

平成27年度原子力施設等防災対策等委託費  
（耐津波設計・フラジリティ評価手法の整備に  
係る防潮堤水理試験（その1））事業

成果報告書

平成28年3月

大成建設株式会社

技術センター



# 目 次

I	総則	
1.	事業概要	I-1-1
2.	既往の津波波力評価手法	I-2-1
II	津波波力特性の把握水理試験	
1	概要	II-1-1
2	試験方法	II-2-1
2.1.	試験装置	II-2-1
2.1.1.	試験縮尺	II-2-1
2.1.2.	試験水槽と試験模型	II-2-2
2.1.3.	計測項目及び計測手法	II-2-8
2.2.	試験ケース	II-2-10
2.2.1.	通過波検定試験	II-2-10
2.2.2.	波力/波圧試験	II-2-12
2.3.	試験手順	II-2-18
2.3.1.	波検定	II-2-18
2.3.2.	通過波検定試験	II-2-18
2.3.3.	波力/波圧試験	II-2-18
2.3.4.	波力算出結果のノイズ処理	II-2-19
3.	試験結果	II-3-1
3.1.	通過波検定試験	II-3-1
3.2.	波力/波圧試験（基本ケース）	II-3-35
3.3.	波力/波圧試験（低剛性堤体模型）	II-3-123
3.4.	波力/波圧試験（スリット付堤体模型）	II-3-131
3.5.	波力/波圧試験（障害物模型）	II-3-135
3.6.	波力/波圧試験（盛土模型）	II-3-147
4.	試験結果の考察	II-4-1
4.1.	通過波の特性	II-4-1
4.2.	波力の時系列特性	II-4-7
4.3.	水深係数の算出方法	II-4-10
4.4.	汀線からの距離による浸水深，波力，水深係数の変化	II-4-13
4.5.	最大浸水深を基準としたフルード数と水深係数の関係	II-4-16
4.6.	堤体前面浸水深を基準としフルード数と水深係数の関係	II-4-20
4.7.	通過波の汀線浸水深を基準としたフルード数と水深係数の関係	II-4-21
4.8.	その他の基準によるフルード数と水深係数の関係	II-4-22
4.9.	スリットの影響	II-4-27
4.10.	障害物の影響	II-4-33
4.11.	盛土の影響	II-4-36

4.12. まとめ .....	II-4-39
III 津波波力特性の把握水理試験のシミュレーション解析	
1. 概要 .....	III-1-1
2. 解析方法 .....	III-2-1
3. シミュレーション解析 .....	III-3-1
3.1. 解析条件 .....	III-3-1
3.2. 解析結果 .....	III-3-3
3.2.1. 通過波検定試験 .....	III-3-3
3.2.2. 波力/波圧試験 .....	III-3-28
IV 防潮堤の平面配置影響の把握水理試験	
1 概要 .....	IV-1-1
2 試験方法 .....	IV-2-1
2.1. 試験装置 .....	IV-2-1
2.1.1. 試験縮尺 .....	IV-2-1
2.1.2. 試験水槽と試験模型 .....	IV-2-1
2.1.3. 計測項目及び計測手法 .....	IV-2-3
2.2. 試験ケース .....	IV-2-5
2.2.1. 通過波検定試験 .....	IV-2-5
2.2.2. 波力/波圧試験 .....	IV-2-6
2.3. 試験手順 .....	IV-2-7
2.3.1. 波検定 .....	IV-2-7
2.3.2. 通過波検定試験 .....	IV-2-7
2.3.3. 波力/波圧試験 .....	IV-2-7
3. 試験結果 .....	IV-3-1
3.1. 通過波検定試験 .....	IV-3-1
3.2. 波力/波圧試験 .....	IV-3-11
4. 試験結果の考察 .....	IV-4-1
4.1. 通過波の特性 .....	IV-4-1
4.2. 汀線からの距離による浸水深, 波力, 水深係数の変化 .....	IV-4-3
4.3. 防潮堤横断方向の分布 .....	IV-4-7
4.4. フルード数と水深係数の関係 .....	IV-4-10
V 防潮堤の平面配置影響の把握水理試験のシミュレーション解析	
1. 概要 .....	V-1-1
2. 解析方法 .....	V-2-1
3. シミュレーション解析 .....	V-3-1
3.1. シミュレーション解析条件 .....	V-3-1
3.2. シミュレーション解析結果 .....	V-3-3
3.2.1. 通過波検定試験 .....	V-3-3
3.2.2. 波力/波圧解析 .....	V-3-12

# 第 I 編

## 総則



## 1. 事業概要

構造物に作用する津波波力として、津波先端部の砕波等により生じる衝撃的な圧力（段波波圧）や、それに続く津波により持続的に作用する圧力（持続波圧）がある。それらの津波波圧に関する設計式の提案などは多くなされているが、入力津波の砕波位置や波形形状、構造物配置等が構造物の健全性に及ぼす影響については、その影響を適切に把握可能とするための試験データのさらなる拡充が求められている。そこで、水理試験により防潮堤のフラジリティ評価に必要な試験データを取得するとともに、解析手法の整備のため、一般的に用いられる解析手法の適用範囲を確認するための参照データを取得した。

水理試験では、防潮堤に作用する段波波圧、持続波圧及びそれらのばらつきに関する試験データを取得した。そして、水理試験で観測した現象を分析し、水深係数（防潮堤に作用する波圧と最大水深浸に相当する静水圧との比を表す無次元数）等の防潮堤の構造健全性評価に用いるパラメータの適切な大きさ等を明確にした。

本試験では、以下の2種類の試験を実施した。

### (1) 津波波力特性の把握水理試験

津波波力を受ける防潮堤を対象とした縦断方向2次元条件の水理試験を実施し、入力津波の砕波位置及び波形形状等を変化させた場合の、防潮堤（堤体模型）に作用する津波波力（段波及び持続波）の特性及びそれらのばらつきに関する試験データを取得した。地形及び入力津波等が異なる複数の試験ケースを実施し、入力津波の砕波位置及び波形形状等が津波波力特性に与える影響に着目して、試験結果を水深係数とフルード数（流体の慣性力と重力との比を表す無次元数）の関係等を用いて分析した。

試験は、防潮堤を設置しない状態での通過波検定試験と、防潮堤模型前面に働く津波波力を測定する波力/波圧試験の2種類を実施した。

### (2) 防潮堤の平面配置影響の把握水理試験

津波波力を受ける防潮堤を対象とした3次元条件の水理試験を実施し、特徴的な平面配置の防潮堤（堤体模型）に作用する津波波力（段波及び持続波）の特性に関する試験データを取得した。試験は、防潮堤を設置しない状態での通過波検定試験と、防潮堤模型前面に働く津波波力を測定する波力/波圧試験の2種類を実施した。



## 2. 既往の津波波力評価手法

内閣府による「津波避難ビル等に係るガイドライン」(2005)では、朝倉ら(2000)による水理実験結果に基づき、設計で考慮すべき津波波圧は、対象構造物の位置における通過波の最大浸水深の3倍(水深係数と呼ばれることが多い)の高さに対する静水圧としている。これは条件によっては過大評価となる場合があり、国土交通省による「津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について」では、陸上構造物の護岸からの距離や遮蔽物の有無により水深係数を低減できるとしている。

松富・飯塚(1998)は、津波諸元から陸上流速を簡易に推定することを目的に、エネルギー保存則から家屋前後の浸水深と流速の関係を導出した。現地調査および水理模型実験の結果を用いて導出式の検討を行っており、家屋の密集地域を除いて導出式は有効性があると報告している。

木原ら(2012)や高畠ら(2013)は、陸上構造物に作用する段波による津波波力に対して、数値解析から検討を実施し、構造物に津波が到達してからの波圧特性を経時的に衝撃波圧、極大波圧、準定常波圧の3段階に区別されることを示した。特に、準定常時の波圧は、非通過波の構造物前面での浸水深の静水圧分布におおむね従うことを報告している。

有光ら(2012)は、ゲート急開により発生させた段波を陸上に設置した二次元および三次元構造物に作用させ、構造物前面に作用する波圧分布を計測した。実験の結果、段波衝突時の波圧分布は必ずしも静水圧分布に従うとは限らず、波圧の評価にはこれまでの浸水深に対する静水圧に、流速による運動量を付加することで、計測された津波波圧分布を良好に再現している。

有川・大家(2014)は、各種形状の陸上構造物に作用する津波波圧に対して、防潮堤の有無の影響を水理実験により検討し、防潮堤を設置することで水深係数(津波波圧)が大きくなる傾向を示した。これは、防潮堤を越流した流れが、低水深・高流速の流れとなり、低い高さにおいて大きな波圧を発生させたと考えられる。

津波波形によっては、最大津波波圧は必ずしも通過波の最大浸水深に対応するとは限らず、Asakuraら(2002)、榊山(2012)や池谷ら(2013)は水深係数をフルード数の関数として提案し、最大波圧を最大浸水深および最大浸水深発生時のフルード数から求めている。さらに、織田ら(2014)は水理実験結果および理論的アプローチにより、フルード数による水深係数の算定を時系列で実施し、榊山(2012)の水深係数の算定式が津波波力の時系列評価まで可能であることを示した。ただし、木原ら(2012)と同様に、遡上波の水位が短時間に上昇する場合、打ち上がった水塊の落下により大きな波力が働く場合があることを指摘している。

なお、陸上構造物全体に作用する津波波力については、FEMA(2008)や飯塚・松富(2000)などにより、一様流れ中の物体の抗力計算と同様の方法が提案されている。

以下に、上述の評価式のうち、フルード数  $Fr$  を用いた水深係数  $\alpha$  の主な提案式を示す。

- 松富・飯塚(1998) :  $\alpha = 1.0 + 0.5(1.0 + \zeta)Fr^2$      $\zeta$ : 広義のエネルギー損失係数  
Asakuraら(2002) :  $\alpha = 1.0 + 1.2Fr$   
榊山(2012) :  $\alpha = 1.0 + 1.4Fr$   
池谷ら(2013) :  $\alpha = 1.0 + 1.3Fr$

織田ら (2014) :  $\alpha = \left( 2Fr^2 + \sqrt{1 + 8(1 + Fr)^2} - 2 \right)^{1/2}$

## 参考文献

- 朝倉良介・岩瀬浩二・池谷 毅・高尾 誠・金戸俊道・藤井直樹・大森正則 (2000) : 護岸を越流した津波に作用する波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.911-915.
- 有川太郎・大家隆行 (2014) : 防潮堤背後の建物に作用する津波力に関する実験的検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I\_806-I\_810.
- 有光 剛・大江一也・川崎浩司 (2012) : 構造物前面の浸水深と流速を用いた津波波圧の評価手法に関する水理実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I\_816-I\_820.
- 飯塚秀則・松富英夫 (2000) : 津波氾濫流の被害想定, 海岸工学論文集, Vol.47, pp.381-385.
- 池谷 毅・秋山義信・岩前伸幸 (2013) : 陸上構造物に作用する津波持続波圧に関する水理学的考察, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I\_816-I\_820.
- 織田幸伸・本田隆英・高島知行 (2014) : 陸上構造物に働く津波波力の時系列評価に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I\_796-I\_800.
- 木原直人・高島大輔・吉井 匠・池野正明・太田一行・田中伸和 (2012) : 陸上構造物に対する津波流体力評価 (その 1) - 有限幅構造物に対する非越流条件での数値的検討 -, 電力中央研究所報告, N12010.
- 国土交通省 (2011) : 津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について.
- 榊山 勉 (2012) : 陸上遡上津波の伝播と構造物に作用する津波波圧に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I\_777-I\_775.
- 高島大輔・木原直人・田中伸和 (2013) : 陸上構造物前面に作用する津波波圧に関する数値実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I\_851-I\_855.
- 内閣府 (2005) : 津波避難ビル等に係るガイドライン, 68p.
- 松富英夫・飯塚秀則 (1998) : 津波の陸上流速とその簡易推定法, 海岸工学論文集, Vol.45, pp.361-365.
- Asakura, R, K. Iwase, T. Ikeya, M. Takao, T. Kaneto, N. Fujii and M. Ohmori (2002) : The tsunami wave force acting on land structure, Proc. of 28th ICCE, ASCE, pp.1191-1202.
- FEMA (2008) : Guidelines for design of structures for vertical evacuation from tsunamis, FEMA P646, 158p.

## 第 II 編

### 津波波力特性の把握水理試験



## 1. 概要

津波波力を受ける防潮堤を対象とした縦断方向 2 次元条件の水理試験を実施し、入力津波の碎波位置及び波形形状等を変化させた場合の、防潮堤（堤体模型）に作用する津波波力（段波及び持続波）の特性及びそれらのばらつきに関する試験データを取得した。海底地形として、単純勾配及び直立護岸（水平地形）の 2 種類について試験を行った。また、入力津波として、周期や波高、前面勾配の異なった 13 種類の入射津波を対象とし、入力津波の碎波位置及び波形形状等が津波波力特性に与える影響に着目して、水深係数とフルード数の関係について解析した。

実施した試験は、堤体模型を設置せずに通過波について計測する通過波検定試験と堤体模型を設置し、堤体に働く波圧および波力を測定する波力/波圧試験の 2 種類であり、波力/波圧試験として、以下の 5 種類の試験を実施した。

### (1)基本堤体模型試験（単純勾配／直立護岸）

単純な鉛直板である基本堤体模型を対象とした試験

### (2)低剛性堤体模型試験（直立護岸）

堤体模型である鉛直板を剛ではなくロードセルを介して固定した模型を対象とした試験

### (3)スリット付堤体模型試験（直立護岸）

堤体にスリット状の隙間が存在する模型を対象とした試験

### (4)障害物模型試験（直立護岸）

堤体前方に棒状の障害物が多数存在する場合を対象とした試験

### (5)盛土模型試験（直立護岸）

堤体前方に盛土状の障害物が存在する場合を対象とした試験

## 2. 試験方法

### 2.1. 試験装置

#### 2.1.1. 試験縮尺

想定する模型縮尺は 1/40 とし，試験諸元はフルードの相似則に従って設定した．対象とする実際の現象の流速を  $v=5.0$  m/s 程度，陸上部での浸水深  $\eta$  を 4m 程度，水の動粘性係数  $\nu=1.14\times 10^{-2}$  cm<sup>2</sup>/s (15°C) とすると，次式で求められるレイノルズ数  $Re$  は，実機で  $1.75\times 10^5$ ，縮尺模型で  $6.9\times 10^4$  となる．

$$Re = v \eta / \nu$$

一般に，レイノルズ数が  $10^4$  以上であれば十分に大きく，乱流状態であると言えるため，縮尺模型による水の粘性の影響は無視できる程度に小さいと考えられる．

フルード則に基づく各物理量の縮尺は，模型の縮尺を  $\lambda$  (ここでは 1/40) とすると以下の通りとなる．本試験では，この縮尺に沿って各諸元を設定した．

長さの縮尺：	$\lambda$
時間の縮尺：	$\lambda^{1/2}$
流速の縮尺：	$\lambda^{1/2}$
圧力の縮尺：	$\lambda$
力の縮尺：	$\lambda^3$

## 2.1.2. 試験水槽と試験模型

### (1) 試験水槽と地形模型

水理試験は、幅 80 cm、長さ 47m、片面ガラス張りの二次元長水槽を用いて実施した（図 II.2.1-1(a)参照）。水槽の端部には、津波造波装置が設置されており、これにより津波を造波して、試験を実施した。

本津波造波装置は、チャンバー式の津波造波装置で、前面に高さ 40 cm で水槽幅の開口部があり、それ以外は密閉された容器（チャンバー）となっている。試験準備としてチャンバー内の空気を吸引し、水を吸い上げる。チャンバーの天井部分には、空気バルブが設置されており、造波時にはこれを解放することによりチャンバー内に空気が供給され、前面の開口部から水が吐き出されることにより、津波を造波する。空気バルブは複数設置されており、これらの空気バルブの解放タイミングを制御することにより、任意の波形の津波を造波することが可能となる。

海底地形として、図 II.2.1-1 に示す単純勾配タイプと直立護岸タイプの 2 種類を対象に試験を実施した。水深は 60cm とし、単純勾配タイプでは地形勾配 1/20 の一定斜面を設置した。直立護岸タイプでは護岸前面に水深 30cm、長さ 10m の水平海底地形を設置し、1/10 勾配の地形で水槽底面と擦り付けた。陸上地形は水平とし、汀線において水面と同一の高さとした。地形模型の表面は、塩ビ製とした。

### (2) 防潮堤（堤体）模型

陸上部には、堤体模型を設置した。堤体模型の設置位置は汀線から 0, 1.25, 2.5m の 3 種類（図 II.2.1-1 参照）とした。堤体は、図 II.2.1-2, 図 II.2.1-4 に示すように水槽に剛に固定する模型（TypeA ~ E）と、圧力計による波力計測とロードセルによる波力計測を比較するための、図 II.2.1-3 に示す堤体模型（TypeL）を用いた。後者は、ロードセルのみにより水平方向の変位を固定されるため、剛性の低い固定形式となる。

高剛性の堤体模型としては、水槽全幅で完全に水の浸入を防ぐ場合（TypeA）と、スリット状の隙間がある場合（TypeB, C, D）、及び中央部分のみに板がある場合（TypeE）の 5 種類の堤体模型を使用した。堤体前面には、後述する圧力計を設置し、堤体に働く波力を圧力の積分により算出した。

### (3) 障害物模型

堤体前方に棒状の障害物が多数存在する場合の試験として、図 II.2.1-5 に示す 3 種類の模型を用いた。ここで、高密度の棒状構造物の模型は防潮林を想定しており、首藤<sup>1</sup>により示されている平均的な樹林密度の値である  $dn=120$  本/cm となるよう、以下のように樹林間隔を設定した。

実機：幅 23m、直径 12 cm、樹林間隔  $\sqrt{23/(120/12)}=1.517$ m

模型：幅 57.5cm、直径 0.3 cm、樹林間隔=37.9mm

### (4) 盛土模型

盛土模型の設置状況を図 II.2.1-6 に示す。盛土模型設置時には、直立護岸の前面に 1/2 勾配の斜面を設置した。盛土模型は、前後に 1/2 勾配の斜面を有する台形状として、設置位置を汀線から 1.25m と 2.5m の 2 種類とした。また、比較のため盛土模型のない斜面のみケースについても試験を実施した。

<sup>1</sup>首藤伸夫(1985):防潮林の津波に対する効果と限界,海岸工学論文集,pp.465-469.

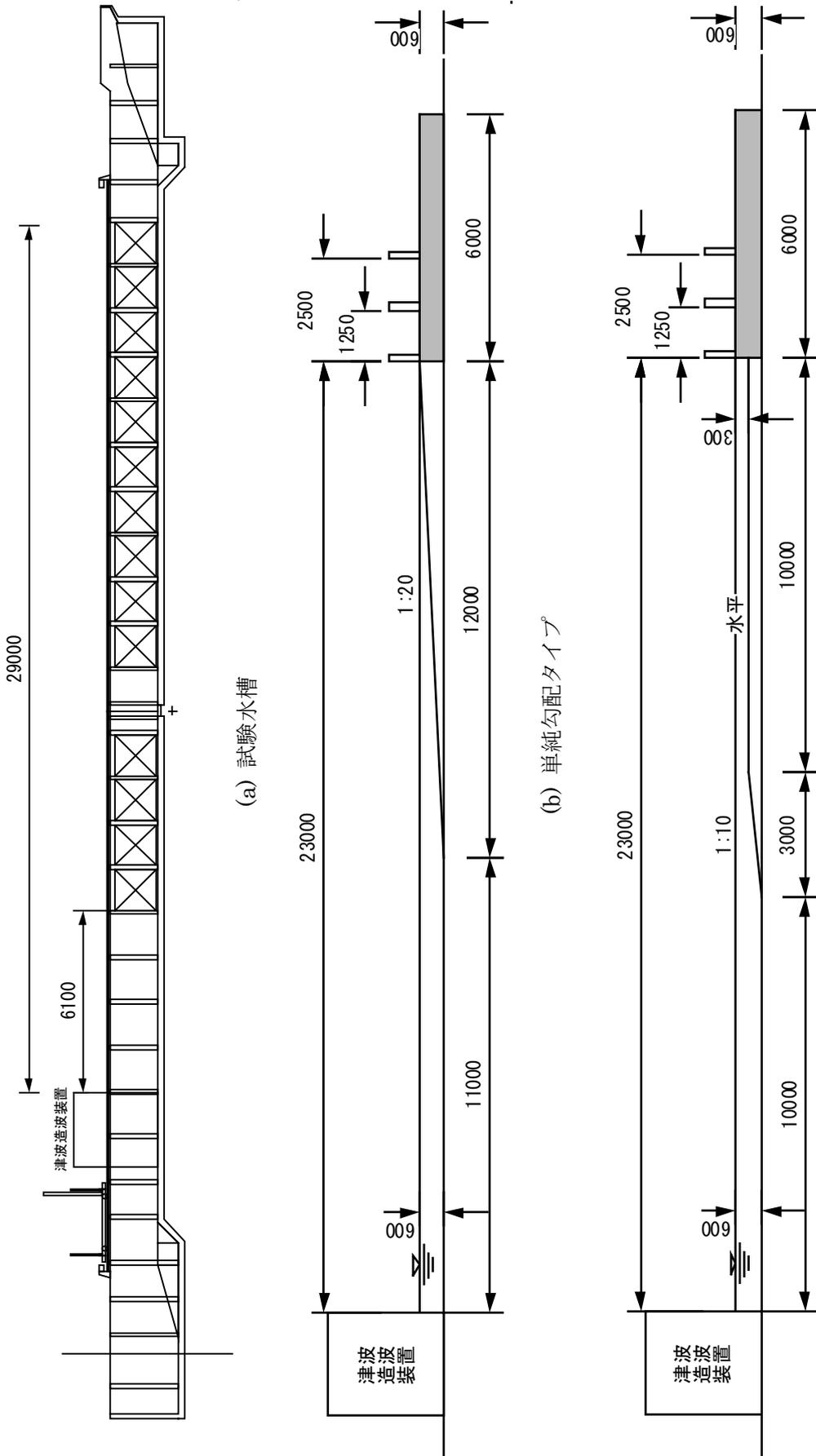


図 II.2.1-1 試験水槽と試験模型

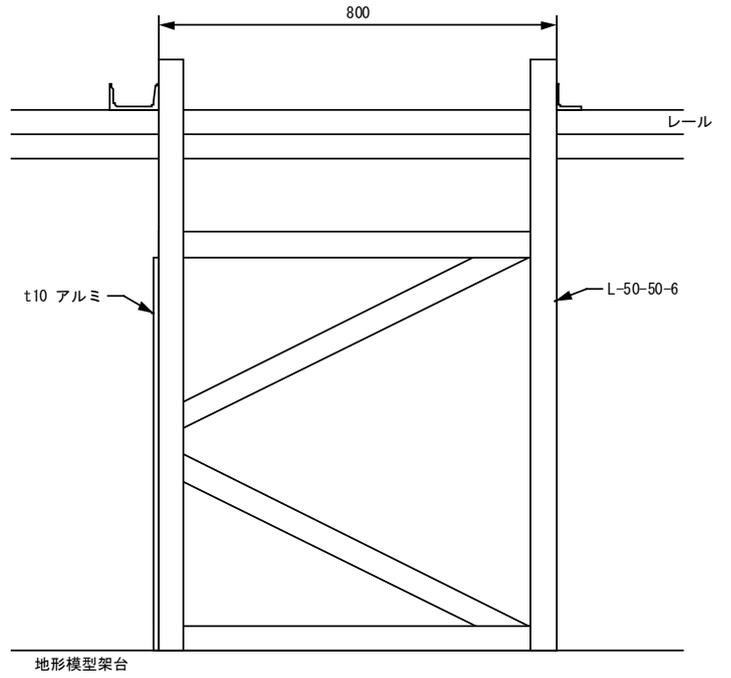
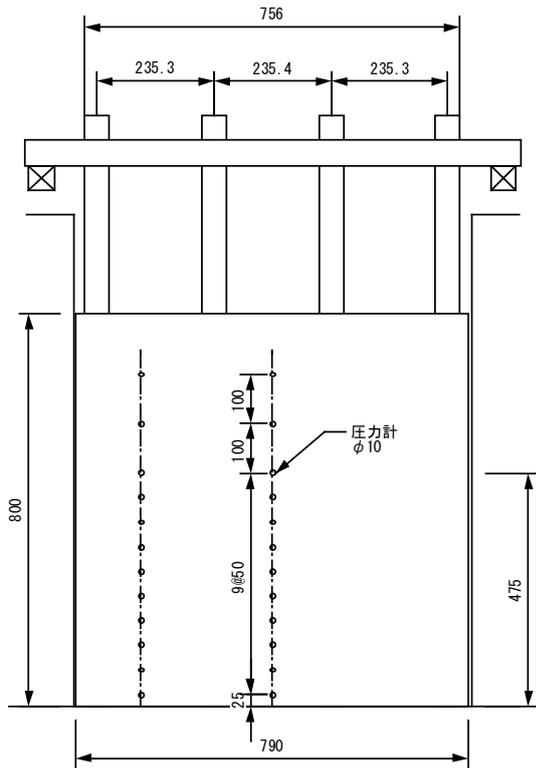


図 II.2.1-2 堤体模型 (高剛性基本形状)

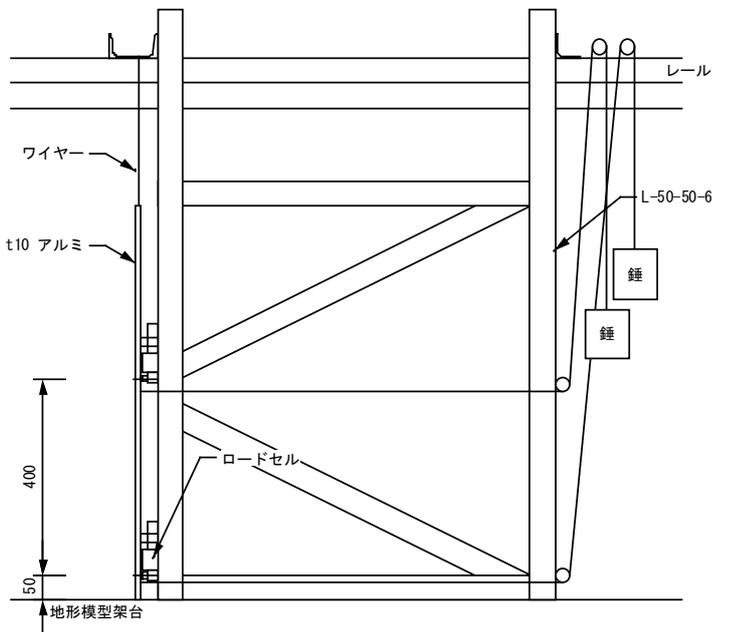
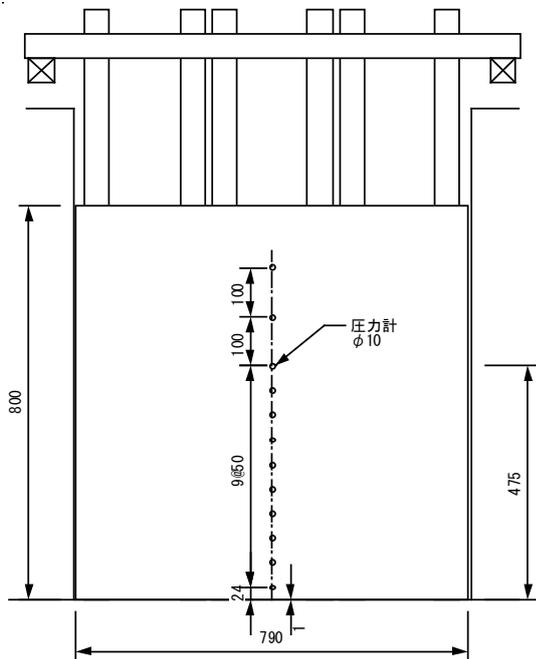
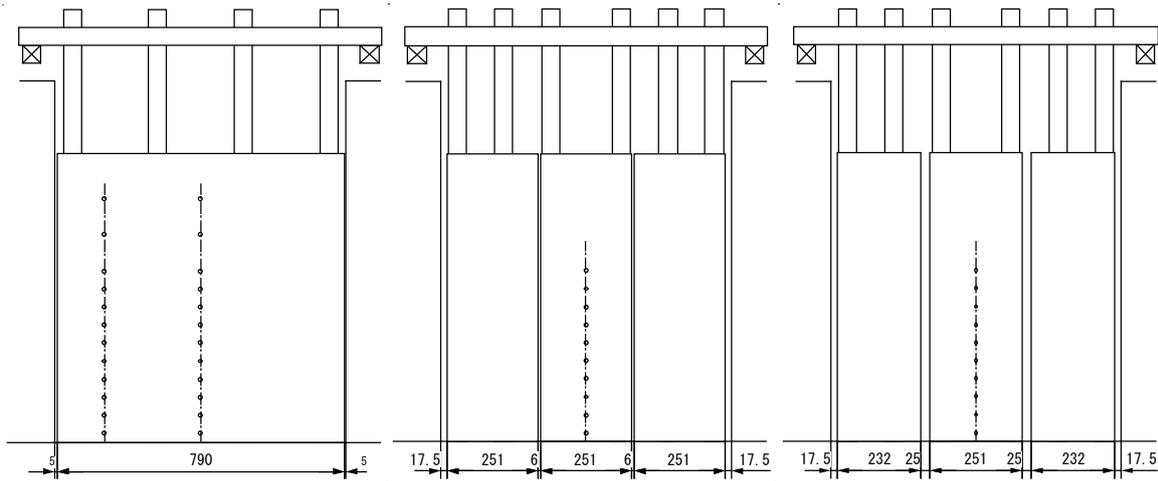


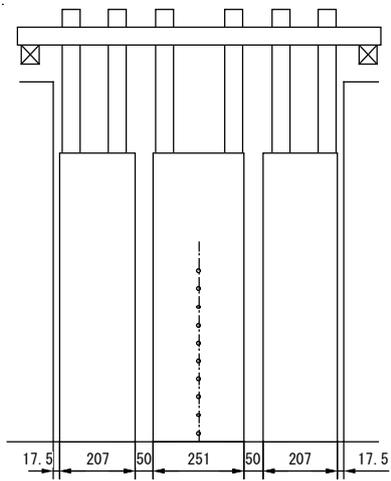
図 II.2.1-3 堤体模型 (低剛性 ; TypeL)



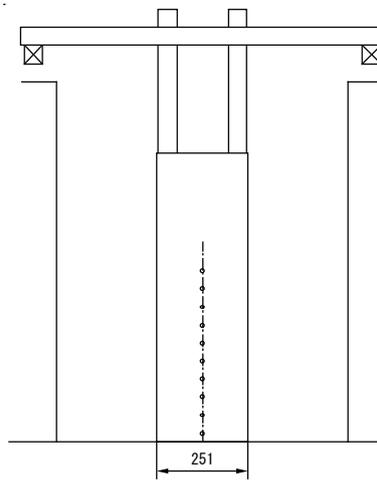
(a) 全幅 (TypeA)

(b) スリット 6mm (TypeB)

(c) スリット 25mm (TypeC)

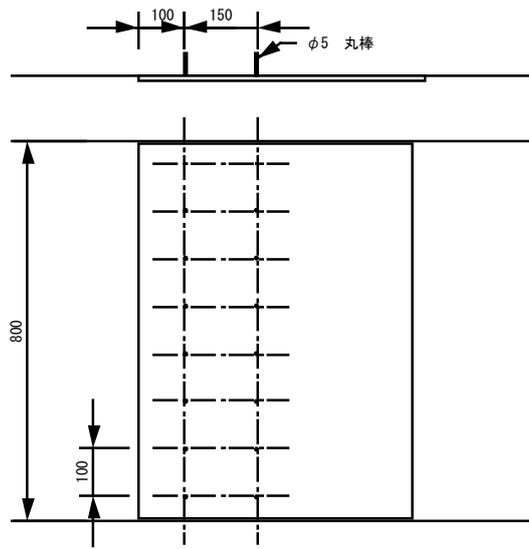


(d) スリット 50mm (TypeD)

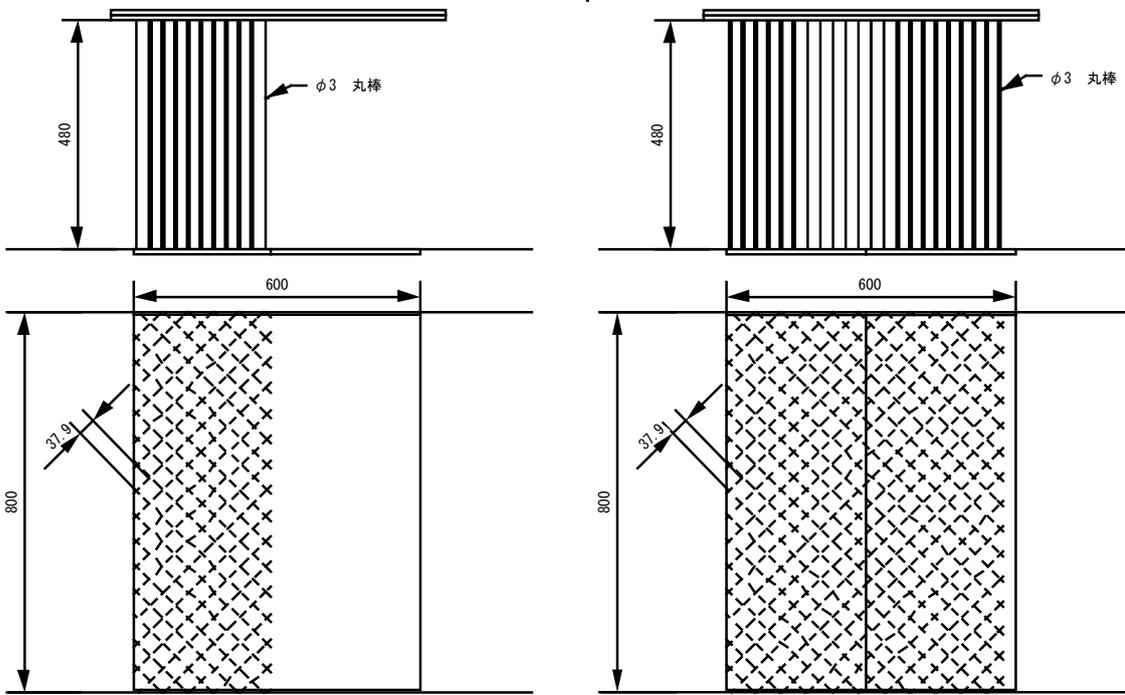


(e) 1/3 幅 (TypeE)

図 II.2.1-4 堤体模型 (高剛性)



(a) 低密度 (障害物 1)



(b) 高密度狭幅 (障害物 2)

(c) 高密度広幅 (障害物 3)

图 II.2.1-5 障害物模型

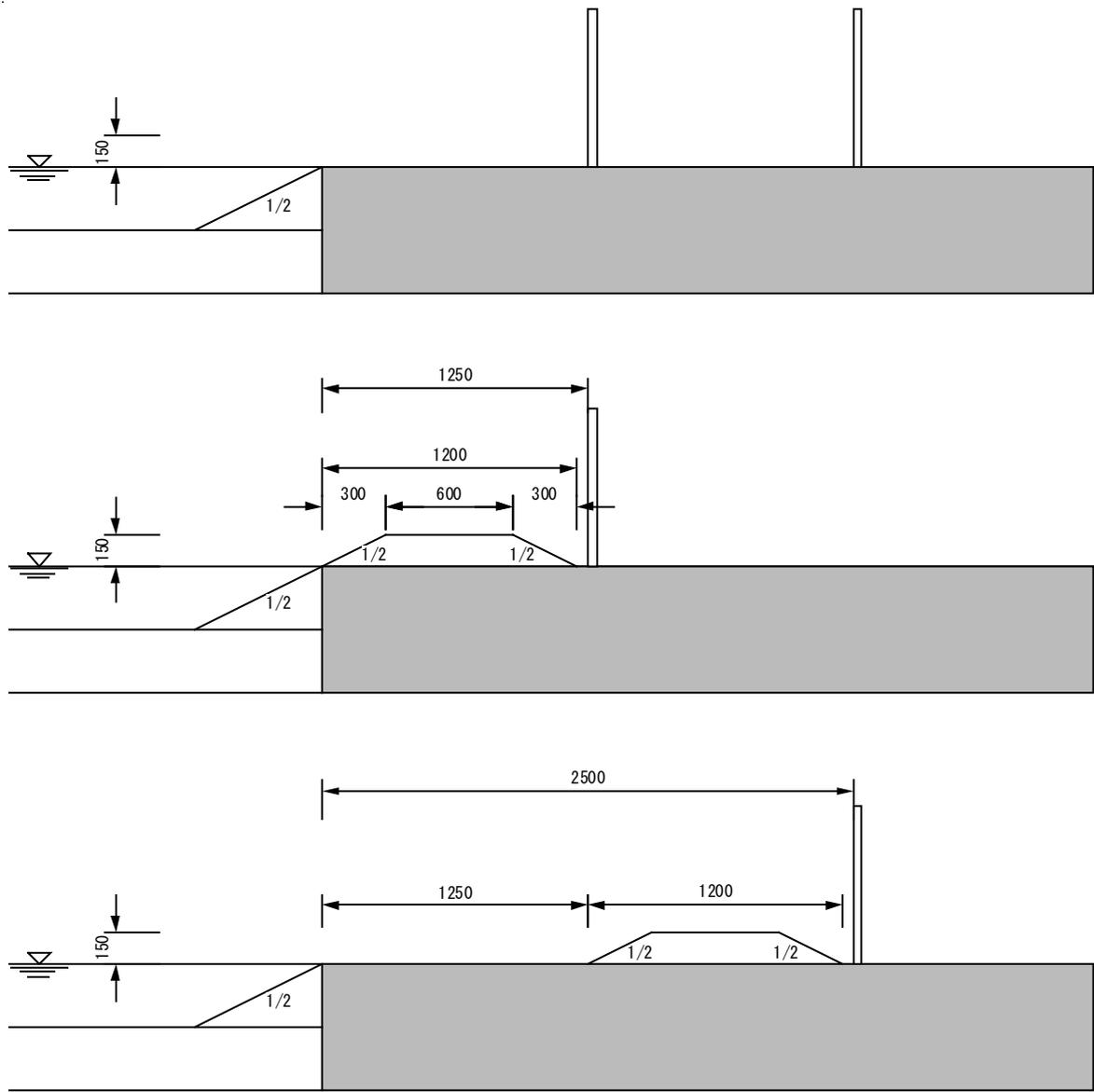


図 II.2.1-6 盛土模型と設置位置

### 2.1.3. 計測項目及び計測手法

計測項目は、水位、流速、圧力・波力、及び堤体模型衝突時の波形（動画）とした。各計測項目の計測位置を、図 II.2.1-7 に示す。各計測値のサンプリング間隔は、1ms とし、全てのデータを同時に計測した。

#### (1) 水位

水位は、容量式水位計（ケネック社製 CH-406）により計測した。通過波検定においては、海底地形上での波の進行による波形の変化を記録するため、水位計を 3m おきに配置した。陸上部では、干出した状態からの計測となるため、安定した計測結果が得られるよう、地形模型に穴を空け、津波の遡上前でも容量線の先端が水没した状態になるように設置した。

波力/波圧試験においては、堤体模型前面の流況を確認するため、堤体から 0.5m, 1.0m 手前の水位を計測した。

#### (2) 流速

流速は、電磁流速計、プロペラ流速計、底面電磁流速計、レーザー流速計の 4 種類を適切に配置して計測した。V3, V5, V7 では常に流速計を水没させることが出来るため、電磁流速計（ケネック社製 VM-802HA）により流速を計測した。V3, V5 は水深が大きいいため、適宜、上層下層の 2 点（1/3 初期水深）で計測し、V7 では水深が小さいため 6 割初期水深の高さに設置した。陸上部（V8, V9, V10）では、主にプロペラ流速計（ケネック社製 VO-301A4/VOT2-400-20）を使用した。なるべく浸水深が小さい範囲でも流速を計測するため、プロペラ流速計の設置位置は、地形模型と干渉しない範囲で底面近傍とし、プロペラの中心が底面より 15mm の位置に設置した。なお、直立護岸の汀線においては、プロペラ流速計のガードリングの前面が、護岸汀線と一致するように、すなわち汀線の陸上側に設置した。また、プロペラ流速計は、プロペラ部が完全に水没しないと流速が正しく計測できない。そのため、特に V9, V10 では遡上波の先端部分の流速が計測できないと考えられる。そこで、底面電磁流速計（ケネック社製 FM2001HA/FMT2-4-80P）による計測を併用し、計測データの補完をした。また、いくつかのケースでは陸上部の流況が水深に比較して非常に大きな流速となる場合が考えられる。この場合、計測装置の後流が剥離して正しく計測出来ない可能性があるため、非接触の計測手法としてレーザードップラー流速計（LDV）（日本カノマックス社製 SmartLDV II/S8008）による計測を実施し、計測結果の妥当性を確認した。なお、LDV による流速計測位置は、底面から 10mm とした。

#### (3) 圧力・波力

圧力は、 $\phi 10$  の超小型圧力計（エス・エス・ケイ社製 P310-02）を使用し、図 II.2.1-4, 図 II.2.1-3 に示すように、堤体模型に圧力計を埋め込んで、圧力を計測した。設置間隔は、鉛直方向に 5 cm 間隔とした。津波波力は、圧力計による圧力計測結果を積分して求めた。なお、低剛性堤体模型（図 II.2.1-3）では、ロードセル（共和電業社製 LUB-50KB）による直接波力計測を併用し、圧力計による計測結果の妥当性を検証した。

#### (4) 動画

堤体模型に衝突する津波の状況は、高速度カメラ（キーエンス社製 VW-9000/VW-600C）により撮影した。撮影スピードは、1000fps とした。動画とその他の計測結果は同期をとり、水位や圧力と比較できるようにした。

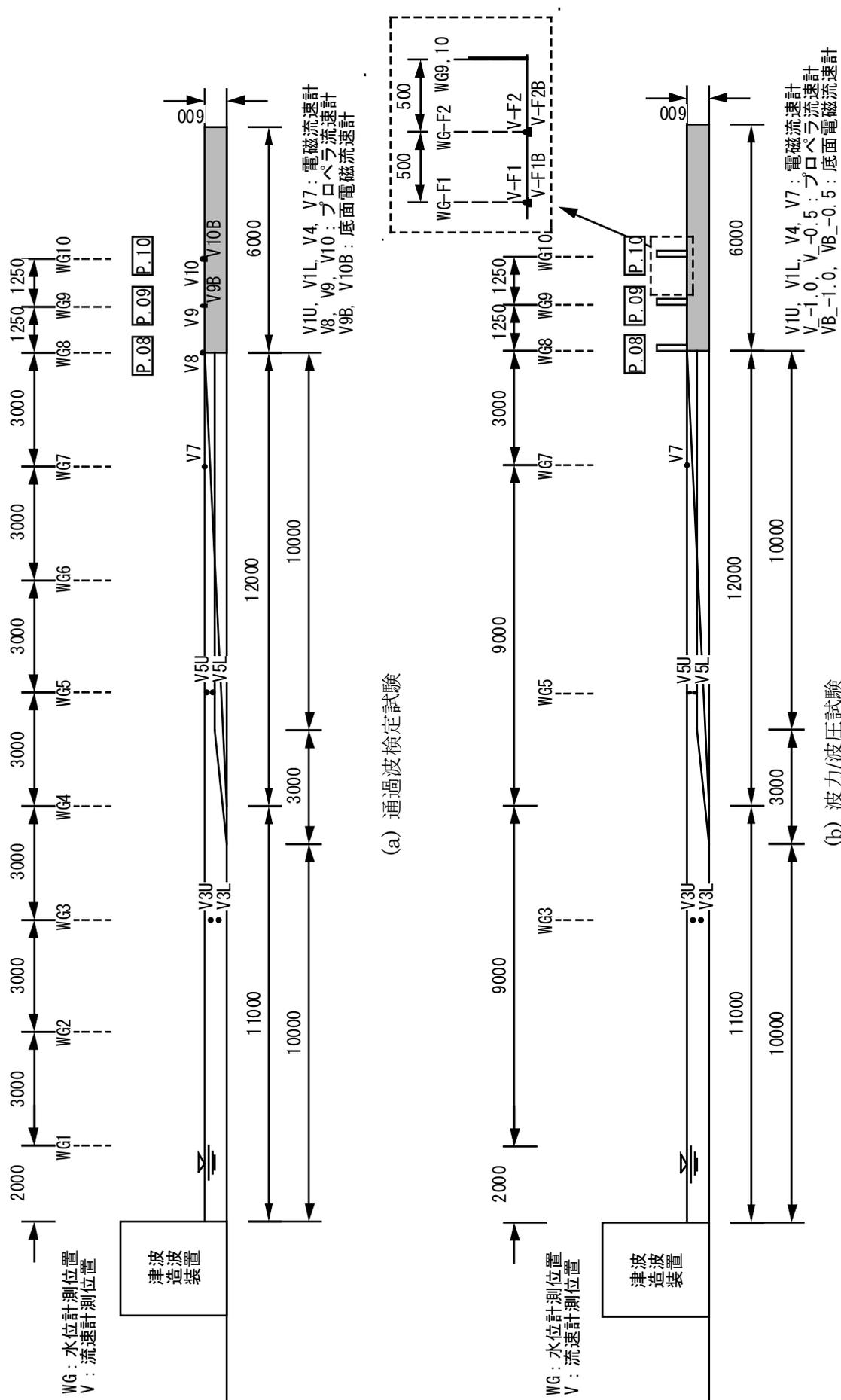


図 II.2.1-7 各計測項目の計測位置

## 2.2. 試験ケース

### 2.2.1. 通過波検定試験

通過波検定試験の試験ケースを、表 II.2.2-1 に示す。対象波形は単純勾配では W01~W12 の 12 種類、直立護岸では W01~W13 の 13 種類とした。単純勾配地形を用いて後述する波検定により造波波形を決定したのち、単純勾配タイプと直立護岸タイプの 2 種類の地形について、同様の試験を実施した。なお、計測結果の確認のため、同じ試験を 2 回繰り返した。

障害物模型を設置したケースでは、海底地形を直立護岸とし、W01, W04, W13 の 3 種類の波形を対象に、障害物を設置した状態で通過波検定を実施した。

盛土模型を設置したケースでは、海底地形を直立護岸とし、W02, W04, W05, W06, W10, W13 の 6 種類の波形を対象に、障害物を設置した状態で通過波検定を実施した。

表 II.2.2-1 通過波検定試験の試験ケース

No	ケース名	地形	波形	堤体位置	障害物	繰り返し
1	S-W01-0-N	単純勾配 S	W01	N/A 0	なし N	2
2	S-W02-0-N		W02			
3	S-W03-0-N		W03			
4	S-W04-0-N		W04			
5	S-W05-0-N		W05			
6	S-W06-0-N		W06			
7	S-W07-0-N		W07			
8	S-W08-0-N		W08			
9	S-W09-0-N		W09			
10	S-W10-0-N		W10			
11	S-W11-0-N		W11			
12	S-W12-0-N		W12			
13	F-W01-0-N	直立護岸 F	W01			
14	F-W02-0-N		W02			
15	F-W03-0-N		W03			
16	F-W04-0-N		W04			
17	F-W05-0-N		W05			
18	F-W06-0-N		W06			
19	F-W07-0-N		W07			
20	F-W08-0-N		W08			
21	F-W09-0-N		W09			
22	F-W10-0-N		W10			
23	F-W11-0-N		W11			
24	F-W12-0-N		W12			
25	F-W13-0-N	W13				
26	F-W01-0-1	直立護岸 F	W01	障害物1 1		
27	F-W04-0-1		W04	障害物2 2		
28	F-W13-0-1		W13	障害物3 3		
29	F-W01-0-2		W01	盛土なし 斜面のみ A		
30	F-W04-0-2		W04			
31	F-W13-0-2		W13			
32	F-W01-0-3	W01				
33	F-W04-0-3	W04	盛土0m B			
34	F-W13-0-3	W13				
35	F-W02-0-A	W02				
36	F-W04-0-A	W04				
37	F-W05-0-A	W05				
38	F-W06-0-A	W06				
39	F-W10-0-A	W10				
40	F-W13-0-A	W13				
41	F-W02-0-B	W02	盛土1.25m C			
42	F-W04-0-B	W04				
43	F-W05-0-B	W05				
44	F-W06-0-B	W06				
45	F-W10-0-B	W10				
46	F-W13-0-B	W13				
47	F-W02-0-C	W02				
48	F-W04-0-C	W04				
49	F-W05-0-C	W05				
50	F-W06-0-C	W06				
51	F-W10-0-C	W10				
52	F-W13-0-C	W13				
合計					104	ケース

### 2.2.2. 波力/波圧試験

波圧/波力試験では、以下に示す 5 種類の試験を実施した。波力/波圧試験における試験ケースを、表 II-2-2 に示す。

#### (1)基本ケース（単純勾配／直立護岸）

堤体模型の基本ケースは、TypeA（図 II.2.1-4 参照）とした。堤体模型の設置位置を 3 種類に変えて、単純勾配タイプと直立護岸タイプの 2 種類の地形について同様の試験を実施した。なお、試験毎のばらつきを確認するため、同じ試験を 15 回繰り返した。

#### (2)低剛性堤体模型（直立護岸）

基本ケースに加え、直立護岸タイプの地形については、低剛性堤体模型を対象に、同様の試験を実施した。ただし繰り返し回数は 3 回とした。

#### (3)スリット付堤体模型（直立護岸）

堤体模型に隙間がある場合のケース（TypeB～E）について、直立護岸タイプの地形で同様の試験を実施した。対象とする波形は 2 種類のみとし、通過波検定試験において障害物模型を対象とした試験と同じ波形を用いた。繰り返し回数は 3 回とした。

#### (4)障害物模型（直立護岸）

障害物を設置した試験では、通過波検定試験において障害物模型を対象とした試験と同じ条件で、堤体模型を設置した場合に働く波力について試験を実施した。繰り返し回数は 5 回とした。

#### (5)盛土模型（直立護岸）

盛土模型を設置した試験では、通過波検定試験において盛土模型を対象とした試験と同じ条件で、堤体模型を設置した場合に働く波力について試験を実施した。堤体模型は、盛土なしのケースにおいて P.09, P.10, 盛土模型の汀線からの設置位置 0m に対して P.09, 1.25m に対し P.10 の位置にそれぞれ設置した。繰り返し回数は 5 回とした。

表 II-2-2 波圧/波力試験の試験ケース

(1) 単純勾配タイプ地形

No	ケース名	地形	波形	堤体位置	障害物	堤体模型	繰り返し
1	S-W01-1-N-A	単純勾配 S	W01	0m 1	なし N	Type-A A	15
2	S-W02-1-N-A		W02				
3	S-W03-1-N-A		W03				
4	S-W04-1-N-A		W04				
5	S-W05-1-N-A		W05				
6	S-W06-1-N-A		W06				
7	S-W07-1-N-A		W07				
8	S-W08-1-N-A		W08				
9	S-W09-1-N-A		W09				
10	S-W10-1-N-A		W10				
11	S-W11-1-N-A		W11				
12	S-W12-1-N-A		W12				
13	S-W01-2-N-A		W01	1.25m 2			
14	S-W02-2-N-A		W02				
15	S-W03-2-N-A		W03				
16	S-W04-2-N-A		W04				
17	S-W05-2-N-A		W05				
18	S-W06-2-N-A		W06				
19	S-W07-2-N-A		W07				
20	S-W08-2-N-A		W08				
21	S-W09-2-N-A		W09				
22	S-W10-2-N-A		W10				
23	S-W11-2-N-A		W11				
24	S-W12-2-N-A		W12				
25	S-W01-3-N-A		W01	2.5m 3			
26	S-W02-3-N-A		W02				
27	S-W03-3-N-A		W03				
28	S-W04-3-N-A		W04				
29	S-W05-3-N-A		W05				
30	S-W06-3-N-A		W06				
31	S-W07-3-N-A		W07				
32	S-W08-3-N-A		W08				
33	S-W09-3-N-A		W09				
34	S-W10-3-N-A		W10				
35	S-W11-3-N-A		W11				
36	S-W12-3-N-A		W12				

表 II-2-2 波圧/波力試験の試験ケース

(2) 直立護岸タイプ地形

No	ケース名	地形	波形	堤体位置	障害物	堤体模型	繰り返し
37	F-W01-1-N-A	直立護岸 F	W01	0m 1	なし N	Type-A A	15
38	F-W02-1-N-A		W02				
39	F-W03-1-N-A		W03				
40	F-W04-1-N-A		W04				
41	F-W05-1-N-A		W05				
42	F-W06-1-N-A		W06				
43	F-W07-1-N-A		W07				
44	F-W08-1-N-A		W08				
45	F-W09-1-N-A		W09				
46	F-W10-1-N-A		W10				
47	F-W11-1-N-A		W11				
48	F-W13-1-N-A		W12				
49	F-W12-1-N-A		W13				
50	F-W01-2-N-A		W01	1.25m 2			
51	F-W02-2-N-A		W02				
52	F-W03-2-N-A		W03				
53	F-W04-2-N-A		W04				
54	F-W05-2-N-A		W05				
55	F-W06-2-N-A		W06				
56	F-W07-2-N-A		W07				
57	F-W08-2-N-A		W08				
58	F-W09-2-N-A		W09				
59	F-W10-2-N-A		W10				
60	F-W11-2-N-A		W11				
61	F-W12-2-N-A		W12				
62	F-W13-2-N-A		W13				
63	F-W01-3-N-A		W01	2.5m 3			
64	F-W02-3-N-A		W02				
65	F-W03-3-N-A		W03				
66	F-W04-3-N-A		W04				
67	F-W05-3-N-A		W05				
68	F-W06-3-N-A		W06				
69	F-W07-3-N-A		W07				
70	F-W08-3-N-A		W08				
71	F-W09-3-N-A		W09				
72	F-W10-3-N-A		W10				
73	F-W11-3-N-A		W11				
74	F-W12-3-N-A		W12				
75	F-W13-3-N-A		W13				

表 II-2-2 波圧/波力試験の試験ケース

(3) 低剛性堤体模型

No	ケース名	地形	波形	堤体位置	障害物	堤体模型	繰り返し
76	S-W01-1-N-L		W01	0m 1			
77	S-W02-1-N-L		W02				
78	S-W03-1-N-L		W03				
79	S-W04-1-N-L		W04				
80	S-W05-1-N-L		W05				
81	S-W06-1-N-L		W06				
82	S-W07-1-N-L		W07				
83	S-W08-1-N-L		W08				
84	S-W09-1-N-L		W09				
85	S-W10-1-N-L		W10				
86	S-W11-1-N-L		W11				
87	S-W12-1-N-L		W12				
88	S-W12-1-N-L		W13				
89	S-W01-2-N-L	直立護岸 F	W01	1.25m 2	なし N	Type-L L	3
90	S-W02-2-N-L		W02				
91	S-W03-2-N-L		W03				
92	S-W04-2-N-L		W04				
93	S-W05-2-N-L		W05				
94	S-W06-2-N-L		W06				
95	S-W07-2-N-L		W07				
96	S-W08-2-N-L		W08				
97	S-W09-2-N-L		W09				
98	S-W10-2-N-L		W10				
99	S-W11-2-N-L		W11				
100	S-W12-2-N-L		W12				
101	S-W12-2-N-L		W13				
102	S-W01-3-N-L		W01	2.5m 3			
103	S-W02-3-N-L		W02				
104	S-W03-3-N-L		W03				
105	S-W04-3-N-L		W04				
106	S-W05-3-N-L		W05				
107	S-W06-3-N-L		W06				
108	S-W07-3-N-L		W07				
109	S-W08-3-N-L		W08				
110	S-W09-3-N-L		W09				
111	S-W10-3-N-L		W10				
112	S-W11-3-N-L		W11				
113	S-W12-3-N-L		W12				
114	S-W12-3-N-L	W13					

表 II-2-2 波圧/波力試験の試験ケース

(4) スリット付堤体模型

No	ケース名	地形	波形	堤体位置	障害物	堤体模型	繰り返し
115	F-W04-1-N-B	直立護岸 F	W04	0m	なし N	Type-B B	3
116	F-W07-1-N-B		W07	1			
117	F-W04-2-N-B		W04	1.25m			
118	F-W07-2-N-B		W07	2			
119	F-W04-3-N-B		W04	2.5m			
120	F-W07-3-N-B		W07	3			
121	F-W04-1-N-C		W04	0m	なし N	Type-C C	
122	F-W07-1-N-C		W07	1			
123	F-W04-2-N-C		W04	1.25m			
124	F-W07-2-N-C		W07	2			
125	F-W04-3-N-C		W04	2.5m			
126	F-W07-3-N-C		W07	3			
127	F-W04-1-N-D		W04	0m	なし N	Type-D D	
128	F-W07-1-N-D		W07	1			
129	F-W04-2-N-D		W04	1.25m			
130	F-W07-2-N-D		W07	2			
131	F-W04-3-N-D		W04	2.5m			
132	F-W07-3-N-D		W07	3			
133	F-W04-1-N-E	W04	0m	なし N	Type-E E		
134	F-W07-1-N-E	W07	1				
135	F-W04-2-N-E	W04	1.25m				
136	F-W07-2-N-E	W07	2				
137	F-W04-3-N-E	W04	2.5m				
138	F-W07-3-N-E	W07	3				

(5) 障害物模型

No	ケース名	地形	波形	堤体位置	障害物	堤体模型	繰り返し
139	F-W01-2-1-A	直立護岸 F	W01	1.25m	障害物1	Type-A A	5
140	F-W04-2-1-A		W04	2			
141	F-W13-2-1-A		W13				
142	F-W01-3-1-A		W01	2.5m	1		
143	F-W04-3-1-A		W04	3			
144	F-W13-3-1-A		W13				
145	F-W01-2-2-A		W01	1.25m	障害物2 2		
146	F-W04-2-2-A		W04	2			
147	F-W13-2-2-A		W13				
148	F-W01-3-2-A		W01	2.5m	障害物3		
149	F-W04-3-2-A		W04	3			
150	F-W13-3-2-A		W13				
151	F-W01-2-3-A		W01	1.25m	障害物3		
152	F-W04-2-3-A		W04	2			
153	F-W13-2-3-A		W13				
154	F-W01-3-3-A		W01	2.5m	3		
155	F-W04-3-3-A		W04	3			
156	F-W13-3-3-A		W13				

表 II-2-2 波圧/波力試験の試験ケース

(6) 盛土構造物

No	ケース名	地形	波形	堤体位置	障害物	堤体模型	繰り返し
157	F-W02-2-A	直立護岸 F	W02	1.25m 2	盛土なし 斜面のみ A	Type-A A	5
158	F-W04-2-A		W04				
159	F-W05-2-A		W05				
160	F-W06-2-A		W06				
161	F-W10-2-A		W10				
162	F-W13-2-A		W13				
163	F-W02-3-A		W02	2.5m 3			
164	F-W04-3-A		W04				
165	F-W05-3-A		W05				
166	F-W06-3-A		W06				
167	F-W10-3-A		W10				
168	F-W13-3-A		W13				
169	F-W02-2-B		W02	1.25m 2	盛土0m B		
170	F-W04-2-B		W04				
171	F-W05-2-B		W05				
172	F-W06-2-B		W06				
173	F-W10-2-B		W10				
174	F-W13-2-B		W13				
175	F-W02-3-C	W02	2.5m 3	盛土1.25m C			
176	F-W04-3-C	W04					
177	F-W05-3-C	W05					
178	F-W06-3-C	W06					
179	F-W10-3-C	W10					
180	F-W13-3-C	W13					
				合計		1524	ケース

## 2.3. 試験手順

### 2.3.1. 波検定

試験に先立ち、試験に用いる造波波形を決定した。本装置で用いる津波造波装置は、チャンバー一式で、複数の給気バルブの制御により任意波形を造波することが可能となる。波検定では、この複数の給気バルブの開放タイミングと、それぞれのバルブの開口面積を変更しながら、目的の波形状が造波出来るように試行錯誤的に繰り返し造波を行った。目的の波形状は、WG3における波形の計測結果が目的波形に一致するように確認した。

造波波形として、波の周期が比較的短い孤立波状の短周期タイプと、周期が十分長い段波状の長周期タイプの波を設定した。また各々で、波の前方勾配を変えて、砕波点が異なる複数の波を用意した。このうち、汀線位置に堤体模型がある場合に衝撃的な波力が発生すると考えられる、汀線付近で砕波する波形を含むようにした。造波した波の波高は、沖波（WG3の位置）でおおむね0.2mとしたが、上記条件を満たすように適宜波高を調整した。

### 2.3.2. 通過波検定試験

通過波検定試験は、波検定で決定した波形について、堤体模型を設置しないで図 II.2.1-7 に示した位置で水位と流速を時系列で計測した。計測結果の時系列を整理し、各堤体模型設置位置における水位（浸水深） $\eta$ と流速  $V$ 及びこれらから算出したフルード数  $Fr (= V/\sqrt{g\eta})$ の時系列から、最大浸水深 $\eta_{max}$ が生じている時のそれぞれの値を求めた。また同時に、高速度カメラ及び通常のビデオカメラで通過波形状を撮影した。

### 2.3.3. 波力/波圧試験

堤体模型を設置し、波検定で決定した波形を作用させて堤体模型に働く波力を計測した。圧力の計測値から波力を求める際には、鉛直方向の圧力の計測値を線形補完し、積分して堤体単位幅あたりの波力を算出した。各計測項目の時系列計測結果を整理し、最大波力を波力の時系列から求めた。この値と、上記通過波検定試験の計測結果を用いて、水深係数を算出した。繰り返し計測した結果については、その平均値と最大・最小値について整理した。また同時に、高速度カメラ及び通常のビデオカメラで通過波形状を撮影した。高速度カメラは、計測結果と同期を取り、波力の時系列を同時に表示できるように動画を編集した。

### 2.3.4. 波力算出結果のノイズ処理

圧力の測定結果から波力を算出する際は、各時間の圧力値を鉛直方向に積分して求めた。その際、圧力にスパイクノイズのような瞬間的な変動が計測されている。これは、その圧力計に働く局所的な圧力変動と考えられるが、積分による波力の算出時にはこの影響により大きな力が算出される。これは実際に働く波力とは異なると考えられるが、一般的なフィルターにより処理すると、実際に働く短時間の力も低減させてしまう可能性がある。そこで、以下の処理によりデータを処理した。

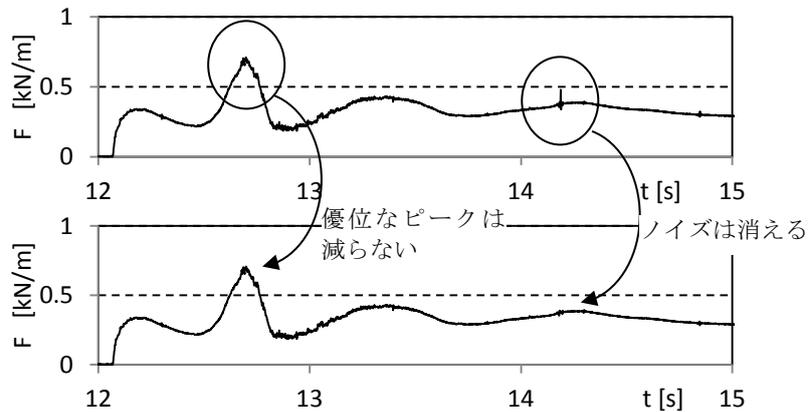
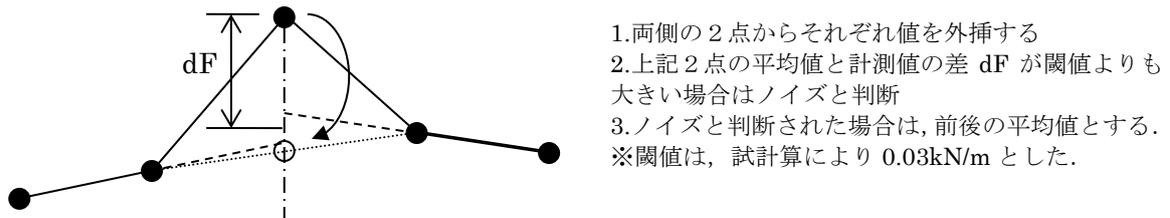


図 II.2.3-1 ノイズの処理方法

### 3. 試験結果

#### 3.1. 通過波検定試験

図 II.3.1-1 に、試験に用いた津波の WG3 地点における沖波水位時系列を示す。W01, W02, W13 は孤立波形状の津波、W03～W08 は正弦波形状の津波、W09～W12 は継続的な水位上昇をともなう津波（長周期波）をそれぞれ対象としたものである。W01 と W09, W03 と W10, W07 と W11 はそれぞれ立ち上がり部分の形状がほぼ同一の波である。また、W06～W07 は、周期がほぼ同じで、津波高が異なる波形である。

各計測点における単純勾配および直立護岸のケースにおける水位の時系列計測結果を、図 II.3.1-2, 図 II.3.1-3 にそれぞれ示す。なお、試験はそれぞれ 2 回繰り返しているが、ここには 1 回目の結果を示した。汀線位置である WG8(η 8)において、水位波形に短時間の水位上昇が表れているケースがあるが、これは砕波によるものであり、この時、巻き波状態で計測点を通過するため、計測された水位はそれらの影響を含んでおり、底面から連続する水深を計測しているものではないことに注意が必要である。そのため、後述する最大浸水深の算出においては、この砕波時の水位を除いた最大浸水深を求めている。単純勾配においては、W07, W08, W11, W12 の比較的緩やかな前面勾配をもつ正弦波タイプの波を除くケースで、汀線に入射する際に砕波が発生している。単純勾配では、汀線位置まで徐々に水深が小さくなるため、波形の前傾化が顕著となり、汀線近傍で砕波している。一方直立護岸では、砕波が発生しているのは W01, W09, W13 の 3 ケースのみである。これらのケースはいずれも、前面が孤立波状に切り立った波形であり、水平海底地形を進行するに従い徐々に前傾し、護岸到達前に砕波していることが分かる。

陸上物の堤体模型設置位置における浸水深、流速の時系列変化を、図 II.3.1-4, 図 II.3.1-5 にそれぞれ示す。陸上部流速は、プロペラ流速計、底面電磁流速計、レーザードップラー流速計 (LDV) の 3 種類の計測装置により計測した。V としたものがプロペラ流速計、V\_B としたものが底面電磁流速計、VL としたものが LDV のそれぞれ計測結果である。なお LDV は、レーザーストリークが通過した際に流速が計測されるため、計測結果が不連続となる。また、P.08 の汀線では底面に流速計を設置出来ないため、底面電磁流速計による計測結果は行っていない。3 つを比較すると、P.08 をのぞき流速の計測結果はほぼ一致している。ただし、プロペラ流速計の値を底面電磁流速計や LDV の計測結果と比較すると、波形の到達した直後の流速の計測結果が小さい。プロペラ流速計は、津波の到達直後は水位が低いため、流速計のプロペラ部分が完全に没水していない。このため、プロペラ流速計による計測結果が小さくなる。また、直立護岸の汀線 (P.08) では、LDV の計測結果がプロペラ流速計の計測結果よりも小さくなっている。直立護岸では、護岸からの剥離により底面近傍の流速が小さくなる。LDV では、この底面近傍の流速を計測するため、断面全体の平均流速よりも小さな値を示していると考えられる。

以降の通過波水位の評価では、汀線 (P.08) においては、平均的な流速を評価していると考えられるプロペラ流速計の結果を、汀線から 1.25m (P.09), 2.5m (P.10) においては、津波到達時の流速の立ち上がりが大きく、連続計測が出来ている底面流速計の結果を用いることとする。

防潮堤位置における通過波の浸水深、流速、フルード数の時系列を比較したものを、図 II.3.1-6, 図 II.3.1-7 に示す。一般にフルード数  $Fr$  は、同じ時間の水位と流速から求められ、以下の式によ

って算出される無次元数である。

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g\eta}}$$

図 II.3.1-6, 図 II.3.1-7 によると, 浸水深は波形により様々な形状を呈しているが, 流速は津波到達時が最も大きく, 時間とともに小さくなる。またフルード数も, 概略津波到達時に最大値を示し, その後流速と同様に, 時間経過とともに小さくなることが分かる。

直立護岸の汀線域 (P.08) では, フルード数が波形の初期を除いて 0.7 程度のほぼ一定値となっている。護岸を越流する際には, 支配断面が汀線の少し陸側 (下流側) に発生していると考えられ, 支配断面では  $Fr=1$  となることから, これよりも少し小さい値でほぼ一定値を示していると考えられる。また, 単純勾配と直立護岸を比較すると, 単純勾配では P.08~P.10 まで, 堤体模型の設置位置によらず類似の時系列を示しているのに対し, 単純勾配では, P.09 と P.10 は類似の時系列を示し, P.08 のみ異なった時系列形状となっている。このことから, 鉛直護岸の汀線は, 他のケースとは異なった流況となっていることが想定される。

障害物模型及び盛土模型を設置した試験においても通過波検定試験を実施しているが, これについては波力/波圧試験の結果とともに後述する。

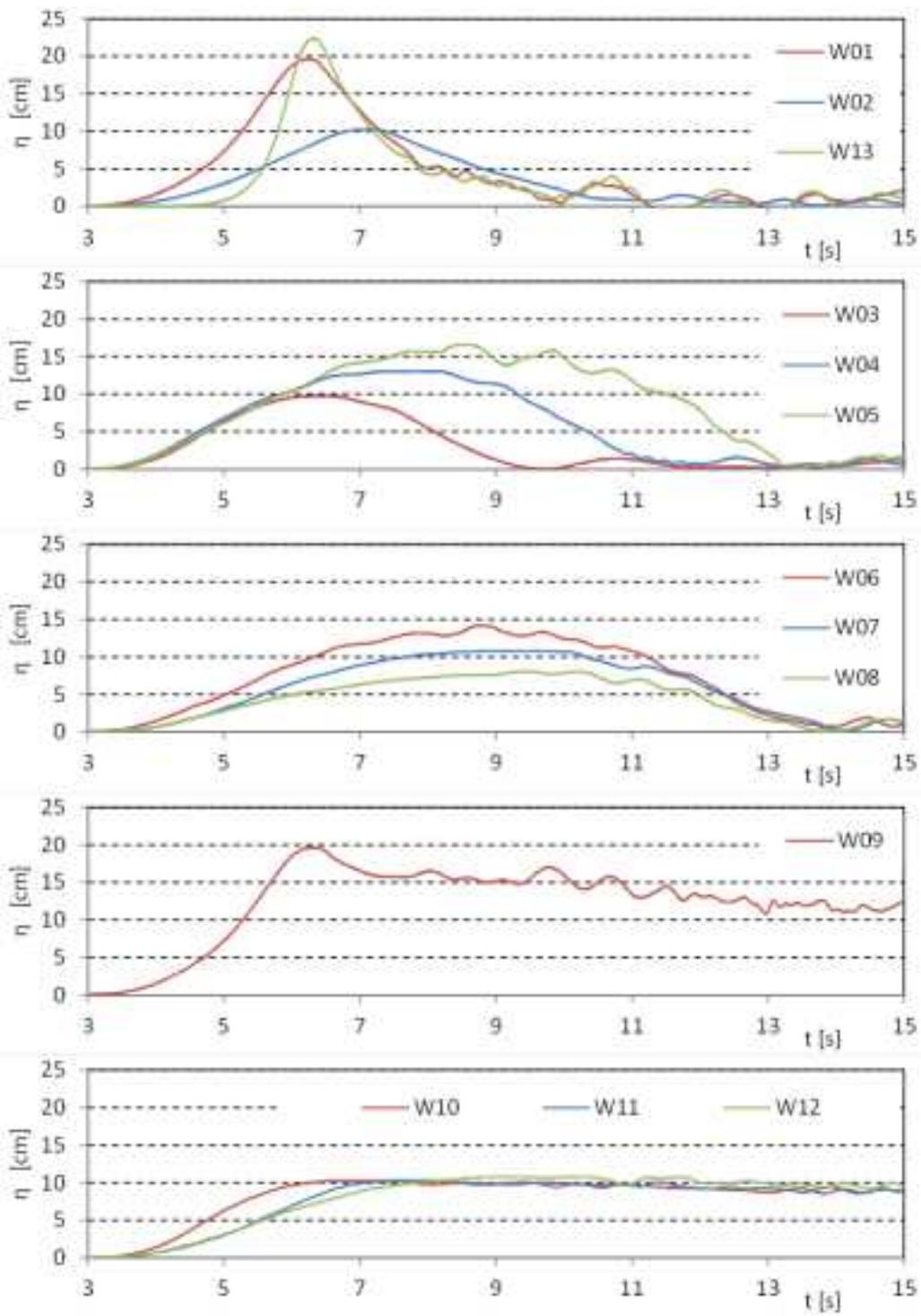


図 II.3.1-1 入射津波の水位計測結果(WG3)

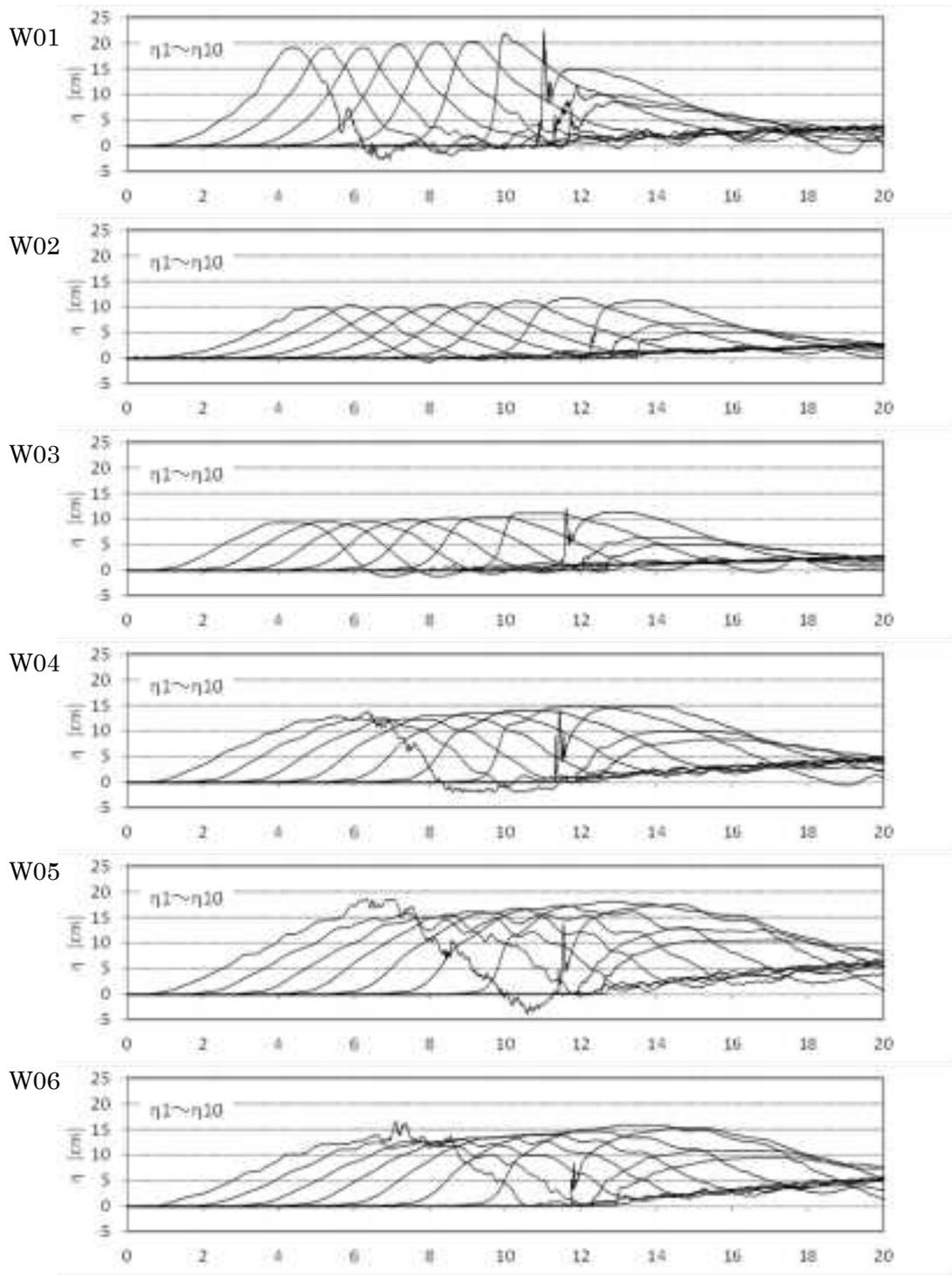


図 II.3.1-2 各測定点の水位時系列 (単純勾配,  $\eta 1 \sim \eta 6$ : 海域,  $\eta 7$ : 汀線,  $\eta 8 \sim 10$ : 陸上部)

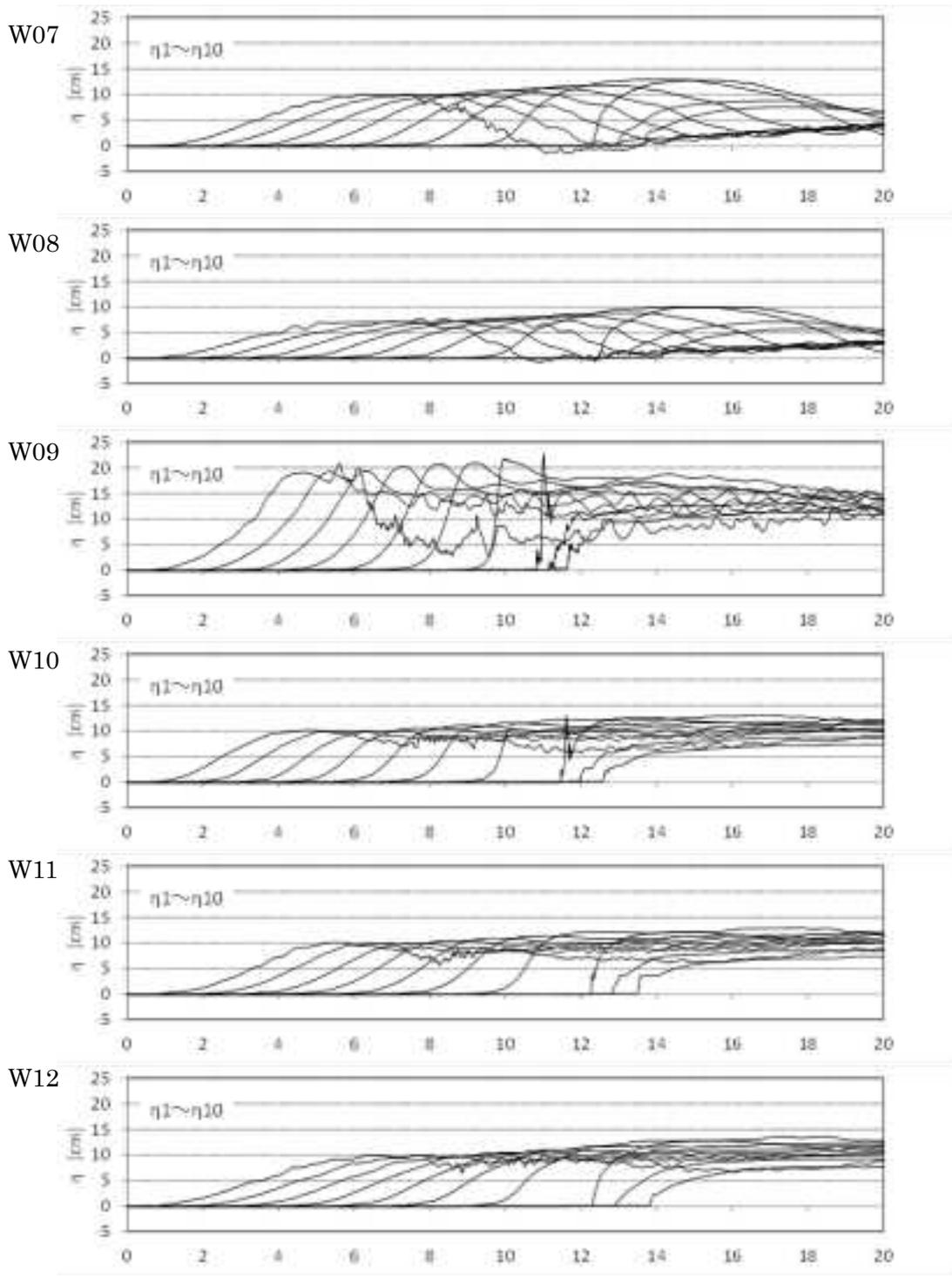


図 II.3.1-2 各測定点の水位時系列 (単純勾配,  $\eta 1 \sim \eta 6$ : 海域,  $\eta 7$ : 汀線,  $\eta 8 \sim 10$ : 陸上部)

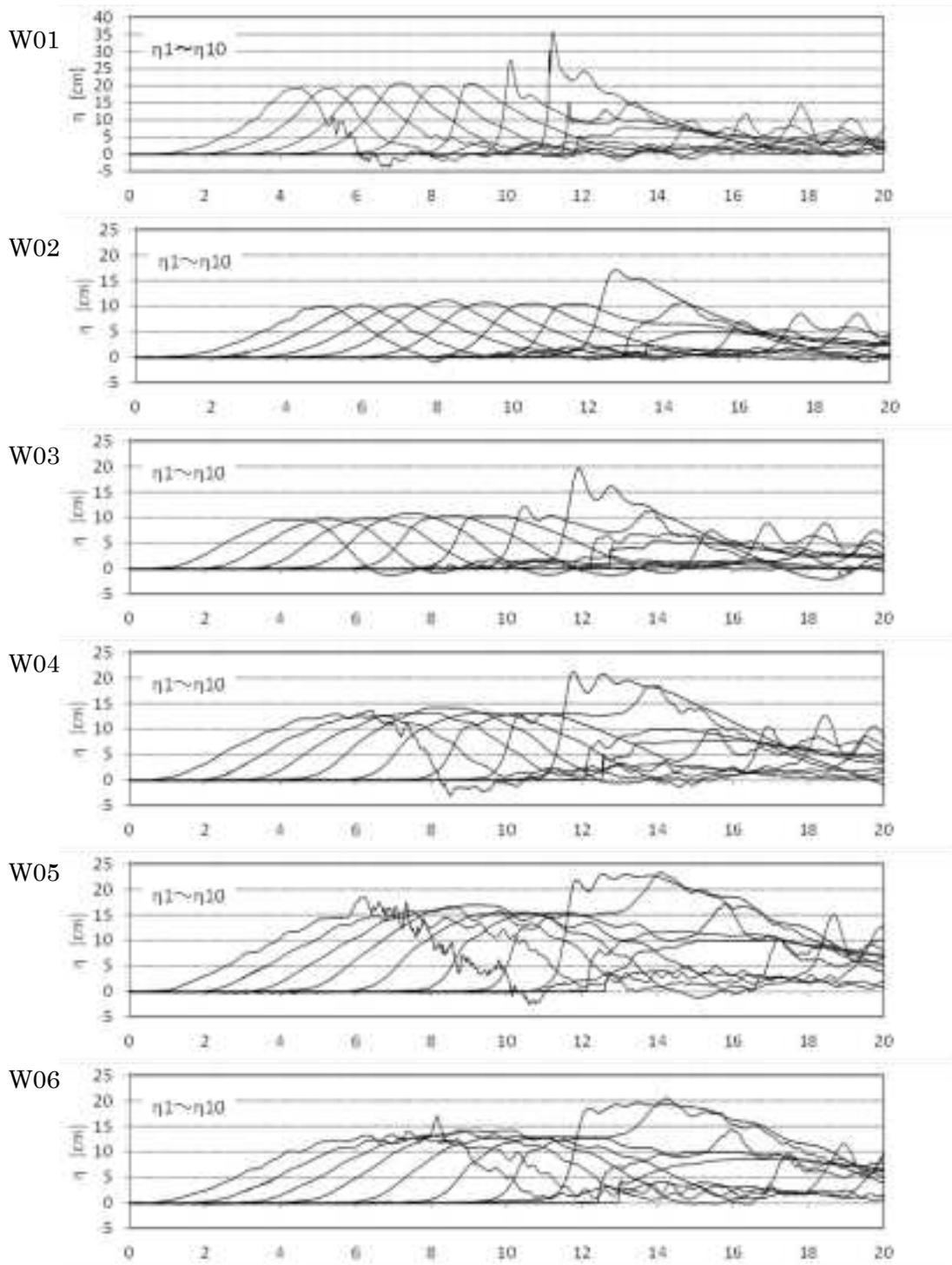


図 II.3.1-3 各測定点の水位時系列 (直立護岸,  $\eta_1 \sim \eta_6$ : 海域,  $\eta_7$ : 汀線,  $\eta_8 \sim 10$ : 陸上部)

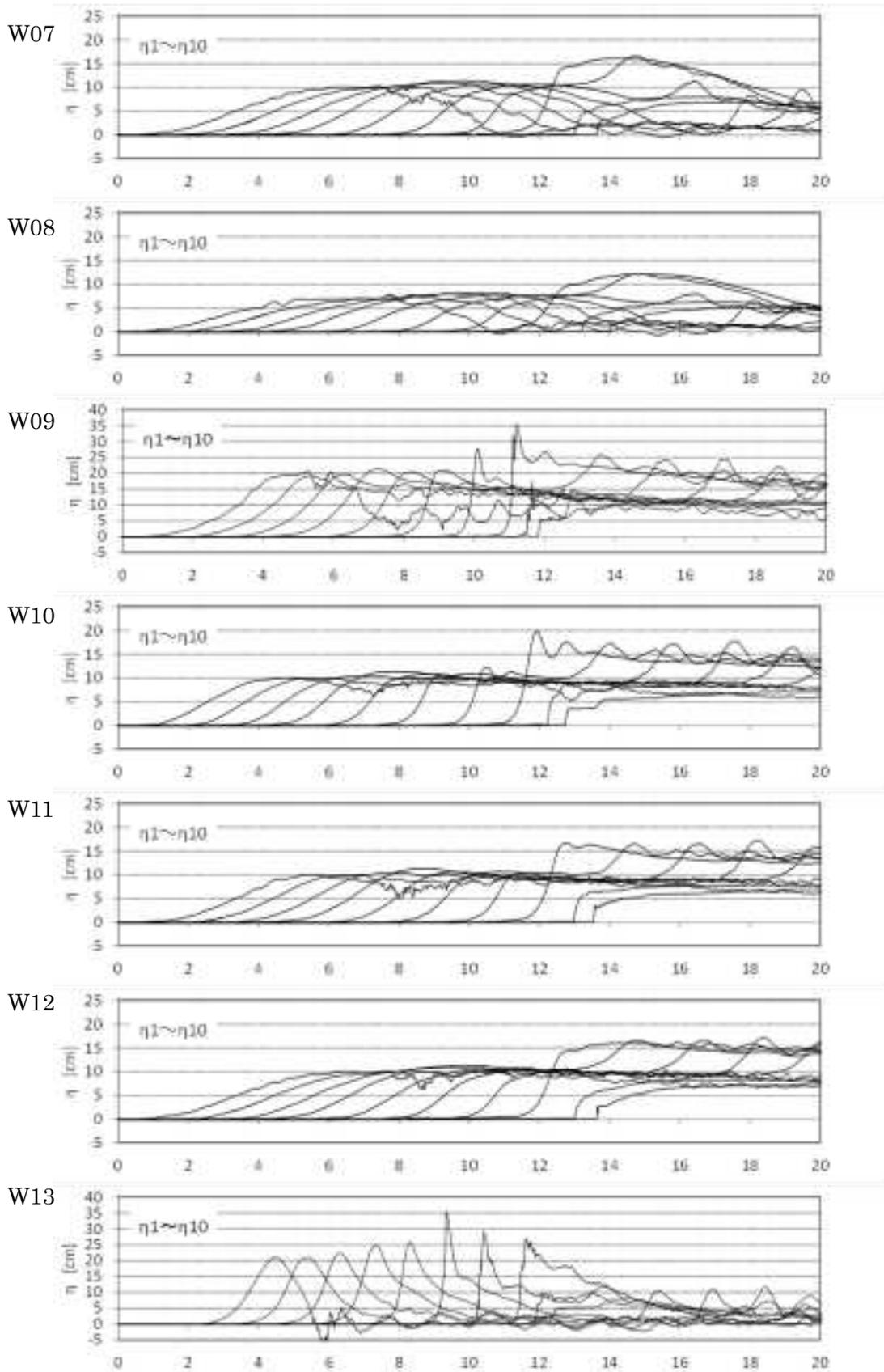


図 II.3.1-3 各測定点の水位時系列（直立護岸， $\eta 1 \sim \eta 6$ ：海域， $\eta 7$ ：汀線， $\eta 8 \sim 10$ ：陸上部）

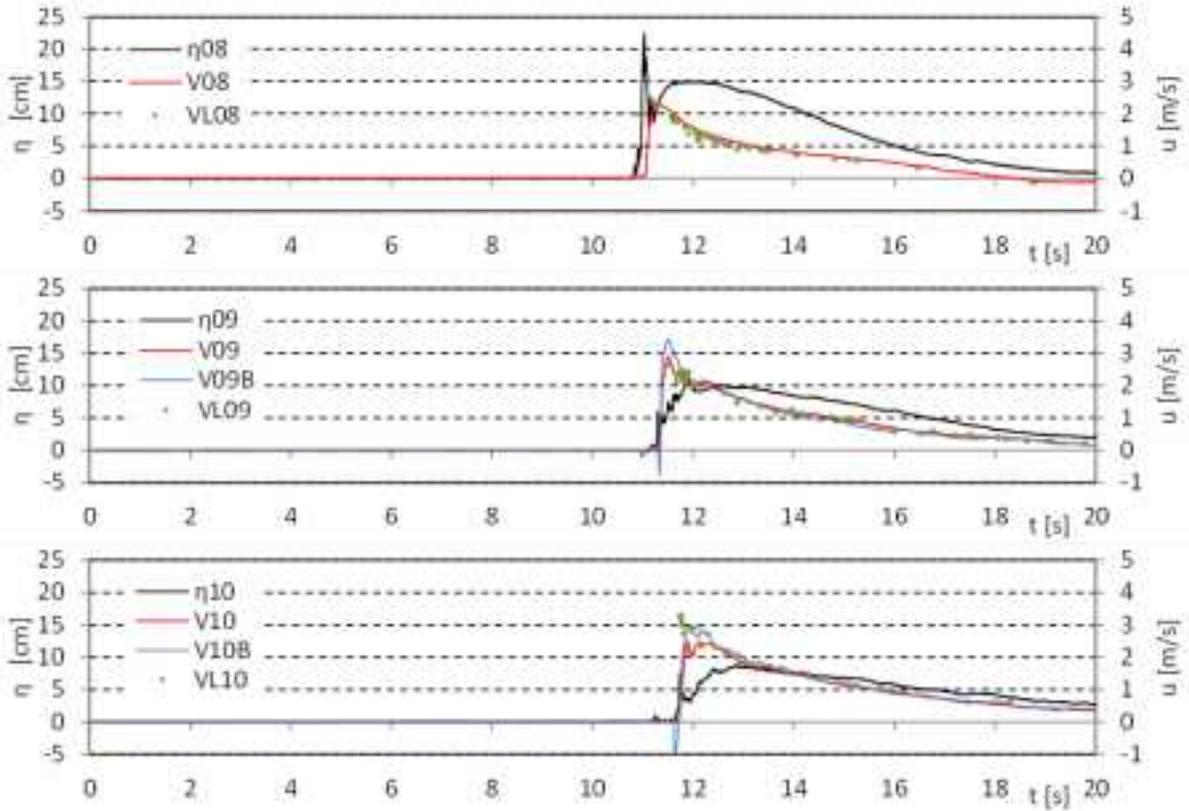


図 II.3.1-4 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W01)

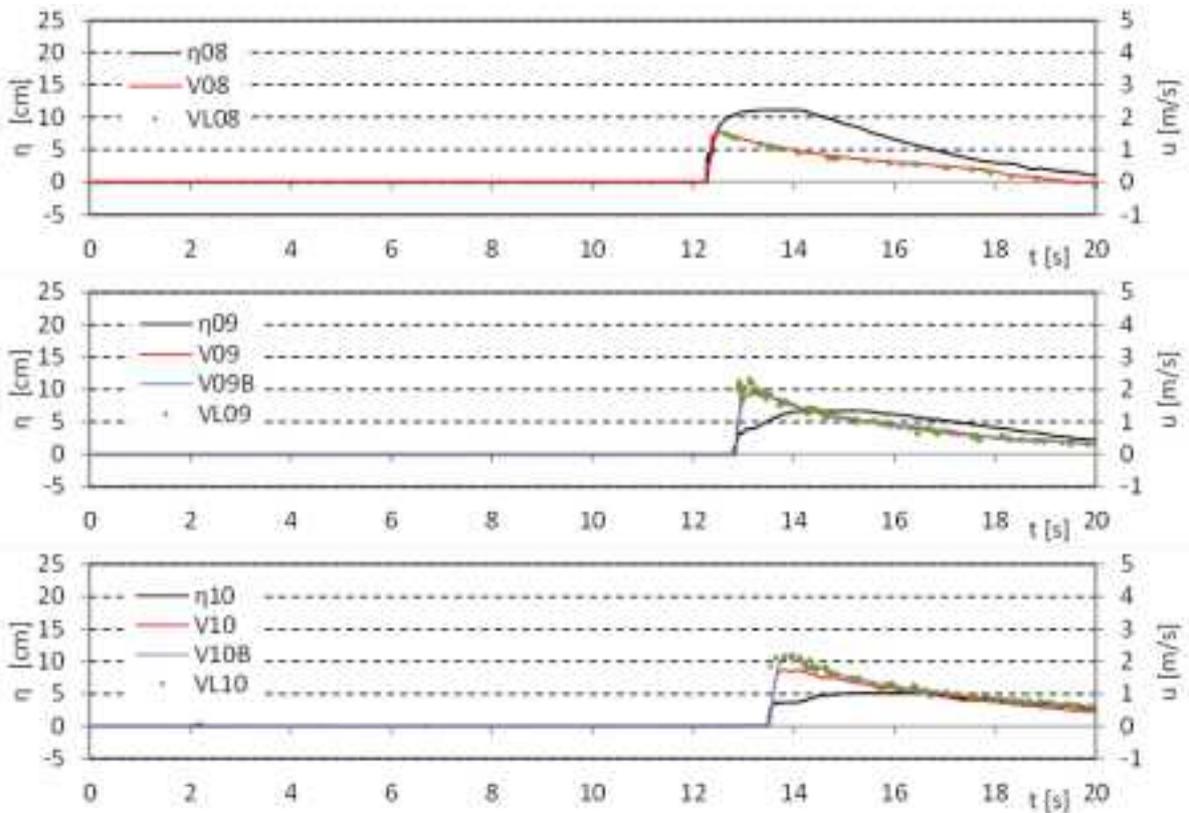


図 II.3.1-4 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W02)

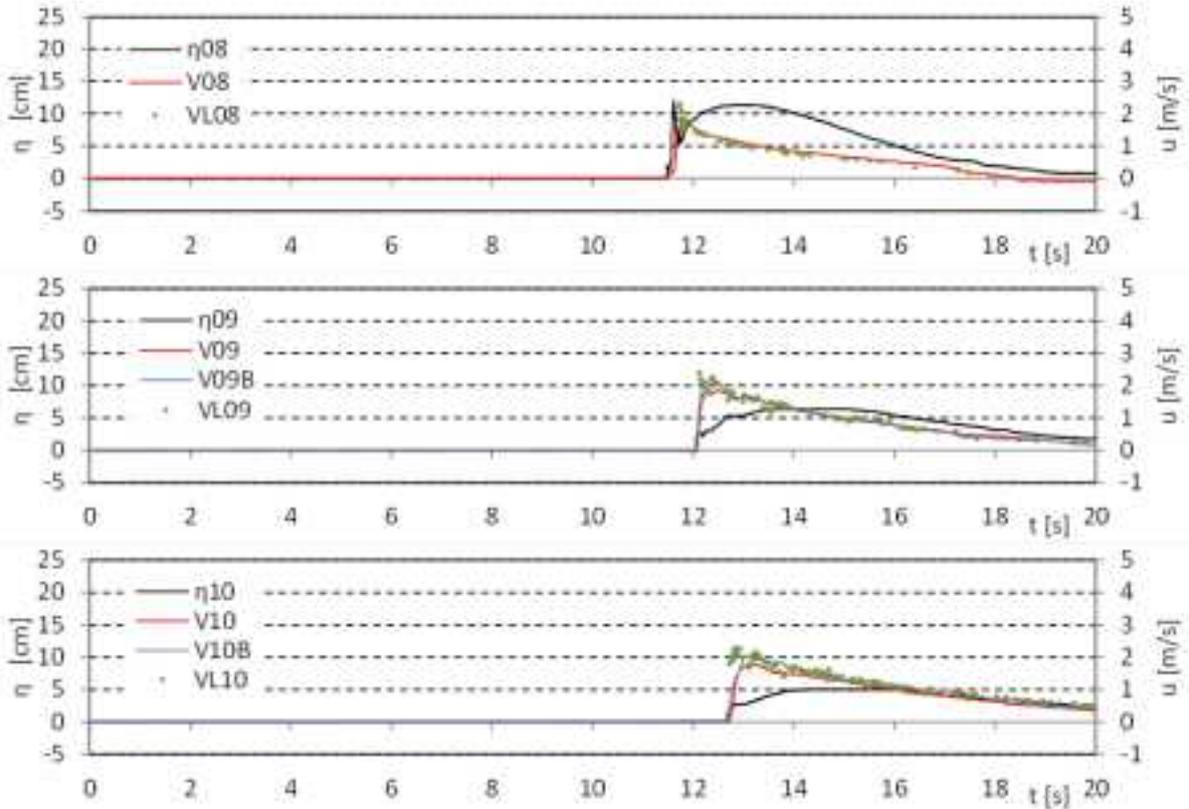


図 II.3.1-4 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W03)

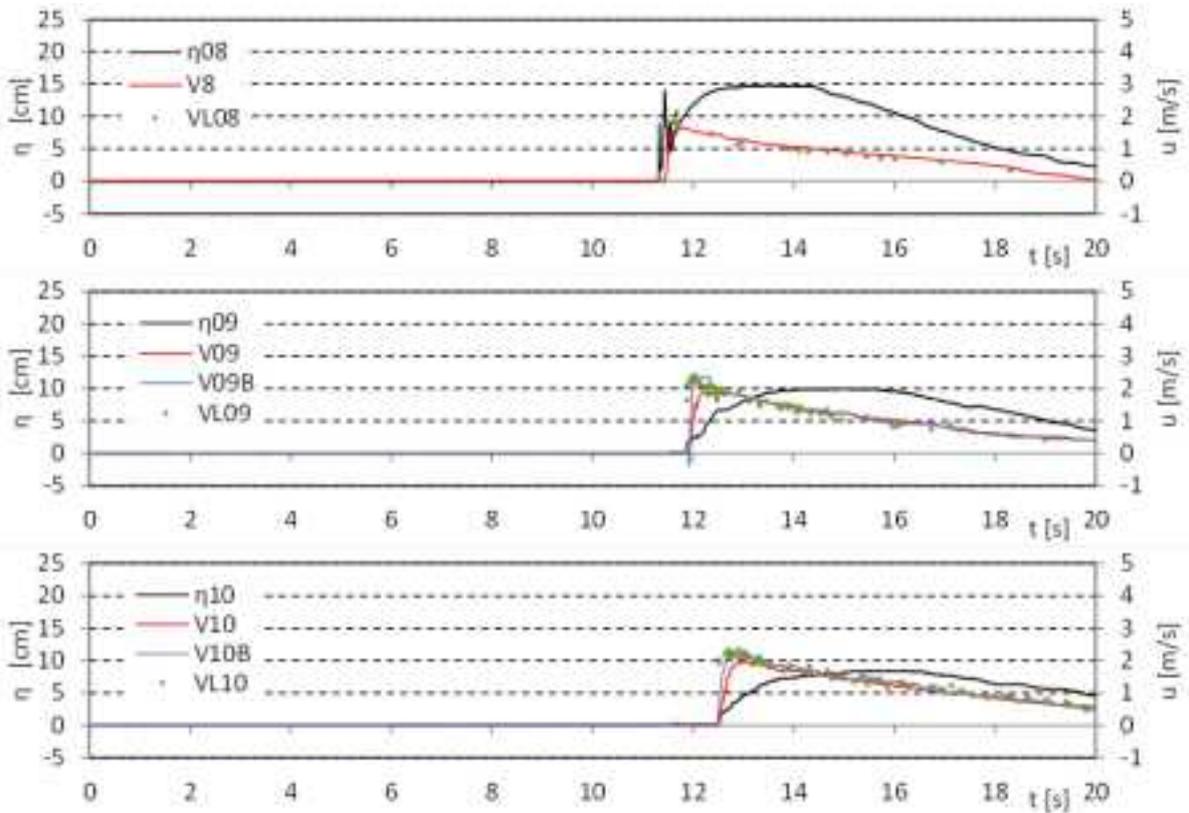


図 II.3.1-4 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W04)

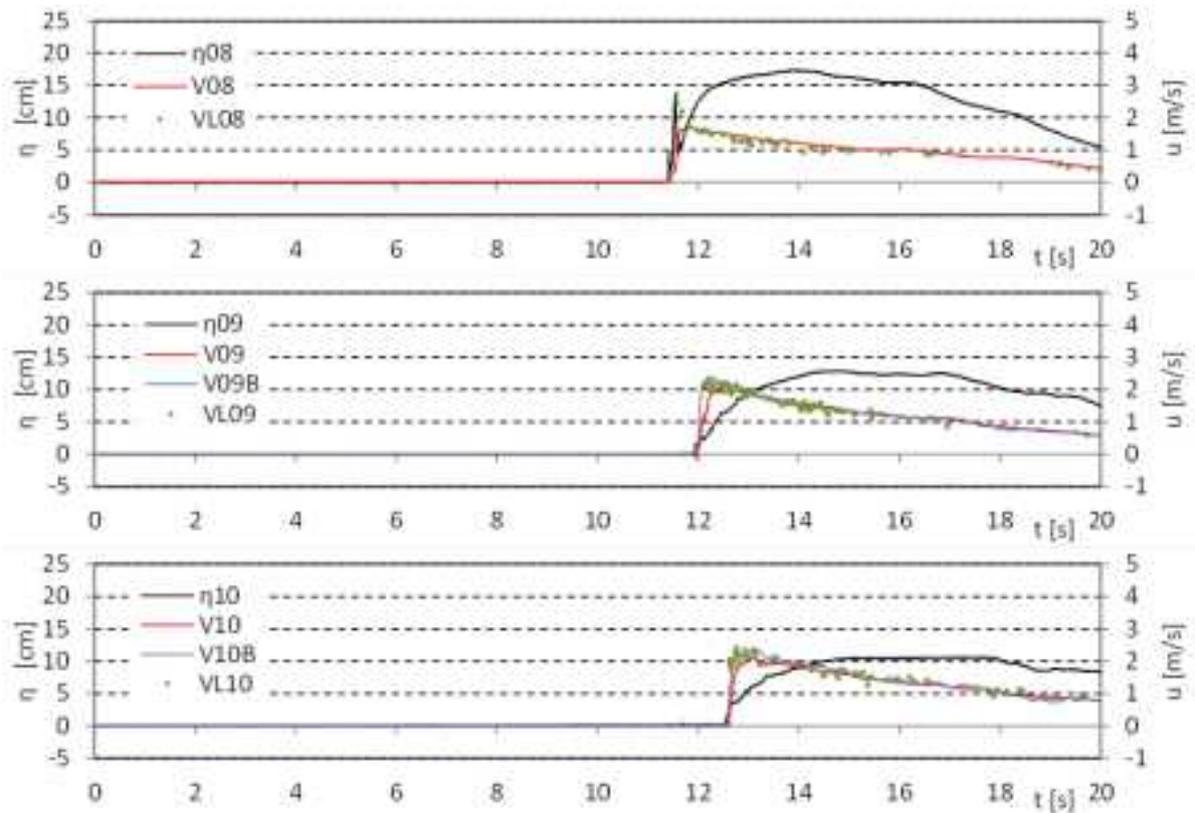


図 II.3.1-4 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W05)

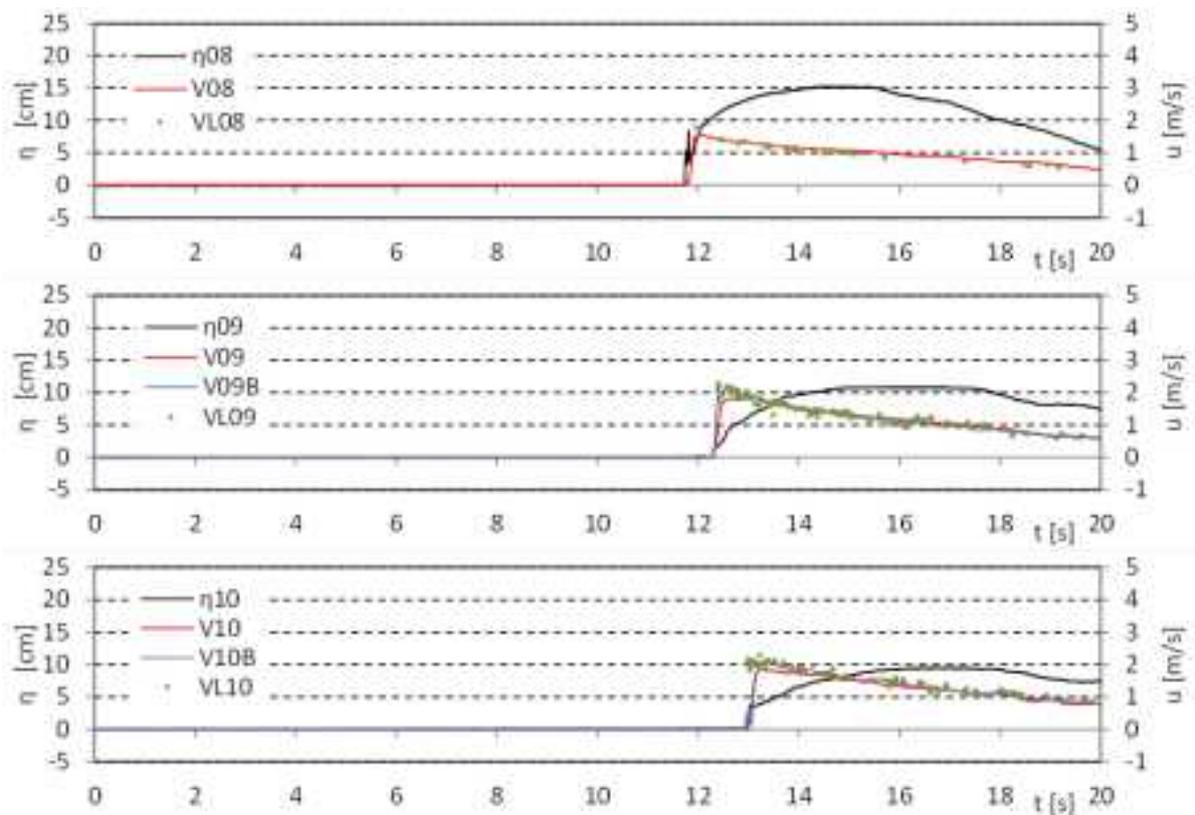


図 II.3.1-4 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W06)

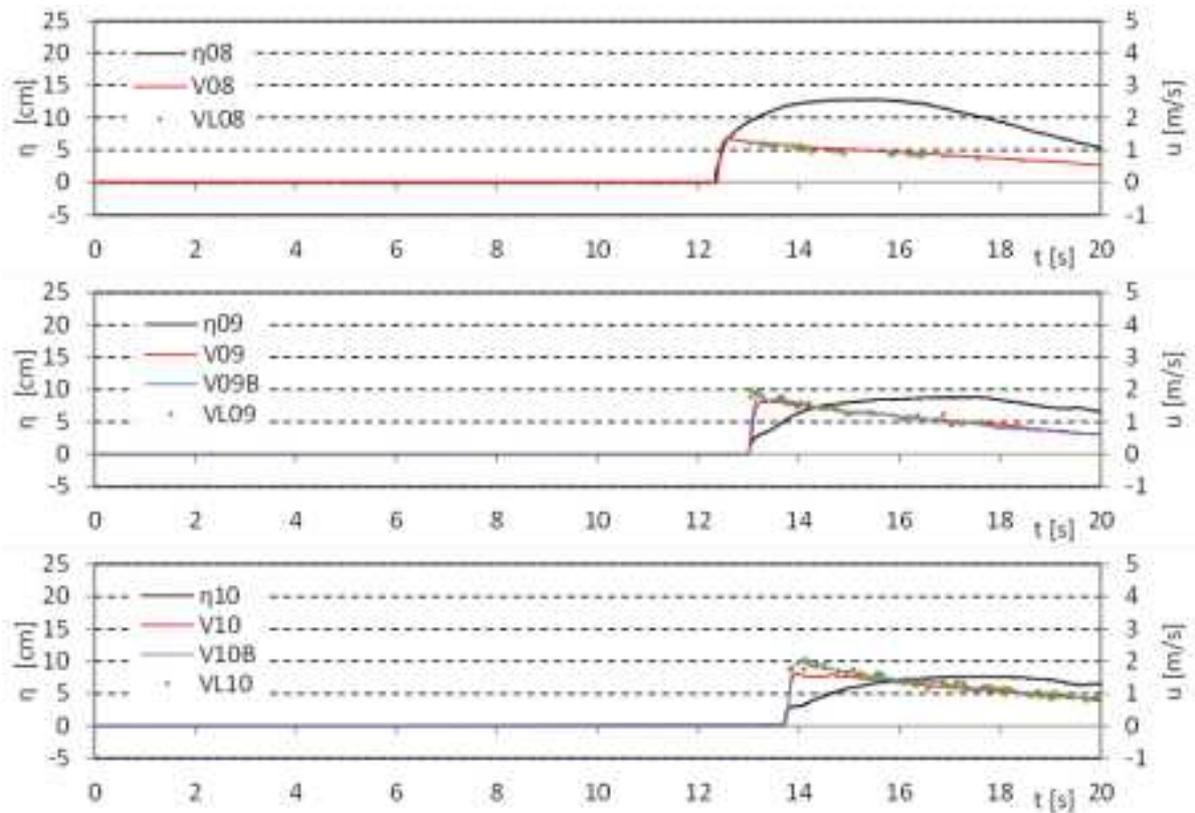


図 II.3.1-4 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W07)

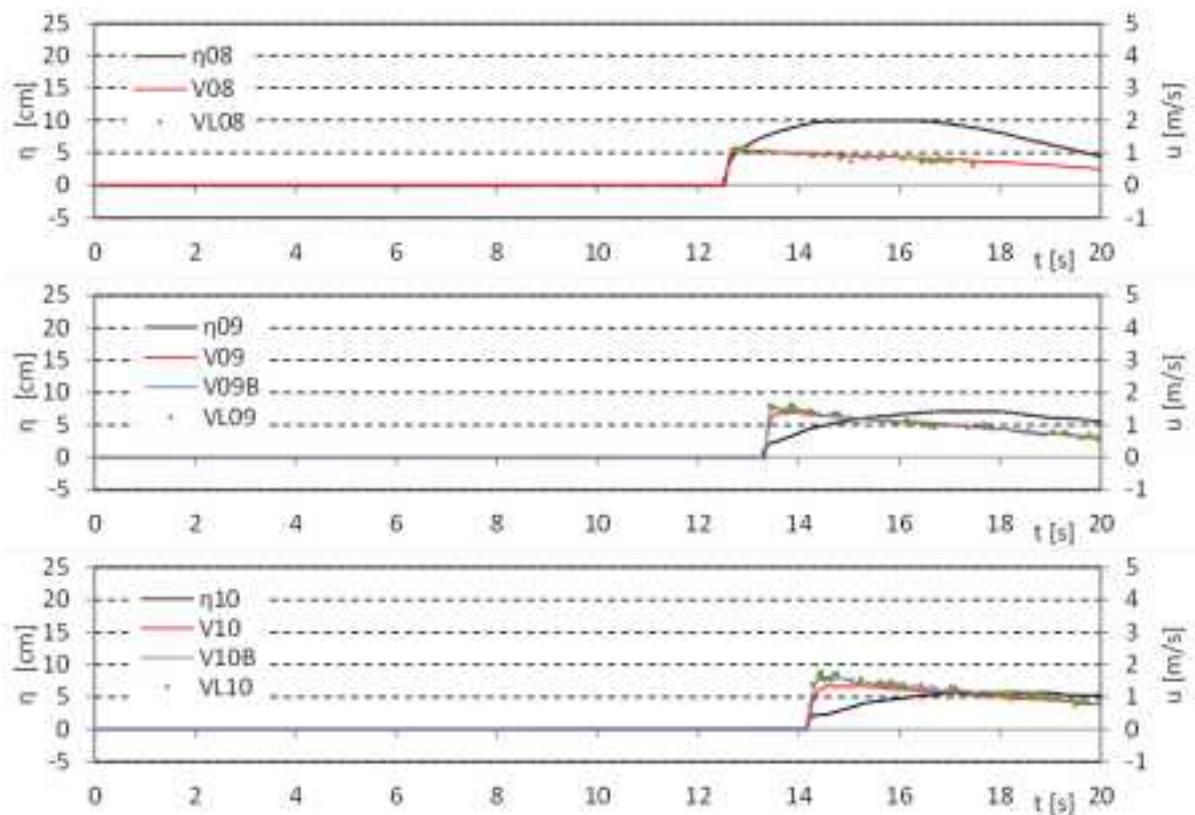


図 II.3.1-4 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W08)

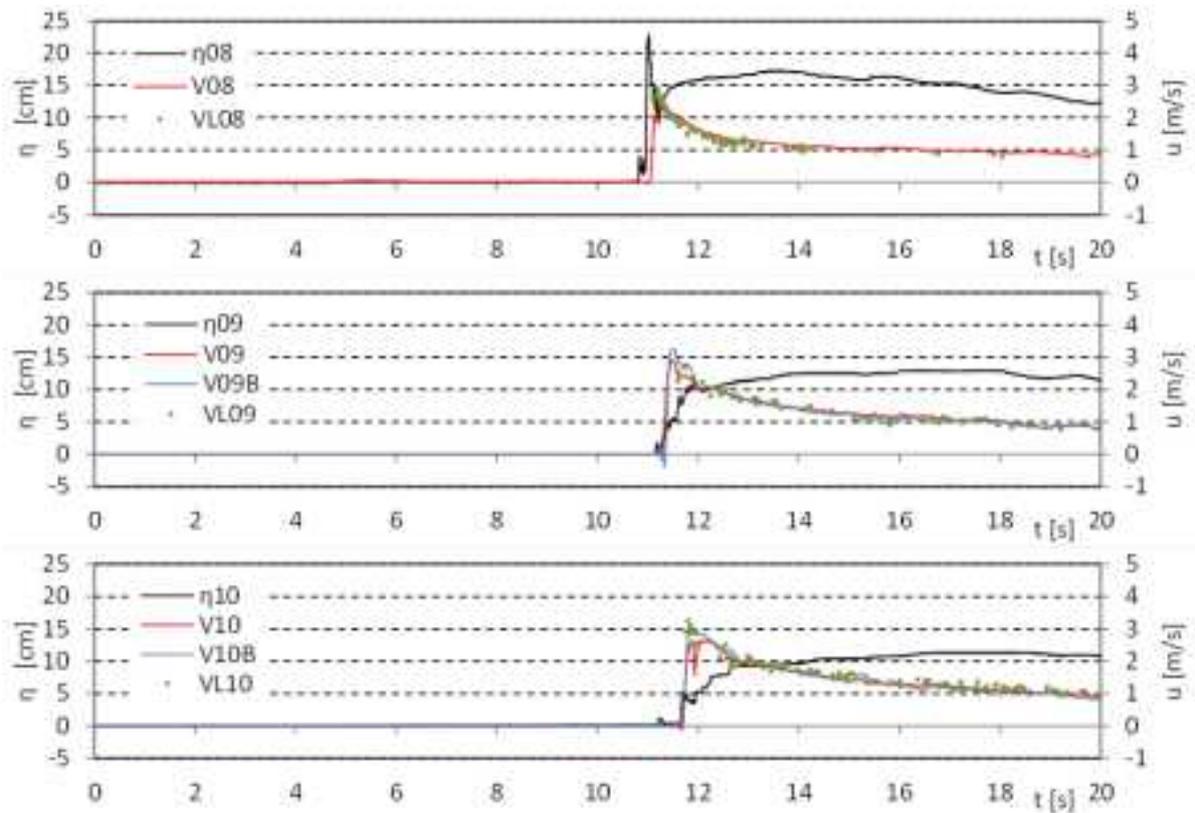


図 II.3.1-4 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W09)

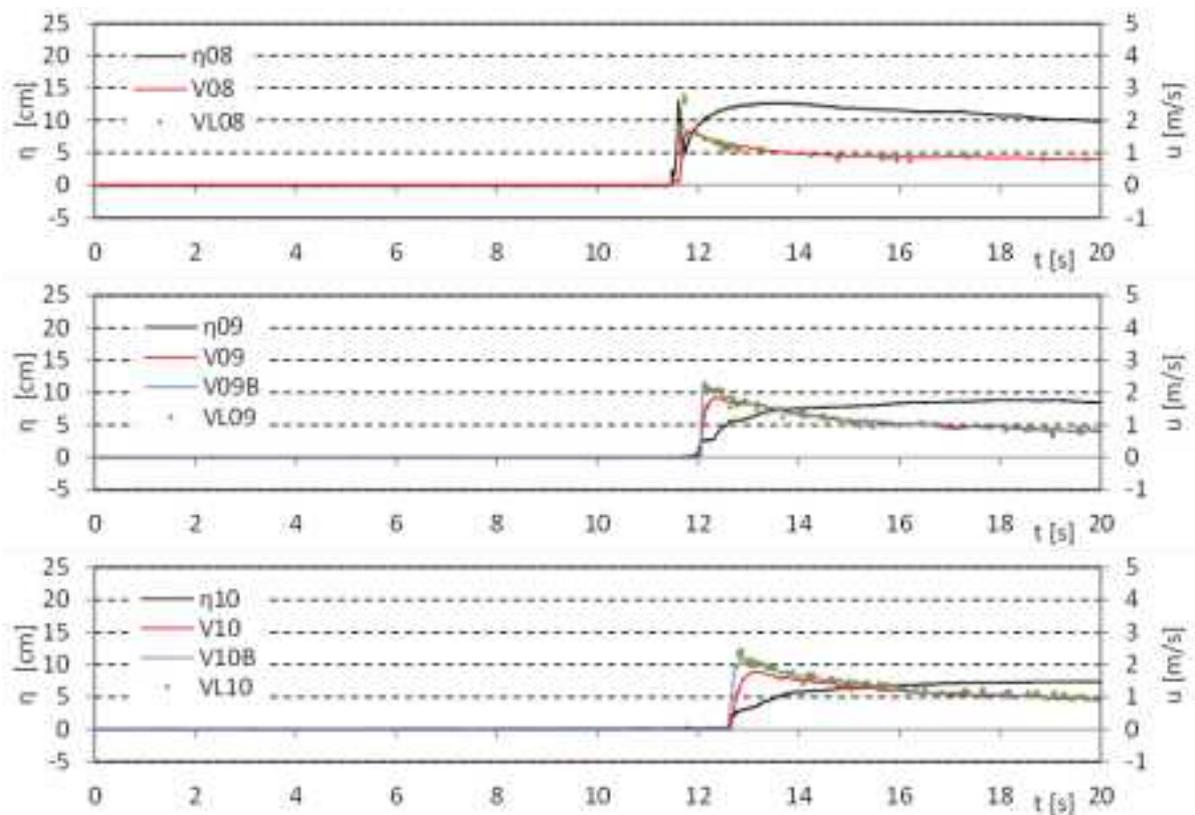


図 II.3.1-4 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W10)

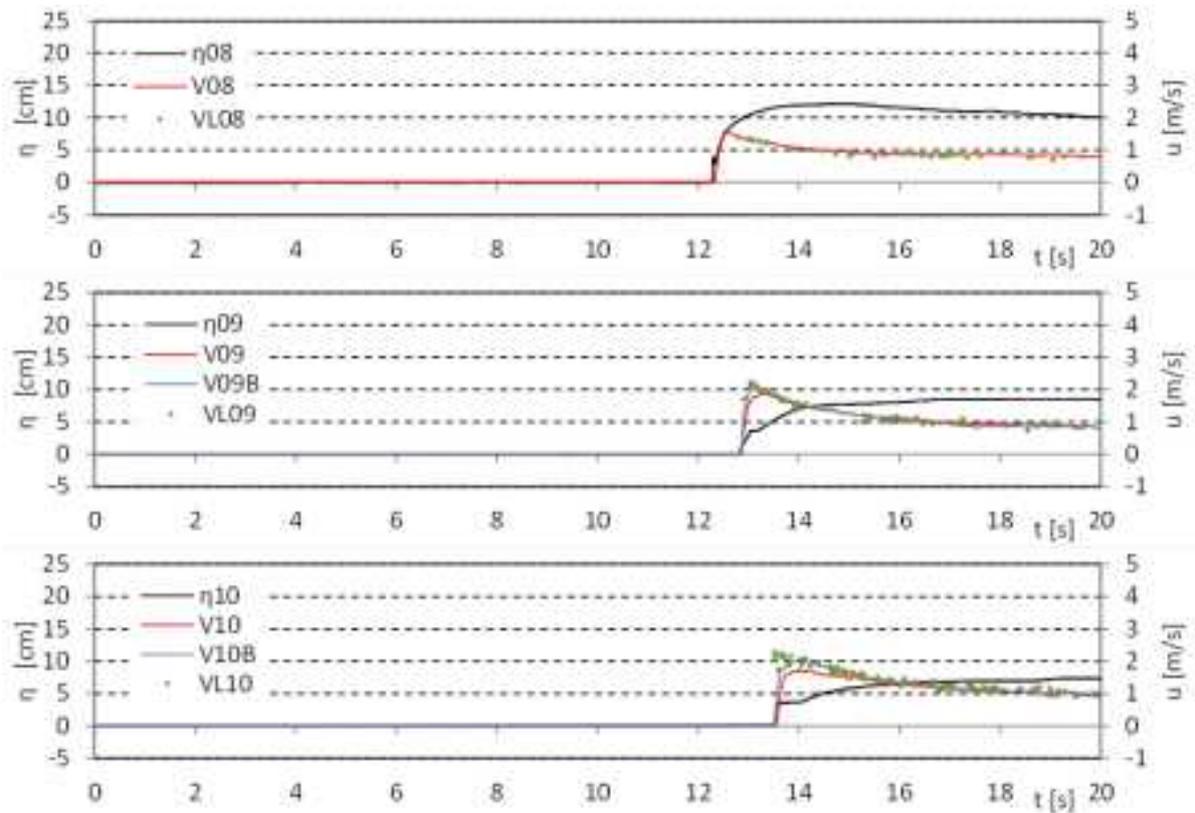


図 II.3.1-4 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W11)

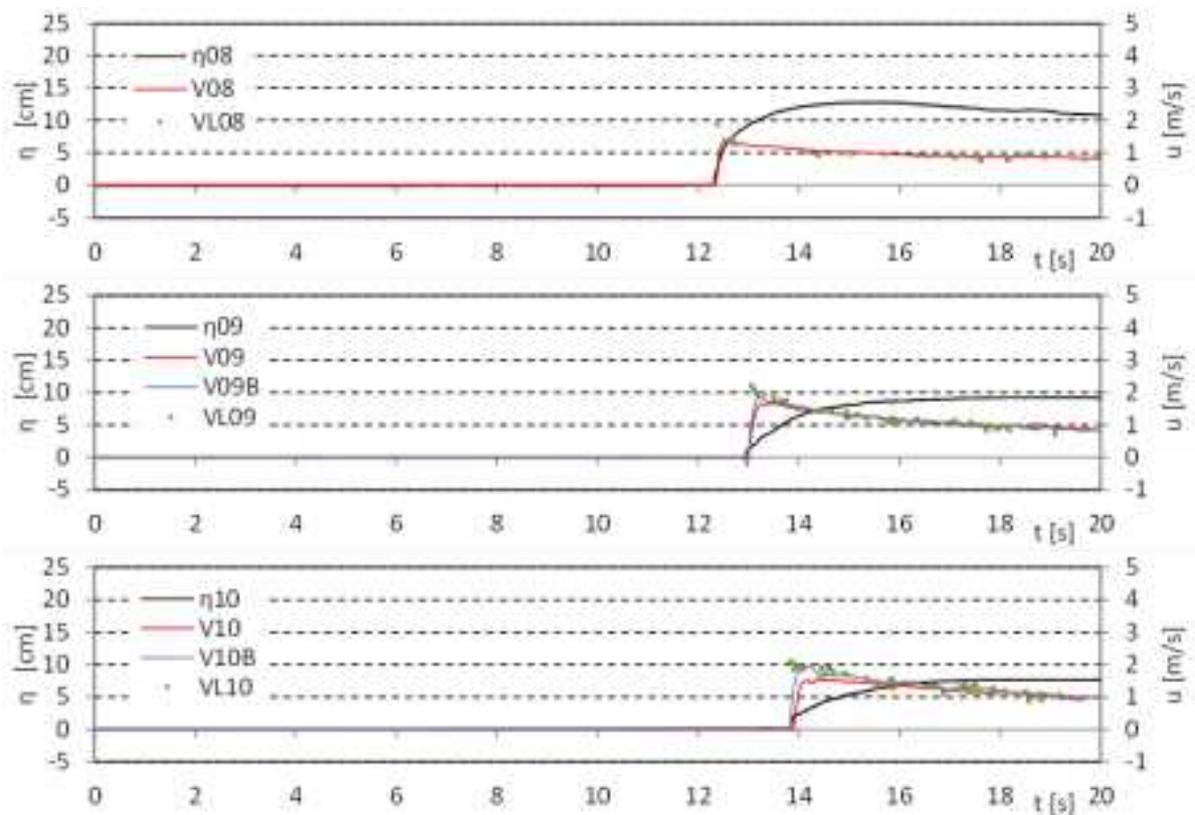


図 II.3.1-4 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W12)

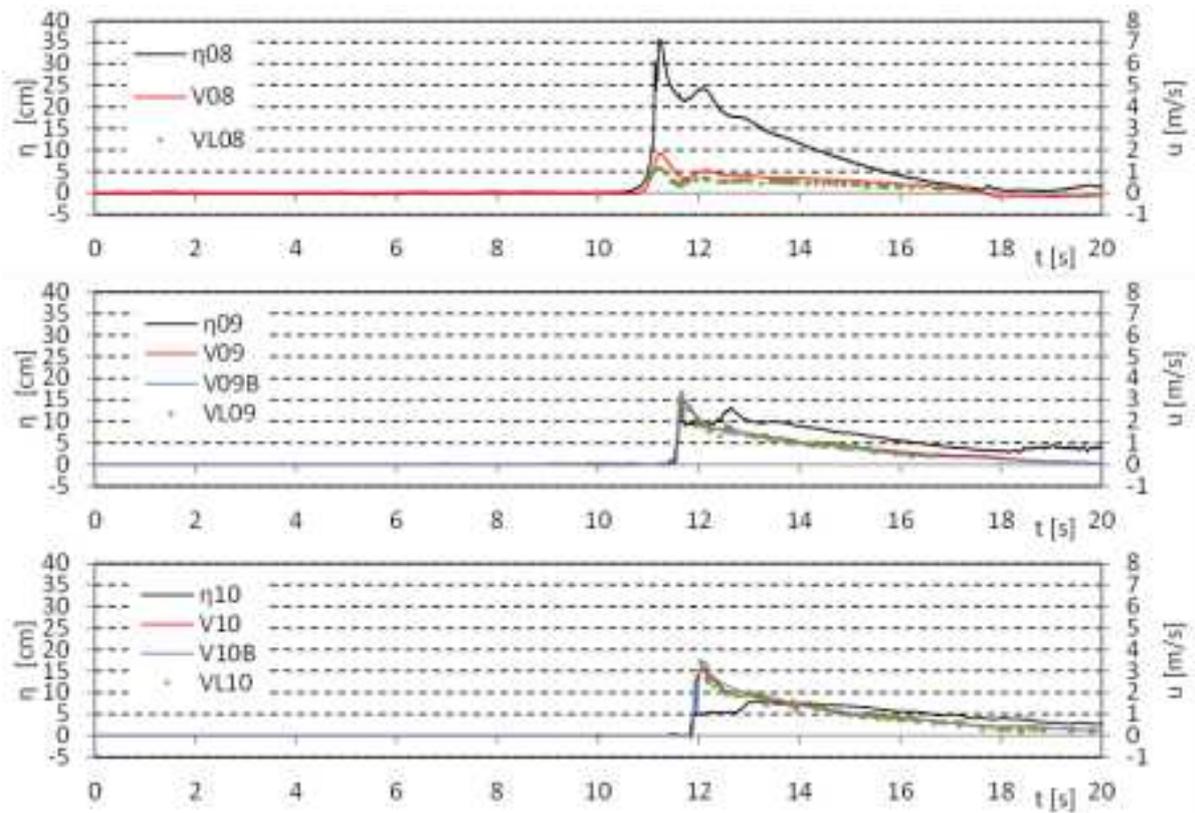


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W01)

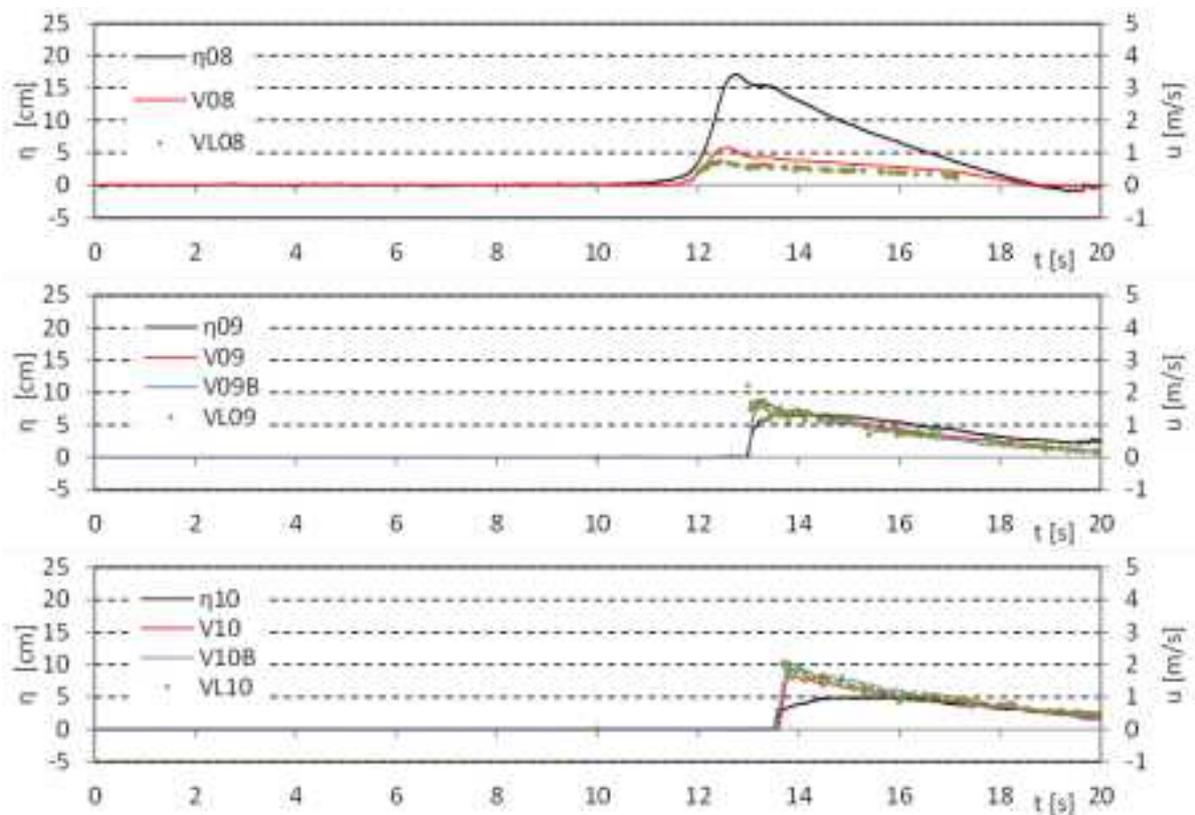


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W02)

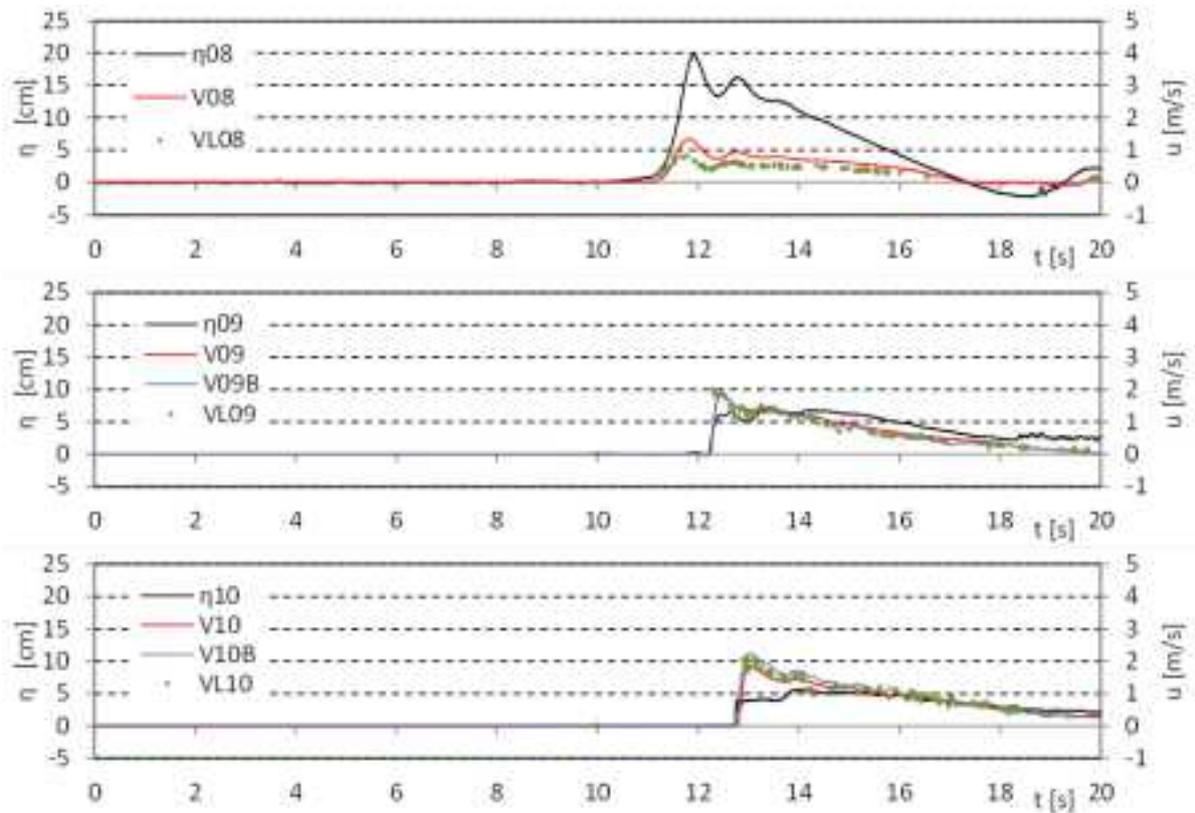


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W03)

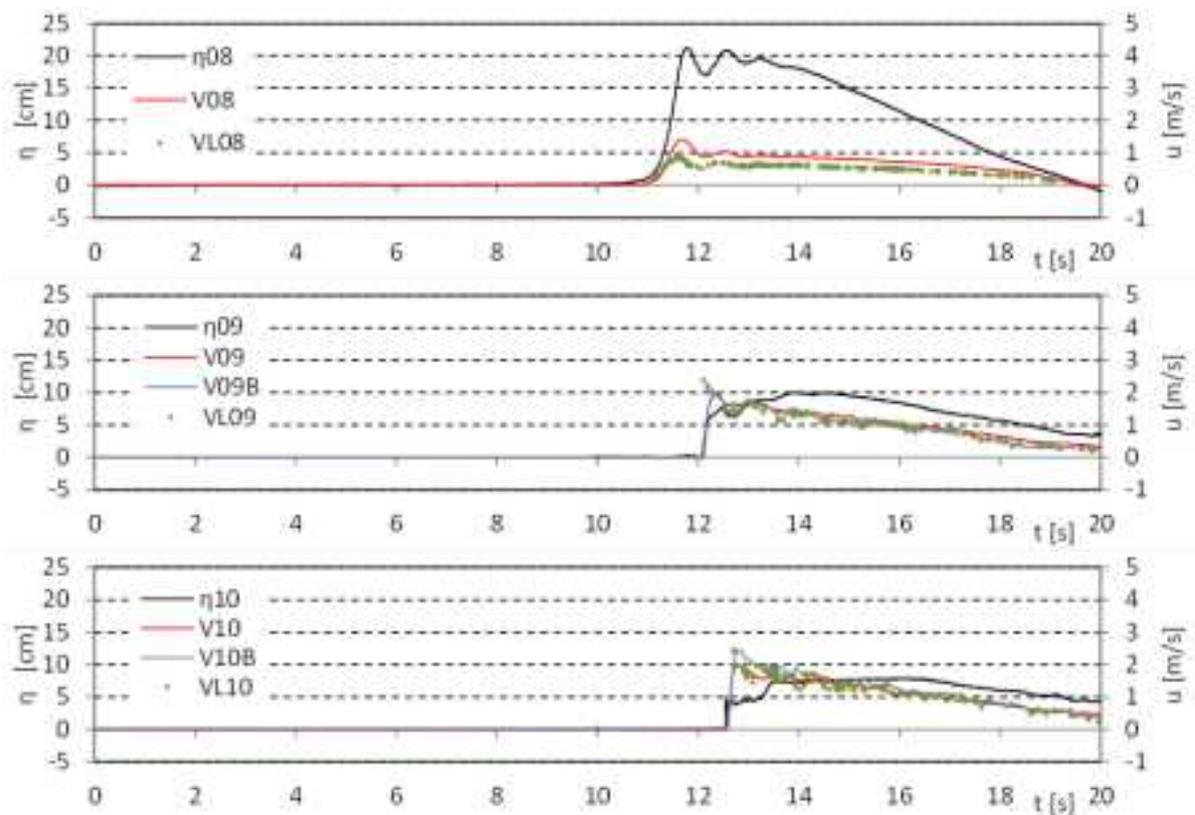


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W04)

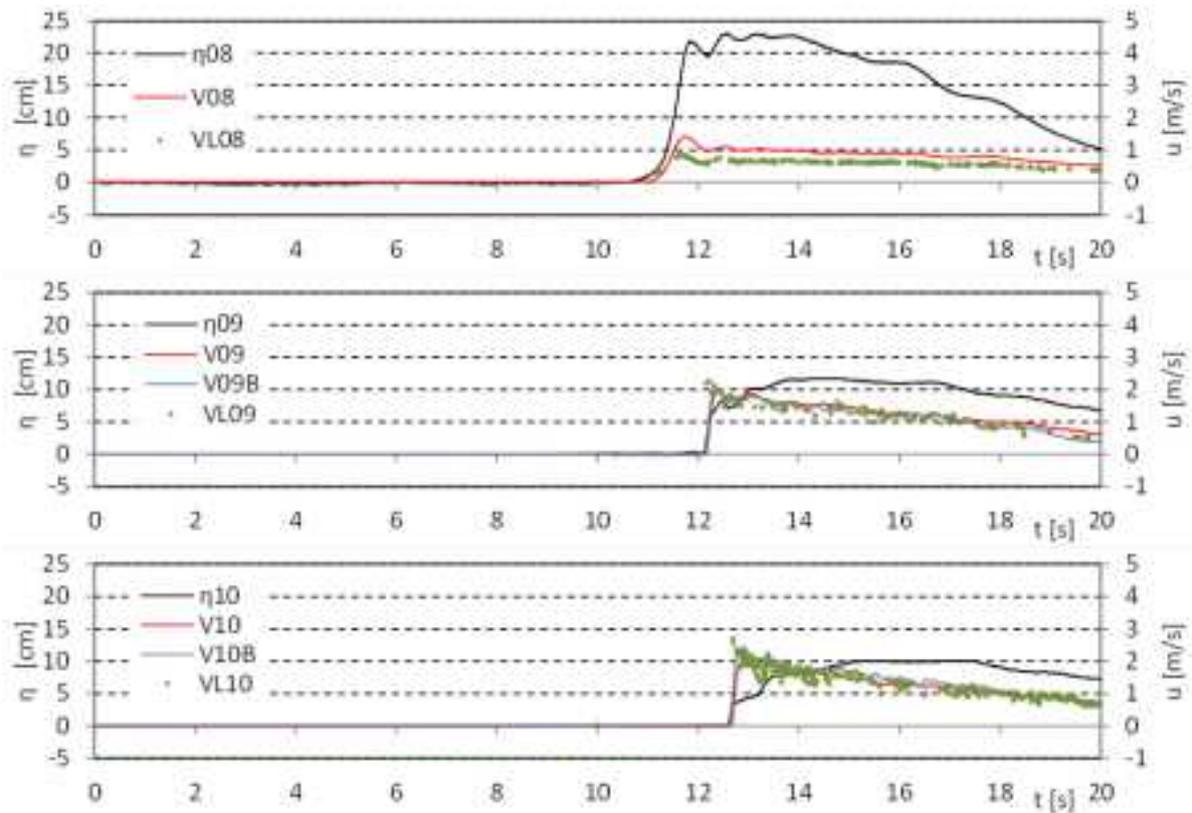


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W05)

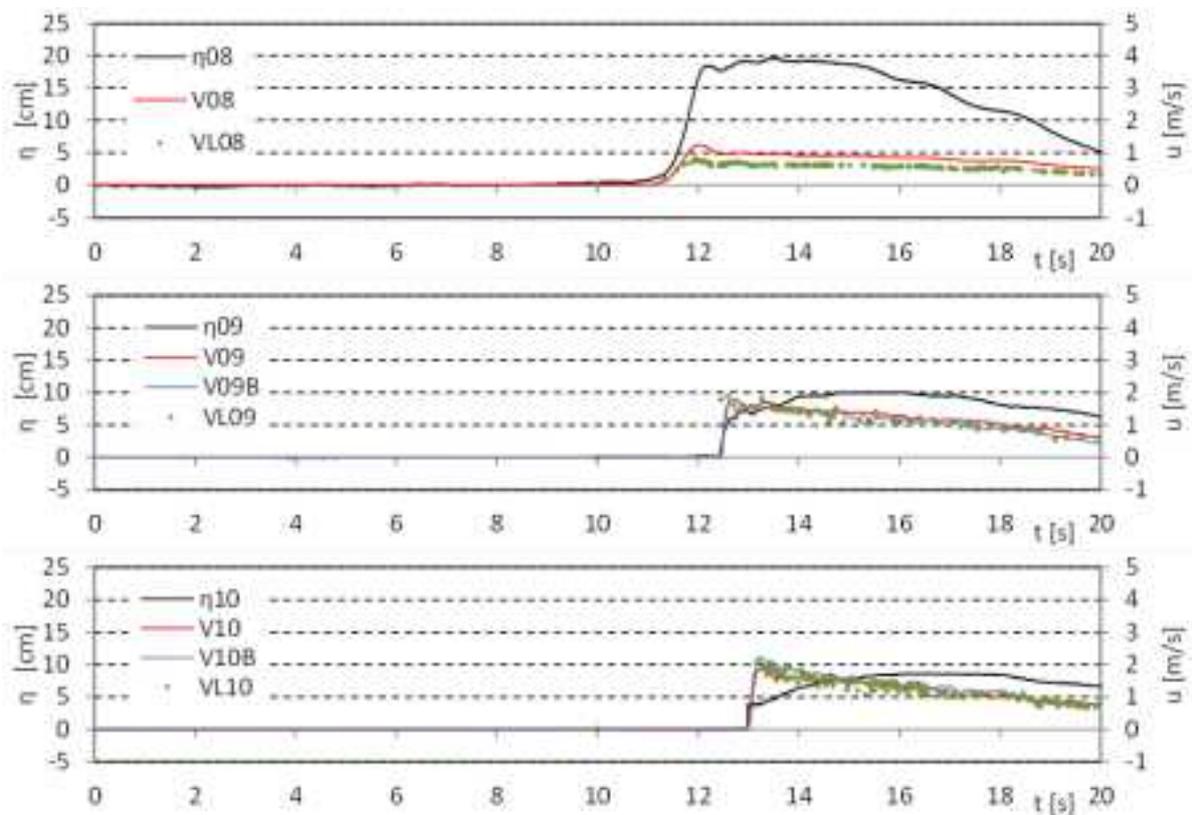


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W06)

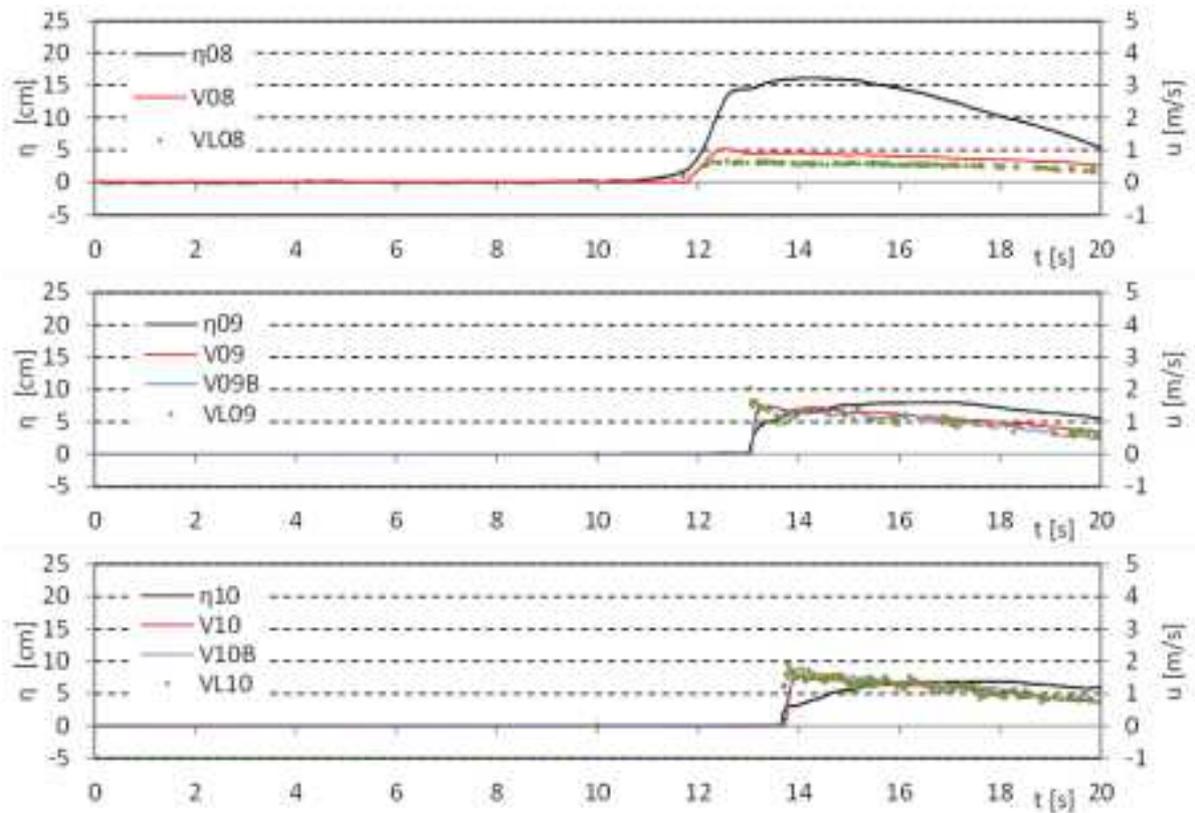


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W07)

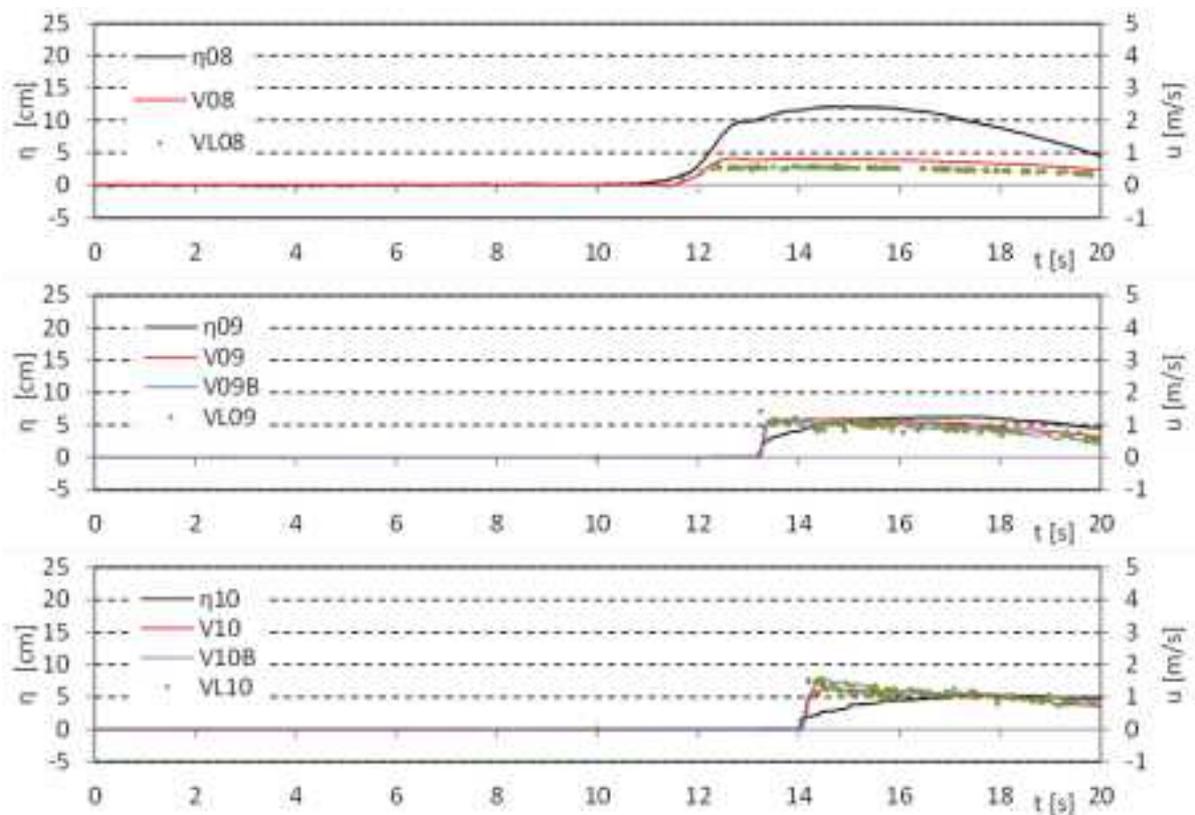


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W08)

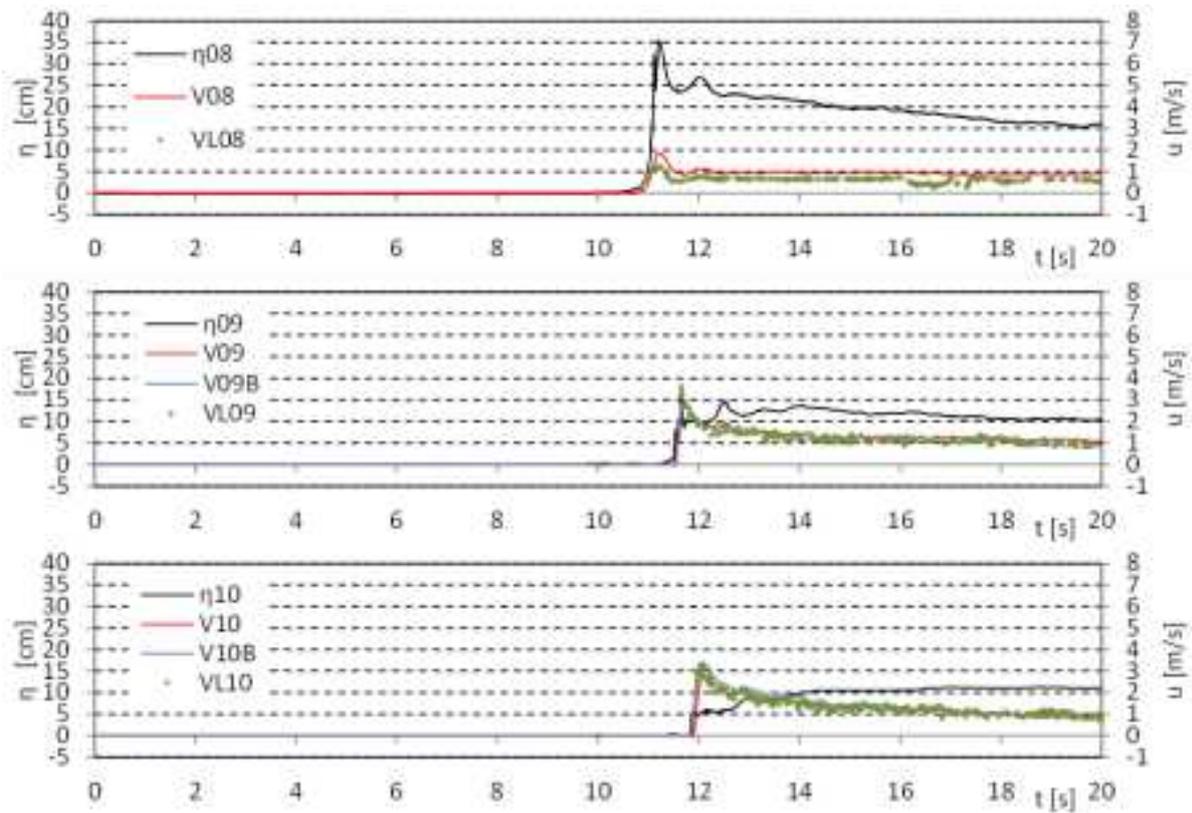


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W09)

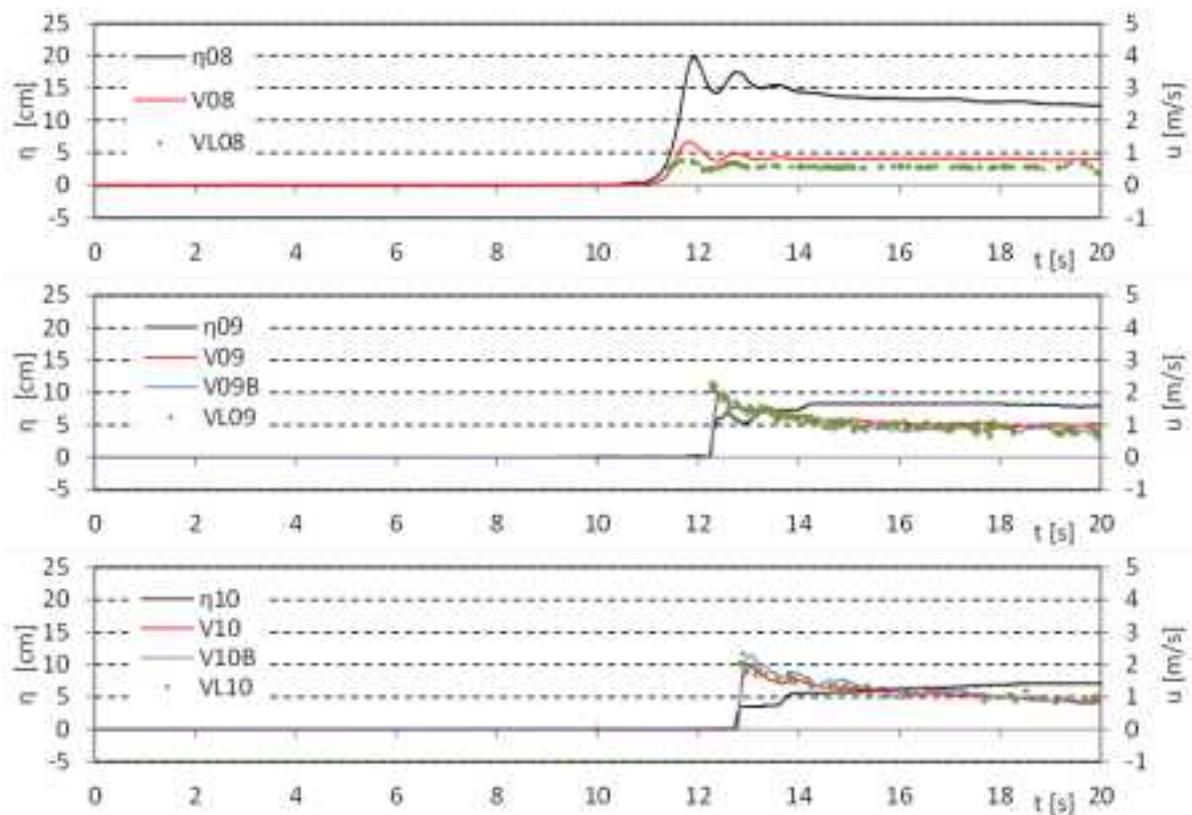


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W10)

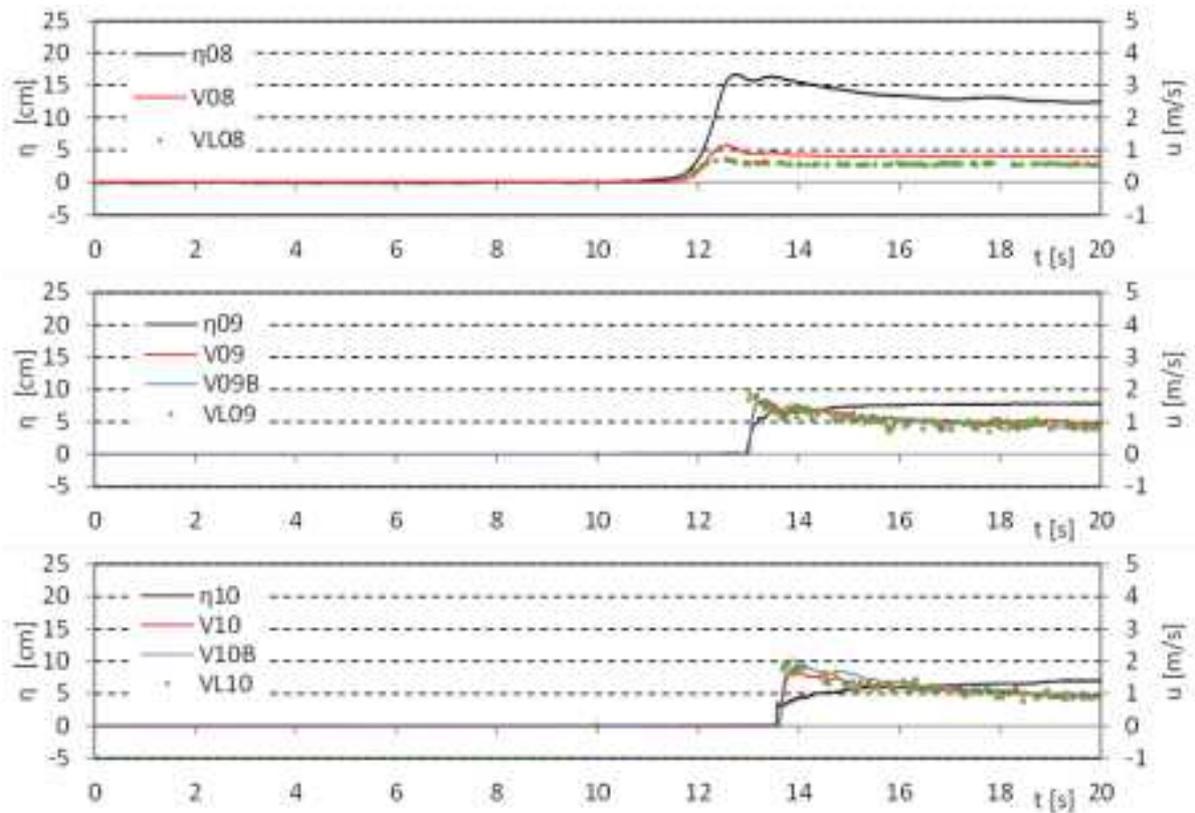


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W11)

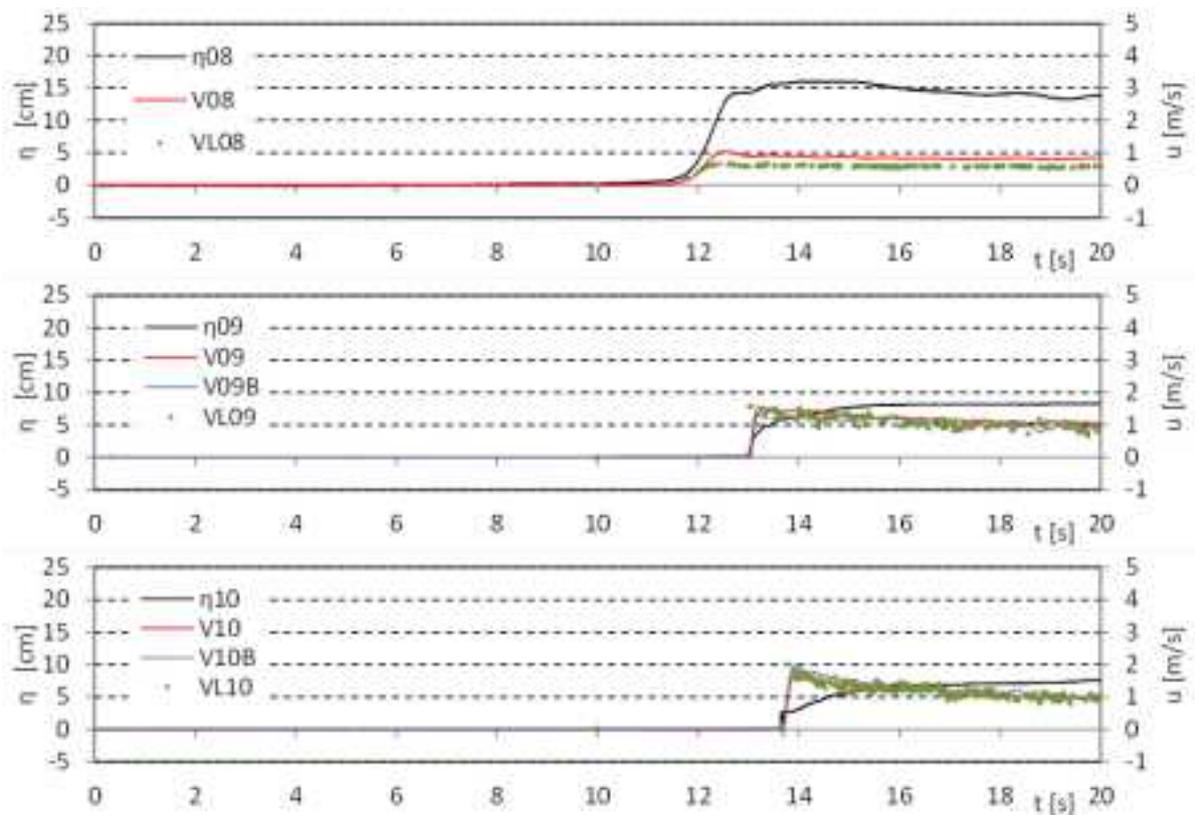


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W12)

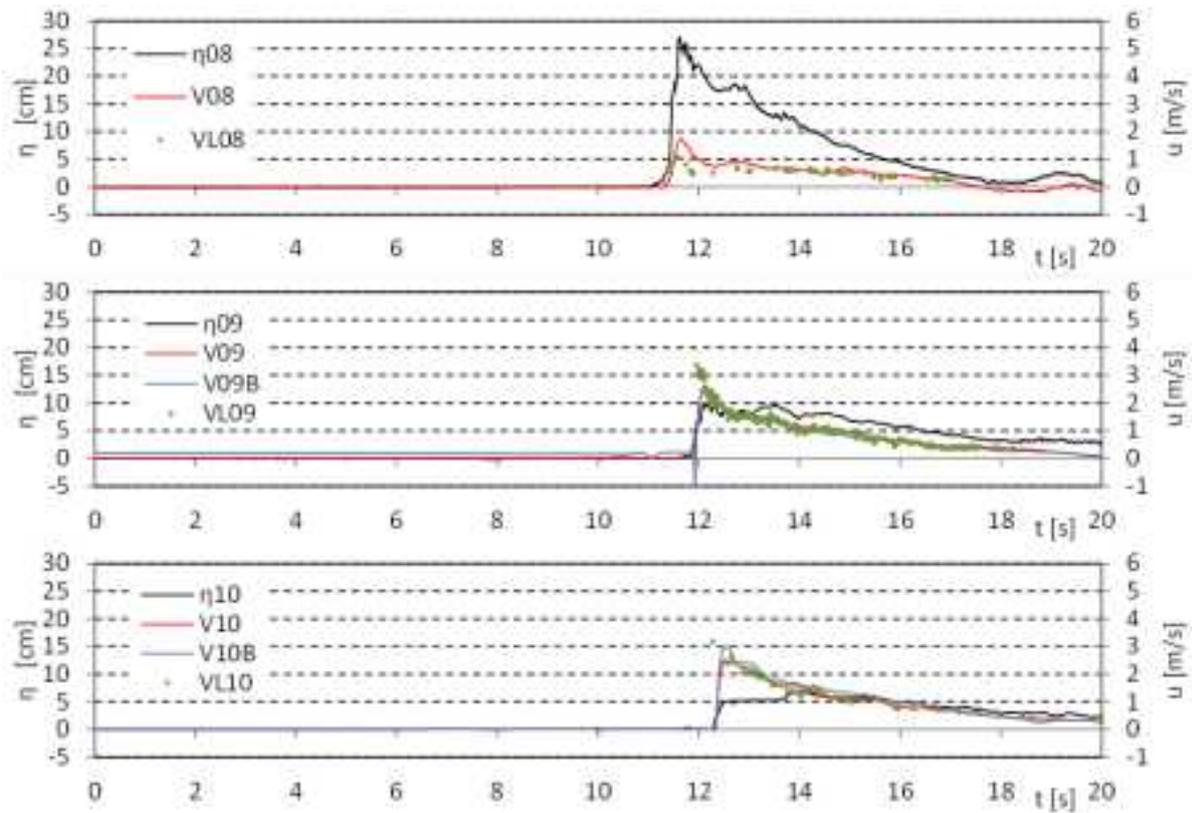


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W13)

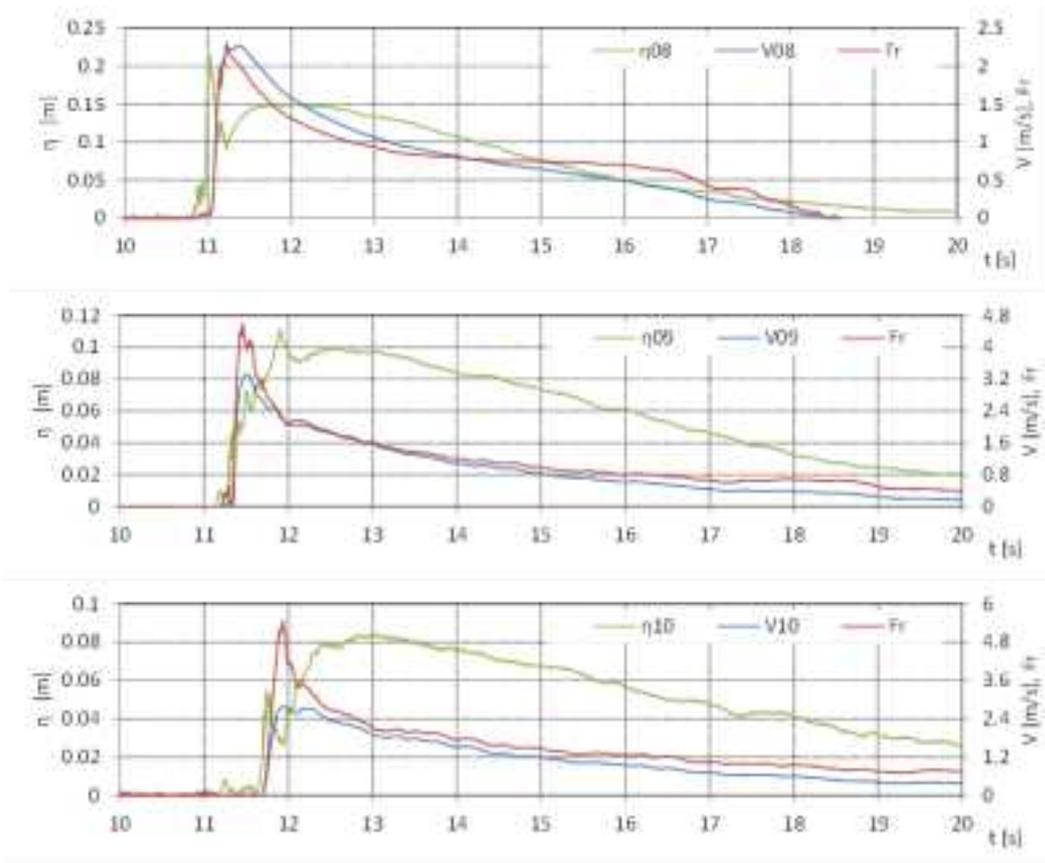


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（単純勾配，W01）

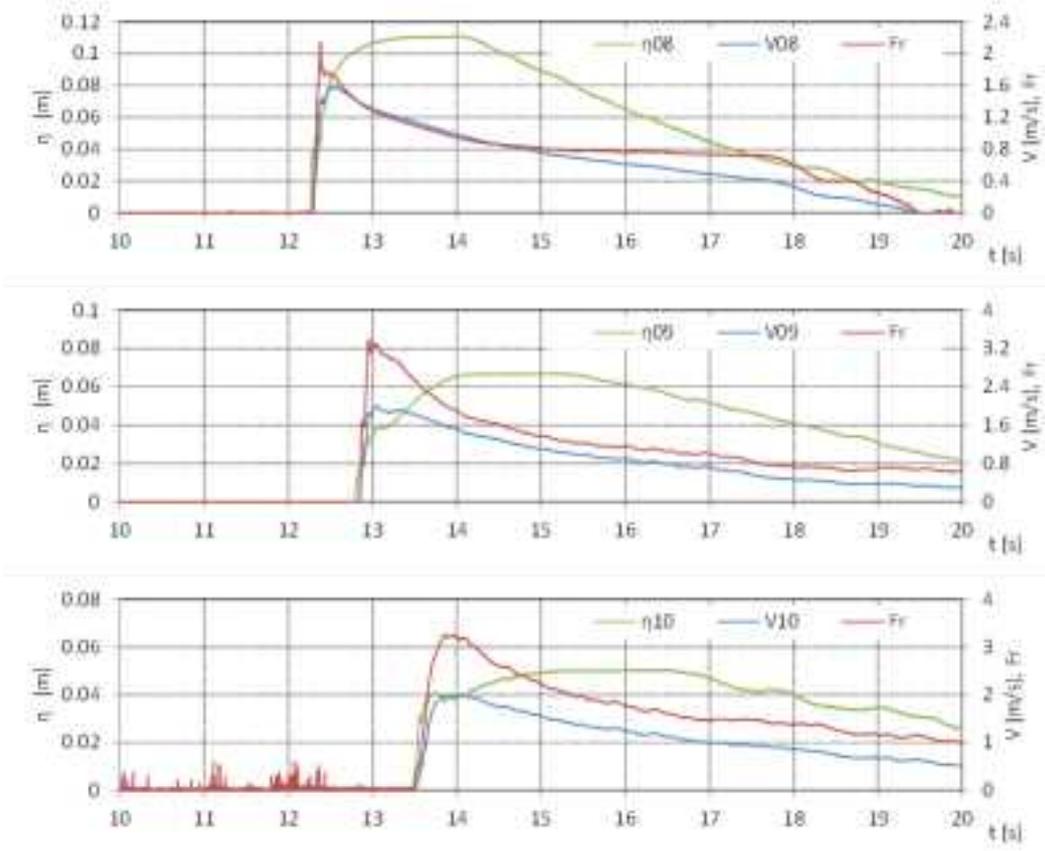


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（単純勾配，W02）

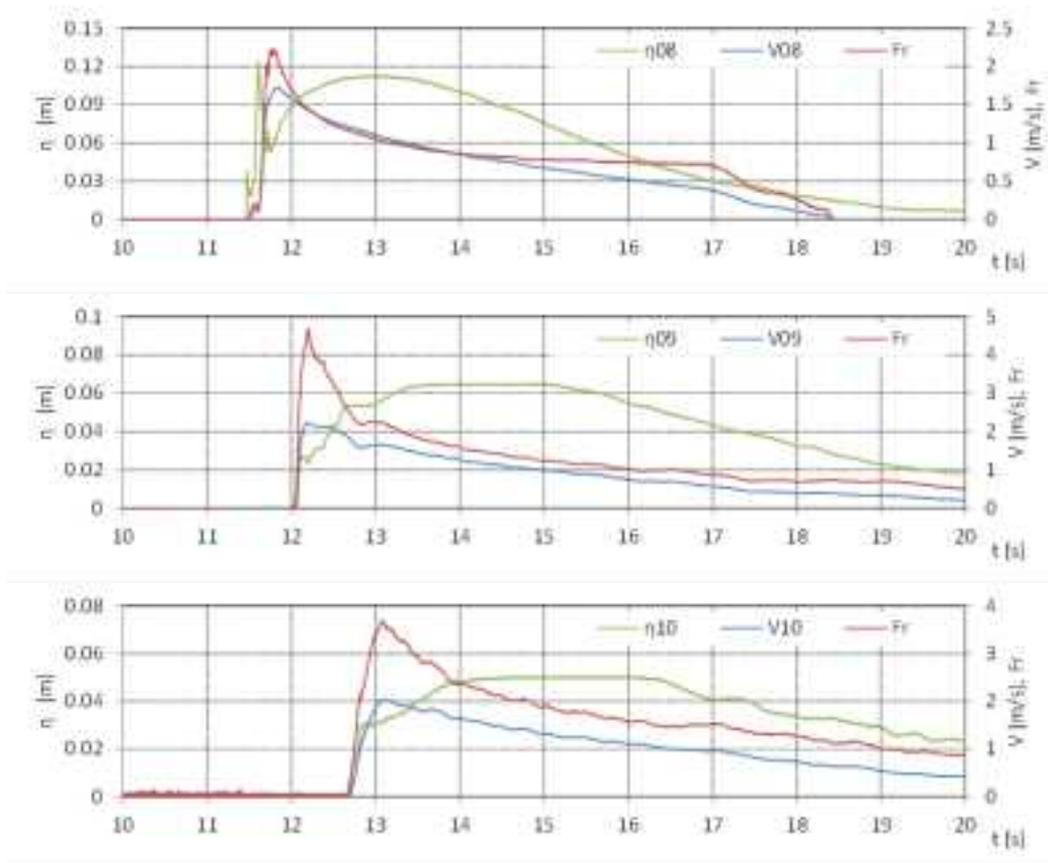


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（単純勾配，W03）

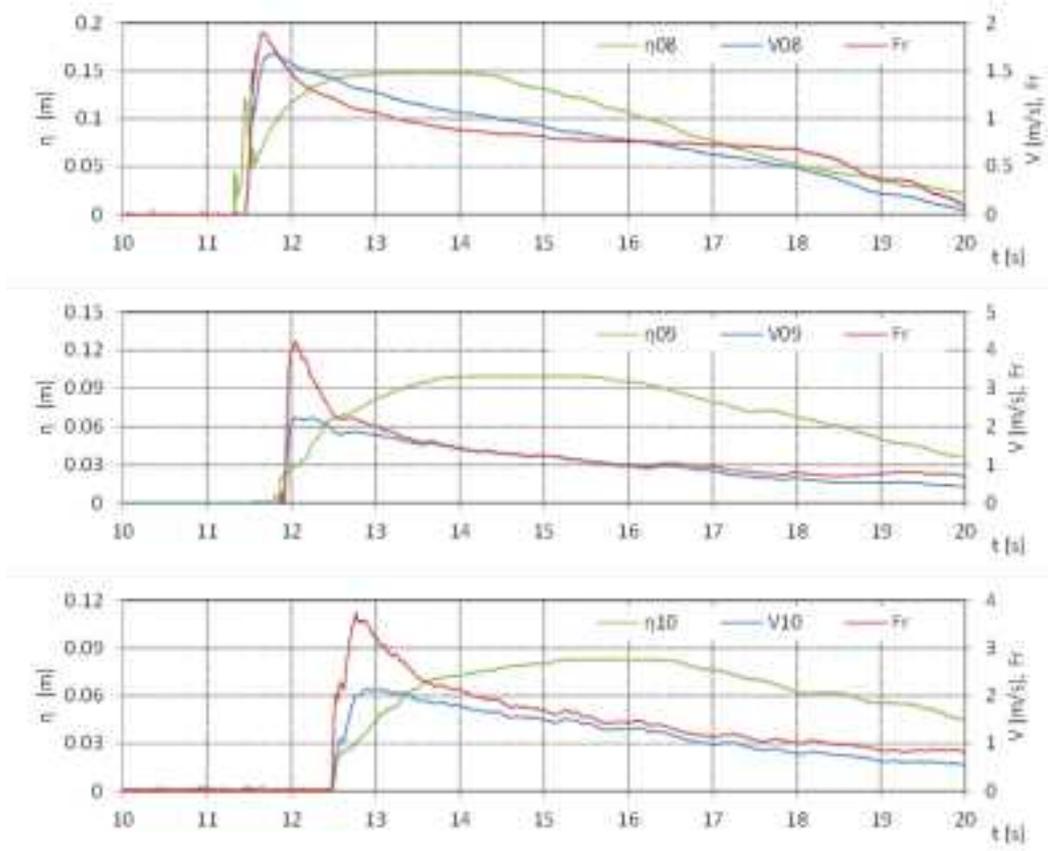


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（単純勾配，W04）

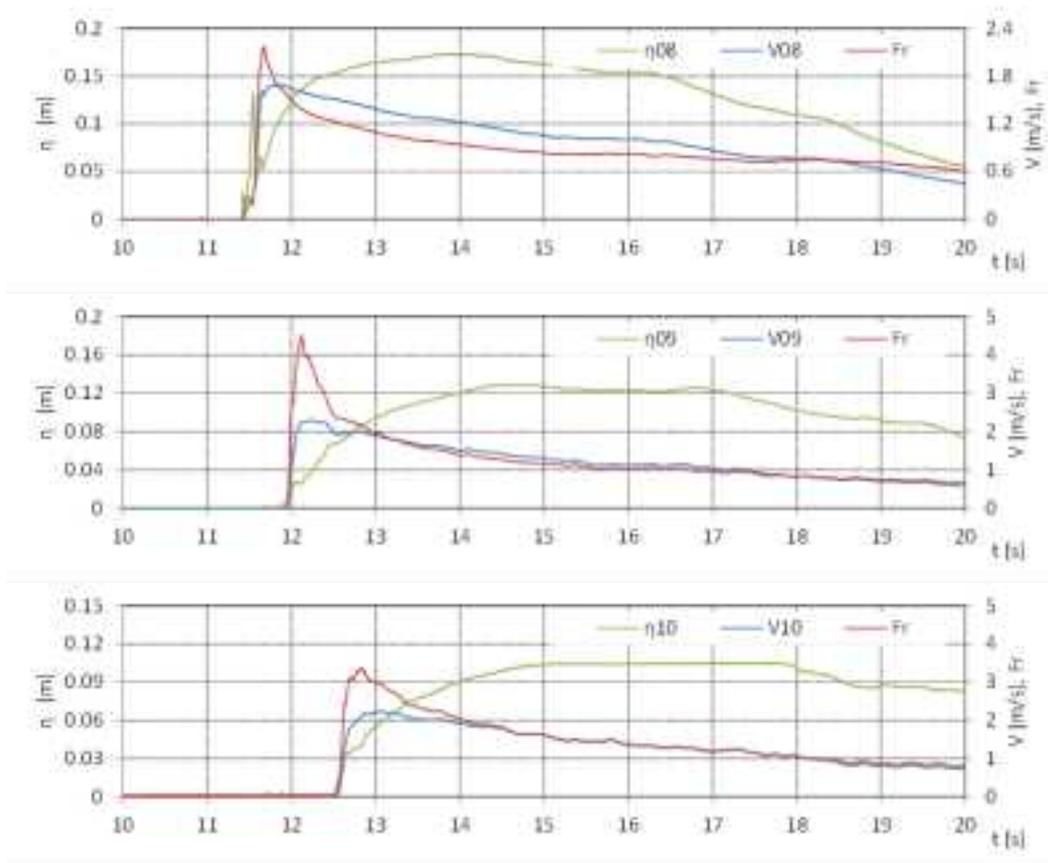


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（単純勾配，W05）

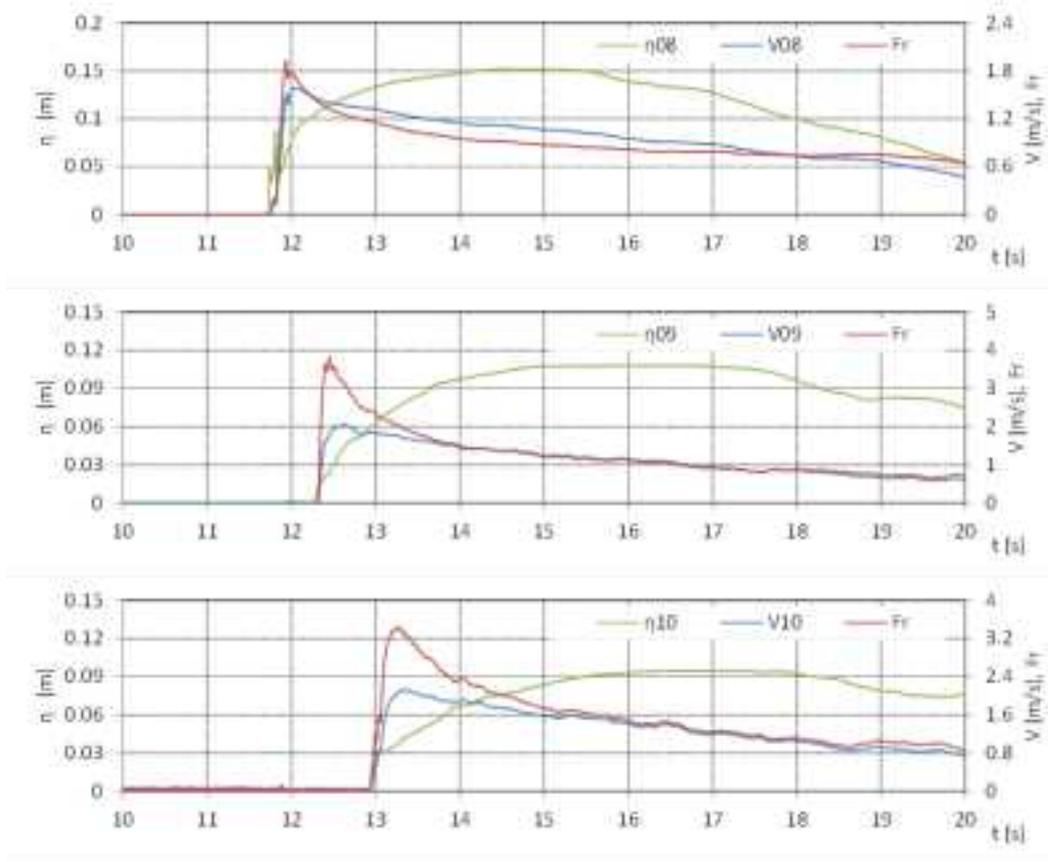


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（単純勾配，W06）

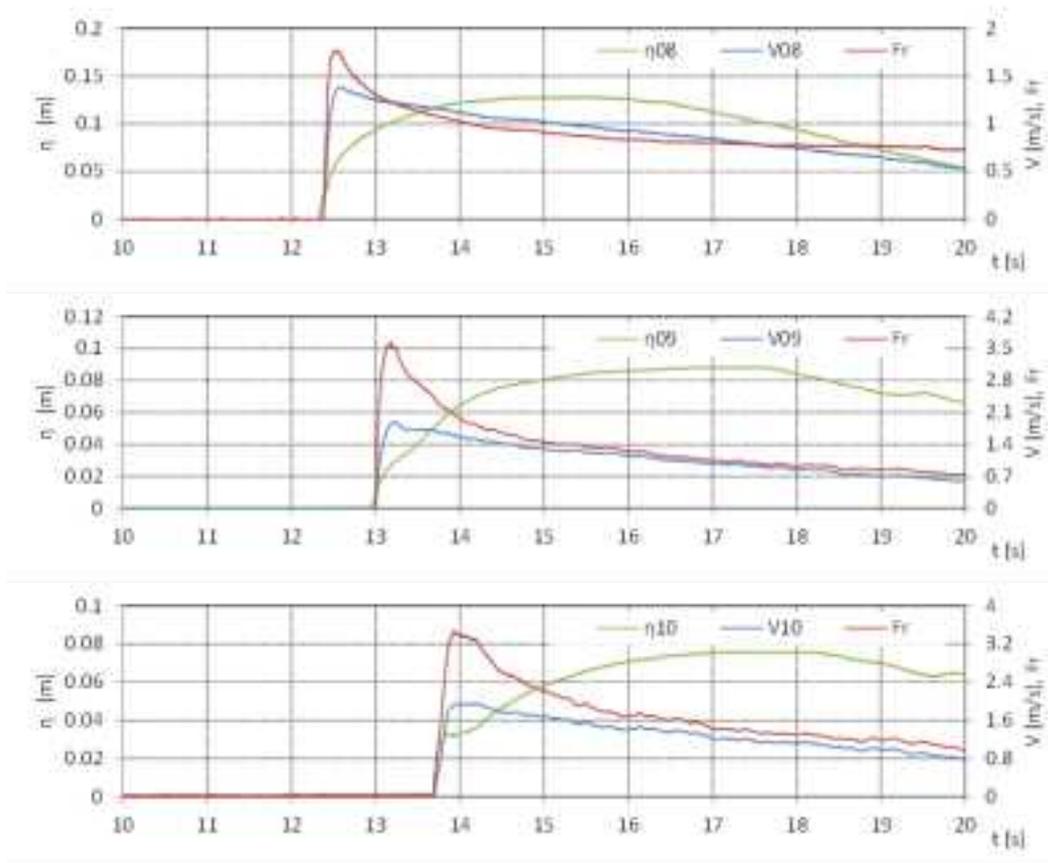


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（単純勾配，W07）

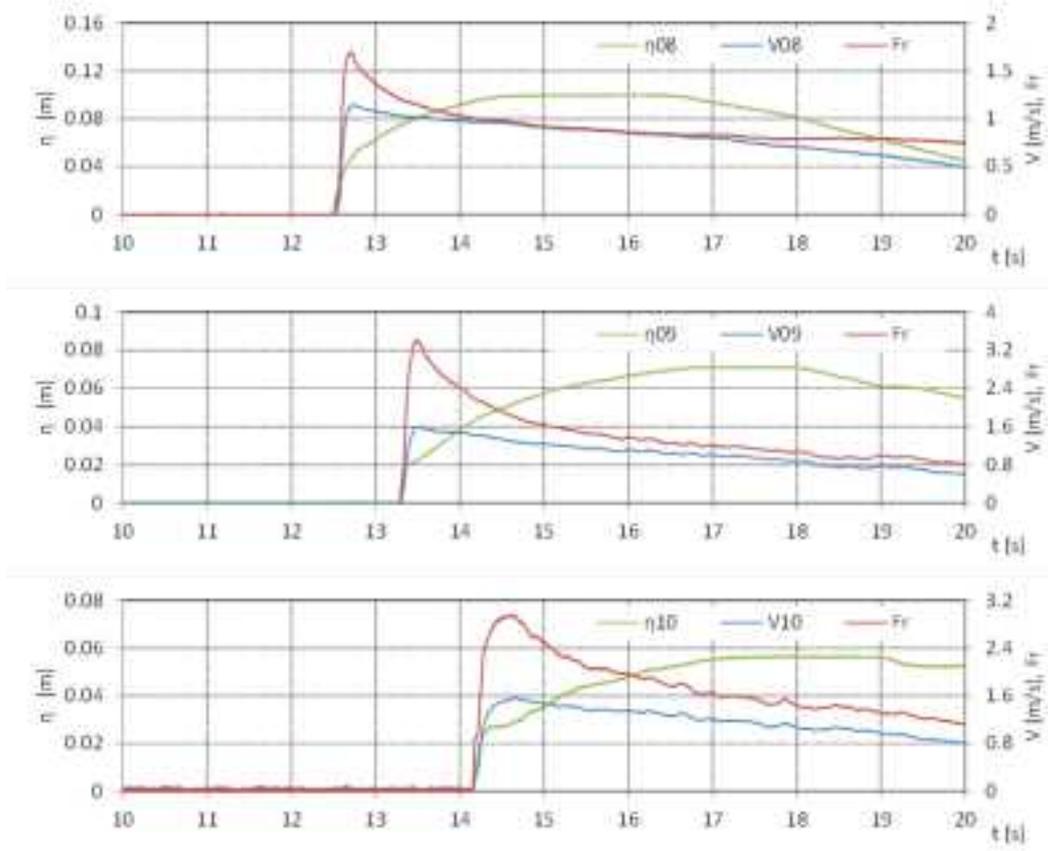


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（単純勾配，W08）

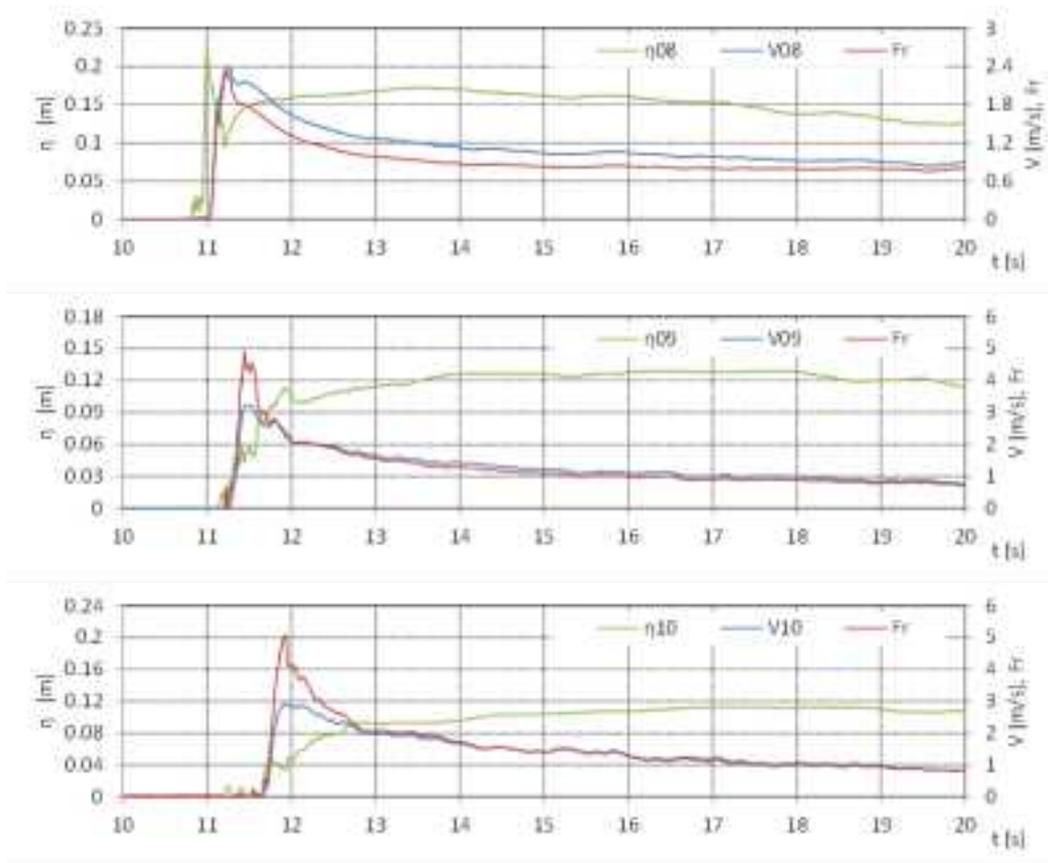


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（単純勾配，W09）

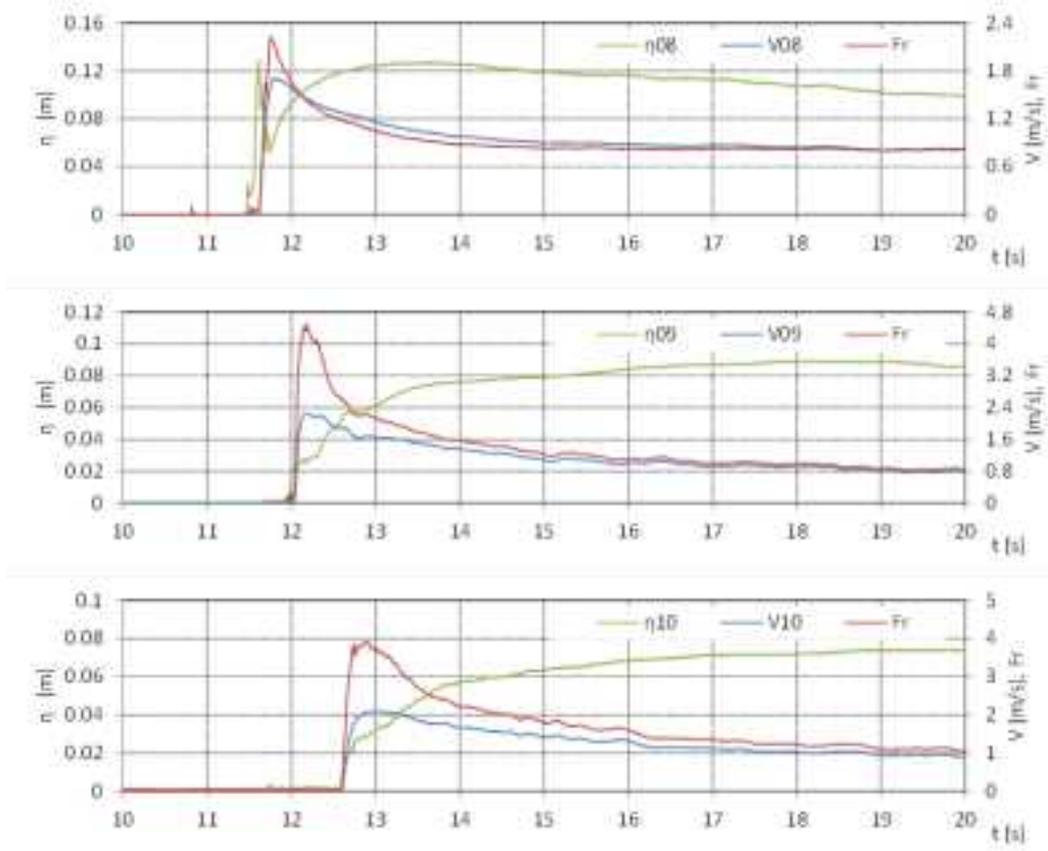


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（単純勾配，W10）

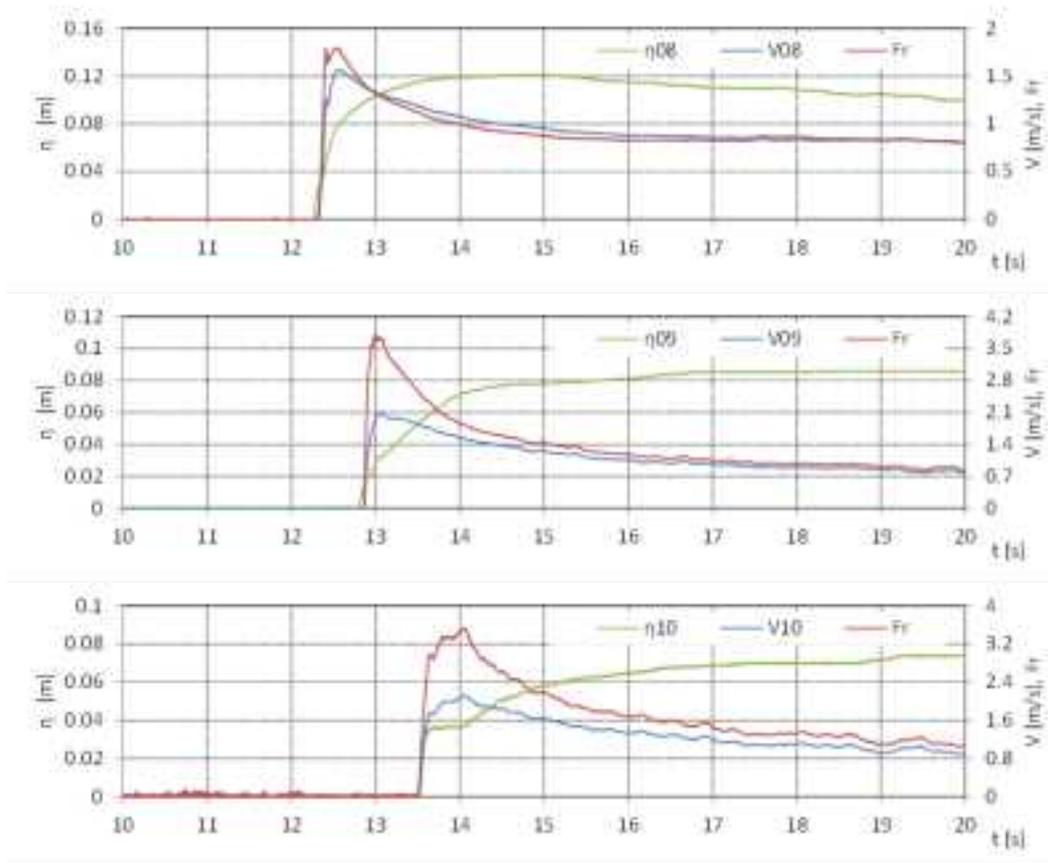


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（単純勾配，W11）

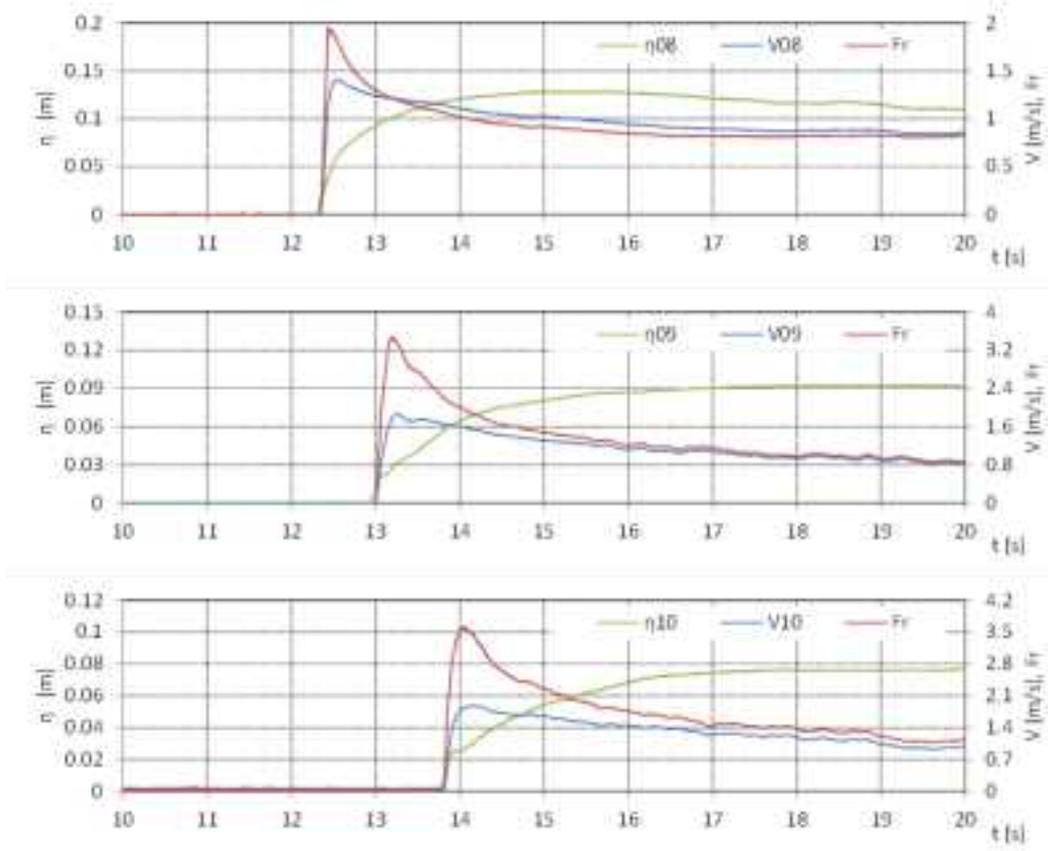


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（単純勾配，W12）

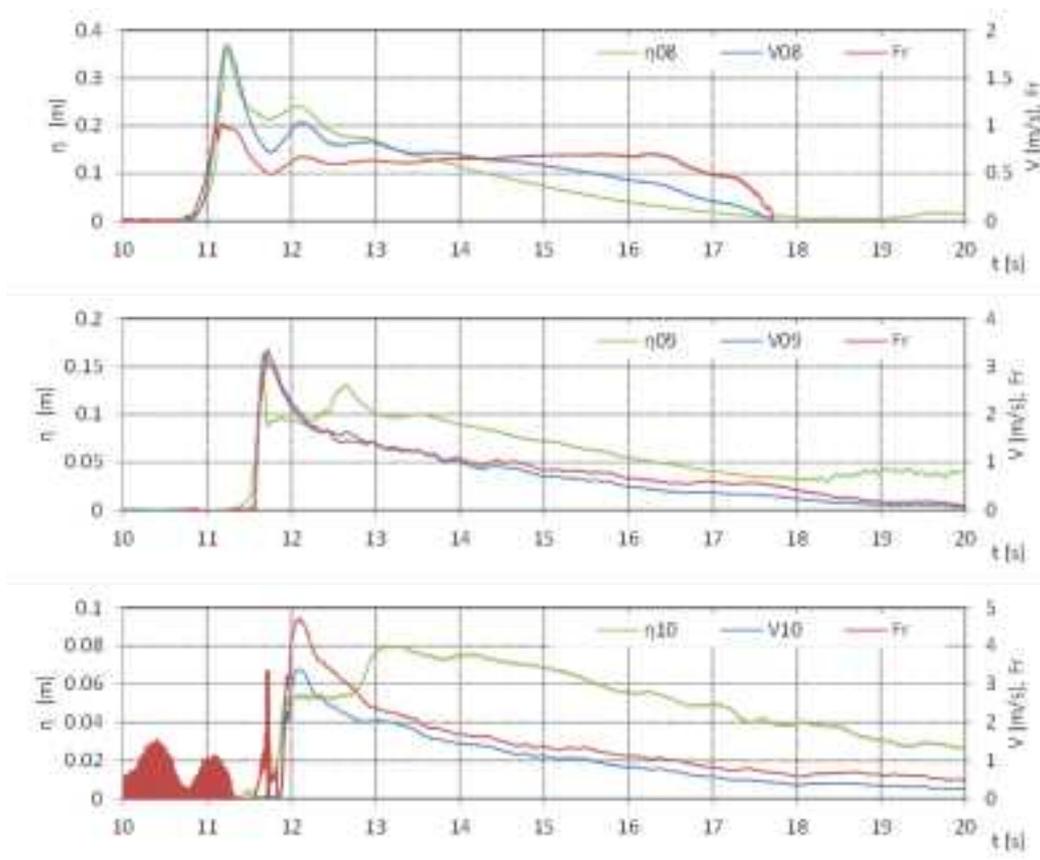


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（直立護岸，W01）

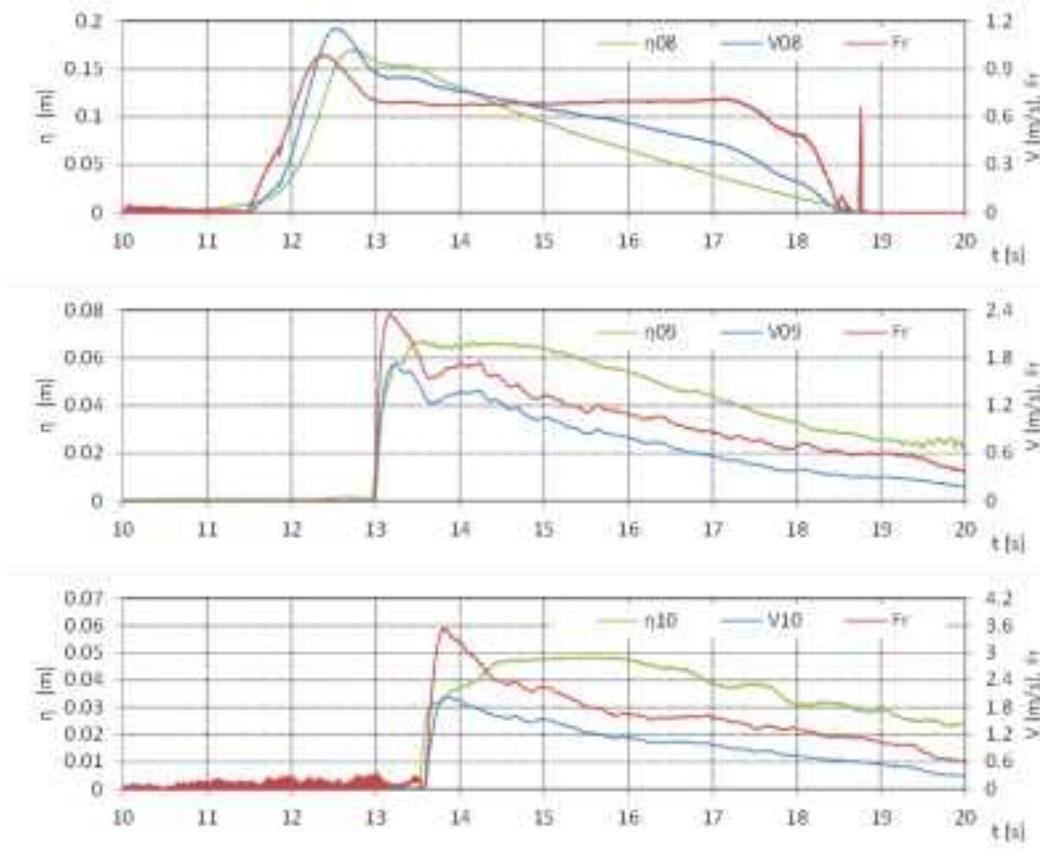


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（直立護岸，W02）

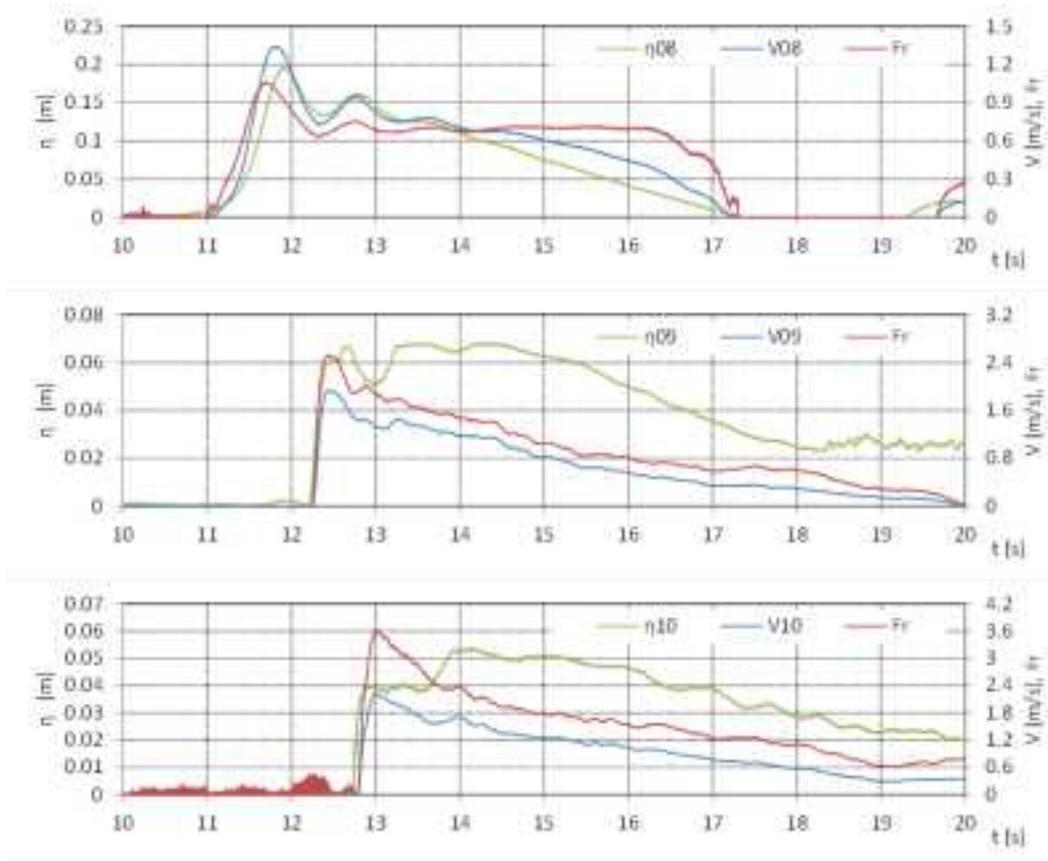


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（直立護岸，W03）

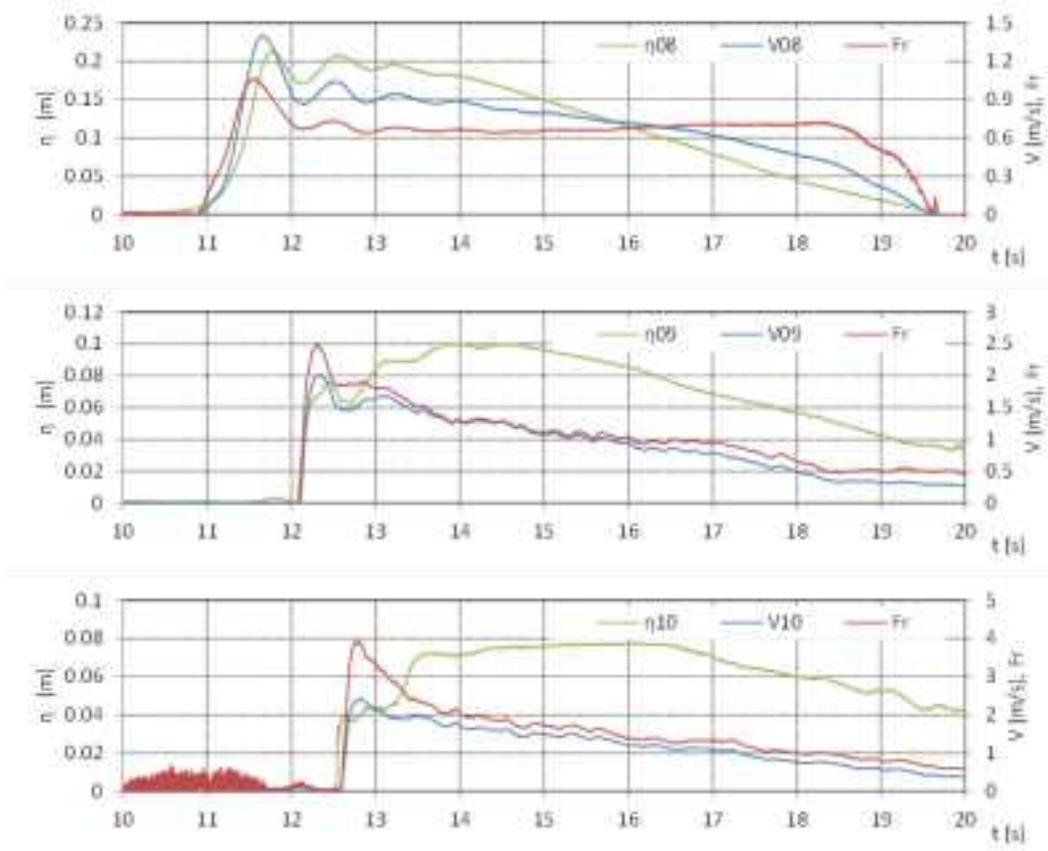


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（直立護岸，W04）

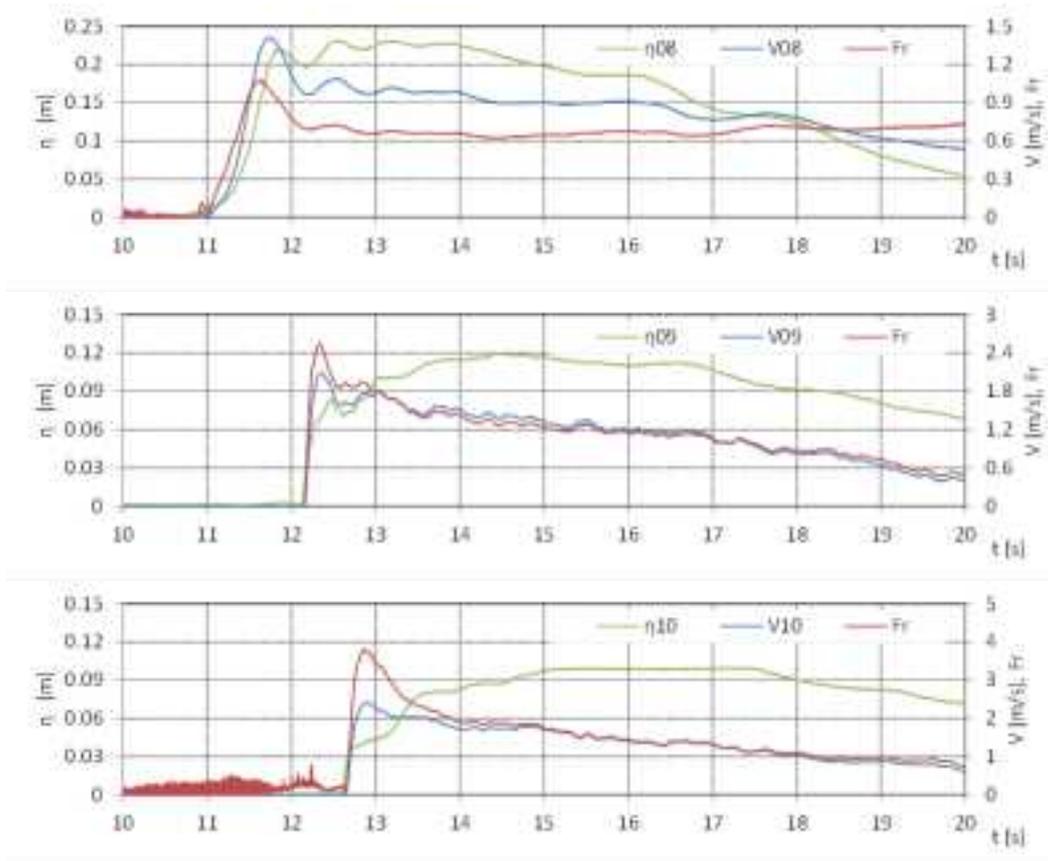


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（直立護岸，W05）

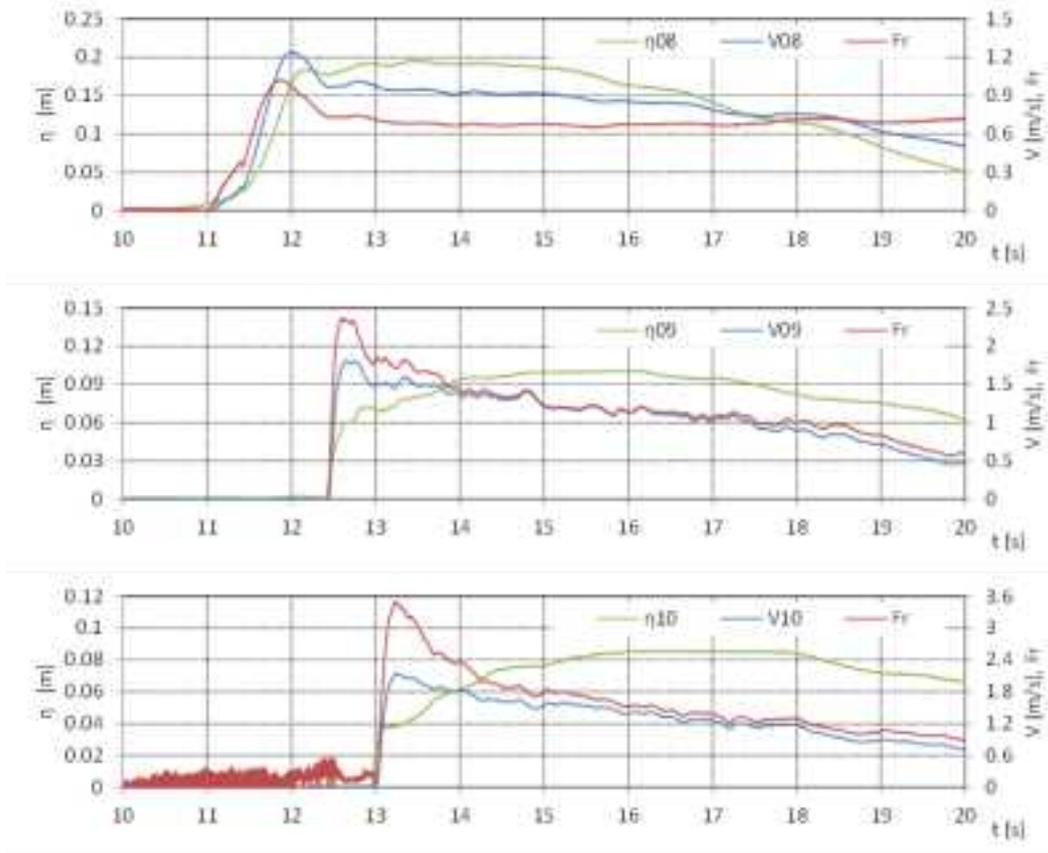


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（直立護岸，W06）

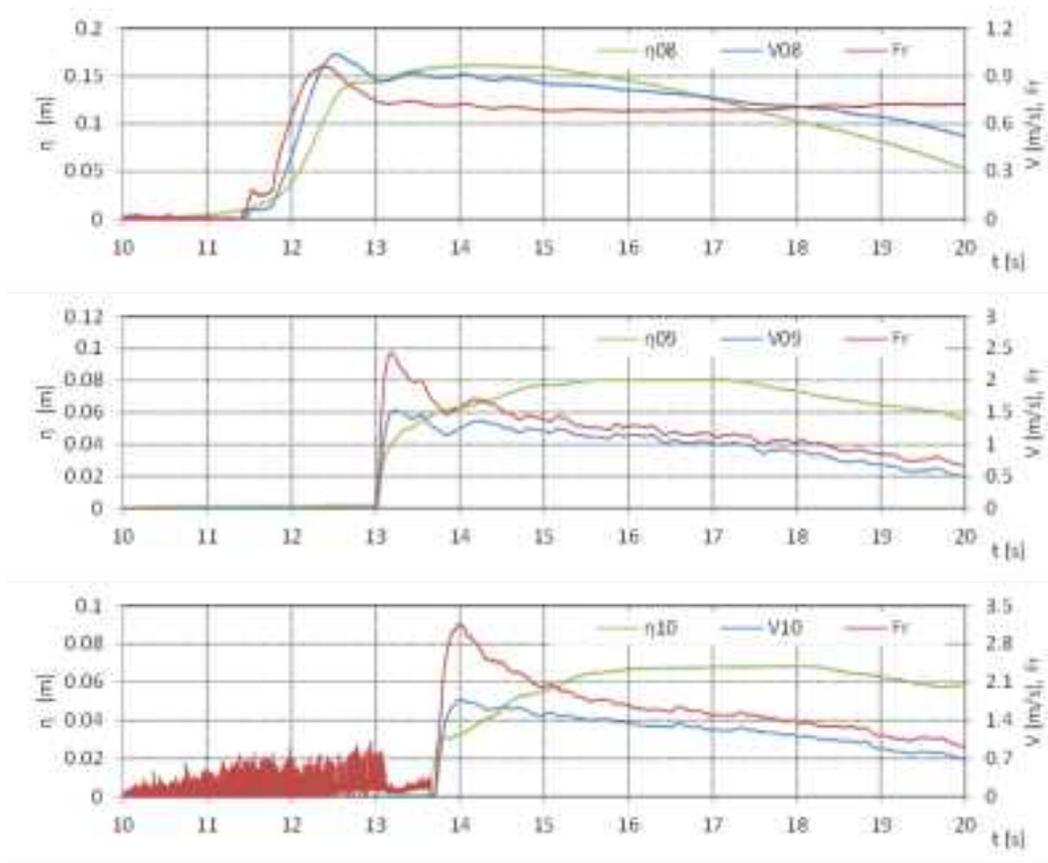


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（直立護岸，W07）

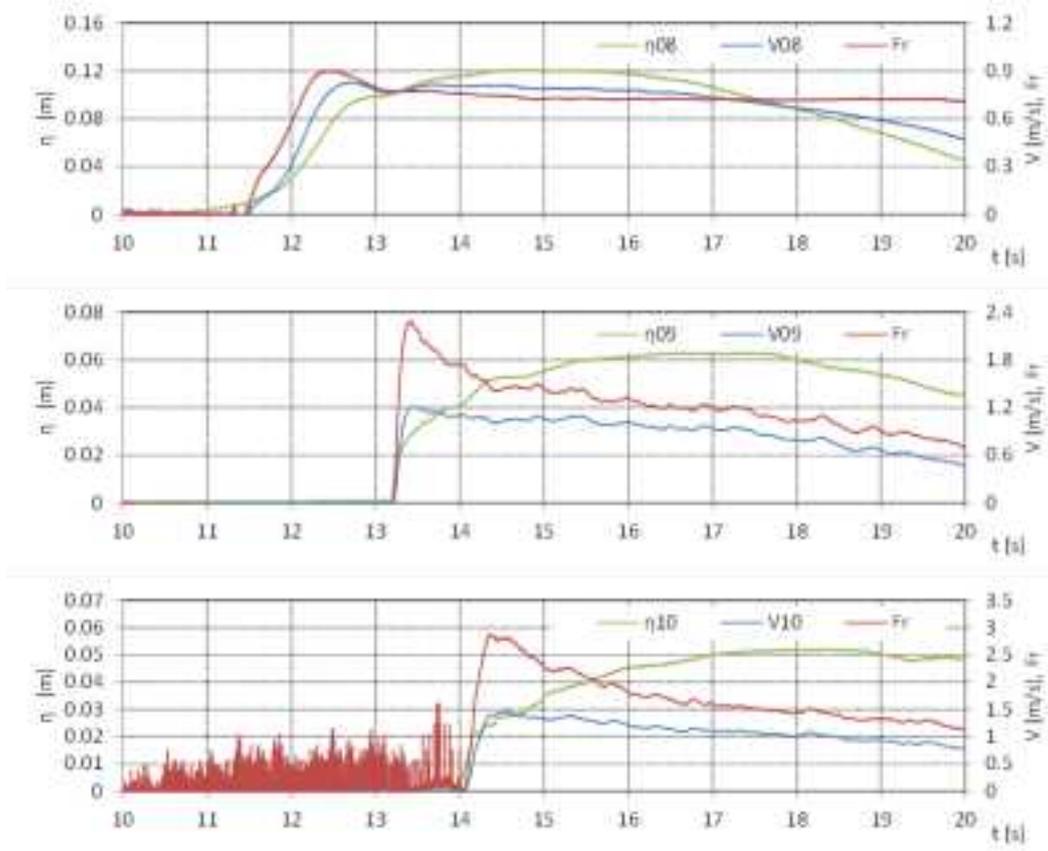


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（直立護岸，W08）

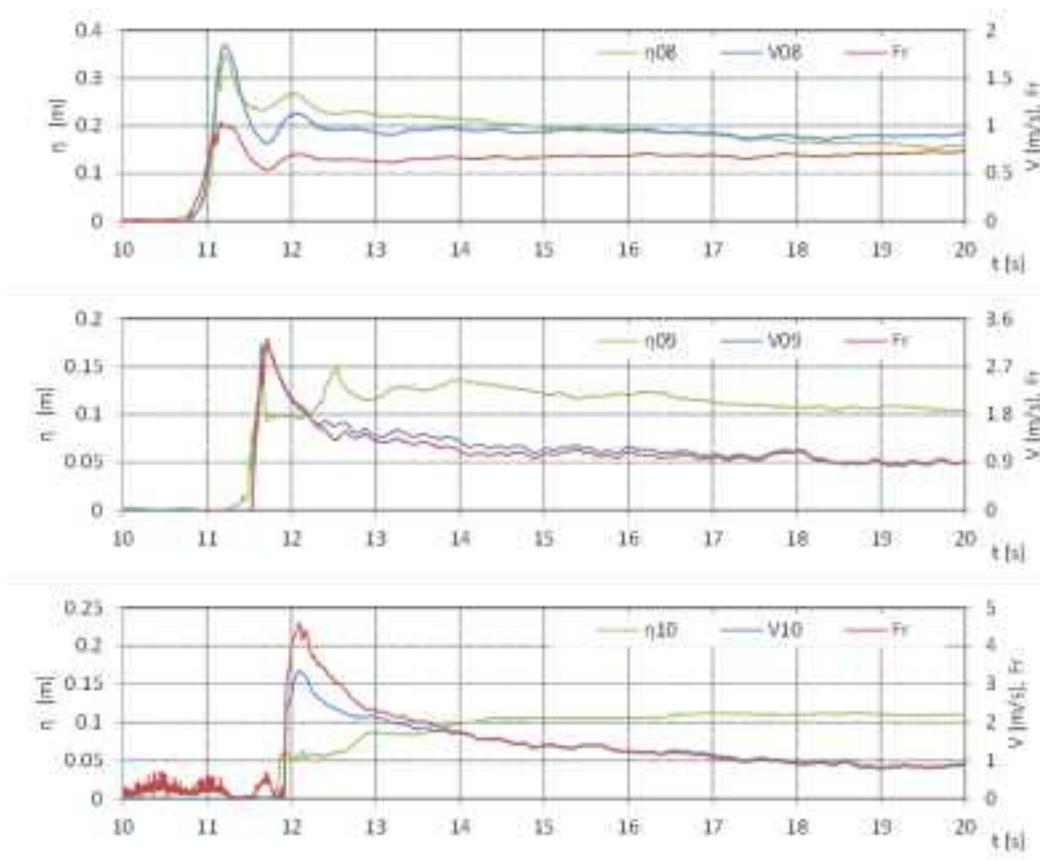


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（直立護岸，W09）

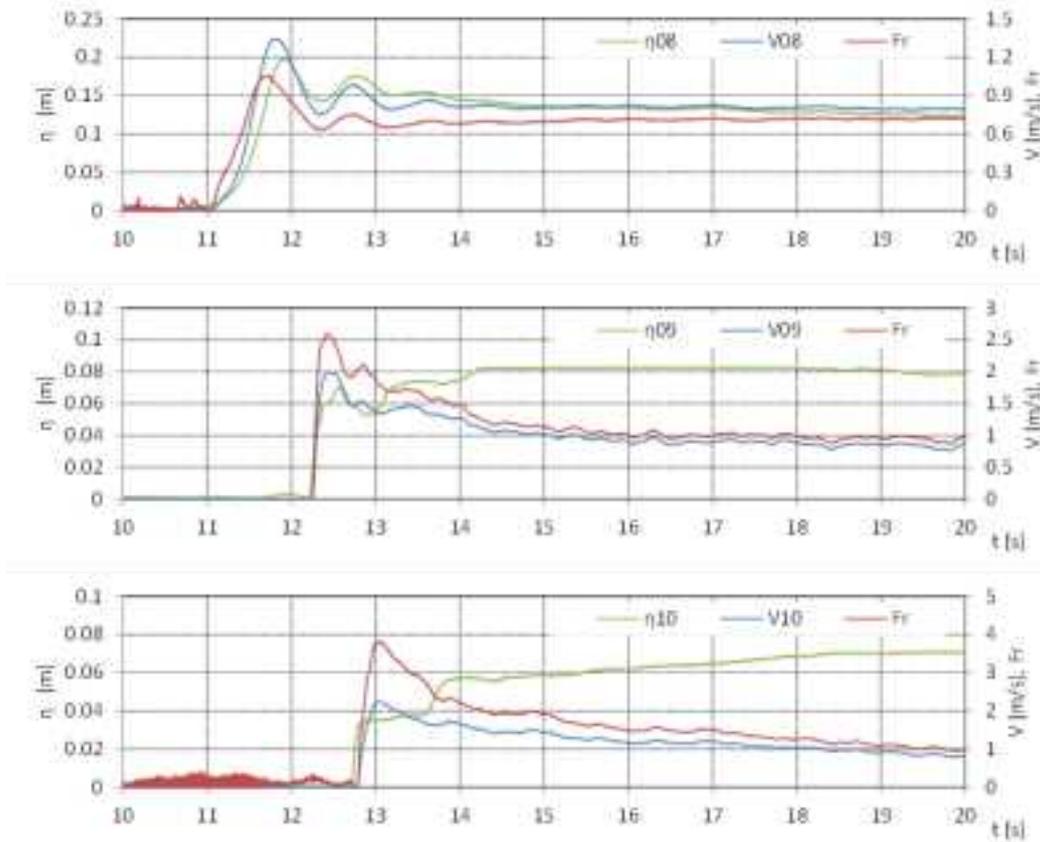


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（直立護岸，W10）

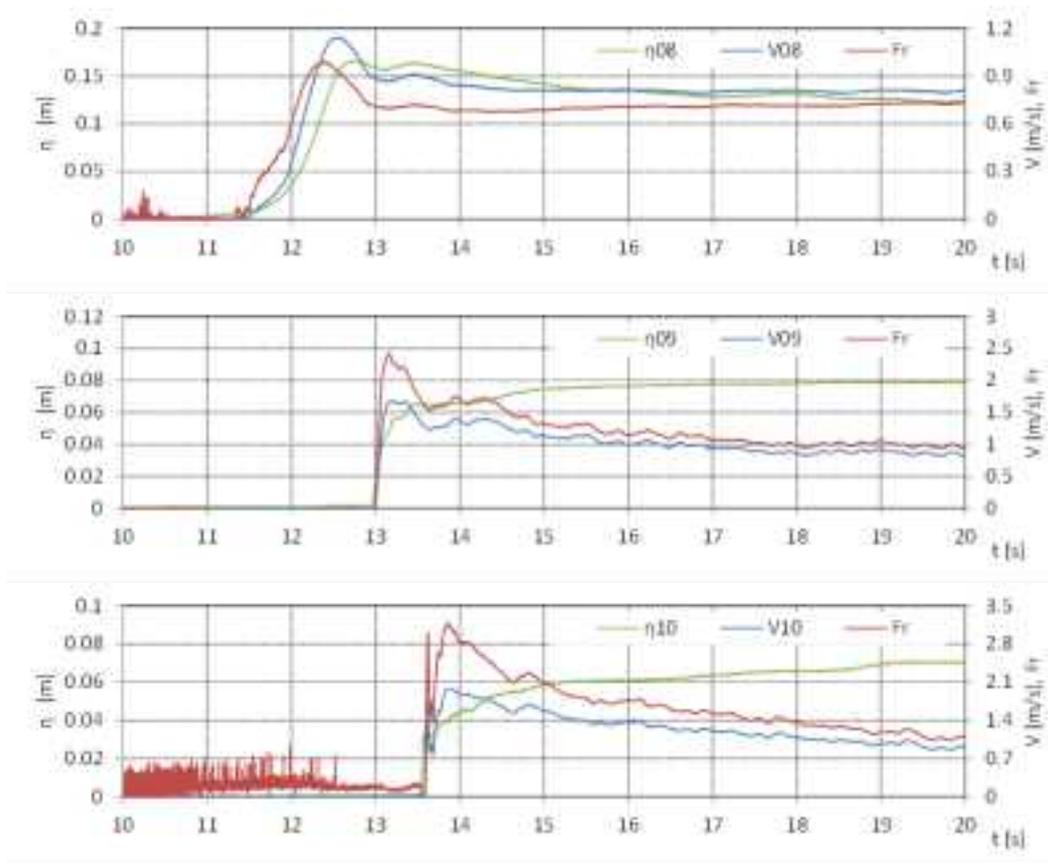


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（直立護岸，W11）

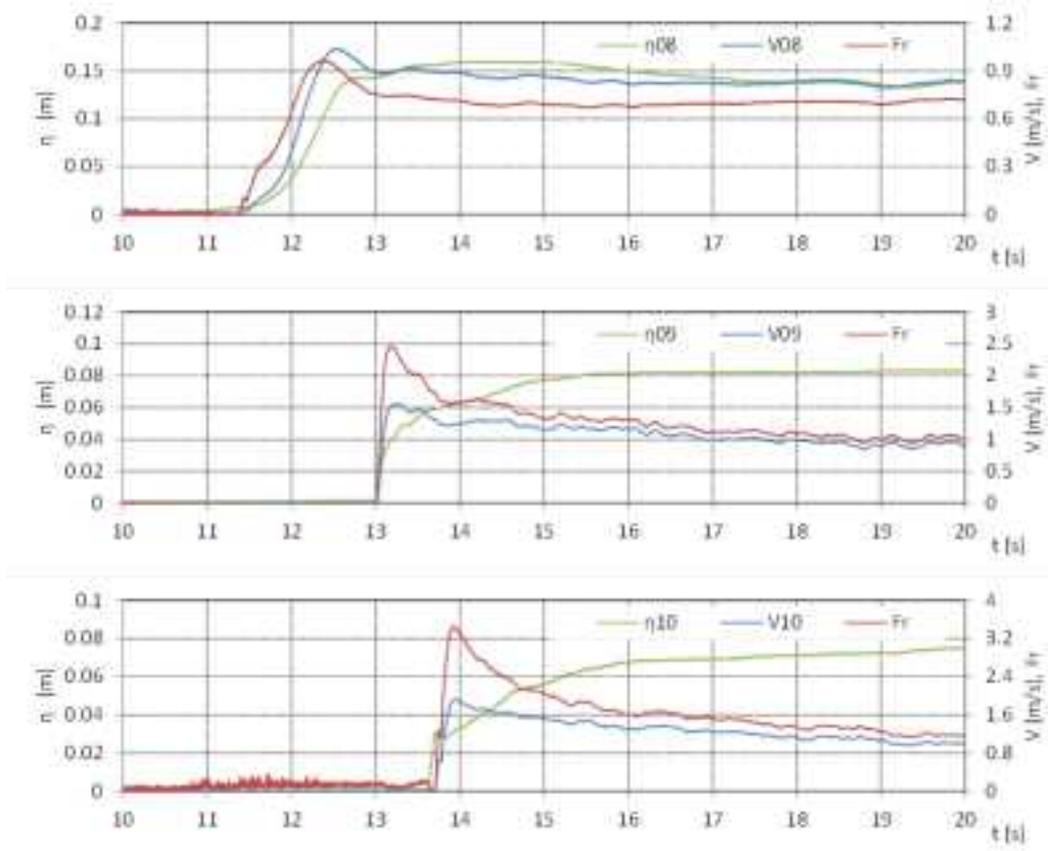


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（直立護岸，W12）

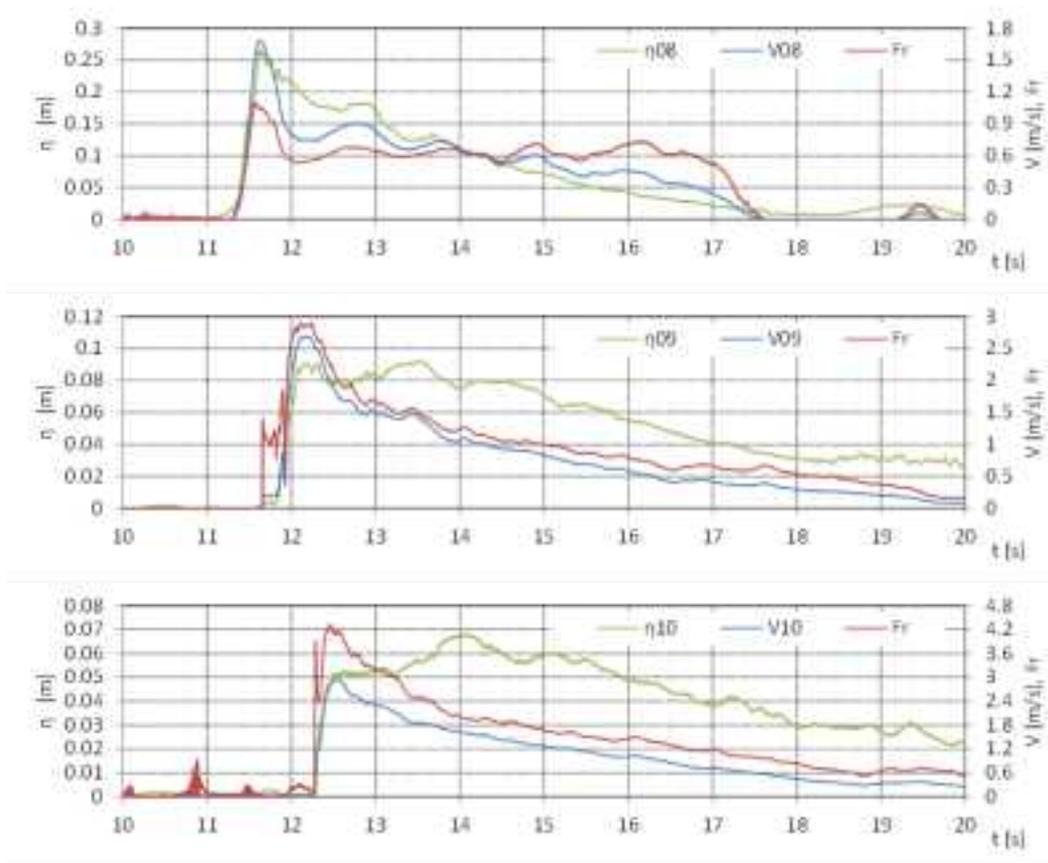


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深，流速，フルード数の時系列（直立護岸，W13）



### 3.2. 波力/波圧試験（基本ケース）

波力/波圧試験の計測結果を，単純勾配タイプ地形について，図 II.3.2-1～図 II.3.2-3 に，直立護岸タイプ地形について，図 II.3.2-4～図 II.3.2-6 にそれぞれ示す．同図には，沖波の代表水位時系列と，堤体模型前面および 0.5m，1.0m 手前（海側）の水位，流速の時系列，堤体に設置した圧力計により計測した圧力の時系列計測結果を示した．圧力計は 2 測線に設置しているため，それぞれを示している（堤体中心 P1～，横 P11～）．なお，計測は各ケース 15 回繰り返しており，ここには 1 回目の結果を示した．

圧力計の計測結果によれば，津波到達時に衝撃的な圧力が発生し，その後，比較的滑らかに変動している．津波到達時の衝撃的な圧力を除くと，各高さの圧力はほぼ等間隔を保って変動しており，静水圧に近い圧力となっていることが分かる．一方，到達時の衝撃的な圧力は，P1 や P2 の底面付近の圧力のみが上昇しており，水位上昇に対し底面付近のみに大きな圧力が生じていることが分かる．図 II.3.2-4 に示した直立護岸の汀線位置に堤体模型を設置したケースでは，W01，W09，W13 を除くケースで衝撃的な圧力が生じていない．この場合，堤体模型は護岸の延長線上となるため，津波進入時の水平流速が小さいために衝撃的な圧力が生じていないと考えられる．W01，W09，W13 では，汀線（護岸）に碎波した状態で津波が浸入するため，これにより衝撃的な圧力が生じている．

上記の結果から，堤体に働く津波波力を算出した結果を，図 II.3.2-7～図 II.3.2-9，図 II.3.2-10～図 II.3.2-12 に単純勾配と直立護岸についてそれぞれ示す．津波波力は，堤体模型に設置した圧力計の積分により求めた．ここで， $F_1$  は堤体の中心線上に働く単位幅波力， $F'_1$  は，横に設置した測線に働く単位幅波力を示す． $F_1$  と  $F'_1$  はほぼ一致しており，横断方向に一様な波力が働いていることが分かる．

波力の時系列結果は，圧力の結果と同様に，津波到達時に衝撃的な力が発生した後，比較的滑らかに力が変動している．ただしこの衝撃的な力は，後続の準定常的な力の変動に比較して，圧力の結果ほど卓越した力とはなっていない．前述したように，津波到達時の衝撃的な圧力は底面付近に集中しているため，面的に積分した力の場合，圧力の変動ほど卓越した力とはなっていないことが分かる．堤体の構造的な安定性を考えた場合，この衝撃的な力は作用点が底面近傍となるため，後続の準定常的な力の方が大きなモーメント荷重になると考えられる．

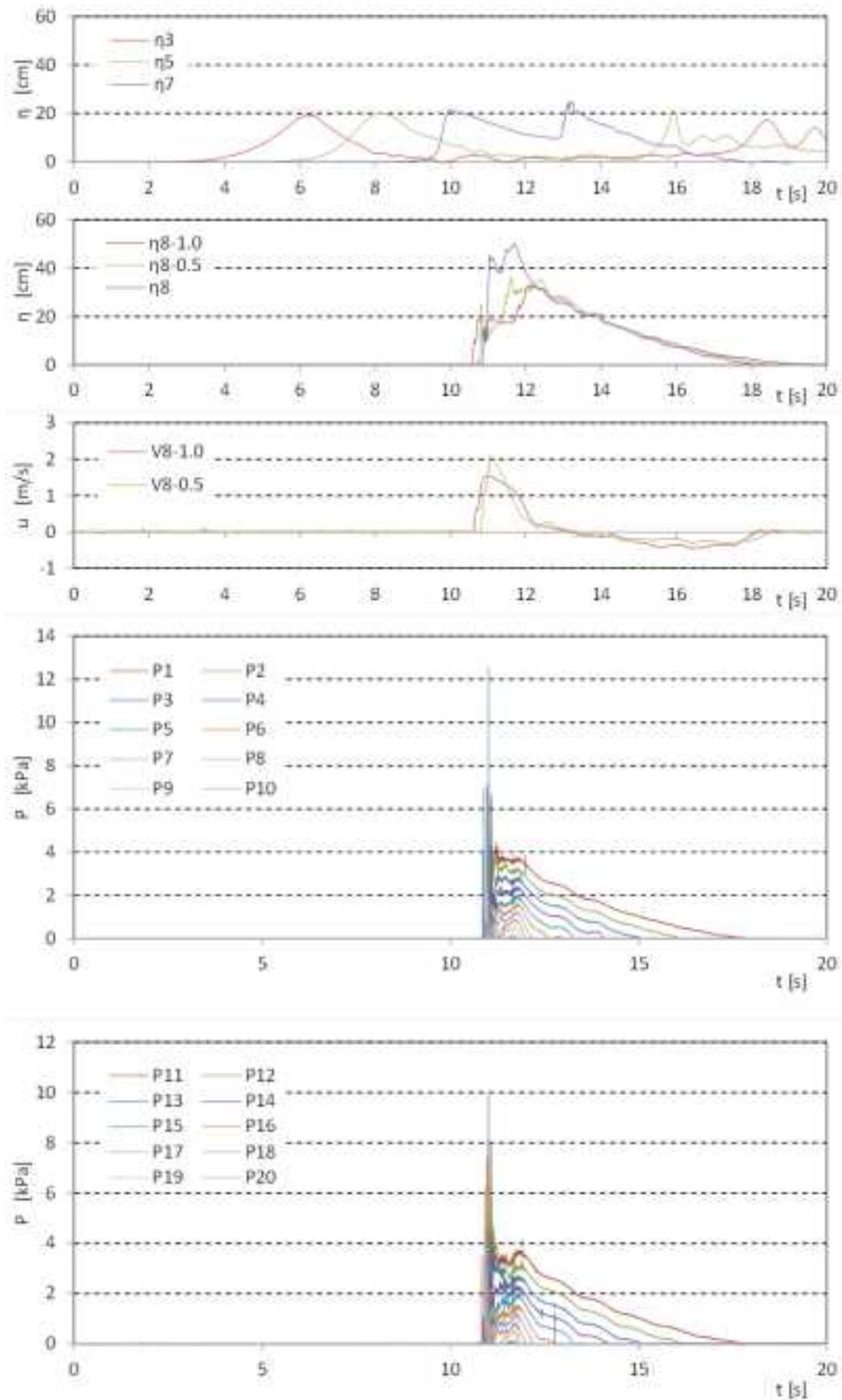


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 0m, W01)

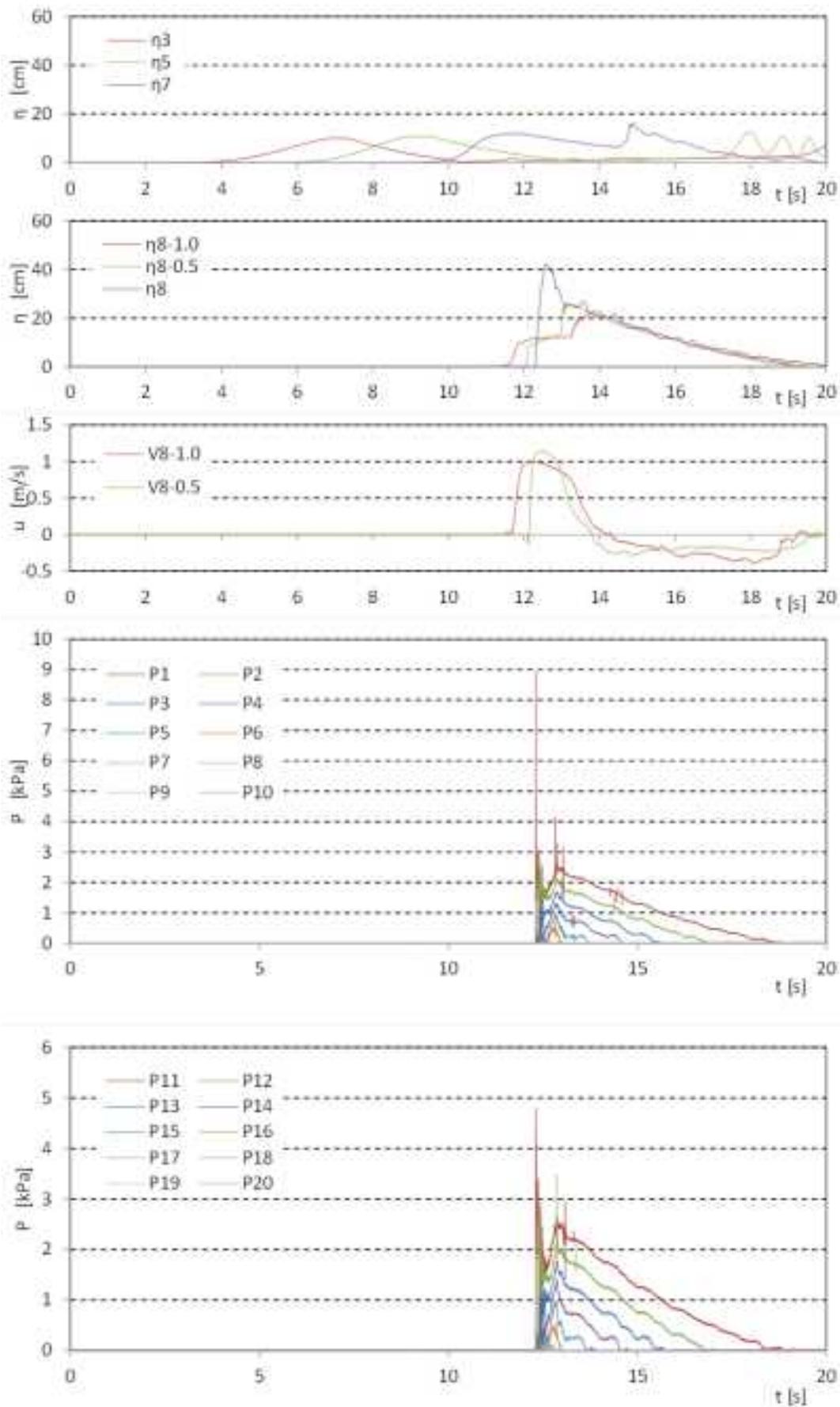


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 0m, W02)

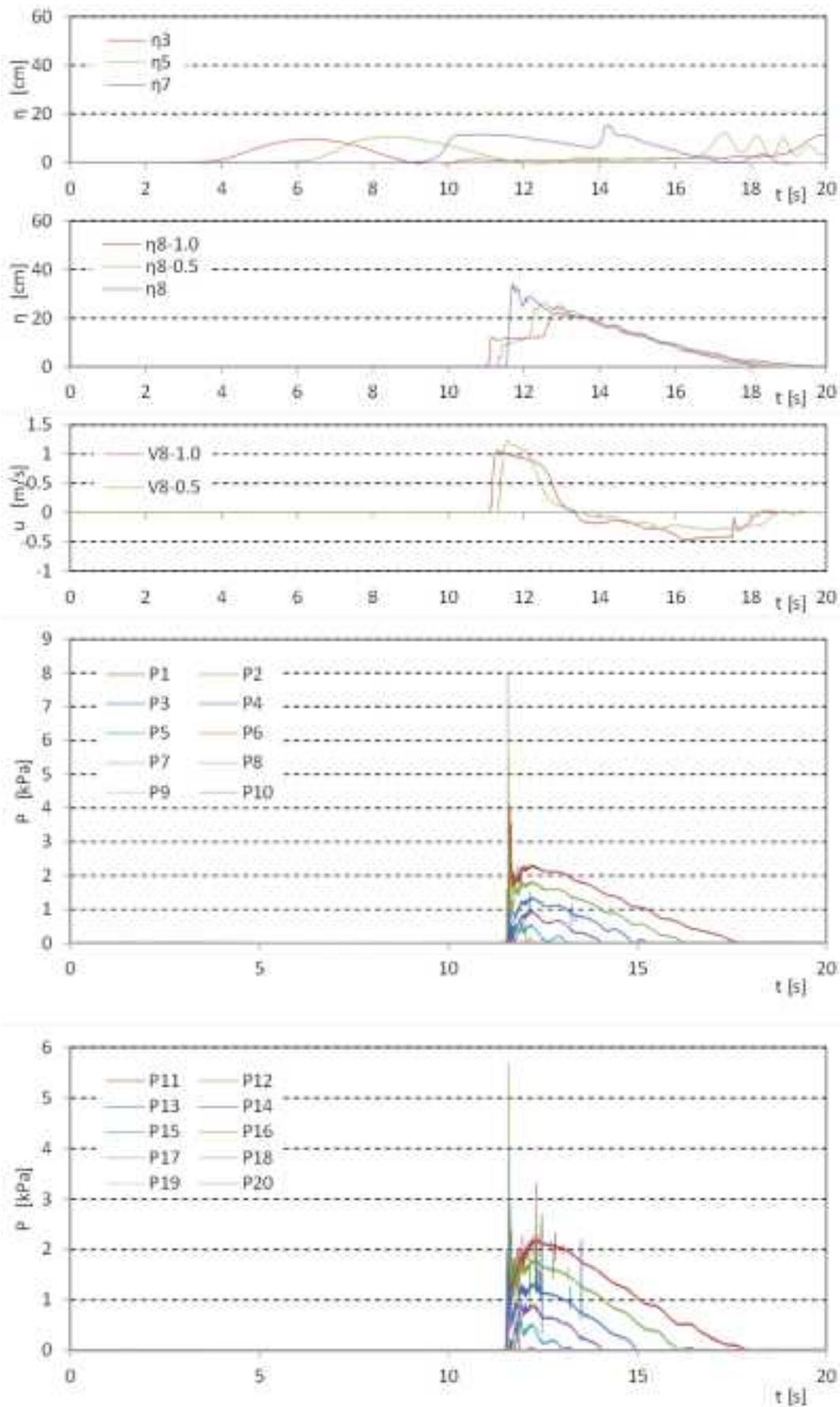


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 0m, W03)

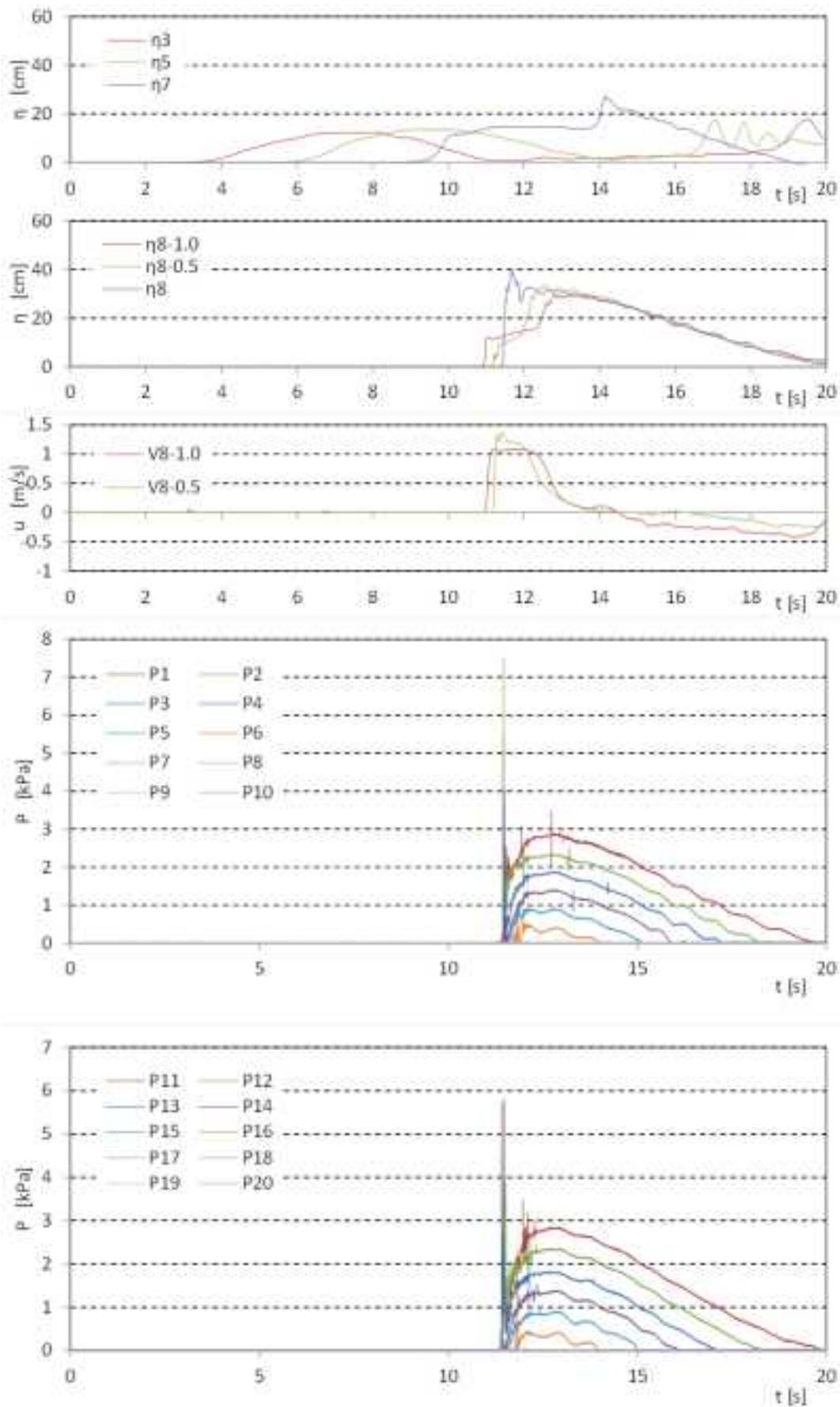


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 0m, W04)

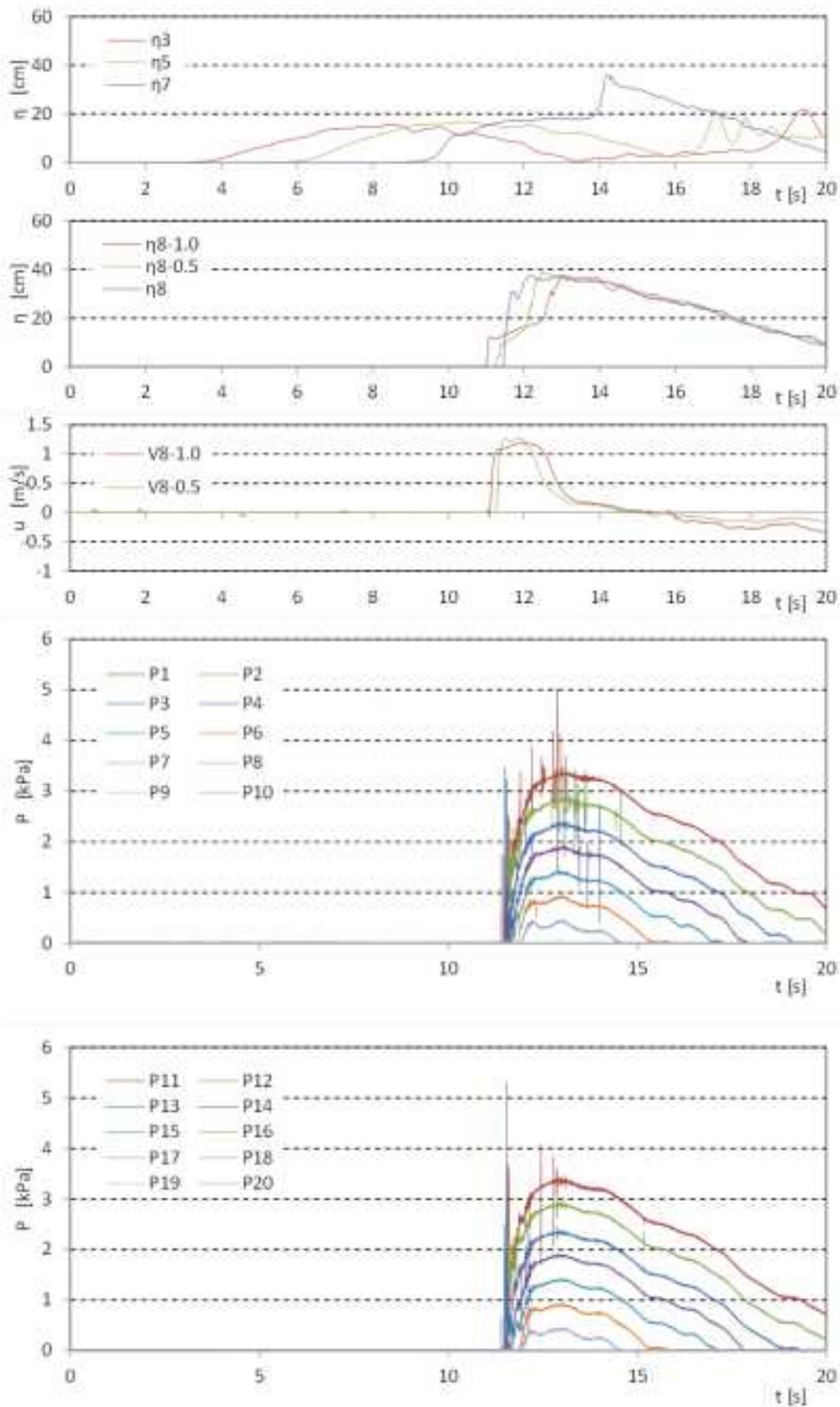


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 0m, W05)

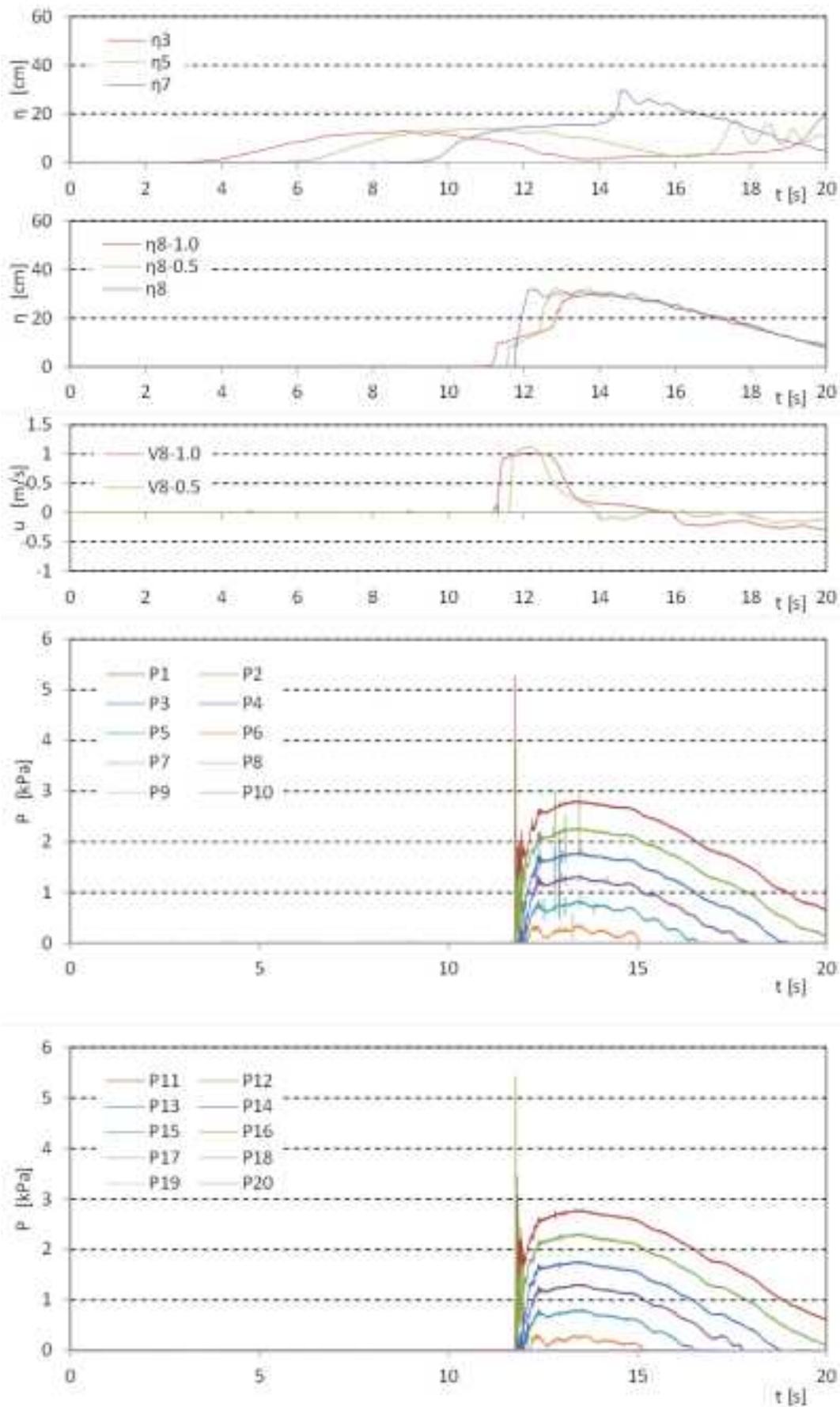


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 0m, W06)

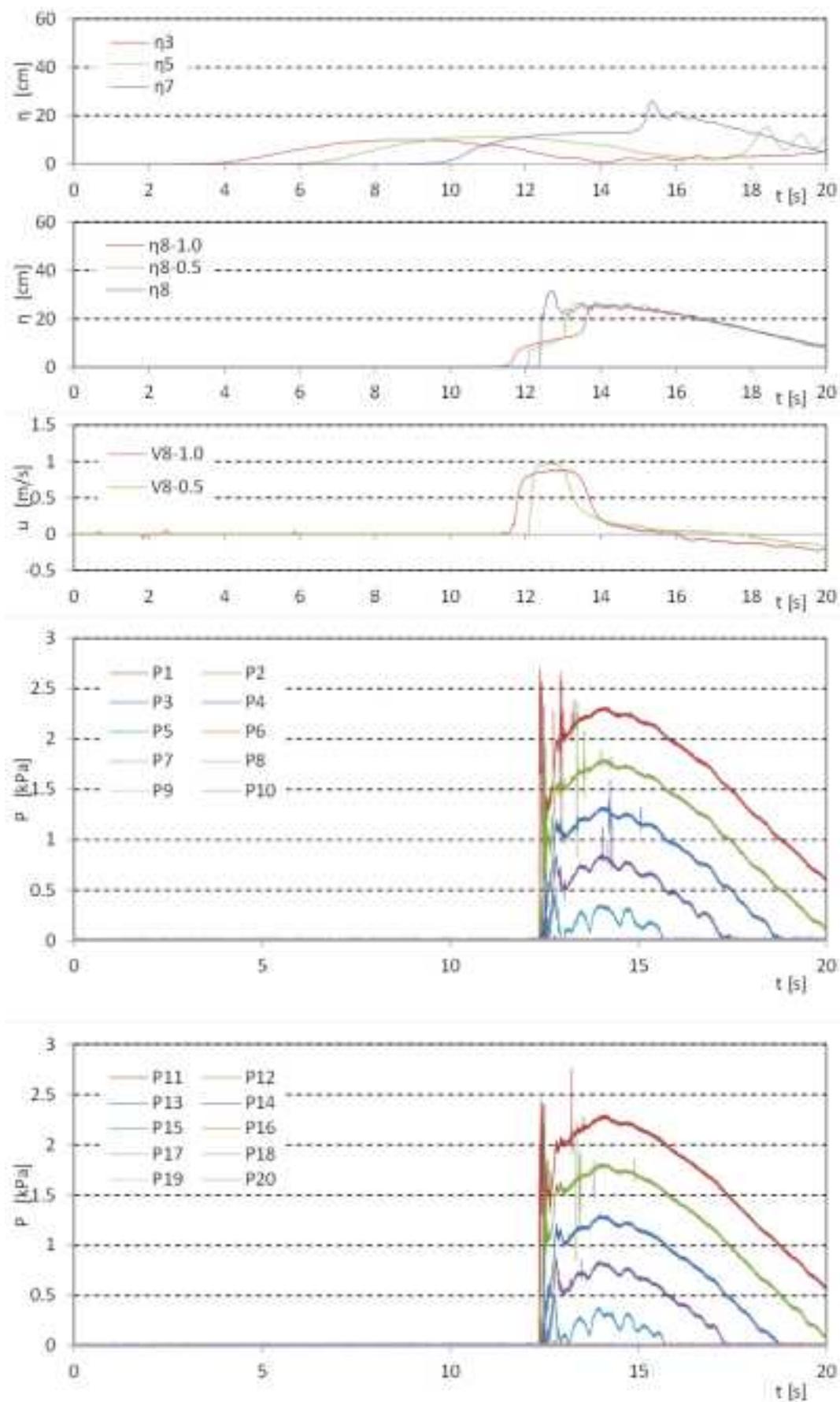


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 0m, W07)

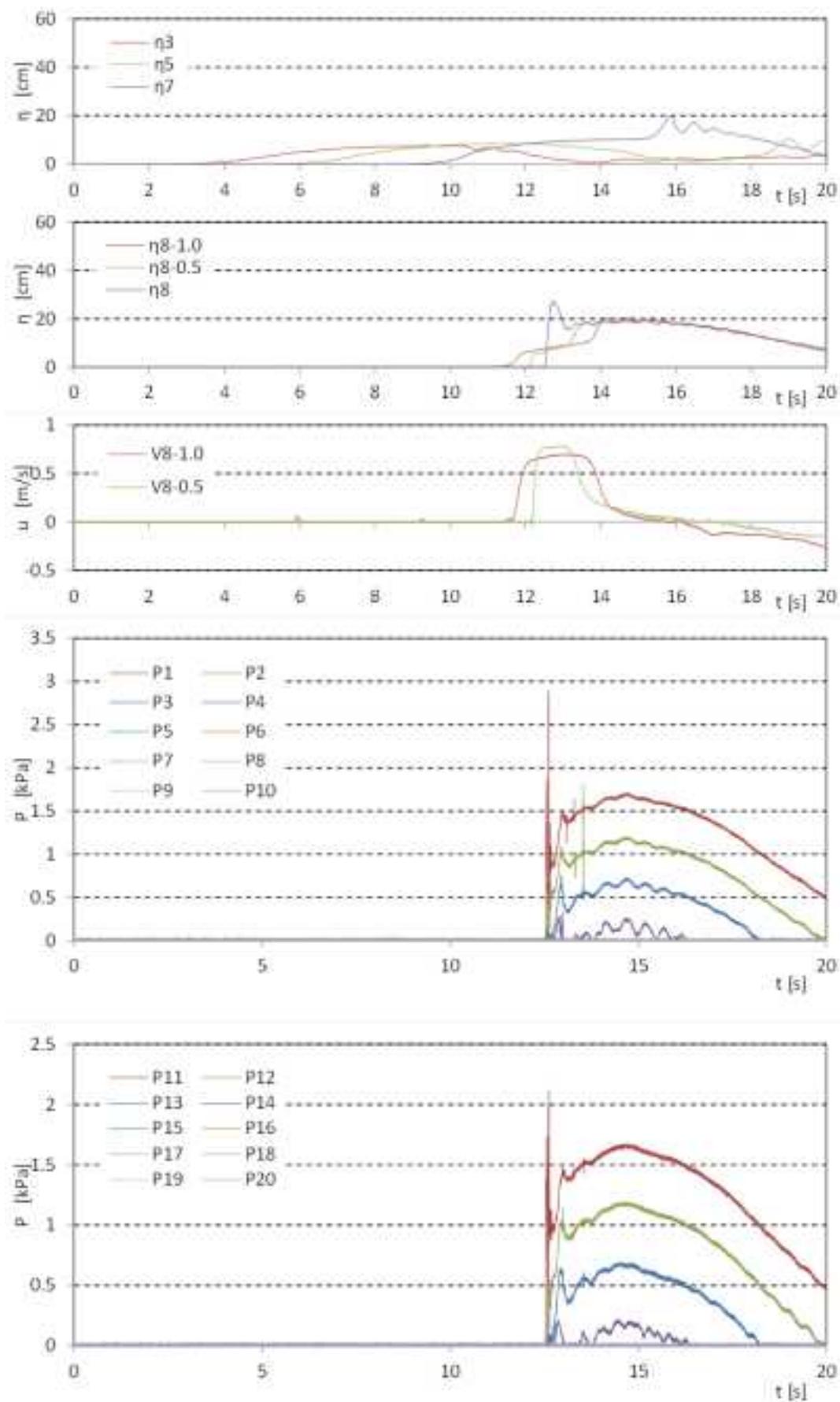


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 0m, W08)

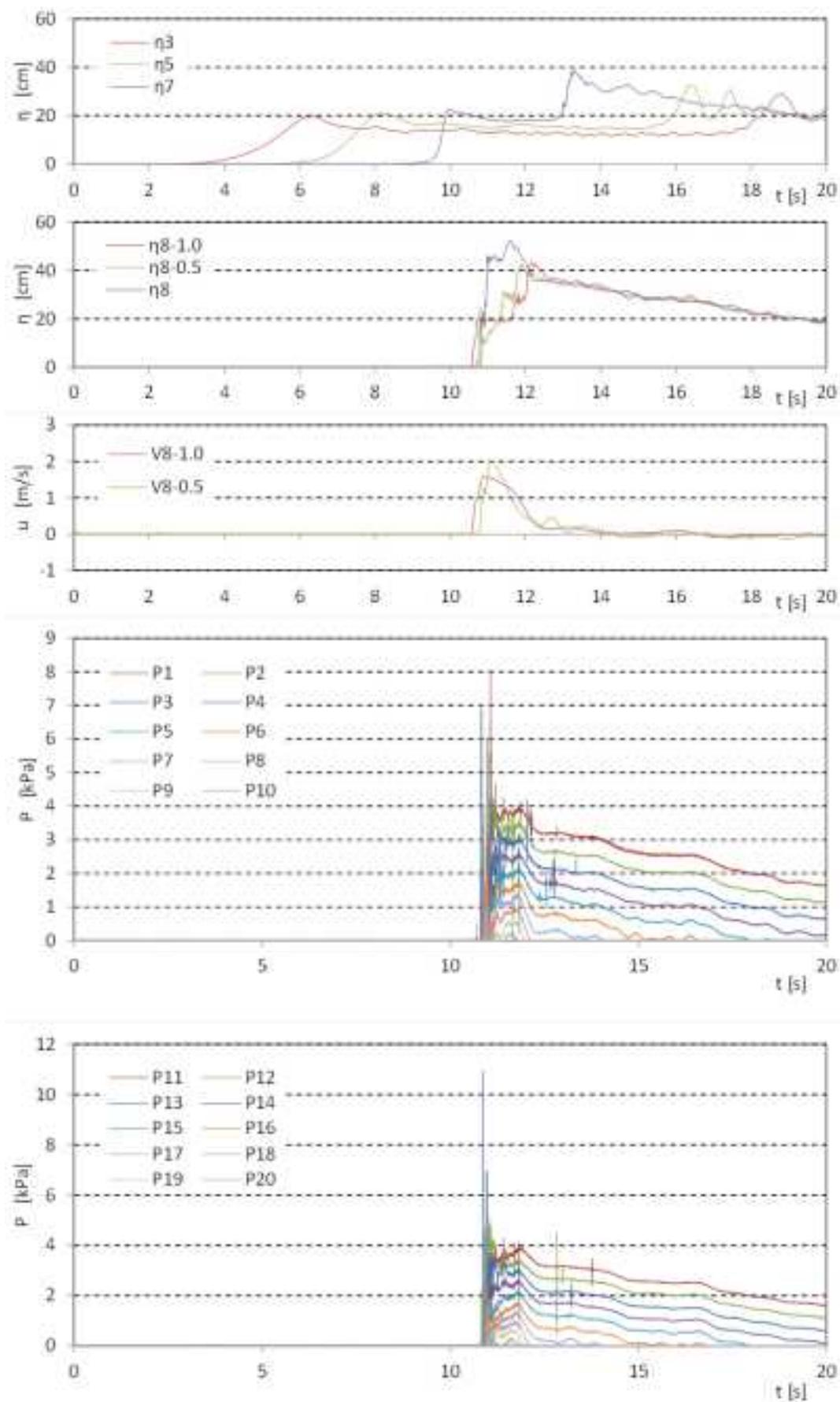


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 0m, W09)

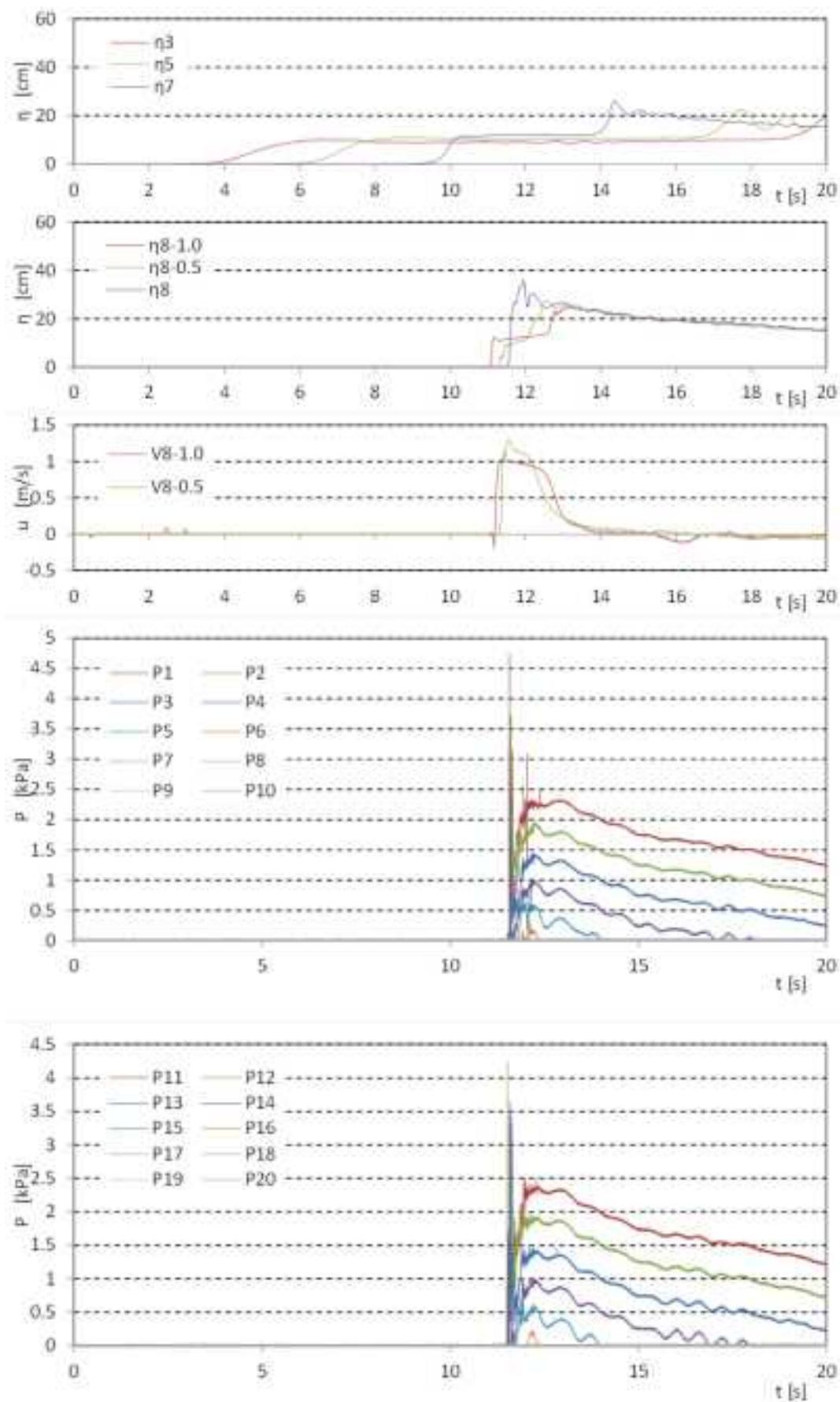


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 0m, W10)

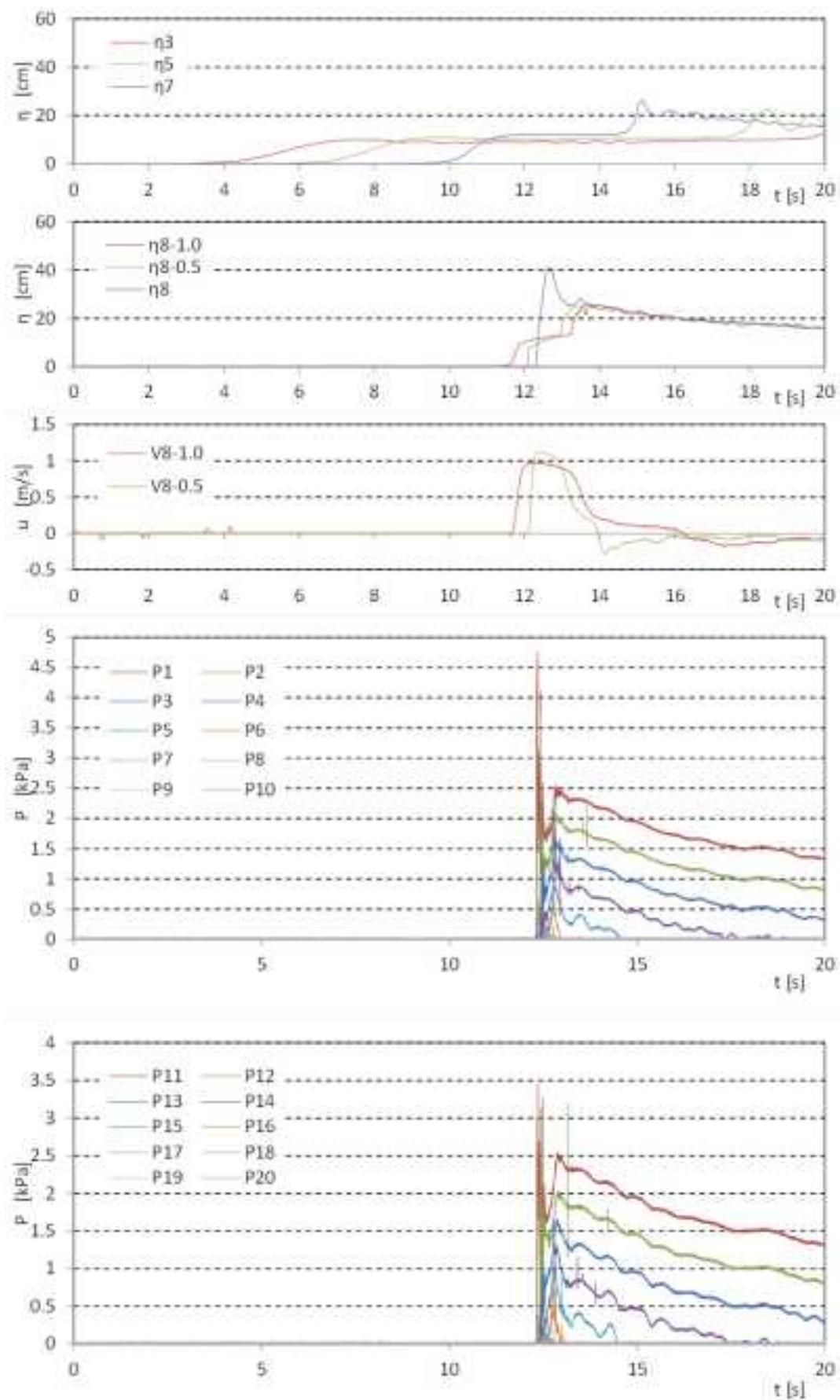


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 0m, W11)

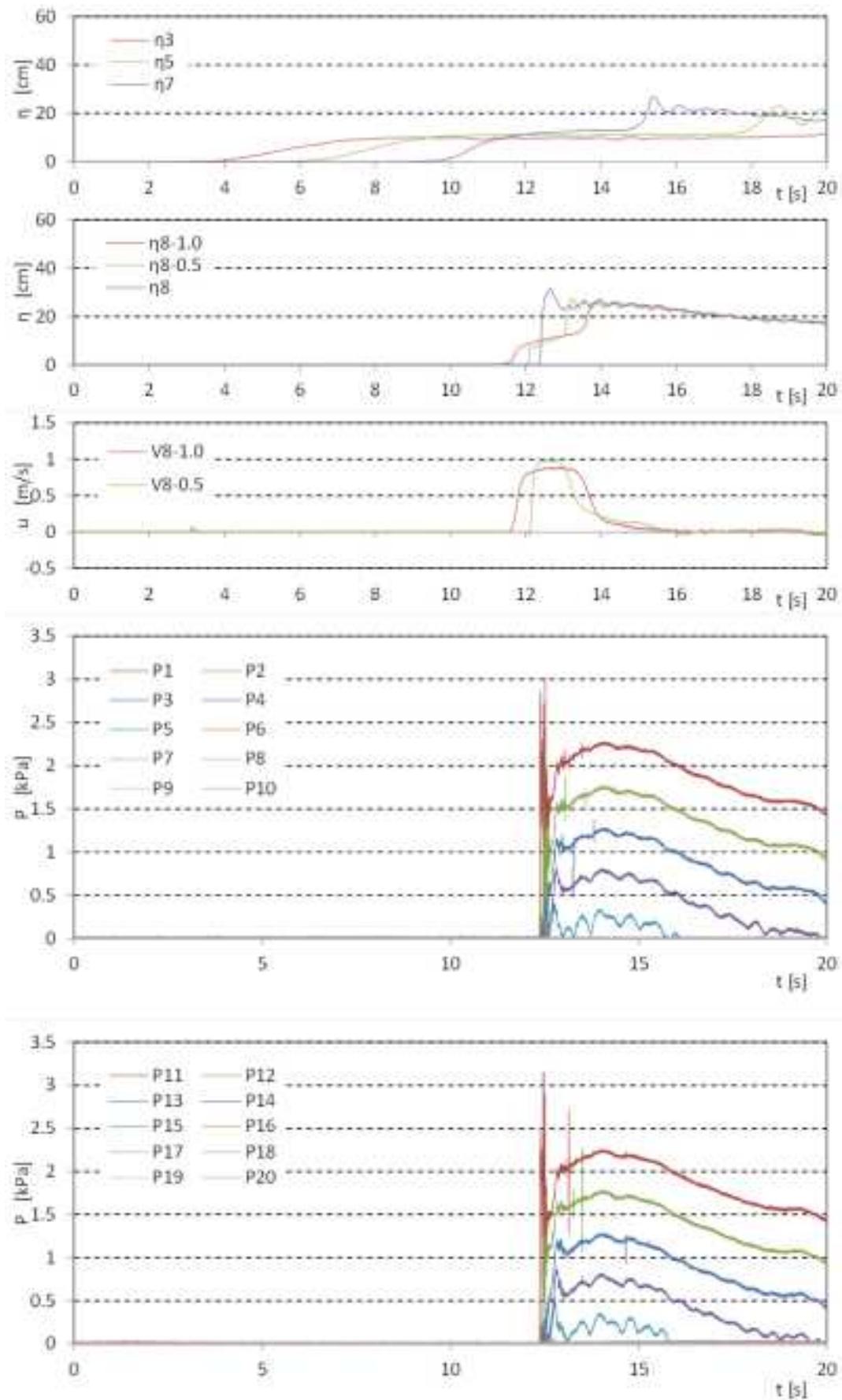


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 0m, W12)

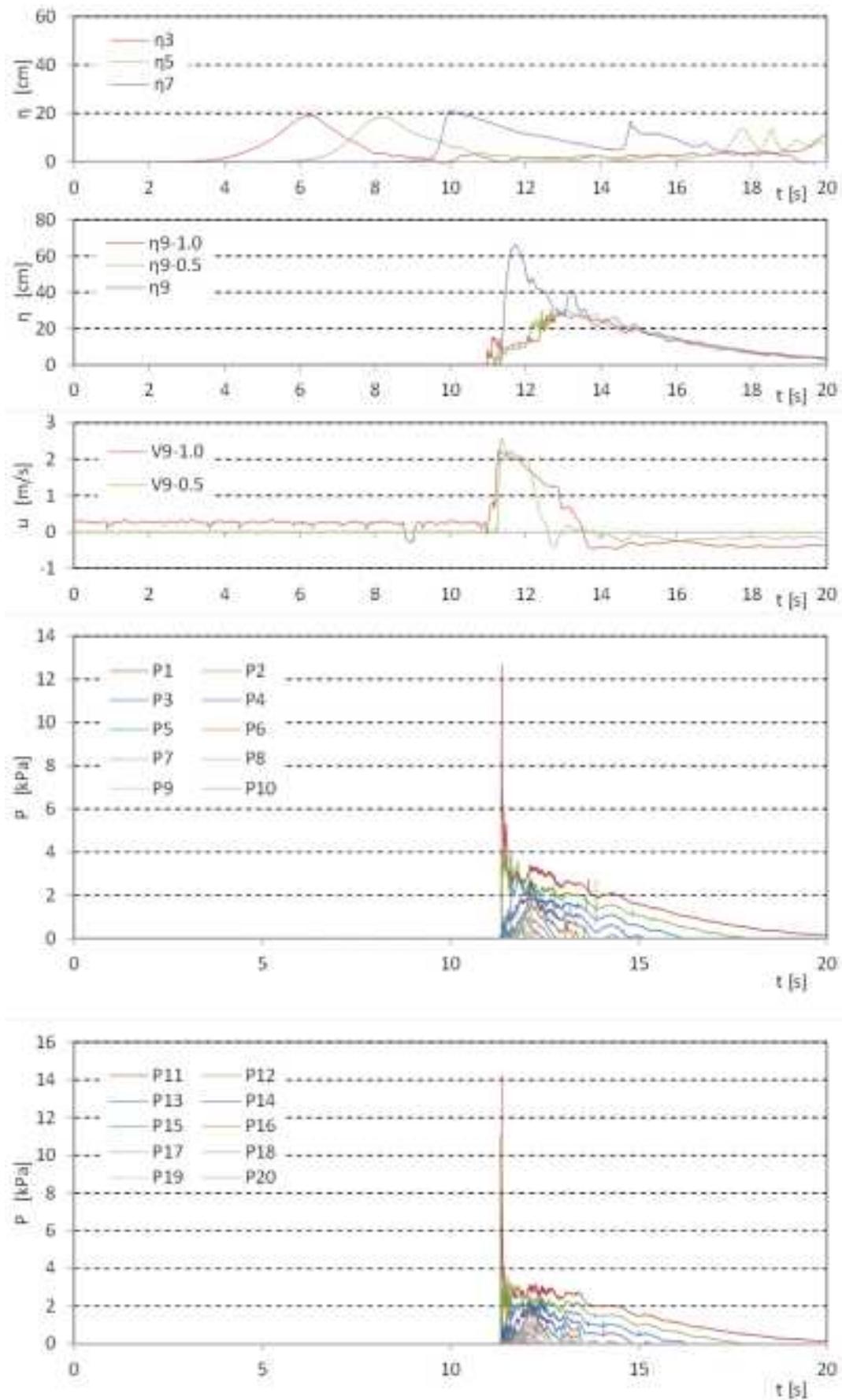


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W01)

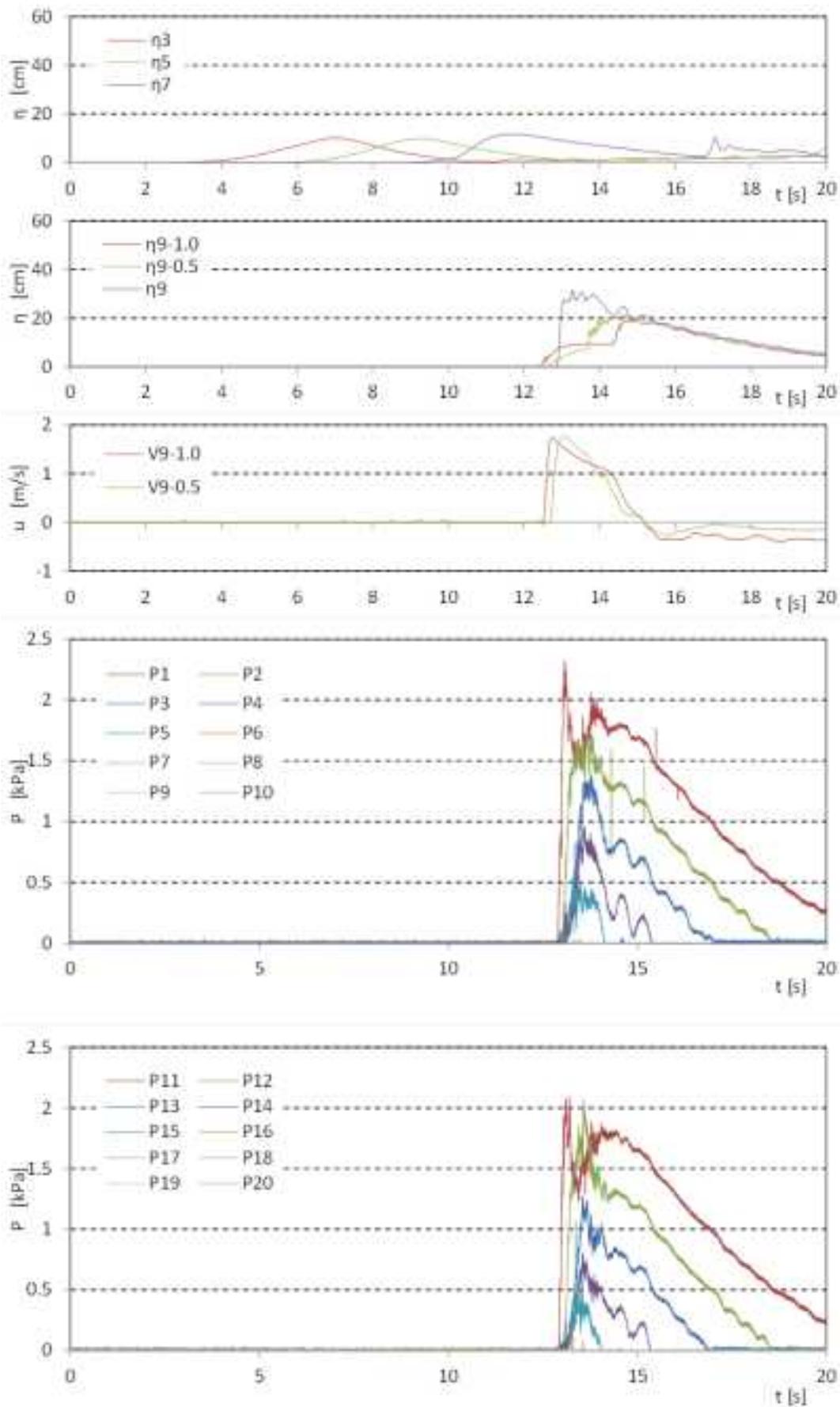


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W02)

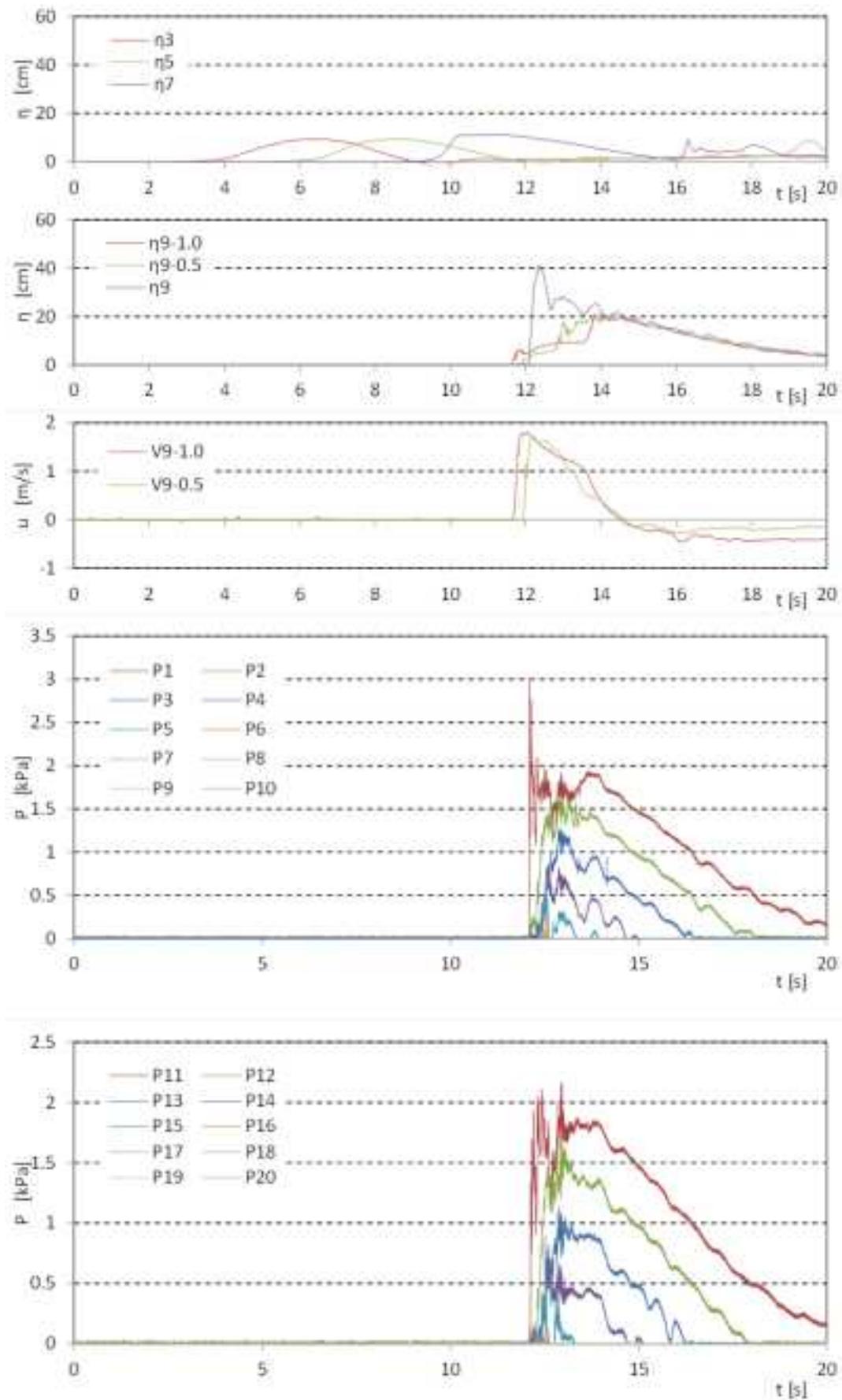


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W03)

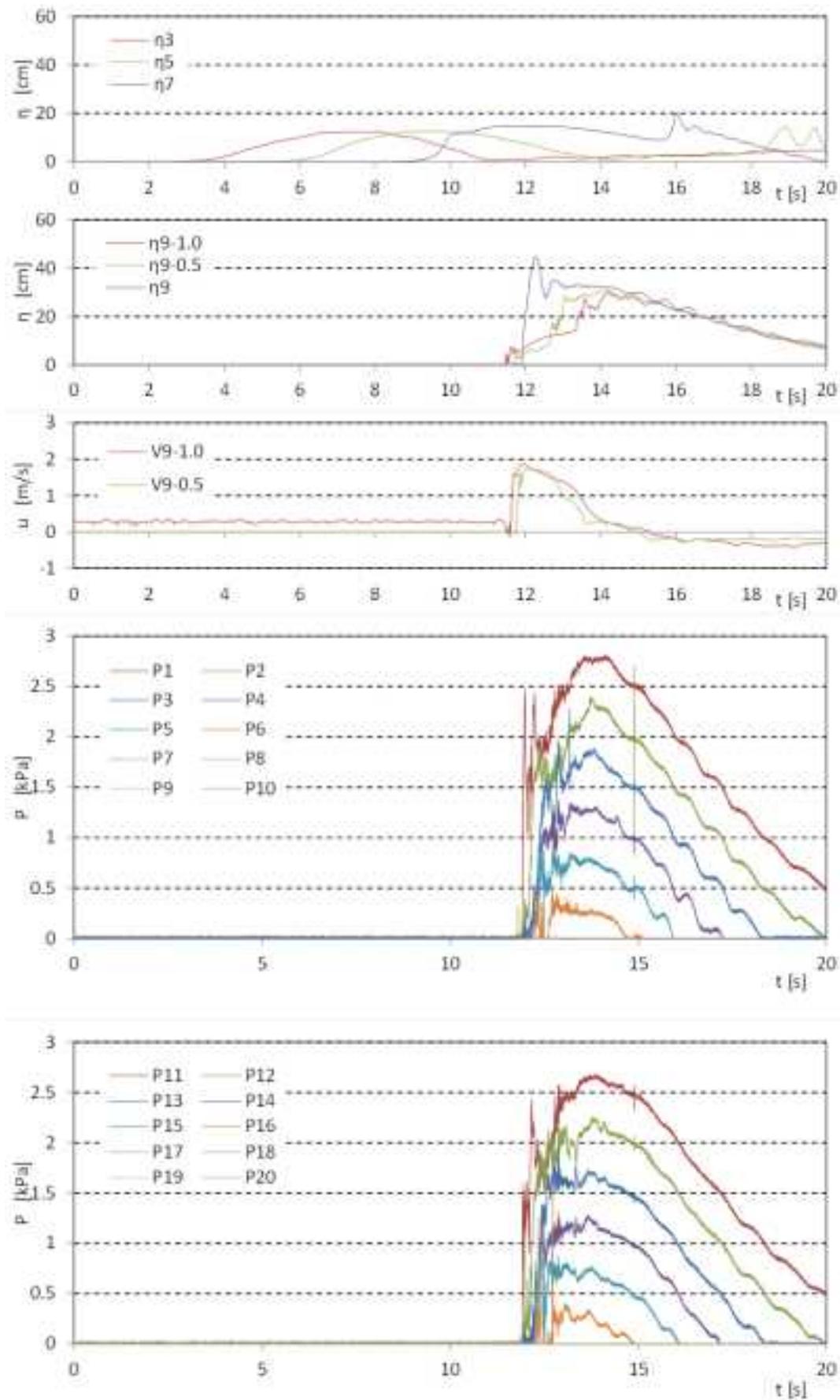


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W04)

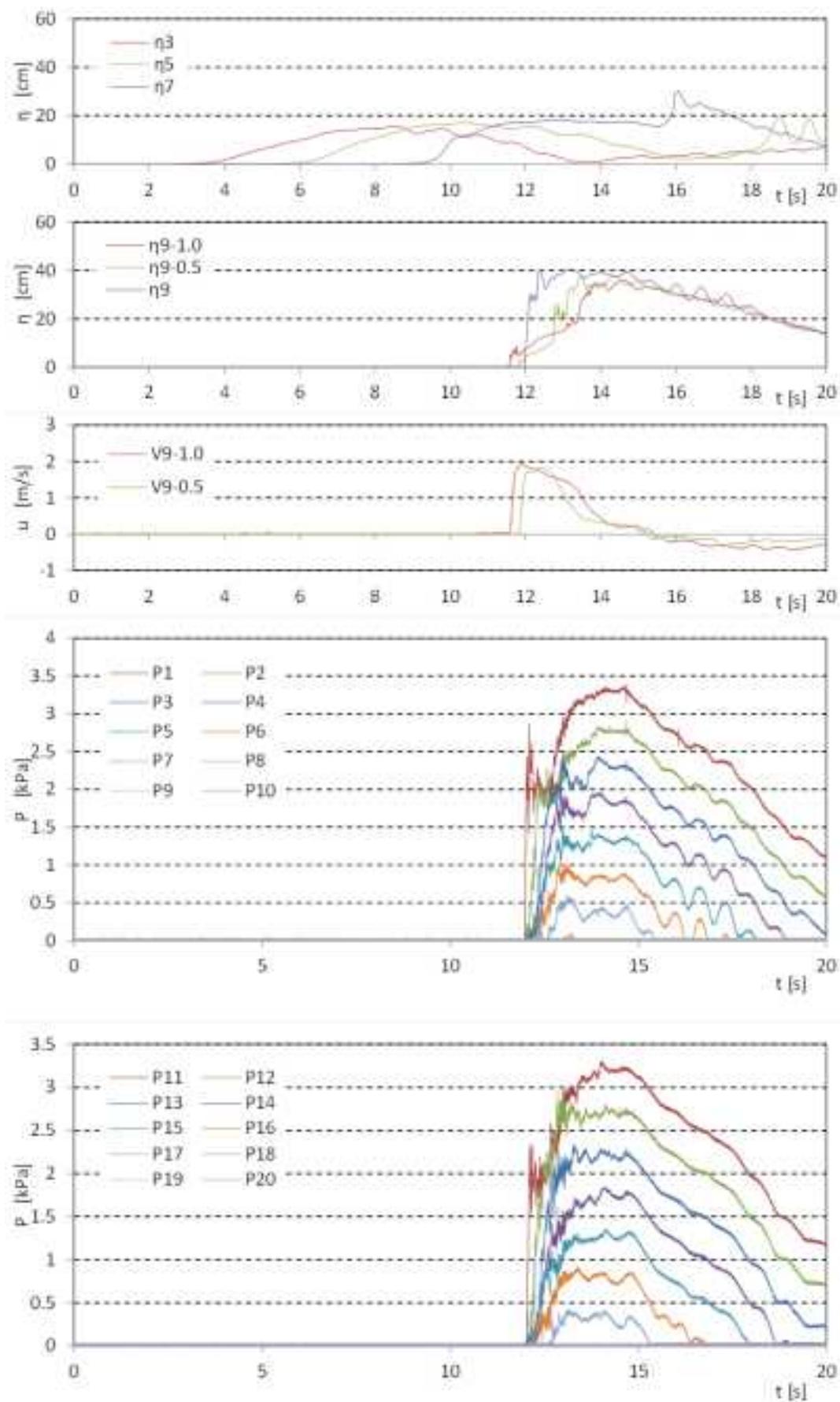


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W05)

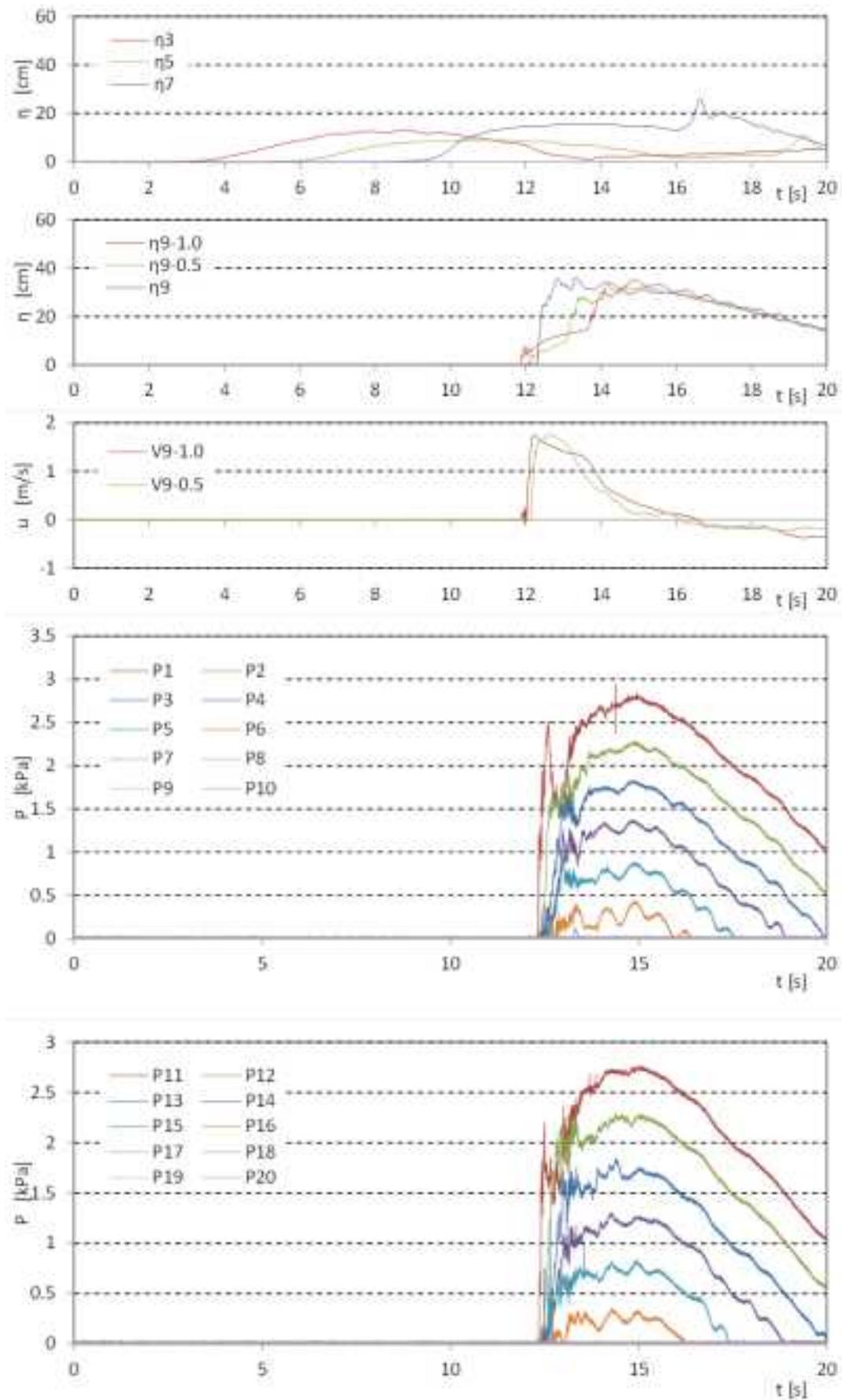


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W06)

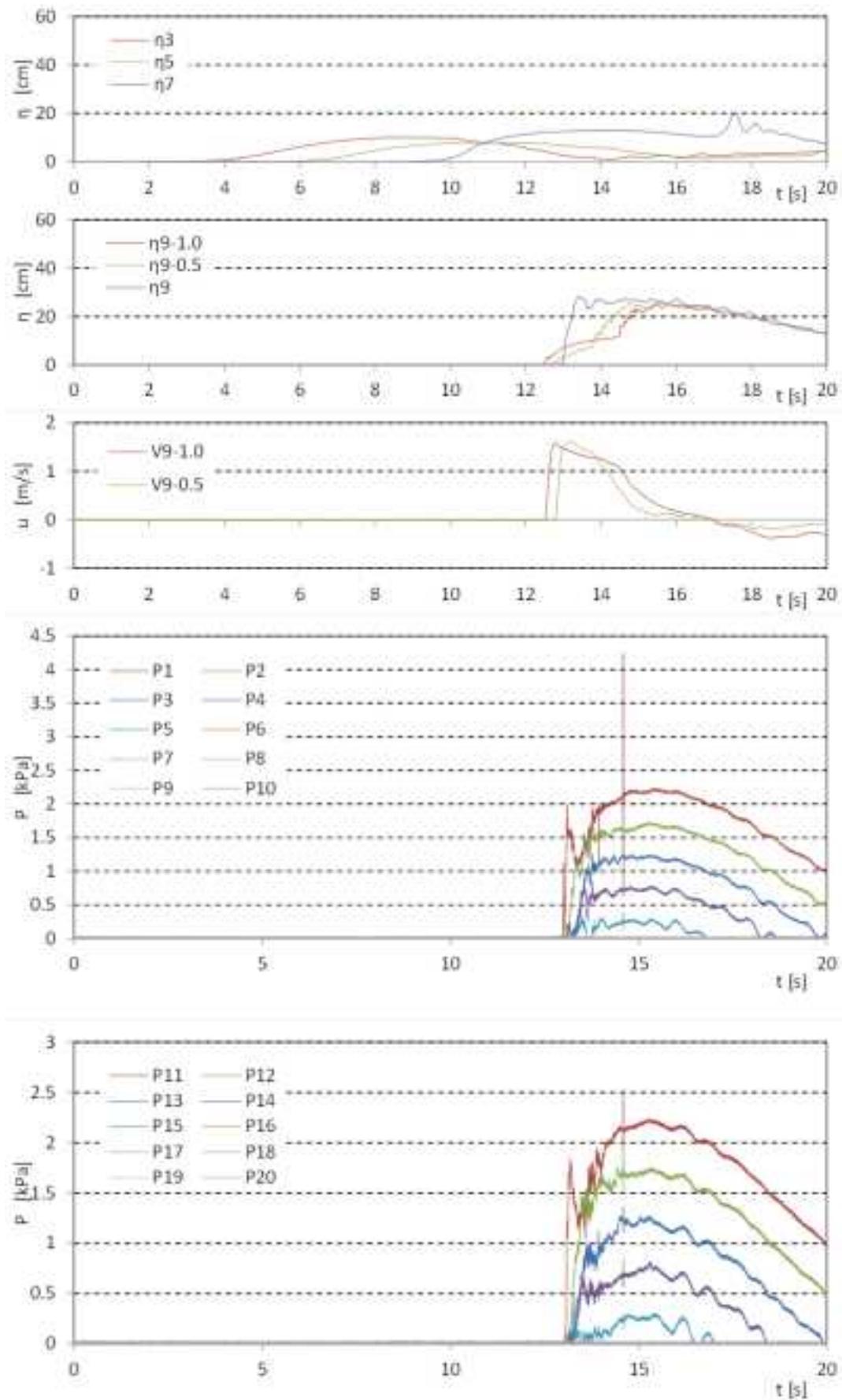


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W07)

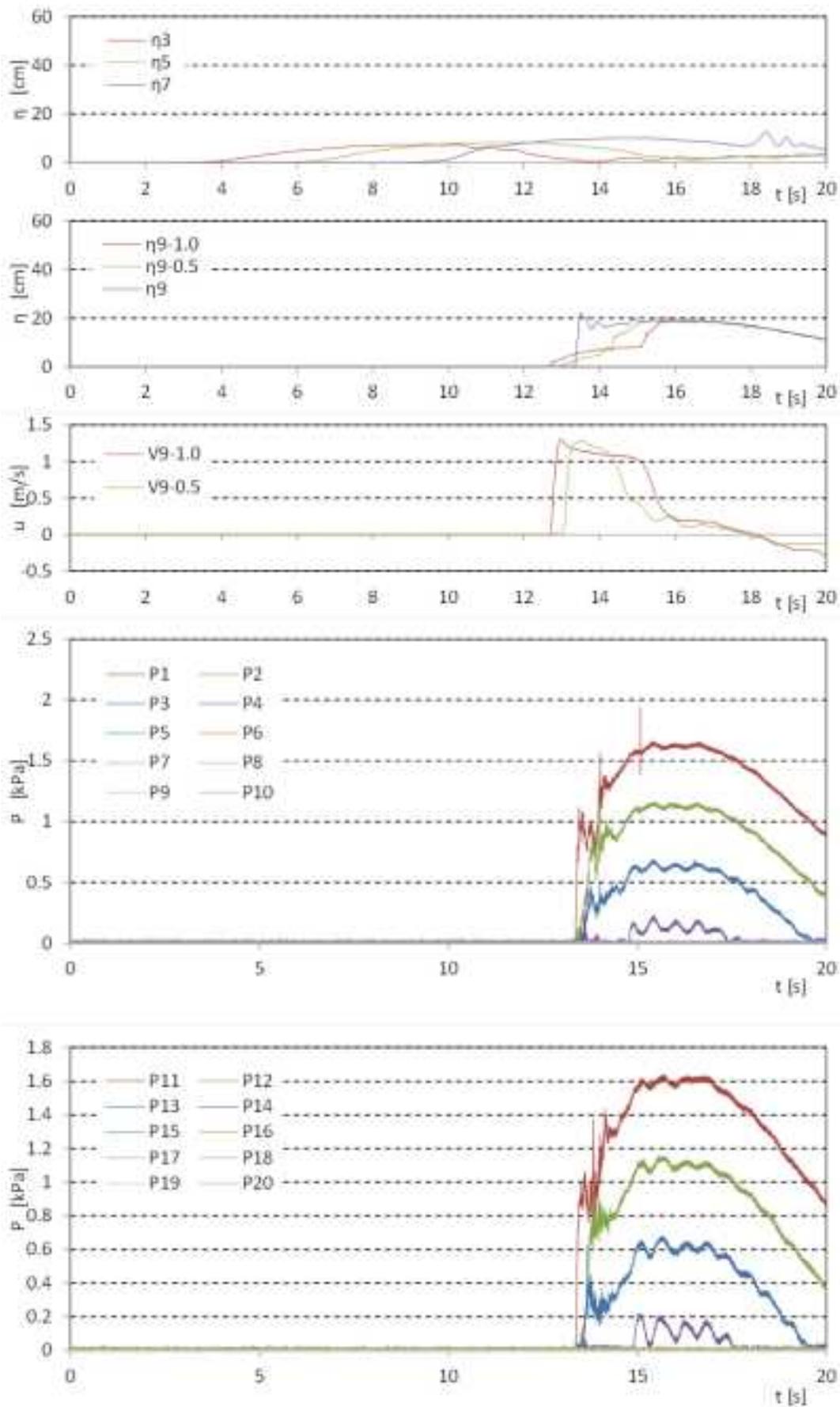


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W08)

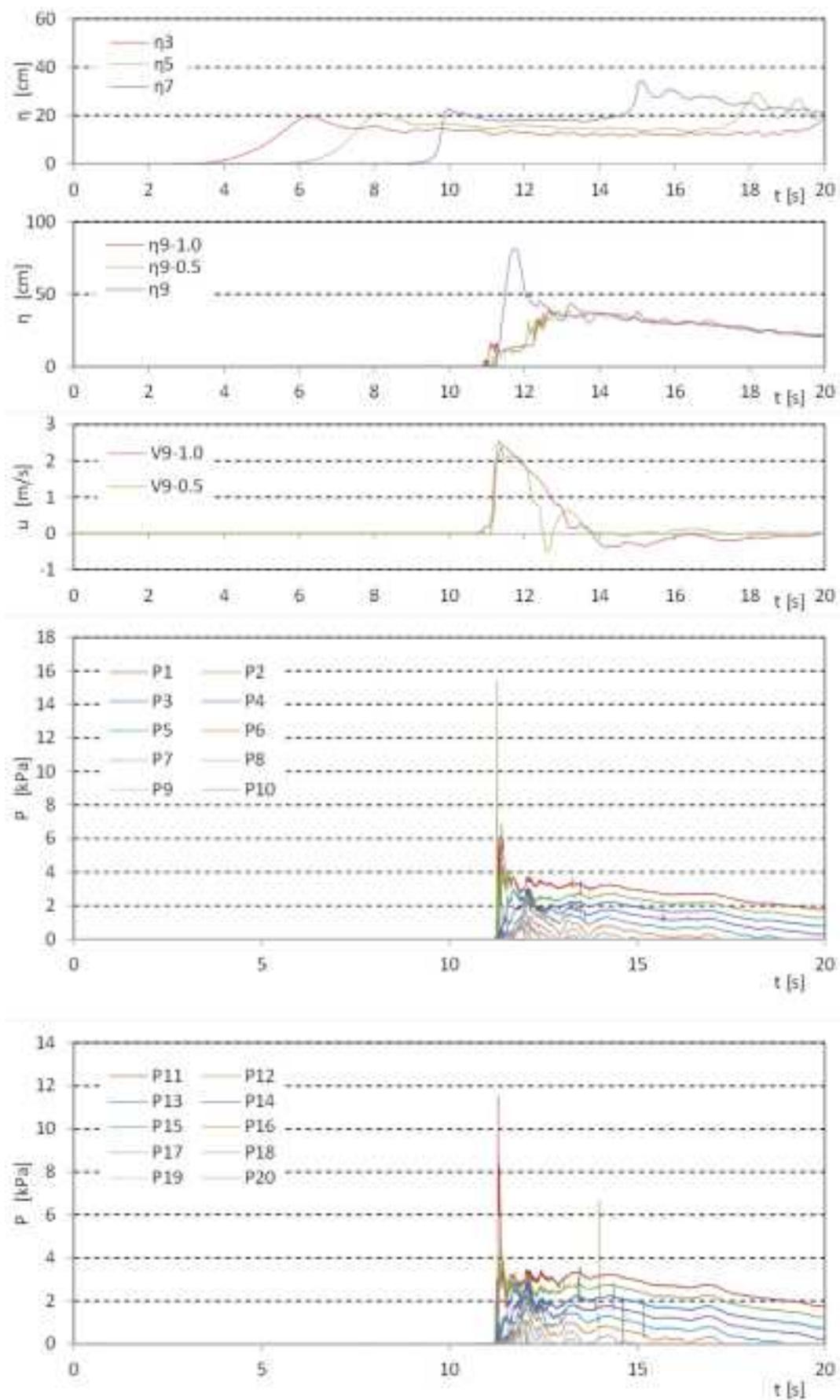


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W09)

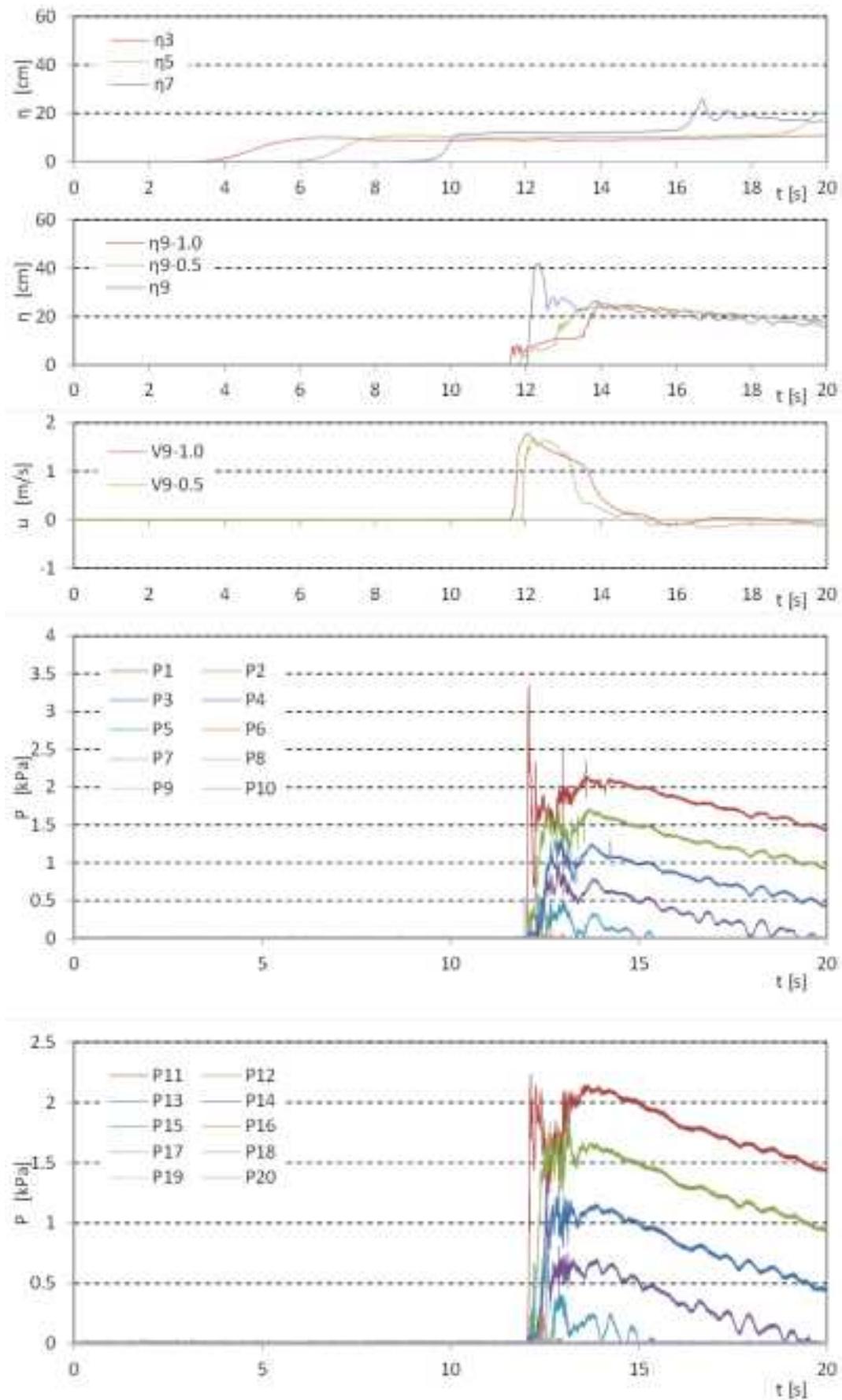


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W10)

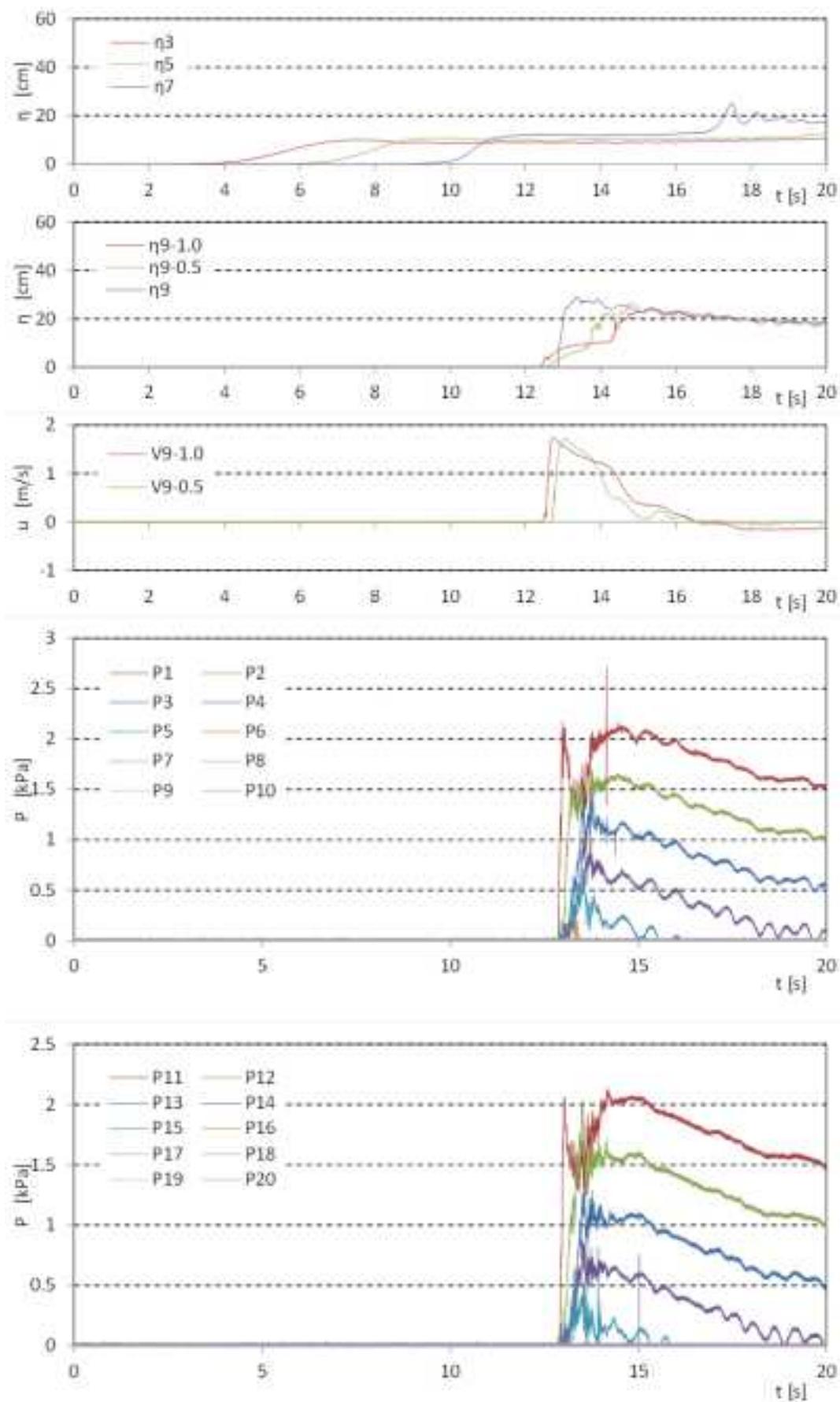


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W11)

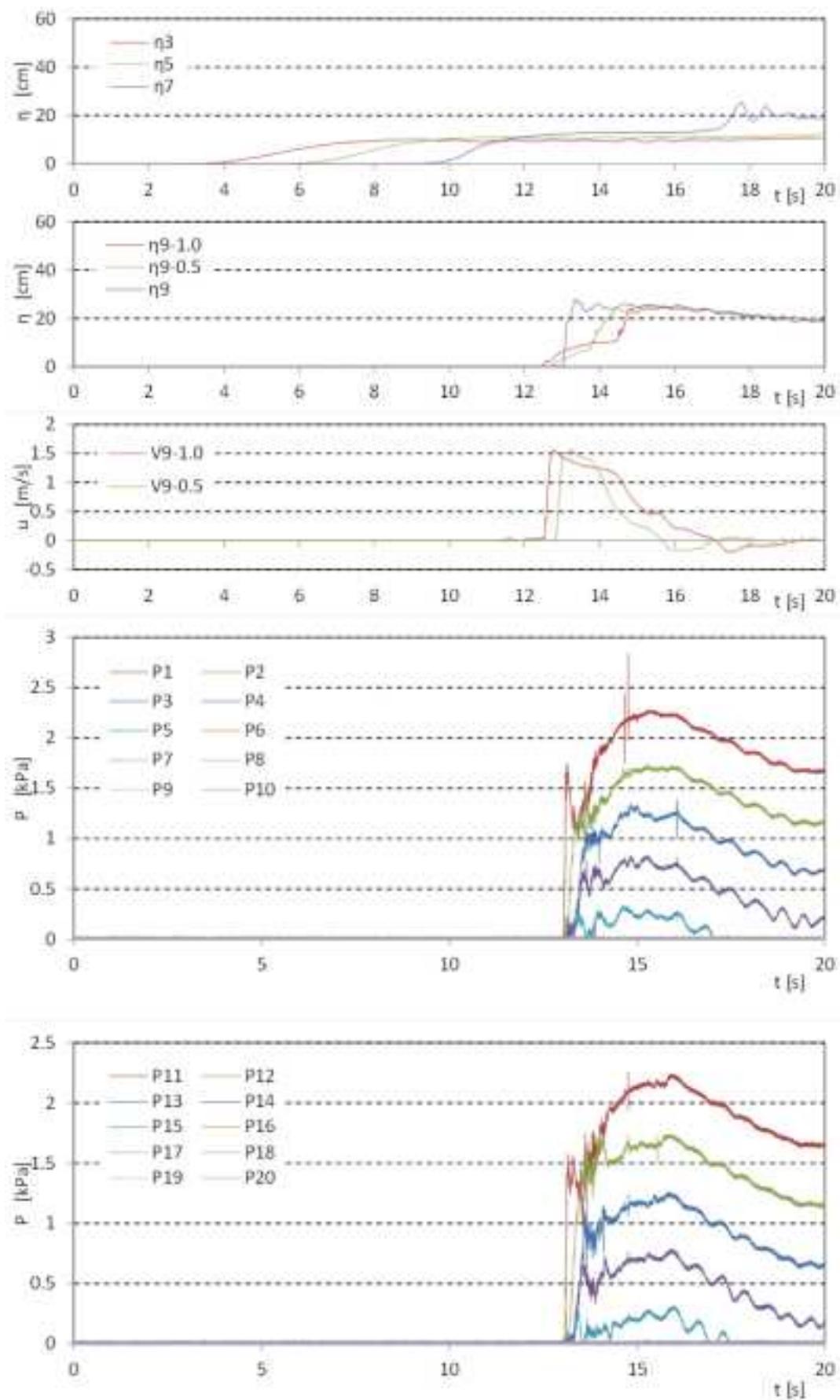


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W12)

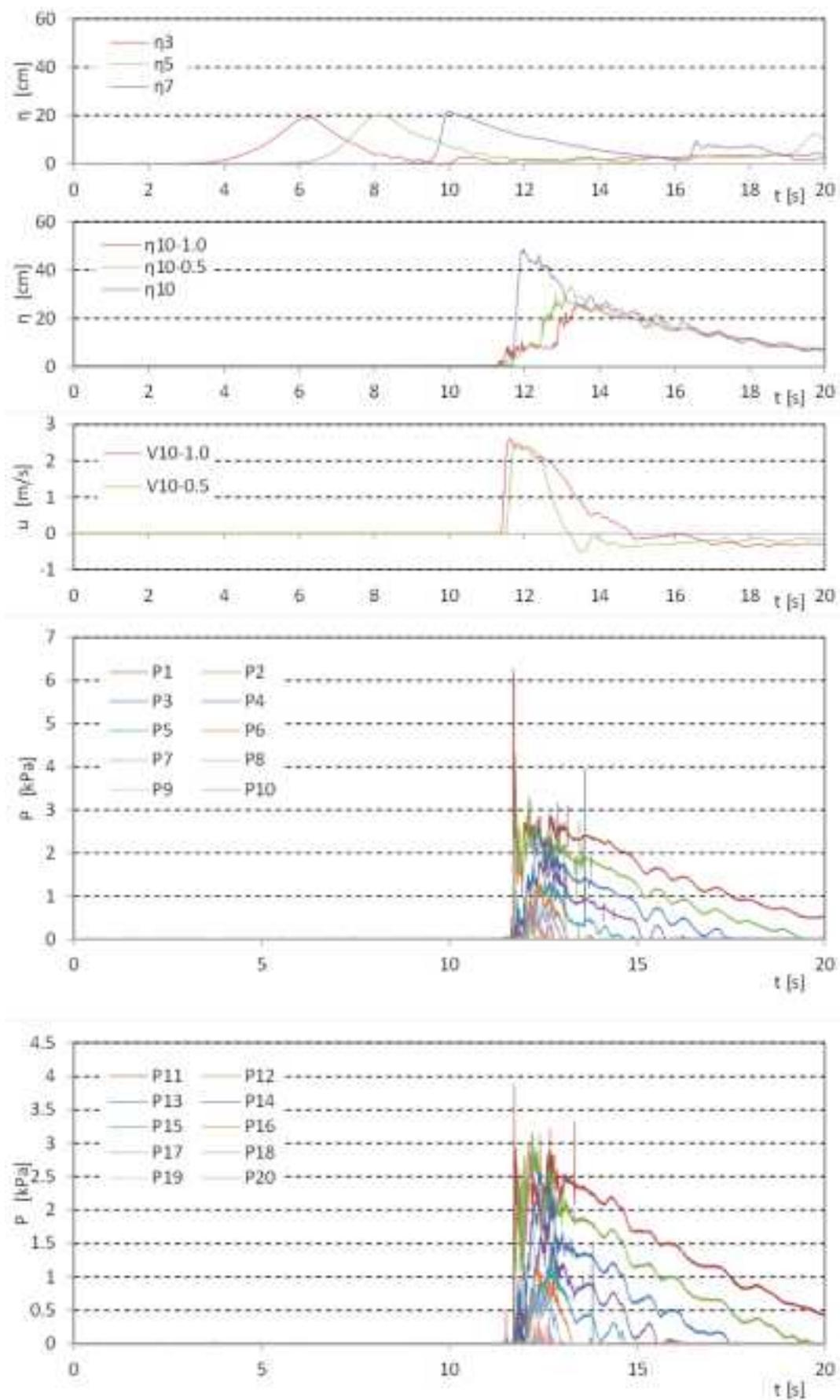


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W01)

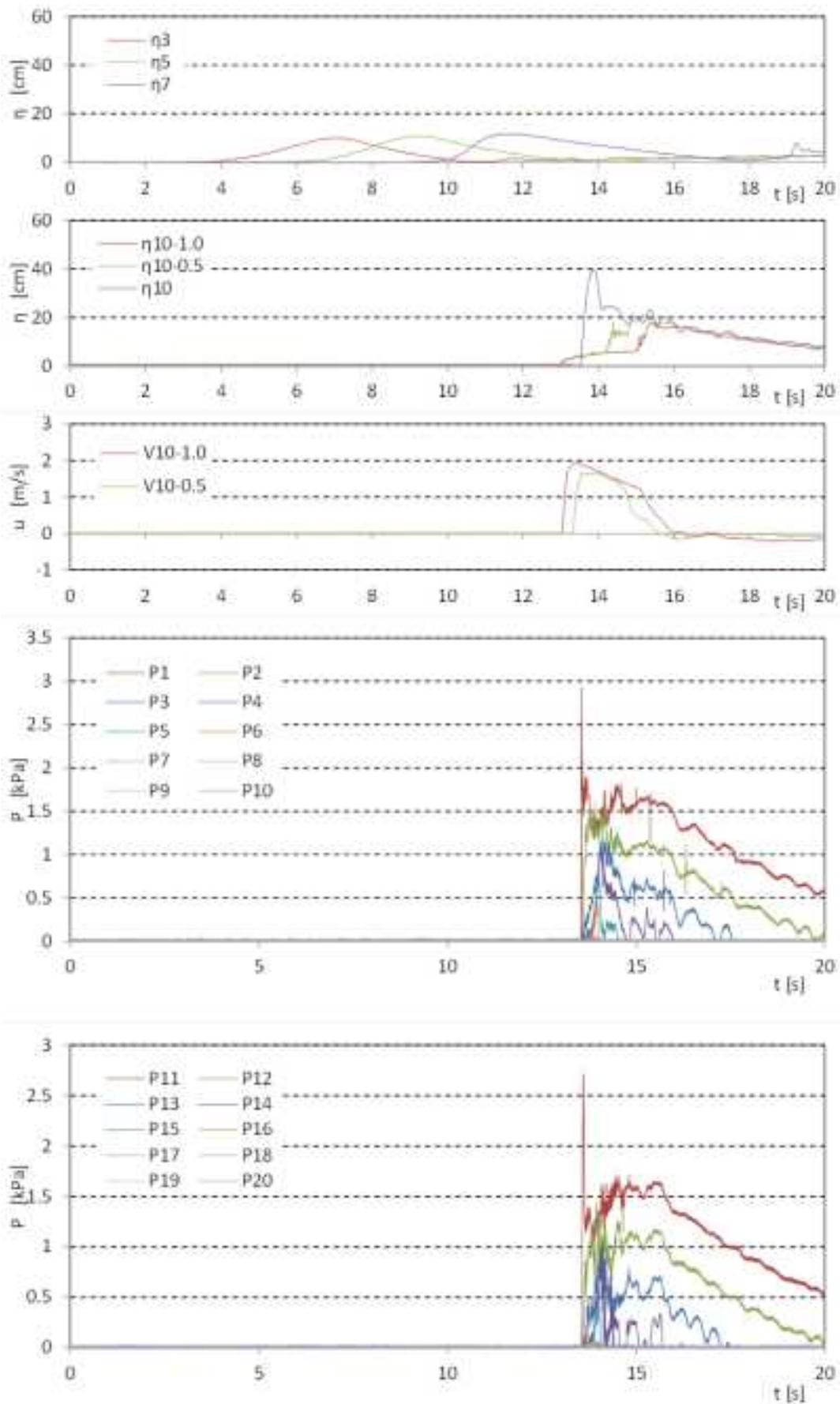


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W02)

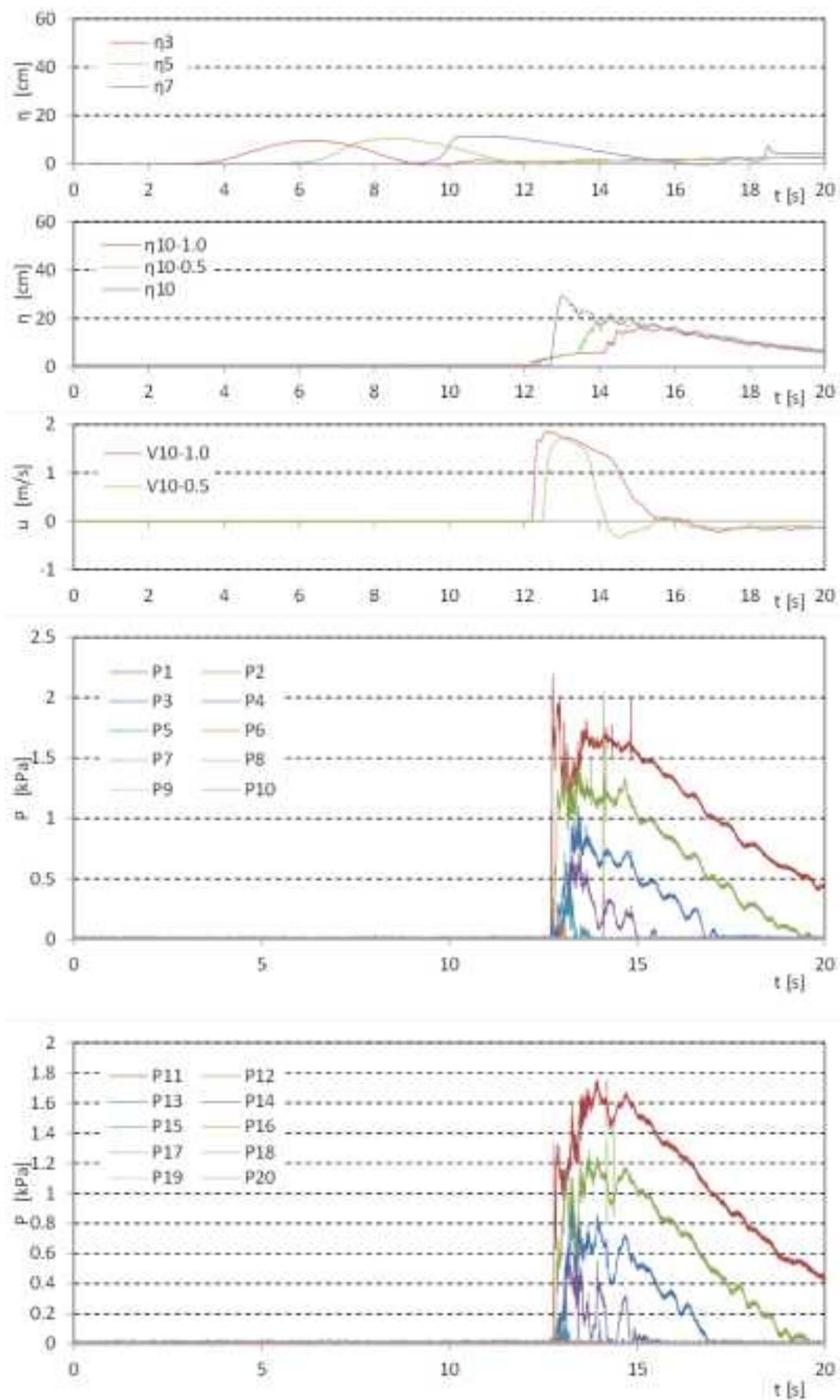


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W03)

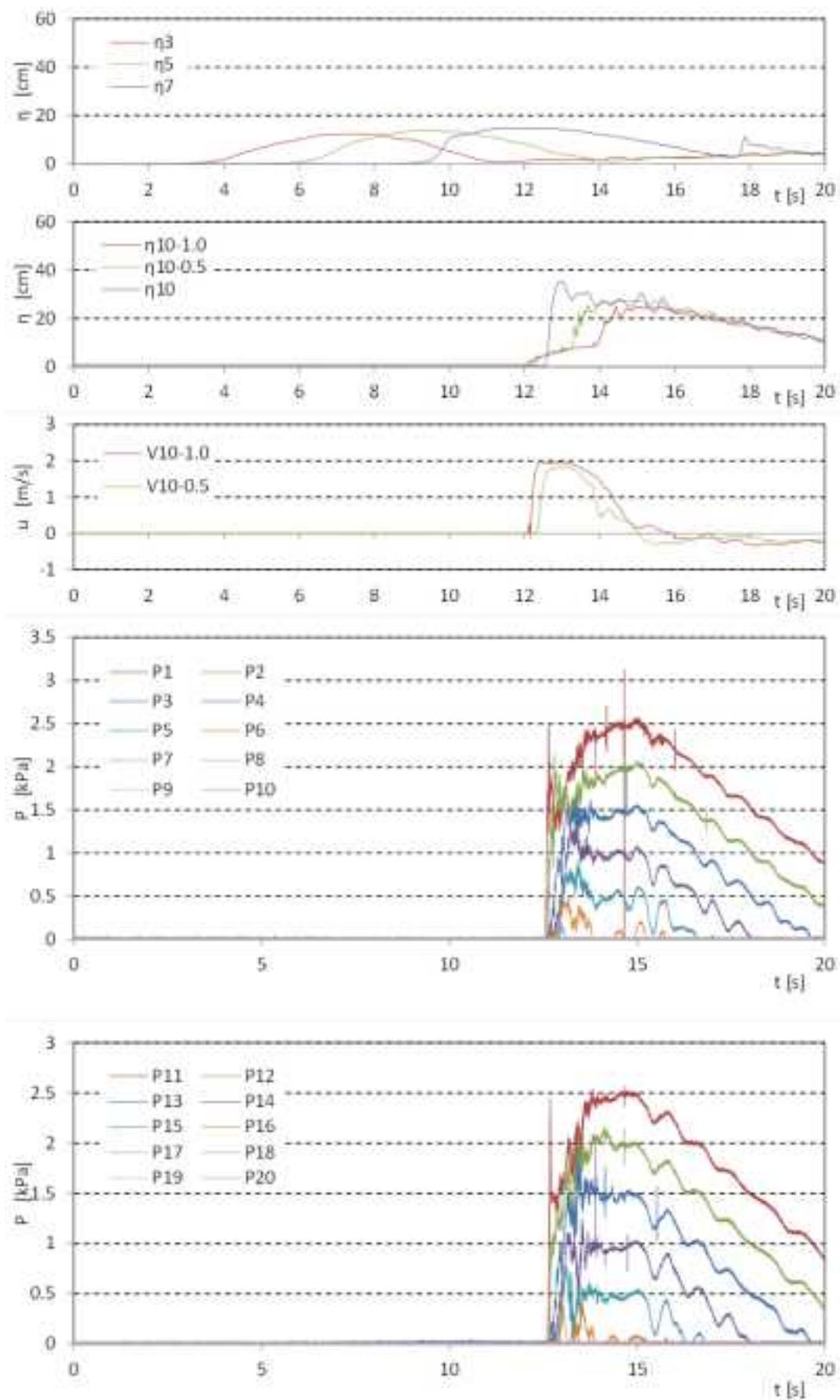


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W04)

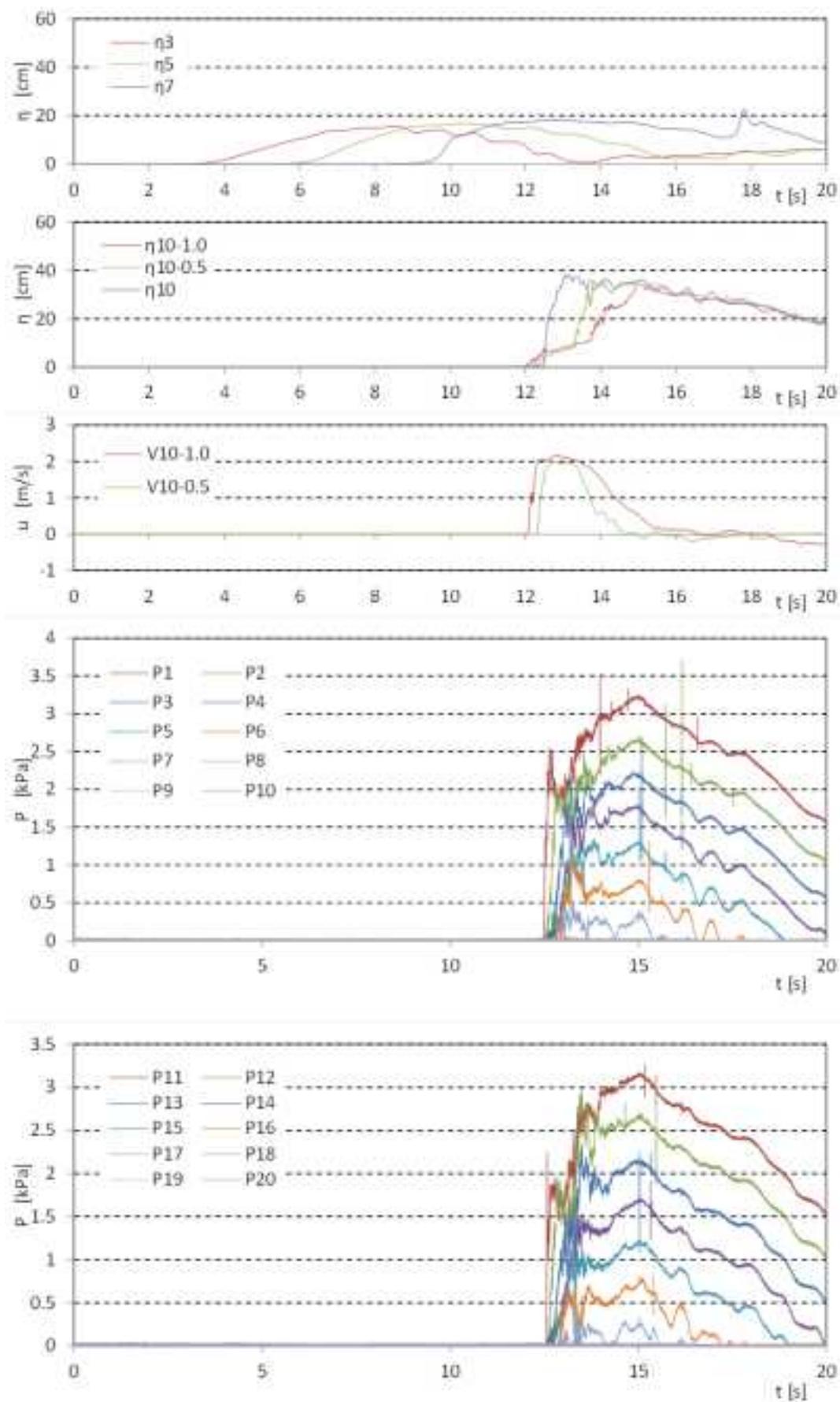


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W05)

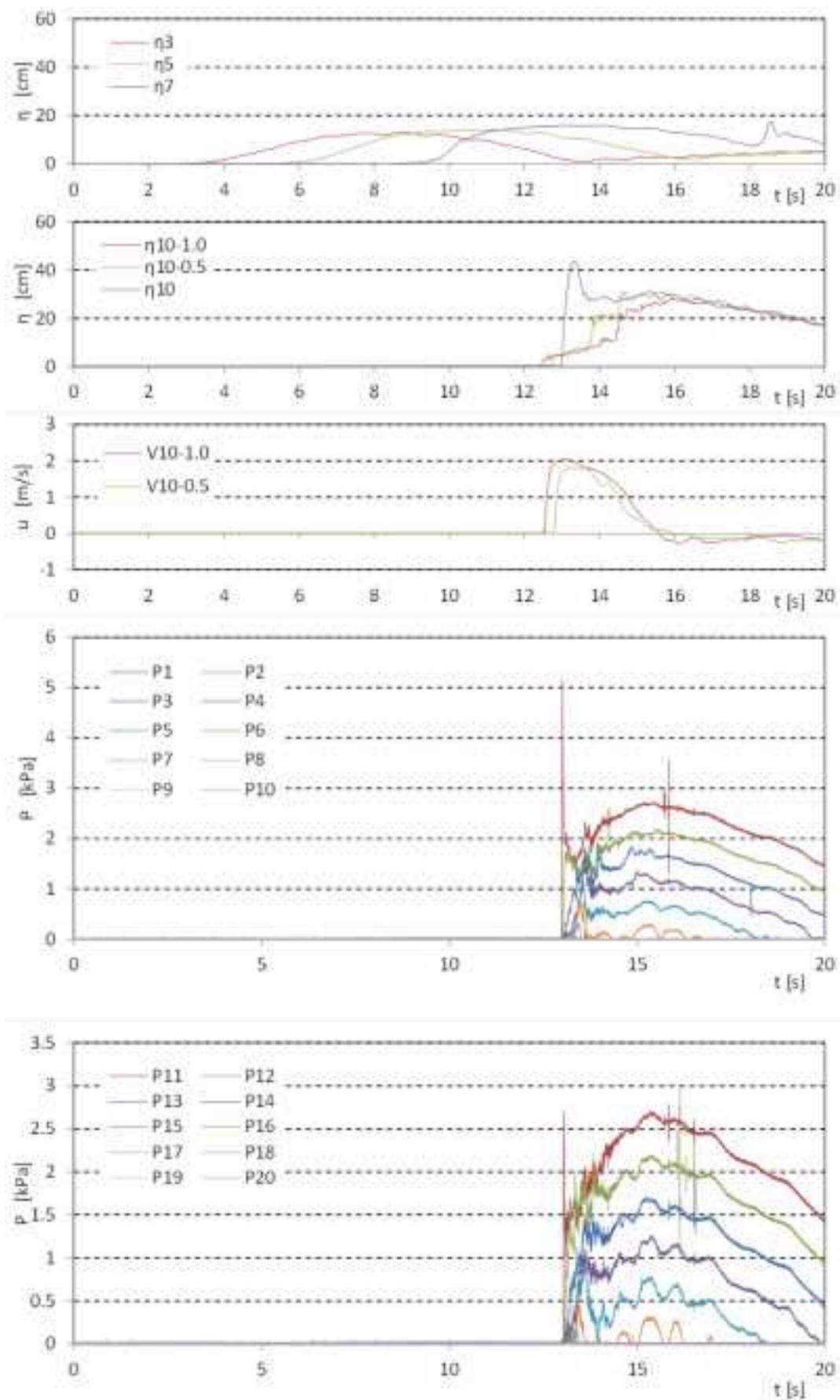


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W06)

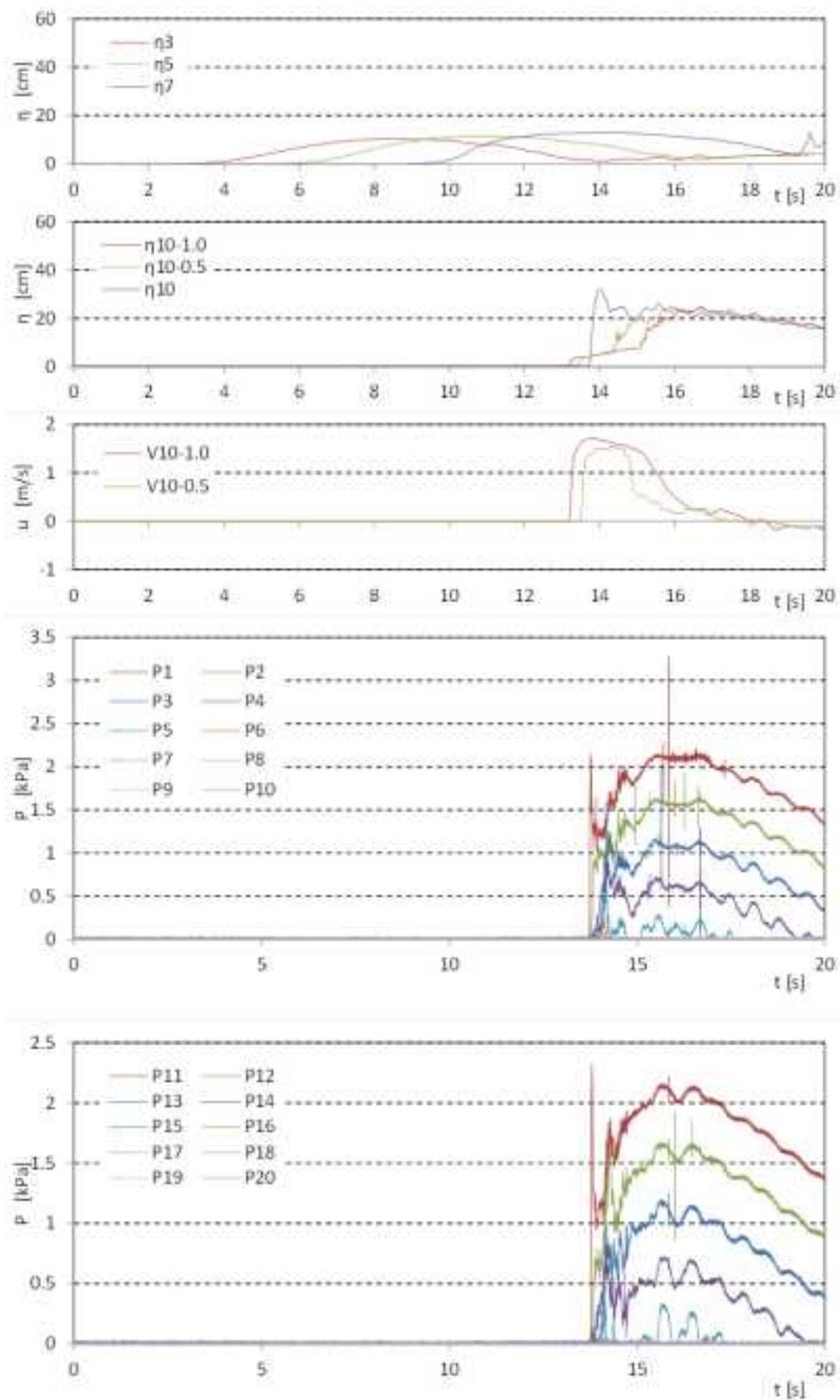


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W07)

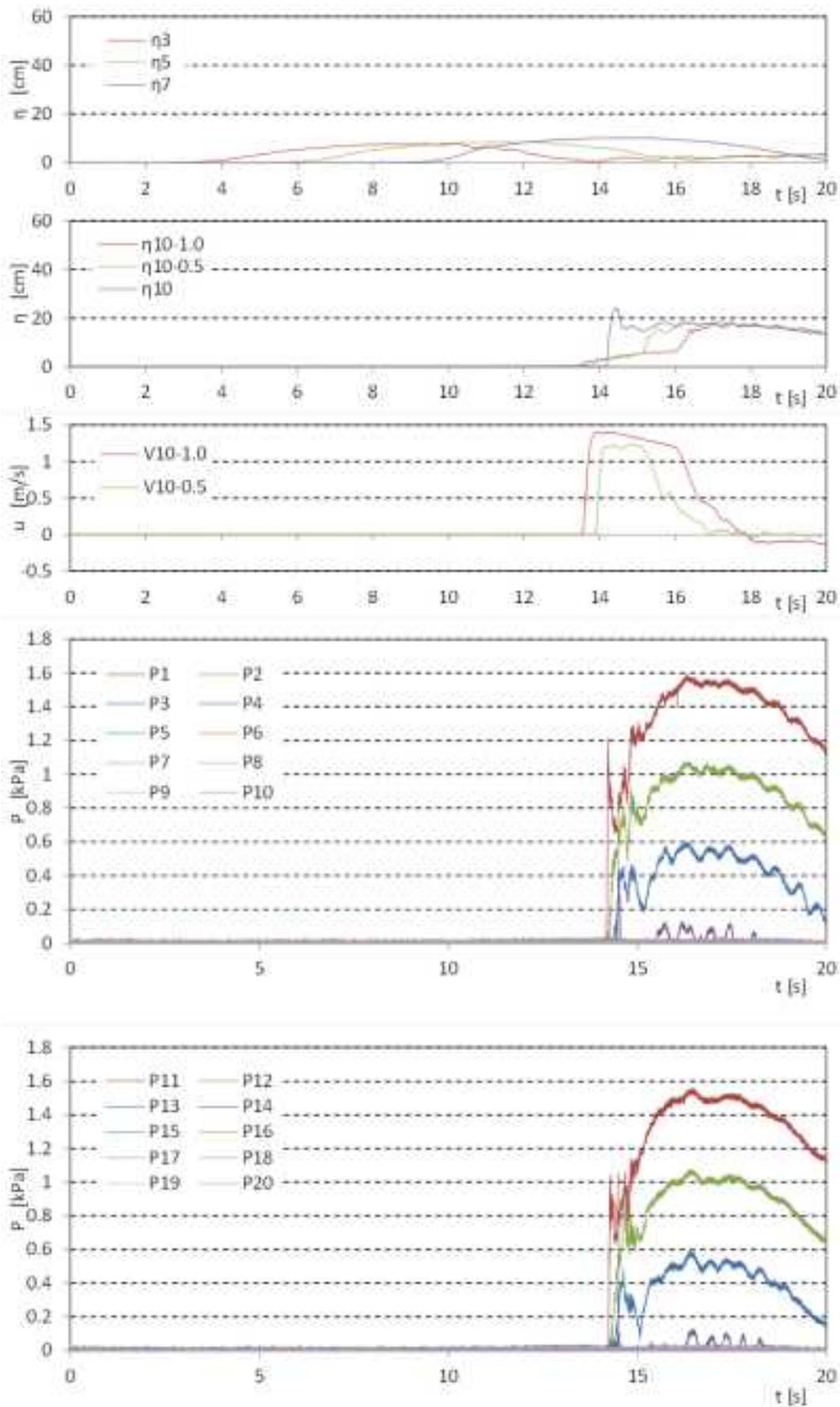


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W08)

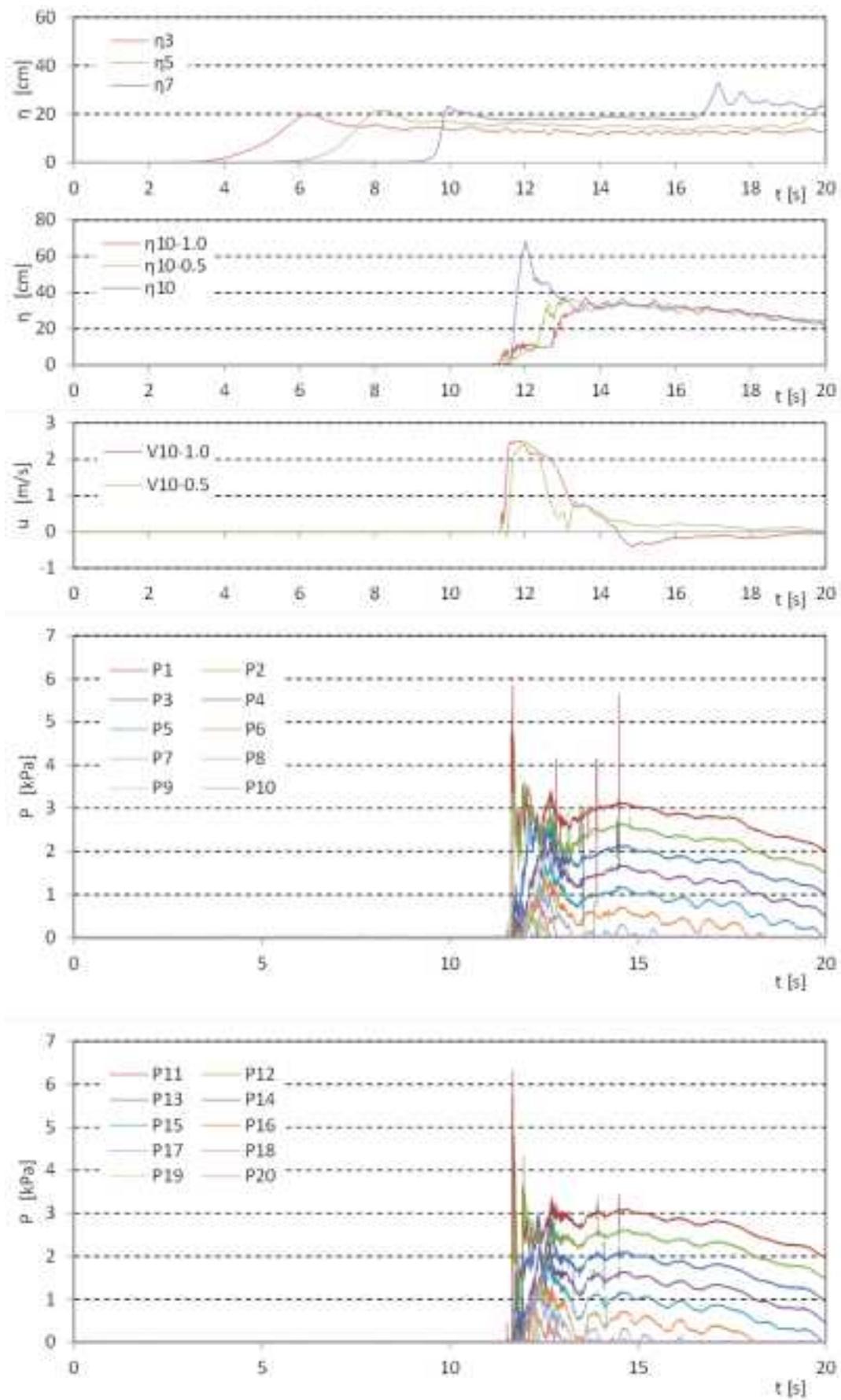


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W09)

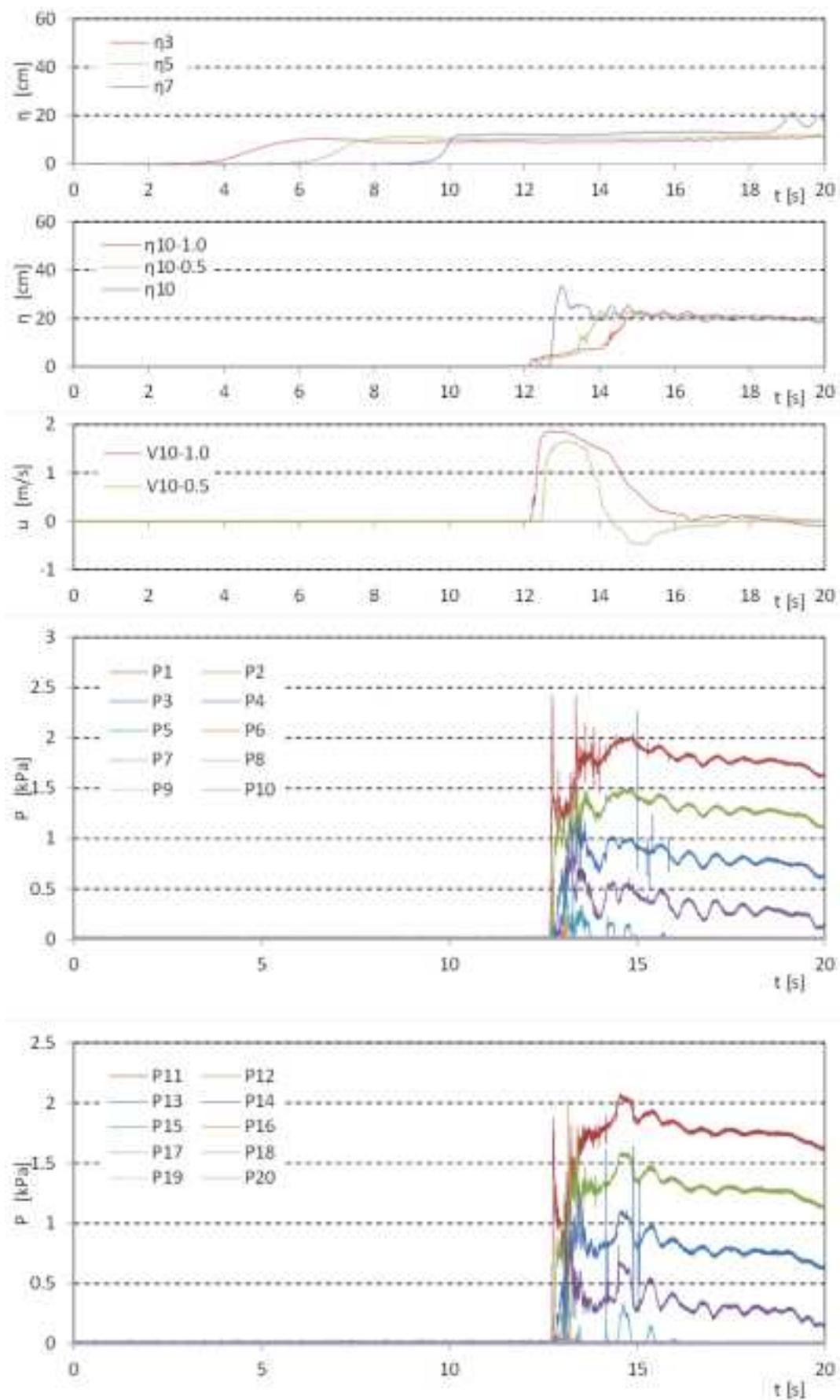


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W10)

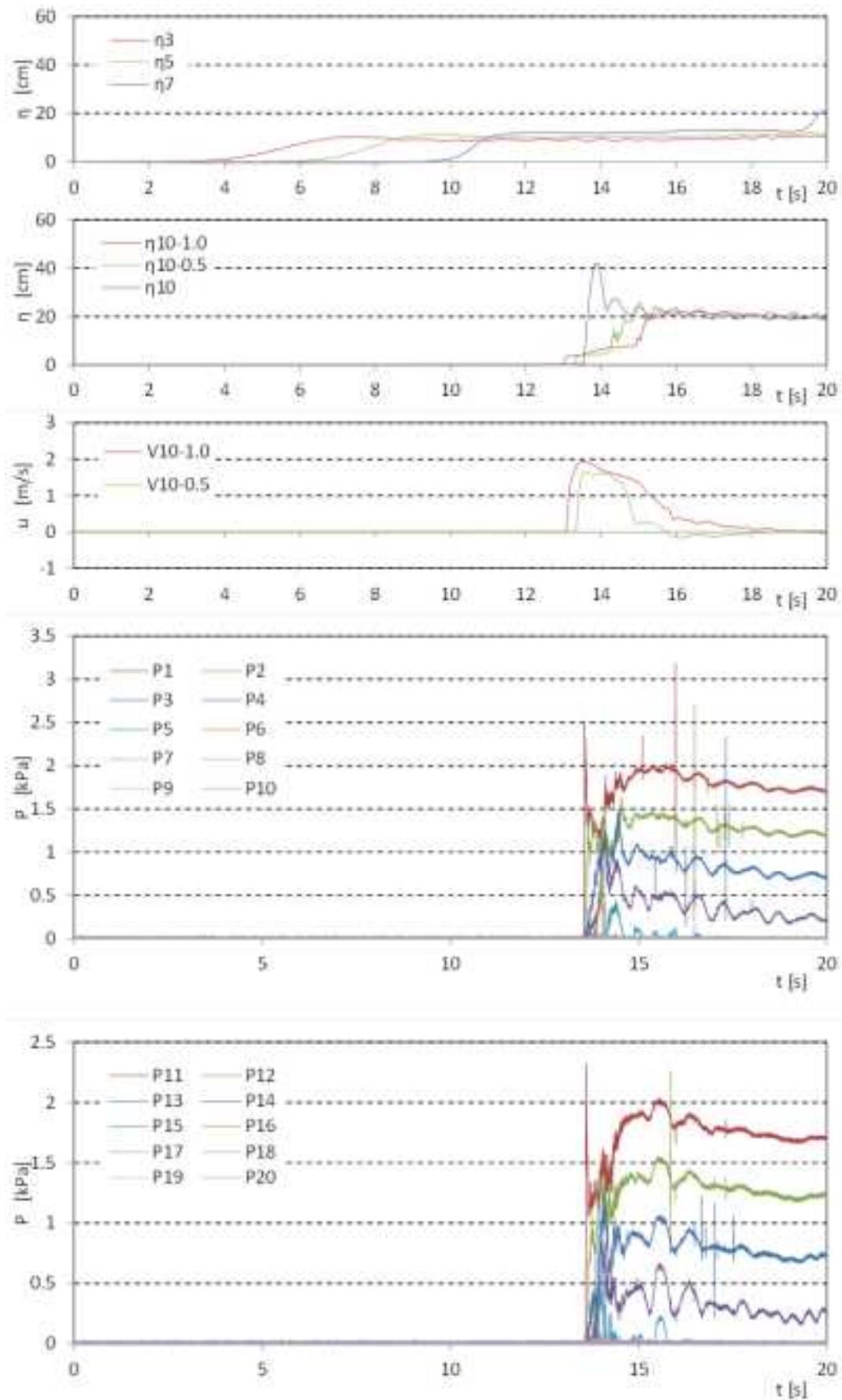


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W11)

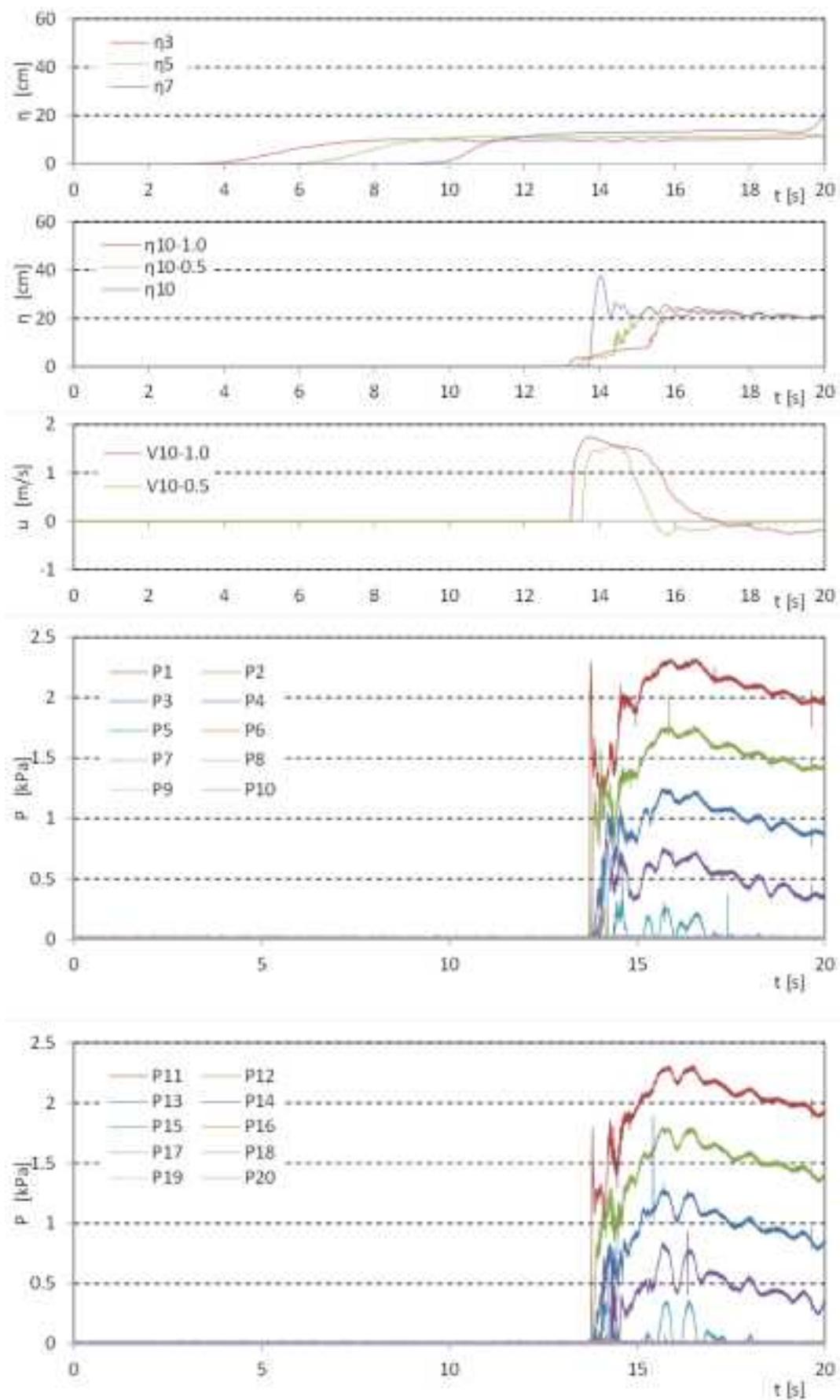


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W12)

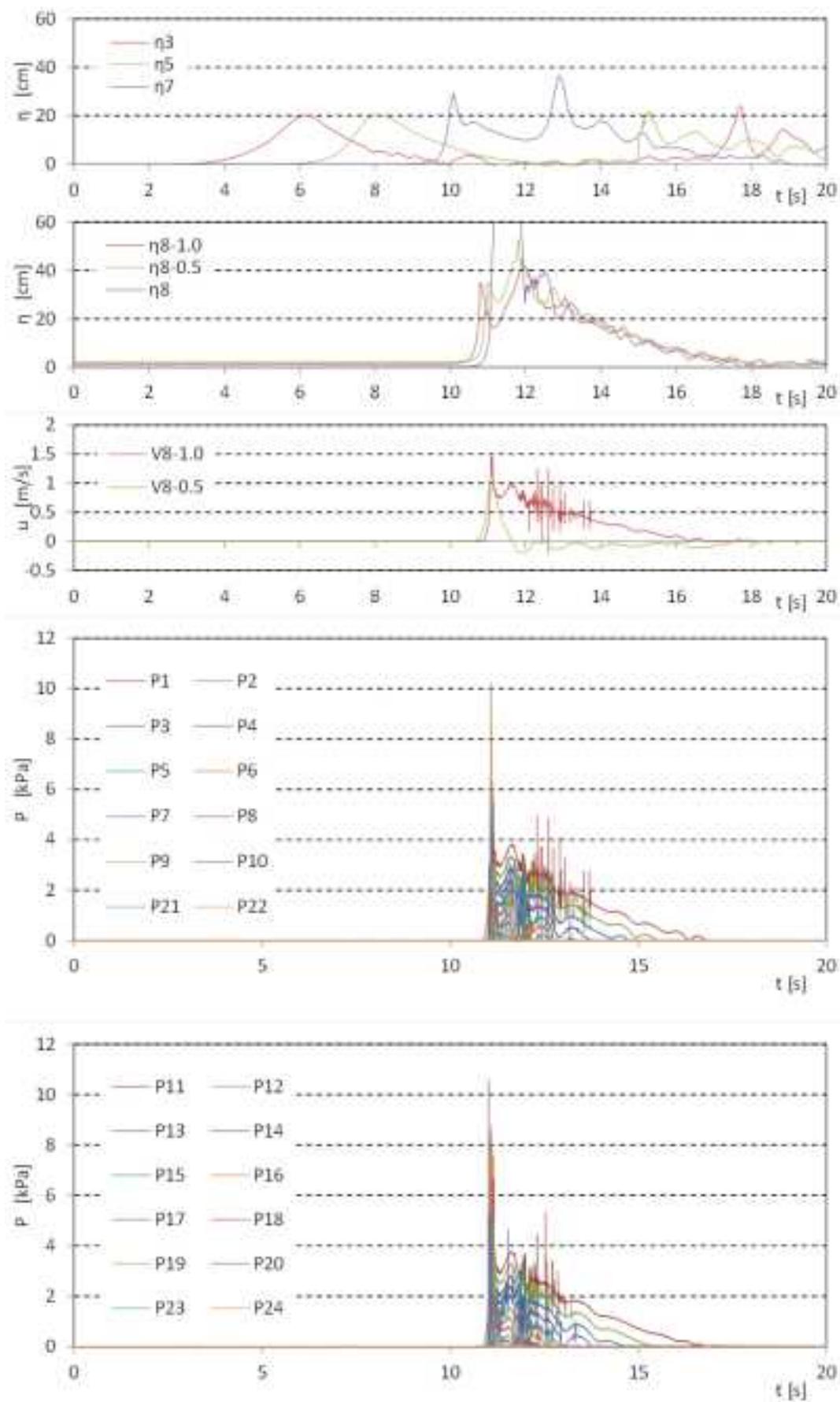


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 0m, W01)

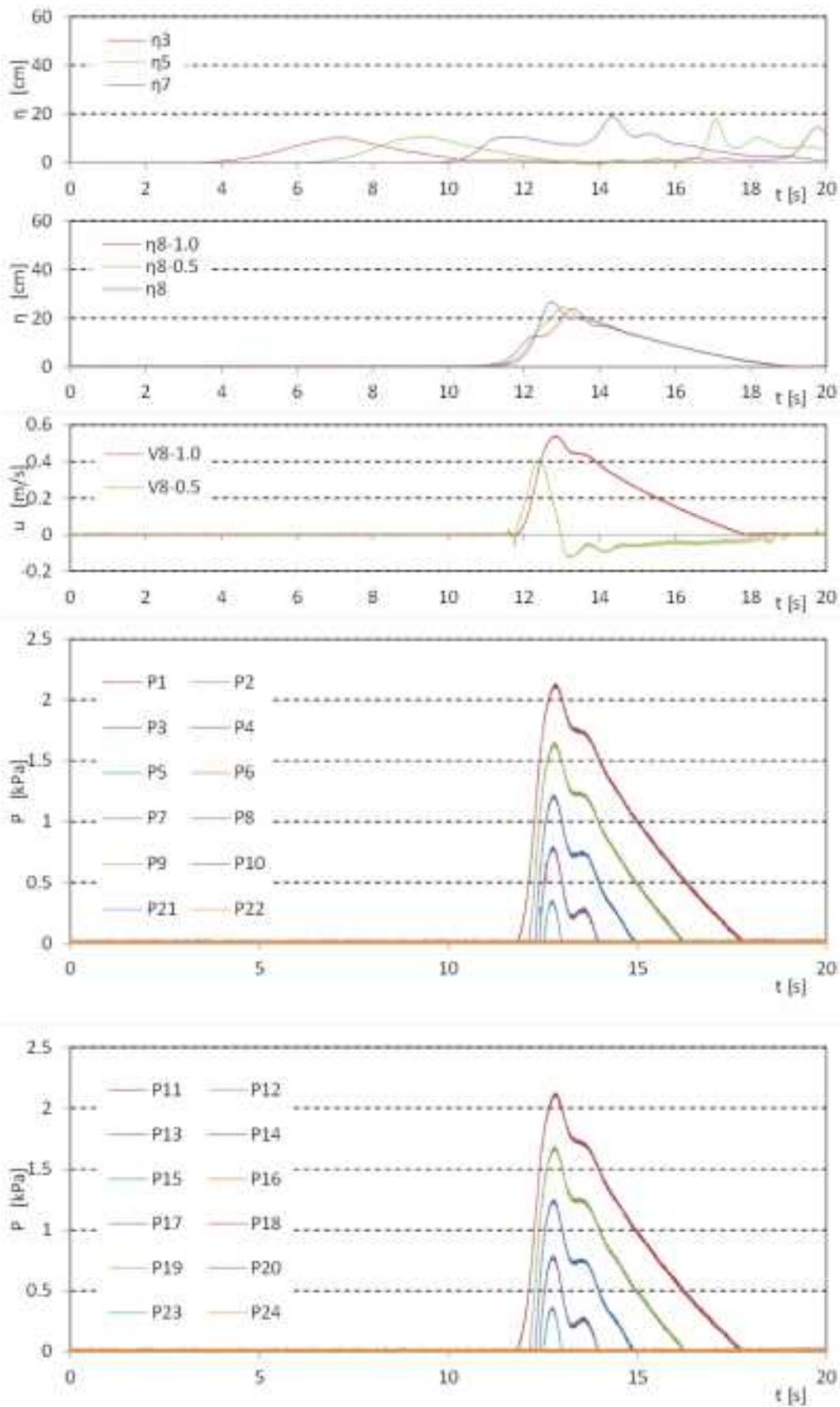


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 0m, W02)

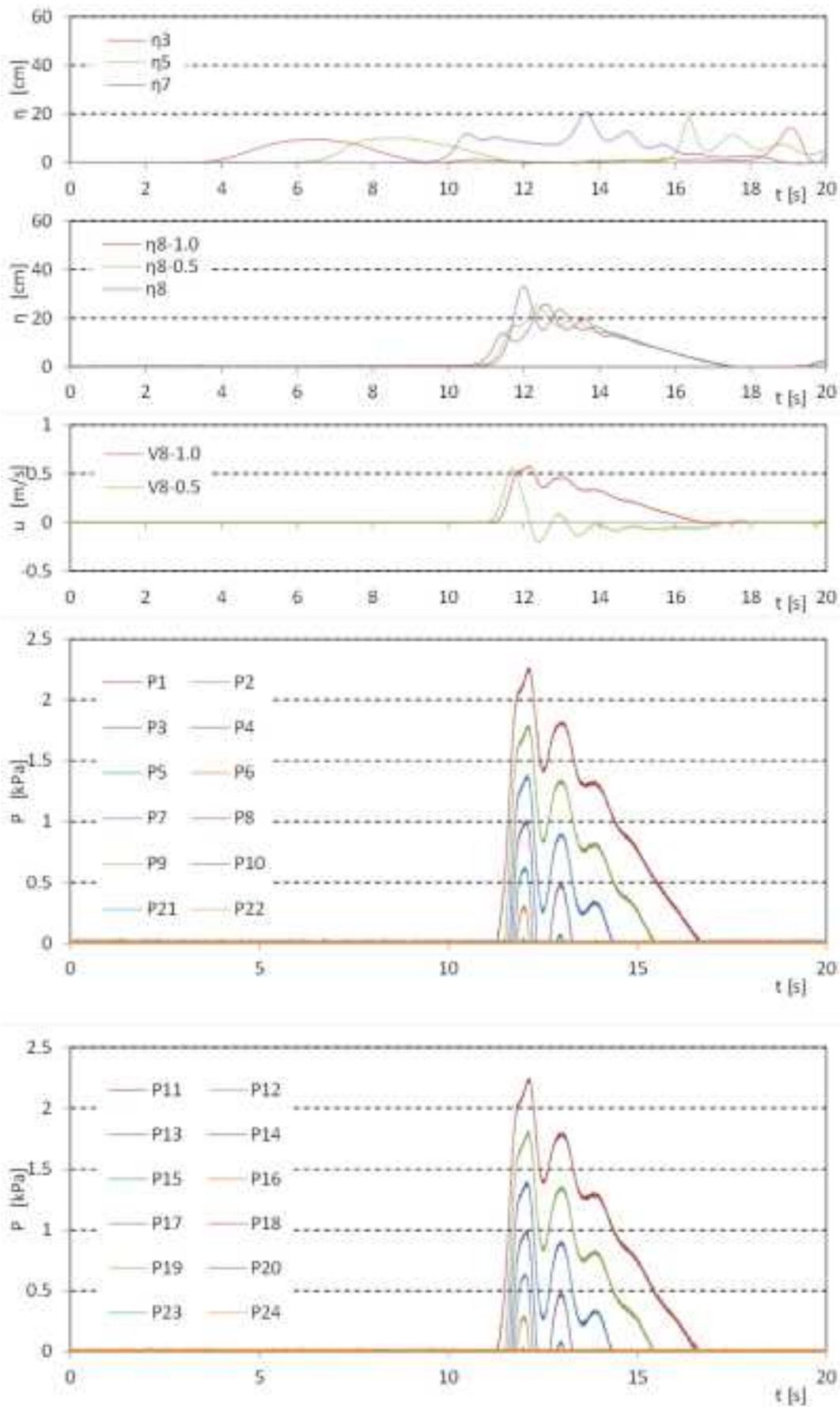


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 0m, W03)

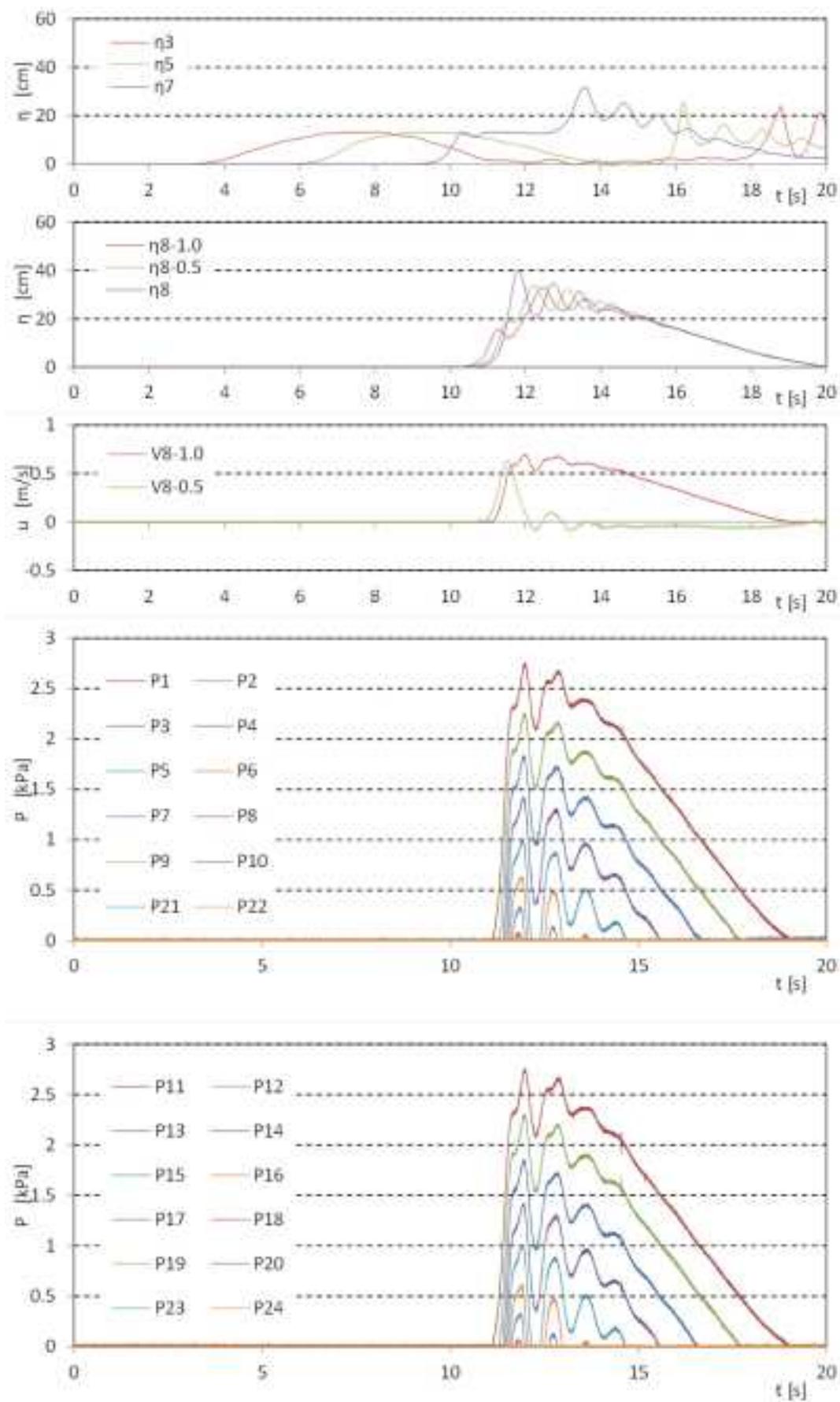


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 0m, W04)

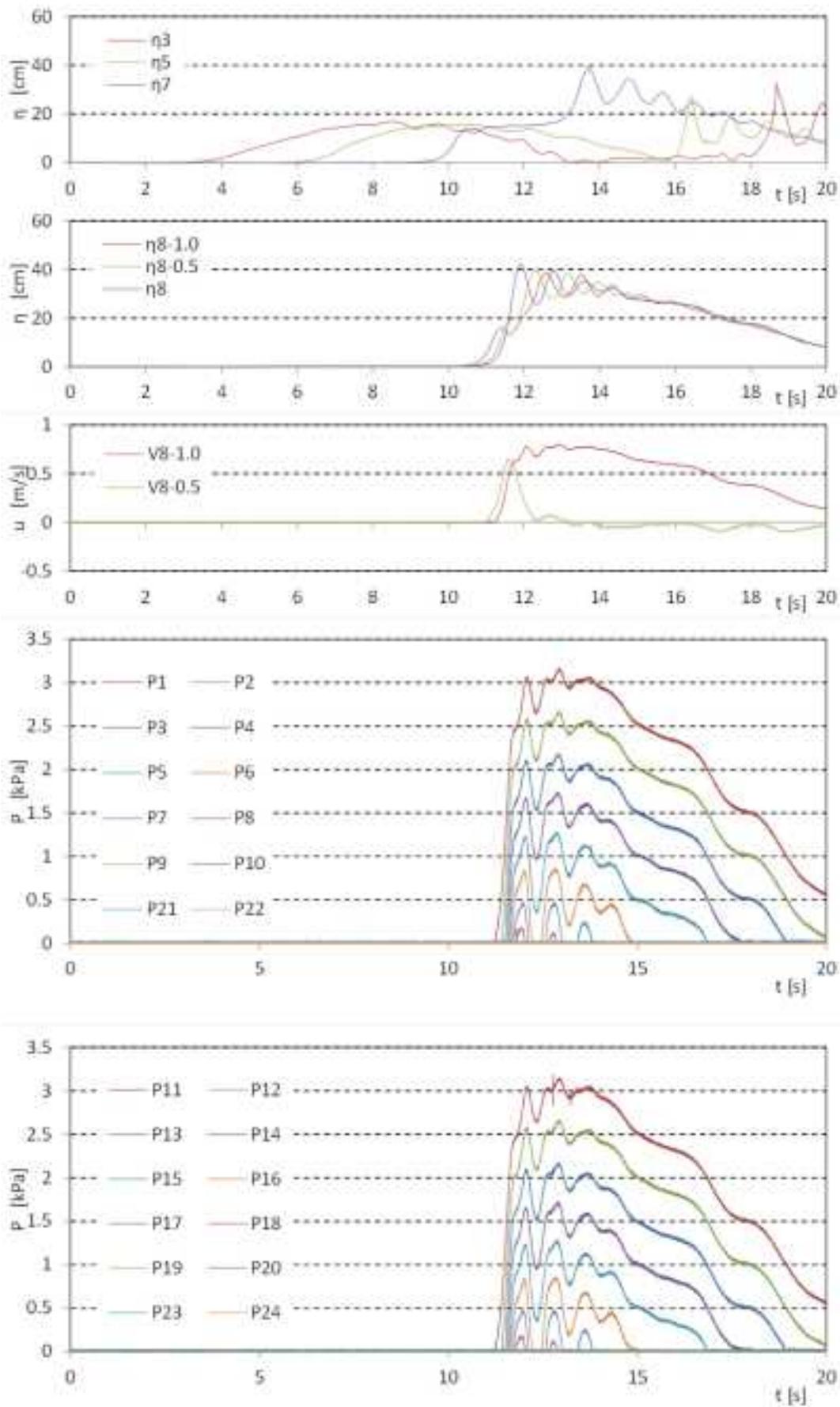


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 0m, W05)

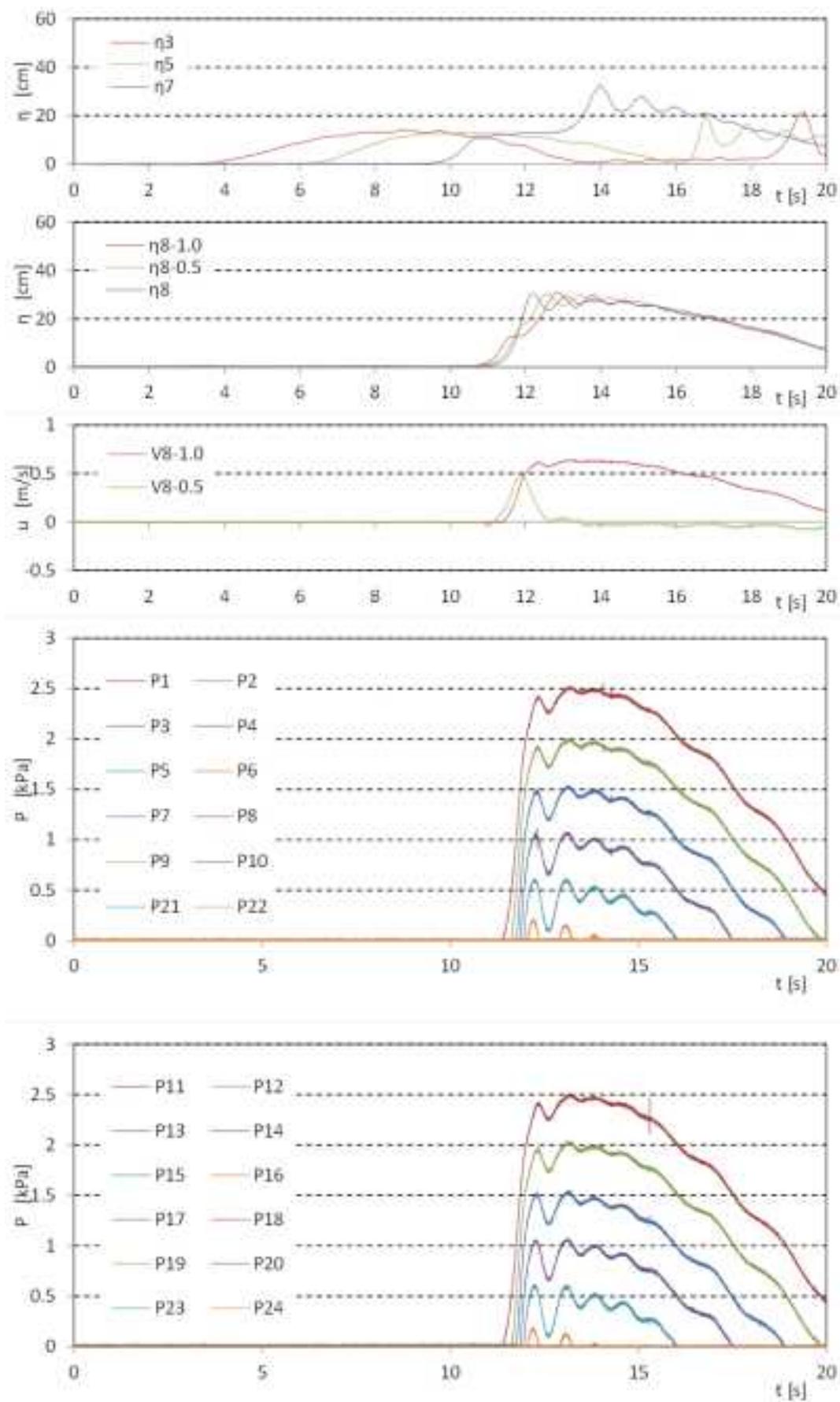


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 0m, W06)

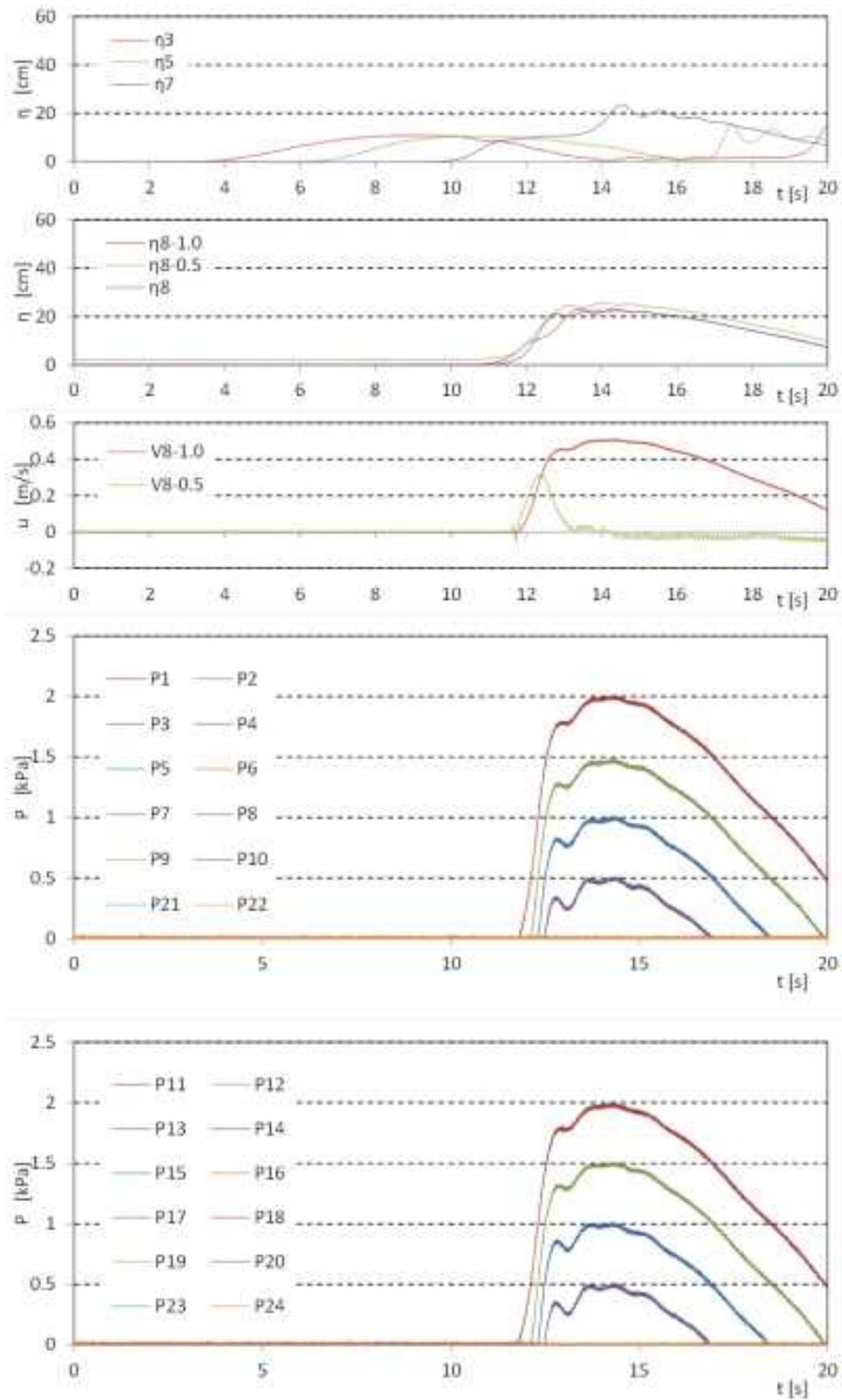


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 0m, W07)

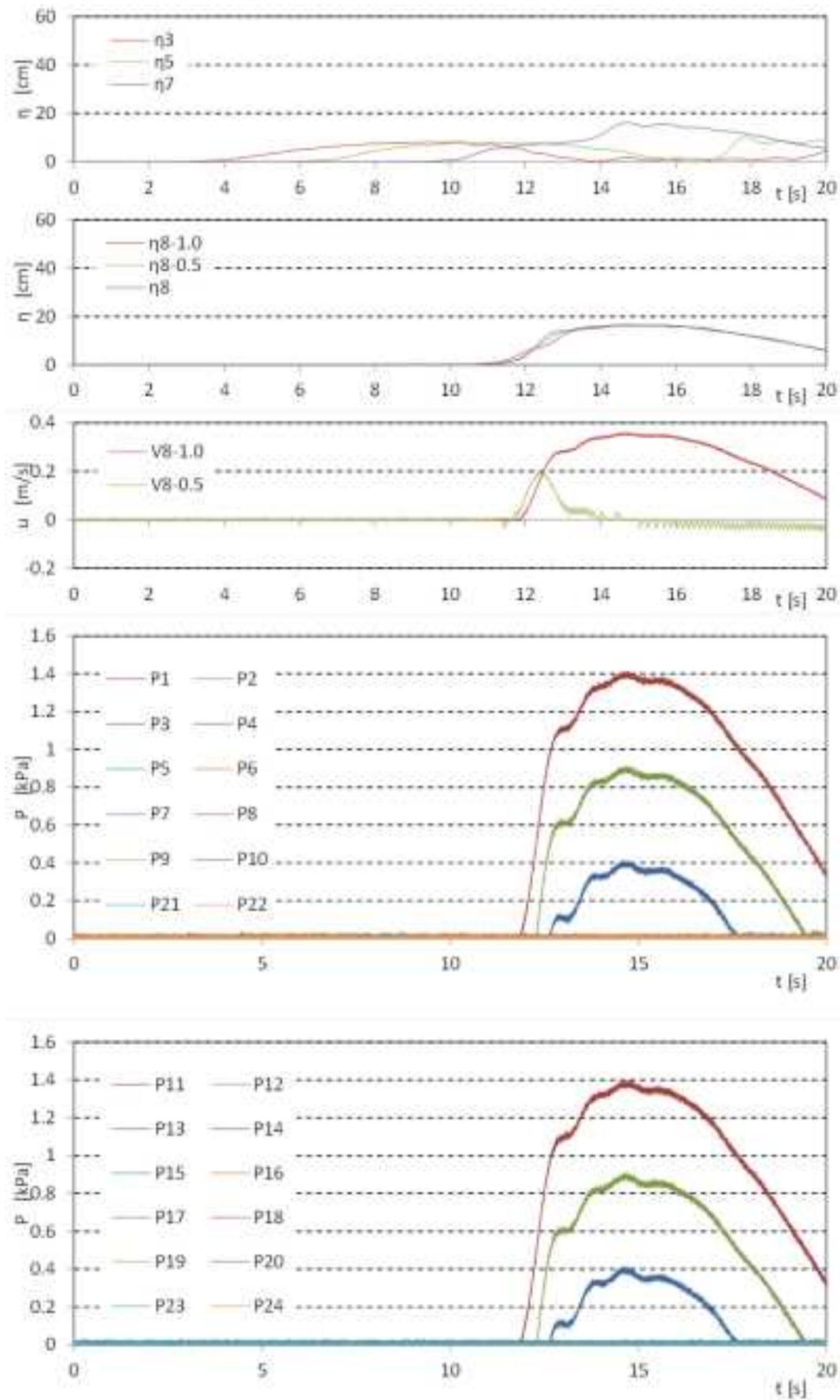


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 0m, W08)

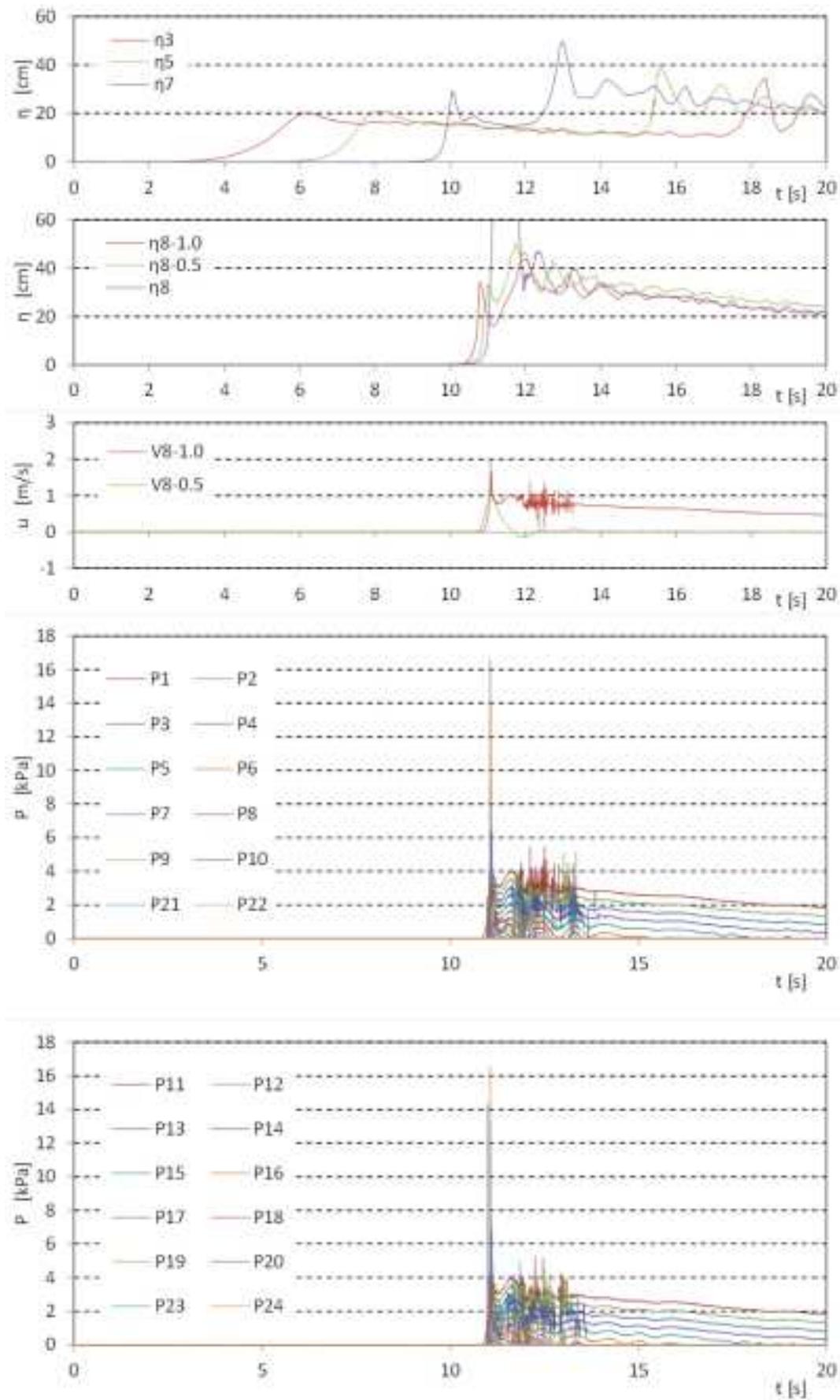


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 0m, W09)

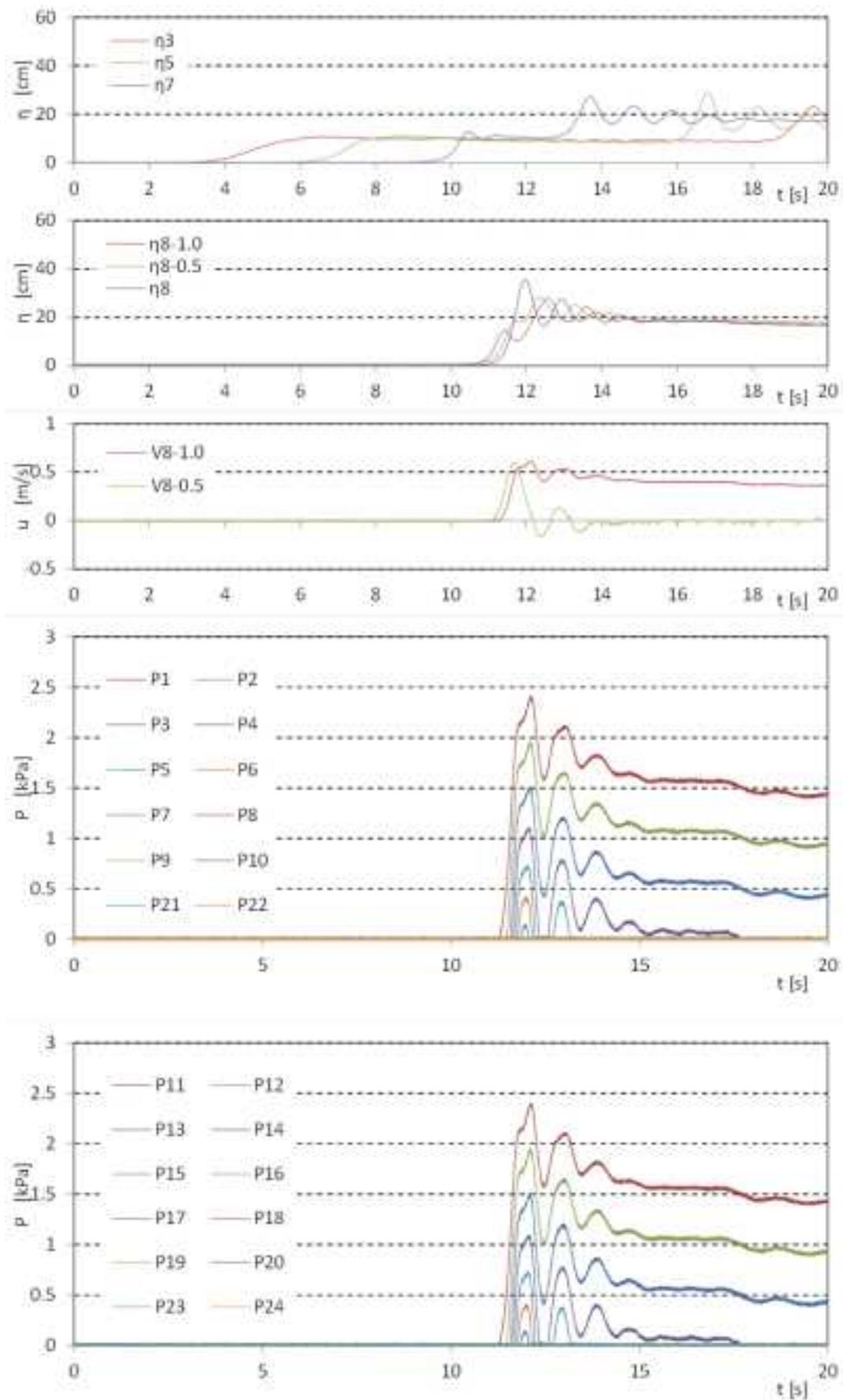


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 0m, W10)

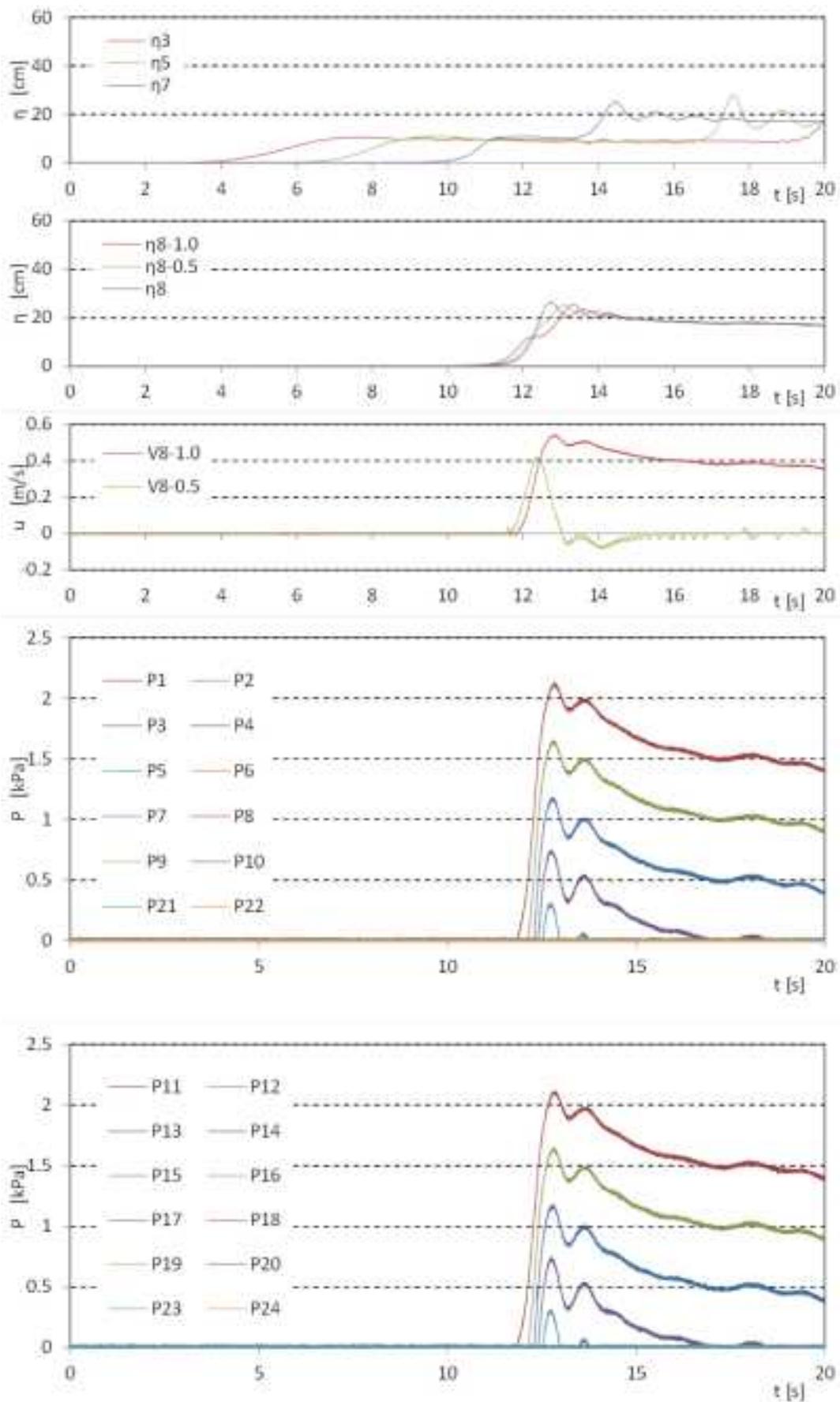


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 0m, W11)

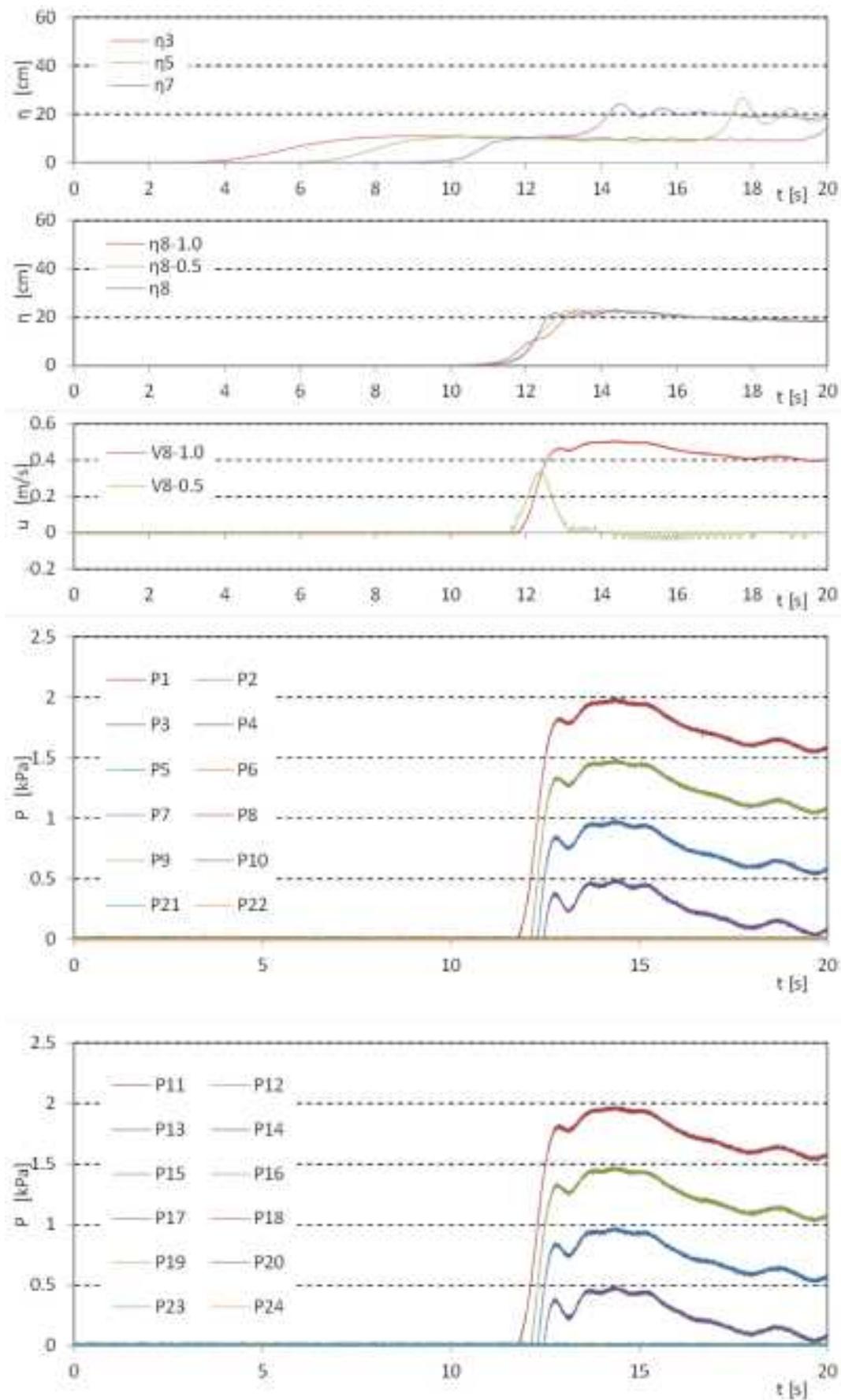


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 0m, W12)

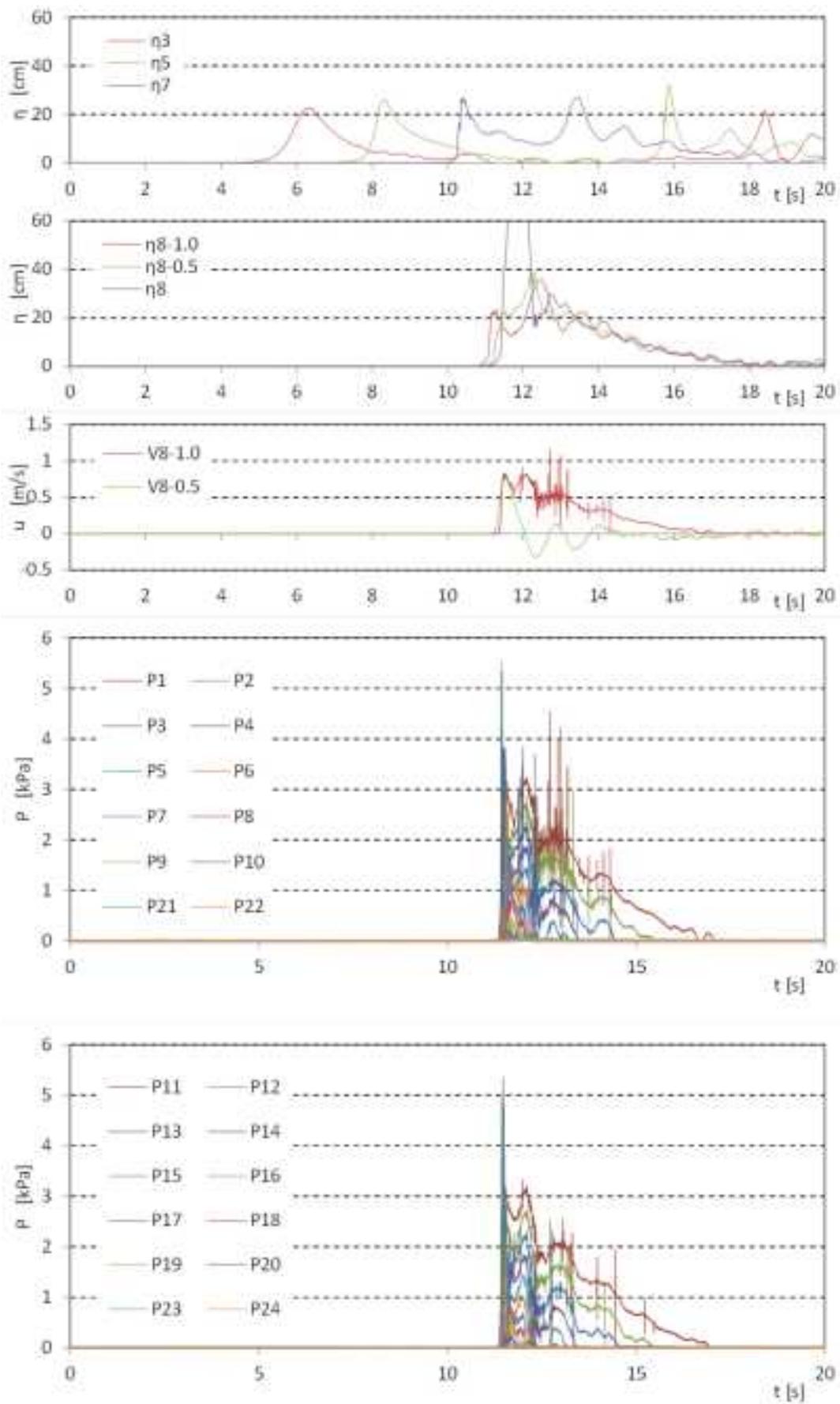


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 0m, W13)

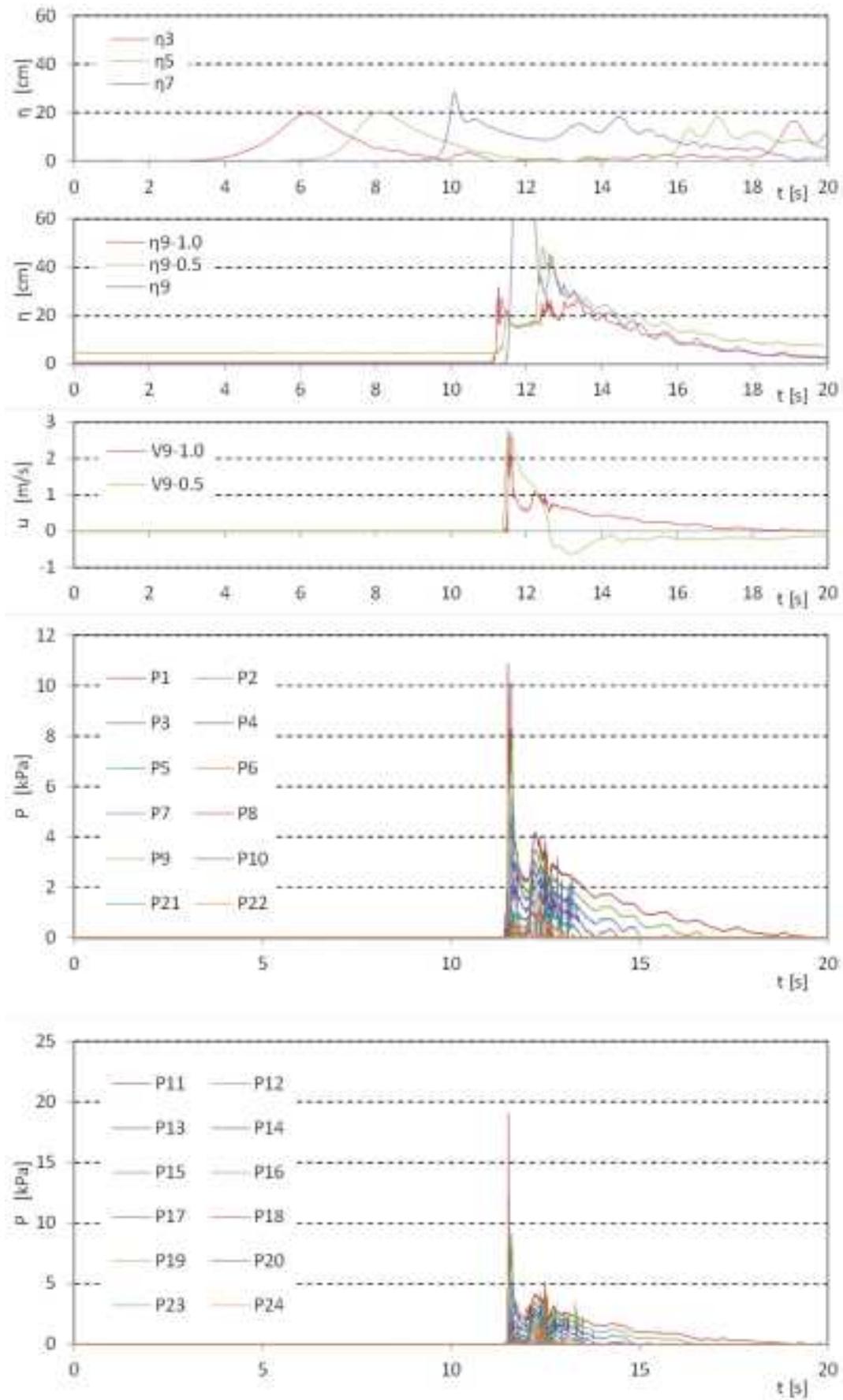


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 1.25m, W01)

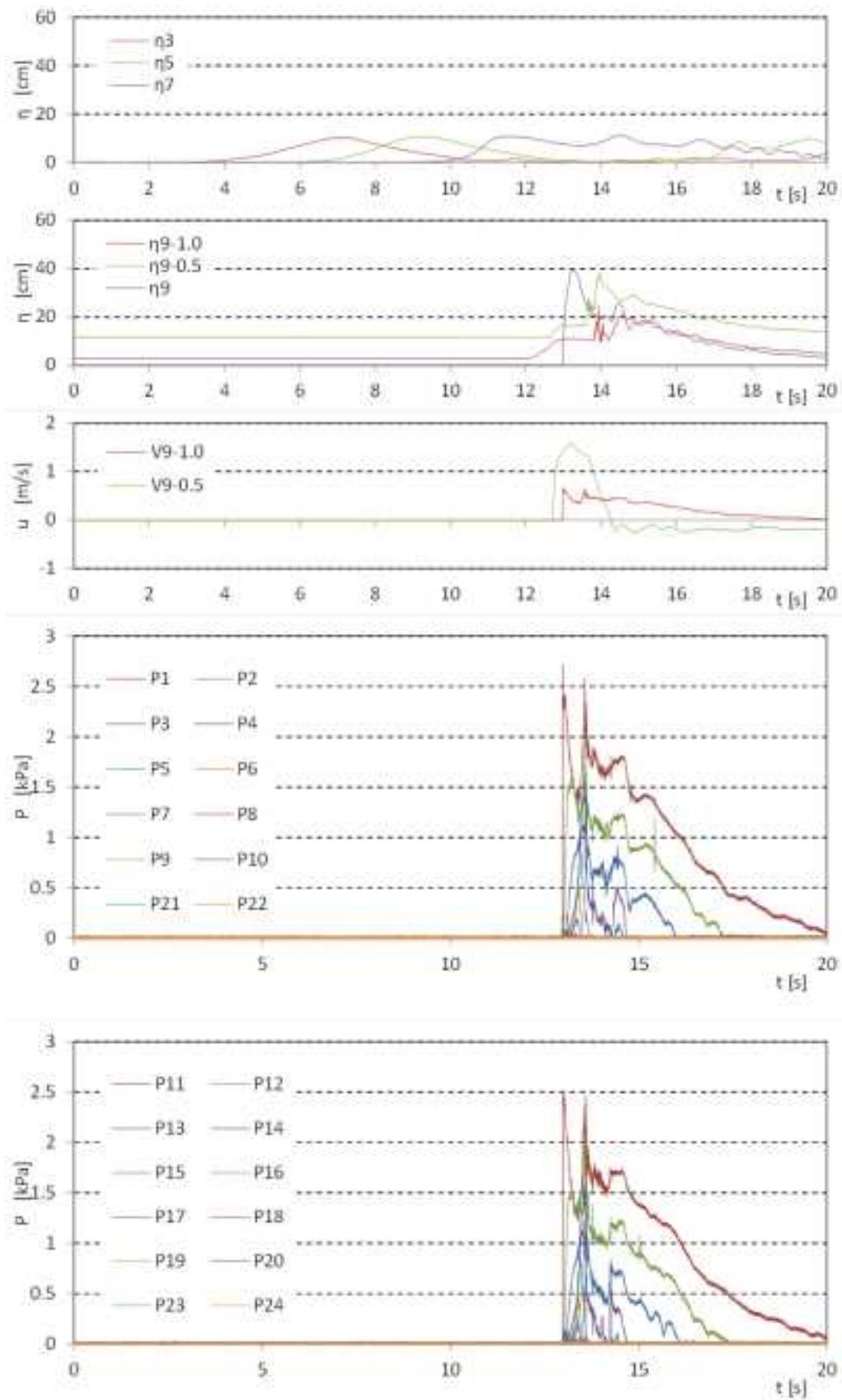


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果（直立護岸，設置位置 1.25m，W02）

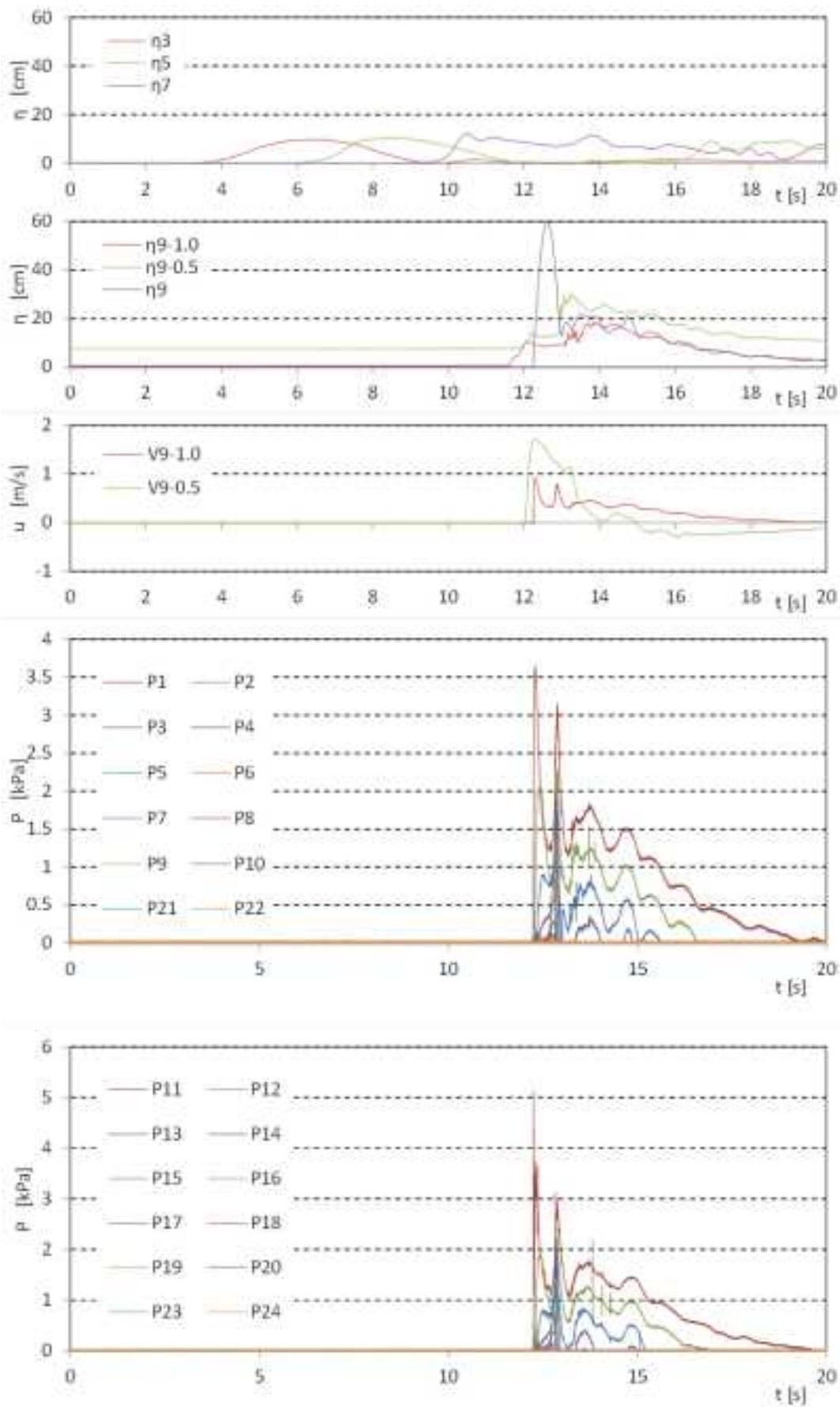


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果（直立護岸，設置位置 1.25m，W03）

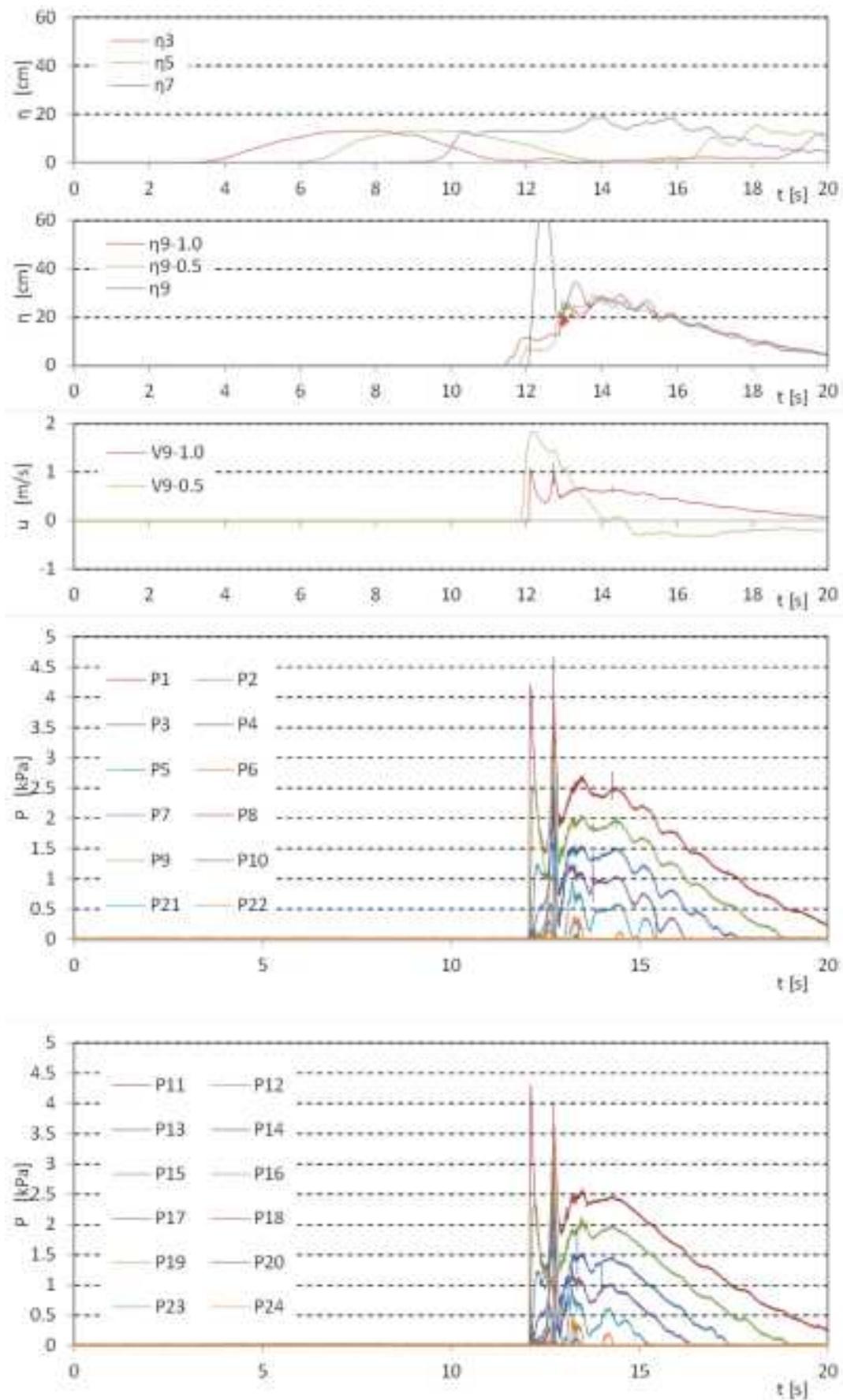


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 1.25m, W04)

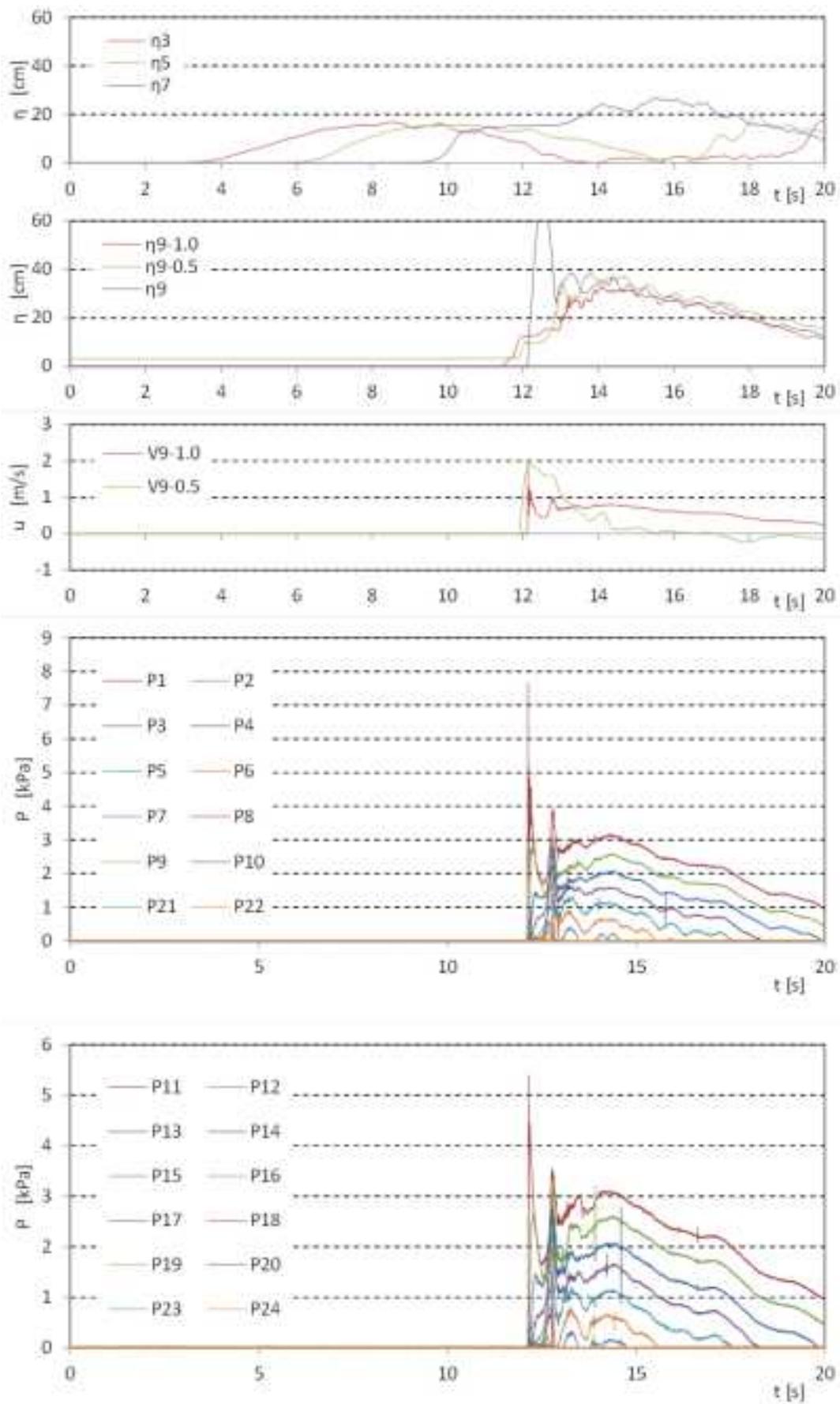


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果（直立護岸，設置位置 1.25m，W05）

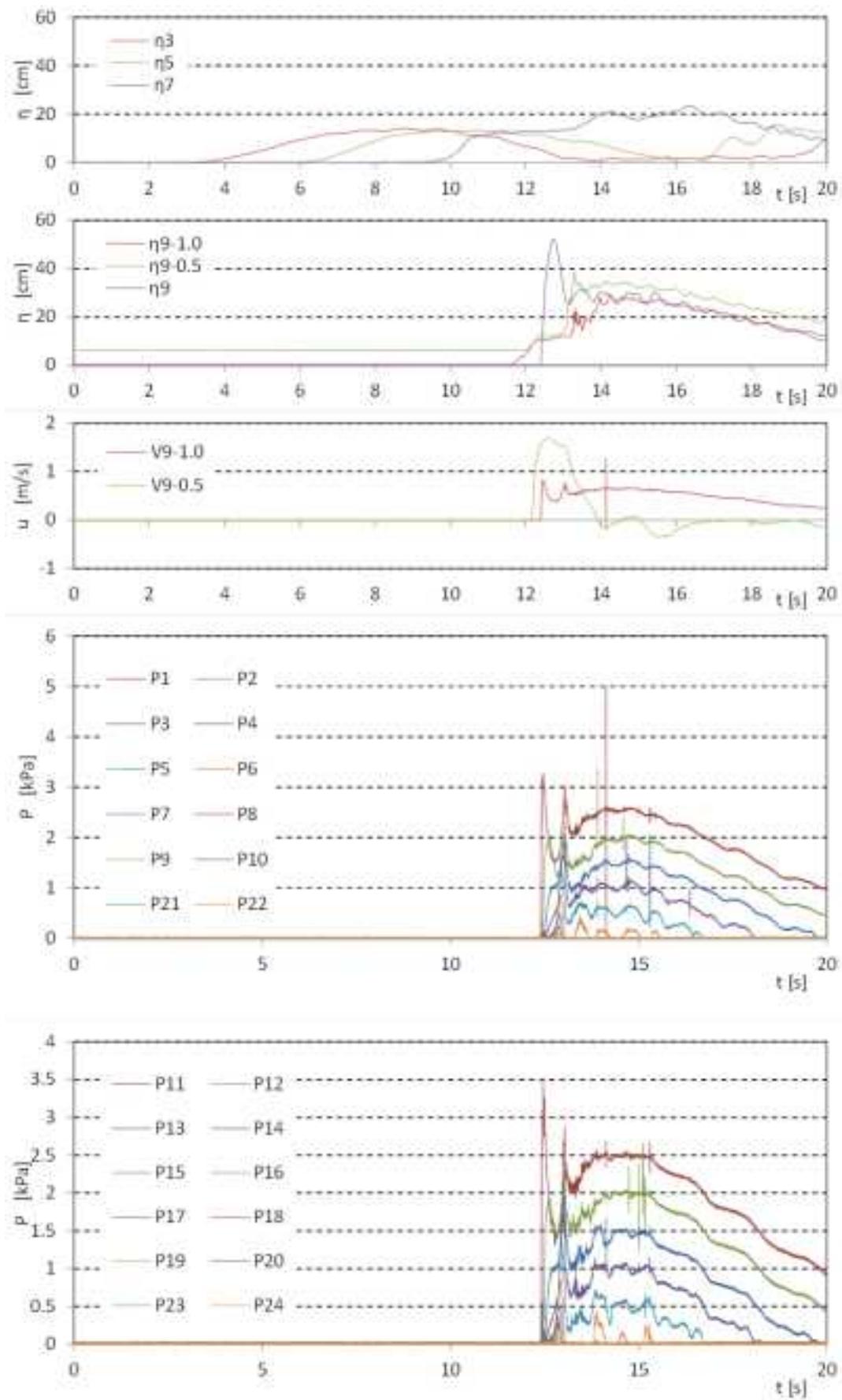


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 1.25m, W06)

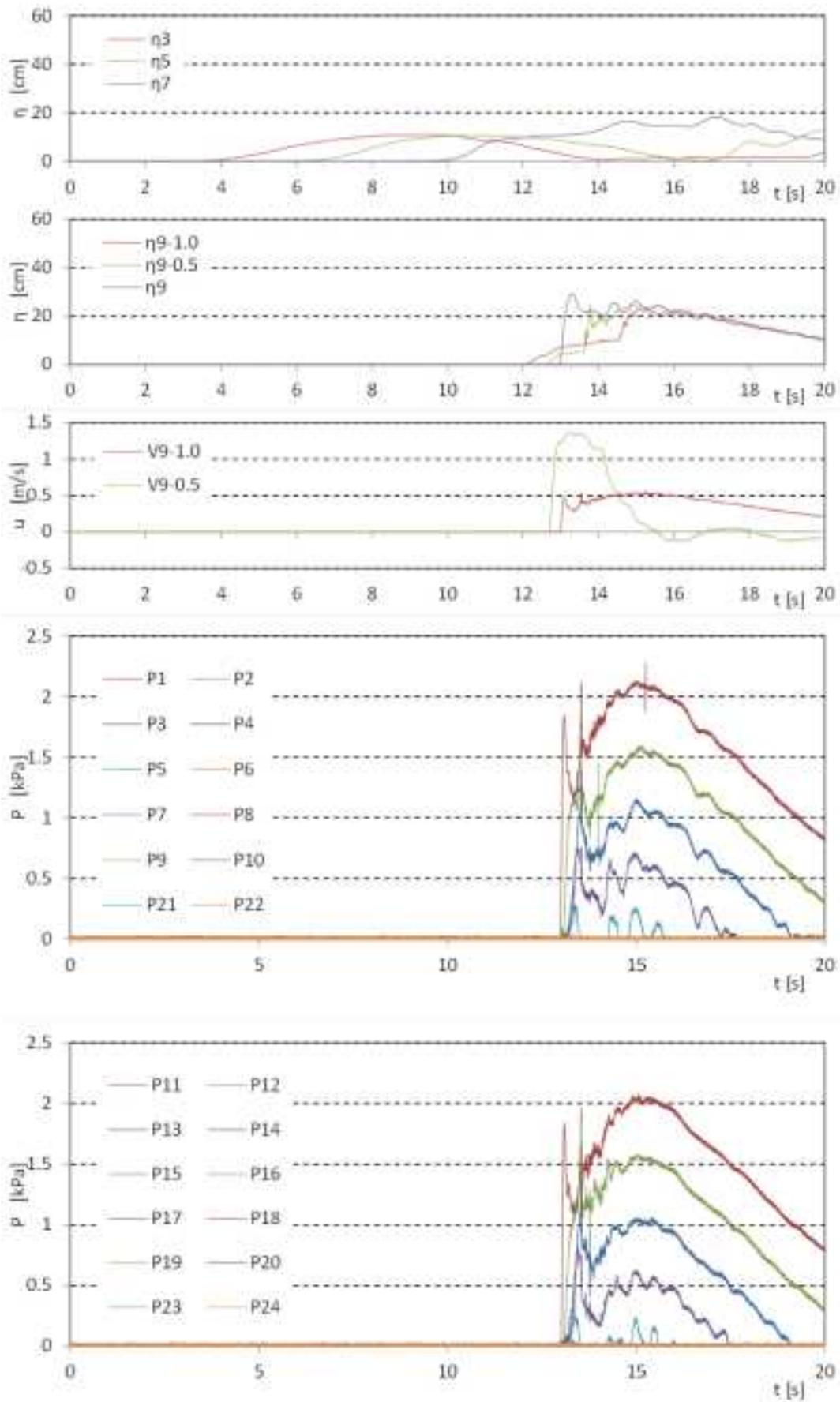


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果（直立護岸，設置位置 1.25m，W07）

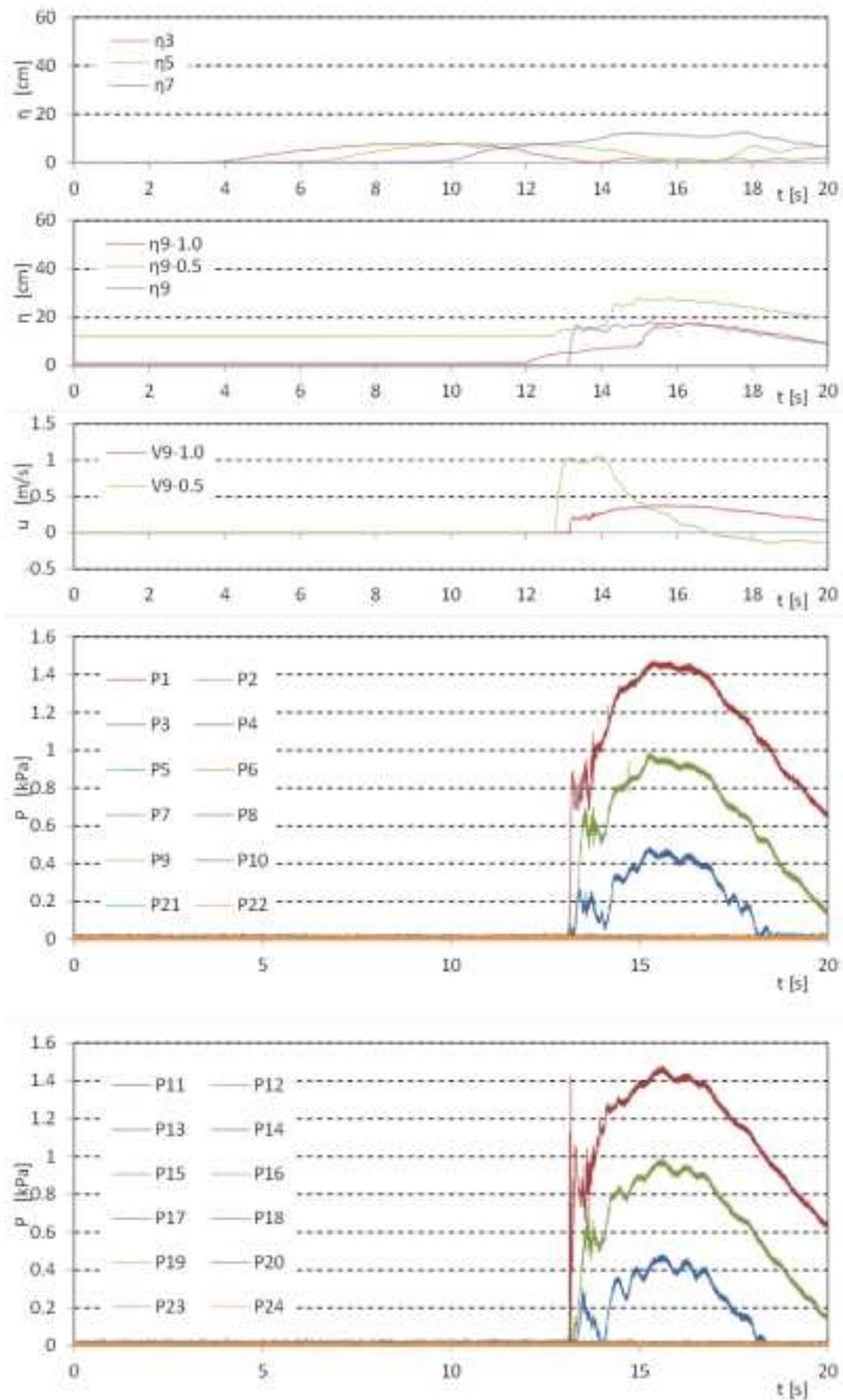


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 1.25m, W08)

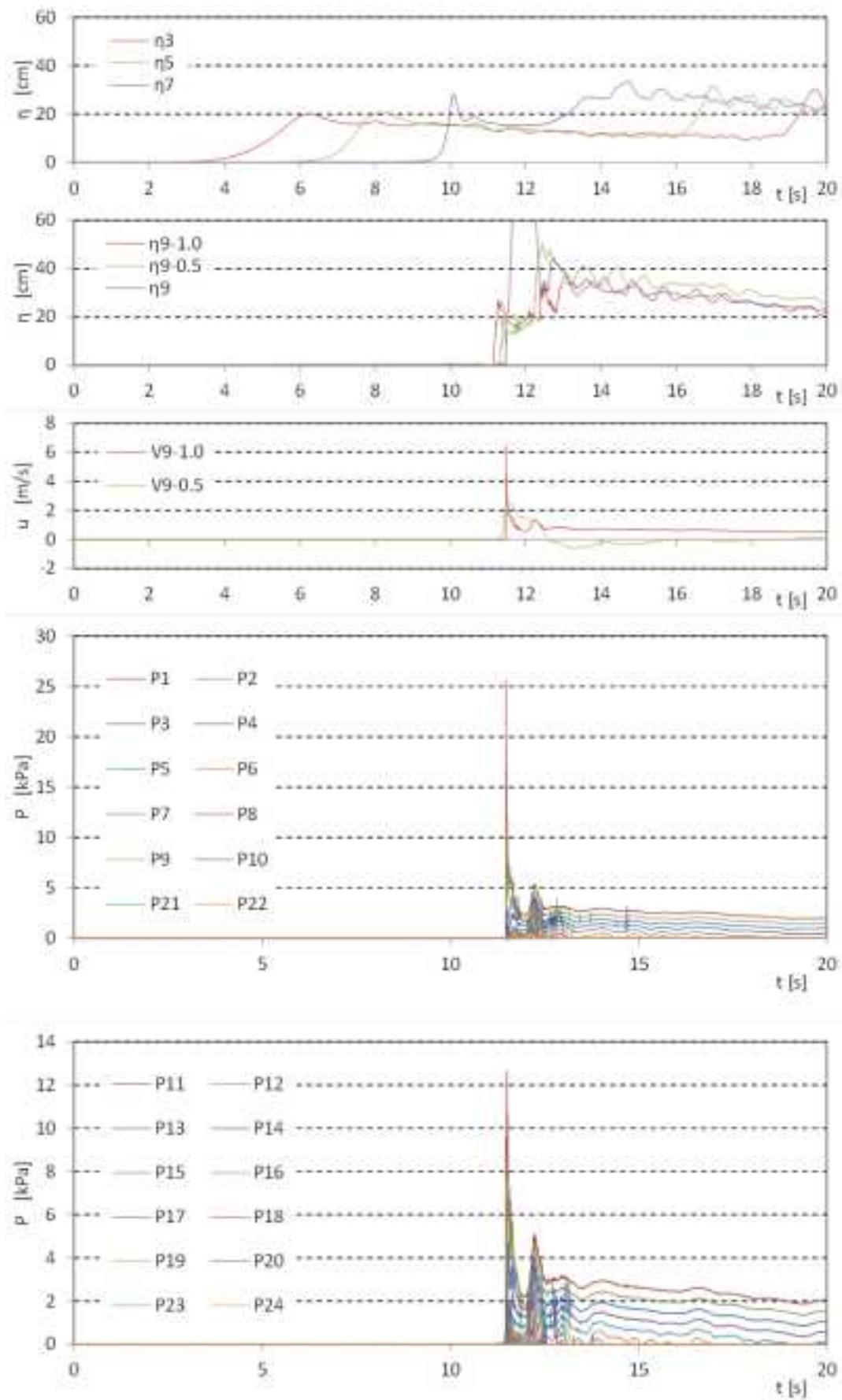


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果（直立護岸，設置位置 1.25m，W09）

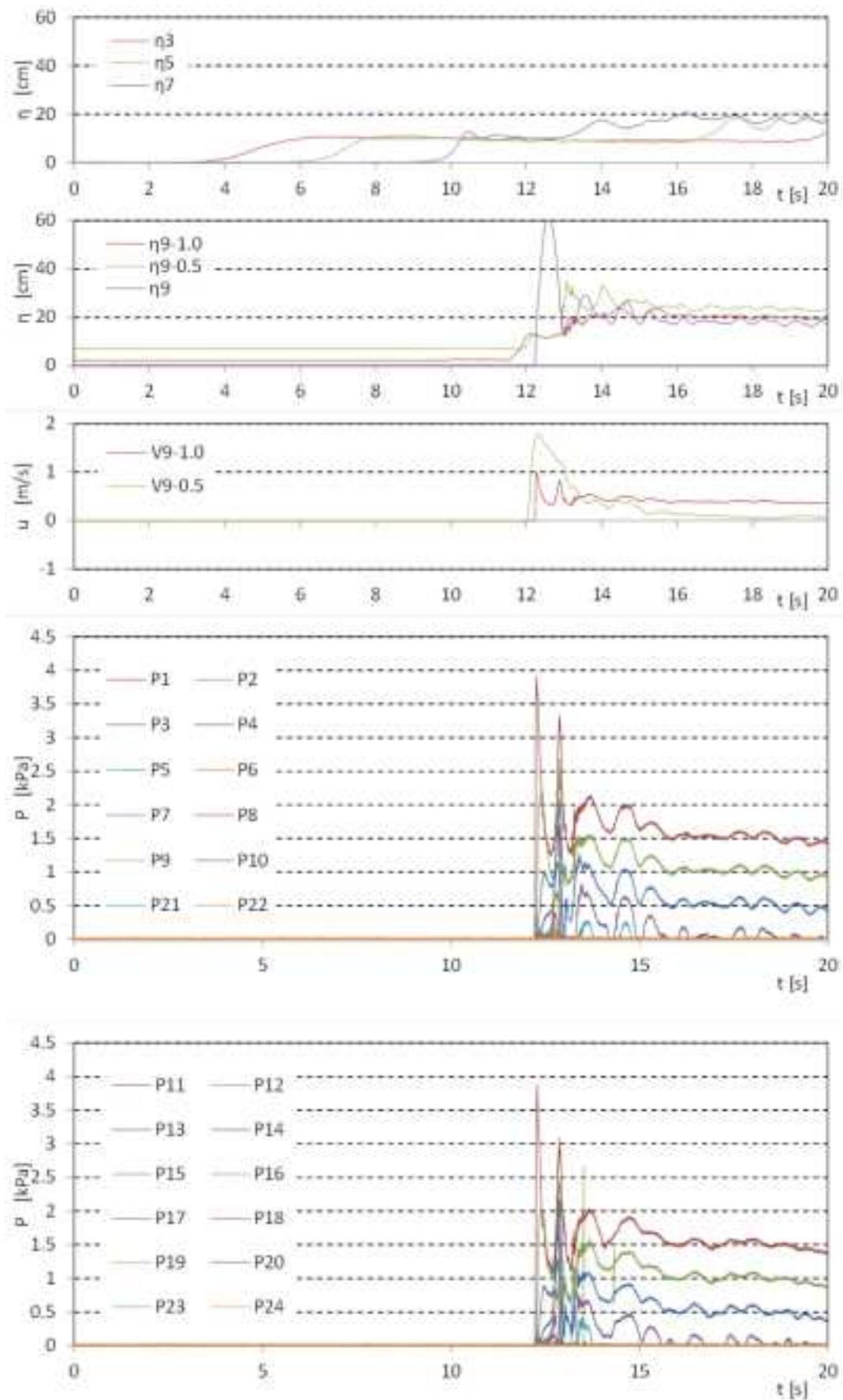


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 1.25m, W10)

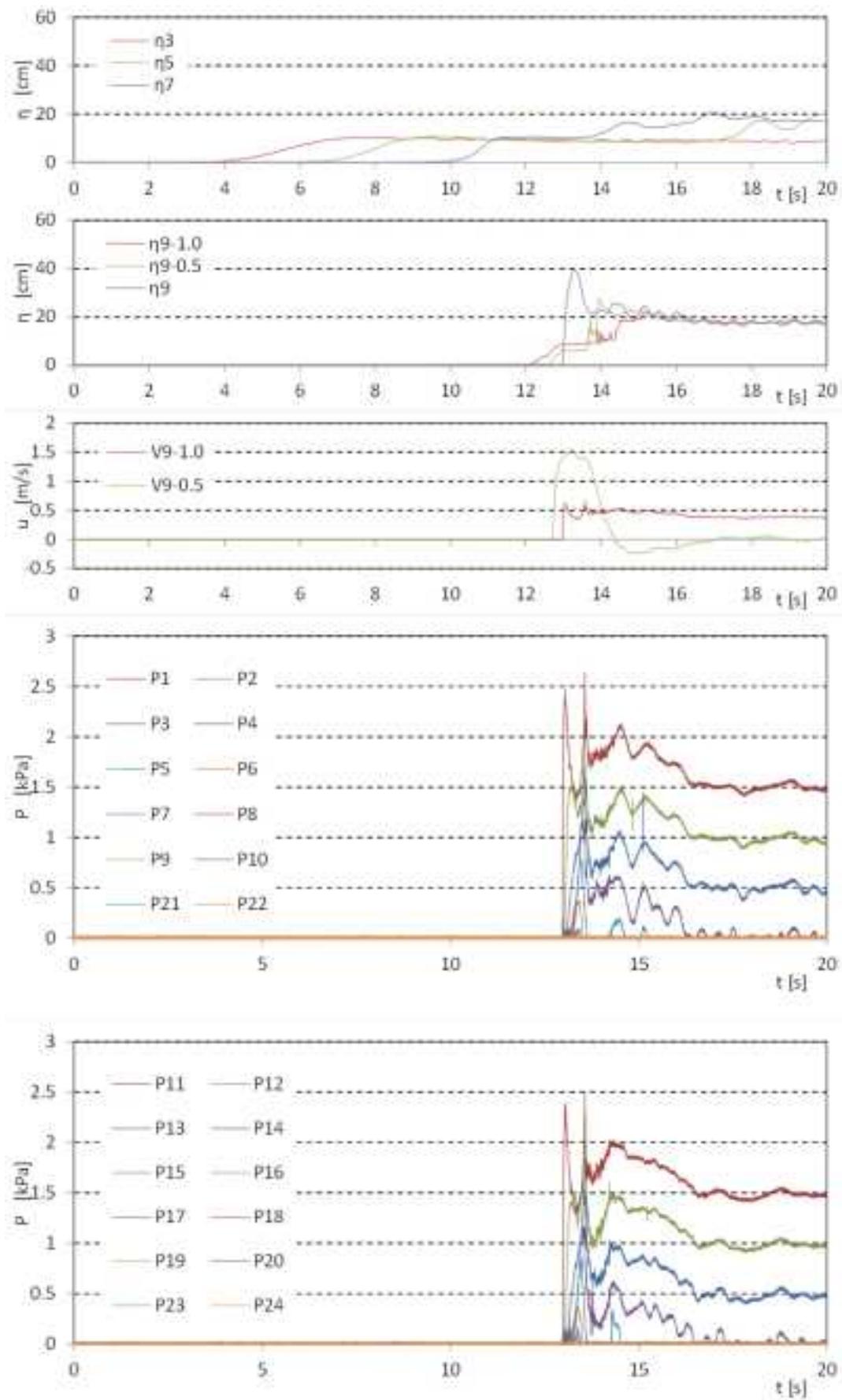


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果（直立護岸，設置位置 1.25m，W11）

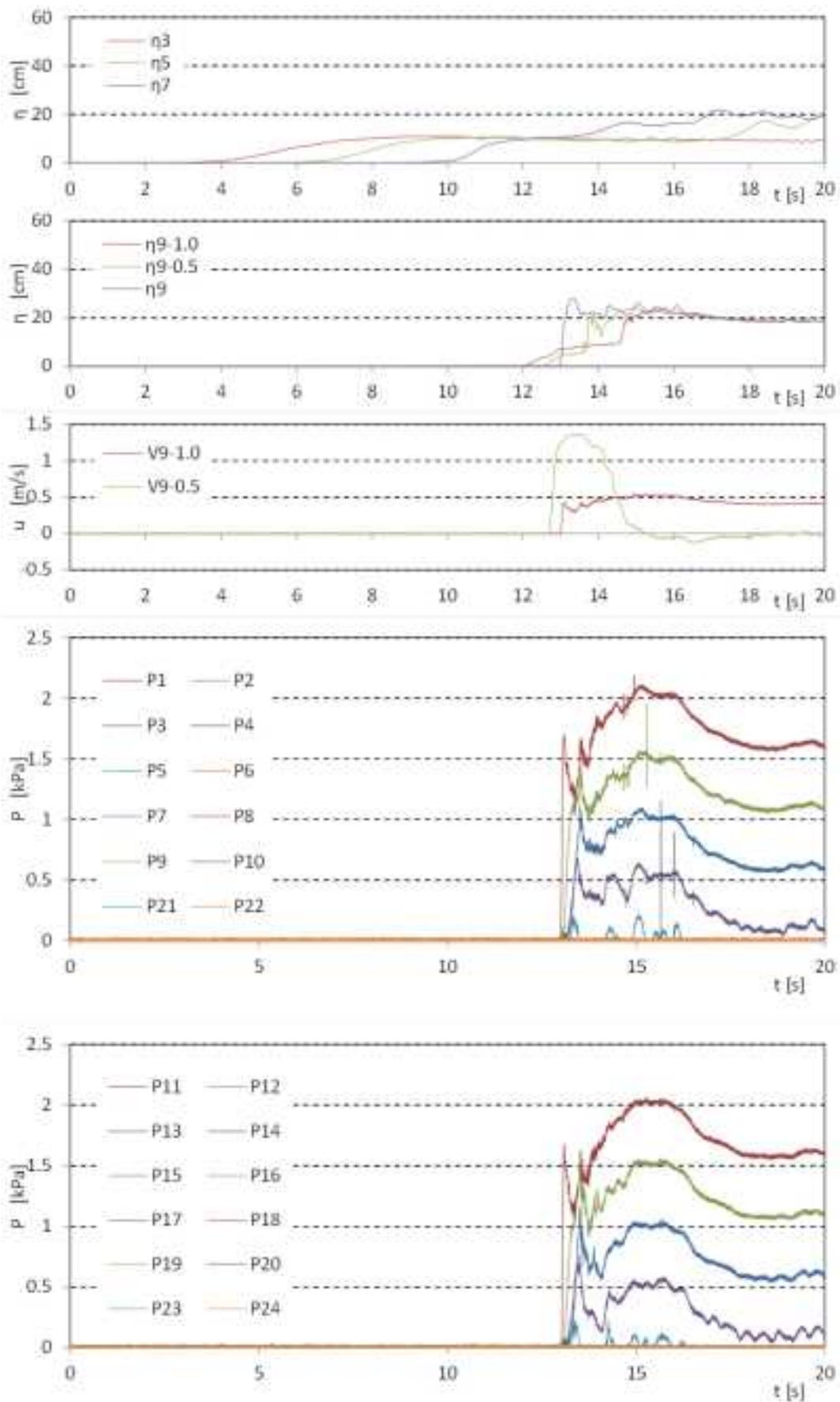


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果（直立護岸，設置位置 1.25m，W12）

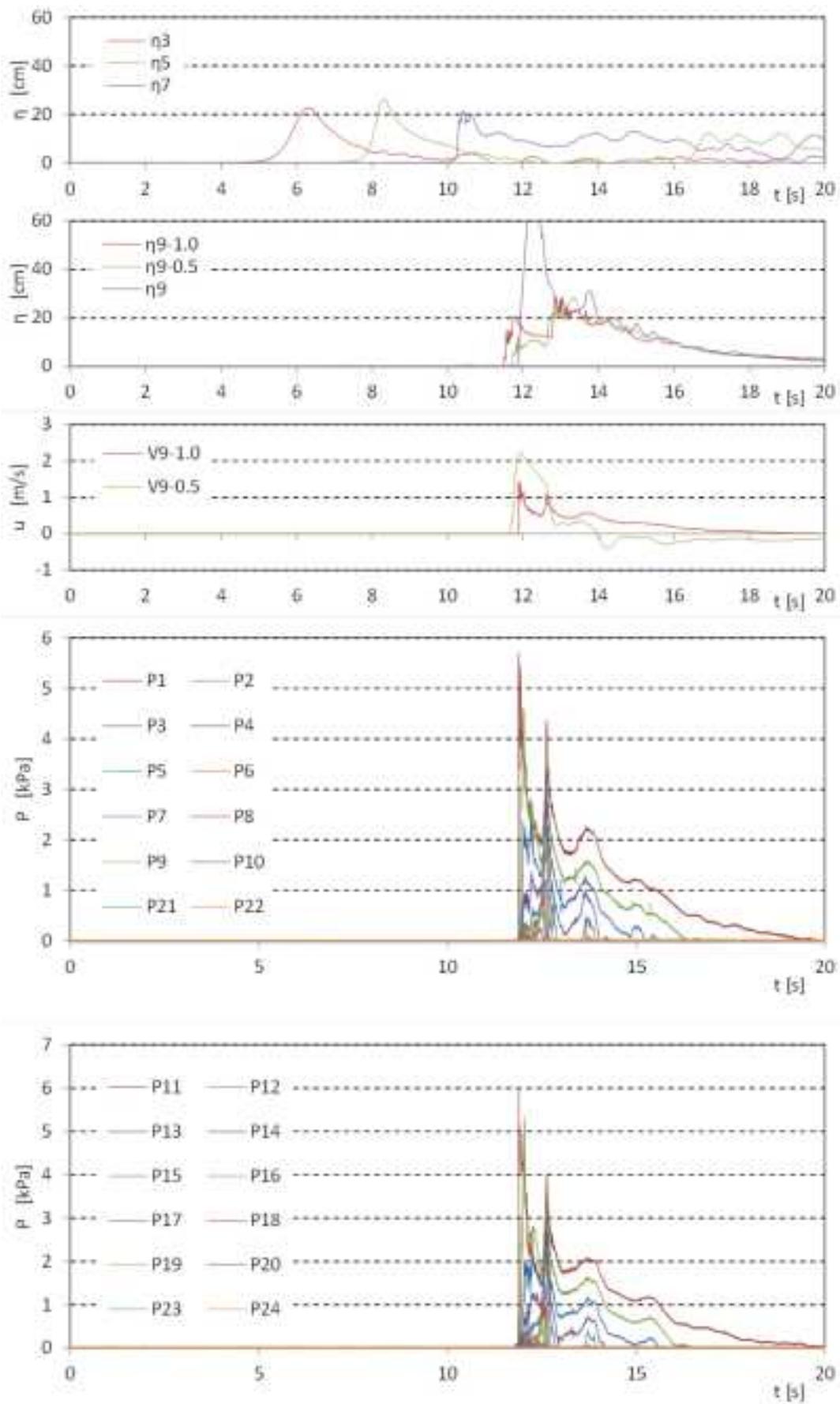


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 1.25m, W13)

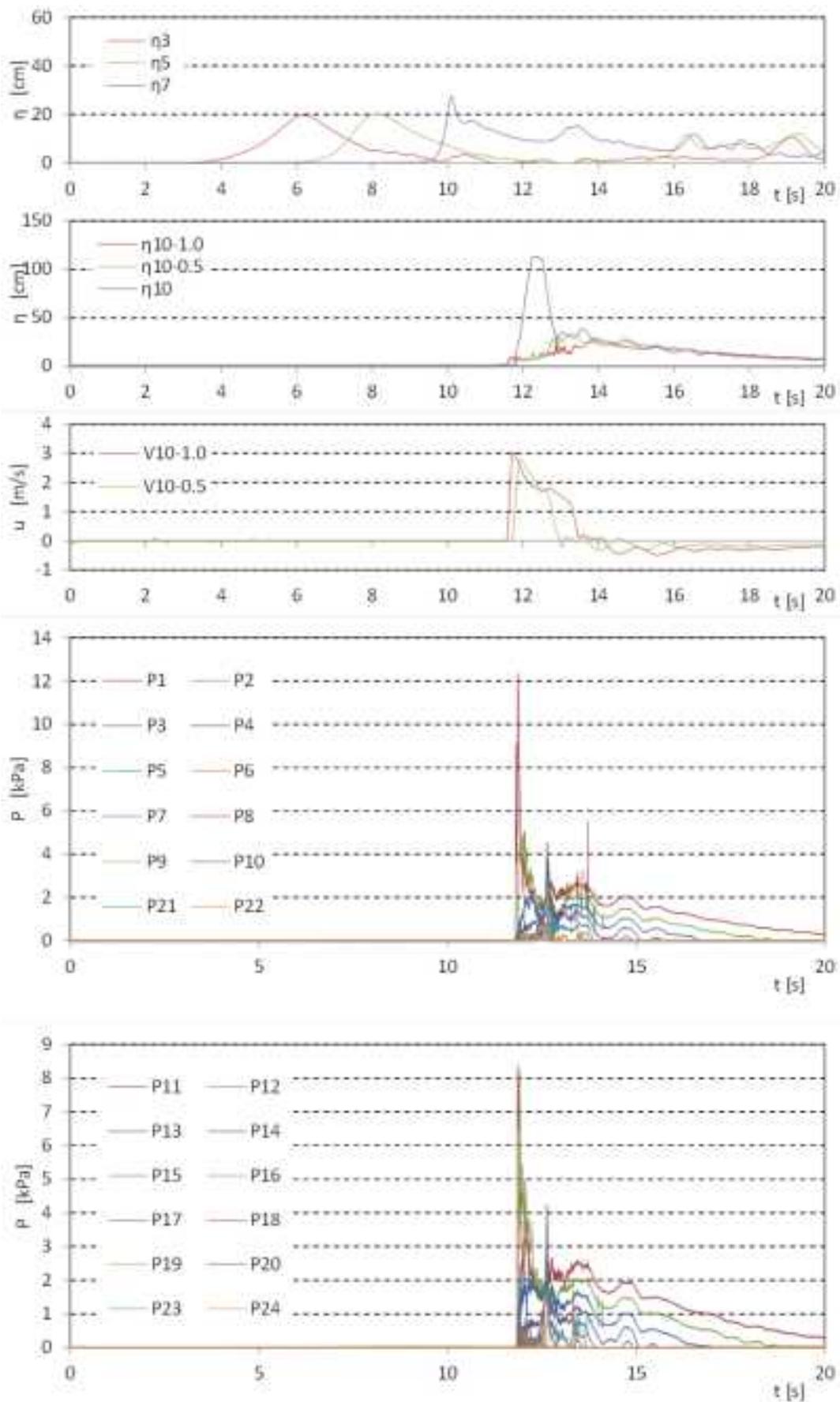


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 2.5m, W01)

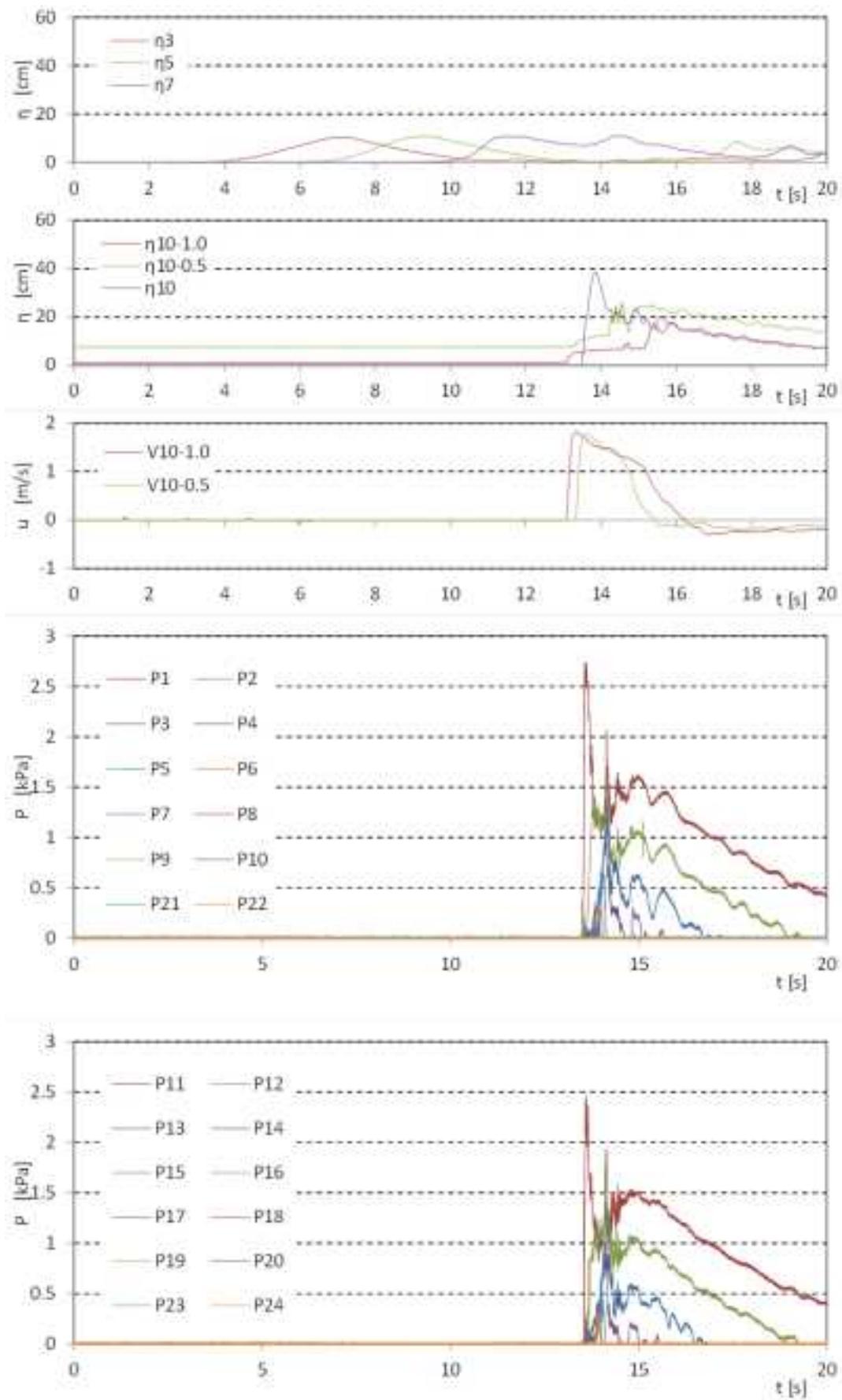


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 2.5m, W02)

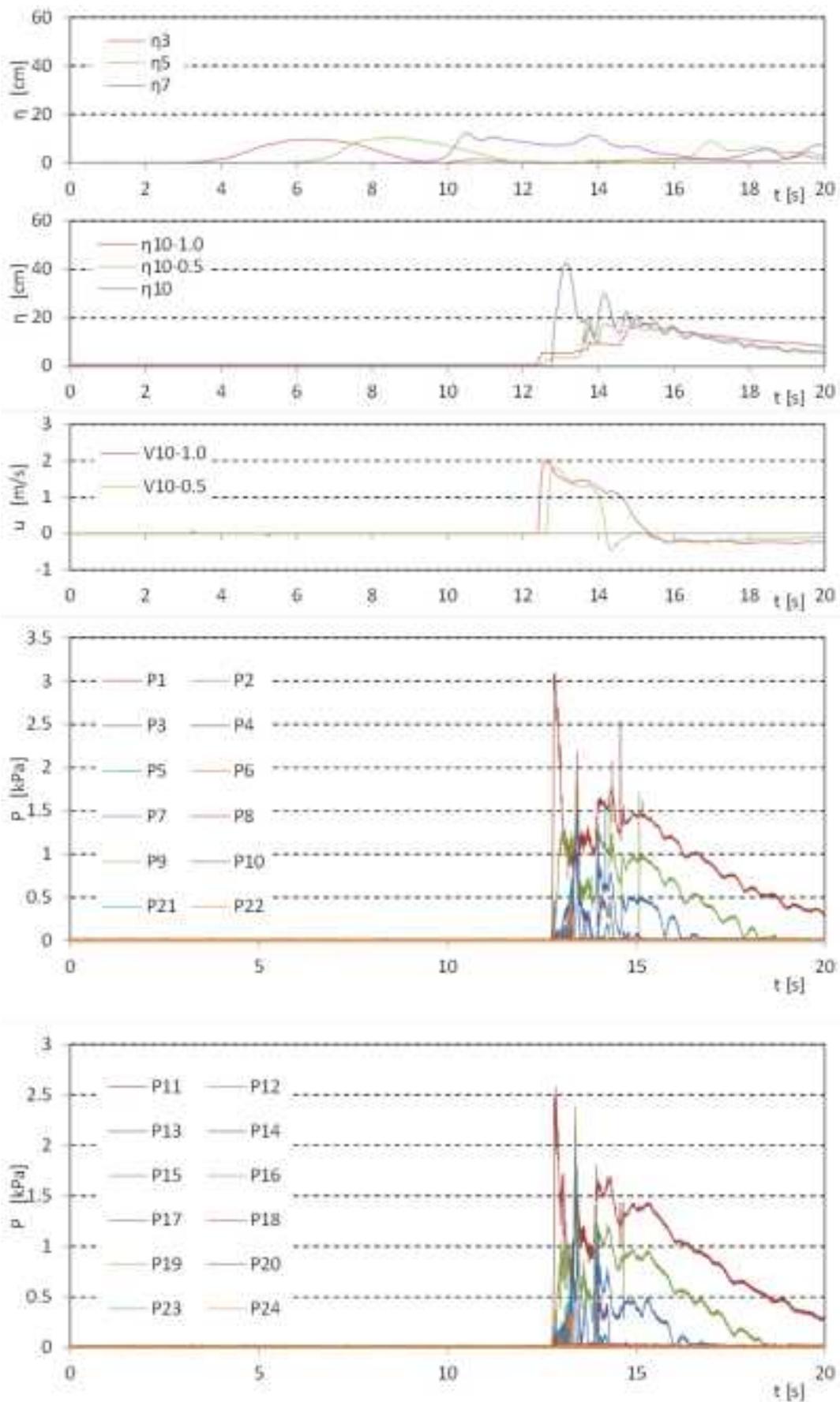


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果（直立護岸，設置位置 2.5m，W03）

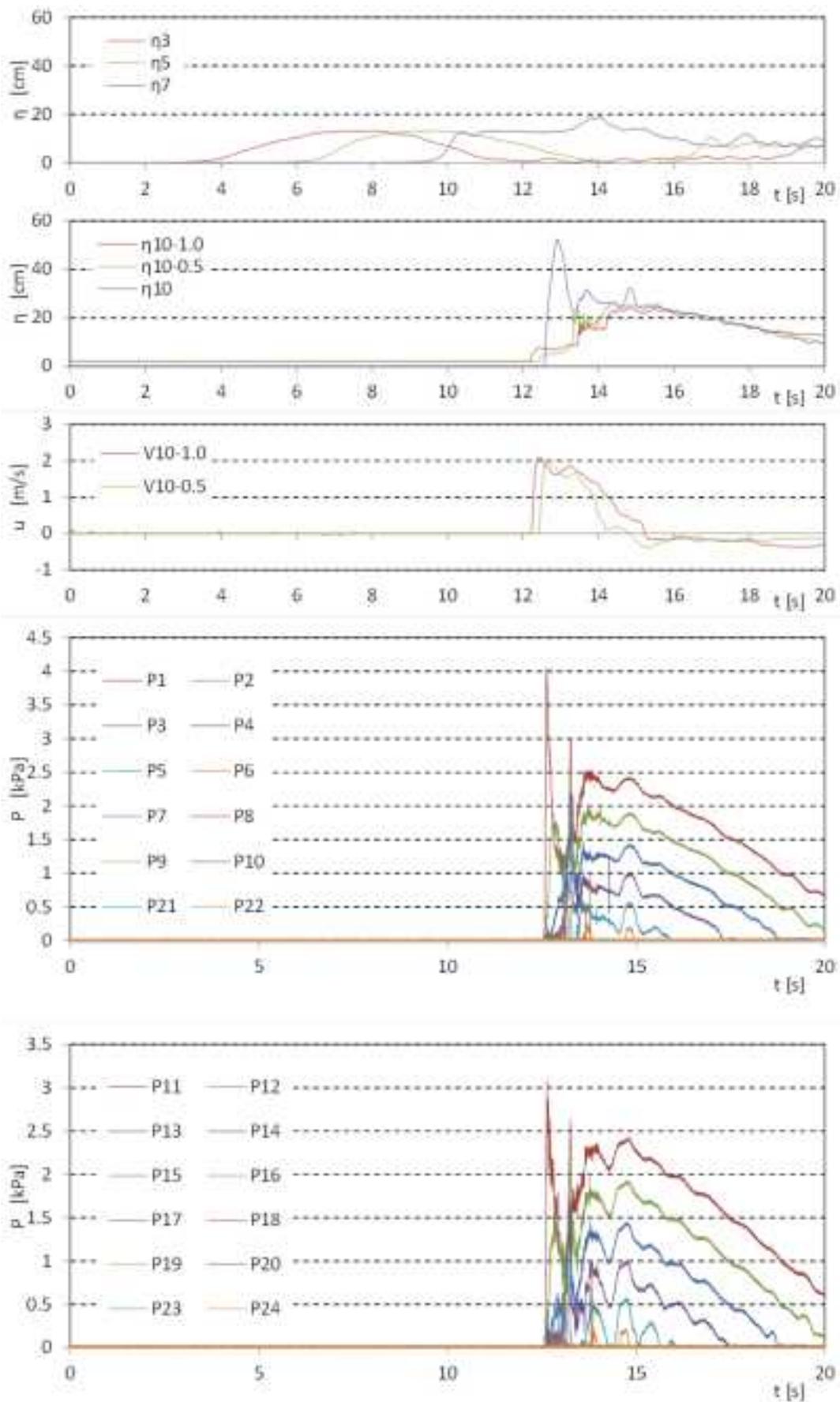


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果（直立護岸，設置位置 2.5m，W04）

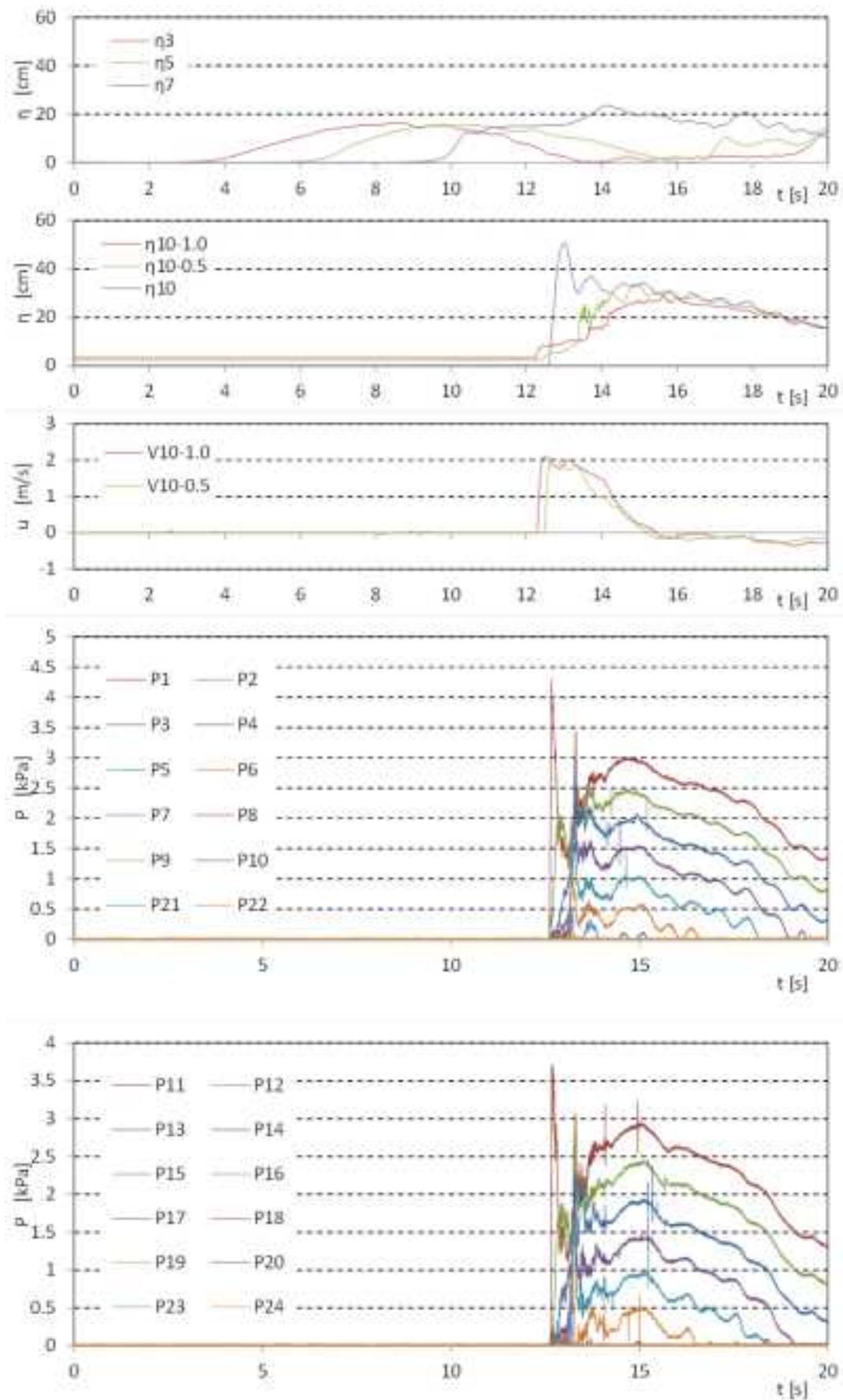


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 2.5m, W05)

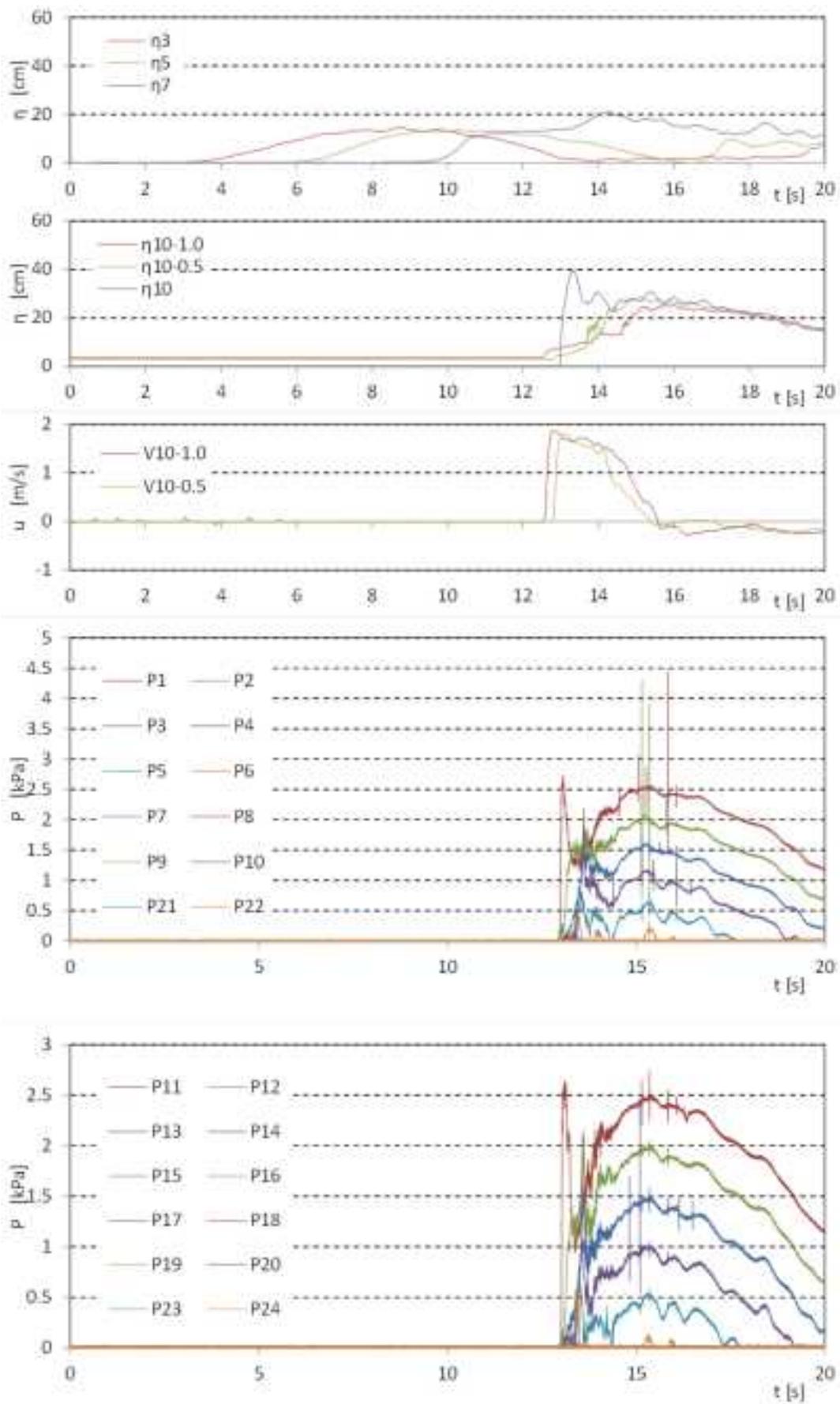


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 2.5m, W06)

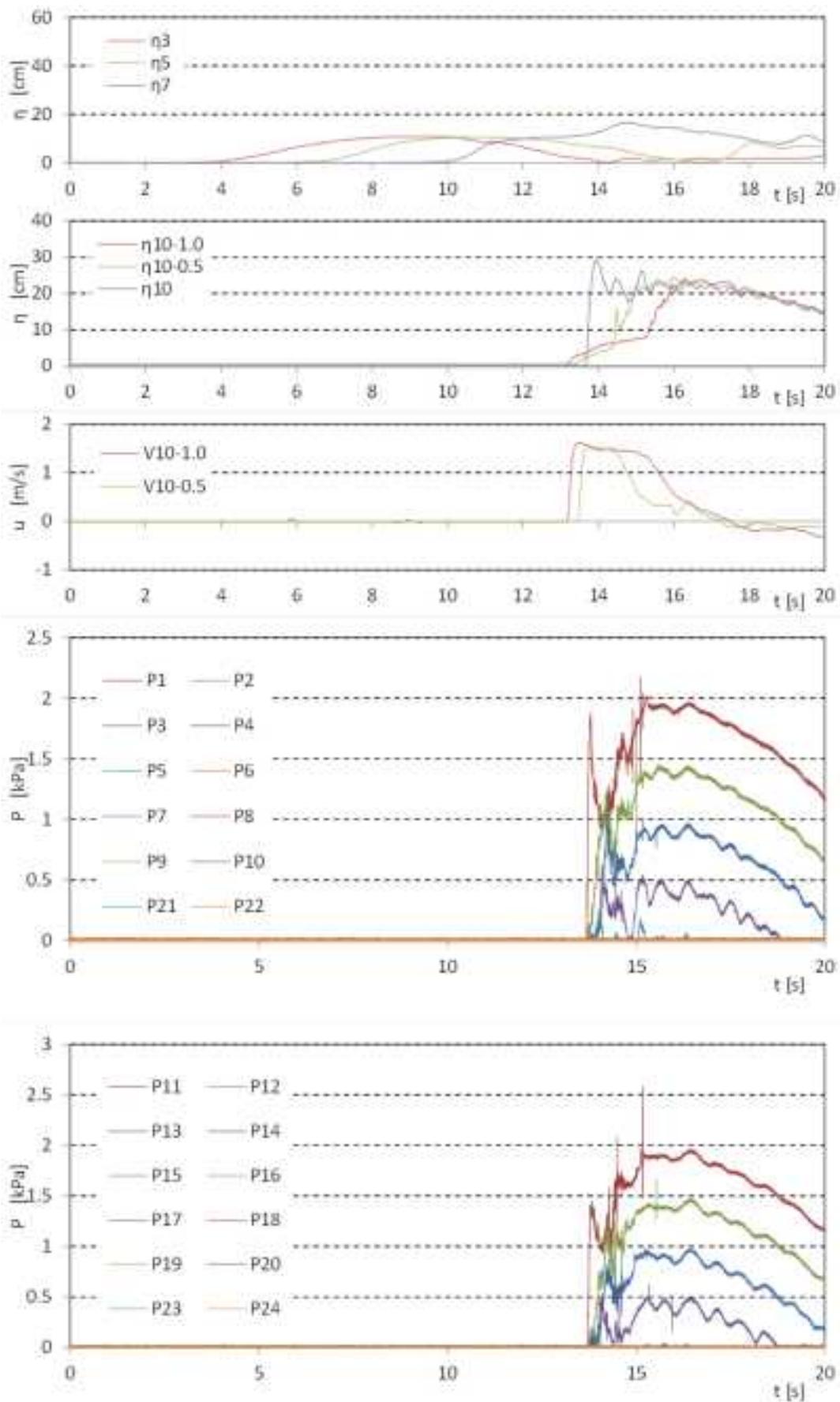


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 2.5m, W07)

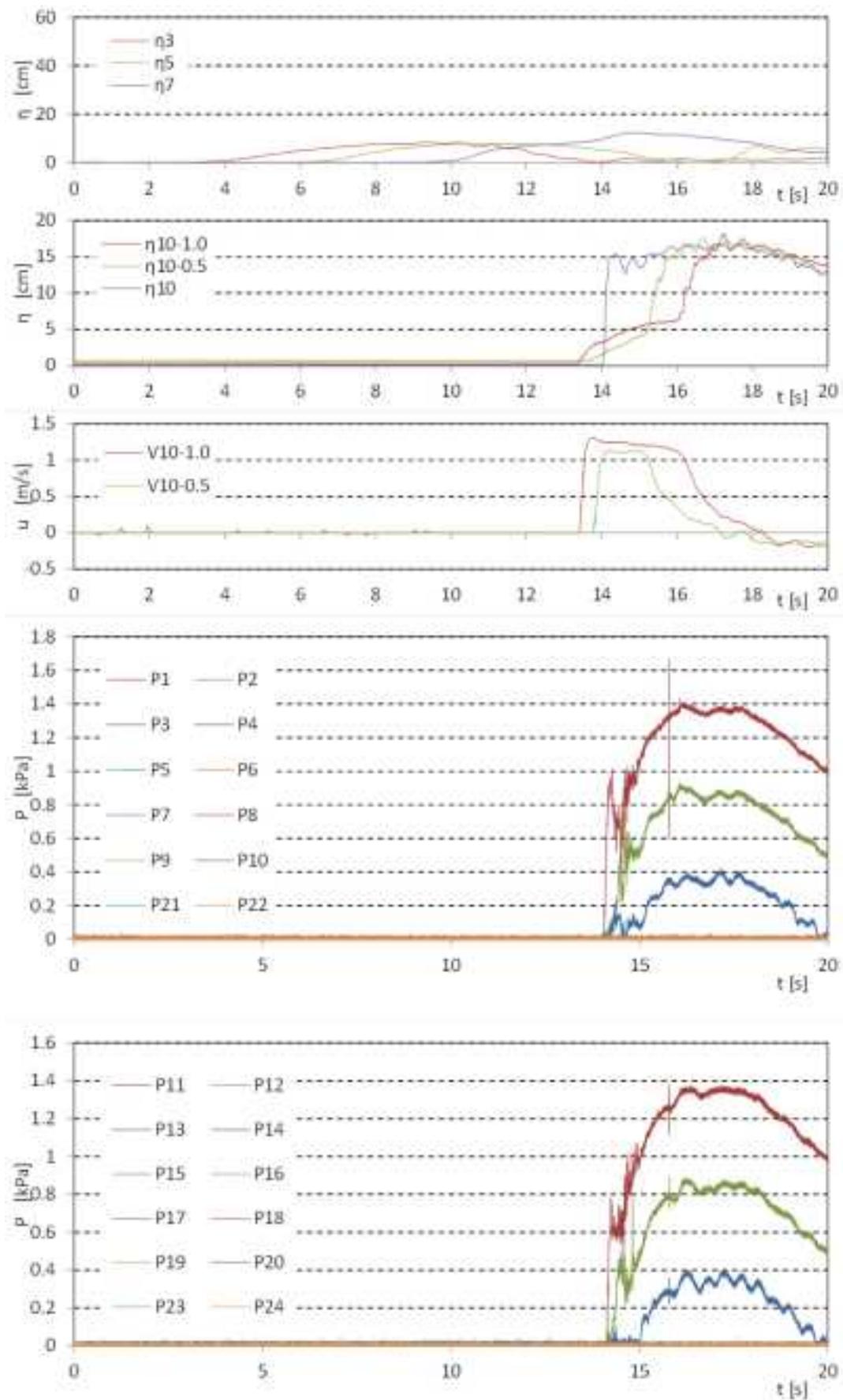


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 2.5m, W08)

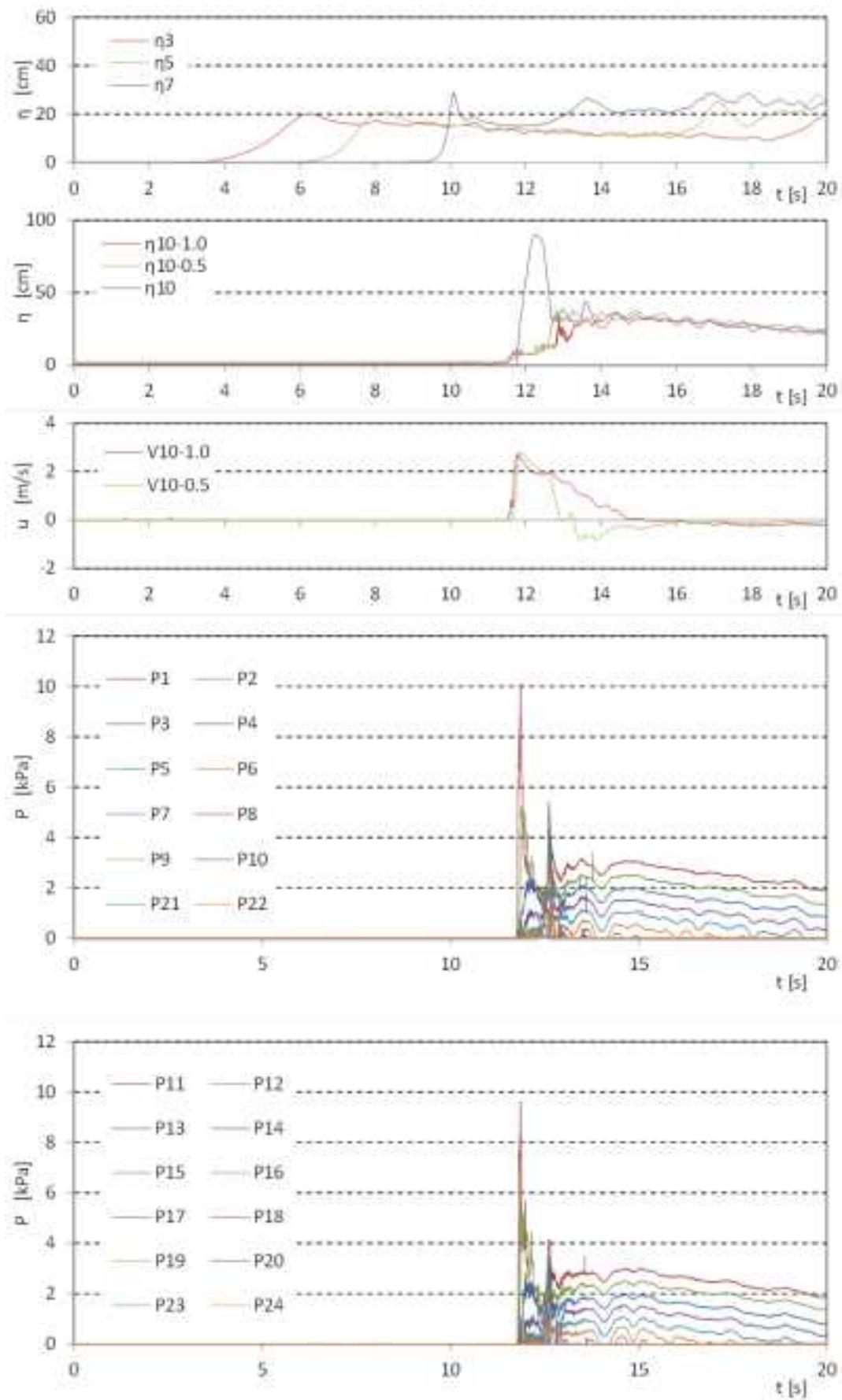


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果（直立護岸，設置位置 2.5m，W09）

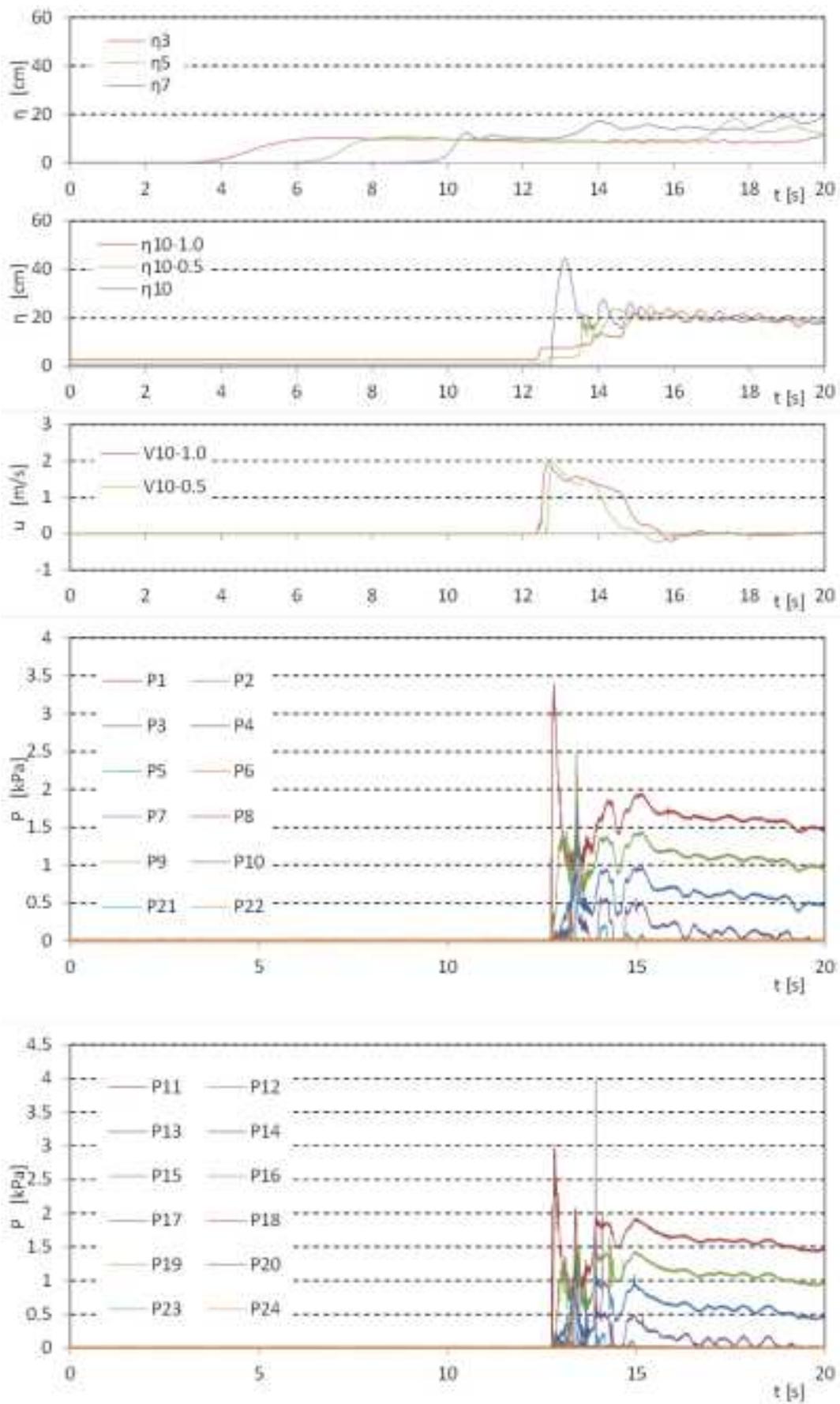


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 2.5m, W10)

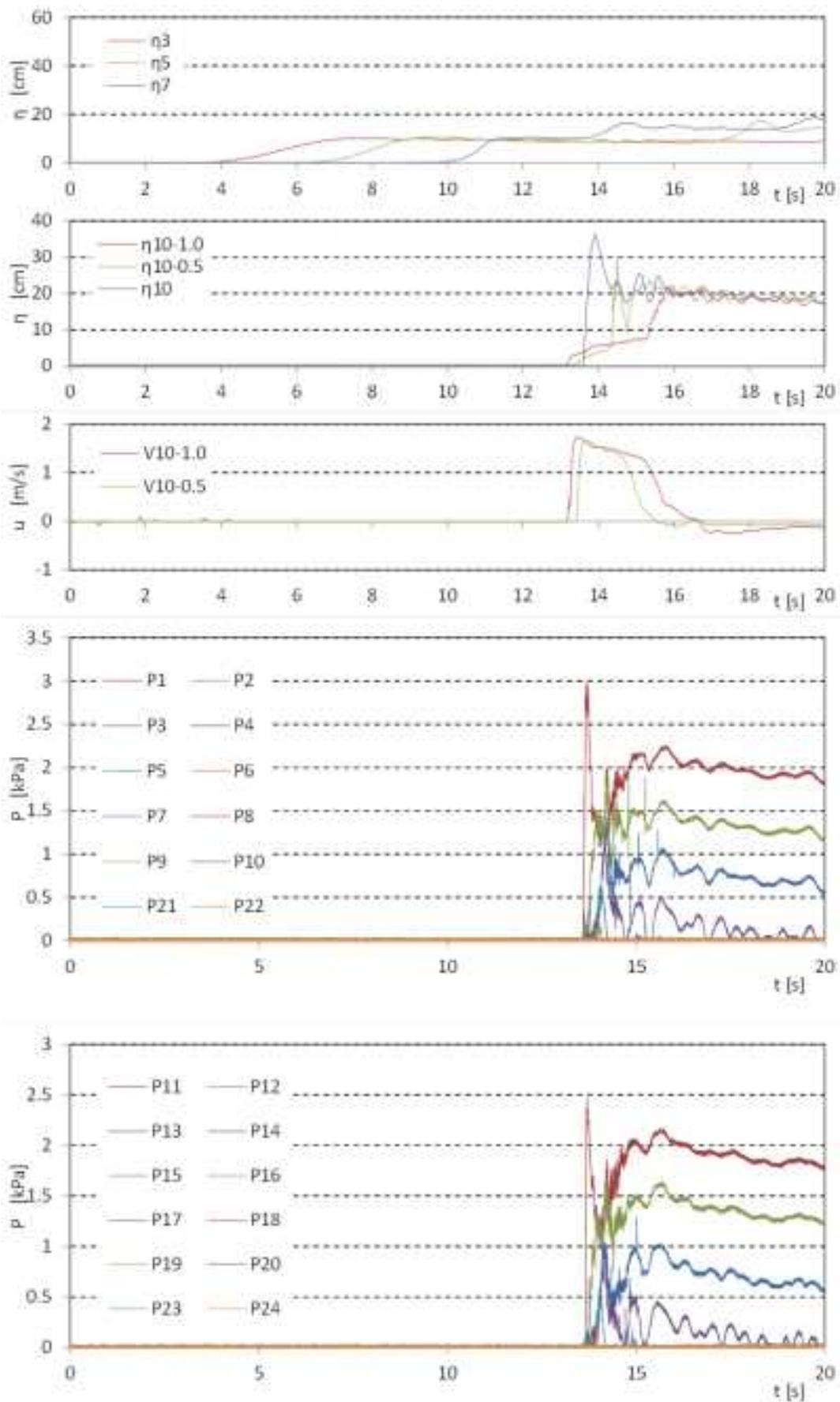


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 2.5m, W11)

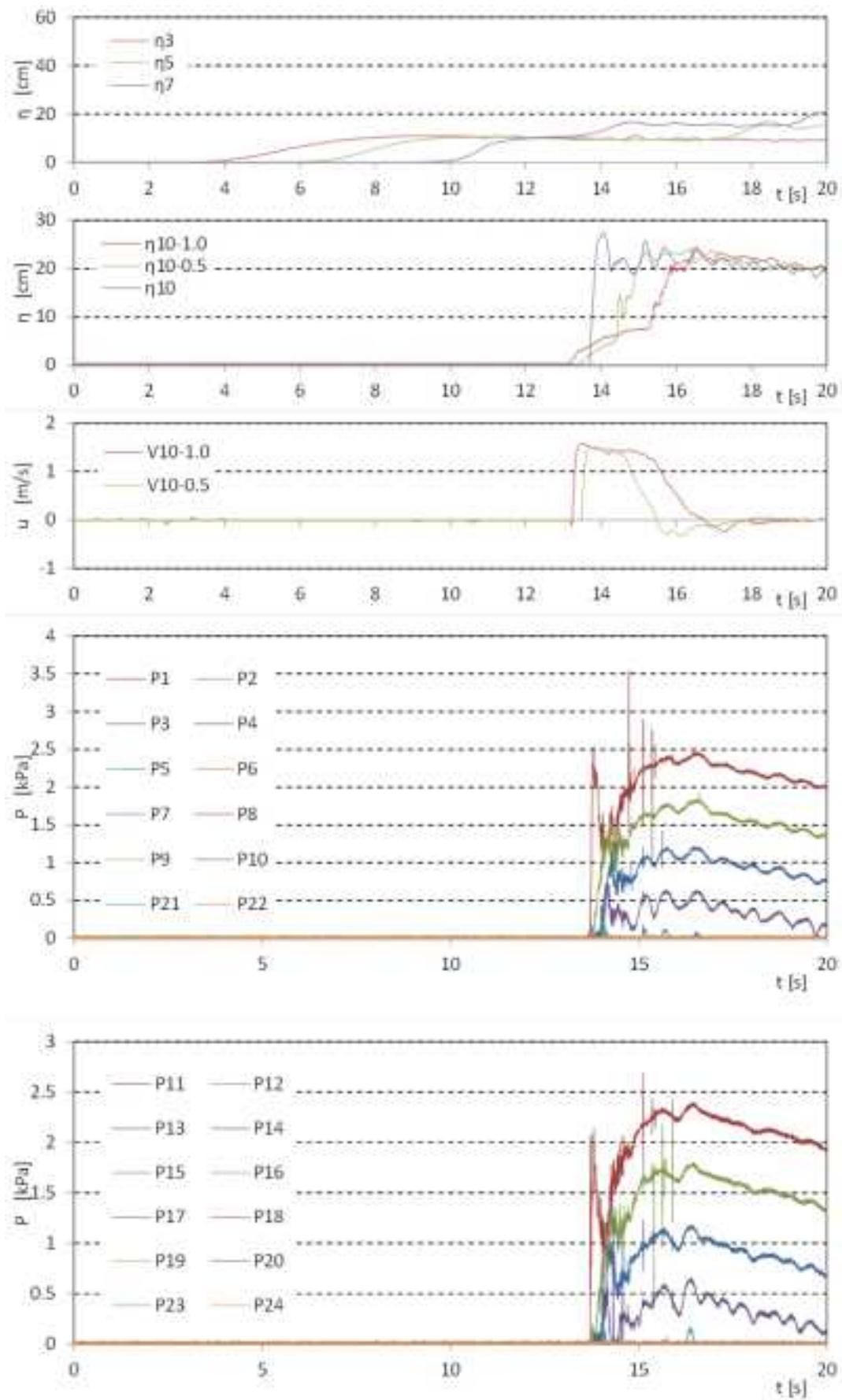


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 2.5m, W12)

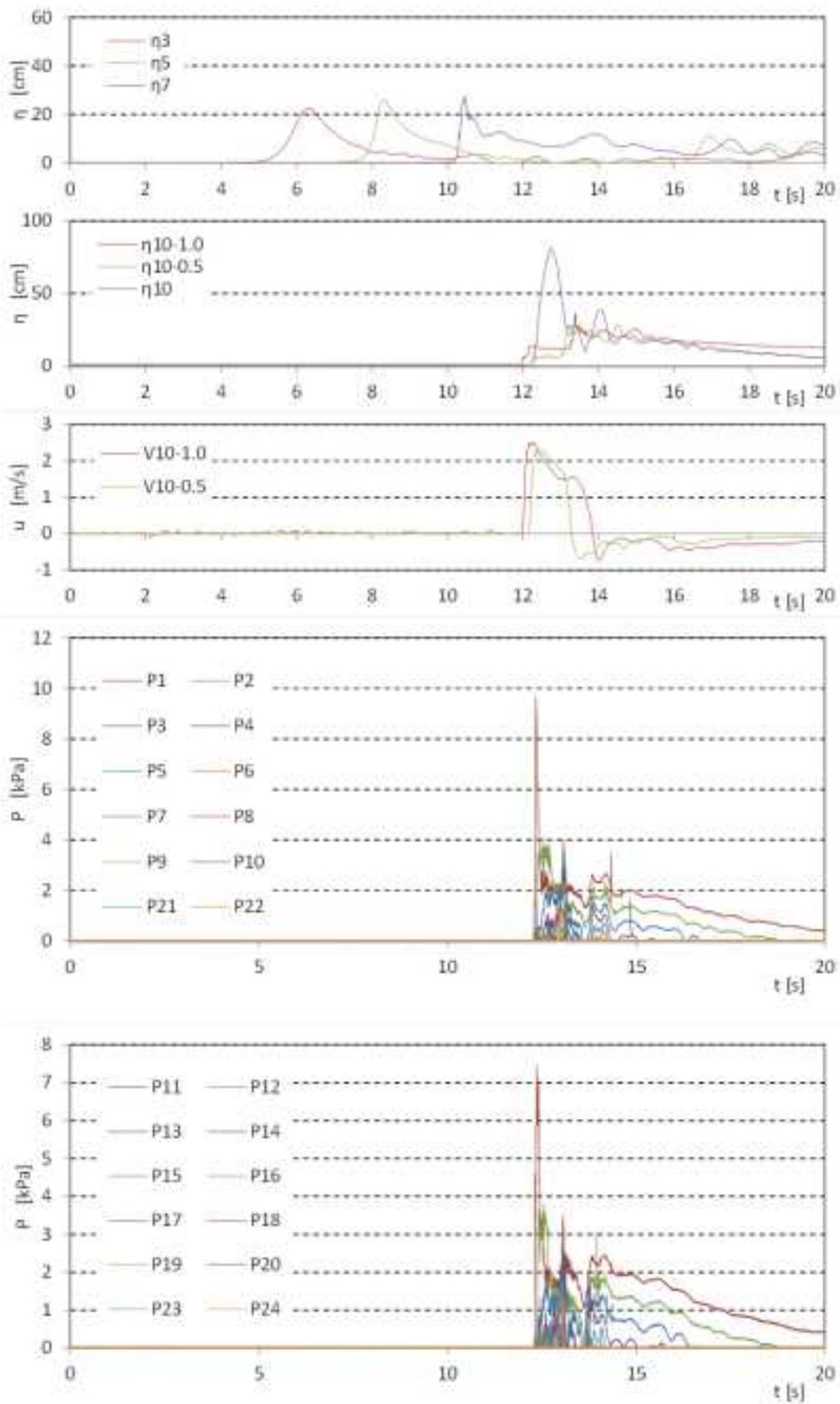


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 設置位置 2.5m, W13)

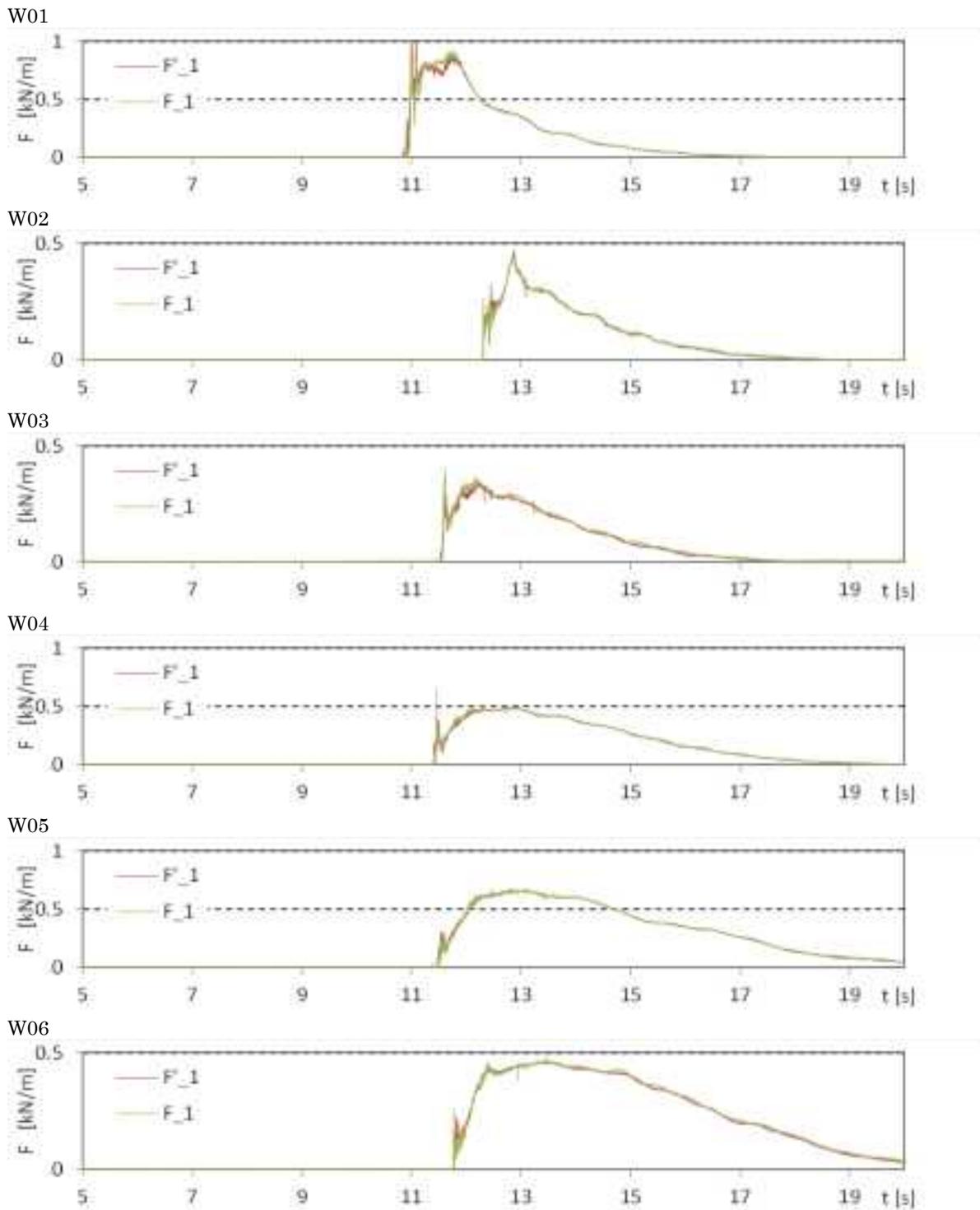


図 II.3.2-7 津波波力の算出結果 (単純勾配, 設置位置 0m)

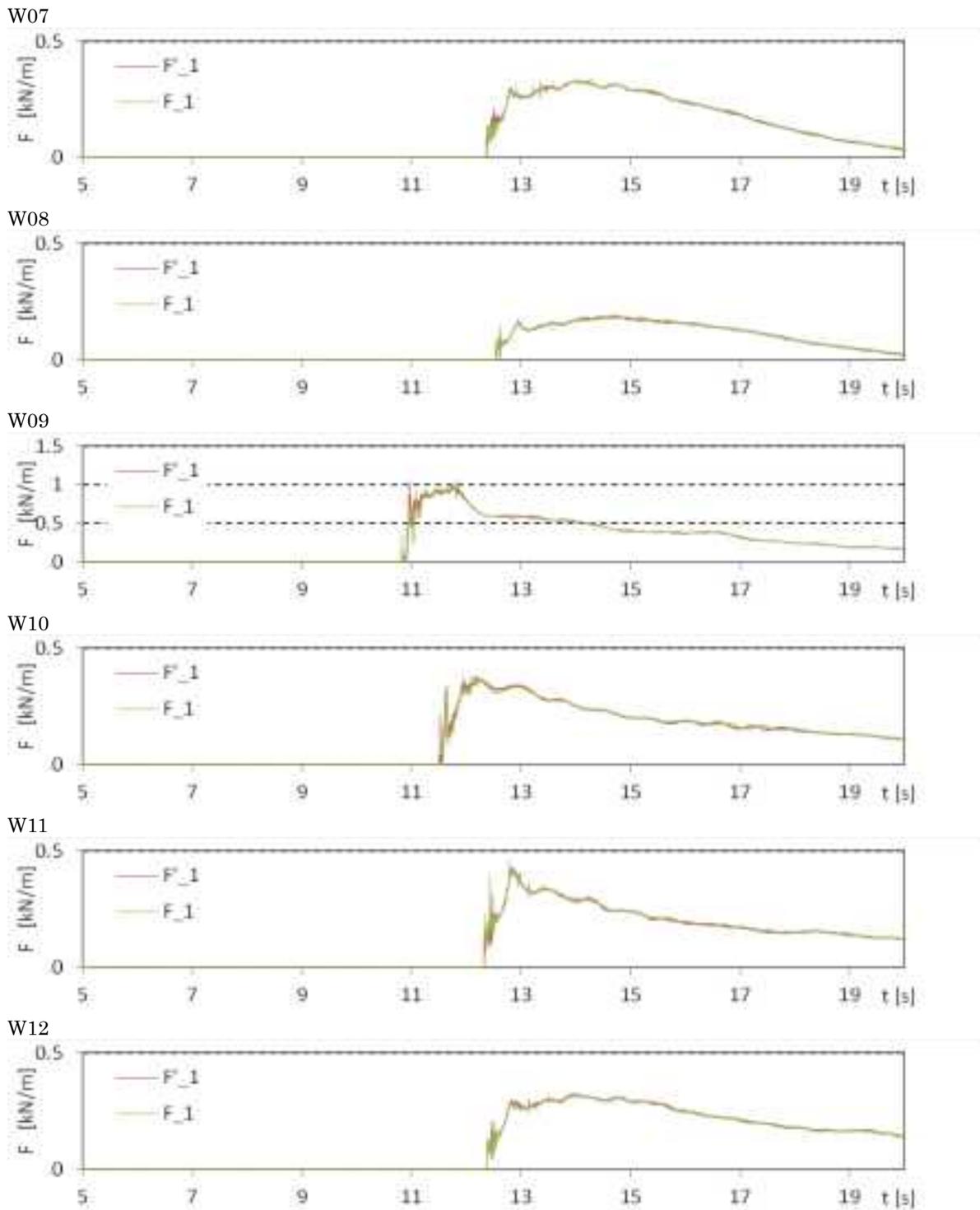


図 II.3.2-7 津波波力の算出結果 (単純勾配, 設置位置 0m)

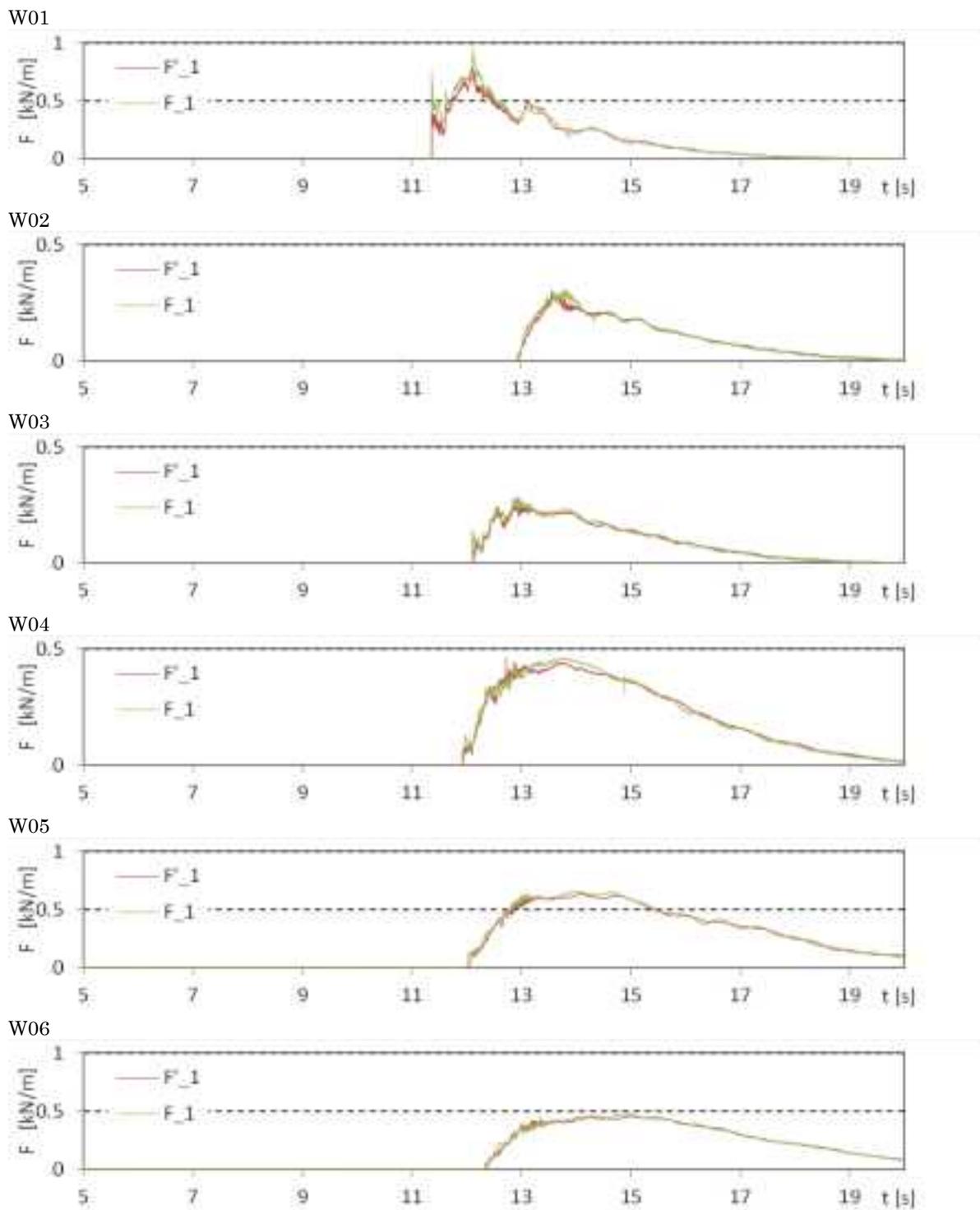


図 II.3.2-8 津波波力の算出結果 (単純勾配, 設置位置 1.25m)

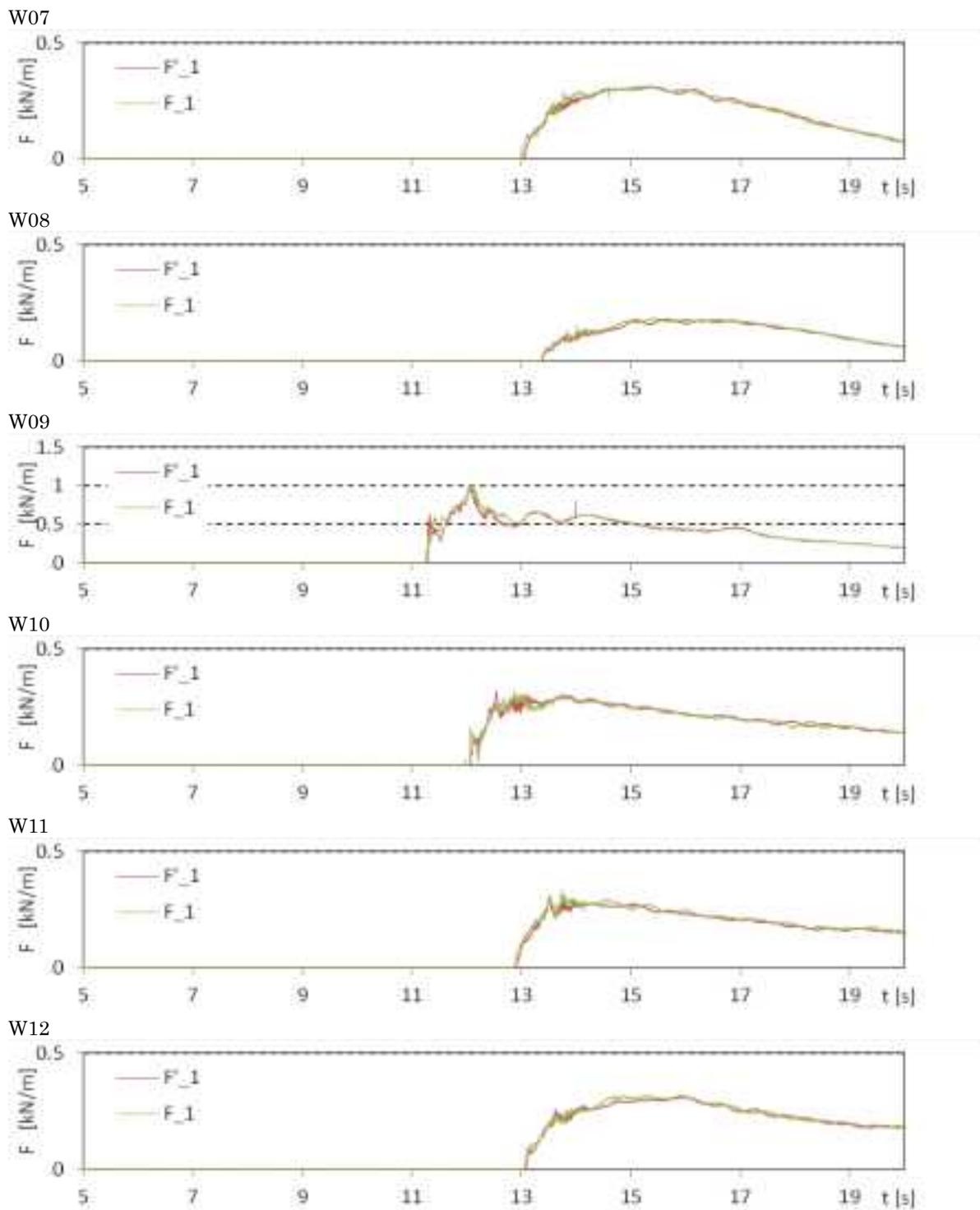


図 II.3.2-8 津波波力の算出結果 (単純勾配, 設置位置 1.25m)

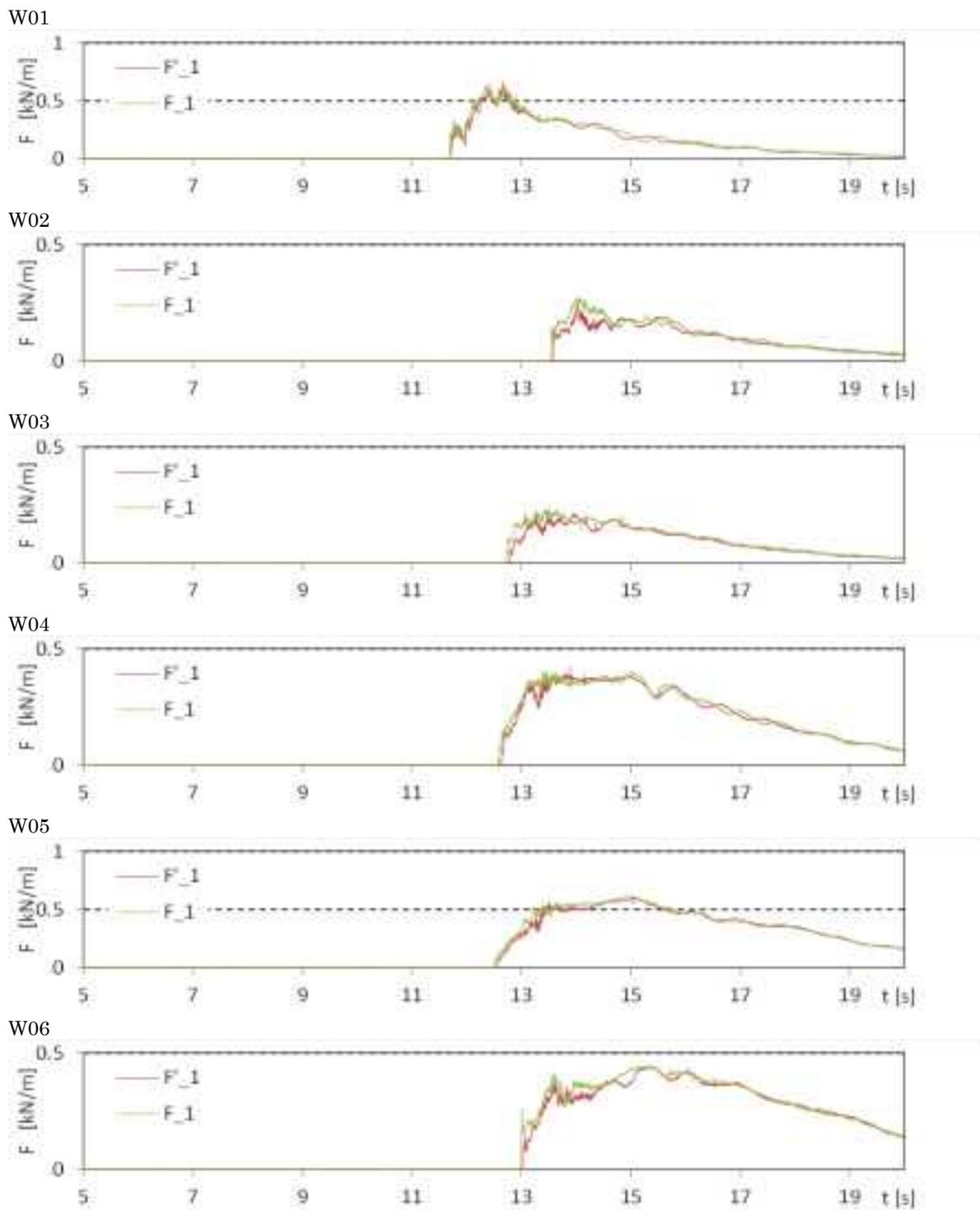


図 II.3.2-9 津波波力の算出結果 (単純勾配, 設置位置 2.5m)

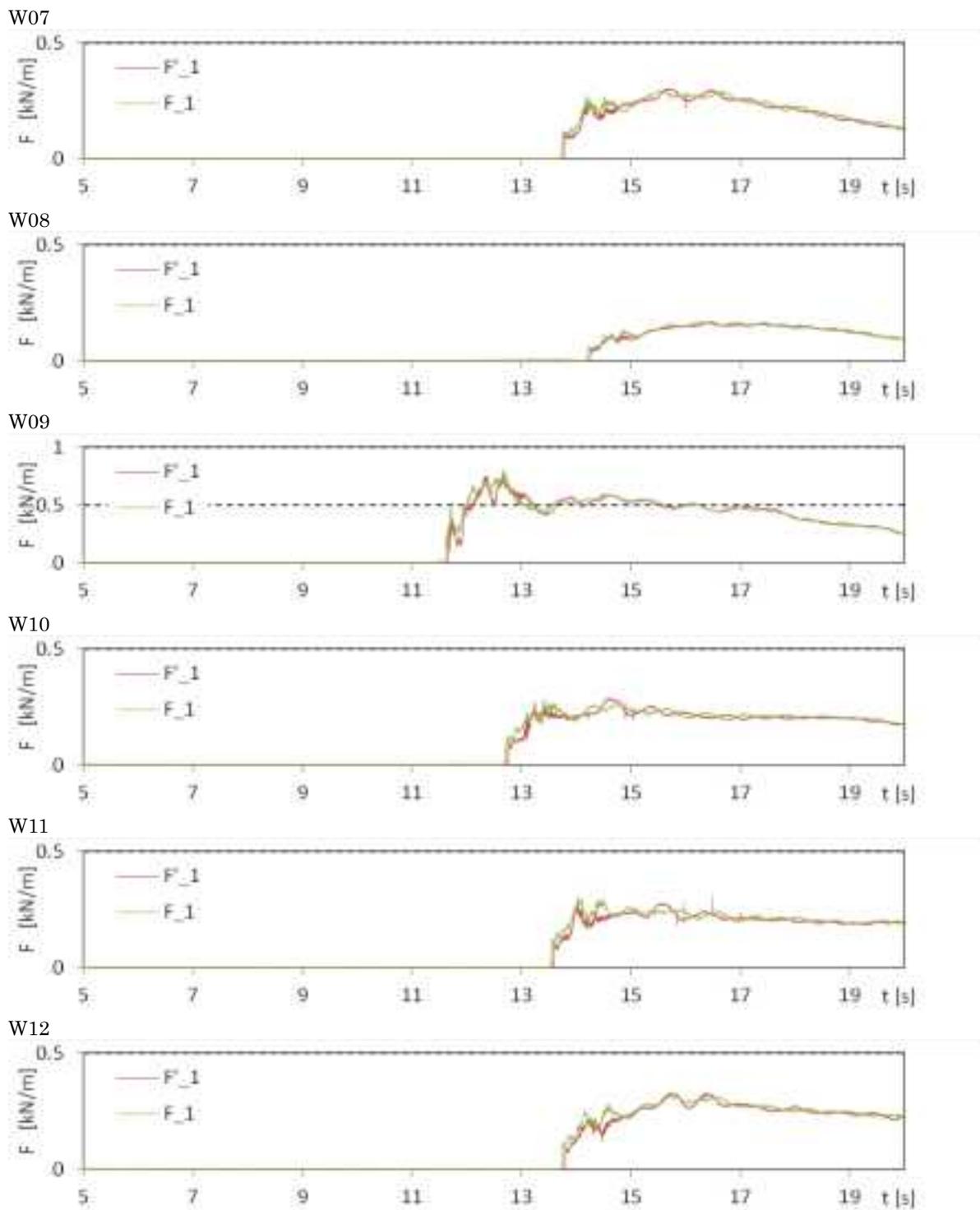


図 II.3.2-9 津波波力の算出結果 (単純勾配, 設置位置 2.5m)

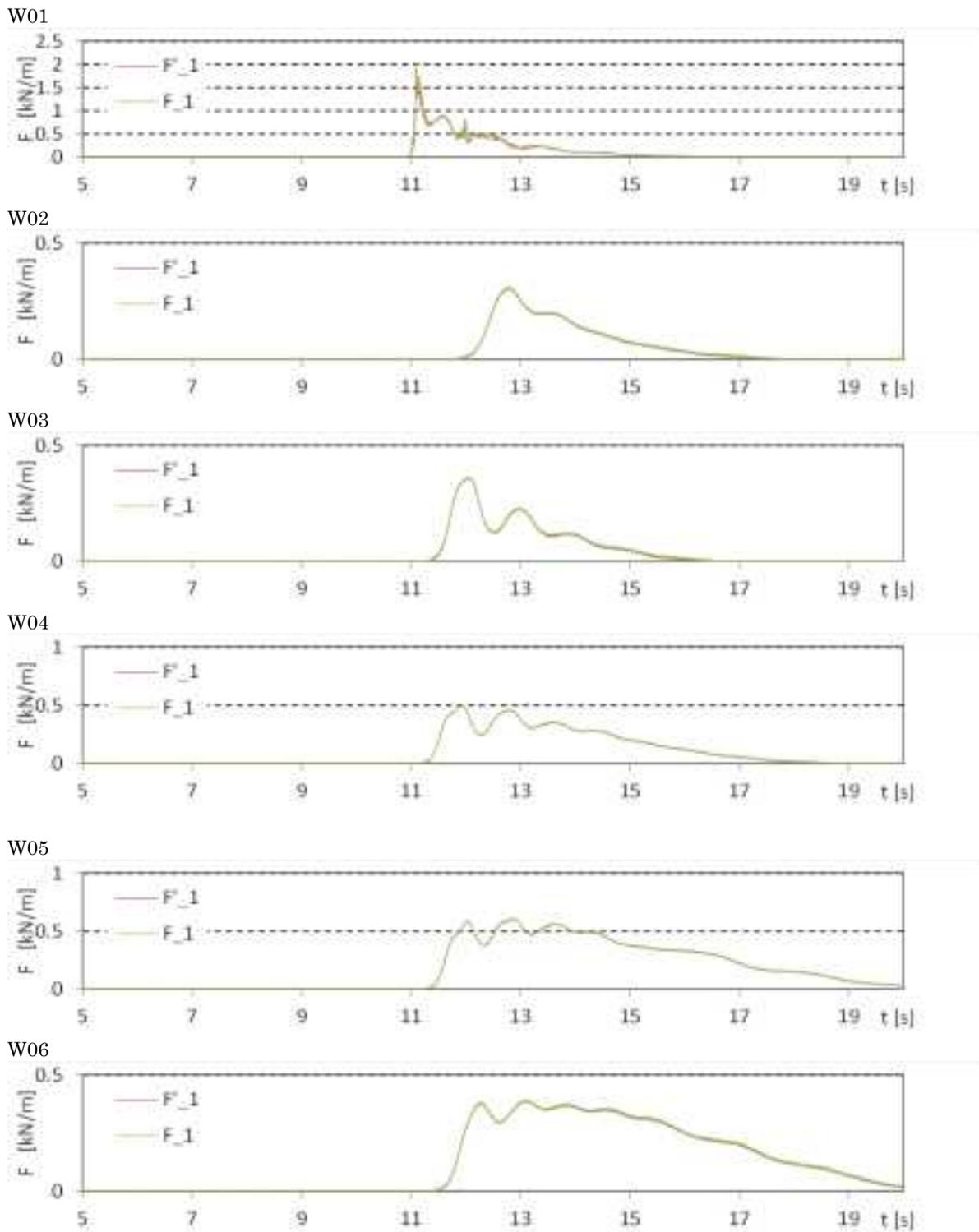


図 II.3.2-10 津波波力の算出結果 (直立護岸, 設置位置 0m)

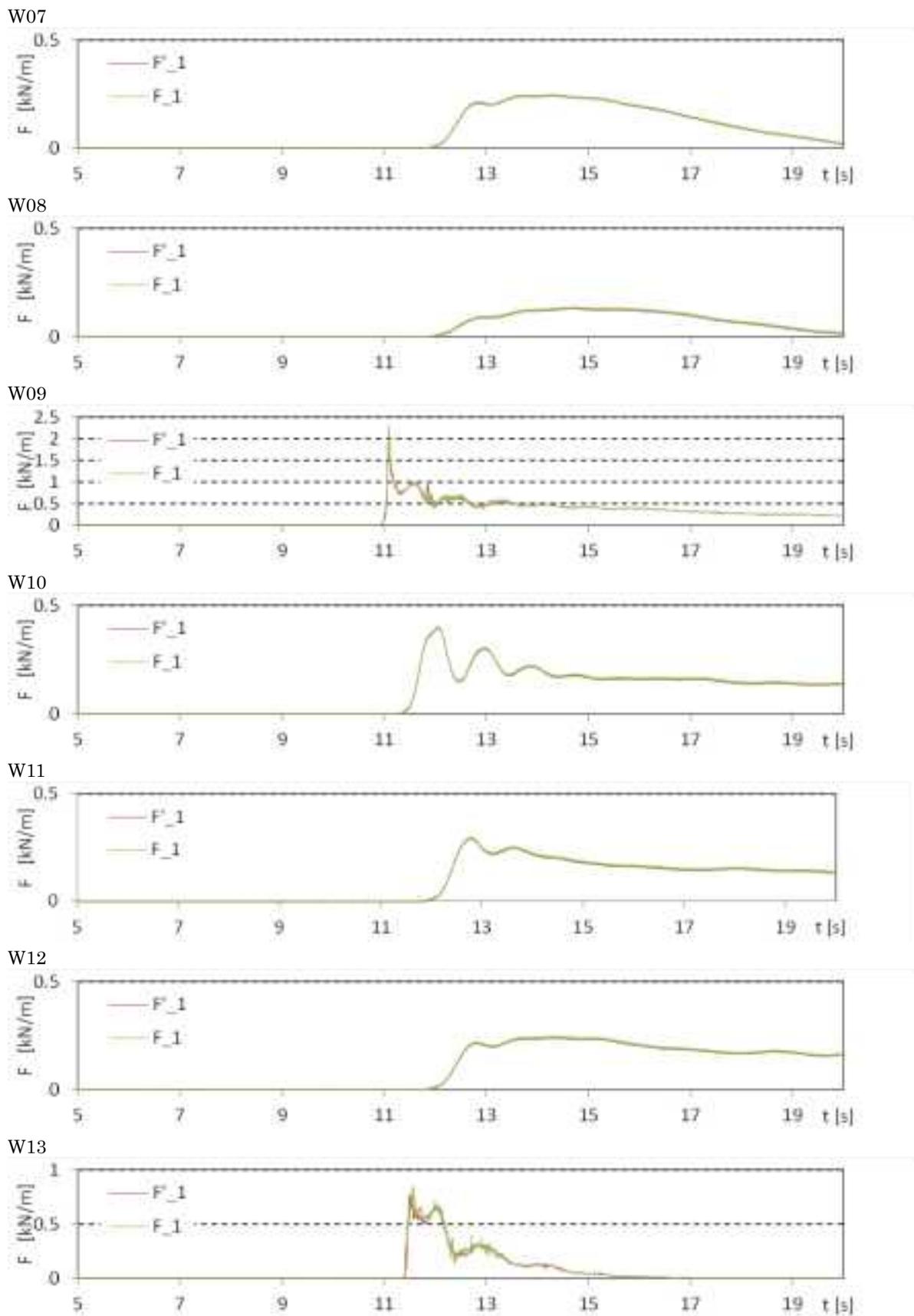


図 II.3.2-10 津波波力の算出結果 (直立護岸, 設置位置 0m)

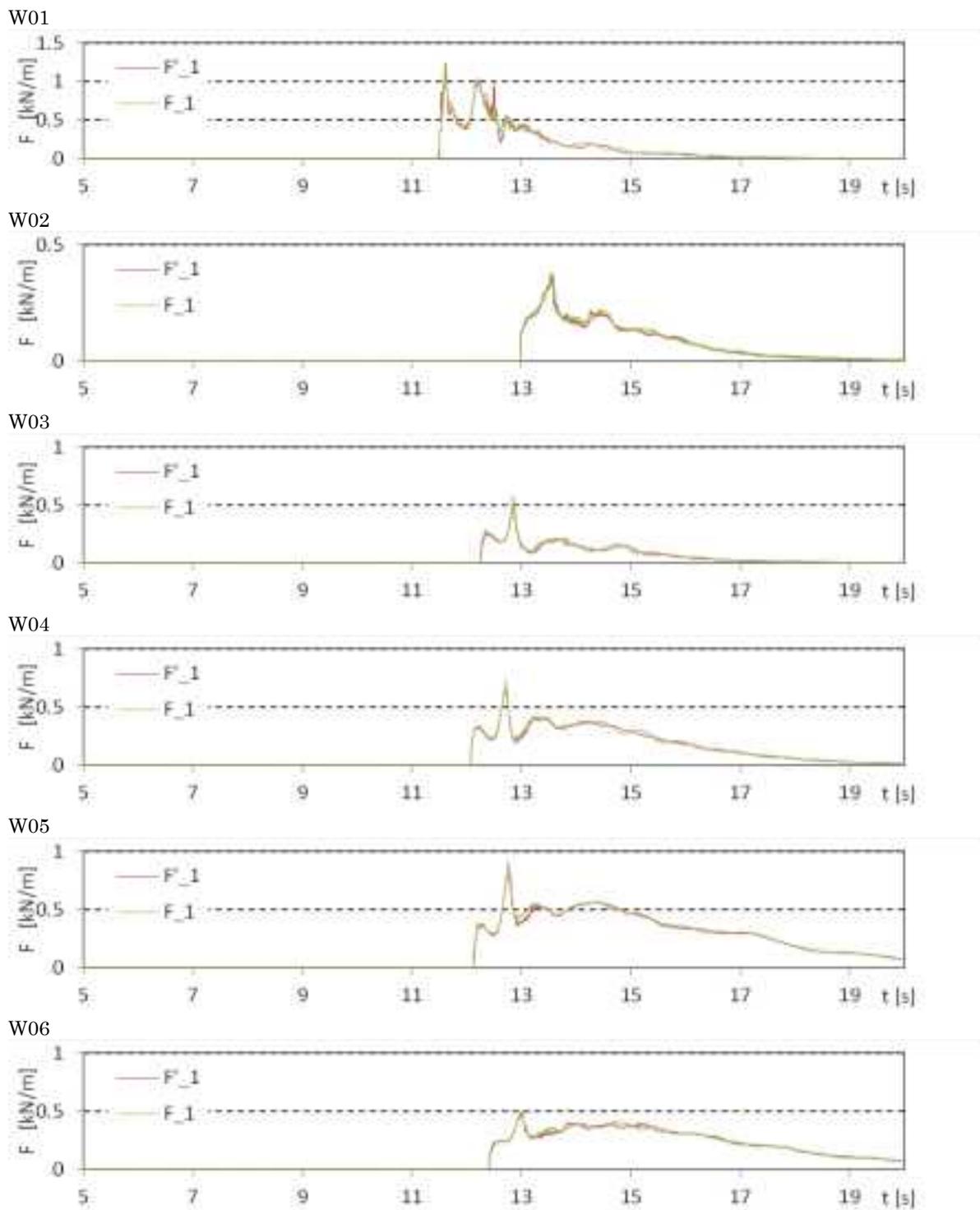


図 II.3.2-11 津波波力の算出結果 (直立護岸, 設置位置 1.25m)

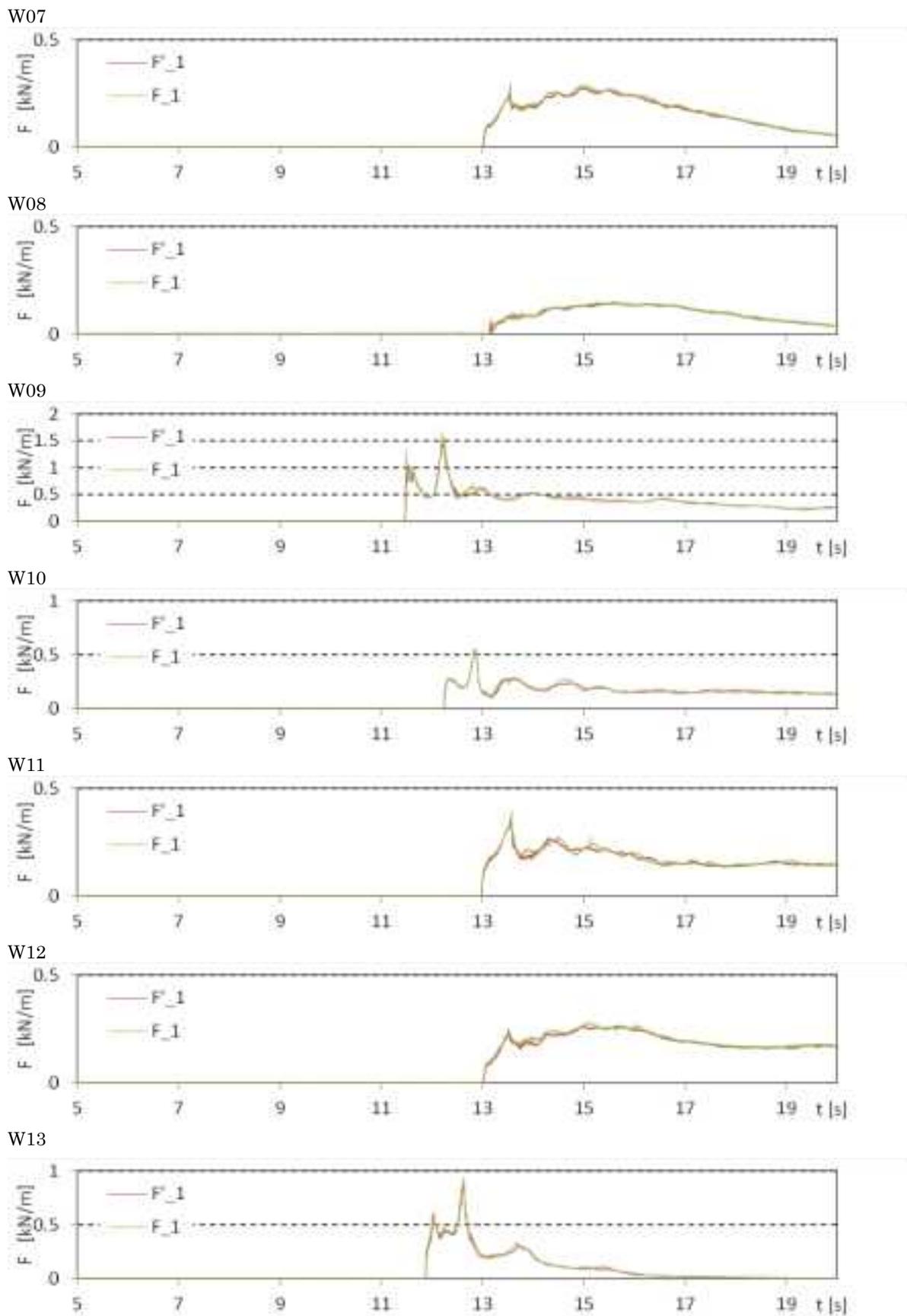


図 II.3.2-11 津波波力の算出結果 (直立護岸, 設置位置 1.25m)

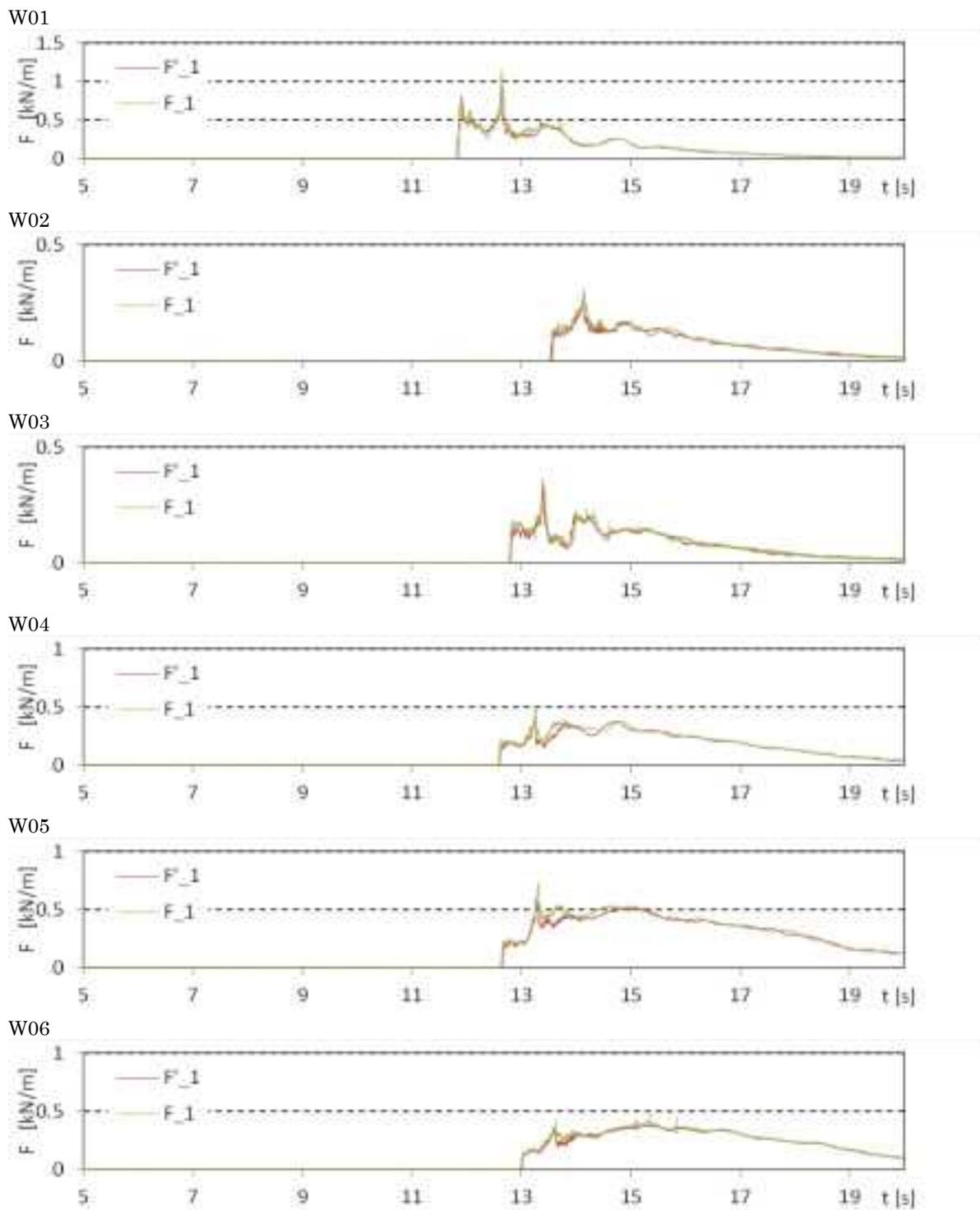


図 II.3.2-12 津波波力の算出結果 (直立護岸, 設置位置 2.5m)

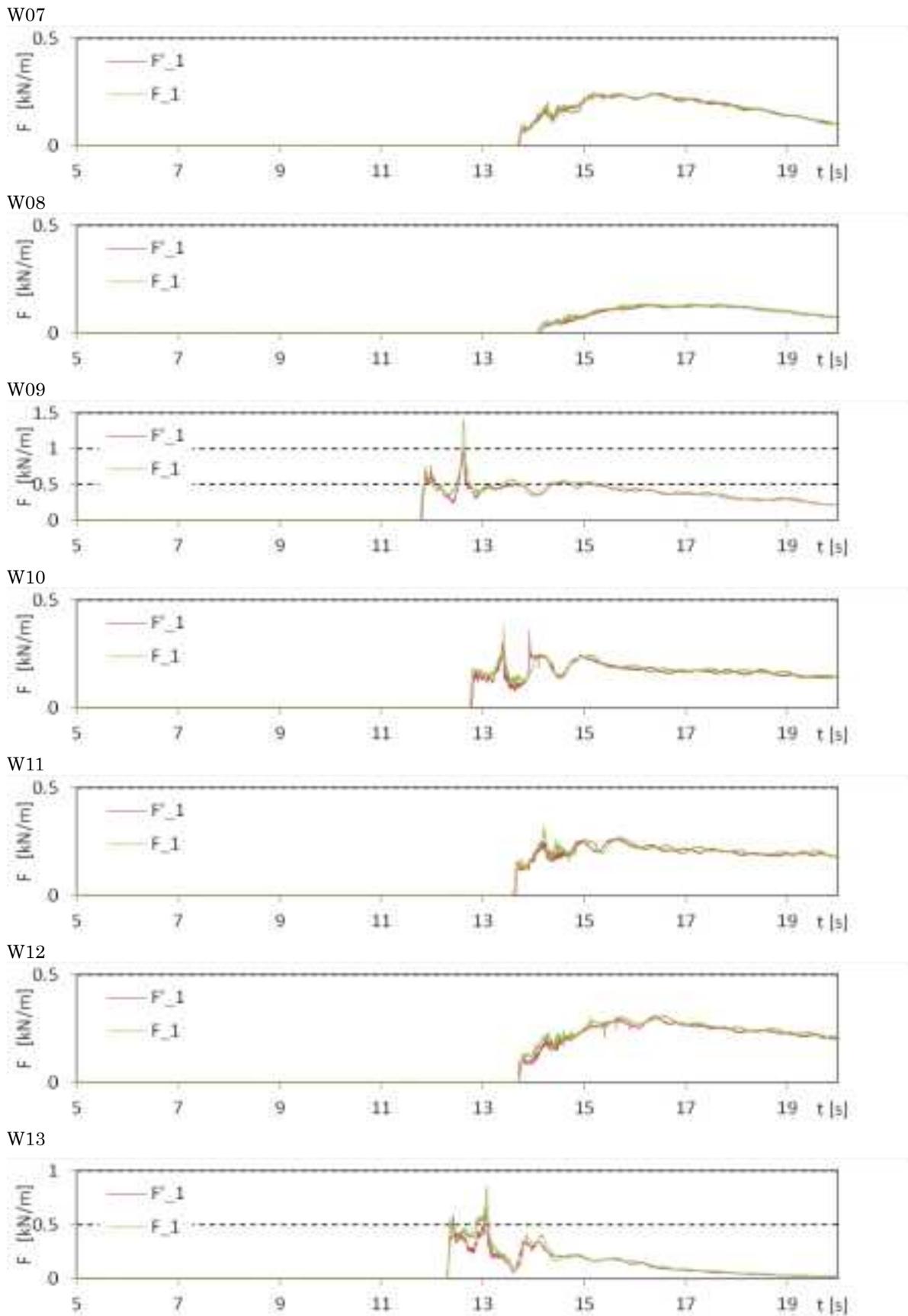


図 II.3.2-12 津波波力の算出結果 (直立護岸, 設置位置 2.5m)

### 3.3. 波力/波圧試験（低剛性堤体模型）

低剛性堤体模型の試験結果を図 II.3.3-1～図 II.3.3-3 に示す。水位や流速の変動は、基本ケースと同様であるため、ここでは波力の算出結果のみを示した。低剛性堤体模型では、波力を圧力計の積分とロードセルの合計値の 2 種類で算出しているため、同図ではこれを比較している。なお、低剛性堤体模型のケースでは、圧力計は堤体模型の中心線上 1 測線のみを設置している。

圧力計による計測結果とロードセルによる計測結果は、ほぼ一致することが分かる。圧力計から算出した波力では、準定常状態の波力においてもノイズ的な短時間の変動が表れているが、ロードセルによる計測にはこれが表れていない。圧力計では、圧力を離散的に計測しているため、渦や水中の気泡により大きな圧力変動が計測される場合がある。これを積分して波力を算出するため、鉛直方向だけではなく横断方向にも局所的に働いている短時間の圧力変動を、鉛直方向には圧力計の設置間隔（5 cm）、横断方向には全幅に均等に働いているとして見積もることになる。このため、波力が瞬間的に過大／過小評価されると考えられる。一方ロードセルによる計測では、堤体模型全体に働く波力を計測しているため、この局所的な圧力変動の影響は小さく、また堤体模型であるアルミ板の質量力により、1/1000 秒オーダーの変動には反応しないと考えられる。

準定常的な波力に対し、圧力計に現れる 0.5s 程度の周期の変動（例えば、図 II.3.3-2 W04 の  $t=14\sim 15s$ ）がロードセルでは小さく評価されている場合がある。ただし、基本ケースの結果を見ると、同じケースの 2 測線で計測された波力の同周期の変動の程度が異なっている。したがってこの変動は、水槽の横断方向に発生した変動成分（例えばスロッシングのような）によるものと考えられる。その場合、横断方向の平均的な波力という観点からみると、圧力計から算出した波力が、この短周期の変動を過大評価していると評価される。

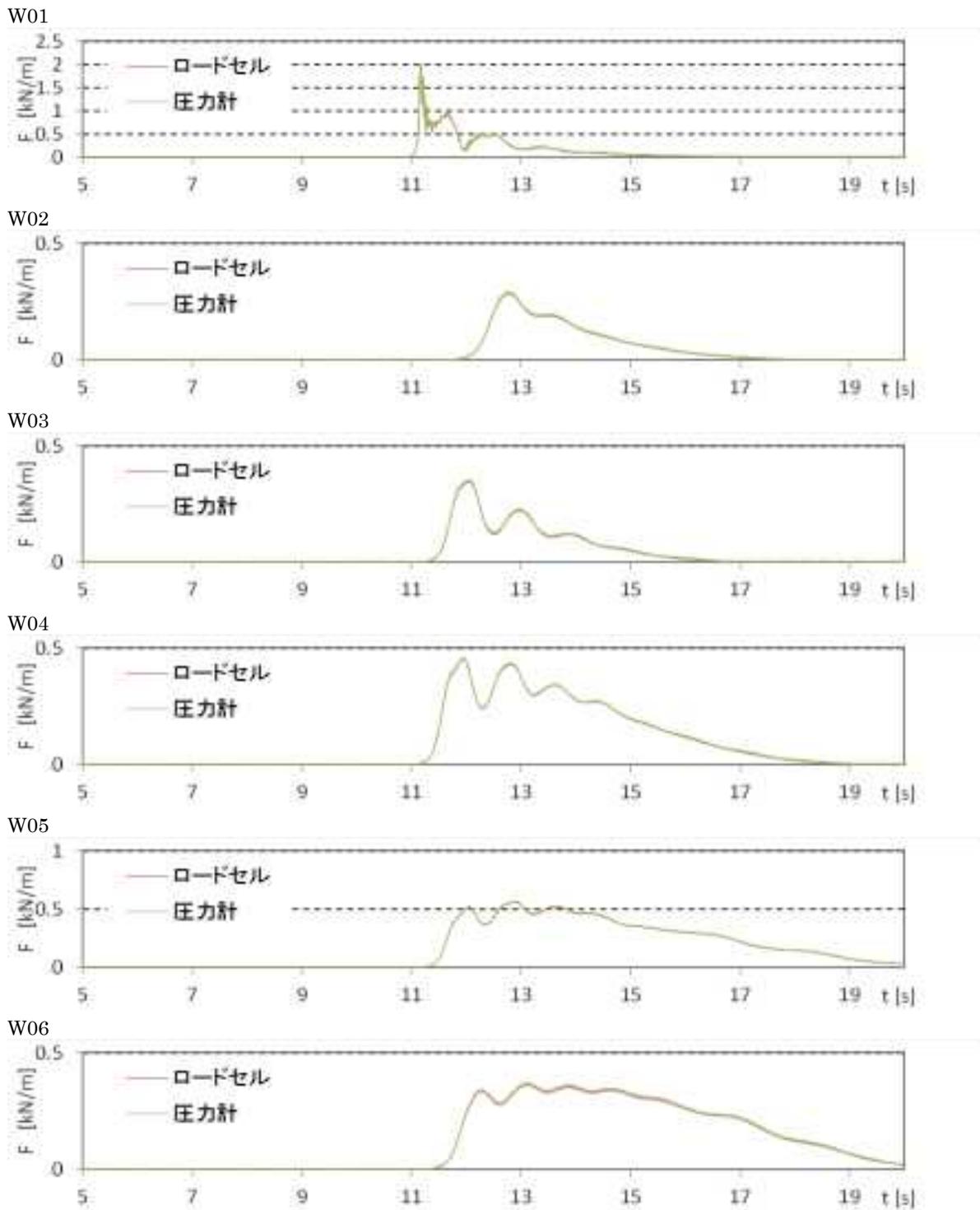


図 II.3.3-1 低剛性堤体模型の津波波力計測結果 (直立護岸, 設置位置 0m)

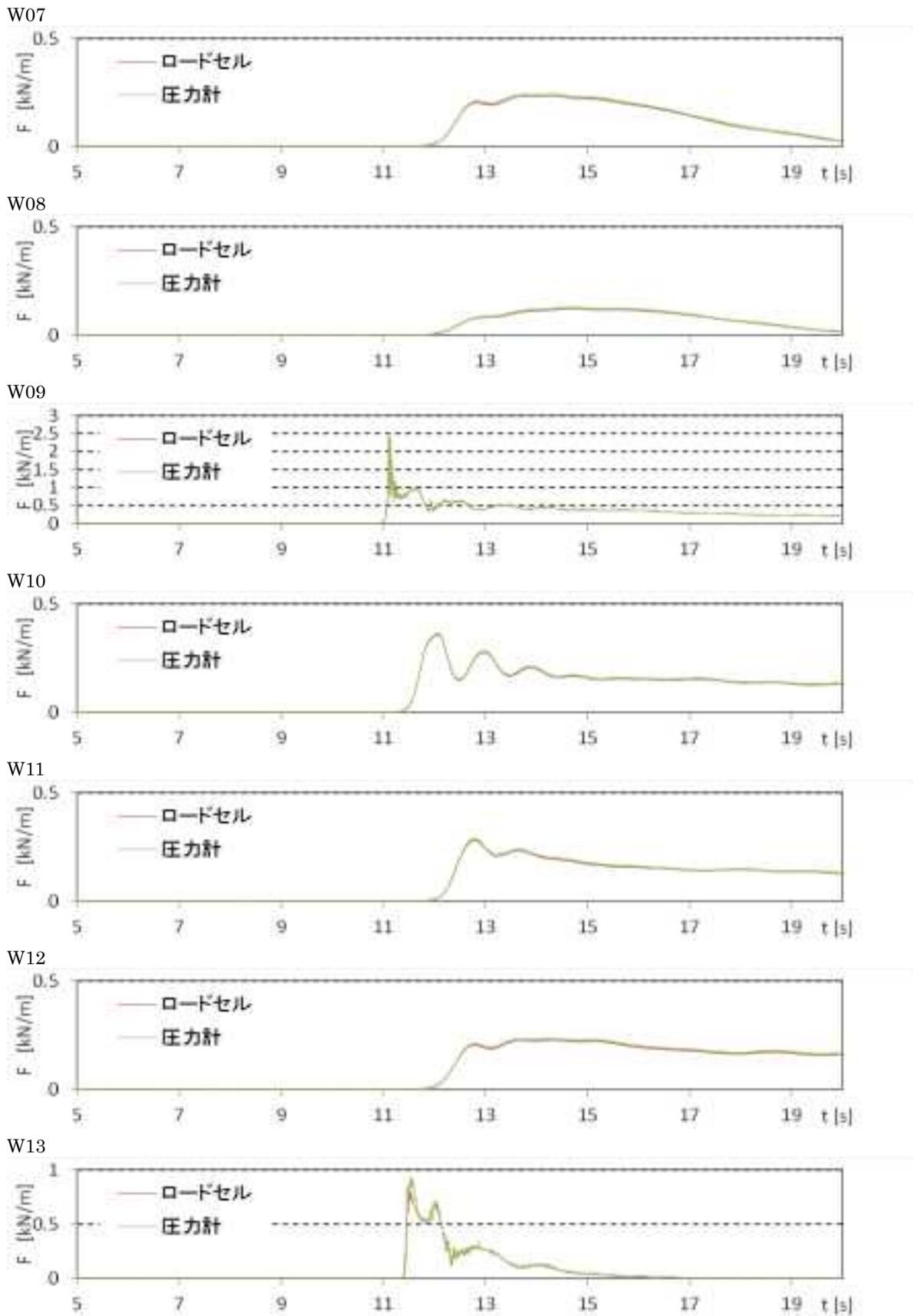
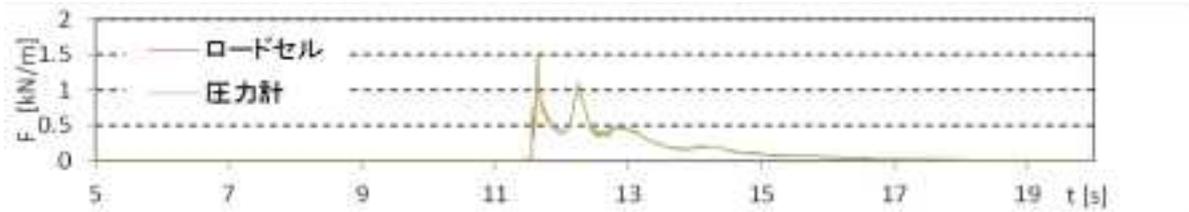
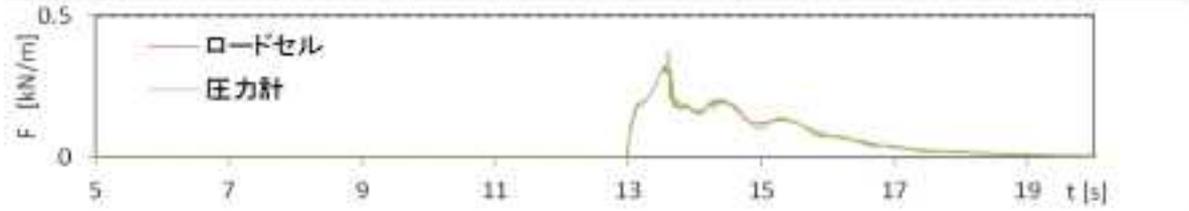


図 II.3.3-1 低剛性堤体模型の津波波力計測結果 (直立護岸, 設置位置 0m)

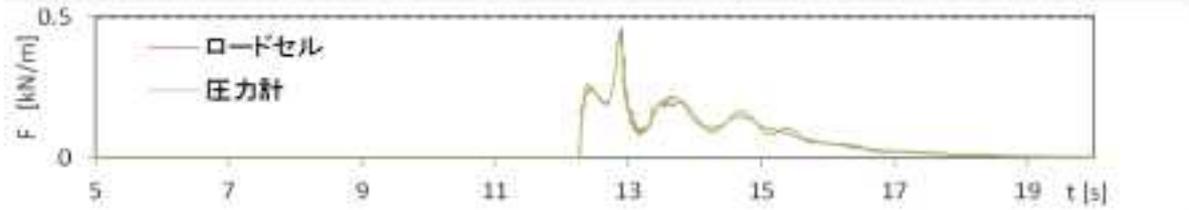
W01



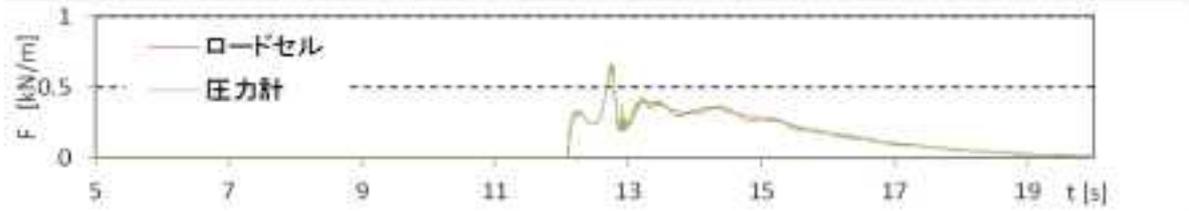
W02



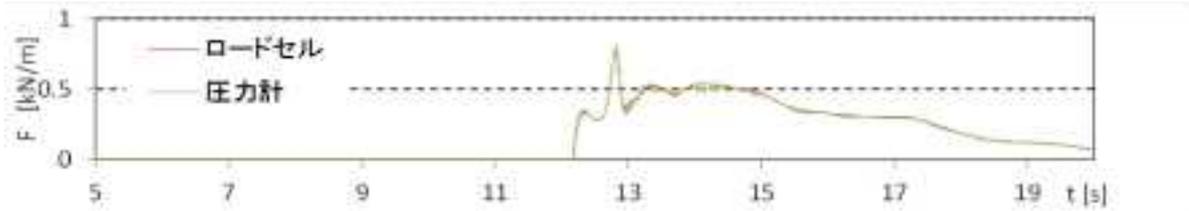
W03



W04



W05



W06

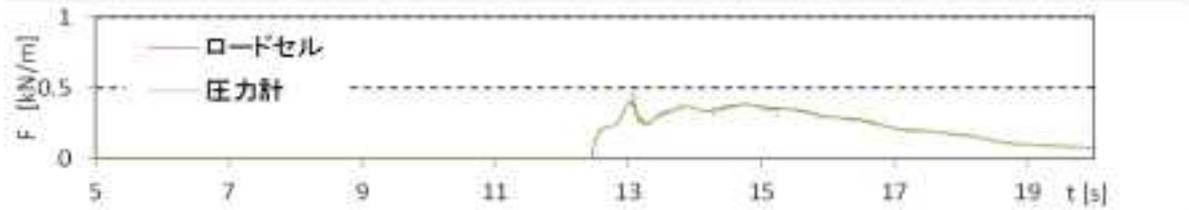


図 II.3.3-2 低剛性堤体模型の津波波力計測結果 (直立護岸, 設置位置 1.25m)

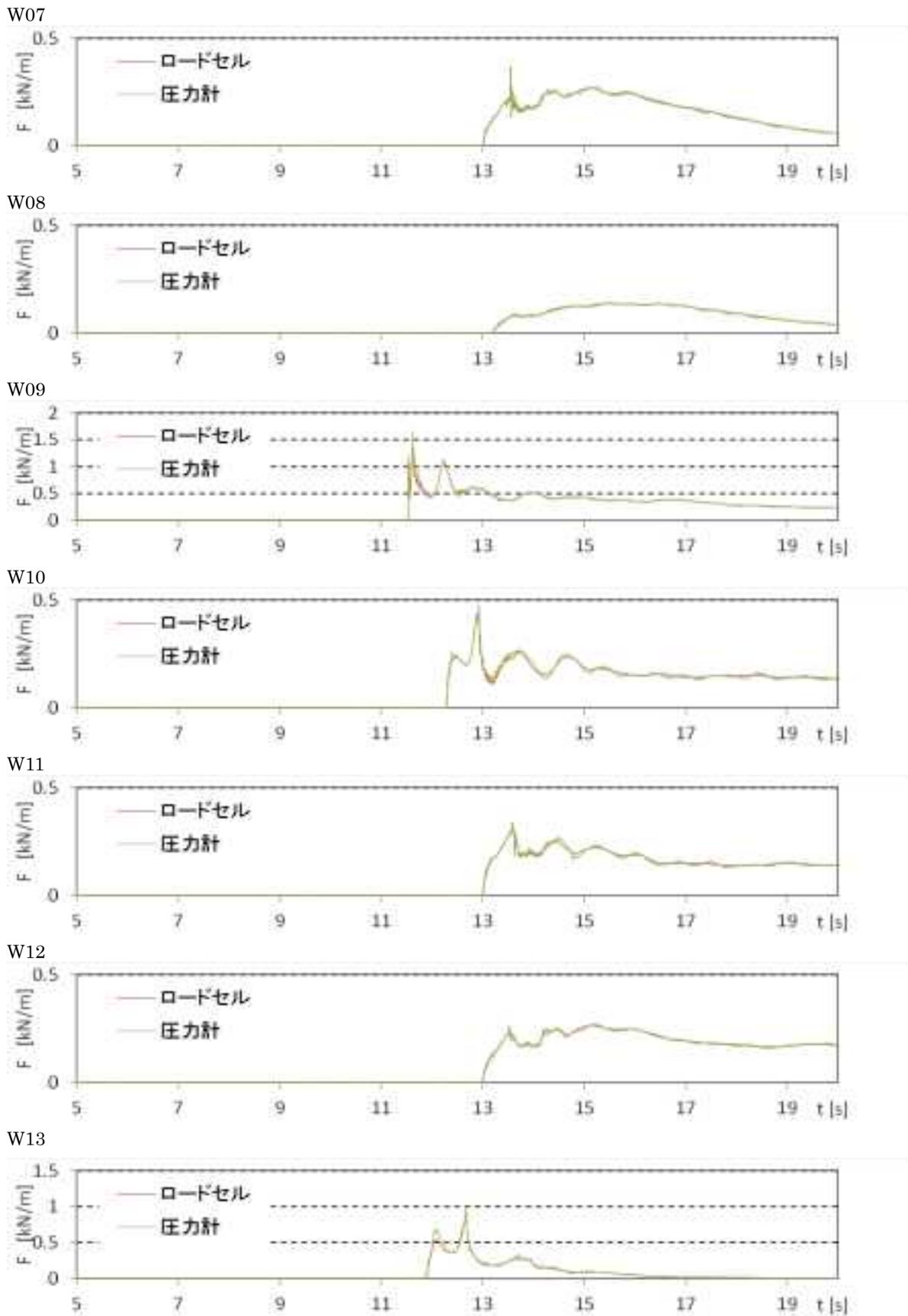


図 II.3.3-2 低剛性堤体模型の津波波力計測結果 (直立護岸, 設置位置 1.25m)

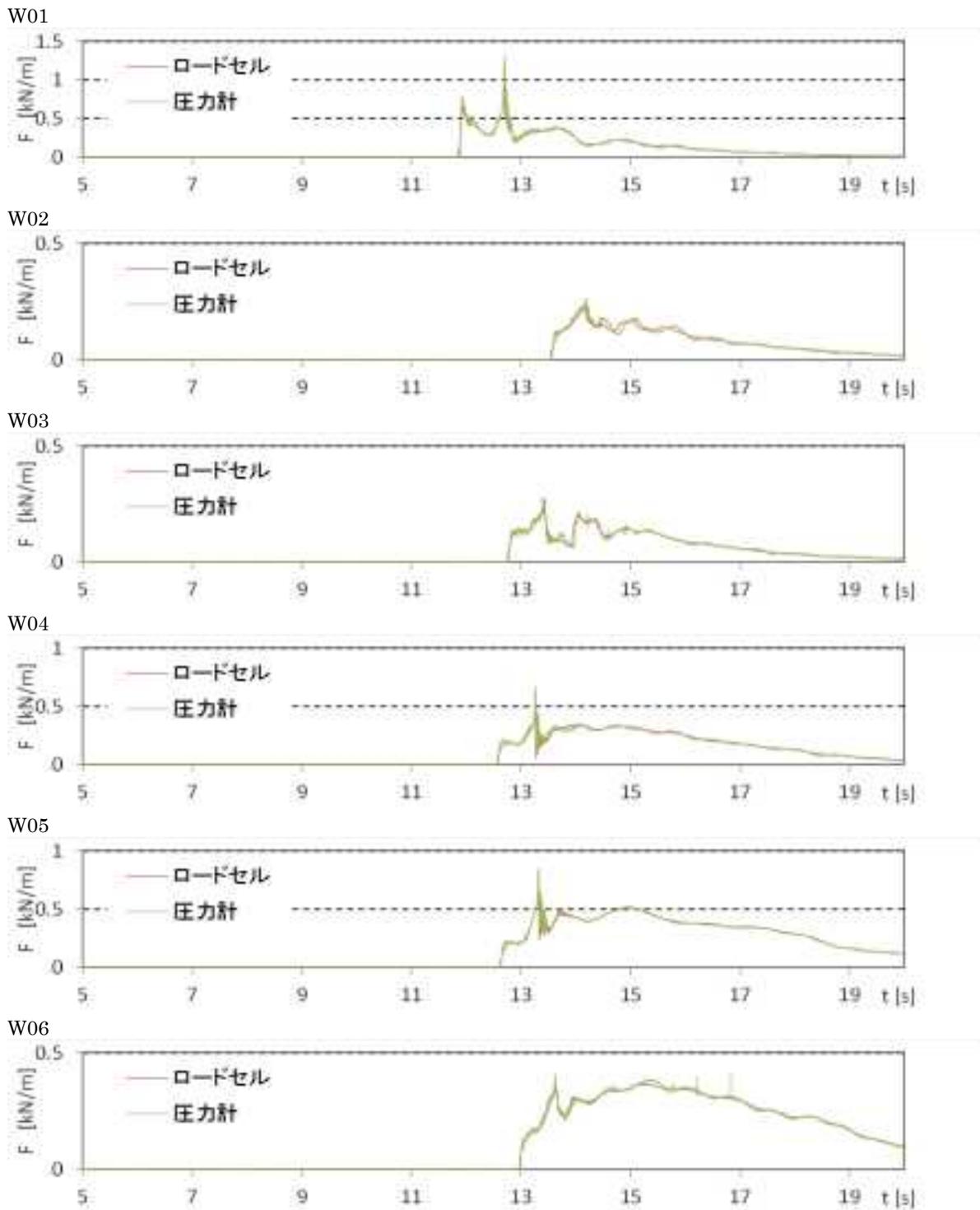


図 II.3.3-3 低剛性堤体模型の津波波力計測結果 (直立護岸, 設置位置 2.5m)

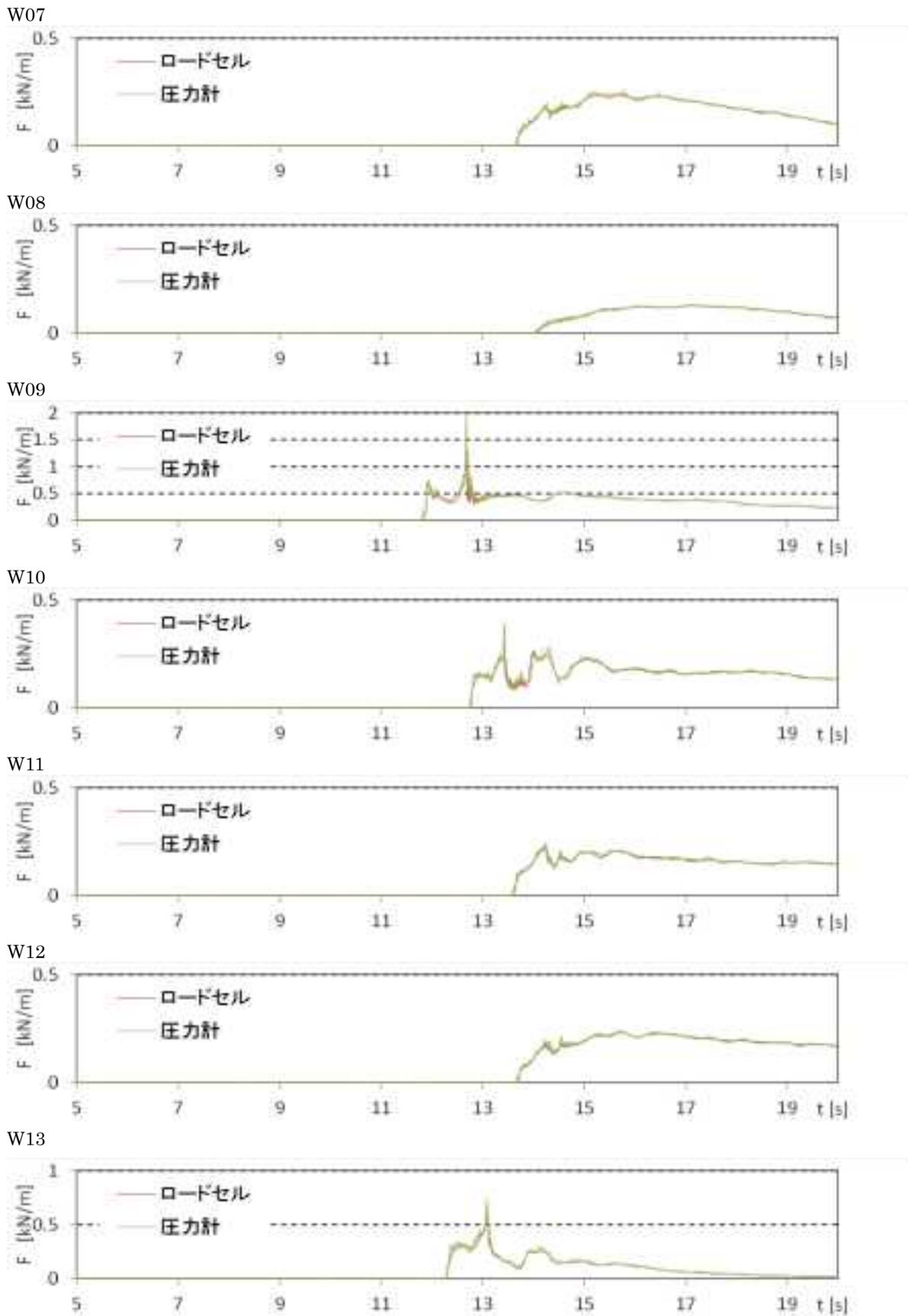


図 II.3.3-3 低剛性堤体模型の津波波力計測結果 (直立護岸, 設置位置 2.5m)

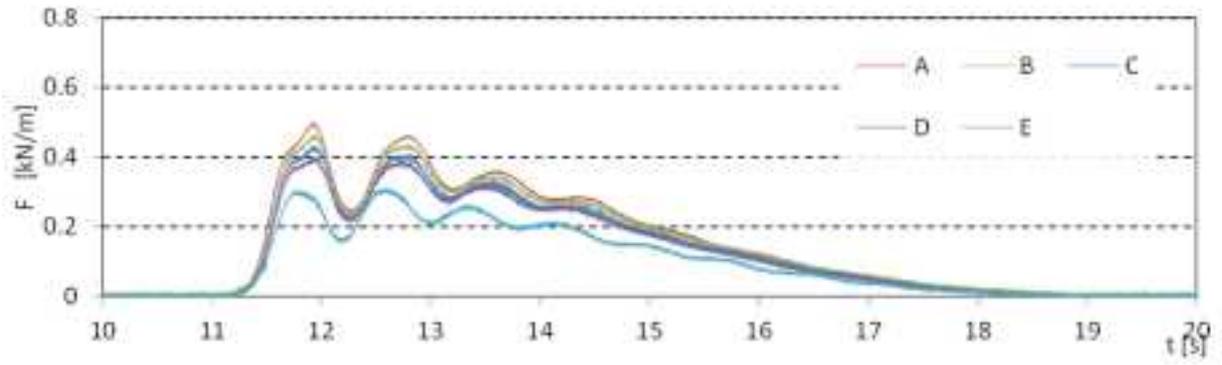


### 3.4. 波力/波圧試験（スリット付堤体模型）

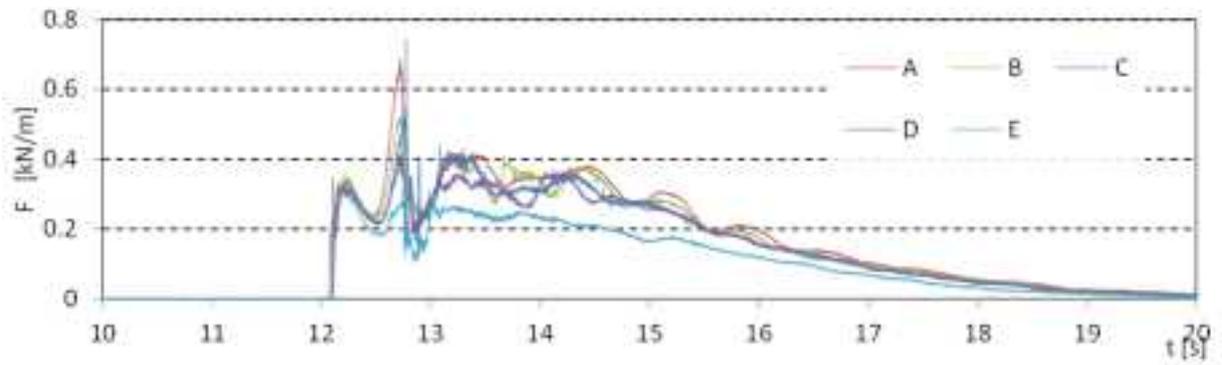
図 II.3.4-1, 図 II.3.4-2 にスリット付堤体模型に働く波力の時系列算出結果を示す。スリット幅は、CaseA～E でそれぞれ、A：なし、B：6mm、C：25mm、D：50mm、E：中央壁のみである。

波力の時系列特性は、スリットによらず類似となっている。CaseA～E の 5 種類のケースを比較すると、CaseE のみ顕著に低減していることが分かる。ただし、準定常的な波力については CaseE が顕著に低減しているが、波形の初期に働く衝撃的な波力については、その低減度合いが比較的小さい。CaseE では、中央の堤体模型板のみでその横に十分な空間があるため、準定常状態では、津波がある程度透過出来るため、波力が低減していると考えられる。

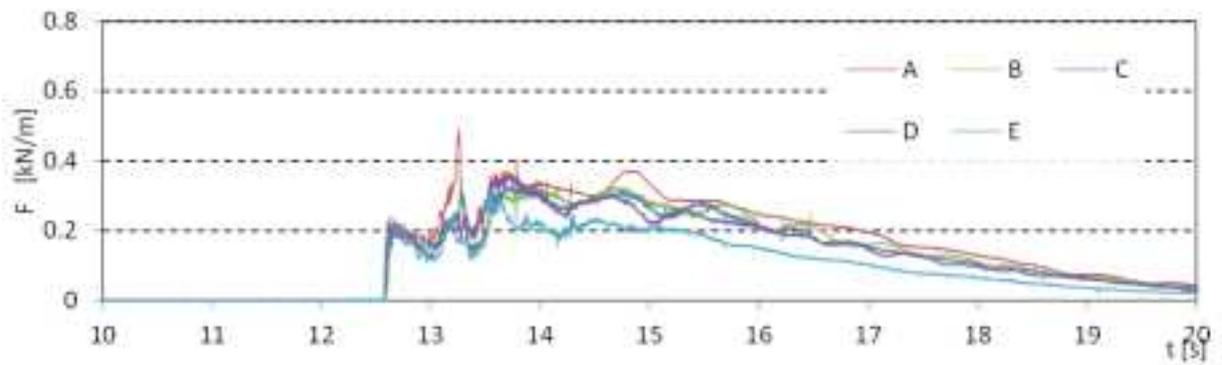
その他のケースにおいても、スリットがあることにより波力が低減している。特に、防潮堤位置 0m (P.08) においては、衝撃的な波力が働いていないため、スリットの幅に応じた波力の低下が確認できる。一方、防潮堤位置 2.5m (P.10) においては、スリットの有無による波力の違いはあるが、CaseB～D の波力は同程度で、スリットの幅による違いが小さい。P.08 は海に直接面した状態で堤体模型が設置されているため、水位変動により静水圧に準じた波力が生じており、スリットを抜ける水の量によって波力が低下している。一方 P.9, P.10 は、陸上部に設置されており、陸上を進行する津波の運動量が波力に影響するため、スリットを抜ける運動量に対するスリット幅の影響が小さいと考えられる。



(a)防潮堤位置 0m

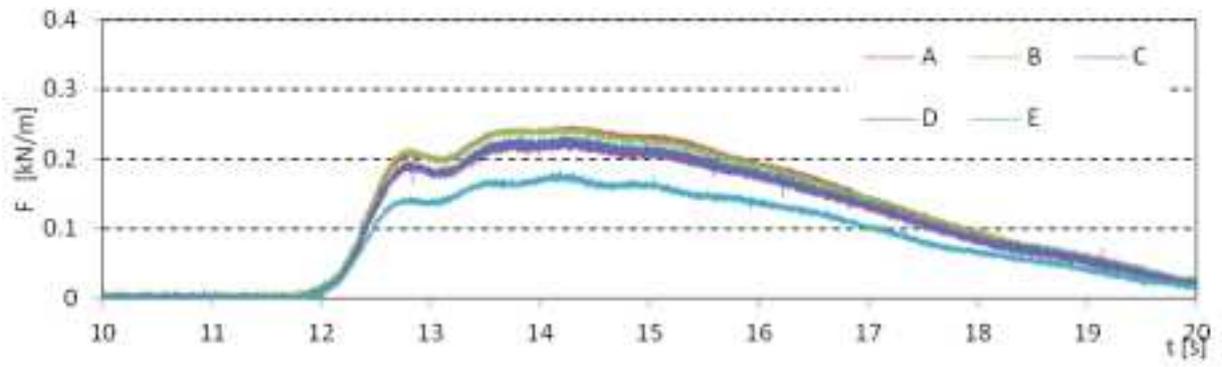


(b)防潮堤位置 1.25m

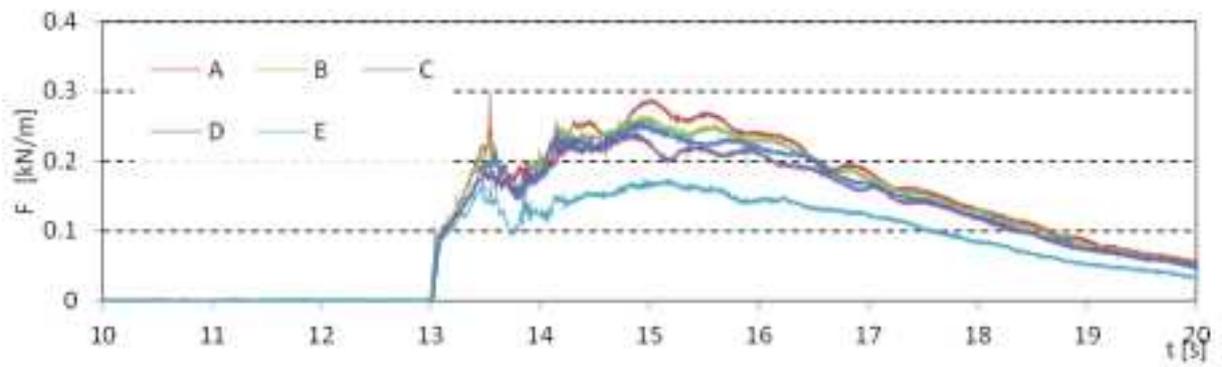


(c)防潮堤位置 2.5m

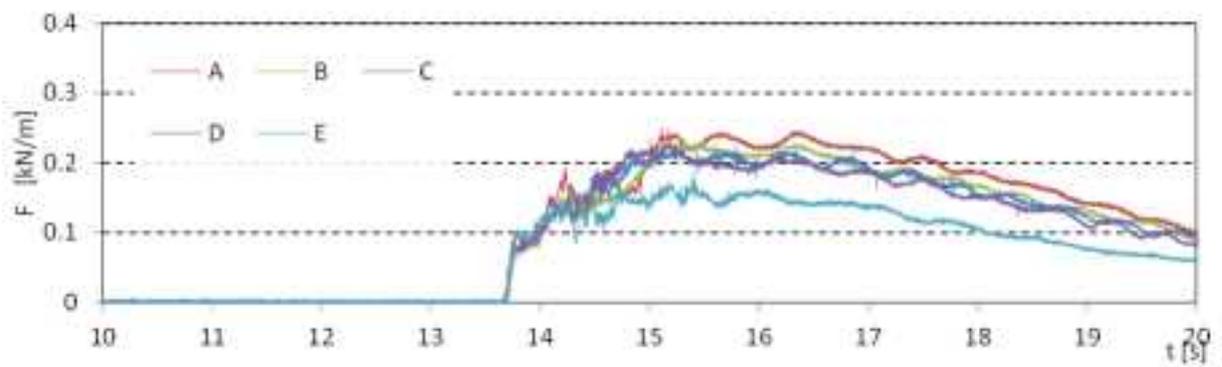
図 II.3.4-1 スリット付堤体模型における津波波力計測結果 (W04)



(a)防潮堤位置 0m



(b)防潮堤位置 1.25m



(c)防潮堤位置 2.5m

図 II.3.4-2 スリット付堤体模型における津波波力計測結果 (W07)



### 3.5. 波力/波圧試験（障害物模型）

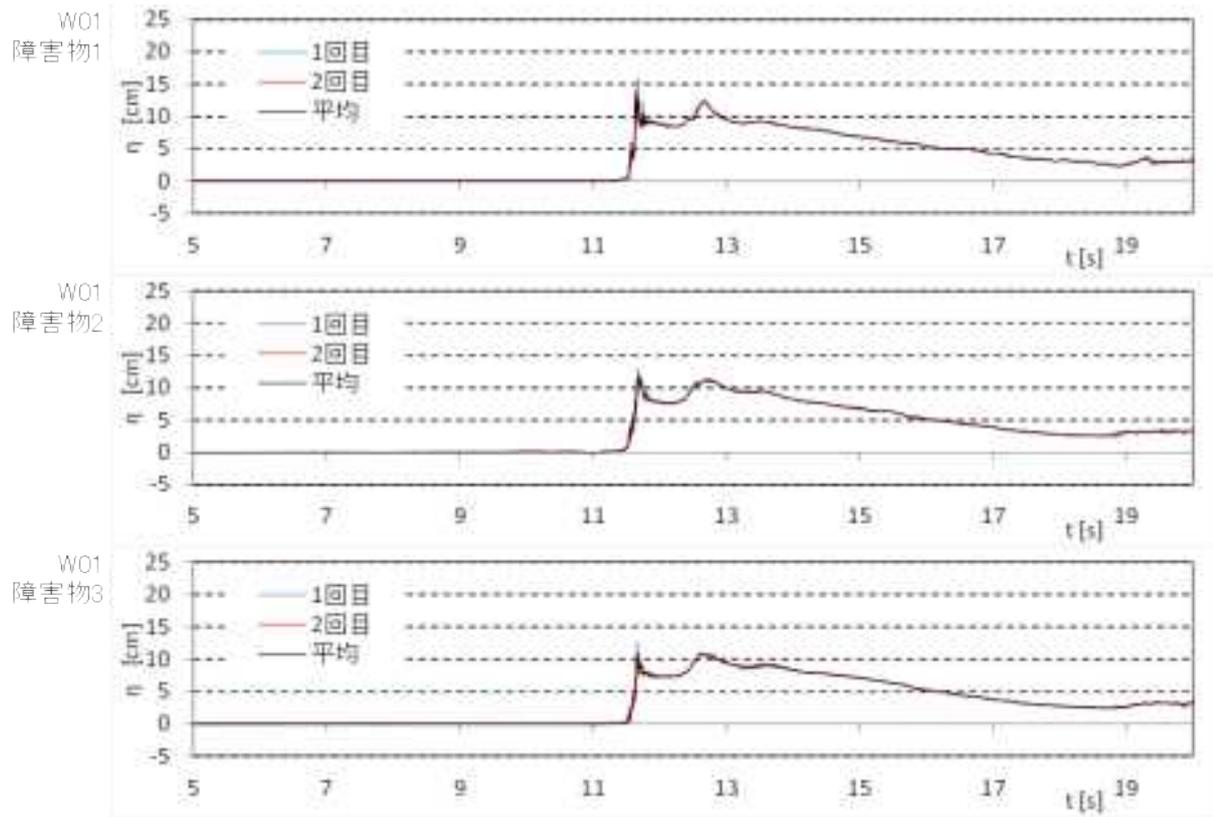
図 II.3.5-1 に示す 3 種類の障害物模型を設置した試験について、通過波の結果を図 II.3.5-2, 図 II.3.5-3 に、波力の算定結果を図 II.3.5-4, 図 II.3.5-5 に示す。図 II.3.5-2, 図 II.3.5-3 の一部の流速の計測結果に、津波到達後しばらくの間までのデータの欠測が見られるが、底面流速計上に水が十分ない、もしくは剥離等の空気の混入により流速が正しく測れなかったものである。流速の再現性が良好なため、少なくとも 1 回は全てのケースでデータが取得できるまで繰り返し、1 回分しかデータが計測できなかったものについては、これを採用することとした。

障害物 1～3 を比較すると、その時系列特性（形状）はいずれも類似である。また、違いは小さいものの、障害物 1, 2, 3 の順に通過波、波力ともに低下していることが分かる。特に通過波については、障害物の存在により、短周期の変動成分が減少し、波形が全体に平滑化する傾向にある。一般に、障害物を通過する波は、周期が短いほどエネルギーが減少することが知られており、上述の結果はこれに整合する。

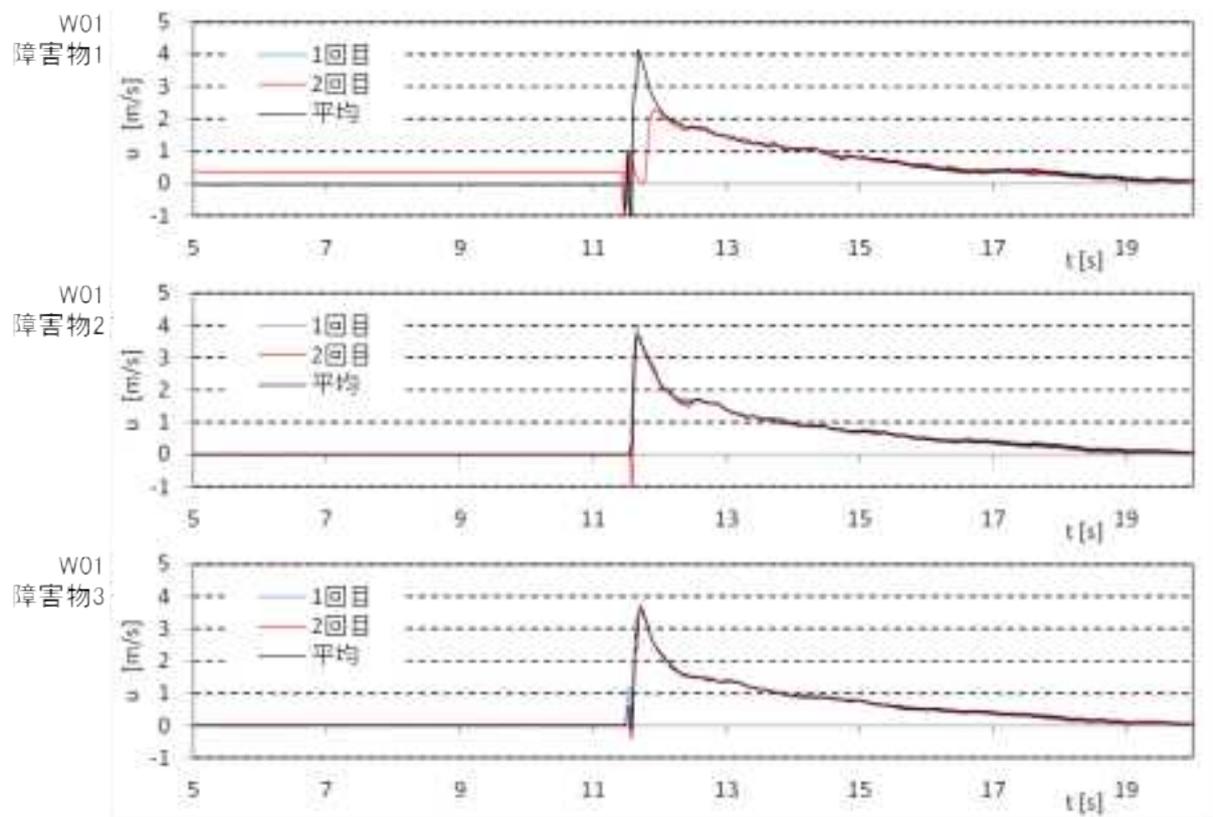
また、障害物による水位や波力の低下は、津波到達時の波形の先端部分で顕著である。定常的な流れを考えると、障害物によるエネルギーの損失は流速の 2 乗に比例すると考えられる。したがって、流速が大きいほど相対的に障害物の抵抗も大きくなる。陸上部を進行する津波の流速は、先端部分がもっとも大きくその後徐々に小さくなるため、障害物による低減効果も波形の先端部分で顕著に表れていると考えられる。



図 II.3.5-1 障害物模型の設置模式図

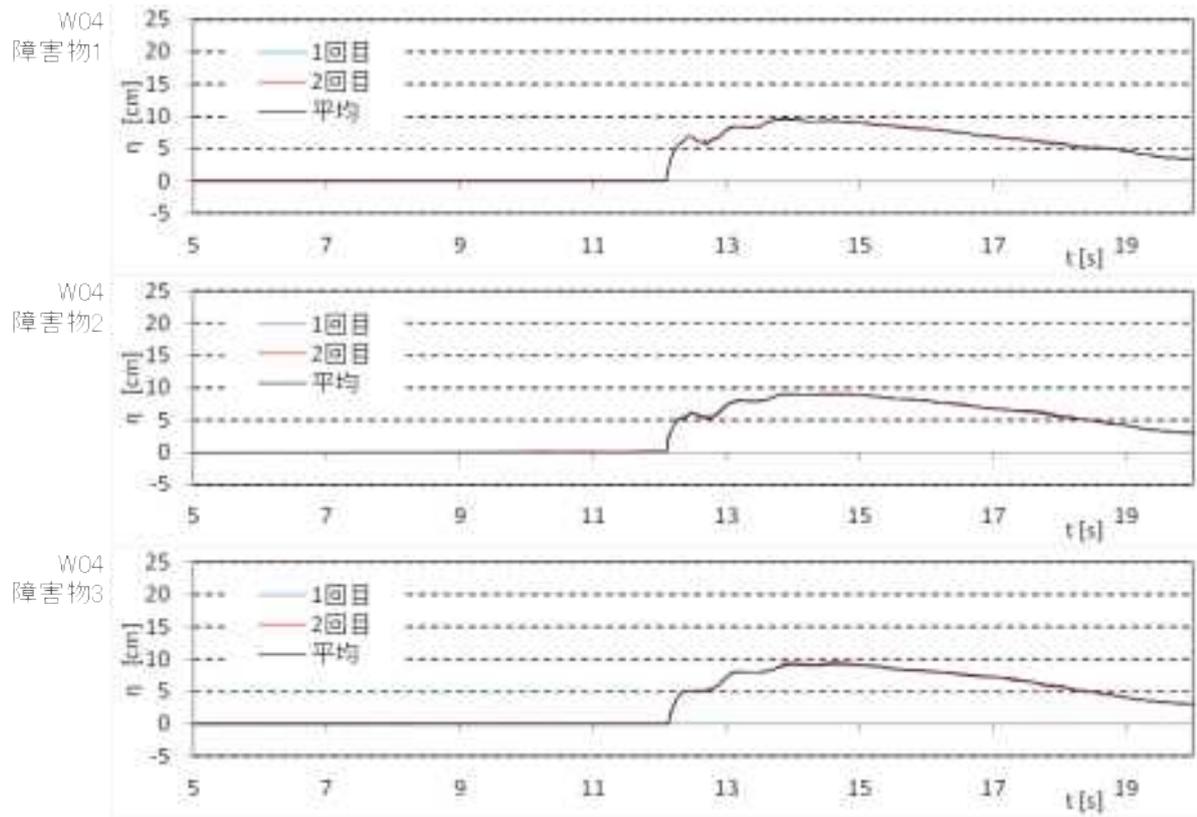


(a)水位

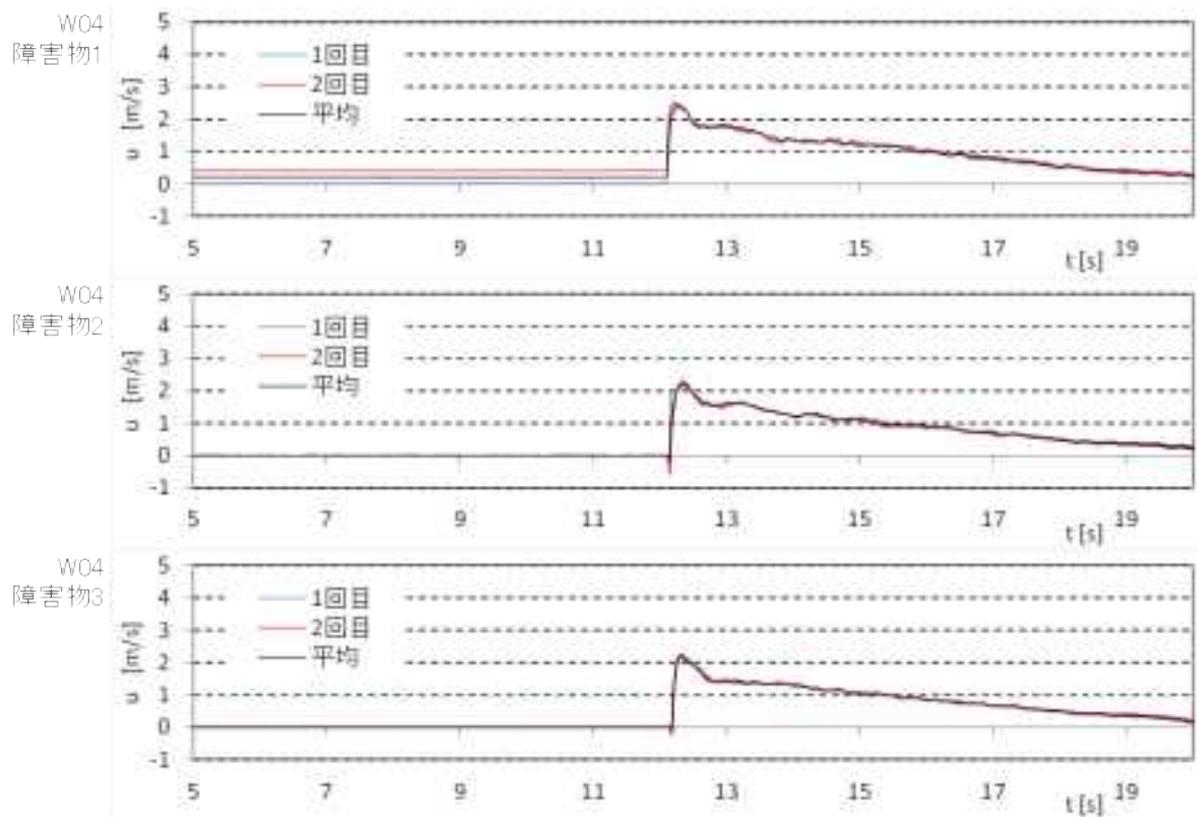


(b)流速

図 II.3.5-2 障害物模型の通過波時系列計測結果 (防潮堤位置 1.25m, W01)

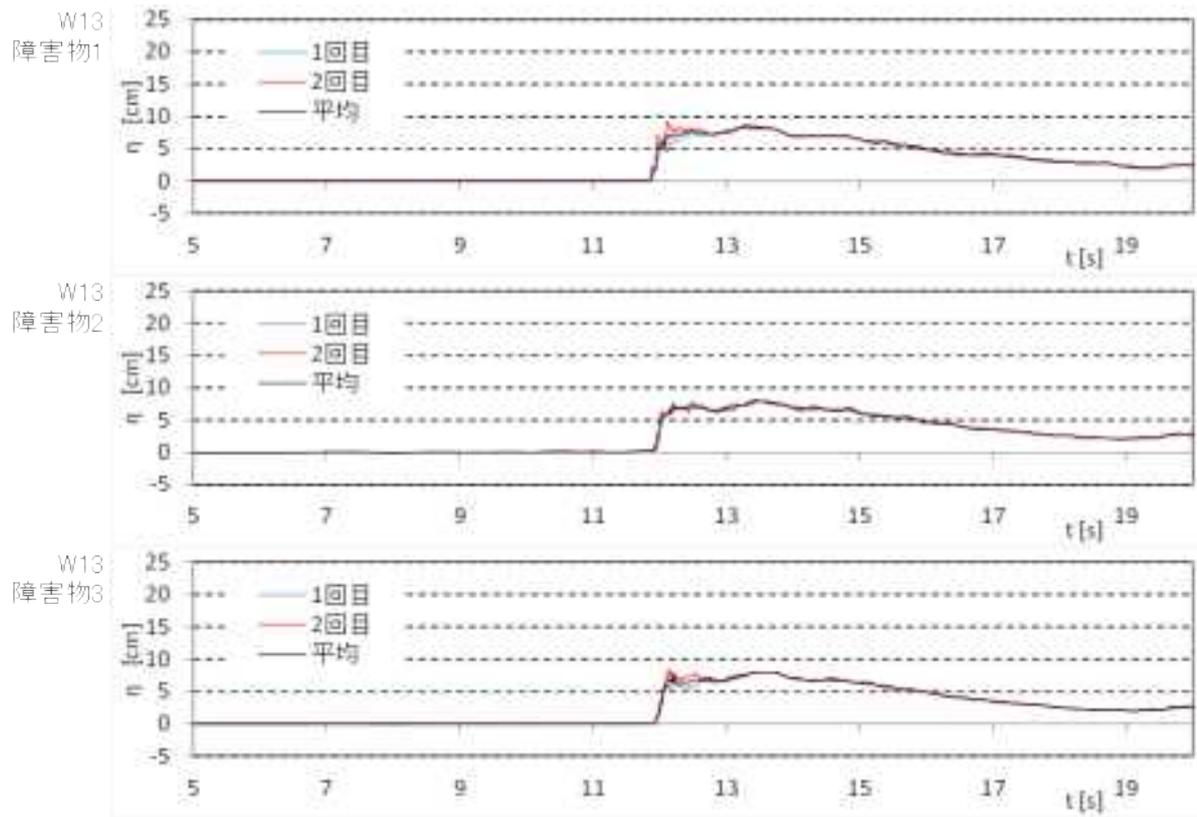


(a)水位

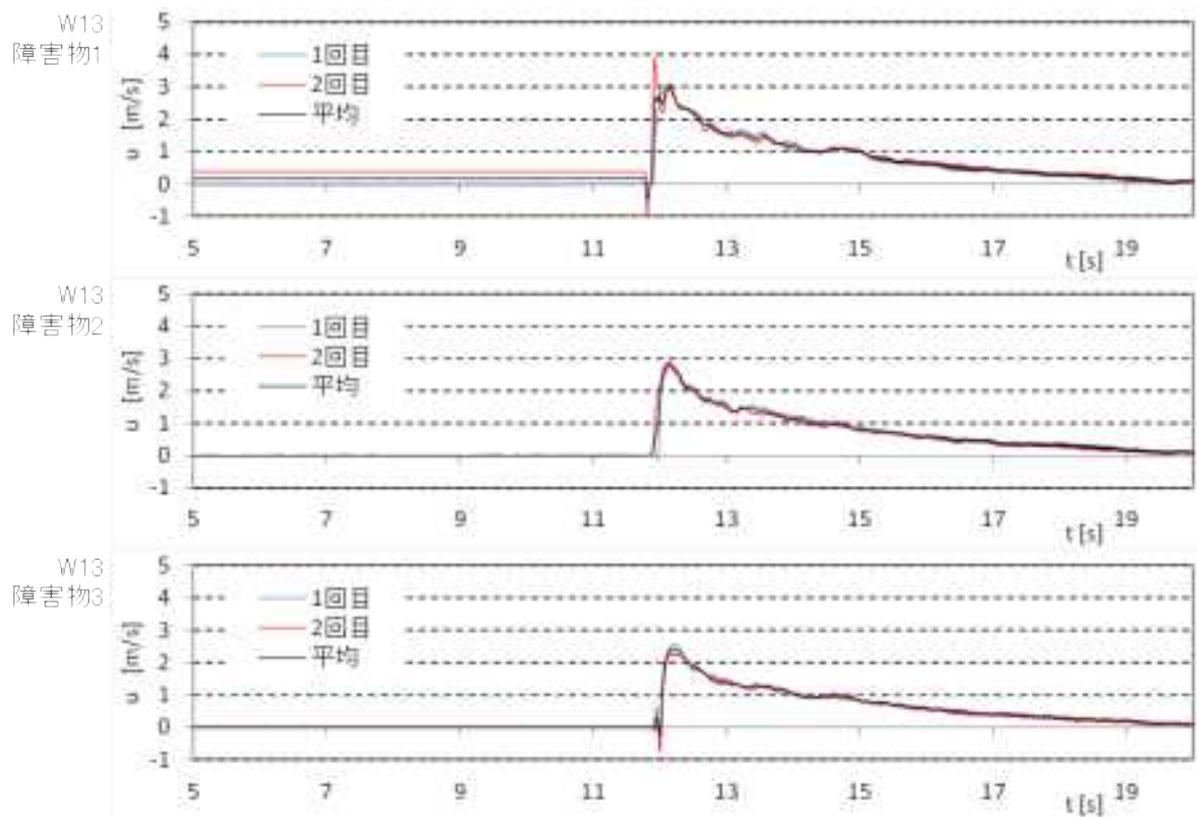


(b)流速

図 II.3.5-2 障害物模型の通過波時系列計測結果 (防潮堤位置 1.25m, W04)

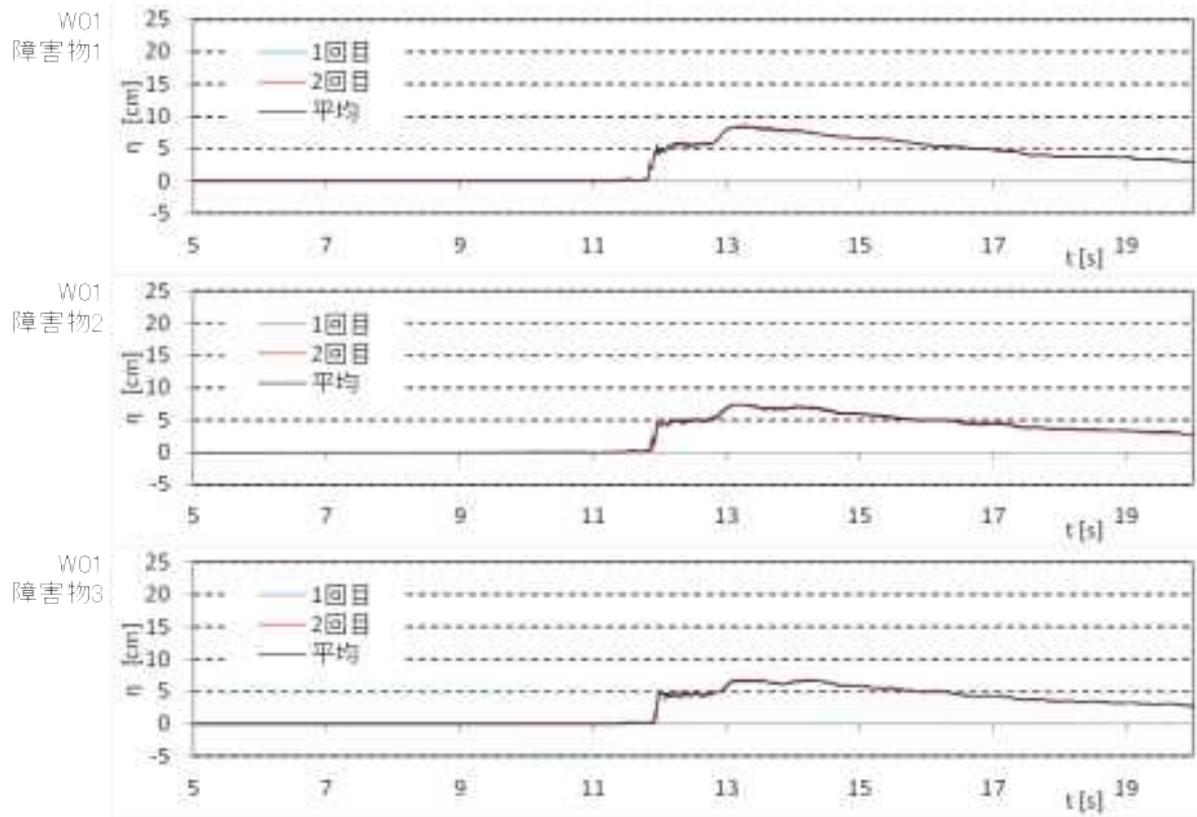


(a)水位

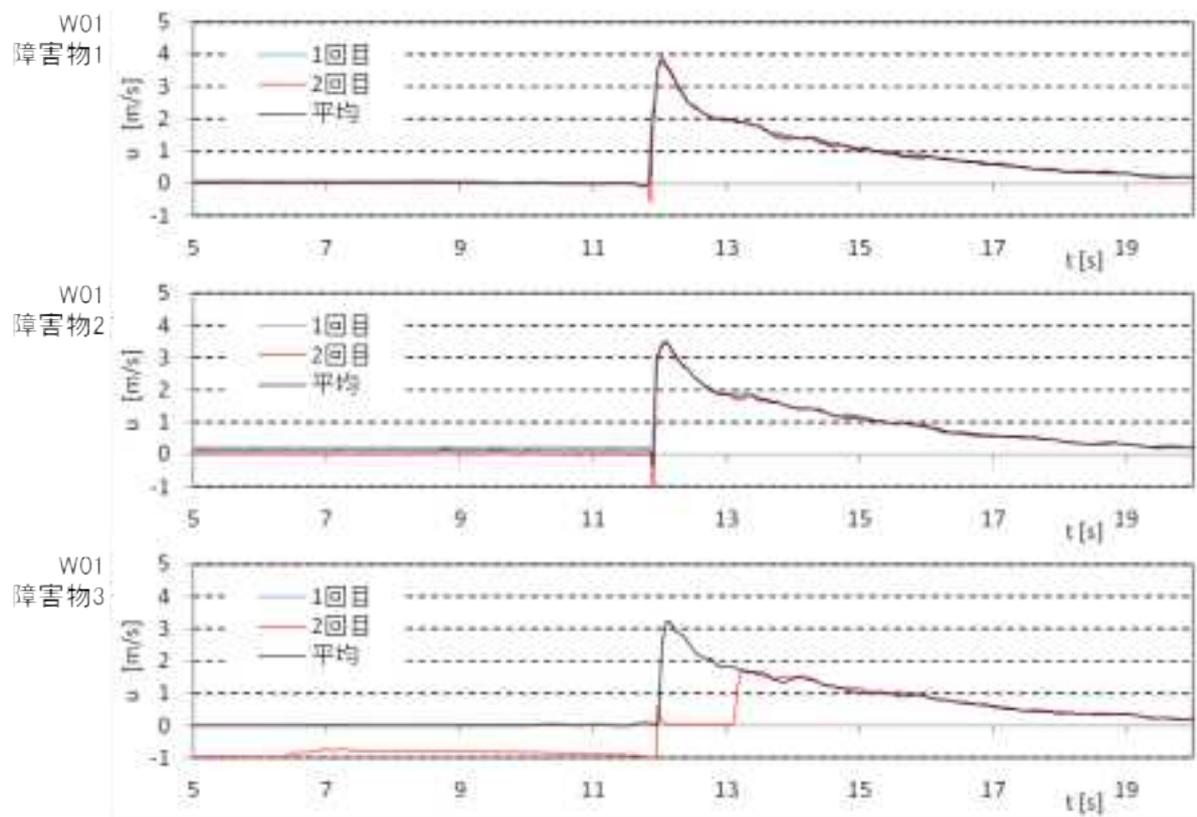


(b)流速

図 II.3.5-2 障害物模型の通過波時系列計測結果 (防潮堤位置 1.25m, W04)

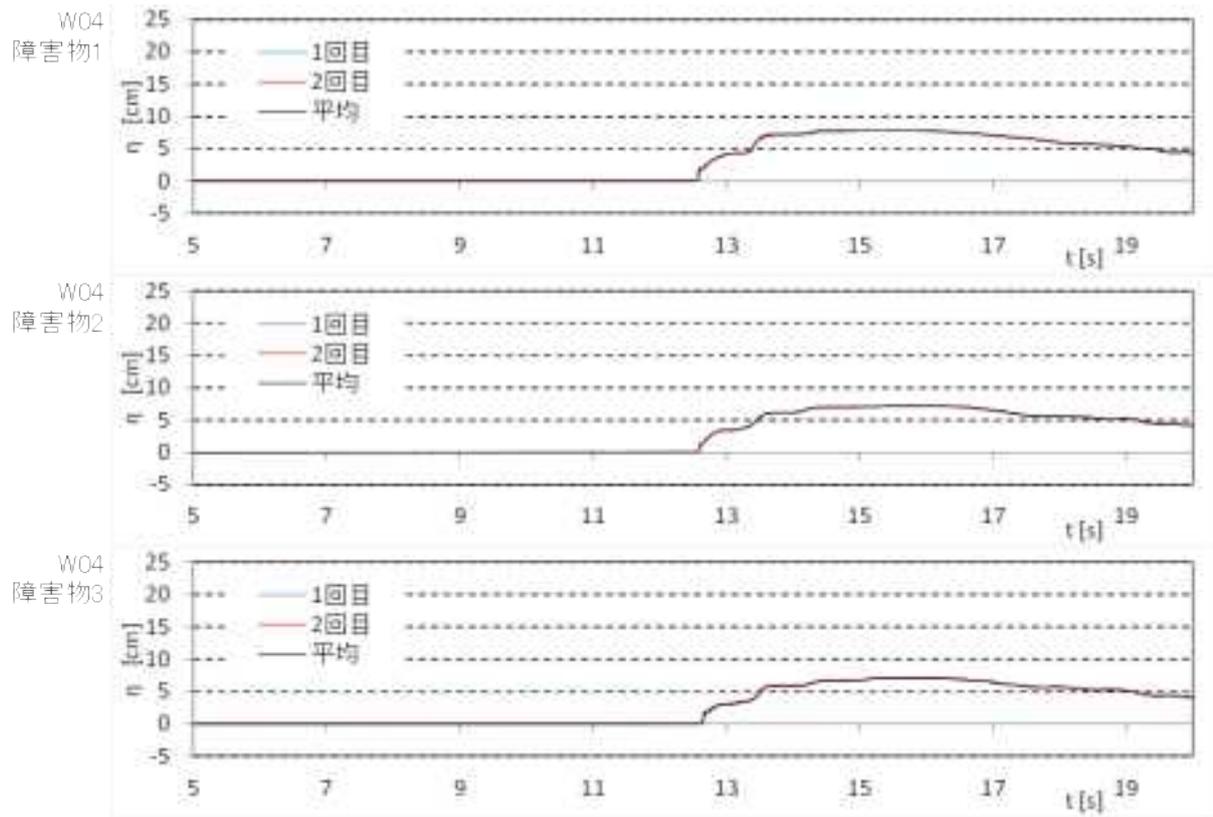


(a)水位

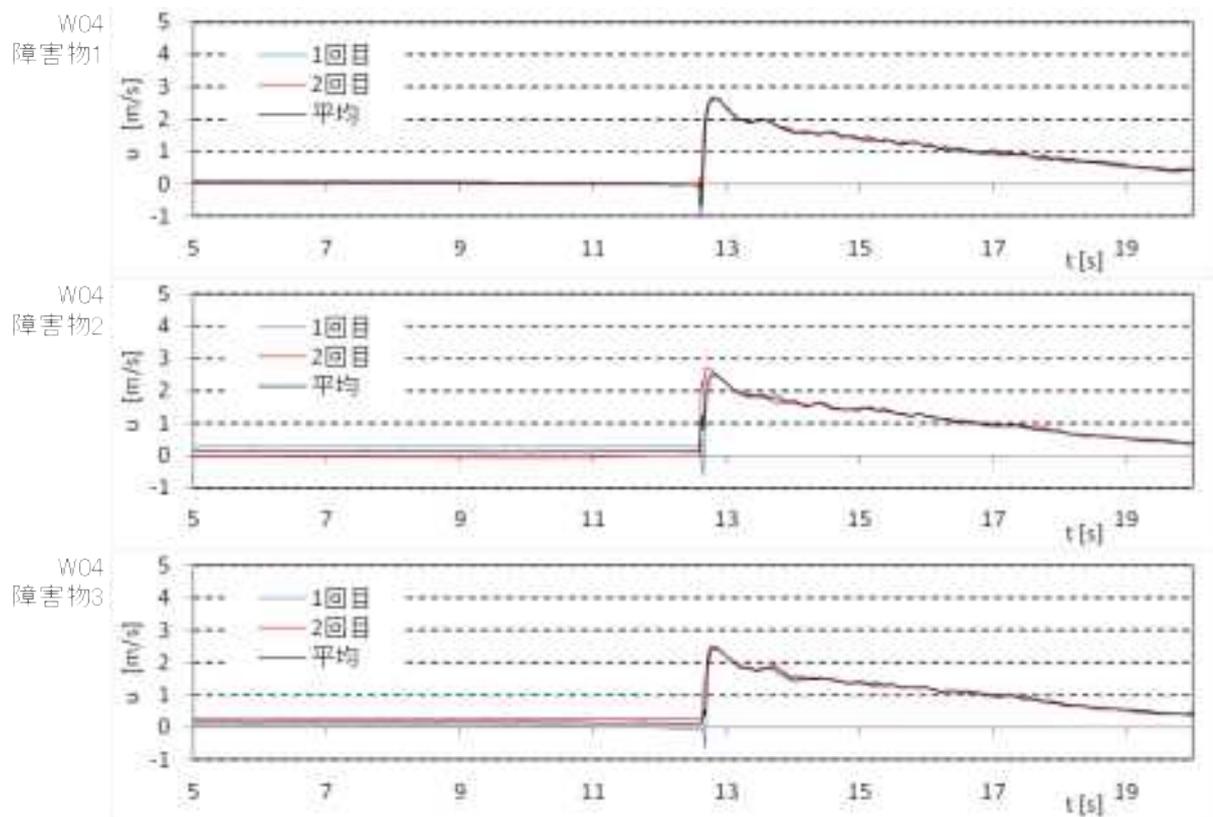


(b)流速

図 II.3.5-3 障害物模型の通過波時系列計測結果 (防潮堤位置 2.5m, W01)

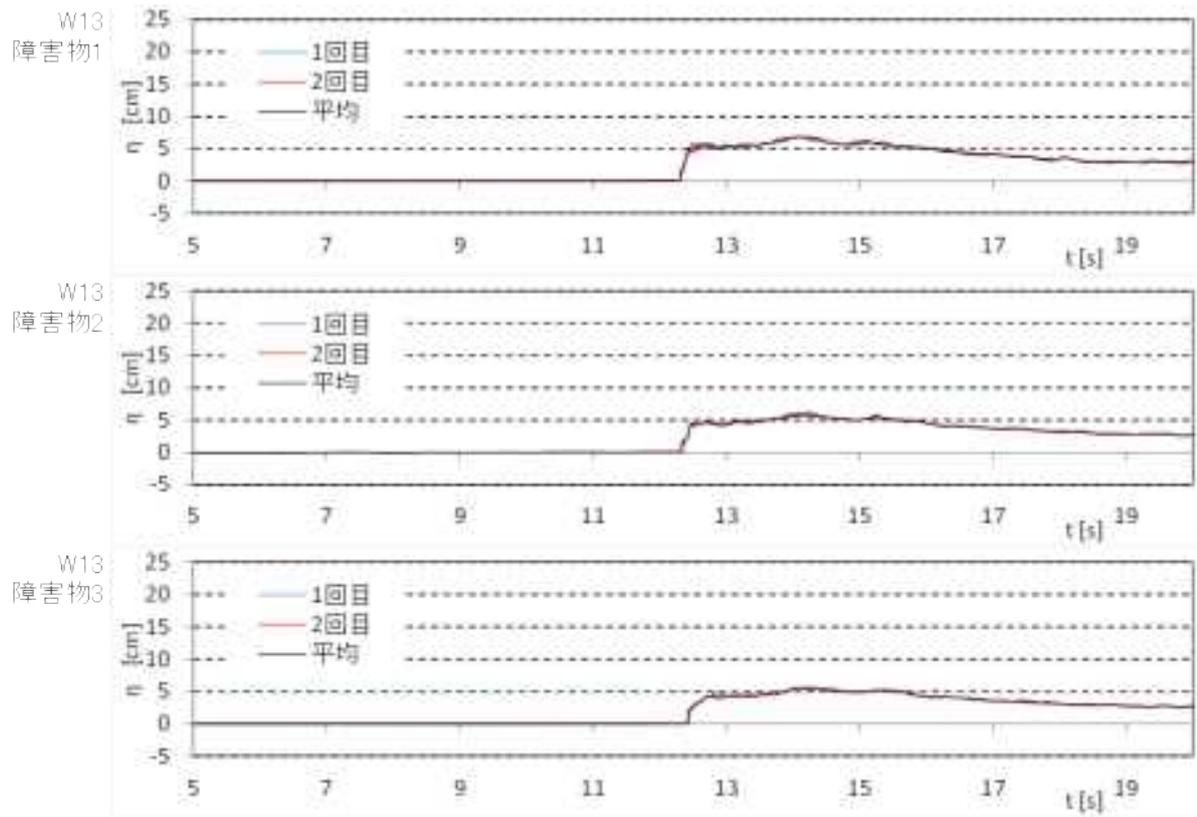


(a)水位

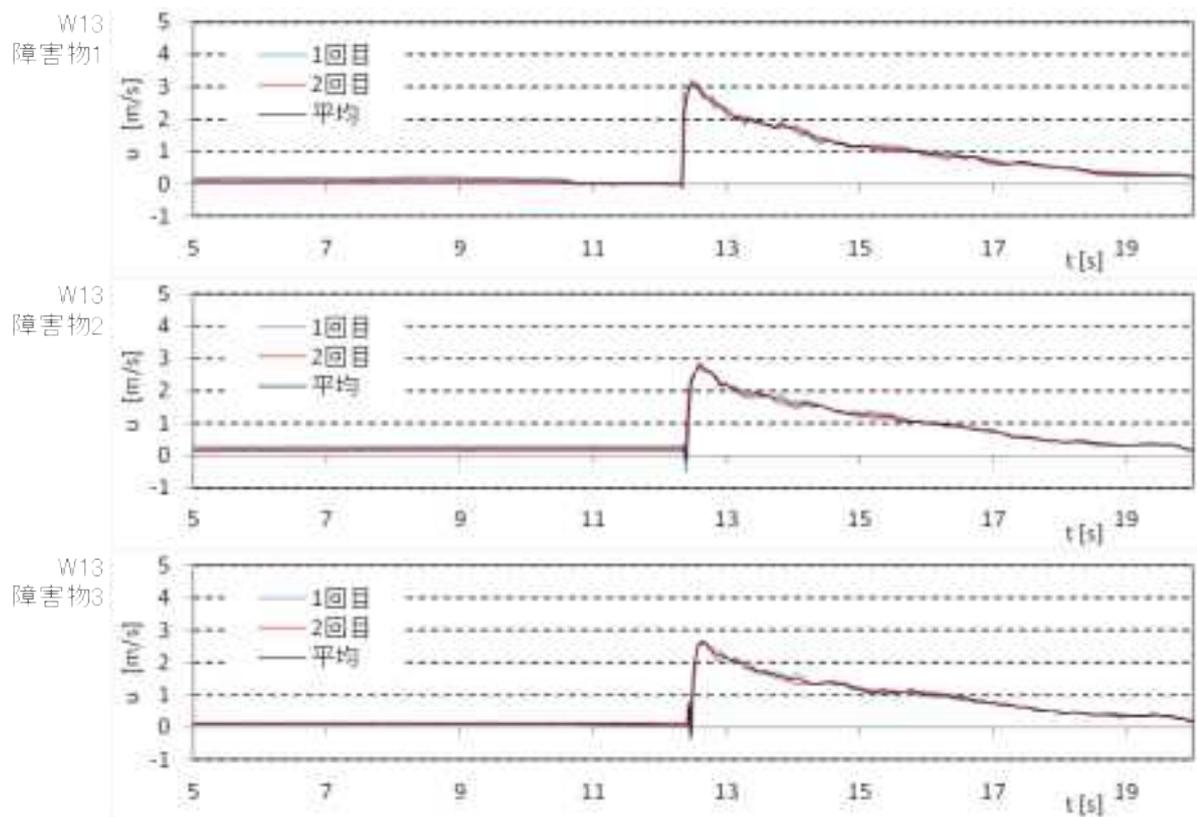


(b)流速

図 II.3.5-3 障害物模型の通過波時系列計測結果 (防潮堤位置 2.5m, W04)

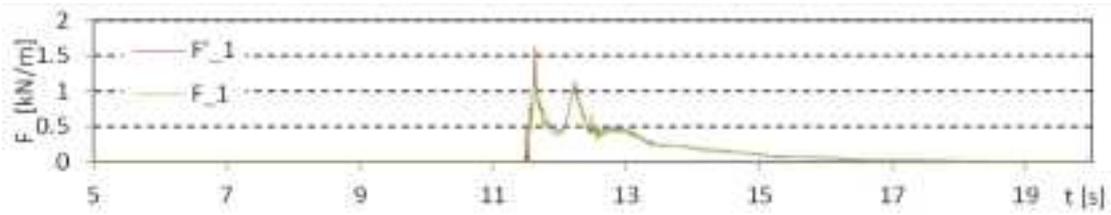


(a)水位

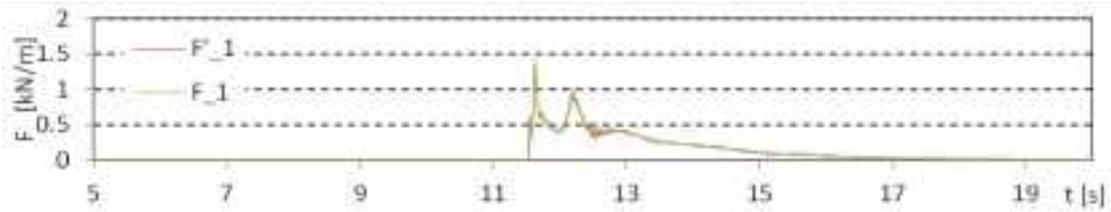


(b)流速

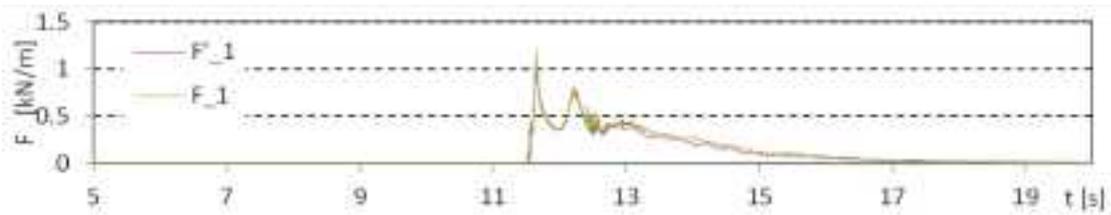
図 II.3.5-3 障害物模型の通過波時系列計測結果 (防潮堤位置 2.5m, W04)



(a) 障害物 1

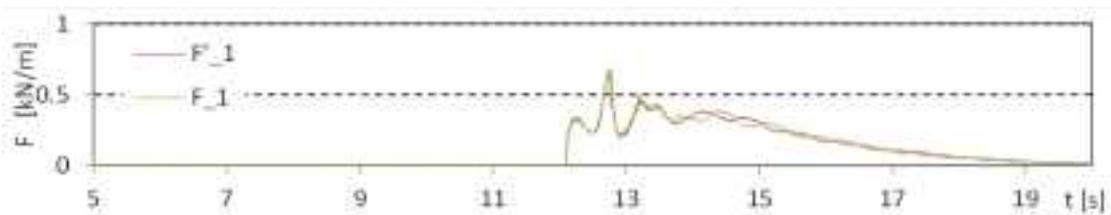


(b) 障害物 2

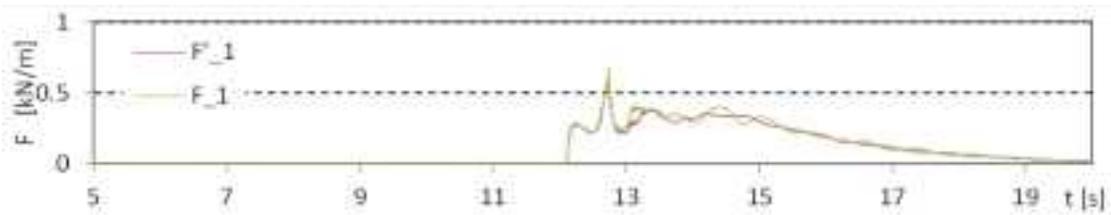


(c) 障害物 3

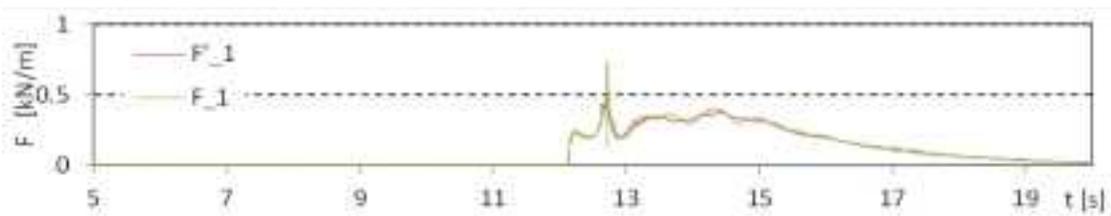
図 II.3.5-4 障害物模型の津波波力時系列 (防潮堤位置 1.25m, W01)



(a) 障害物 1

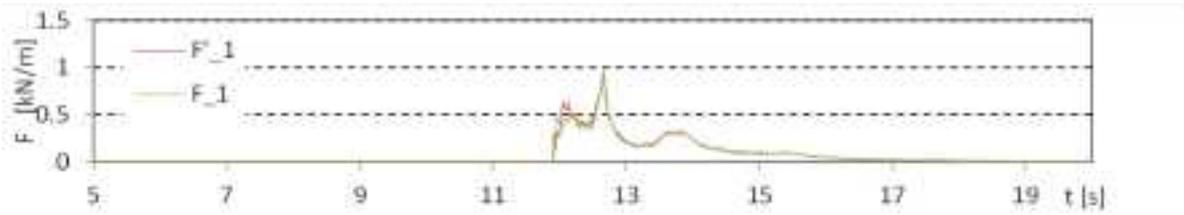


(b) 障害物 2

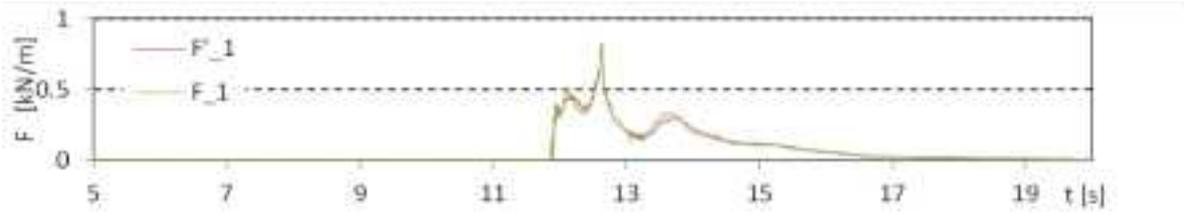


(c) 障害物 3

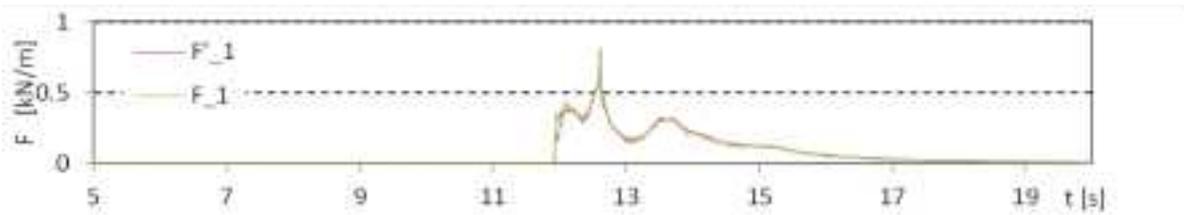
図 II.3.5-4 障害物模型の津波波力時系列 (防潮堤位置 1.25m, W04)



(a)障害物 1

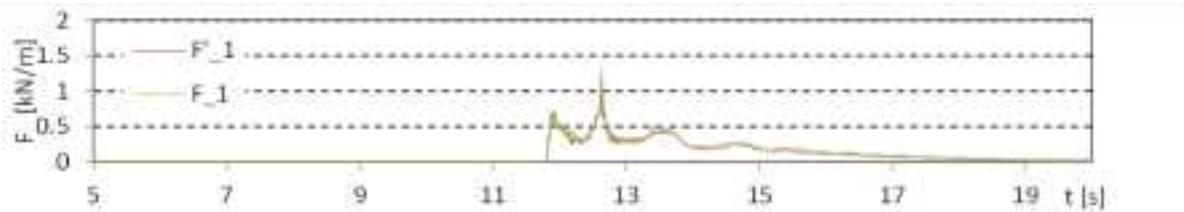


(b)障害物 2

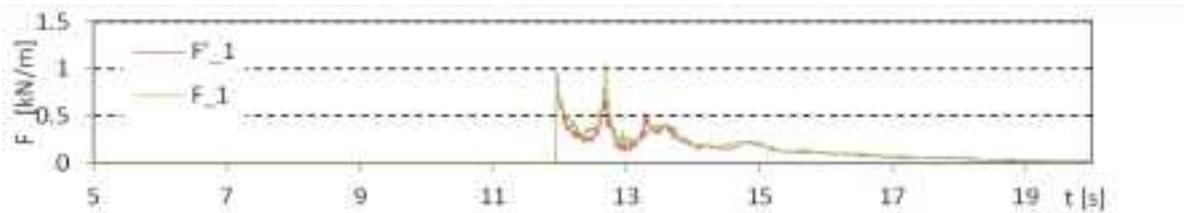


(c)障害物 3

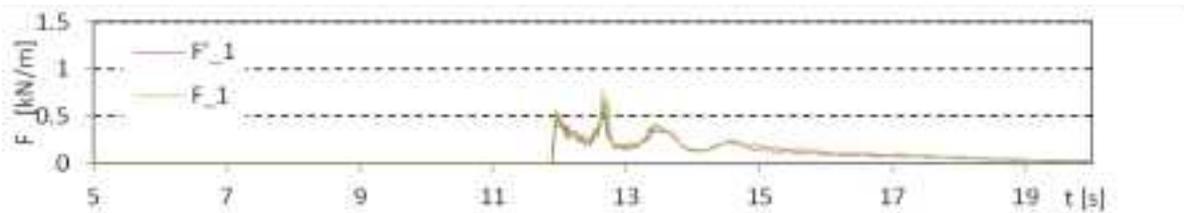
図 II.3.5-4 障害物模型の津波波力時系列 (防潮堤位置 1.25m, W04)



(a)障害物 1

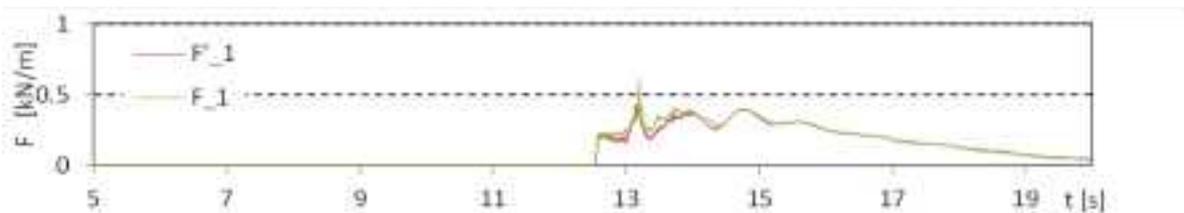


(b)障害物 2

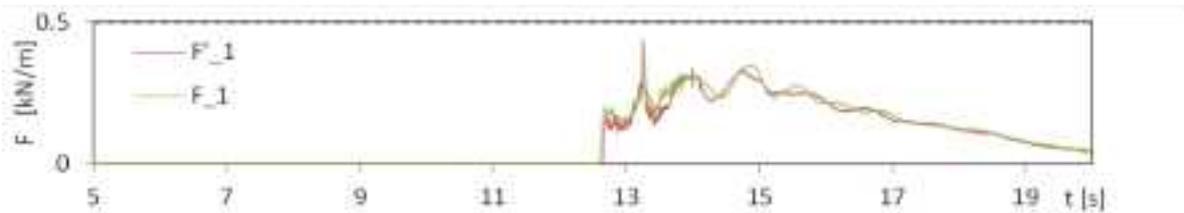


(c)障害物 3

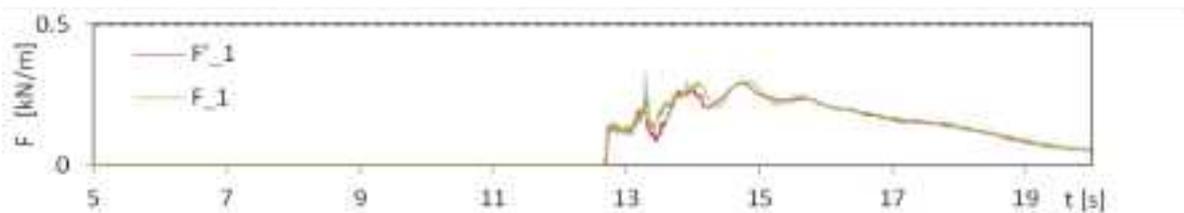
図 II.3.5-5 障害物模型の津波波力時系列 (防潮堤位置 2.5m, W01)



(a)障害物 1

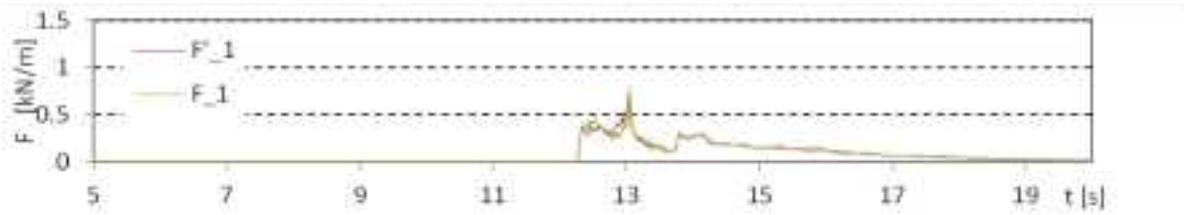


(b)障害物 2

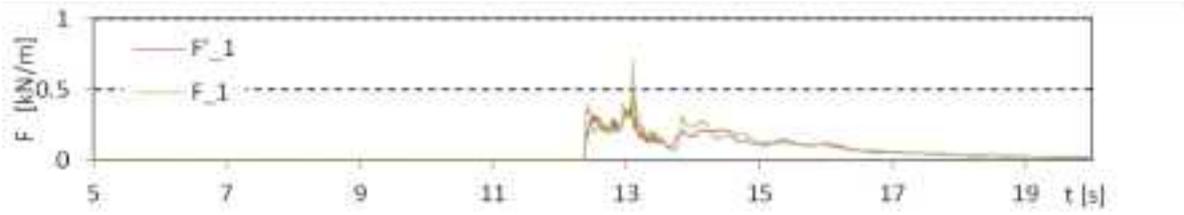


(c)障害物 3

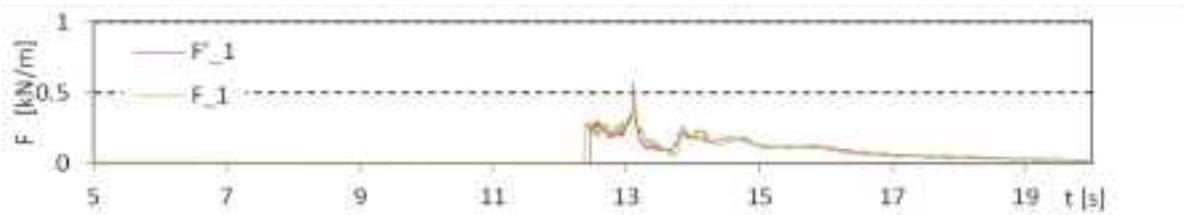
図 II.3.5-5 障害物模型の津波波力時系列 (防潮堤位置 2.5m, W04)



(a)障害物 1



(b)障害物 2



(c)障害物 3

図 II.3.5-5 障害物模型の津波波力時系列 (防潮堤位置 2.5m, W04)



### 3.6. 波力/波圧試験（盛土模型）

図 II.3.6-2～図 II.3.6-7 に、盛土模型を設置したケースの通過波の計測結果を示す。それぞれ、CaseA～C の盛土模型設置状態の通過波の結果を示した。ここで、盛土模型設置時 CaseB の P.08 と CaseC の P.09 の水位と流速の計測点は、図 II.3.6-1 に示すように他の試験とは位置が異なっており、例えば図 II.3.6-2 の CaseB に示した  $\eta_{08}$  は盛土天端からの水深を示しているため、15cm 加えたものが水位となる。盛土のない CaseA に比較すると、盛土のある CaseB, C では盛土の背面において水位が非常に小さく、全てのケースで 5 cm 程度以下となる。一方流速は大きく、2m を超える流速が生じている。これは、盛土の背面斜面を滑り降りることにより水脈が薄く速い流れになることが要因である。またこのため、斜面を滑り下りて水平床に衝突する部分で大きな乱れが発生しており、水位、流速ともに計測結果が不安定となっている。なお、プロペラ流速計による流速の計測結果が、底面電磁流速計によるものよりも小さくなっているのは、水深が小さくプロペラ流速計が完全に水没していないためである。また、一部の底面流速計でデータが欠測しているが、水脈が薄く流速が大きいため、剥離の影響により流速が計測出来なかったものである。図 II.3.6-8～図 II.3.6-13 に、波力の算出結果を示す。堤体模型設置位置 1.25m (P.09) に対する CaseA, B の盛土模型の試験結果、堤体模型設置位置 2.5m (P.10) に対する CaseA, C の盛土模型の試験結果をそれぞれ示している。

CaseA では、波力の時系列特性（形状）は 1.25m と 2.5m で類似であるが、波力が汀線から離れるにしたがって低減している。これに対し盛土の有無による違い（CaseA1.25m vs. CaseB1.25m および CaseA2.5m vs. CaseC2.5m）を比較すると、盛土がない場合は水塊落下時に生じる波力（セカンドピーク）が卓越するのに対し、盛土があるとこれが低減し、その後の準定常波力（サードピーク）が卓越するようになる。盛土により一旦流速が低下することと、斜面を滑り落ちることにより流速が下向きになり、水塊の跳ね上げが低減することが要因と考えられる。なお、この準定常波力波、堤体模型と盛土の間に水が溜まった状態で生じるため、実際の構造物を考える場合、この間の水は横断方向に一部は抜けると考えられるため、これよりも波力は低減する可能性が考えられる。

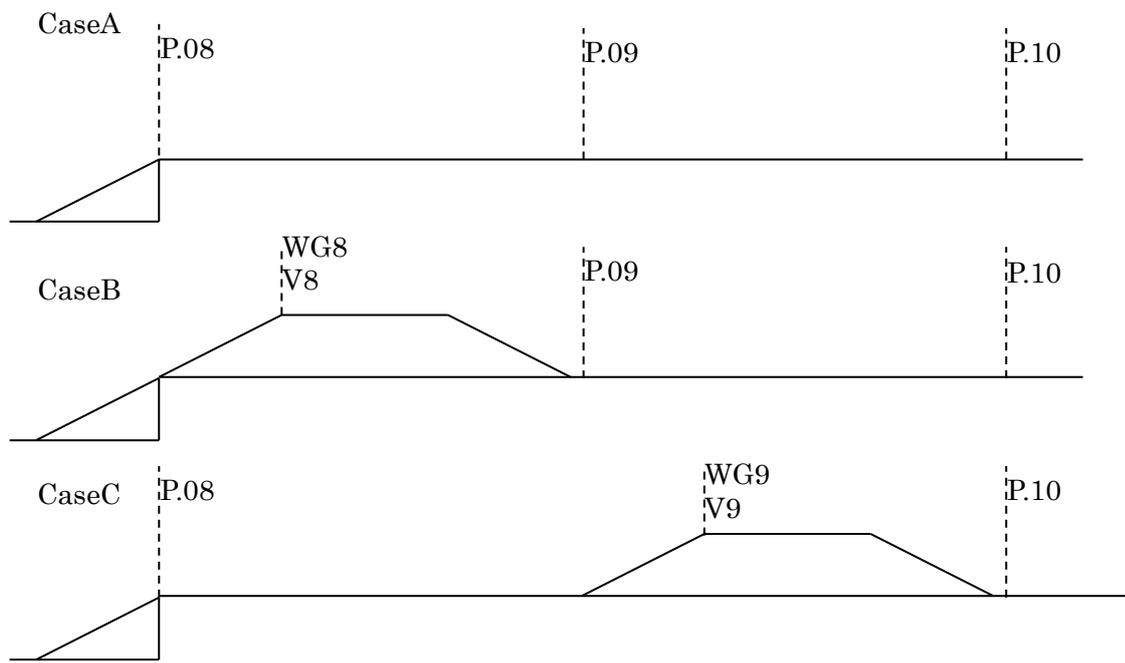


図 II.3.6-1 盛土模型設置時の水位流速計測位置

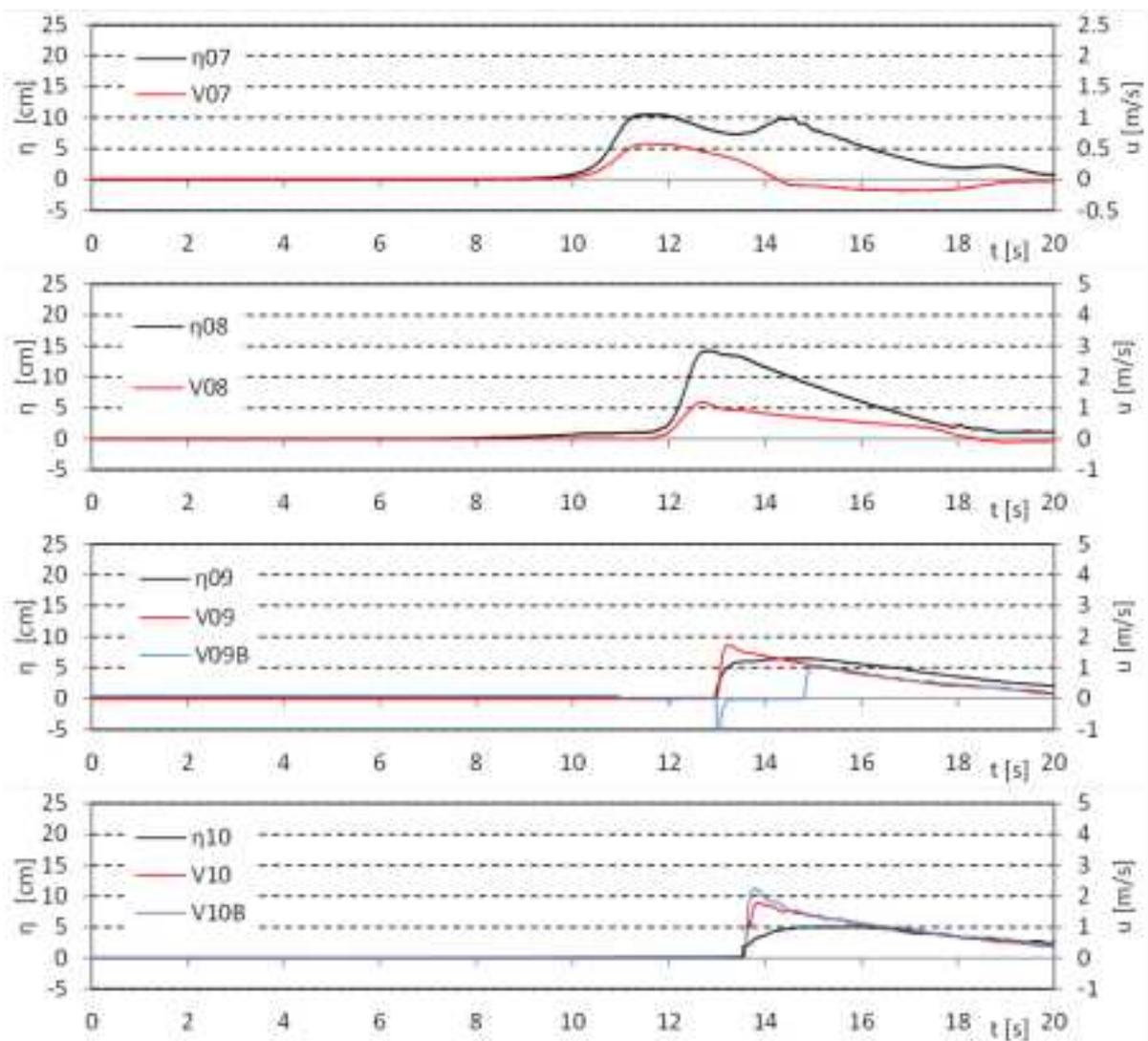


図 II.3.6-2 盛土模型の通過波計測結果 (CaseA, W02)

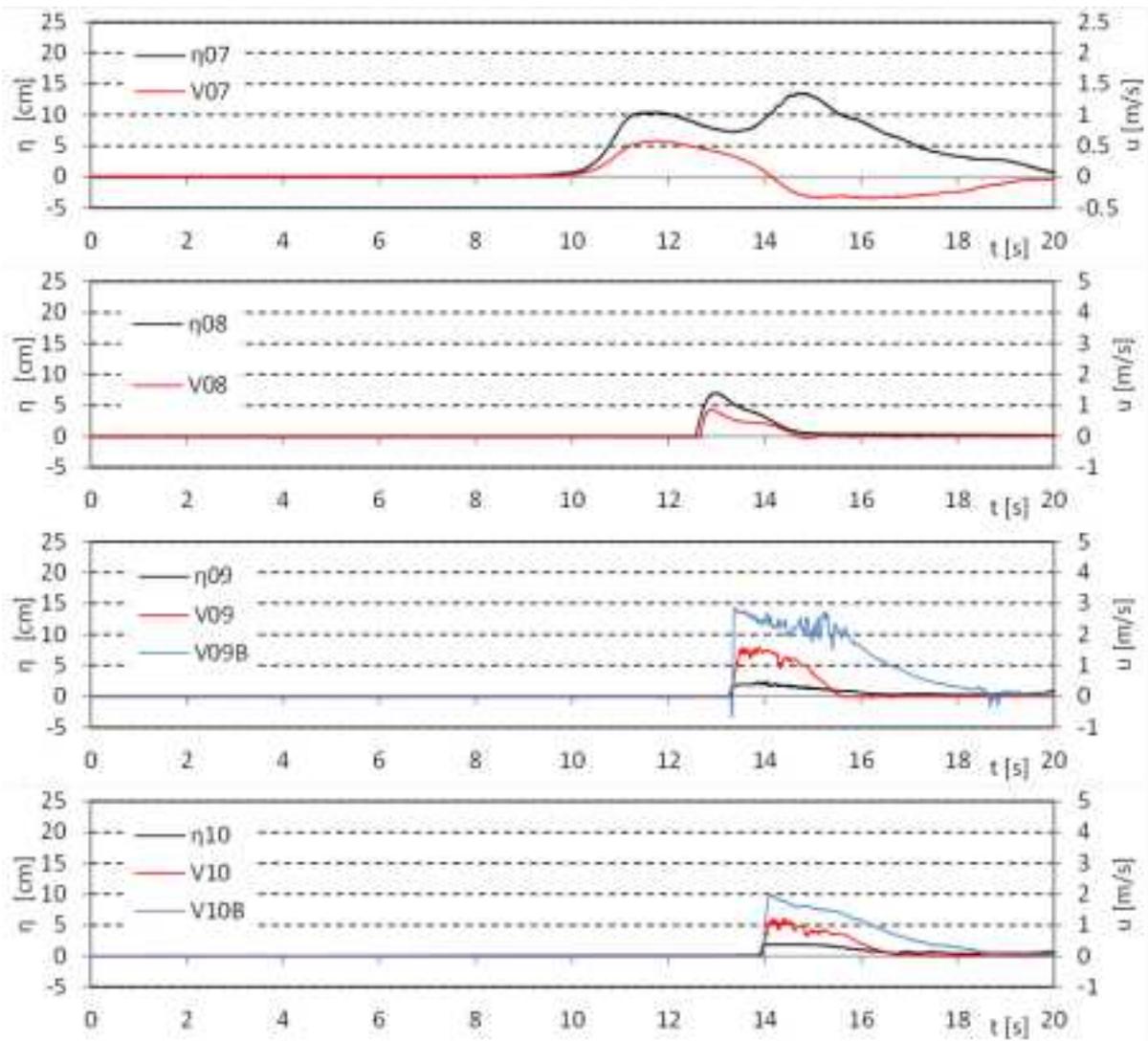


図 II.3.6-2 盛土模型の通過波計測結果 (CaseB, W02)

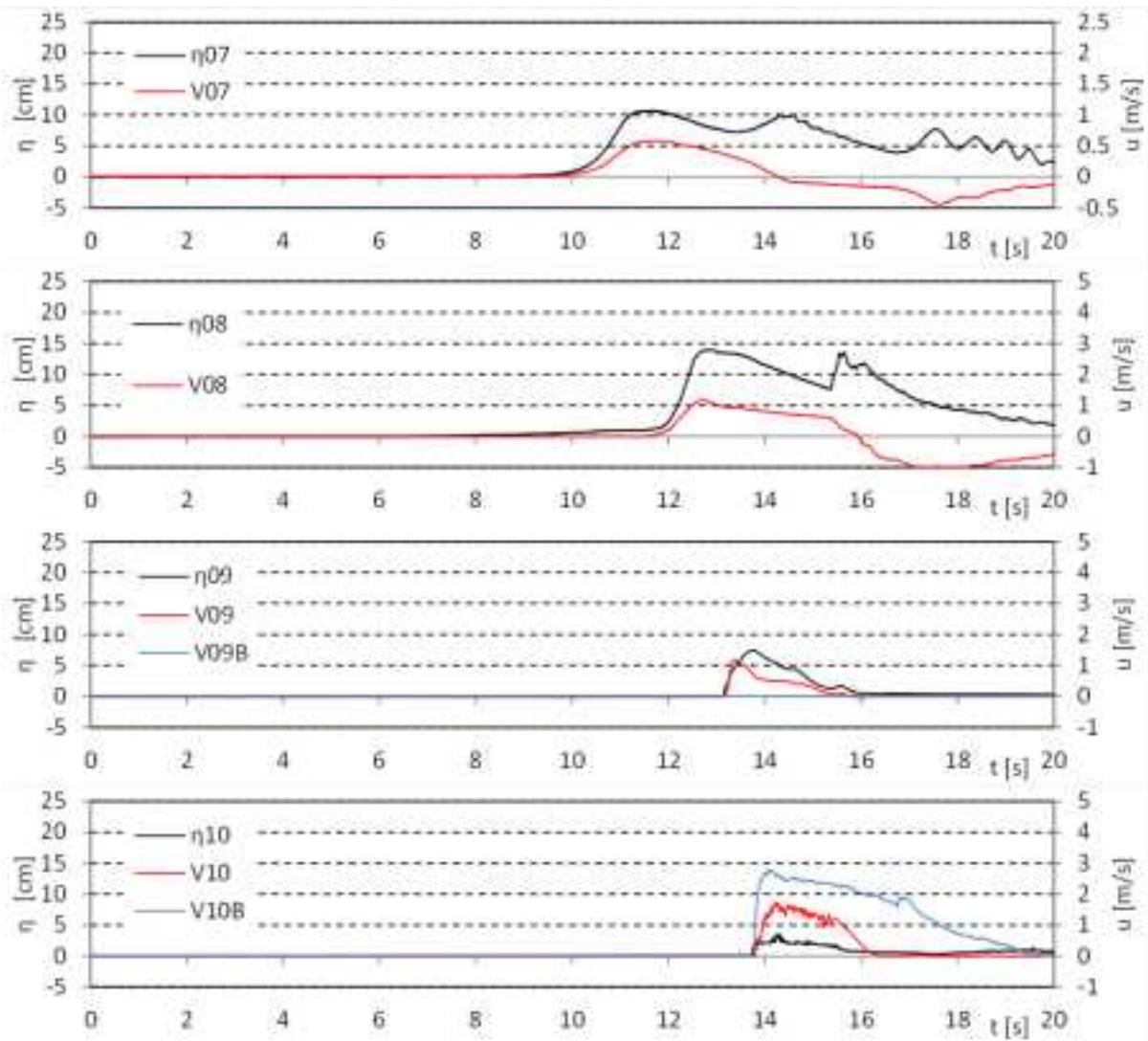


図 II.3.6-2 盛土模型の通過波計測結果 (CaseC, W02)

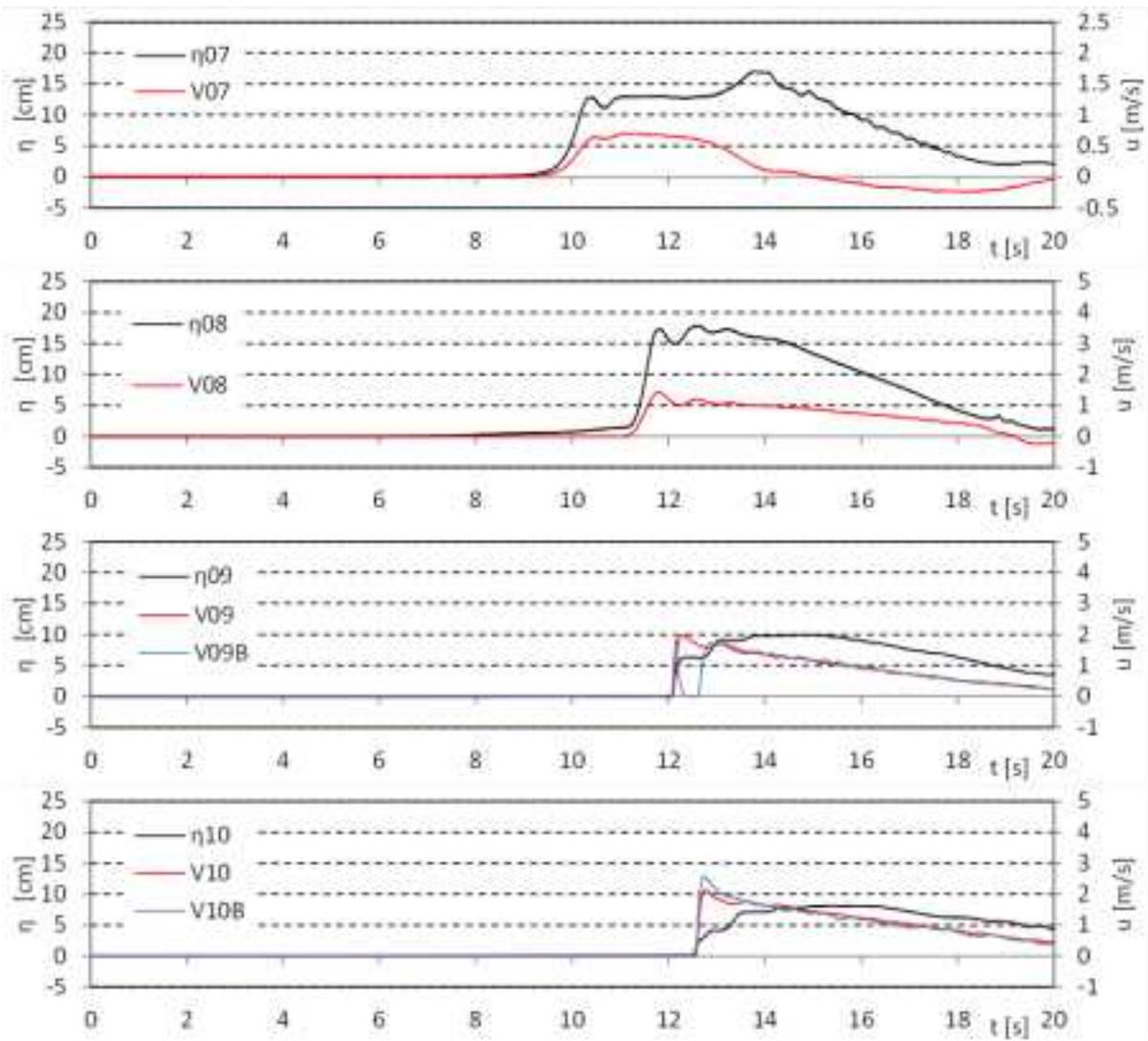


図 II.3.6-3 盛土模型の通過波計測結果 (CaseA, W04)

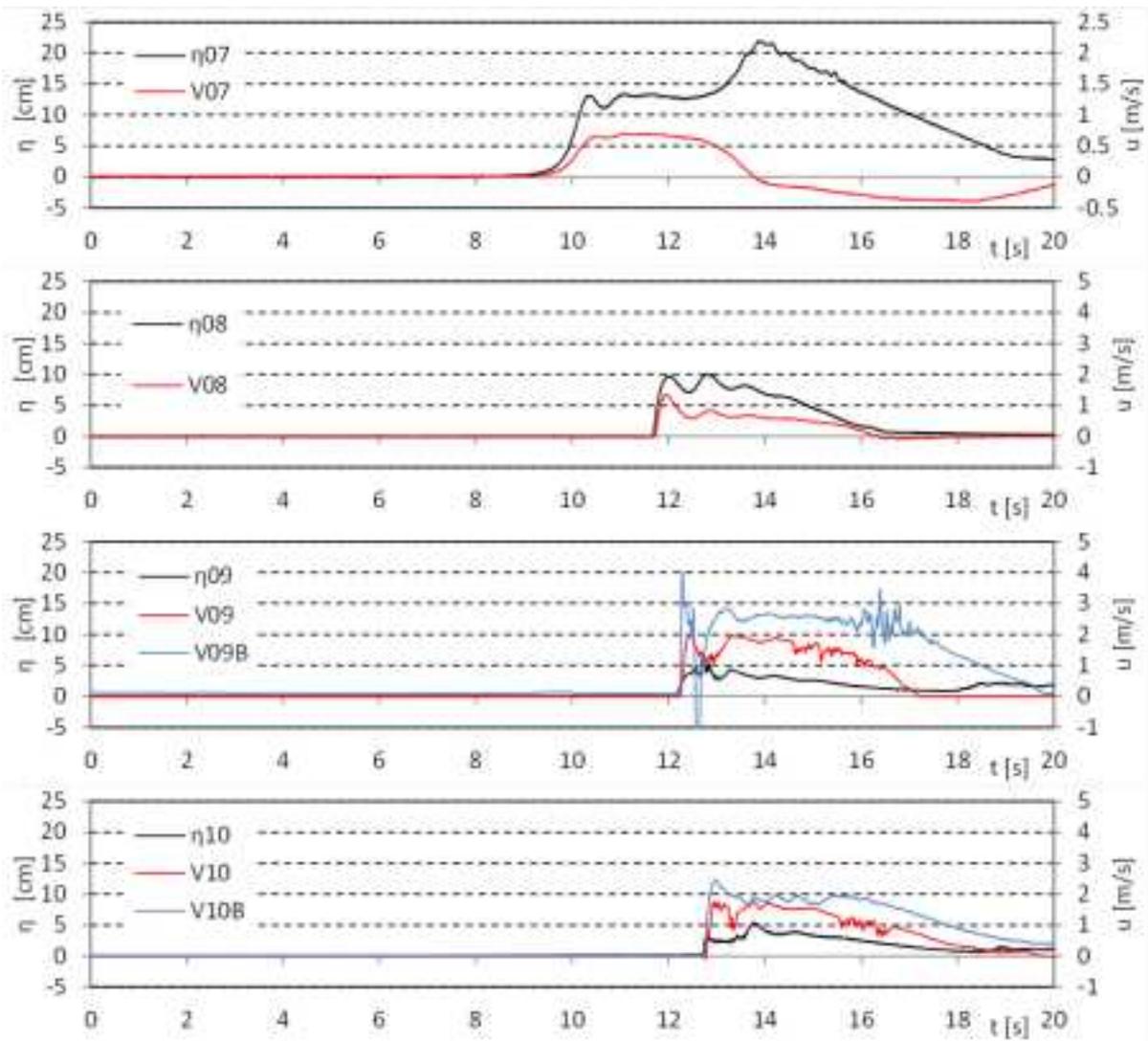


図 II.3.6-3 盛土模型の通過波計測結果 (CaseB, W04)

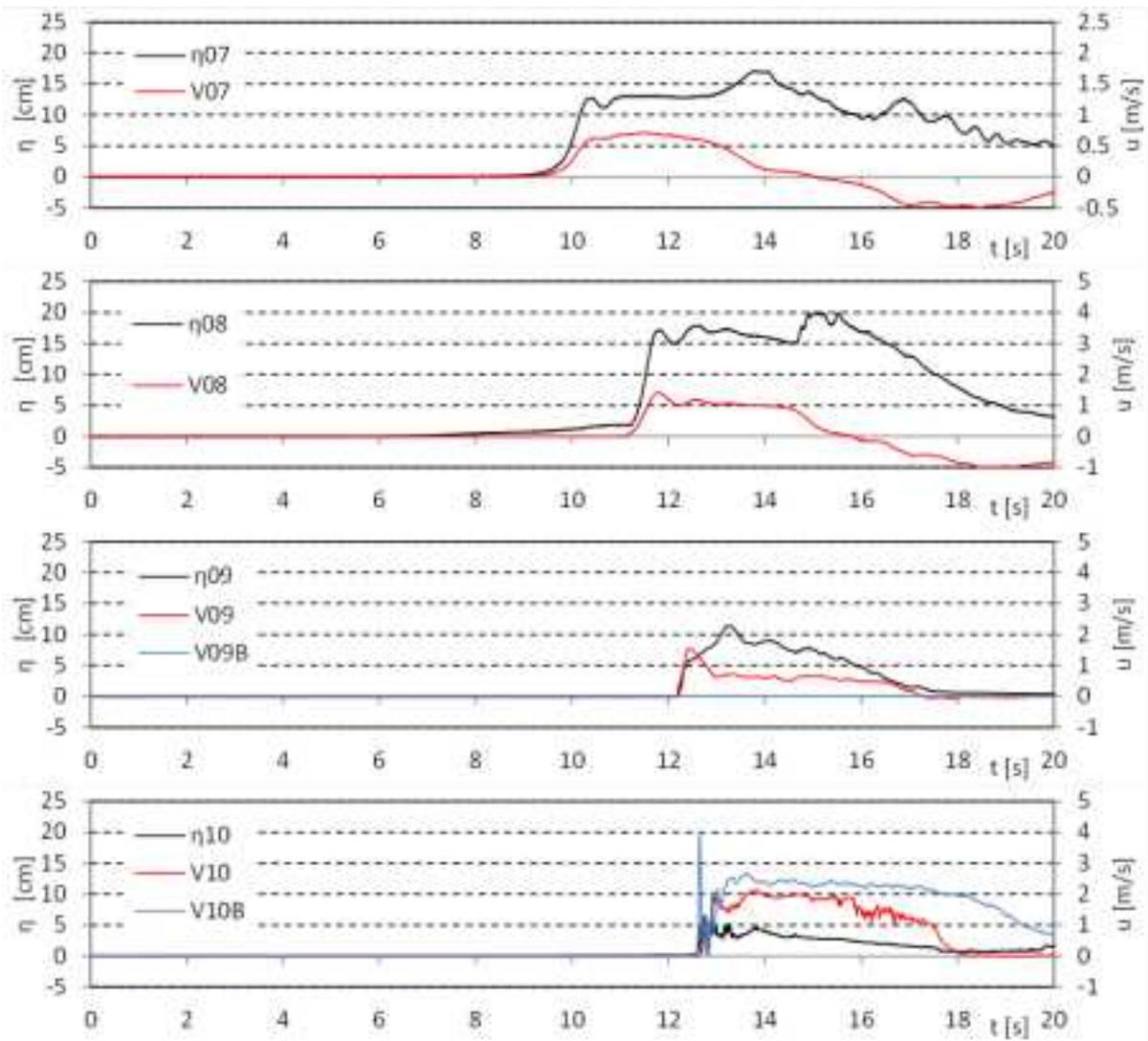


図 II.3.6-3 盛土模型の通過波計測結果 (CaseC, W04)

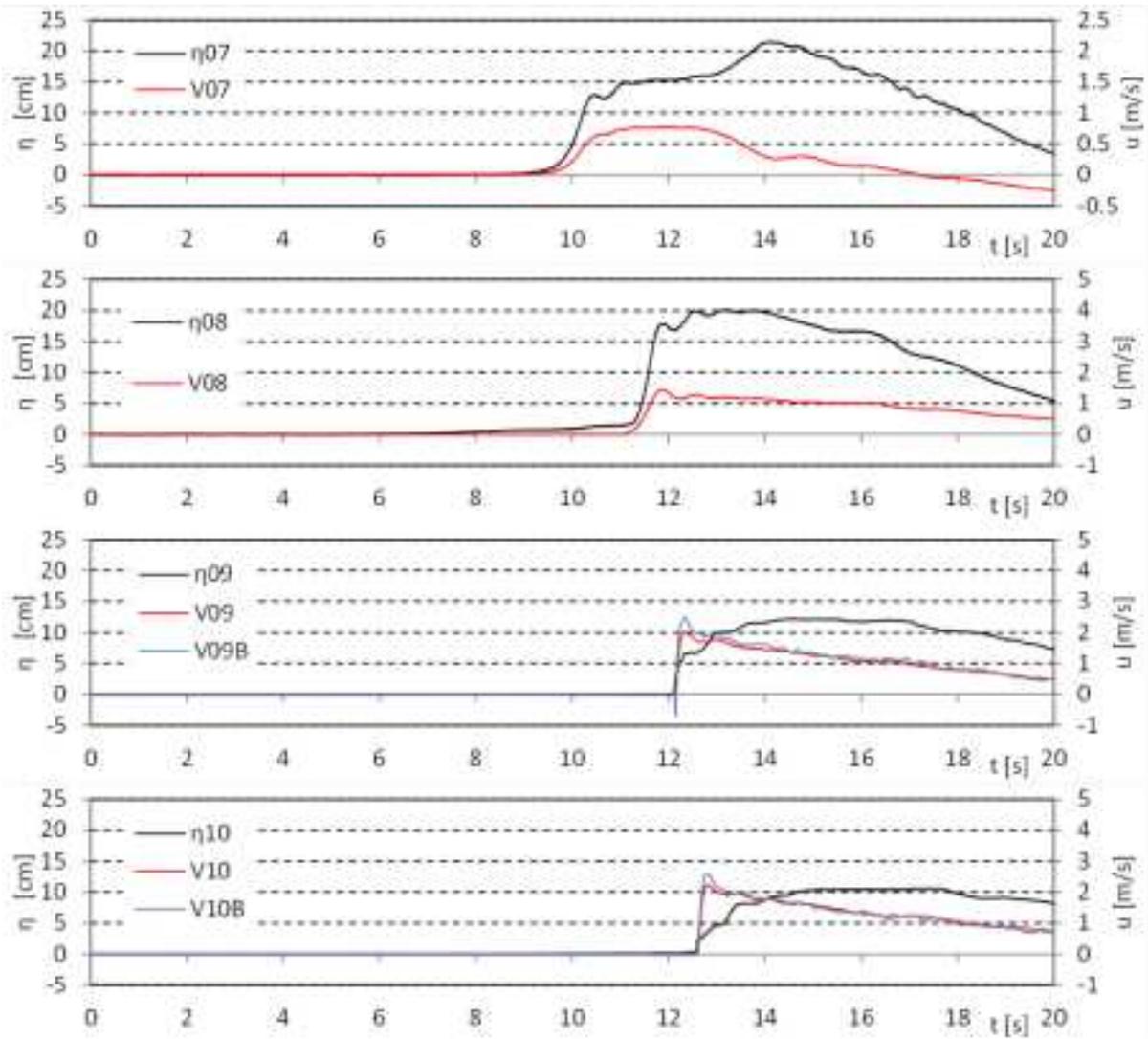


図 II.3.6-4 盛土模型の通過波計測結果 (CaseA, W05)

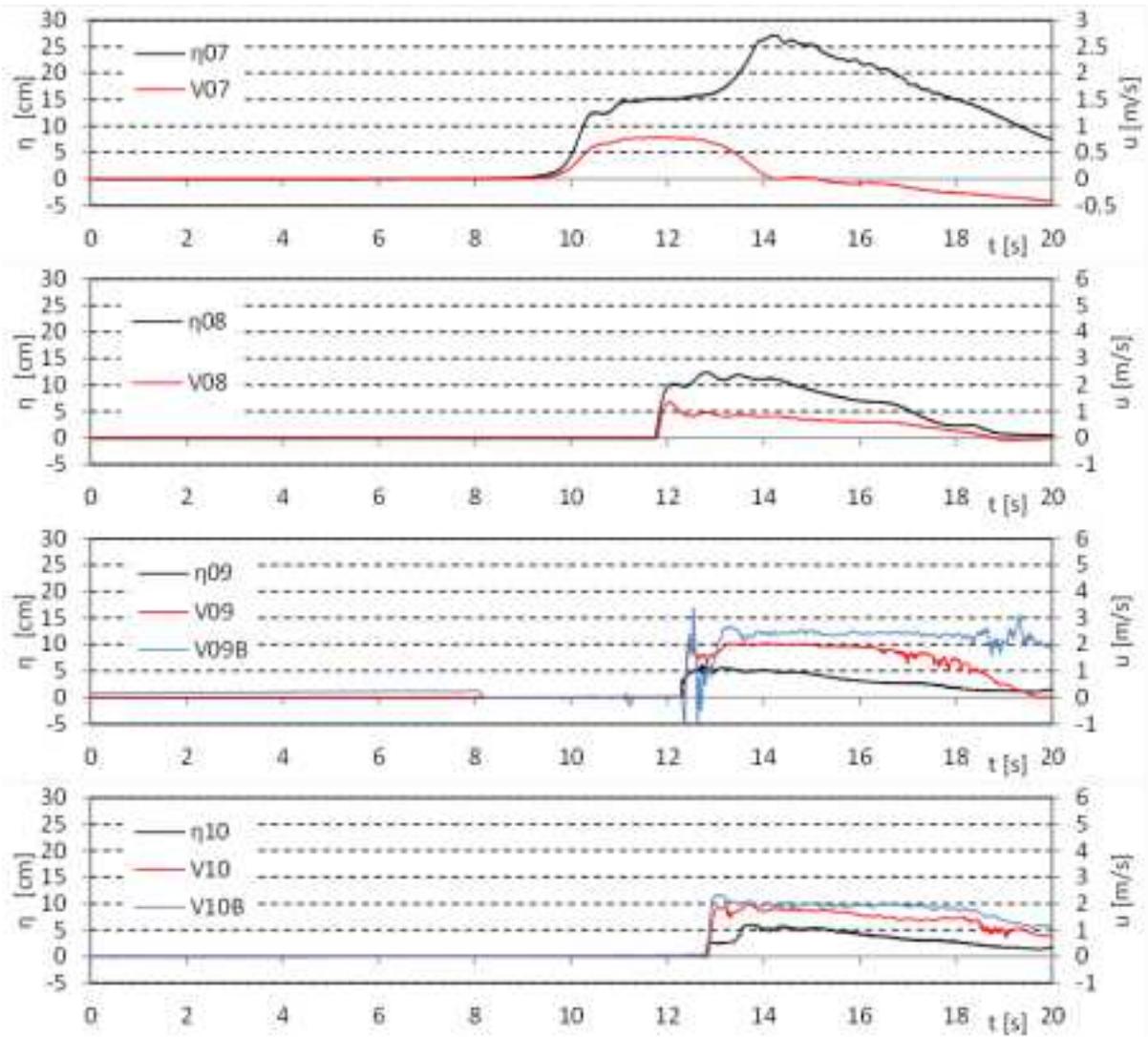


図 II.3.6-4 盛土模型の通過波計測結果 (CaseB, W05)

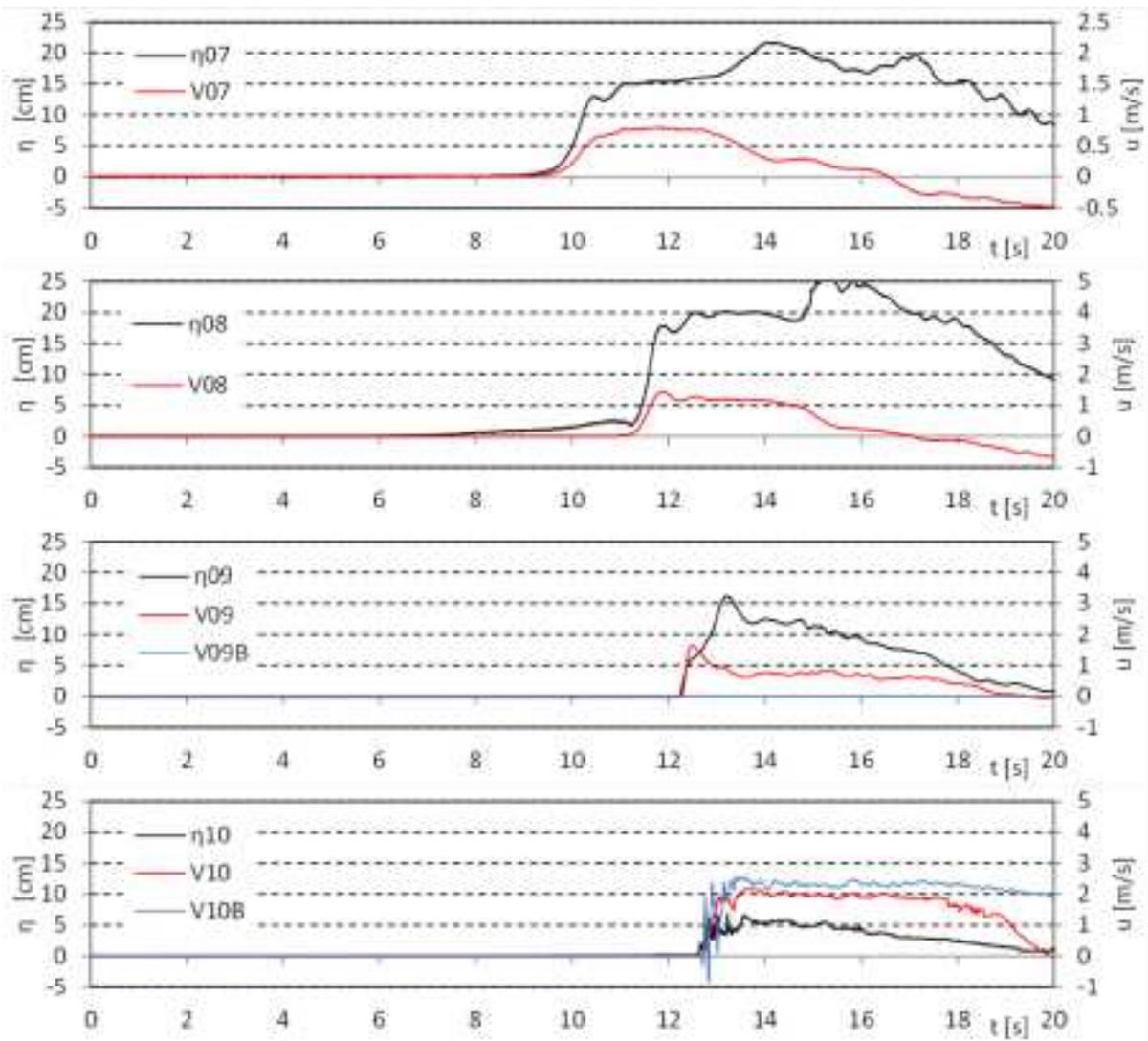


図 II.3.6-4 盛土模型の通過波計測結果 (CaseC, W05)

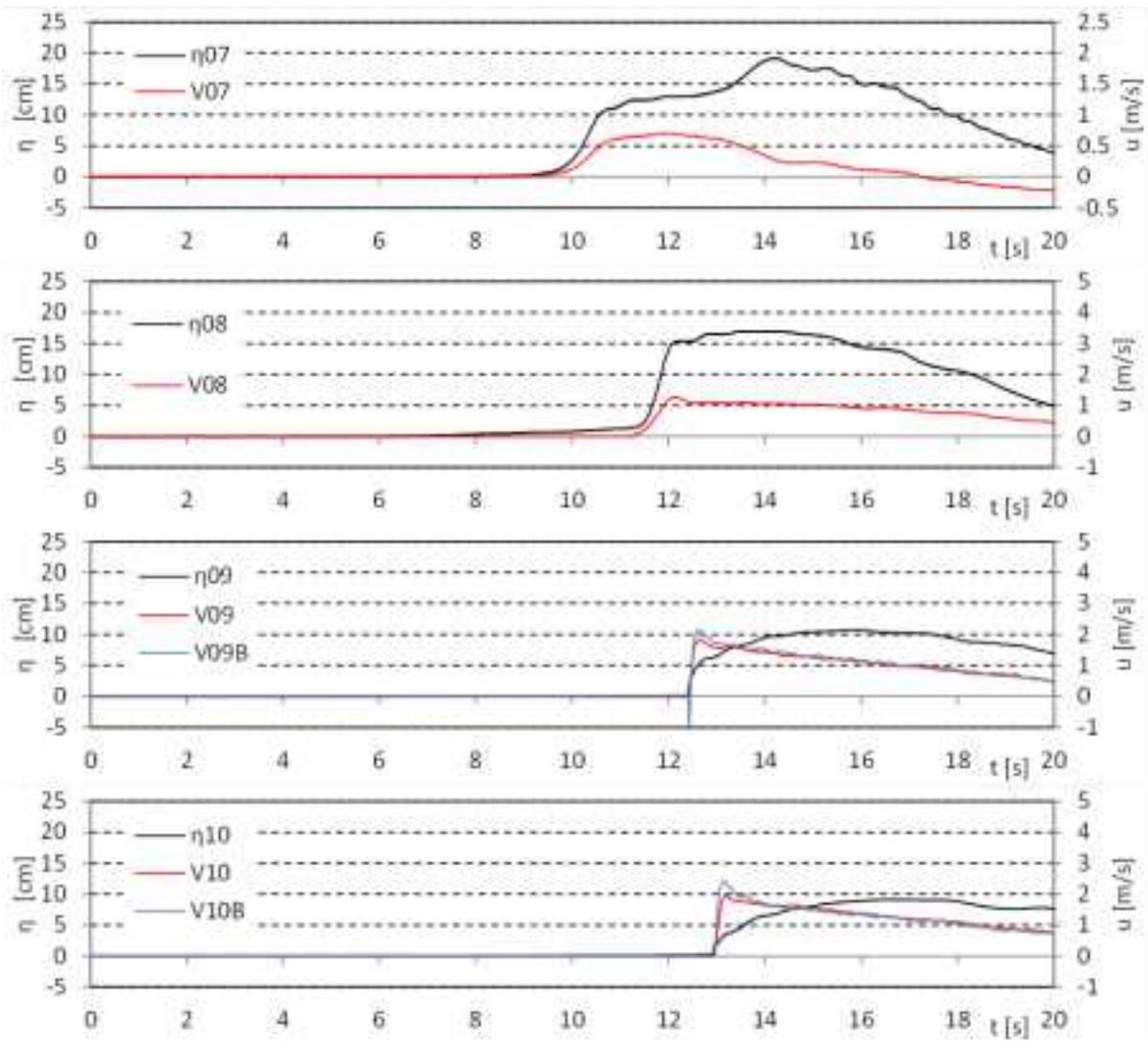


図 II.3.6-5 盛土模型の通過波計測結果 (CaseA, W06)

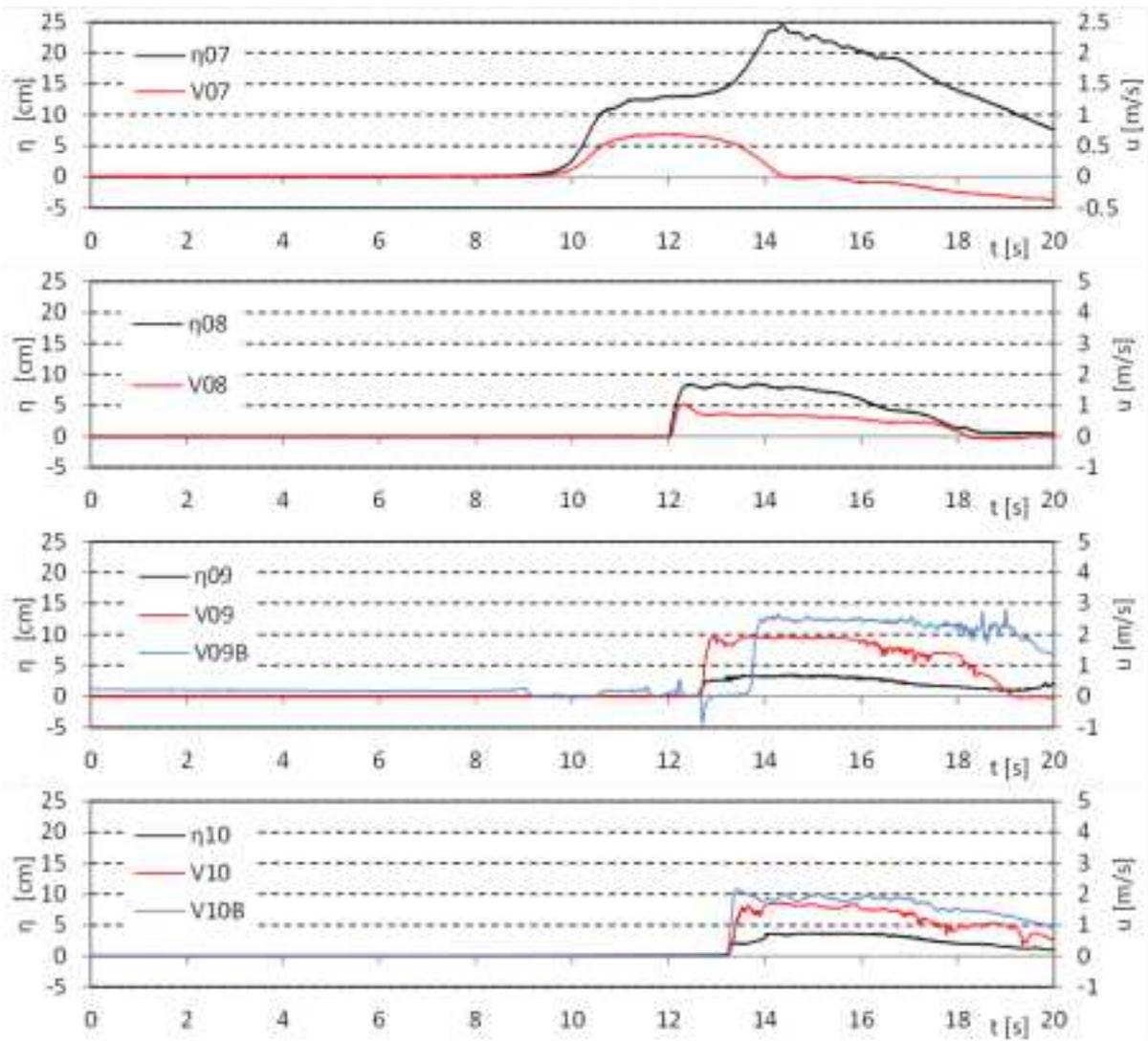


図 II.3.6-5 盛土模型の通過波計測結果 (CaseB, W06)

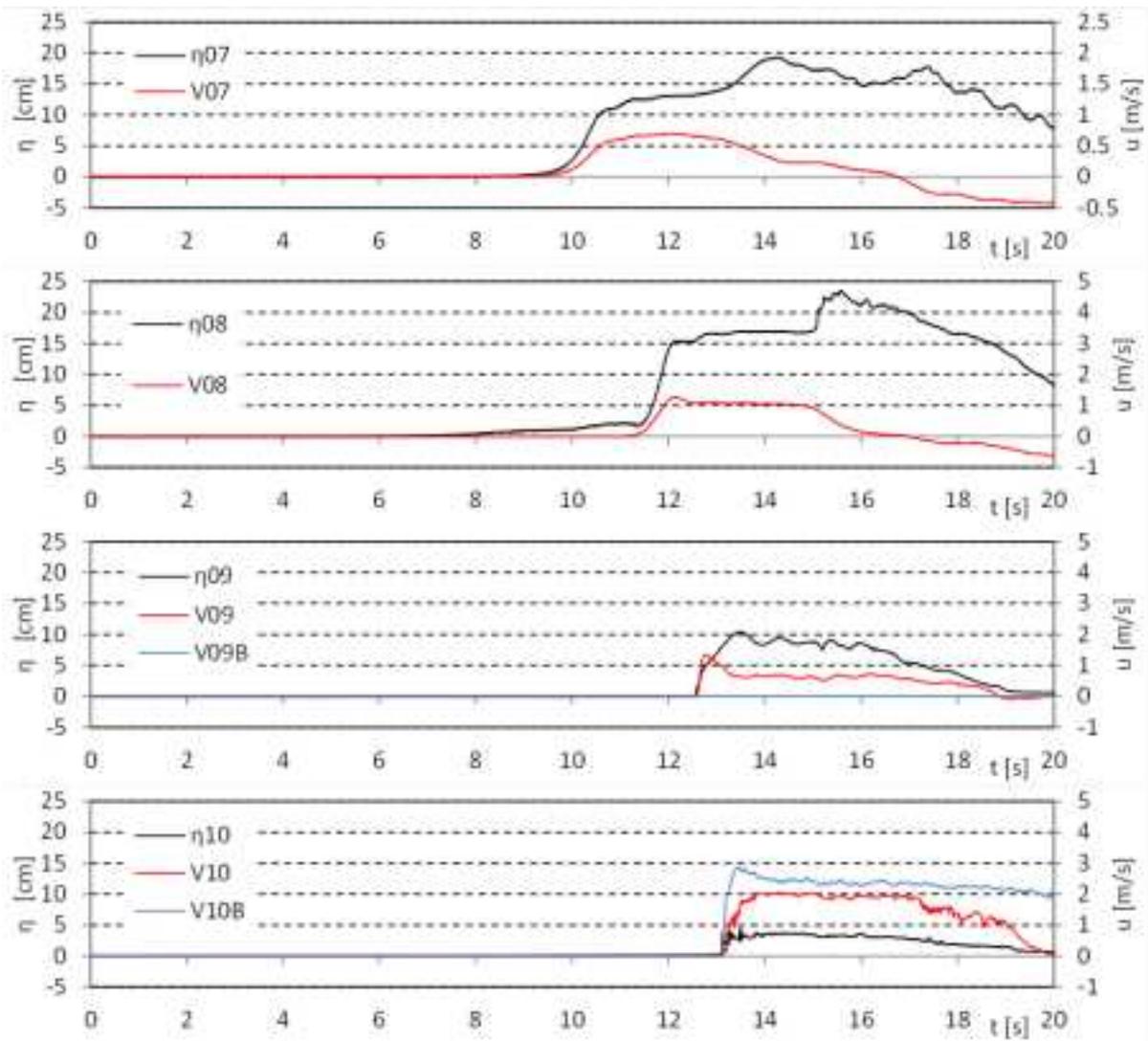


図 II.3.6-5 盛土模型の通過波計測結果 (CaseC, W06)

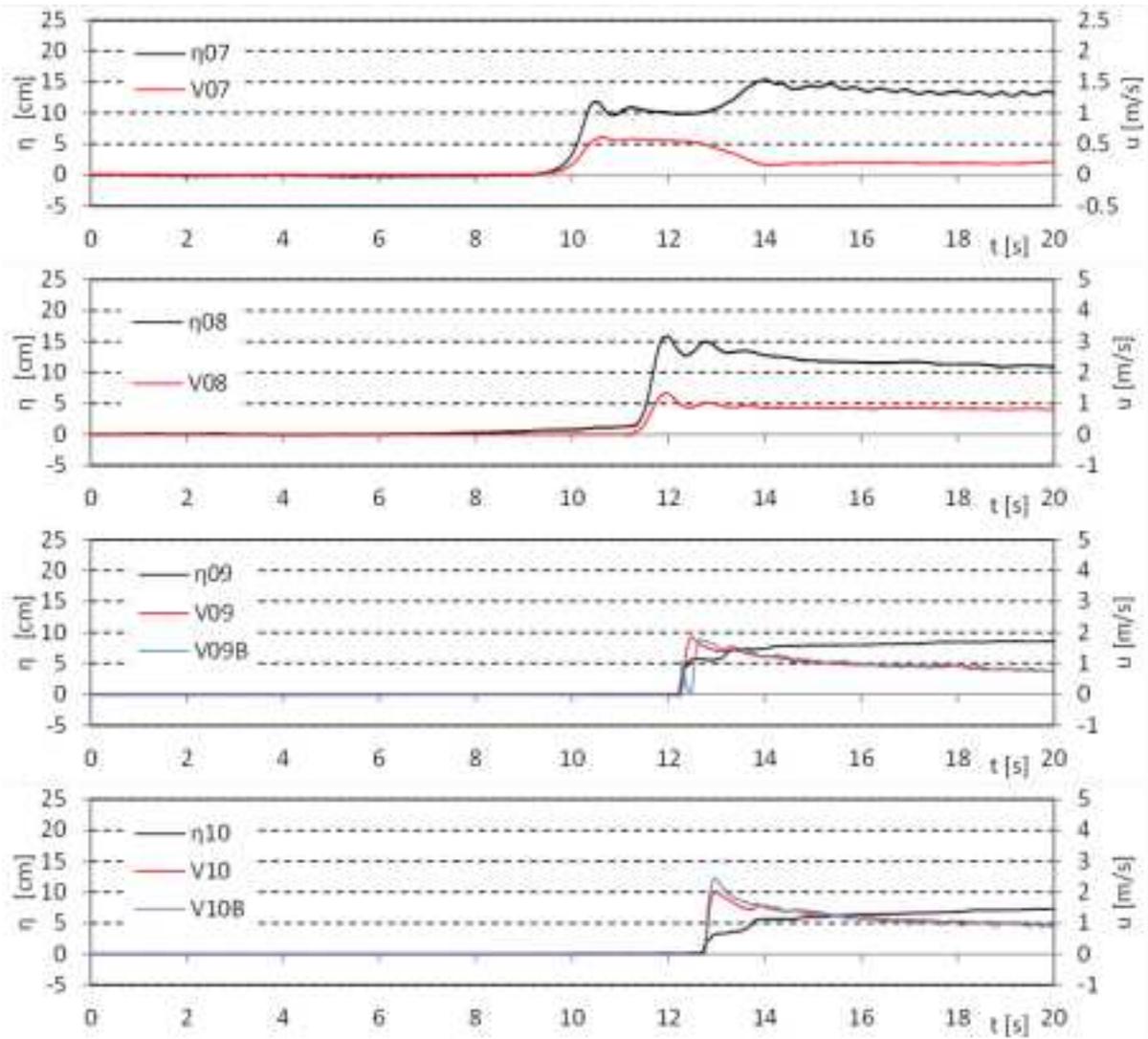


図 II.3.6-6 盛土模型の通過波計測結果 (CaseA, W10)

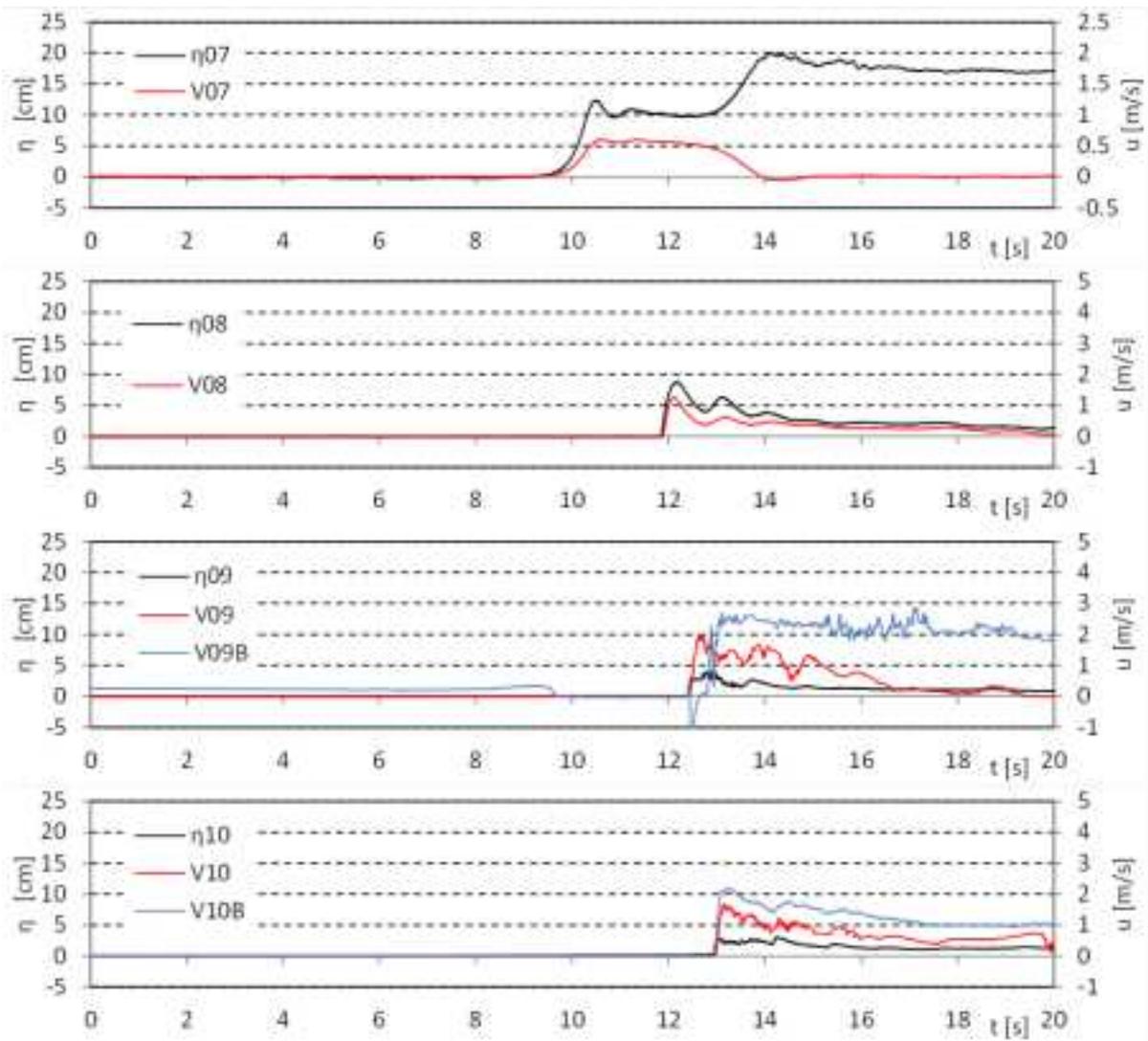


図 II.3.6-6 盛土模型の通過波計測結果 (CaseB, W10)

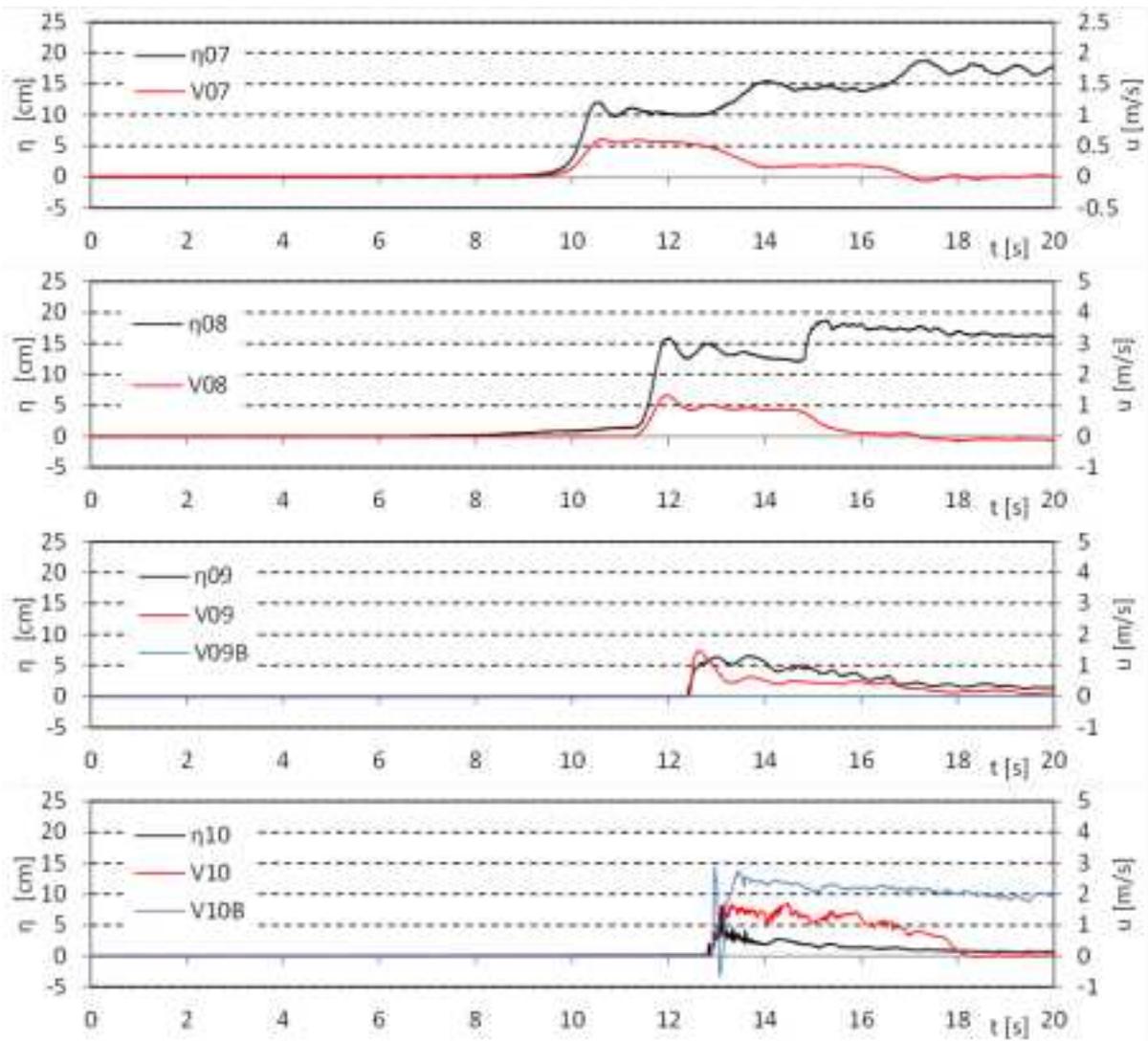


図 II.3.6-6 盛土模型の通過波計測結果 (CaseC, W10)

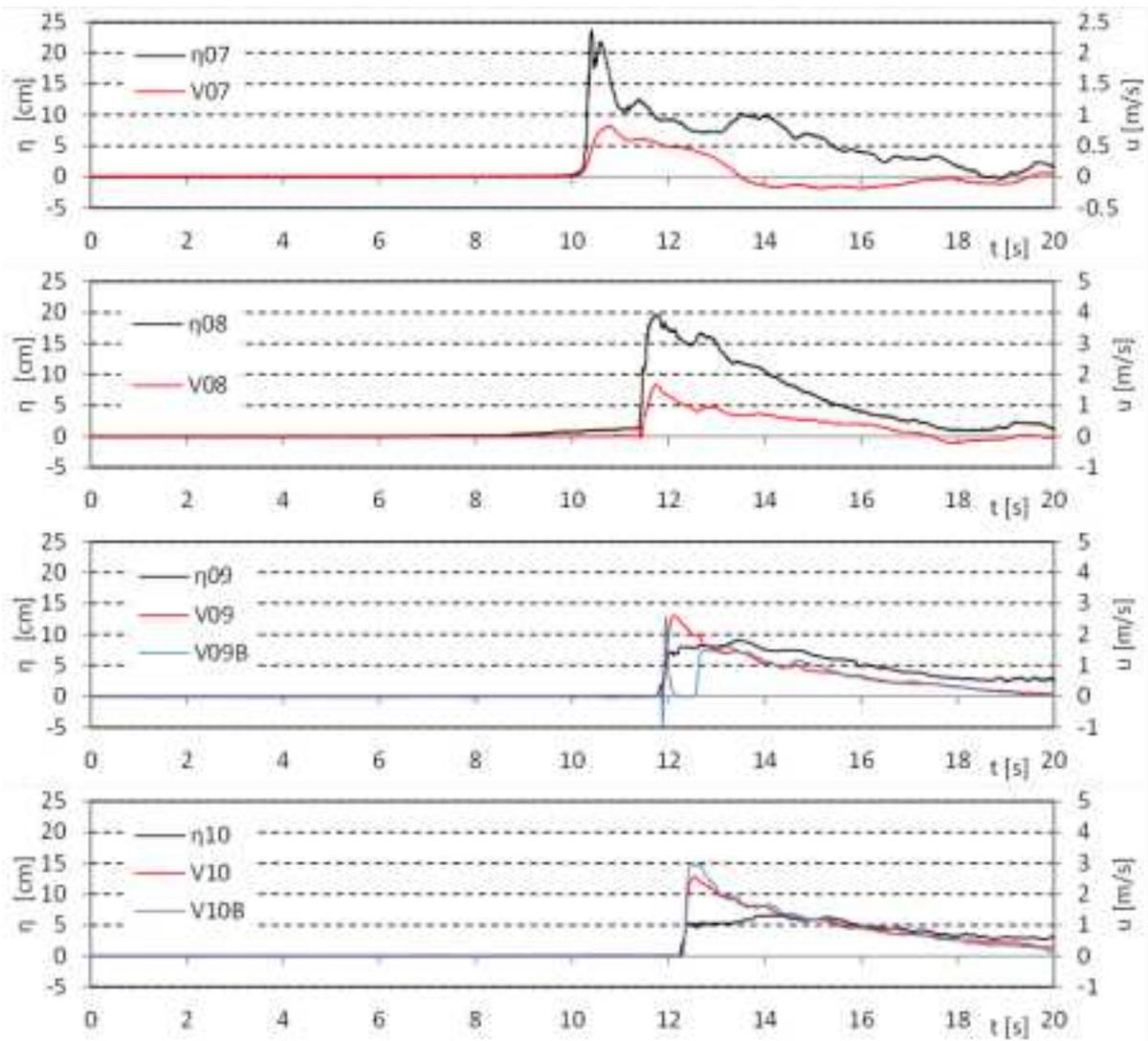


図 II.3.6-7 盛土模型の通過波計測結果 (CaseA, W13)

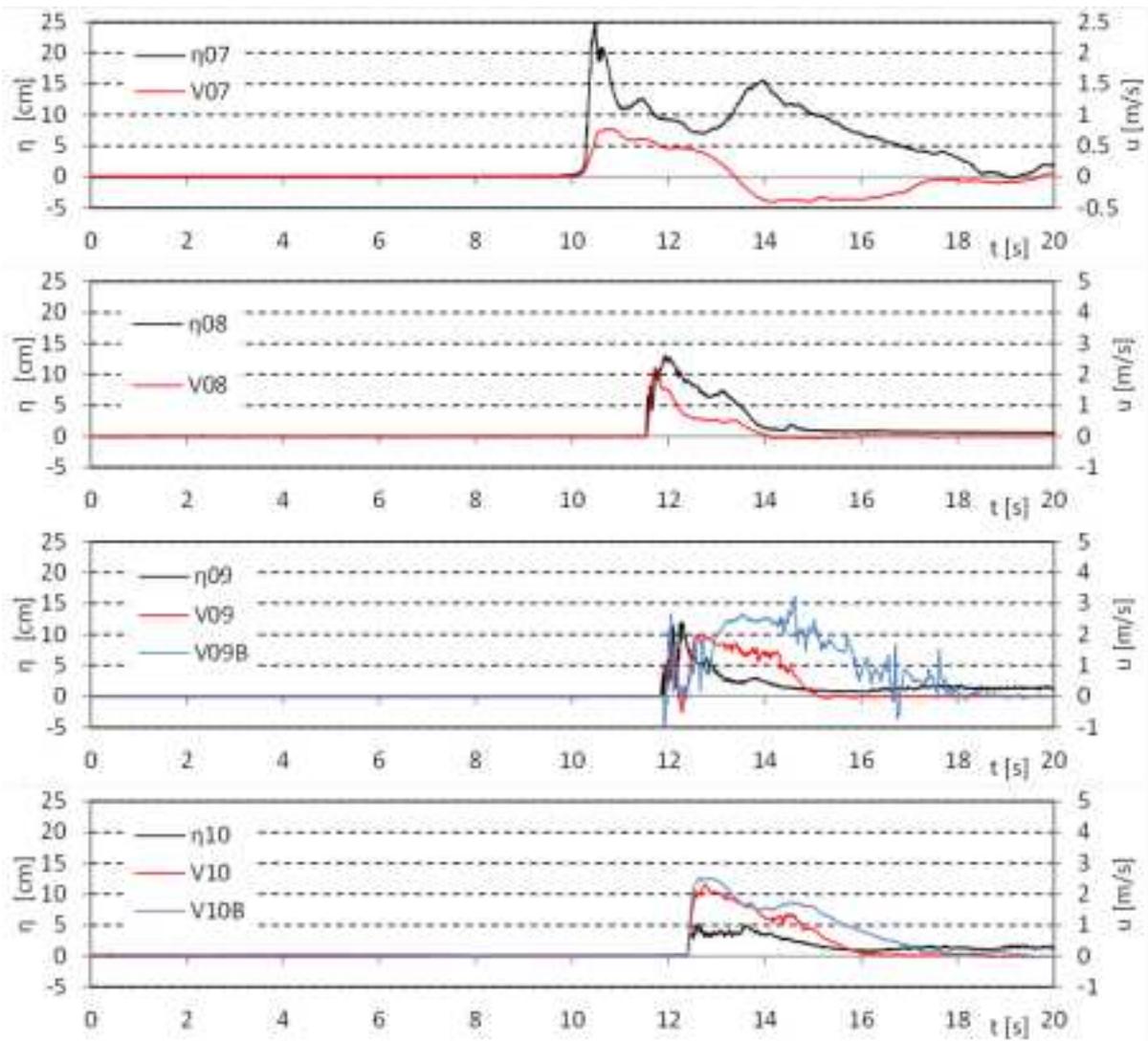


図 II.3.6-7 盛土模型の通過波計測結果 (CaseB, W13)

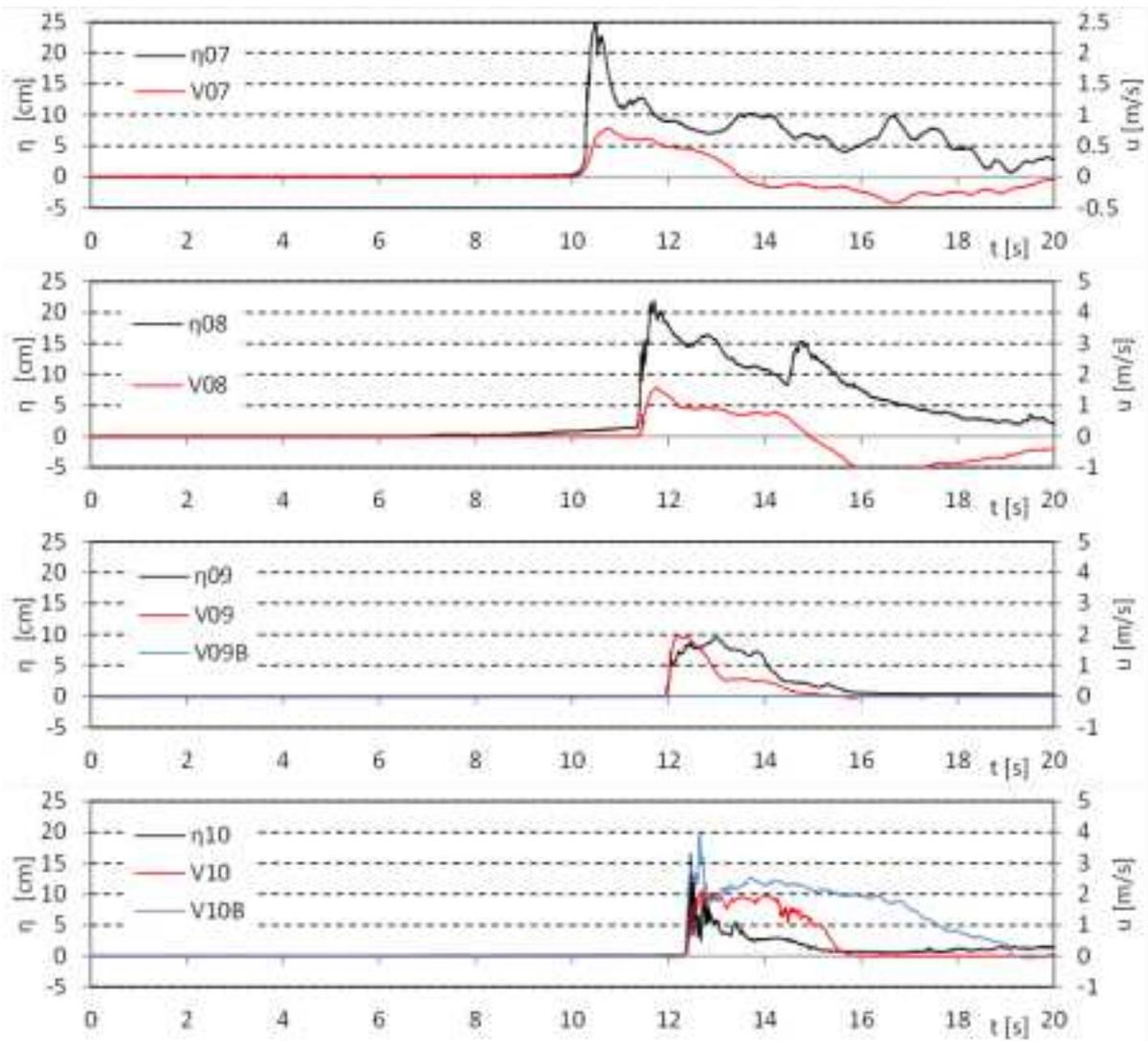
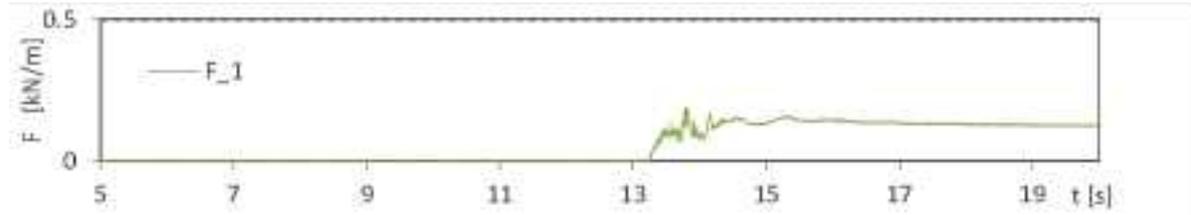


図 II.3.6-7 盛土模型の通過波計測結果 (CaseC, W13)

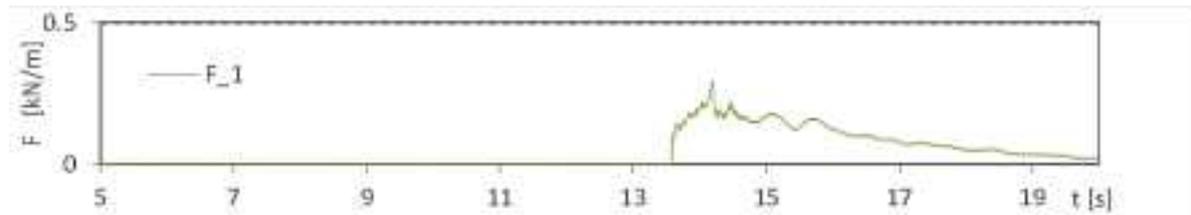
CaseA 1.25m



CaseB 1.25m



CaseA 2.5m



CaseC 2.5m

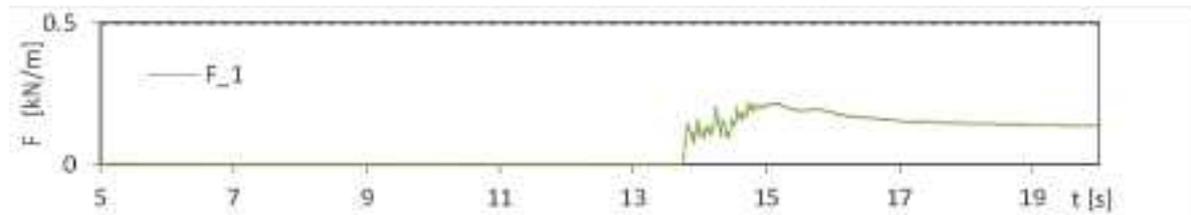
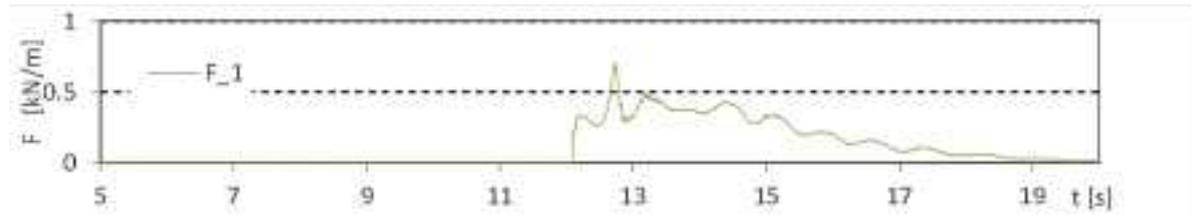
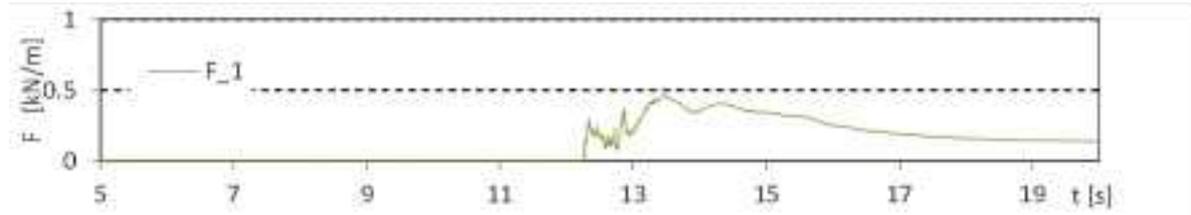


図 II.3.6-8 盛土模型の津波波力計測結果 (W02)

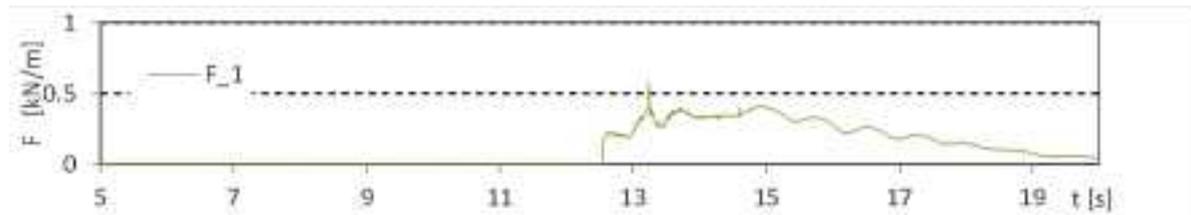
CaseA 1.25m



CaseB 1.25m



CaseA 2.5m



CaseC 2.5m

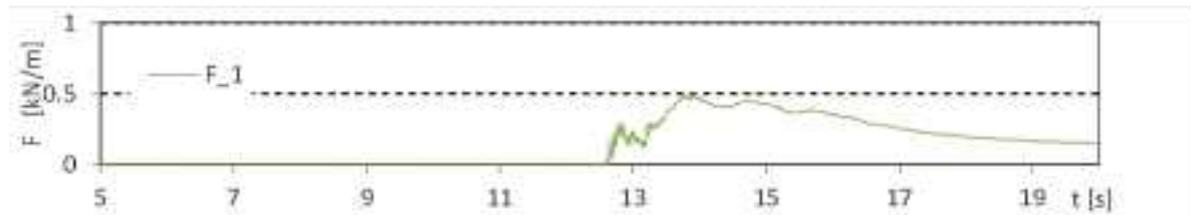
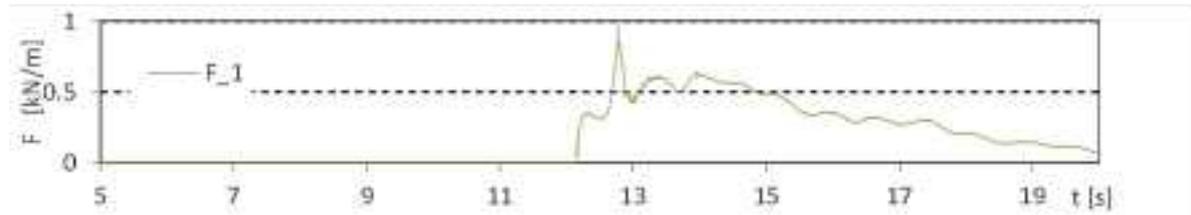
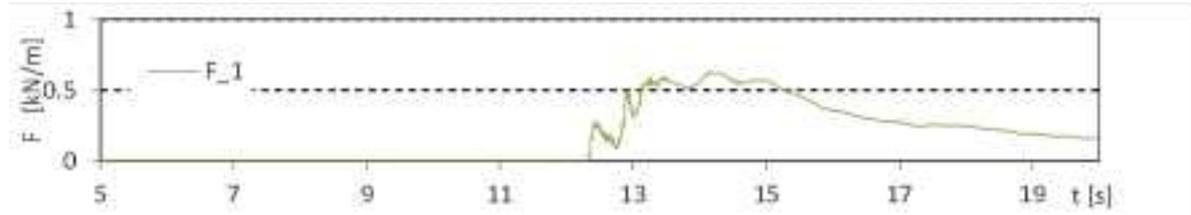


図 II.3.6-9 盛土模型の津波波力計測結果 (W04)

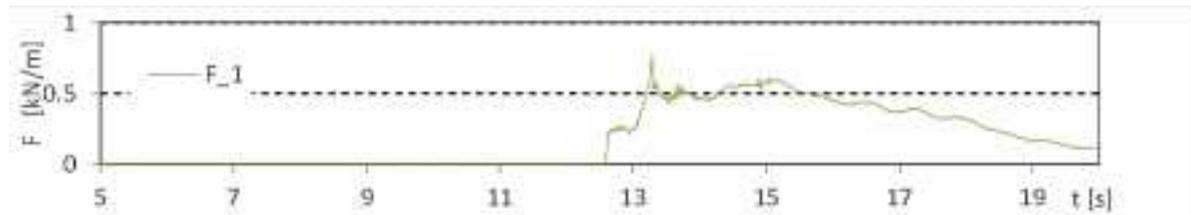
CaseA 1.25m



CaseB 1.25m



CaseA 2.5m



CaseC 2.5m

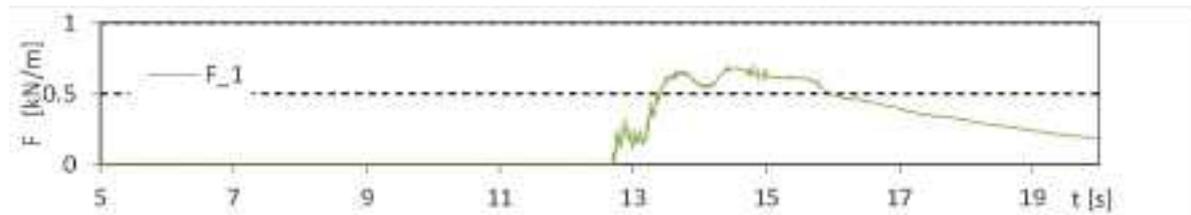
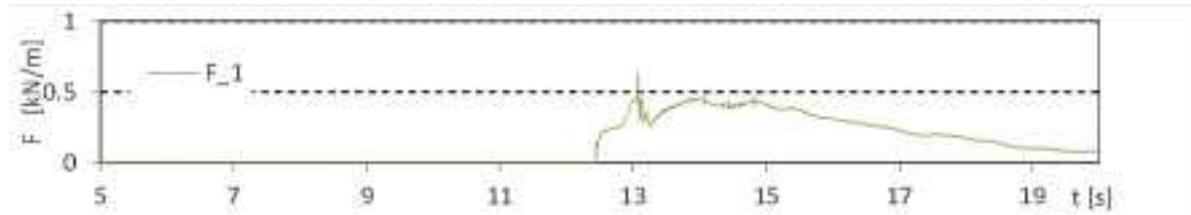
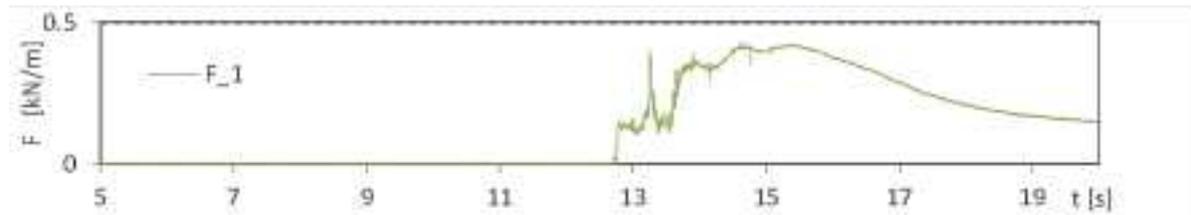


図 II.3.6-10 盛土模型の津波波力計測結果 (W05)

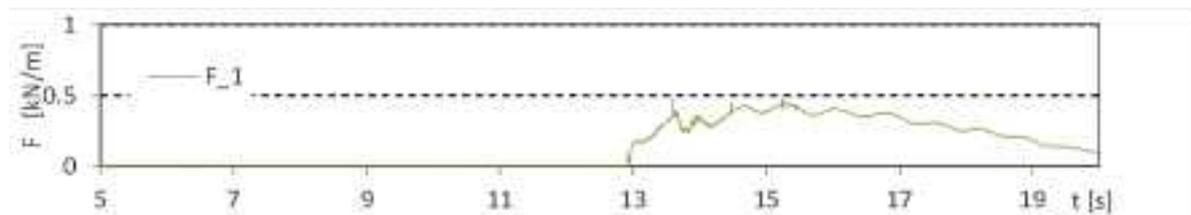
CaseA 1.25m



CaseB 1.25m



CaseA 2.5m



CaseC 2.5m

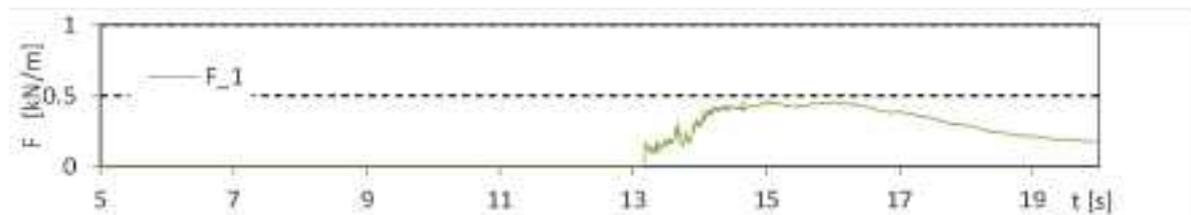
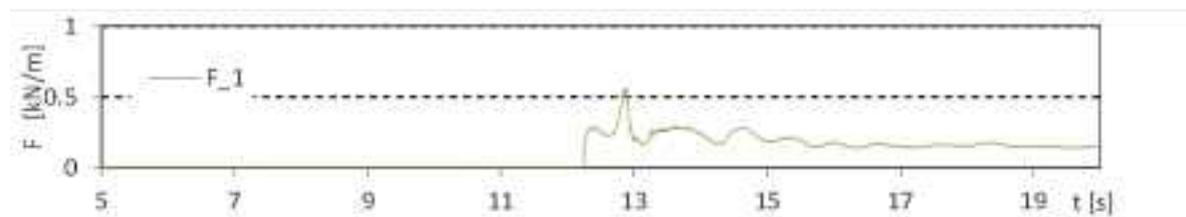
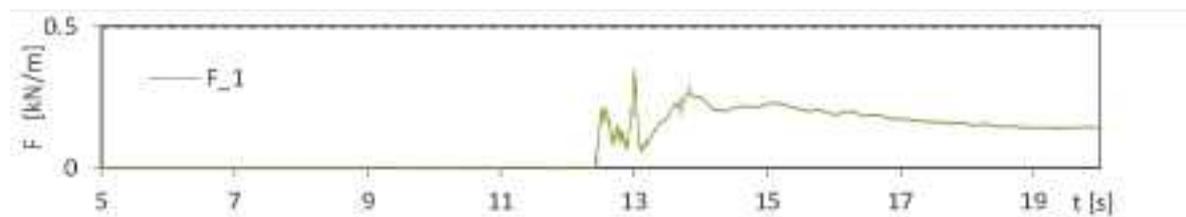


図 II.3.6-11 盛土模型の津波波力計測結果 (W06)

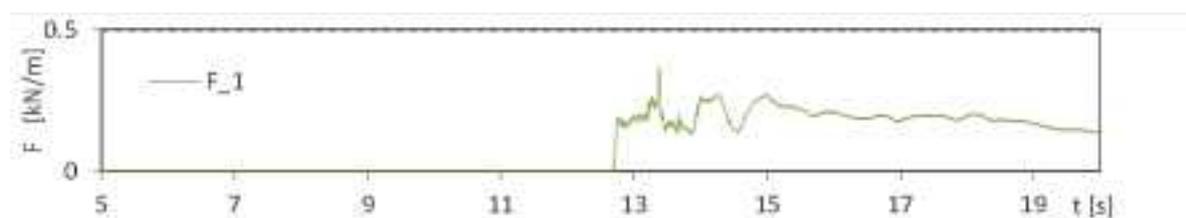
CaseA 1.25m



CaseB 1.25m



CaseA 2.5m



CaseC 2.5m

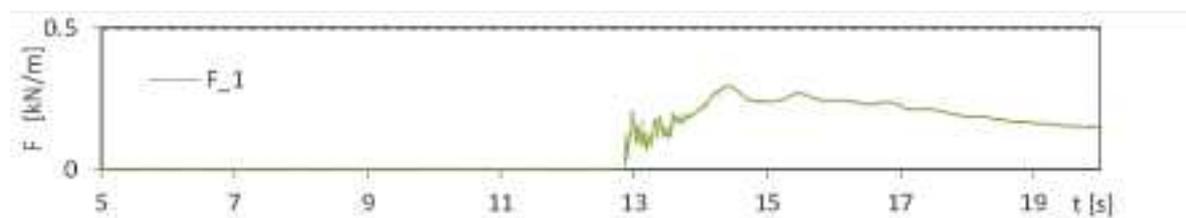
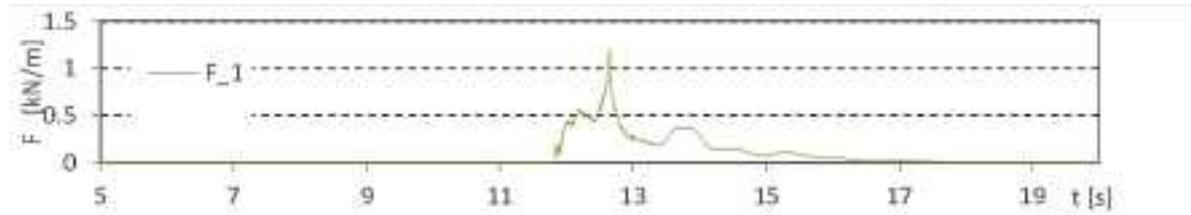
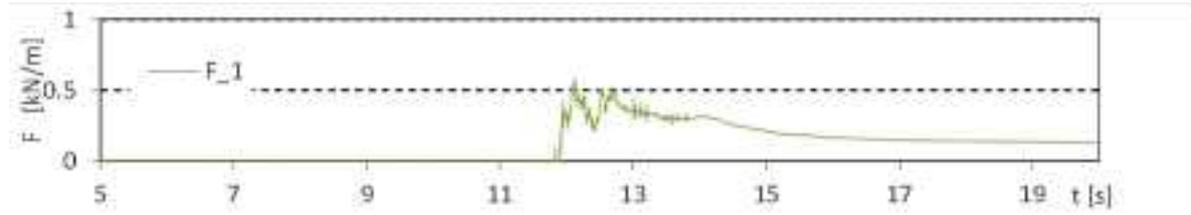


図 II.3.6-12 盛土模型の津波波力計測結果 (W10)

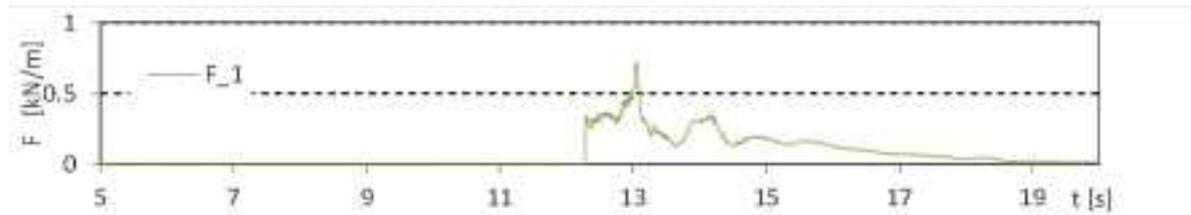
CaseA 1.25m



CaseB 1.25m



CaseA 2.5m



CaseC 2.5m

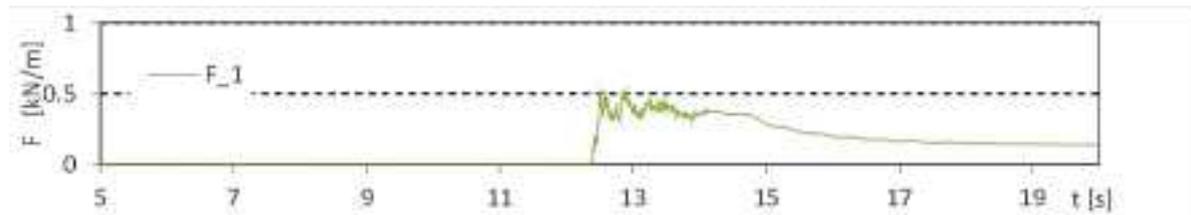


図 II.3.6-13 盛土模型の津波波力計測結果 (W13)

## 4. 試験結果の考察

### 4.1. 通過波の特性

図 II.4-1, 図 II.4-2 に, 通過波検定試験による最大浸水深とその時の流速およびフルード数を, 単純勾配と直立護岸についてそれぞれ示す. 横軸は, 汀線からの距離であり, P.08 が汀線, P.09 が汀線から 1.25m, P.10 が汀線から 2.5m の位置を示している.

これによると, 直立護岸の汀線位置のみ他のケースと大きく特性が異なることが分かる. 直立護岸の汀線では, 護岸の反射により水位が上昇し, そのためフルード数は小さくなる. またこの時, 汀線近傍に支配断面が生じていると考えられるため, フルード数は 1 もしくはそれよりも若干小さめの値を示している.

孤立波形状の津波である W01, W02, W13 では, 上述の直立護岸の汀線位置を除き, 陸側ほど浸水深が小さく, 流速は大きくなっており, したがってフルード数は陸側ほど大きくなる. 孤立波の場合, 図 II.4-3(a)に示すように最大浸水深が発生したのち水位が低下するため, 最大浸水深と流速の関係が比較的一定となる. ただし, 周期に比較して津波高が小さい場合は, 図 II.4-3(b)のように陸域で最大浸水深となる時間が長くなり, 最大浸水深となる時間が遅れる傾向にある.

正弦波形状の津波で周期の異なる W03, W04, W05 を比較すると, 最大浸水深は陸域ほど小さくなっている. 一方その時の流速およびフルード数は, 陸域ほど大きくなる傾向にあるが, 周期の長い W05 の場合 P.10 の方が P.09 よりも小さくなっている. この場合でも, 時系列(図 II.4-4 参照)で見ると, P.10 の方が P.09 よりも流速は大きい, 最大浸水深の発生時間が P.10 の方が遅れるため, 最大浸水深発生時の流速で比較すると P.10 の方が小さくなっている. この特性は, 前面の波形形状が同じで後続の水位が異なる W01 と W09 の比較においても確認される. W01 と W09 は, 初期の水位や流速の時間変動は同じであるが, W09 では最大浸水深が遅れて発生するため, 流速やフルード数が小さくなっている.

周期が同じで津波高の異なる W06, W07, W08 を比較すると, 汀線からの距離による変動特性はほぼ同じで, 津波高とともに水位, 流速が大きくなっている. またフルード数については, 津波高が変わってもほぼ同じ値を示す.

W10, W11, W12 の一定の水位が長い時間保持される長周期波の場合, この保持される水位が支配的であり, 前面の立上り勾配が変わっても通過波の最大浸水深時の特性に大きな変化はない. 図 II.4-5 に示すように, 最大浸水深が波形のかなり後ろ側で生じるため, 津波到達時の初期の波形の影響がないと考えられる.

	W01	W02	W03	W04	W05	W06	W07	W08	W09	W10	W11	W12
	$\eta_{\max}$ [cm]											
P.08	14.9	11.1	11.3	14.9	17.3	15.2	12.9	10.0	17.3	12.7	12.1	12.9
P.09	10.05	6.70	6.49	10.01	12.86	10.84	8.84	7.13	12.90	8.93	8.61	9.26
P.10	8.40	5.06	5.04	8.31	10.54	9.49	7.60	5.68	11.34	7.44	7.43	7.74
	$u_{\eta_{\max}}$ [m/s]											
P.08	1.55	0.98	1.10	1.13	1.24	1.12	0.98	0.85	1.20	1.03	0.95	0.97
P.09	1.81	1.11	1.02	1.22	1.34	1.08	0.99	0.94	1.13	0.92	0.88	0.93
P.10	1.93	1.13	1.16	1.32	1.21	1.36	1.12	1.03	1.06	1.00	1.02	0.99
	$Fr_{\eta_{\max}}$											
P.08	1.283	0.940	1.042	0.938	0.950	0.919	0.872	0.853	0.924	0.927	0.870	0.864
P.09	1.8	1.4	1.3	1.2	1.2	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0
P.10	2.13	1.61	1.65	1.47	1.19	1.41	1.30	1.38	1.01	1.17	1.20	1.14

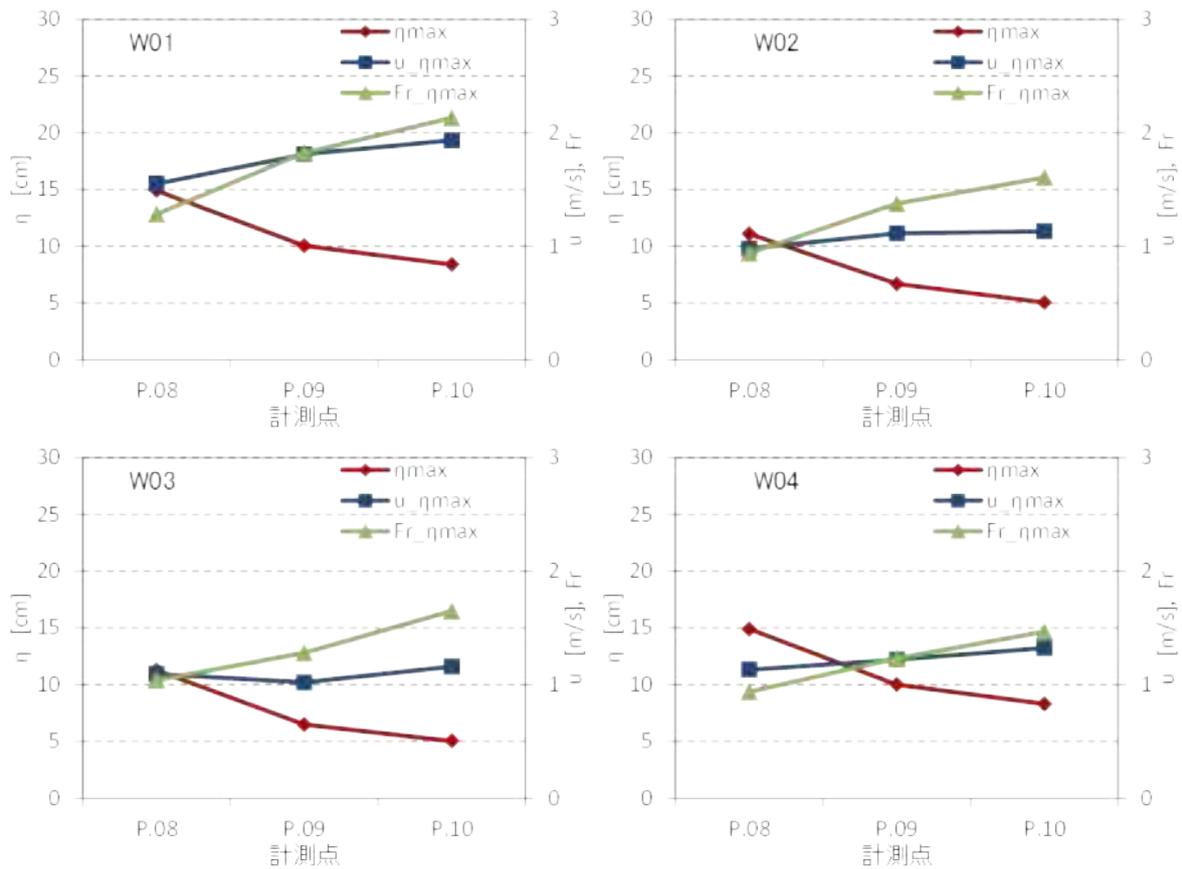


図 II.4-1 通過波検定結果 (単純勾配, 最大浸水深と同時刻の流速, フルード数)

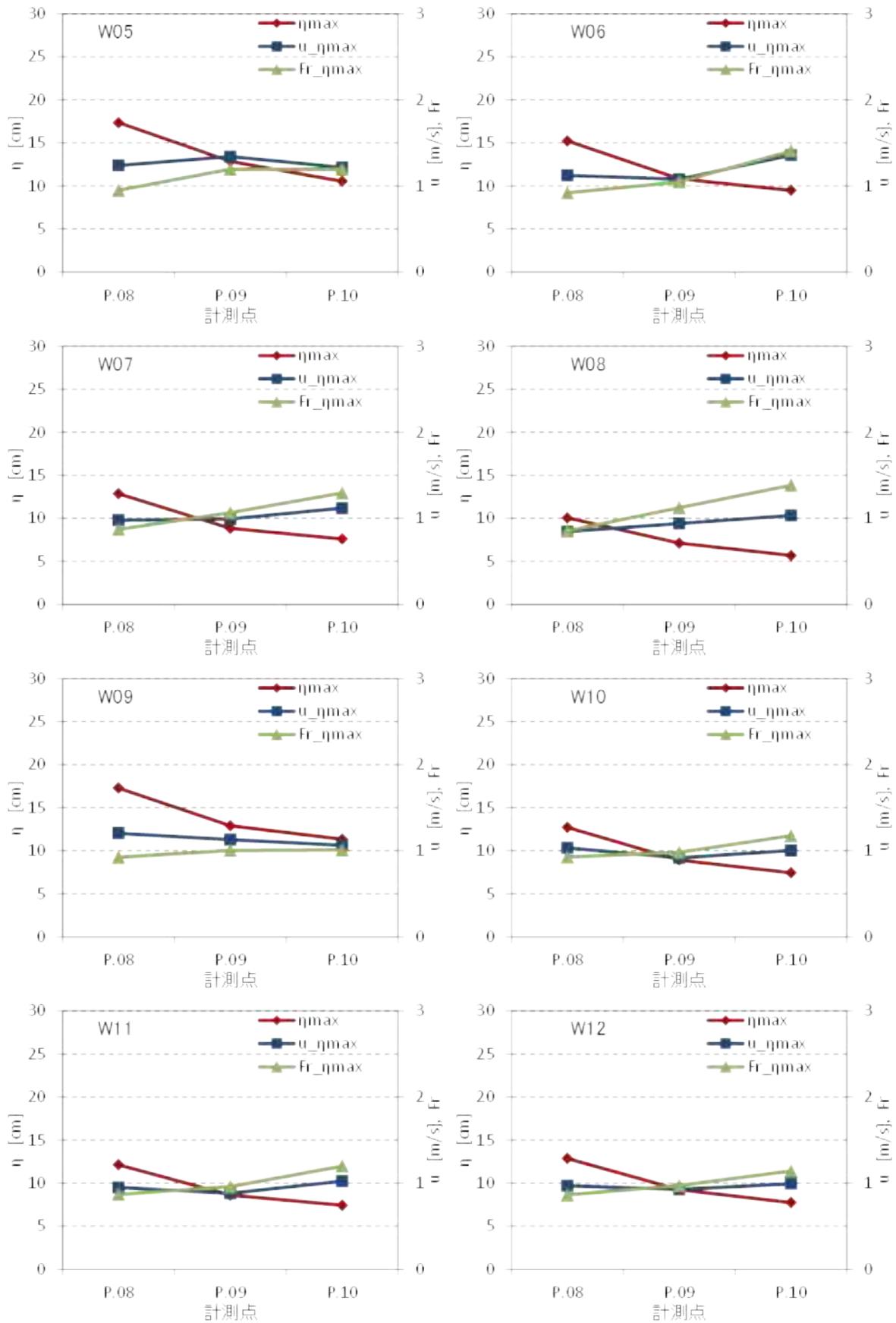


図 II.4-1 通過波検定結果（単純勾配，最大浸水深と同時刻の流速，フルード数）

	W01	W02	W03	W04	W05	W06	W07	W08	W09	W10	W11	W12	W13
$\eta_{max}$ [cm]													
P.08	35.8	16.9	19.6	21.2	23.1	19.6	16.2	12.1	34.9	19.8	16.6	16.0	26.6
P.09	13.02	6.70	6.82	10.00	11.98	10.05	8.11	6.29	14.84	8.29	7.92	8.35	9.20
P.10	8.00	4.85	5.37	7.76	9.98	8.60	6.87	5.21	11.30	7.11	7.09	7.54	6.81
$u_{\eta_{max}}$ [m/s]													
P.08	1.84	1.08	1.27	1.32	1.09	0.95	0.91	0.79	1.85	1.29	1.02	0.86	1.68
P.09	1.61	1.27	1.15	1.28	1.38	1.14	1.03	0.93	1.60	0.89	0.87	0.94	1.41
P.10	1.93	1.24	1.57	1.20	1.19	1.23	1.15	1.02	1.17	0.84	0.91	1.00	1.59
$Fr_{\eta_{max}}$													
P.08	0.979	0.837	0.920	0.917	0.724	0.686	0.720	0.730	1.000	0.929	0.804	0.688	1.038
P.09	1.4	1.6	1.4	1.3	1.3	1.1	1.2	1.2	1.3	1.0	1.0	1.0	1.5
P.10	2.18	1.80	2.17	1.38	1.21	1.34	1.40	1.42	1.11	1.01	1.09	1.16	1.94

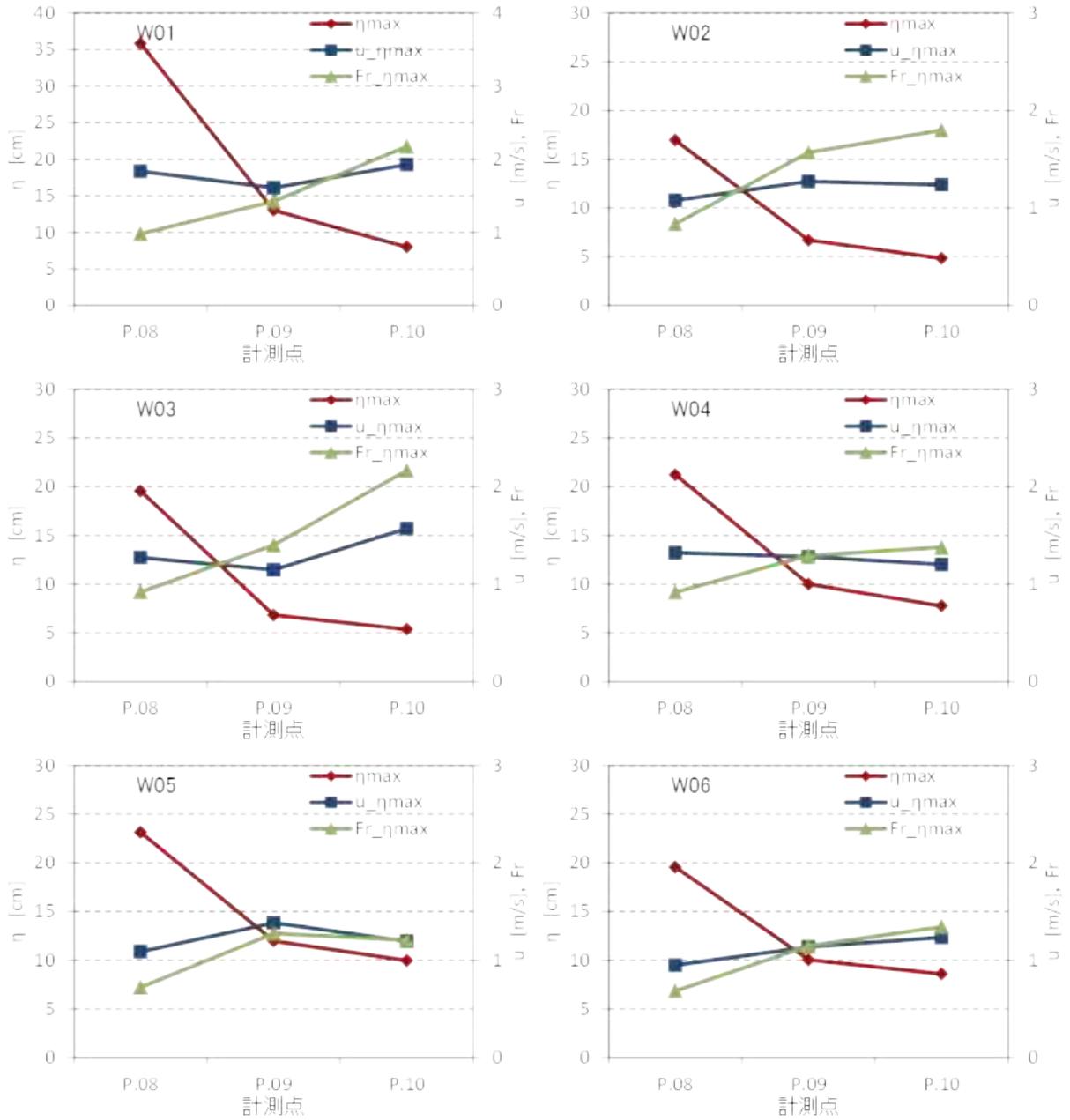


図 II.4-2 通過波検定結果（直立護岸，最大浸水深と同時刻の流速，フルード数）

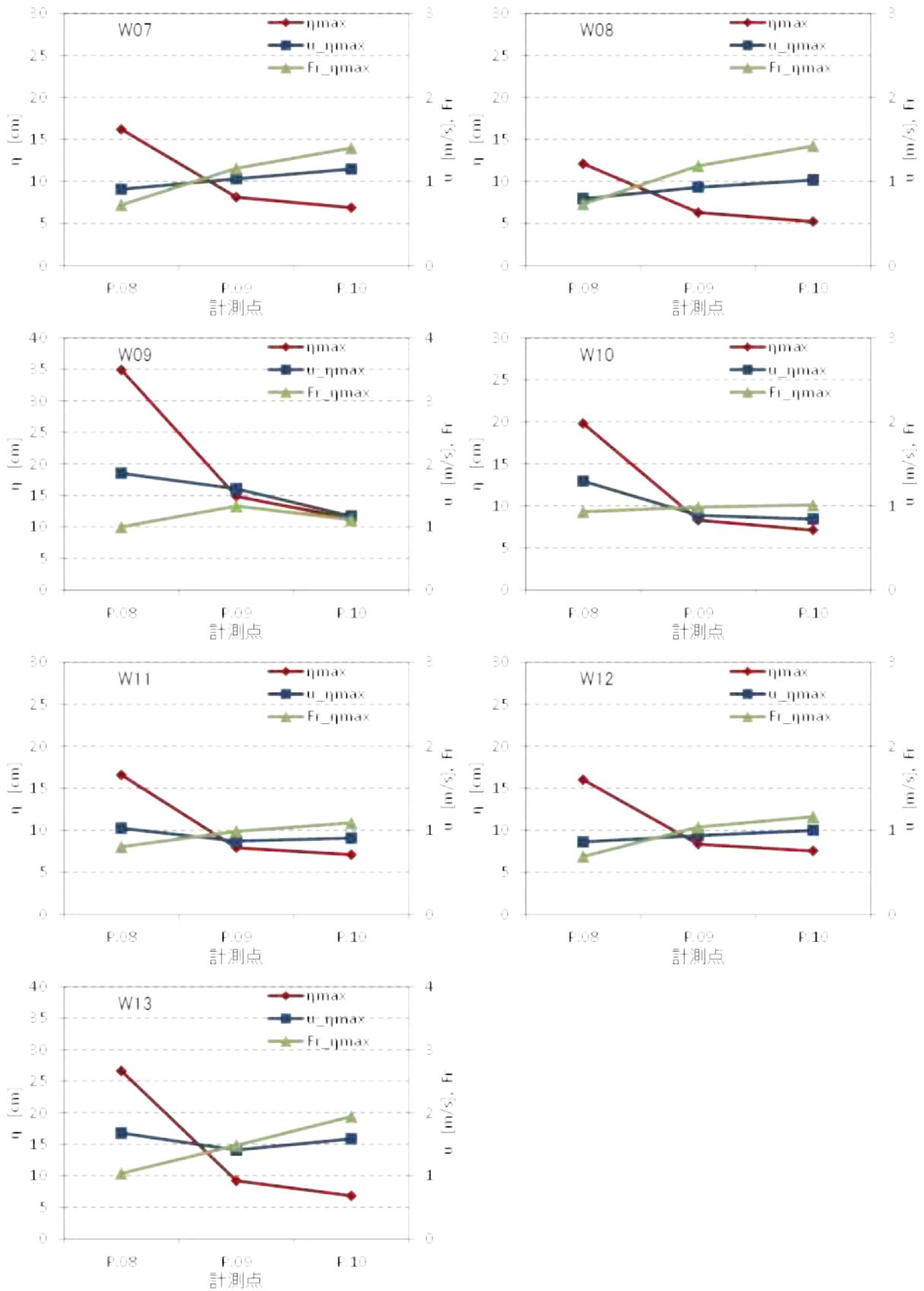
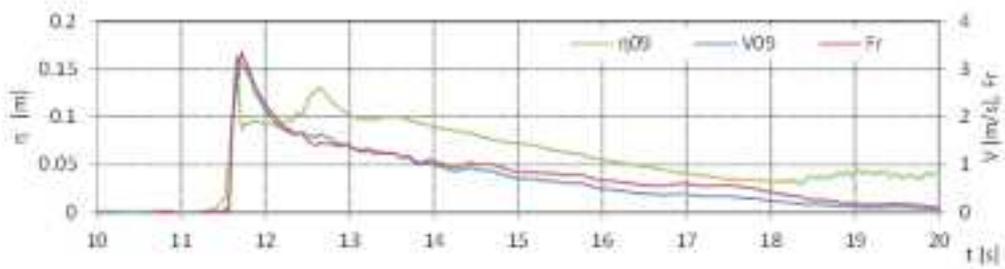
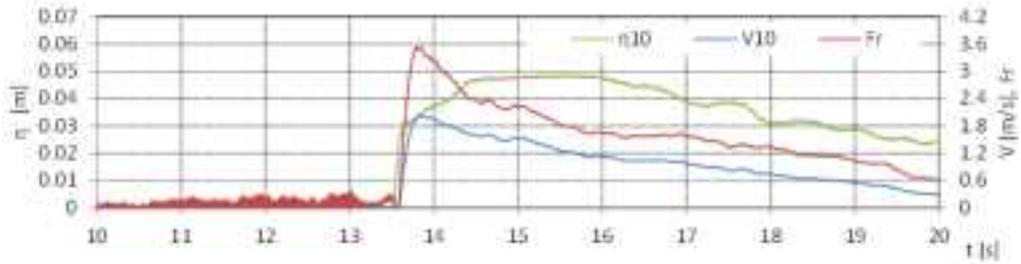


図 II.4-2 通過波検定結果（直立護岸，最大浸水深と同時刻の流速，フルード数）

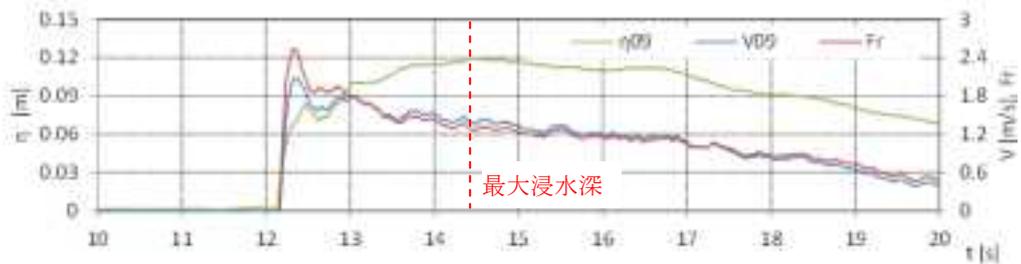


(a)W01, P.09

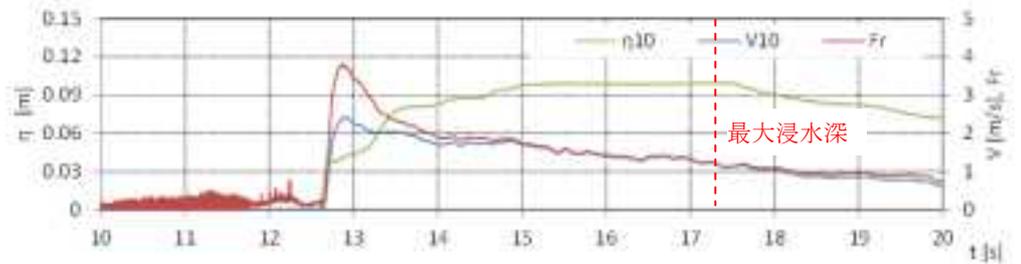


(b)W02, P.10

図 II.4-3 通過波の時系列 (直立護岸)



(a)P.09



(b)P.10

図 II.4-4 通過波の時系列 (直立護岸, W05)

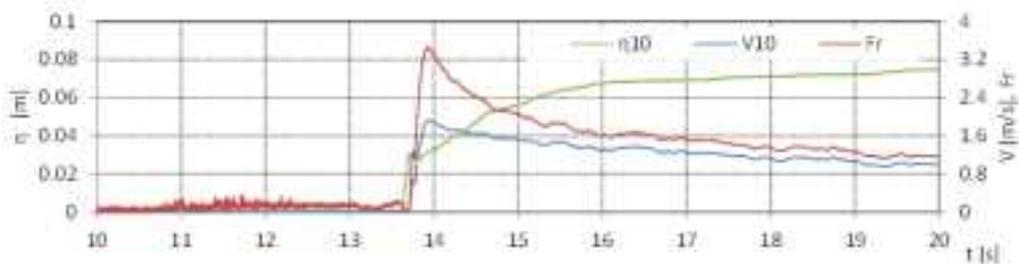


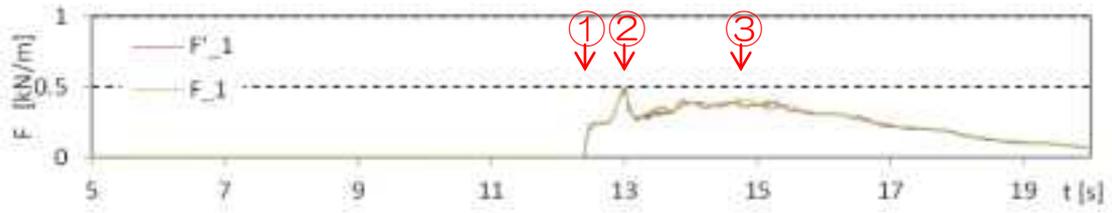
図 II.4-5 通過波の時系列 (直立護岸, W12, P.10)

## 4.2. 波力の時系列特性

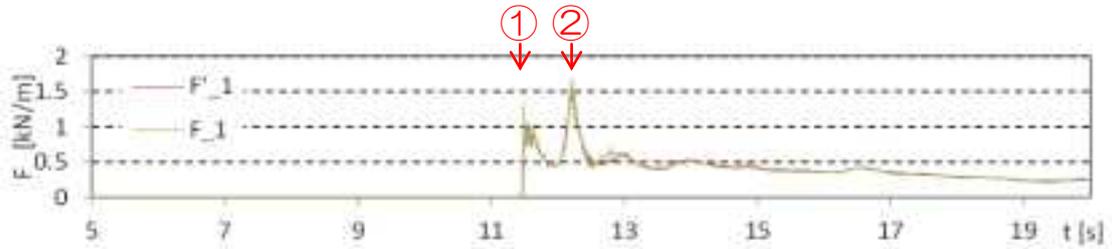
図 II.4-6 に波力の時系列の例を示す．図(b)の①のように，津波の先端が堤体に衝突した際に，衝撃的な波力のピーク（以降，ファーストピークと呼ぶ）が生じる．この力は，津波の形状により大きな力となるが，波形によっては図(a)のように明確な衝撃力とならない．ただし，この衝撃力は継続時間が非常に短いことから，ここでは最大波力の解析対象とはしない．堤体前面を跳ね上がった水塊は，落下時に大きな波力を発生する．図(b)(c)では，これが明確に表れており，波力の最大値となっている（以降，セカンドピークと呼ぶ）．その後，図(a)に示すように，堤体前面水位が上昇することにより，最大津波波力（以降，サードピークと呼ぶ）が生じている．図(c)のセカンドピークとサードピークを比較すると，セカンドピークの方が大きいですが，波形によってはサードピークの方が大きくなる場合がある．以降では，セカンドピークとサードピークの大きい方を最大波力として解析する．

図 II.4-7 に各ピークにおける圧力の鉛直分布を示す．15回の繰り返し試験の結果を重ねて示した．赤線は，後述する等価静水圧分布である．ファーストピークでは，圧力が底面付近で大きくなっており，静水圧とは異なる分布を示している．一方，セカンドピーク，サードピークでは，静水圧に近い分布を示しており，セカンドピーク，サードピークを対象とした場合には，後述する水深係数により波力の評価が可能であることが分かる．

図 II.4-8 は，堤体前面の水位時系列  $\eta$  と津波波力  $F$ ，およびその津波波力と同等の力を生じる等価な静水圧を仮定した場合の水位  $\eta^*$  を示したものである．津波の到達した直後は， $\eta$  よりも  $\eta^*$  の方が大きく，静水圧以上の力が働いて衝撃的波力（ファーストピーク）が生じていることが分かる．その後，堤体前面水位  $\eta$  は急激に上昇するが， $\eta^*$  は減少している．これは，水塊が堤体前面で打ち上げられ，空中に浮いたような状態となるため，水位は高くても圧力が働いていないことを意味する．この水塊が落下する際に，セカンドピークが生じているが，セカンドピークにおいては  $\eta$  と  $\eta^*$  はほぼ同じ値となっている．このことから，セカンドピークにおいても静水圧近似による評価が可能であることが分かる．セカンドピーク以降は，水位に短周期の擾乱はあるものの， $\eta$  は  $\eta^*$  とほぼ一致しており，静水圧分布となっていることが分かる．

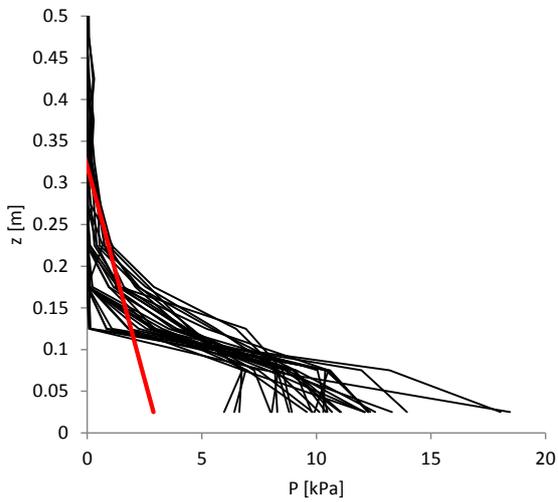


(a)W06

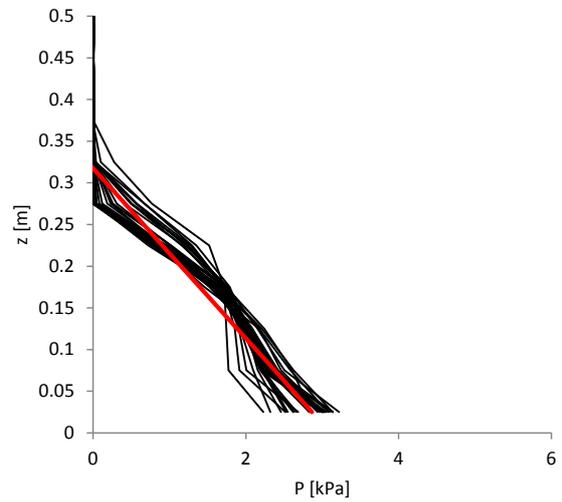


(b)W09

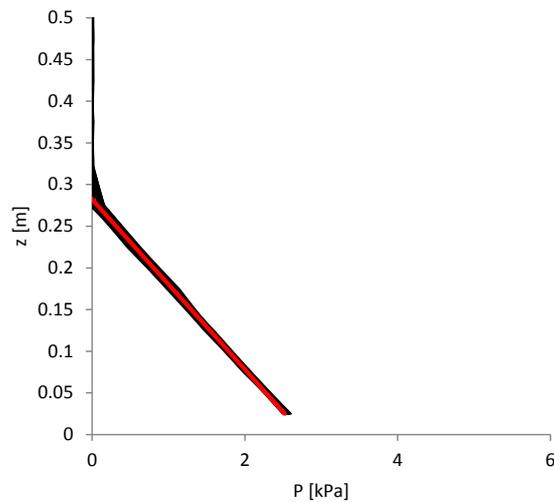
図 II.4-6 波力の時系列 (直立護岸, P.09)



(a)W09 の①



(b)W06 の②



(c)W06 の③

図 II.4-7 堤体前面の鉛直圧力分布 (直立護岸, P.09)

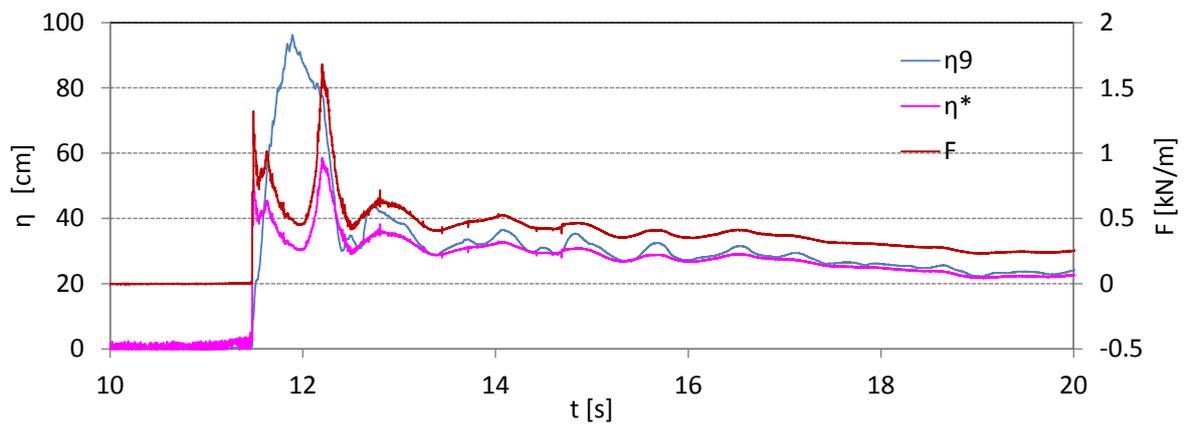


図 II.4-8 堤体前面水位と津波波力の時系列 (直立護岸, W09, P.09)

### 4.3. 水深係数の算出方法

水深係数は、最大津波波力発生時の構造物（堤体）前面の浸水深と、構造物がない場合の通過波の浸水深の比として定義される。これは、最大津波波力発生時には、鉛直圧力分布がほぼ静水圧になっていることが前提となっている。

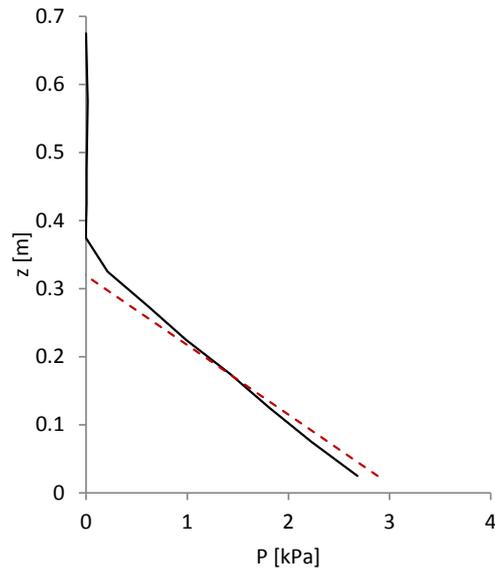
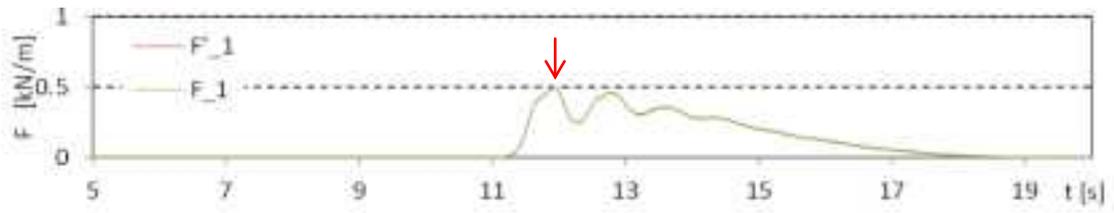
図 II.4-9 に最大津波波力発生時の鉛直圧力分布図の例を示す。実線は計測結果を、破線は後述する静水圧分布を表す。図の(a)は、堤体模型を汀線位置に設置した場合の例である。この場合、砕波しながら護岸に浸入するケース（例えば W01）を除き、最大波力は堤体前面で水位が上下する 1 波目で発生している。圧力分布は静水圧に近いものの、その傾きが静水圧のものよりも大きい。これは、鉛直方向の流速変動によるものであり、最大波力を示す瞬間は、水位が極大値を示す時であり、この時鉛直下向きの加速度が最大となる。これにより、圧力の鉛直分布の傾きが、静水圧の場合の傾き  $\rho g$ （図中では  $1/\rho g$ ）よりも小さく（図中では大きく）なっている。

図(b)(c)は、津波が陸上に遡上した後堤体に衝突する際の津波最大波力の例である。図(b)に示すセカンドピークの最大波力の鉛直圧力分布では、概略静水圧分布に近い形状となっているが、水塊落下による流れの乱れにより、完全な直線分布とはなっていない。一方、サードピークである図(c)の場合は、直線分布となり、この例ではほぼ静水圧分布となっている。ただし、実験ケースによっては、サードピークの圧力分布勾配は図(a)のように静水圧よりも大きな傾きとなる場合がある。

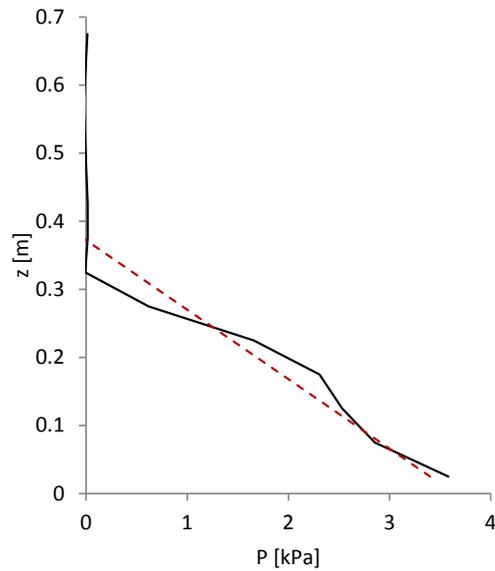
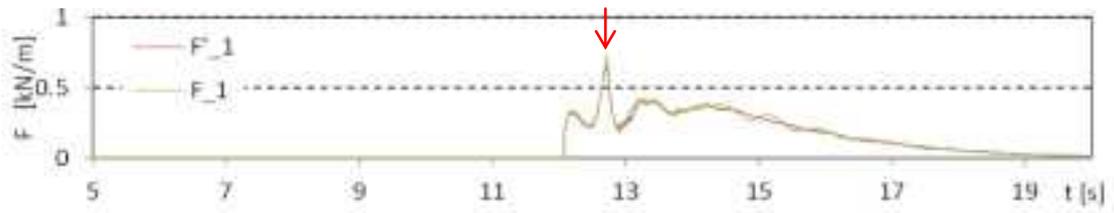
以上の水圧分布特性を踏まえ、ここでは水深係数  $\alpha$  を以下の式で定義する。

$$\alpha = \frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{2F}{\rho g}}$$

ここで、 $F$ ：堤体に働く津波波力， $\eta$ ：通過波の浸水深， $\rho$ ：水の密度， $g$ ：重力加速度である。この定義によれば、 $\alpha$  は津波波力が同じとなる等価静水圧分布を示すため、静水圧を仮定することにより波力の評価を正しく出来る。一方、 $\alpha$  による堤体前面の最大浸水深の評価は、圧力を基準としているため、実際の堤体前面水位とよりも低い場合があることに注意が必要である。

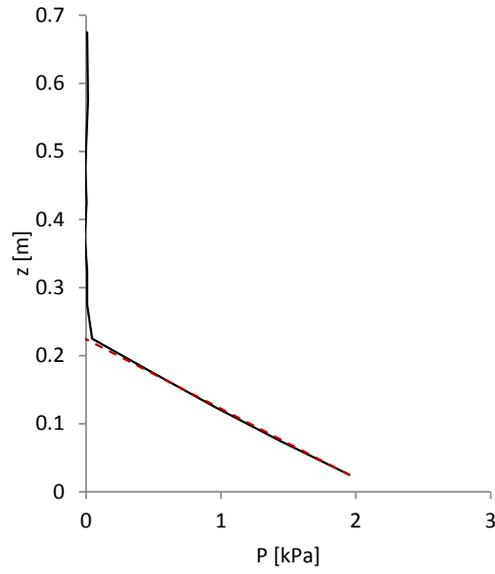
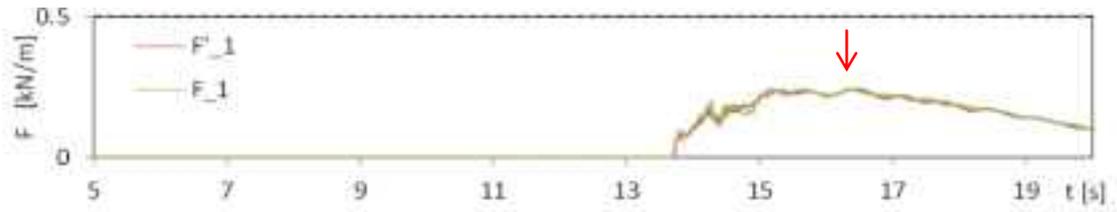


(a)直立護岸, W04, P.08



(b)直立護岸, W04, P.09

図 II.4-9 最大津波波力発生にの鉛直圧力分布の例 (破線は, 同等波力の静水圧分布)



(c)直立護岸, W07, P.10

図 II.4-9 最大津波波力発生にの鉛直圧力分布の例 (破線は, 同等波力の静水圧分布)

#### 4.4. 汀線からの距離による浸水深，波力，水深係数の変化

図 II.4-10, 図 II.4-11 に, 通過波の最大浸水深と, 最大波力および水深係数の汀線からの距離による変化を示す. 前述したように, 浸水深は陸側ほど小さくなっているのに対し, 波力は陸側の方が小さくなる傾向にあるものの, その変化は小さく, ケースによっては陸側 (P.10) の方が大きくなる場合がある. 波力の変化に対し, 最大浸水深の変化が大きいため, 水深係数は陸側ほど大きくなっている. この傾向は, 単純勾配よりも直立護岸の方が顕著である.

図 II.4-11 に示した直立護岸の場合, 汀線位置 (P.08) に堤体模型を設置した場合は, 波力が P.09 よりも小さくなっている. これは, 堤体が護岸の延長上となるため, 陸上構造物でなく, 水中構造物の一部となっているため, セカンドピークにあたる力が働かないためと考えられる. この時, 水深係数はケースによらずほぼ一定値となっている. 汀線では, 通過波浸水深及び最大波力と津波高の比が, 波形によらずほぼ一定となるために, 水深係数が一定値になっていると考えられる.

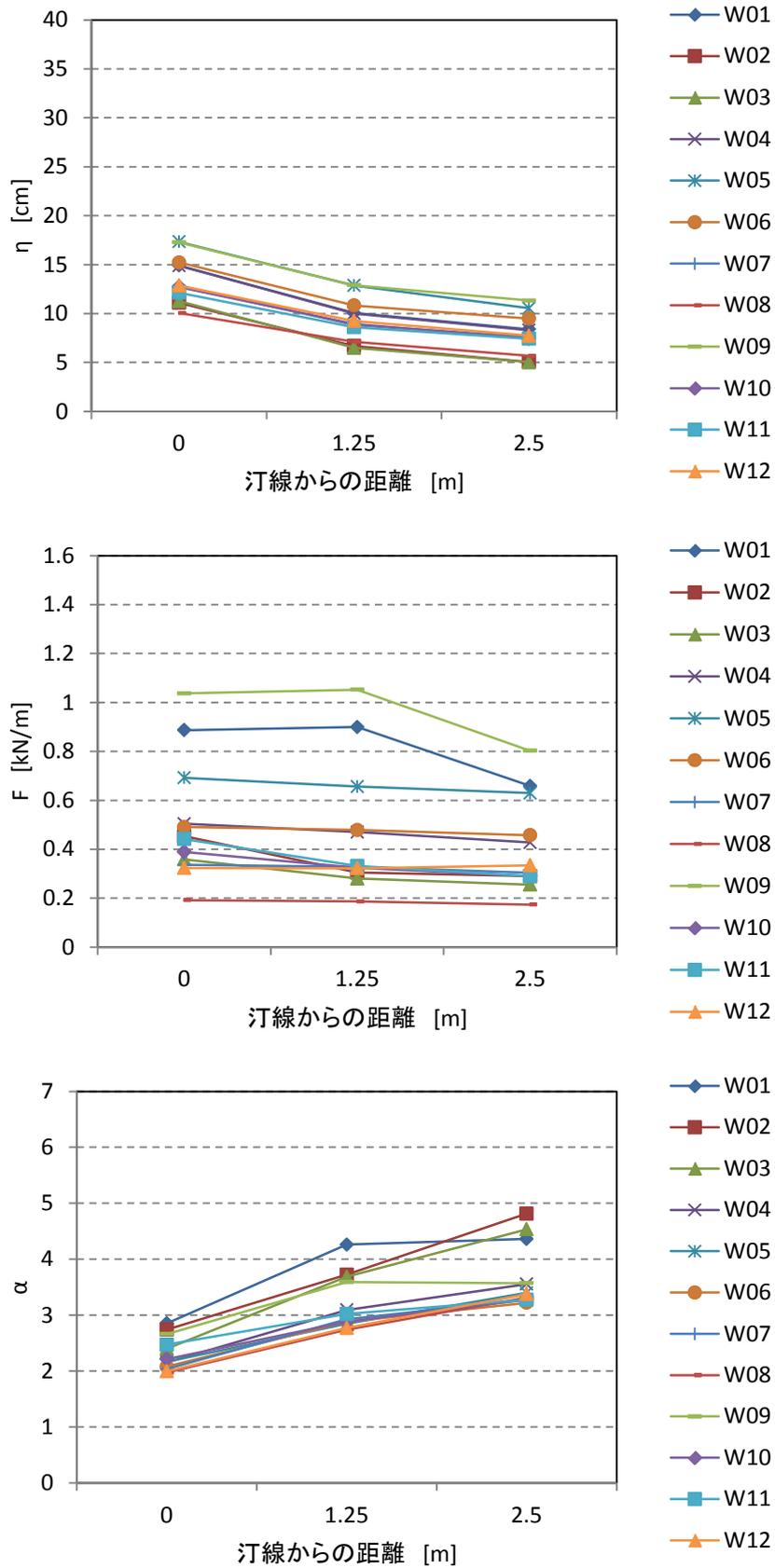


図 II.4-10 汀線からの距離による浸水深, 波力, 水深係数の変化 (単純勾配)

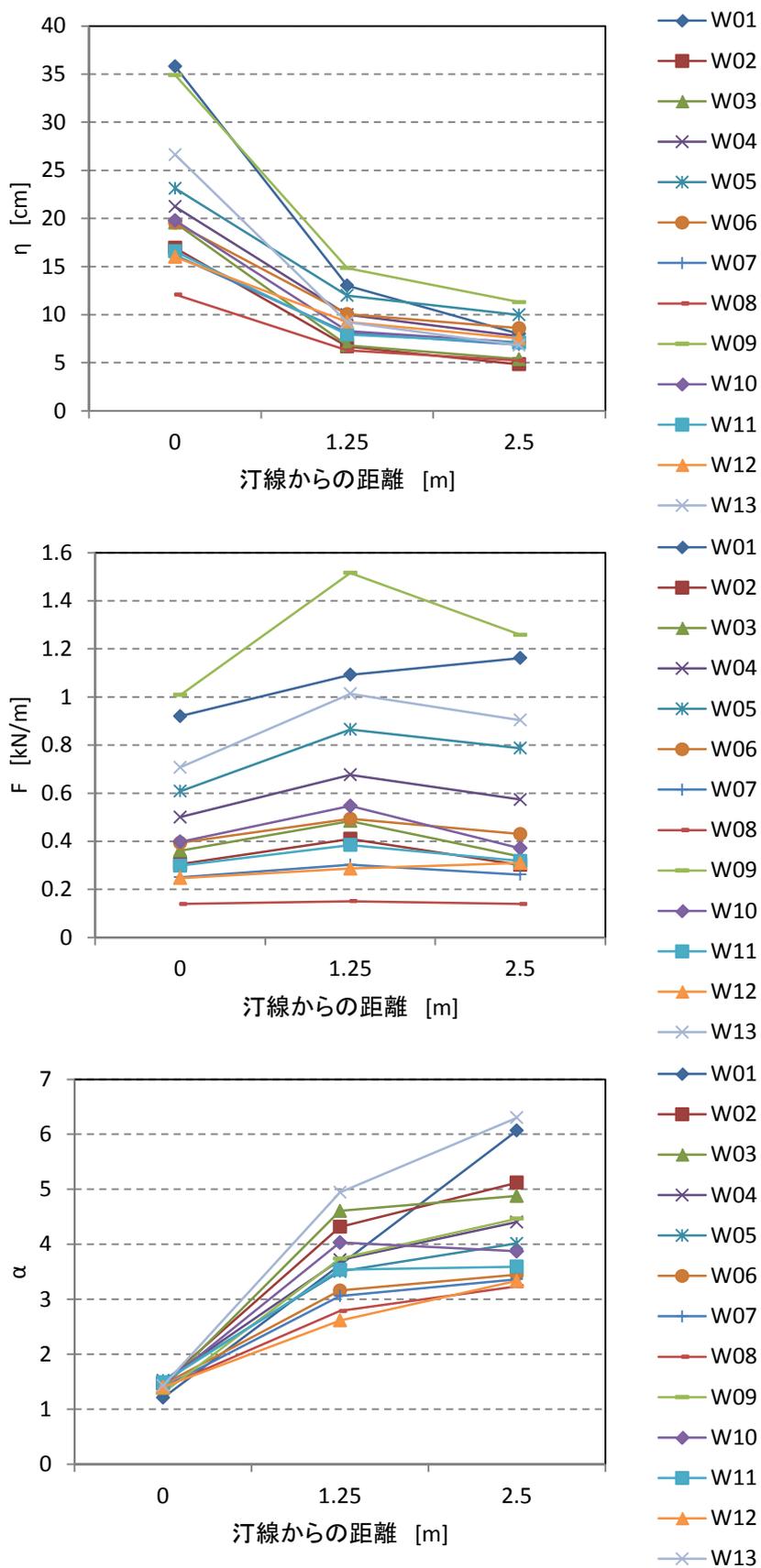


図 II.4-11 汀線からの距離による浸水深, 波力, 水深係数の変化 (直立護岸)

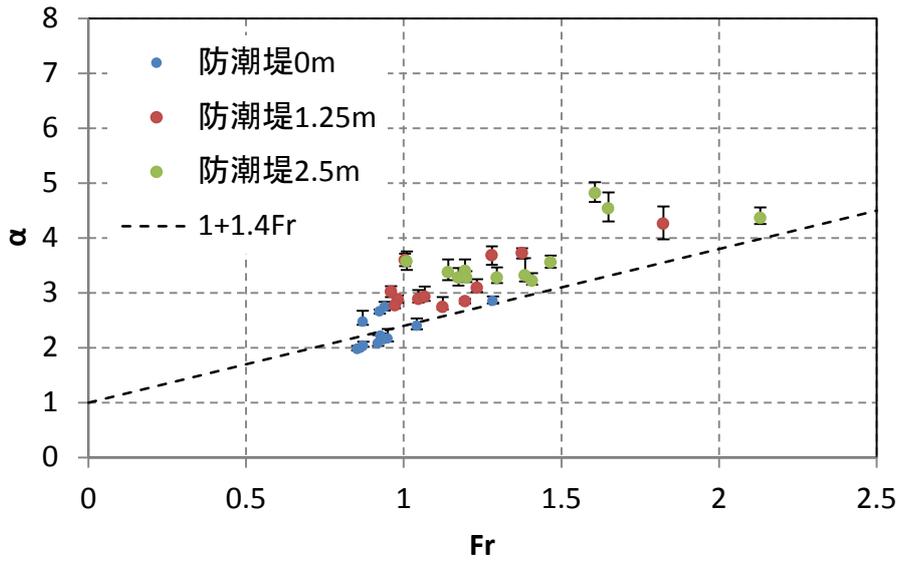
#### 4.5. 最大浸水深を基準としたフルード数と水深係数の関係

図 II.4-12～図 II.4-14 に、フルード数と水深係数の関係を示す。図中の点は 15 回の繰り返し試験の平均を示しており、縦線はそのうちの最大値と最小値を示す。また図中には比較として、水深係数の評価式の例として  $\alpha = 1 + 1.4Fr$  の直線を示した。

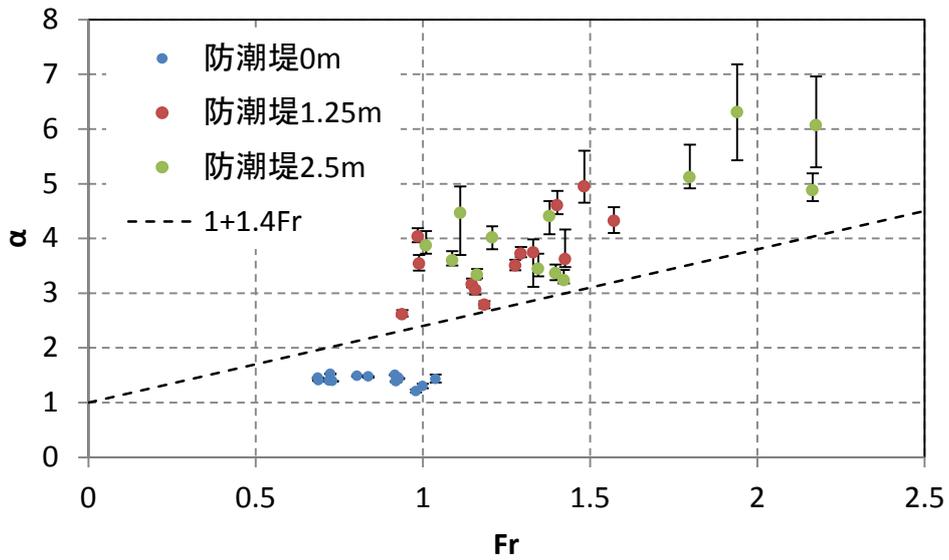
図 II.4-12 の単純勾配と直立護岸の比較によれば、特に P.10 においてフルード数が大きい場合に、直立護岸において水深係数が大きい傾向にあり、その場合のばらつきも大きい。図 II.4-13 によれば、このばらつきの大きいケースは孤立波の場合であることが分かる。孤立波の場合、汀線を通る際に単純勾配であれば波の伝播の延長上で陸域に浸水するが、直立護岸では護岸の反射の影響により、一旦水位が上昇し、大きな速度で陸域に遡上する。このため、陸上を遡上する流速が大きくフルード数が大きくなる。また、水深に比較して流速が大きいことから堤体での打ち上げも大きくなり、セカンドピークが卓越する。セカンドピークは、波力のばらつきが大きくなるため、上記の傾向が表れていると考えられる。

図 II.4-12 の直立護岸において、P.08 での水深係数はほぼ一定値を示している。上述したように、堤体が護岸の延長となるため陸上遡上の影響がなくなり、津波高に応じた波力を生じるため、フルード数に関係なく水深係数がほぼ一定となっていることが分かる。

図 II.4-14 に示した全ケースのフルード数と水深係数の関係によれば、フルード数が増加するに従い水深係数も大きくなっており、フルード数が 1 を超える多くのケースで水深係数は 3 を超えている。一方、フルード数が 1 以下の場合は、水深係数はほぼ 3 以下となっている。ただし、 $Fr=1$  付近に大きな水深係数を示しているケースがある。これは図 II.4-13 によれば、長周期波のケースであることが分かる。図 II.4-15 に長周期波の場合の通過波と波力の時系列の例を示す。この例では、浸水深の最大値は 17s 付近に発生している。一方、最大波力は 12.8s 付近に発生しているセカンドピークであり、最大浸水深と最大波力の発生時刻は 4s 以上ずれている。最大波力の発生時間と同じ時間の通過波のフルード数は 2 程度であることから、通過波の最大浸水深発生時を基準にフルード数を算定しているために、 $Fr=1$  付近で水深係数の大きな結果が得られたと考えられる。特に長周期の波では、図 II.4-15 の例に示したように、大きな浸水深が一定時間継続する（この例では、14.5～18s までほぼ一定）ため、最大浸水深の発生時間の定義が曖昧であり、これによりフルード数の値も最大波力を評価するには適さないものとなる場合がある。以上のように、通過波の基準を最大浸水深で定義した場合、フルード数が小さく評価されて、見掛けの水深係数が大きくなることが明らかとなった。

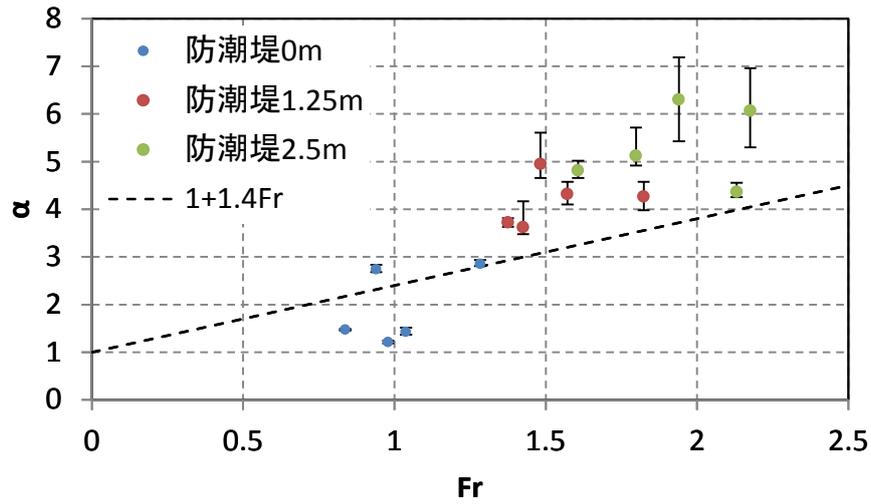


(a)単純勾配

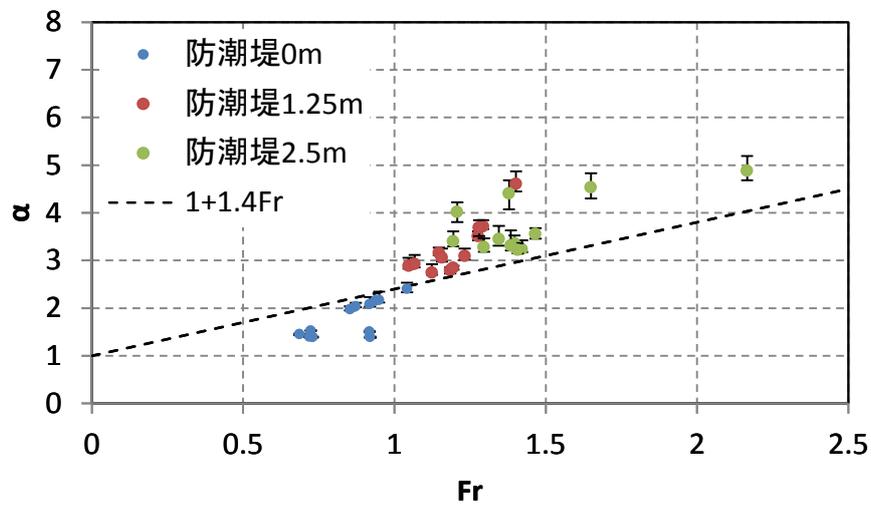


(b)直立護岸

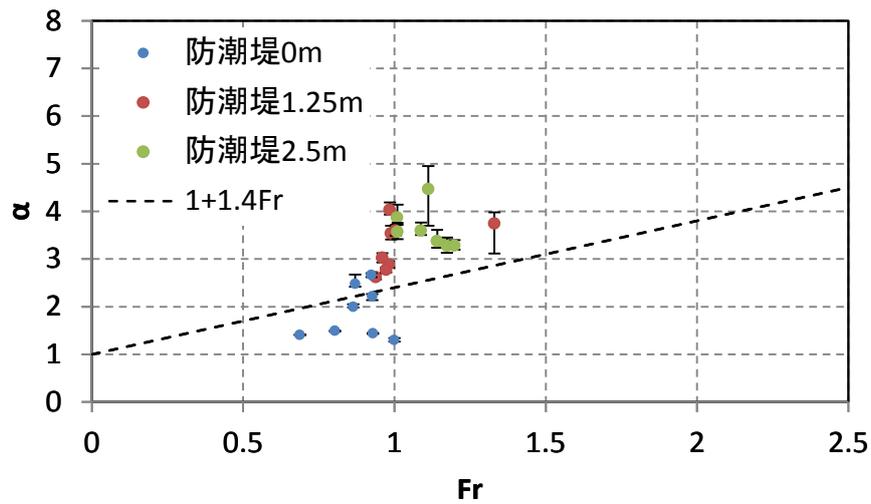
図 II.4-12 フルード数と水深係数の関係 (海底地形別)



(a)孤立波



(b)正弦波



(c)長周期波

図 II.4-13 フルード数と水深係数の関係 (波種別)

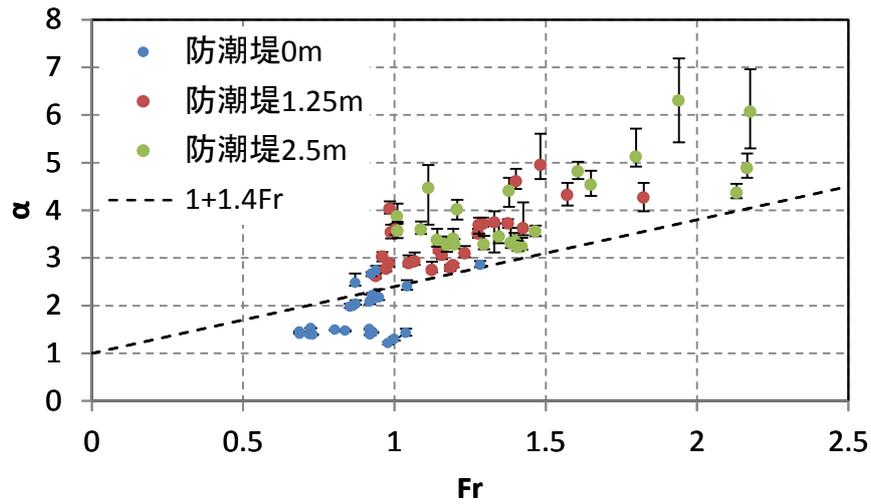


図 II.4-14 フルード数と水深係数の関係 (全ケース)

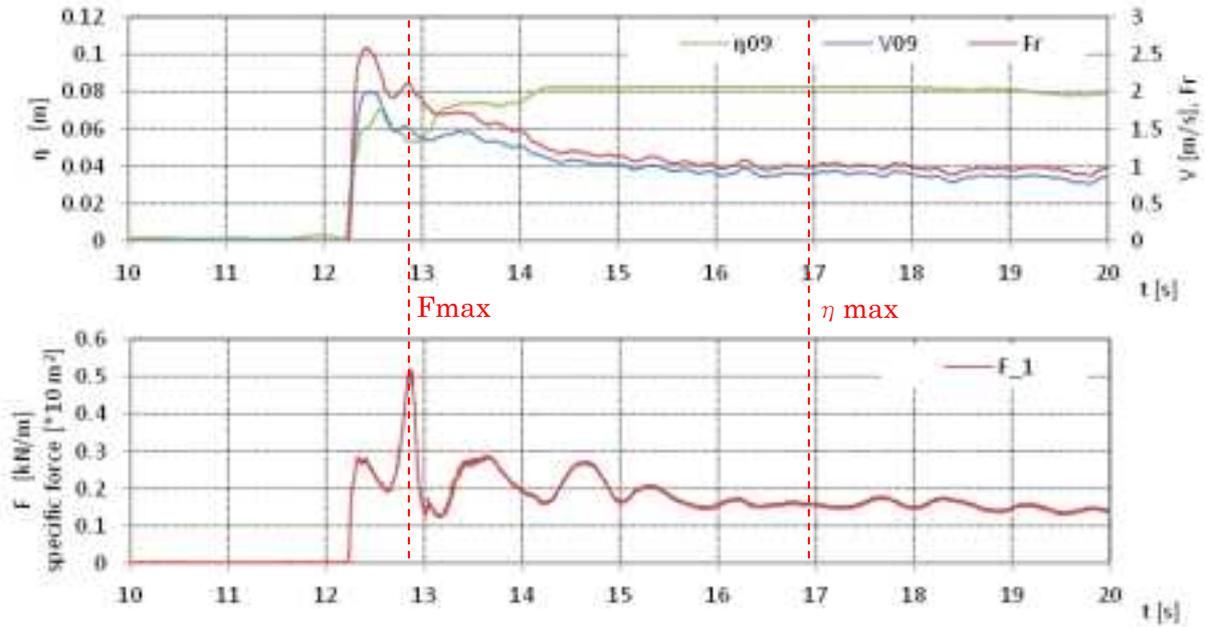
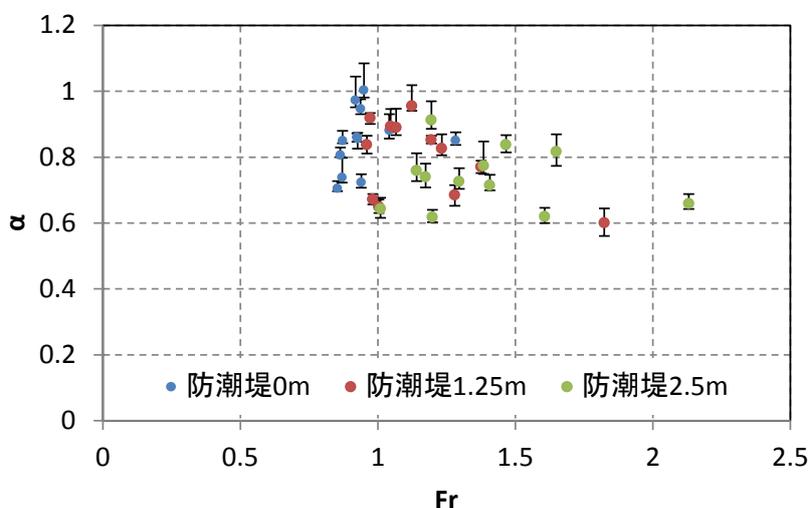


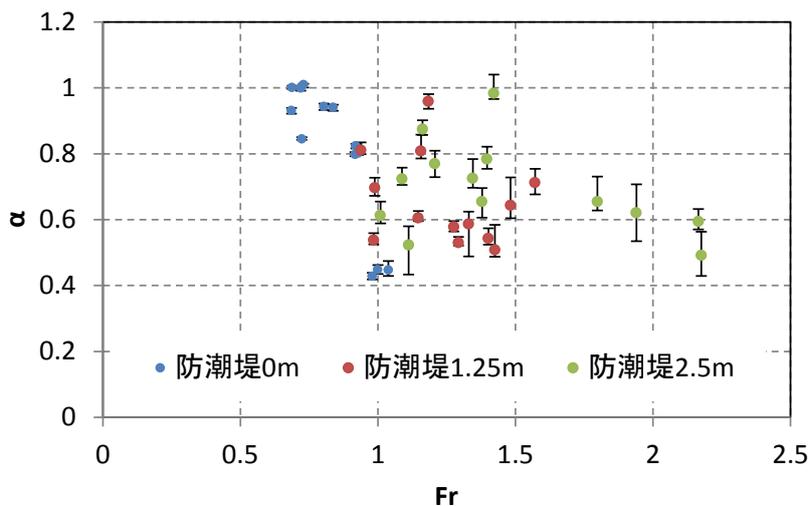
図 II.4-15 長周期波の通過波と波力の時系列の例

#### 4.6. 堤体前面浸水深を基準としフルード数と水深係数の関係

前述したように、通過波の最大浸水深を基準に津波最大波力を評価した場合、水深係数が大きくなり評価手法として不適切と考えられる場合があるため、通過波の基準について以降に検討する。図 II.4-16 は、波力/波圧試験における堤体前面の浸水深の最大値を基準として水深係数を算出した結果である。ただし、堤体を設置した場合は水平流速が 0 になりフルード数が定義できないため、横軸については図 II.4-12 と同じ値を用いた。これによれば、全てのケースで水深係数は 1 以下となっている。最大波力の発生時はほぼ静水圧分布となっているため、堤体前面の最大浸水深に対する静水圧を基準にすることにより、最大波力を安全側に評価できることが分かる。また、特に直立護岸では多くのケースで水深係数は 0.8 を下回っている。最大波力がセカンドピークで発生している場合、堤体前面の水位は打ち上げ時にそれ以上まで上昇していると考えられるため、本手法により水深係数を求めた場合には 1 を下回ることが分かる。



(a)単純勾配



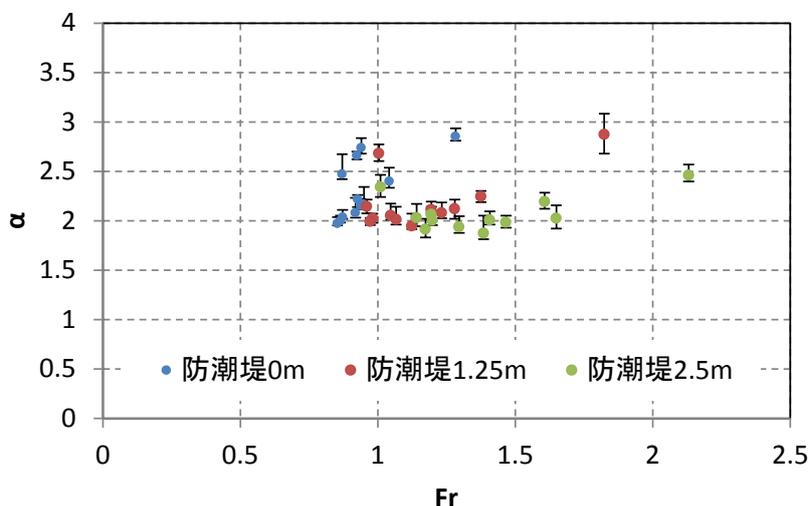
(b)直立護岸

図 II.4-16 堤体前面浸水深を基準としたフルード数と水深係数の関係

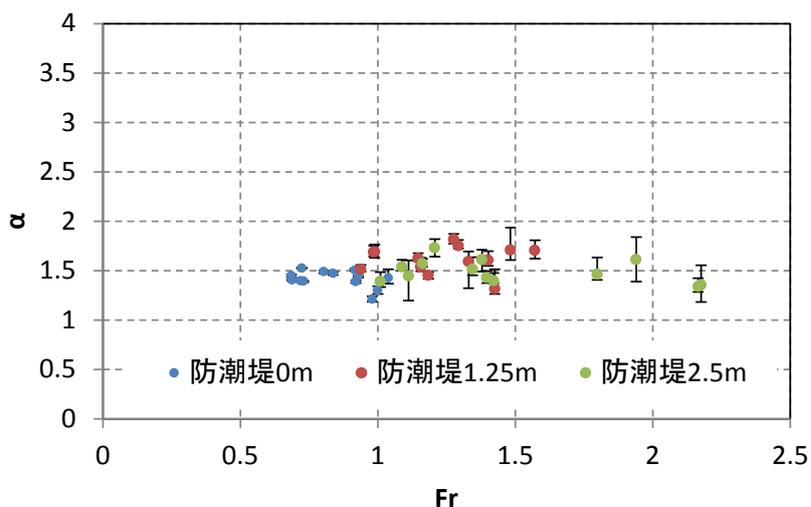
#### 4.7. 通過波の汀線浸水深を基準としたフルード数と水深係数の関係

図 II.4-17 は、各実験ケースにおける通過波の汀線位置での最大浸水深と、その時の流速によるフルード数を基準に、フルード数と水深係数の関係を求めたものである。これによれば、水深係数は全て 3 以下の値となっており、またフルード数によらず、地形毎にほぼ一定の値を取ることが分かる。津波の遡上は、汀線位置からの流れの流入と考えることが出来るため、汀線位置での流入特性により、津波最大波力のある程度評価できることが分かる。これは、汀線からの距離に関わらず波力がほぼ一定であることを示しており、図 II.4-10、図 II.4-11 において、波力の汀線からの距離による変化が、水深やフルード数の変化に比較し小さいことに整合する。

単純勾配の一部のケースで水深係数 2.5 以上の大きな値が表れているが、これらは汀線位置で砕波が発生しているケースである。汀線位置で巻き波砕波が発生し、この時最大浸水深となる場合には、汀線位置の最大浸水深、フルード数は陸域での遡上流れを代表するものにならないため、他のケースとは値が異なり大きな水深係数になっていると考えられる。



(a)単純勾配



(b)直立護岸

図 II.4-17 通過波の汀線浸水深を基準としたフルード数と水深係数の関係

#### 4.8. その他の基準によるフルード数と水深係数の関係

ここでは、通過波の最大浸水深発生時の浸水深とフルード数の代わりに、以下の3種類の方法により、水深係数とフルード数を算出した。

- ①最大波力発生時と同じ時間の通過波の浸水深およびフルード数を用いる。
- ②通過波の比エネルギー最大時の浸水深およびフルード数を用いる。
- ③通過波の比力最大時の浸水深およびフルード数を用いる。

ここで比エネルギー $E$ 、比力 $SF$ は以下の式で定義される。

$$E = \frac{V^2}{2g} + \eta$$
$$SF = \frac{V^2 \eta}{g} + \frac{\eta^2}{2}$$

図 II.4-18 に、各諸量の発生時間の例を示す。最大浸水深は、前述したように、特に周期の長い波形に対し最大波力の発生時よりも遅れて発生する。これに対し、最大比エネルギーは、流速の影響が大きく、波形到達時の初期の段階で発生する。最大比力は、水位の影響による最大比エネルギーよりも遅れて発生するが、波力の最大よりは前に発生する傾向にある。

図 II.4-19 に各諸量の最大値の発生時間の浸水深およびフルード数を用いて、フルード数と水深係数の関係を求めた結果を示す。またこのうち、最大浸水深を用いた場合に水深係数が大きく評価される長周期波のみを対象としたものを図 II.4-20 に示す。

図(a)の最大浸水深で算出したケースは、 $Fr=1\sim 1.5$  に値が集中している。図(b)の最大波力発生時のフルード数はより大きい値に広く分布していることから、最大浸水深ではフルード数を小さく評価していることが分かる。また図 II.4-20 によれば、最大浸水深の発生時間は最大波力の発生時間よりも4s以上遅れている。

最大波力を評価するには、最大波力発生時の浸水深およびフルード数を用いて評価することが適切と考えられる。図(b)によれば、ばらつきの大きな孤立波のケースを除いて、ほぼ直線上に分布することが分かる。ただし、浸水深およびその流速から津波波力を求めるには、最大波力の発生時間が分かっていないため、適用に課題が残る。またばらつきの大きなケースでは、セカンドピークが卓越しており、打ち上がった水塊の落水により働く津波波力の評価手法は、別途検討する必要がある。

図(c)の比エネルギー最大時を基準に整理した場合、 $Fr$  数に対し二次関数的に $\alpha$ が増加する。ここで $Fr$ 数が大きいケースは、先端部分で水脈が薄く流速が大きいケースであり、速度エネルギーが卓越するために最大比エネルギーの発生時刻が最大波力の発生時刻よりより速くなる。そのため、浸水深が小さくなり、水深係数が大きくなっていると考えられる。ただし、長周期波に関しては、図 II.4-20 より最大比エネルギーの発生時間は最大波力の発生時間に概ね近いことが分かる。

図(d)に示した比力最大時を基準に整理した場合は、図(a)や(c)に比較して、フルード数と水深係数の関係がもっとも直線的となる。比力が最大になる時間と波力が最大になる時間が近いと考える。図 II.4-20 によれば、長周期波についても、もっとも最大波力と発生時間が近いことが分かる。また、図(b)と比較して、ばらつきの大きなケースについても、直線付近に分布してい

る。打ち上がった水塊の落水時にエネルギーは、打ち上げ高さに比例すると考えられるが、この打ち上げ高さが比力に関連付けられるために、セカンドピークが卓越するケースでもフルード数と水深係数の関係が直線的になったと考えられる。これについては、さらに検討が必要である。

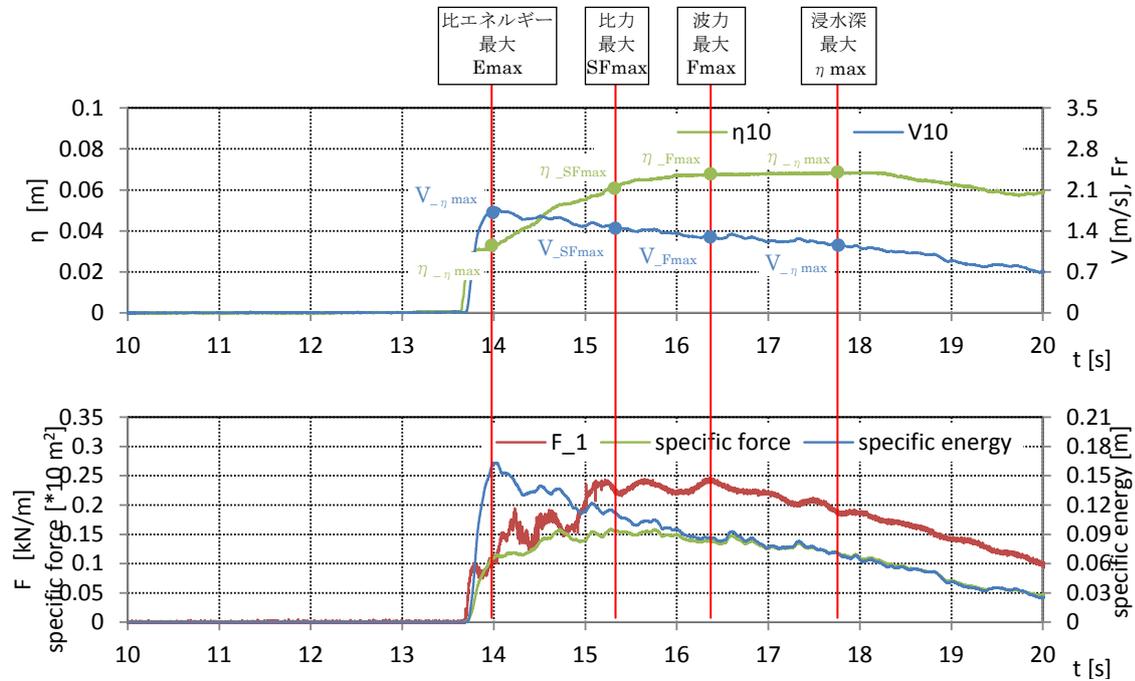
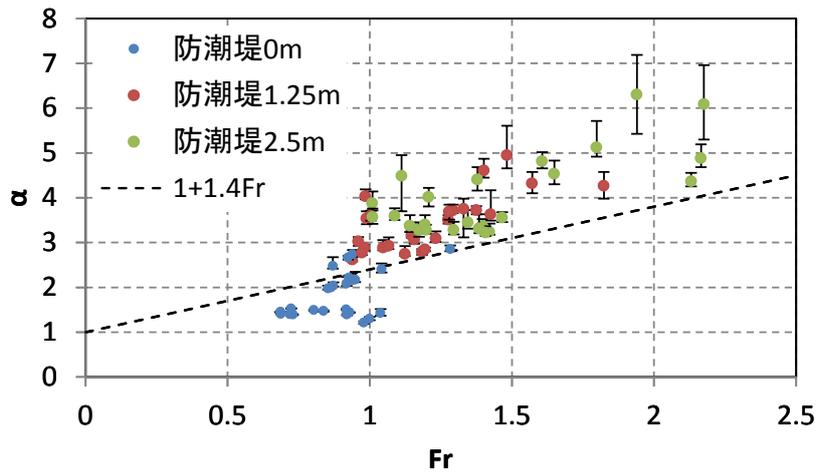
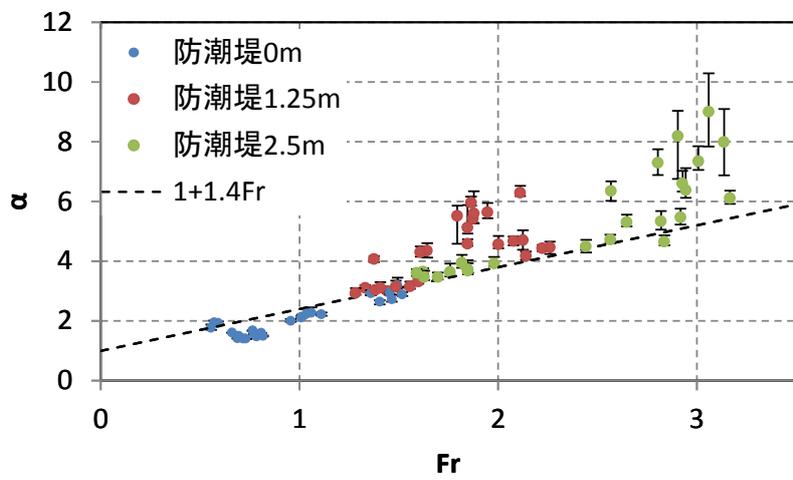


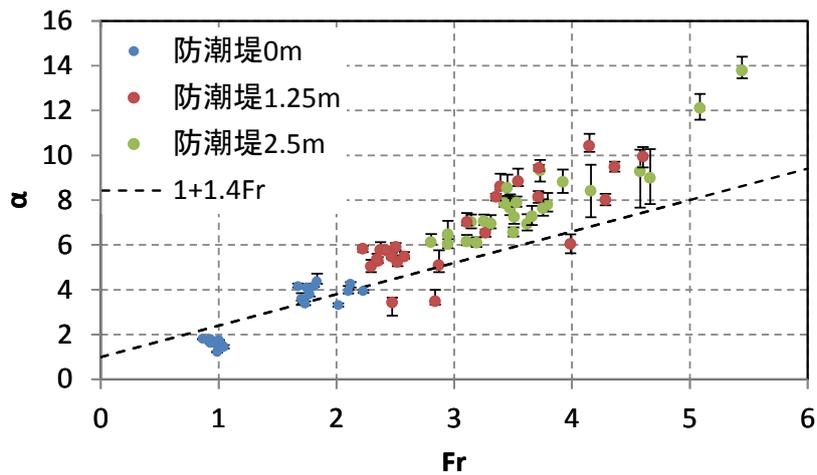
図 II.4-18 通過波の浸水深，比エネルギー，比力と波力の関係（直立護岸，W07，P.10）



(a)最大浸水深発生時を基準とした場合 (再掲)

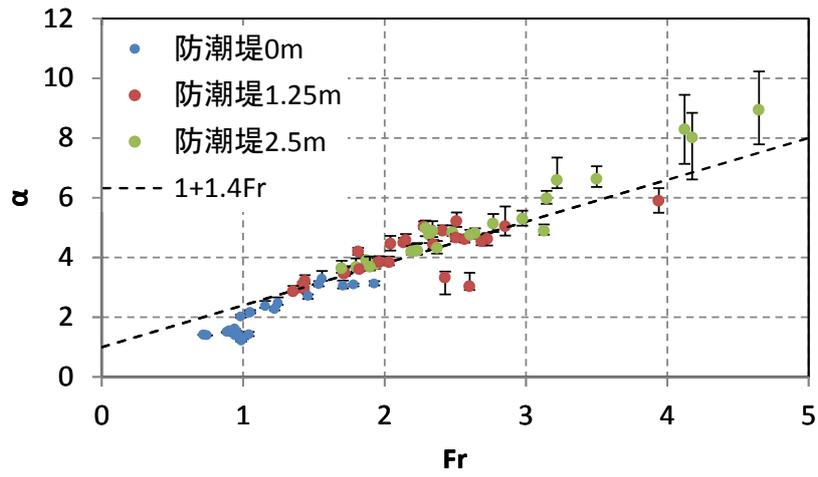


(b)最大波力発生時を基準とした場合



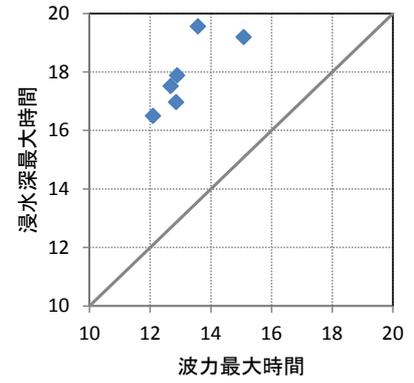
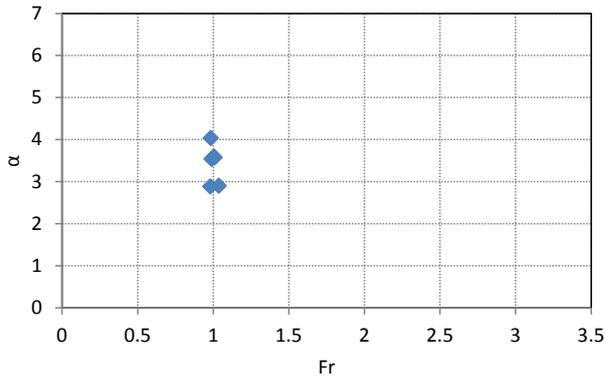
(c)比エネルギー最大時を基準とした場合

図 II.4-19 各基準時間によるフルード数と水深係数の関係

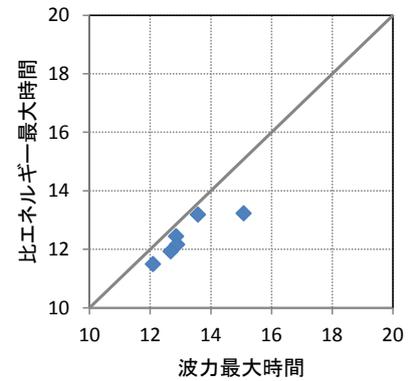
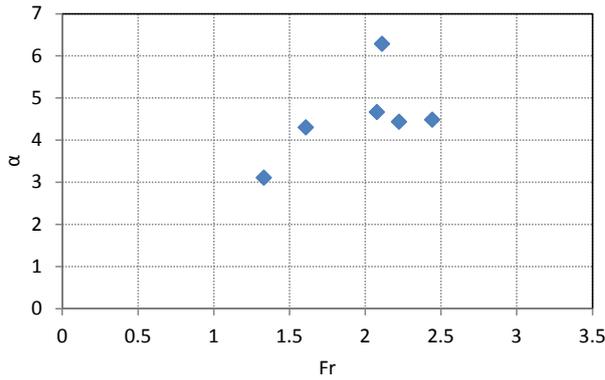


(d)比力最大時を基準とした場合

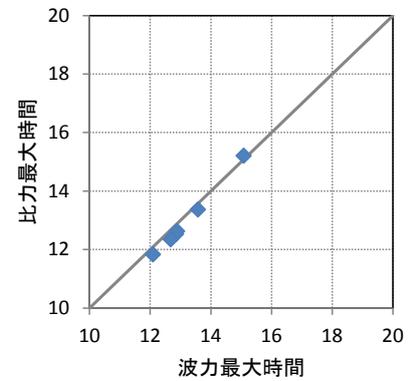
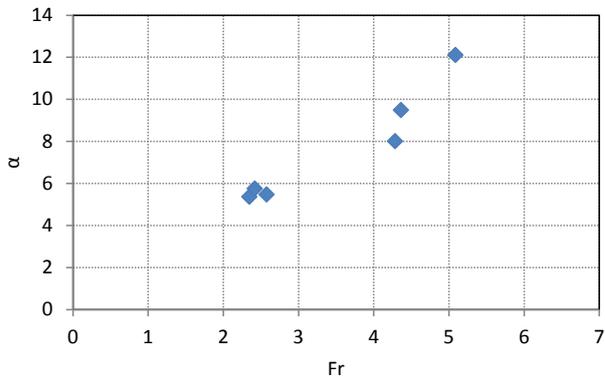
図 II.4-19 各基準時間によるフルード数と水深係数の関係



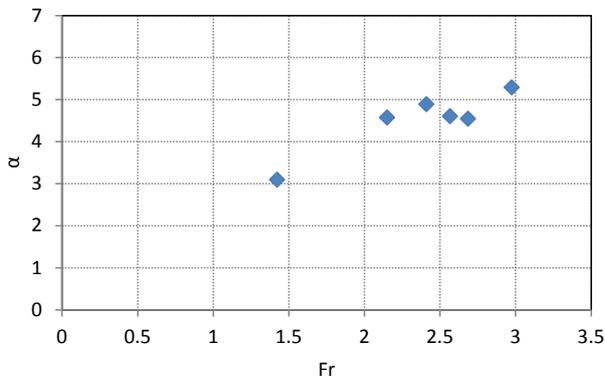
(a)最大浸水深発生時を基準とした場合



(b)最大波力発生時を基準とした場合



(c)比エネルギー最大時を基準とした場合



(d)比力最大時を基準とした場合

図 II.4-20 各基準時間によるフルード数と水深係数の関係（長周期波のみ）

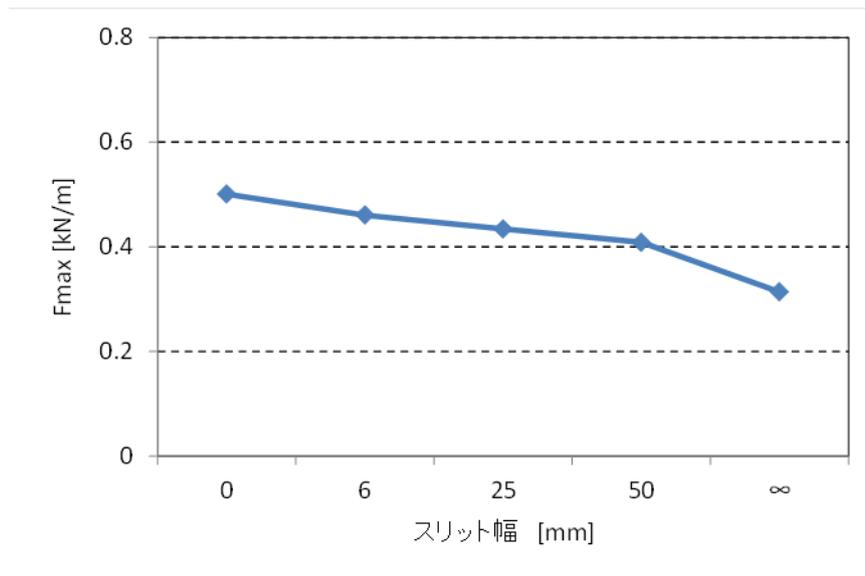
#### 4.9. スリットの影響

図 II.4-21, 図 II.4-22 に, スリット付堤体模型による最大波力の比較を示す. 全てのケースで右下がりの傾向が表れており, スリットがあることにより最大波力が低下することが分かる.

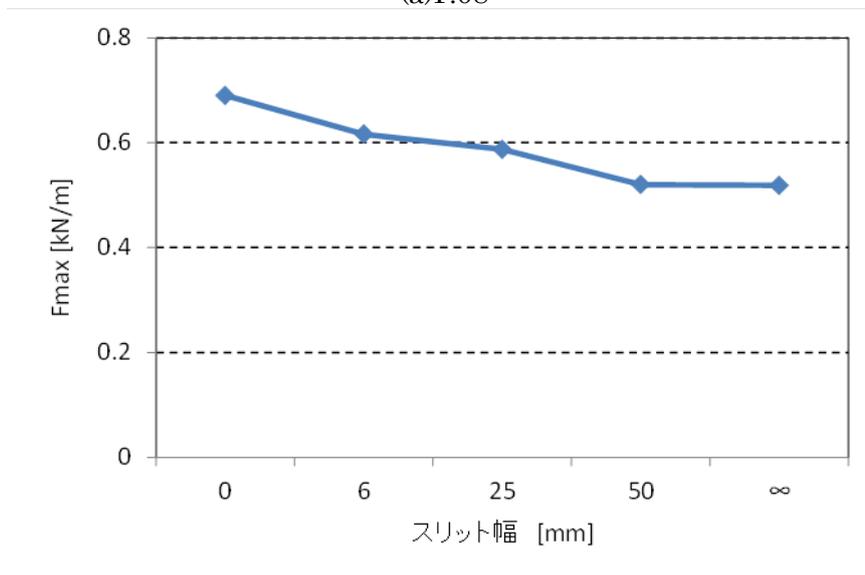
堤体の位置による違いを比較すると, P.08 におけるスリットの有無による違いが, P.09, P.10 よりも小さい. これは, P.09, P.10 では津波の流れに対し鉛直方向に一樣にスリットがあるが, P.08 では堤体が護岸の一部となっており, 波の反射する面積に対するスリットの面積が相対的に小さくなる.

W04 と W07 を比較すると, W04 の方がスリットによる圧力の低減の程度が大きい. 図 II.4-23, 図 II.4-24 にスリットの有無による波力の違いを比較するため, スリット 6mm のケースとスリットのないケースの鉛直圧力分布と波力の時系列を示す. 津波波力最大時の圧力分布を比較すると, P.08 を除き, W04 の方が W07 よりも圧力が低減していることが分かる. 波力の時系列によれば, W04 では最大波力はセカンドピークに発生しており, この波力の低減が大きいことが分かる. W07 ではサードピークで最大波力が発生しており, セカンドピークに比較すると圧力の低減の程度が小さい. セカンドピークは, 打ち上げられた水塊の落下によって発生しているため, 打ち上げ時に底面付近に大きな圧力が発生する. スリットがあることにより, この圧力が低下して打ち上げ高が低くなり, 落下時の波力が小さくなったものと考えられる. なお W04 の時系列を見ると, セカンドピーク以外の波力の低減は, それほど大きくなく W07 と同程度であることが分かる.

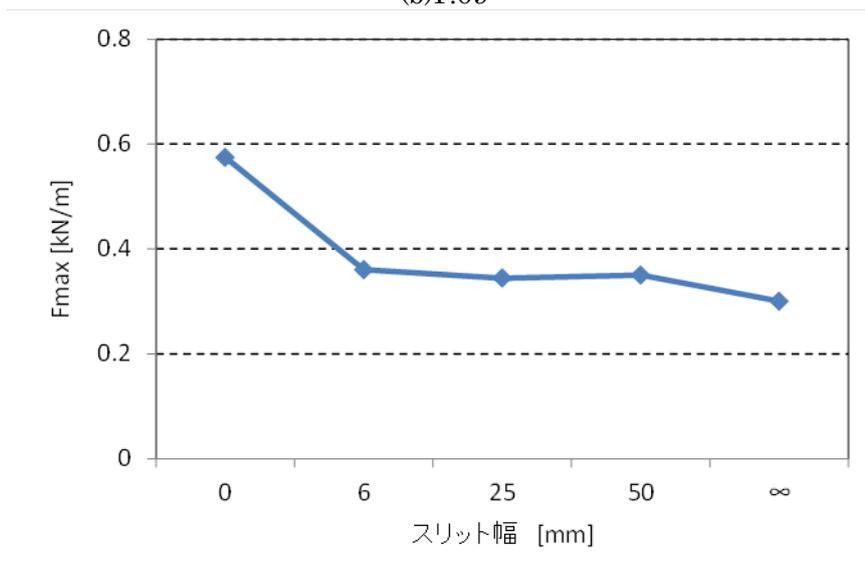
スリット 6mm による波力の低減効果は, W04 の P.10 を除き, 1 割程度である.



(a)P.08

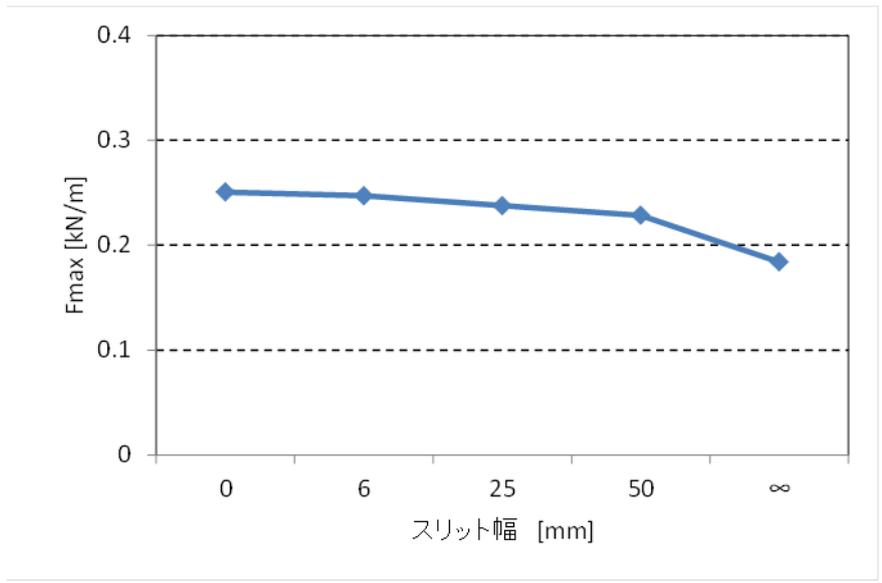


(b)P.09

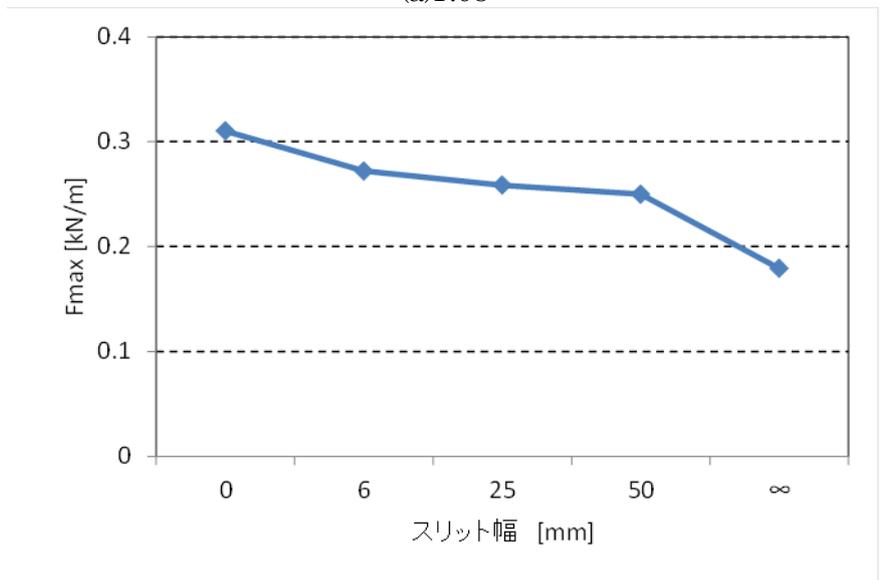


(c)P.10

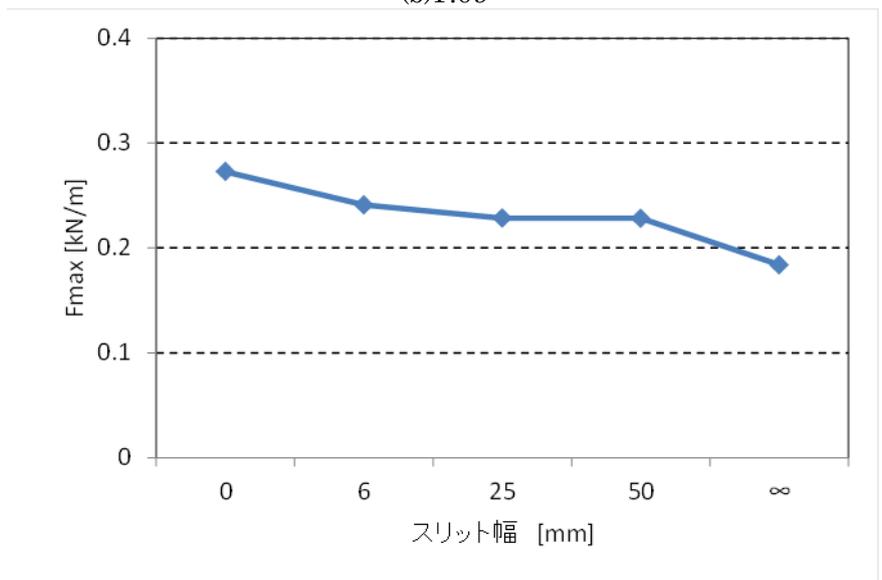
図 II.4-21 スリット付堤体模型における津波波力比較 (W04)



(a)P.08



(b)P.09



(c)P.10

図 II.4-22 スリット付堤体模型における津波波力比較 (W07)

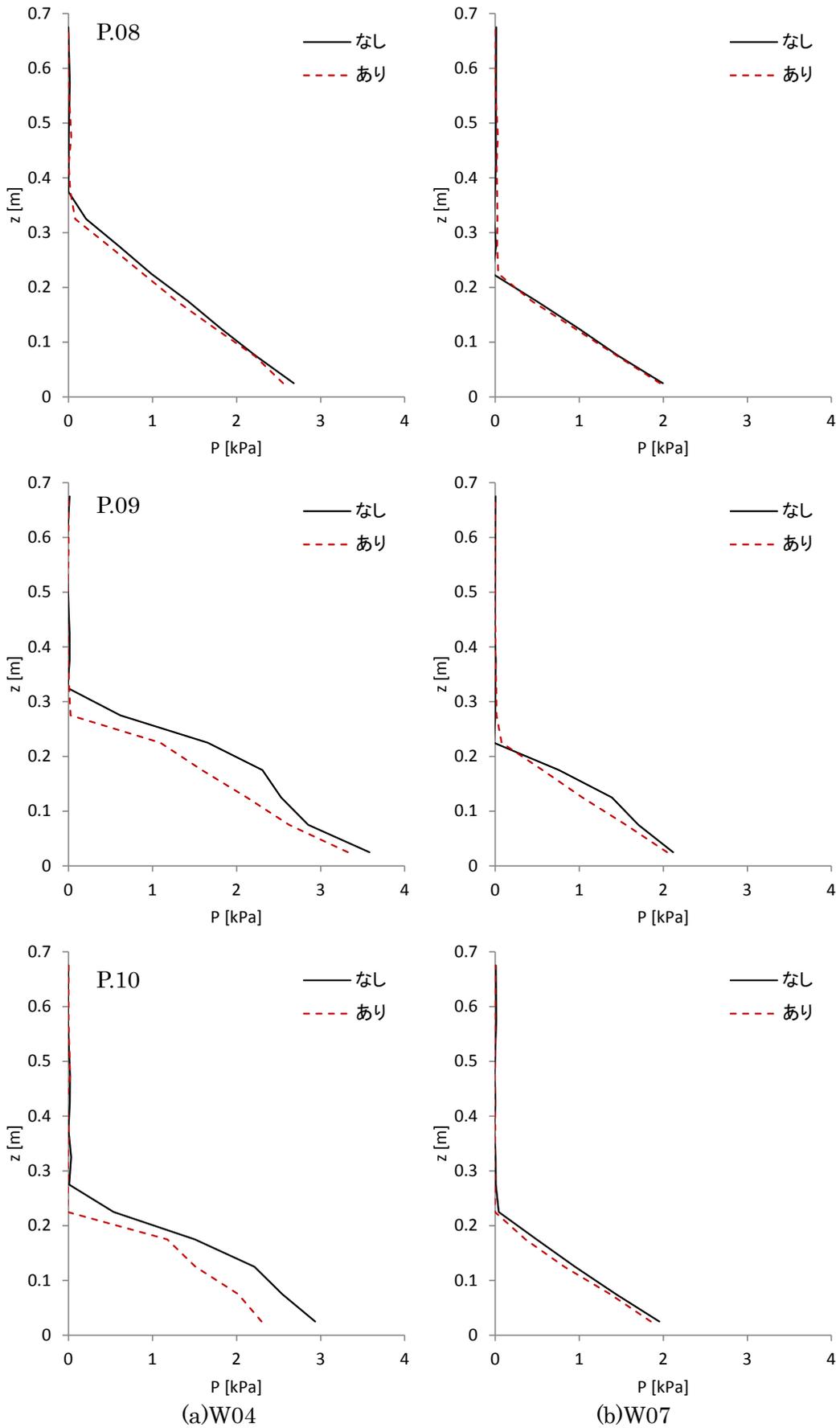
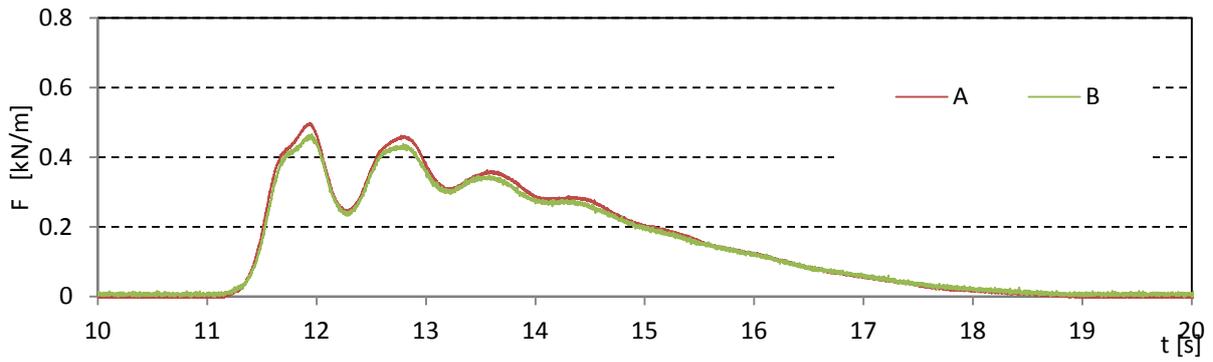
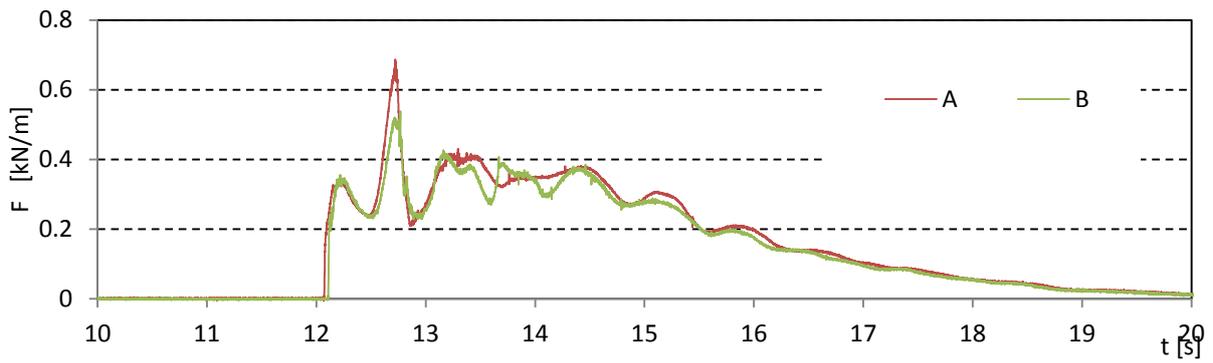


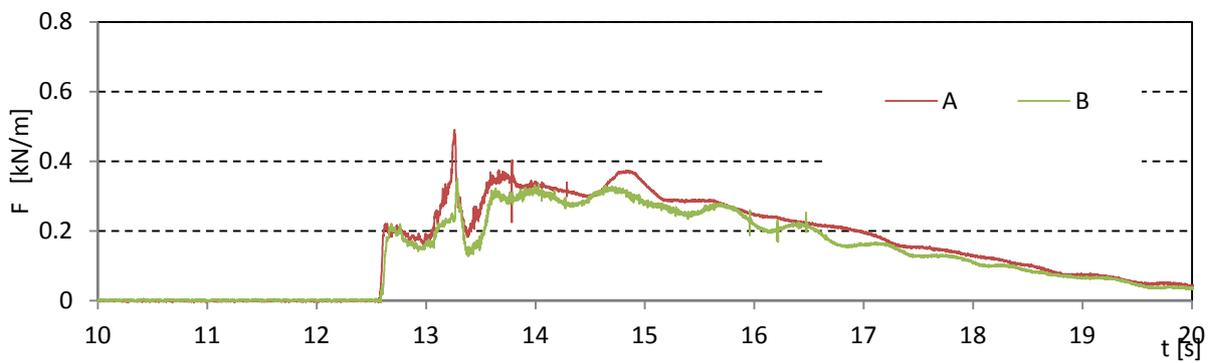
図 II.4-23 スリットの有無による最大波力発生時の鉛直圧力分布比較 (スリット 6mm)



(a)防潮堤位置 0m

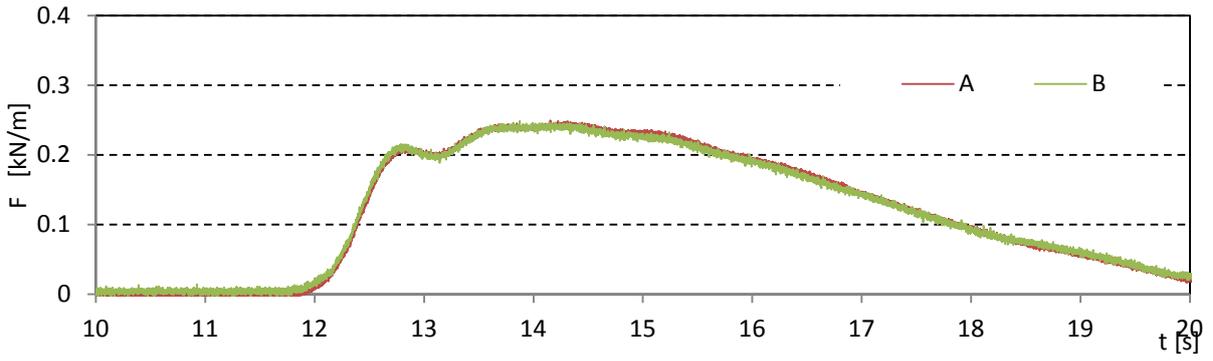


(b)防潮堤位置 1.25m

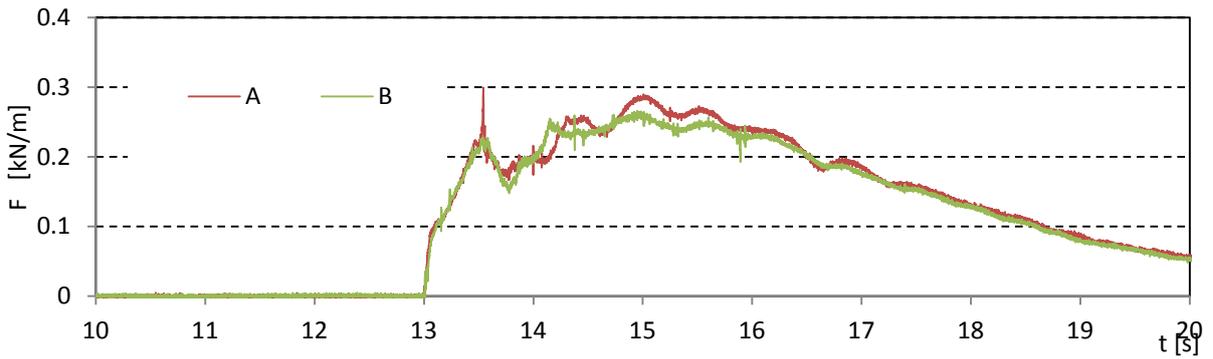


(c)防潮堤位置 2.5m

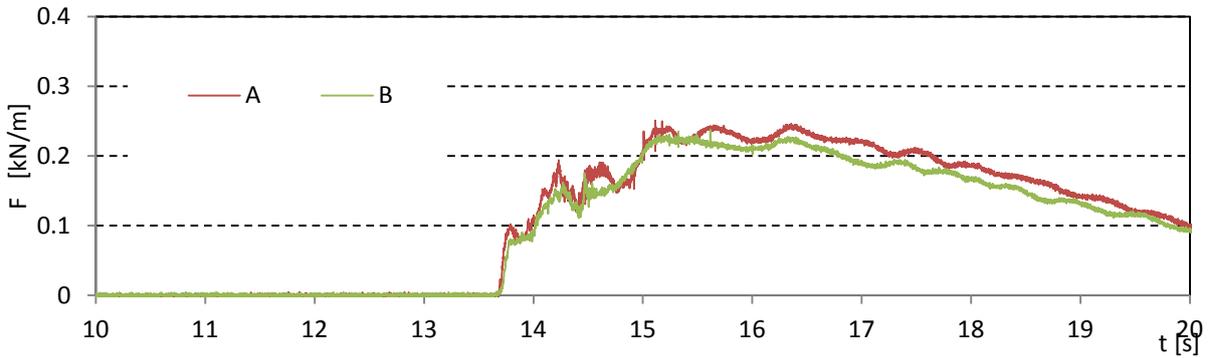
図 II.4-24 スリットの有無による波力の時系列比較 (W04, A:スリットなし, B:スリット 6mm)



(a)防潮堤位置 0m



(b)防潮堤位置 1.25m



(c)防潮堤位置 2.5m

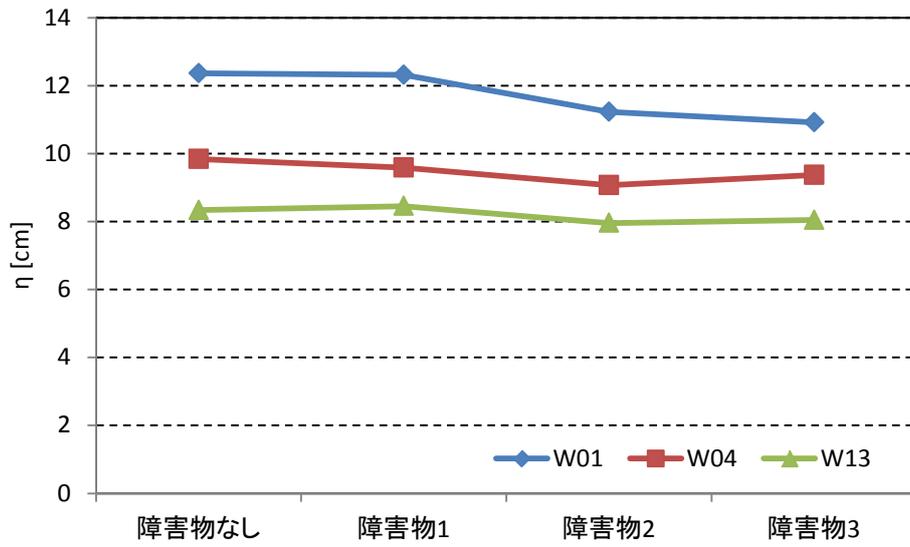
図 II.4-25 スリットの有無による波力の時系列比較 (W07, A:スリットなし, B:スリット 6mm)

#### 4.10. 障害物の影響

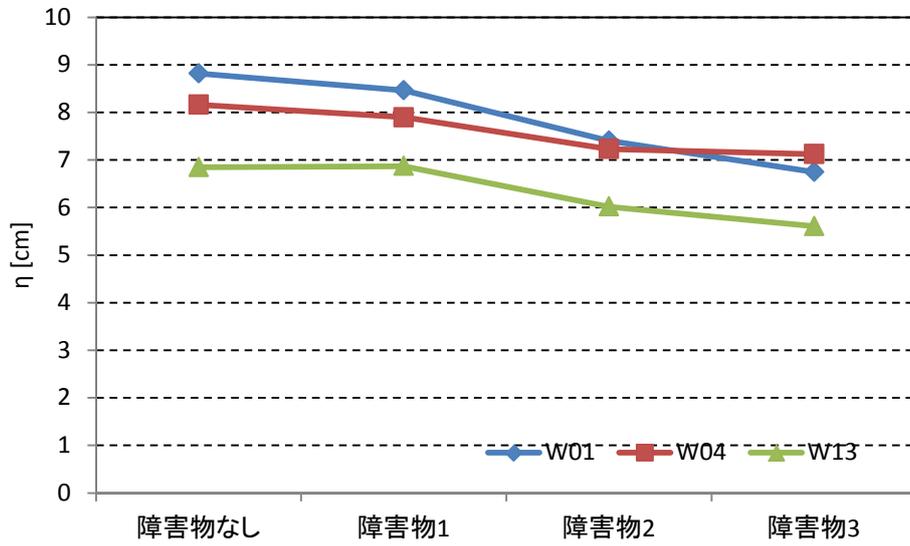
図 II.4-26, 図 II.4-27 に, 障害物による通過波浸水深と波力の変化を示す. 障害物なしと障害物 1 は通過波浸水深, 波力ともに同程度の値であり, 障害物 1 の影響は小さいことが分かる. ただし, 防潮堤位置 2.5m における波力は, 障害物 1 の方が大きくなる場合がある. このケースでは結果にばらつきが大きいため, 障害物 1 (5回繰り返し) の繰り返しを増やせば同程度の値となる可能性がある.

障害物 1,2,3 を比較すると, 明らかな右下がりの傾向が確認できる. この傾向は最大浸水深よりも波力の方が明瞭である. 最大波力は, 波形初期の流速の大きな部分で発生する. 障害物の抵抗は流速の 2 乗に比例すると考えられるため, 最大浸水深よりも最大波力の方が障害物の影響が大きいと考えられる.

障害物 2,3 では, 津波の遡上が阻害され, 波力が低下するが, その効果は幅の広い障害物 3 の方が大きい

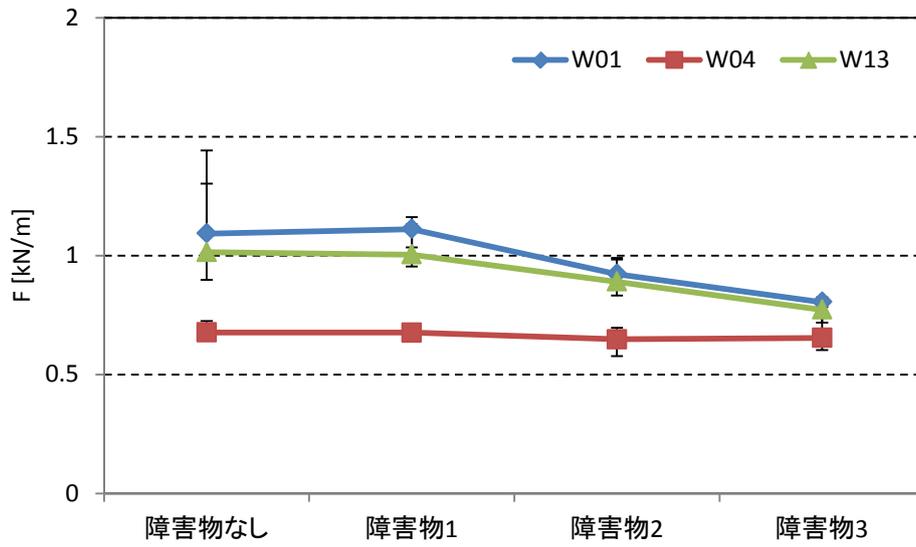


(a)防潮堤位置 1.25m

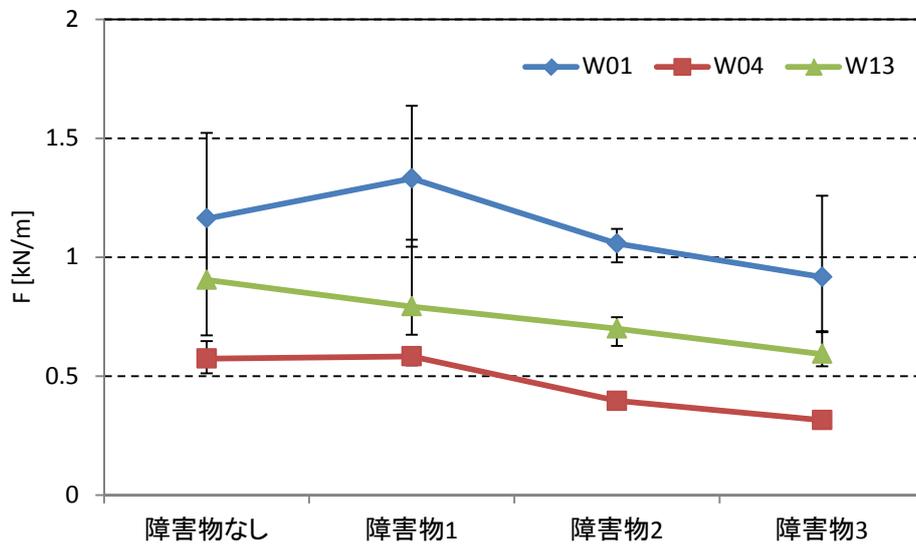


(b)防潮堤位置 2.5m

図 II.4-26 障害物模型の通過波浸水深比較



(a)防潮堤位置 1.25m



(b)防潮堤位置 2.5m

図 II.4-27 障害物模型の津波波力比較

#### 4.11. 盛土の影響

##### (1)波力の計測結果

各ケースの最大津波波力の比較を図 II.4-28 に示す。全ての波ケースにおいて、CaseA の防潮堤位置 1.25m (P.09) の波力がもっとも大きく、CaseA の P.10, CaseB の P.09, CaseC の P.10 は同程度の波力となっている。盛土を通過する際、波形の初期段階の早い流れが低減し、一旦盛土上面に限界水深が発生するため、CaseB と CaseC は盛土を基準にすると同じ条件となる。このため、両者の波力は同等となっていると考えられる。CaseA では、汀線から離れるにしたがって波力が低減していることから、防潮堤位置 2.5m が今回の条件では盛土がある場合と同等の波力が発生していると考えられる。盛土の高さを変更した場合、CaseB, CaseC と同等の波力が発生する防潮堤設置位置は変化すると考えられる。

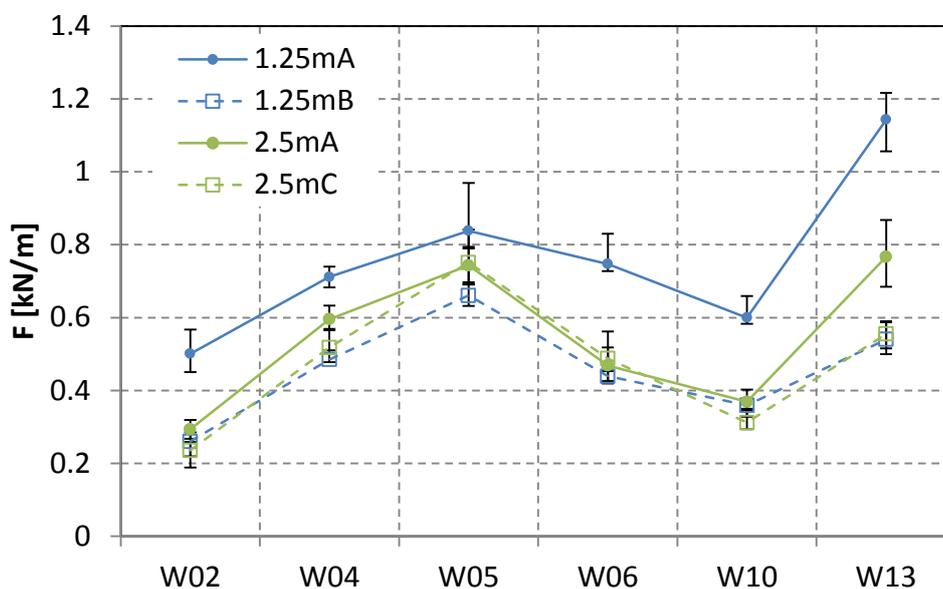


図 II.4-28 盛土模型における最大波力の比較

##### (2)フルード数と水深係数の関係

図 II.4-30 に、以下の 3 種類の方法で算出したフルード数と水深係数の関係を示す。

算出方法 1 ;

一般的な手法では、堤体設置位置の通過波最大浸水深とその時の流速を用いて、フルード数と水深係数を算出するが、CaseB, C では、堤体位置前面の斜面を流下する際に薄い水脈で大きな流速が発生する。これにより、水平床部に衝突し乱れが大きくなるため、水位と流速の計測結果が不安定となり、フルード数や水深係数の算出が困難であった。そのため、CaseB, C については、海側端部の盛土上での浸水深を基準として、フルード数、水深係数を算出した。またこの時、越流水深は壁に働く圧力の高さに対し小さいため、水深係数が非常に大きくなる。そこで、盛土天端面に仮定の床を考え、これを基準とした水深係数を算出した。CaseA については、通常の堤体設置位置での通過波最大水位を用いて算出した。

CaseB, C

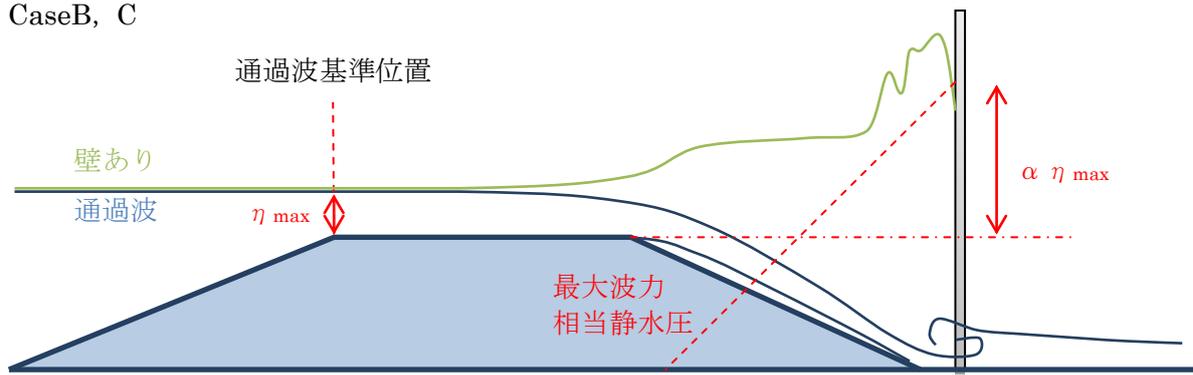


図 II.4-29 盛土模型における水深係数の算出方法

算出方法 2 :

堤体を設置した状態の堤体前面の浸水深により水深係数を算出した。なお横軸は、(a)と同一とした。

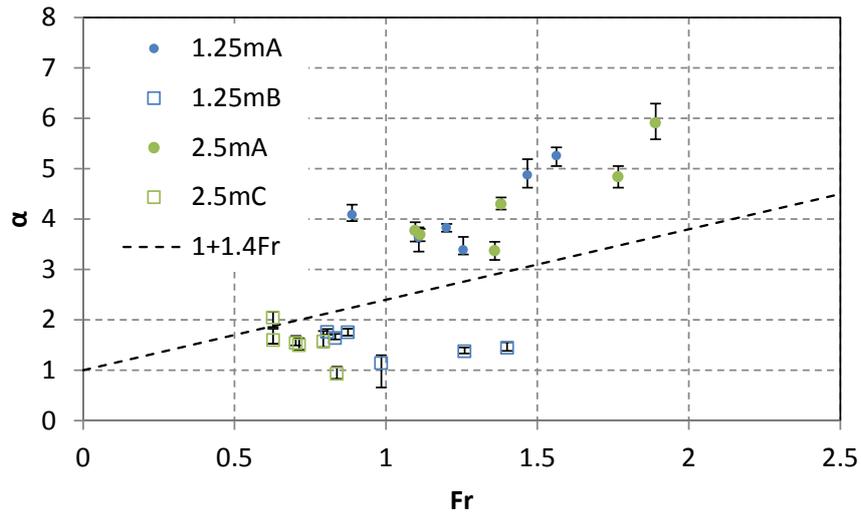
算出方法 3 :

汀線位置での通過波の最大浸水深とその時の流速を用いて、フルード数と水深係数を算出した。ただし、CaseB, C では、堤体の影響で反射後の水位が高く、汀線での通過波浸水深の最大値が最大波力の発生時間（波形の初期部分）から遅れて発生する。また、CaseB では、汀線位置は斜面になっており、フルード数（フルード数は水平底面で定義される）が定義できないため、ここでは CaseA における通過波汀線浸水深を適用した。

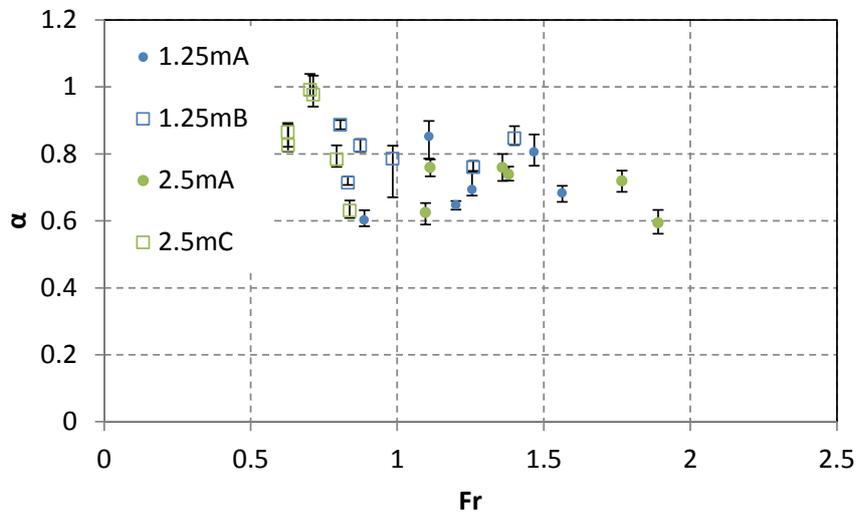
図(a)の算出方法 1 では、CaseA の結果は、単純勾配や直立護岸の基本ケースで得られた結果と同様の傾向を示す。全体に水深係数が大きいのが、これは基本ケースと同様に最大浸水深の発生時刻と最大波力の発生時刻の違いによるものであり、フルード数を小さく評価しているためと考えられる。盛土のある CaseB, C では、フルード数によらず 2 以下となっている。盛土がある場合、算出方法 1 は、基本ケースにおける汀線における通過波を基準としたフルード数と水深係数の関係と類似の算出方法となるため、これと同様の結果となりフルード数による変化が小さいと考えられる。

図(b)の算出方法 2 では、全てのケースで水深係数が 1 以下となる。また CaseA よりも CaseB, C の方がより 1 に近い値を示しており、盛土と壁に挟まれることにより水の動きが小さくなり、より静水圧に近づくと考えられる。

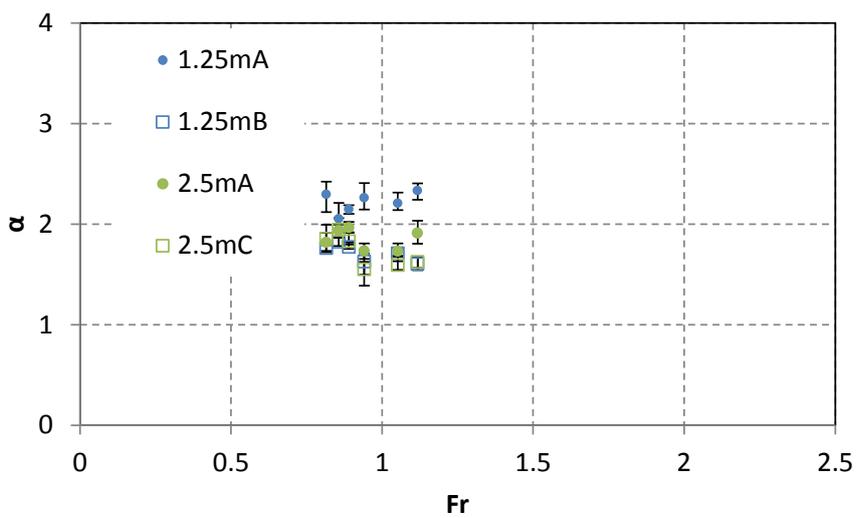
図(c)の算出方法 3 では、各ケースで、波種によらずほぼ一定の値を示しており、2 程度の値を示している。これは、基本ケースで得られた結果と同等である。また、CaseA の P.09 の値が若干大きく、その他の値はほぼ同じ値となっており、図 II.4-17 の単純勾配に示した波力の結果と類似の結果となった。



(a) 盛土上浸水深基準によるフルード数と水深係数の関係



(b) 堤体前面浸水深基準によるフルード数と水深係数の関係



(c) 通過波汀線浸水深基準によるフルード数と水深係数の関係

図 II.4-30 盛土模型におけるフルード数と水深係数の関係

## 4.12. まとめ

試験により得られた結果を以下にまとめる。

### (1)通過波の特性

- ・直立護岸の汀線位置では、他の地点とは特性が異なり、浸水深が護岸の反射により大きくなり、フルード数は1以下で時間的にほぼ一定の値となる。
- ・最大浸水深は、汀線から陸域に向かって小さくなる。一方流速およびフルード数は、陸域ほど大きくなる傾向にあるが、周期が長くなると最大浸水深の発生時間が遅れるため、最大浸水深発生時の流速、フルード数が小さくなる。また、周期が同じであれば、津波高が変わってもフルード数の陸域での変化は同程度の値となる。

### (2)津波波力および推進係数の特性

- ・津波波力の時系列には、津波到達時の衝撃波力、打ち上げられた水塊の落下時に働く波力、堤体による反射波の影響を受けた静水圧分布を持つ波力の3つの特徴的なピークが生じる。これらのピークの大小は、波形により異なる。
- ・最大波力は、陸側ほど小さくなる傾向にあるが、その変化は小さい。一方、最大浸水深は陸側ほど小さくなるため、水深係数は陸側ほど大きくなる。
- ・直立護岸における孤立波形状の波では、遡上する波のフルード数が大きくなりセカンドピークが卓越するため、波力のばらつきが大きく、また水深係数も大きくなる。
- ・フルード数が1を超える多くのケースで水深係数は3を超えるが、フルード数1以下では、ほぼ水深係数は3以下である。ただし、津波波形が長い場合には、最大浸水深が最大波力の発生時間に遅れて発生するため、これを基準に水深係数、フルード数を算出した場合には、フルード数に対する見掛けの水深係数が大きくなる。
- ・堤体前面の最大浸水深を基準に水深係数を求めた場合、全てのケースで水深係数は1以下であり、多くのケースで0.8を下回る。
- ・汀線位置での通過波の最大浸水深、フルード数を基準に水深係数を評価した場合、全てのケースで水深係数は3以下となり、また地形ごとにフルード数に関係なくほぼ一定の値となる。
- ・最大浸水深の発生する時間の代わりに、比エネルギーおよび比力が最大となる時間の通過波の浸水深とフルードを用いてフルード数と水深係数を整理した結果、比力を用いた場合に直線上に分布する結果となった。

### (3)スリット模型

- ・スリットがあることにより、6mmの狭いスリットであっても、津波波力は低下する。特に、セカンドピークの低減効果が大きい。
- ・堤体位置 P.08 の場合は、津波を受ける面に対するスリットの面積が相対的に小さくなるため、P.09、P.10 に比較すると波力の低減効果は小さくなる。

### (4)障害物の影響

- ・障害物1の影響はほとんど確認されなかった。一方、障害物2、3では通過波最大浸水深、最大波力ともに小さくなっており、より障害物の幅の広い障害物3の方が低減効果は大きい。また、通過波最大浸水深よりも、最大波力の方がこの低減効果が顕著である。

#### (5)盛土の影響

- ・盛土がある場合、盛土の背面に位置する堤体に働く波力は、盛土の位置によらず同程度の値となる。
- ・盛土の上での浸水深を基準にした場合、フルード数と水深係数の関係は、基本ケース（単純勾配や直立護岸）の汀線の通過波最大浸水深を基準にした場合と同様の特性を示す。
- ・堤体前面の最大浸水深を基準とした場合、水深係数は1以下となる。また盛土がある場合には、盛土により堤体前面の流れが停滞するため、より静水圧分布に近くなり、水深係数は1に近づく。
- ・汀線の通過波最大浸水深を基準にした場合、基本ケースと同様、水深係数はフルード数に関わらずほぼ一定の値を示し、その値は3以下である。

## 第 III 編

# 津波波力特性の把握水理試験の シミュレーション解析



## 1. 概要

第 II 編に示した水理試験を対象に、数値シミュレーション解析を実施し、解析手法の適用性を確認する。

深海域で発生した津波が沿岸域に到達するまでの解析は、非常に広い海域を対象とするため、水理実験による再現が困難であり、数値解析により解析するのが一般的である。そのため、津波伝播を解析する数値シミュレーションモデルについて様々な検討がされ、高精度で現象を再現する技術が確立していると言える。一方、沿岸域の構造物周辺での津波の挙動は複雑であり、これまで数値解析による解析は困難であった。近年、コンピュータ技術の発展により、複雑な流れ場を解析する様々な解析モデルが開発され、実用化しつつある。

ここでは、水面変動を伴う流れ場を解析可能な手法の 1 つである、VOF 法 (Volume of Fluid Method) を用いた解析ツールを用いて水理試験の再現解析を実施し、その適用範囲を確認して解析手法を整備する。解析コードとして一般に市販されている STAR-CD (CD-adapco 社) およびオープンソフトウェアである OpenFOAM を適用した。これらは、連続の式及び Navier-Stokes 方程式を基礎式とし、界面捕捉法に VOF 法を用いている数値流体解析コードである。

## 2. 解析方法

第 II 編で実施した水理試験結果のシミュレーション解析を実施した。解析コードには STAR-CD および OpenFOAM (ver 2.4.x) を使用した。両者はともに連続式及び Navier-Stokes 方程式を基礎方程式とした 3 次元数値流体解析コードであり、離散化手法として有限体積法を採用している。どちらも流体解析のための解析ソルバを複数有しているが、本解析では気液二相流を対象とした解析ソルバを用いた。気液界面の補足手法はどちらも VOF 法を採用している。

解析条件の一覧を表 III.2-1 に示す。解析格子間隔、境界条件、乱流モデルは STAR-CD と OpenFOAM で共通とした。ただし、解析時間間隔については STAR-CD では 0.001 s の固定としたが、OpenFOAM ではこの場合、計算が不安定になる解析ケースがあった。そのため、クーラン数が 0.5 を超えないよう解析時間間隔を自動調整するよう設定した（解析時間間隔の最大値は 0.001 s に設定した）。

解析に用いた空気・水の物性値は表 III.2-2 に示す通りである。

表 III.2-1 解析条件

	STAR-CD	OpenFOAM
基礎方程式	気液二相流についての Navier-Stokes 方程式および連続式	
気液界面の補足手法	VOF 法	
解析格子間隔	2.5cm	
解析時間間隔	0.001s	自動調整 (最大クーラン数 0.5)
境界条件	壁面部：No-slip 条件 上端：開境界条件 沖合造波位置 (WG3)：造波境界条件	
造波方法	沖合造波位置 (WG3) に水理試験で計測された 水位および流速の時系列データを入力	
乱流モデル	k-εモデル	

表 III.2-2 空気及び水の物性値

物性	空気	水
密度 $\rho$	1 kg/m <sup>3</sup>	1000 kg/m <sup>3</sup>
動粘性係数 $\nu$	1.5 × 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s	1.0 × 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s

### 3. シミュレーション解析

#### 3.1. 解析条件

解析ケース一覧を表 III.3-1, 表 III.3-2 に示す. 通過波検定試験では 8 ケース, 波力/波圧試験では 24 ケースを対象に解析を実施した. 解析では, 水理試験で設定した WG3 の計測地点を始点に実験水槽をモデル化した. 解析における造波は, 実験で計測された WG3 の水位  $\eta$  03 および流速の時系列を入力することで行った. 図 III.3-1 に, 一例として波圧/波力試験 (直立護岸, 堤体位置 2.5m) の解析モデルを示す. なお, 防潮壁高さは越流しない十分な高さに設定した.

表 III.3-1 シミュレーション解析ケース (通過波検定試験)

No	ケース名	地形	波形	堤体位置	障害物
1	S-W01-0-N	単純勾配 S	W01	N/A 0	なし N
2	S-W05-0-N		W05		
3	S-W07-0-N		W07		
4	S-W09-0-N		W09		
5	F-W01-0-N	直立護岸 F	W01		
6	F-W05-0-N		W05		
7	F-W07-0-N		W07		
8	F-W09-0-N		W09		

表 III.3-2 シミュレーション解析ケース (波力/波圧試験)

(1) 単純勾配タイプ地形

No	ケース名	地形	波形	堤体位置	障害物	堤体模型
1	S-W01-1-N-A	単純勾配 S	W01	0m 1	なし	Type-A
2	S-W05-1-N-A		W05			
3	S-W07-1-N-A		W07			
4	S-W09-1-N-A		W09			
5	S-W01-2-N-A		W01	1.25m 2		
6	S-W05-2-N-A		W05			
7	S-W07-2-N-A		W07			
8	S-W09-2-N-A		W09			
9	S-W01-3-N-A		W01	2.5m 3		
10	S-W05-3-N-A		W05			
11	S-W07-3-N-A		W07			
12	S-W09-3-N-A		W09			

(2) 直立護岸タイプ地形

No	ケース名	地形	波形	堤体位置	障害物	堤体模型
13	F-W01-1-N-A	直立護岸 F	W01	0m 1	なし	Type-A
14	F-W05-1-N-A		W05			
15	F-W07-1-N-A		W07			
16	F-W09-1-N-A		W09			
17	F-W01-2-N-A		W01	1.25m 2		
18	F-W05-2-N-A		W05			
19	F-W07-2-N-A		W07			
20	F-W09-2-N-A		W09			
21	F-W01-3-N-A		W01	2.5m 3		
22	F-W05-3-N-A	W05				
23	F-W07-3-N-A	W07				
24	F-W09-3-N-A	W09				

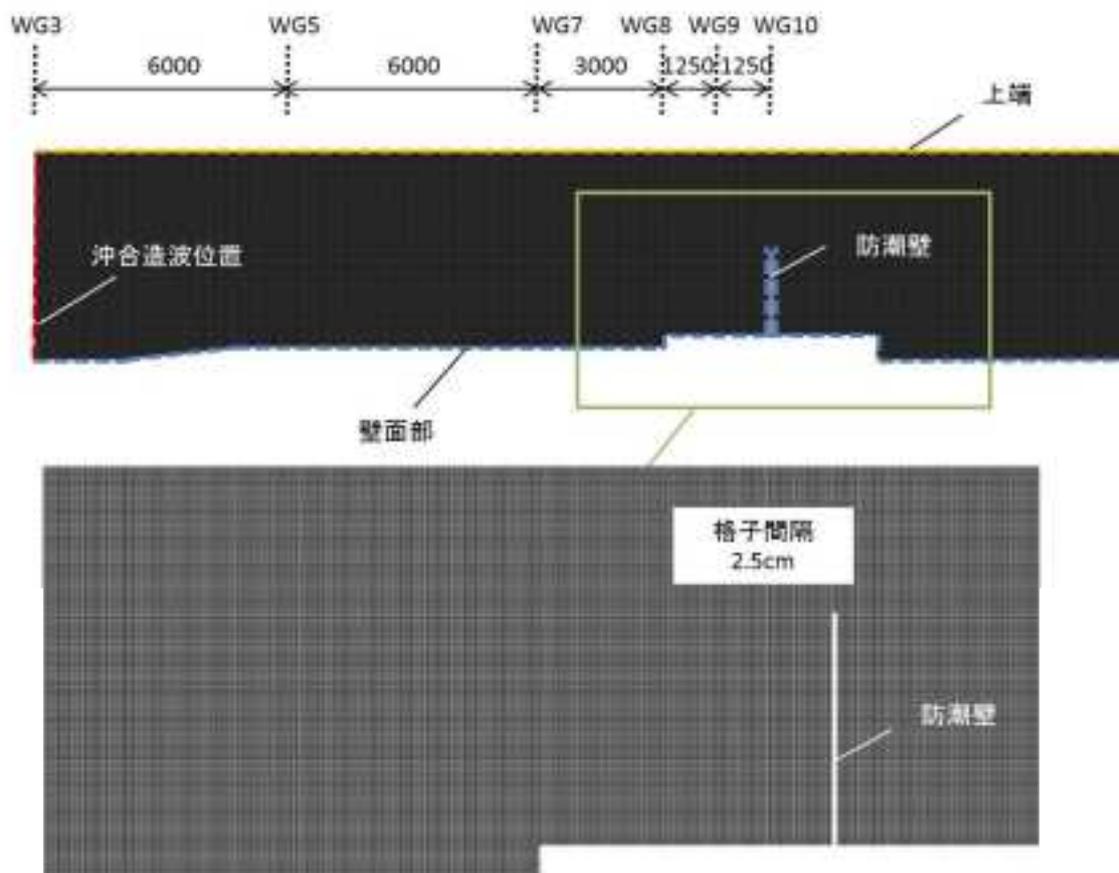


図 III.3-1 解析モデル (直立護岸, 堤体位置 2.5m)

## 3.2. 解析結果

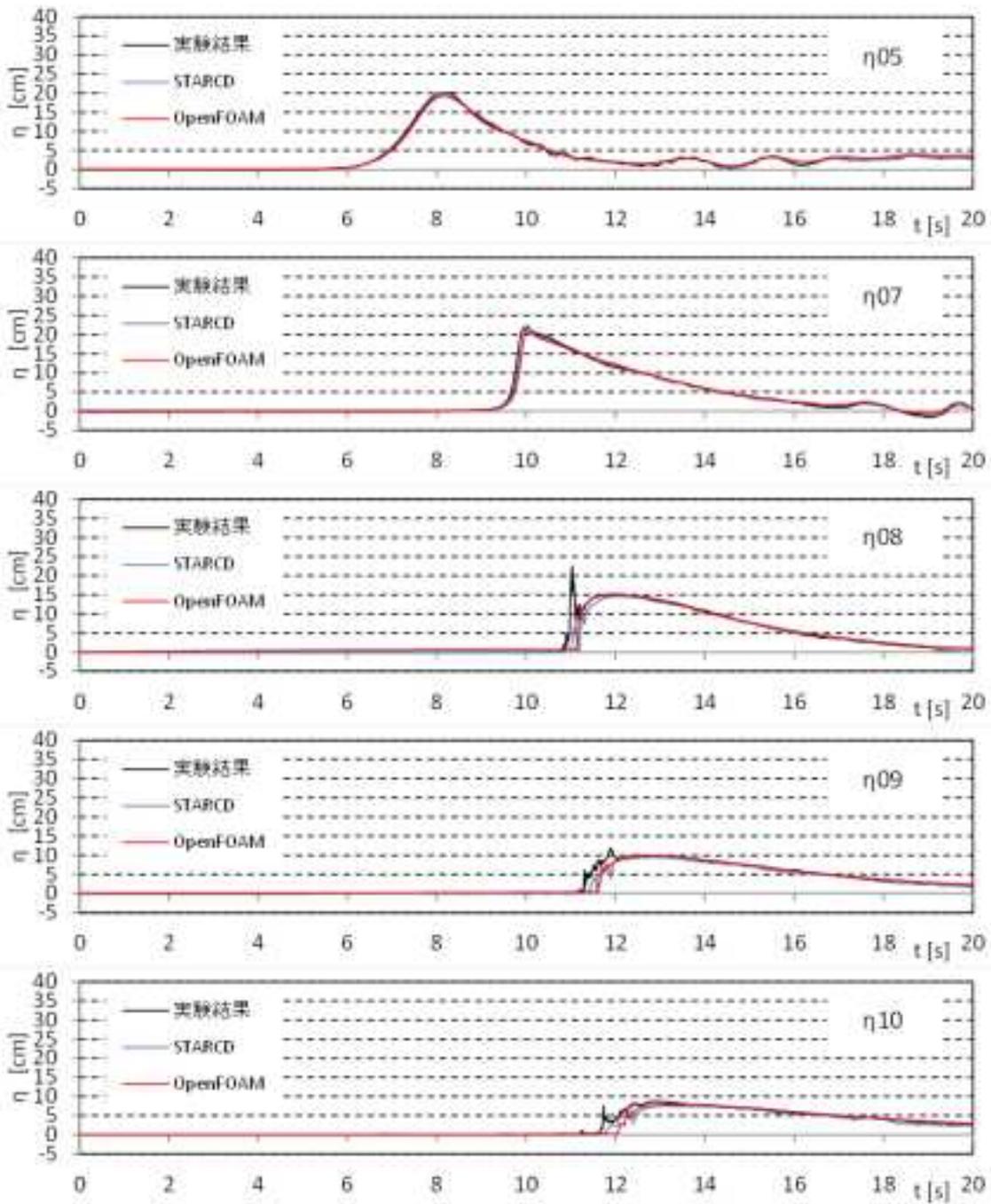
### 3.2.1. 通過波検定試験

通過波検定試験に対する解析結果と実験結果の比較を図 III.3-2, 図 III.3-3 に示す. ここで実験結果の流速は, P.08 (V08) はプロペラ流速計, P.09 (V09), P.10 (V10) は底面流速計による計測結果である. また, STAR-CD, OpenFOAM による各計測点での解析結果を図 III.3-5~図 III.3-8 に示す.

沖合の水位・流速については全ケースで解析と実験は良く一致している. 一方, 陸上部 (P.08~P.10 位置) の水位時系列では, 実験の方が解析よりも水位の立ち上がりは僅かに早い傾向がある. 特にその傾向は単純勾配 (W01, W05, W09) ほど顕著である. 陸上部では, 波形前面が碎波し細かな水しぶきを上げながら遡上していく. 実験で計測される陸上部の初期の水位上昇には, この影響が含まれていると考えられる. 解析でも碎波しながら陸上部を遡上する様子は再現できているが, こうした飛沫の運動を含め遡上先端での複雑な流体場を十分に再現できていないことが, この差の要因と推察される. 遡上先端を除けば, 水位時系列は解析と実験で良く一致している. W01 と W09 は立ち上がり部分がほぼ同一で後半の波形が異なる波形状であるが, 解析でも後半に見られる水位変動の違いを良好に再現できている. なお, STAR-CD の単純勾配 W09 では, 津波到達後に P.09, P.10 の水位がゼロになる時間帯がある. STAR-CD では水路底面から鉛直上向きに VOF 値を走査し, 0.5 を下回る位置を水面と定義するポスト処理により水位を算出している. 同ケースは碎波による空気の混入が大きいので,  $\eta_{09}$ ,  $\eta_{10}$  地点では鉛直線上に位置するメッシュ内の VOF 値が一時的に 0.5 を下回り, その結果水位が見かけ上ゼロとなっている.

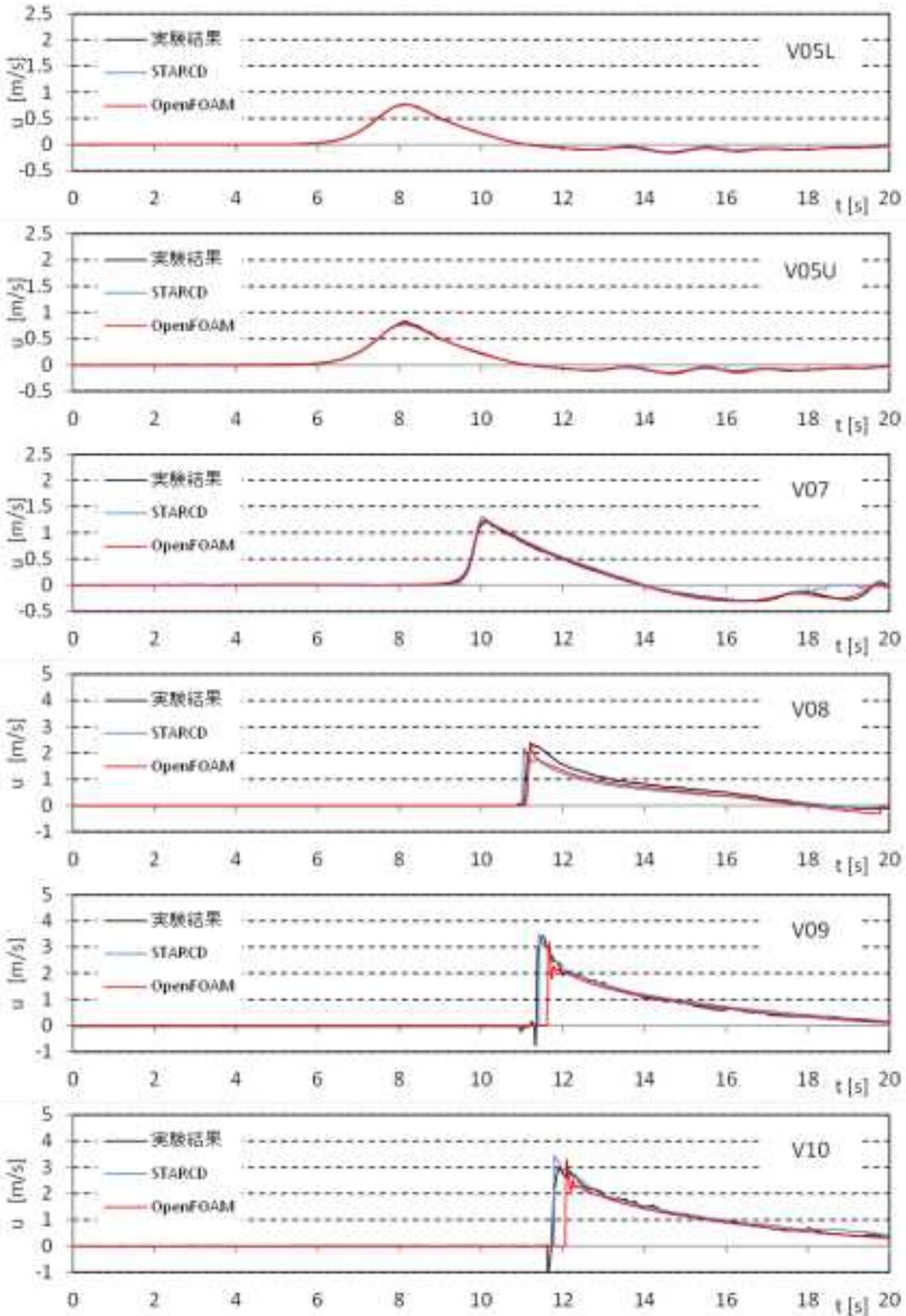
陸上部の流速時系列は, 後述のように単純勾配では OpenFOAM の再現性が低下するところがあるが, いずれのケースでも解析は実験結果を概ね再現できている. ただし, 直立護岸の V09, V10 の結果に着目すると, 波形が到達した直後の流速は解析の方が実験よりも大きい. 実験の計測機器が正確な数値を検知するにはある程度の水深が必要であるが, 遡上先端の浸水深は小さいため反応に若干の時間遅れがある. その結果, 解析の方が実験よりも大きな流速となったと考えられる. 遡上先端を除けば, 流速時系列の結果も解析と実験で良好に一致した. なお, 直立護岸の V08 地点では時系列の傾向は一致するものの, 実験と解析の絶対値の違いが見られる. 直立護岸の場合, V08 地点は地形が大きく変化し, 鉛直方向の流速が卓越する地点であるため, 流速の場所的な違いが大きくなる. 実際に OpenFOAM の解析結果を確認すると, 出力位置が 1 メッシュ違うだけで流速の最大値が 2 倍程度異なっていた. V08 ではプロペラ流速計により流速を計測しており, プロペラ全体に働く流速の平均値を計測していることになるため, 解析の出力地点とは厳密には一致しない. そのため, 解析と実験結果の違いが生じたと考えられる.

STAR-CD と OpenFOAM の結果を比較すると, 単純勾配の W01, W05, W09 の陸上部における津波到達時刻に差があることを除けば, 概ね同様の結果となっている. 単純勾配の W01, W05, W09 では, STAR-CD と比較して陸上部の計測点への到達時刻に 0.2s 程度の時間遅れが OpenFOAM には見られた. 単純勾配の W01, W05, W09 は斜面の影響により水面形が大きく変形し碎波が生じているケースである. このことは, 段波など波形の変化が大きい津波を対象とする場合には, OpenFOAM と STAR-CD で解析結果の差が顕著になる可能性を示唆している. ただし, これらのケースであっても, 津波到達後から 1s 程度が経過すれば OpenFOAM の結果は STAR-CD の結果とほぼ一致した.



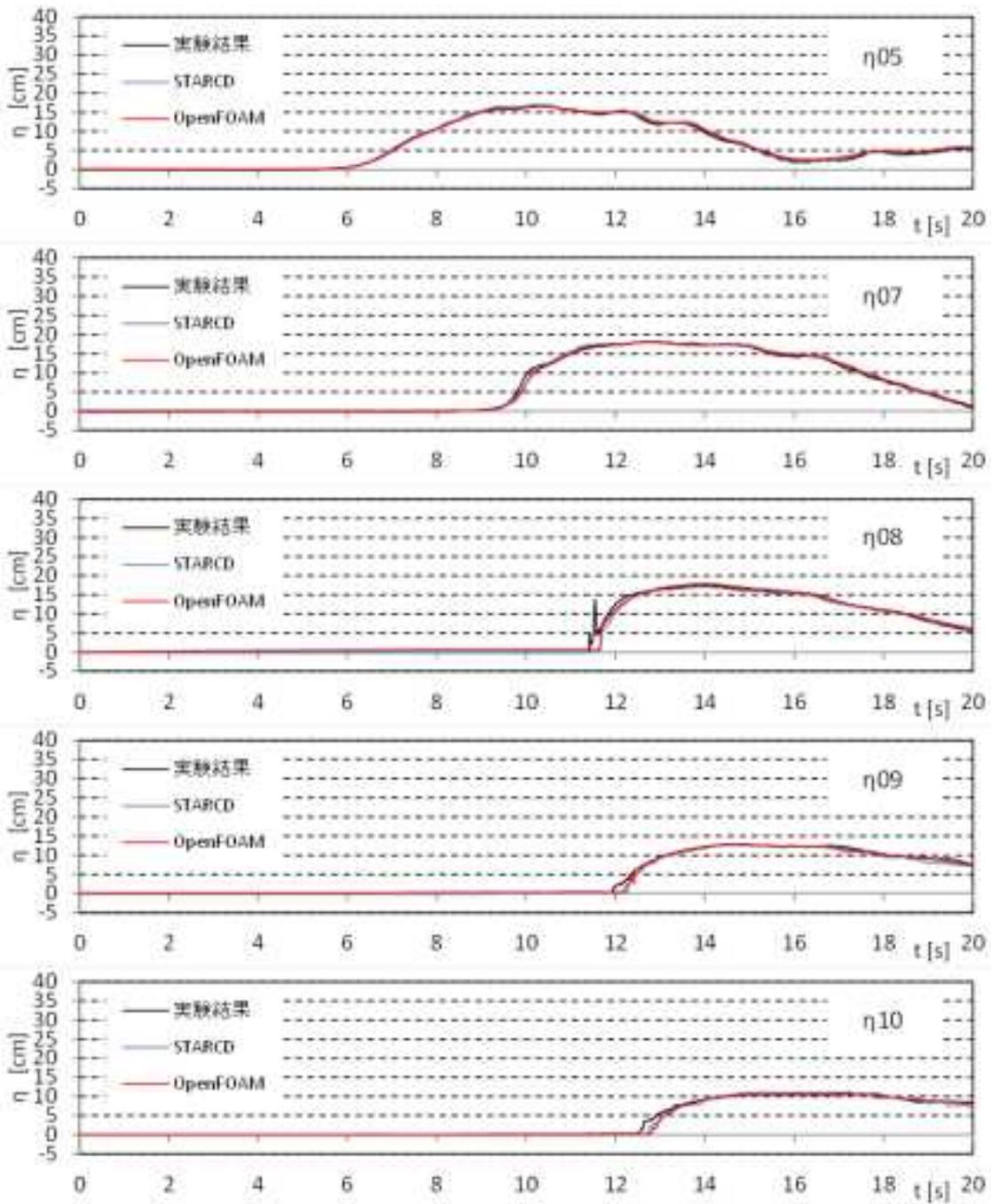
(a) 水位時系列の比較

図 III.3-2 実験と解析結果の比較 (単純勾配, W01)



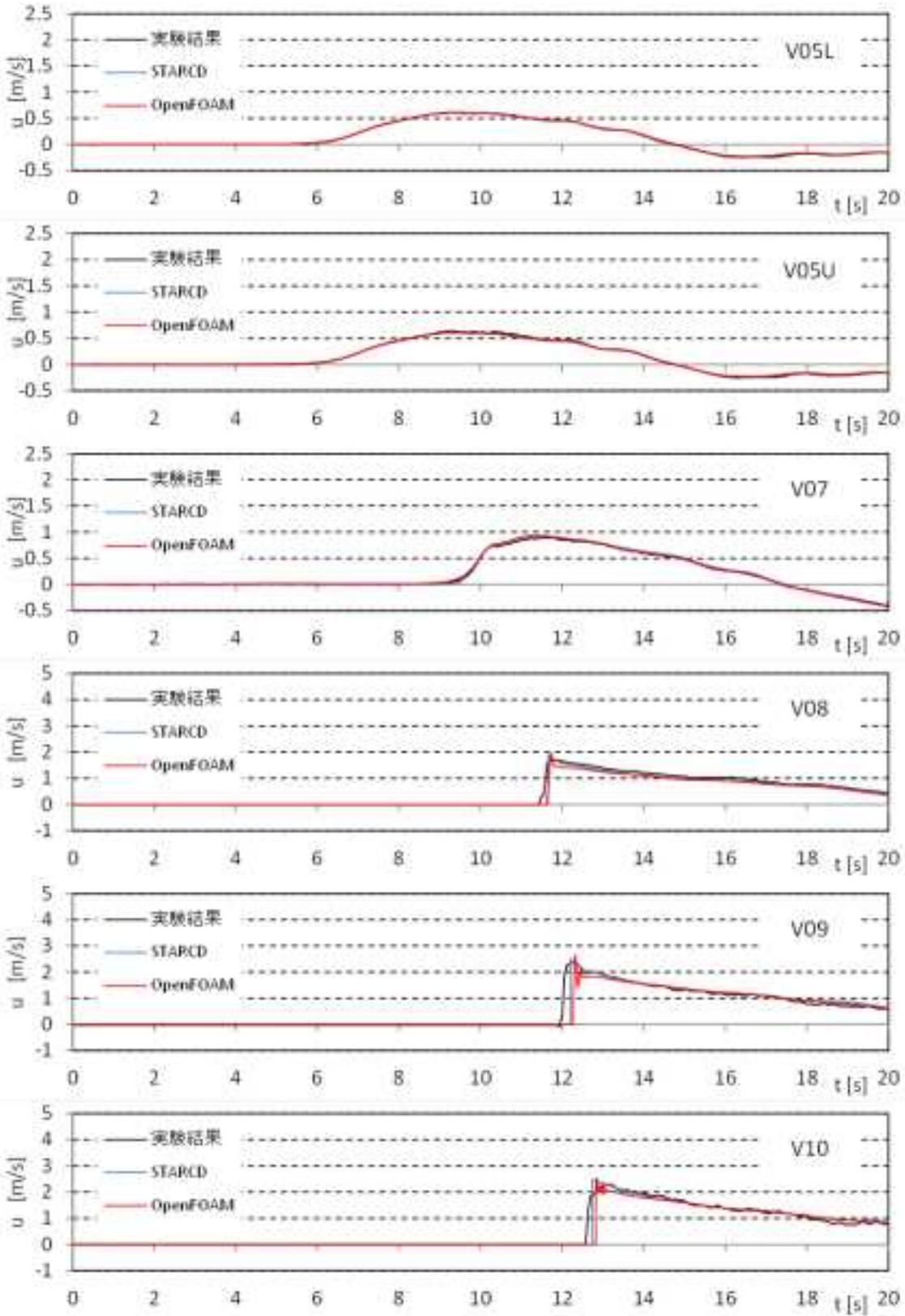
(b) 流速時系列の比較

図 III.3-2 実験と解析結果の比較 (単純勾配, W01)



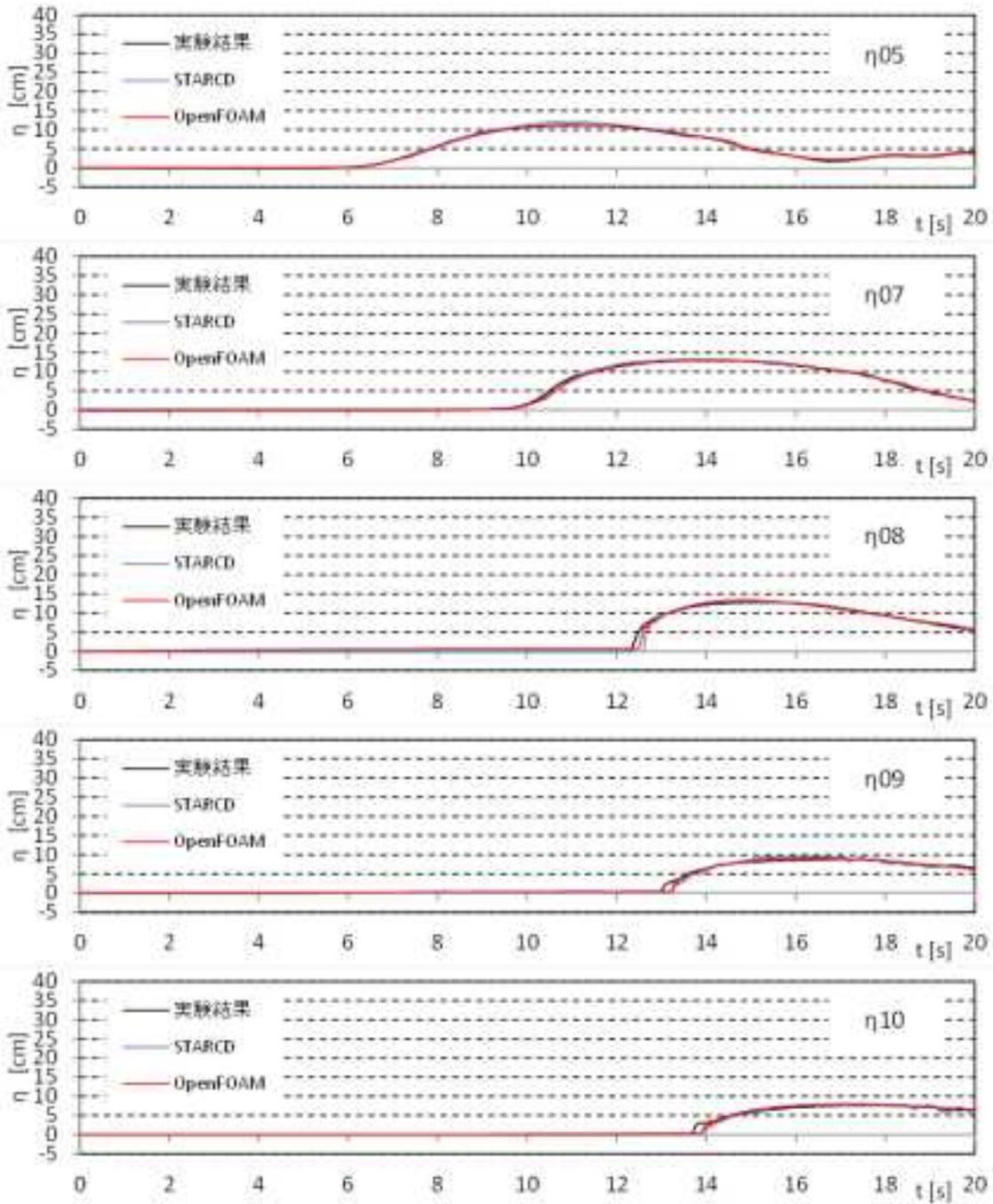
(a) 水位時系列の比較

図 III.3-2 実験と解析結果の比較 (単純勾配, W05)



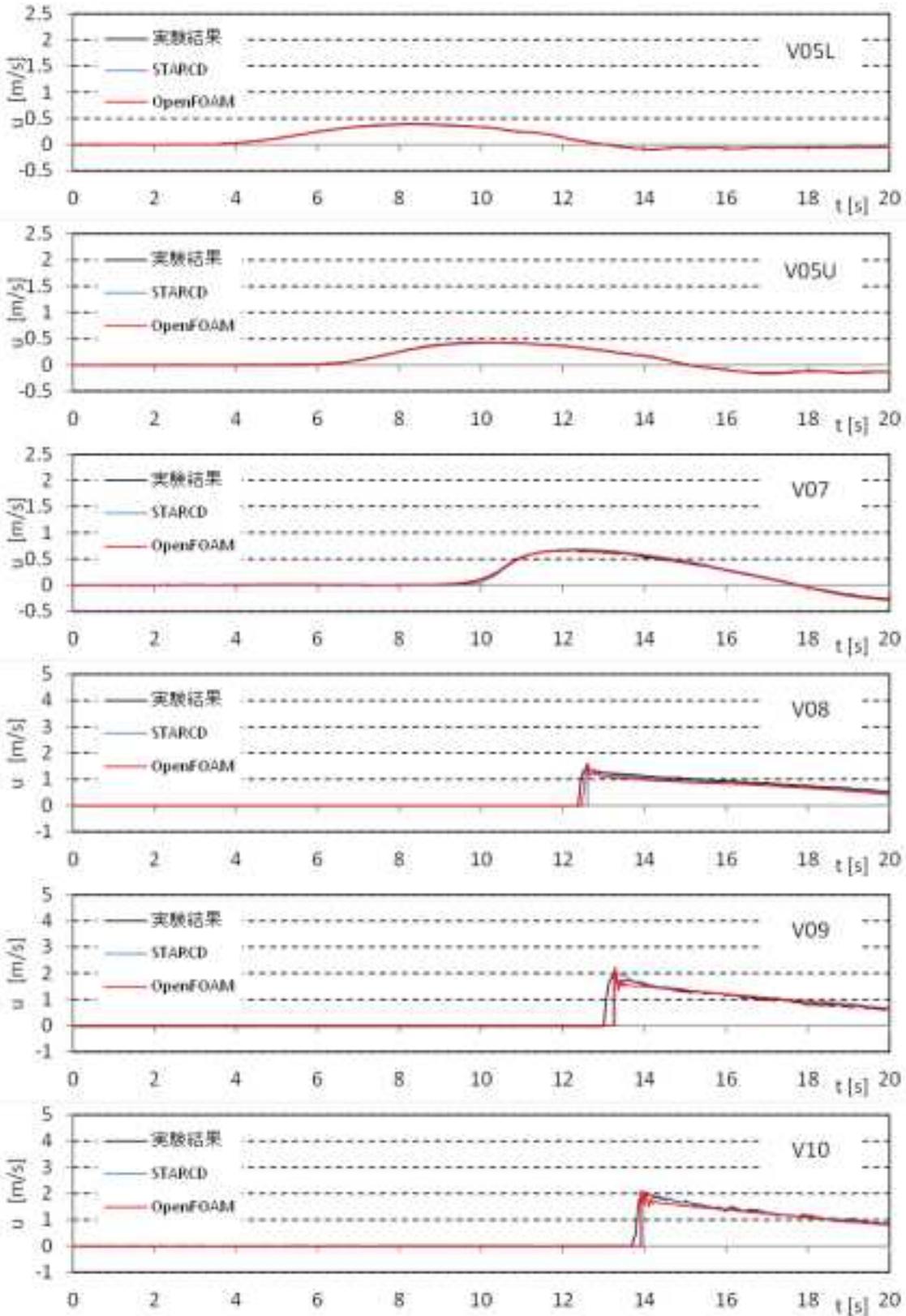
(b) 流速時系列の比較

図 III.3-2 実験と解析結果の比較 (単純勾配, W05)



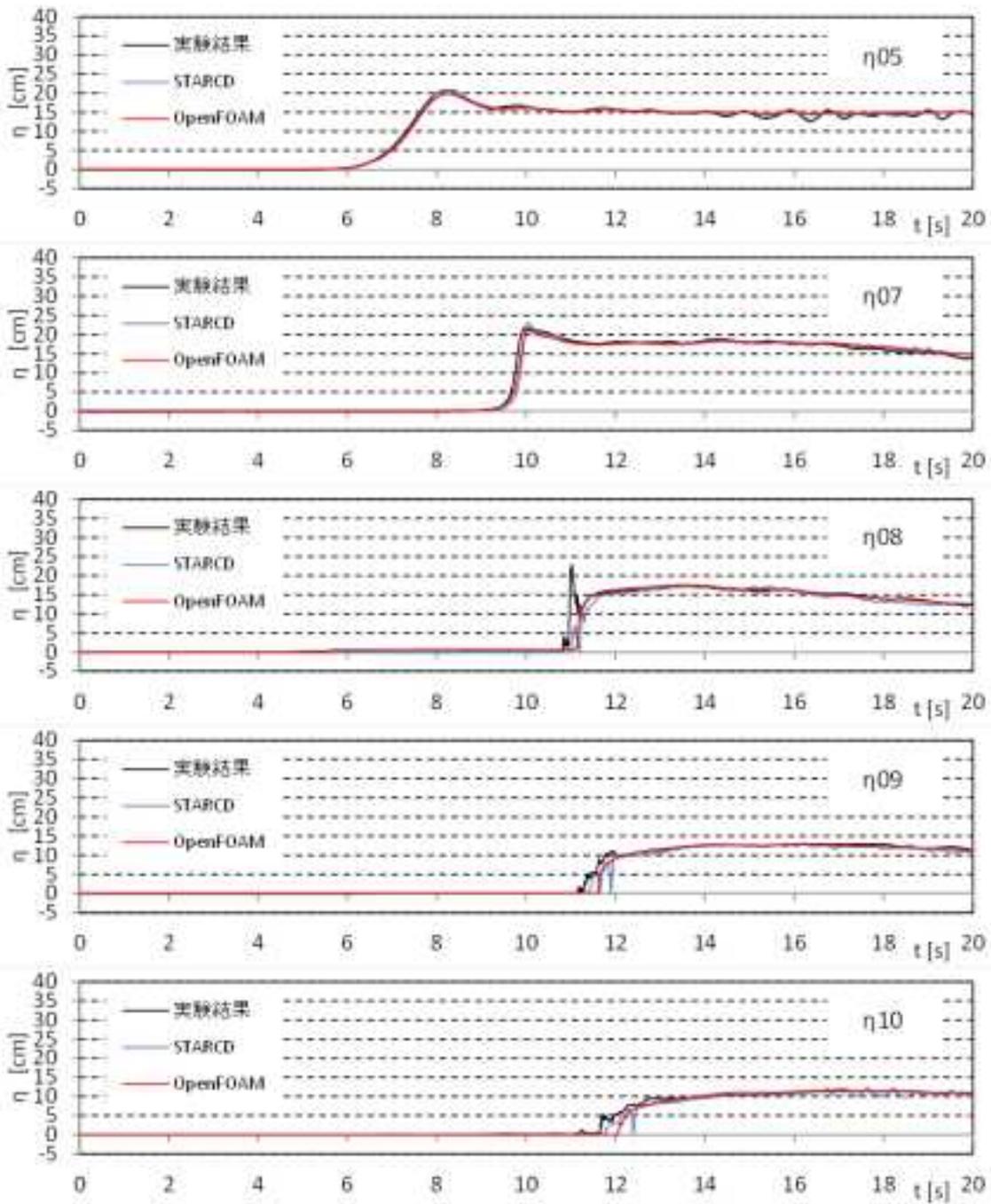
(a) 水位時系列の比較

図 III.3-2 実験と解析結果の比較 (単純勾配, W07)



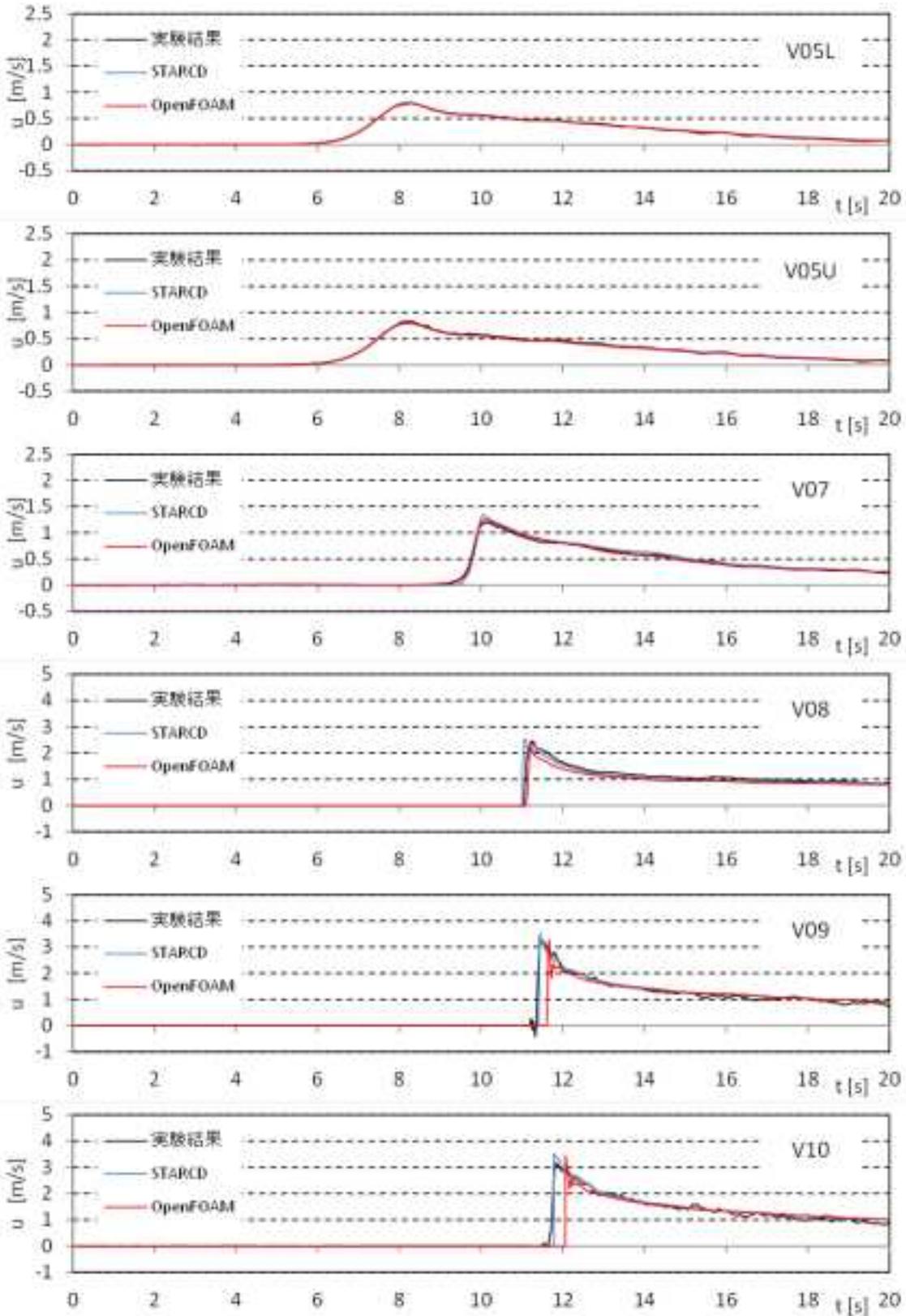
(b) 流速時系列の比較

図 III.3-2 実験と解析結果の比較 (単純勾配, W07)



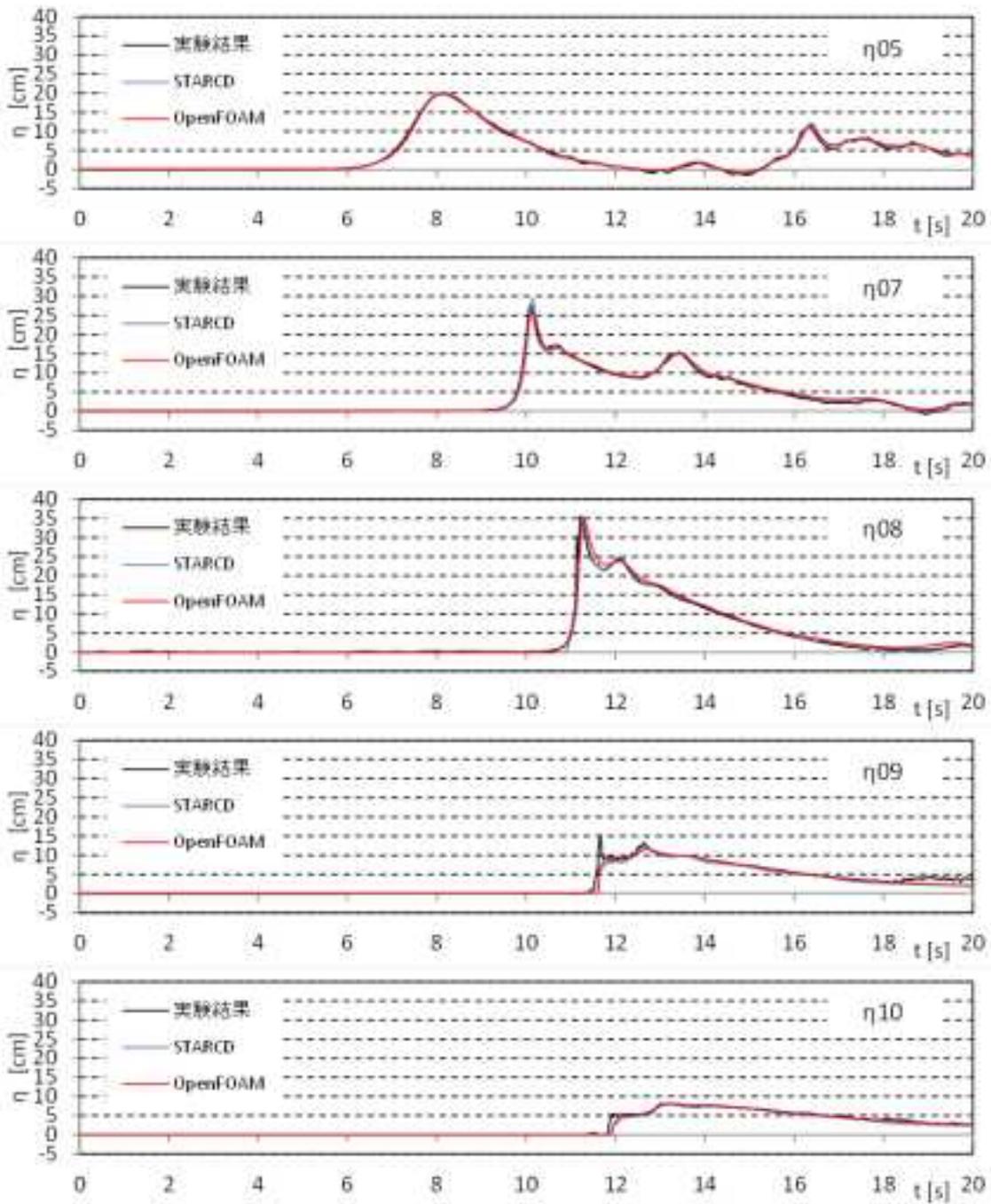
(a) 水位時系列の比較

図 III.3-2 実験と解析結果の比較 (単純勾配, W09)



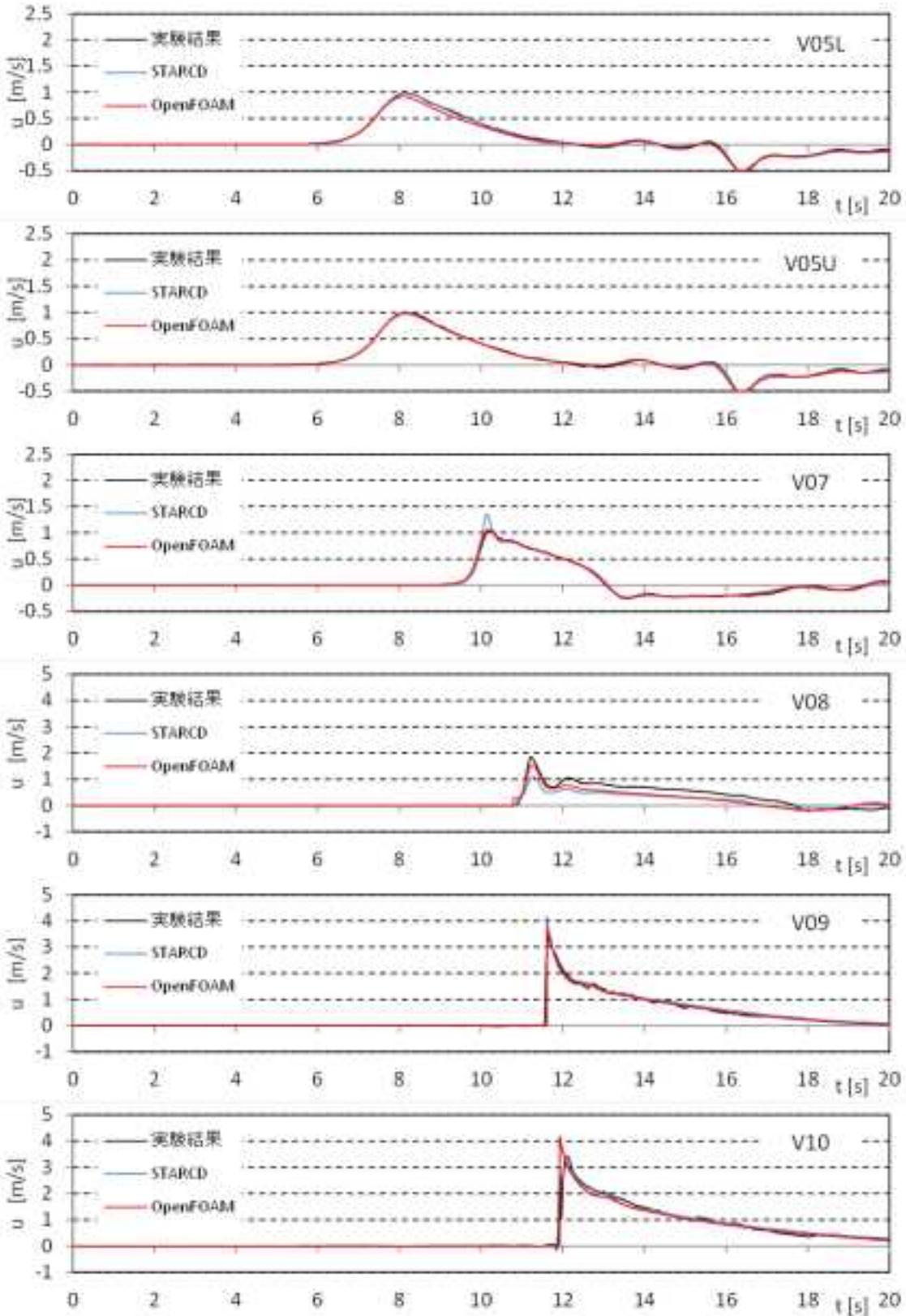
(b) 流速時系列の比較

図 III.3-2 実験と解析結果の比較 (単純勾配, W09)



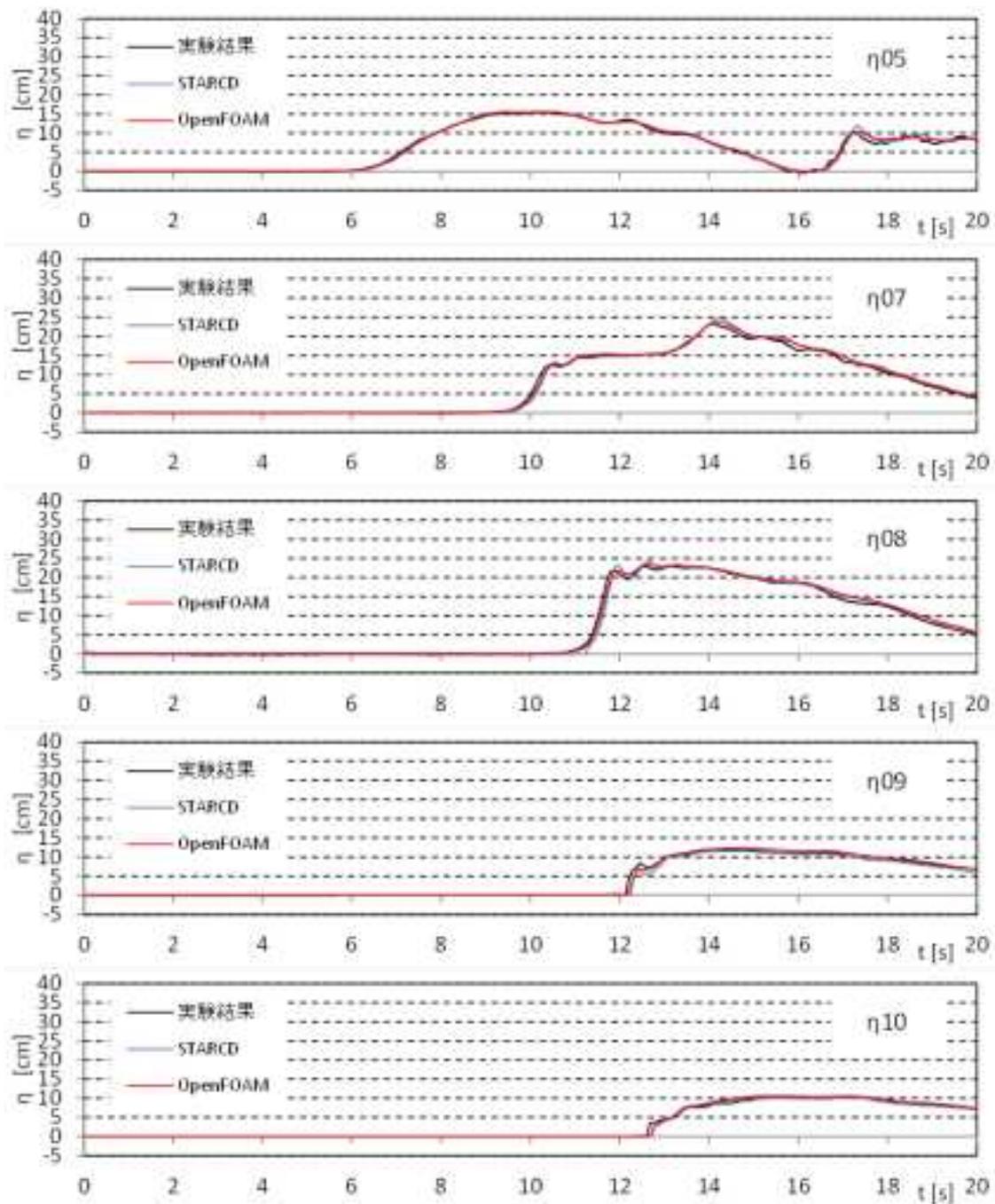
(a) 水位時系列の比較

図 III.3-3 実験と解析結果の比較 (直立護岸, W01)



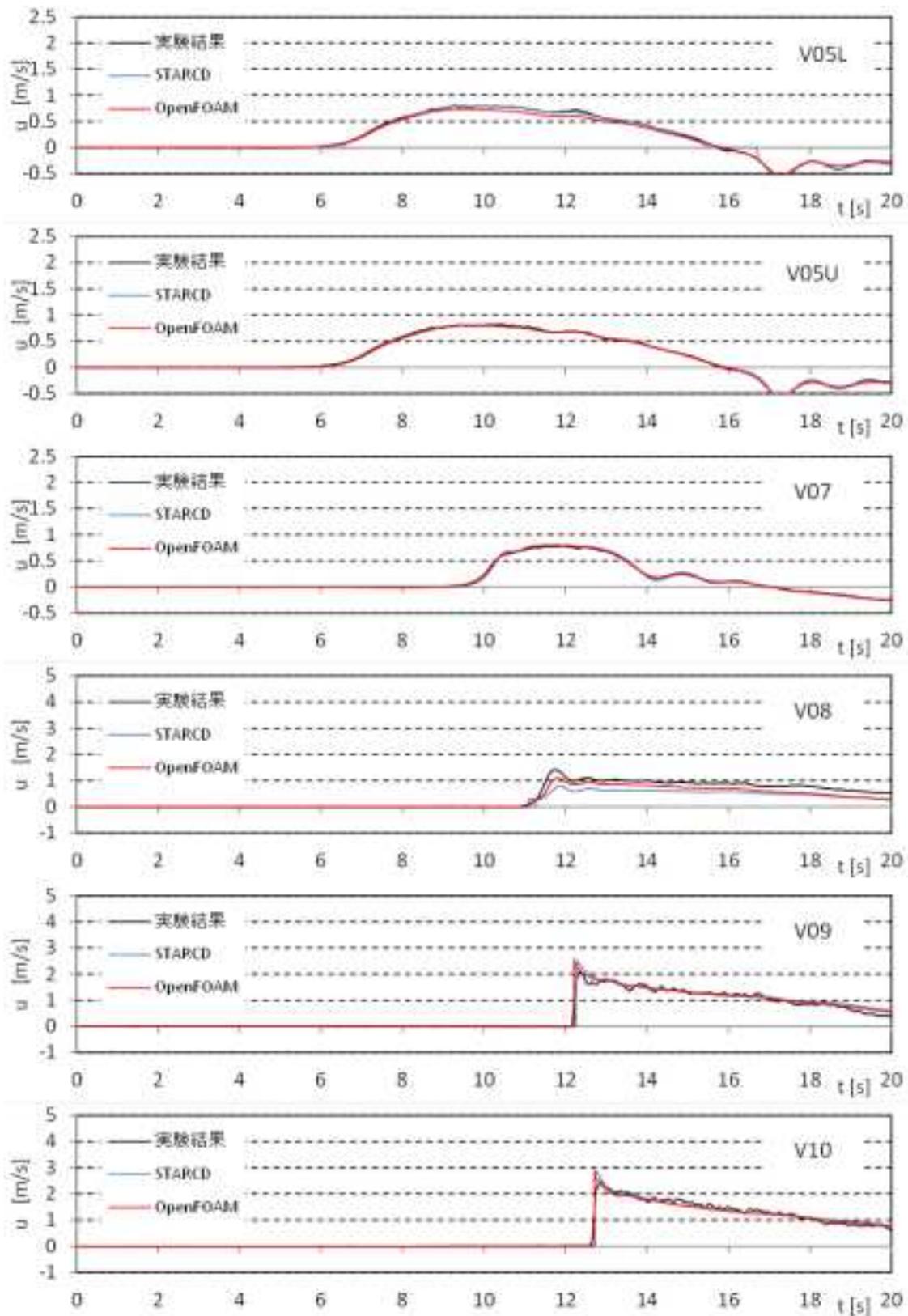
(b) 流速時系列の比較

図 III.3-4 実験と解析結果の比較 (直立護岸, W01)



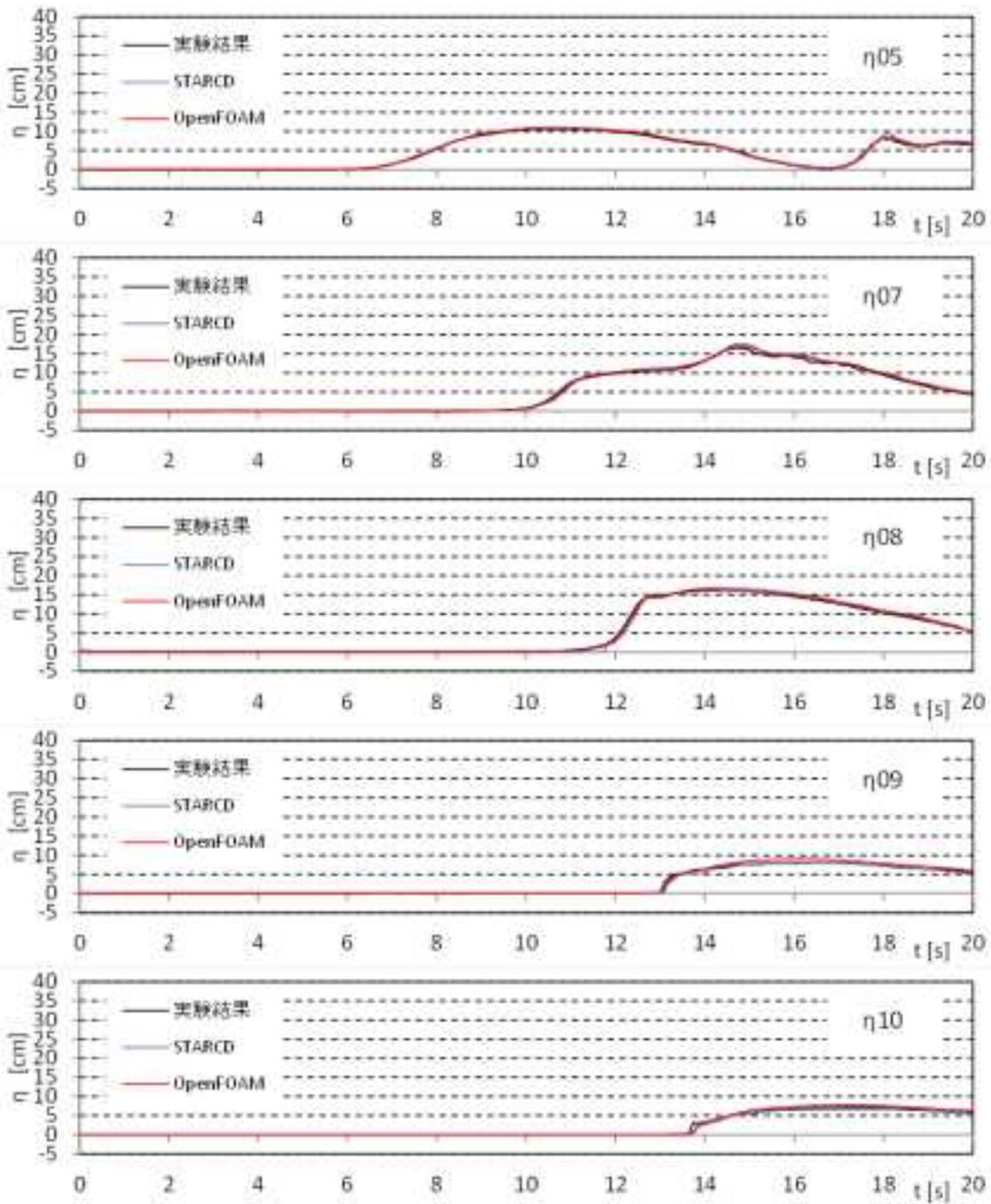
(a) 水位時系列の比較

図 III.3-3 実験と解析結果の比較 (直立護岸, W05)



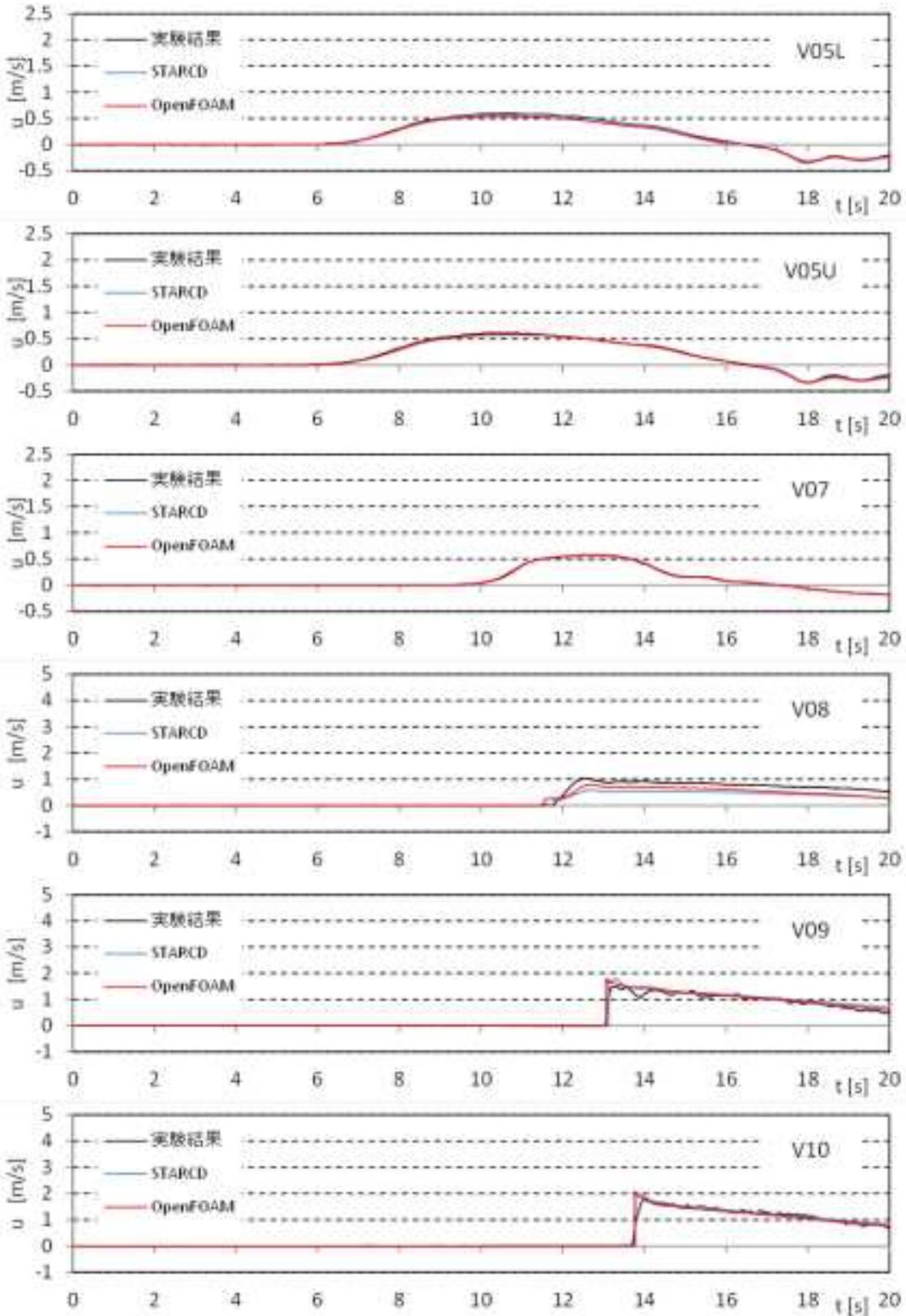
(b) 流速時系列の比較

図 III.3-3 実験と解析結果の比較 (直立護岸, W05)



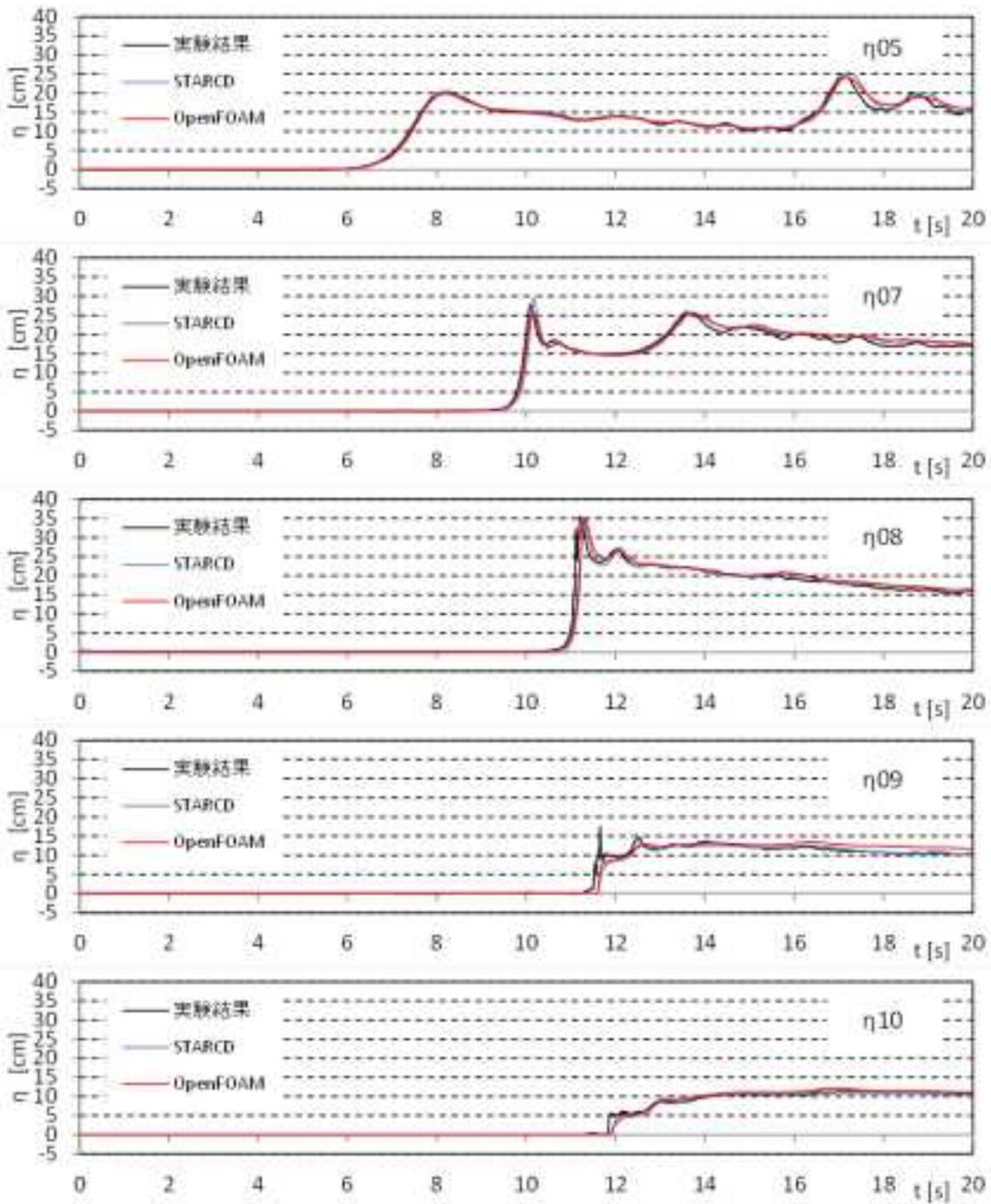
(a) 水位時系列の比較

図 III.3-3 実験と解析結果の比較 (直立護岸, W07)



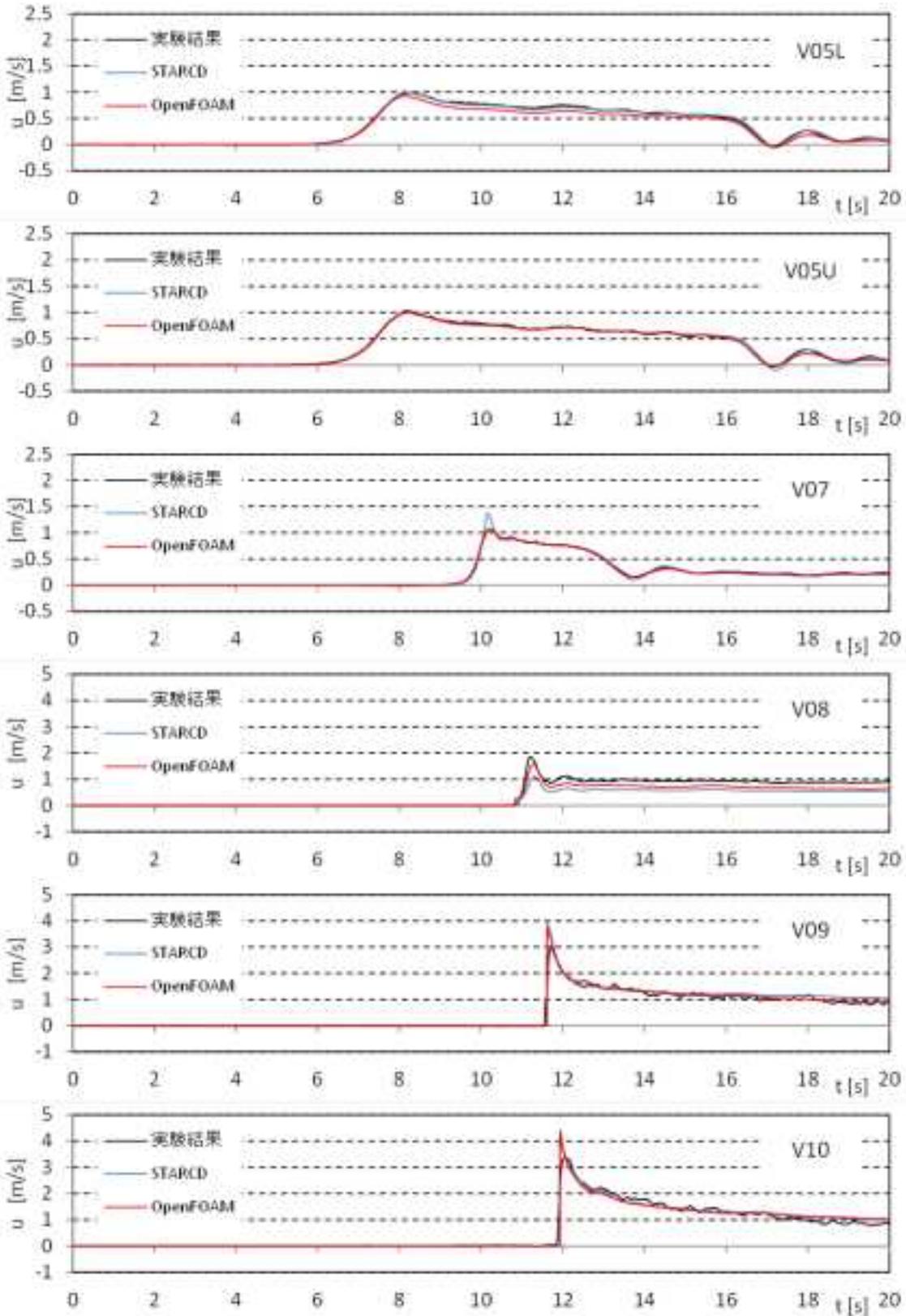
(b) 流速時系列の比較

図 III.3-3 実験と解析結果の比較 (直立護岸, W07)



(a) 水位時系列の比較

図 III.3-3 実験と解析結果の比較 (直立護岸, W09)



(b) 流速時系列の比較

図 III.3-3 実験と解析結果の比較 (直立護岸, W09)

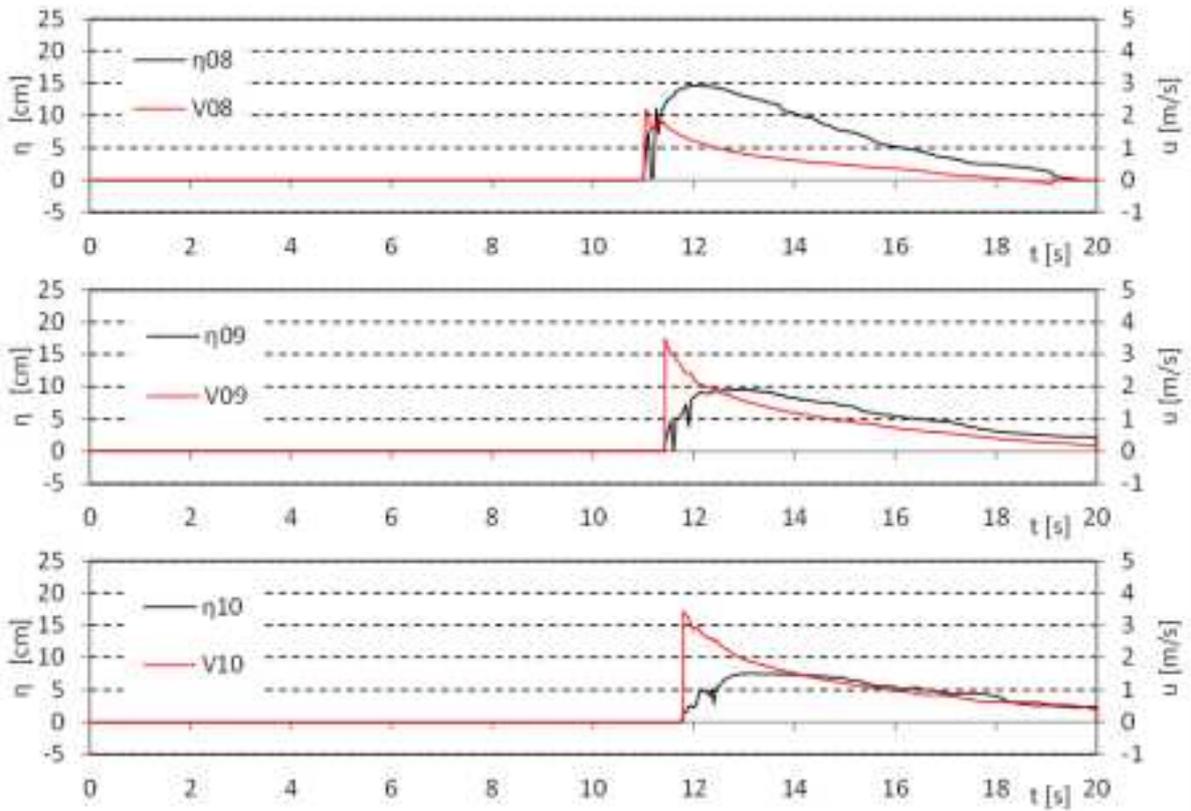


図 III.3-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W01, STAR-CD)

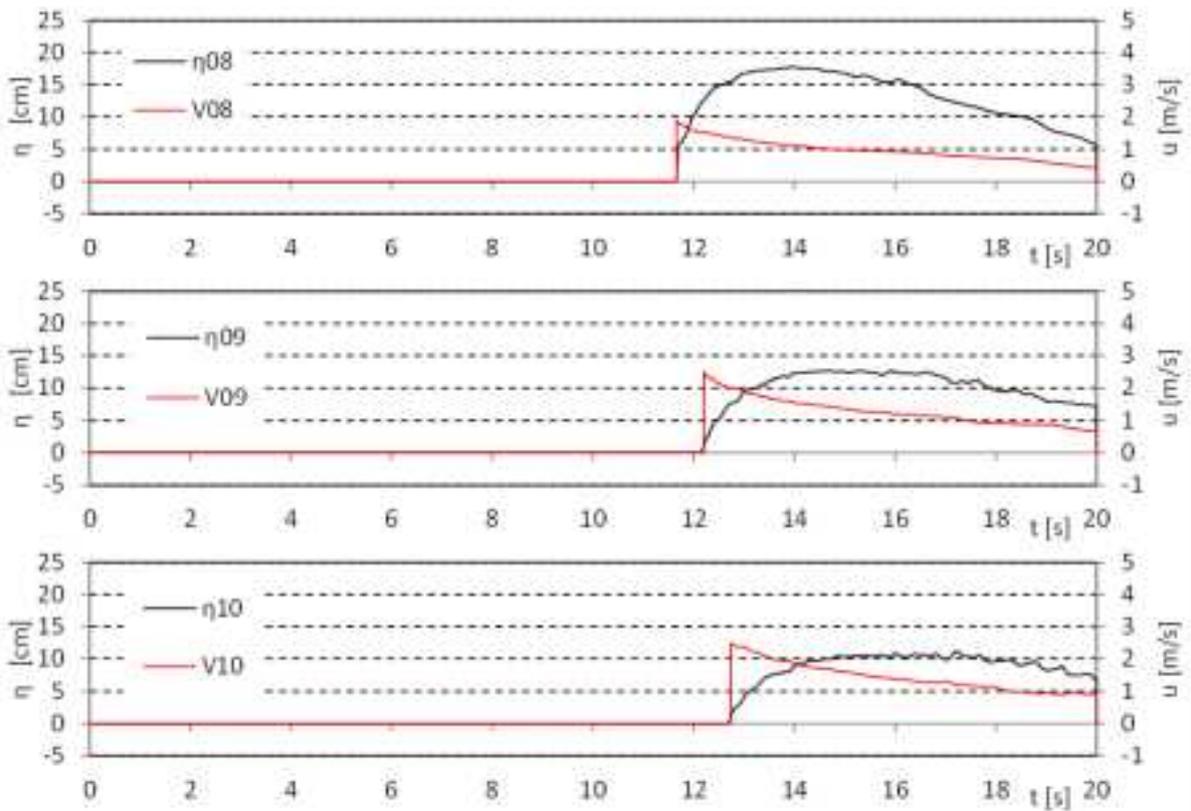


図 III.3-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W05, STAR-CD)

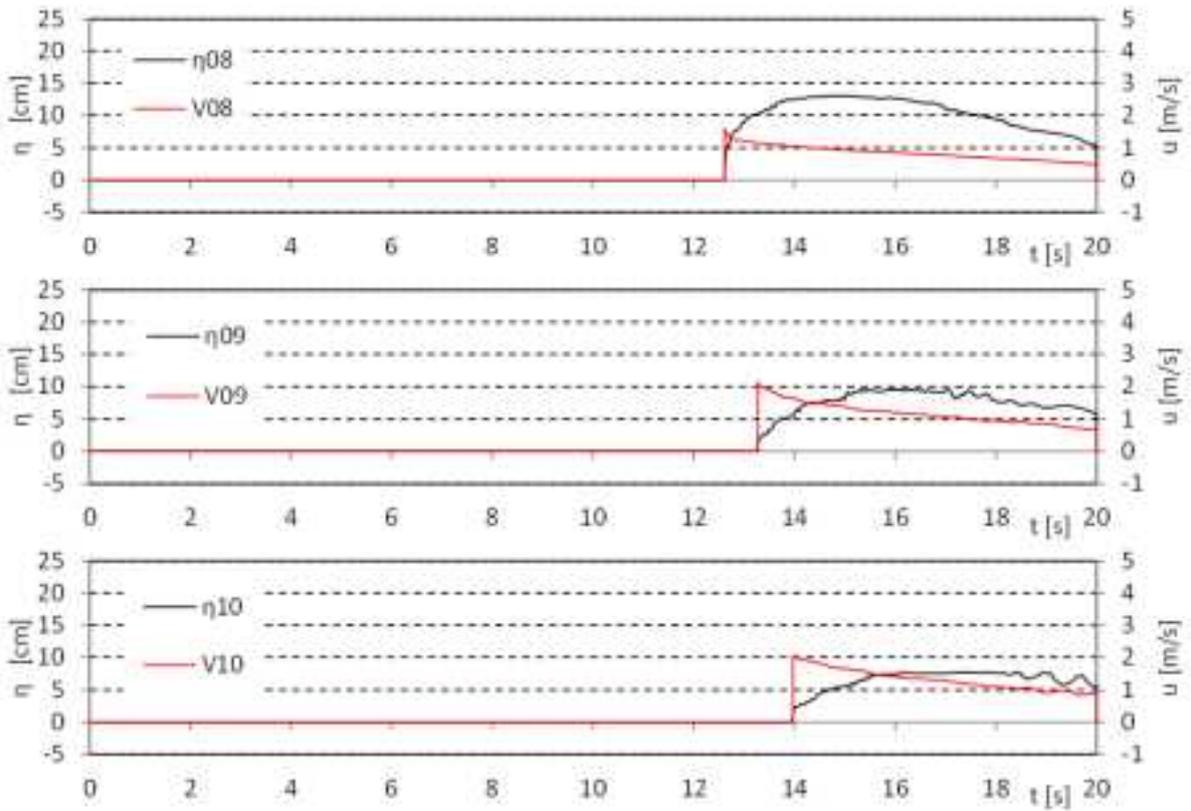


図 III.3-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W07, STAR-CD)

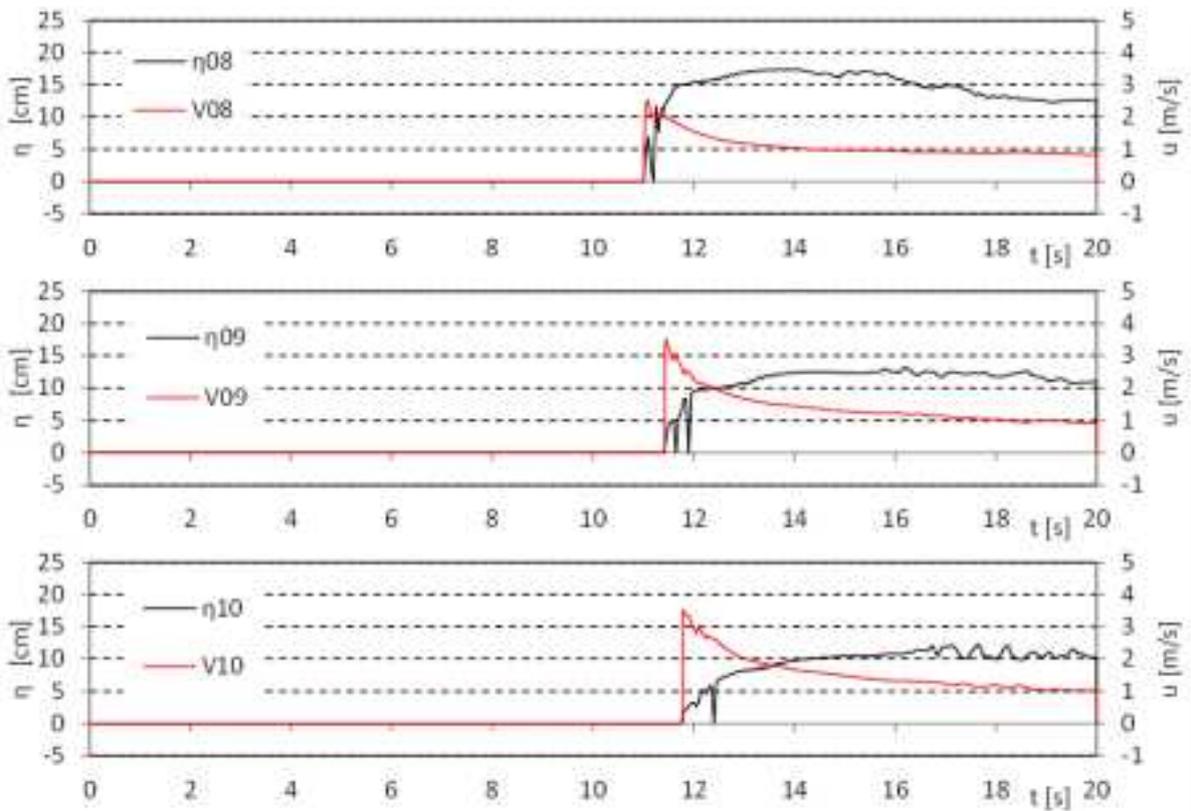


図 III.3-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (W09, STAR-CD)

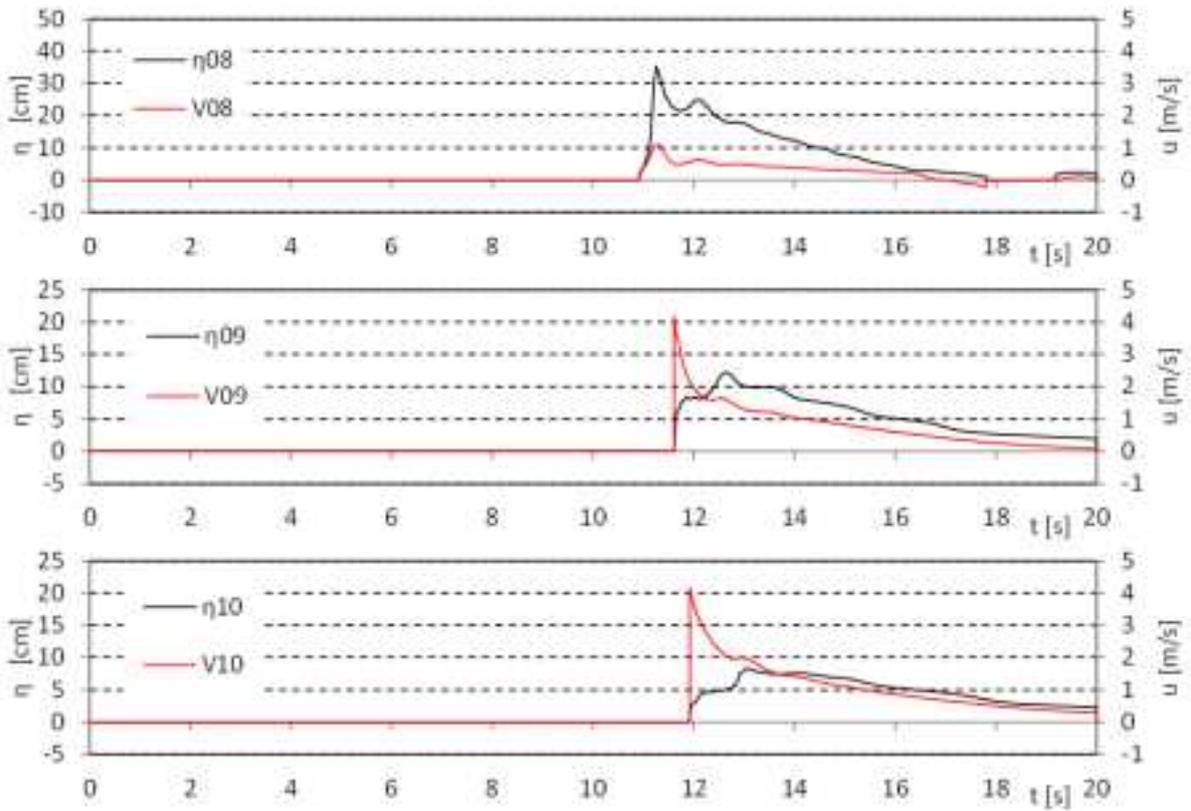


図 III.3-6 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W01, STAR-CD)

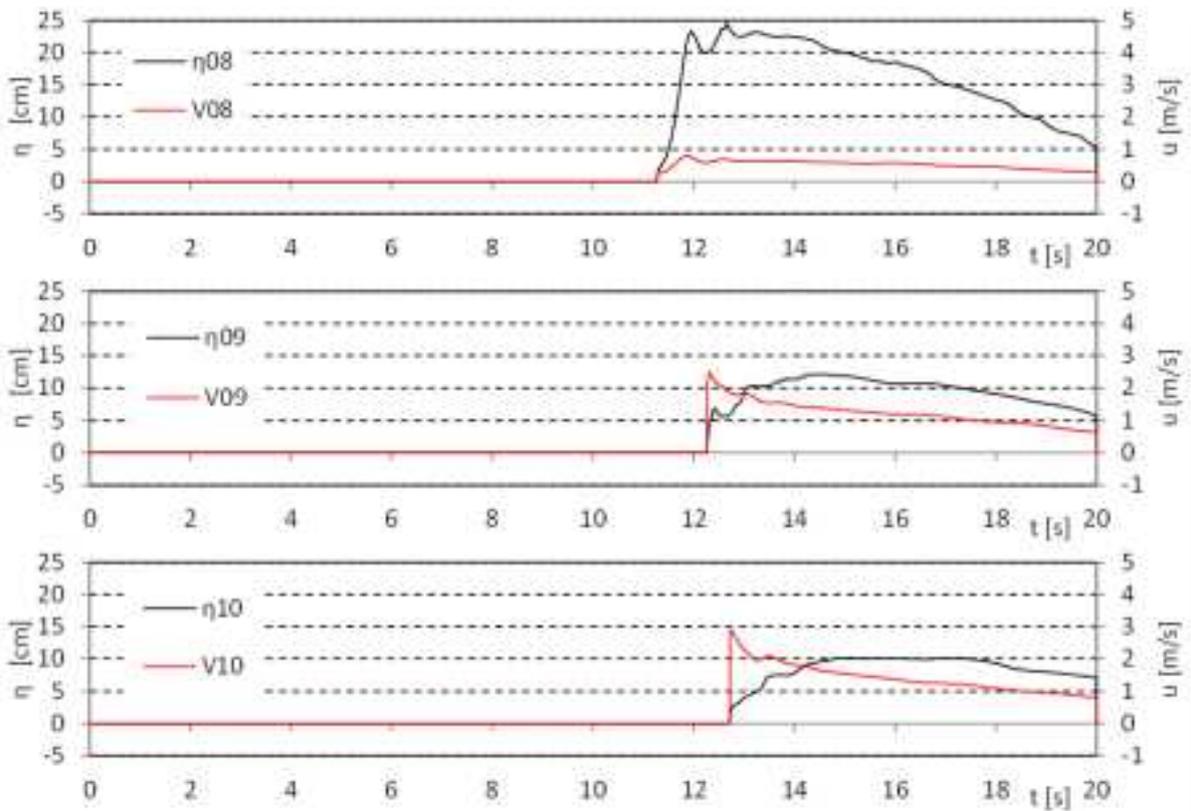


図 III.3-6 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W05, STAR-CD)

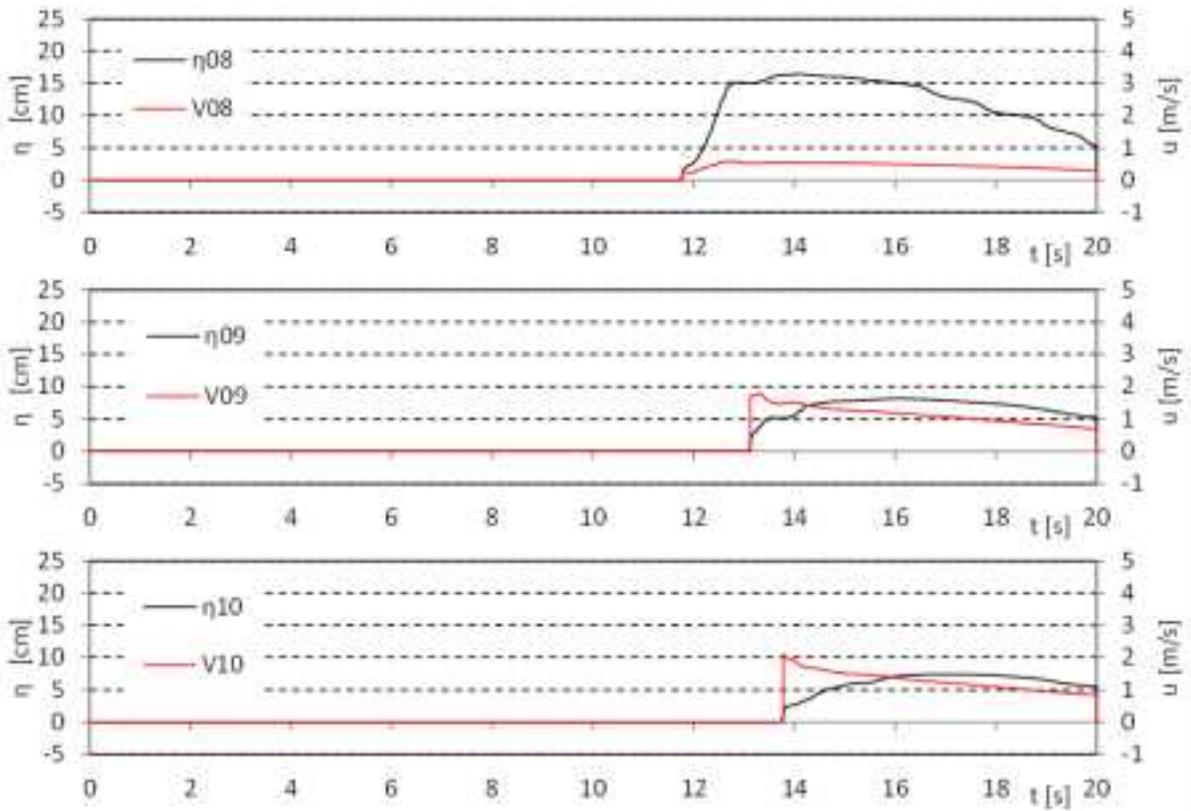


図 III.3-6 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W07, STAR-CD)

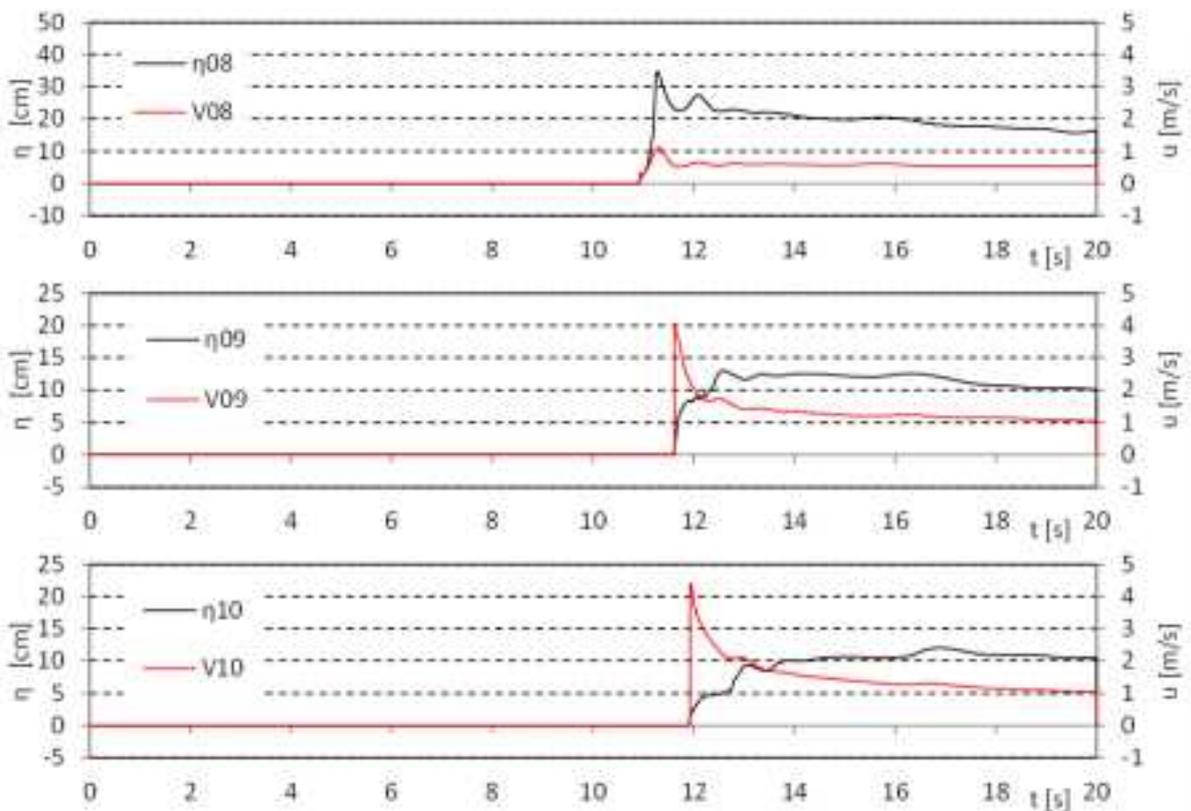


図 III.3-6 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W09, STAR-CD)

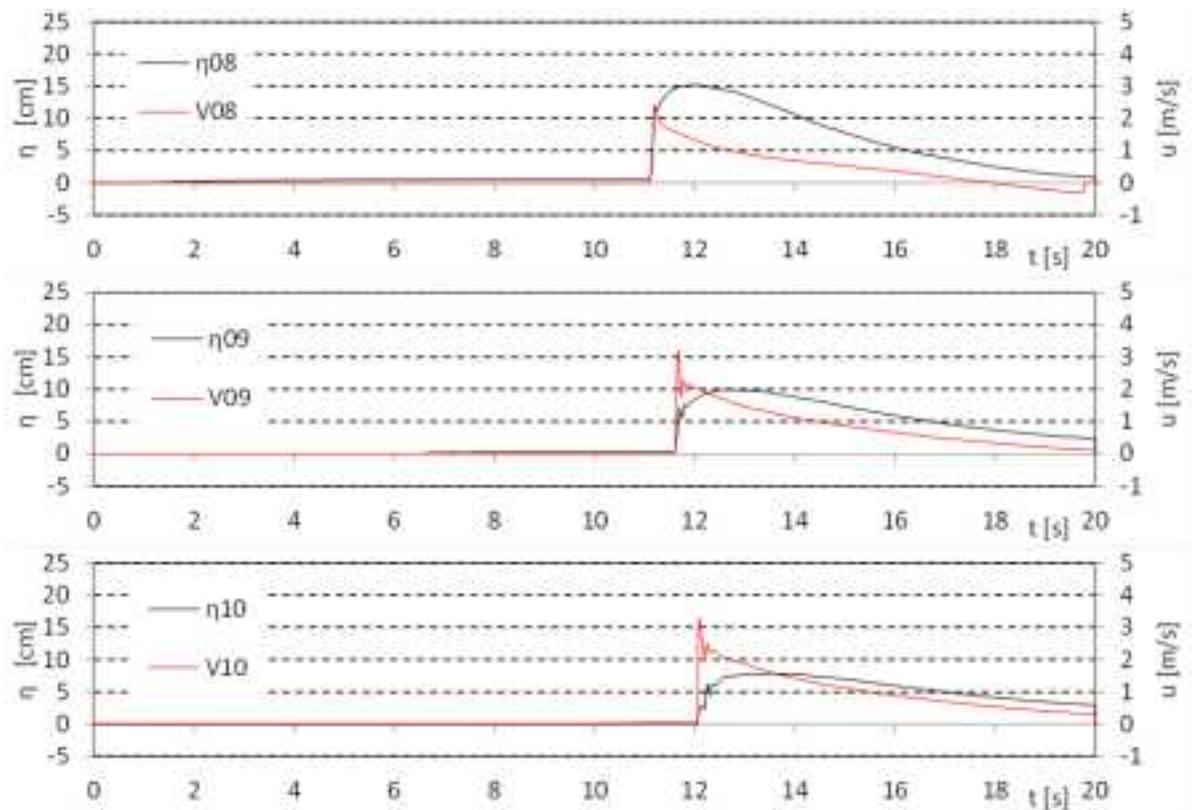


図 III.3-7 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W01, OpenFOAM)

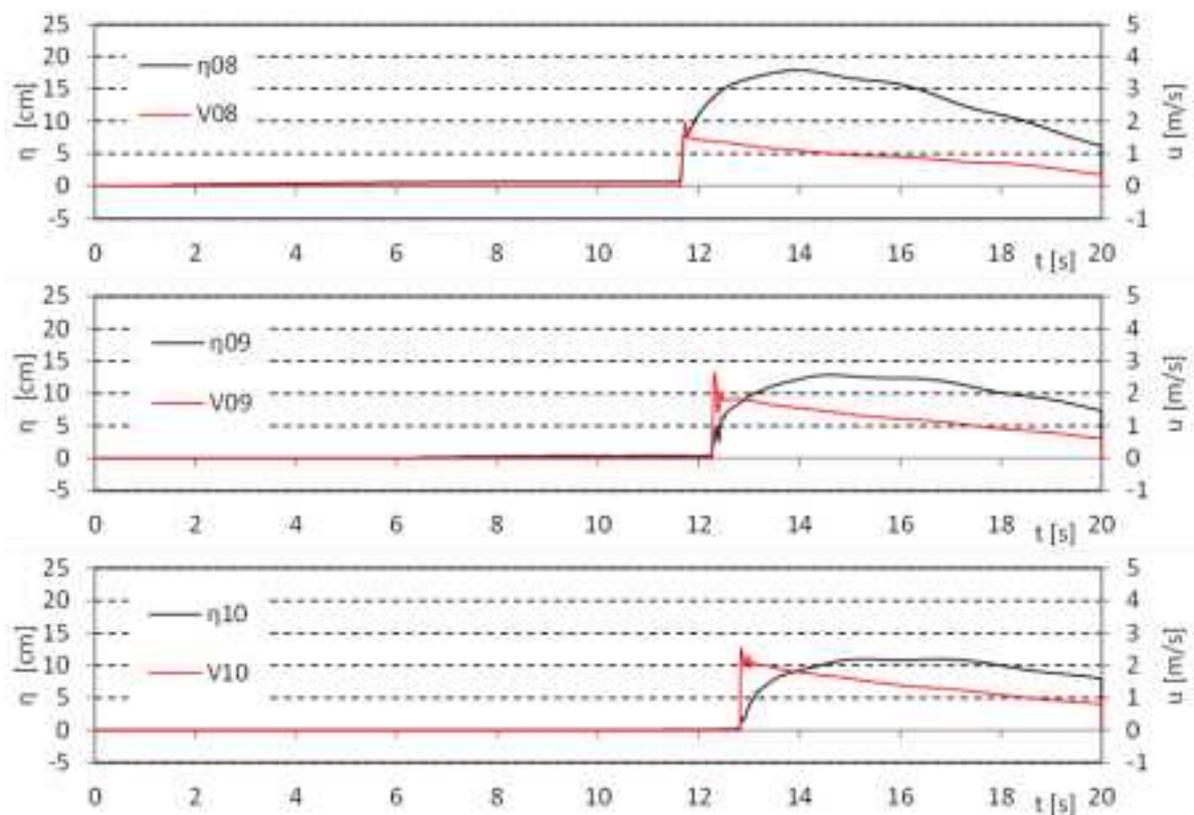


図 III.3-7 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W05, OpenFOAM)

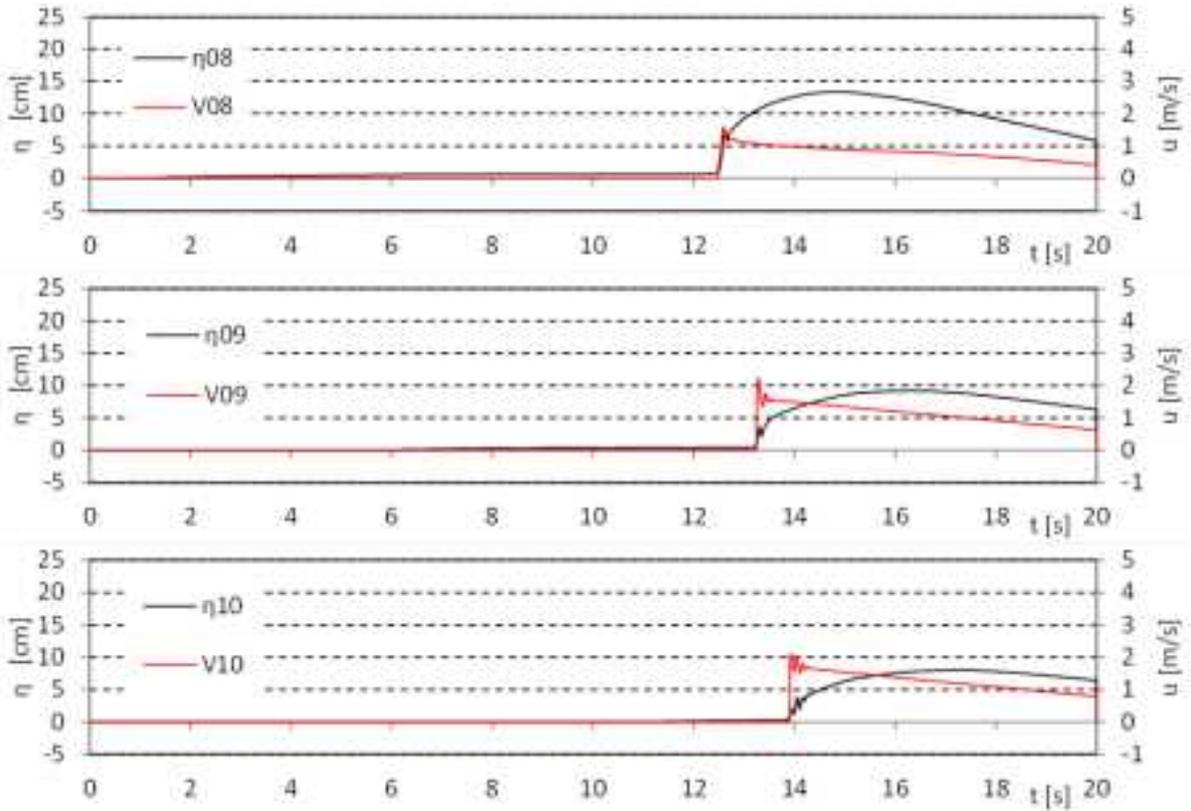


図 III.3-7 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W07, OpenFOAM)

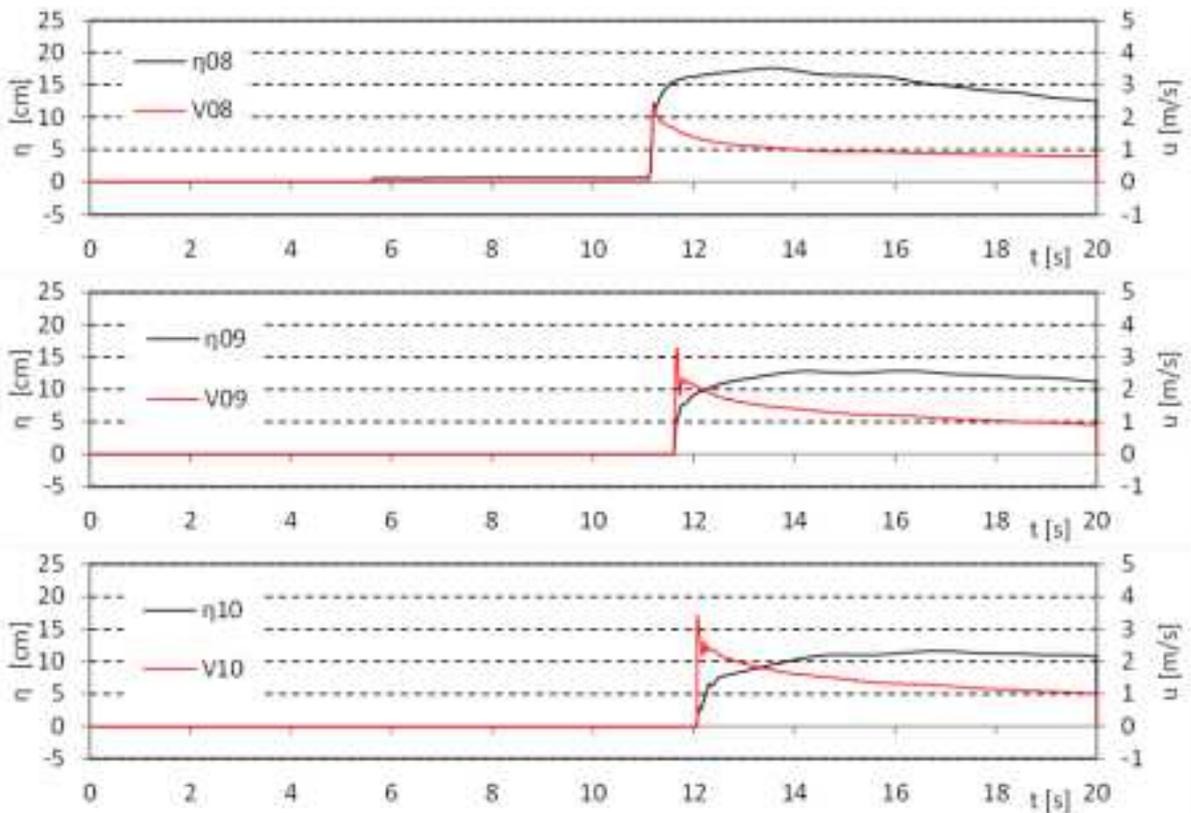


図 III.3-7 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W09, OpenFOAM)

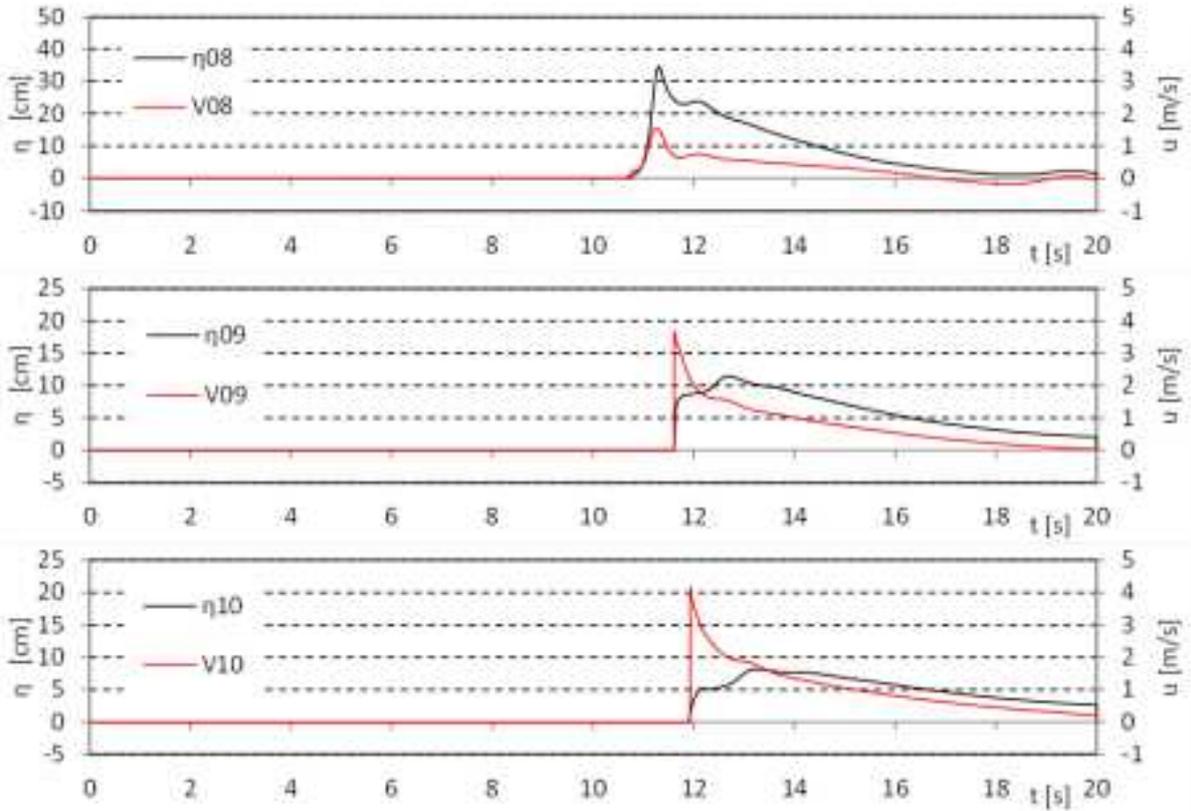


図 III.3-8 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W01, OpenFOAM)

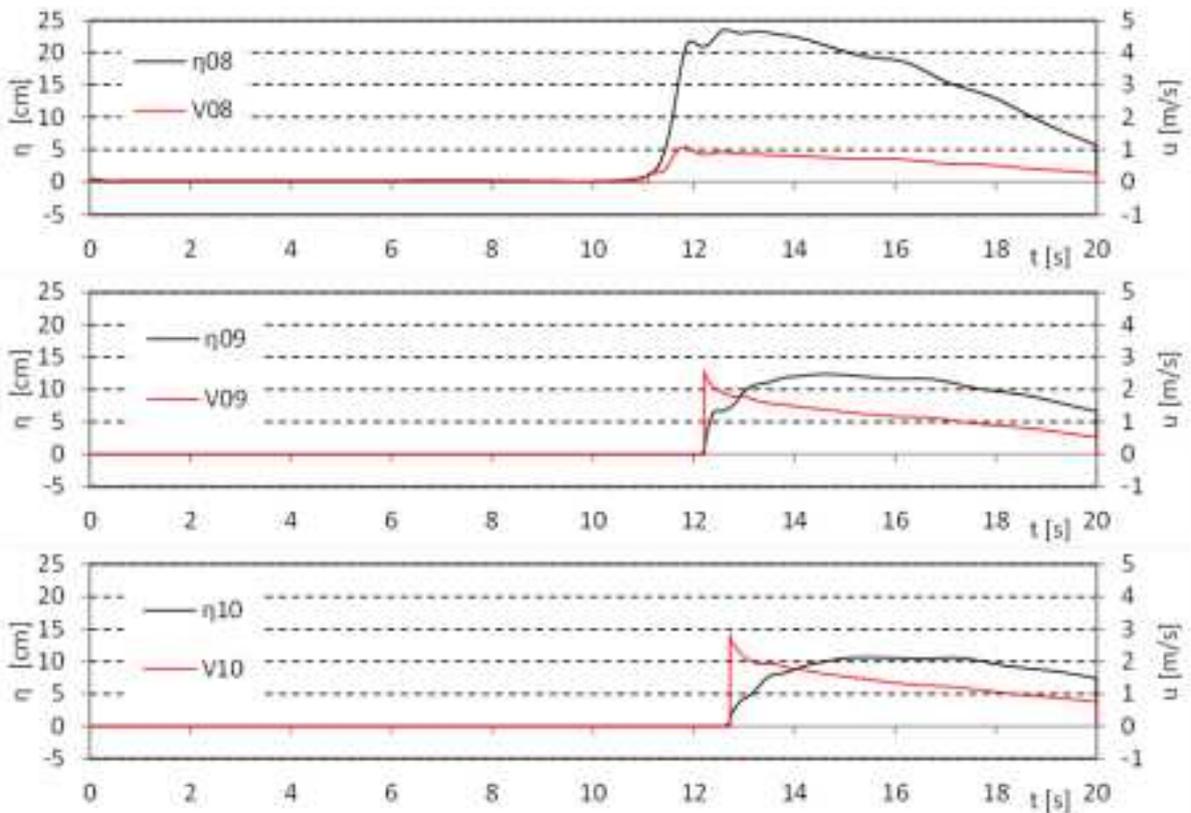


図 III.3-8 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W05, OpenFOAM)

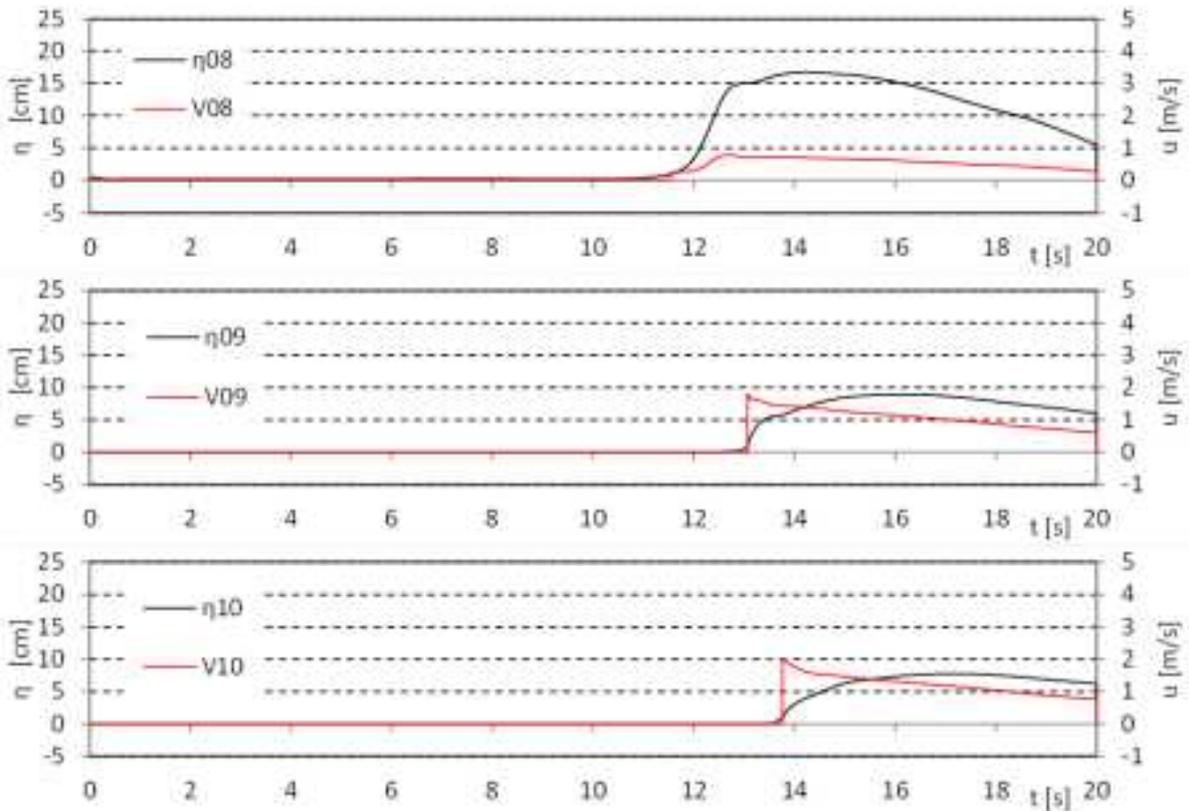


図 III.3-8 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W07, OpenFOAM)

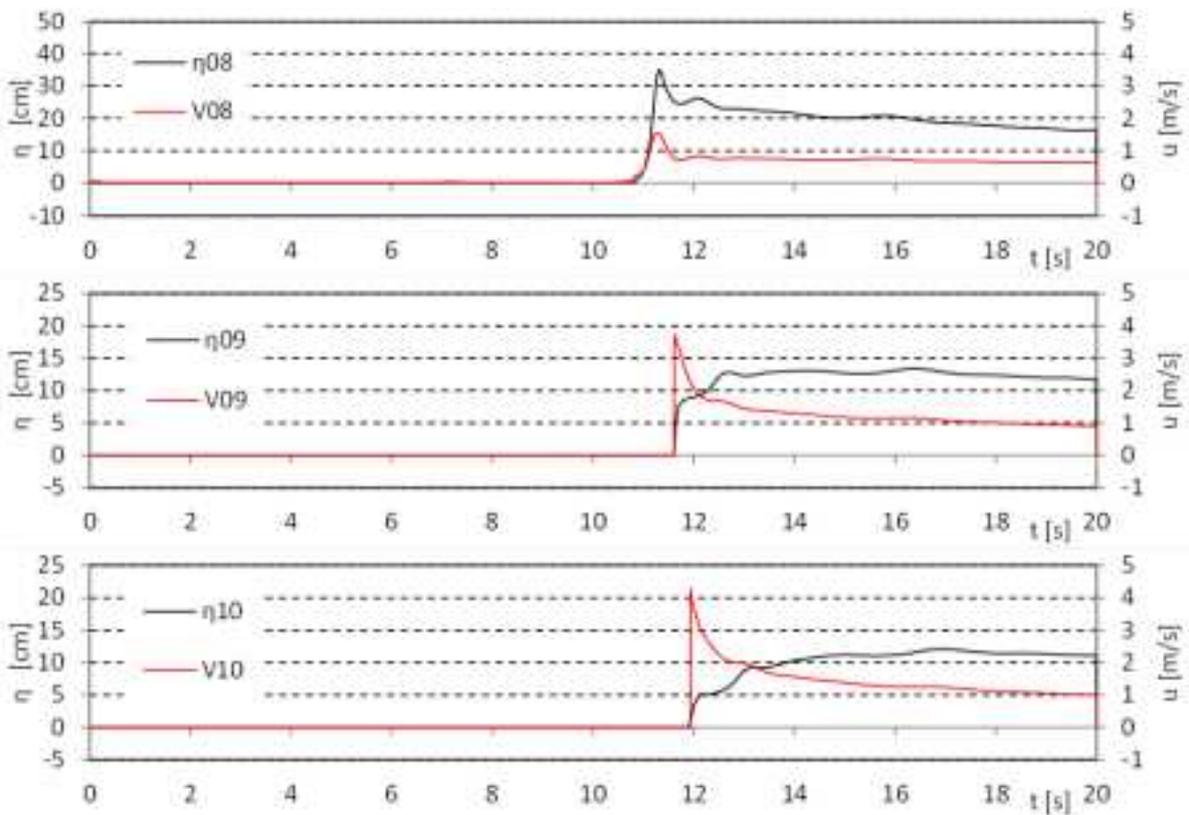


図 III.3-8 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W09, OpenFOAM)

### 3.2.2. 波力/波圧試験

波力/波圧試験に対する解析と実験の波力時系列結果の比較を、図 III.3-9～図 III.3-14 に示す。ここで解析結果の波力は、実験の圧力計測位置と同じ位置の波圧を積分することで求めている。また、STAR-CD、OpenFOAM による各計測点での解析結果を図 III.3-15～図 III.3-26 に示す。なお、これらの図は全体的な変動が把握できるよう縦軸の描画範囲を調整したため、いくつかのケースでは圧力（波力）の最大値が描画範囲外になっていることに留意されたい。

まず、STAR-CD の結果に着目する。単純勾配条件では、W05、W07 作用時の波力時系列については堤体位置によらず、解析は実験結果をよく再現できていることが分かる。また、堤体位置 2.5m での W01、W09 作用時の結果は、解析と実験で良く一致している。一方、堤体位置 0m、1.25m での W01、W09 作用時の結果を見ると、津波の衝突後 1s 程度経過した後に、実験結果よりも大きな波力のピークが解析では生じている。図 III.3-15、図 III.3-16 から同ケースの堤体前面の水位時系列を確認すると、実験よりも大きな水位上昇が算出されており、水塊の打ちあがり高さが実験とは異なることがこの差の要因と考えられる。このような局所的な波力のピークを除けば、解析結果と実験結果は良好に一致していると言える。

直立護岸条件では、堤体位置 0m とした場合は、初期に生じる衝撃圧の大きさに違いはあるものの、解析は良好に実験結果を再現できている。堤体位置 1.25m、2.5m の場合についても、最大波力の発生時刻に違いが見られるケース（例えば、直立護岸、設置位置 1.25m、W05）はあるが、解析結果と実験結果は概ね良好に一致している。

次に、OpenFOAM の解析結果に着目する。全体的に STAR-CD の解析結果よりも再現性が低下するが、堤体位置 0m の場合については実験結果を比較的良好に再現できている。一方、堤体位置 1.25m、2.5m の場合、実験結果を明らかに過小評価する結果となった。特に、W01、W09 作用時にその傾向は顕著であり、実験で生じている波力のピークが解析結果に現れない場合もある（例えば、単純勾配、設置位置 1.25m、W09）。なお、別途実施した試行解析によれば、解析格子間隔や乱流モデルを調整すれば OpenFOAM の解析精度が向上することを確認している。例えば、壁面近傍の解析格子間隔を 5mm、乱流モデルを LES の Smagorinsky モデルとした場合には、衝撃的な波力も含め再現性が向上した。STAR-CD と OpenFOAM はどちらも 3 次元数値流体解析コードであるが、同じ解析条件であっても得られる結果に差が生じることに留意する必要がある。

STAR-CD、OpenFOAM の解析結果を元に算出した、各ケースの水深係数を図 III.3-27、図 III.3-28 に示す。また、解析ケースの結果のみを抜粋した実験の水深係数を図 III.3-29 に示す。STAR-CD の結果は横軸（フルード数）の分布、縦軸（水深係数）の分布ともに実験結果と概ね一致している。水深係数の傾向としても堤体位置 0m では  $\alpha = 1 + 1.4Fr$  の評価式より小さく、堤体位置 1.25m、2.5m ではそれよりも大きくなっており実験結果の傾向と一致する。OpenFOAM の結果では、フルード数の分布は実験結果と概ね類似しているが、水深係数は実験結果よりも小さい傾向にある。特に、堤体位置 1.25m、2.5m の水深係数が実験結果と比較して小さくなっている。これは前述したように、堤体位置が汀線から離れたケースでは、実験の最大波力を OpenFOAM では十分に再現できていないためと考えられる。

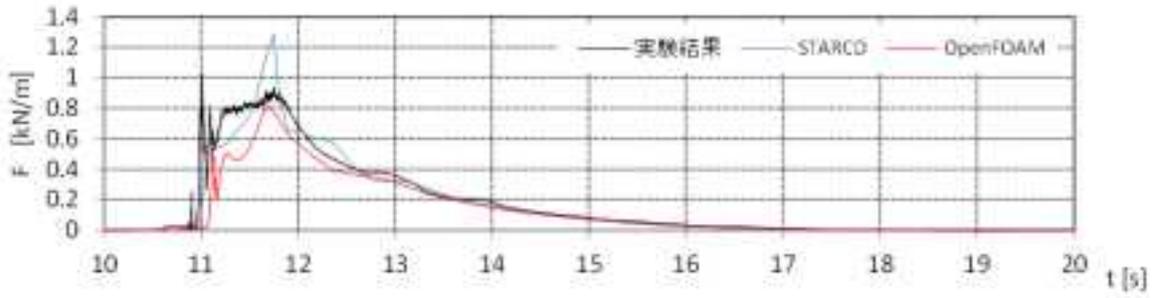


図 III.3-9 波力時系列の実験と解析結果の比較 (単純勾配, 設置位置 0m, W01)

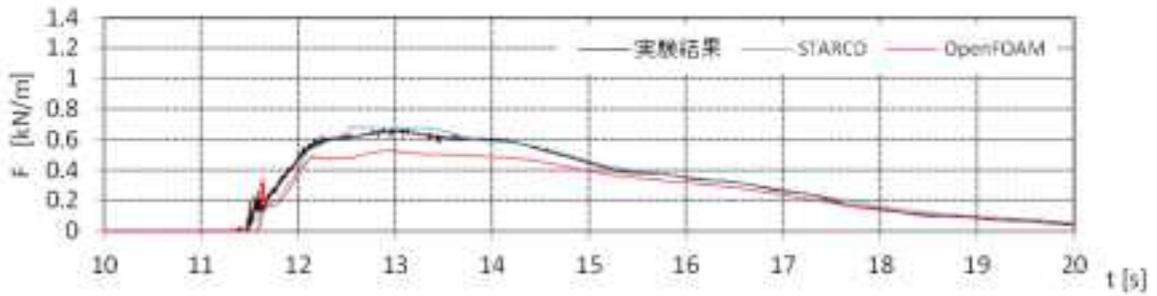


図 III.3-9 波力時系列の実験と解析結果の比較 (単純勾配, 設置位置 0m, W05)

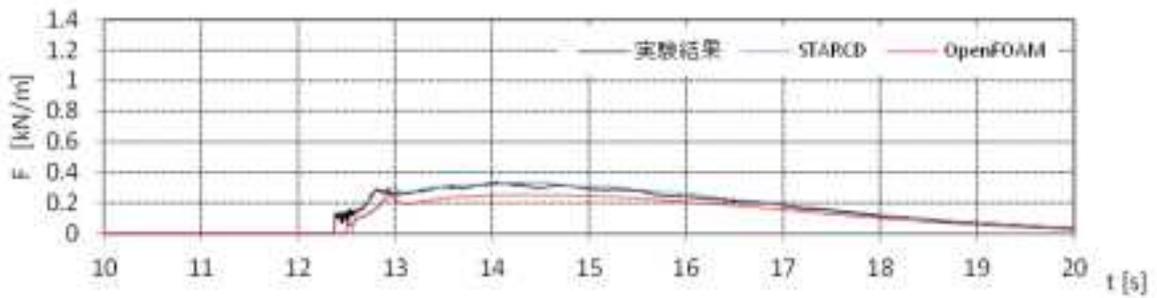


図 III.3-9 波力時系列の実験と解析結果の比較 (単純勾配, 設置位置 0m, W07)

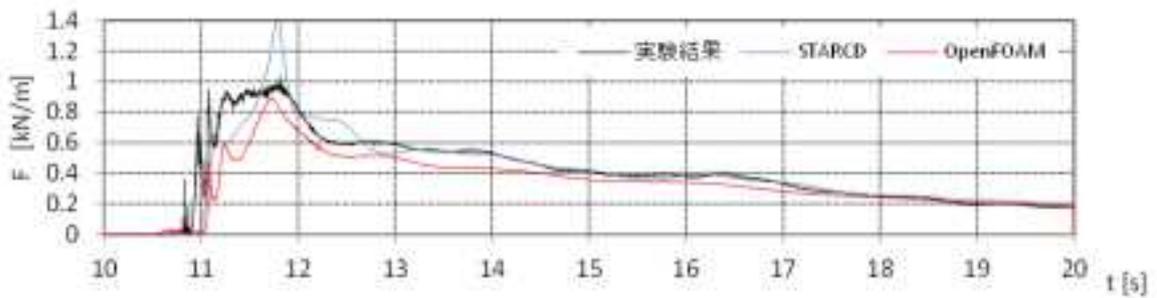


図 III.3-9 波力時系列の実験と解析結果の比較 (単純勾配, 設置位置 0m, W09)

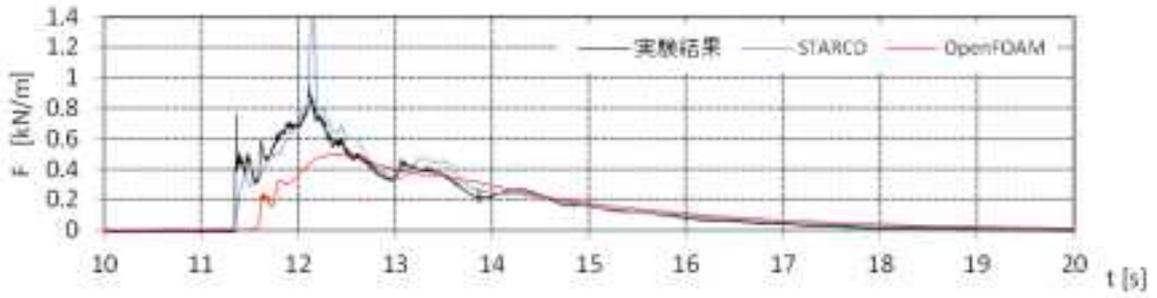


図 III.3-10 波力時系列の実験と解析結果の比較 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W01)

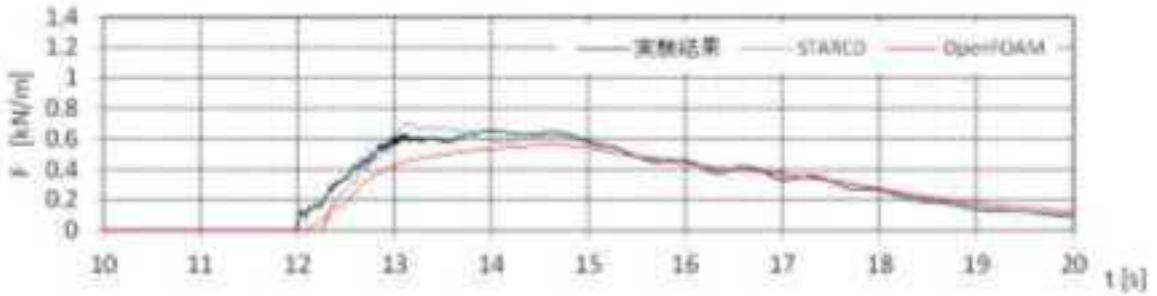


図 III.3-10 波力時系列の実験と解析結果の比較 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W05)

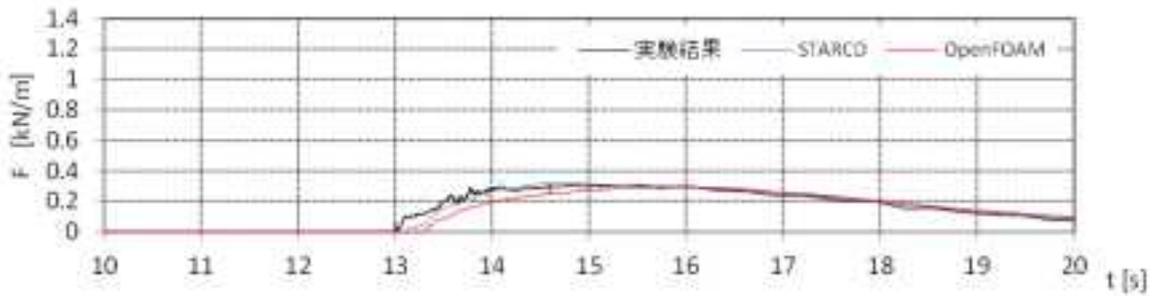


図 III.3-10 波力時系列の実験と解析結果の比較 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W07)

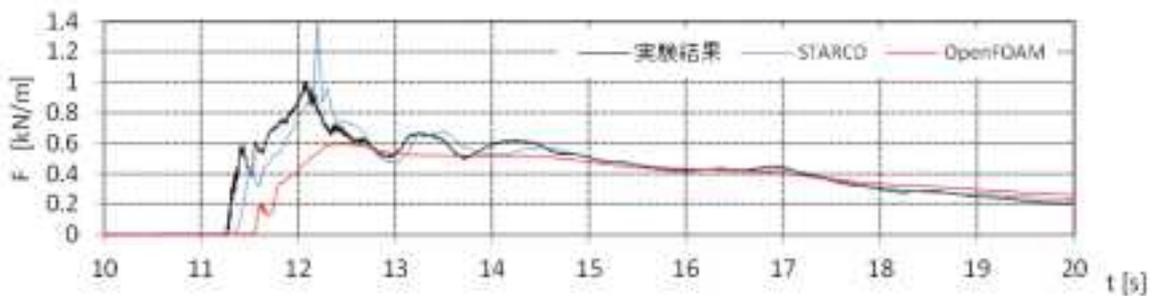


図 III.3-10 波力時系列の実験と解析結果の比較 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W09)

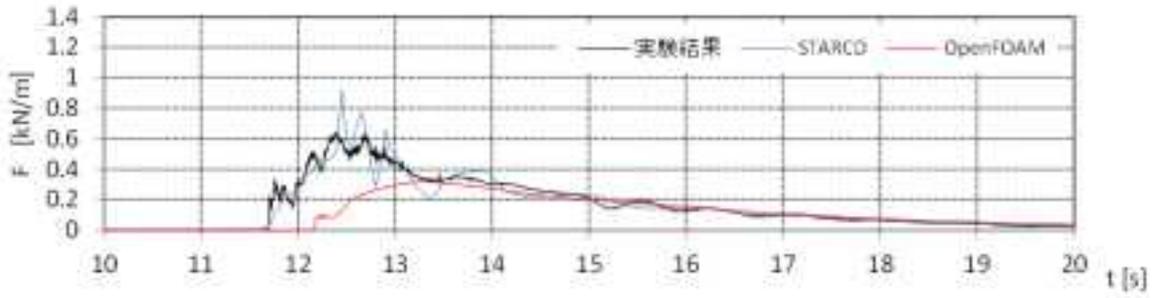


図 III.3-11 波力時系列の実験と解析結果の比較 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W01)

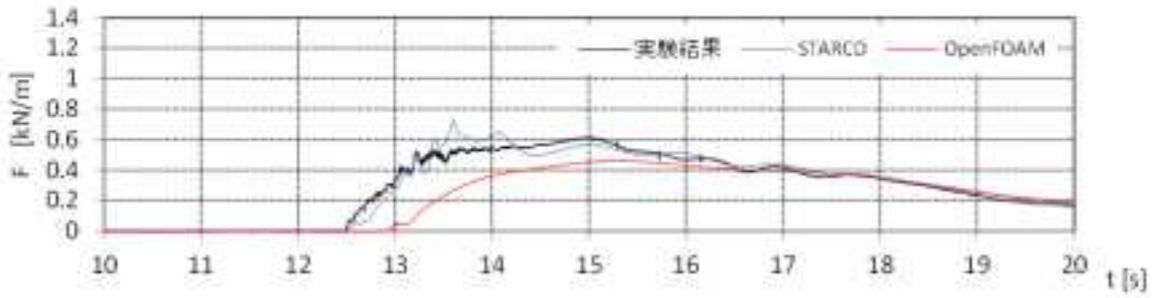


図 III.3-11 波力時系列の実験と解析結果の比較 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W05)

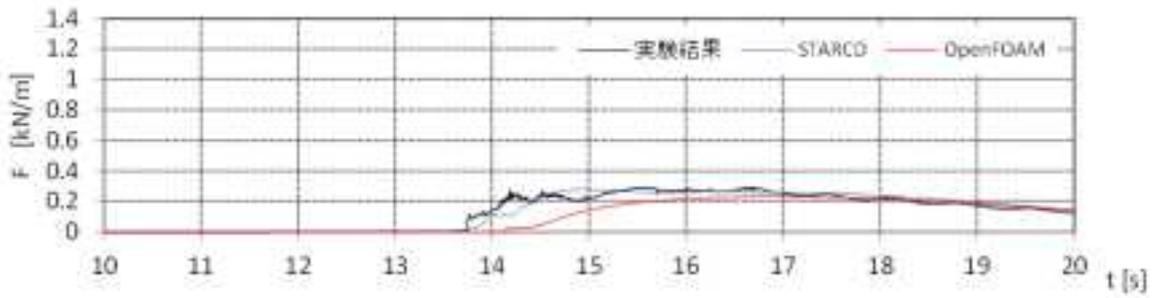


図 III.3-11 波力時系列の実験と解析結果の比較 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W07)

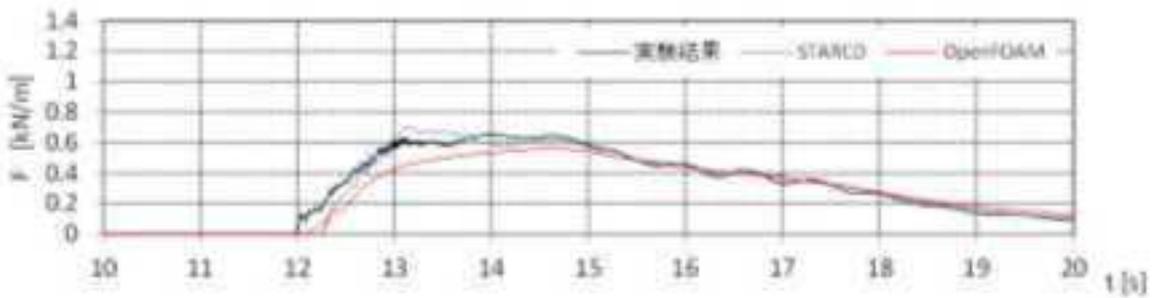


図 III.3-11 波力時系列の実験と解析結果の比較 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W09)

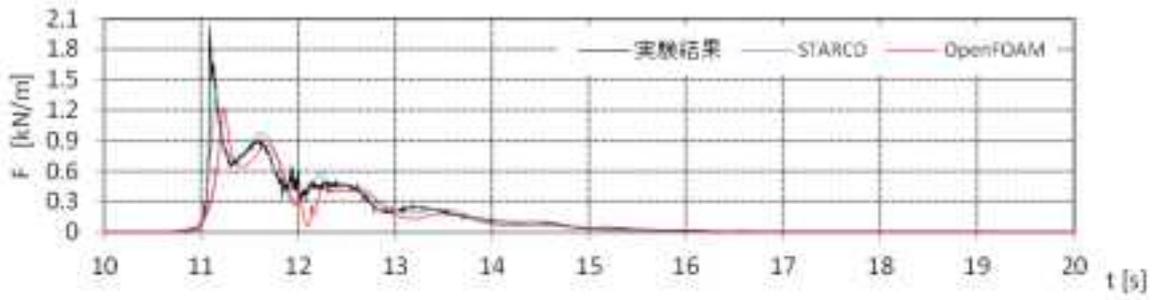


図 III.3-12 波力時系列の実験と解析結果の比較 (直立護岸, 設置位置 0m, W01)

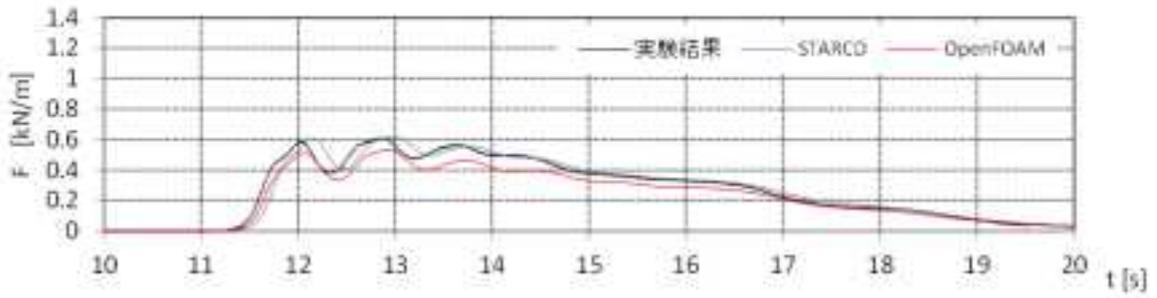


図 III.3-12 波力時系列の実験と解析結果の比較 (直立護岸, 設置位置 0m, W05)

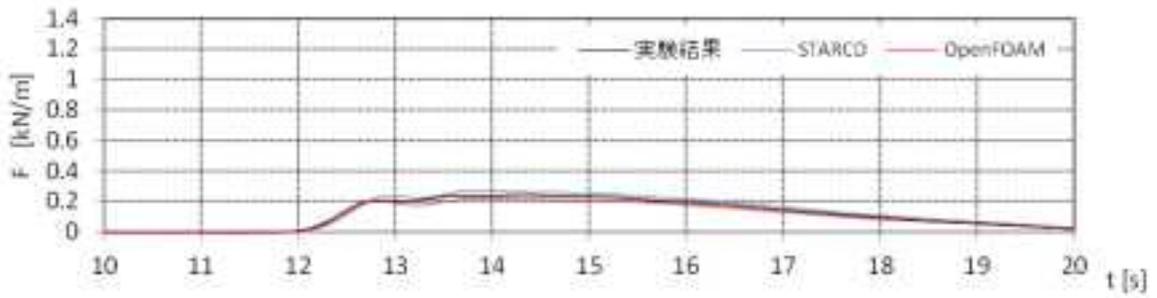


図 III.3-12 波力時系列の実験と解析結果の比較 (直立護岸, 設置位置 0m, W07)

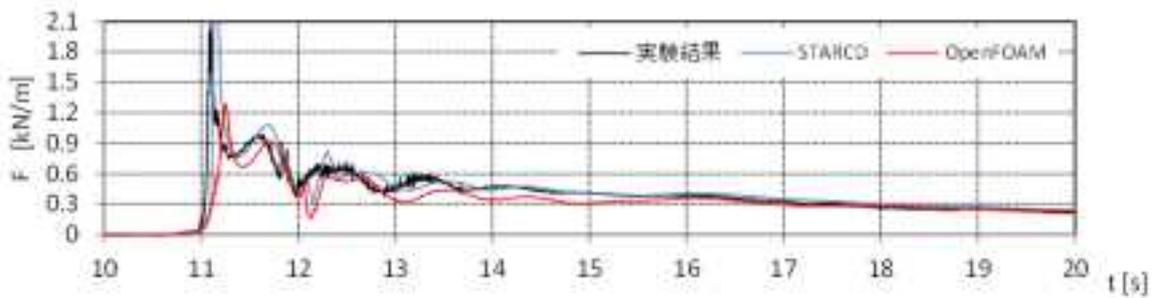


図 III.3-12 波力時系列の実験と解析結果の比較 (直立護岸, 設置位置 0m, W09)

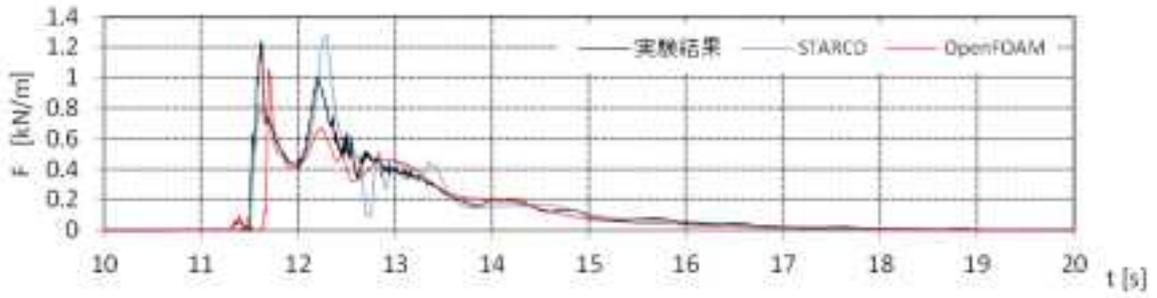


図 III.3-13 波力時系列の実験と解析結果の比較 (直立護岸, 設置位置 1.25m, W01)

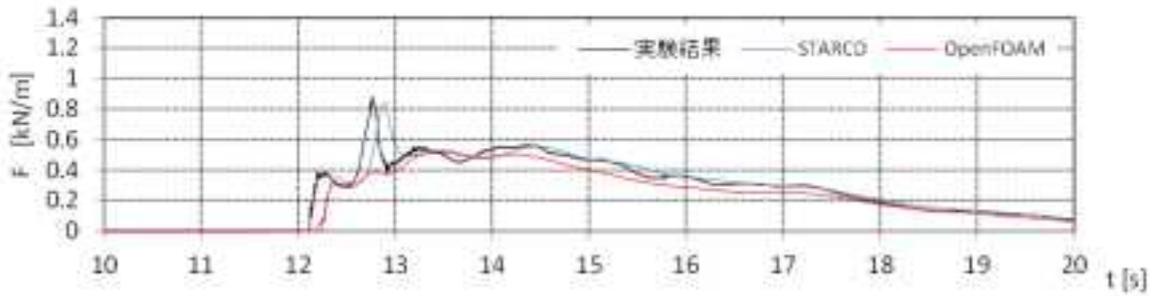


図 III.3-13 波力時系列の実験と解析結果の比較 (直立護岸, 設置位置 1.25m, W05)

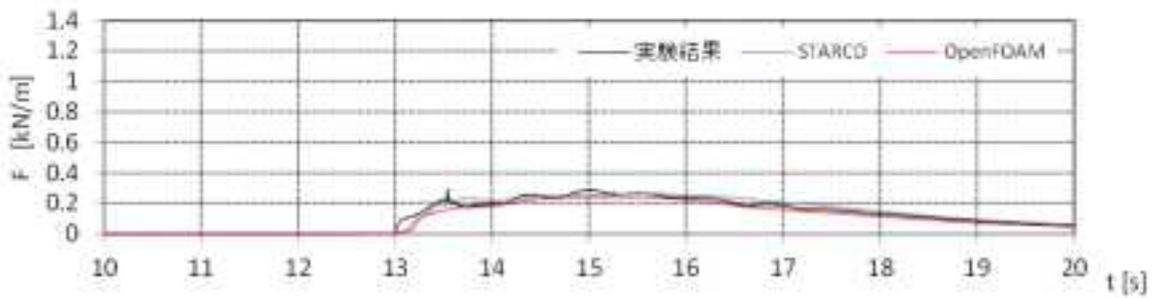


図 III.3-13 波力時系列の実験と解析結果の比較 (直立護岸, 設置位置 1.25m, W07)

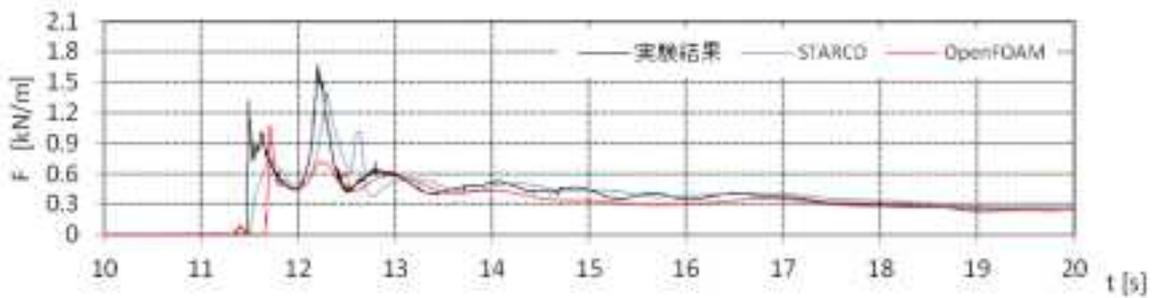


図 III.3-13 波力時系列の実験と解析結果の比較 (直立護岸, 設置位置 1.25m, W09)

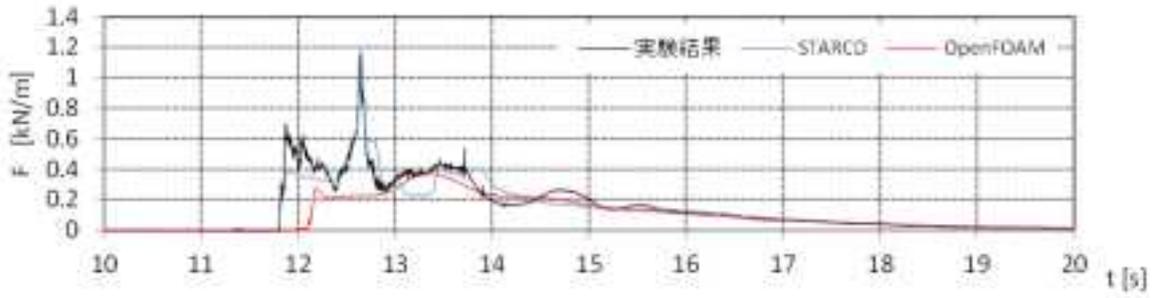


図 III.3-14 波力時系列の実験と解析結果の比較 (直立護岸, 設置位置 2.5m, W01)

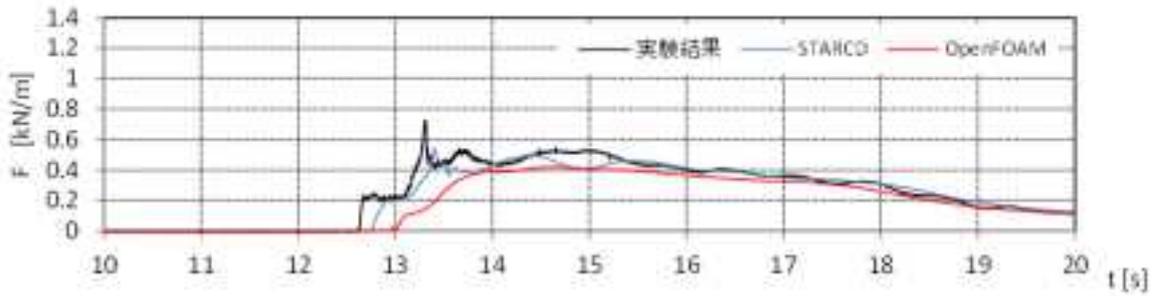


図 III.3-14 波力時系列の実験と解析結果の比較 (直立護岸, 設置位置 2.5m, W05)

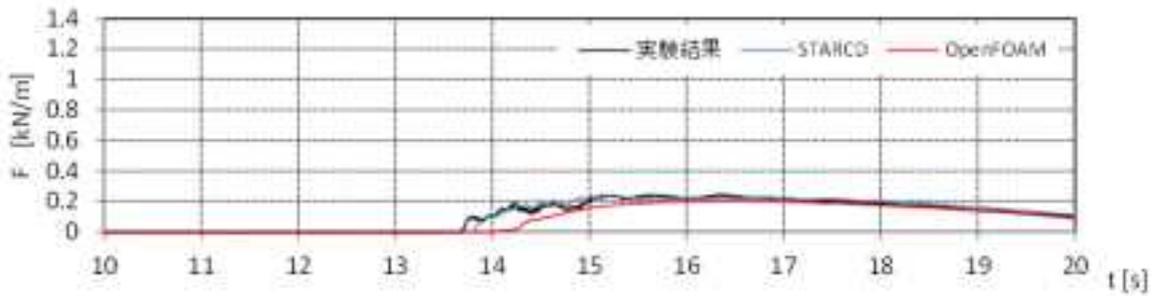


図 III.3-14 波力時系列の実験と解析結果の比較 (直立護岸, 設置位置 2.5m, W07)

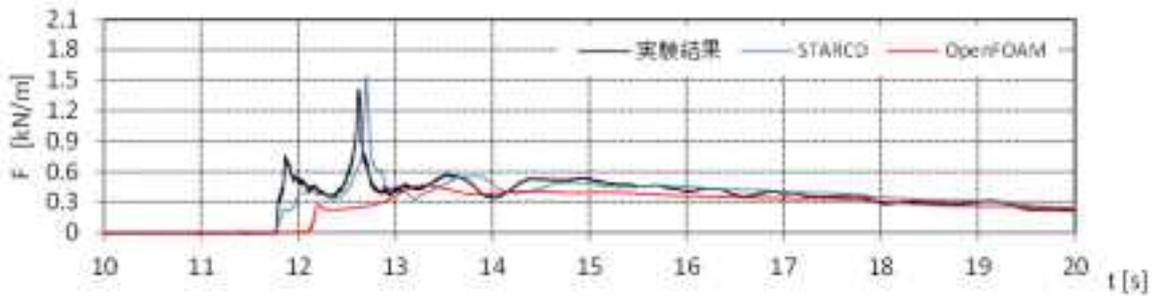


図 III.3-14 波力時系列の実験と解析結果の比較 (直立護岸, 設置位置 2.5m, W09)

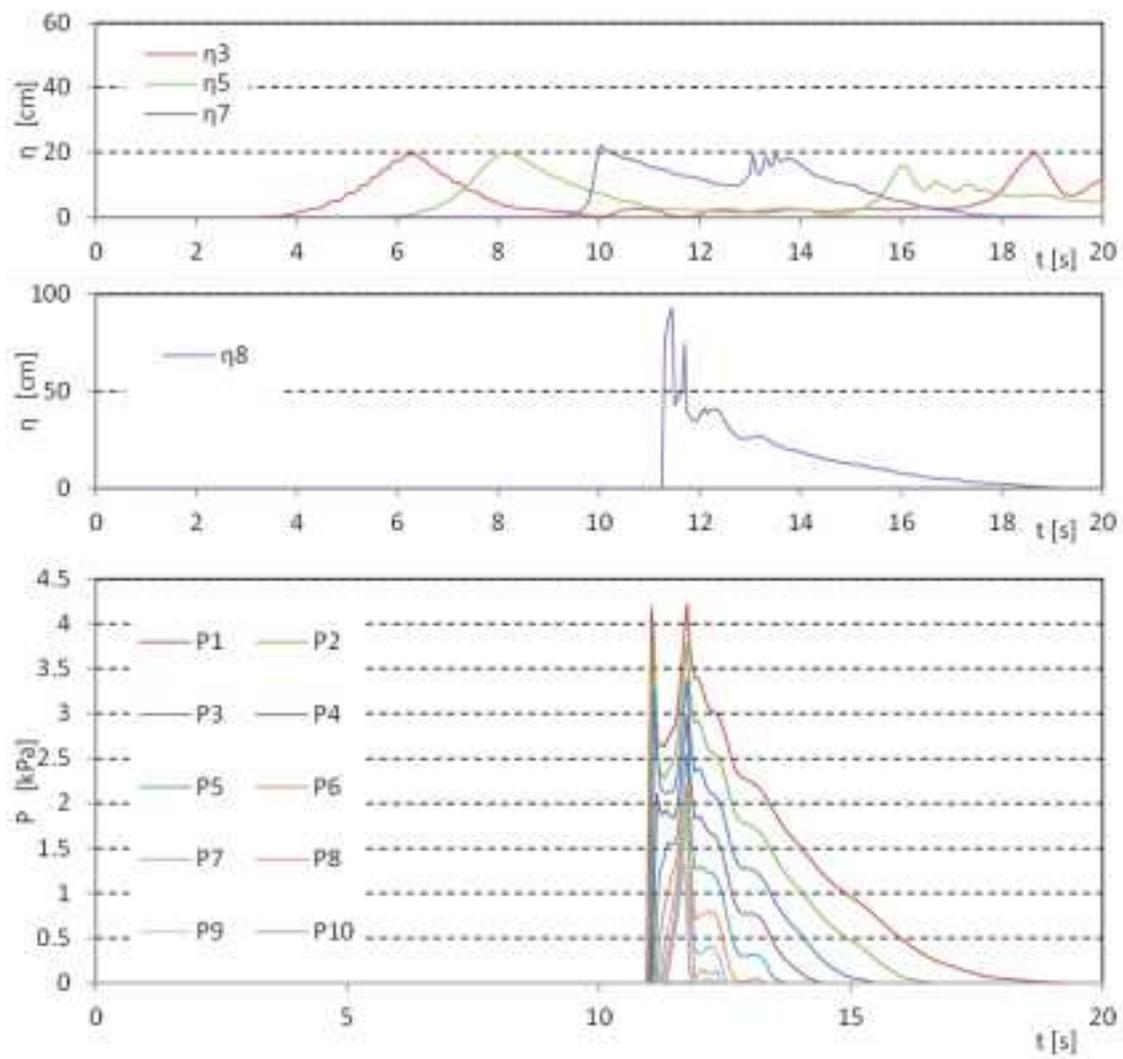


図 III.3-15 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 0m, W01, STAR-CD)

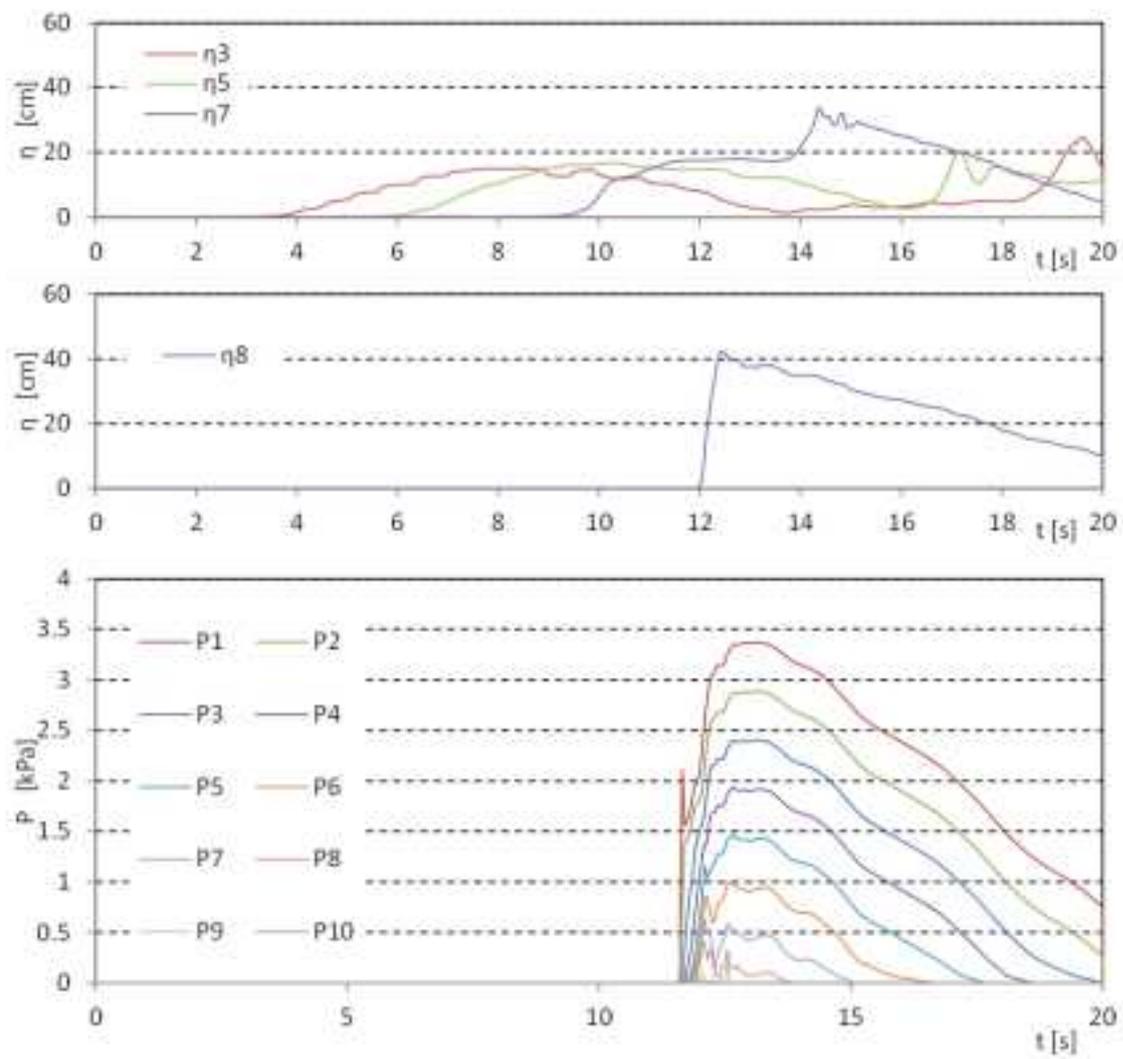


図 III.3-15 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 0m, W05, STAR-CD)

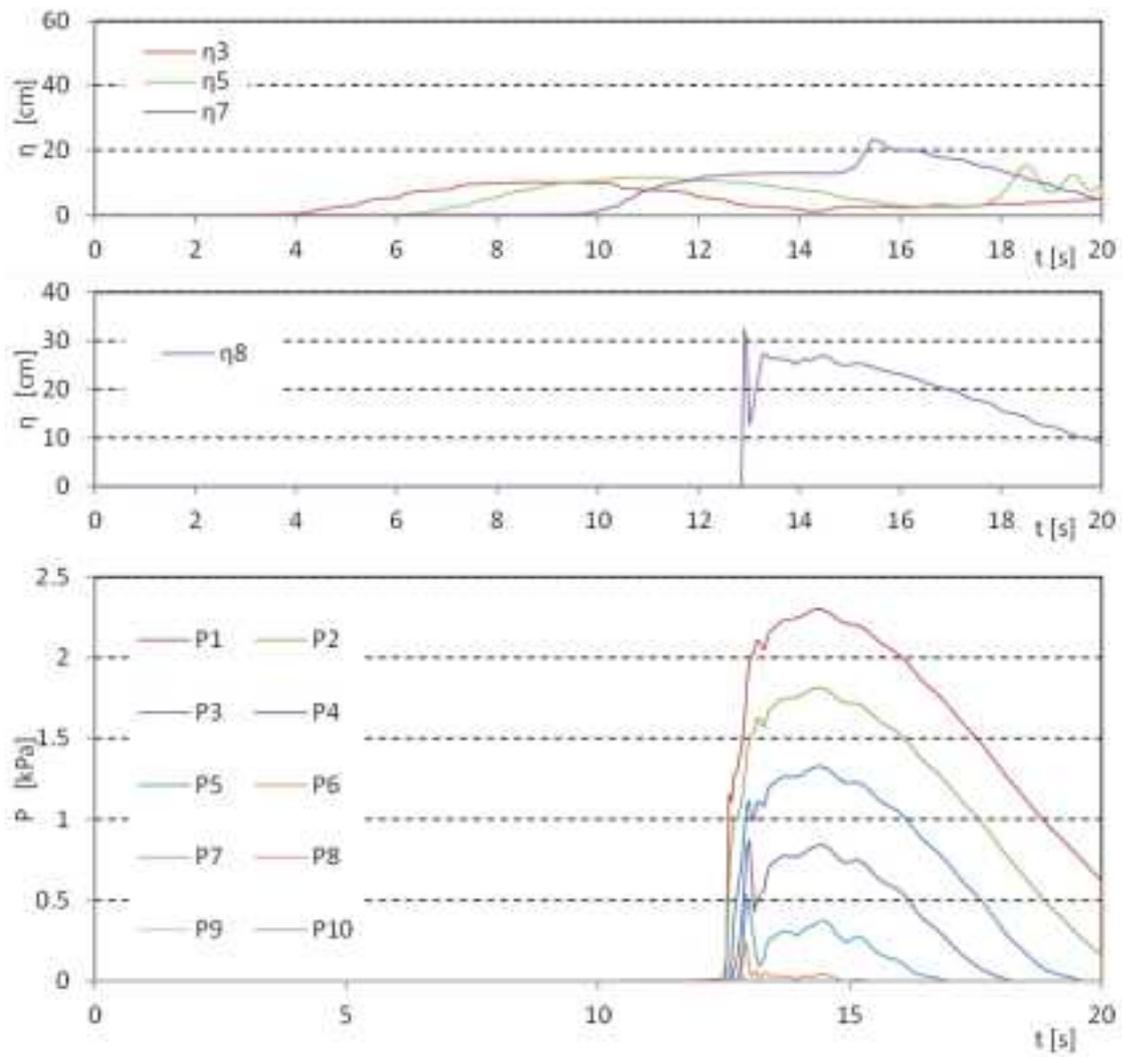


図 III.3-15 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 0m, W07, STAR-CD)

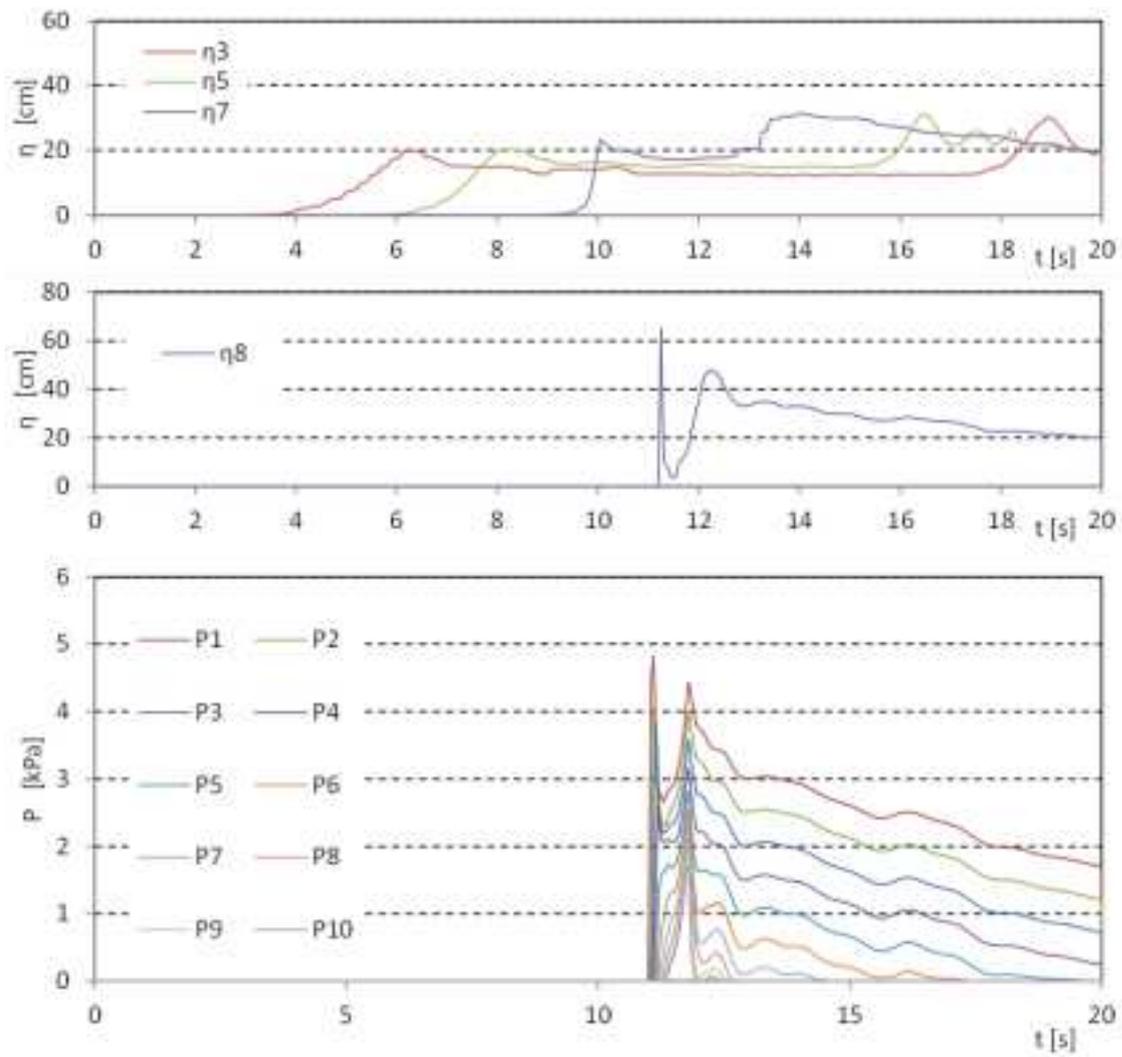


図 III.3-15 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 0m, W09, STAR-CD)

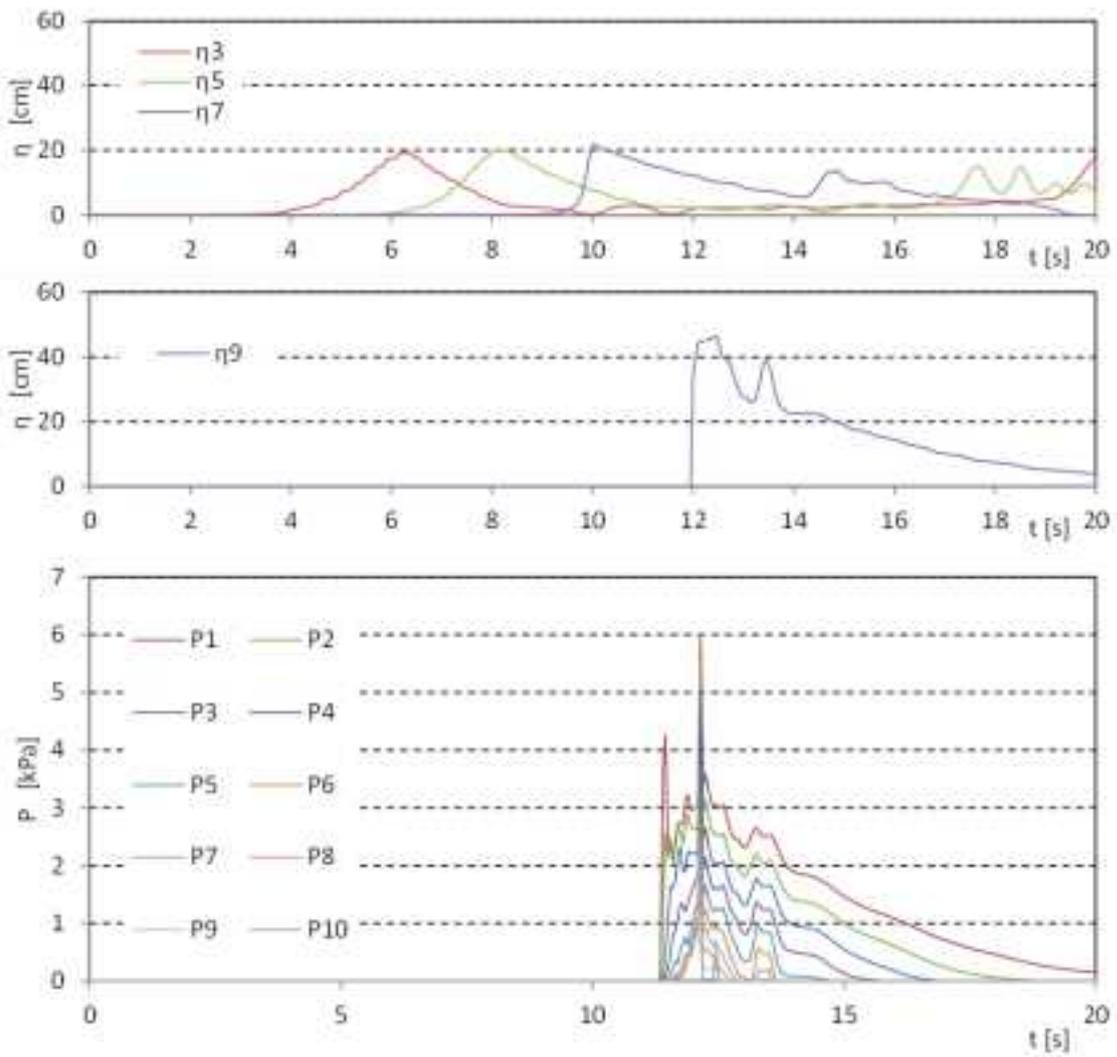


図 III.3-16 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W01, STAR-CD)

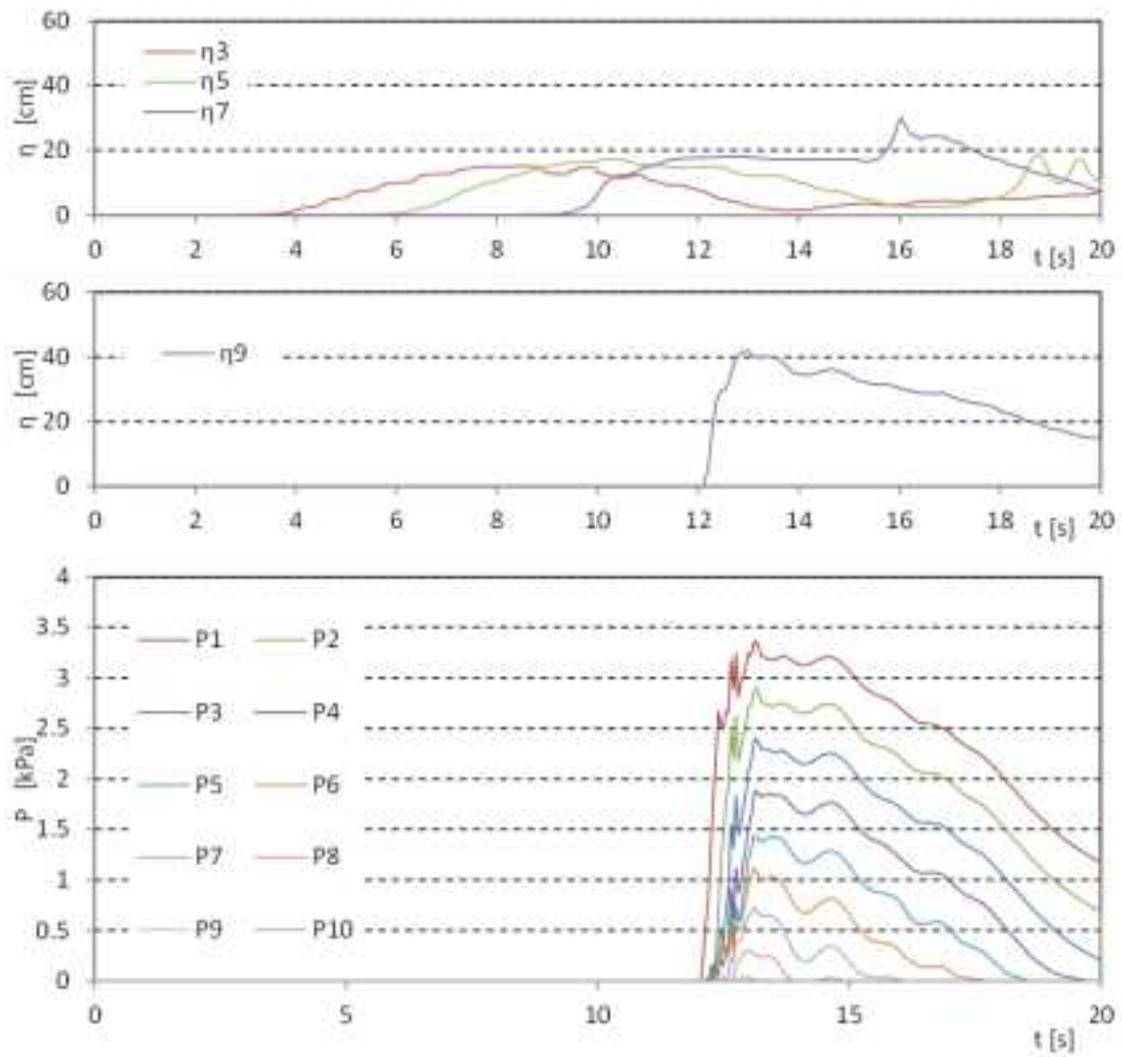


図 III.3-16 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W05, STAR-CD)

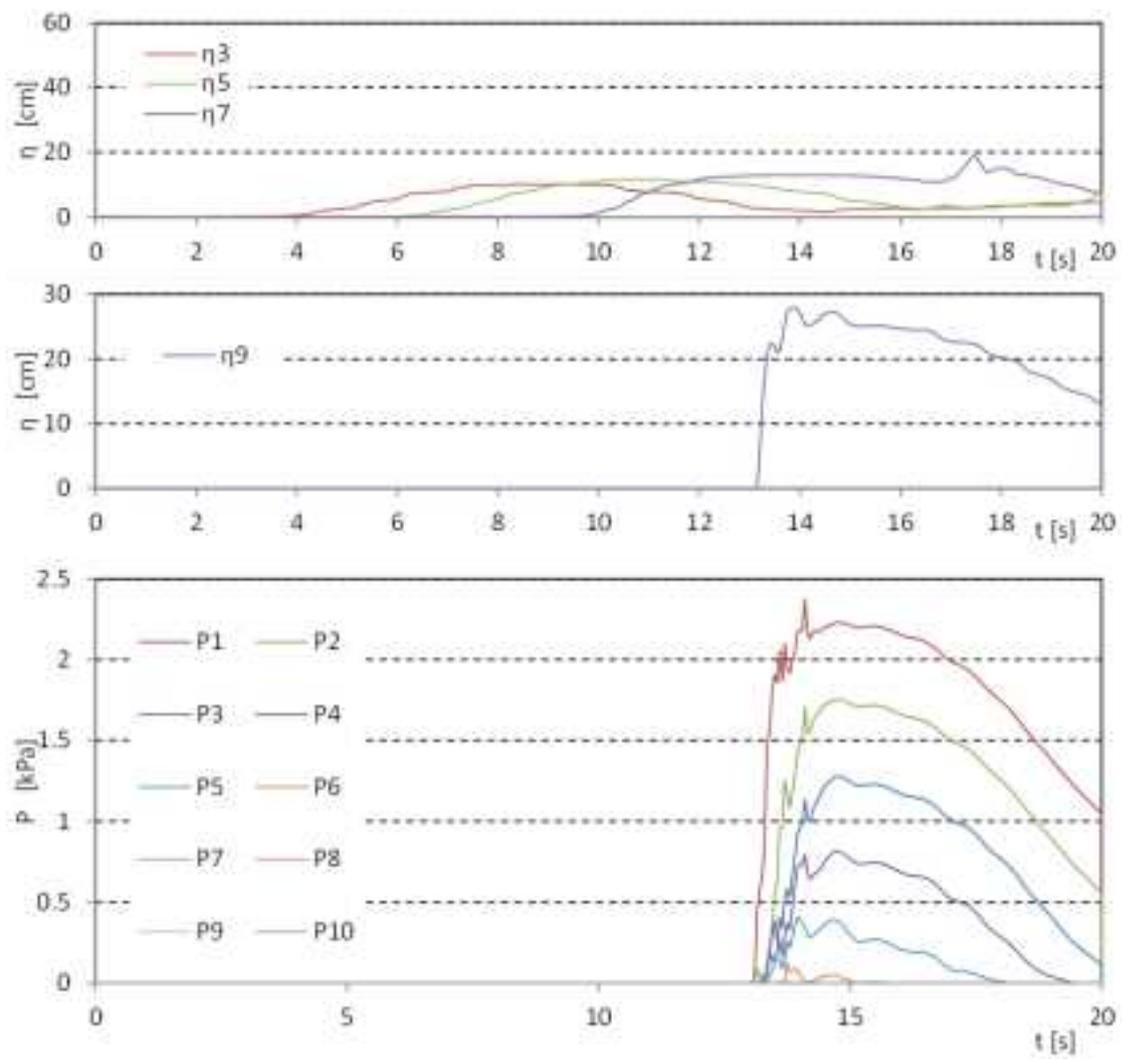


図 III.3-16 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W07, STAR-CD)

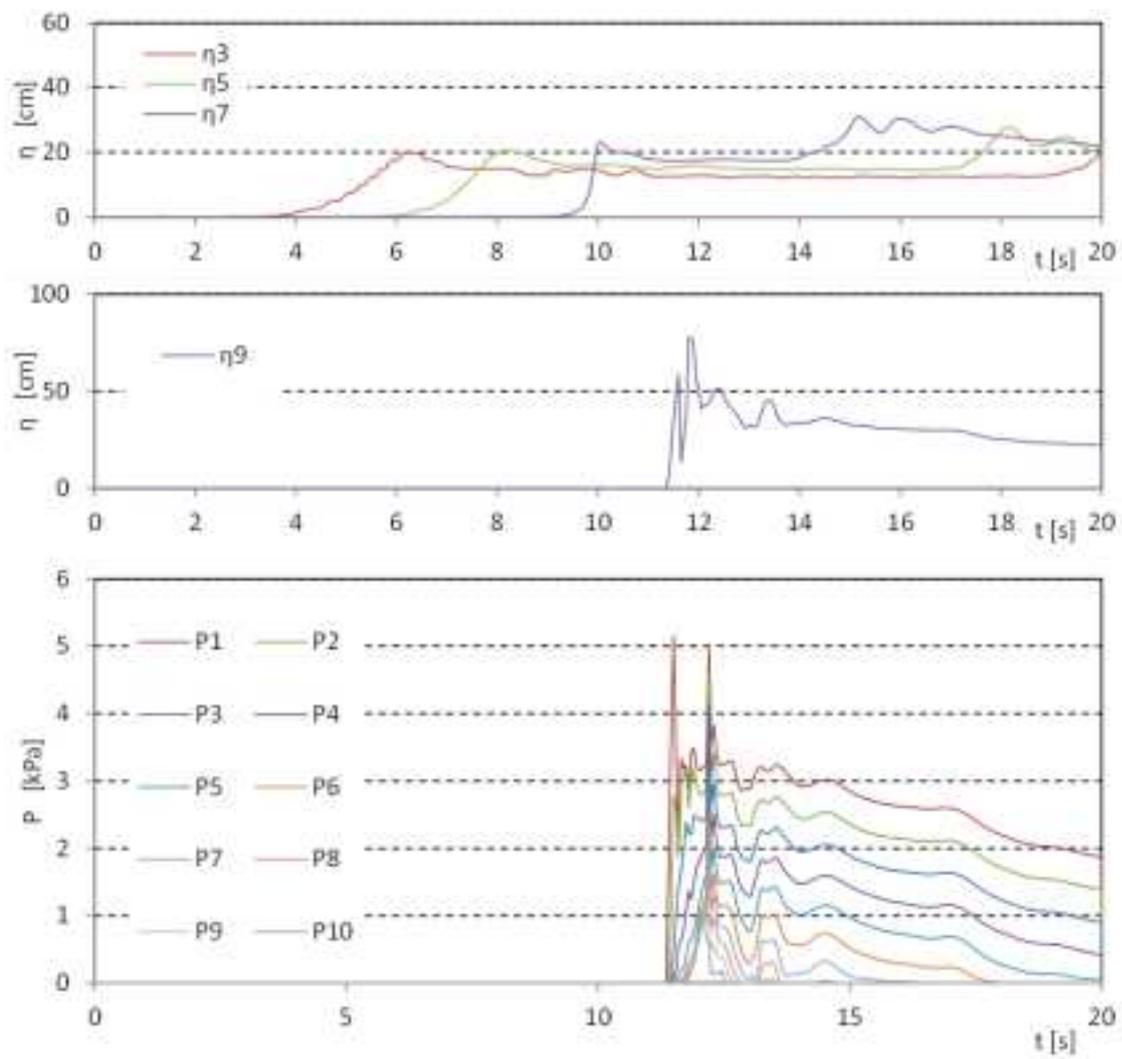


図 III.3-16 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W09, STAR-CD)

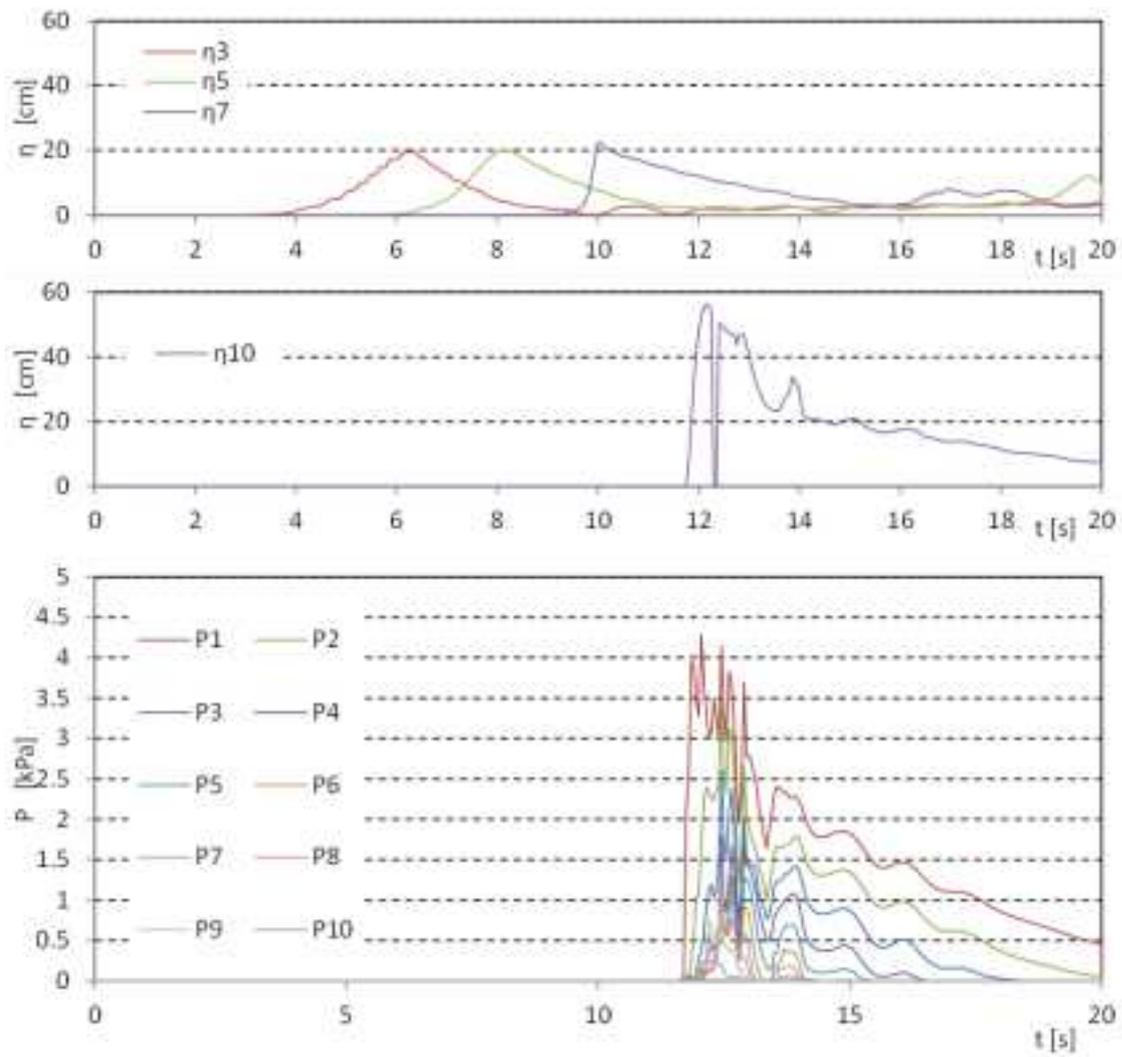


図 III.3-17 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W01, STAR-CD)

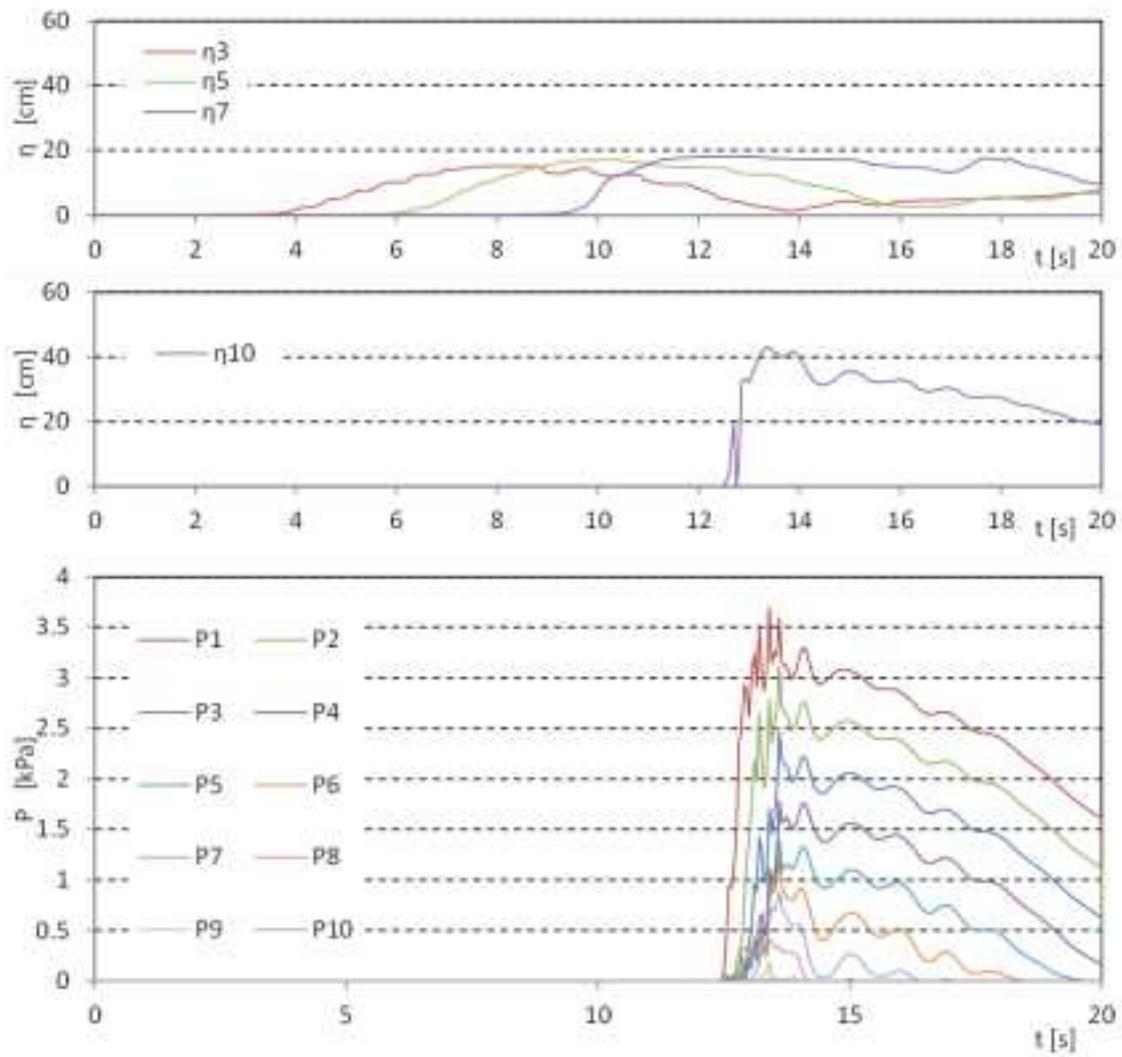


図 III.3-17 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W05, STAR-CD)

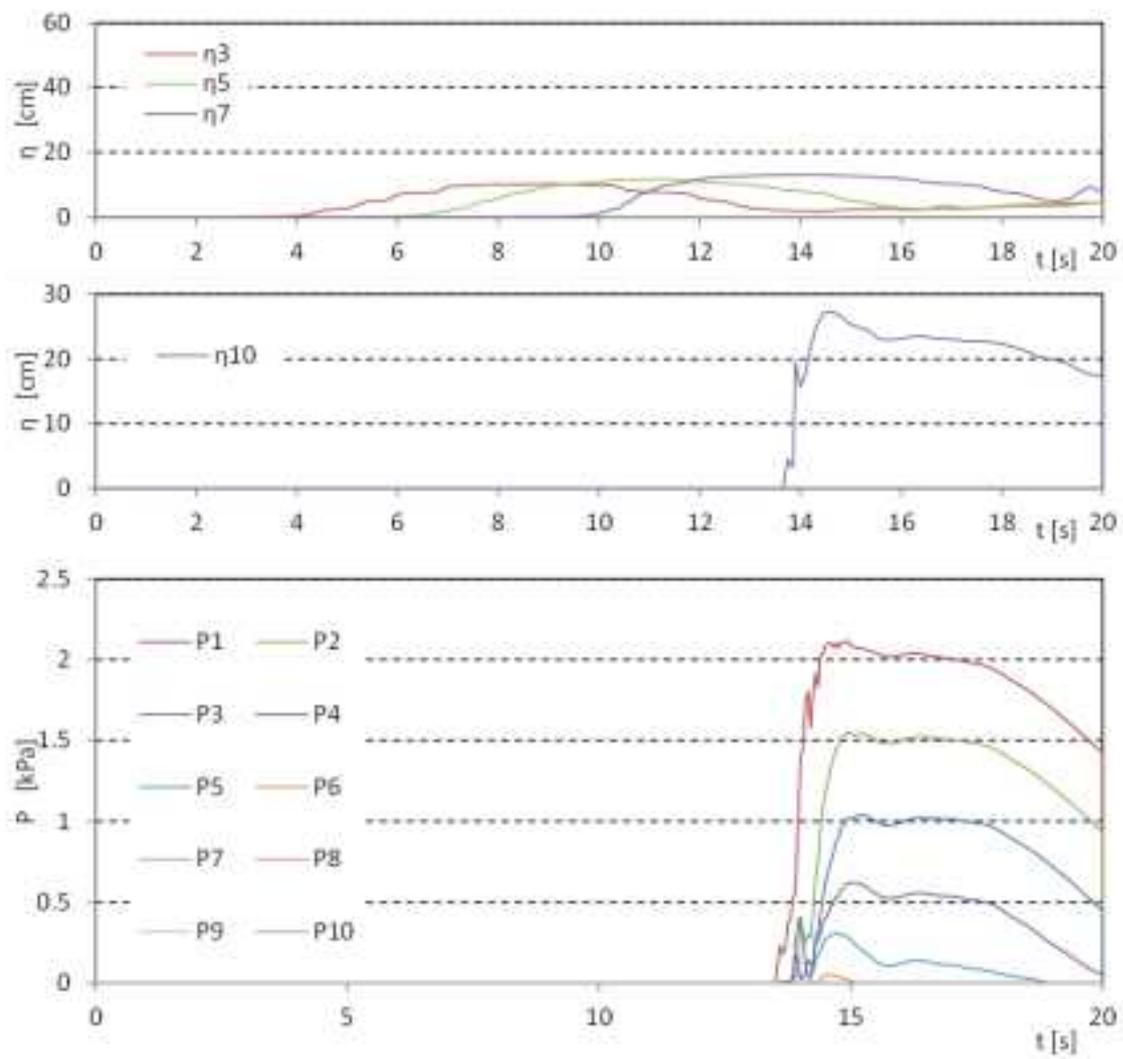


図 III.3-17 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W07, STAR-CD)

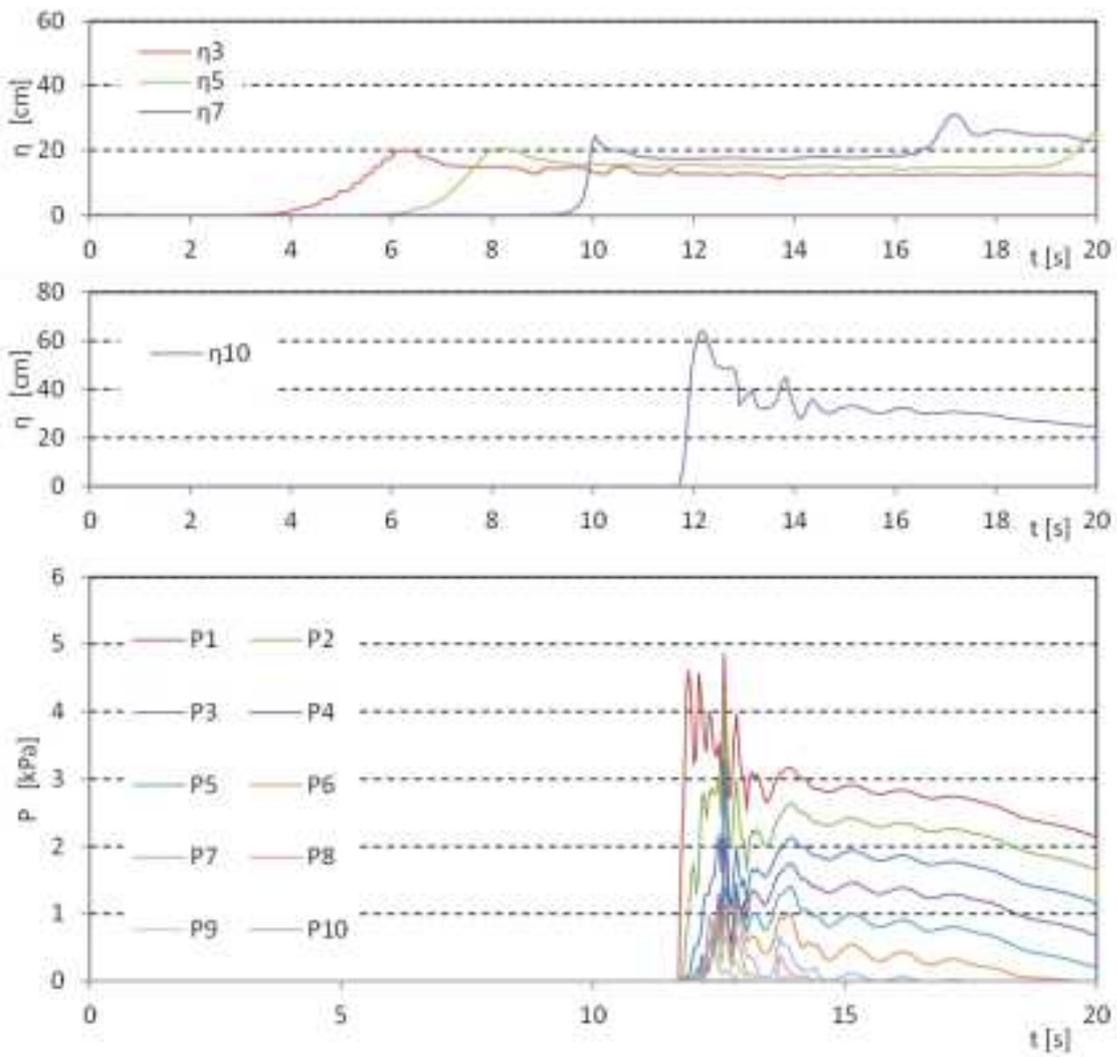


図 III.3-17 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W09, STAR-CD)

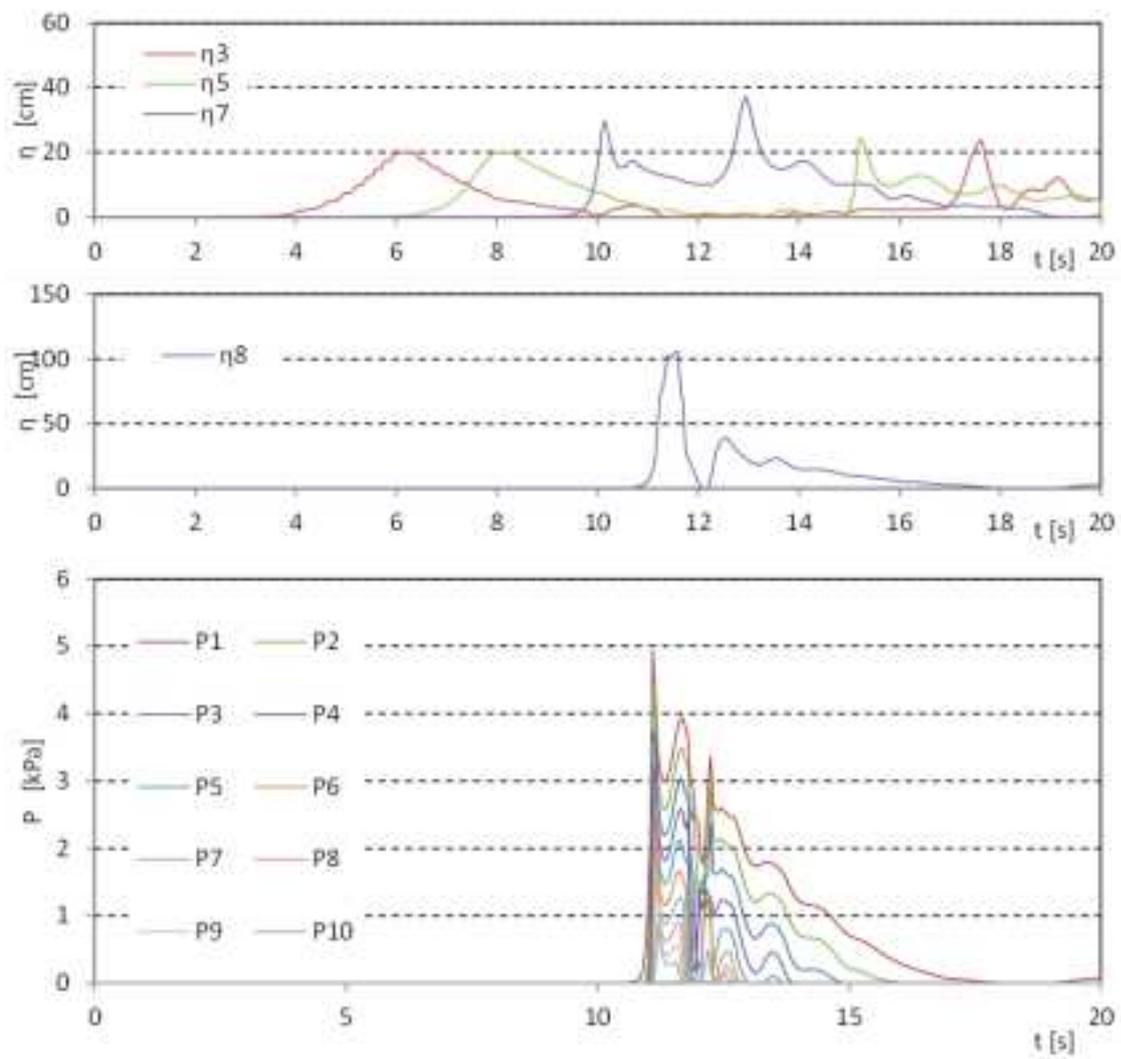


図 III.3-18 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 0m, W01, STAR-CD)

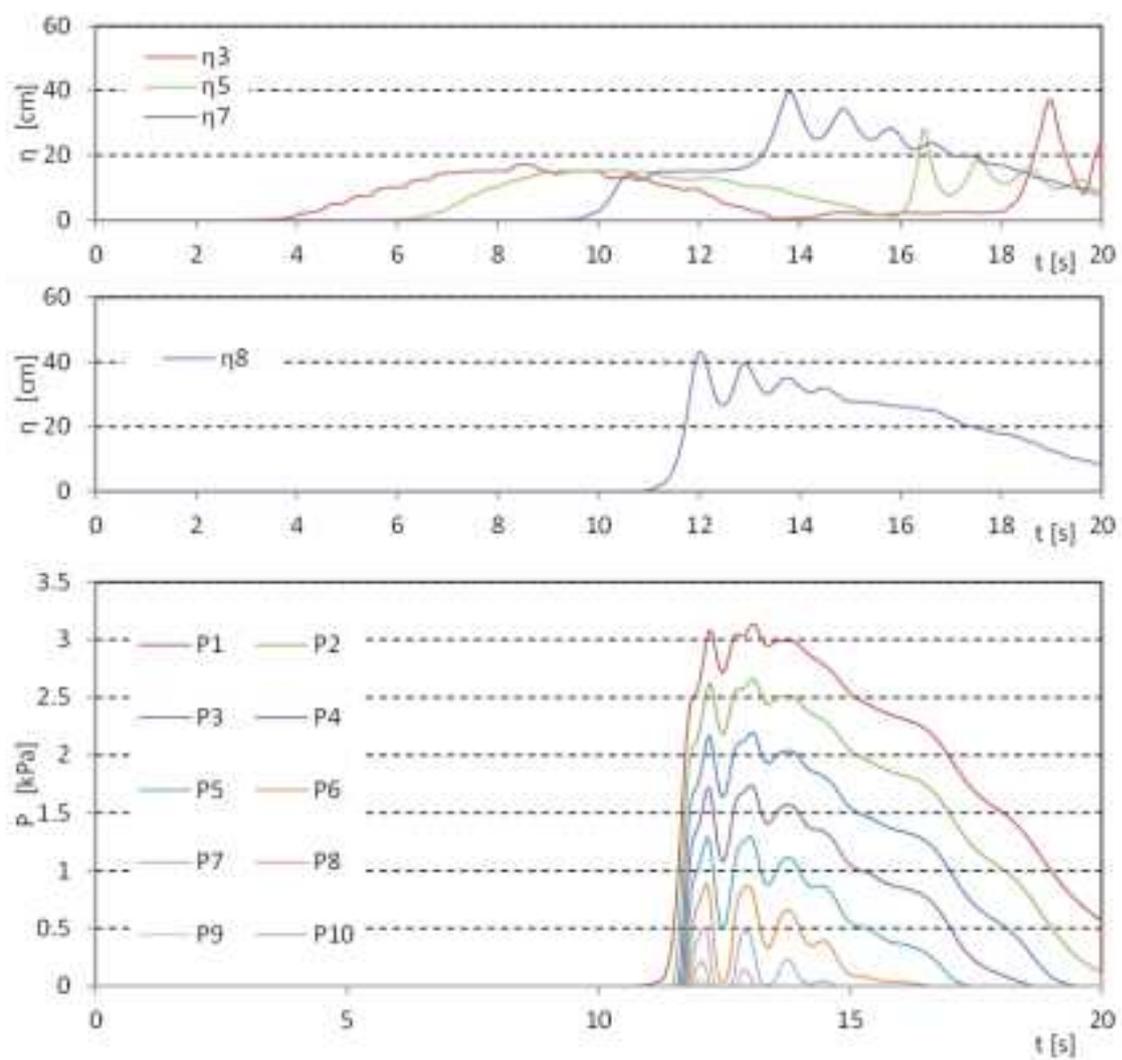


図 III.3-18 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 0m, W05, STAR-CD)

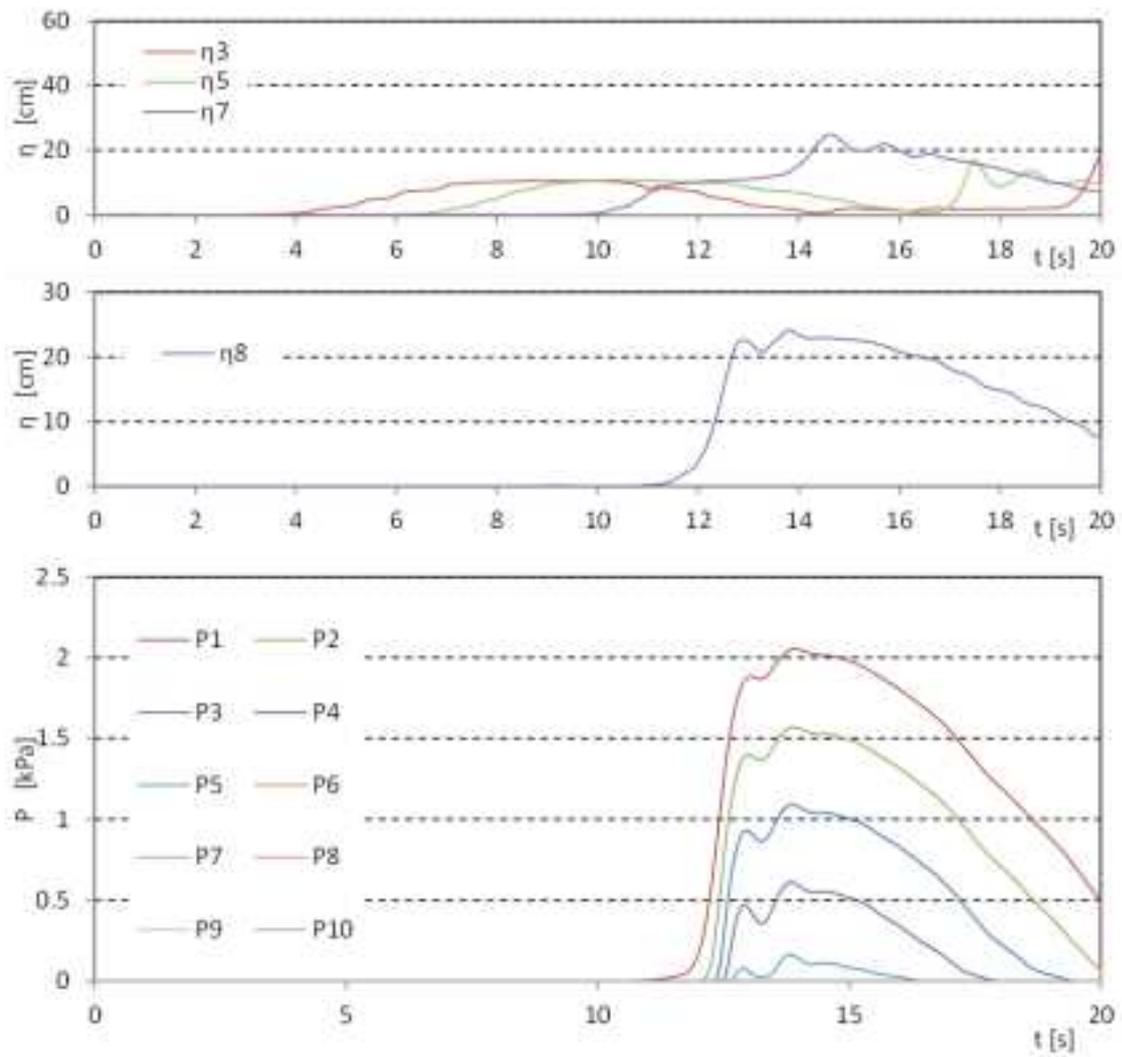


図 III.3-18 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 0m, W07, STAR-CD)

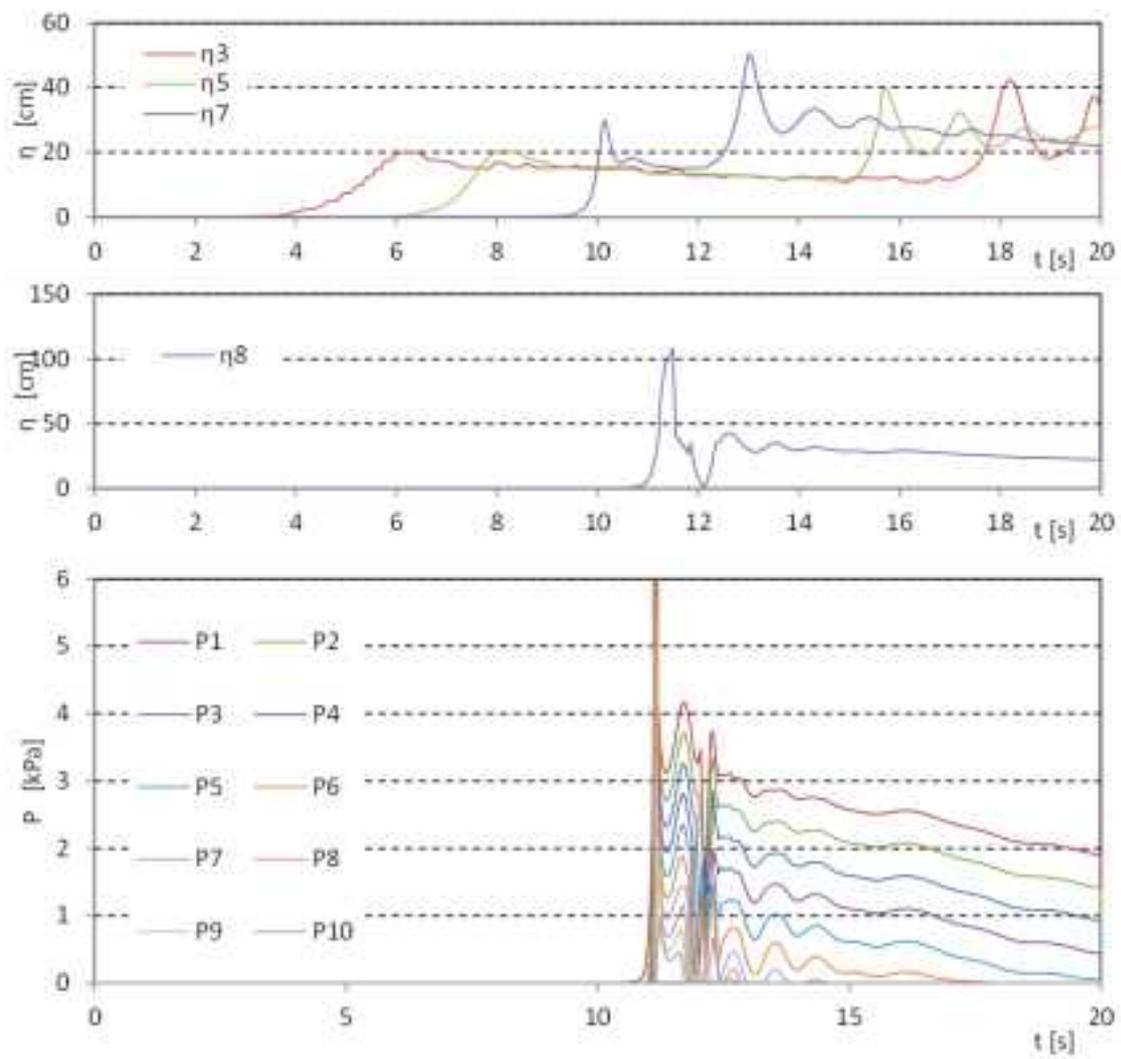


図 III.3-18 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 0m, W09, STAR-CD)

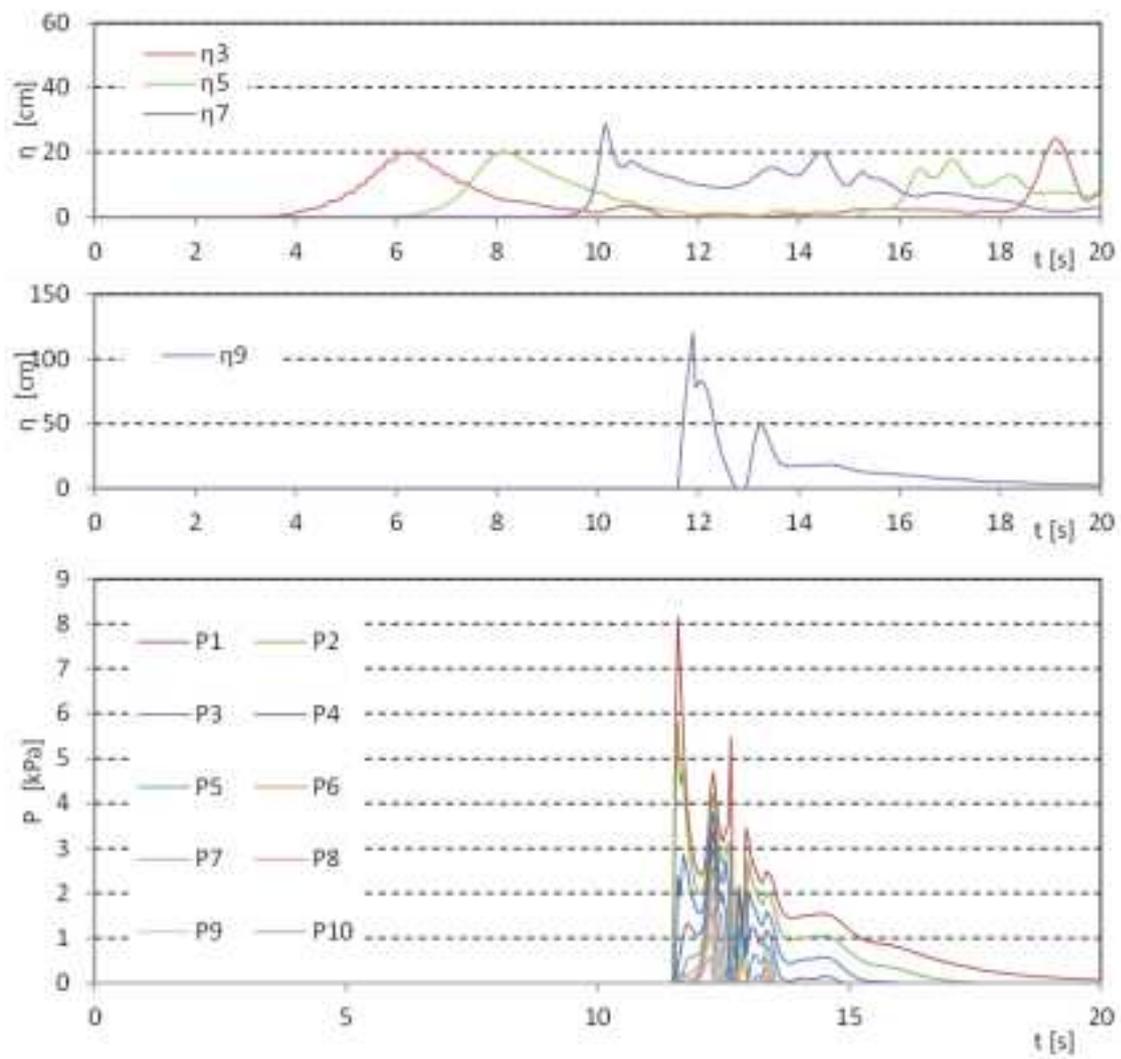


図 III.3-19 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 1.25m, W01, STAR-CD)

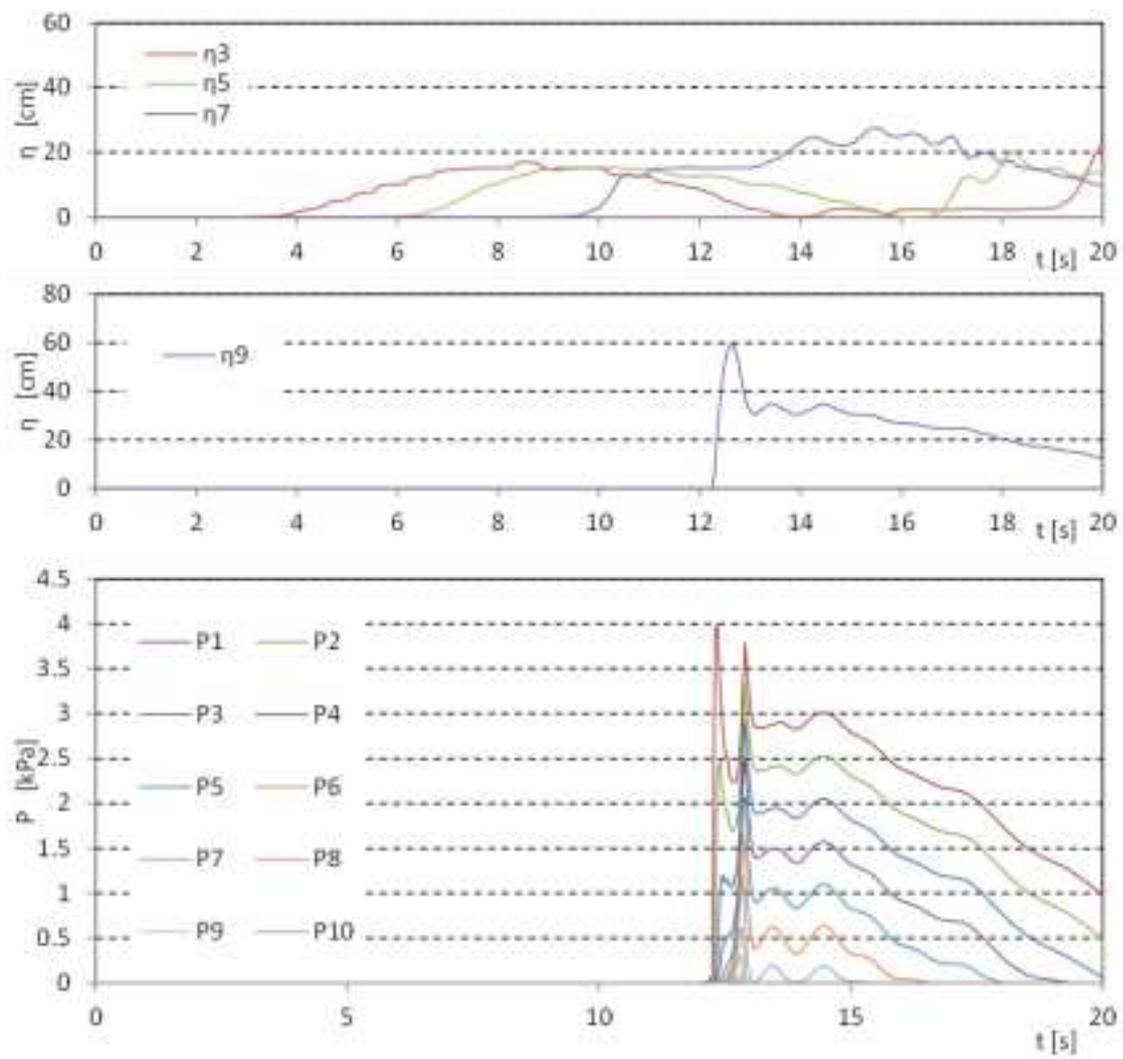


図 III.3-19 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 1.25m, W05, STAR-CD)

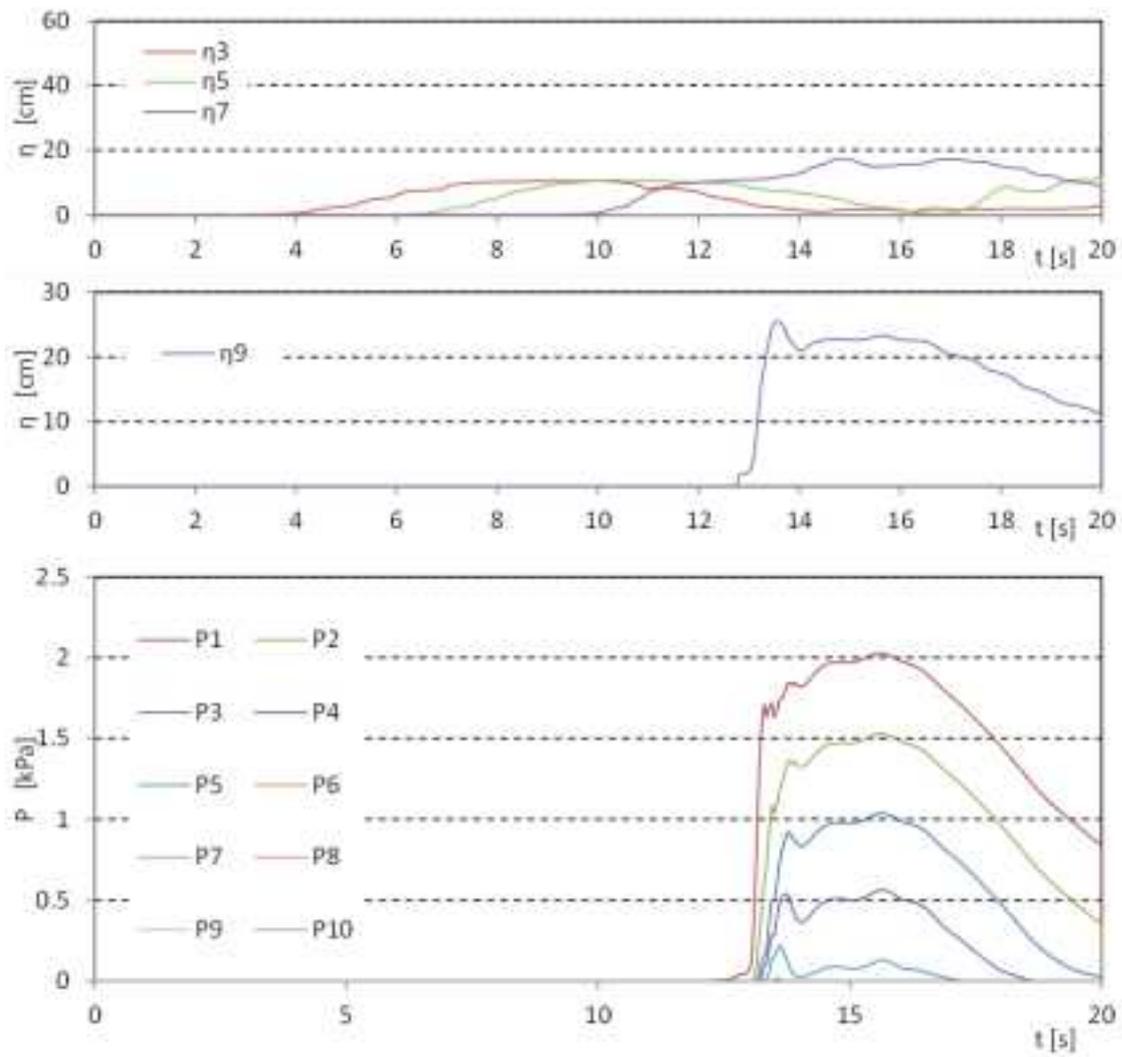


図 III.3-19 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 1.25m, W07, STAR-CD)

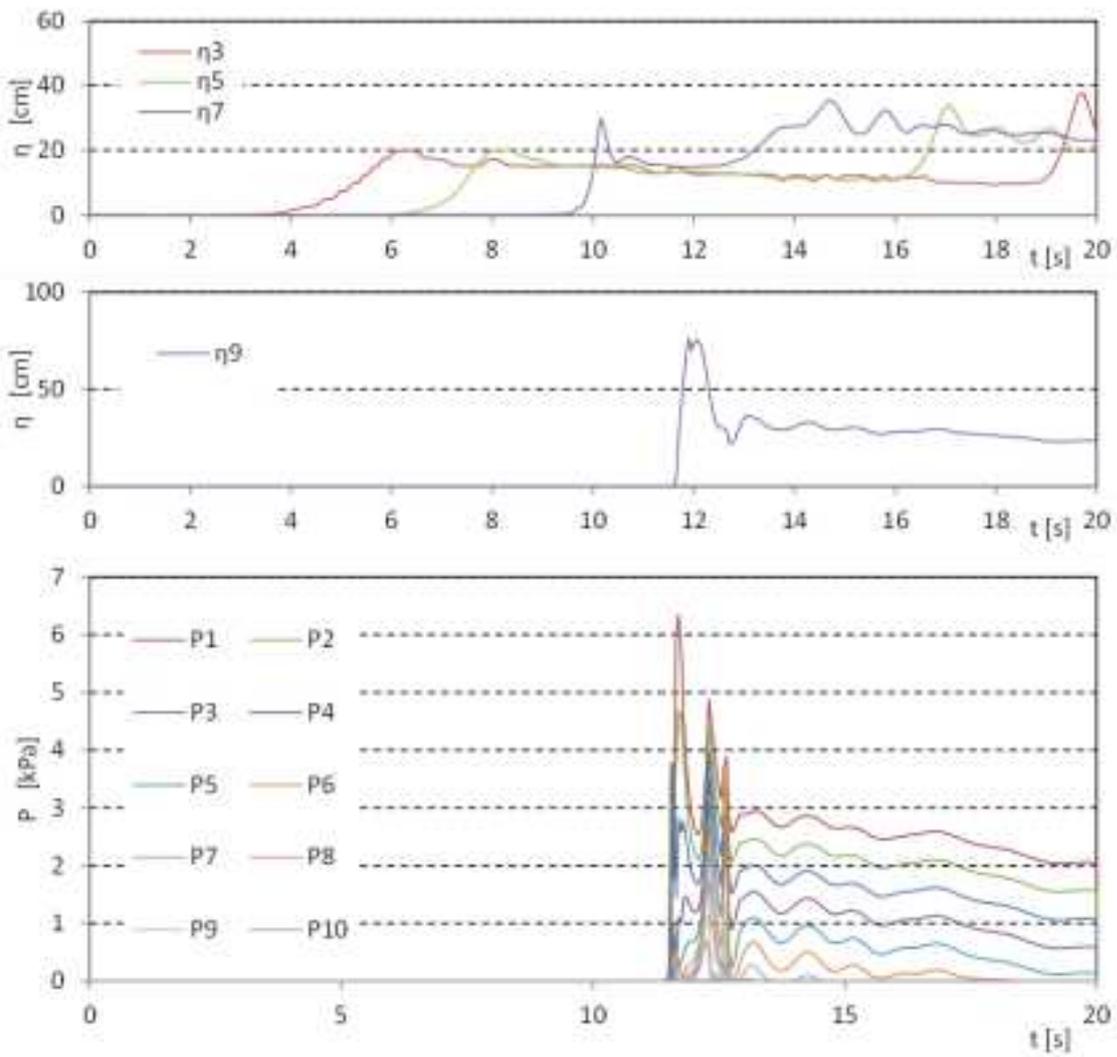


図 III.3-19 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 1.25m, W09, STAR-CD)

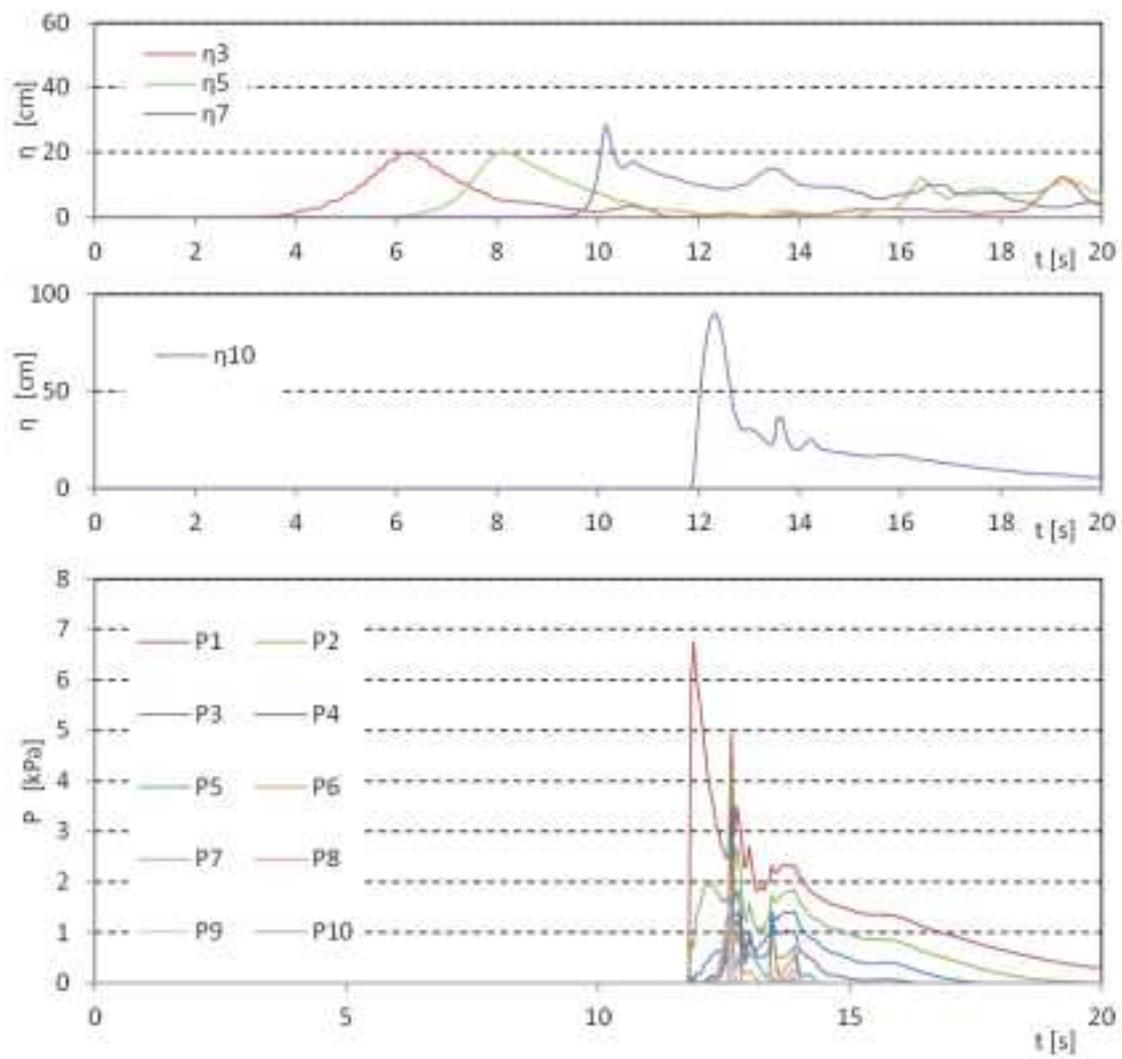


図 III.3-20 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 2.5m, W01, STAR-CD)

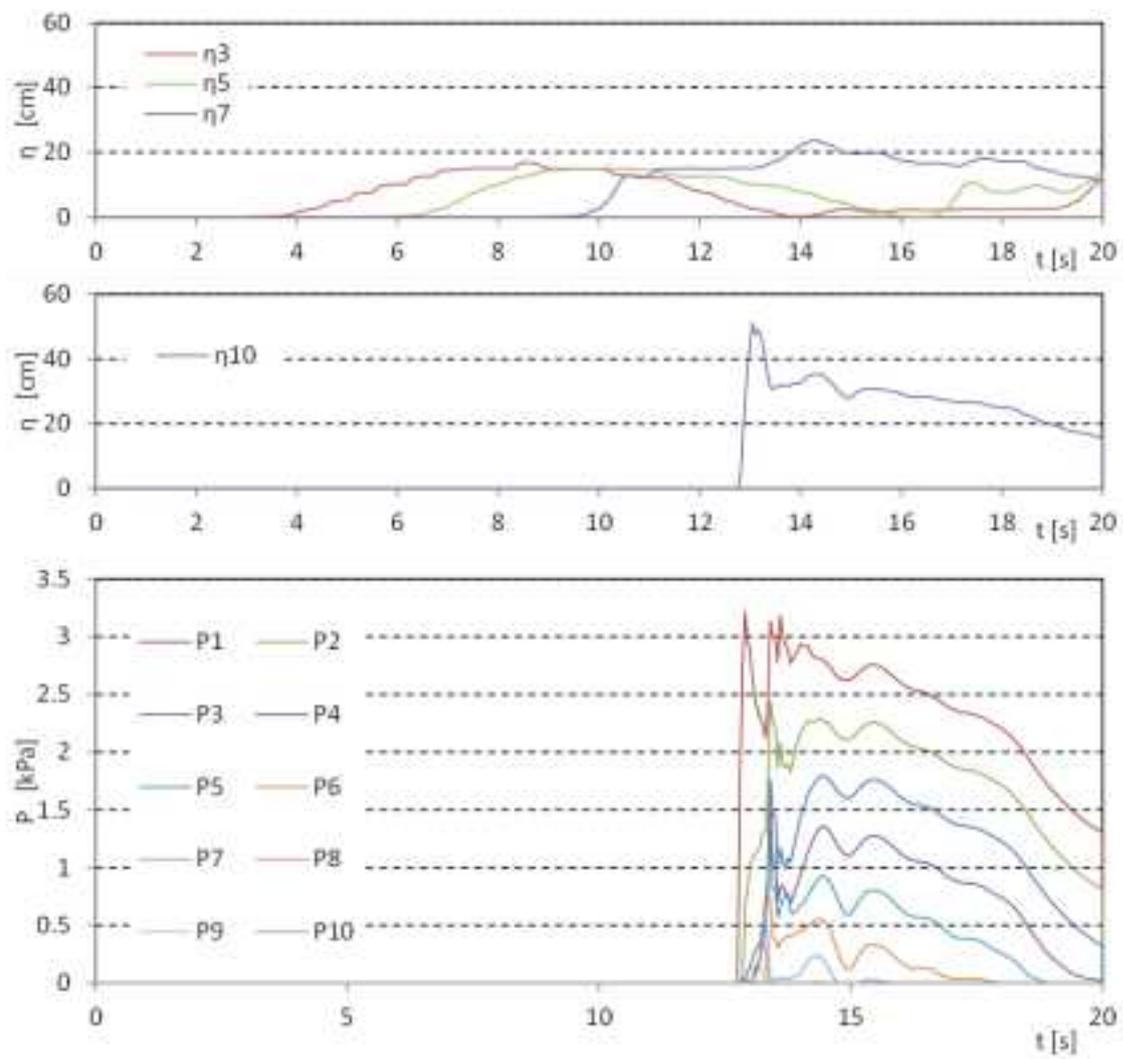


図 III.3-20 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 2.5m, W05, STAR-CD)

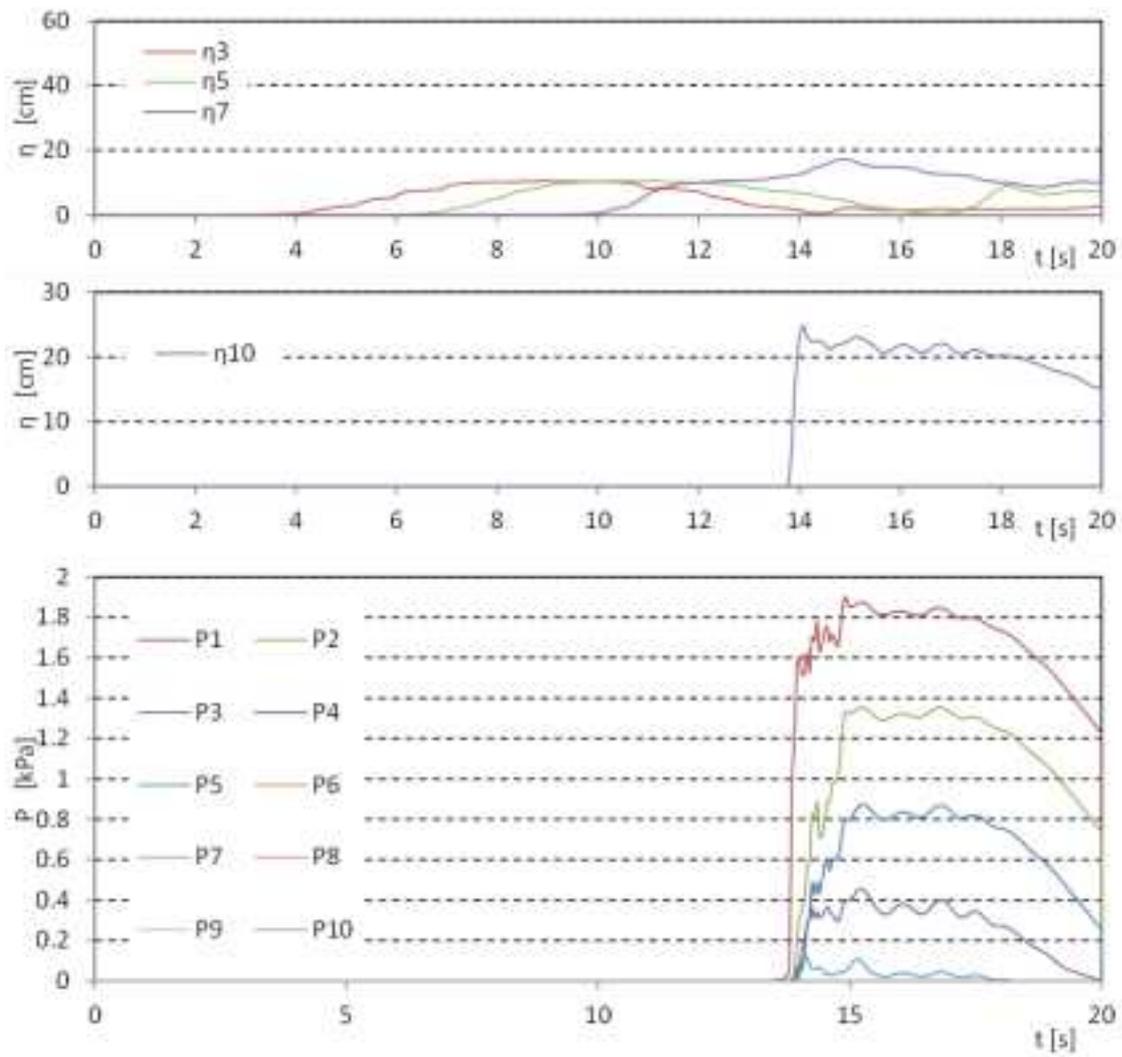


図 III.3-20 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 2.5m, W07, STAR-CD)

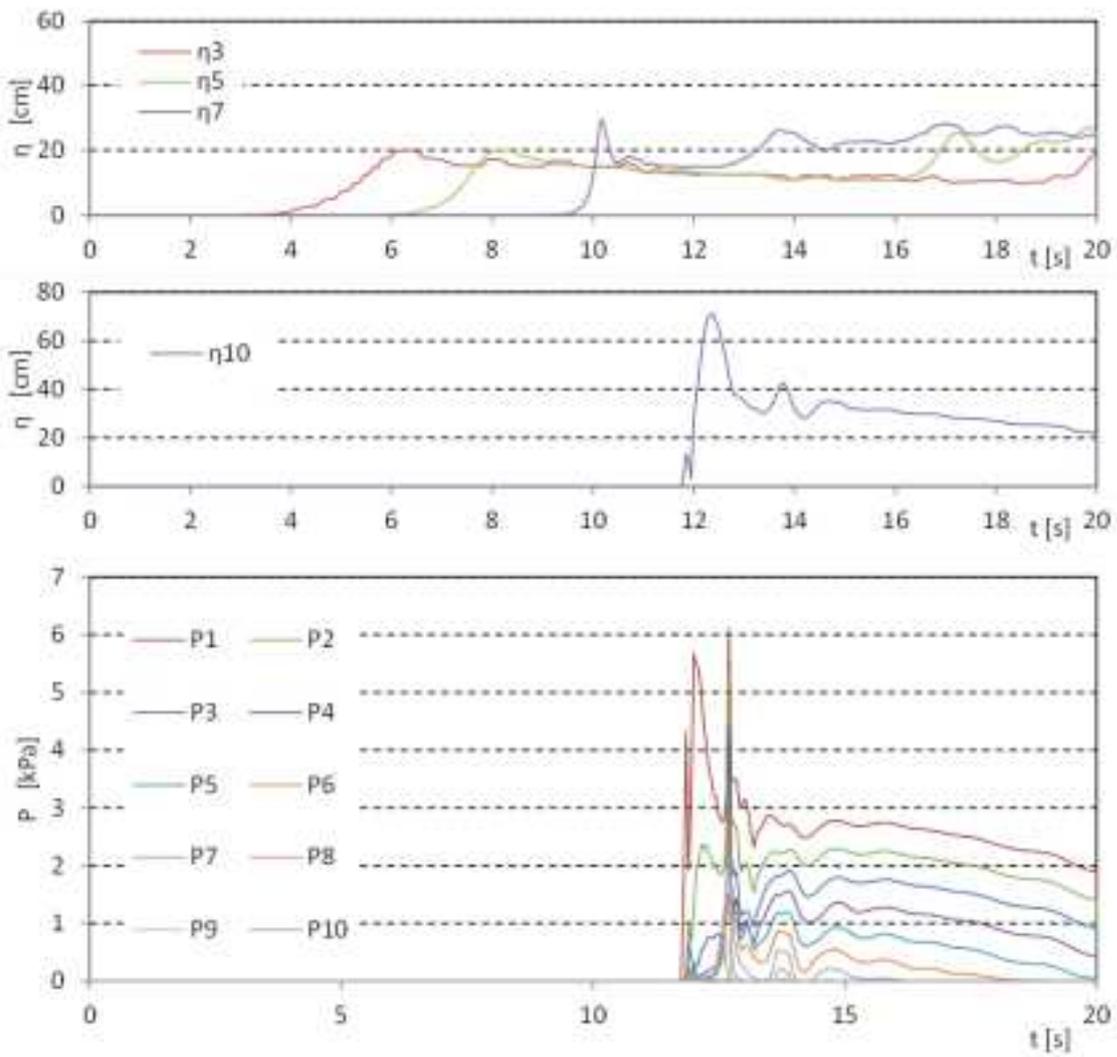


図 III.3-20 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 2.5m, W09, STAR-CD)

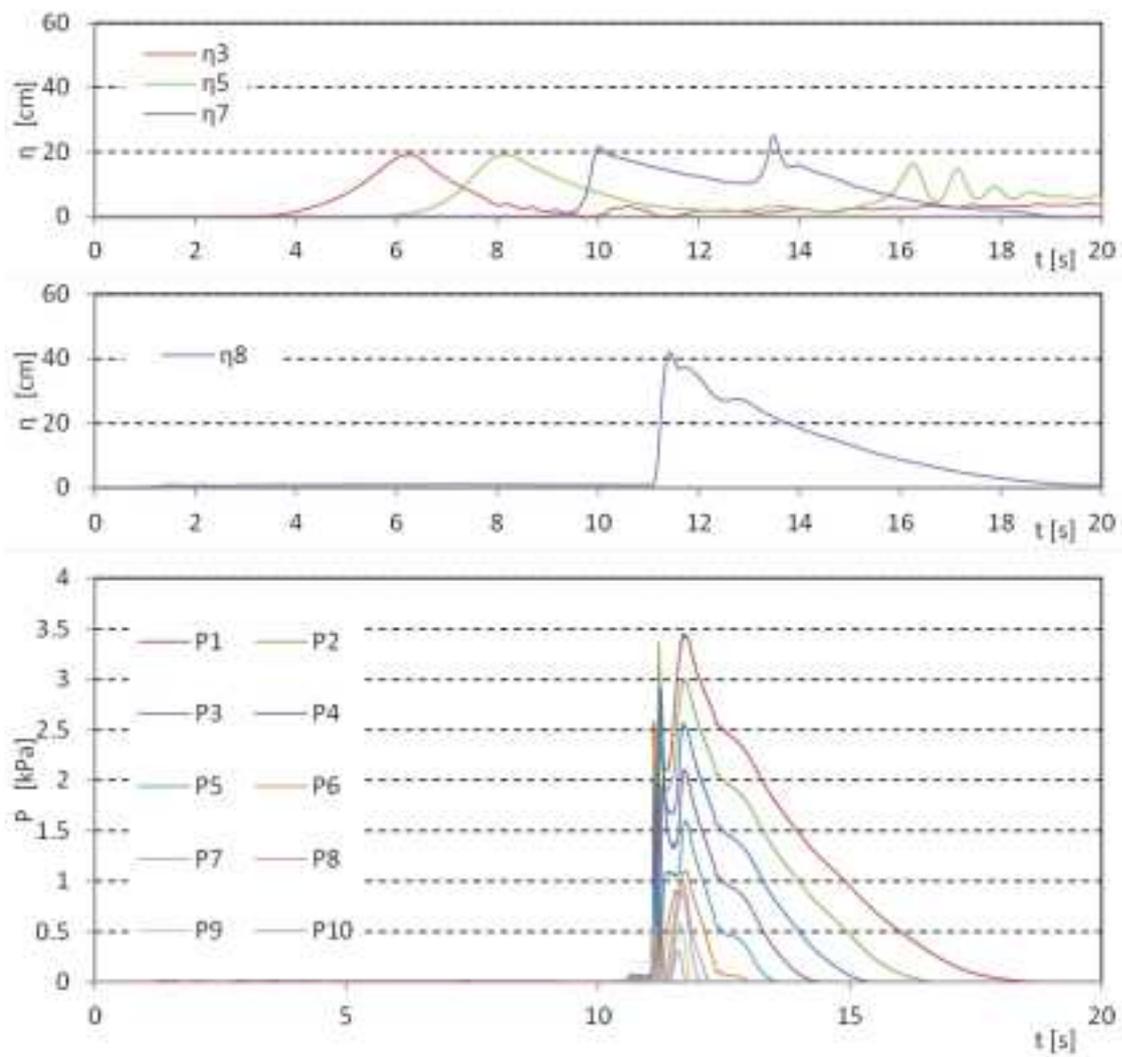


図 III.3-21 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 0m, W01, OpenFOAM)

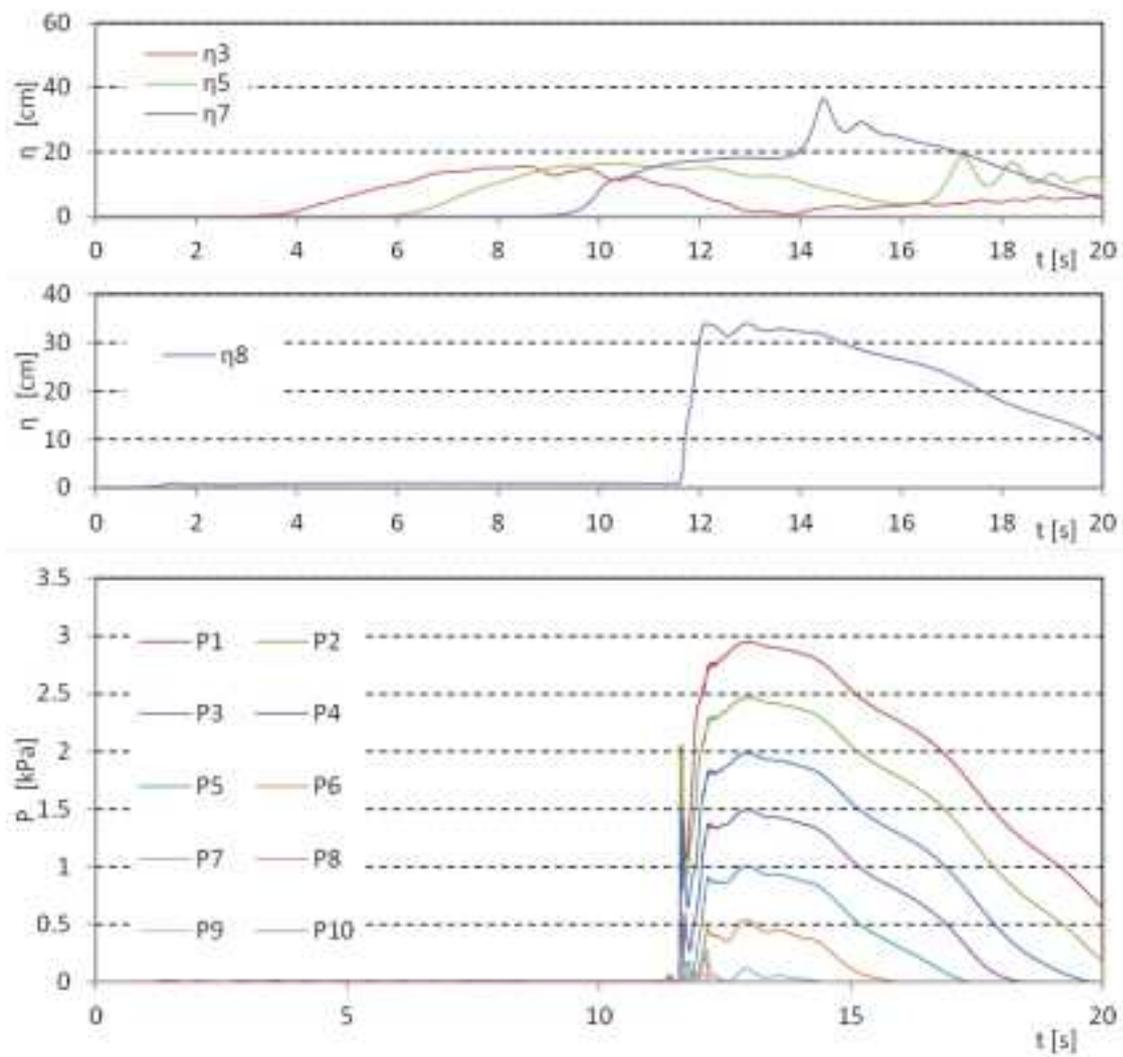


図 III.3-21 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 0m, W05, OpenFOAM)

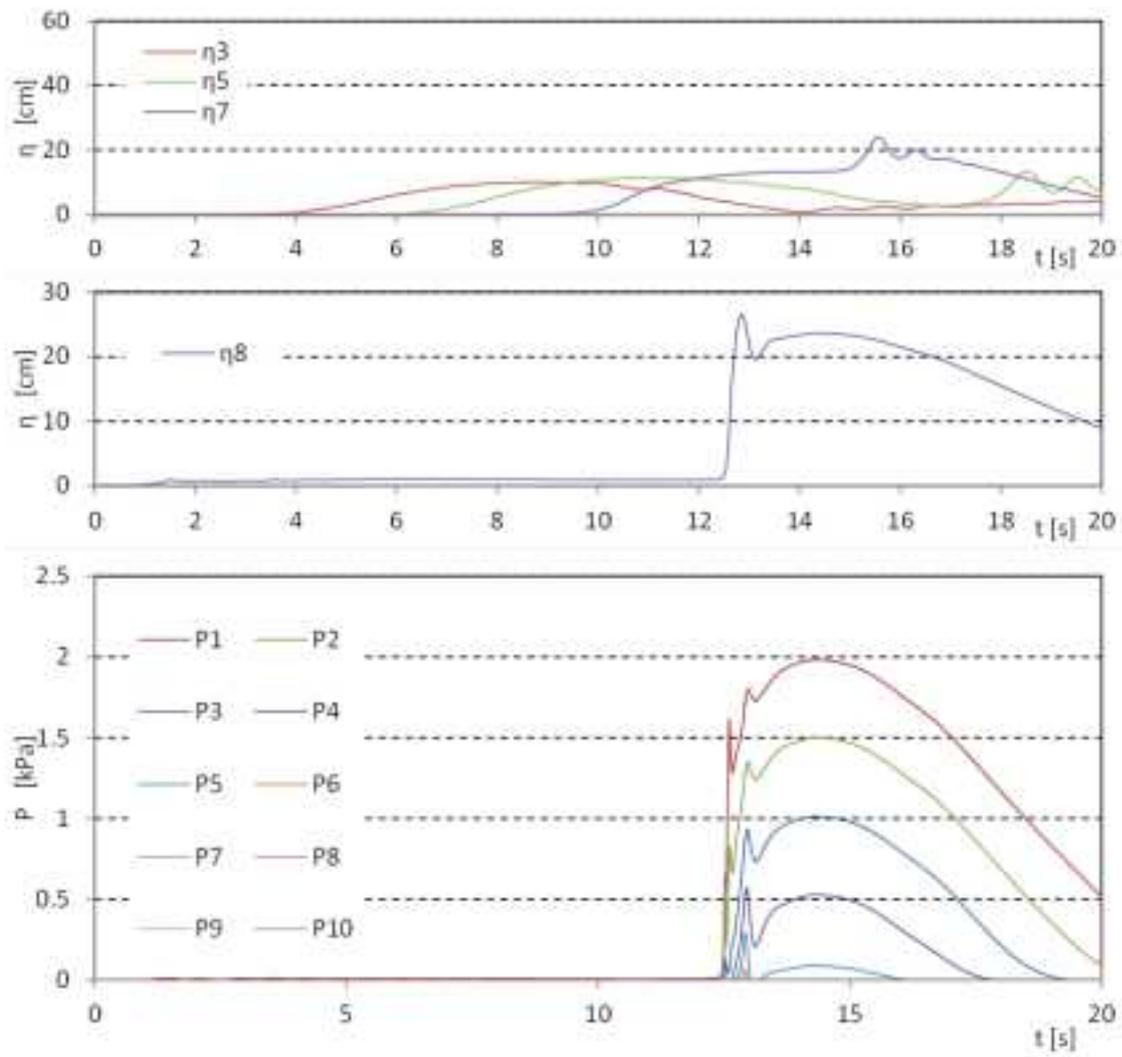


図 III.3-21 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 0m, W07, OpenFOAM)

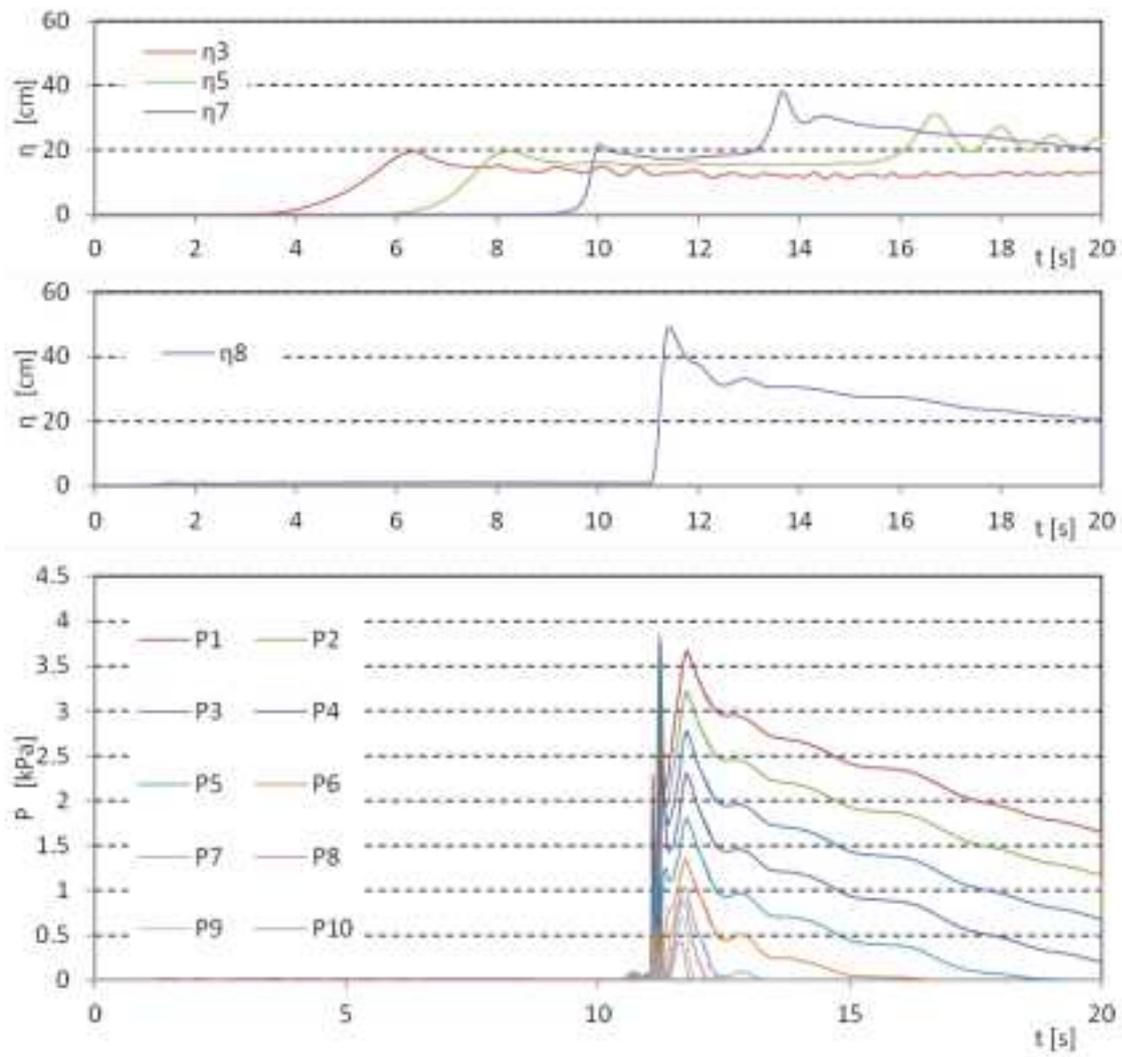


図 III.3-21 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 0m, W09, OpenFOAM)

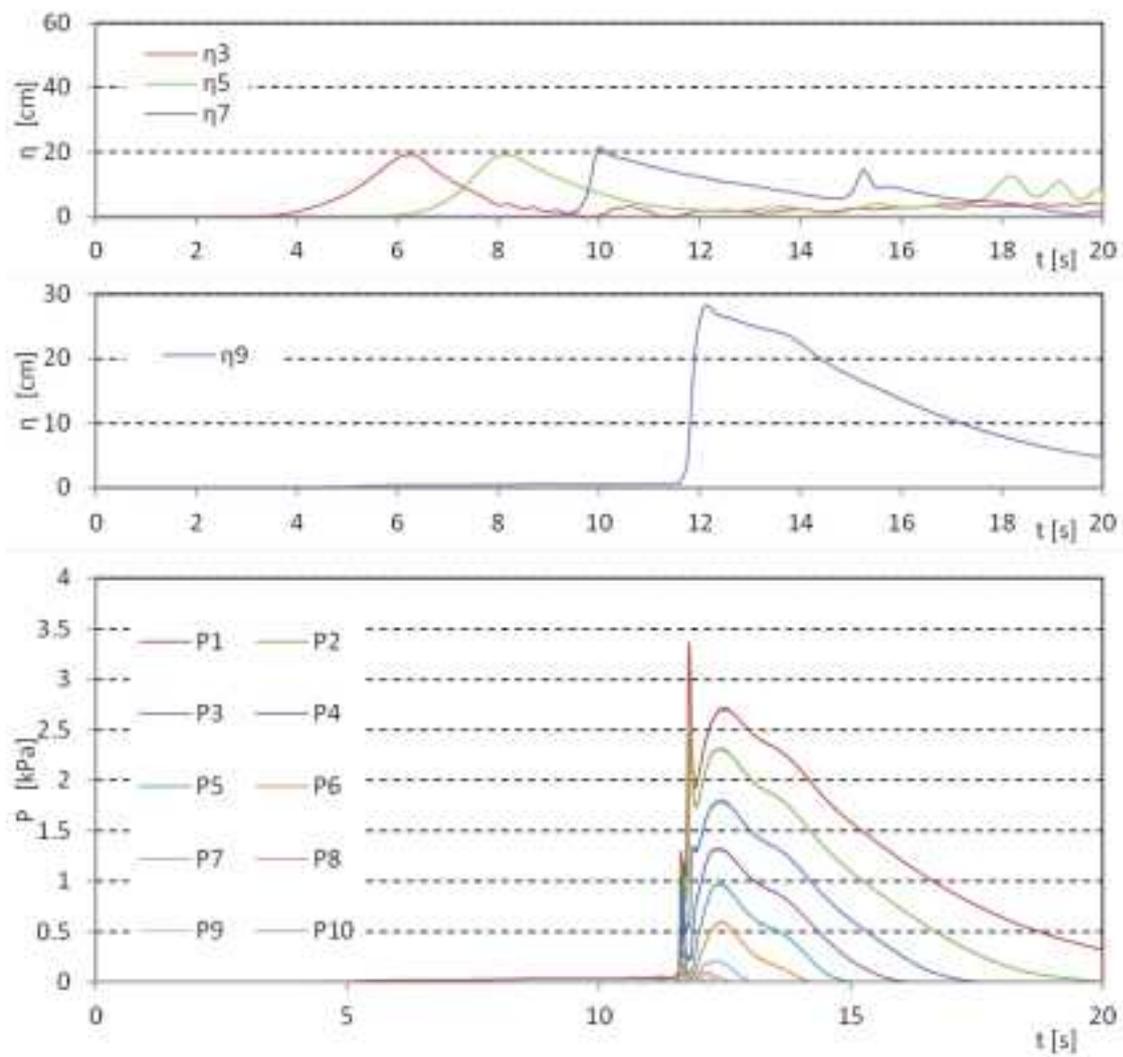


図 III.3-22 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W01, OpenFOAM)

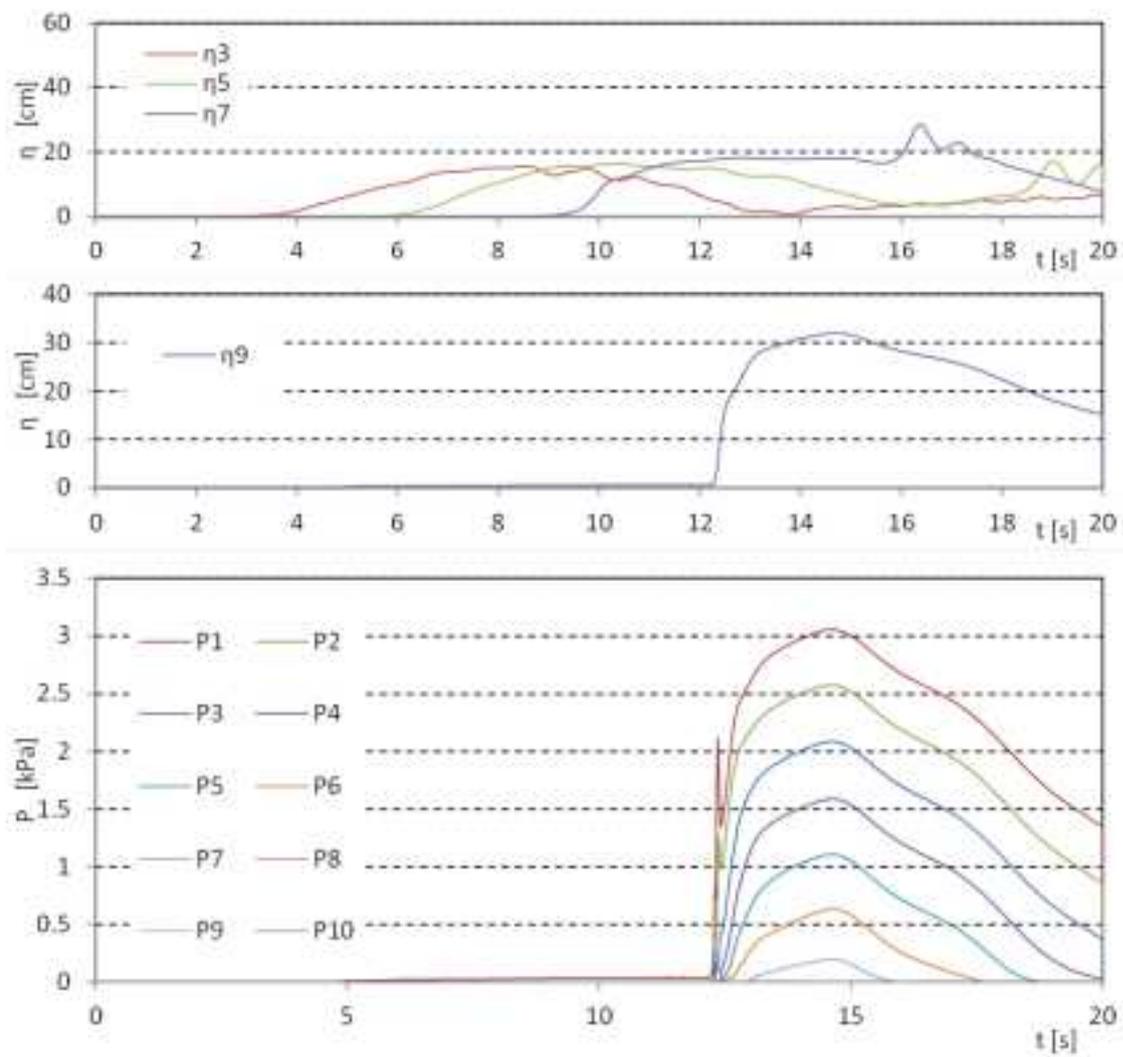


図 III.3-22 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W05, OpenFOAM)

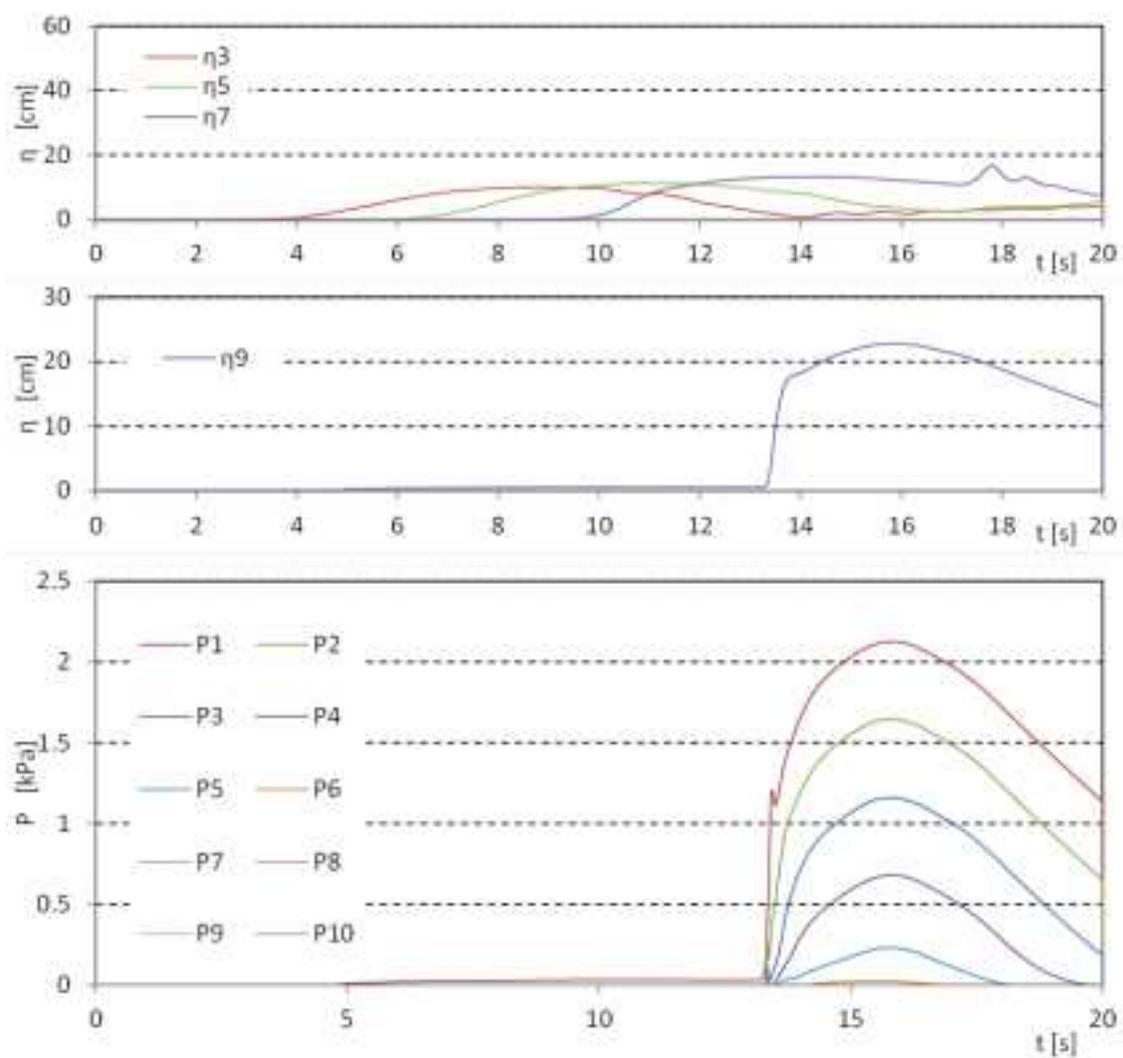


図 III.3-22 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W07, OpenFOAM)

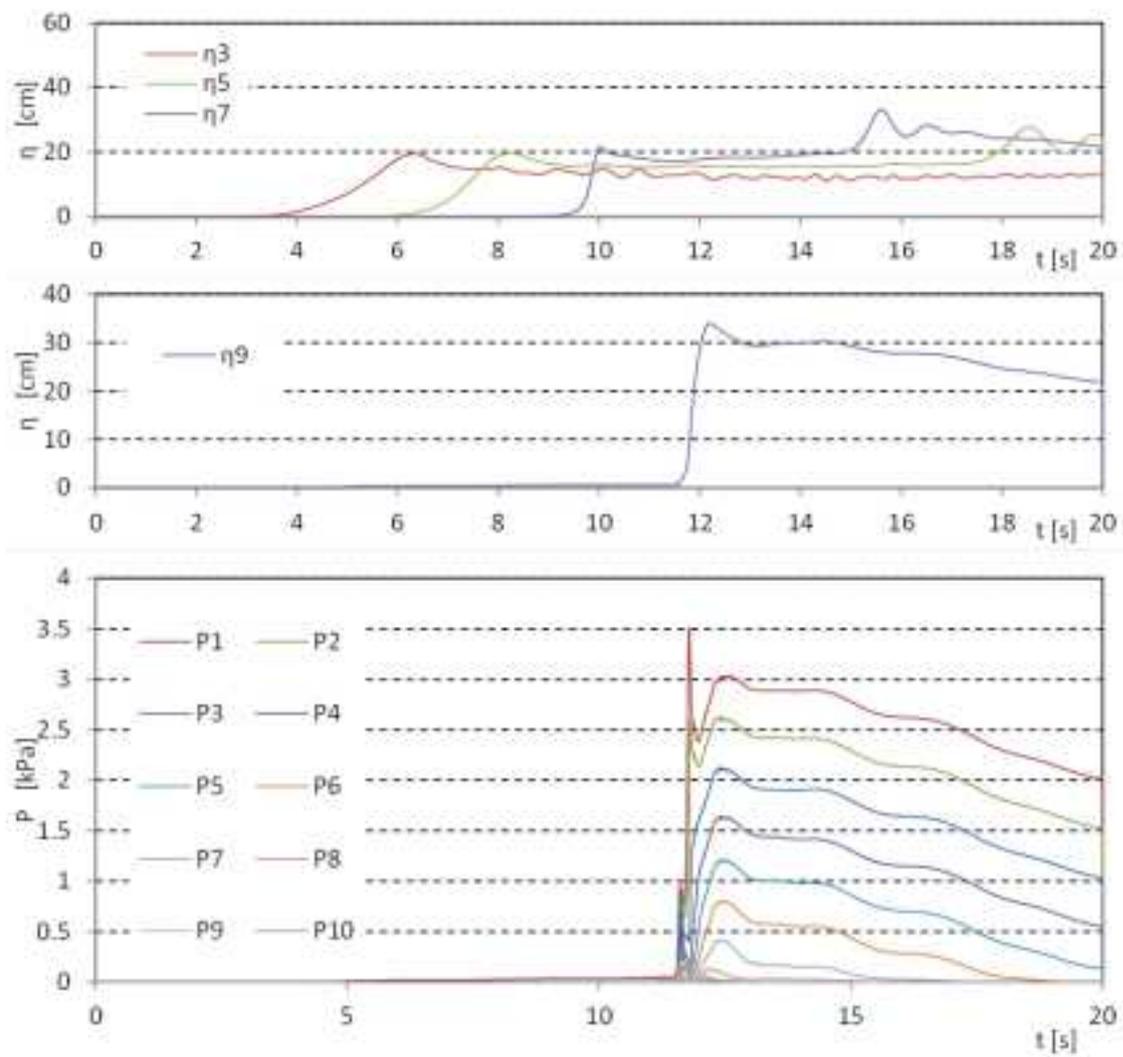


図 III.3-22 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 1.25m, W09, OpenFOAM)

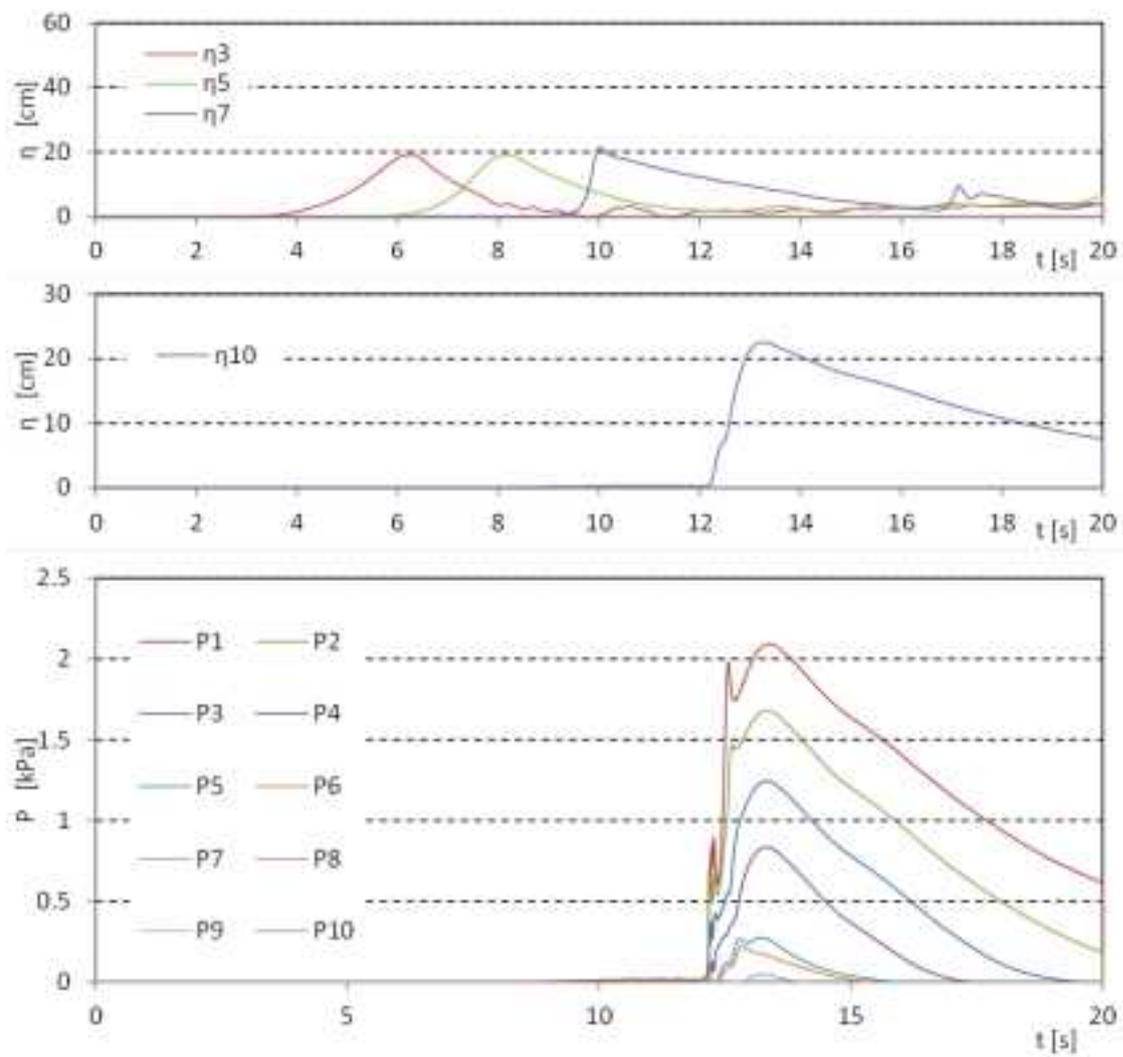


図 III.3-23 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W01, OpenFOAM)

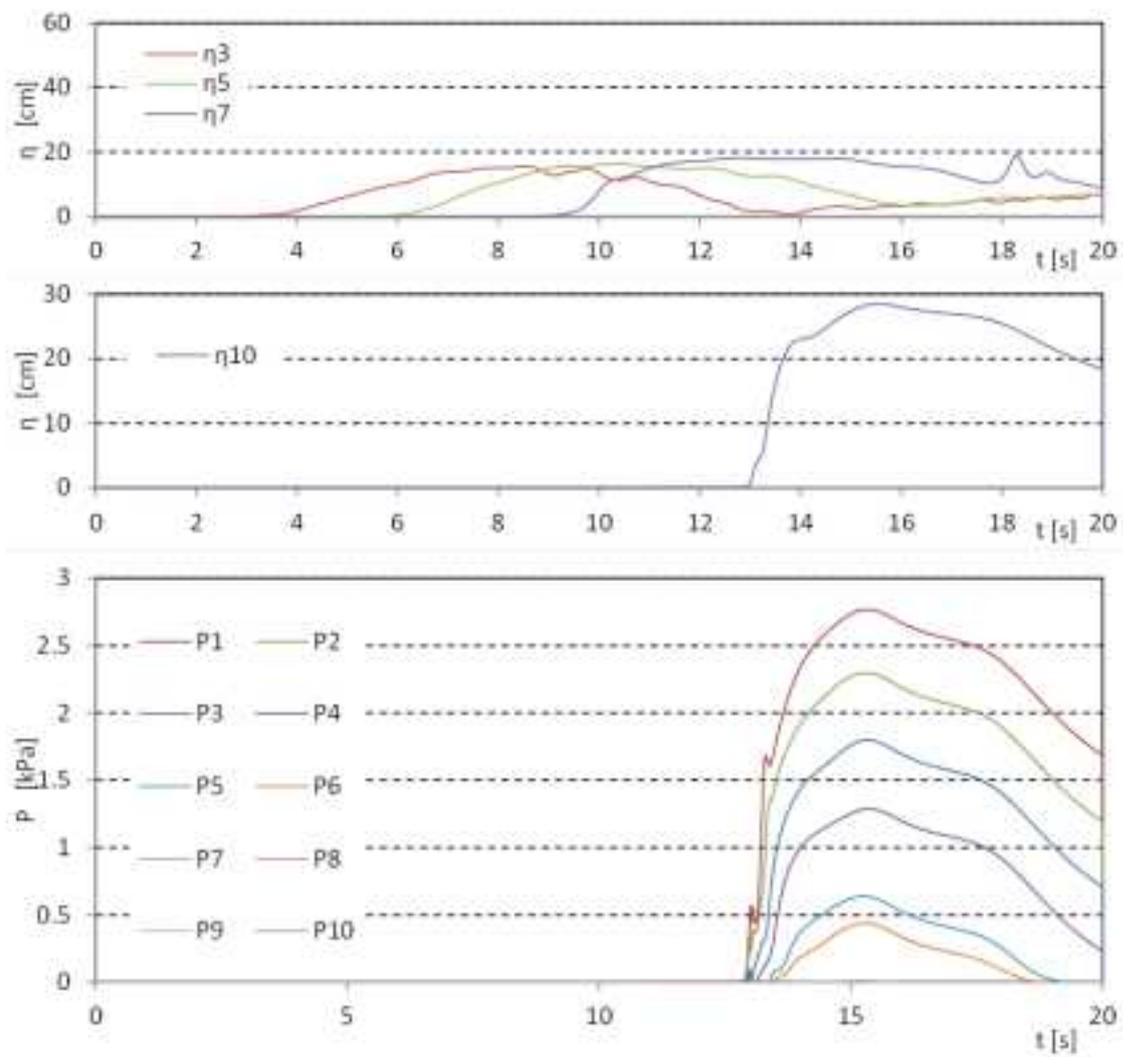


図 III.3-23 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W05, OpenFOAM)

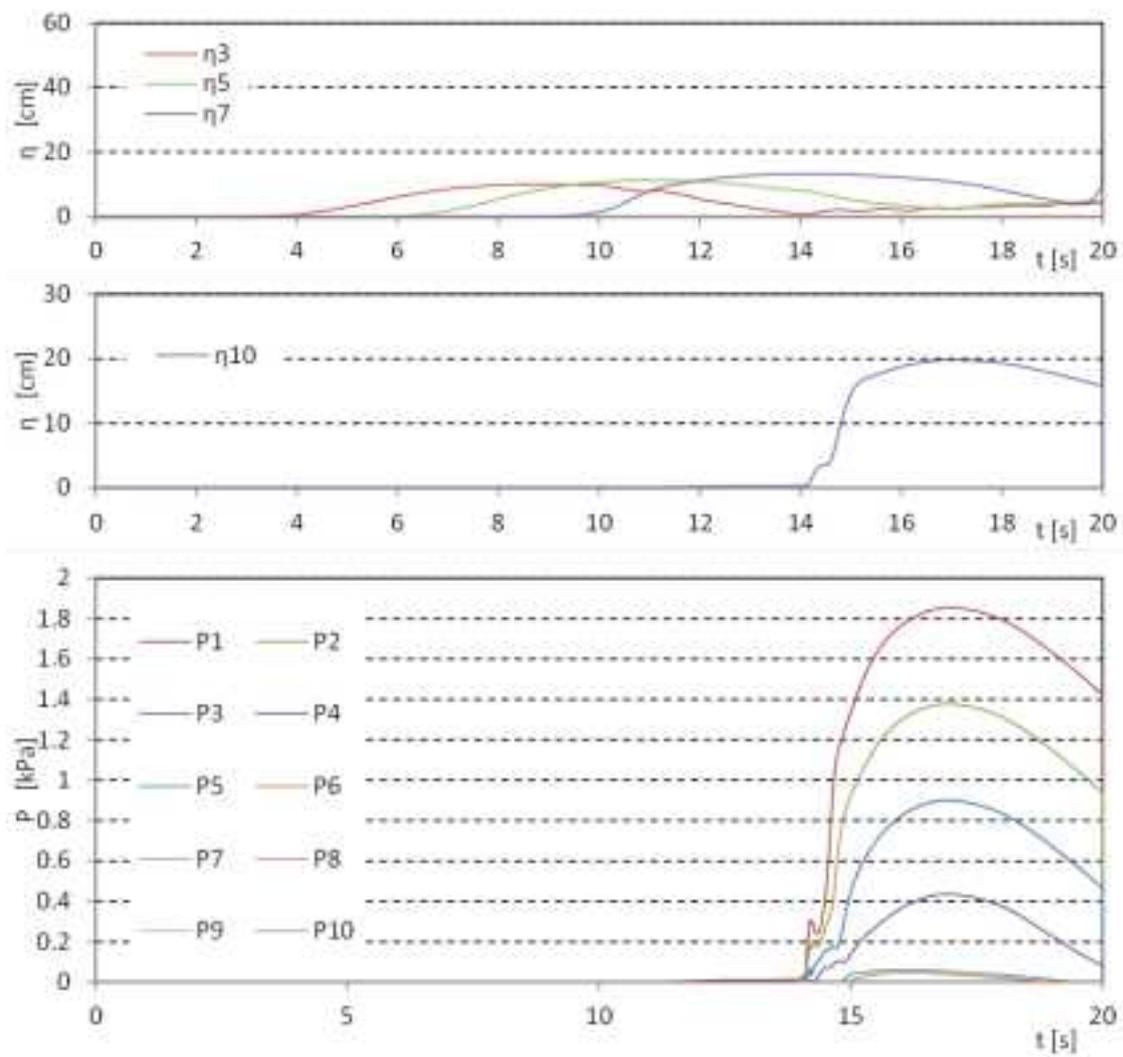


図 III.3-23 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W07, OpenFOAM)

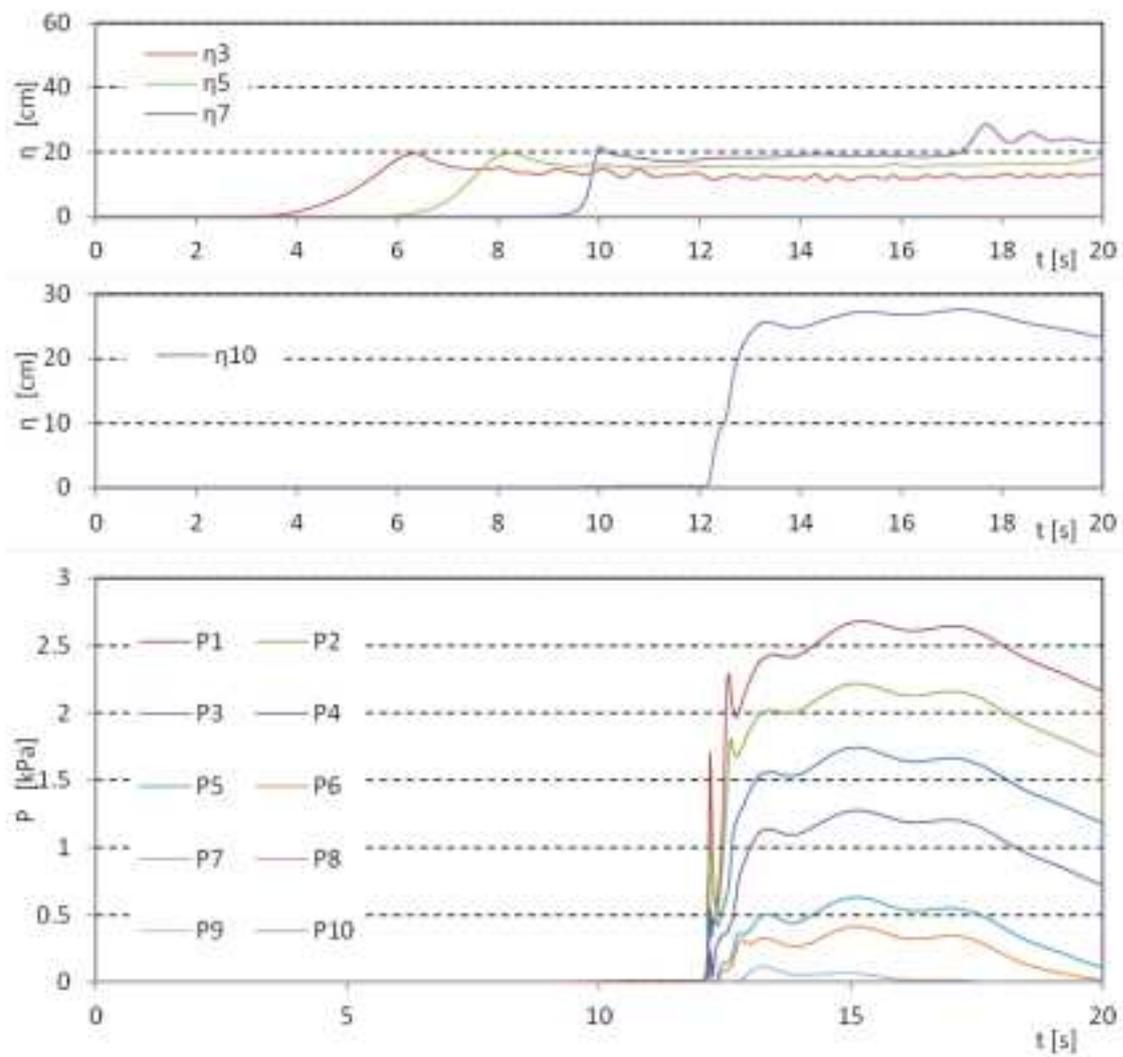


図 III.3-23 波力/波圧試験の解析結果 (単純勾配, 設置位置 2.5m, W09, OpenFOAM)

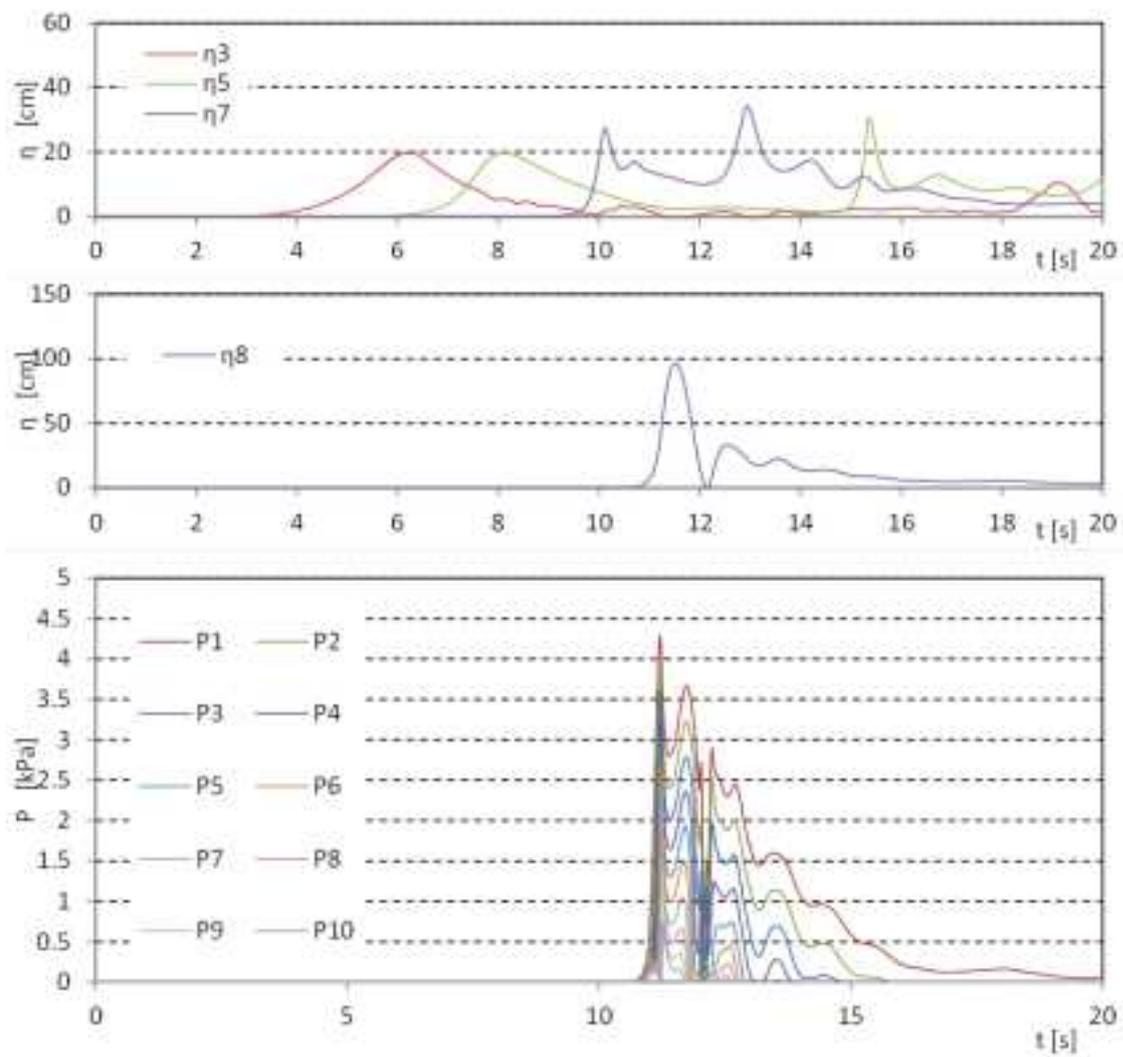


図 III.3-24 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 0m, W01, OpenFOAM)

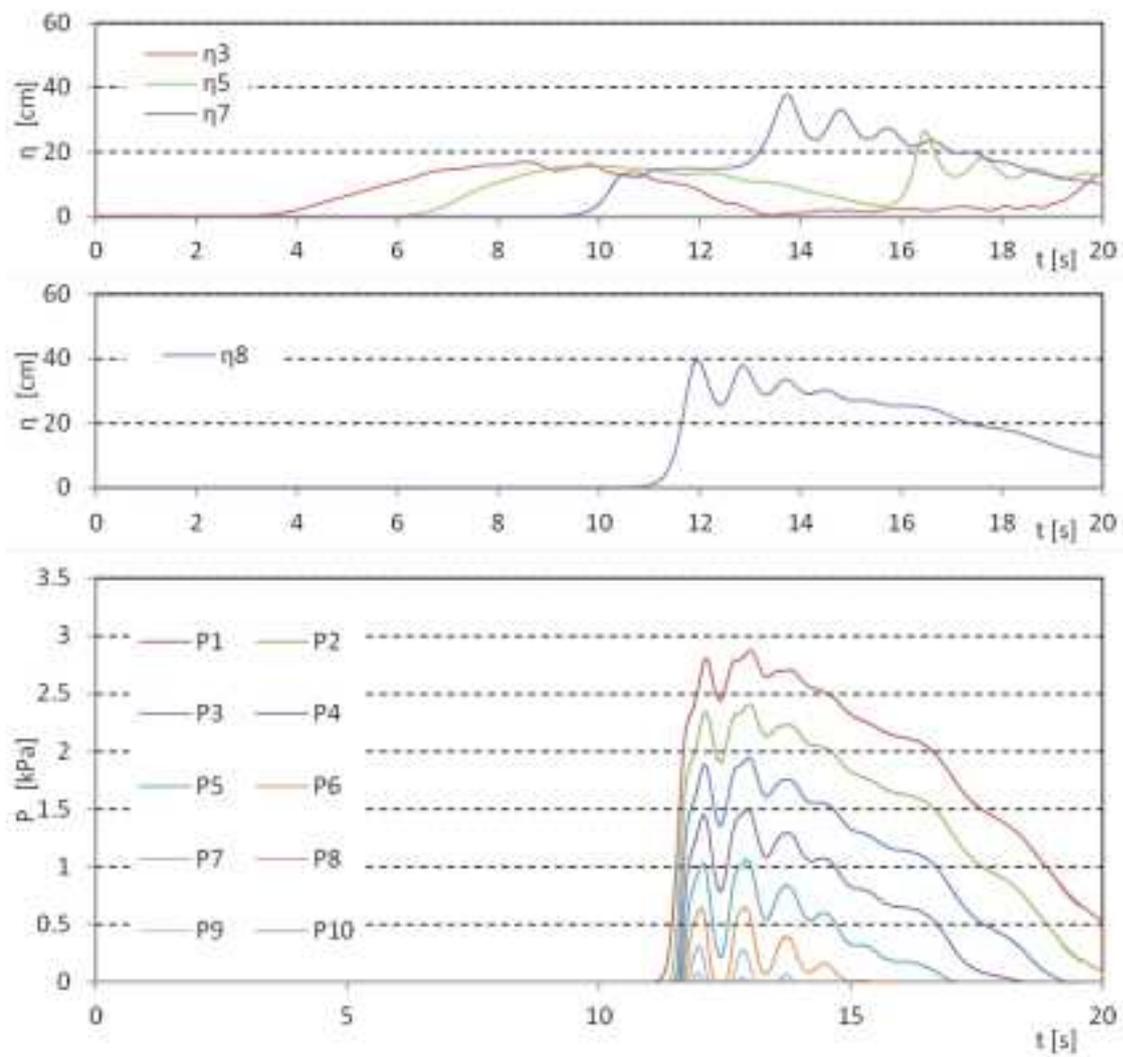


図 III.3-24 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 0m, W05, OpenFOAM)

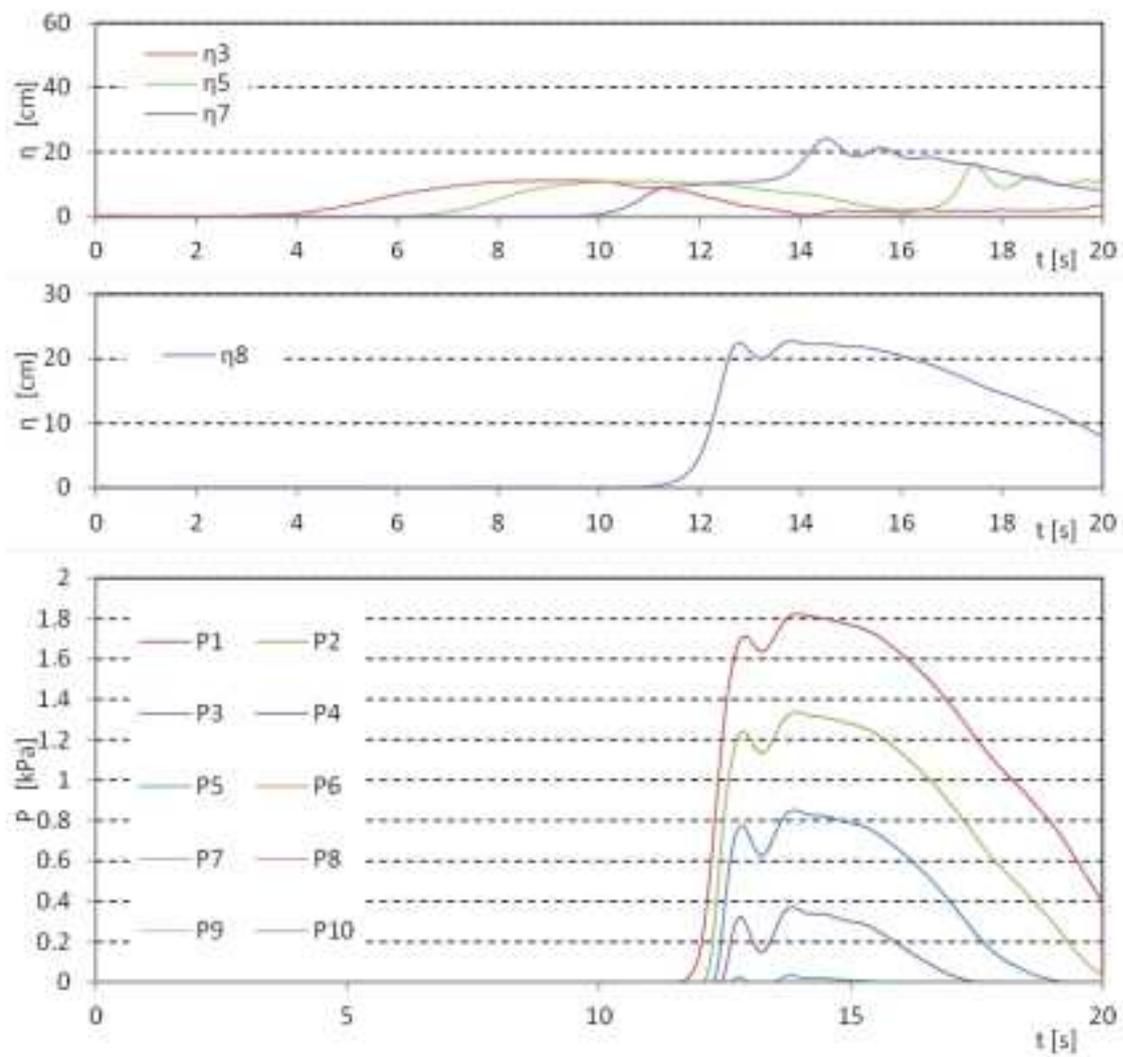


図 III.3-24 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 0m, W07, OpenFOAM)

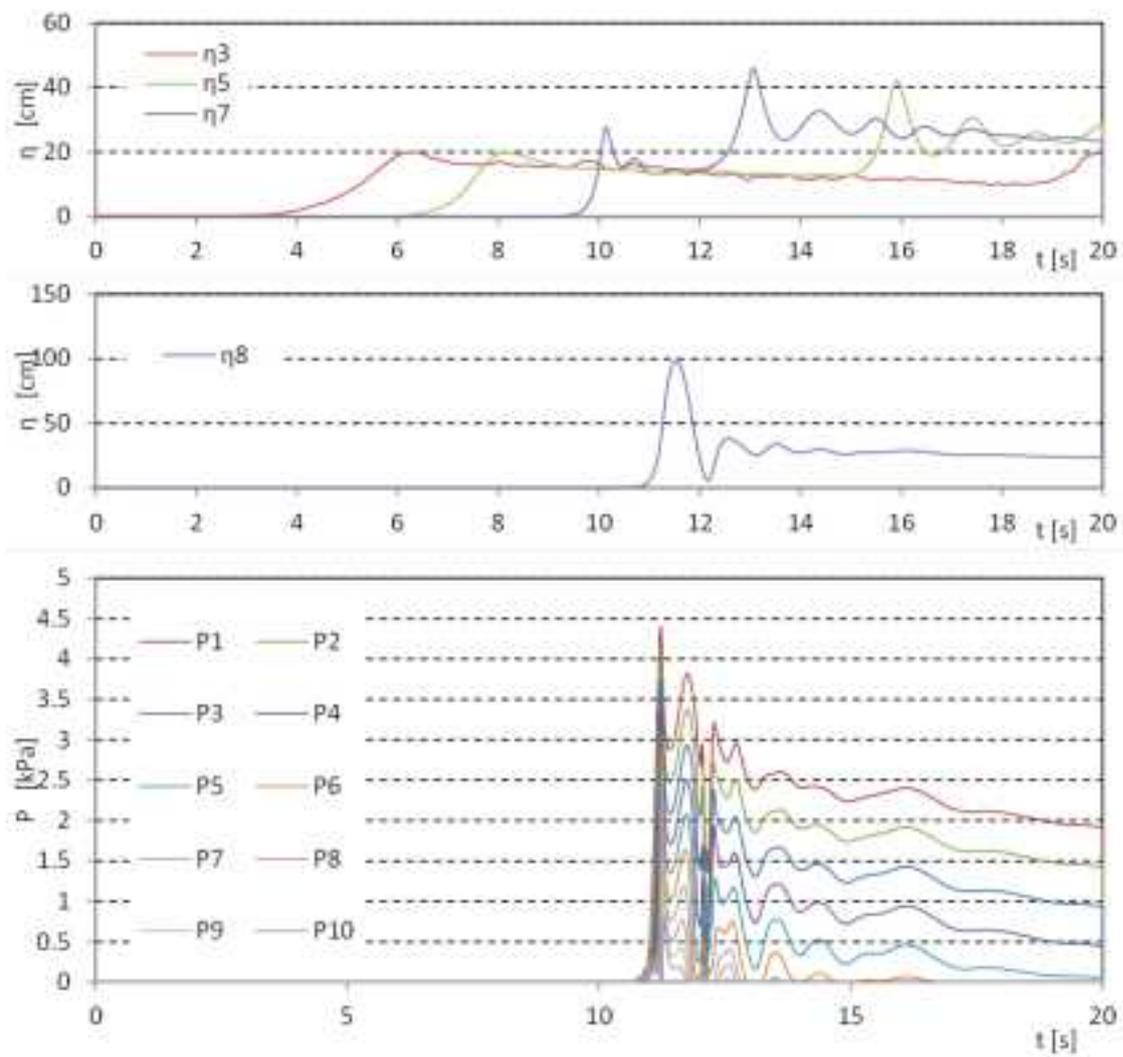


図 III.3-24 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 0m, W09, OpenFOAM)

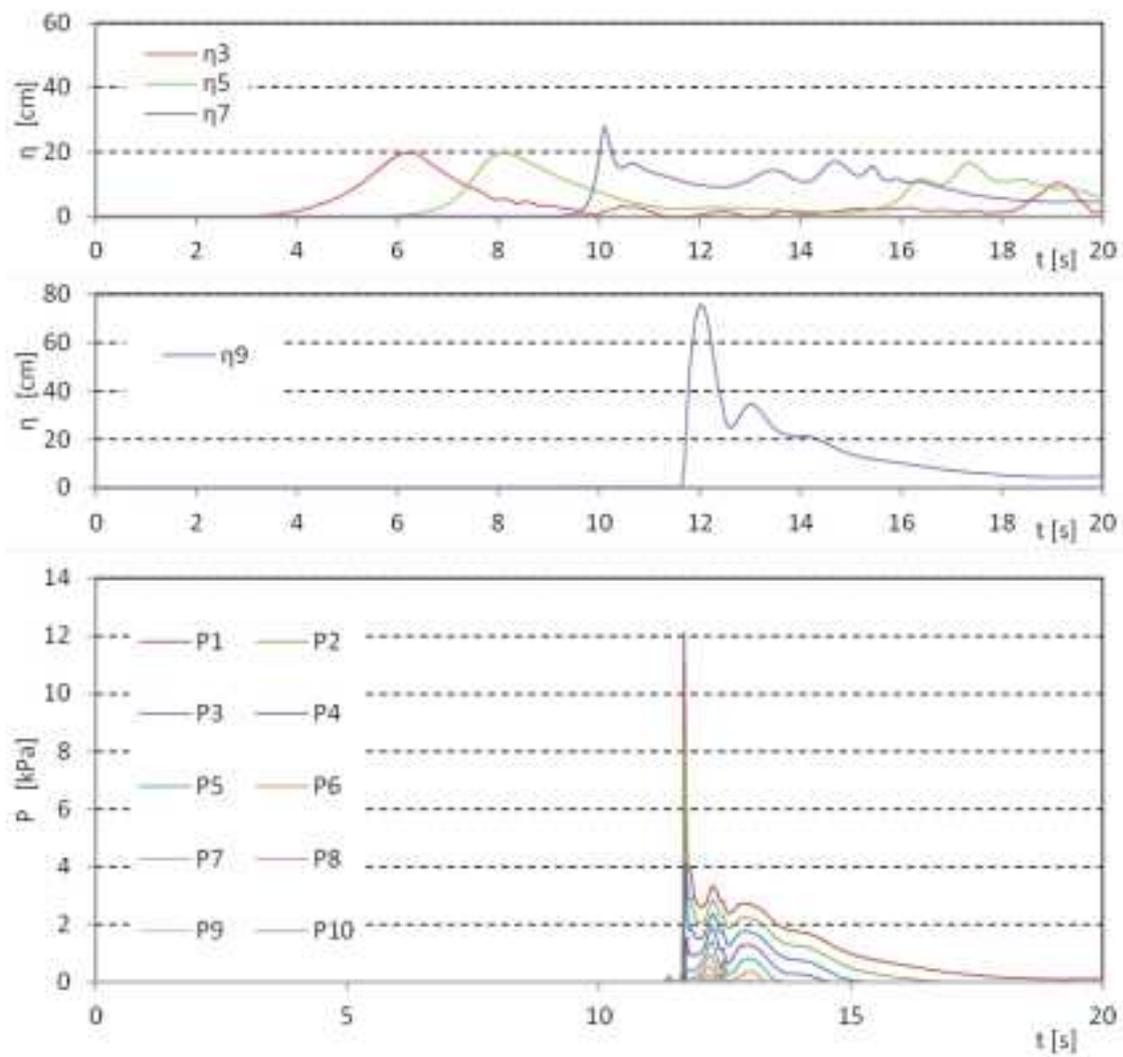


図 III.3-25 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 1.25m, W01, OpenFOAM)

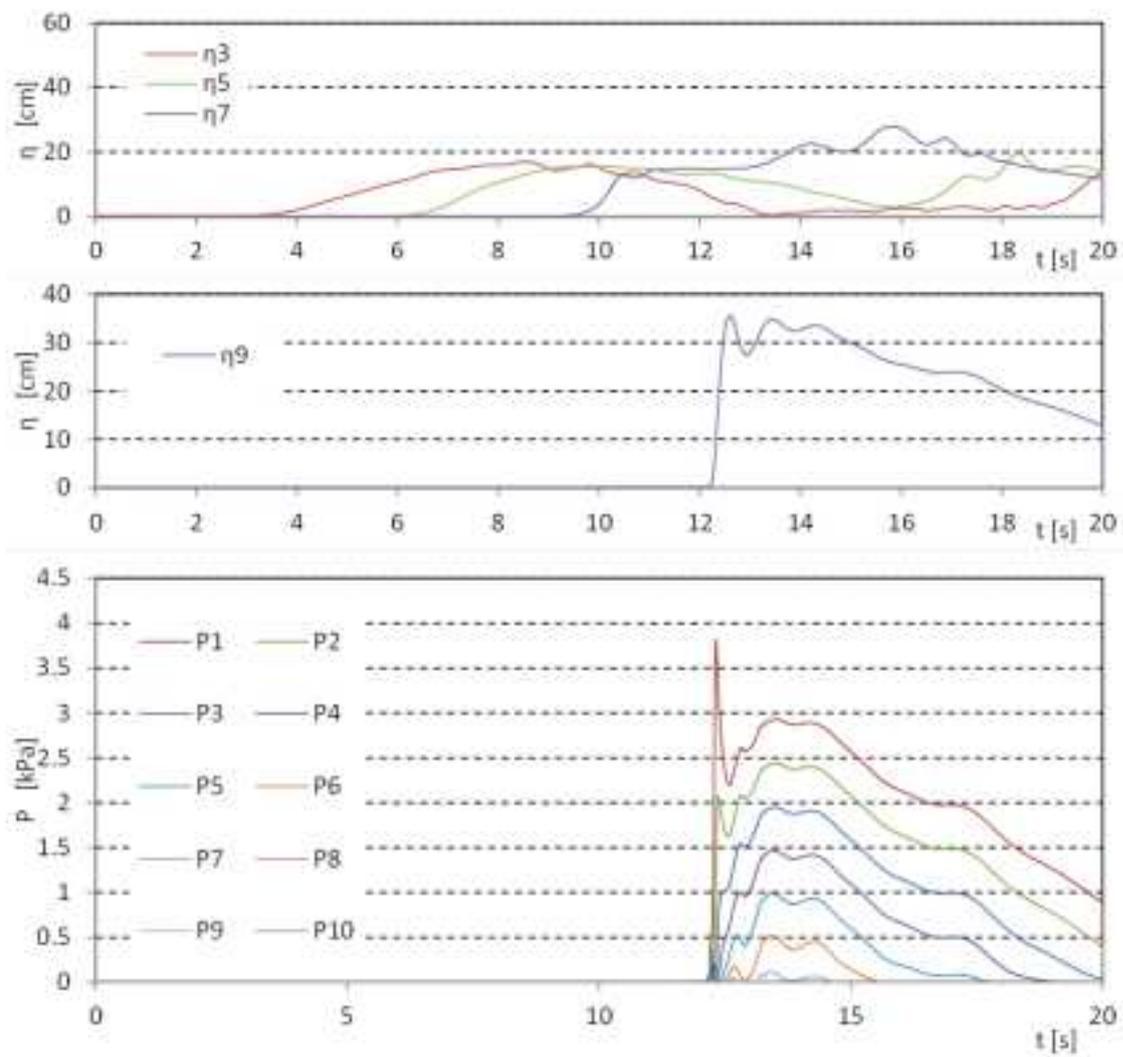


図 III.3-25 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 1.25m, W05, OpenFOAM)

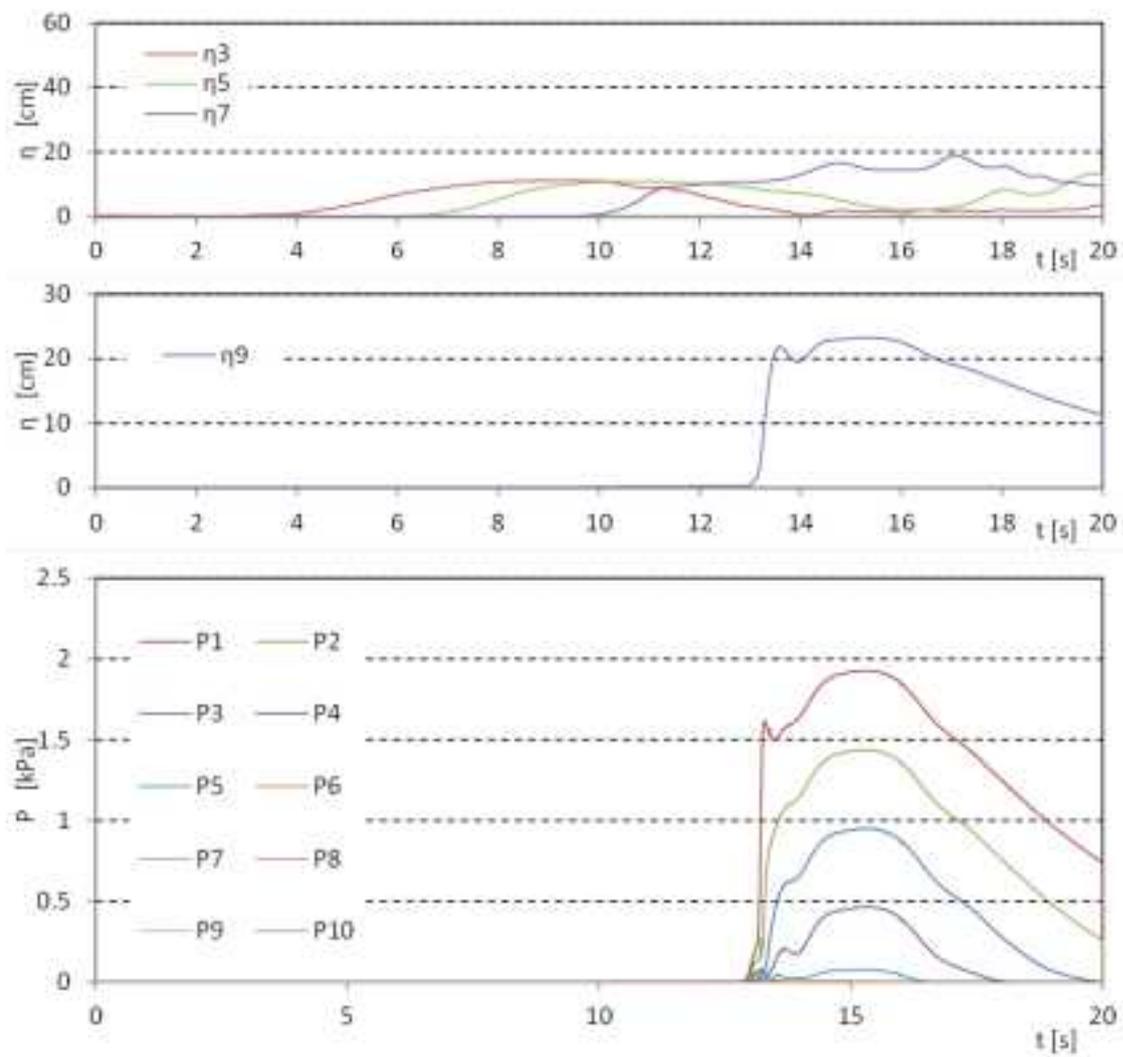


図 III.3-25 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 1.25m, W07, OpenFOAM)

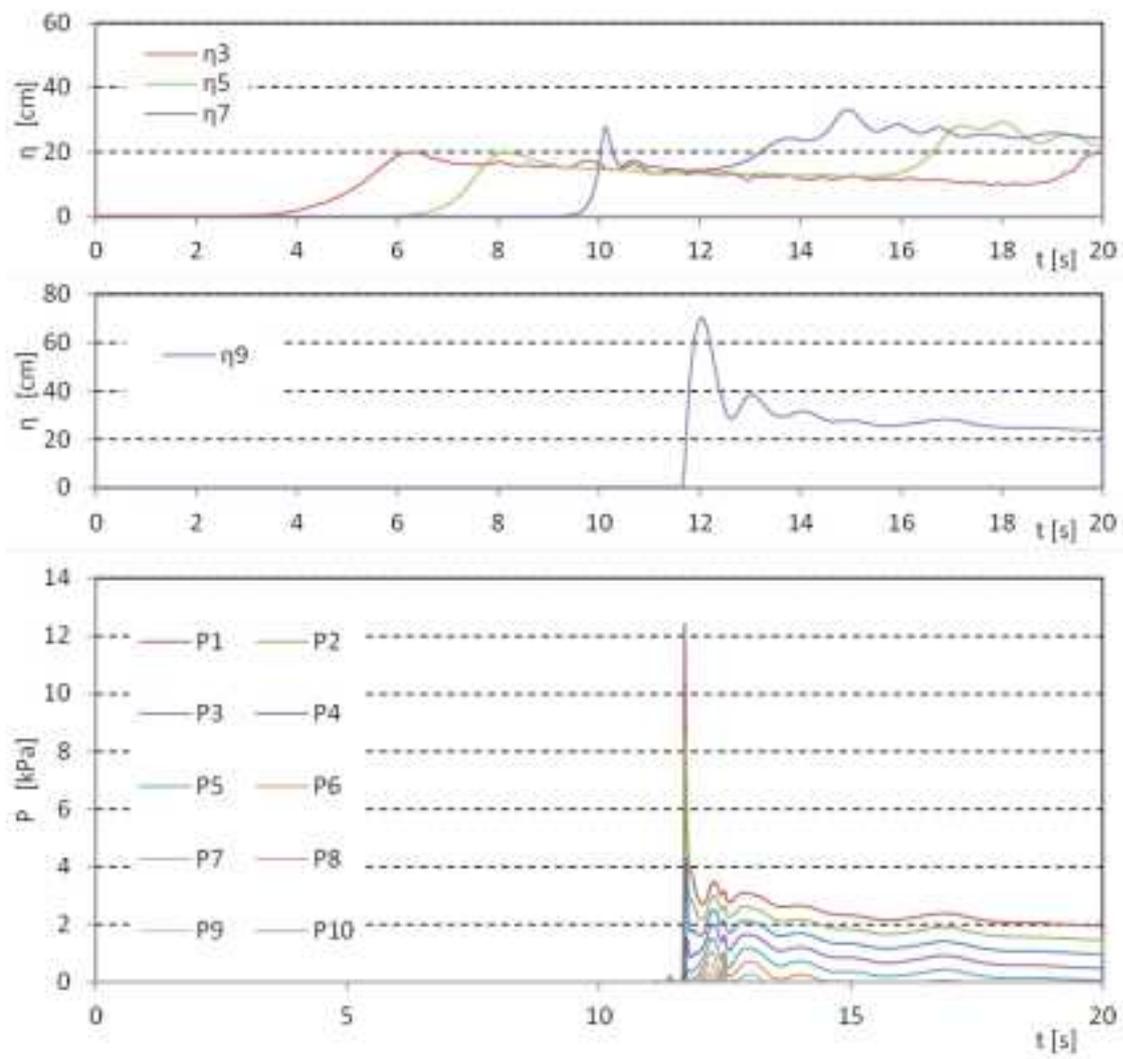


図 III.3-25 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 1.25m, W09, OpenFOAM)

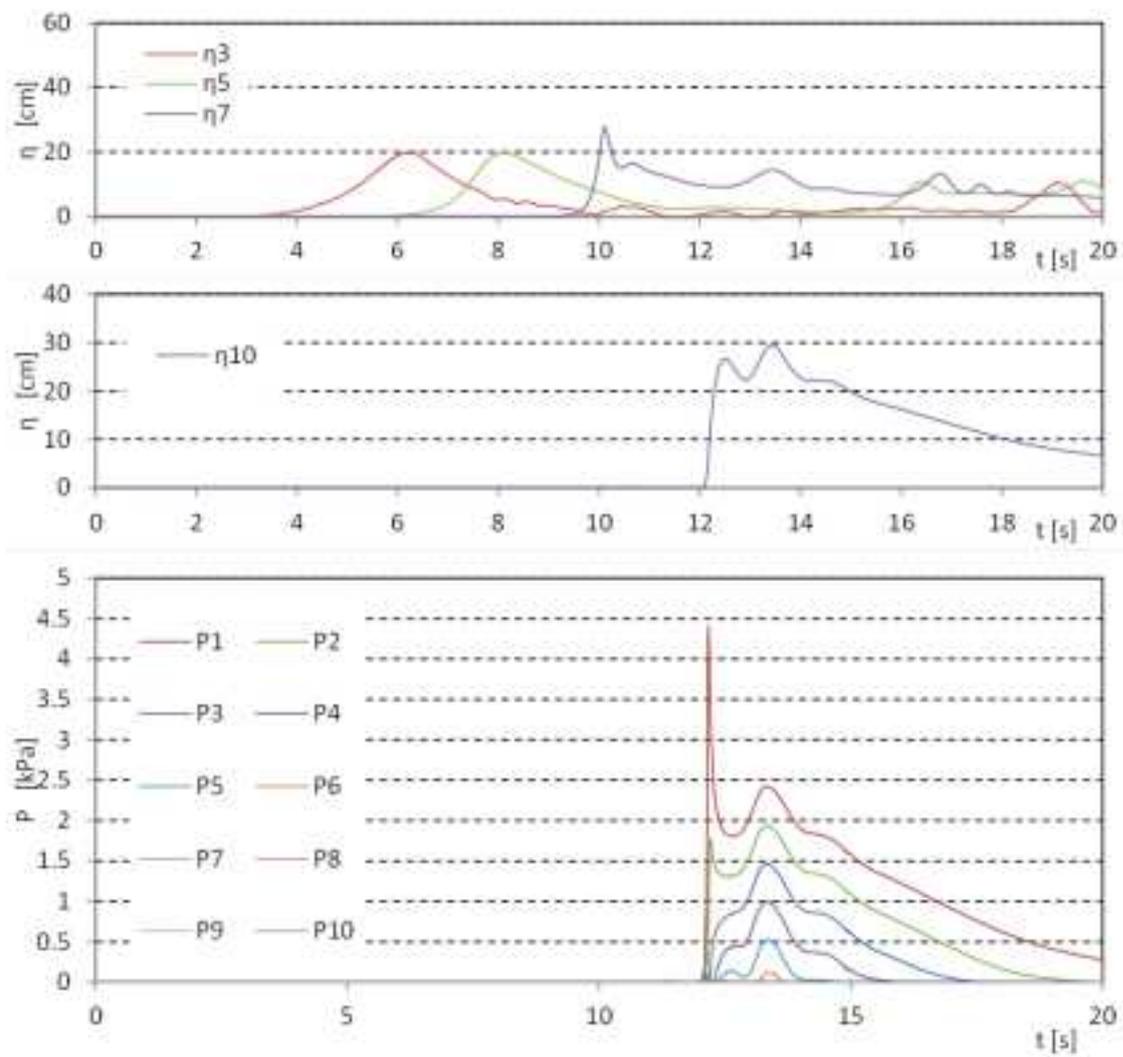


図 III.3-26 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 2.5m, W01, OpenFOAM)

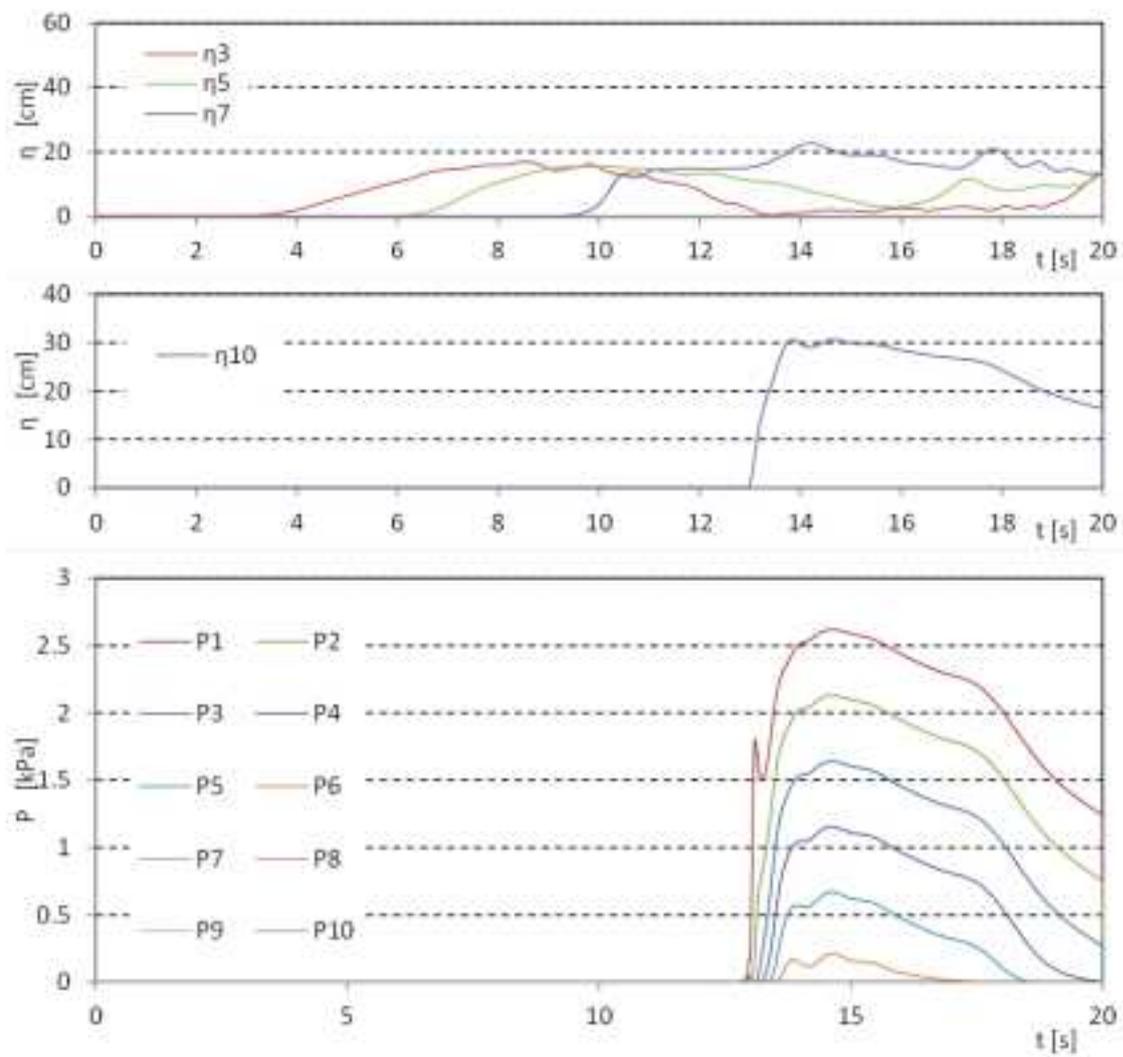


図 III.3-26 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 2.5m, W05, OpenFOAM)

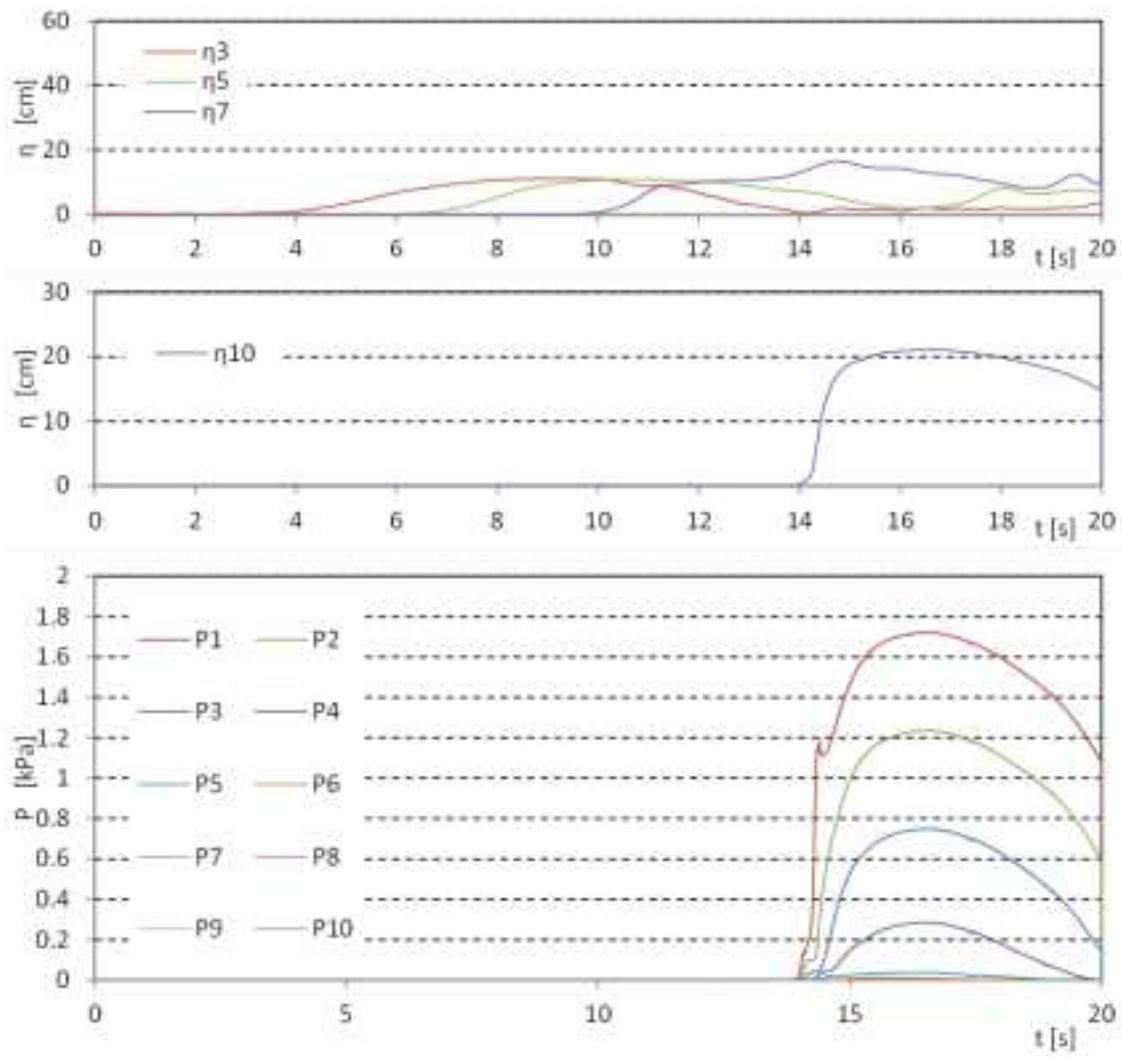


図 III.3-26 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 2.5m, W07, OpenFOAM)

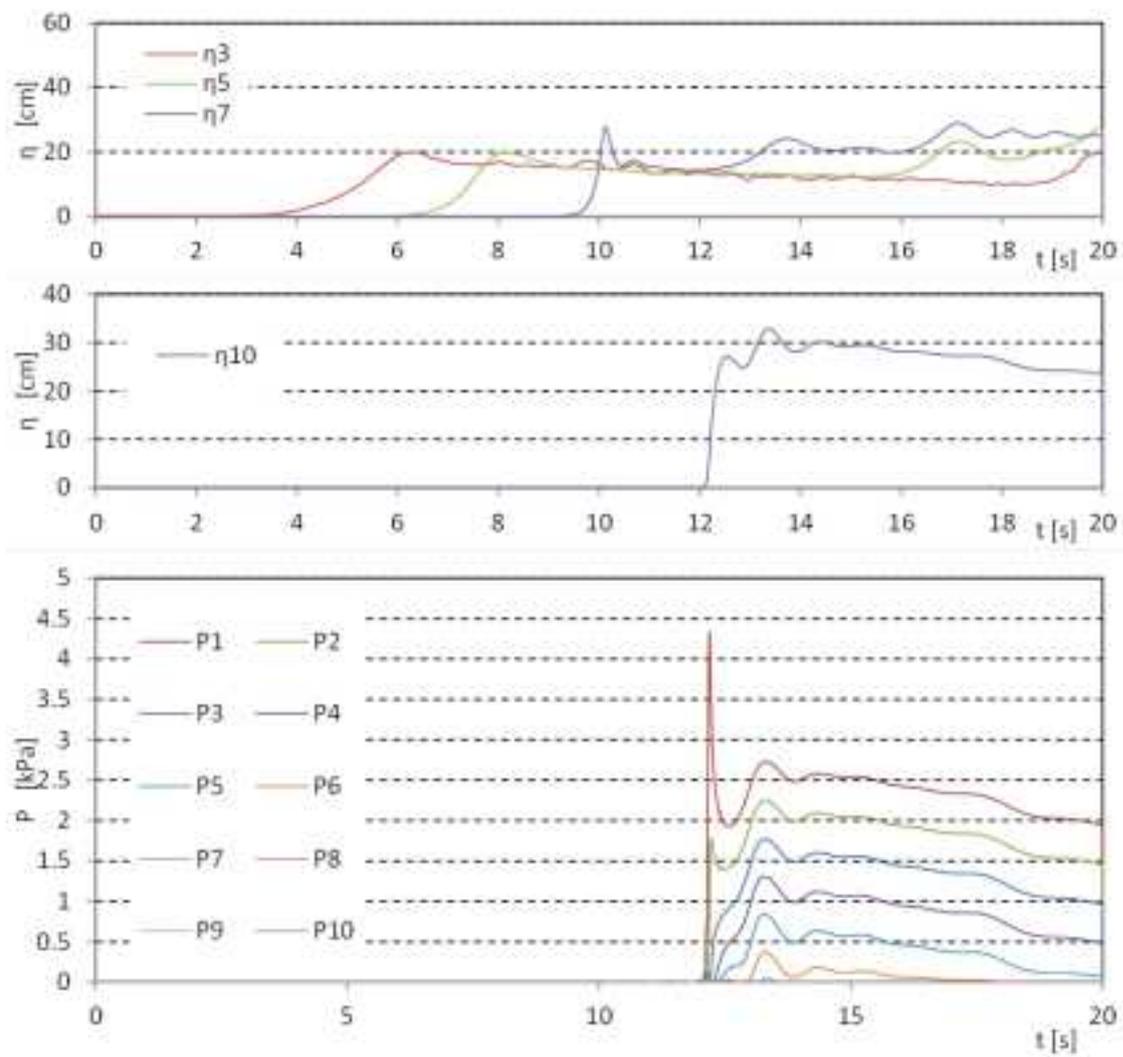
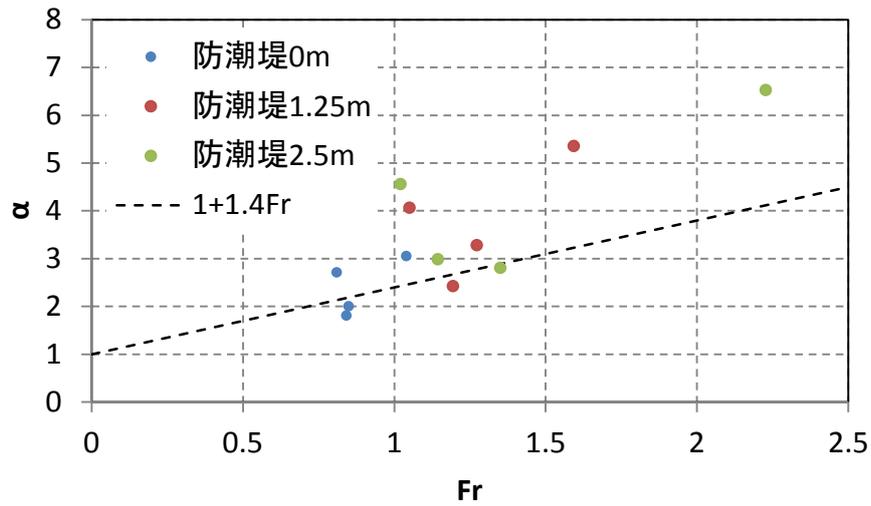
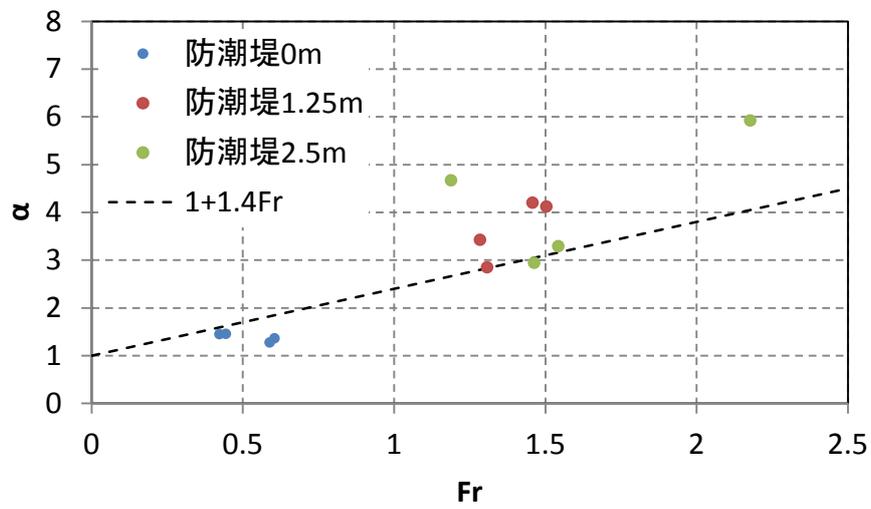


図 III.3-26 波力/波圧試験の解析結果 (直立護岸, 設置位置 2.5m, W09, OpenFOAM)

単純勾配



直立護岸



単純勾配+直  
立護岸

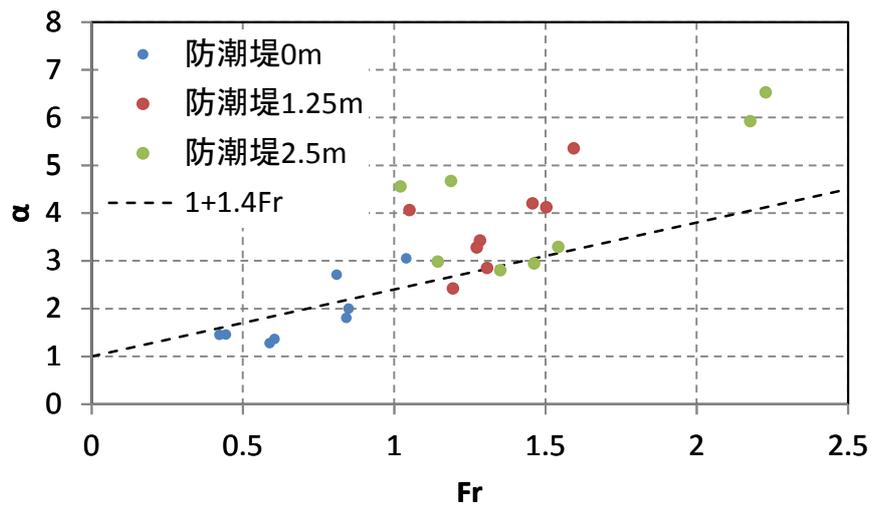


図 III.3-27 水深係数の算出結果 (STAR-CD)

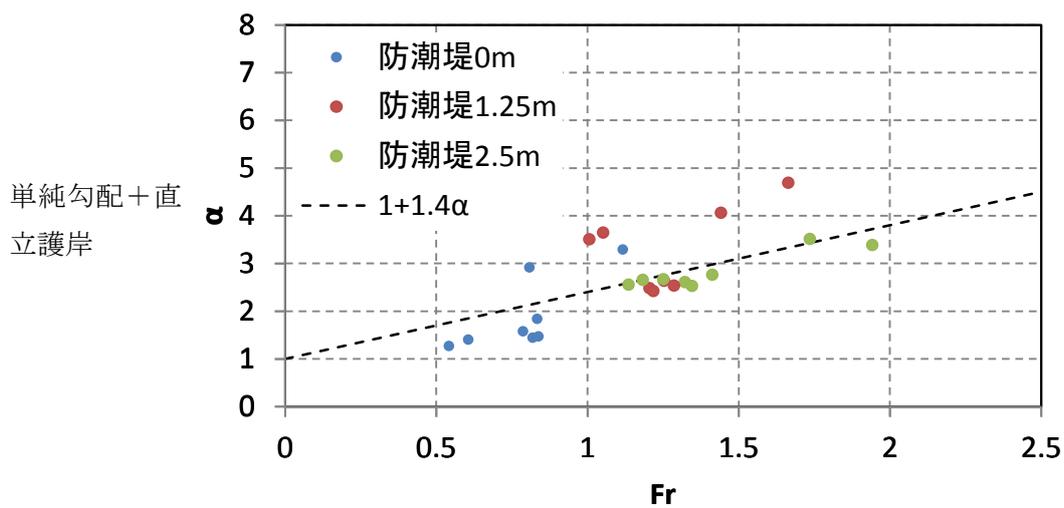
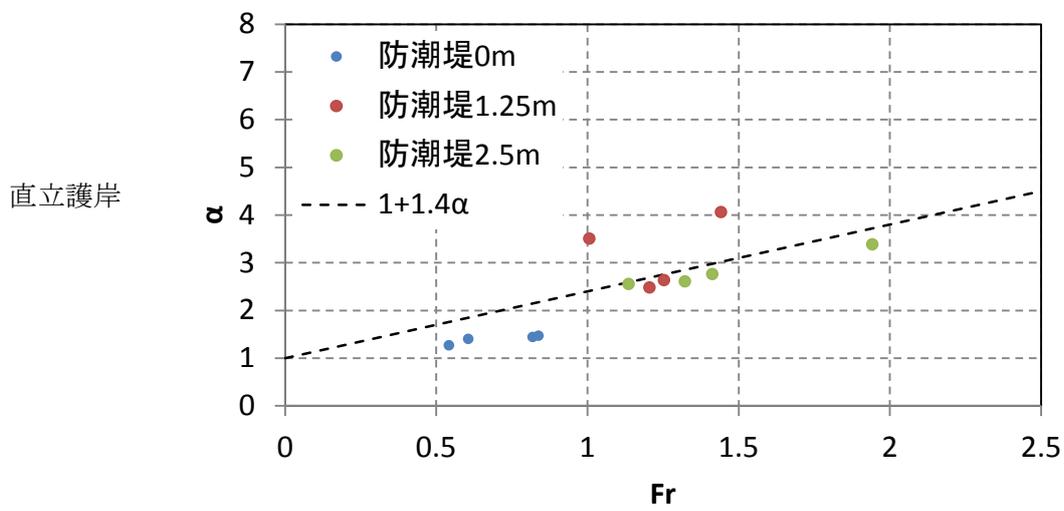
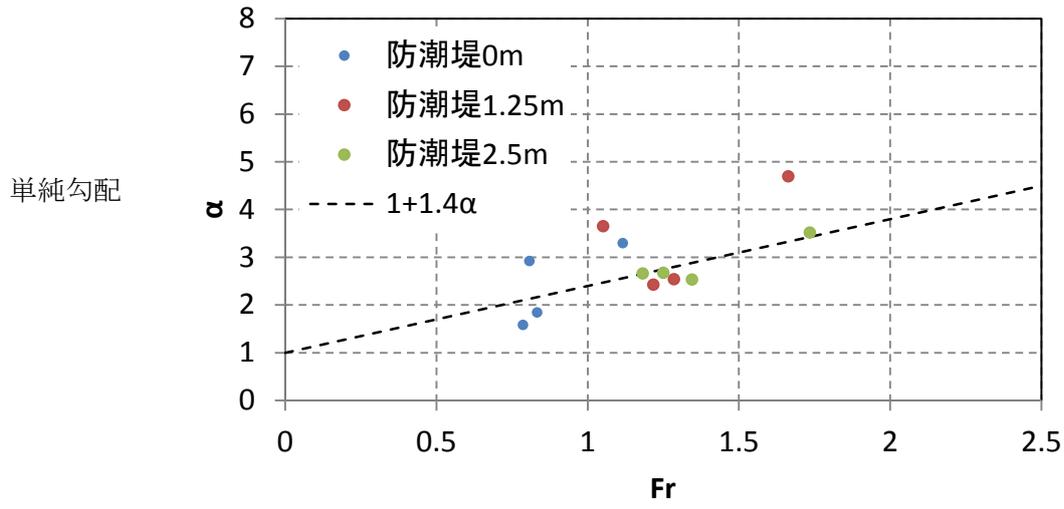


図 III.3-28 水深係数の算出結果 (OpenFOAM)

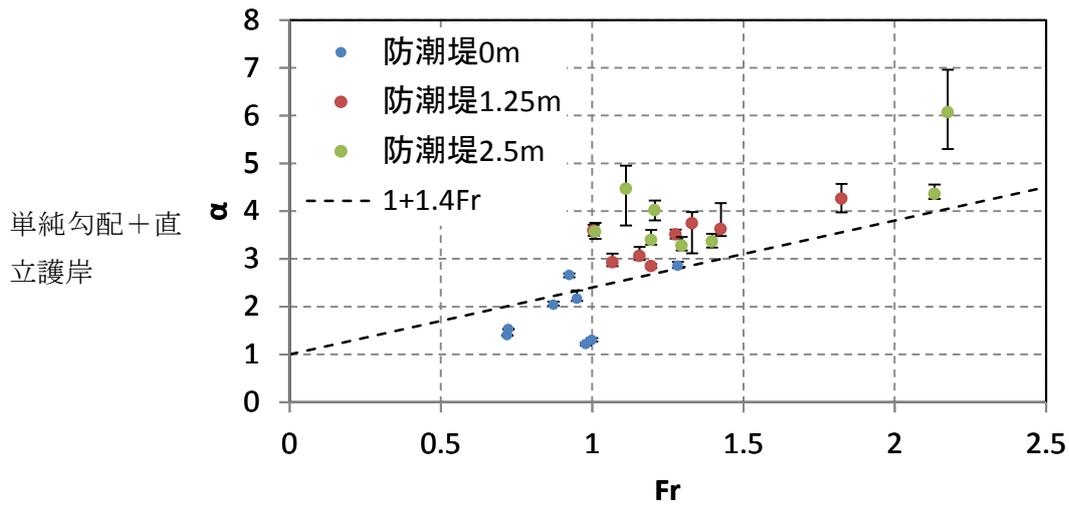
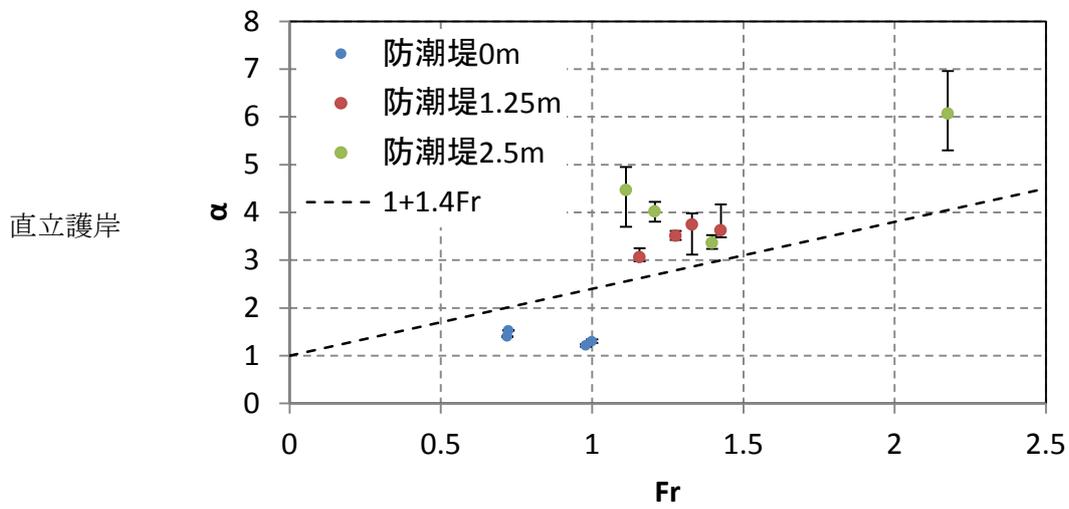
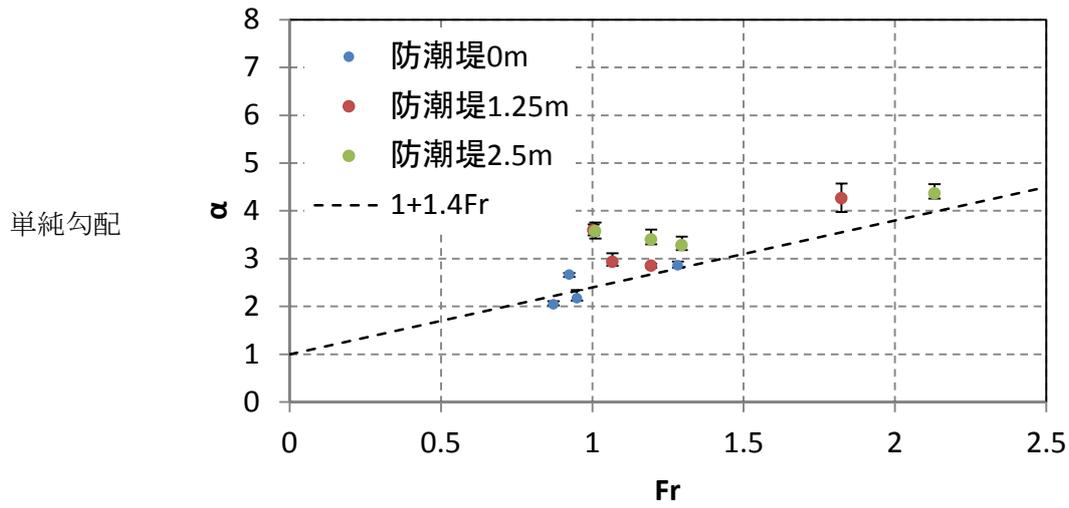


図 III.3-29 水深係数の算出結果（実験結果の抜粋）



## 第 IV 編

# 防潮堤の平面配置影響の把握水理試験



## 1. 概要

### (1) 試験の概要

津波波力を受ける防潮堤を対象とした3次元条件の水理試験を実施し、特徴的な平面配置の防潮堤（堤体模型）に作用する津波波力（段波及び持続波）の特性に関する試験データを取得した。海底地形は直立護岸とし、護岸前面水深を「津波波力特性の把握水理試験」と同一とした。入力津波の波形についても、「津波波力特性の把握水理試験」で採用した波形と同等の6種類の入射波形を対象とし、波力の横断方向分布特性について解析した。

実施した試験は、堤体模型を設置せずに通過波について計測する通過波検定試験と堤体模型を設置し、堤体に働く波圧および波力を測定する波力/波圧試験の2種類である。堤体模型の平面形状は1種類とし、堤体模型の汀線からの距離を3種類に変更して、それぞれ試験を実施した。



## 2. 試験方法

### 2.1. 試験装置

#### 2.1.1. 試験縮尺

想定する模型縮尺は、「津波波力特性の把握水理試験」と同じ 1/40 とした。

#### 2.1.2. 試験水槽と試験模型

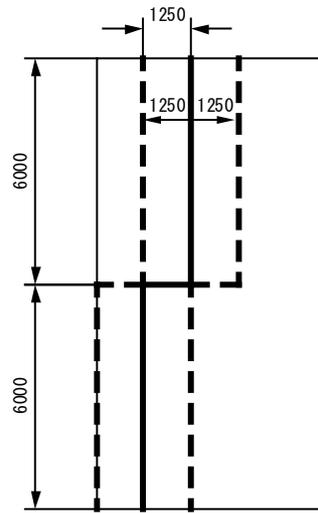
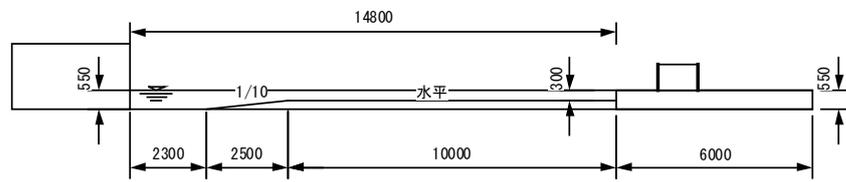
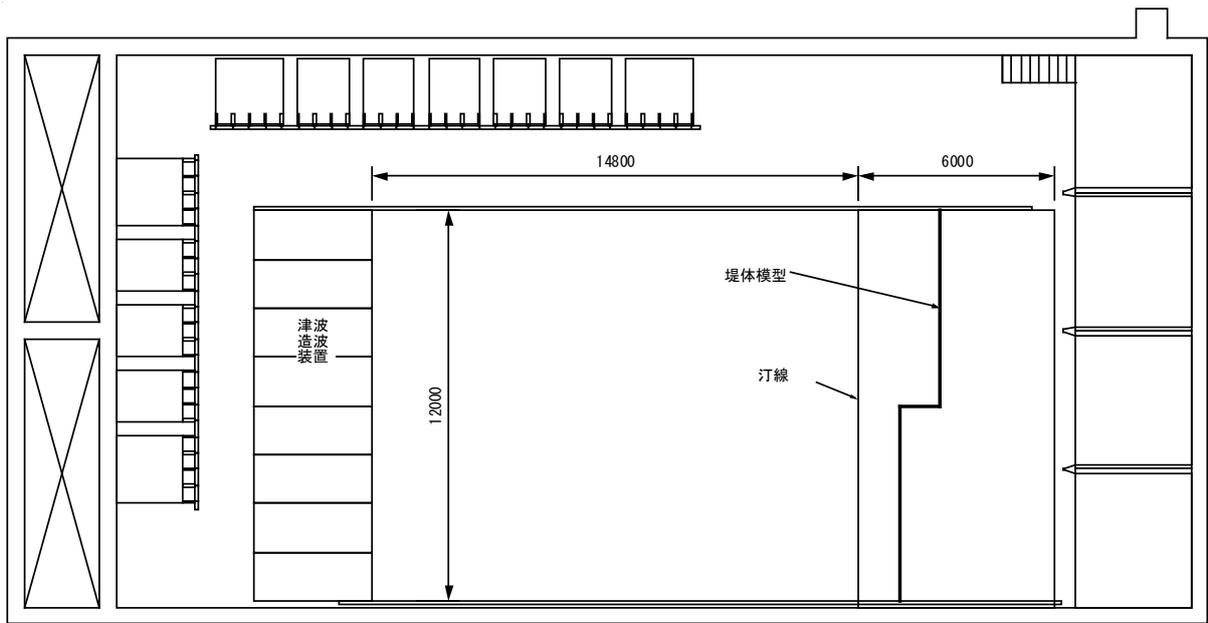
##### (1) 試験水槽と地形模型

水理試験は、平面水槽を隔壁で仕切り、幅 12m として使用した (図 IV.2.1-1 参照)。端部には、津波波力特性の把握水理試験と同様の仕組みの津波造波装置を設置し、これにより津波を造波して試験を実施した。

海底地形は、図 IV.2.1-1 に示す直立護岸タイプとし、護岸前面水深 30cm 長さ 10m の水平海底地形を設置し、地形の前面は、1/10 勾配の斜面で水深 55 cm とした水槽底面と擦り付けた。陸上地形は水平とし、汀線において水面と同一の高さとした。地形模型の表面は、塩ビ製とした。

##### (2) 防潮堤 (堤体) 模型

陸上部に設置した堤体模型の平面配置は、図 IV.2.1-1 に示す様に、水槽中心線上でクランク状に前後に折れ曲がり、左右で汀線までの距離が 1.25m 異なった、それぞれ汀線と平行な鉛直板で構成される形状とした。また、堤体の設置位置は 3 種類とし、それぞれ前側 (造波装置から見て右側) の堤体模型の汀線からの距離が 0m, 1.25m, 2.5m (それぞれ P.08, P.09, P.10 とする) とした。堤体前面には、後述する圧力計を設置し、堤体に働く波力を圧力の積分により算出した。



堤体配置

図 IV.2.1-1 試験水槽と試験模型

### 2.1.3. 計測項目及び計測手法

計測項目は、水位、流速、及び圧力（波力）とした。また、全体状況をビデオカメラにより撮影した。各計測項目の計測位置を、図 IV.2.1-2 に示す。水位、流速の計測点は、通過波検定試験ではすべて水槽の中心線上であり、波力/波圧試験においては、堤体模型前面についてのみ、図 IV.2.1-2(b)に示す様に、圧力計設置位置の近傍で水位を計測した（造波機側から見て、右から計測点 f2, f1, b1, b2）。各計測値のサンプリング間隔は、1ms とし、全てのデータを同時に計測した。

#### (1) 水位

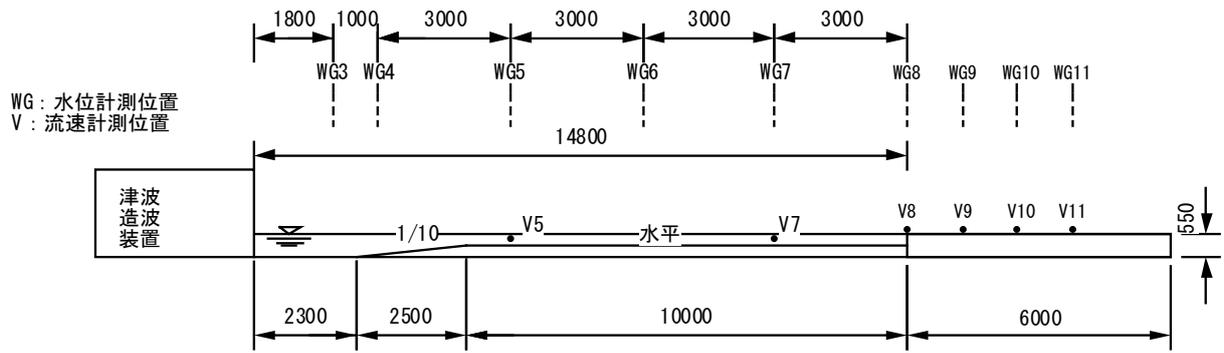
水位は、容量式水位計（ケネック社製 CH-406）により計測した。津波特性の把握水理試験と同様に、陸上部では地形模型に穴を空け、津波の遡上前でも容量線の先端が水没した状態になるように設置した。

#### (2) 流速

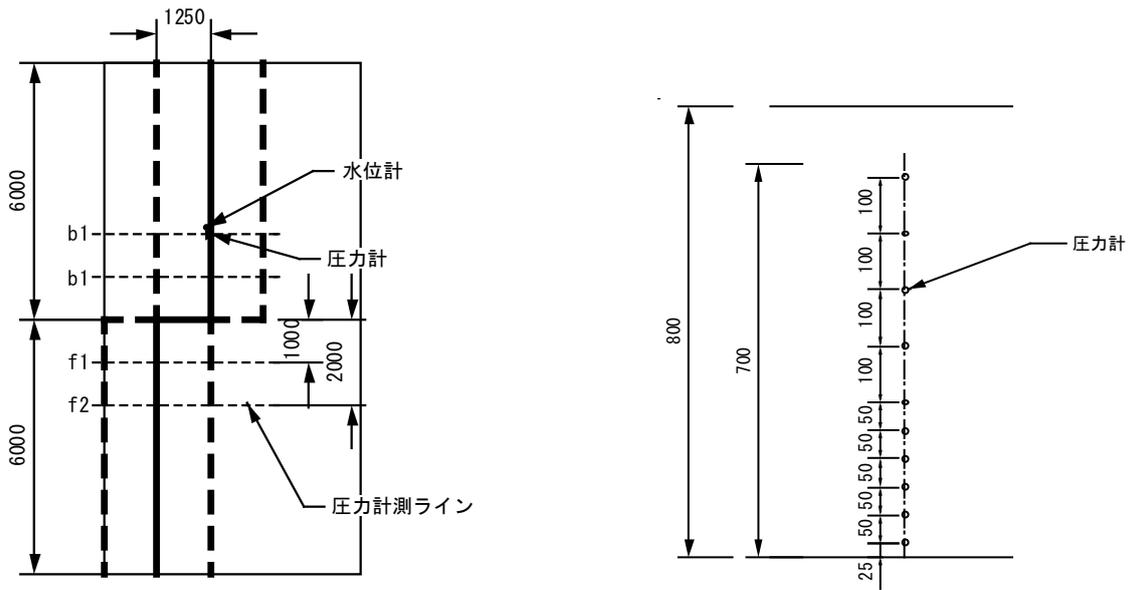
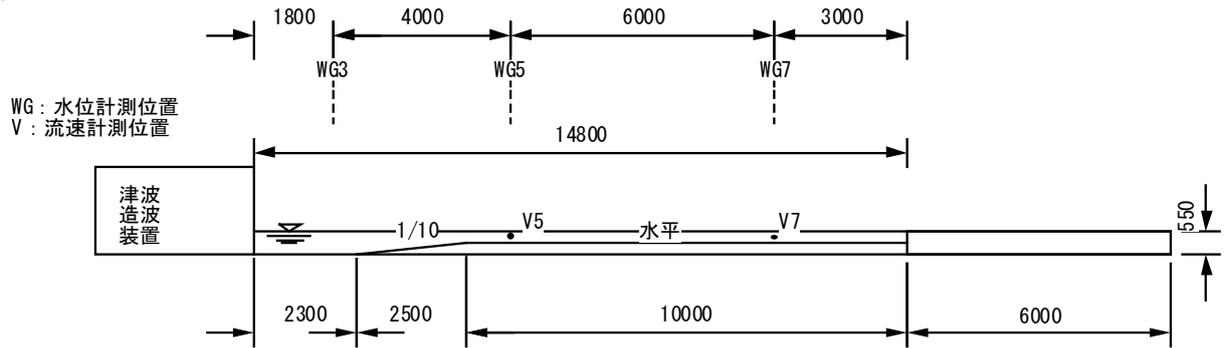
流速は、電磁流速計、プロペラ流速計の 2 種類を用いて計測した。V5, V7 では常に流速計を水没させることが出来るため、電磁流速計（ケネック社製 VM-802HA）により流速を計測した。流速計は、6 割初期水深の高さに設置した。陸上部（V8～V10）では、プロペラ流速計（ケネック社製 VO-301A4/VOT2-400-20）を使用した。浸水深が小さい範囲でも流速を計測するため、プロペラ流速計の設置位置は、地形模型と干渉しない範囲でなるべく底面近傍とし、プロペラの中心が底面より 15mm の位置に設置した。また、汀線位置では、プロペラ流速計のガードリングの前面が、護岸汀線と一致するように、すなわち汀線の陸上側に設置した。

#### (3) 圧力・波力

圧力は、φ10 の超小型圧力計（エス・エス・ケイ社製 P310-02）を使用し、図 IV.2.1-2(b)に示すように堤体模型に鉛直方向に 10 個の圧力計を埋め込んで圧力を計測した。圧力の計測は、4 測線で行った。設置間隔は、地面近傍では鉛直方向に 5 cm 間隔とし、上方では 10cm 間隔とした。津波波力は、圧力計による圧力計測結果を積分して求めた。



(a)通過波検定



(b)波力/波圧試験

図 IV.2.1-2 各計測項目の計測位置

## 2.2. 試験ケース

### 2.2.1. 通過波検定試験

通過波検定試験の試験ケースを，表 IV.2.2-1 に示す．対象波形は，「津波波力特性の把握水理試験」に適用した波形のうち W01, W07, W09, W11, W13 と同形状のもの 5 種類に，W13 と類似で砕波点が沖に移動する W14 を加えた 6 種類とし，後述する波検定により造波波形を決定した．なお，計測結果の確認のため，同じ試験を 2 回繰り返した．

表 IV.2.2-1 通過波検定試験の試験ケース

No	ケース名	地形	波形	堤体位置	繰り返し
1	F-W01-0-N	直立護岸 F	W01	なし 0	2
2	F-W07-0-N		W07		
3	F-W09-0-N		W09		
4	F-W11-0-N		W11		
5	F-W13-0-N		W13		
6	F-W14-0-N		W14		

## 2.2.2. 波力/波圧試験

波力/波圧試験における試験ケースを、表 IV.2.2-2 に示す。対象波形は、W01, W07, W09, W11, W13, W14 の 6 種類であり、堤体模型の設置位置を 3 種類に変えて、同様の試験を実施した。なお、試験毎のばらつきを確認するため、同じ試験を 3 回繰り返した。

表 IV.2.2-2 波力/波圧試験の試験ケース

No	ケース名	地形	波形	堤体位置	繰り返し
1	F-W01-1-A	直立護岸 F	W01	0m 1	3
2	F-W07-1-A		W07		
3	F-W09-1-A		W09		
4	F-W11-1-A		W11		
5	F-W13-1-A		W13		
6	F-W14-1-A		W14		
7	F-W01-2-A		W01	1.25m 2	
8	F-W07-2-A		W07		
9	F-W09-2-A		W09		
10	F-W11-2-A		W11		
11	F-W13-2-A		W13		
12	F-W14-2-A		W14		
13	F-W01-3-A		W01	2.5m 3	
14	F-W07-3-A		W07		
15	F-W09-3-A		W09		
16	F-W11-3-A		W11		
17	F-W13-3-A		W13		
18	F-W14-3-A		W14		

## 2.3. 試験手順

### 2.3.1. 波検定

試験に先立ち、試験に用いる造波波形を決定した。この時、「津波波力特性の把握水理試験」の造波波形に適用した波計となるべく同形状の波形になるよう、WG5 の位置における「津波波力特性の把握水理試験」の計測結果と一致するように、造波波形を調整した。また、段波状の津波波形として、砕波後に護岸に入射する孤立波形状である W13 と前面波形が同一で、後続する波形が高い水位を保つ WG14 の波形を試験ケースに加えた。

### 2.3.2. 通過波検定試験

通過波検定試験は、波検定で決定した波形について、堤体模型を設置しないで図 IV.2.1-2 に示した位置で各項目を計測した。計測結果の時系列を整理し、各堤体模型設置位置における水位（浸水深） $\eta$ と流速  $V$  及びこれらから算出したフルード数  $Fr (=v/\sqrt{g\eta})$  の時系列から、最大浸水深  $\eta_{max}$  が生じている時のそれぞれの値を求めた。

### 2.3.3. 波力/波圧試験

堤体模型を設置し、波検定で決定した波形を作用させて堤体模型に働く波力を計測した。圧力の計測値から波力を求める際には、鉛直方向の圧力の計測値を線形補完し、積分して堤体単位幅あたりの波力を算出した。各計測項目の時系列計測結果を整理し、最大波力を波力の時系列から求めた。この値と、上記通過波検定試験の計測結果を用いて、水深係数を算出した。繰り返し計測した結果については、その平均値と最大・最小値について整理した。



### 3. 試験結果

#### 3.1. 通過波検定試験

図 IV.3.1-1 に、試験に用いた津波の WG5 地点における沖波水位時系列を示す。波検定により、「津波波力特性の把握水理試験」(2次元試験)で適用した波と同形の波形に調整しているため、比較として2次元試験の通過波検定結果を合わせて示した。2次元試験の波形と比較すると、後続の波形に若干の違いがあるが、第1波目の波形についてはほぼ同一の波形となっていることが分かる。このうち、W01とW13は同じ規模の孤立波でW13の方が碎波点が沖にあり碎波してから護岸に到達する波形である。また、W01, W07, W13とW09, W11, W14はそれぞれ沖波(2次元試験のWG3)において立ち上がり形状が同一で後続の水位が異なり、W09, W11, W14が段波状の波形となる。

各計測点における水位の時系列計測結果を、図 IV.3.1-2 に、また陸上物の堤体模型設置位置における浸水深、流速の時系列変化を図 IV.3.1-3 にそれぞれ示す。なお、試験はそれぞれ2回繰り返しているが、ここには1回目の結果を示した。それぞれの結果は、2次元試験とほぼ同等の時系列変化を示している。また、いずれも流速は津波到達時に最大となり、その後低下する。また、汀線から陸側に離れるにしたがって、水位・流速ともに、低減する傾向にある。

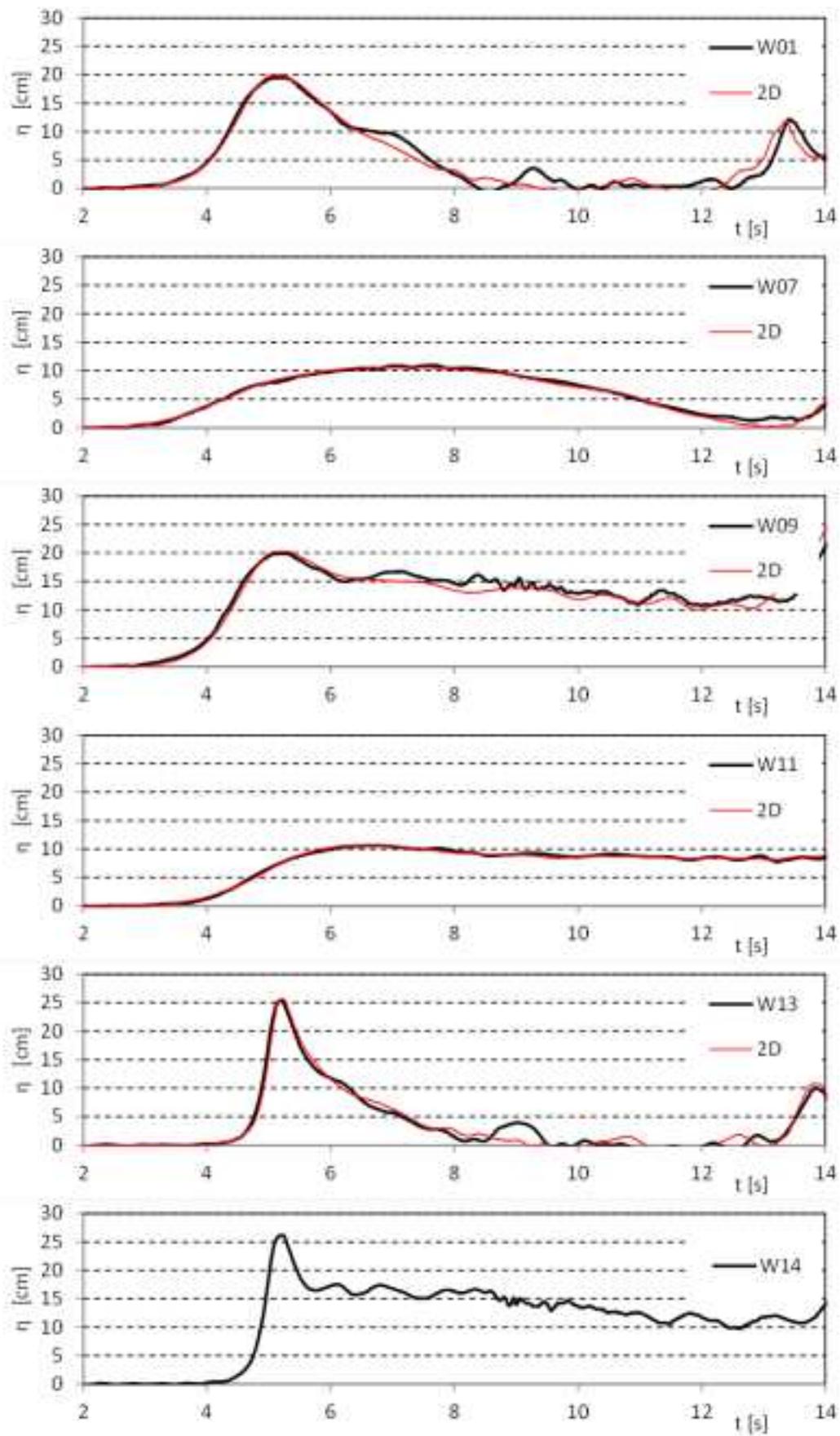
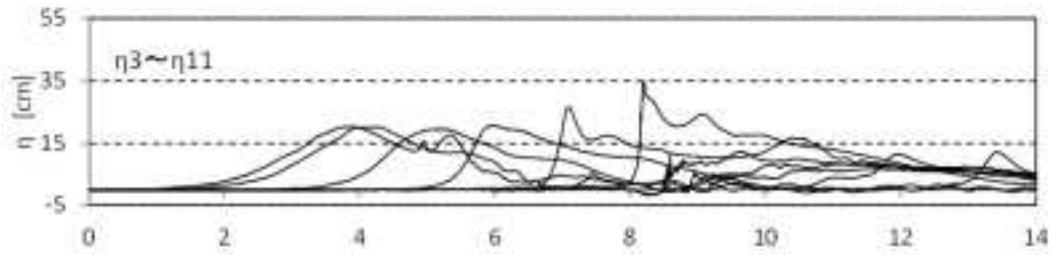
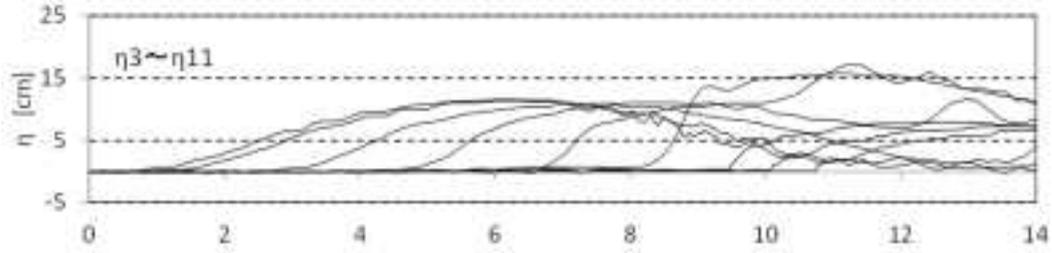


図 IV.3.1-1 入射津波の水位計測結果 (WG5)

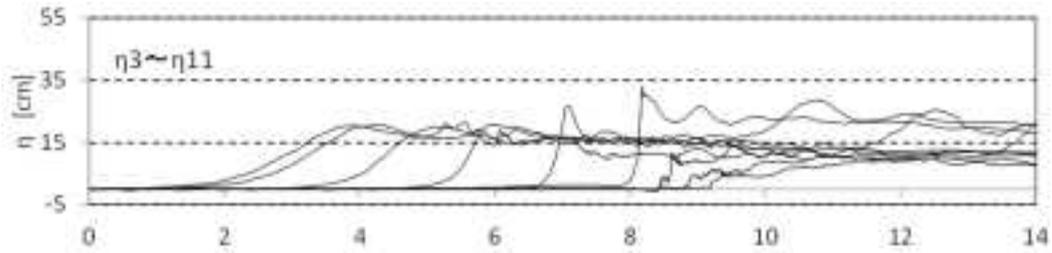
W01



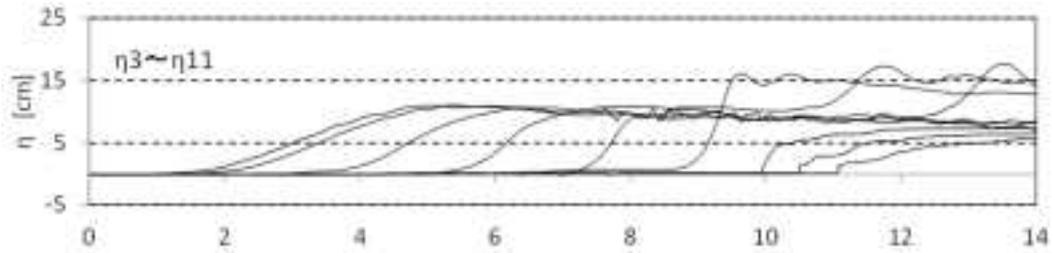
W07



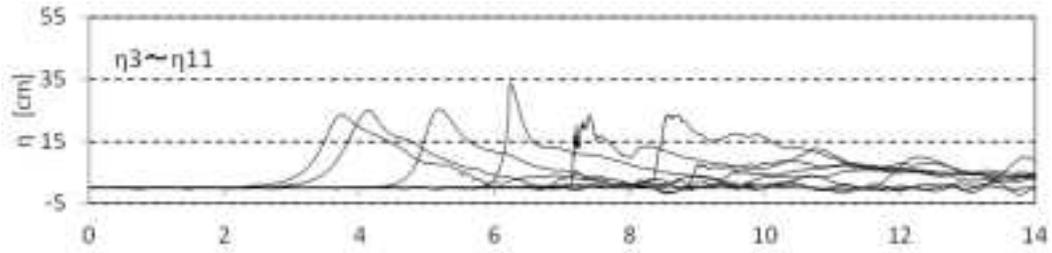
W09



W11



W13



W14

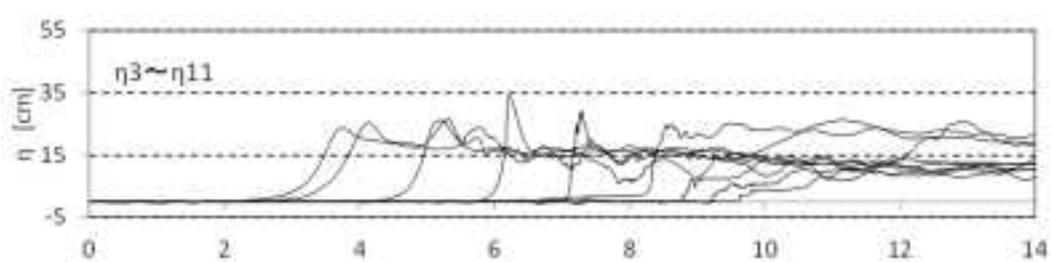


図 IV.3.1-2 各測定点の水位時系列 ( $\eta 3 \sim \eta 6$  : 海域,  $\eta 7$  : 汀線,  $\eta 8 \sim 11$  : 陸上部)

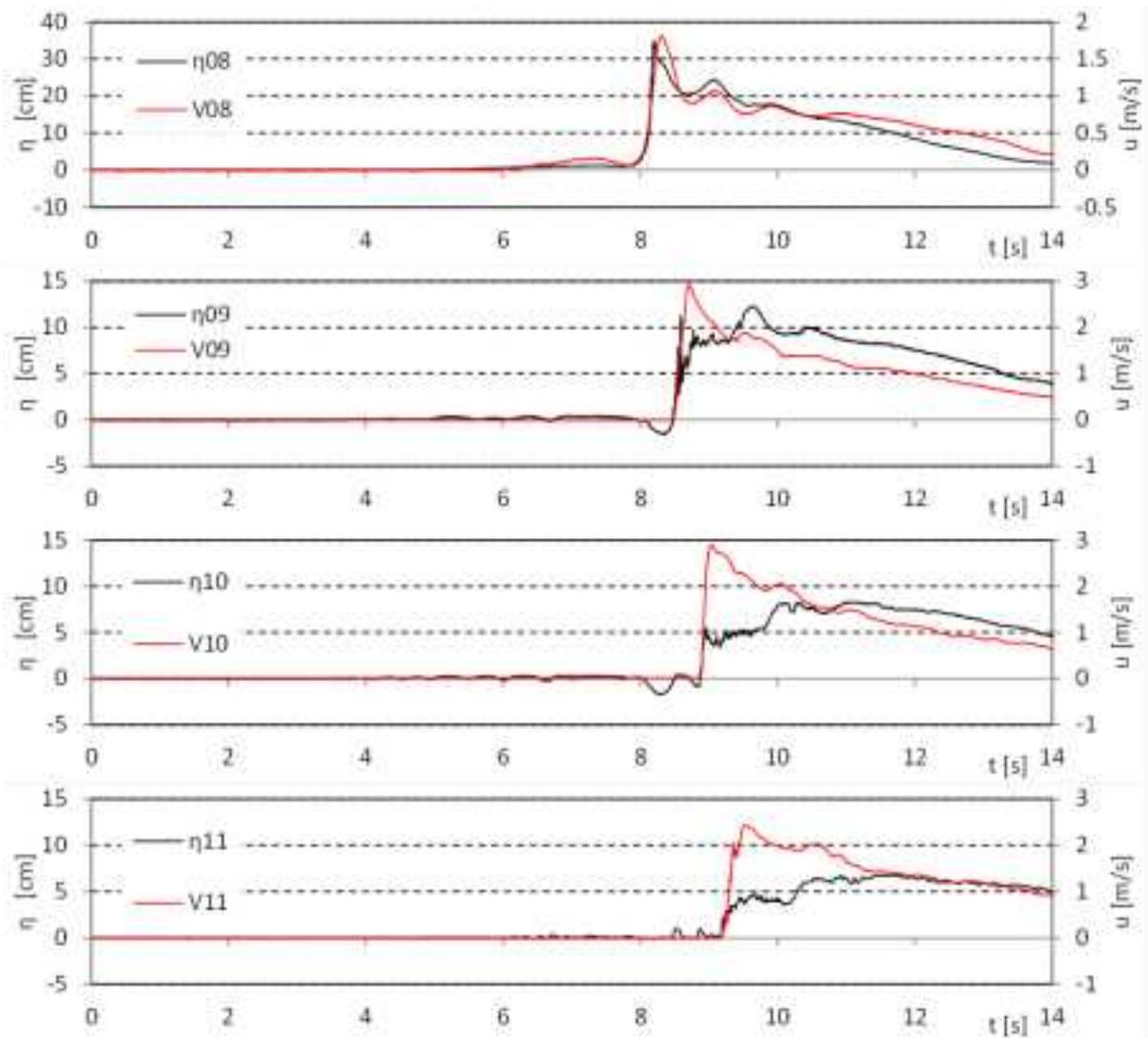


図 IV.3.1-3 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (W01)

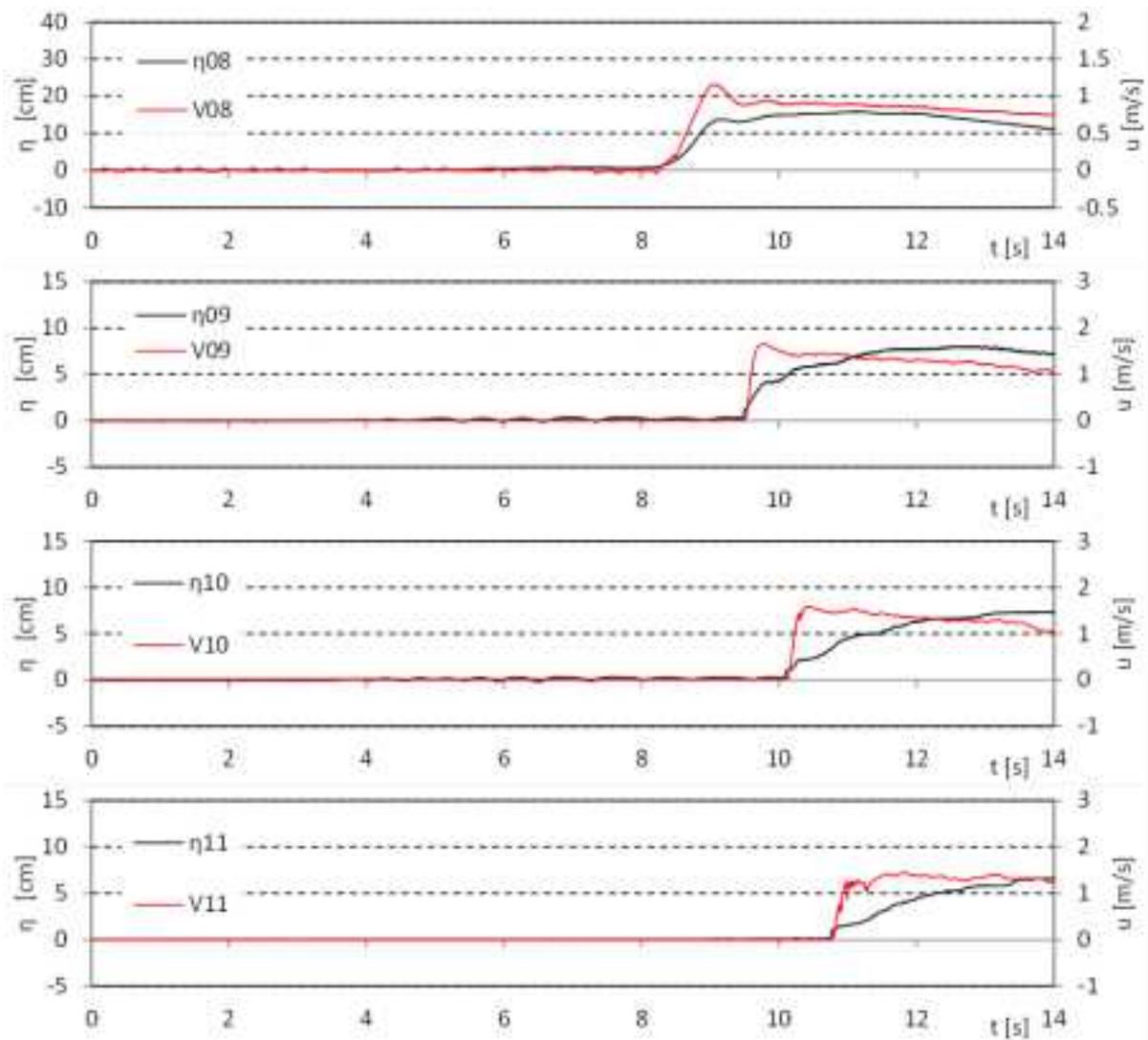


図 IV.3.1-3 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (W07)

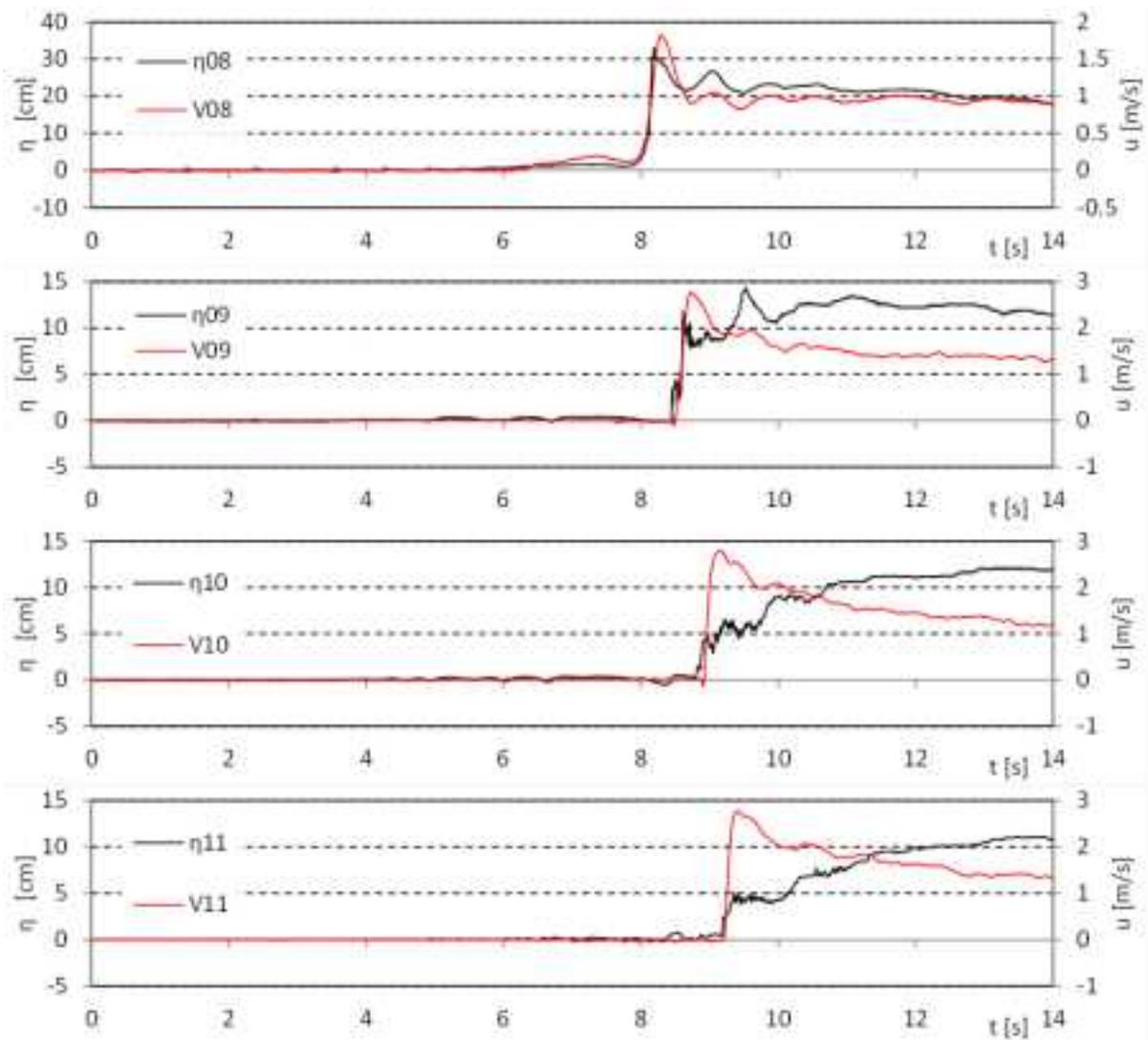


図 IV.3.1-3 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (W09)

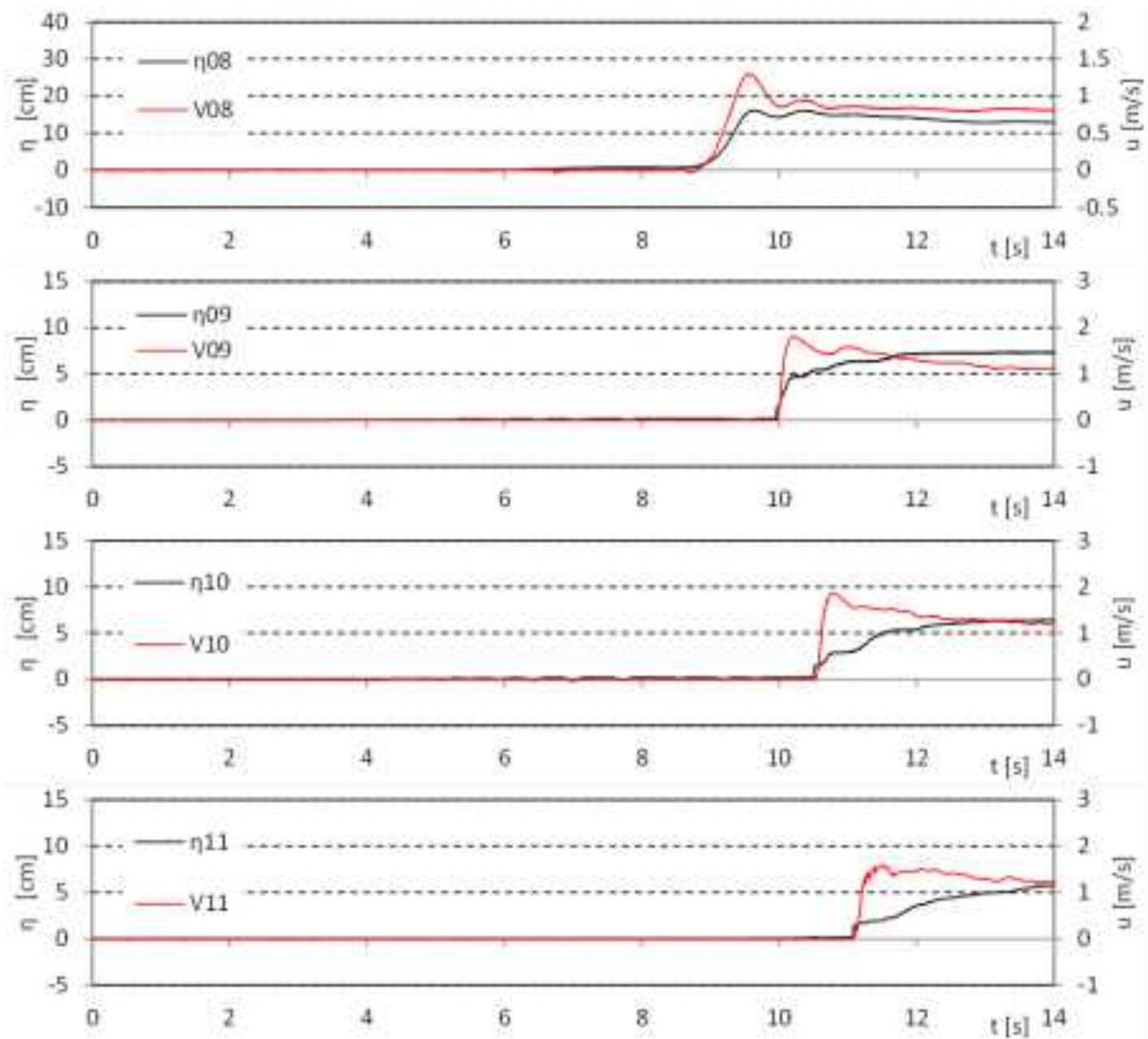


図 IV.3.1-3 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (W11)

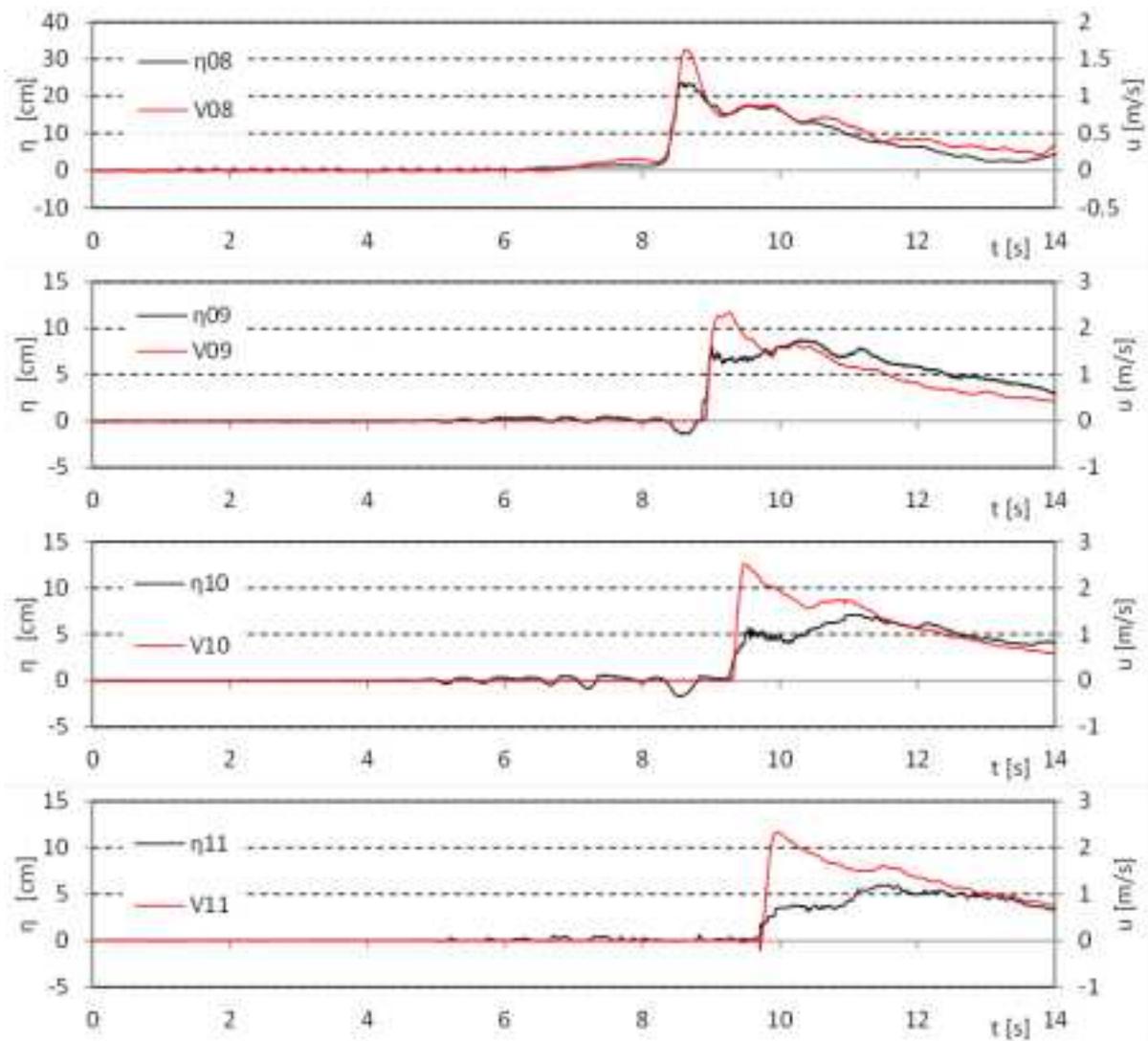


図 IV.3.1-3 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (W13)

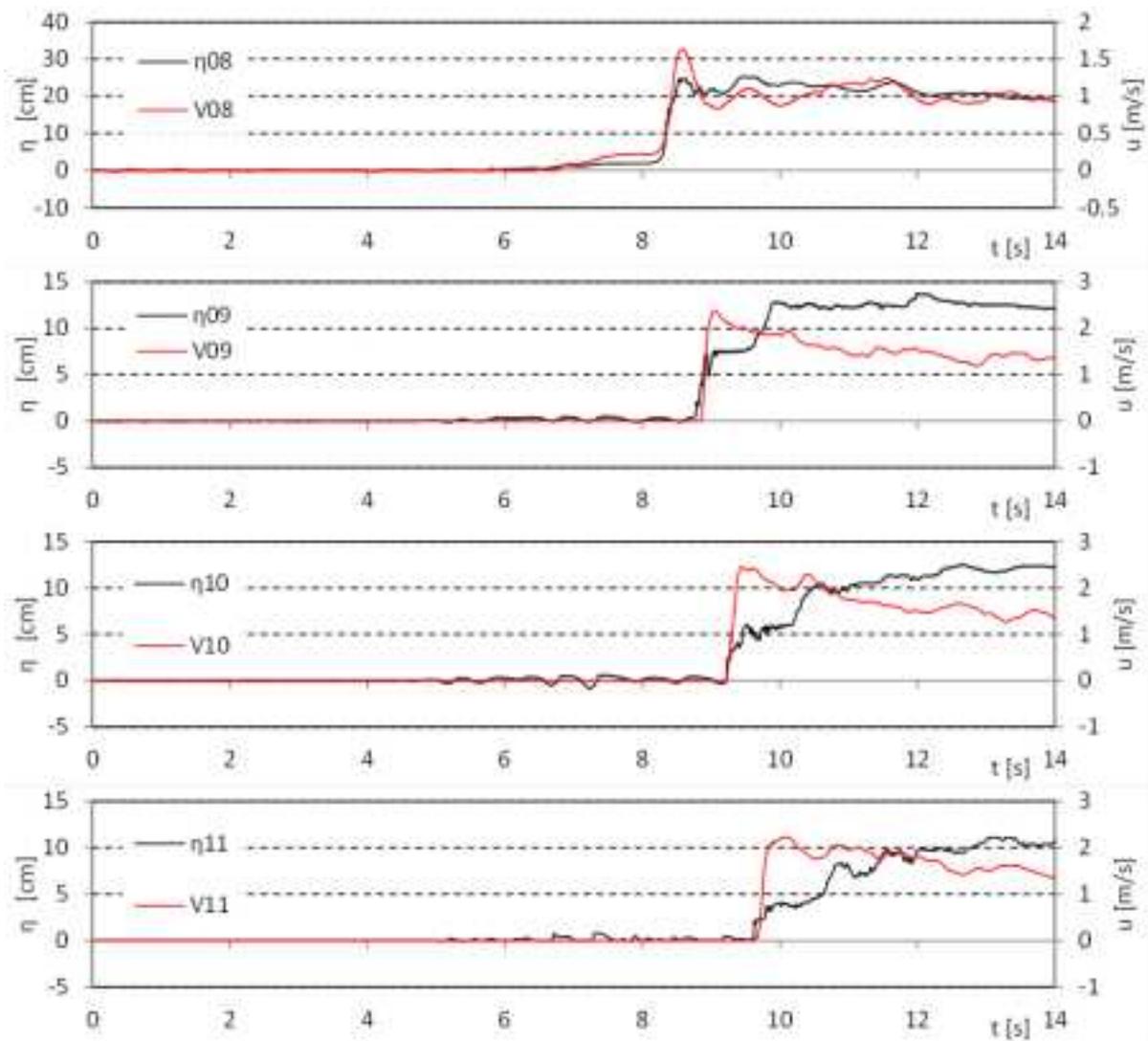


図 IV.3.1-3 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (W14)



### 3.2. 波力/波圧試験

波力/波圧試験の堤体模型設置位置 0m (P.08), 1.25m (P.09), 2.5m (P.10) における計測結果を、それぞれ図 IV.3.2-1, 図 II.3.2-2, 図 II.3.2-3 に示す。同図には、沖波の水位時系列及び堤体模型前面の水位、堤体に設置した圧力計の時系列計測結果を示した。圧力計は 4 測線に設置しているため、それぞれを別に示している。それぞれ、前側の堤体模型が f1, f2, 後側の堤体模型が b1, b2 であり、b1, b2 の設置位置は 1.25m, 2.5m, 3.75m となる。なお、計測は各々 3 回繰り返しており、ここには 1 回目の結果を示した。

f1, f2 と b1, b2 それぞれで、波の到達時間は同じである。f1, f2 と b1, b2 を比較すると b1, b2 の方が前面水深が小さく、これは汀線から離れているためと考えられる。概略の水位変動や波力の時系列は、「津波波力特性の把握水理試験」の結果と類似である。津波到達時の壁を打ち上げる水位変動において、f1 と f2 の違いは比較的小さいが、b1 と b2 では、b1 の方が大きい傾向にある。b1 は水槽中心側であるため、前側の堤体からの周り込みにより、水位が高くなるものと考えられる。一方、圧力の時系列を見ると、b2 の方が圧力が大きい。b1 では、前面堤体からの周り込みにより水面の擾乱は大きくなるが横断方向の流速も卓越するため、堤体に働く圧力としては正面から直角に波の作用する b2 の方が大きくなる傾向にある。

上記の結果から、圧力計による計測結果の積分により堤体に働く津波波力を算出した。堤体模型の各設置位置における算出結果を、図 IV.3.2-4, 図 IV.3.2-5, 図 IV.3.2-6 に示す。f1 と f2, b1 と b2 それぞれで、波力の時系列特性に大きな違いはないが、水塊の落下時に発生する波力（セカンドピーク）の値が、いずれも外側の測線である f2, b2 の方が大きい。上述したように、堤体横断方向の流速が発生することにより、f1, b1 の波力が f2, b2 よりも小さくなったと考えられる。

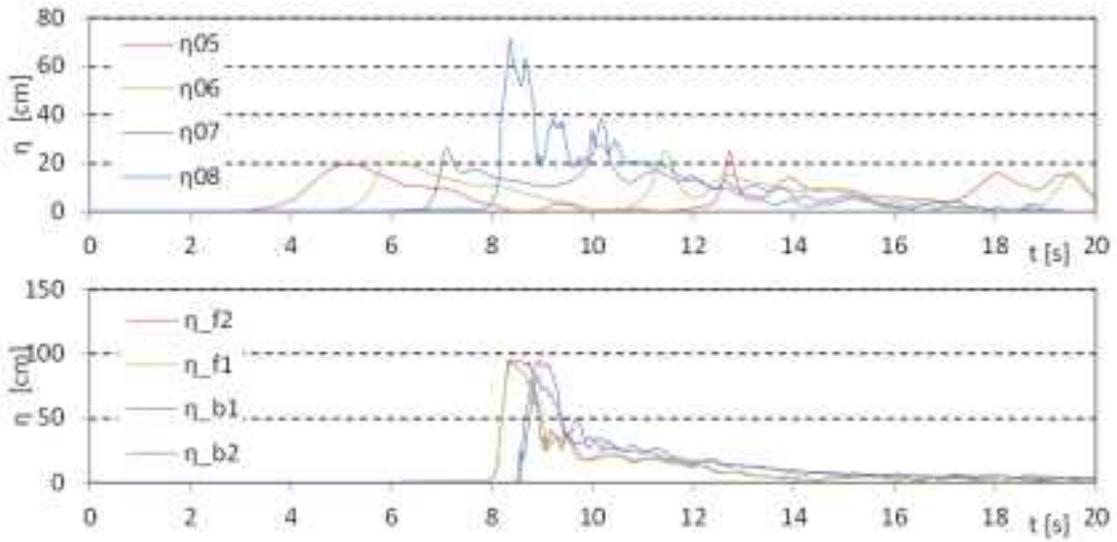


図 IV.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 0m, W01)

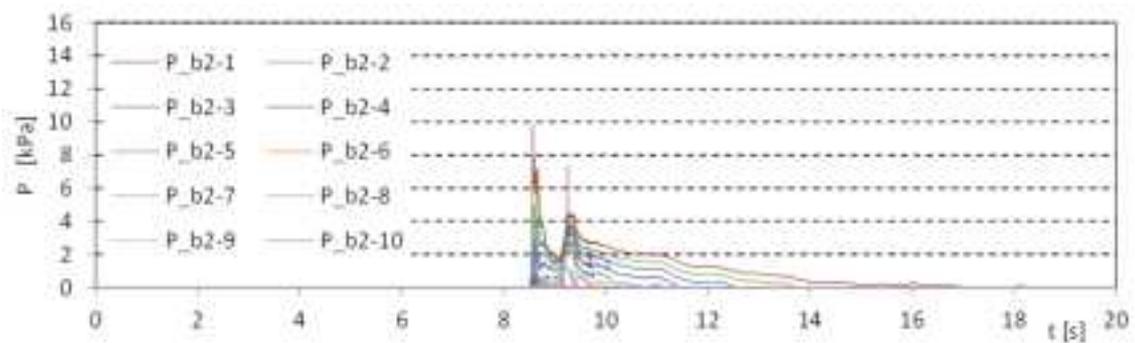
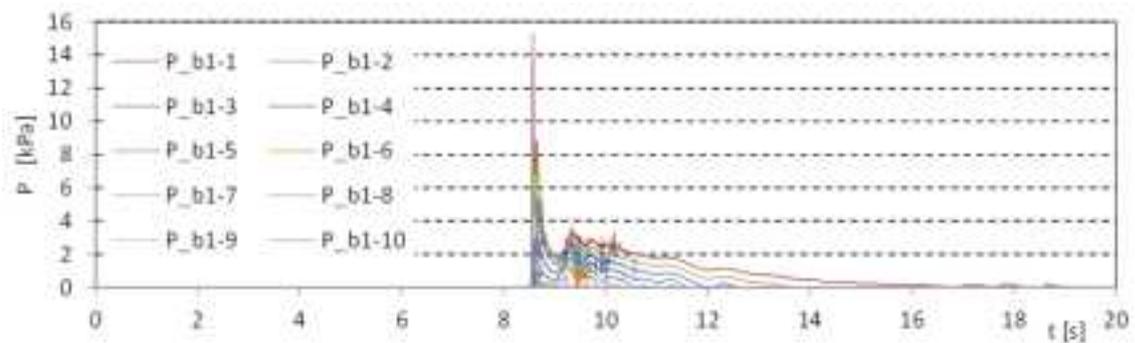
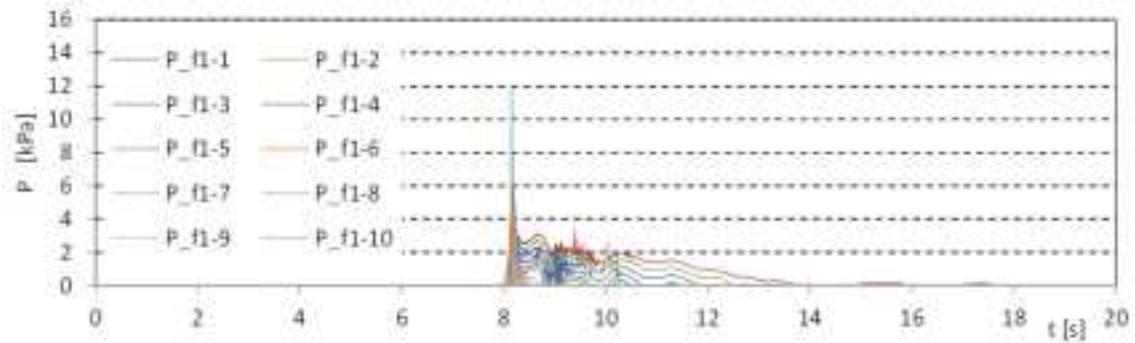
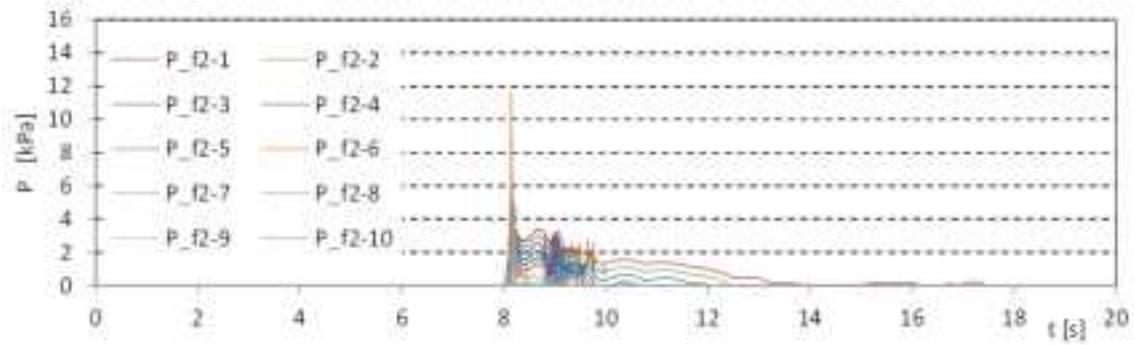


図 IV.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 0m, W01)

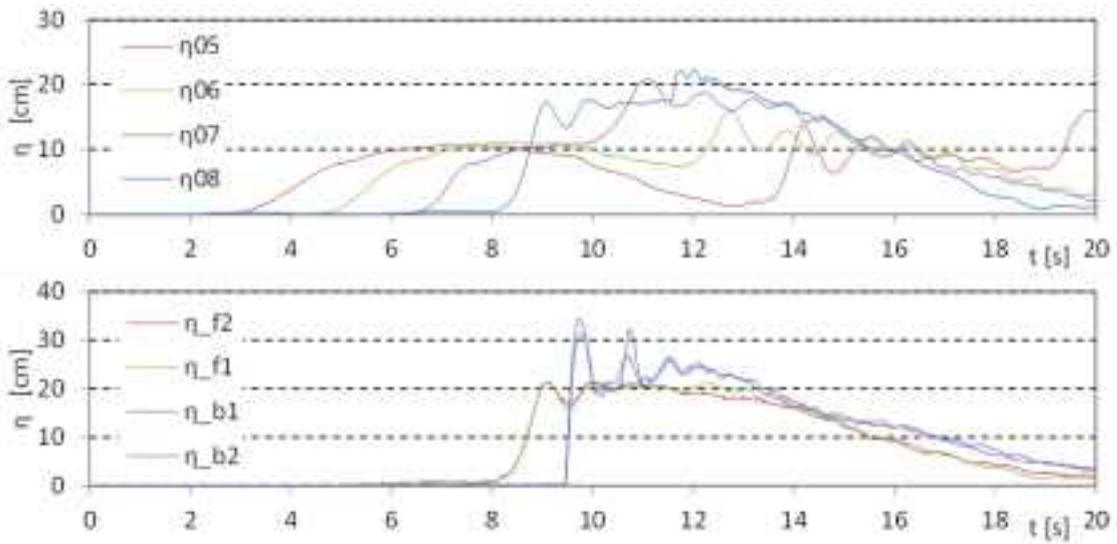


図 IV.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 0m, W07)

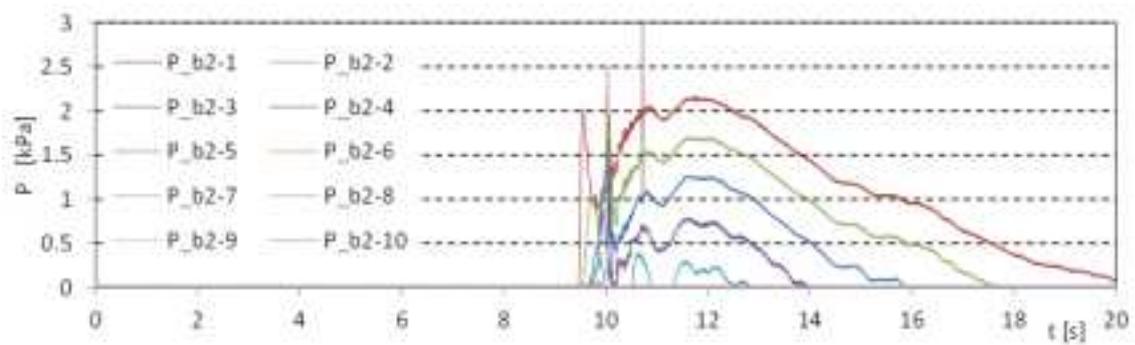
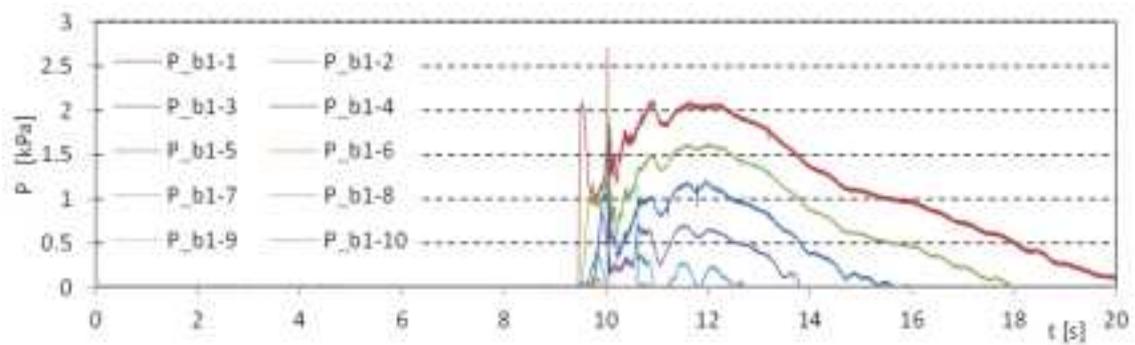
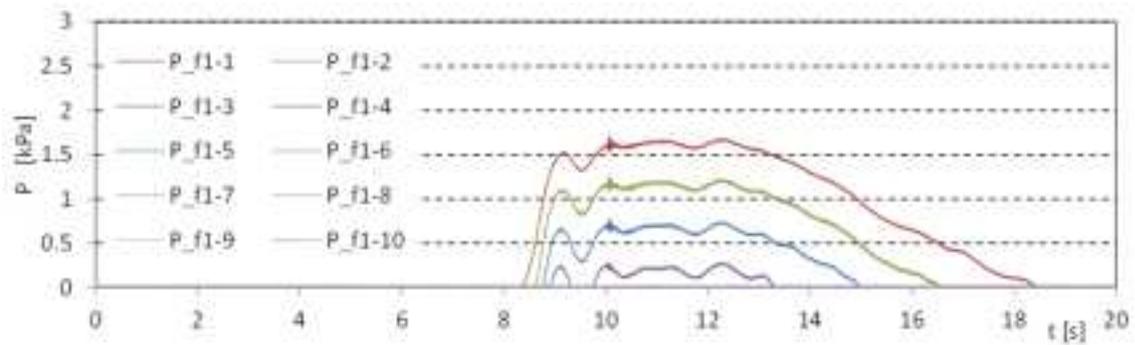
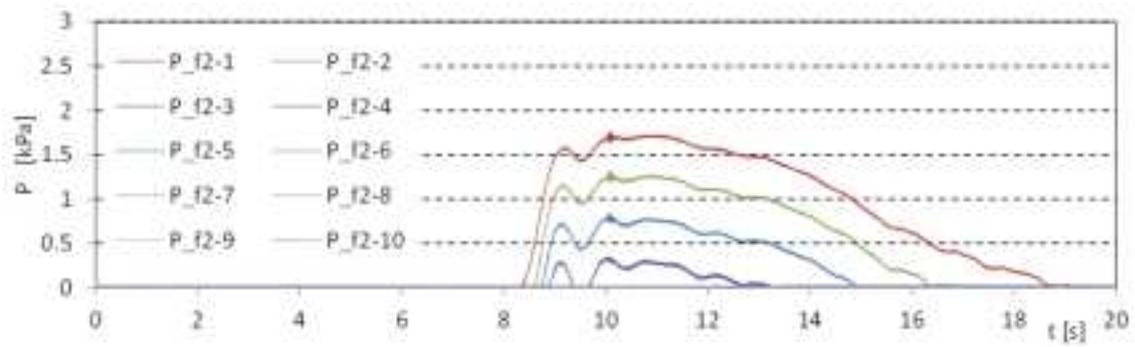


図 IV.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 0m, W07)

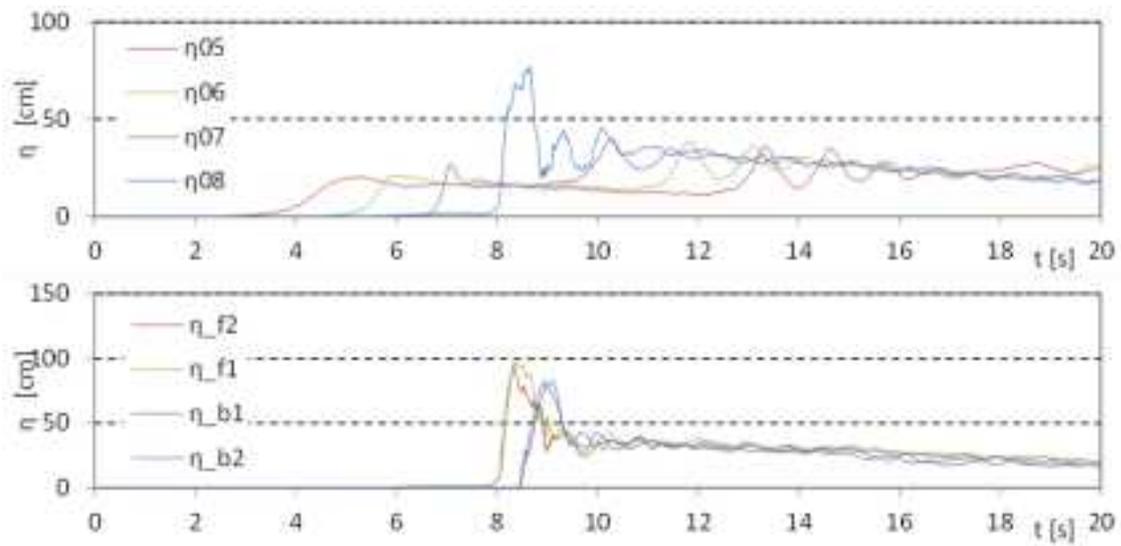


図 IV.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 0m, W09)

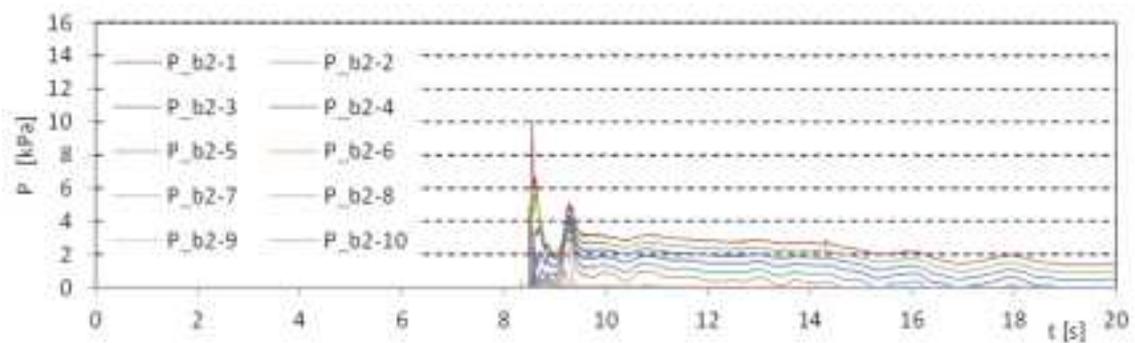
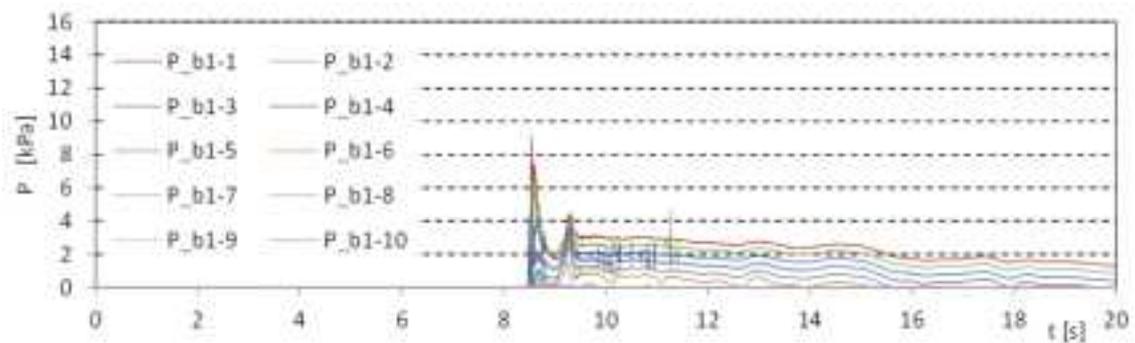
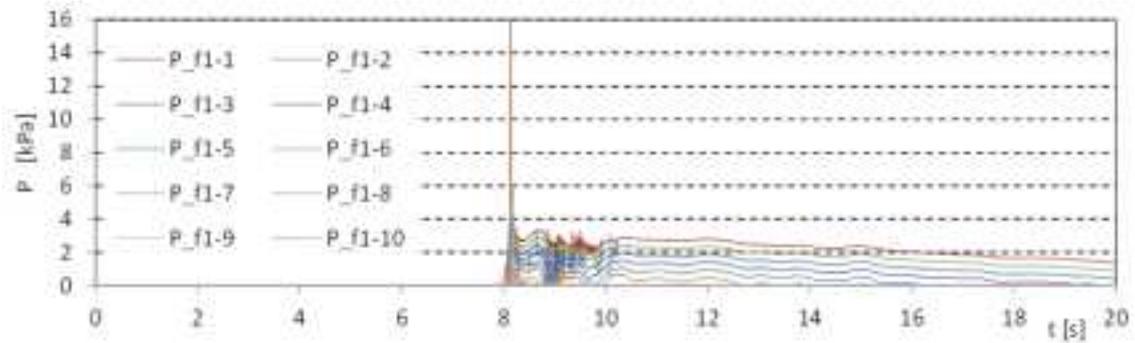
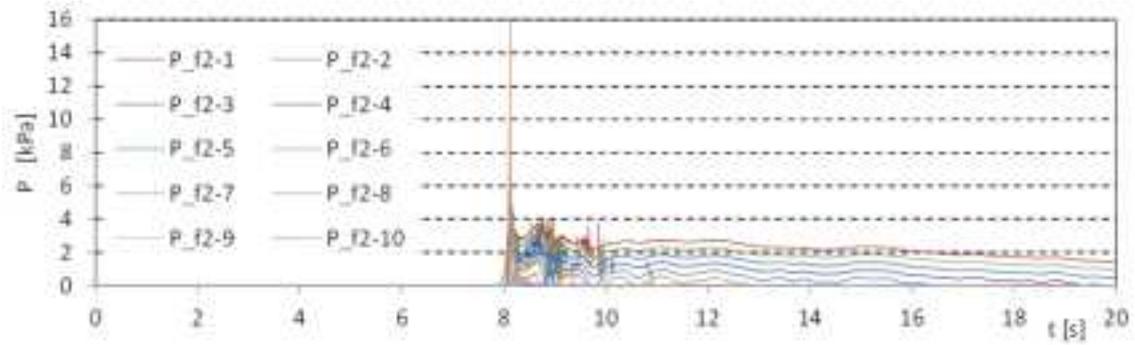


図 IV.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 0m, W09)

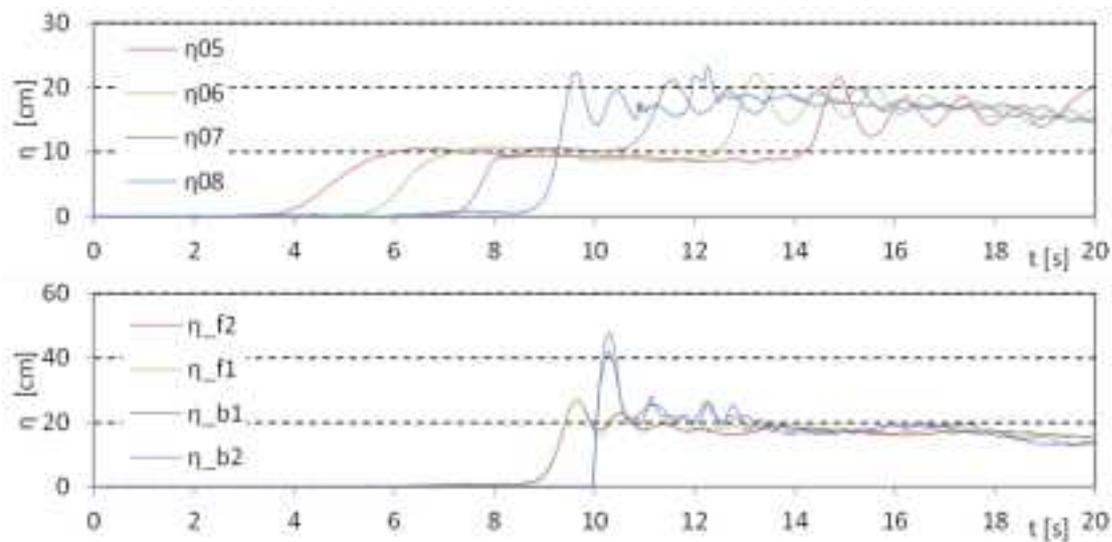


図 IV.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 0m, W11)

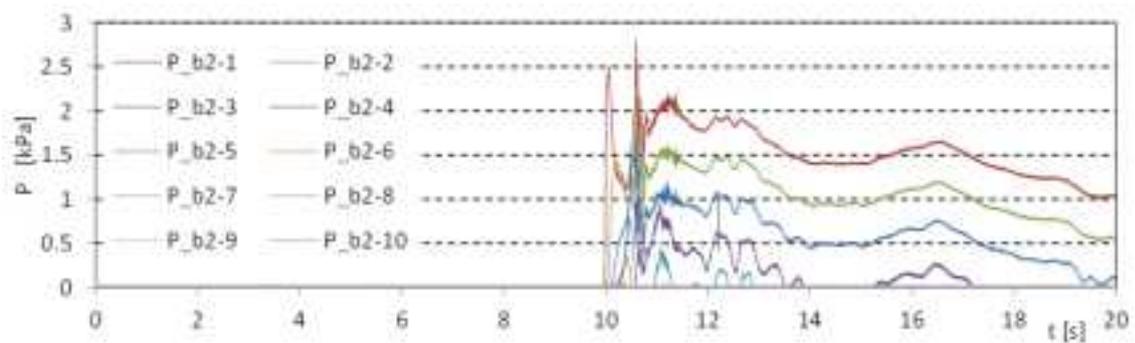
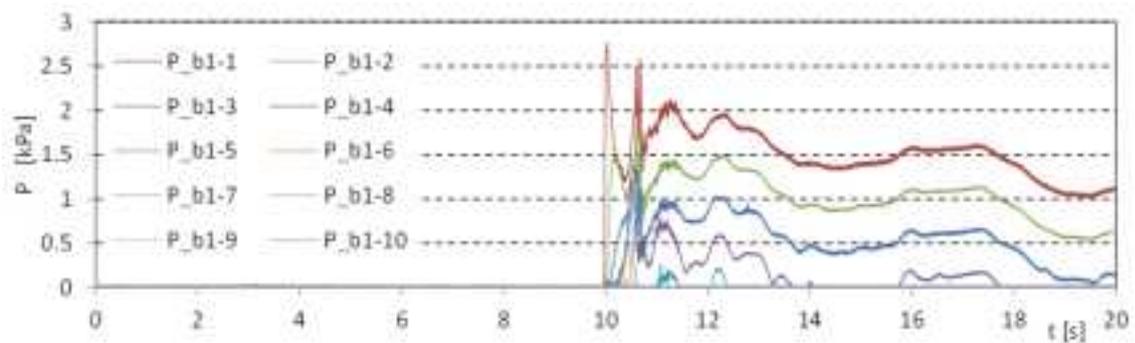
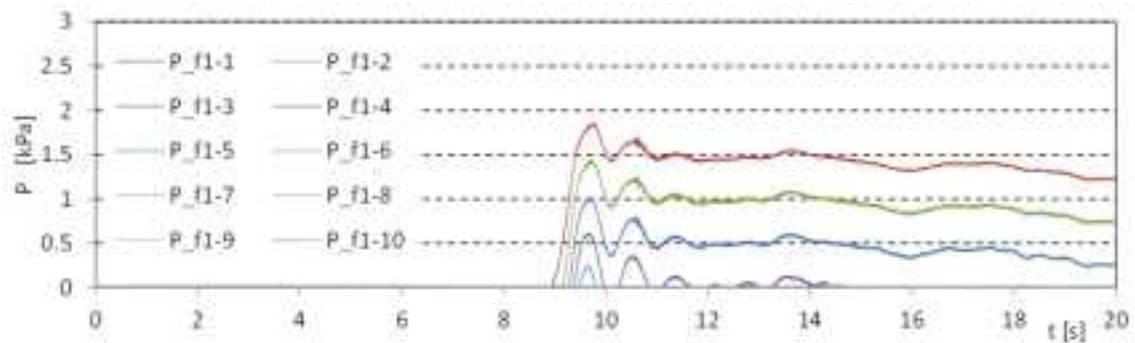
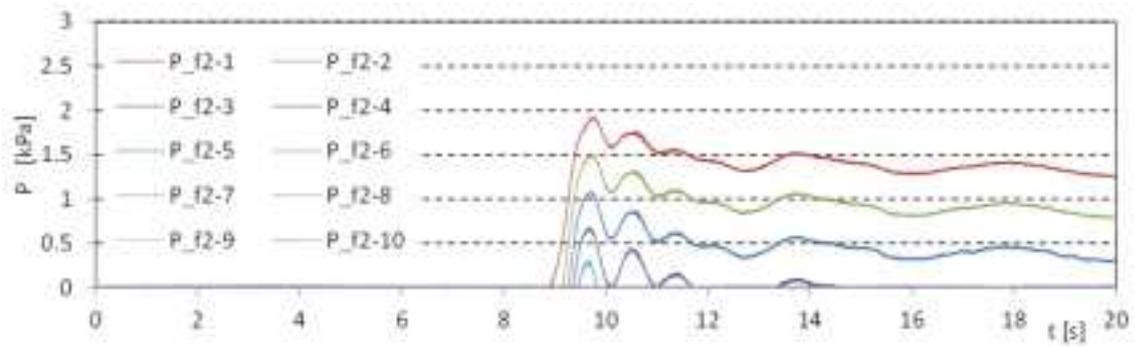


図 IV.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 0m, W11)

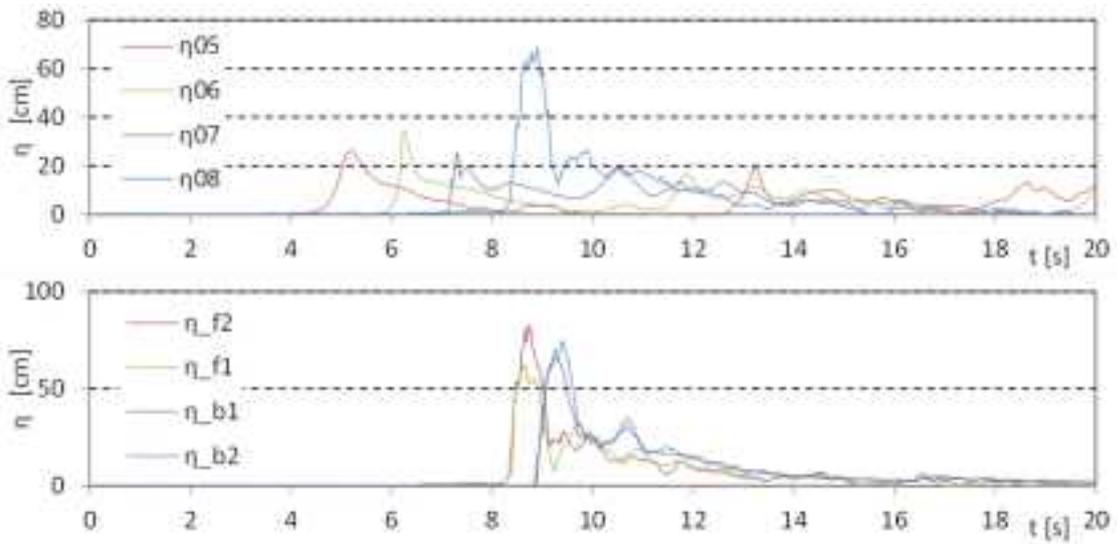


図 IV.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 0m, W13)

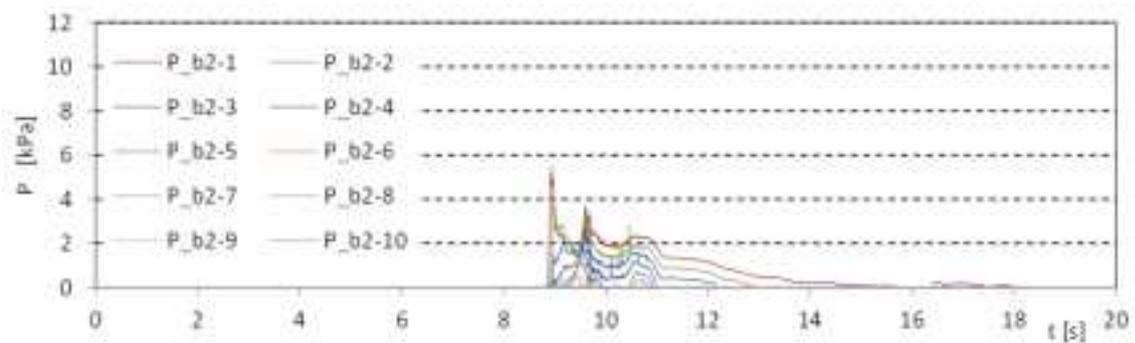
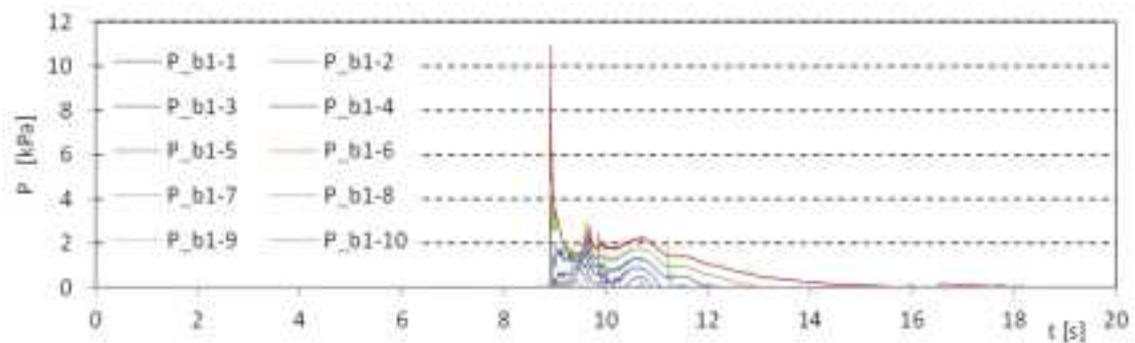
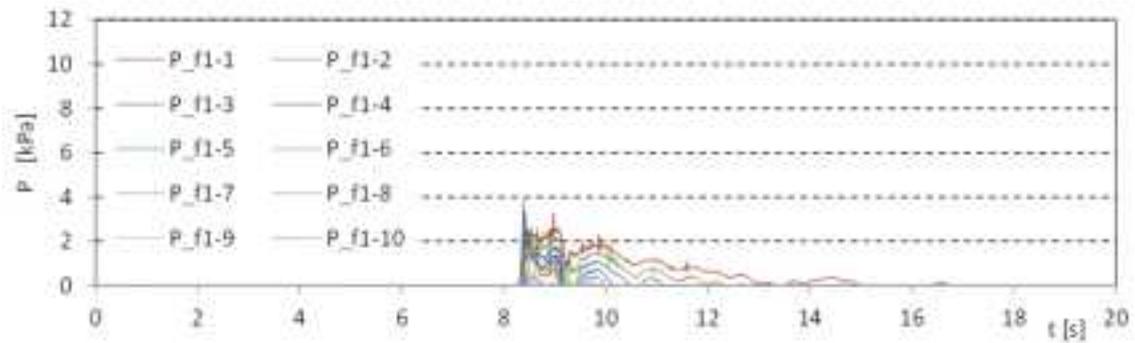
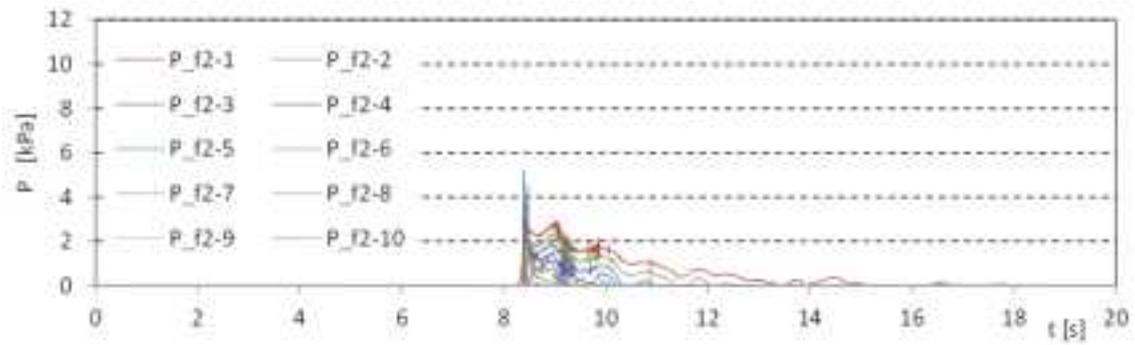


図 IV.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 0m, W13)

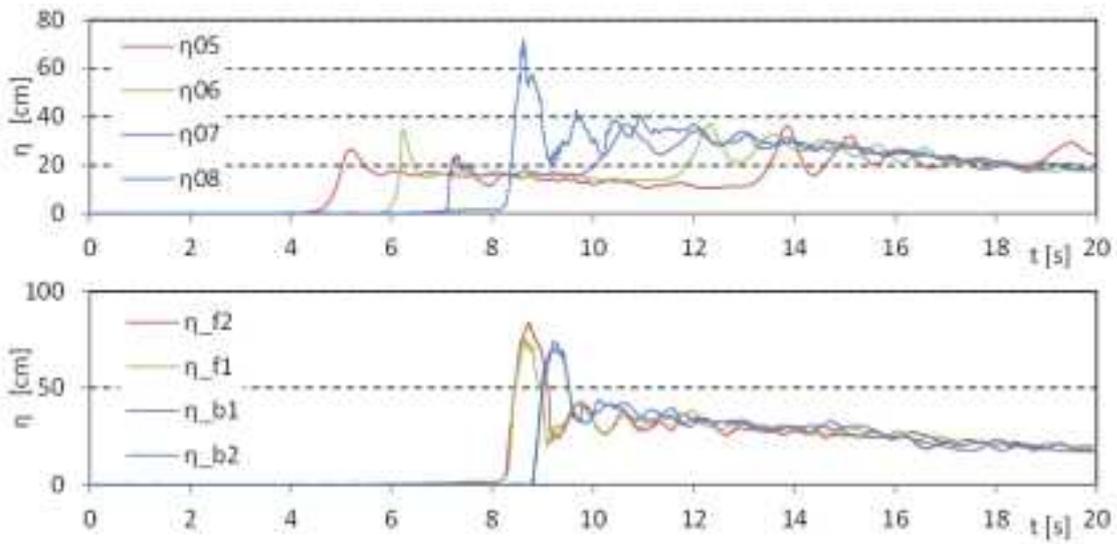


図 IV.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 0m, W14)

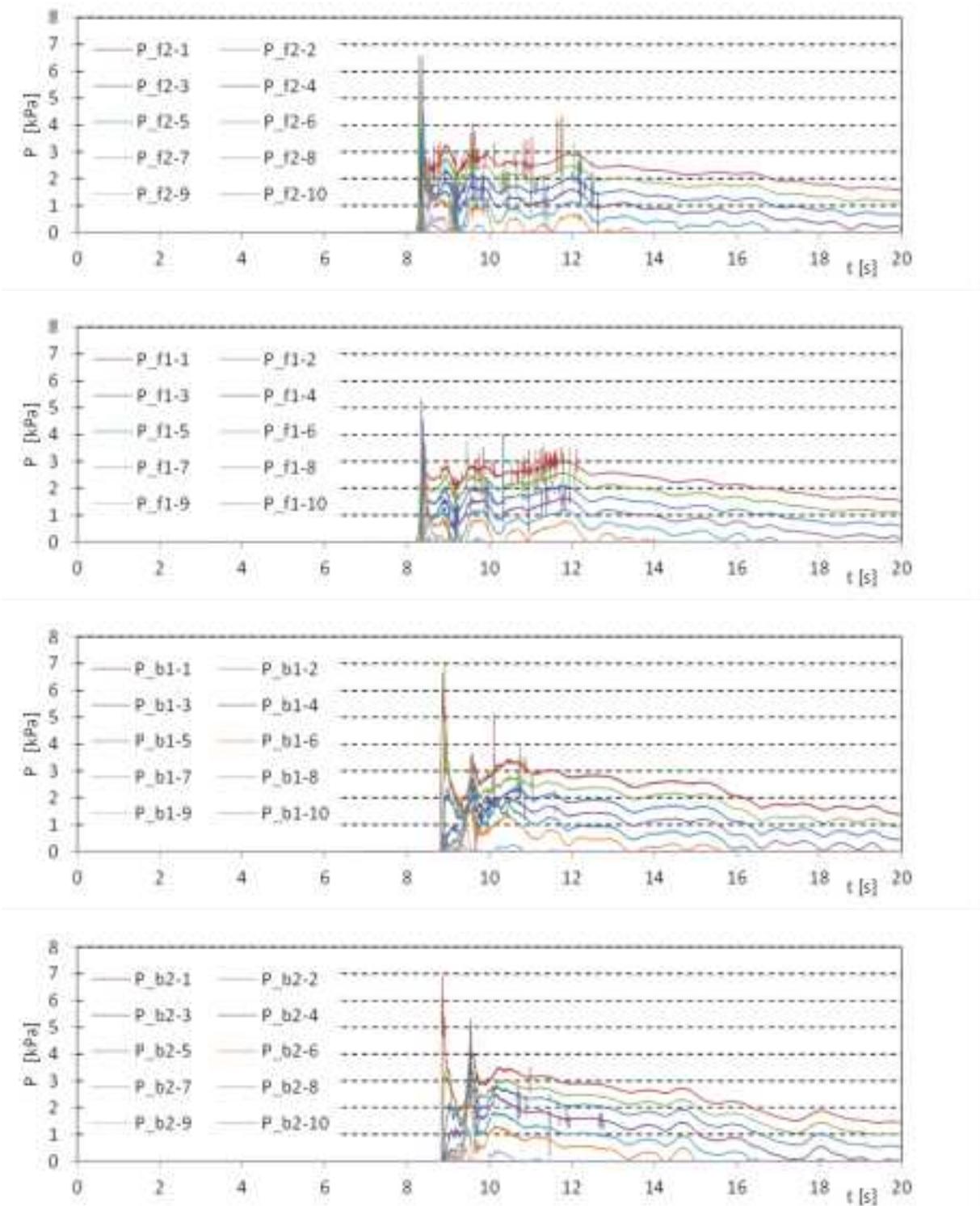


図 IV.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 0m, W14)

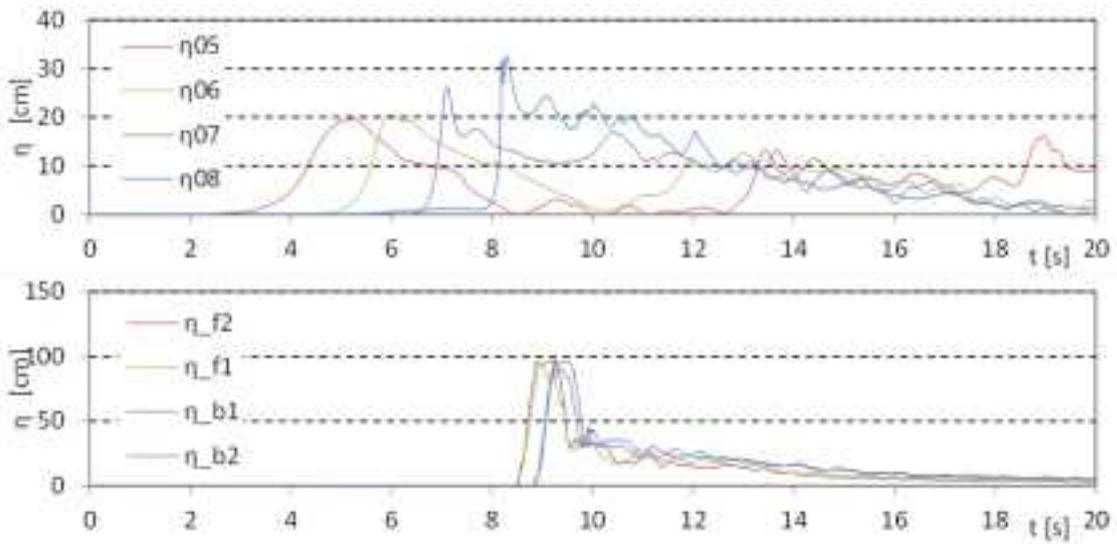


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 1.25m, W01)

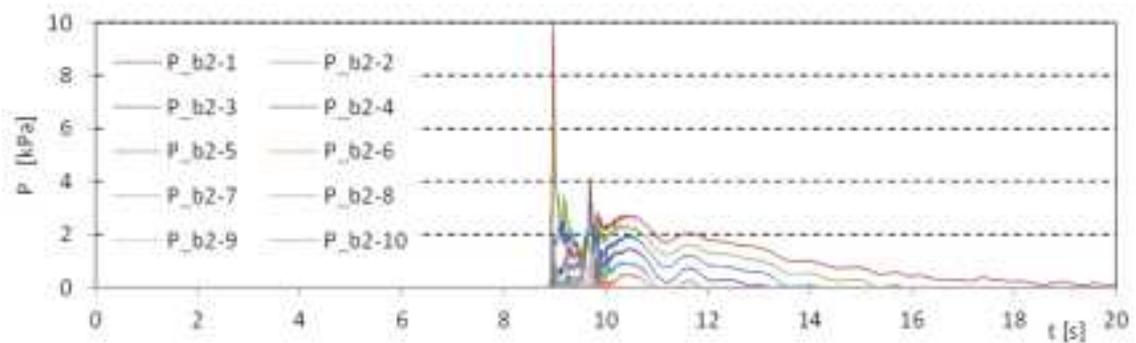
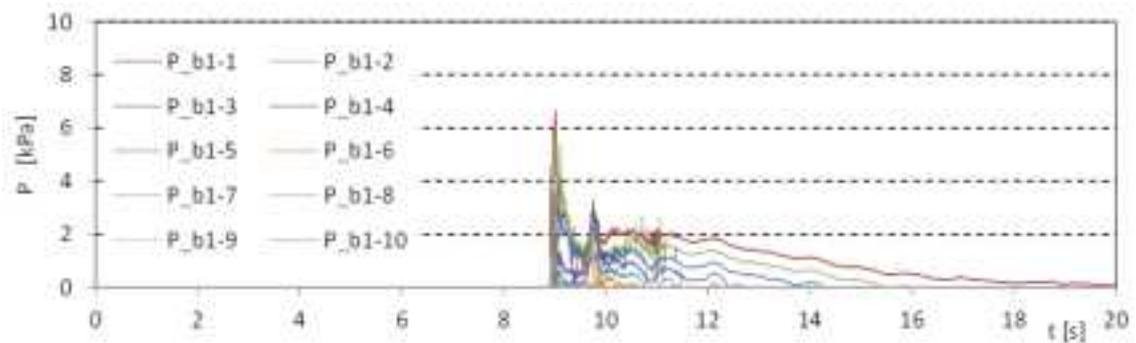
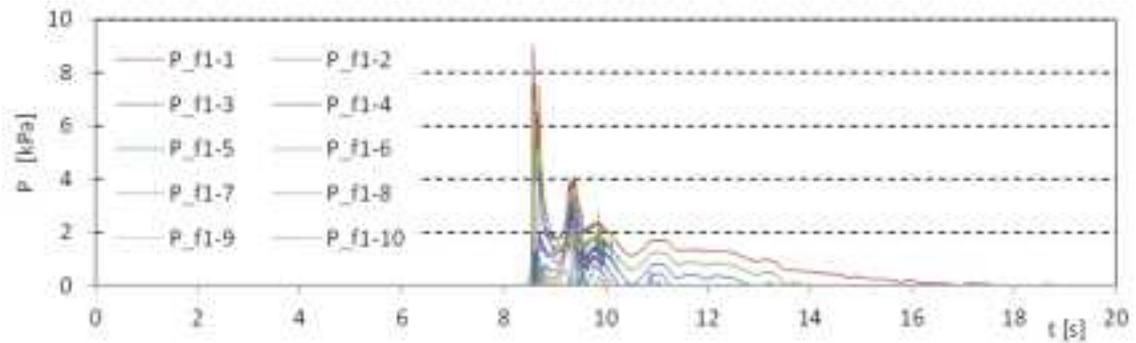
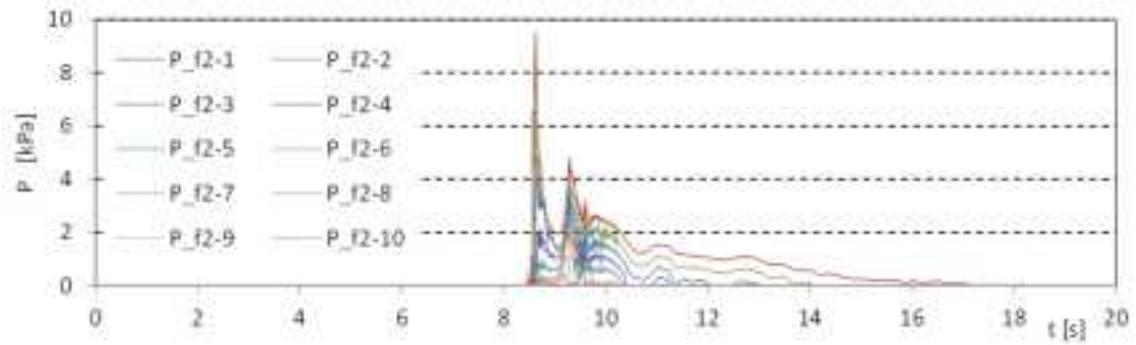


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 1.25m, W01)

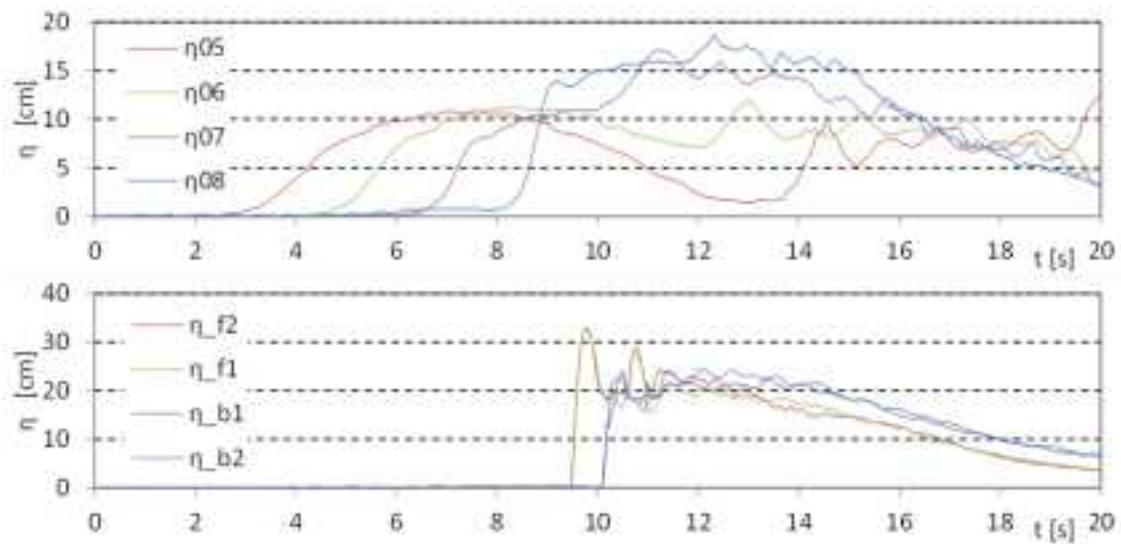


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 1.25m, W07)

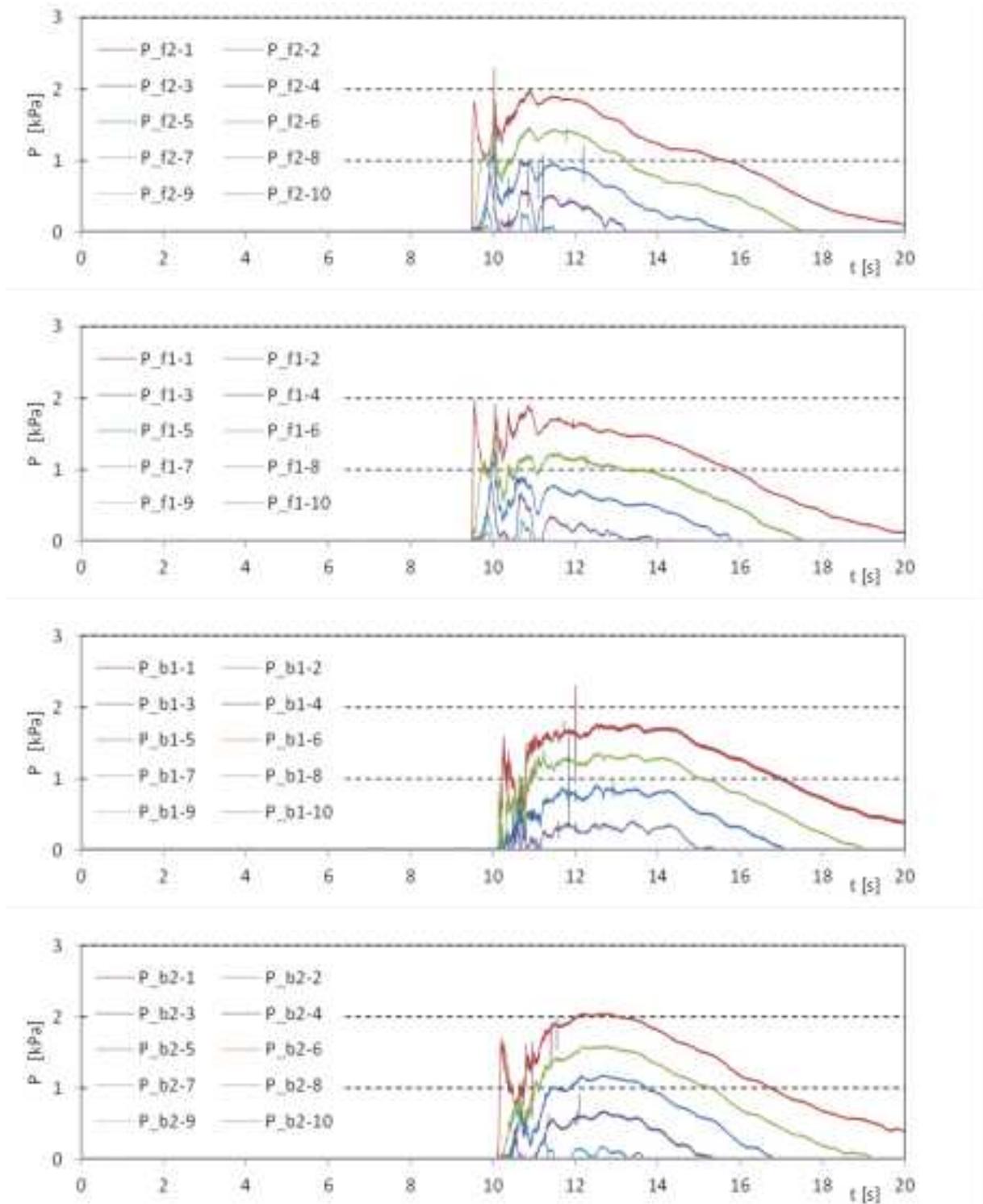


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 1.25m, W07)

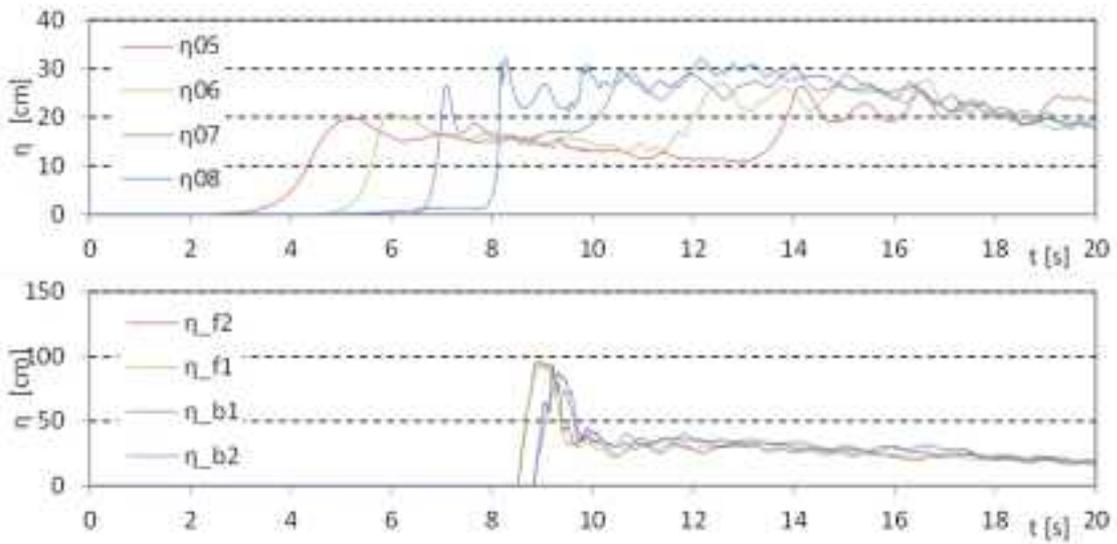


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 1.25m, W09)

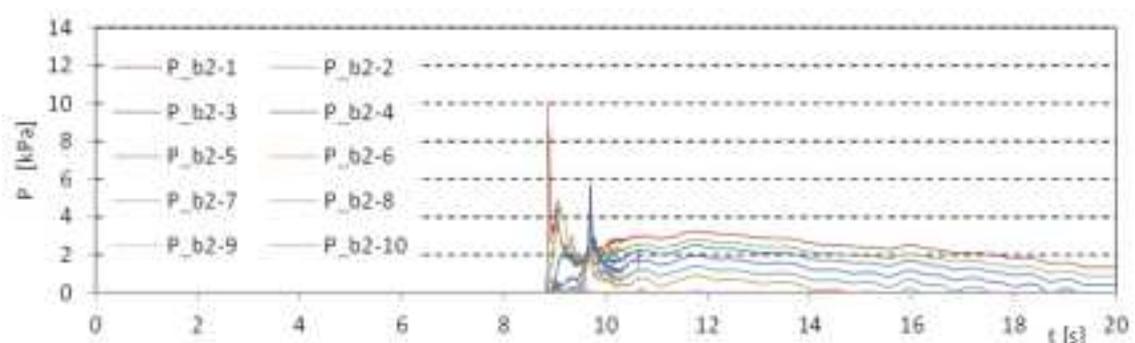
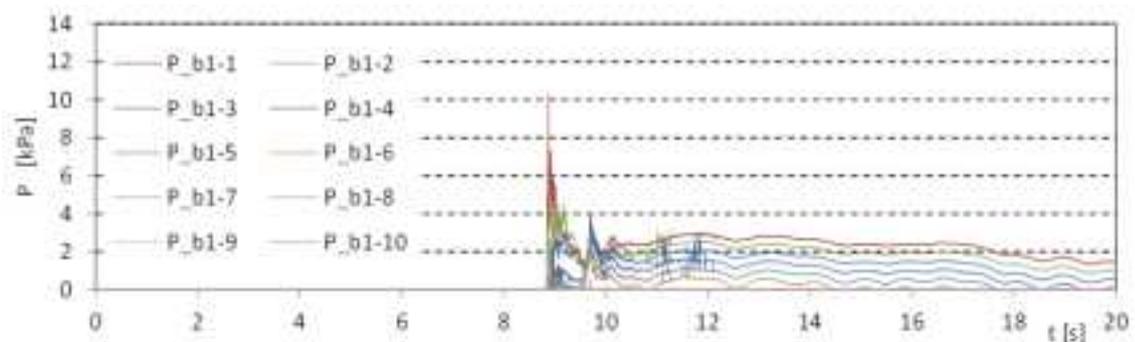
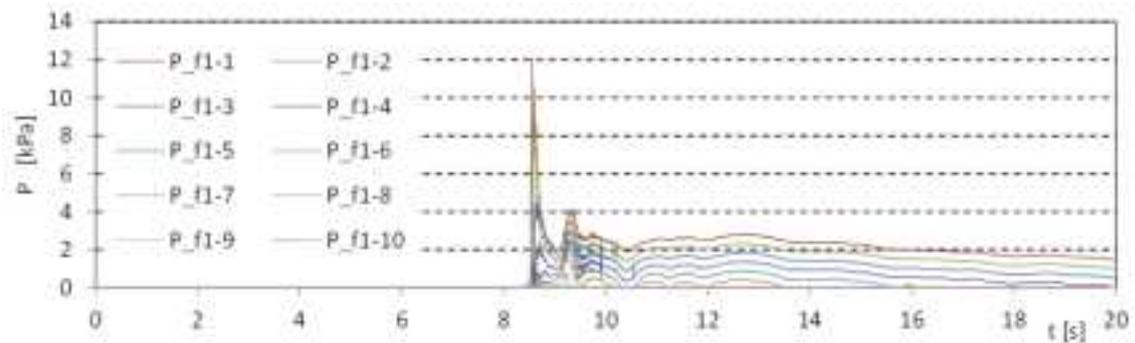
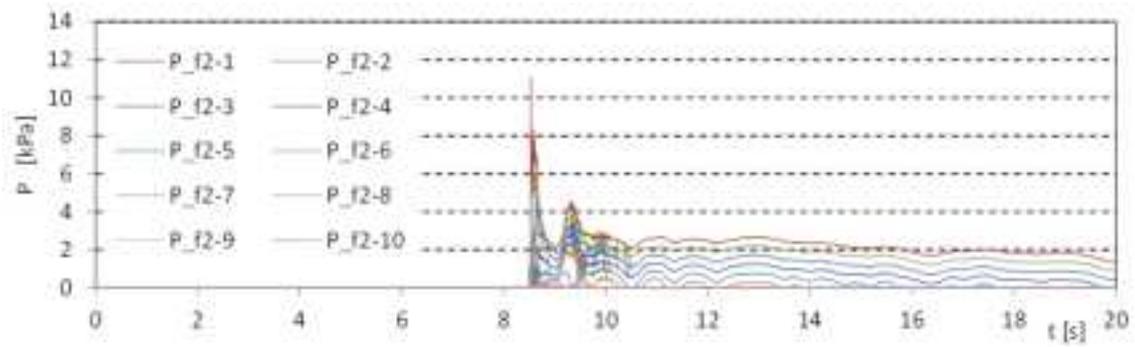


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 1.25m, W09)

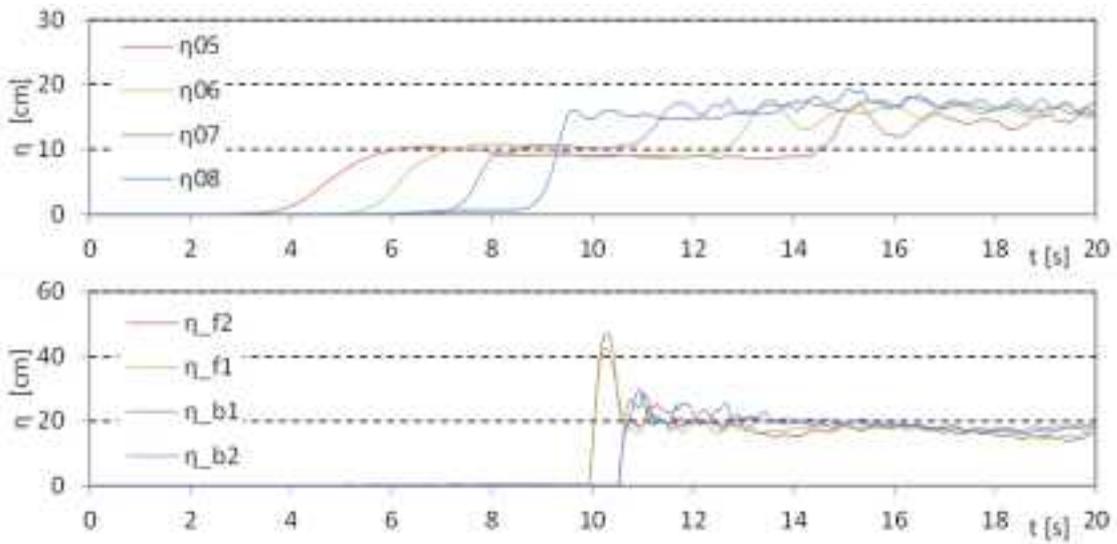


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 1.25m, W11)

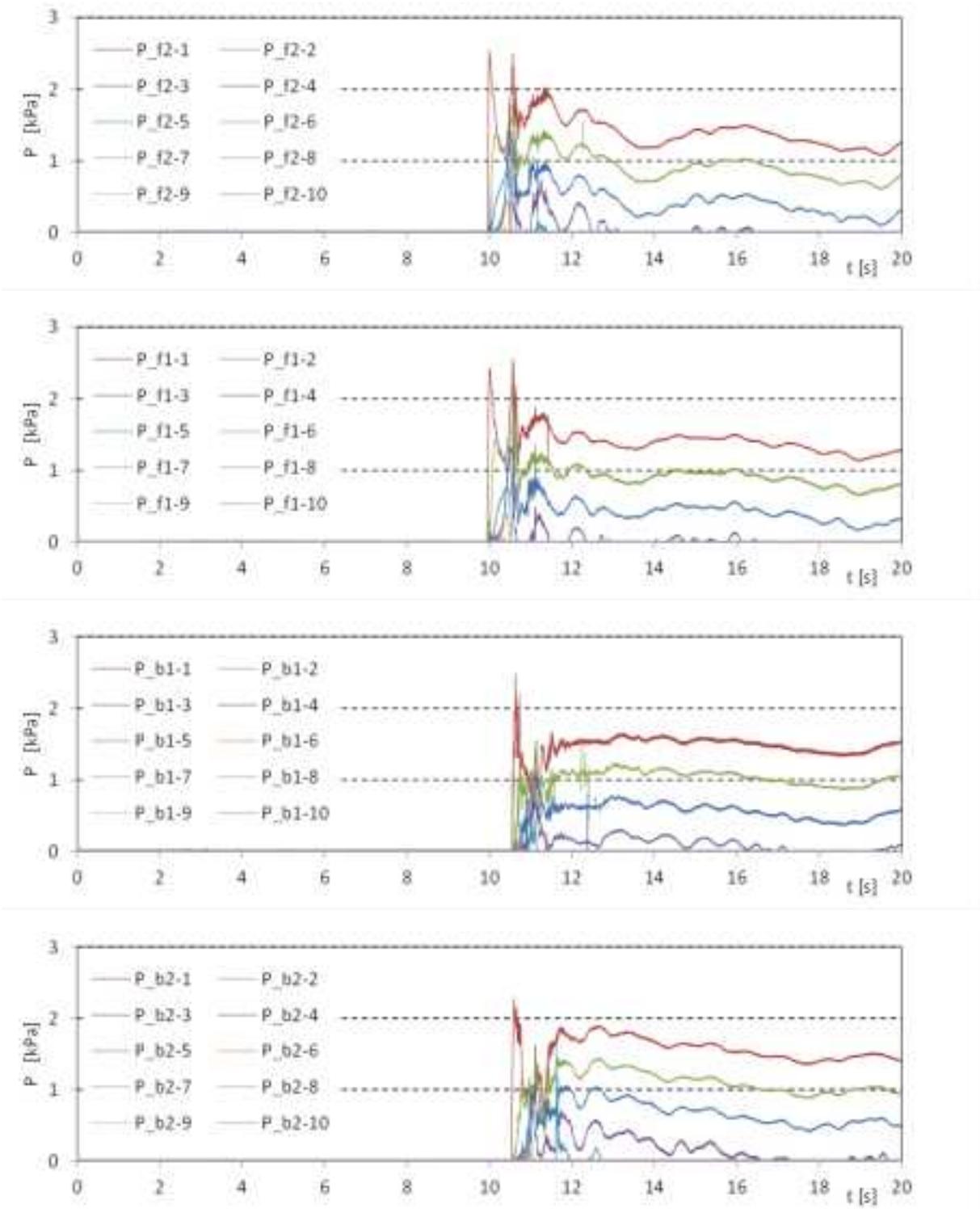


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 1.25m, W11)

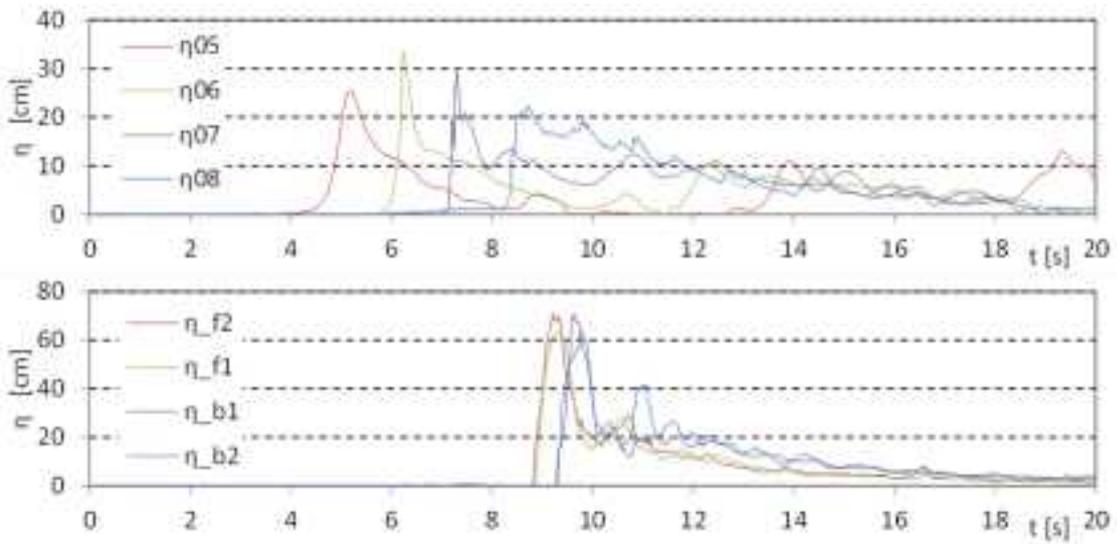


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 1.25m, W13)

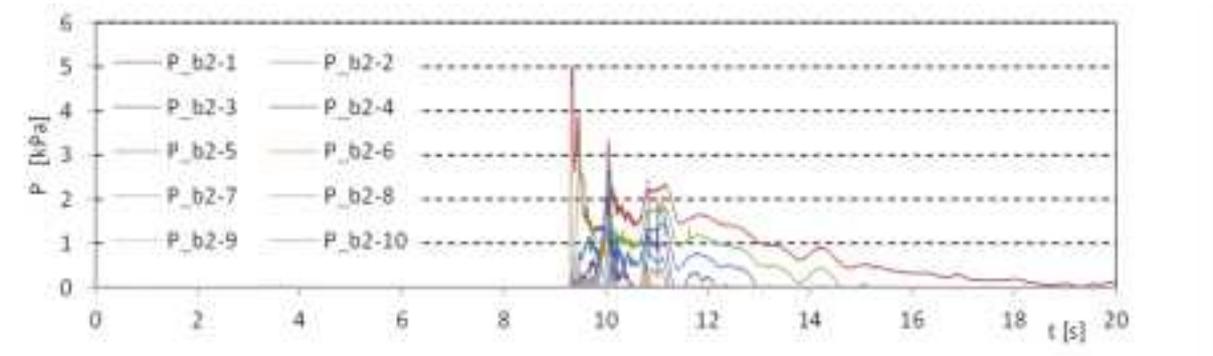
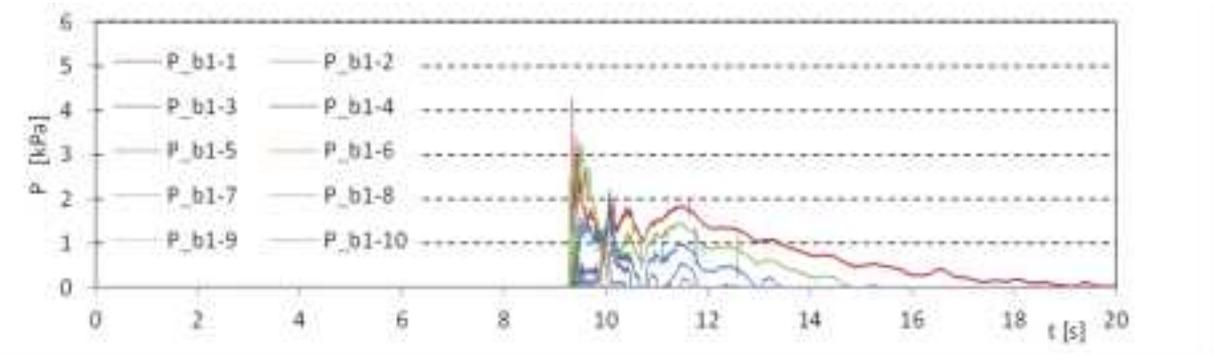
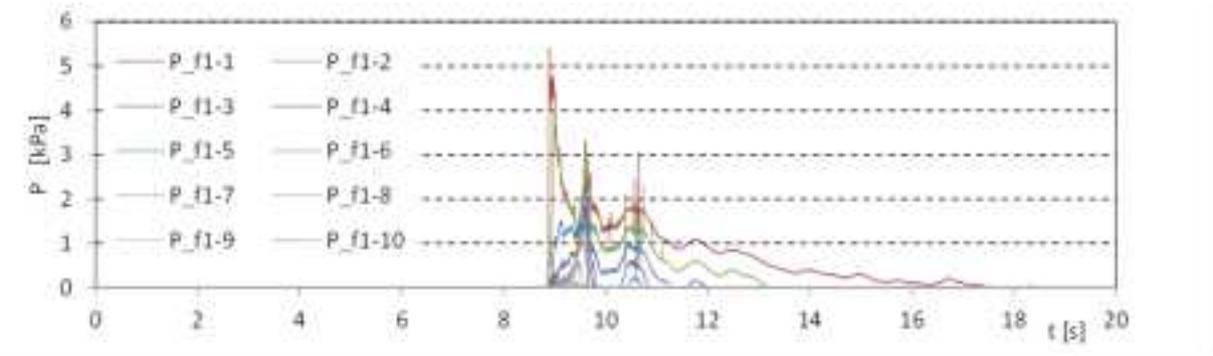
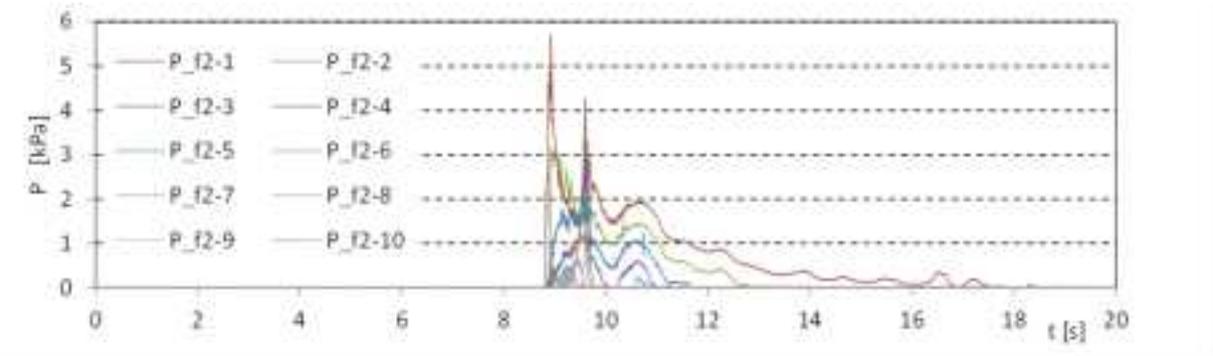


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 1.25m, W13)

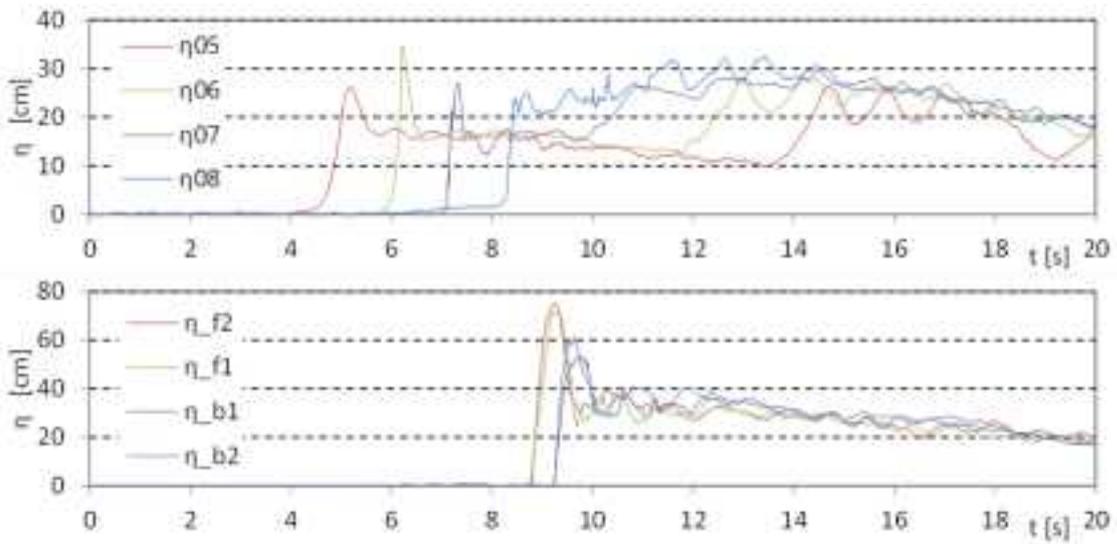


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 1.25m, W14)

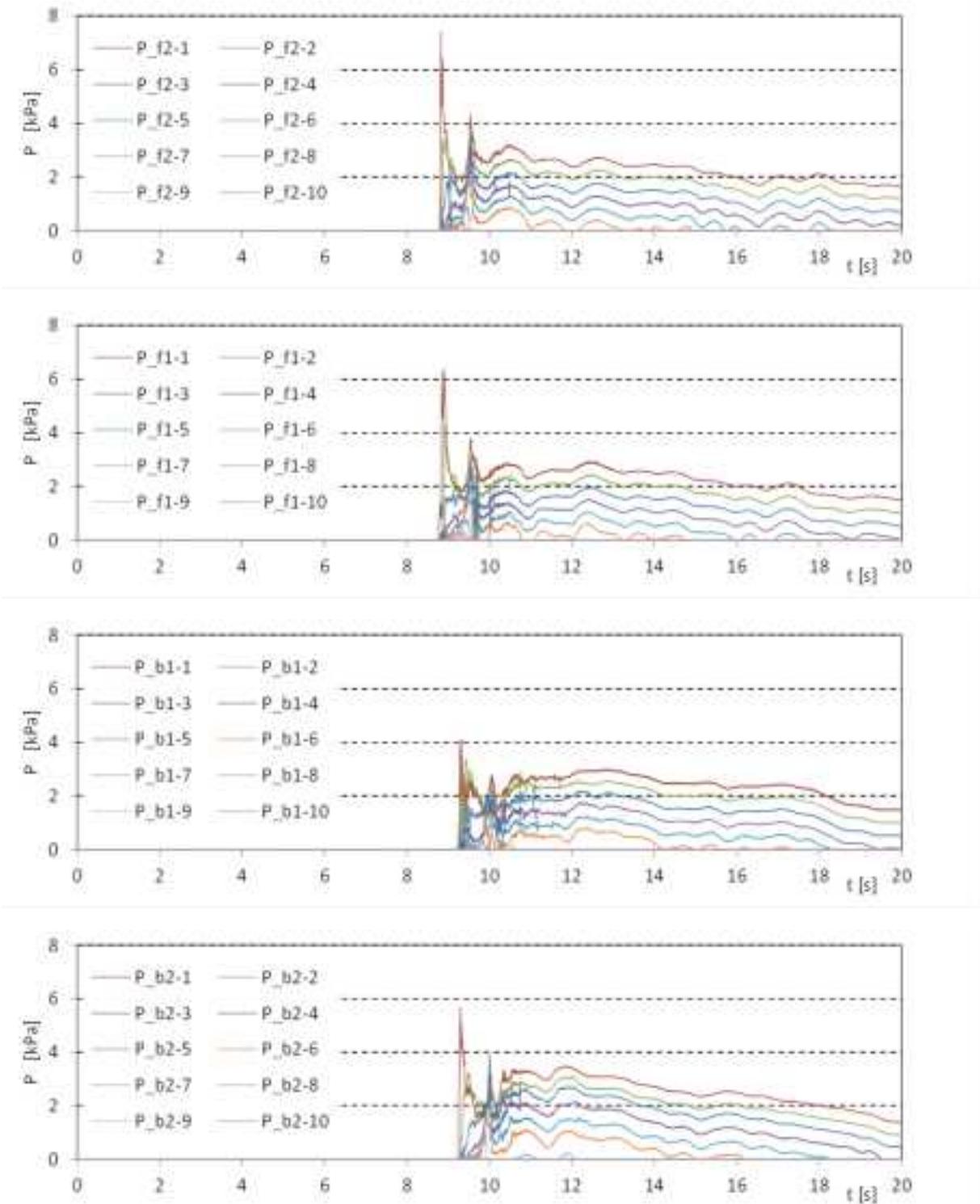


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 1.25m, W14)

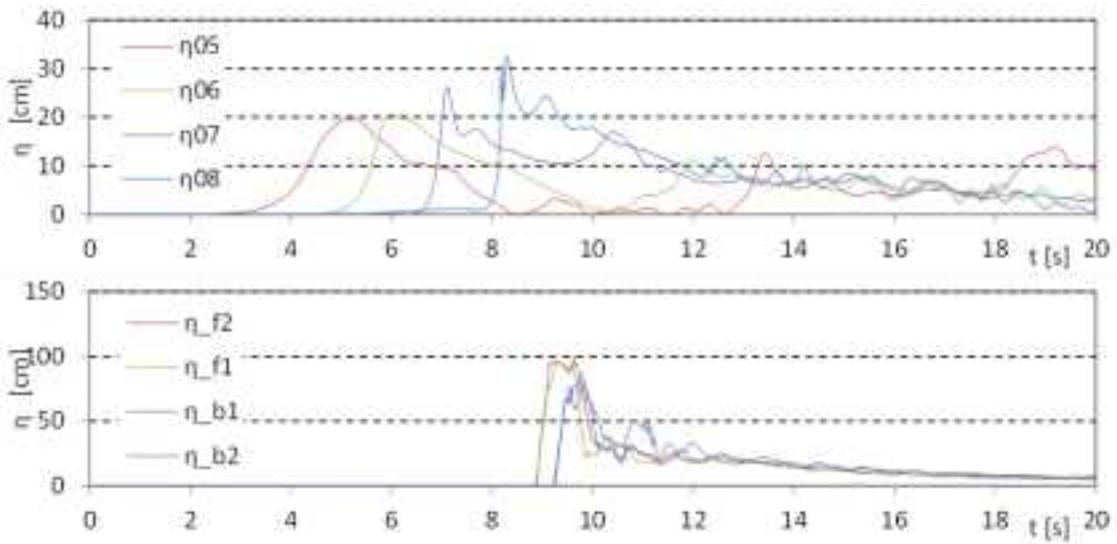


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 2.5m, W01)

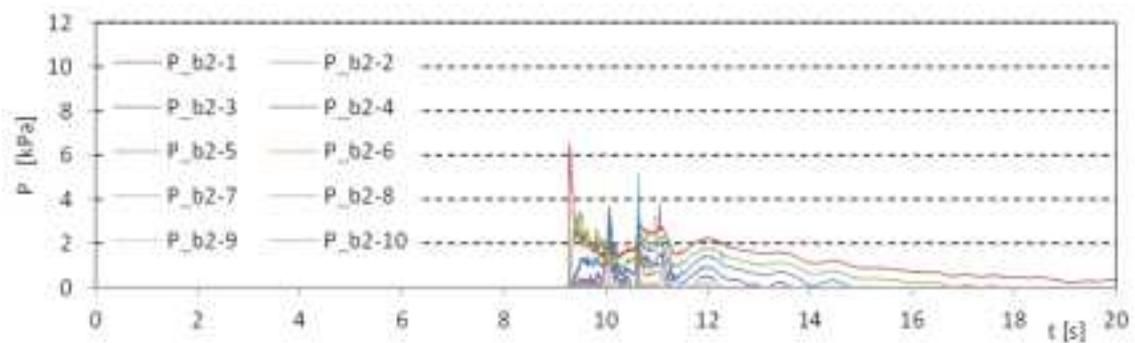
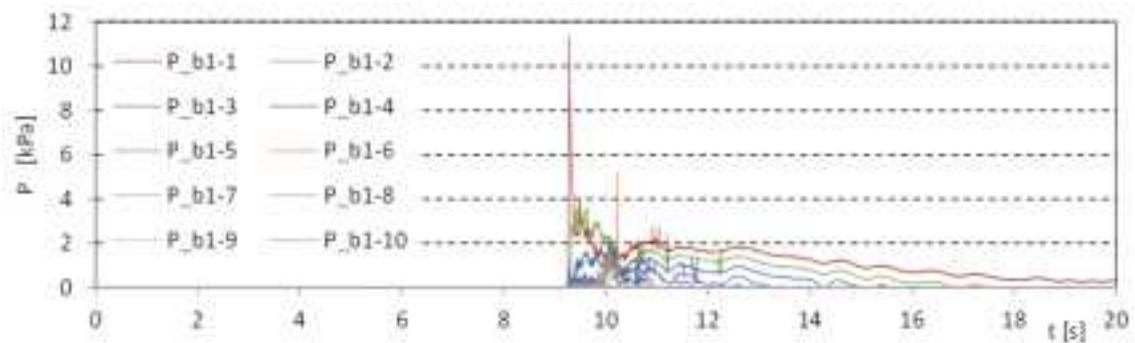
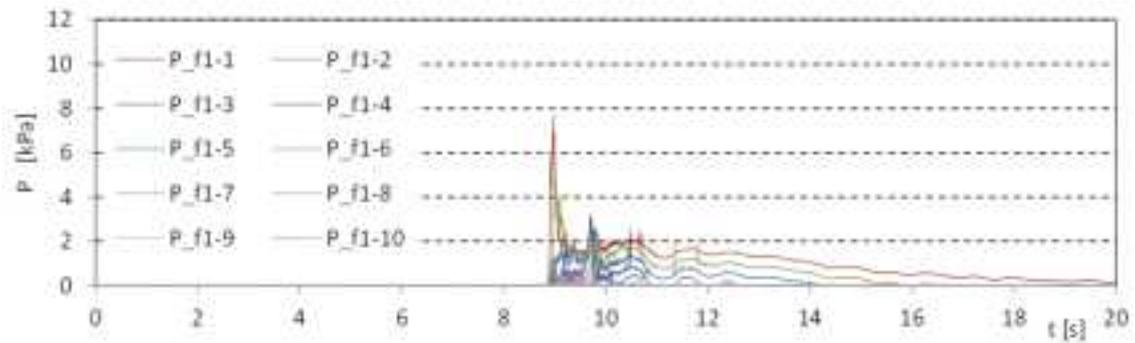
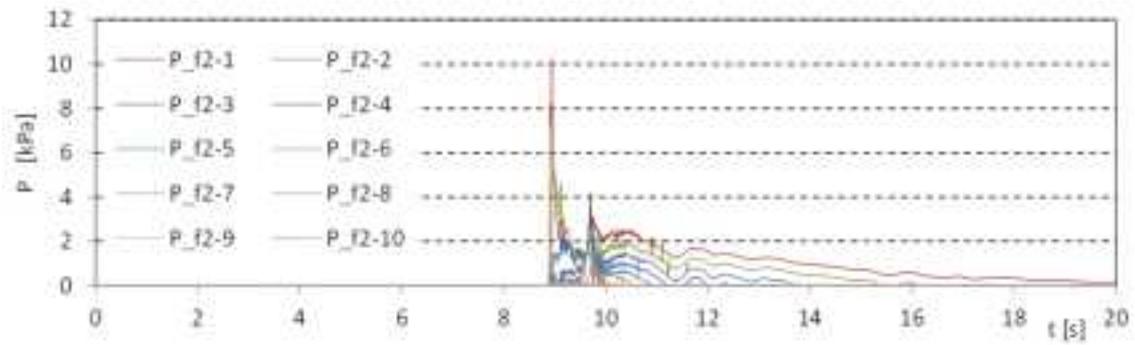


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 2.5m, W01)

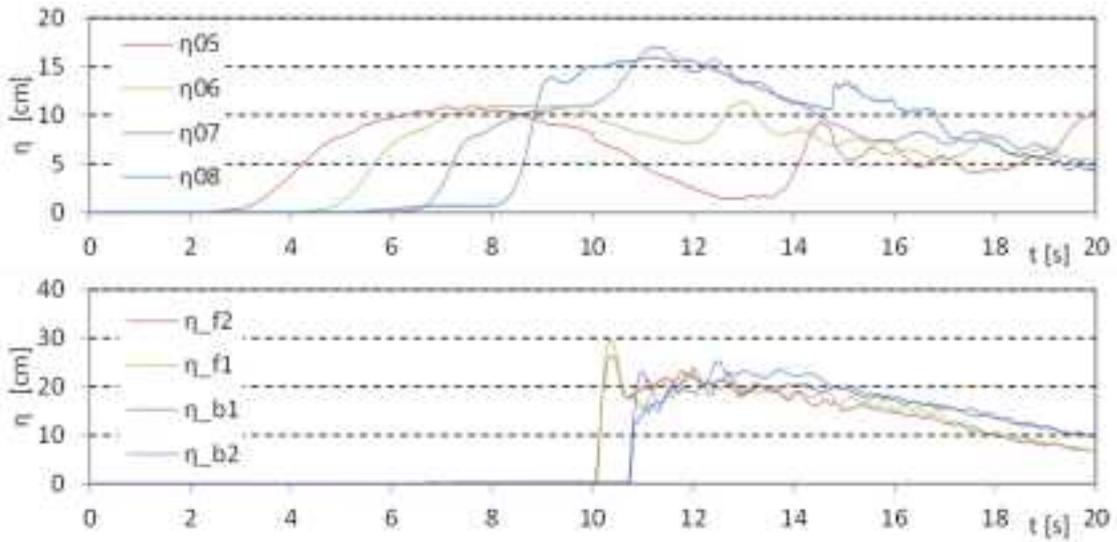


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 2.5m, W07)

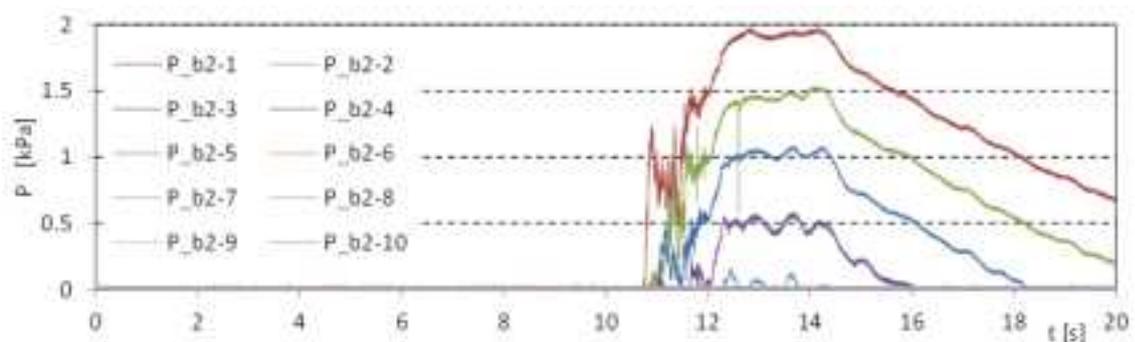
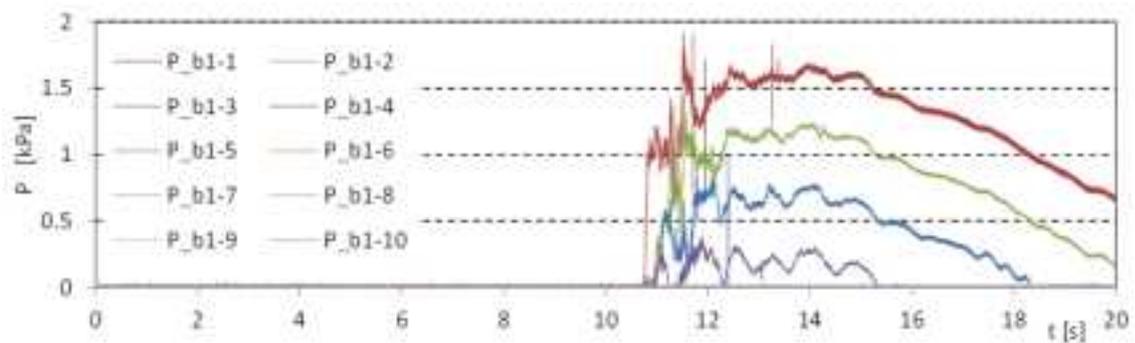
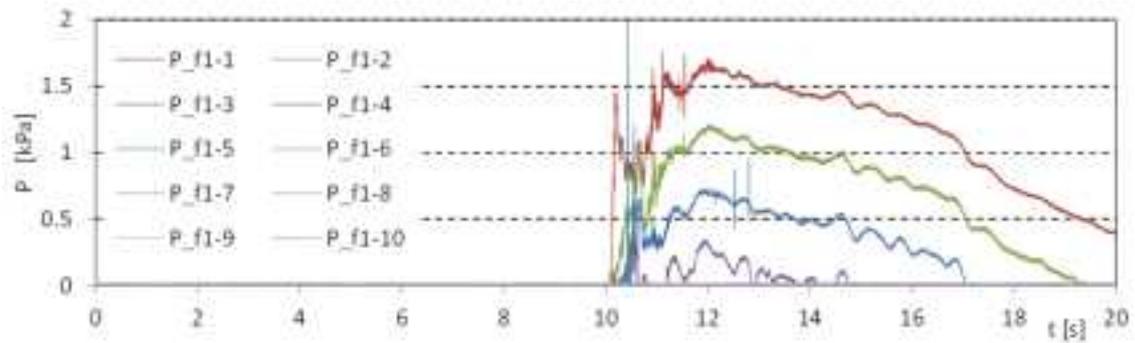
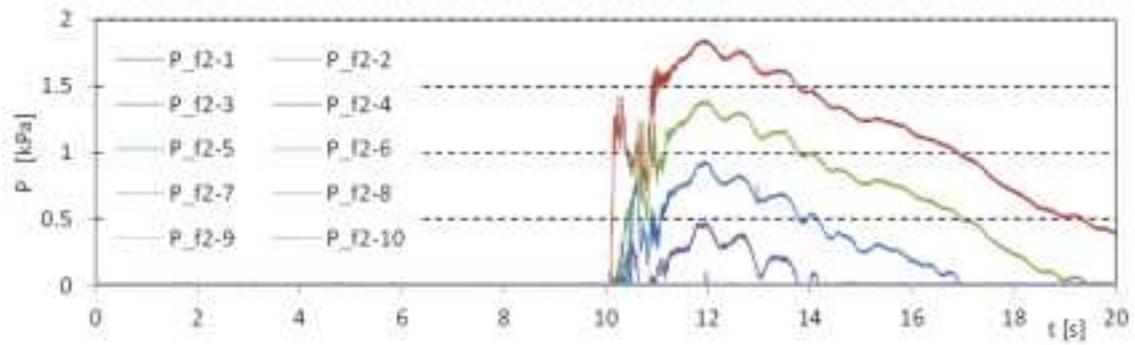


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 2.5m, W07)

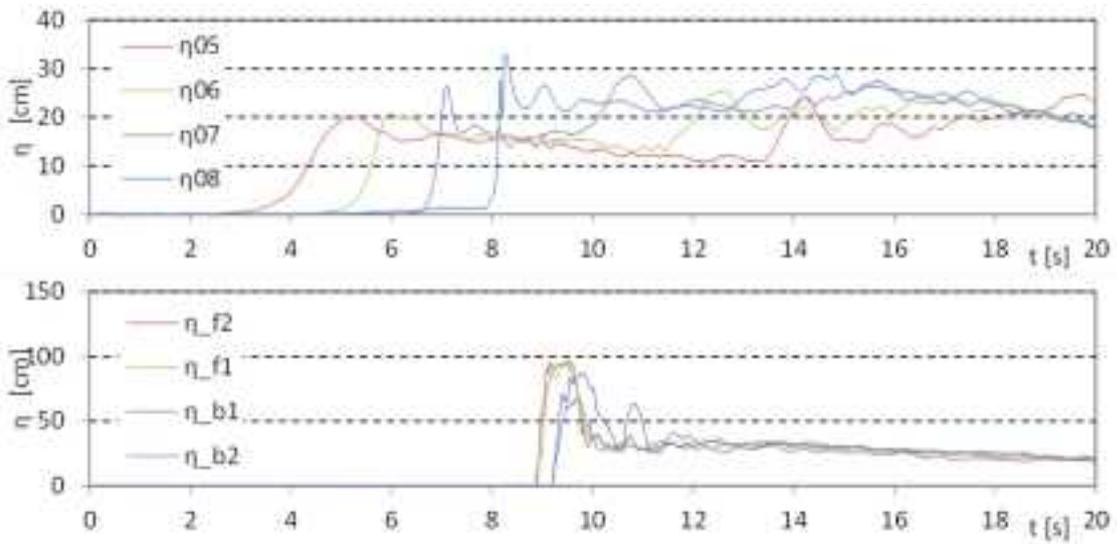


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 2.5m, W09)

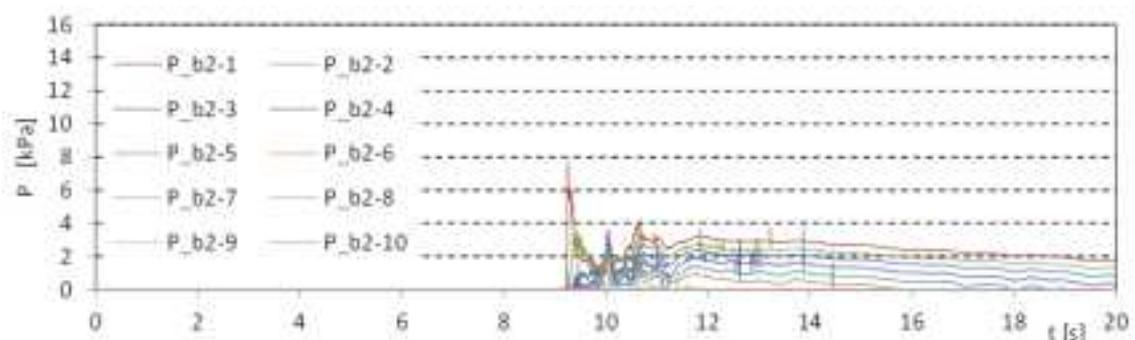
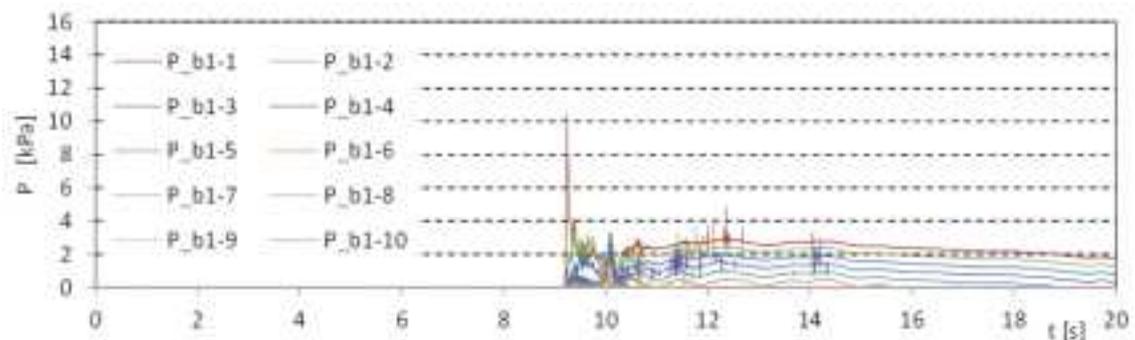
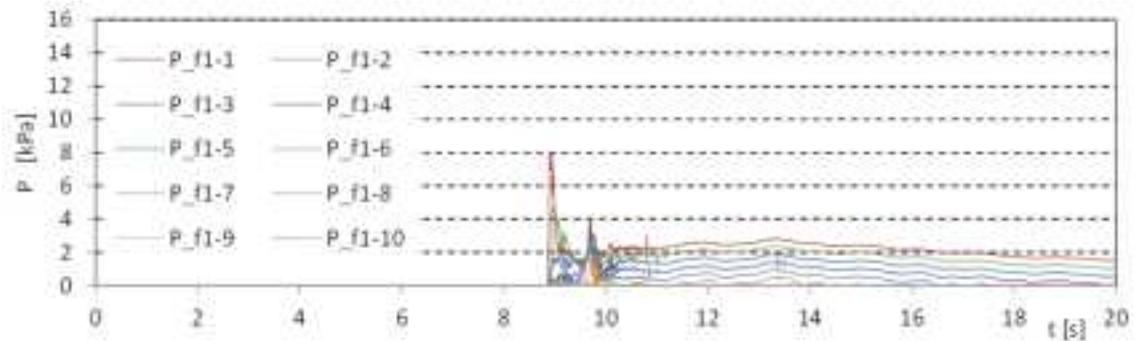
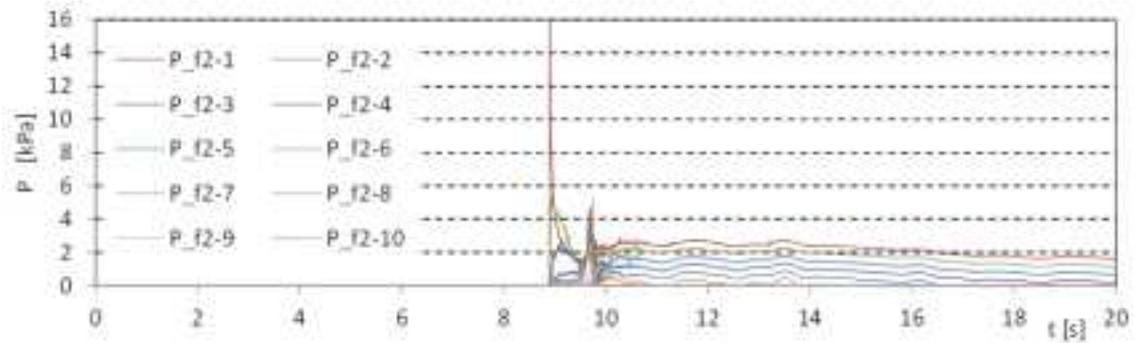


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 2.5m, W09)

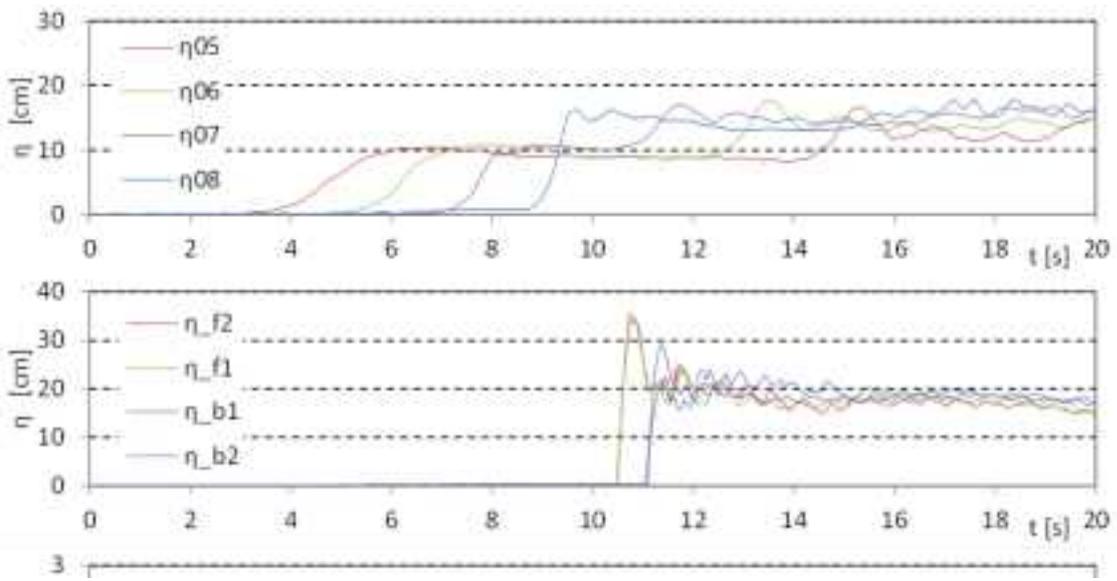


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 2.5m, W11)

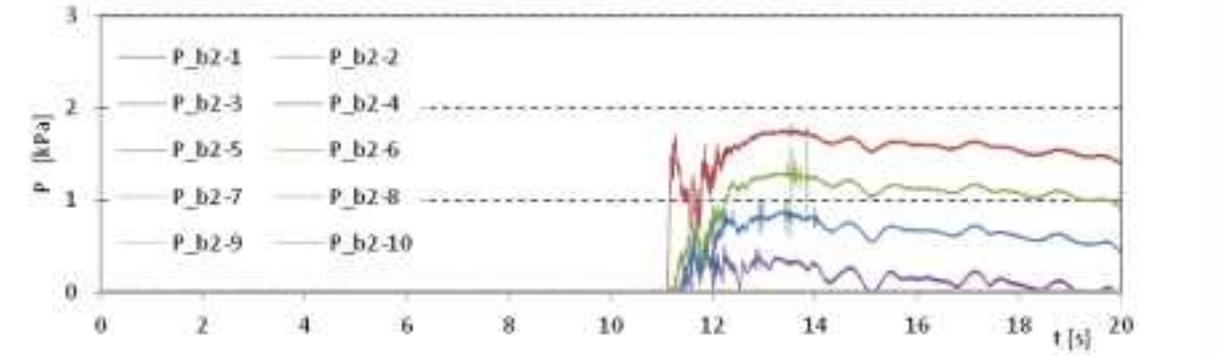
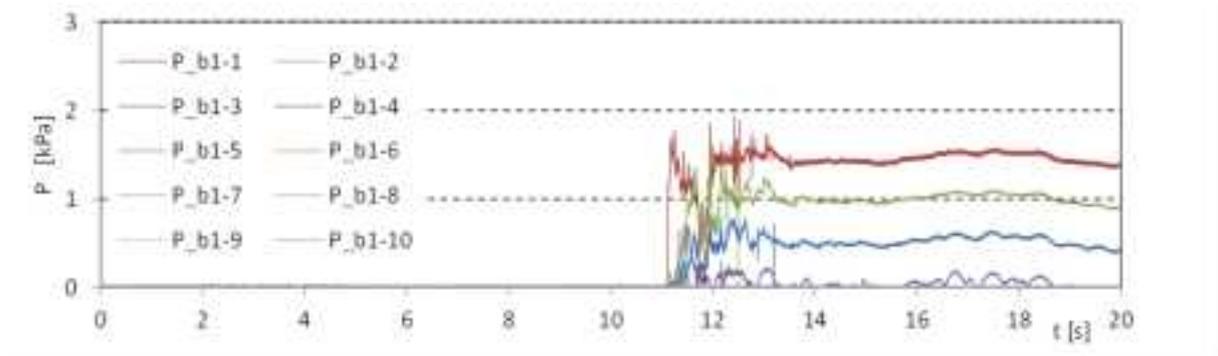
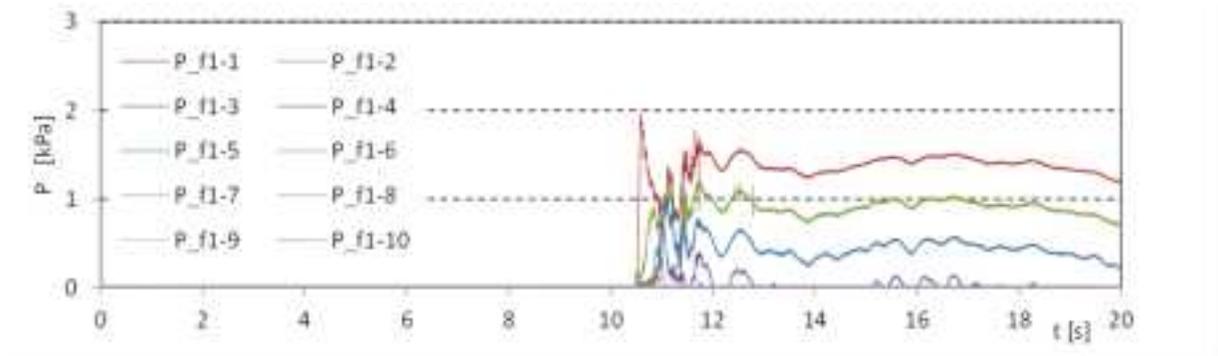
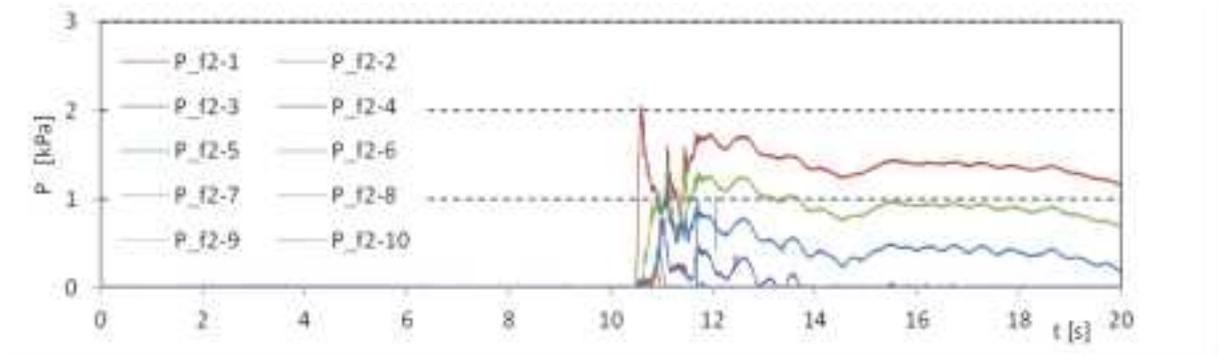


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 2.5m, W11)

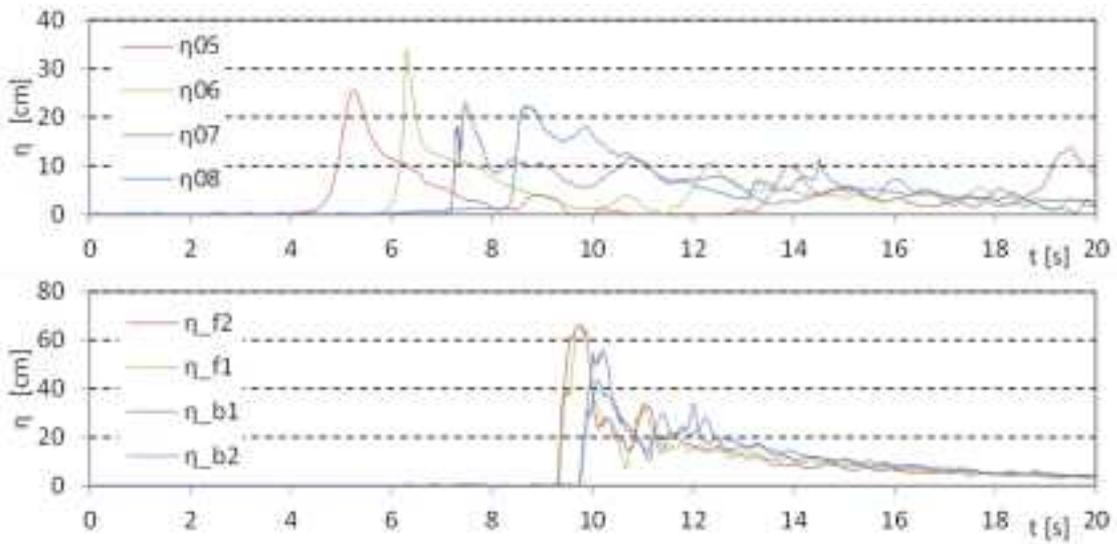


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 2.5m, W13)

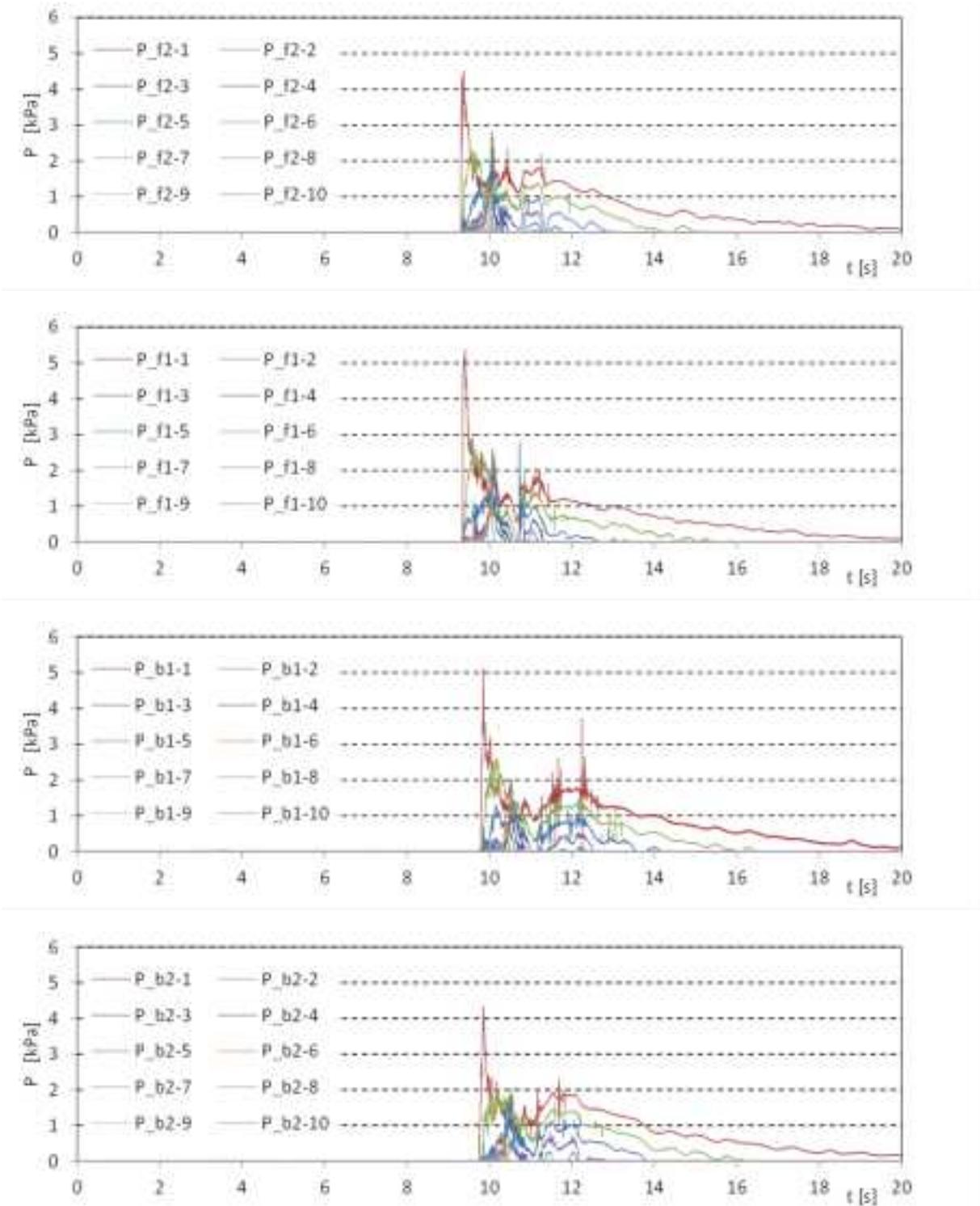


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 2.5m, W13)

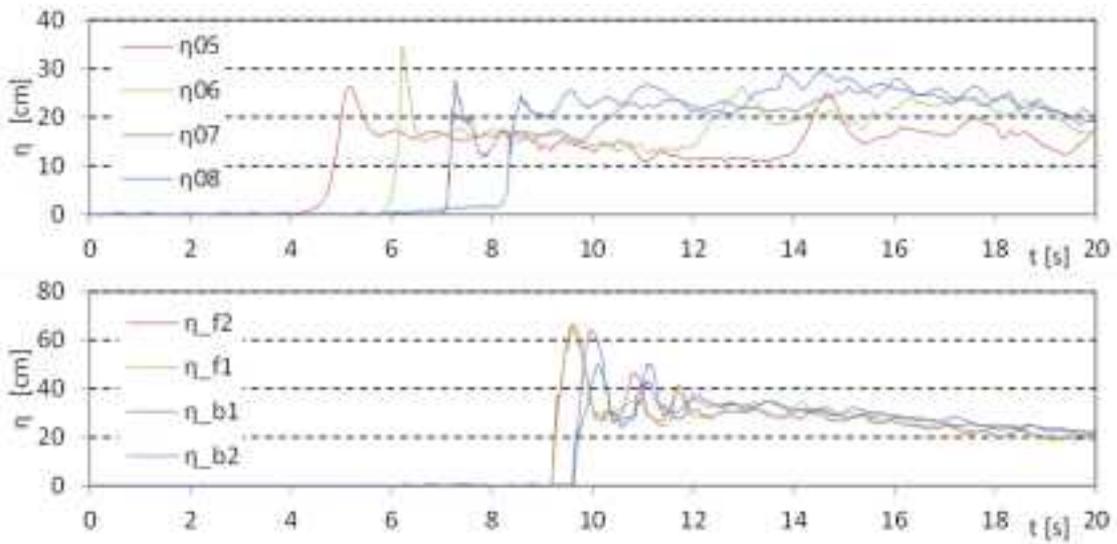


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 2.5m, W14)

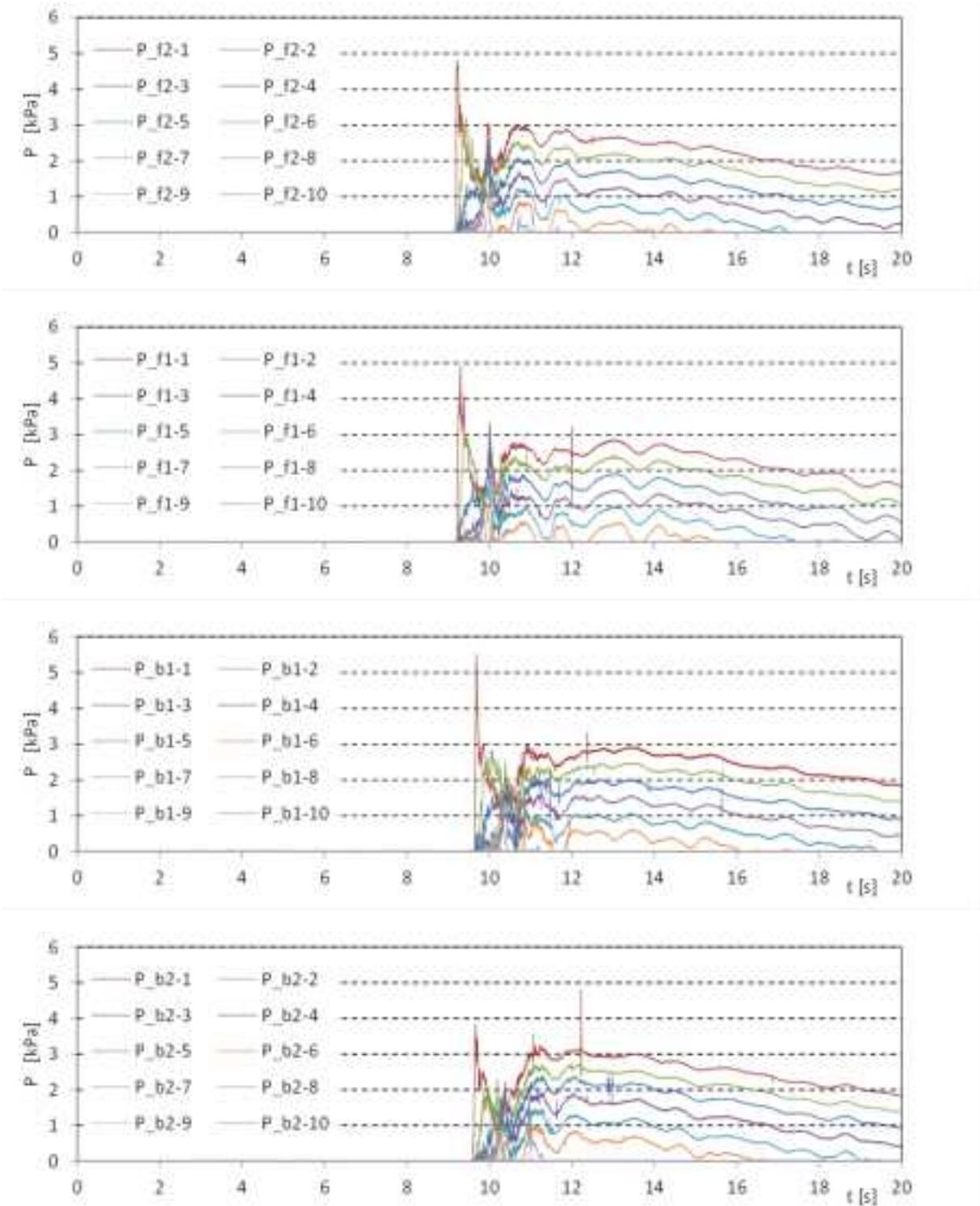


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (設置位置 2.5m, W14)

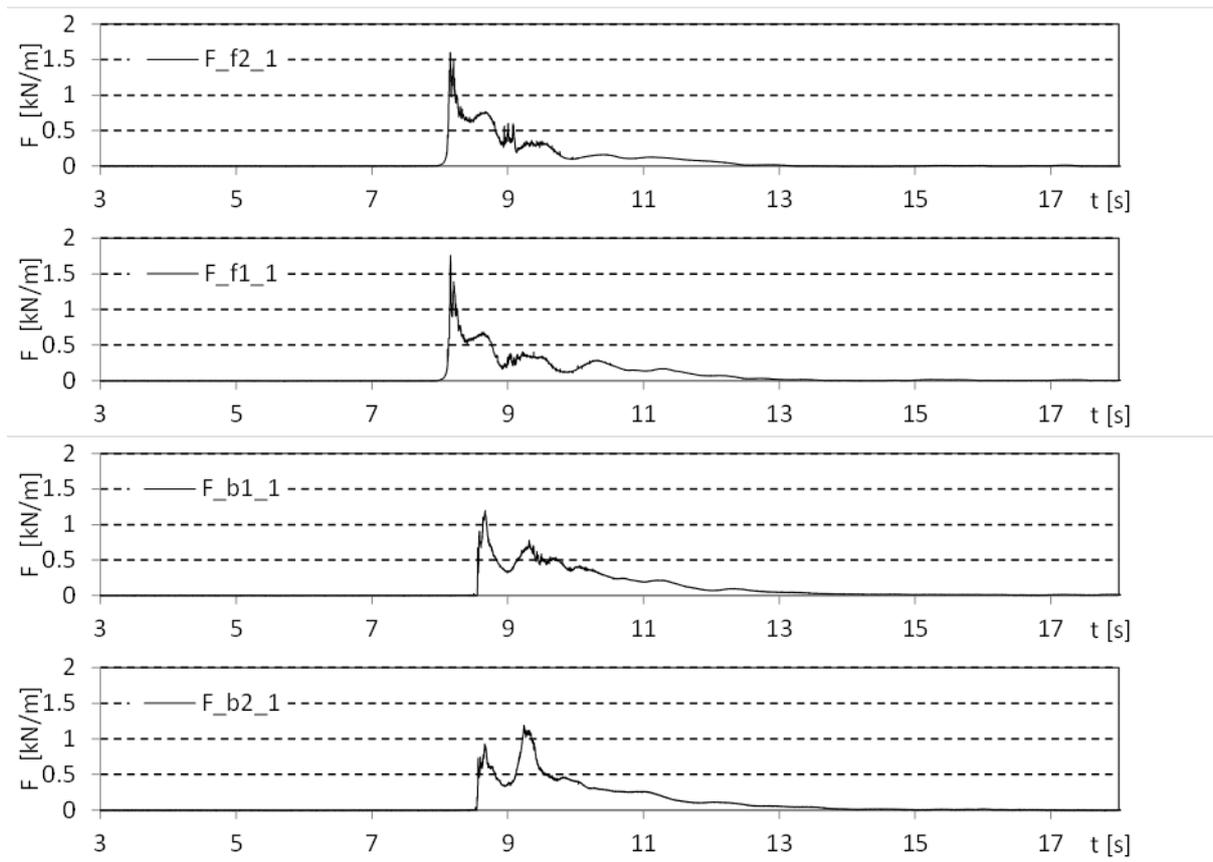


図 IV.3.2-4 津波波力の算出結果（設置位置 0m, W01）

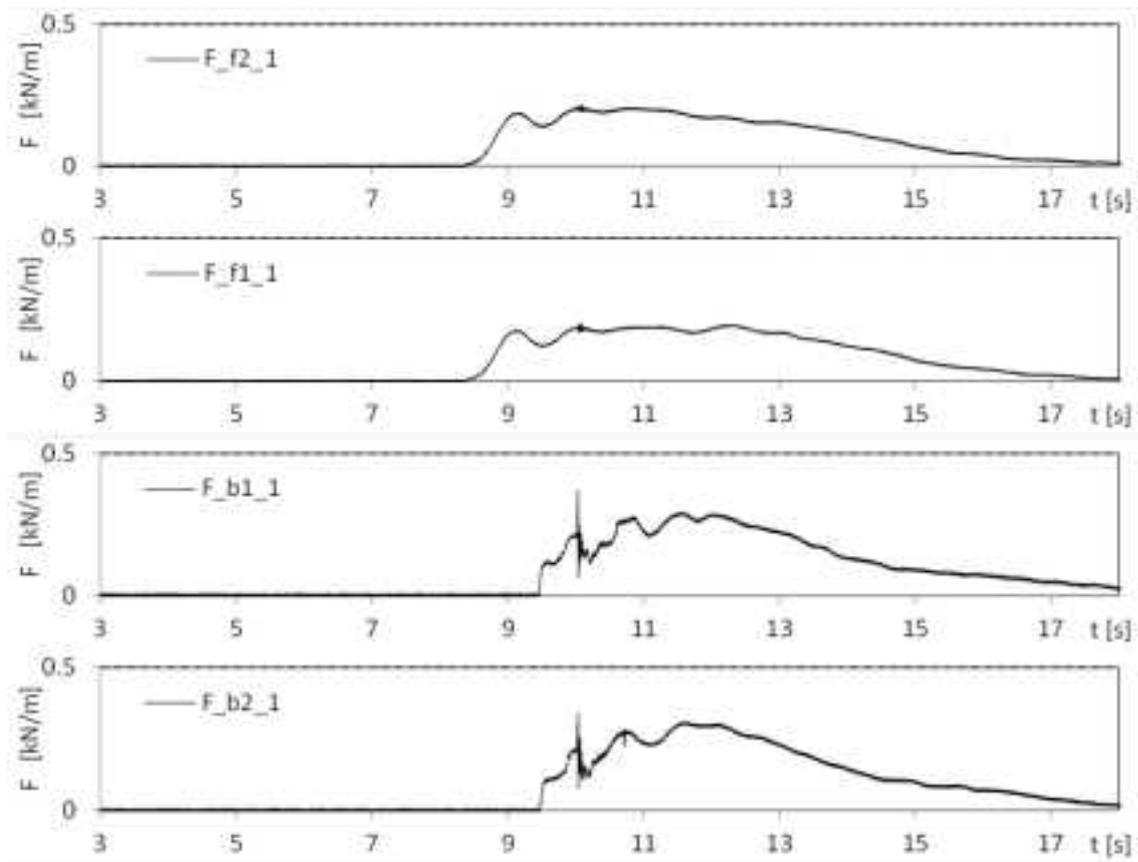


図 IV.3.2-4 津波波力の算出結果（設置位置 0m, W07）

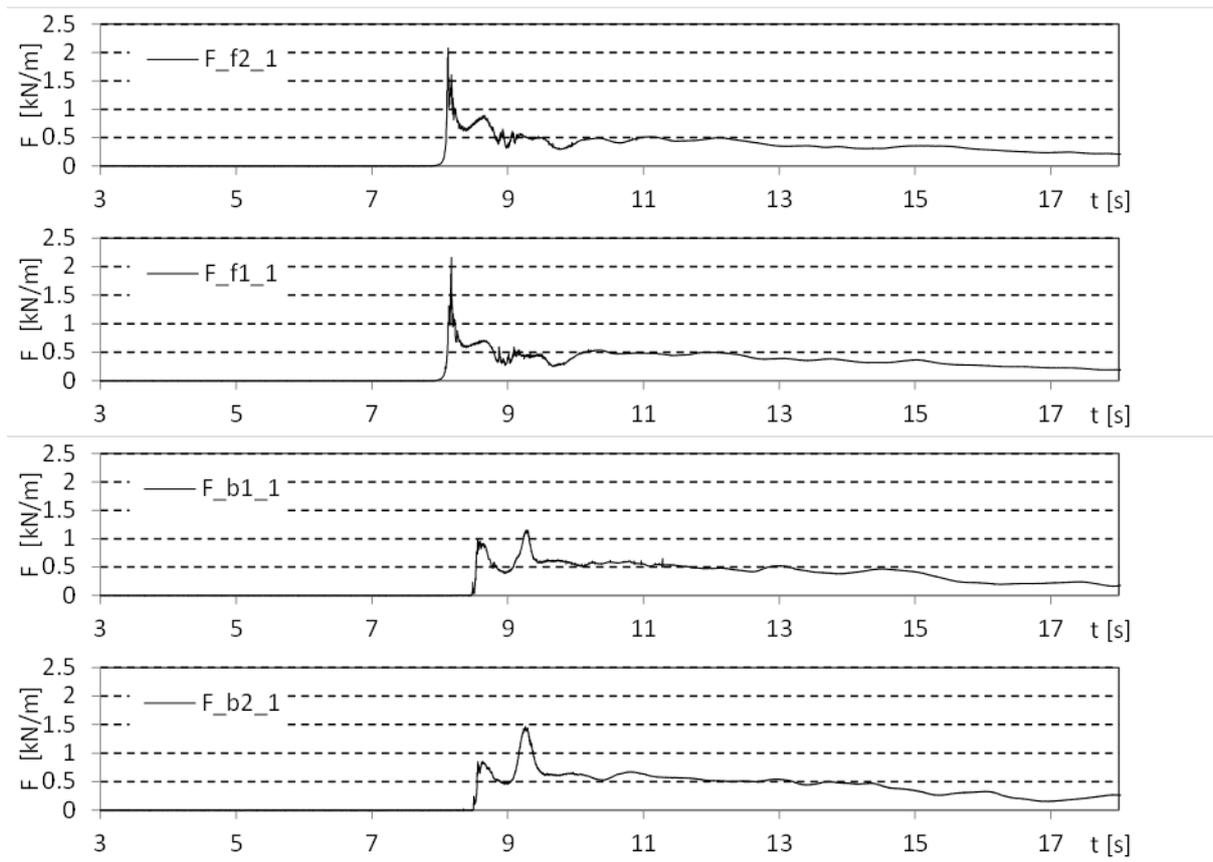


図 IV.3.2-4 津波波力の算出結果（設置位置 0m, W09）

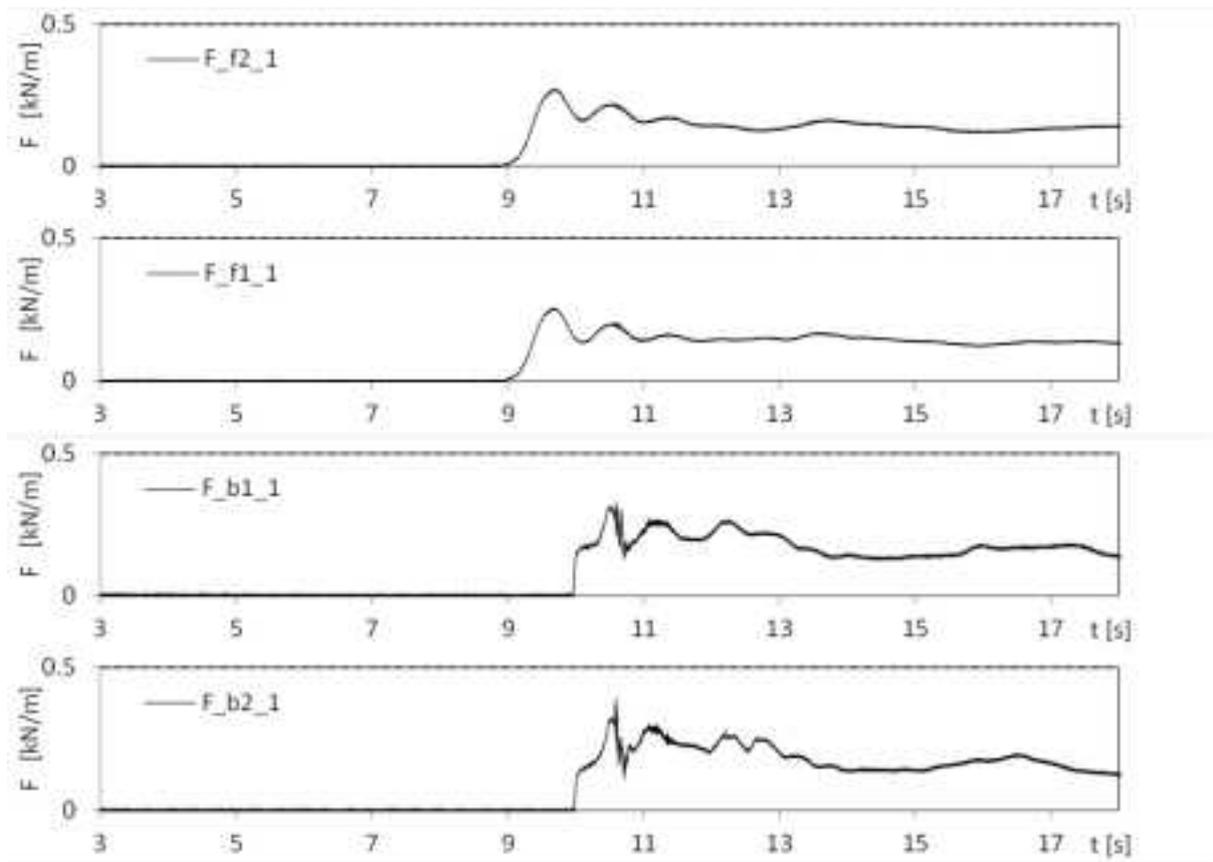


図 IV.3.2-4 津波波力の算出結果（設置位置 0m, W11）

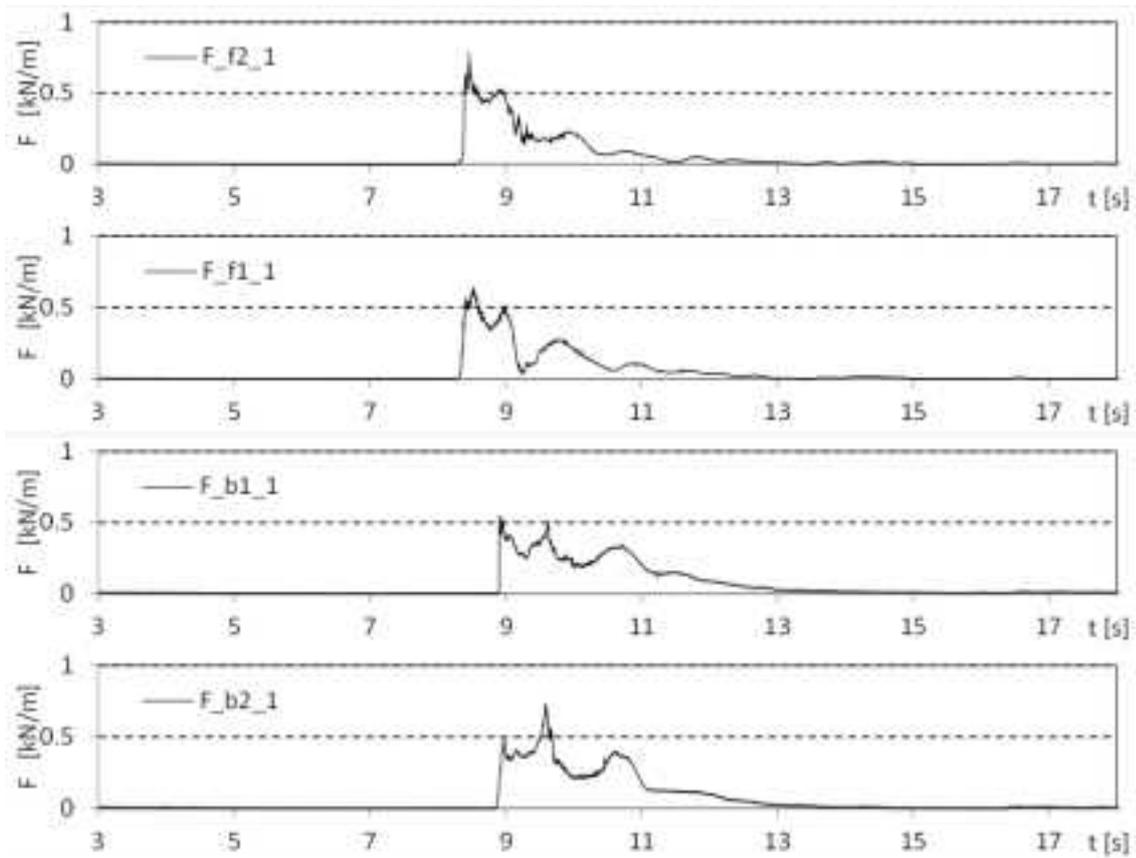


図 IV.3.2-4 津波波力の算出結果（設置位置 0m, W13）

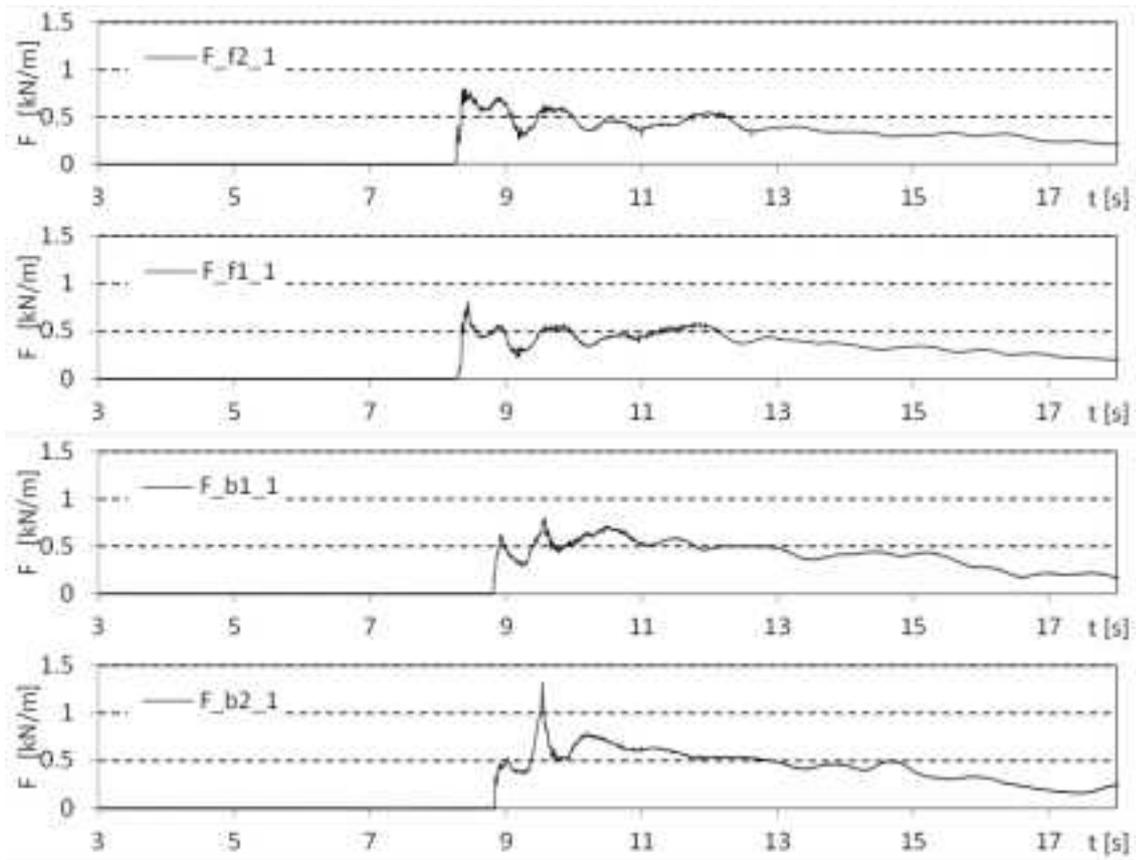


図 IV.3.2-4 津波波力の算出結果（設置位置 0m, W14）

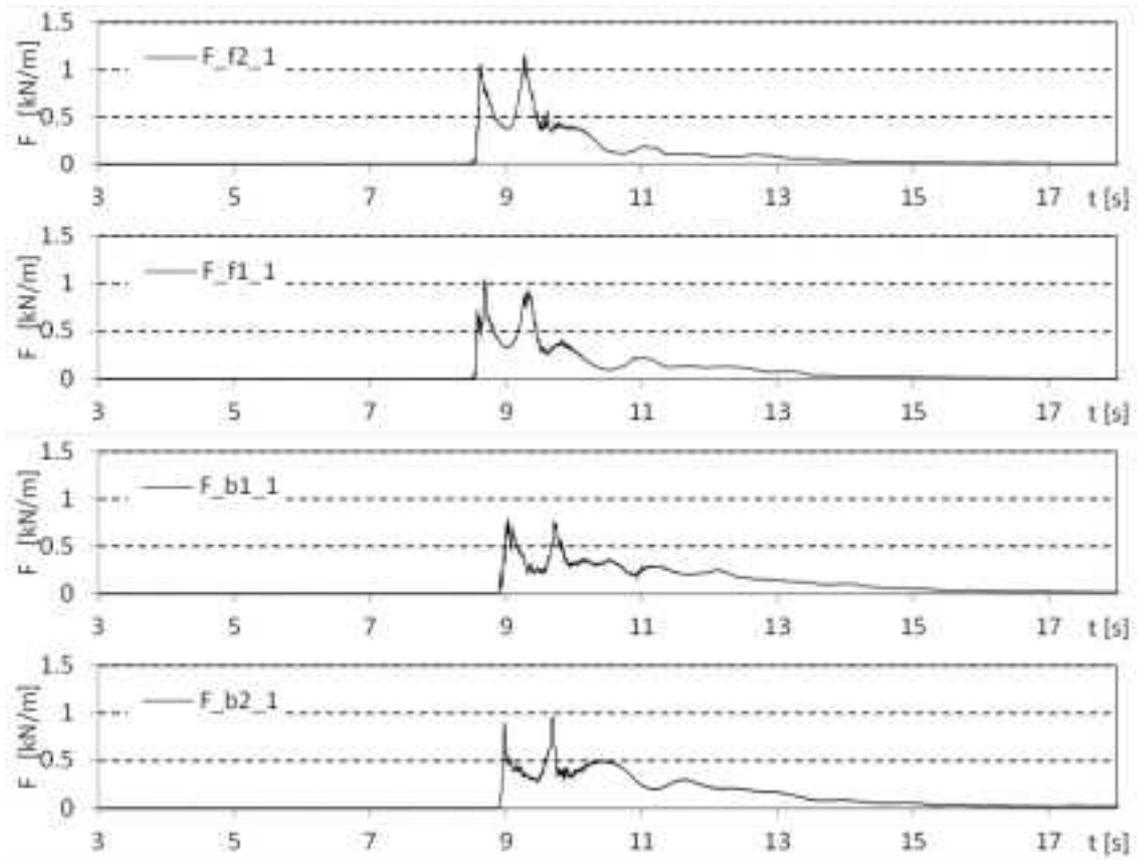


図 IV.3.2-5 津波波力の算出結果（設置位置 1.25m, W01）

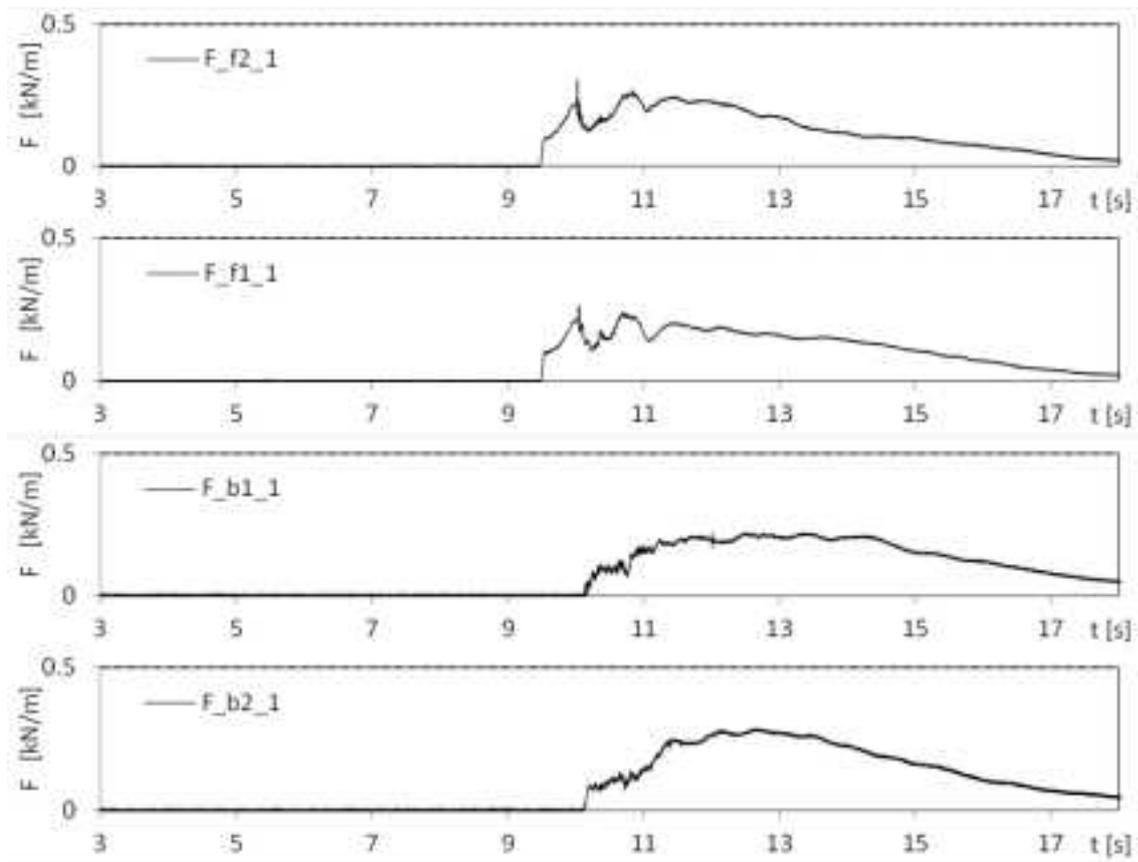


図 IV.3.2-5 津波波力の算出結果 (設置位置 1.25m, W07)

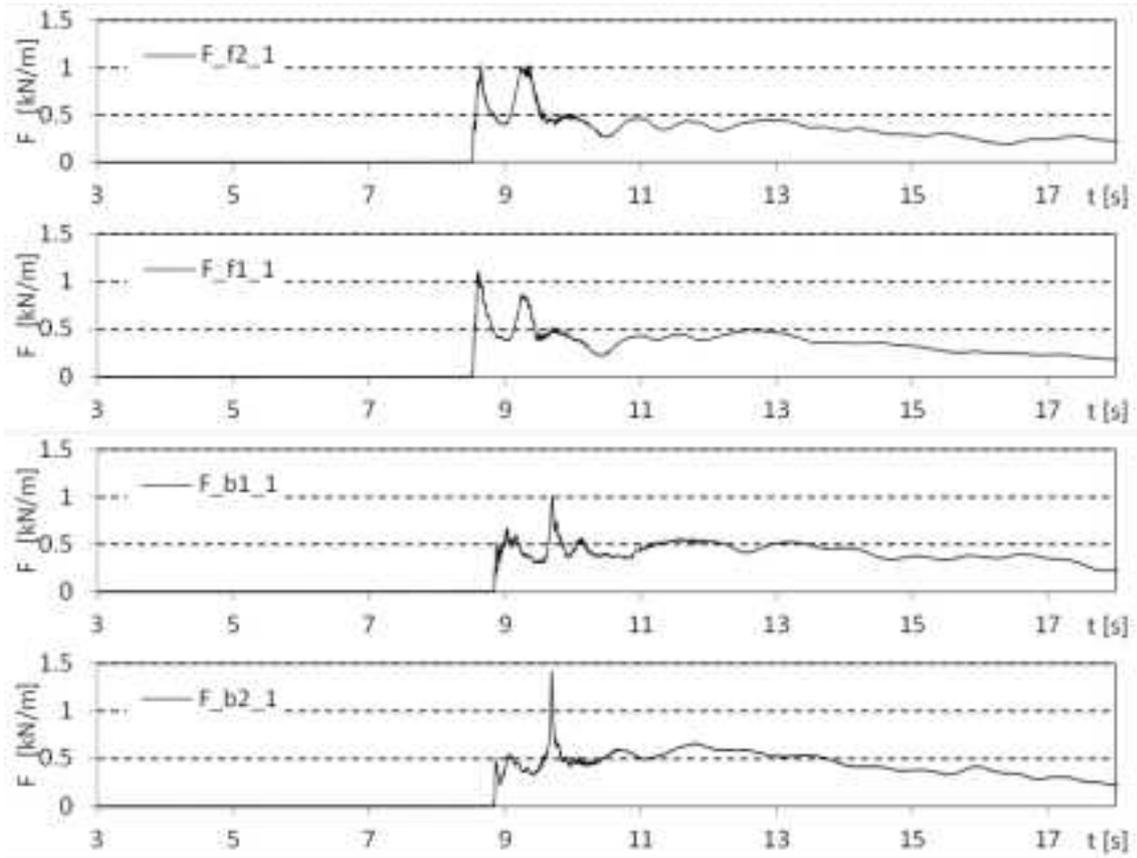


図 IV.3.2-5 津波波力の算出結果 (設置位置 1.25m, W09)

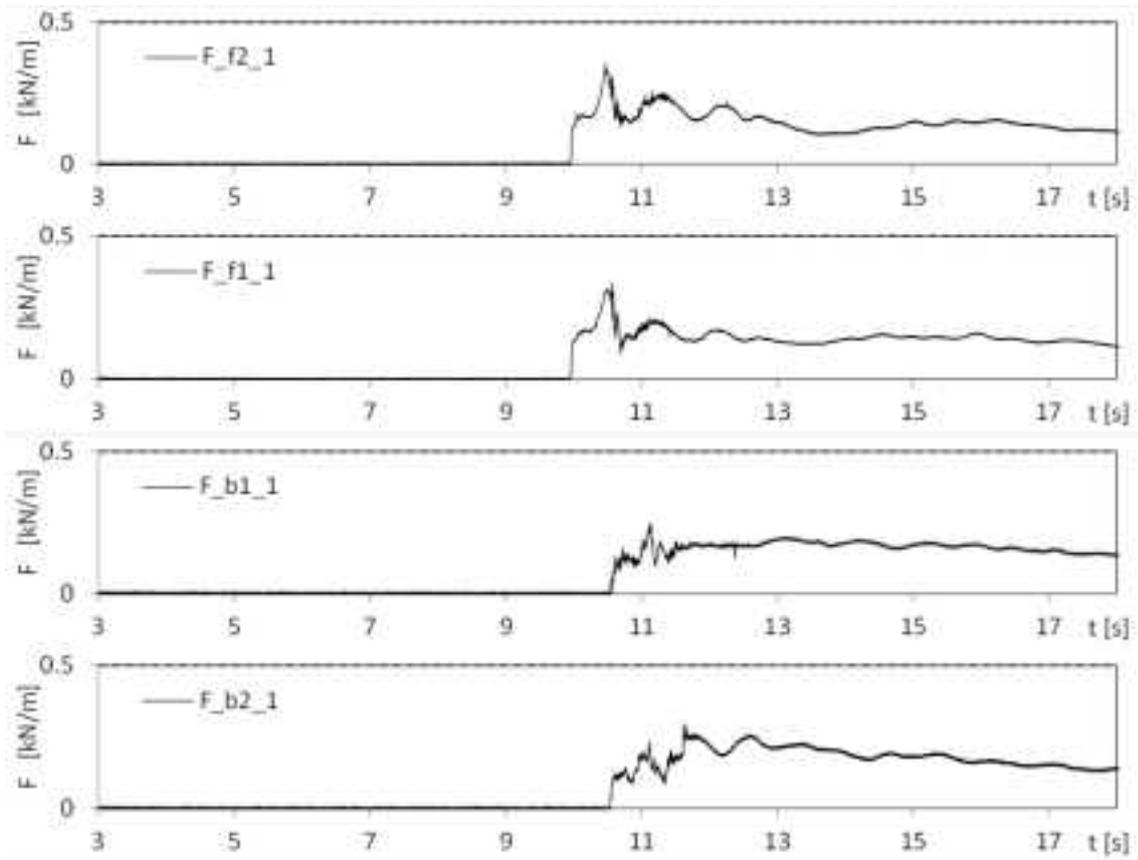


図 IV.3.2-5 津波波力の算出結果（設置位置 1.25m, W11）

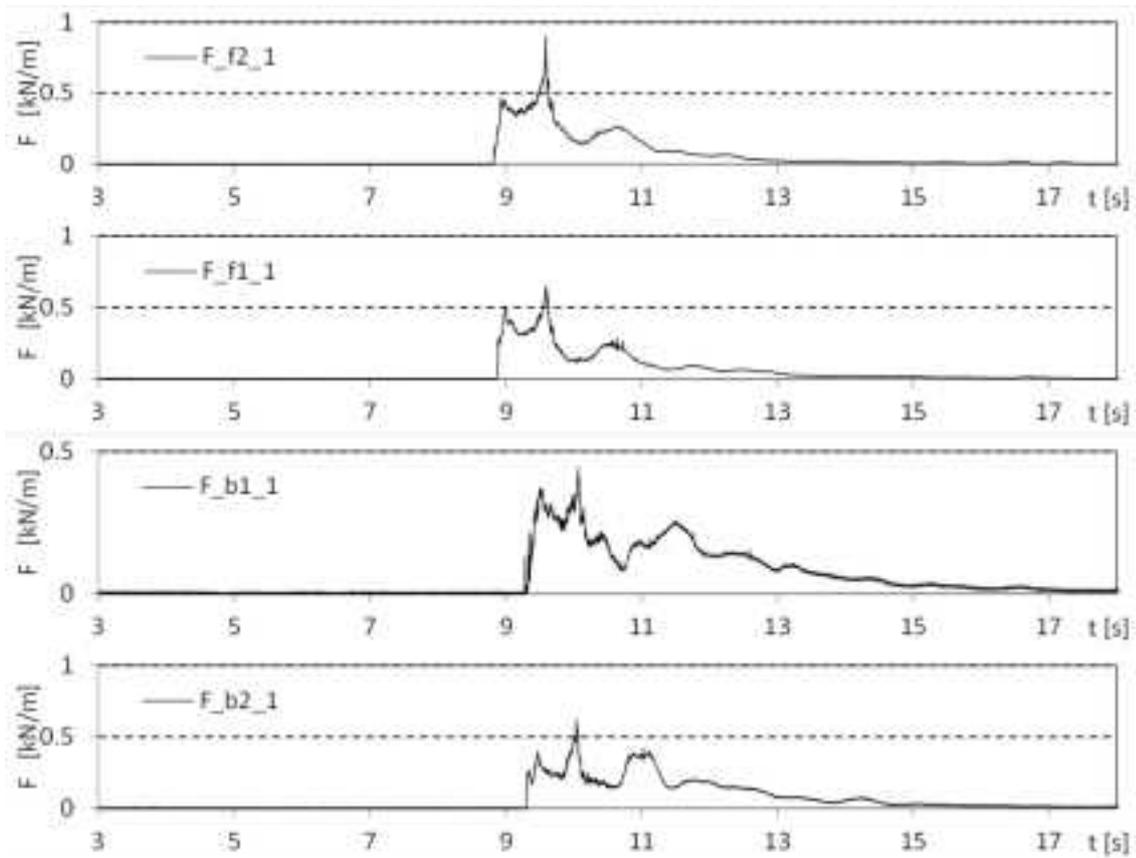


図 IV.3.2-5 津波波力の算出結果（設置位置 1.25m, W13）

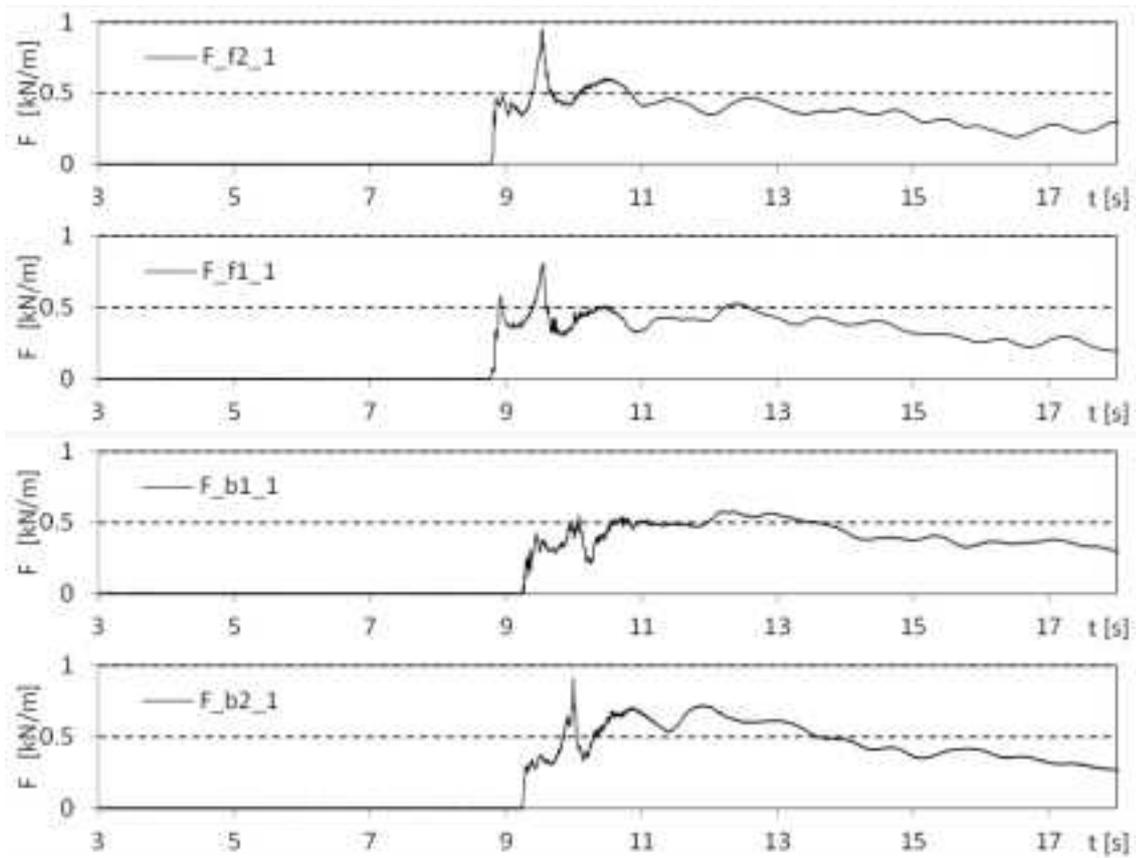


図 IV.3.2-5 津波波力の算出結果（設置位置 1.25m, W14）

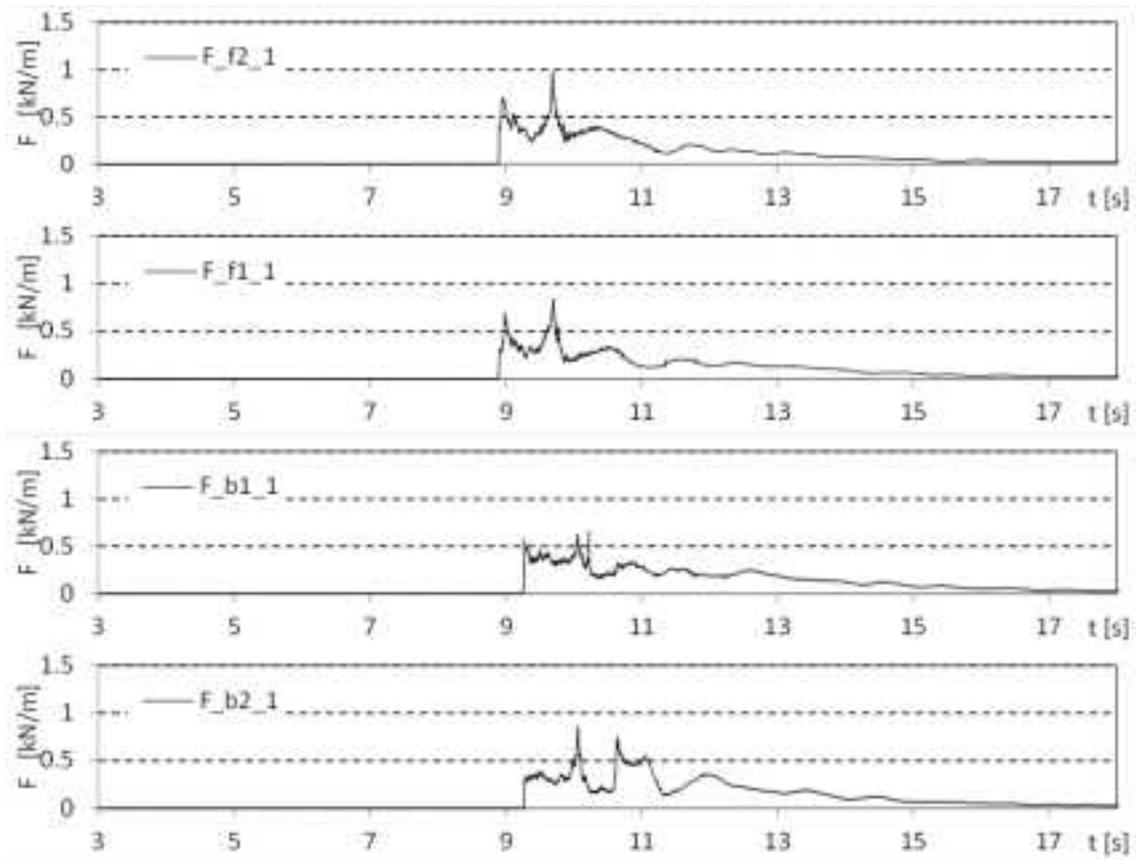


図 IV.3.2-6 津波波力の算出結果（設置位置 2.5m, W01）

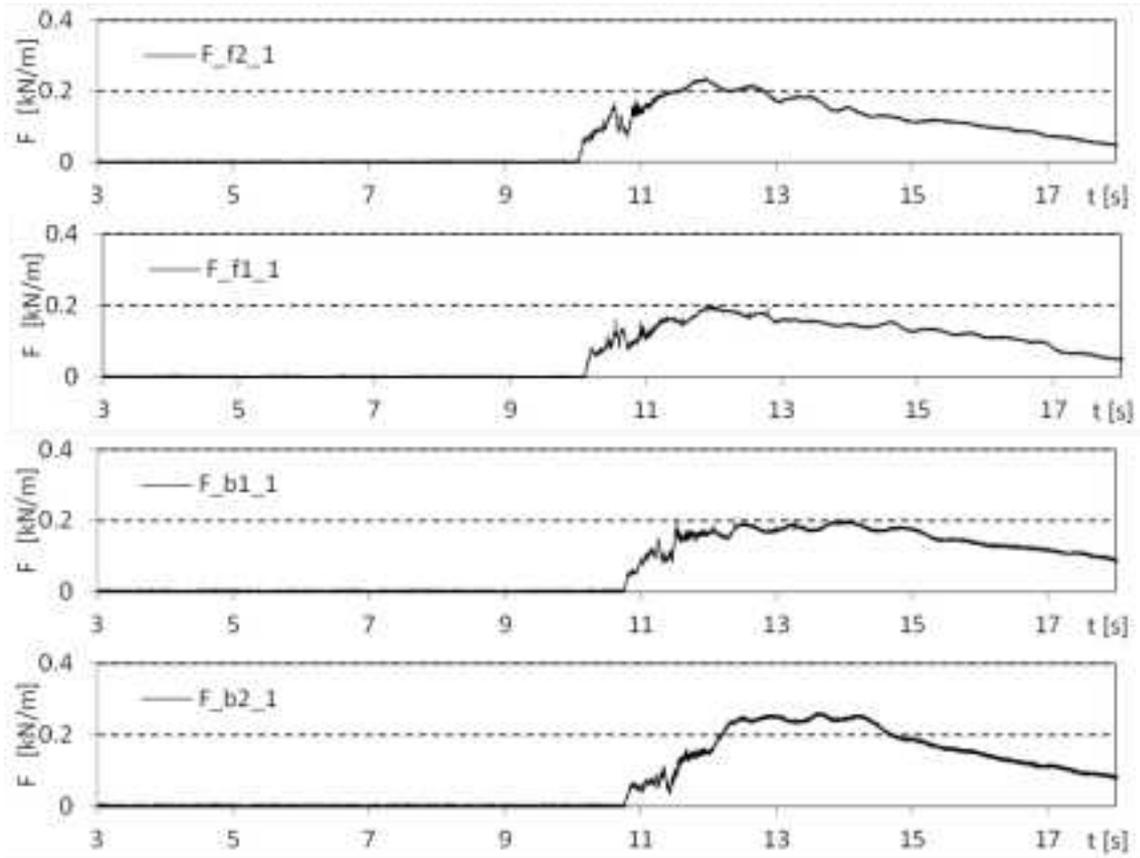


図 IV.3.2-6 津波波力の算出結果（設置位置 2.5m, W07）

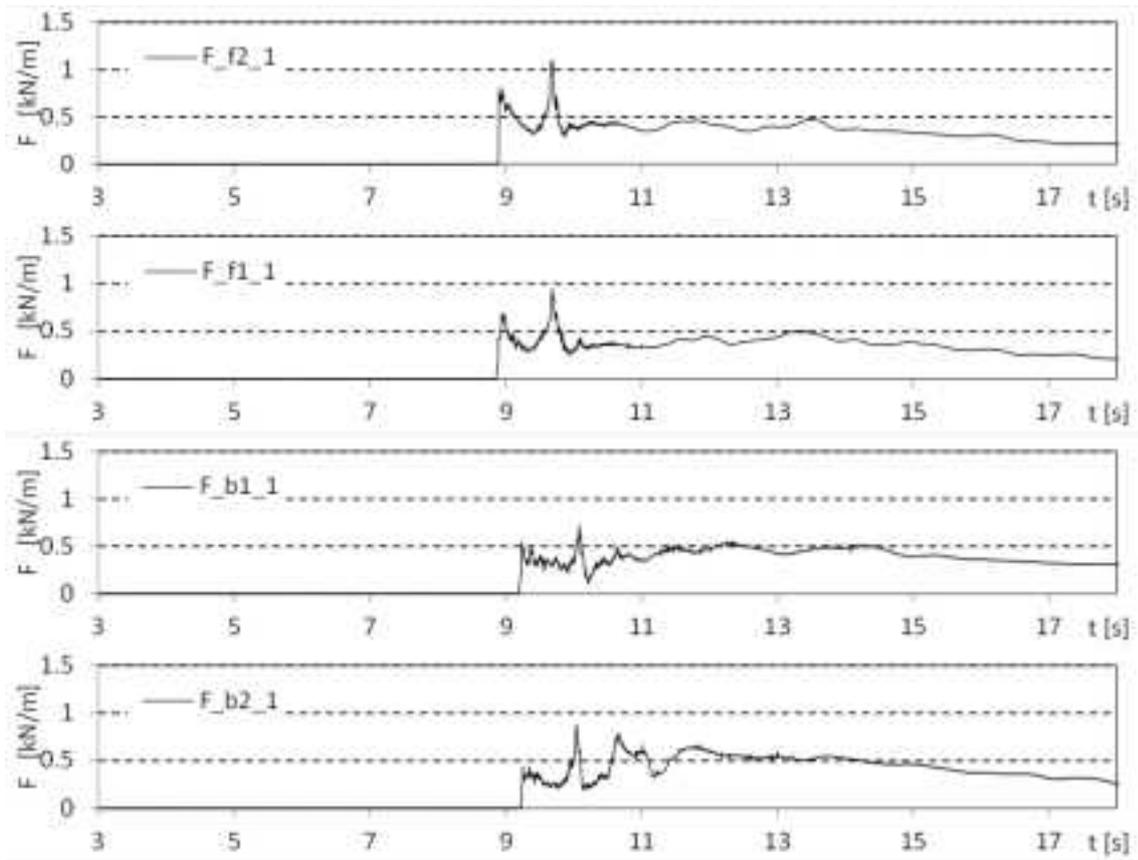


図 IV.3.2-6 津波波力の算出結果（設置位置 2.5m, W09）

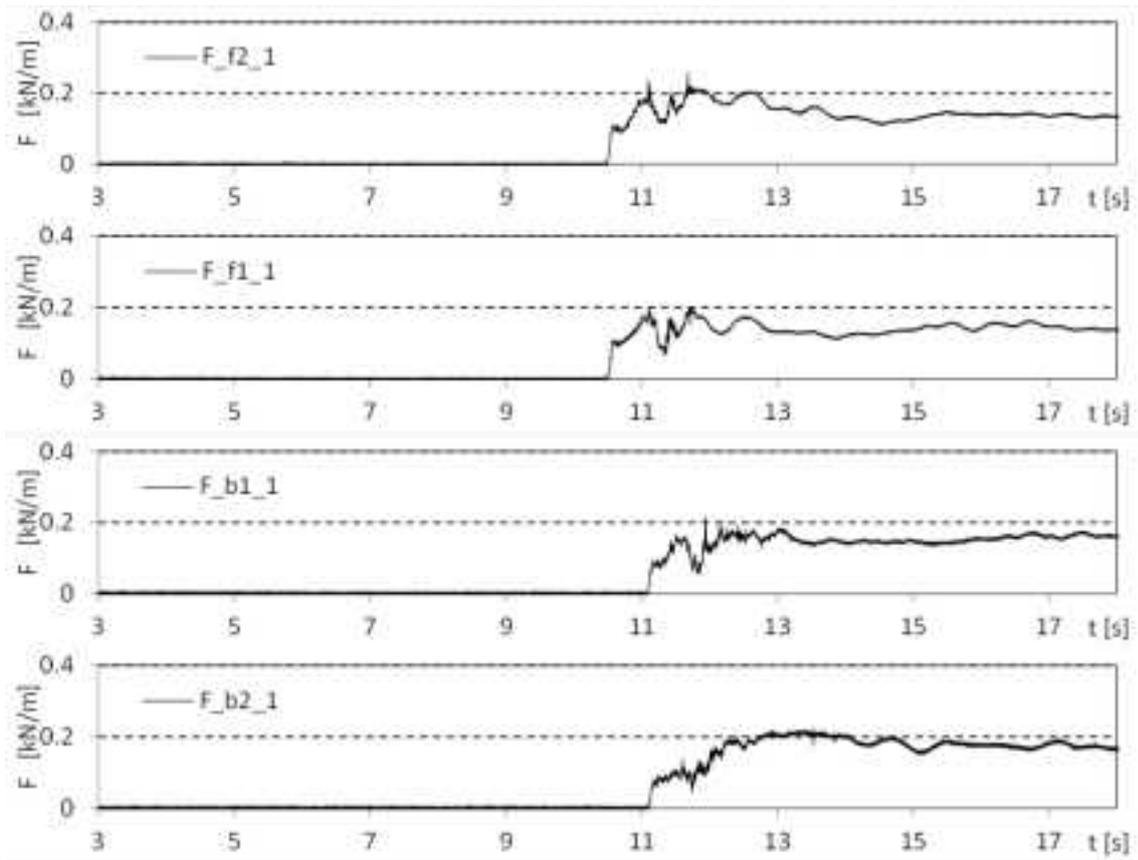


図 IV.3.2-6 津波波力の算出結果（設置位置 2.5m, W11）

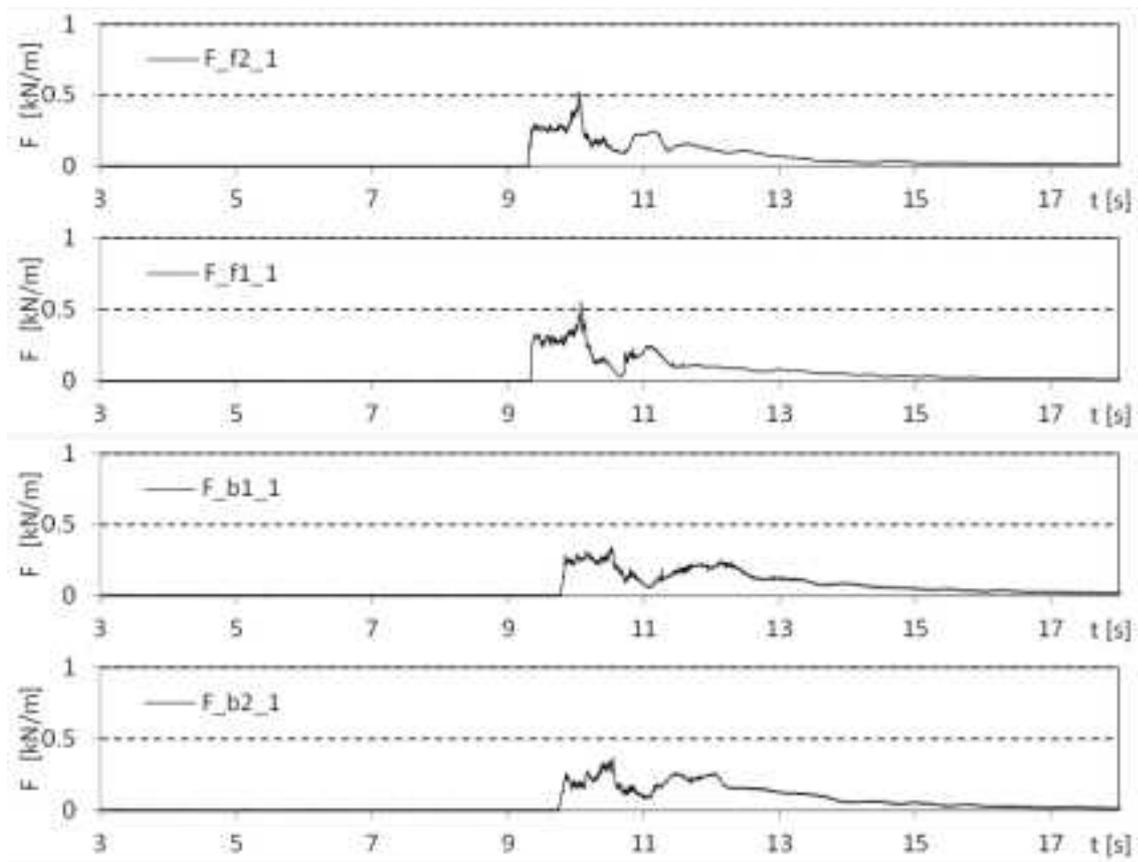


図 IV.3.2-6 津波波力の算出結果（設置位置 2.5m, W13）

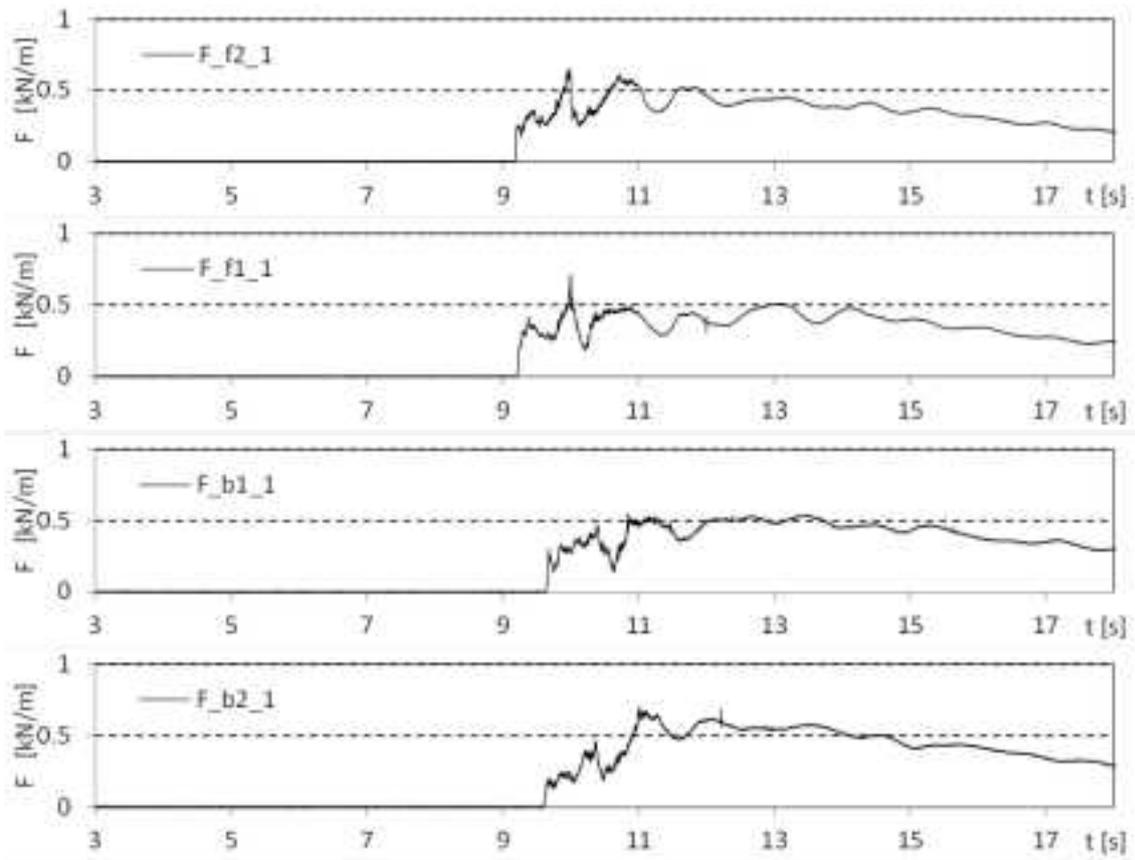


図 IV.3.2-6 津波波力の算出結果 (設置位置 2.5m, W14)



## 4. 試験結果の考察

### 4.1. 通過波の特性

図 IV.4-1 に、最大浸水深とその時の流速、フルード数の汀線からの距離による変化を示す。「津波波力特性の把握水理試験」(2次元試験)と同形の波形を適用したため、結果は2次元試験の直立護岸の結果とほぼ整合する。ただし、汀線から 3.75m (P.11) がこれに加えられている。P.11 についても P.09, P.10 と同様、汀線から離れるにしたがって水位は低減している。一方、流速の変化は前述の試験結果(時系列)によれば小さく、P.10 と同程度である。このためフルード数は大きくなる傾向にある。ただし、特に W09, W11, W14 は高い水位を保持する波形のため、最大浸水深の位置が不明瞭となる。ここでは、数値的に最大値を抽出しているが、このため流速及びフルード数の特性にケース毎のばらつきが生じている。

	W01	W07	W09	W11	W13	W14
$\eta$ max [cm]						
P.08	34.8	15.8	33.3	16.0	22.9	25.1
P.09	12.13	7.95	14.17	7.51	9.11	13.65
P.10	8.25	7.36	12.26	7.36	6.96	12.54
P.11	6.88	6.68	11.05	7.37	5.85	11.16
$u$ , $\eta$ max [m/s]						
P.08	1.31	0.89	1.31	1.26	1.59	1.11
P.09	1.80	1.26	1.91	1.09	1.58	1.51
P.10	1.45	1.10	1.12	0.80	1.63	1.44
P.11	1.46	1.23	1.39	0.75	1.58	1.33
$Fr$ , $\eta$ max						
P.08	0.708	0.714	0.727	1.005	1.058	0.707
P.09	1.7	1.4	1.6	1.3	1.7	1.3
P.10	1.61	1.29	1.02	0.95	1.97	1.30
P.11	1.78	1.52	1.34	0.88	2.09	1.27

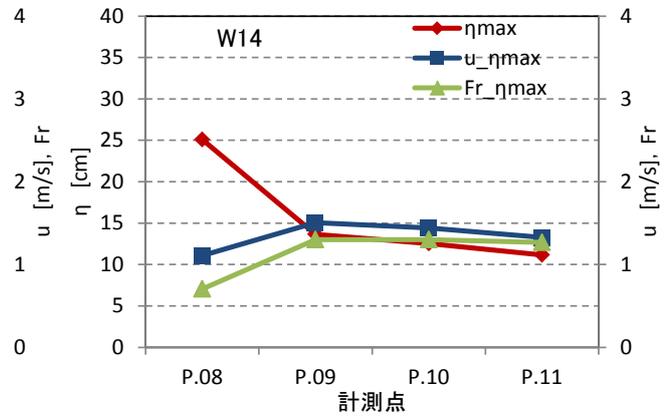
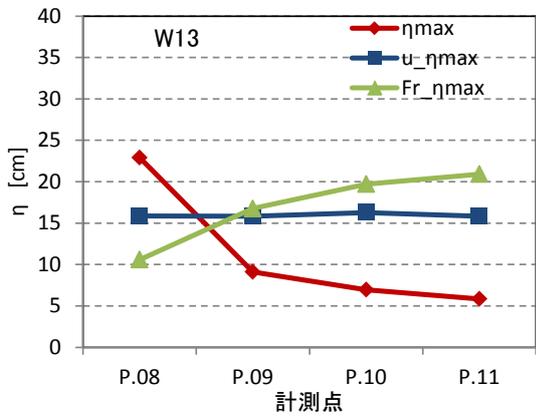
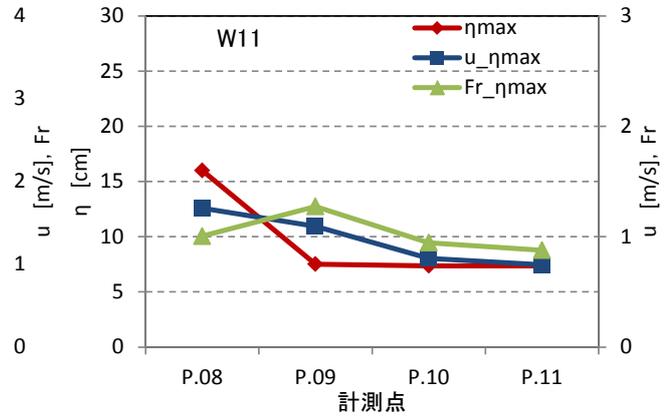
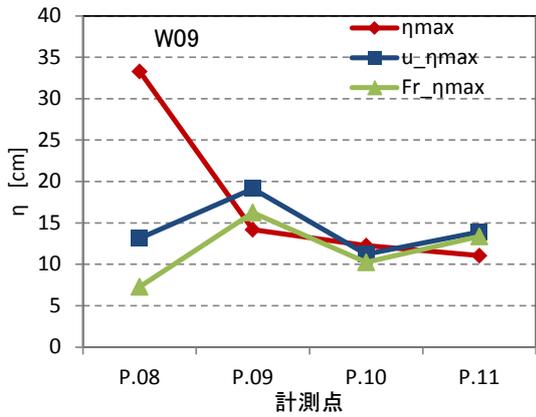
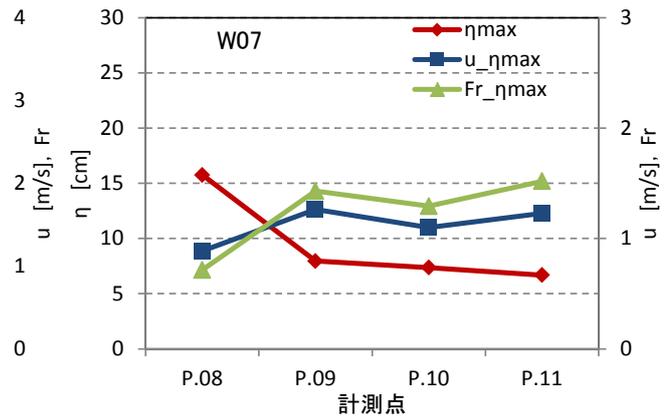
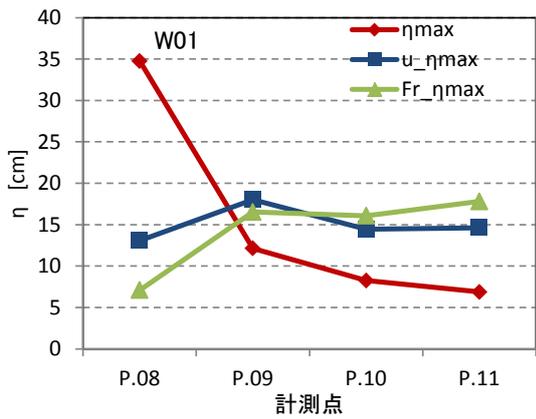


図 IV.4-1 通過波検定結果 (最大浸水深と同時刻の流速, フルード数)

#### 4.2. 汀線からの距離による浸水深、波力、水深係数の変化

図 IV.4-2 に、通過波最大浸水深について、汀線からの距離による変化の波種による比較を示す。最大浸水深は、汀線から陸側に離れるにしたがって低減しており、これは 2 次元水理試験の結果とほぼ一致する。汀線位置においては最大浸水深が非常に大きくなるが、1.25m 地点で小さくなり、その後、W07, W11 の正弦波タイプの波では、1.25m~3.75m まで最大浸水深に大きな変化はなく微減しており、それ以外の波ケースでは、徐々に低減している。正弦波タイプでは、水位上昇が緩やかなため、陸域を進行する遡上波の前面勾配が遡上直後から比較的小さい。そのため波形が保持されたまま陸域を進行する。一方その他のケースでは、先端部分が孤立波状に切り立つため、遡上直後の遡上波の前面勾配が大きく、切り立っている。この場合、陸上部を進行するとともに、波形の裾野部分が広がるように前面勾配が小さくなるため、浸水深の最大値が小さくなっている。

図 IV.4-3 に、汀線からの距離による波力の変化を、図 IV.4-4 に水深係数の変化を示す。堤体模型は、汀線からの距離に左右 1.25m の段差を有している。ここでは、各堤体の圧力計測面の汀線からの距離で示している。堤体の前面側が f1, f2 であり、後面側が b1, b2 である。

図 IV.4-3 によれば、汀線位置での波力が 1.25m の場合よりも全てのケースで小さい。堤体が汀線位置にある時は、堤体に津波が衝突するときの水平方向の流速が小さいため、衝撃的な波力が働かないためと考えられ、これは 2 次元試験の結果に一致する。その後、汀線から離れるにしたがって波力は小さくなる。もっとも波力が大きいのは、汀線から 1.25m における b2 (後面外側側) であるが、その値は 2 次元実験と同等である。

波力の測定位置による違いは、f1 と f2 では f2 の方が波力が大きくなり、b1 と b2 では b2 の波力が大きくなる。堤体模型が前面側の場合は、後面側へと波が回り込むことが出来るため、隅角部に近い f1 の方が f2 より波力が低減していると考えられる。一方 b1 は、後面側の隅角部に近く、この回り込んだ波の影響を受ける。この時、隅角部により近い b1 では横断方向の流速の影響により、堤体に鉛直方向から入射する津波の波形が乱れ、最大波力が低下していると推察される。一方 b2 は、隅角部からある程度距離があるため、前面側からの回り込みの影響が小さく、2 次元実験と同等の波力が生じていると考えられる。

W01 と W09, W07 と W11, W13 と W14 はそれぞれ互いに、水位の立ち上がり時の波形が同じで後続の水位が低下するケースと高い水位を保持するケースの関係にある。これらの結果を比較すると、いずれも波力の分布特性は同じで、高い水位を保持する W09, W11, W14 の方が、波力が全体に大きくなっている。

図 IV.4-4 によれば、水深係数は汀線位置が最も小さく、またその値は全てのケースで同程度である。汀線からの距離 1.25m から 3.75m にかけては、ケースにより増減が異なるが、増加傾向にある W01, W09, W13 でも 2.5m と 3.75m の値は同程度となっており、汀線から 2.5m 程度以上離れると、水深係数は同等か減少していくと推察される。

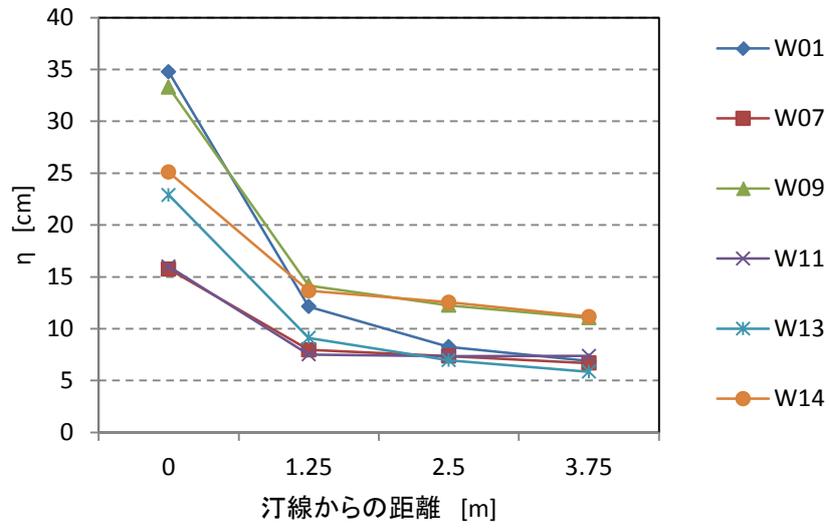
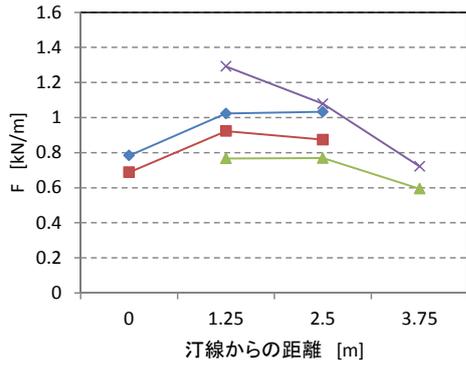
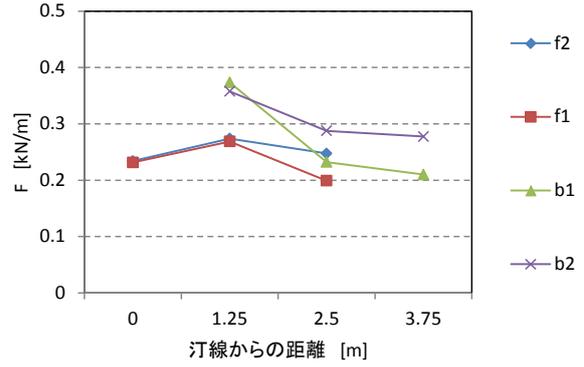


図 IV.4-2 汀線からの距離による浸水深の変化

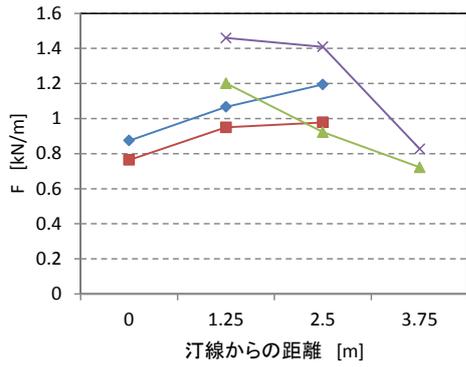
W01



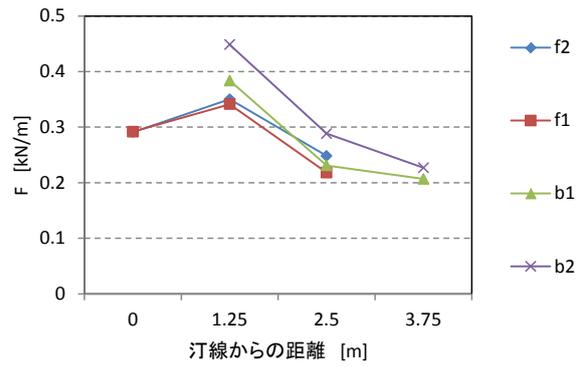
W07



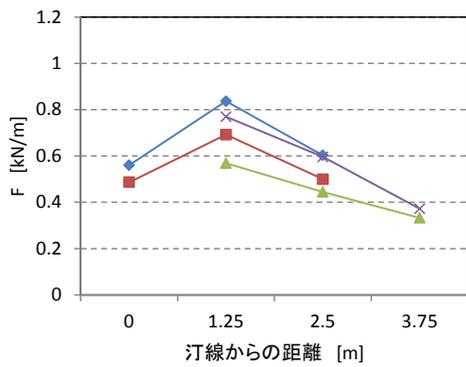
W09



W11



W13



W14

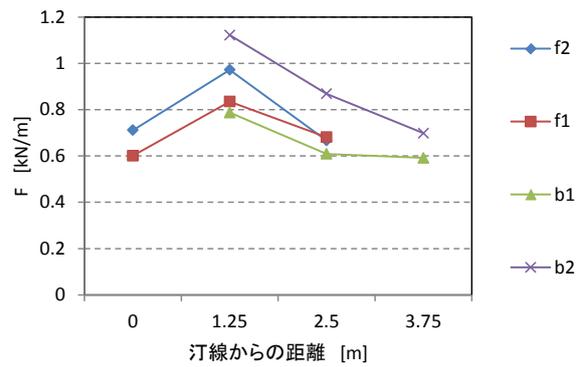


図 IV.4-3 汀線からの距離による波力の変化

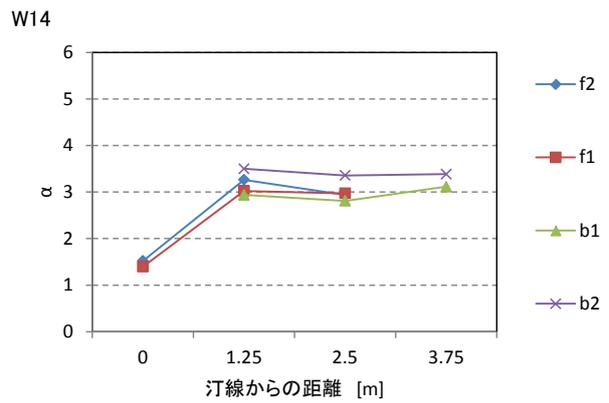
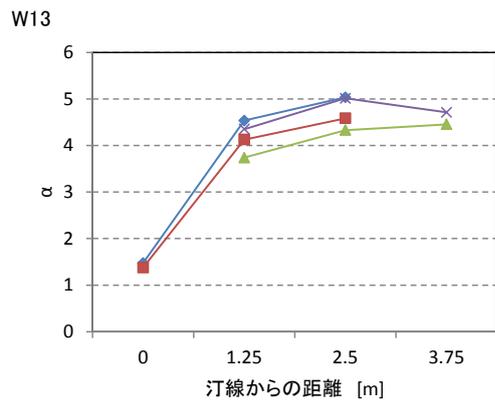
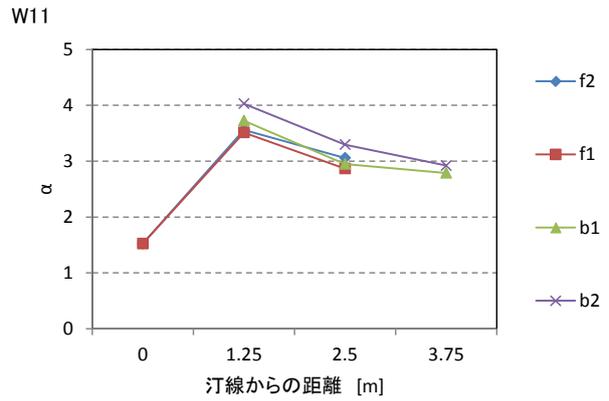
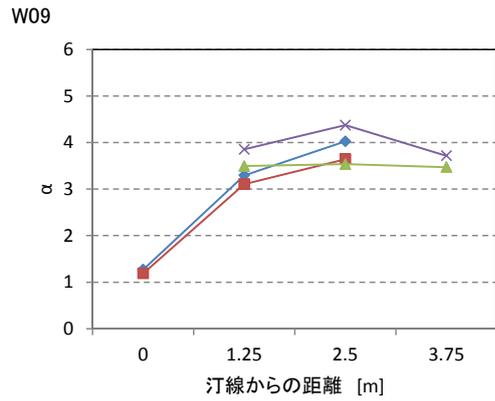
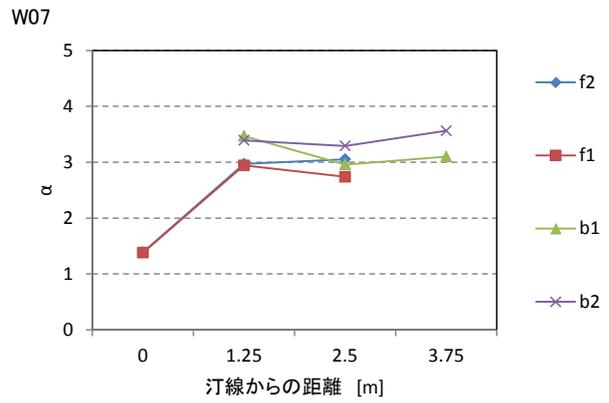
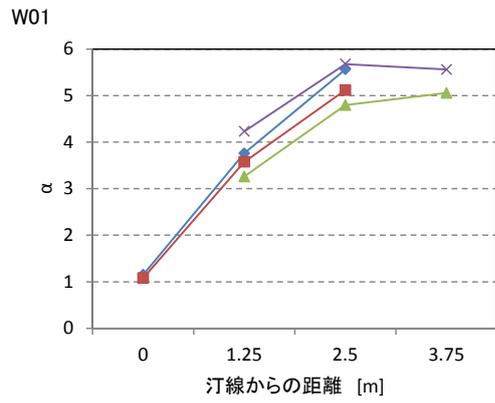


図 IV.4-4 汀線からの距離による水深係数の変化

### 4.3. 防潮堤横断方向の分布

堤体模型の横断方向の分布について、図 IV.4-5 に波力の最大値の、図 IV.4-6 に水深係数の算出結果を示す。ここで、設置位置は前面側の堤体位置を示しており、例えば P.08 では前面側が 0m、後面側が 1.25m の位置に設置されていることを示している。

図 IV.4-5 によると、全てのケースに共通して、波力は f2 と f1 では同程度の波力ではあるが f1 の方が若干小さく、b1 と b2 では b2 の方が大きい。横断方向分布特性は、P.08 では、f1, f2 よりも b1, b2 の波力が大きい、P.09, P.10 と陸側に行くにしたがって、b1, b2 の波力が相対的に小さくなっている。

図 IV.4-6 の水深係数は、P.08 の f1, f2 のみ小さくなっているが、それ以外では横断方向の違いは小さい。特に、b1, b2 では P.09, P.10 の違いが小さくなっている。前述したように、汀線からの距離が 2.5m 以上では水深係数の変化が小さくなっているためと考えられる。

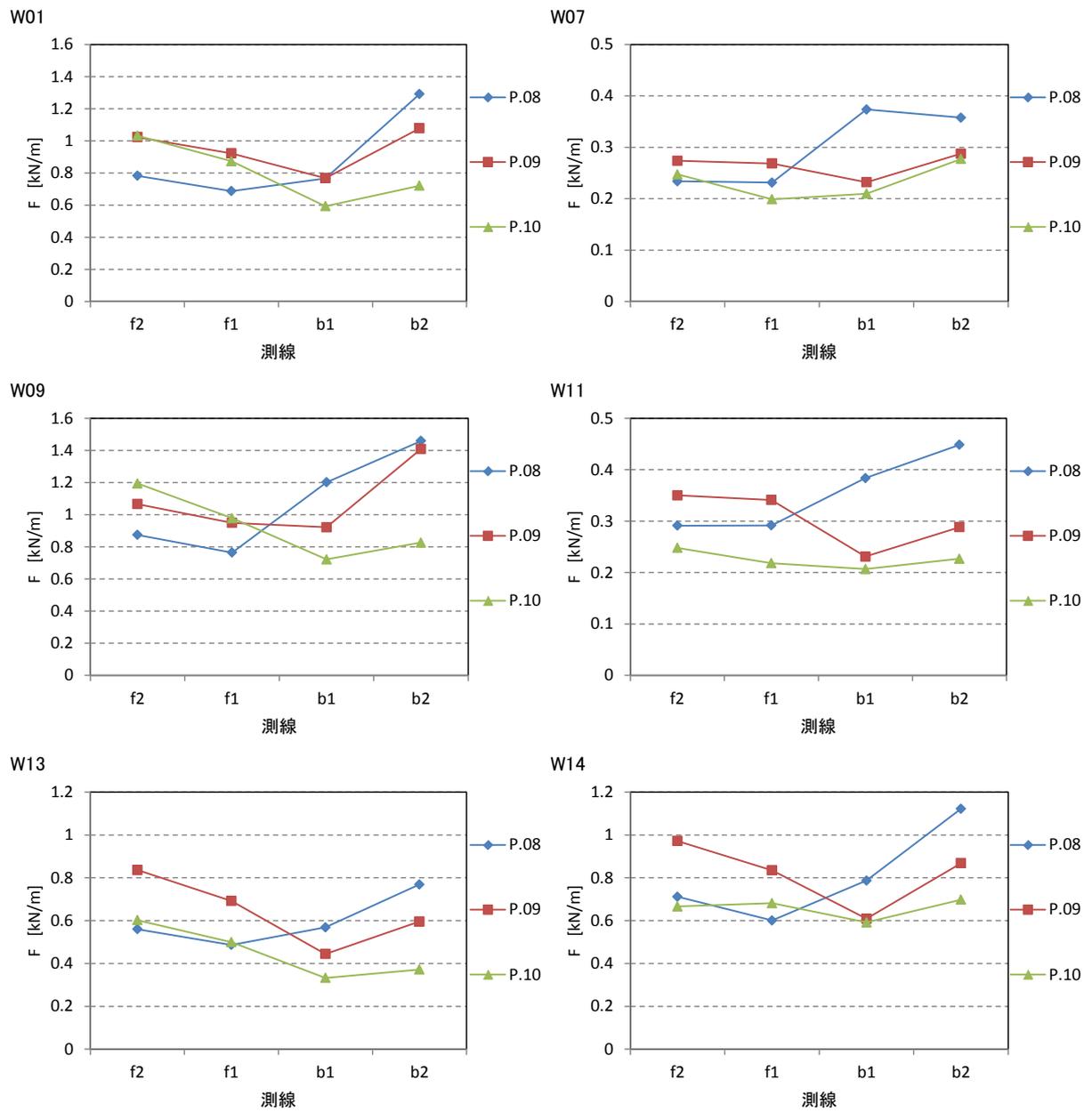


図 IV.4-5 波力の横断方向分布

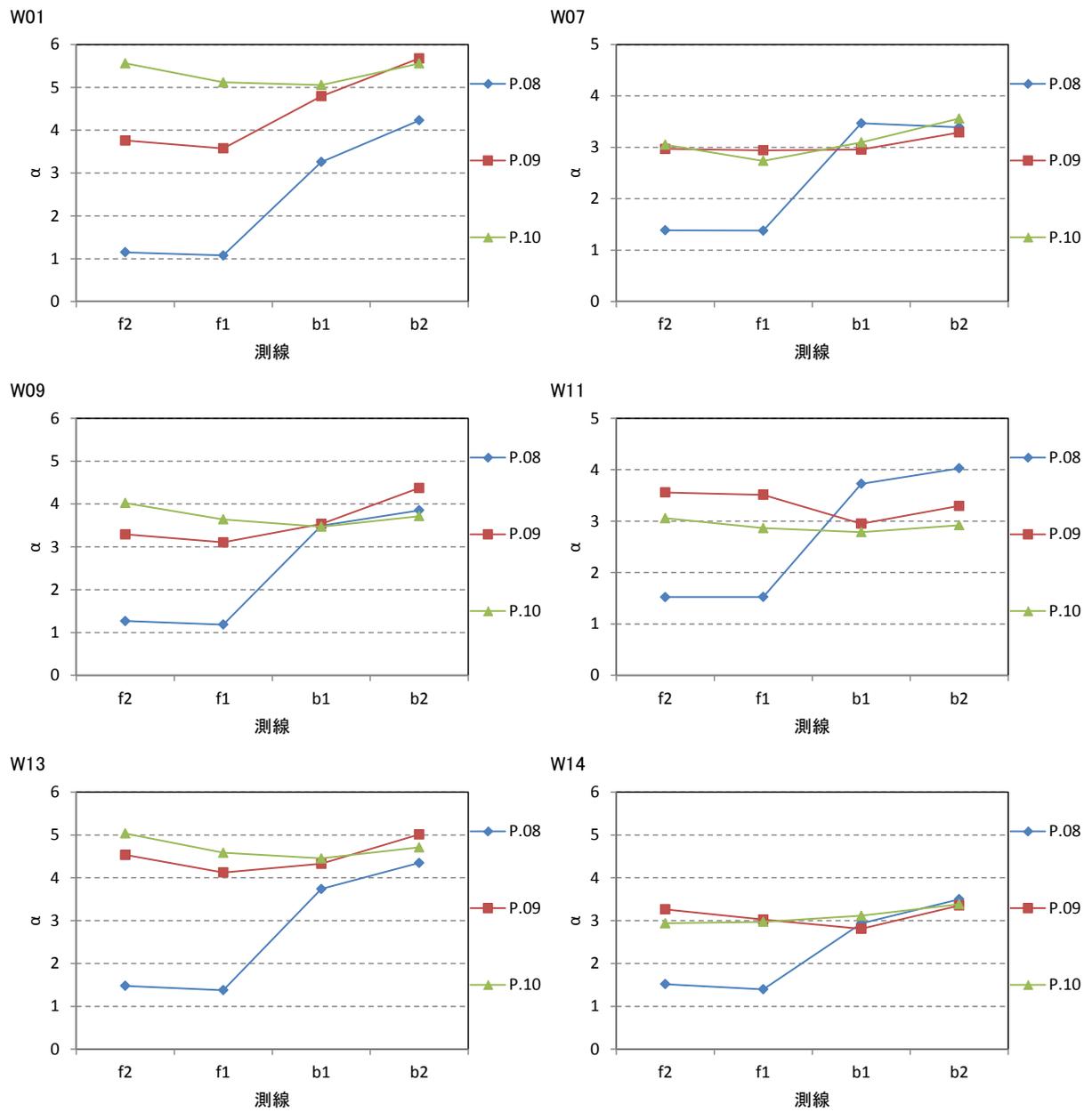


図 IV.4-6 水深係数の横断方向分布

#### 4.4. フルード数と水深係数の関係

図 IV.4-7 に、フルード数と水深係数の関係を示す。ここで、凡例に示した距離は、それぞれの計測点の汀線からの距離を示しており、各試験ケースにおいて、海側に位置する堤体を前面、陸側に位置する堤体を後面とした。例えば、P08 の設置位置に対し、前述の測線 f1, f2 は 0m(前面)、測線 b1, b2 は 1.25m(後面)となる。

フルード数と水深係数の関係は、2次元試験の結果と同様であり、ここで対象とした堤体の平面配置では、波力が2次元試験の結果よりも大きくなることはないことが分かる。前面側と後面側で特段の特性の違いは確認できず、堤体配置の影響は小さいと考えらえる。

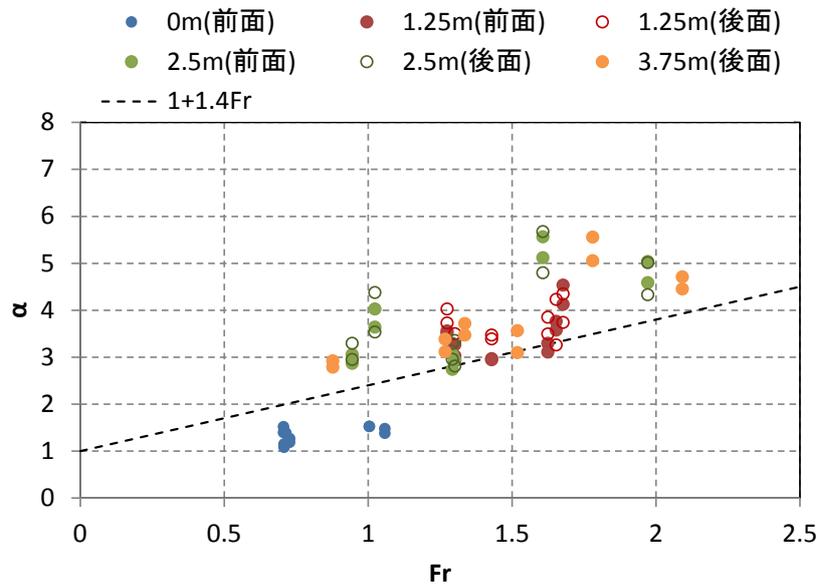


図 IV.4-7 フルード数と水深係数の関係

## 第 V 編

# 防潮堤の平面配置影響の 把握水理試験のシミュレーション解析



## 1. 概要

第 IV 編で実施した水理試験を対象にシミュレーション解析を実施し、解析手法の適用性を確認する。

「津波波力特性の把握のシミュレーション解析」と同様に、「防潮堤の平面配置影響の把握水理試験」を対象としたシミュレーション解析を実施し、解析手法の適用範囲を確認して解析手法を整備する。解析手法として「津波波力特性の把握のシミュレーション解析」に適用した、市販の解析コードである STAR-CD (CD-adapco 社) を適応するとともに、浅水長波方程式を基礎式とした平面 2 次元条件の解析手法として、市販の解析コードである Delft3D (Deltares 社) を適用した。Delft3D は、その解析コードがオープンソースソフトウェアとして公開されており、単層モデルとして適用した場合、一般に津波氾濫解析に用いられている非線形浅水長波方程式モデルとなる。

## 2. 解析方法

第 IV 編で実施した水理試験結果のシミュレーション解析を実施した。解析コードには STAR-CD および非線形浅水長波方程式を基礎方程式とした解析コード（以下、NLSW と称す）を使用した。STAR-CD の解析条件、用いた物性値は第 II 編と同一である。ただし、解析格子間隔は圧力計測点近傍については 2.5cm と設定したが、それ以外の領域では 5cm～20cm に設定した。NLSW の解析条件を表 V.2-1 に示す。NLSW の解析では、解析格子間隔を全て 2.5cm と設定した。

表 V.2-1 解析条件 (NLSW)

基礎方程式	非線形浅水長波方程式 (浅水理論に基づく連続式と運動方程式)
解析格子間隔	2.5cm
解析時間間隔	0.006s
Manning の粗度係数	$0.001\text{m}^{-1/3}\text{s}$
水平渦粘性係数	$0.01\text{m}^2/\text{s}$

### 3. シミュレーション解析

#### 3.1. シミュレーション解析条件

解析ケース一覧を表 V.3-1, 表 V.3-2 に示す. 通過波検定試験では 2 ケース, 波力/波圧試験では 6 ケースを対象に解析を実施した. 解析では, WG05 地点を始点として実験水槽を再現した. 解析における造波は, STAR-CD では水位と流速の境界条件が必要となるため, 実験で計測された WG05 の水位および流速時系列を, NLSW では水位条件のみが必要なため, WG05 の水位時系列を入力することで行った. 図 V-3-1 に, 一例として波圧/波力試験 (堤体位置 2.5m) の解析モデル (STAR-CD) を示す.

表 V.3-1 シミュレーション解析ケース (通過波検定試験)

No	ケース名	地形	波形	堤体位置	平面配置
1	F-W01-0-N	直立護岸	W01	N/A	なし
2	F-W07-0-N	F	W07	0	N

表 V.3-2 シミュレーション解析ケース (波力/波圧試験)

No	ケース名	地形	波形	堤体位置	平面配置
1	F-W01-1-A	直立護岸 F	W01	0m	堤体配置 A
2	F-W07-1-A		W07	1	
3	F-W01-2-A		W01	1.25m	
4	F-W07-2-A		W07	2	
5	F-W01-3-A		W01	2.5m	
6	F-W07-3-A		W07	3	

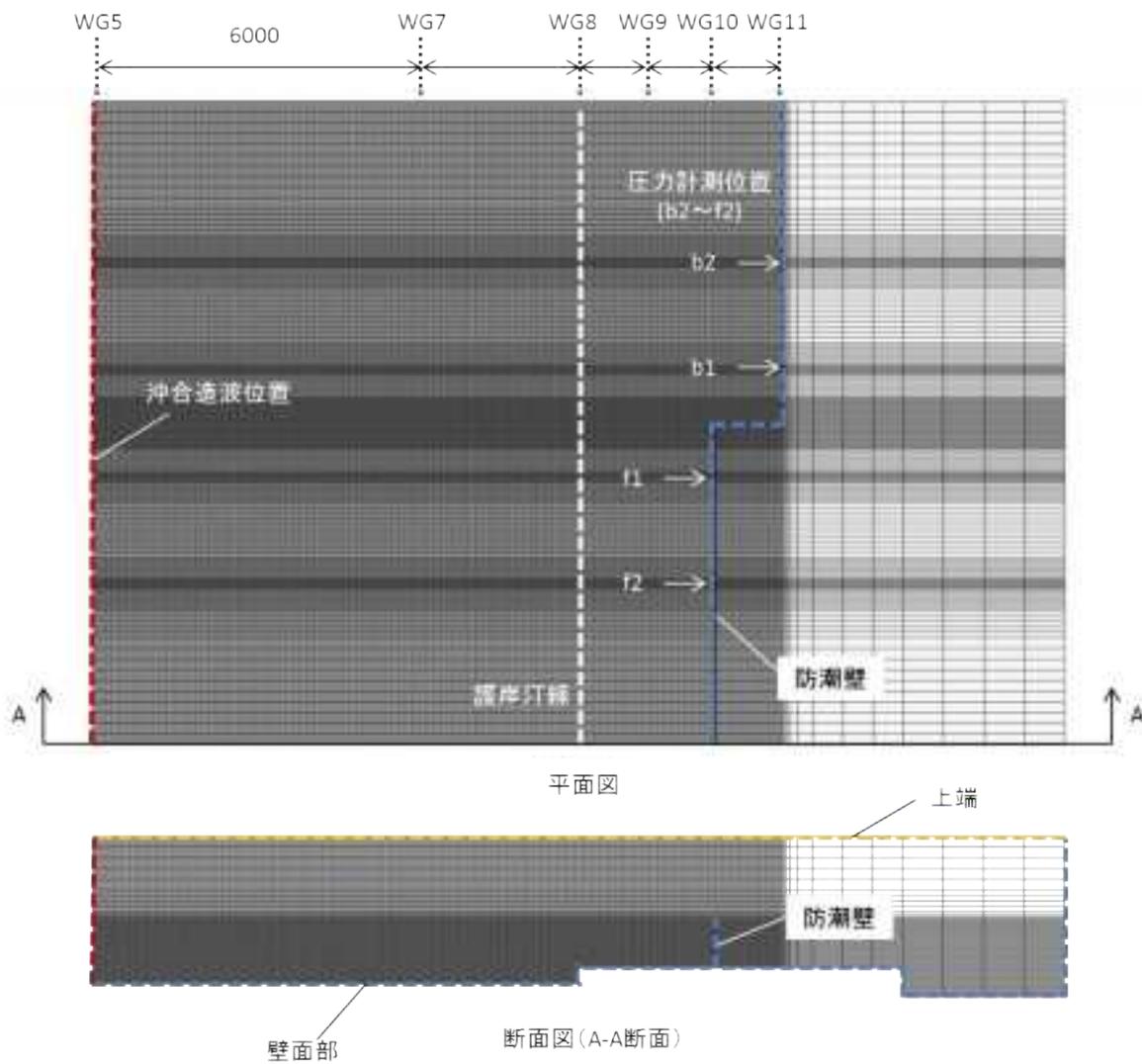


図 V-3-1 解析モデル (直立護岸, 堤体位置 2.5m, STAR-CD)

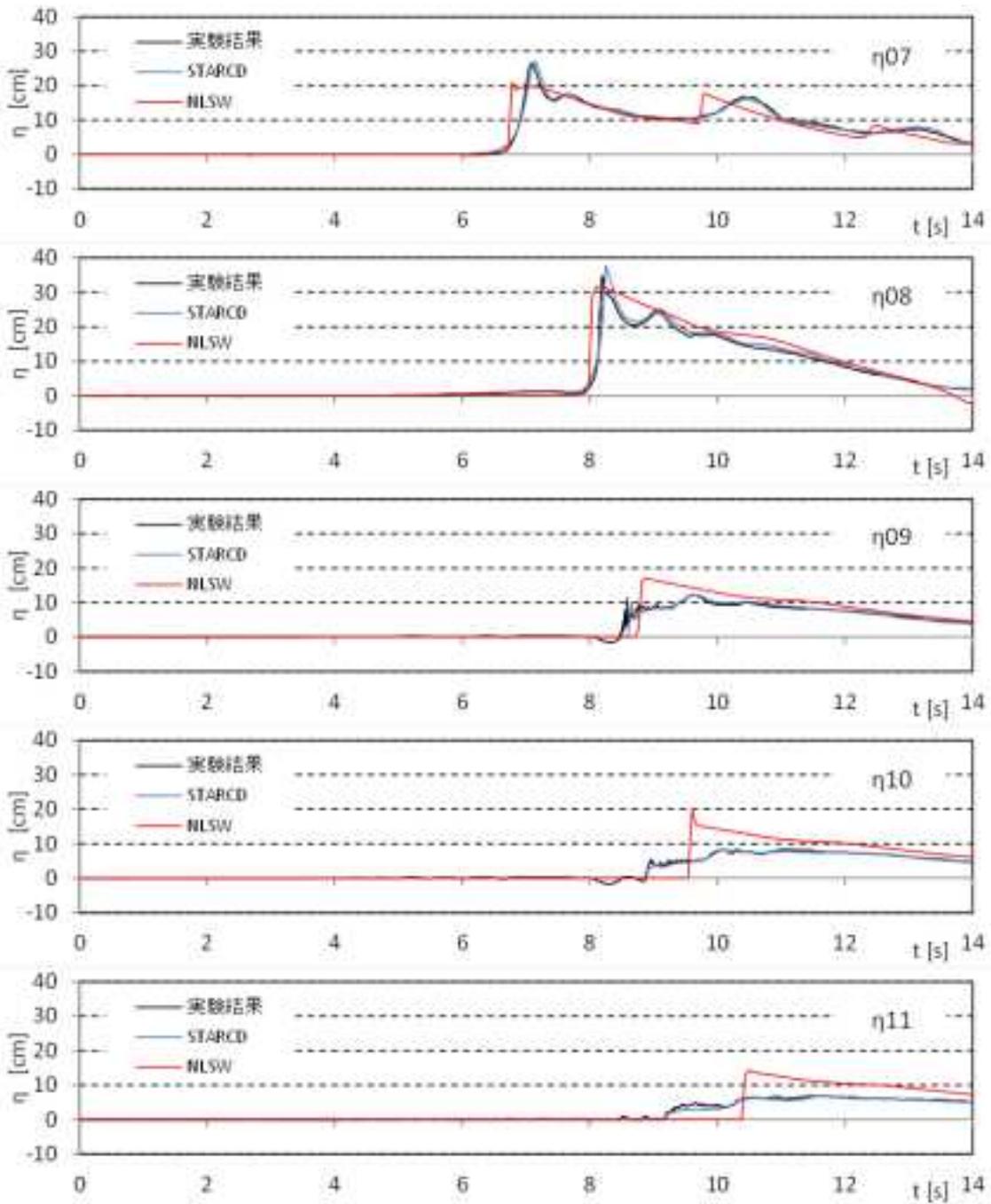
## 3.2. シミュレーション解析結果

### 3.2.1. 通過波検定試験

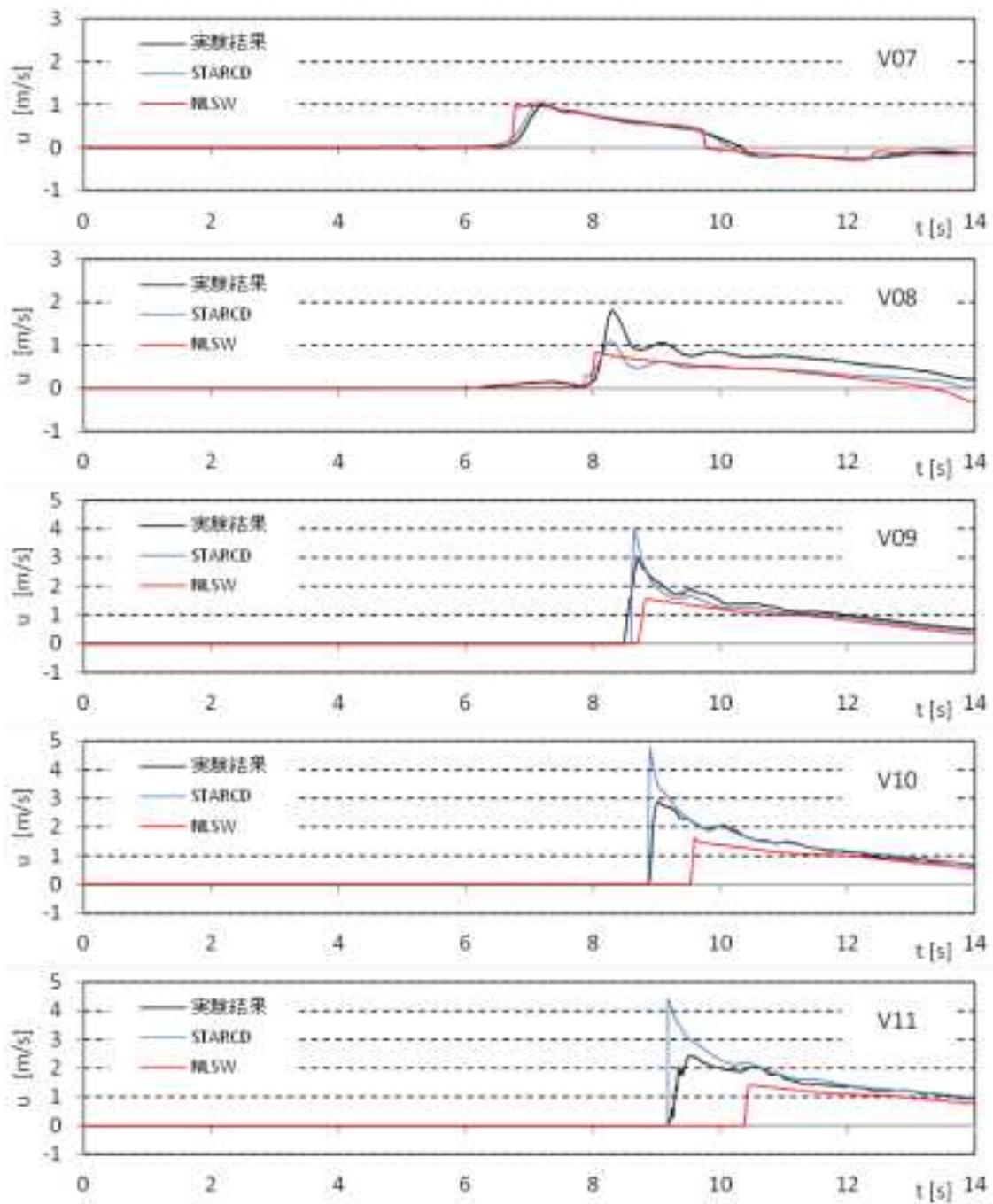
通過波検定試験に対する解析結果と実験結果の比較を、図 V.3-2 に示す。また、STAR-CD, NLSW による各計測点での解析結果を図 V.3-3, 図 V.3-4 に示す。

STAR-CD の水位時系列結果に着目すると、W01, W07 ともに実験結果を良好に再現していることが確認できる。W01 は波形の前傾化が顕著で、陸上部を砕波しながら遡上する津波波形であるが、沖合・陸上部ともに解析結果は水位変化の様子を良く再現できている。陸上部の流速時系列に着目すると、V09, V10, V11 では津波到達直後の流速の立ち上がりが実験結果よりも大きくなっている。実験の流速はプロペラ流速計による計測結果である。プロペラ流速計の場合、プロペラ部分が完全に水没しないと正確な流速が得られないため、初期の流速値が実現象よりも小さくなっていると考えられる。解析結果はこうした遡上先端の流速についても正確に算定できていると考えられ、また遡上先端以降の流速値も実験結果とほぼ一致することから、精度よく実験を再現できていると言える。

次に、NLSW の結果に着目する。NLSW には分散項が含まれないため、W01 の沖合 ( $\eta$  07,  $\eta$  08) で実験や STAR-CD の結果よりも水面が切り立った形状になっており、 $\eta$  08 の 9s 付近に見られる短周期の水位変動も再現されていない。また、本解析で用いた NLSW は、一般的な解析コードを想定したため、津波の先端部に特別な遡上モデルを考慮していない。そのため、W01, W07 ともに水面が急峻に立ち上がった波形のまま陸上部を遡上している。実験においては、遡上先端では圧力分布が静水圧分布とならず、特に W01 では陸上部で波が砕波した状態で遡上している。NLSW ではこれらを再現できないため、 $\eta$  10,  $\eta$  11 地点で波の到達時刻に遅れが生じていると考えられる。なお、津波先端部の到達から暫く時間が経過すると、水位・流速ともに実験結果と概ね一致するようになる。これは、同時刻の流れの状態が静水圧分布で近似できる状態になっていることを意味している。

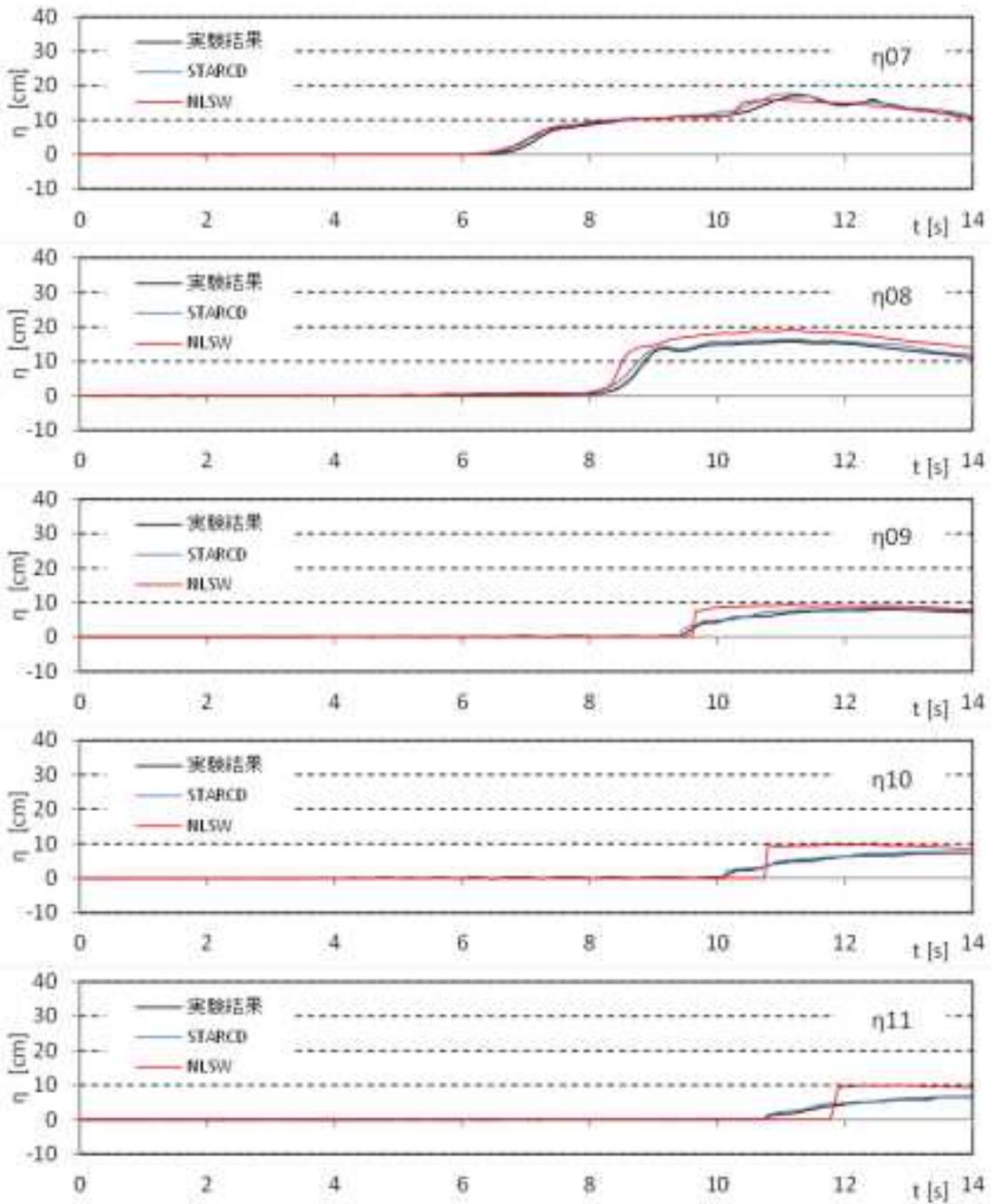


(a) 水位時系列の比較

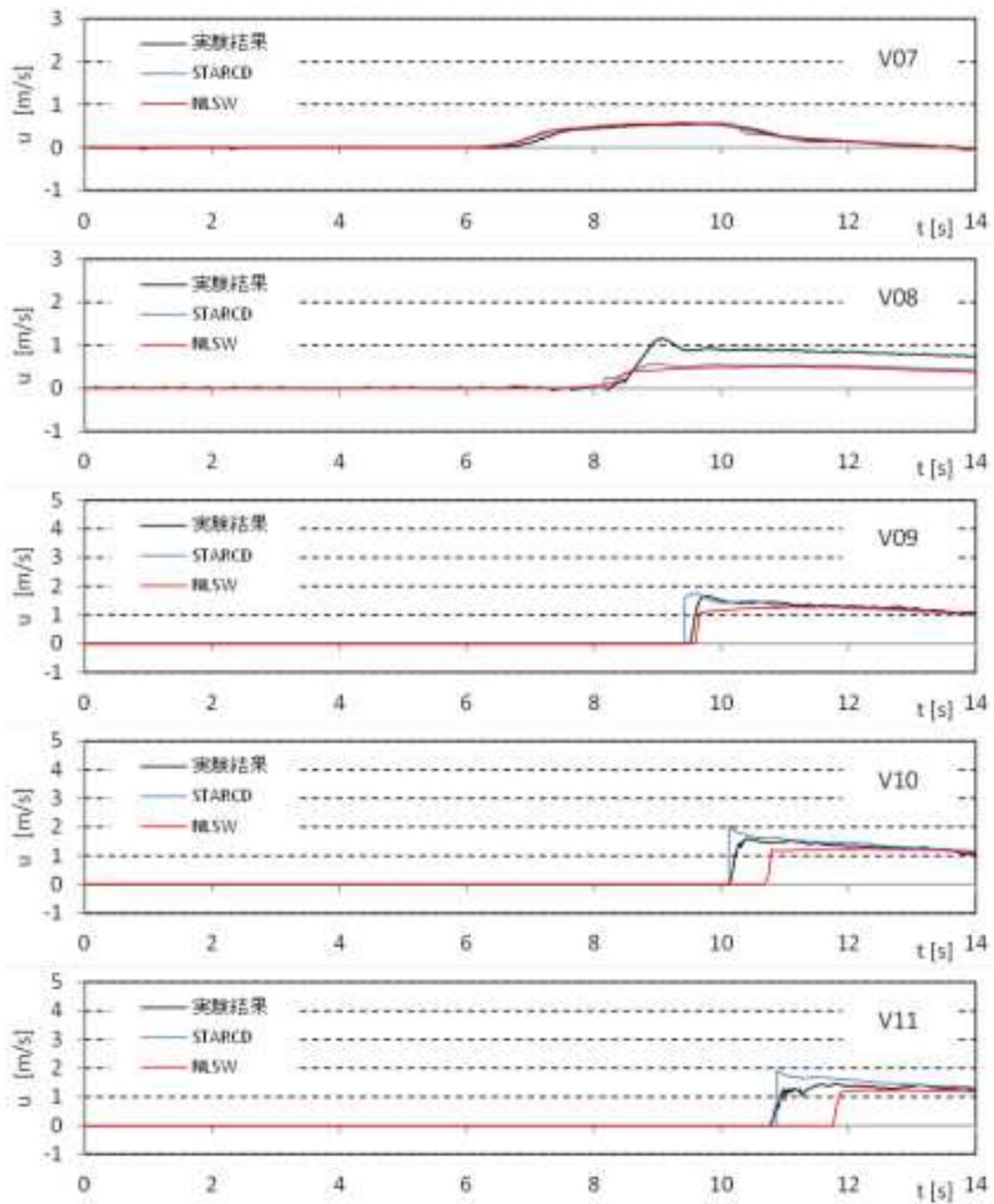


(b) 流速時系列の比較

図 V.3-2 実験と解析結果の比較 (W01)



(a) 水位時系列の比較



(b) 流速時系列の比較

図 V.3-2 実験と解析結果の比較 (W07)

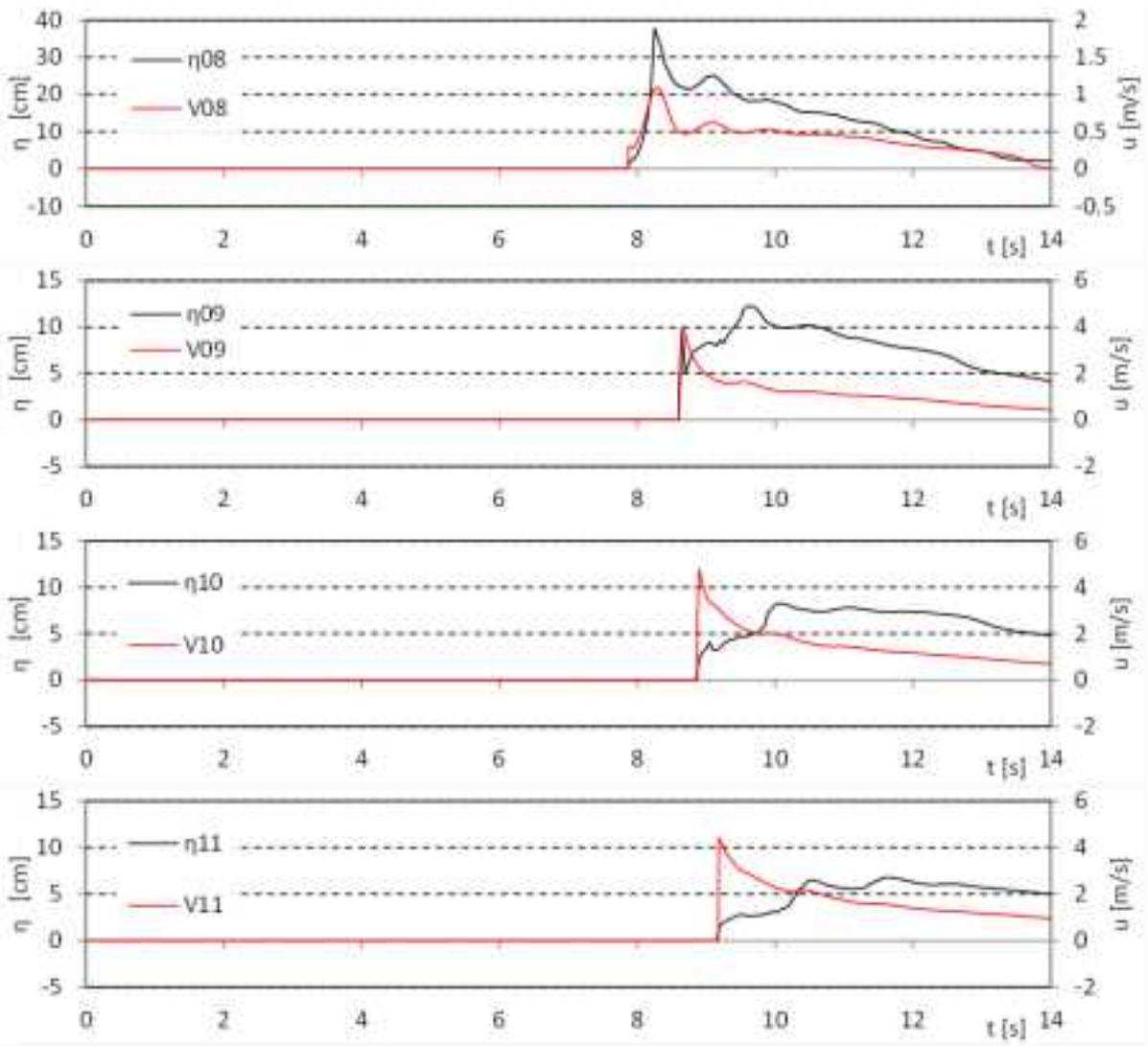


図 V.3-3 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (W01, STAR-CD)

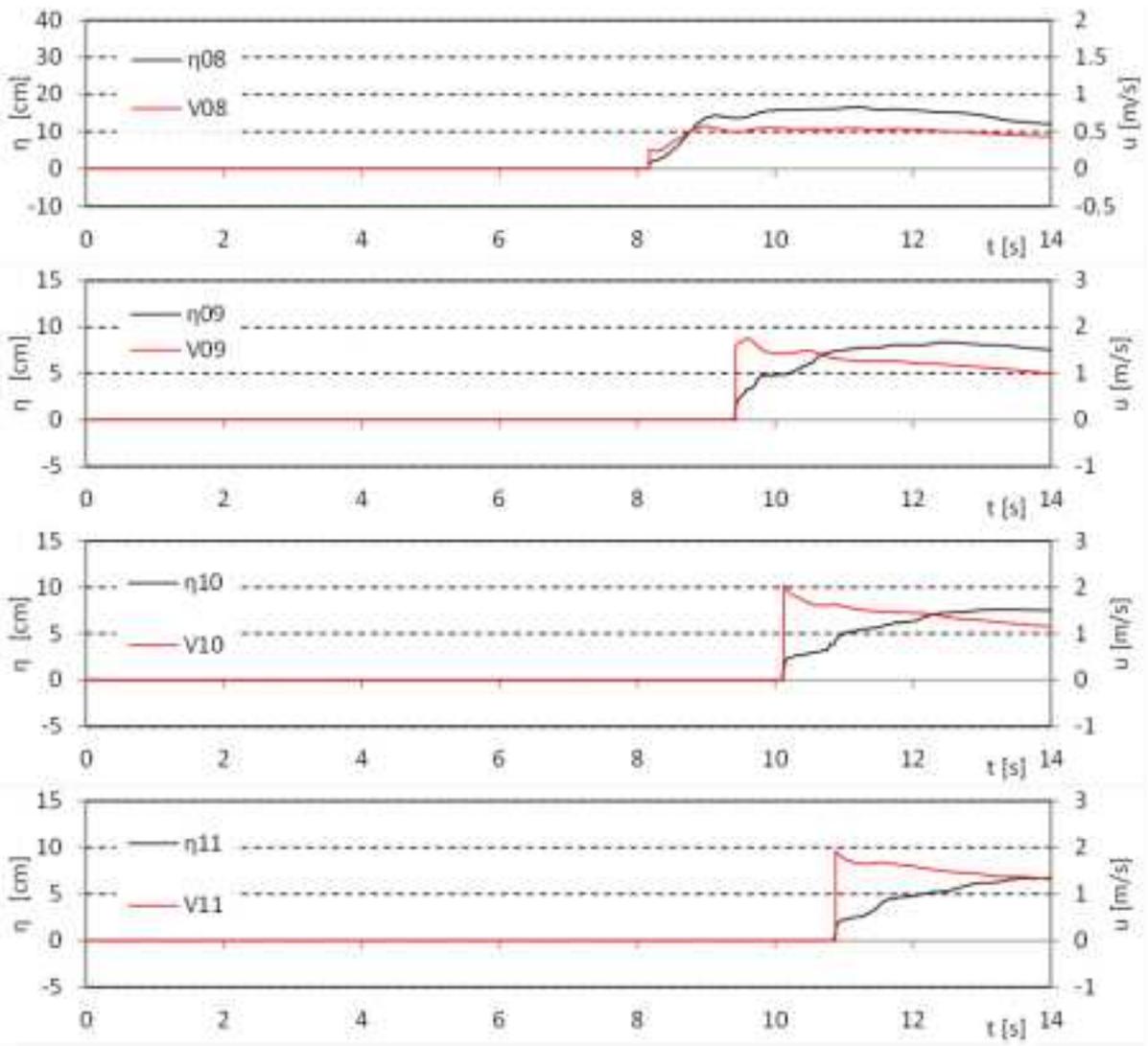


図 V.3-3 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (W07, STAR-CD)

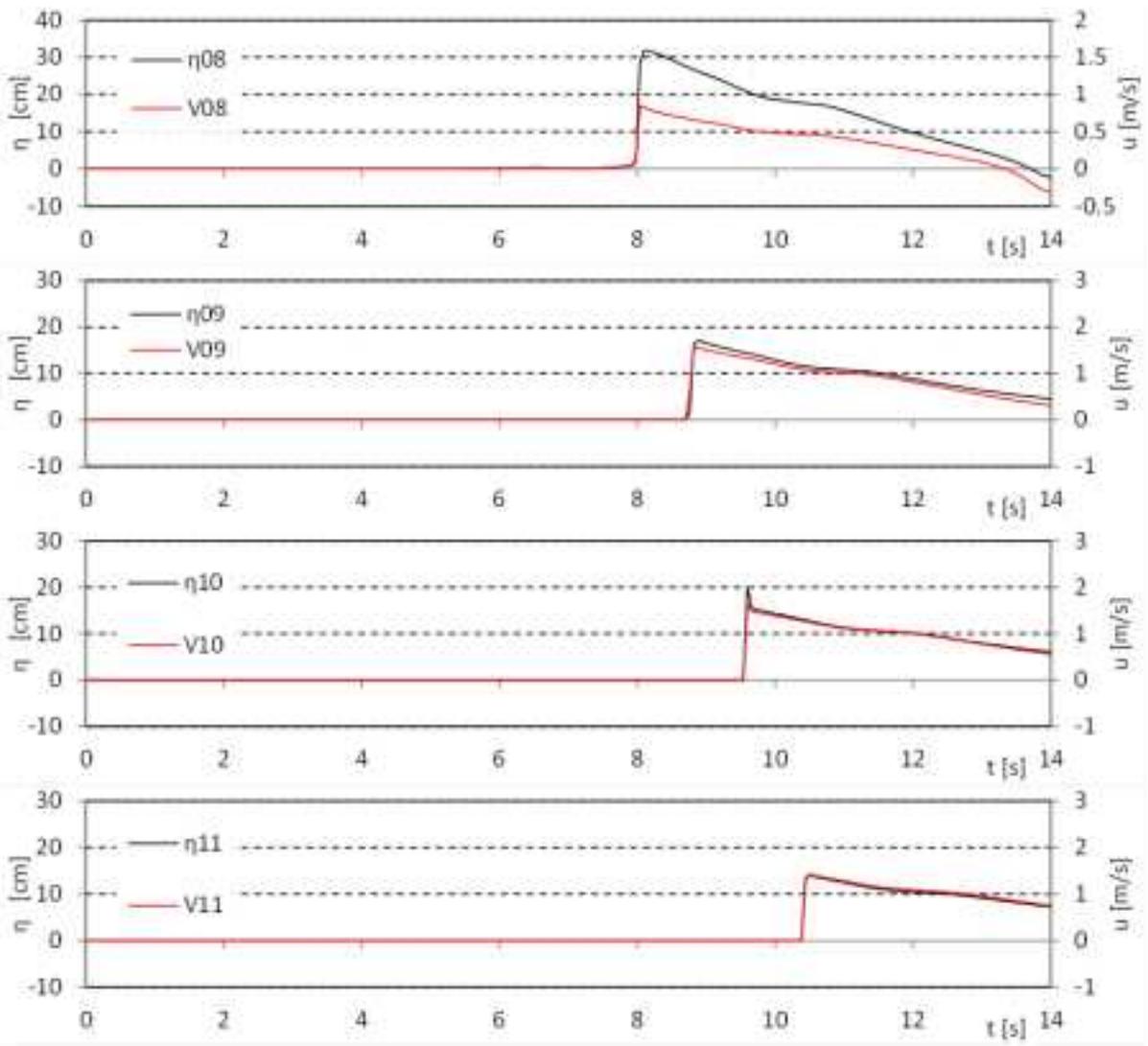


図 V.3-4 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (W01, NLSW)

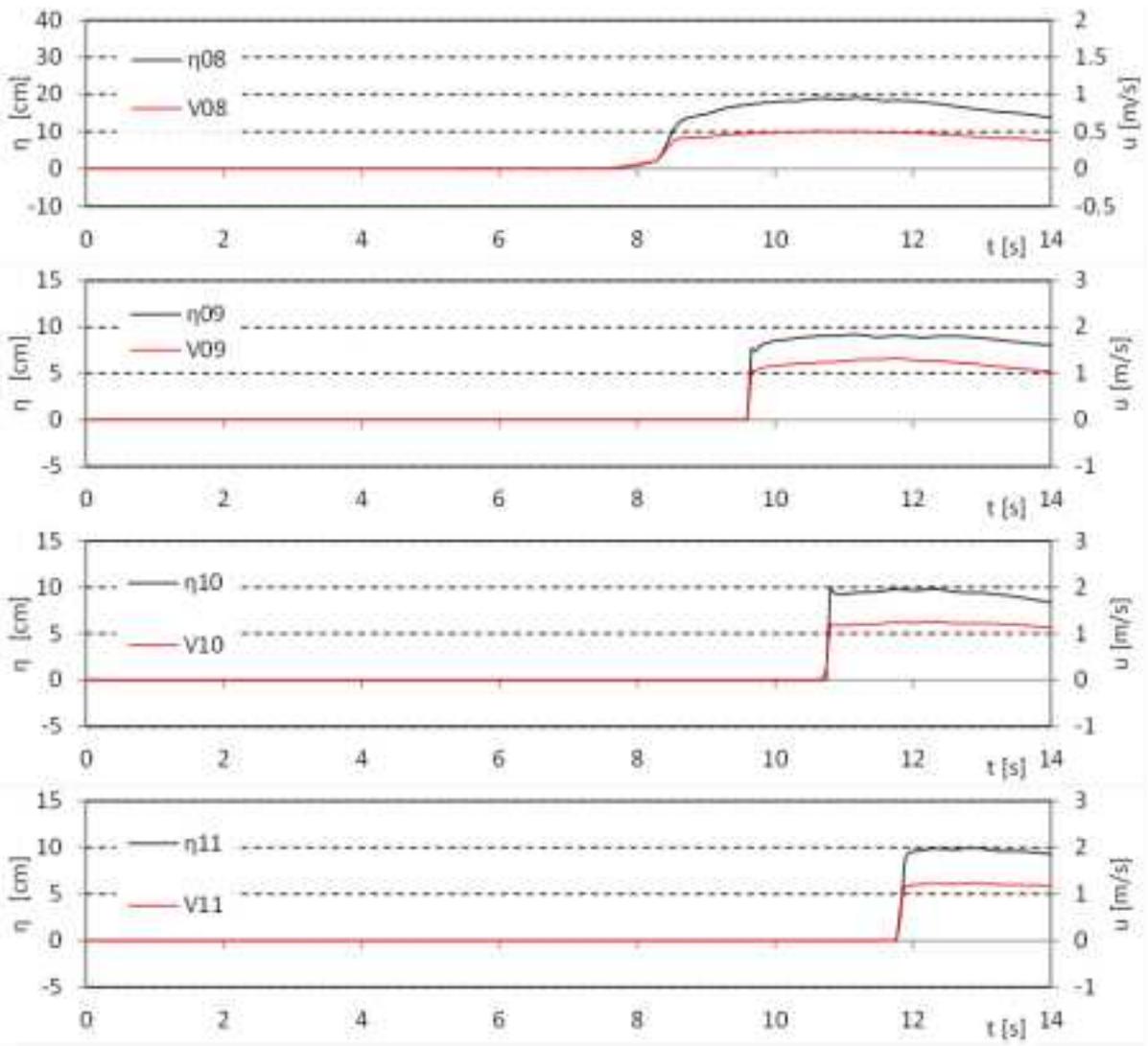


図 V.3-4 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (W07, NLSW)

### 3.2.2. 波力/波圧解析

波力/波圧試験に対する解析と実験の波力時系列結果の比較を、図 V.3-8 に示す。ここで STAR-CD の波力は実験の圧力計測位置と同じ位置の波圧を積分して求めている。NLSW でも圧力の積分により波力を算出したが、圧力の値は防潮壁前面の水位から定まる静水圧として算出した。STAR-CD、NLSW による各計測点での解析結果を図 V.3-8～図 V.3-13 に示す。なお、これらの図は全体的な変動が把握できるよう縦軸の描画範囲を調整したため、いくつかのケースでは圧力の最大値が描画範囲外になっていることに留意されたい。

W01 作用時の実験結果を見ると、津波衝突直後と打ちあがった水塊の落下時に大きな波力のピークが生じている。STAR-CD の解析結果では、各波力のピーク値に違いが見られる場合もあるが、この 2 回の波力上昇を再現できている。また、W07 については防潮壁の設置位置によらず、解析は実験結果を良好に再現できていることが確認できる。計測測線ごとの結果に着目すると、実験では防潮壁中心に近い F\_f1, F\_b1 よりも、F\_f2, F\_b2 の波力が大きくなる傾向がある。解析でも実験と比較すると顕著ではないものの、その傾向が再現されている(例えば、設置位置 0m, W01)。

NLSW の結果に着目すると、W01 で計測された二つの波力のピークが解析では再現されていない。これは、NLSW の解析では、動圧や鉛直加速度による圧力変化の影響が考慮できないためである。ただし、波力の最大値のみに着目すると概ね実験と一致した値となっている。一方、W07 については、波力発生時刻に遅れが見られるケースがあるものの、概ね実験と一致した結果が得られている。W07 は比較的緩やかに水位上昇する津波波形であり、最大波力も概ね水位が最大になる時刻で発生している。本解析による結果は、こうした津波波形を対象とする場合には、NLSW による解析でも波力を算定できる可能性を示唆している。

STAR-CD、NLSW の解析結果を元に算出した、各ケースの水深係数を図 V.3-14、図 V.3-15 に示す。また、解析ケースの結果のみを抜粋した実験の水深係数を図 V.3-16 に示す。まず STAR-CD の結果に着目すると、実験では堤体位置 1.25m～3.75m に対する結果はフルード数が 1.5 の周辺にプロットされているが、解析でもその傾向を概ね再現できている。ただし、解析では堤体 2.5m の結果が  $Fr=2.20$  の位置にプロットされるケース (W01 作用時に対応する) があるのに対し、実験では同じケースの結果が  $Fr=1.61$  の位置にプロットされている。ここで再度、図 V.3-2 に示した W01 作用時の  $\eta_{10}$  の結果に着目する。実験と解析結果は良く一致していることが再確認できるが、最大水位の発生時刻に着目すると、1s 程度のずれが生じている(解析では 10.05s に最大値が生じると算定されたが、実験結果では 11.12s に最大値が生じている)。 $\eta_{10}$  地点では水位変動に対して流速の変動が比較的大きく、1s の違いでも流速は約 3 割 ( $1.98\text{m/s}\rightarrow 1.45\text{m/s}$ ) 低減している。そのため同ケースのフルード数は、解析の方が 3 割程度大きくなったと考えられる。縦軸(水深係数)の分布に着目すると、堤体位置 3.75m の結果を除けば解析結果の分布は実験結果の分布と概ね良好に一致している。なお、堤体位置 3.75m での水深係数が解析結果で大きくなるのは、同ケースの最大波力が実験よりも 2 倍程度大きく算出されているためである(図 V.3-7「設置位置 2.5m, W01」の F\_b1, F\_b2 を参照)。打ち上がった水塊の落水時に働く波力の場合、水塊は空気と複雑に混合されたような状態で落水するため、数値解析による再現が困難である。この場合、数値解析の方が短時間で大きな値を示す。

NLSW の結果に着目すると、堤体 0m の結果を除き  $Fr=1.2\sim 1.4$  にプロットが集中している。また、水深係数の値は全てのケースで 3.0 を下回る結果となった。

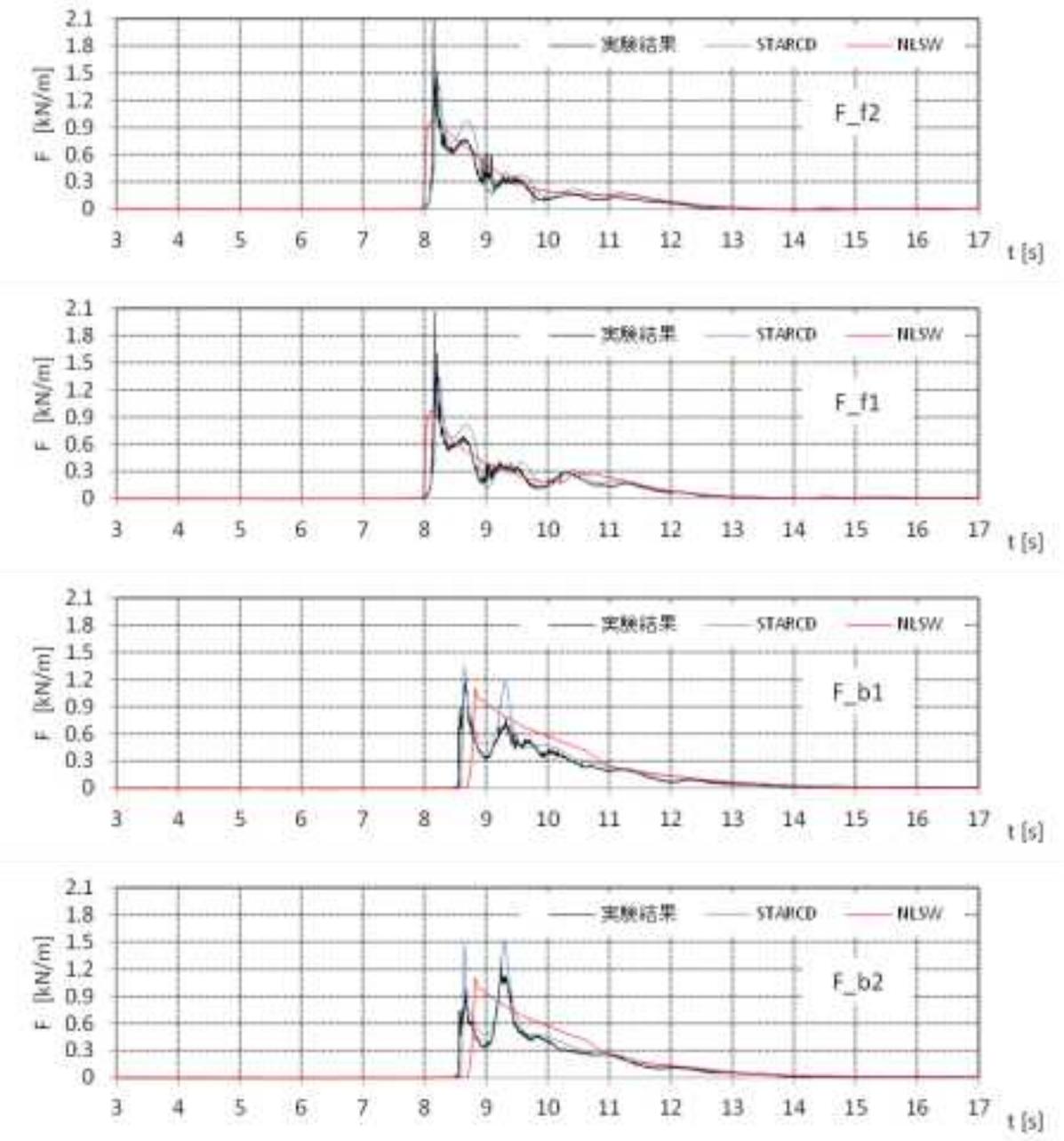


図 V.3-5 波力時系列の実験と解析結果の比較 (設置位置 0m, W01)

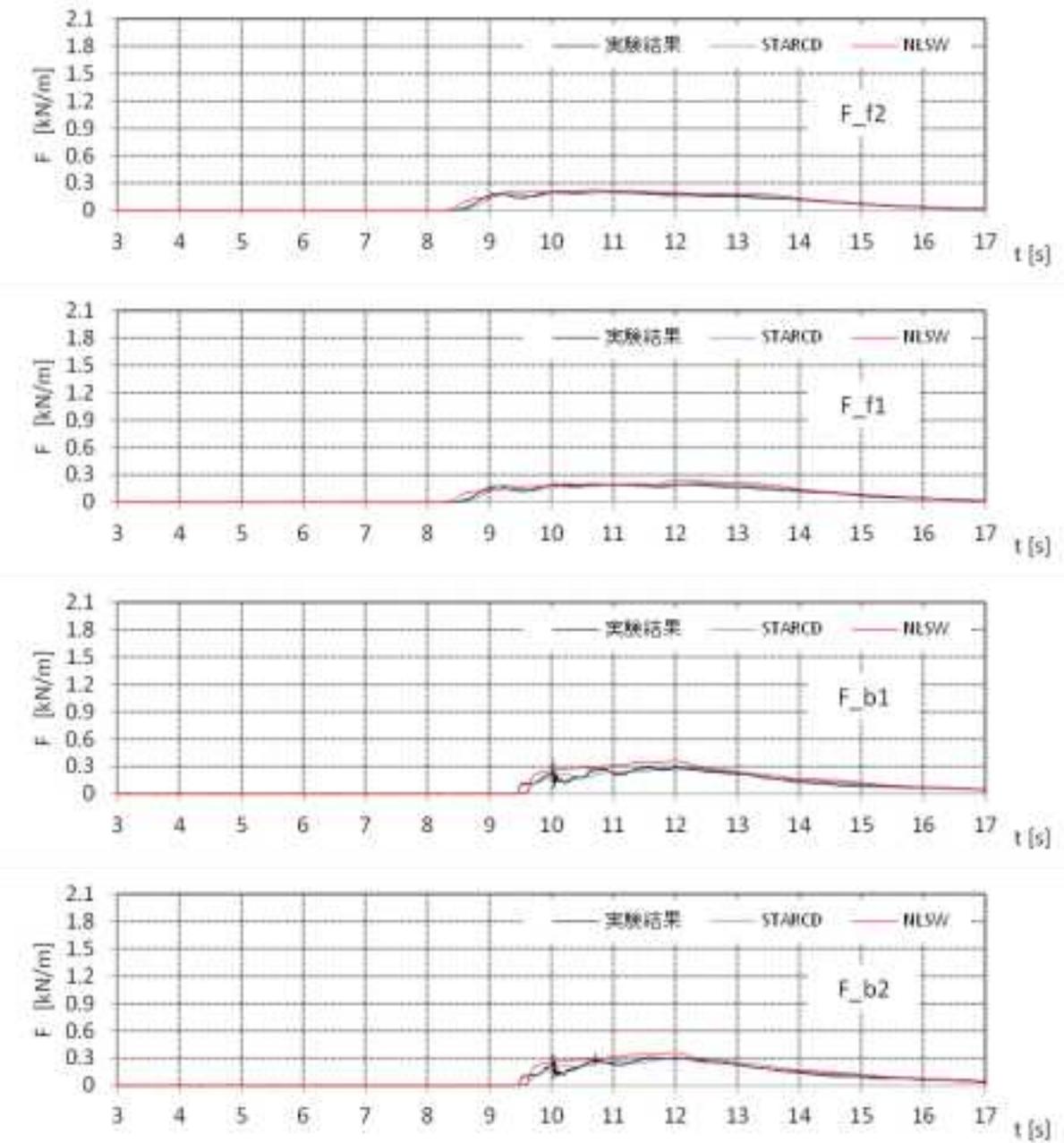


図 V.3-5 波力時系列の実験と解析結果の比較 (設置位置 0m, W07)

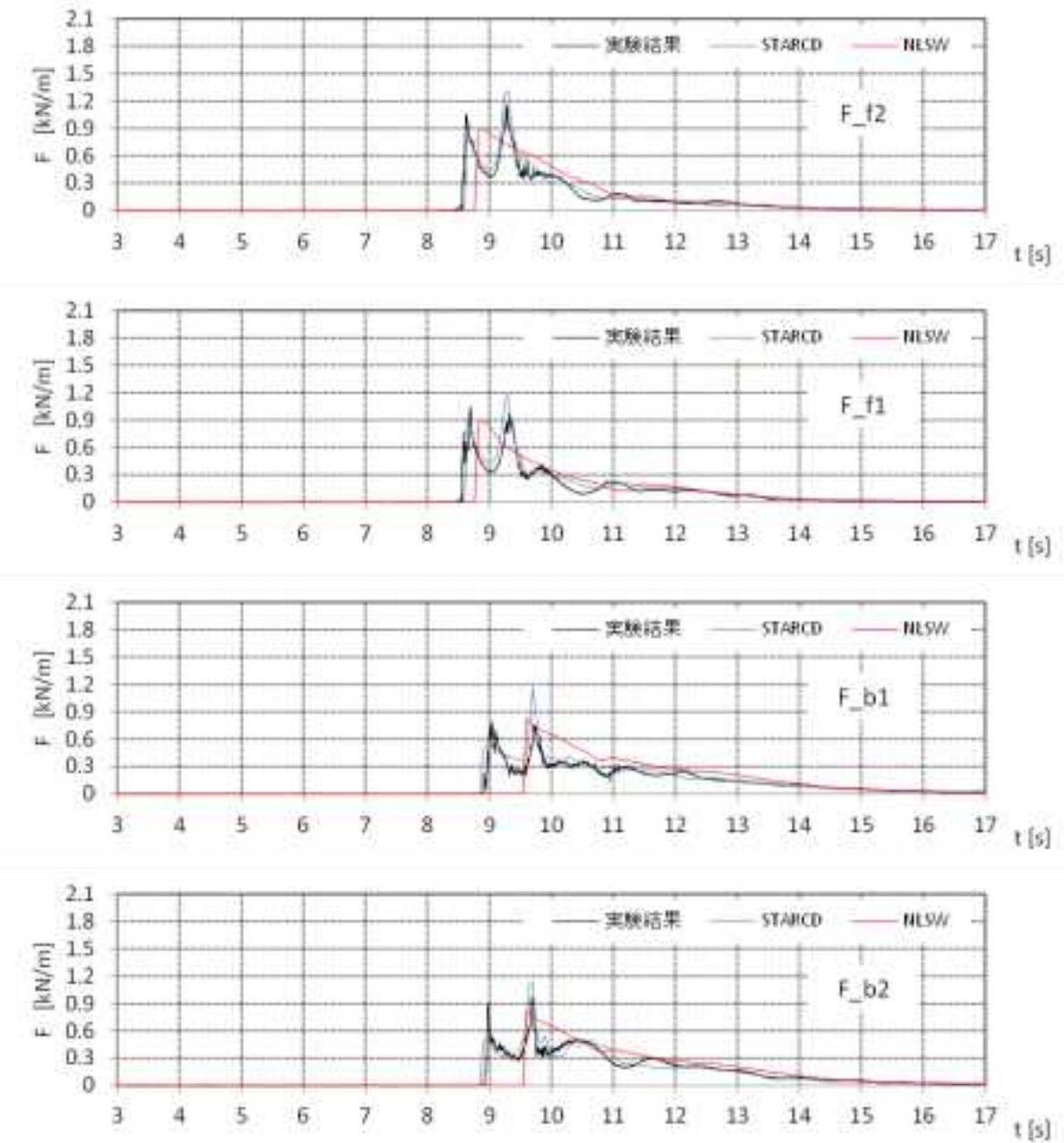


図 V.3-6 波力時系列の実験と解析結果の比較 (設置位置 1.25m, W01)

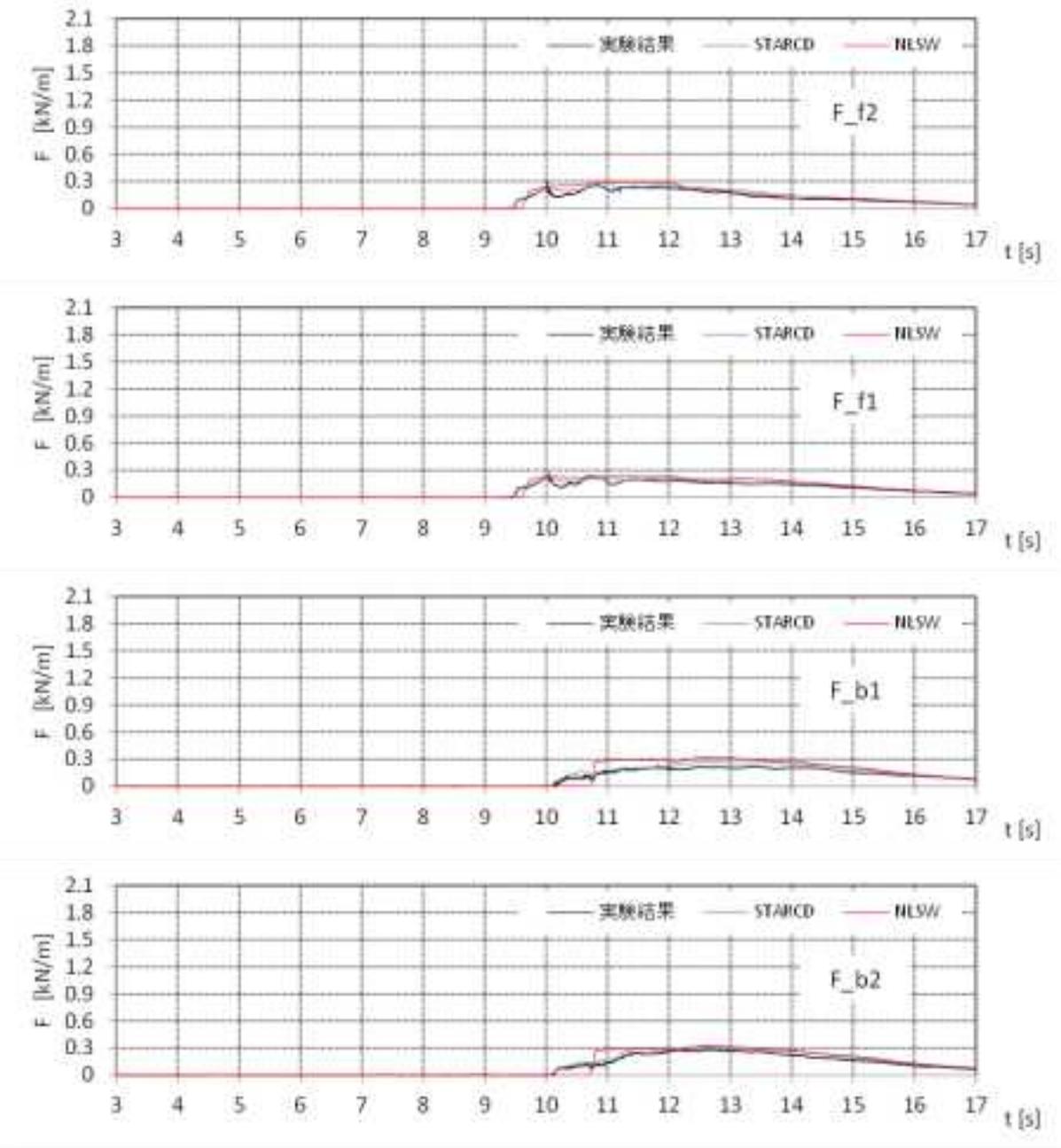


図 V.3-6 波力時系列の実験と解析結果の比較 (設置位置 1.25m, W07)

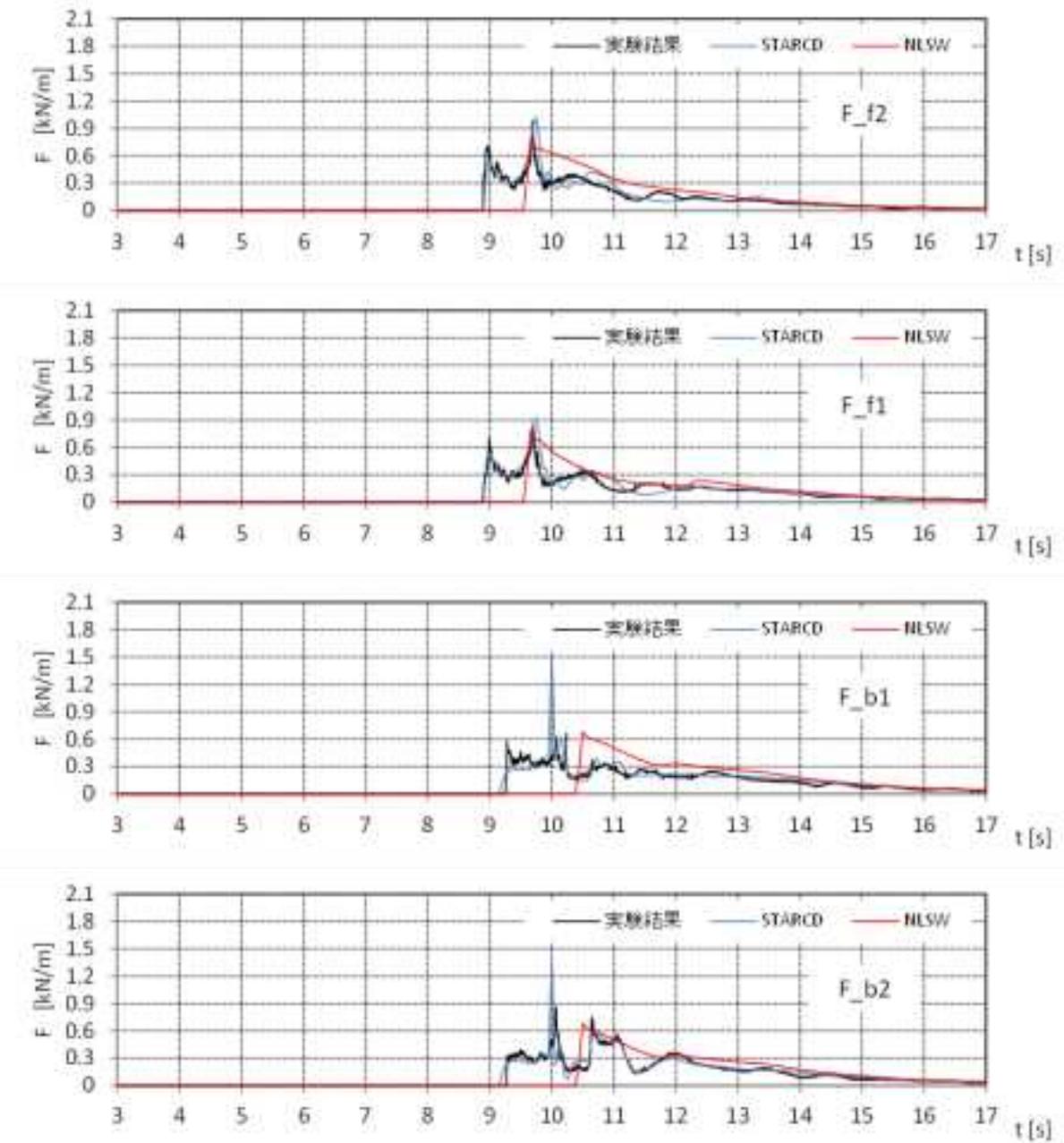


図 V.3-7 波力時系列の実験と解析結果の比較 (設置位置 2.5m, W01)

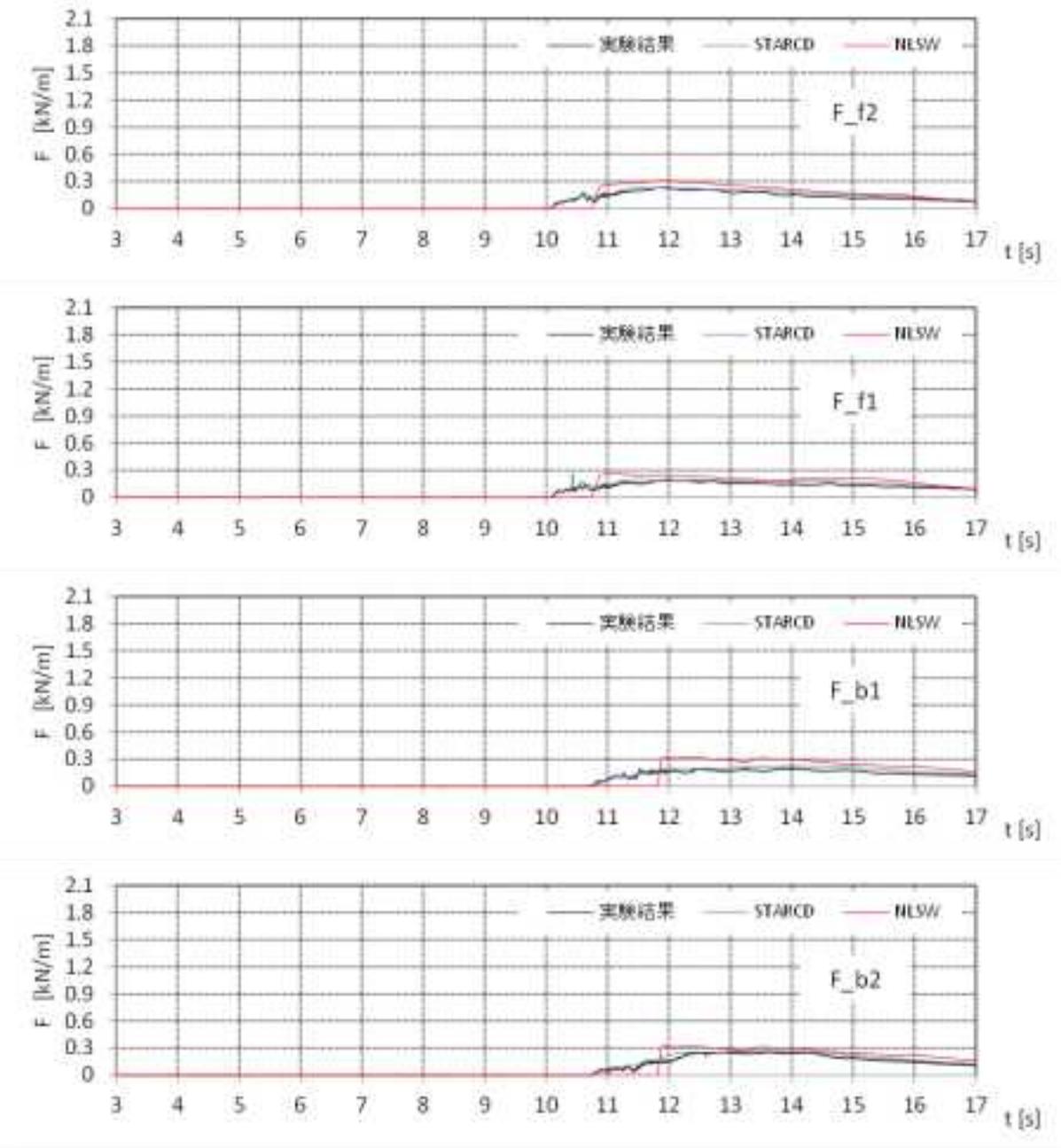


図 V.3-7 波力時系列の実験と解析結果の比較 (設置位置 1.25m, W07)

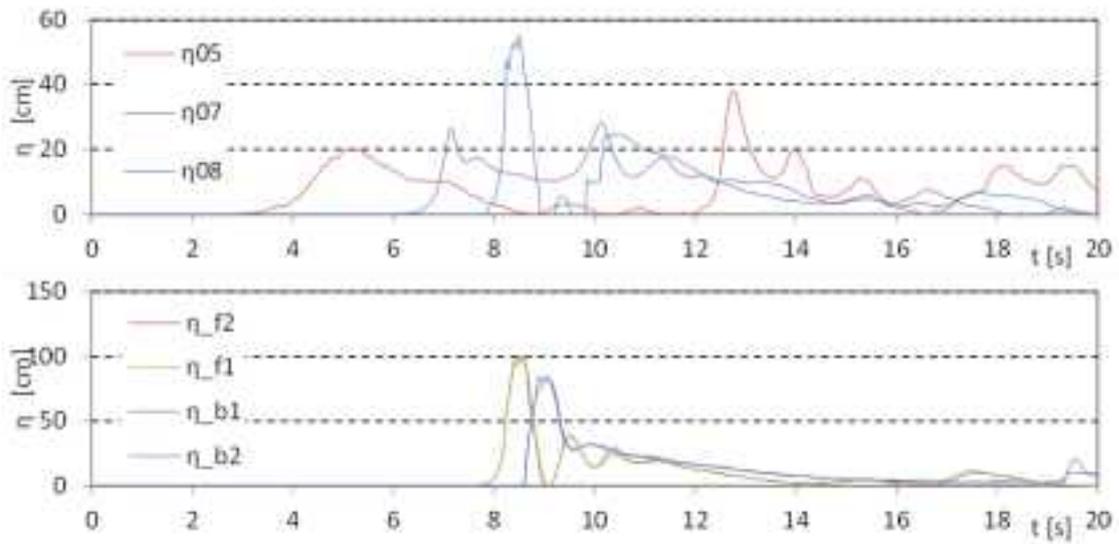


図 V.3-8 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 0m, W01, STAR-CD)

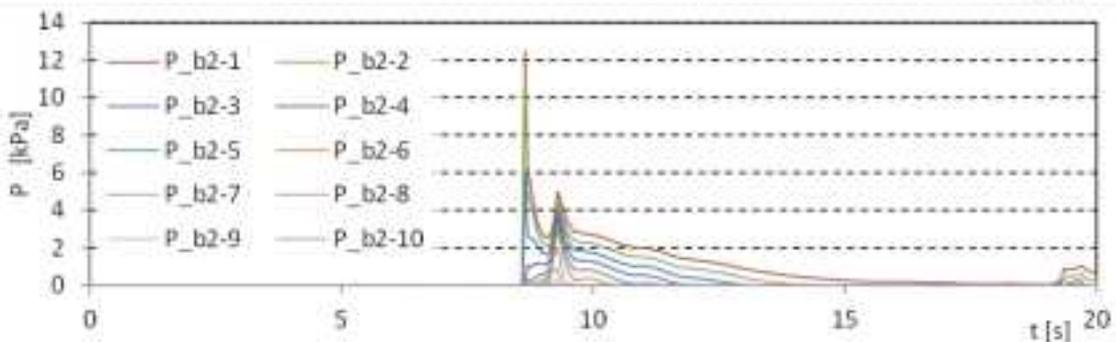
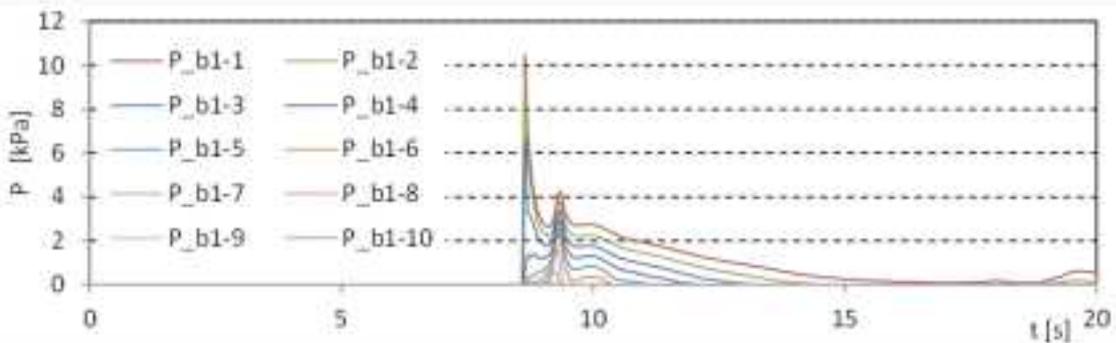
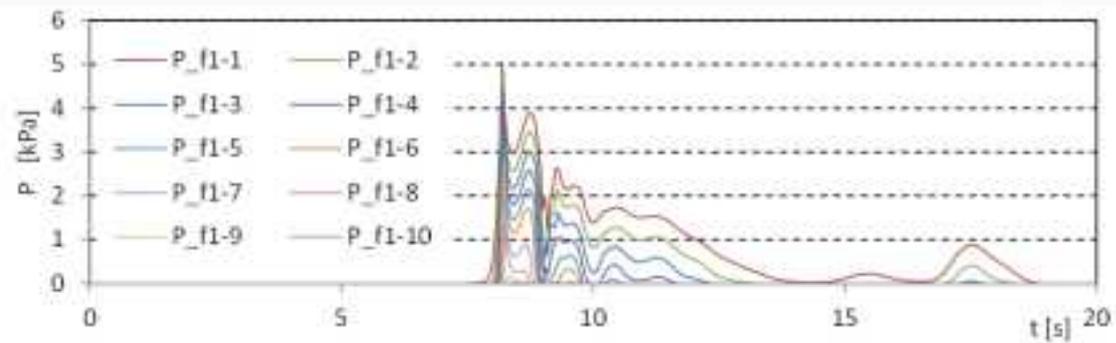
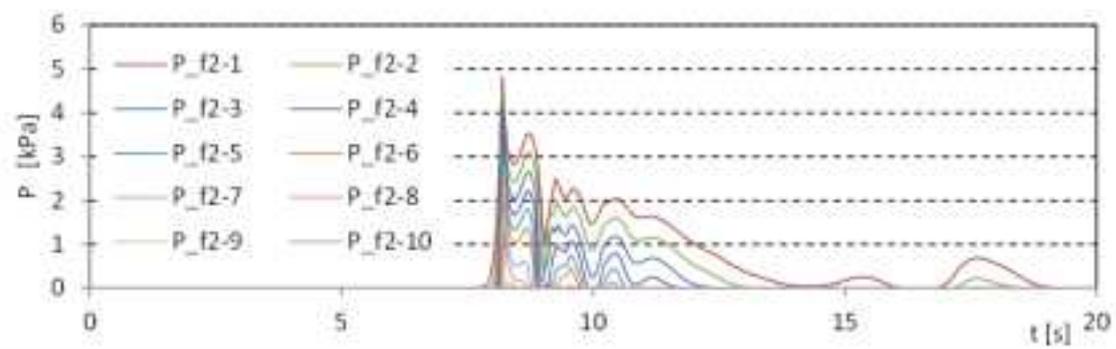


図 V.3-8 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 0m, W01, STAR-CD)

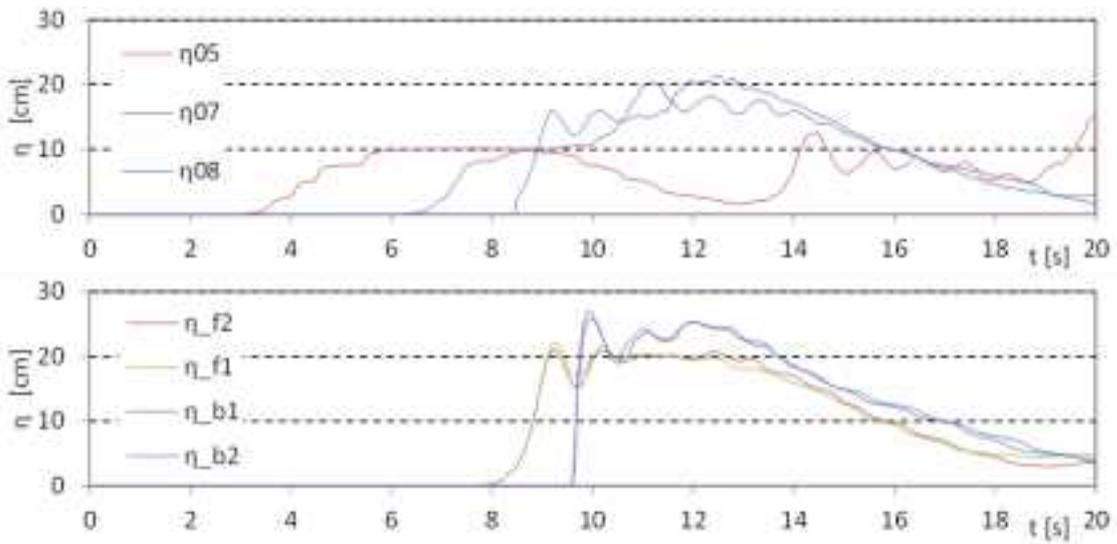


図 V.3-8 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 0m, W07, STAR-CD)

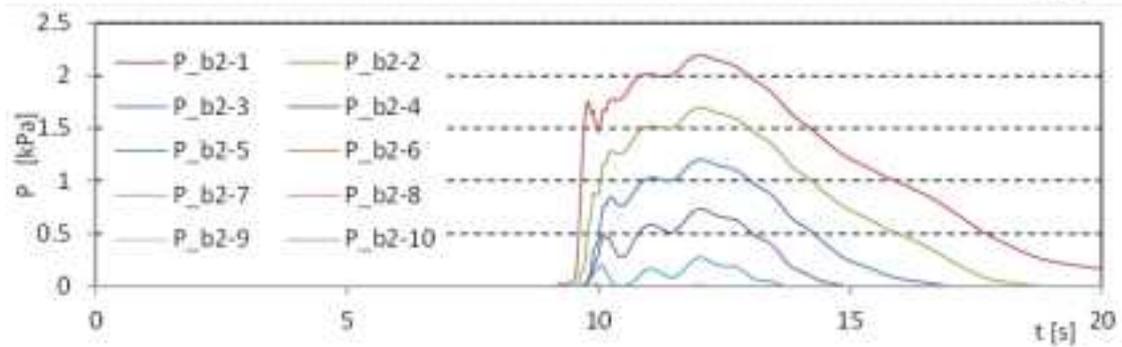
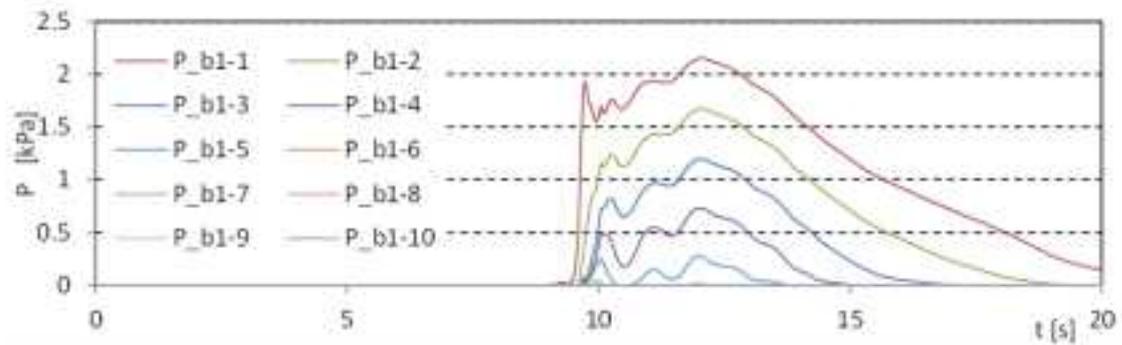
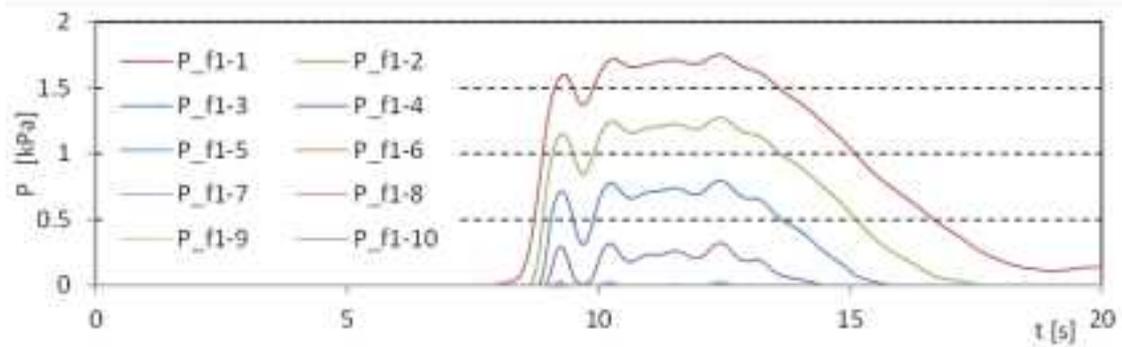
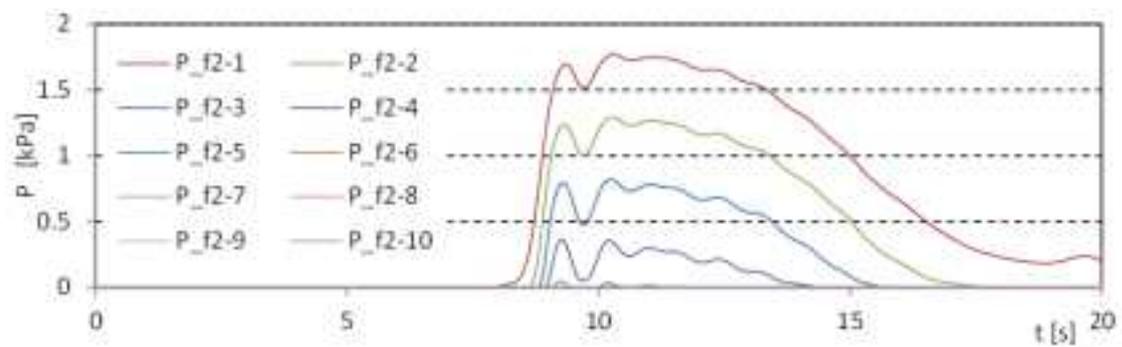


図 V.3-8 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 0m, W07, STAR-CD)

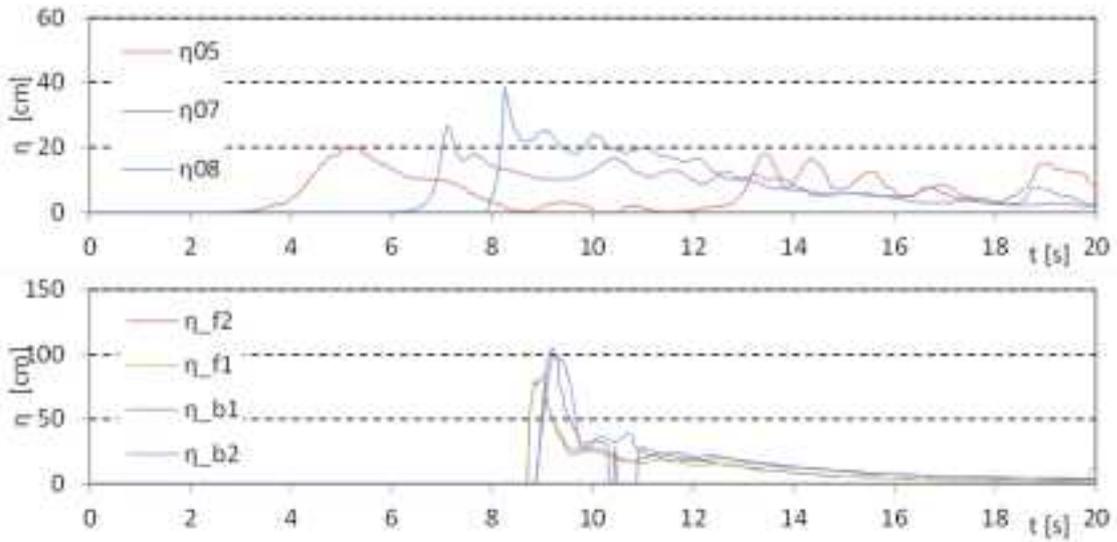


図 V.3-9 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 1.25m, W01, STAR-CD)

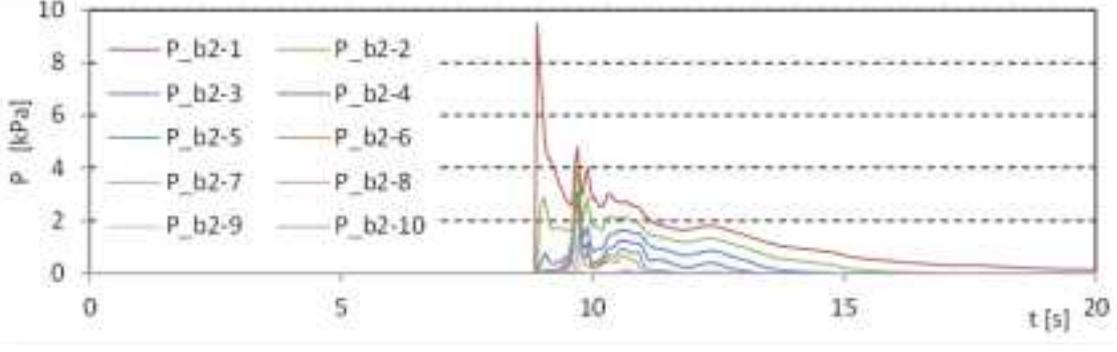
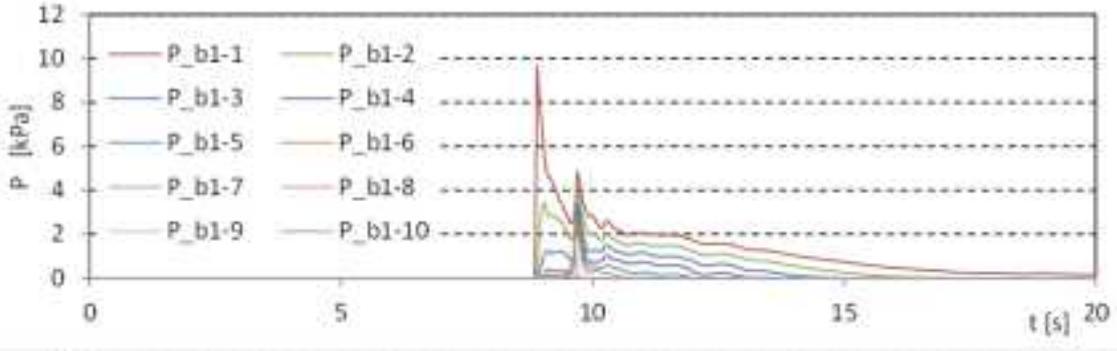
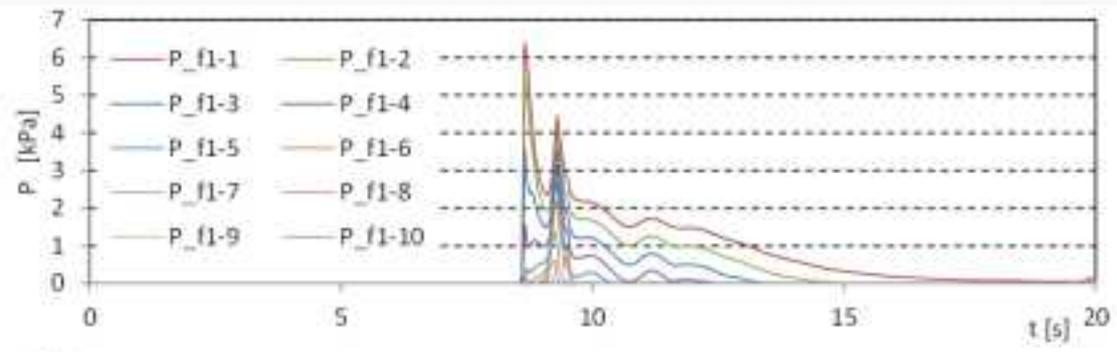
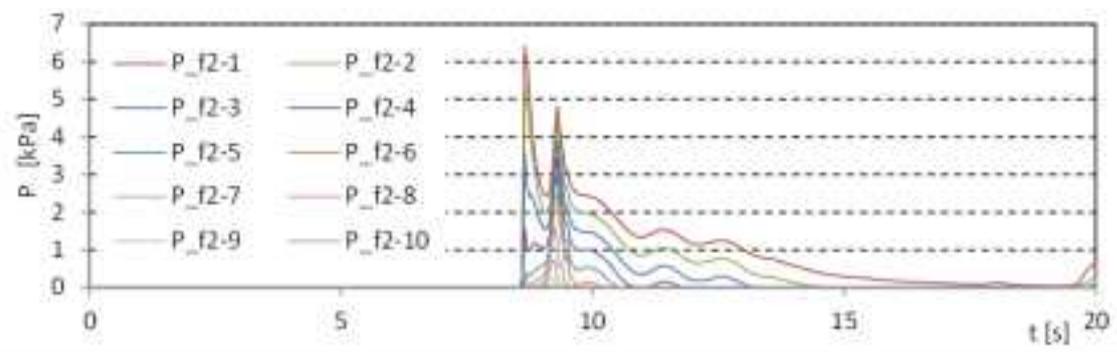


図 V.3-9 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 1.25m, W01, STAR-CD)

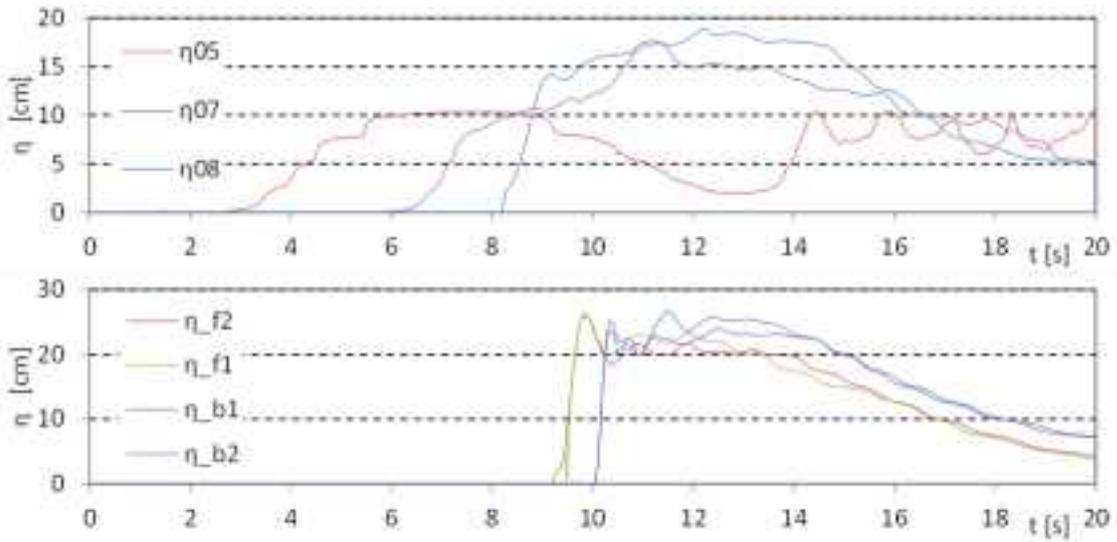


図 V.3-9 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 1.25m, W07, STAR-CD)

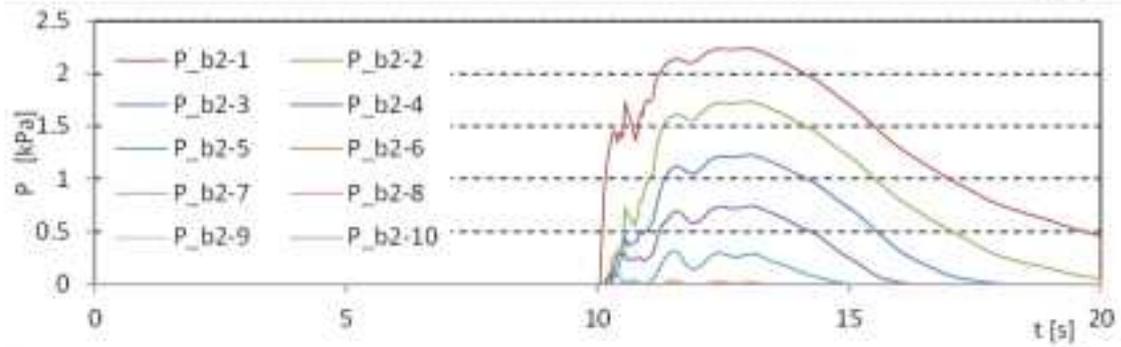
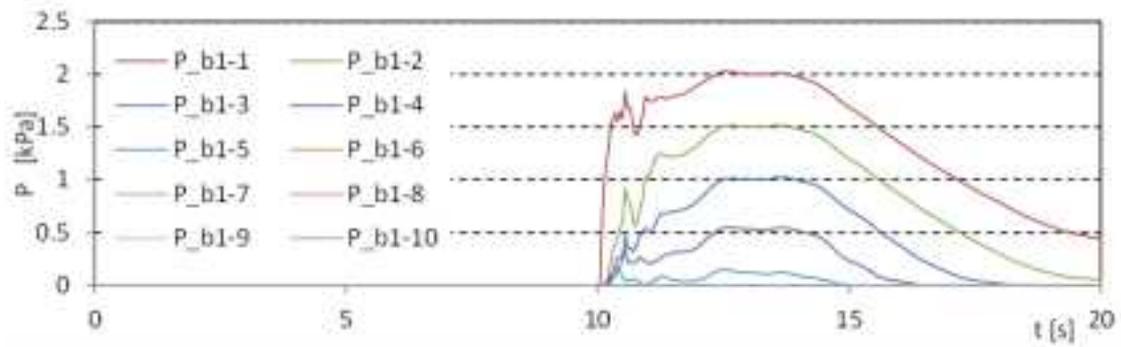
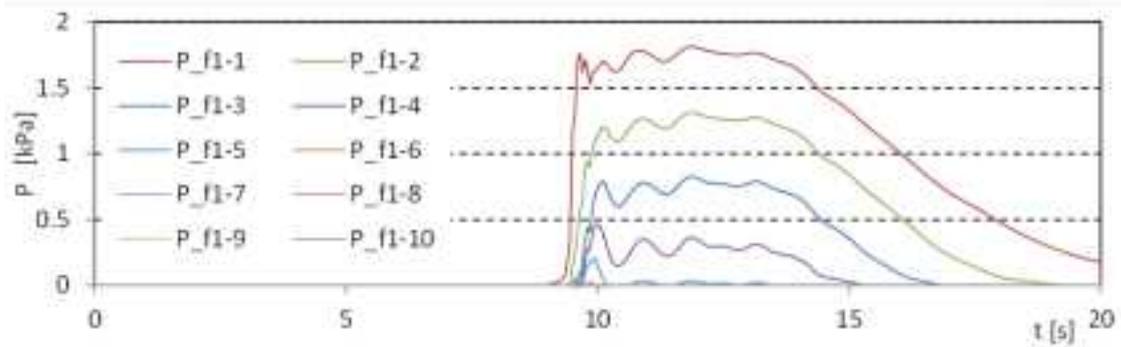
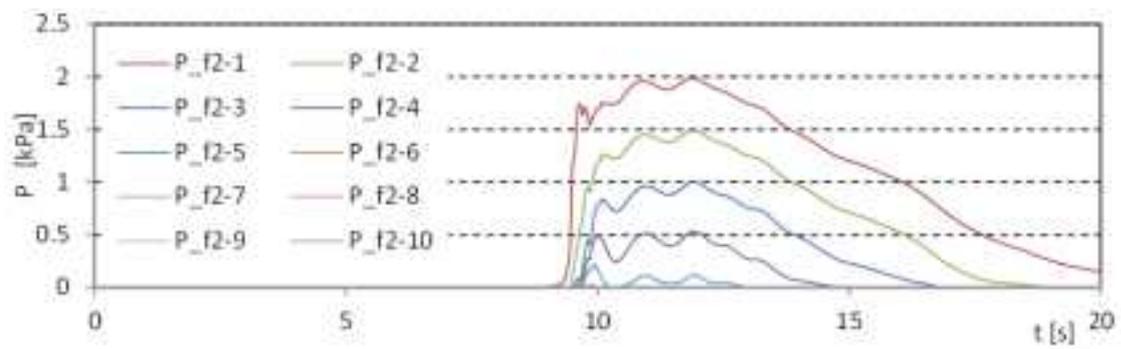


図 V.3-9 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 1.25m, W07, STAR-CD)

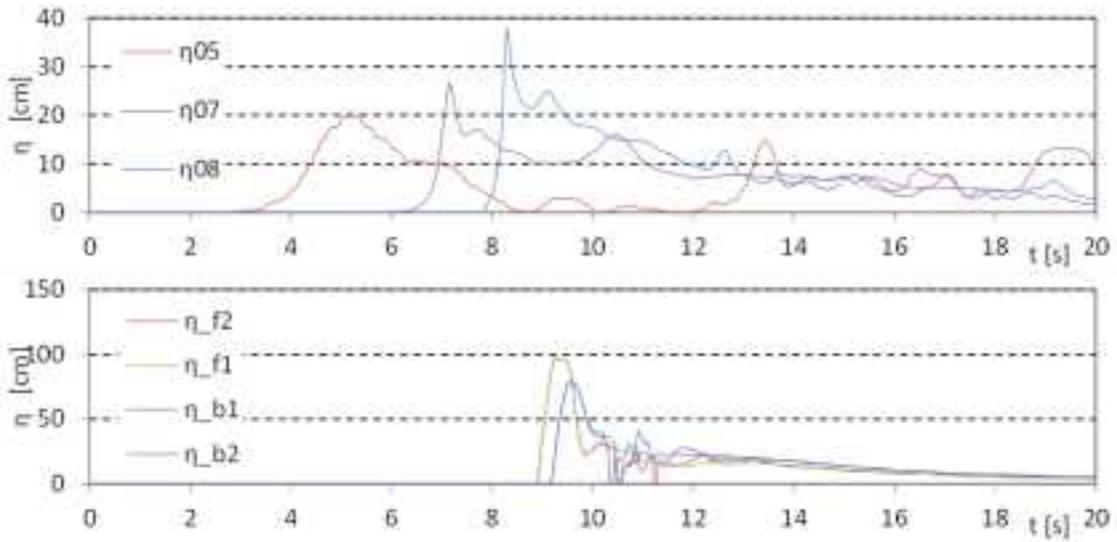


図 V.3-10 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 2.5m, W01, STAR-CD)

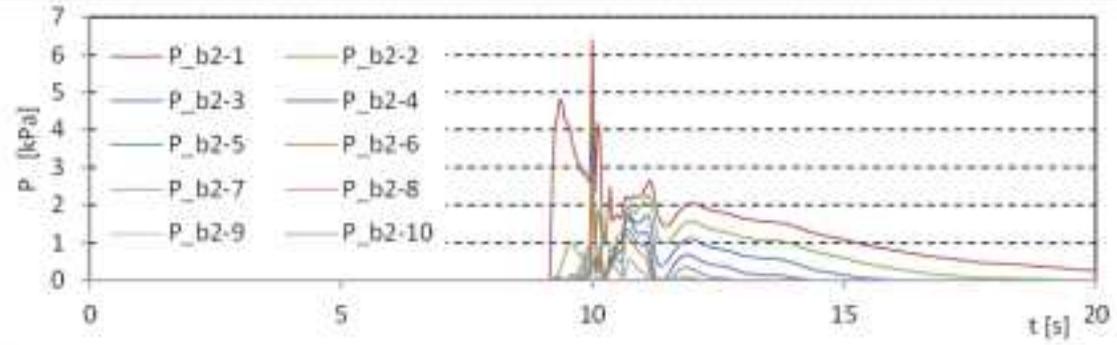
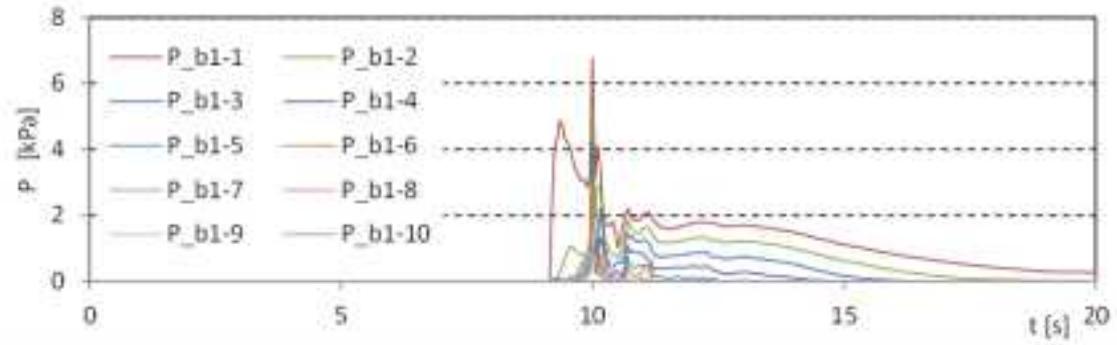
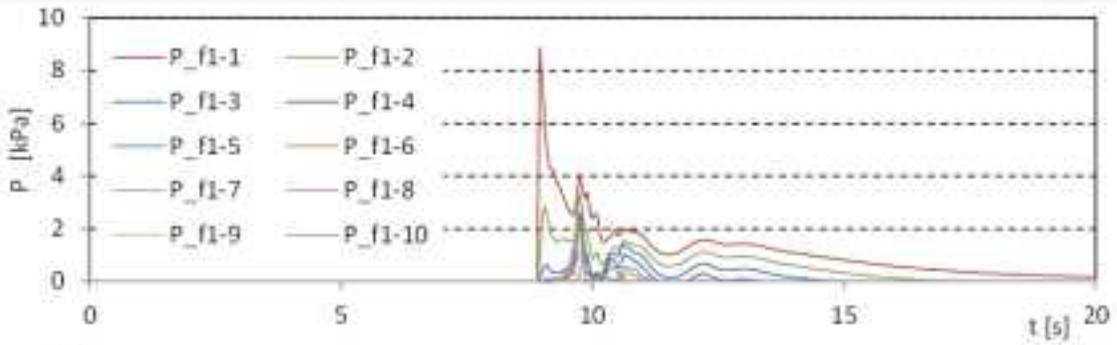
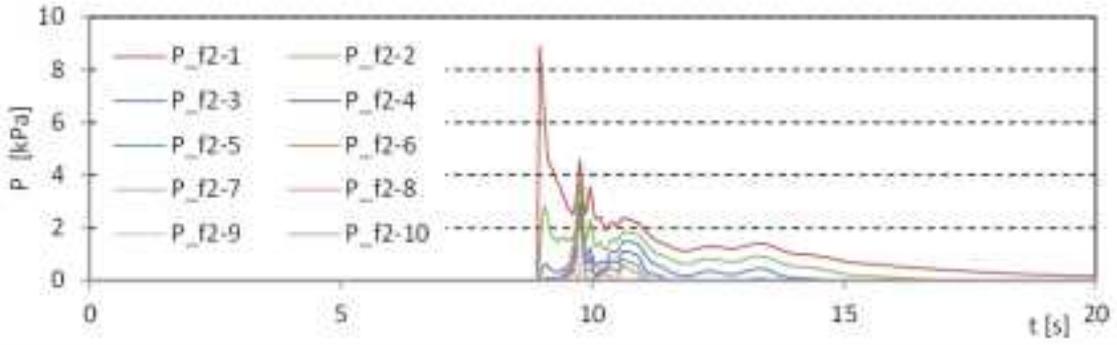


図 V.3-10 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 2.5m, W01, STAR-CD)

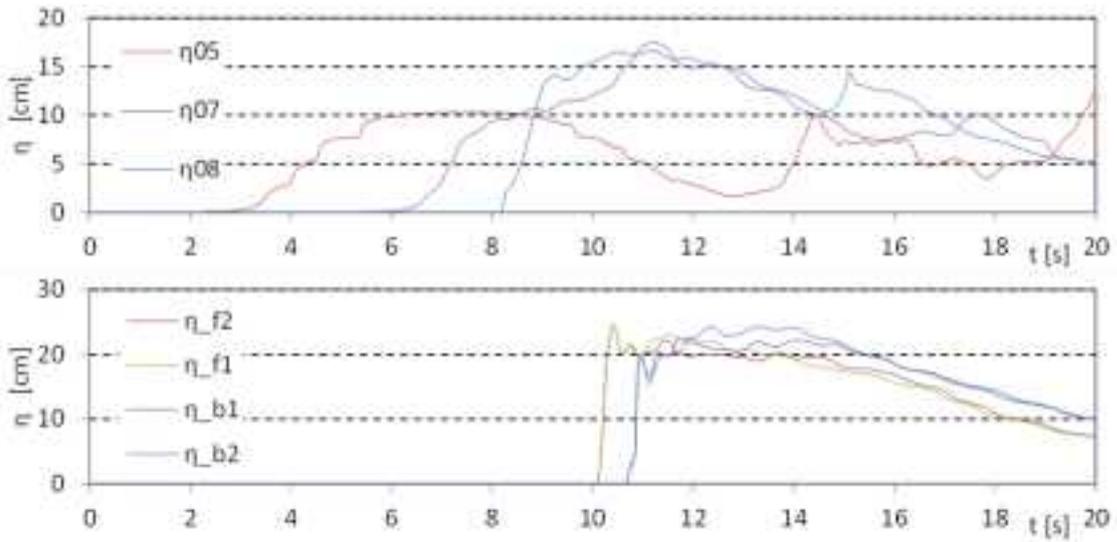


図 V.3-10 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 2.5m, W07, STAR-CD)

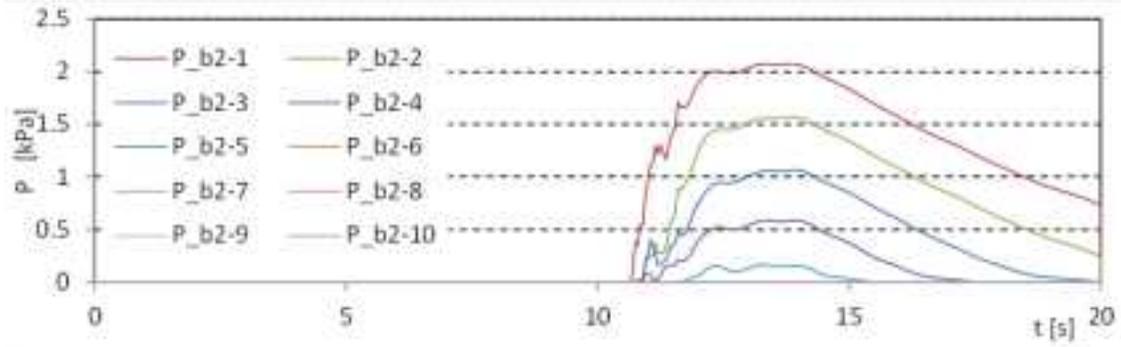
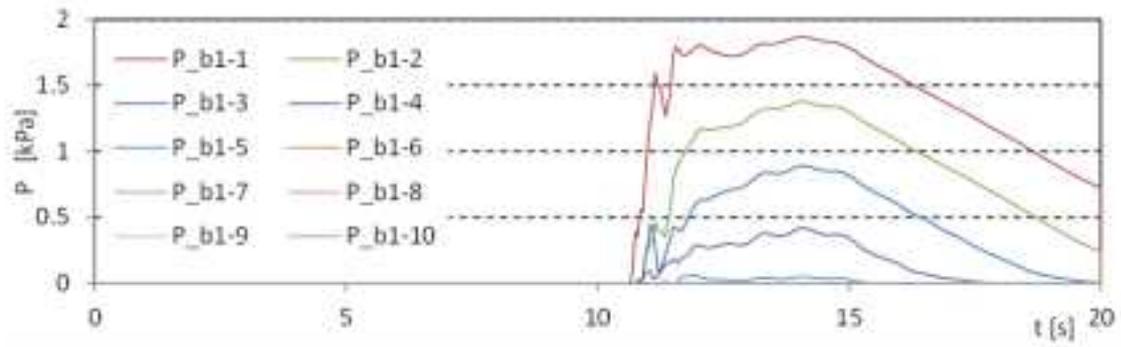
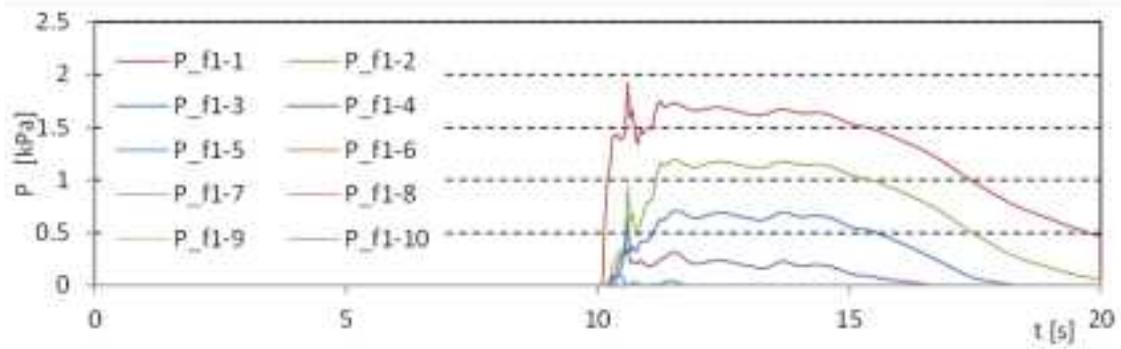
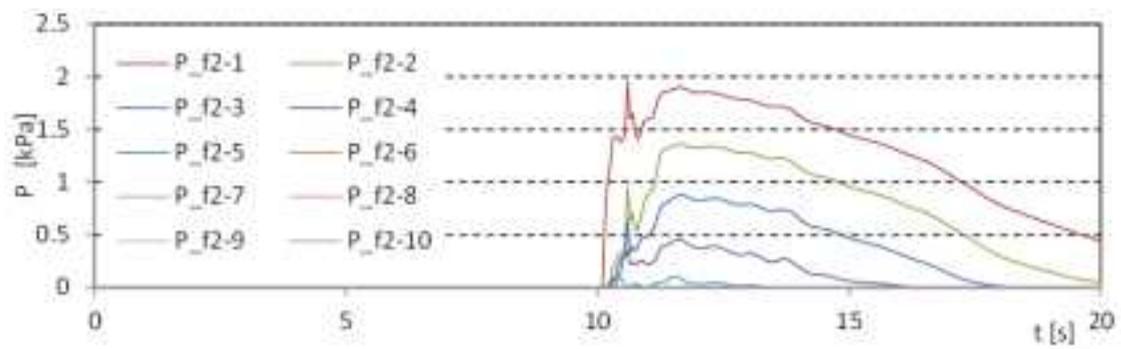


図 V.3-10 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 2.5m, W07, STAR-CD)

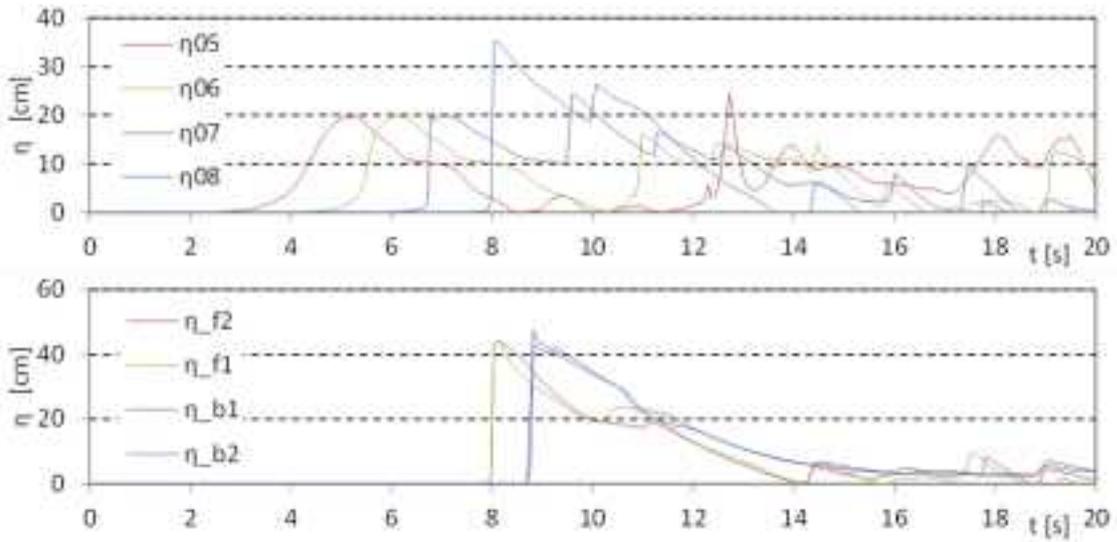


図 V.3-11 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 0m, W01, NLSW)

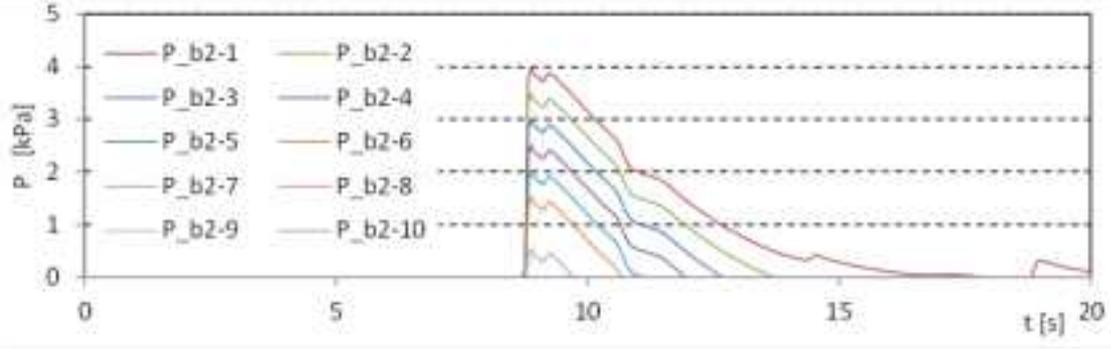
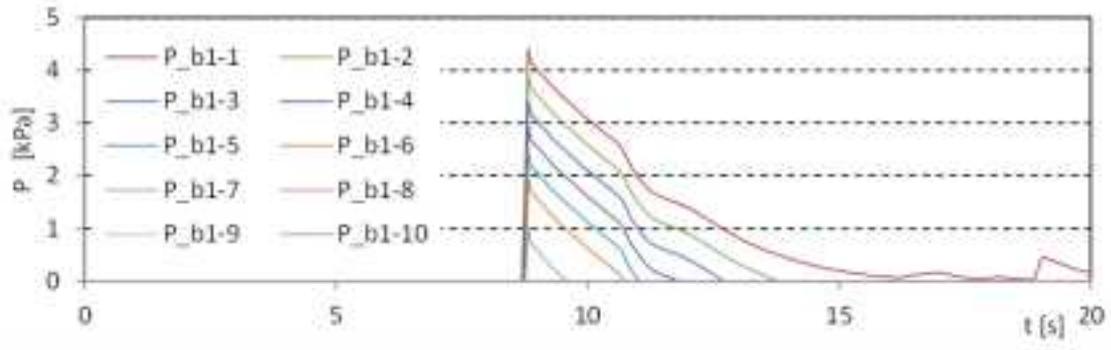
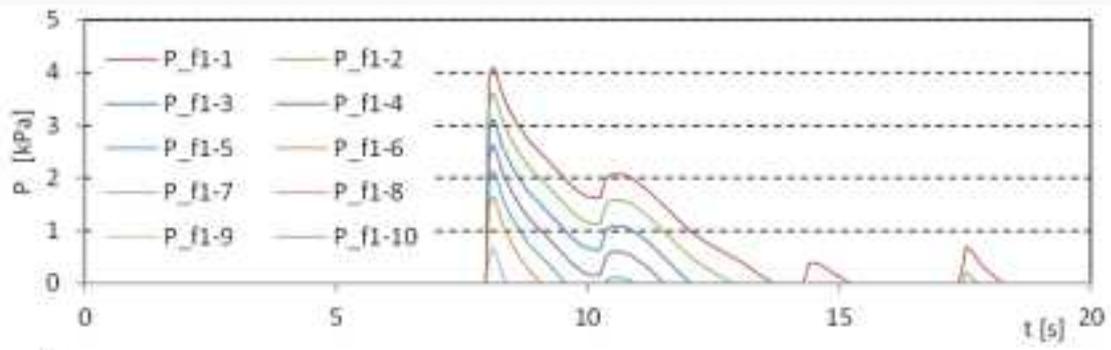
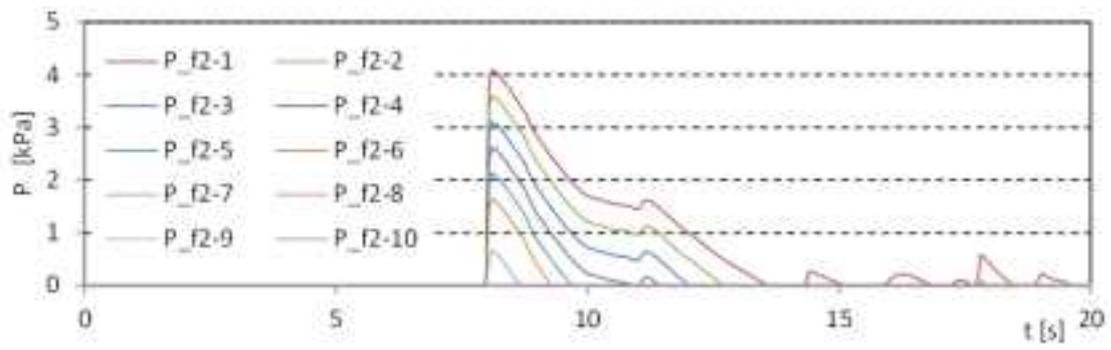


図 V.3-11 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 0m, W01, NLSW)

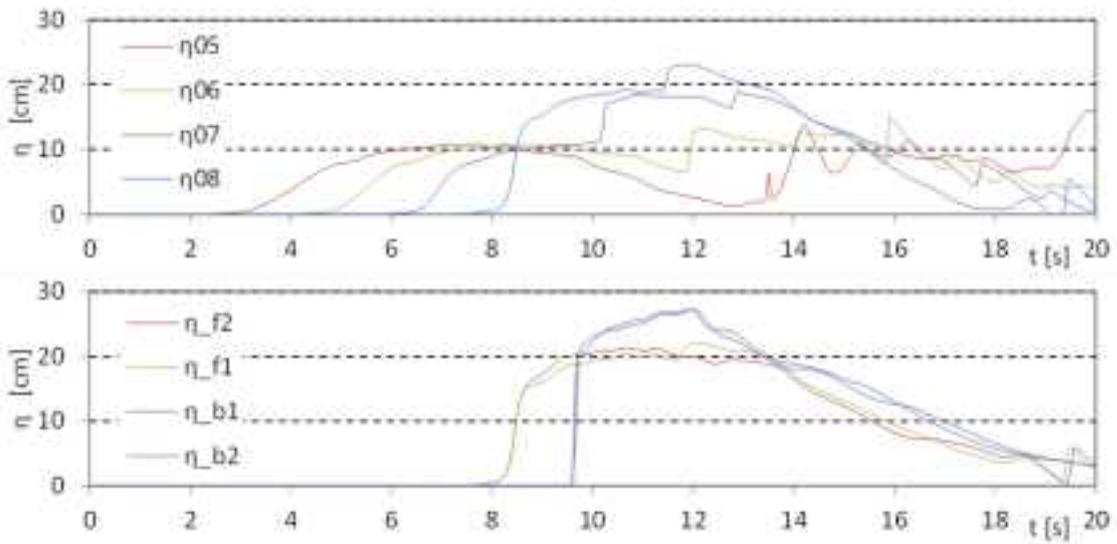


図 V.3-11 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 0m, W07, NLSW)

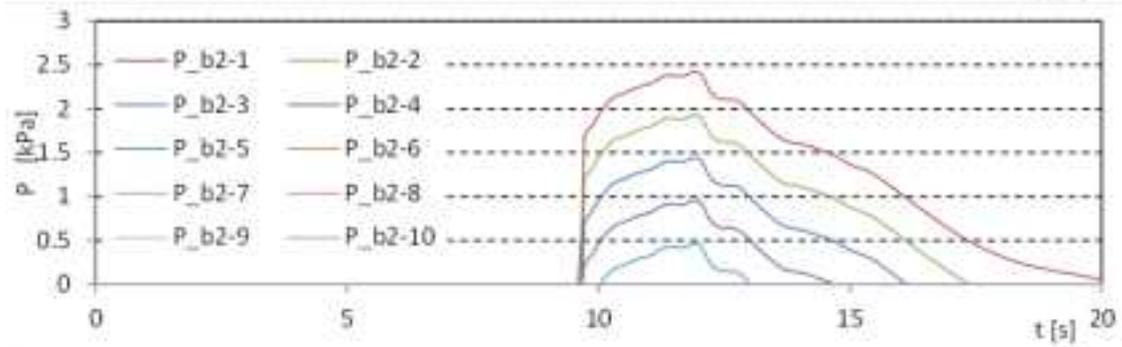
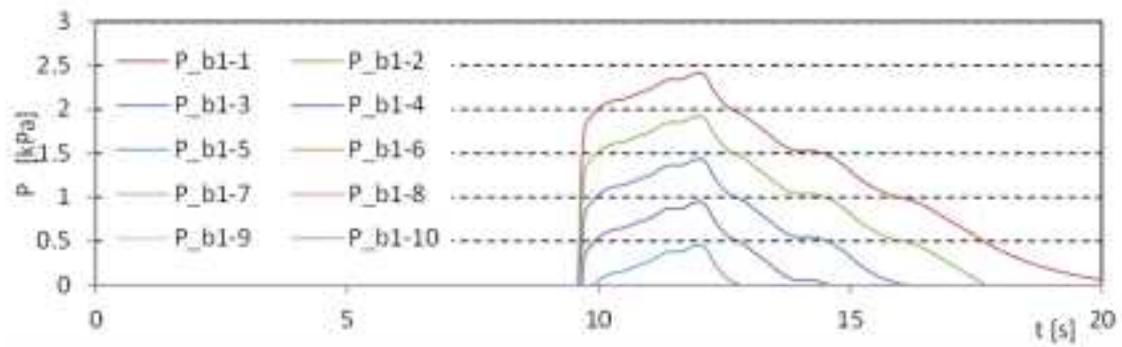
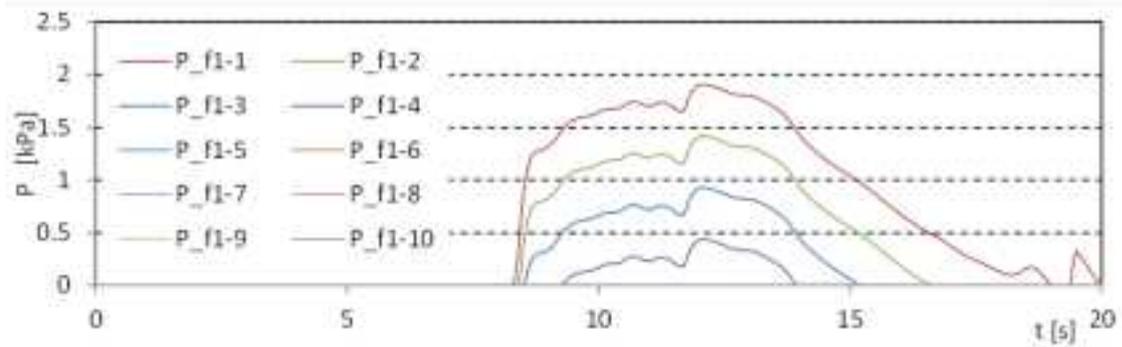
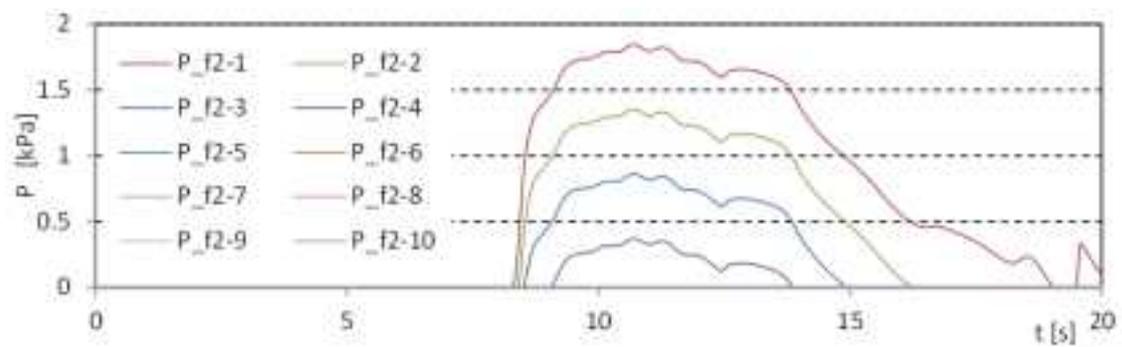


図 V.3-11 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 0m, W07, NLSW)

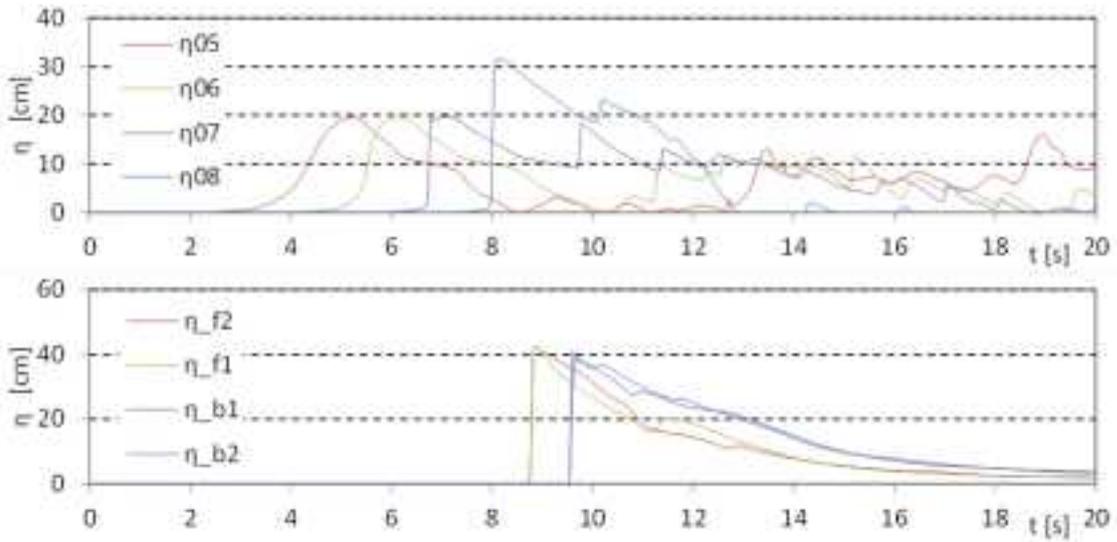


図 V.3-12 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 1.25m, W01, NLSW)

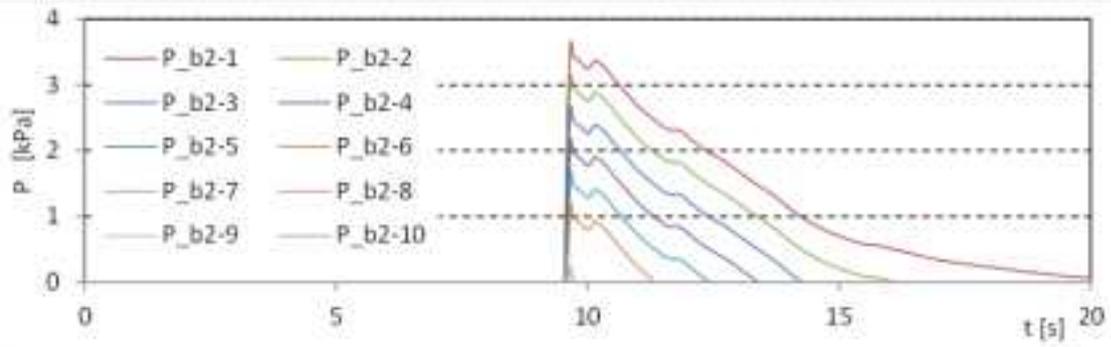
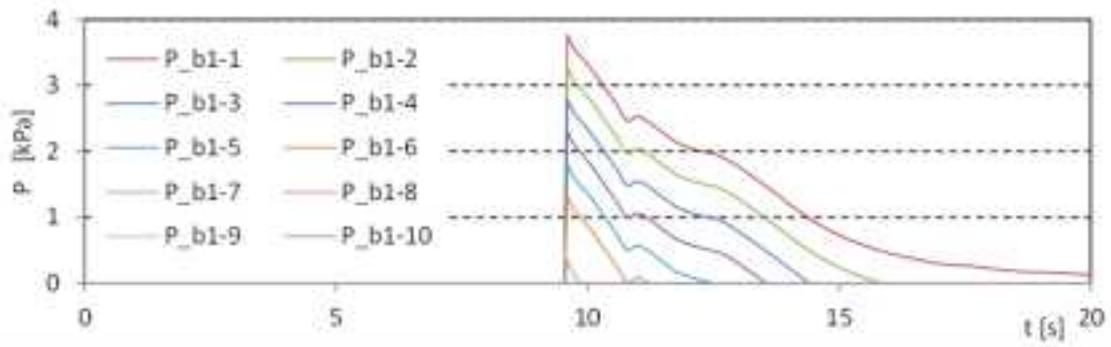
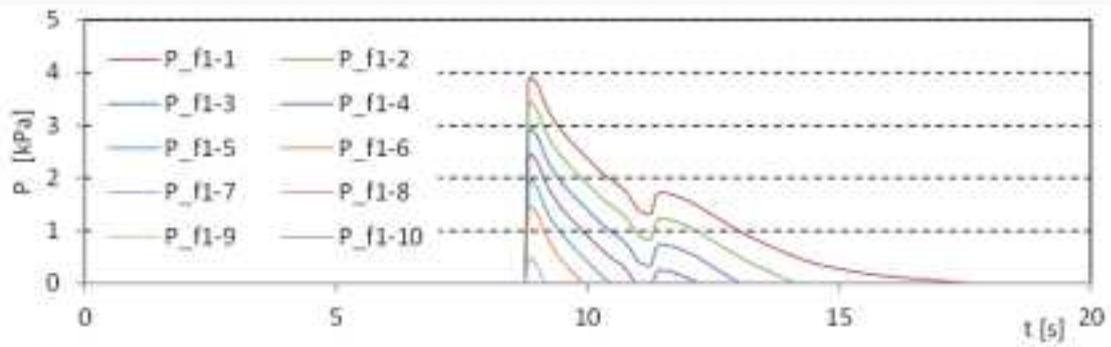
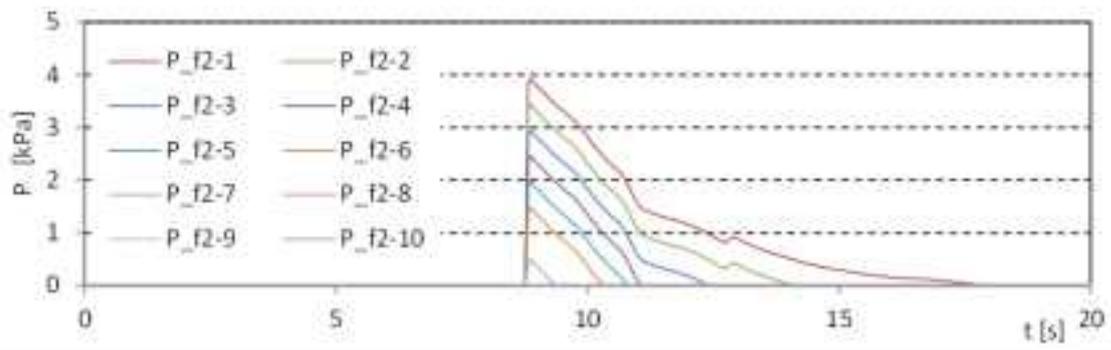


図 V.3-12 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 1.25m, W01, NLSW)

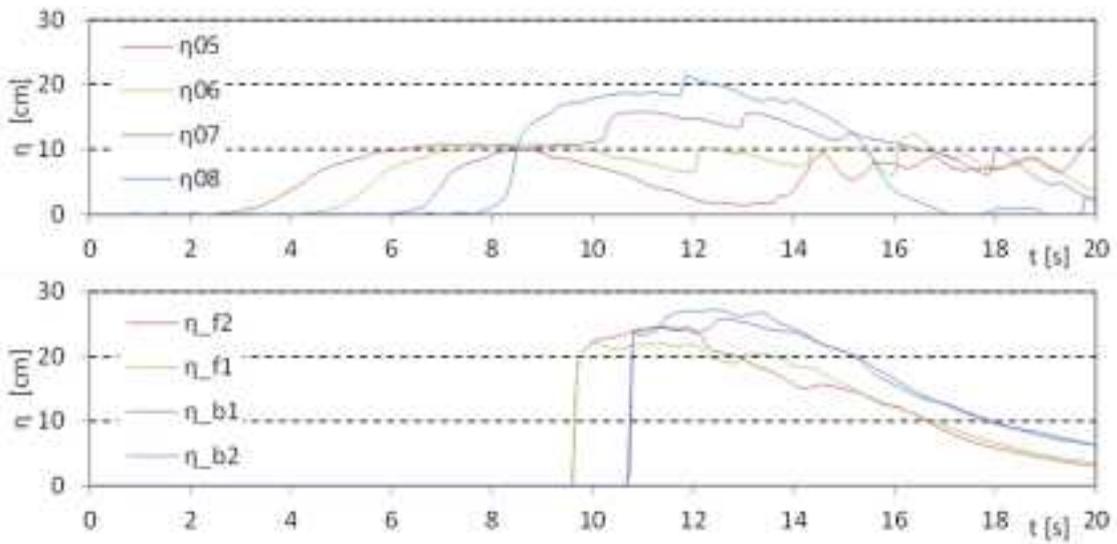


図 V.3-12 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 1.25m, W07, NLSW)

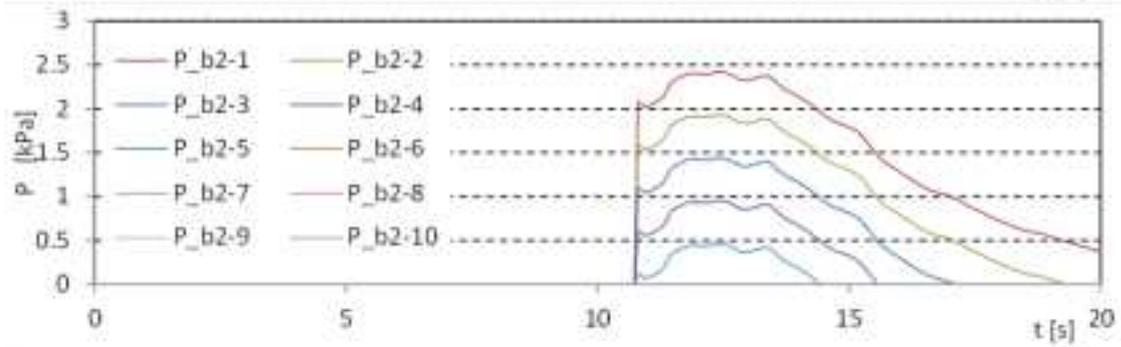
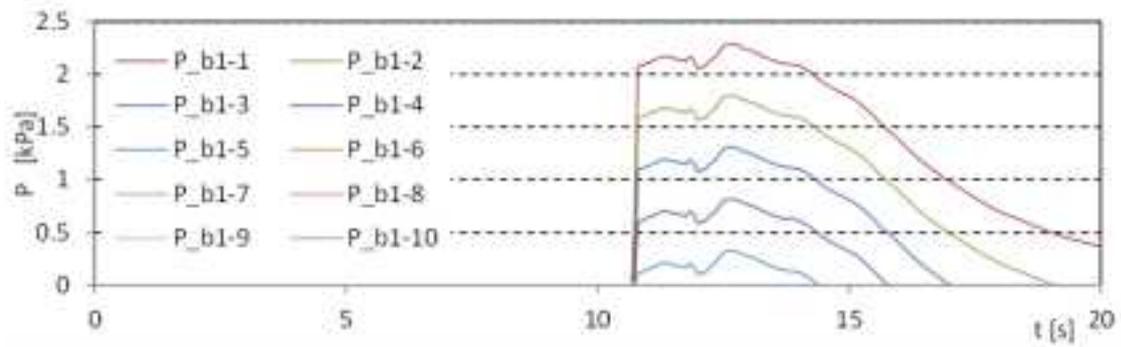
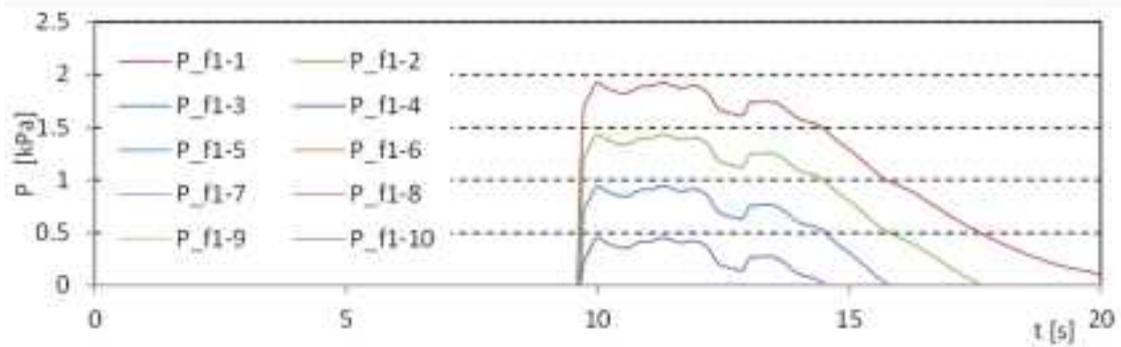
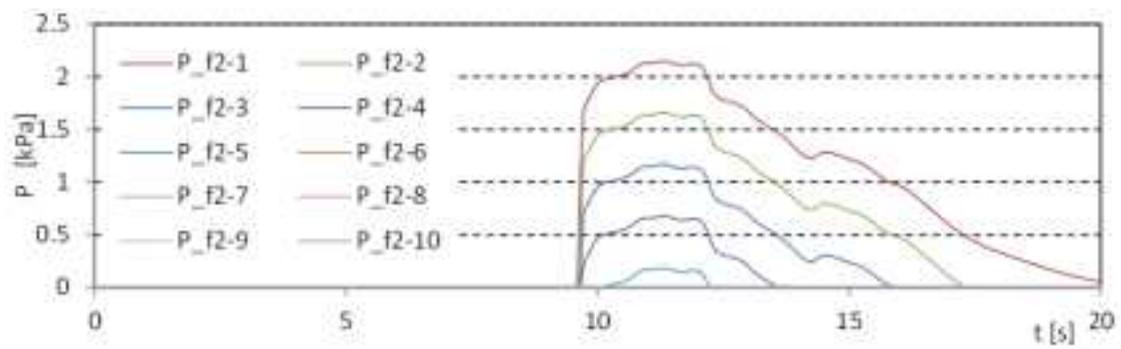


図 V.3-12 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 1.25m, W07, NLSW)

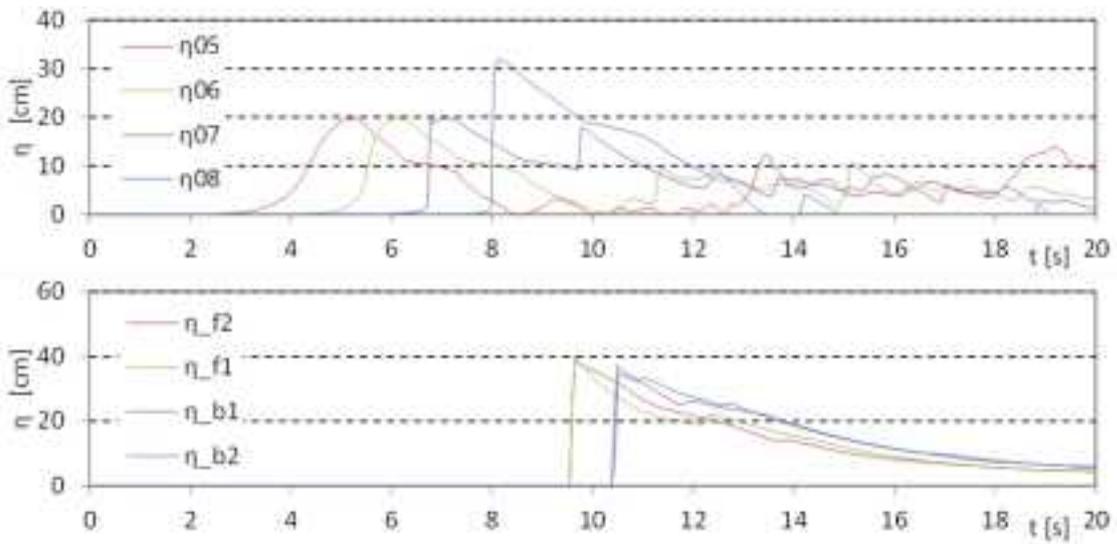


図 V.3-13 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 2.5m, W01, NLSW)

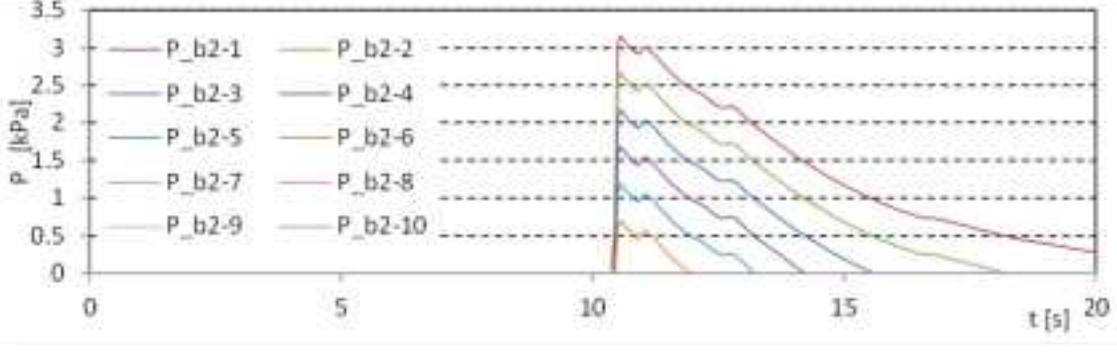
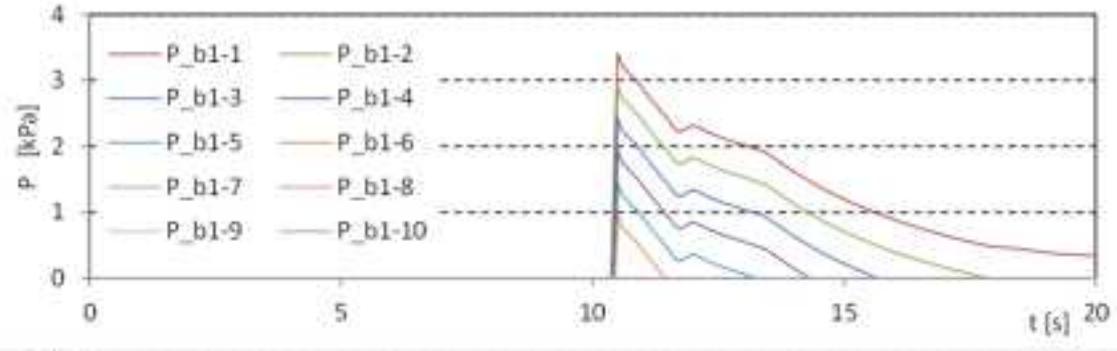
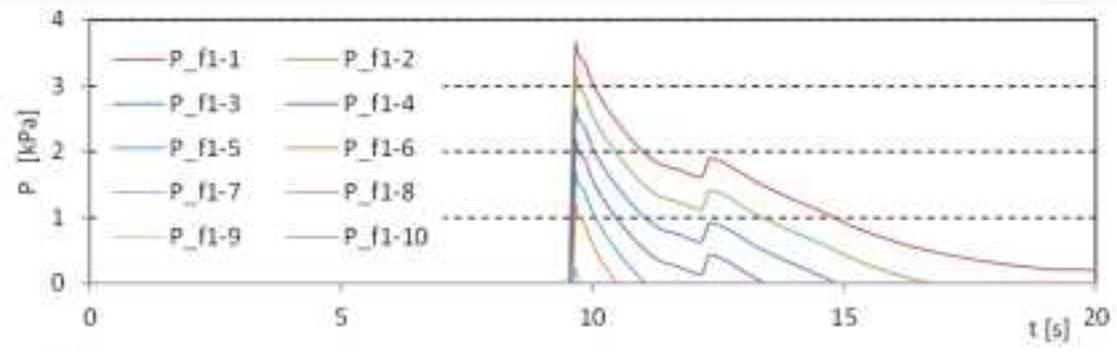
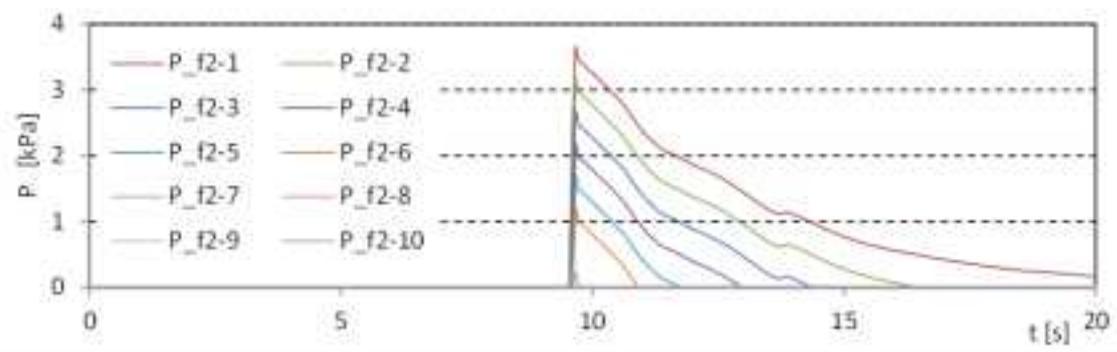


図 V.3-13 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 2.5m, W01, NLSW)

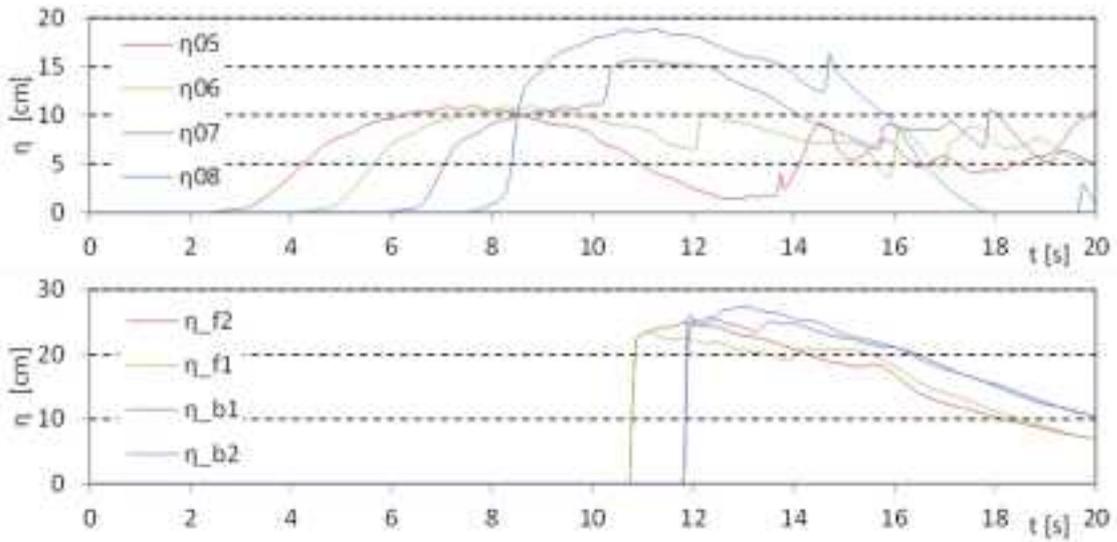


図 V.3-13 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 2.5m, W07, NLSW)

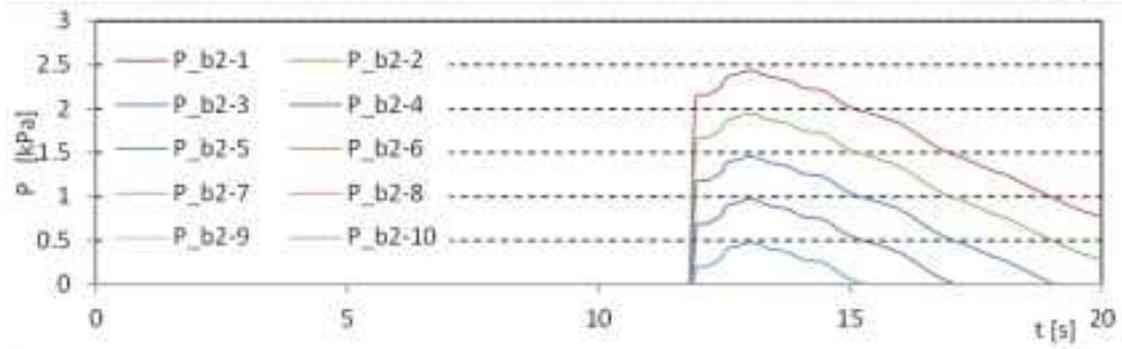
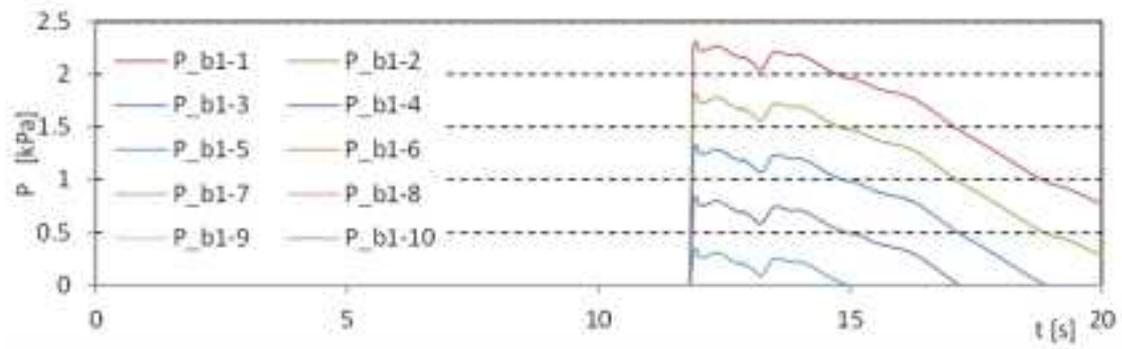
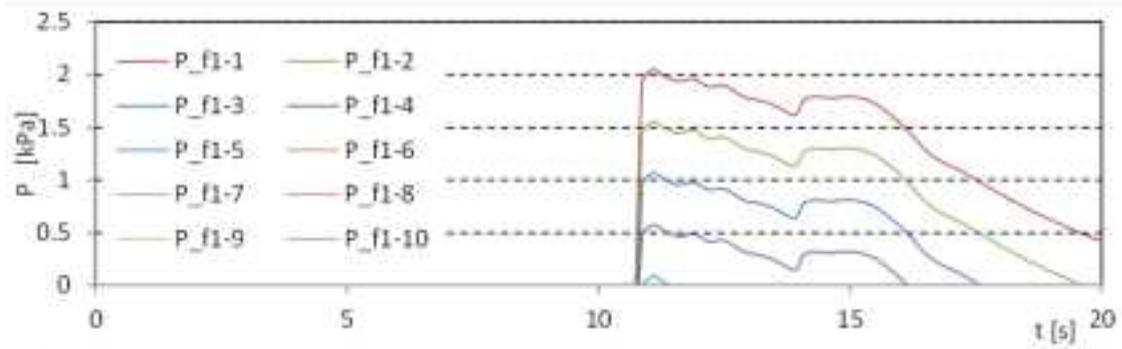
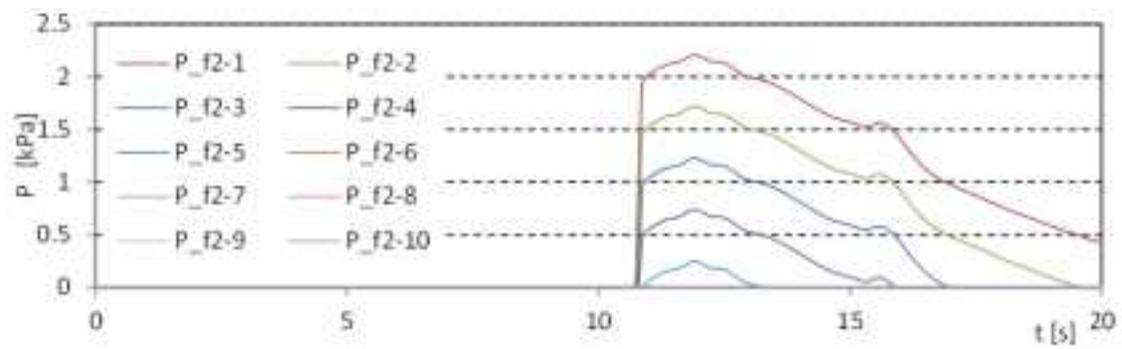


図 V.3-13 波力/波圧試験の解析結果 (設置位置 2.5m, W07, NLSW)

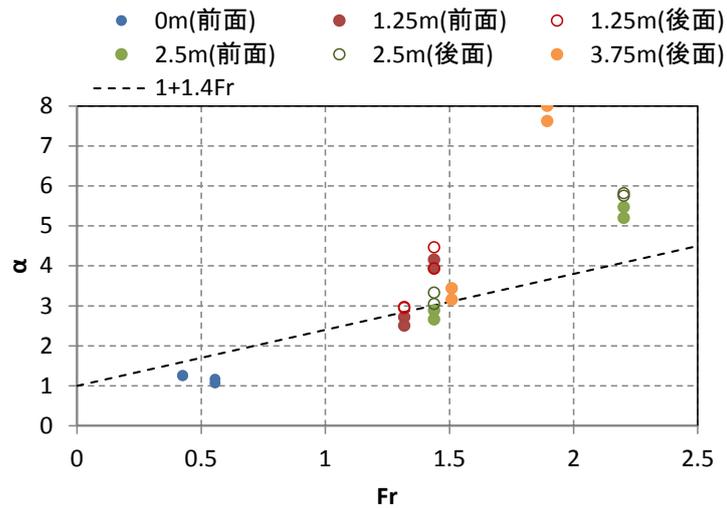


図 V.3-14 水深係数の比較 (STAR-CD)

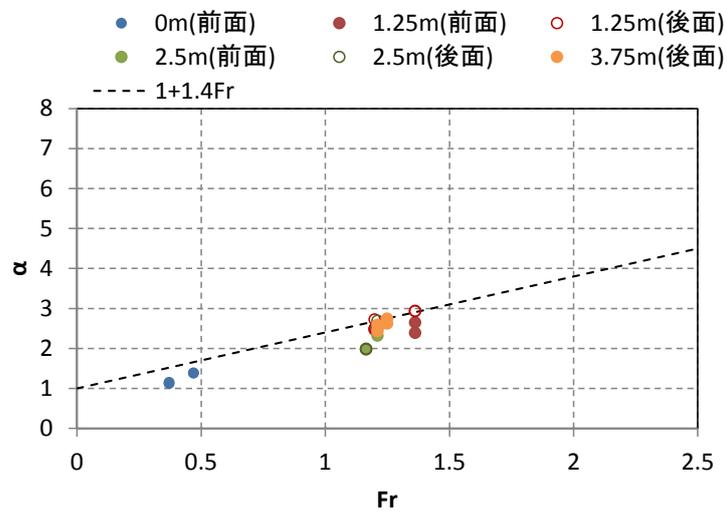


図 V.3-15 水深係数の比較 (NLSW)

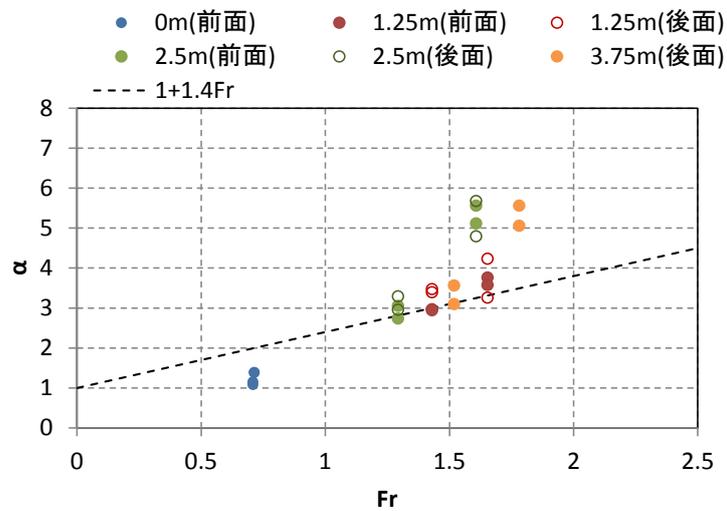


図 V.3-16 水深係数の比較 (実験結果の抜粋)