

平成28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(障害物影響))事業

成果報告書

平成29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	2次元水槽水理試験	
1	概要	II-1-1
2	試験方法	II-2-1
2.1.	試験装置	II-2-1
2.2.	試験ケース	II-2-7
2.3.	試験手順	II-2-11
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（越流）	II-3-45
3.3.	波力/波圧試験（非越流）	II-3-113
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-4-11
4.3.	越流時波力評価のためのパラメタ	II-4-13
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-4-15
4.5.	通過波と最大波力発生時刻の関係	II-4-25
4.6.	最大波力と堤体前面せり上がり高の関係	II-4-27
4.7.	フルード数と水深係数の関係	II-4-29
4.8.	越流による波力の変化	II-4-33
4.9.	まとめ	II-4-39
III	2次元水槽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.	解析条件	III-3-1
4.	解析結果	III-4-1
4.1.	通過波検定試験	III-4-1
4.2.	波力/波圧試験	III-4-27
IV	平面水槽水理試験	
1	概要	IV-1-1
2	試験方法	IV-2-1
2.1.	試験装置	IV-2-1
2.2.	試験ケース	IV-2-5
2.3.	試験手順	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（越流）	IV-3-11
3.3.	波力/波圧試験（非越流）	IV-3-63
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と越流による波力の低減	IV-4-9
V	平面水槽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.	解析条件	V-3-1
4.	解析結果	V-4-1
4.1.	通過波検定試験	V-4-1
4.2.	波力/波圧試験.....	V-4-11
5.	解析結果（障害物影響）	V-5-1
5.1.	通過波検定試験	V-5-1
5.2.	波力/波圧試験.....	V-5-11

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。特に、想定を越える津波が来襲した際には、防潮堤を津波が越流して堤内に浸水するが、その際に防潮堤に働く波力については、提案式や水理試験による試験データはほとんどないのが現状である。今後、津波に対する防潮堤のフラジリティ評価のためには、越流する場合の津波波力を精度良く見積もる必要がある。

また、防潮堤の前面に障害物がある時の防潮堤に作用する津波波力及びそれが構造健全性に与える影響についても、検討データのさらなる拡充が求められている。

本事業では、下記（１）及び（２）に関する水理試験及び水理試験のシミュレーション解析及び感度解析を実施し、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、一般的に用いられる解析手法の適用範囲を確認して解析手法を整備した。

（１）２次元水槽を用いた津波波力特性に対する堤体越流の影響把握水理試験

（２次元水槽水理試験）

（２）３次元平面水槽を用いた津波波力特性に対する堤体越流の影響把握水理試験堤および

体前面障害物影響の把握数値シミュレーション解析

（平面水槽水理試験）

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、試験条件ごとに水深係数（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）、フルード数（流体の慣性力と重力との比を表す無次元数）及びせり上がり波高等を整理した。また、堤体を越流することの波力に対する影響特性について整理した。験模型の縮尺は 1/80 を想定した。また、シミュレーション解析では、本事業で実施した水理試験を対象とした再現シミュレーション解析を行った。そして、防潮堤の構造健全性評価に影響を与え得ると判断できる現象の再現性に着目し、解析手法を整備するため、その解析手法の再現特性を確認した。加えて、平面水槽水理試験の再現解析の条件をベースに、堤体前面に盛土形状の障害物がある場合について解析し、障害物があることによる津波波力への影響特性について検討した。

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。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、一樣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。

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。

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 α の主な提案式を示す。

松富・飯塚(1998) : $\alpha = 1.0 + 0.5(1.0 + \zeta)Fr^2$ ζ : 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) : $\alpha = \left(2Fr^2 + \sqrt{1 + 8(1 + Fr)^2} - 2 \right)^{1/2}$

織田ら(2016) : $\alpha = 1 + \sqrt{2}Fr$

堤体を津波が越流する場合の津波波力の算定手法としては、池谷ら（2013）が段波の理論に基づき導出しているが、水理試験による検証はされておらずモデルの解析精度については検証されていない。また、上述の津波波力の評価は、主に津波先端部の衝突による衝撃的な波力（段波波圧）を除いた、持続波圧に対するものであるが、木原ら（2016）は、段波波圧について理論的に推定方法を導出し、水理試験との良い一致を確認している。

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.
- 織田幸伸・本田隆英・小俣哲平（2016）：遡上津波の流体力に対する構造物幅の影響に関する水理実験，土木学会第 71 回年次学術講演会梗概集，II-172.
- 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.
- 木原直人・木原直人（2016）：直立壁に作用する段波波圧の推定方法，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.72, No.2, pp.I_973-I_978.
- 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

2 次元水槽水理試験

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、入力津波の波形形状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、周期特性について 3 種類、沖波津波高について 4 種類の入射津波を対象とし、入力津波の波形形状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。また、同じ津波に対して堤体の高さが十分に高く津波が越流しない場合と、堤体の高さが不十分であり堤体上を越流する場合の試験を実施し、越流による津波波力の低減効果について検討し、津波越流時の適切な波力評価手法について検討した。

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。波力/波圧試験の対象とした堤体模型は鉛直板とし、前面に設置した圧力計により津波波力を計測した。

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 1/80 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 η を 4m 程度、水の動粘性係数 $\nu=1.14 \times 10^{-2}$ cm²/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 1.75×10^7 、縮尺模型で 2.45×10^4 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 λ (ここでは 1/80) 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：	λ
時間の縮尺：	$\lambda^{1/2}$
流速の縮尺：	$\lambda^{1/2}$
圧力の縮尺：	λ
力の縮尺：	λ^3

2.1.2. 試験水槽と試験模型

(1) 試験水槽と地形模型

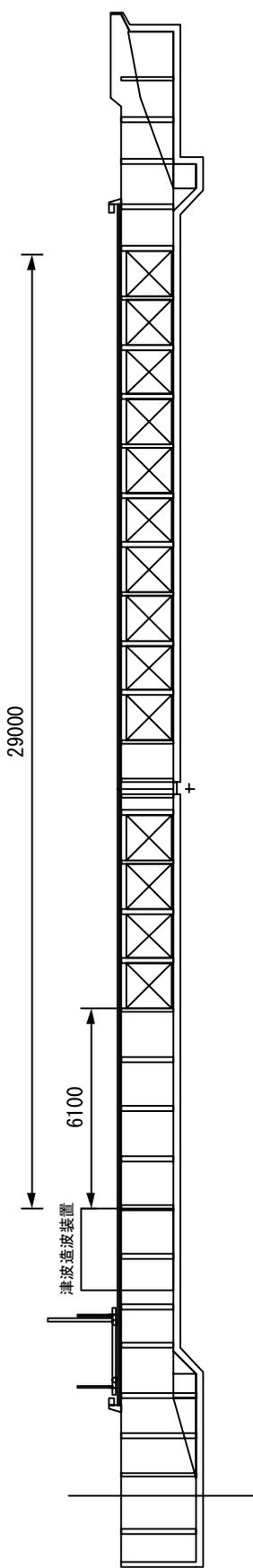
水理試験は、幅 80cm、長さ 47m、片面ガラス張りの二次元長水槽を用いて実施した（図 II.2.1-1(a)参照）。水槽の端部には、津波造波装置が設置されており、これにより津波を造波して、試験を実施した。

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 30 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。

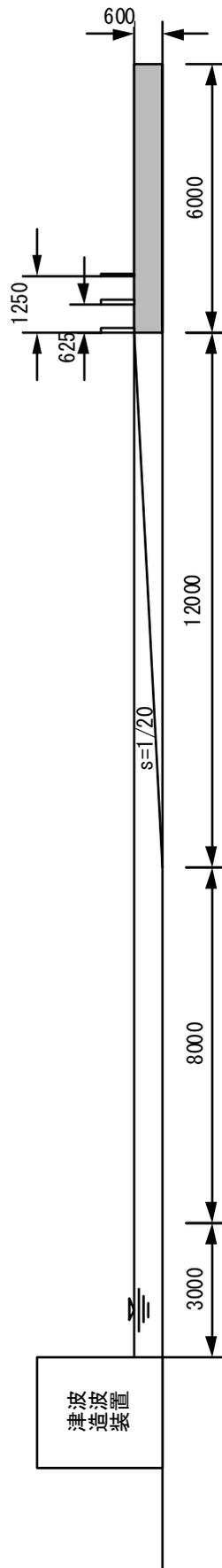
海底地形として、図 II.2.1-1 に示す単純勾配タイプと直立護岸タイプの 2 種類を対象に試験を実施した。水深は 60cm とし、単純勾配タイプでは地形勾配 1/20 の一定斜面を設置した。直立護岸タイプでは護岸前面に水深 15cm、長さ 8m の水平海底地形を設置し、1/10 勾配の地形で水槽底面と擦り付けた。陸上地形は水平とし、汀線において水面と同一の高さとした。地形模型の表面は、塩ビ製とした。

(2) 防潮堤（堤体）模型

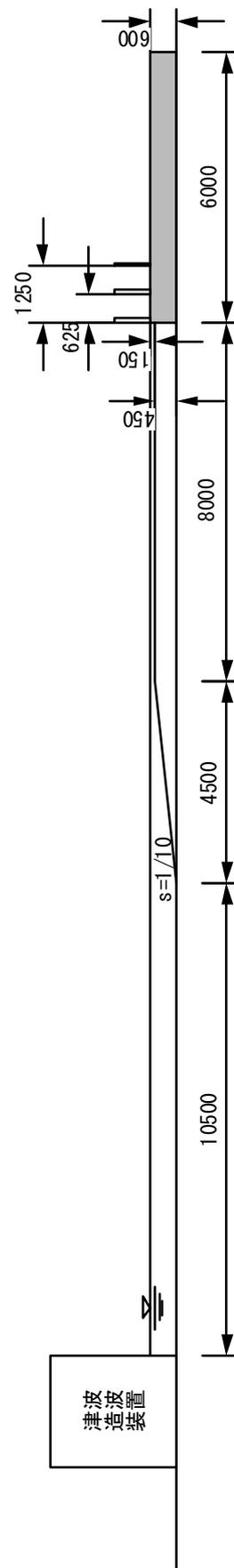
陸上部には、堤体模型を設置した。堤体模型の設置位置は汀線から 0, 0.625, 1.25m の 3 種類（図 II.2.1-1 参照）とした。堤体は、図 II.2.1-2 に示すように水槽に剛に固定する模型を用いた。堤体前面には、後述する圧力計を設置し、堤体に働く波力を圧力の積分により算出した。堤体は、高さ 0.1m の短冊状の板で構成され、任意の高さに設定することが可能な構造とした。例として、堤体高 0.27m とする場合は、最上部に 0.05m の圧力計を設置した短冊状の板と、0.02m の圧力計のない短冊状の板を設置することにより高さを調整した。



(a) 試験水槽

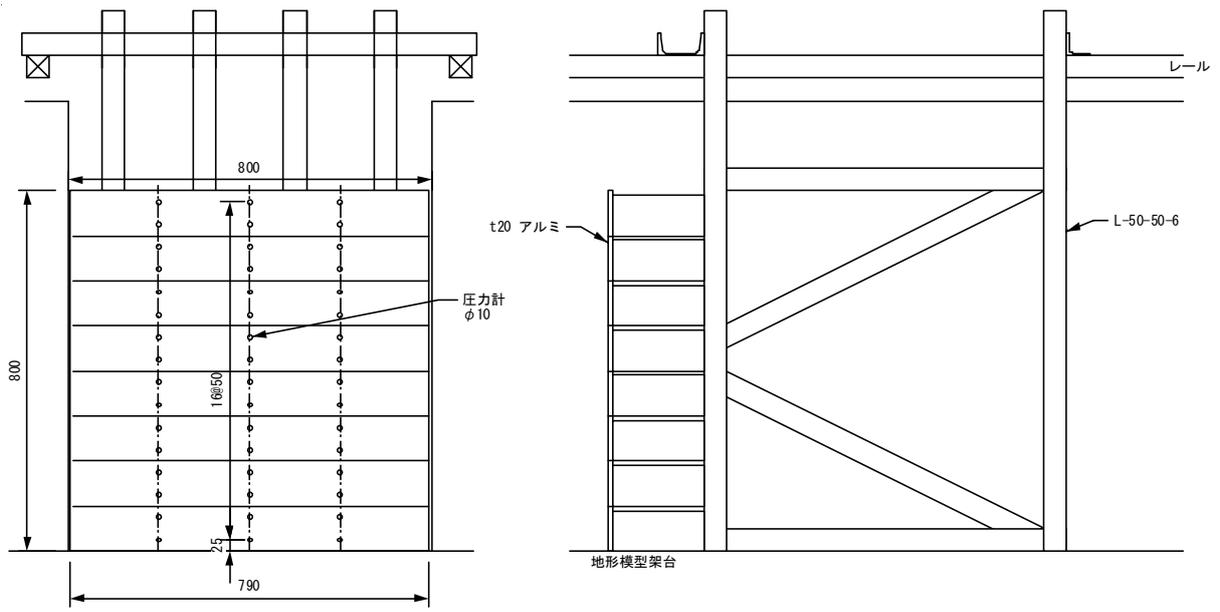


(b) 単純勾配タイプ

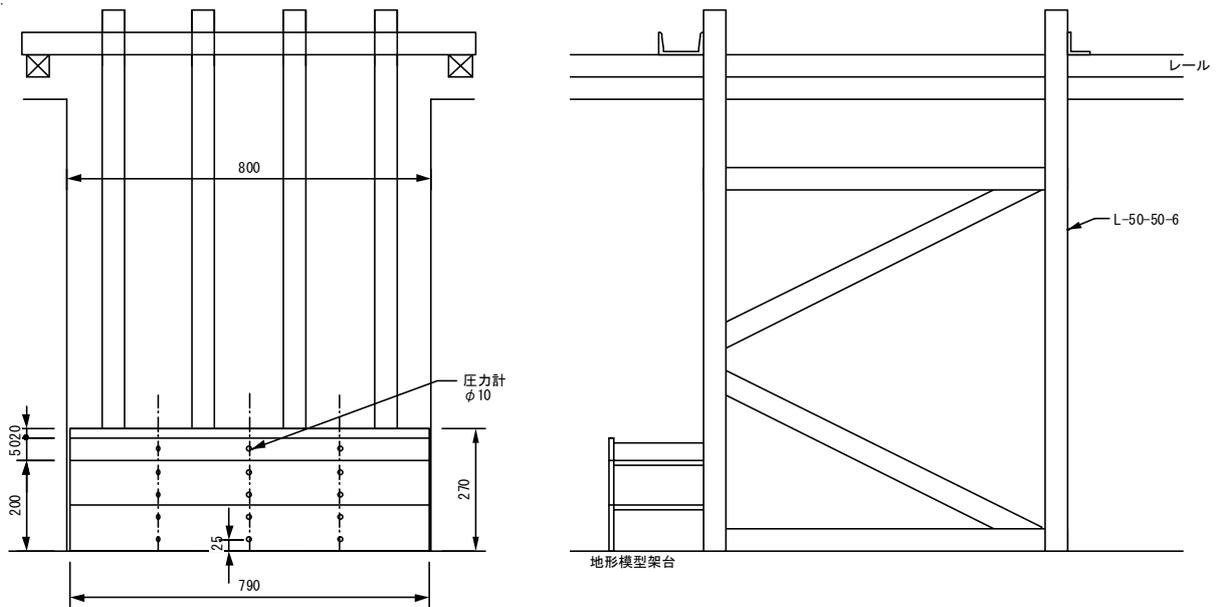


(c) 直立護岸タイプ

図 II.2.1-1 試験水槽と試験模型



(a)非越流堤体模型



(b)越流堤体模型 (堤体高 0.27m の例)

図 II.2.1-2 堤体模型

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.2.1-3 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。

(2) 流速

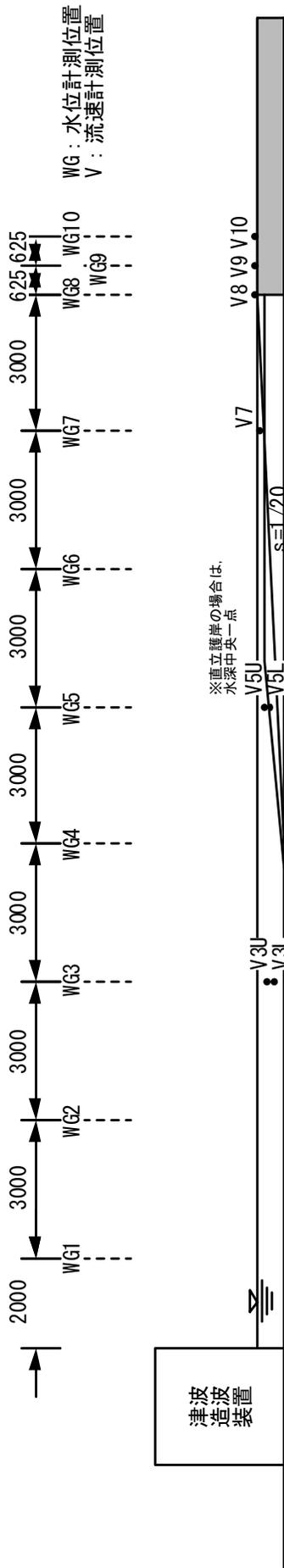
流速は、電磁流速計、プロペラ流速計、底面電磁流速計、レーザー流速計の 4 種類を適切に配置して計測した。V3, V5, V7 では常に流速計を水没させることが出来るため、電磁流速計（ケネック社製 VM-802HA）により流速を計測した。V3, V5 は水深が大きいいため、適宜、上層下層の 2 点（1/3 初期水深）で計測し、直立護岸の V5 及び V7 では水深が小さいため水深の中央高さに流速計を設置した。陸上部（V8, V9, V10）では、プロペラ流速計（ケネック社製 VO-301A4/VOT2-400-20）と底面電磁流速計（ケネック社製 FM2001HA/FMT2-4-80P）を併用して計測した。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、汀線の陸上側に設置した。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ため、V9, V10 では遡上波の先端部分の流速も計測できるよう、底面電磁流速計による計測を併用した。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

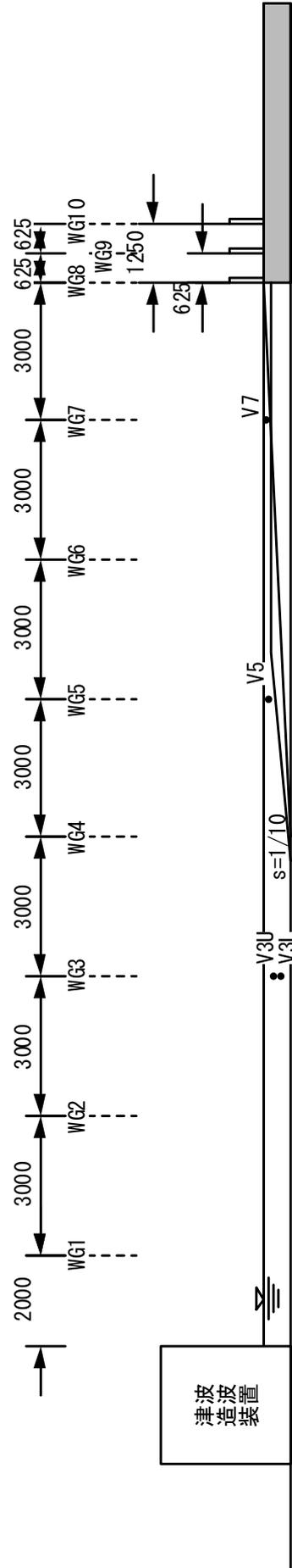
圧力は、φ10 の超小型圧力計（エス・エス・ケイ社製 P310-02）を使用し、図 II.2.1-2 に示すように、堤体模型に圧力計を埋め込んで圧力を計測した。設置間隔は、鉛直方向に 5cm 間隔とした。津波波力は、圧力計による圧力計測結果を積分して求めた。

(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。



(a) 通過波検定試験



(b) 波力/波圧試験

図 II.2.1-3 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 W11~W34 の 11 種類とした。造波のための造波信号は、単純勾配地形を用いて後述する波検定により作成し、単純勾配と直立護岸では同じ造波信号により造波を行った。目標波形については、通過波検定試験の結果において後述するが、W11~W13, W21~W24, W31~W34 はそれぞれ周期特性が同じであり、波高が異なる波形である。なお、計測結果の確認のため、同じ試験を 3 回繰り返し、合計 66 回の造波試験を実施した。

表 II.2.2-1 通過波検定試験の試験ケース

通過波検定				
No	ケース名	地形	波形	繰り返し
1	S-W11-0-0	単純勾配 S	W11	3
2	S-W12-0-0		W12	
3	S-W13-0-0		W13	
4	S-W21-0-0		W21	
5	S-W22-0-0		W22	
6	S-W23-0-0		W23	
7	S-W24-0-0		W24	
8	S-W31-0-0		W31	
9	S-W32-0-0		W32	
10	S-W33-0-0		W33	
11	S-W34-0-0		W34	
12	F-W11-0-0	直立護岸 F	W11	
13	F-W12-0-0		W12	
14	F-W13-0-0		W13	
15	F-W21-0-0		W21	
16	F-W22-0-0		W22	
17	F-W23-0-0		W23	
18	F-W24-0-0		W24	
19	F-W31-0-0		W31	
20	F-W32-0-0		W32	
21	F-W33-0-0		W33	
22	F-W34-0-0		W34	

2.2.2. 波力/波圧試験

波圧/波力試験で実施した試験ケースを，表 II.2.2-2 に示す．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．堤体の高さについては予備試験を実施し，各周波数特性の波ケースのうち一番波高の小さいケースについて，堤体を越流しない高さとした．津波が越流するケースを L と非越流ケースを H として，2 種類の堤体高を設定した．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，合計 1,710 回の造波試験を実施した．

表 II.2.2-2 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	堤体高 [m]	堤体位置	繰り返し
1	S-W11-L-1	単純勾配 S	W11	L 0.33	0m	15
2	S-W12-L-1		W12	L 0.33		
3	S-W12-H-1		W12	H -		
4	S-W13-L-1		W13	L 0.33		
5	S-W13-H-1		W13	H -		
6	S-W21-L-1		W21	L 0.28		
7	S-W22-L-1		W22	L 0.28		
8	S-W22-H-1		W22	H -		
9	S-W23-L-1		W23	L 0.28		
10	S-W23-H-1		W23	H -		
11	S-W24-L-1		W24	L 0.28		
12	S-W24-H-1		W24	H -		
13	S-W31-L-1		W31	L 0.27		
14	S-W32-L-1		W32	L 0.27		
15	S-W32-H-1		W32	H -		
16	S-W33-L-1		W33	L 0.27		
17	S-W33-H-1		W33	H -		
18	S-W34-L-1		W34	L 0.27		
19	S-W34-H-1		W34	H -		
20	S-W11-L-2		W11	L 0.33	0.625m	
21	S-W12-L-2		W12	L 0.33		
22	S-W12-H-2		W12	H -		
23	S-W13-L-2		W13	L 0.33		
24	S-W13-H-2		W13	H -		
25	S-W21-L-2		W21	L 0.28		
26	S-W22-L-2		W22	L 0.28		
27	S-W22-H-2		W22	H -		
28	S-W23-L-2		W23	L 0.28		
29	S-W23-H-2		W23	H -		
30	S-W24-L-2		W24	L 0.28		
31	S-W24-H-2		W24	H -		
32	S-W31-L-2		W31	L 0.27		
33	S-W32-L-2		W32	L 0.27		
34	S-W32-H-2		W32	H -		
35	S-W33-L-2		W33	L 0.27		
36	S-W33-H-2		W33	H -		
37	S-W34-L-2		W34	L 0.27		
38	S-W34-H-2		W34	H -		
39	S-W11-L-3	W11	L 0.28	1.25m		
40	S-W12-L-3	W12	L 0.28			
41	S-W12-H-3	W12	H -			
42	S-W13-L-3	W13	L 0.28			
43	S-W13-H-3	W13	H -			
44	S-W21-L-3	W21	L 0.28			
45	S-W22-L-3	W22	L 0.28			
46	S-W22-H-3	W22	H -			
47	S-W23-L-3	W23	L 0.28			
48	S-W23-H-3	W23	H -			
49	S-W24-L-3	W24	L 0.28			
50	S-W24-H-3	W24	H -			
51	S-W31-L-3	W31	L 0.27			
52	S-W32-L-3	W32	L 0.27			
53	S-W32-H-3	W32	H -			
54	S-W33-L-3	W33	L 0.27			
55	S-W33-H-3	W33	H -			
56	S-W34-L-3	W34	L 0.27			
57	S-W34-H-3	W34	H -			

表 II.2.2-2 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	堤体高 [m]	堤体位置	繰り返し	
58	F-W11-L-1	直立護岸 F	W11	L 0.29	0m	15	
59	F-W12-L-1		W12	L 0.29			
60	F-W12-H-1		W12	H -			
61	F-W13-L-1		W13	L 0.29			
62	F-W13-H-1		W13	H -			
63	F-W21-L-1		W21	L 0.28			
64	F-W22-L-1		W22	L 0.28			
65	F-W22-H-1		W22	H -			
66	F-W23-L-1		W23	L 0.28			
67	F-W23-H-1		W23	H -			
68	F-W24-L-1		W24	L 0.28			
69	F-W24-H-1		W24	H -			
70	F-W31-L-1		W31	L 0.27			
71	F-W32-L-1		W32	L 0.27			
72	F-W32-H-1		W32	H -			
73	F-W33-L-1		W33	L 0.27			
74	F-W33-H-1		W33	H -			
75	F-W34-L-1		W34	L 0.27			
76	F-W34-H-1		W34	H -			
77	F-W11-L-2		W11	L 0.29			0.625m
78	F-W12-L-2		W12	L 0.29			
79	F-W12-H-2		W12	H -			
80	F-W13-L-2		W13	L 0.29			
81	F-W13-H-2		W13	H -			
82	F-W21-L-2		W21	L 0.28			
83	F-W22-L-2		W22	L 0.28			
84	F-W22-H-2		W22	H -			
85	F-W23-L-2		W23	L 0.28			
86	F-W23-H-2		W23	H -			
87	F-W24-L-2		W24	L 0.28			
88	F-W24-H-2		W24	H -			
89	F-W31-L-2		W31	L 0.27			
90	F-W32-L-2		W32	L 0.27			
91	F-W32-H-2		W32	H -			
92	F-W33-L-2	W33	L 0.27				
93	F-W33-H-2	W33	H -				
94	F-W34-L-2	W34	L 0.27				
95	F-W34-H-2	W34	H -				
96	F-W11-L-3	W11	L 0.29	1.25m			
97	F-W12-L-3	W12	L 0.29				
98	F-W12-H-3	W12	H -				
99	F-W13-L-3	W13	L 0.29				
100	F-W13-H-3	W13	H -				
101	F-W21-L-3	W21	L 0.28				
102	F-W22-L-3	W22	L 0.28				
103	F-W22-H-3	W22	H -				
104	F-W23-L-3	W23	L 0.28				
105	F-W23-H-3	W23	H -				
106	F-W24-L-3	W24	L 0.28				
107	F-W24-H-3	W24	H -				
108	F-W31-L-3	W31	L 0.27				
109	F-W32-L-3	W32	L 0.27				
110	F-W32-H-3	W32	H -				
111	F-W33-L-3	W33	L 0.27				
112	F-W33-H-3	W33	H -				
113	F-W34-L-3	W34	L 0.27				
114	F-W34-H-3	W34	H -				

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。

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.2.1-3 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) η 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 η_{\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、後述するように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. 波力の算定方法

波力は、堤体模型前面に設置した圧力計の計測結果から求める。圧力は、図 II.2.1-3 に示す 3 側線で計測しているため、現象の 2 次元性（水槽幅方向に一様）であることを確認した上で、各高さの圧力を 3 つの圧力計の平均値とした。波力の算定は、各圧力計の値に、高さ方向のピッチ 0.05m を乗じて合計することにより算出した。これは、各高さの圧力計の間の圧力を線形補完したことになる。なお、越流するケースでは 0.05m ピッチの圧力計に対して、半端な壁高の壁を追加することになる。この場合は、最上段 2 つの圧力計の値を外挿した台形状の圧力分布の積分値を求め、これを加えることにより堤体全体に働く波力を算出した。

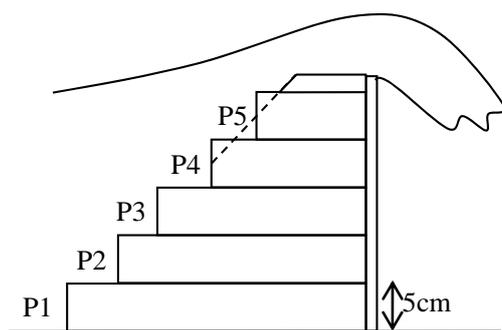


図 II.2.1-4 波力の算定方法

3. 試験結果

3.1. 通過波検定試験

図 II.3.1-1, 図 II.3.1-2 に, 試験に用いた津波の WG3 地点における沖波の目標水位時系列, 計測水位時系列を示す. W11~13, W21~24, W31~34 それぞれで, 周期特性は同一で波高が大きくなるように設定した. W11~13 は孤立波形状の津波, W21~24, W31~34 は正弦波形状の津波である. 波高はそれぞれ, 0.1, 0.125, 0.15, 0.2m の 4 種類とした. ただし, W1 のシリーズのみ, 波高 0.2m とすると汀線に到達する前に碎波し, 波高が低減してしまうため試験ケースから除外した.

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.3.1-3, 図 II.3.1-4 にそれぞれ示す. なお, 試験はそれぞれ 3 回繰り返しているが, ここには 1 回目の結果を示した. 単純勾配のケースでは, 汀線位置である WG8($\eta 8$)において, 波形の立ち上がり時に短時間の水位上昇が現れているケースがある. 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, 汀線近傍で碎波する. この時, 巻き波状態で計測点を通過するため短時間の水位上昇が現れているが, 計測された水位は碎波状態の水位を計測しているため, 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, この碎波時の水位を除いた最大浸水深を求めている. 直立護岸のケースでは, WG7($\eta 7$)の計測結果に, 短周期の波が含まれている. これは, 津波の進行とともに先端部分が非線形性, 分散性により分裂したものである. この影響が, 陸上部 ($\eta 8 \sim \eta 10$) にも現れ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.3.1-5, 図 II.3.1-6 にそれぞれ示す. 陸上部流速は, プロペラ流速計, 底面電磁流速計による計測結果を示した. 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の計測結果である. なお, P.08 では, 地形が屈曲しており底面電磁流速計を設置できないため, プロペラ流速計のみの計測としている. プロペラ流速計の結果と底面電磁流速計の結果を比較すると, 流速の計測結果はほぼ一致している. ただし, プロペラ流速計の計測結果では, 波形の到達した直後の流速の計測結果が小さい. プロペラ流速計では, 津波の到達直後は水位が低く, 流速計のプロペラ部分が完全に没水していないため, 計測結果が小さくなる. 以降の試験結果の解析では, P.09, P.10 については津波到達時の流速の立ち上がりが大きい底面電磁流速計の計測結果を採用している.

図 II.3.1-5, 図 II.3.1-6 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ことが分かる. 後述するフルード数の変化からも明らかのように, 遡上した津波は, 最初に水深が小さく流速の大きい射流の状態であり, 徐々に流速が低下して常流の状態へと遷移していることが分かる.

防潮堤位置における通過波の浸水深, 比エネルギー, フルード数の時系列を比較したものを, 図 II.3.1-7, 図 II.3.1-8 に示す. 比エネルギーは以下の式によって算出される.

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

また, 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.3.1-7, 図 II.3.1-8 によると, フルード数は, 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。そのため汀線位置では, 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。

図 II.3.1-9, 図 II.3.1-10 に流速の計測結果とレーザードップラー流速計 (LDV) の計測結果 (VL) を比較したものを示す。LDV は, レーザー光を粒子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。また直立護岸では, 護岸天端からの剥離により底面近傍の流速が小さくなり, LDV で底面近傍の流速を計測すると, 断面全体の平均流速よりも小さな値を示すため, ここには示していない。レーザー流速計の計測結果と流速計の計測結果を比較すると両者はよく一致しており, 流速計による計測の妥当性が検証された。また, 津波到達直後に生じている大きな流速についても, 底面電磁流速計とレーザー流速計の計測結果が良い一致を示すことから, 底面電磁流速計の計測結果により, 津波到達初期の大きな流速についても精度良く計測できていることが検証された。

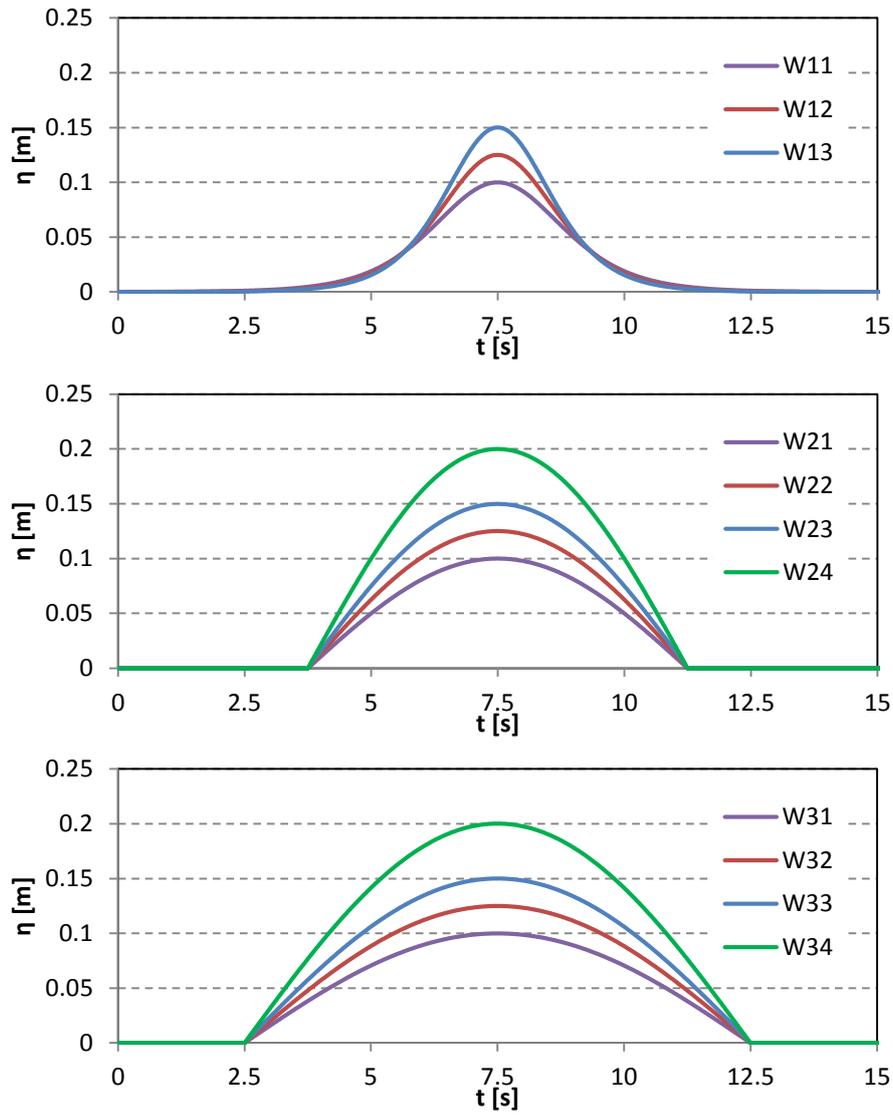


図 II.3.1-1 入射津波の目標波形(η 03)

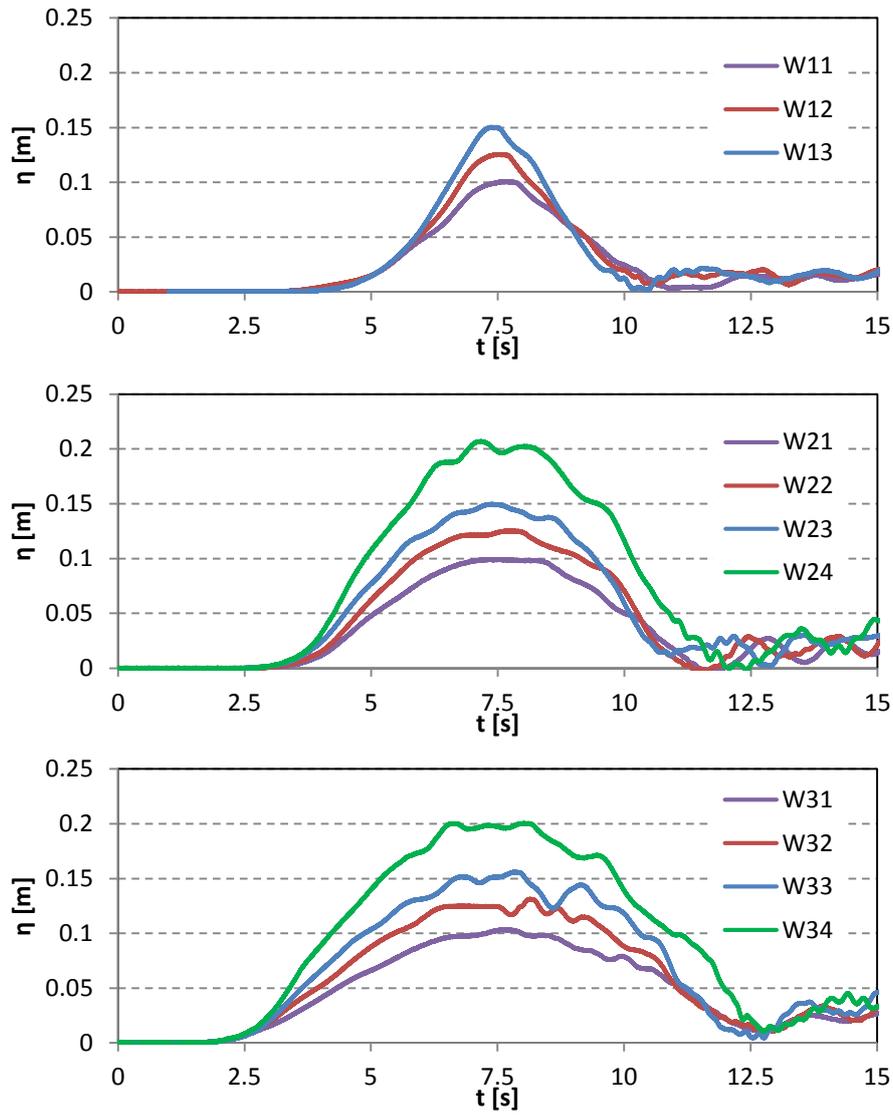


図 II.3.1-2 入射津波の水位計測結果(η 03)

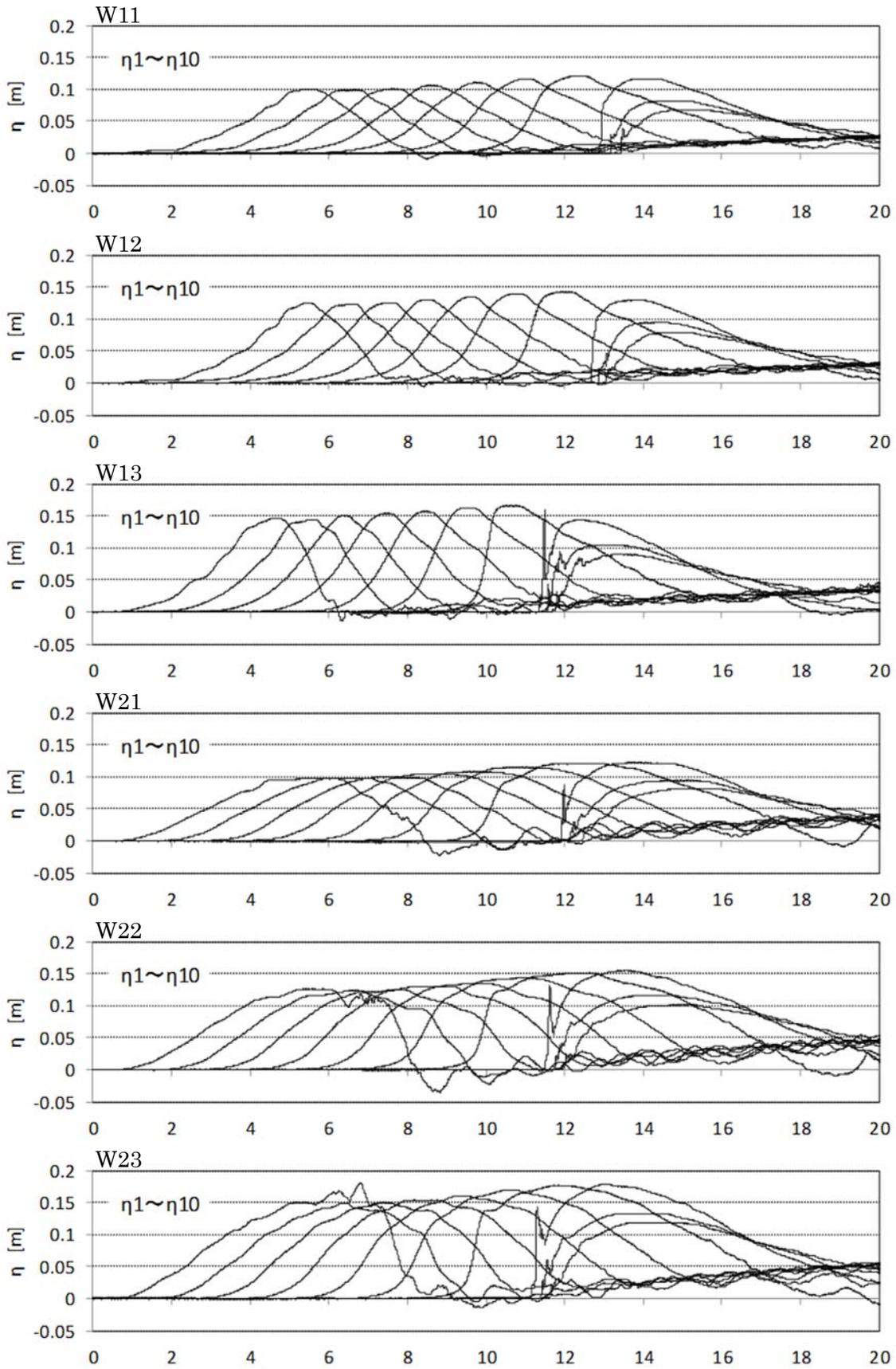


図 II.3.1-3 各測定点の水位時系列（単純勾配， $\eta 1 \sim \eta 6$ ：海域， $\eta 8$ ：汀線， $\eta 9, 10$ ：陸上部）

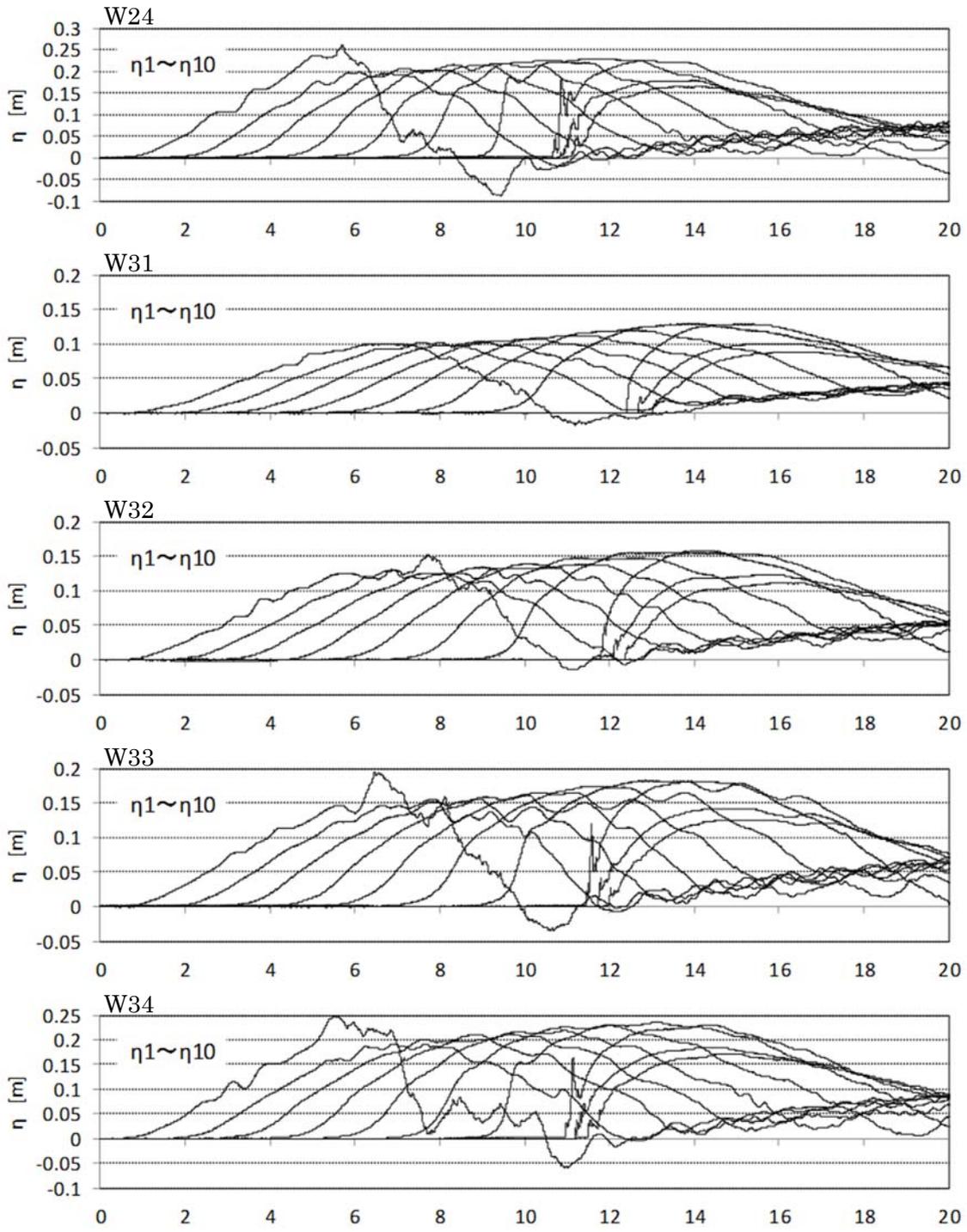


図 II.3.1-3 各測定点の水位時系列（単純勾配， $\eta_1 \sim \eta_6$ ：海域， η_8 ：汀線， $\eta_9, 10$ ：陸上部）

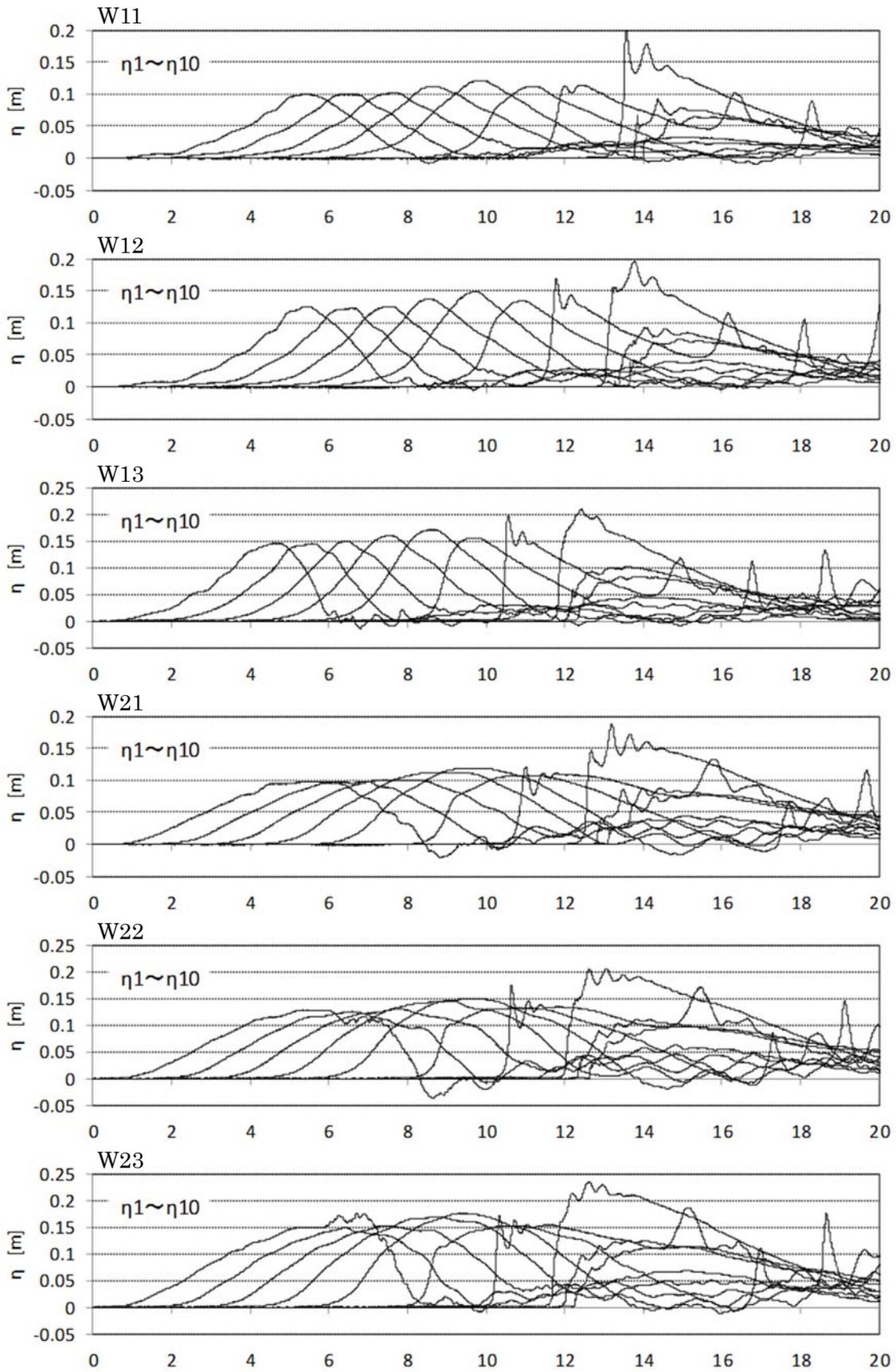


図 II.3.1-4 各測定点の水位時系列（直立護岸， $\eta 1 \sim \eta 6$ ：海域， $\eta 8$ ：汀線， $\eta 9, 10$ ：陸上部）

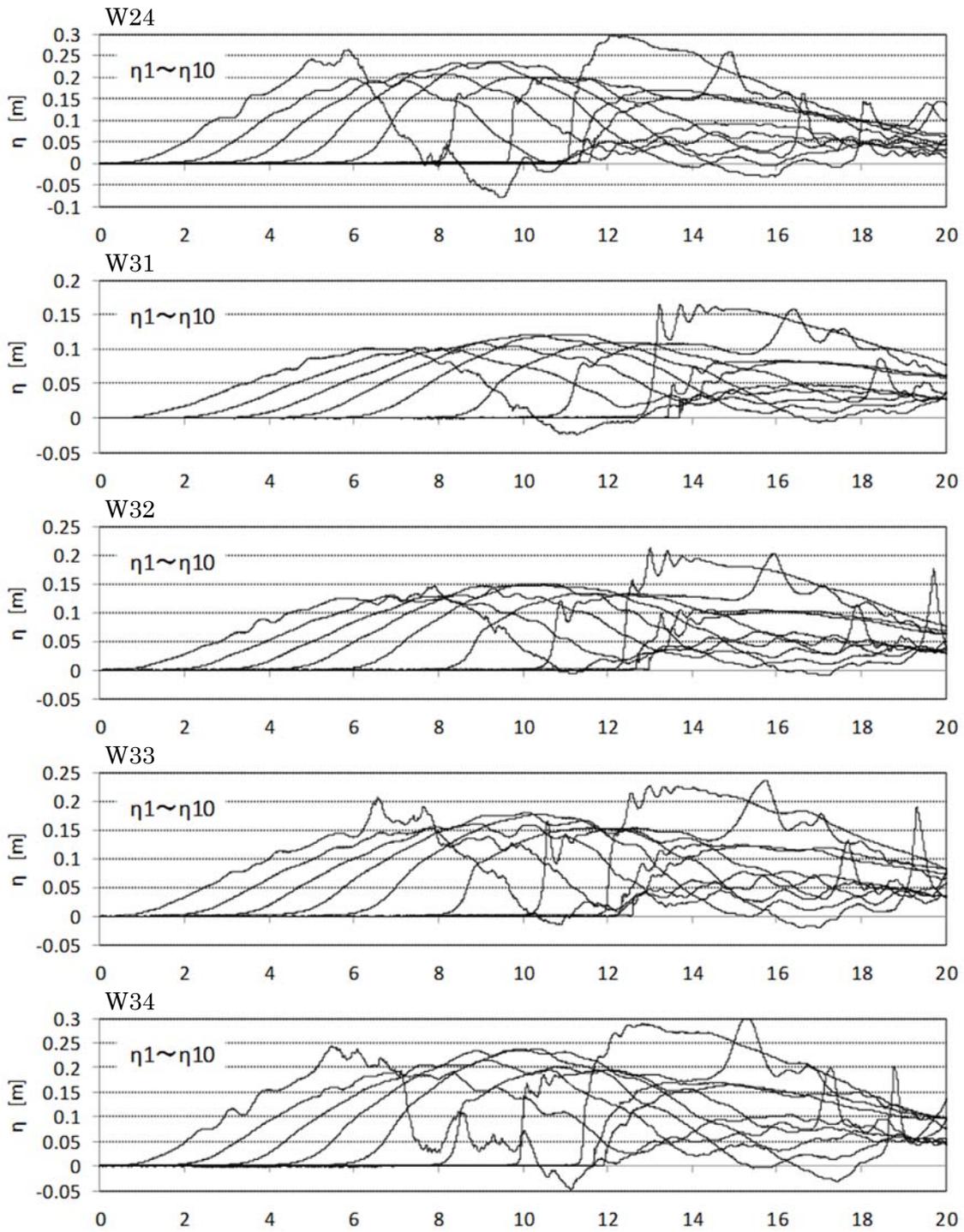


図 II.3.1-4 各測定点の水位時系列（直立護岸， $\eta 1 \sim \eta 6$ ：海域， $\eta 8$ ：汀線， $\eta 9, 10$ ：陸上部）

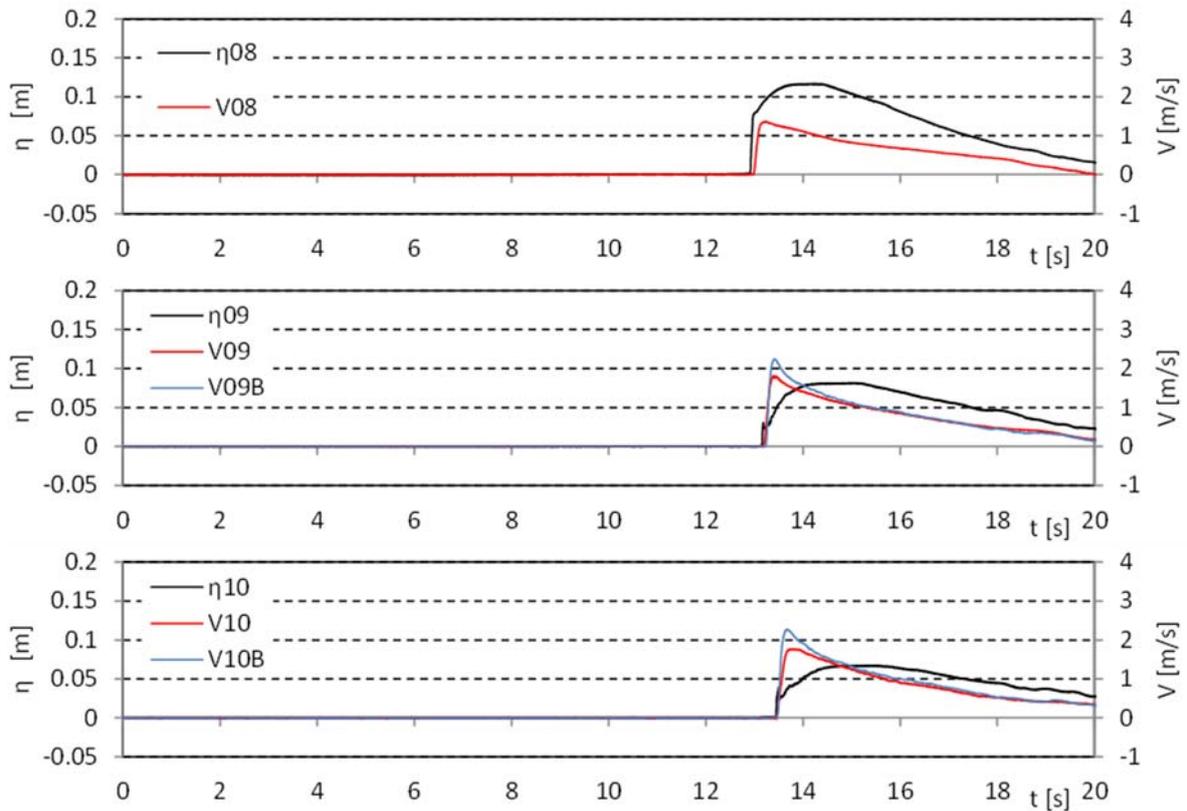


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W11)

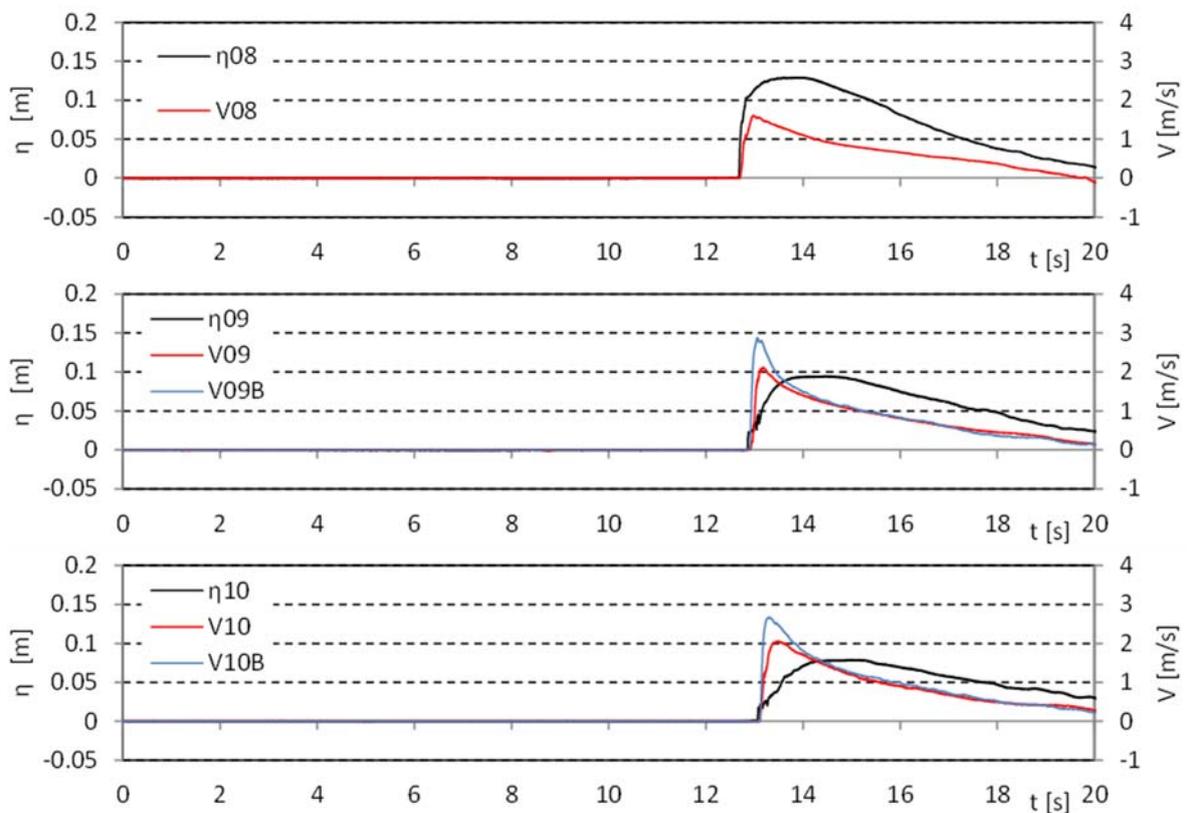


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W12)

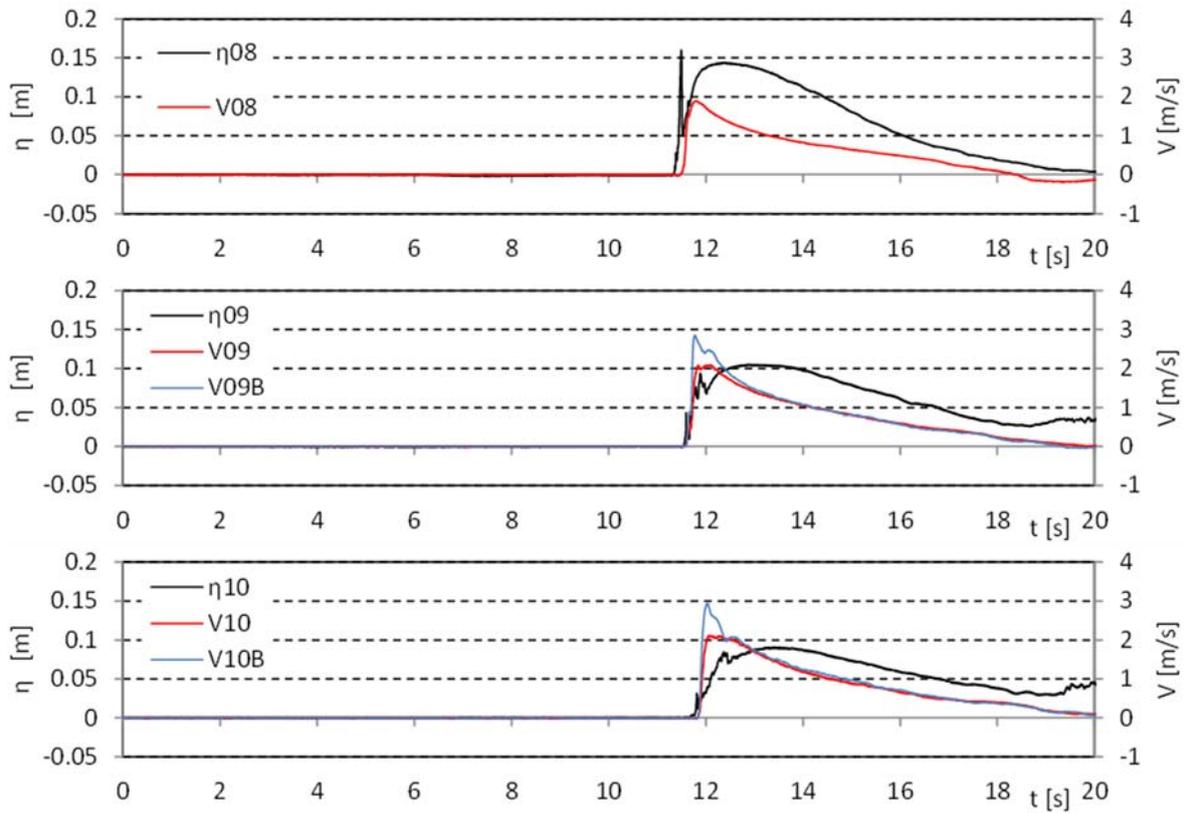


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W13)

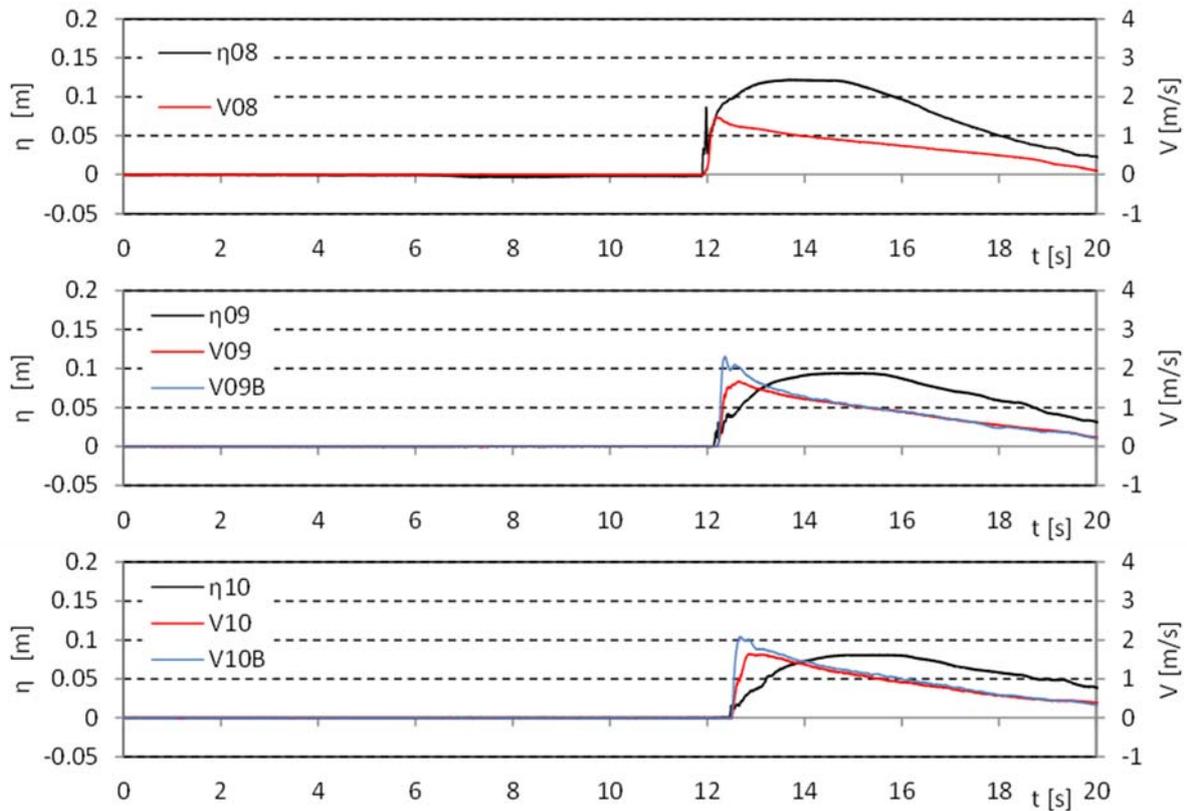


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W21)

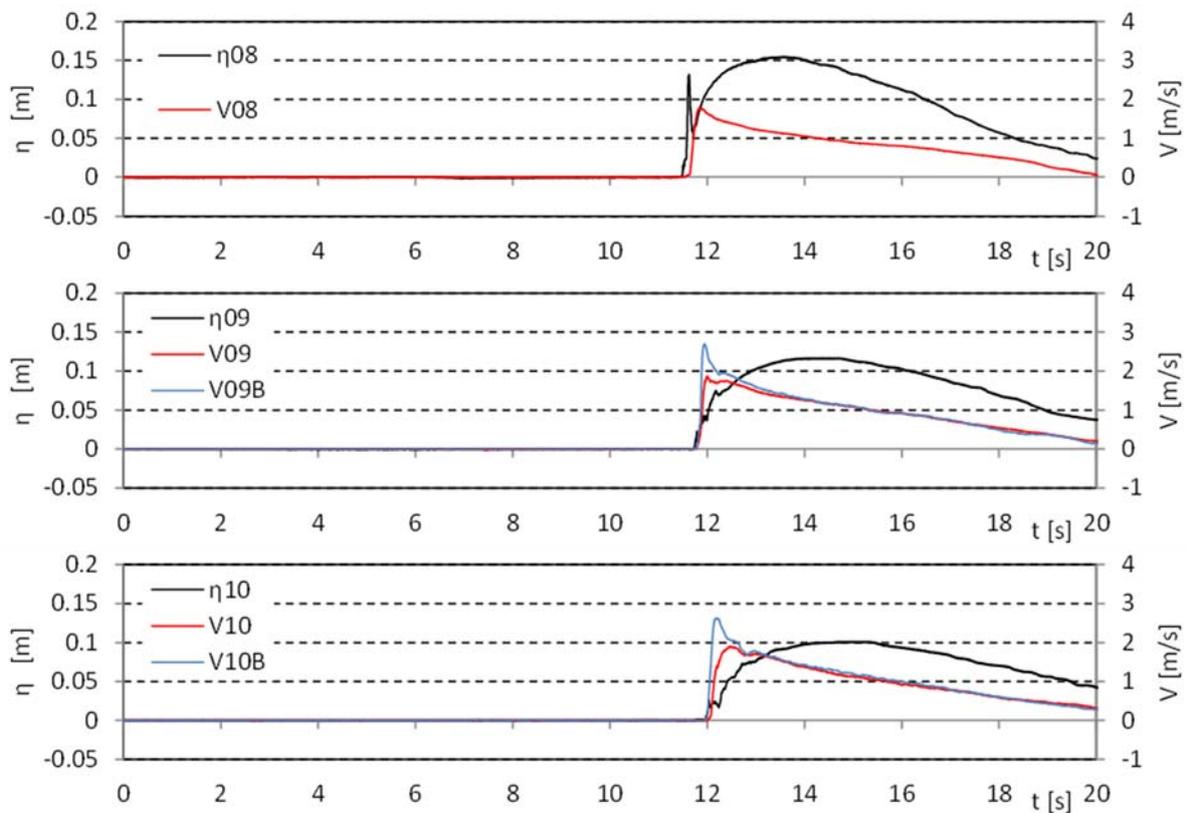


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W22)

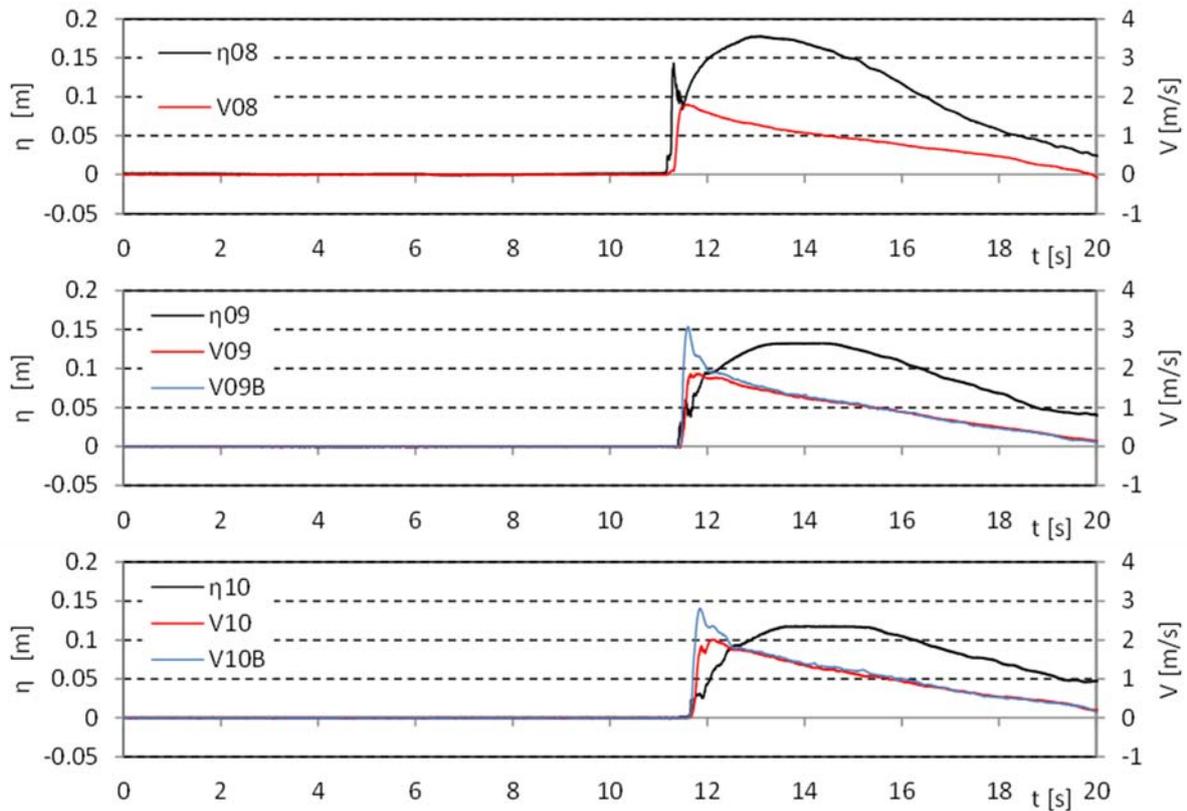


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W23)

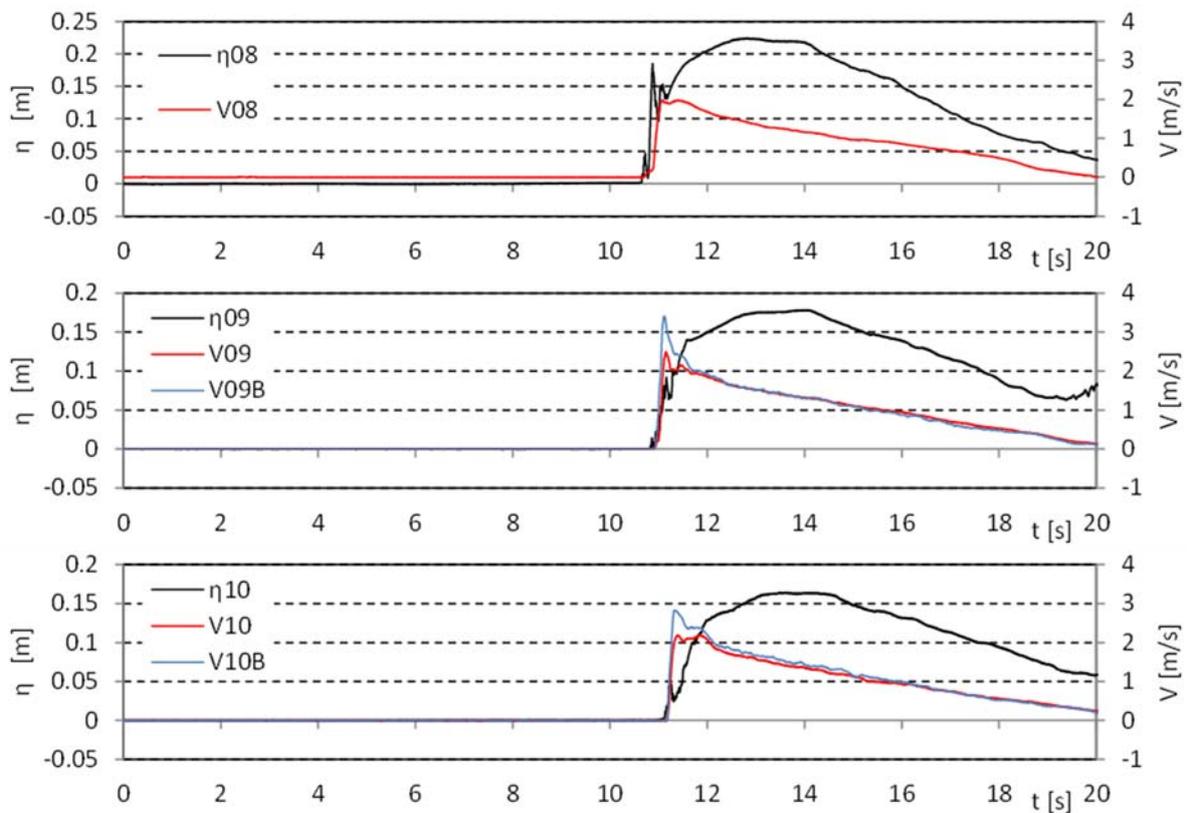


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W24)

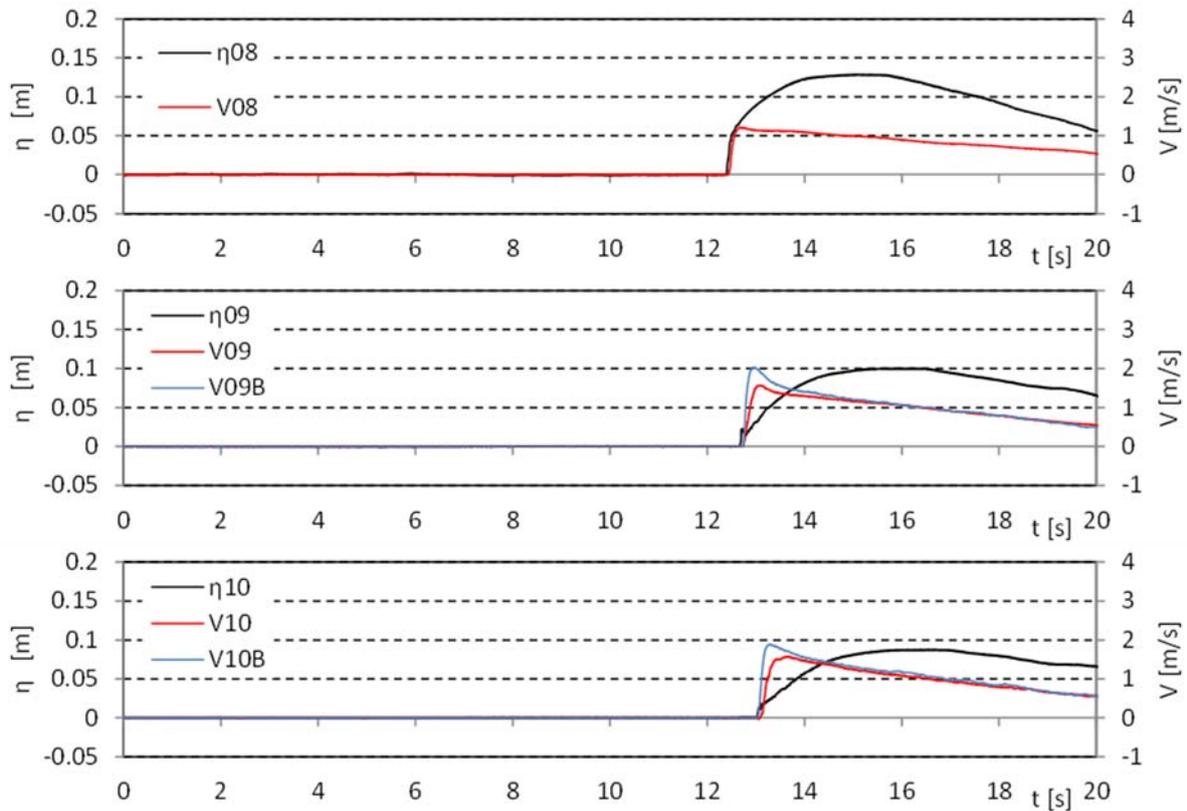


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W31)

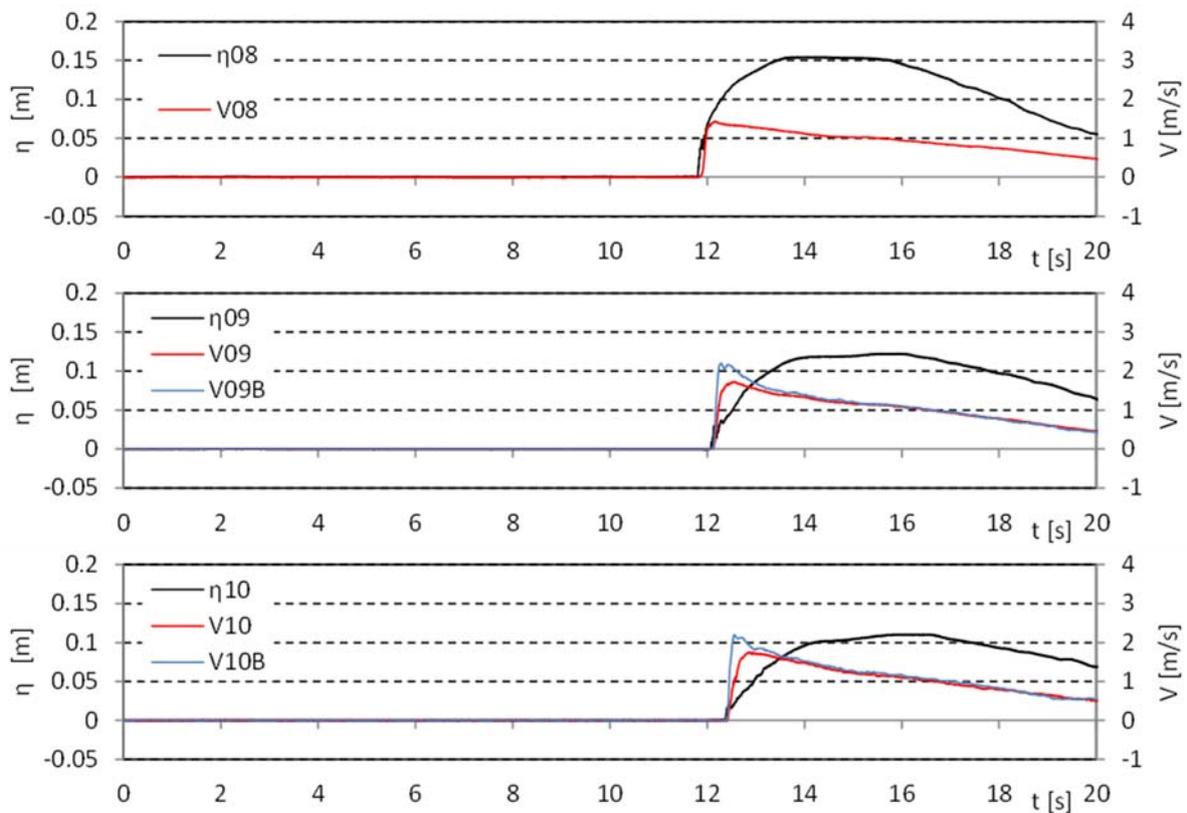


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W32)

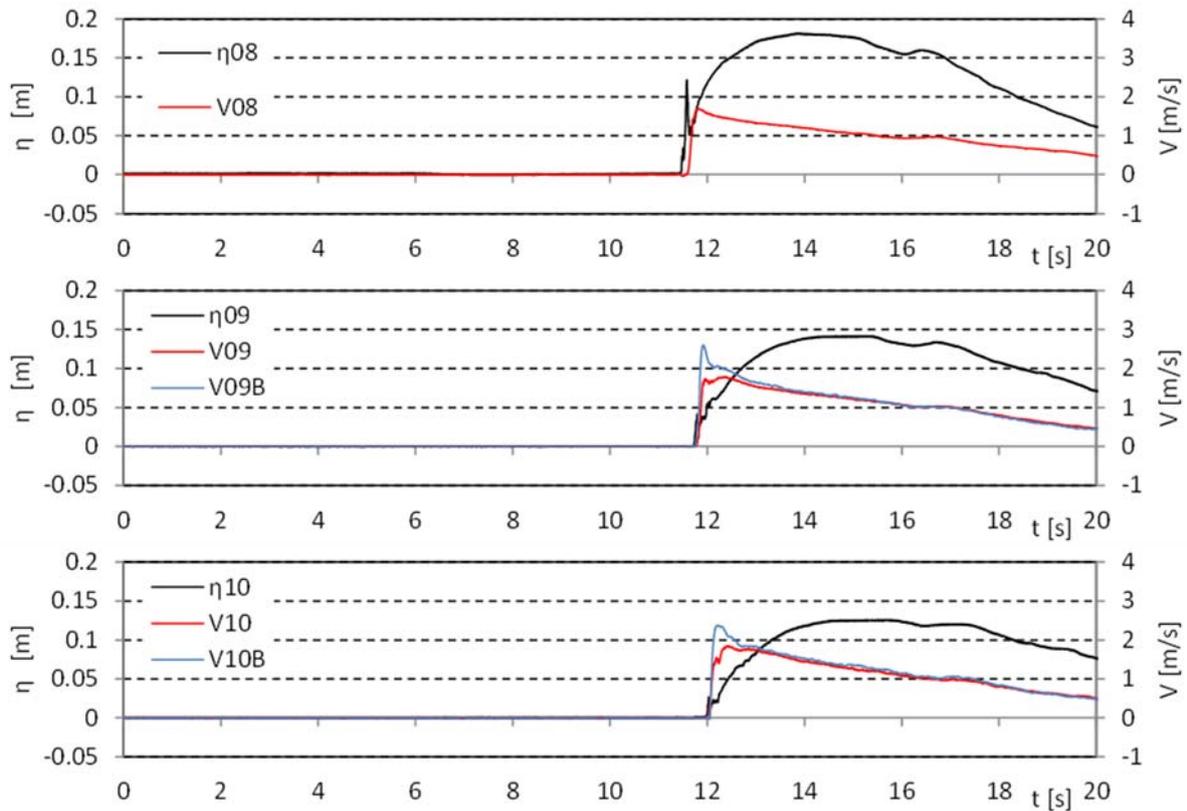


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W33)

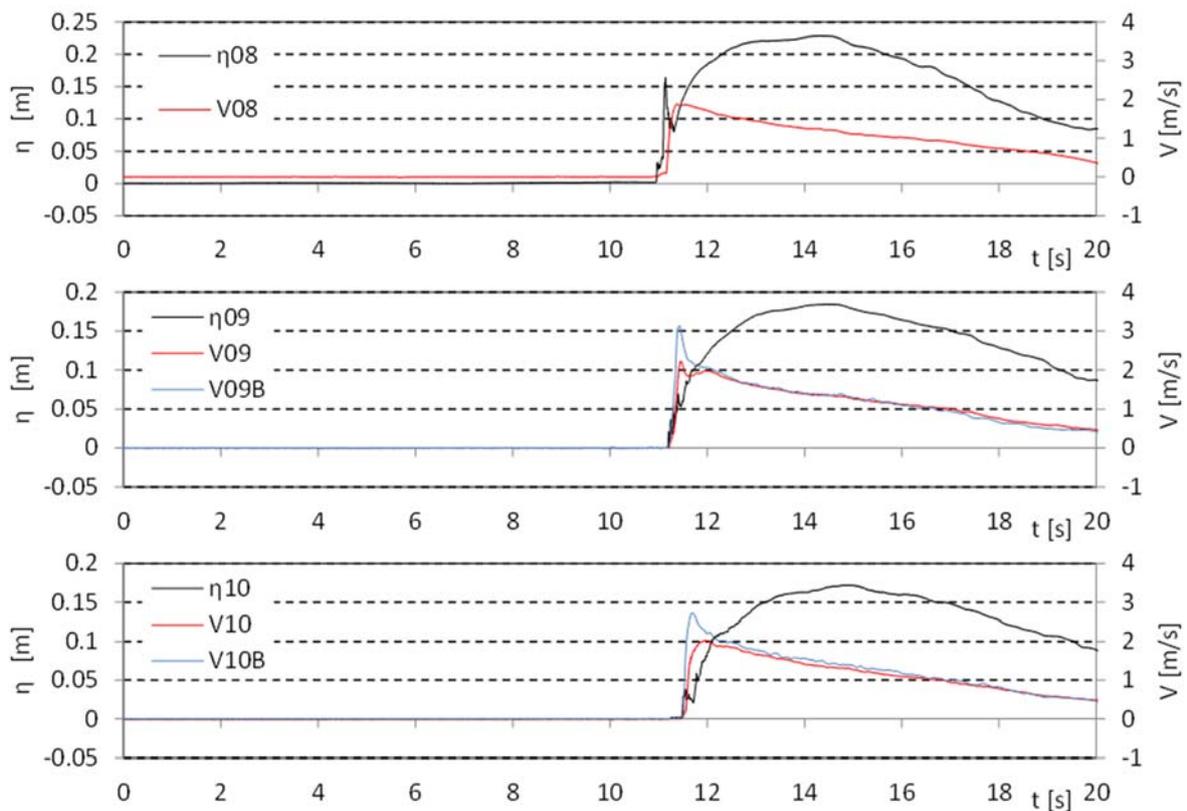


図 II.3.1-5 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配, W34)

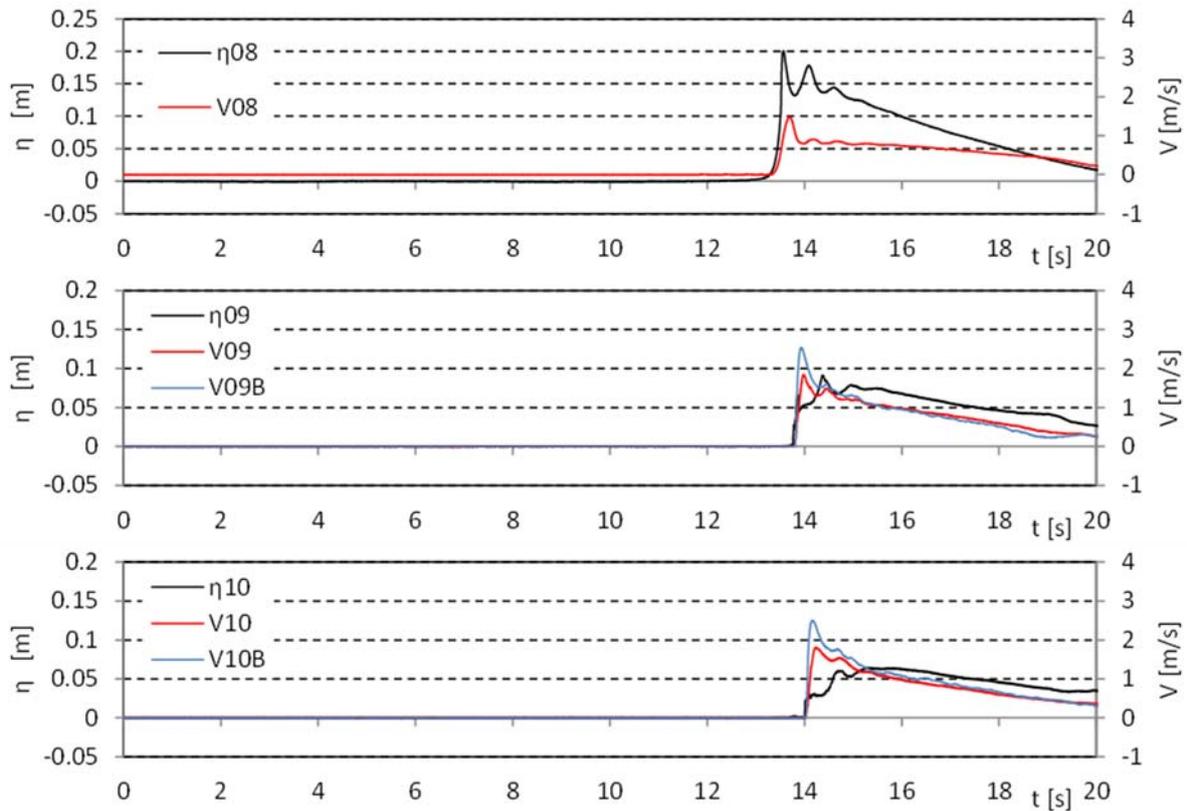


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W11)

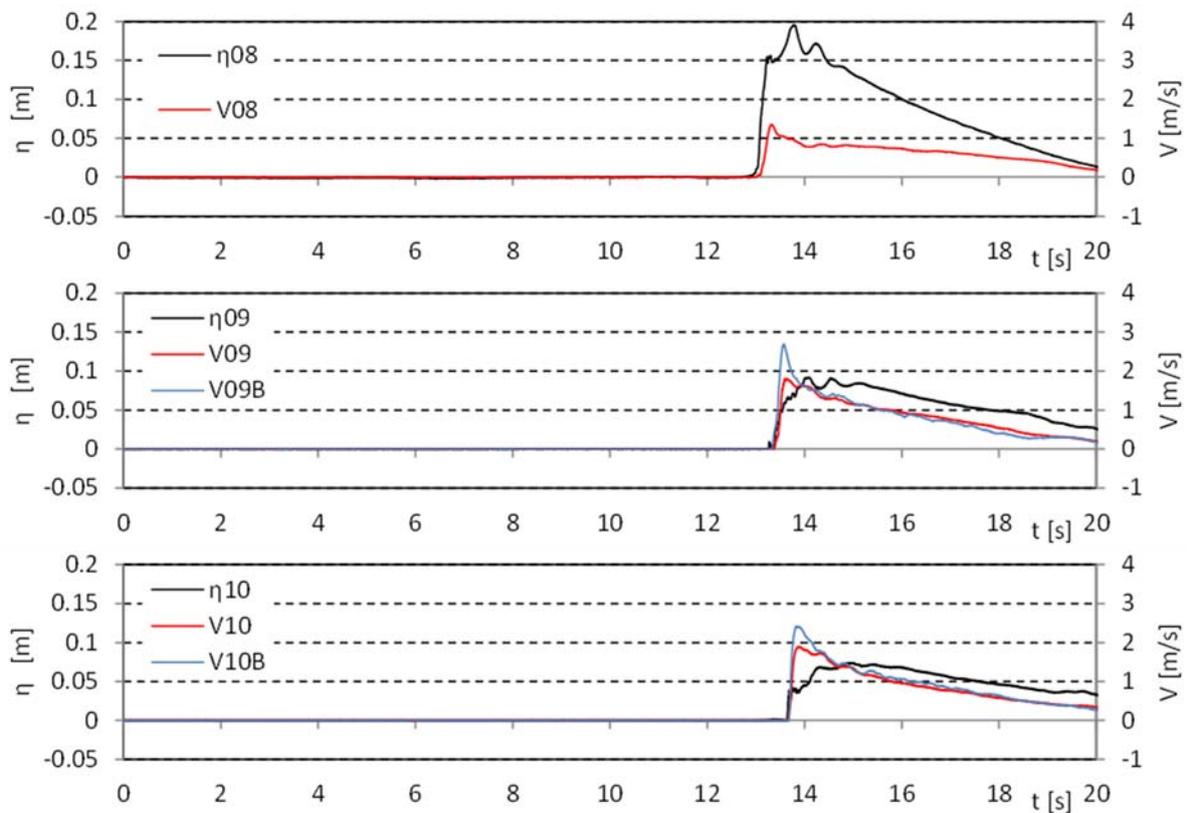


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W12)

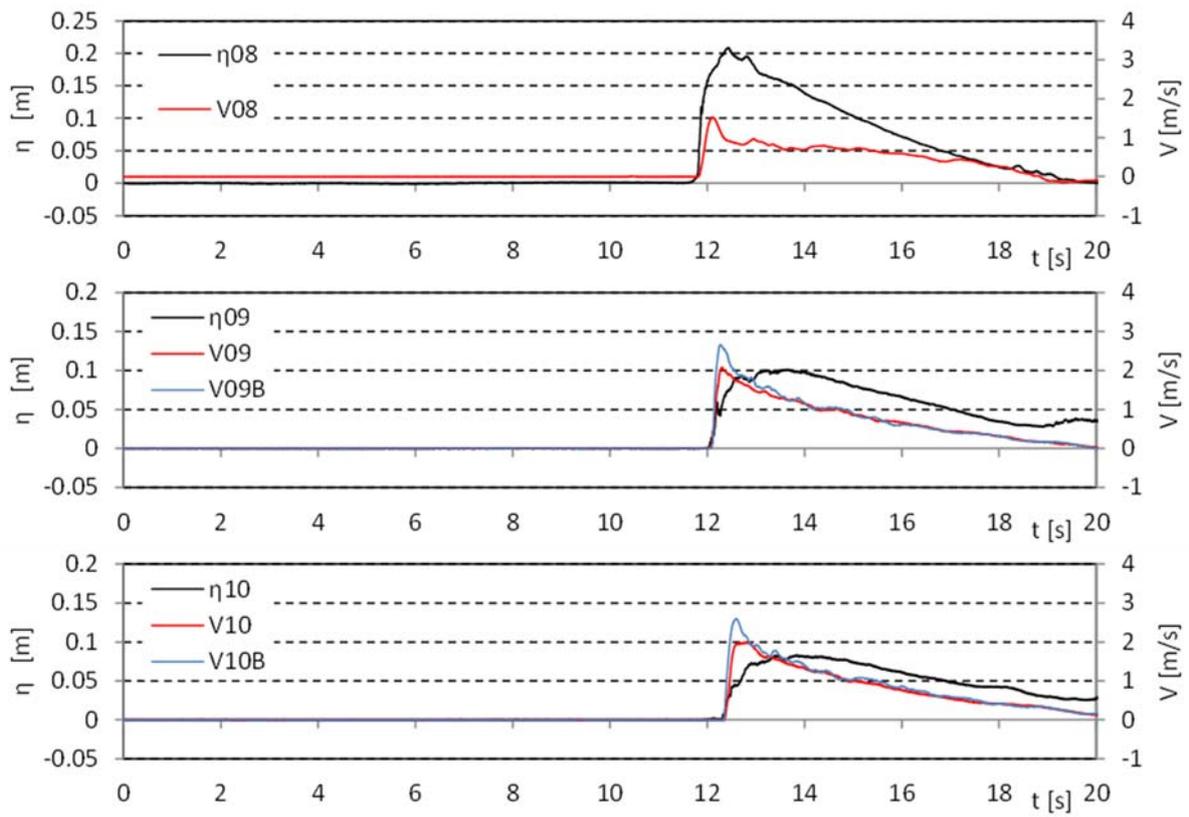


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W13)

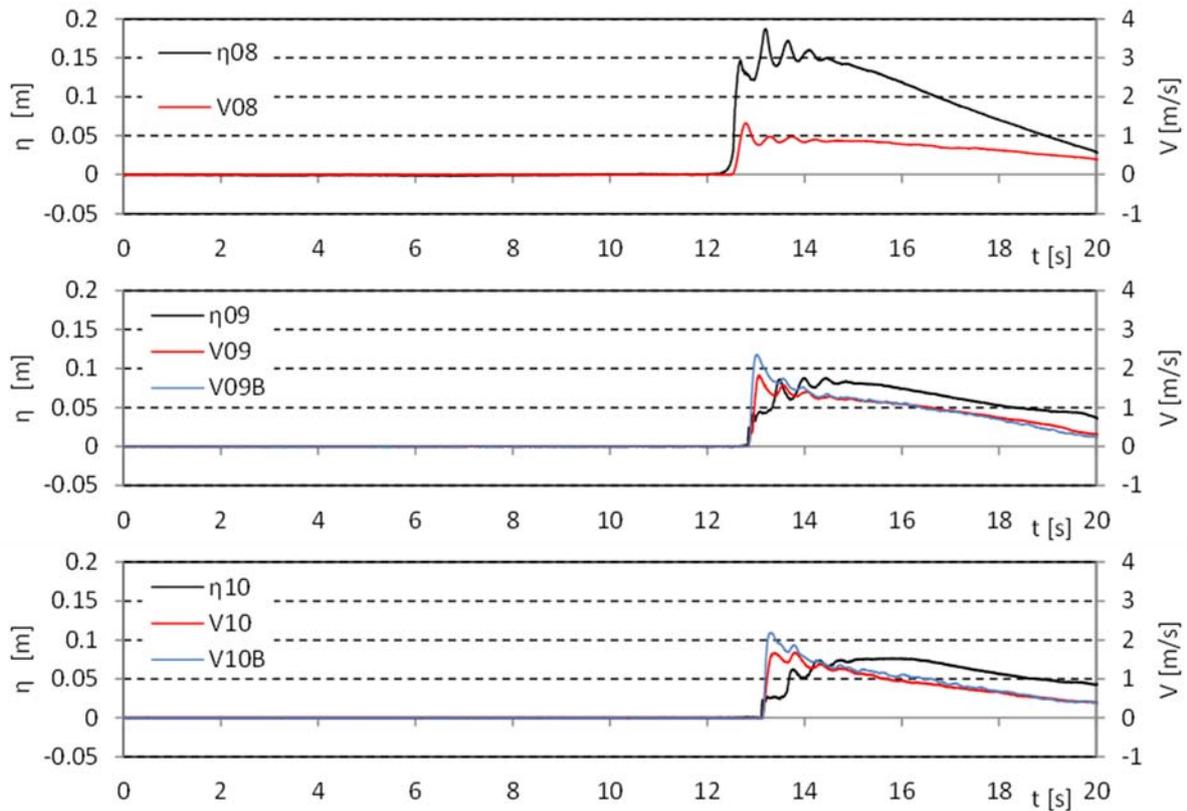


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W21)

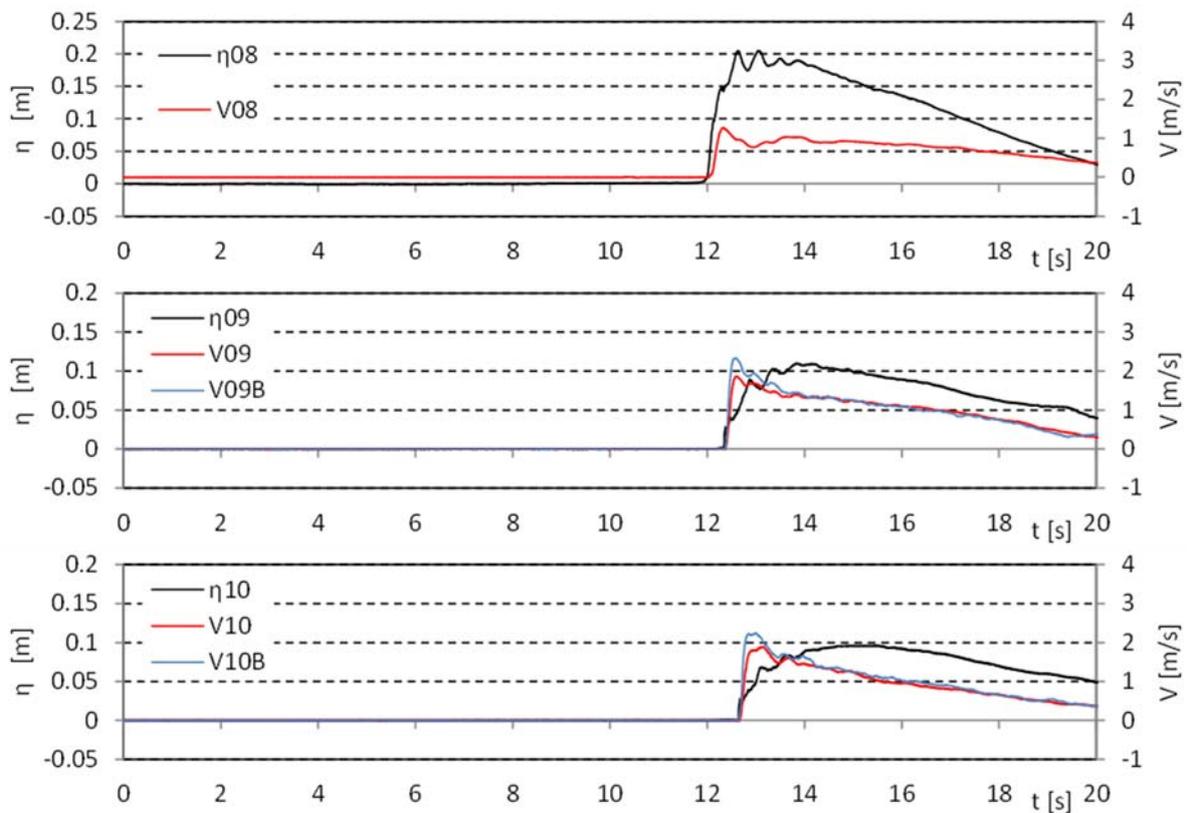


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W22)

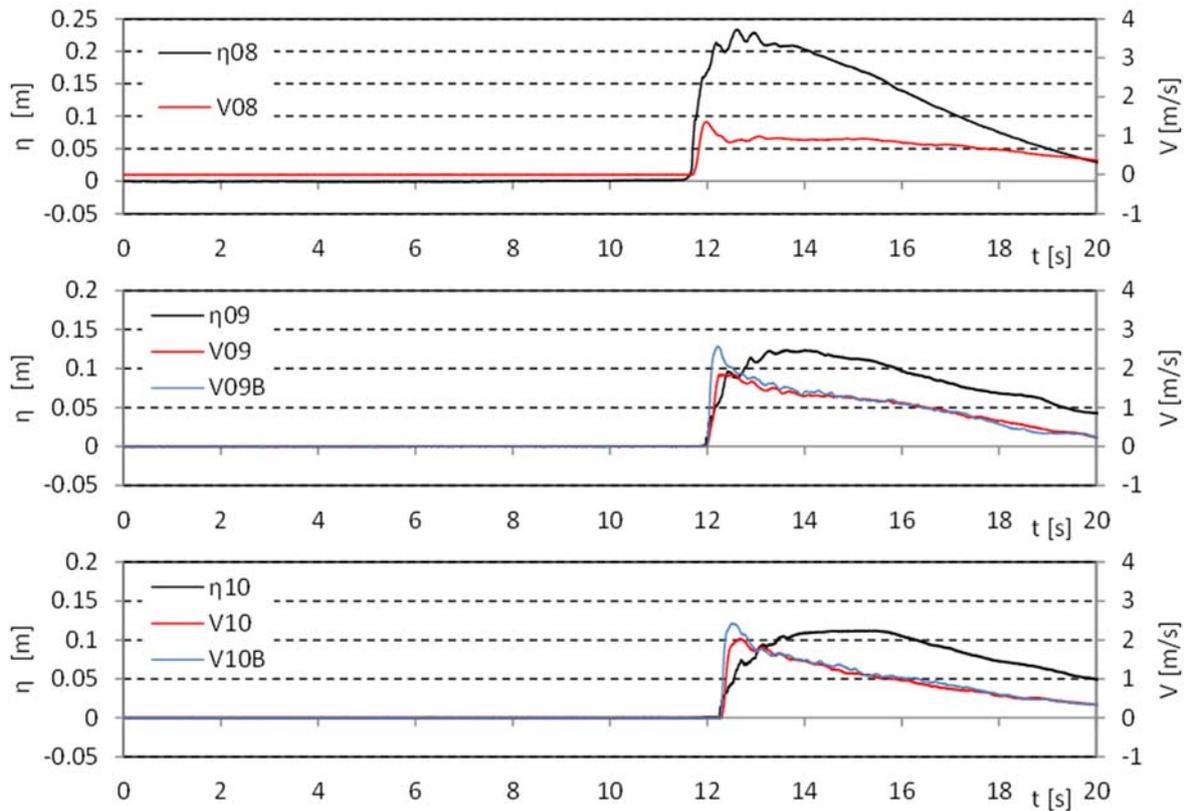


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W23)

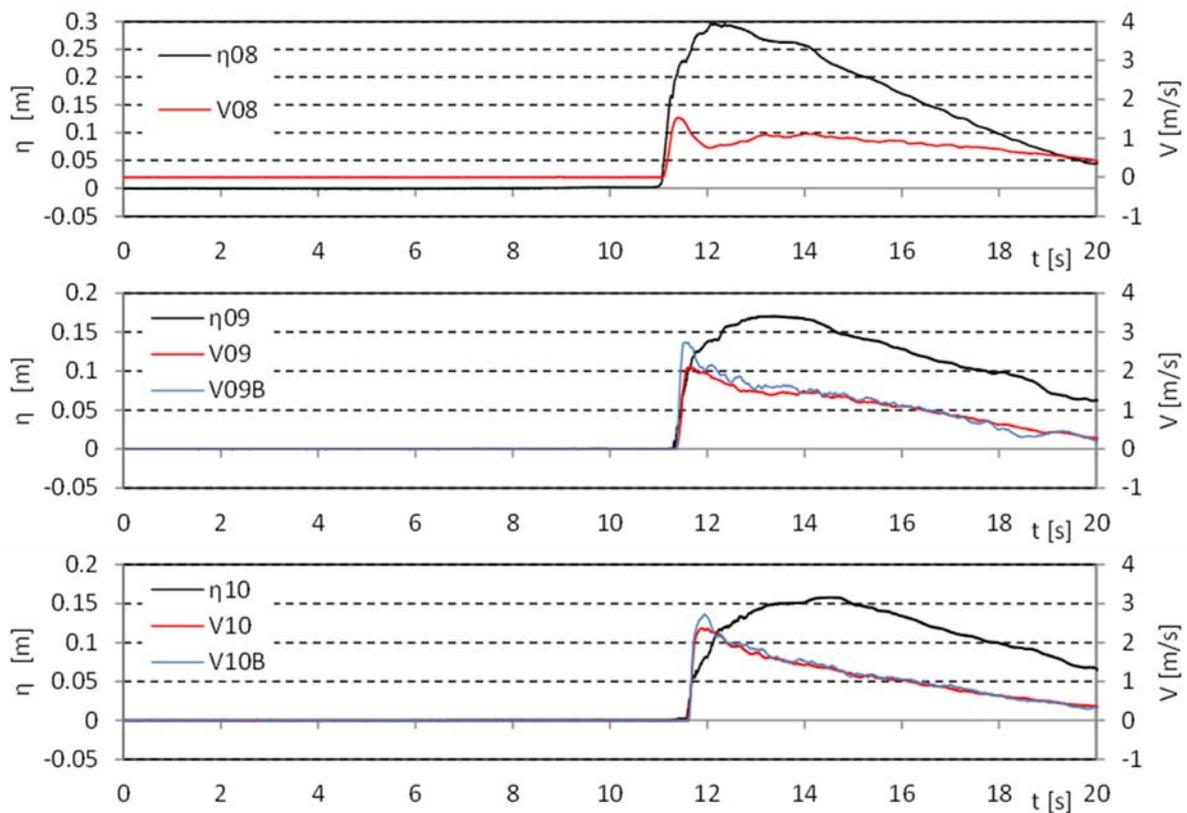


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W24)

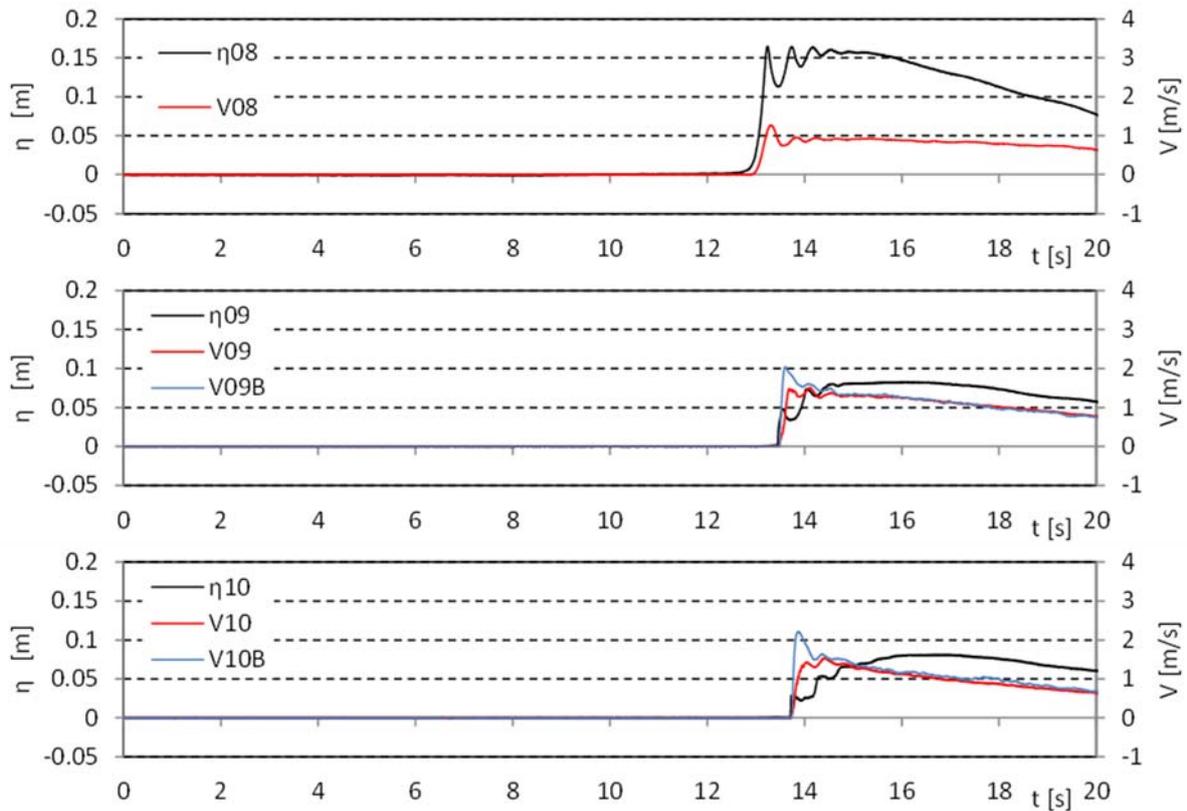


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W31)

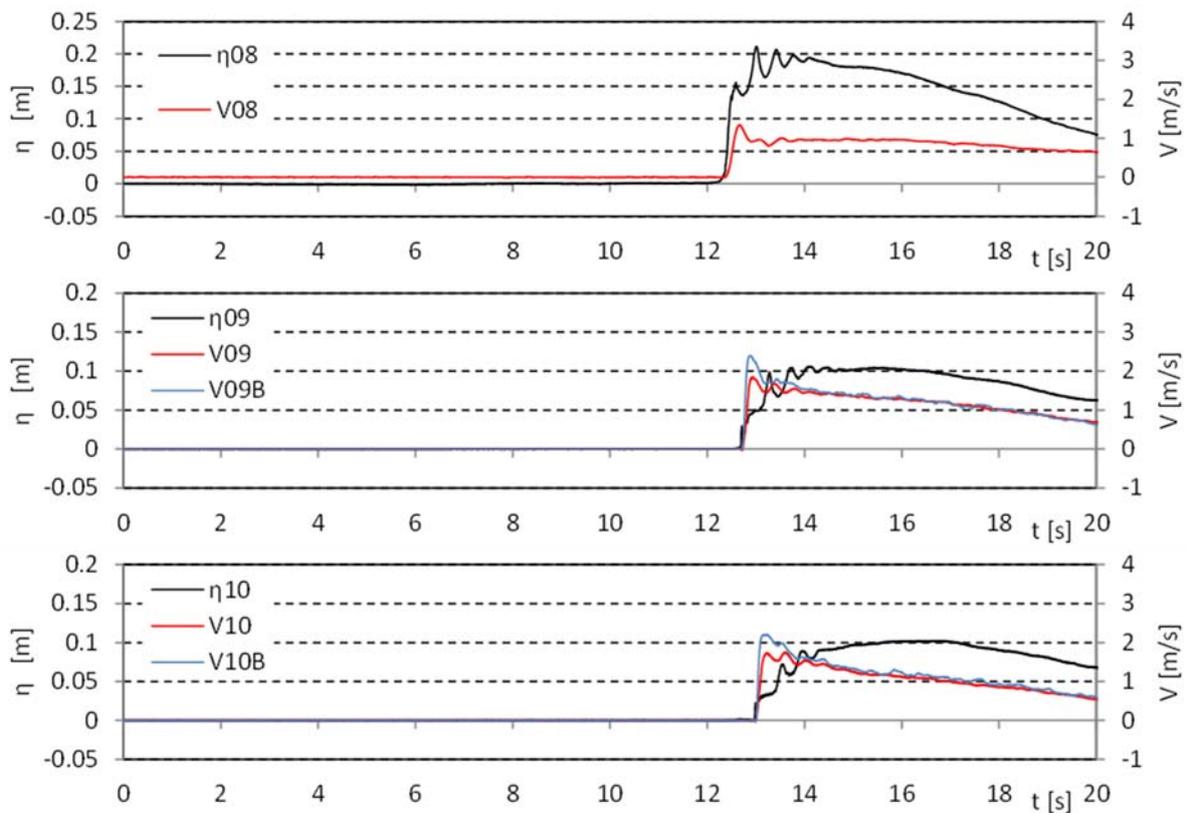


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W32)

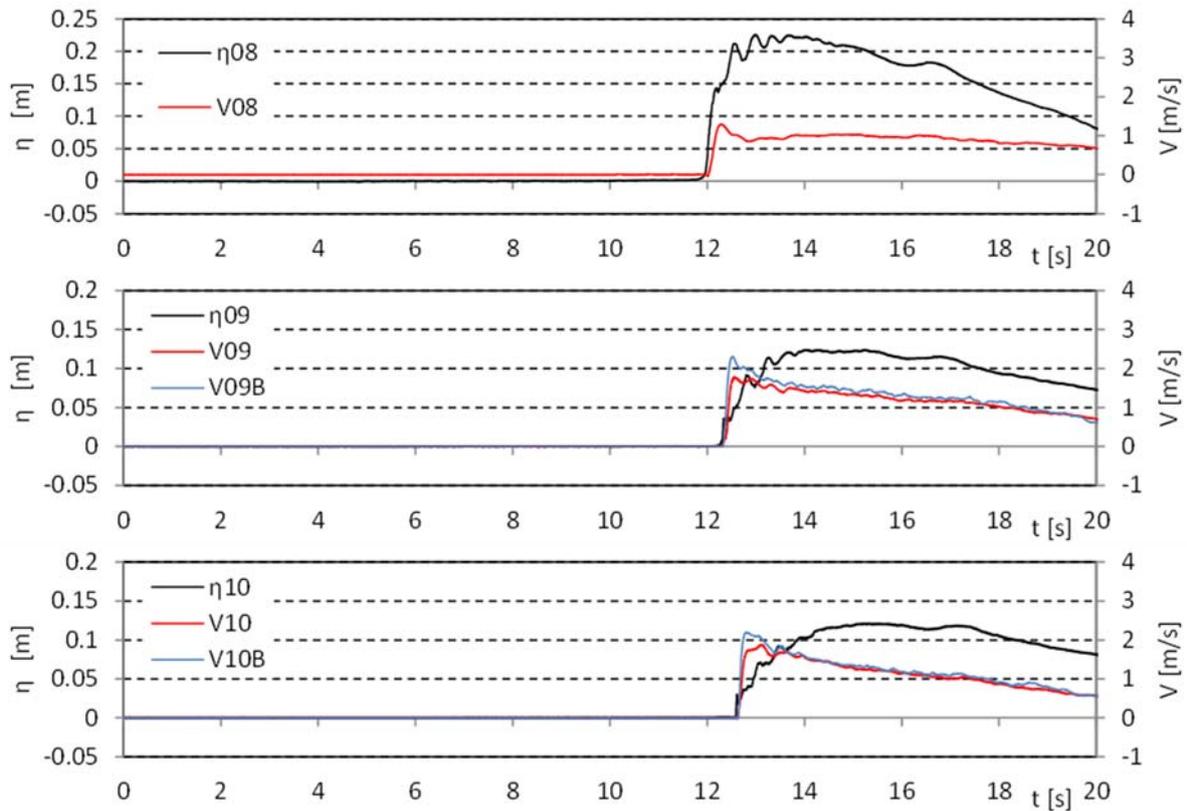


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W33)

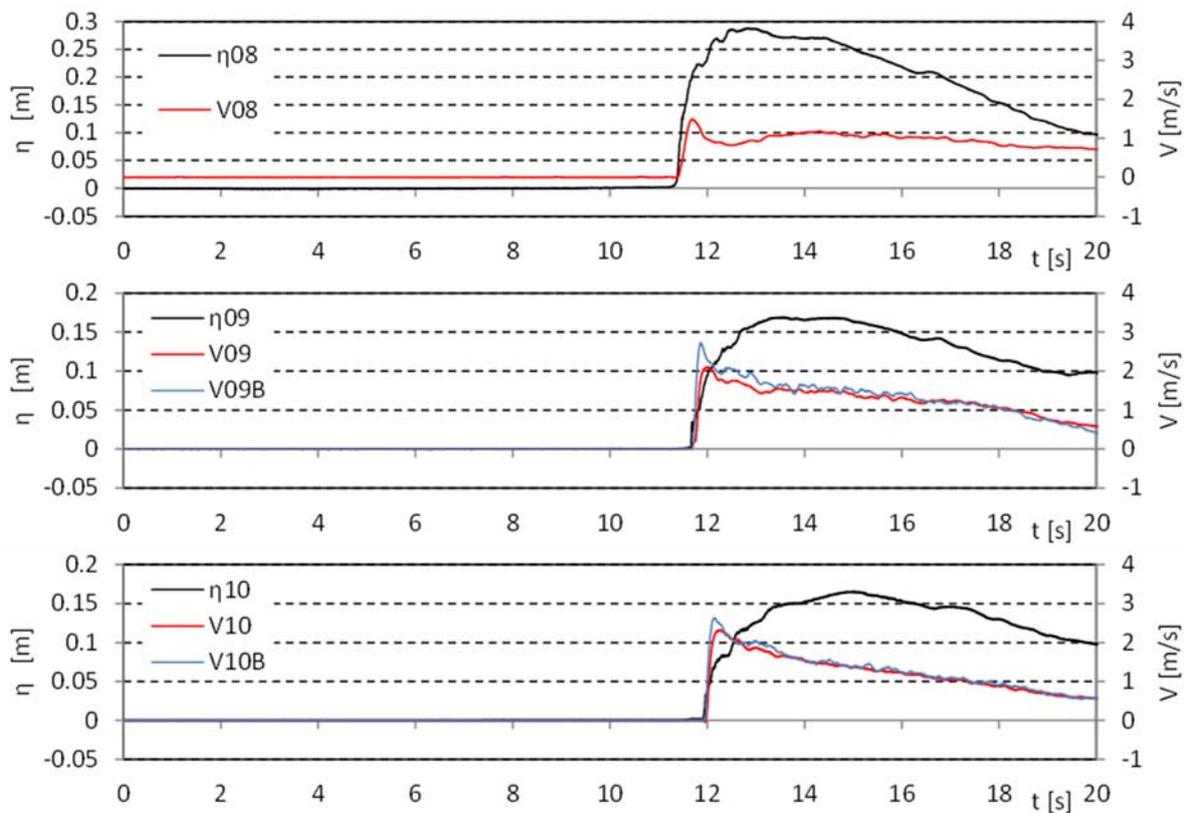


図 II.3.1-6 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸, W34)

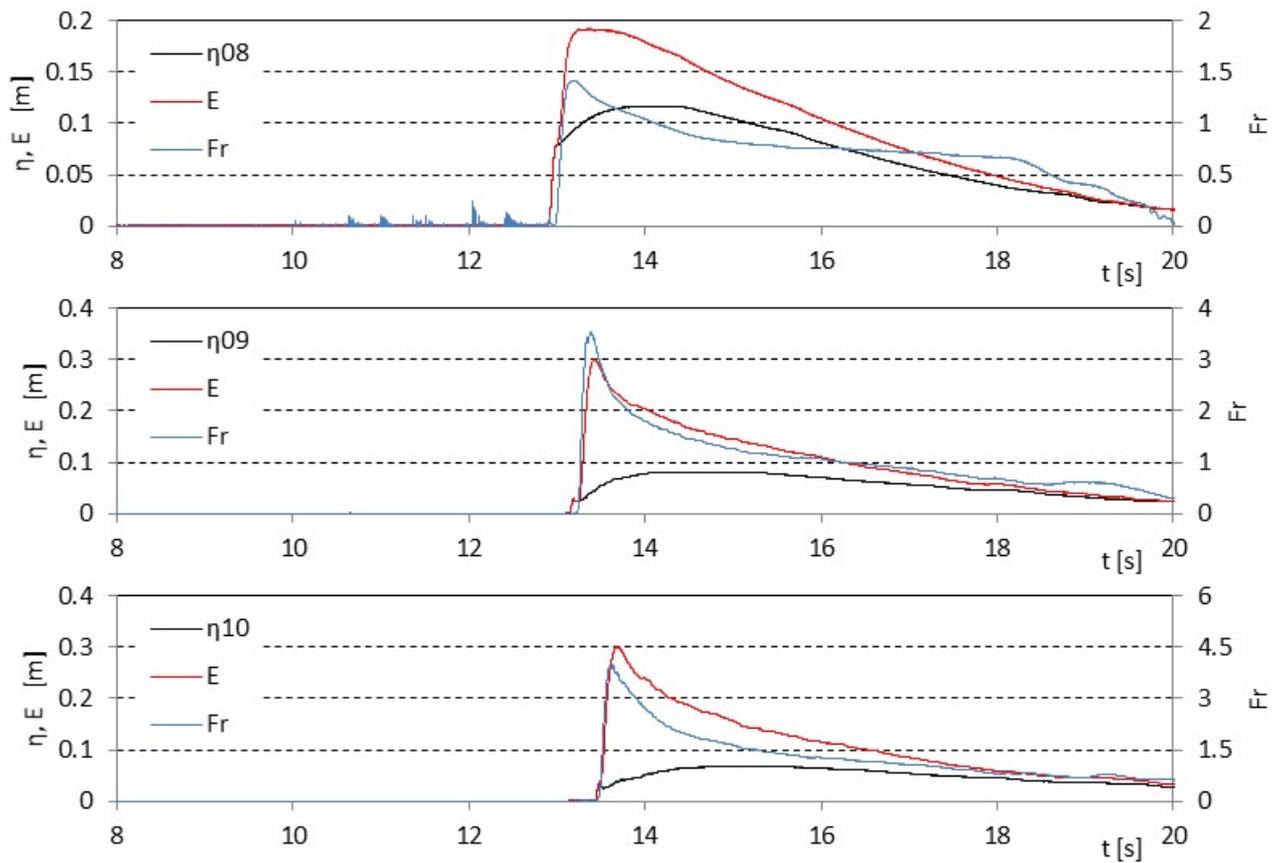


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (単純勾配, W11)

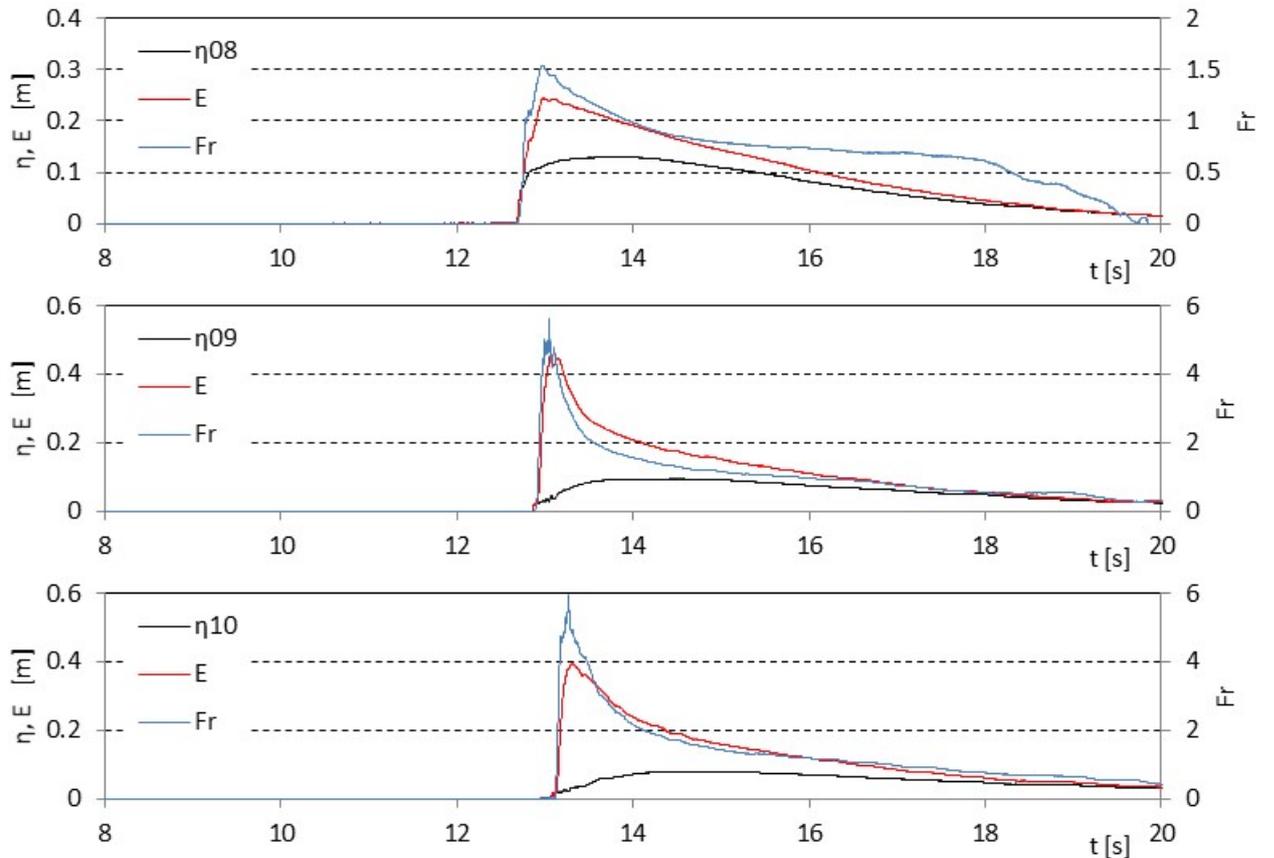


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (単純勾配, W12)

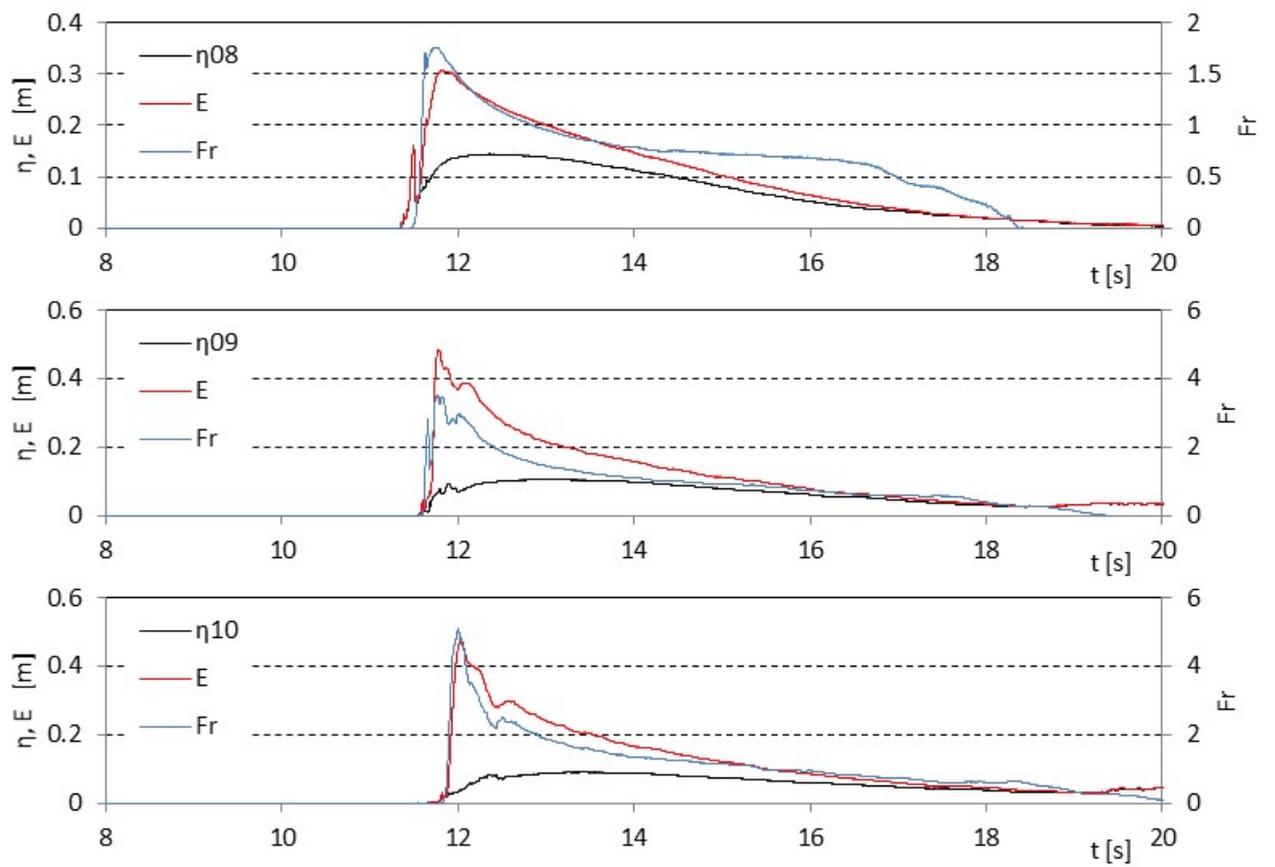


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (単純勾配, W13)

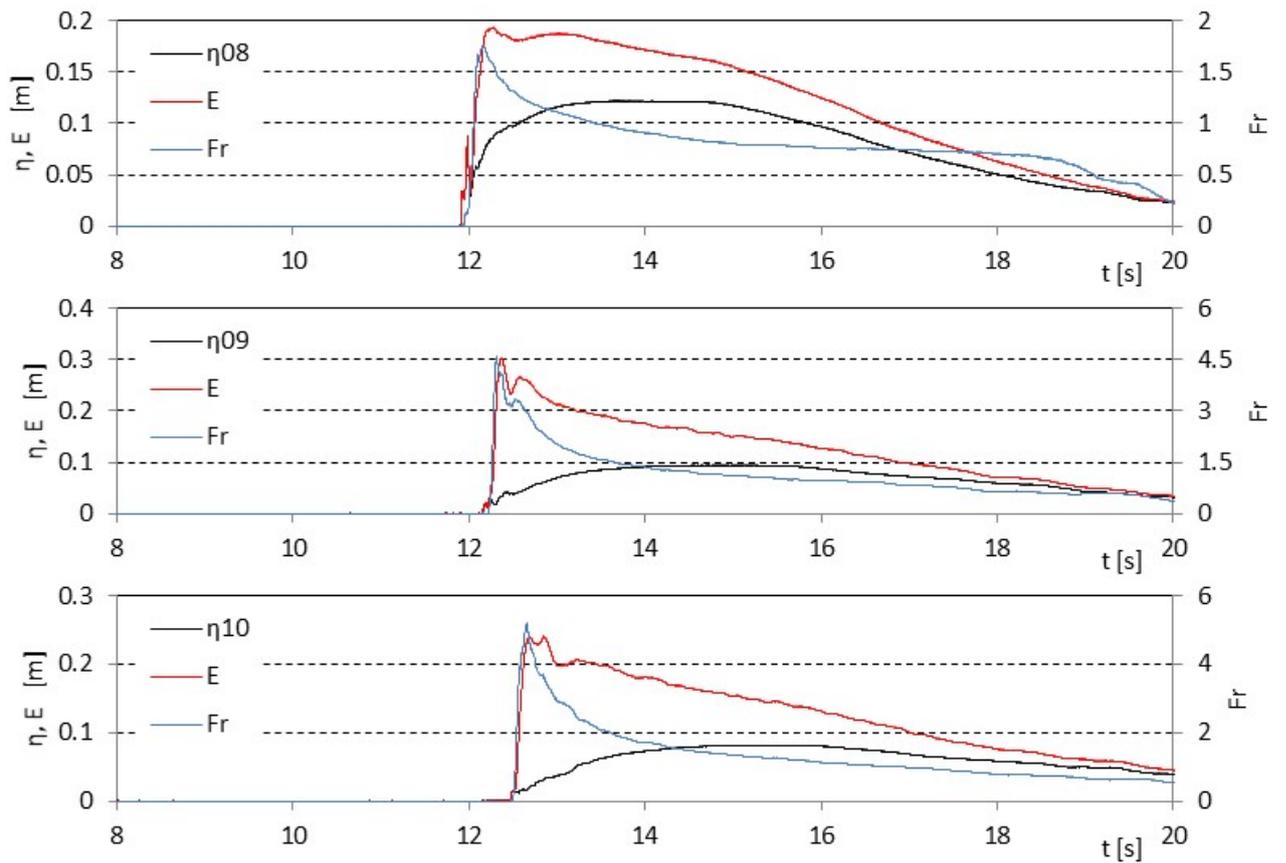


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (単純勾配, W21)

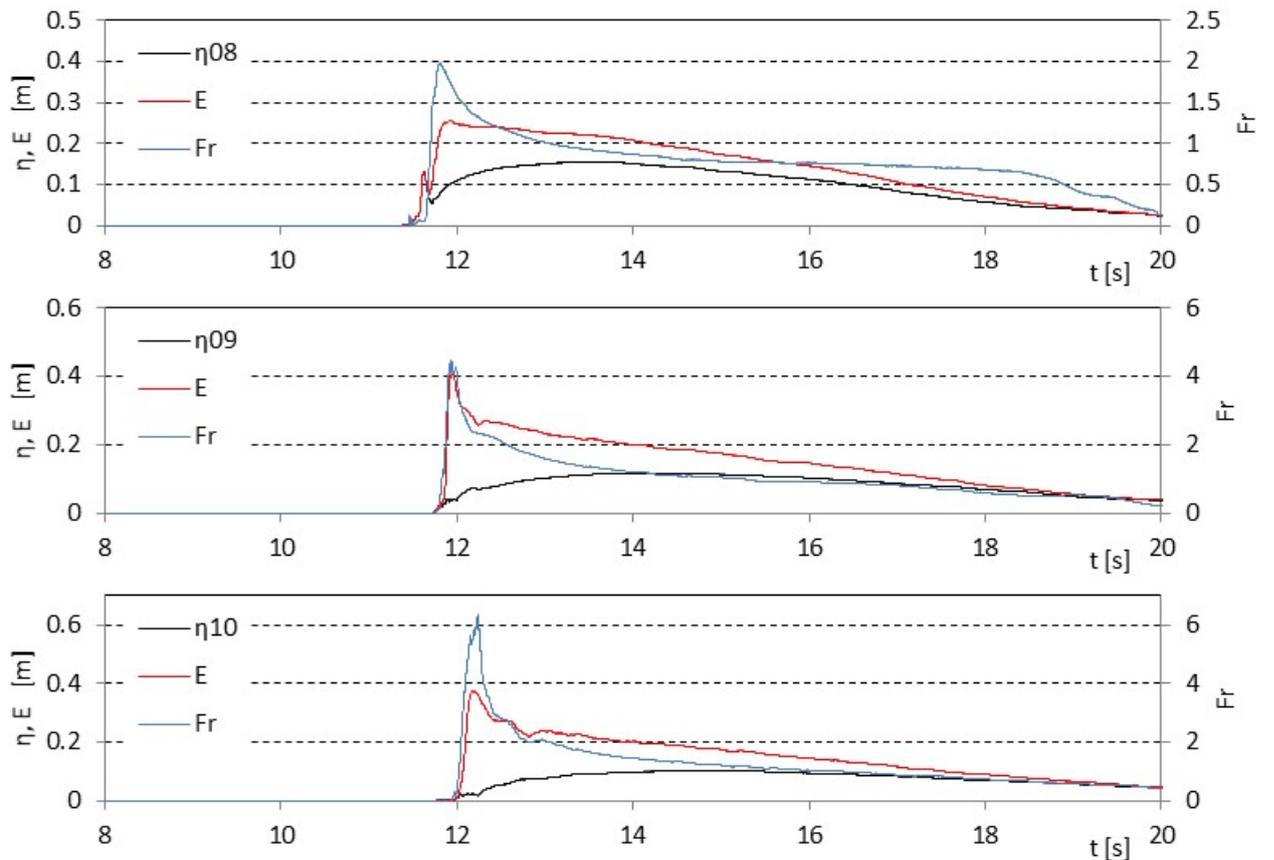


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (単純勾配, W22)

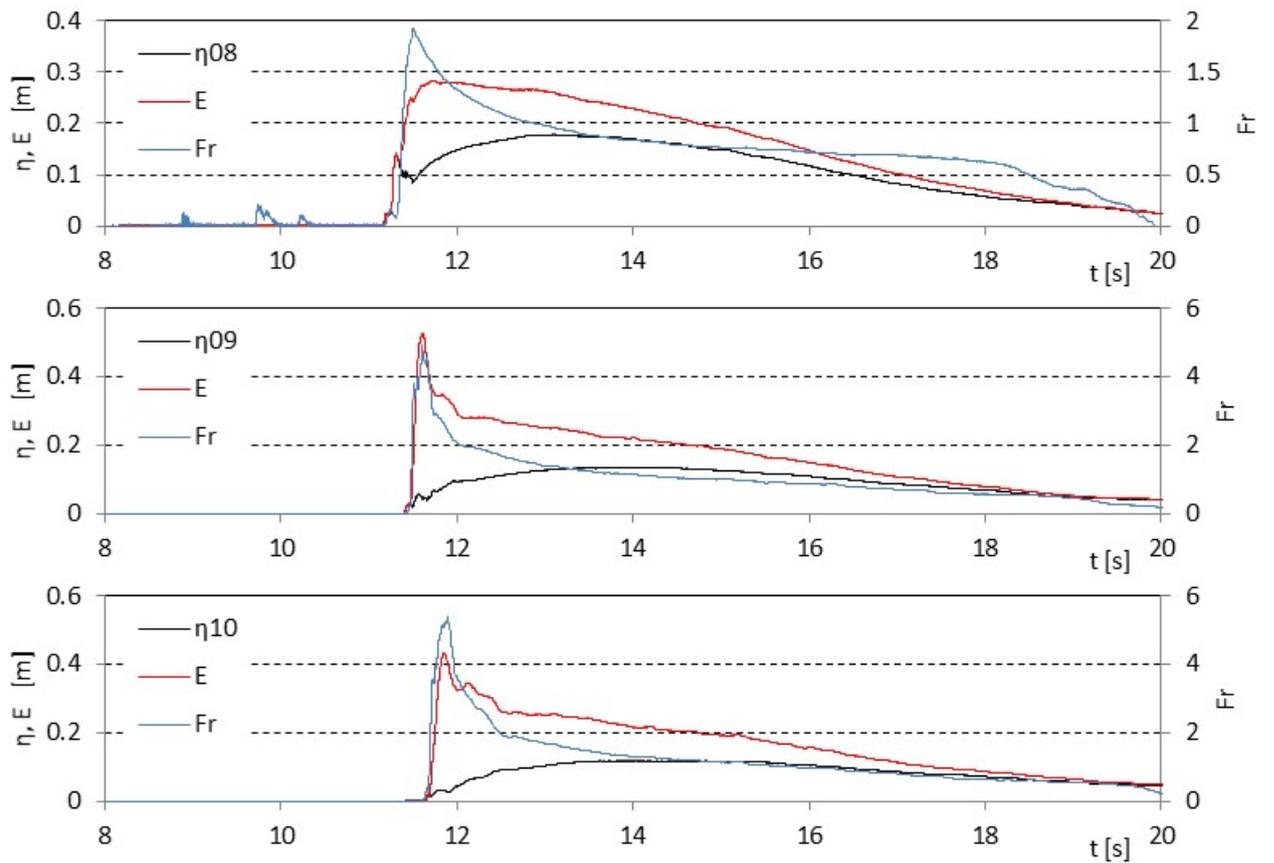


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (単純勾配, W23)

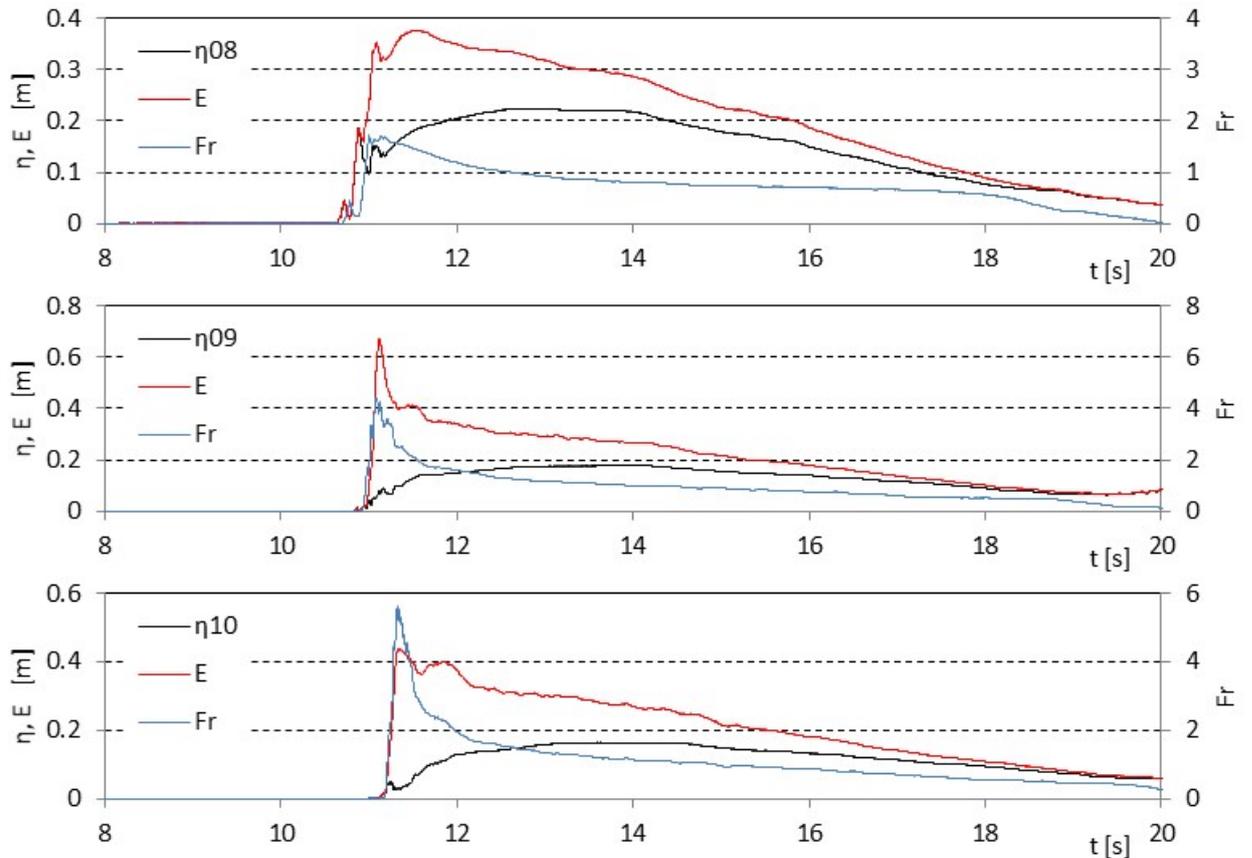


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (単純勾配, W24)

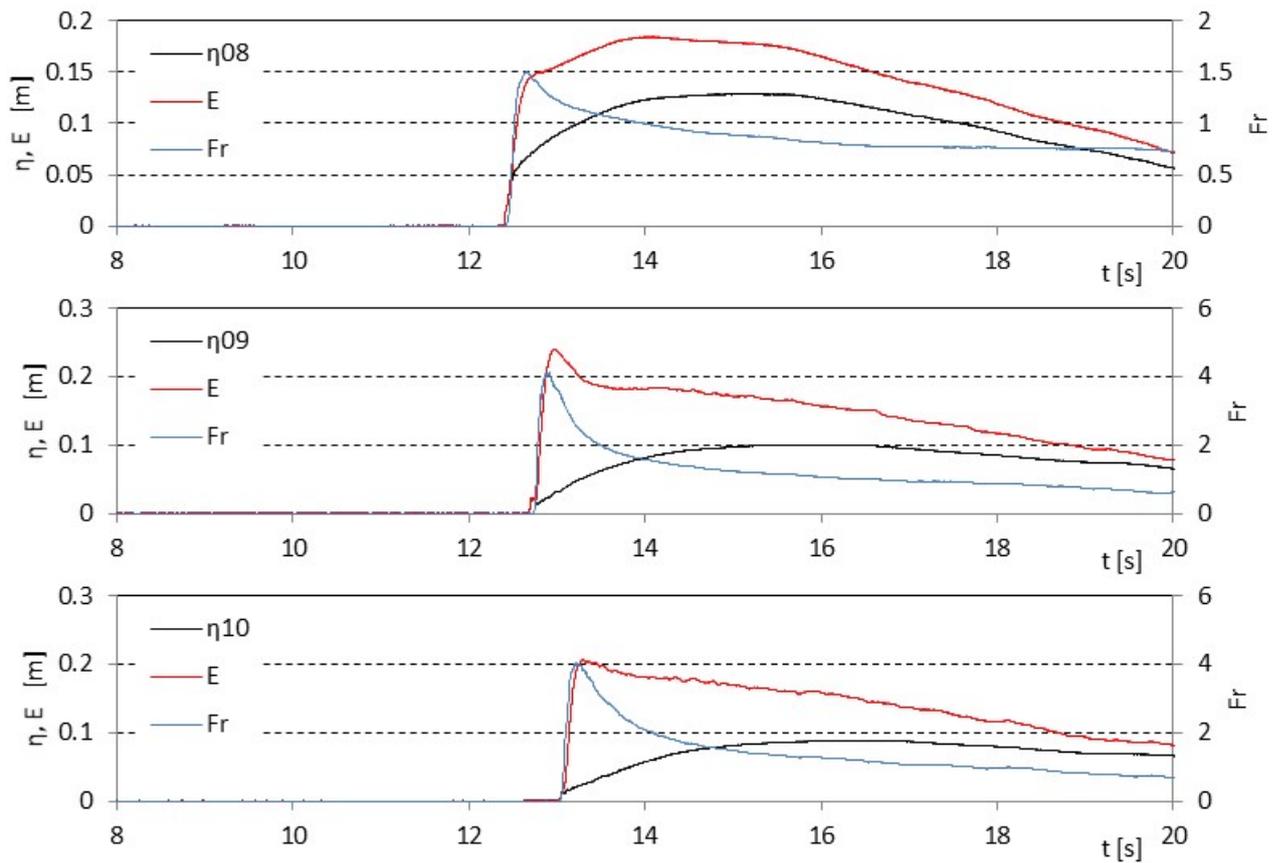


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (単純勾配, W31)

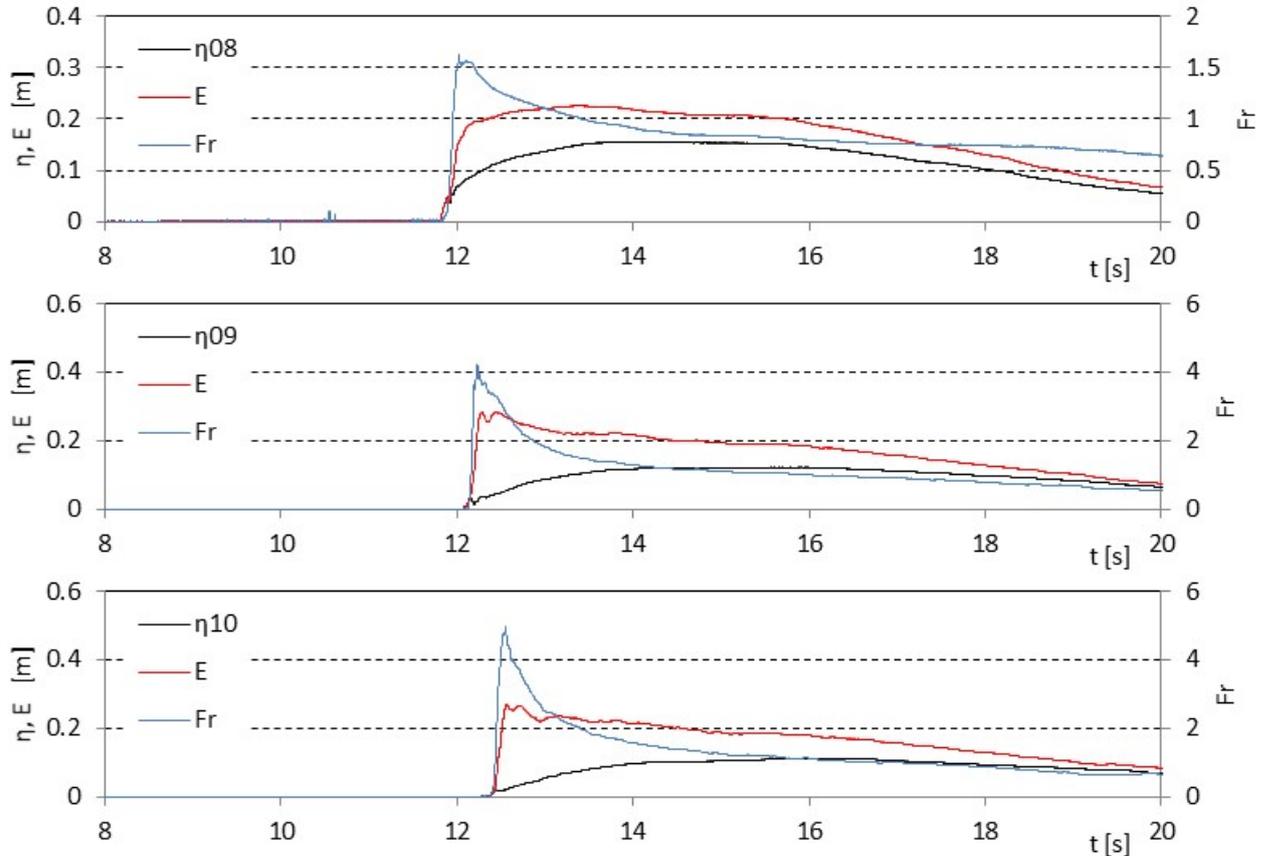


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (単純勾配, W32)

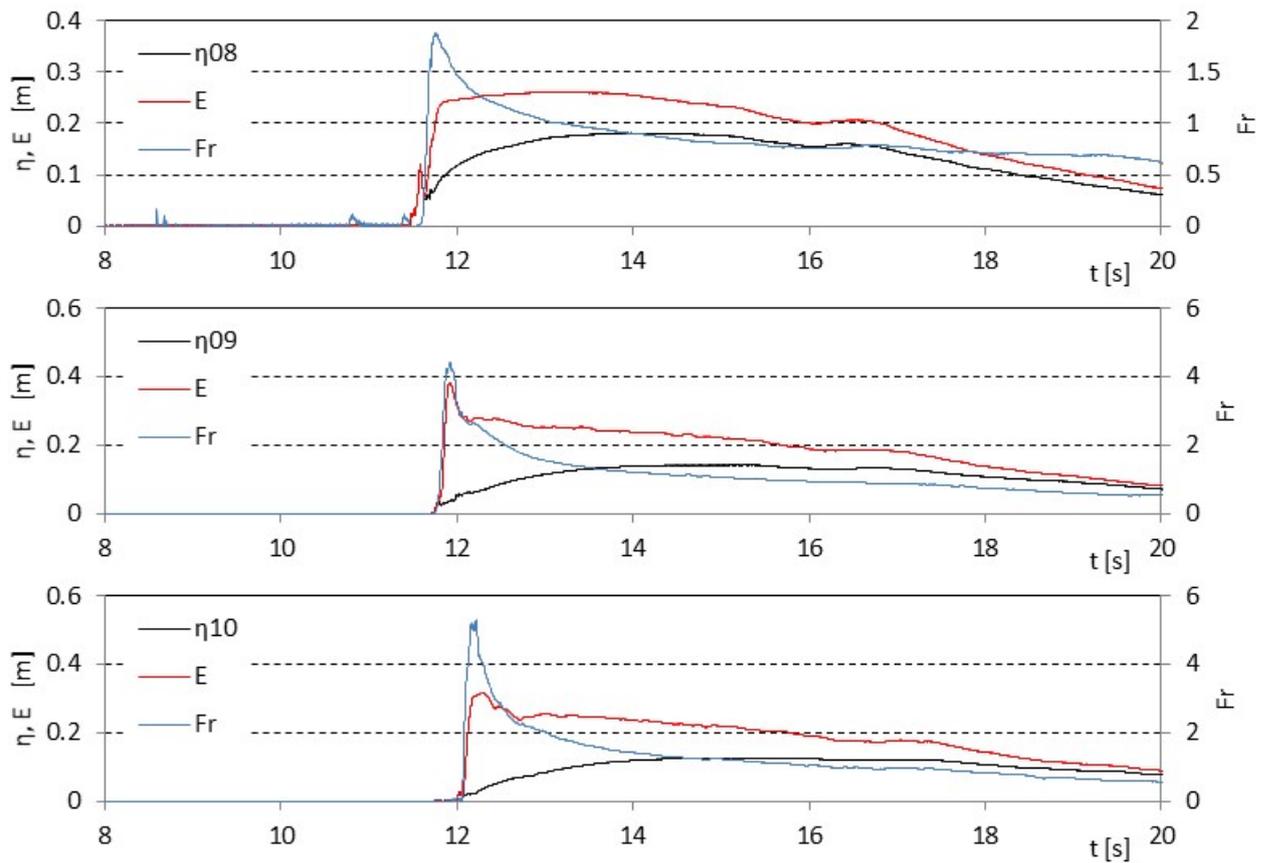


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (単純勾配, W33)

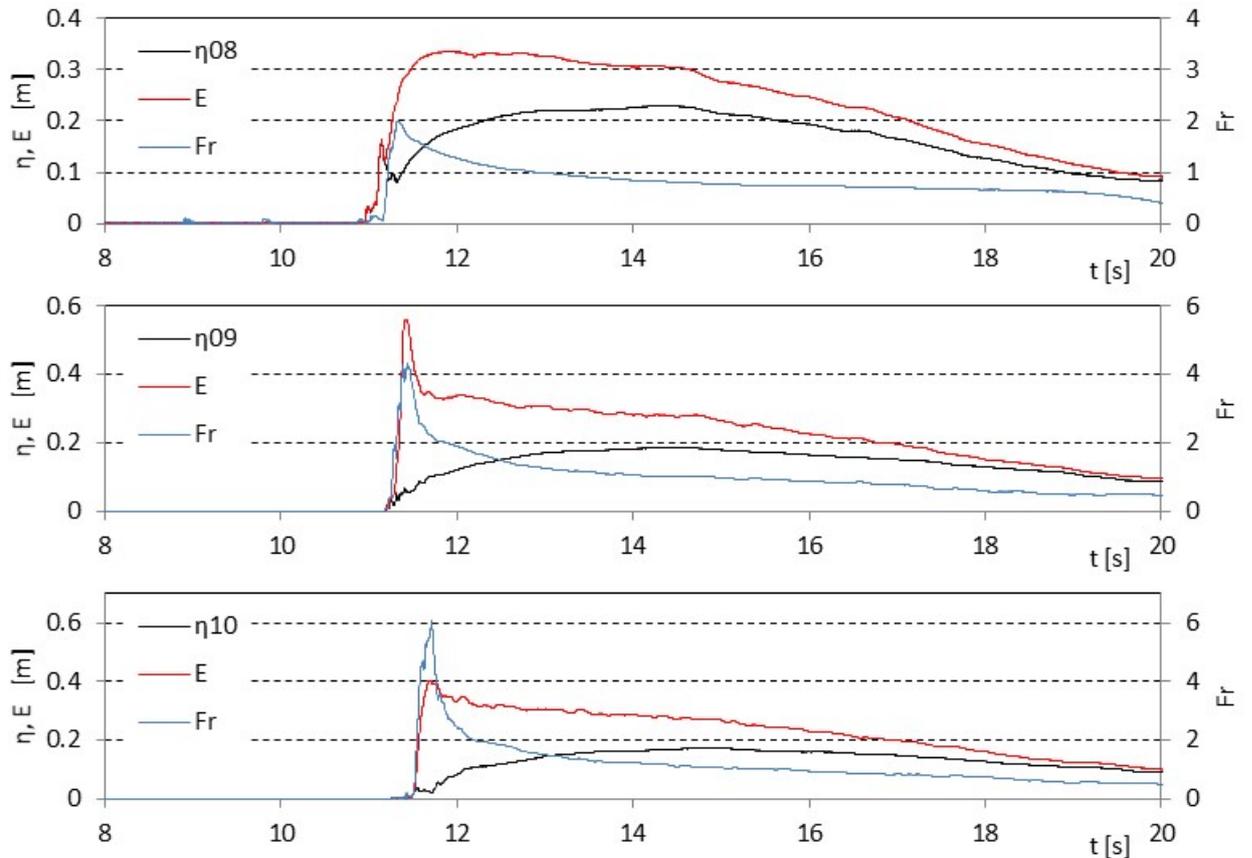


図 II.3.1-7 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (単純勾配, W34)

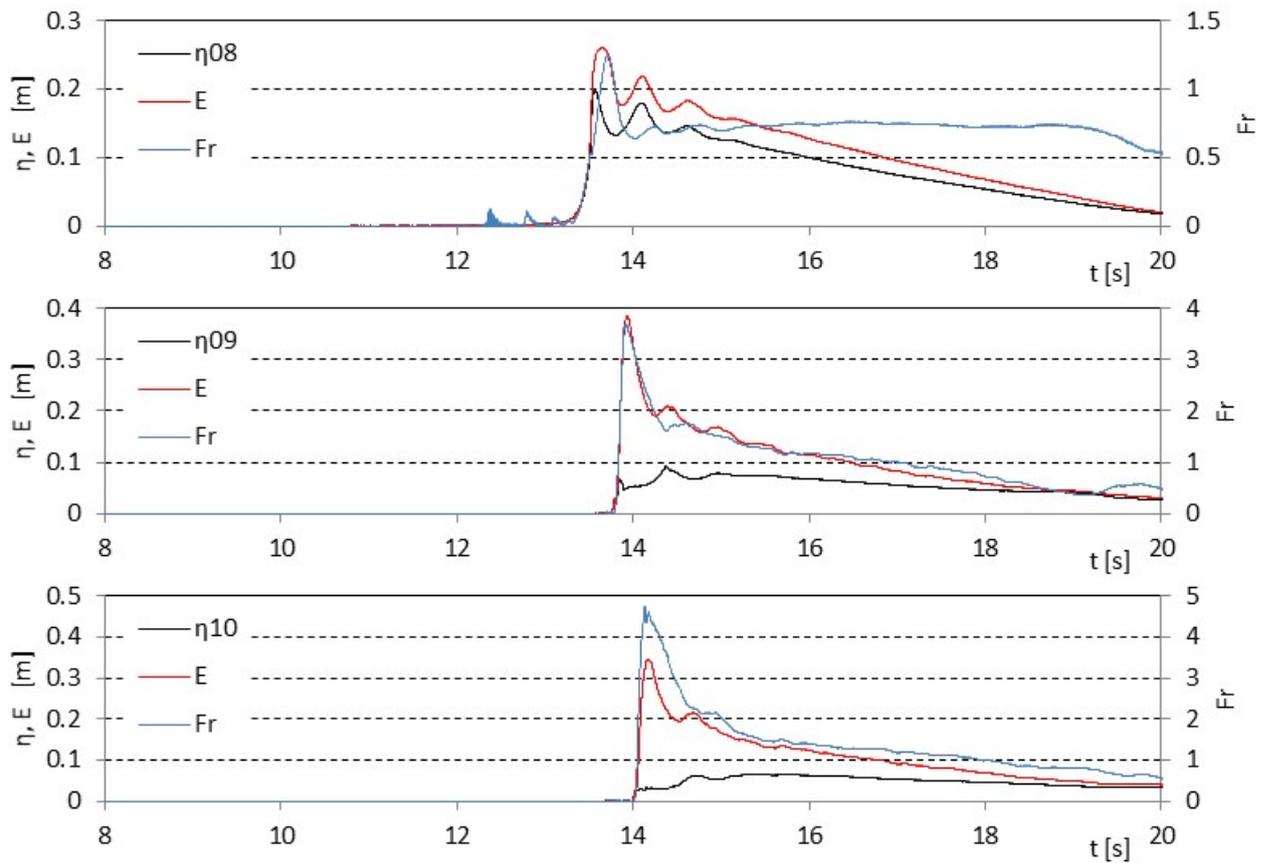


図 II.3.1-8 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (直立護岸, W11)

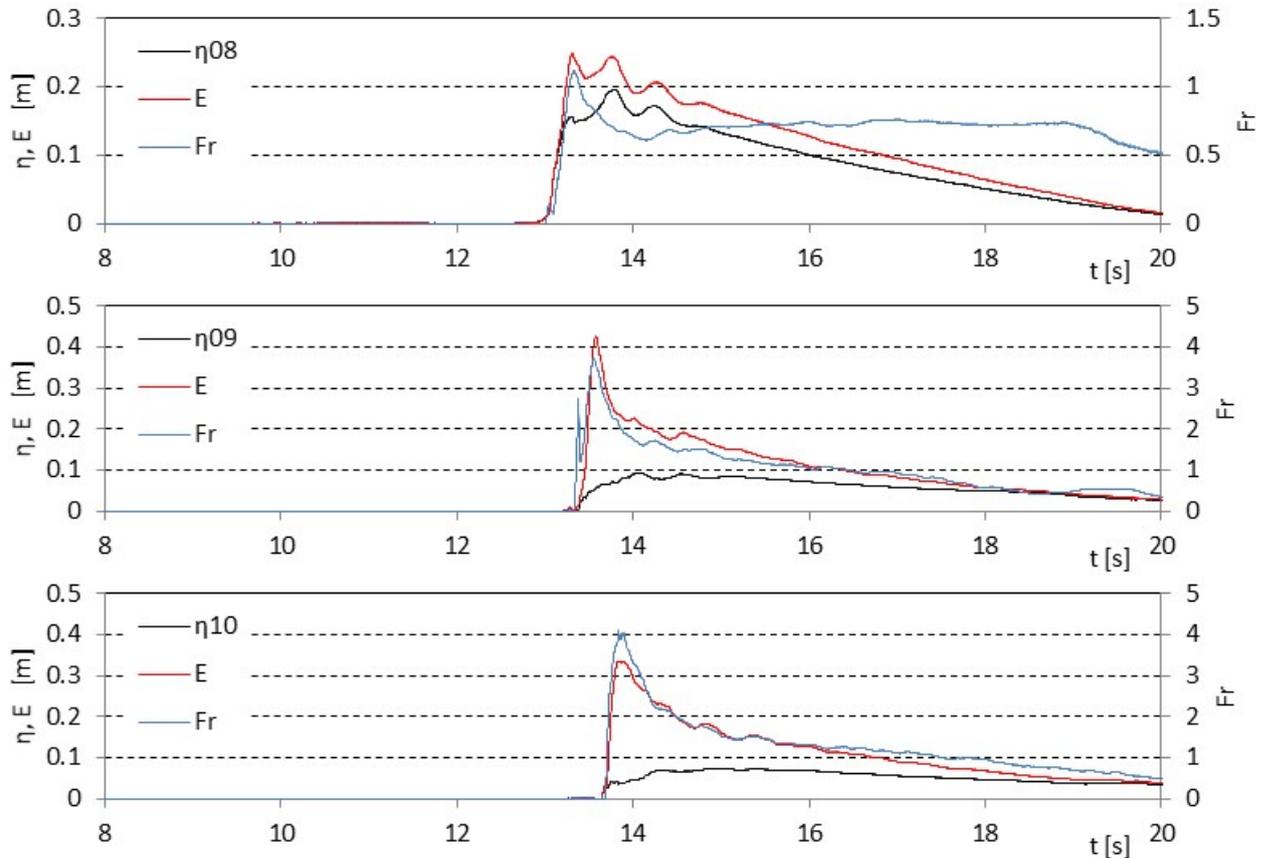


図 II.3.1-8 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (直立護岸, W12)

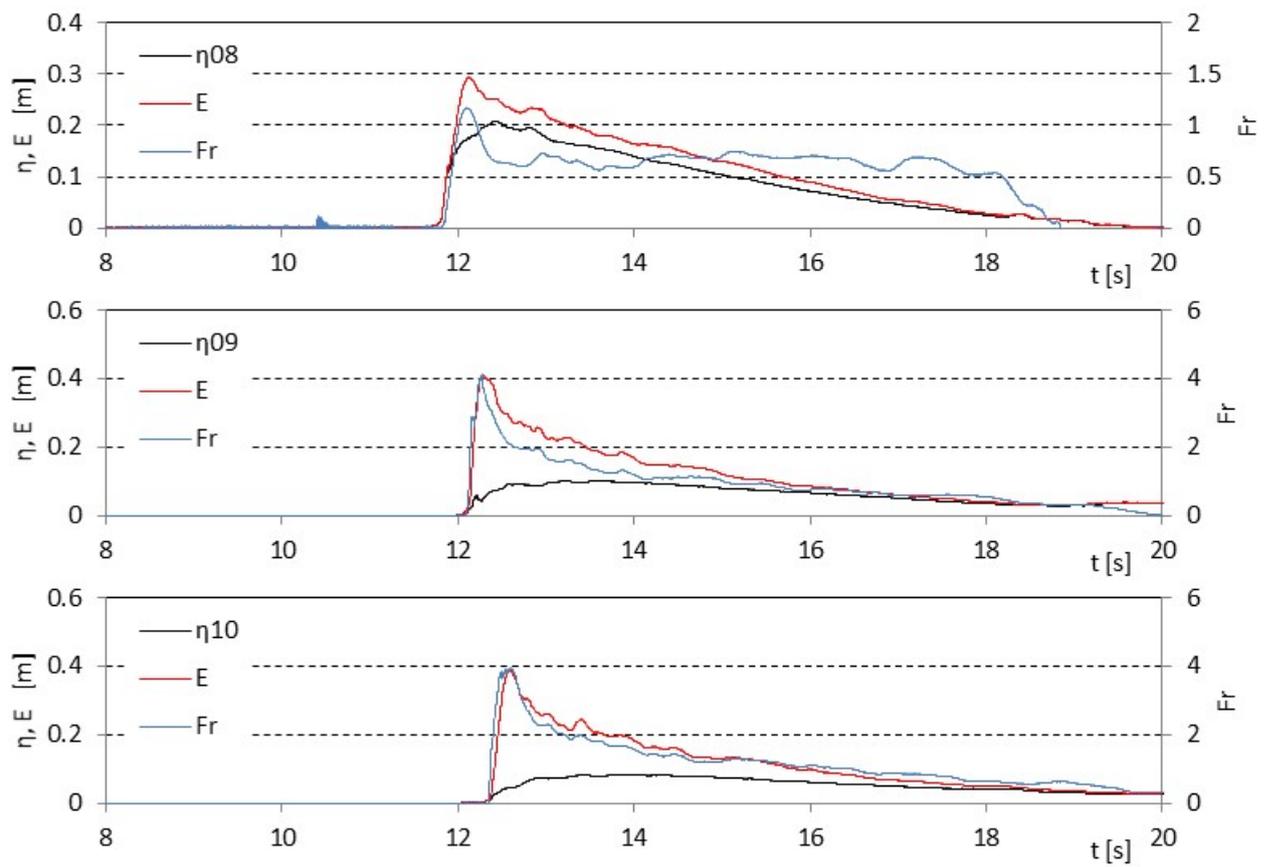


図 II.3.1-8 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (直立護岸, W13)

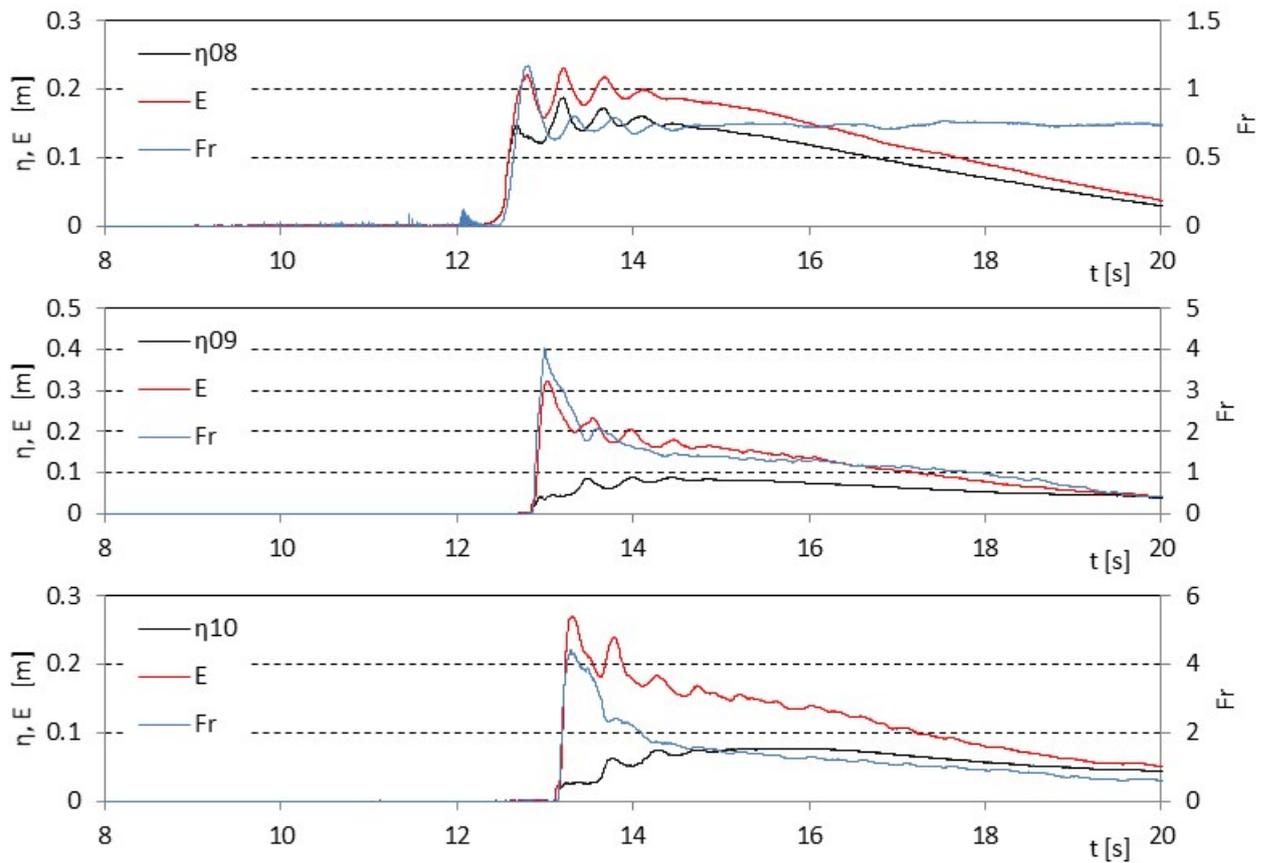


図 II.3.1-8 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (直立護岸, W21)

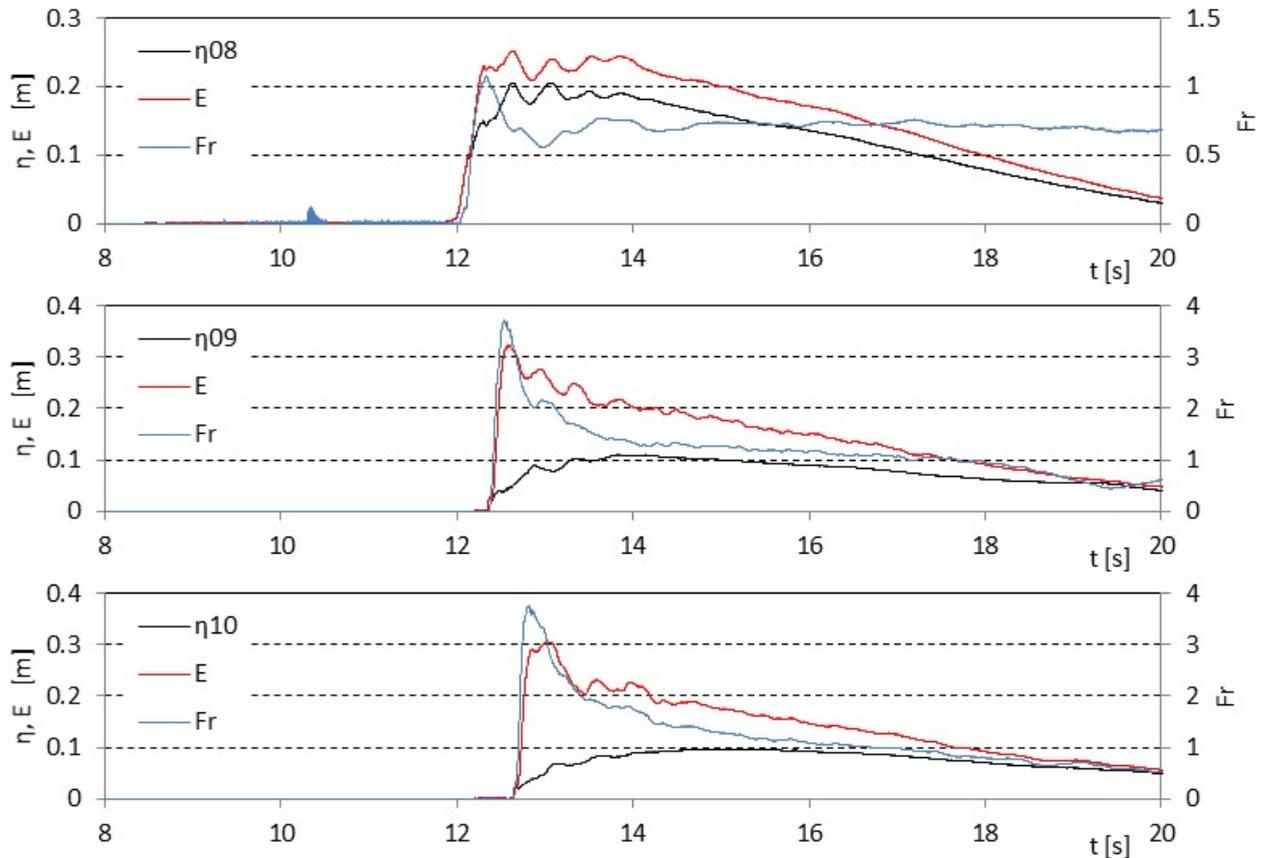


図 II.3.1-8 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (直立護岸, W22)

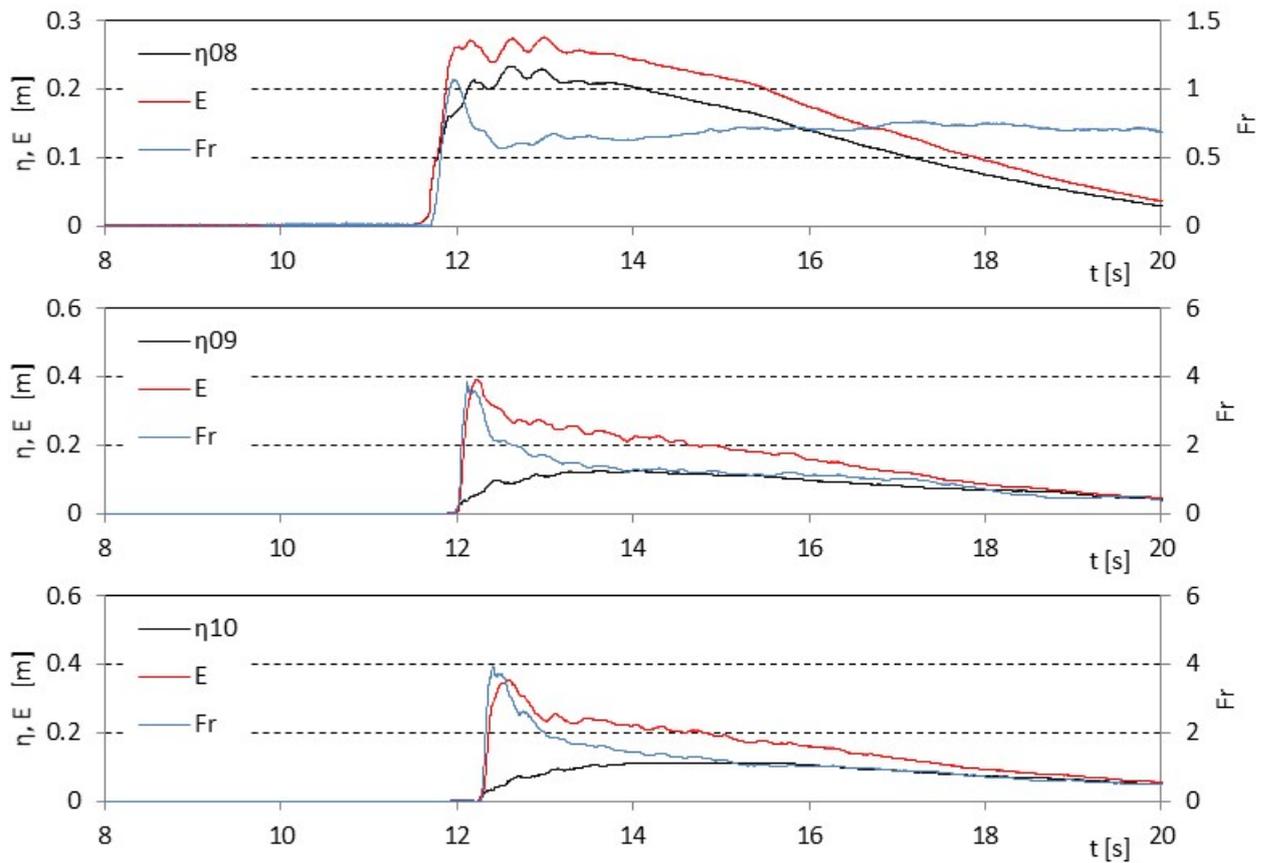


図 II.3.1-8 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (直立護岸, W23)

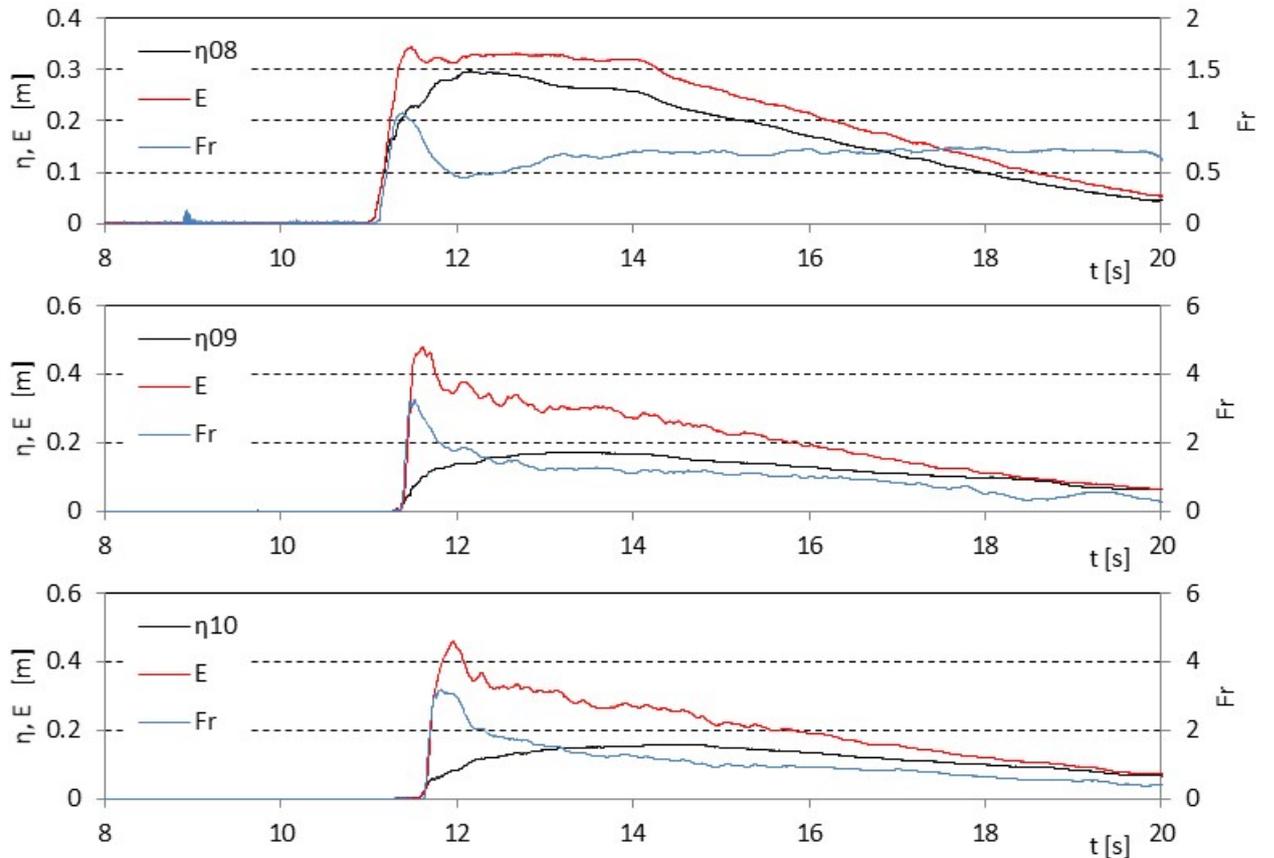


図 II.3.1-8 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (直立護岸, W24)

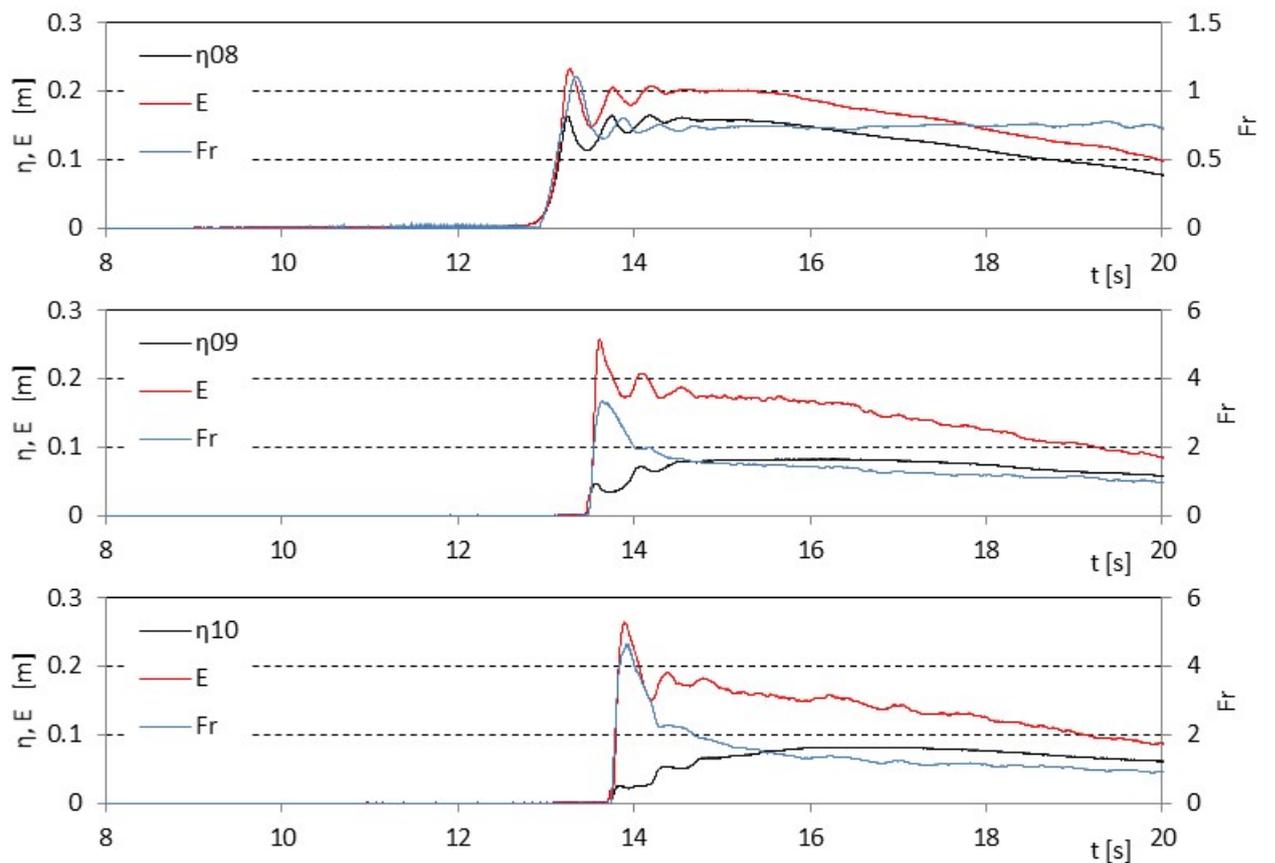


図 II.3.1-8 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (直立護岸, W31)

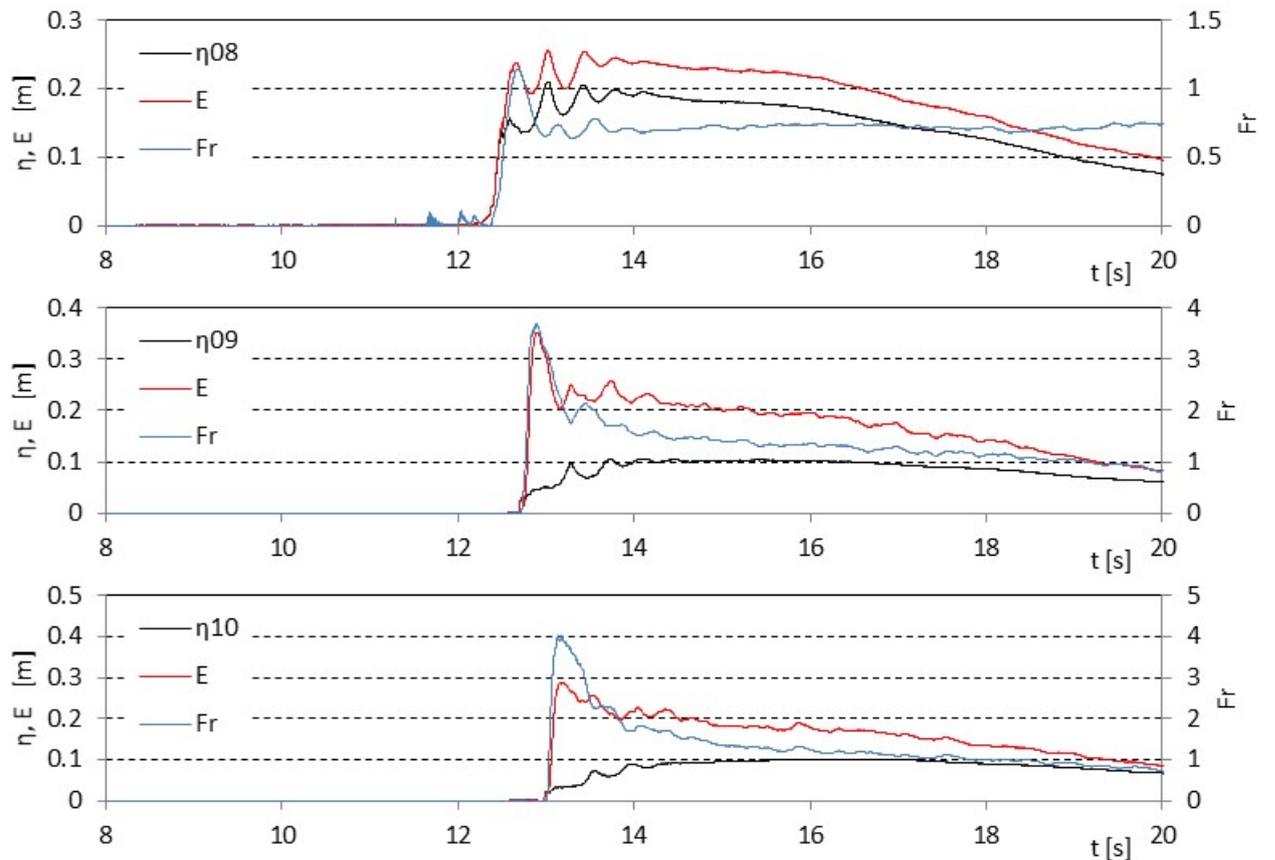


図 II.3.1-8 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (直立護岸, W32)

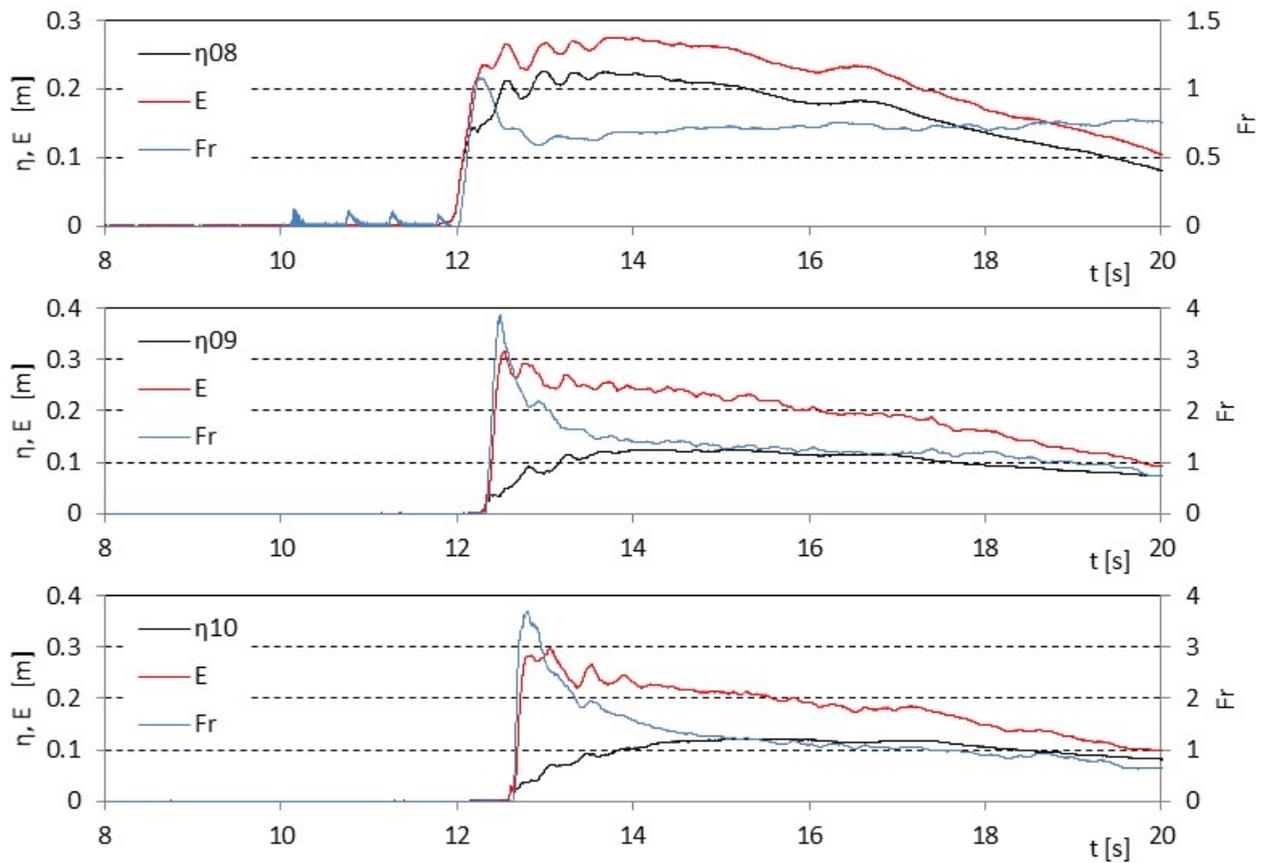


図 II.3.1-8 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (直立護岸, W33)

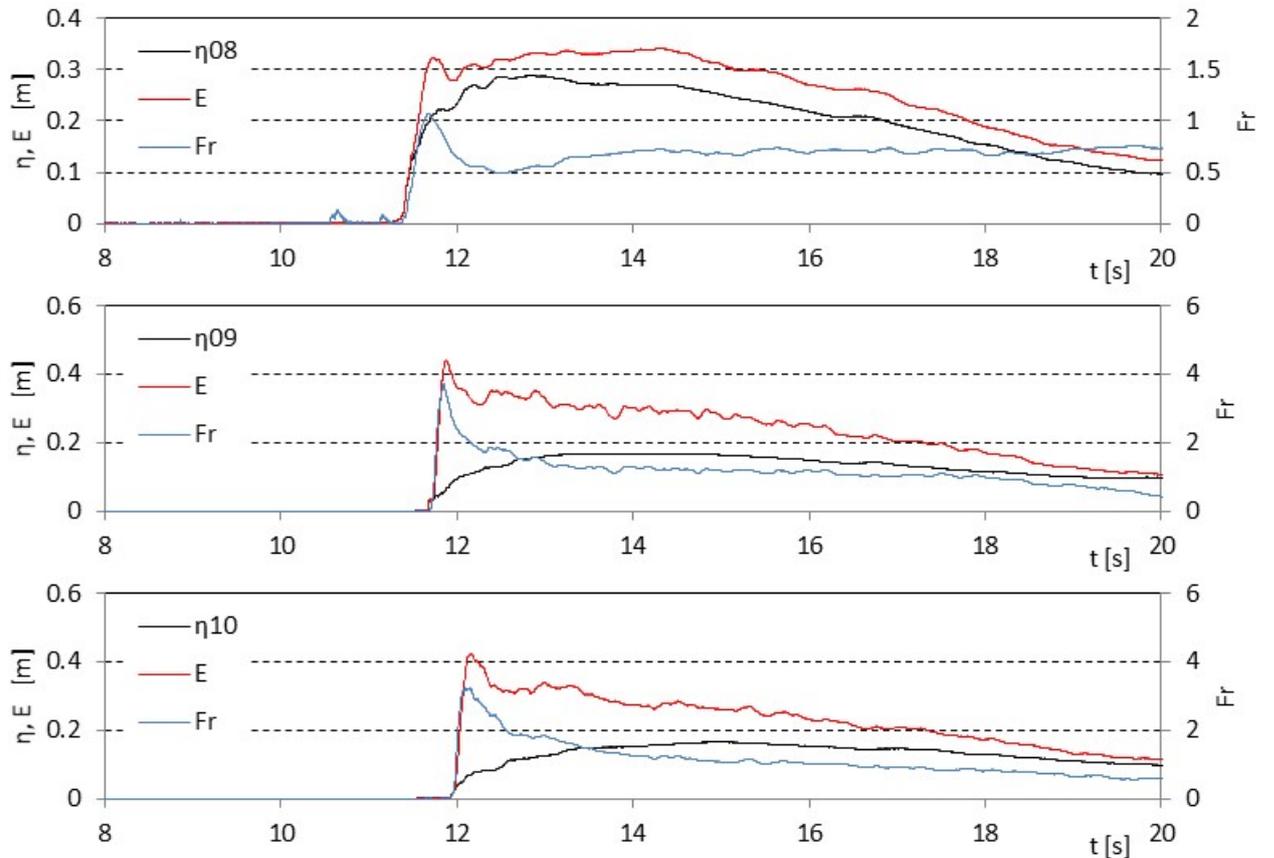


図 II.3.1-8 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (直立護岸, W34)

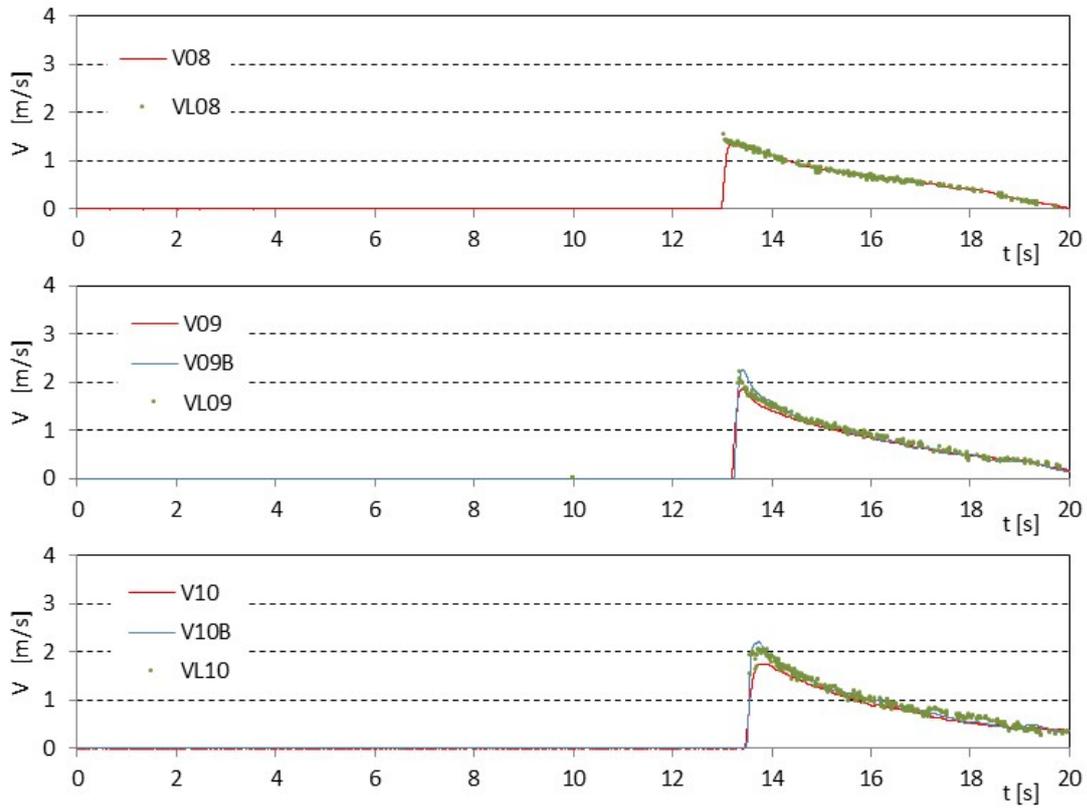


図 II.3.1-9 底面流速計，プロペラ流速計とレーザー流速計の比較（単純勾配，W11）

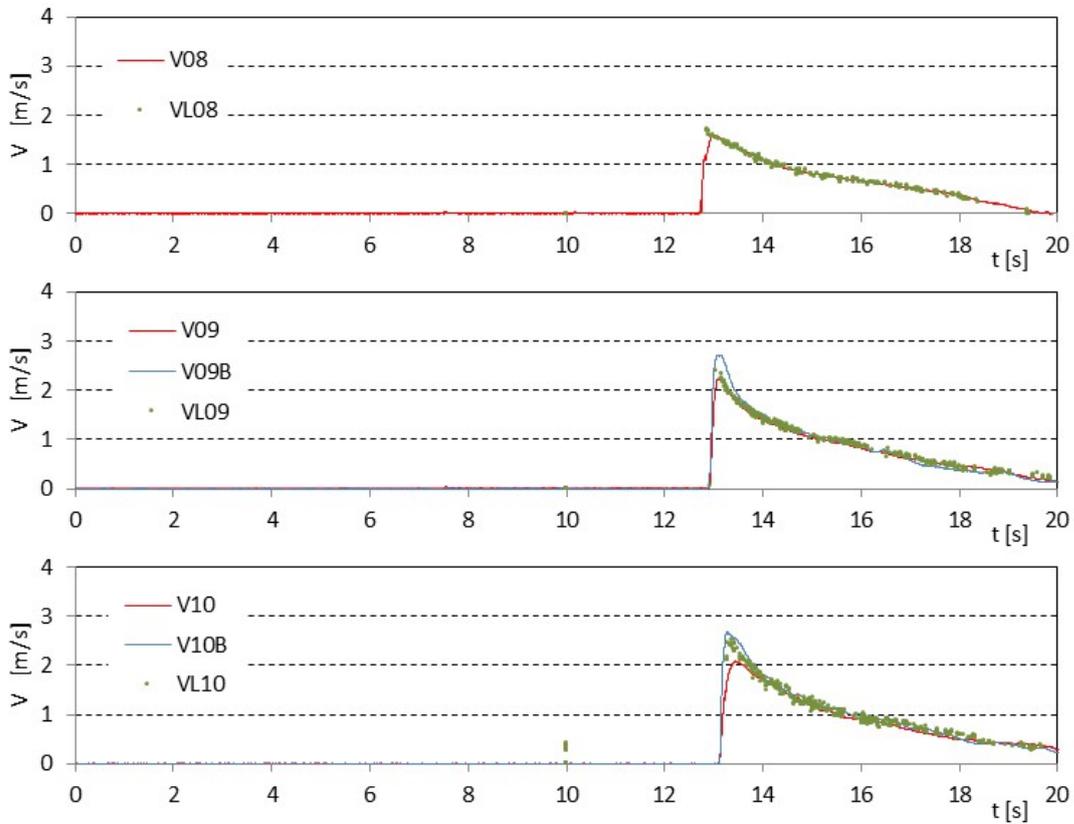


図 II.3.1-9 底面流速計，プロペラ流速計とレーザー流速計の比較（単純勾配，W12）

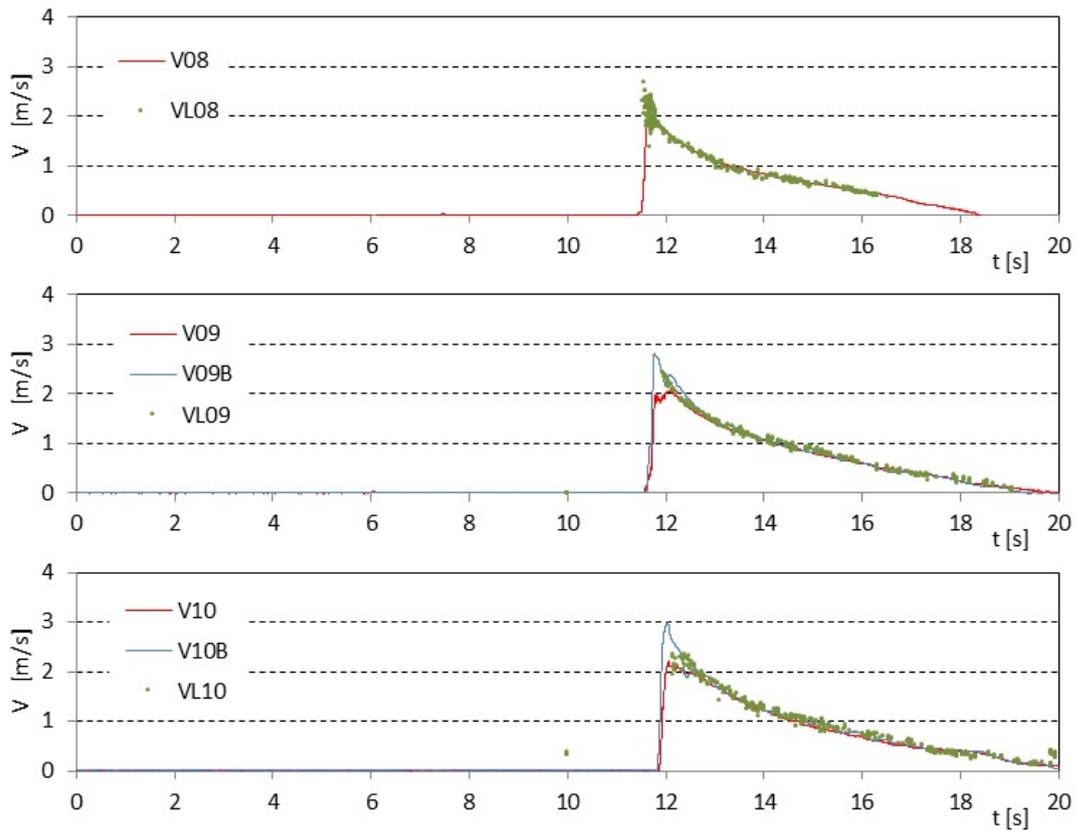


図 II.3.1-9 底面流速計，プロペラ流速計とレーザー流速計の比較（単純勾配，W13）

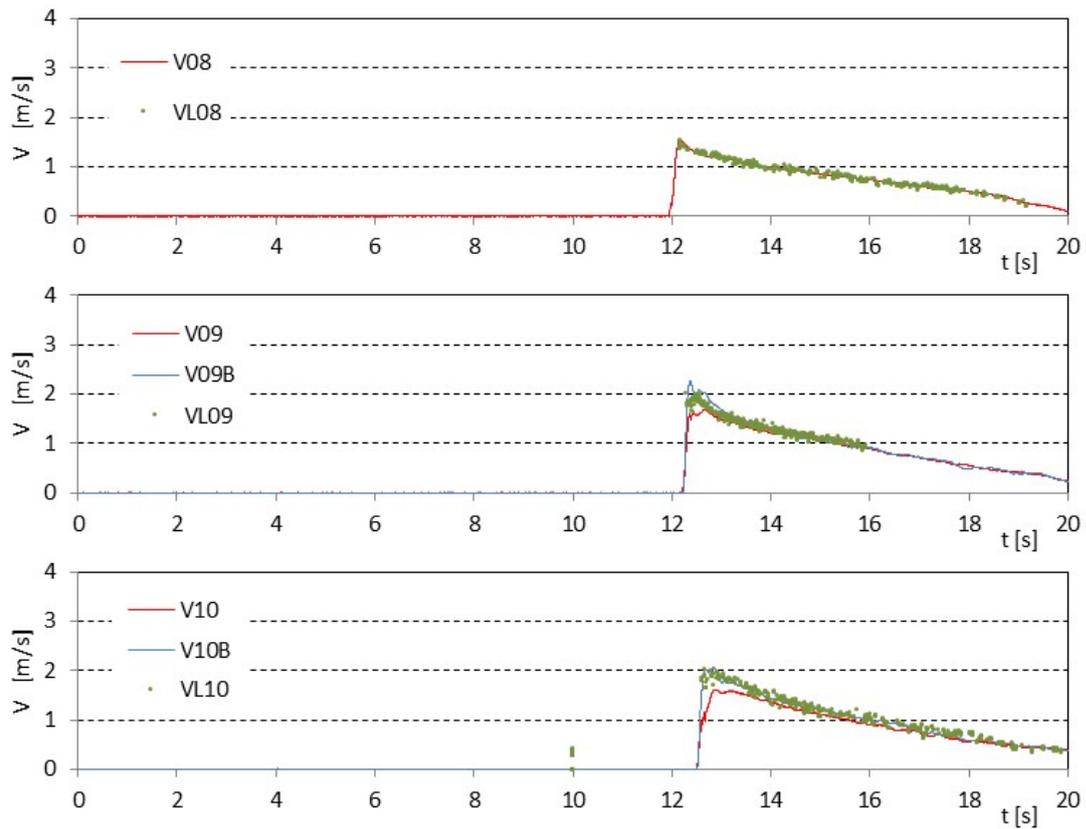


図 II.3.1-9 底面流速計，プロペラ流速計とレーザー流速計の比較（単純勾配，W21）

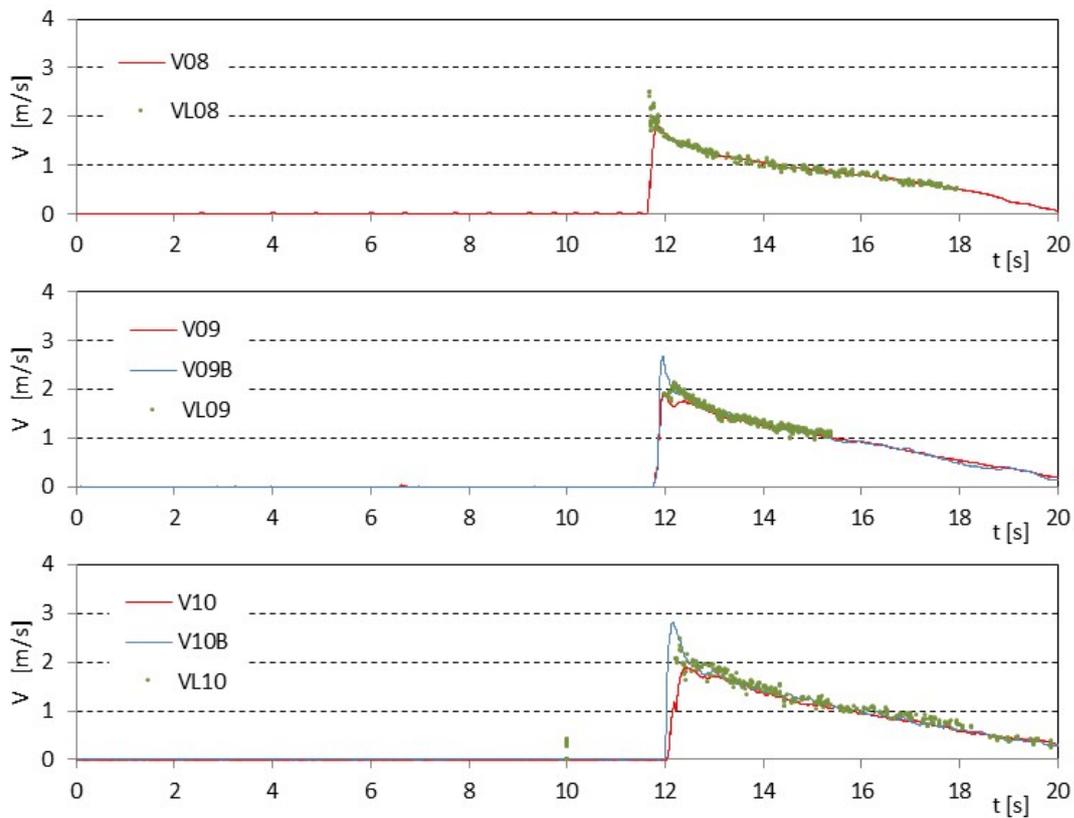


図 II.3.1-9 底面流速計，プロペラ流速計とレーザー流速計の比較（単純勾配，W22）

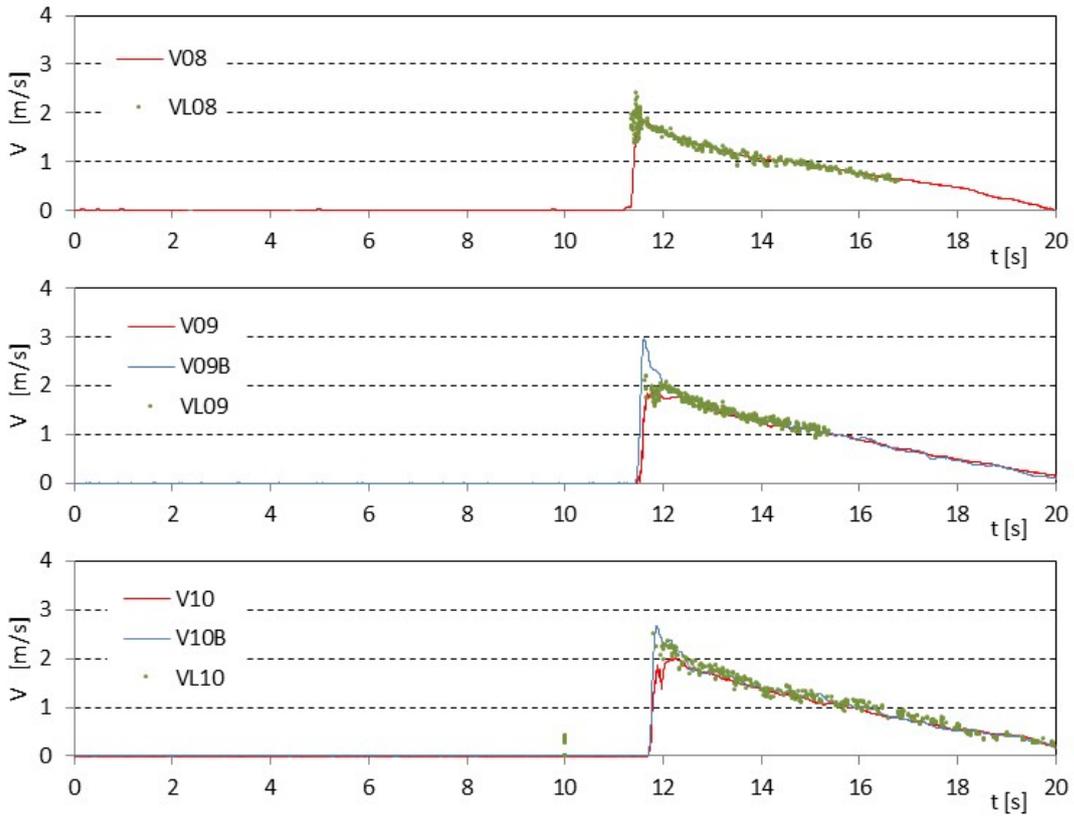


図 II.3.1-9 底面流速計，プロペラ流速計とレーザー流速計の比較（単純勾配，W23）

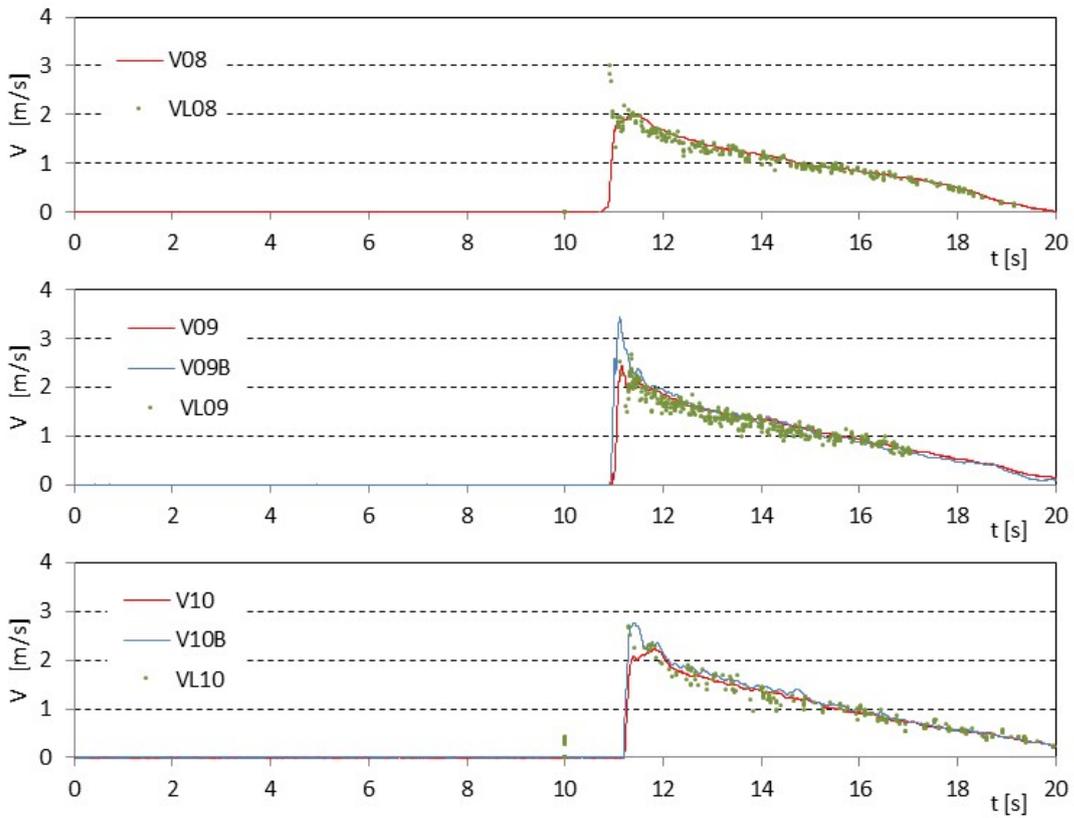


図 II.3.1-9 底面流速計，プロペラ流速計とレーザー流速計の比較（単純勾配，W24）

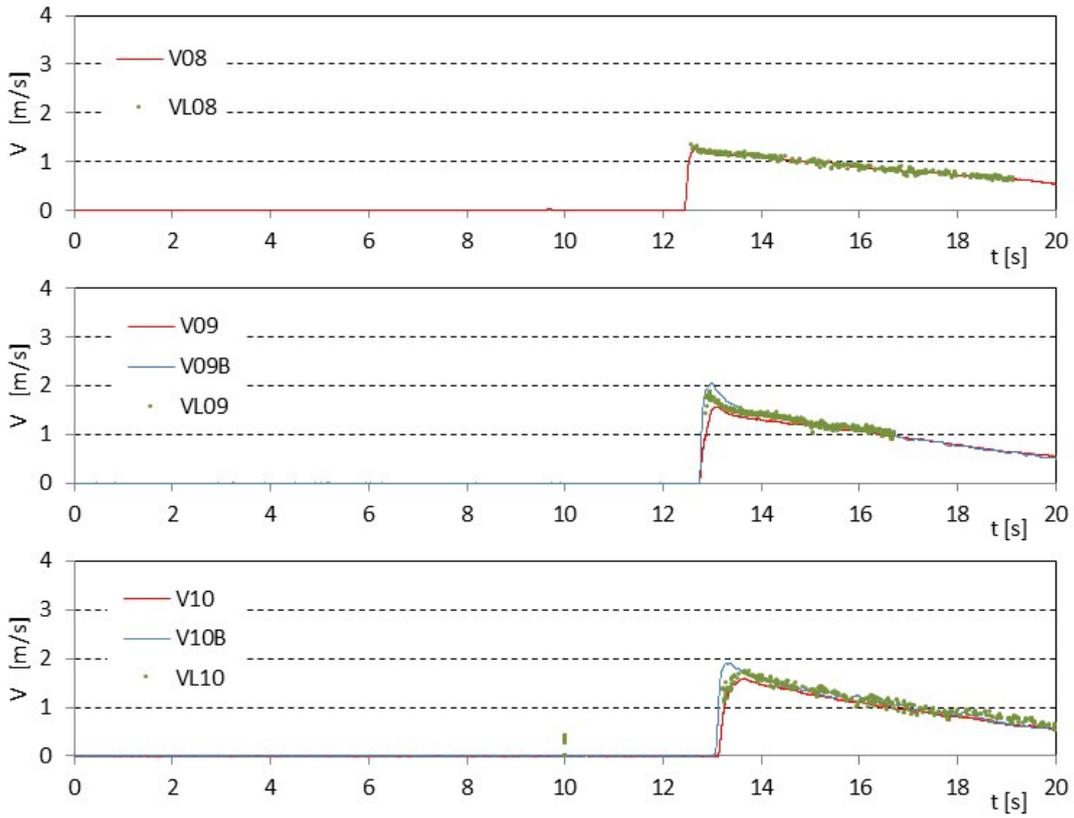


図 II.3.1-9 底面流速計，プロペラ流速計とレーザー流速計の比較（単純勾配，W31）

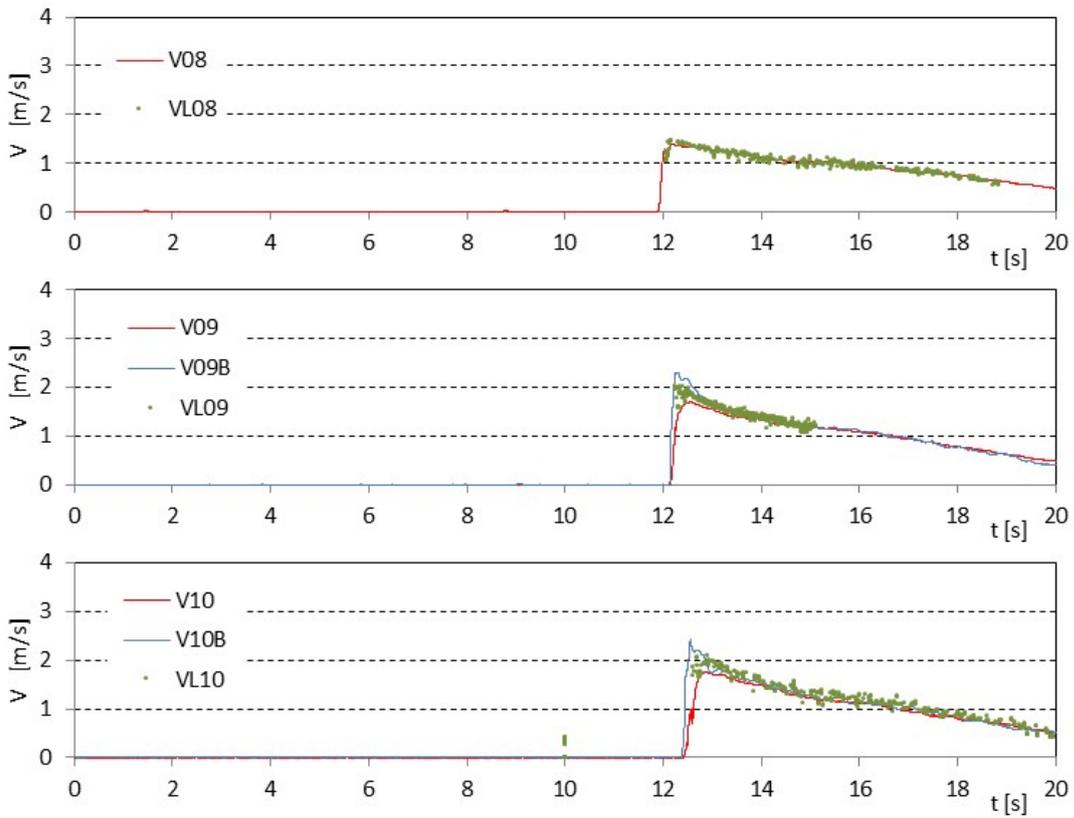


図 II.3.1-9 底面流速計，プロペラ流速計とレーザー流速計の比較（単純勾配，W32）

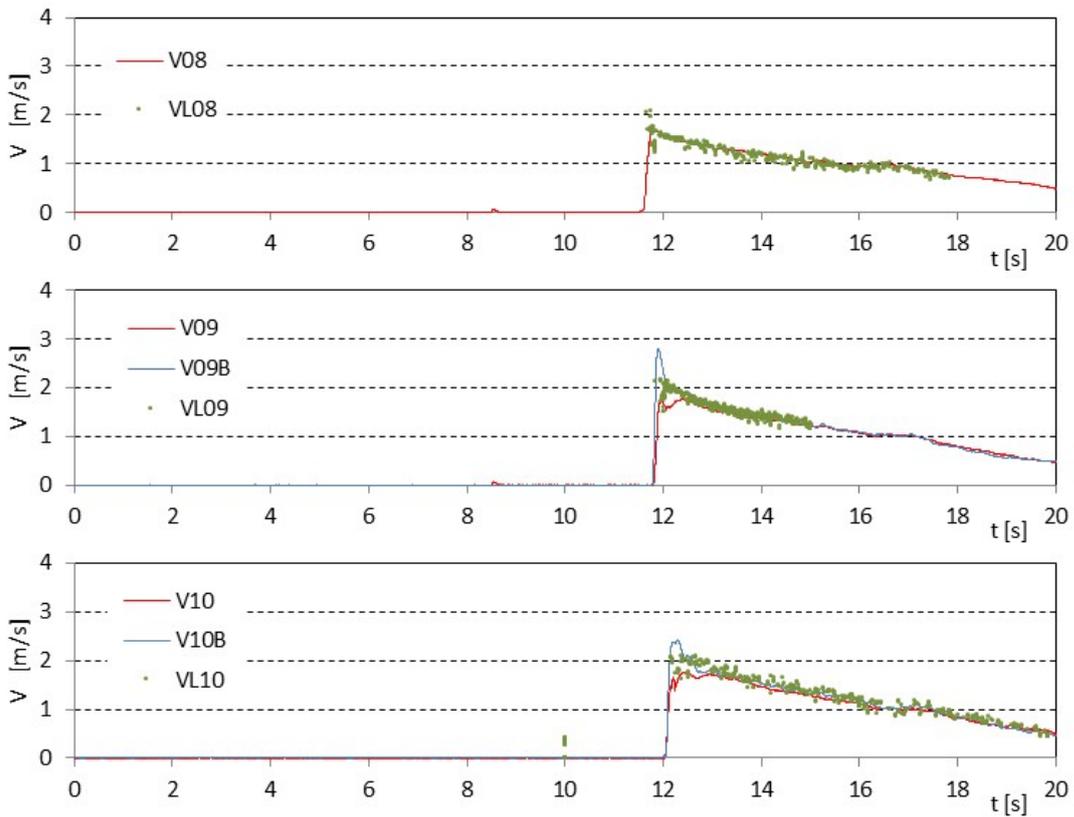


図 II.3.1-9 底面流速計，プロペラ流速計とレーザー流速計の比較（単純勾配，W33）

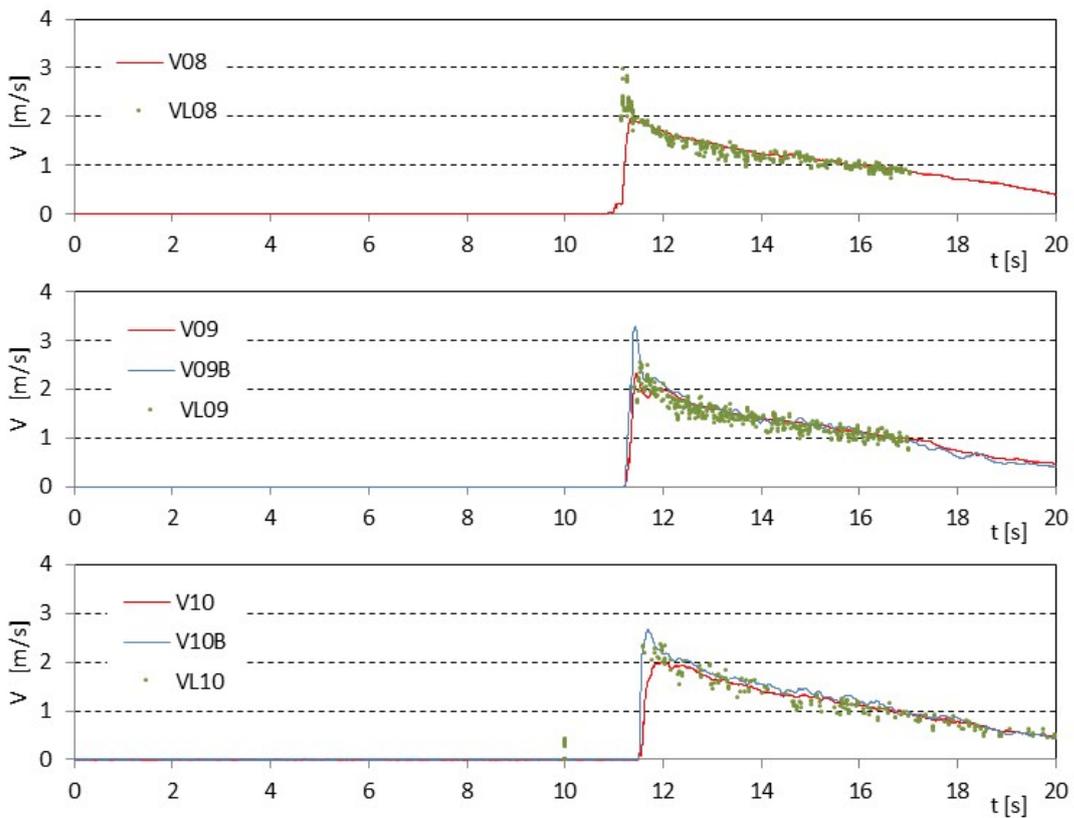


図 II.3.1-9 底面流速計，プロペラ流速計とレーザー流速計の比較（単純勾配，W34）

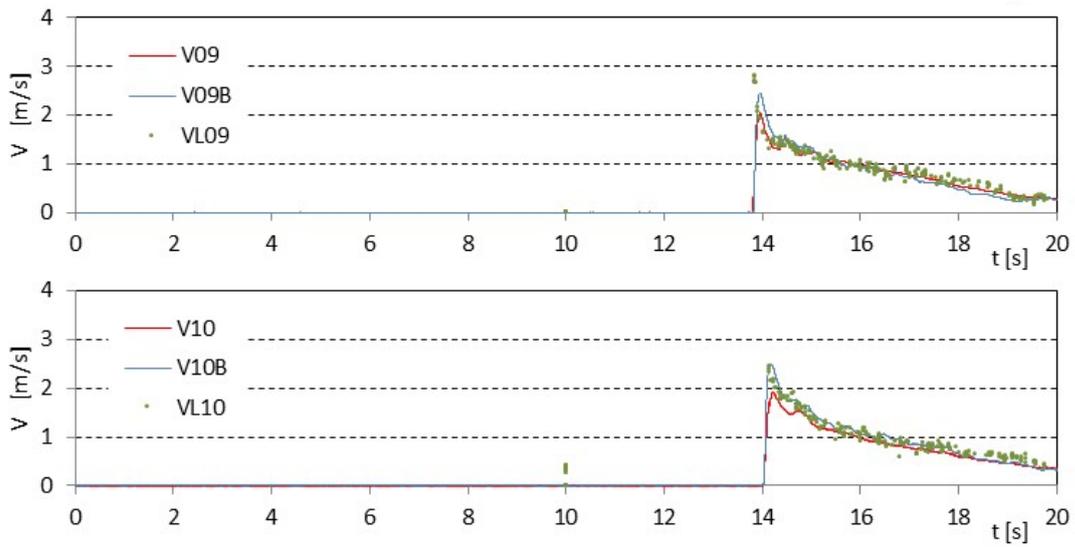


図 II.3.1-10 底面流速計，プロペラ流速計とレーザー流速計の比較（直立護岸，W11）

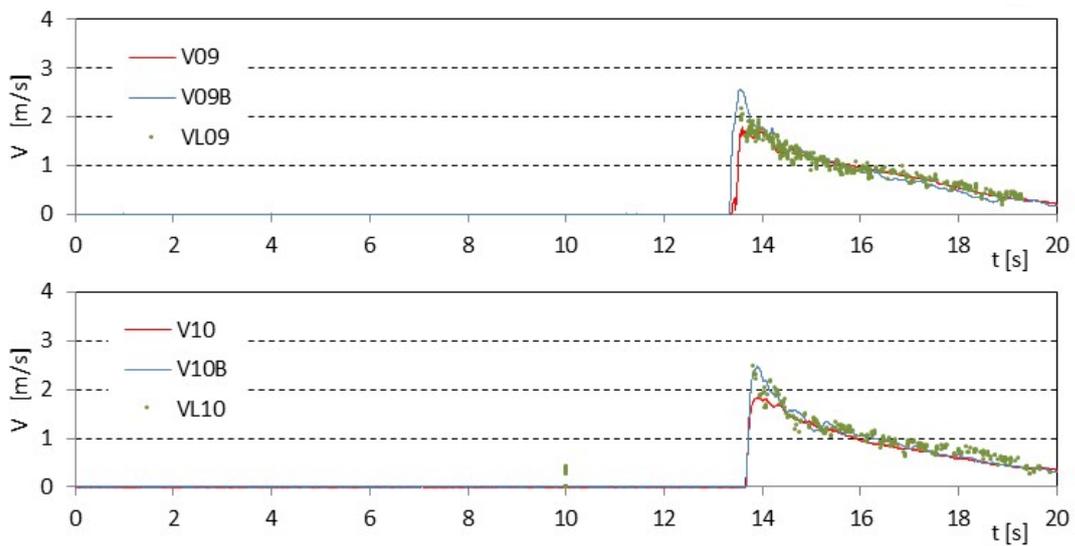


図 II.3.1-10 底面流速計，プロペラ流速計とレーザー流速計の比較（直立護岸，W12）

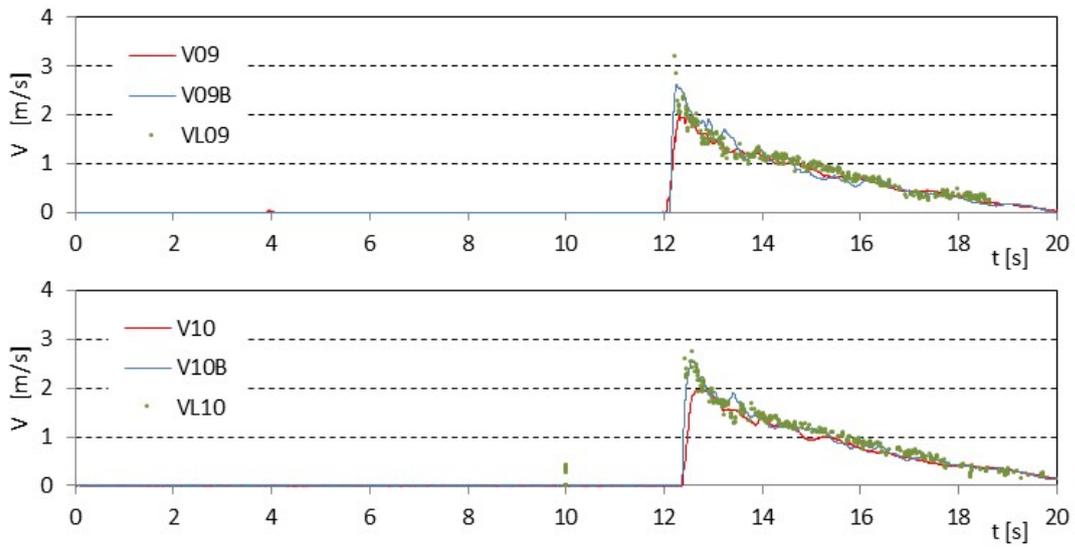


図 II.3.1-10 底面流速計，プロペラ流速計とレーザー流速計の比較（直立護岸，W13）

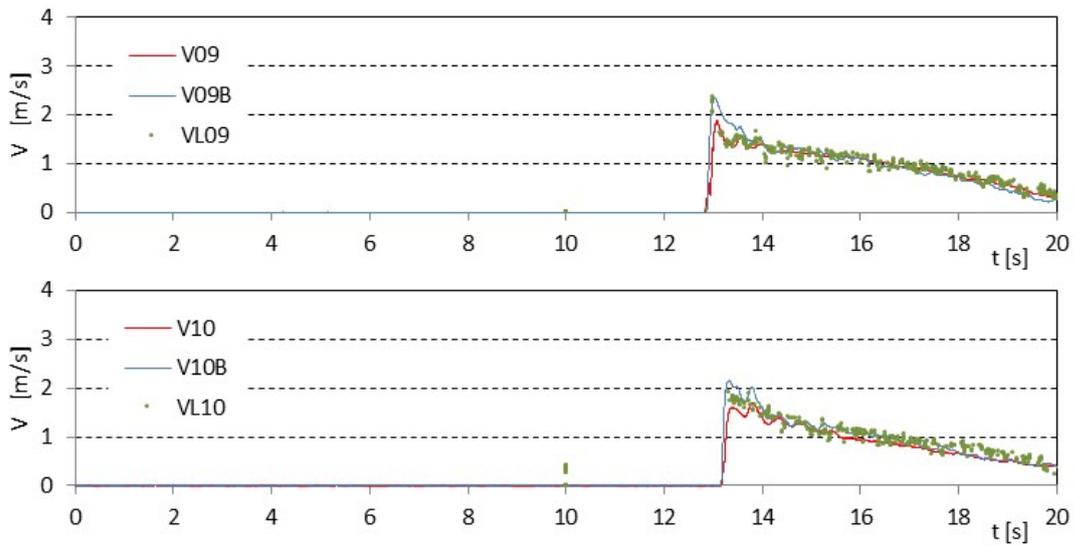


図 II.3.1-10 底面流速計，プロペラ流速計とレーザー流速計の比較（直立護岸，W21）

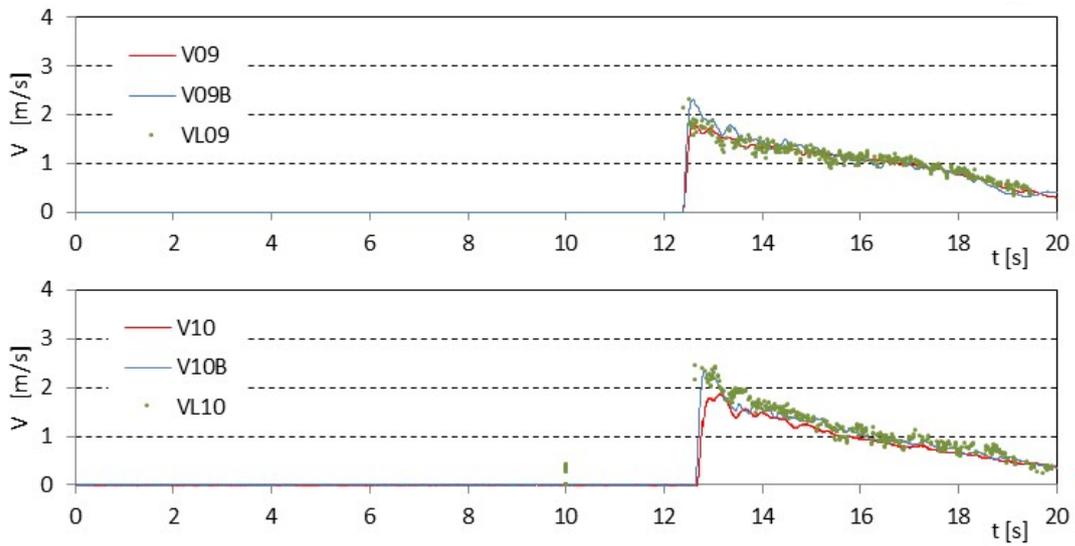


図 II.3.1-10 底面流速計，プロペラ流速計とレーザー流速計の比較（直立護岸，W22）

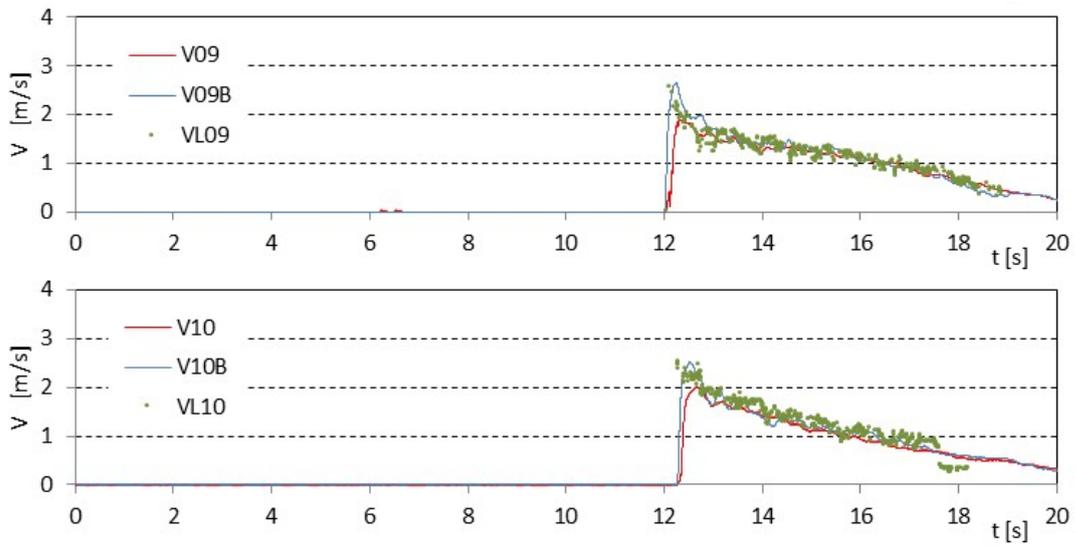


図 II.3.1-10 底面流速計，プロペラ流速計とレーザー流速計の比較（直立護岸，W23）

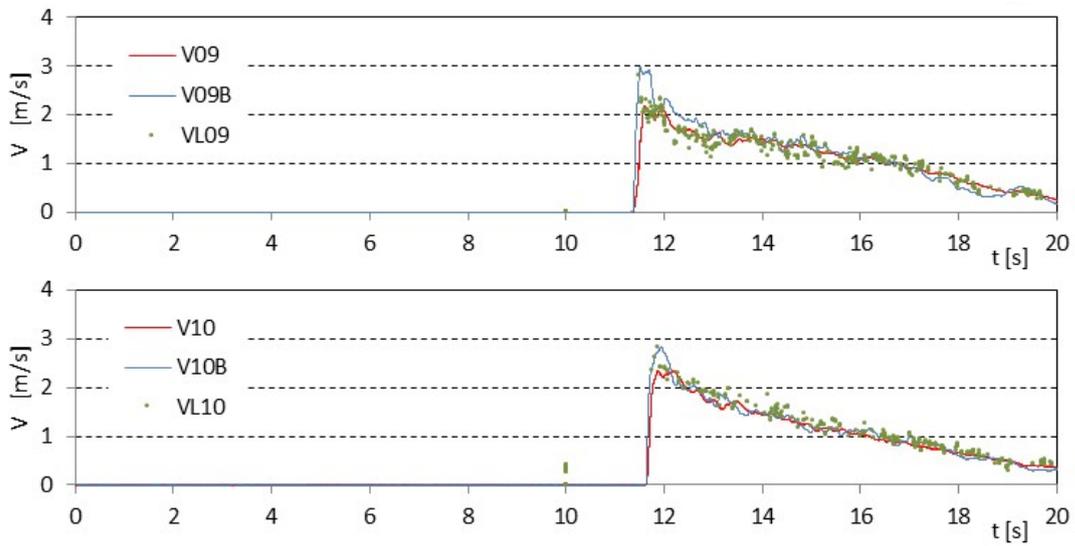


図 II.3.1-10 底面流速計，プロペラ流速計とレーザー流速計の比較（直立護岸，W24）

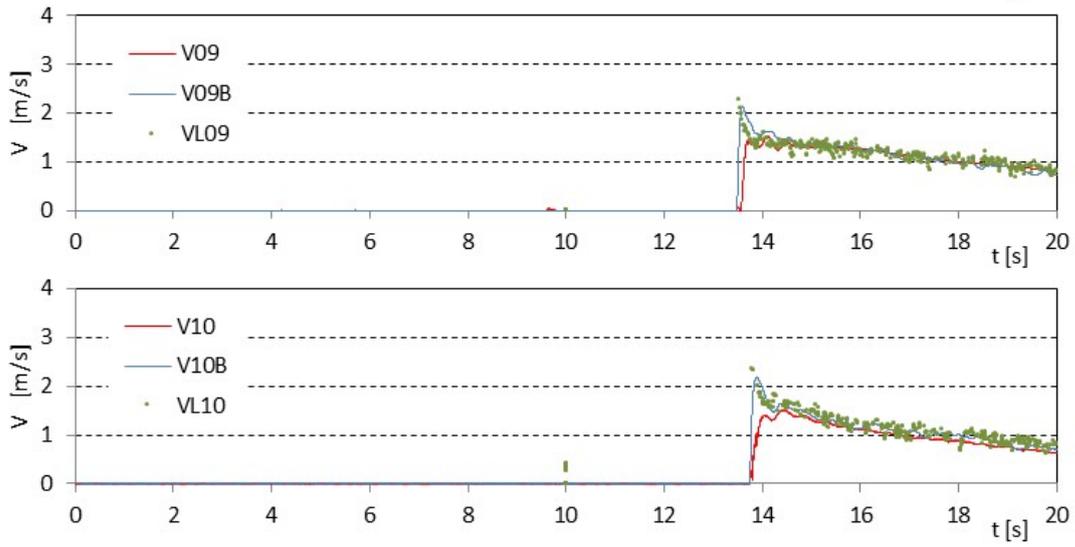


図 II.3.1-10 底面流速計，プロペラ流速計とレーザー流速計の比較（直立護岸，W31）

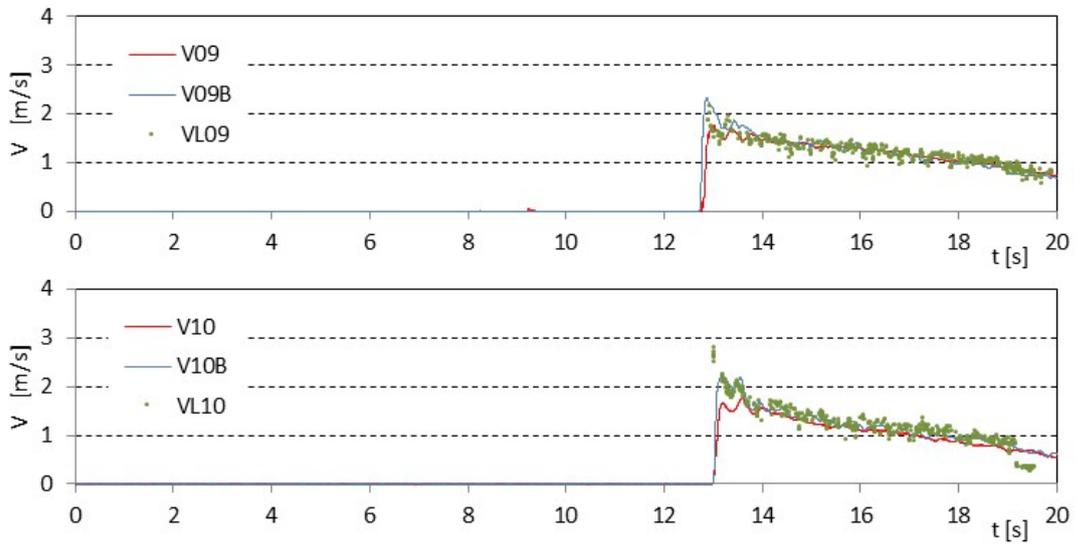


図 II.3.1-10 底面流速計，プロペラ流速計とレーザー流速計の比較（直立護岸，W32）

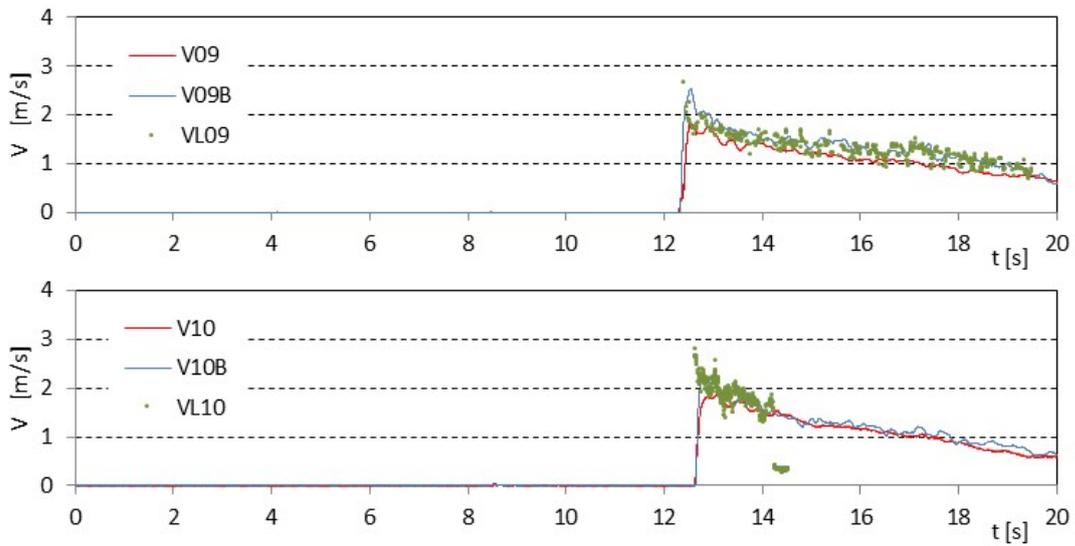


図 II.3.1-10 底面流速計，プロペラ流速計とレーザー流速計の比較（直立護岸，W33）

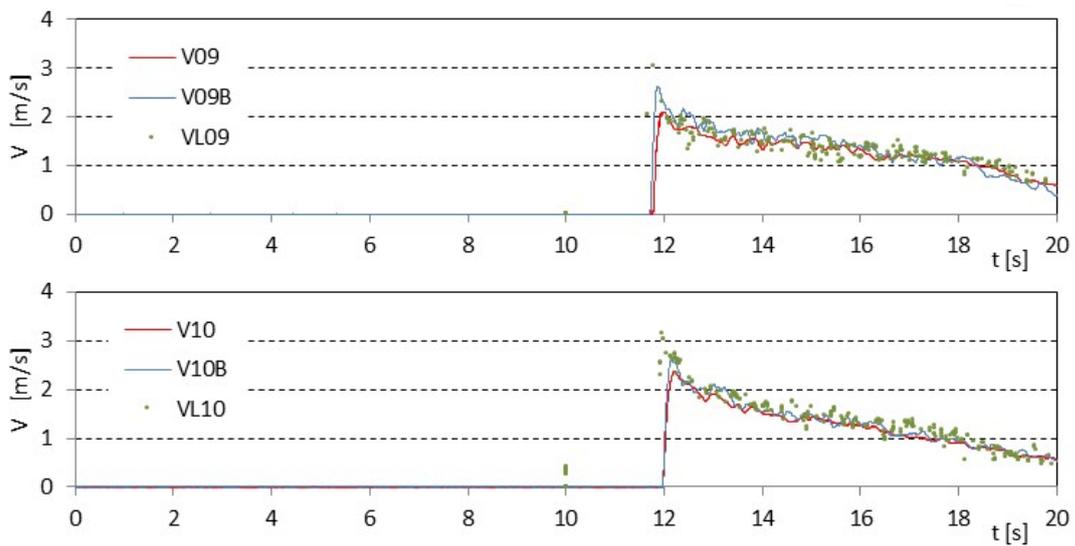


図 II.3.1-10 底面流速計，プロペラ流速計とレーザー流速計の比較（直立護岸，W34）

3.2. 波力/波圧試験（越流）

越流時の波力/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及び圧力計の計測結果を鉛直方向に積分することにより算出した波力の計測結果を示した。波力の図中に示した破線は、波力の最大値の発生時刻を示している。なお、圧力計は 3 測線に設置しており、その平均時系列を示している。また、W11～W13 の堤体設置位置 0, 0.625m については圧力計は P1～P6 の 6 台、その他については P1～P5 までの 5 台のみ圧力計を設置している。各圧力計の設置高さは、P1 が底面から 0.025m、それ以降 0.05m ピッチで等間隔に鉛直上方向に設置している。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、波力ともに、計測結果は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。また、圧力の計測結果に比較して波力の計測結果では、津波到達時の衝撃的な力は、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、鉛直方向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。

単純勾配と直立護岸を比較すると、汀線位置に堤体模型を設置したケースでは、津波到達時の衝撃的な力が直立護岸では顕著に現れていない。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くなり、衝撃的な力が生じていないと考えられる。

図 II.3.2-7～図 II.3.2-12 に、堤体前面の 3 側線（F1～F3）で計測した圧力から、それぞれ波力を積分により求めた結果を示す。なお、15 回繰り返した試験のうち、ここには 1 回目の結果を示した。津波到達時の衝撃的な波力を除き、3 側線の波力の計測結果はほぼ一致しており、水路横断方向に一樣に津波が作用していることが分かる。一方で、津波到達時には 3 側線で若干の違いが確認される。津波が堤体に衝突すると、水塊が壁面に沿って上方に打ち上げられ、また水位が十分に上昇するまで渦による乱れが大きく跳水に似た現象が見られた。そのため流況が乱れ、壁面に働く圧力も不均等になると考えられる。また、3 側線の結果を比較すると、単純勾配では概略 F3 が大きく F1 が小さい。単純勾配では、汀線付近で碎波しながら陸上に遡上する。この時、海底地形のわずかな違いにより、碎波位置が横断方向に若干異なっている。早めに碎波するほどエネルギー損失が大きく遡上浸水深は小さくなる。この影響により、3 側線を比較すると F1 が全体に小さめの値となっていると考えられる。

図 II.3.2-13、図 II.3.2-14 に、波力最大時の鉛直圧力分布を示す。各点は、同じ高さの 3 側線の圧力計の計測結果の平均値を示しており、15 回の繰り返し試験のそれぞれの計測結果を示した。圧力分布は、静水圧分布に近い形状をしている場合と、底面付近に大きな圧力が集中する場合の 2 通りの分布形状が確認される。静水圧分布に近い形状の場合、15 回の計測ごとのばらつきは小さい。逆に静水圧分布をしていない場合、計測ごとばらつきも大きくなっている。波力のピーク

発生特性について後述するが、前者はサードピークが最大に、後者はセカンドピークが最大になる場合に、このような特徴が生じると考えられる。

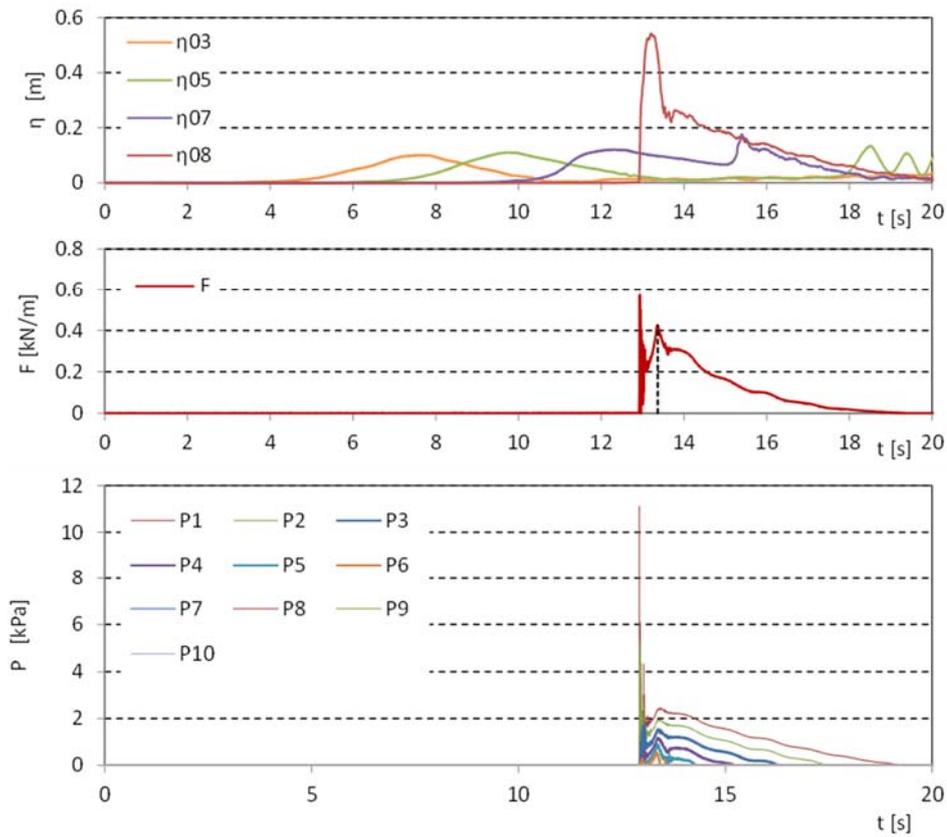


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L , 設置位置 0m, W11)

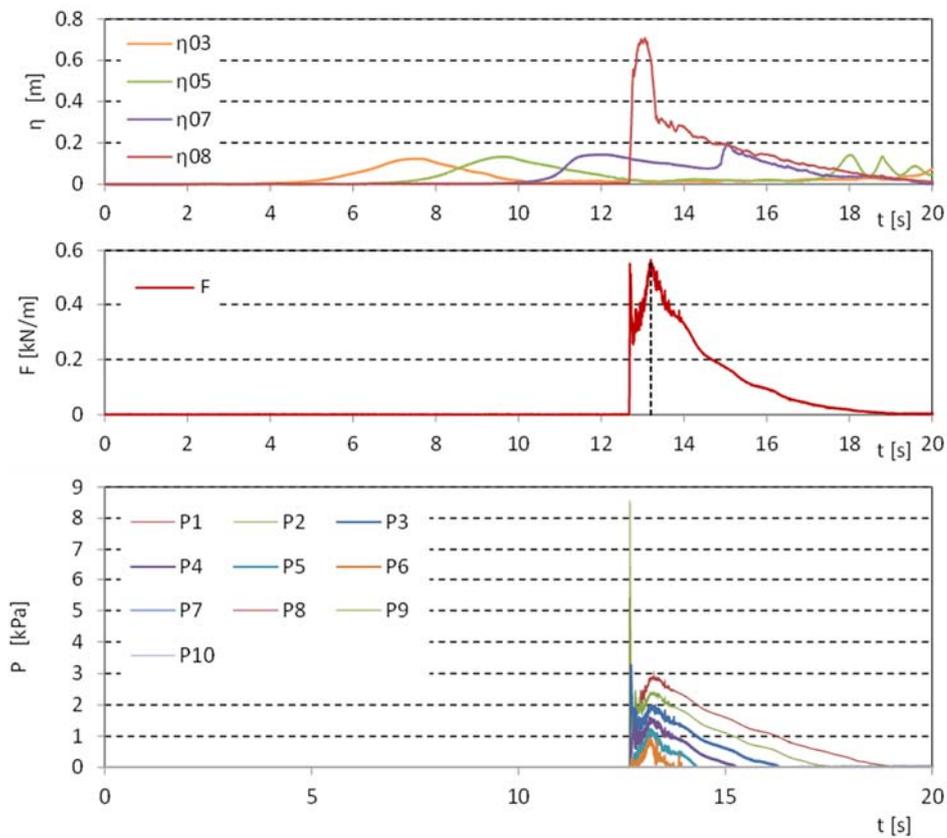


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L , 設置位置 0m, W12)

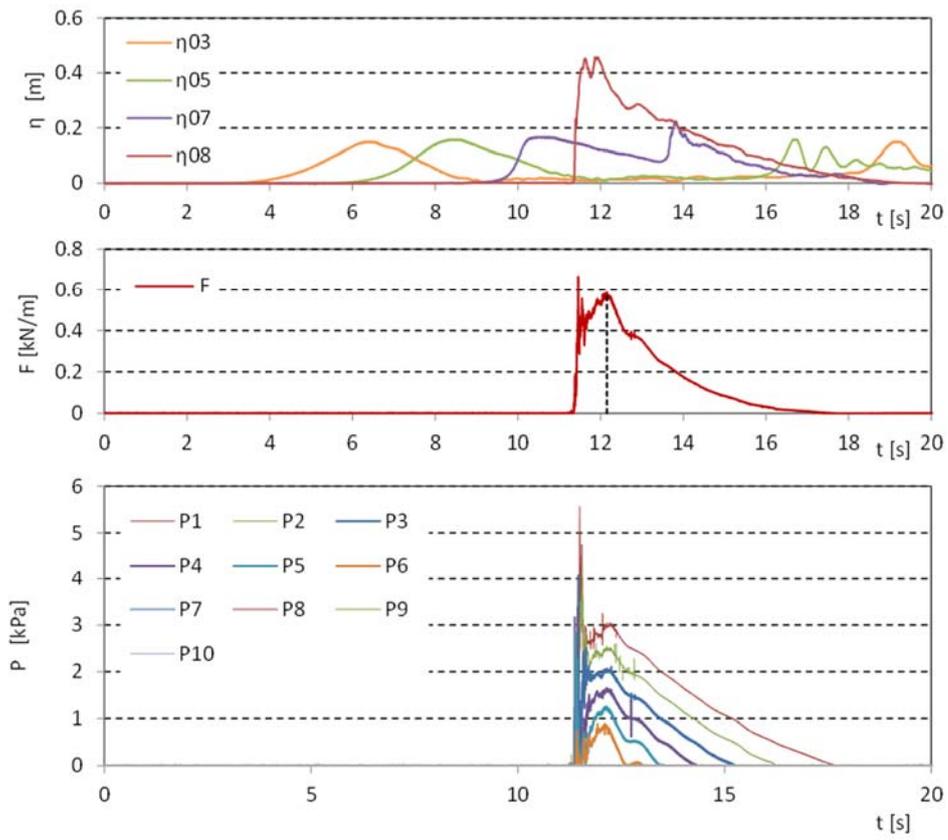


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L , 設置位置 0m, W13)

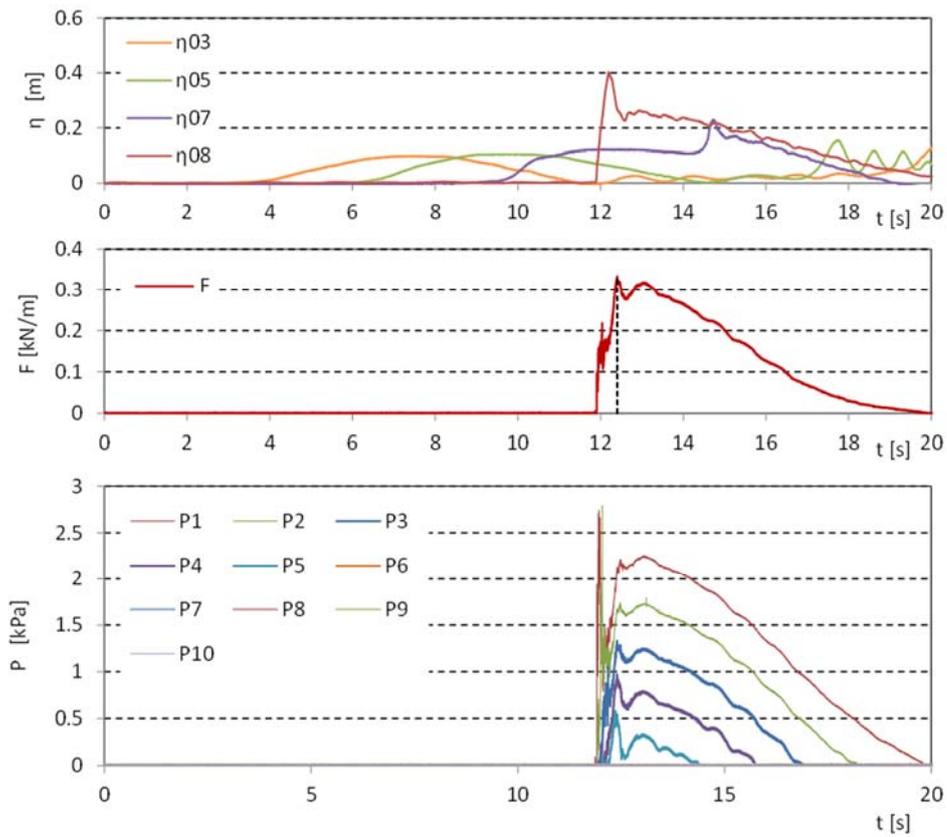


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0m, W21)

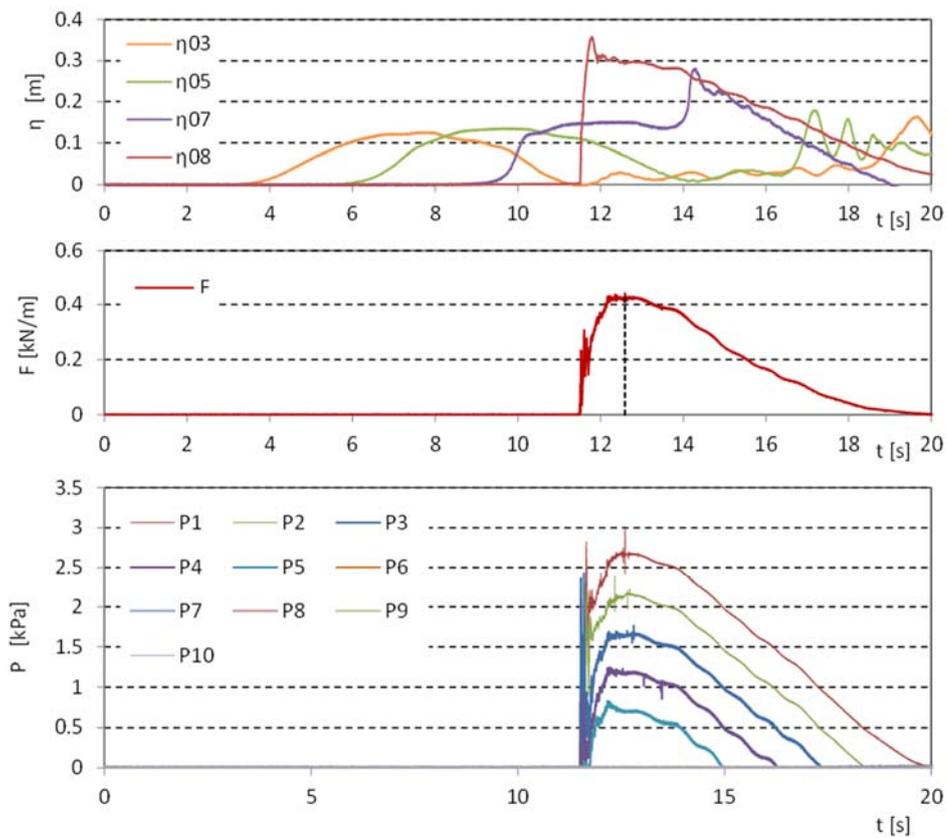


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0m, W22)

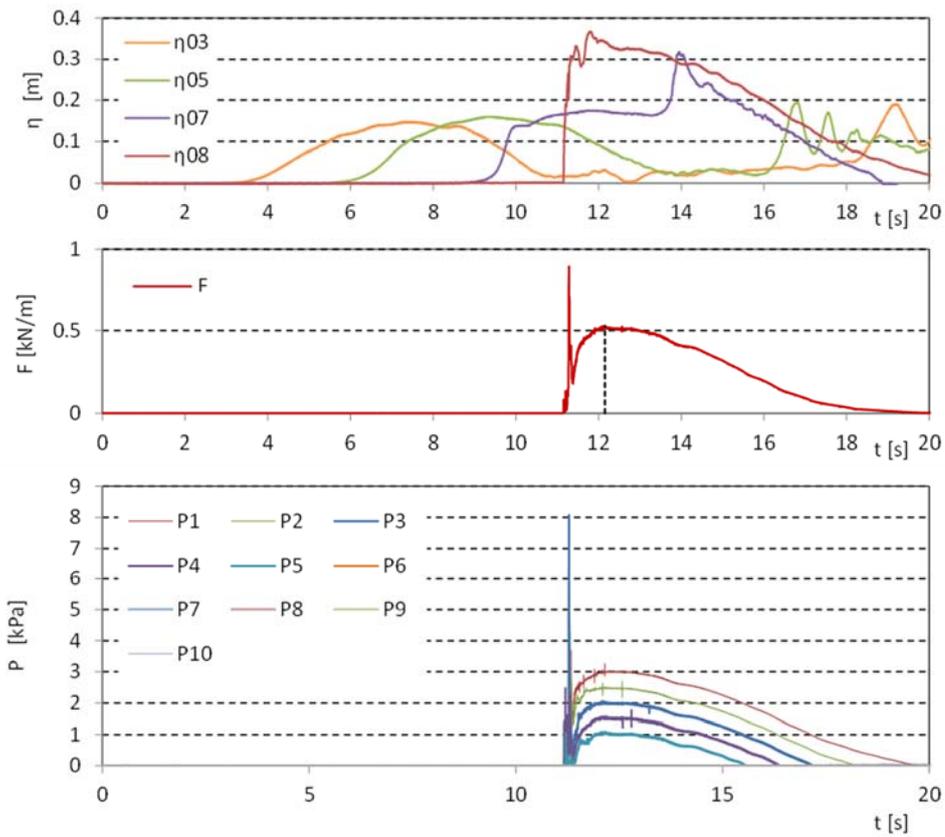


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0m, W23)

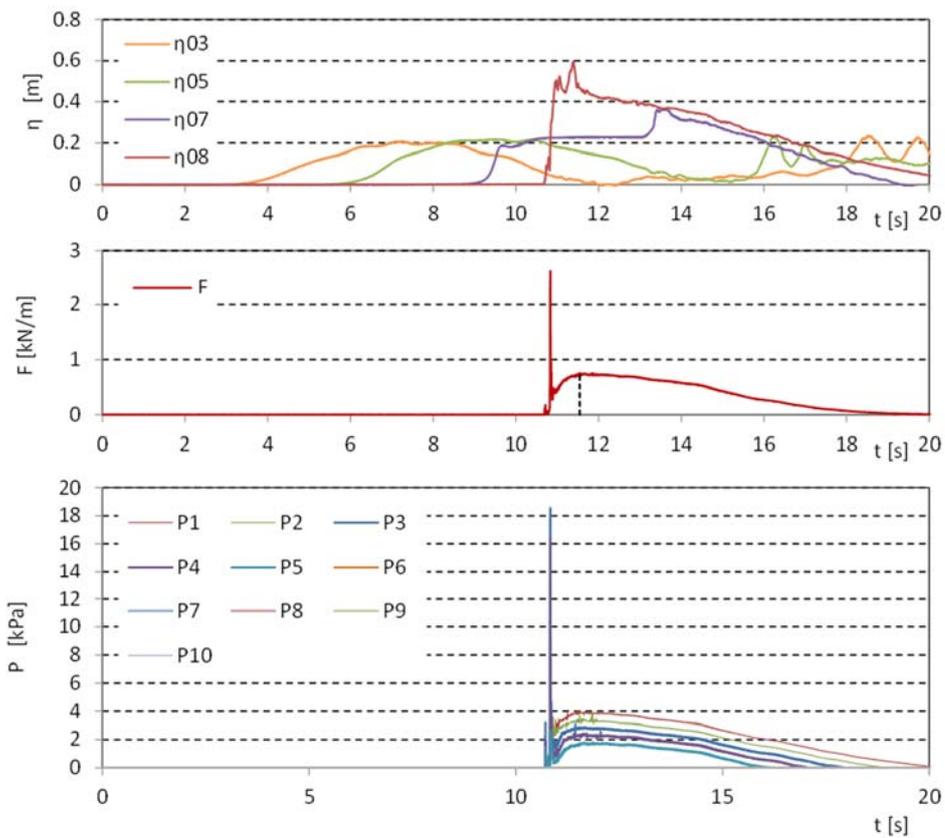


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0m, W24)

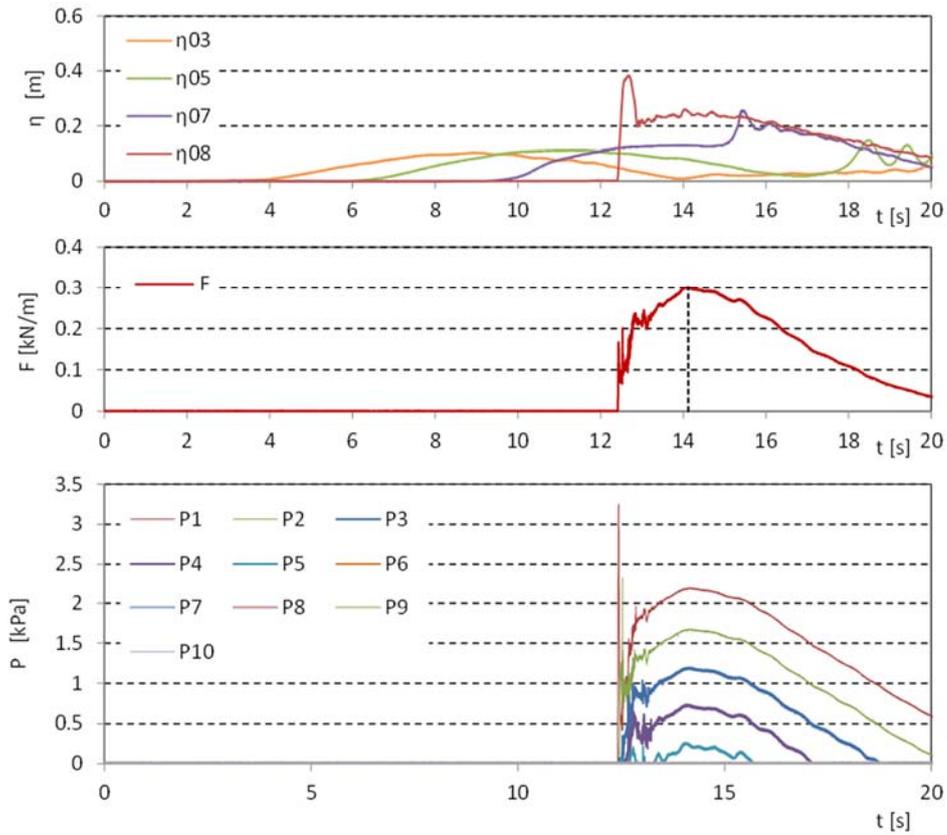


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0m, W31)

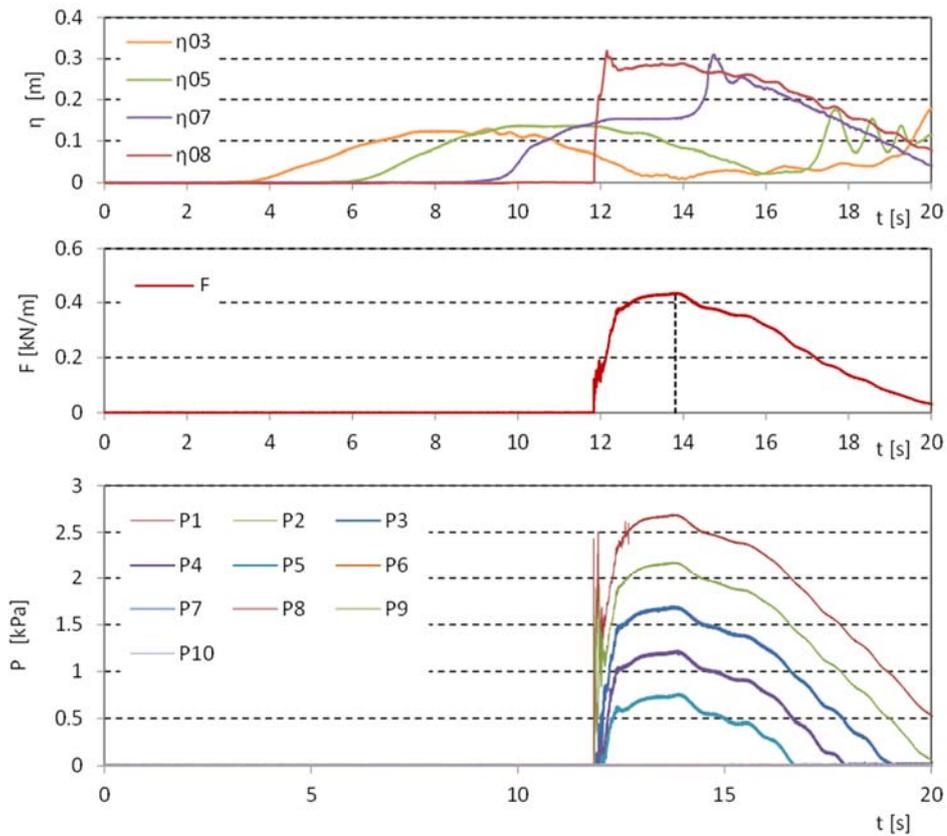


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0m, W32)

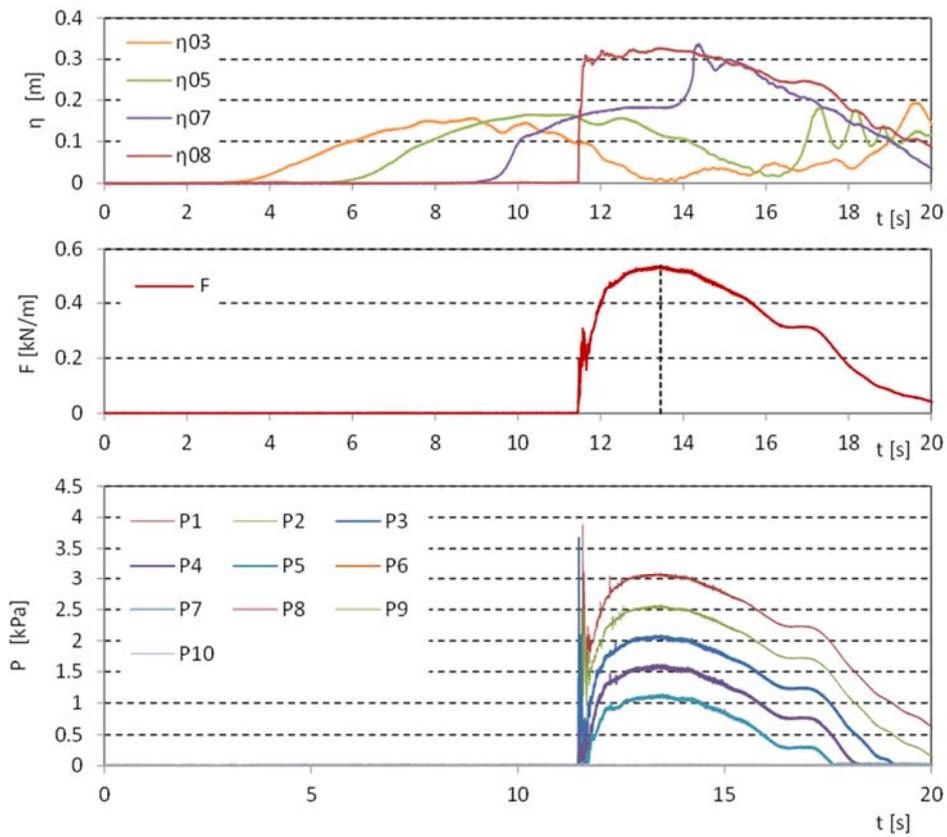


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0m, W33)

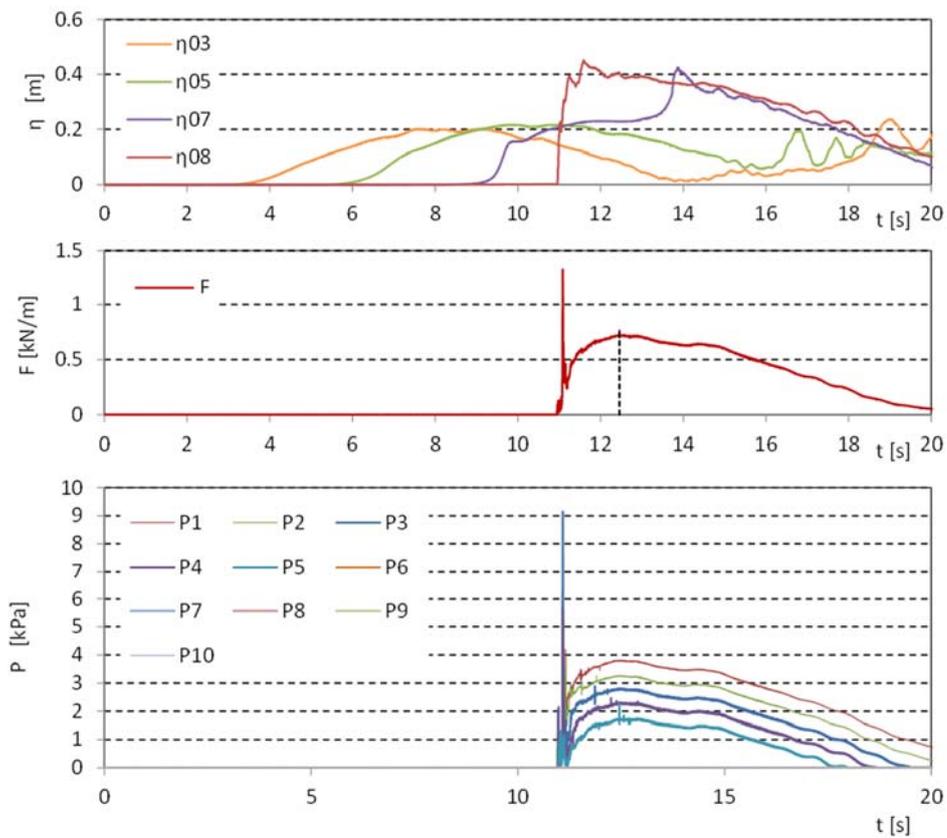


図 II.3.2-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0m, W34)

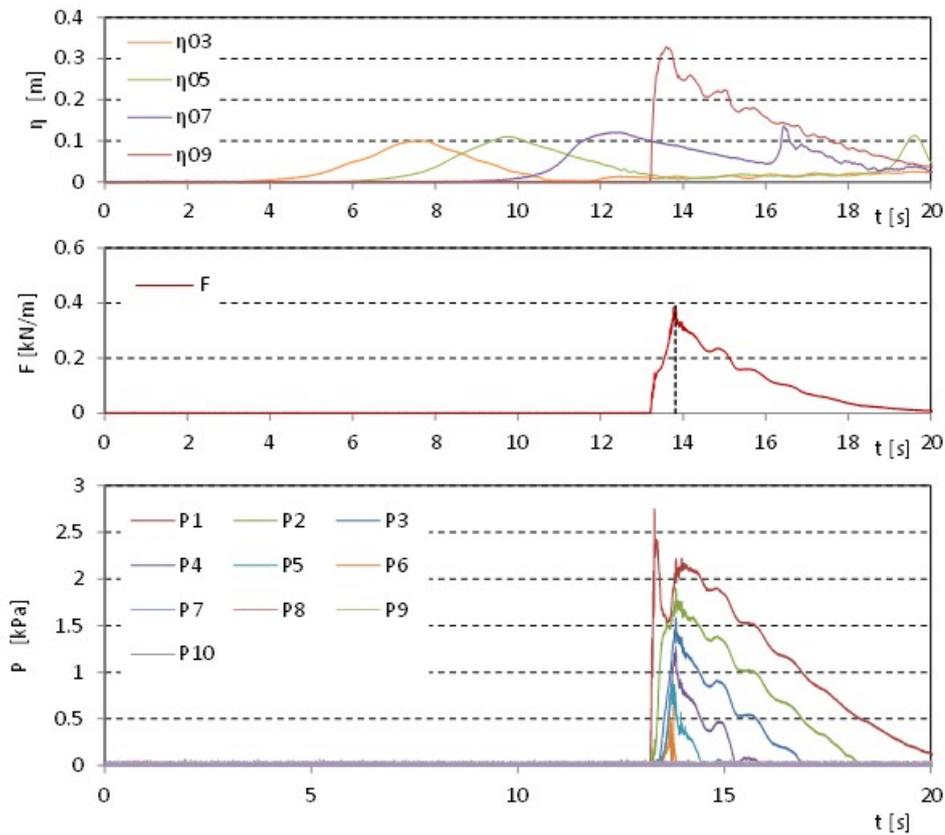


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, W11)

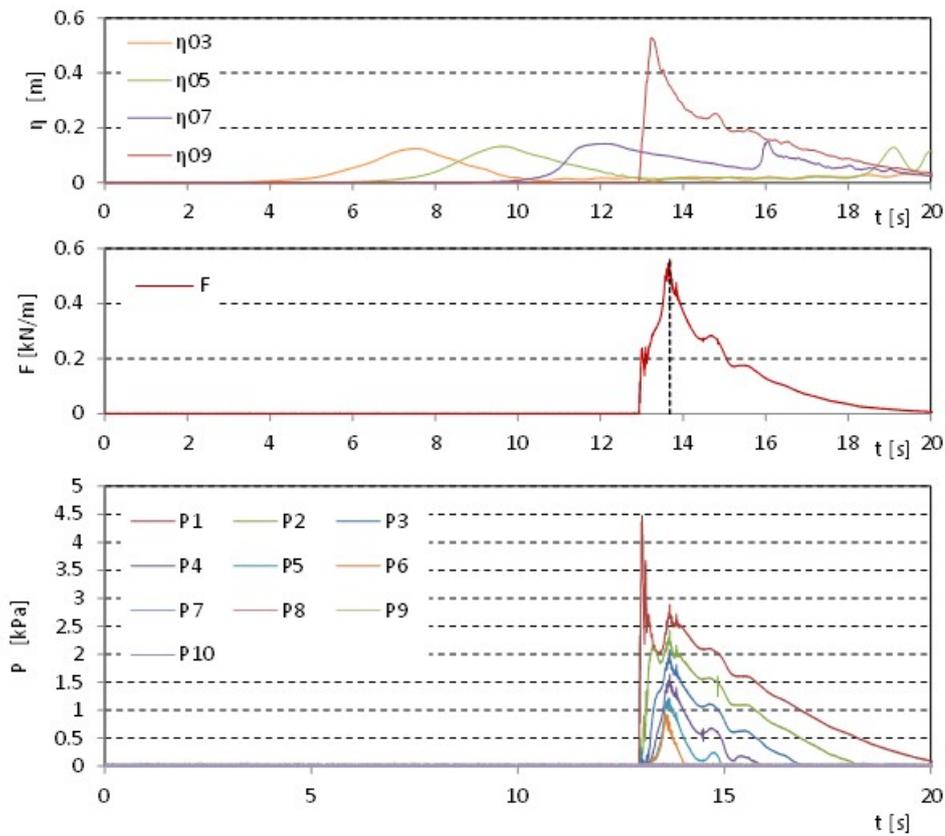


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, W12)

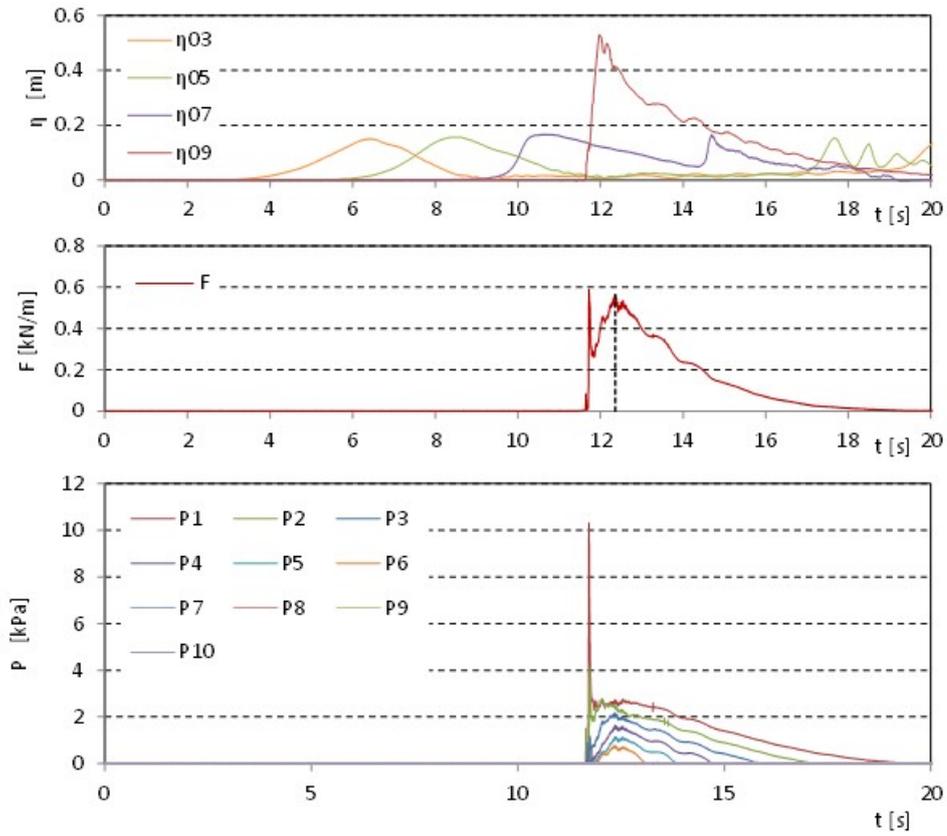


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, W13)

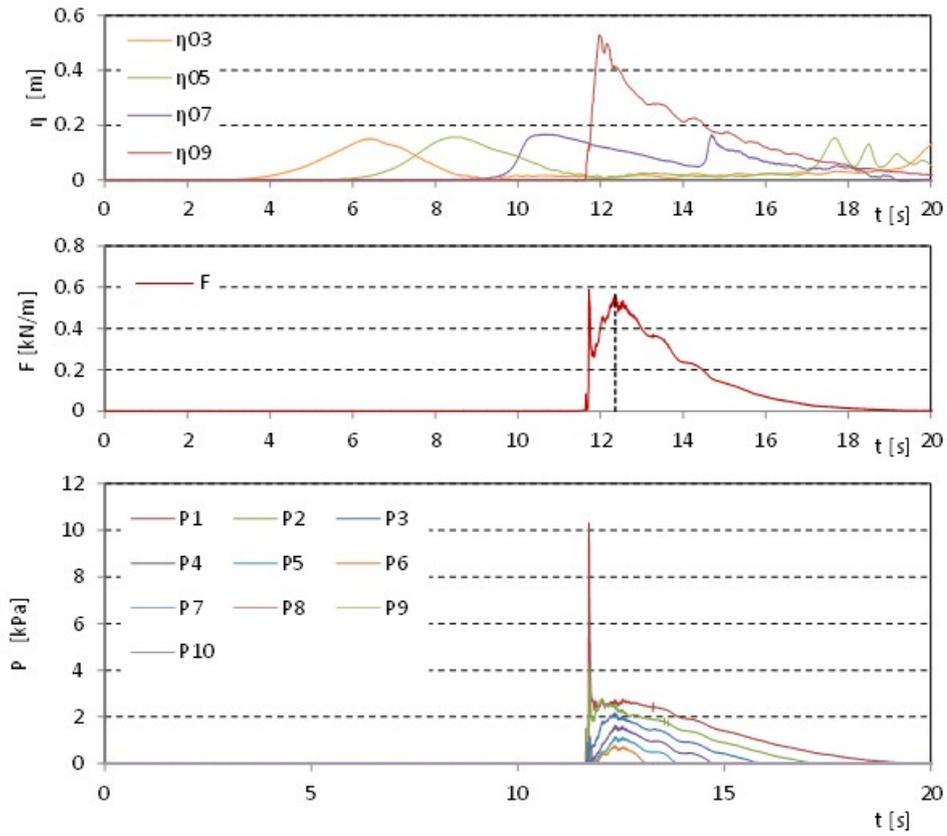


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, W21)

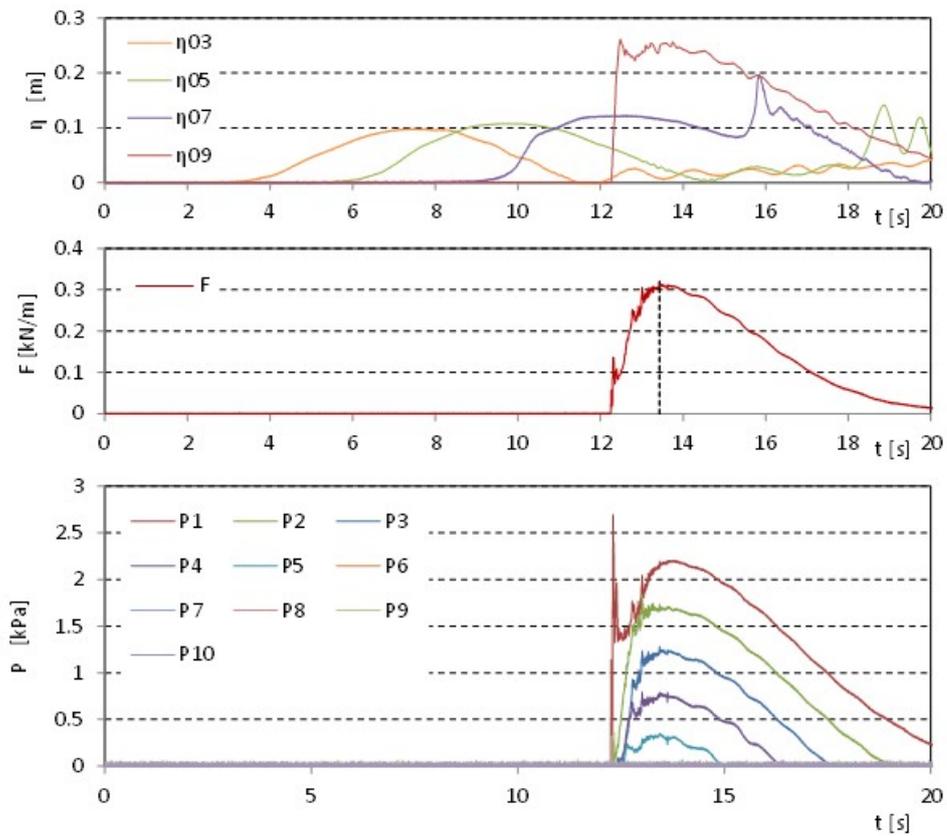


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, W22)

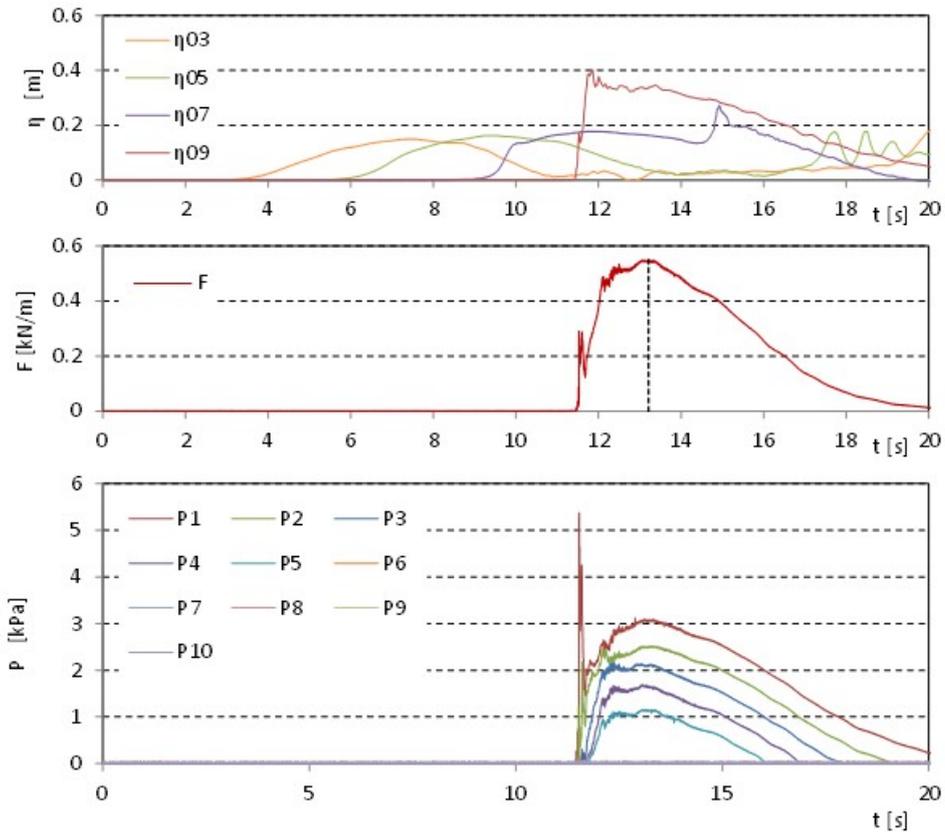


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, W23)

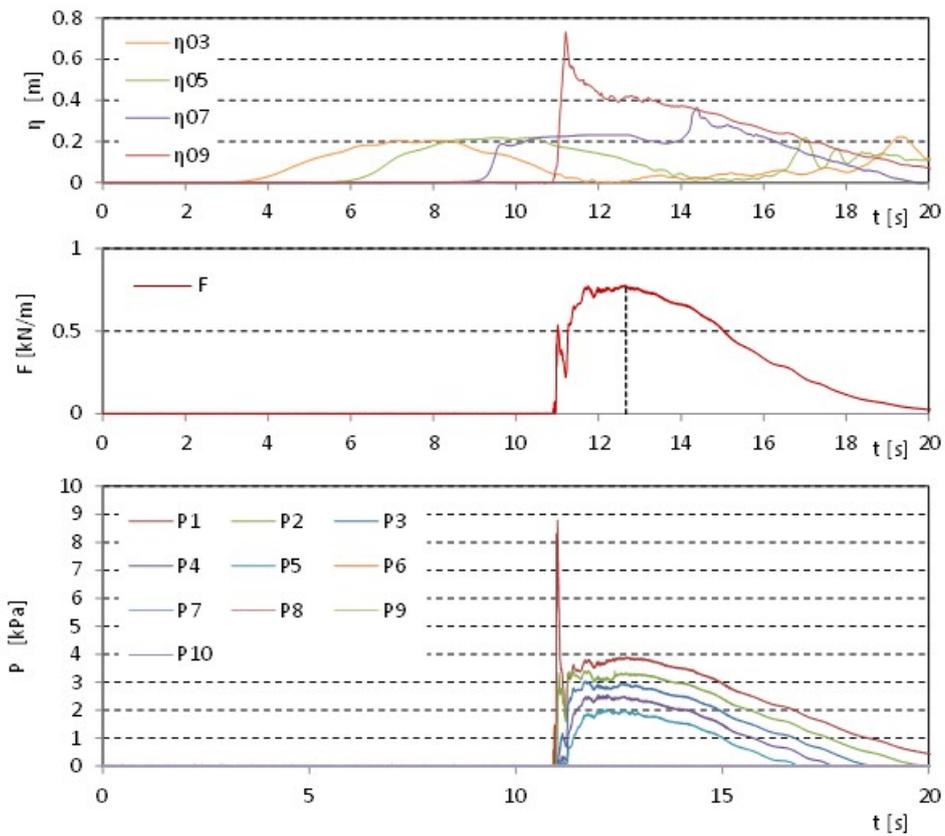


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, W24)

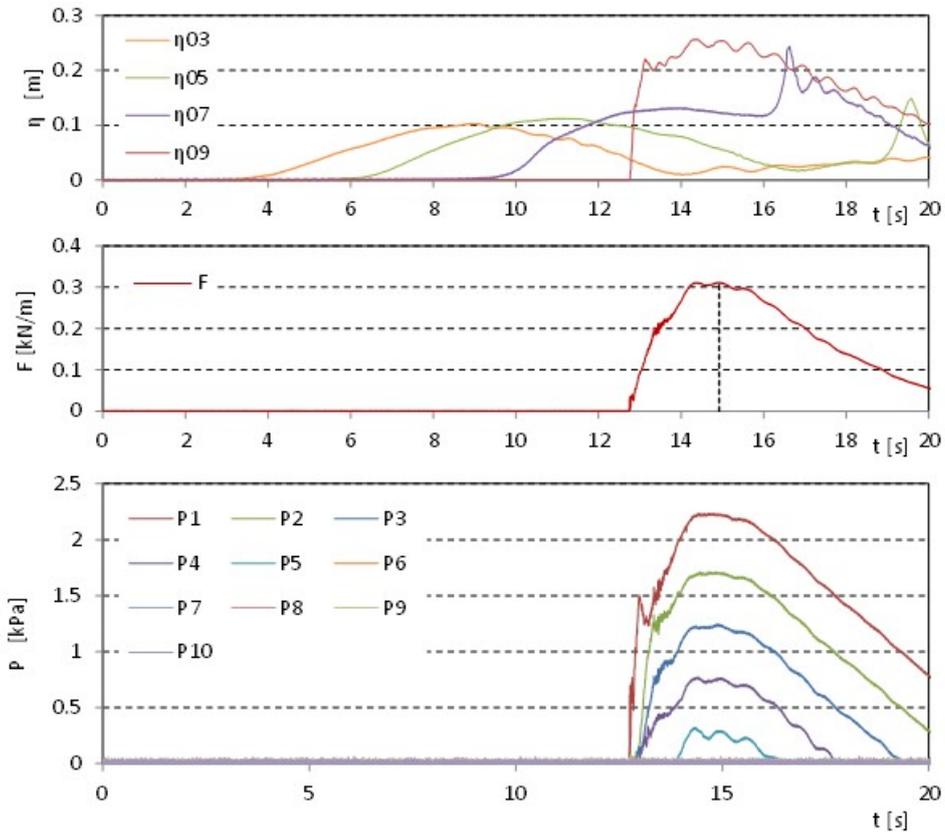


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, W31)

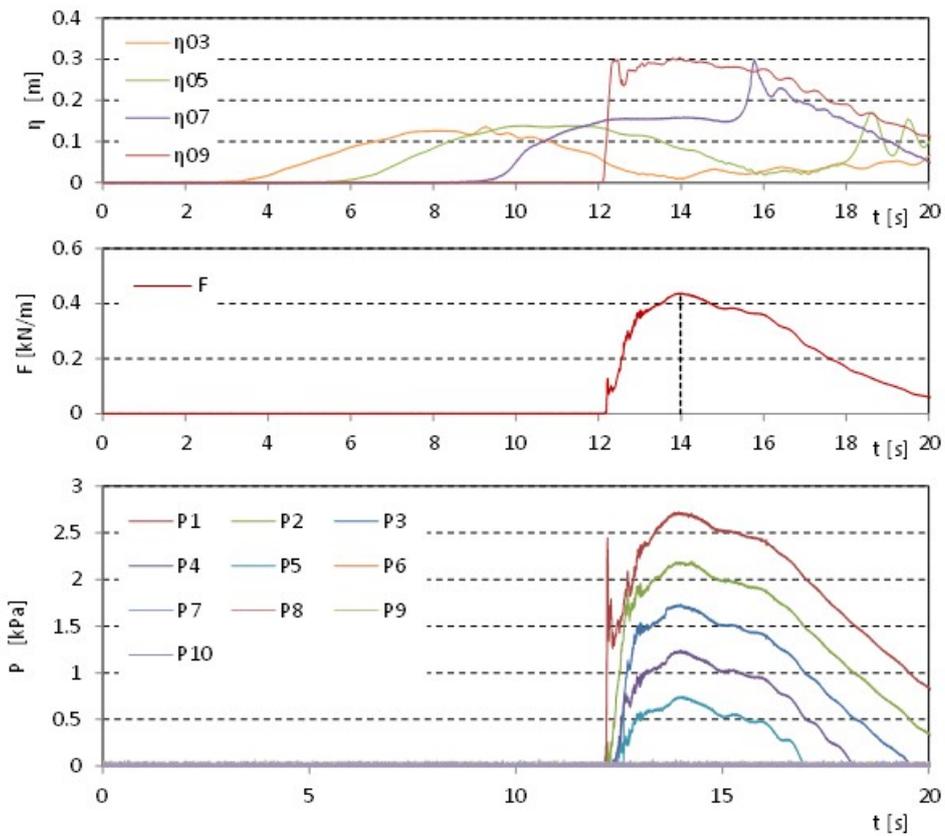


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, W32)

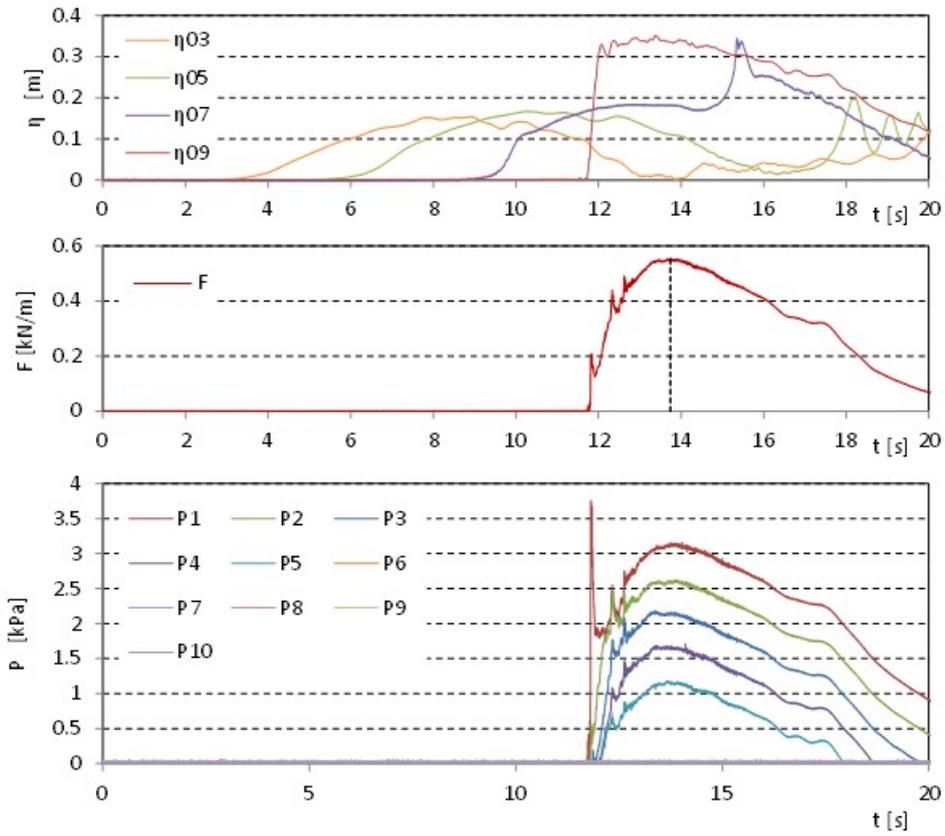


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, W33)

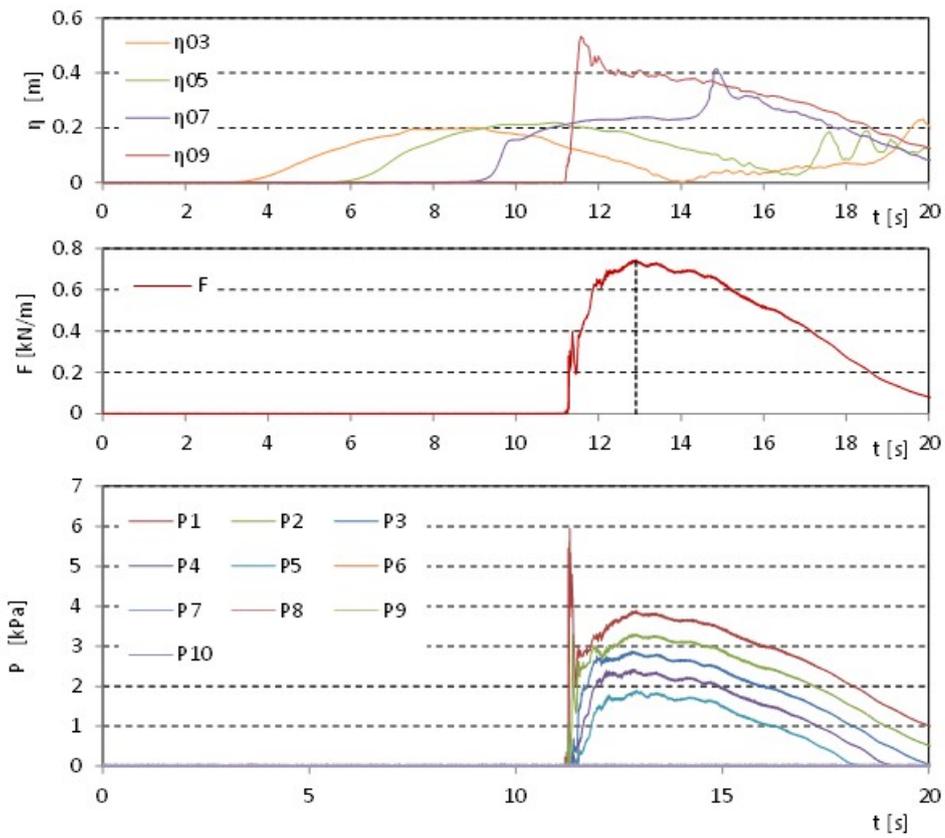


図 II.3.2-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, W34)

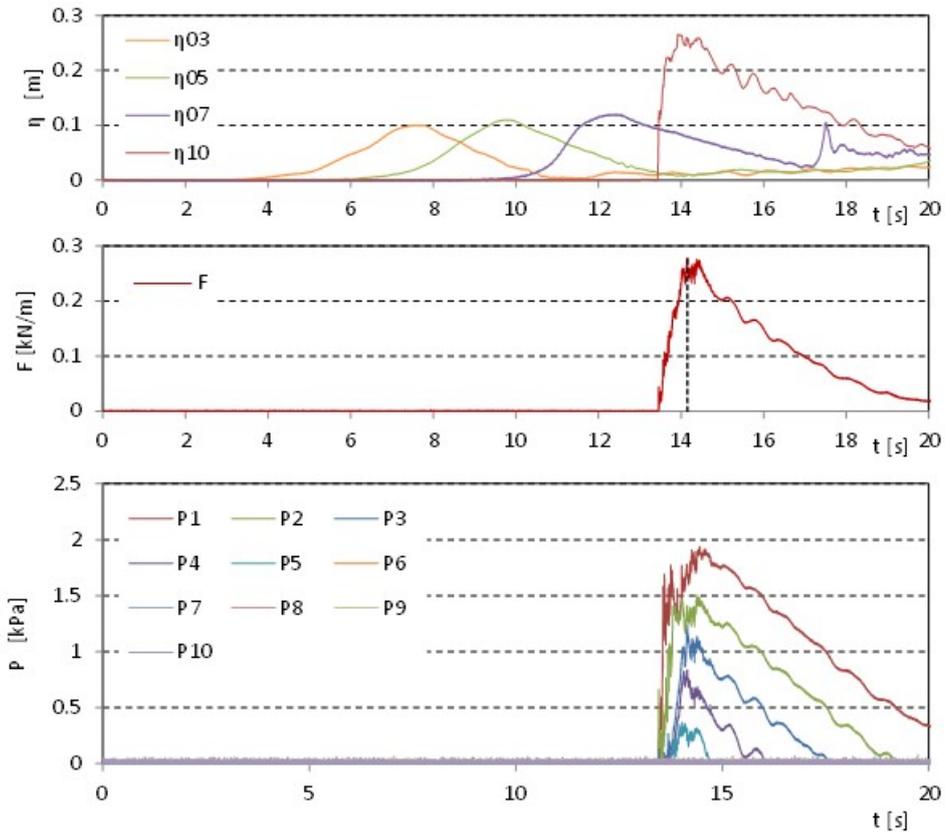


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, W11)

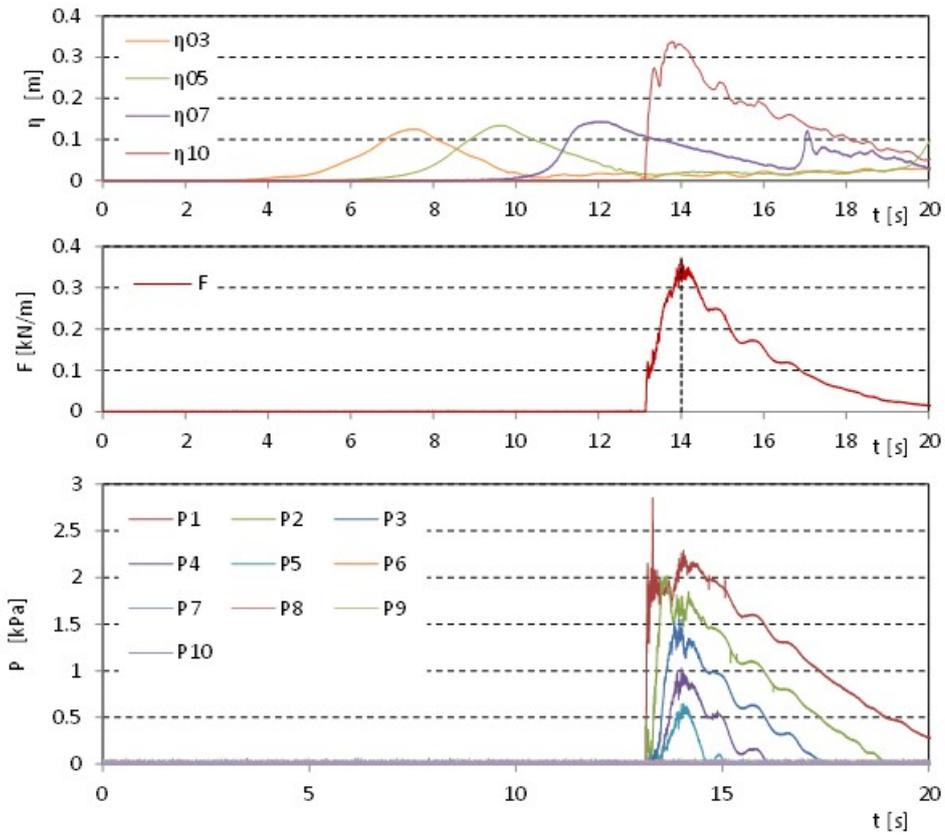


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, W12)

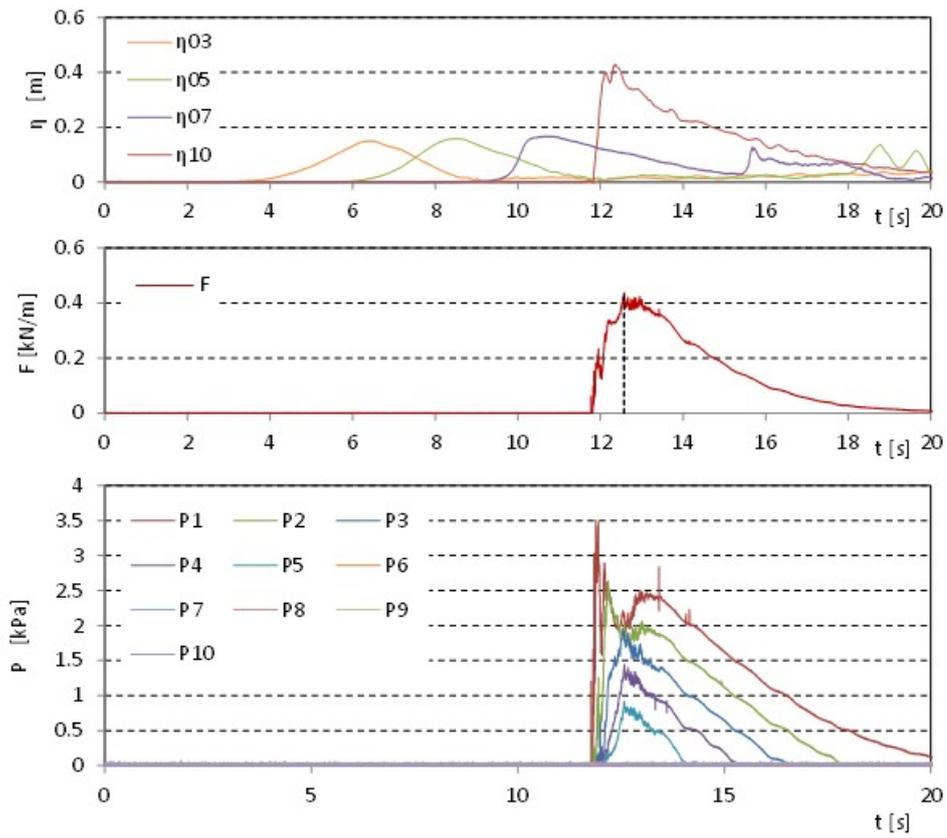


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, W13)

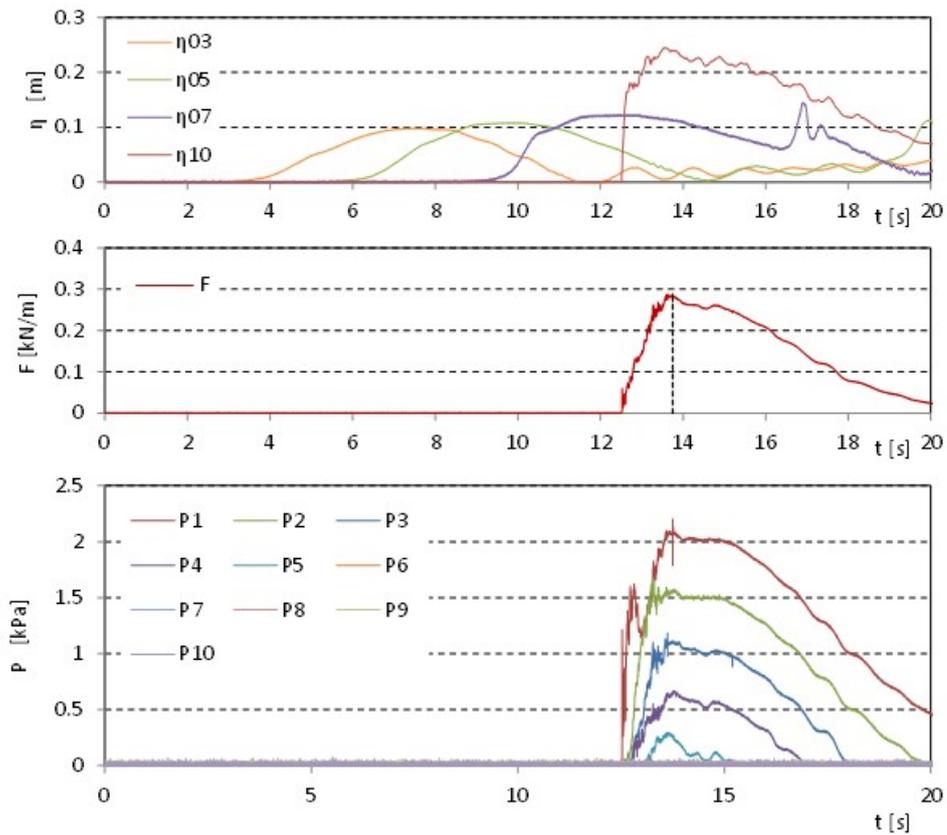


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, W21)

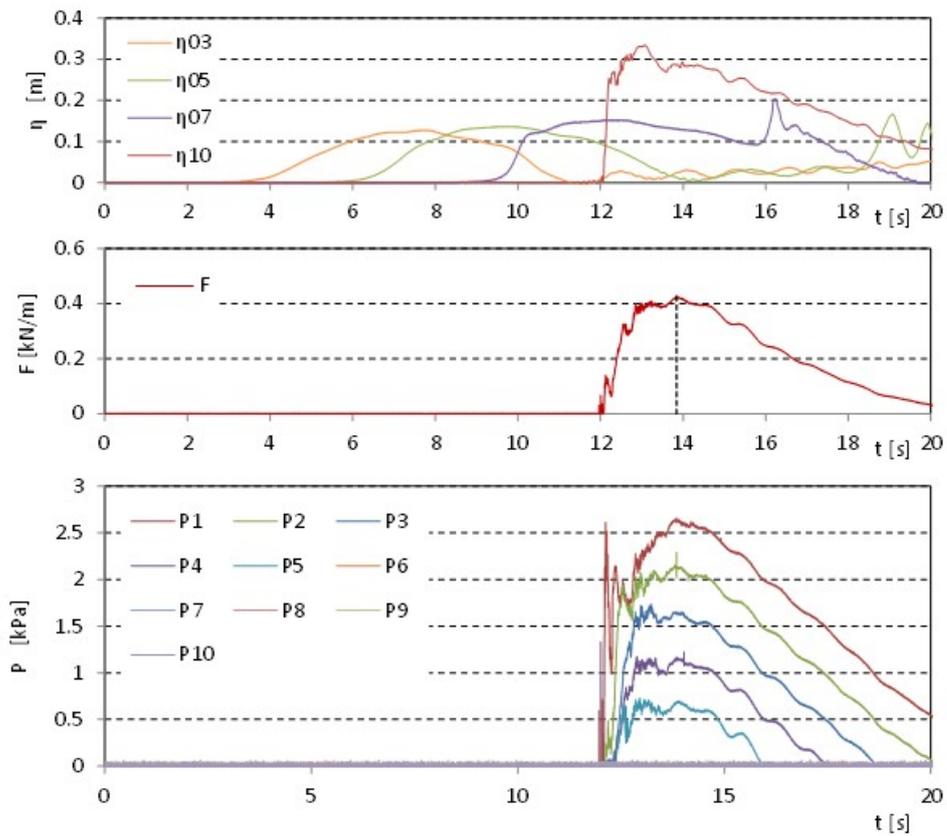


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, W22)

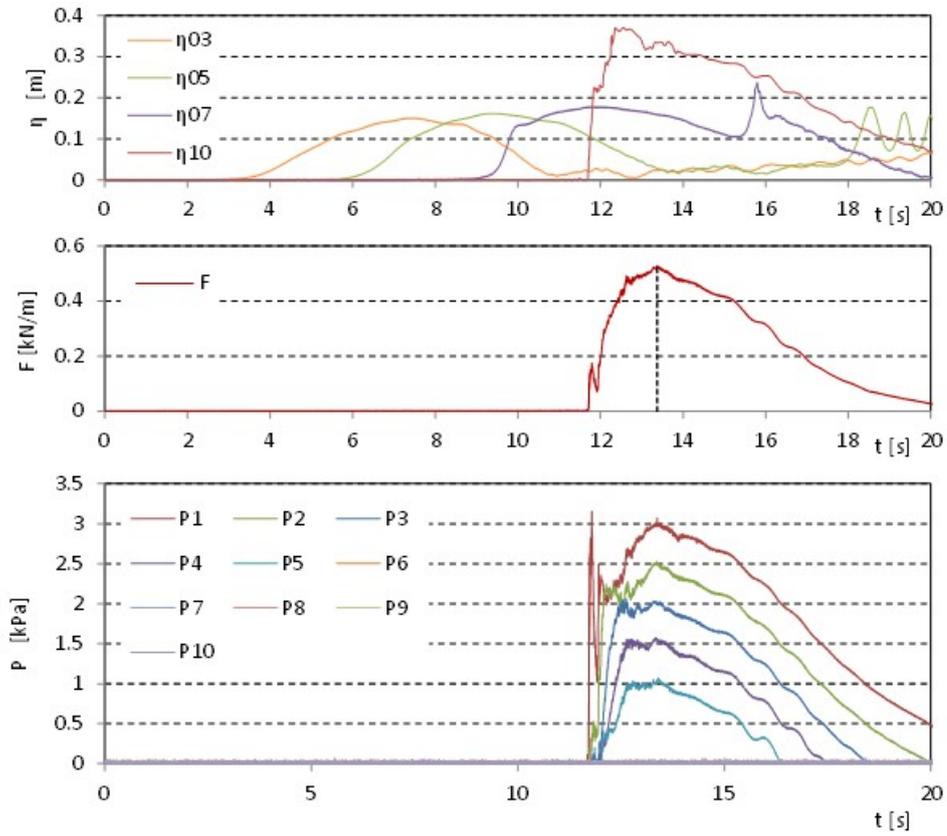


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, W23)

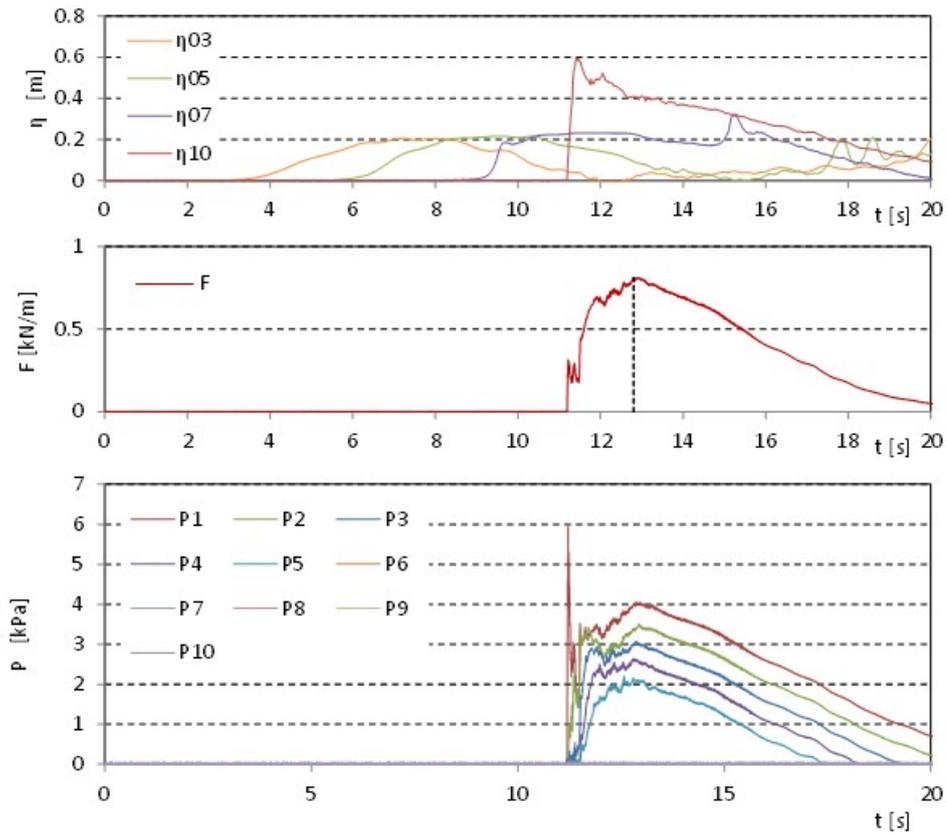


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, W24)

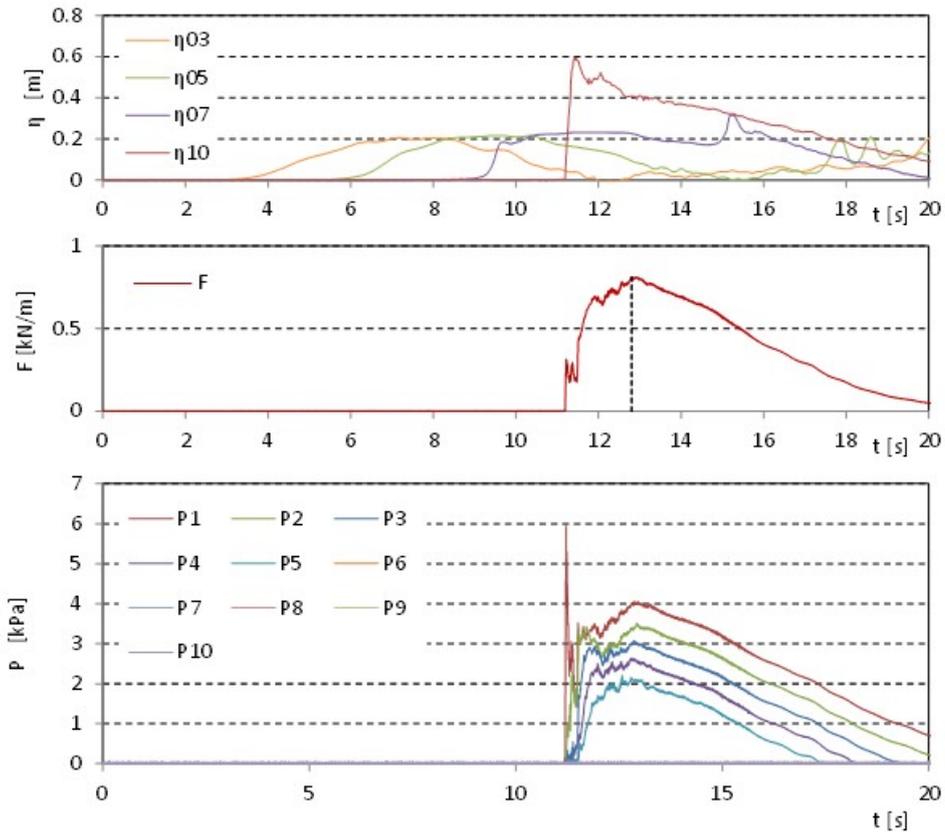


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, W31)

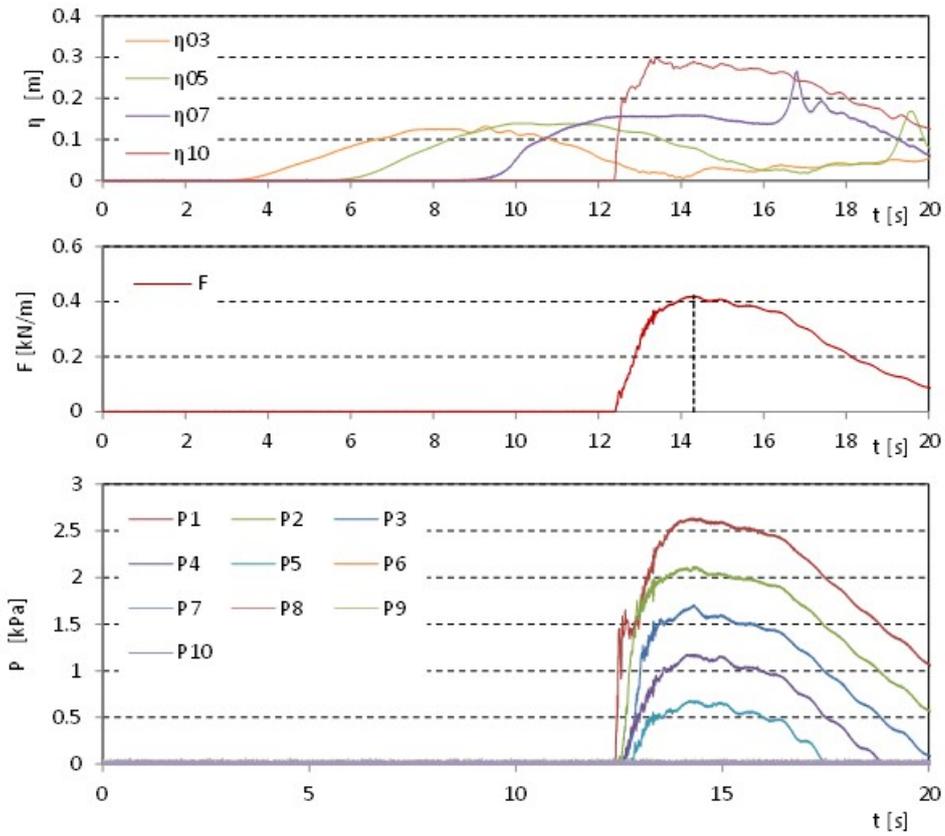


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, W32)

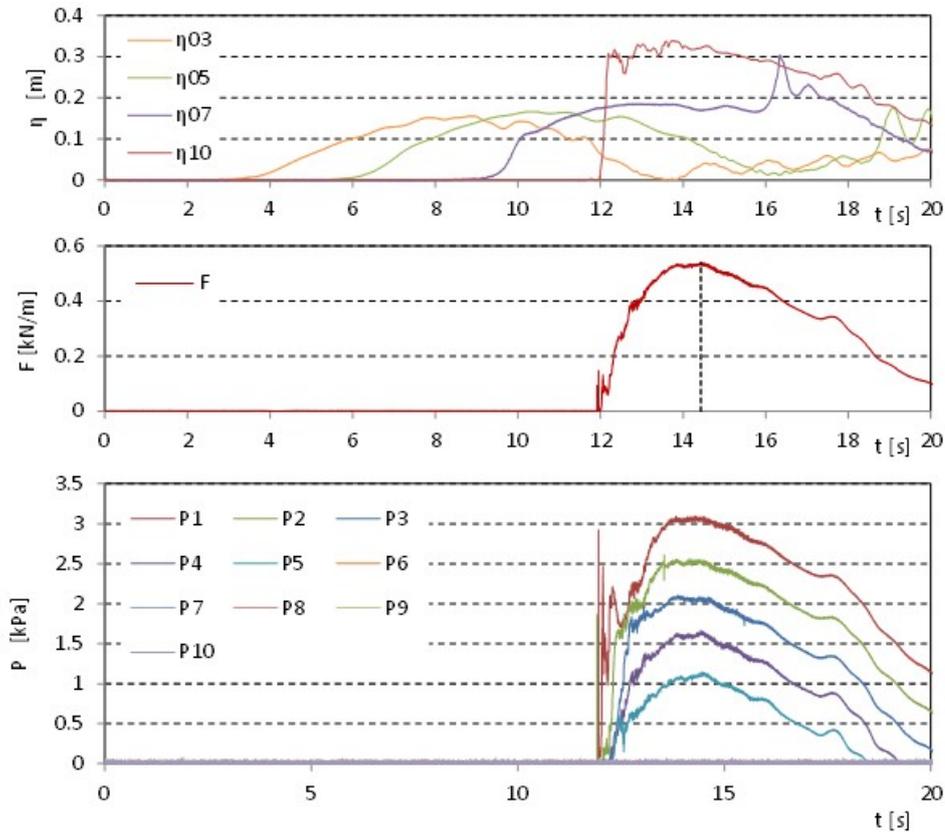


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, W33)

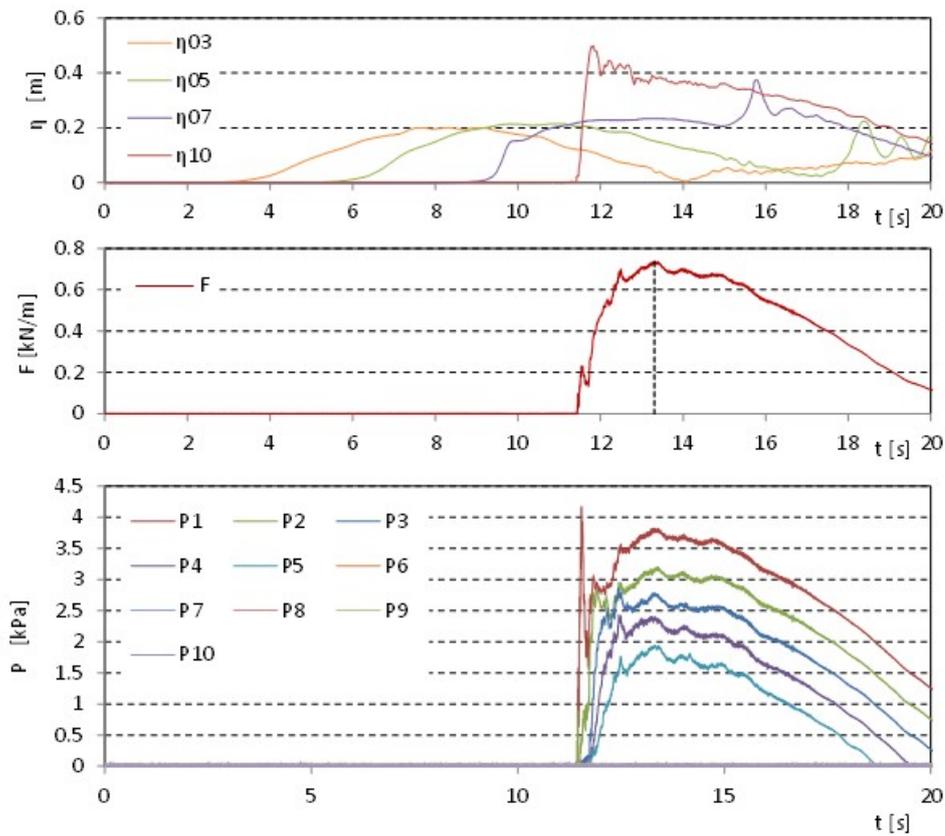


図 II.3.2-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, W34)

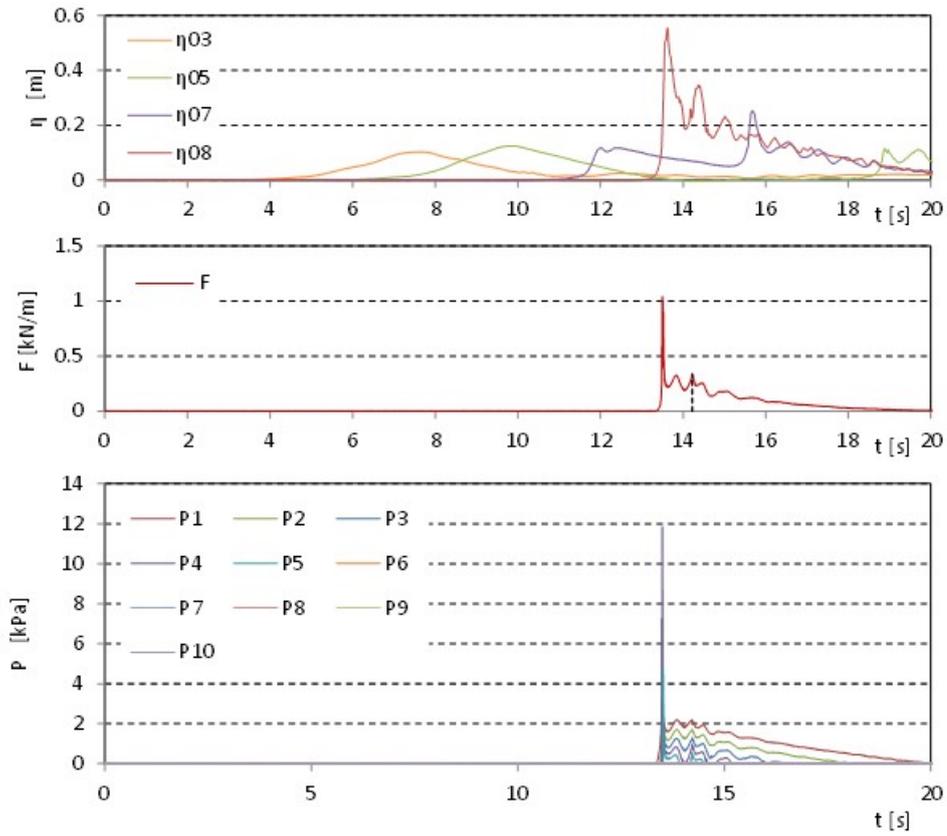


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0m, W11)

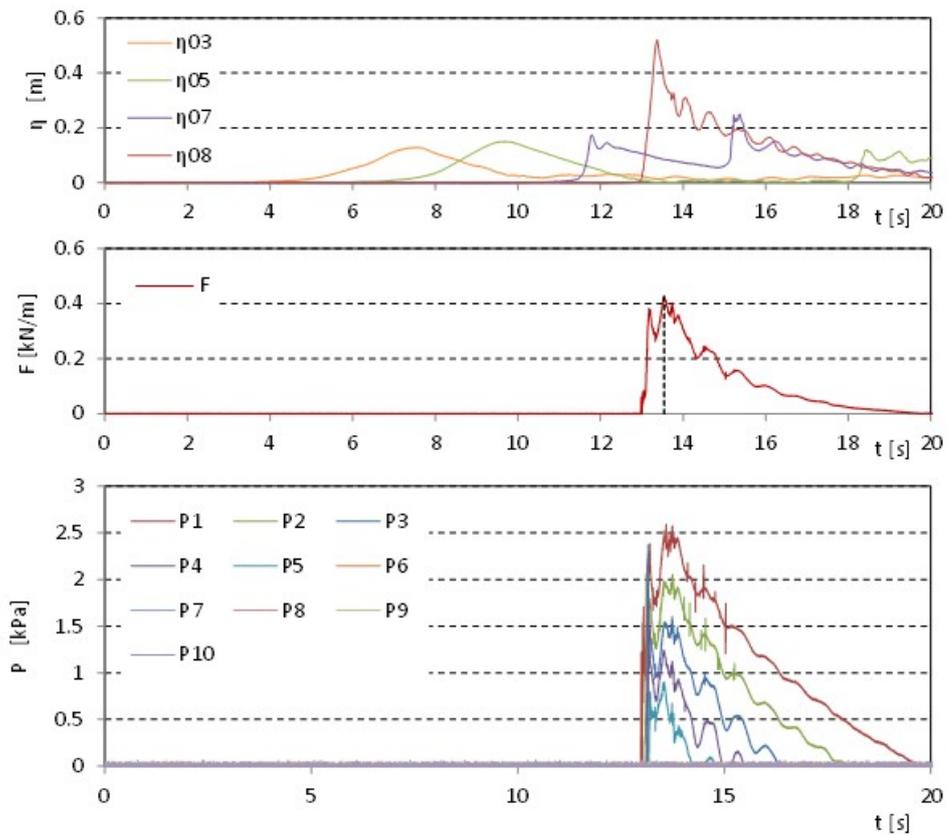


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0m, W12)

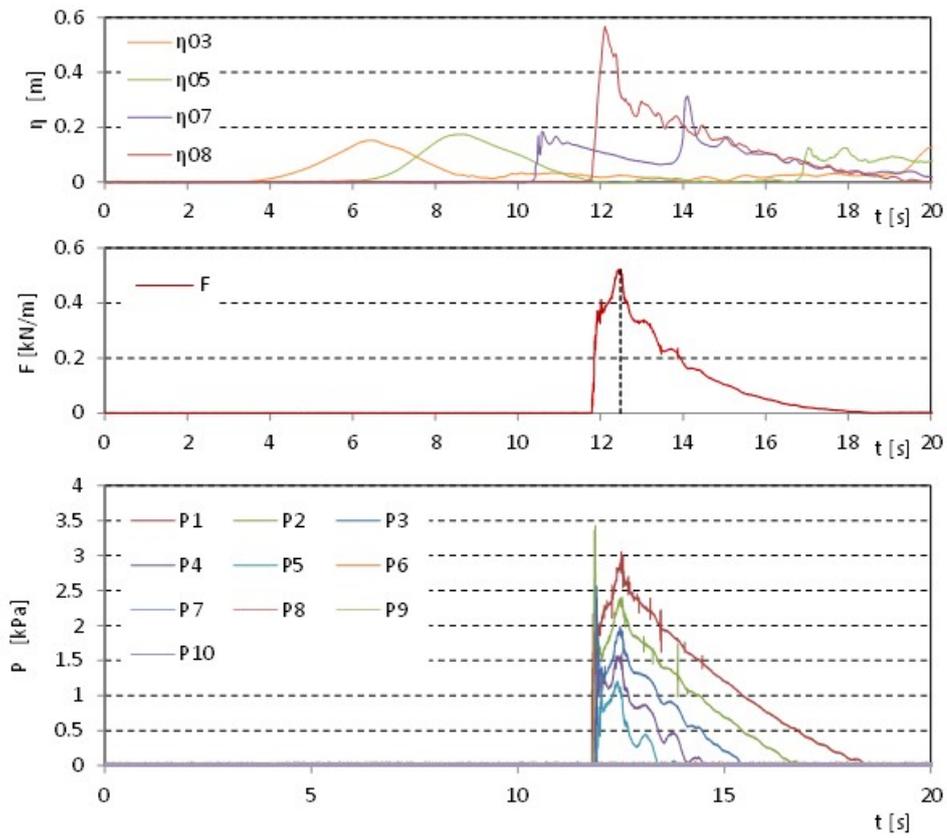


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0m, W13)

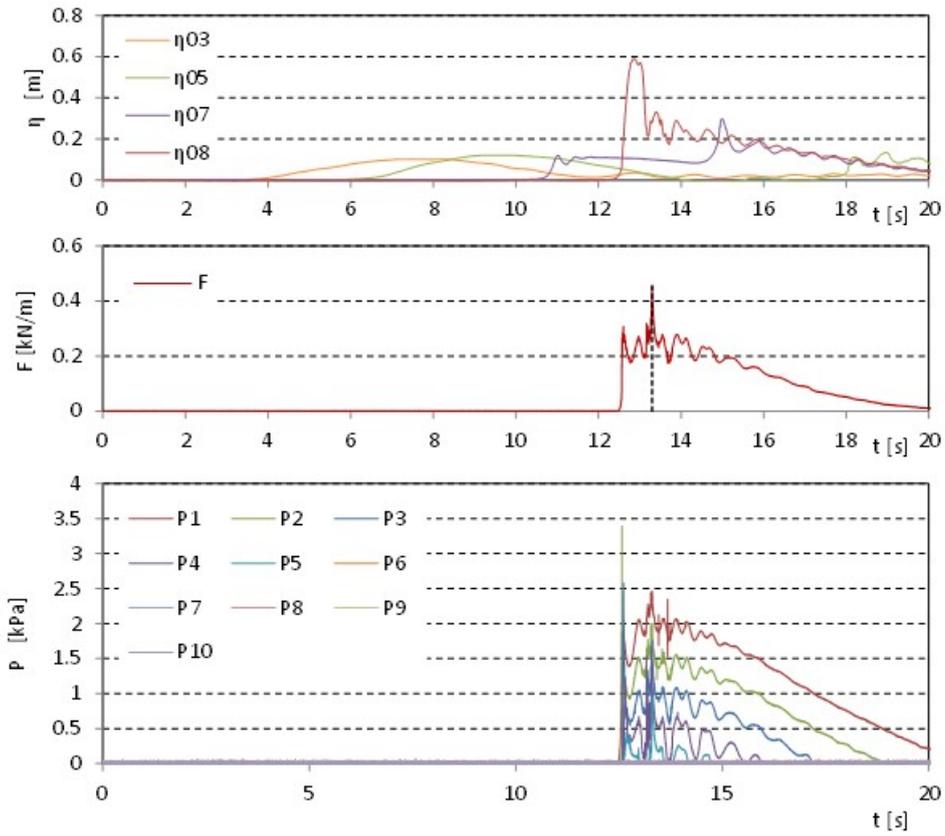


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0m, W21)

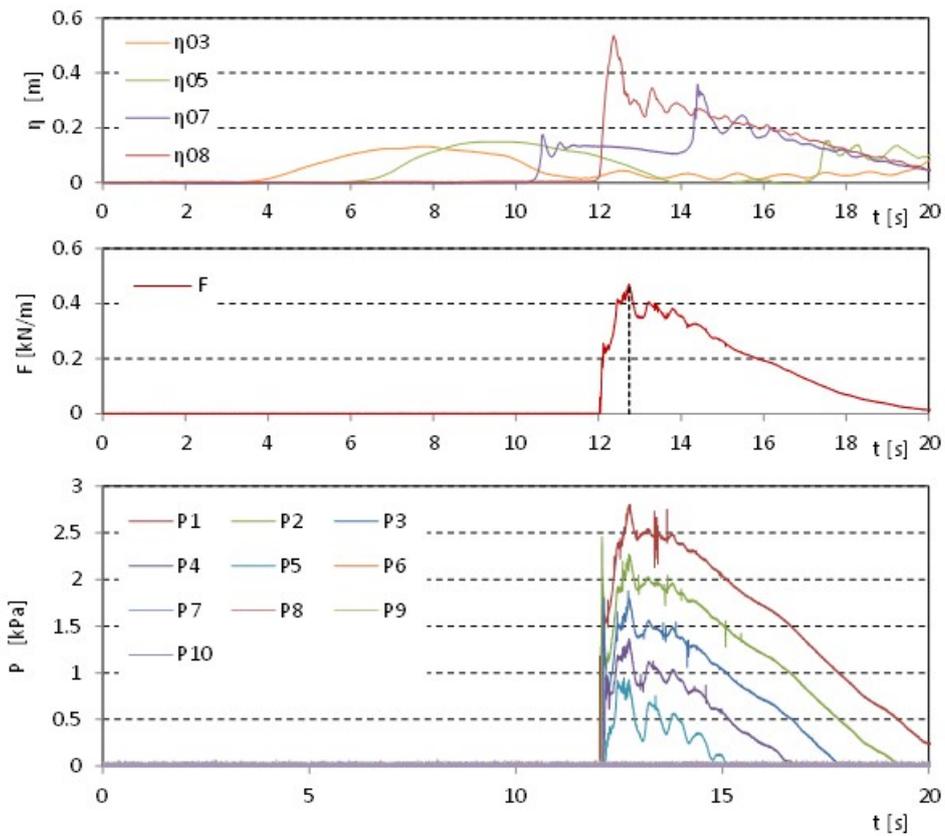


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0m, W22)

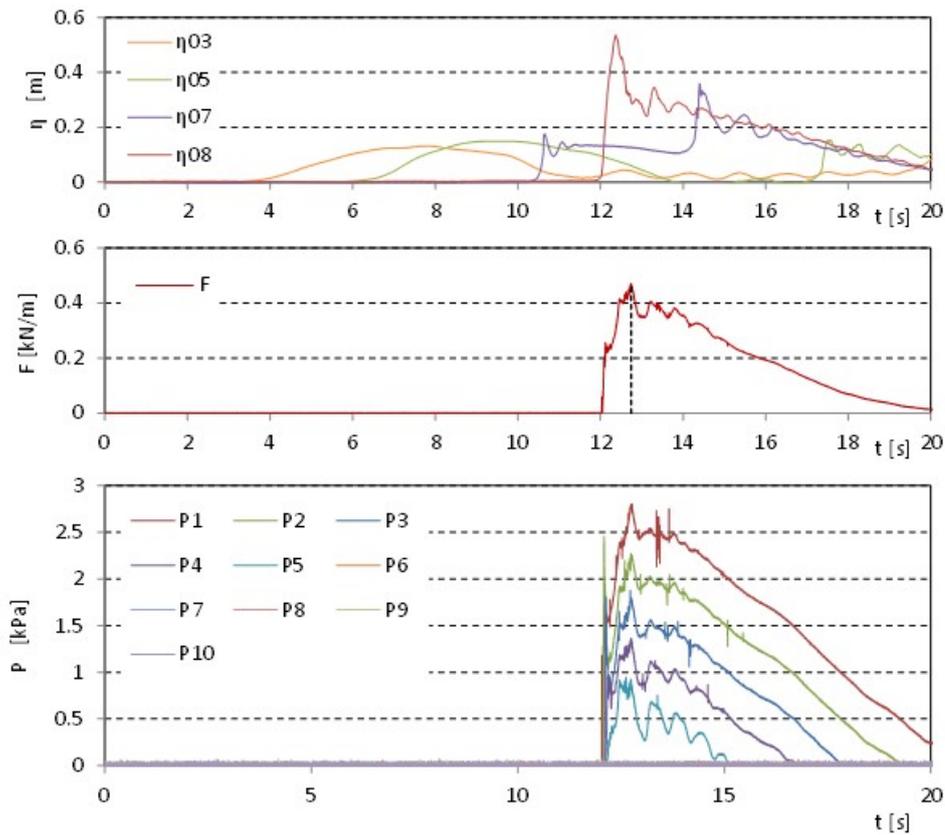


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0m, W23)

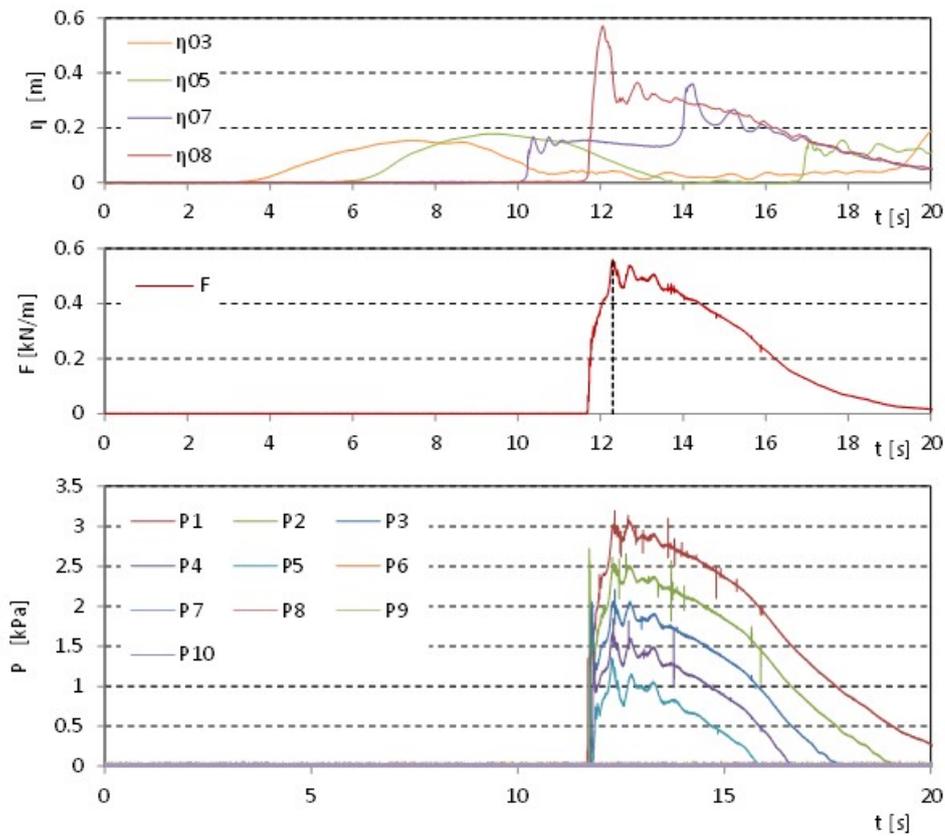


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0m, W24)

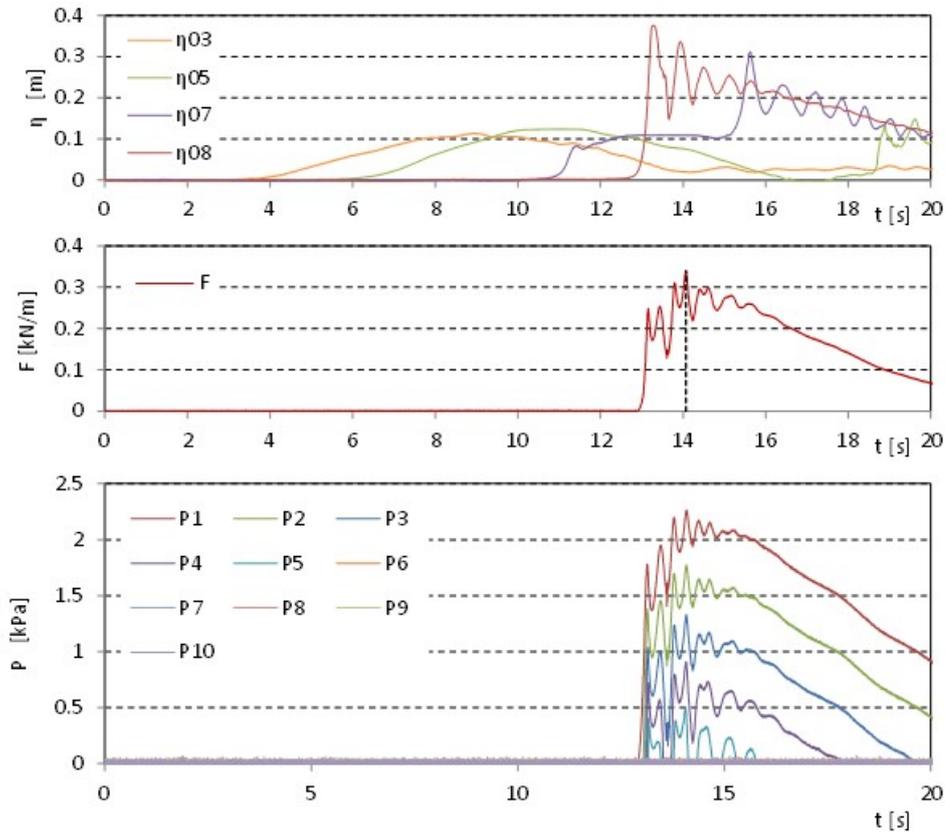


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0m, W31)

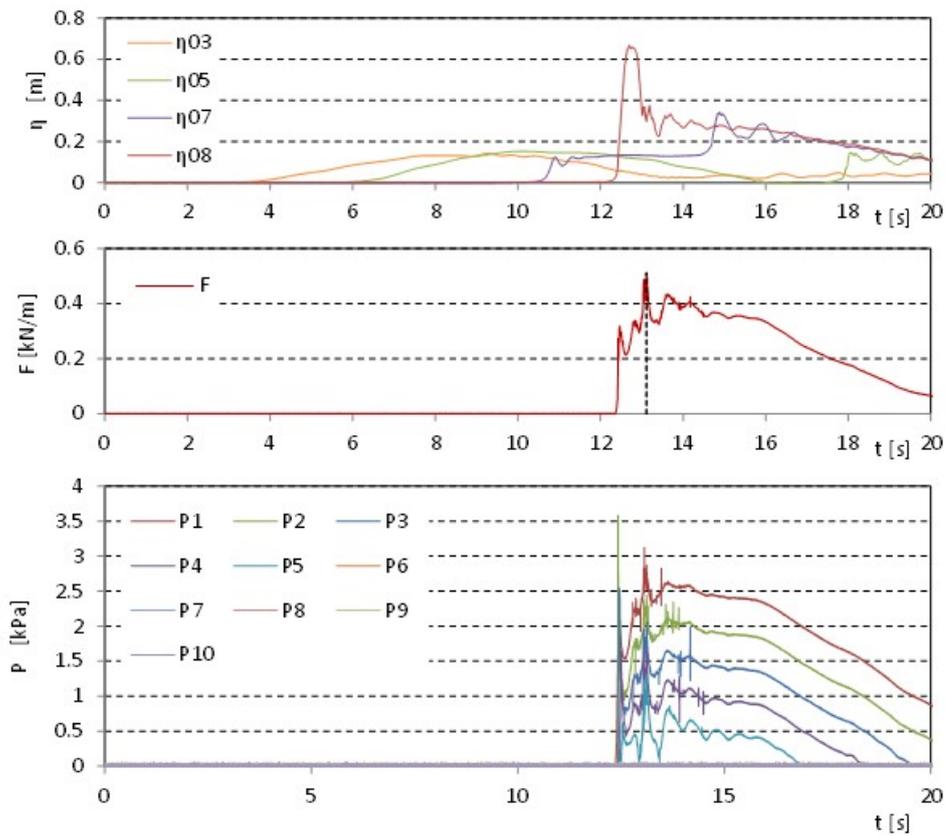


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0m, W32)

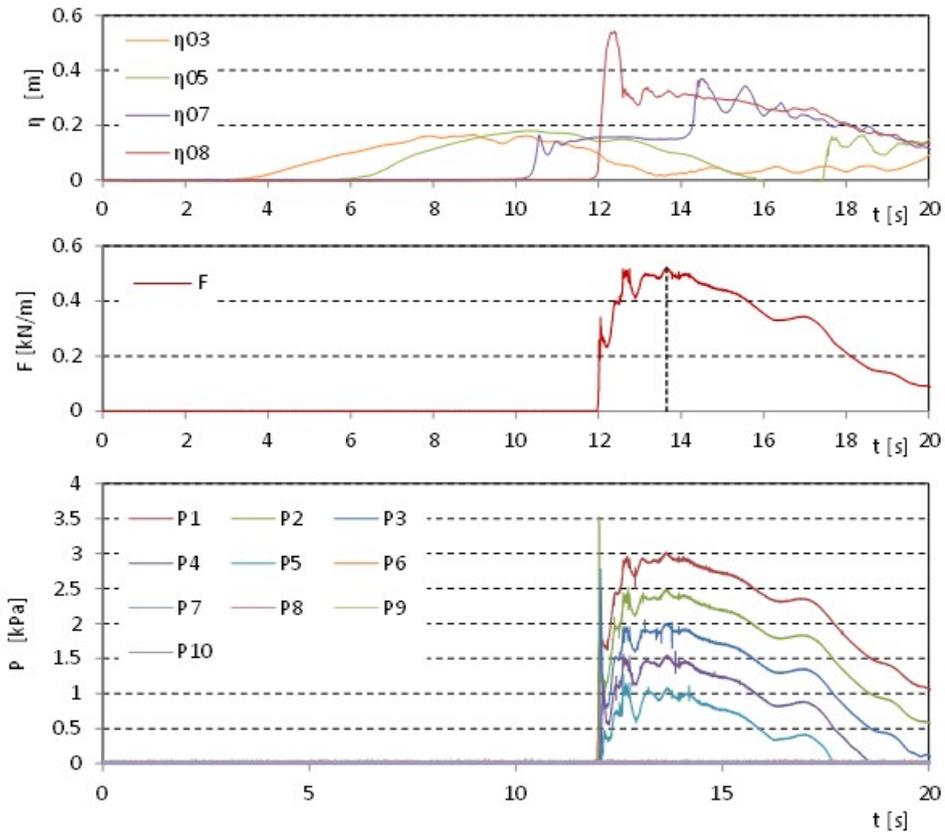


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0m, W33)

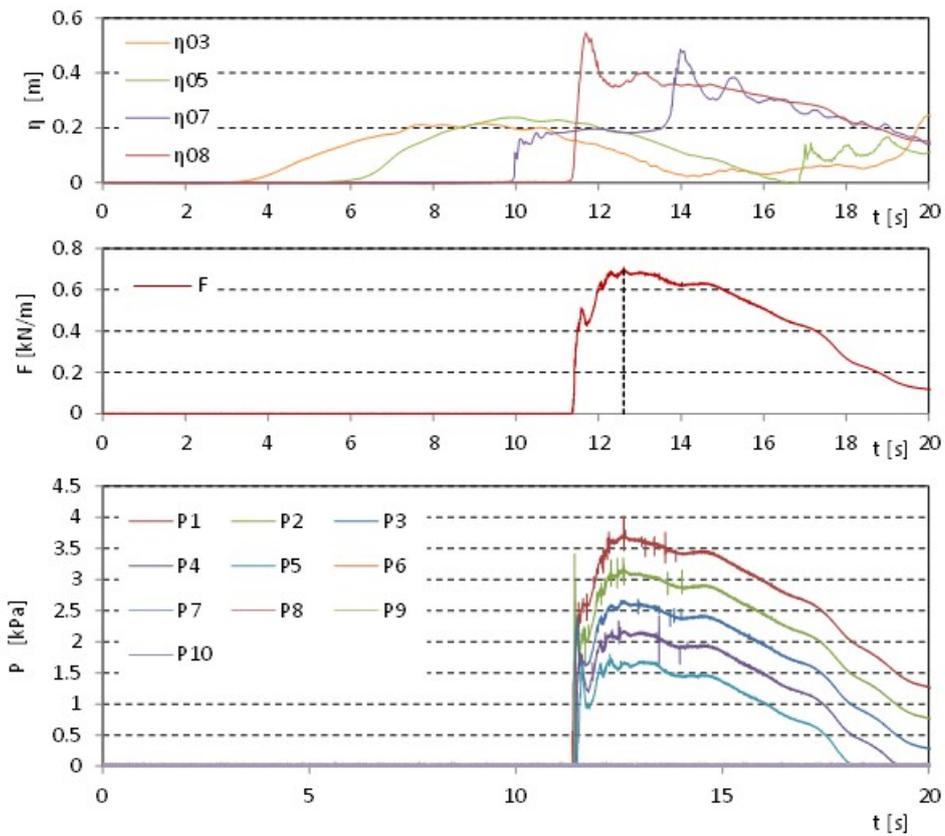


図 II.3.2-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0m, W34)

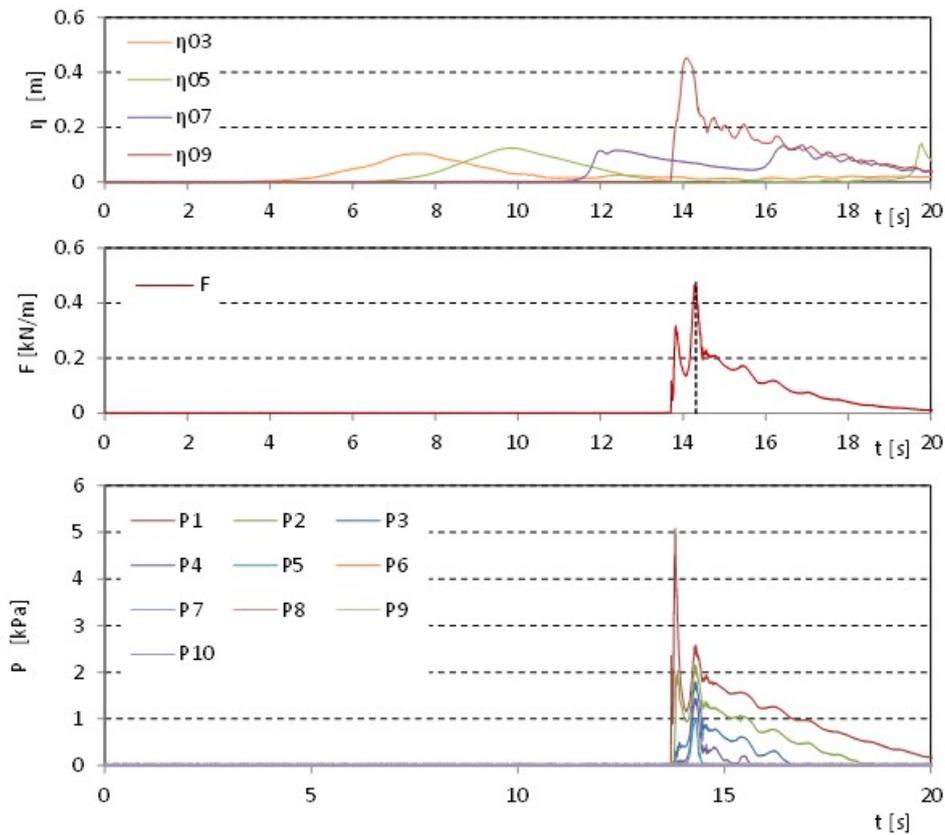


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, W11)

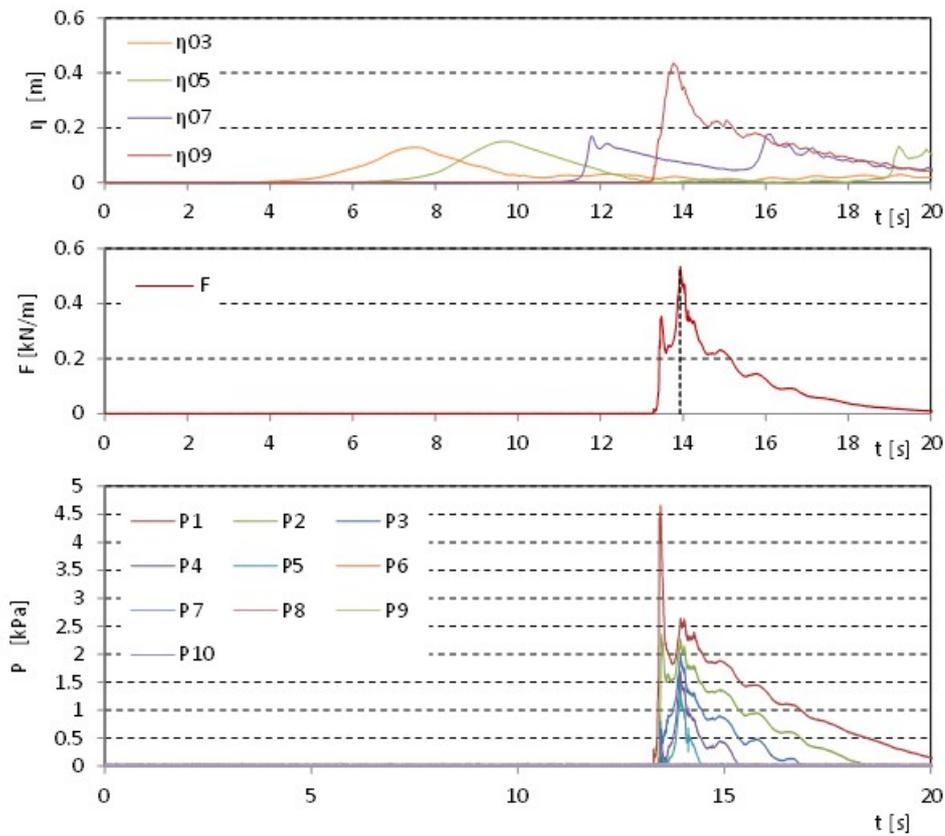


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, W12)

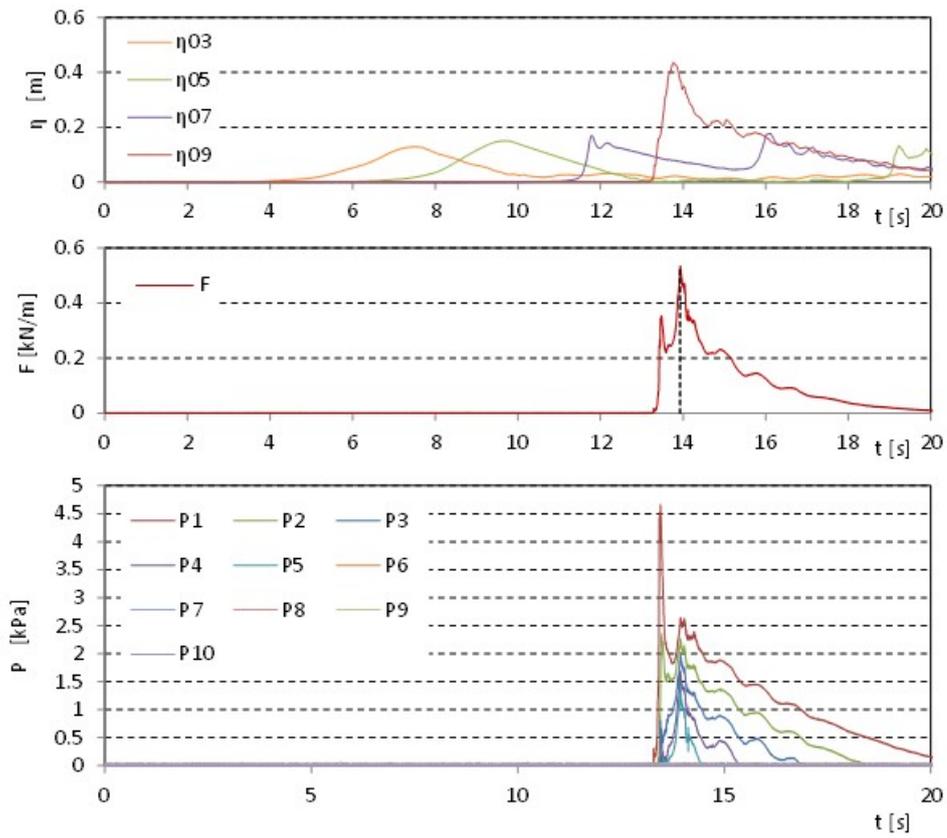


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, W13)

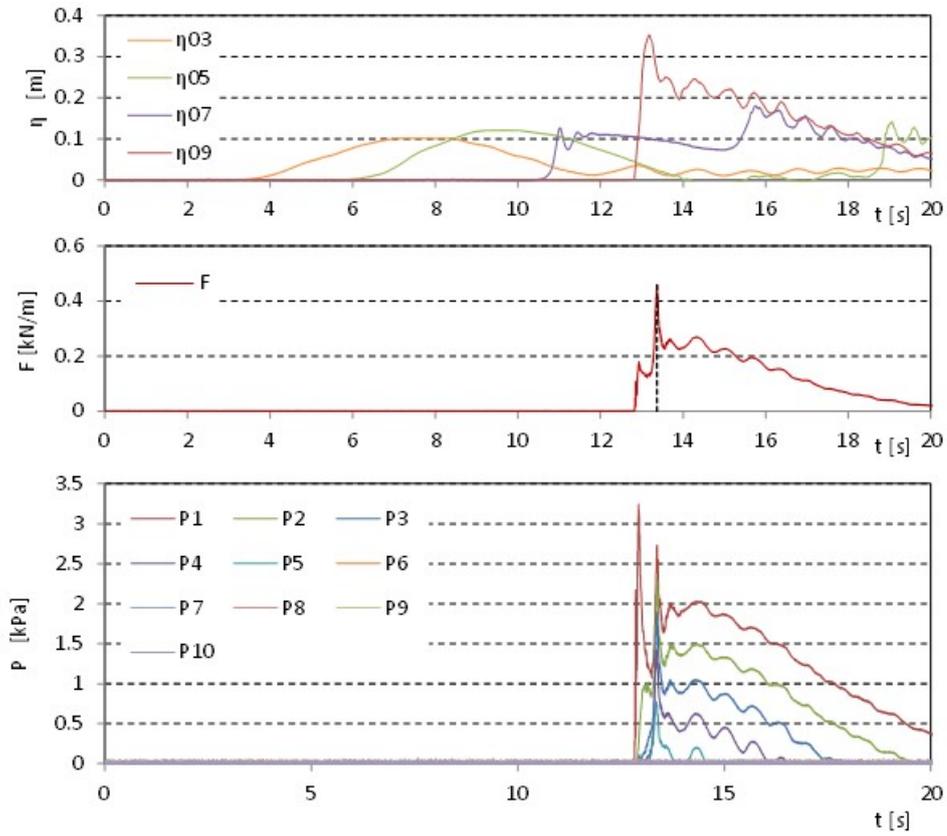


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, W21)

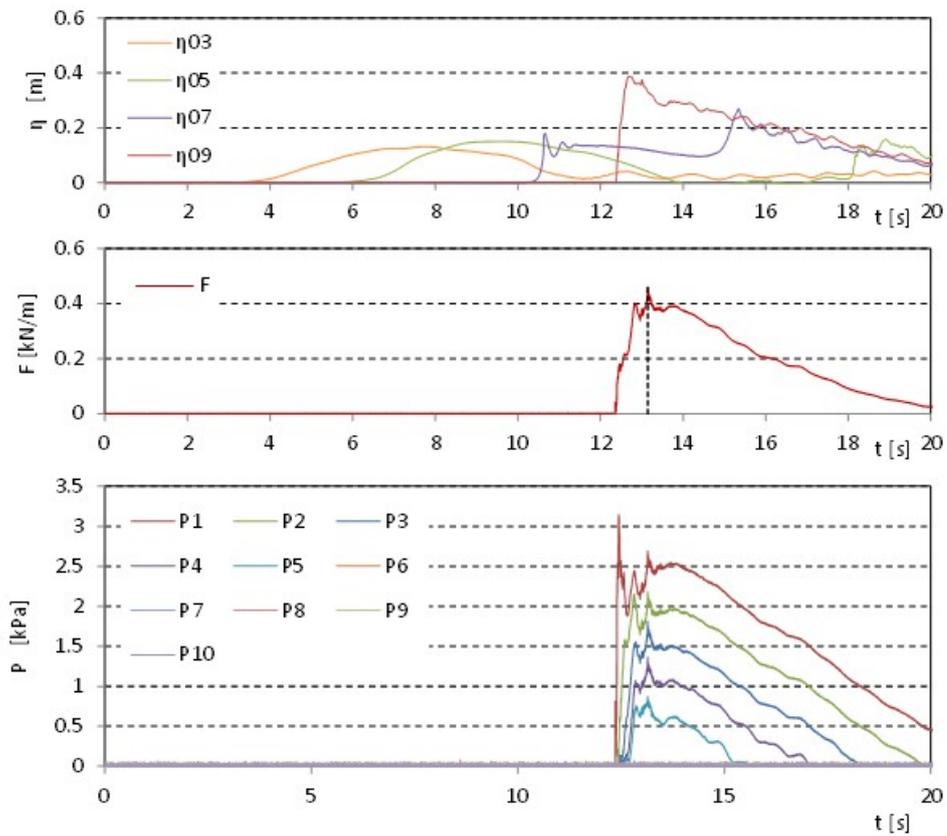


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, W22)

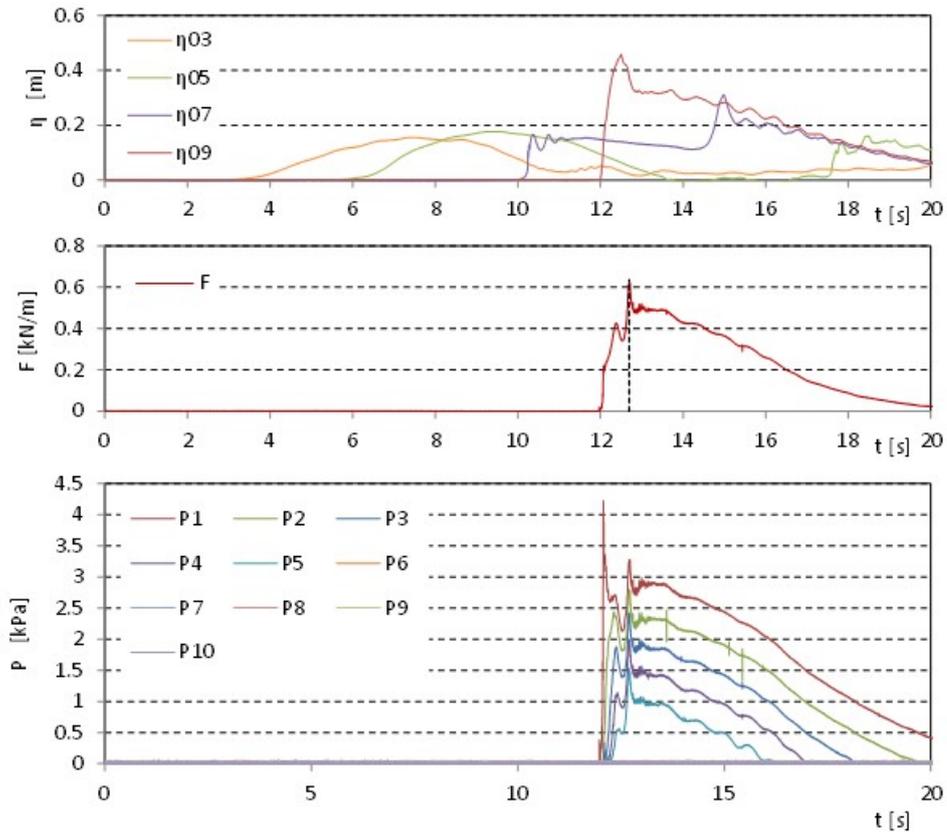


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, W23)

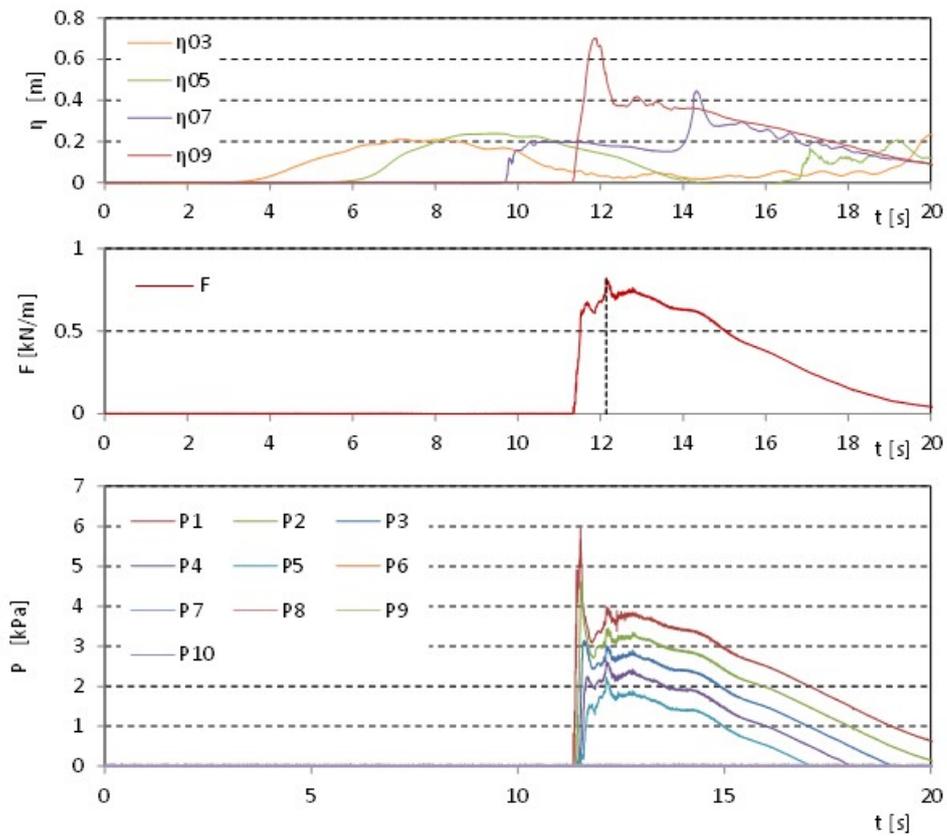


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, W24)

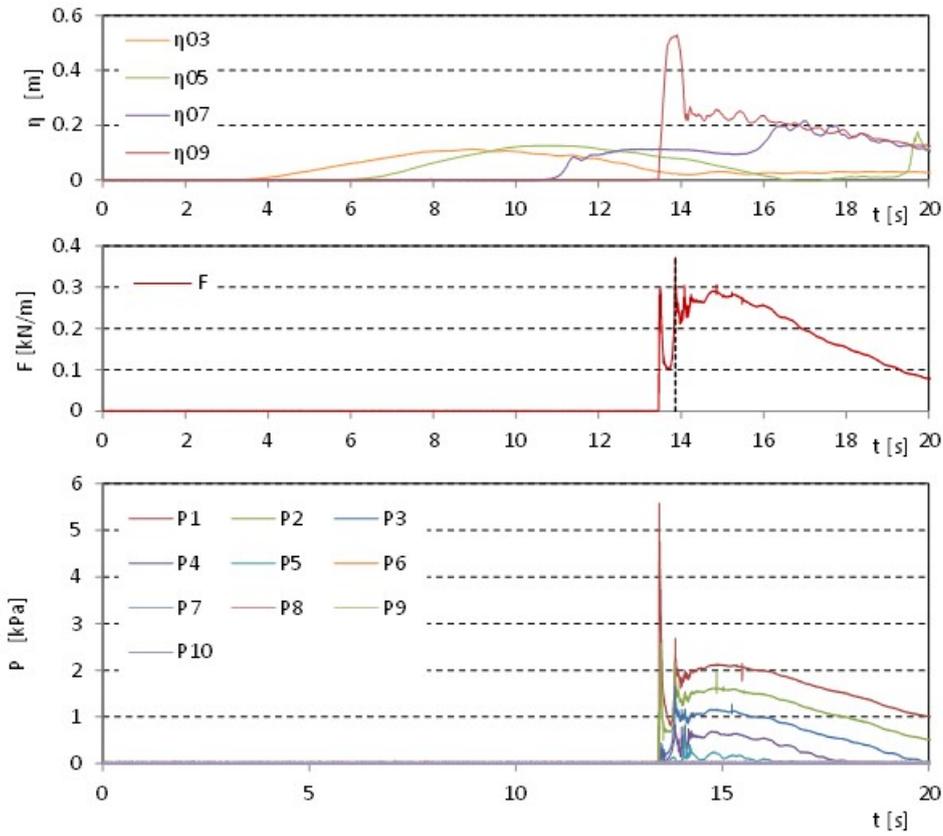


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, W31)

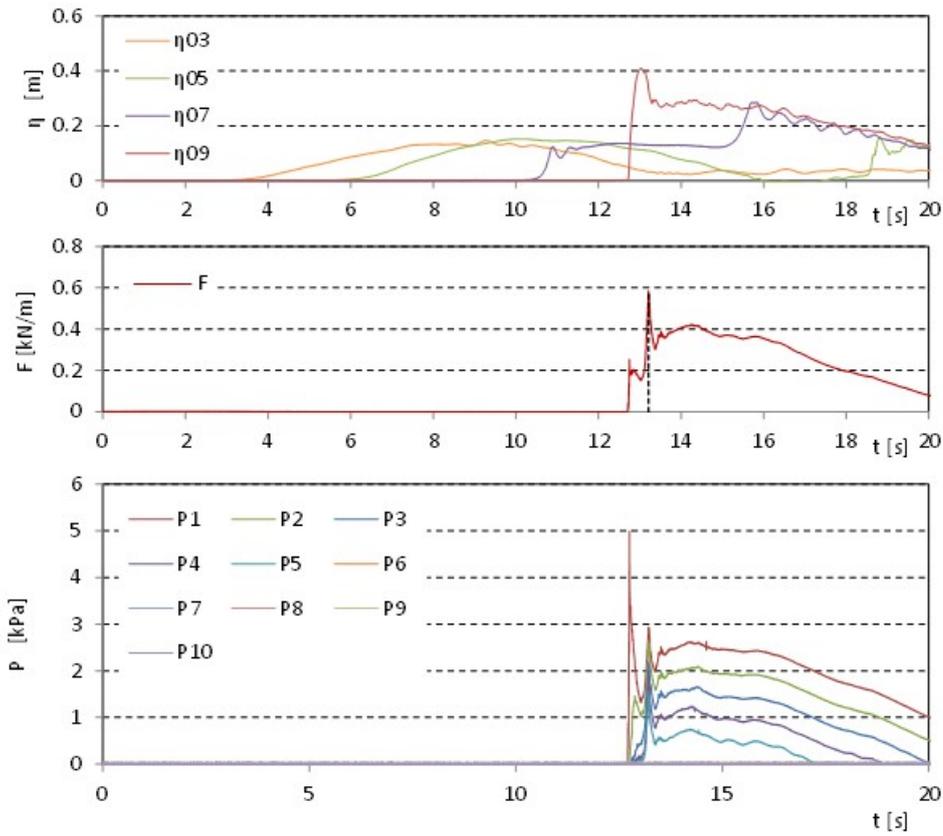


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, W32)

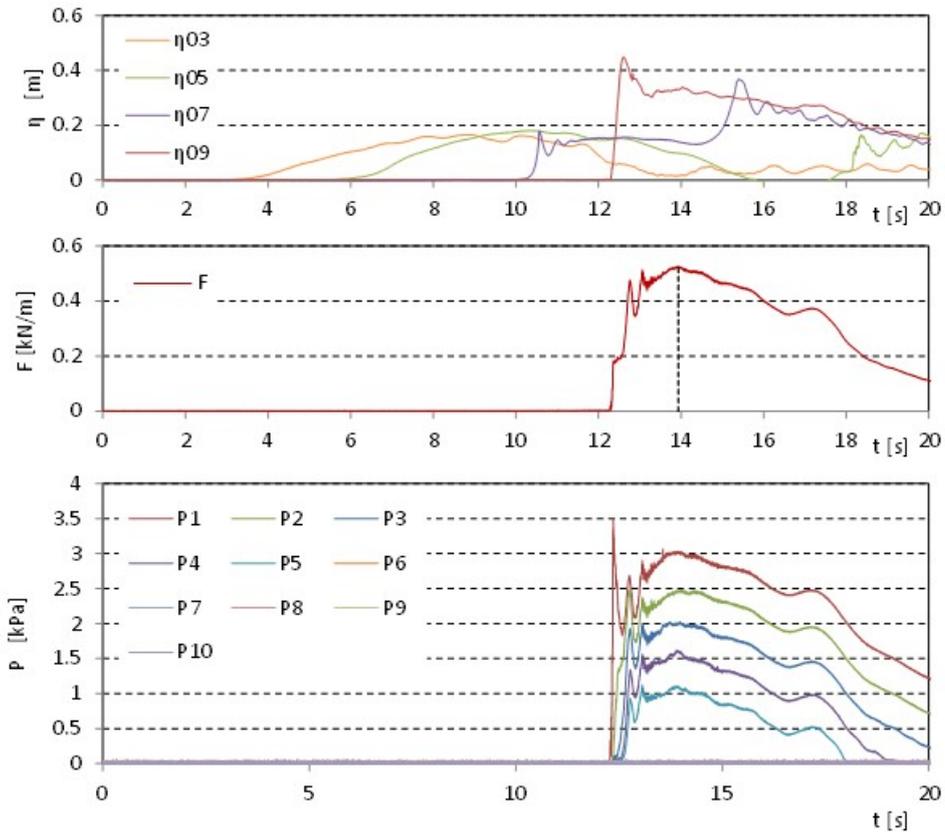


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, W33)

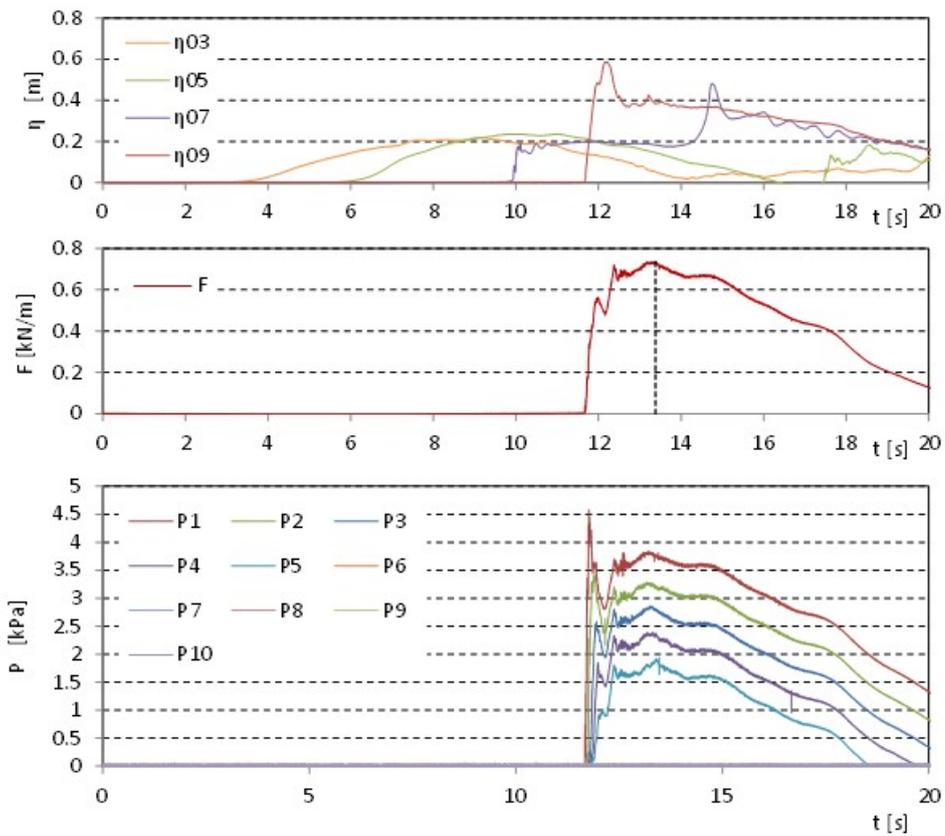


図 II.3.2-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, W34)

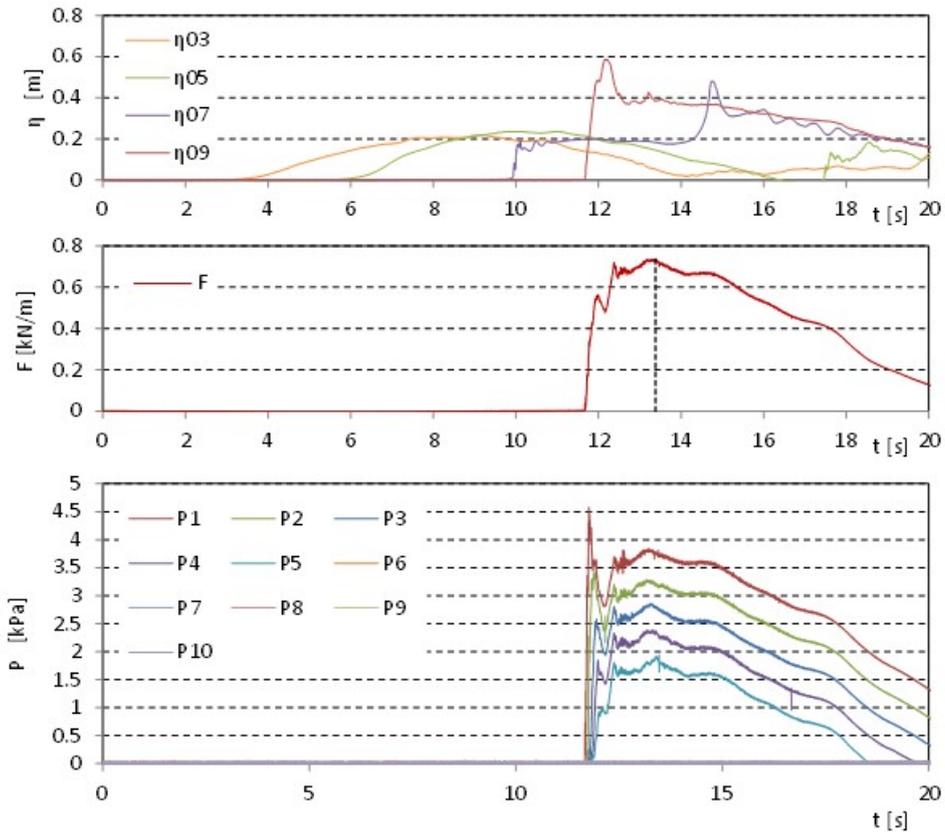


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, W11)

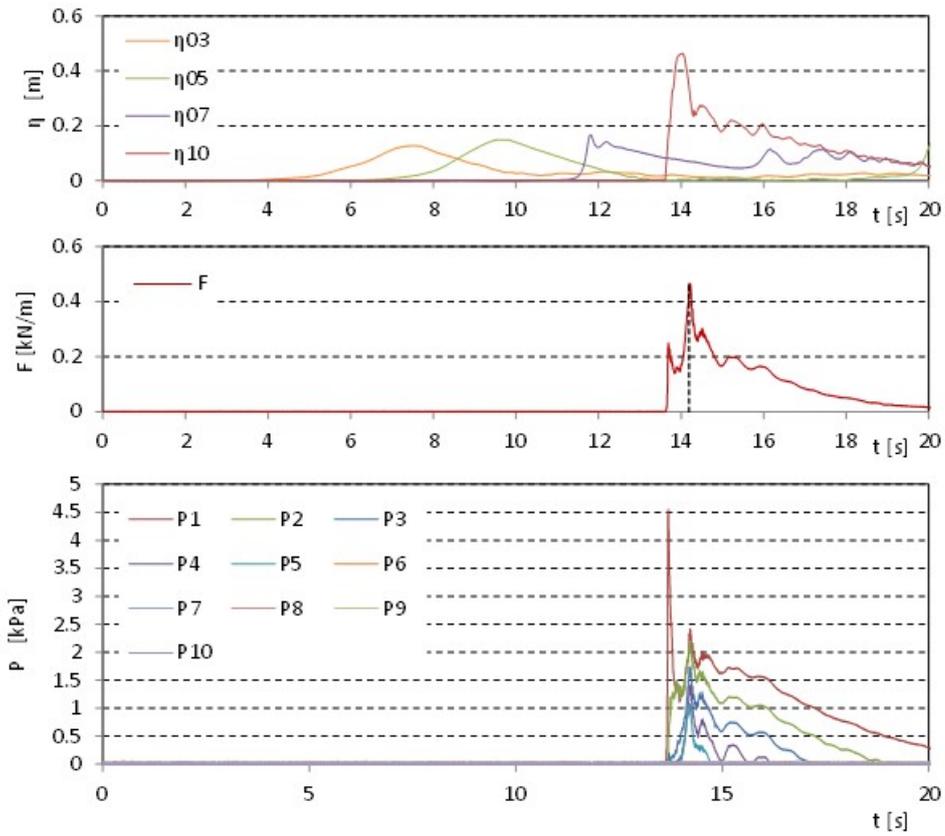


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, W12)

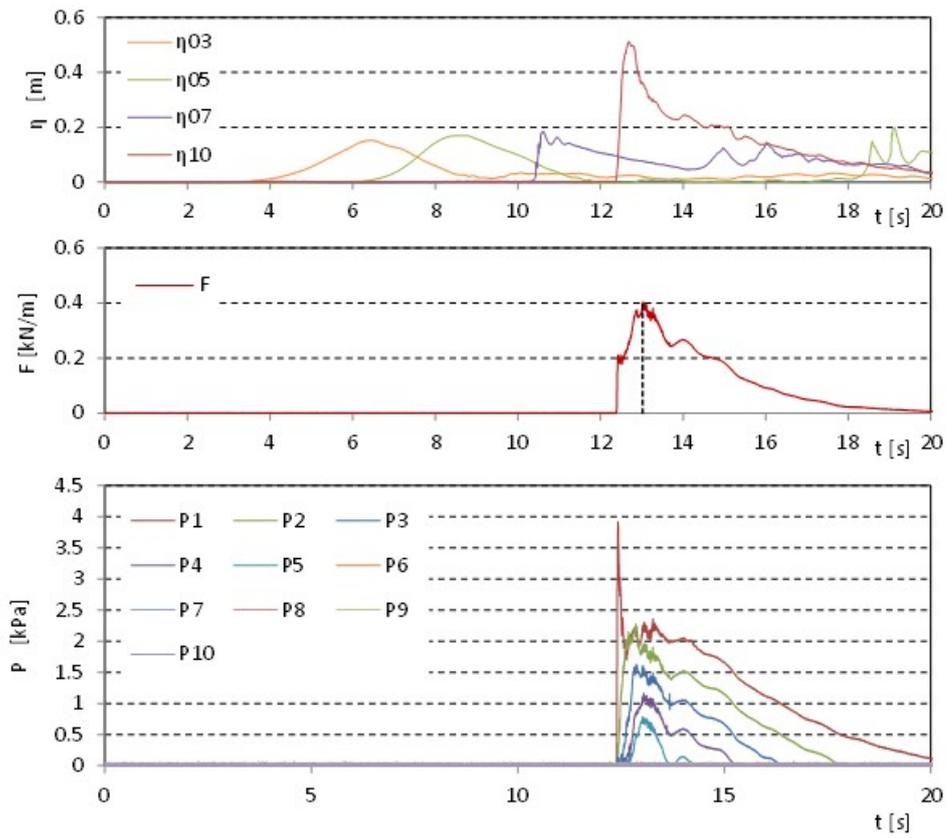


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, W13)

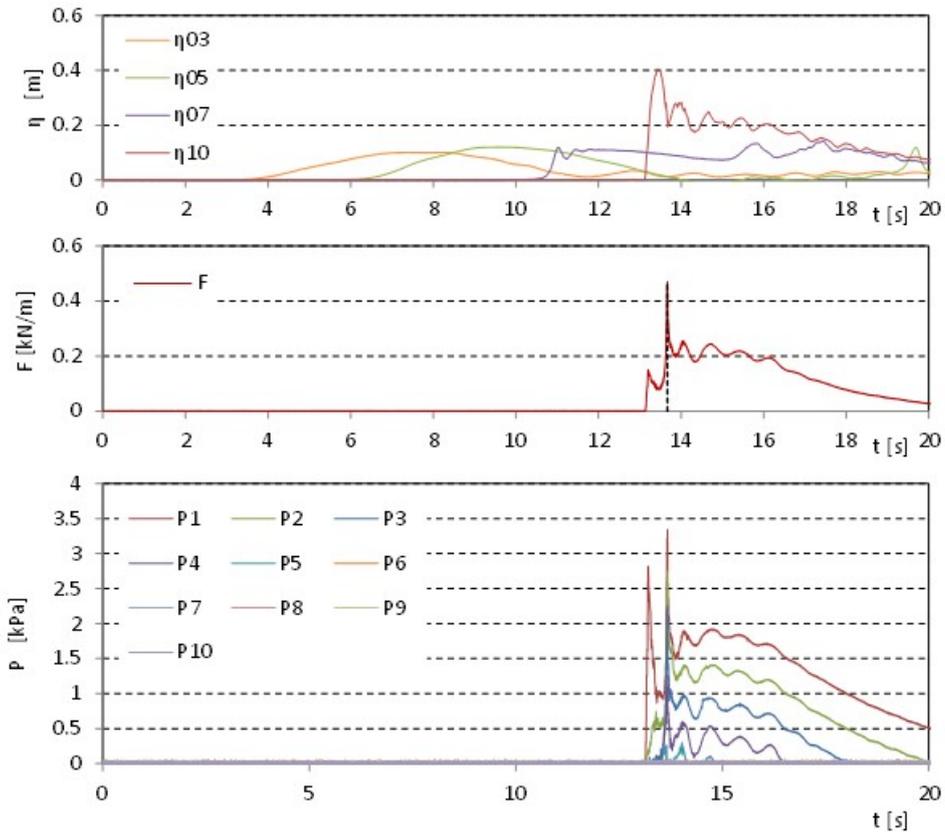


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, W21)

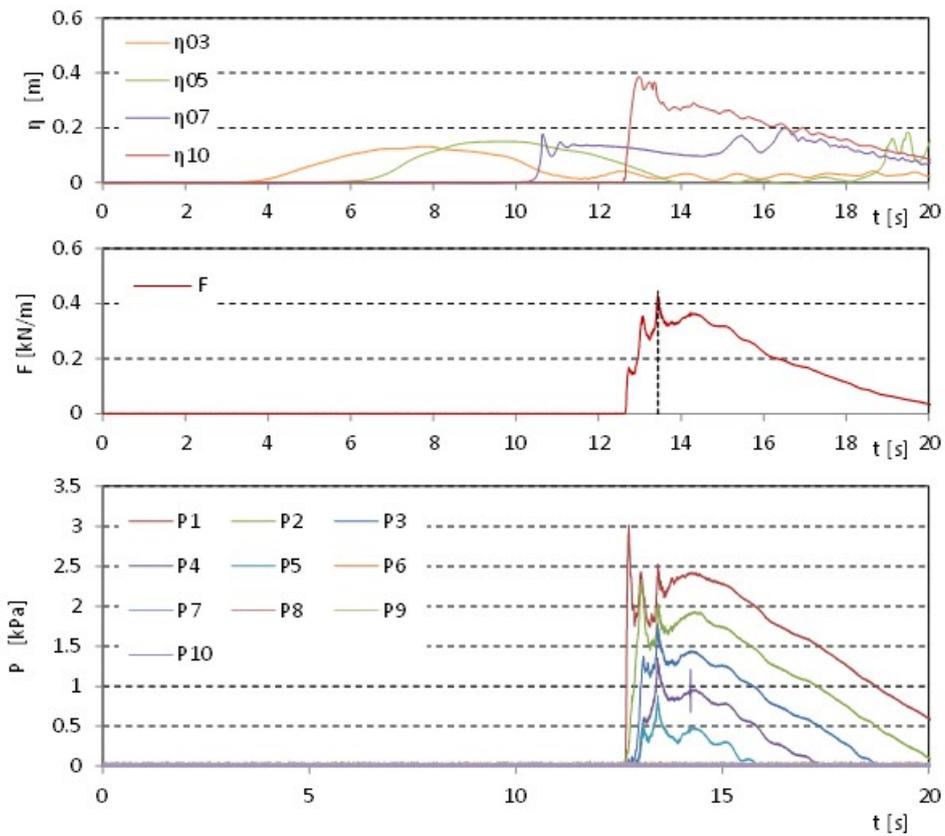


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, W22)

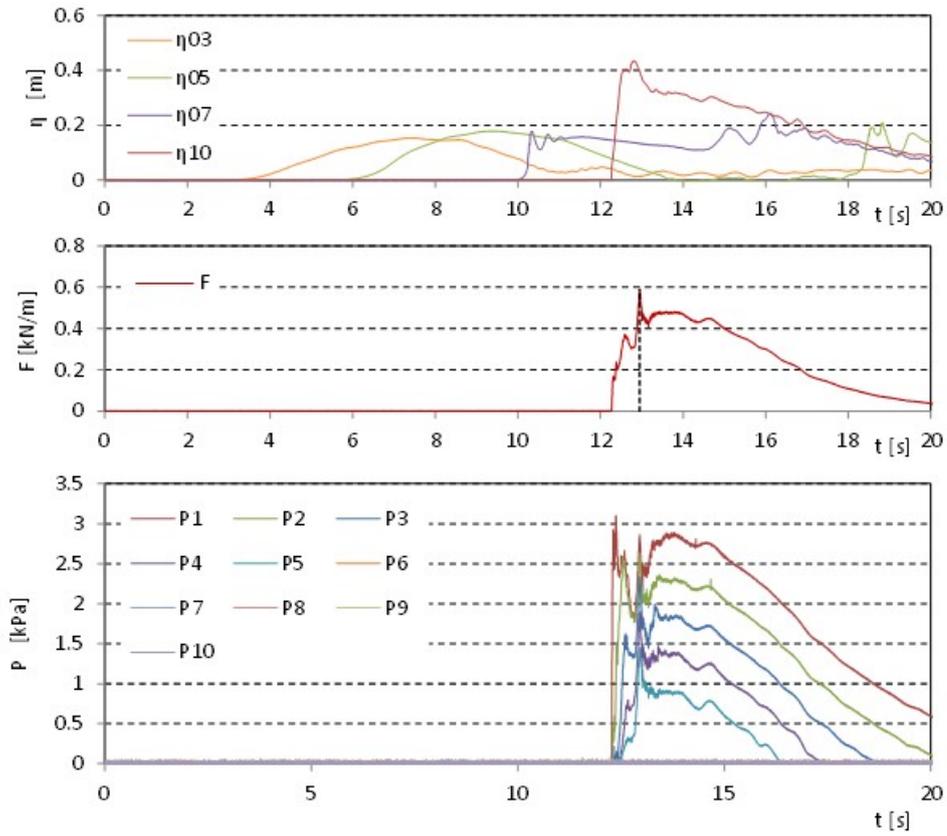


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, W23)

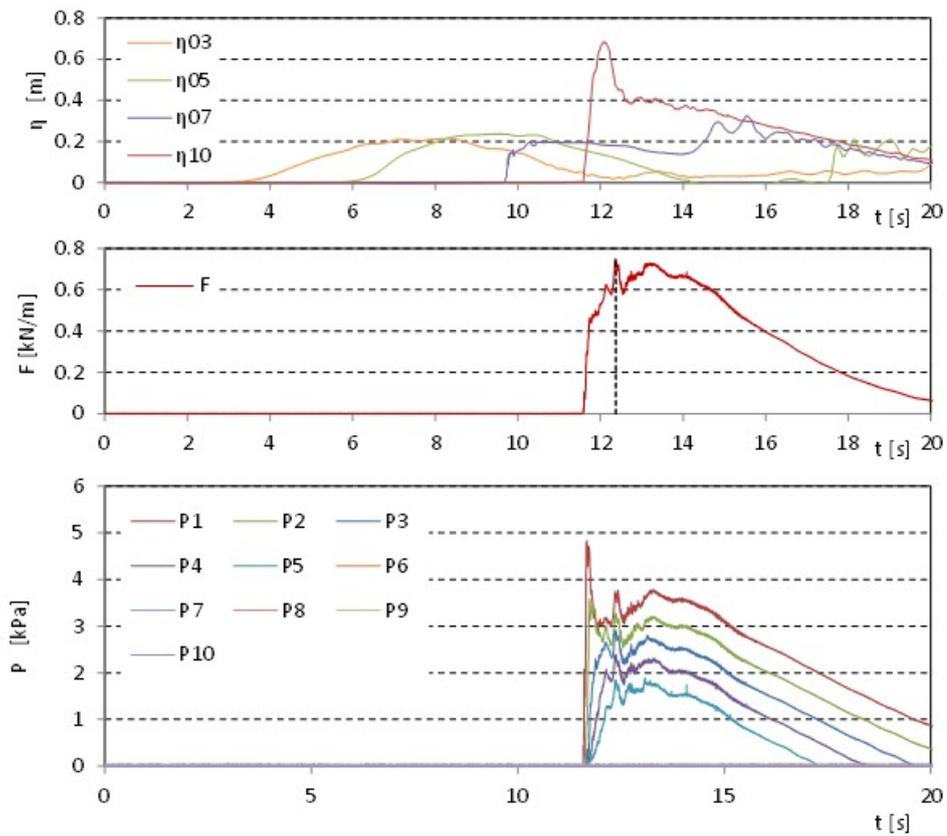


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, W24)

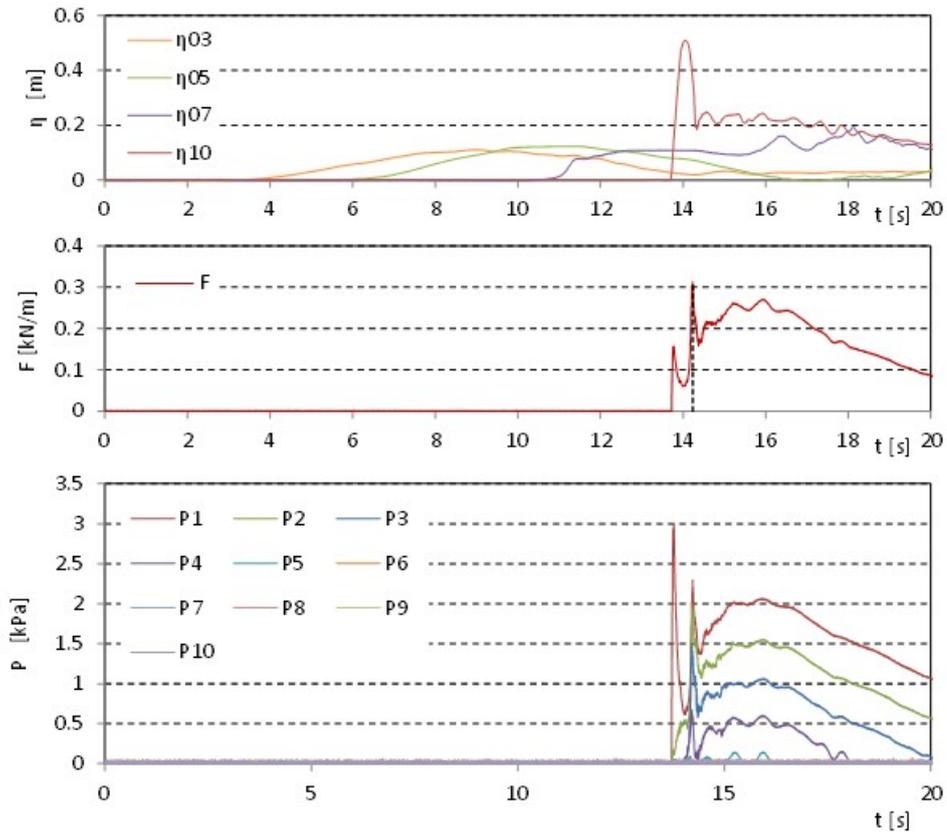


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, W31)

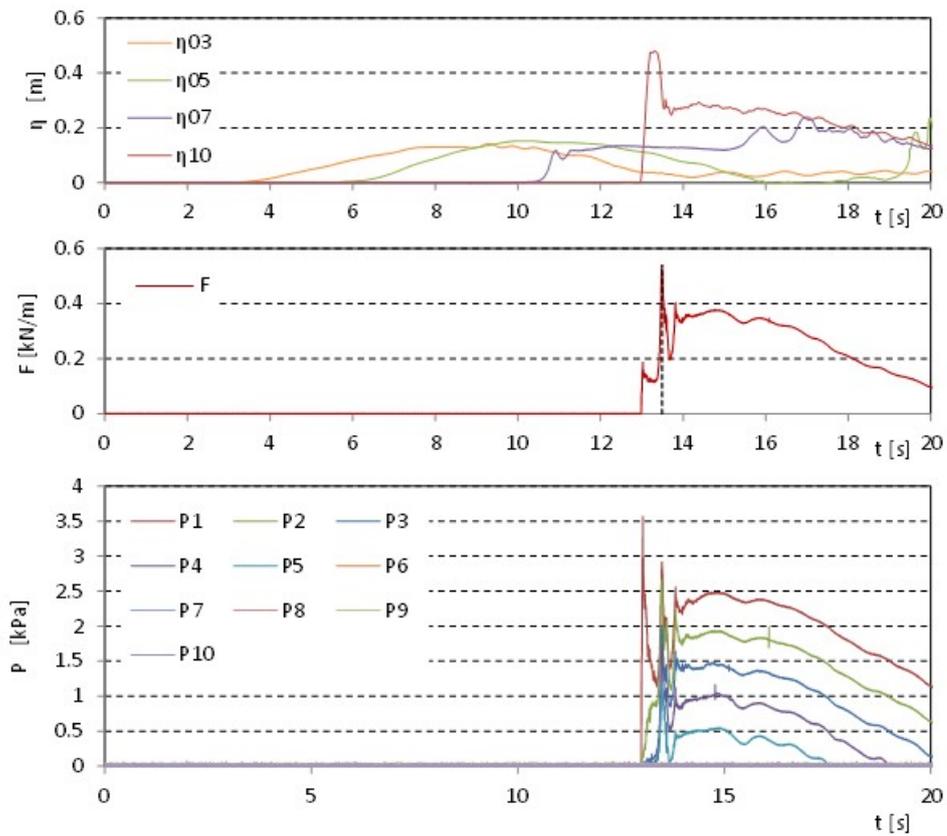


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, W32)

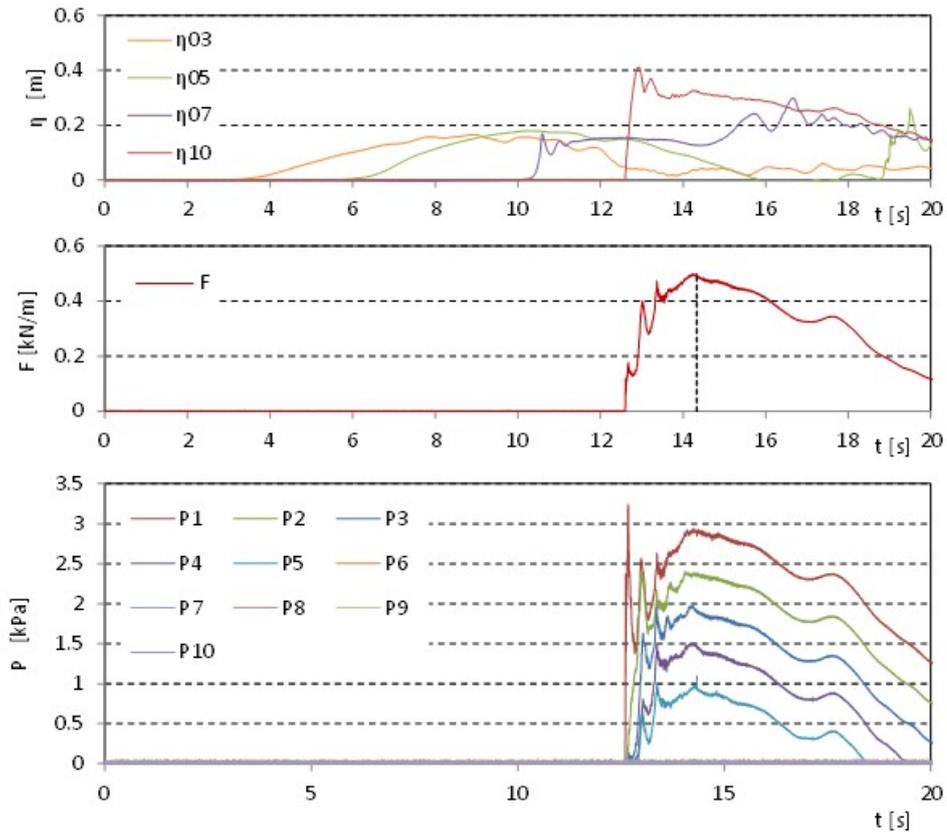


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, W33)

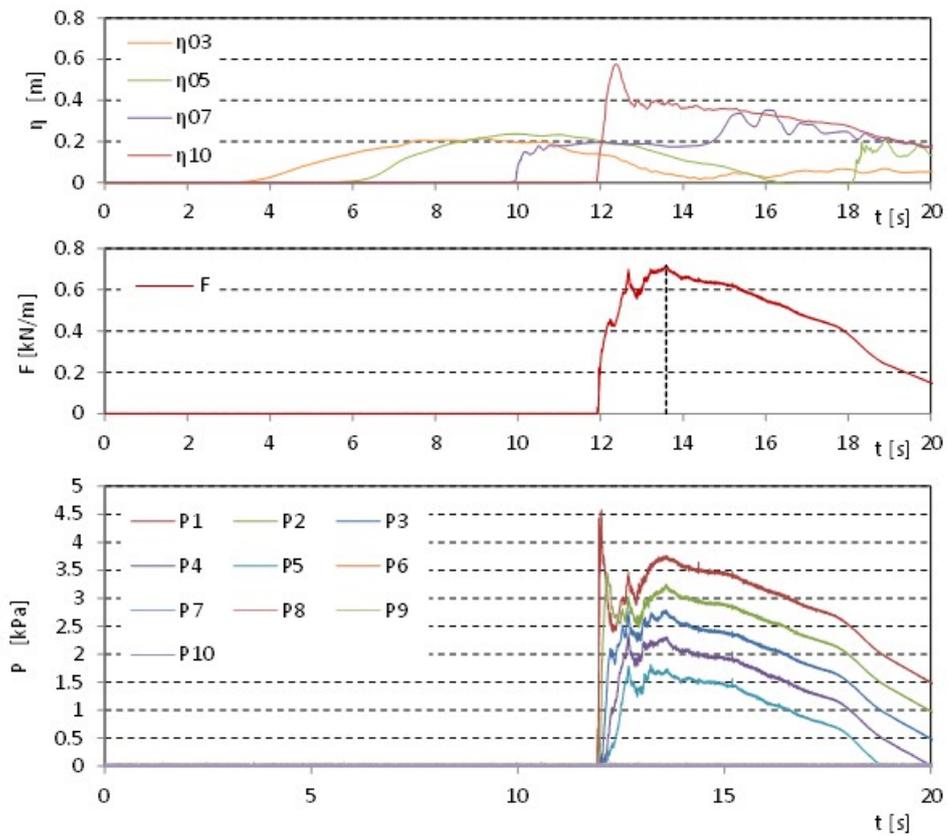


図 II.3.2-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, W34)

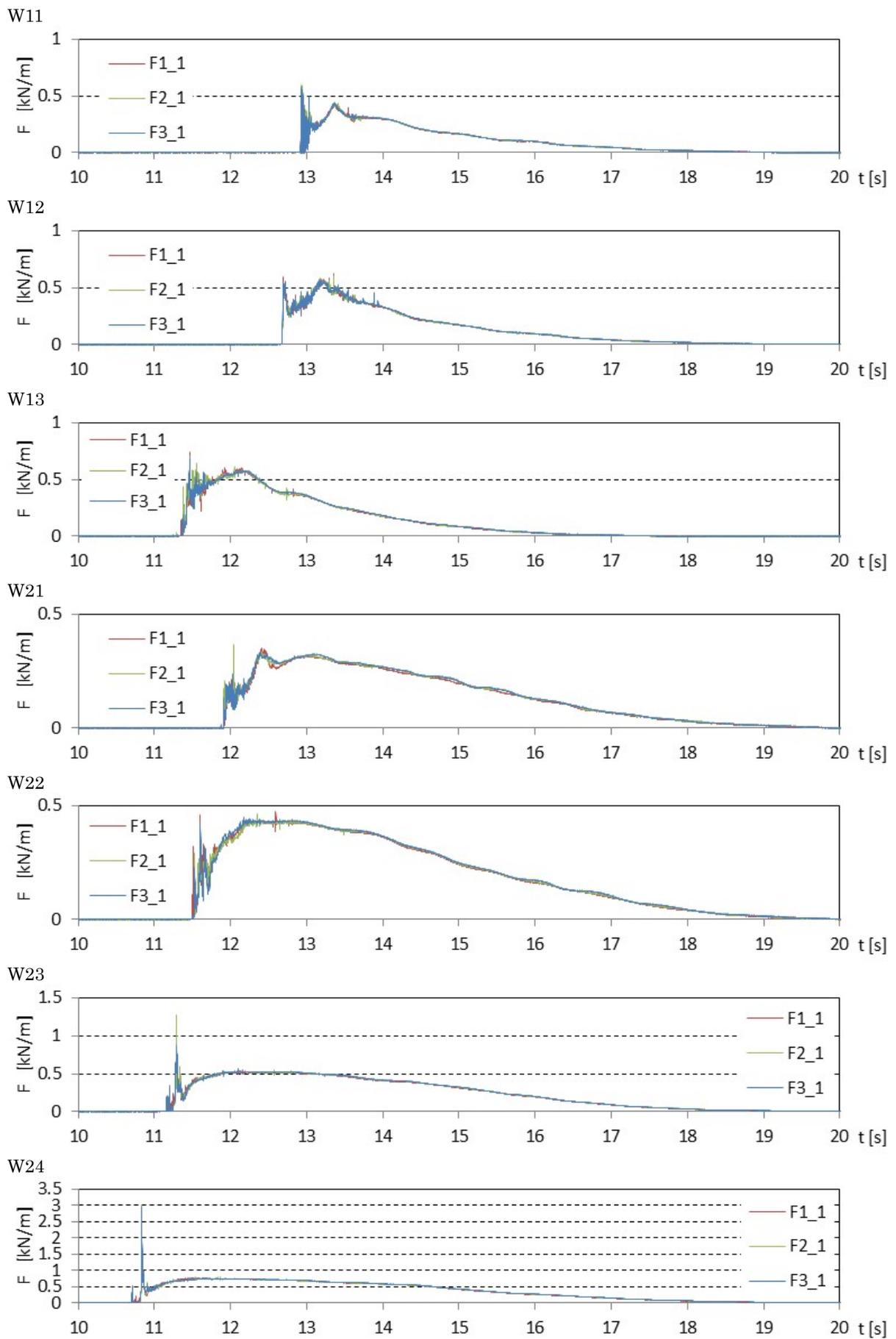


図 II.3.2-7 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体高さ L , 設置位置 0m , 1回目)

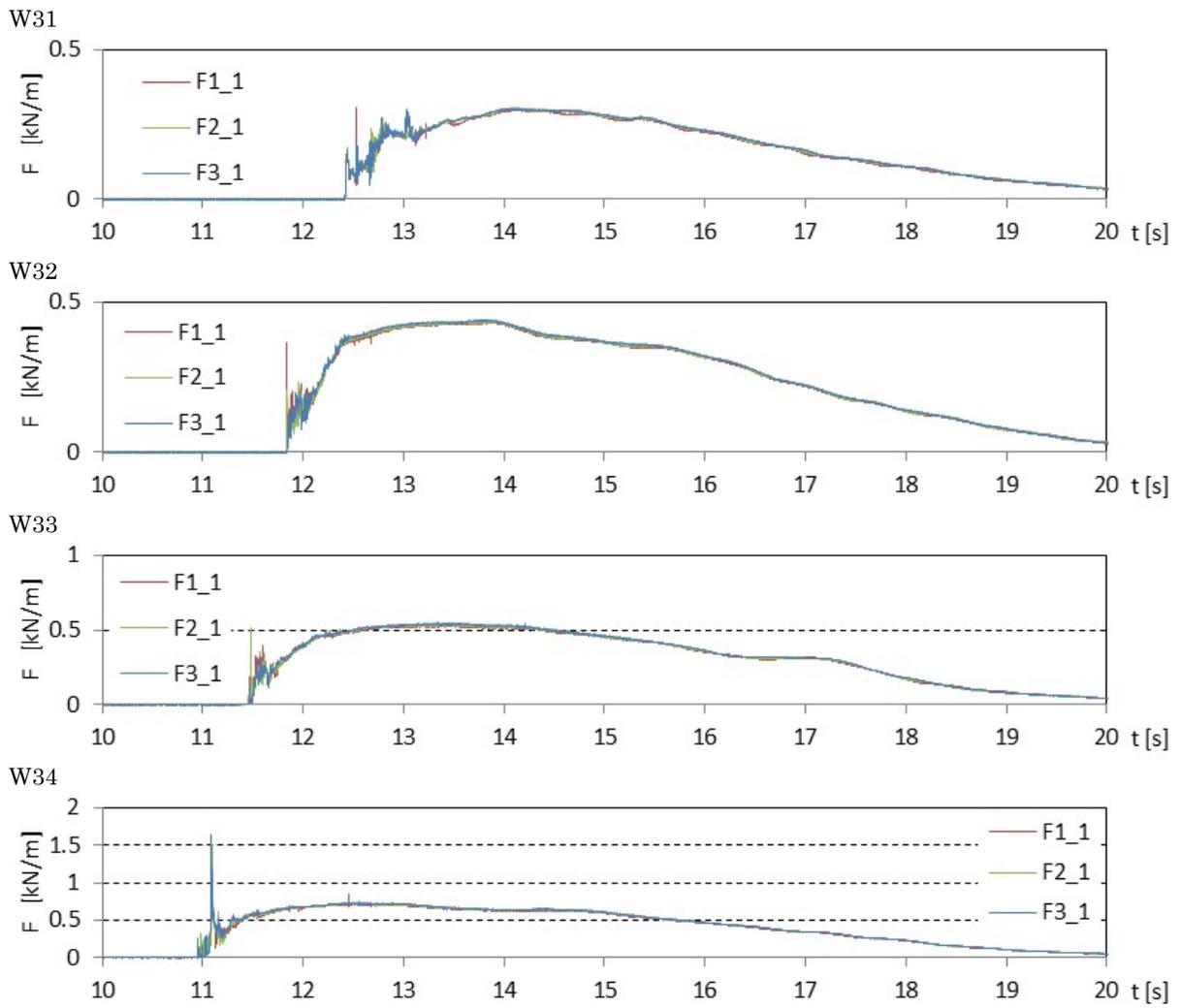


図 II.3.2-7 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体高さ L , 設置位置 0m, 1回目)

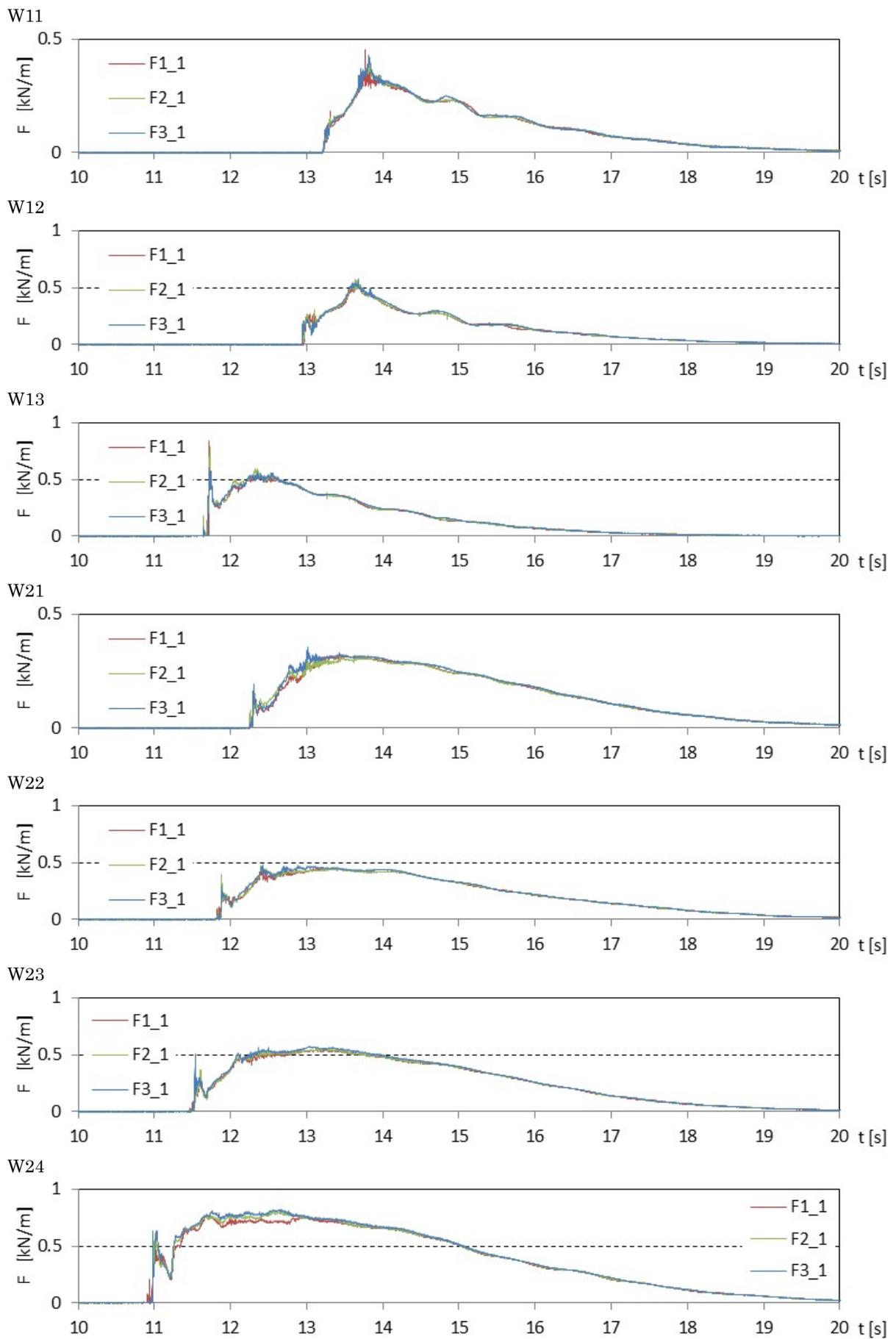


図 II.3.2-8 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体高さ L , 設置位置 0.625m , 1回目)

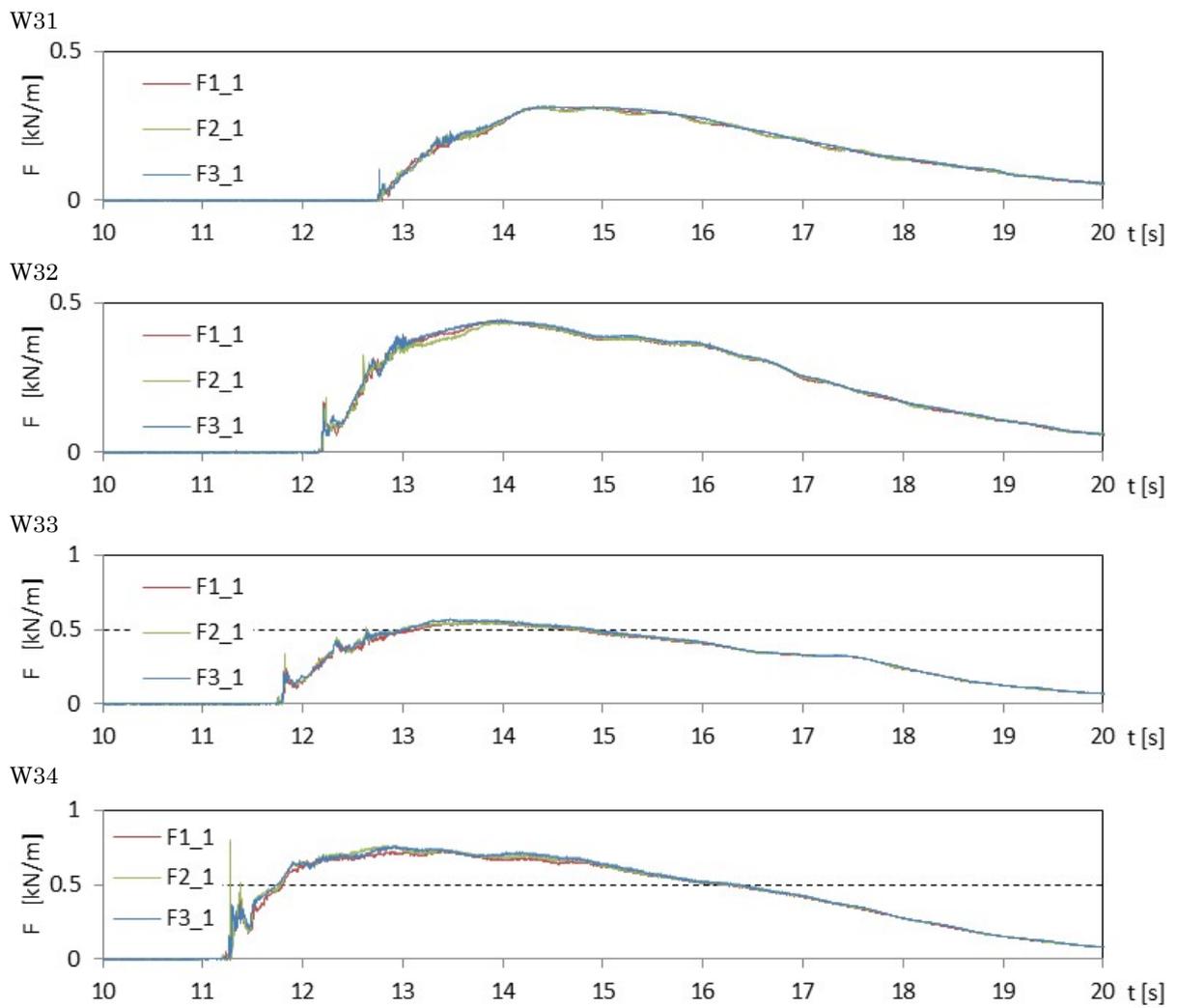


図 II.3.2-8 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m, 1 回目)

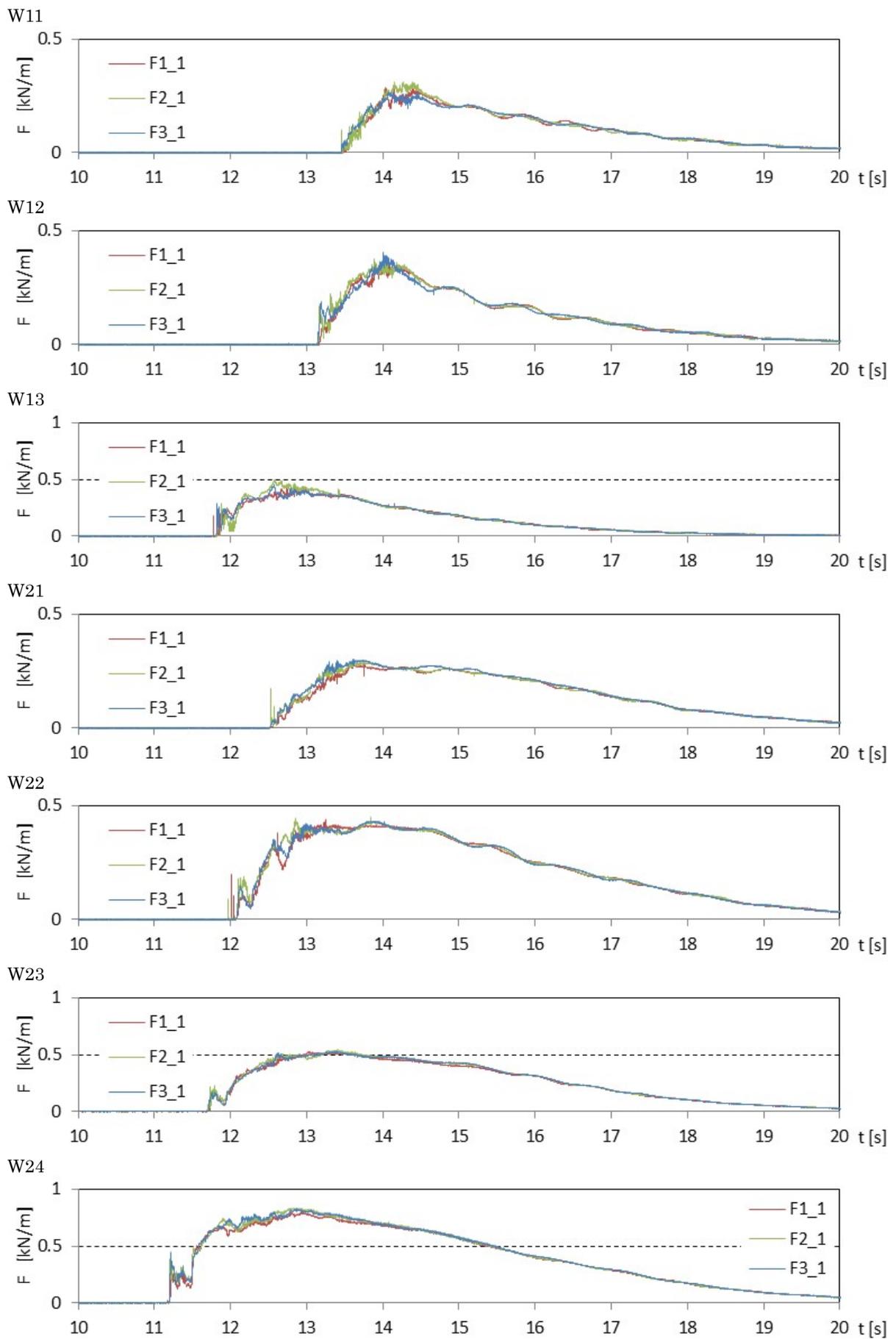


図 II.3.2-9 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, 1 回目)

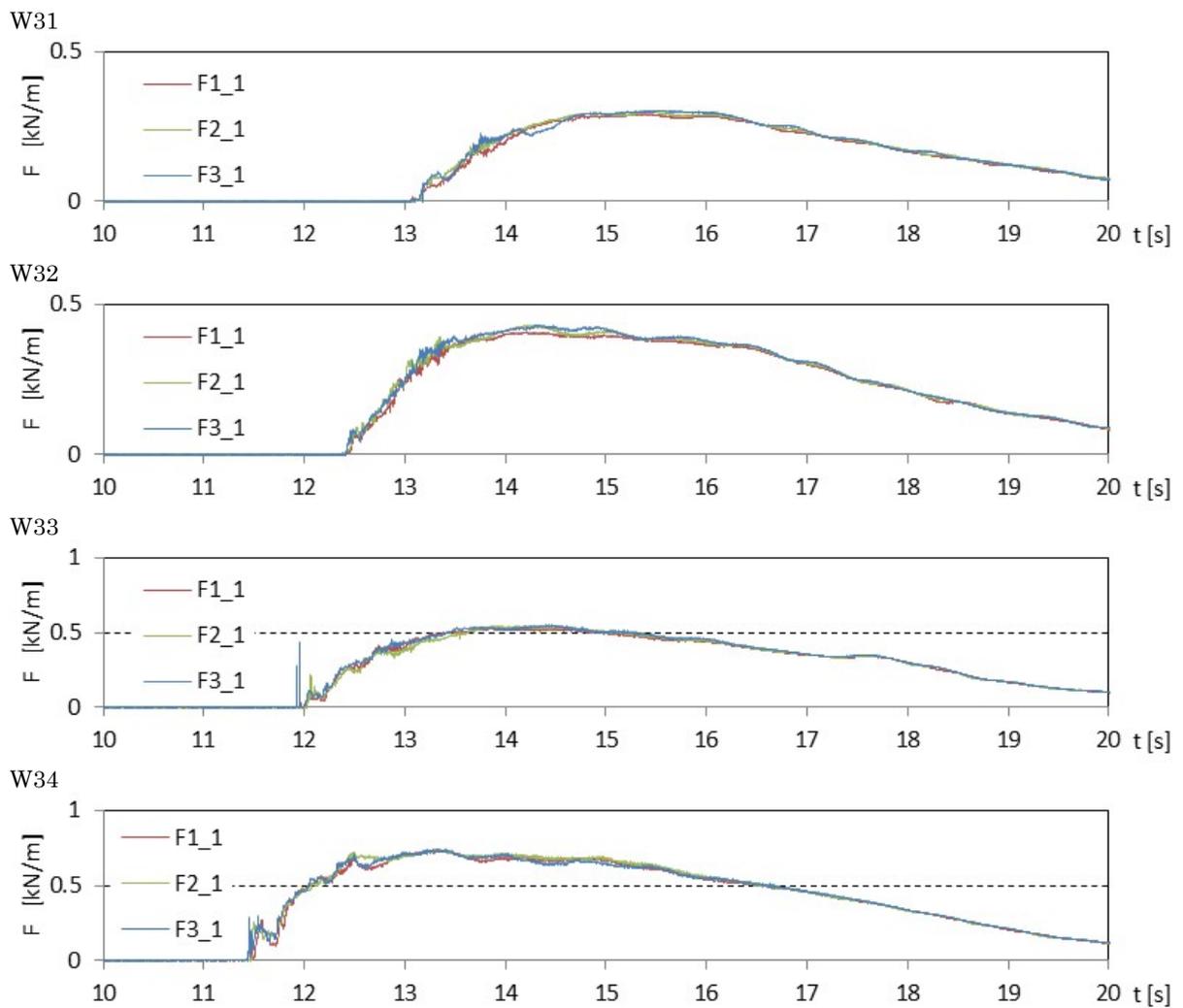


図 II.3.2-9 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, 1回目)

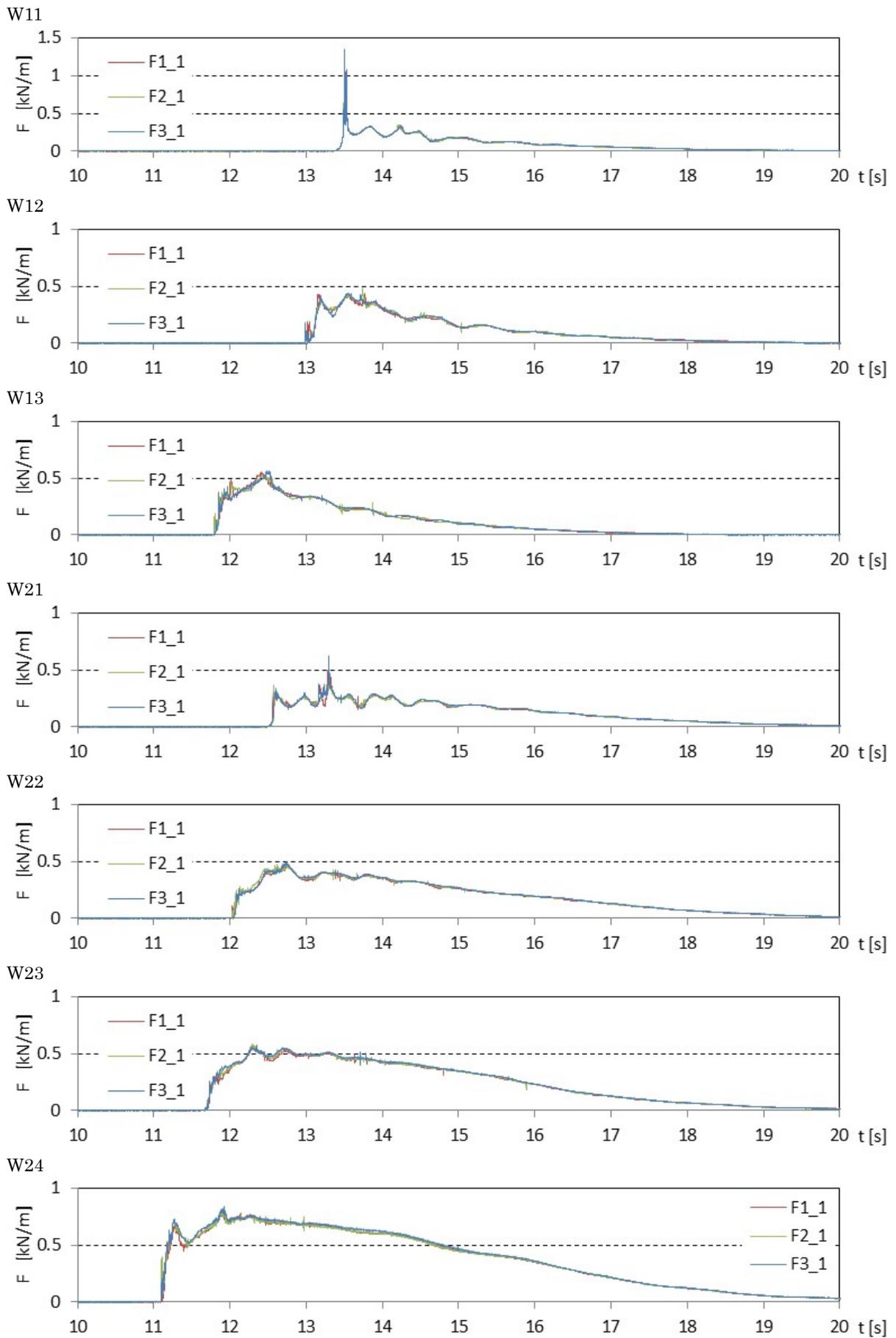


図 II.3.2-10 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体高さ L , 設置位置 $0m$, 1回目)

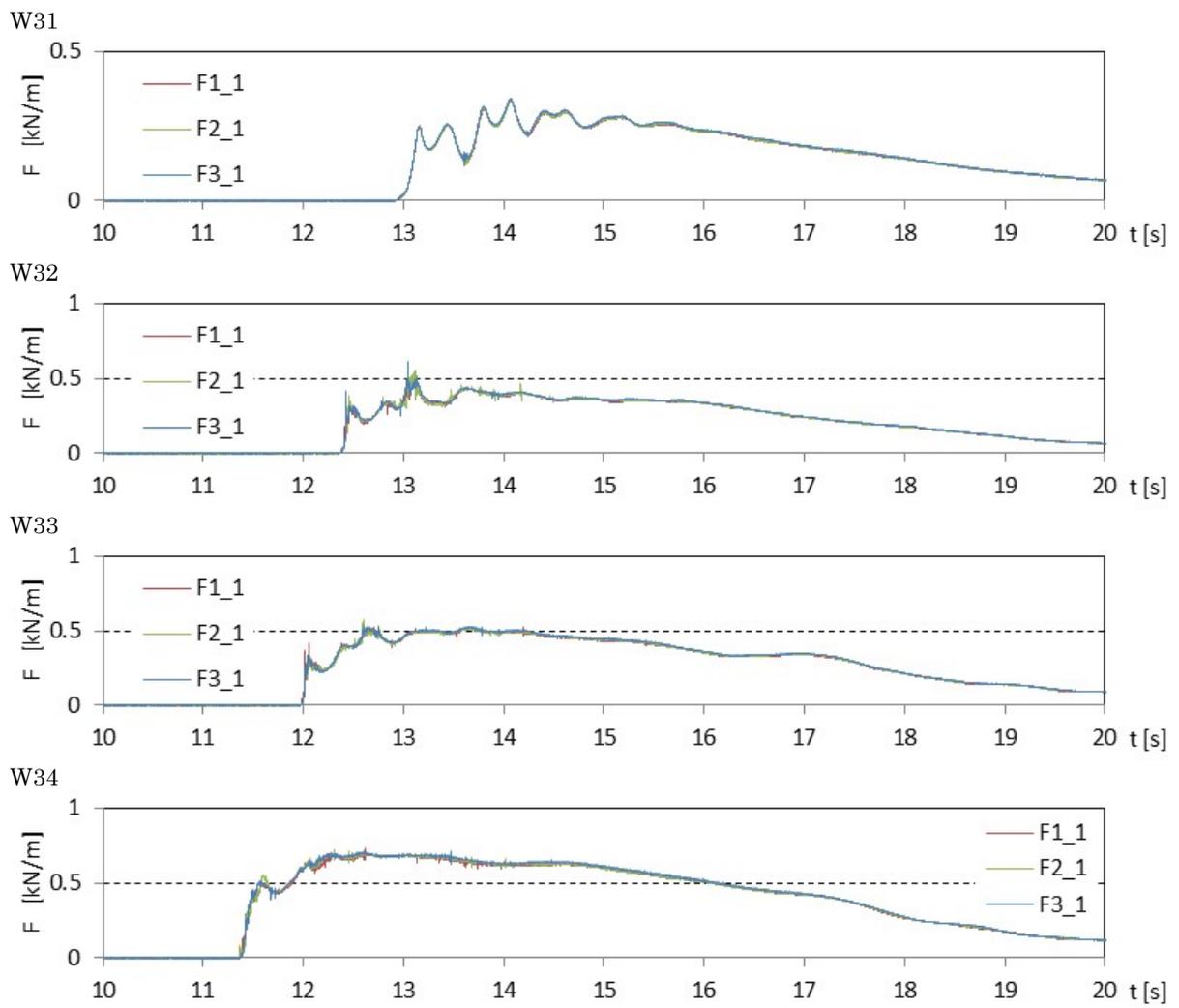


図 II.3.2-10 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0m, 1回目)

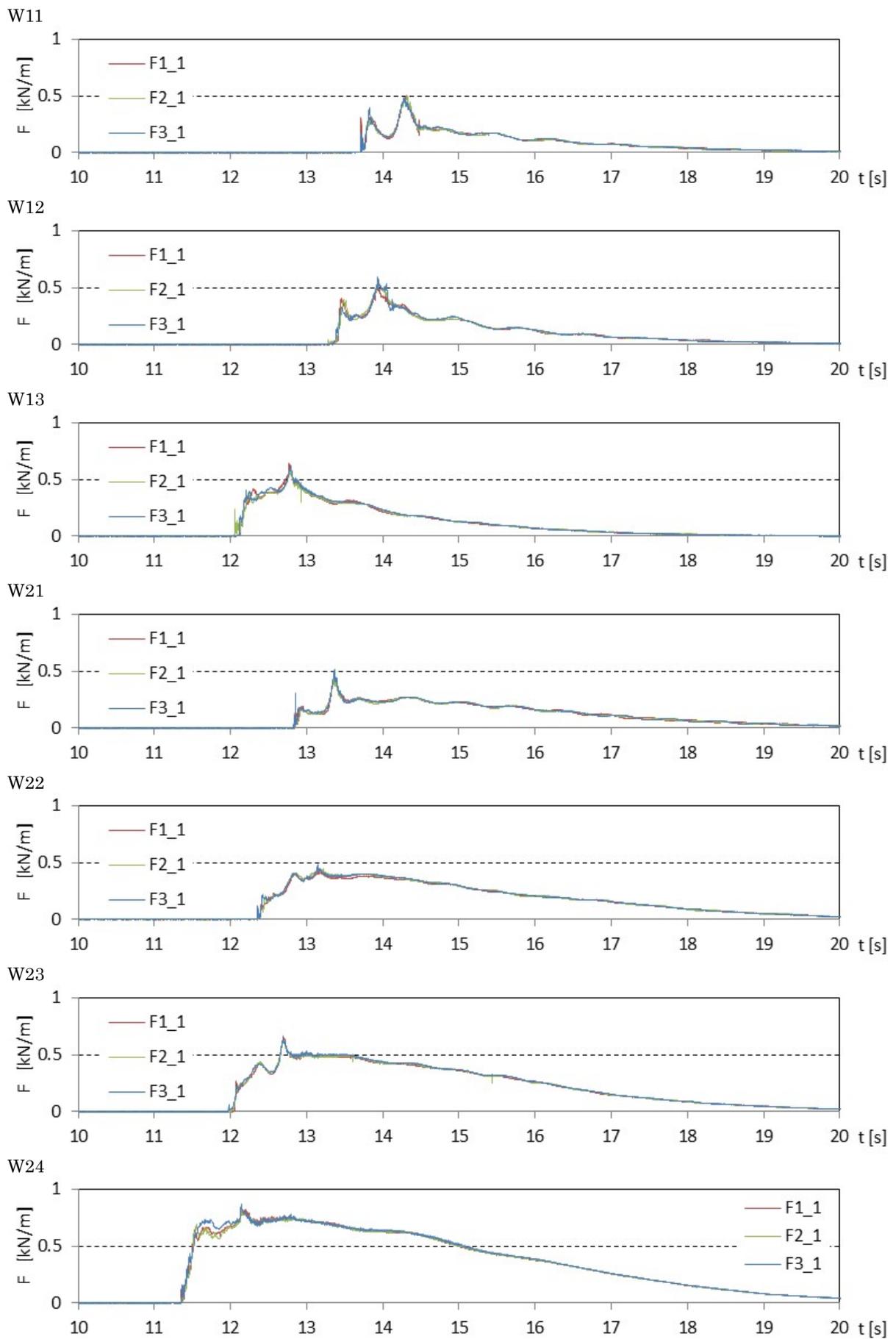


図 II.3.2-11 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体高さ L , 設置位置 $0.625m$, 1 回目)

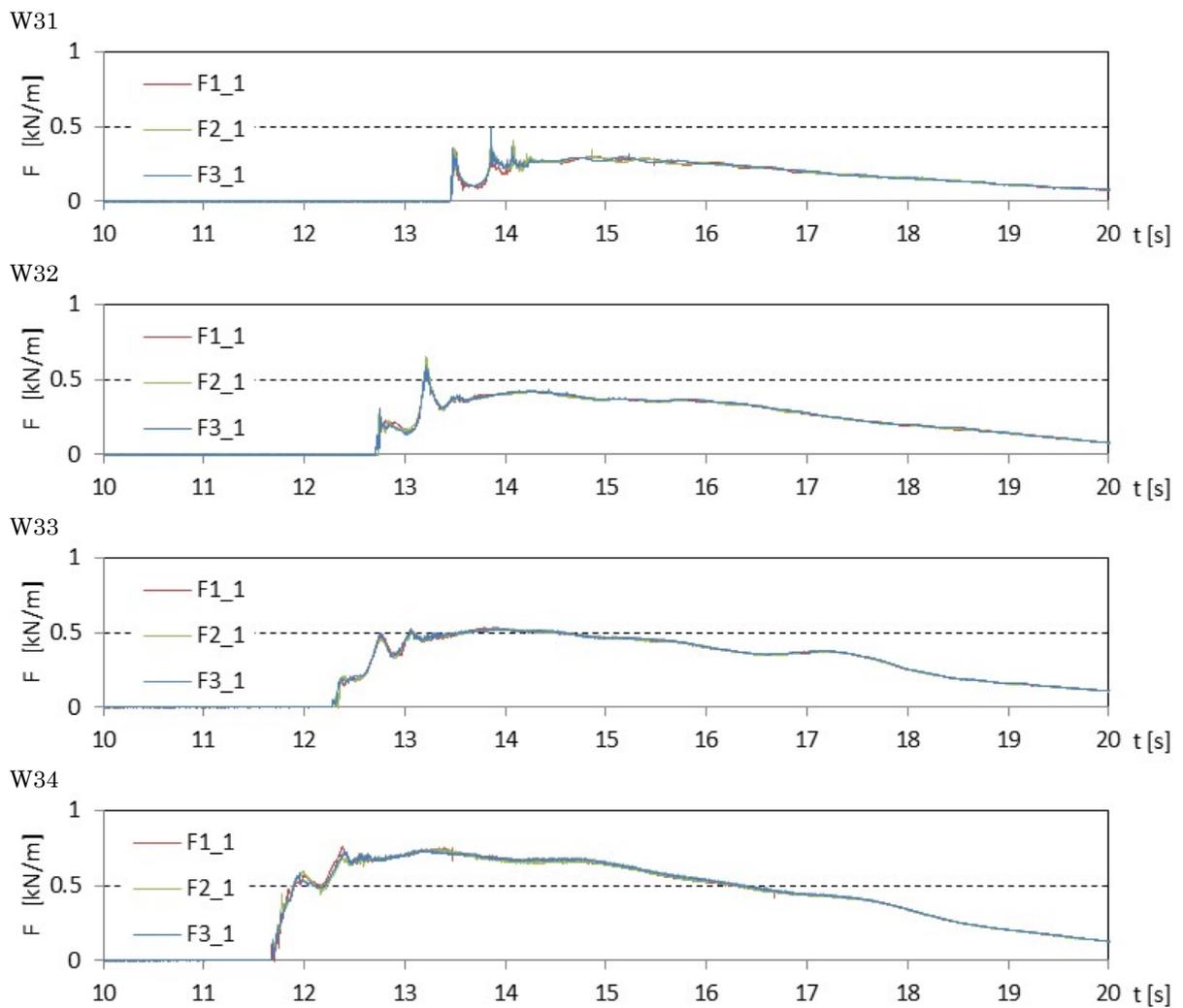


図 II.3.2-11 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体高さ L , 設置位置 0.625m, 1 回目)

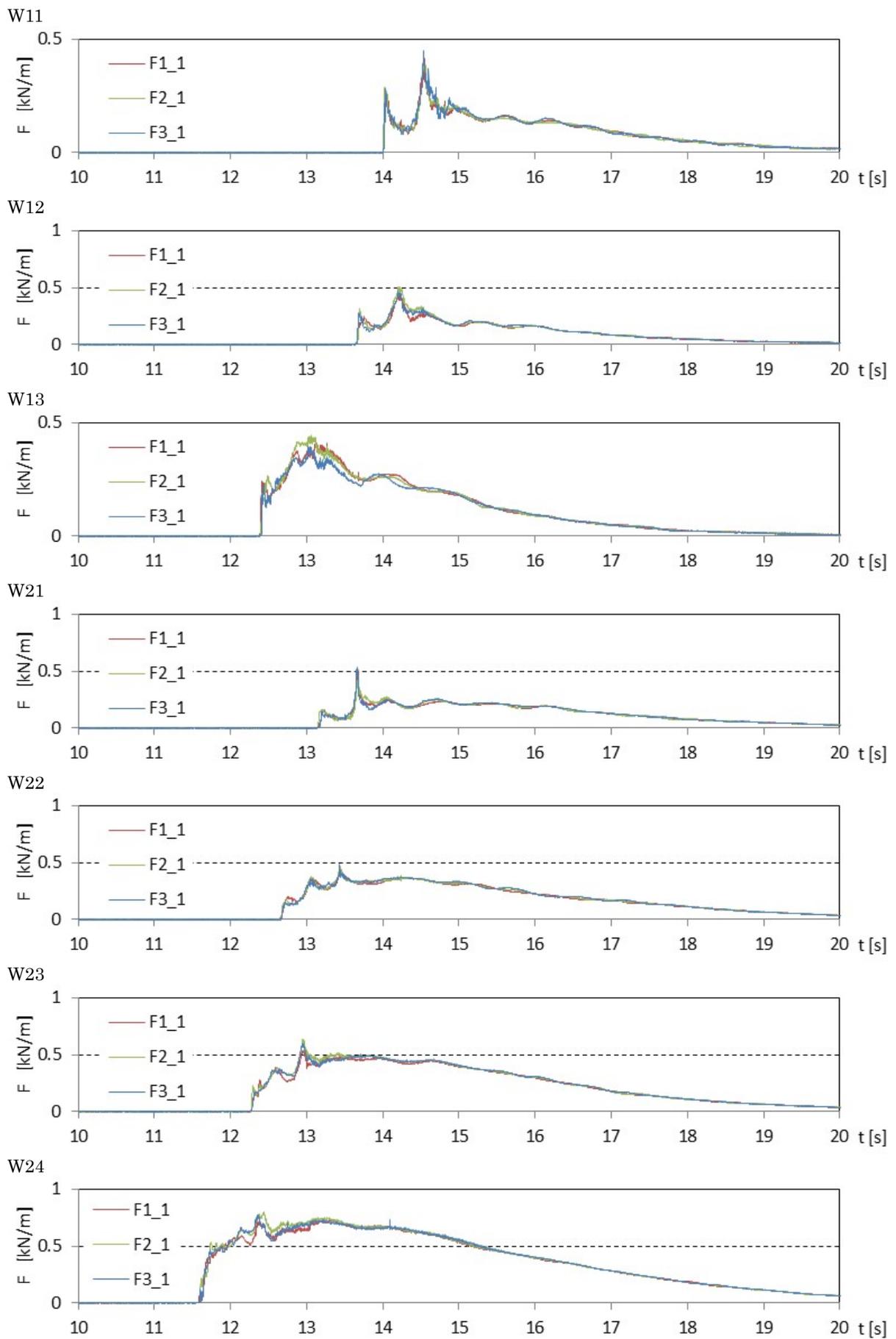


図 II.3.2-12 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体高さ L , 設置位置 1.25m, 1回目)

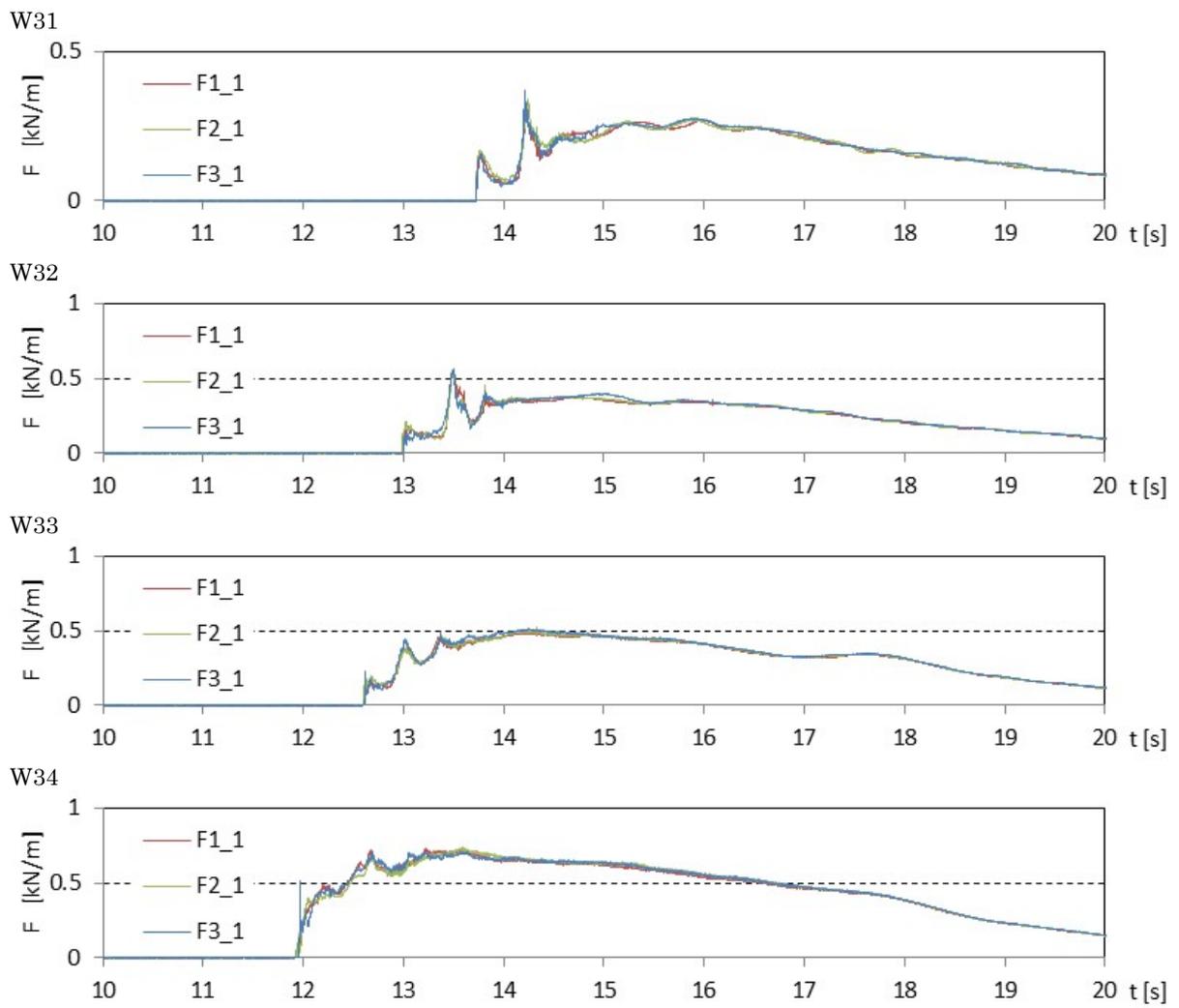
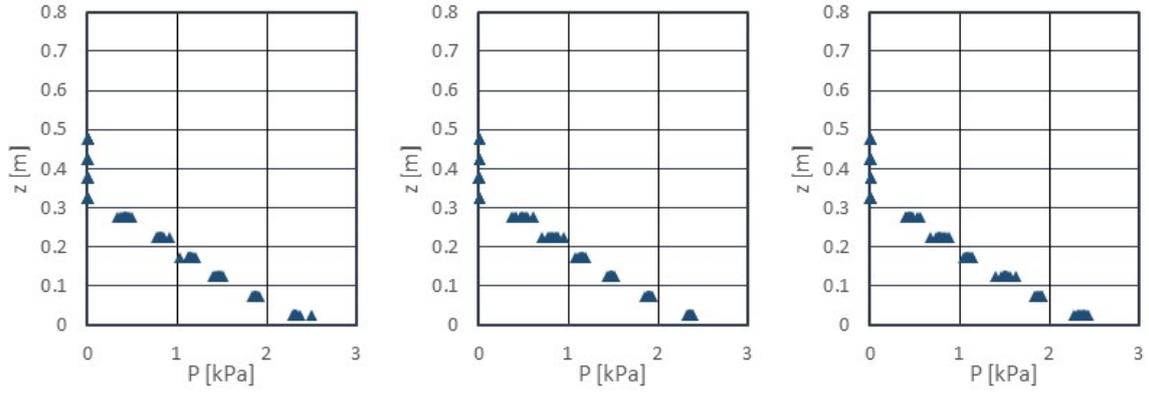
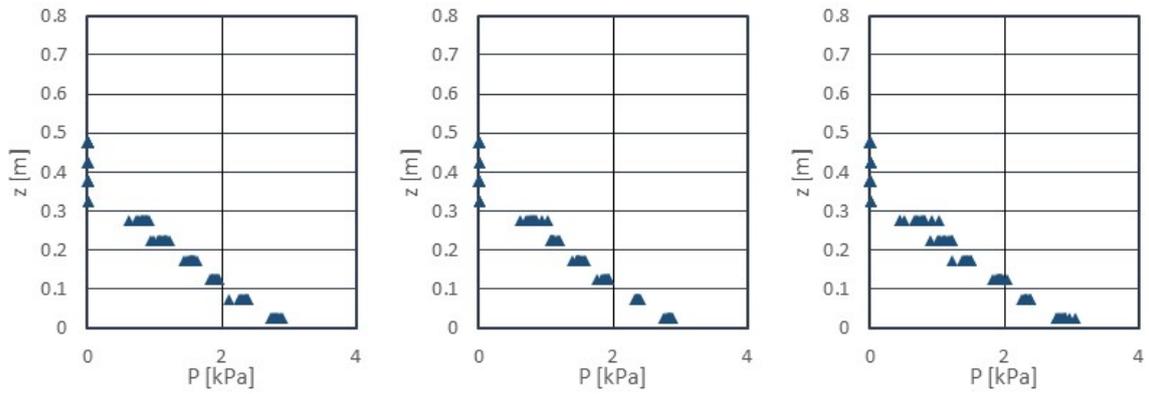


図 II.3.2-12 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m, 1回目)

W11



W12



W13

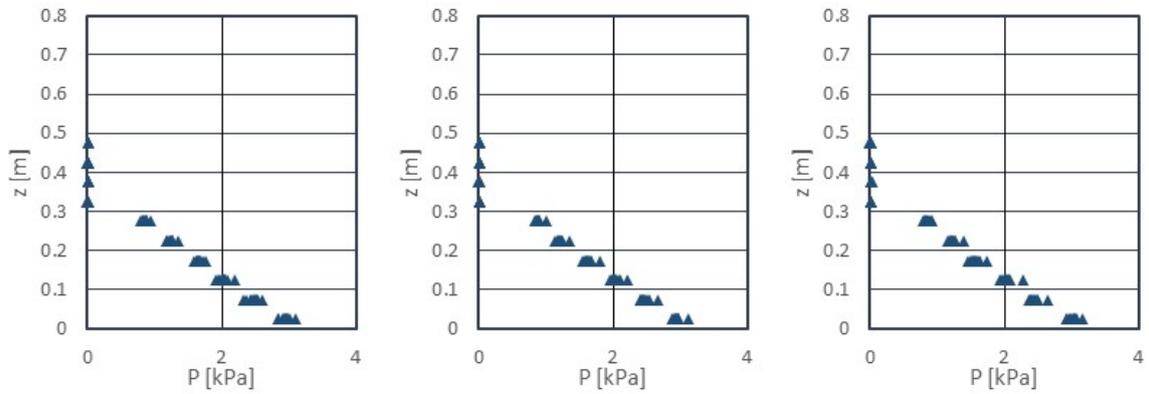
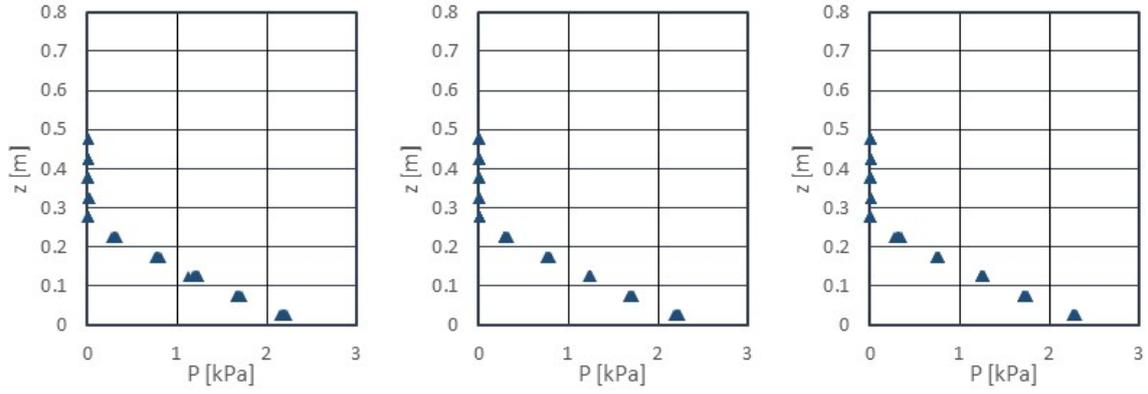
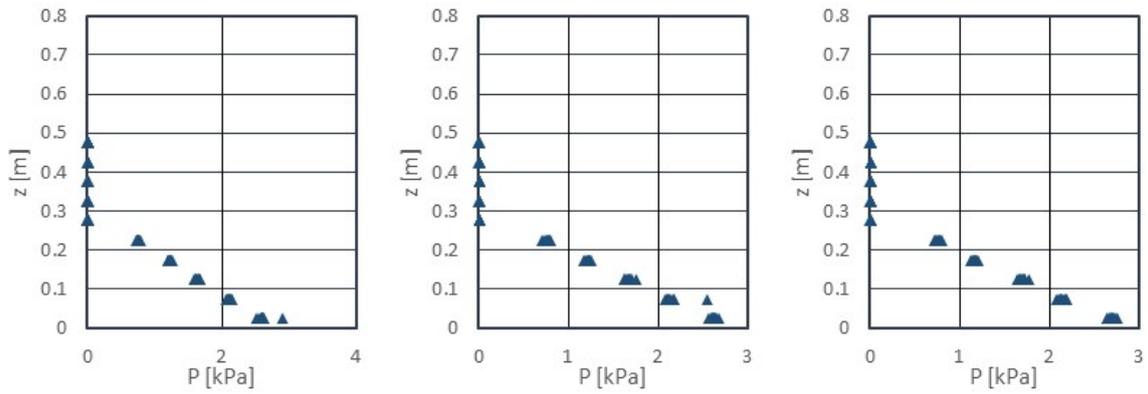


図 II.3.2-13 圧力鉛直分布の観測結果 (単純勾配, 堤体高さ L , 設置位置 0m)

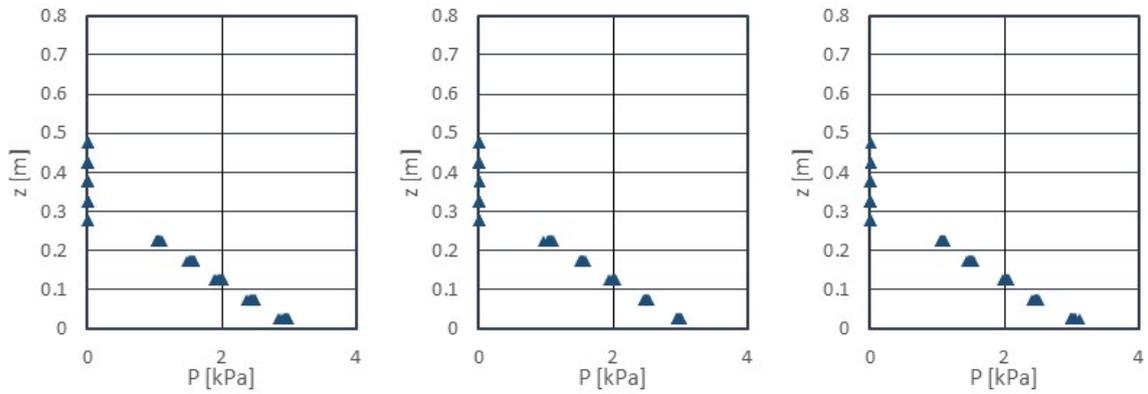
W21



W22



W23



W24

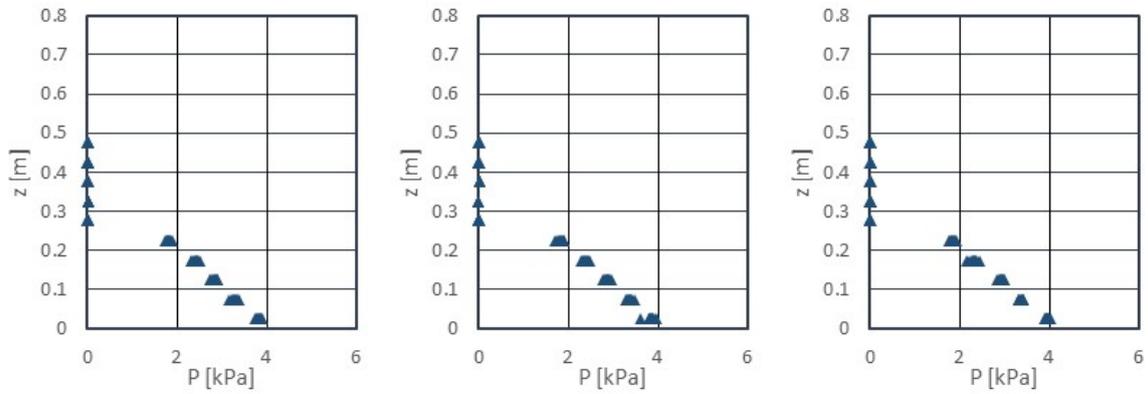
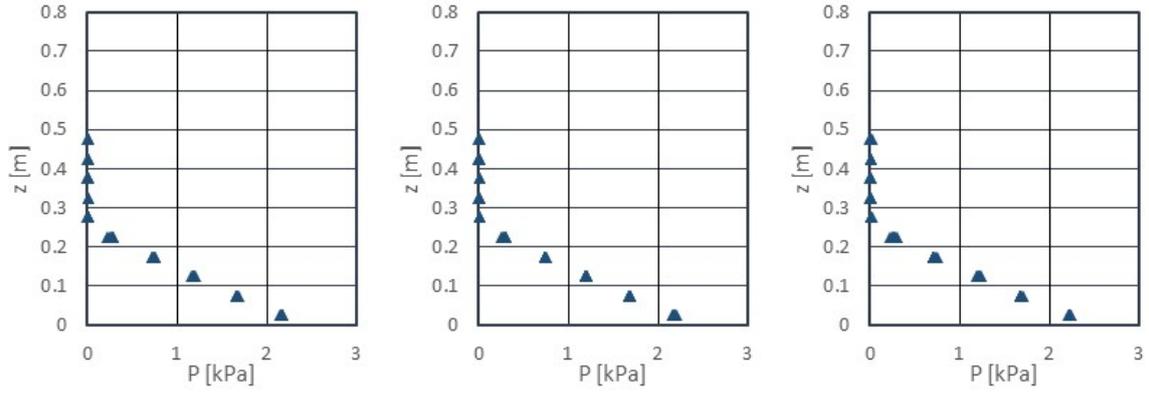
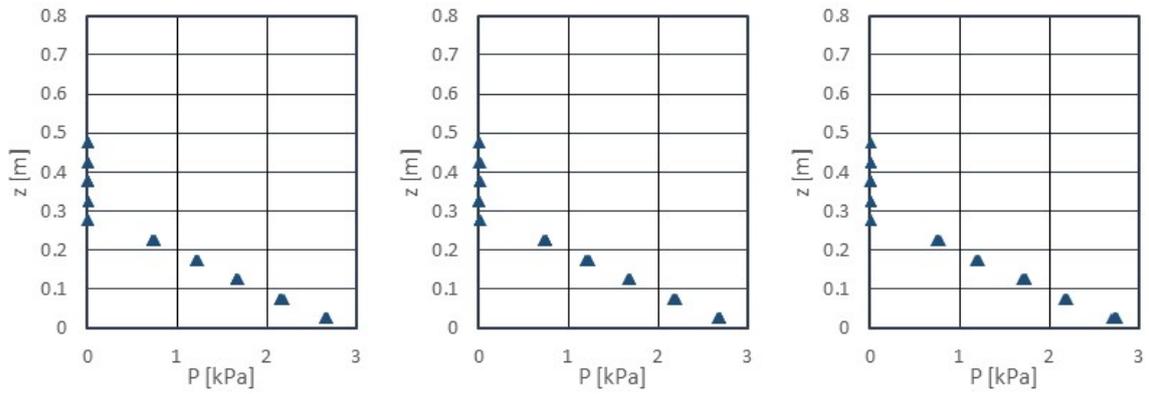


図 II.3.2-13 圧力鉛直分布の観測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0m)

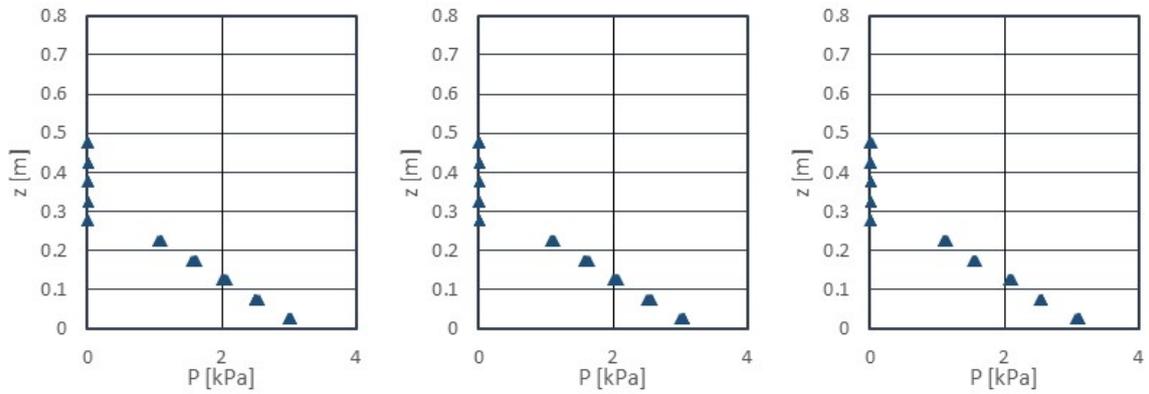
W31



W32



W33



W34

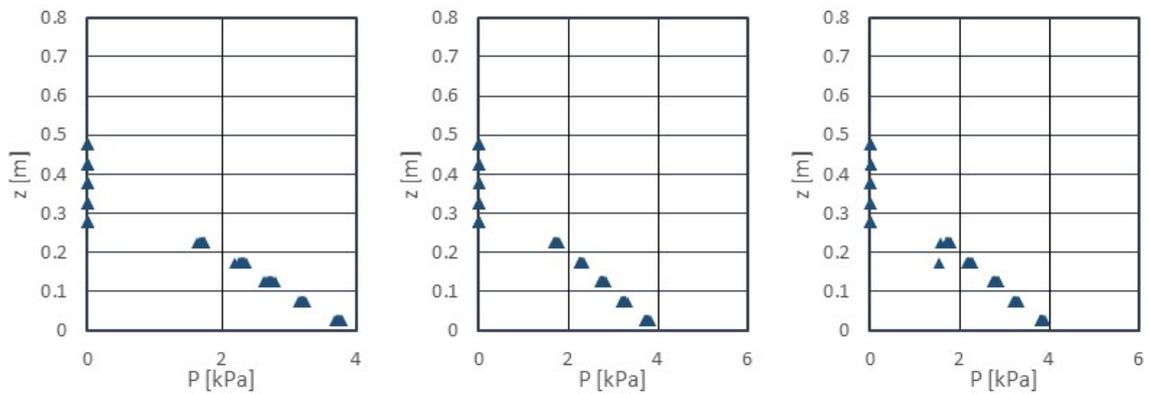
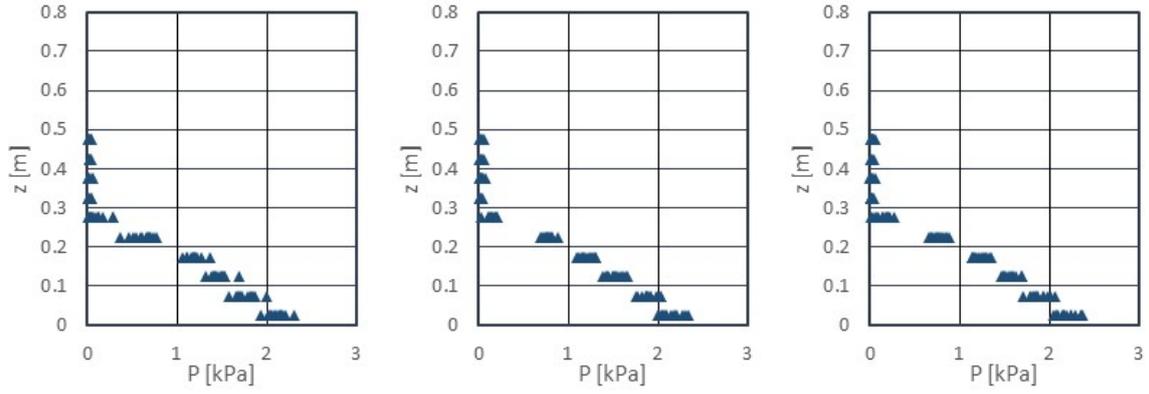
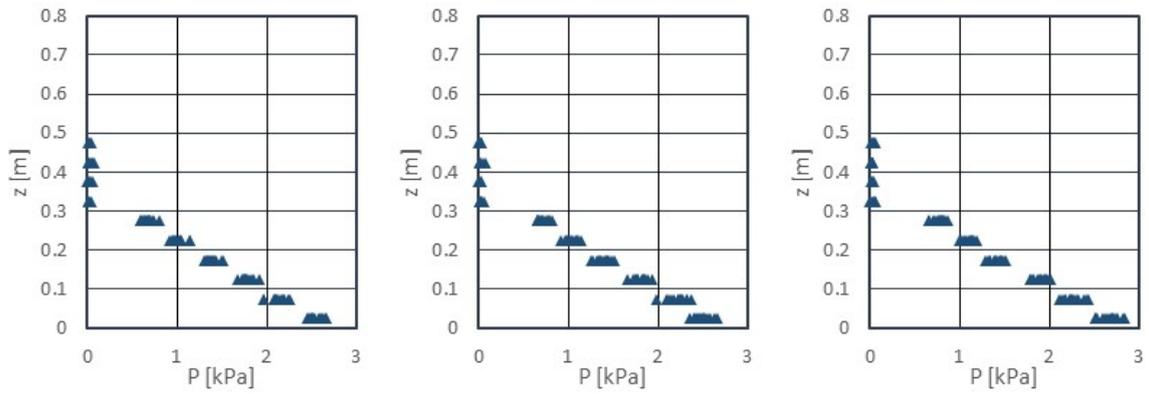


図 II.3.2-13 圧力鉛直分布の観測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0m)

W11



W12



W13

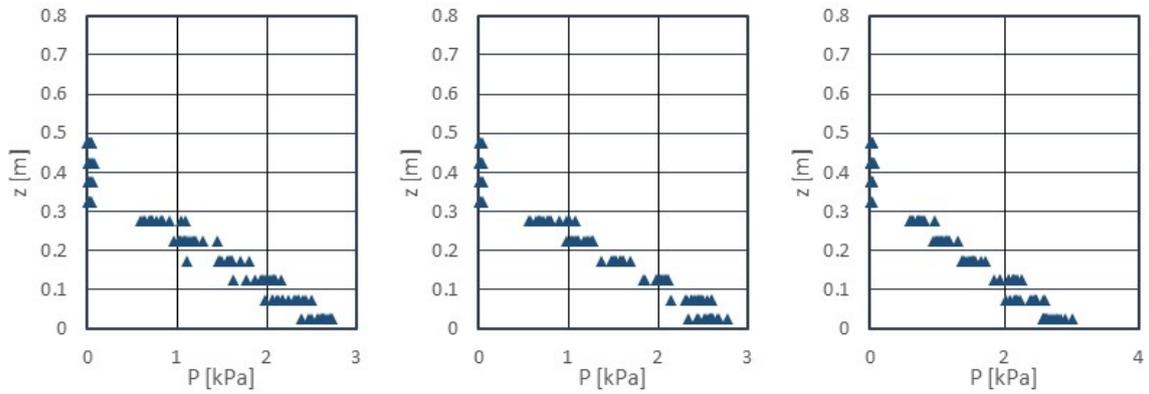
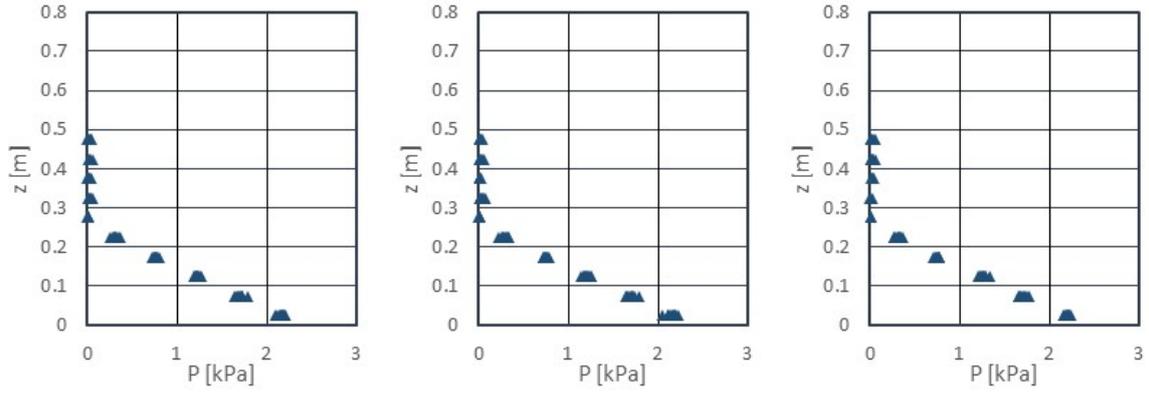
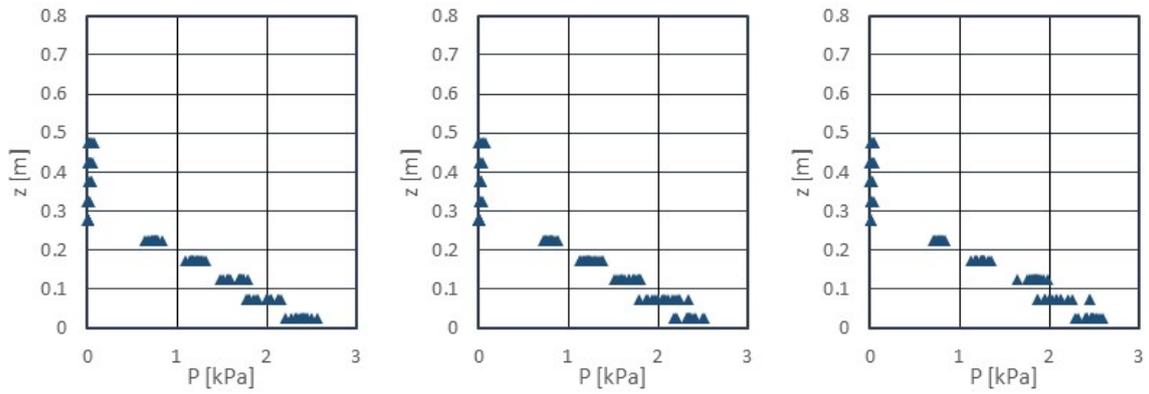


図 II.3.2-13 圧力鉛直分布の観測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m)

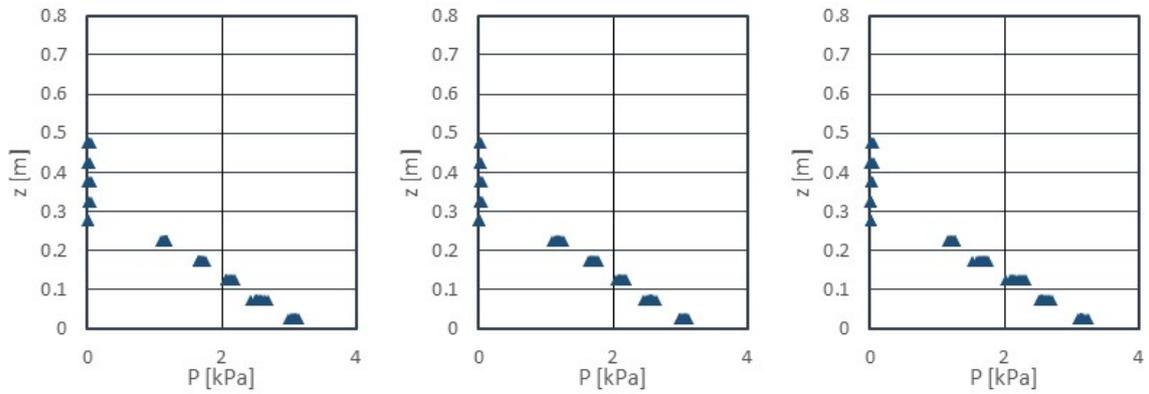
W21



W22



W23



W24

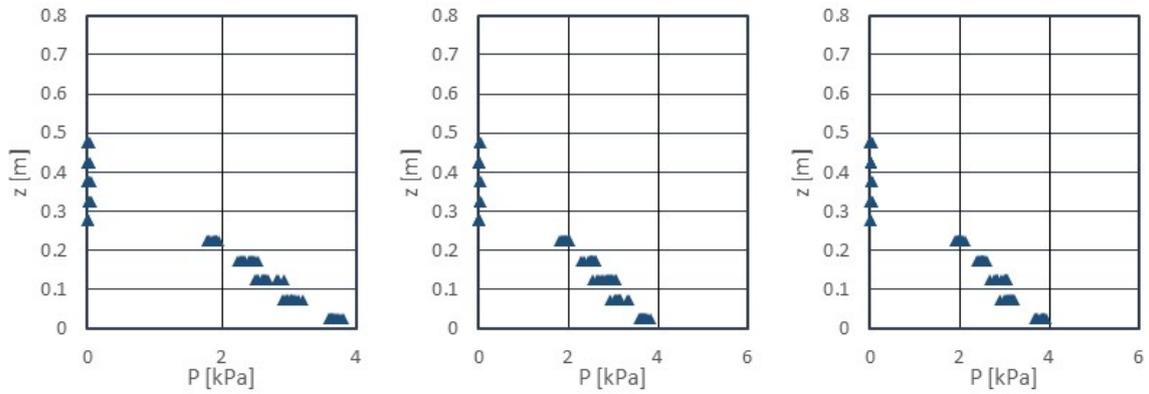
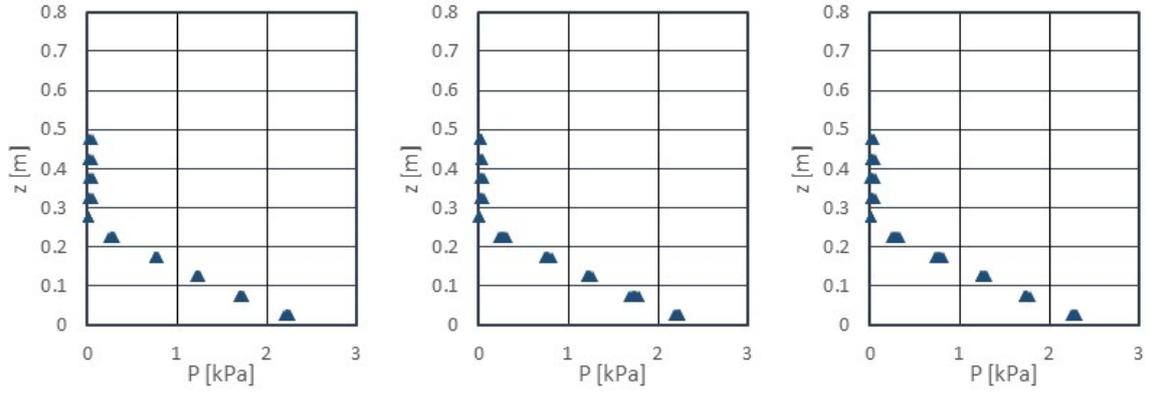
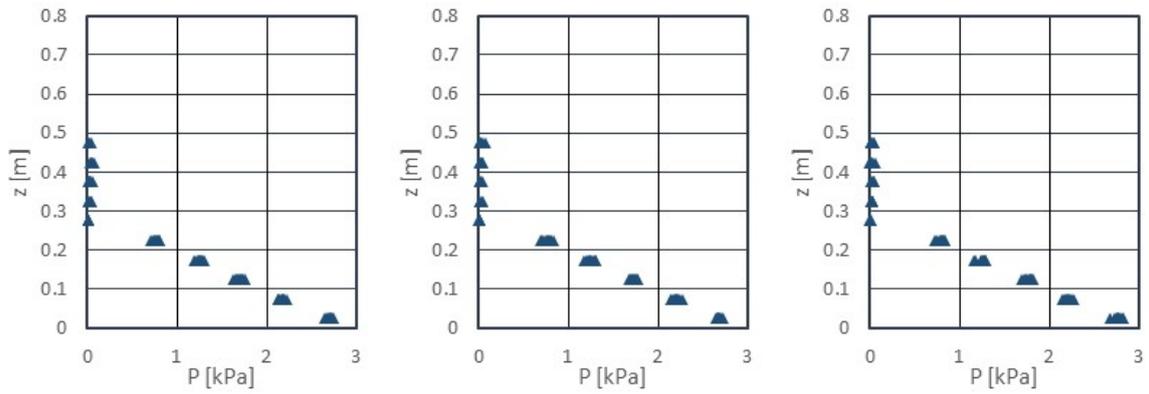


図 II.3.2-13 圧力鉛直分布の観測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m)

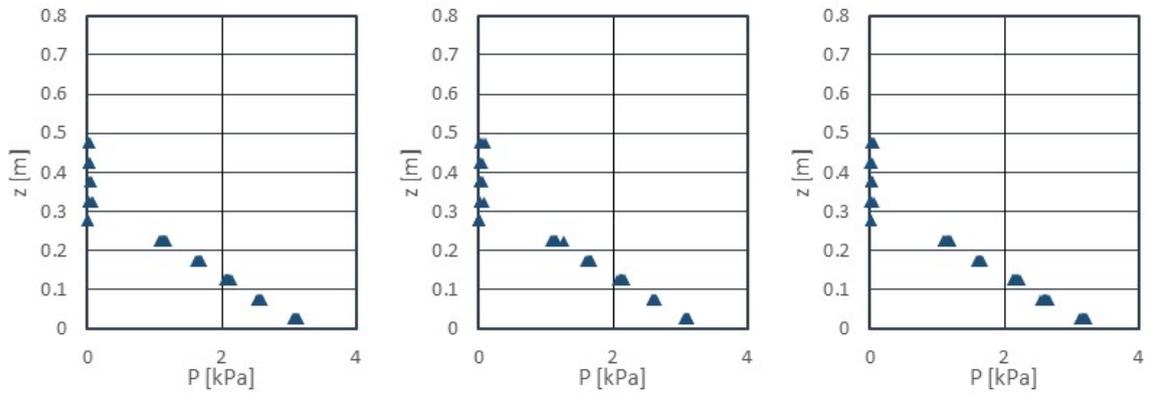
W31



W32



W33



W34

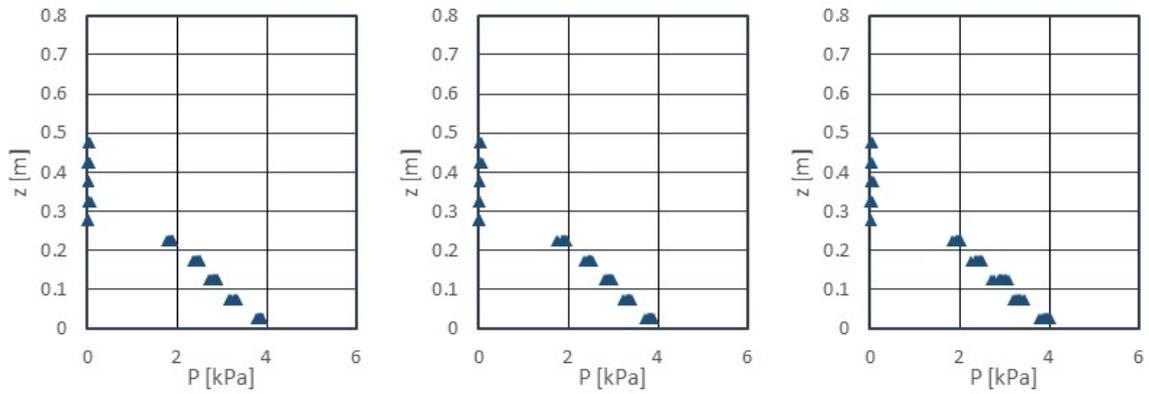
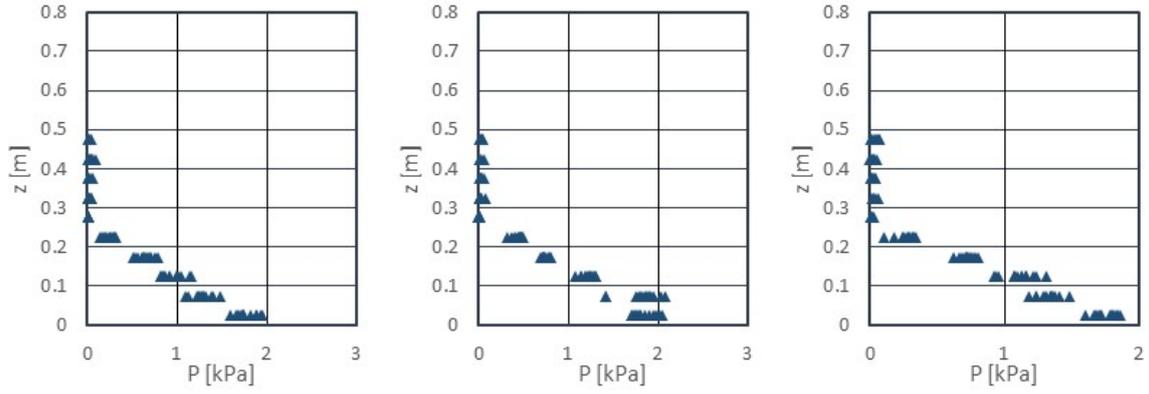
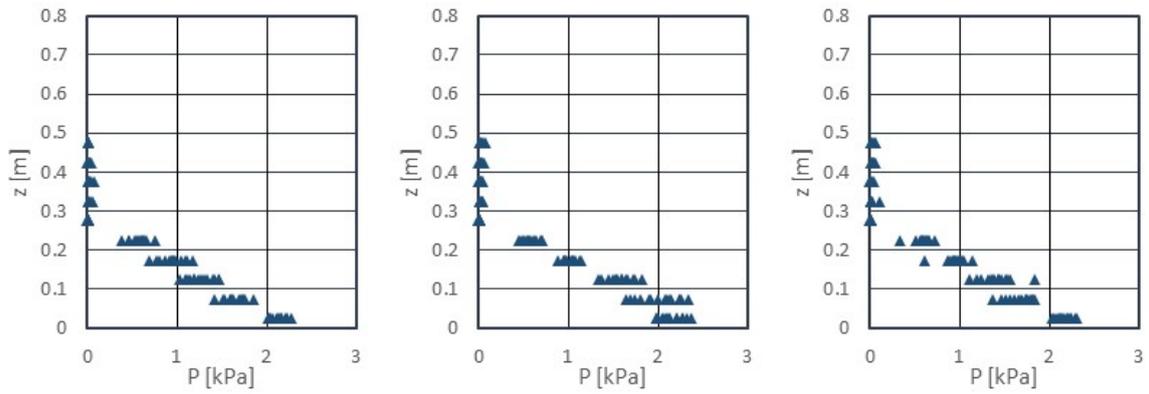


図 II.3.2-13 圧力鉛直分布の観測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m)

W11



W12



W13

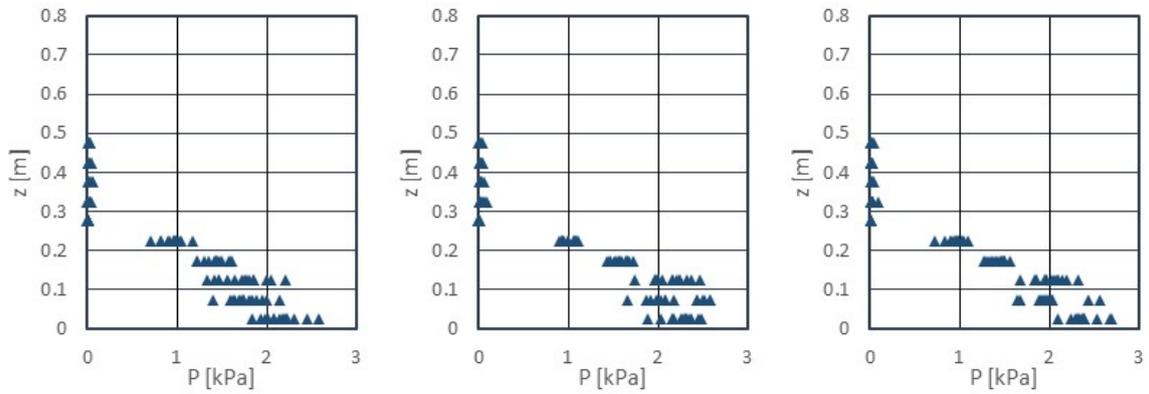
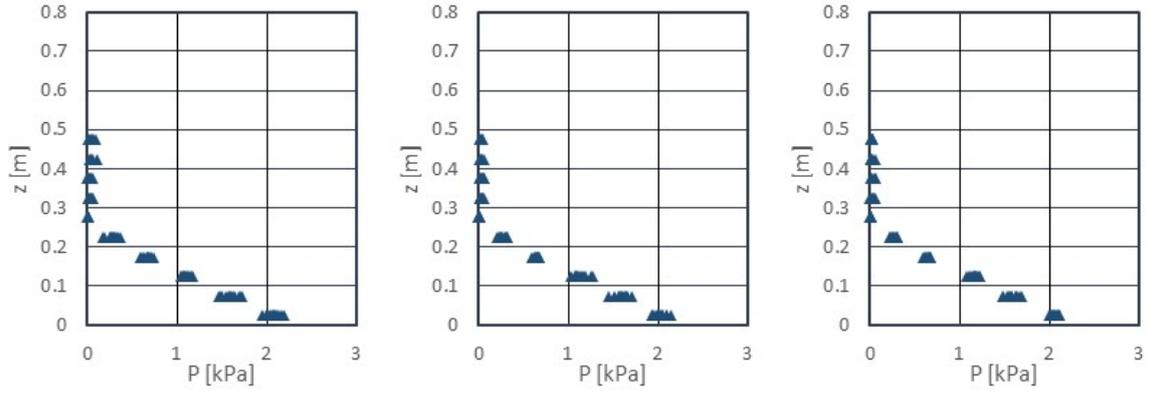
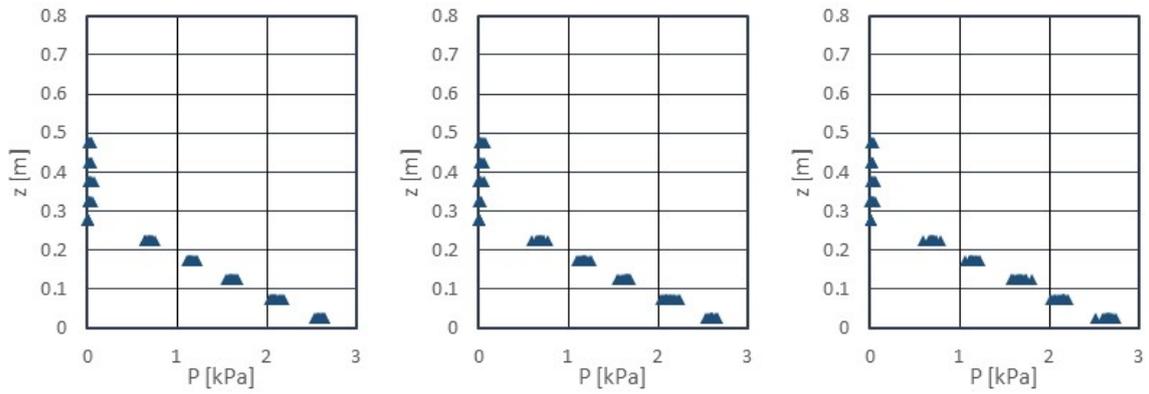


図 II.3.2-13 圧力鉛直分布の観測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m)

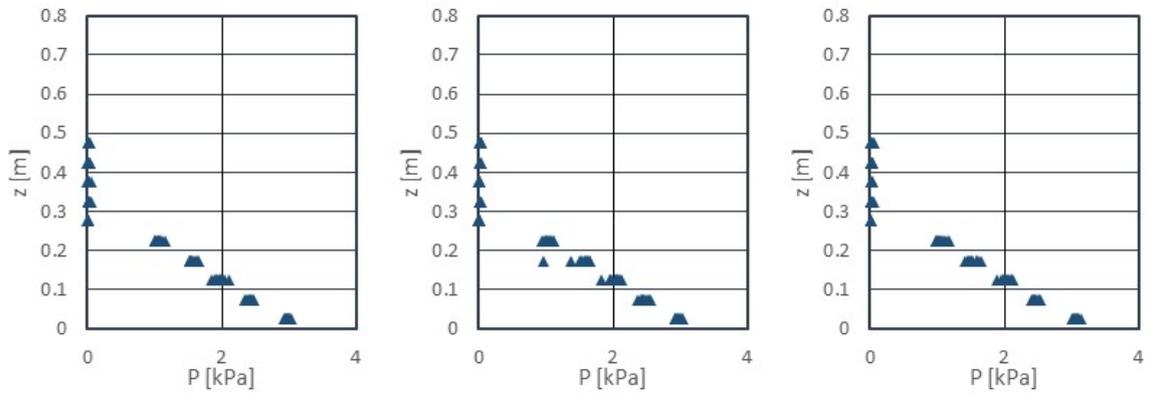
W21



W22



W23



W24

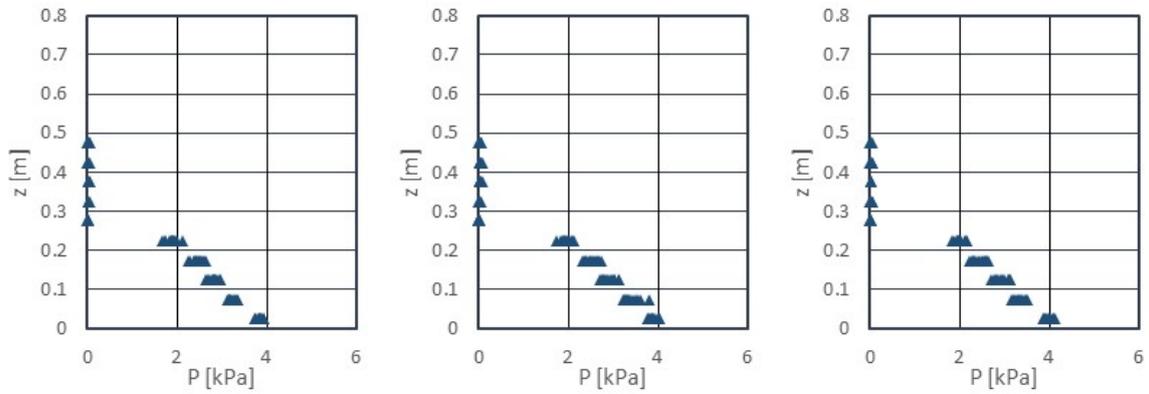
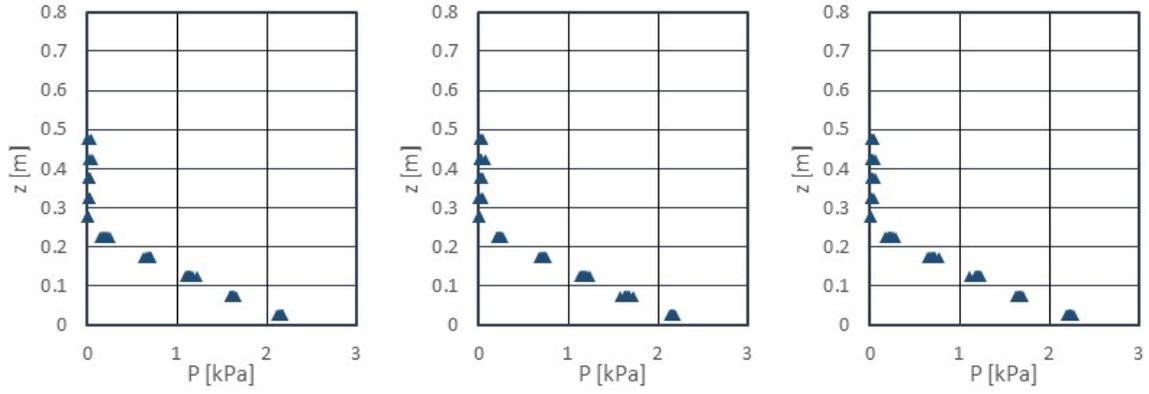
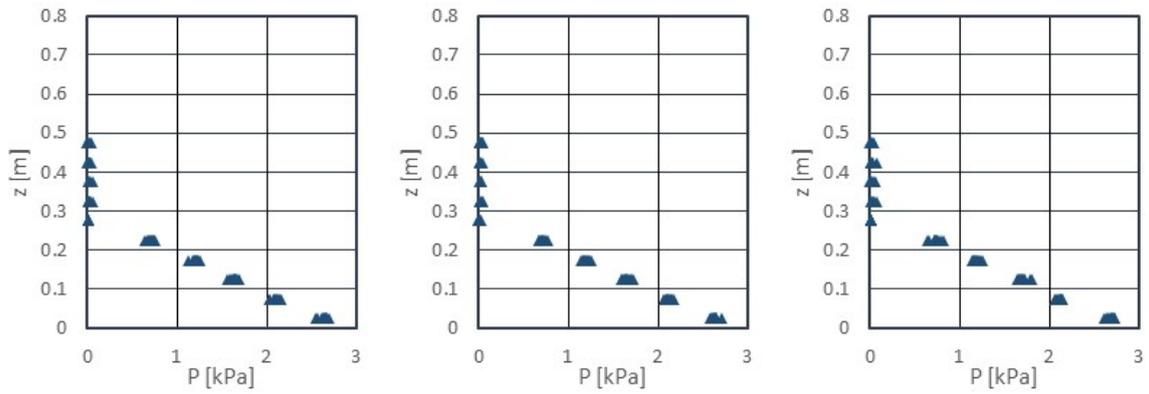


図 II.3.2-13 圧力鉛直分布の観測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m)

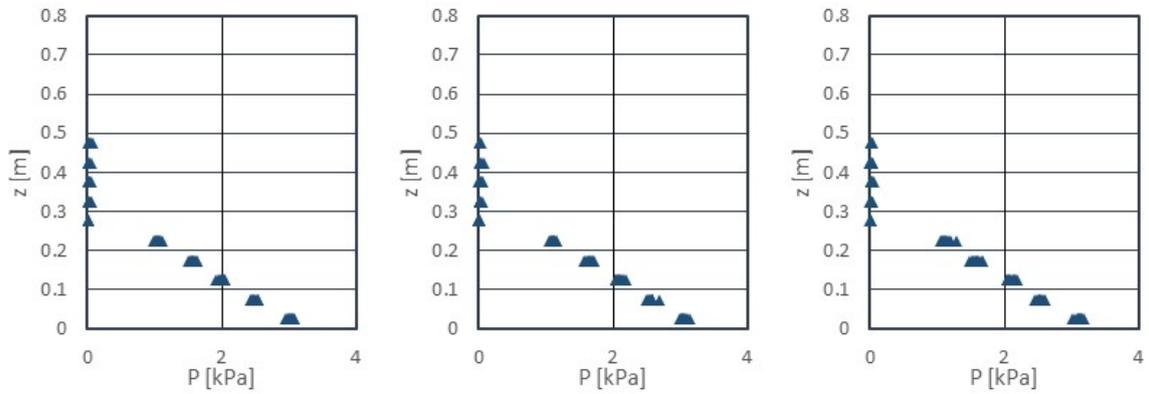
W31



W32



W33



W34

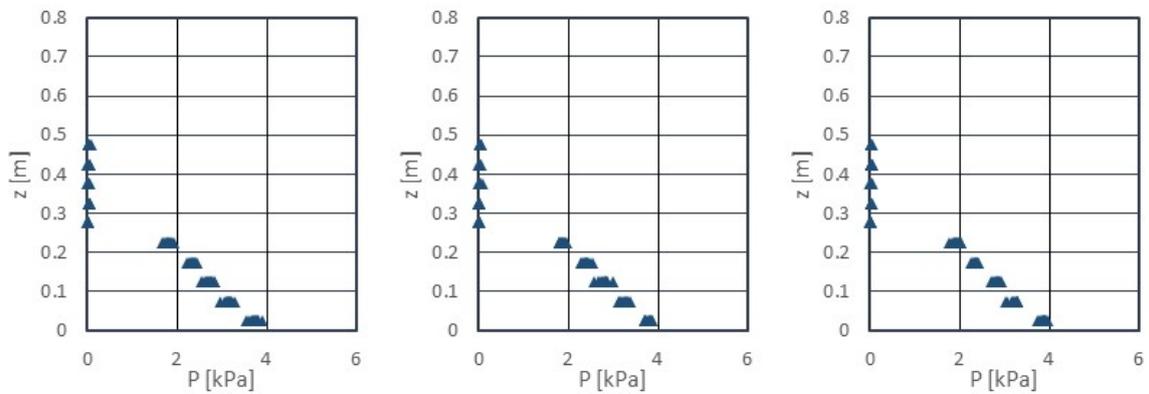
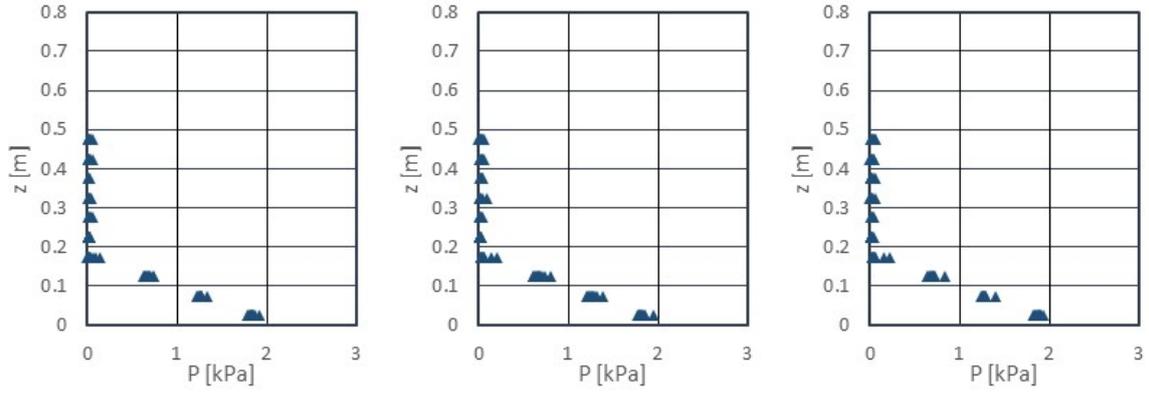
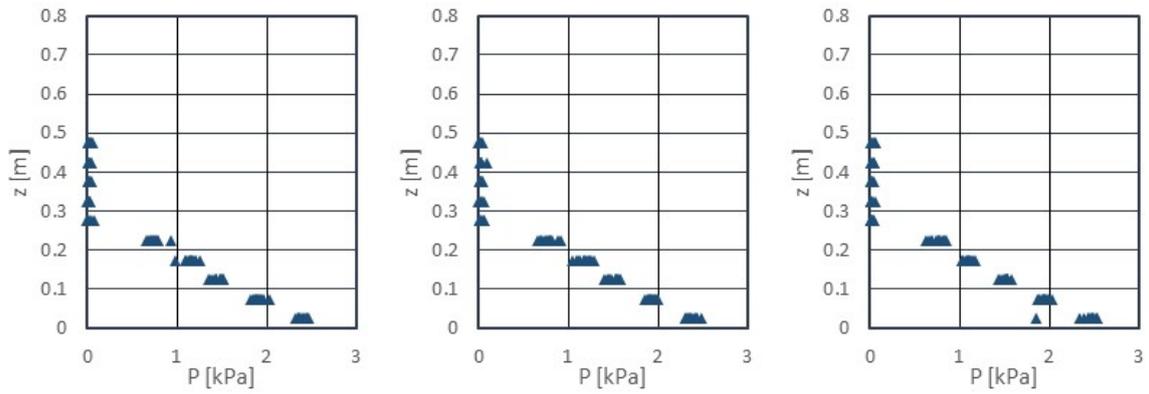


図 II.3.2-13 圧力鉛直分布の観測結果 (単純勾配, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m)

W11



W12



W13

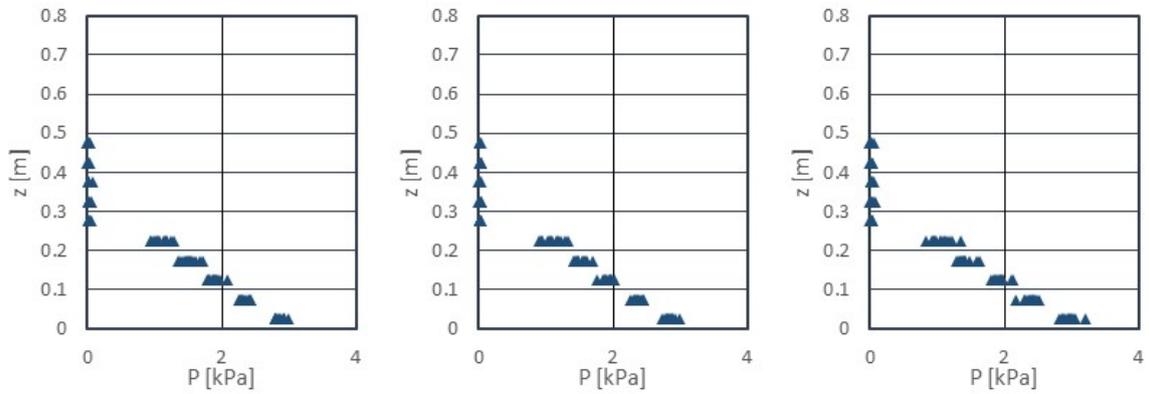
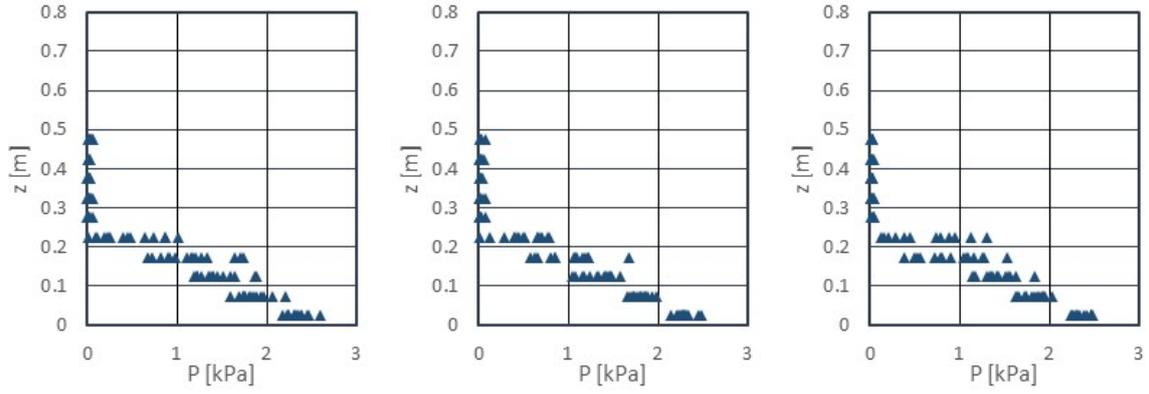
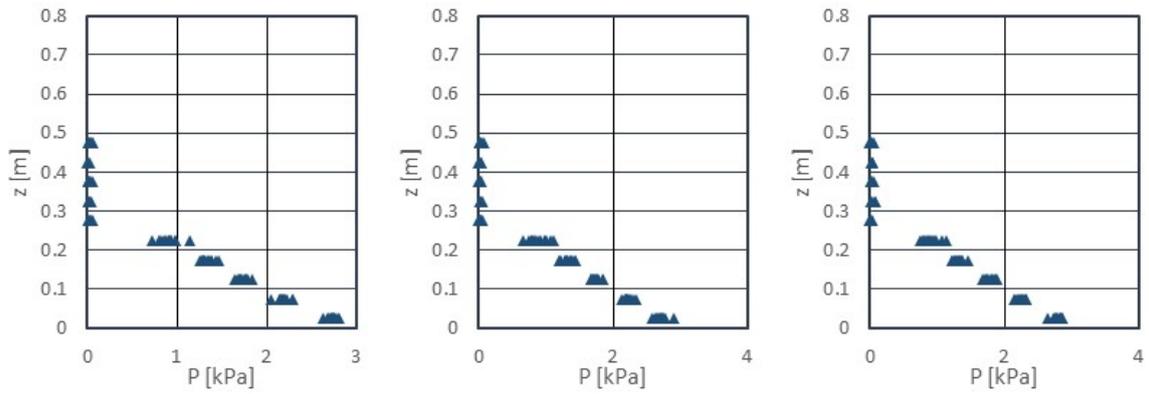


図 II.3.2-14 圧力鉛直分布の観測結果 (直立護岸, 堤体高さ L , 設置位置 0m)

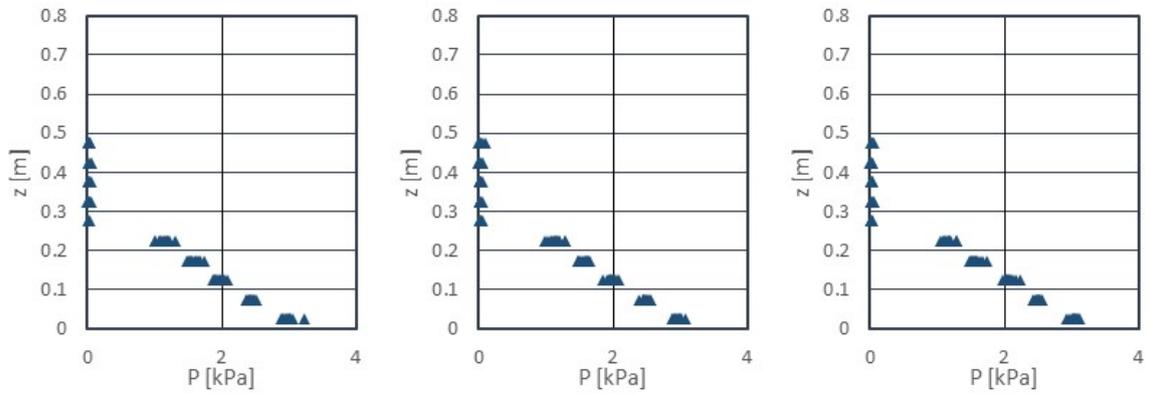
W21



W22



W23



W24

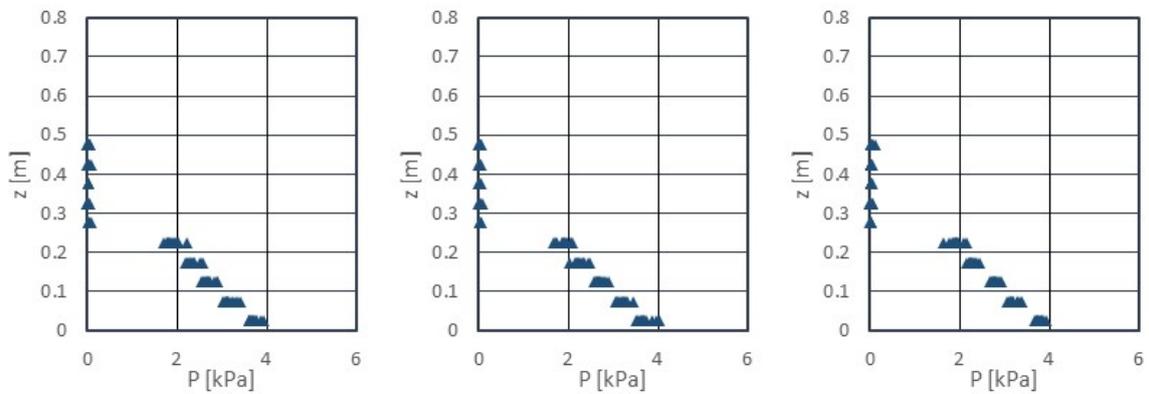
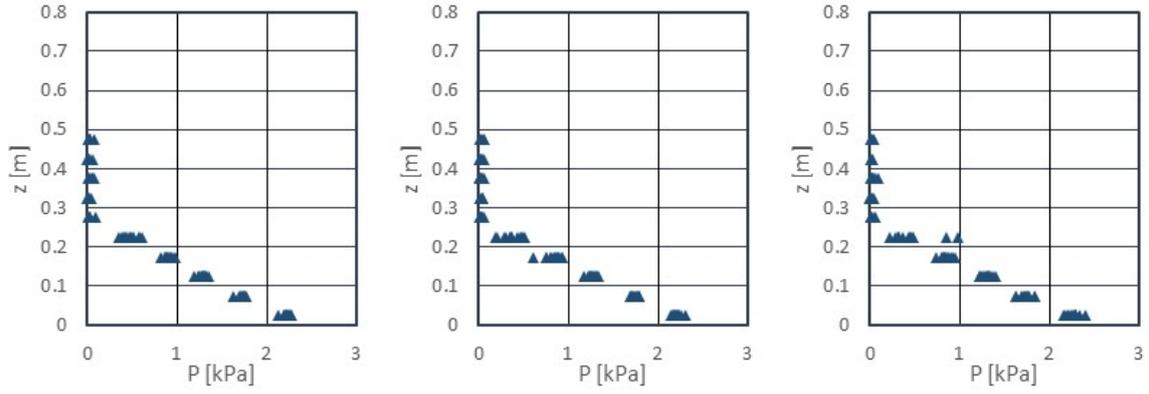
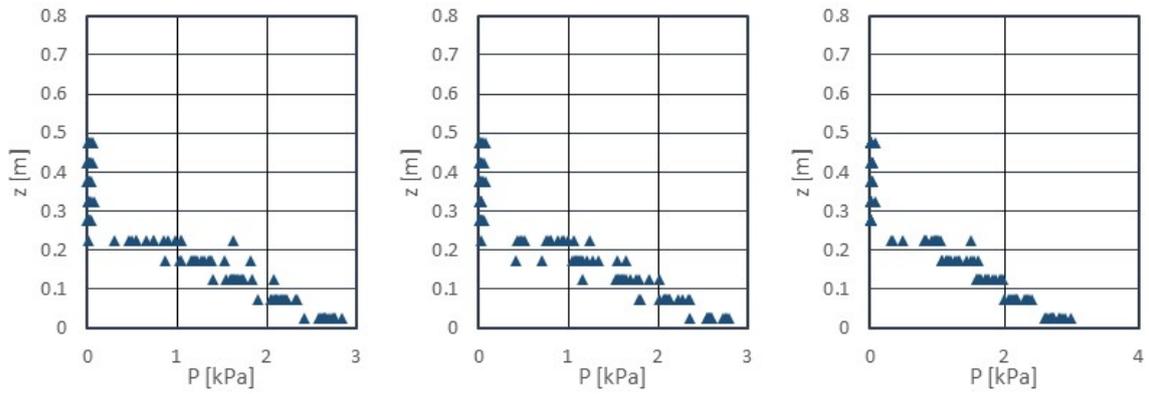


図 II.3.2-14 圧力鉛直分布の観測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0m)

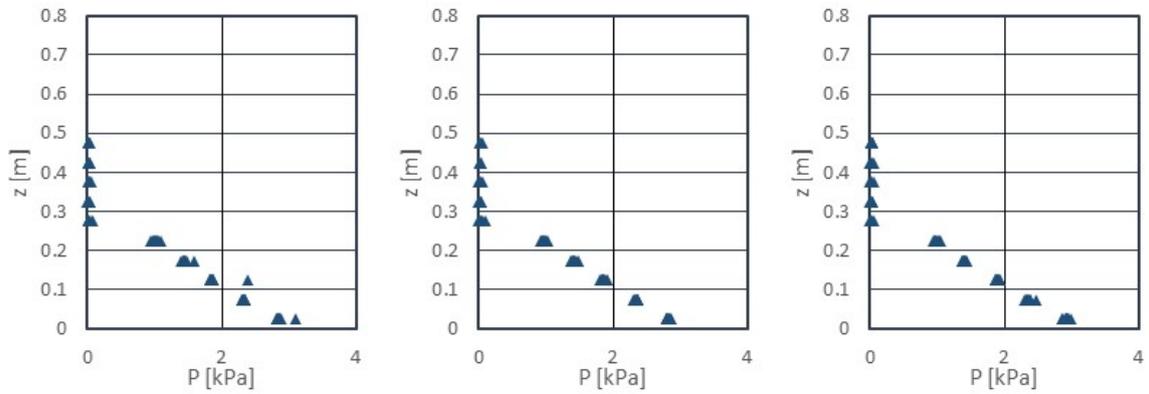
W31



W32



W33



W34

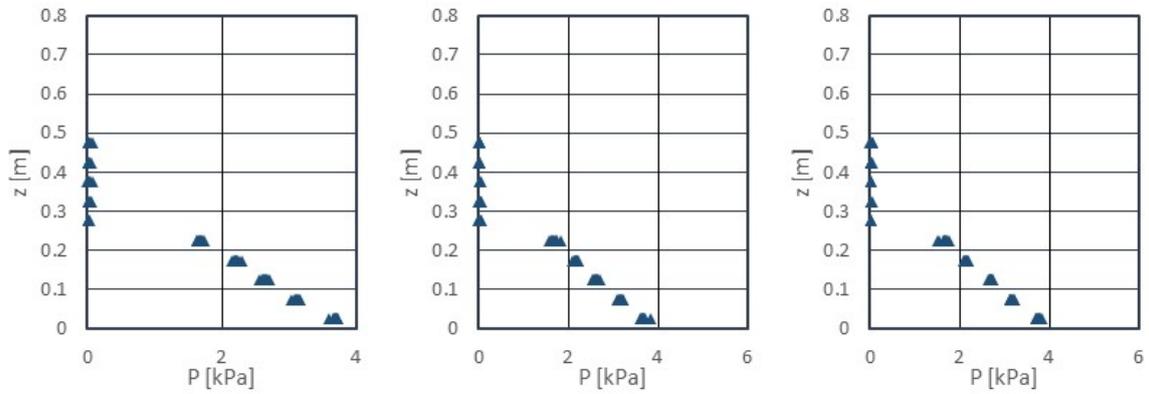
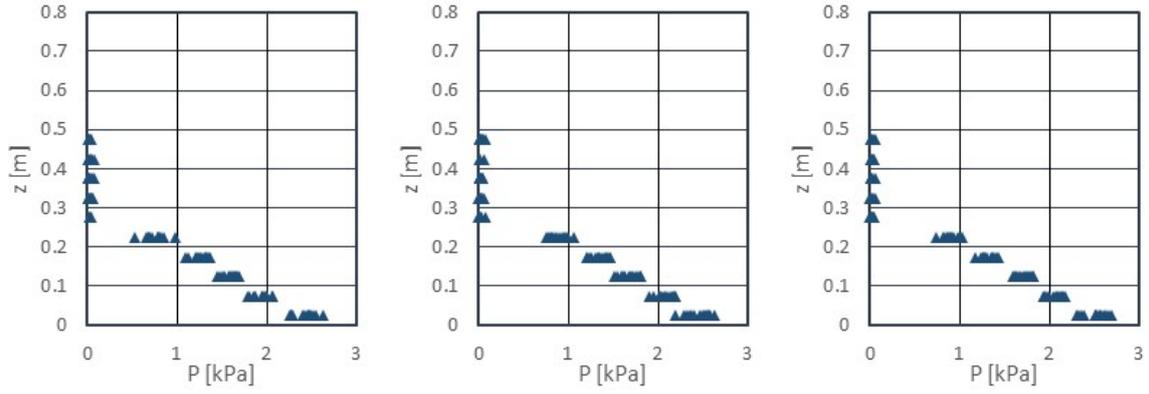
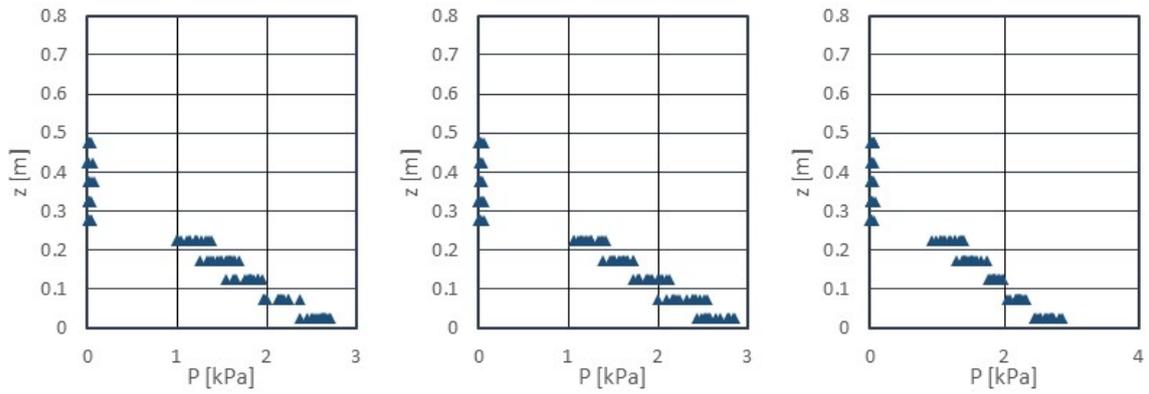


図 II.3.2-14 圧力鉛直分布の観測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0m)

W11



W12



W13

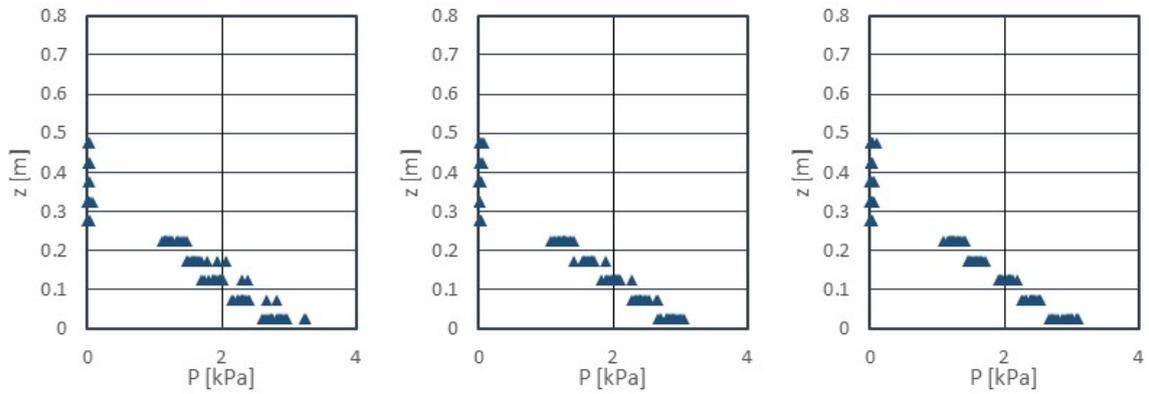
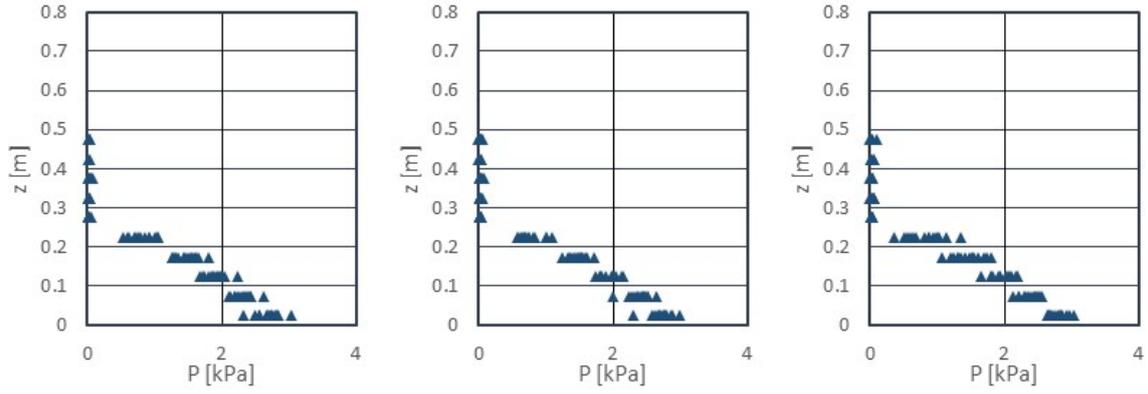
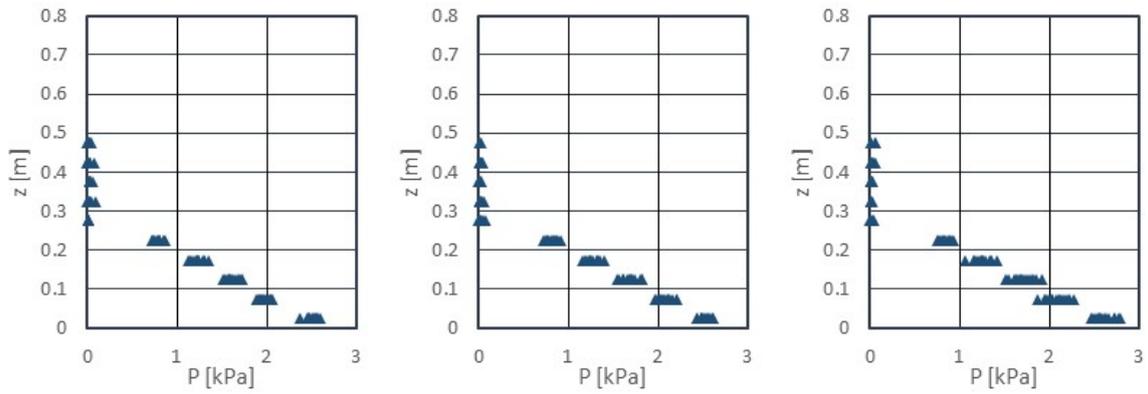


図 II.3.2-14 圧力鉛直分布の観測結果 (直立護岸, 堤体高さ L , 設置位置 0.625m)

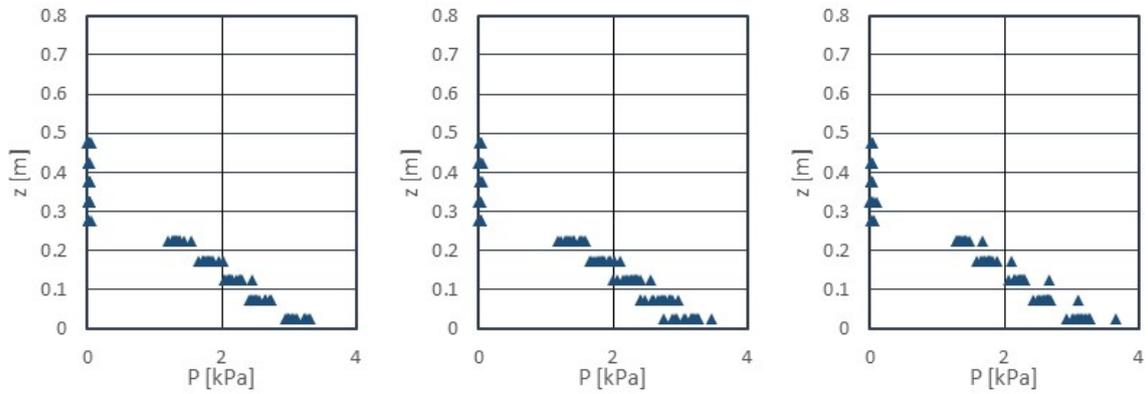
W21



W22



W23



W24

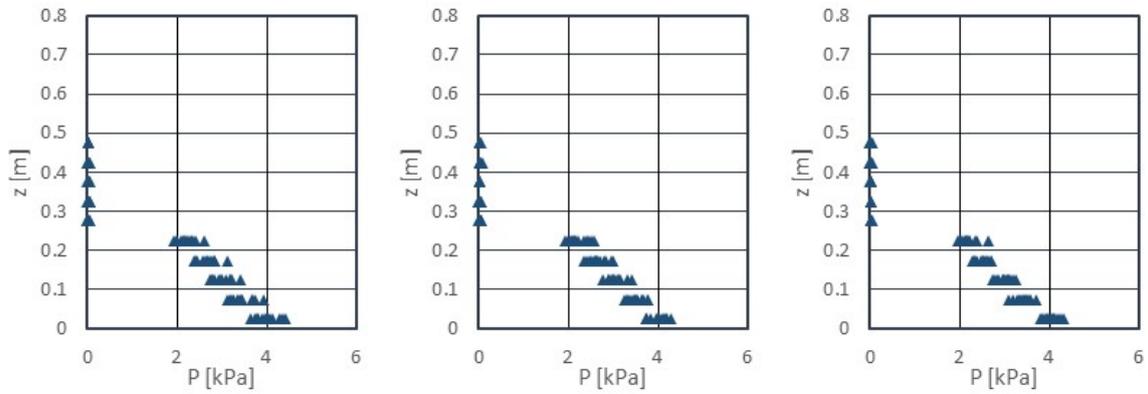
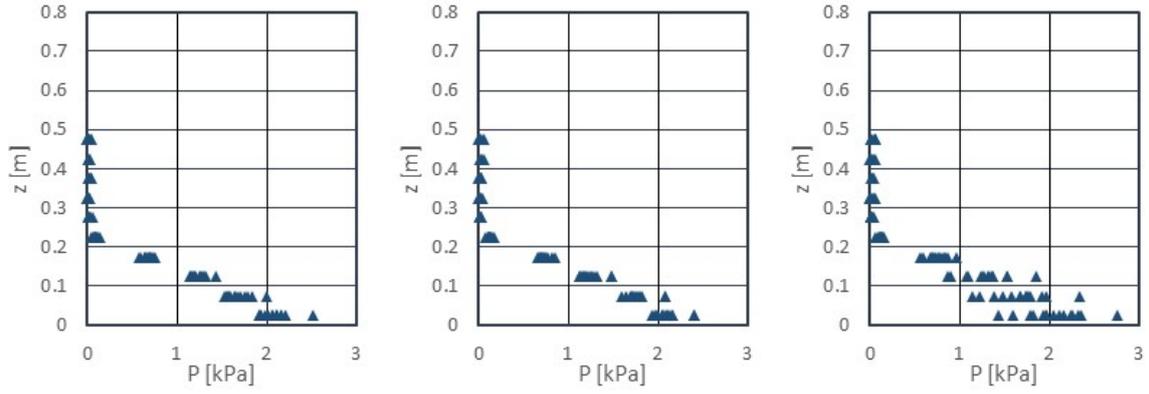
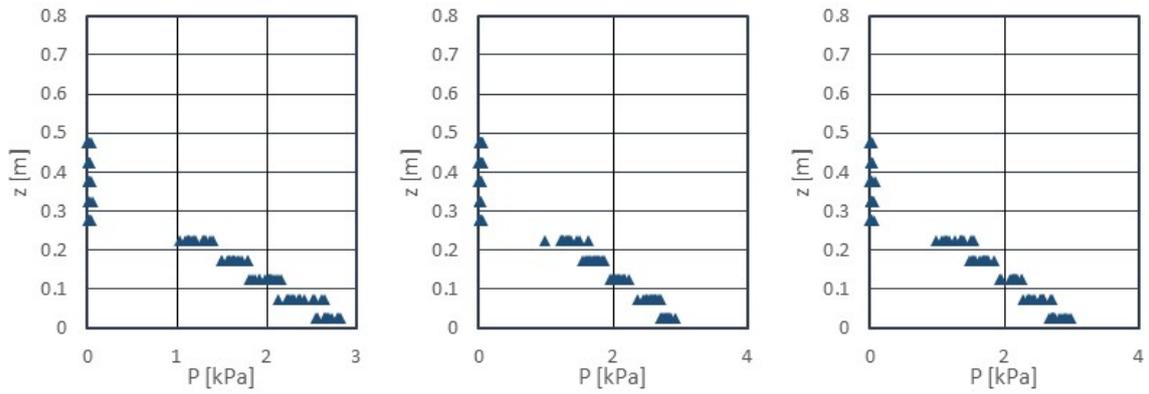


図 II.3.2-14 圧力鉛直分布の観測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m)

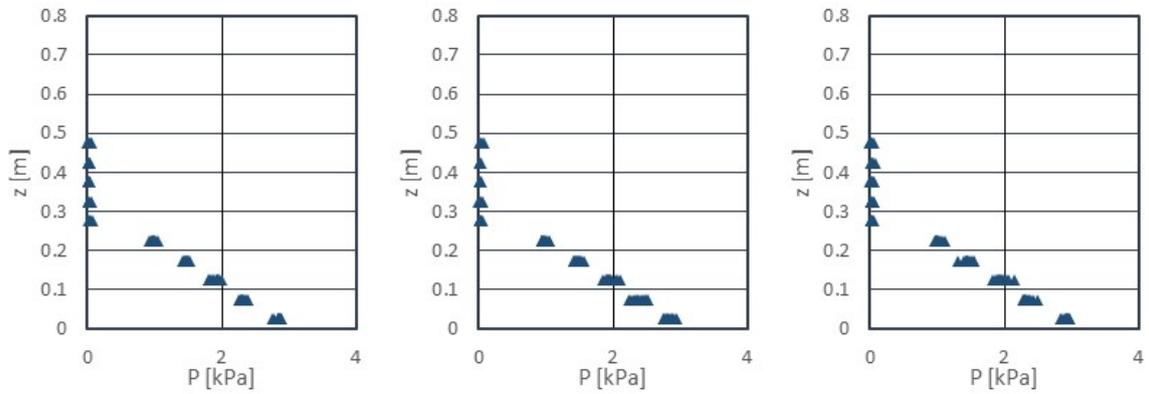
W31



W32



W33



W34

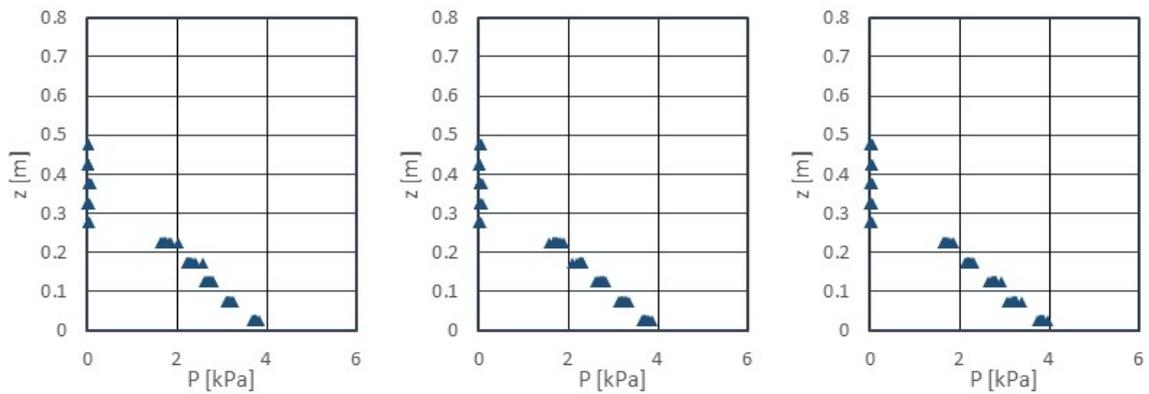
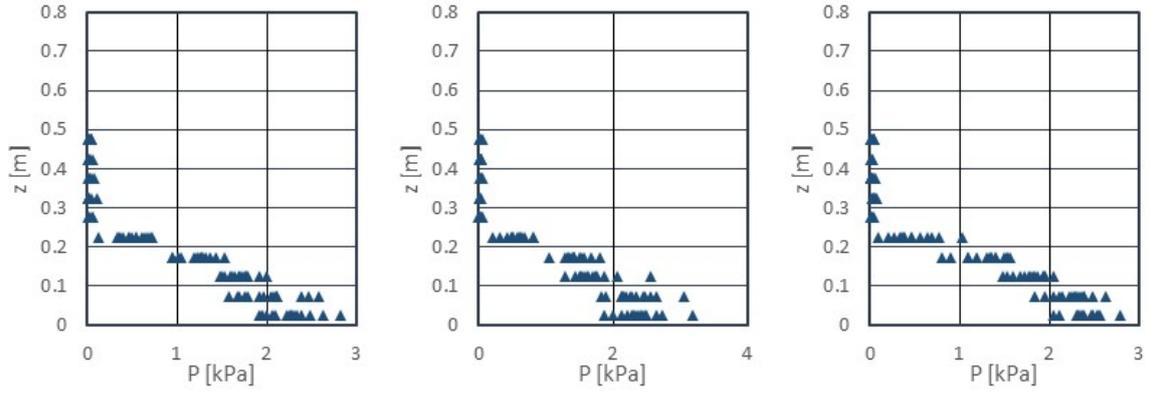
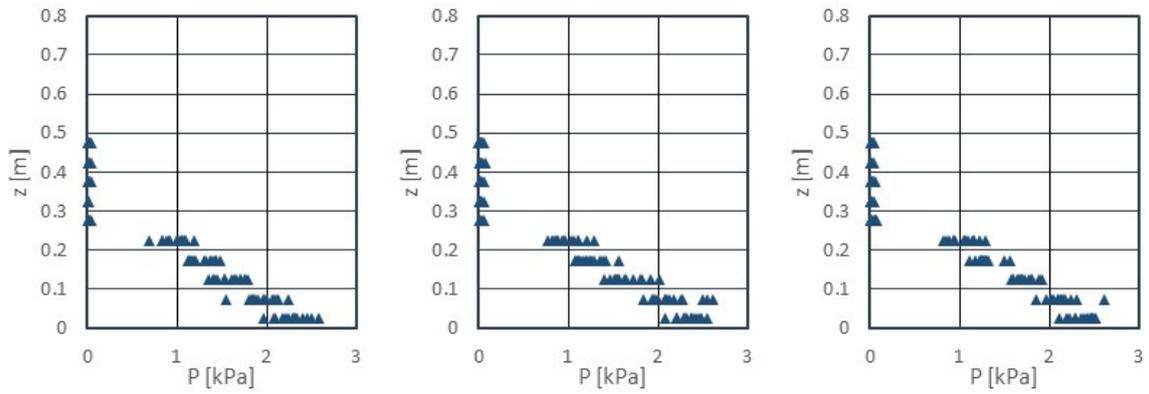


図 II.3.2-14 圧力鉛直分布の観測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 0.625m)

W11



W12



W13

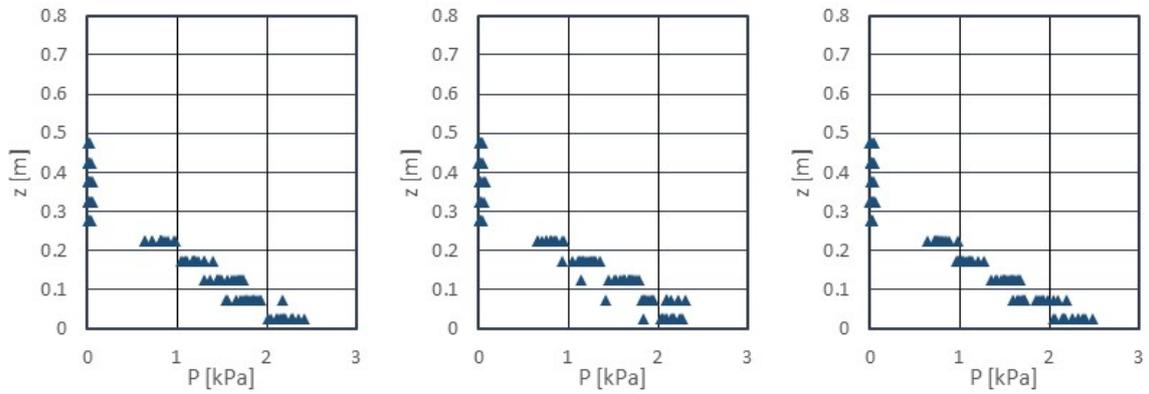
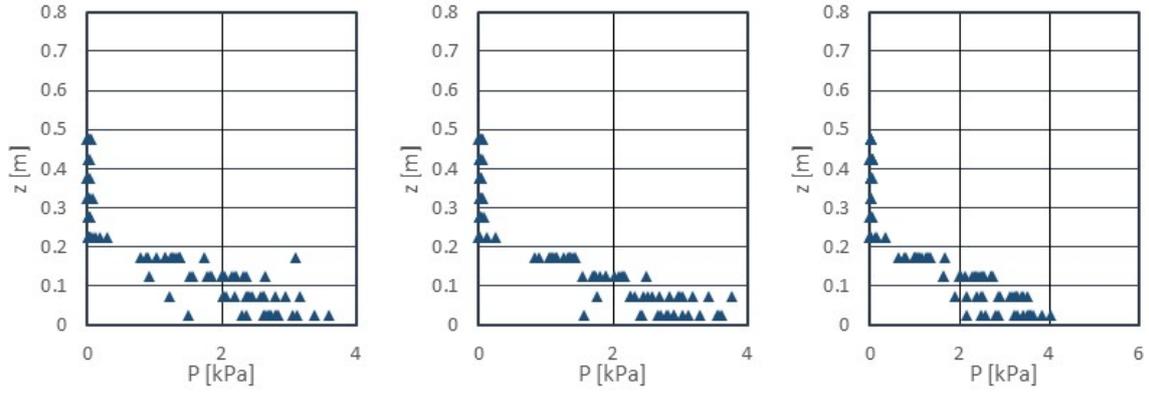
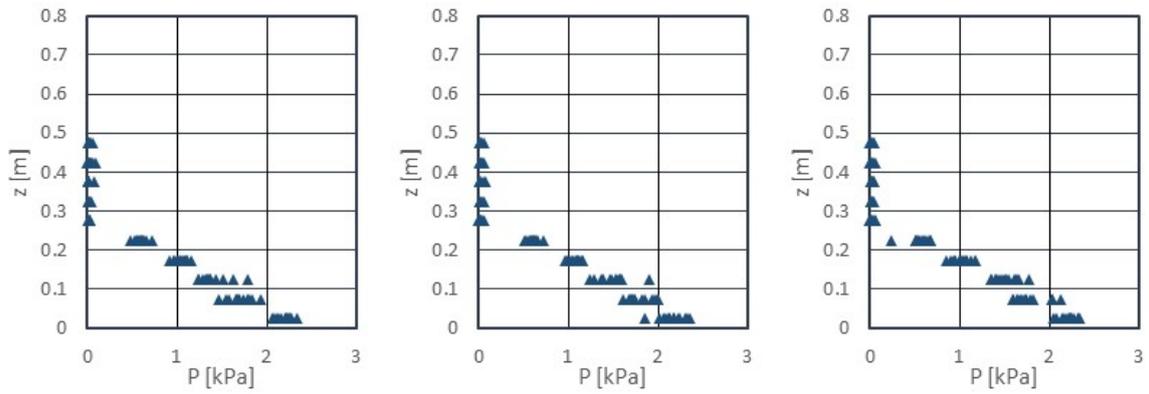


図 II.3.2-14 圧力鉛直分布の観測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m)

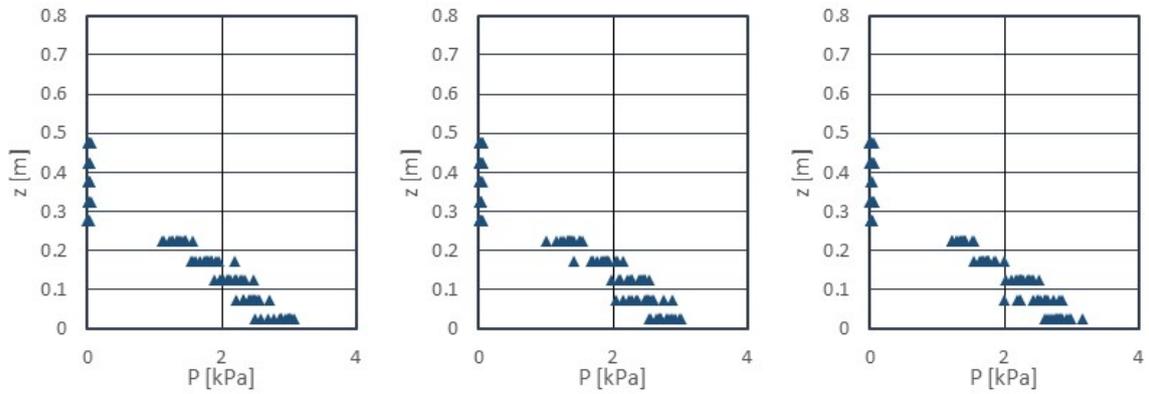
W21



W22



W23



W24

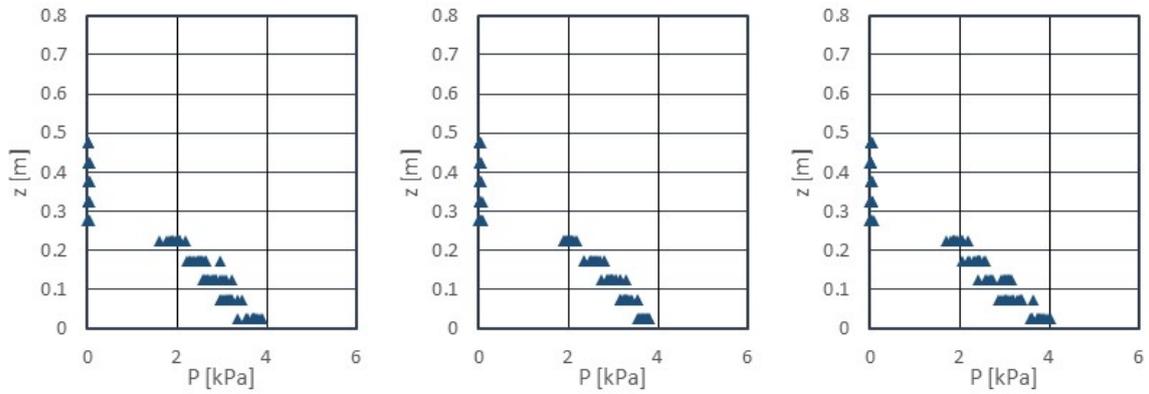
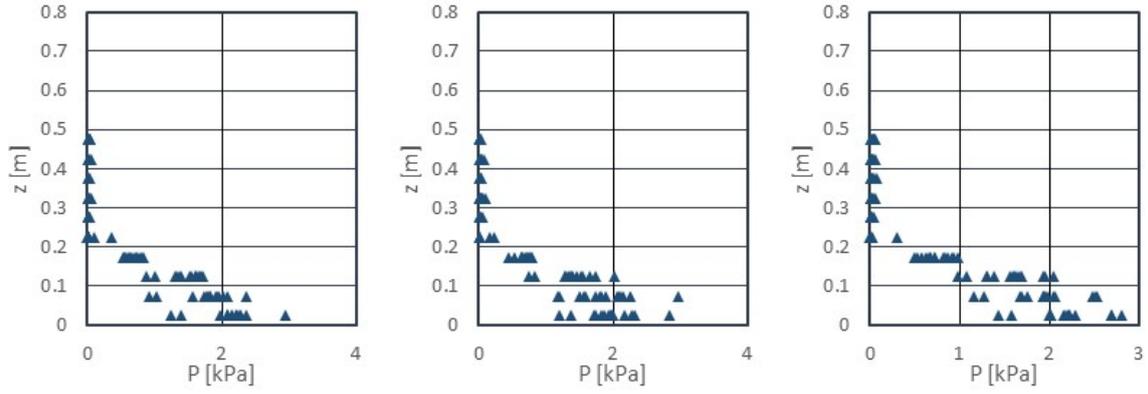
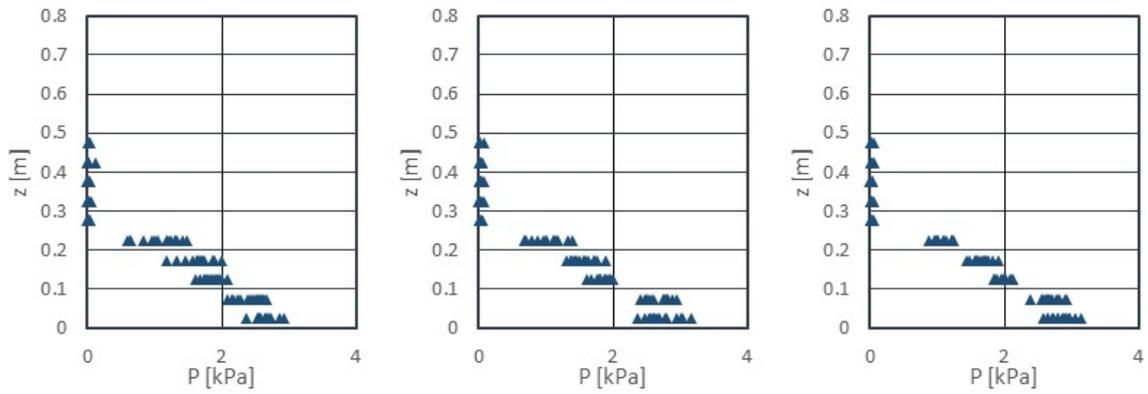


図 II.3.2-14 圧力鉛直分布の観測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m)

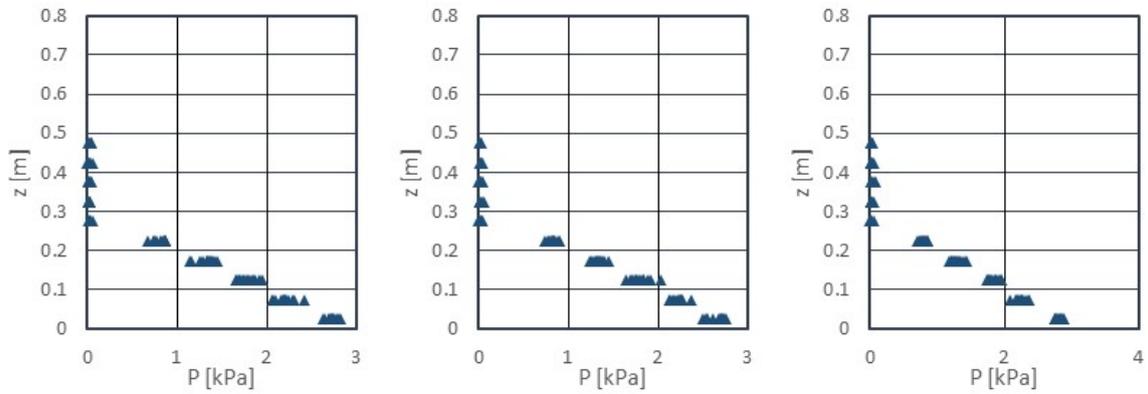
W31



W32



W33



W34

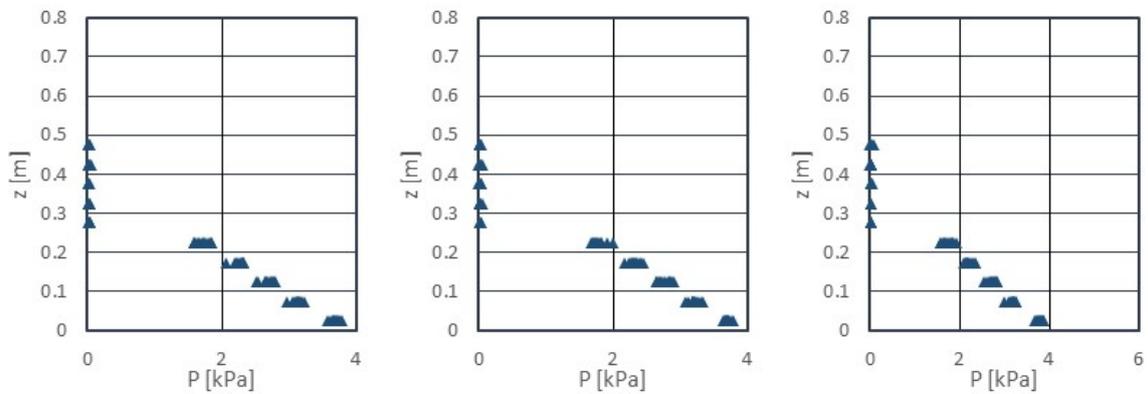


図 II.3.2-14 圧力鉛直分布の観測結果 (直立護岸, 堤体高さ L, 設置位置 1.25m)

3.3. 波力/波圧試験（非越流）

壁が十分高く非越流の場合の、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.3.3-1～図 II.3.3-3 に、直立護岸タイプ地形について、図 II.3.3-4～図 II.3.3-6 に 3.2. に示した越流の場合と同様にそれぞれ示す。同図には、沖波の代表水位時系列と、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及び圧力計の計測結果を鉛直方向に積分することにより算出した波力の計測結果を示した。また、圧力計は P1～P16 の 16 台を設置しており、設置高さは、P1 が底面から 0.025m、それ以降 0.05m ピッチで等間隔に鉛直上方向に設置している。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。

越流する場合と同様、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。また、津波到達時の衝撃的な圧力を除くと、静水圧に近い圧力となっていることが分かる。越流する場合と比較すると、水位や波力の時系列形状はほぼ同じであり、最大値が越流する場合に小さくなっている。ただし、特に単純勾配の W12 で顕著であるが、津波の先端が堤体に衝突して堤体前面の水位が上昇した後、越流する場合には比較的短時間に水位が減少するのに対し、非越流では水位がただちには低下せず、徐々に低下している。津波衝突時には堤体に沿って水隕が上昇するが、そのときの上向きの流速は堤体の高さによらずほぼ同じなため、最高水位については越流、非越流に関わらず同程度になる。その後、越流する場合は堤体上に堤体裏側に向かう流れが生じるため水位が減少するが、非越流の場合には横方向への流れがないため、後続の津波波形からの連続的な流入によりある程度水位が維持されることが分かる。ただし波力については、越流と非越流で水位の比較ほどの違いは現れておらず、ここで計測された水位のうち上方の水隕は、圧力の小さい気中に飛来している状態の水隕であることが分かる。

図 II.3.3-7～図 II.3.3-12 に、堤体前面の 3 側線（F1～F3）で計測した圧力から、それぞれ波力を積分により求めた結果を示す。15 回繰り返し試験のうち、1 回目の結果を示した。全てのケースで、非越流の場合とほぼ同様の時系列形状をしているが、波力最大値の大きさは非越流の方が大きくなっている。特に、後述波力特性のうち、セカンドピークとサードピークが小さくなる。ファーストピークである衝突時の波力は、堤体の底面付近に集中する圧力によって生じているため、堤体が低いことの影響はほとんど現れていないと考えられる。

図 II.3.3-13、図 II.3.3-14 に、波力最大時の鉛直圧力分布を示す。各点は、同じ高さの 3 側線の圧力計の計測結果の平均値を示しており、15 回の繰り返し試験のそれぞれの計測結果を示した。波力の時系列と同様、圧力分布についても非越流と同じ特徴を示す。ただし、両者がともに静水圧形状となる場合も、非越流の方が越流のケースよりも圧力は大きくなっており、越流により圧力分布自体が低減していることが分かる。

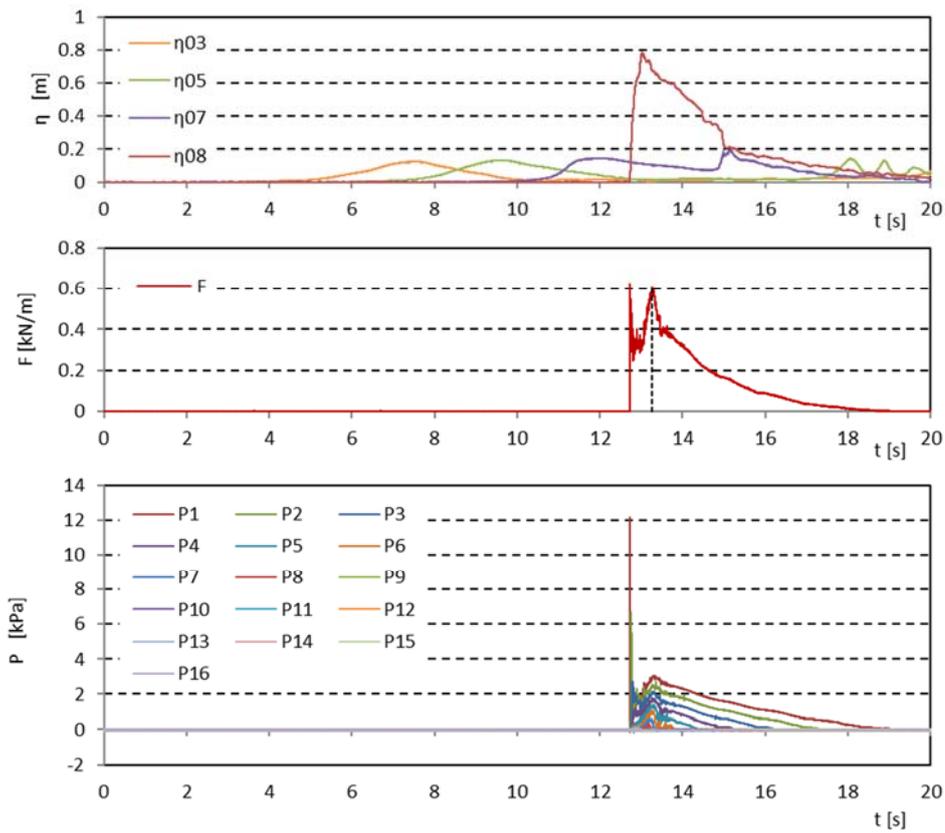


図 II.3.3-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0m, W12)

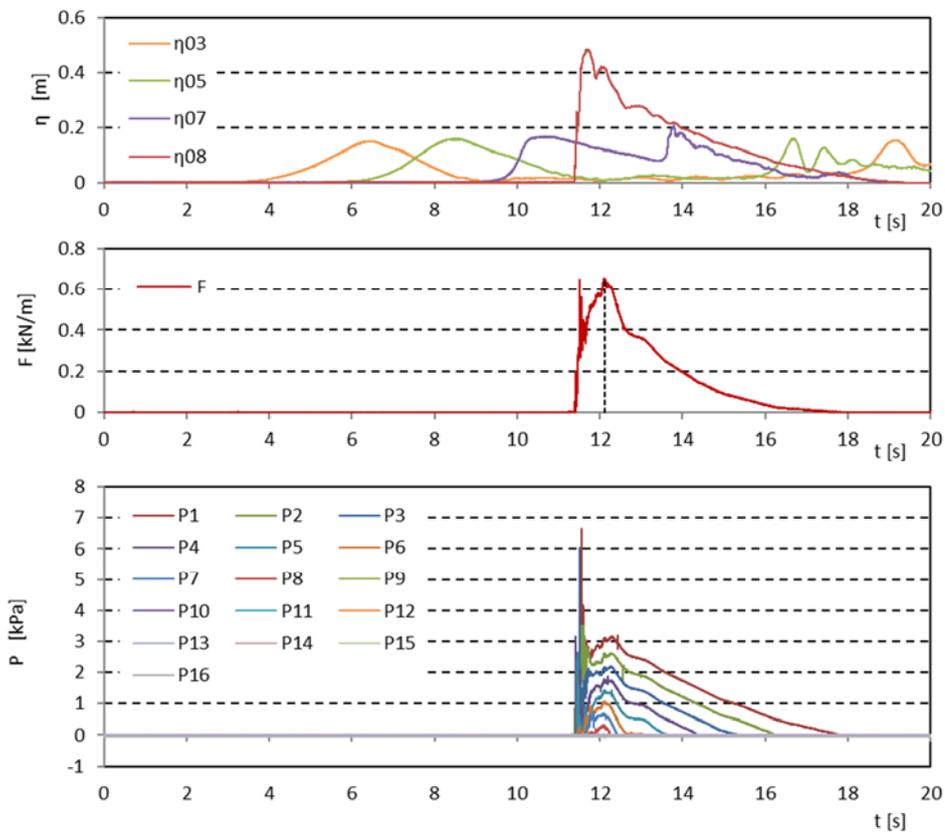


図 II.3.3-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0m, W13)

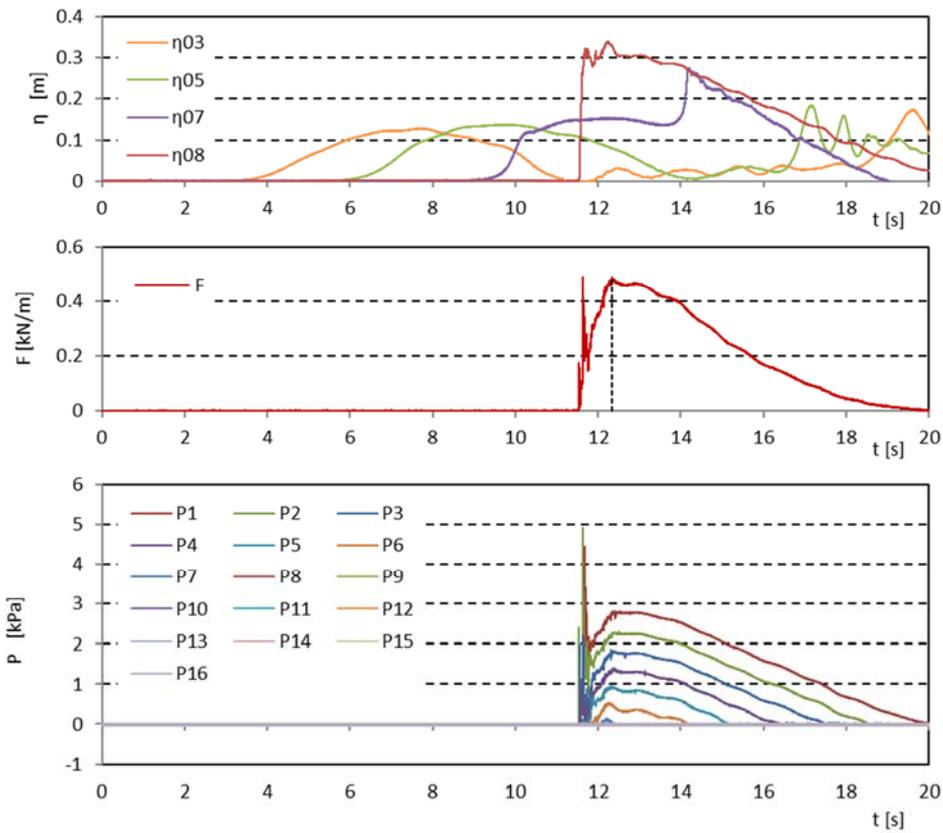


図 II.3.3-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0m, W22)

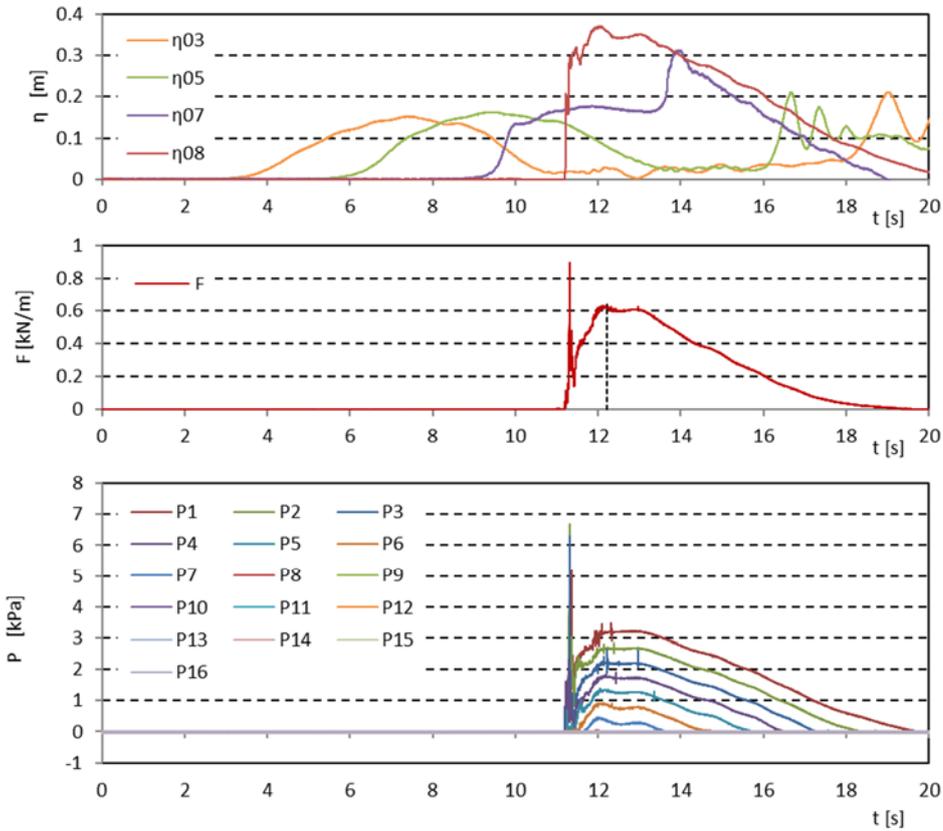


図 II.3.3-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0m, W23)

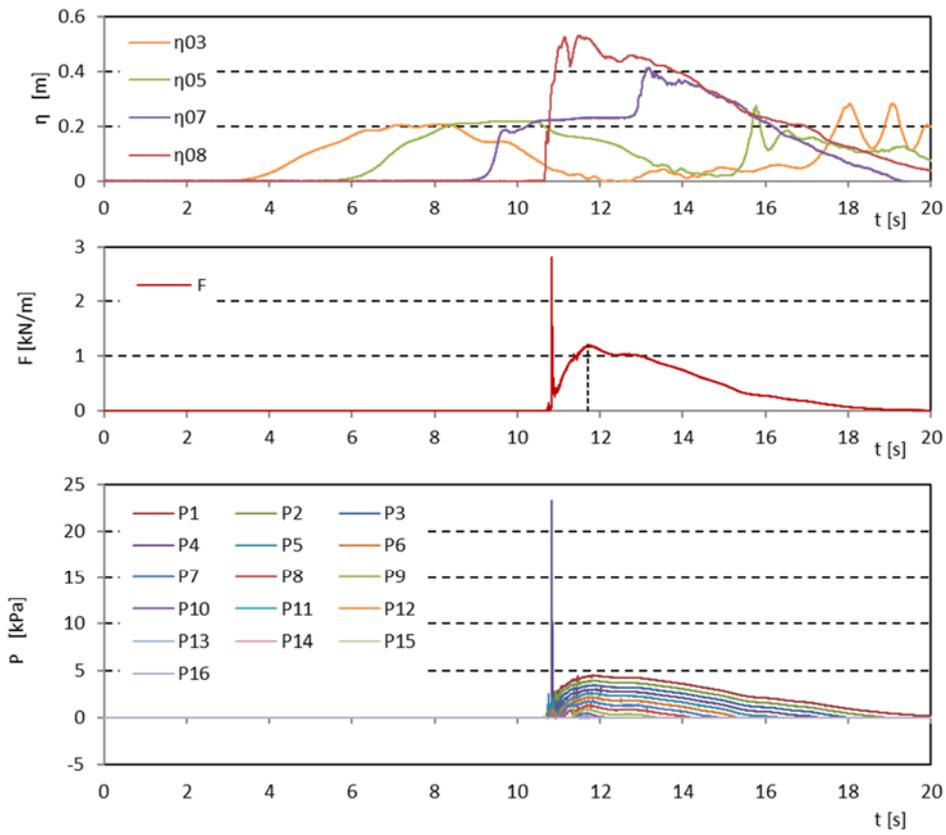


図 II.3.3-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0m, W24)

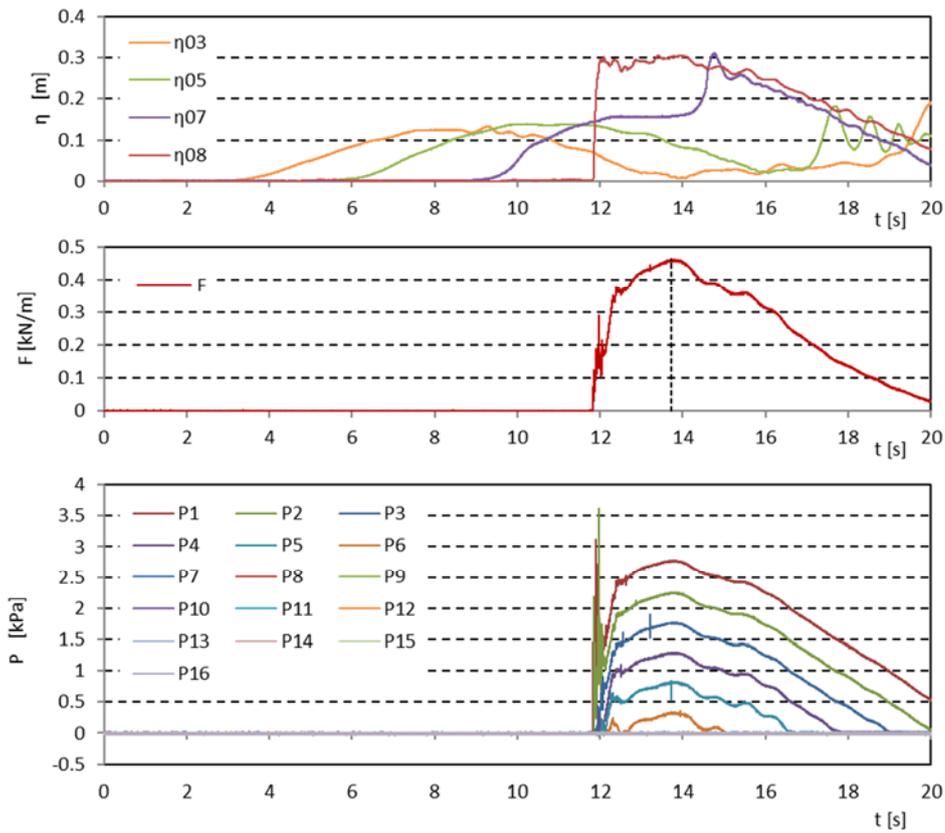


図 II.3.3-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0m, W32)

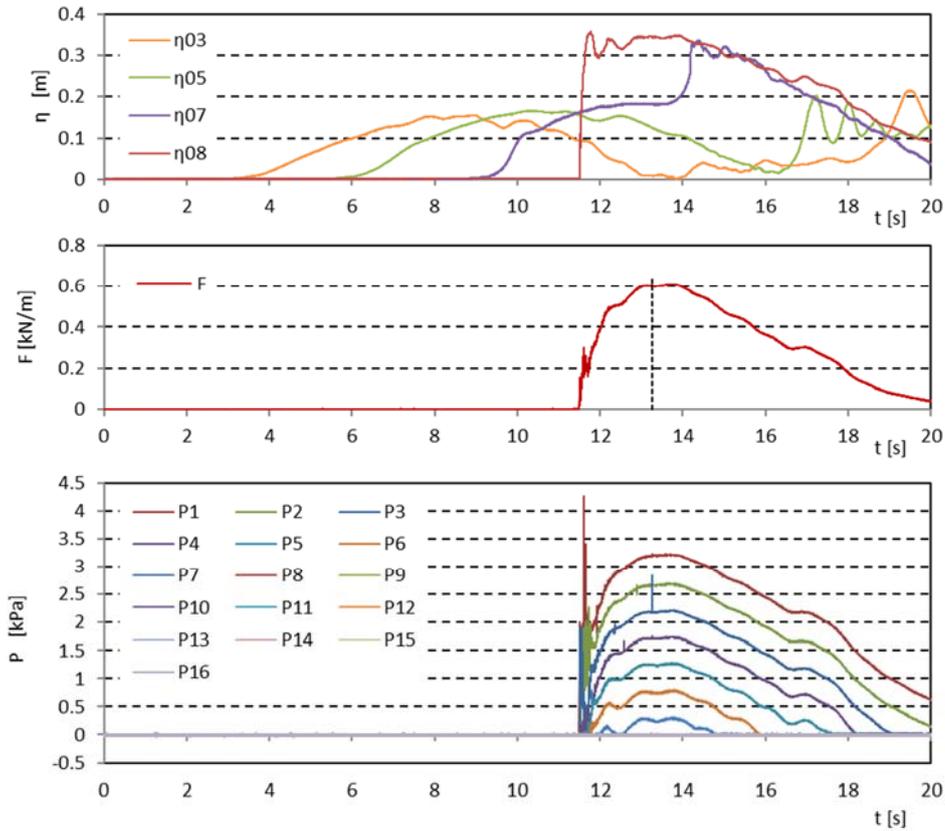


図 II.3.3-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0m, W33)

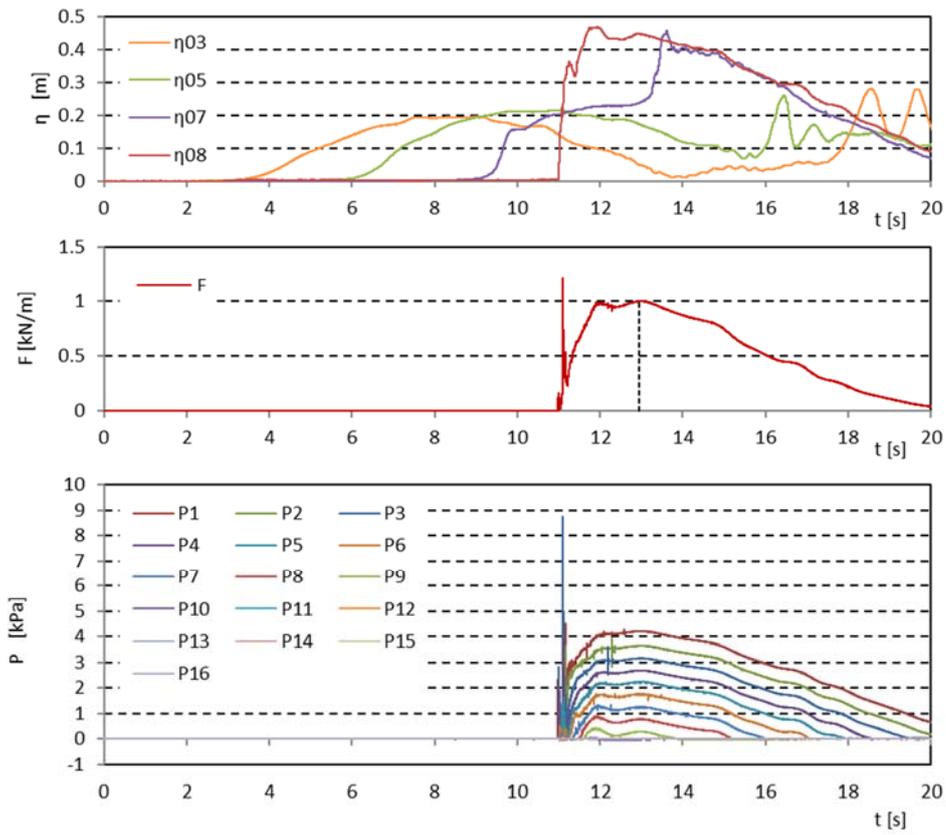


図 II.3.3-1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0m, W34)

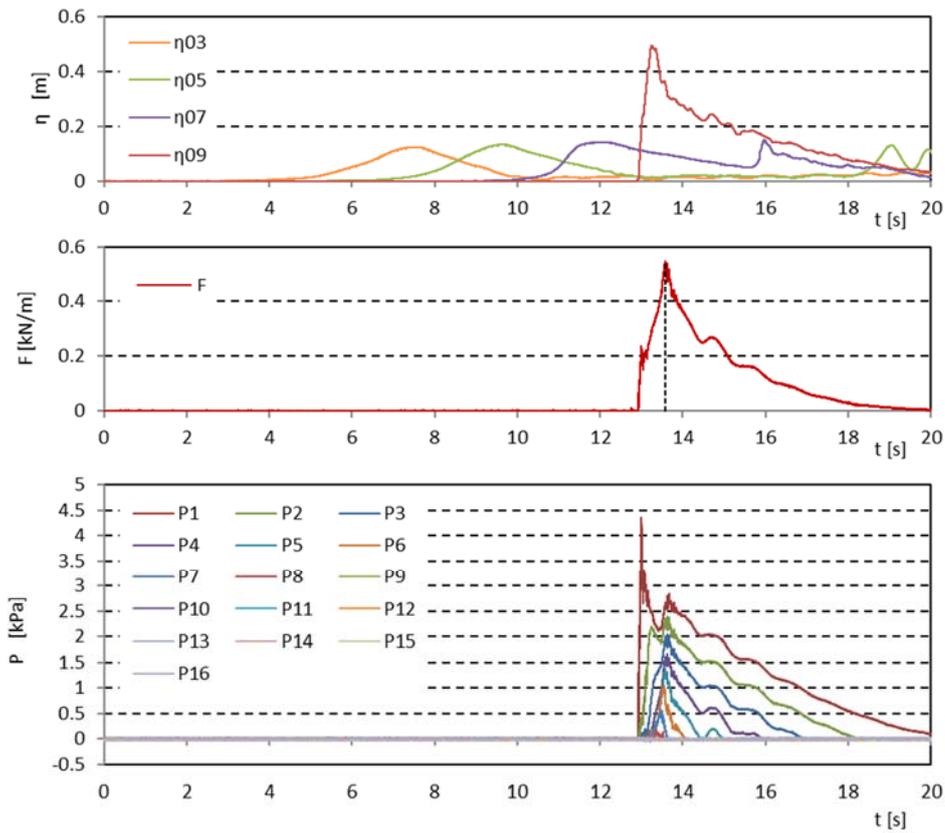


図 II.3.3-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m, W12)

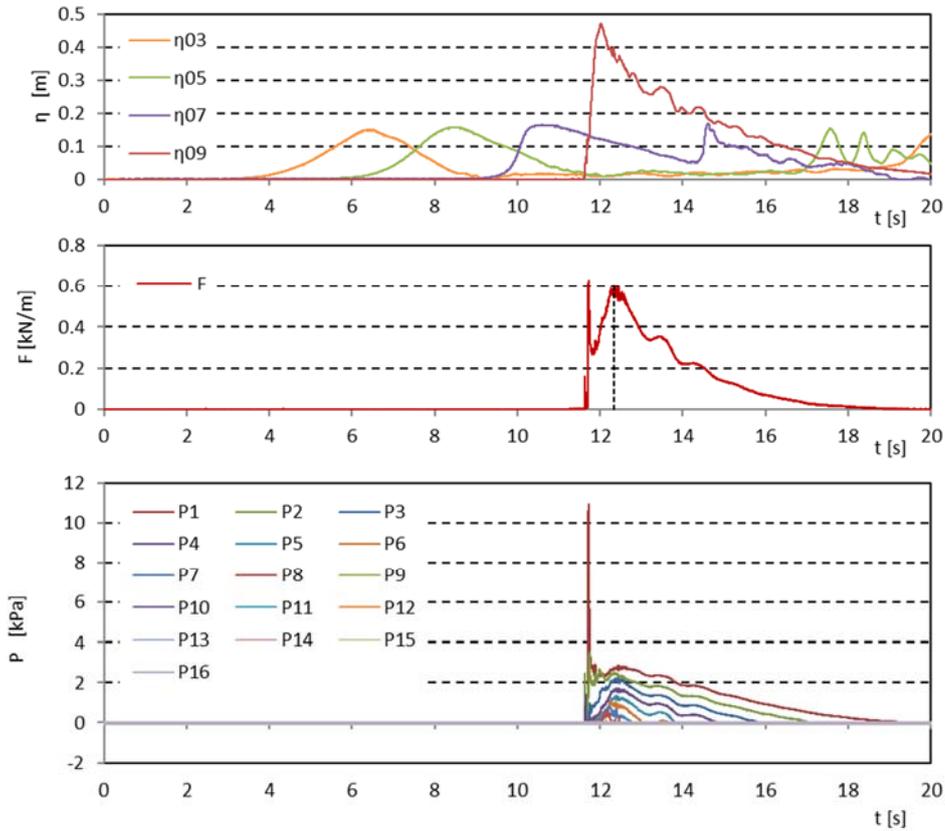


図 II.3.3-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m, W13)

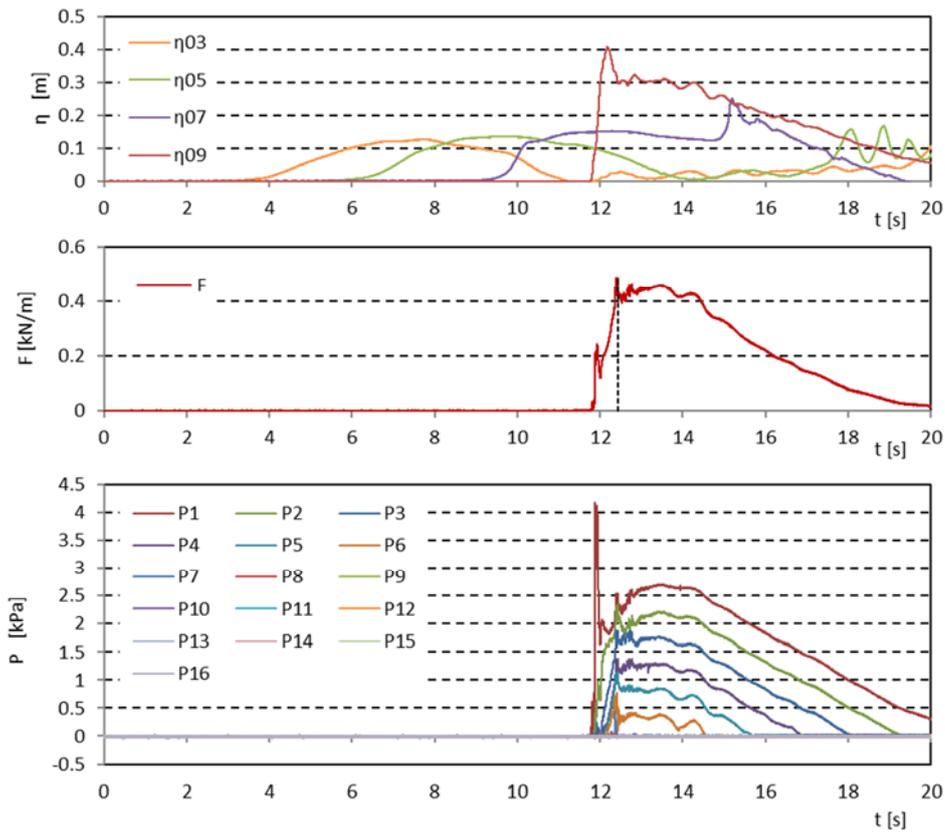


図 II.3.3-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m, W22)

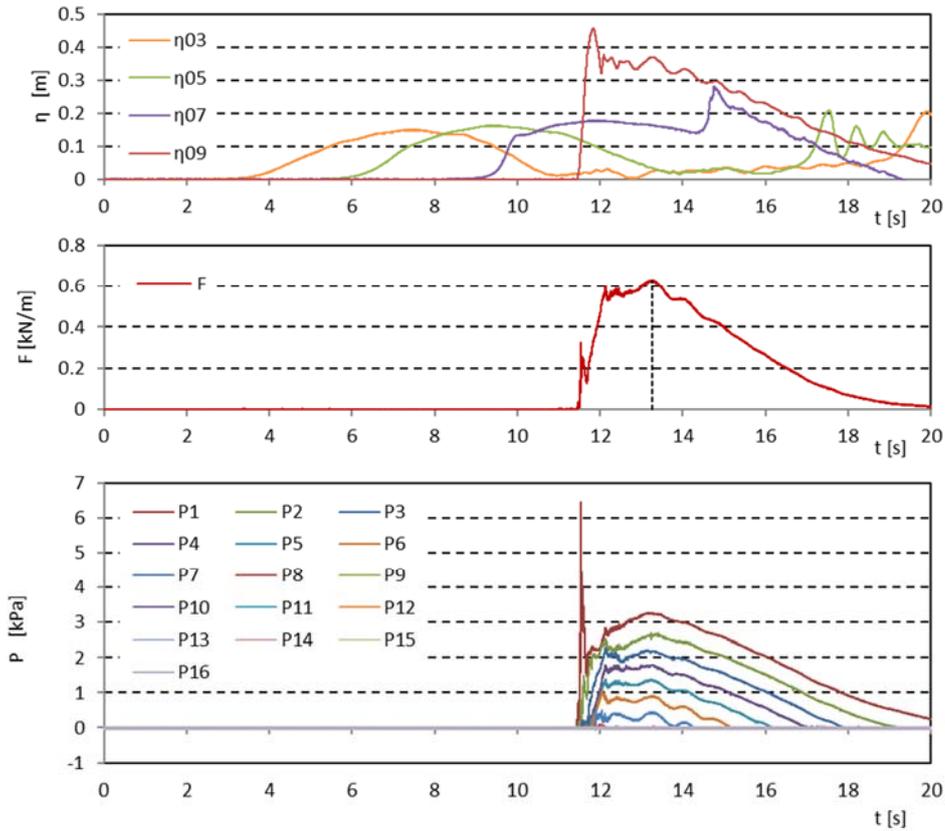


図 II.3.3-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m, W23)

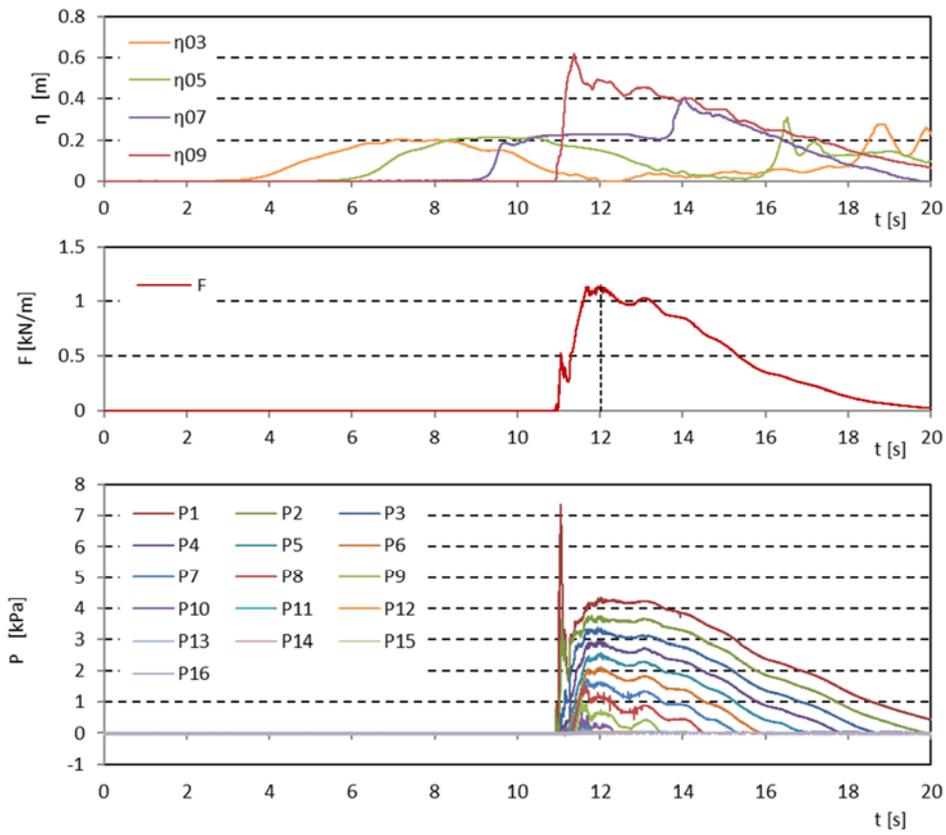


図 II.3.3-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m, W24)

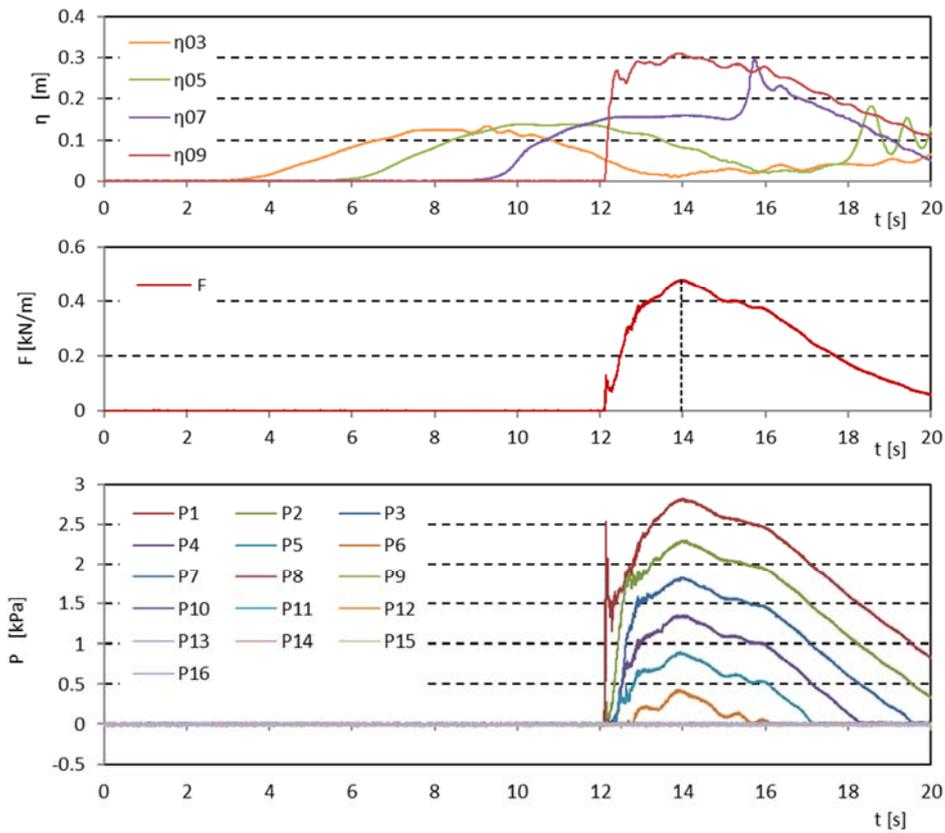


図 II.3.3-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m, W32)

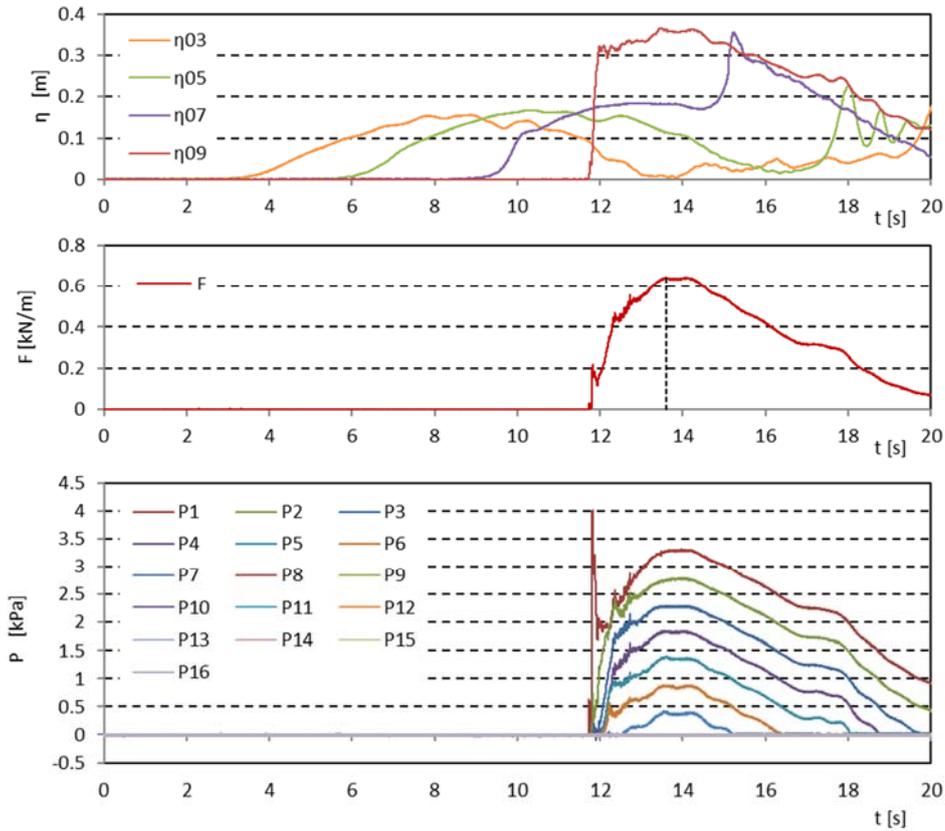


図 II.3.3-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m, W33)

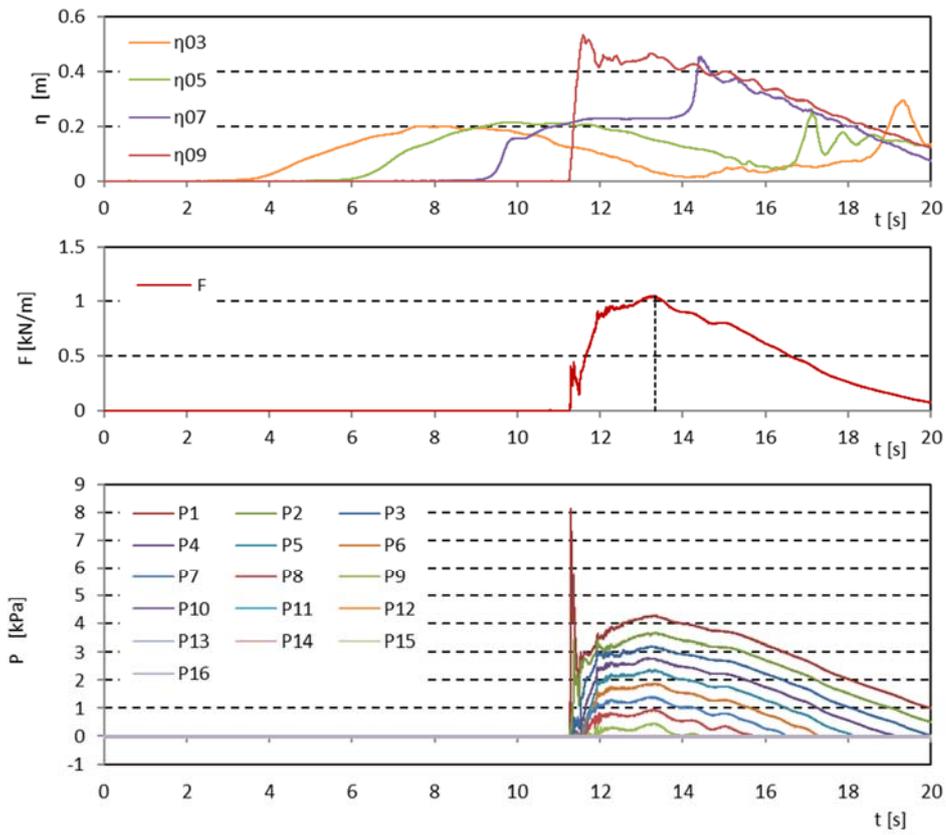


図 II.3.3-2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m, W34)

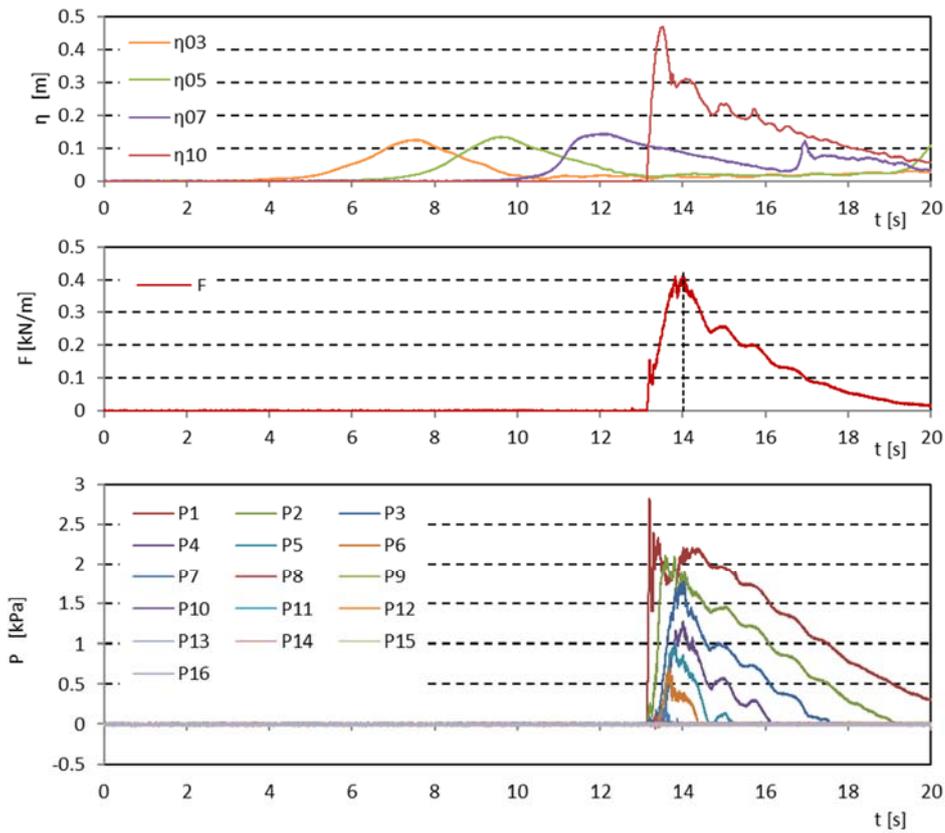


図 II.3.3-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m, W12)

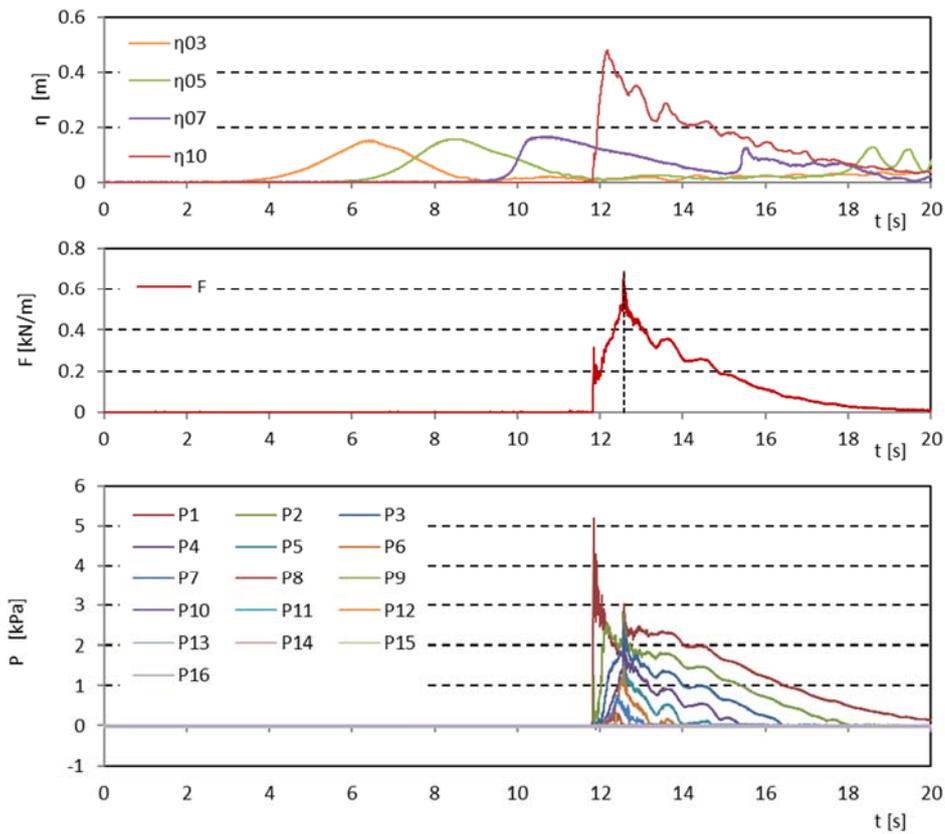


図 II.3.3-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m, W13)

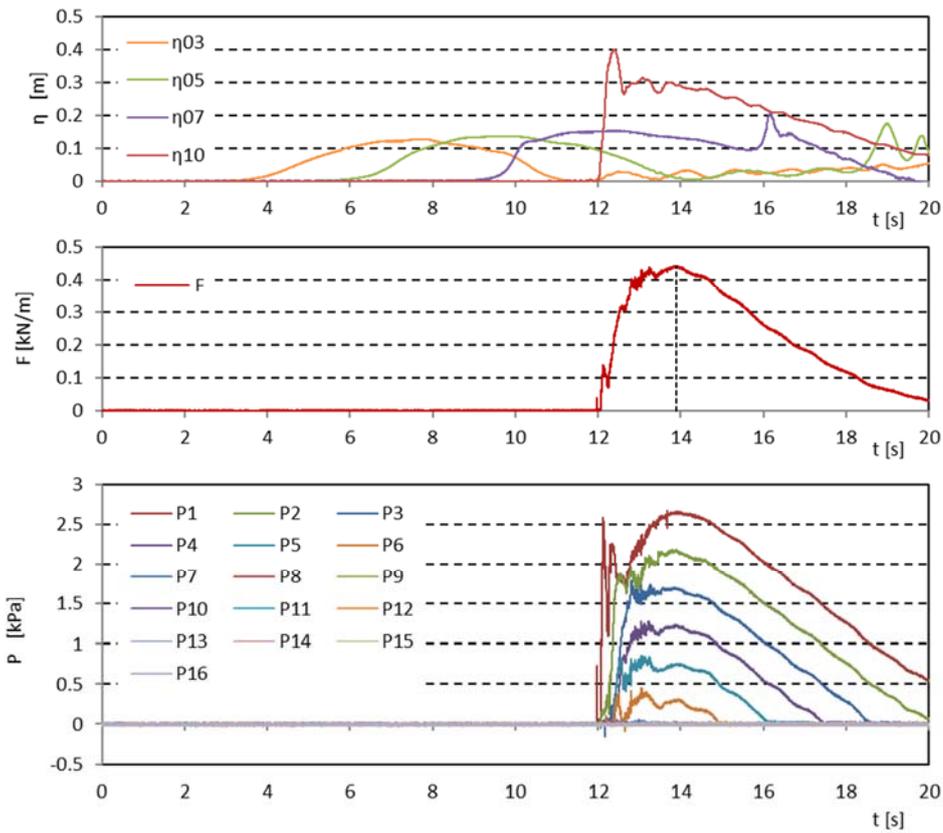


図 II.3.3-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m, W22)

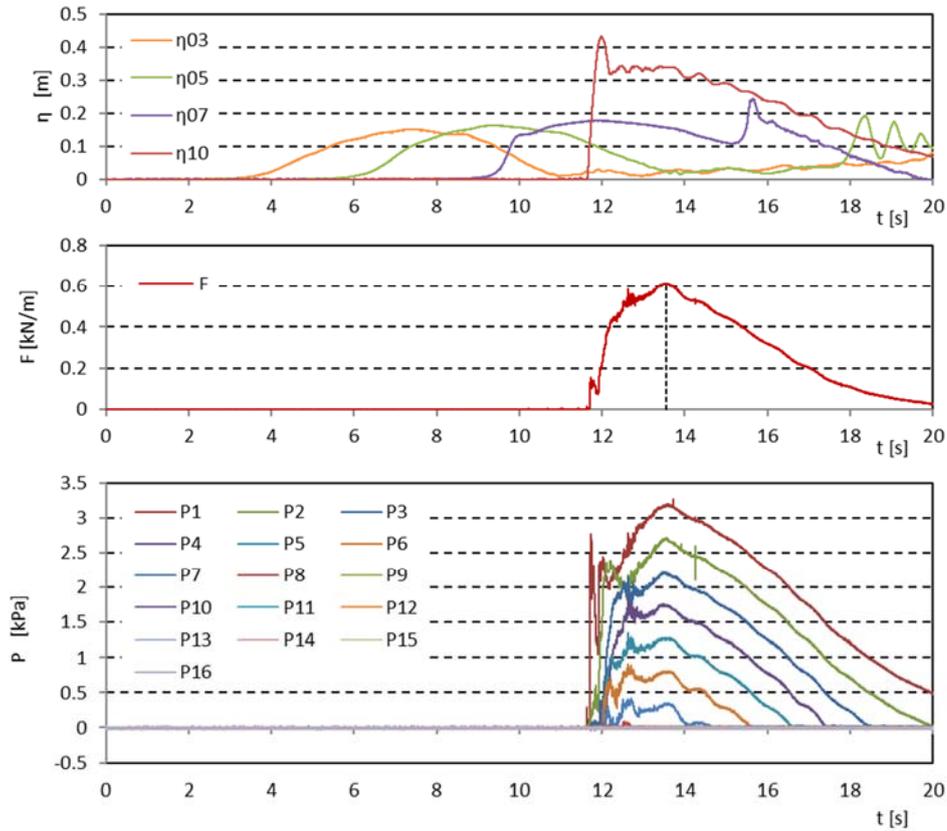


図 II.3.3-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m, W23)

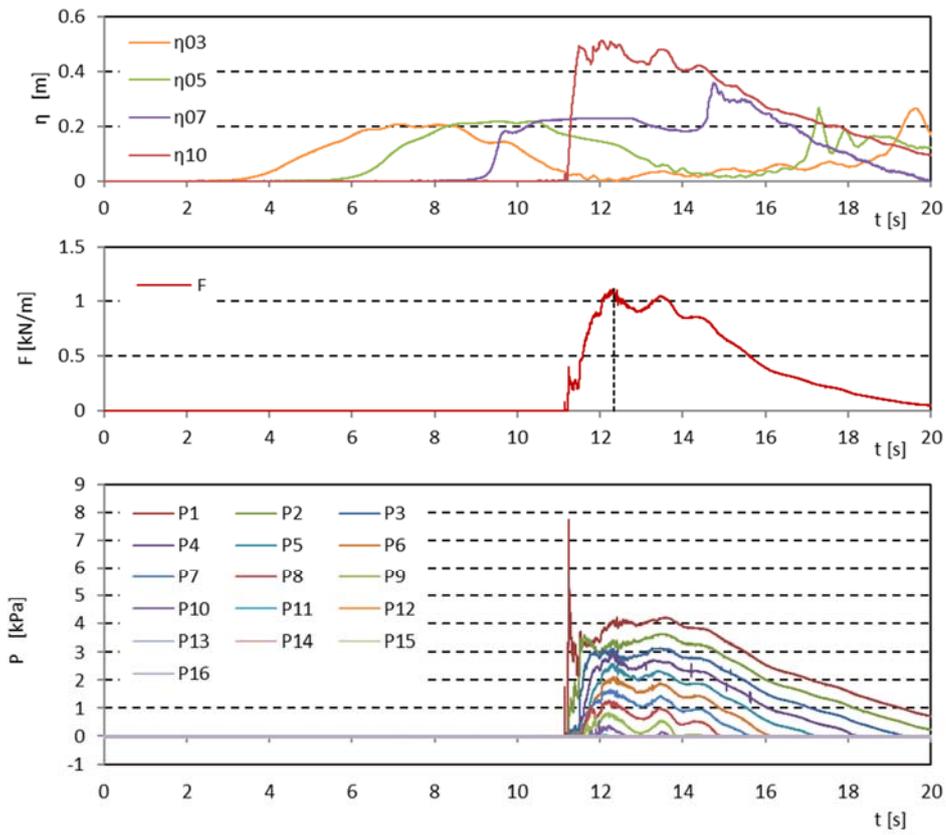


図 II.3.3-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m, W24)

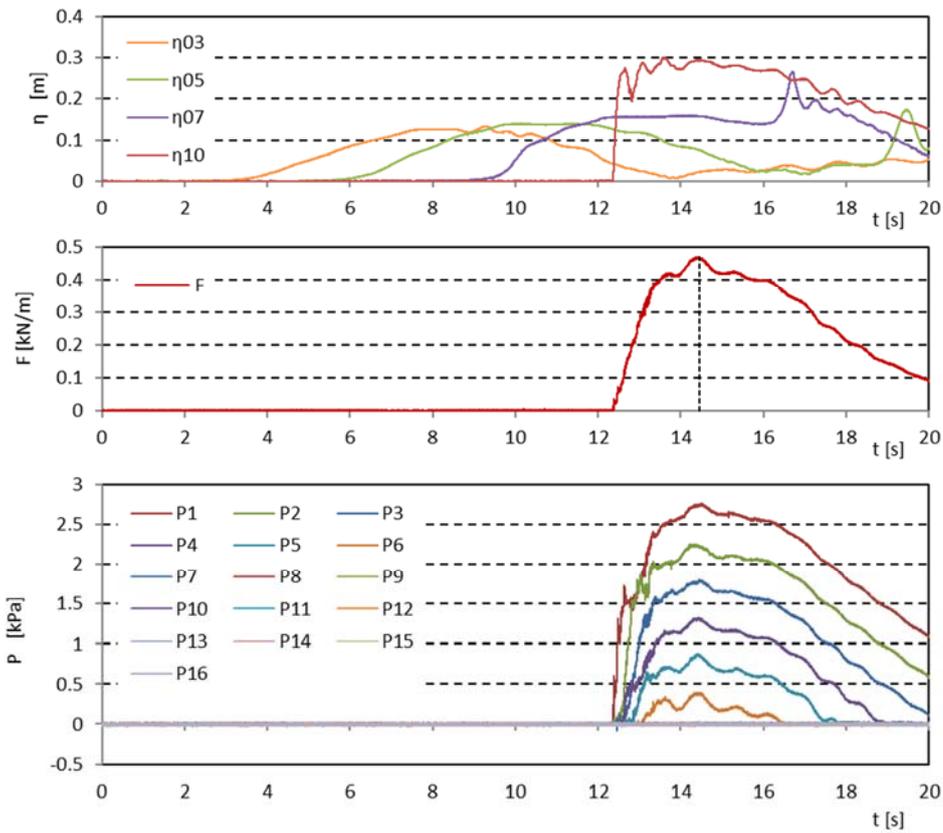


図 II.3.3-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m, W32)

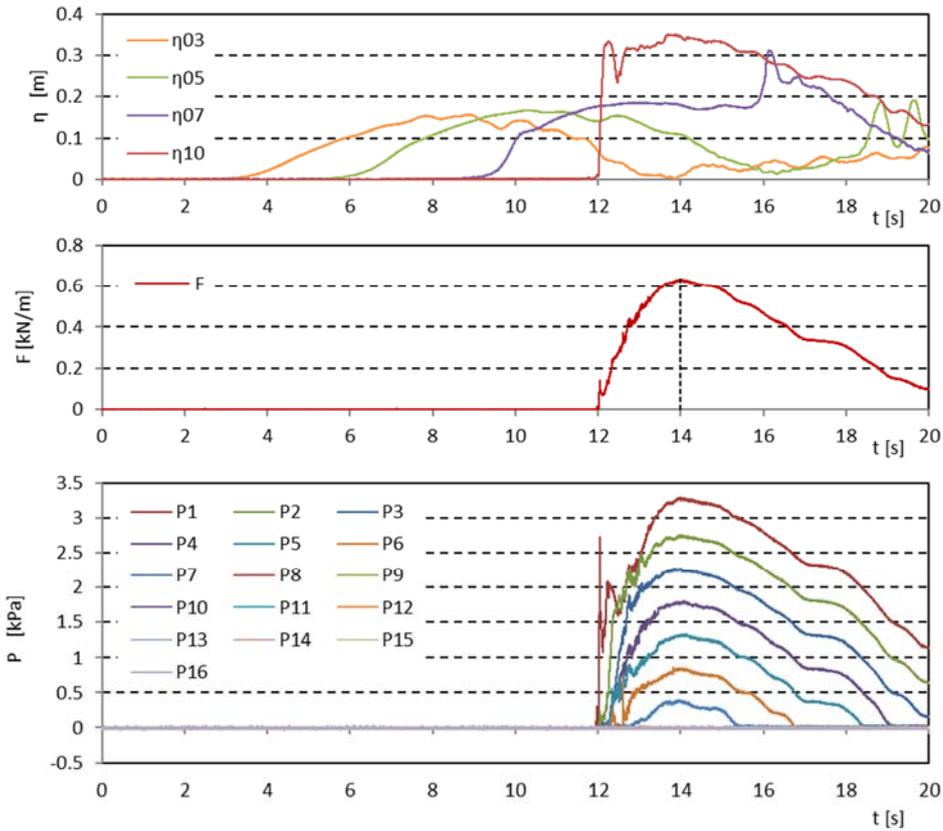


図 II.3.3-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m, W33)

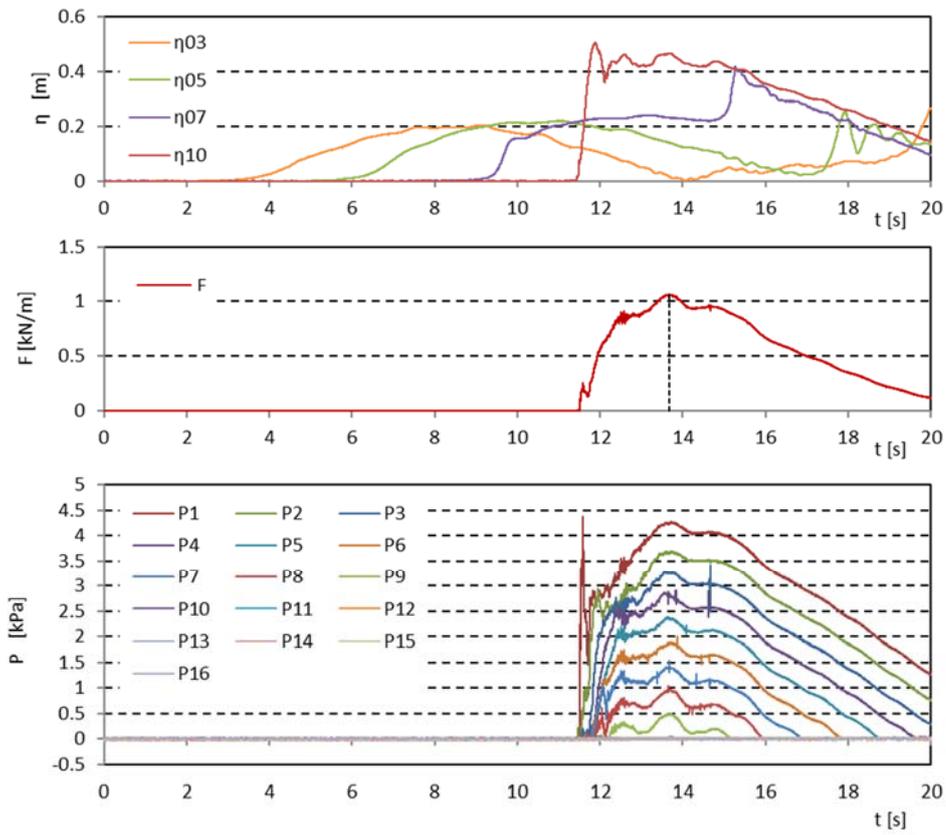


図 II.3.3-3 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m, W34)

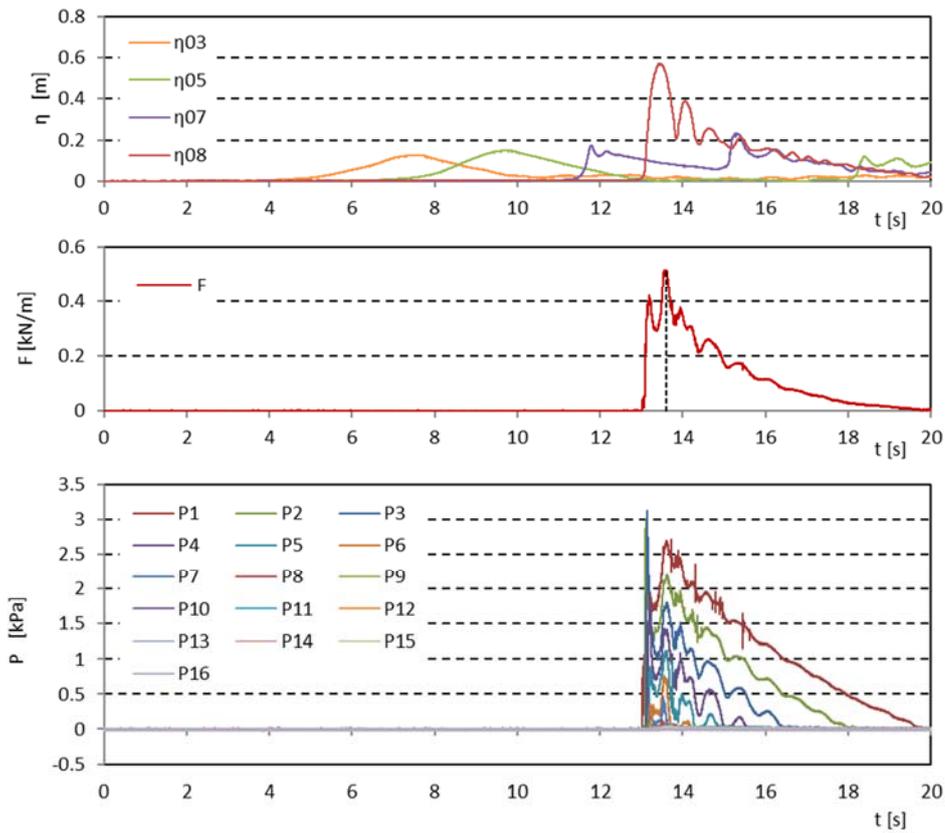


図 II.3.3-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0m, W12)

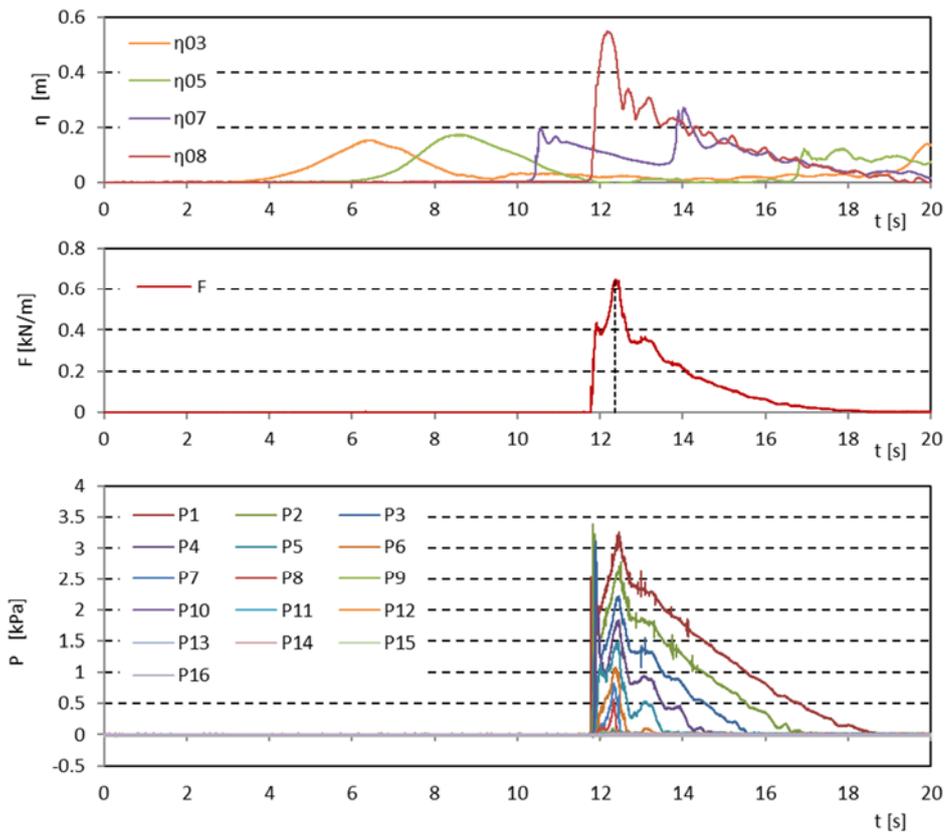


図 II.3.3-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0m, W13)

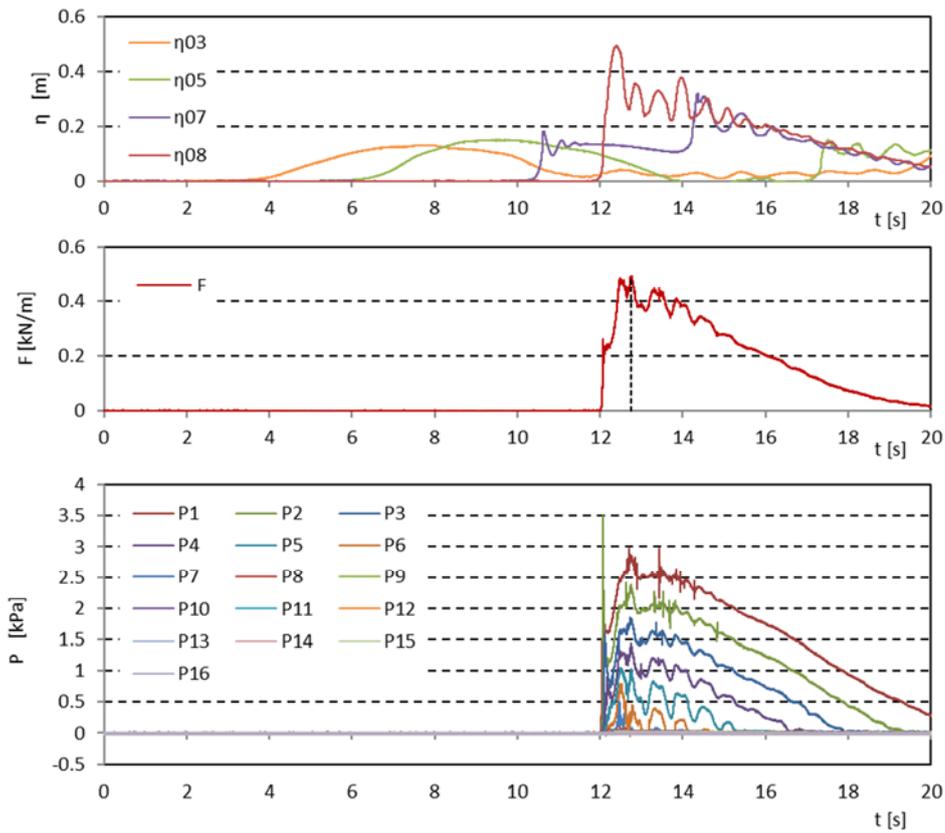


図 II.3.3-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0m, W22)

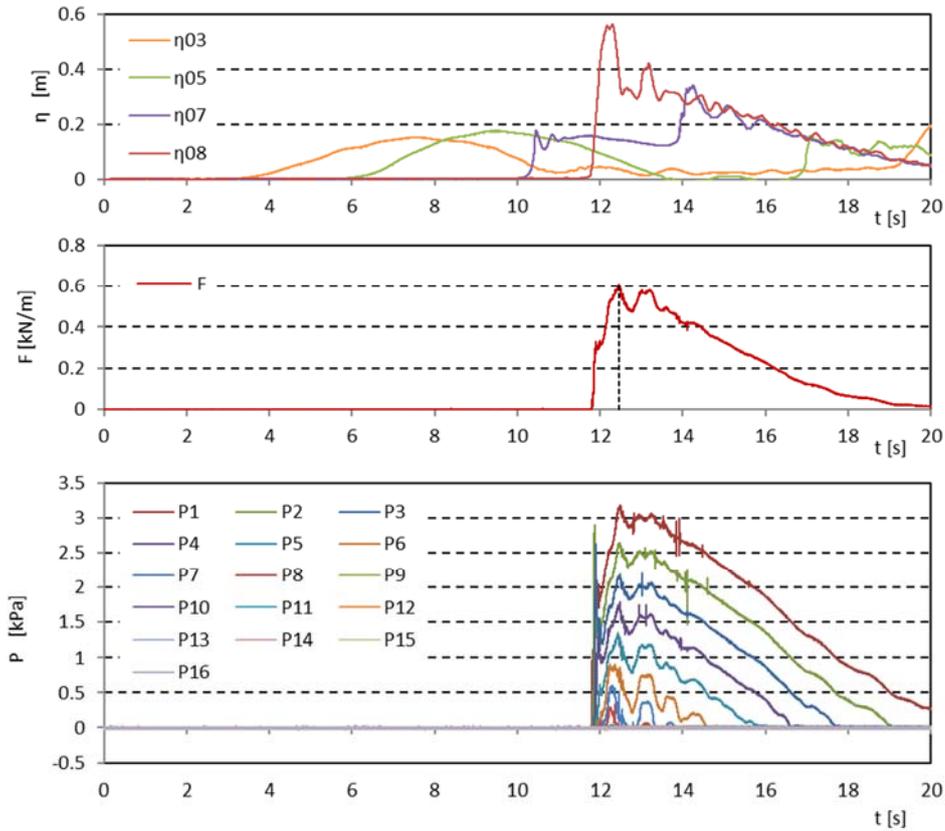


図 II.3.3-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0m, W23)

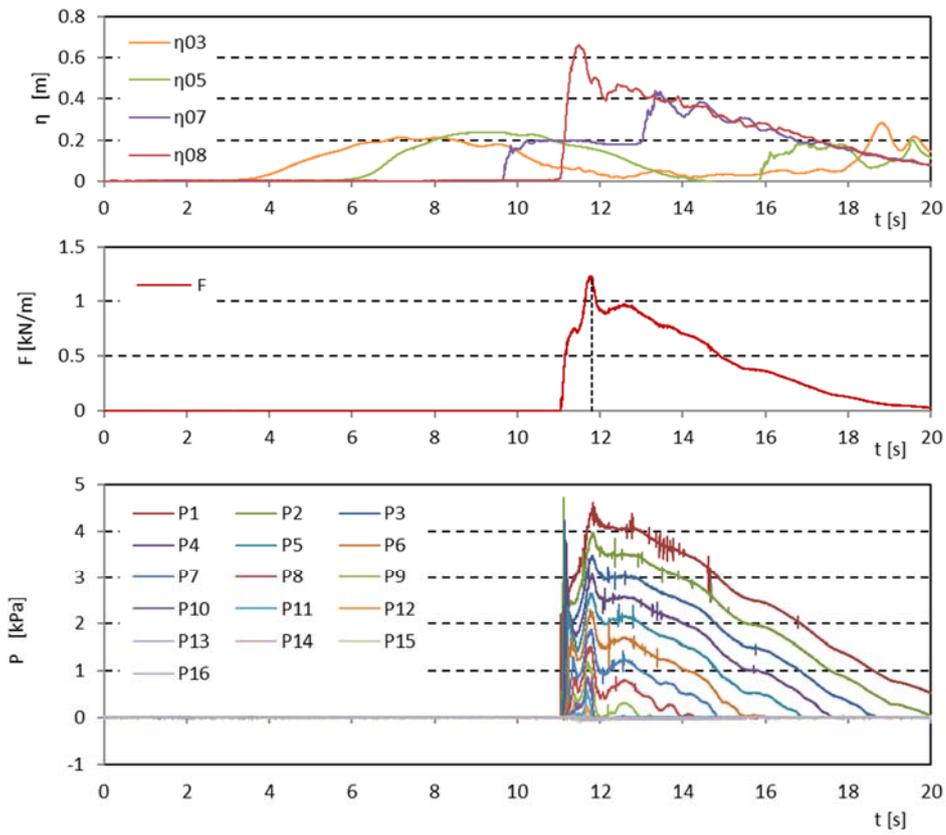


図 II.3.3-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0m, W24)

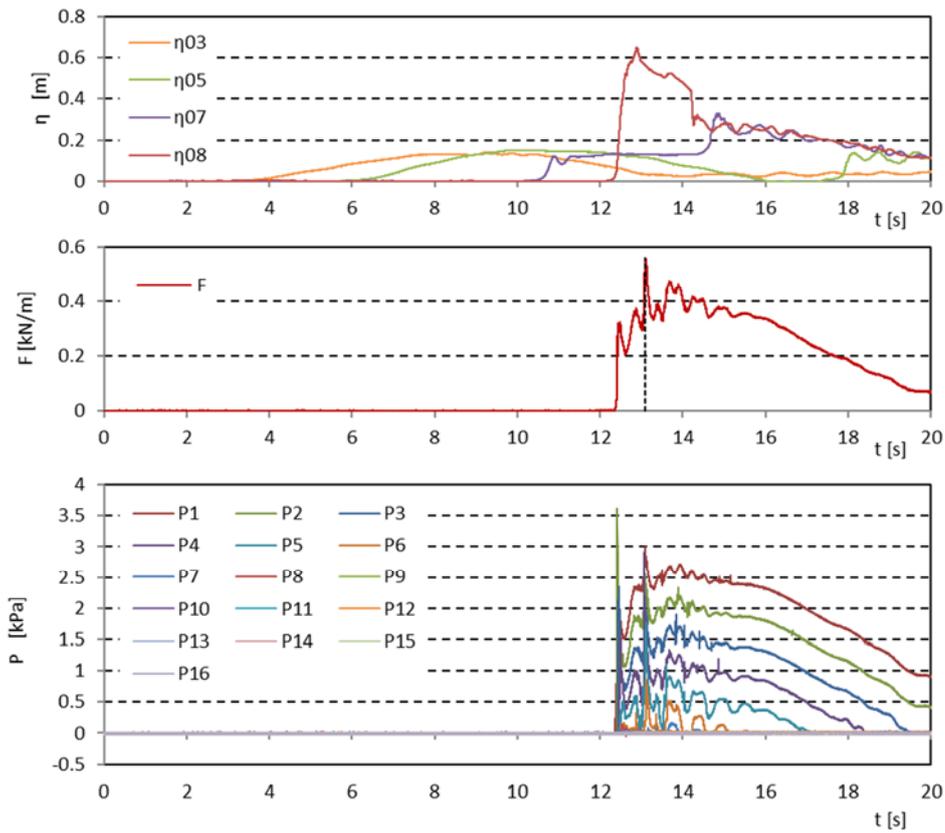


図 II.3.3-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0m, W32)

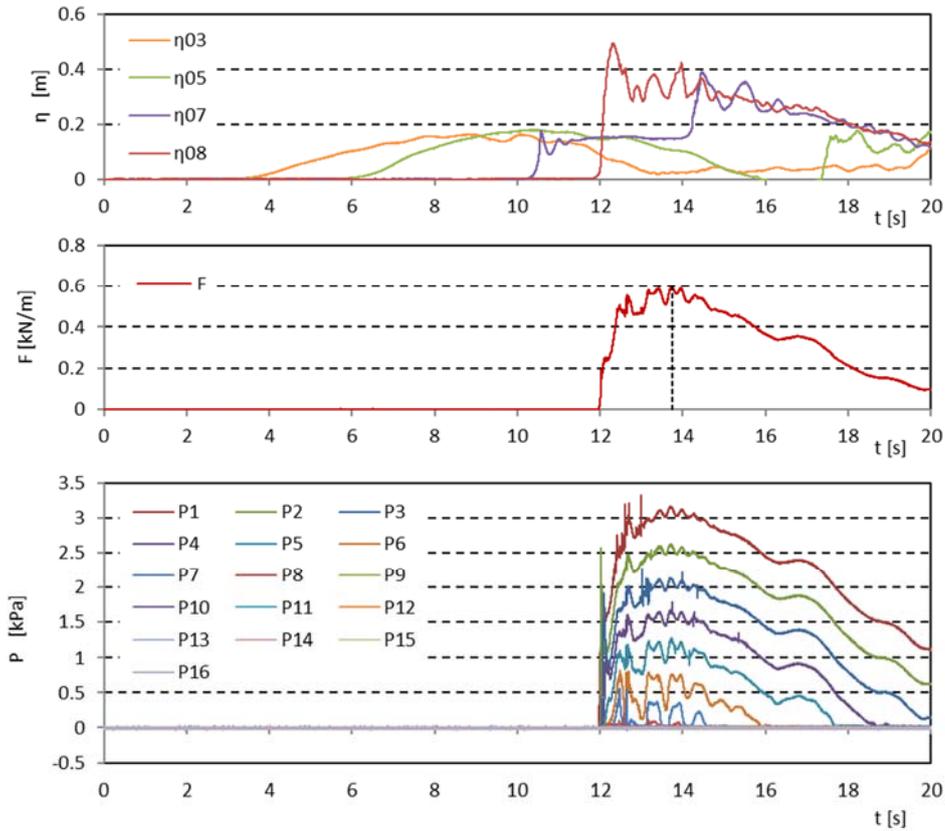


図 II.3.3-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0m, W33)

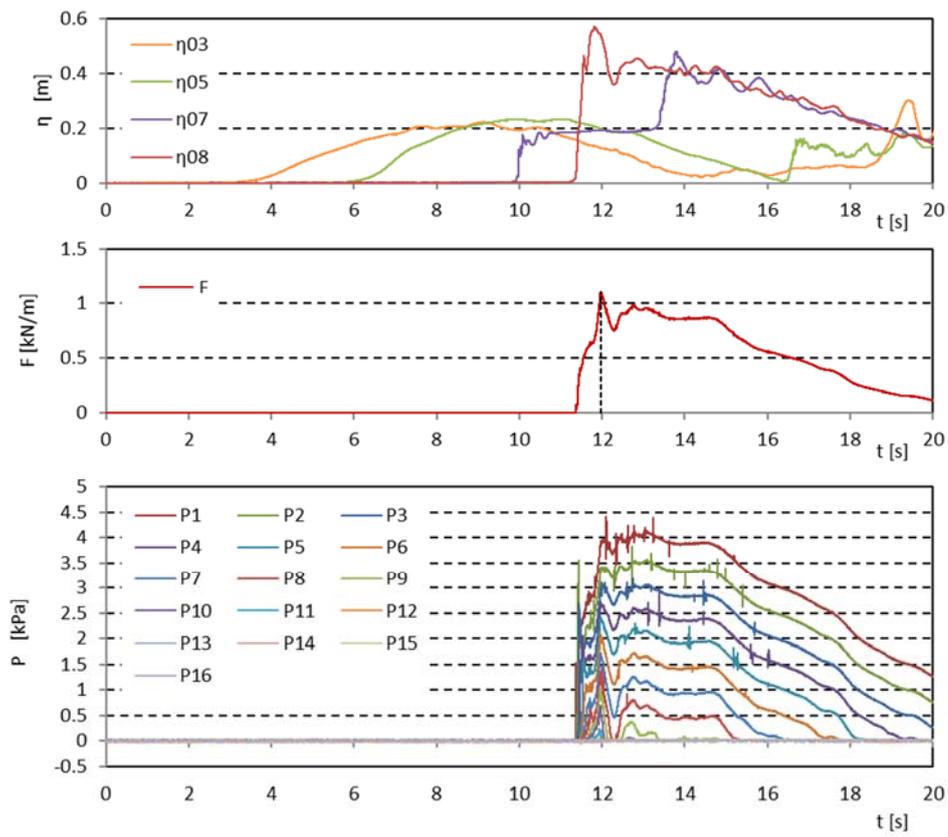


図 II.3.3-4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0m, W34)

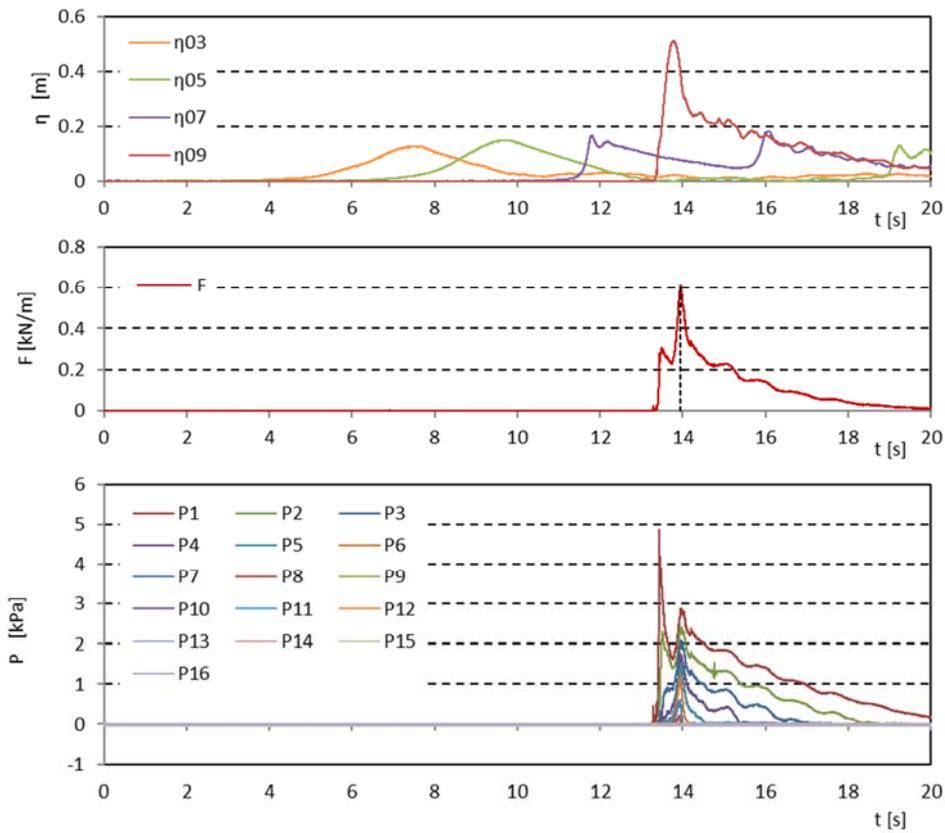


図 II.3.3-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m, W12)

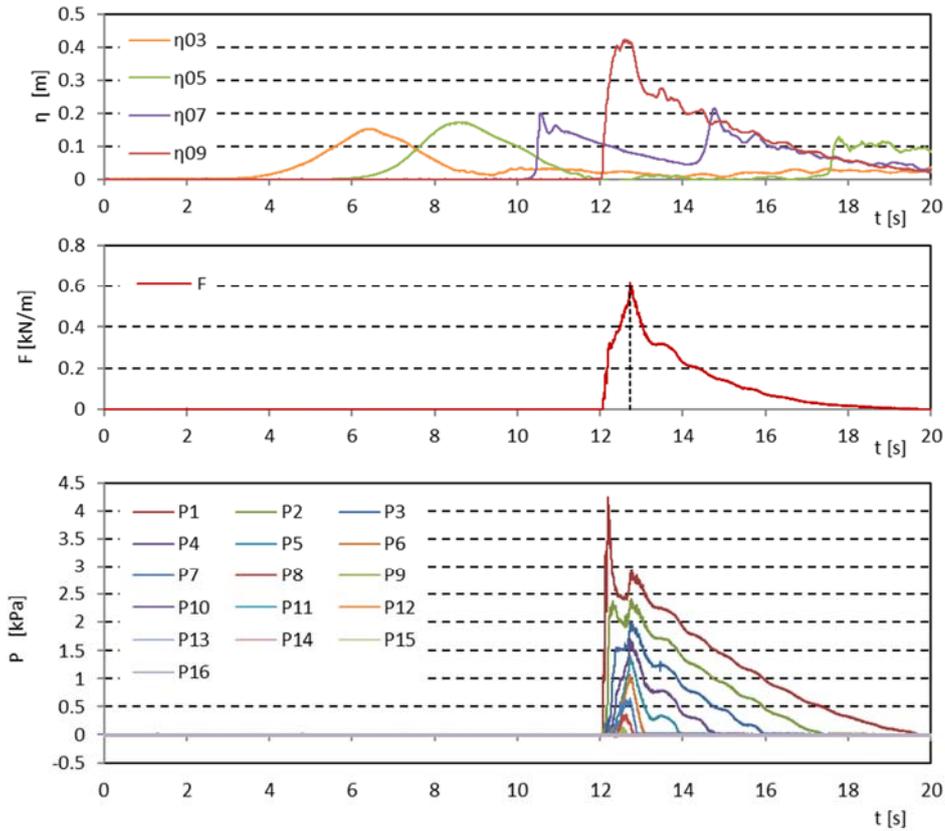


図 II.3.3-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m, W13)

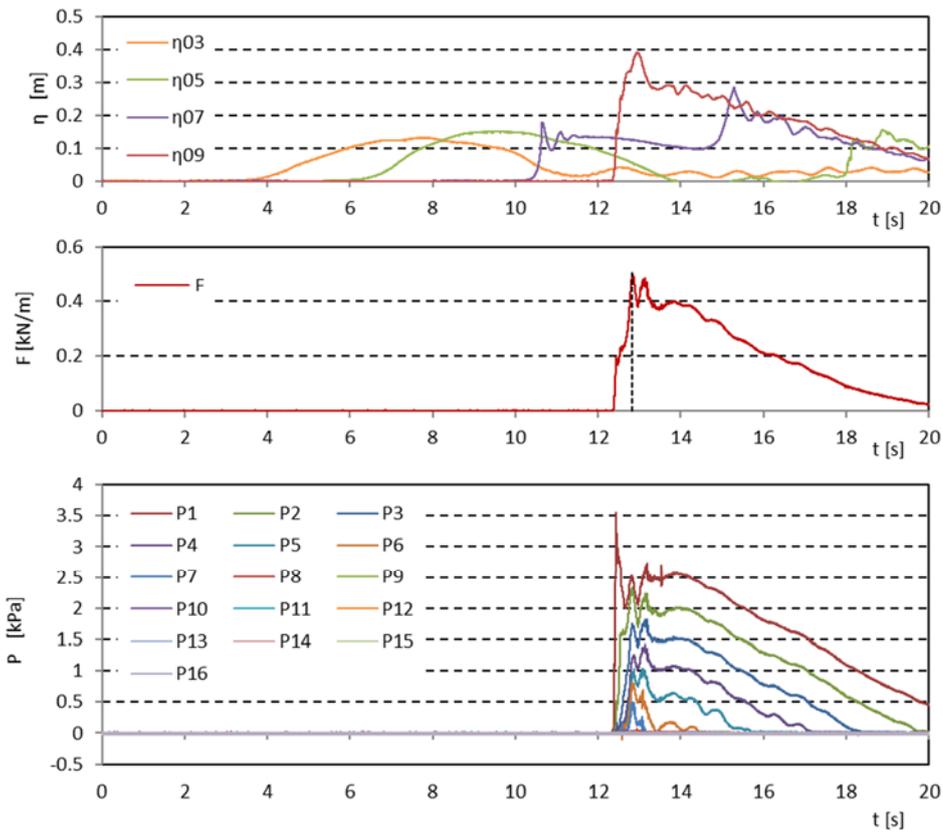


図 II.3.3-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m, W22)

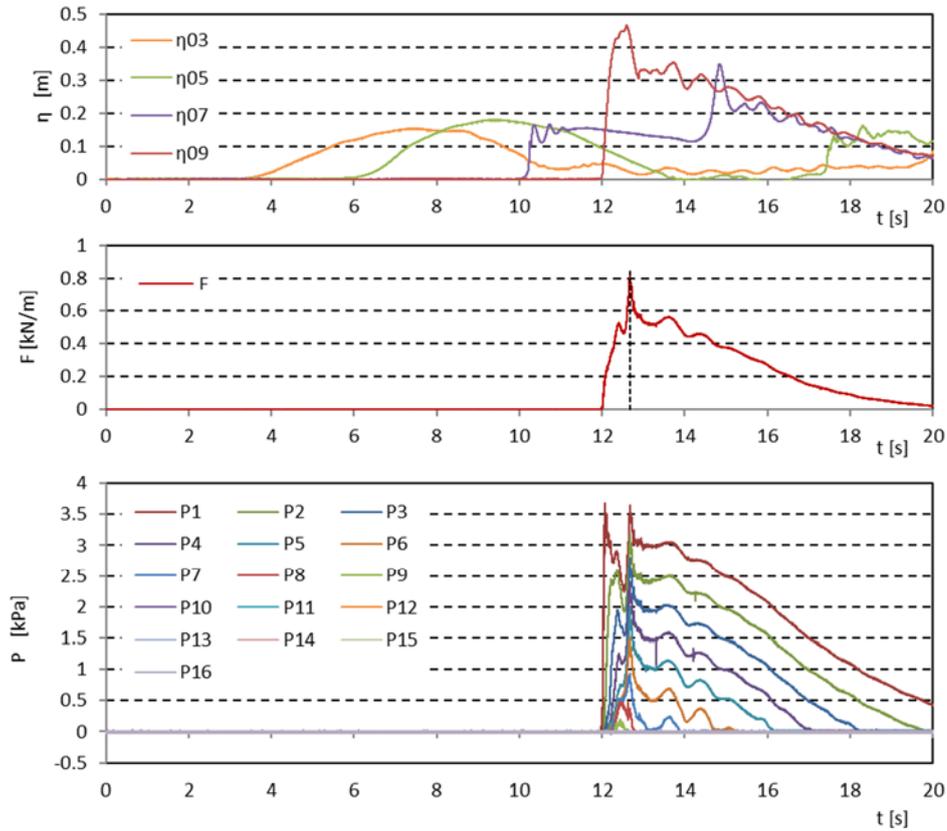


図 II.3.3-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m, W23)

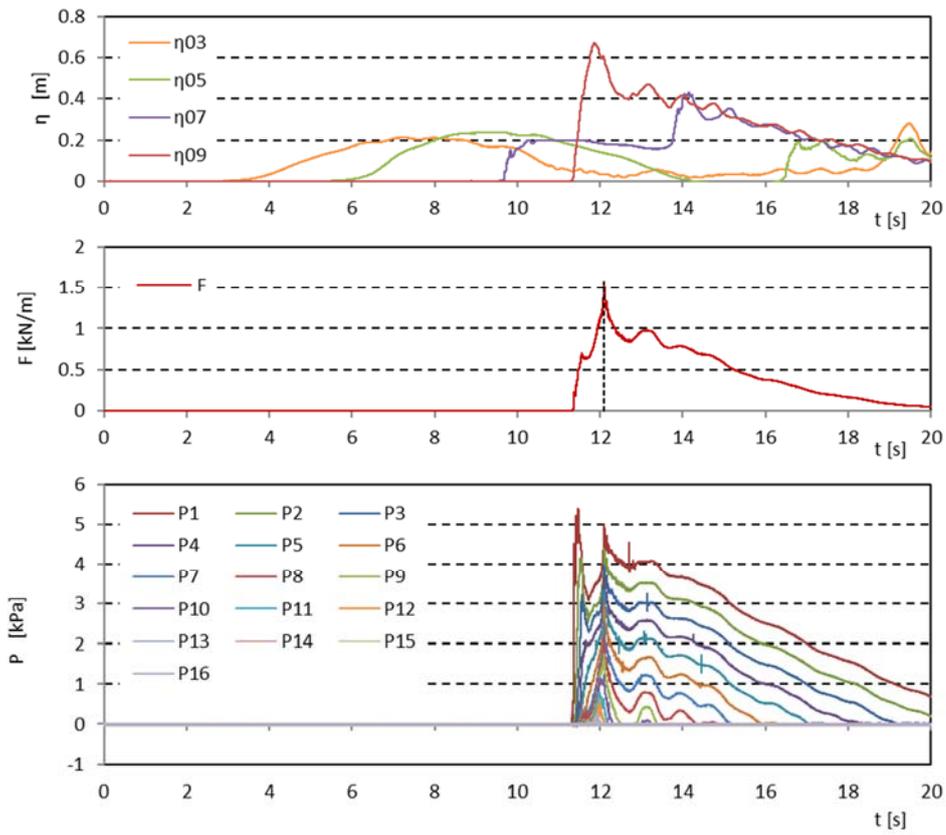


図 II.3.3-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m, W24)

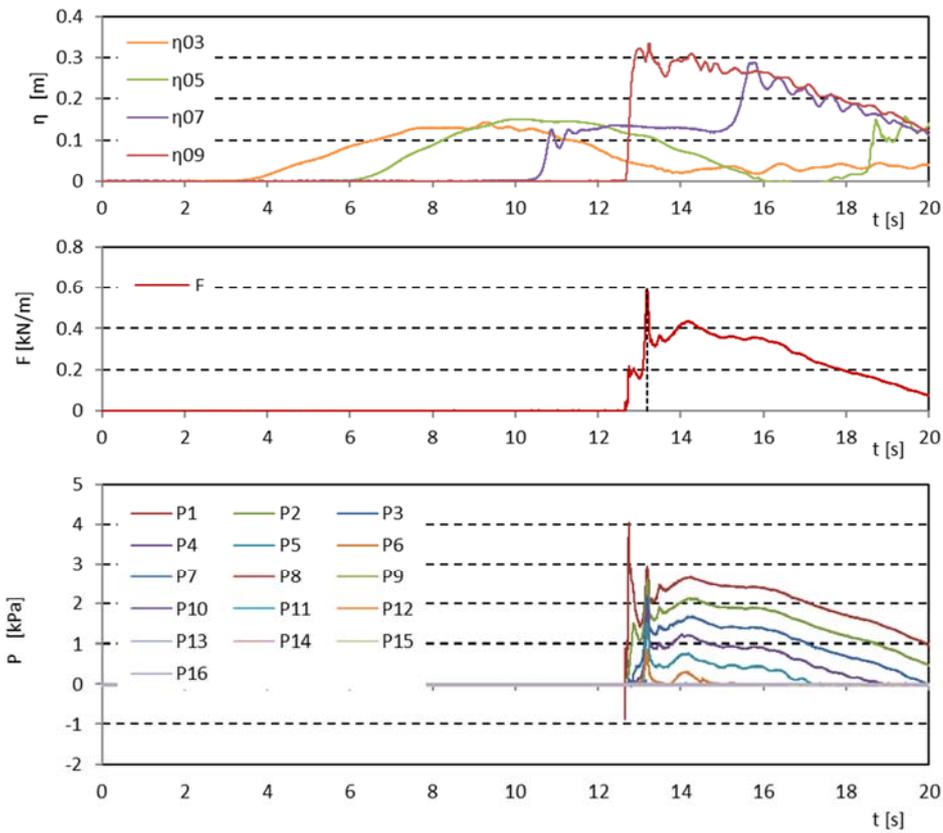


図 II.3.3-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m, W32)

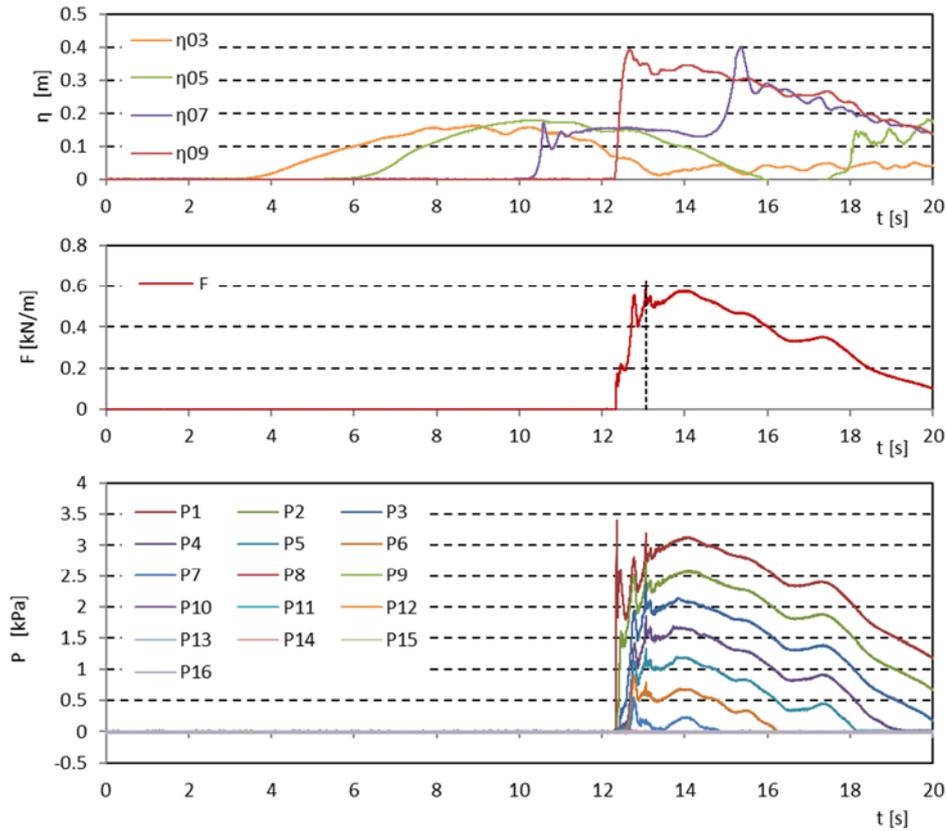


図 II.3.3-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m, W33)

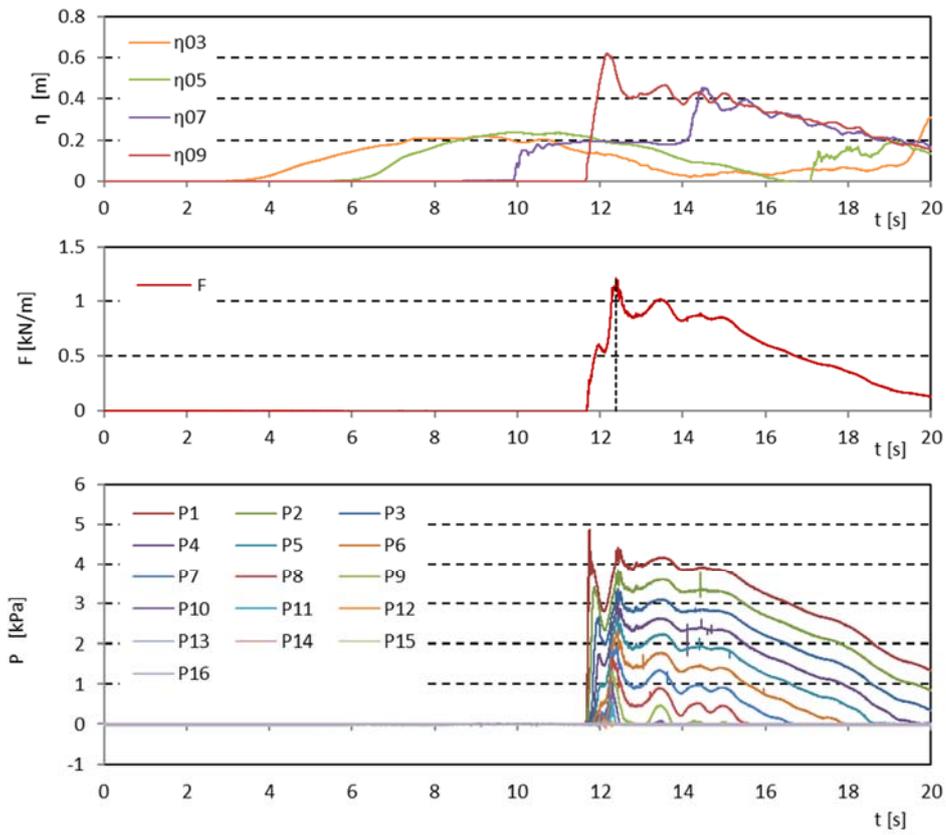


図 II.3.3-5 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m, W34)

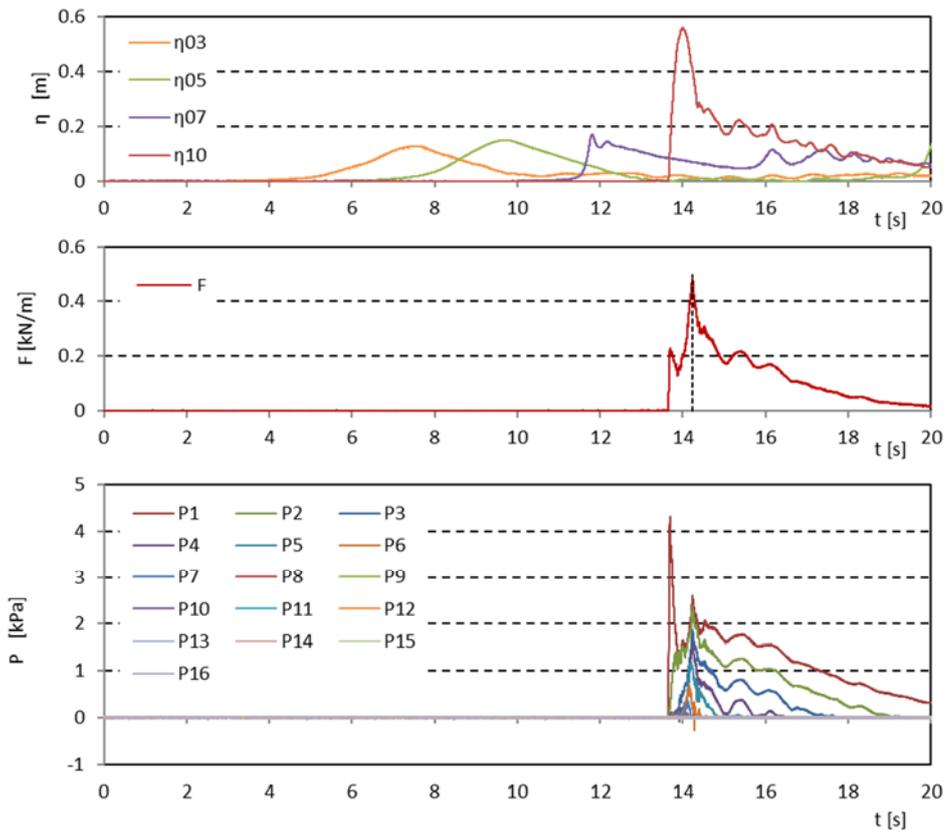


図 II.3.3-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m, W12)

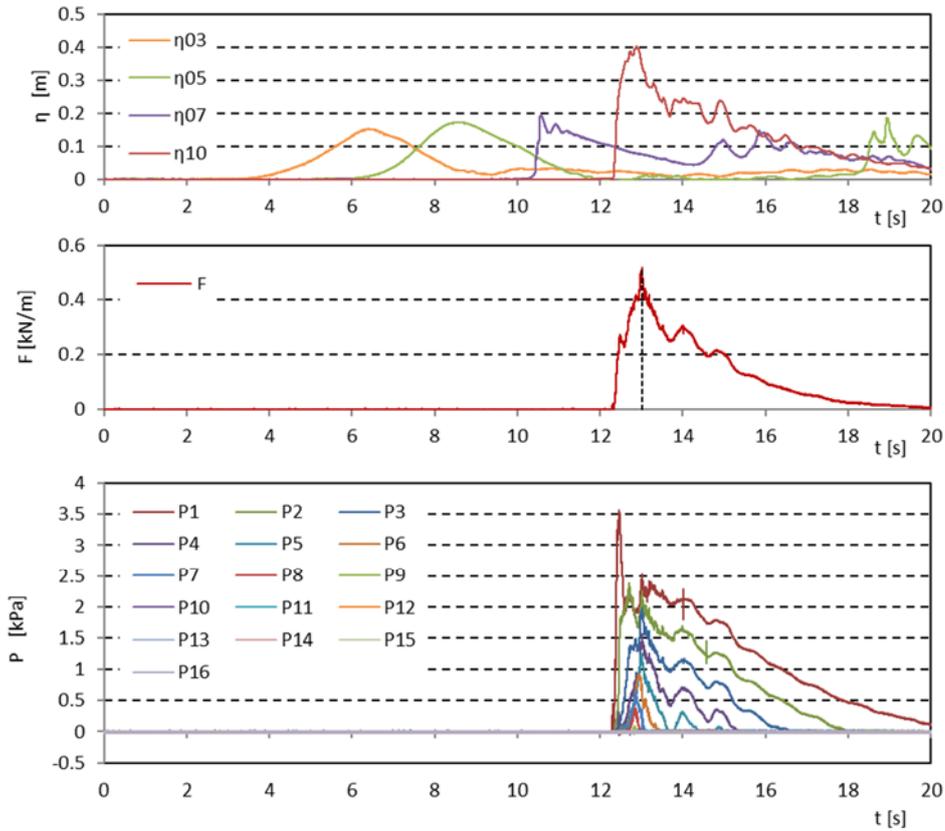


図 II.3.3-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m, W13)

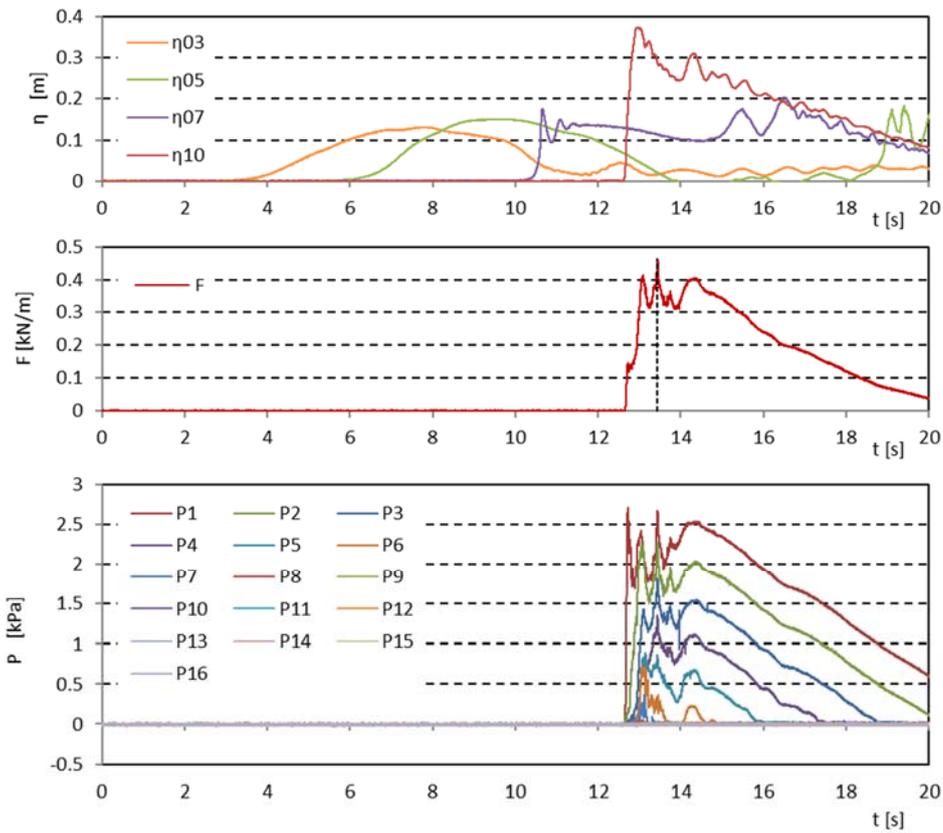


図 II.3.3-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m, W22)

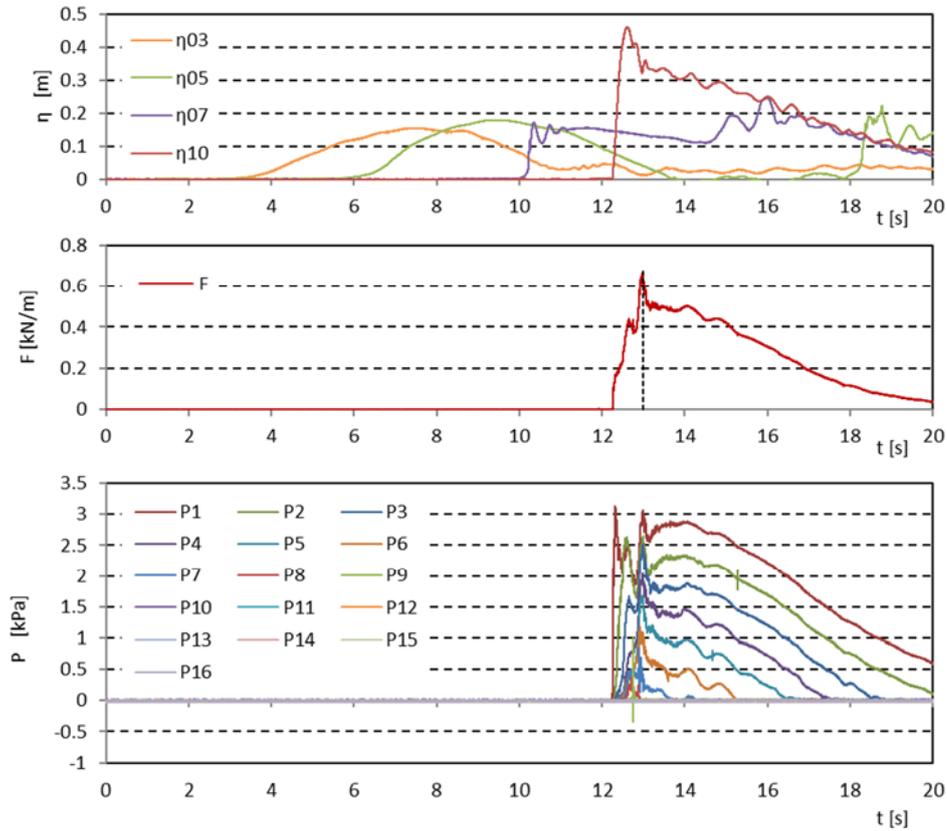


図 II.3.3-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m, W23)

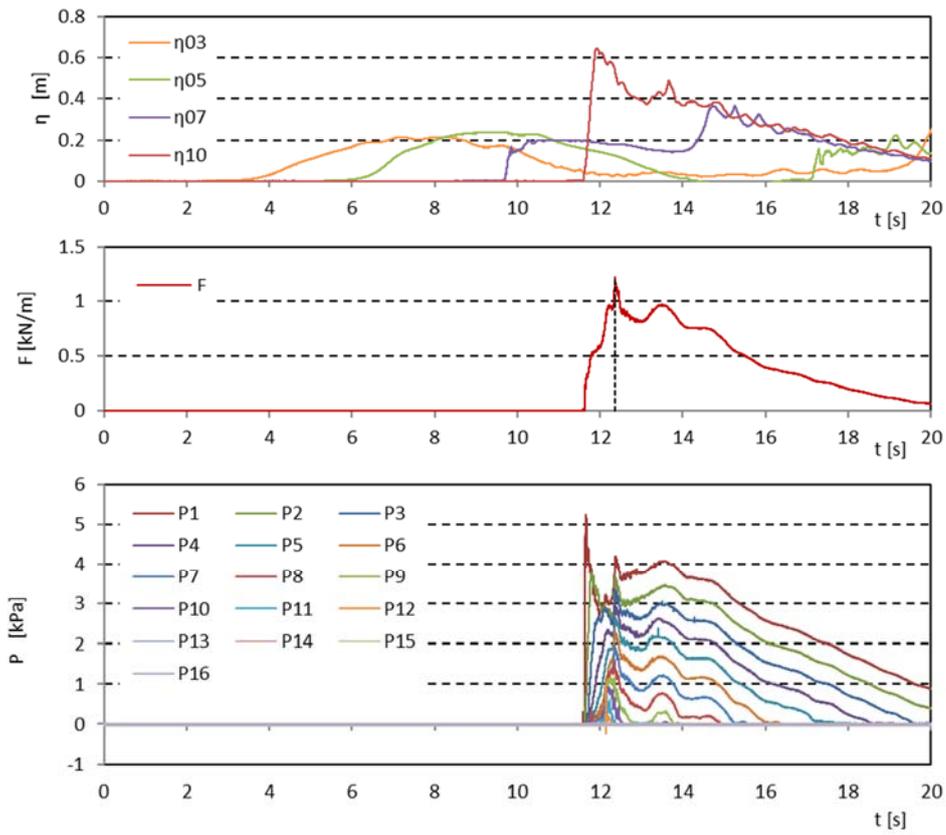


図 II.3.3-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m, W24)

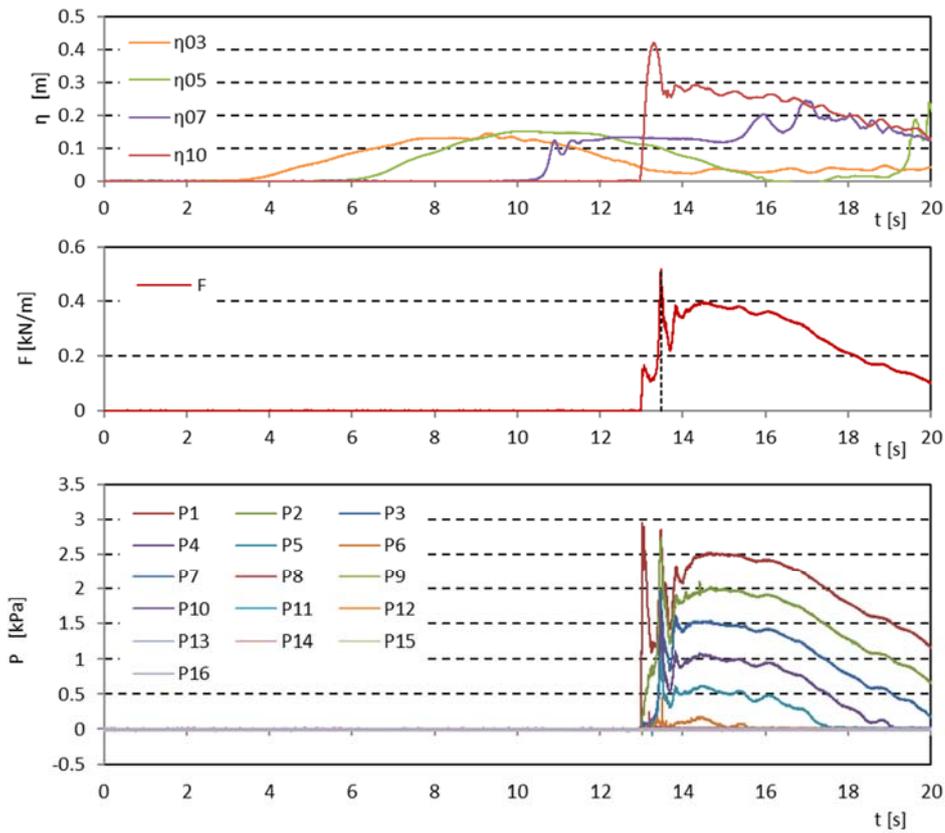


図 II.3.3-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m, W32)

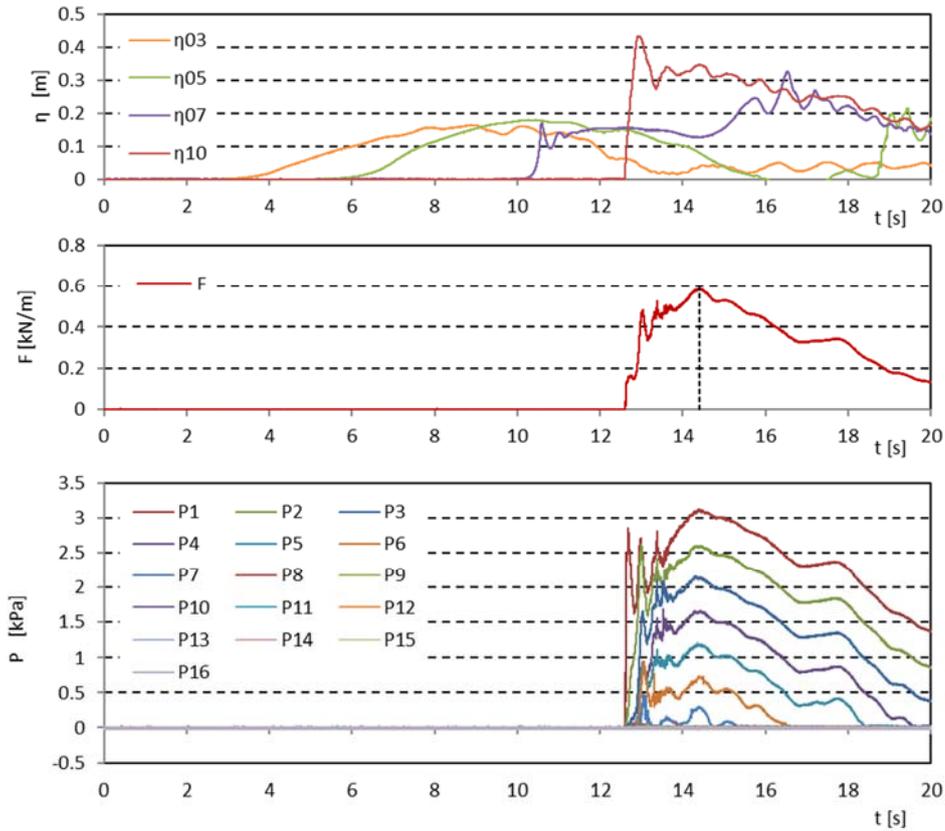


図 II.3.3-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m, W33)

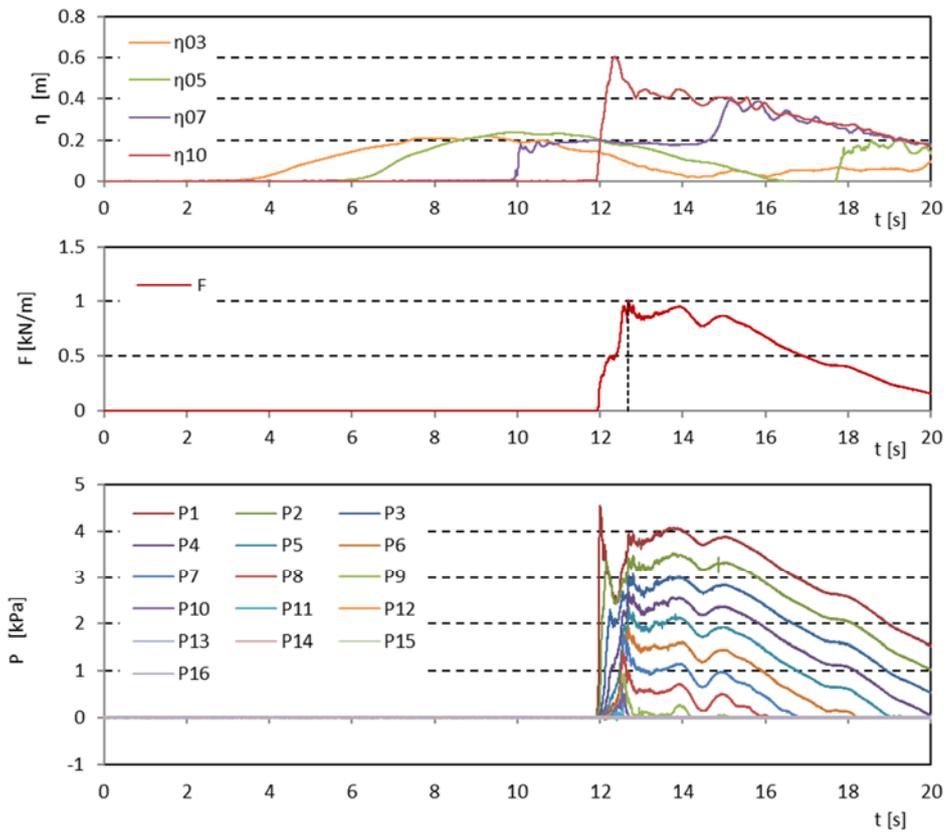


図 II.3.3-6 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体高さ H , 設置位置 1.25m, W34)

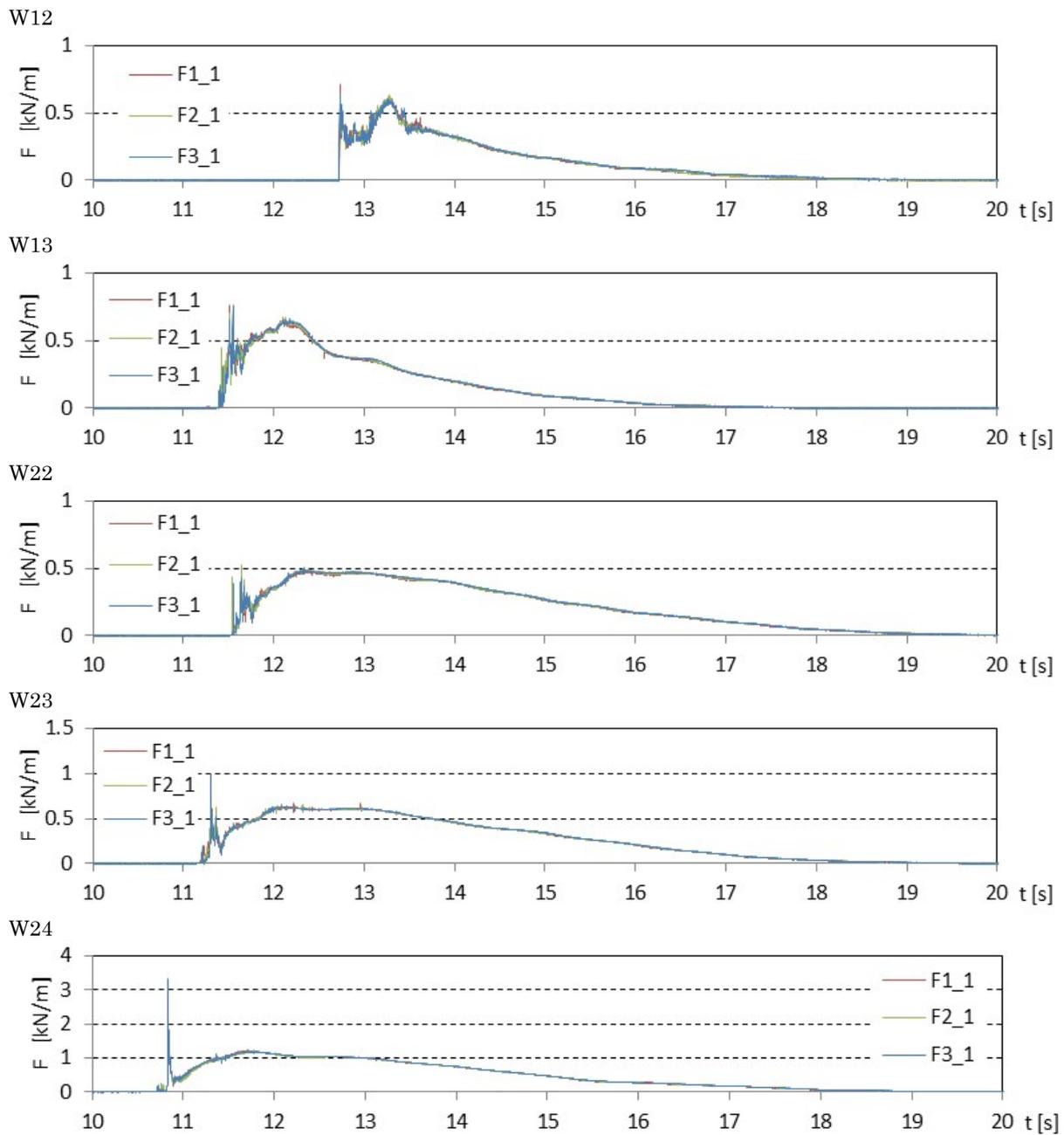


図 II.3.3-7 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体高さ H , 設置位置 $0m$, 1回目)

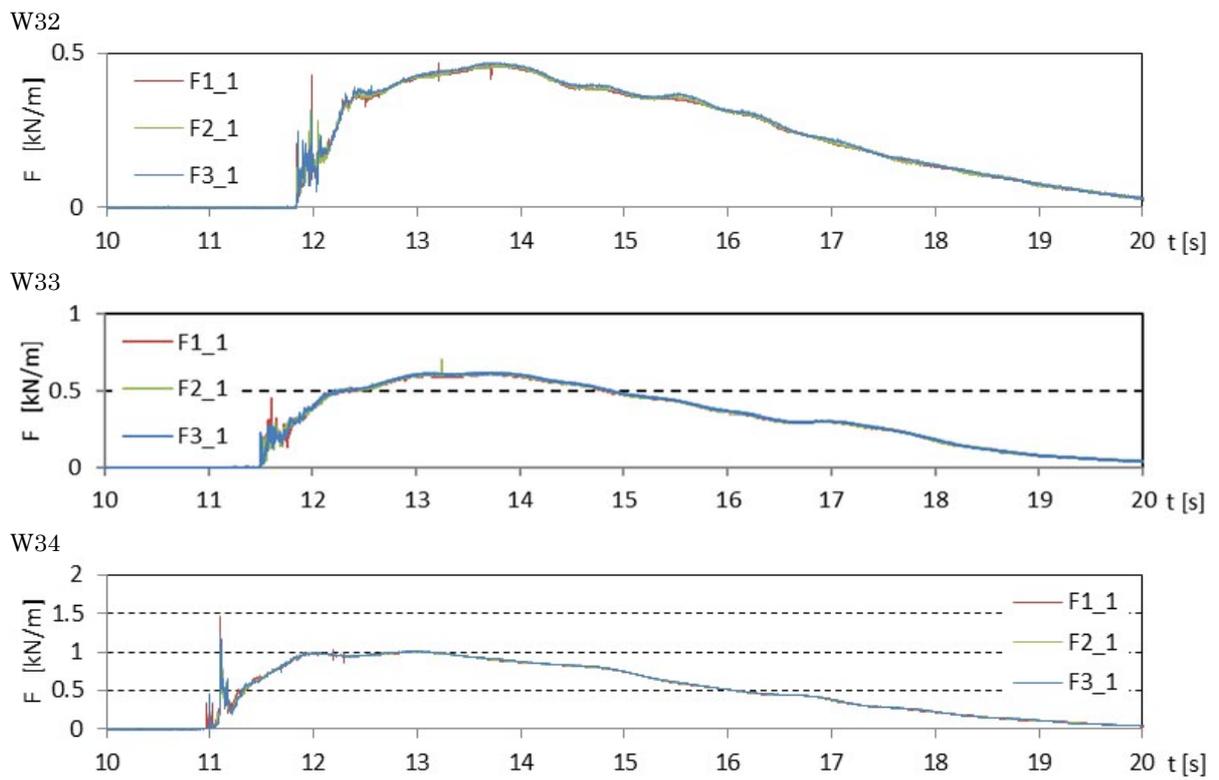


図 II.3.3-7 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0m, 1 回目)

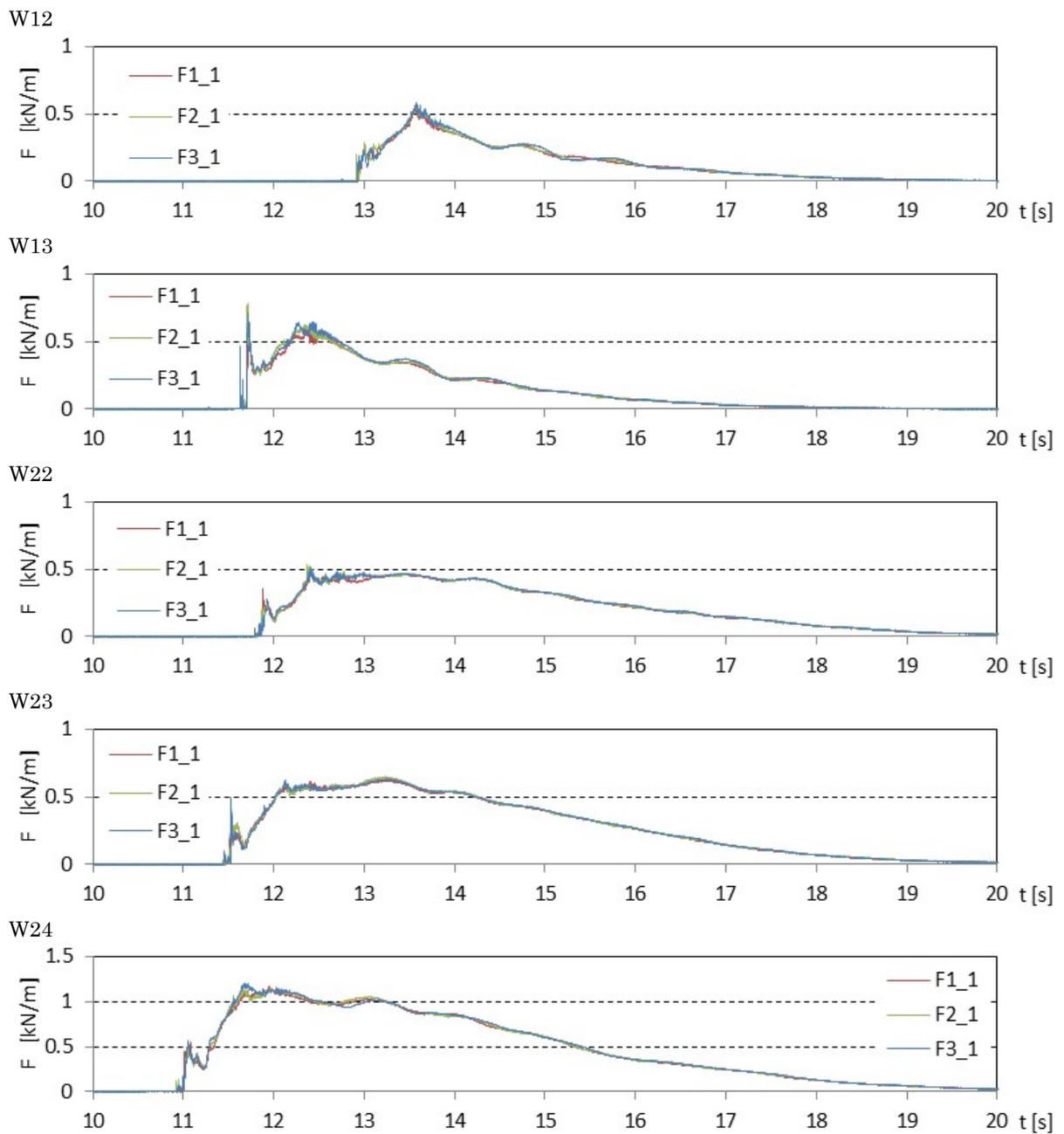


図 II.3.3-8 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m, 1 回目)

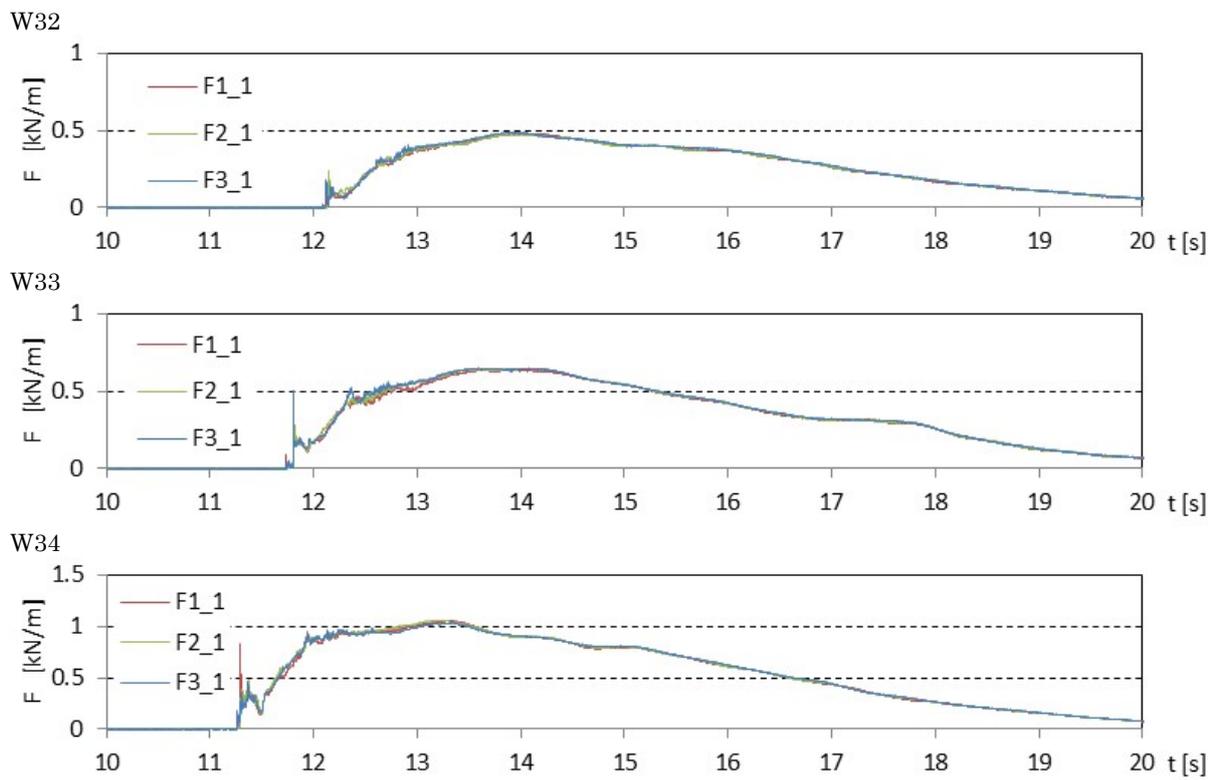


図 II.3.3-8 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m, 1 回目)

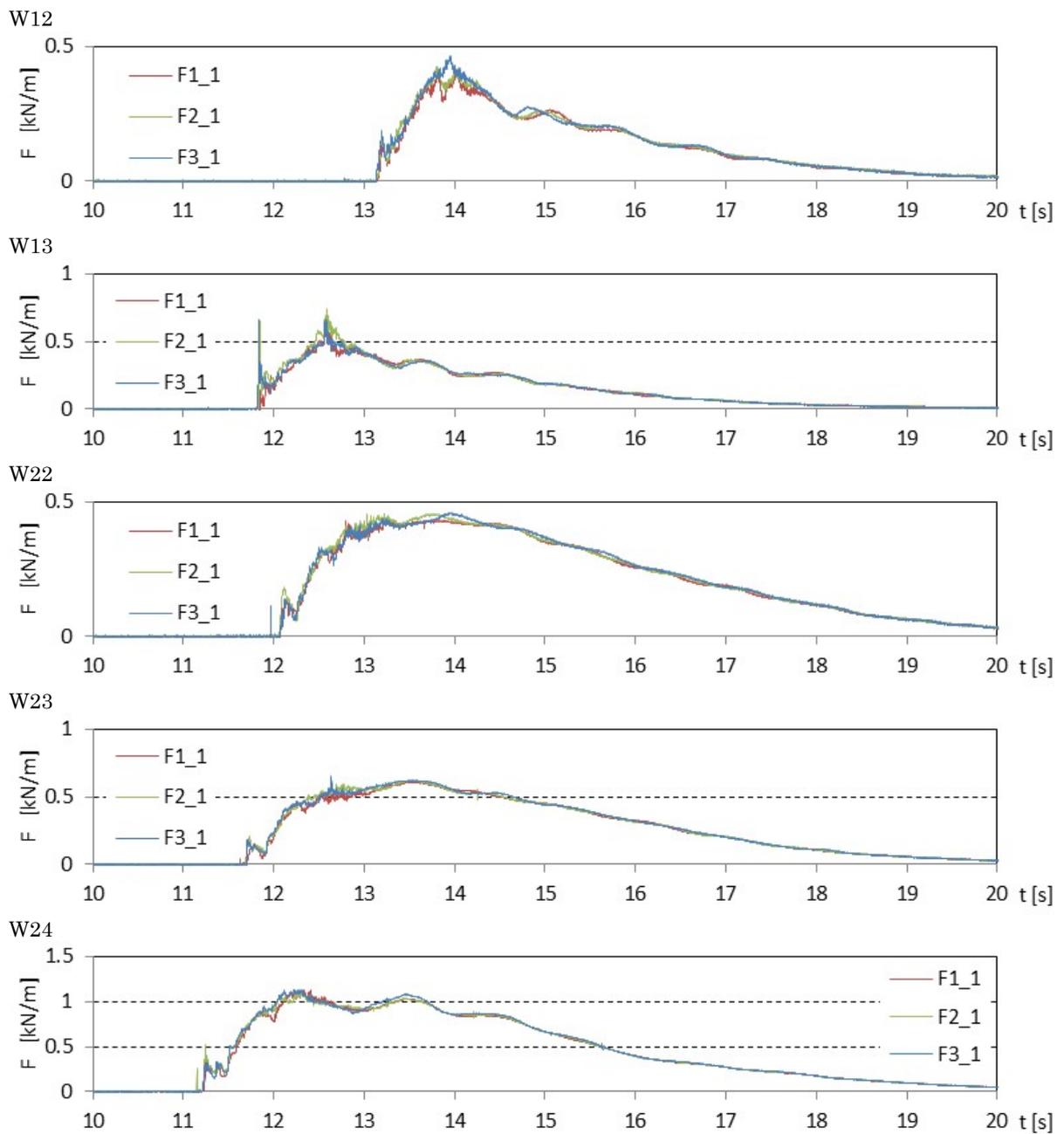


図 II.3.3-9 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m, 1 回目)

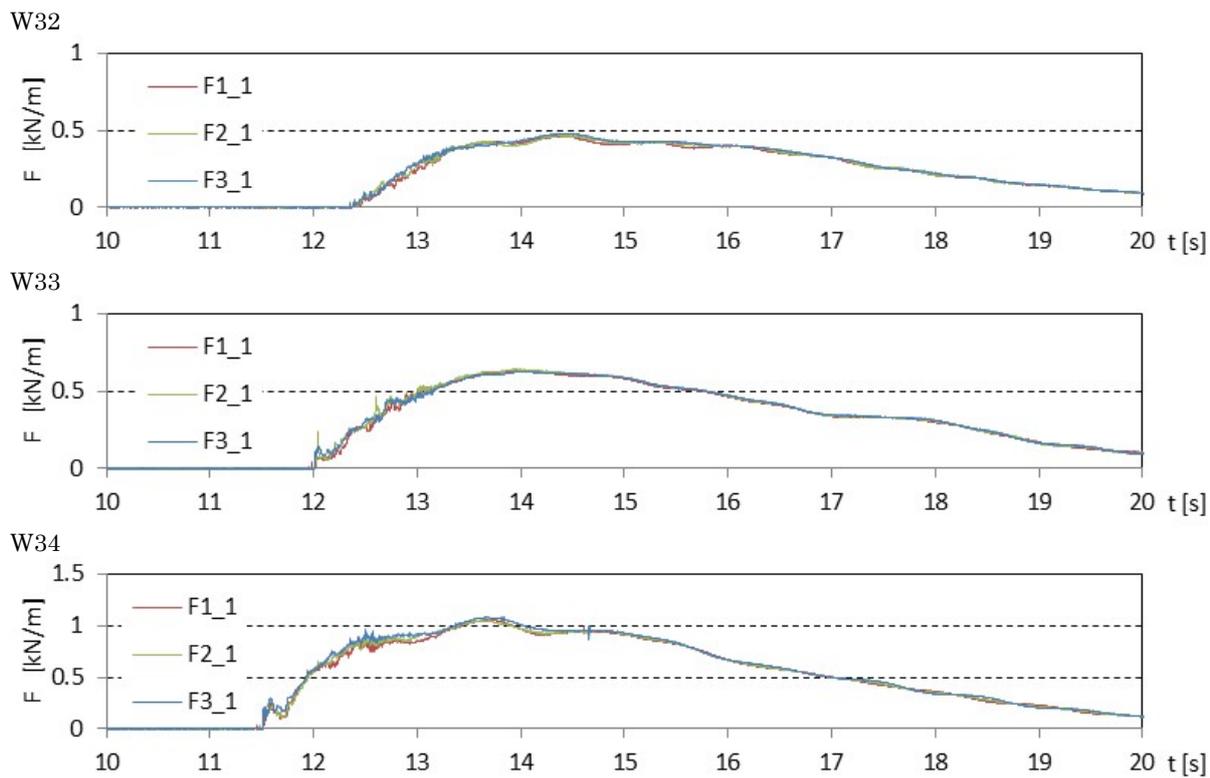


図 II.3.3-9 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m, 1 回目)

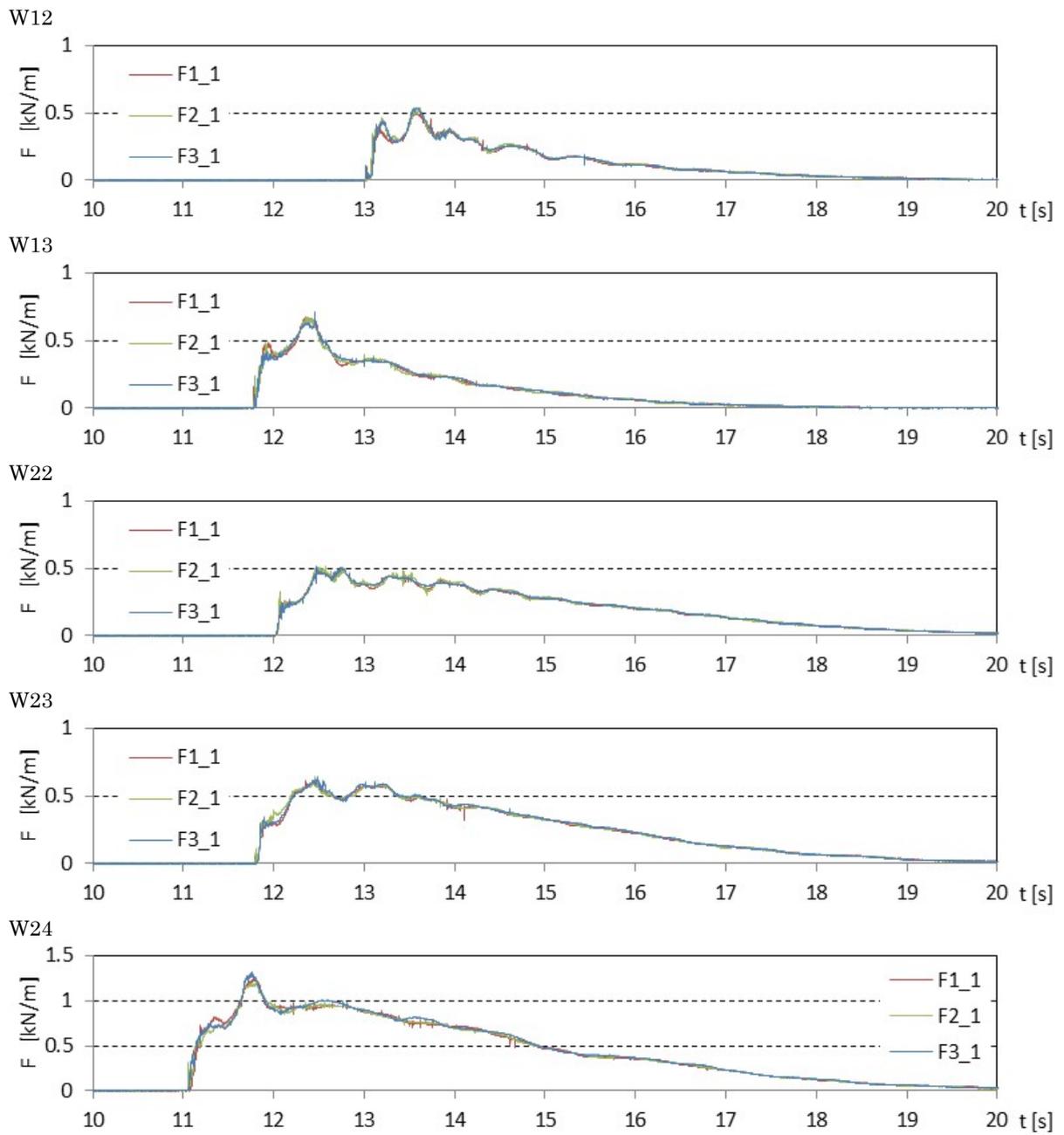


図 II.3.3-10 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0m, 1回目)

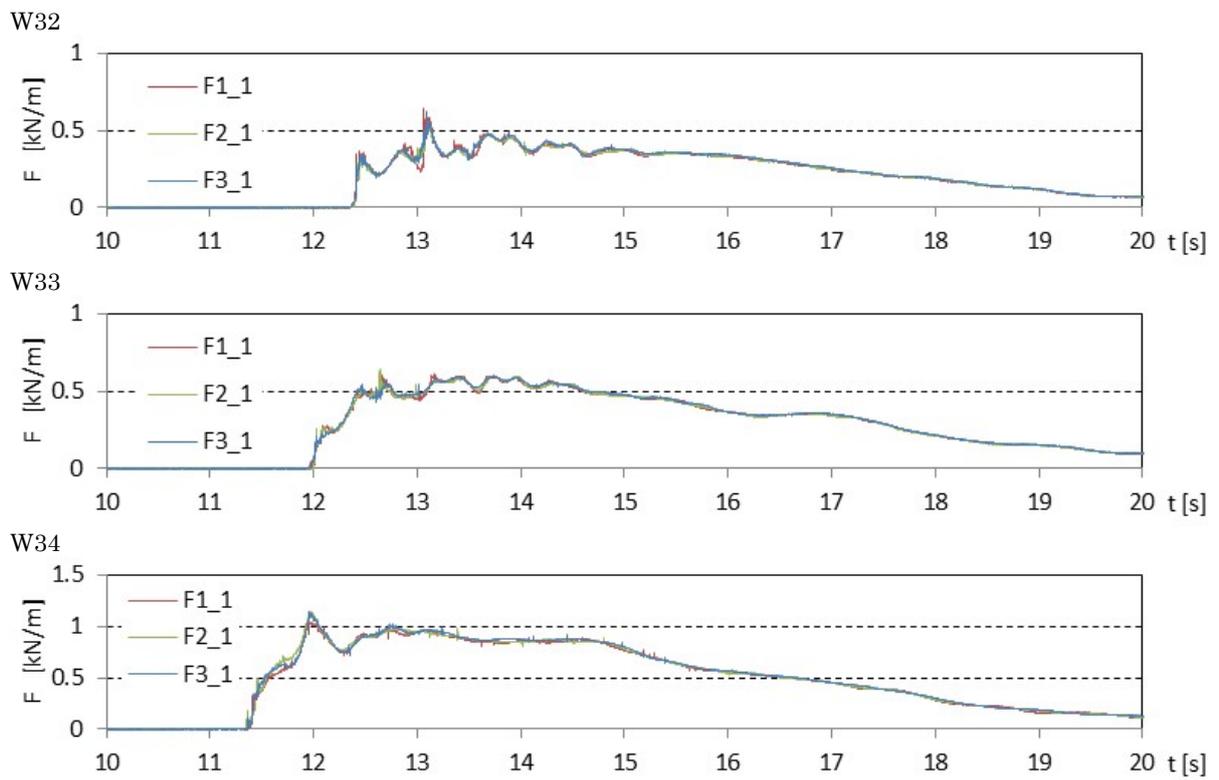


図 II.3.3-10 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0m, 1 回目)

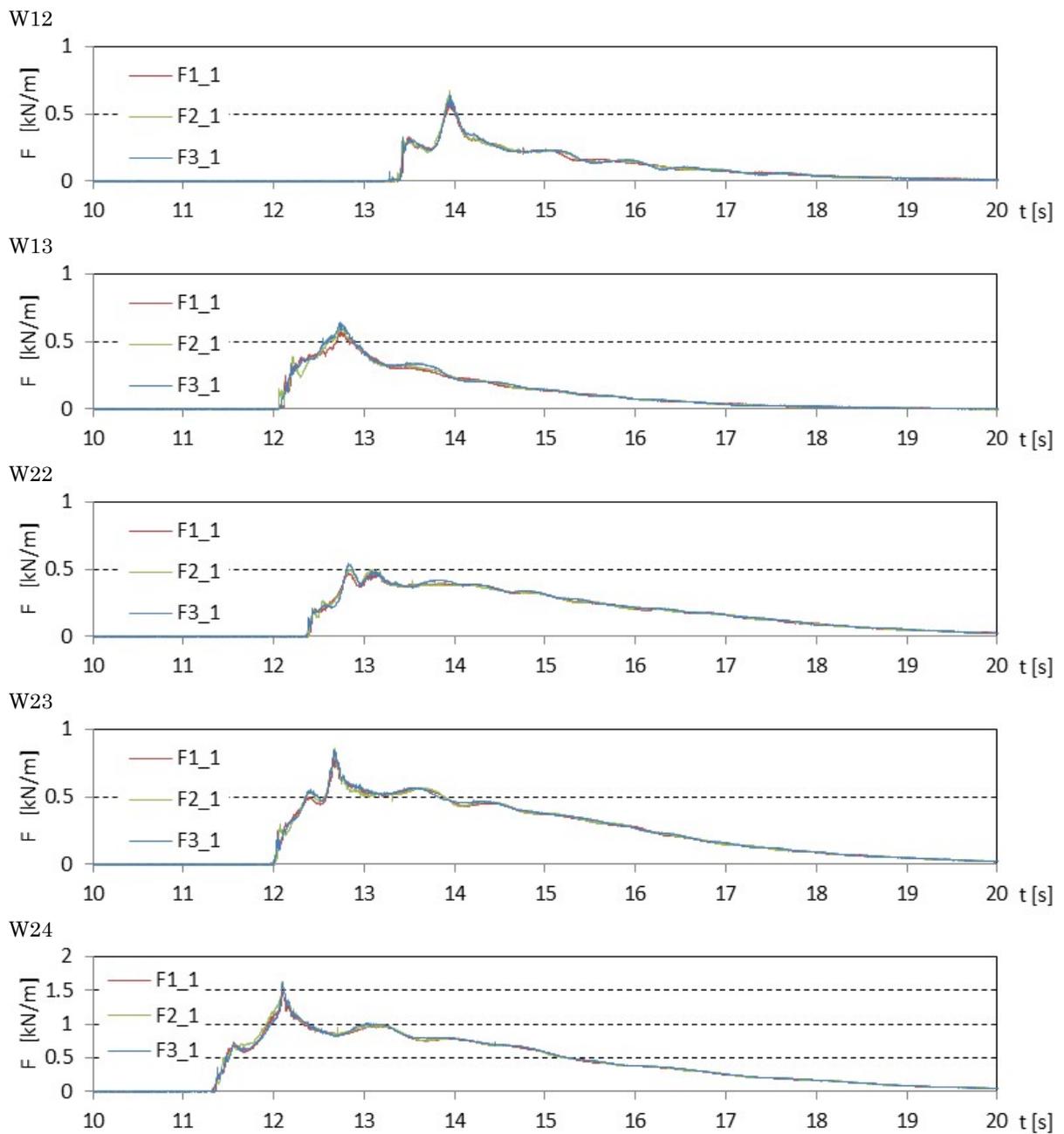


図 II.3.3-11 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m, 1 回目)

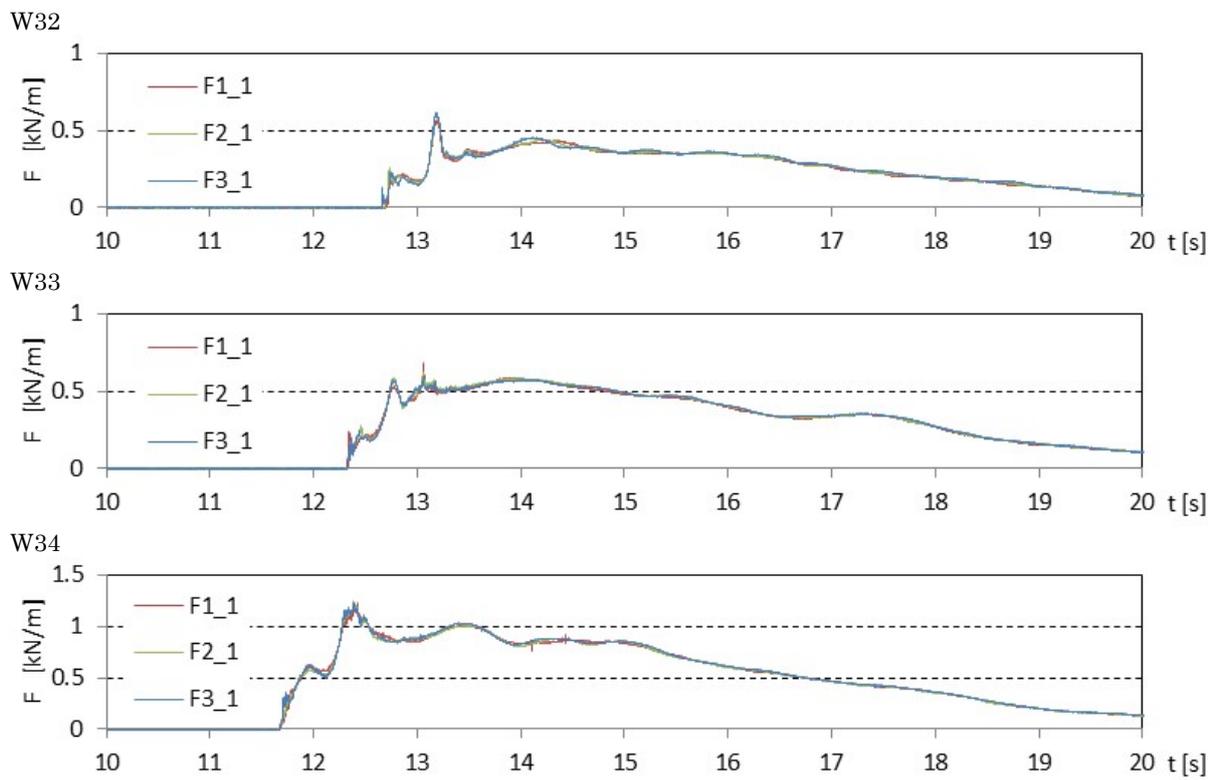


図 II.3.3-11 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体高さ H , 設置位置 0.625m , 1 回目)

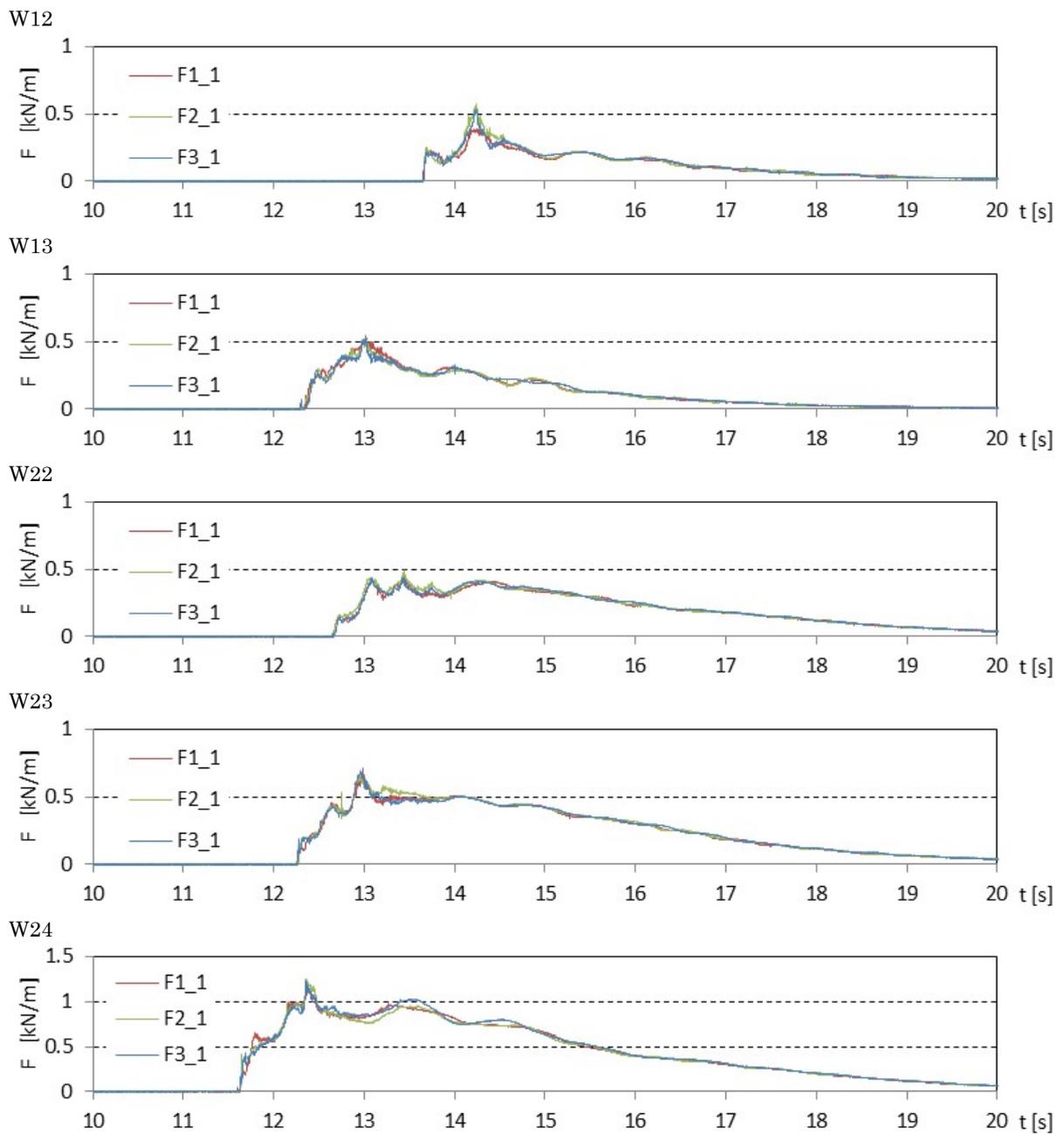


図 II.3.3-12 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m, 1 回目)

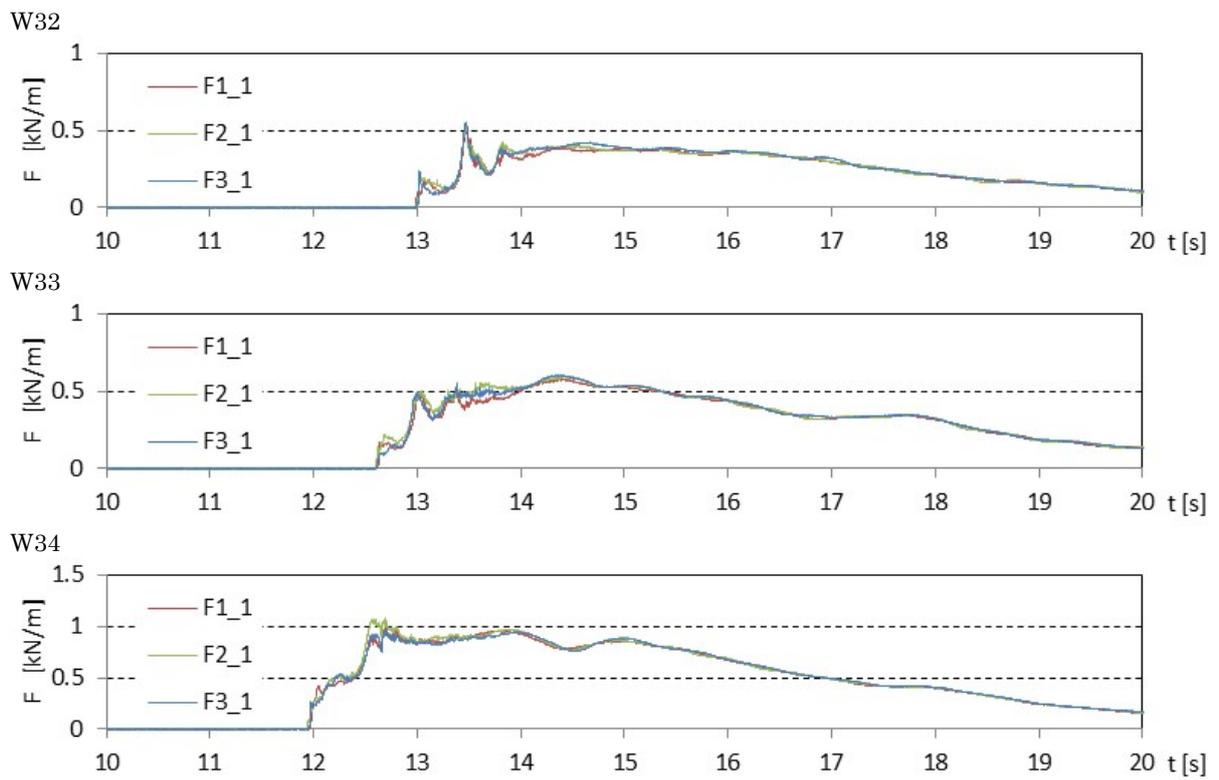
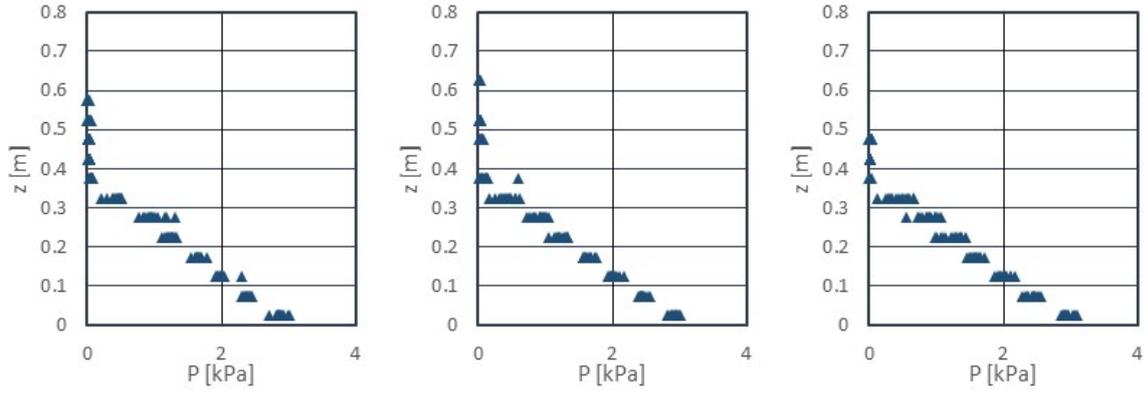


図 II.3.3-12 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m, 1 回目)

W12



W13

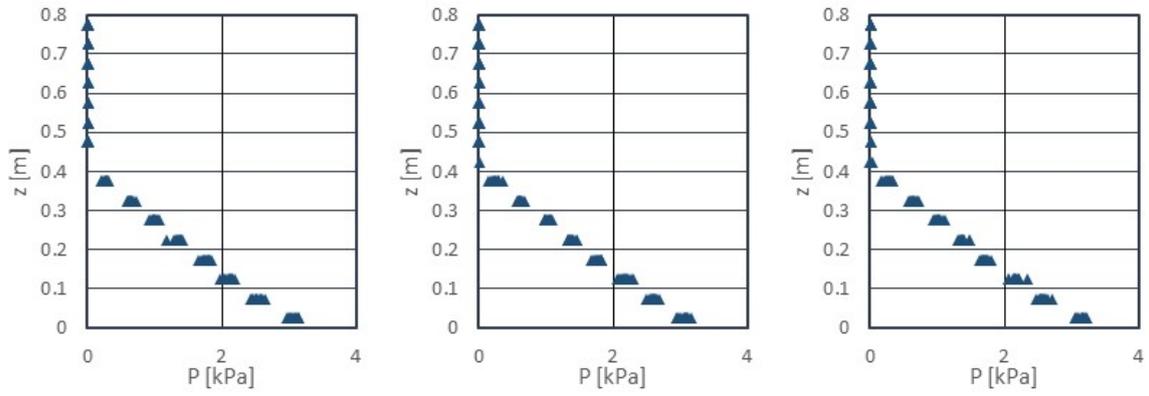
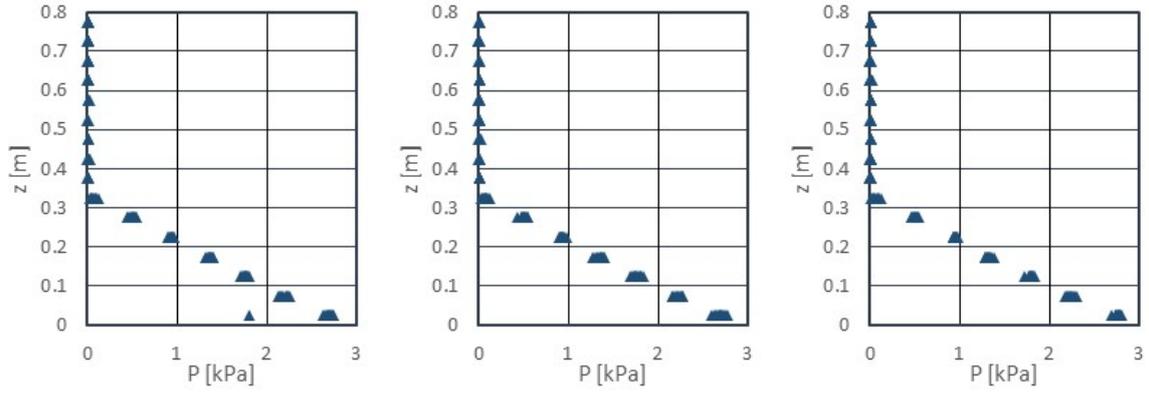
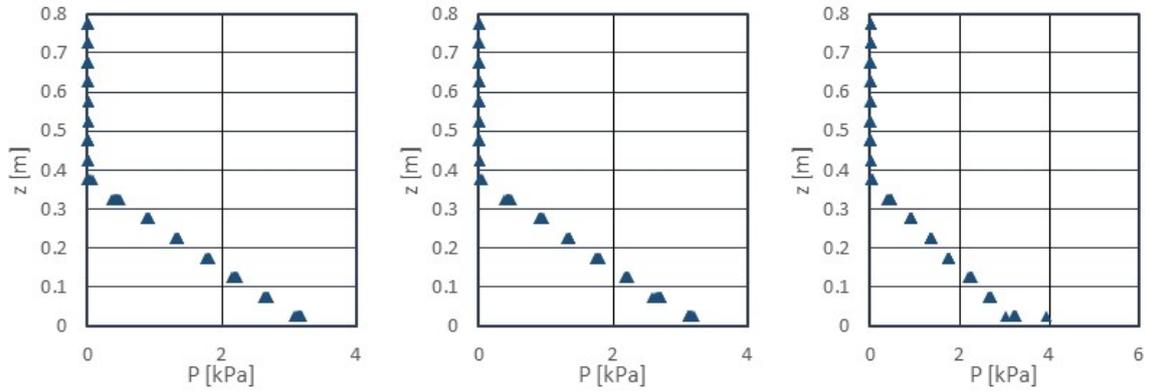


図 II.3.3-13 圧力鉛直分布の観測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0m)

W22



W23



W24

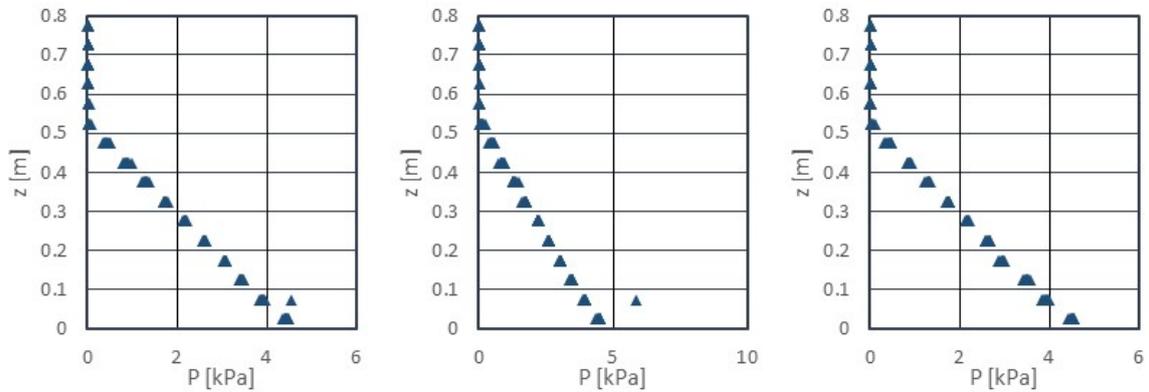
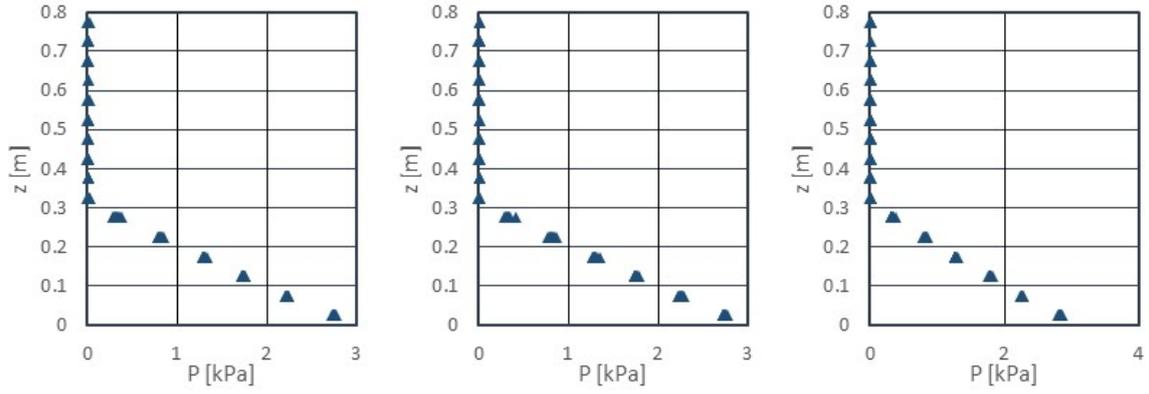
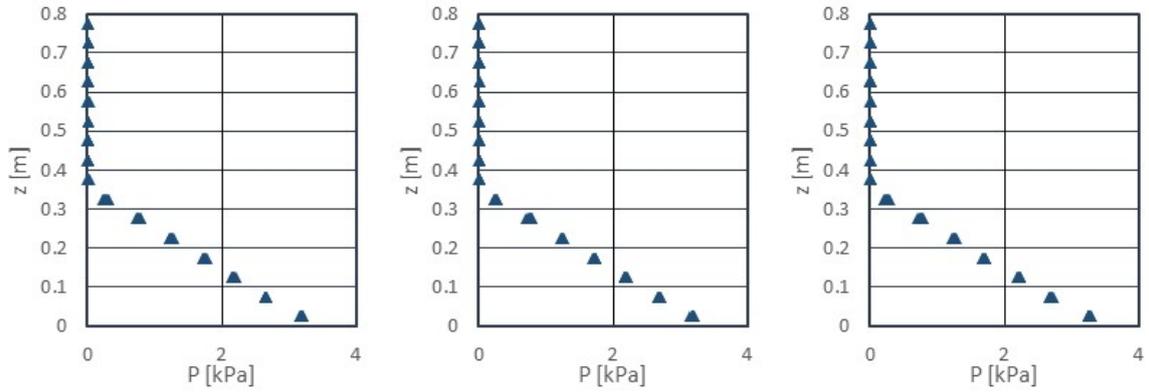


図 II.3.3-13 圧力鉛直分布の観測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0m)

W32



W33



W34

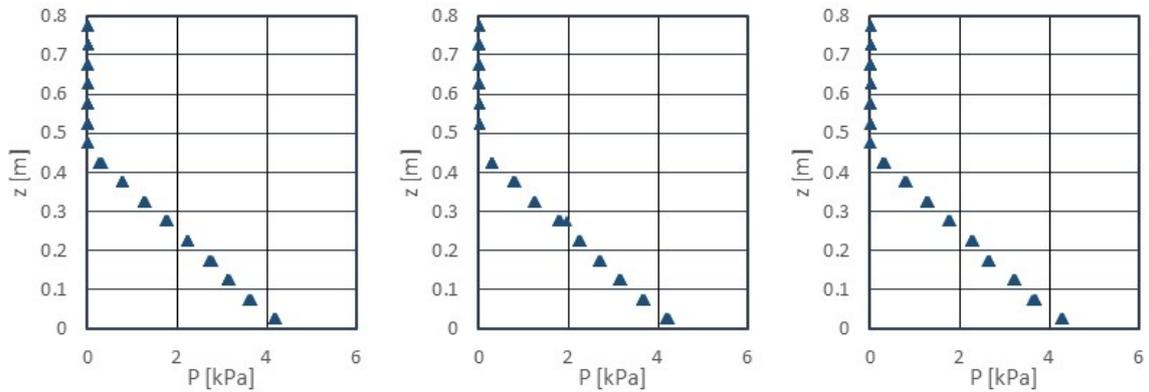
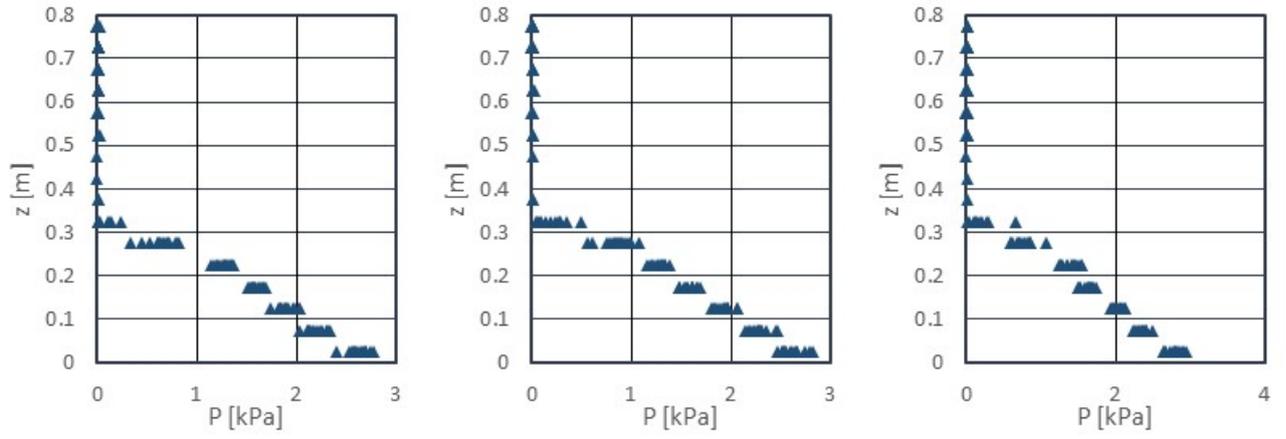


図 II.3.3-13 圧力鉛直分布の観測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0m)

W12



W13

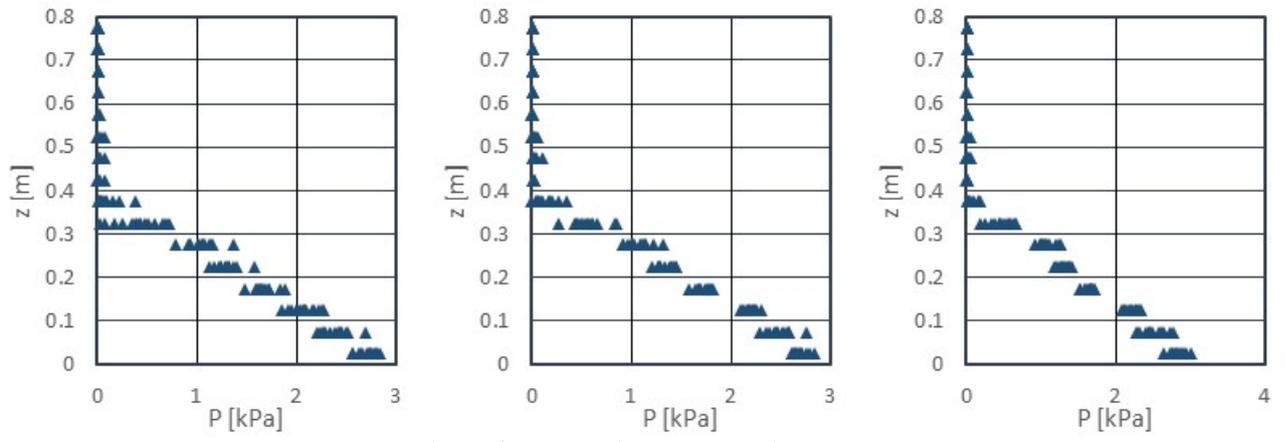
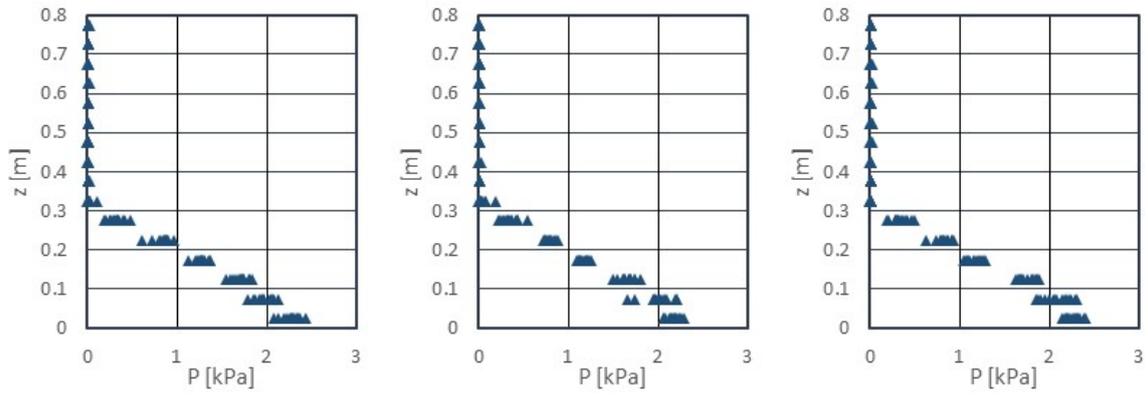
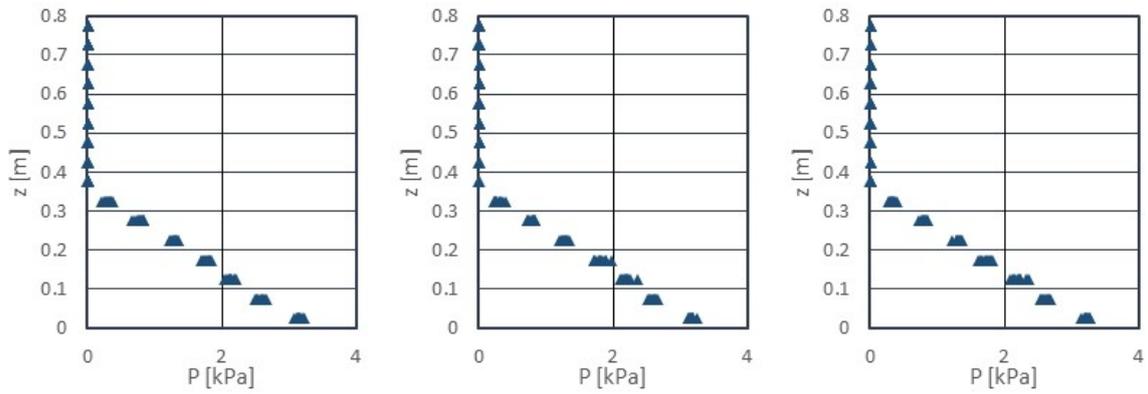


図 II.3.3-13 圧力鉛直分布の観測結果 (単純勾配, 堤体高さ H , 設置位置 0.625m)

W22



W23



W24

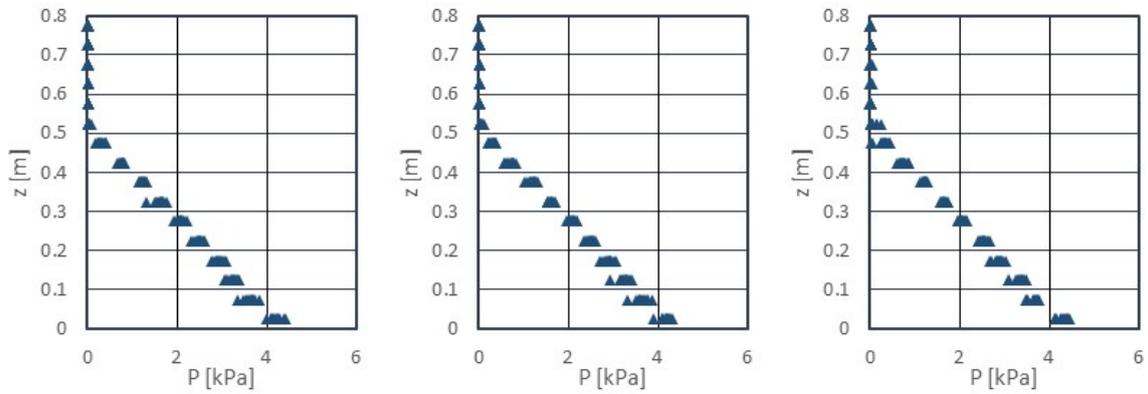
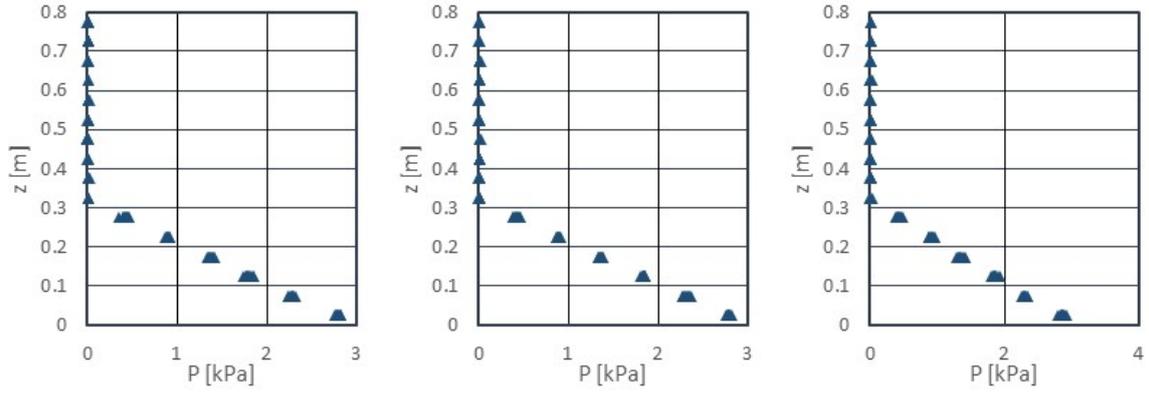
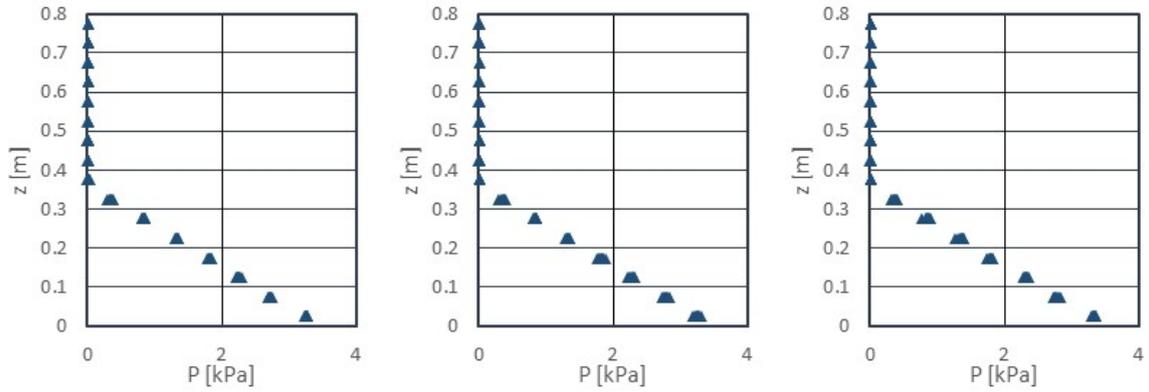


図 II.3.3-13 圧力鉛直分布の観測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m)

W32



W33



W34

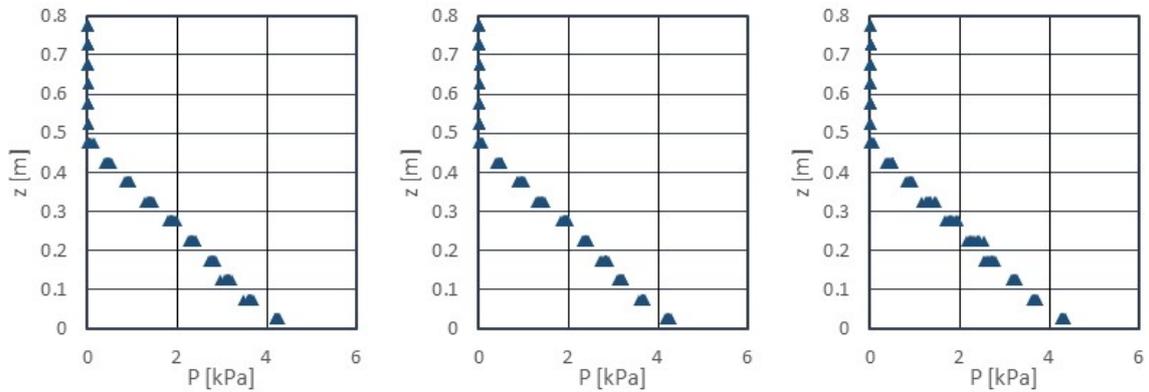
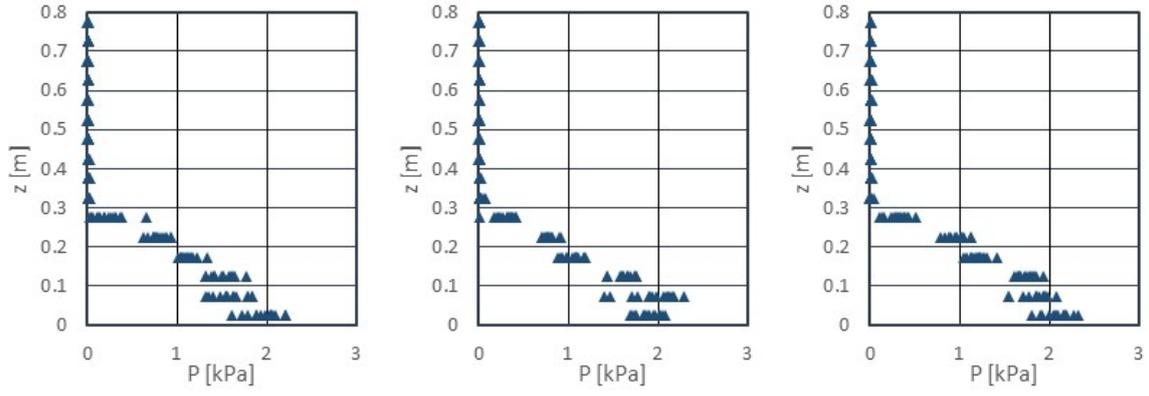


図 II.3.3-13 圧力鉛直分布の観測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m)

W12



W13

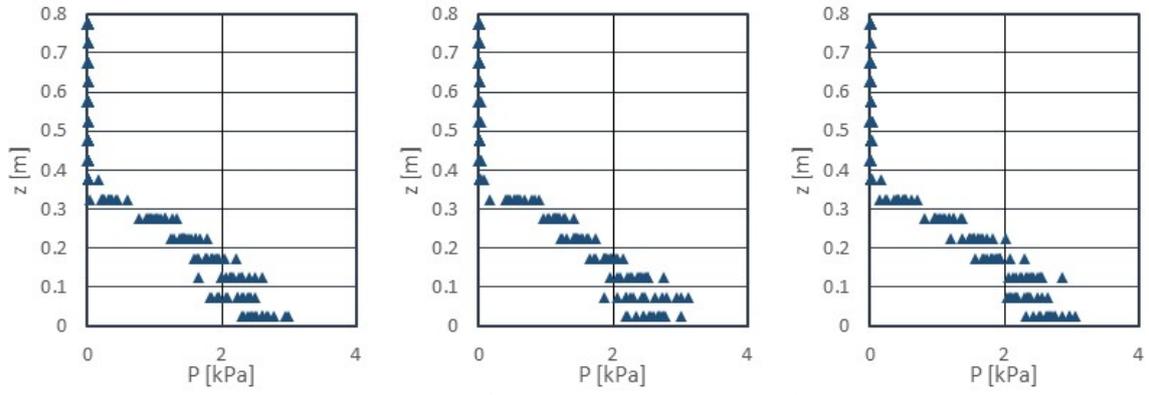
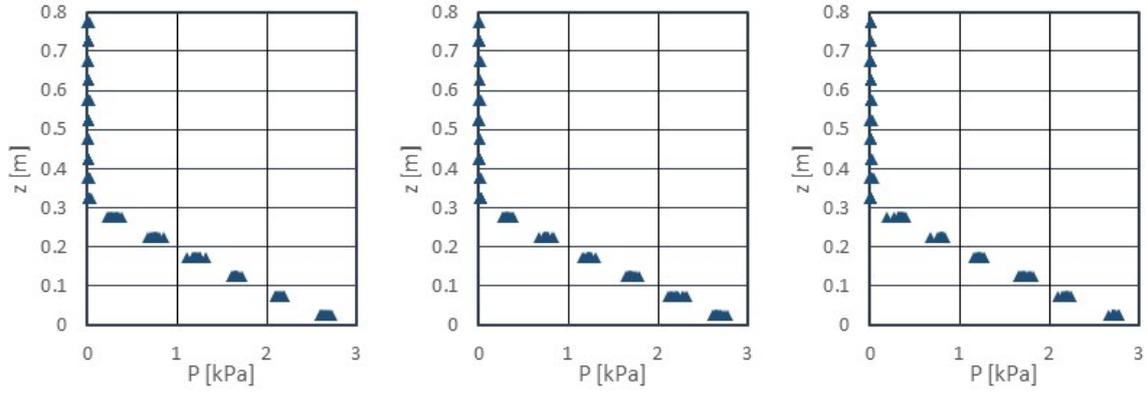
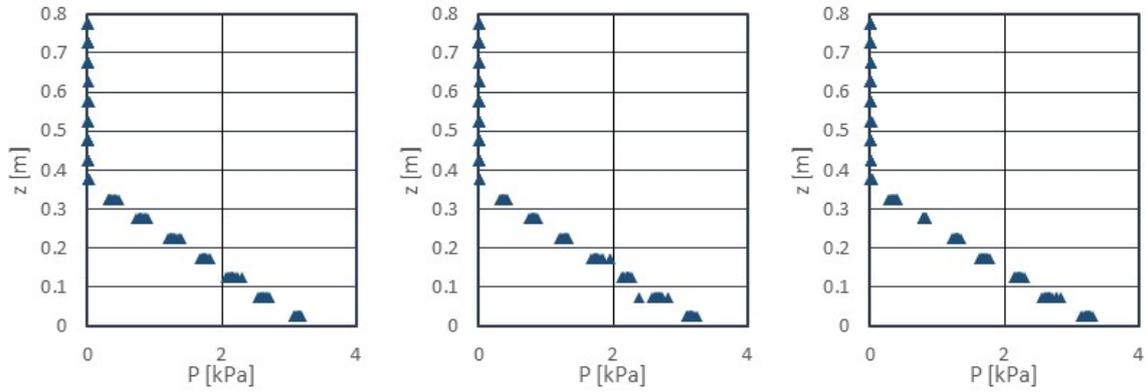


図 II.3.3-13 圧力鉛直分布の観測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m)

W22



W23



W24

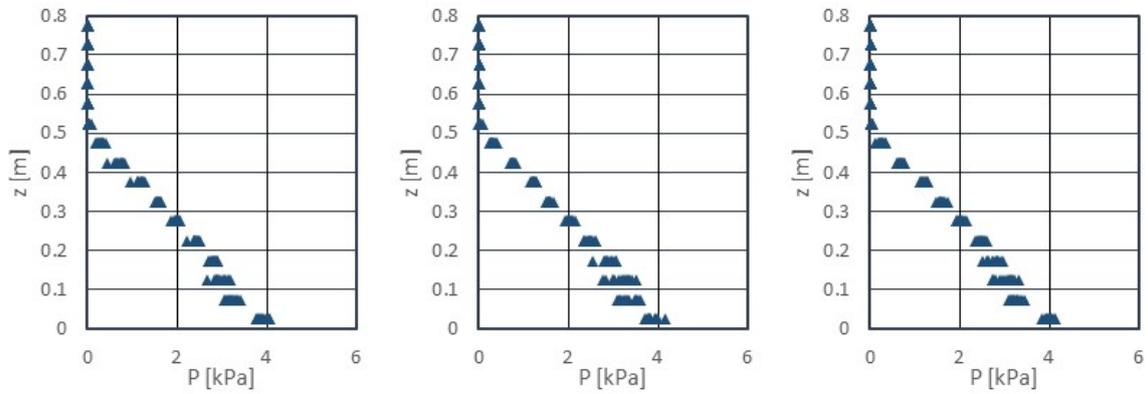
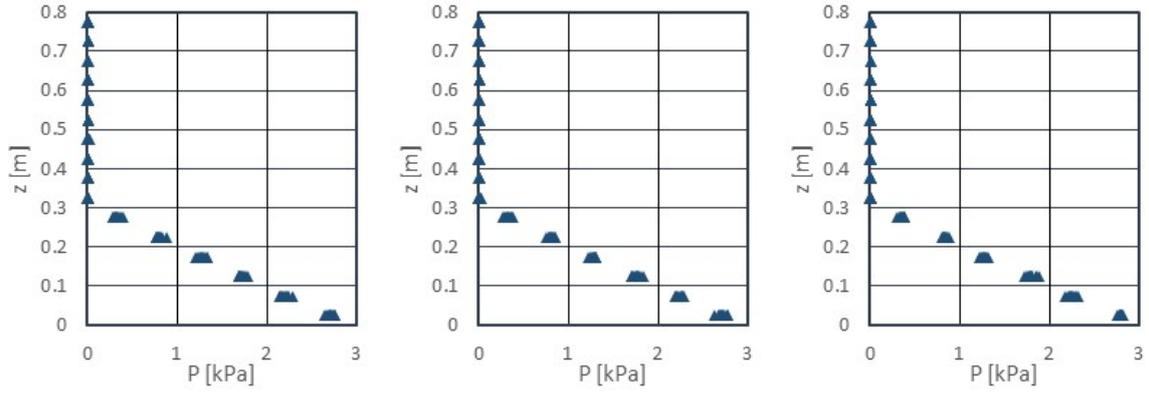
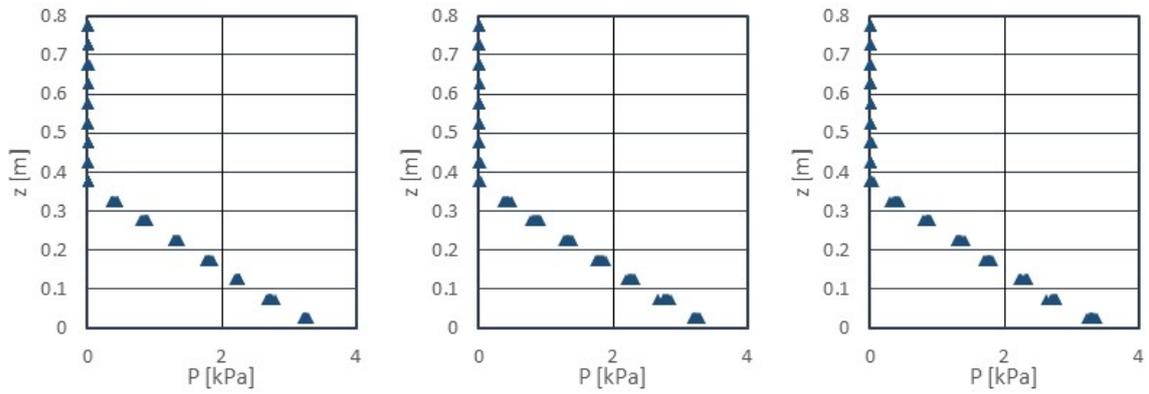


図 II.3.3-13 圧力鉛直分布の観測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m)

W32



W33



W34

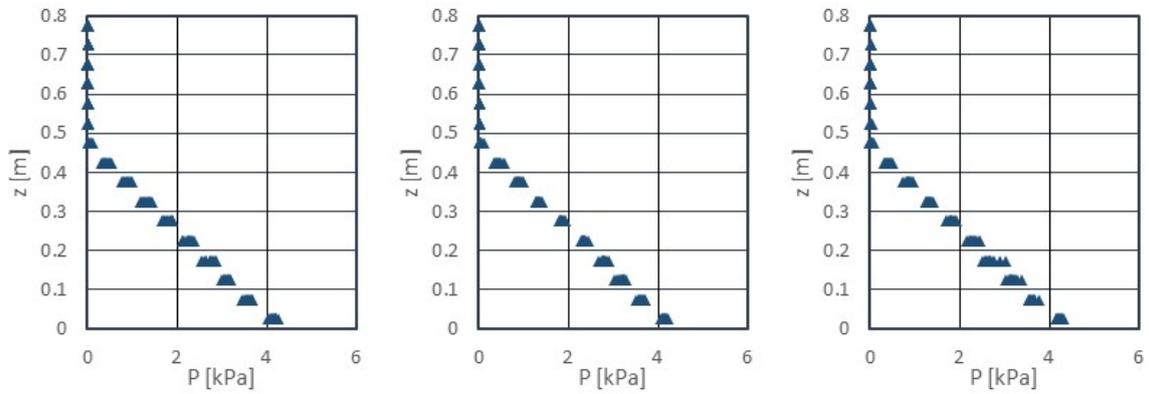
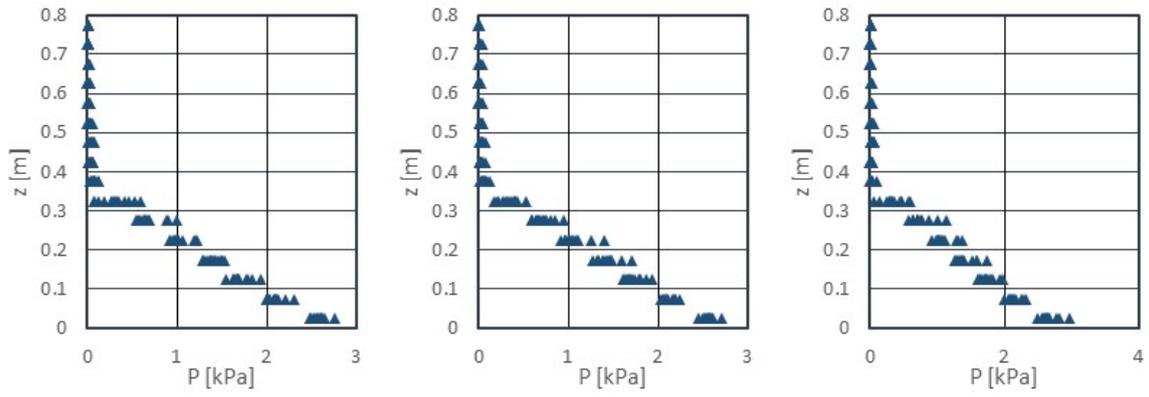


図 II.3.3-13 圧力鉛直分布の観測結果 (単純勾配, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m)

W12



W13

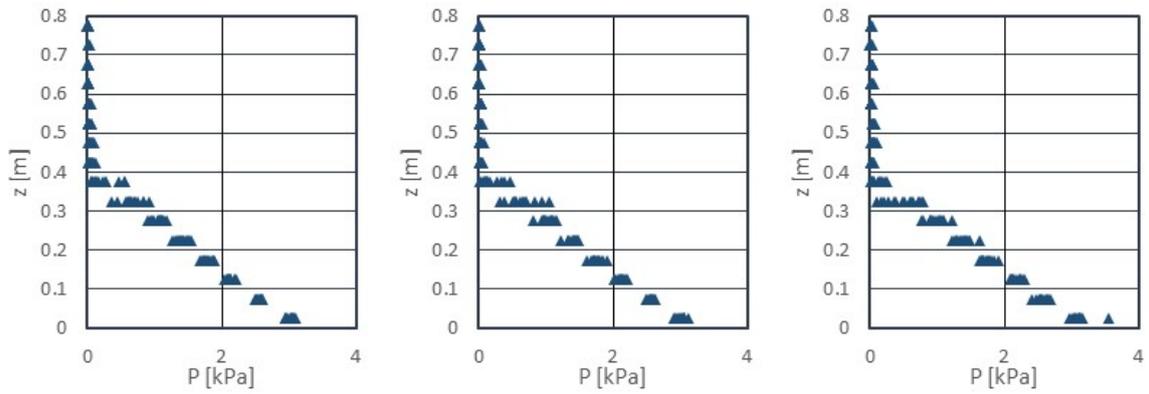
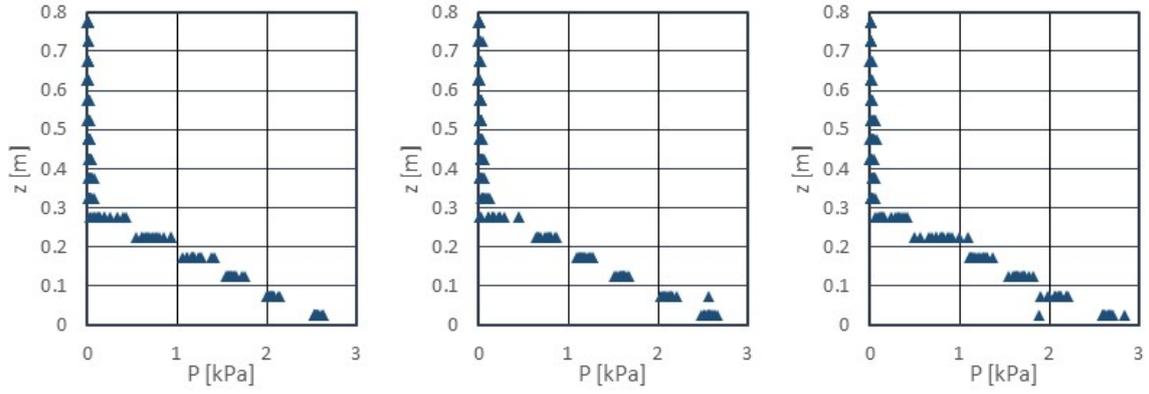
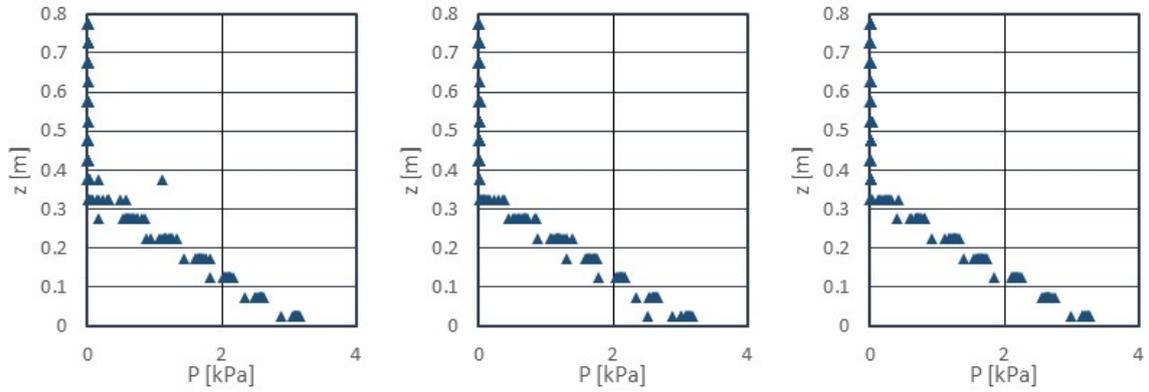


図 II.3.3-14 圧力鉛直分布の観測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0m)

W22



W23



W24

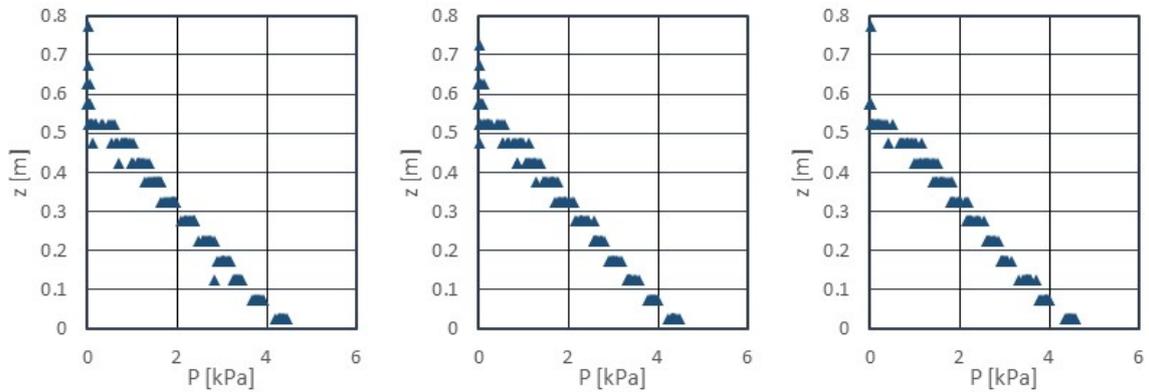
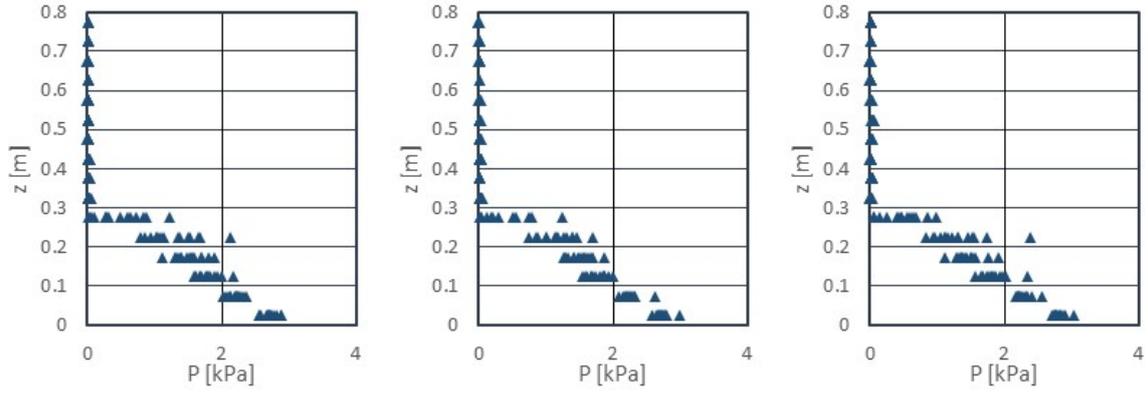
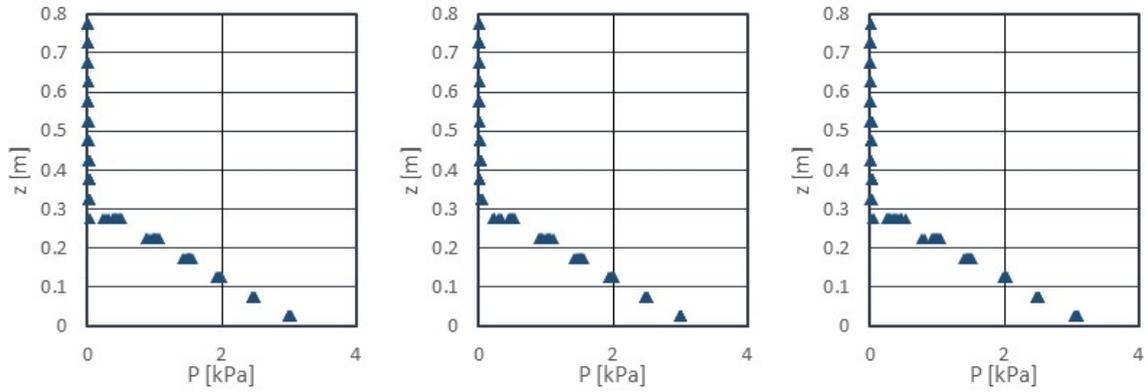


図 II.3.3-14 圧力鉛直分布の観測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0m)

W32



W33



W34

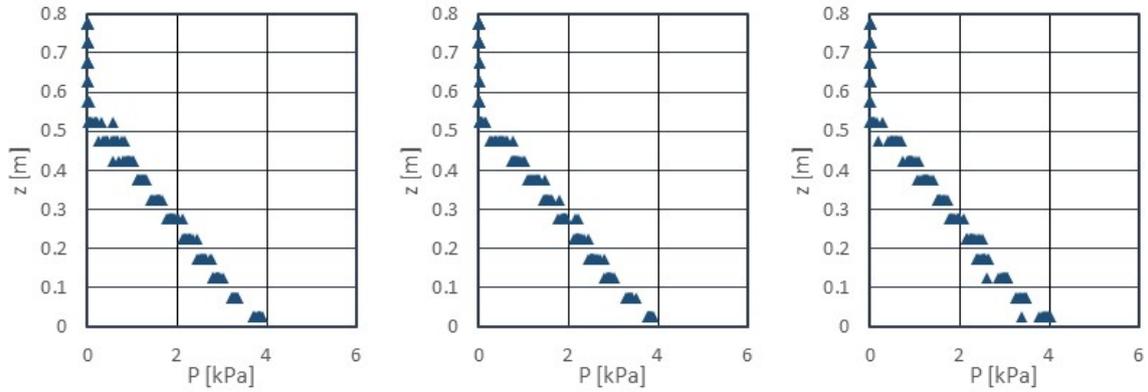
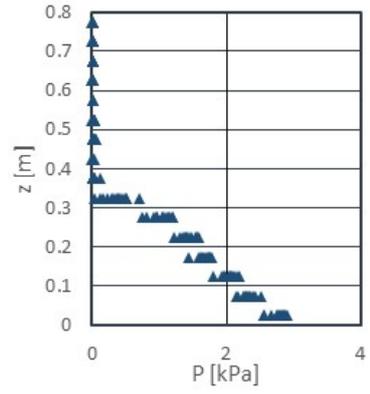
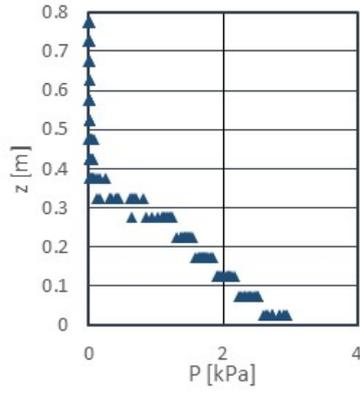
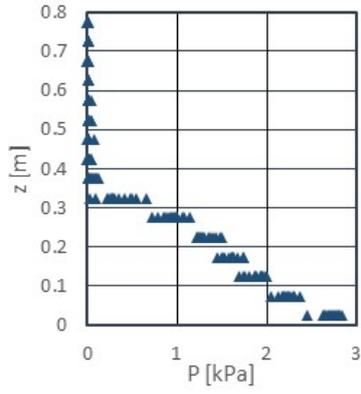


図 II.3.3-14 圧力鉛直分布の観測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0m)

W12



W13

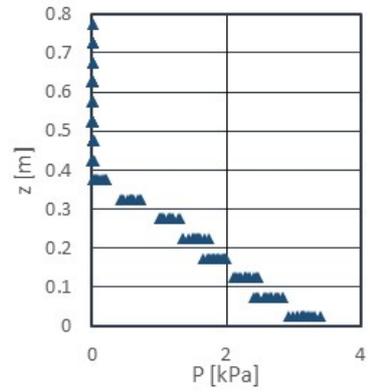
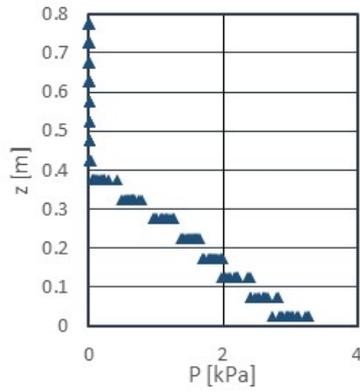
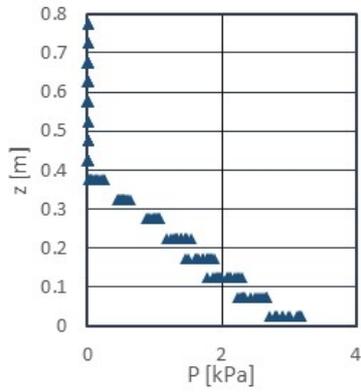
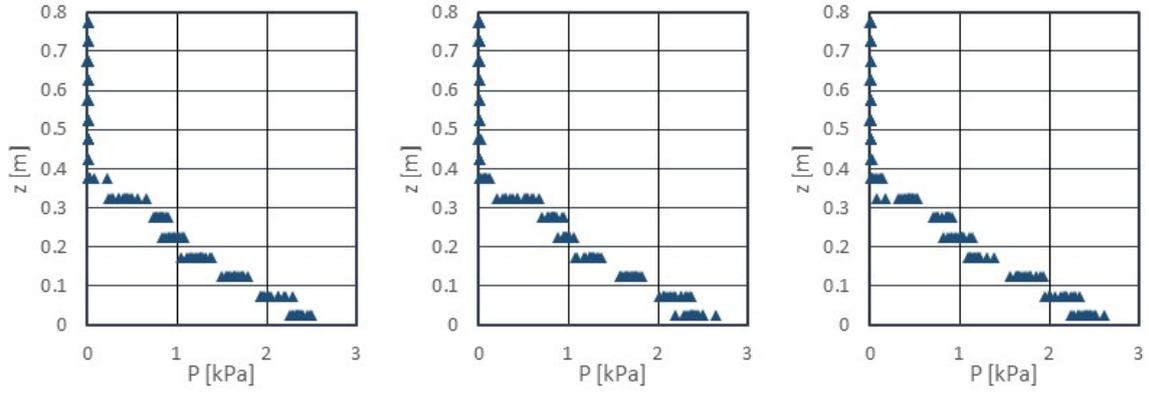
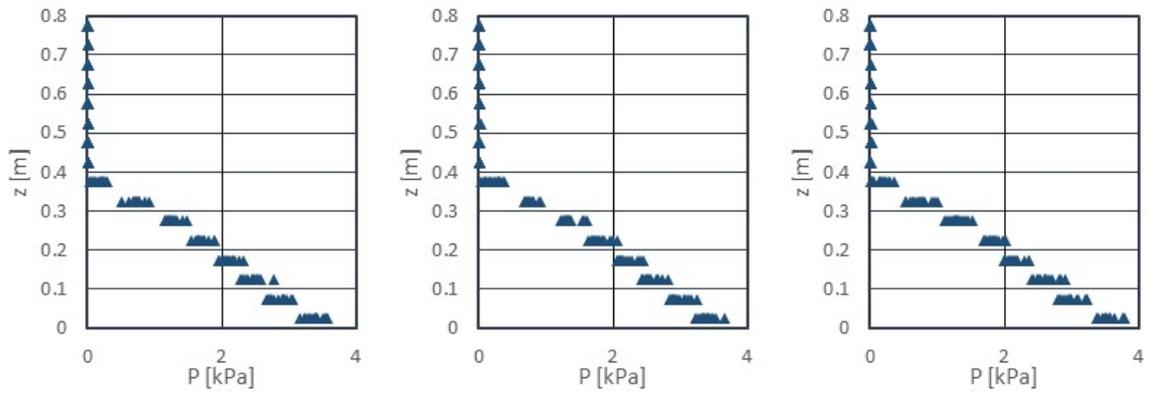


図 II.3.3-14 圧力鉛直分布の観測結果 (直立護岸, 堤体高さ H , 設置位置 0.625m)

W22



W23



W24

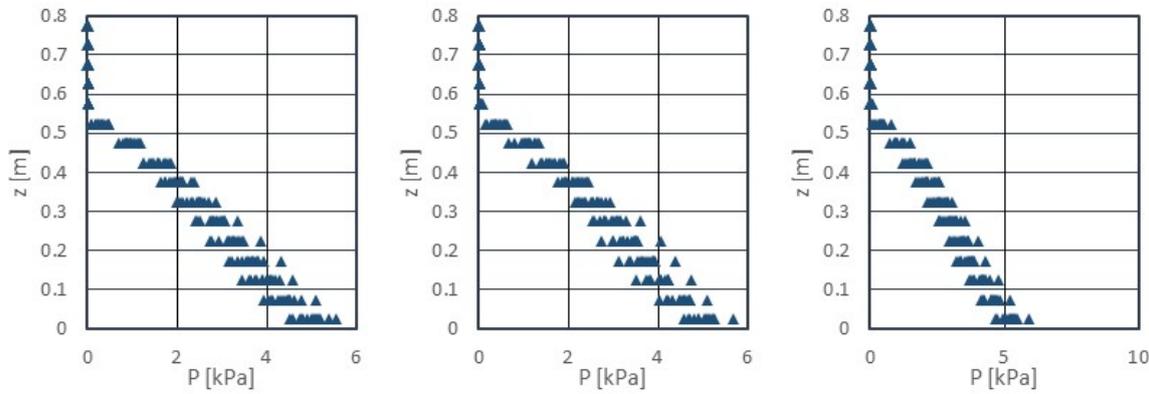
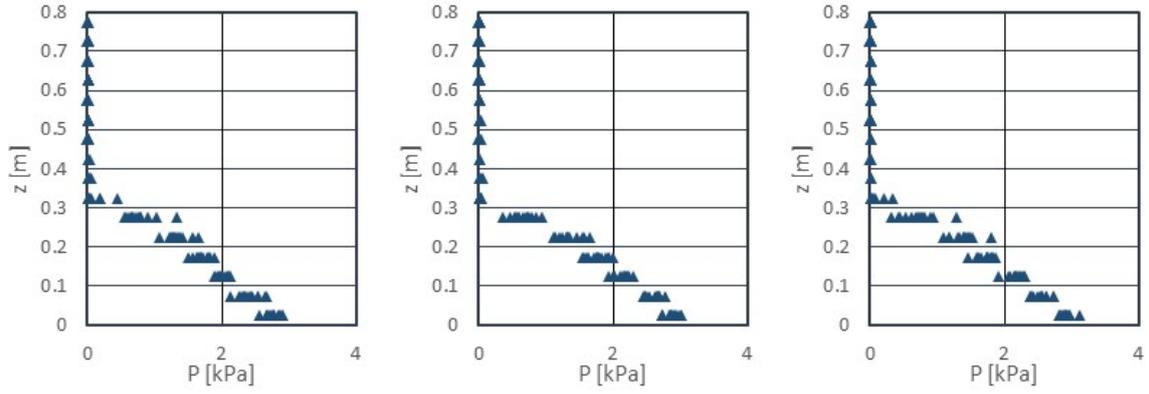
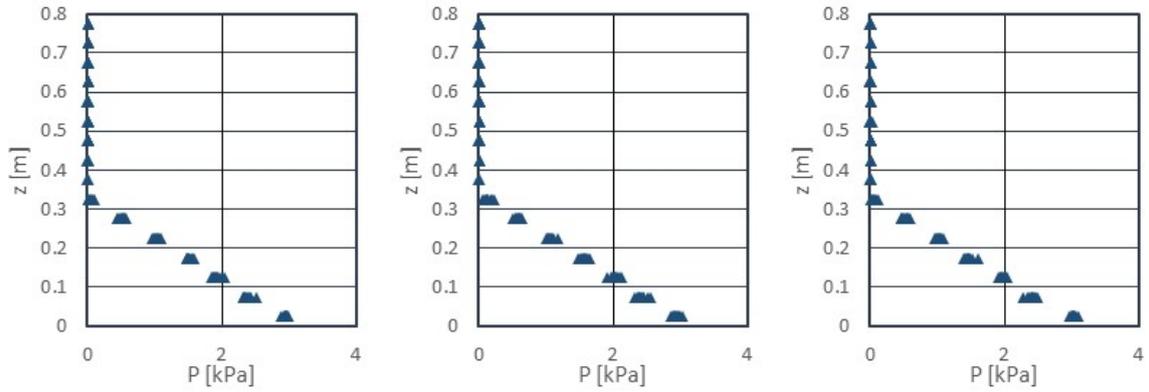


図 II.3.3-14 圧力鉛直分布の観測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m)

W32



W33



W34

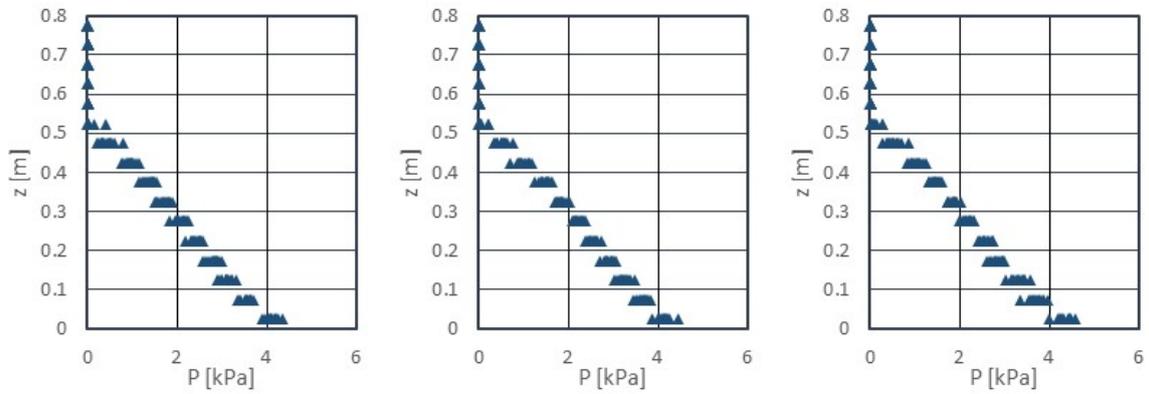
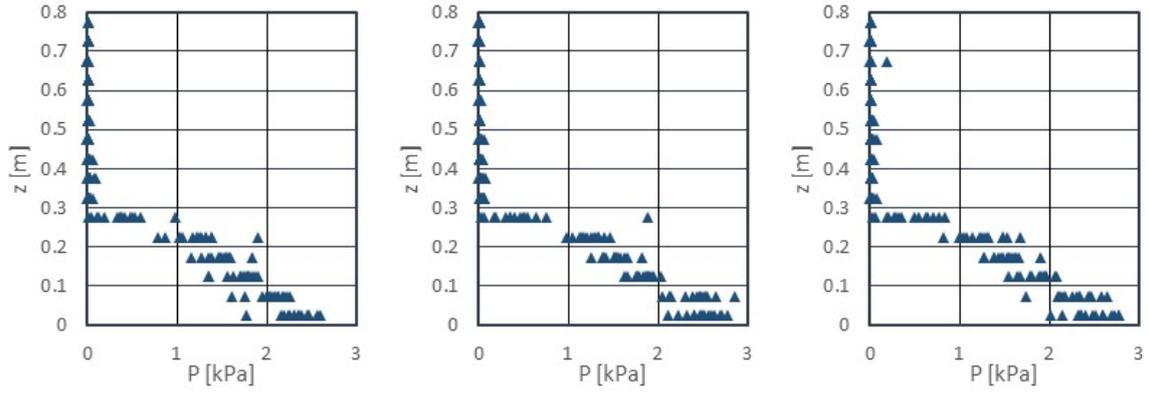


図 II.3.3-14 圧力鉛直分布の観測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 0.625m)

W12



W13

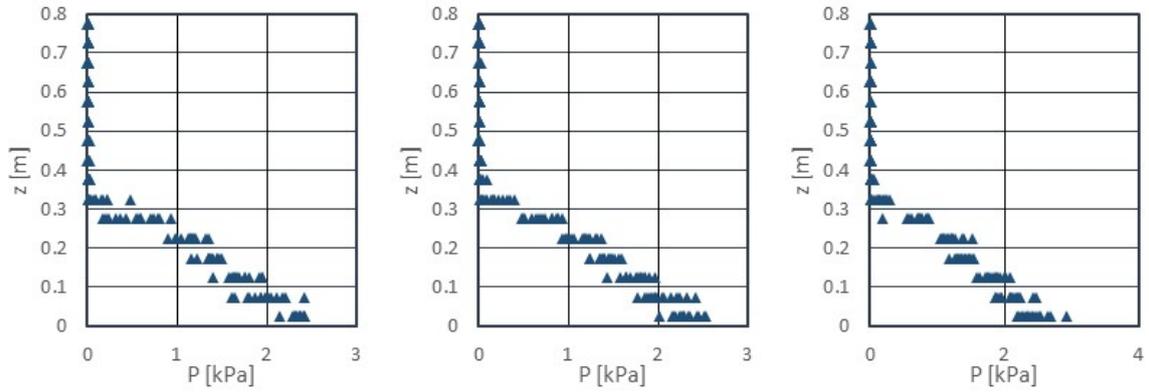
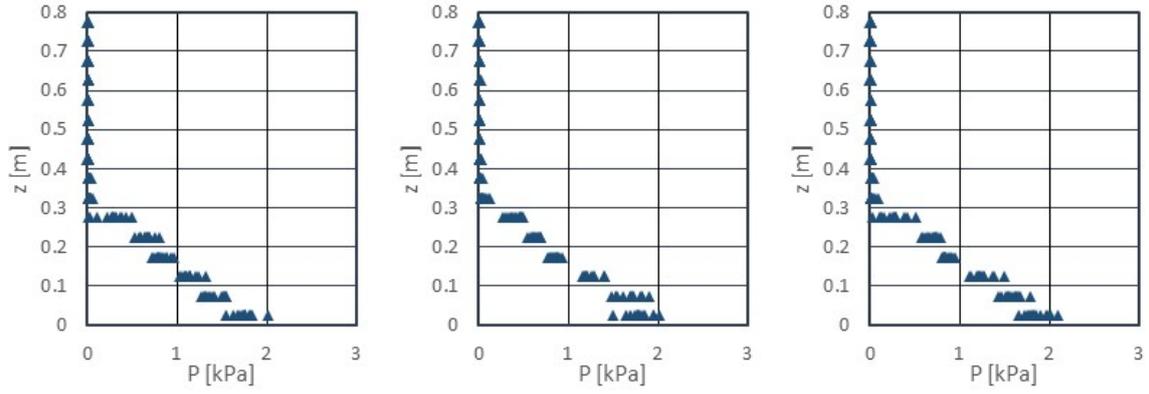
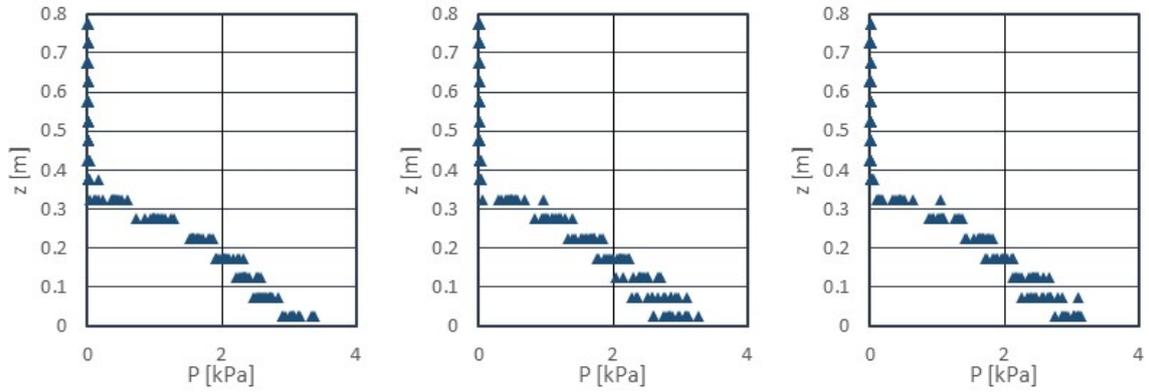


図 II.3.3-14 圧力鉛直分布の観測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m)

W22



W23



W24

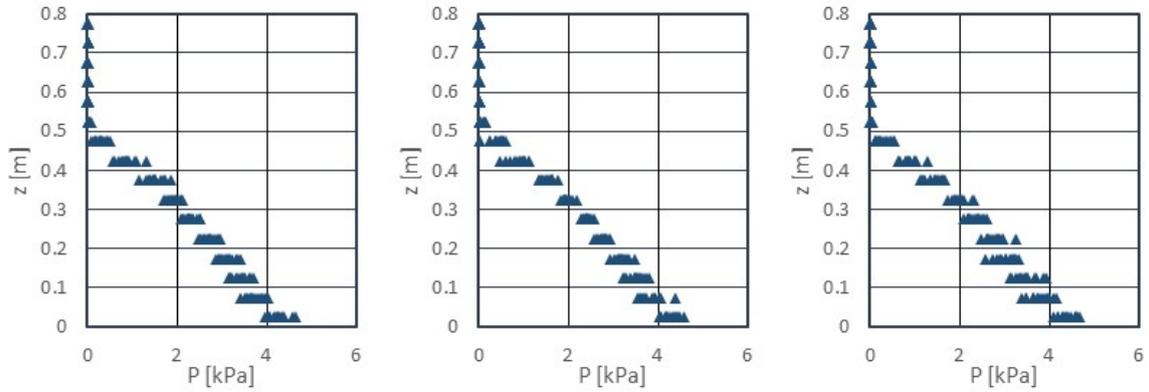
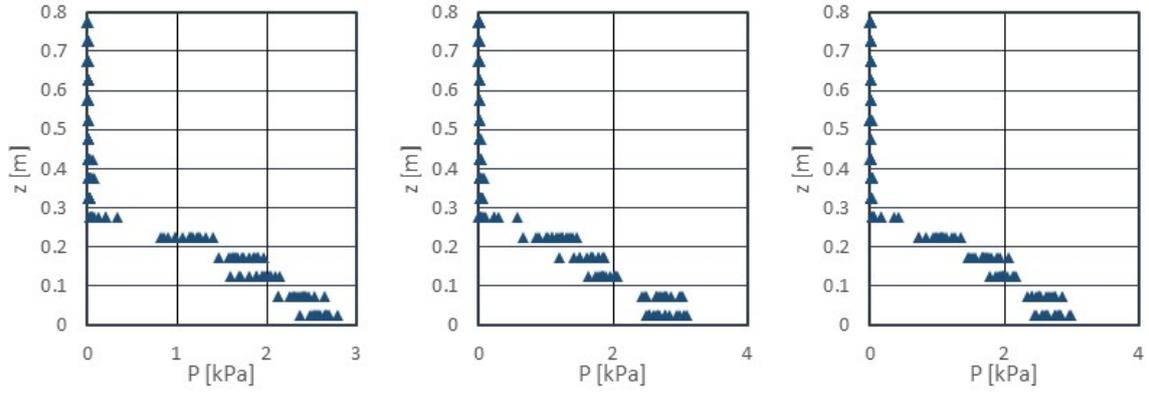
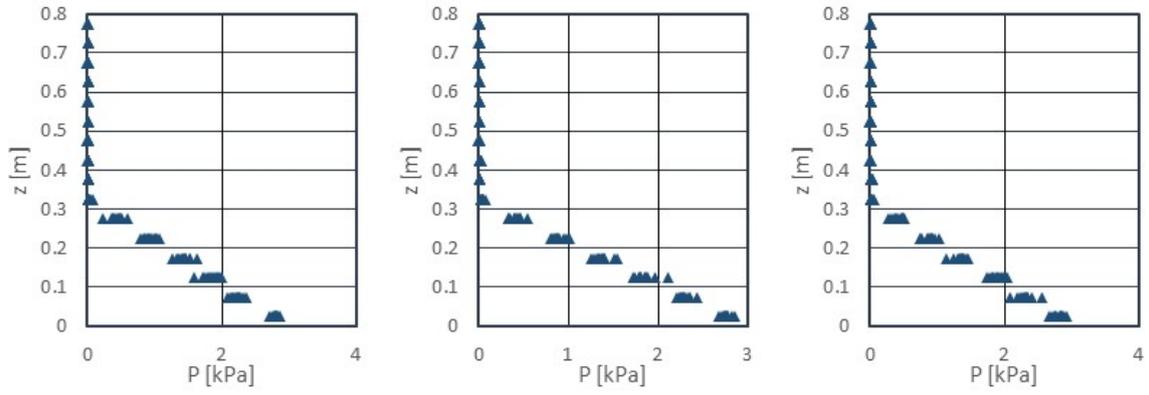


図 II.3.3-14 圧力鉛直分布の観測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m)

W32



W33



W34

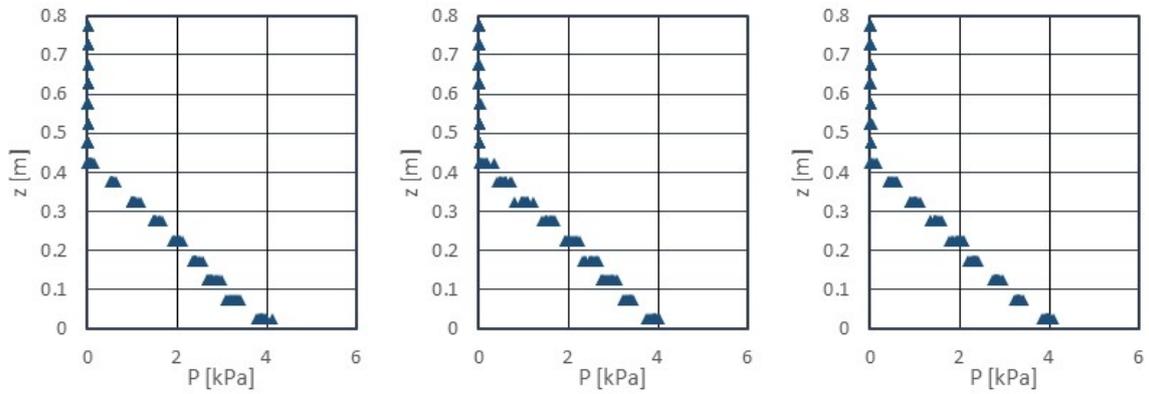


図 II.3.3-14 圧力鉛直分布の観測結果 (直立護岸, 堤体高さ H, 設置位置 1.25m)

4. 試験結果の考察

4.1. 通過波の特性

一般に、津波波力の評価は通過波の最大浸水深発生時刻を対象に、 η_{\max} と同じ時刻の流速から算出したフルード数 Fr を通過波の代表パラメタとして評価する。しかし、波長が長く緩やかに浸水深が上昇する波形の場合、最大波力の発生時間に対し、通過波の最大浸水深の発生時間が相当遅れる場合がある。そこでここでは、最大波力を評価するために最適なパラメタを検討するため、図 II.4-1 に示す3つのパラメタについて検討する。ここで E_{\max} は以下の式で与えられる比エネルギーの最大値である。

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

また $0.95 \eta_{\max}$ は、 η_{\max} の 95%浸水深を表す。図 II.4-1 (b)において、浸水深は 12.6s 以降、ほぼ同程度の値となっている。この時、数値的な最大浸水深発生時刻は約 14s であるが、通過波の代表時刻を最大浸水深発生時刻として定義した場合、12.6s でほぼ最大浸水深は発生していると判断できる。このように、略最大浸水深の発生時刻として 95%浸水深の発生時刻を通過波の代表時刻としたものが $0.95 \eta_{\max}$ である。以降では、最大浸水深発生時刻 (η_{\max})、最大浸水深の 95%浸水深発生時刻 ($0.95 \eta_{\max}$)、最大比エネルギー発生時刻 (E_{\max}) を代表時刻として求めた通過波の代表パラメタ (浸水深、フルード数) について整理する。

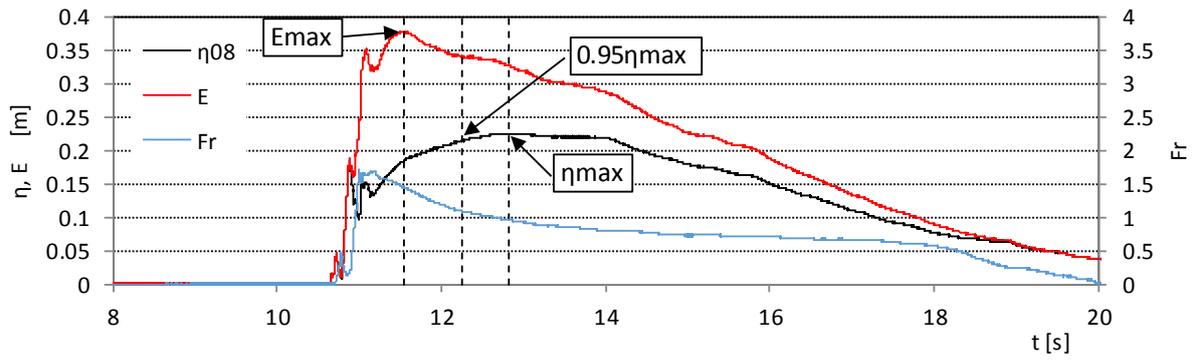
図 II.4-2, 図 II.4-3 に、通過波検定試験による最大浸水深とその時の流速およびフルード数を、単純勾配と直立護岸についてそれぞれ示す。横軸は、汀線からの距離であり、P.08 が汀線、P.09 が汀線から 0.625m、P.10 が汀線から 1.25m の位置を示している。これによると、直立護岸の汀線位置のみ他のケースと大きく特性が異なることが分かる。直立護岸の汀線では、護岸の反射により水位が上昇し、そのためフルード数は小さくなる。またこの時、汀線近傍に支配断面が生じていると考えられるため、フルード数は 1 もしくはそれよりも若干小さめの値を示している。

浸水深については、代表時刻の選び方によらず、汀線から離れるにしたがって低下している。一方流速およびフルード数は、単純勾配の最大浸水深、95%浸水深では汀線から離れるにしたがって大きくなるが、その他のケースでは P.09 から P.10 に向かって、同程度もしくは小さくなっている。II.3 に示したフルード数の時系列を見ると、フルード数は津波到達時に最大となり、時間とともに小さくなっていく。その値は P.09 と P.10 で同程度の値であるが、各パラメタの最大値の発生時刻が陸域にしたがって波形に対し遅くなるため、フルード数が低下する傾向にあると考えられる。

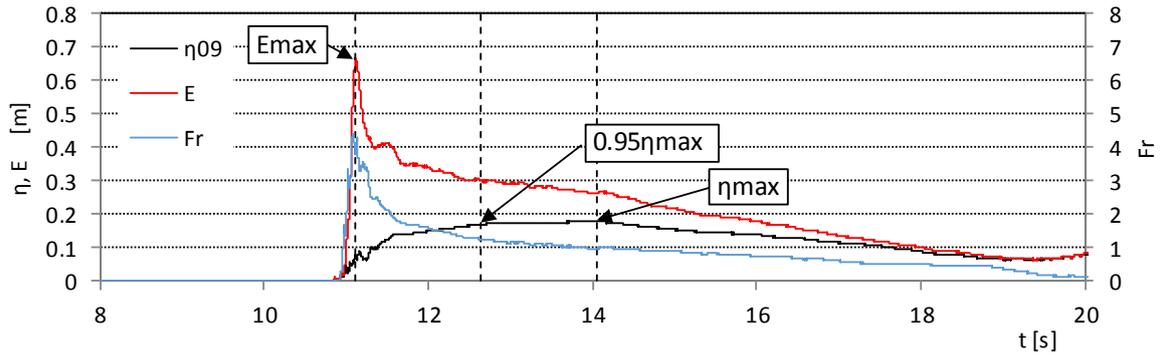
最大浸水深と 95%最大浸水深を比較すると、単純勾配、直立護岸ともに、汀線からの距離による変動特性は類似している。ただし、95%最大浸水深の方が浸水深が小さくなり、また流速が大きくなるためフルード数が大きくなっている。比エネルギー最大とした場合、最大浸水深を基準にする場合に比べて、特にフルード数の汀線からの距離による変動が大きくなる。比エネルギー最大は波形の先端部分で発生するが、フルード数は波形の先端で最大となりその後すぐに低減したのち、徐々に緩やかな低減となる。したがって、比エネルギーが最大となる時刻ではフルード

数が短時間で低減しており，波形に対する比エネルギー最大の発生位置の違いによるフルード数の違いが大きくなるものと考えられる。

周期特性が同じで津波高の異なるケース同士を比較すると，最大浸水深と 95%最大浸水深では，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。一方，比エネルギー最大とした場合，前述したように波高が違えばフルード数の汀線からの距離に対する変動特性も異なっている。



(a)単純勾配, 汀線より 0m, W24



(b)単純勾配, 汀線より 0.625m, W24

図 II.4-1 通過波の代表時間の考え方

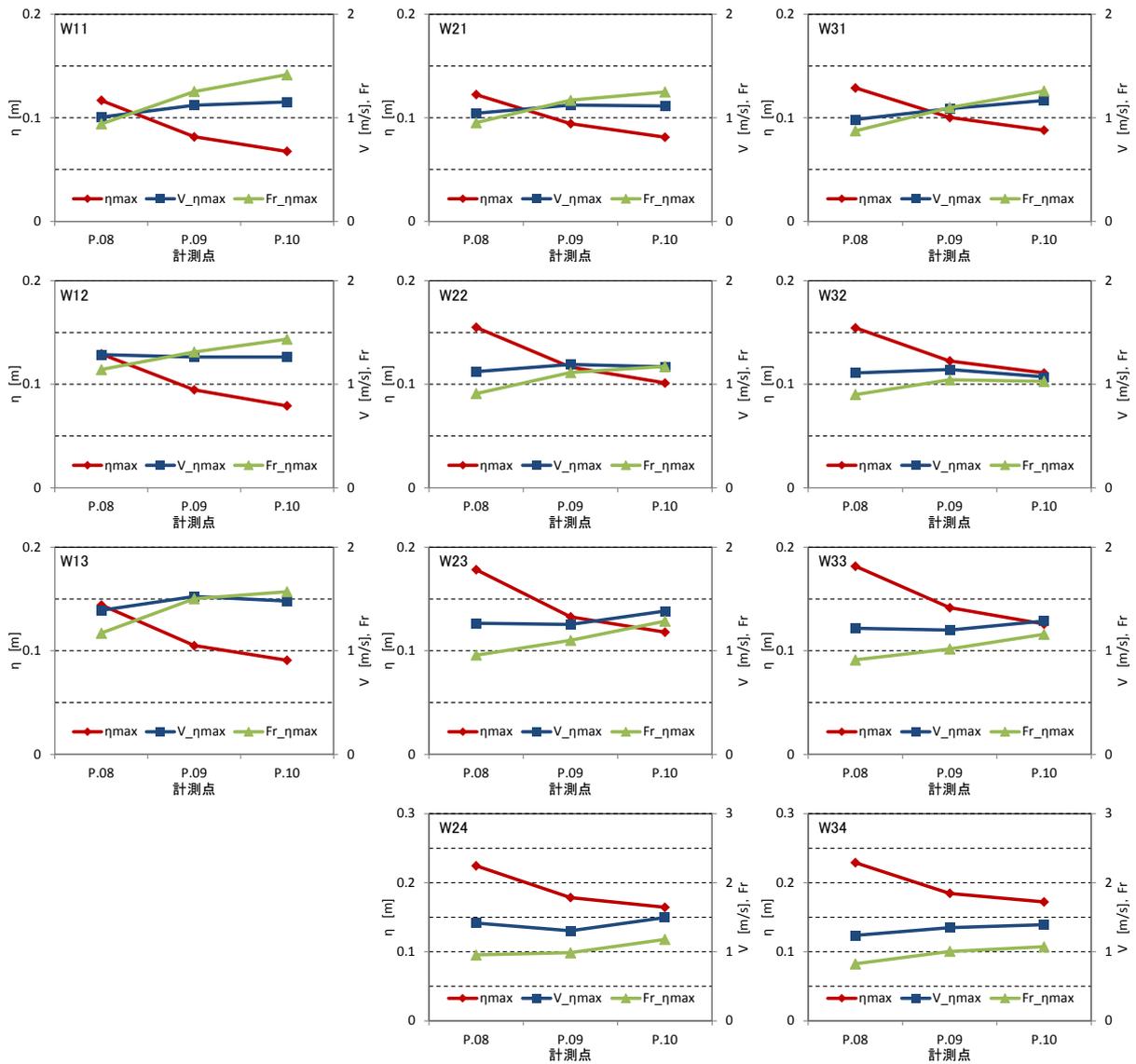


図 II.4-2 通過波の浸水深，流速，フルード数計測結果（単純勾配，浸水深最大）

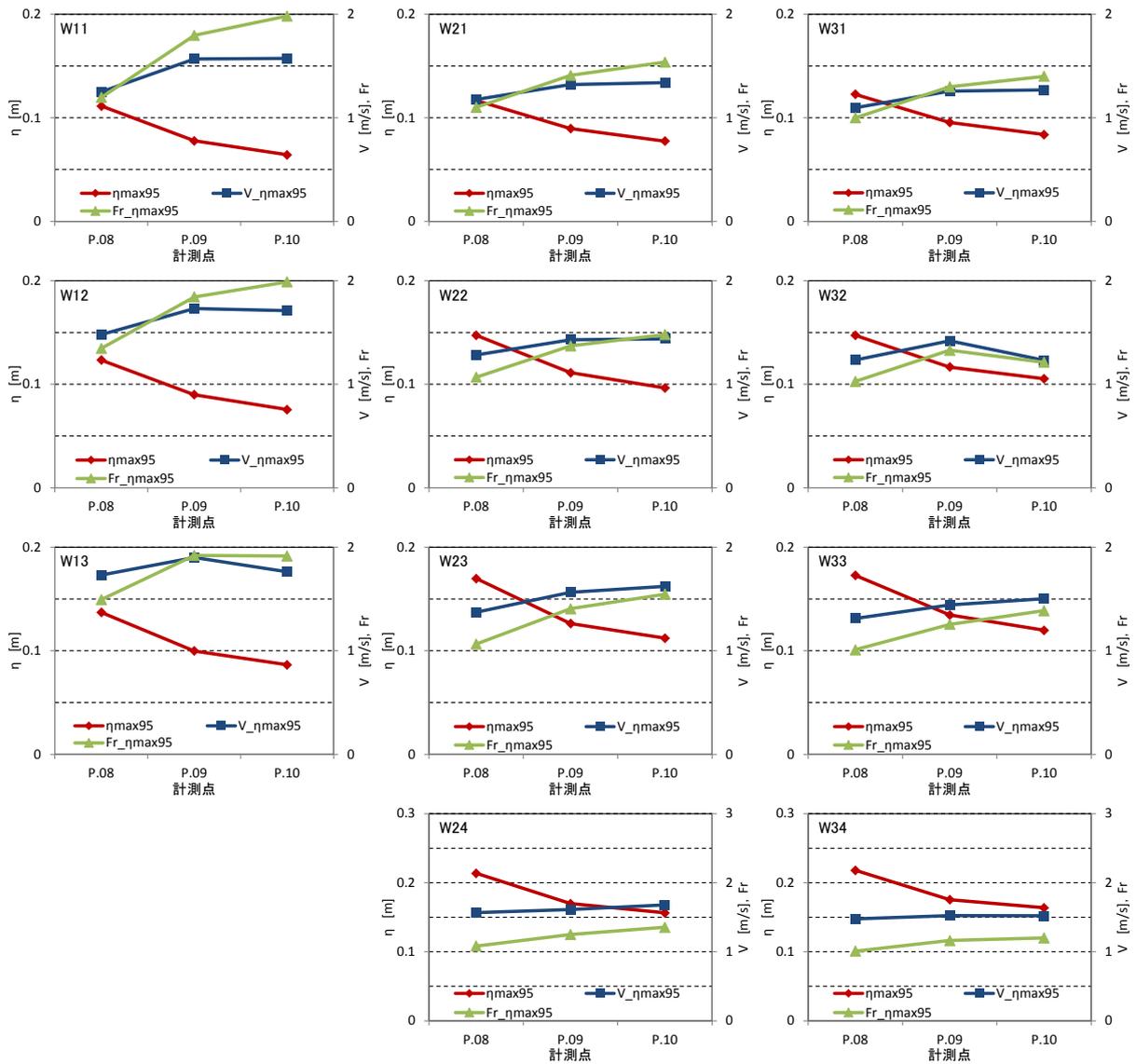


図 II.4-2 通過波の浸水深，流速，フルード数計測結果（単純勾配，最大浸水深の 95%）

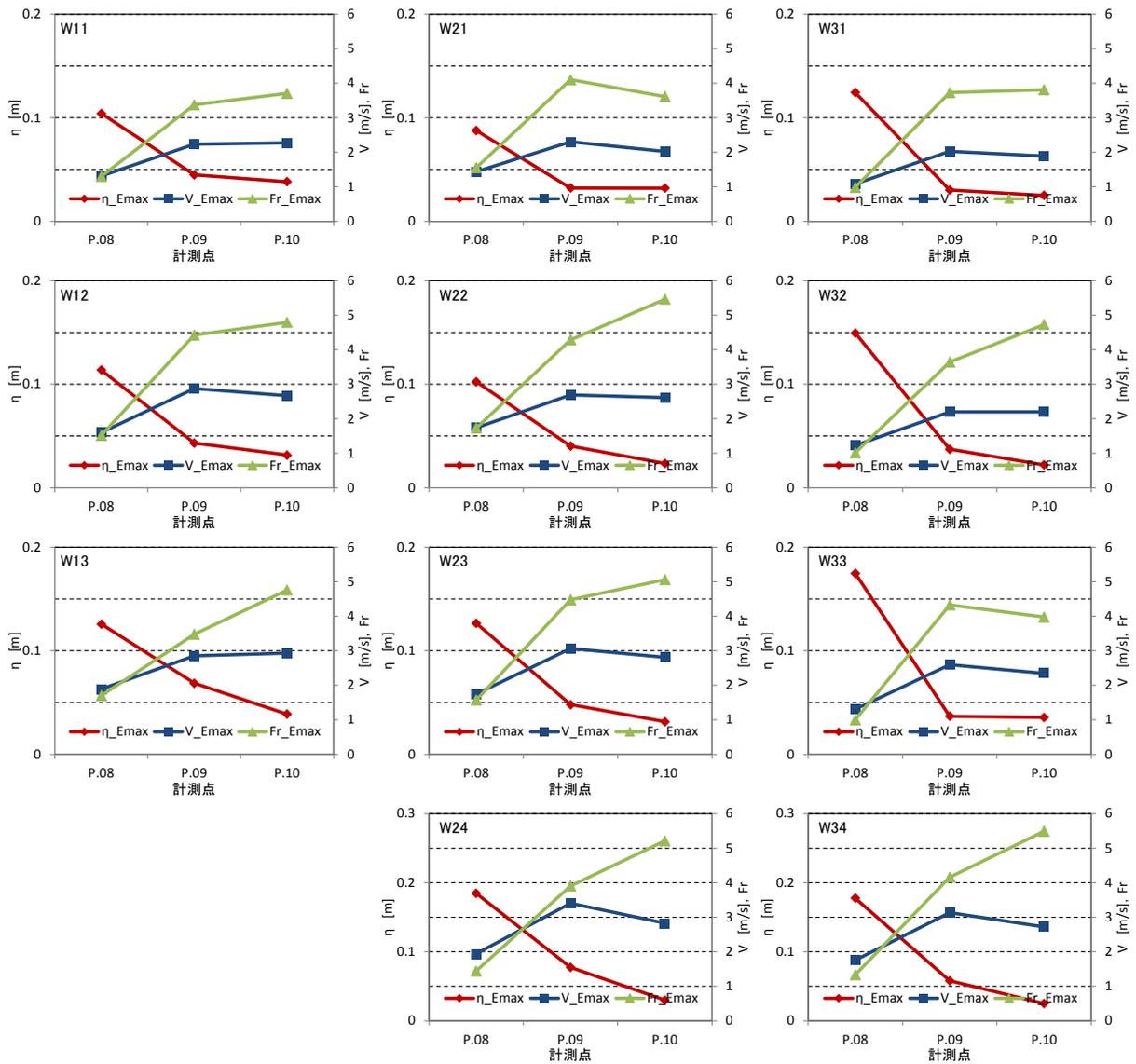


図 II.4-2 通過波の浸水深，流速，フルード数計測結果（単純勾配，非エネルギー最大）

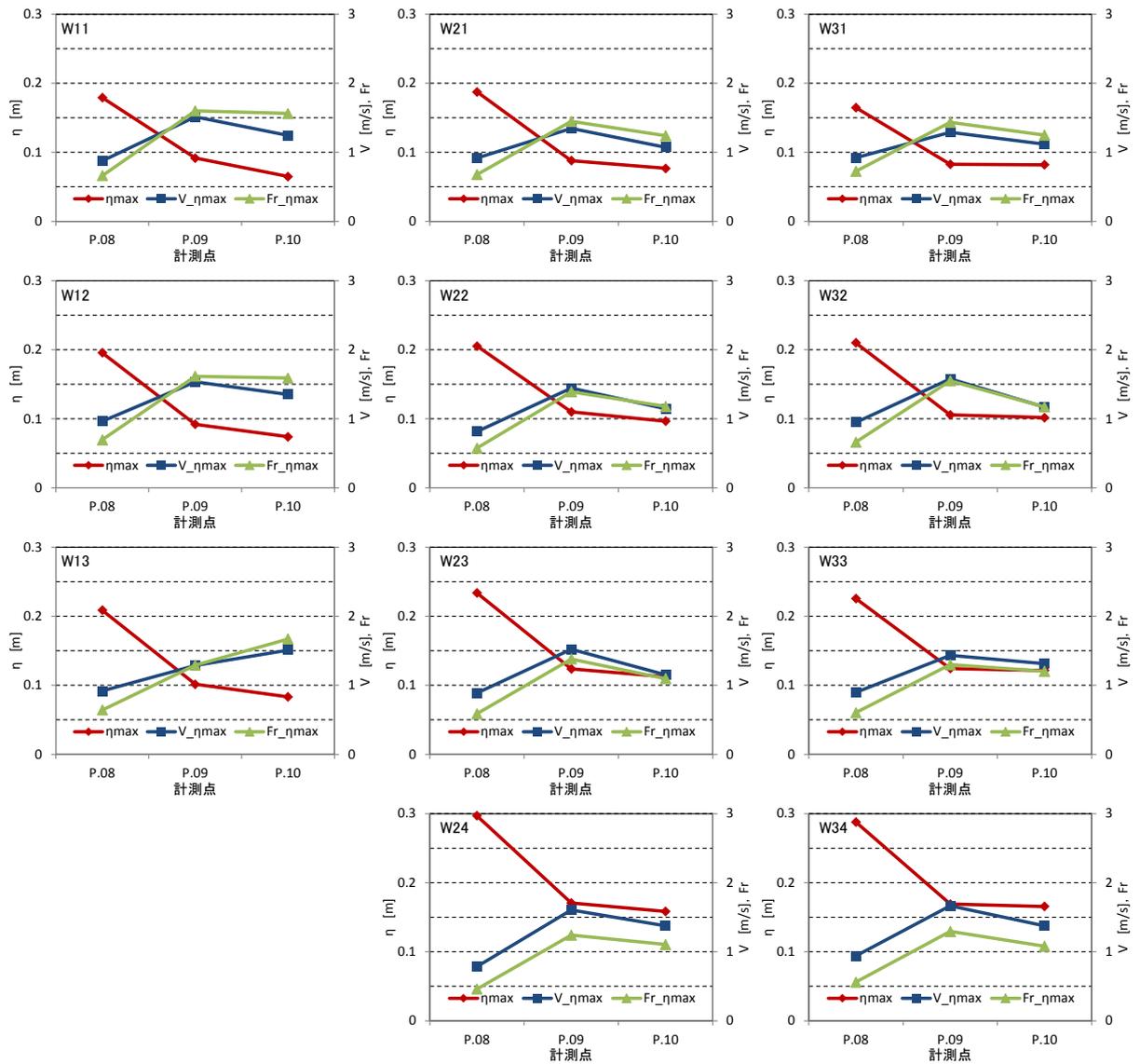


図 II.4-3 通過波の浸水深，流速，フルード数計測結果（直立護岸，浸水深最大）

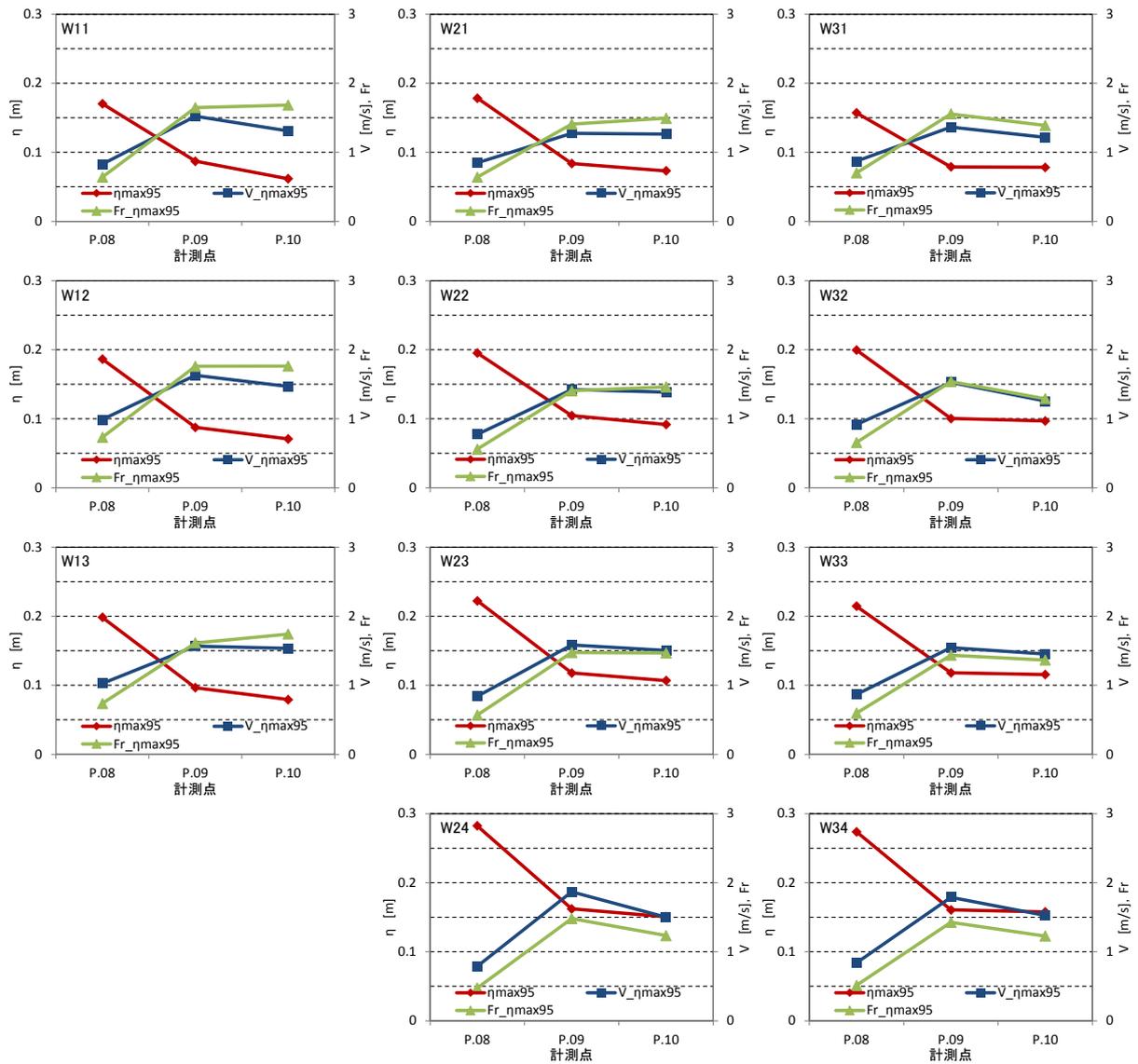


図 II.4-3 通過波の浸水深，流速，フルード数計測結果（直立護岸，最大浸水深の 95%）

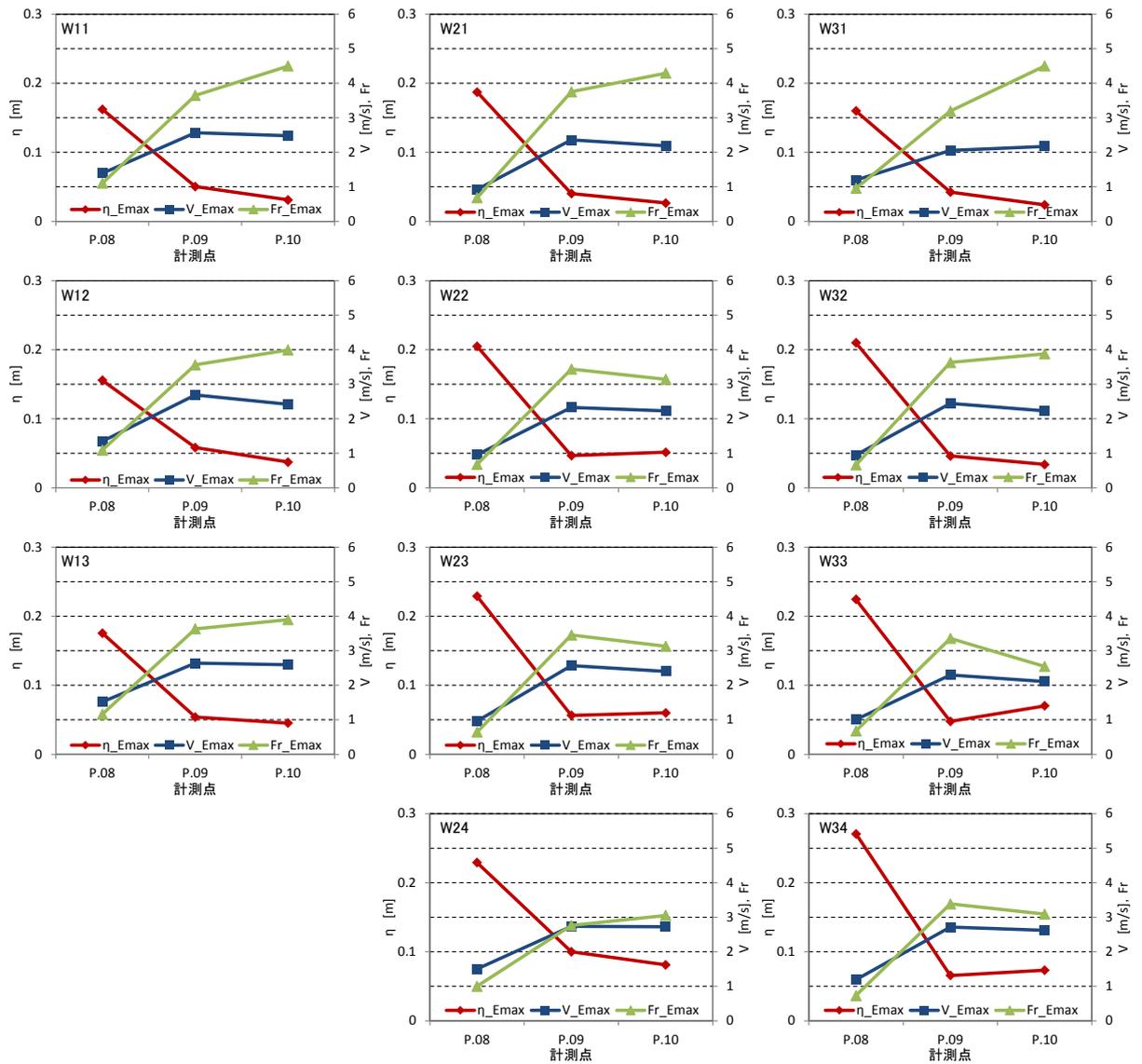


図 II.4-3 通過波の浸水深，流速，フルード数計測結果（直立護岸，比エネルギー最大）

4.2. 波力の時系列特性

図 II.4-4 に波力の時系列の例を示す。同図に示すように、波力の時系列では 3 つのピークを生じる。ただし、これらのピークが全て明確に生じるのではなく、浸入する津波の波形により、これらのいくつかのピークのみが生じている。最初に、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、波形先端部の水位の上昇が比較的緩やかな場合は、明確な衝撃力とはならない。次に、堤体前面を打ちあがった水塊が落下する際に発生する波力のピーク（以降、セカンドピークと呼ぶ）が発生する。その後、堤体前面水位が上昇することにより、静水圧分布に近い準定常的な津波波力（以降、サードピークと呼ぶ）が生じている。これら 3 つのピークのうち本報告では、ファーストピークについては衝撃力の継続時間が非常に短く構造物の健全性への影響が小さいと考えられることから最大波力の解析対象とはせず、セカンドピークとサードピークのうち大きい方を最大波力として解析対象とする。

図 II.4-5 は、同じ波形、堤体設置位置における、越流時と非越流時の波力の作用波力の時系列を比較したものである。これによるとファーストピークは低減しておらず、セカンドピーク、サードピークが低減していることが分かる。堤体高は、W13 は 0.26m、W34 は 0.27m であり、堤体高と同じ水深の静水圧による波力はそれぞれ 0.33、0.36kN/m であるため、これを超えた範囲で越流により波力が低減していることが分かる。

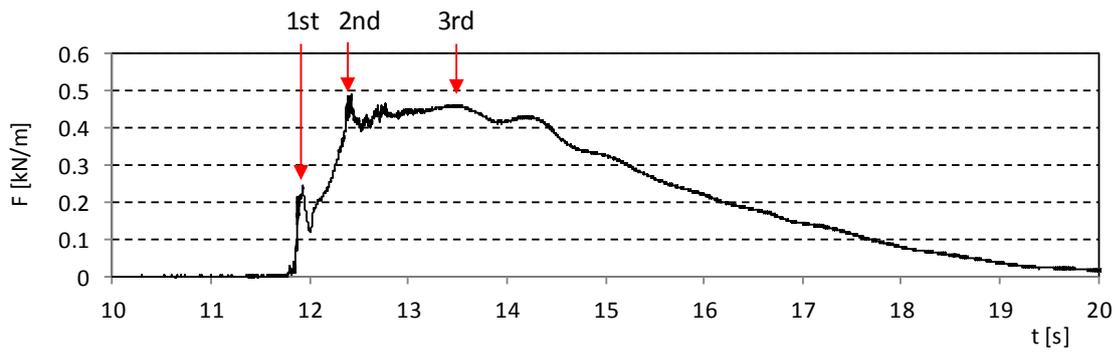
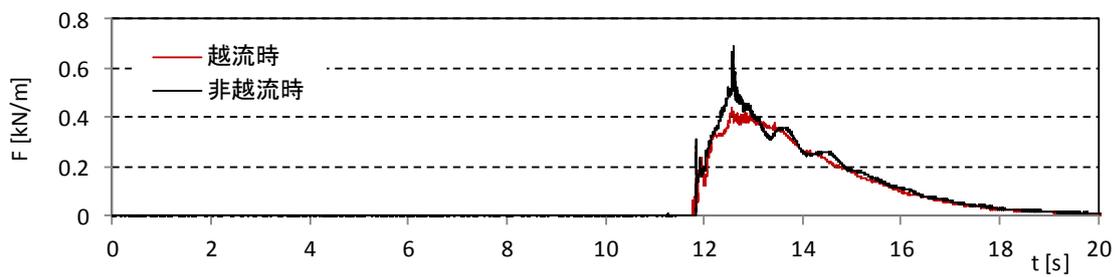
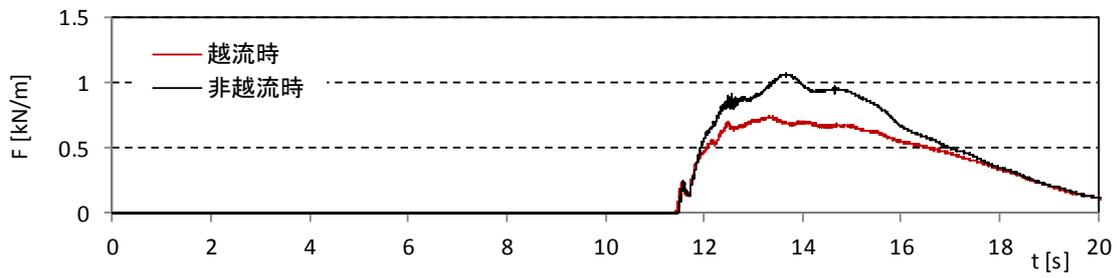


図 II.4-4 波力の時系列特性（単純勾配，汀線より 0.625m，W22）



(a) 単純勾配，汀線より 1.25m，W13



(b) 単純勾配，汀線より 1.25m，W13

図 II.4-5 越流による波力時系列の変化

4.3. 越流時波力評価のためのパラメタ

図 II.4-6 に、波力最大時に堤体前面に働く圧力分布の例を示す。同じ波の条件に対し、堤体が十分高く非越流の場合と堤体高が低く越流する場合を比較して示した。非越流に比較して、堤体を越える部分の三角形の圧力分布がなくなるとともに、越流により圧力分布自体も低減していることが分かる。そこで、津波越流時の波力を検討するために、図 II.4-7 に示すパラメタを考える。

ここで静水圧分布を仮定し、越流時の堤体高さを h_d とする。非越流の場合に最大波力発生時の堤体前面の浸水深を η^* とする。水深係数 α は、 η^* と通過波の浸水深の比として定義される。また越流する場合にも堤体に働く波力は静水圧に準ずるとし、その静水圧を与える水深を $\eta^{*'}$ とし、これと通過波浸水深との比を α' とする。また、越流時と非越流時で圧力分布が等しい場合にも、対体の高さが低いために堤体に働く波力は小さくなる。この η^* の静水圧分布に対して堤体高 h_d の部分のみの圧力を積分して得られる波力を F^* とし、 $\eta^{*'}$ の静水圧分布に対し堤体に働く圧力を積分した波力を F' とする。したがって、 F' が越流時の堤体に働く波力となる。また $\eta^{*'}$ は、非越流のために必要な最低堤体高を意味する。

上述の定義は、堤体に働く圧力が静水圧分布となっていることが前提となっているが、計測された圧力は静水圧形状に近い分布をしているものの、特にセカンドピークが卓越する場合には圧力のばらつきが大きく、また圧力の鉛直方向の勾配も ρg (ρ : 水の密度, g : 重力加速度) と厳密には一致しない。そこでここでは、水深係数 α を以下の式で定義する。

$$\alpha = \frac{\eta^*}{\eta} \quad \eta^* = \sqrt{\frac{2F}{\rho g}}$$
$$\alpha' = \frac{\eta^{*'}}{\eta} \quad \eta^{*'} = \frac{F'}{\rho g h_d} + \frac{1}{2} h_d$$

ここで、 F は非越流時の堤体に働く津波波力、 η は通過波の代表時刻における浸水深、である。この定義によれば、 α は積分した波力が実際に作用する津波波力と同じとなる等価な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、 α 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。

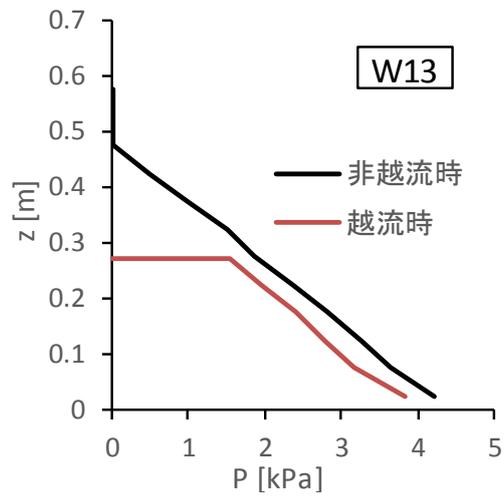


図 II.4-6 堤体前面圧力分布の例（単純勾配，P.10，W13）

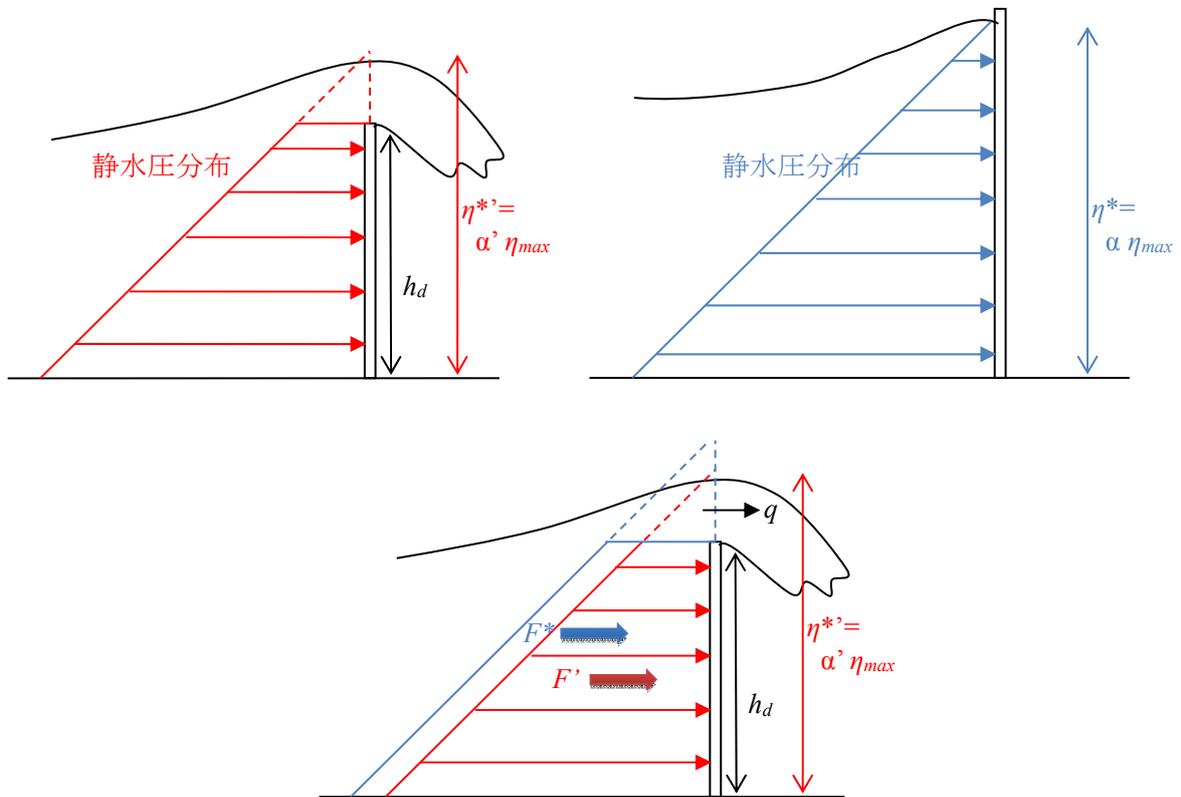


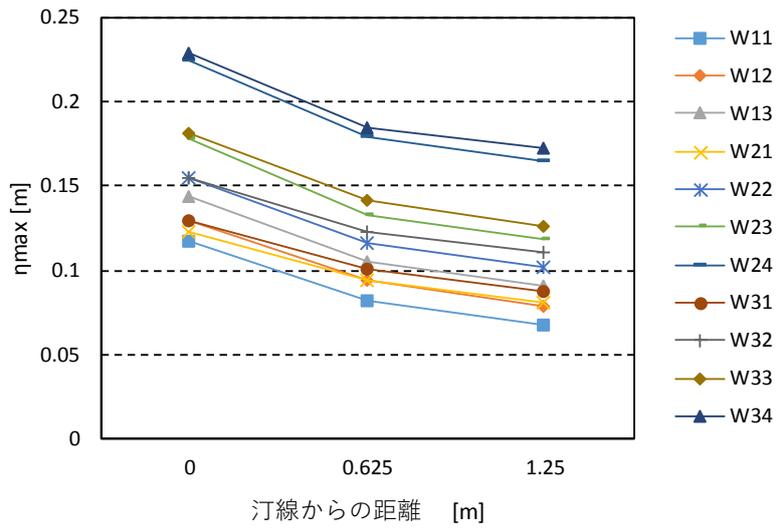
図 II.4-7 津波波力の各係数の定義

4.4. 汀線からの距離による浸水深、波力、水深係数の変化

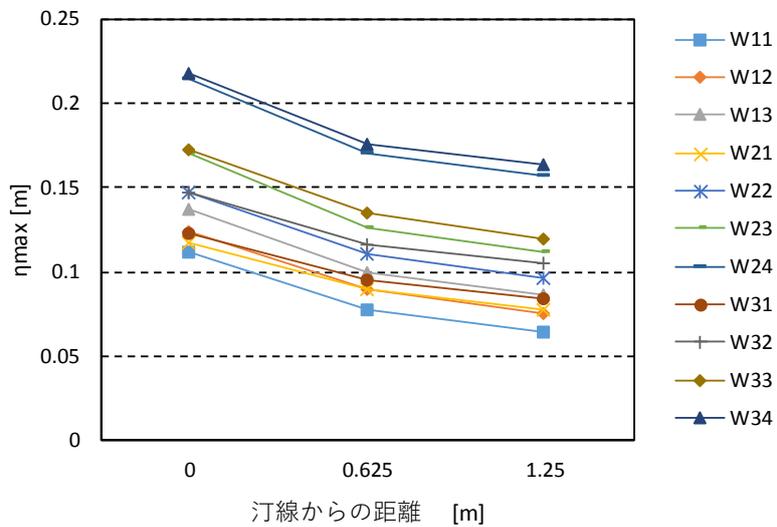
図 II.4-8, 図 II.4-9 に, 通過波の最大浸水深, 図 II.4-10, 図 II.4-11 に波力, 図 II.4-12, 図 II.4-13, に非越流時の水深係数, 図 II.4-14, 図 II.4-15 に越流時の水深係数それぞれの, 汀線からの距離による変化を示す. 前述したように, 浸水深は陸側ほど小さくなっている. 代表時刻を最大浸水深, 95%最大浸水深では, 各入射波ケースがほぼ等間隔に陸側に向かって浸水深が低減しているのに対し, 比エネルギー最大とした場合, 波高の大きいほど陸側に向かって浸水深の低減率が大きく, 入射波高によらず陸側では同程度の浸水深となる傾向が確認できる. ただし, 波高が小さいケースでは, 汀線からの距離 1.25m の方が 0.625m よりも浸水深が大きくなる特徴を示す. 一方波力については, 陸側の方が小さくなる傾向にあるものの, その変化は小さい. 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. 特にこの傾向は, 単純勾配よりも直立護岸の方が顕著である. また, 最大浸水深を基準とした場合には, 波形によらず水深係数は陸側に向かって増加傾向にあるが, 比エネルギー最大基準とした場合には, 波高の小さい場合には増加傾向にあるが, 波高が大きくなると汀線からの距離 1.25m の方が 0.625m よりも小さくなっている.

図 II.4-11 に示した直立護岸の場合, 汀線位置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.

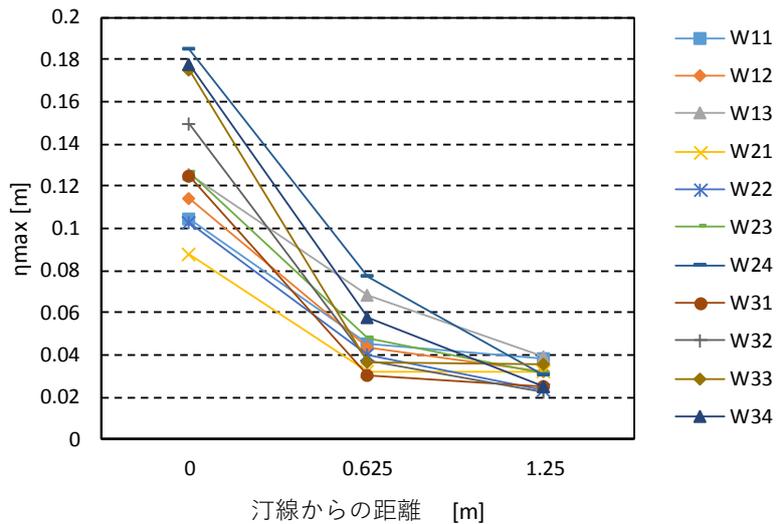
図 II.4-10, 図 II.4-11 には, 越流時, 非越流時の比較を示した. これによると, 汀線からの距離によらず波力は低減しており, 波高が大きいほど低減率が大きいことが分かる.



(a)最大浸水深

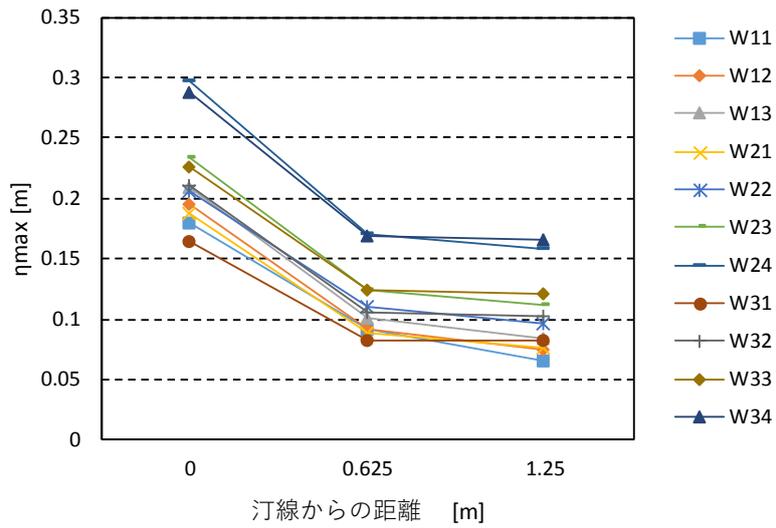


(b)95%最大浸水深

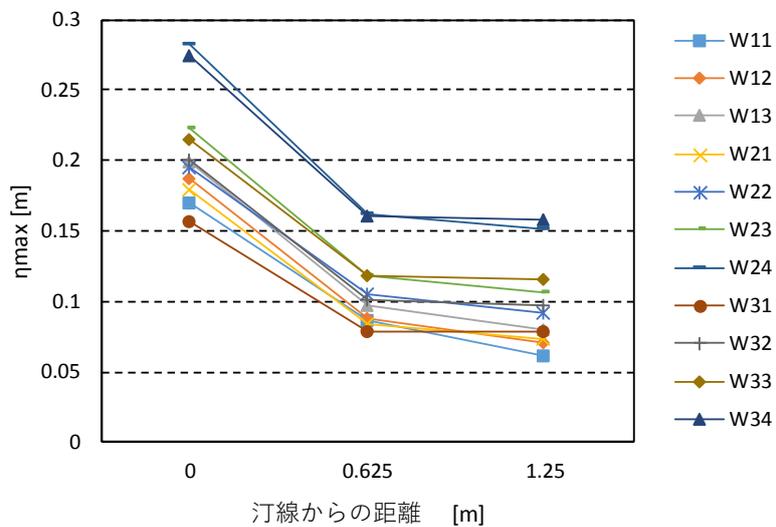


(c)最大比エネルギー

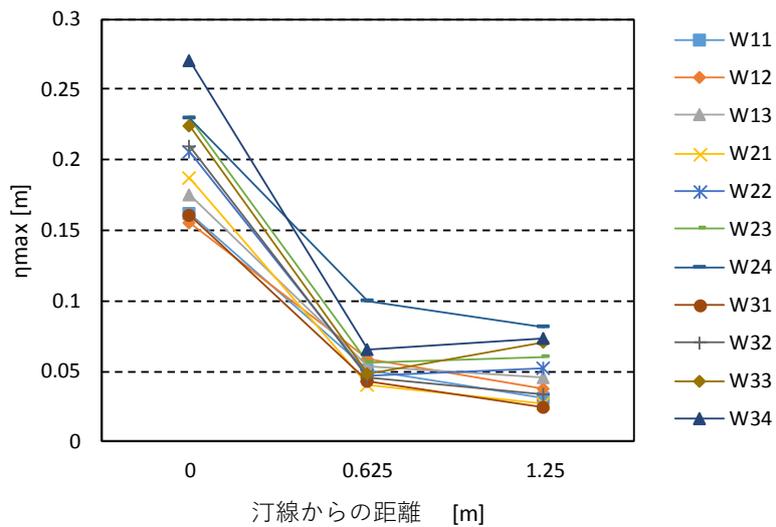
図 II.4-8 汀線からの距離による通過波浸水深の変化 (単純勾配)



(a)最大浸水深



(b)95%最大浸水深



(c)最大比エネルギー

図 II.4-9 汀線からの距離による通過波浸水深変化 (直立護岸)

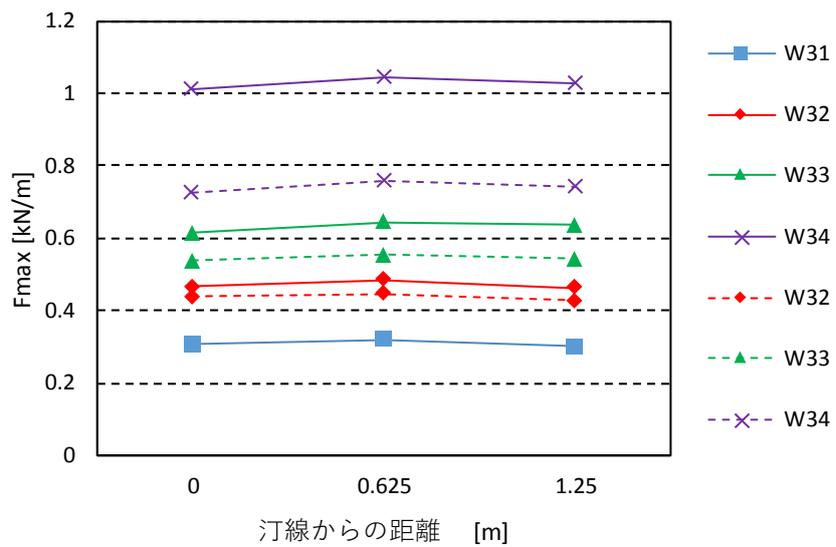
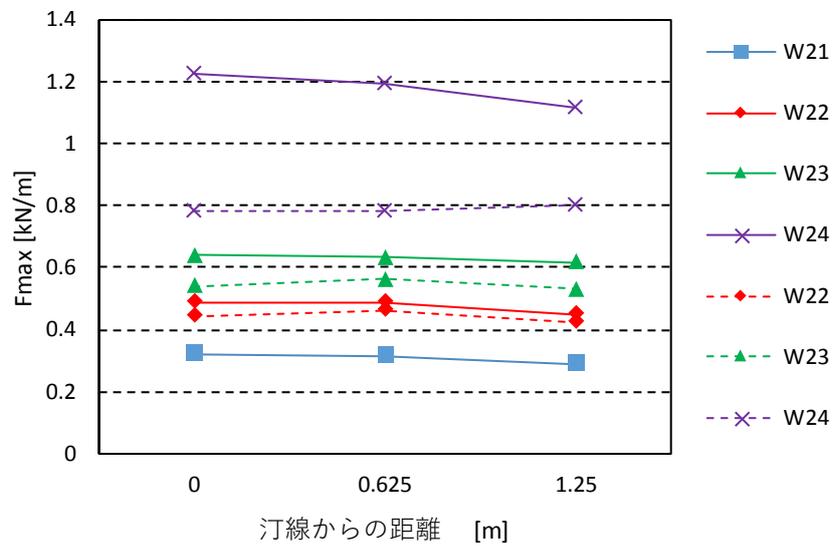
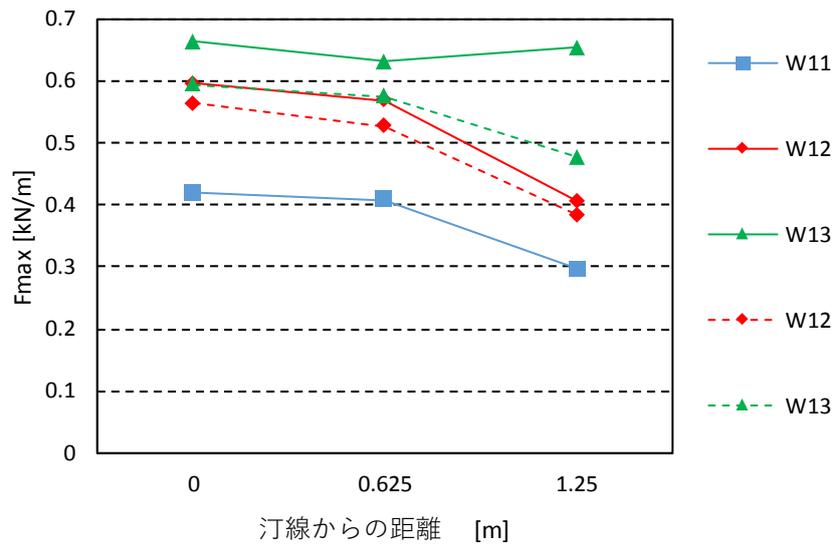


図 II.4-10 汀線からの距離による波力の変化の越流・非越流比較 (単純勾配)

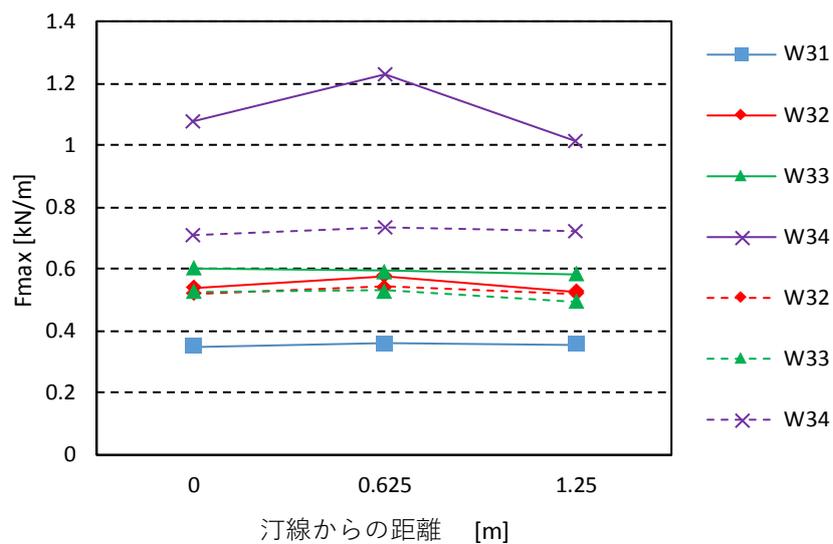
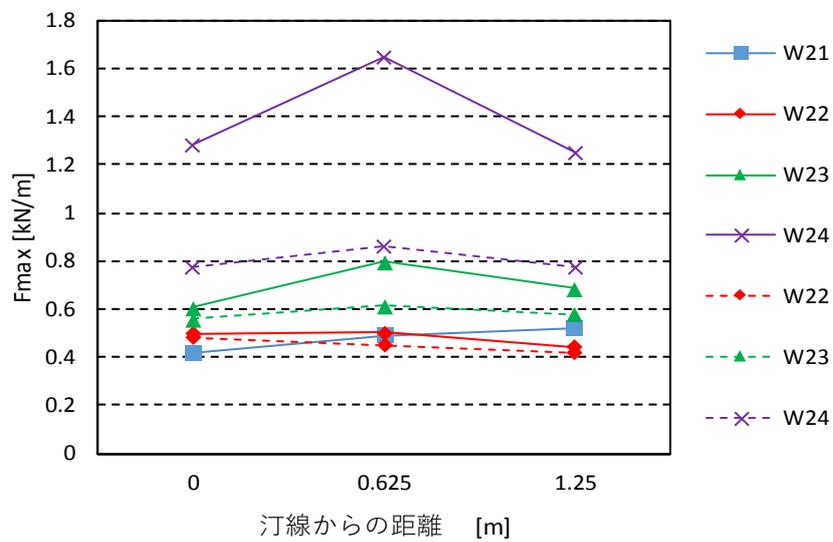
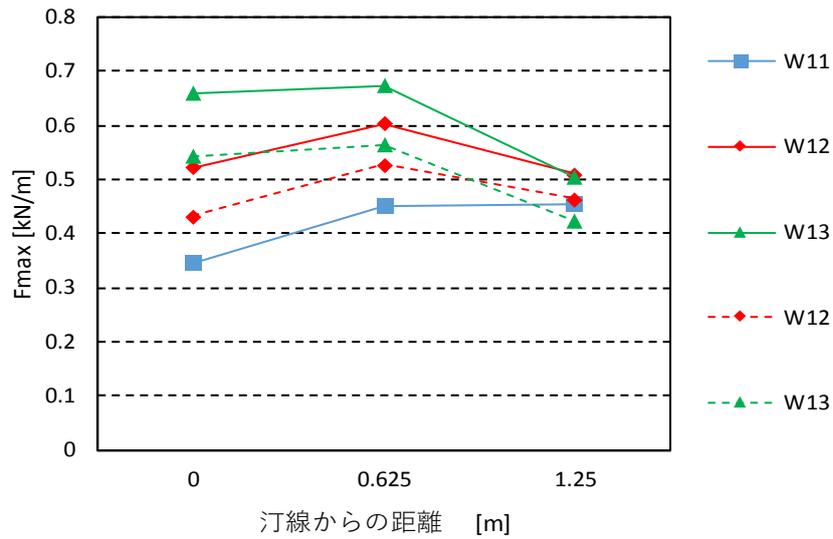


図 II.4-11 汀線からの距離による波力の変化の越流・非越流比較 (直立護岸)

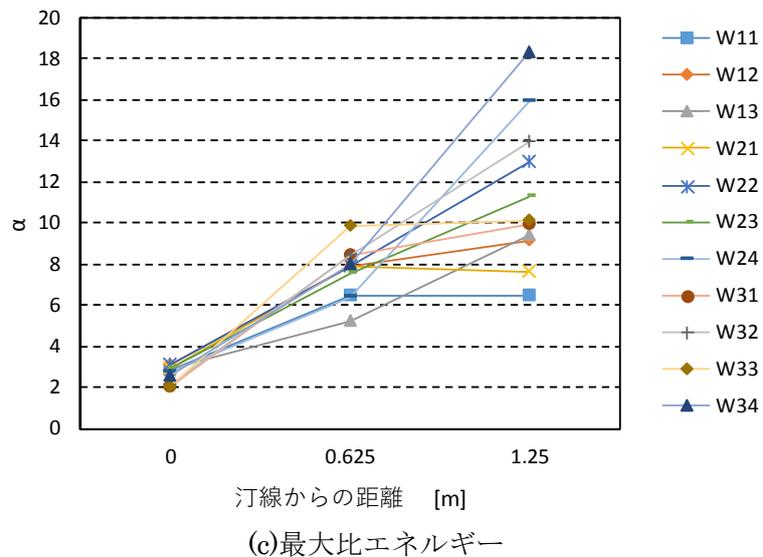
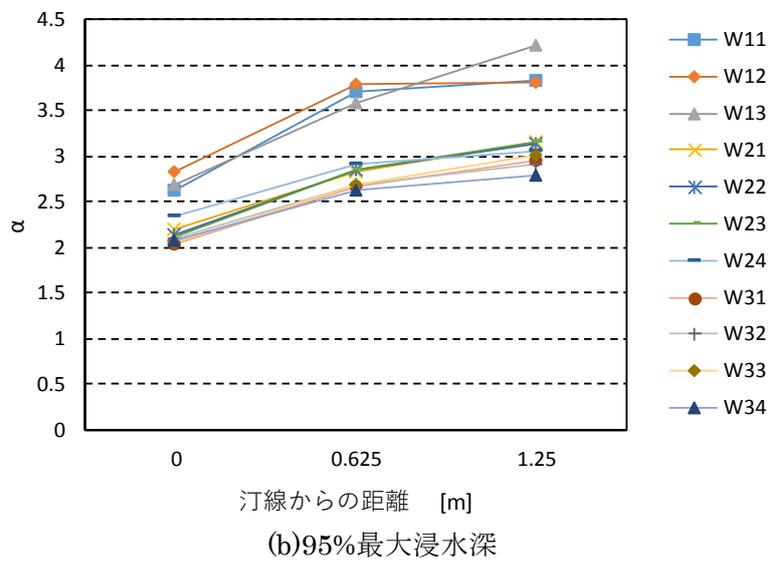
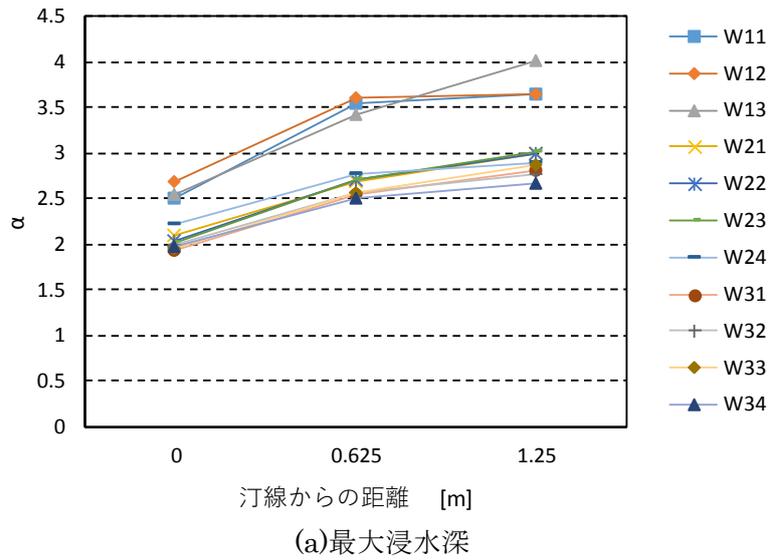


図 II.4-12 汀線からの距離による水深係数の変化 (単純勾配, 非越流)

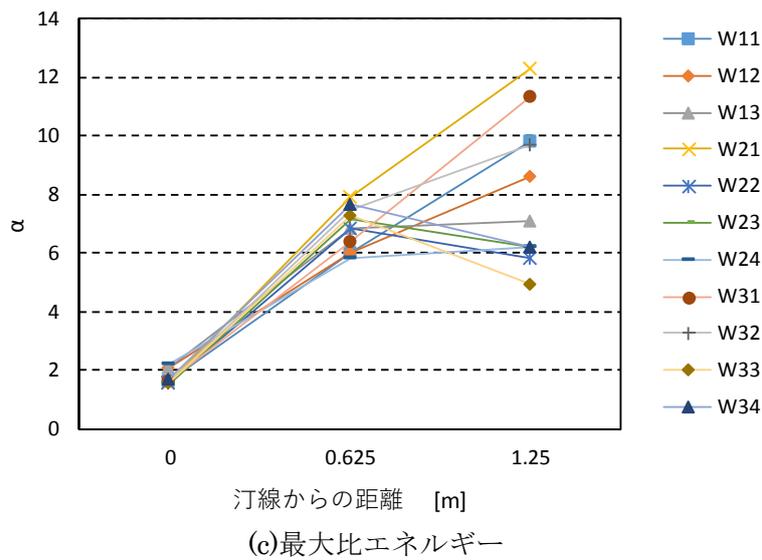
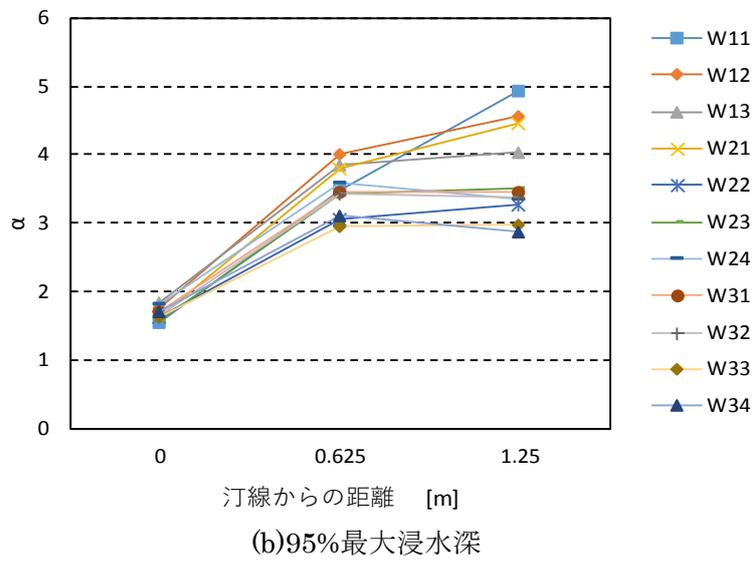
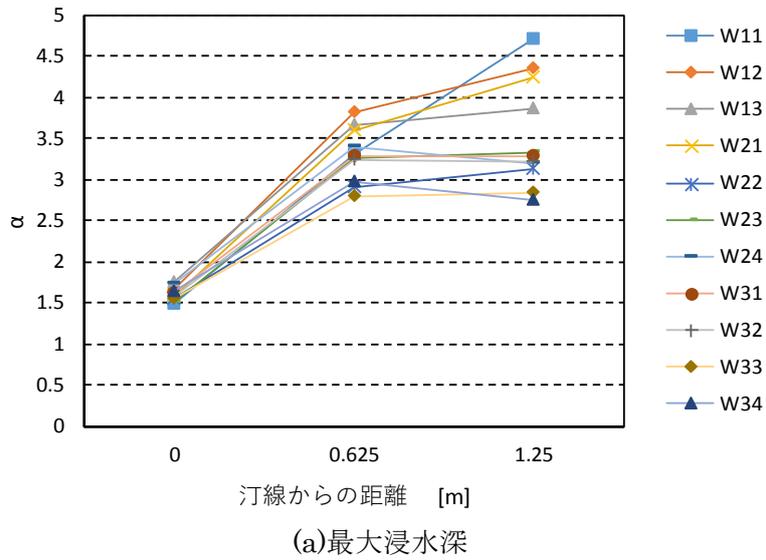
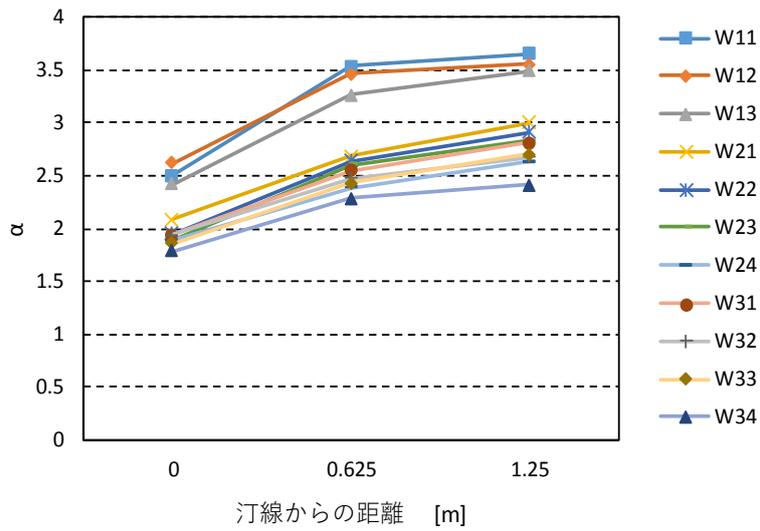
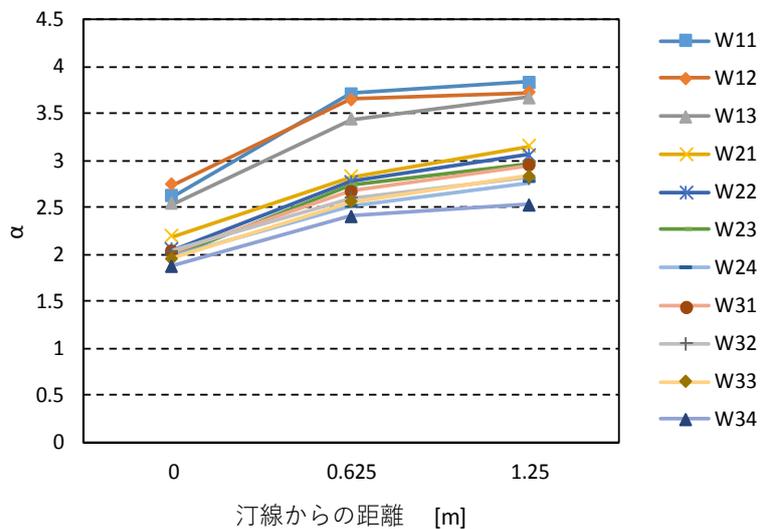


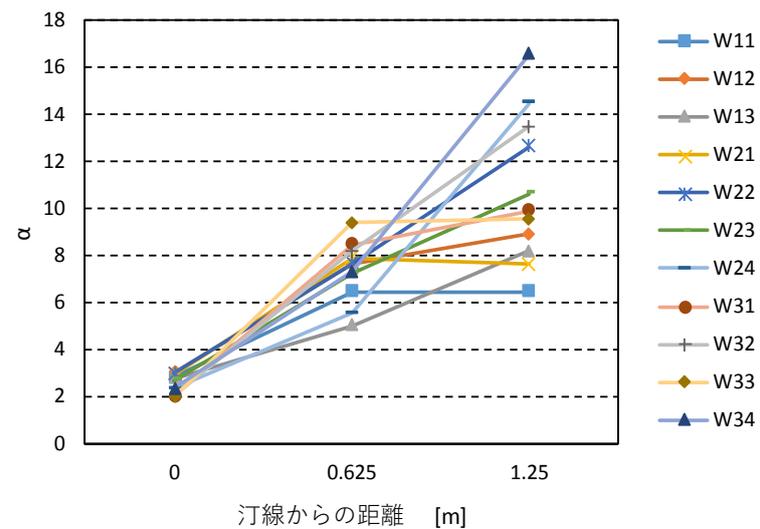
図 II.4-13 汀線からの距離による水深係数の変化 (直立護岸, 非越流)



(a)最大浸水深

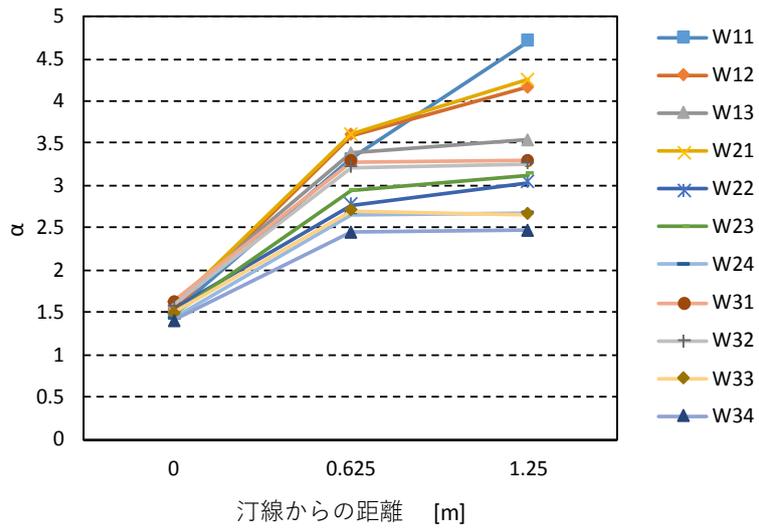


(b)95%最大浸水深

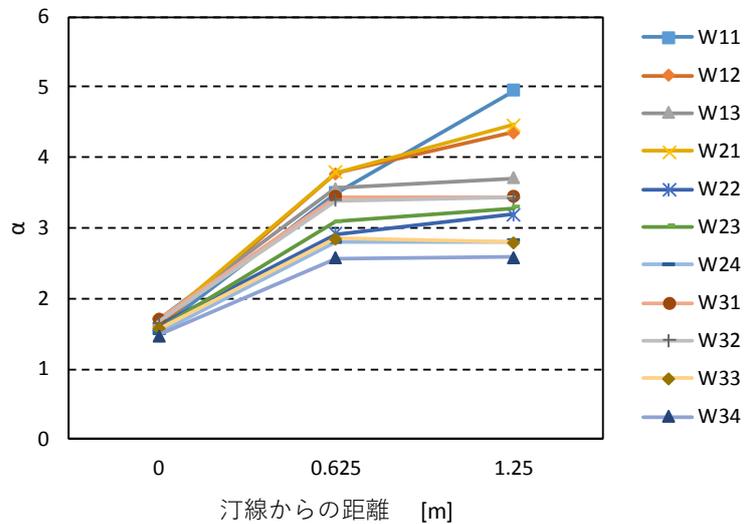


(c)最大比エネルギー

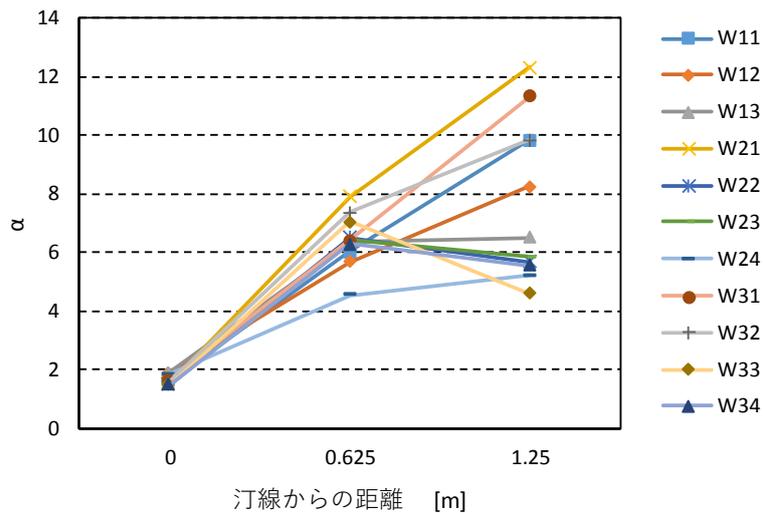
図 II.4-14 汀線からの距離による水深係数の変化 (単純勾配, 越流)



(a)最大浸水深



(b)95%最大浸水深

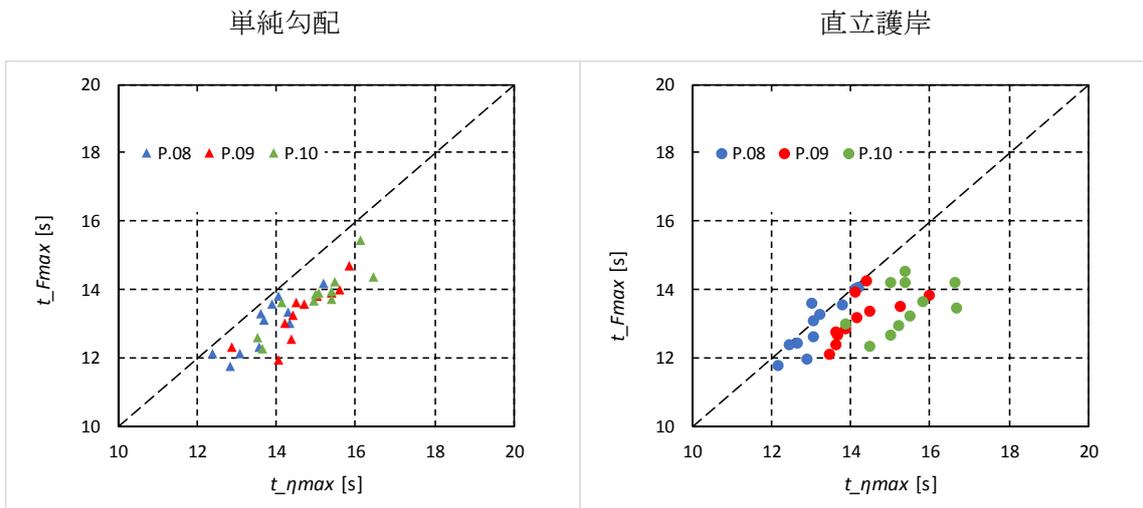


(c)最大比エネルギー

図 II.4-15 汀線からの距離による水深係数の変化 (直立護岸, 越流)

4.5. 通過波と最大波力発生時刻の関係

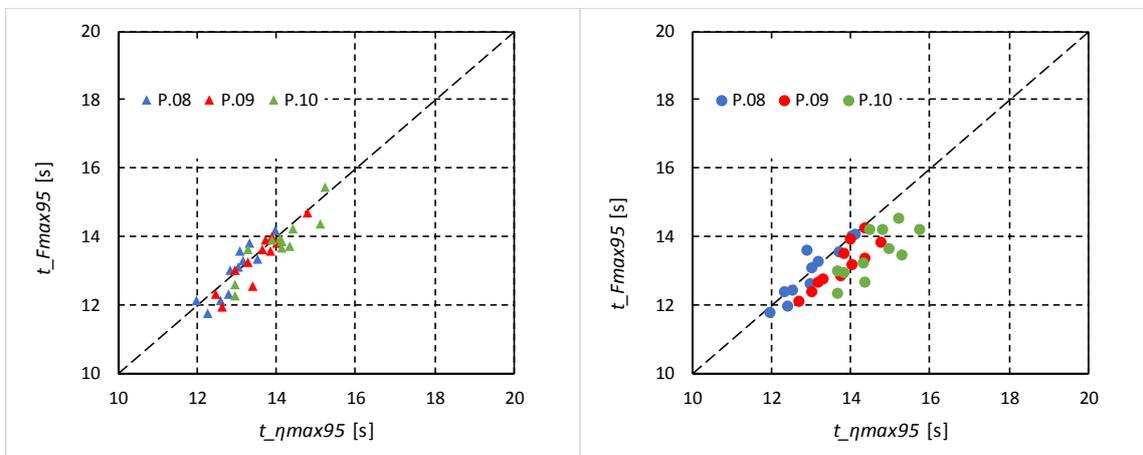
図 II.4-16 に、通過波の各パラメタによる代表時刻と最大波力の発生時刻を比較する。最大浸水深時を代表時刻とした場合、通過波の代表時刻は最大波力発生時刻よりも遅れ、汀線から離れるほどその遅れは大きくなることが分かる。これに対し、代表時刻を 95%最大浸水深とした場合、最大波力発生時刻よりも若干遅れる傾向にあるが、その差は小さく、ほぼ最大波力発生時刻に一致するようになる。比エネルギー最大時を代表時刻とした場合、最大波力発生時刻よりも概ね早くなり、特に単純勾配でその傾向が顕著である。単純勾配では、汀線において大きな流速を伴って陸域に遡上するため、津波波形の先端部でも運動エネルギーが大きい。そのため、最大浸水深に比較して比エネルギーの最大値が早く発生すると考えられる。



単純勾配

直立護岸

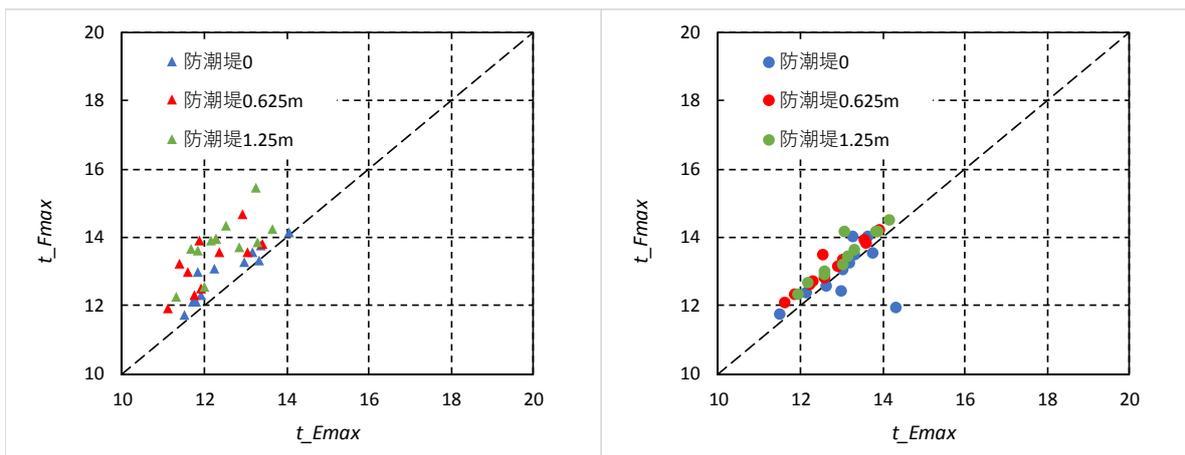
(a) 浸水深最大



単純勾配

直立護岸

(b) 最大浸水深の95%



単純勾配

直立護岸

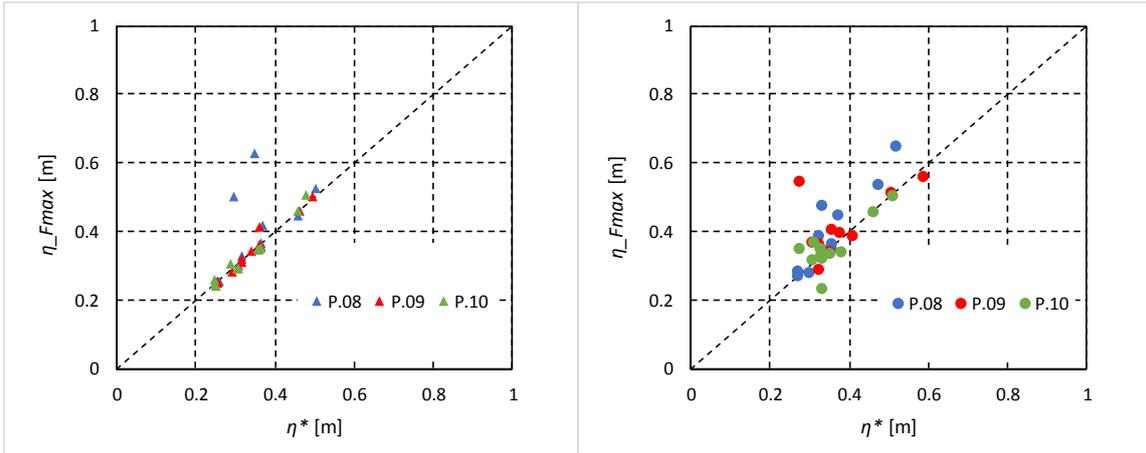
(c) 比エネルギー最大

図 II.4-16 通過波代表時刻と最大波力発生時刻の関係

4.6. 最大波力と堤体前面せり上がり高の関係

図 II.4-17, 図 II.4-18 に, 積分値が最大波力と等しくなる静水圧分布の水深 η^* , η^{*} と, 堤体前面での計測された波力最大時の水位上昇の最大値 η_{Fmax} を比較したものである. 越流時, 非越流時ともに, 概ね両者は同じ値となるか, η_{Fmax} の方が大きくなっている. 両者が一致する場合は, 静水圧分布が概略成立していると考えられる. 一方で, η_{Fmax} の方が大きい場合は, 水隗の打ち上げにより, 鉛直下向きの加速度を有しているために, 鉛直方向の圧力勾配が静水圧分布よりも小さくなっており, そのため実際の水位が大きくなっていると考えられる.

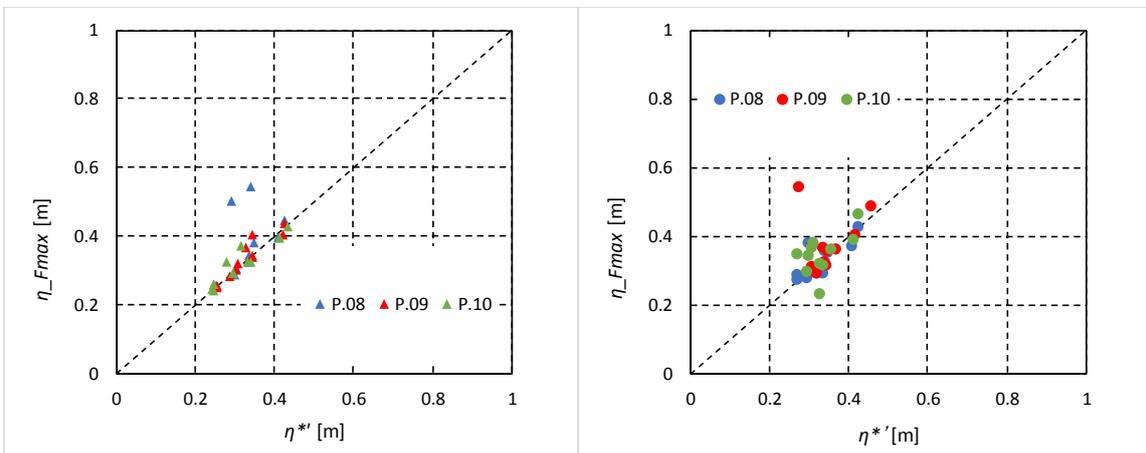
図によれば, 単純勾配では水深 η^* , η^{*} と η_{Fmax} の一致度が高く, 直立護岸では比較的一致度が低くなる. 直立護岸の方が, 陸域に浸水する場合のフルード数が大きくなる傾向にあるため, 堤体による打ち上げの影響が大きく, セカンドピークが卓越するために, 圧力分布が静水圧分布からはずれる傾向にあると考えられる. この現象は, 越流と非越流で同様となっている.



(a)単純勾配

(b)直立護岸

図 II.4-17 最大波力と堤体前面せり上がり高の関係（越流）



(a)単純勾配

(b)直立護岸

図 II.4-18 最大波力と堤体前面せり上がり高の関係（非越流）

4.7. フルード数と水深係数の関係

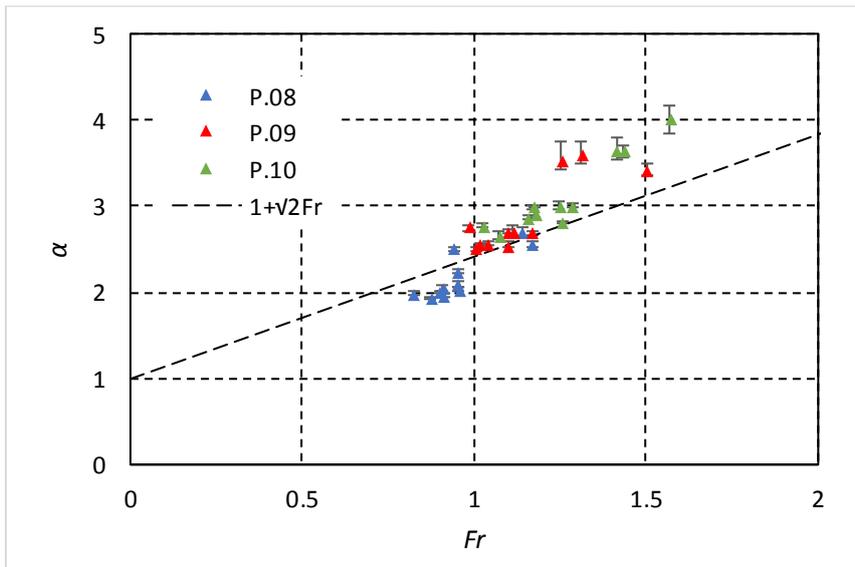
図 II.4-19～図 II.4-21 に、フルード数と水深係数の関係を、通過波の代表時刻について最大浸水深基準、95%最大浸水深基準、最大比エネルギー基準としたものについてそれぞれ示す。図中の点は15回の繰り返し試験の平均を示しており、縦線はそのうちの最大値と最小値を示す。また図中には比較として、水深係数の評価式の例として $\alpha=1+\sqrt{2Fr}$ の直線を示した。

特に P.10 においてフルード数が大きい場合に、水深係数が大きい傾向にあり、ばらつきも大きい。P.10 では陸上を遡上する流速が大きくフルード数が大きくなり、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って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傾向にあるため、上述の特徴が表れていると考えられる。

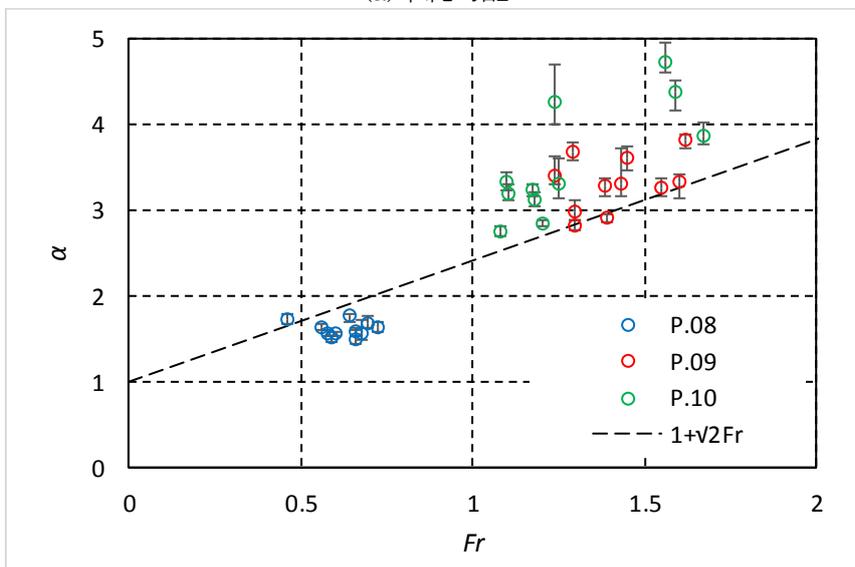
最大浸水深基準と95%最大浸水深基準を比較すると、単純勾配においては95%最大浸水深基準とすることによって、フルード数と水深係数の関係が評価式の直線上に一致するようになる。これは、図 II.4-16 に示した、95%最大浸水深の発生時刻と最大波力の発生時刻が一致することに整合する。一方直立護岸では、95%最大浸水深の方が評価式に近づくものの、ばらつきは大きい。

比エネルギー最大基準については、エネルギー保存式から導かれた評価式 $\alpha=1/2Fr^2+1$ を図中に示した。単純勾配の結果はフルード数が大きい場合にばらつきが大きいものの、解析結果はエネルギー保存式から導かれた評価式と良い一致を示す。直立護岸の方が一致どが高いのは、図 II.4-16 に示した最大比エネルギーの発生時刻と最大波力の発生時刻が近いことに整合する。

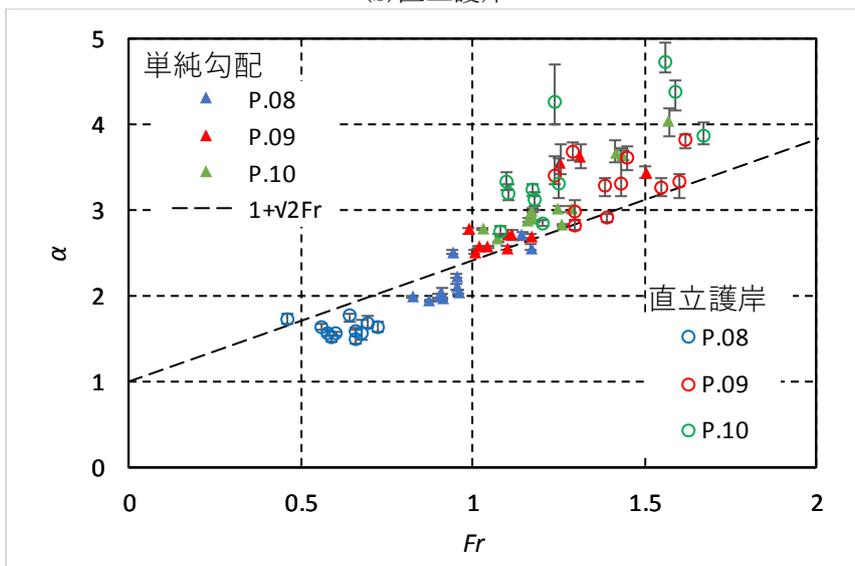
最大浸水深基準、95%最大浸水深基準の場合には、P.08 での水深係数がほぼ一定値を示している。前述したように、堤体が護岸の延長となるため陸上遡上の影響がなくなり、津波高に応じた波力を生じるため、フルード数に関係なく水深係数がほぼ一定となっていることが分かる。一方、比エネルギー最大を基準にした場合は、フルード数による水深係数の変化が明瞭に現れている。汀線前面でのせり上がり高に対し、波の持つ比エネルギーが支配的であると考えられ、また通過波においては、汀線を通過する流れもこれと同じ比エネルギーを持つことから、最大比エネルギーと水深係数の関連性が強く表れるものと考えられる。



(a)単純勾配

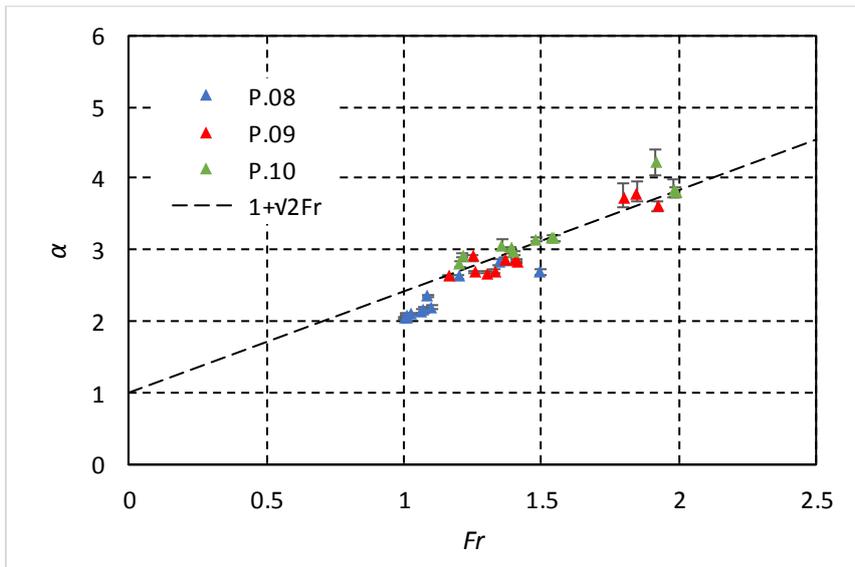


(b)直立護岸

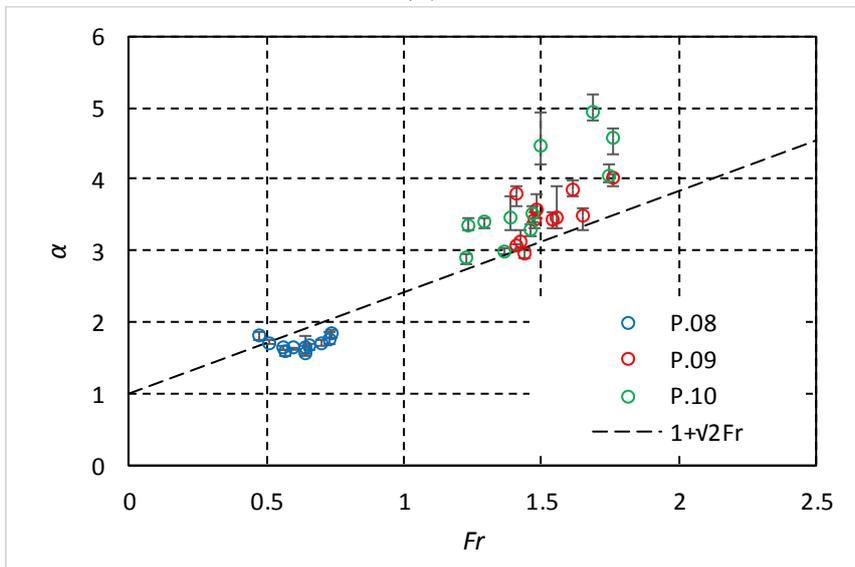


(c)全ケース

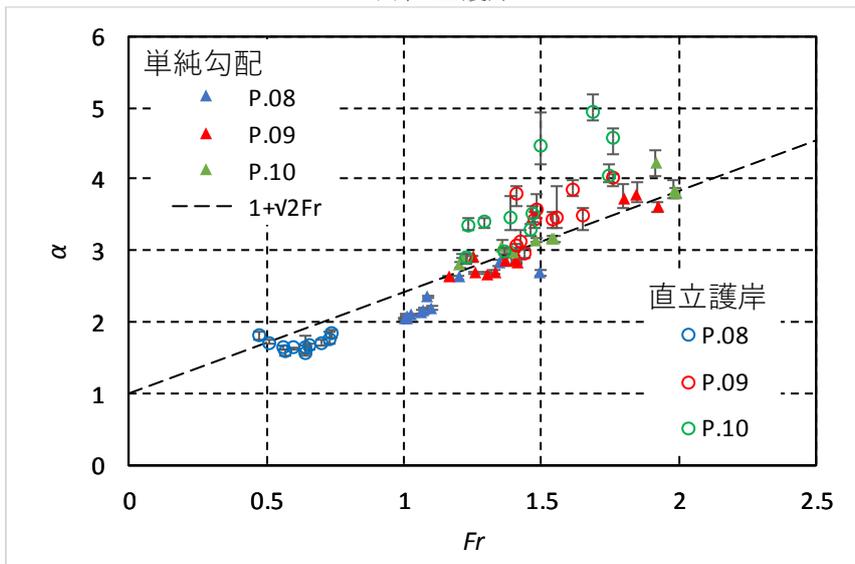
図 II.4-19 フルード数と水深係数の関係 (浸水深最大)



(a)単純勾配

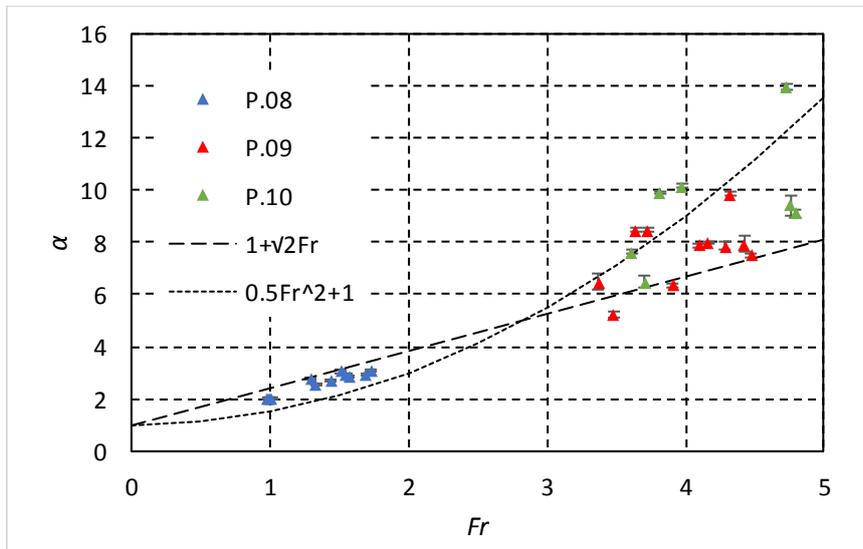


(b)直立護岸

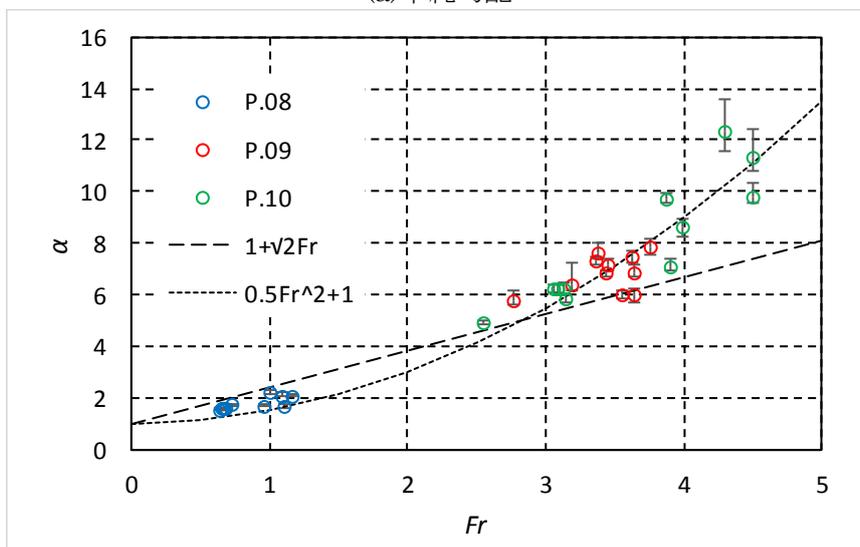


(c)全ケース

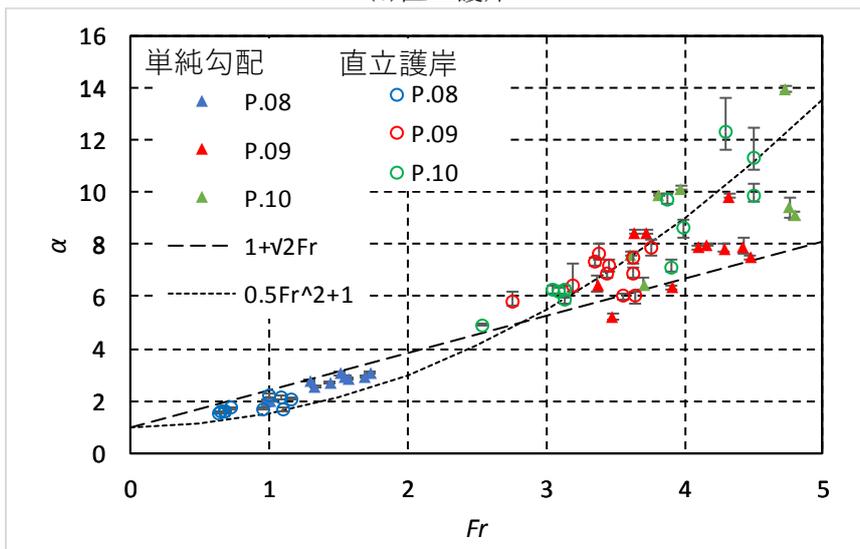
図 II.4-20 フルード数と水深係数の関係 (浸水深最大の 95%)



(a)単純勾配



(b)直立護岸



(c)全ケース

図 II.4-21 フルード数と水深係数の関係 (非エネルギー最大)

4.8. 越流による波力の変化

図 II.4-22 に、越流による波力の低減効果を比較する。堤体が十分に高い場合に堤体に働く波力 F と、越流時に堤体に働く波力 F' を比較すると、波力が大きいほど低減効果は大きくなっている。ここでは各周波数特性を持つ入射波に対して堤体高を一定としているため、波力が大きければ越流水深が大きいことになる。そのため、波力の増加とともに越流による波力の低減率も大きくなっている。非越流の場合の静水圧分布に対して堤体に作用する高さのみを積分して求めた波力 F^* と F' を比較した場合、上述の F - F' の関係よりは低減の程度が小さいが、やはり波力が大きくなると F' の方が波力が低減している。これは、堤体前面に働く波圧が非越流の場合よりも小さくなっていることを意味する。

図 II.4-23 に、波圧の低減の程度を示すパラメタとして、 F^* と F' を比較した低減率を、図 II.4-24 に、波力から求めた越流による堤体前面せり上がり高の低減率を示す。なお、 η^*/η'^* は水深係数の低減率 α^*/α'^* に一致する。横軸は、入射津波の規模を示す堤体が十分に高い場合の前面せり上がり高 η^* と堤体高さ h_d の比 η^*/h_d とした。単純勾配、直立護岸ともに波高が大きくなり η^*/h_d が大きくなると、相対波力 F^*/F' 、相対せり上がり高 η^*/η'^* ともに小さくなっていることが分かる。

図 II.4-25 は、越流時の波力を、堤体が十分に高い場合の前面せり上がり高 η^* と堤体高さ h_d で無次元化した、無次元波力の変化を示す。波高が大きくなると無次元波力は大きくなるが、 η^*/h_d がある程度大きくなると、ある値以上には大きくなることが分かる。

図 II.4-23~図 II.4-25 には、以下に示す解析値を破線で示した。

非越流時と越流時で、堤体の沖側での運動量の流出入が等しいと仮定すると、

$$\frac{1}{2}\rho g\eta^{*2} = \frac{1}{2}\rho g\eta'^{*2} + \rho\frac{q^2}{\eta'^* - h_d} \quad (4.8.1)$$

の関係が成り立つ。また、堰状の堤体を越流する流量係数を C (一般的には、上流側断面の水位を対象とするが、ここでは、堤体前面における水位を対象とする) を用いて、

$$q = C(\eta'^* - h_d)^{3/2} \quad q^2 = C(\eta'^* - h_d)^3 \quad (4.8.2)$$

とする。これ式(4.8.1)に代入して整理すると、

$$\eta^{*2} = \eta'^{*2} + \frac{2C^2}{g}(\eta'^* - h_d)^2 \quad (4.8.3)$$

が得られる。これを無次元化することにより、次式が得られる。

$$1 = \left(\frac{\eta'^*}{\eta^*}\right)^2 + \frac{2C^2}{g}\left(\frac{\eta'^*}{\eta^*} - \frac{h_d}{\eta^*}\right)^2 \quad \frac{\eta'^*}{\eta^*} = \frac{\frac{2C^2}{g}\frac{h_d}{\eta^*} + \sqrt{\frac{2C^2}{g}\left\{1 - \left(\frac{h_d}{\eta^*}\right)^2\right\} + 1}}{1 + \frac{2C^2}{g}} \quad (4.8.4)$$

$$\frac{\eta'^*}{\eta^*} = \frac{\frac{2C^2}{g} + \sqrt{\frac{2C^2}{g}\left\{\left(\frac{\eta^*}{h_d}\right)^2 - 1\right\} + \left(\frac{\eta^*}{h_d}\right)^2}}{\left(1 + \frac{2C^2}{g}\right)\frac{\eta^*}{h_d}} \quad (4.8.5)$$

また、堤体に働く波力は

$$F' = \frac{1}{2}\rho g\eta'^{*2} - \frac{1}{2}\rho g(\eta'^* - h_d)^2 \quad (4.8.6)$$

$$F^* = \frac{1}{2} \rho g h_d (2\eta^* - h_d) \quad (4.8.7)$$

であるから、これを式(4.8.3)に代入して整理すると、

$$\left(1 + \frac{2C^2}{g}\right) \left(\frac{2\eta^*}{h_d} - 1\right)^2 \left(\frac{F'}{F^*}\right)^2 + 2 \left(1 - \frac{2C^2}{g}\right) \left(\frac{2\eta^*}{h_d} - 1\right) \frac{F'}{F^*} + 1 + \frac{2C^2}{g} - 4 \left(\frac{\eta^*}{h_d}\right)^2 = 0 \quad (4.8.8)$$

が得られる。また、式(4.8.6)より

$$\eta^{*'} = \frac{F'}{\rho g h_d} + \frac{h_d}{2} \quad (4.8.9)$$

であるため、これを式(4.8.3)に代入して整理すると、

$$\left(\frac{F'}{\rho g \eta^* h_d} + \frac{h_d}{2\eta^*}\right)^2 + \frac{2C^2}{g} \left(\frac{F'}{\rho g \eta^* h_d} - \frac{h_d}{2\eta^*}\right)^2 = 1 \quad (4.8.10)$$

が得られる。

ここで、堤体位置において、限界水深が発生していると仮定すると、 $C = \sqrt{g} = 3.13$ となるため、これを、式(4.8.5)、式(4.8.8)、式(4.8.10)に代入すると、それぞれ以下の式となる。

$$\frac{\eta^{*'}}{\eta^*} = \frac{2 + \sqrt{3 \left(\frac{\eta^*}{h_d}\right)^2 - 2}}{3 \frac{\eta^*}{h_d}} \quad (4.8.11)$$

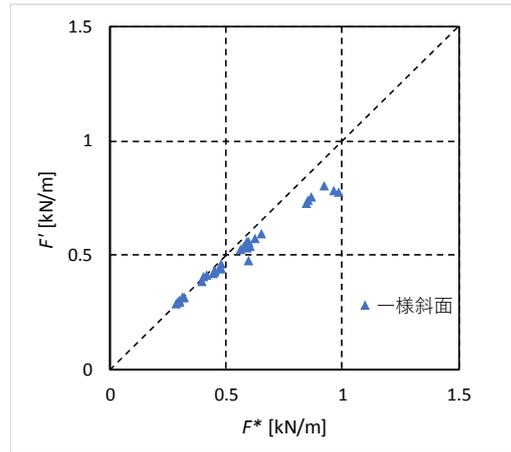
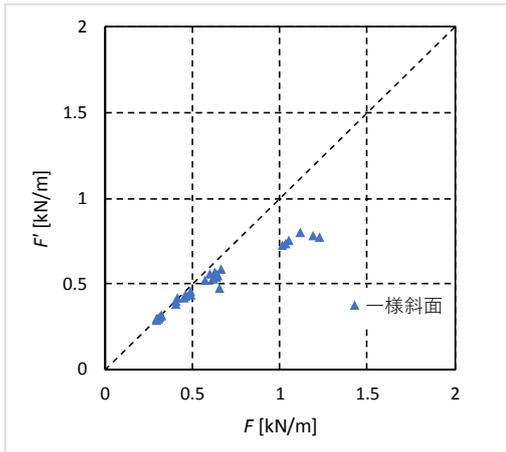
$$\frac{F'}{F^*} = \frac{1 \pm 2 \sqrt{3 \left(\frac{\eta^*}{h_d}\right)^2 - 2}}{3 \left(\frac{2\eta^*}{h_d} - 1\right)} \quad (4.8.12)$$

$$\frac{F'}{\rho g \eta^* h_d} = \frac{1 + \sqrt{12 \left(\frac{\eta^*}{h_d}\right)^2 - 8}}{6 \frac{\eta^*}{h_d}} \quad (4.8.13)$$

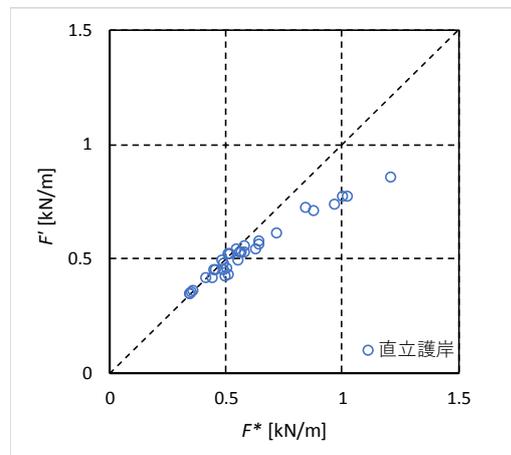
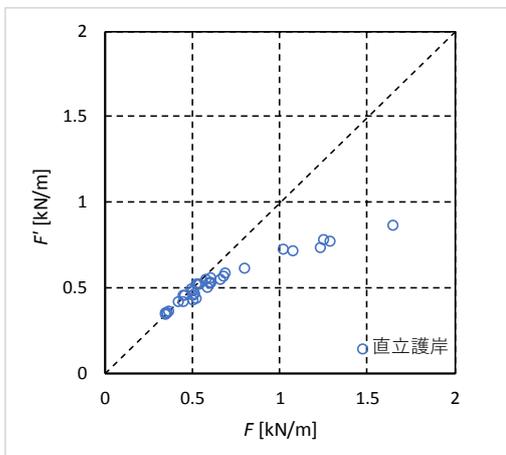
図 II.4-23~図 II.4-25 には、式(4.8.11)~式(4.8.13)の解析値を示した。なお、式(4.8.13)で $\eta^* h_d \rightarrow \infty$ とすると、

$$\frac{F'}{\rho g \eta^* h_d} = 0.58$$

となる。図より、解析結果は実験結果の上限値とよく整合していることが分かる。実験結果が解析値より小さくなるのは、主に上述の仮定のうち、越流によらず沖側の運動量が等しいという仮定によると考えられる。すなわち、本来は堤体での反射により沖側に戻る運動量は、越流により小さくなるが、この影響を考慮していないため沖に向かう運動量を大きく評価し、そのため波力を大きく評価していると考えられる。ただし、本解析値は安全側の値を与える。

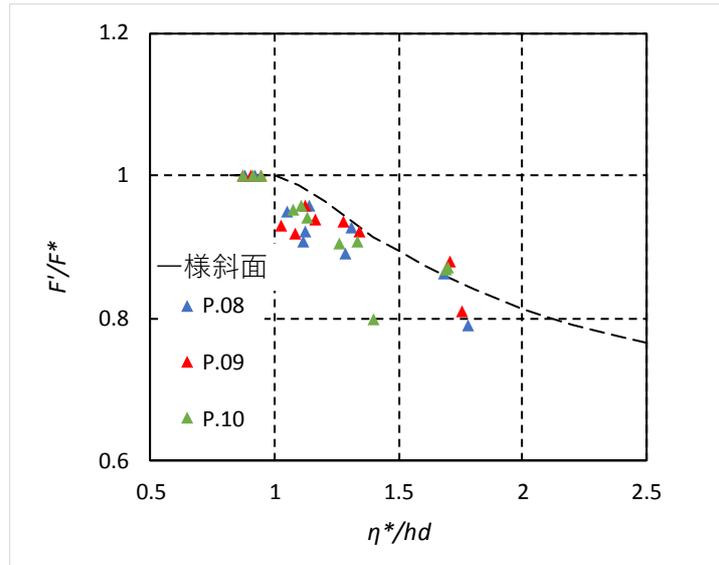


(a) 単純勾配

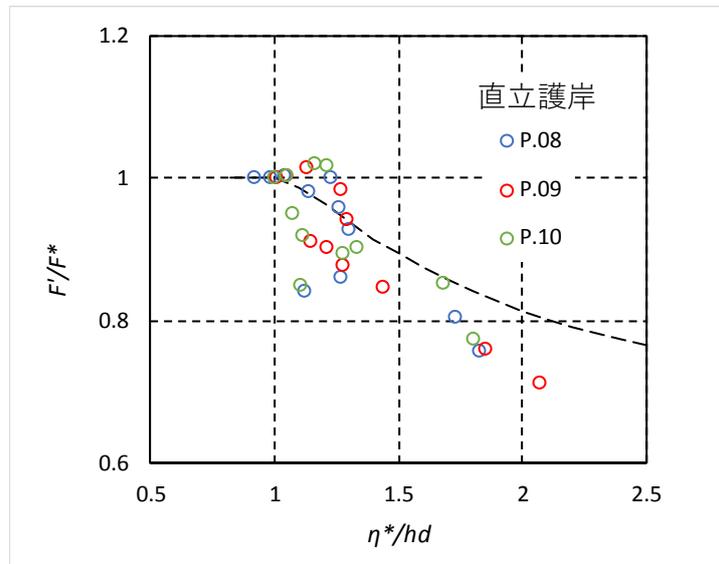


(b) 直立護岸

図 II.4-22 越流による波力変化 (F' : 越流時の最大波力, F^* : 非越流時の波力から求めた波力)

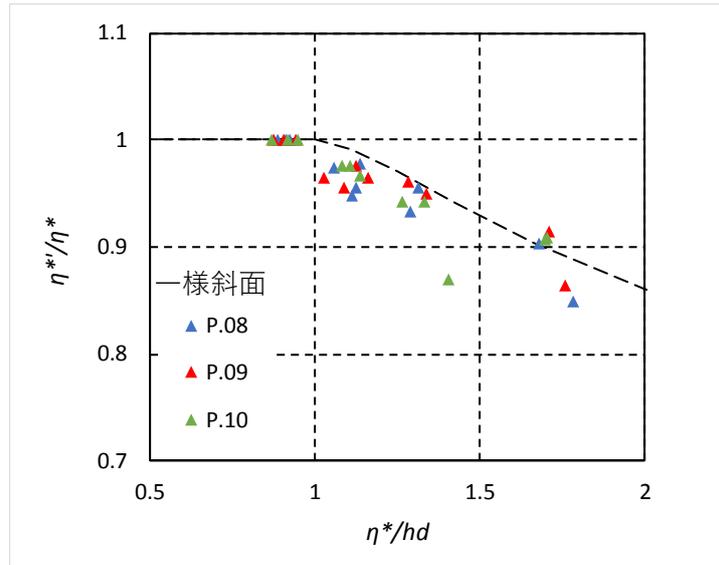


(a)単純勾配

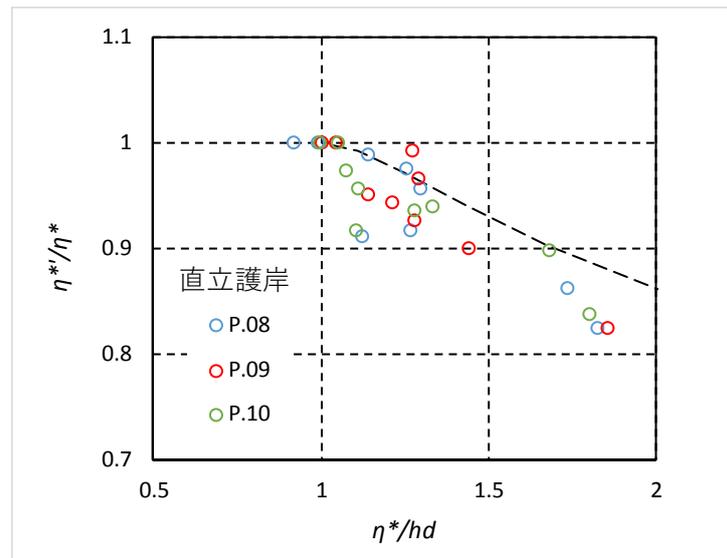


(b)直立護岸

図 II.4-23 波圧低減率

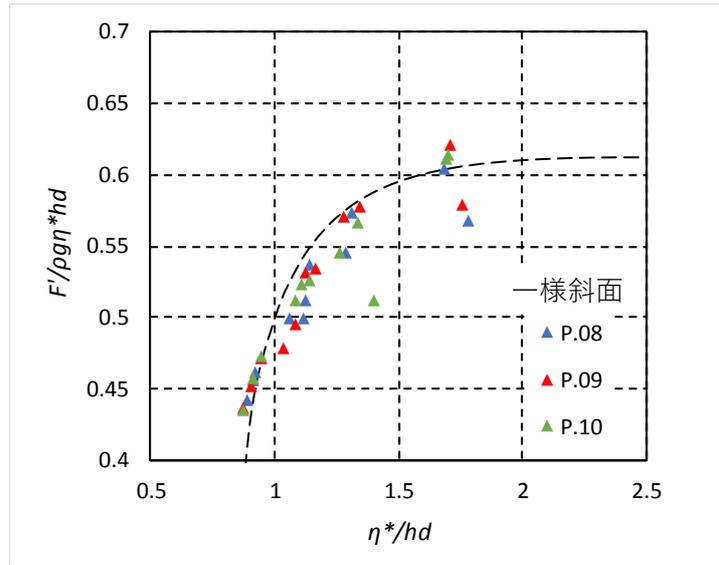


(a)単純勾配

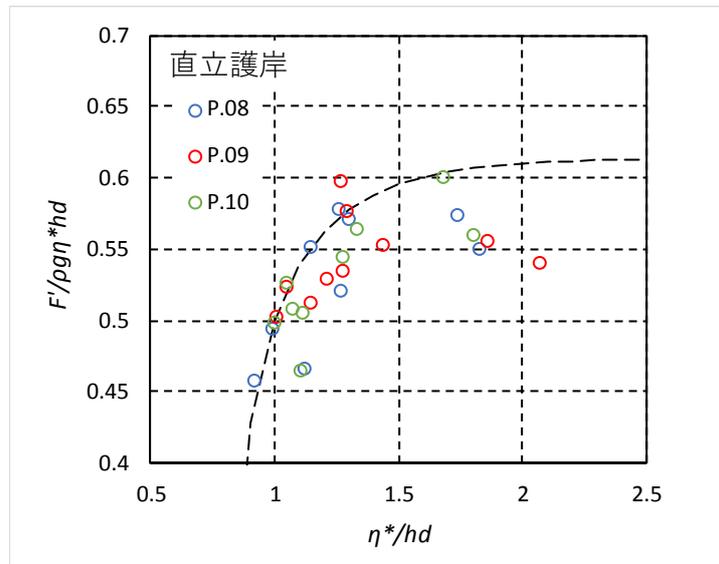


(b)直立護岸

図 II.4-24 堤体前面せり上がり高の低減率



(a)単純勾配



(b)直立護岸

図 II.4-25 越流水深と無次元波力の関係

4.9. 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

- ・最大浸水深発生時刻 (η_{\max})、最大浸水深の 95%浸水深発生時刻 ($0.95 \eta_{\max}$)、最大比エネルギー発生時刻 (E_{\max}) の 3 種類の代表時刻を対象に、通過波の特性について検討した。
- ・浸水深は、代表時刻の選び方によらず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、単純勾配の最大浸水深を基準とした場合には、汀線から離れるにしたがって大きくなるが、その他のケースでは汀線からの距離による変化は小さく、P.09 から P.10 に向かって、同程度もしくは小さくなっている。
- ・比エネルギー最大とした場合、特にフルード数の汀線からの距離による変動が大きくなる。
- ・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 以下となる。

(2)越流による津波波力の特性

- ・津波波力の時系列には、津波到達時の衝撃波力（ファーストピーク）、打ち上げられた水塊の落下時に働く波力（セカンドピーク）、その後続く準定常的な静水圧分布を持つ波力（サードピーク）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。
- ・越流することにより、主にセカンドピーク、サードピークが低減する。
- ・最大浸水深時を代表時刻とした場合、通過波の代表時刻は最大波力発生時刻よりも遅れ、95%最大浸水深とした場合、最大波力発生時刻よりも若干遅れる傾向にあるが、ほぼ最大波力発生時刻に一致する。比エネルギー最大時を代表時刻とした場合、最大波力発生時刻よりも概ね早くなり、特に単純勾配でその傾向が顕著である。
- ・単純勾配と直立護岸を比較すると、直立護岸の方がセカンドピークが卓越する傾向にある。
- ・最大浸水深、95%最大浸水深を代表時刻として算出したフルード数と水深係数の関係は、特にフルード数が大きいと評価式よりも大きくなる。ただし、95%最大浸水深を通過波の代表時刻とすることにより、最大浸水深を代表時刻とする場合よりも評価式に近い値となる。
- ・比エネルギー最大を代表時刻とした場合、フルード数と水深係数の関係は、エネルギー保存に基づいて導出された評価式に従う。
- ・越流により低減した波力は、提案した解析値を上限としこれよりも小さくなる。本解析値によって、越流する場合の波力を安全側に評価することが可能である。
- ・越流時の無次元波力は、波高の増大とともに大きくなるが、ある程度波高が大きくなると、上限値以上には大きくなりなくなる。

