

平成 30 年度原子力規制庁委託成果報告書

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（波圧影響、漂流物影響）
（平成 30 年度分）

大成建設株式会社

平成 31 年 3 月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

目 次

1. 概要	1-1
1.1. 事業概要	1-1
1.2. 既往の研究	1-2
2. 越流試験方法	2-1
2.1. 試験装置	2-1
2.1.1. 試験縮尺	2-1
2.1.2. 試験水槽と地形模型	2-2
2.1.3. 防潮堤模型	2-2
2.1.4. 計測項目及び計測方法	2-4
2.2. 試験ケース	2-6
2.2.1. 通過波検定試験	2-6
2.2.2. 越流試験	2-7
2.3. 試験手順	2-8
2.3.1. 波検定	2-8
2.3.2. 通過波検定試験	2-8
2.3.3. 越流試験	2-8
3. 通過波試験結果	3-1
3.1. 水位時系列	3-1
3.2. 遡上した通過波の浸水深と流速	3-8
3.3. 防潮堤位置における通過波のフルード数と比エネルギー	3-17
3.4. 各計測位置における最大浸水深	3-22
4. 越流試験結果	4-1
4.1. 陸上部の越流浸水深時系列	4-1
4.2. 越流最大浸水深	4-34
4.3. 最大浸水深比	4-36
5. 越流試験シミュレーション	5-1
5.1. シミュレーション手法と解析条件	5-1
5.2. 解析ケース	5-5
5.3. シミュレーション結果	5-7
5.3.1. 通過波検定試験	5-7
5.3.2. 越流試験	5-56
5.4. 越流最大浸水深	5-121
5.5. 最大浸水深比	5-126
6. 越流時における津波波圧評価手法の検討	6-1
6.1. 堤体位置の通過波	6-1
6.2. 越流時の越流最大浸水深	6-4
6.2.1. 越流浸水深最大時のフルード数	6-4
6.2.2. 越流最大浸水深	6-6
6.3. 越流時の波圧評価	6-9
6.3.1. 段波波圧と持続波圧	6-9
6.3.2. 越流時の持続波圧評価	6-10
7. 漂流物試験方法	7-1
7.1. 試験装置	7-1
7.1.1. 試験縮尺	7-1
7.1.2. 試験水槽と地形模型	7-1
7.1.3. 防潮堤模型	7-1
7.1.4. 漂流物模型	7-3

7.1.5. 計測項目及び計測方法	7-5
7.2. 試験ケース	7-6
7.2.1. 予備試験	7-6
7.2.2. 漂流物試験	7-7
7.3. 試験手順	7-8
8. 漂流物試験結果	8-1
8.1. 予備試験結果	8-1
8.2. 漂流物衝突試験	8-3
8.2.1. 水位・圧力の計測結果	8-3
8.2.2. ひずみの時系列計測結果	8-12
8.2.3. 漂流物衝突衝突時のひずみ鉛直分布	8-45
8.2.4. 最大ひずみ	8-113
8.2.5. 漂流物の接近速度	8-115
9. 漂流物試験再現シミュレーション	9-1
9.1. シミュレーション手法と解析条件	9-1
9.2. 解析ケース	9-4
9.3. 解析結果	9-5
9.3.1. 水位の時系列波形	9-5
9.3.2. 流速の時系列波形	9-14
9.3.3. 波圧の時系列波形	9-23
9.3.4. 圧力の鉛直分布	9-60
9.3.5. 漂流物の移動軌跡	9-75
9.3.6. 漂流物の衝突状況	9-80
10. 漂流物衝突力評価手法の検討	10-1
10.1. 衝突頻度の比較（予備試験結果）	10-1
10.2. 曲げひずみエネルギーによる衝突力の評価	10-4
10.3. 漂流物の接近速度と曲げひずみエネルギーの関係	10-13
10.4. 衝突高さ	10-16
10.5. 漂流物衝突力の評価	10-17
10.5.1. 等価なひずみの生じる静的衝突力による評価	10-17
10.5.2. 等価なひずみエネルギーの生じる静的衝突力による評価	10-19
10.5.3. 既往の評価式との比較	10-21
11. まとめ	11-1

1. 概要

1.1. 事業概要

本事業は、防潮堤に関する耐津波設計・フラジリティ評価手法の高度化を目的に、水理試験及びシミュレーション解析を実施し、津波波圧及び漂流物衝突力等に関するデータを取得するものである。また、類似事業で取得した結果と併せて、水理試験結果及びシミュレーション解析結果を整理・分析することで、越流時における津波波圧評価手法及び漂流物衝突力評価手法を検討するものである。

越流時における津波波圧評価手法については、水理試験、シミュレーション解析の結果及び類似事業で得られた知見を整理・分析することで検討した。水理試験では、防潮堤が無い条件（通過波条件）及び、防潮堤がある場合の水理試験（堤体設置条件）で計測された陸側浸水深からその差異が小さくなる時の入力津波波高を確認することで、津波波圧評価手法の検討に際し、防潮堤の津波波圧評価における上限波高について検討した。また、防潮堤の有無による陸側浸水深の差異を適切に評価可能な解析モデルを用いて、本事業で実施する水理試験を対象としたシミュレーション解析を実施し、適用範囲を確認した。加えて、水理試験及び類似事業で得られた知見等を基に、越流時における津波波圧評価手法について検討した。

漂流物衝突力評価手法については、水理試験の結果、類似事業及び過去の文献で得られた知見を整理・分析することで検討した。防潮堤に漂流物模型を衝突させる水理試験を実施し、防潮堤に生じる衝突力に関する試験データを取得した。また、防潮堤に生じる衝突力及び漂流物移動軌跡等を適切に評価可能な解析モデルを用いて、本事業で実施する水理試験を対象としたシミュレーション解析を実施し、その適用範囲を確認した。水理試験で計測されたデータ、類似事業及び過去の文献で得られた知見を基に、漂流物衝突力に関する複数の既往式について、各々の適用範囲を検討した。

1.2. 既往の研究

(1) 津波波圧の評価

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。

木原ら(2012)や高島ら(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が経時的に衝撃波圧、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。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。なお、陸上構造物全体に作用する津波波圧については、FEMA(2008)や飯塚・松富(2000)などにより、一様流れ中の物体の抗力計算と同様の方法が提案されている。

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圧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圧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) : $\alpha = 1 + \sqrt{2}Fr$

また、上述の津波波圧の評価は、主に津波先端部の衝突による衝撃的な波圧(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。

堤体を津波が越流する場合の津波波圧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。これに対し織田ら（2017）は、同じ入射津波に対して、堤体の高さが十分であり越流しない条件と、堤体高が不足し越流する条件でのそれぞれの波圧の比をモデル化し、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.
- 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.
- 織田幸伸・本田 隆英・小俣 哲平・大野 剛（2017）：津波越流時の防潮堤に働く津波波力特性に関する実験的研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.73, No.2, pp.I_1087-I_1092.
- 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・甲斐田秀樹（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.

(2) 漂流物の衝突力評価式

津波による漂流物の衝突力の評価式として、主なものは表-1.1の通りである。

これらのうち、多くの評価式は、流木を対象に提案されている式である。船舶を対象とした場合、船舶と流木では剛性が異なるため、衝撃力の算定のためには船舶の剛性を考慮する必要がある。上記評価式のうち船舶剛性を考慮出来る可能性があるものを表中に示した。ただし、いずれの式も船舶の衝突力を評価するには課題が残る。

また後述するように、式の導出のために実施されている水理実験は、いずれも陸上部に漂流物を設置して段波状の津波を作用させたものである。この場合、漂流物は水塊に押されて受圧板に衝突するが、浮遊している船舶が衝突する場合は、これとは状況が異なる。参考として示した池野ら(2004)の実験では、漂流物が段波先端部と同時に移動せずこれに遅れる場合は、有意な衝突力が生じないことが示されている。

船舶の衝突の場合、例えば防潮堤の破壊等を考える場合には先に船舶が圧壊すると考えられる。そのため流木を対象とした式を船舶に適用した場合、剛性が大きすぎるため過大評価になると考えられる。一方道路橋示方書の式では、弾性変形を仮定した場合、衝突時間1s(後述)は大きすぎるが、圧壊することを考慮すると、結果として妥当な値となる可能性も考えられる。ただしこれについては、適切な方法で衝突力を評価しないと判断できない。圧壊を考慮した評価式としては、表中の土木学会の式が挙げられるが、これは津波を対象としたものではなく、航行船舶の衝突を対象としているため、衝突速度が小さく静的な荷重による圧壊を対象としたものであり、津波衝突のような大きな速度での衝突時の衝撃的な衝突力を評価できない。

以上のように、既存の評価式では、いずれも船舶の衝突を精度良く評価するのは困難であり、剛性や波条件の観点から、過大評価となる傾向にあると考えられる。

表-1.1のうち道路橋示方書の式は、衝突時間を1sとした力積の式から求められるものであるが、その根拠は不明であり、式の妥当性を文献調査等で証明するのは難しい。また、一般に道路橋示方書の式は、他の評価式に比べて衝突力を小さく評価する。表-1.2は、大阪府の実施した「南海トラフ巨大地震土木構造物耐震対策検討部会」の第6回資料2に示されている、各式による衝突力の評価値の比較である。対象は主に流木であるが、道路橋示方書の式は他の式に比較して1~2オーダー小さい値となっている。これは、特に流木のような比較的剛性が大きく、また圧壊し難いものを対象とした場合、衝突時間1sの仮定が大きすぎるのが要因である。

表- 1.1 既往の衝突力評価式

評価式	根拠	対象	船舶剛性考慮	備考
松富らの式(1996) 松富の式(1999)	流木を対象とした段波水理実験	流木	×	木材の弾性係数と降伏応力の関係を内包する. 船舶への適用には課題がある
池野らの式(2003)	流木を対象とした水理実験	流木	×	材質のパラメタを含んでいない. 船舶への適用には課題がある
道路橋示方書(2012)	衝突時間 1s と仮定した力積の式	流木等	△	衝突時間 1s の根拠は不明
FEMA(2012)	非減衰振動方程式	流木, コンテナ	△	有効軸剛性や付加質量係数の設定が課題となる.
水谷ら(2005)	陸上部のコンテナを対象とした水理実験	コンテナ	△	衝突時間の設定が課題となる.
有川らの式(2007, 2010)	実験および弾性接触理論	流木, コンテナ	△	剛性や付加質量係数の設定が課題となる.
ガイドライン※1(2014)	被衝突側の塑性変形に基づくエネルギー消費式	限定なし	×	防潮堤のような高剛性(弾性変形)を対象に出来ない
土木学会の式※2(1994)	船舶の静的圧壊(衝突速度小)を仮定した式	船舶	×	衝突速度を考慮しない. 船舶の剛性で衝突力が決まる.

※1 津波漂流物対策施設設計ガイドライン

※2 構造物の衝撃挙動と設計法

表- 1.2 各衝突力評価式による評価値の比較例

試算対象：流木 L=11m, D=0.5m, 衝突速度 0.7m/s	
評価式	衝突力(kN/m)
松富の式	11.0
池野らの式	1.0
道路橋示方書	0.1
FEMA	7.9
有川らの式	13.0
津波漂流物対策施設設計ガイドライン	6.0

出展：大阪府 南海トラフ巨大地震土木構造物耐震対策検討部会 第6回資料2

参考文献

- 有川太郎・大坪大輔・中野史丈・下迫健一郎・石川信隆 (2007) : 遡上津波によるコンテナ漂流力に関する大規模実験, 海岸工学論文集, Vol.54, pp.840-850.
- 有川太郎・鷺崎誠 (2010) : 津波による漂流木のコンクリート壁面破壊に関する大規模実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.781-785.
- 池野正明・田中寛好 (2003) : 陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.721-725.
- 沿岸技術研究センター (2014) : 津波漂流物対策施設設計ガイドライン, pp.44.
- 土木学会 (1994) : 構造物の衝撃挙動と設計法, 構造工学シリーズ 6, p.296.
- 日本道路協会 (2012) : 道路橋示方書・同解説, I 共通編, pp.71-72.
- 松富英雄・池田弘樹 (1996) : 大規模実験に基づく流木衝突力の評価法, 海岸工学論文集, Vol.43, pp.781-785
- 松富英夫 (1999) : 流木衝突力の実用的な算定式と変化特性, 土木学会論文集, No.621, pp.111-127.
- 水谷法美・高木祐介・白石和睦・宮島正悟・富田孝史 (2005) : エプロン上のコンテナに作用する津波力と漂流衝突力に関する研究, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.741-745.
- FEMA (2012) : Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis, Second Edition, FEMA P-646.

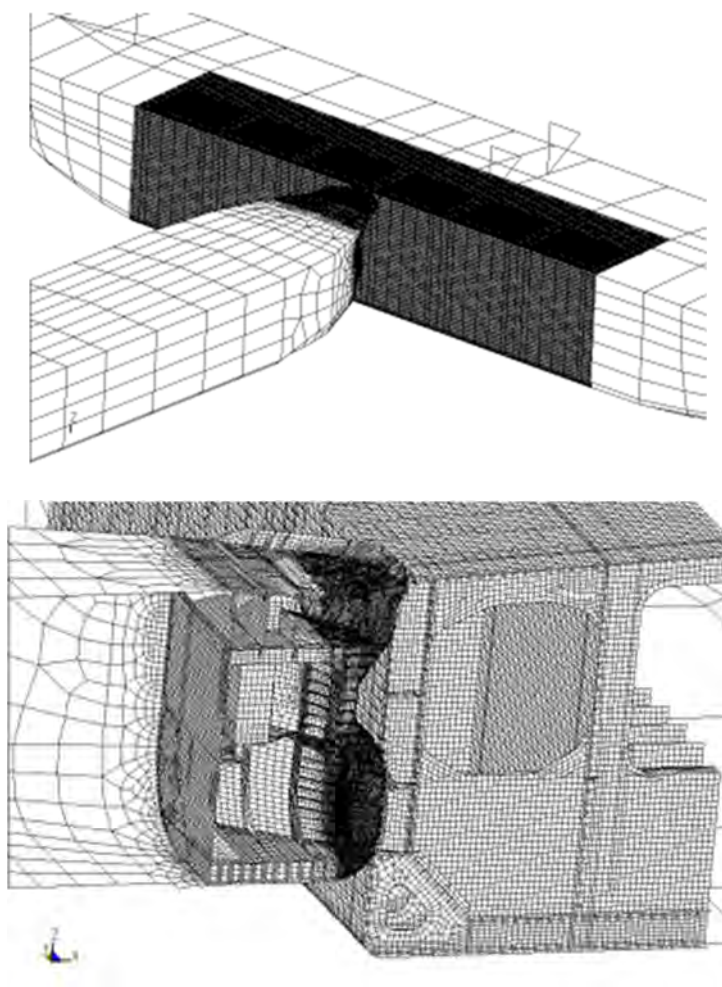
(3) 漂流物の衝突力の評価方法

津波により漂流物が漂流する時, その漂流形態は, ①段波先端部の移動に伴う場合, ②陸上遡上流れ先端部の移動に伴う流れ, ③それらの背後にある, すなわち定常的な流れに伴う場合の三つに大別される (松富, 1999). 船舶の漂流による防潮堤への衝突を対象とする場合, ②のケースは除外できると考えられる. また, 水理実験による既往の衝突力の式は①を対象としたものと考えられる.

③については, 浮体の漂流を考慮した平面 2 次元の津波シミュレーションにより, 防潮堤への接近速度を評価する方法が考えられる. ただし, 防潮堤前面では流速は防潮堤に沿う方向になり, 接近方向 (防潮堤直角方向) への流速はないため, 船舶移動の慣性力のみで接近することになり, 接近速度は小さく, 衝突力も比較的小さくなると考えられる.

数値解析については, VOF 法や粒子法等の, CFD 解析に漂流物を考慮した解析手法が近年提案されておりこの適用が考えられる. この際, 漂流物を剛体あるいは弾性体として解析する方法が現状では一般的であるため, 船舶の圧壊を考慮した場合に比較すると衝突力は大きくなる. 一方, 圧壊を考慮した解析手法も構造解析の分野では可能であるが, 流体を同時に考慮した信頼性の高い解析は現状では困難である. 1つの方法として, 漂流物を弾性体として考慮し, 衝突速度を算定した上で, 圧壊を考慮した構造解析を実施する手法が考えられる. 数値解析による構造解析は, 船舶の構造を正しく入力することが出来れば, 信頼性の高い弾塑性解析が可能である. 図-1.1 に, 船舶の衝突解析 (FEM 構造解析プログラム LS-DYNA による) 事例を示す. なお, 圧壊を考慮した構造物と流体の連成解析も近年では実施例があるが, 流体の動き (例えば津波波形) の任意性が低く, 津波の流況をどのように解析に反映するかが課題となる.

水理実験で衝突力を評価する場合、船舶模型の剛性や座屈荷重を実験模型で正確に再現することが必要となる。しかし、実際の漂流物や被衝突構造物の剛性を模型に反映するのは困難であり、これを再現するには大きな模型となるため大縮尺の実験となり、大規模な水理実験施設が必要となる。また圧壊を考慮するためには、実験模型はケース毎に破壊することになるため、複数の模型を製作する必要もあり、衝突力評価の水理実験の実施は現実的でない。また、ある程度安全側の値となるような簡易模型を用いた実験は可能かもしれないが、安全側の計測結果となるため、衝突力を過大に評価することになる。



出展：“衝突・座礁のCAE”，日本造船学会 TECHNO MARINE 第876号(2003)

図- 1.1 圧壊を考慮した構造解析事例

2. 越流試験方法

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陸上部での流速を $v=5.0$ m/s 程度，陸上部での浸水深を $\eta=4$ m 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

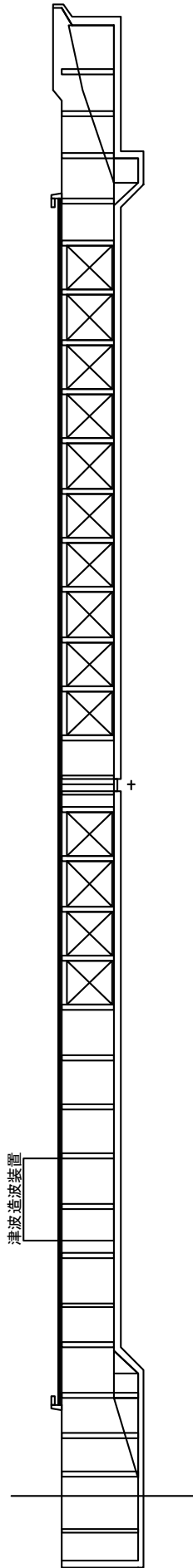
水理試験は、幅 80cm、長さ 47m、片面ガラス張りの二次元長水槽を用いて実施した（図- 2.1(a)参照）。水槽の端部には、津波造波装置が設置されており、これにより津波を造波した。

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 40cm 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である。

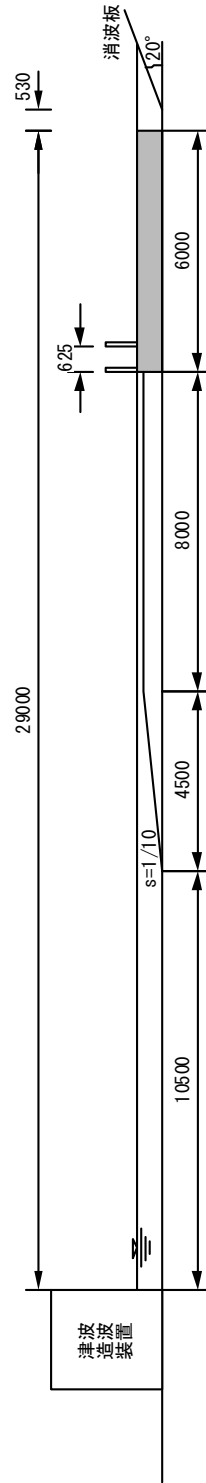
海底地形として、図- 2.1(b)に示す直立護岸タイプを対象に試験を実施した。造波装置前面の水深は 60cm とし、護岸前面水深 15cm、長さ 8m の水平海底地形を 1/10 勾配の地形で水槽底面に擦り付けた。陸上地形は長さ 6m の水平地形とし、汀線において水面と同一の高さとした。地形模型の表面は、塩ビ製とした。

2.1.3. 防潮堤模型

陸上部には、防潮堤模型を設置した。模型の設置位置は汀線位置と汀線から 0.625m の 2 種類（図- 2.1(b)参照）とした。堤体模型は厚さ 10 mm の塩ビ製とし、高さは、0.25m、0.125m の 2 種類とした。



(a) 試験水槽



(b) 直立護岸地形模型

図-2.1 試験水槽と試験模型

2.1.4. 計測項目及び計測方法

計測項目は、水位、流速および越流状況の動画撮影とした。各計測項目の計測位置を、図- 2.2 に示す。各計測値のサンプリング間隔は、1ms とし、全てのデータを同期して計測した。

(1) 水位

水位は、入射波の計測として、計測点 A, B, C の 3 点において、また、陸上部の浸水深計測として、汀線より 0.625 m おきの 5 点（計測点 0~4, 汀線より 0 m~2.5 m）において、容量式水位計により計測した。陸上部では、安定した計測結果が得られるよう、干出した状態からの計測とならないように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。計測点は、通過波検定試験を含め、すべてのケースで共通とした。

(2) 流速

流速の計測点は水位の計測点と共通とした。計測手法として、電磁流速計、プロペラ流速計、底面電磁流速計の 3 種類のいずれかを計測点により配置して計測した。計測点 A, B, C では常に流速計が水没するため、電磁流速計を用いた。計測点 A は水深が大きいため、上層下層の 2 点（1/3 初期水深）で計測し、計測点 B, C では水深が小さいため初期水深の中間高さに設置した。陸上部（計測点 0~4）では、底面電磁流速計とプロペラ流速計を併用した。プロペラ流速計の設置高さは、堤体模型設置時の計測点 0 または 1 では堤体模型の天端とし、それ以外では、なるべく浸水深が小さい範囲でも流速を計測するため、地形模型と干渉しない範囲で底面近傍とした。設置高さは、堤体天端または底面よりプロペラ中心までの高さで 15mm とした。また、底面電磁流速計による計測は、堤体設置位置を除く計測点 1~4 とした。

(3) 動画

堤体を越流する津波の状況は、ハイスピードカメラにより撮影した。撮影スピードは、1000fps とし、水位や流速と比較できるように、計測結果と同期するようにした。また、通常のビデオカメラにより、全体の越流状況を撮影した。

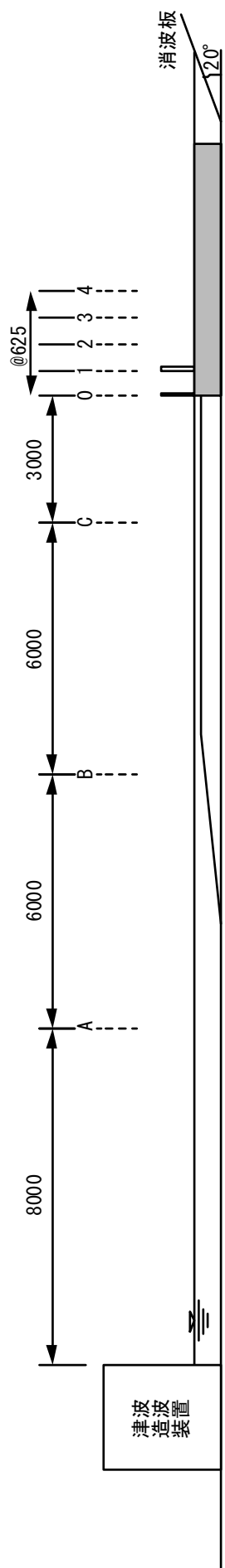


図-2.2 各計測項目の計測位置

2.2. 試験ケース

2.2.1. 通過波検定試験

通過波検定試験の試験ケースを、表- 2.1 に示す。対象波形は 8 種類とし、後述する波検定により造波波形を決定した。波形については、3 章に示す。なお、計測結果の確認のため、同じ試験を 3 回繰り返した。波形については後述する。

表- 2.1 通過波検定試験の試験ケース

No	ケース名	波形	堤体高	堤体位置	繰り返し
1	F-Wd10-0-0	Wd10	0m	0m	3
2	F-Wd11-0-0	Wd11			
3	F-Wd20-0-0	Wd20			
4	F-Wd21-0-0	Wd21			
5	F-Wd30-0-0	Wd30			
6	F-Wd31-0-0	Wd31			
7	F-Wd40-0-0	Wd40			
8	F-Wd41-0-0	Wd41			

試験数：24

2.2.2. 越流試験

越流試験における試験ケースを、表- 2.2 に示す。波形を 8 種類、堤体高 2 種類、堤体位置 2 種類の、合計 32 ケースを実施した。なお、試験毎のばらつきを確認するため、同じ試験を 3 回繰り返した。

表- 2.2 波圧/波力試験の試験ケース

No	ケース名	波形	堤体高	堤体位置	繰り返し
1	F-Wd10-A-0	Wd10	0.25m	0m	3
2	F-Wd11-A-0	Wd11			
3	F-Wd20-A-0	Wd20			
4	F-Wd21-A-0	Wd21			
5	F-Wd30-A-0	Wd30			
6	F-Wd31-A-0	Wd31			
7	F-Wd40-A-0	Wd40			
8	F-Wd41-A-0	Wd41			
9	F-Wd10-B-0	Wd10	0.125m	0m	
10	F-Wd11-B-0	Wd11			
11	F-Wd20-B-0	Wd20			
12	F-Wd21-B-0	Wd21			
13	F-Wd30-B-0	Wd30			
14	F-Wd31-B-0	Wd31			
15	F-Wd40-B-0	Wd40			
16	F-Wd41-B-0	Wd41			
17	F-Wd10-A-1	Wd10	0.25m	0.625m	
18	F-Wd11-A-1	Wd11			
19	F-Wd20-A-1	Wd20			
20	F-Wd21-A-1	Wd21			
21	F-Wd30-A-1	Wd30			
22	F-Wd31-A-1	Wd31			
23	F-Wd40-A-1	Wd40			
24	F-Wd41-A-1	Wd41			
25	F-Wd10-B-1	Wd10	0.125m	0.625m	
26	F-Wd11-B-1	Wd11			
27	F-Wd20-B-1	Wd20			
28	F-Wd21-B-1	Wd21			
29	F-Wd30-B-1	Wd30			
30	F-Wd31-B-1	Wd31			
31	F-Wd40-B-1	Wd40			
32	F-Wd41-B-1	Wd41			

試験数：96

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である。波検定では、この複数の給気バルブの開放タイミングと、それぞれのバルブの開口面積を変更しながら、目的の波形状が造波出来るように試行錯誤的に繰り返し造波を行った。目的の波形状は、計測点 A における波形の計測結果が目的波形に一致するようにした。

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状態で、図-2.2 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 およ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、計測点 0~4 における最大通過波浸水深について整理した。

2.3.3. 越流試験

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を越流した背後の浸水深および流速を計測した。各計測項目の時系列計測結果を整理し、堤体の高さと同越流後の最大浸水深の関係を求めた。

3. 通過波試験結果

3.1. 水位時系列

図-3.1, 図-3.2 に, 試験に用いた津波の A 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. Wd10, Wd20, Wd30 は, 波高を 0.20m でほぼ同じとして周期特性を変えた波形であり, Wd11, Wd21, Wd31 は, それぞれ Wd10, Wd20, Wd30 と同じ立ち上がり波形でその後高い水位を持続する波形である. また Wd40, Wd41 は, Wd30, Wd31 に対し波高を 0.15m としたものである.

汀線より沖の各計測点における, 入射波の水位と流速の時系列計測結果を, 図-3.3 に示す. 試験はそれぞれ 3 回繰り返しているが, ここには平均値の結果を示した. なお, 3 回の繰り返し結果はほぼ同じとなることを確認している. すべての計測点において, 最高水位以降の継続水位の影響は, 波形の立ち上がりに影響しておらず, Wd10, Wd20, Wd30, Wd40 のケースと Wd11, Wd21, Wd31, Wd41 のケースで, それぞれ立ち上がり波形は同じであることが確認できる. また, 浅水変形により計測点 A から計測点 B にかけて波高が大きくなっているが, 計測点 C においては, ほぼ計測点 A の波高と同じ程度に小さくなっている. これは, 砕波後のエネルギー減少によるものと考えられる. なお, 計測点 C の計測結果に, 短周期の波が含まれているケースがある (特に, Wd40, Wd41) が, これは, 津波の進行とともに先端部分が非線形性および分散性により分裂したものである.

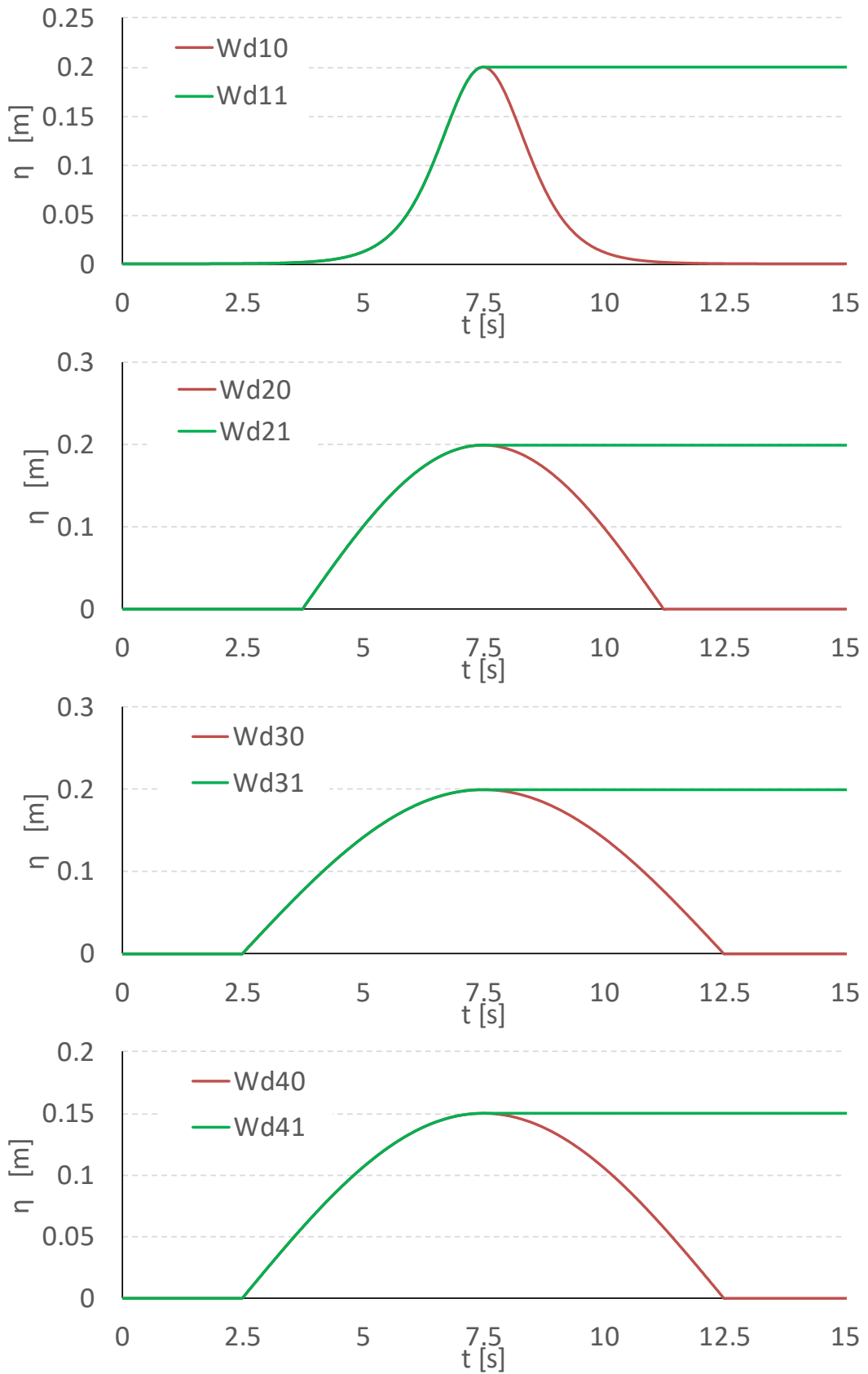


図- 3.1 入射津波の目標波形 (計測点 A)

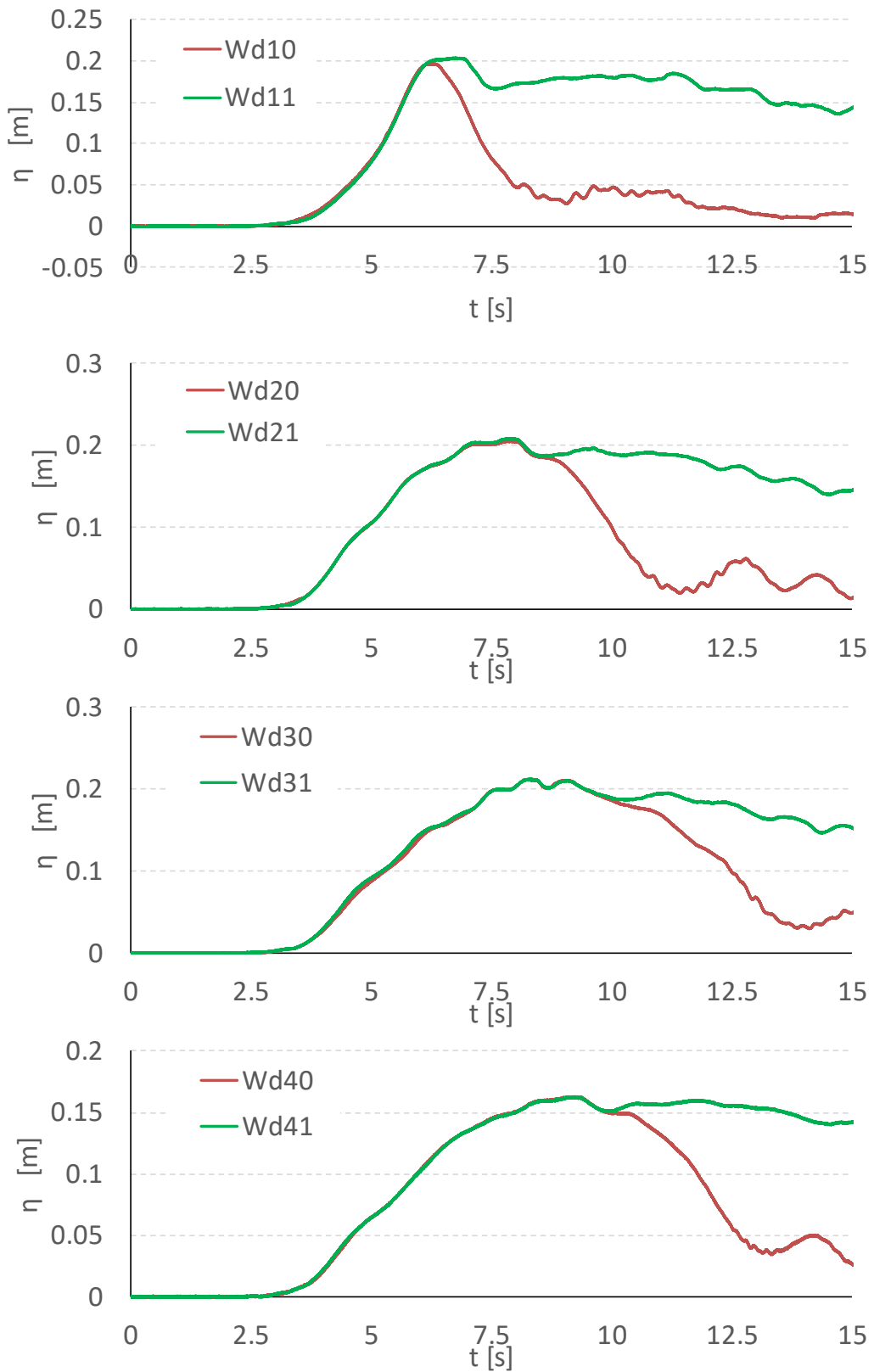
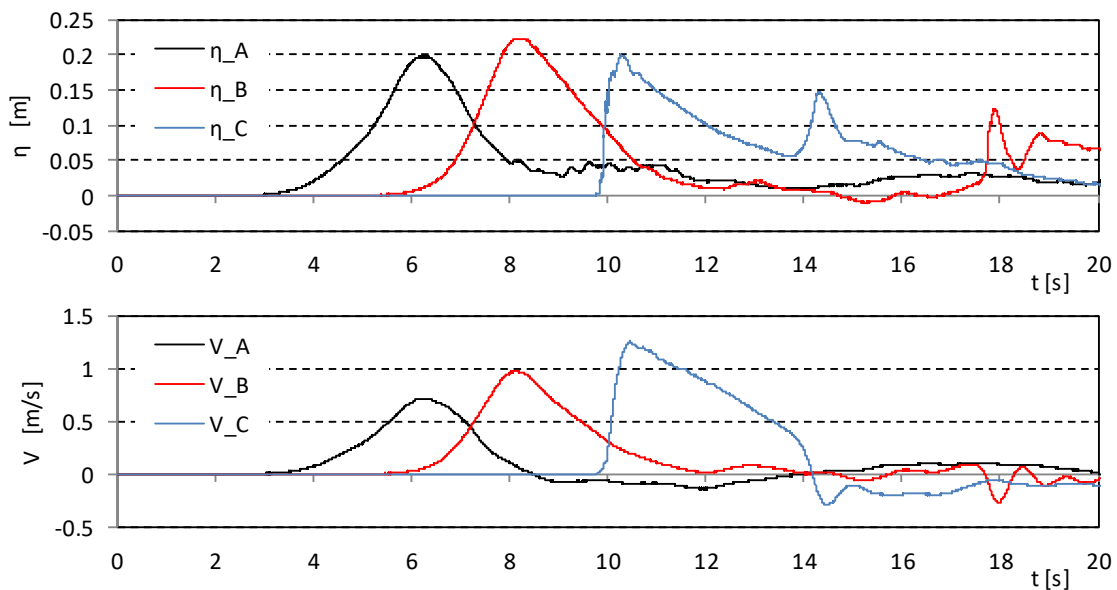


図- 3.2 入射津波の水位計測結果 (計測点 A)

Wd10



Wd11

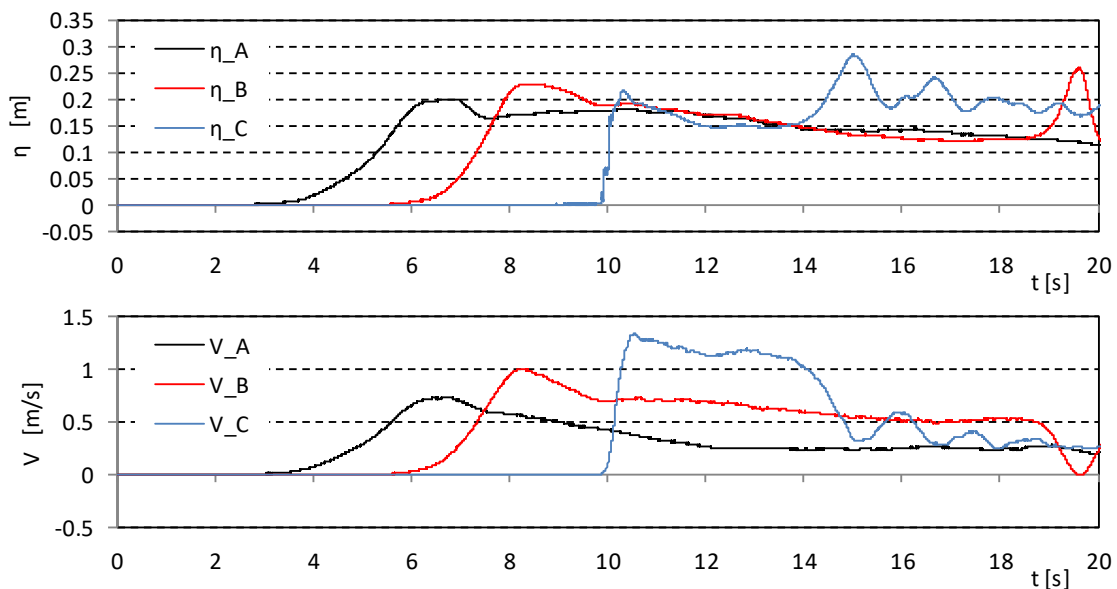
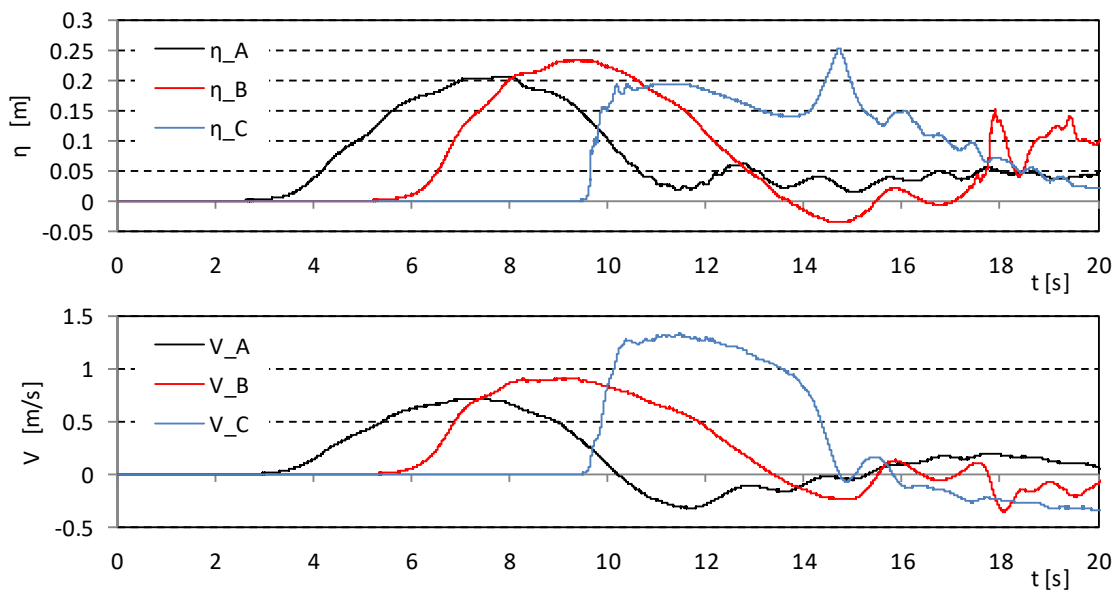


図-3.3 入射波の水位・流速時系列

Wd20



Wd21

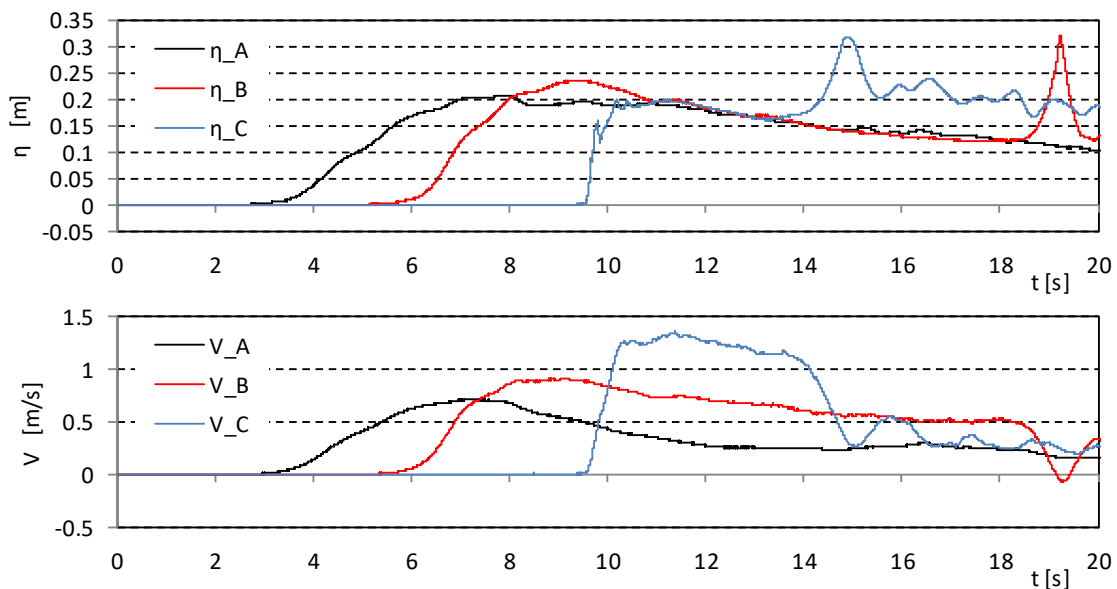
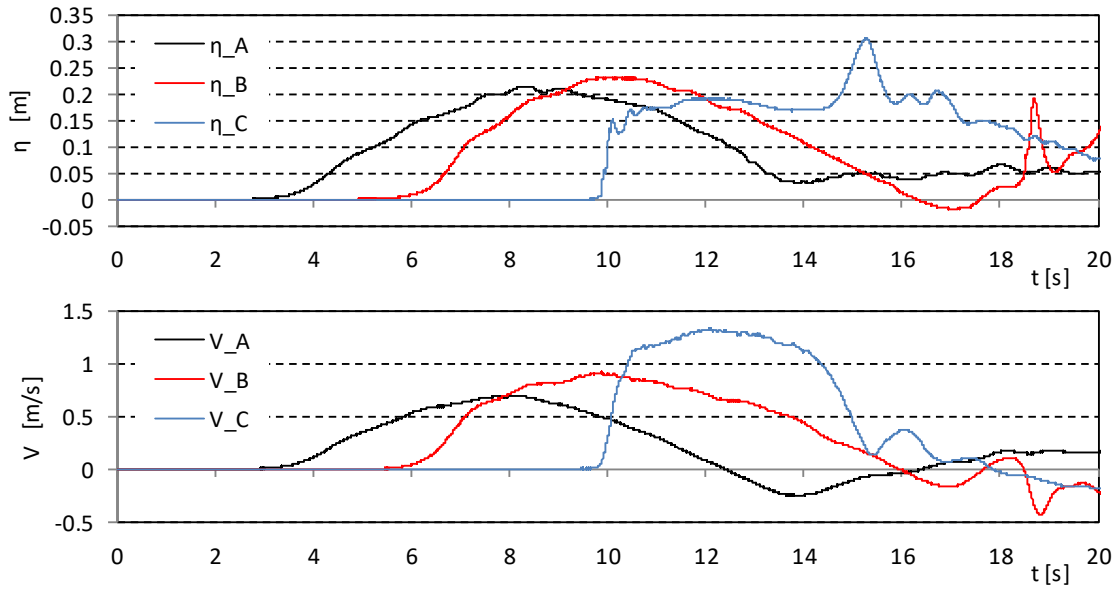


図-3.3 入射波の水位・流速時系列

Wd30



Wd31

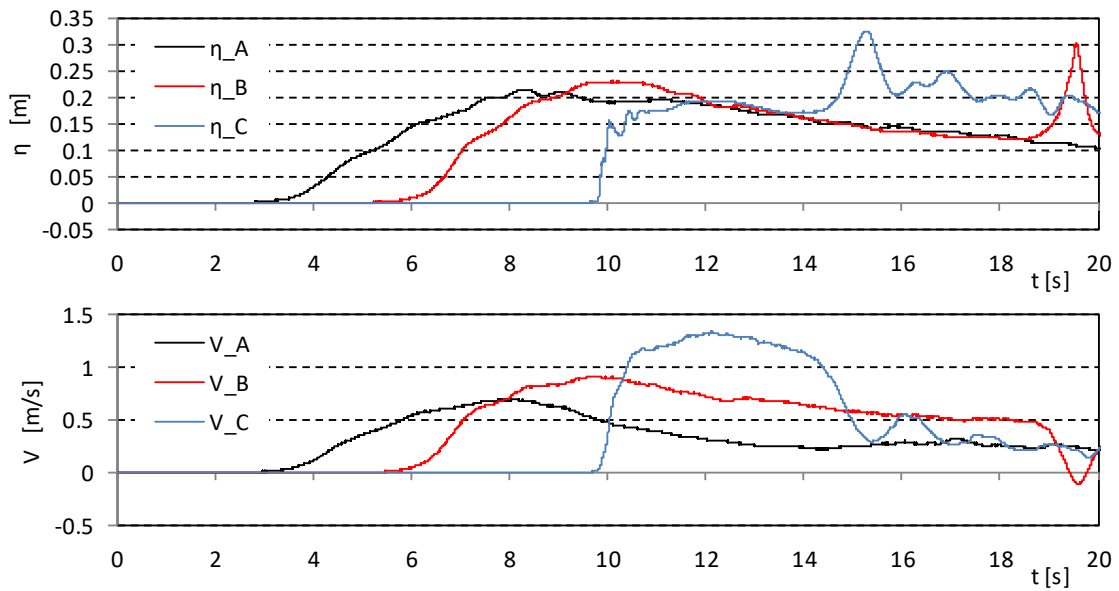
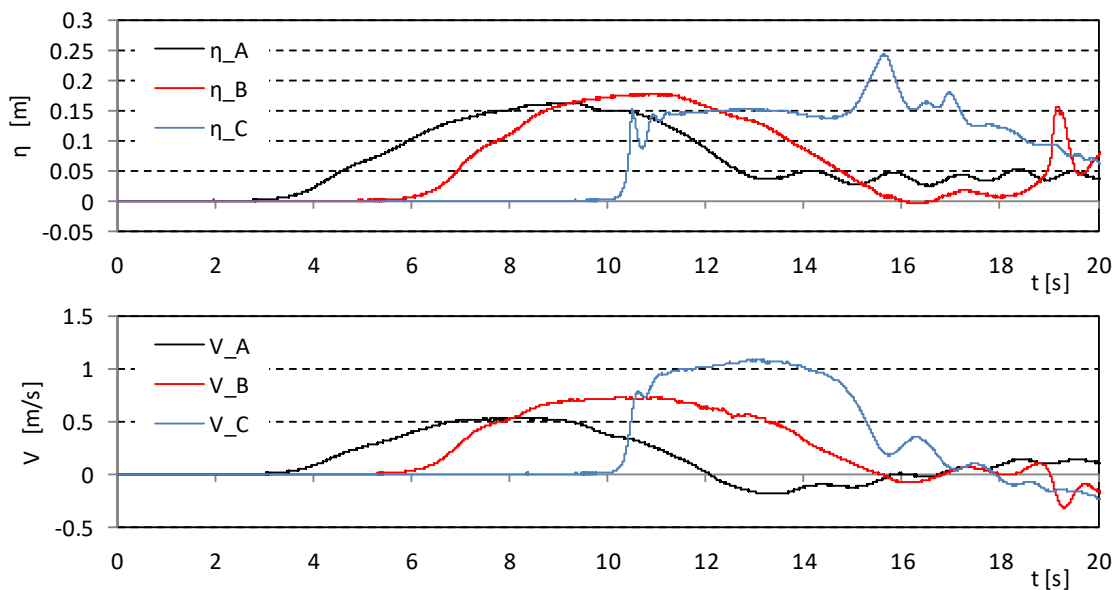


図-3.3 入射波の水位・流速時系列

Wd40



Wd41

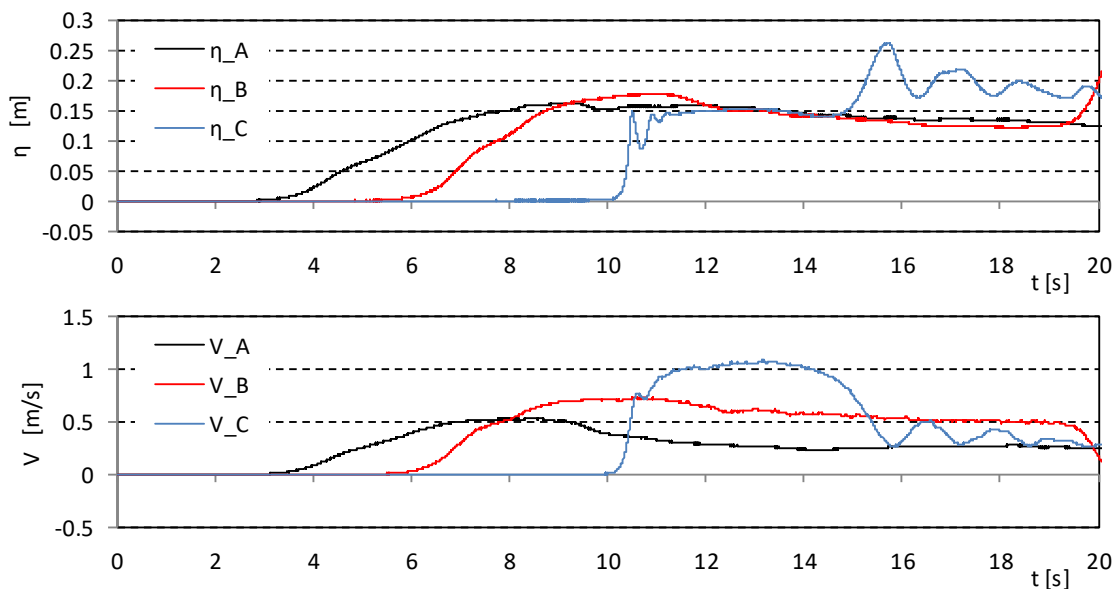


図-3.3 入射波の水位・流速時系列

3.2. 遡上した通過波の浸水深と流速

陸上物の浸水深，流速の時系列変化を，図- 3.4 に示す．陸上部（St.1～St.4）の流速については，プロペラ流速計，底面電磁流速計による計測結果をともに示した（添え字 B が底面電磁流速計を表す）．なお，St.0 では，地形模型の端部で底面電磁流速計を設置できないため，プロペラ流速計の計測のみとしている．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，流速の計測結果は概略一致しているが，プロペラ流速計の計測結果の方が若干小さい傾向にある．プロペラ流速計は一方向の流れの流速を計測するものであり，複雑な流況下では計測精度が低下するため，沖側に設置された他の波高計や流速計または碎波により生じる，渦や横断方向流速の影響を受けていると考えられる．また，波形の到達した直後は，プロペラが完全に水没していないため，プロペラ流速系の反応が遅れている．このため，以降の解析では基本的に底面流速計の値を採用する．

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，時間とともに単調に小さくなっている．後述するフルード数の変化からも分かるように，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，時間とともに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．

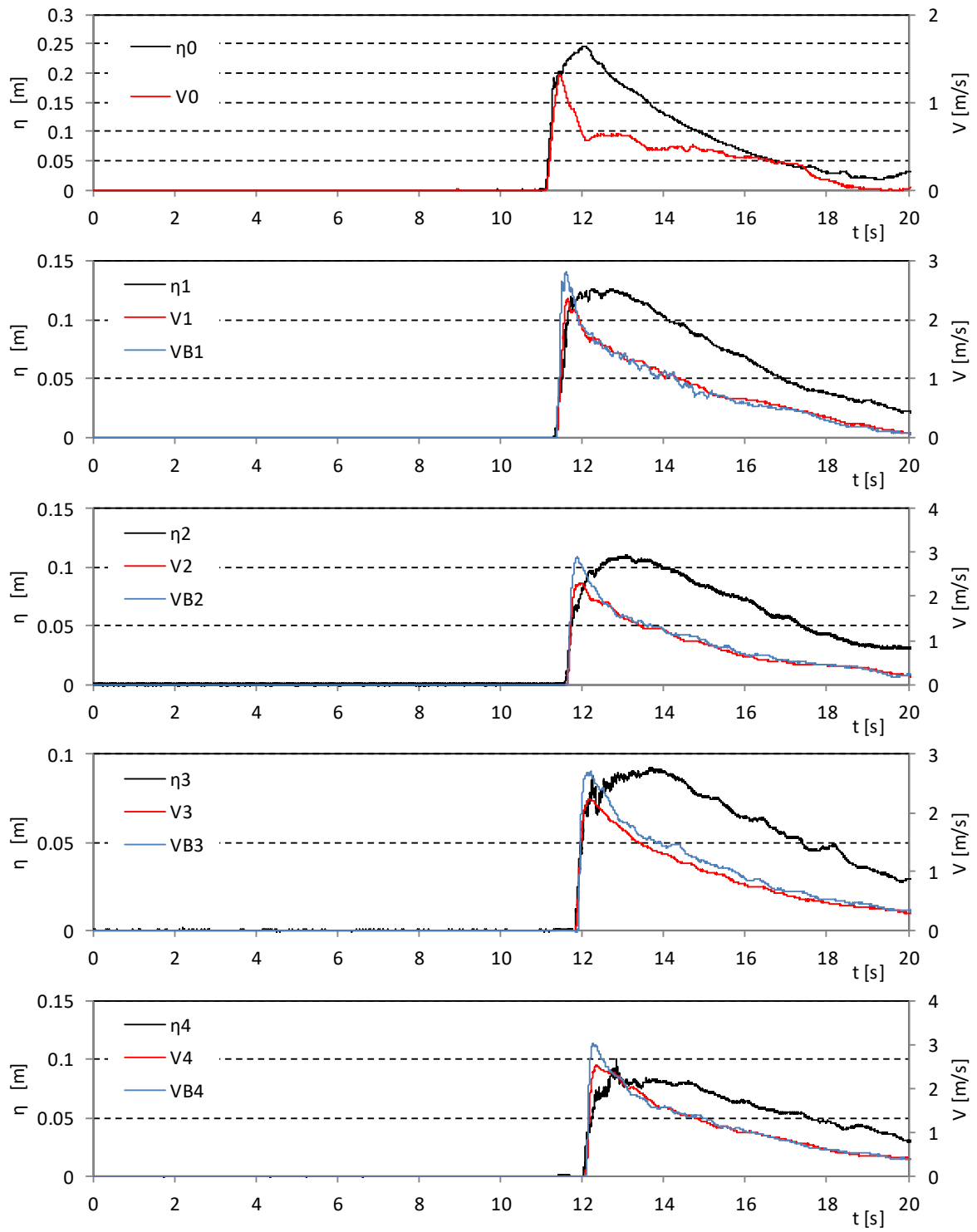


図- 3.4 陸上部の浸水深と流速の時系列 (Wd10)

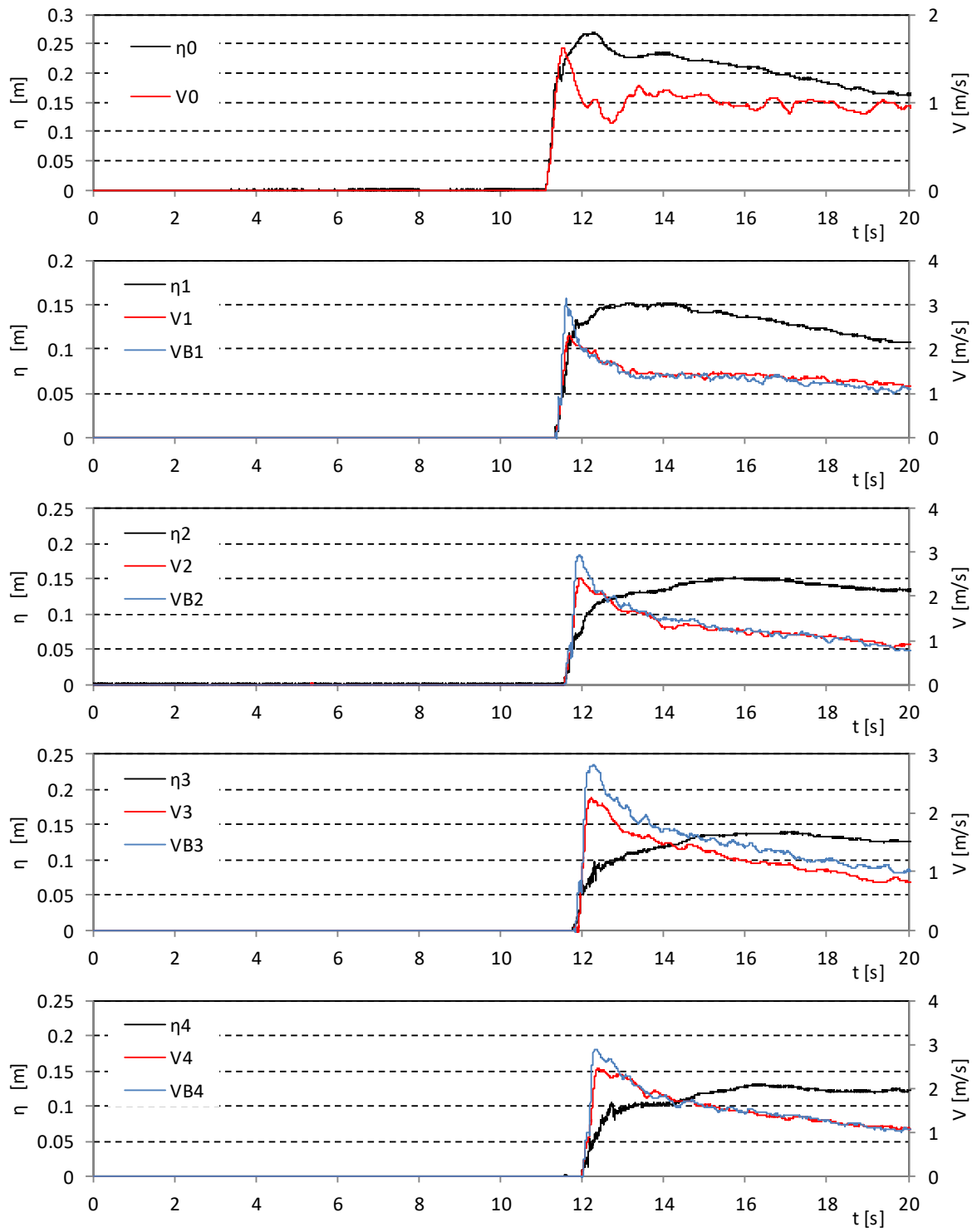


図- 3.4 陸上部の浸水深と流速の時系列 (Wd11)

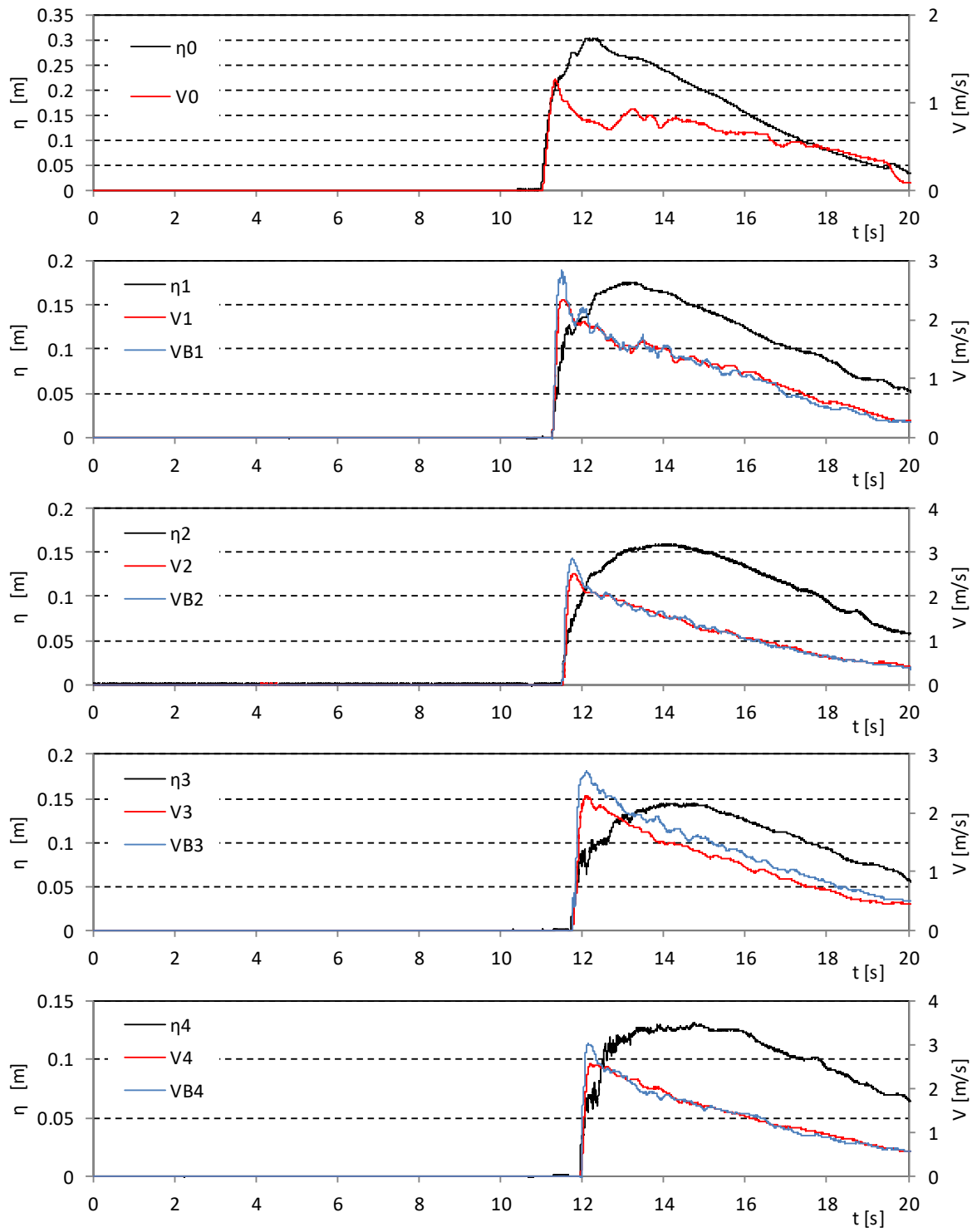


図- 3.4 陸上部の浸水深と流速の時系列 (Wd20)

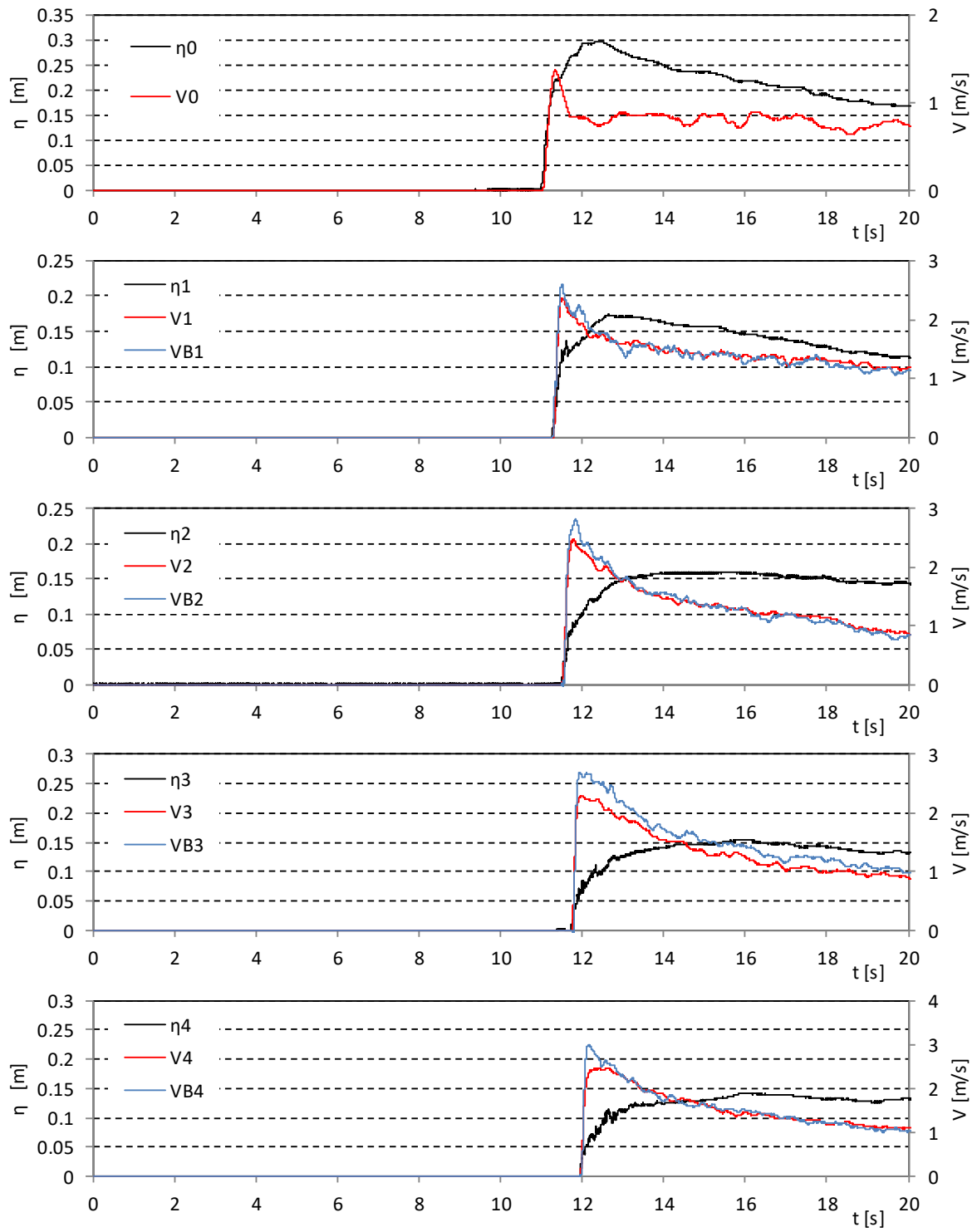


図- 3.4 陸上部の浸水深と流速の時系列 (Wd21)

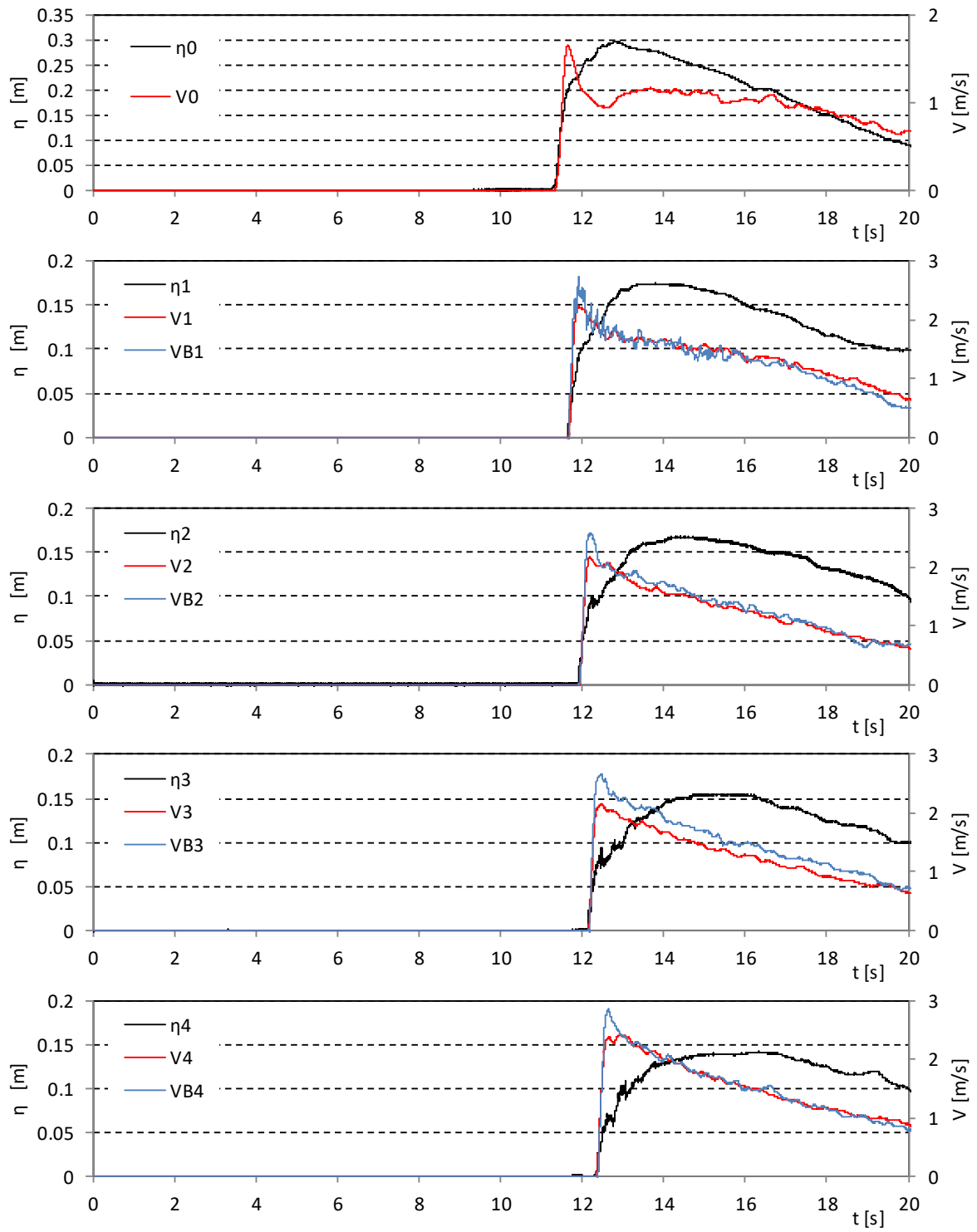


図- 3.4 陸上部の浸水深と流速の時系列 (Wd30)

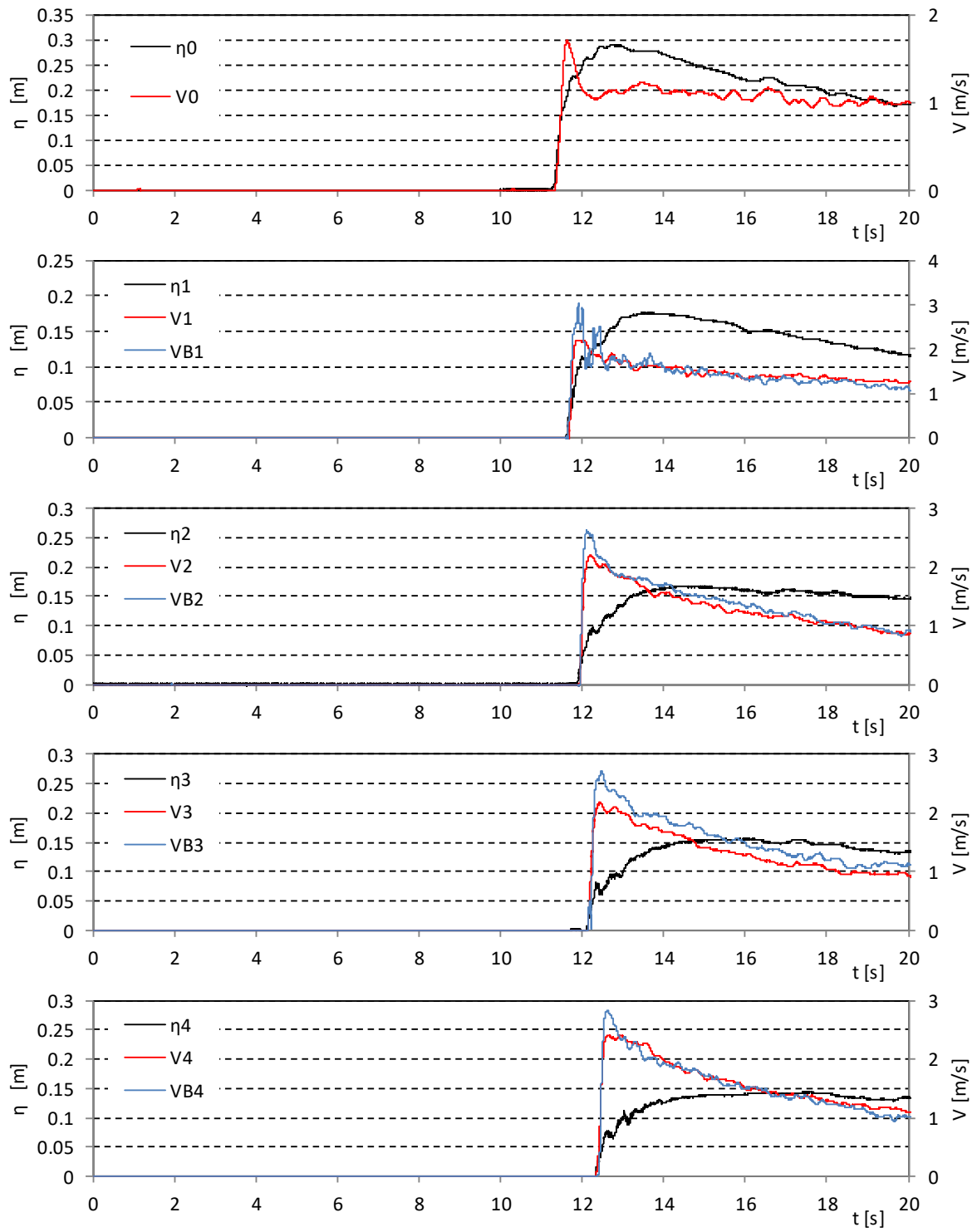


図- 3.4 陸上部の浸水深と流速の時系列 (Wd31)

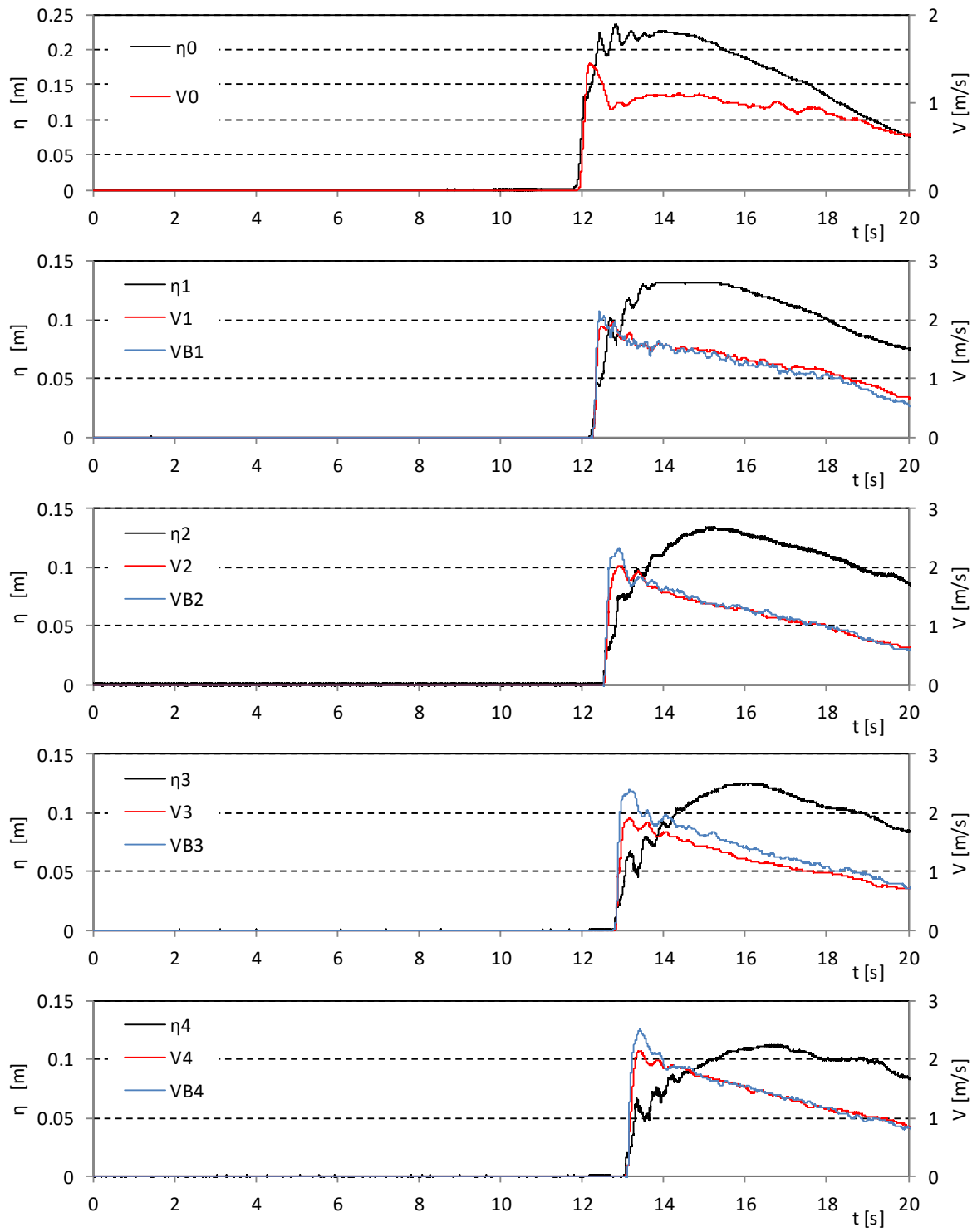


図- 3.4 陸上部の浸水深と流速の時系列 (Wd40)

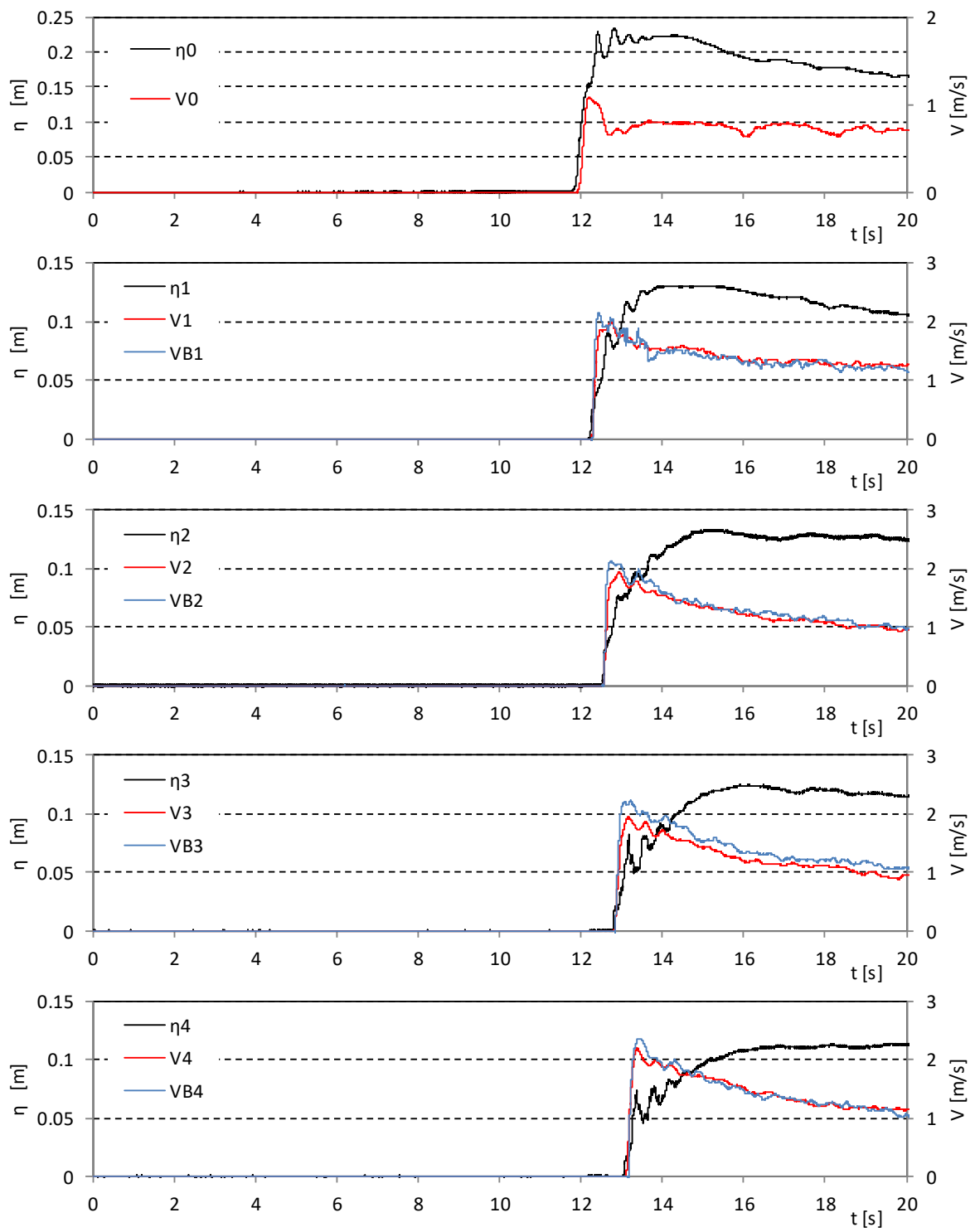


図- 3.4 陸上部の浸水深と流速の時系列 (Wd41)

3.3. 防潮堤位置における通過波のフルード数と比エネルギー

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，図- 3.5 に示す．ここで比エネルギー E 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．

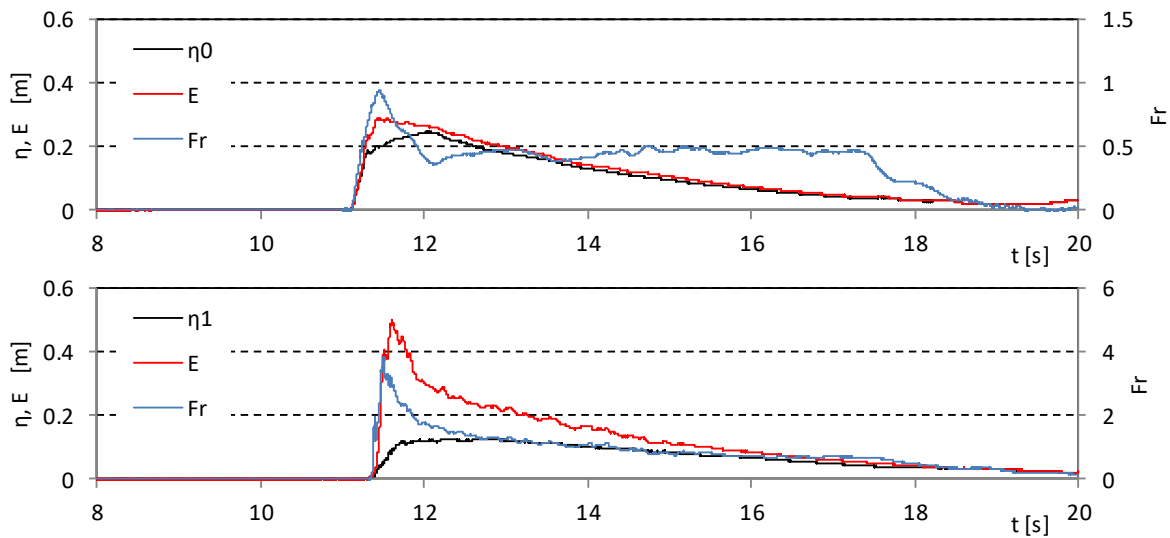
$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g\eta}}$$

ここで， η は通過波の浸水深， V は通過波の流速である．

図- 3.5 によると，護岸汀線位置 (η_0) では，フルード数は津波到達時に最大値を示し，その後ほぼ一定の値となっている．護岸の段上がり部にプロペラ流速計を設置しているため断面平均流速を計測できていないと考えられるが，汀線の少し陸側（下流側）に支配断面 ($Fr=1$) が形成されているため，津波到達時を除きフルード数がこれよりも少し小さい値で一定になっていると考えられる．一方，比エネルギーについては，津波到達時に極大値が生じるものの，その変化は浸水深と類似であり，比エネルギーに含まれる位置エネルギーが支配的であることが分かる．

St.1 (η_1) においても，フルード数は津波到達時に最大値を示し，高水位の継続する Wd11, Wd21, Wd31, Wd41 ではその後，ほぼ一定の値を示す．Wd10, Wd20, Wd30, Wd40 では徐々に低下するが，その低下の度合いは周期特性が長いほど小さく，上述の特性と整合する．比エネルギーについては津波到達時に最大値となるが，汀線位置とは異なり，浸水深に比較してその値が大きい．この時フルード数は 1 よりも大きく，位置エネルギーに対し運動エネルギーが相対的に大きくなっていることが分かる．

Wd10



Wd11

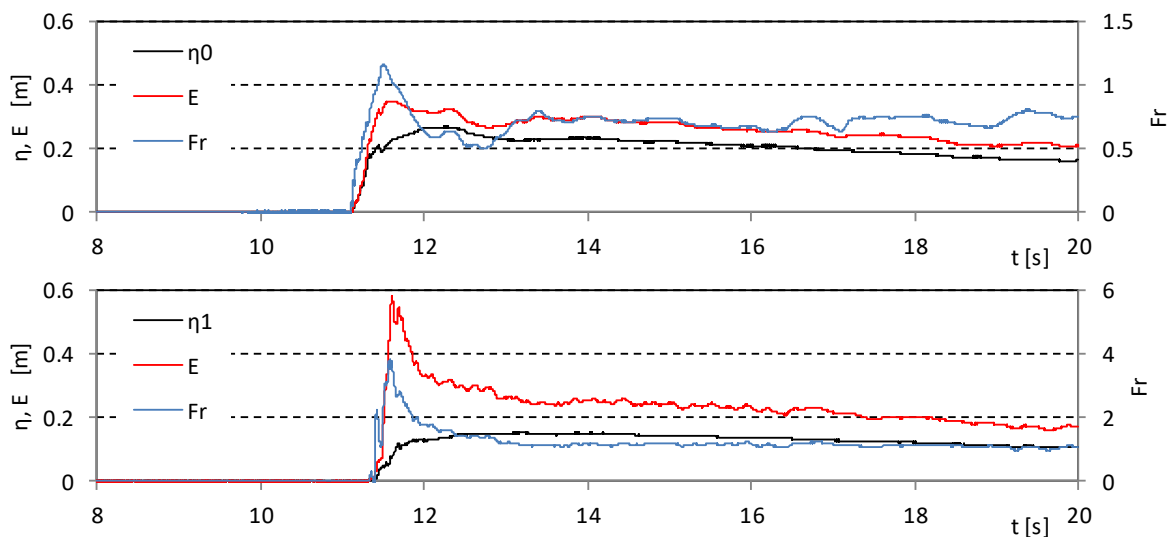
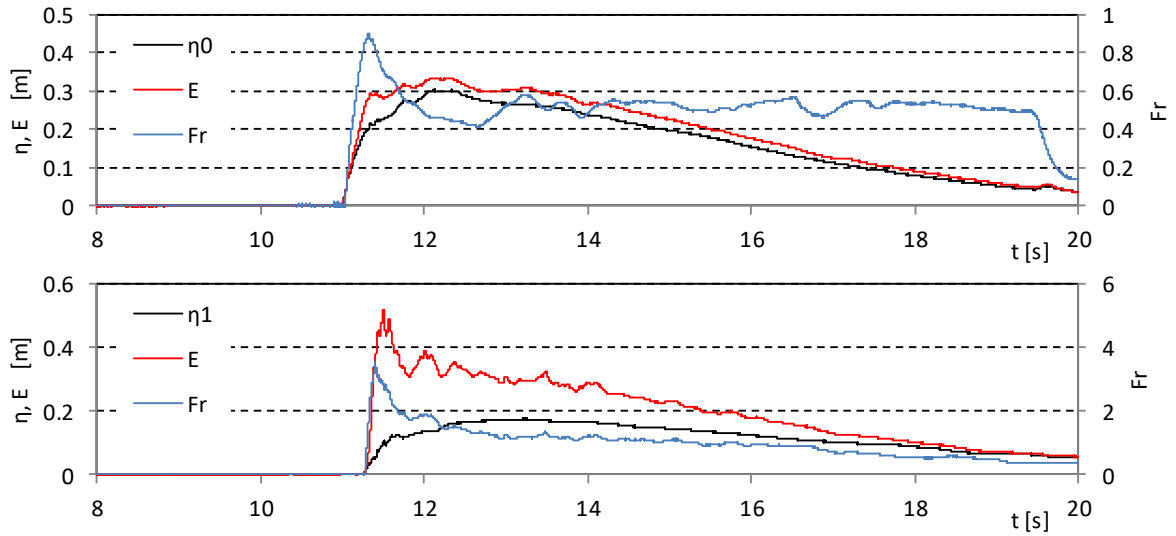


図- 3.5 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列

Wd20



Wd21

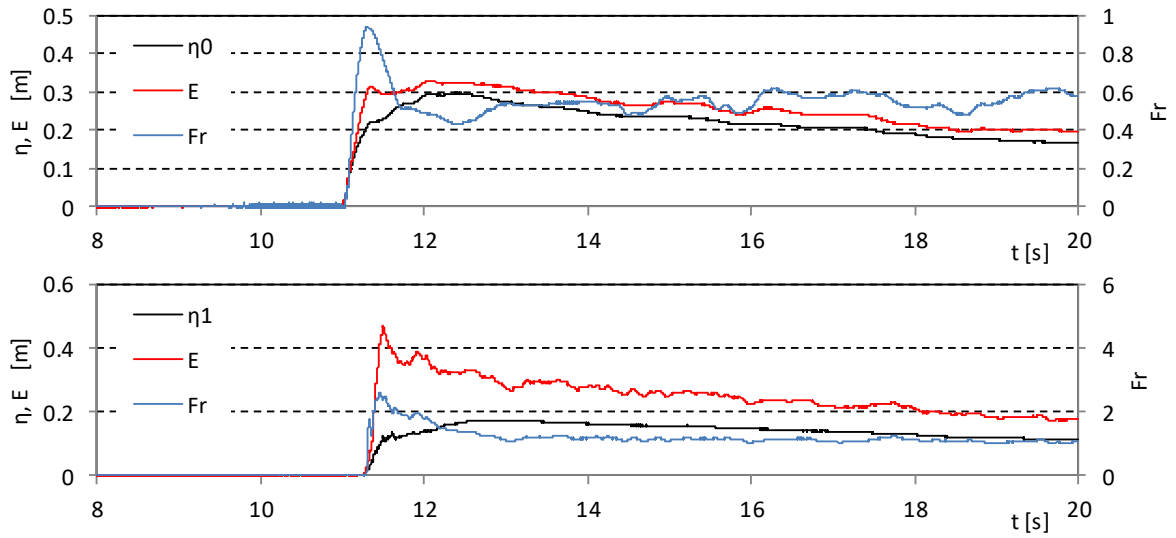


図- 3.5 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列

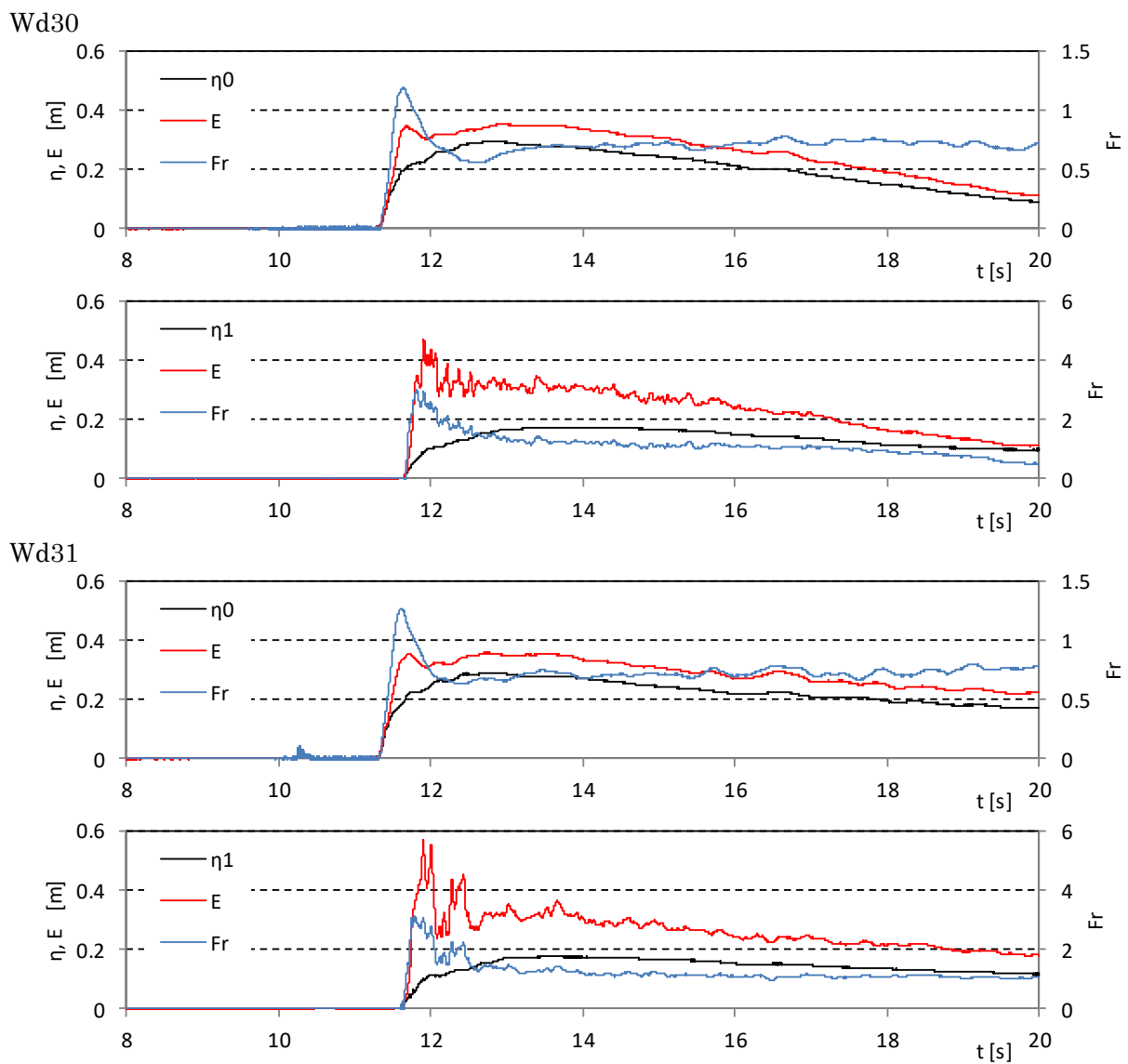
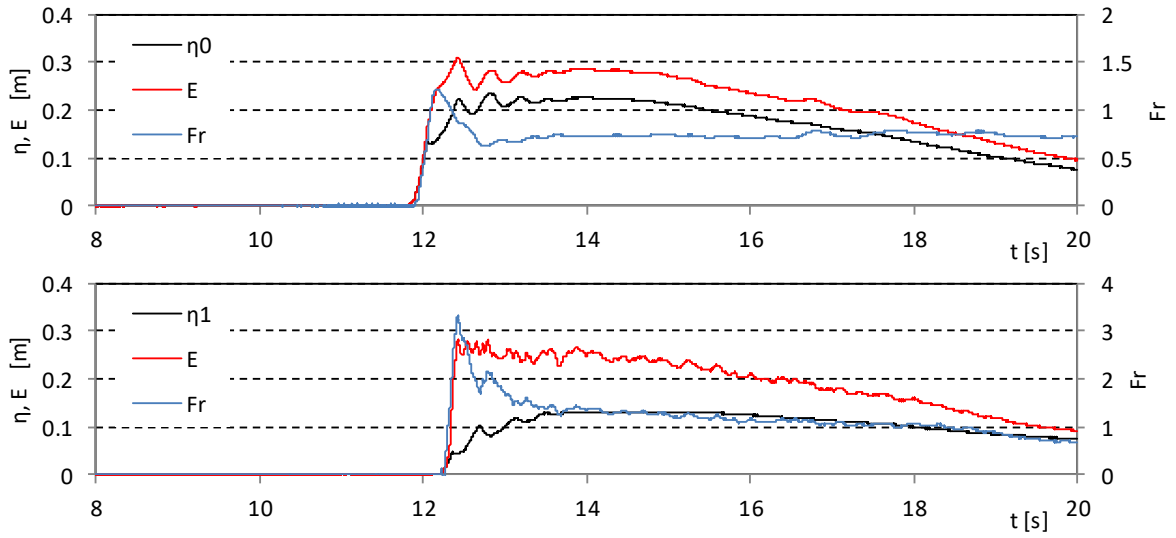


図- 3.5 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列

Wd40



Wd41

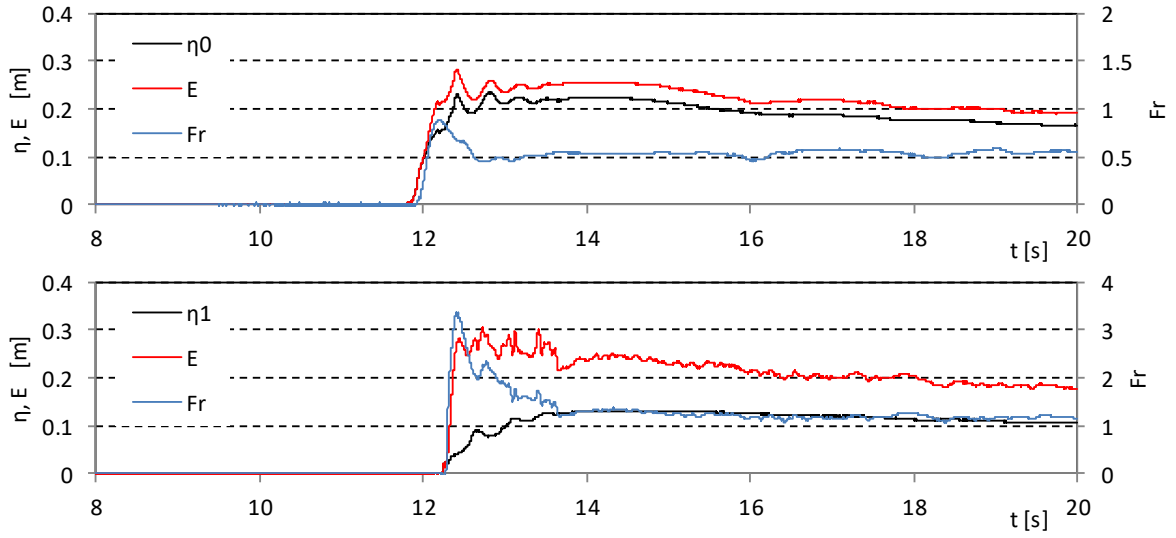


図- 3.5 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列

3.4. 各計測位置における最大浸水深

図-3.6 に、各計測点の通過波浸水深の最大値を示した。これによると、Wd20, Wd30, Wd21, Wd31 は、ほぼ同じ値となっている。これに対し沖波津波高の同じ Wd10 や Wd11 は、最大浸水深が小さい。これは St.0 での最大浸水深が小さいことから、周期特性が短い Wd10 や Wd11 では、砕波により汀線での入射津波高が小さくなっているためと考えられる。Wd10 や Wd11 を除くと、Wd20, Wd30, Wd40 と Wd21, Wd31, Wd41 の値が同じことから、ピーク後の高水位の継続の影響は、最大浸水深には表れていないことが分かる。一方で、Wd10 と Wd11 を比較すると、ピーク水位後に高水位の継続する Wd11 の方が最大浸水深は大きい。最大浸水深は、津波の到達からある程度遅れて発生するため、周期特性が短い波の場合、ピーク水位後に護岸の越流が継続するかどうかによって最大浸水深が異なることが分かる。

図-3.7, 図-3.8 は、図-3.6 に示した最大浸水深発生時の流速とフルード数を示したものである。図-3.7 の流速については、汀線位置を除き計測位置による明確な特徴は見られず、ほぼ 1.2 ~ 1.8 m/s の間に不規則に分布している。また、図-3.6 で見られたような、ケース毎の特徴的な傾向も確認できない。図-3.4 によれば、流速は津波到達から時間とともに低下しており、一方浸水深の時間変化は比較的緩やかであるため、浸水深最大となる時間はある幅を持って評価すべきであるが、ここでは、浸水深が最大となる瞬間を選択して流速を求めている。そのため、ばらつきが出ているものと考えられる。このことを鑑みると、汀線位置 St.0 と Wd10 の St.4 を除けば、流速はほぼ一定の値になっていると考えられる。Wd10 の St.4 のみ流速が大きくなっているが、これは図-3.4 の Wd10 に示すように、St.4 以外では津波到達から 2s 後付近で浸水深が最大になっているのに対し、St.4 では 1s 後付近で浸水深が最大になっているためである。

図-3.8 のフルード数については、汀線位置 St.0 と Wd10 を除くと 1~1.5 の値になっており、計測位置やケース毎の特徴的な傾向は確認できない。Wd10 のフルード数が大きいのは、護岸側からの水の供給が継続しないために、他のケースに比較して浸水深の低下が早く、最大浸水深が波形の先端により近い時間に生じるために流速が大きくなっているためである。したがって、Wd10 のような浸水深が継続しない波形の場合は、長時間浸水する場合と異なった特徴を呈することが分かる。

汀線位置については、護岸の段上がり部であるため流速が小さく、また図-3.8 に示すフルード数は 1 よりも小さくなる。

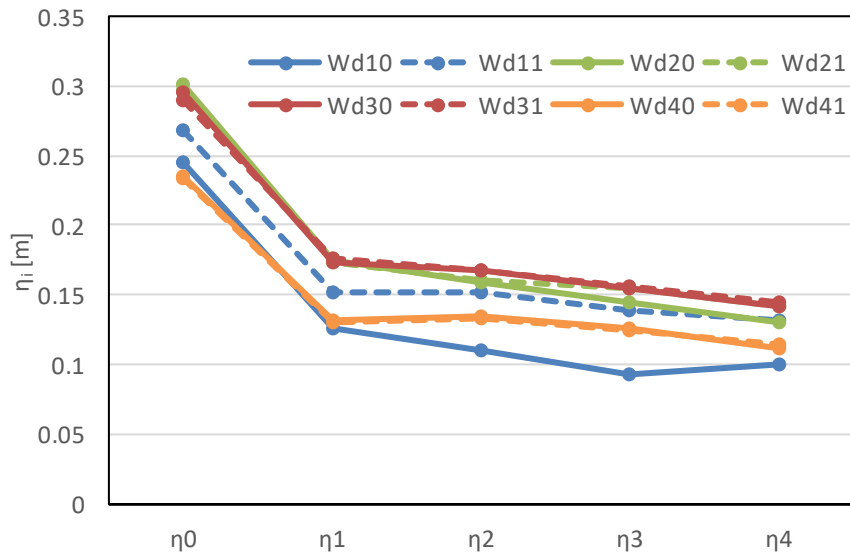


図- 3.6 各計測位置における通過波の最大浸水深

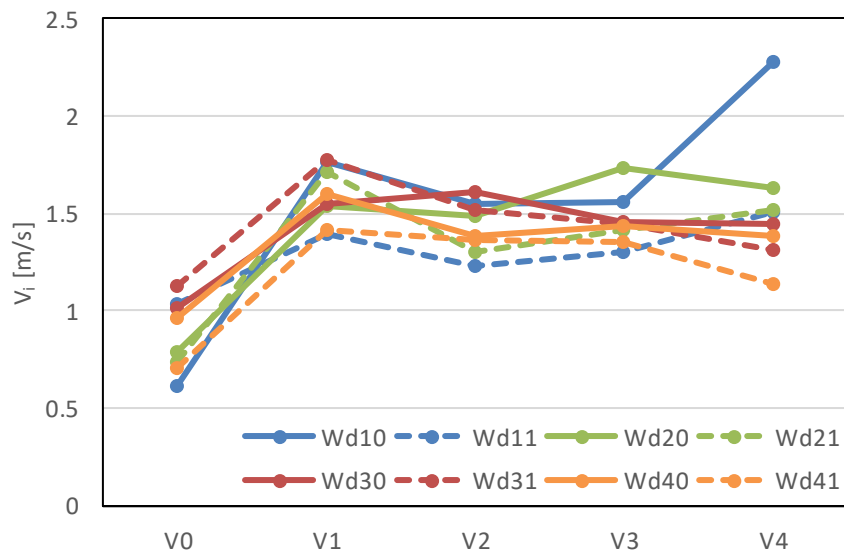


図- 3.7 各計測位置における通過波浸水深最大時の流速

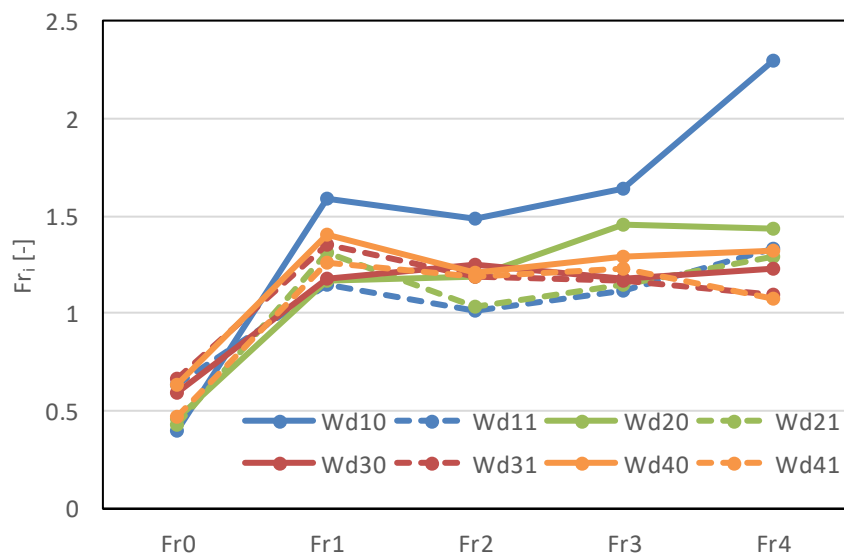


図- 3.8 各計測位置における通過波浸水深最大時のフルード数

4. 越流試験結果

4.1. 陸上部の越流浸水深時系列

陸上部の越流浸水深の時系列を図-4.2～図-4.5に示す。なおここには、3回の繰り返し実験の結果を平均したものを示した。

堤体設置位置 0m の時の η_1 および 0.625m の時の η_2 で、越流到達時の初期段階に最大値が発生する傾向にあり、その値は、それよりも背後側の水位計測点に比較して大きくなっている。一方、これよりも背後側の計測点の水位は、最大値が越流到達時よりも少し遅れて発生している。これは、津波が堤体を越流する際、津波到達時には鉛直上向きの流速をともなった越波水塊が生じ、この水塊は堤体背後への到達距離が長いために水位計付近に直接落水し、これが本来の浸水深よりも大きな水深として計測されたためと考えられる(図-4.1参照)。これらの計測結果では、浸水深が見掛け上、堤体がない時よりもある時の方が大きくなる場合があるため、計測結果の解釈には注意が必要である。

陸側の計測点(特に、Wd40やWd41)において、浸水深に0.4s周期程度の短周期成分が生じているケースがある。これは、津波が分裂した状態で入射するためであり、このようなケースでは堤体の越流時の流速(堤体位置0mのV0、堤体位置0.625mのV1)に、同じ周期の短周期成分が生じていることが分かる。この短周期の変動は、通過波検定試験の結果においても確認できるが、これと比較すると、越流浸水深の方が顕著に現れている。時間的に平均された浸水流量は、堤体がない場合に比較してある場合には減少する。このため、短周期変動の影響が、堤体がある場合に相対的に大きく表れたものと考えられる。

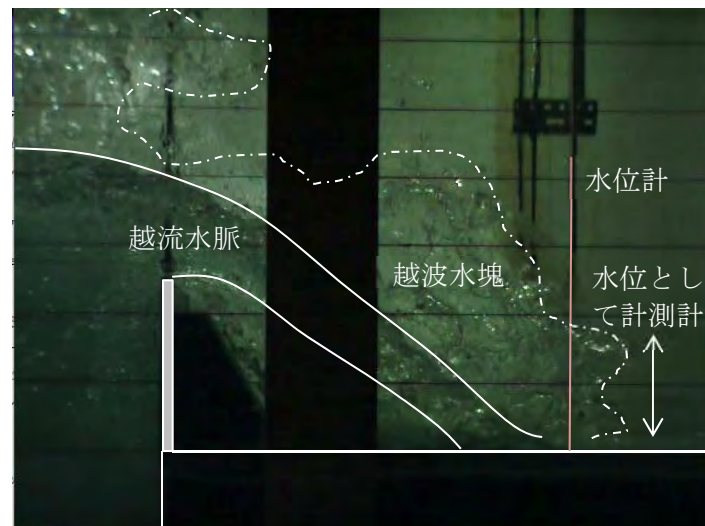


図-4.1 堤体模型背後の最大浸水深のイメージ図

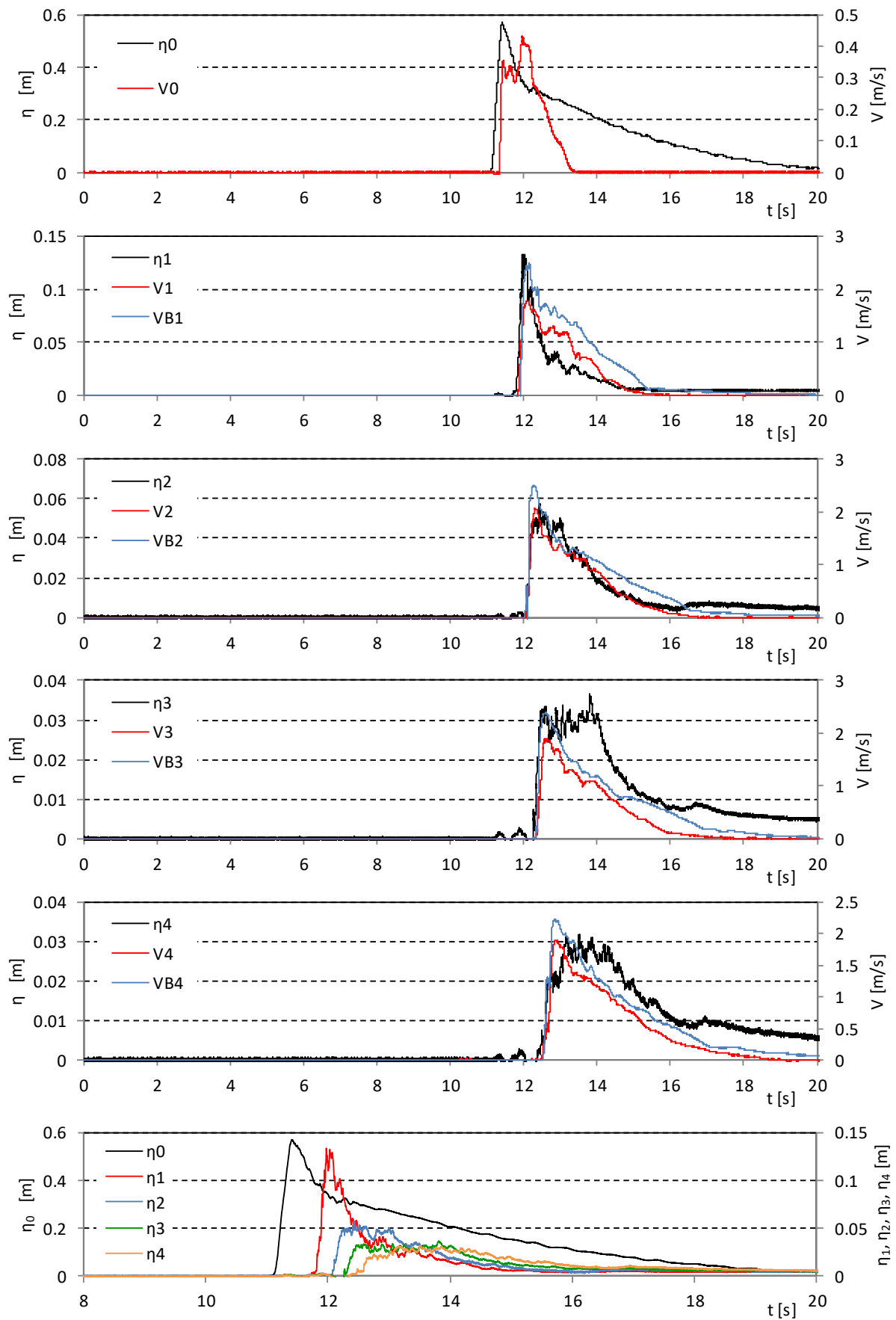


図- 4.2 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.25m, 設置位置 0m (Wd10)

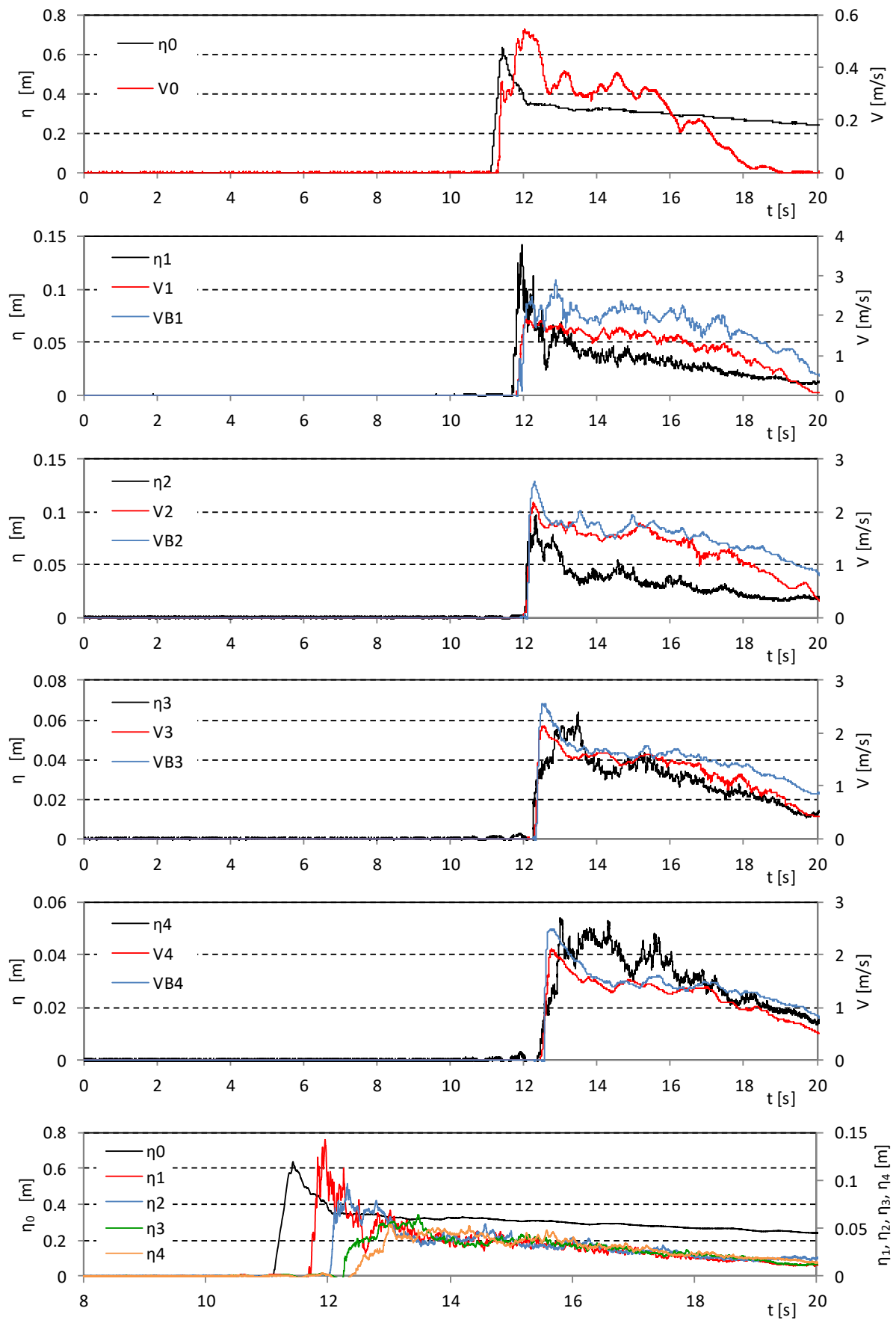


図- 4.2 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.25m, 設置位置 0m (Wd11)

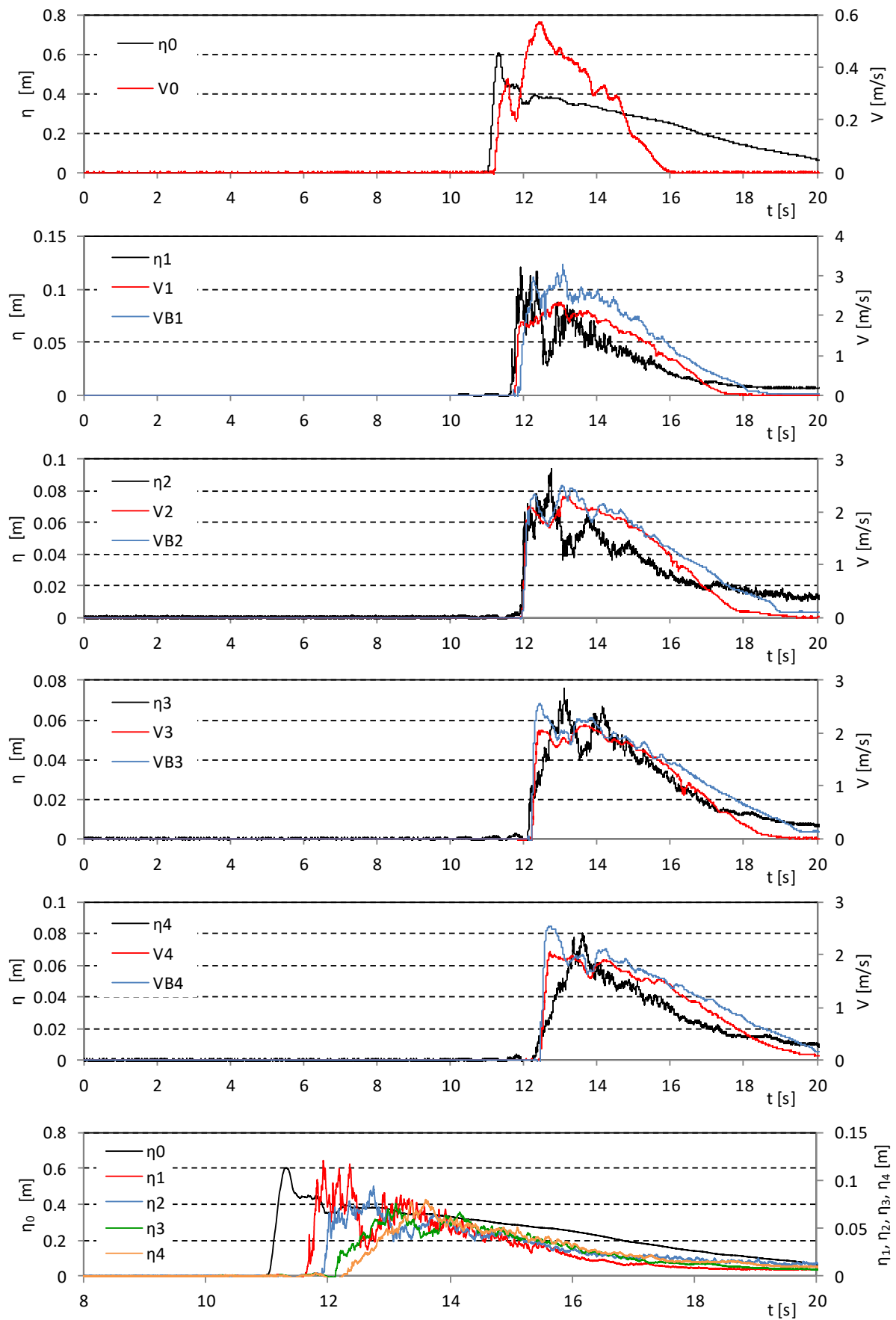


図- 4.2 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.25m, 設置位置 0m (Wd20)

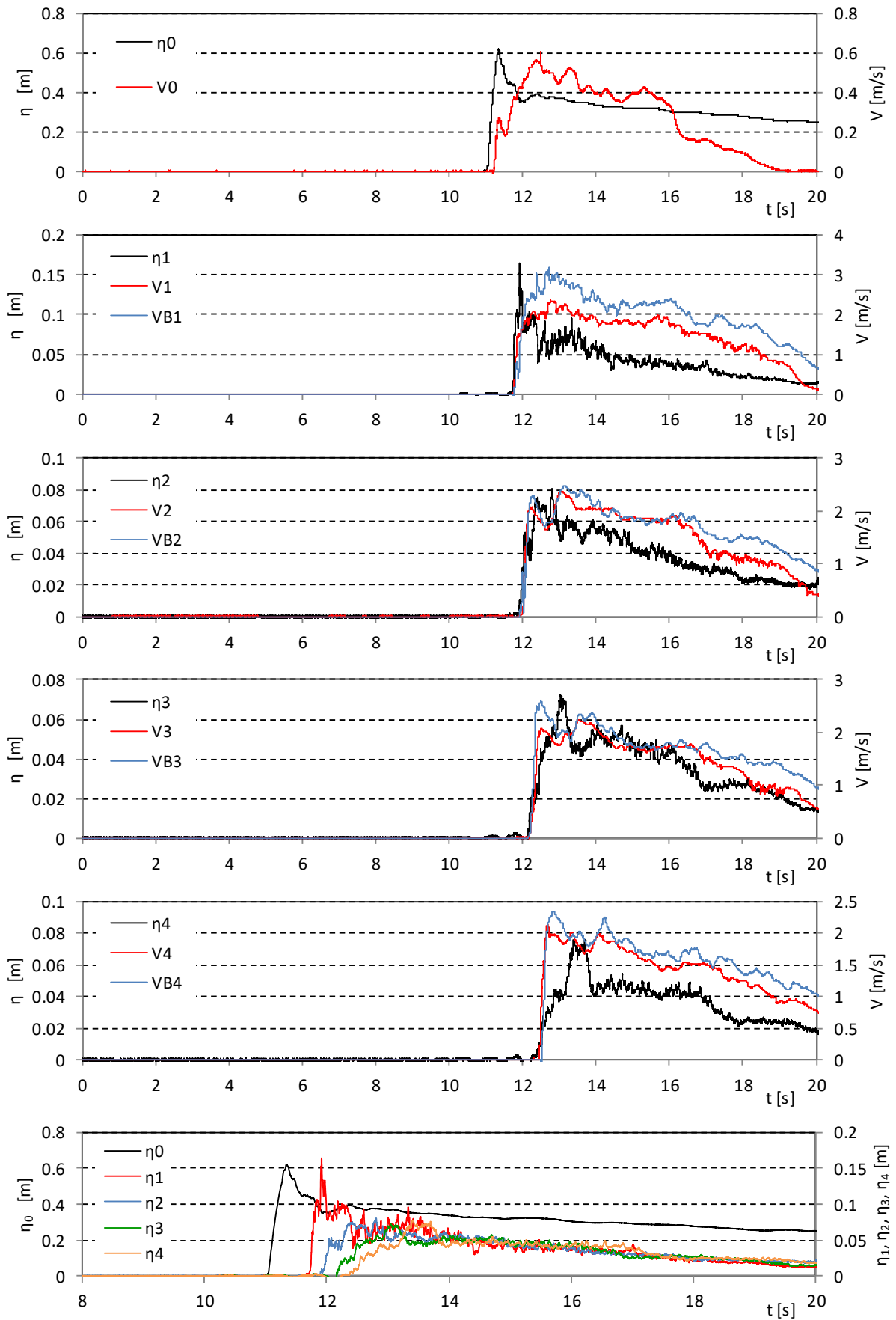


図- 4.2 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.25m, 設置位置 0m (Wd21)

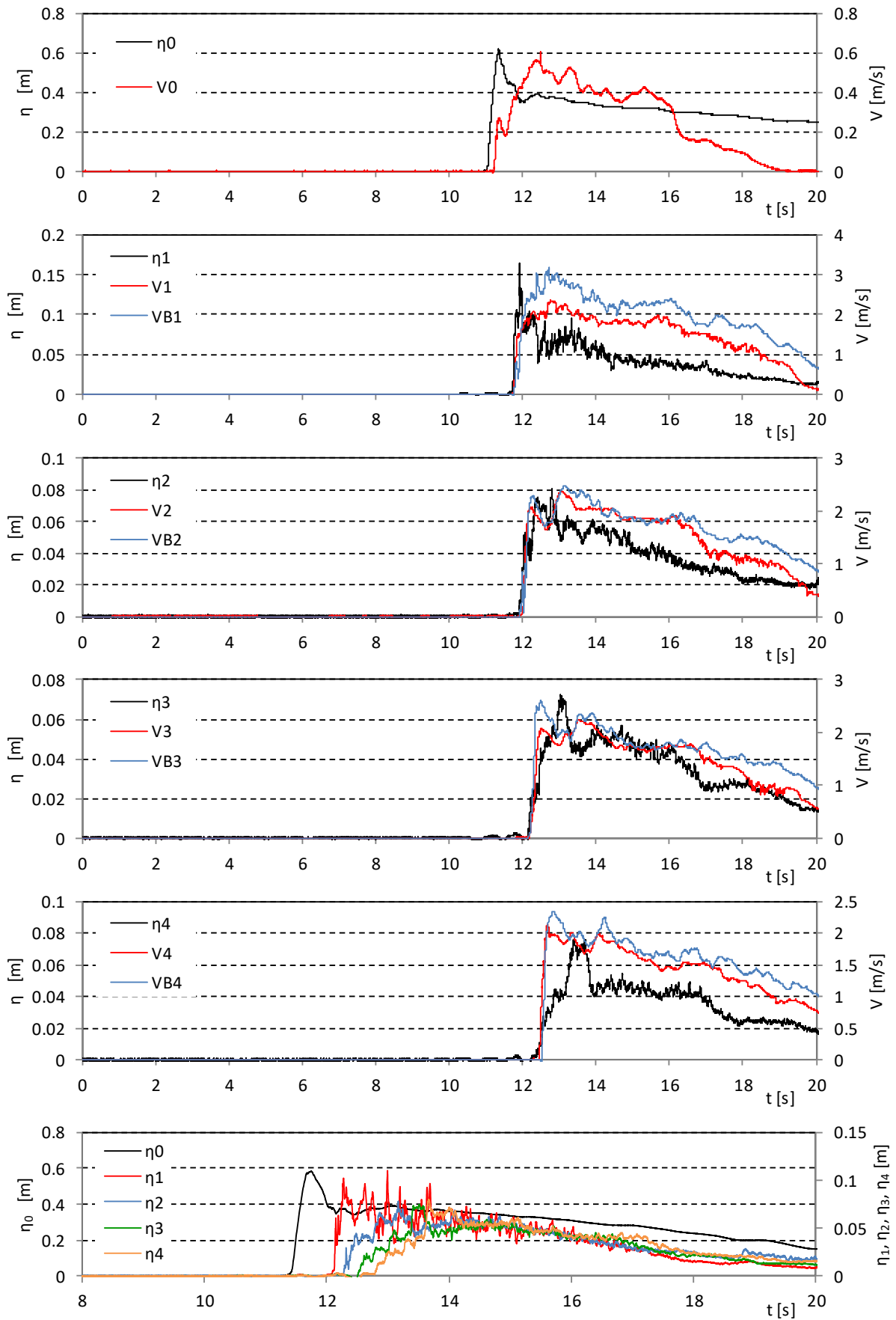


図- 4.2 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.25m, 設置位置 0m (Wd30)

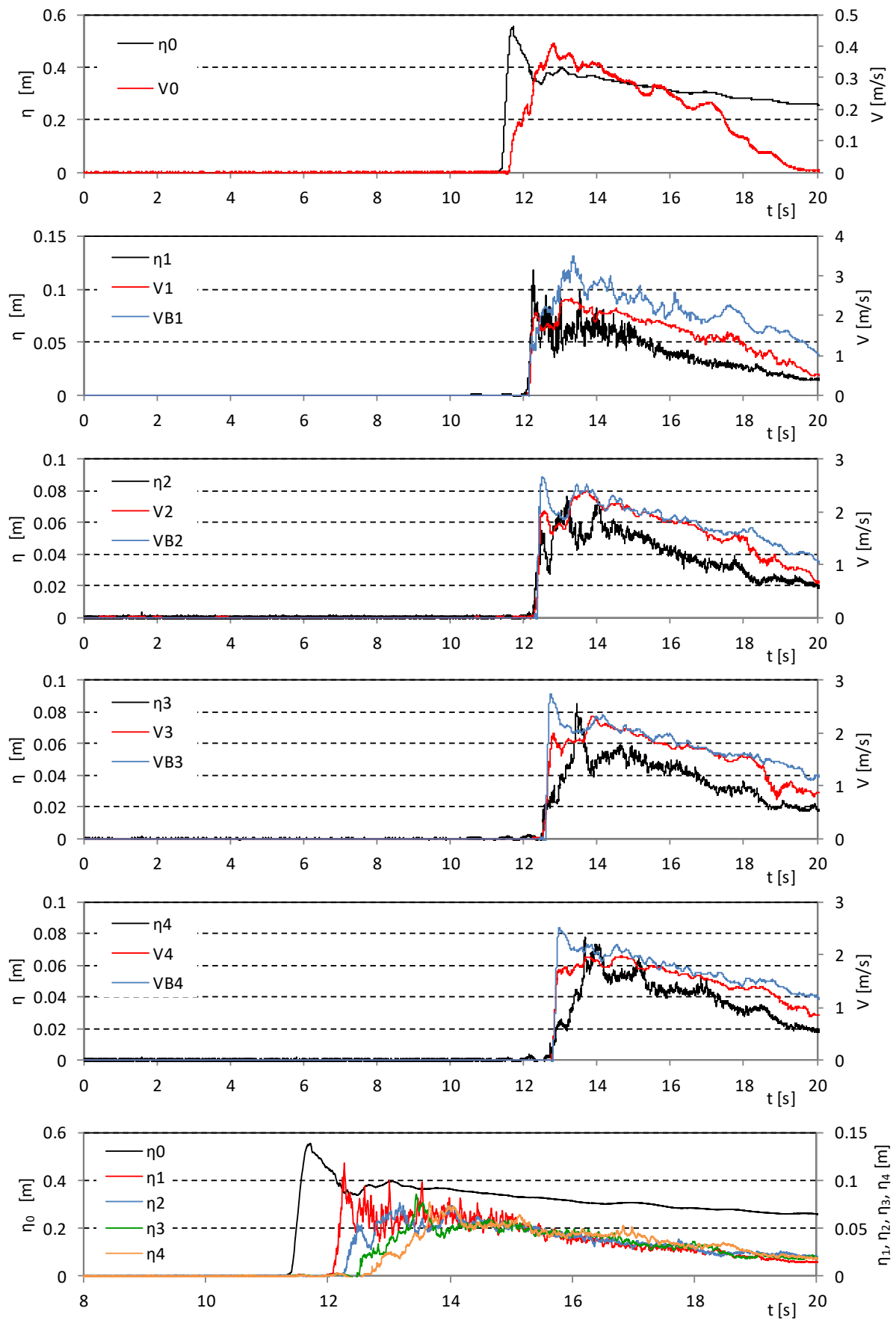


図- 4.2 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.25m, 設置位置 0m (Wd31)

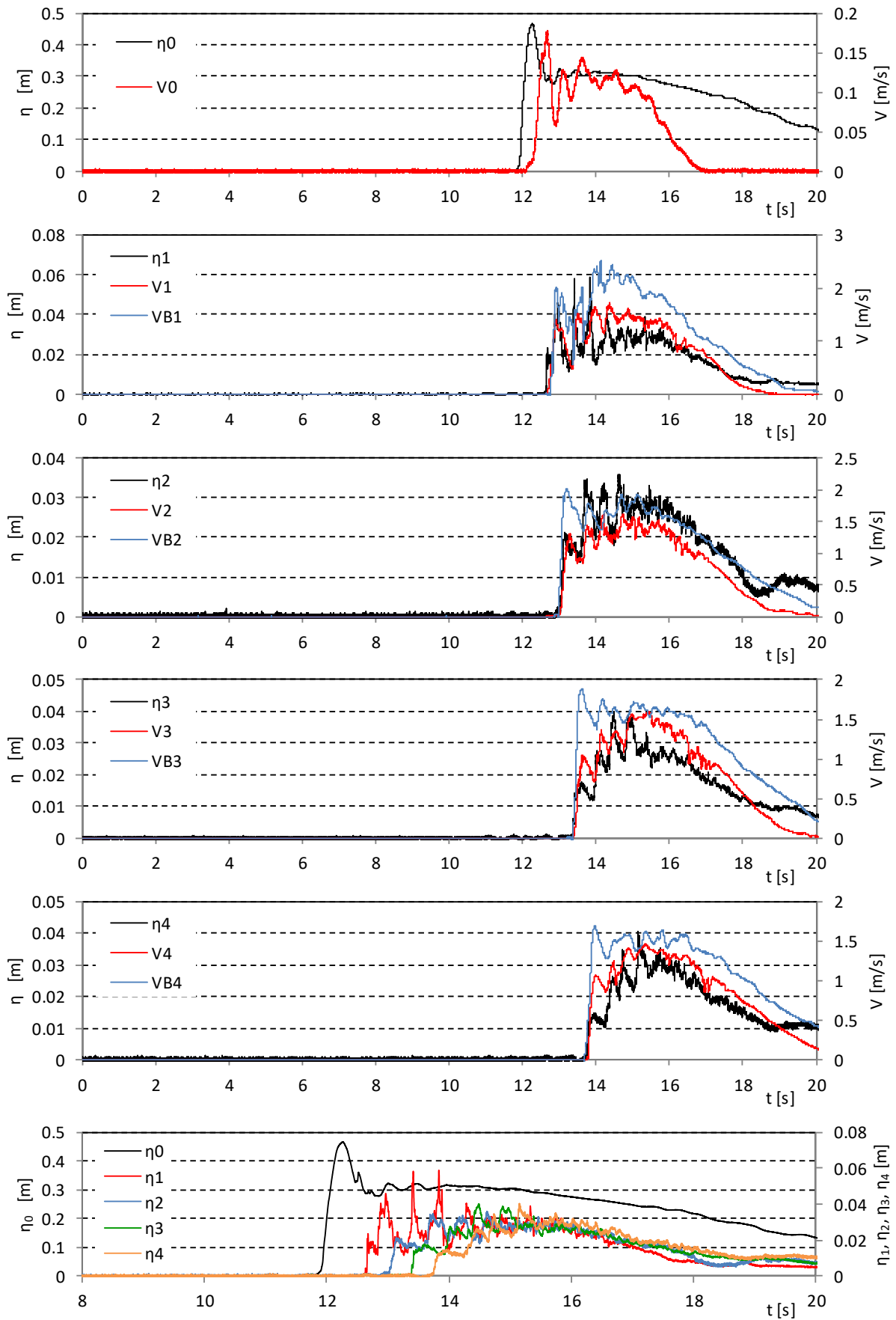


図- 4.2 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.25m, 設置位置 0m (Wd40)

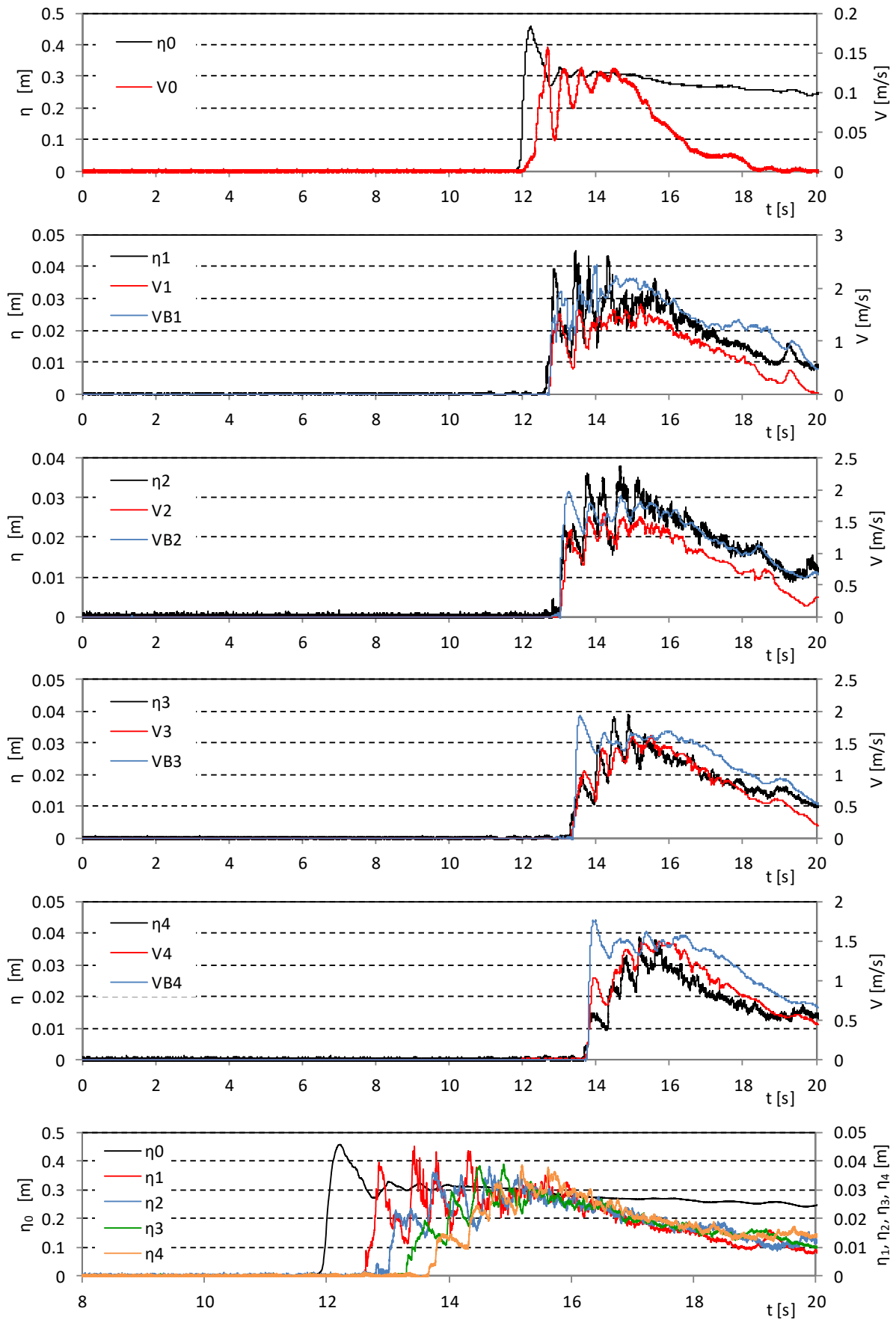


図- 4.2 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.25m, 設置位置 0m (Wd41)

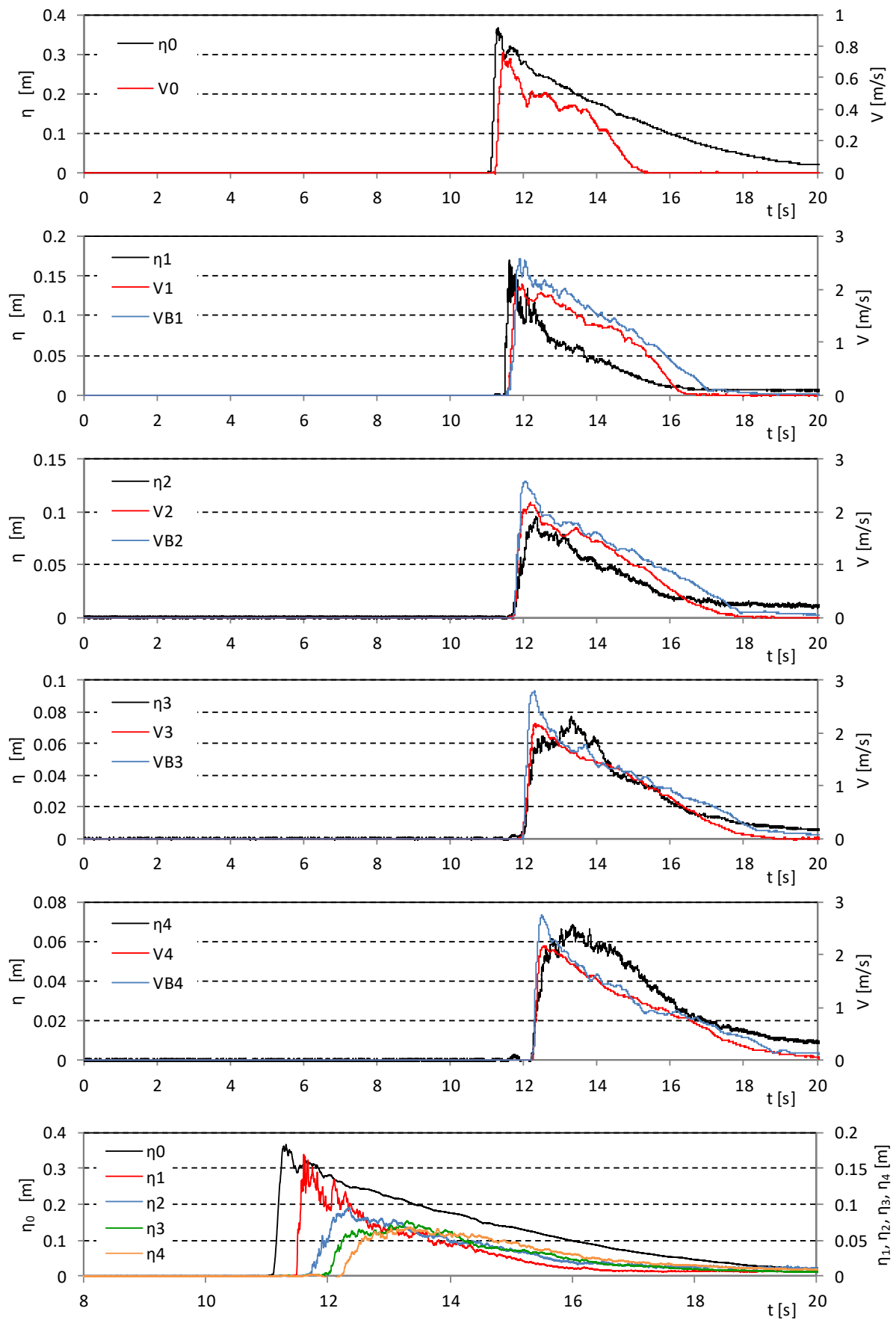


図- 4.3 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.125m，設置位置 0m (Wd10)

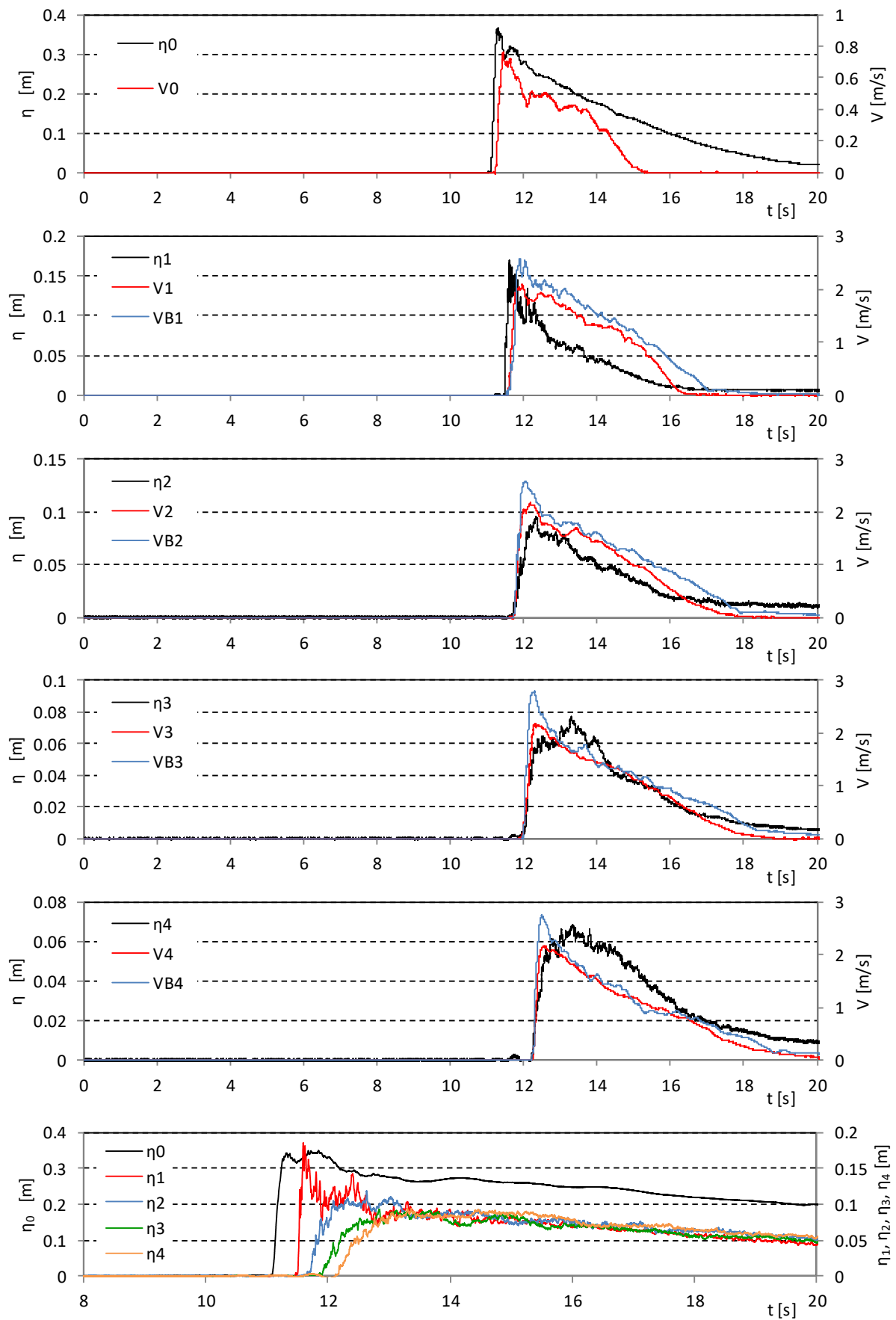


図- 4.3 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.125m，設置位置 0m (Wd11)

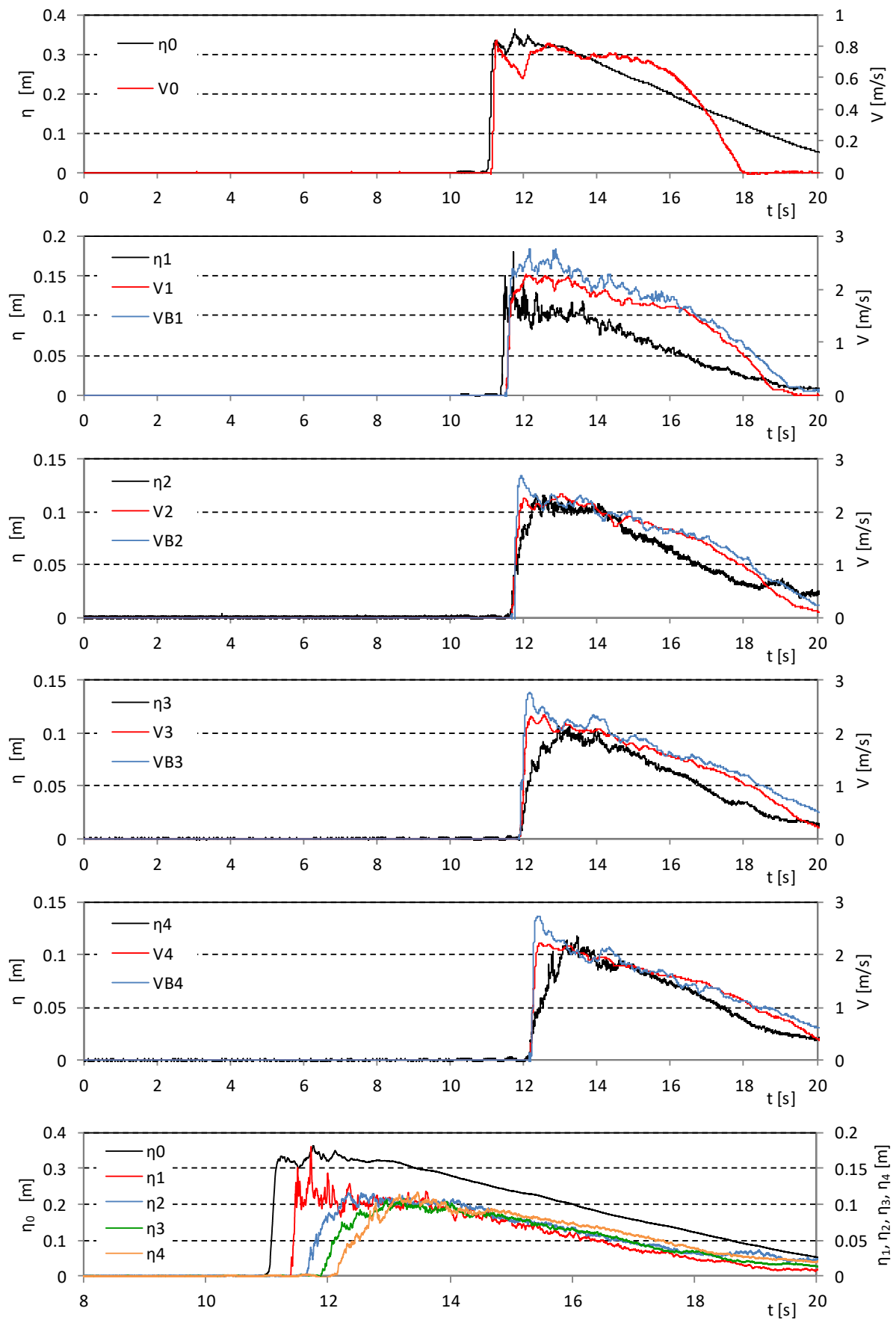


図- 4.3 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.125m，設置位置 0m (Wd20)

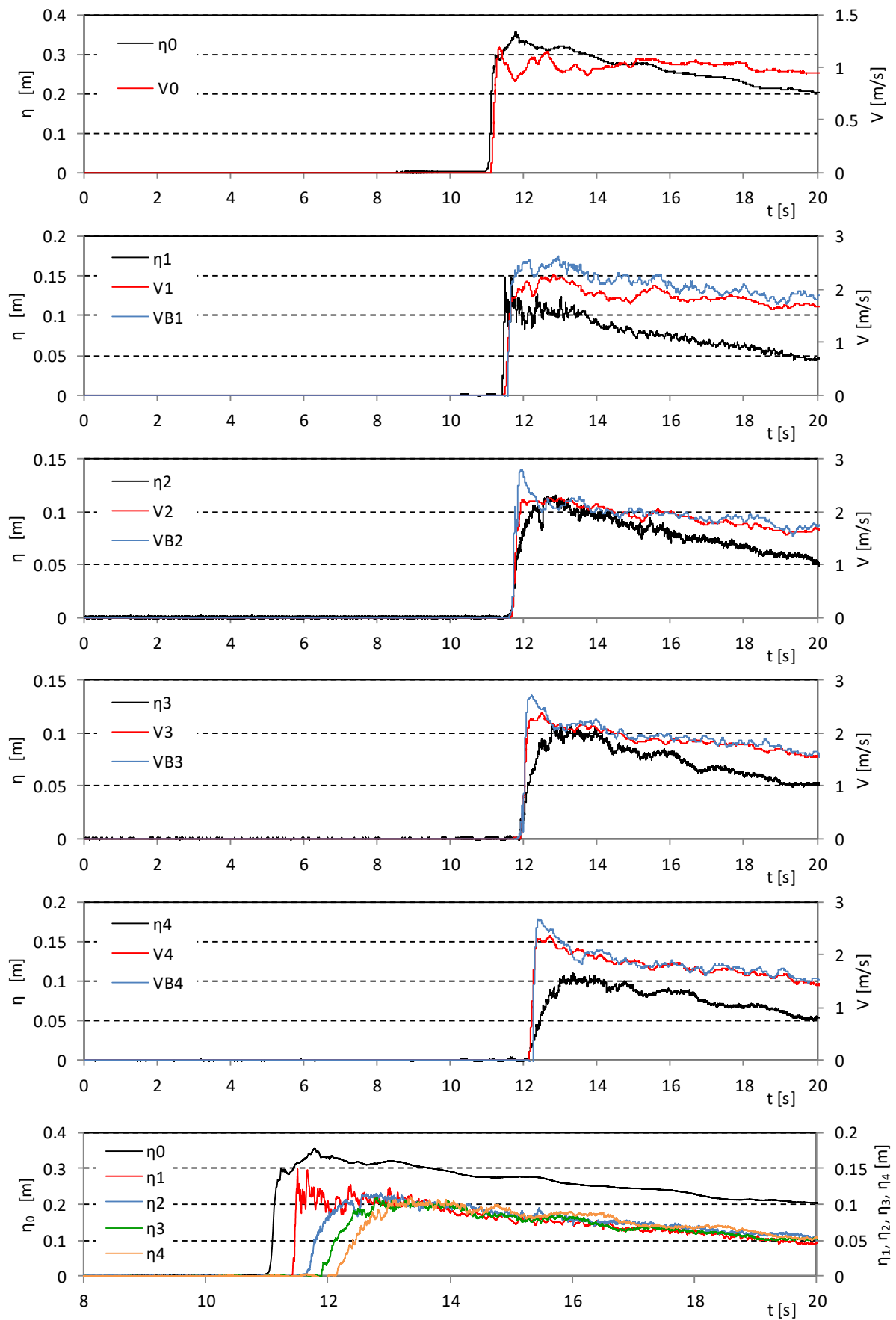


図- 4.3 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.125m, 設置位置 0m (Wd21)

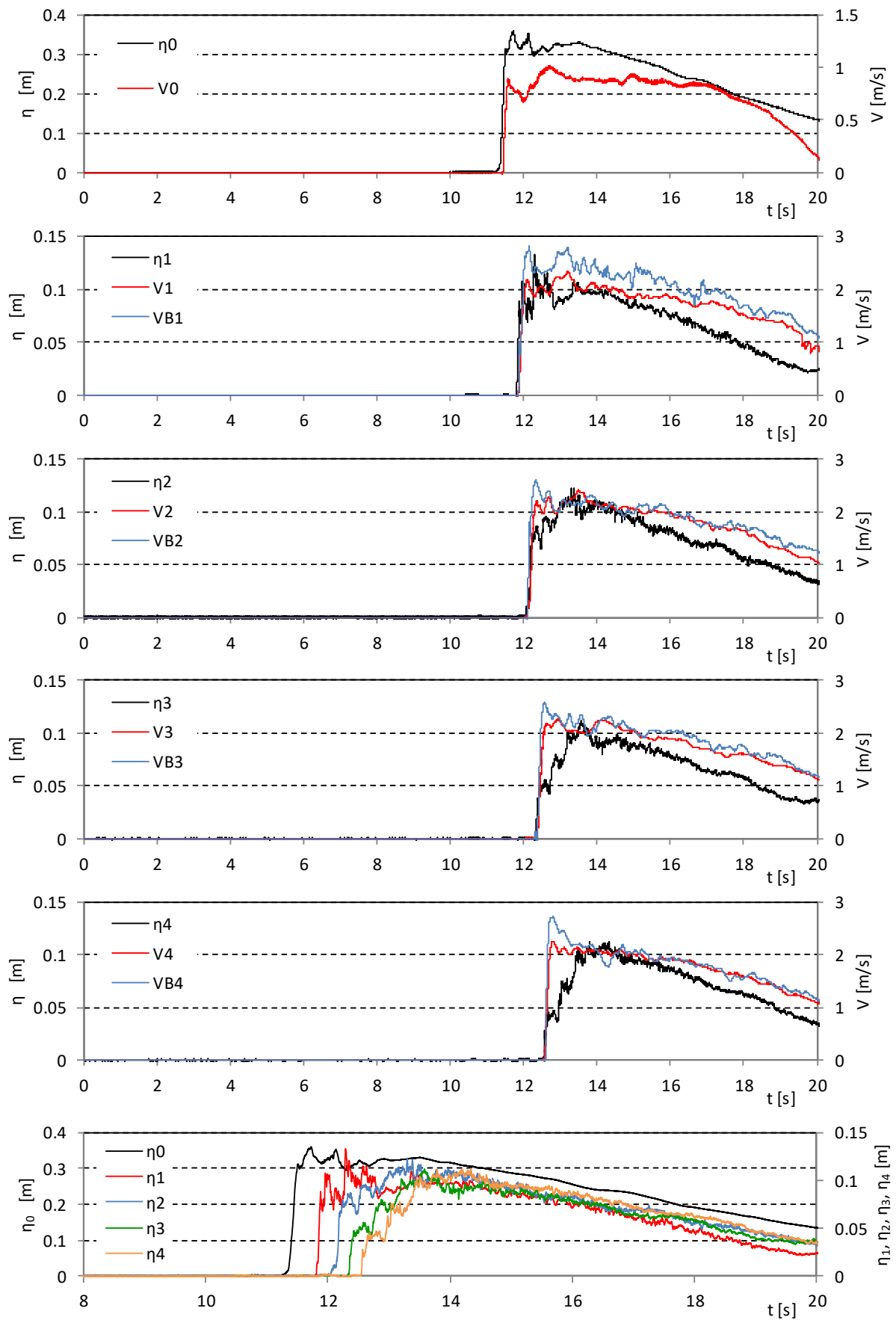


図- 4.3 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.125m, 設置位置 0m (Wd30)

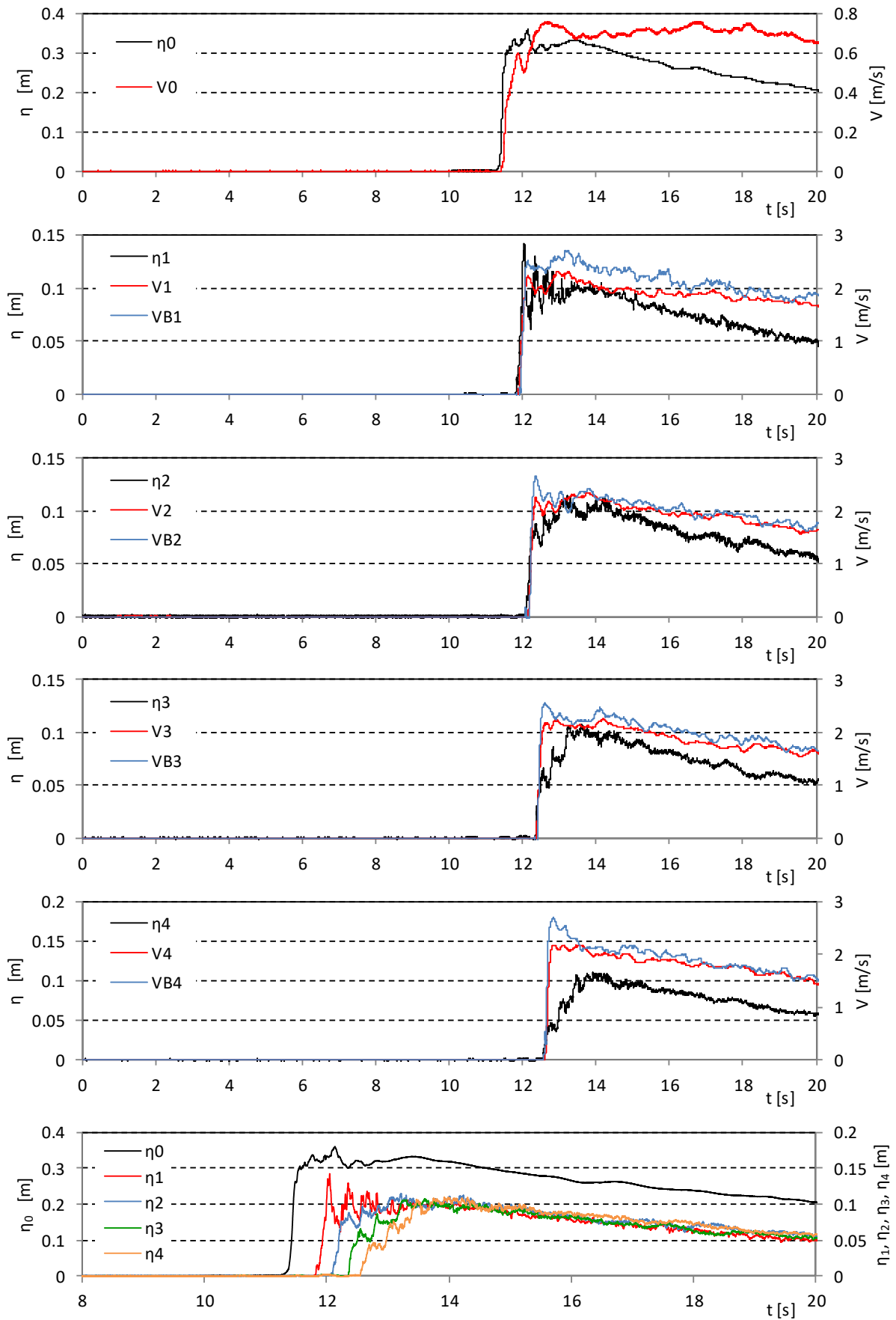


図- 4.3 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.125m，設置位置 0m (Wd31)

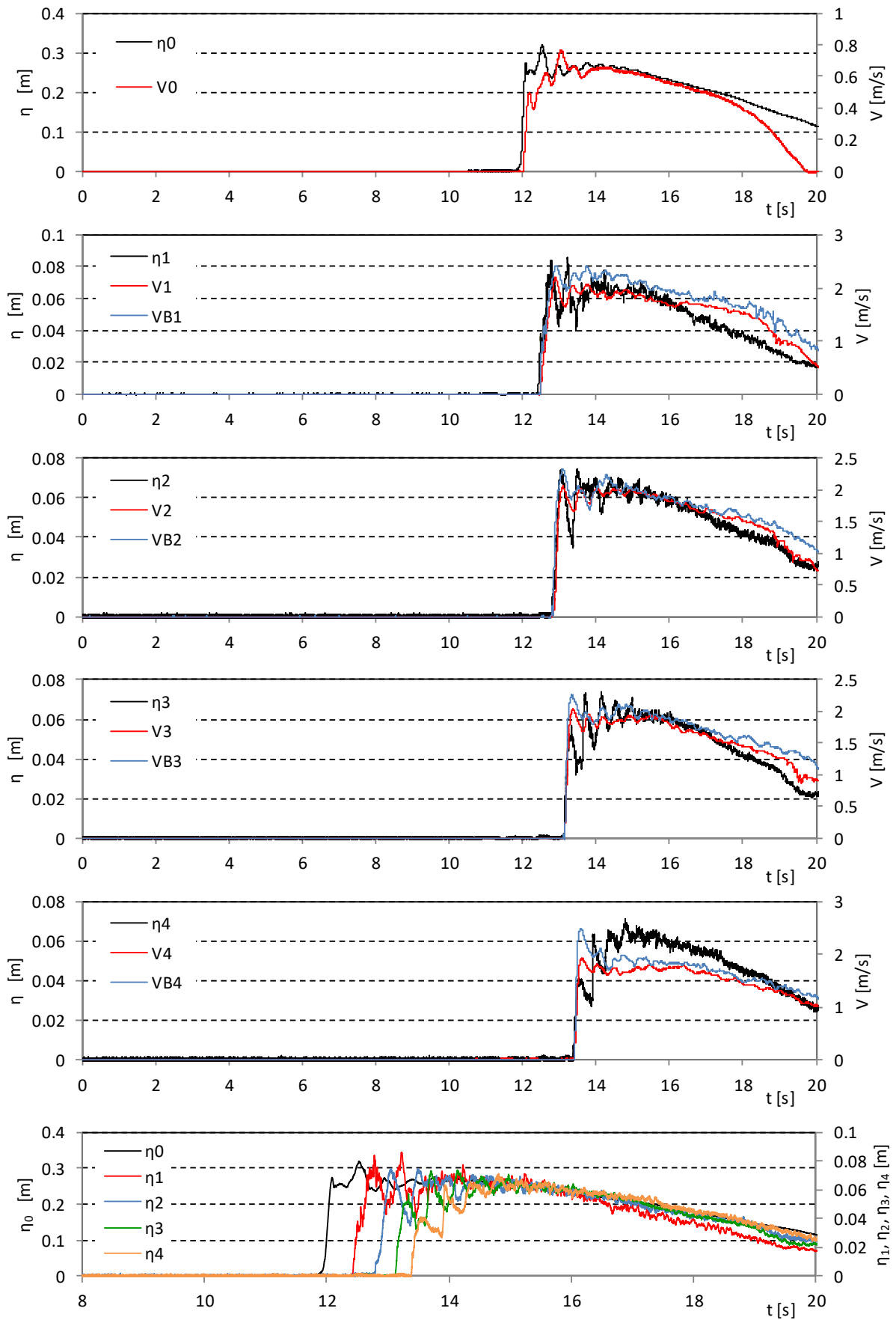


図- 4.3 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.125m，設置位置 0m (Wd40)

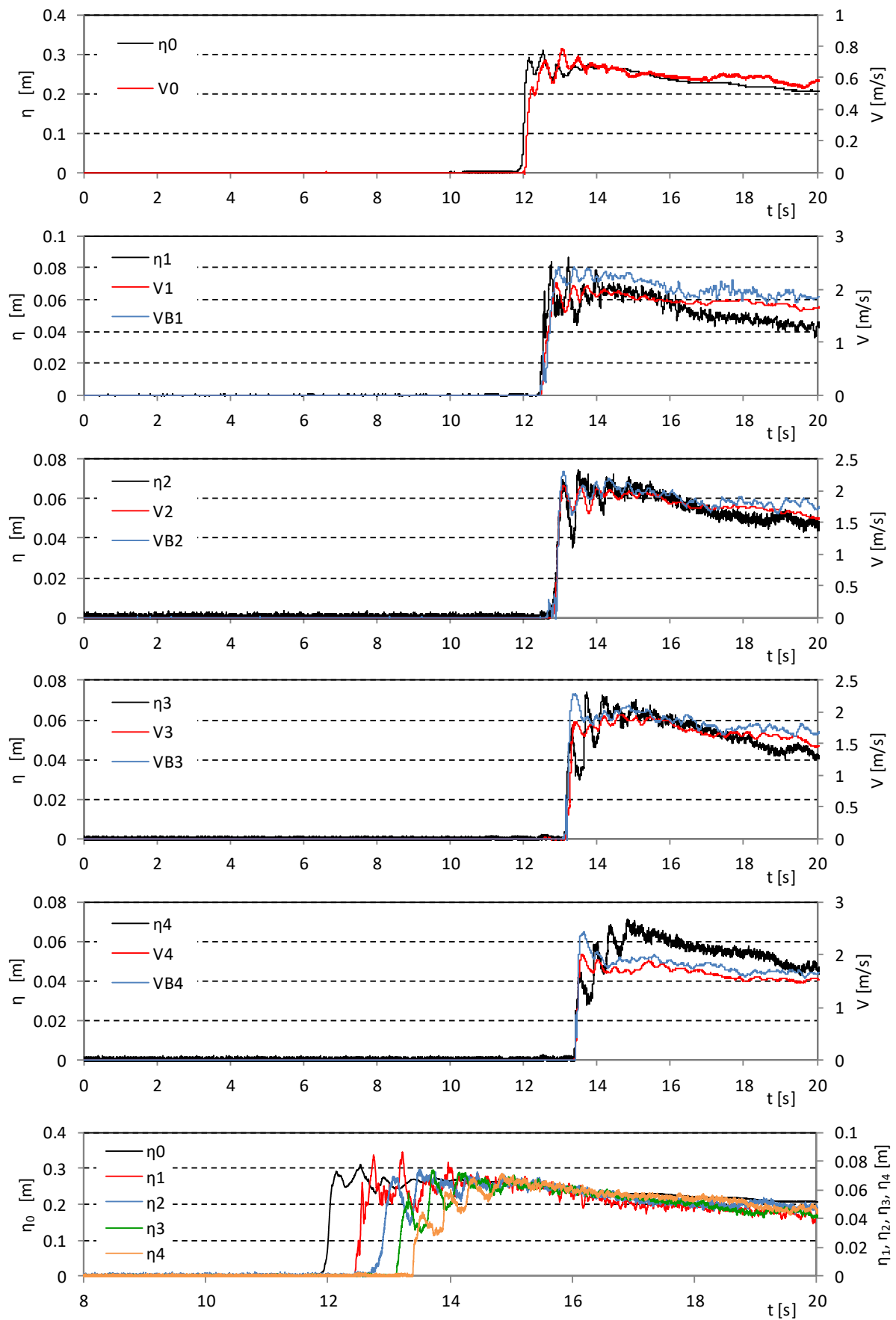


図- 4.3 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.125m, 設置位置 0m (Wd41)

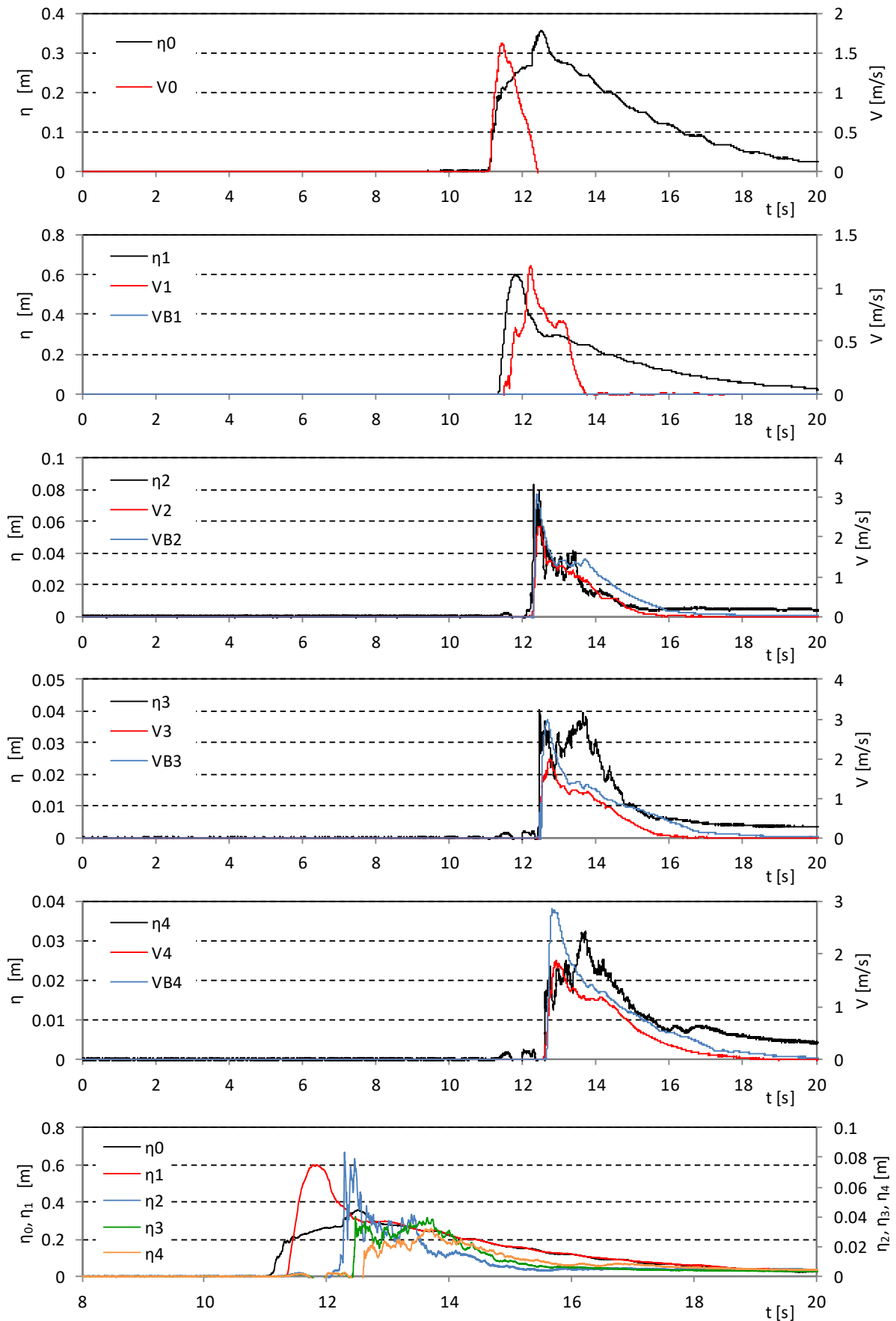


図- 4.4 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.25m，設置位置 0.625m (Wd10)

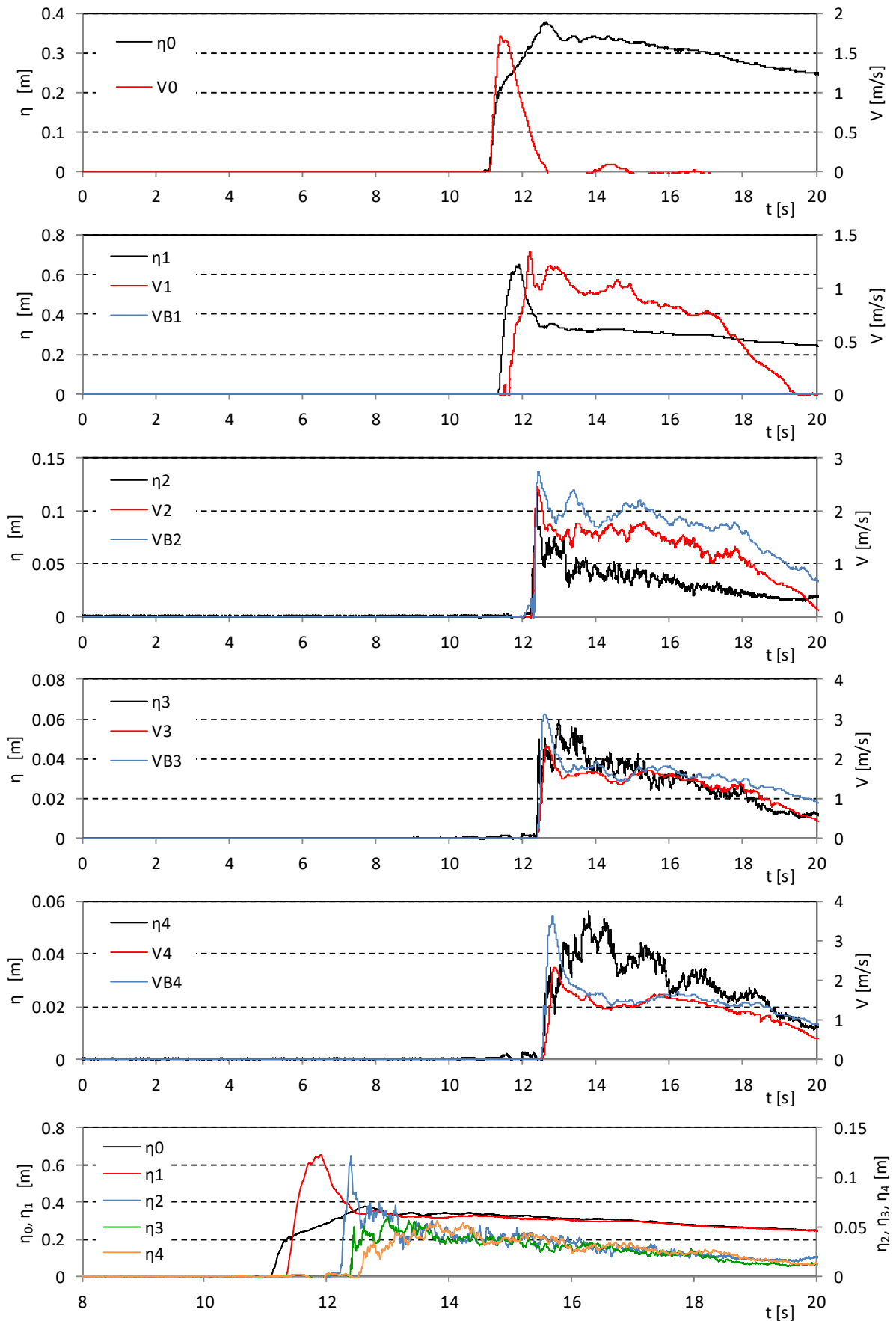


図- 4.4 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.25m, 設置位置 0.625m (Wd11)

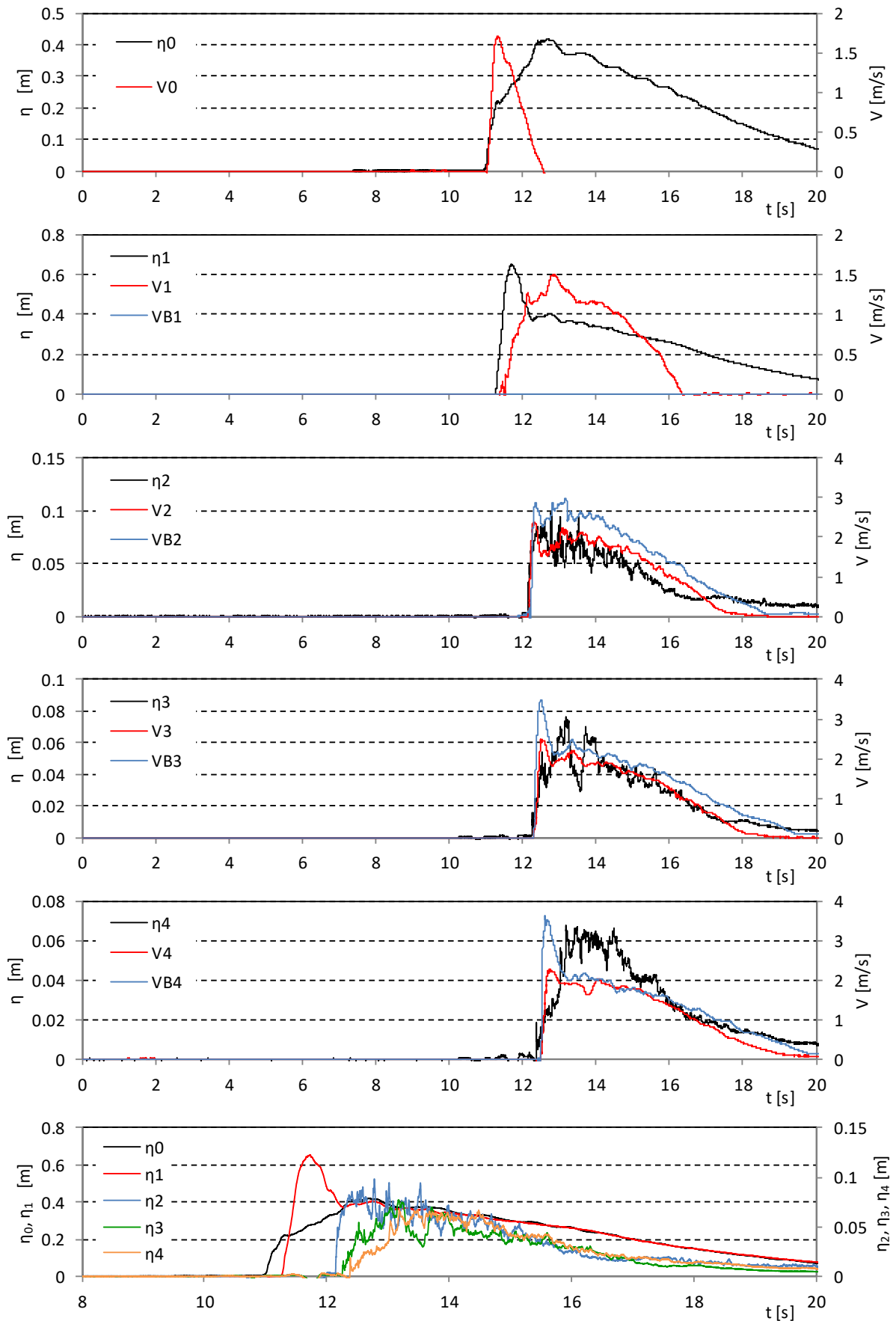


図- 4.4 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.25m, 設置位置 0.625m (Wd20)

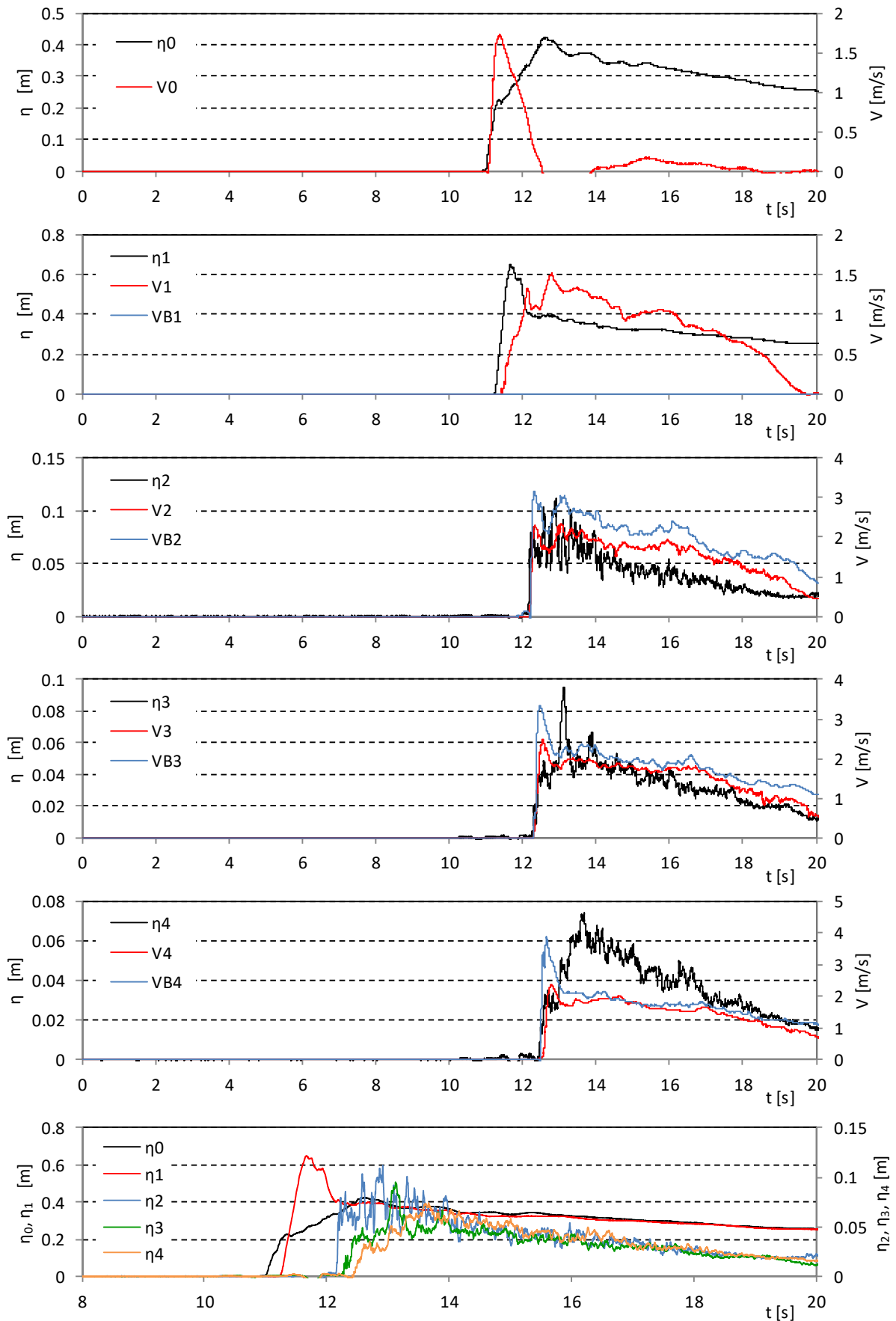


図- 4.4 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.25m, 設置位置 0.625m (Wd21)

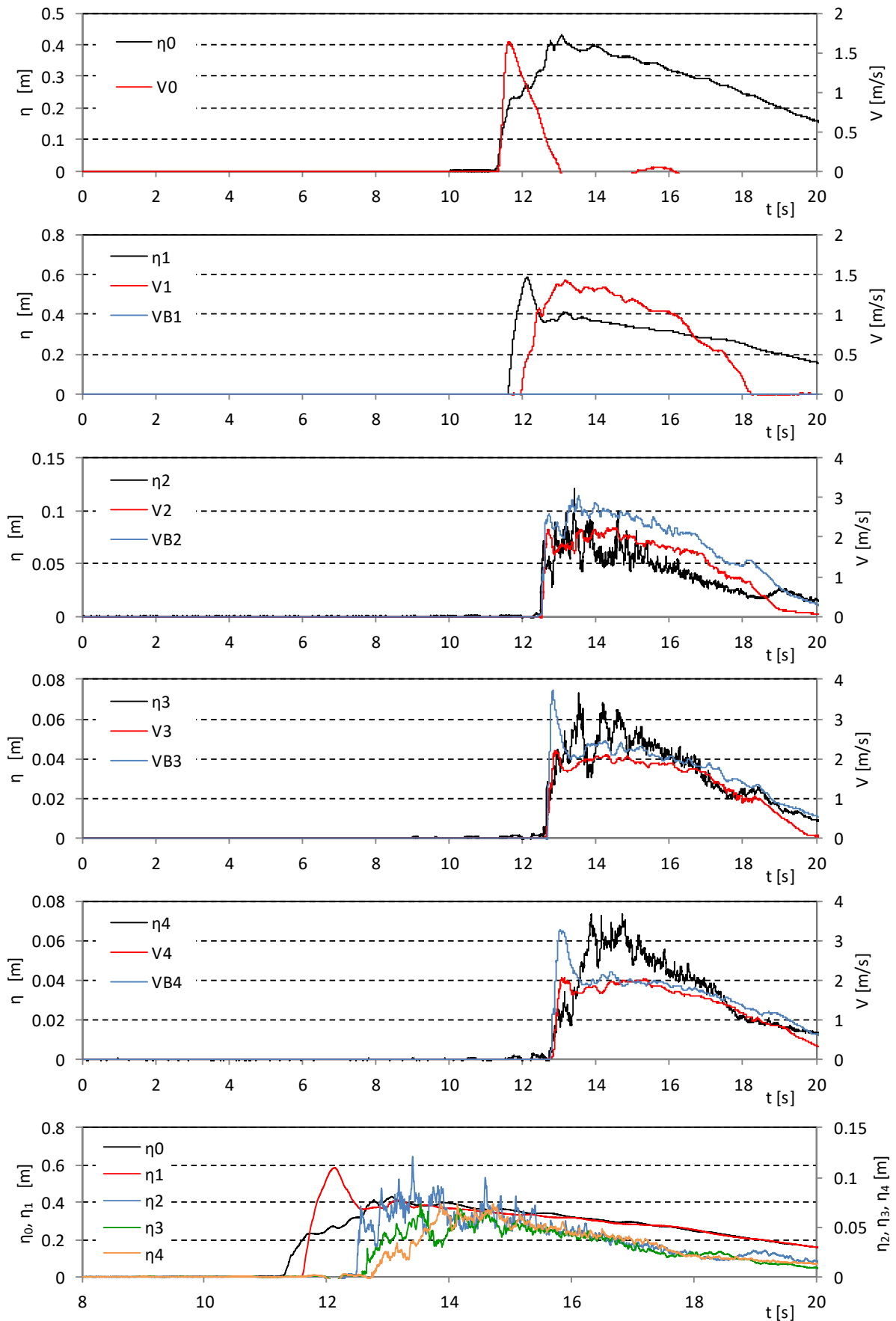


図- 4.4 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.25m, 設置位置 0.625m (Wd30)

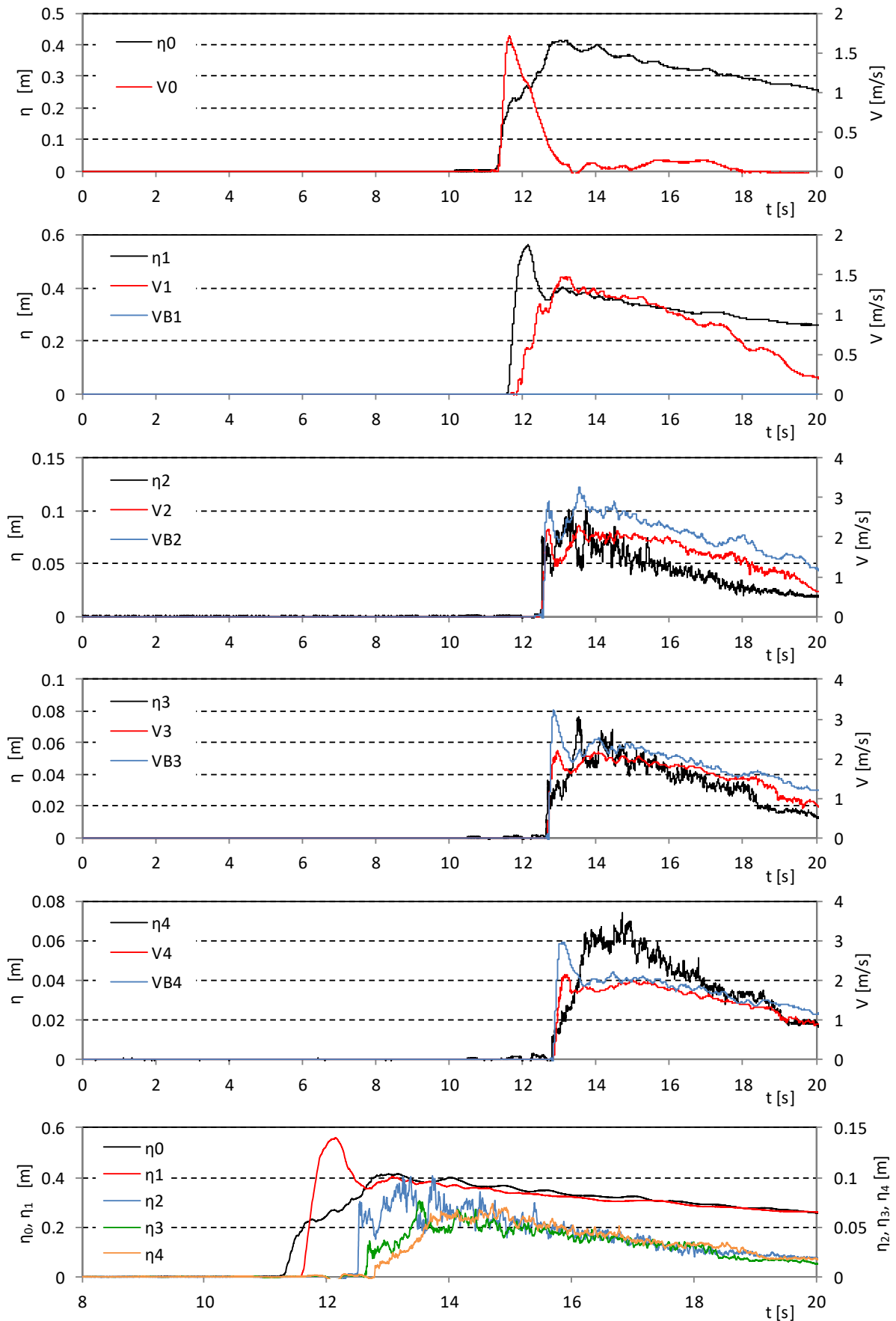


図- 4.4 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.25m，設置位置 0.625m (Wd31)

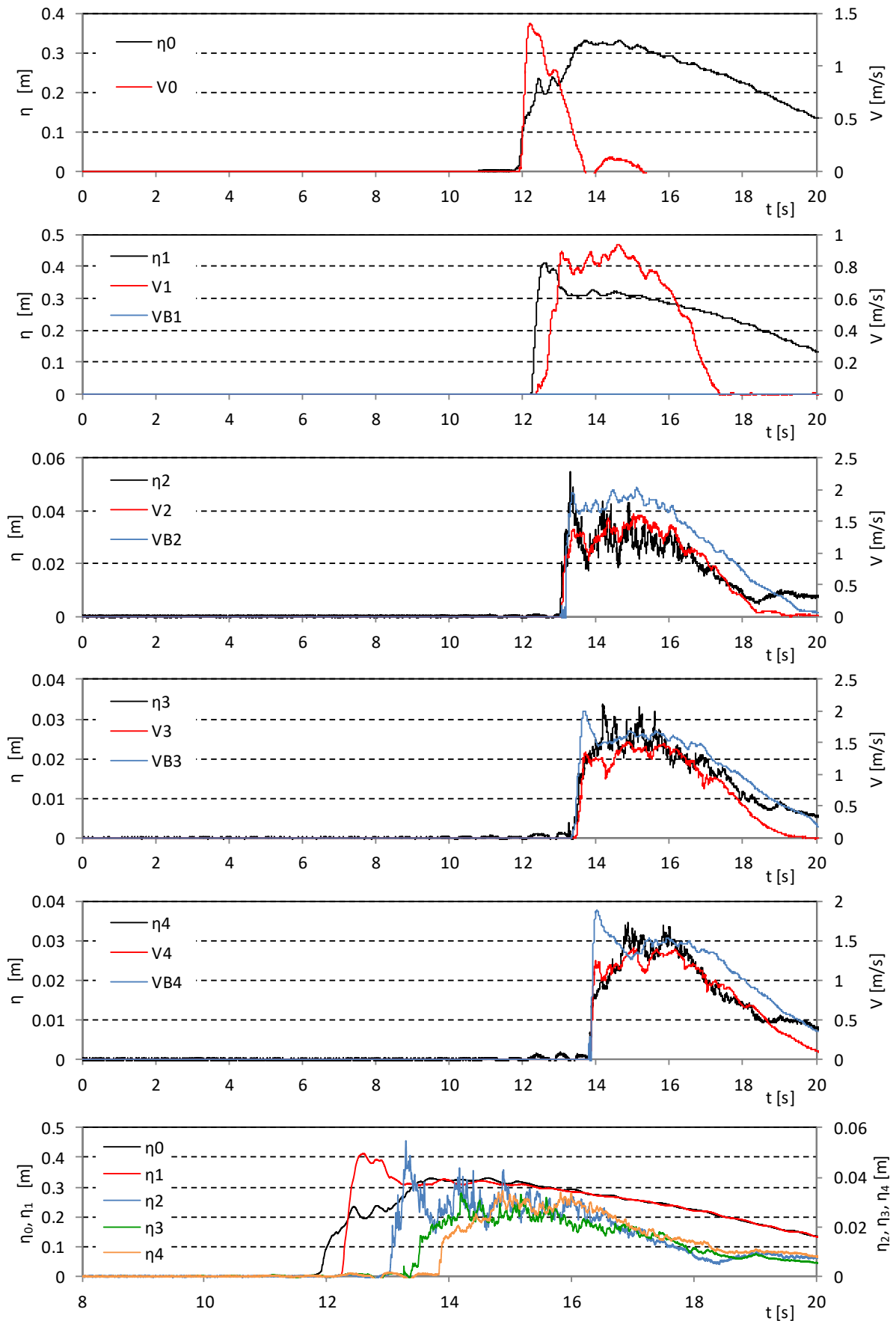


図- 4.4 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.25m, 設置位置 0.625m (Wd40)

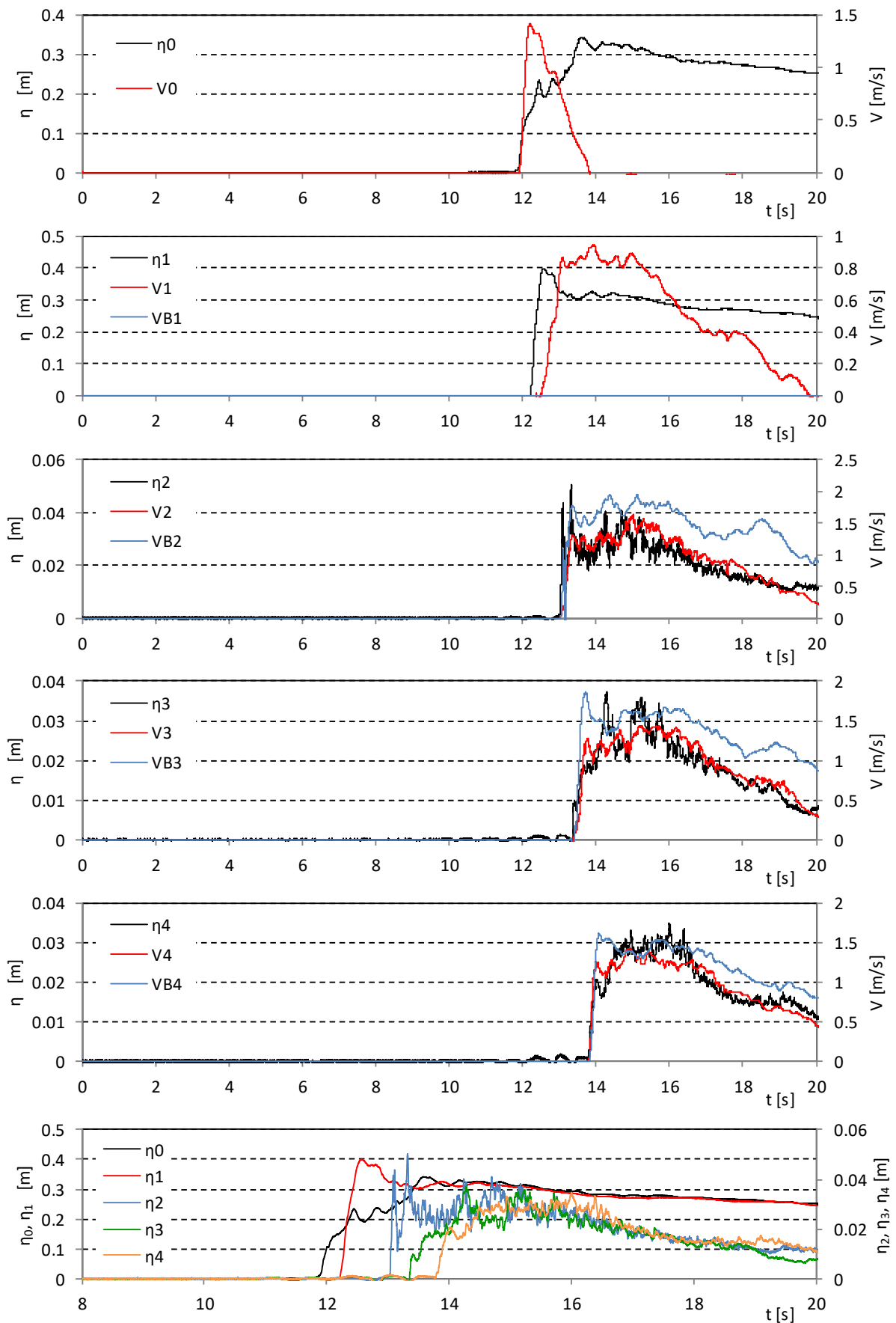


図- 4.4 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.25m, 設置位置 0.625m (Wd41)

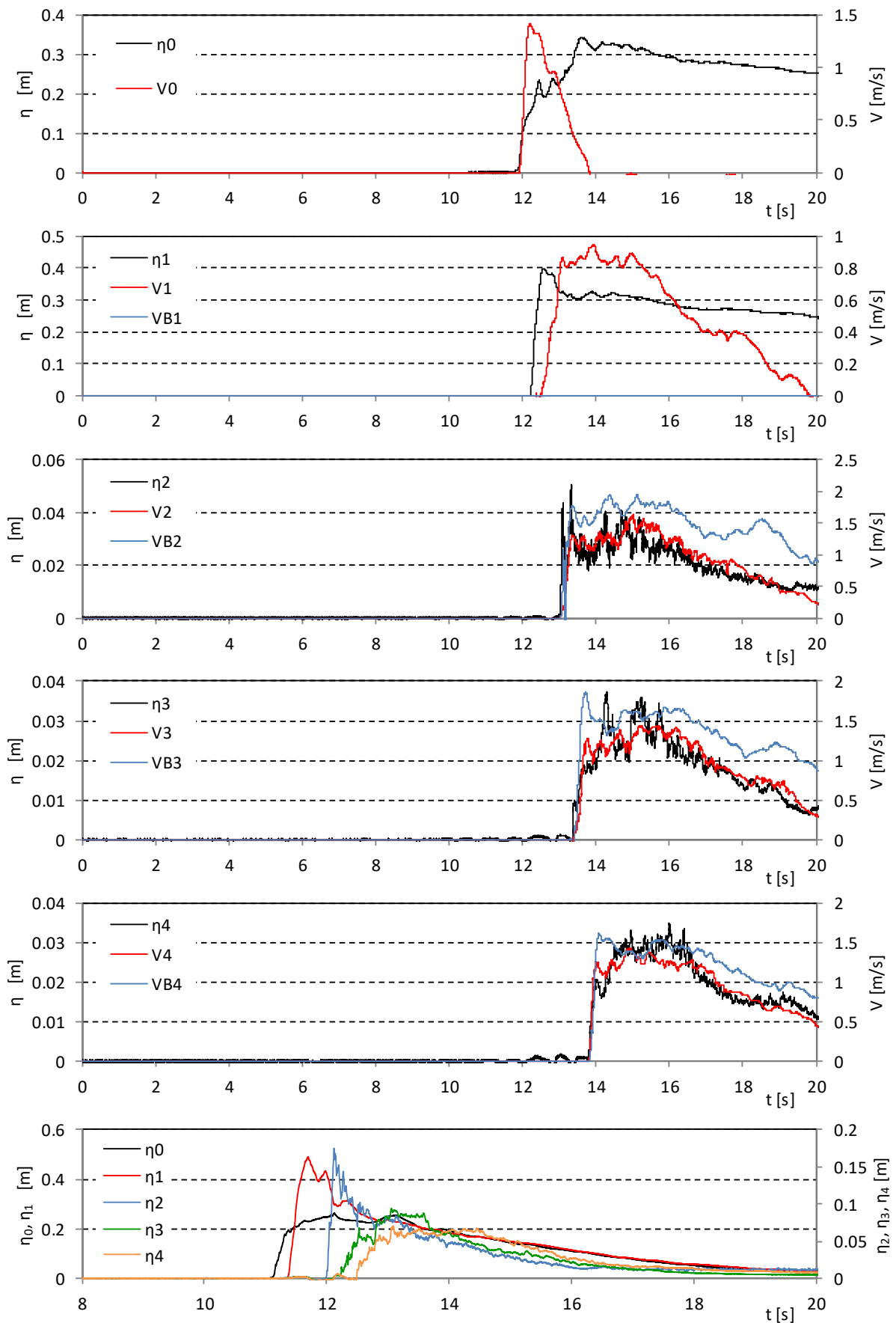


図- 4.5 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.125m, 設置位置 0.625m (Wd10)

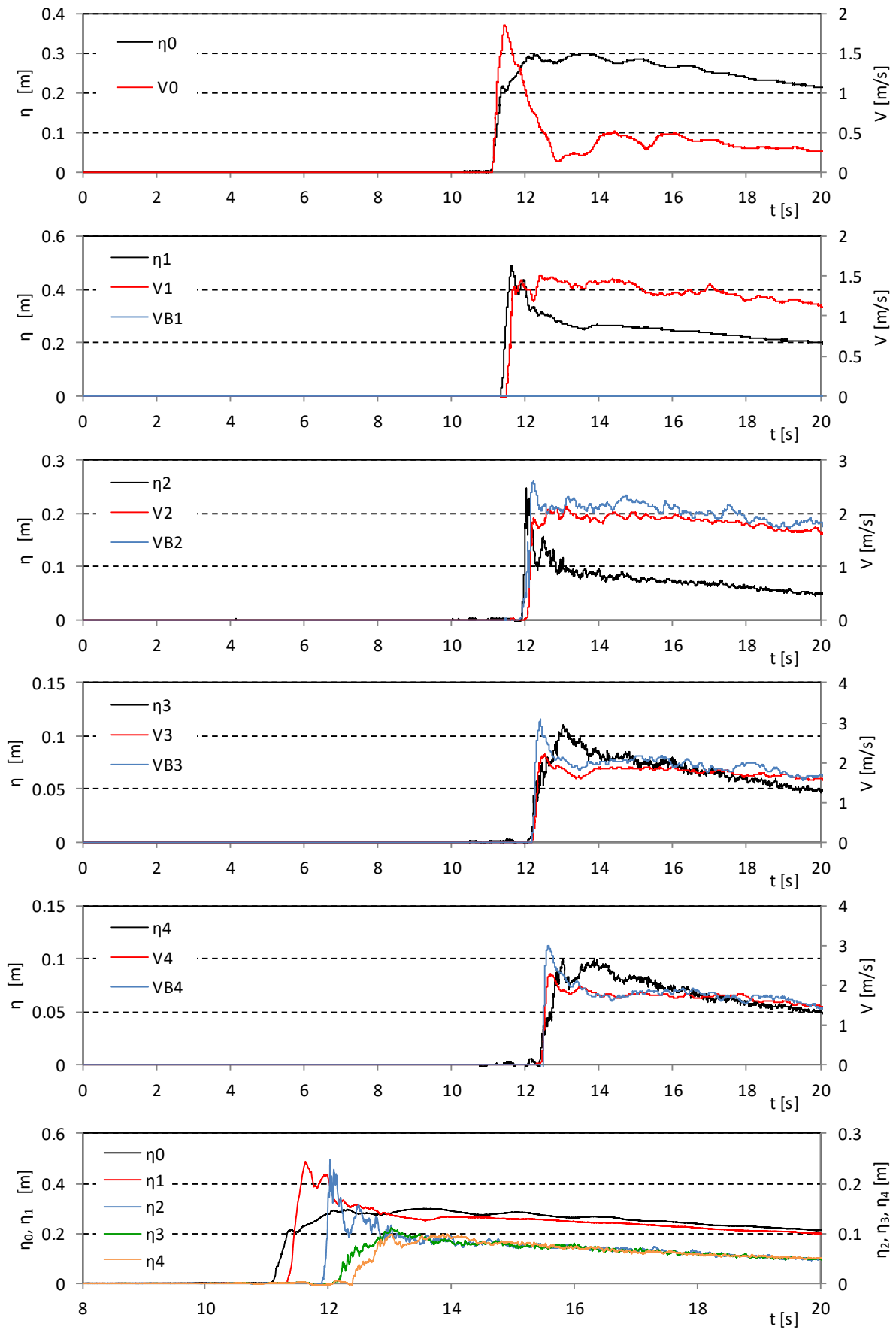


図- 4.5 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.125m, 設置位置 0.625m (Wd11)

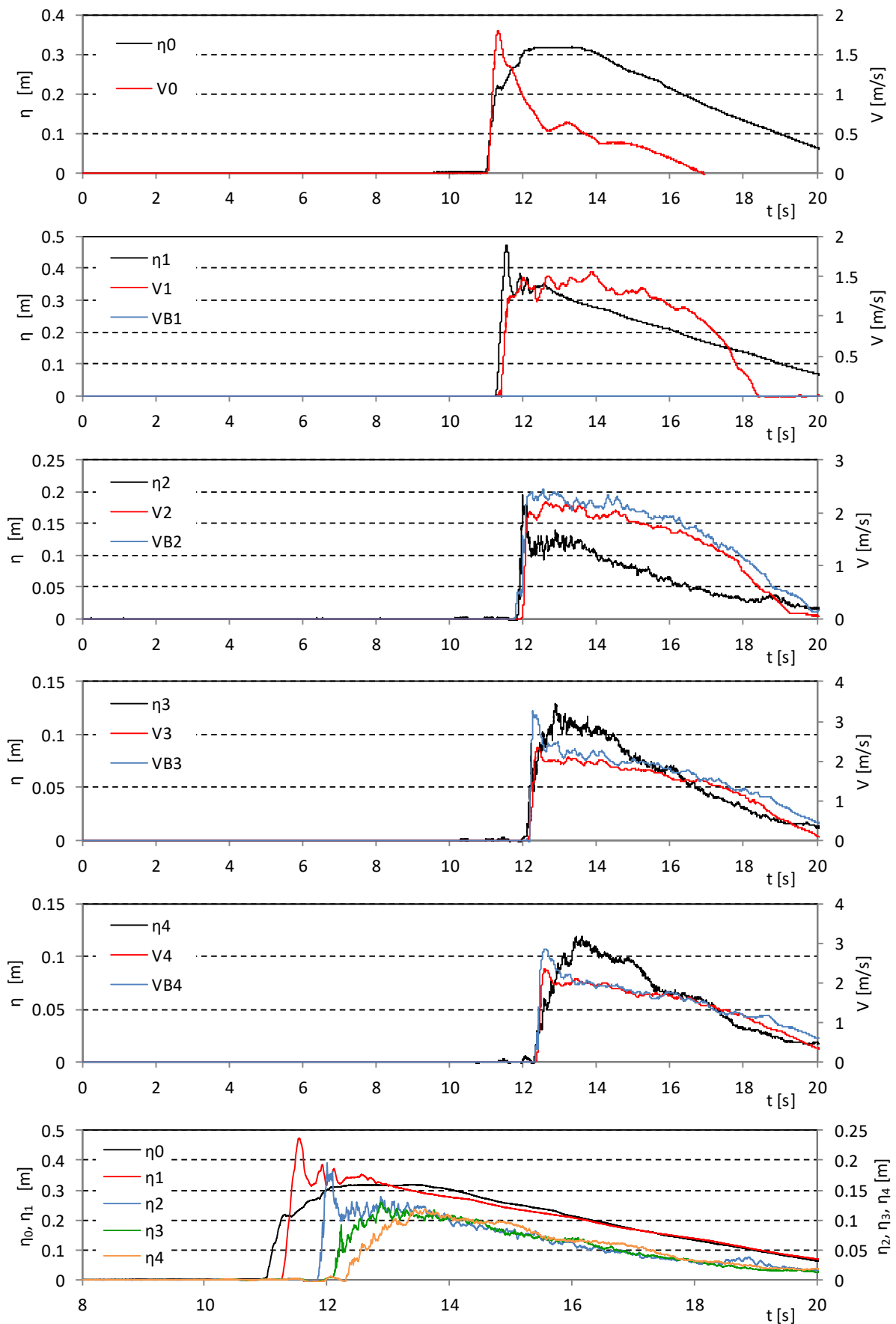


図- 4.5 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.125m, 設置位置 0.625m (Wd20)

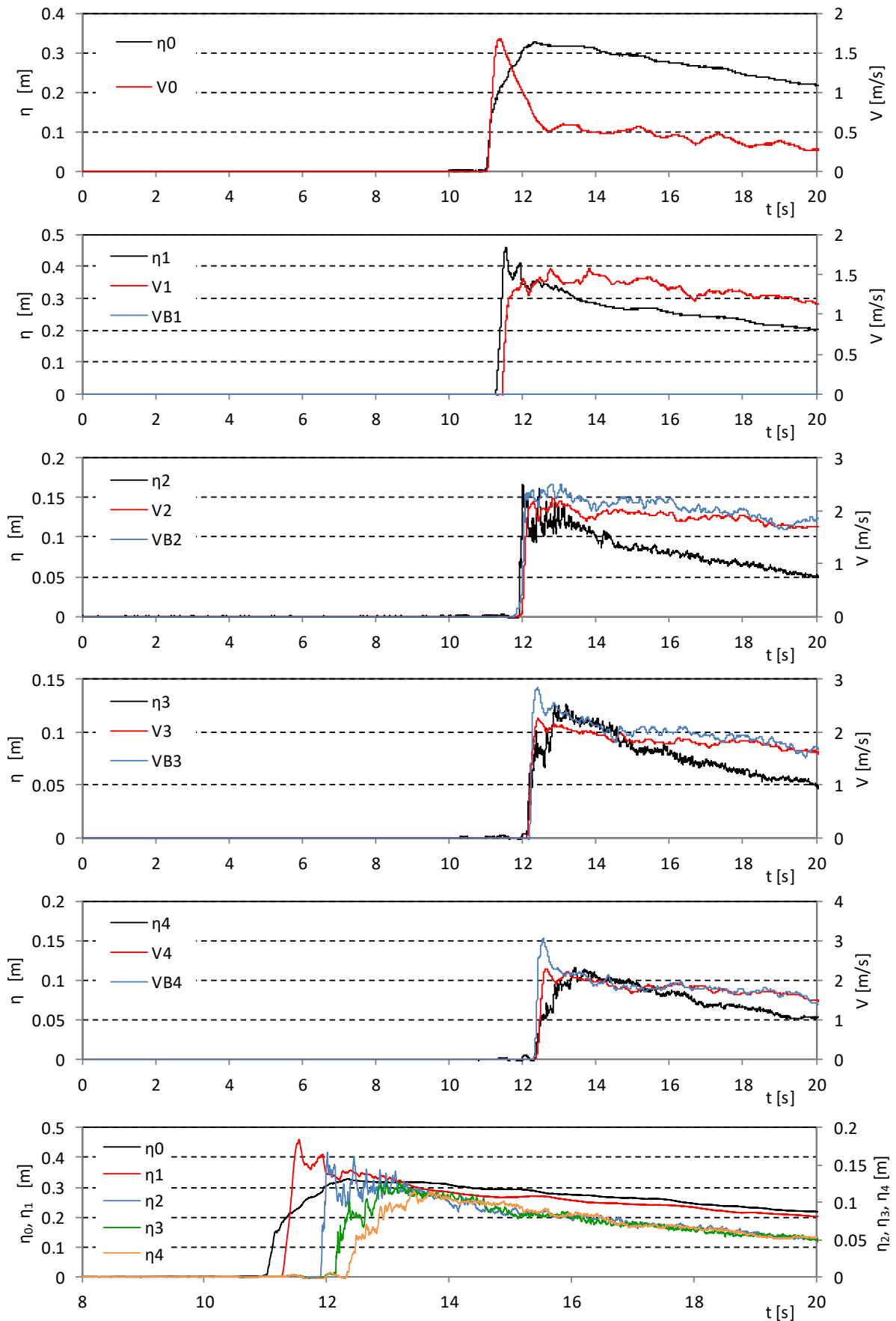


図-4.5 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.125m, 設置位置 0.625m (Wd21)

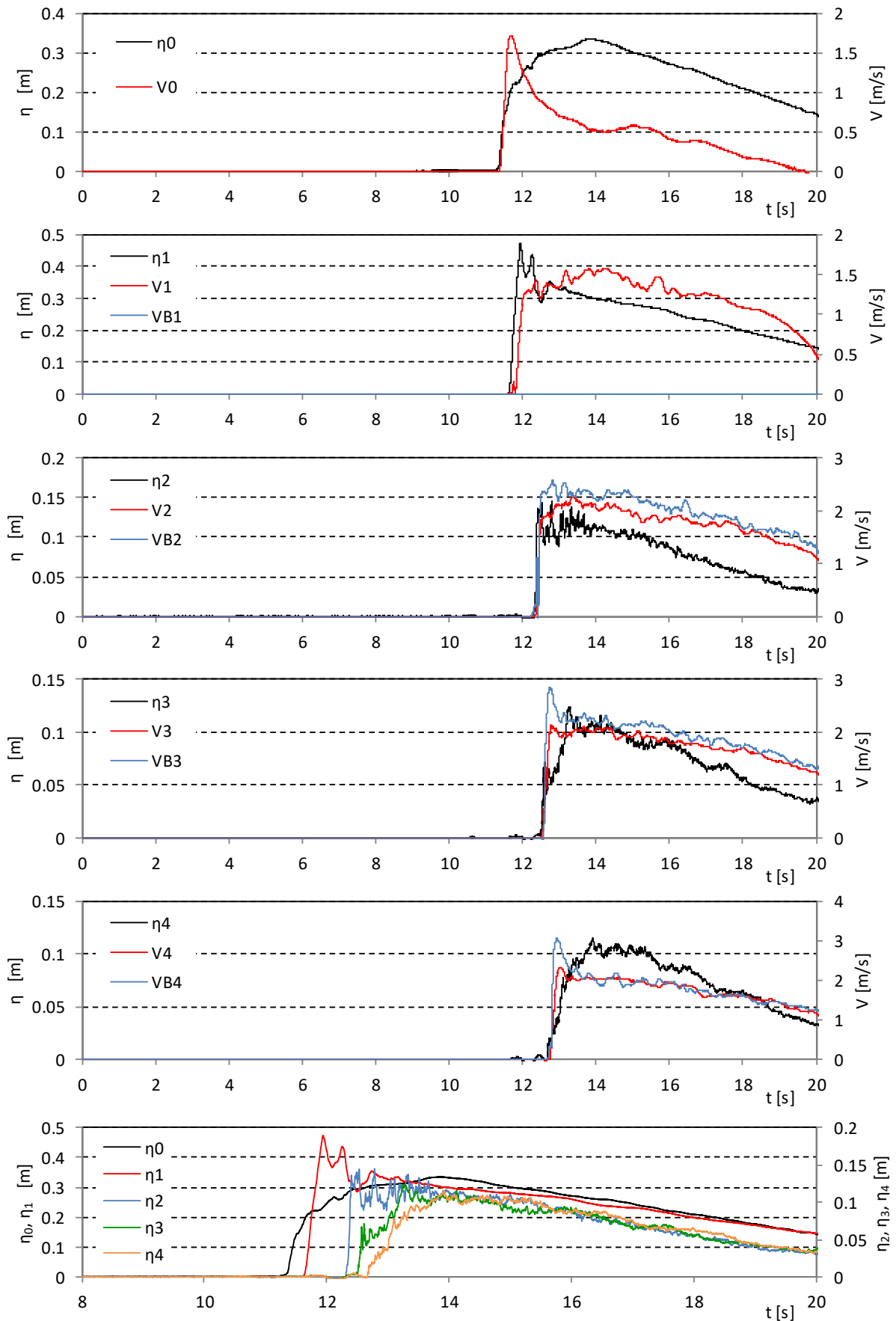


図-4.5 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.125m, 設置位置 0.625m (Wd30)

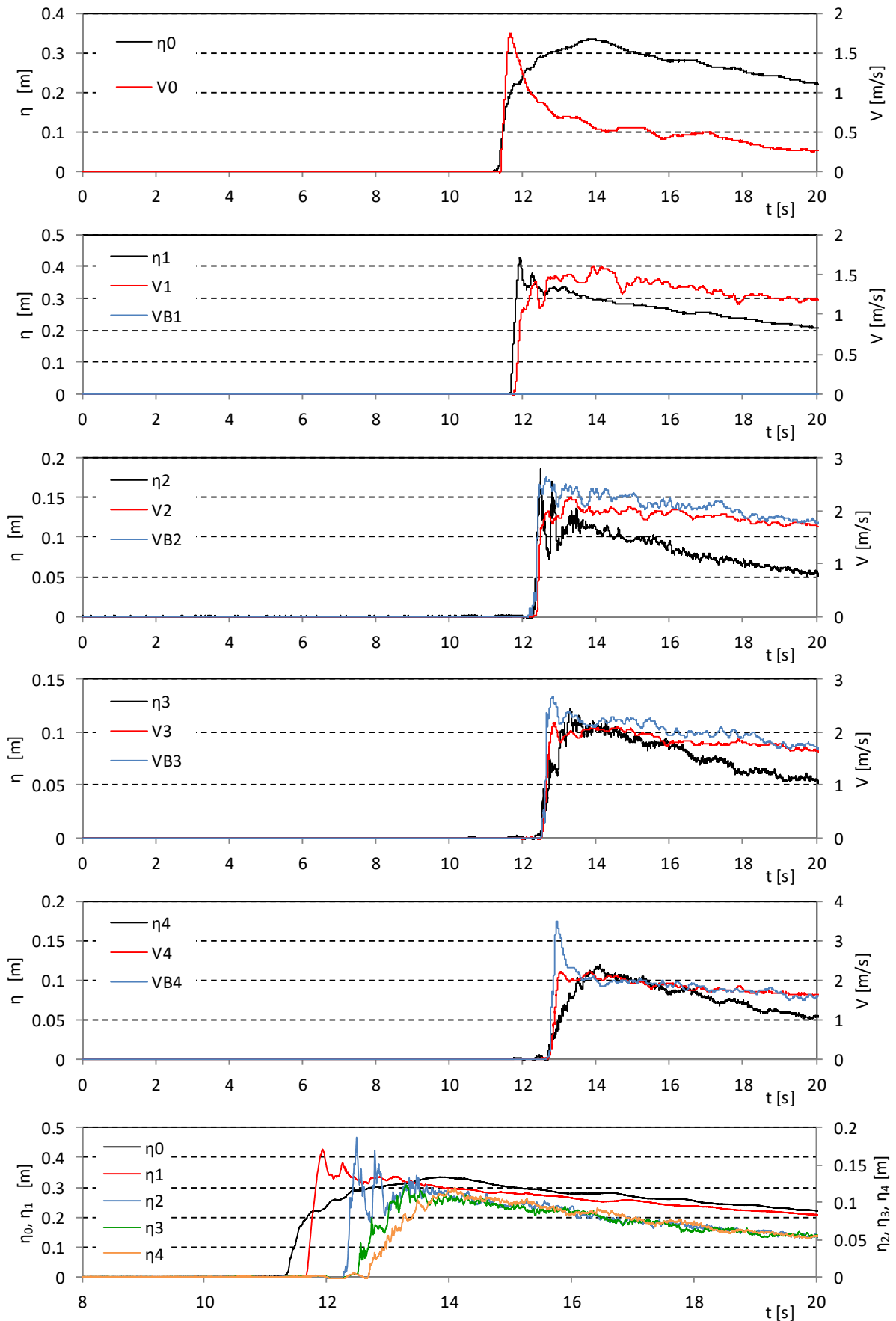


図-4.5 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.125m, 設置位置 0.625m (Wd31)

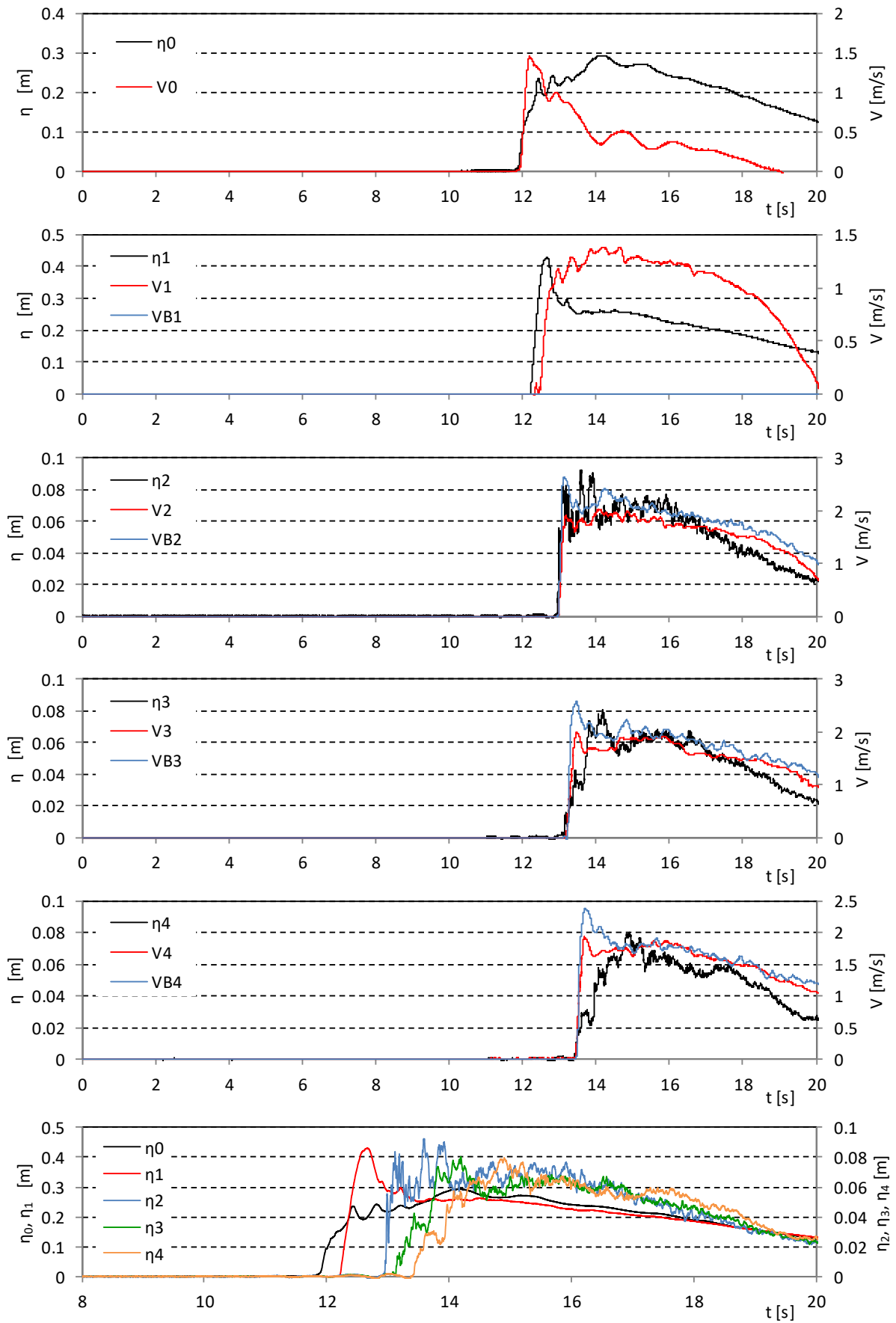


図-4.5 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.125m, 設置位置 0.625m (Wd40)

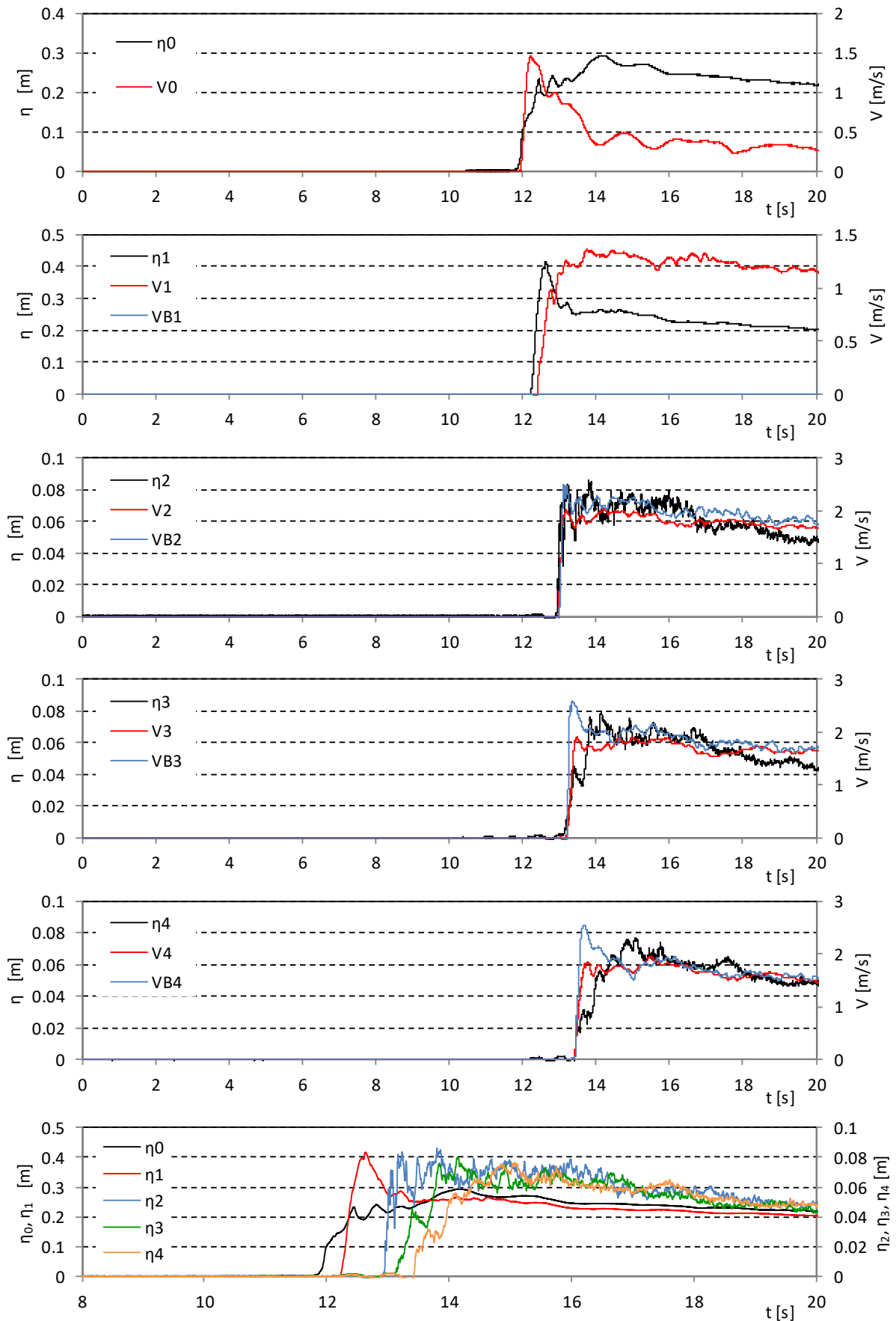


図-4.5 陸上部の浸水深と流速の時系列：堤体高 0.125m, 設置位置 0.625m (Wd41)

4.2. 越流最大浸水深

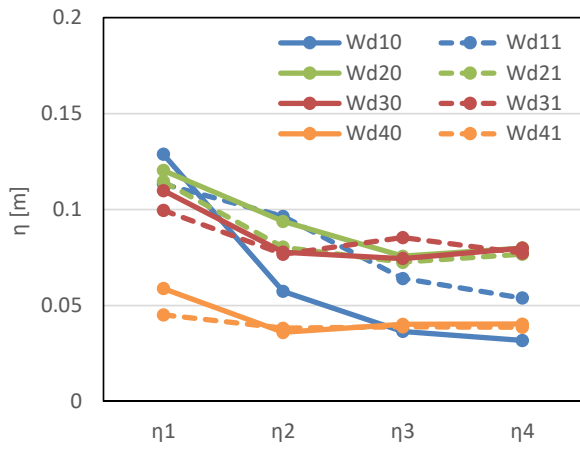
図-4.6は、図-4.2~図-4.5に示した越流浸水深時系列より求めた、越流後の防潮堤背後における、各計測点での最大浸水深を示したものである。また、図-4.7、図-4.8は、最大浸水深が発生した時の流速と、これらから求めたフルード数を示している。

堤体位置0mの時の η_1 、堤体位置0.625mの時の η_2 の値が、Wd40, 41を除き、大きくなっている。これは、図-4.1に示したように、越流の開始時において、堤体を越える際に生じる越波水塊が水位計の付近に落水することと、加えて落水位置では鉛直方向の流速による乱れが生じるために、局所的に水位が高くなることが要因と考えられる。Wd40, 41については、越波の規模が小さく水位計よりも十分手前に落水するために、この影響が出ていないと考えられる。

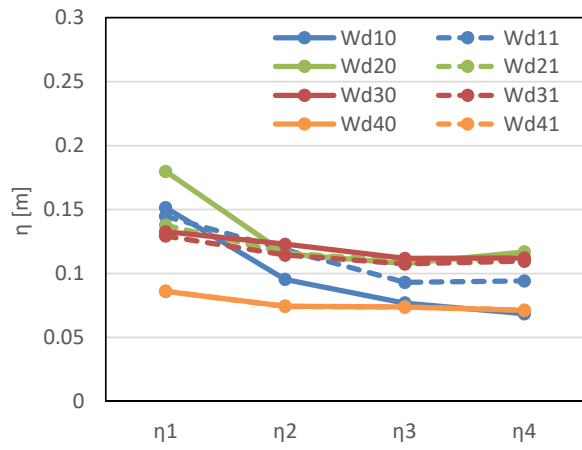
図によると、Wd10とWd11のみ、高水位の継続の有無による違いが出ているが、その他のケースでは、Wd20, Wd30, Wd40とWd21, Wd31, Wd41の値が同程度であることから、ピーク後の高水位の継続の影響は、ある程度津波周期が長くなると、最大浸水深には表れていないことが分かる。また、Wd20, Wd30, Wd21, Wd31は、ほぼ同じ値となっており、周期の短いWd10と、波高の小さいWd40, 41がこれらよりも小さくなっている。また、Wd10とWd11ではWd11の方が大きく、Wd20等のケースよりも若干小さいものの、近い値を示している。波形立ち上がりの波形周期が短くても、高水位が続くことにより、波長が長い津波となるため、他の同じ津波高のケースと同程度の浸水深になることが分かる。以上の特徴は、前述の通過波検定試験の結果と整合するものである。

図-4.7の流速は、堤体に最も近い計測点（図中の左端）とWd10, Wd11のケースでばらつきが大きいものの、各ケースの相対的な大小の関係は、最大浸水深と類似である。なお、堤体位置0mのV1、堤体位置0.62mのV2に、非常に小さな流速が計測されているケースがあるが、これは、最大浸水深が水塊落下時に発生しているため、空気の巻き込みや乱れの影響が大きく、流速計の反応が遅れているために小さくなったものであり、最大浸水深発生時刻よりも少し遅れた時刻では、他のケースと同程度（2m/s程度）の流速が計測されている。

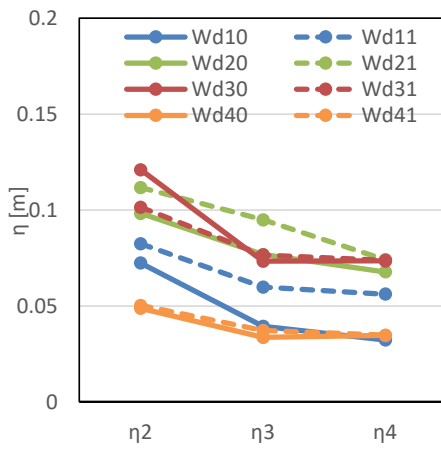
防潮堤を超えて越流した後の浸水の流れは、乱れ成分が大きいため、浸水深に比べて流速の時間変動が大きく、そのためばらつきの大きな結果になっていると考ええる。一方、図-4.8のフルード数をみると、流速のばらつきの影響を受けてはいるが、堤体高0.25mでは $Fr = 2.5$ 程度、堤体高0.125mでは $Fr = 2.0$ 程度と、各堤体高でフルード数がほぼ同一になっていることが分かる。例えば、Wd40, Wd41は他のケースに比較して浸水深は小さいが、フルード数は他のケースと同程度となっている。



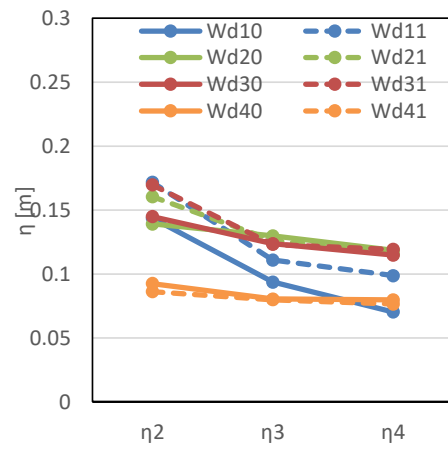
(a) 堤体高0.25m, 堤体位置0m



(b) 堤体高0.125m, 堤体位置0m

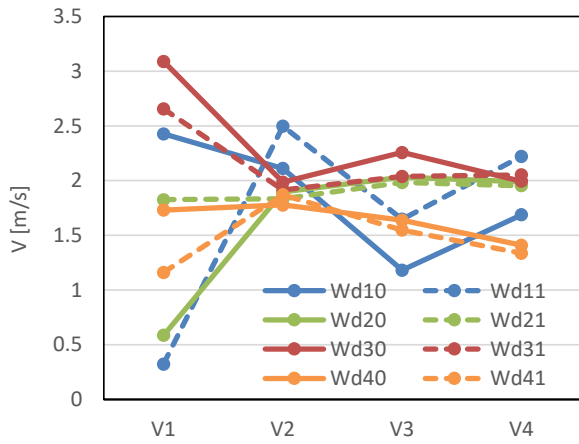


(c) 堤体高0.25m, 堤体位置0.625m

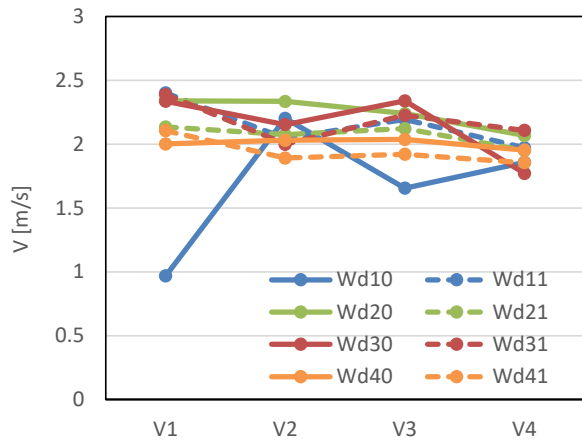


(d) 堤体高0.125m, 堤体位置0.625m

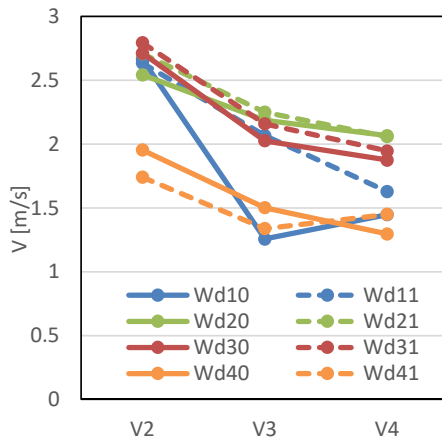
图- 4.6 越流最大浸水深



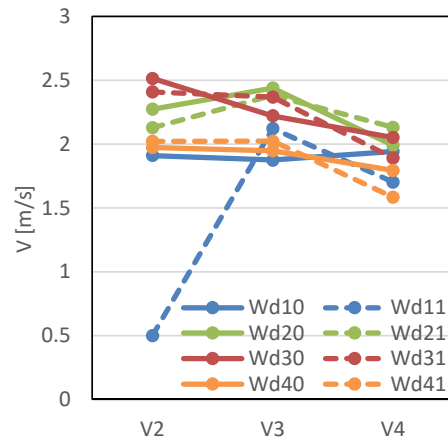
(a) 堤体高0.25m, 堤体位置0m



(b) 堤体高0.125m, 堤体位置0m

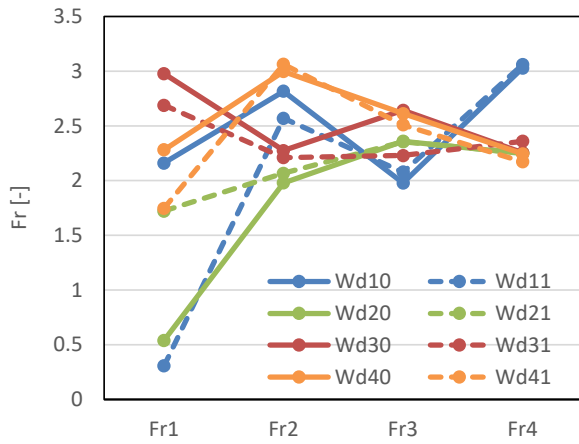


(c) 堤体高0.25m, 堤体位置0.625m

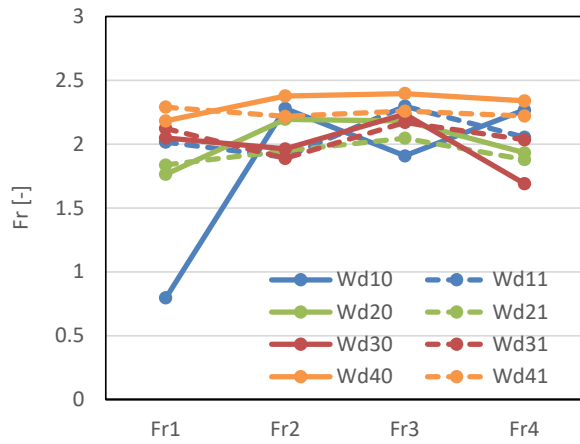


(d) 堤体高0.125m, 堤体位置0.625m

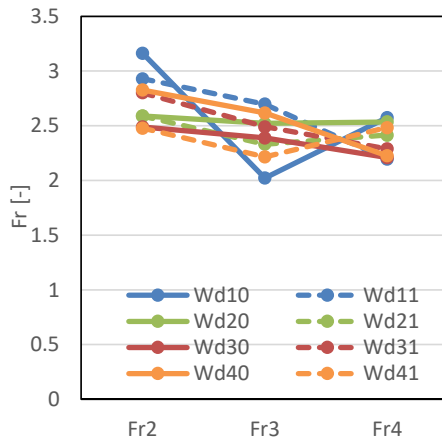
図- 4.7 越流最大浸水深発生時の流速



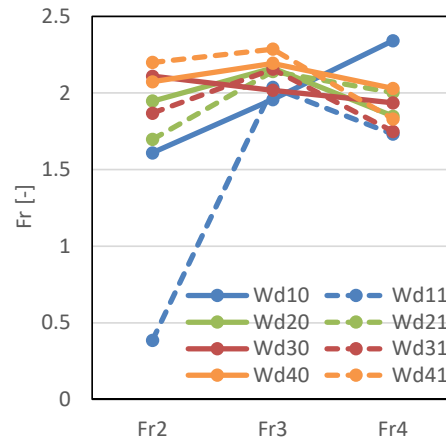
(a) 堤体高0.25m, 堤体位置0m



(b) 堤体高0.125m, 堤体位置0m



(c) 堤体高0.25m, 堤体位置0.625m



(d) 堤体高0.125m, 堤体位置0.625m

図-4.8 越流最大浸水深発生時のフルード数

4.3. 最大浸水深比

表- 4.1 に、最大越流浸水深の一覧を示す。ここで、 h_d は堤体の高さ、 $\eta_0 \sim \eta_4$ は各計測位置における浸水深の最大値、 $\eta_0' \sim \eta_4'$ は堤体模型がない場合（通過波）の各計測位置における浸水深の最大値、 η^* は堤体位置での越流最大浸水深（越流時の最大せり上がり高さ）を示す。また図- 4.9 には、越流度合いを示すパラメタ η^*/h_d と、最大浸水深比 η/η^* の関係を示した。ここで図- 4.9 では、最大浸水深比が 1 を超えているものがある。これらの値が生じるのは、防潮堤背後の計測点（計測点 1 または 2）であり、前述した、越波水塊の落下位置の影響を受けている（図- 4.1 参照）ものと考えられ、浸水深とは異なる値を計測していると考えられる。そこで、図- 4.9 から最大浸水深比が 1 を超えるものを除外したものを、図- 4.10 に示す。

図- 4.10 によると、越流度合いが大きくなるに従い最大浸水深比は大きくなり、越流度合いが概略 3 を超えると最大浸水深比は 1 すなわち最大越流浸水深と最大通過波浸水深の値がほぼ等しくなる。これは、越流浸水深に対する防潮堤の効果が小さくなることを意味し、この特性は、前述の越流水脈の落下位置の影響を受けているケースを除き、計測点の位置（St.2~4）によらず同じであることが分かる。

なお表- 4.1 には、最大浸水深比が 1 を超えているものに網掛けをしている。そのほとんどが、堤体の高さが低い 0.125m のケースであり、また堤体位置が 0.625m のケースの場合が多い。堤体が低くて越流の規模が大きく、また一端陸上に遡上し水平流速が大きい状態で堤体を越流する場合に、最大浸水深比が 1 を超える傾向にあると言える。

表-4.1 越流浸水深の最大値

	hd	η_0	η_1	η_2	η_3	η_4	η^*	η^*/hd	η_1/η_1'	η_2/η_2'	η_3/η_3'	η_4/η_4'
堤体位置0m												
Wd10	0.250	0.569	0.129	0.057	0.036	0.032	0.569	2.275	1.018	0.519	0.395	0.317
Wd11	0.250	0.636	0.113	0.096	0.064	0.054	0.636	2.545	0.743	0.636	0.460	0.411
Wd20	0.250	0.602	0.120	0.094	0.076	0.080	0.602	2.410	0.687	0.589	0.526	0.611
Wd21	0.250	0.620	0.115	0.080	0.072	0.077	0.620	2.480	0.660	0.500	0.467	0.539
Wd30	0.250	0.583	0.110	0.078	0.074	0.080	0.583	2.331	0.631	0.462	0.479	0.565
Wd31	0.250	0.553	0.100	0.077	0.085	0.077	0.553	2.213	0.565	0.455	0.547	0.536
Wd40	0.250	0.466	0.059	0.036	0.040	0.040	0.466	1.864	0.446	0.268	0.319	0.360
Wd41	0.250	0.456	0.045	0.038	0.039	0.039	0.456	1.826	0.345	0.285	0.311	0.339
Wd10	0.125	0.366	0.151	0.095	0.077	0.068	0.366	2.924	1.196	0.862	0.832	0.685
Wd11	0.125	0.349	0.145	0.118	0.093	0.094	0.349	2.791	0.950	0.781	0.668	0.718
Wd20	0.125	0.363	0.180	0.116	0.108	0.117	0.363	2.903	1.025	0.726	0.748	0.893
Wd21	0.125	0.355	0.138	0.116	0.110	0.110	0.355	2.836	0.793	0.722	0.707	0.773
Wd30	0.125	0.359	0.133	0.123	0.112	0.112	0.359	2.876	0.762	0.731	0.720	0.793
Wd31	0.125	0.359	0.129	0.114	0.107	0.110	0.359	2.876	0.733	0.679	0.688	0.759
Wd40	0.125	0.319	0.086	0.074	0.074	0.071	0.319	2.552	0.652	0.556	0.586	0.636
Wd41	0.125	0.310	0.086	0.074	0.074	0.071	0.310	2.482	0.660	0.556	0.591	0.626
堤体位置0.625m												
Wd10	0.250	0.358	0.600	0.072	0.039	0.032	0.600	2.399		0.655	0.427	0.322
Wd11	0.250	0.376	0.653	0.082	0.060	0.056	0.653	2.613		0.544	0.429	0.429
Wd20	0.250	0.420	0.653	0.098	0.077	0.068	0.653	2.614		0.617	0.533	0.518
Wd21	0.250	0.424	0.648	0.112	0.095	0.074	0.648	2.594		0.696	0.612	0.521
Wd30	0.250	0.430	0.585	0.121	0.073	0.073	0.585	2.340		0.720	0.472	0.520
Wd31	0.250	0.414	0.559	0.101	0.077	0.074	0.559	2.237		0.603	0.490	0.512
Wd40	0.250	0.331	0.413	0.049	0.034	0.035	0.413	1.651		0.364	0.267	0.309
Wd41	0.250	0.342	0.400	0.050	0.037	0.035	0.400	1.598		0.377	0.298	0.305
Wd10	0.125	0.262	0.489	0.144	0.094	0.070	0.489	3.909		1.301	1.014	0.702
Wd11	0.125	0.298	0.488	0.172	0.111	0.099	0.488	3.901		1.132	0.795	0.753
Wd20	0.125	0.318	0.474	0.139	0.130	0.118	0.474	3.789		0.874	0.901	0.906
Wd21	0.125	0.328	0.461	0.160	0.126	0.115	0.461	3.685		1.000	0.815	0.812
Wd30	0.125	0.335	0.474	0.145	0.124	0.115	0.474	3.791		0.862	0.797	0.811
Wd31	0.125	0.334	0.427	0.170	0.123	0.119	0.427	3.418		1.008	0.789	0.826
Wd40	0.125	0.293	0.430	0.092	0.080	0.080	0.430	3.442		0.690	0.639	0.713
Wd41	0.125	0.293	0.417	0.086	0.080	0.076	0.417	3.338		0.646	0.640	0.672

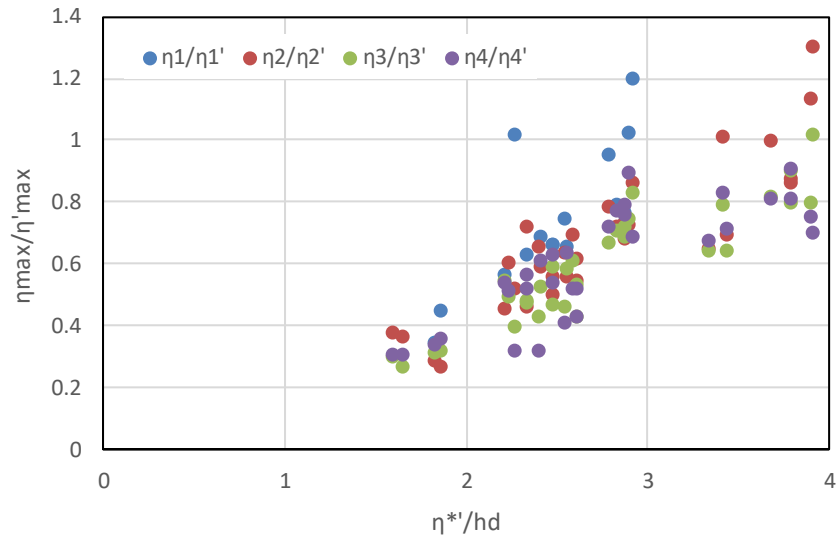


図- 4.9 越流度合いと最大浸水深比の関係

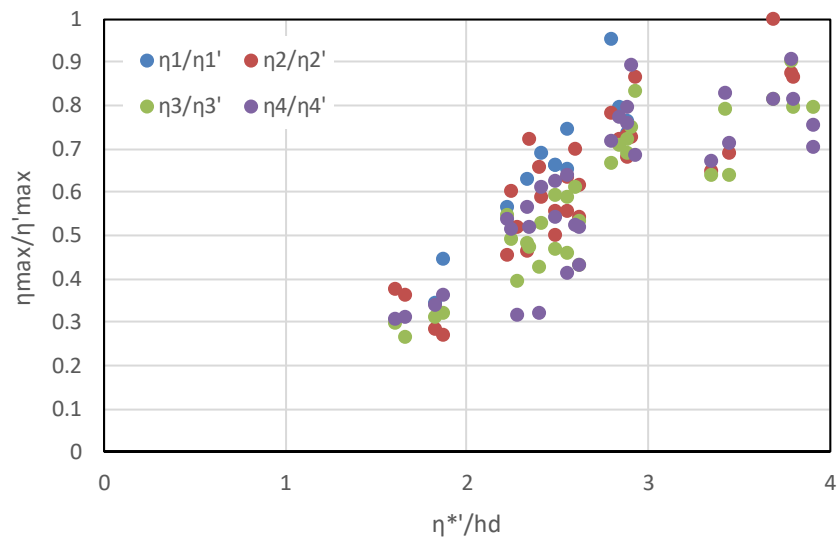


図- 4.10 越流度合いと最大浸水深比の関係 (最大浸水深比 1 以下のみ)

5. 越流試験シミュレーション

5.1. シミュレーション手法と解析条件

(1)解析モデル

水理試験を対象に、数値シミュレーション解析を実施し、解析手法の適用性を確認した。ここでは、水面変動を伴う流れ場を解析可能な手法の1つであるVOF法 (Volume of Fluid Method) を用いた解析ツールと、浅水長波方程式を基礎式とした平面2次元解析手法の2種類を用いて水理試験の再現解析を実施した。VOF法の解析コードには、オープンソースコードであるOpenFOAM(v1806)を適用した。これは、連続の式及びNavier-Stokes方程式を基礎式とし、界面捕捉法にVOF法を用いている数値流体解析コードである。浅水長波方程式の解析コードには、解析コードの公開されているT-STOC (国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所) を適用した。T-STOCは、STOC-ML (準3次元モデル)、STOC-IC (3次元モデル)、STOC-DM (漂流物モデル) の3種類のコードからなるが、ここではSTOC-MLを用いた。STOC-MLは静水近似を用いた多層モデルであるが、これを1層のみとすることにより一般的な浅水長波方程式を基礎式とした解析となる。解析条件の一覧を表-5.1.1に、解析に用いた空気・水の物性値を表-5.1.2に示す。

(2)解析領域

直立護岸のケースの解析領域は、水理試験のSt.3よりも上流側全体とした。また、単純勾配地形は、類似事業の水理試験模型に準じて図-5.1.1とし、直立護岸と同様にSt.3よりも上流側全体を解析対象領域とした。

(3)解析格子の解析時間ステップ

OpenFOAMの解析領域と解析格子を、図-5.1.2に示す。OpenFOAMにおける解析格子は2.5cmを基本とし、護岸近傍および越流浸水深の解析対象部分を1.25cmとした。解析時間ステップについては、クーラン数が0.5を超えないよう解析時間間隔を自動調整する設定とし、解析時間間隔の最大値を0.001sに設定した。T-STOCの解析格子は、2.5cmで一定とした。

(4)入力津波条件

解析では、2次元水理試験で設定した計測点Aを造波境界として試験水槽をモデル化した。造波境界では、水理試験で計測された計測点Aの水位 η_A および流速 V_A の時系列を入力することで造波を行った。ただし、後述する試験ケースにおいて、単純勾配地形は水理試験を実施しておらず、シミュレーションでのみ地形の影響を検討するものである。そのため、類似事業である「平成29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 (波圧影響)) 事業」の試験データを入力条件として用いた。

表- 5.1.1 解析条件

	OpenFOAM	T-STOC
基礎方程式	気液二相流についての Navier-Stokes 方程式および連続式	非線形浅水長波方程式 浅水理論による連続式と運動方程式
気液界面の 補足手法	VOF 法	N/A
格子間隔	1.25~2.5cm	2.5cm
時間間隔	自動調整 $\Delta t_{\max}=0.001s$ (最大クーラン数 0.5)	自動調整 $\Delta t=0.0001\sim 0.001s$
境界条件	底面部：Non-slip 条件 壁面部：Non-slip 条件 上端：開境界条件 沖合造波位置 (St.A)：造波境界条件	底面部： $n = 0.015m^{-1/3}s$ (マニングの粗度係数) 沖合造波位置 (St.A)：造波境界条件
造波方法	沖合造波位置 (St.A) に水理試験で計測された 水位および流速の時系列データを入力	
乱流モデル	k- ϵ モデル	N/A

表- 5.1.2 空気及び水の物性値

物性	空気	水
密度 ρ	1.205kg/m ³	1000 kg/m ³
動粘性係数 ν	$1.5 \times 10^{-5} m^2/s$	$1.0 \times 10^{-6} m^2/s$

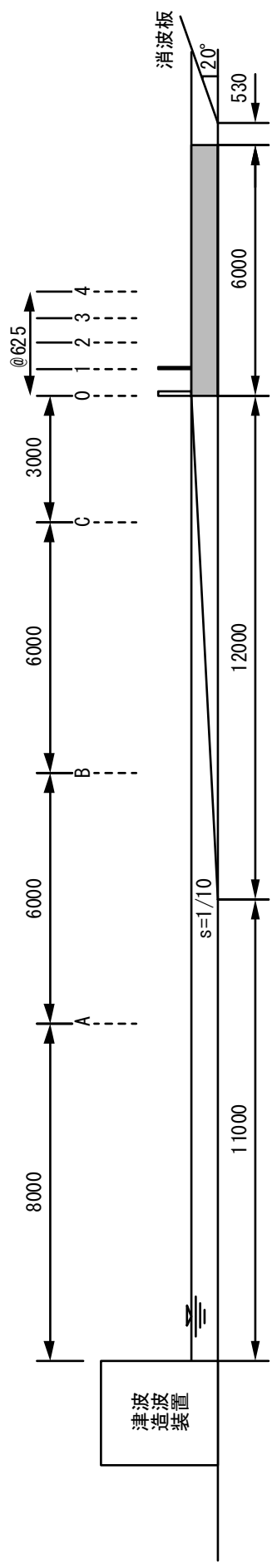
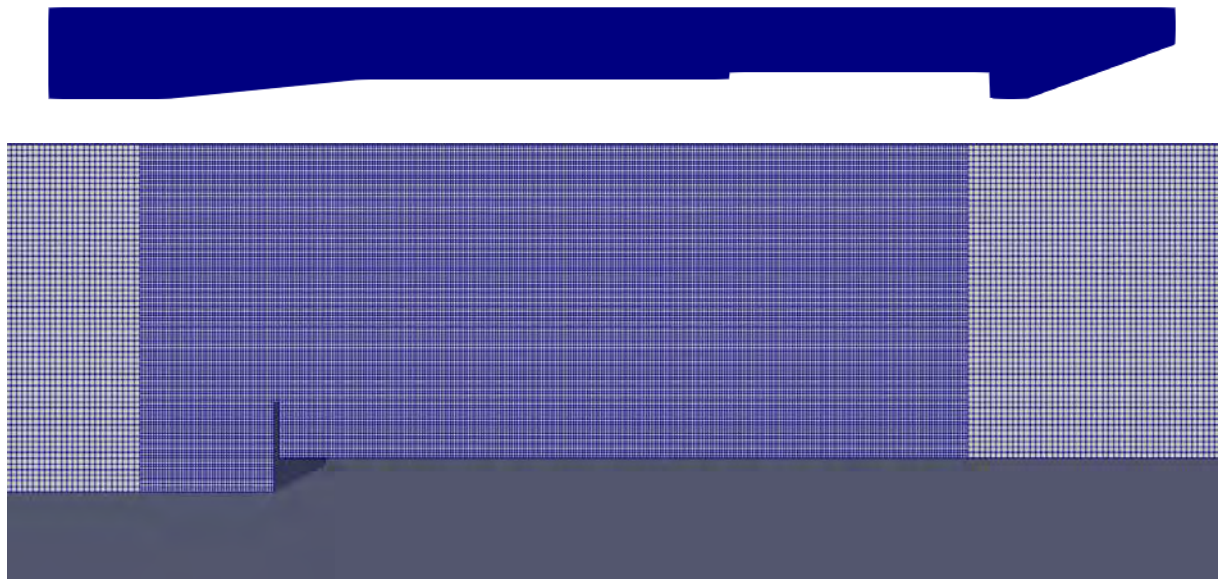
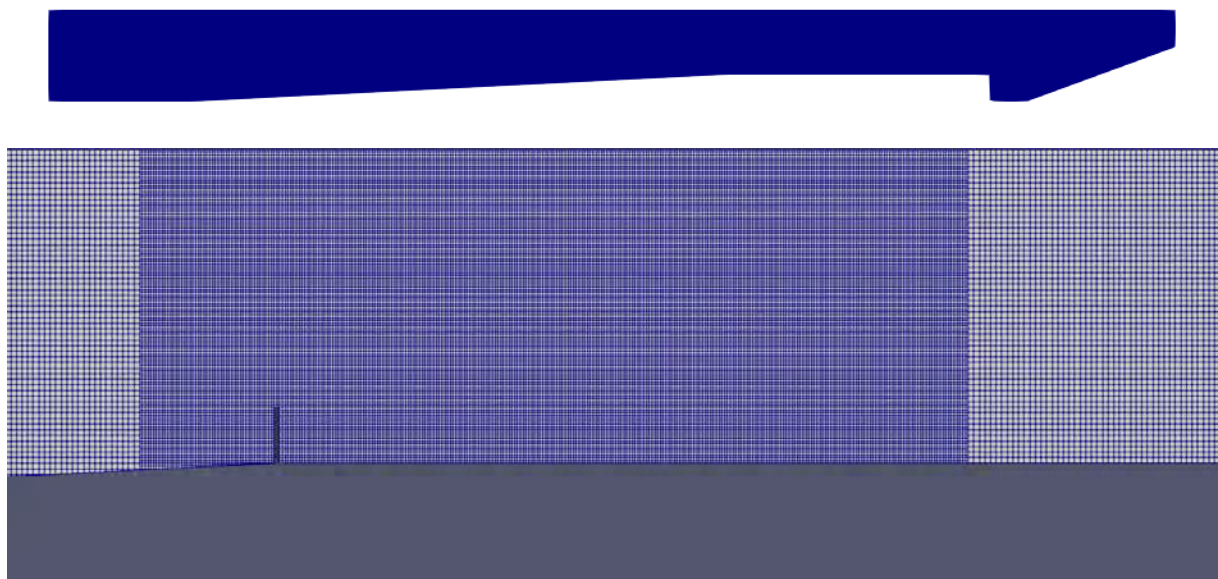


図-5.1.1 単純勾配地形と計測位置



(a)直立護岸



(b)単純勾配

図- 5.1.2 堤体周辺の解析格子 (単純勾配, OpenFOAM)

5.2. 解析ケース

表-5.2.1, 表-5.2.2 に解析ケース一覧を示す. 2次元水理試験に適用した波全てを対象とし, また水理試験では直立護岸地形のみを対象としたが, 数値シミュレーションにおいては地形の影響を検討するため, 直立護岸と単純勾配地形の2種類を対象とした. 単純勾配の地形を, 図-5.1.1 に示す. 直立護岸については, 水理試験の越流試験方法を参照されたい. 水理試験と同様に, 堤体の設置位置を2種類, 堤体高さを2種類とし, 通過波検定試験では16ケース, 越流試験では64ケースを対象に, OpenFOAM および T-STOC のそれぞれで解析を実施した.

解析結果は, 水理試験の計測位置での水位, 流速を時系列で出力し, 水理試験との比較を行った.

表-5.2.1 シミュレーション解析ケース (通過波検定試験)

No	ケース名		波形
	直立護岸	単純勾配	
1	F-Wd10-0-0	S-Wd10-0-0	Wd10
2	F-Wd11-0-0	S-Wd11-0-0	Wd11
3	F-Wd20-0-0	S-Wd20-0-0	Wd20
4	F-Wd21-0-0	S-Wd21-0-0	Wd21
5	F-Wd30-0-0	S-Wd30-0-0	Wd30
6	F-Wd31-0-0	S-Wd31-0-0	Wd31
7	F-Wd40-0-0	S-Wd40-0-0	Wd40
8	F-Wd41-0-0	S-Wd41-0-0	Wd41

表- 5.2.2 シミュレーション解析ケース (越流試験)

No	ケース名		波形	堤体高	堤体位置	
	直立護岸	単純勾配				
1	F-Wd10-A-0	S-Wd10-A-0	Wd10	0.25m	0m	
2	F-Wd11-A-0	S-Wd11-A-0	Wd11			
3	F-Wd20-A-0	S-Wd20-A-0	Wd20			
4	F-Wd21-A-0	S-Wd21-A-0	Wd21			
5	F-Wd30-A-0	S-Wd30-A-0	Wd30			
6	F-Wd31-A-0	S-Wd31-A-0	Wd31			
7	F-Wd40-A-0	S-Wd40-A-0	Wd40			
8	F-Wd41-A-0	S-Wd41-A-0	Wd41			
9	F-Wd10-B-0	S-Wd10-B-0	Wd10	0.125m		0m
10	F-Wd11-B-0	S-Wd11-B-0	Wd11			
11	F-Wd20-B-0	S-Wd20-B-0	Wd20			
12	F-Wd21-B-0	S-Wd21-B-0	Wd21			
13	F-Wd30-B-0	S-Wd30-B-0	Wd30			
14	F-Wd31-B-0	S-Wd31-B-0	Wd31			
15	F-Wd40-B-0	S-Wd40-B-0	Wd40			
16	F-Wd41-B-0	S-Wd41-B-0	Wd41			
17	F-Wd10-A-1	S-Wd10-A-1	Wd10	0.25m	0.625m	
18	F-Wd11-A-1	S-Wd11-A-1	Wd11			
19	F-Wd20-A-1	S-Wd20-A-1	Wd20			
20	F-Wd21-A-1	S-Wd21-A-1	Wd21			
21	F-Wd30-A-1	S-Wd30-A-1	Wd30			
22	F-Wd31-A-1	S-Wd31-A-1	Wd31			
23	F-Wd40-A-1	S-Wd40-A-1	Wd40			
24	F-Wd41-A-1	S-Wd41-A-1	Wd41			
25	F-Wd10-B-1	S-Wd10-B-1	Wd10	0.125m		0.625m
26	F-Wd11-B-1	S-Wd11-B-1	Wd11			
27	F-Wd20-B-1	S-Wd20-B-1	Wd20			
28	F-Wd21-B-1	S-Wd21-B-1	Wd21			
29	F-Wd30-B-1	S-Wd30-B-1	Wd30			
30	F-Wd31-B-1	S-Wd31-B-1	Wd31			
31	F-Wd40-B-1	S-Wd40-B-1	Wd40			
32	F-Wd41-B-1	S-Wd41-B-1	Wd41			

5.3. シミュレーション結果

5.3.1. 通過波検定試験

直立護岸について、通過波検定試験における沖波の水位と流速の、解析結果と試験結果を比較したものを、OpenFOAM について図-5.3.1 に、また T-STOC について図-5.3.2 に示す。また同様に、陸上の通過浸水深と流速について比較したものを、図-5.3.3、図-5.3.4 に示す。単純勾配については、解析結果のみについて、沖波の水位と流速の結果を図-5.3.5 (OpenFOAM)、図-5.3.6 (T-STOC) に、陸上の通過波浸水深と流速の結果を図-5.3.7 (OpenFOAM)、図-5.3.8 (T-STOC) に示す。

沖合の水位については、OpenFOAM 解析による結果は全ケースで、解析結果と試験結果が良く一致しており、St.C における波の分裂についても精度よく再現している。T-STOC については、St.A, B では精度よく再現されているが、非線形性、分散性が卓越する St.3 で、値は概略一致しているものの、津波到達時の時系列波形の立ち上がりが急峻となり、分裂波も再現できない。一般に非線形性が卓越すると、水位の高い部分の波速が大きくなるため、波形が前傾化する。一方、分散性は水面の曲率が正（下に凸）の場合に波速が大きくなり、負の場合に小さくなるため、水面の立ち上がり部が速く進み、波峰の部分が遅れて前傾化が緩和される。T-STOC では、非線形性は考慮されているが分散性は考慮されていないため、特に St.C で試験結果よりも波形前面が急峻となる。一方、3次元解析である OpenFOAM では、分散性が考慮されている。なお、鉛直積分型方程式による解析手法でこの分散性を考慮するには、ブシネスク方程式や多層型の解析モデルを適用することが考えられる。

陸上部の通過波については、OpenFOAM 解析による結果は浸水深の再現精度は高いが、流速を若干小さく評価する傾向にあり、特に浸水深の上昇フェーズでこの傾向が強い。この要因としては、解析メッシュの影響が考えられ、津波先端部では VOF 値が 1 よりも小さな解析格子が複数存在することになるため、圧力勾配を正しく評価できず、過小評価している可能性がある。本解析では最大浸水深が主なターゲットであるため、浸水深上昇時の流速の影響は小さいと考えられるが、詳細な解析メッシュで解析すれば改善する可能性はある。なお、OpenFOAM の流速の解析結果において、特に津波到達時の早い時間帯で、激しい乱れが生じている。遡上する津波の先端部では、ボアの状態で空気を巻き込んでいるため、解析対象メッシュに空気が含まれると見掛けの流速が小さくなってしまい、このような時系列上の乱れが生じていると考えられる。

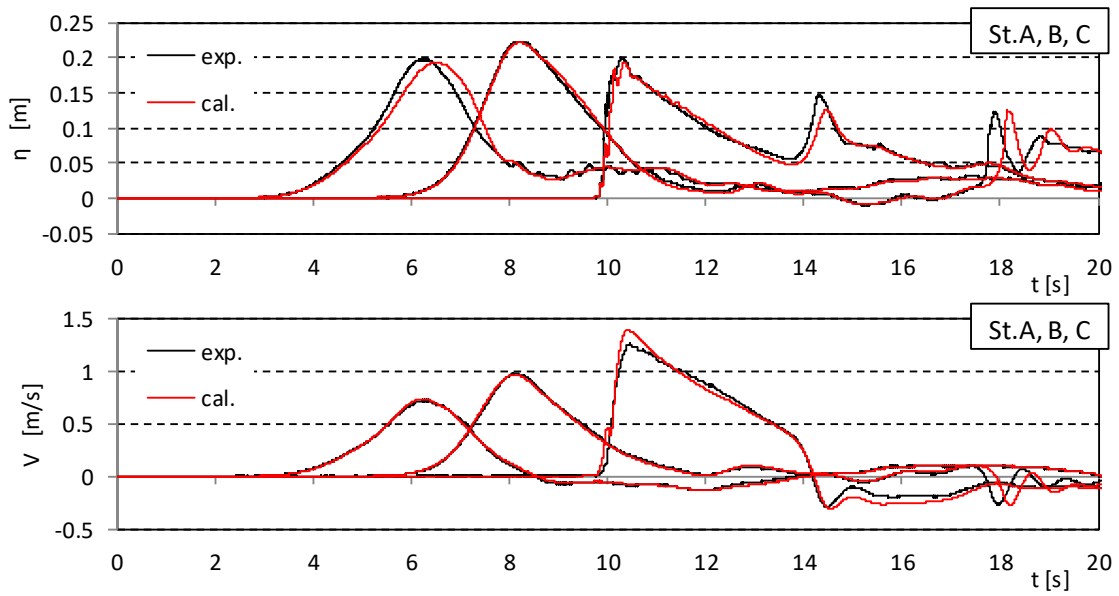


図- 5.3.1 通過波検定試験における入射波の比較 (OpenFOAM, 直立護岸, Wd10)

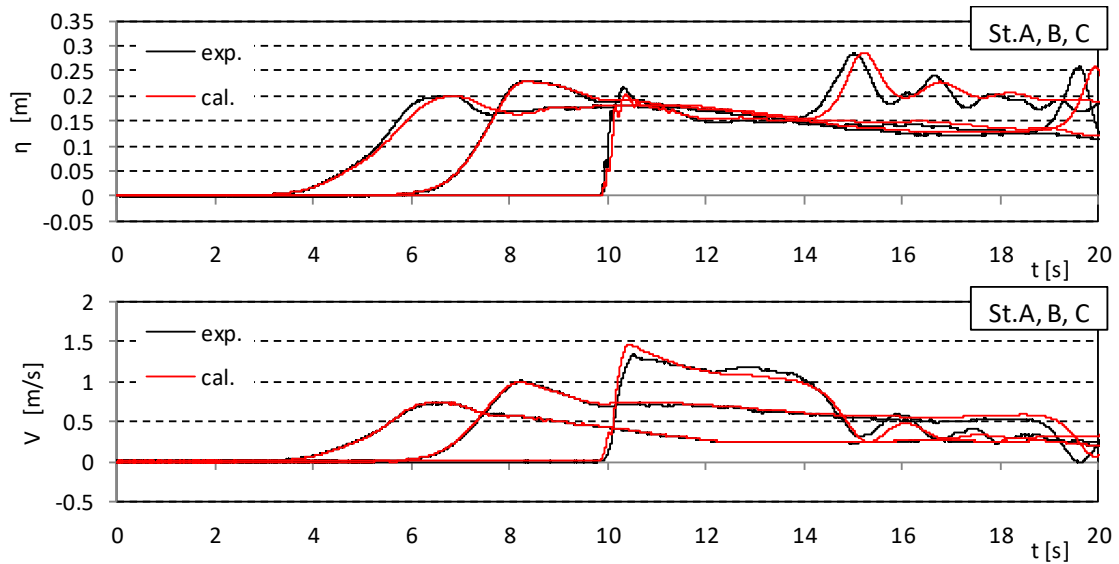


図- 5.3.1 通過波検定試験における入射波の比較 (OpenFOAM, 直立護岸, Wd11)

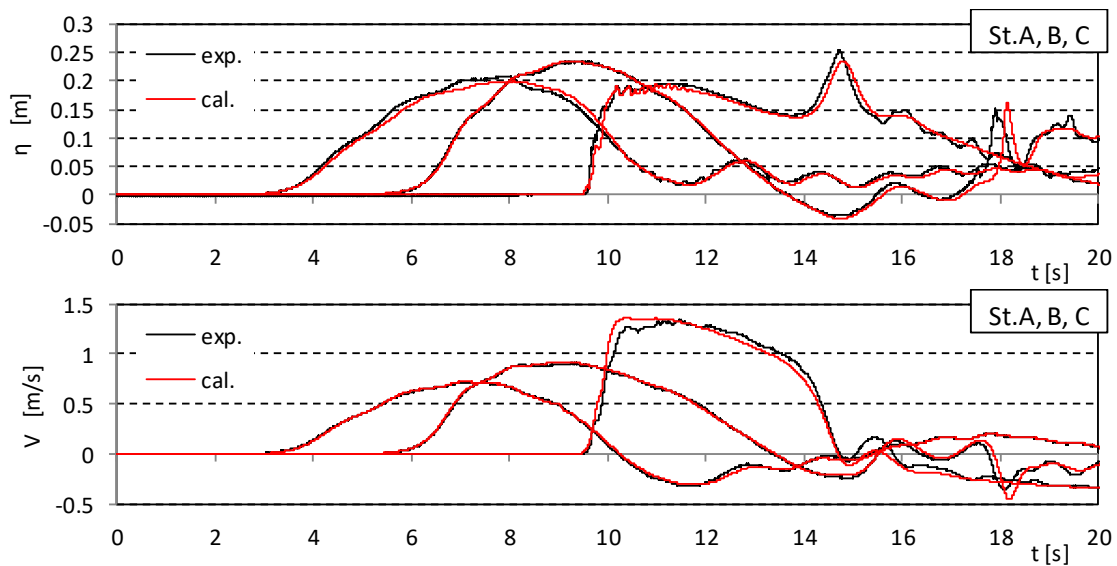


図- 5.3.1 通過波検定試験における入射波の比較 (OpenFOAM, 直立護岸, Wd20)

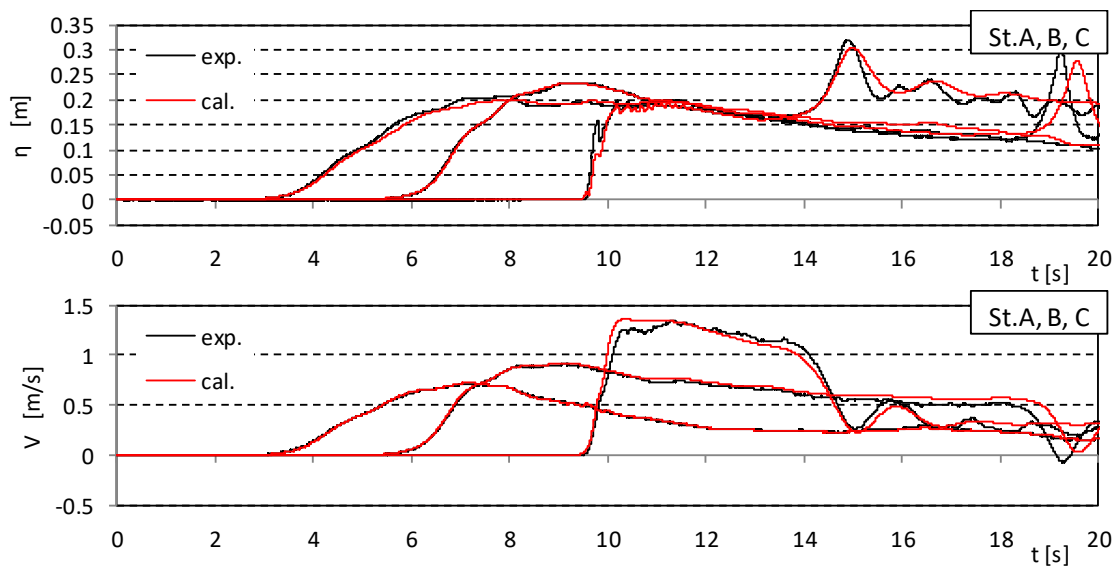


図- 5.3.1 通過波検定試験における入射波の比較 (OpenFOAM, 直立護岸, Wd21)

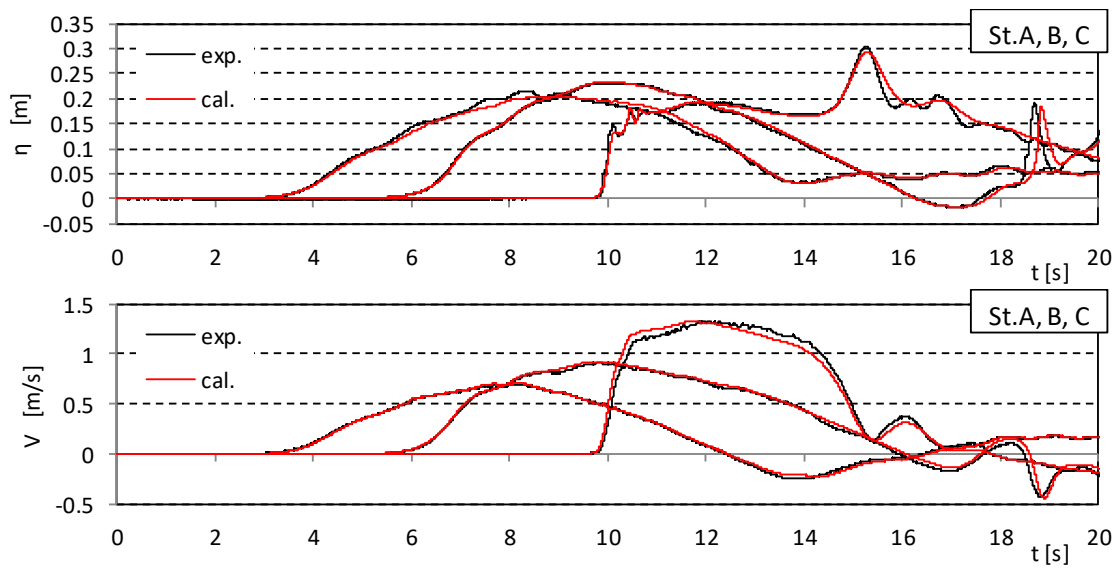


図- 5.3.1 通過波検定試験における入射波の比較 (OpenFOAM, 直立護岸, Wd30)

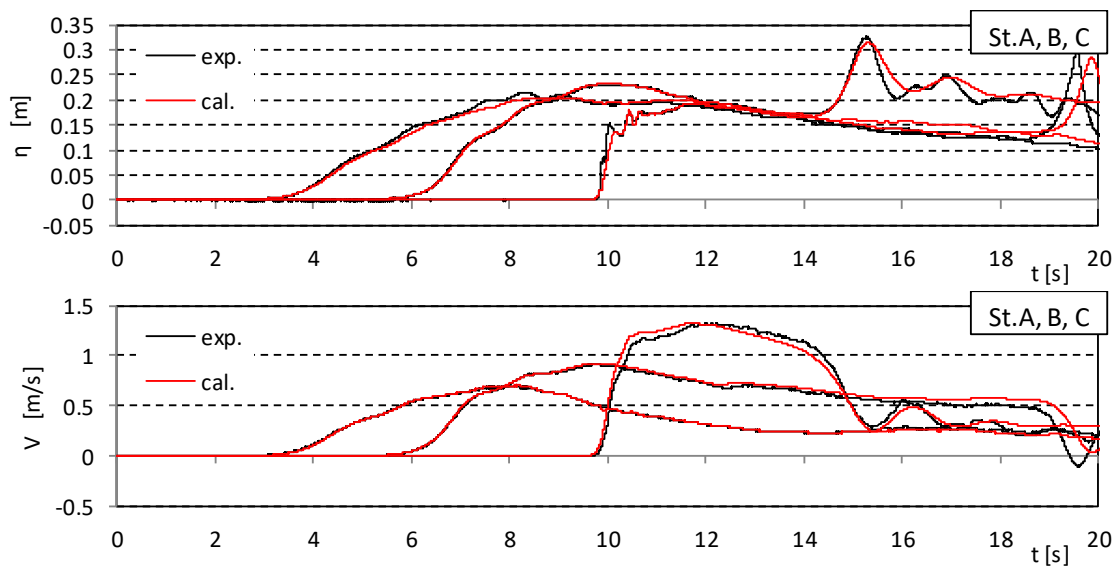


図- 5.3.1 通過波検定試験における入射波の比較 (OpenFOAM, 直立護岸, Wd31)

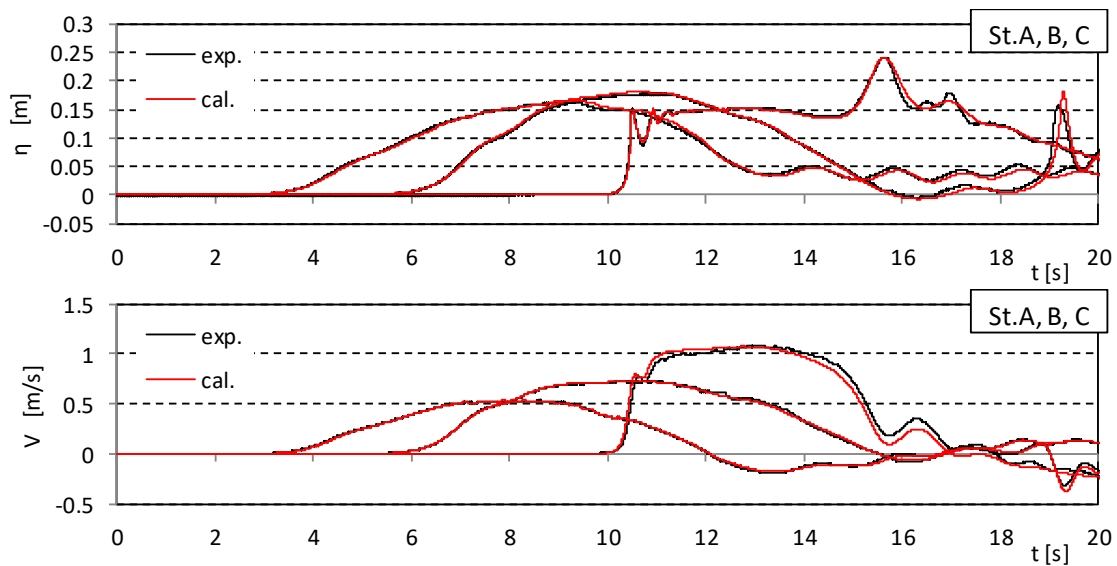


図- 5.3.1 通過波検定試験における入射波の比較 (OpenFOAM, 直立護岸, Wd40)

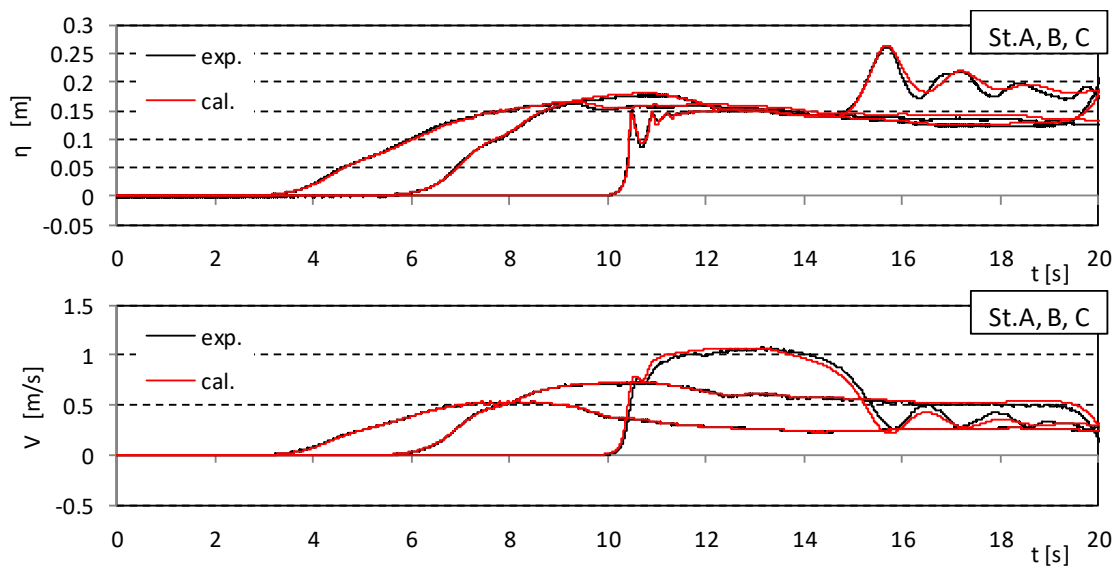


図- 5.3.1 通過波検定試験における入射波の比較 (OpenFOAM, 直立護岸, Wd41)

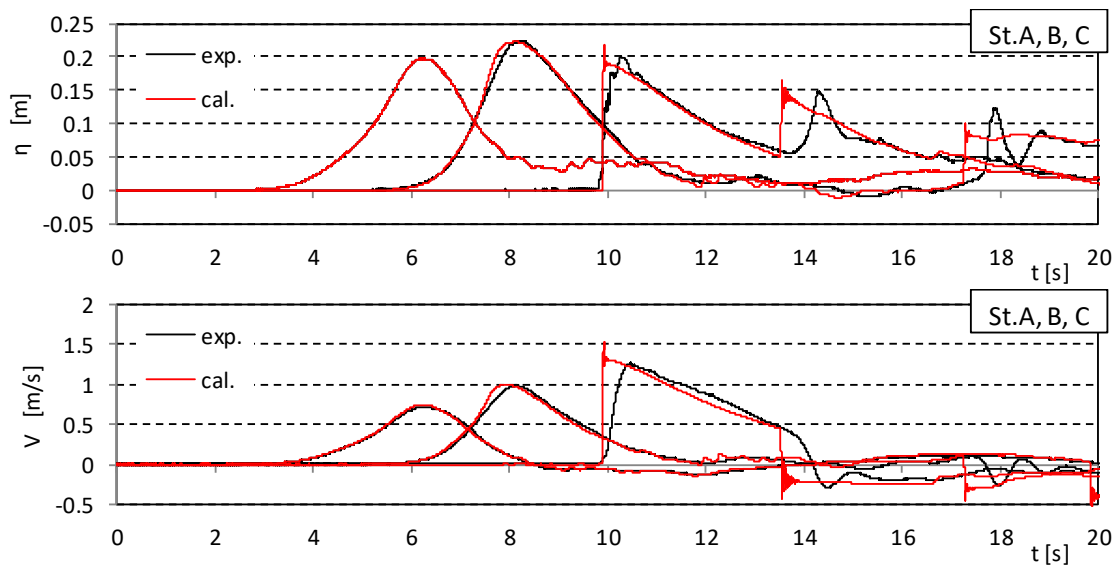


図- 5.3.2 通過波検定試験における入射波の比較 (T-STOC, 直立護岸, Wd10)

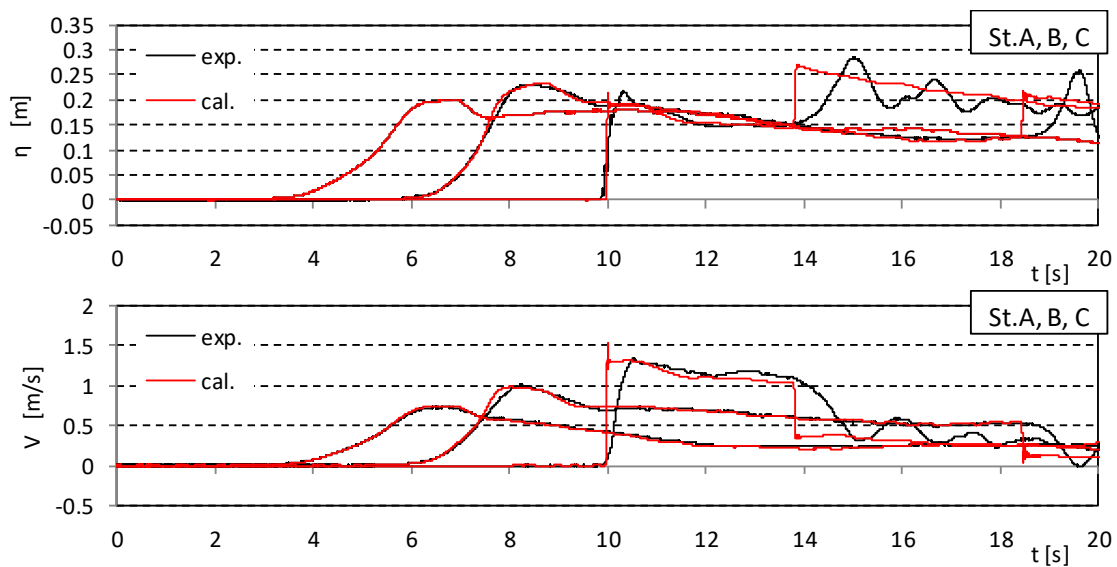


図- 5.3.2 通過波検定試験における入射波の比較 (T-STOC, 直立護岸, Wd11)

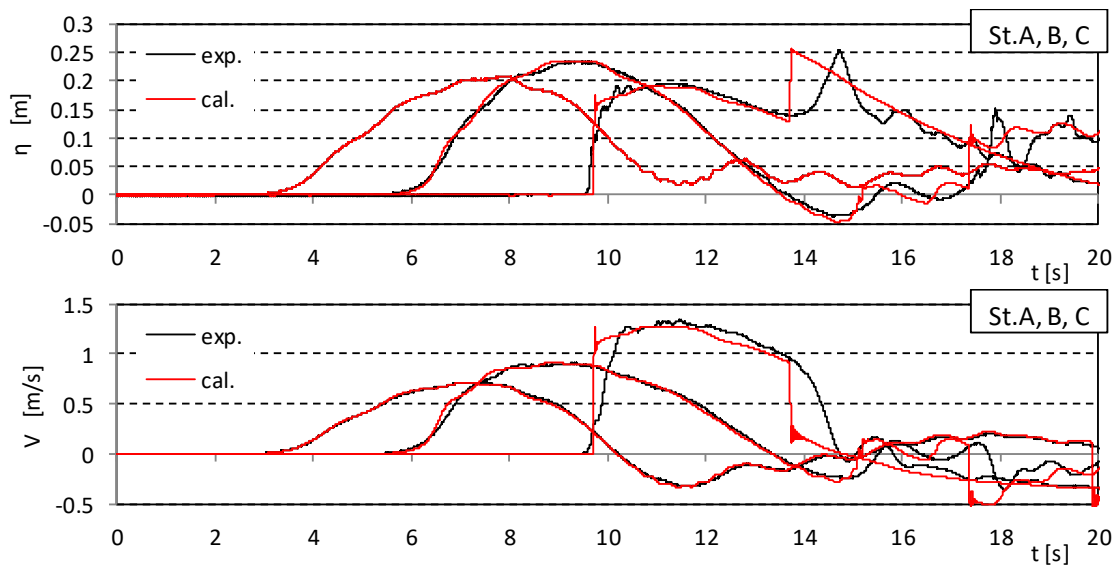


図- 5.3.2 通過波検定試験における入射波の比較 (T-STOC, 直立護岸, Wd20)

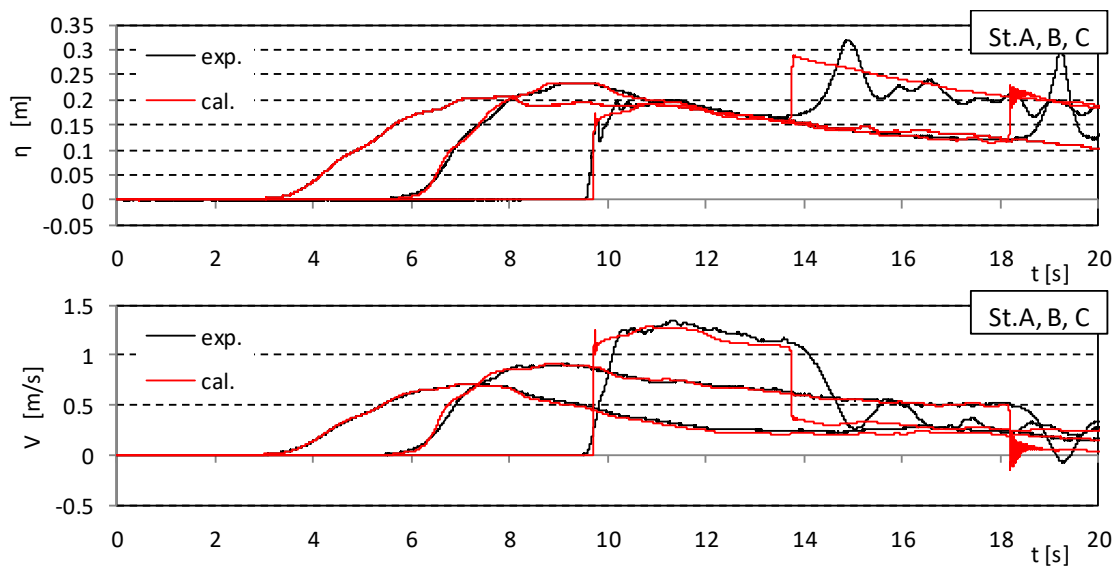


図- 5.3.2 通過波検定試験における入射波の比較 (T-STOC, 直立護岸, Wd21)

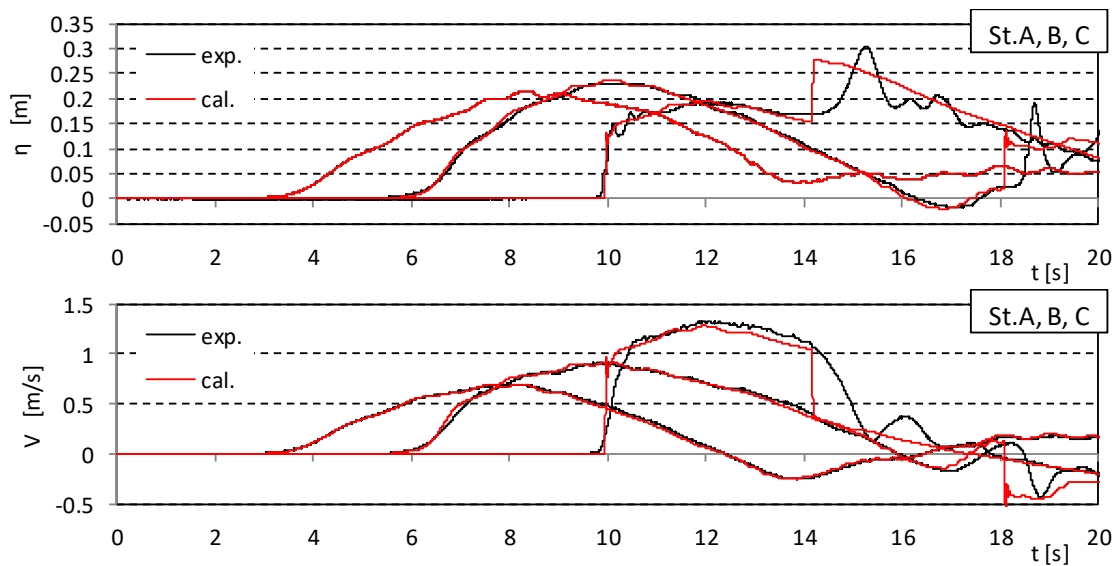


図- 5.3.2 通過波検定試験における入射波の比較 (T-STOC, 直立護岸, Wd30)

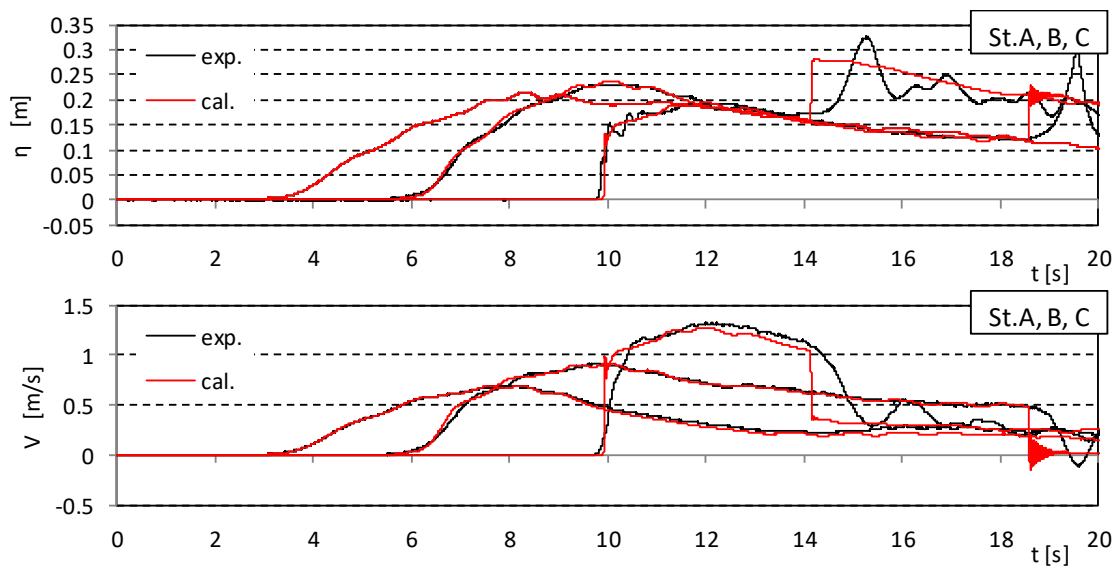


図- 5.3.2 通過波検定試験における入射波の比較 (T-STOC, 直立護岸, Wd31)

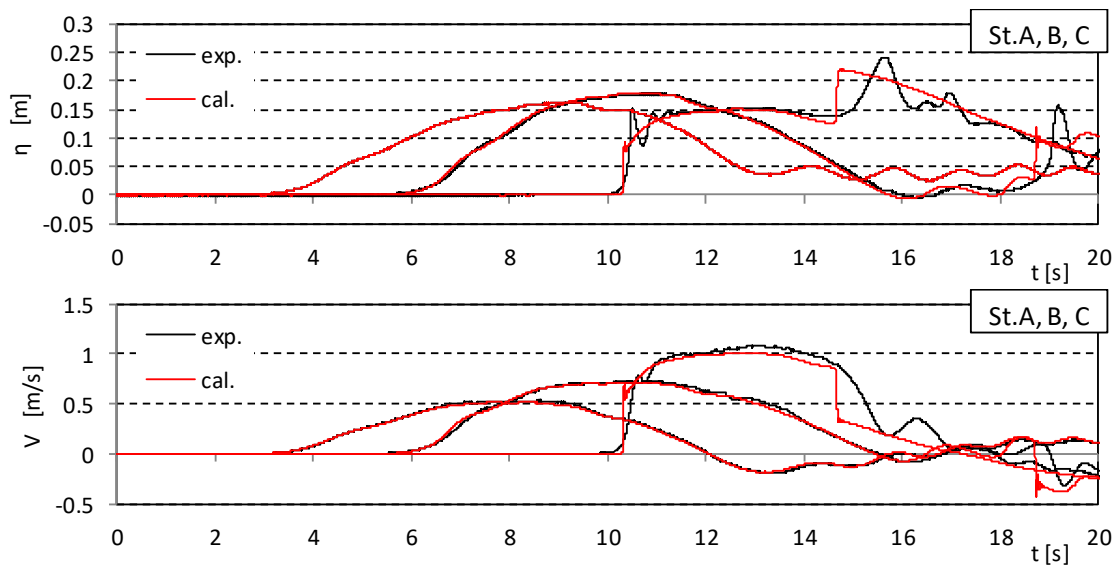


図- 5.3.2 通過波検定試験における入射波の比較 (T-STOC, 直立護岸, Wd40)

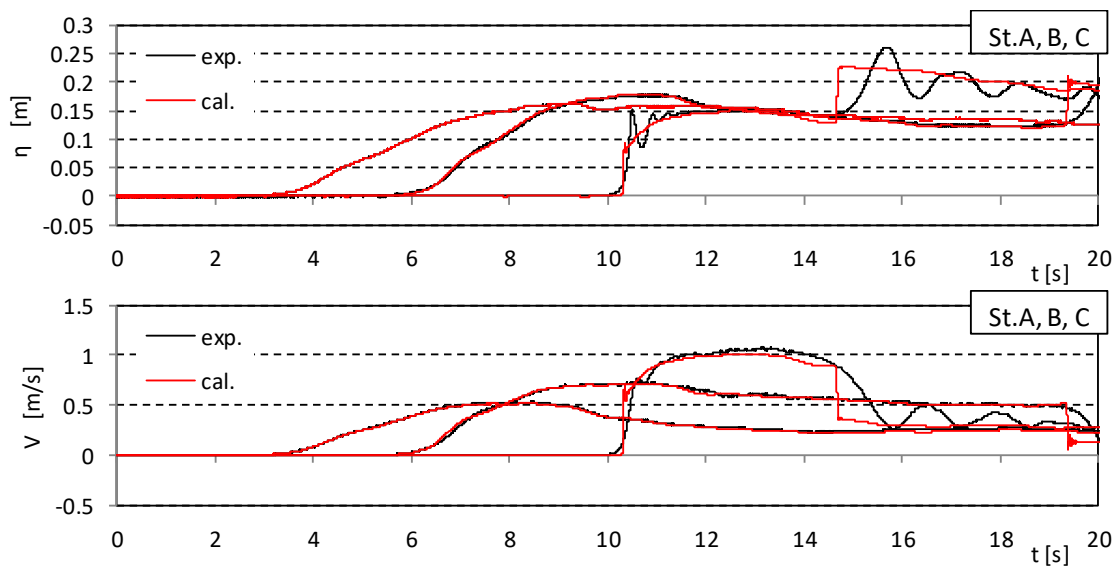


図- 5.3.2 通過波検定試験における入射波の比較 (T-STOC, 直立護岸, Wd41)

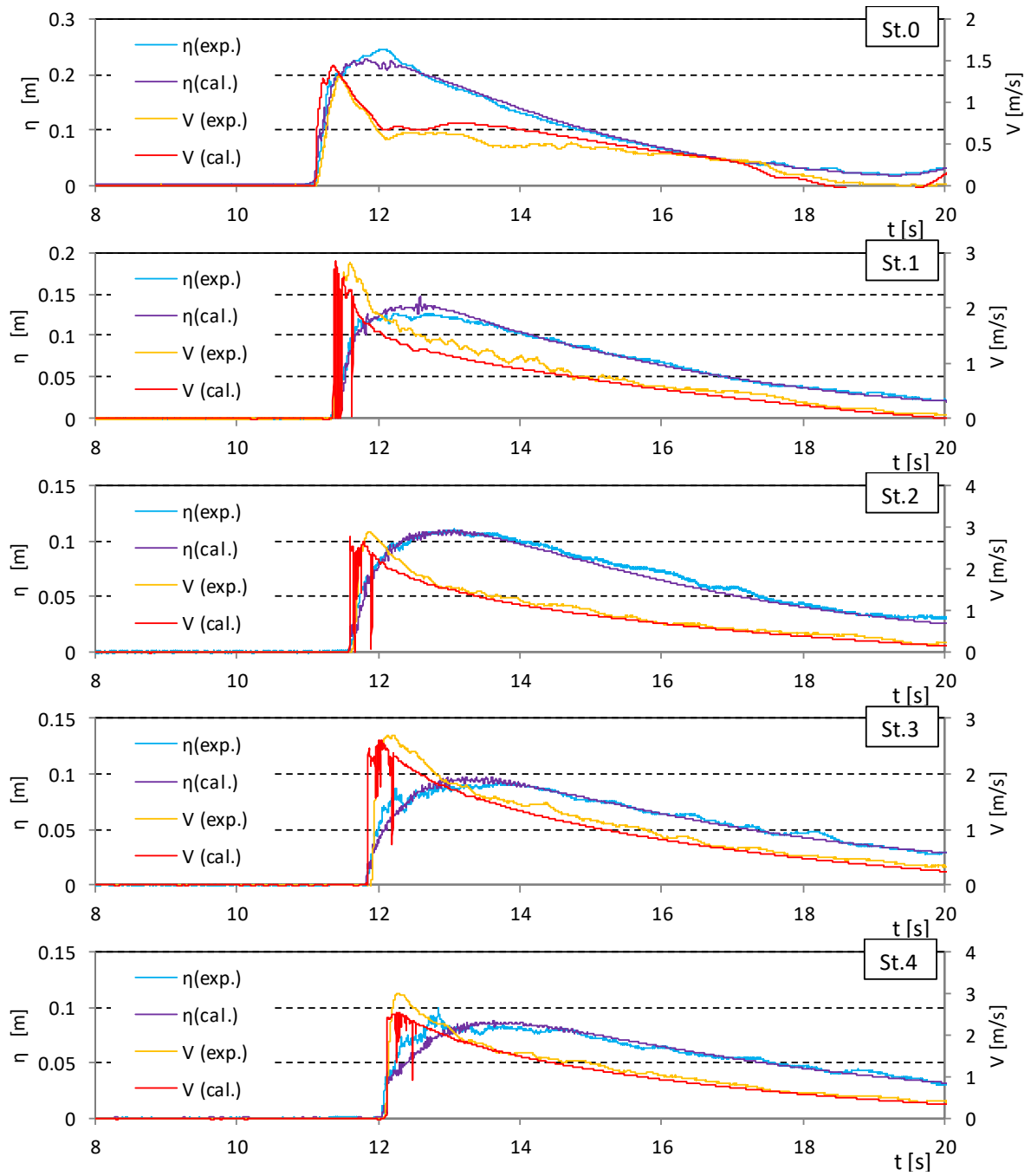


図- 5.3.3 通過波検定試験における浸水深と流速の比較 (OpenFOAM, 直立護岸, Wd10)

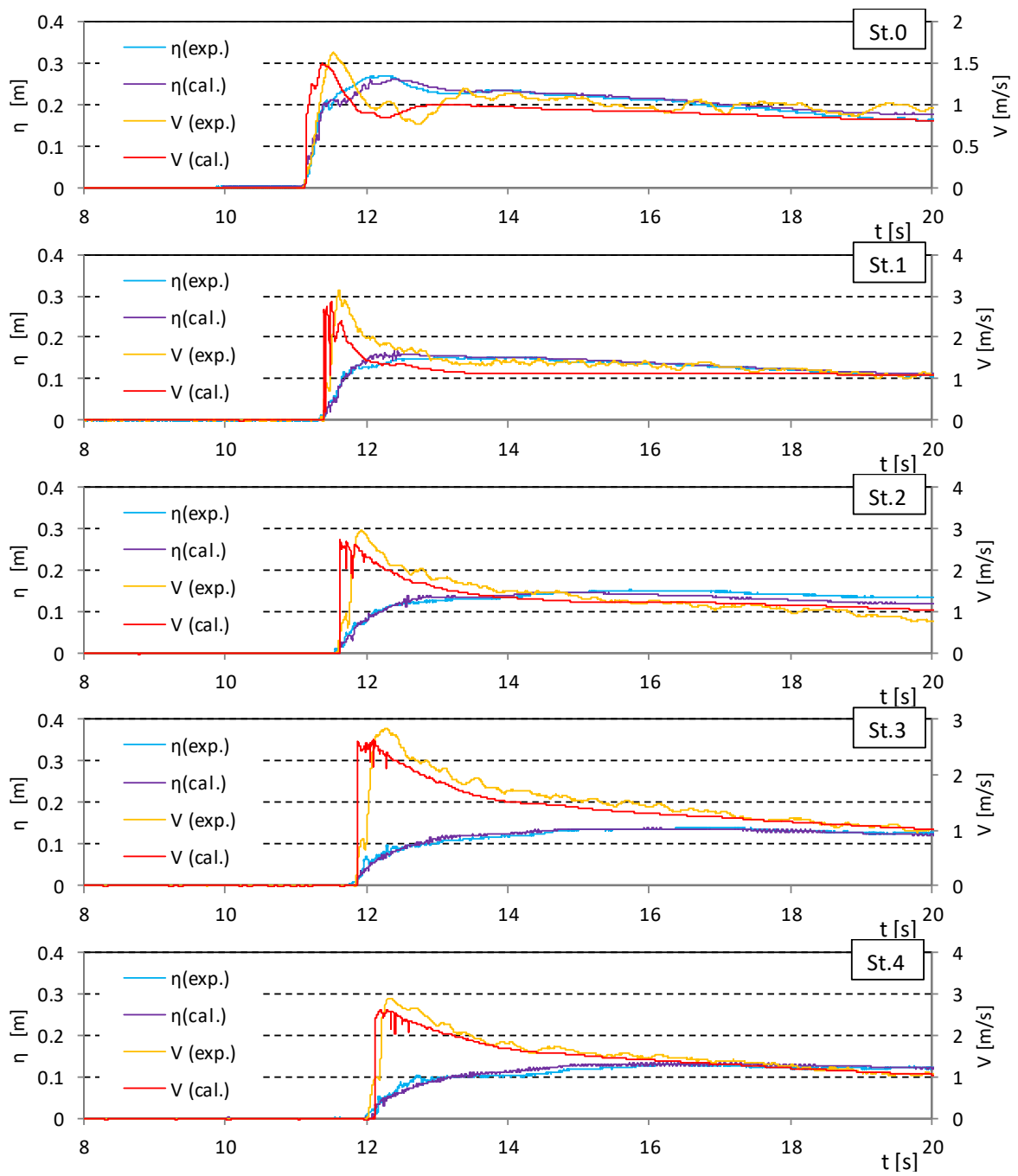


図- 5.3.3 通過波検定試験における浸水深と流速の比較 (OpenFOAM, 直立護岸, Wd11)

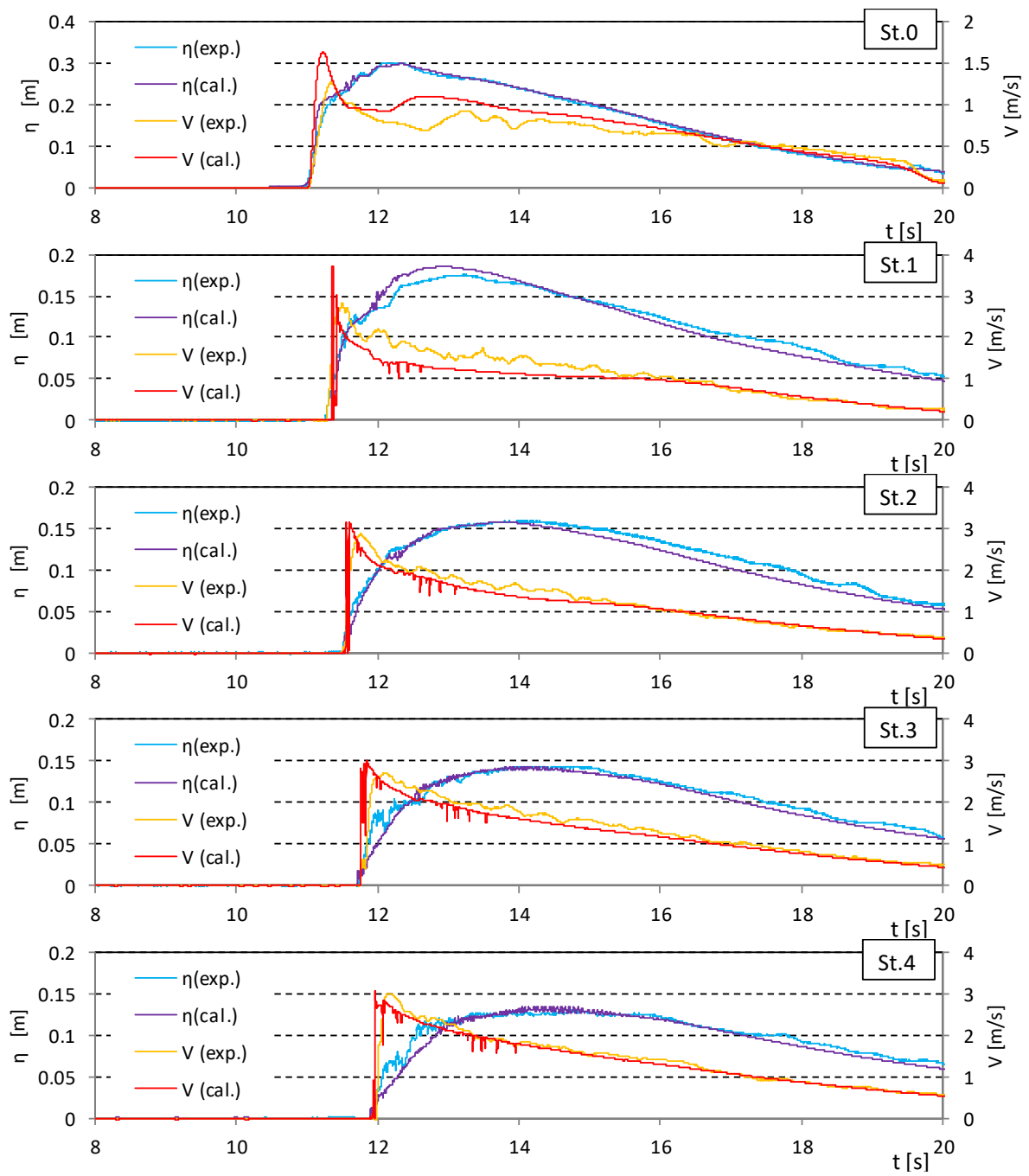


図- 5.3.3 通過波検定試験における浸水深と流速の比較 (OpenFOAM, 直立護岸, Wd20)

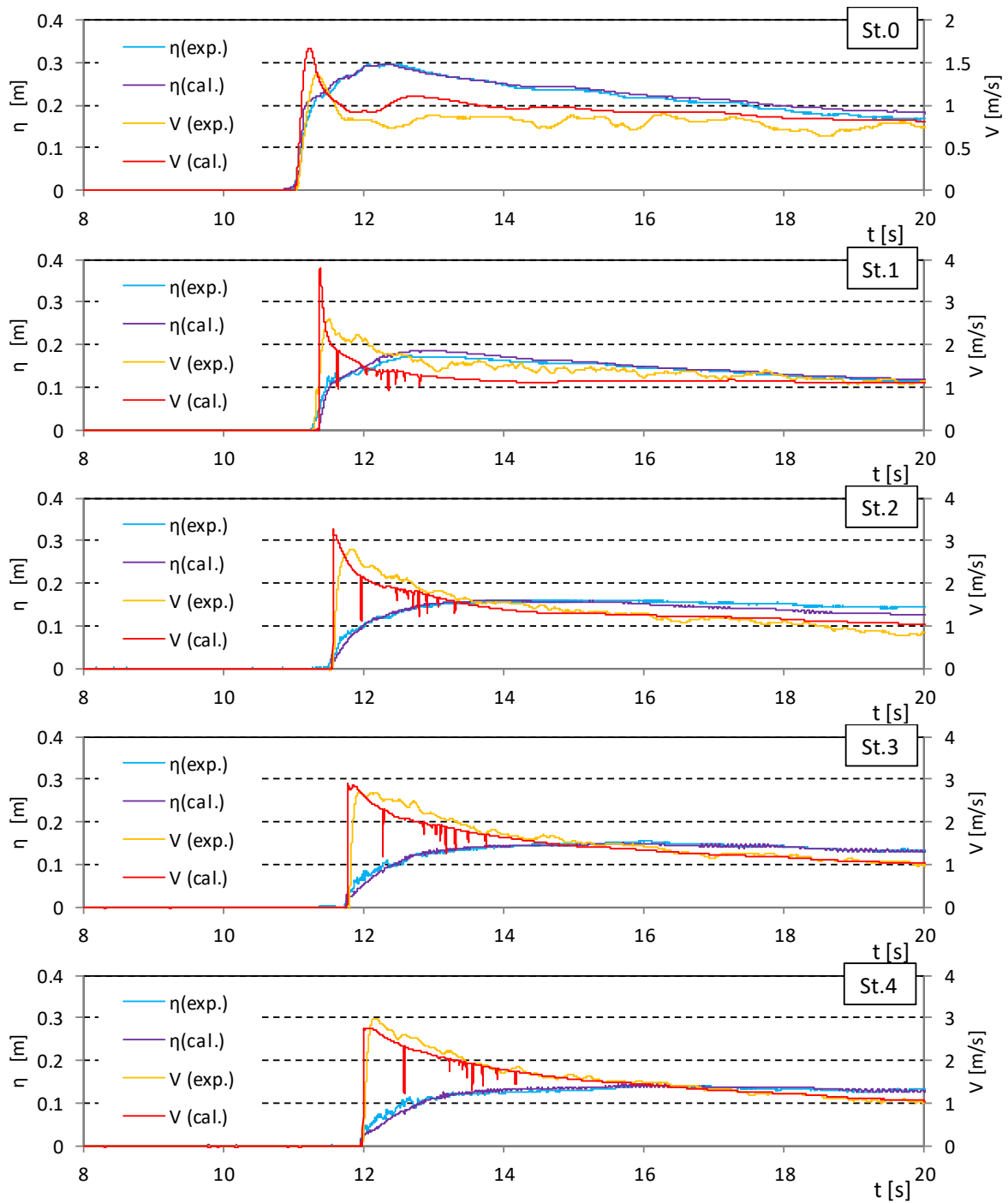


図- 5.3.3 通過波検定試験における浸水深と流速の比較 (OpenFOAM, 直立護岸, Wd21)

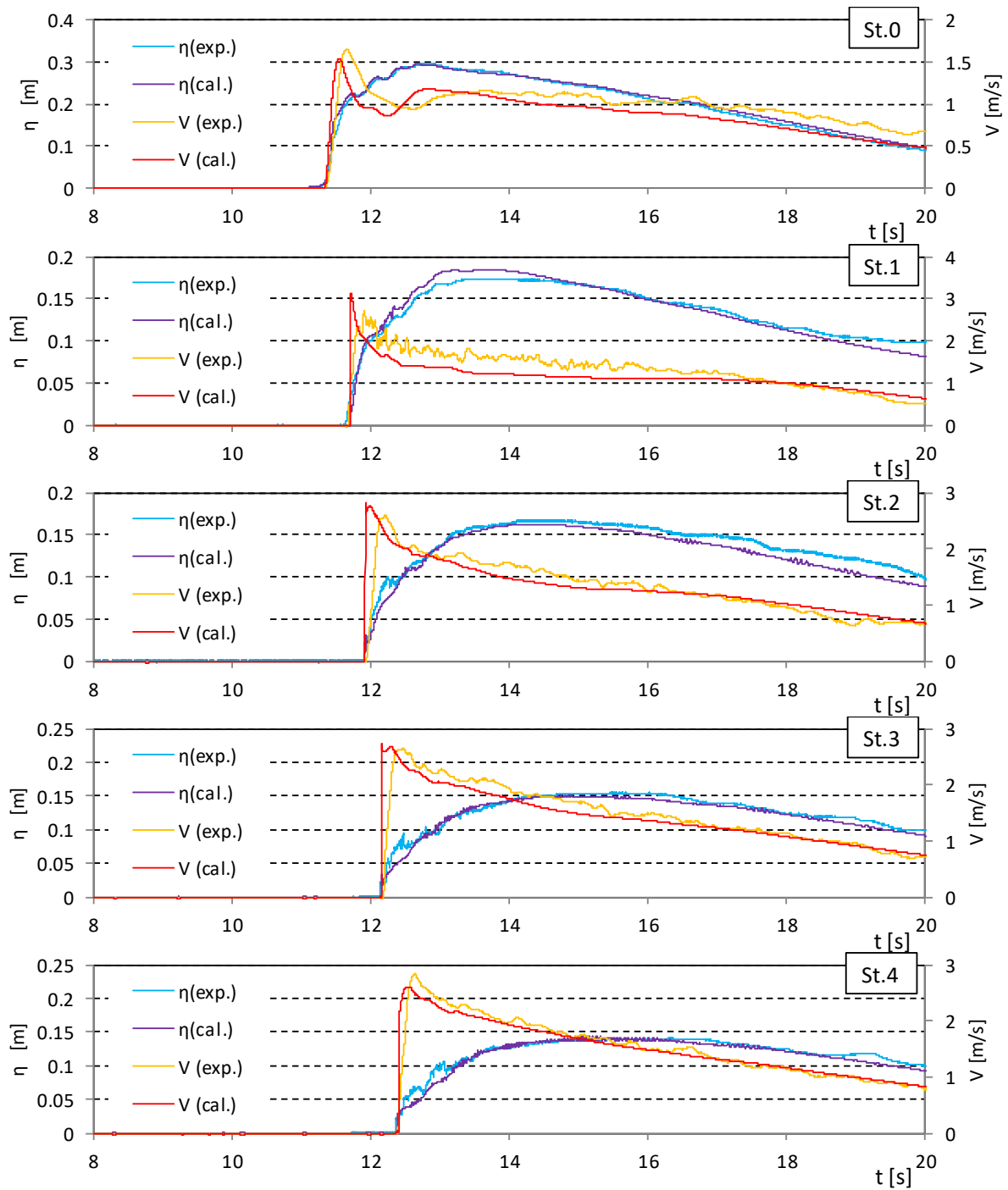


図- 5.3.3 通過波検定試験における浸水深と流速の比較 (OpenFOAM, 直立護岸, Wd30)

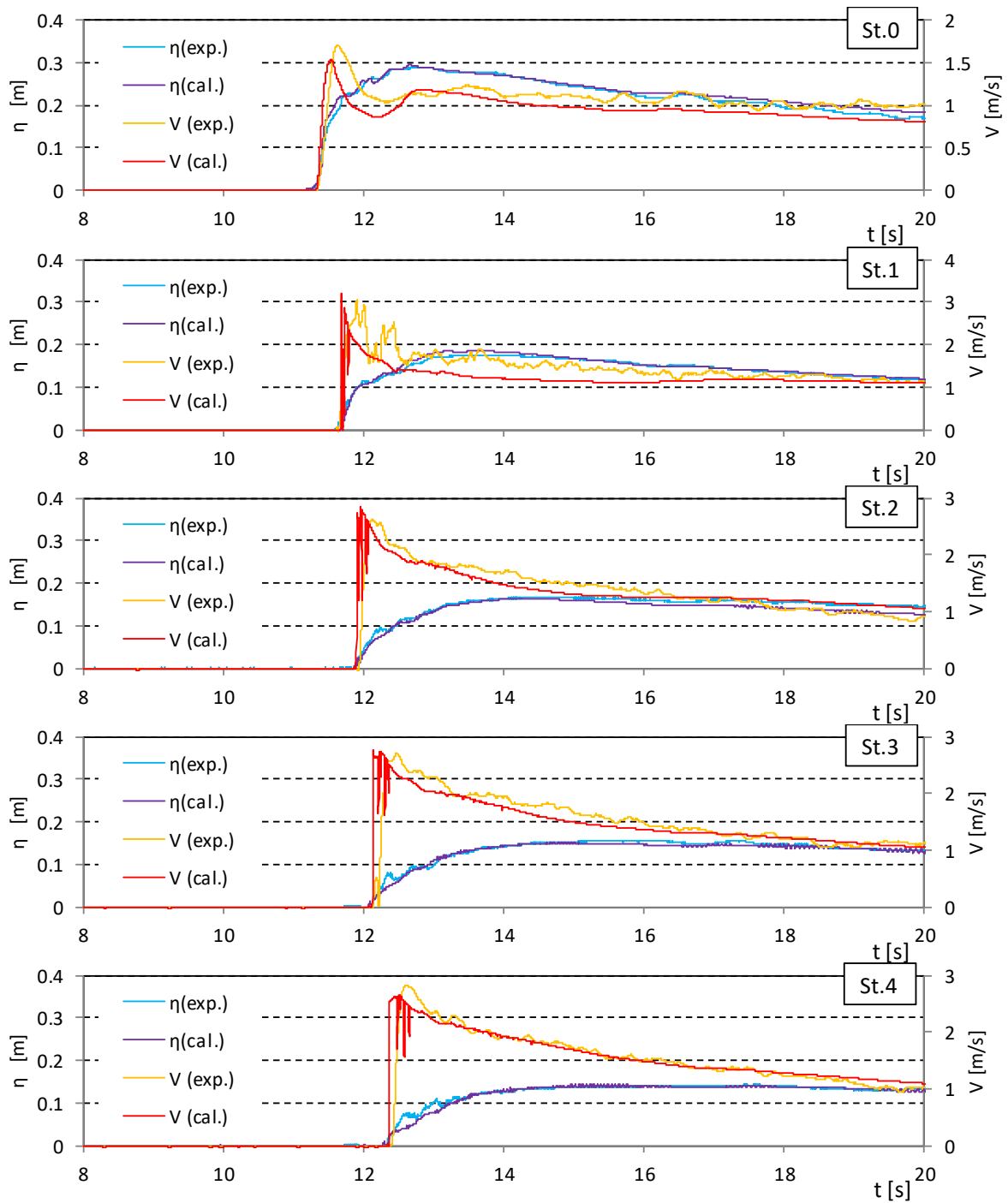


図- 5.3.3 通過波検定試験における浸水深と流速の比較 (OpenFOAM, 直立護岸, Wd31)

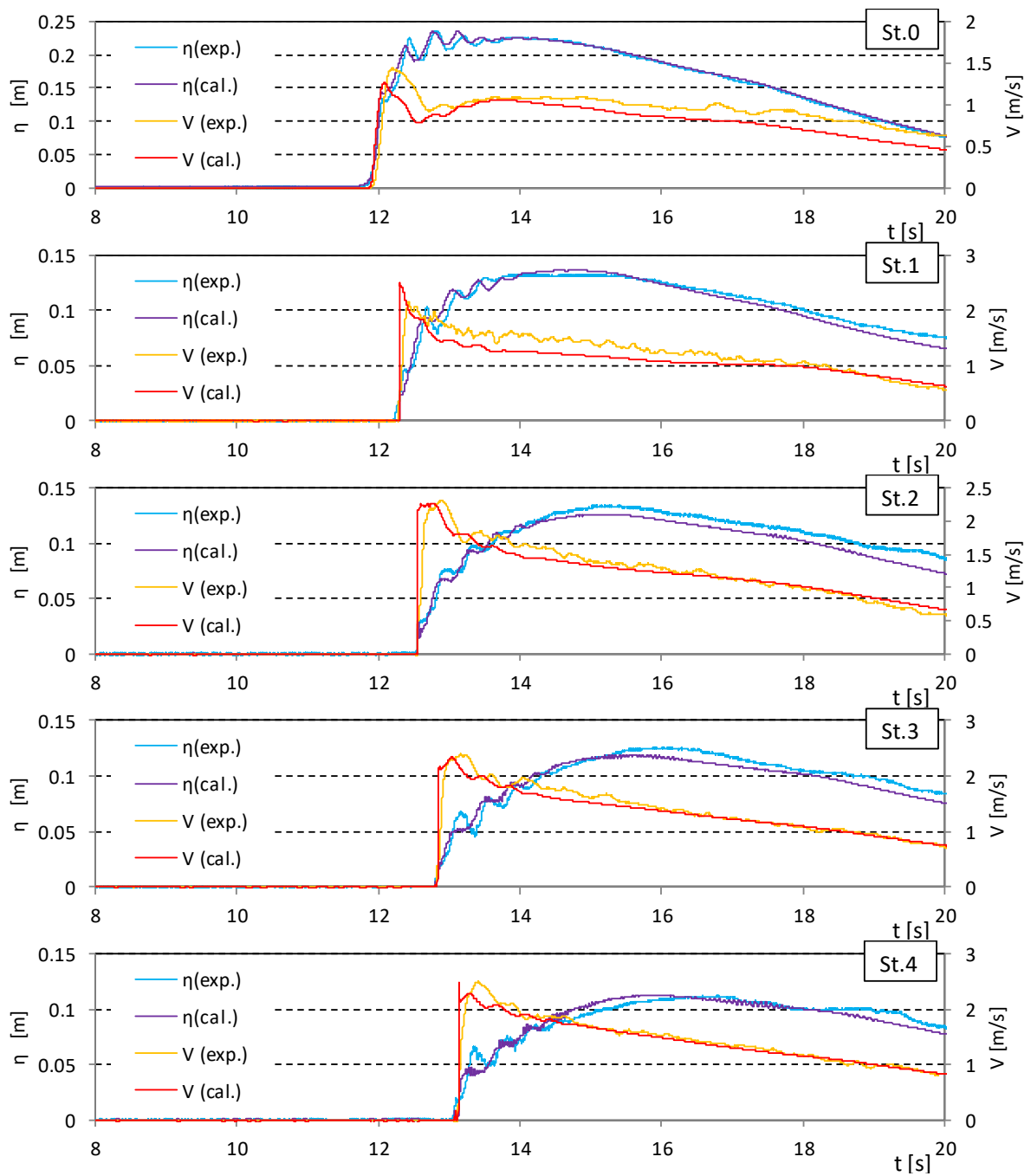


図- 5.3.3 通過波検定試験における浸水深と流速の比較 (OpenFOAM, 直立護岸, Wd40)

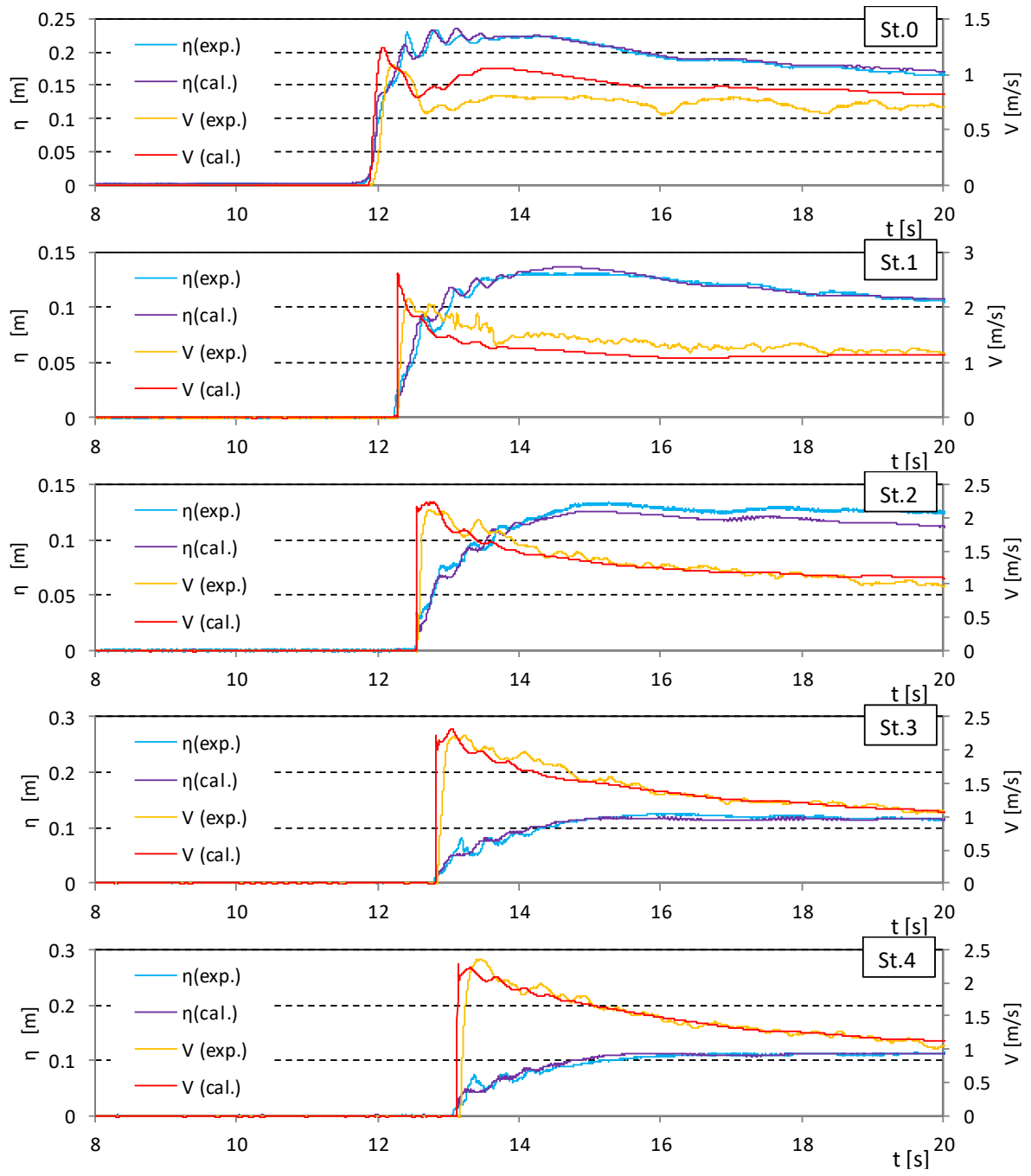


図- 5.3.3 通過波検定試験における浸水深と流速の比較 (OpenFOAM, 直立護岸, Wd41)

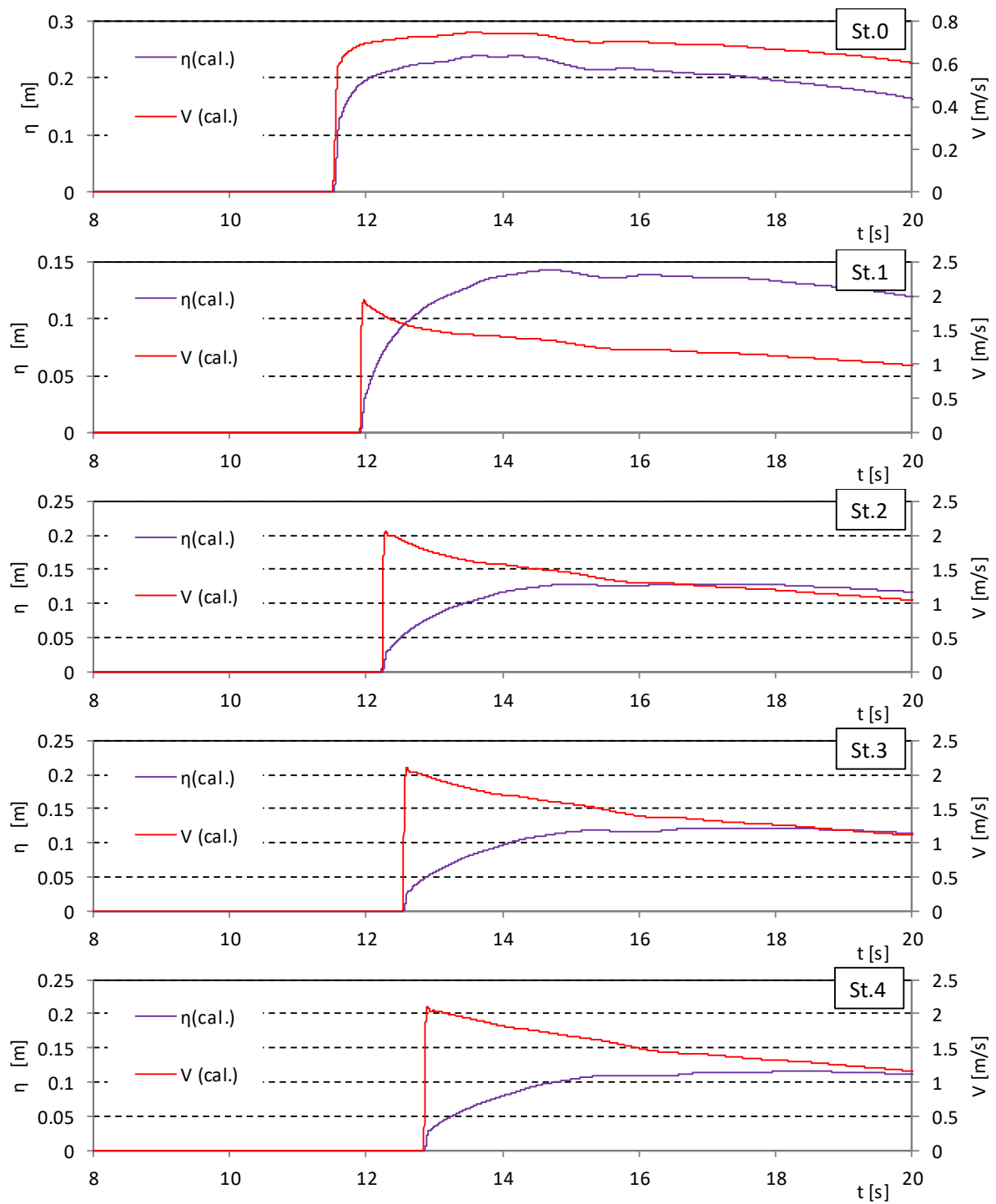


図- 5.3.4 通過波検定試験における浸水深と流速の比較 (T-STOC, 直立護岸, Wd10)

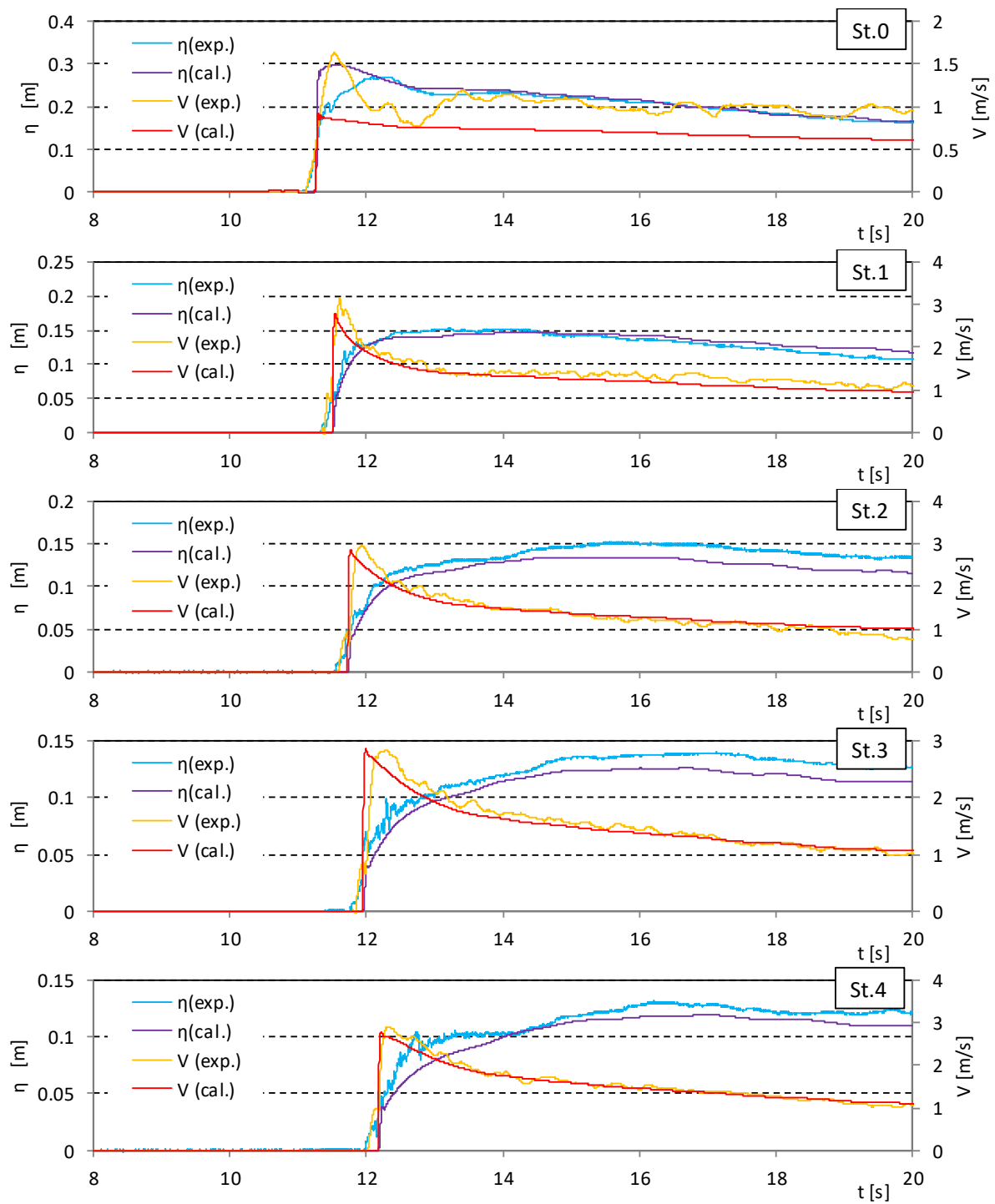


図- 5.3.4 通過波検定試験における浸水深と流速の比較 (T-STOC, 直立護岸, Wd11)

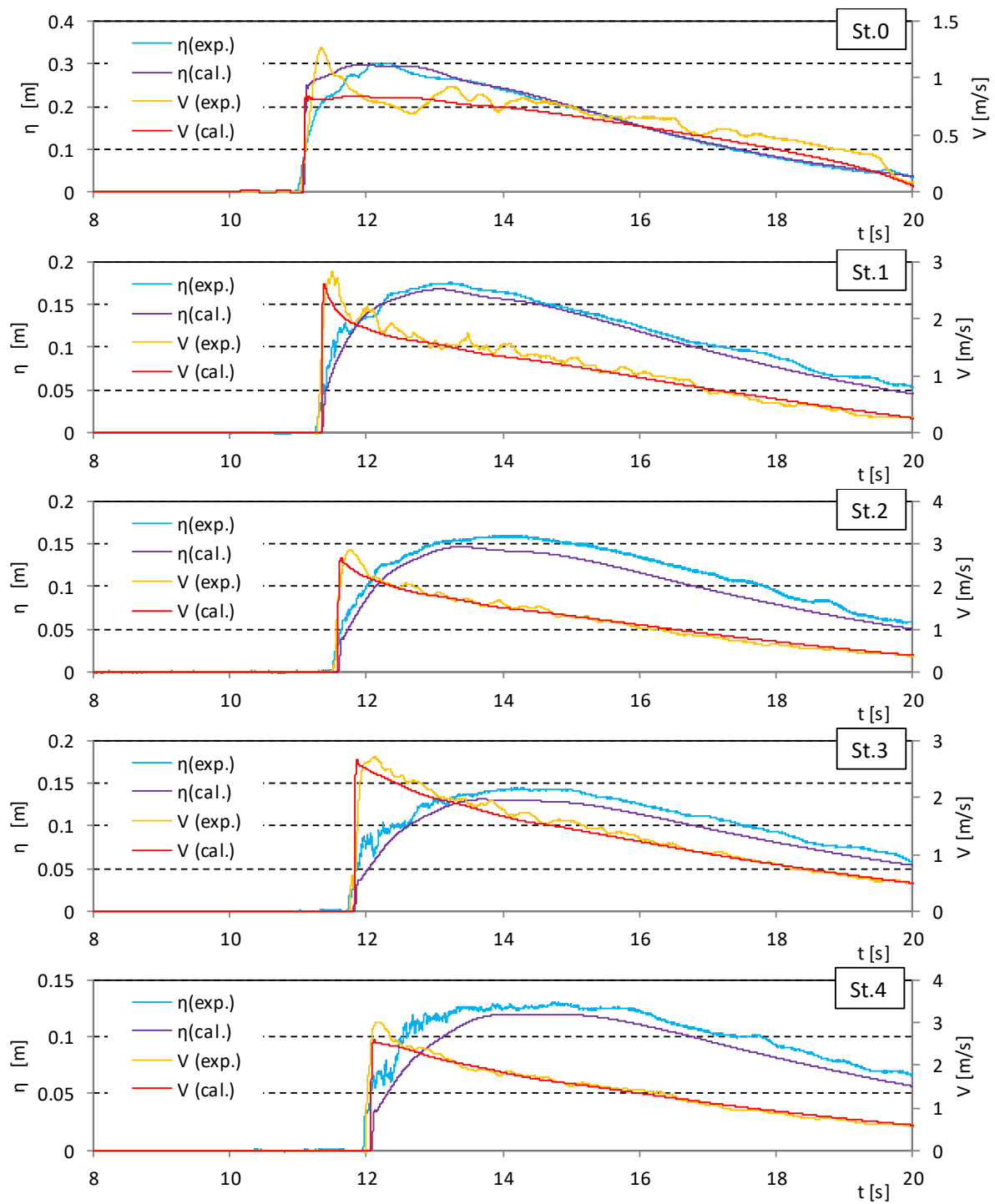


図- 5.3.4 通過波検定試験における浸水深と流速の比較 (T-STOC, 直立護岸, Wd20)

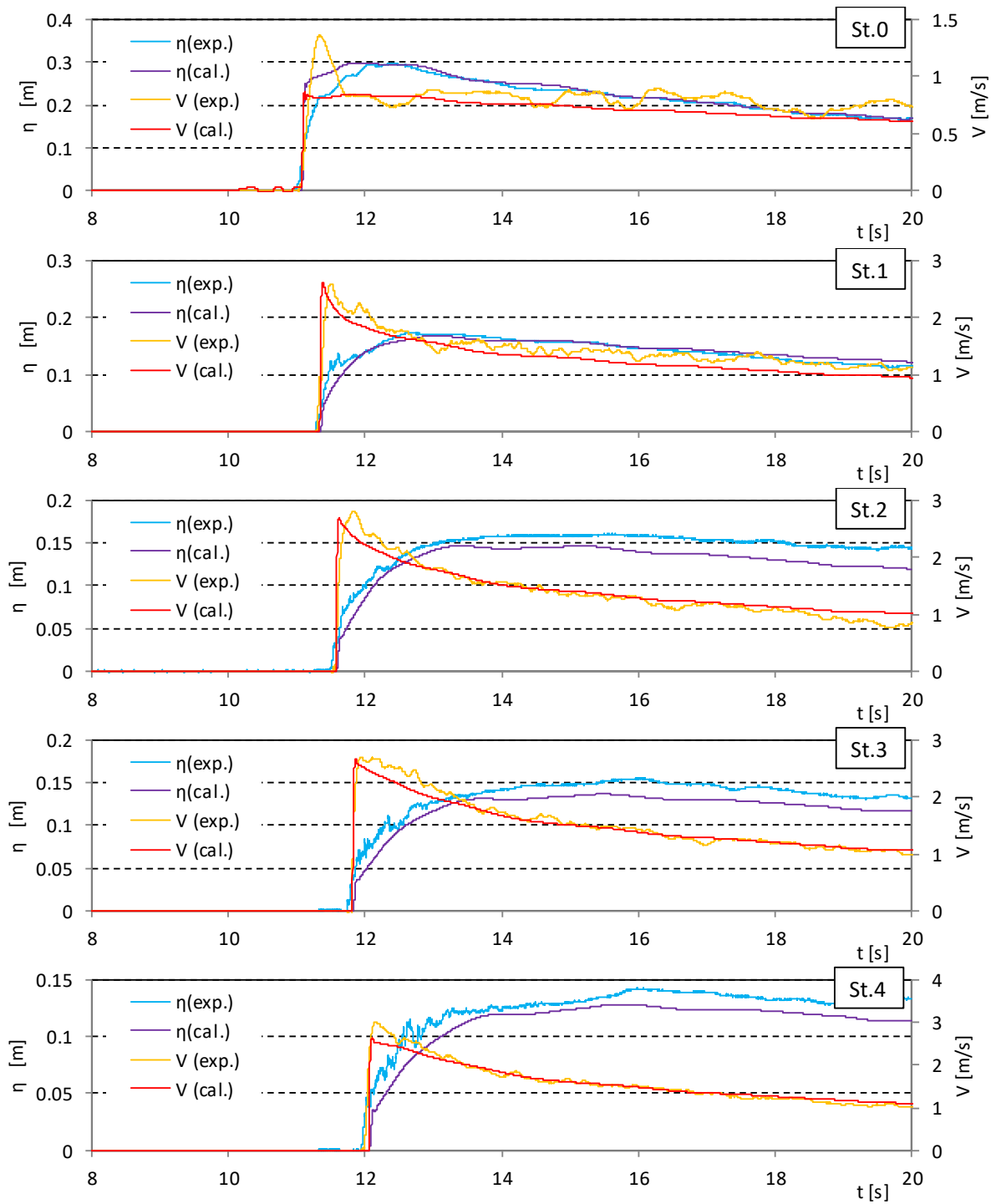


図- 5.3.4 通過波検定試験における浸水深と流速の比較 (T-STOC, 直立護岸, Wd21)

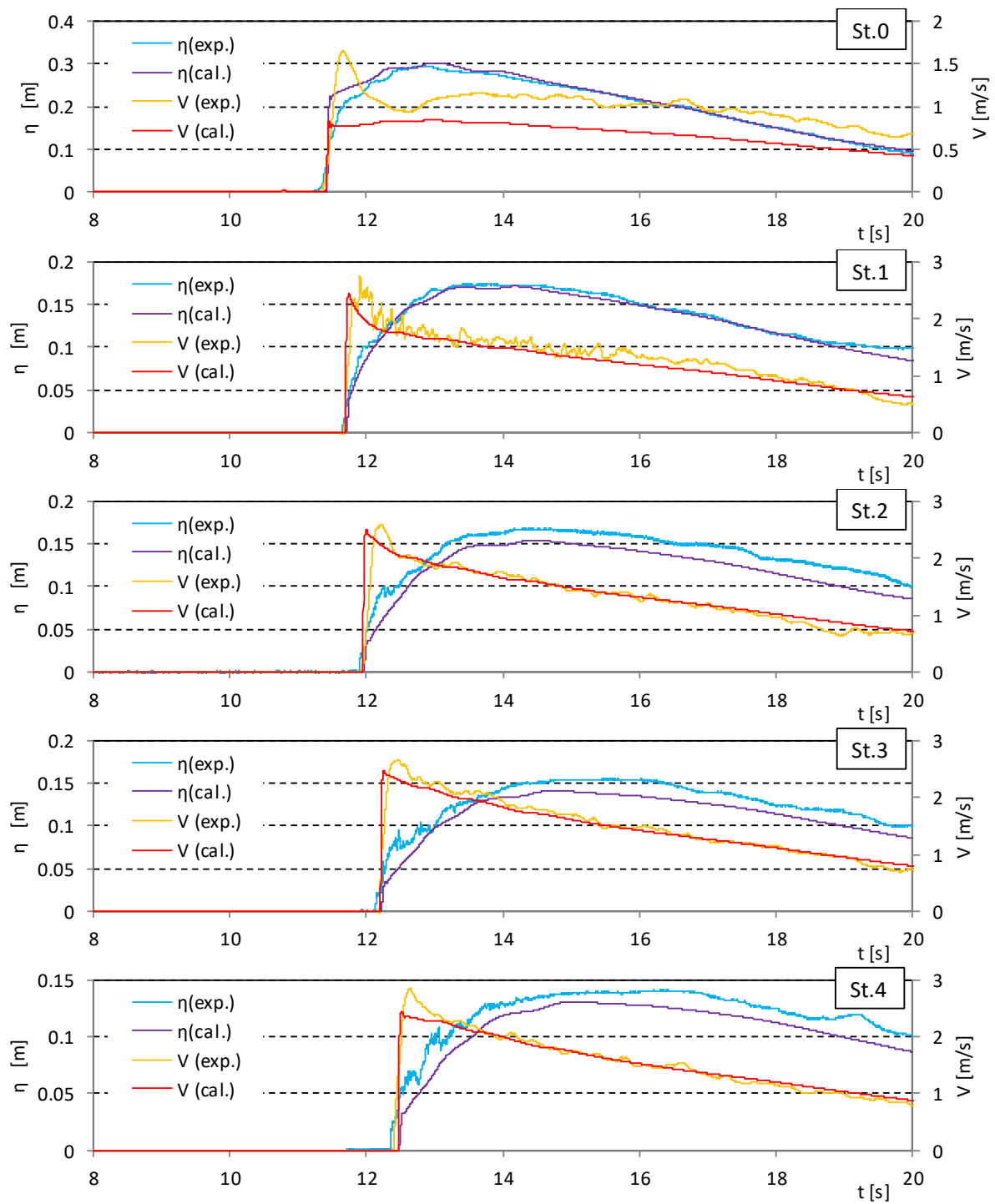


図- 5.3.4 通過波検定試験における浸水深と流速の比較 (T-STOC, 直立護岸, Wd30)

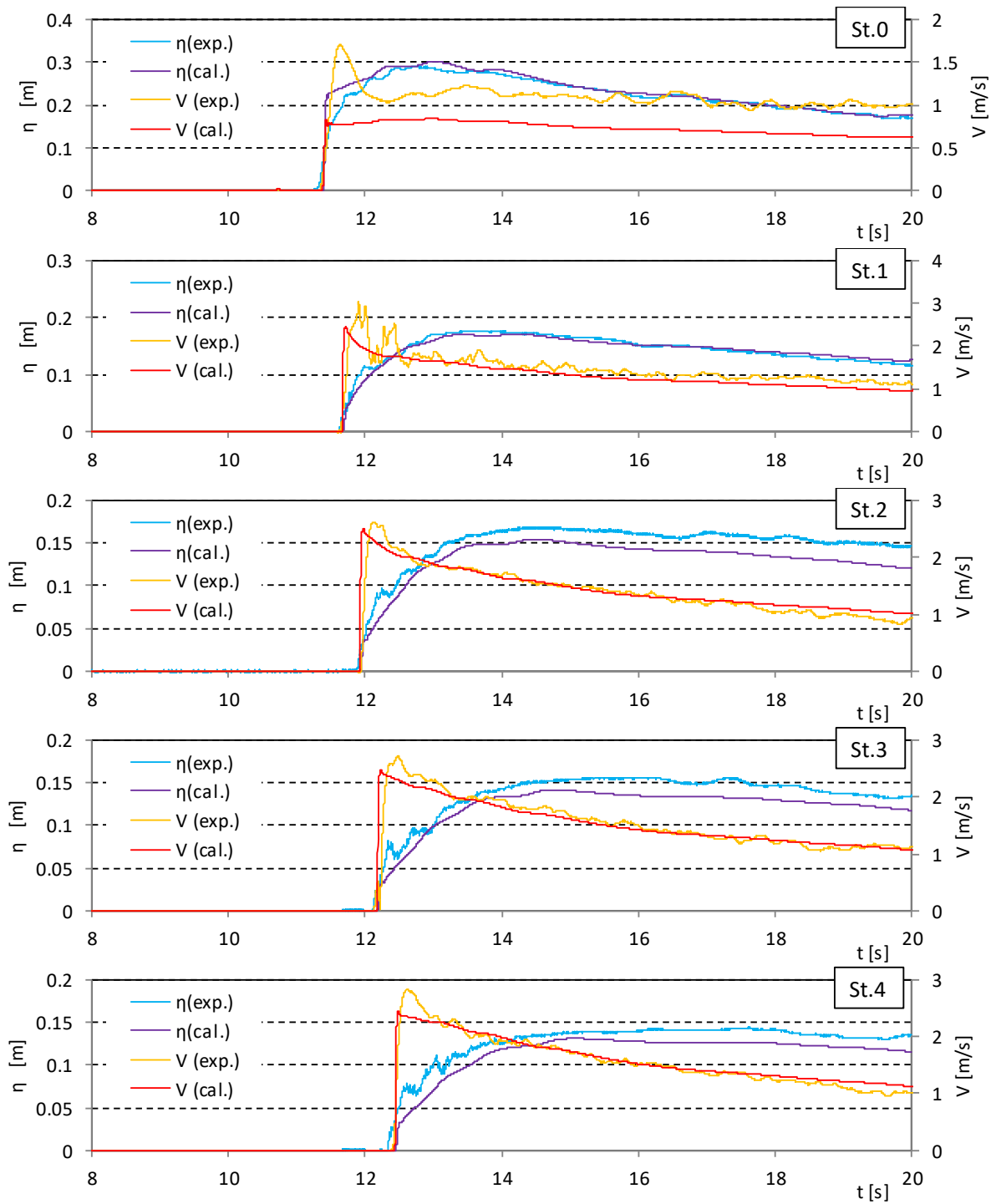


図- 5.3.4 通過波検定試験における浸水深と流速の比較 (T-STOC, 直立護岸, Wd31)

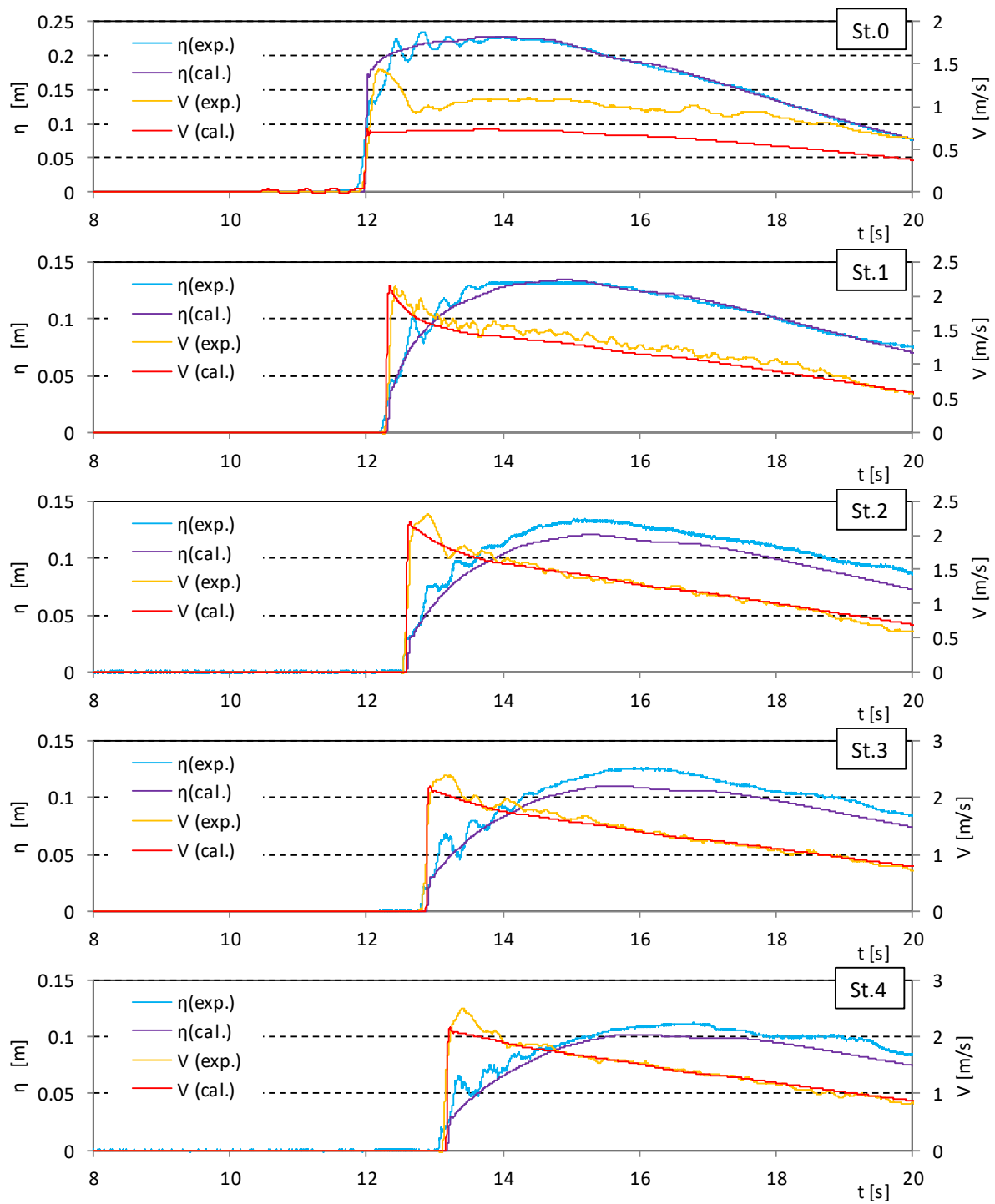


図- 5.3.4 通過波検定試験における浸水深と流速の比較 (T-STOC, 直立護岸, Wd40)

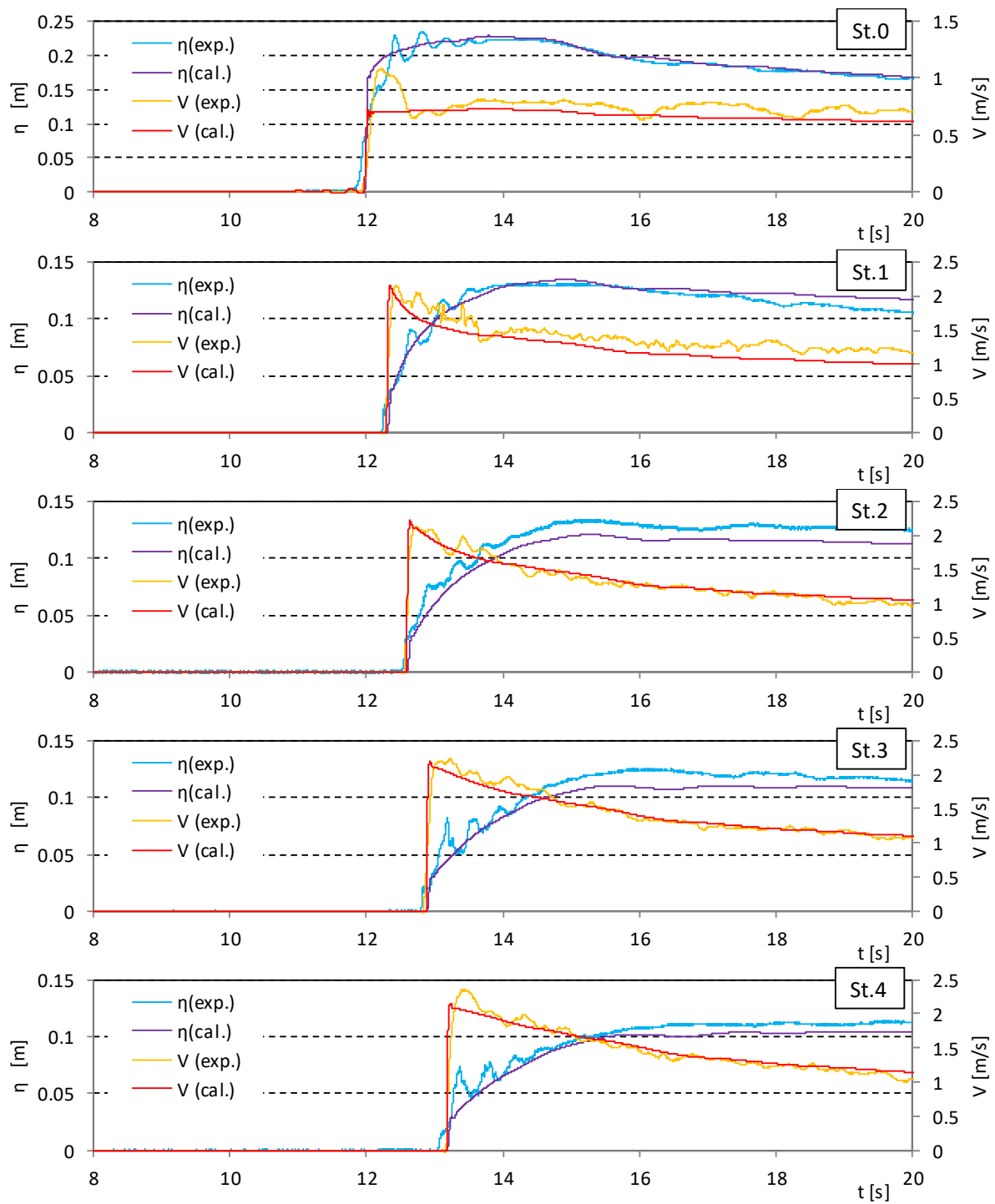


図- 5.3.4 通過波検定試験における浸水深と流速の比較 (T-STOC, 直立護岸, Wd41)

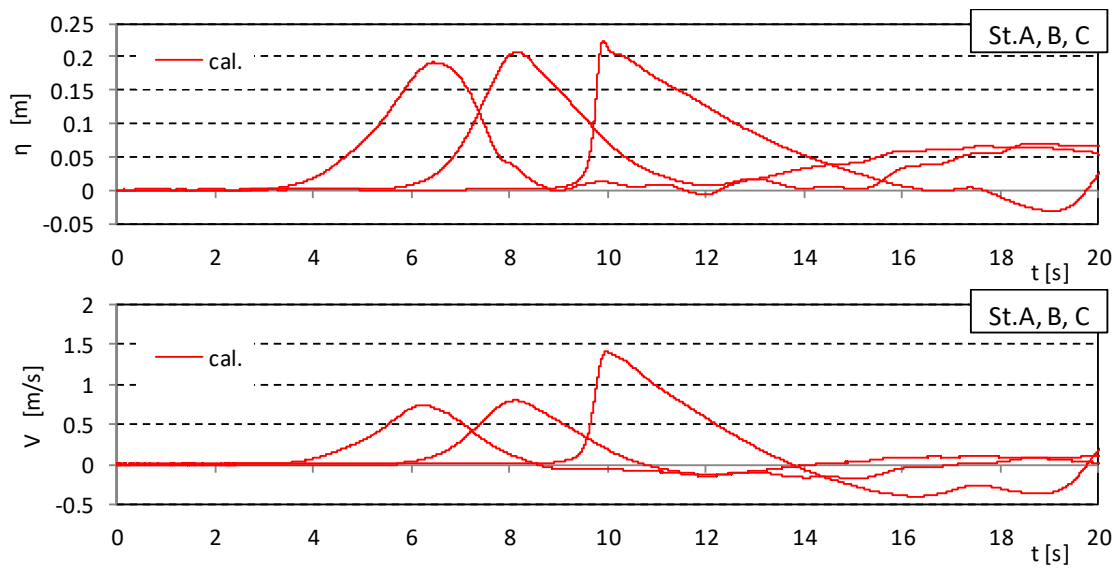


図- 5.3.5 通過波検定試験における入射波の解析 (OpenFOAM, 単純勾配, Wd10)

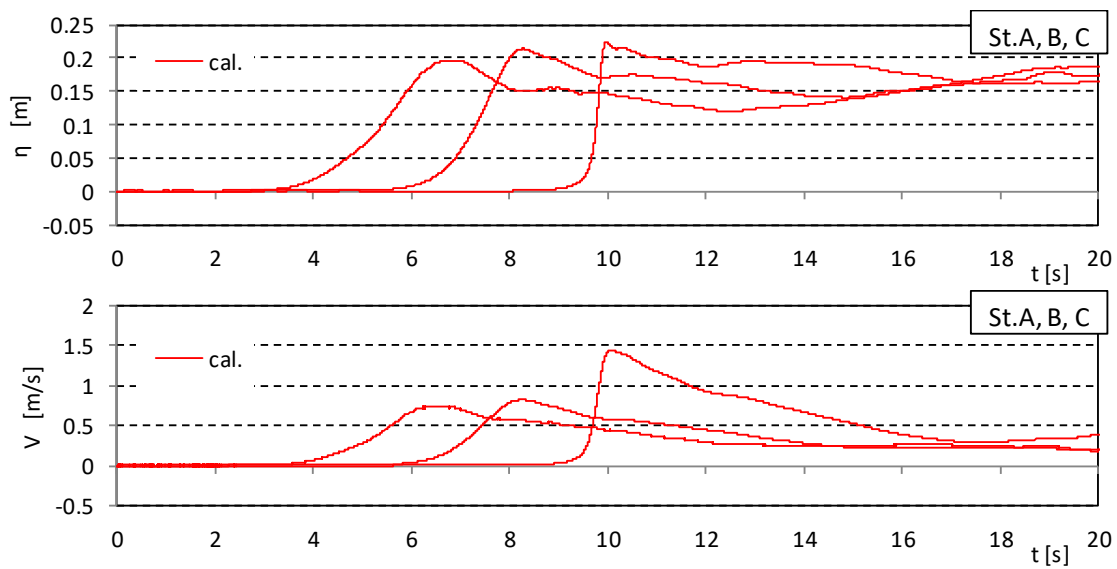


図- 5.3.5 通過波検定試験における入射波の解析 (OpenFOAM, 単純勾配, Wd11)

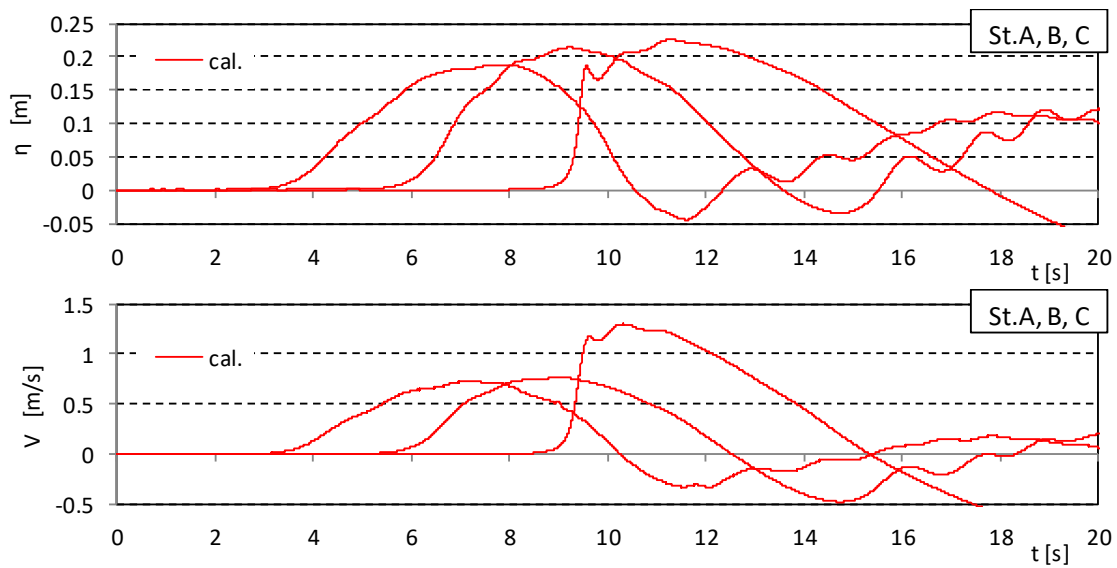


図- 5.3.5 通過波検定試験における入射波の解析 (OpenFOAM, 単純勾配, Wd20)

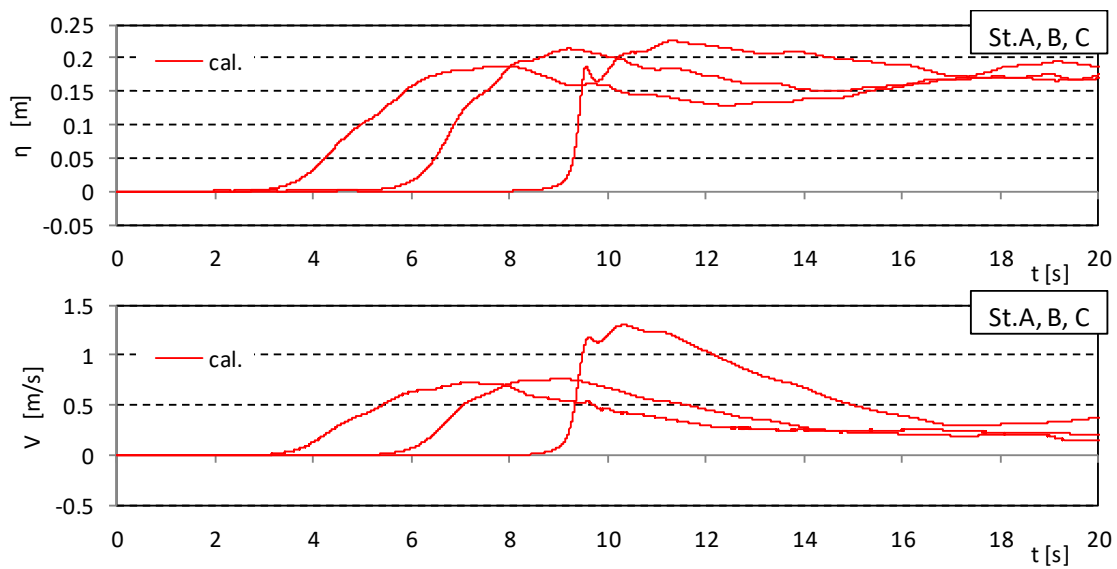


図- 5.3.5 通過波検定試験における入射波の解析 (OpenFOAM, 単純勾配, Wd21)

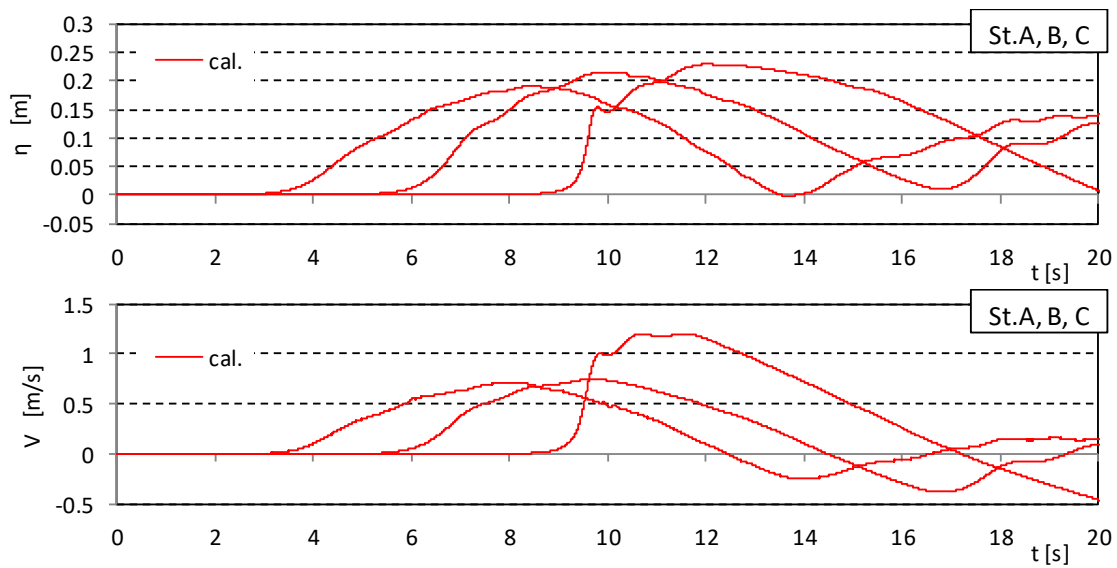


図- 5.3.5 通過波検定試験における入射波の解析 (OpenFOAM, 単純勾配, Wd30)

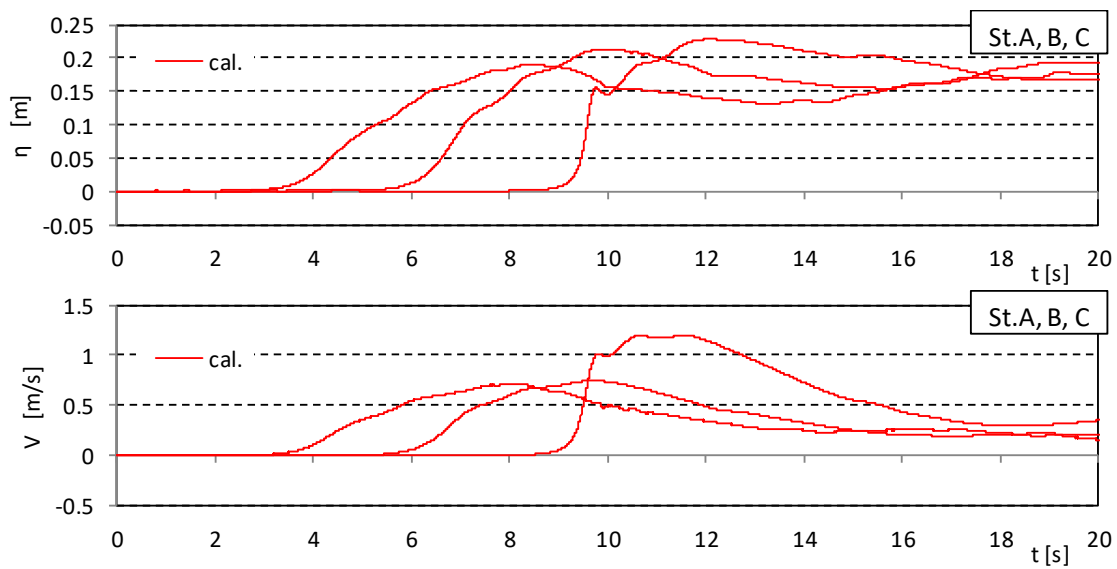


図- 5.3.5 通過波検定試験における入射波の解析 (OpenFOAM, 単純勾配, Wd31)

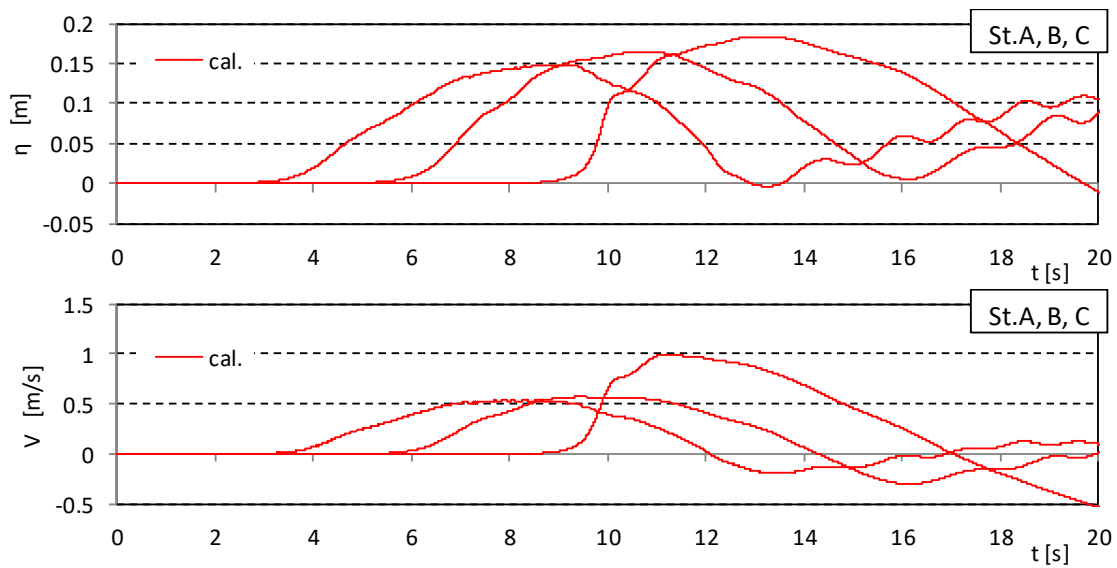


図- 5.3.5 通過波検定試験における入射波の解析 (OpenFOAM, 単純勾配, Wd40)

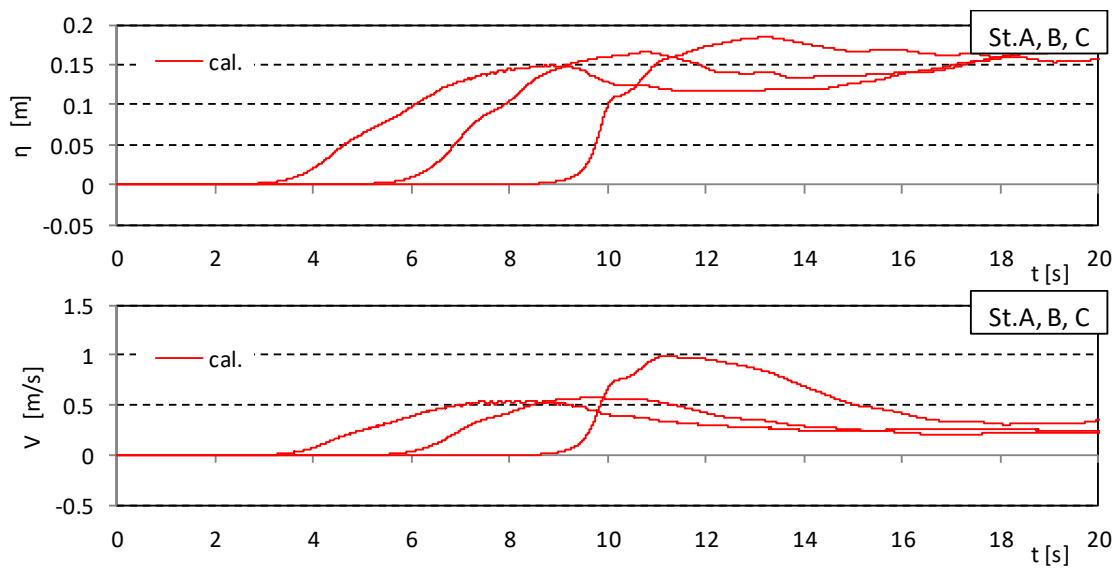


図- 5.3.5 通過波検定試験における入射波の解析 (OpenFOAM, 単純勾配, Wd41)

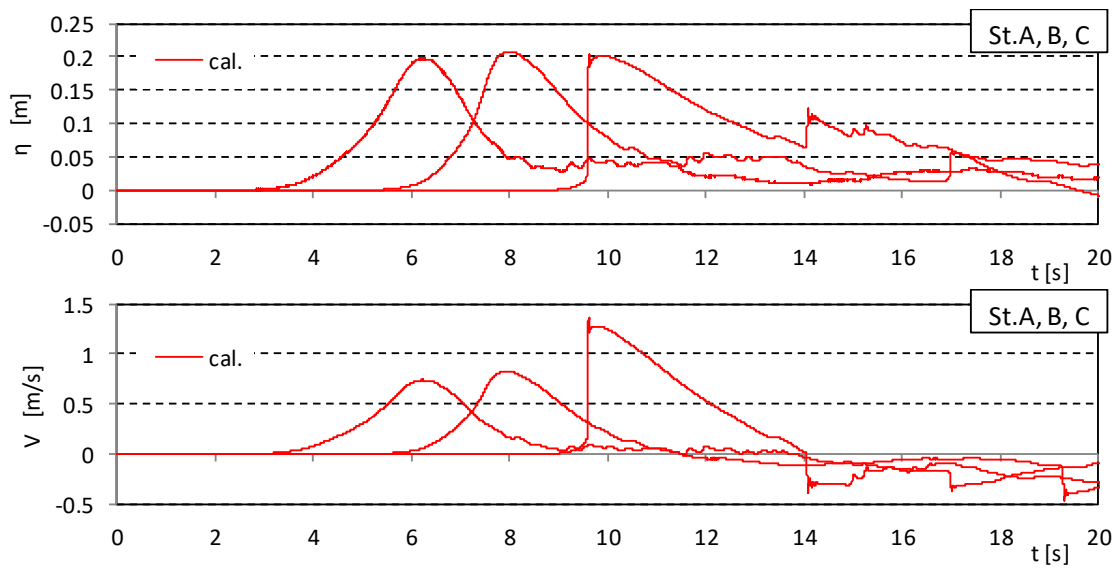


図- 5.3.6 通過波検定試験における入射波の解析 (T-STOC, 単純勾配, Wd10)

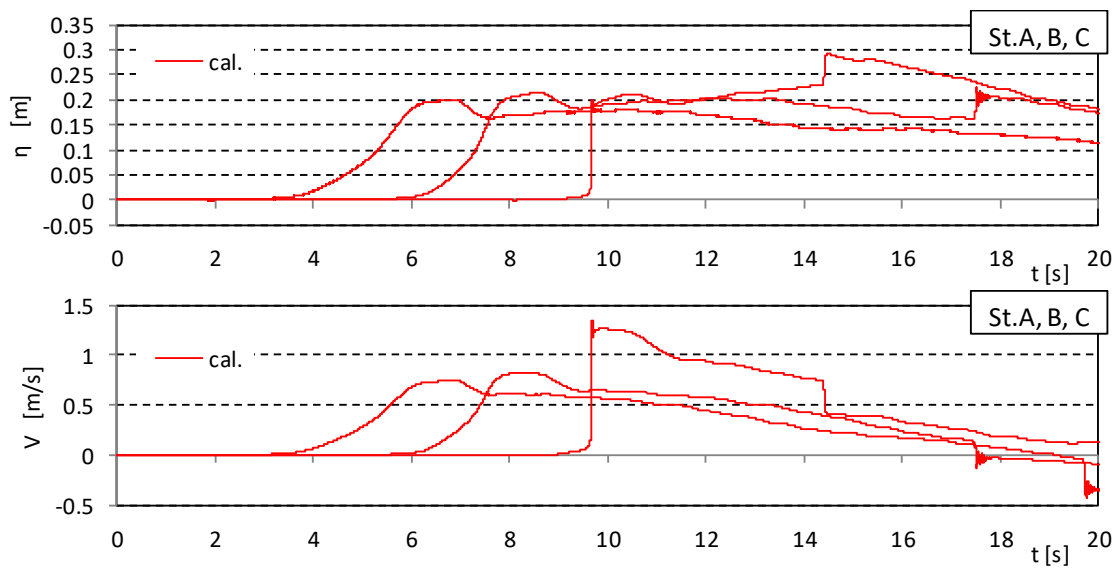


図- 5.3.6 通過波検定試験における入射波の解析 (T-STOC, 単純勾配, Wd11)

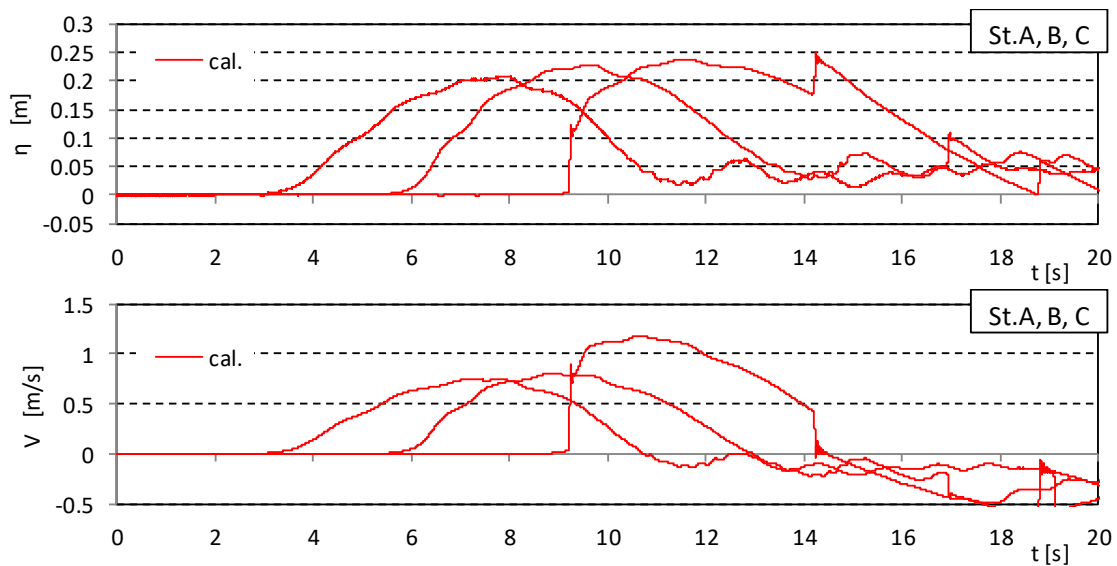


図- 5.3.6 通過波検定試験における入射波の解析 (T-STOC, 単純勾配, Wd20)

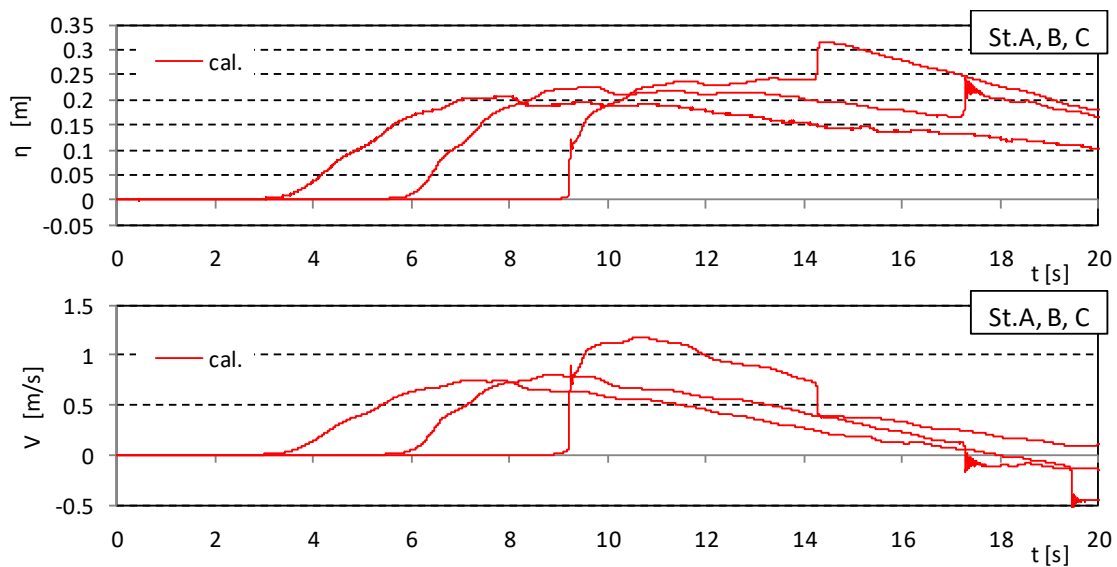


図- 5.3.6 通過波検定試験における入射波の解析 (T-STOC, 単純勾配, Wd21)

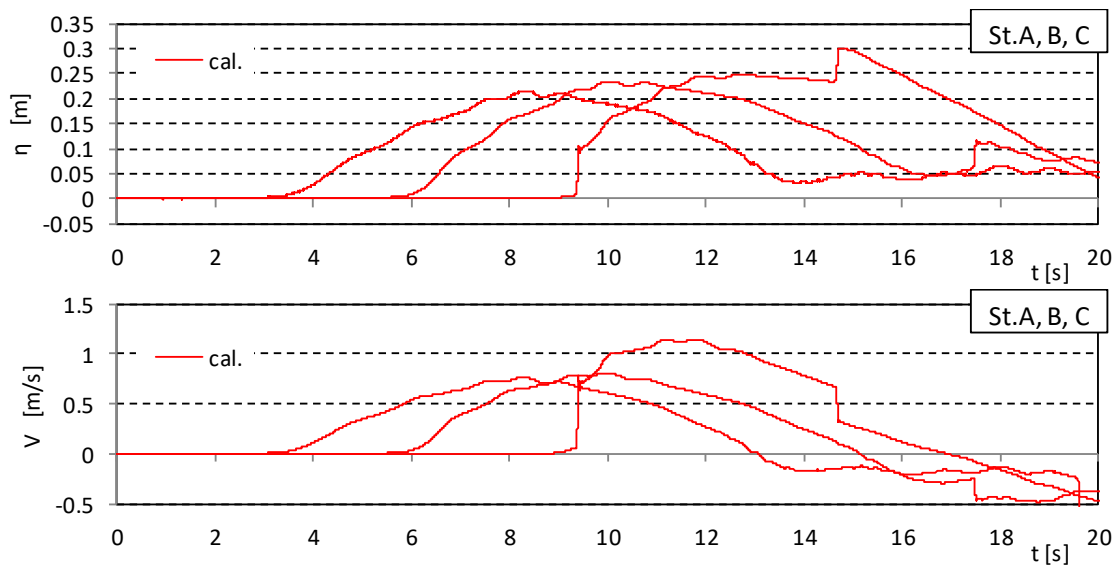


図- 5.3.6 通過波検定試験における入射波の解析 (T-STOC, 単純勾配, Wd30)

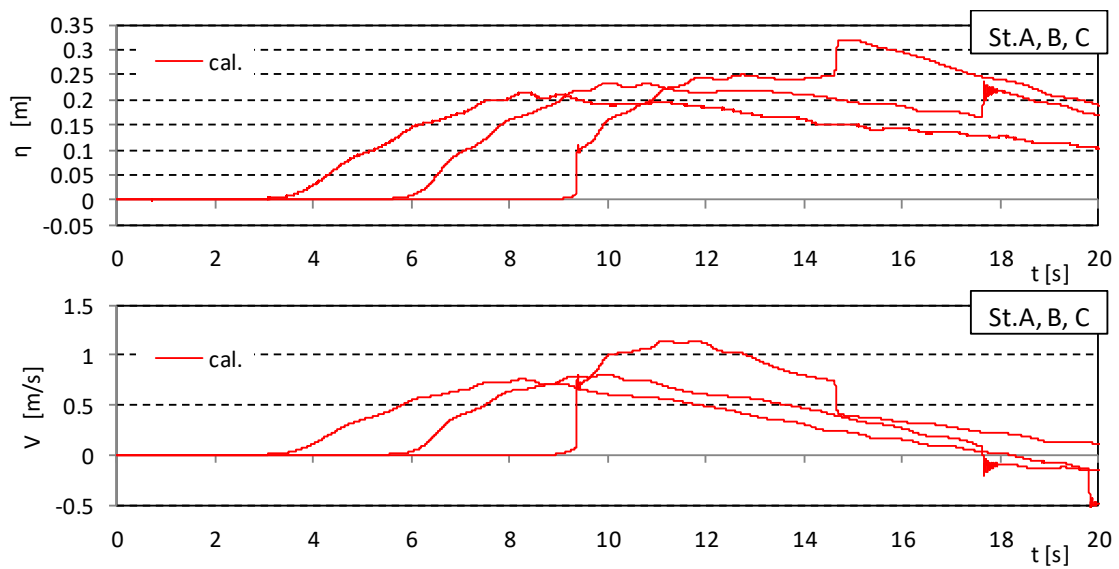


図- 5.3.6 通過波検定試験における入射波の解析 (T-STOC, 単純勾配, Wd31)

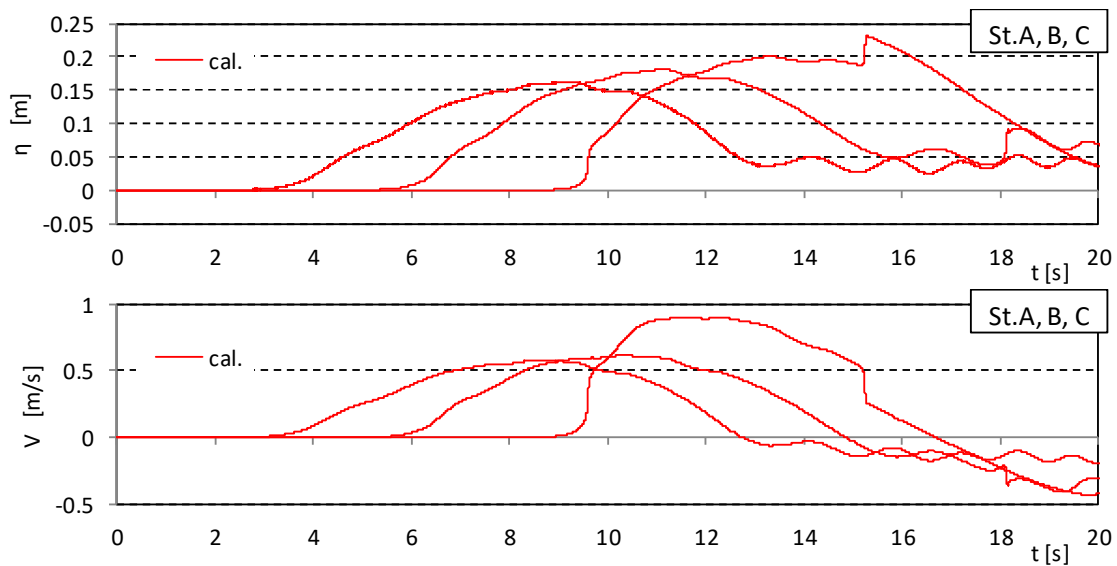


図- 5.3.6 通過波検定試験における入射波の解析 (T-STOC, 単純勾配, Wd40)

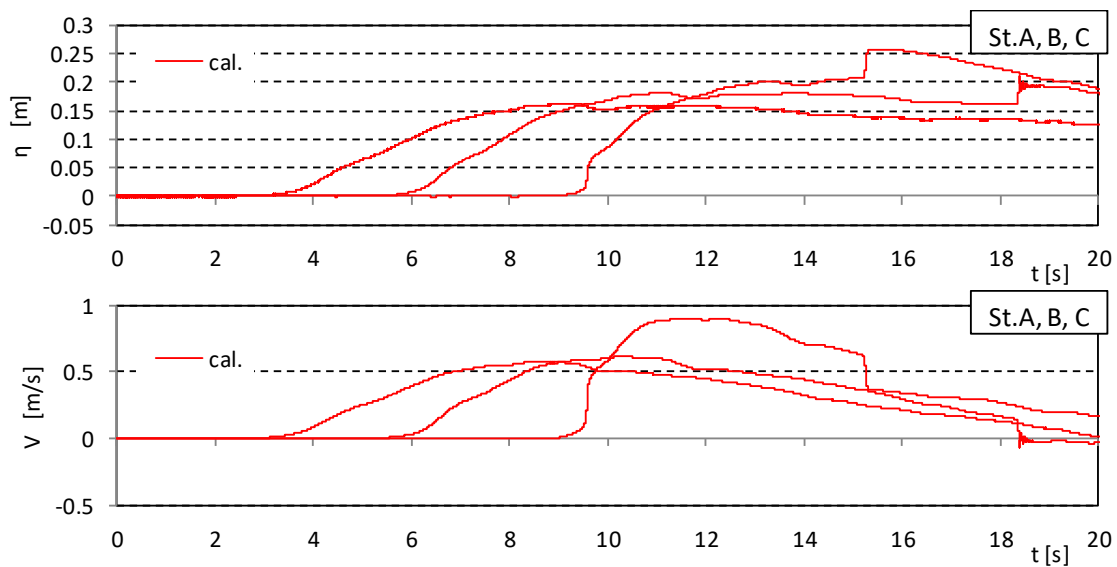


図- 5.3.6 通過波検定試験における入射波の解析 (T-STOC, 単純勾配, Wd41)

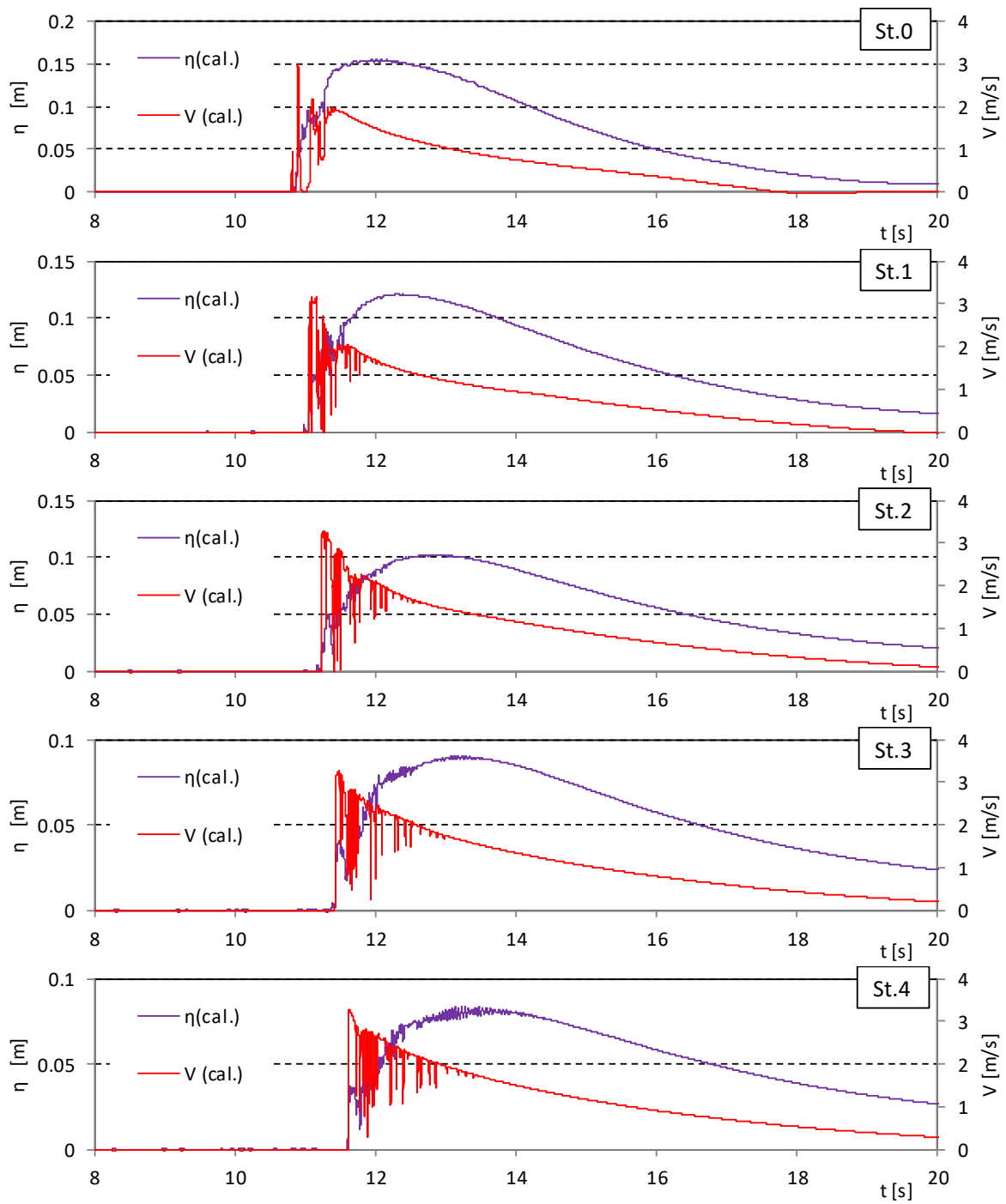


図- 5.3.7 通過波検定試験における浸水深と流速の解析 (OpenFOAM, 単純勾配, Wd10)

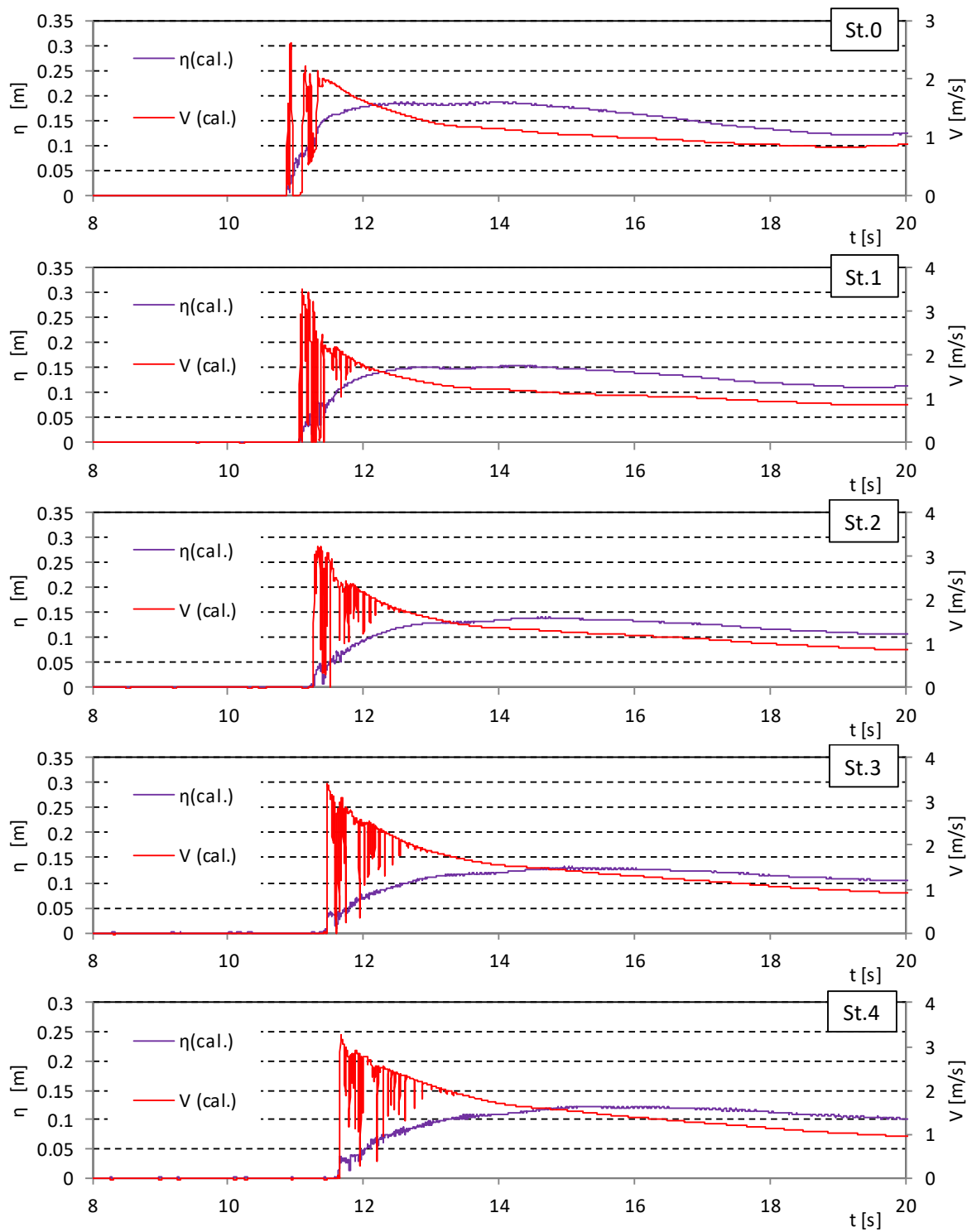


図- 5.3.7 通過波検定試験における浸水深と流速の解析 (OpenFOAM, 単純勾配, Wd11)

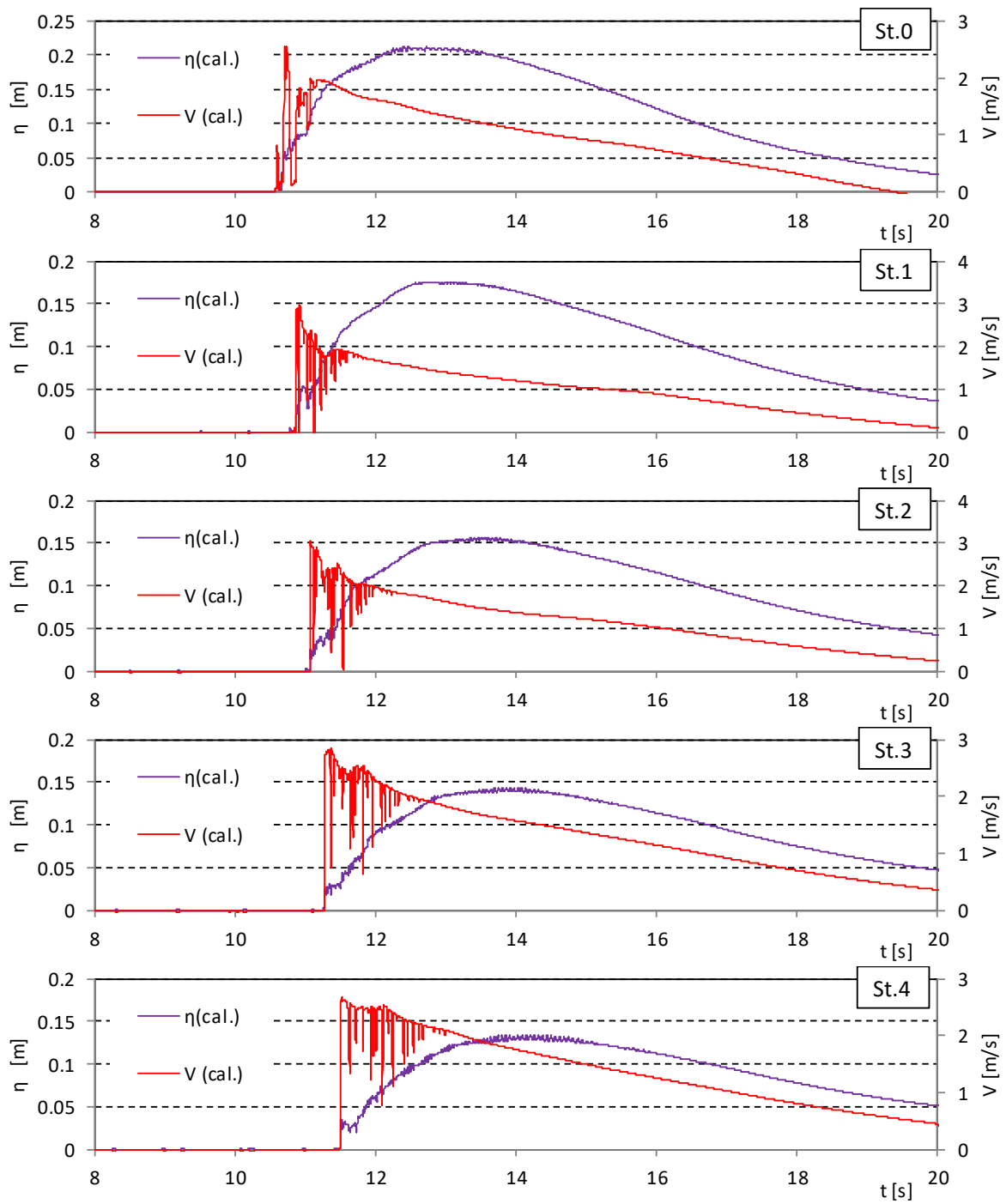


図- 5.3.7 通過波検定試験における浸水深と流速の解析 (OpenFOAM, 単純勾配, Wd20)

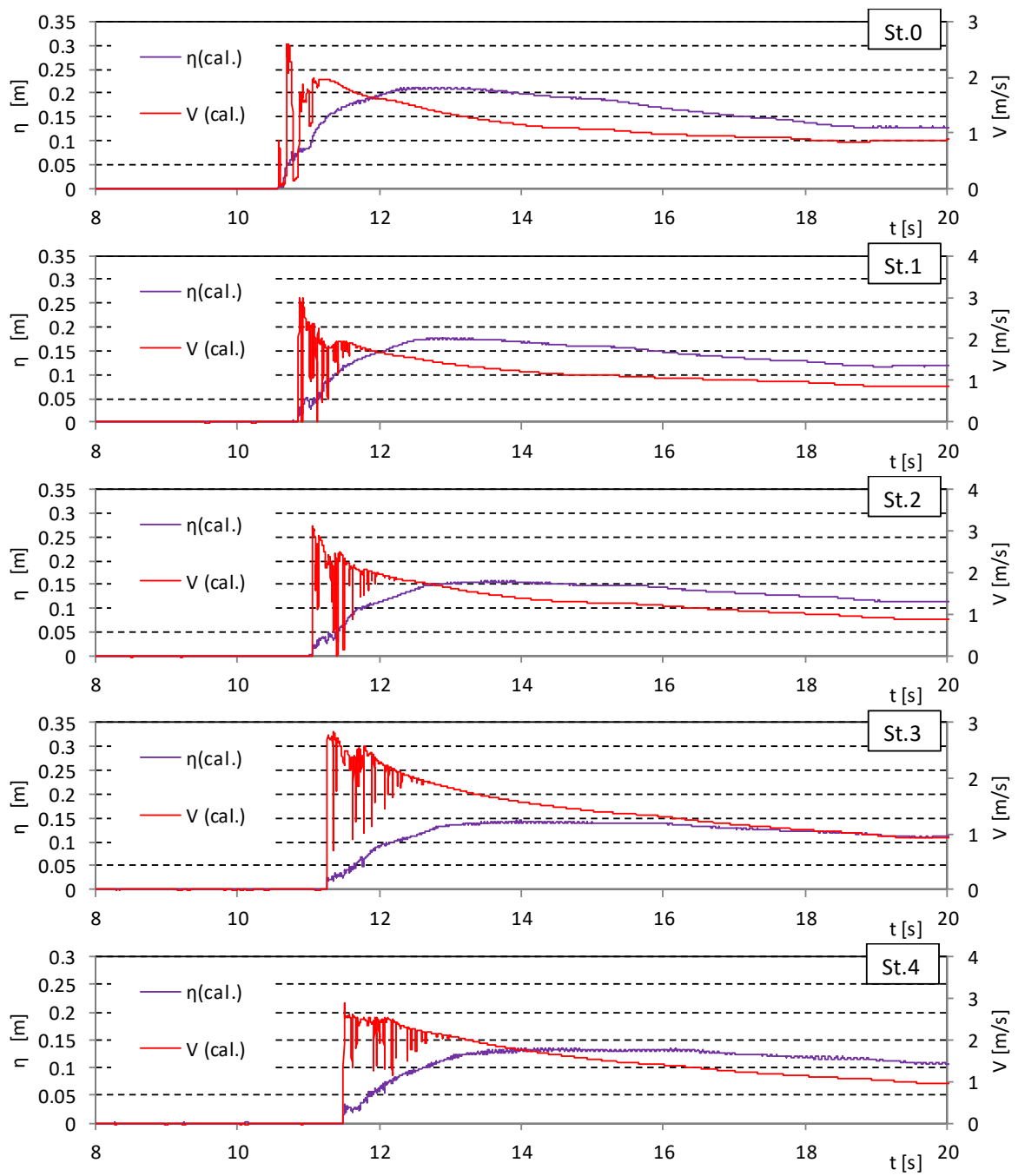


図- 5.3.7 通過波検定試験における浸水深と流速の解析 (OpenFOAM, 単純勾配, Wd21)

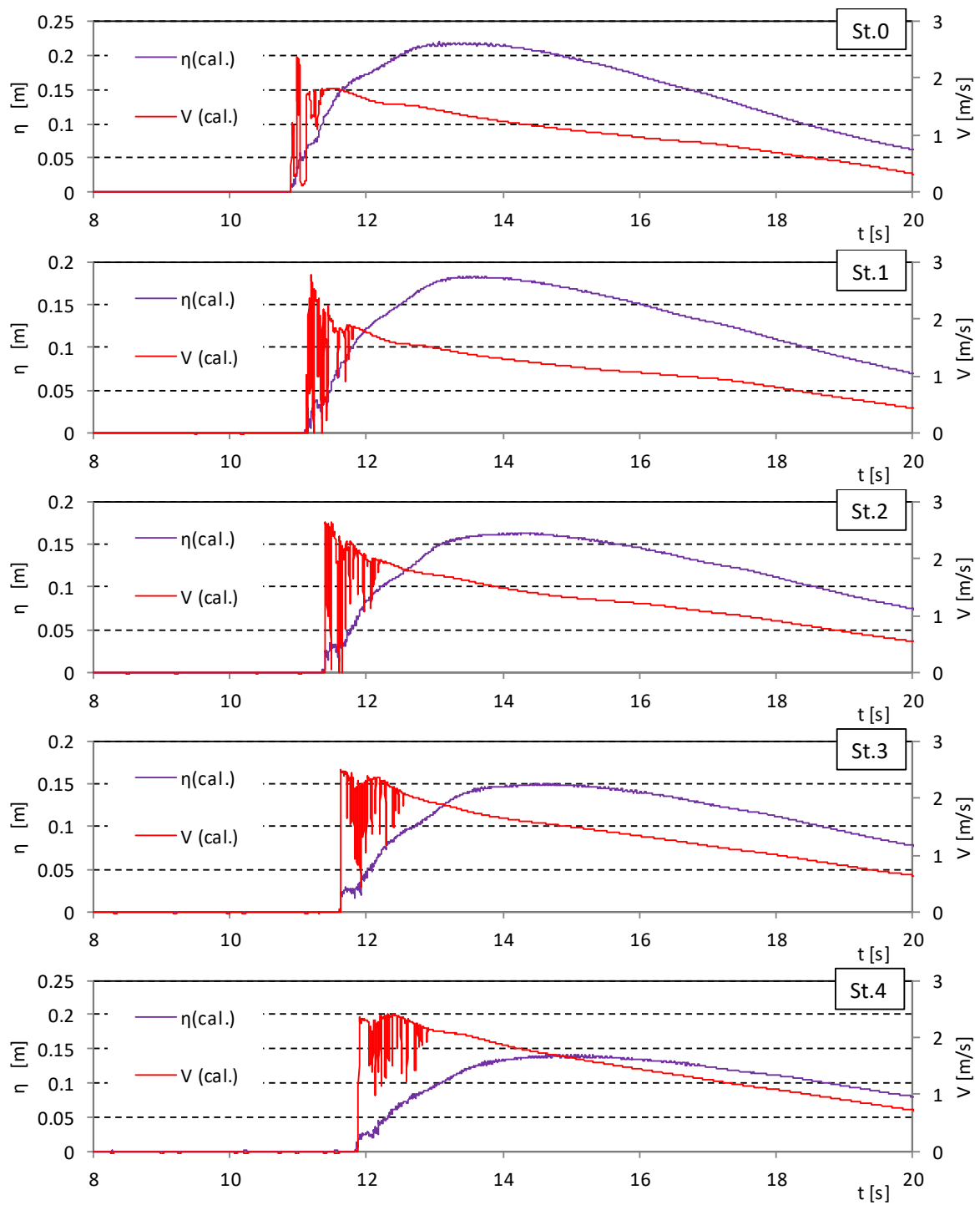


図- 5.3.7 通過波検定試験における浸水深と流速の解析 (OpenFOAM, 単純勾配, Wd30)

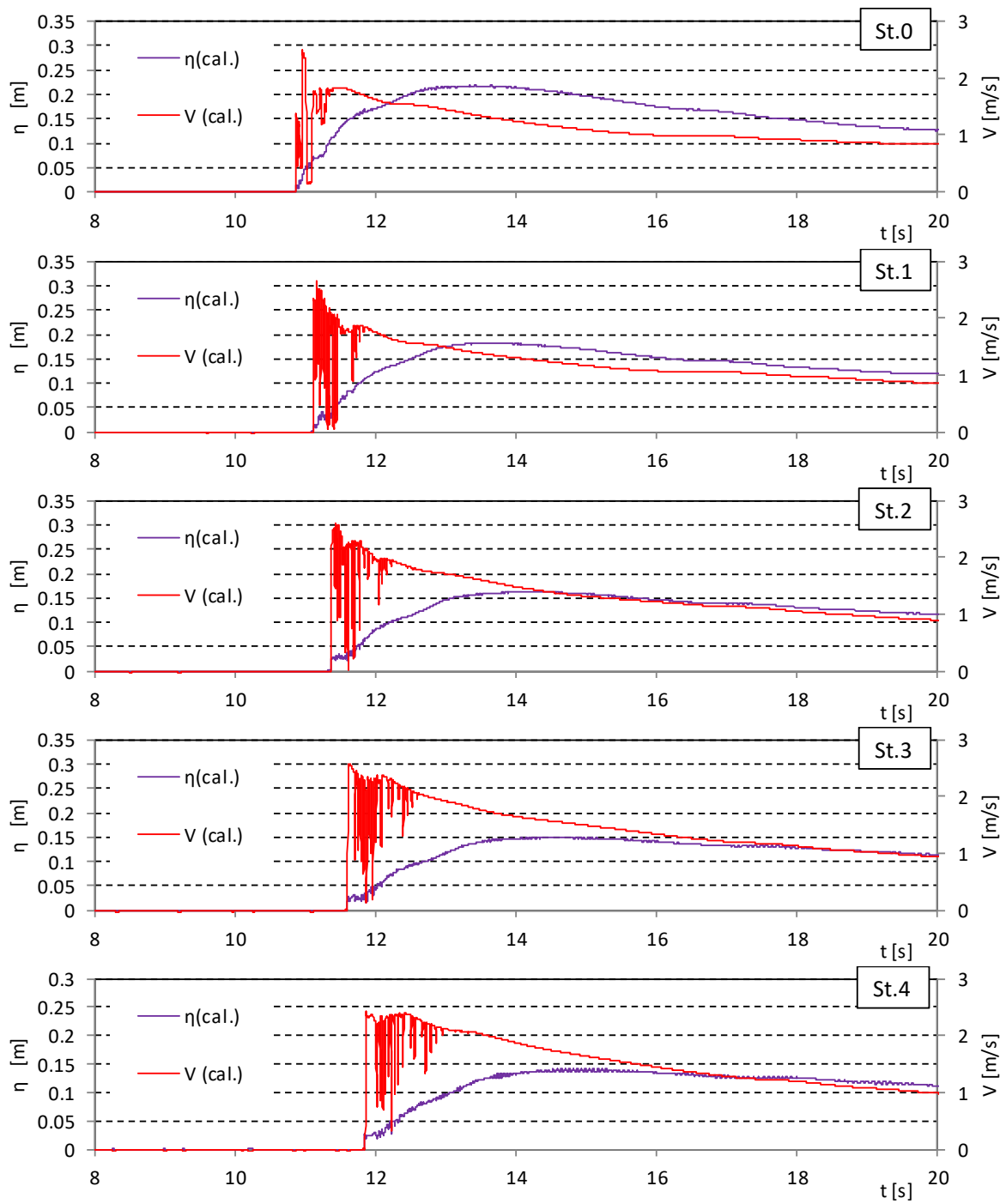


図- 5.3.7 通過波検定試験における浸水深と流速の解析 (OpenFOAM, 単純勾配, Wd31)

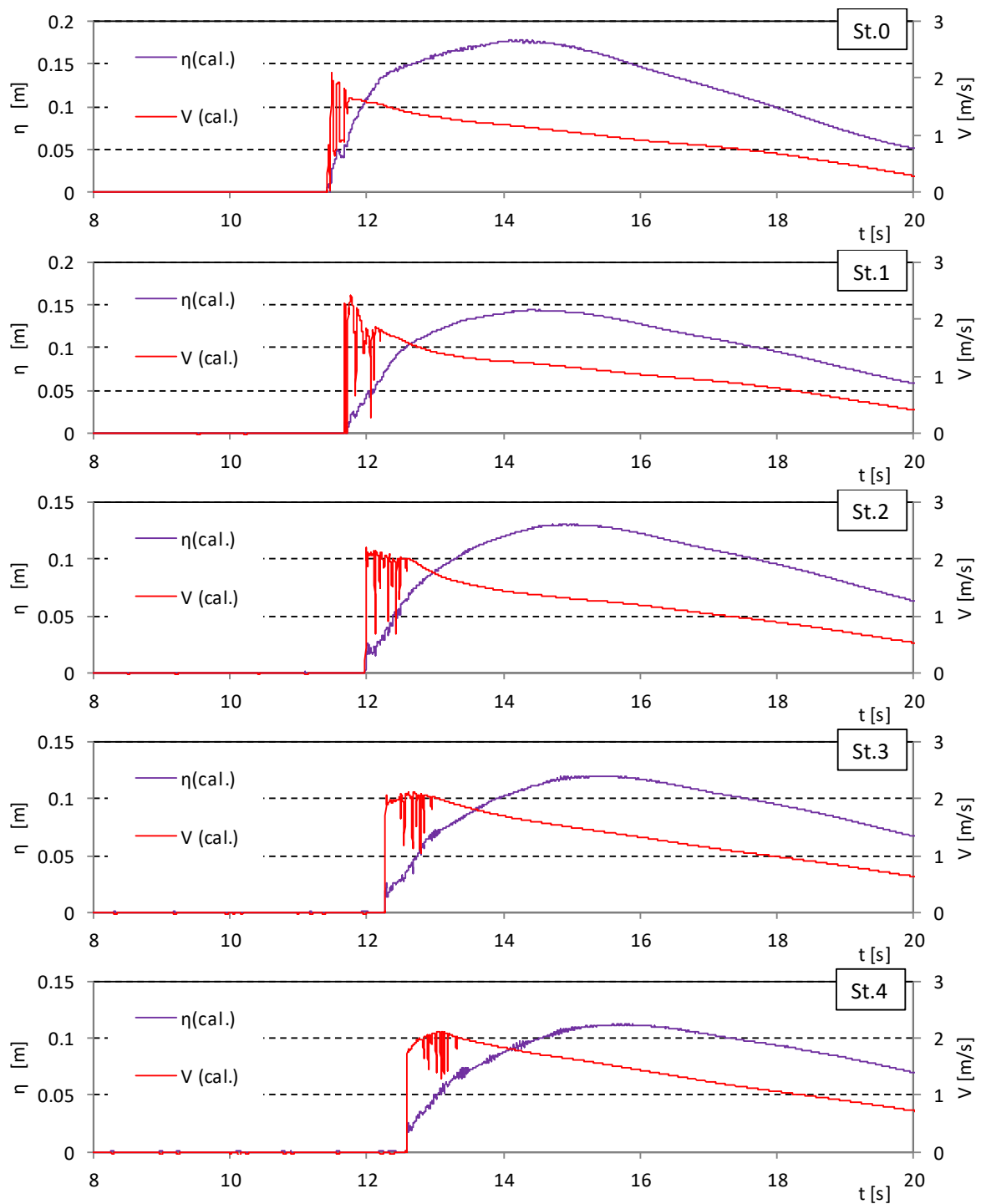


図- 5.3.7 通過波検定試験における浸水深と流速の解析 (OpenFOAM, 単純勾配, Wd40)

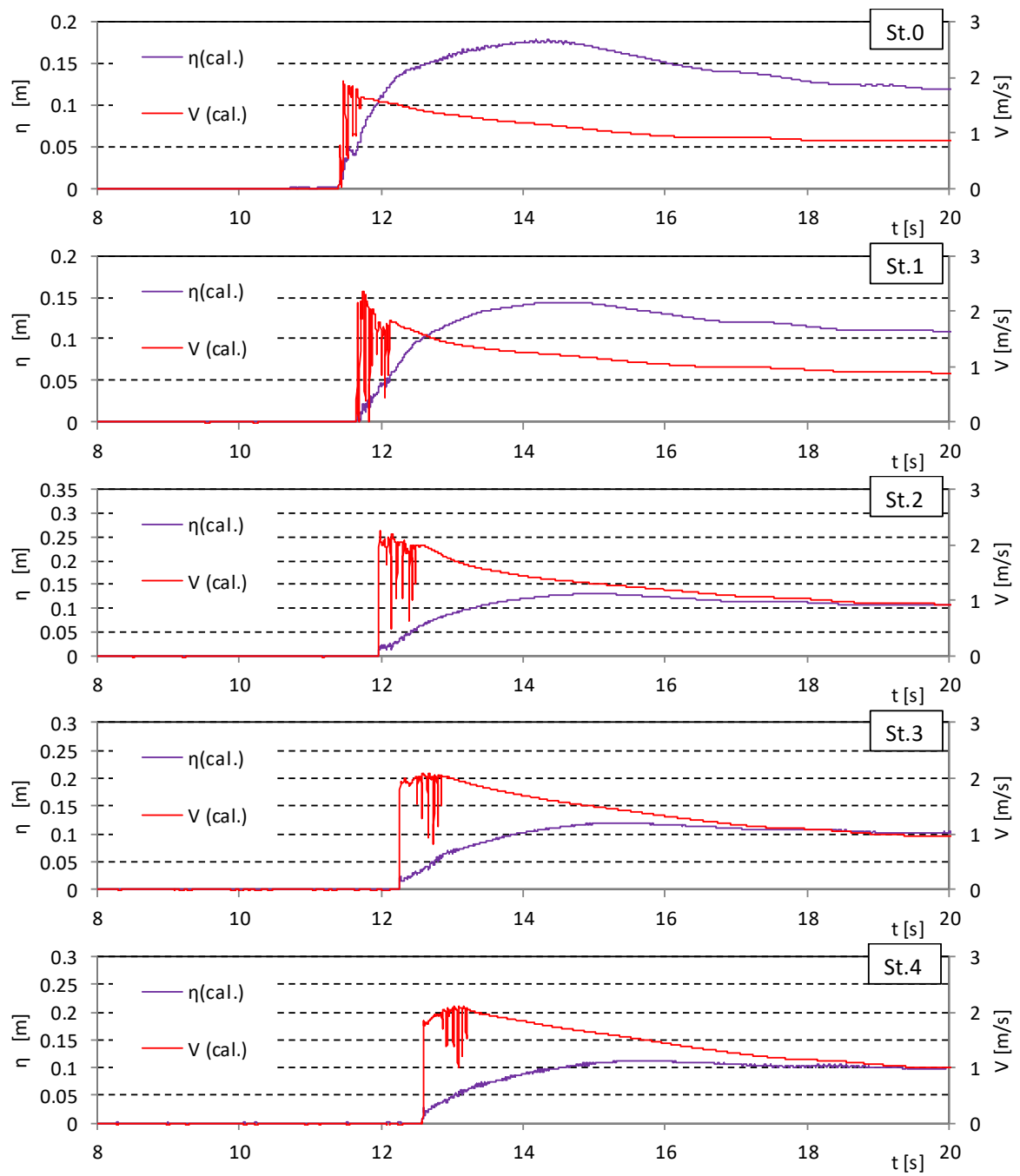


図- 5.3.7 通過波検定試験における浸水深と流速の解析 (OpenFOAM, 単純勾配, Wd41)

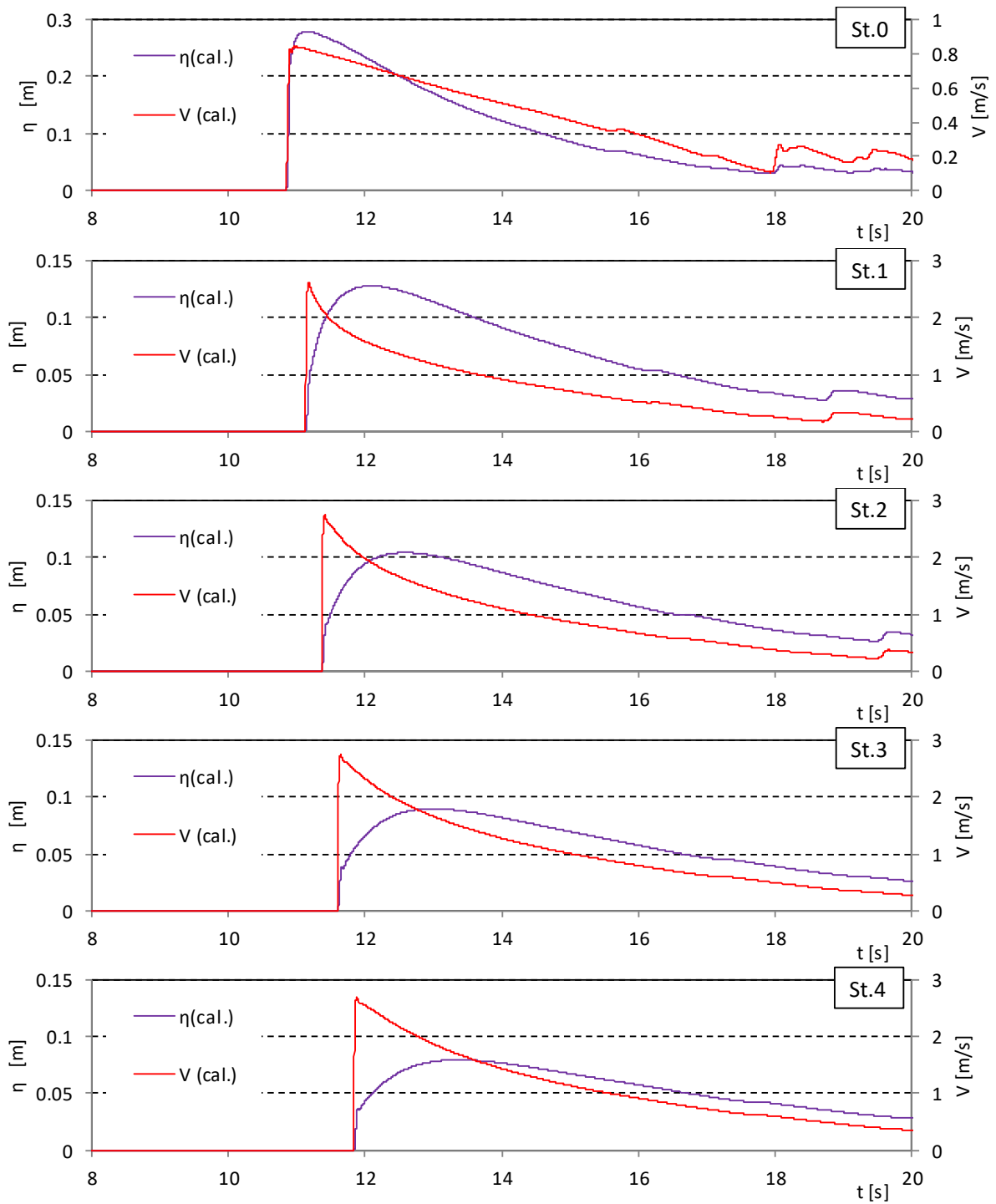


図- 5.3.8 通過波検定試験における浸水深と流速の解析 (T-STOC, 単純勾配, Wd10)

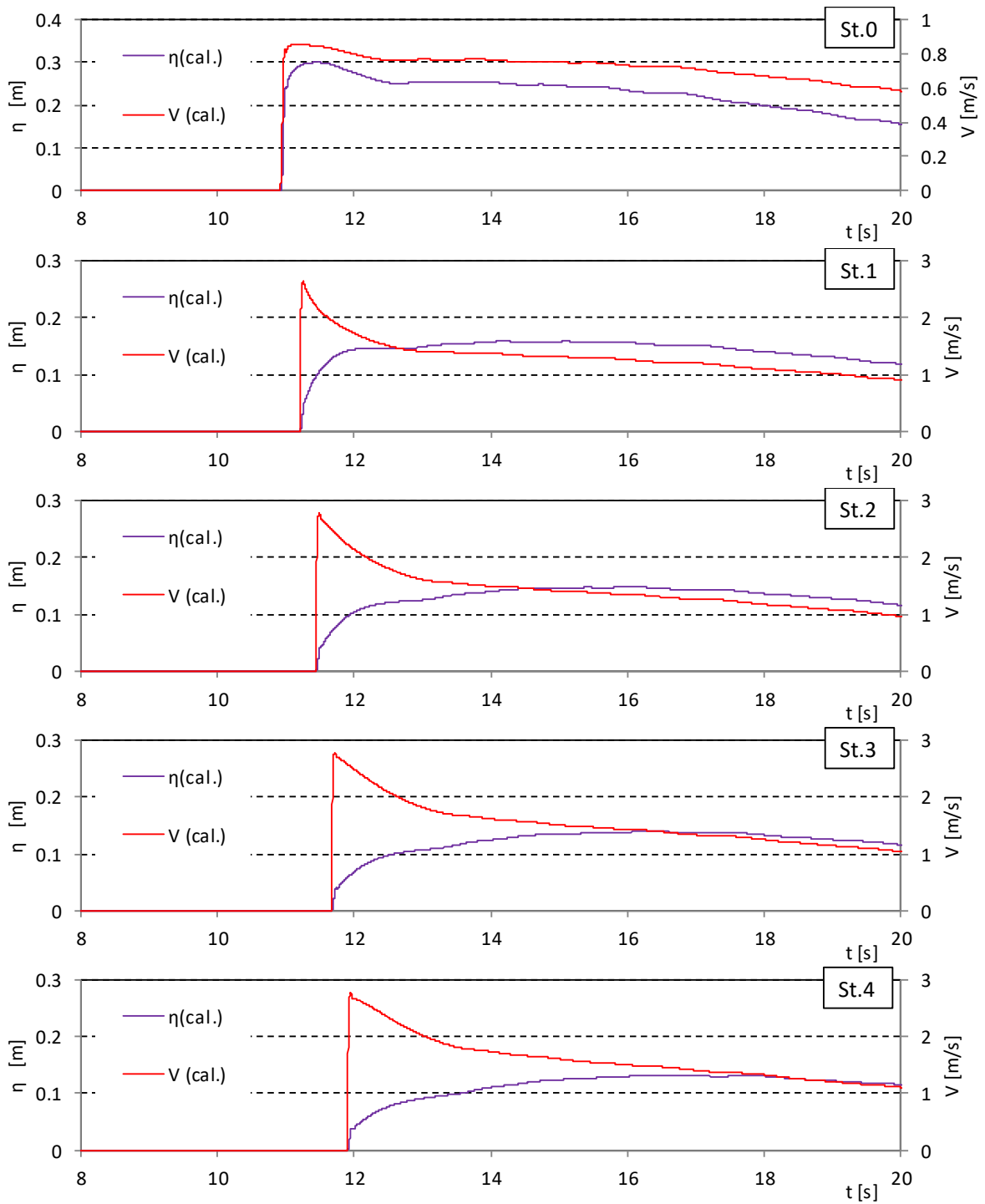


図- 5.3.8 通過波検定試験における浸水深と流速の解析 (T-STOC, 単純勾配, Wd11)

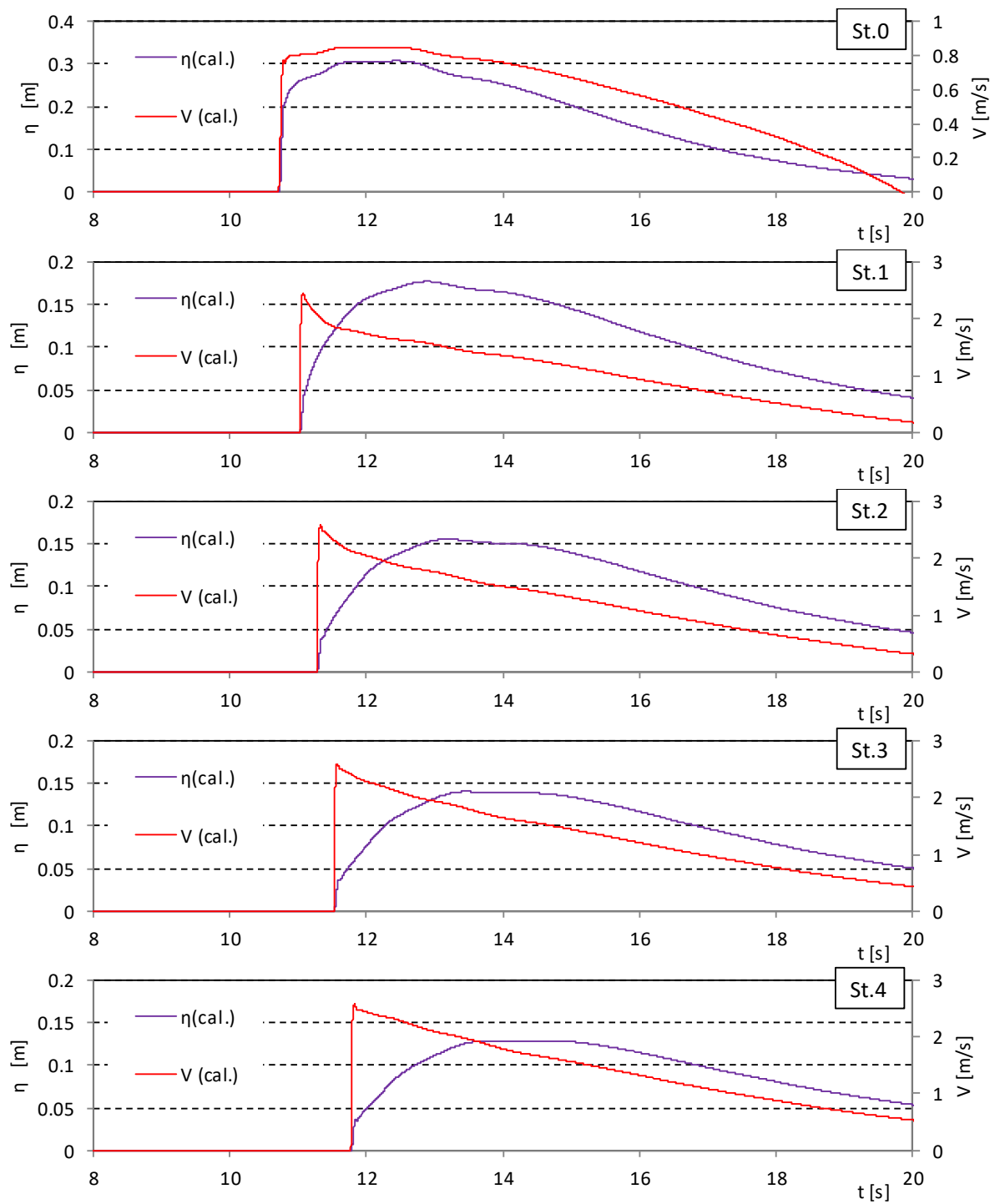


図- 5.3.8 通過波検定試験における浸水深と流速の解析 (T-STOC, 単純勾配, Wd20)

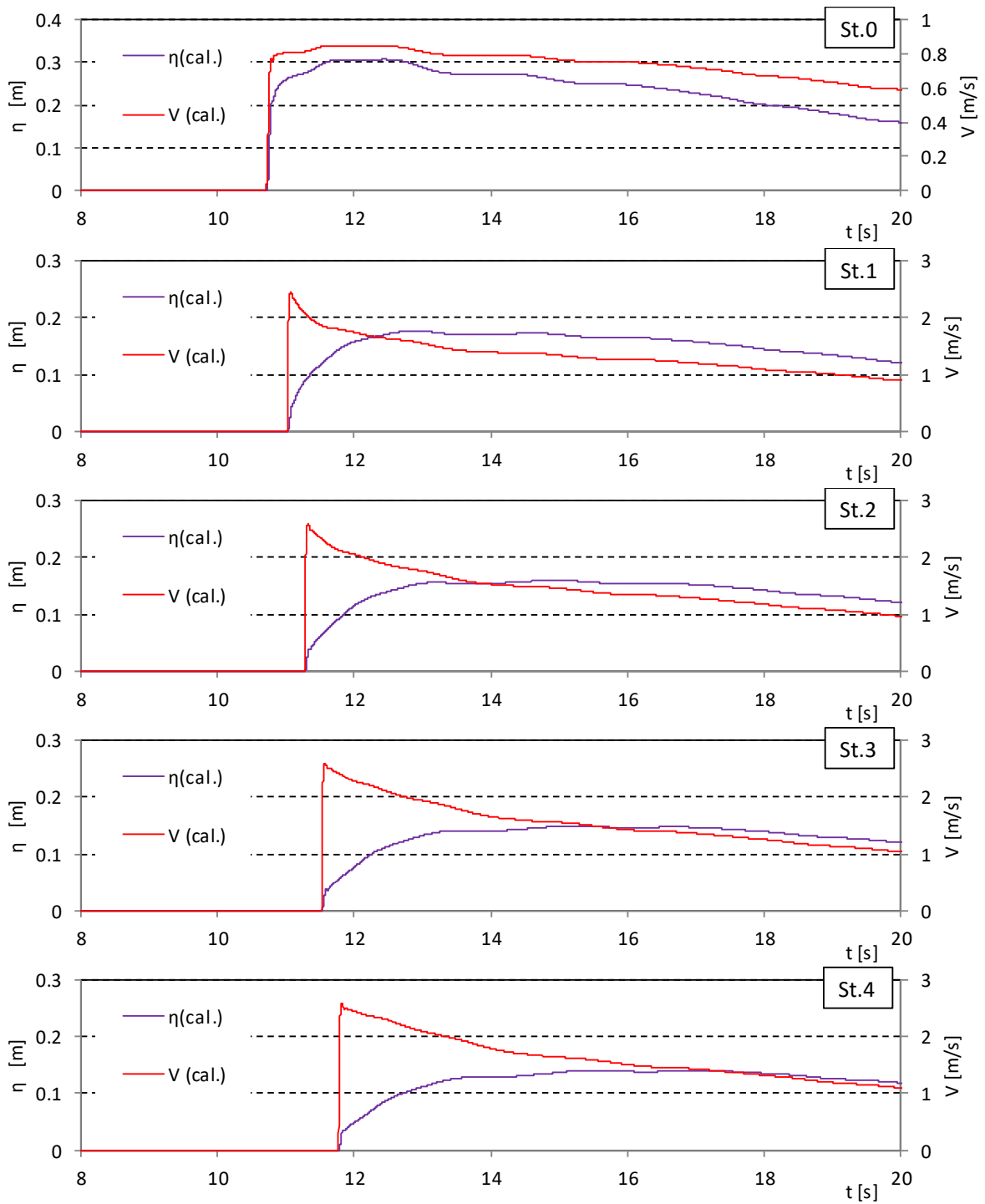


図- 5.3.8 通過波検定試験における浸水深と流速の解析 (T-STOC, 単純勾配, Wd21)

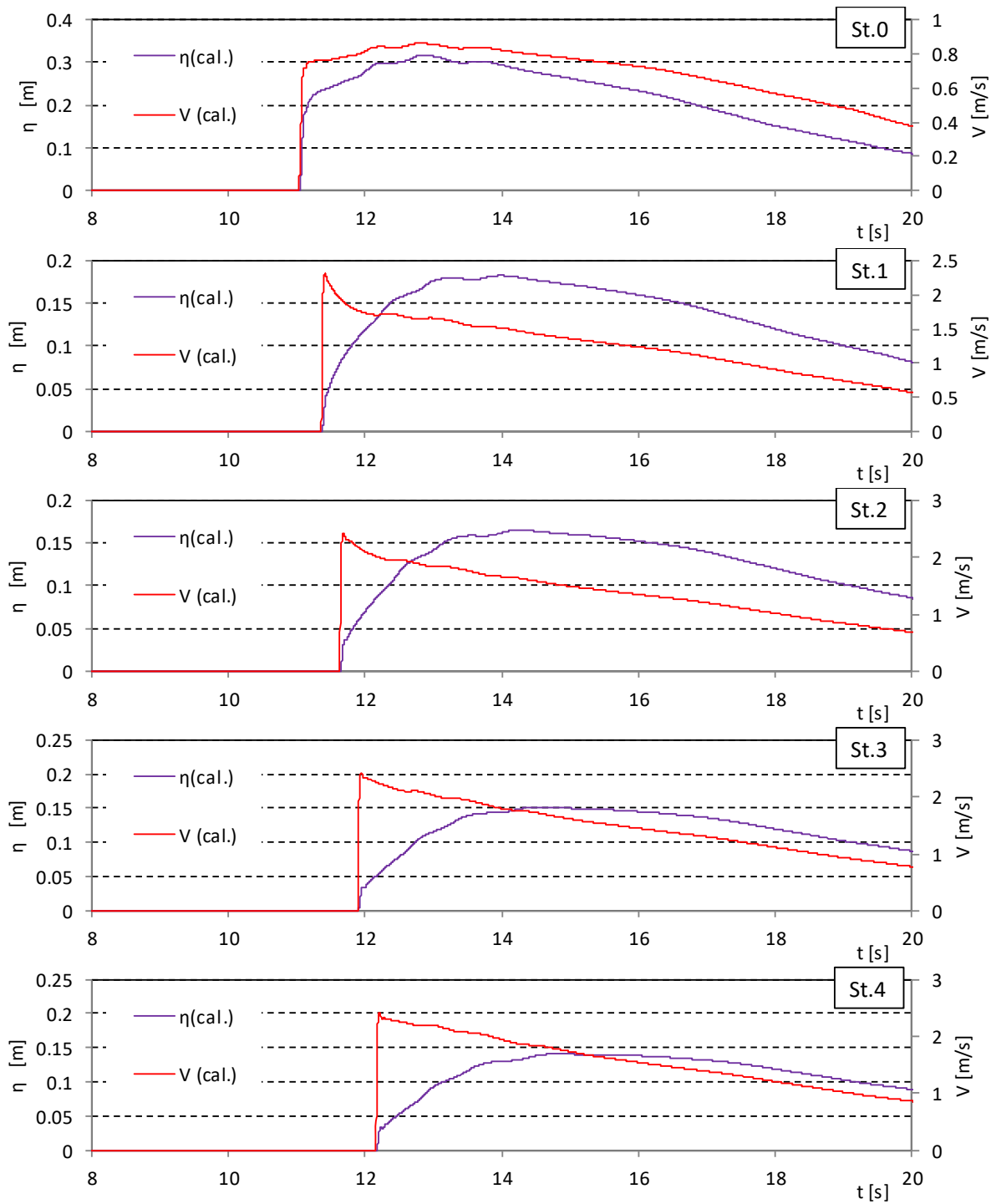


図- 5.3.8 通過波検定試験における浸水深と流速の解析 (T-STOC, 単純勾配, Wd30)

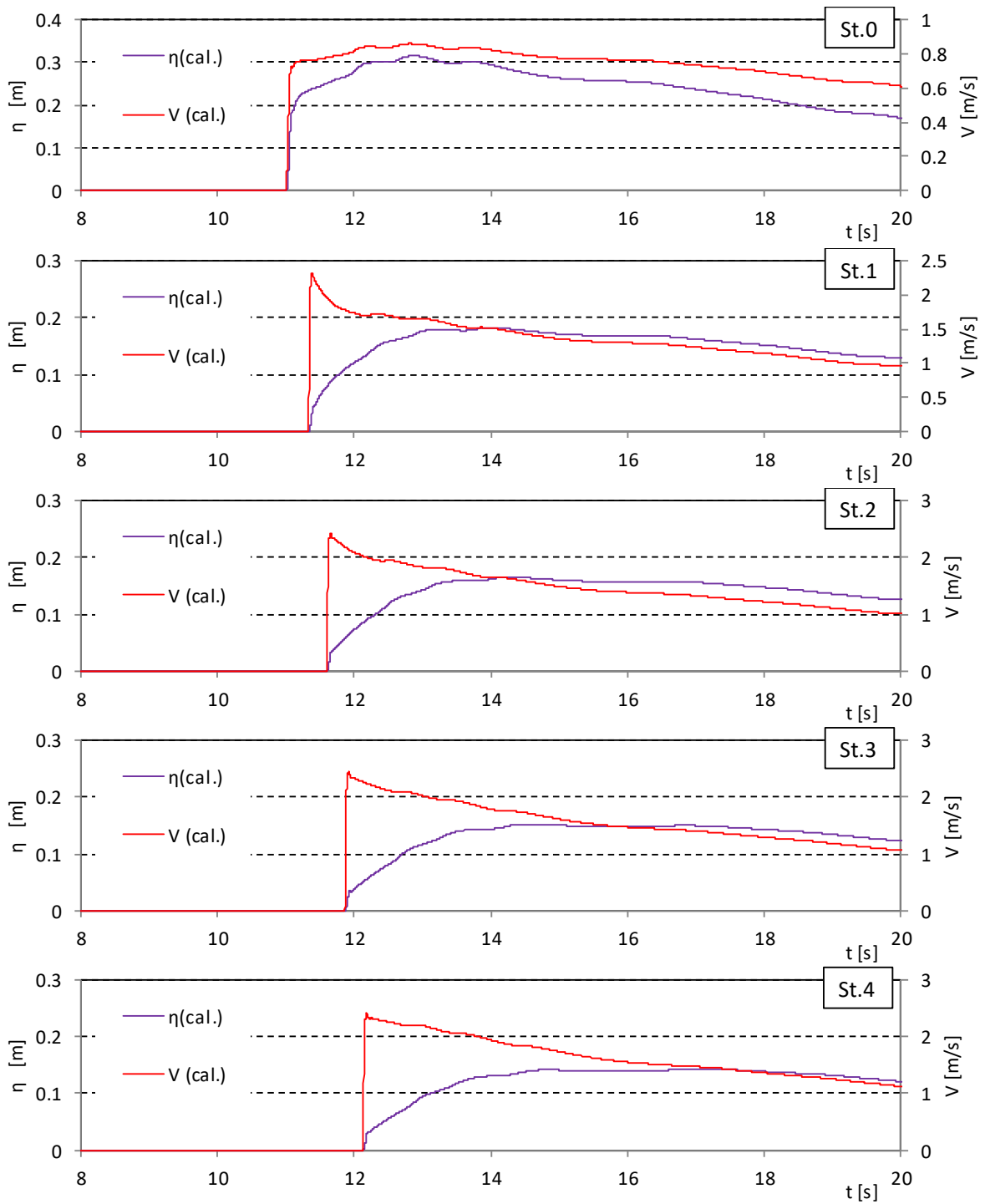


図- 5.3.8 通過波検定試験における浸水深と流速の解析 (T-STOC, 単純勾配, Wd31)

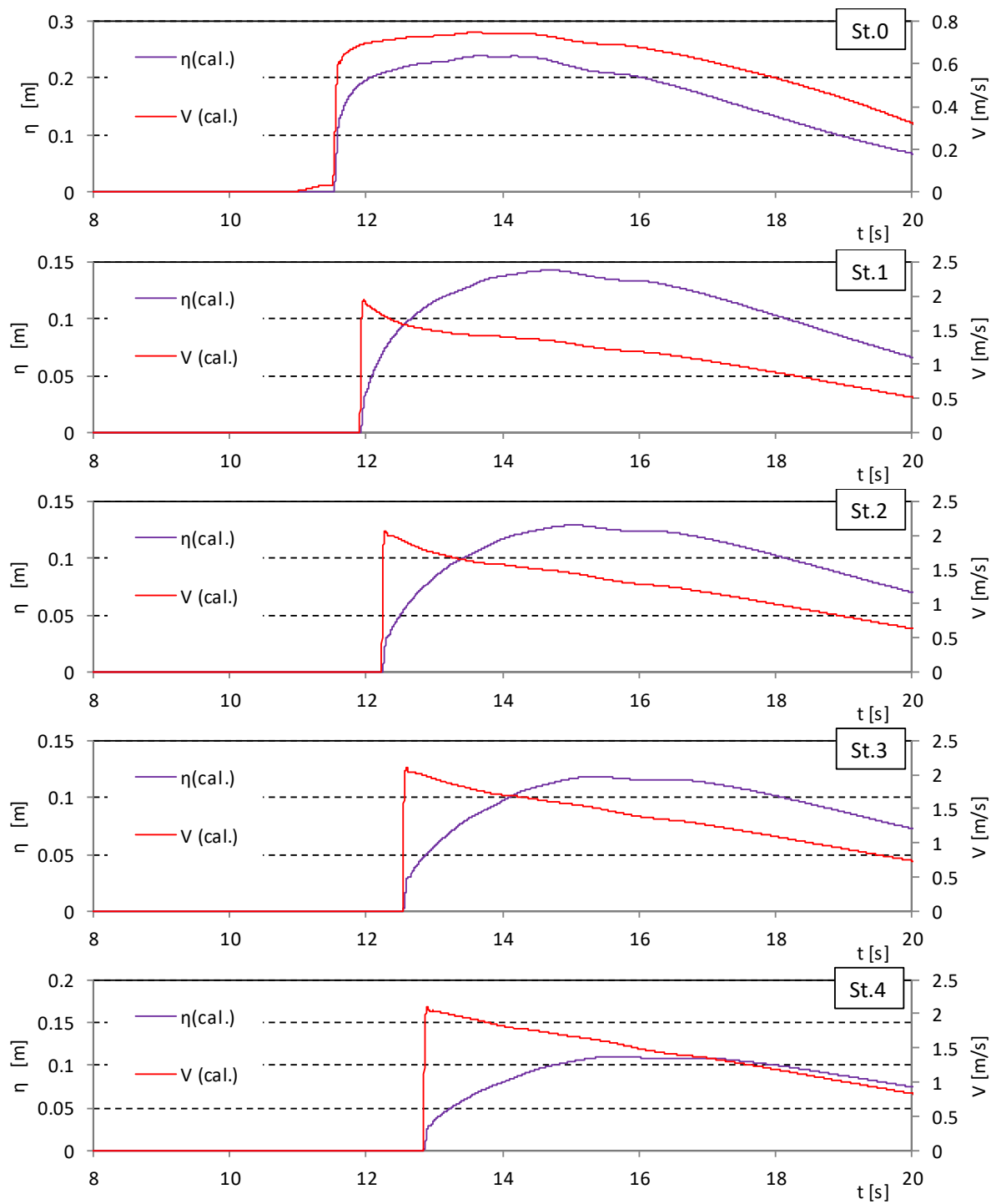


図- 5.3.8 通過波検定試験における浸水深と流速の解析 (T-STOC, 単純勾配, Wd40)

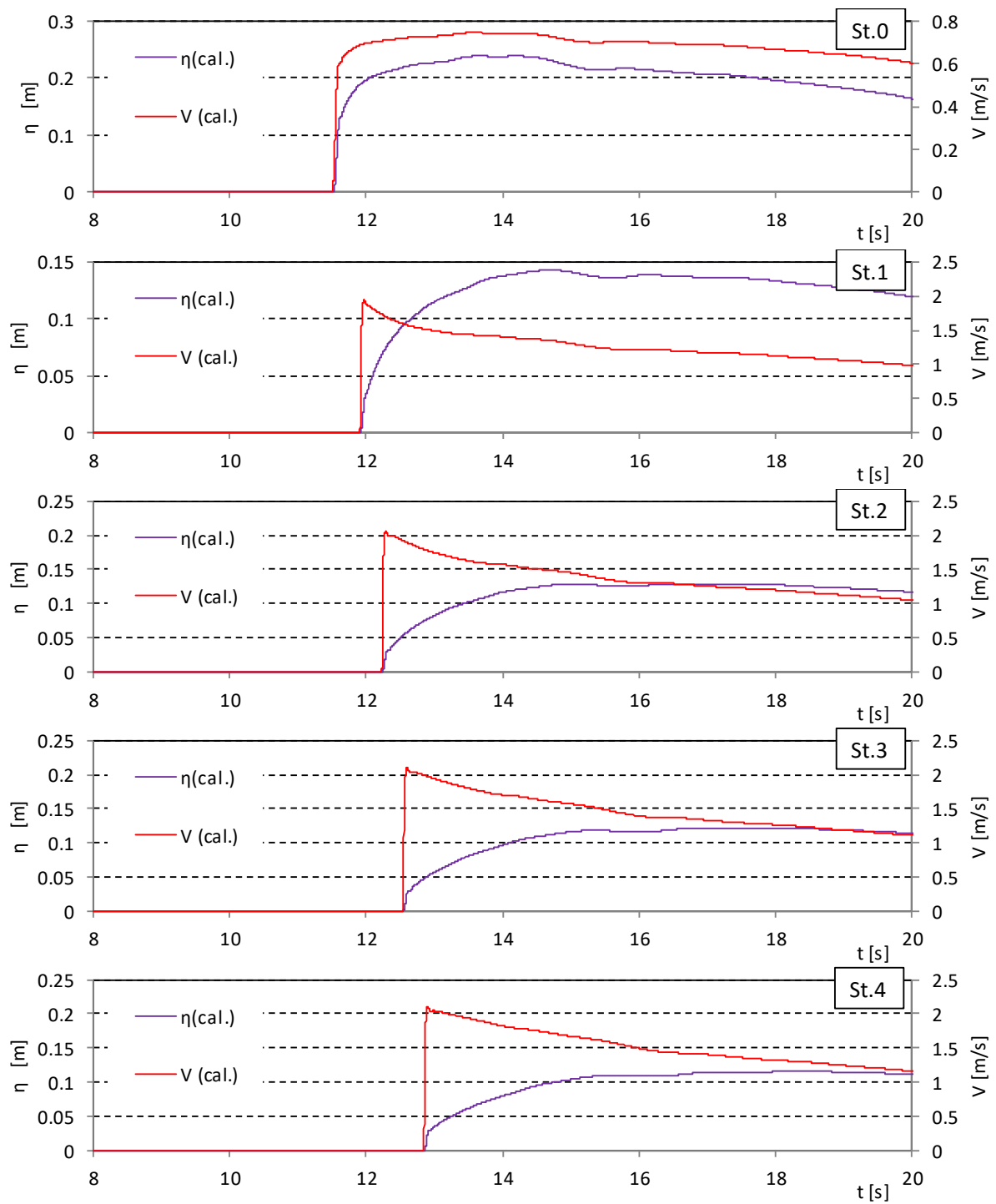


図- 5.3.8 通過波検定試験における浸水深と流速の解析 (T-STOC, 単純勾配, Wd41)

5.3.2. 越流試験

図- 5.3.9～図- 5.3.24 に、越流試験の再現解析結果を示す。[堤体高 0.25m, 堤体位置 0m], [堤体高 0.25m, 堤体位置 0.625m], [堤体高 0.125m, 堤体位置 0m], [堤体高 0.125m, 堤体位置 0.625m]の順に示しており、図- 5.3.9～図- 5.3.12 が OpenFOAM による直立護岸の解析結果、図- 5.3.13～図- 5.3.16 が T-STOC による直立護岸の解析結果であり、また図- 5.3.17～図- 5.3.20, 図- 5.3.21～図- 5.3.24 はそれぞれ、OpenFOAM, T-STOC による単純勾配の解析結果を示している。

OpenFOAM による解析結果について、St.0 や St.1 の堤体の上を越流する部分では、越流開始時の水位の盛り上がり数値シミュレーションでは再現できていないものの、それを除くと越流水深を精度良く再現している。この水位の盛り上がりは、越流開始時に鉛直上方向に打ち上る水塊を水理試験では計測していると考えられ、計測位置が少しずれると計測値も異なると考えられる。計測位置と水位算出点を厳密に一致させることにより、再現精度が向上するものと考えられるが、より詳細な解析格子が必要となる。一方、越流時の流速は、総じて解析結果の流速が計測結果よりも小さい。堤体上の越流時の流速は、鉛直方法に分布を持っており、プロペラ流速計は計測装置の直径に当たる部分の平均的な流速を計測していると考えられる。シミュレーションでは、算出点における流速を算出しているため、直接の比較が難しいが、後述する越流後の浸水深と流速の再現精度が良いことから越流量は良い精度で再現できていると考え、流速の再現精度が低いのは算出点の問題によるものと想定される。

越流後の浸水深と流速については、越流開始時には乱れが大きいためその波形までは再現が困難なケースもあるが、秒間隔程度の大きな時間変動として比較すると、試験結果とシミュレーション結果を良く一致していると言える。ただし、前述の通過波検定試験の結果と同様に、流速を小さく評価する傾向にはある。

T-STOC の解析結果については、越流後の浸水深の時間波形を再現するのは難しいことが分かる。特に、堤体高 0.25m の場合に、浸水の開始時間が遅れる傾向にある。この要因としては、実際の越流現象では高い位置から越流するため、上述の流脈の飛ぶ距離も長くなり、浸水の開始地点（越流水の供給位置）が堤体背面から多少離れた位置になるのに対し、T-STOC では越流モデルにより越流量を算定して、これを堤体背面直後の格子に供給することとなる。そのため、T-STOC では浸水の到達時間が遅れていると考えられる。また、越流水深が小さく、また短時間で越流水深が変動する場合には、堤体の越流量モデルの精度も低減するものと考えられる。ただし、堤体高 0.125m の場合の越流量が大きくなると、時間波形のずれはあるものの、最大値は比較的精度よく再現されていると言える。なお、St.0 や St.1 における堤体位置での浸水深については、津波到達時の大きな運動量による壁面前面での水位上昇を T-STOC では考慮できないため、波形先頭部分の水位の上昇（例えば、図- 5.3.13, Wd10 の St.0, $t=10.3\sim 10.8s$ ）については、再現できないが、実際の現象においては鉛直流速が大きくなるために、水位上昇の程度に対し越流量が大きくないため、この影響は小さいと考えられる。最大浸水深については、解析結果が水理試験よりも小さくなる傾向にあるが、一方、最大浸水深以降の時系列波形では T-STOC の方が大きな浸水深を示している。このことから、周期特性の長い、高水位の継続する津波波形を対象とした場合には、T-STOC は安全側の評価を示すことが推察される。

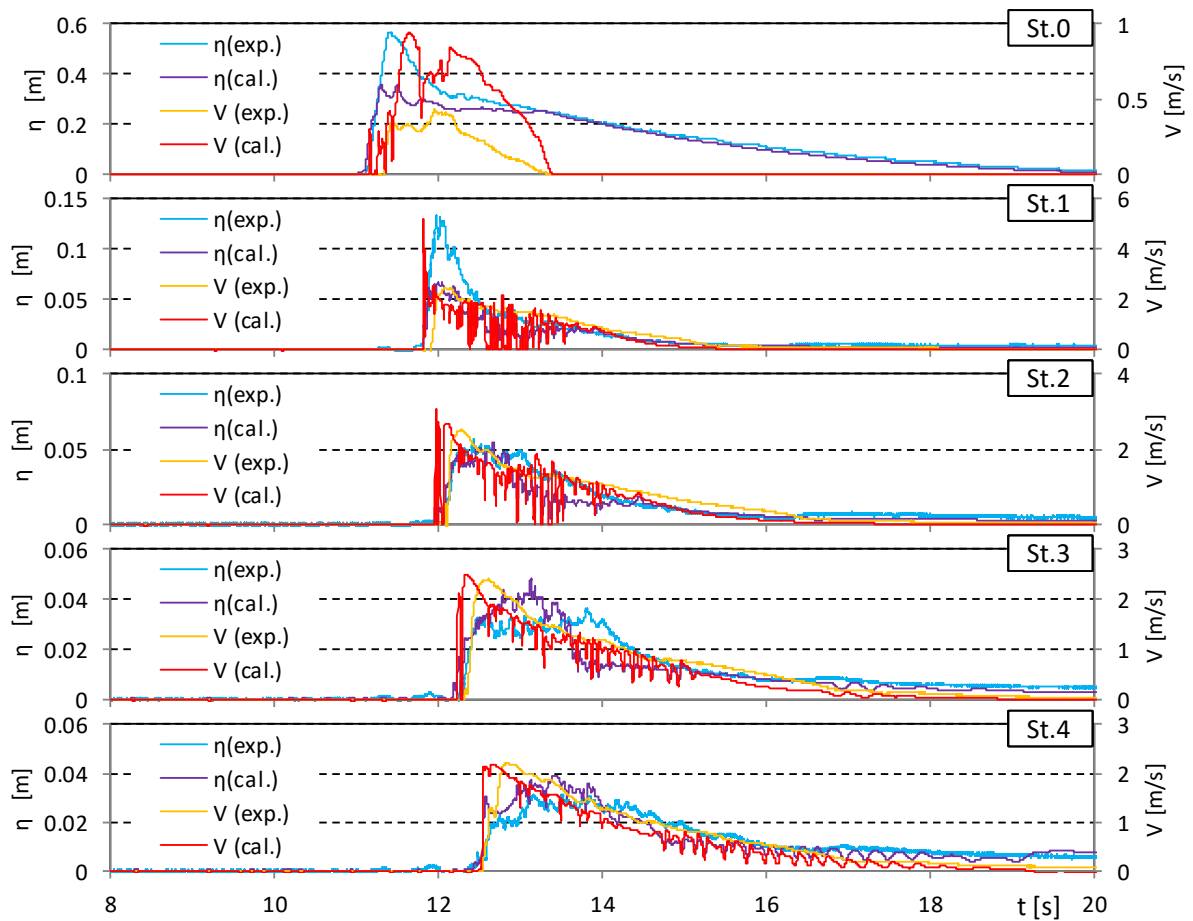


図- 5.3.9 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd10)

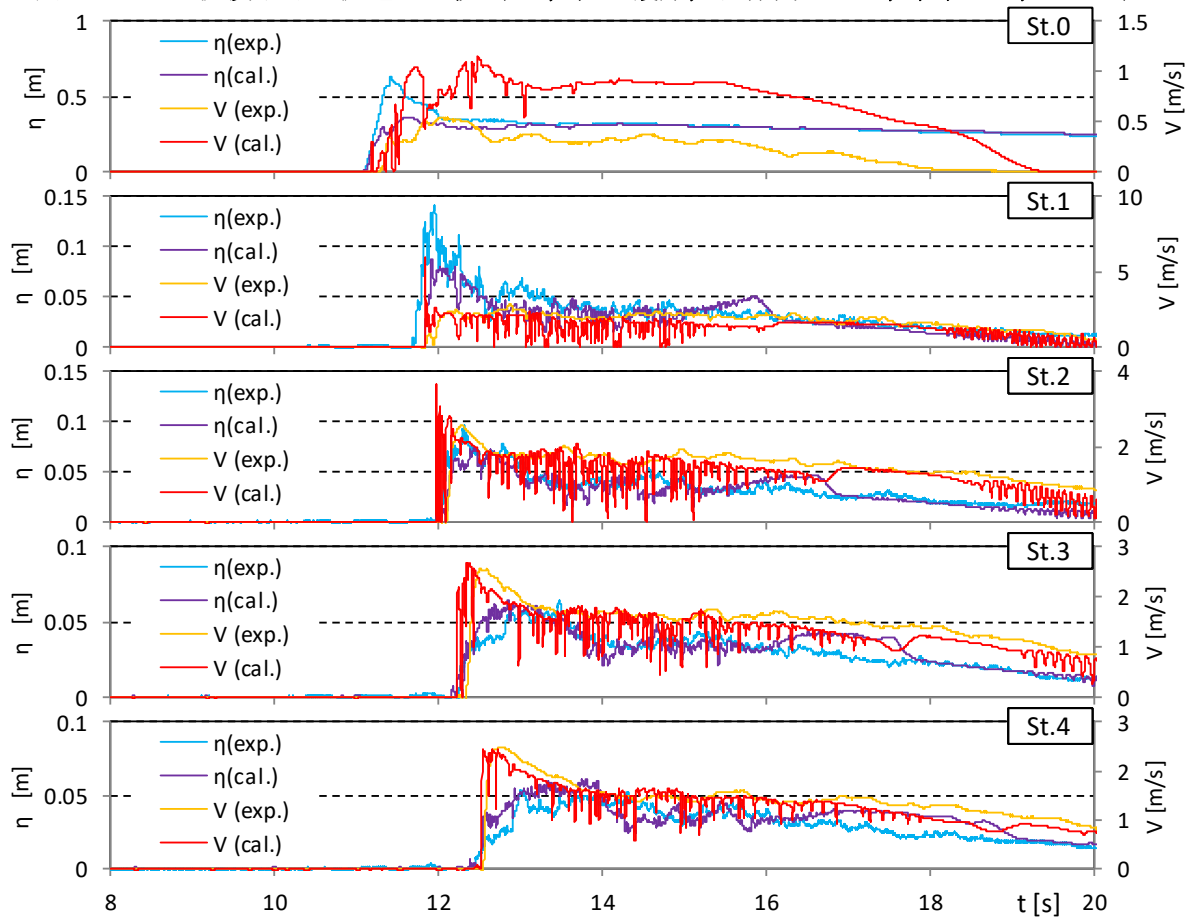


図- 5.3.9 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd11)

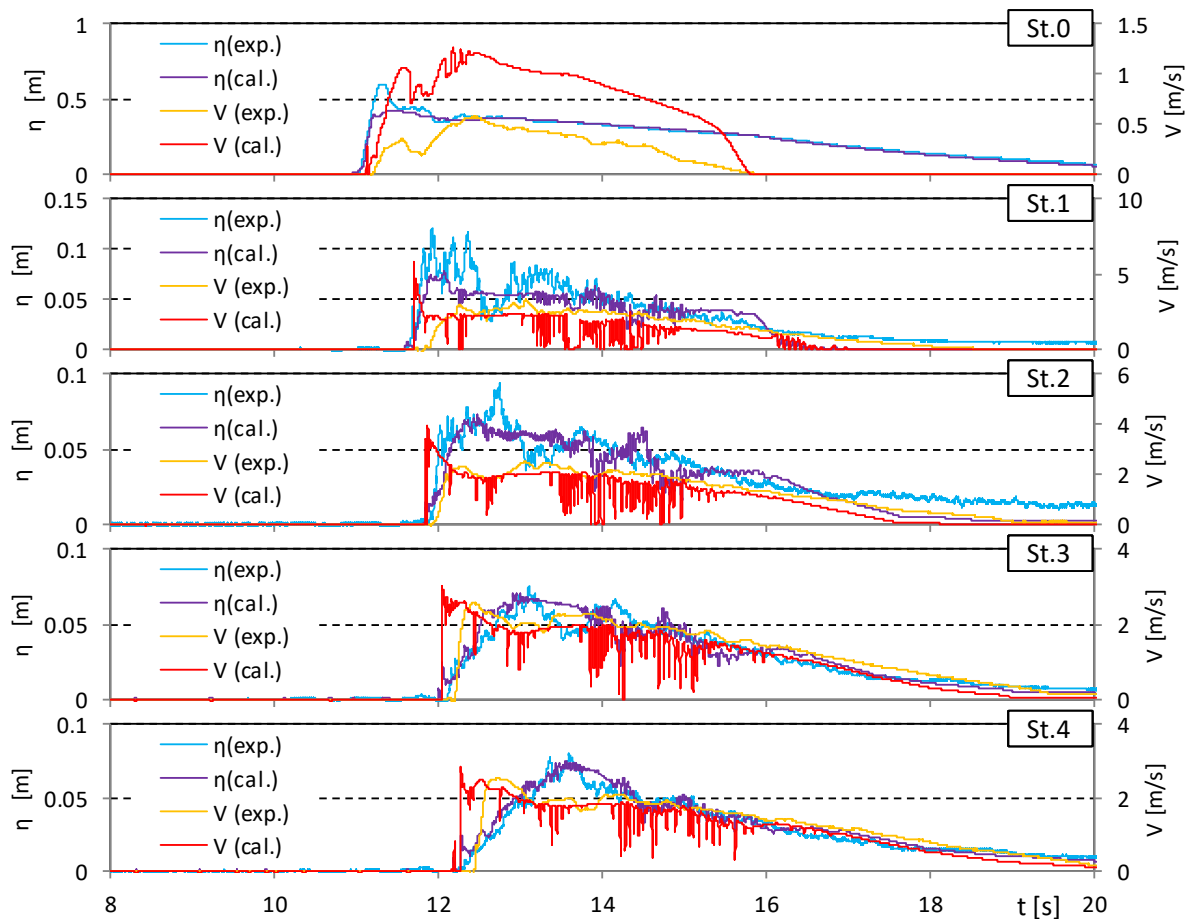


図- 5.3.9 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd20)

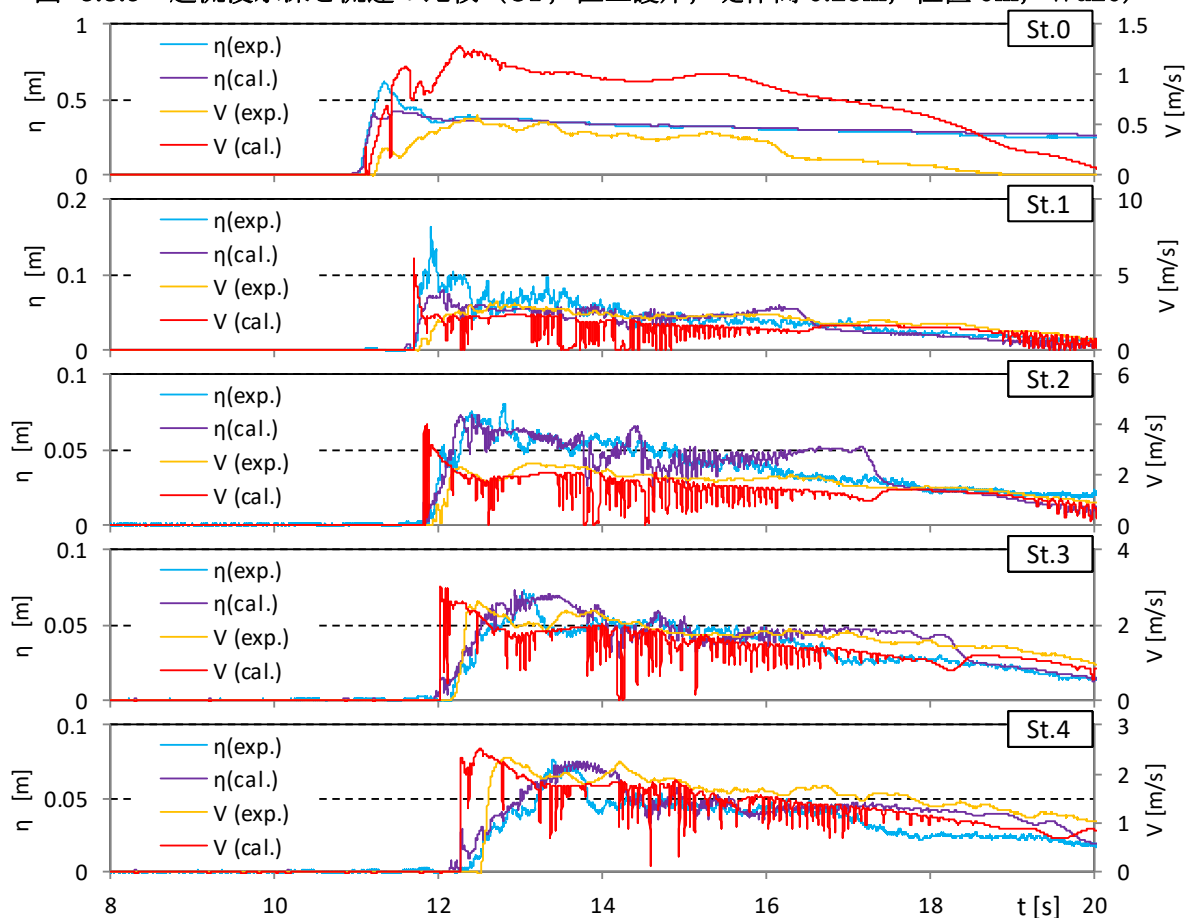


図- 5.3.9 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd21)

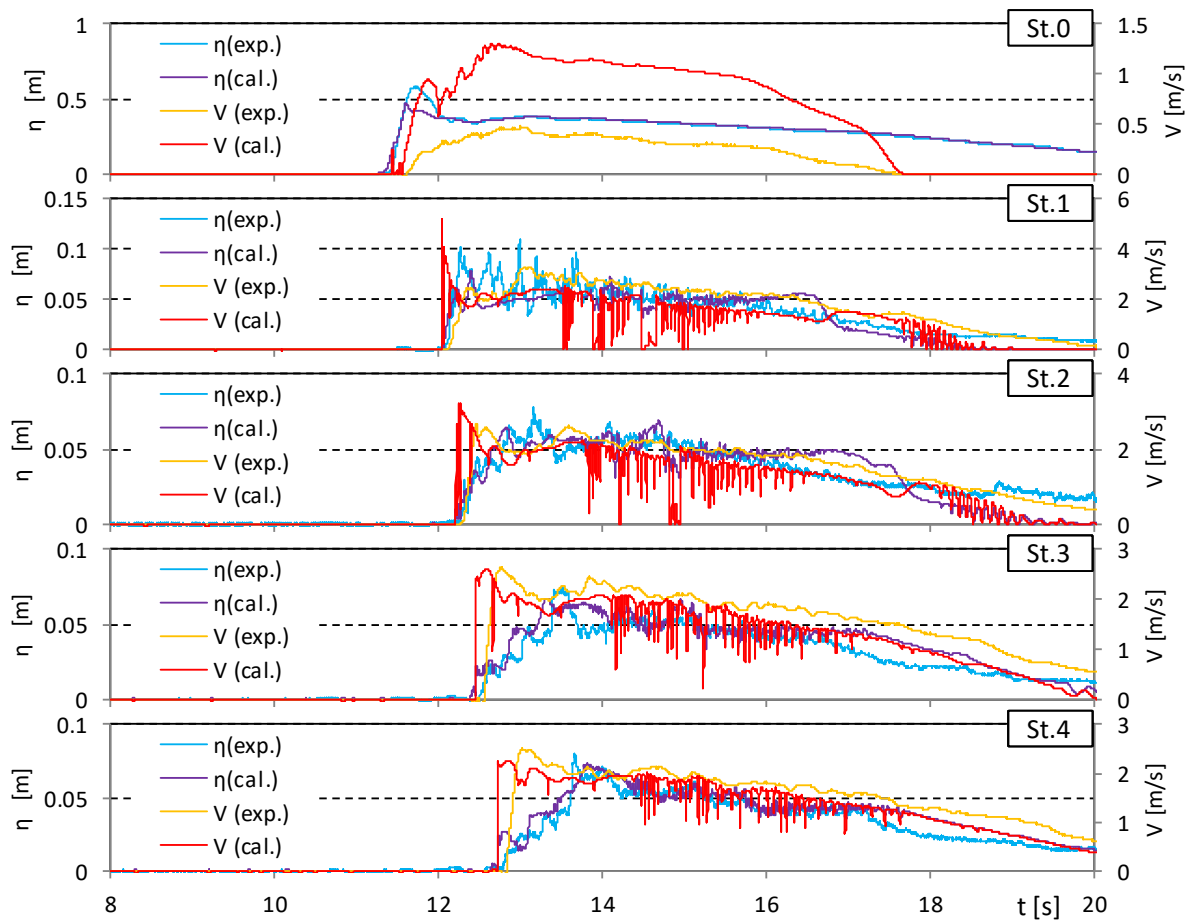


図- 5.3.9 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd30)

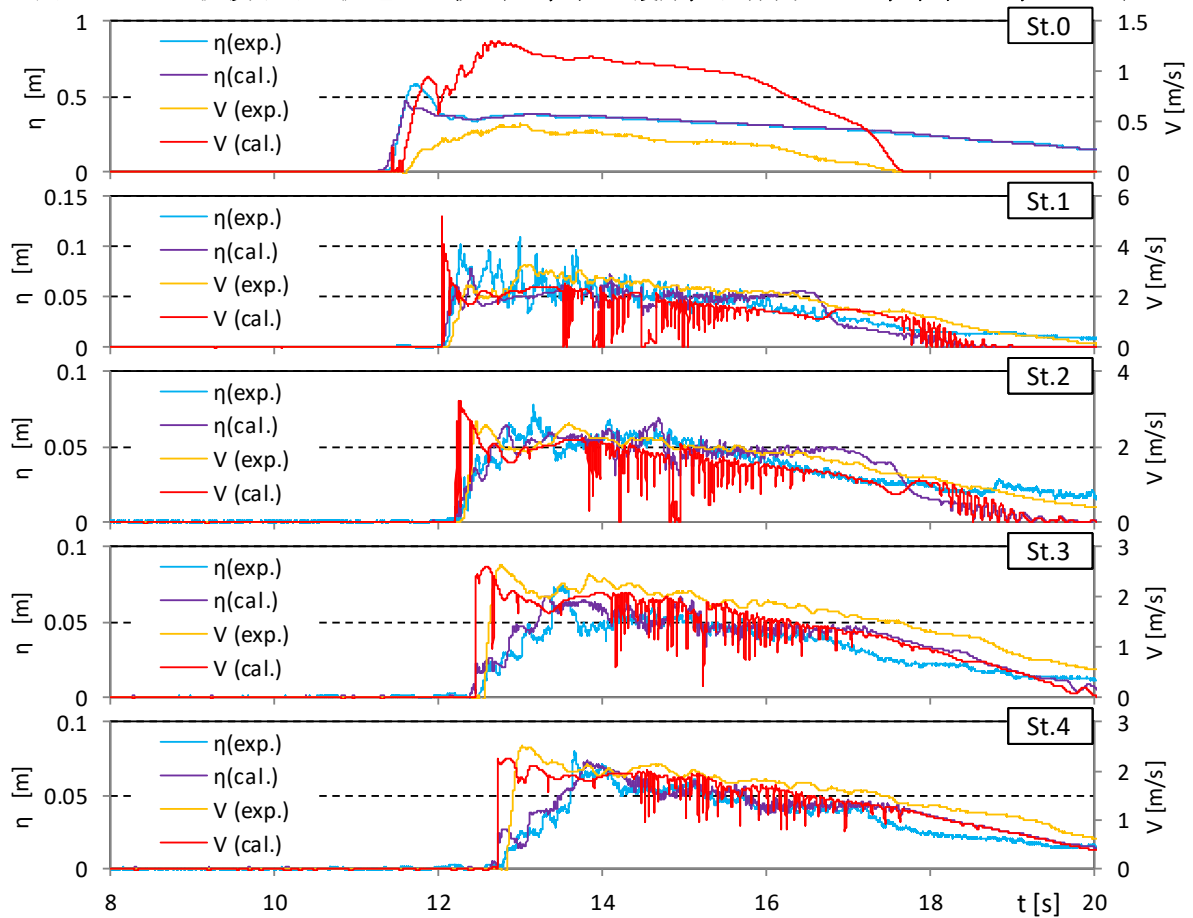


図- 5.3.9 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd31)

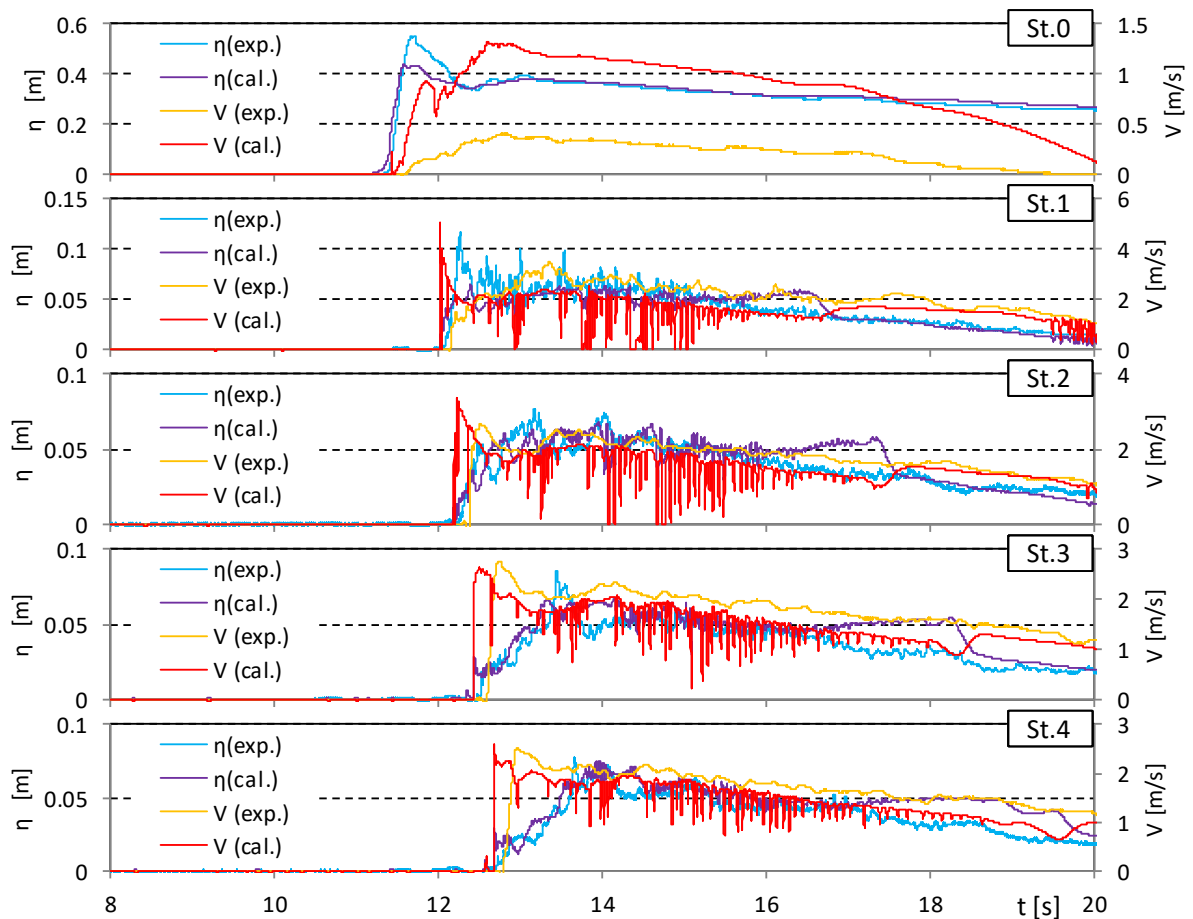


図- 5.3.9 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd40)

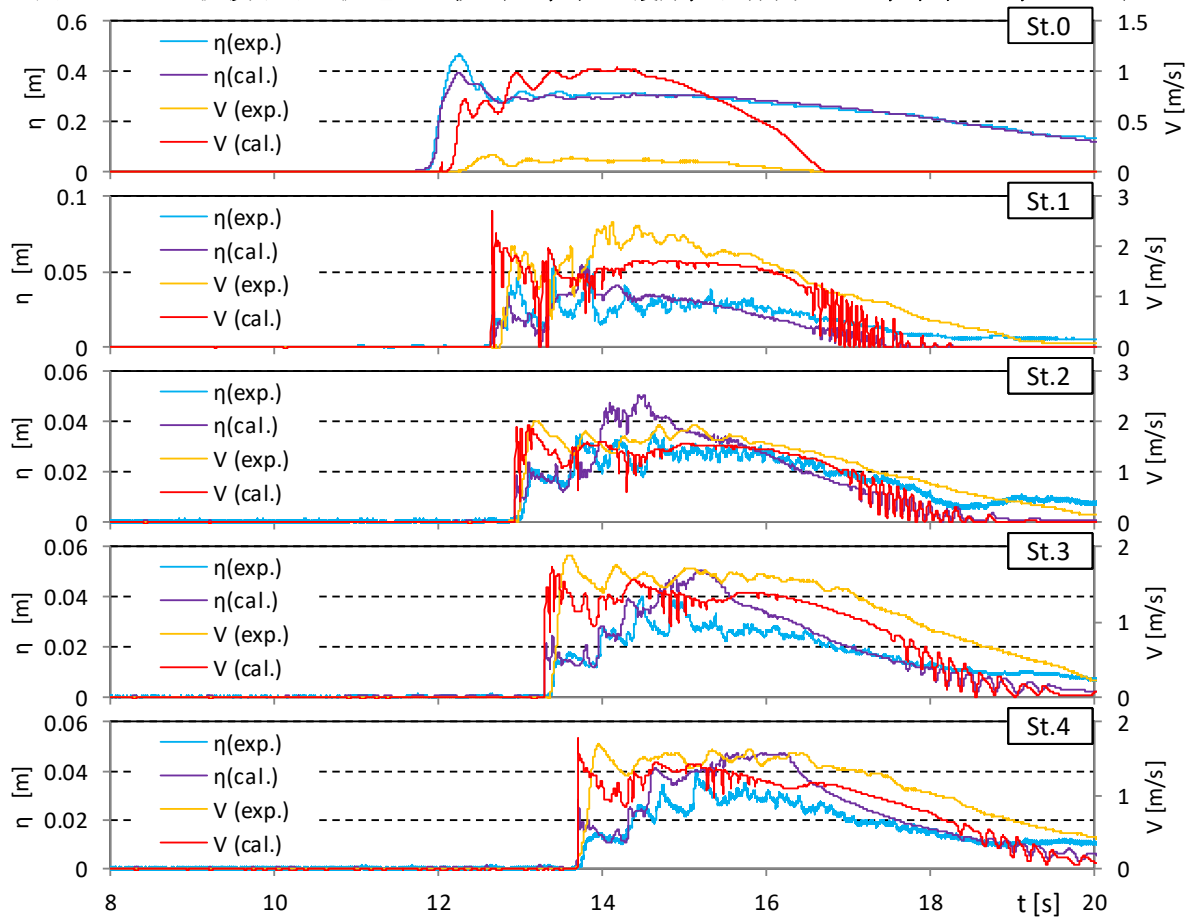


図- 5.3.9 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd41)

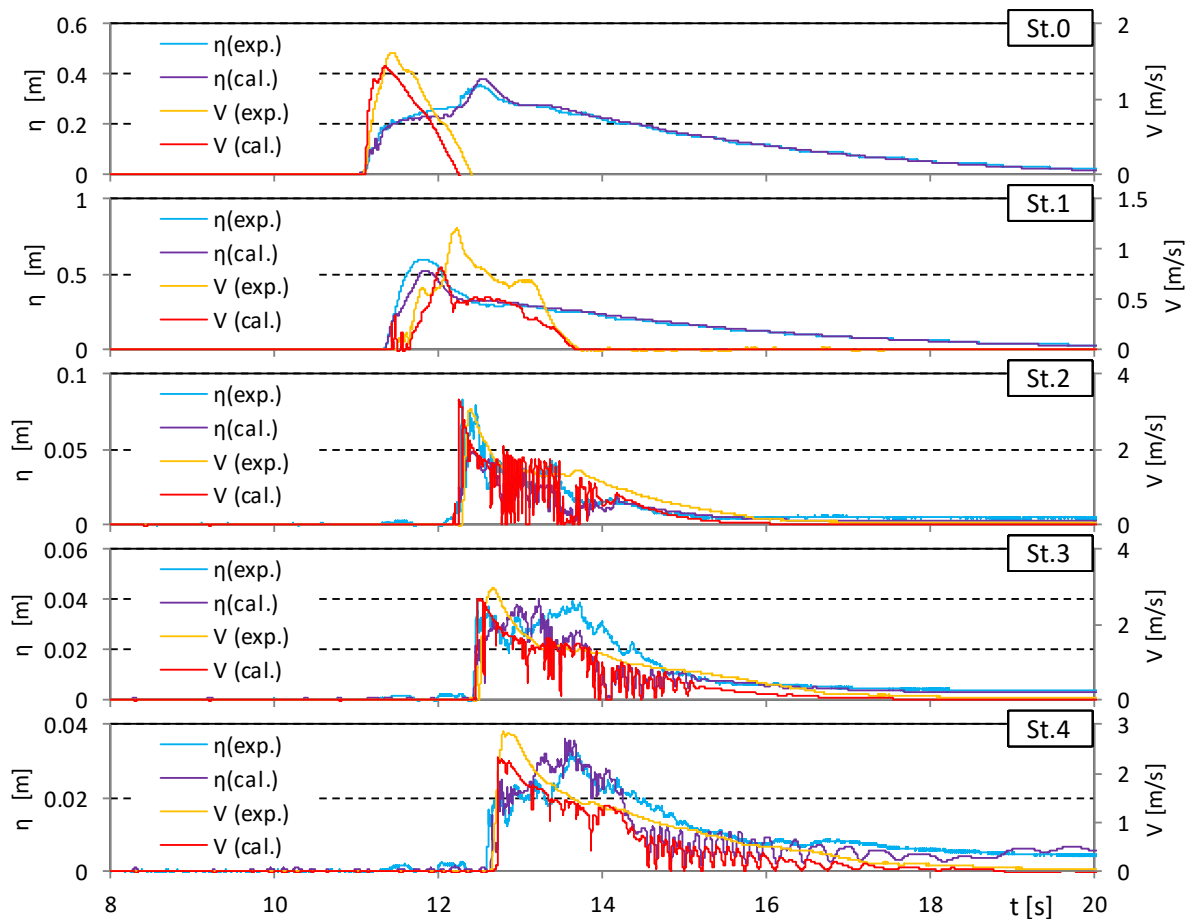


図- 5.3.10 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd10)

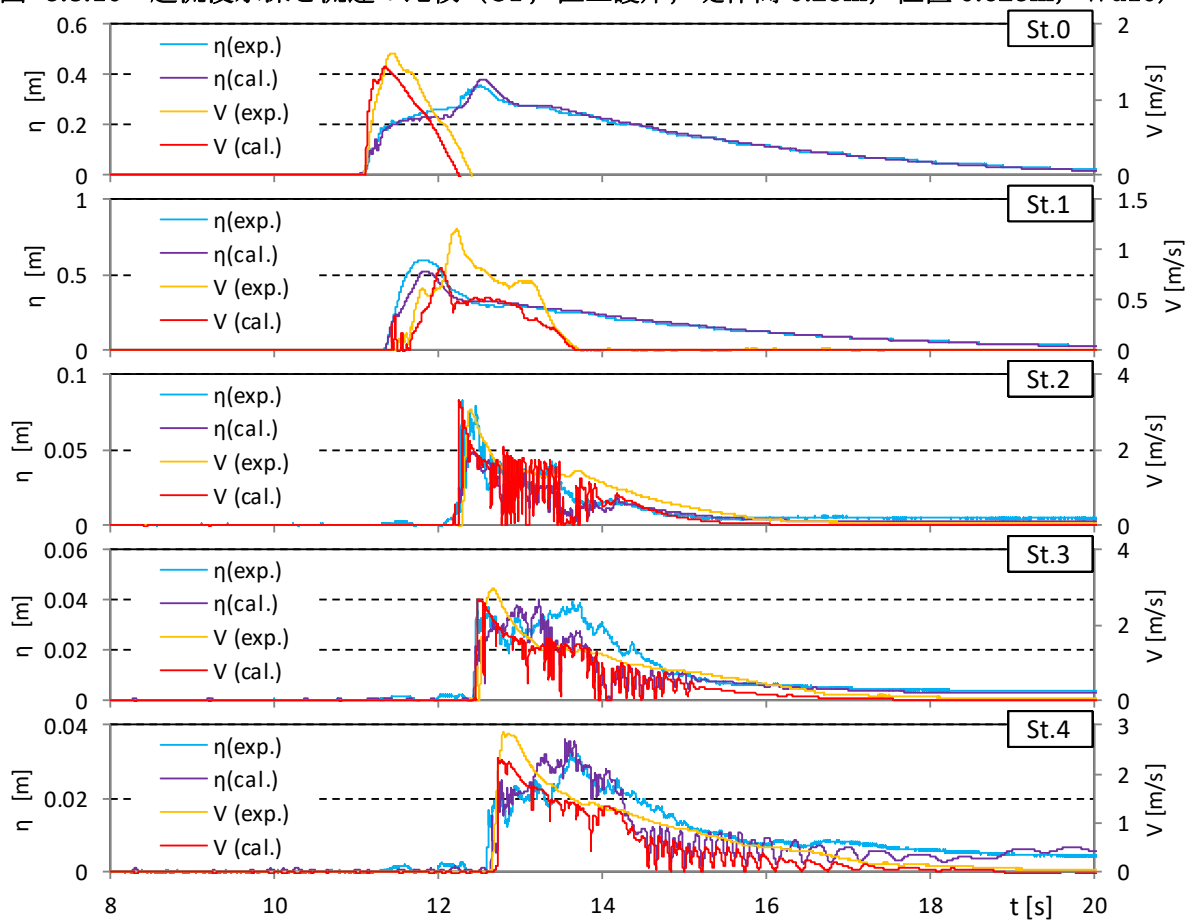


図- 5.3.10 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd11)

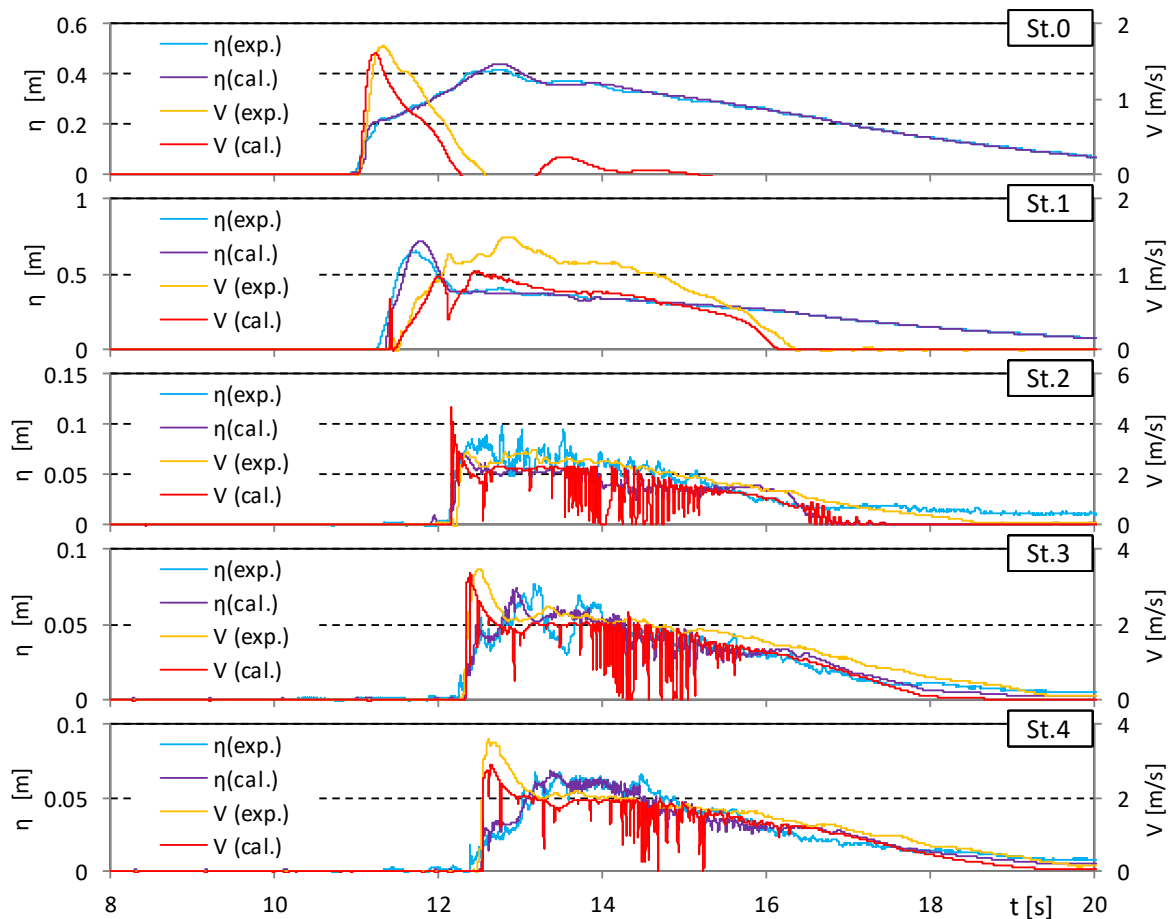


図- 5.3.10 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd20)

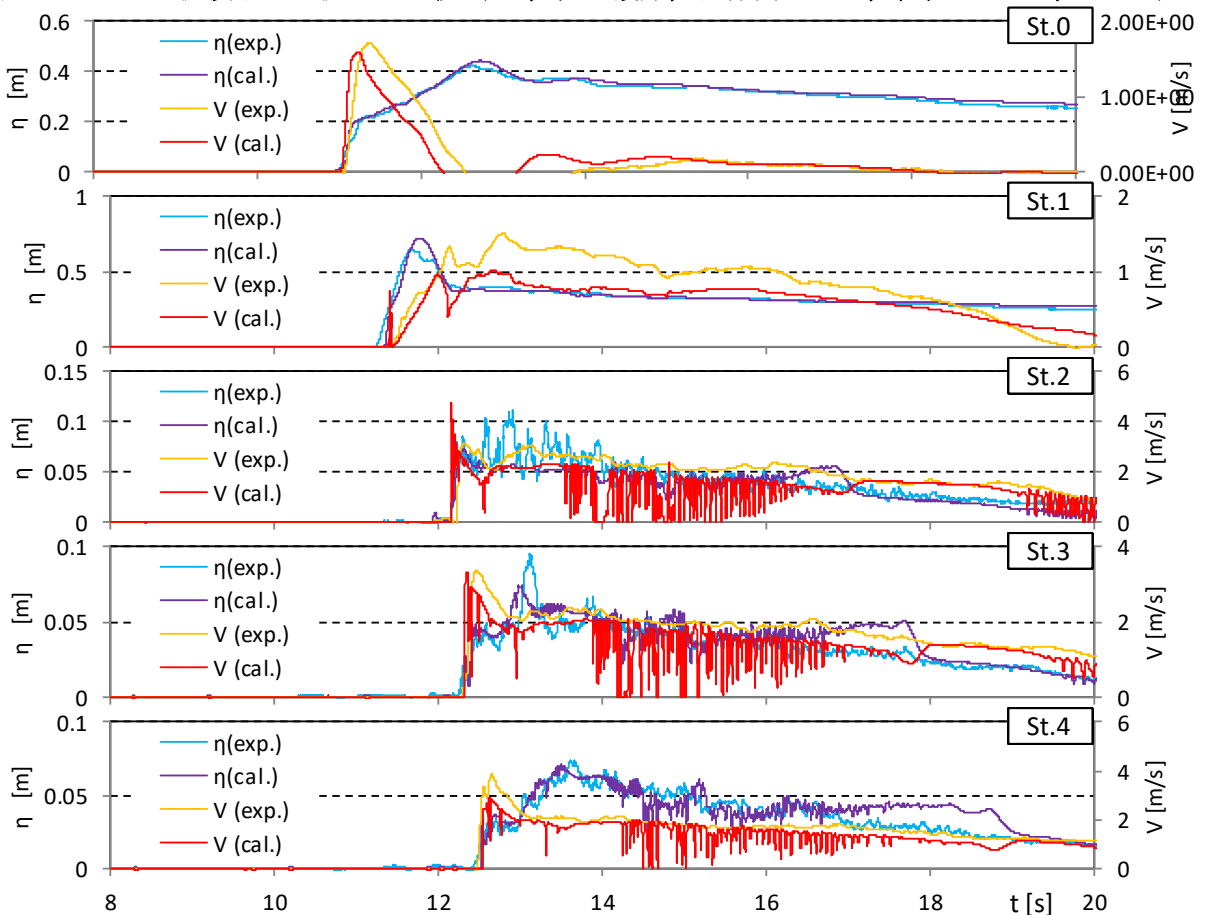


図- 5.3.10 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd21)

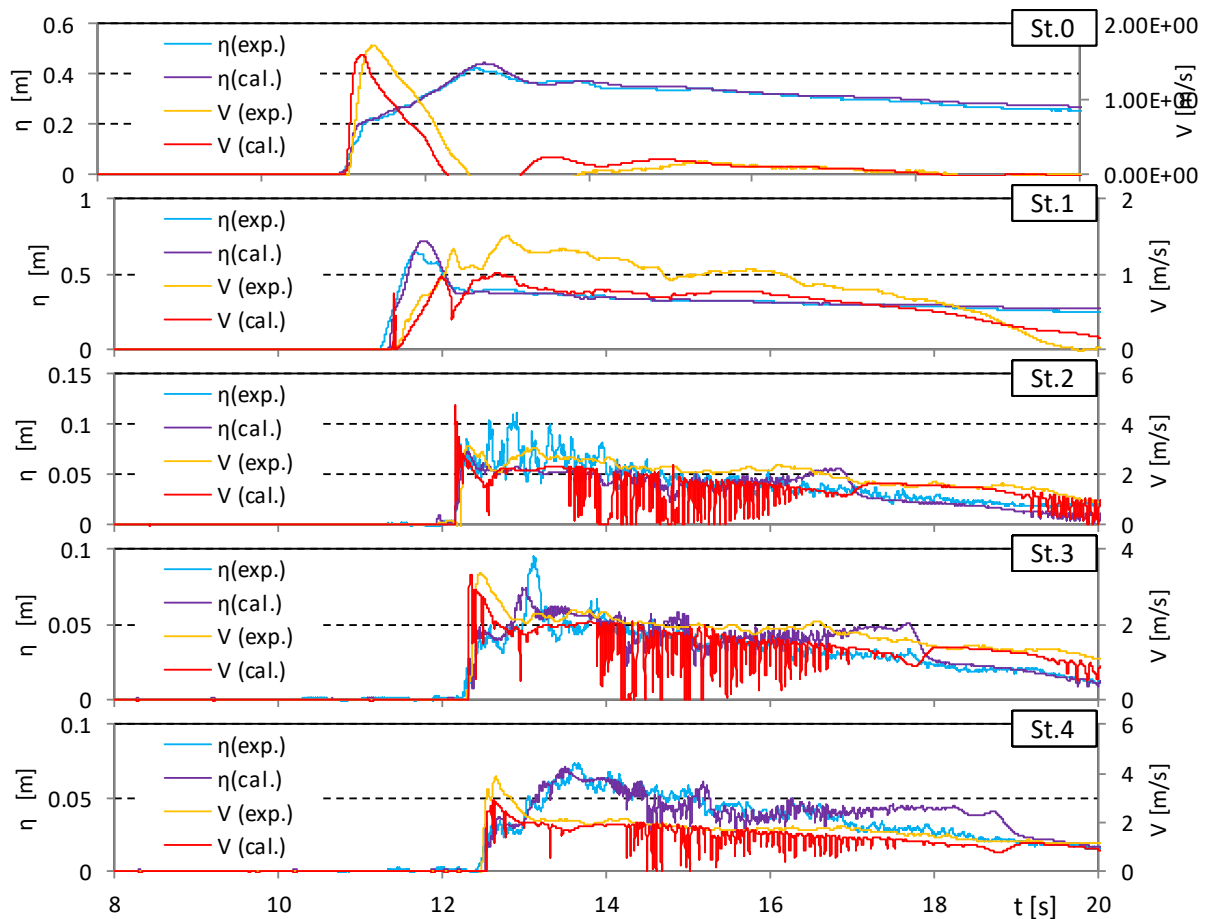


図- 5.3.10 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd30)

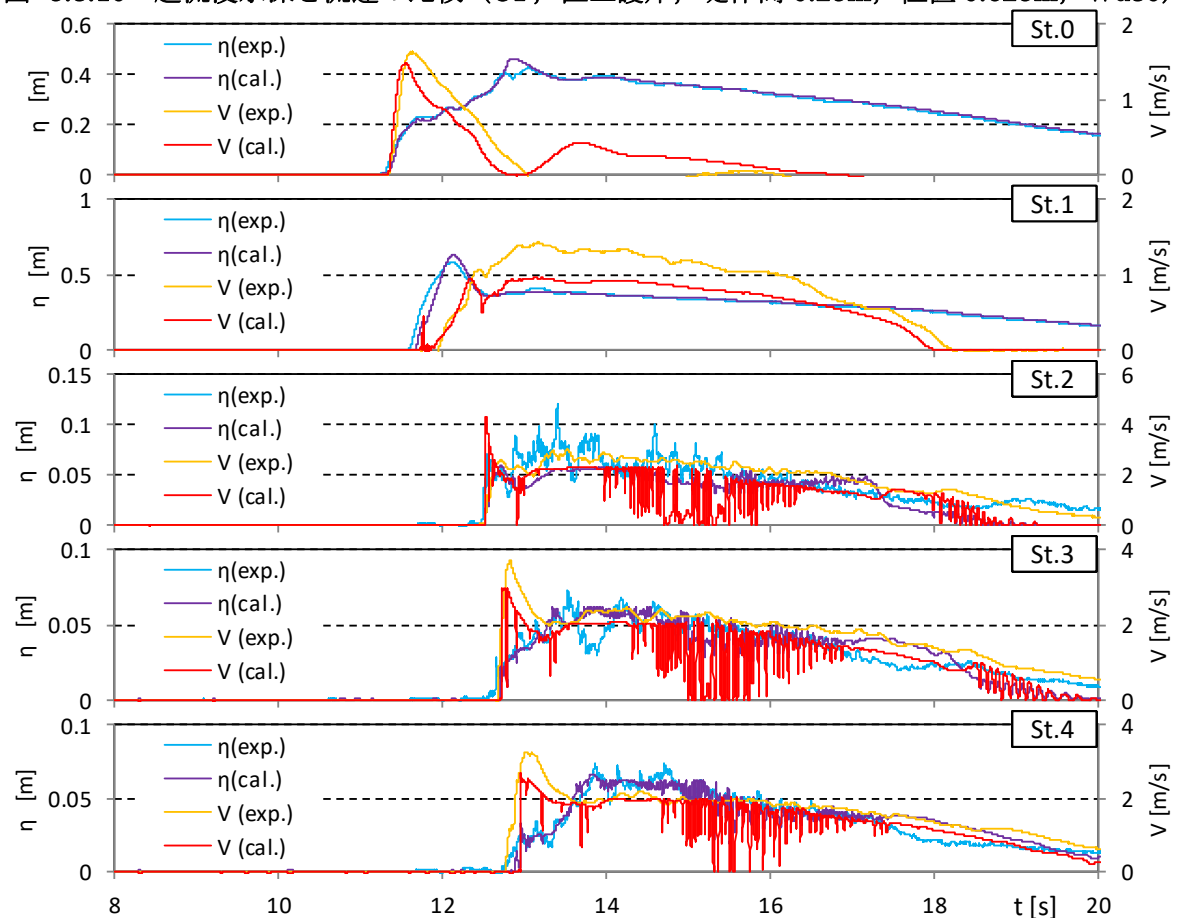


図- 5.3.10 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd31)

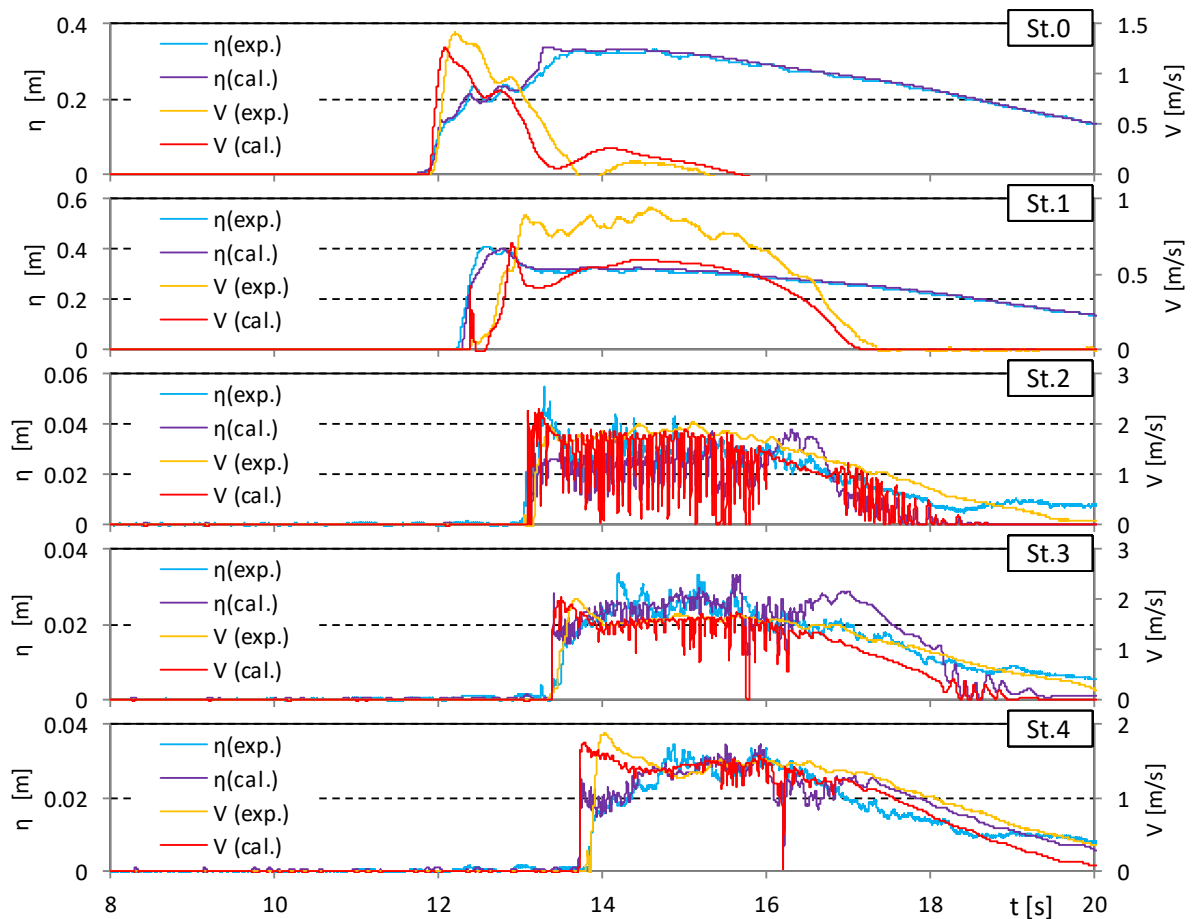


図- 5.3.10 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd40)

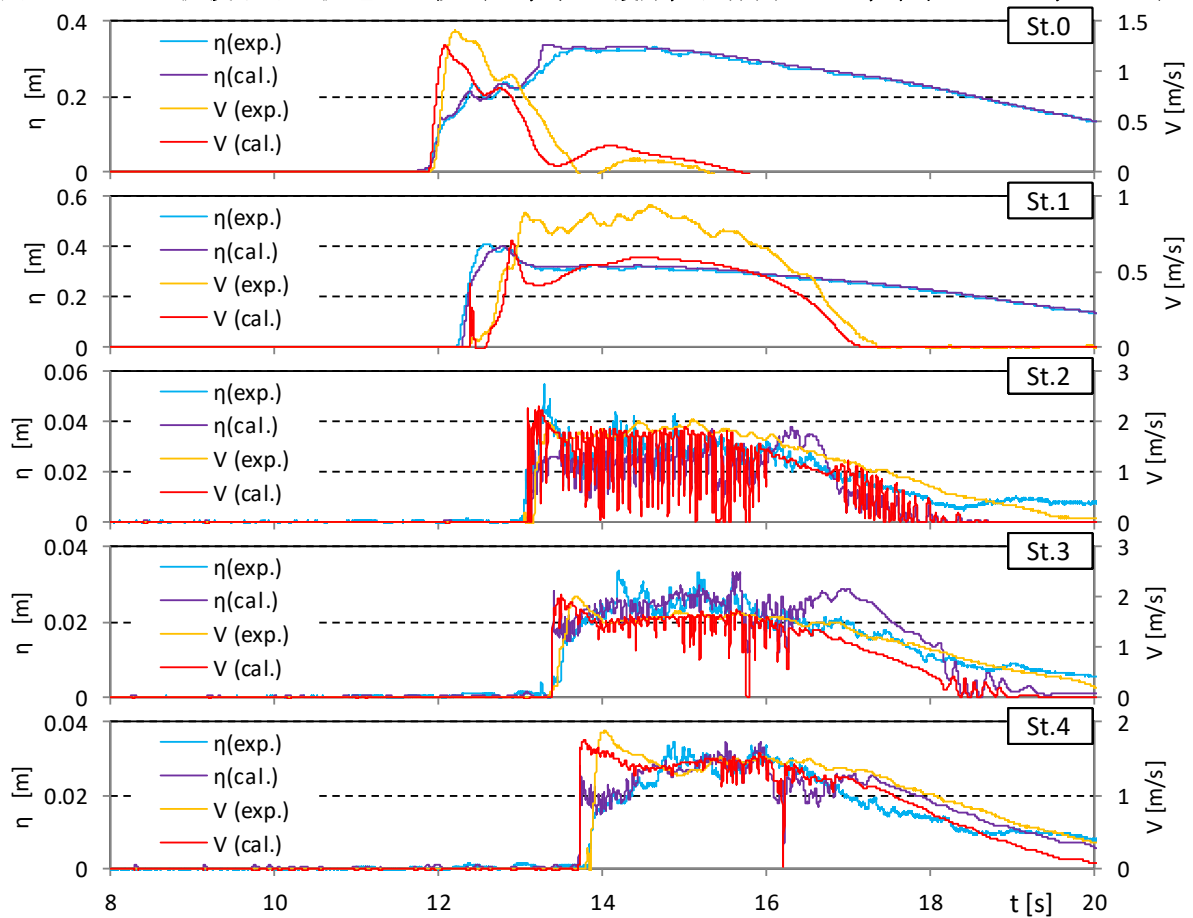


図- 5.3.10 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd41)

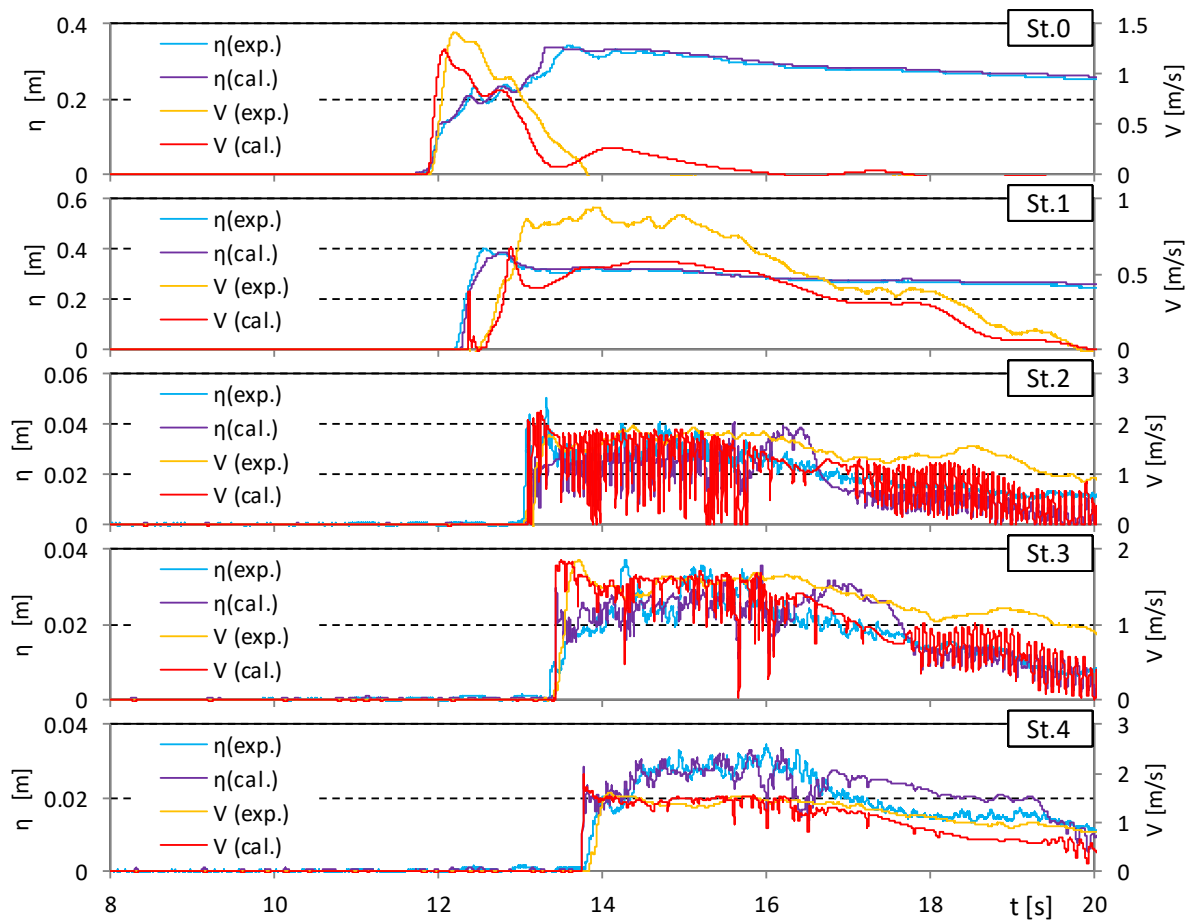


図- 5.3.11 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd10)

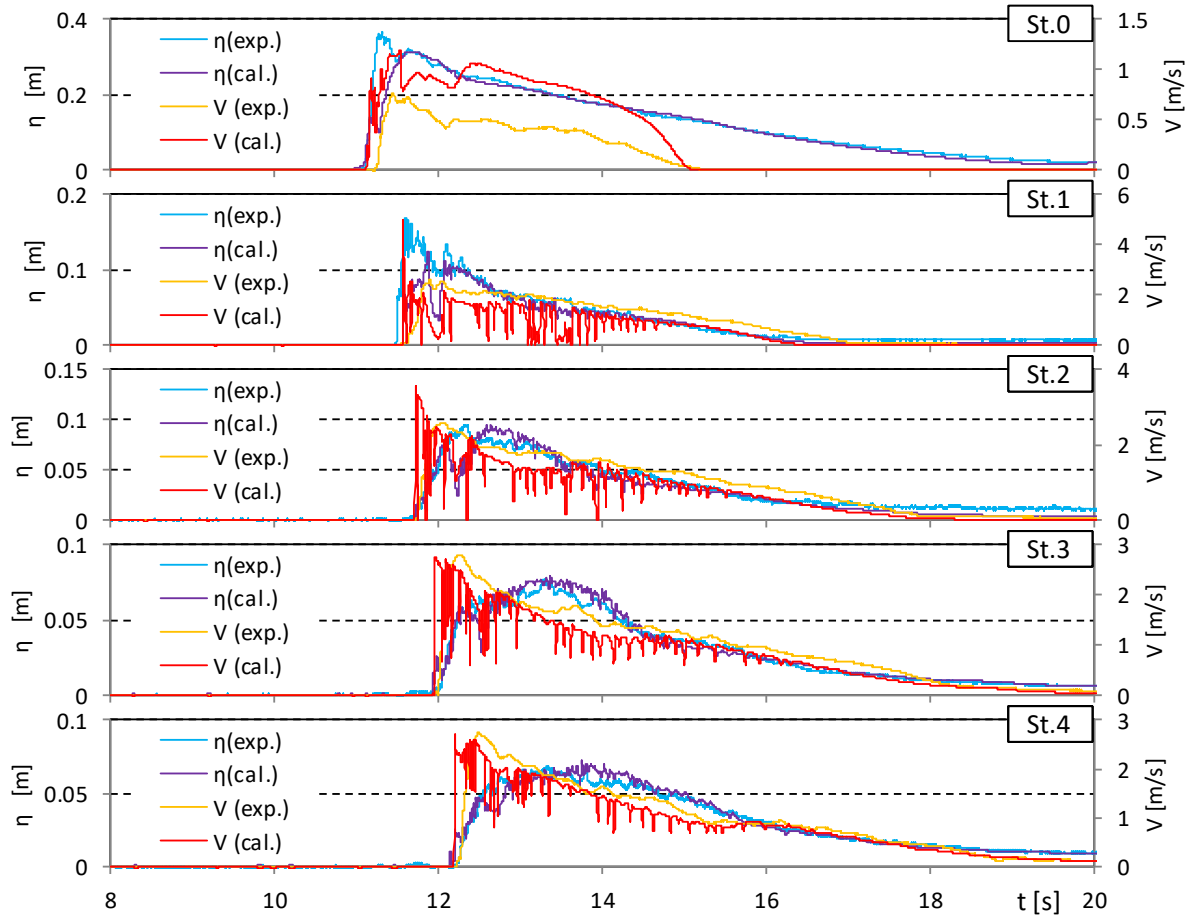


図- 5.3.11 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd11)

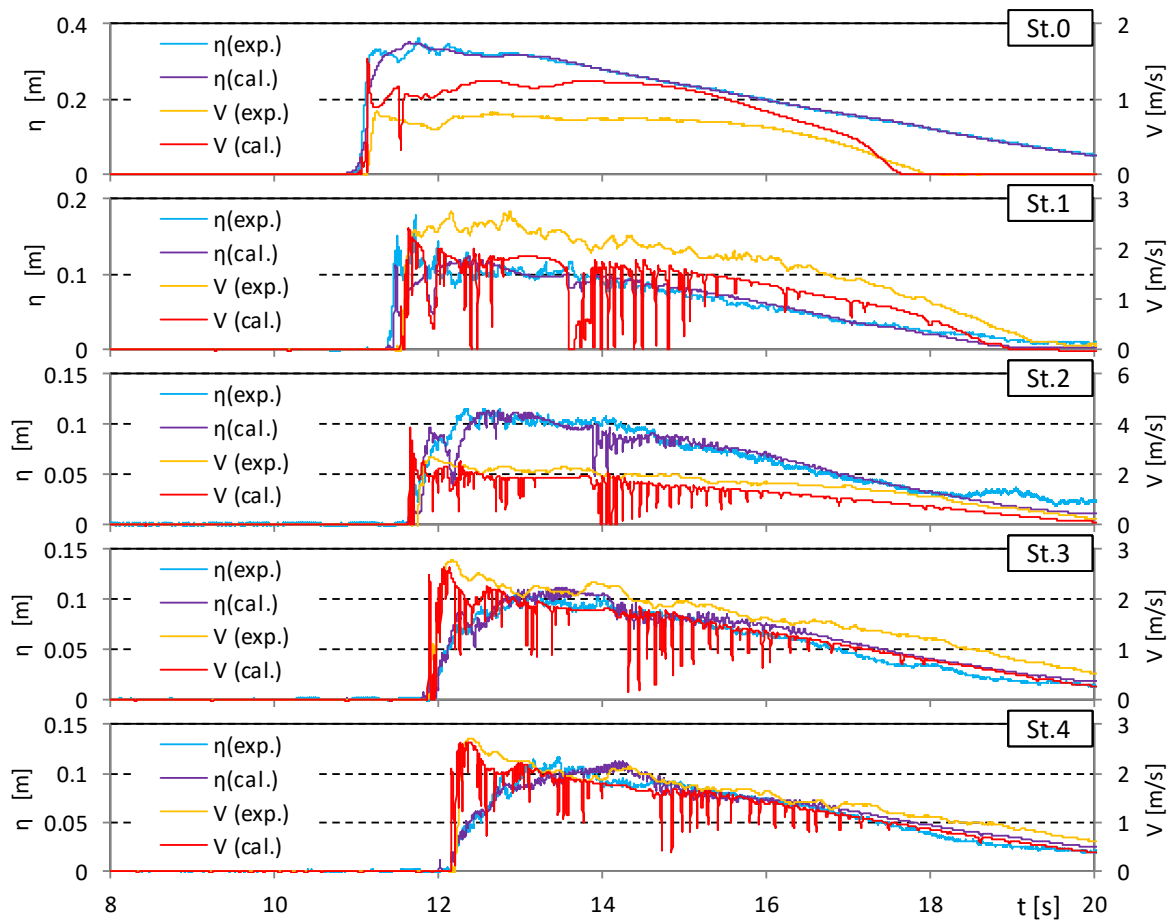


図- 5.3.11 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd20)

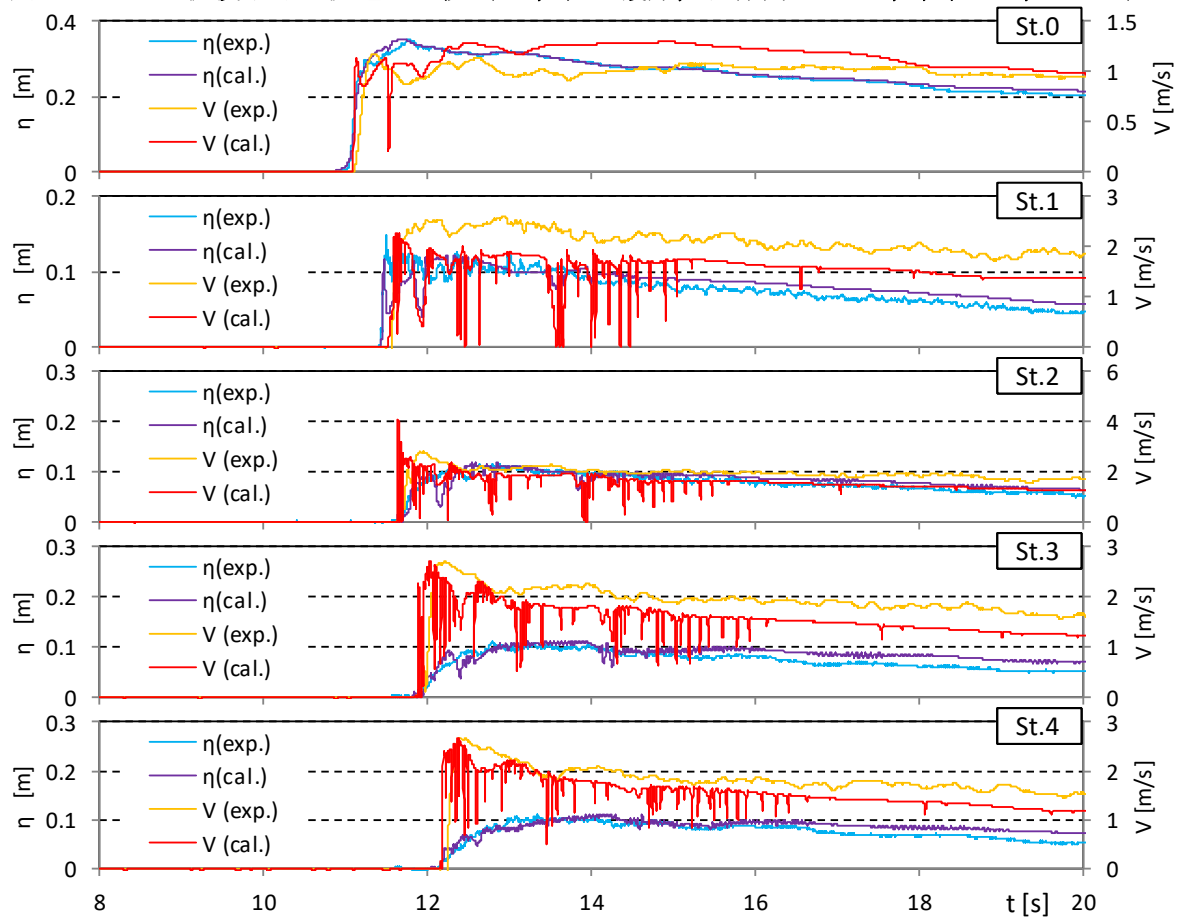


図- 5.3.11 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd21)

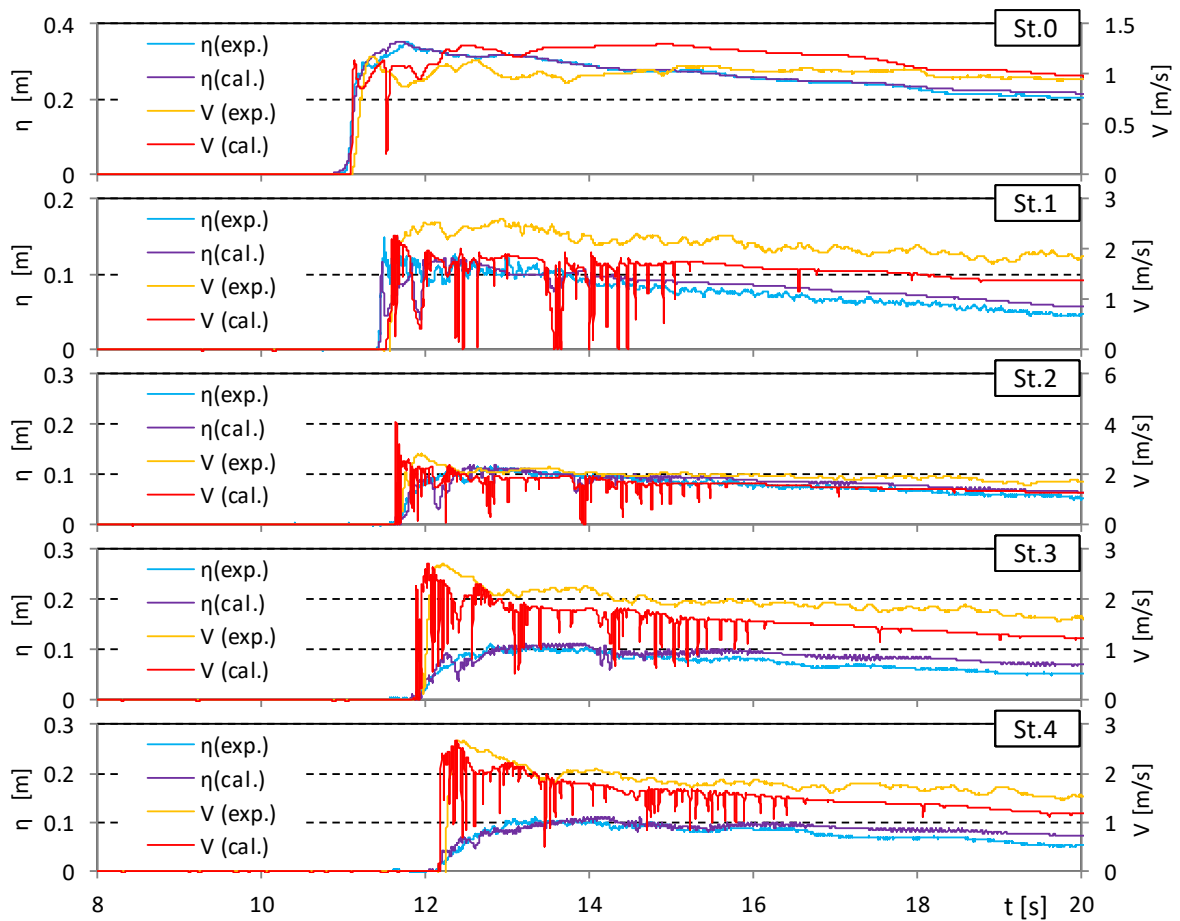


図- 5.3.11 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd30)

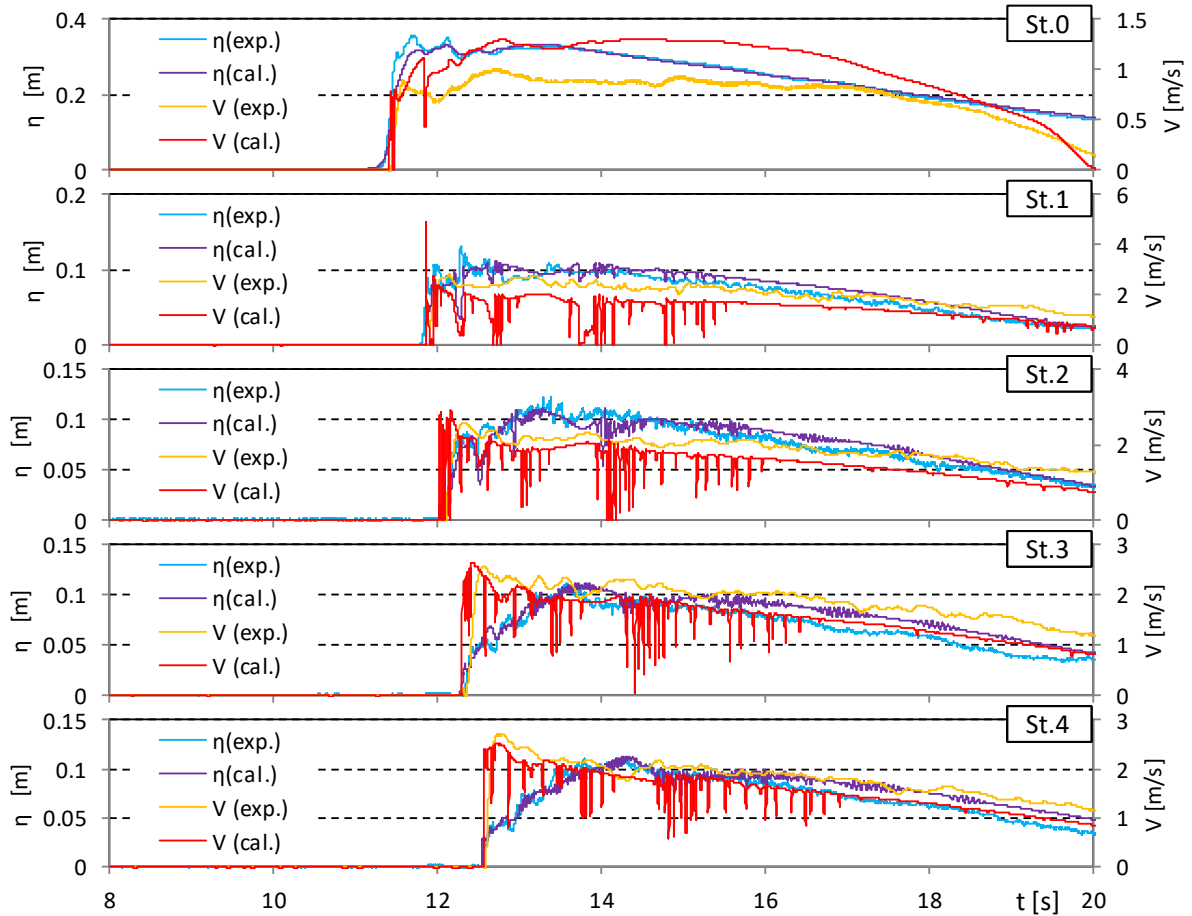


図- 5.3.11 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd31)

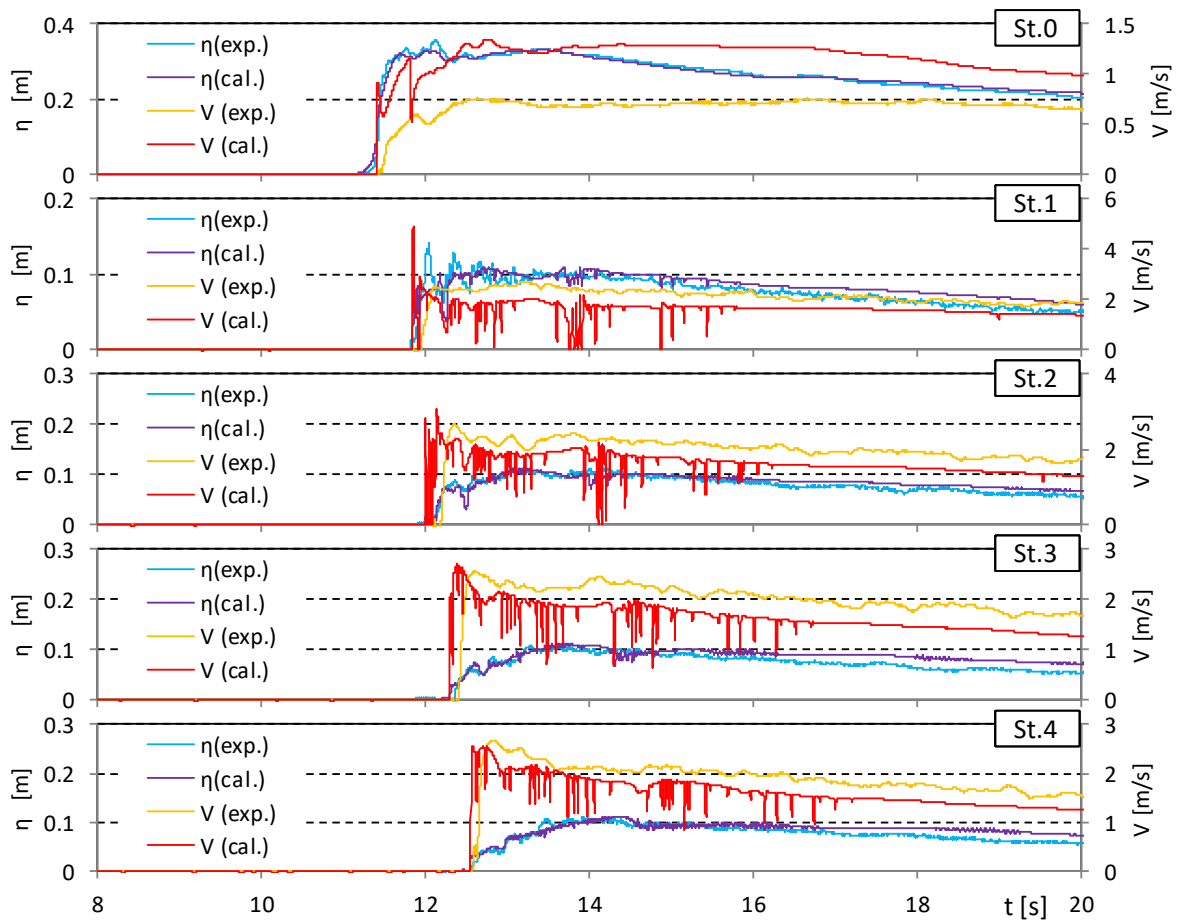


図- 5.3.11 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd40)

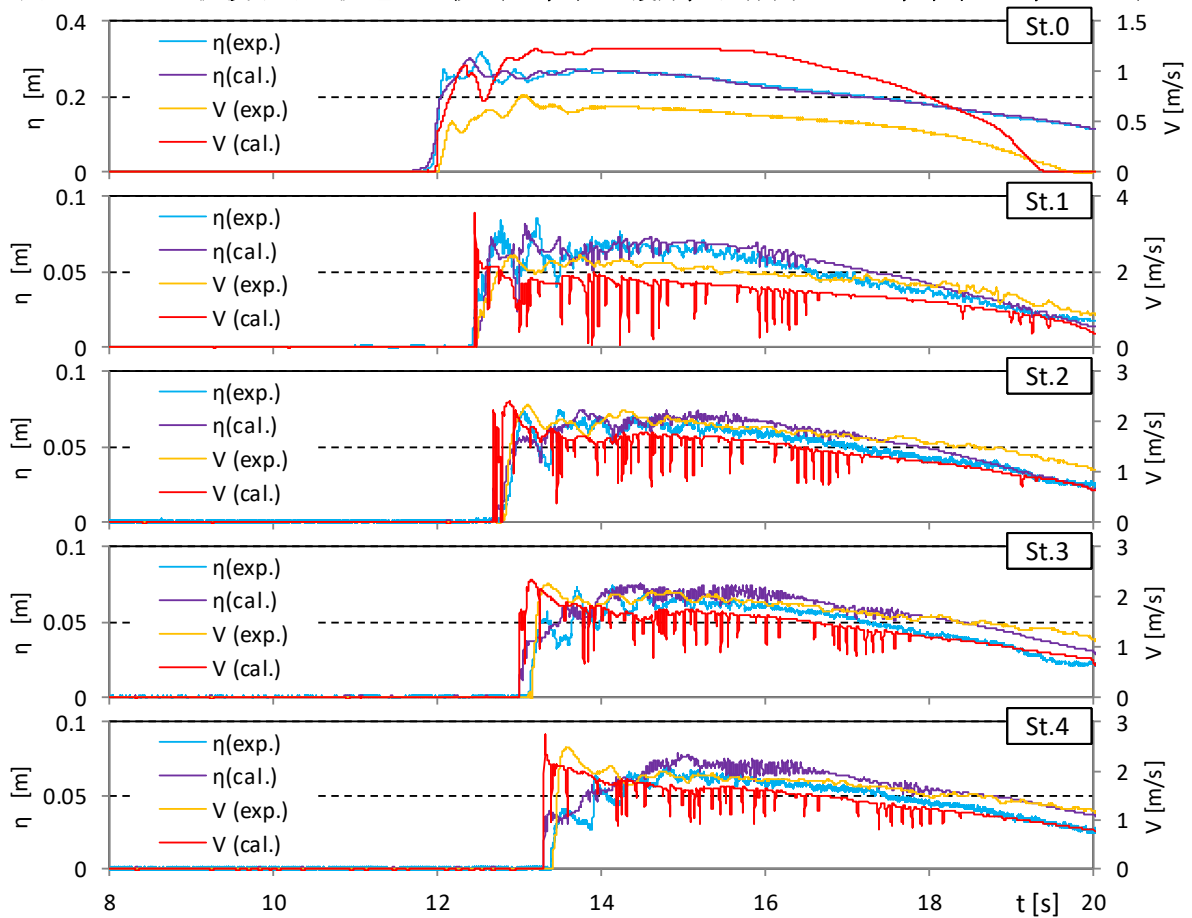


図- 5.3.11 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd41)

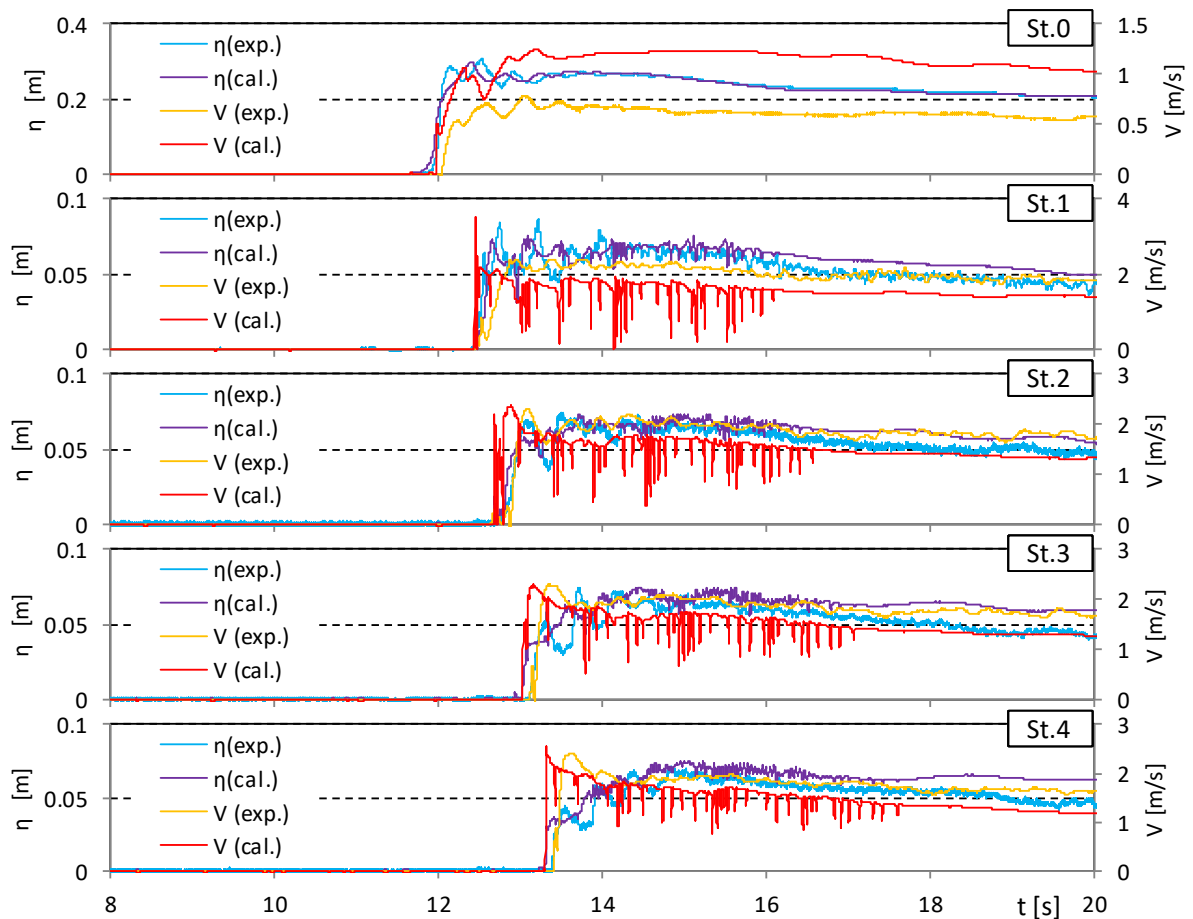


図- 5.3.12 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd10)

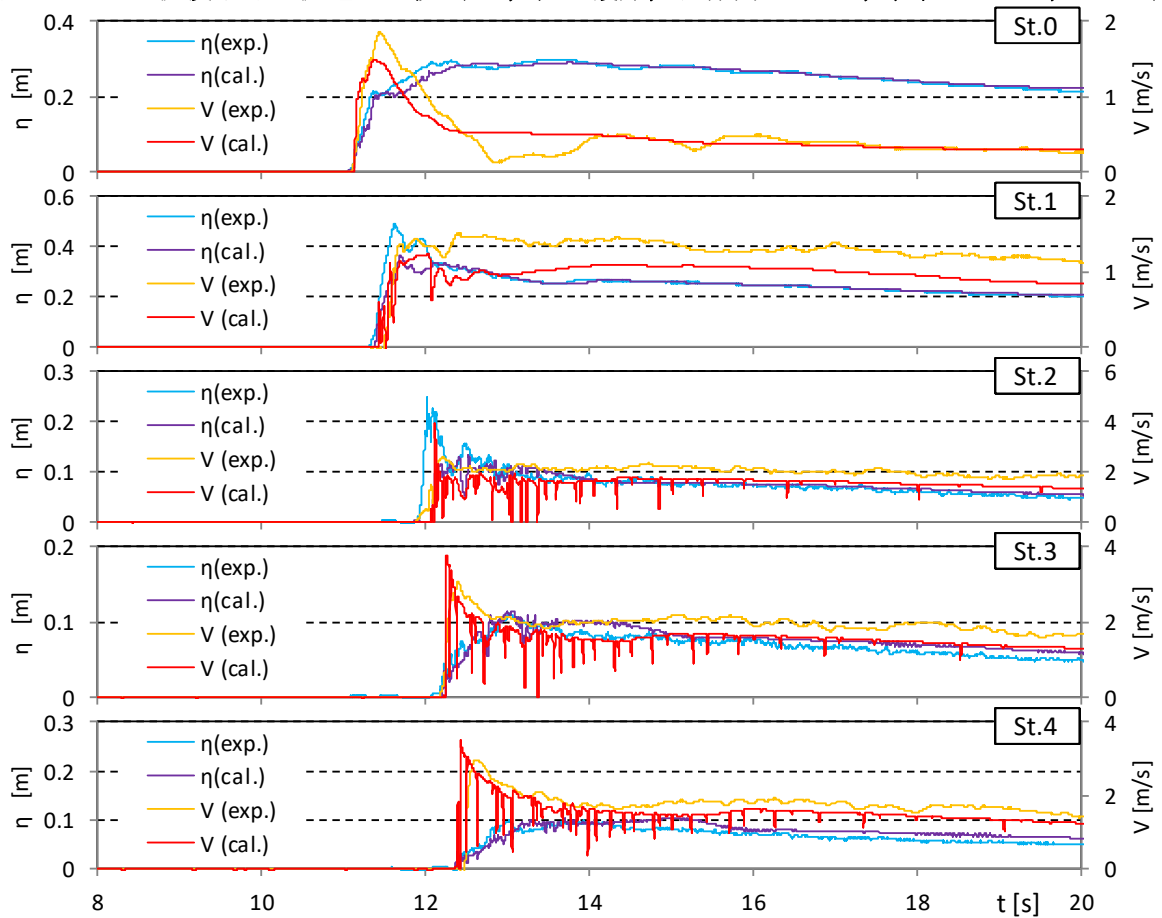


図- 5.3.12 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd11)

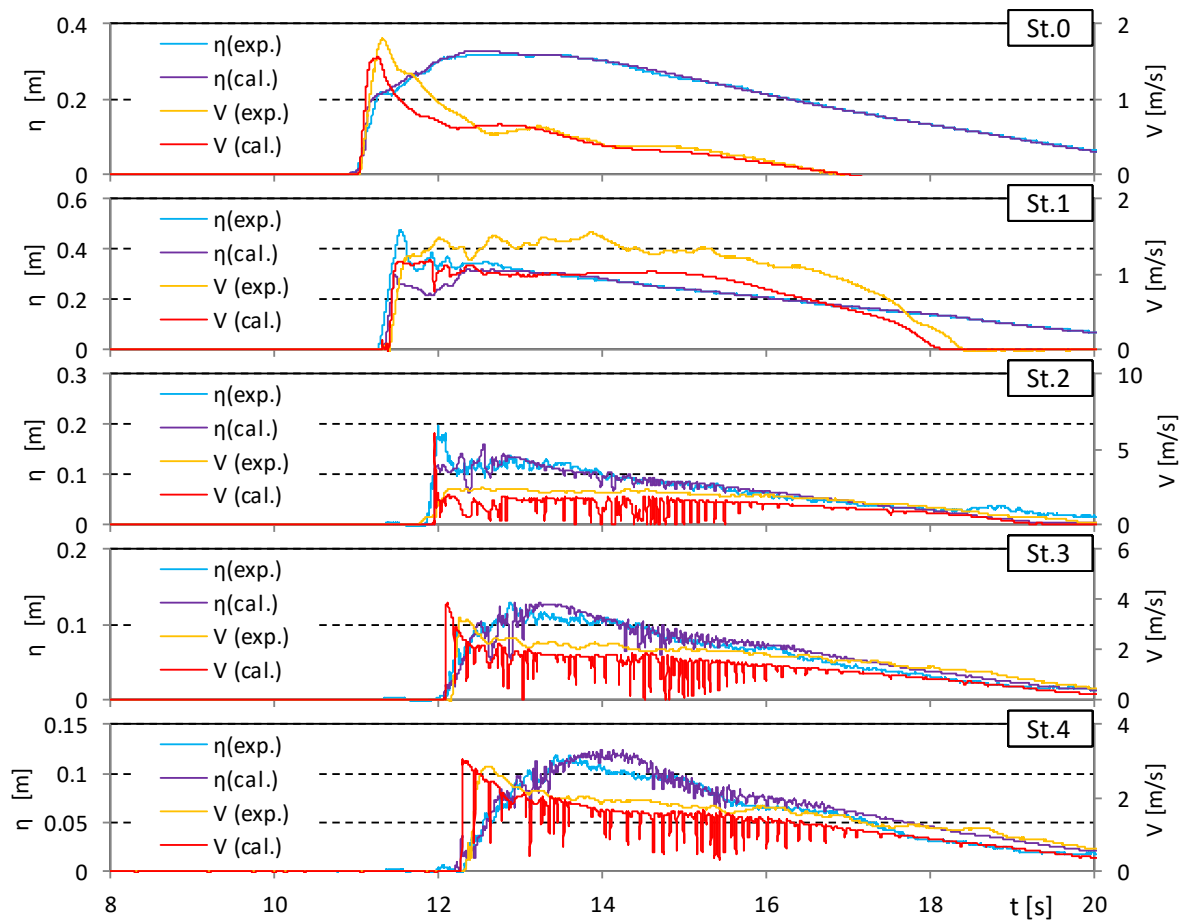


図- 5.3.12 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd20)

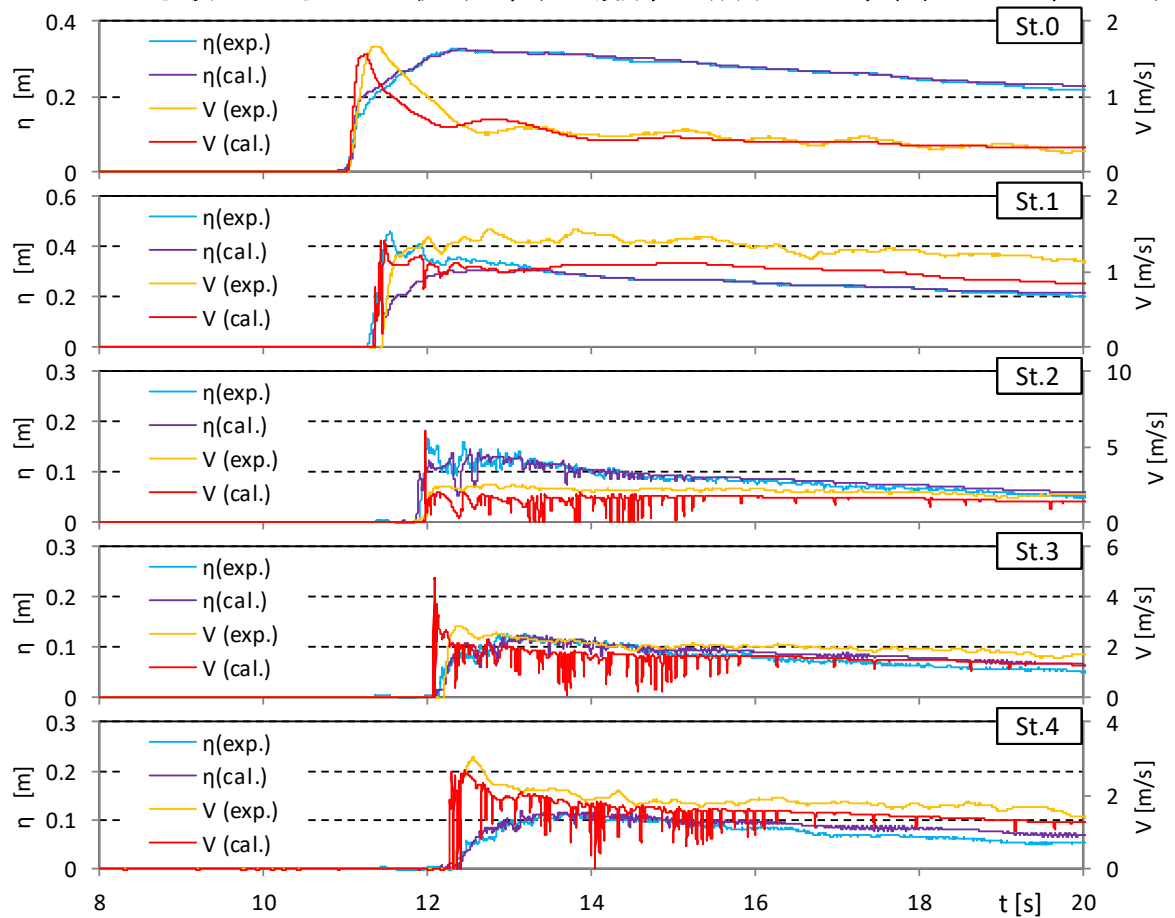


図- 5.3.12 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd21)

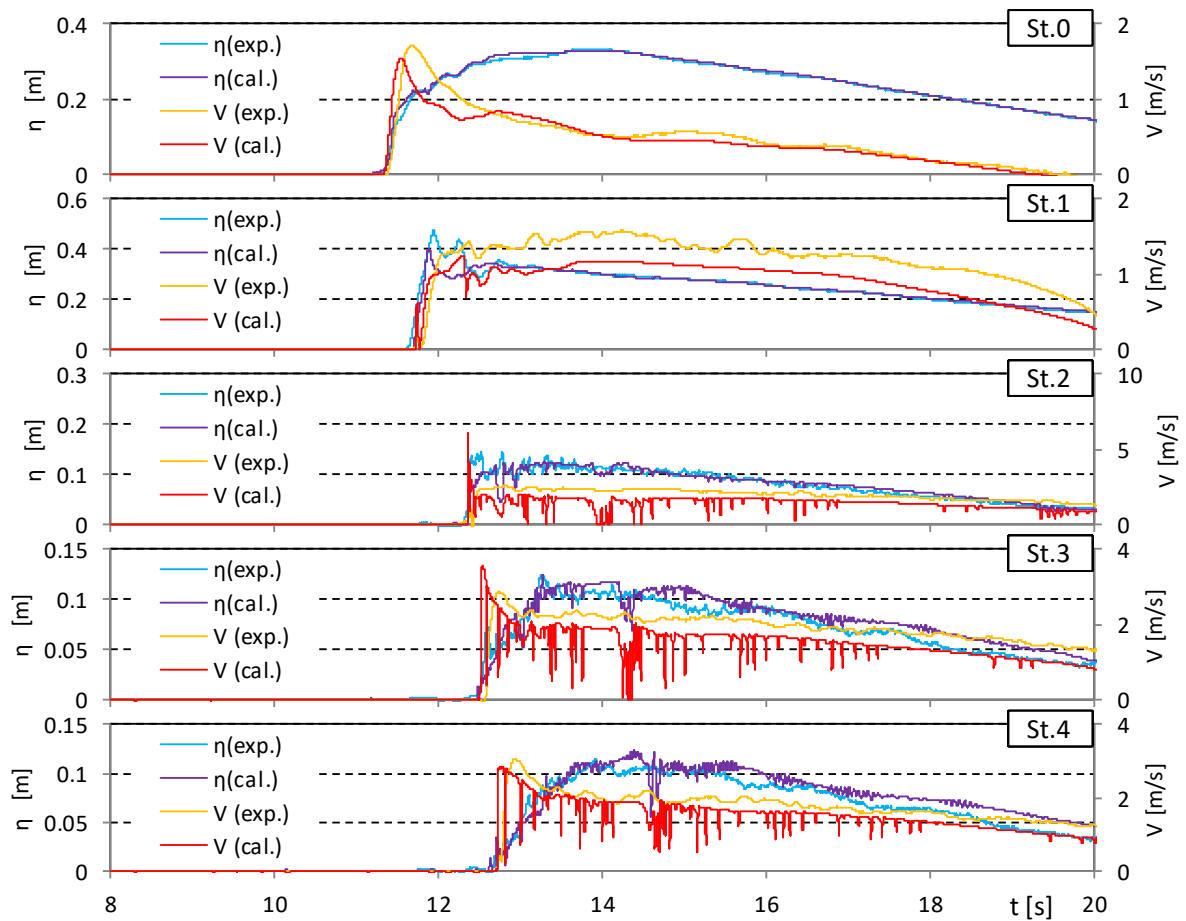


図- 5.3.12 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd30)

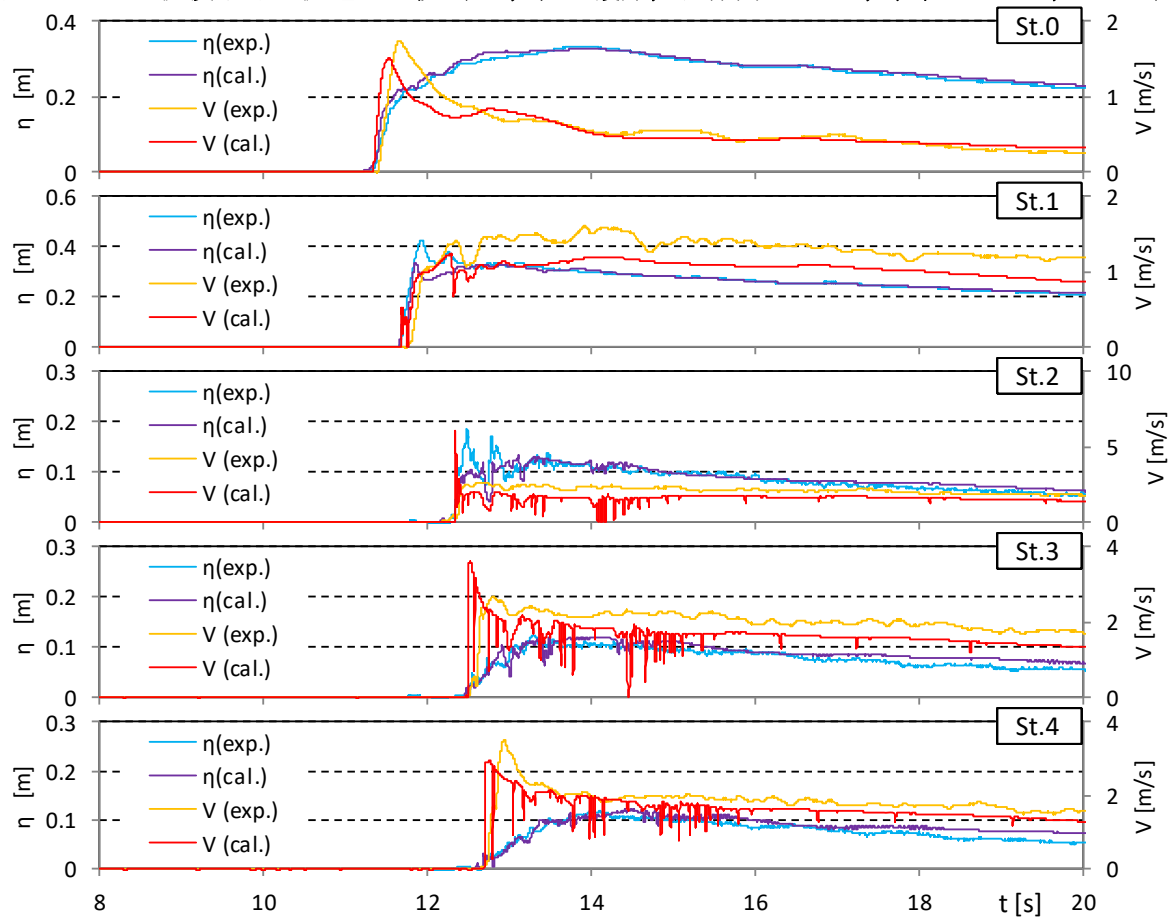


図- 5.3.12 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd31)

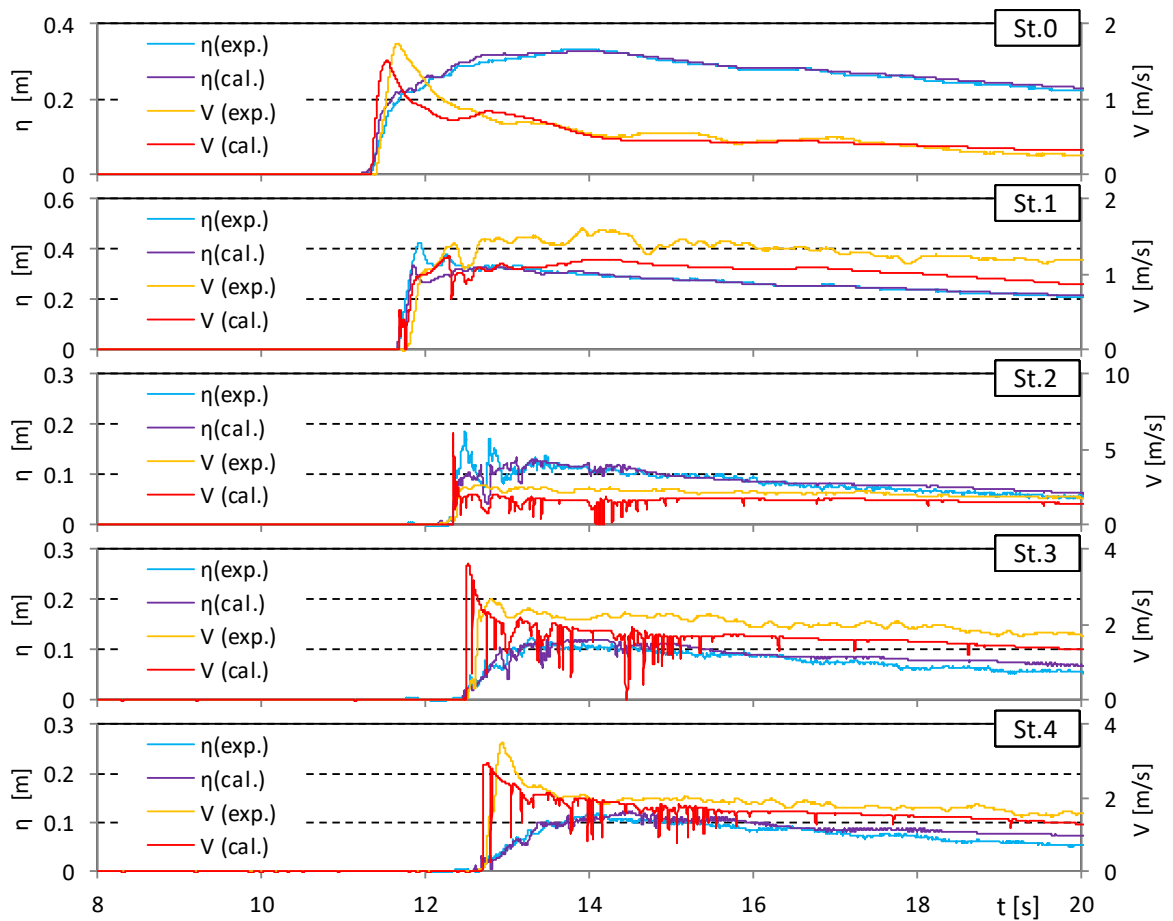


図- 5.3.12 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd40)

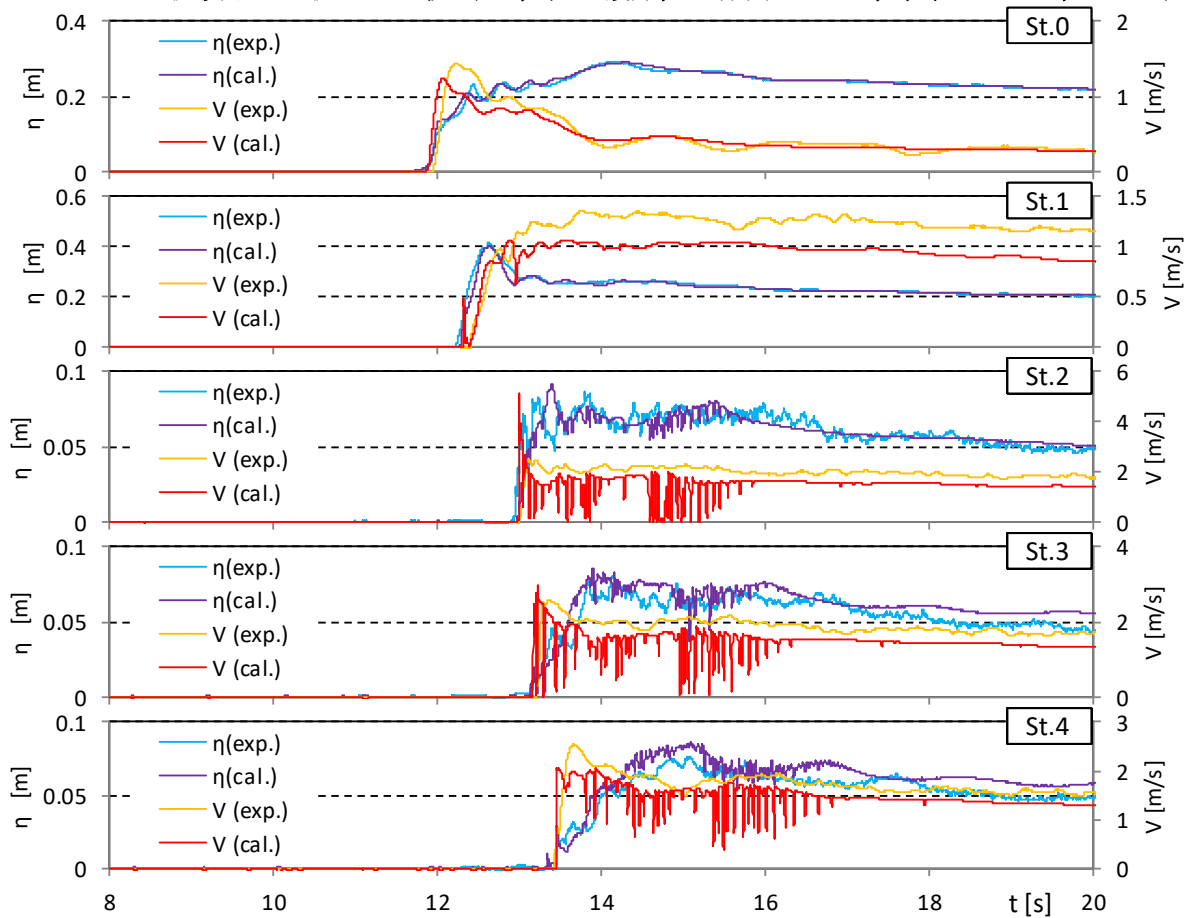


図- 5.3.12 越流浸水深と流速の比較 (OF, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd41)

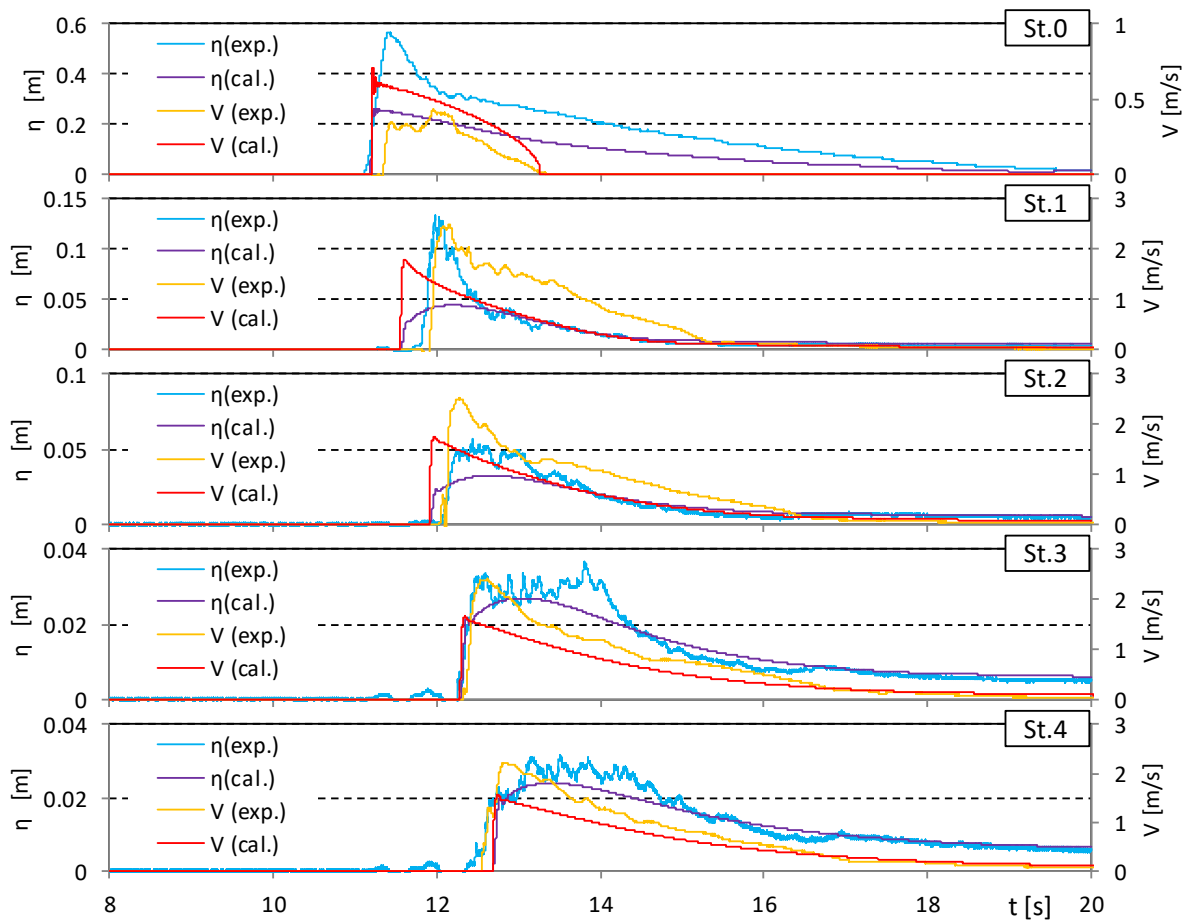


図- 5.3.13 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd10)

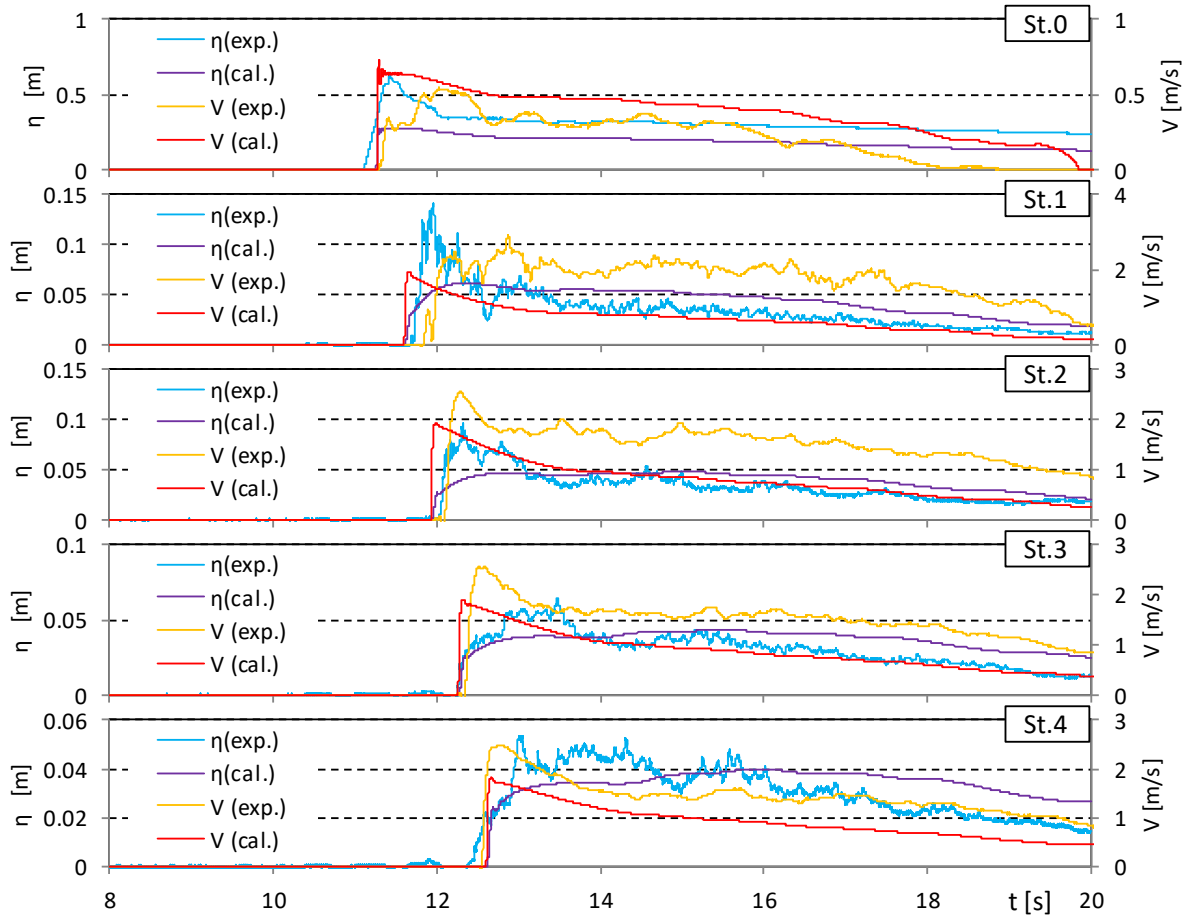


図- 5.3.13 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd11)

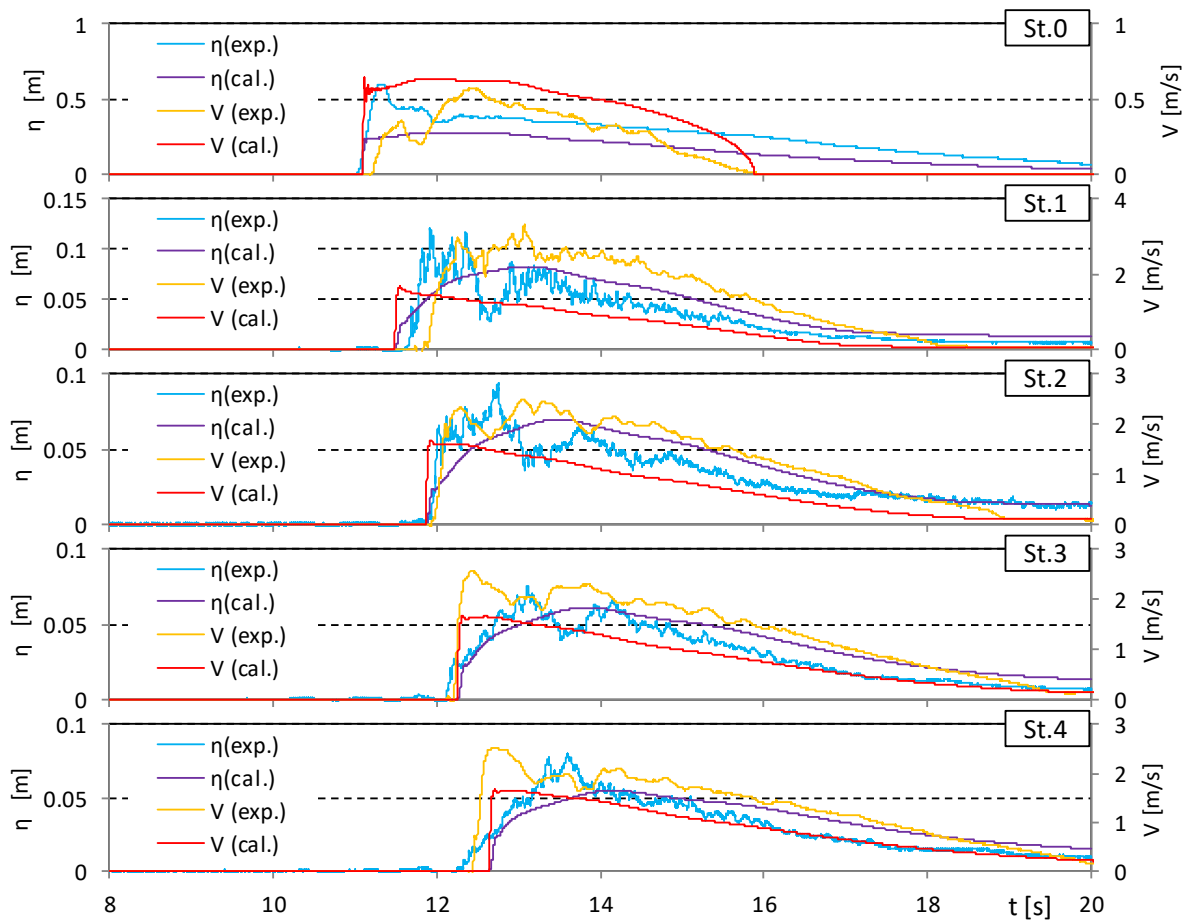


図- 5.3.13 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd20)

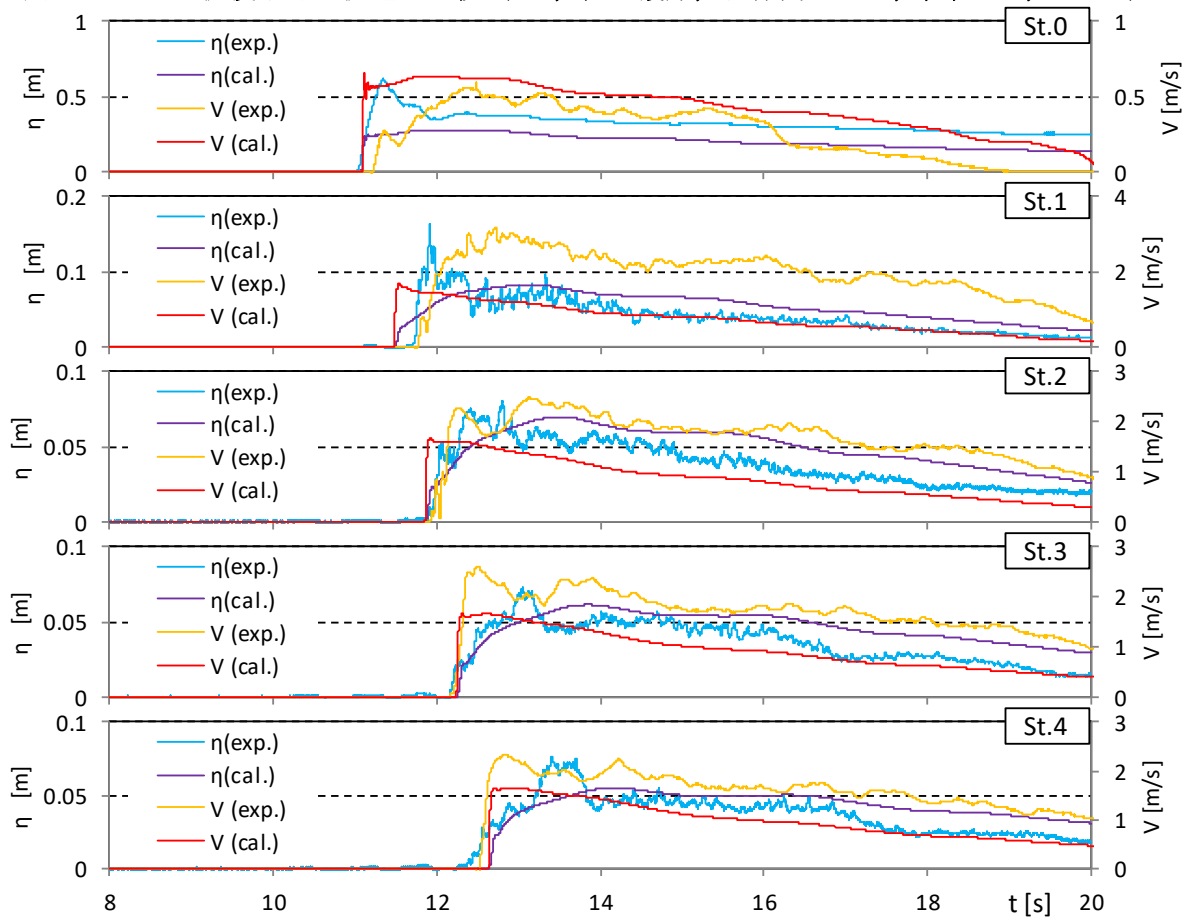


図- 5.3.13 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd21)

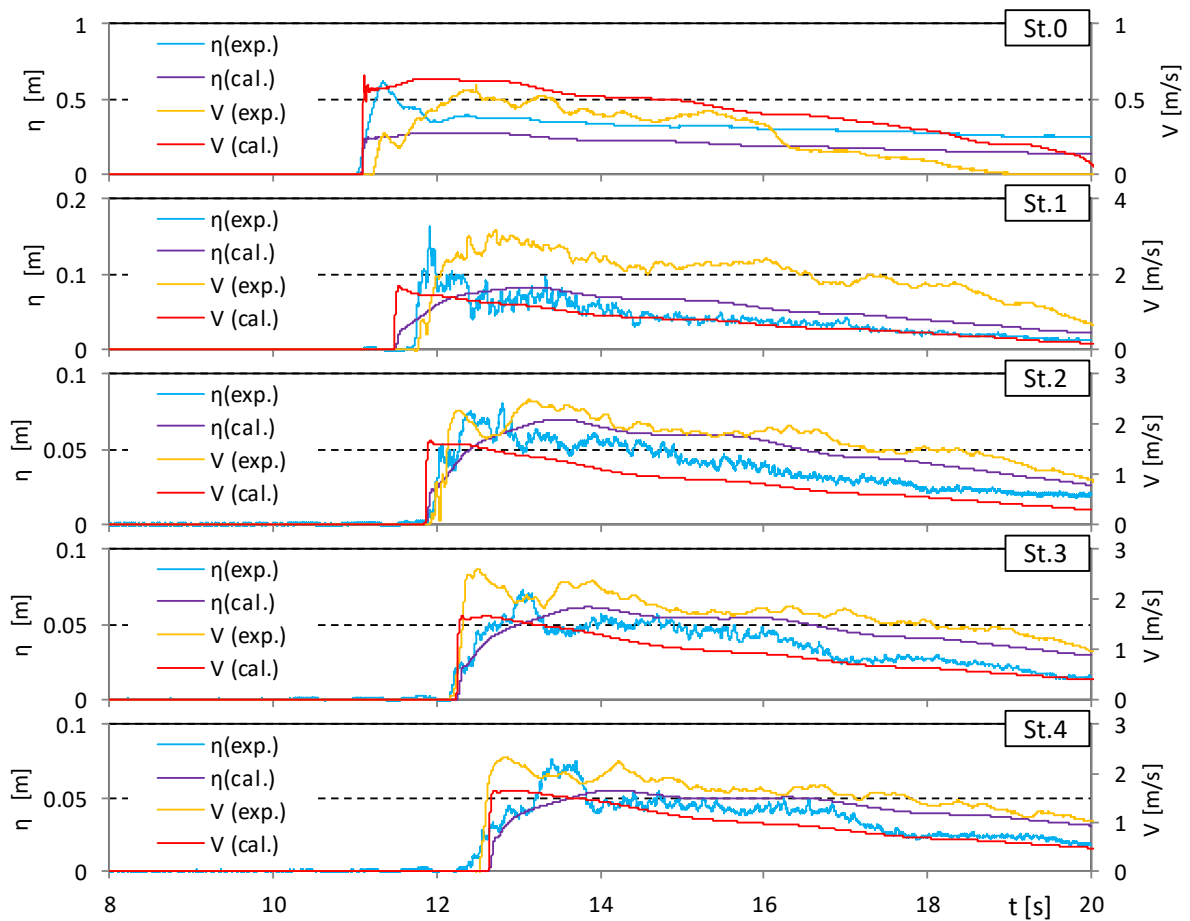


図- 5.3.13 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd30)

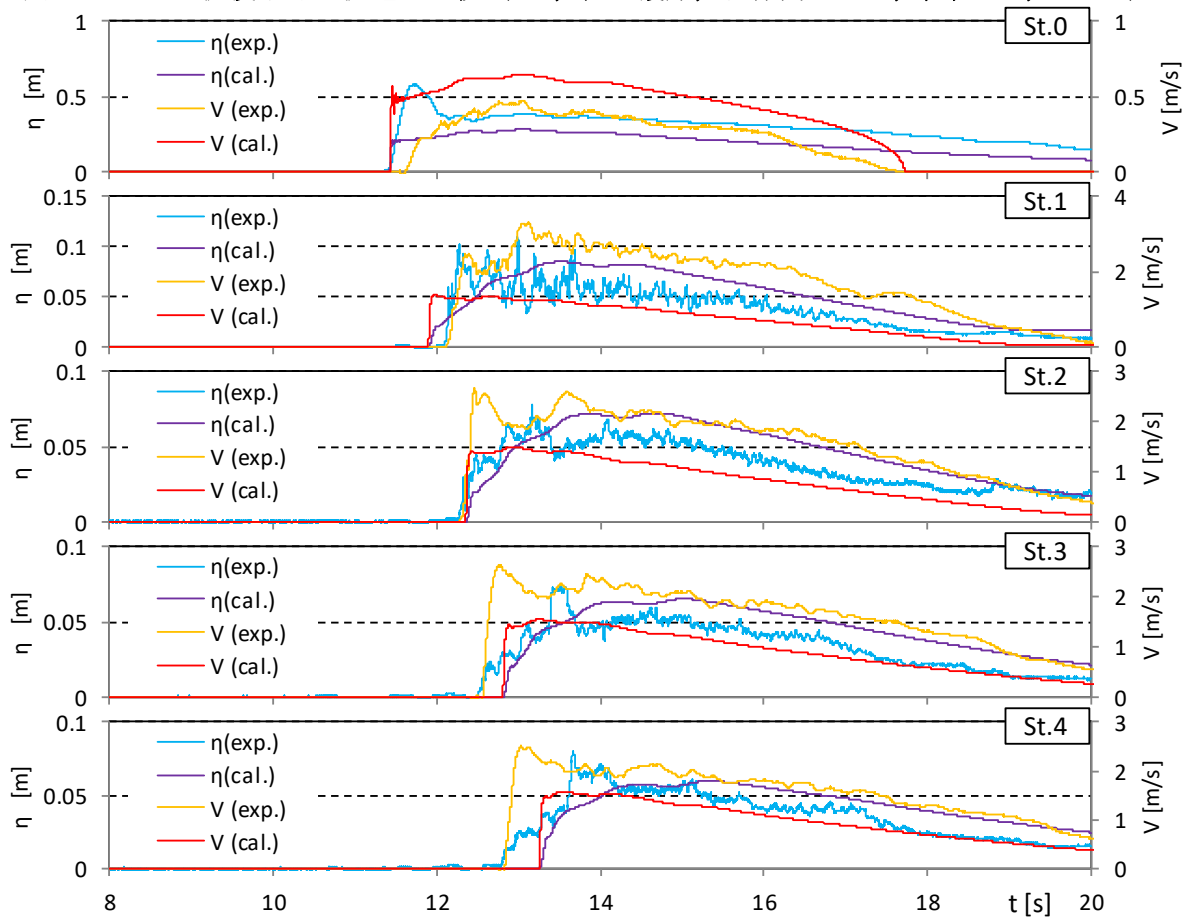


図- 5.3.13 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd31)

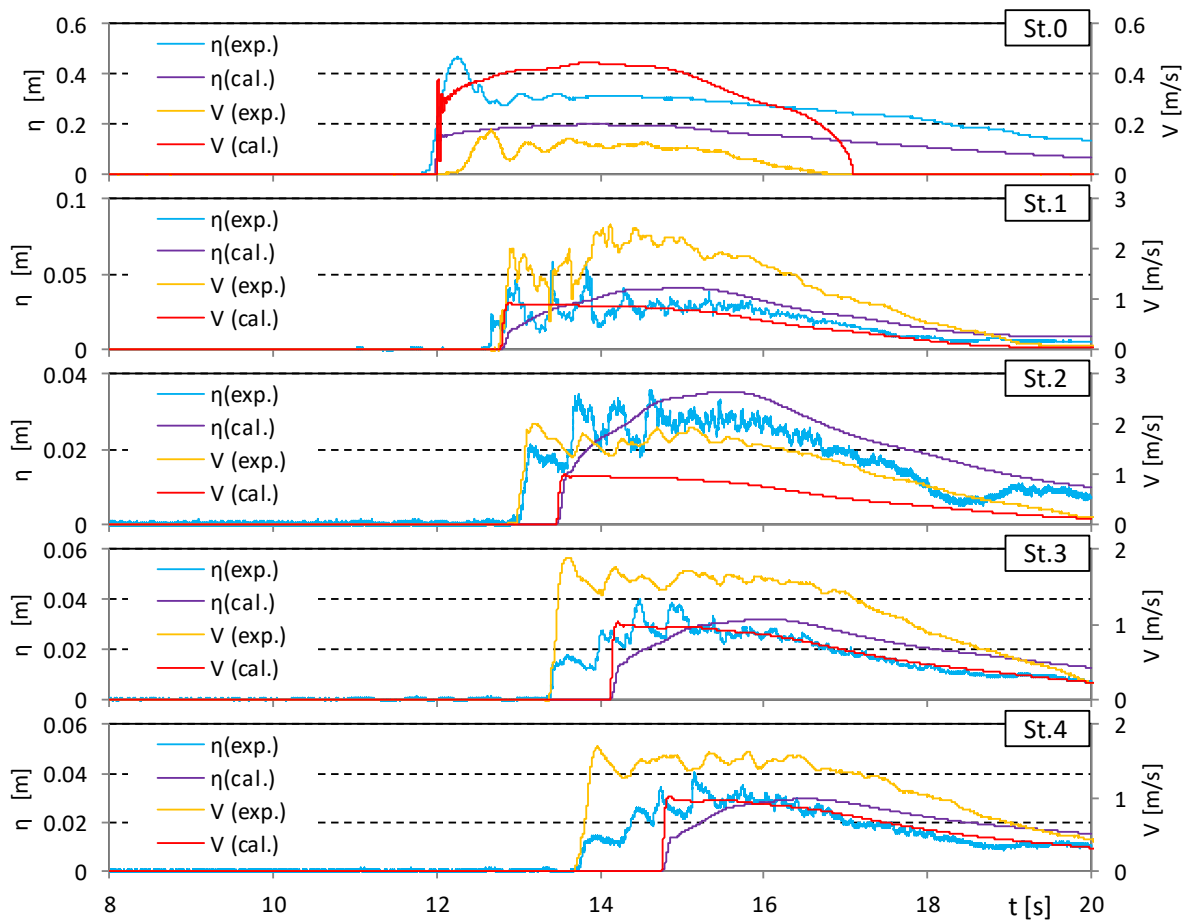


図- 5.3.13 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd40)

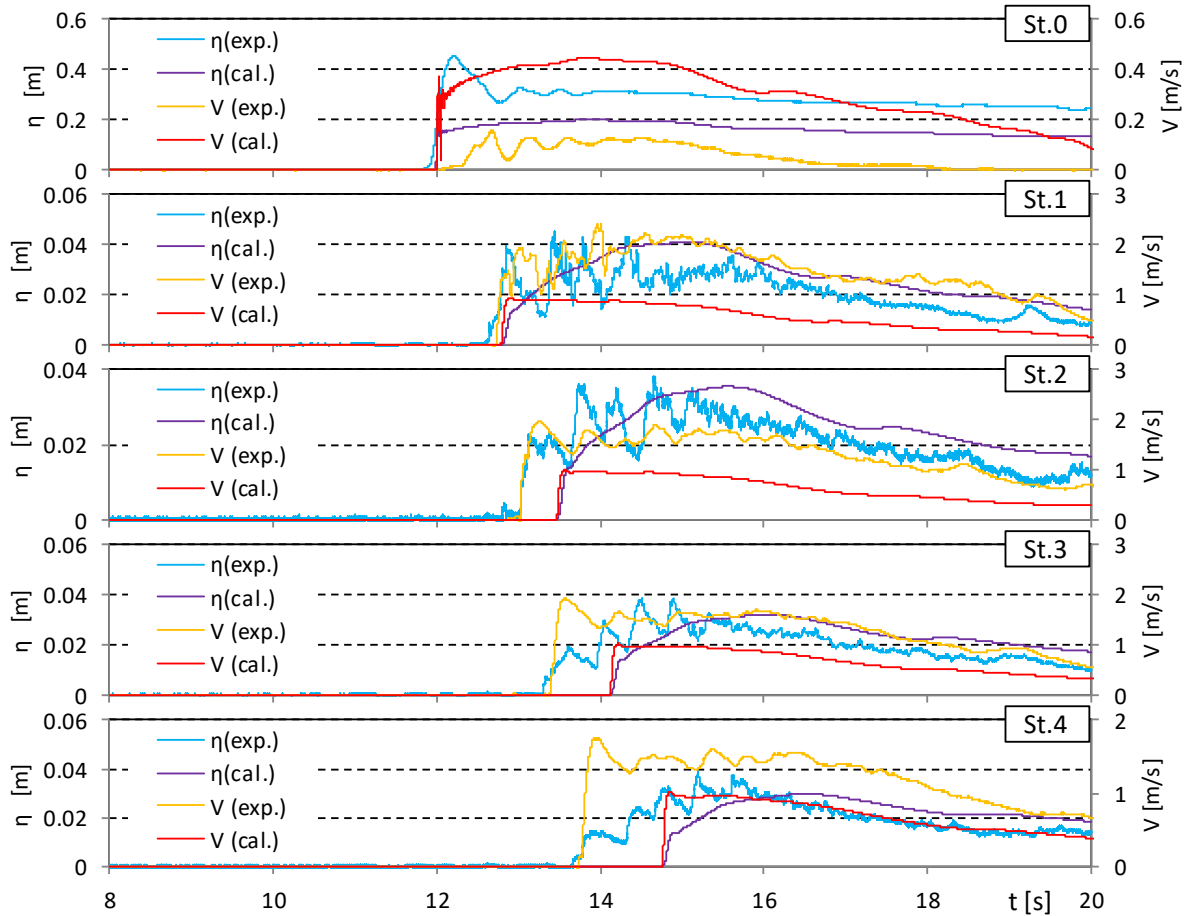


図- 5.3.13 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd41)

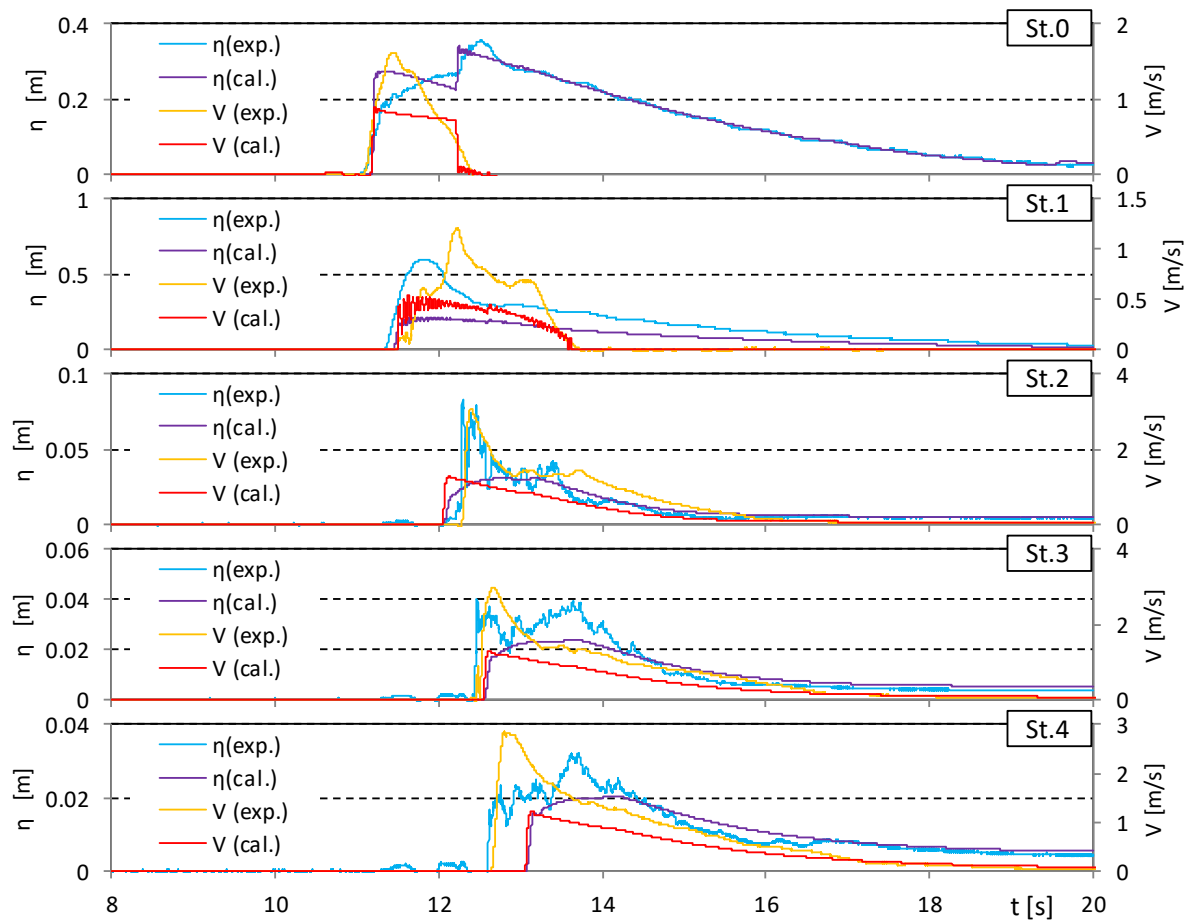


図- 5.3.14 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd10)

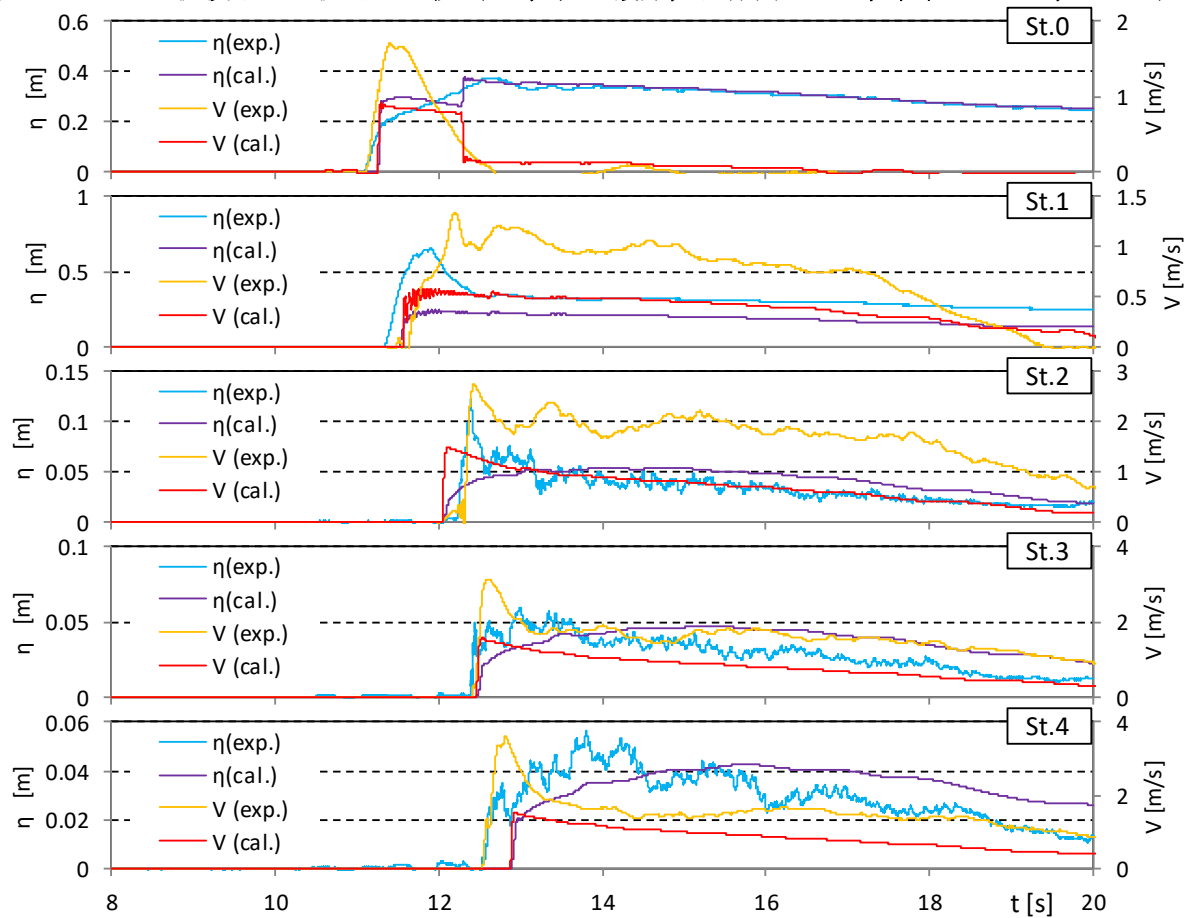


図- 5.3.14 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd11)

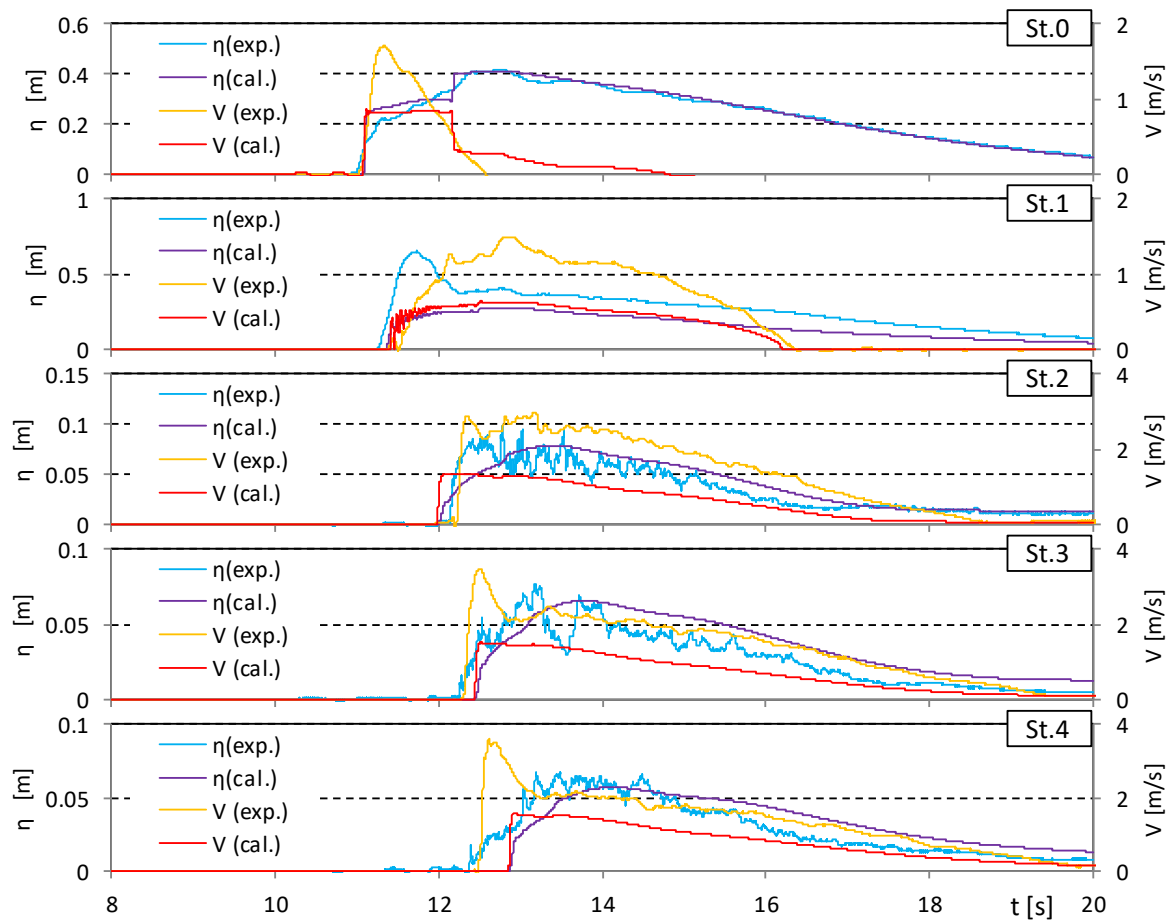


図- 5.3.14 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd20)

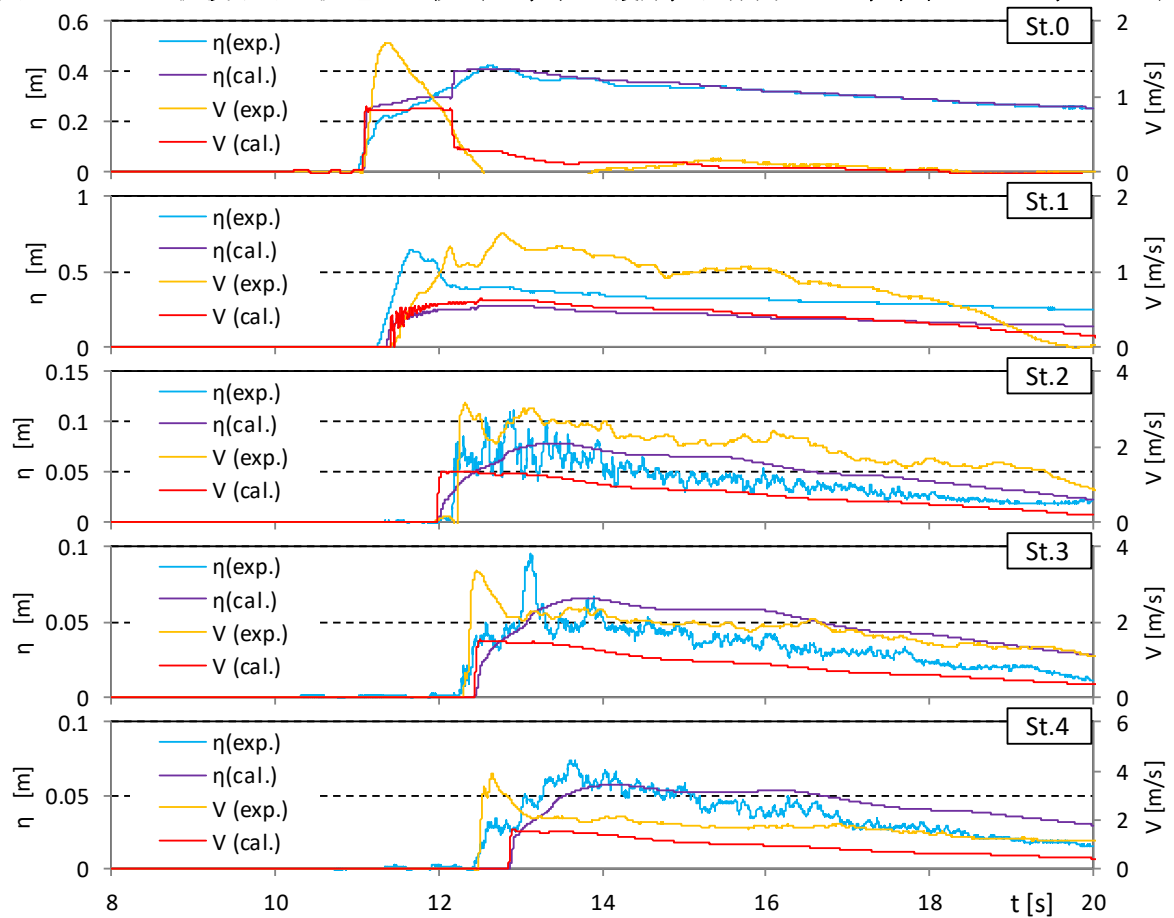


図- 5.3.14 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd21)

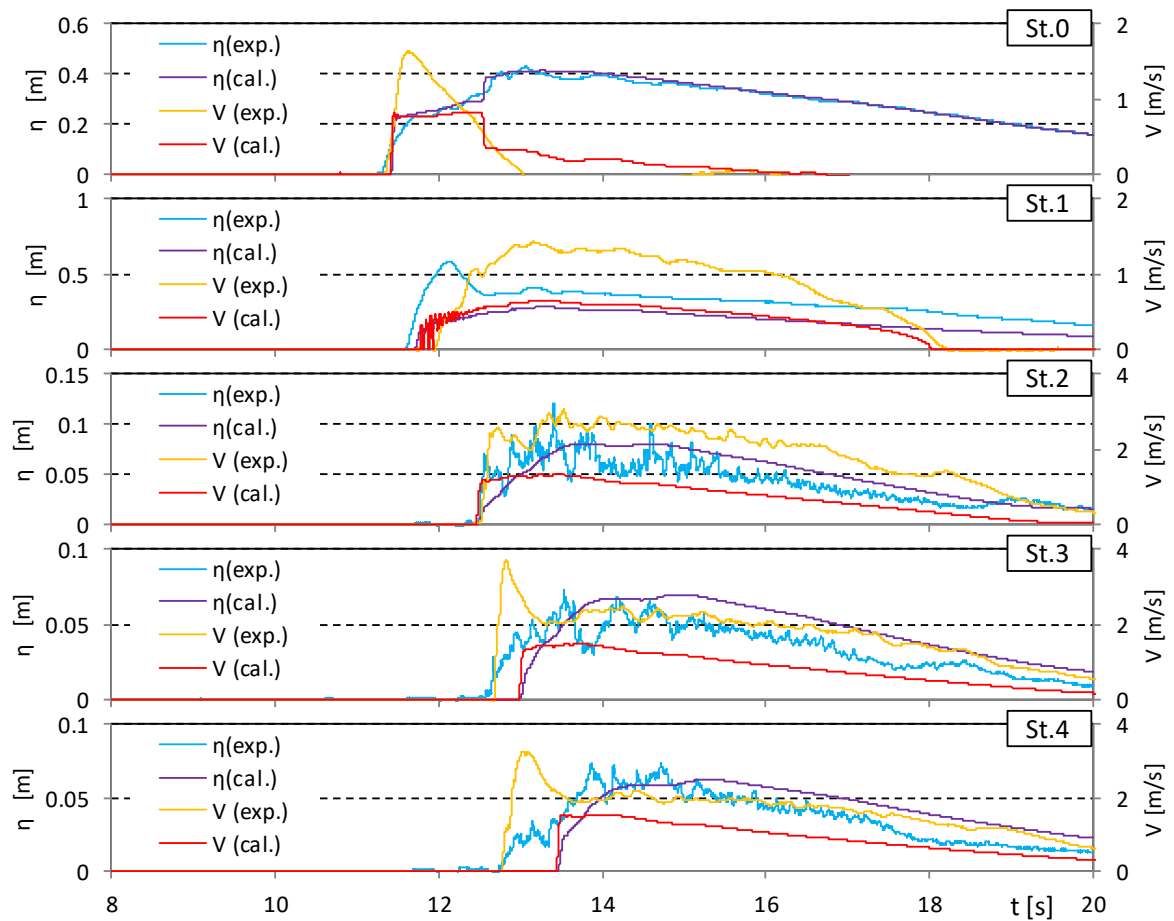


図- 5.3.14 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd30)

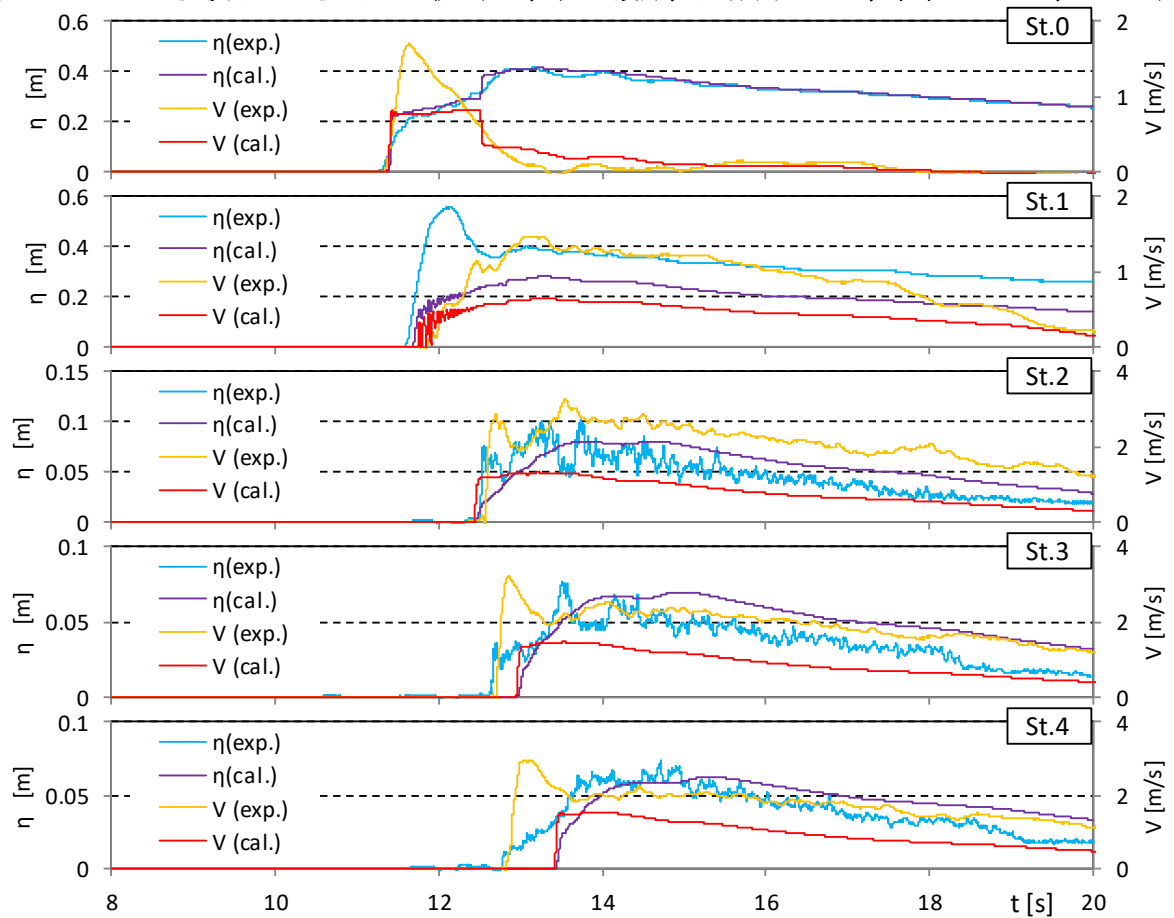


図- 5.3.14 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd31)

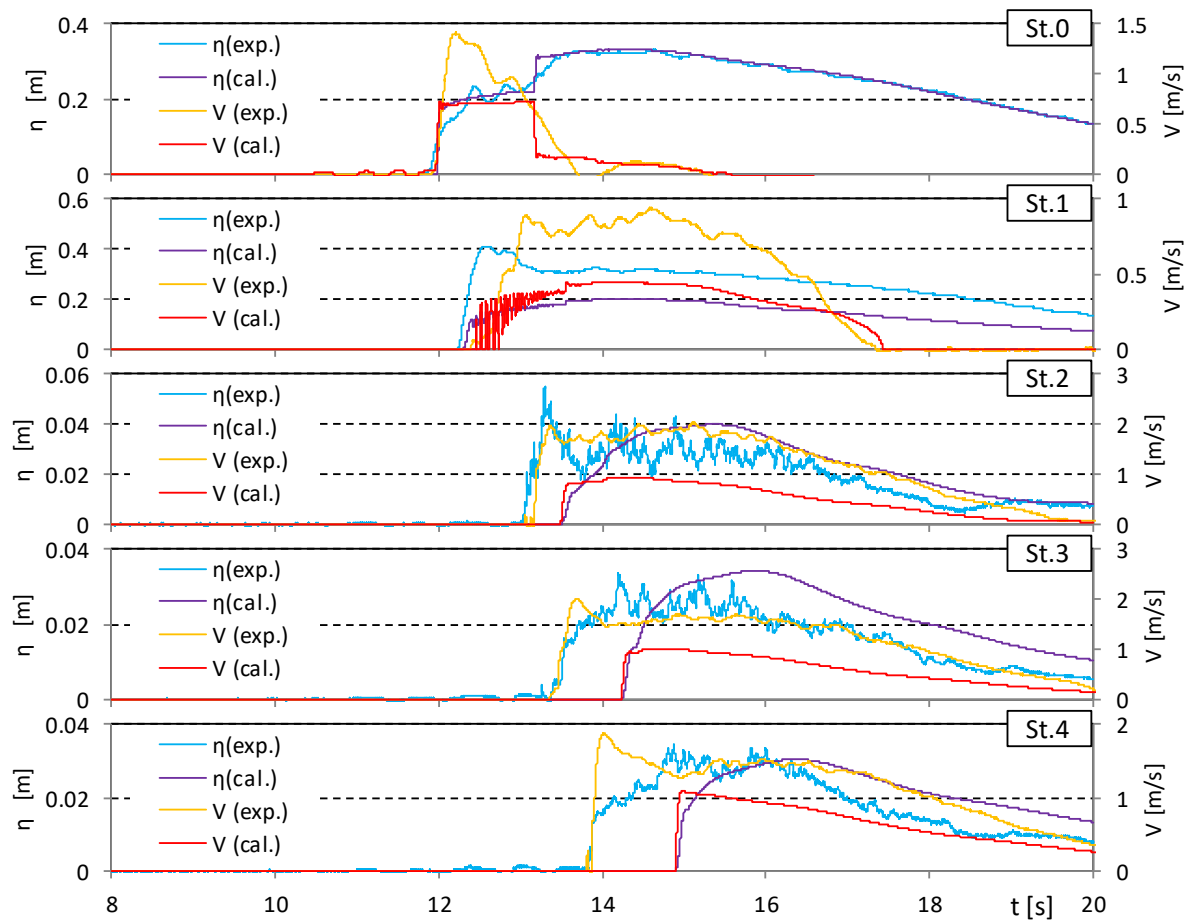


図- 5.3.14 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd40)

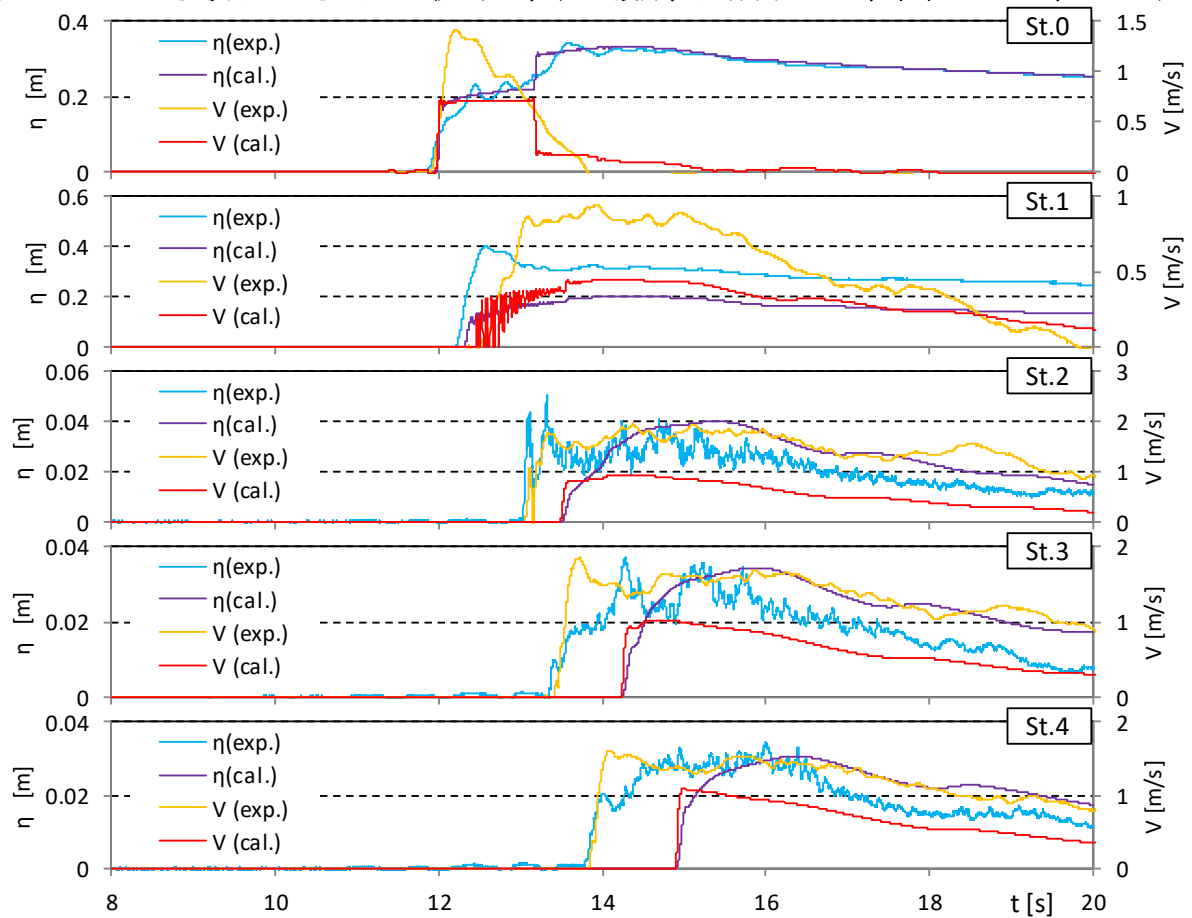


図- 5.3.14 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd41)

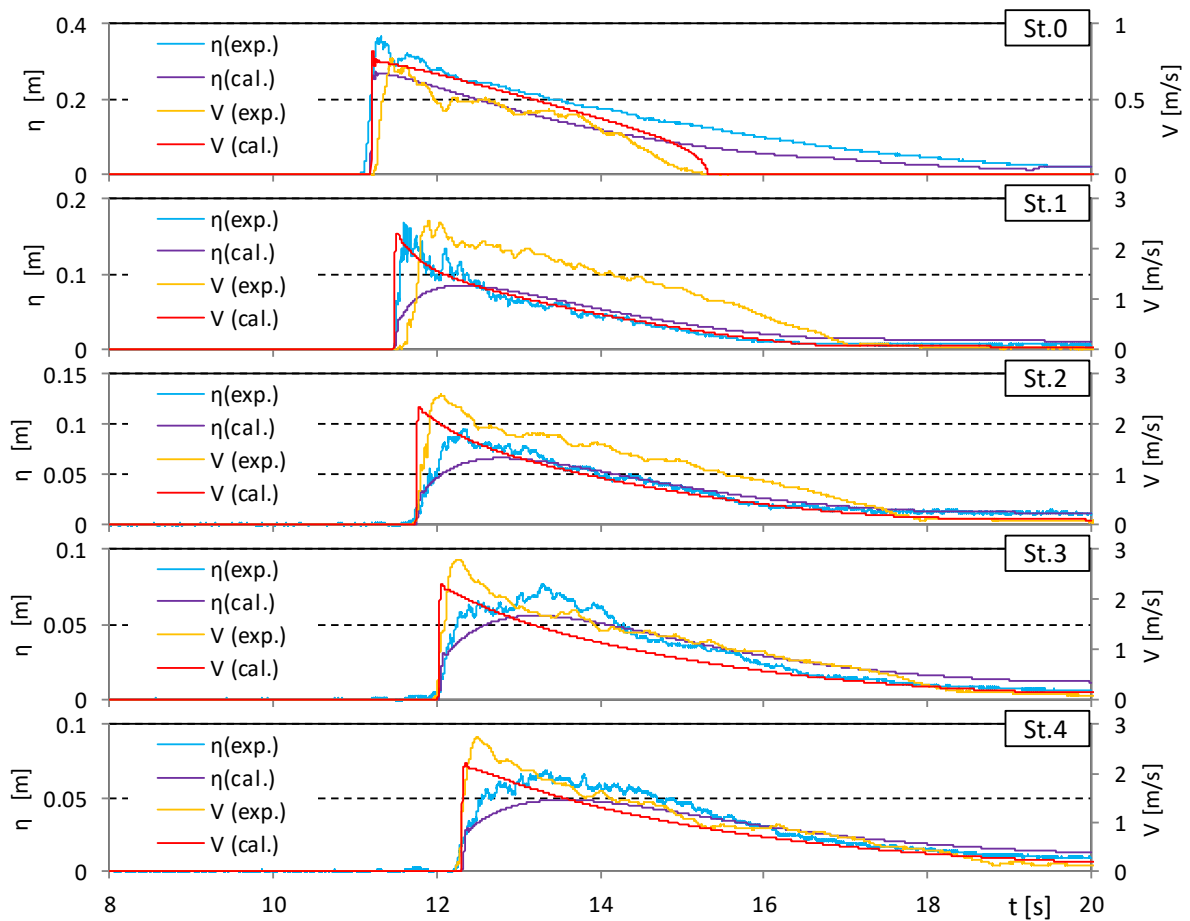


図- 5.3.15 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd10)

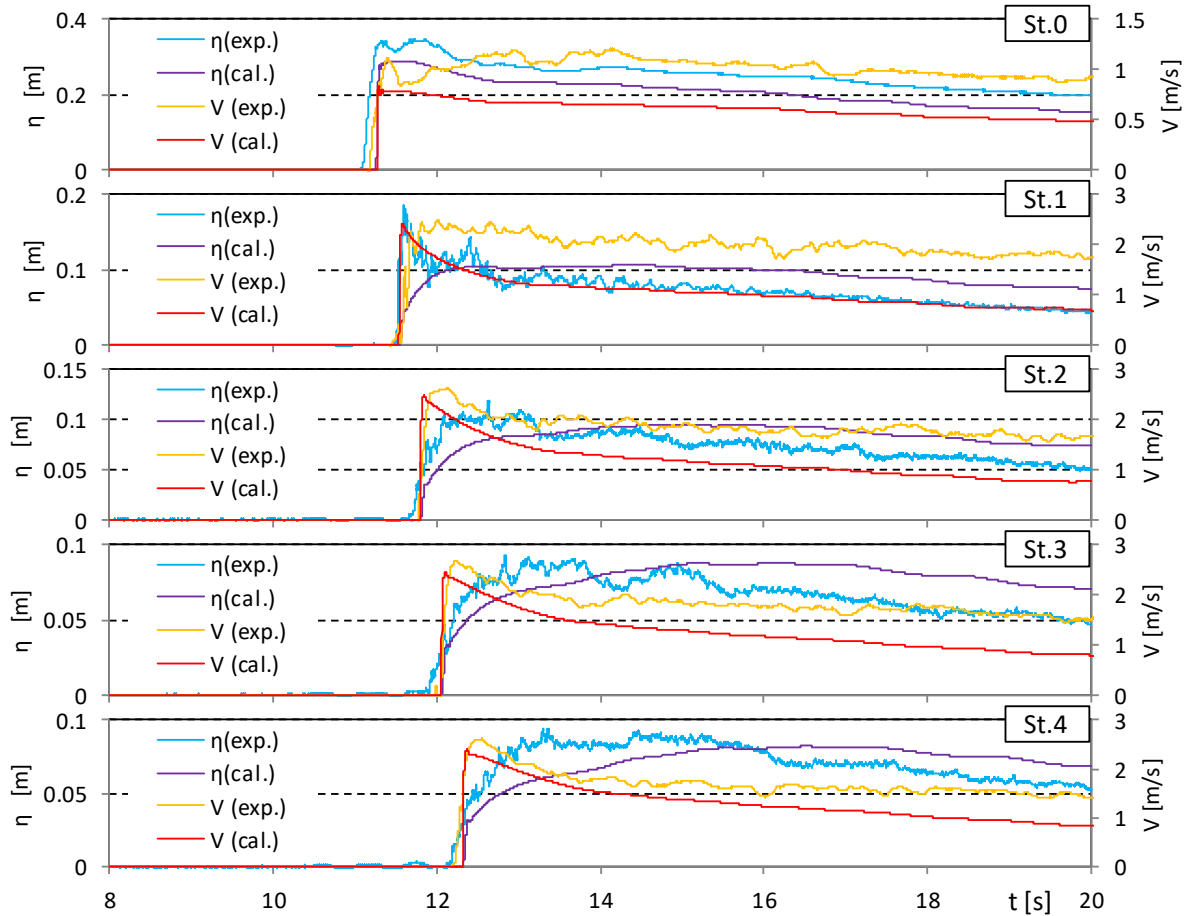


図- 5.3.15 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd11)

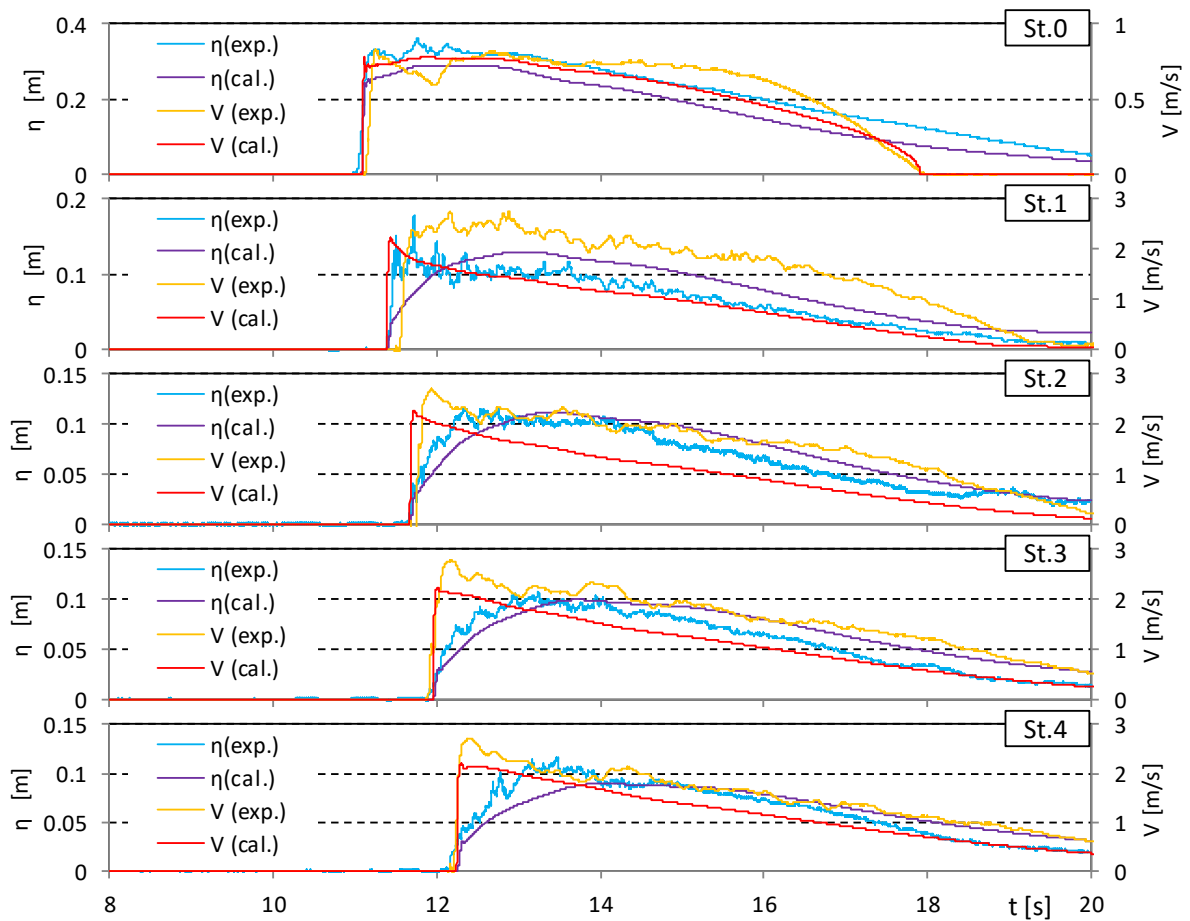


図- 5.3.15 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd20)

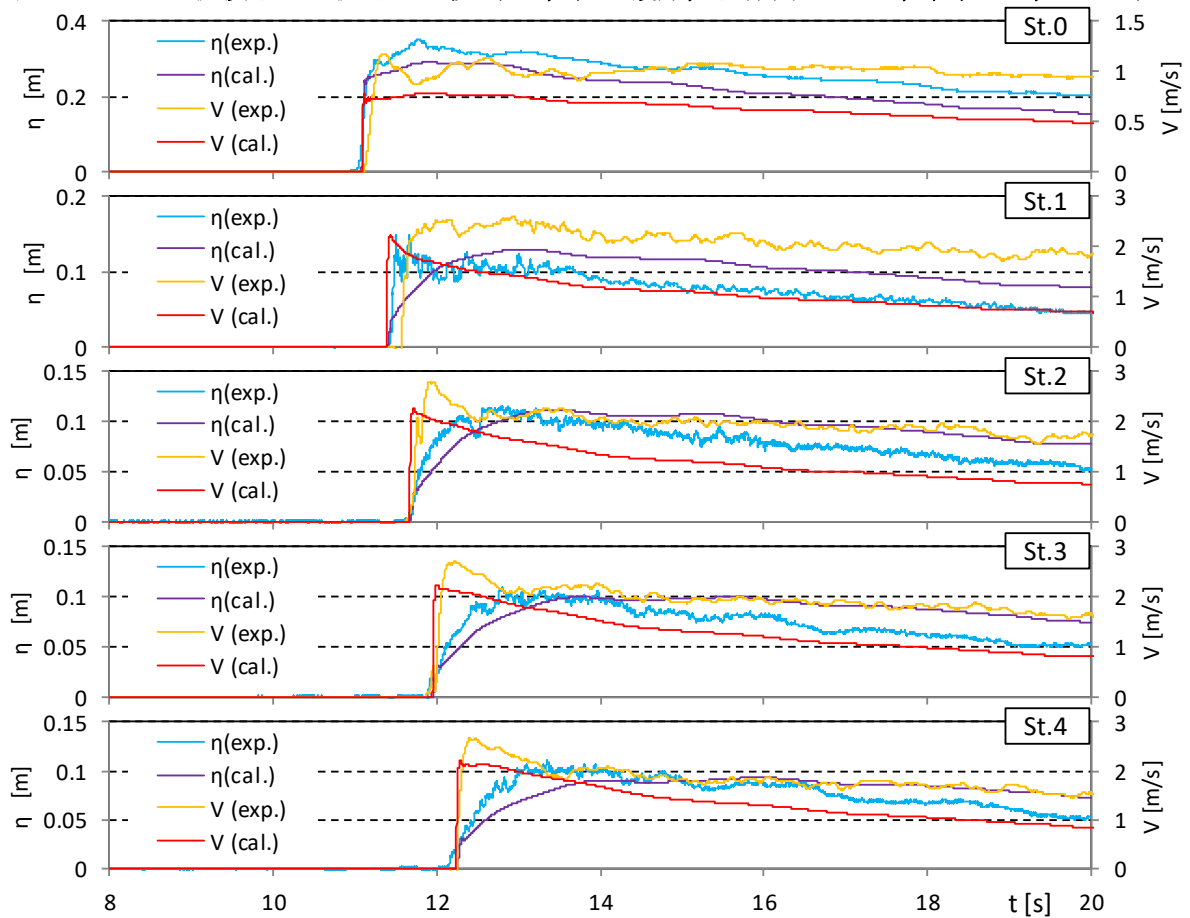


図- 5.3.15 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd21)

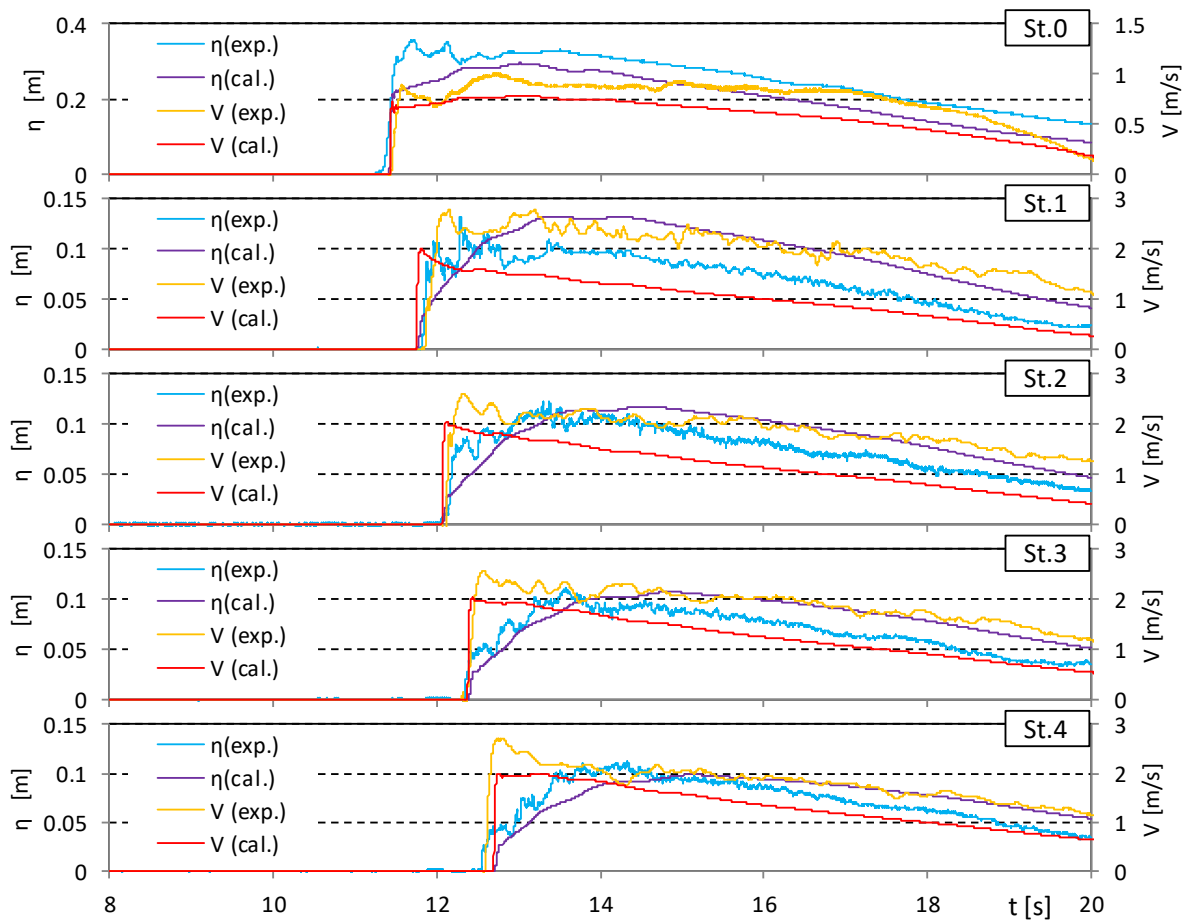


図- 5.3.15 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd30)

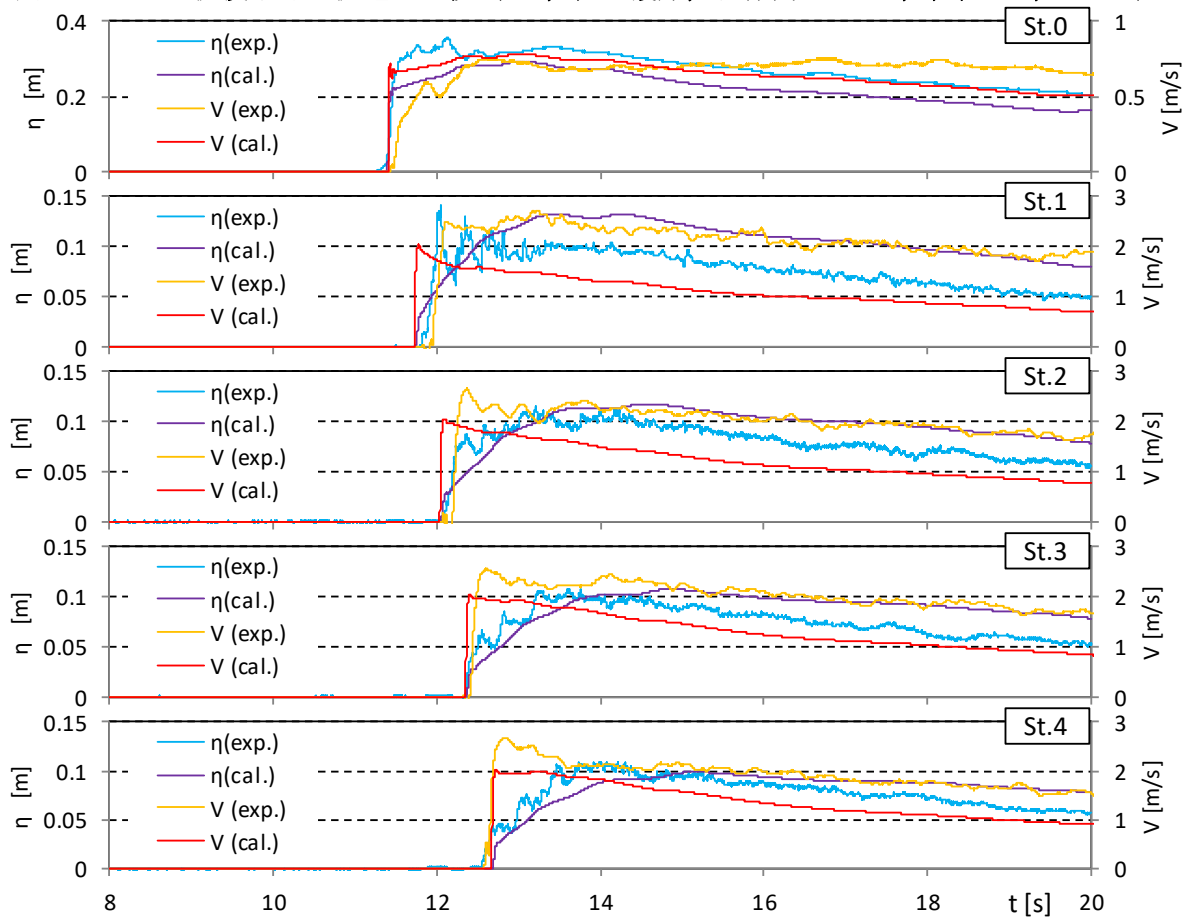


図- 5.3.15 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd31)

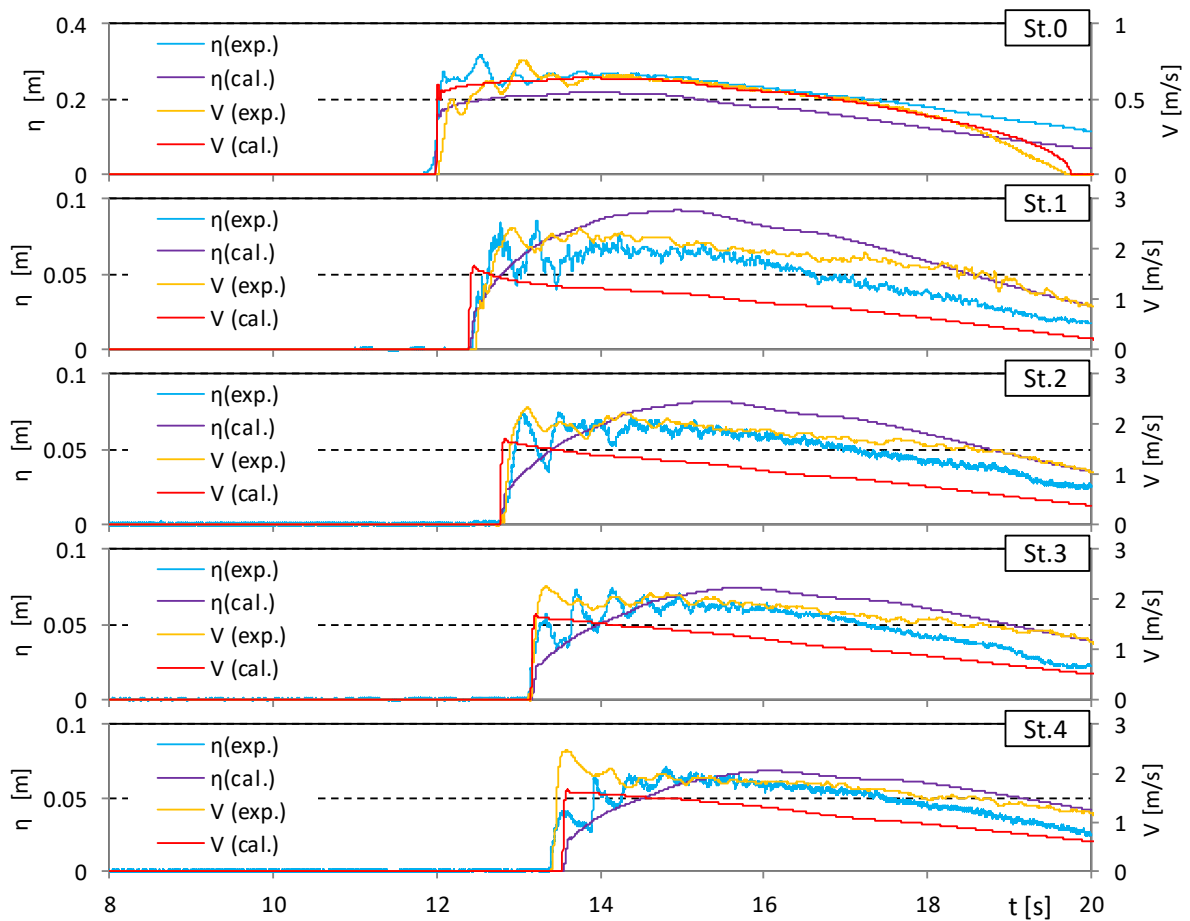


図- 5.3.15 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd40)

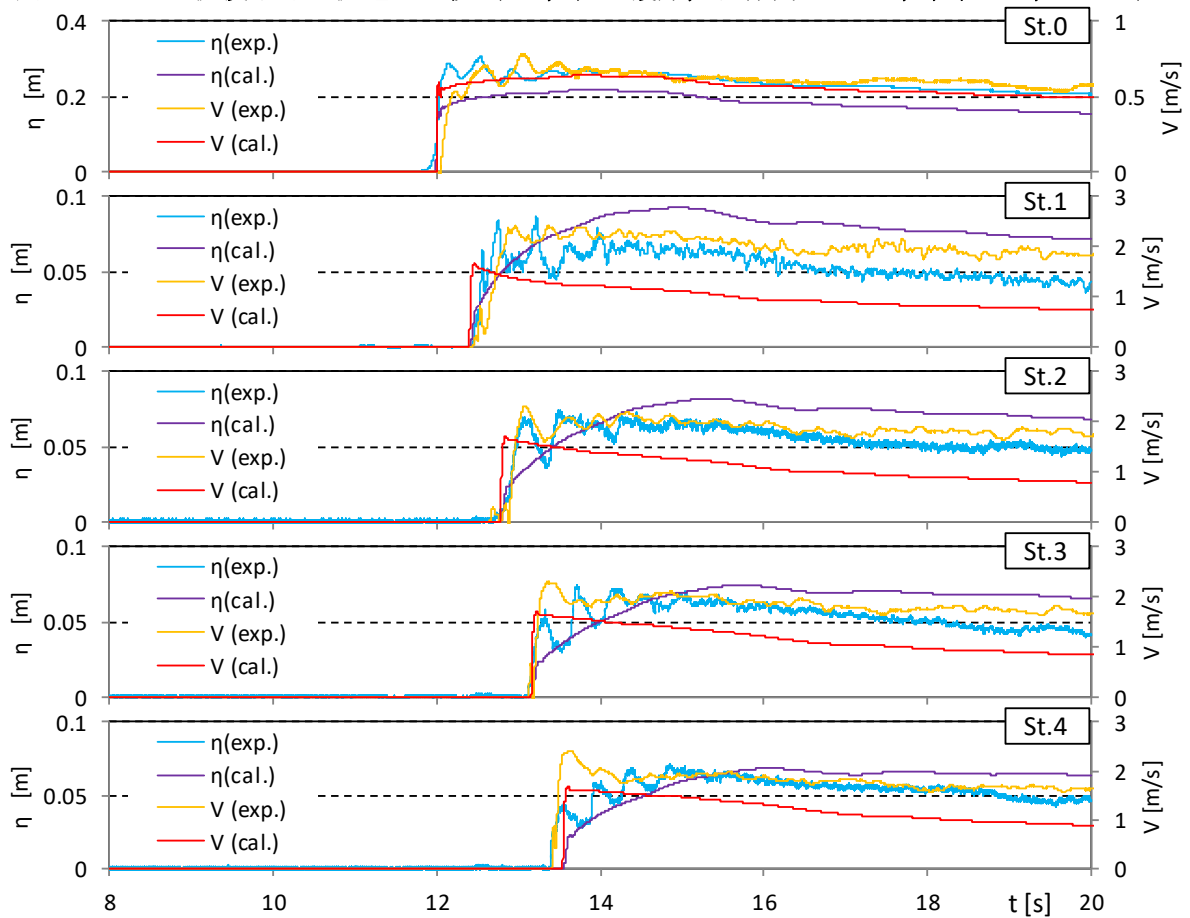


図- 5.3.15 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd41)

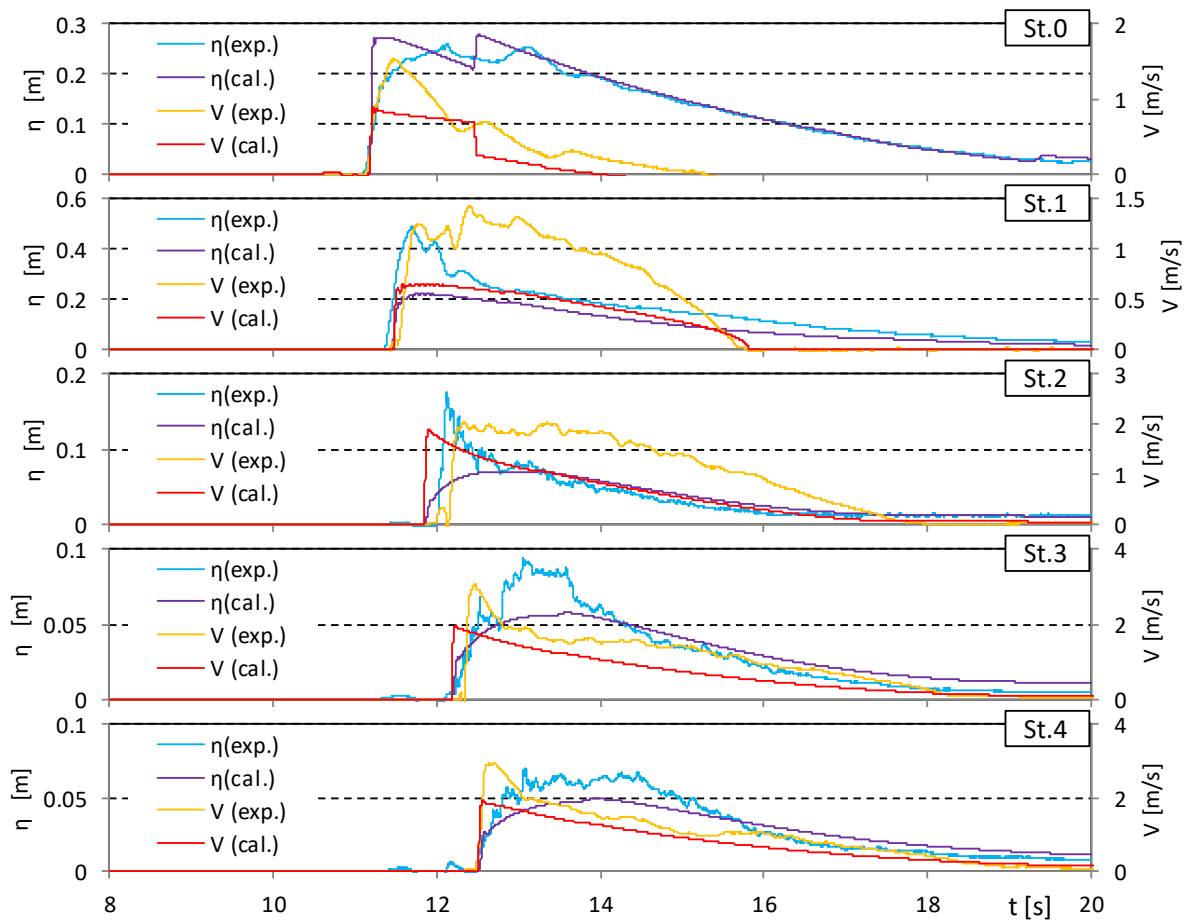


図- 5.3.16 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd10)

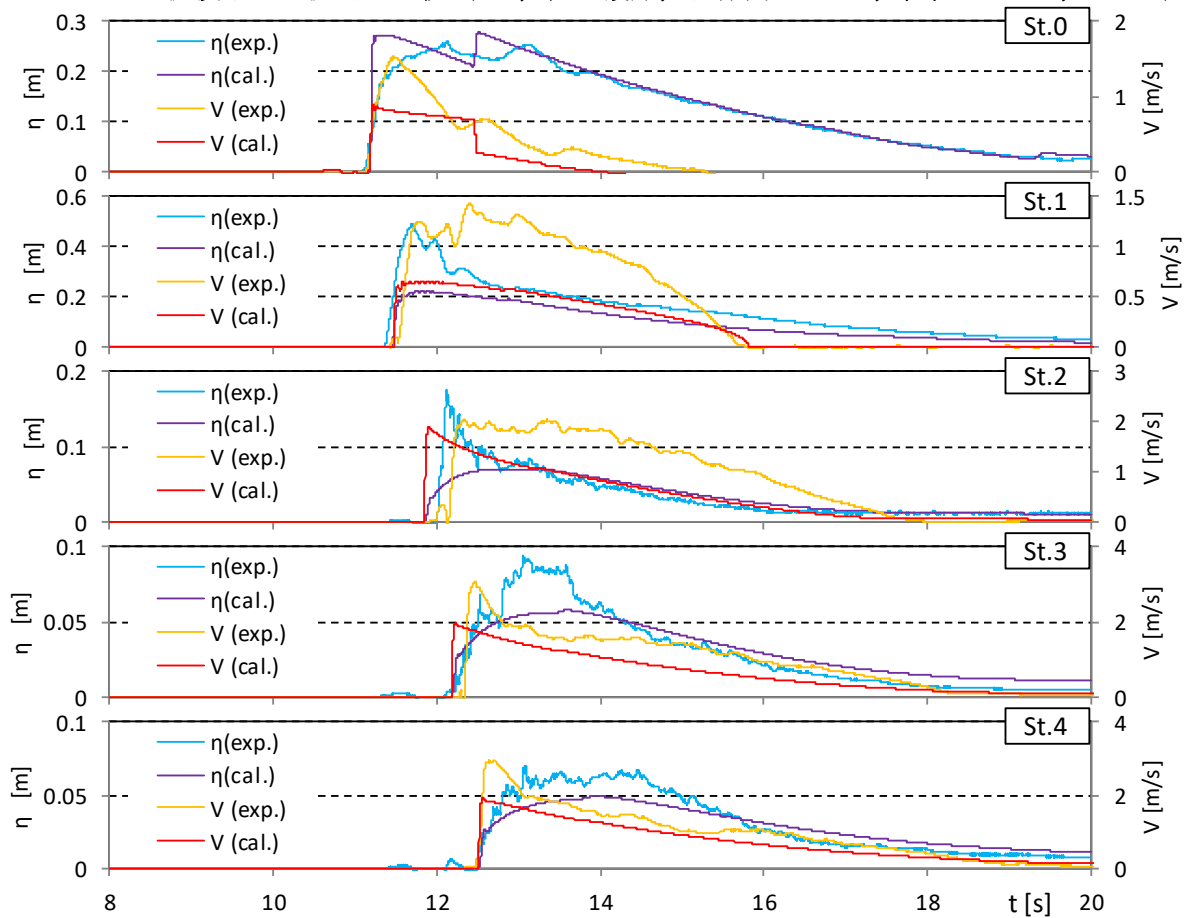


図- 5.3.16 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd11)

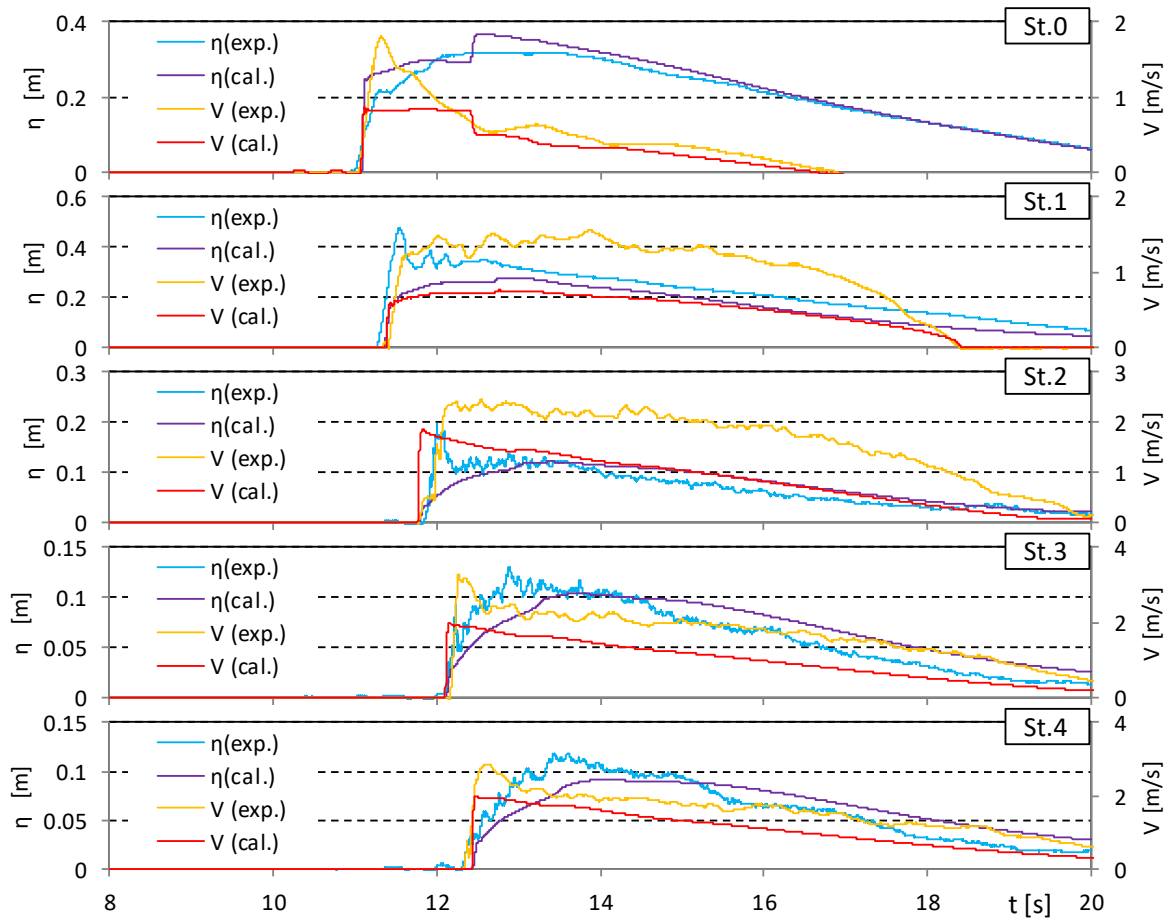


図- 5.3.16 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd20)

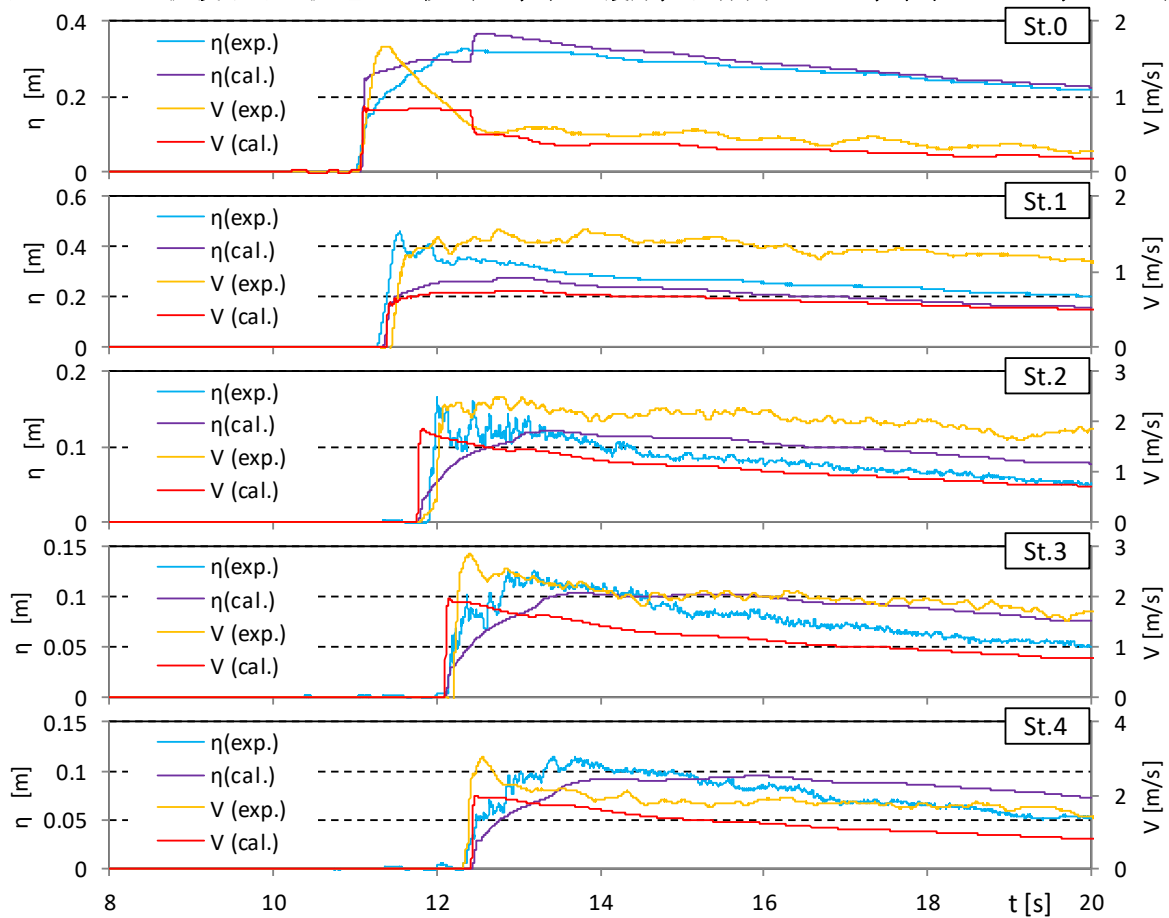


図- 5.3.16 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd21)

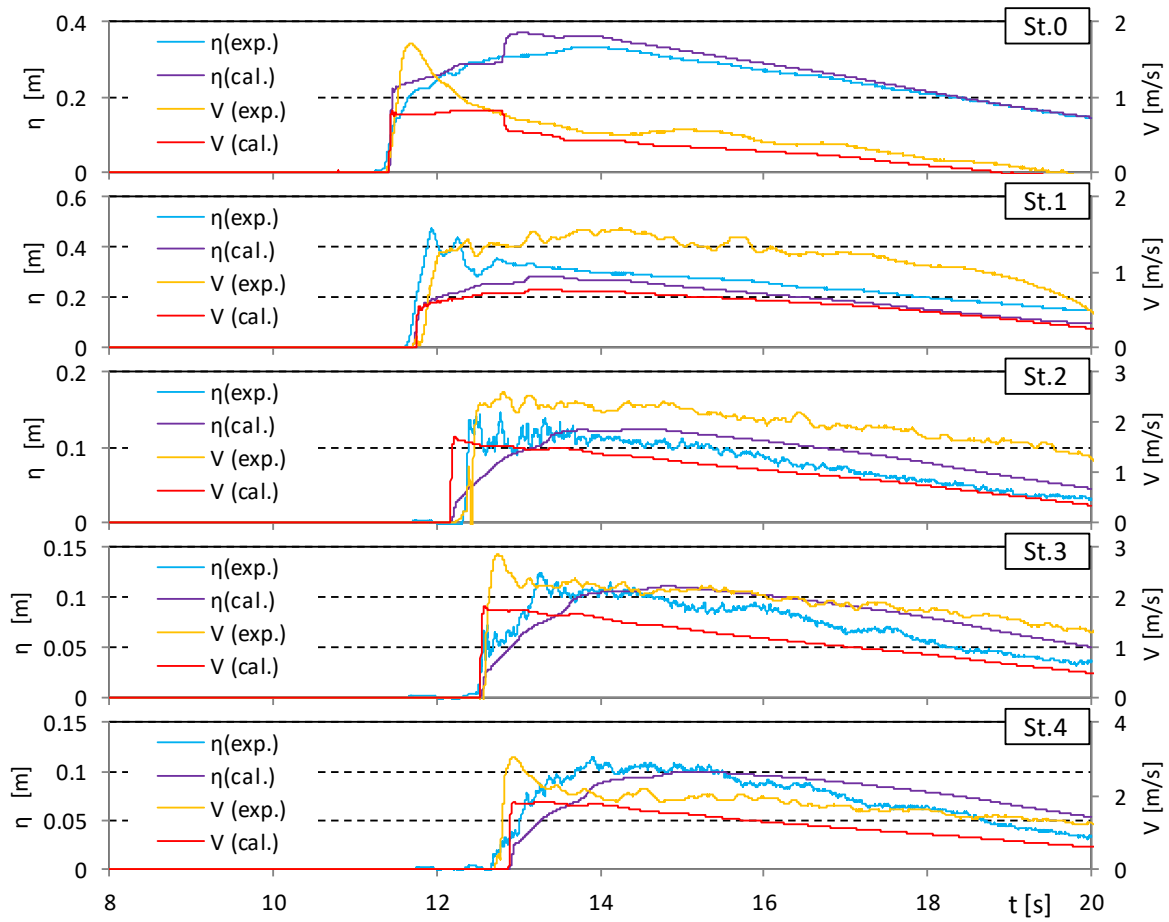


図- 5.3.16 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd30)

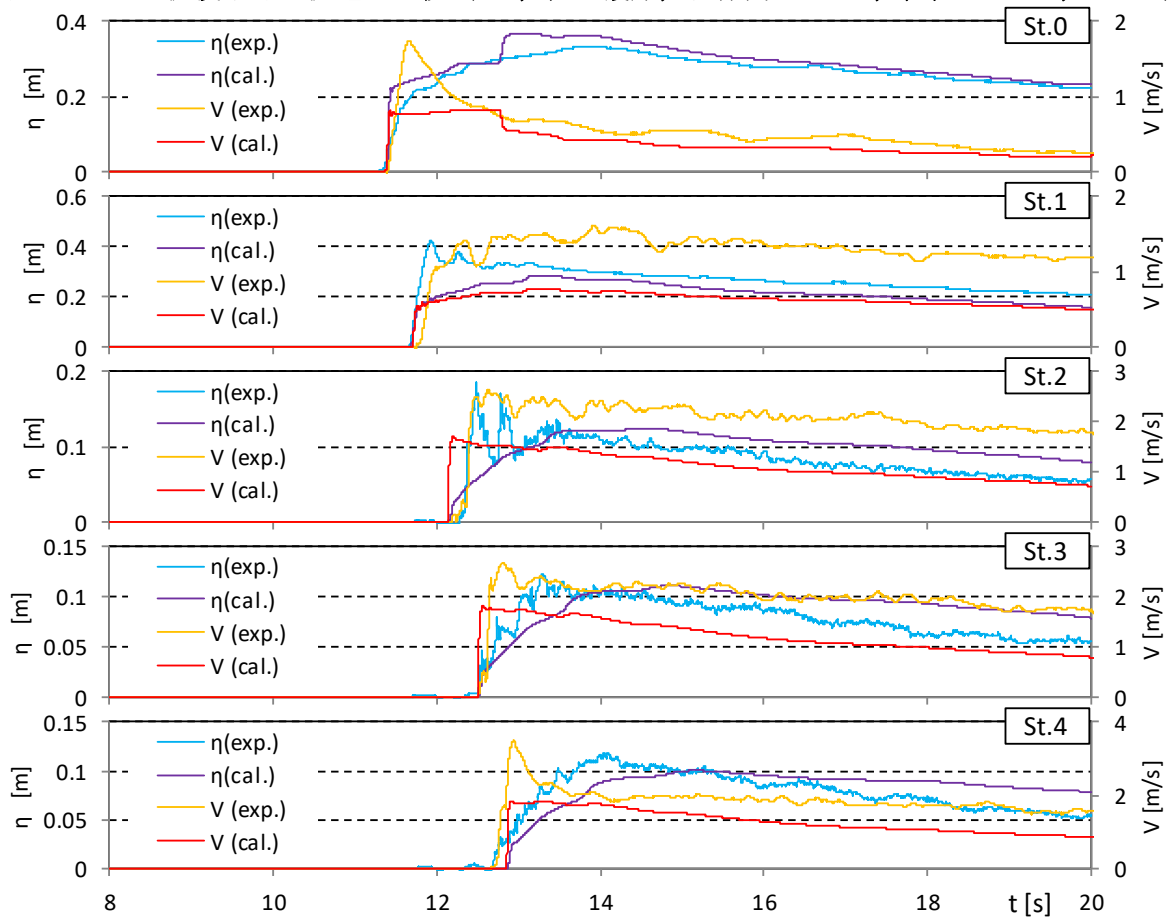


図- 5.3.16 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd31)

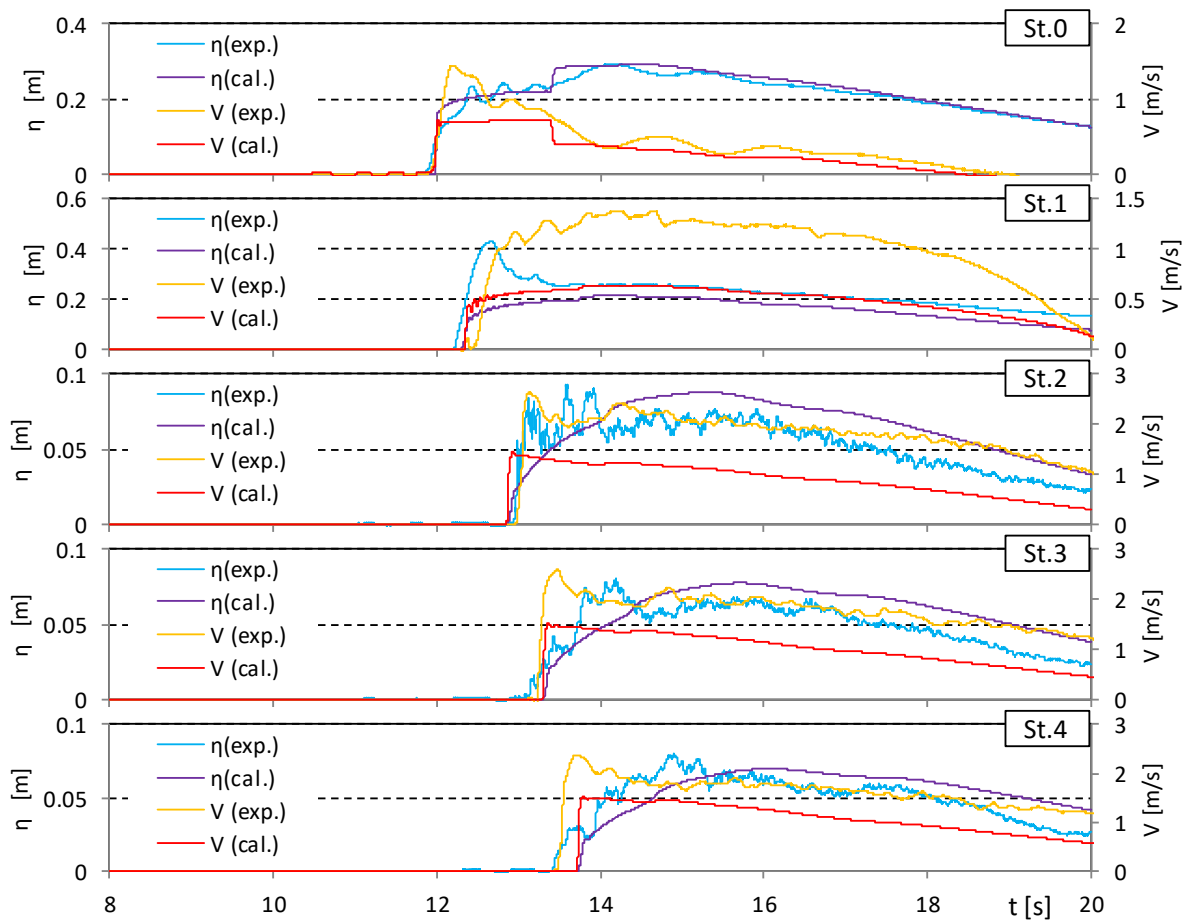


図- 5.3.16 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd40)

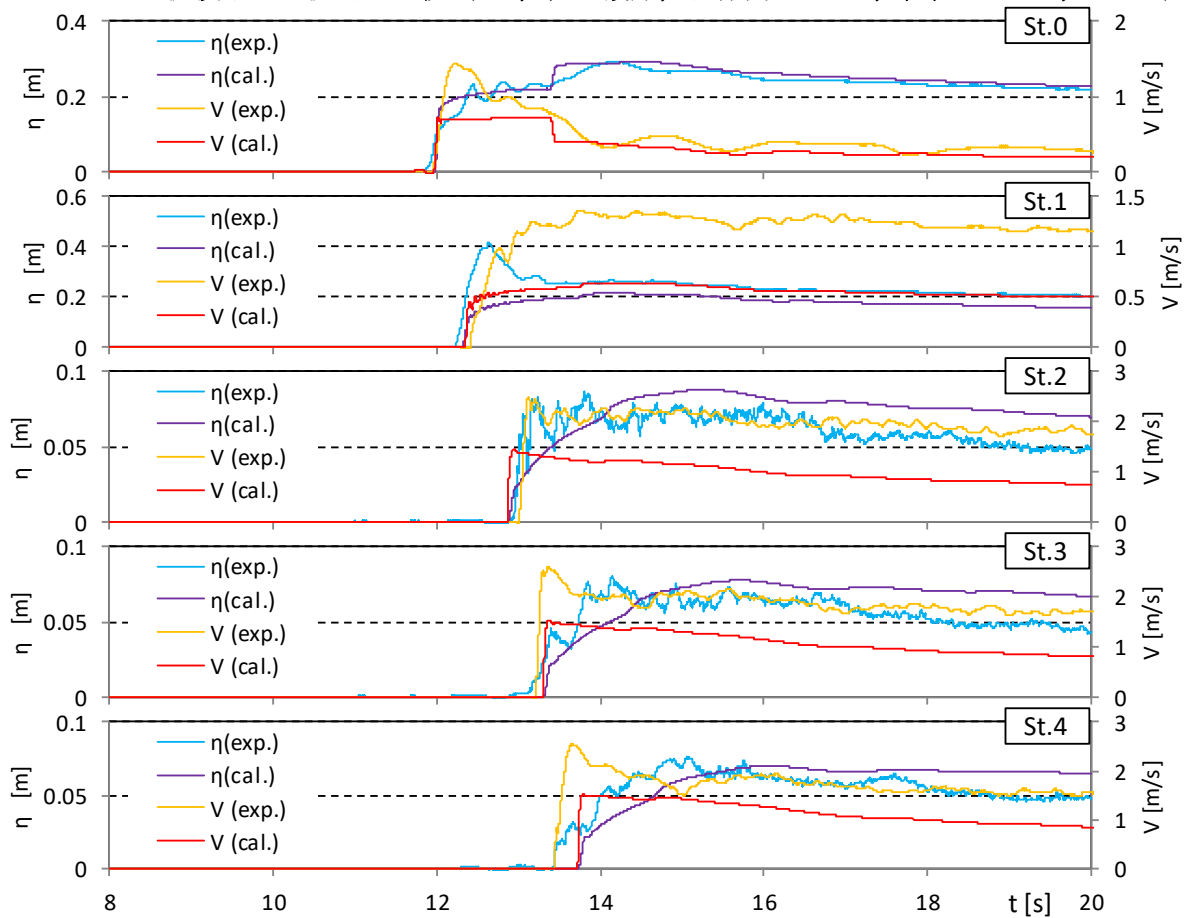


図- 5.3.16 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 直立護岸, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd41)

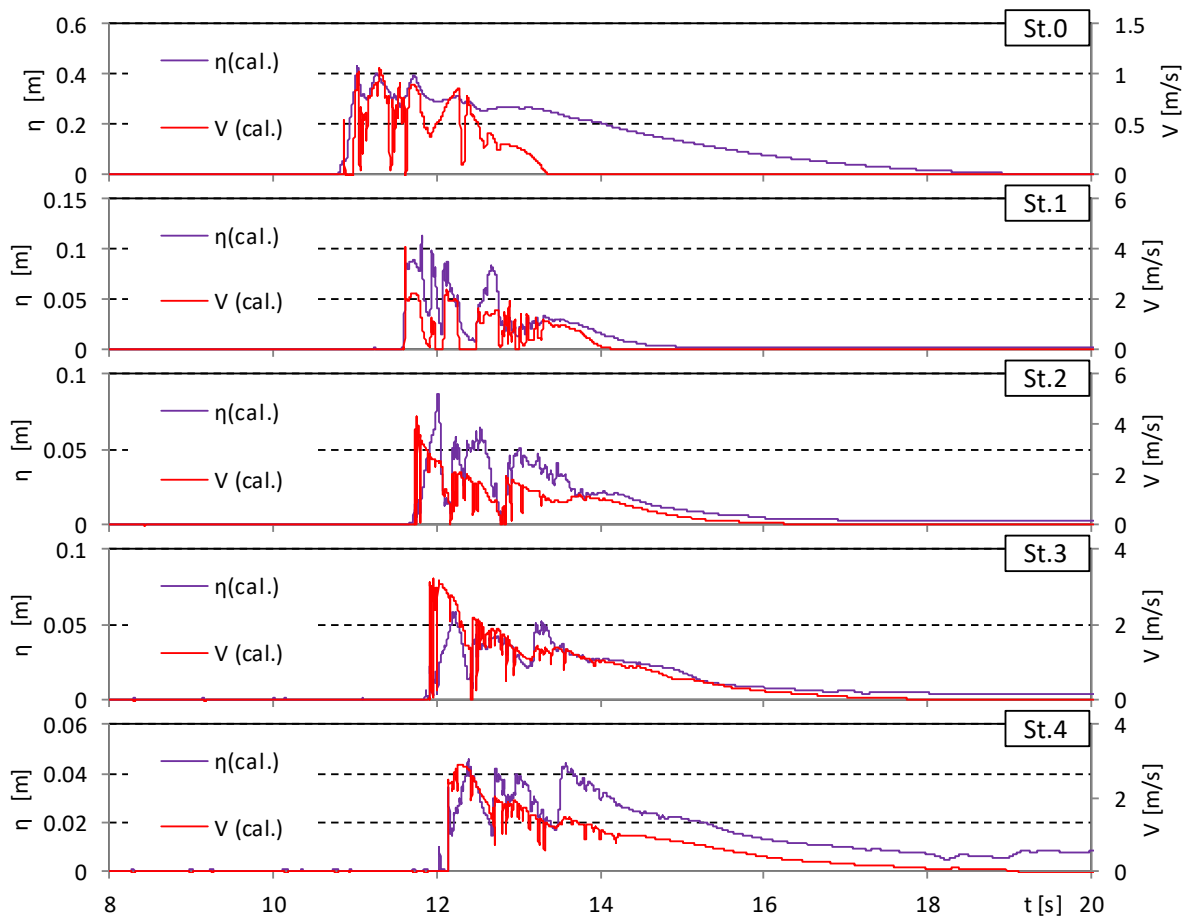


図-5.3.17 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd10)

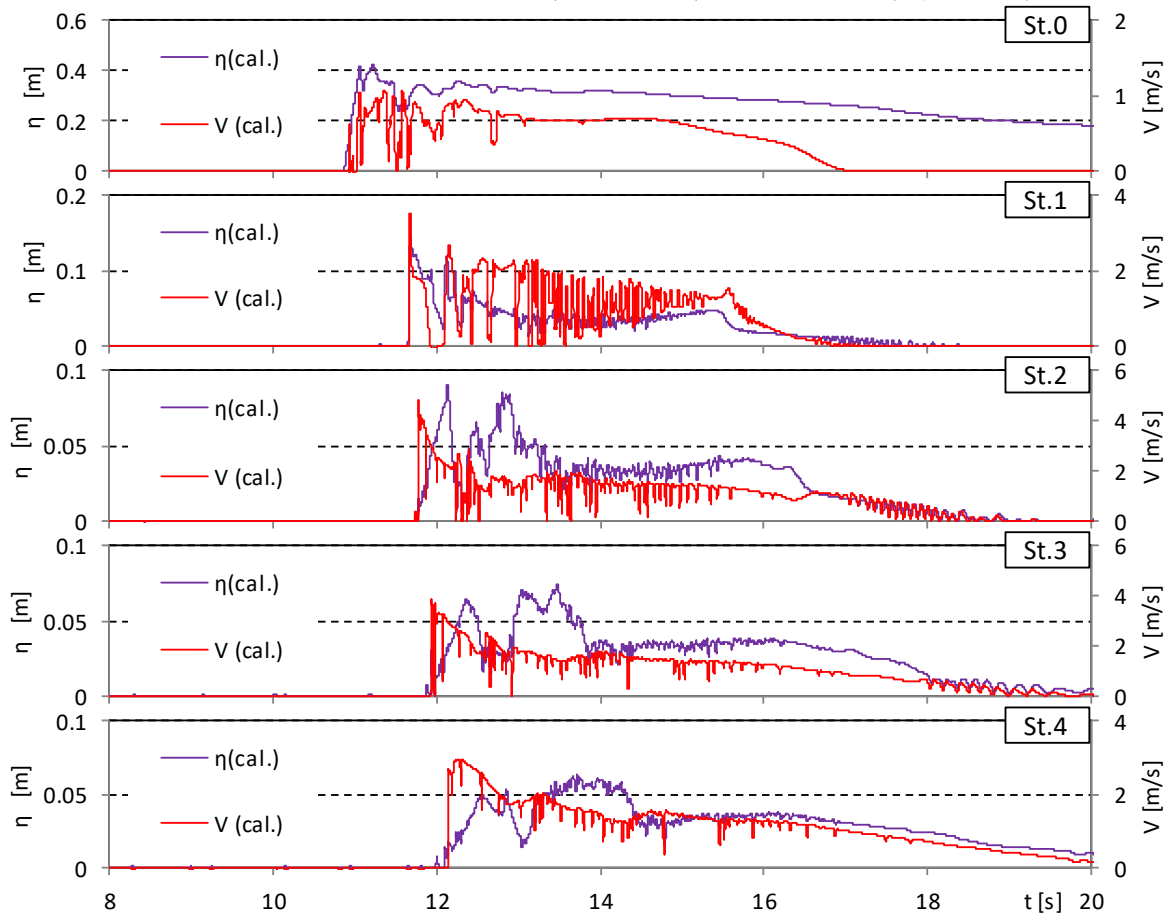


図-5.3.17 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd11)

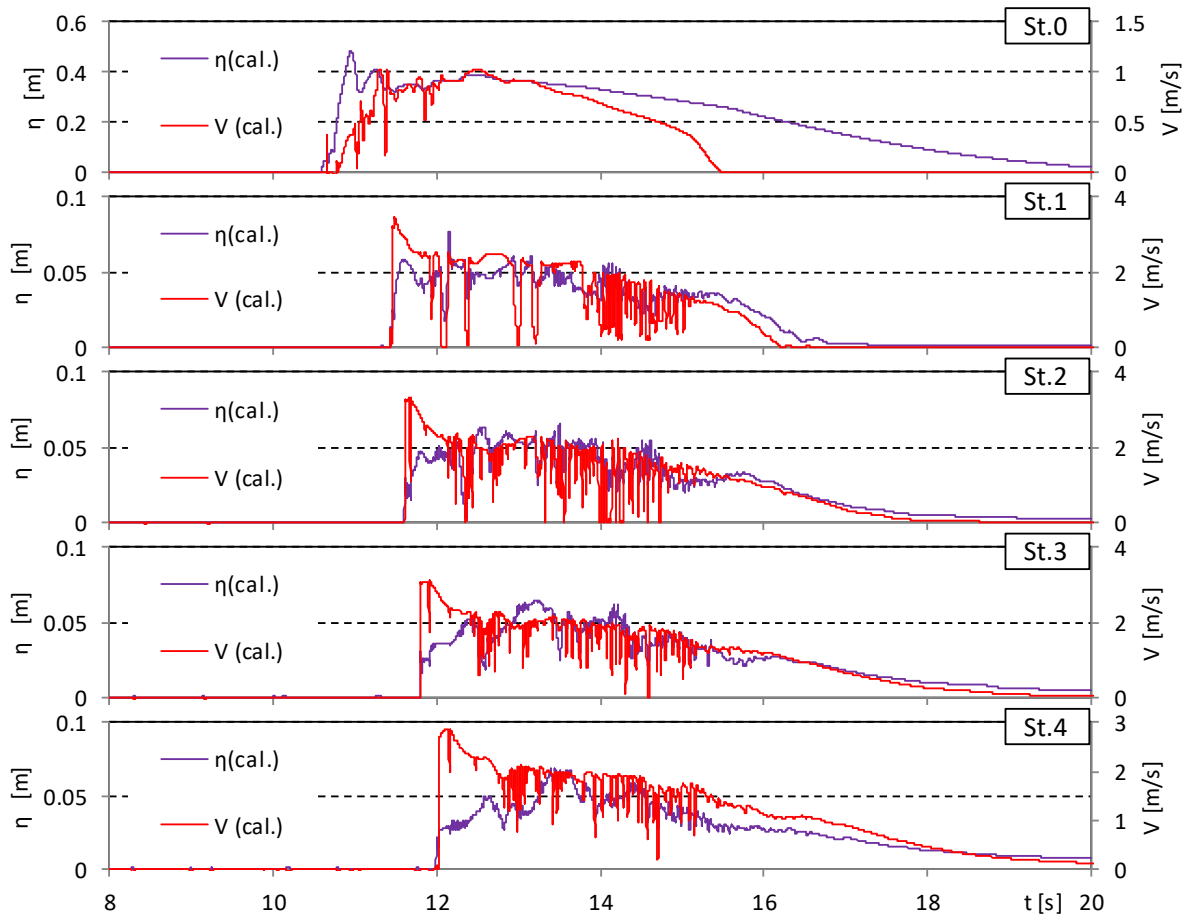


図- 5.3.17 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd20)

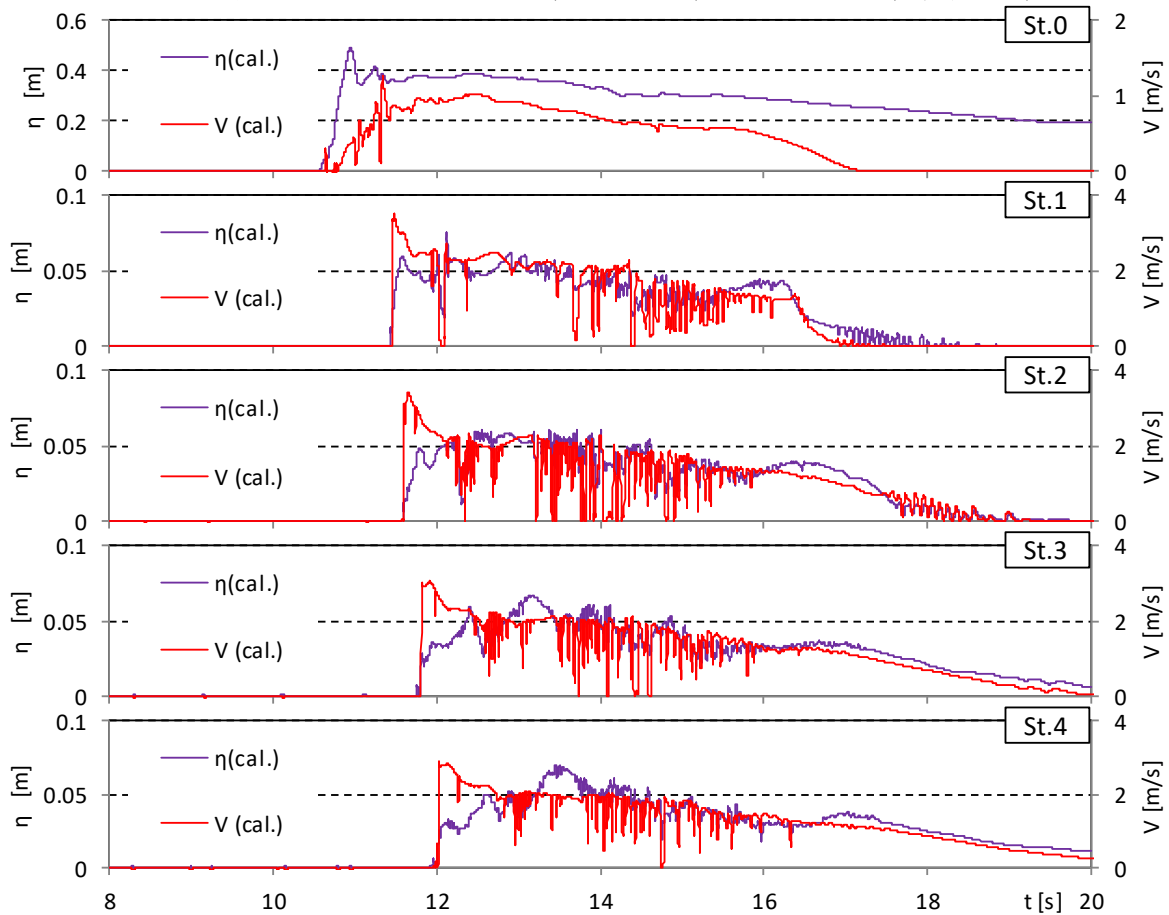


図- 5.3.17 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd21)

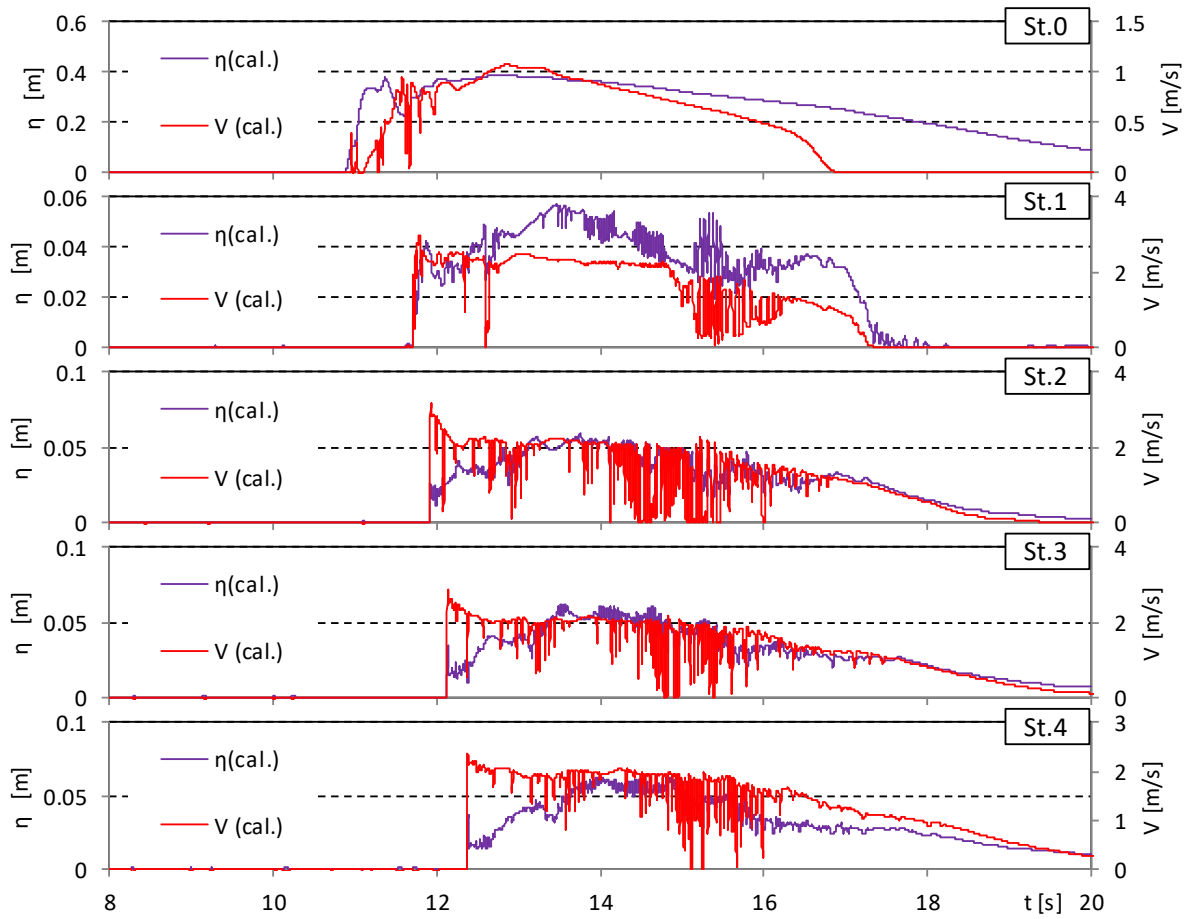


図- 5.3.17 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd30)

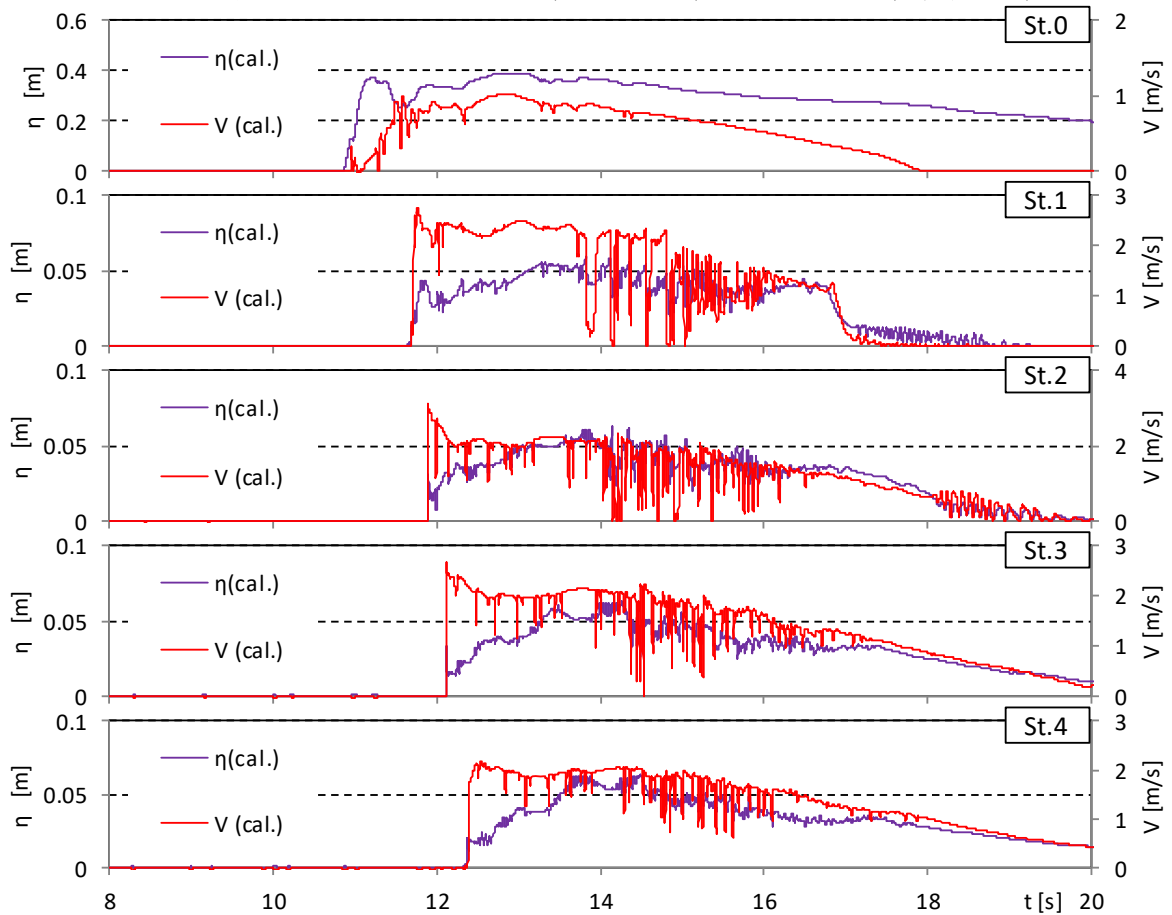


図- 5.3.17 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd31)

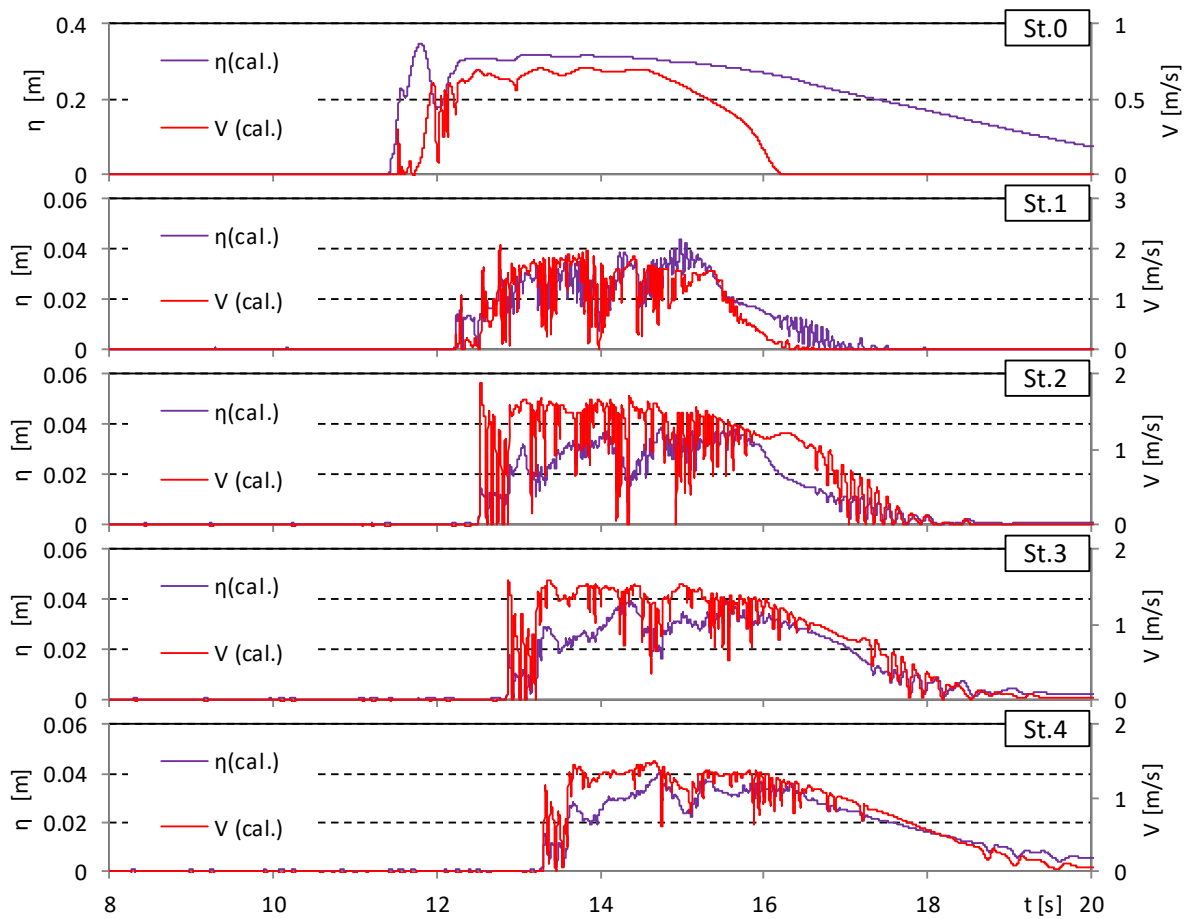


図- 5.3.17 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd40)

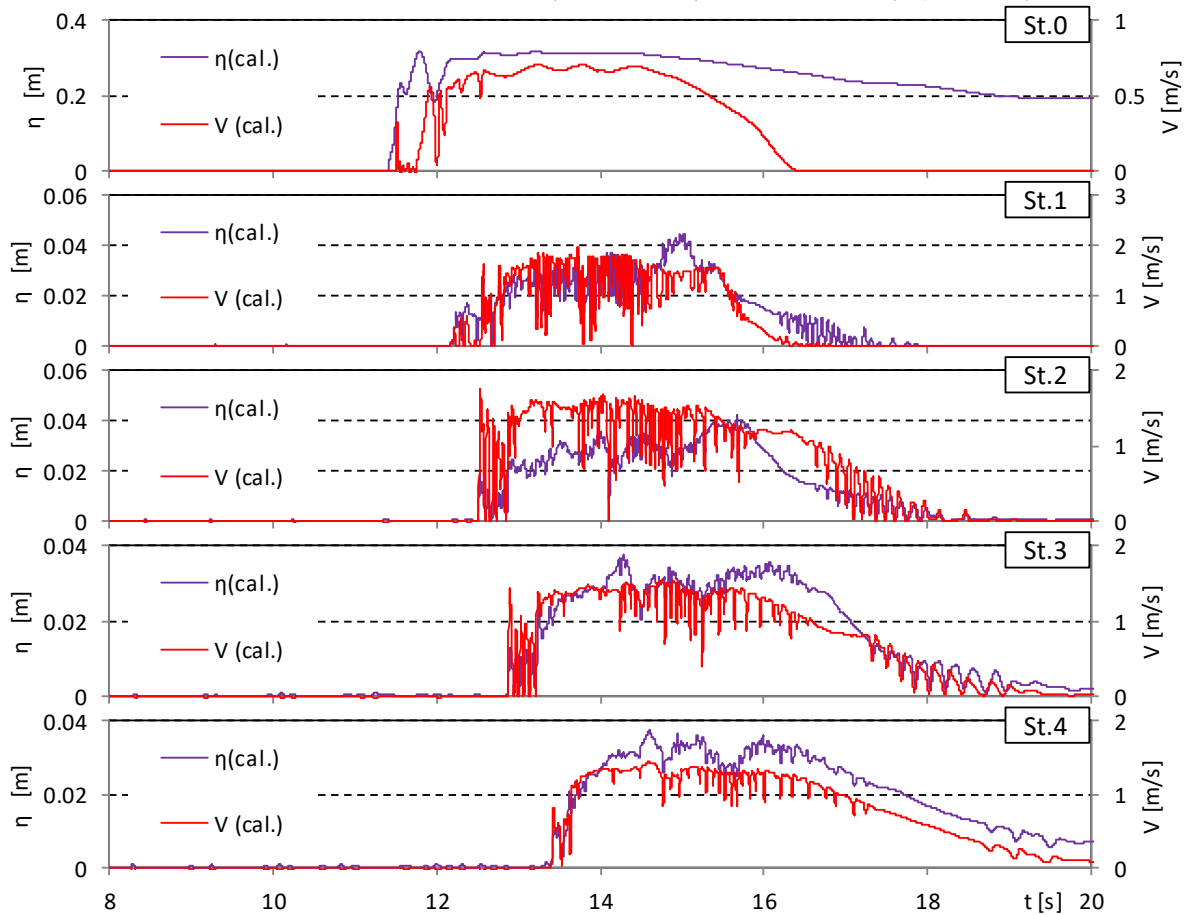


図- 5.3.17 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0m, Wd41)

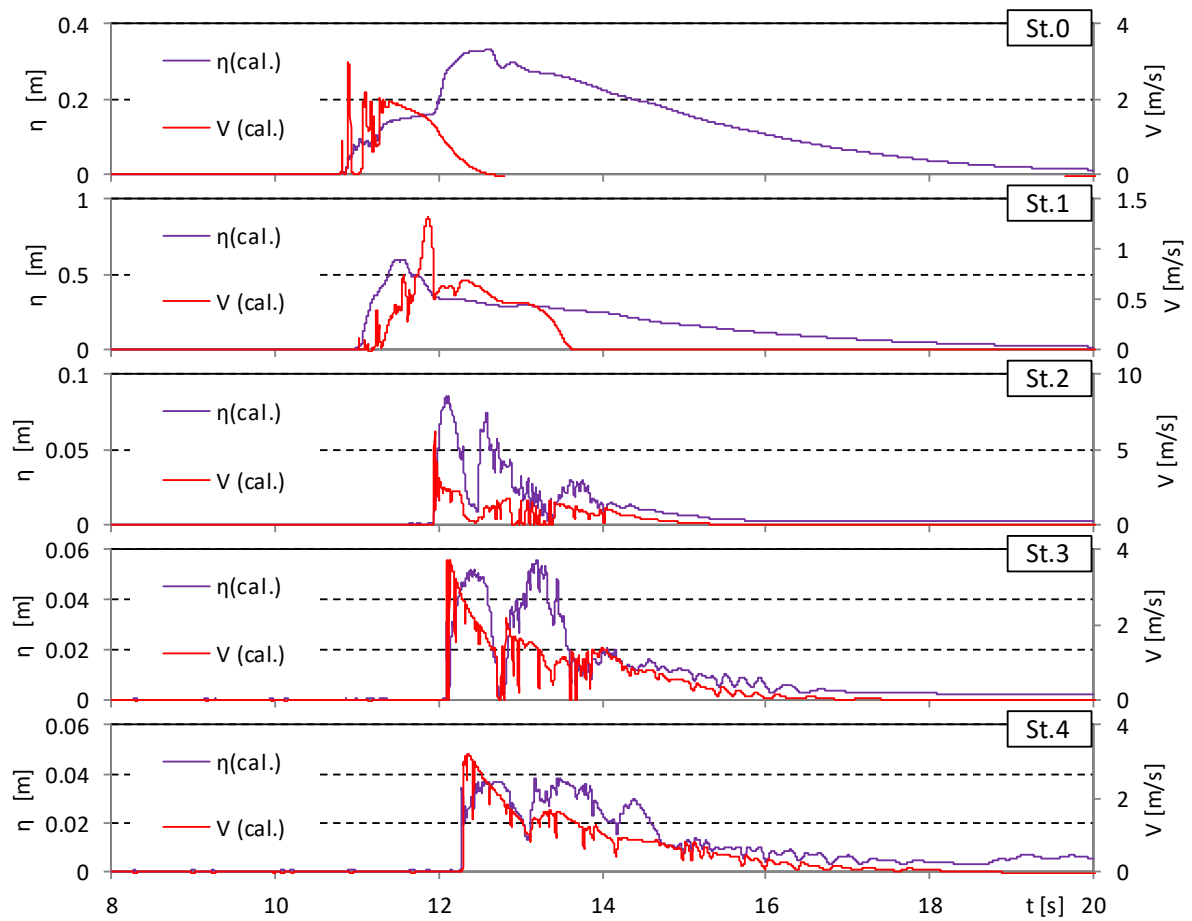


図-5.3.18 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd10)

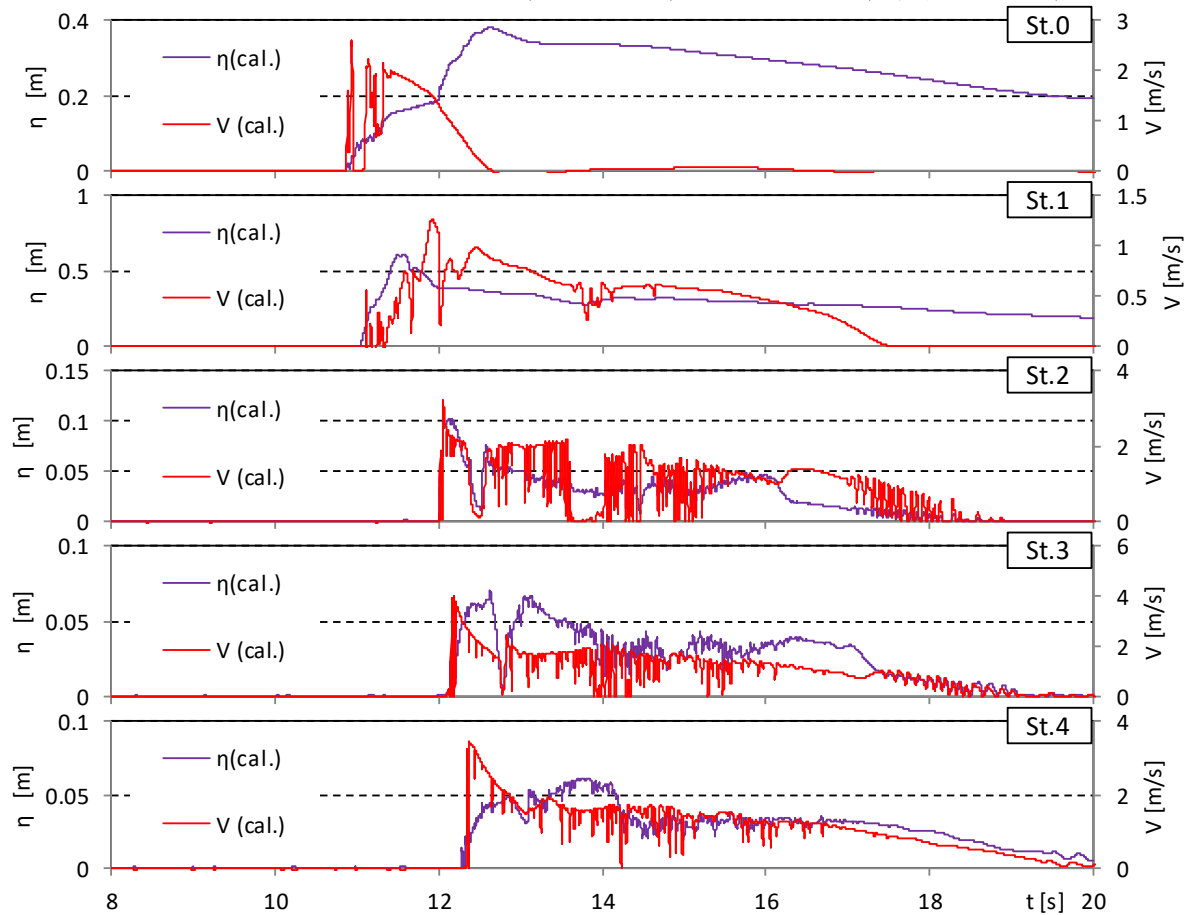


図-5.3.18 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd11)

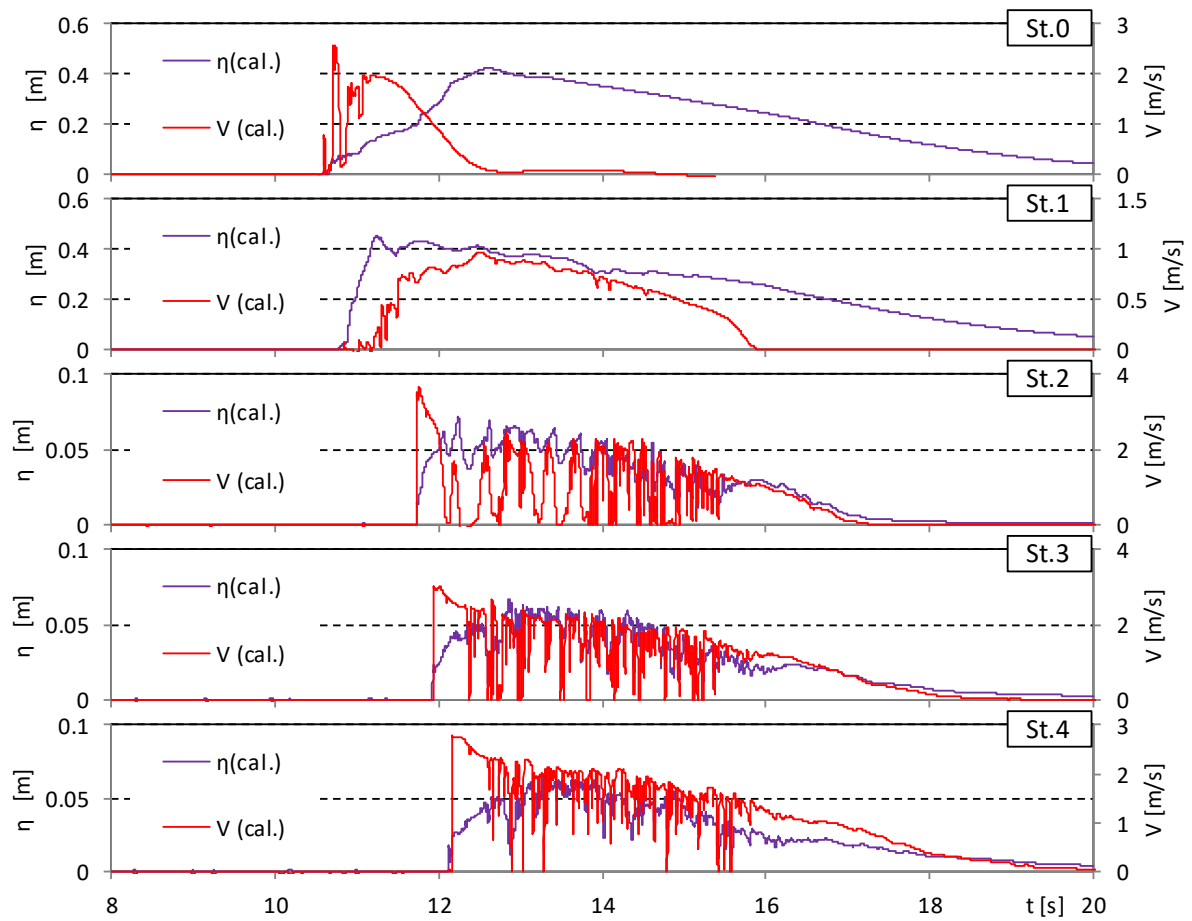


図-5.3.18 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd20)

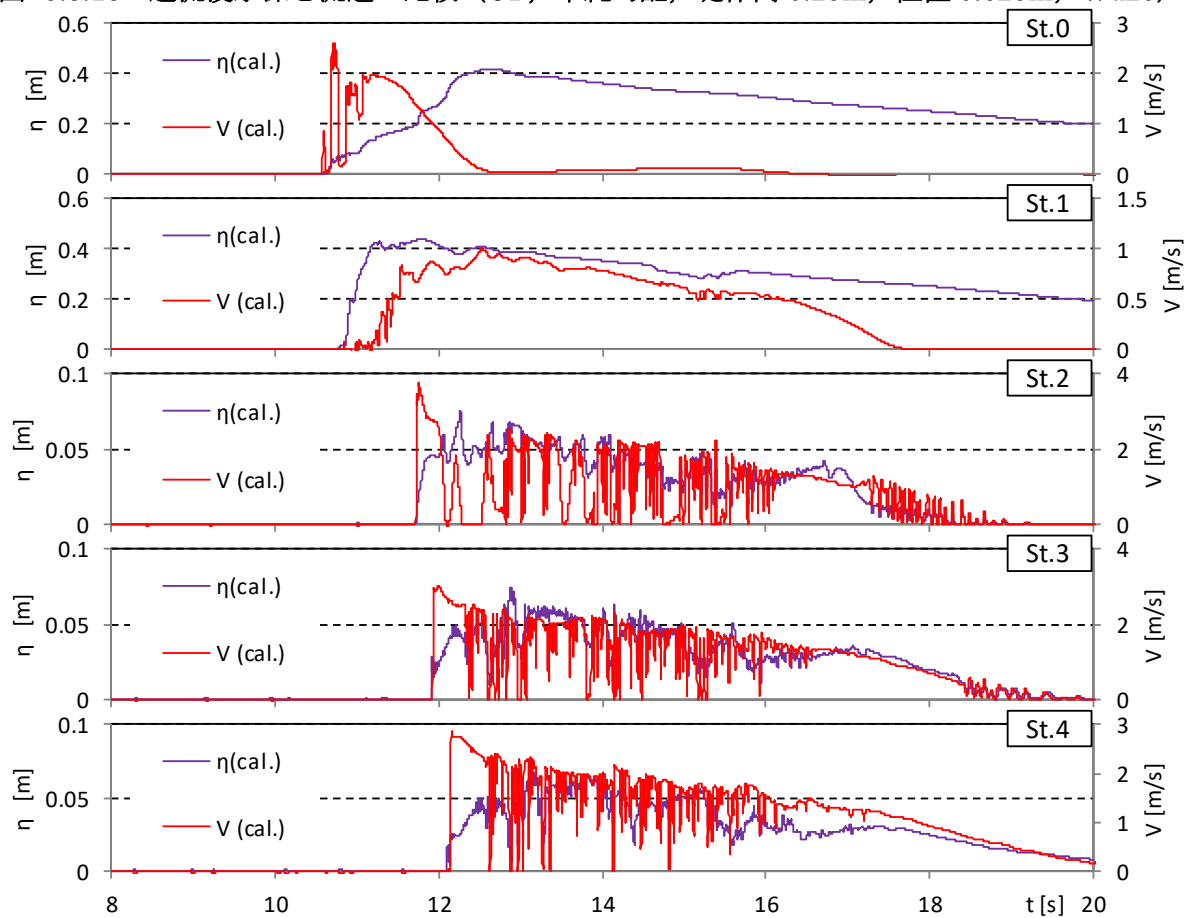


図-5.3.18 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd21)

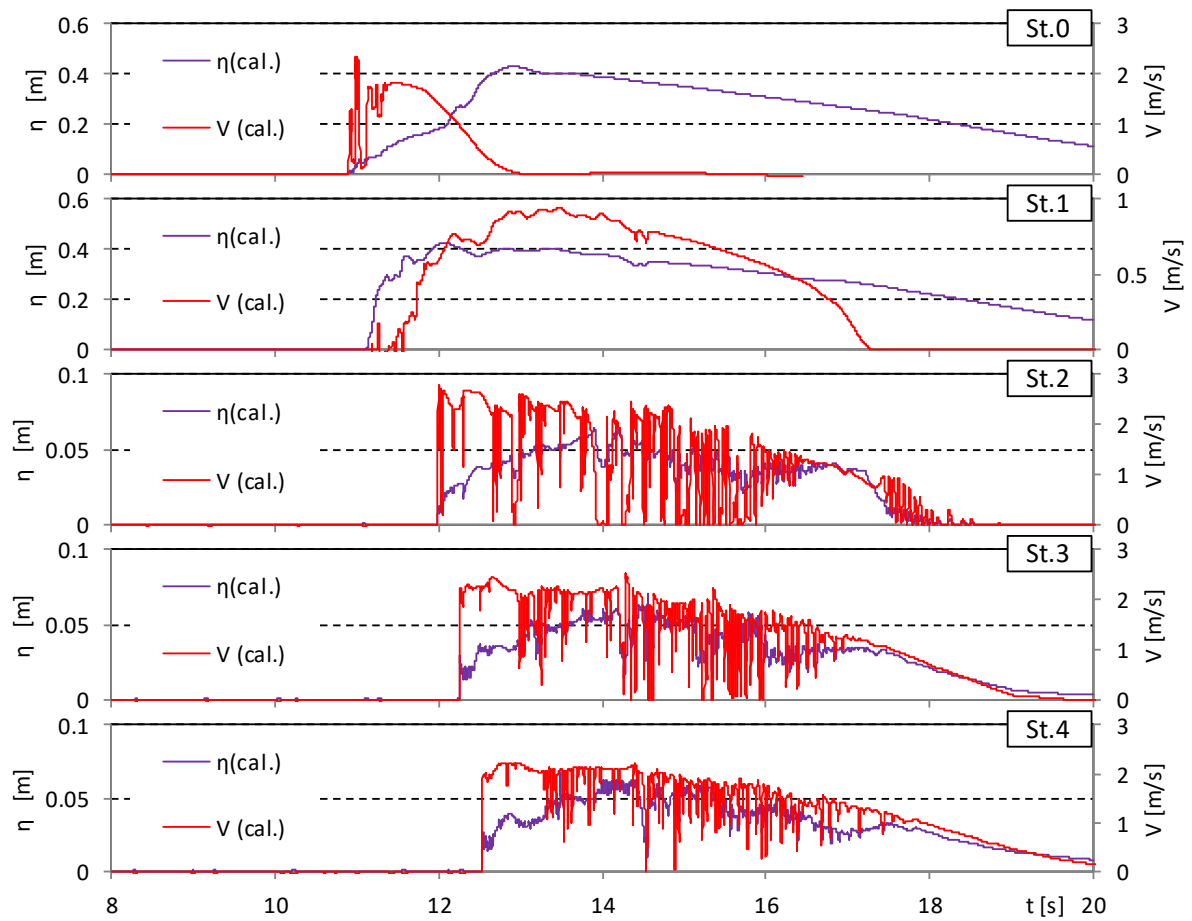


図-5.3.18 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd30)

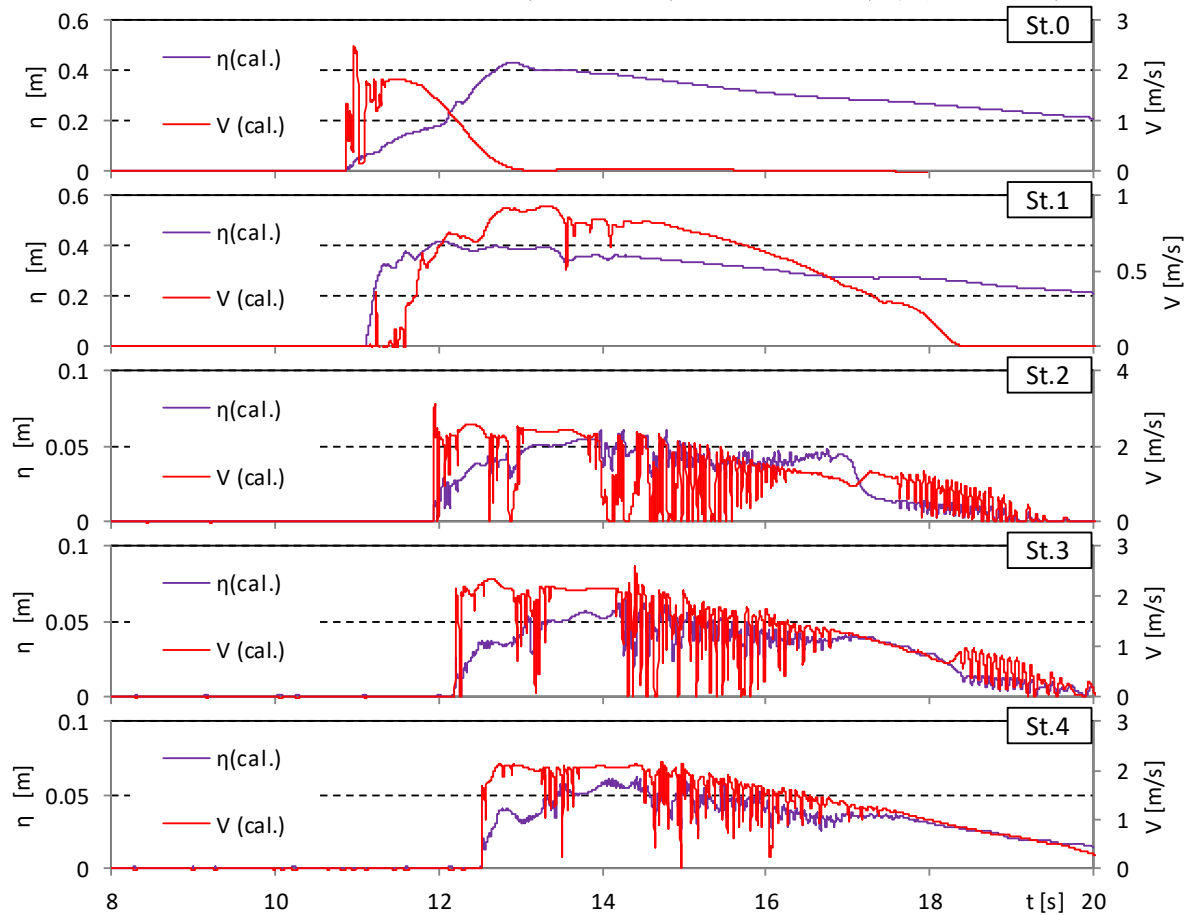


図-5.3.18 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd31)

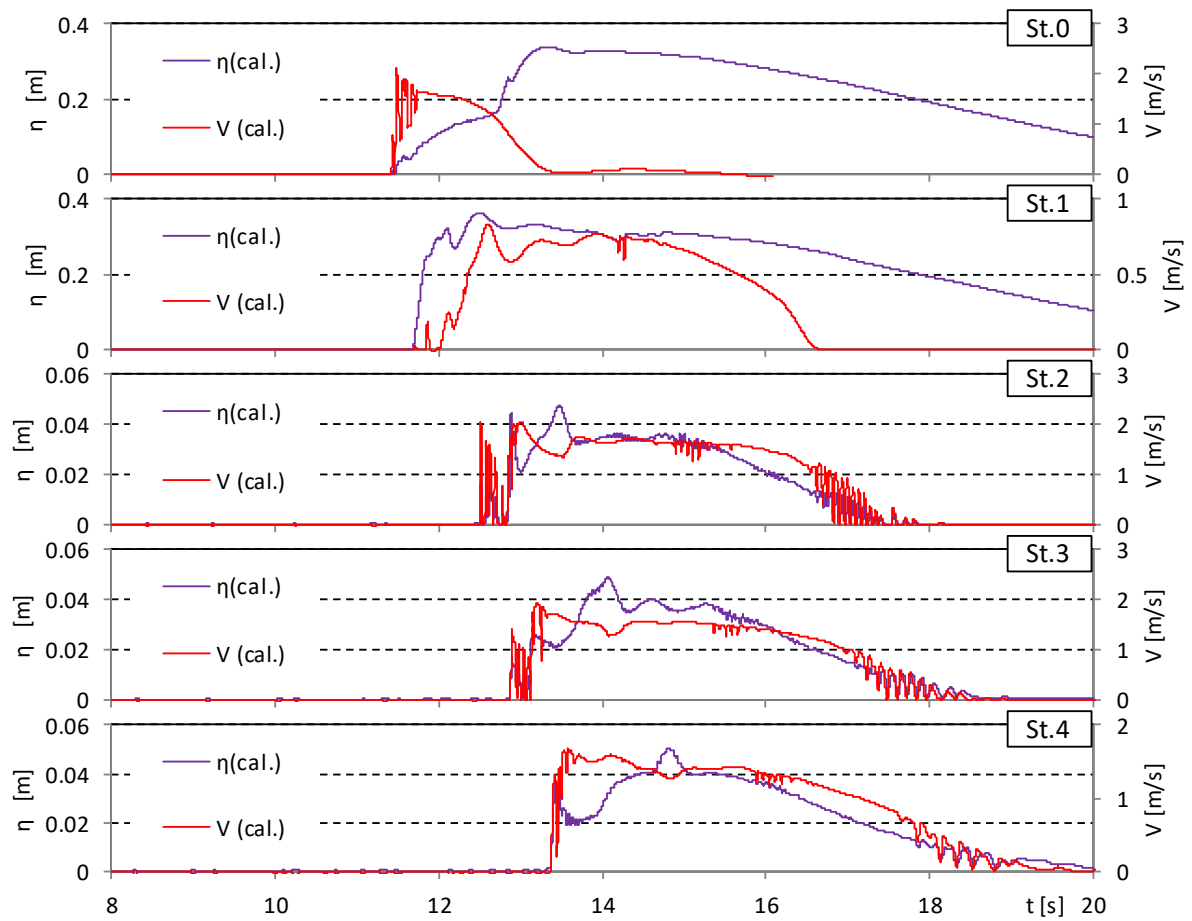


図- 5.3.18 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd40)

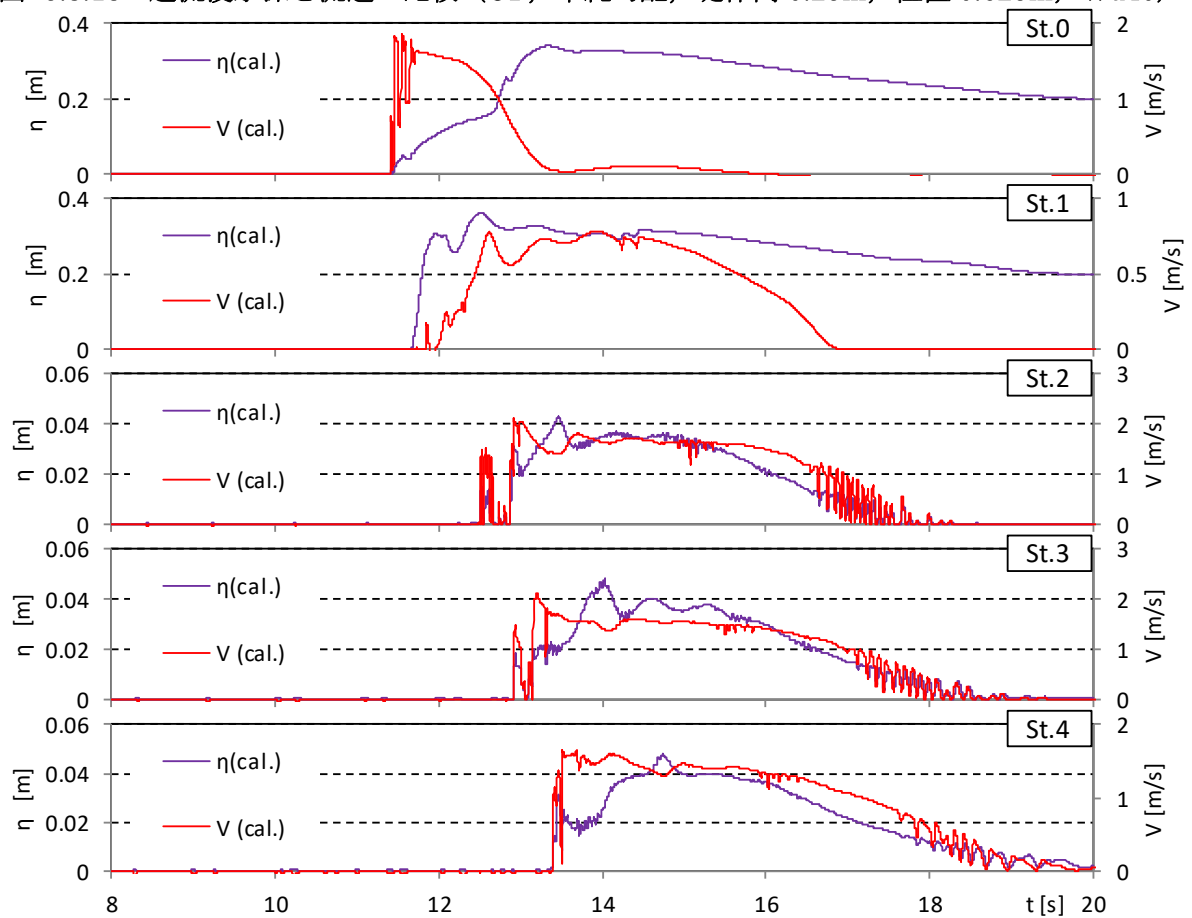


図- 5.3.18 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd41)

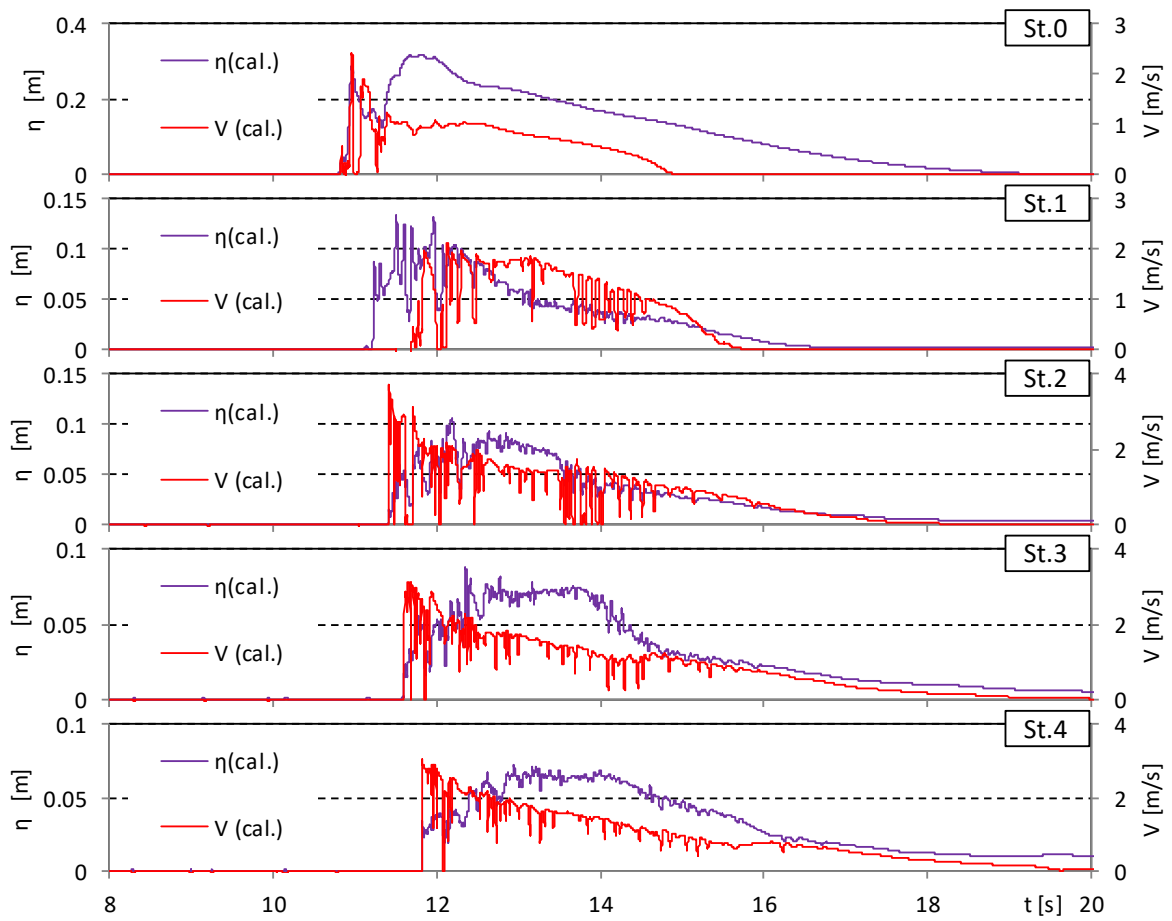


図- 5.3.19 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd10)

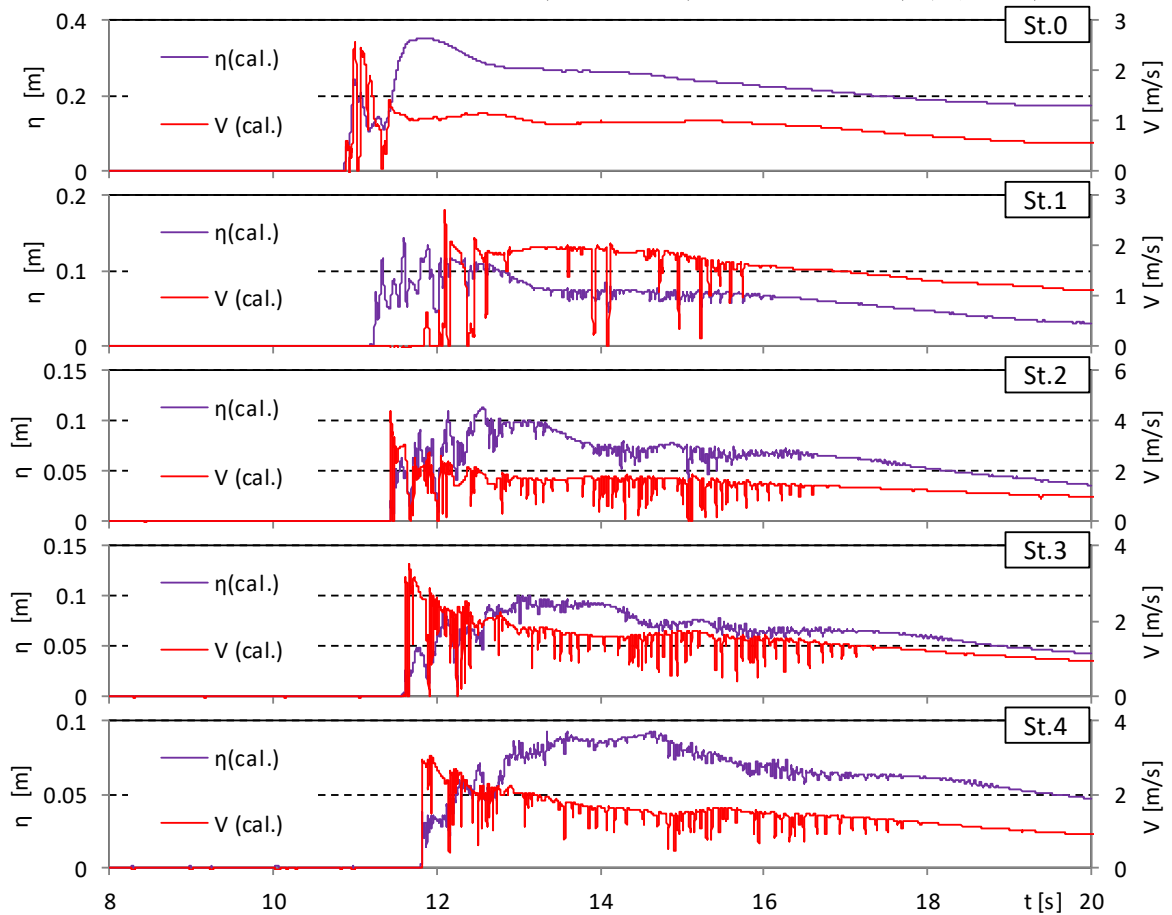


図- 5.3.19 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd11)

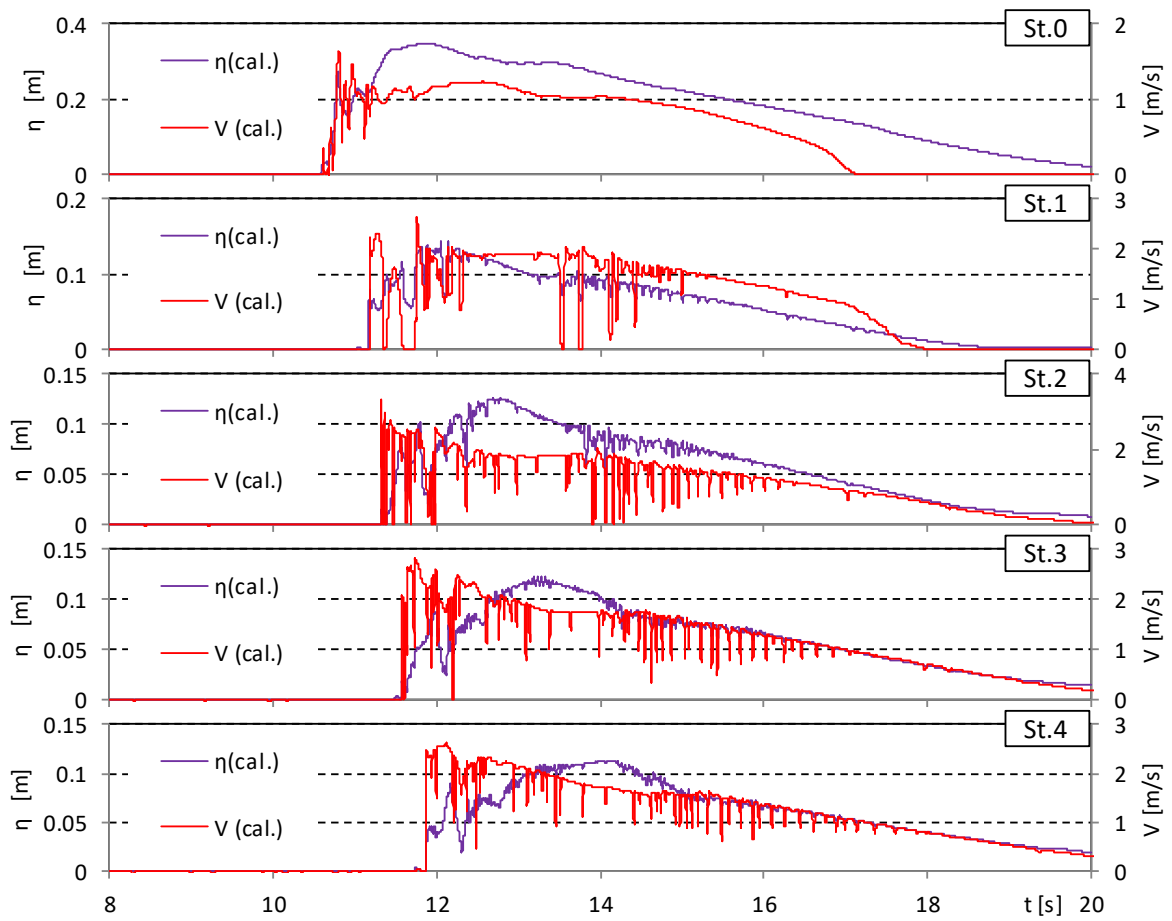


図- 5.3.19 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd20)

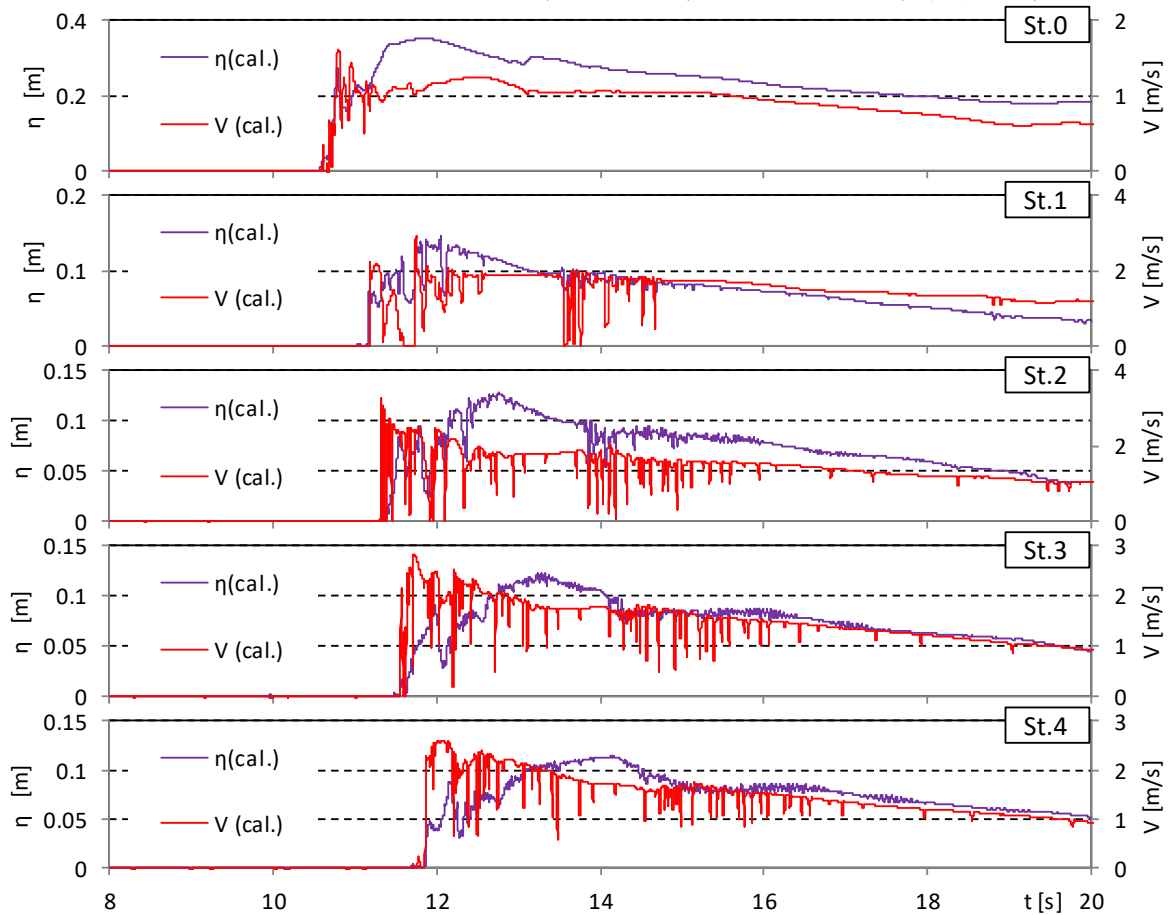


図- 5.3.19 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd21)

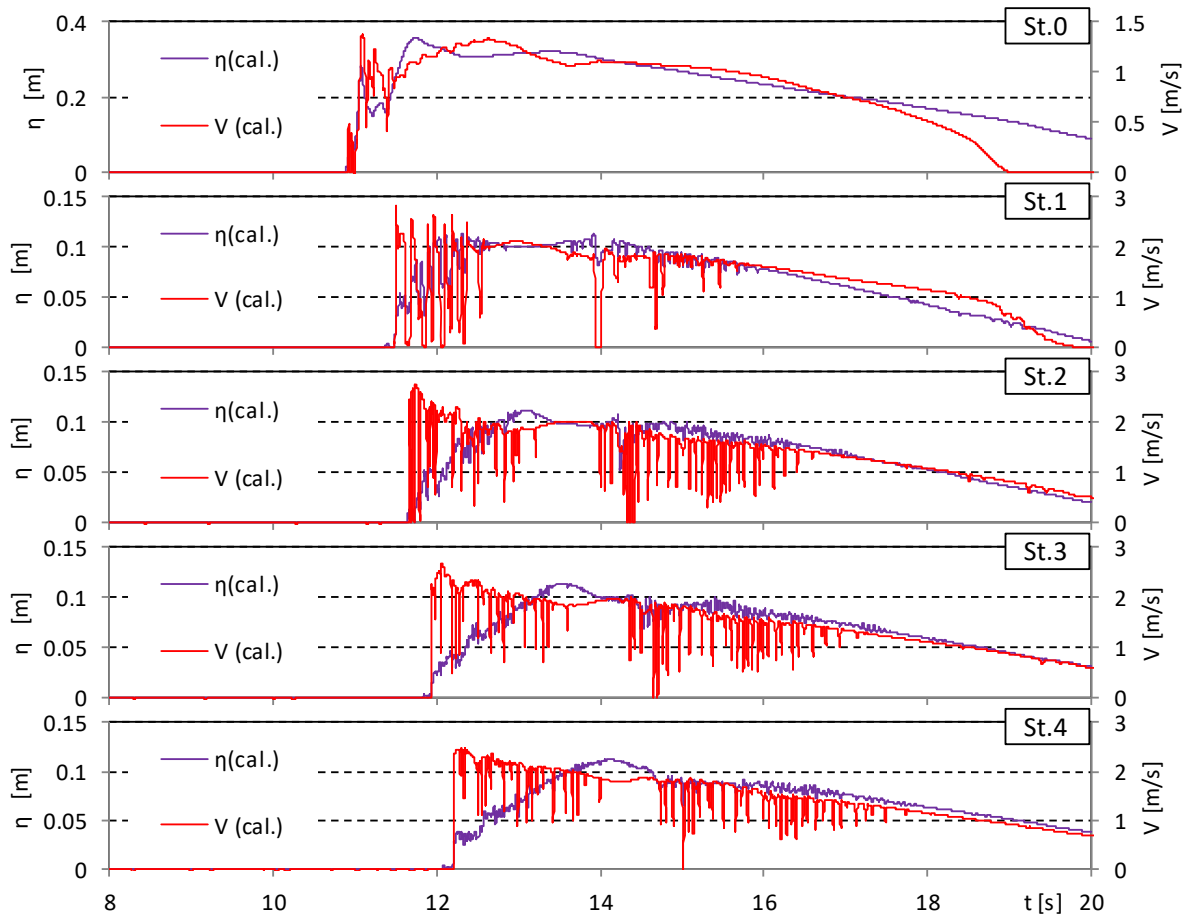


図- 5.3.19 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd30)

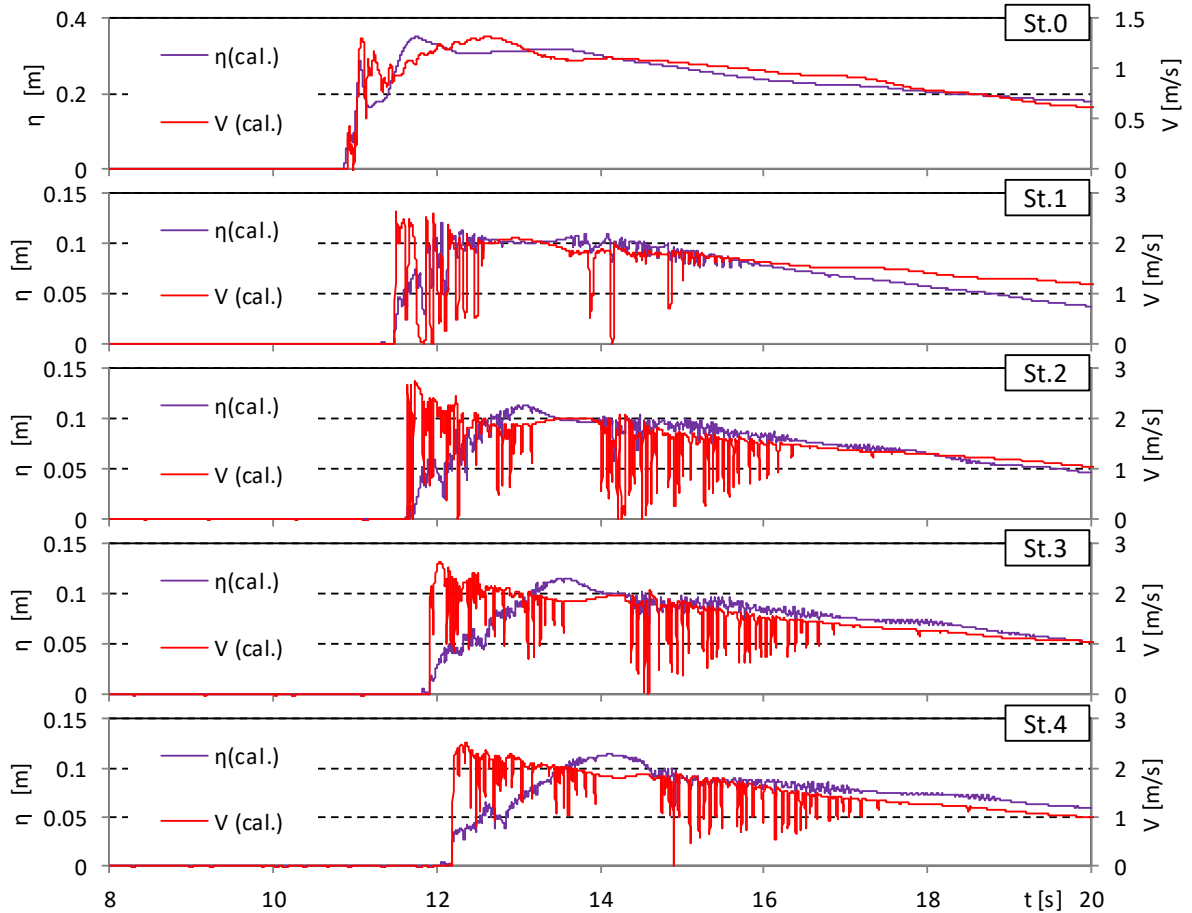


図- 5.3.19 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd31)

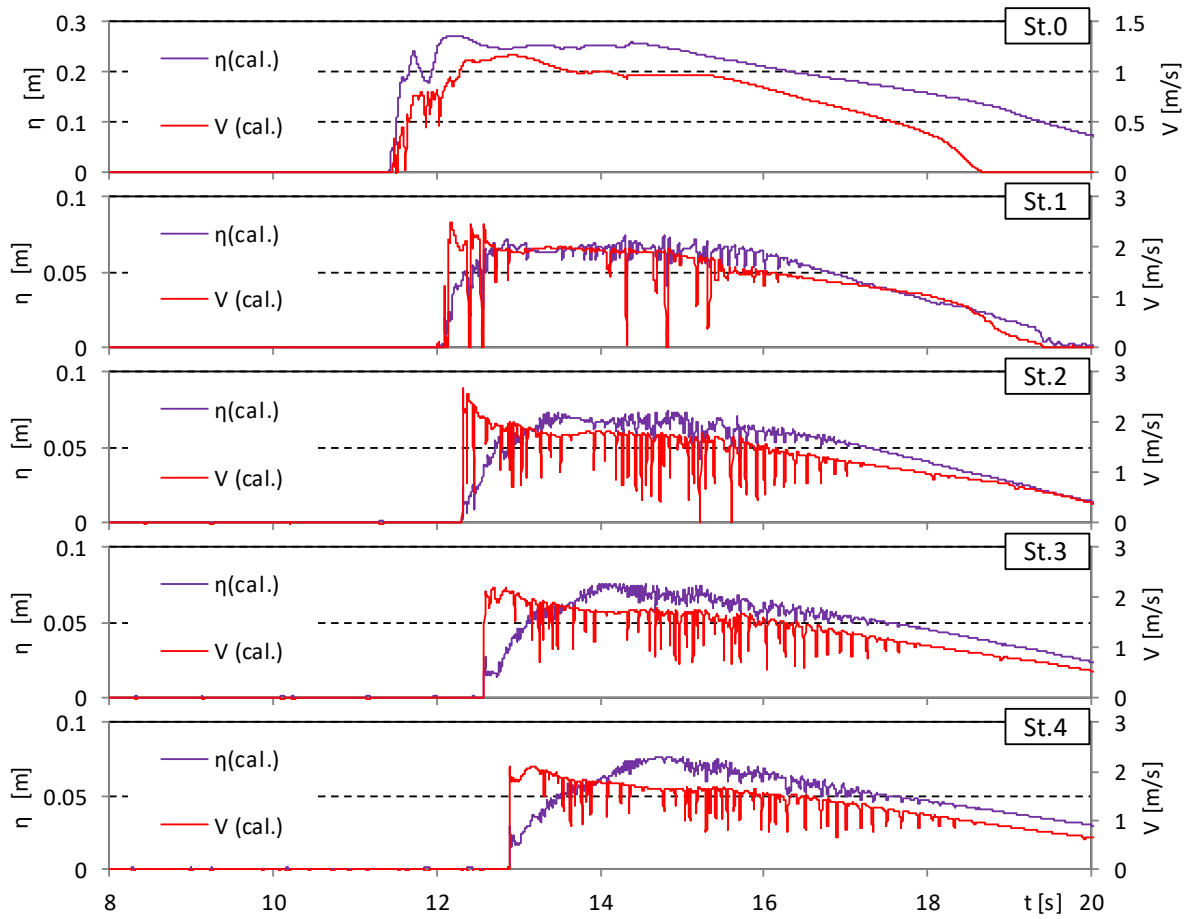


図- 5.3.19 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd40)

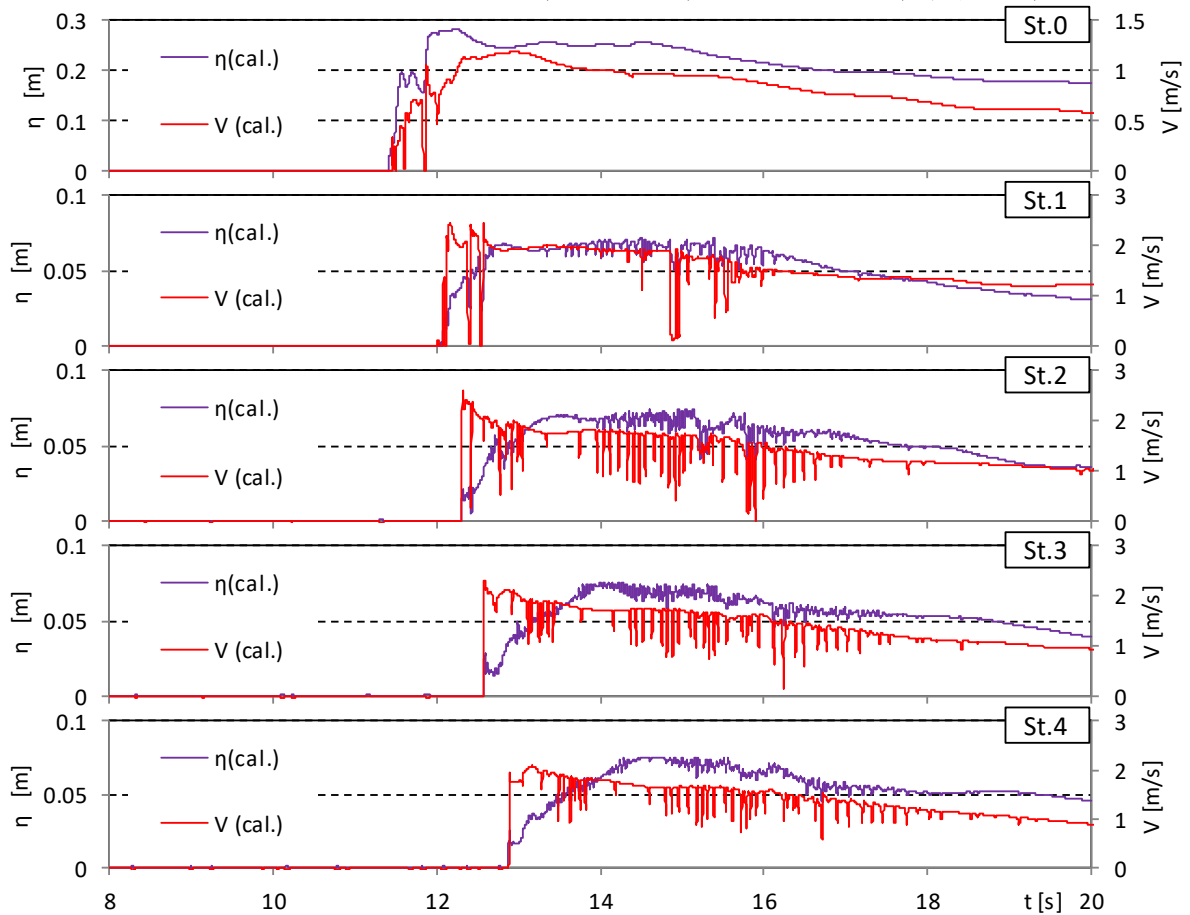


図- 5.3.19 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0m, Wd41)

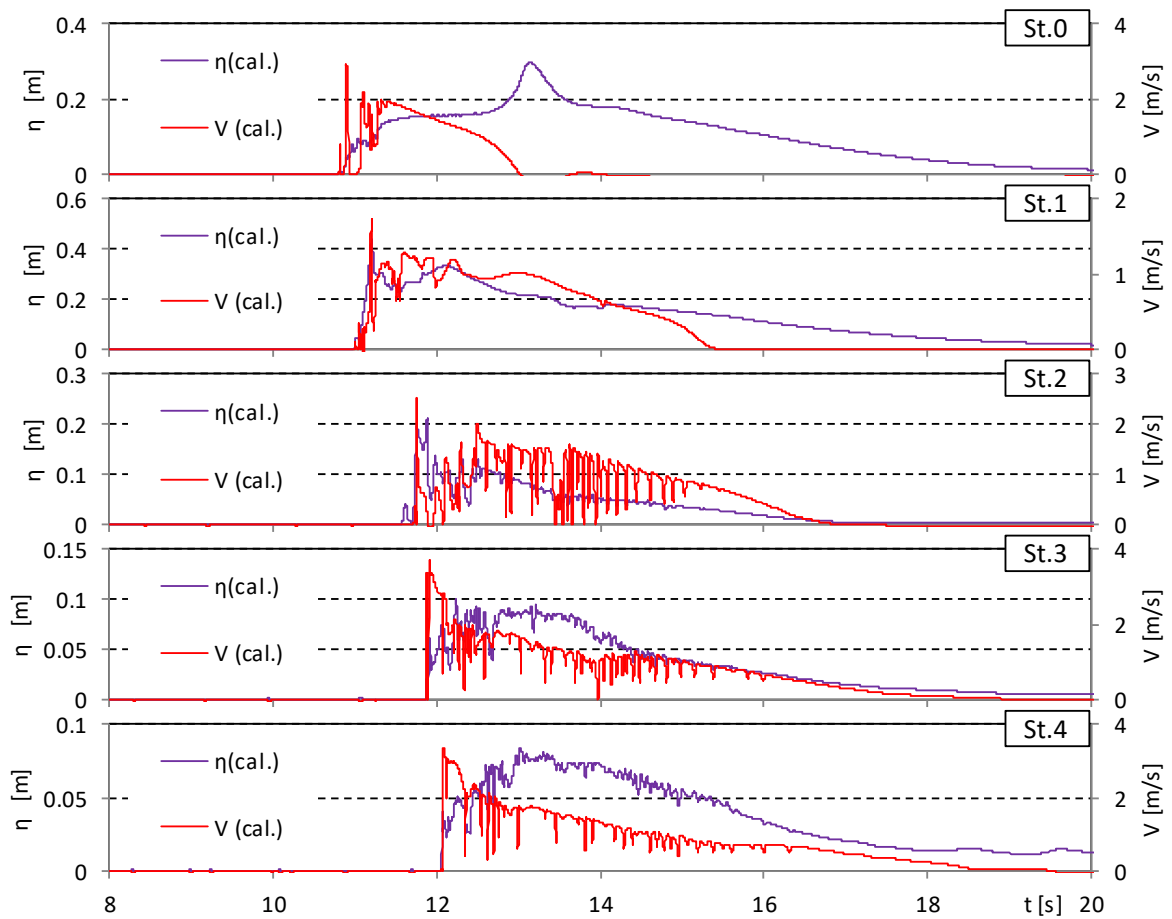


図- 5.3.20 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd10)

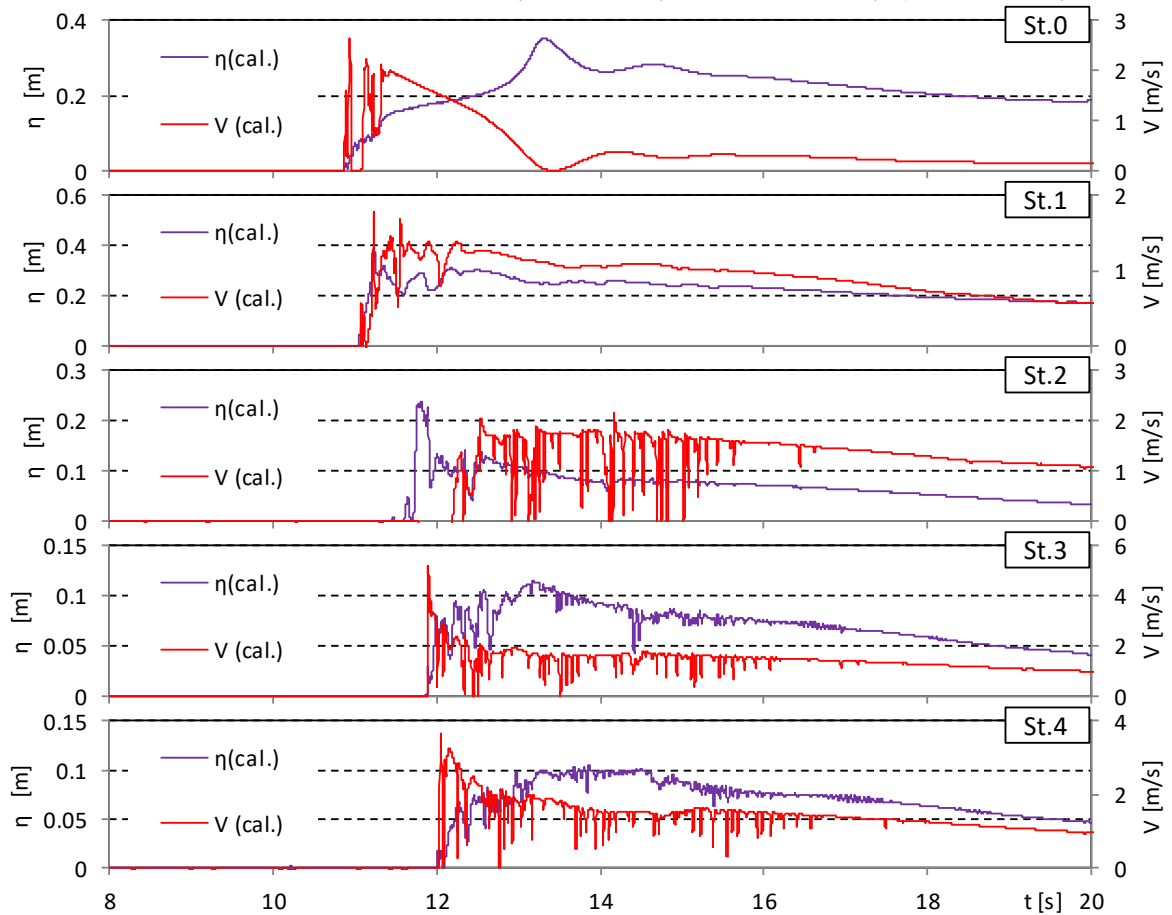


図- 5.3.20 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd11)

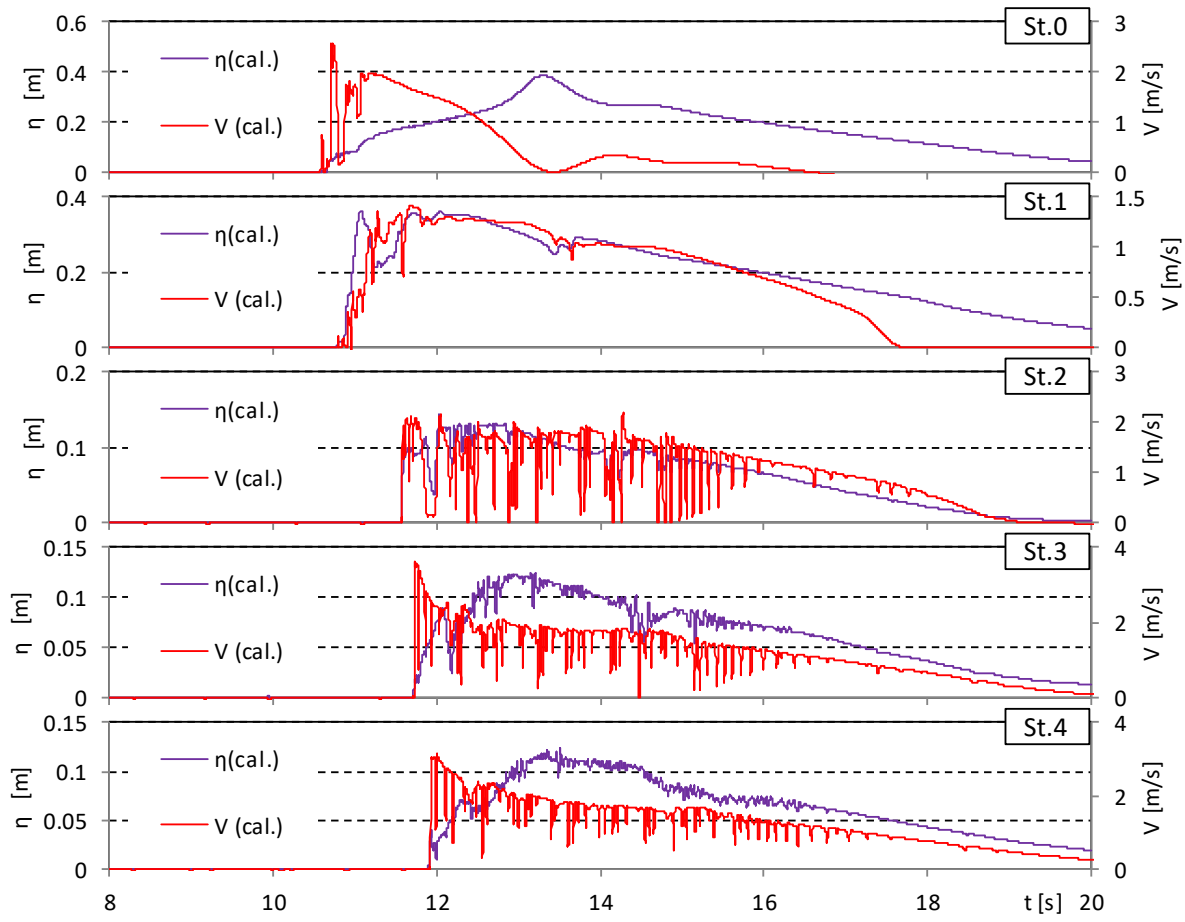


図- 5.3.20 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd20)

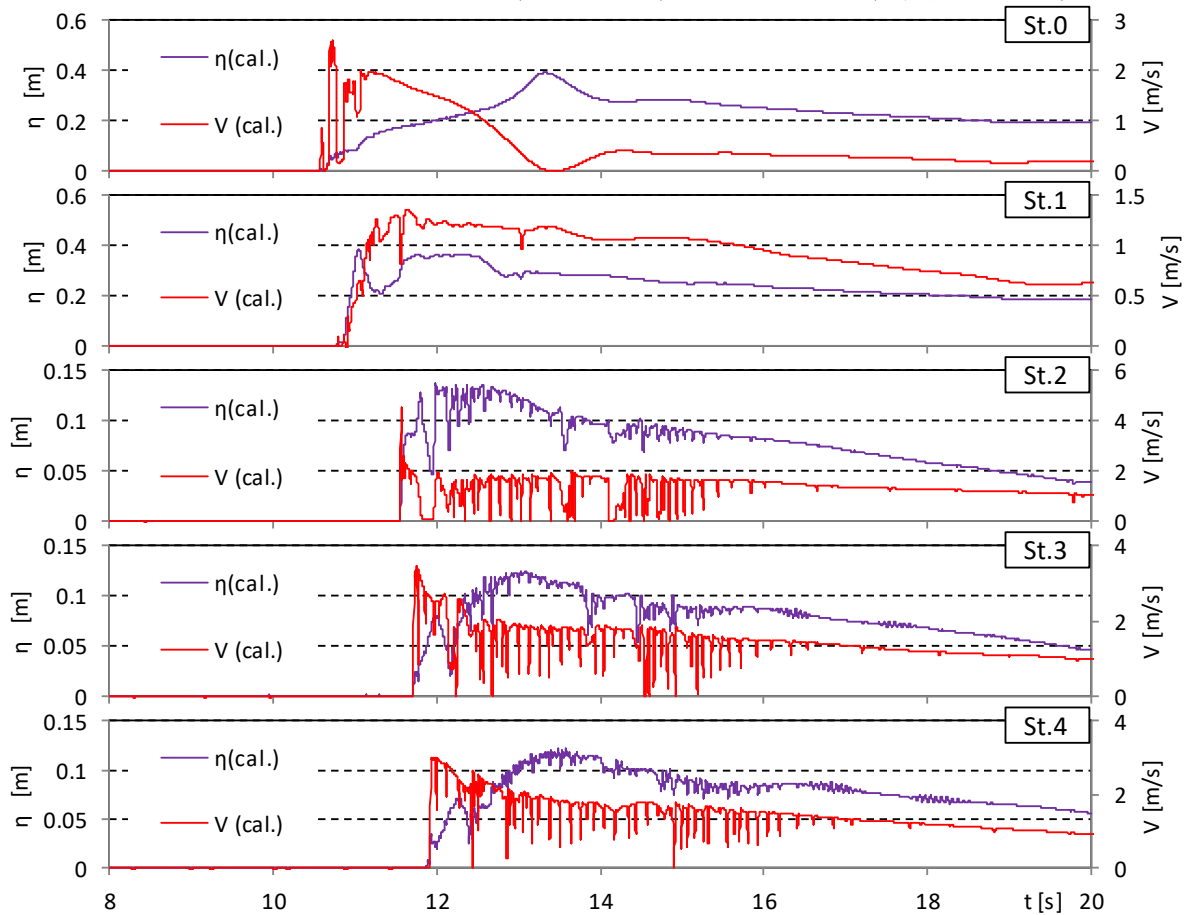


図- 5.3.20 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd21)

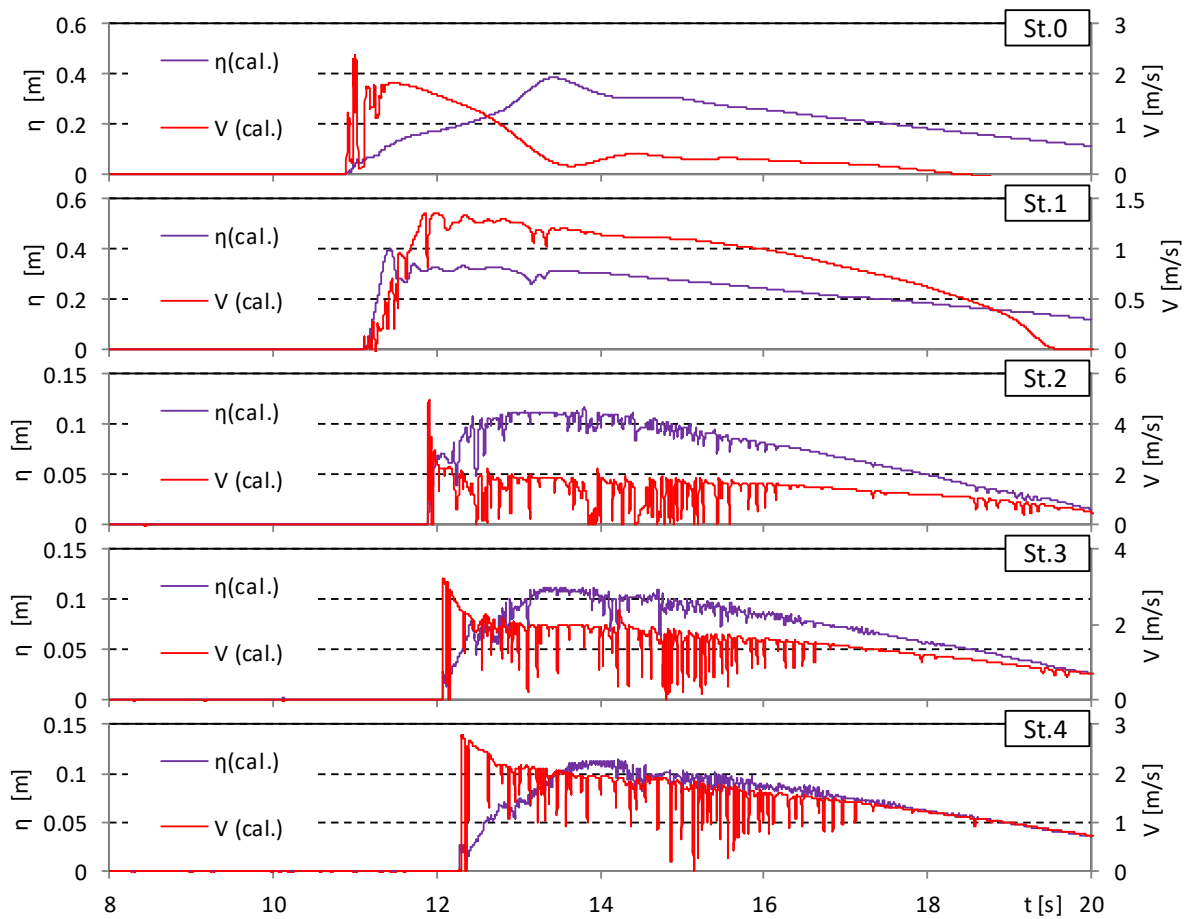


図- 5.3.20 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd30)

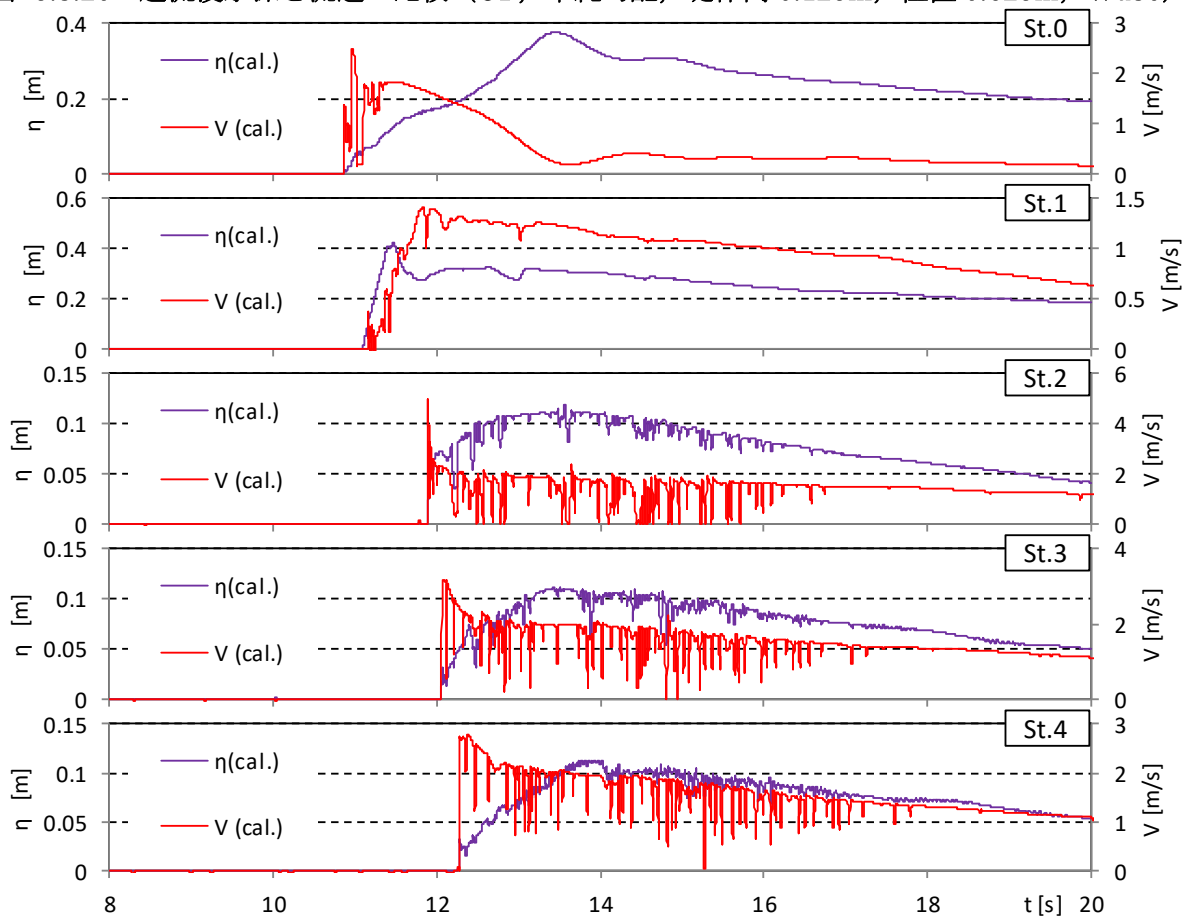


図- 5.3.20 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd31)

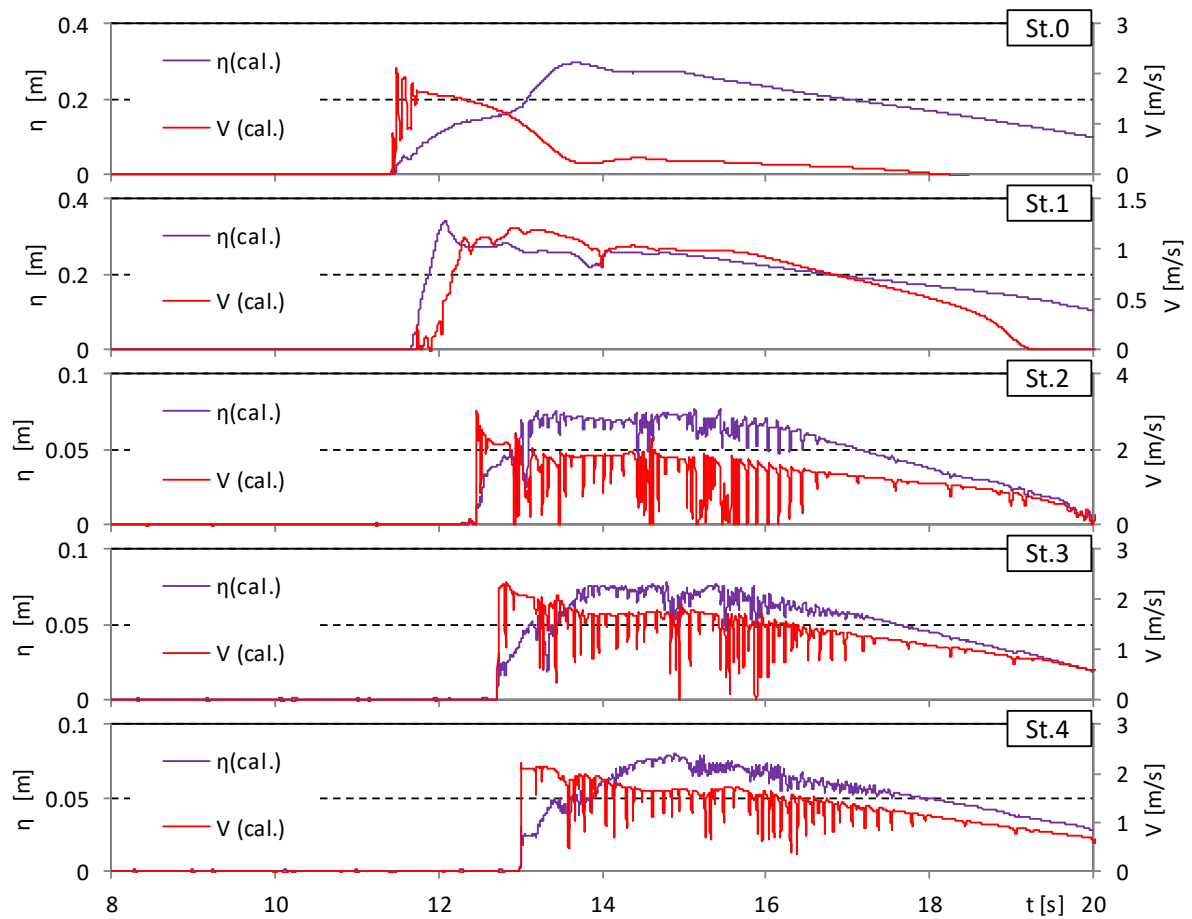


図- 5.3.20 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd40)

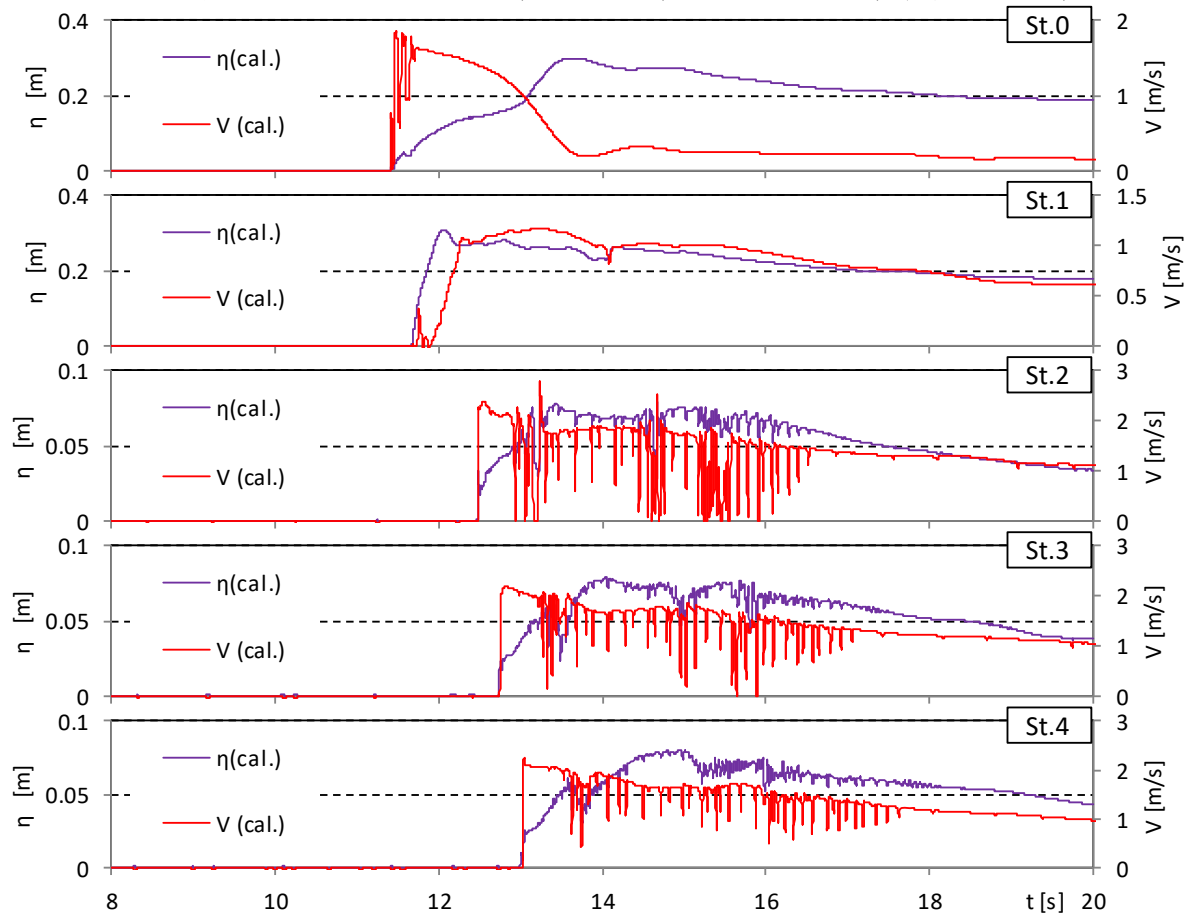


図- 5.3.20 越流浸水深と流速の比較 (OF, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd41)

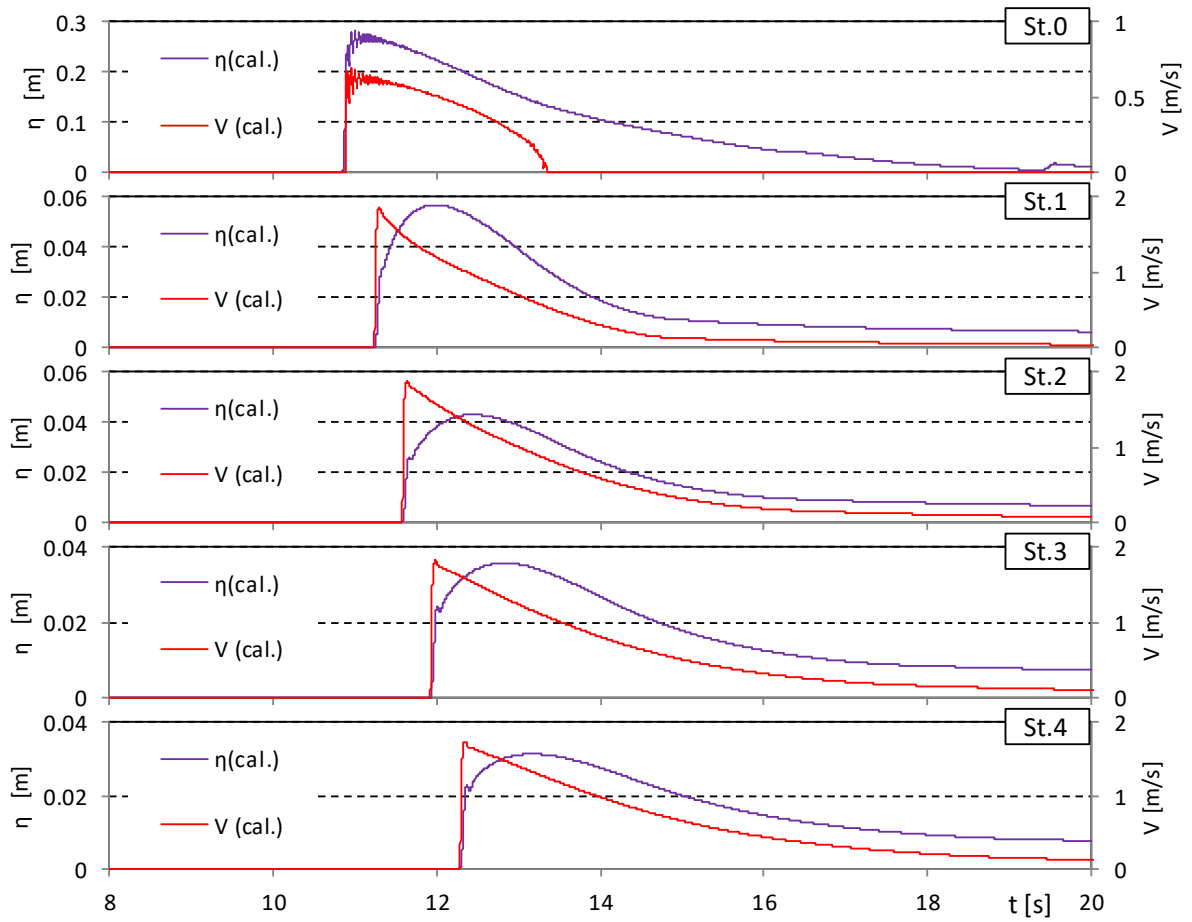


図- 5.3.21 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.m, Wd10)

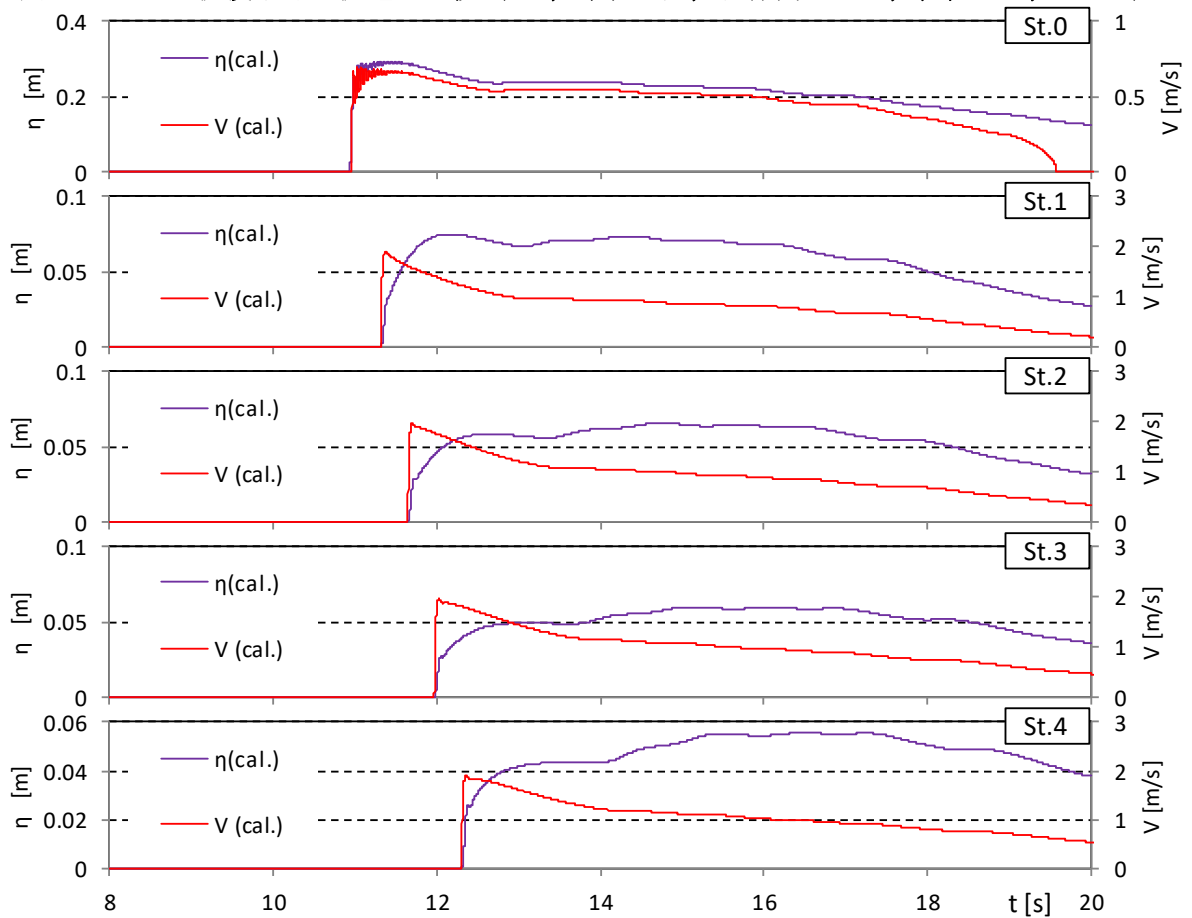


図- 5.3.21 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.m, Wd11)

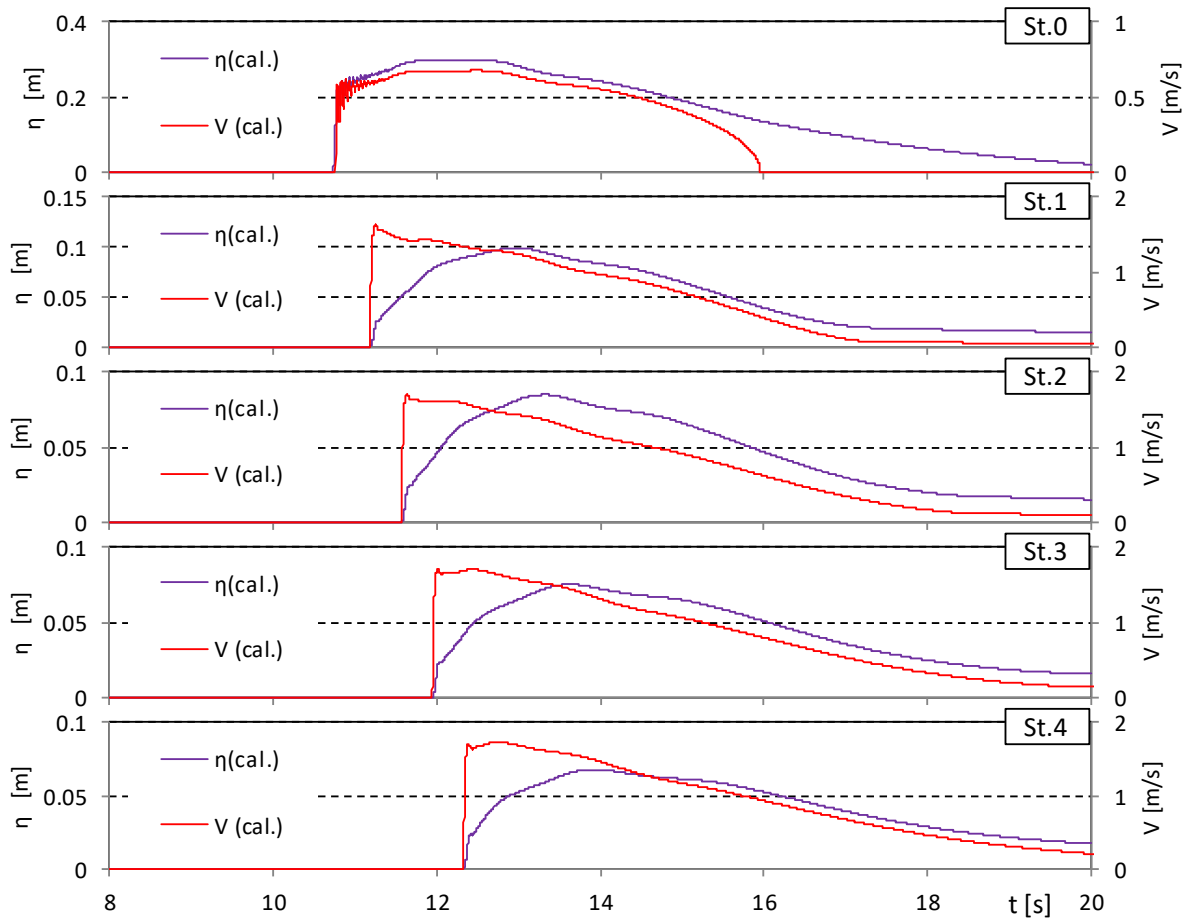


図- 5.3.21 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.m, Wd20)

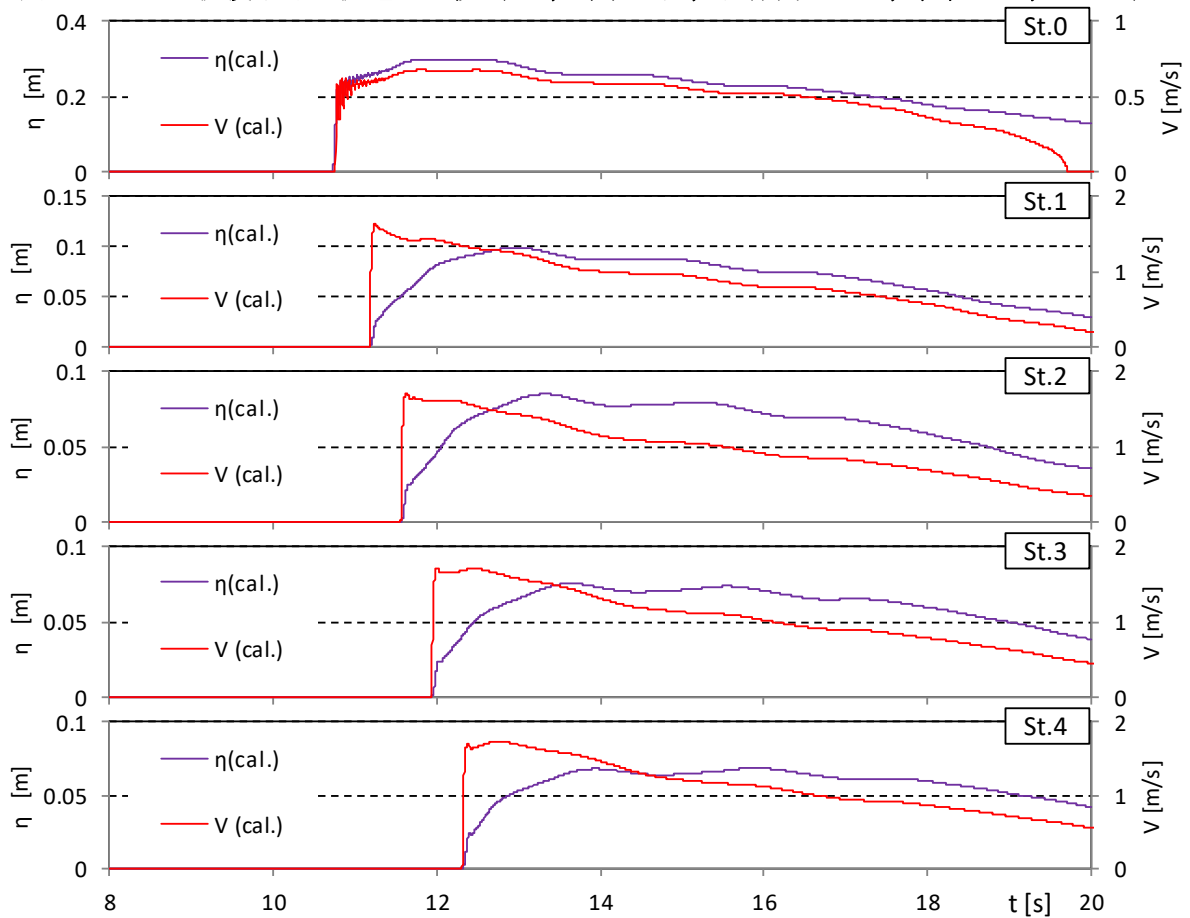


図- 5.3.21 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.m, Wd21)

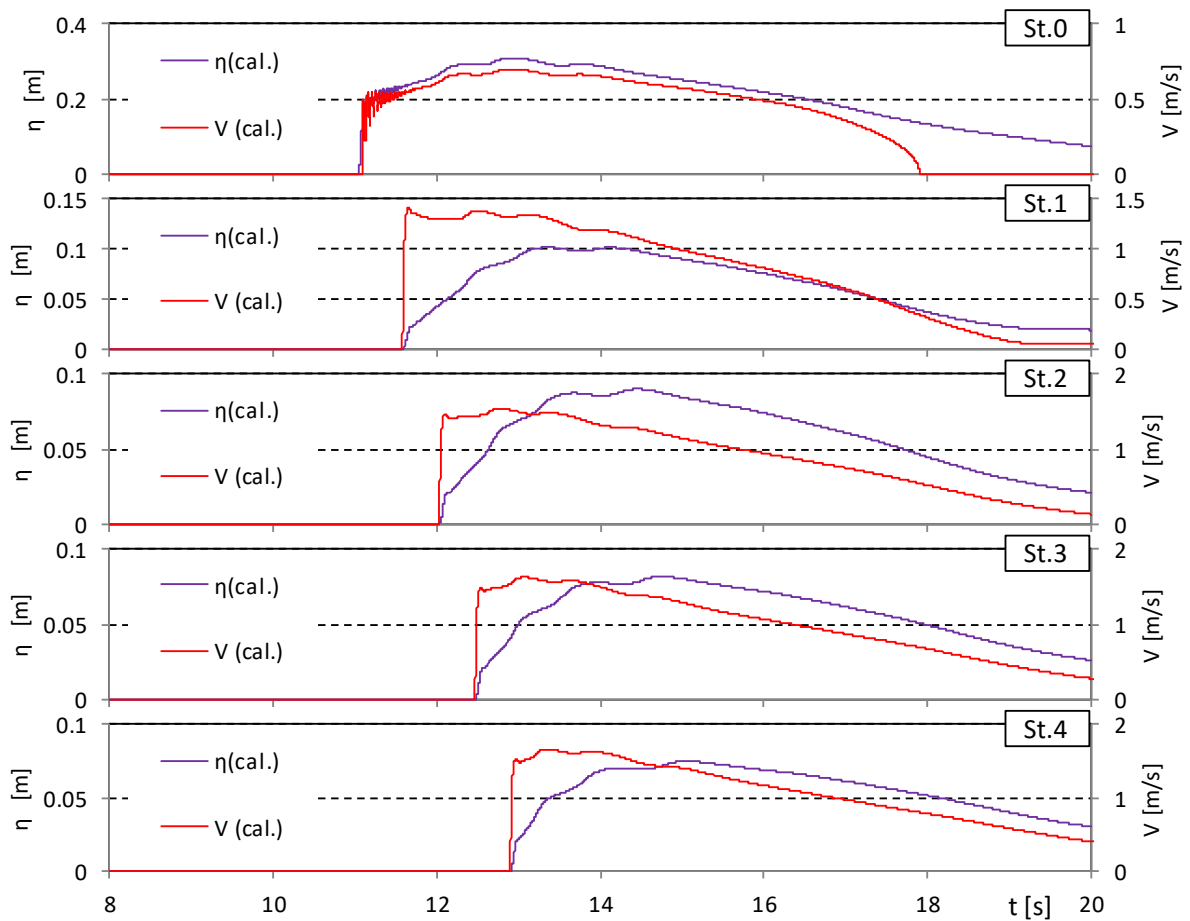


図- 5.3.21 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.m, Wd30)

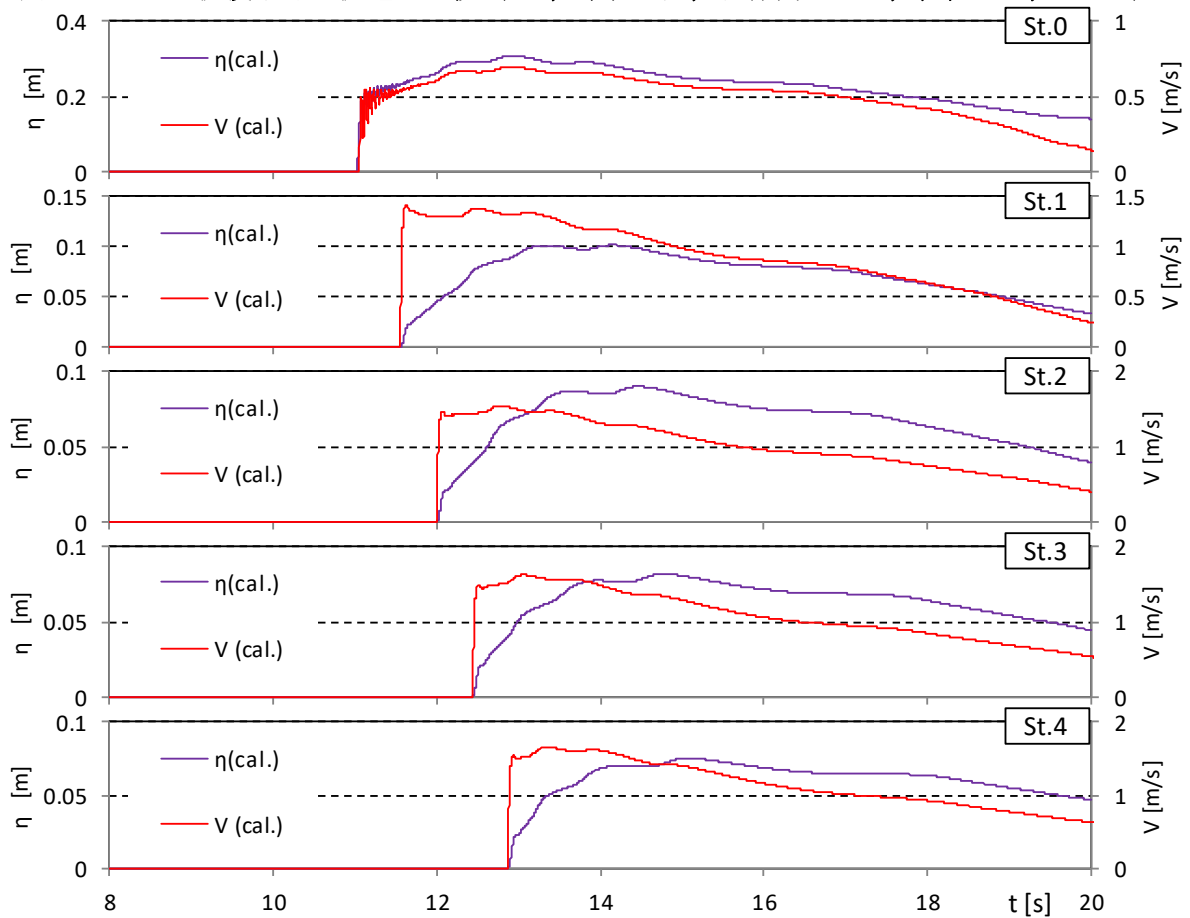


図- 5.3.21 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.m, Wd31)

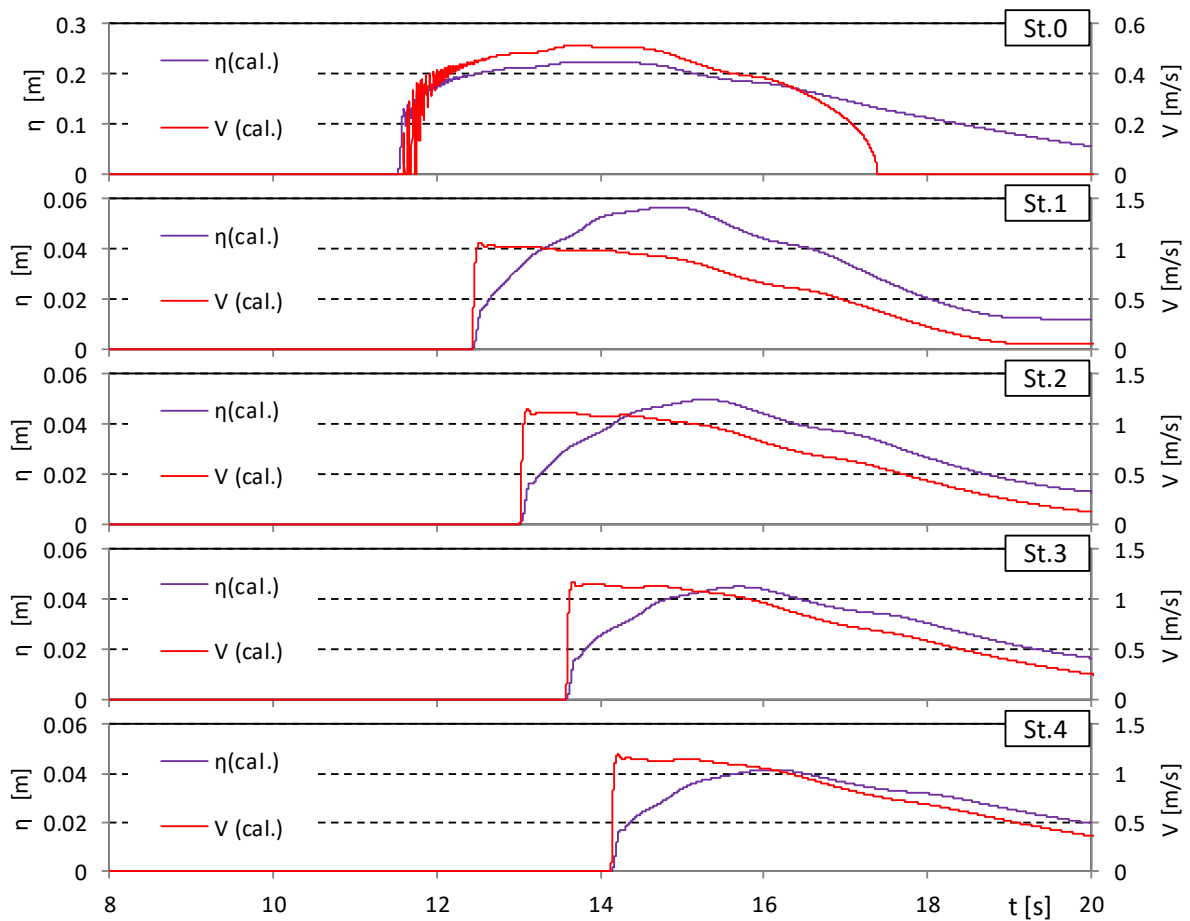


図- 5.3.21 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.m, Wd40)

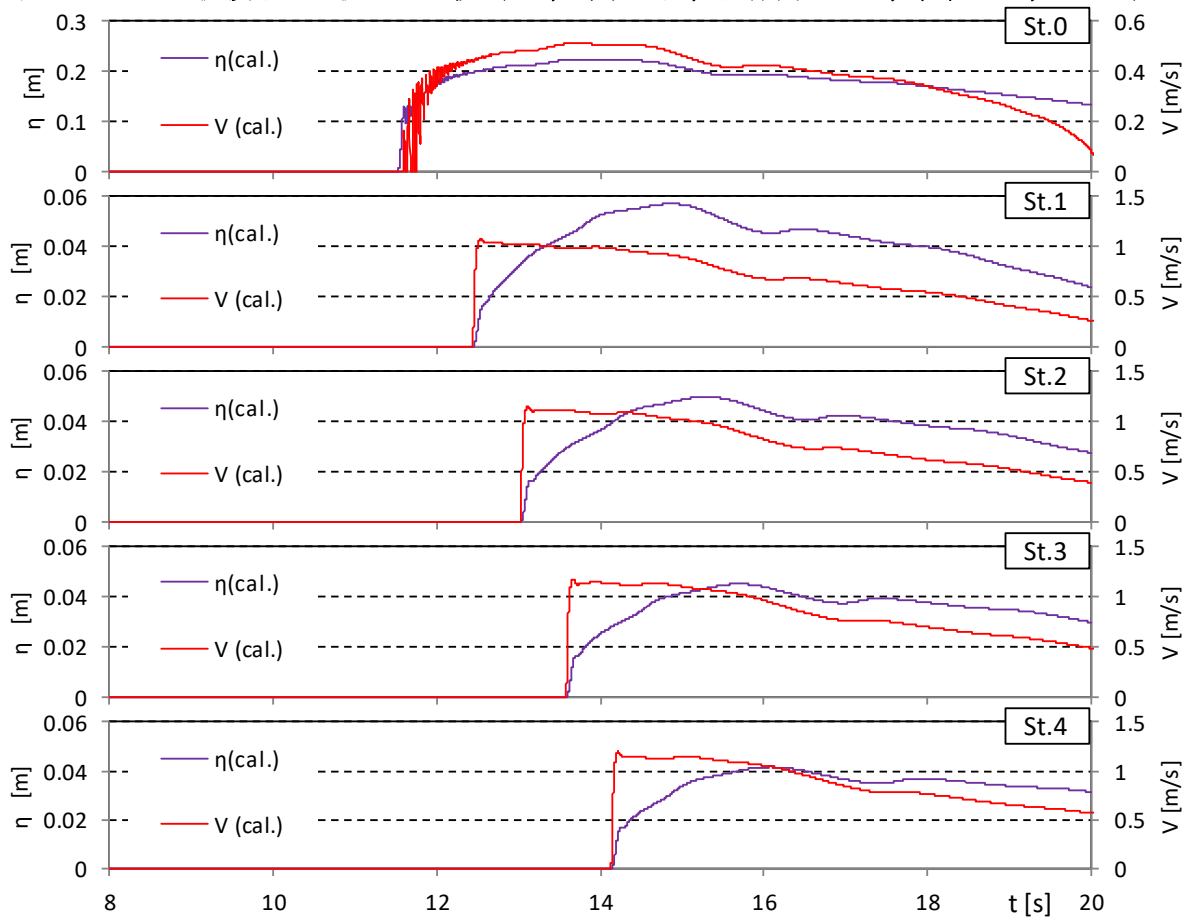


図- 5.3.21 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.m, Wd41)

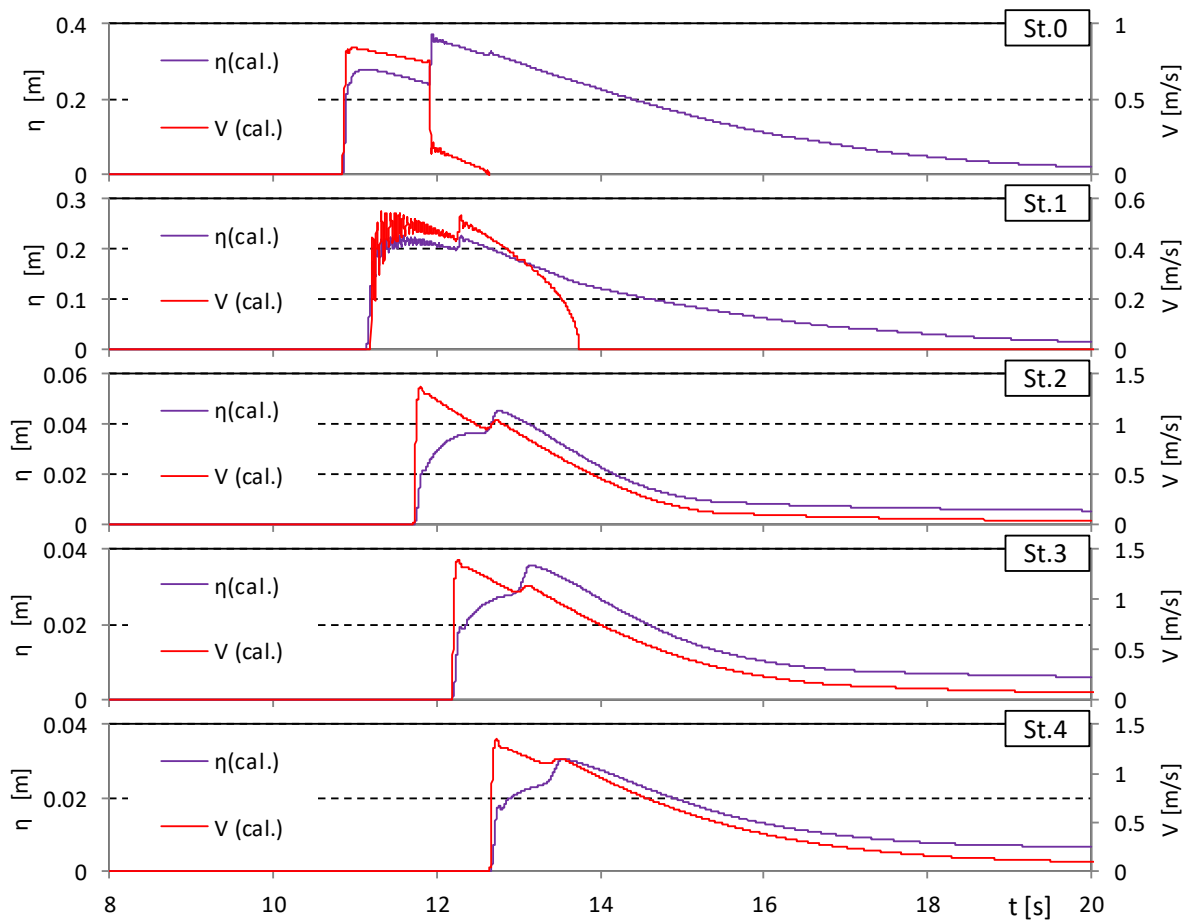


図- 5.3.22 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd10)

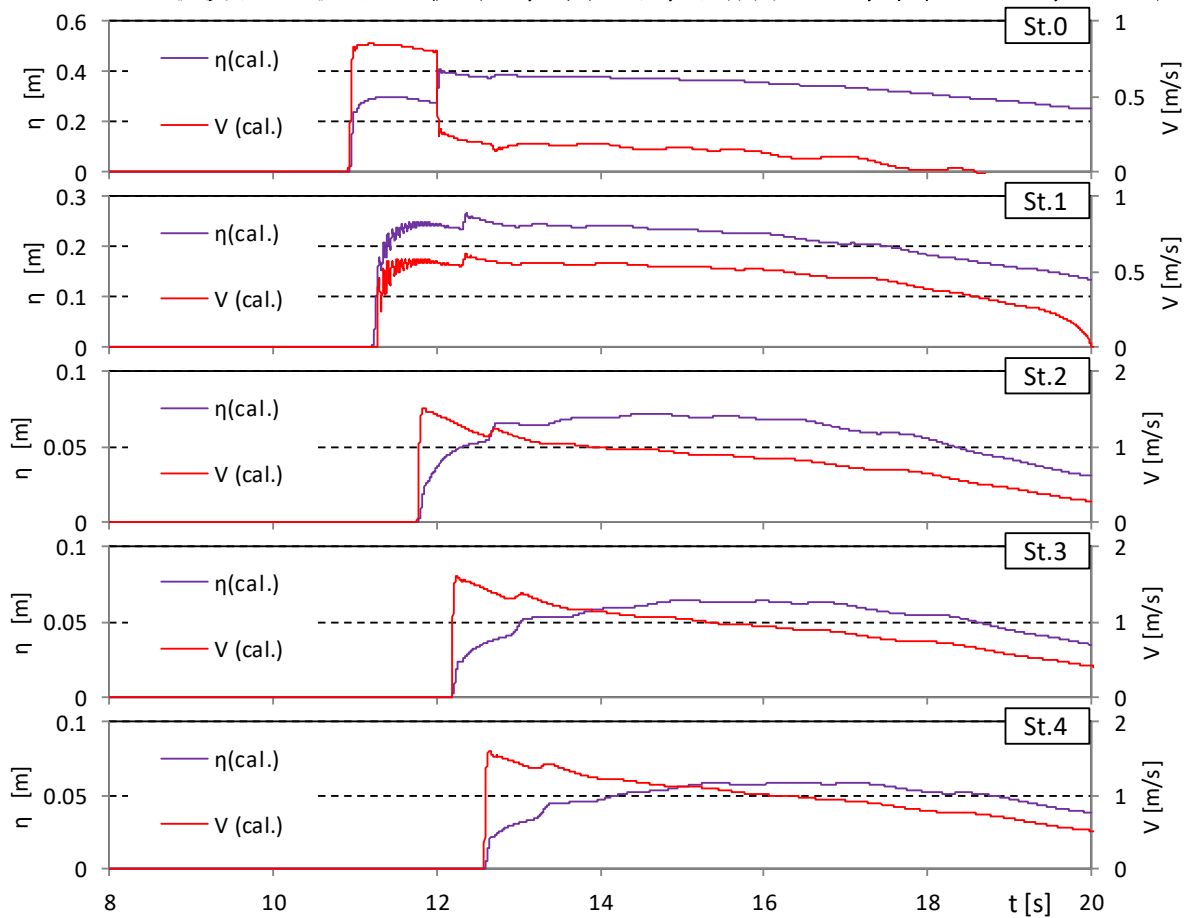


図- 5.3.22 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd11)

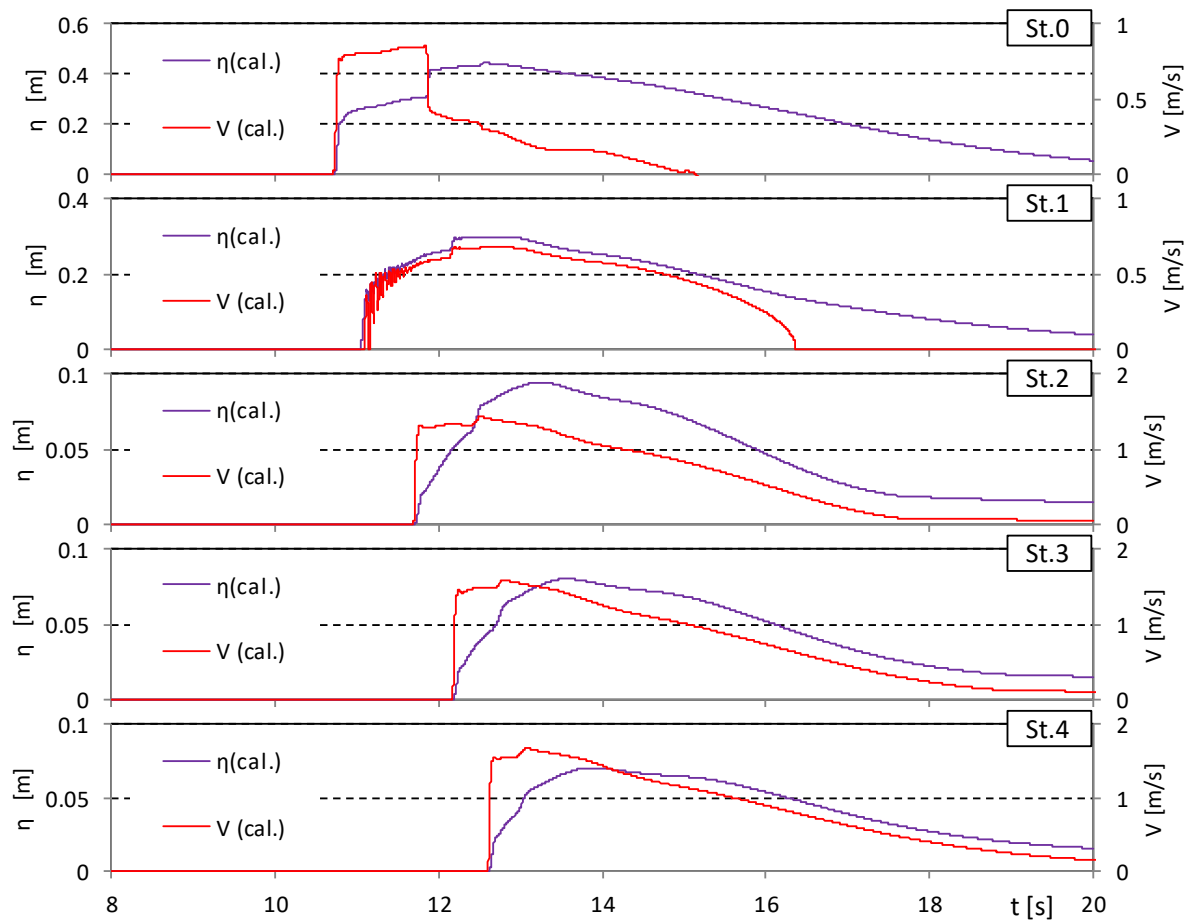


図- 5.3.22 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd20)

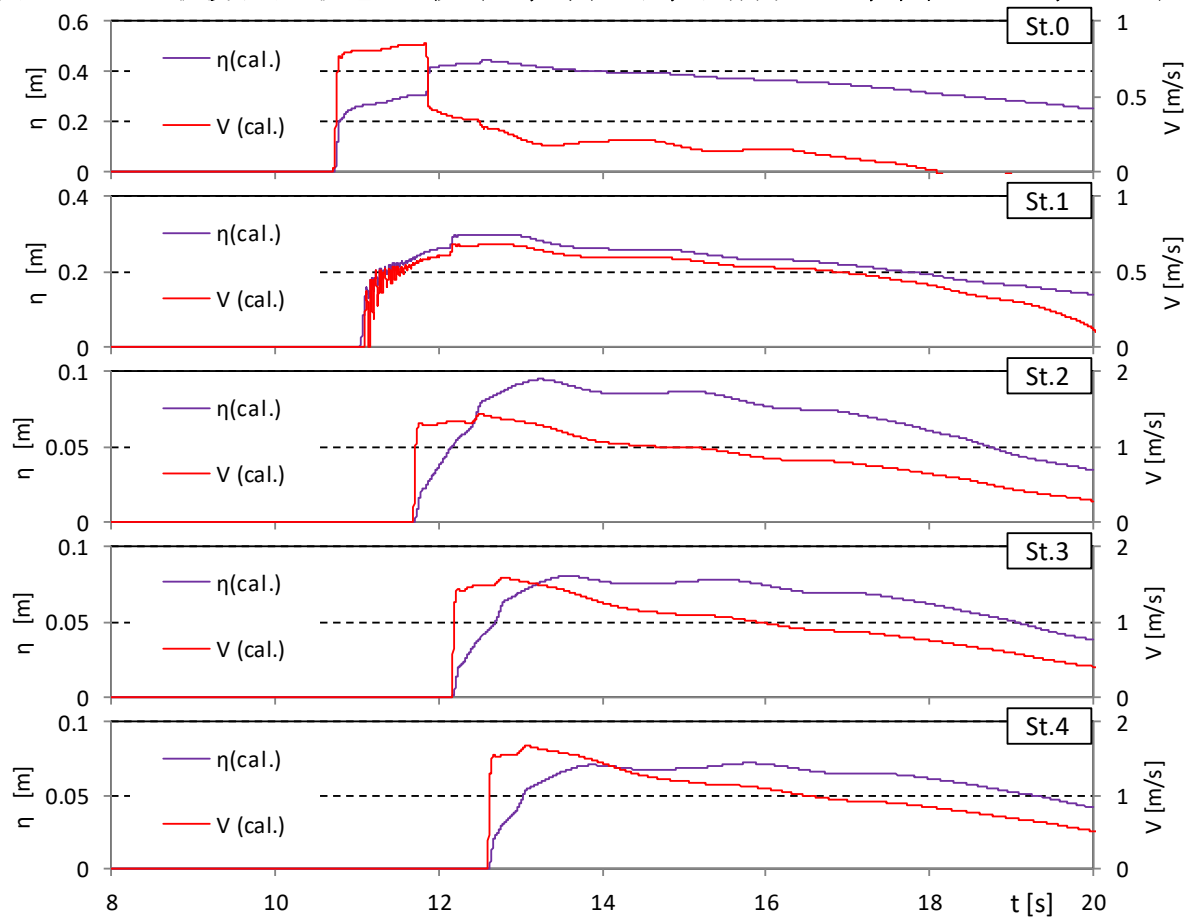


図- 5.3.22 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd21)

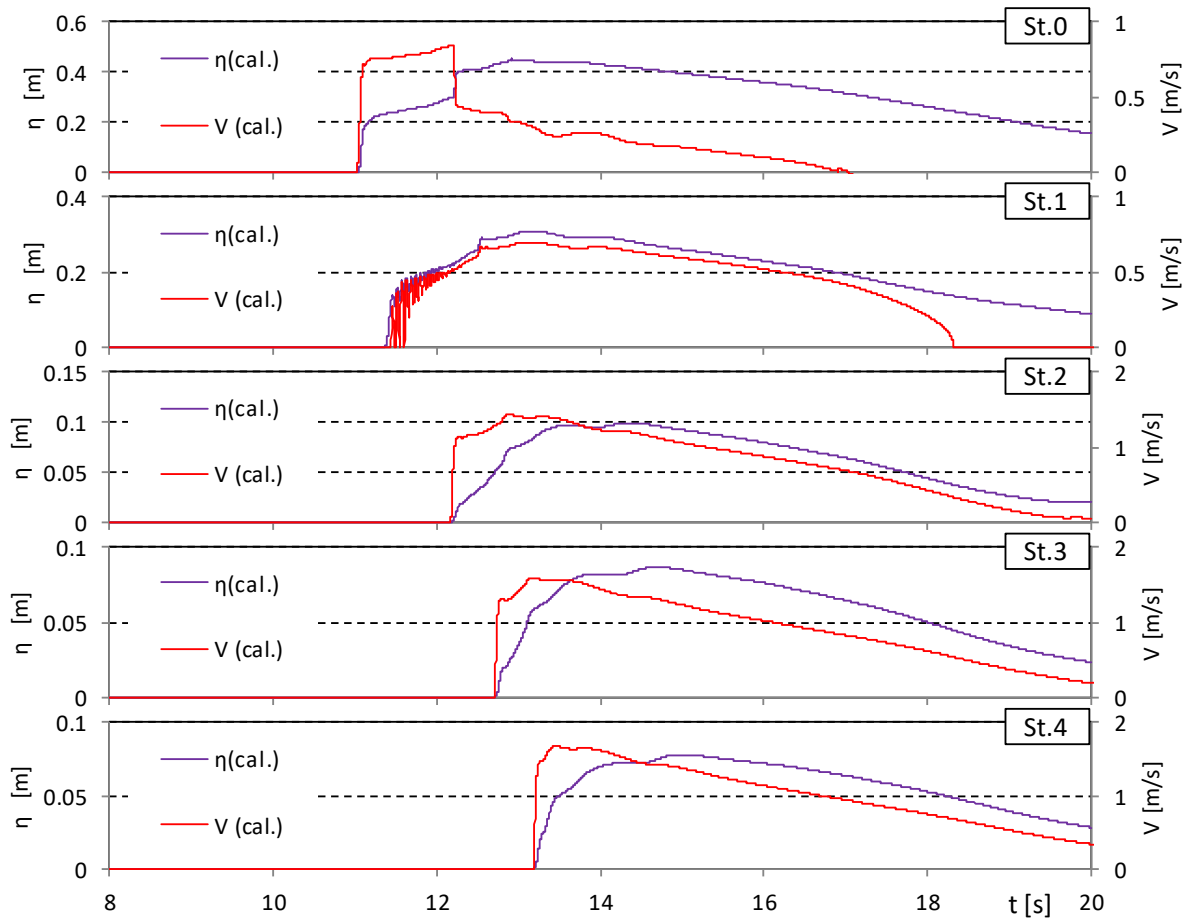


図- 5.3.22 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd30)

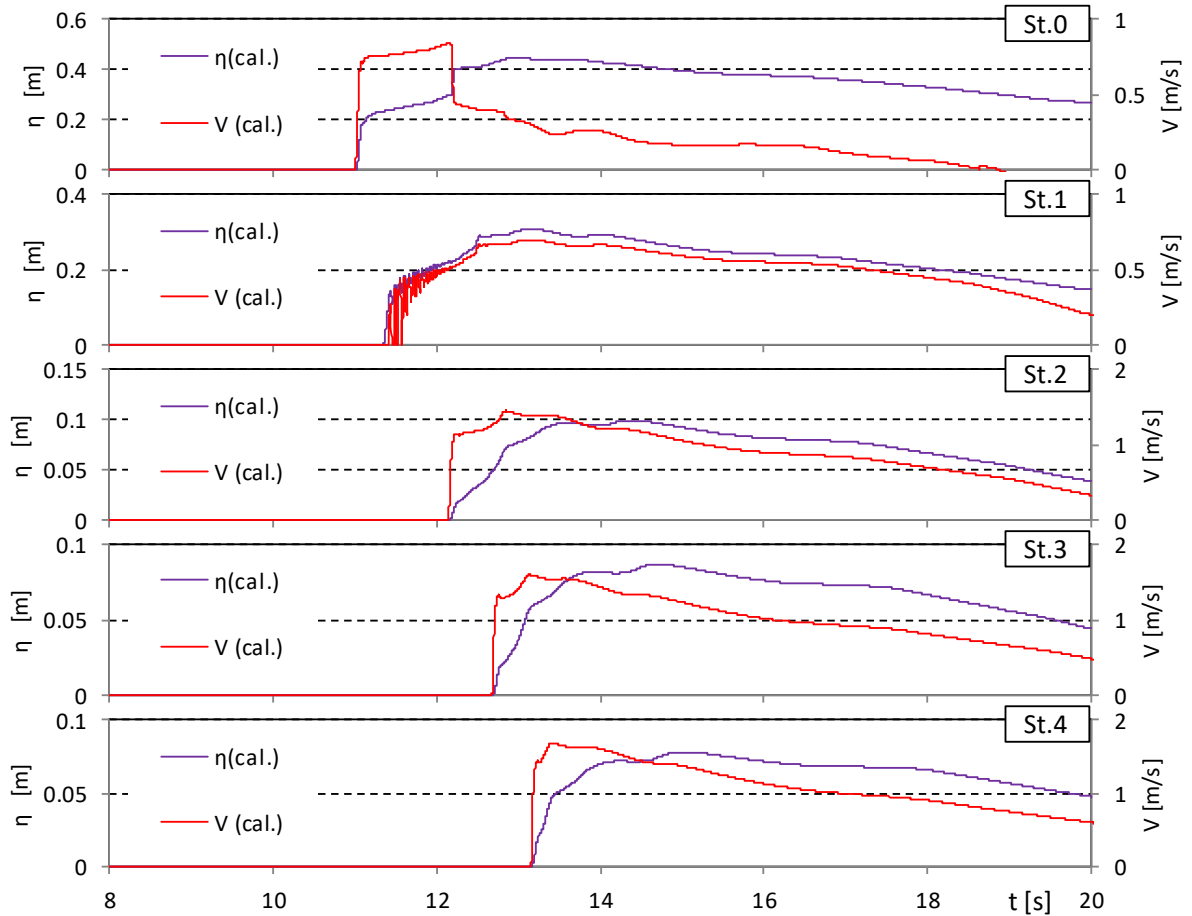


図- 5.3.22 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd31)

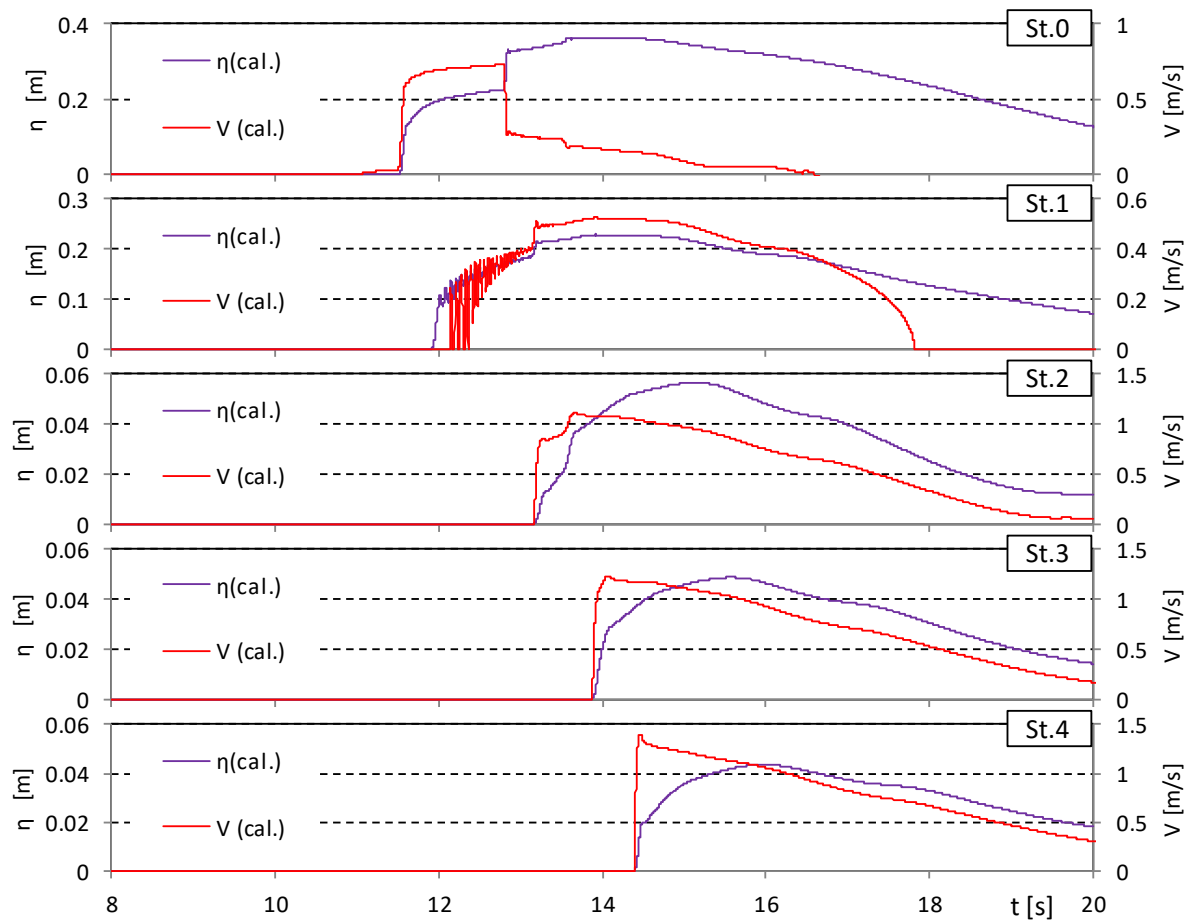


図- 5.3.22 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd40)

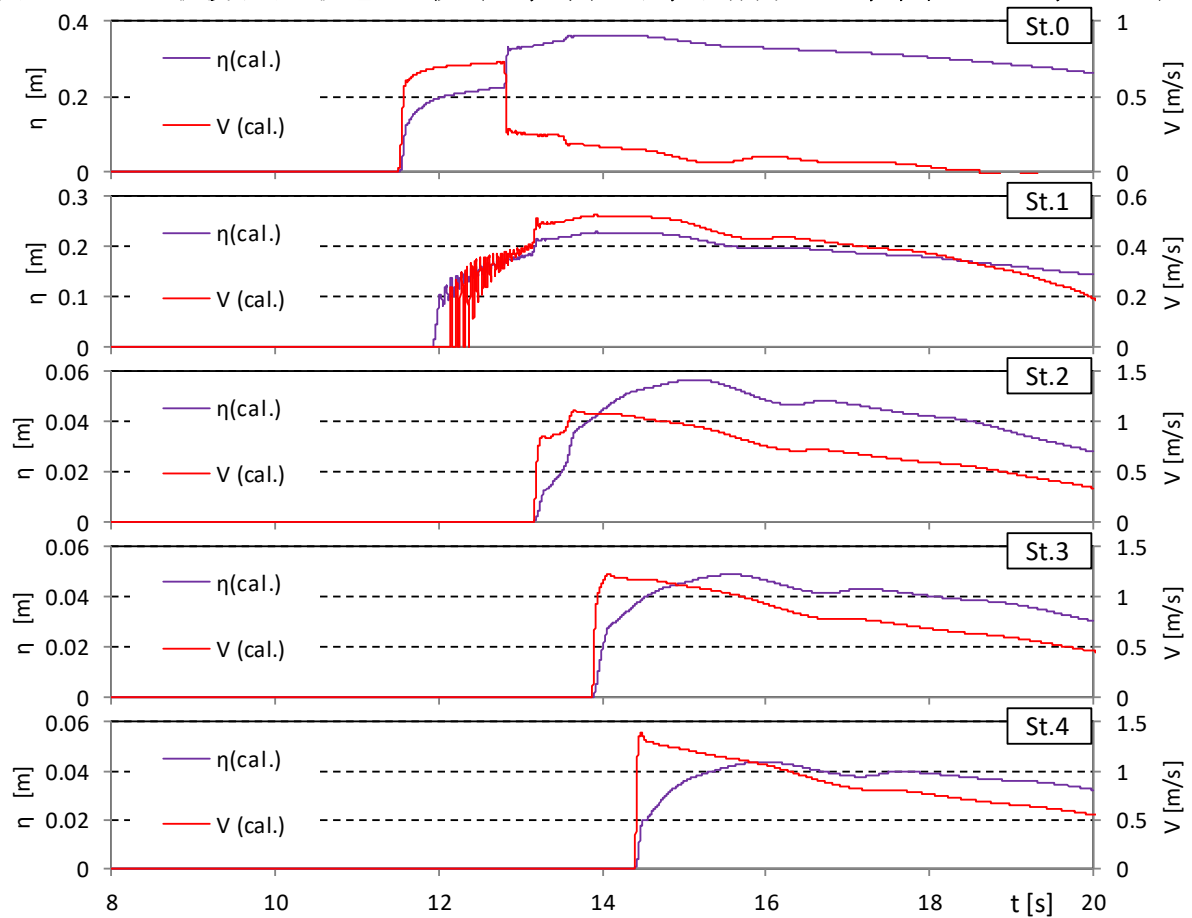


図- 5.3.22 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.25m, 位置 0.625m, Wd41)

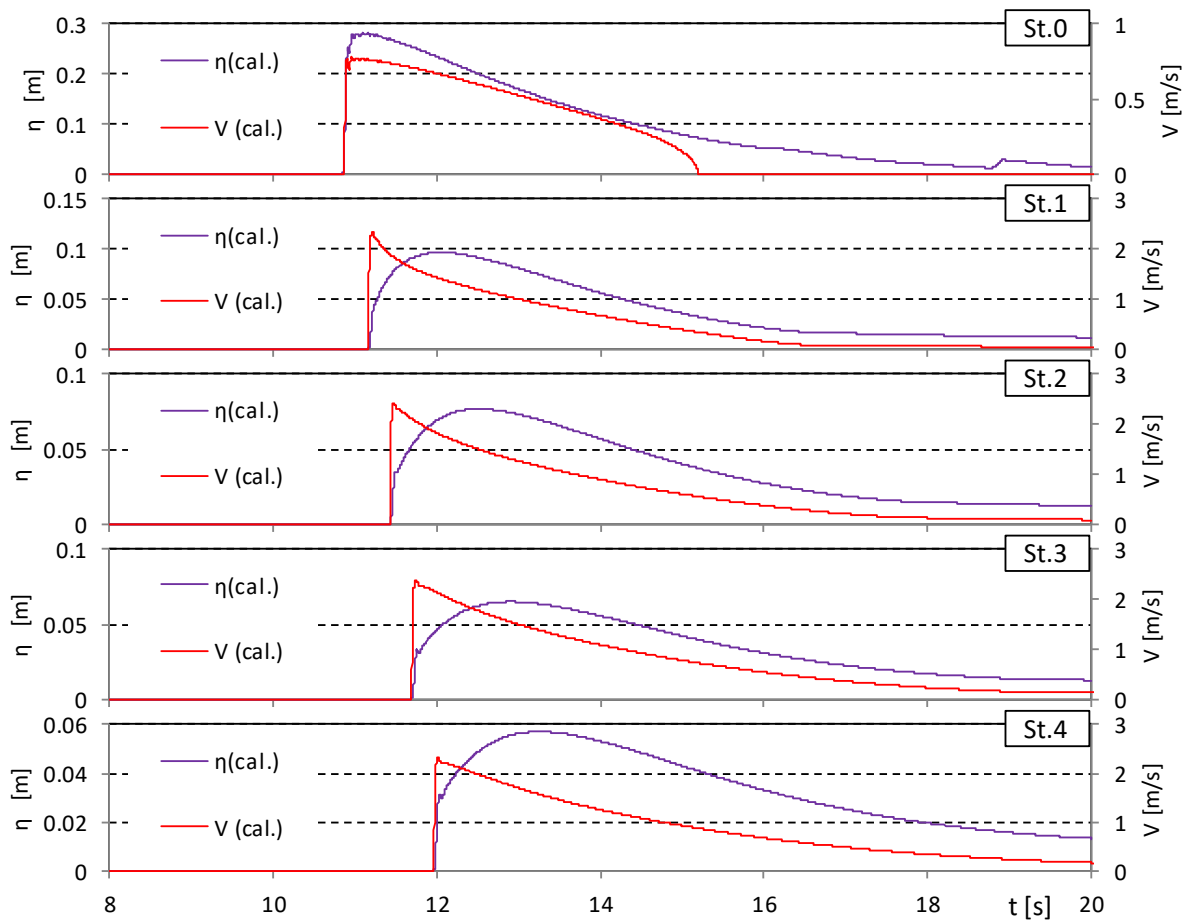


図- 5.3.23 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.m, Wd10)

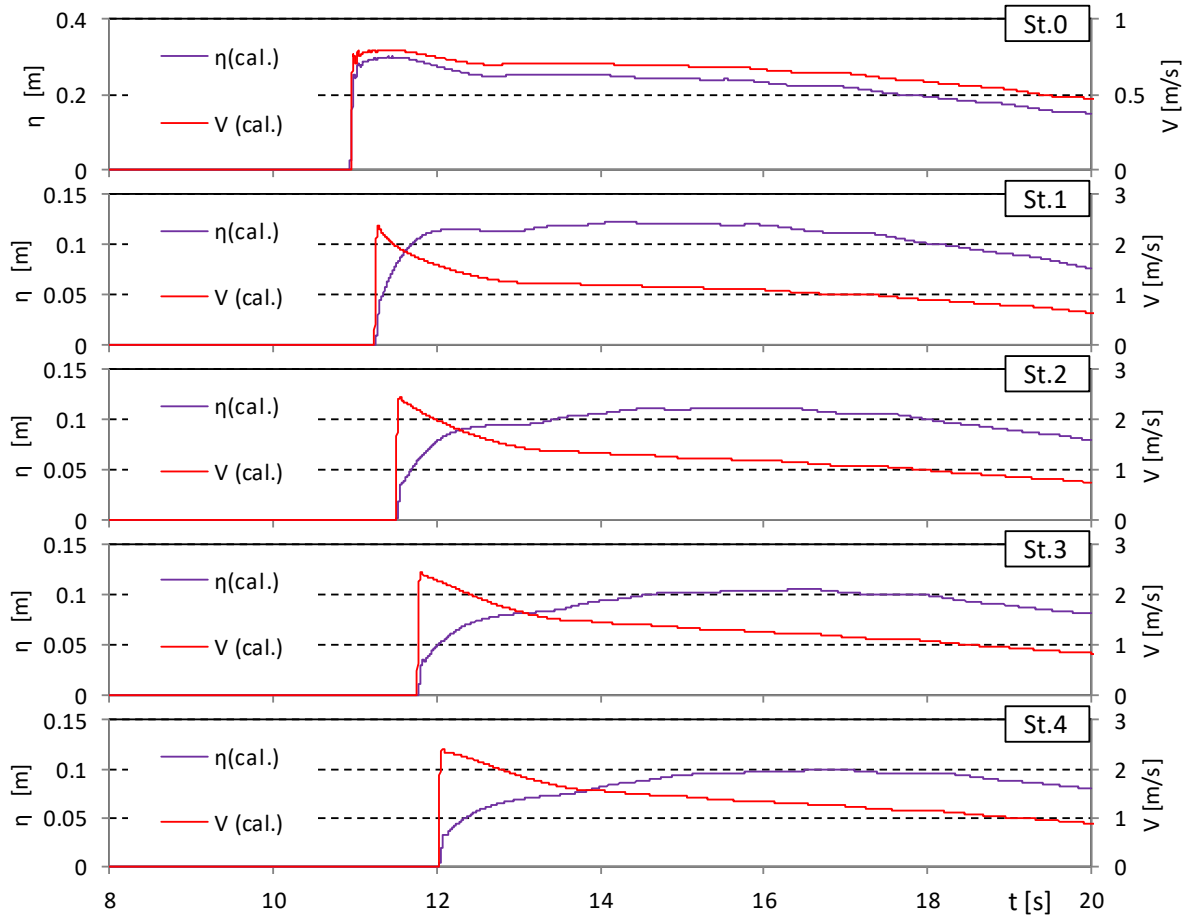


図- 5.3.23 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.m, Wd11)

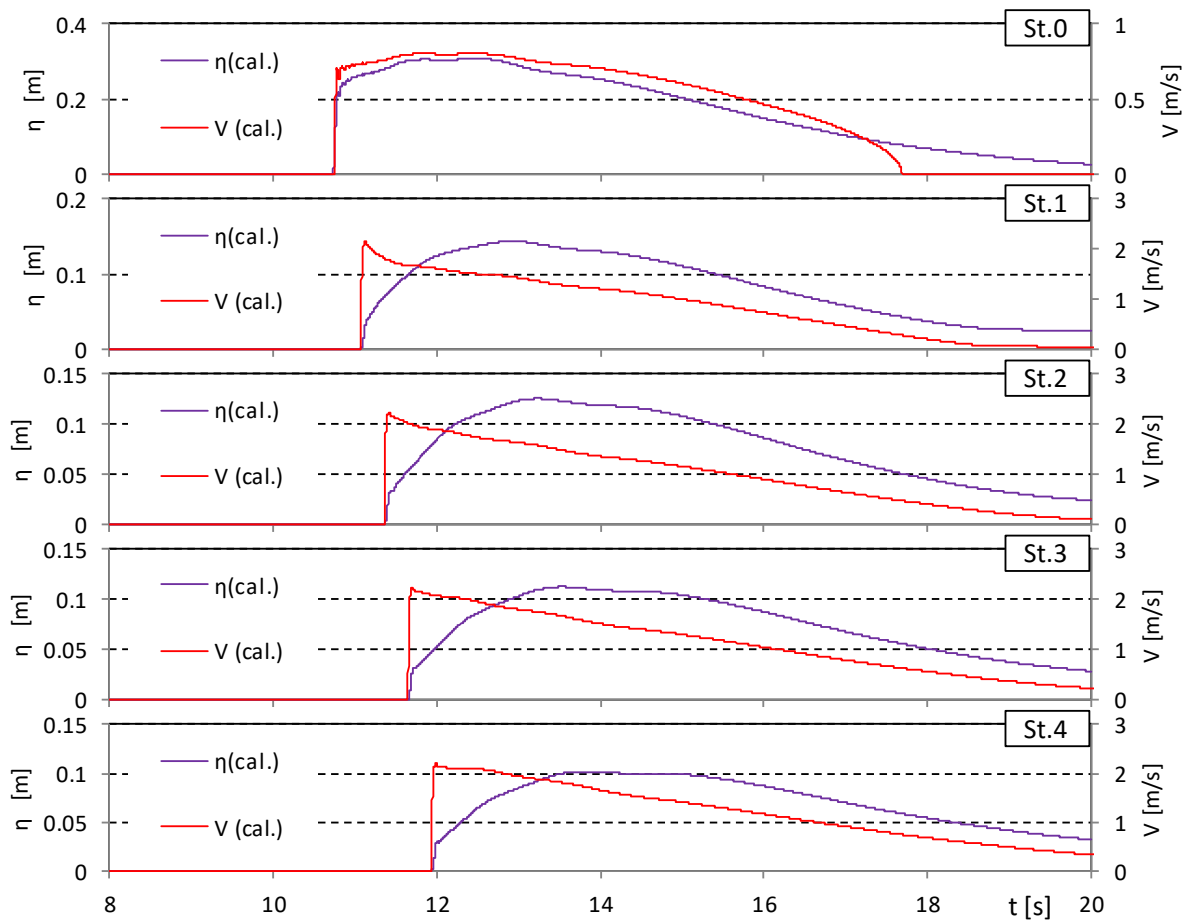


図- 5.3.23 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.m, Wd20)

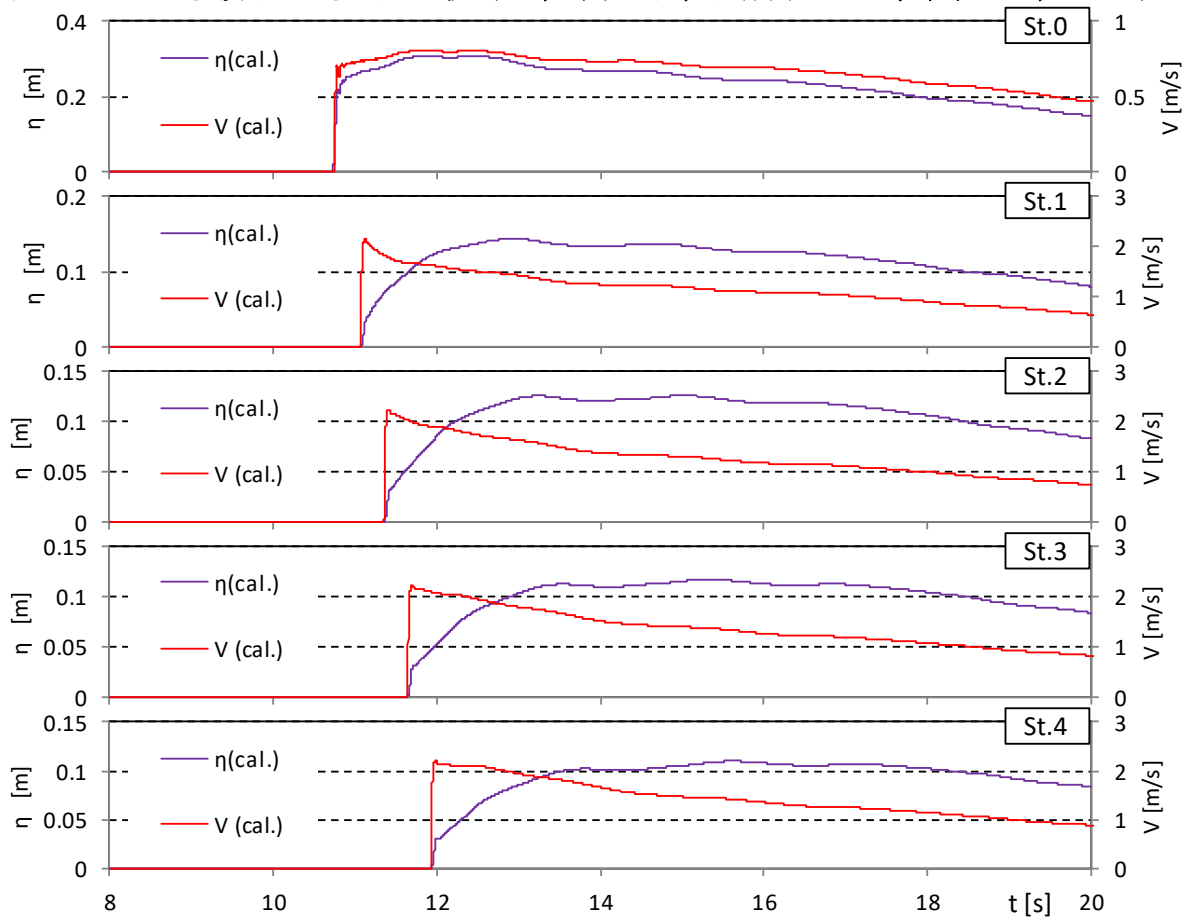


図- 5.3.23 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.m, Wd21)

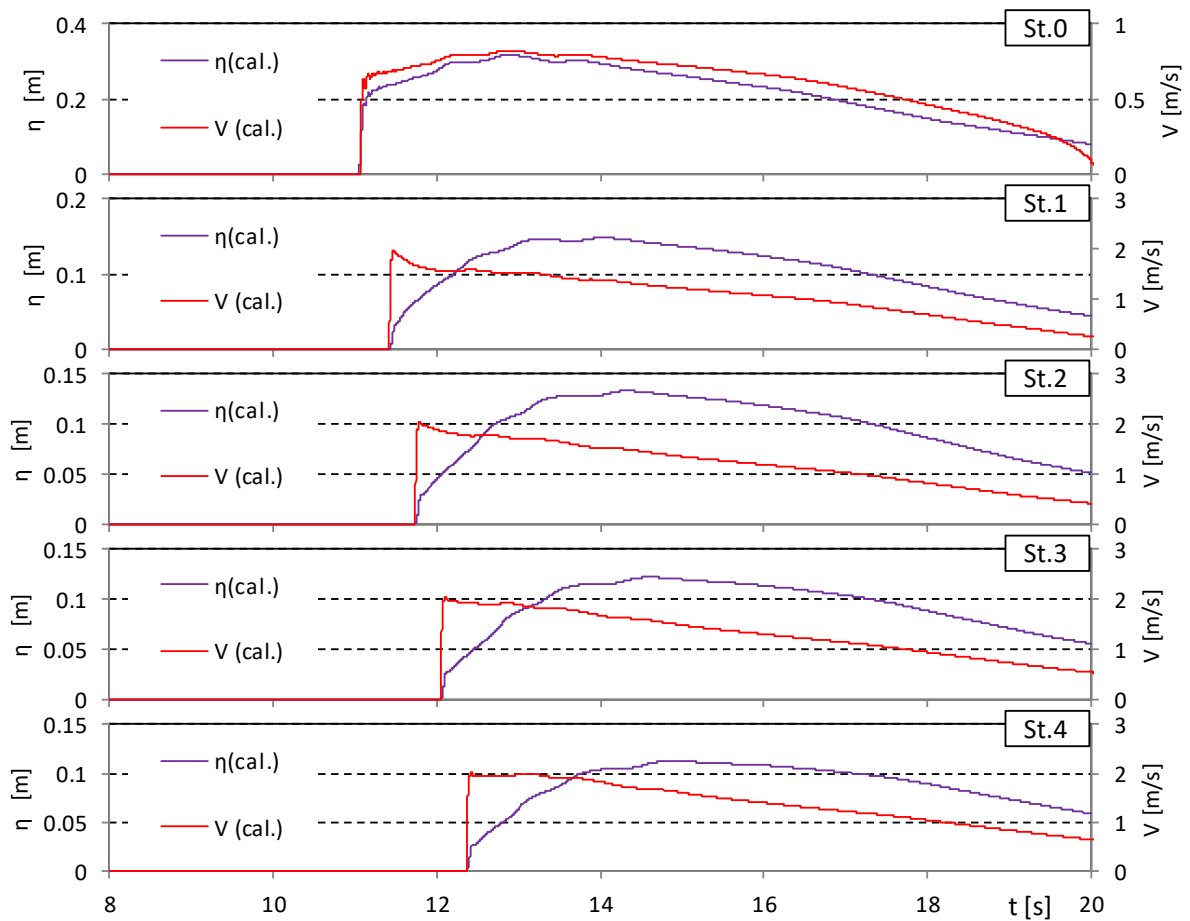


図- 5.3.23 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.m, Wd30)

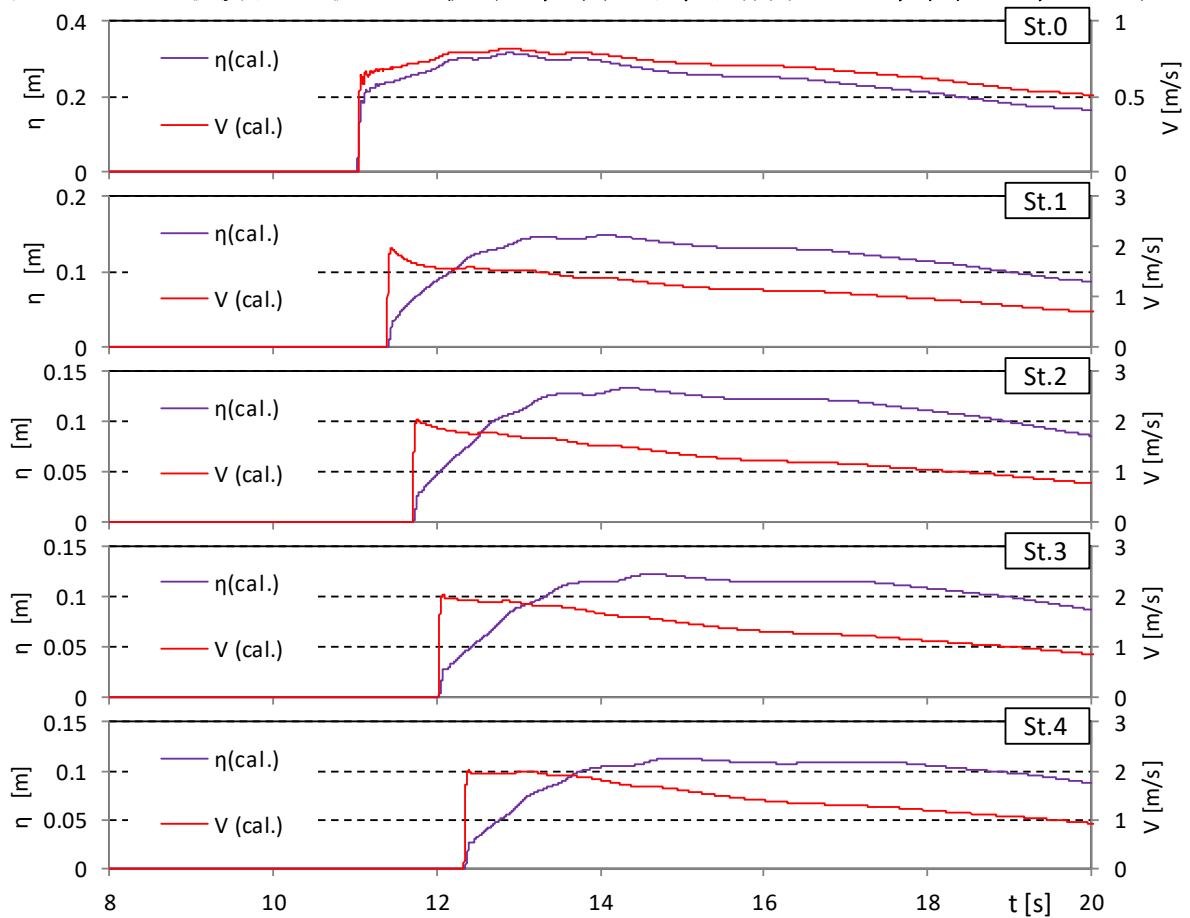


図- 5.3.23 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.m, Wd31)

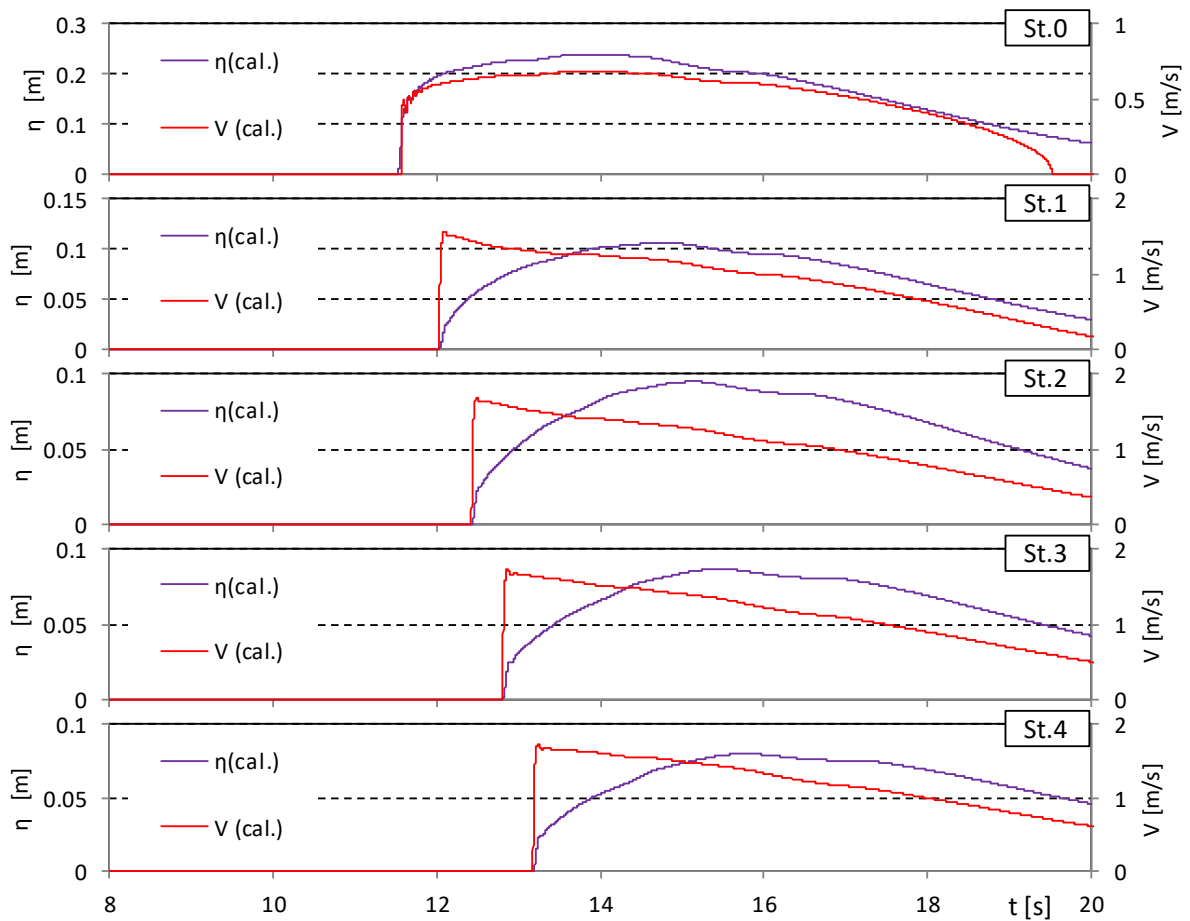


図- 5.3.23 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.m, Wd40)

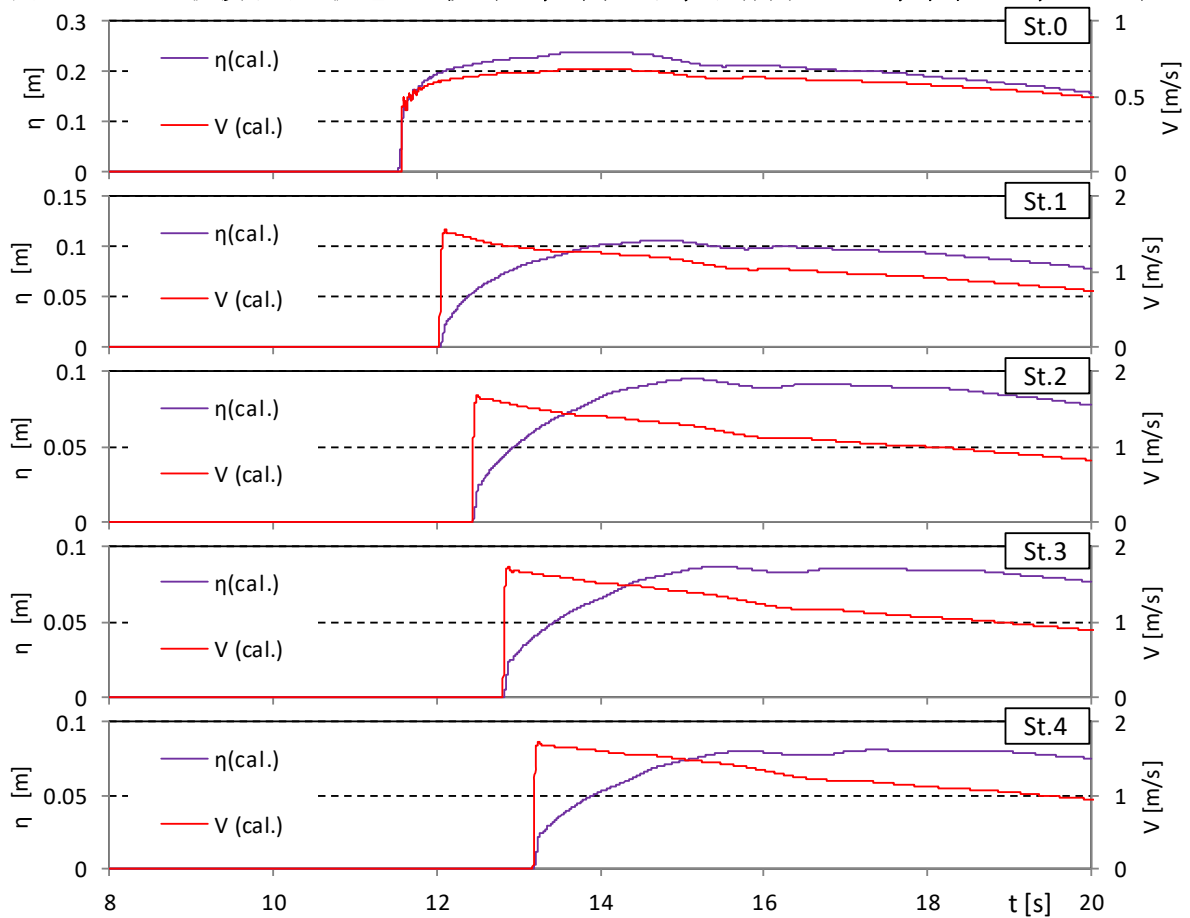


図- 5.3.23 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.m, Wd41)

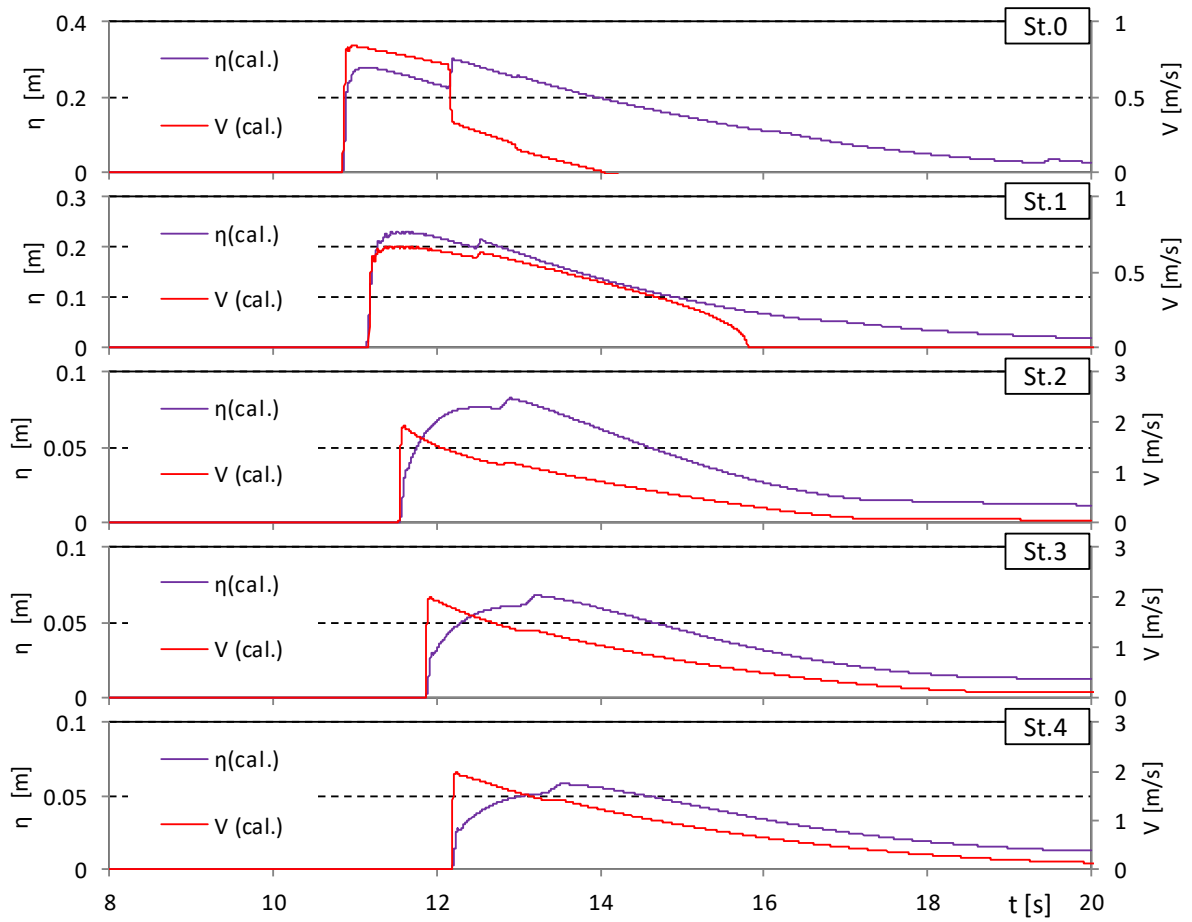


図- 5.3.24 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd10)

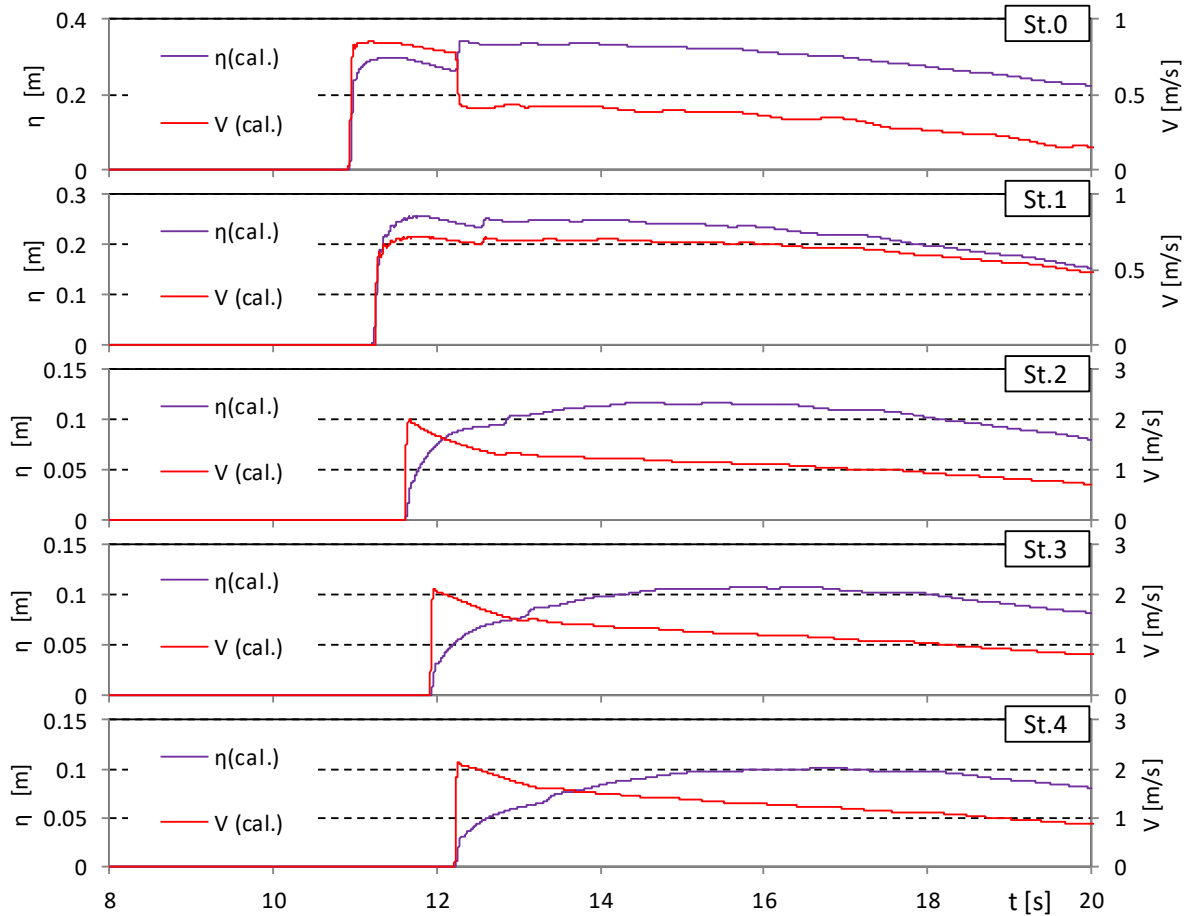


図- 5.3.24 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd11)

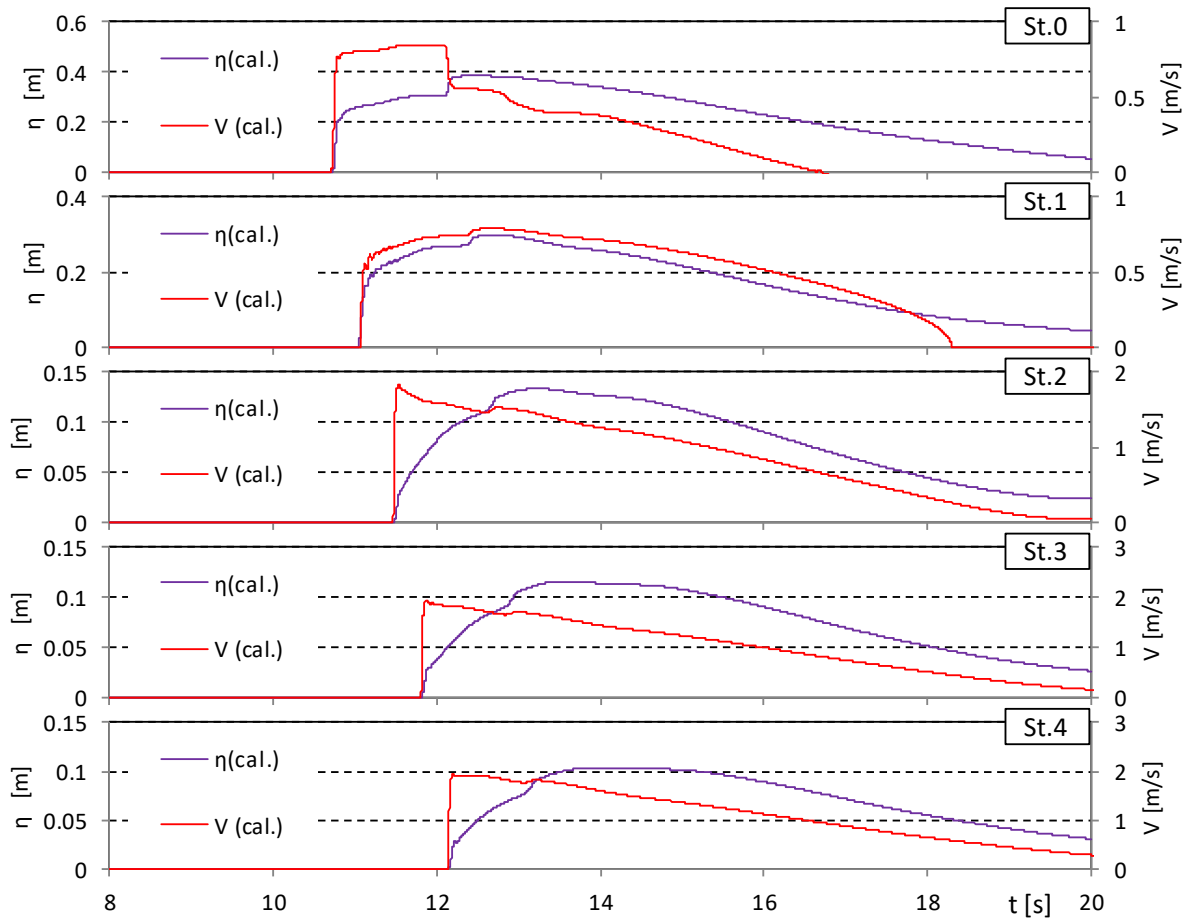


図- 5.3.24 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd20)

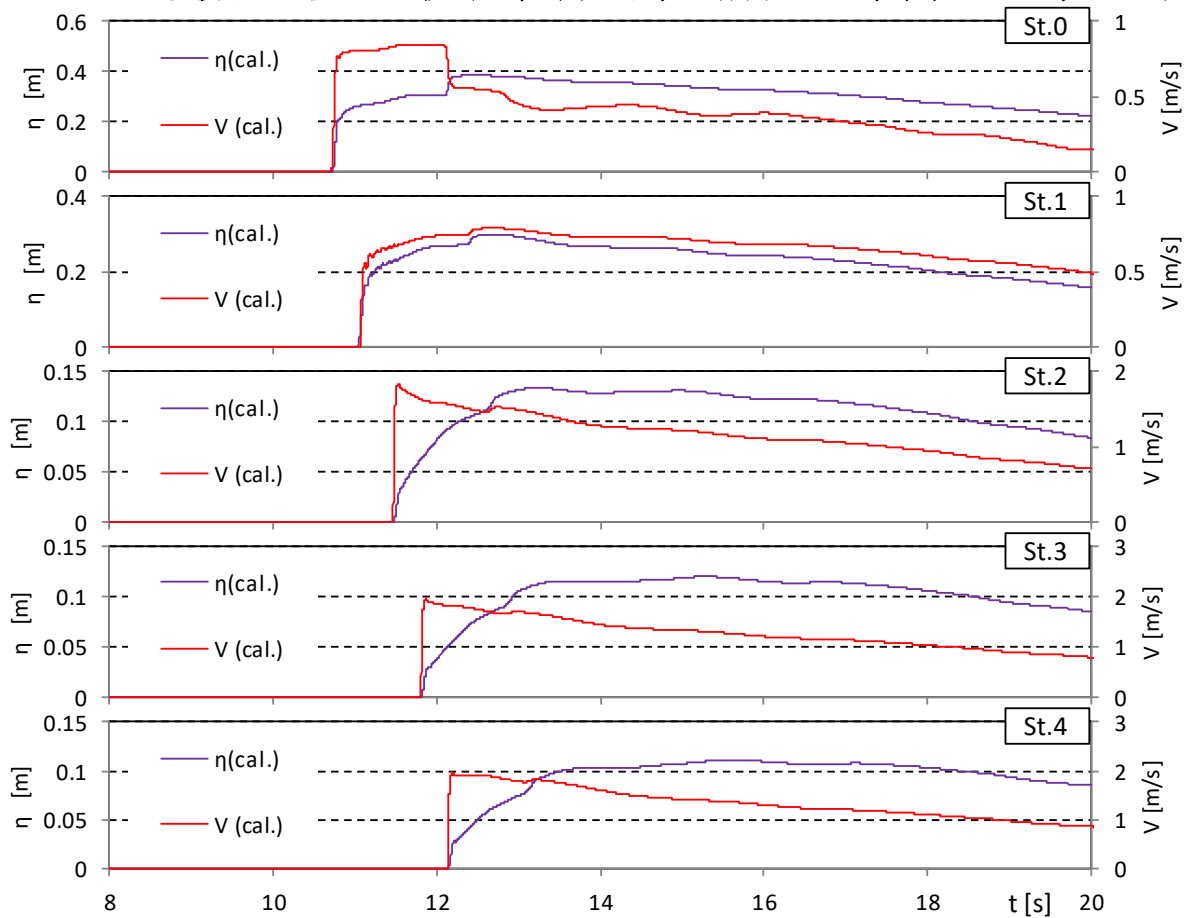


図- 5.3.24 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd21)

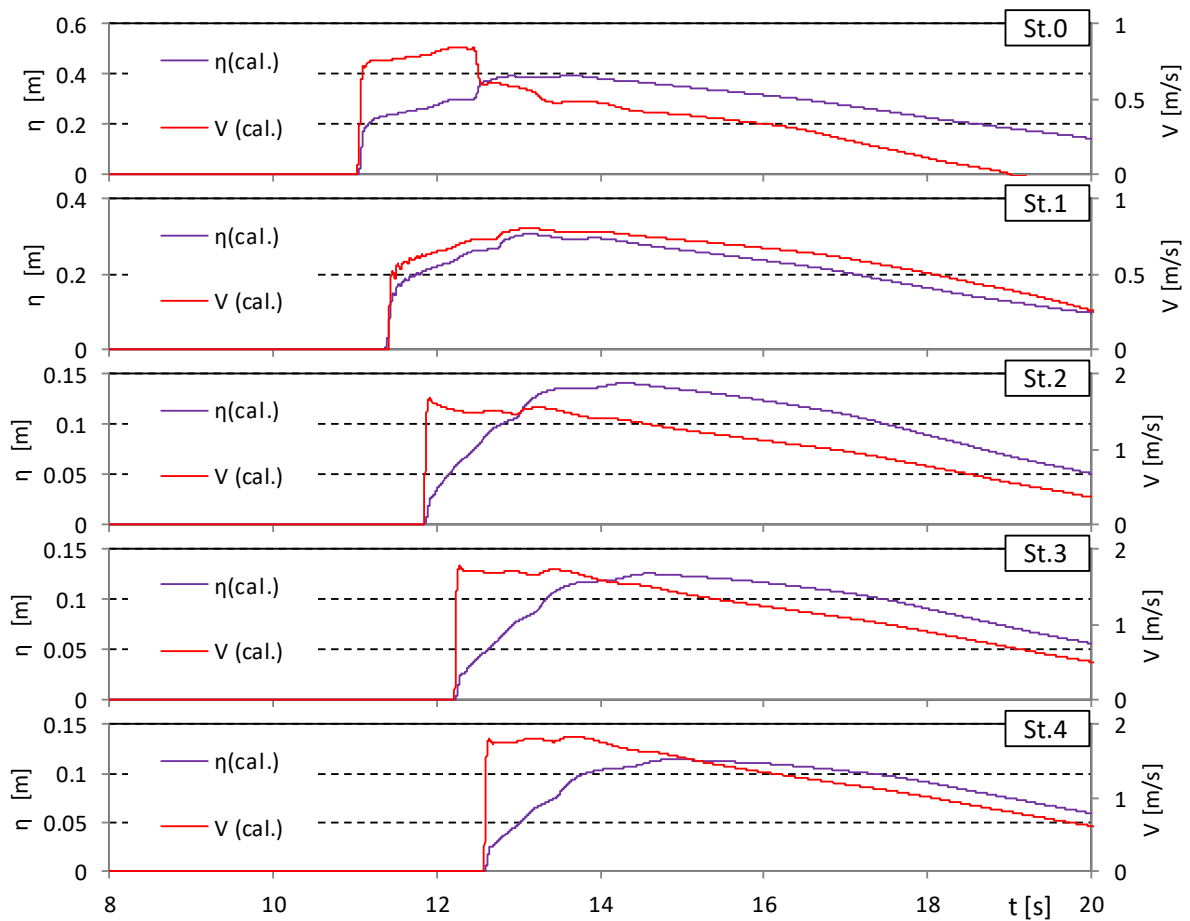


図- 5.3.24 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd30)

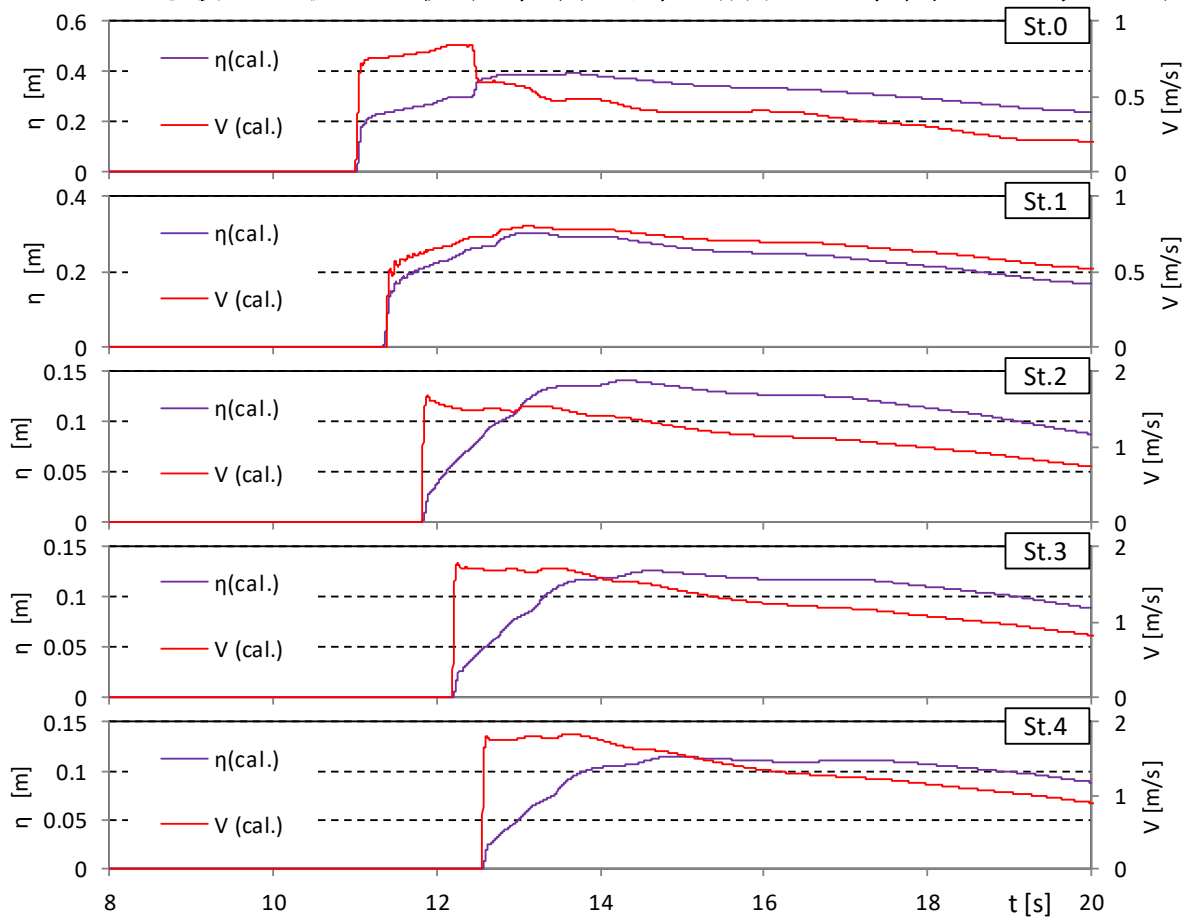


図- 5.3.24 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd31)

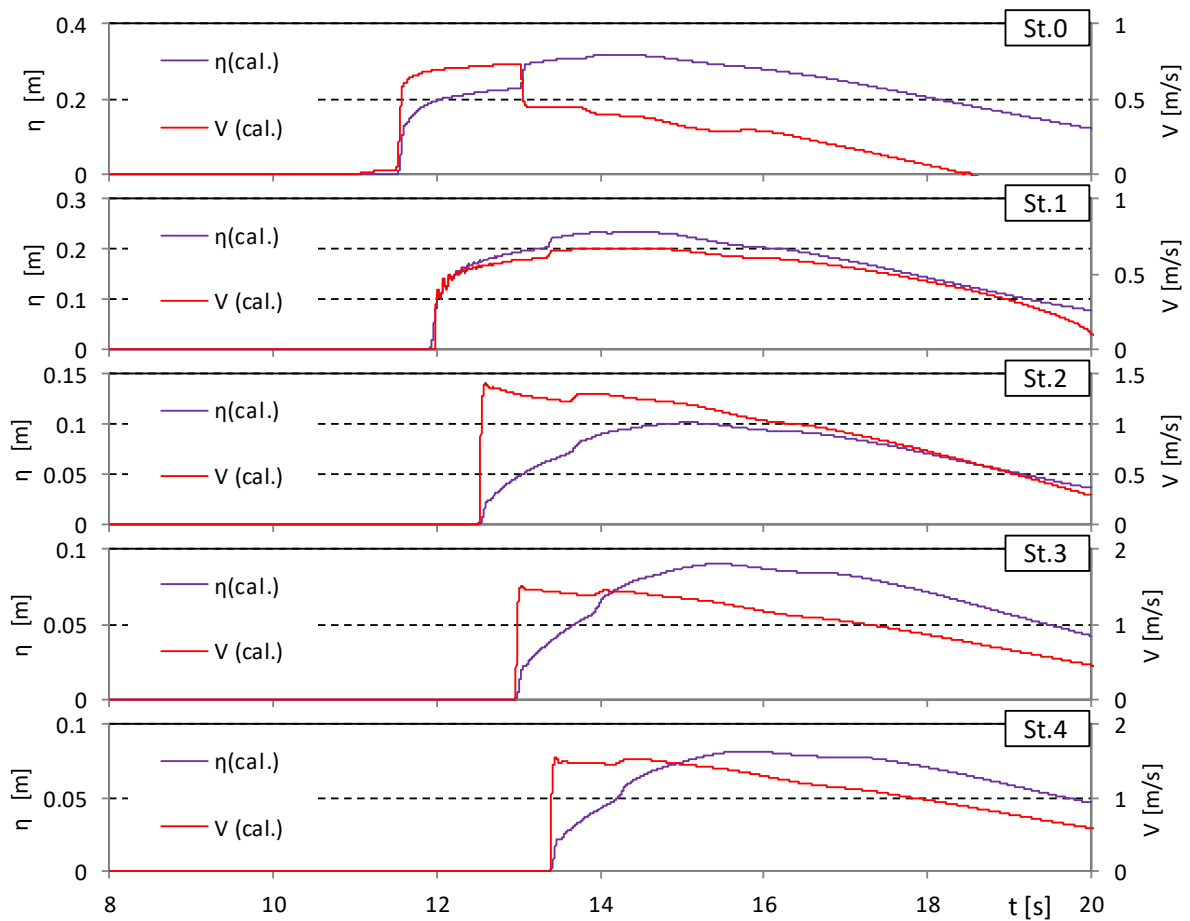


図- 5.3.24 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd40)

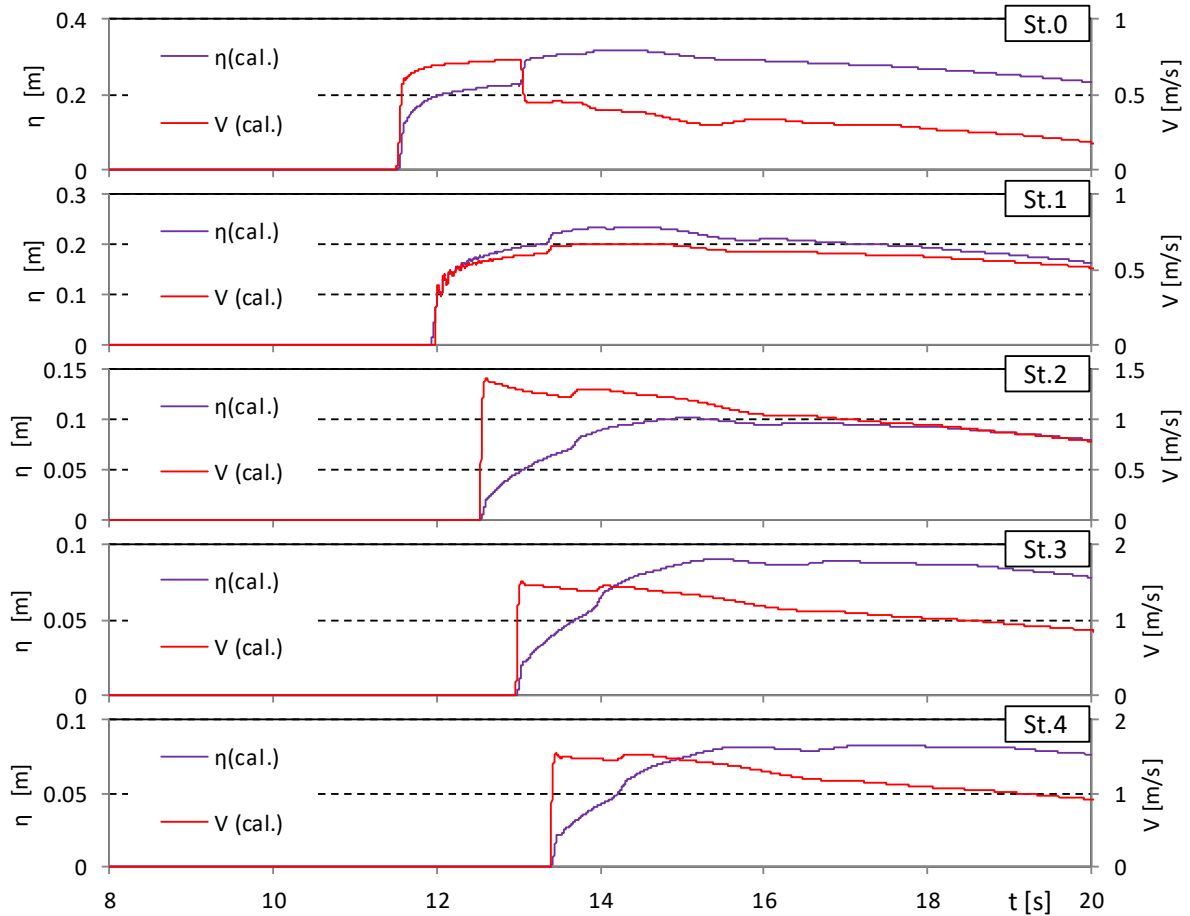


図- 5.3.24 越流浸水深と流速の比較 (T-S, 単純勾配, 堤体高 0.125m, 位置 0.625m, Wd41)

5.4. 越流最大浸水深

前述の時系列解析結果から越流最大浸水深を求めたものを、直立護岸について図- 5.4.1, 図- 5.4.3 に、単純勾配について図- 5.4.5, 図- 5.4.6 に示す。また、図- 5.4.1, 図- 5.4.3 の値を水理試験の結果と比較したものを、図- 5.4.2, 図- 5.4.4 に示す。

OpenFOAM, T-STOC とともに、解析格子よりも小さい水塊による飛沫状の越波水塊は考慮出来ないため、水理試験で計測された、堤体背後の計測点での越流最大浸水深の増大が生じていないことが分かる。また、最大越流水深は、堤体から離れるにしたがって若干減少傾向にあるが、ほぼ同じ値である。

OpenFOAM と T-STOC を比較すると、周期の短い Wd10 と、越流規模の小さい Wd40, Wd41 のケースで、最大越流浸水深を T-STOC の方が小さく評価している。前述したように、越流浸水深の時間変動が顕著な場合や、小さい越流量の場合に、T-STOC は越流量が小さく評価される傾向にあると想定される。

定性的には、OpenFOAM, T-STOC とともに、Wd10 , Wd11 のみで高水位継続の有無による違いが生じること、Wd20, Wd30, Wd21, Wd31 での越流浸水深はほぼ同じ値であり、周期の短い Wd10 と、波高の小さい Wd40, 41 がこれらよりも小さくなっていること、Wd11 は、高水位が継続することにより、Wd20 等と同程度の浸水深となっていることなどの特徴があり、これらは水理試験結果の特徴に一致している。

直立護岸と単純勾配を比較すると、Wd10, Wd11 のみ地形の影響が大きく表れている。Wd10, Wd11 の単純勾配では、汀線に到達する直前に巻波タイプの砕波が生じており、これが直接堤体に衝突している。このため、堤体に衝突して越波した水塊が堤体背後の遠くまで到達しており、越流浸水深の算出点に到達して大きな浸水深として算出されたものと考えられる。

図- 5.4.2 によると、堤体からある程度距離の離れた St.3, 4 では、OpenFOAM は越流最大浸水深を精度よく評価できることが分かる。一方 T-STOC では、越流最大浸水深を、15%程度過小評価している。ただしこれは、時系列の比較から分かるように、浸水到達から比較的短い時間で最大浸水深が発生する場合であり、津波の継続時間が十分に長い場合には、T-STOC は必ずしも過小評価をするものではないと考えられる。

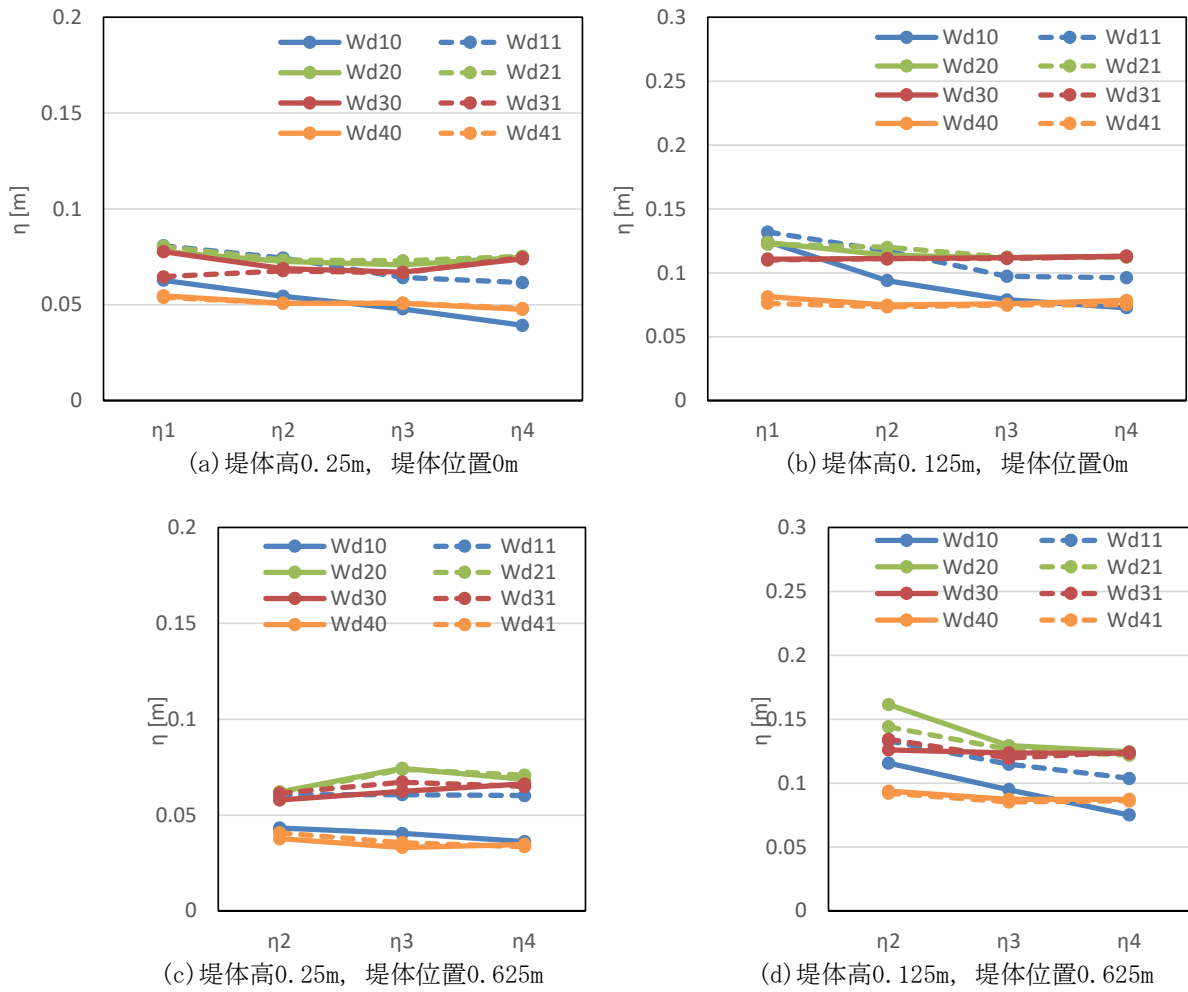


図- 5.4.1 越流最大浸水深 (OpenFOAM, 直立護岸)

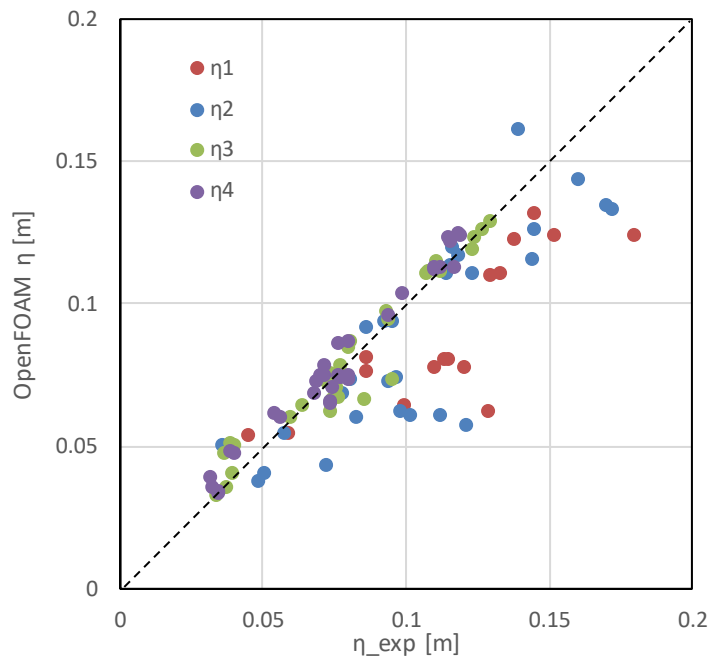
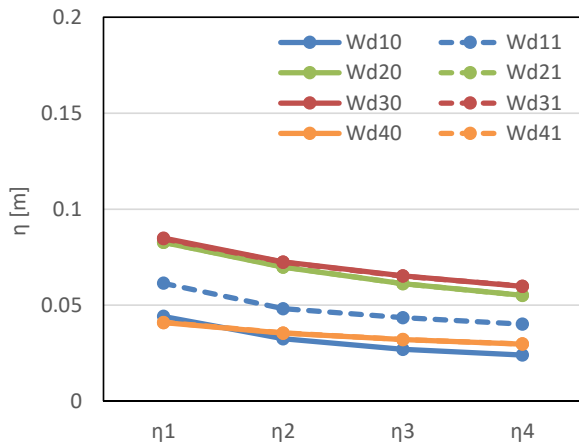
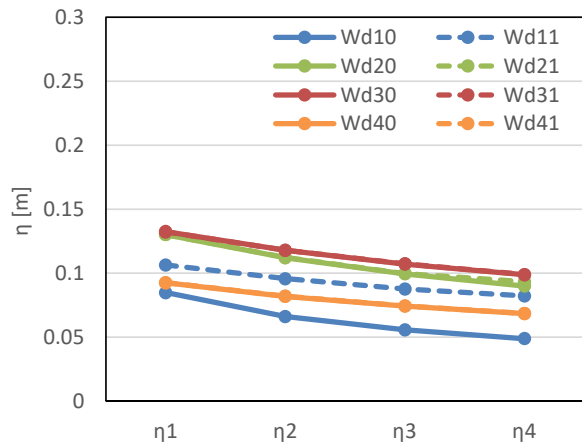


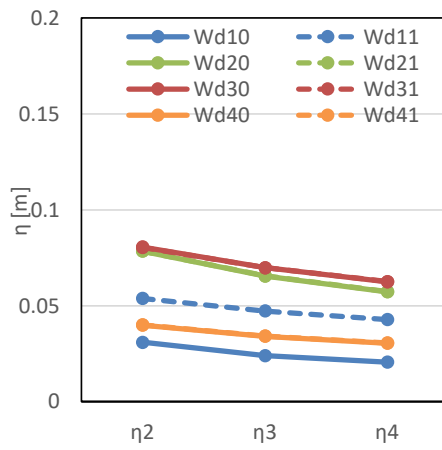
図- 5.4.2 越流最大浸水深の水理試験結果との比較 (OpenFOAM, 直立護岸)



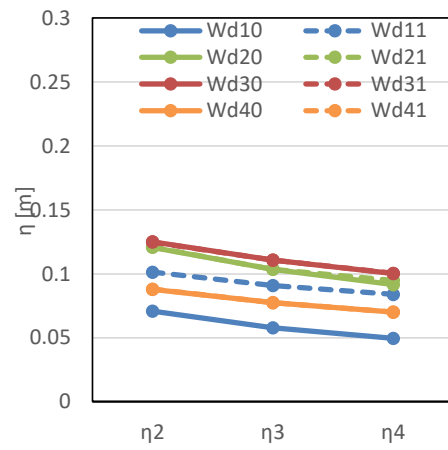
(a) 堤体高0.25m, 堤体位置0m



(b) 堤体高0.125m, 堤体位置0m



(c) 堤体高0.25m, 堤体位置0.625m



(d) 堤体高0.125m, 堤体位置0.625m

図- 5.4.3 越流最大浸水深 (T-STOC, 直立護岸)

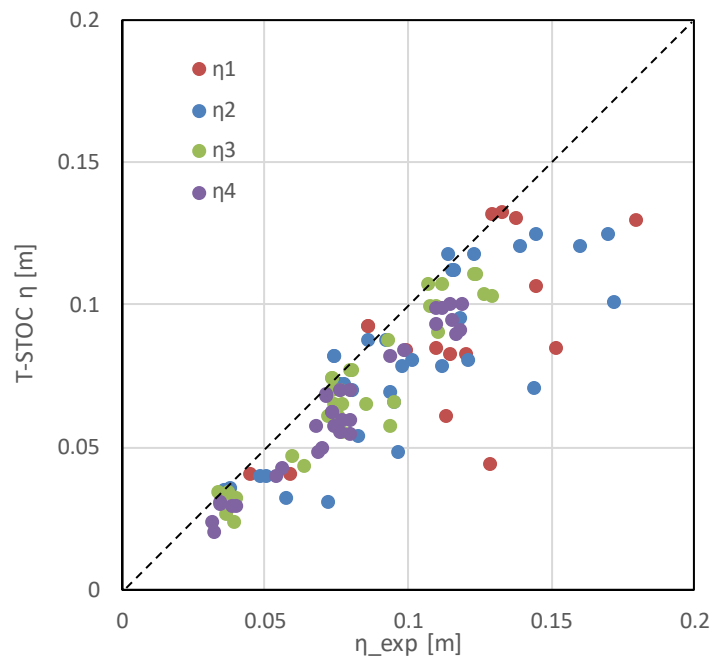
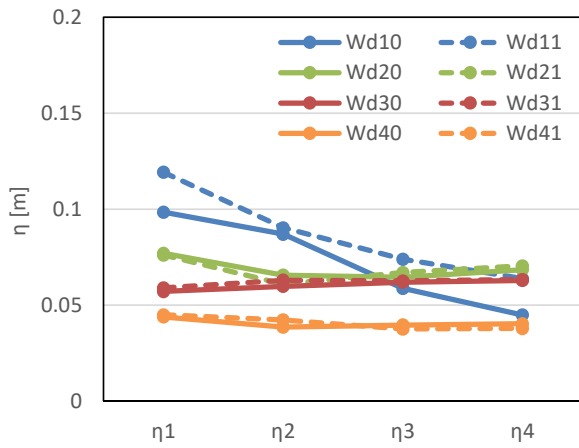
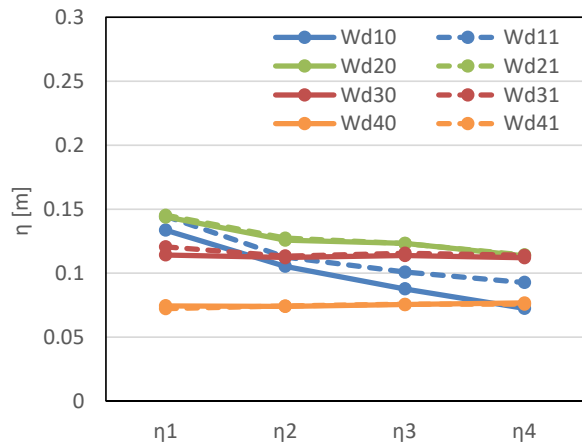


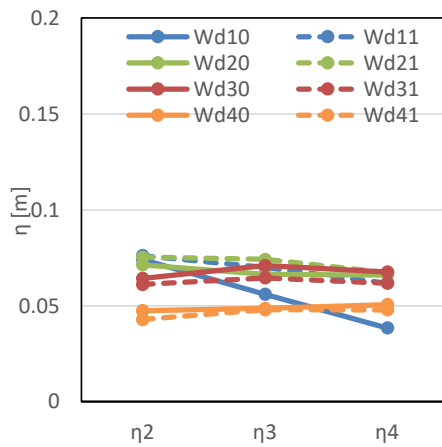
図- 5.4.4 越流最大浸水深の水理試験結果との比較 (T-STOC, 直立護岸)



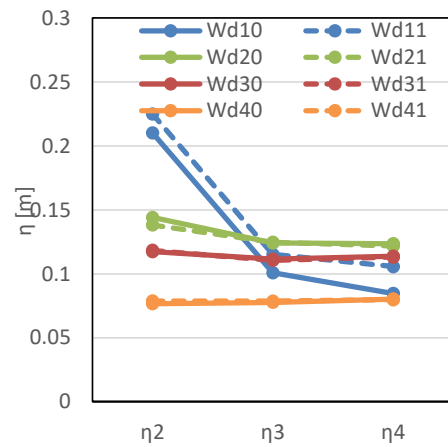
(a) 堤体高0.25m, 堤体位置0m



(b) 堤体高0.125m, 堤体位置0m

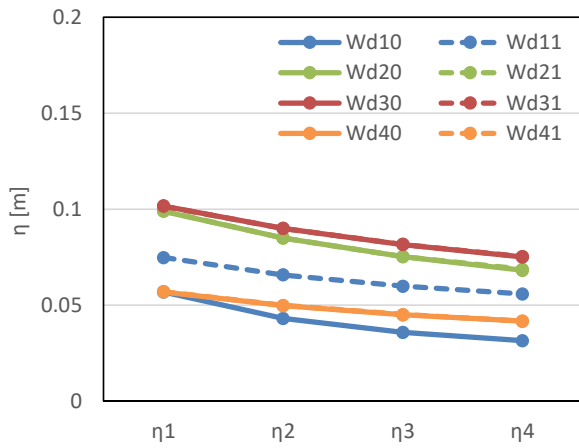


(c) 堤体高0.25m, 堤体位置0.625m

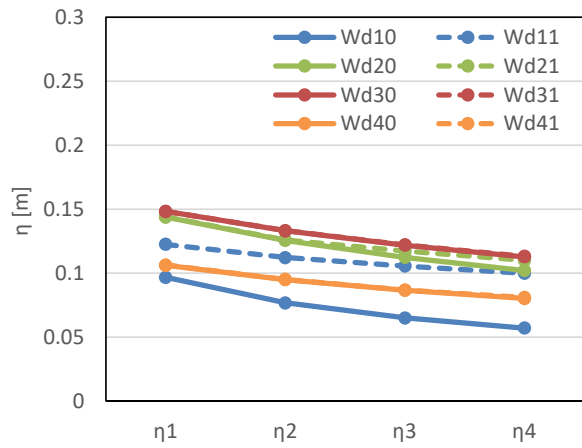


(d) 堤体高0.125m, 堤体位置0.625m

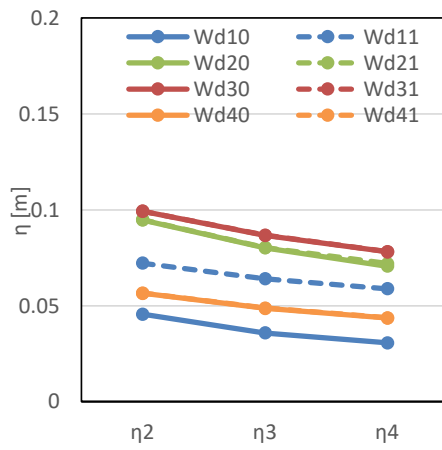
图- 5.4.5 越流最大浸水深 (OpenFOAM, 单纯勾配)



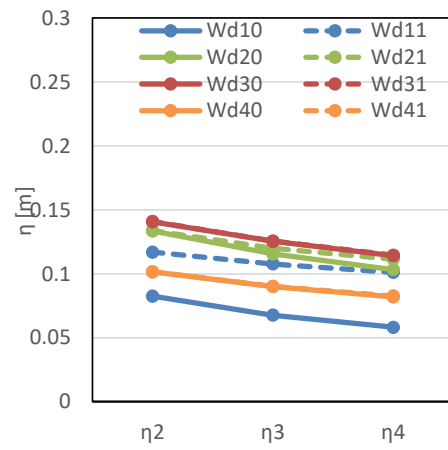
(a) 堤体高0.25m, 堤体位置0m



(b) 堤体高0.125m, 堤体位置0m



(c) 堤体高0.25m, 堤体位置0.625m



(d) 堤体高0.125m, 堤体位置0.625m

图- 5.4.6 越流最大浸水深 (T-STOC, 单纯勾配)

5.5. 最大浸水深比

図-5.5.2, 図-5.5.3, 図-5.5.4, 図-5.5.5 に, 直立護岸と単純勾配のそれぞれについて, 4章の水理試験に示した図と同様に, 越流度合いを示すパラメタ η^*/lh_d と, 最大浸水深比 η/η^* の関係を示した. 水理試験の結果と比較すると, 右肩上がりの傾向は同じだが, 試験結果よりも全体に図の左側, すなわち最大浸水深比が小さい方向に, 全体の結果がずれている. 特に T-STOC の方が顕著に, 全体が横軸方向に小さくなっている. これは主に, 越流時の最大せり上がり高さ η^* の値の違いによるものと考えら. 図-5.5.1 に水理試験と数値シミュレーションの比較を示す. 水塊の動きは数値シミュレーションにより精度よく再現されているが, 水理試験で津波衝突時に発生した堤体上の水塊の打ち上り (図中の点線) が数値シミュレーションでは再現できていない. これにより, 水理試験の越流時最大せり上がり高 η^* が, 数値シミュレーションよりも大きくなっている. このように, 水理試験では津波到達時の上向きの水塊の打ち上りのために, η^* が過大に評価され, 数値シミュレーションの方が η^* や η^*/lh_d が小さくなっていると考えられる. OpenFOAM の結果を詳細に確認すると, この影響は, 特に堤体位置 0m, 堤体高 0.25m のケースで顕著に現れている. 図-5.5.2 では, $\eta^*/lh_d = 2.0 \sim 2.6$ の範囲のデータがないために, この間の η/η^* の値が不明確となっているが, 水理試験では堤体位置 0m, 堤体高 0.25m のケースの結果がこの範囲にプロットされている.

直立護岸と単純勾配の結果を比較すると, 図-5.5.4 の最大浸水深比が 1.4 を超えている 2 点を除き, ほぼ同様の関係となっている. 一部の条件を除けば, 海底地形の影響は小さいことが分かる. なおこの 2 点は, 堤体位置 0.625m の Wd10, Wd11 のケースであり, 前述したように, 巻波タイプの碎波の状態ですり上がりで堤体に衝突し, 越流した水塊が浸水深算出地点まで到達するために最大浸水深が大きくなっているケースである.

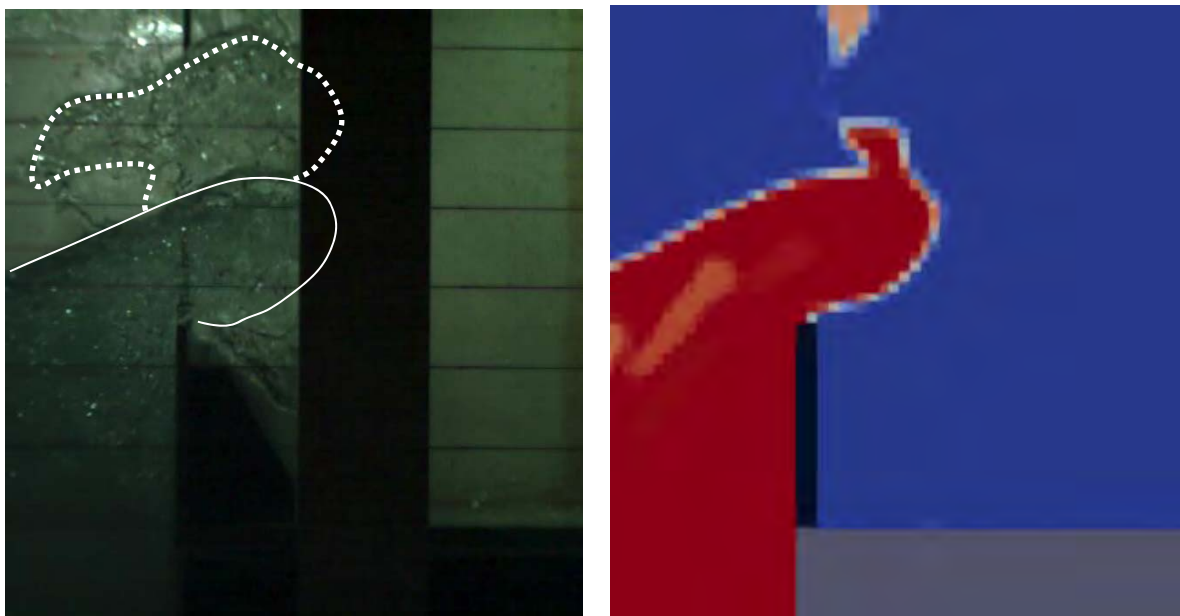


図-5.5.1 水理試験と数値シミュレーションの比較 (OpenFOAM, F-Wd30-A-0)

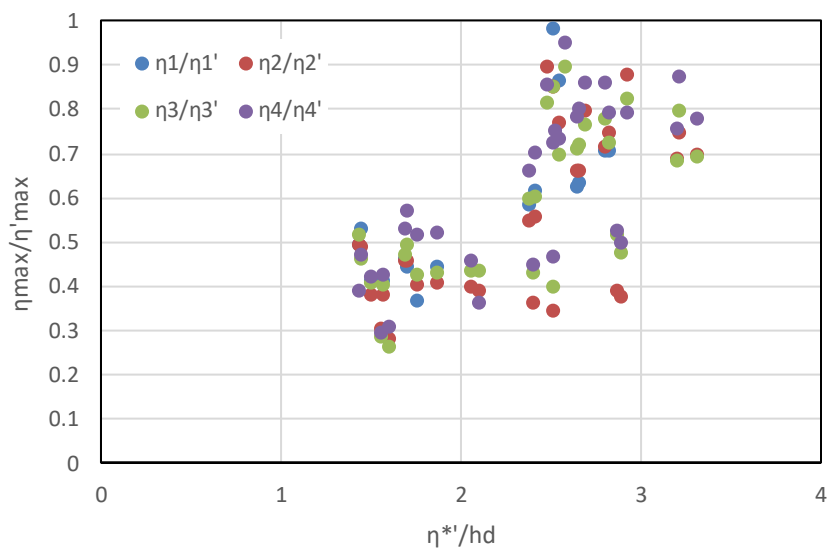
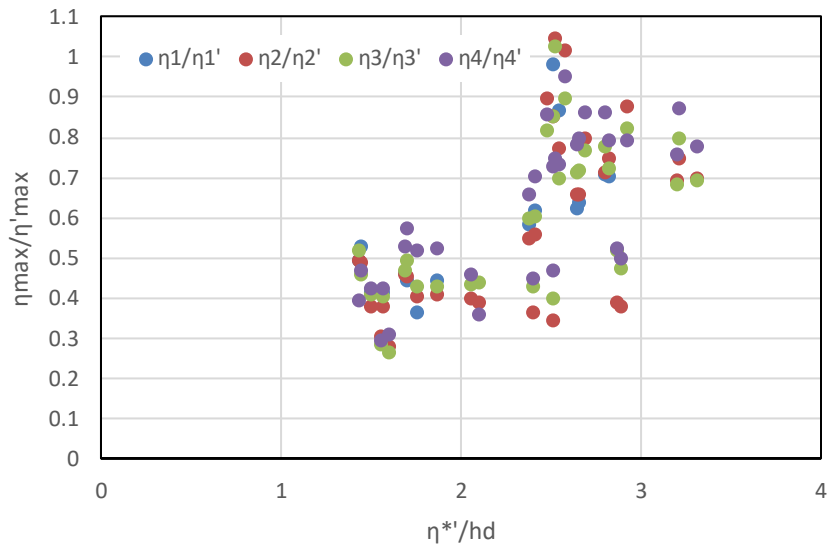


図- 5.5.2 越流度合いと最大浸水深比の関係 (OpenFOAM, 直立護岸, 下段は縦軸 1 以下のみ)

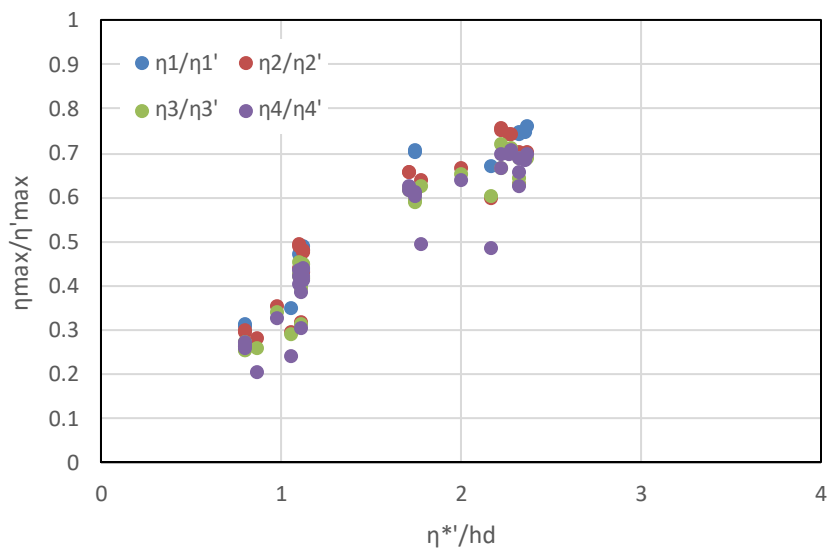


図- 5.5.3 越流度合いと最大浸水深比の関係 (T-STOC, 直立護岸)

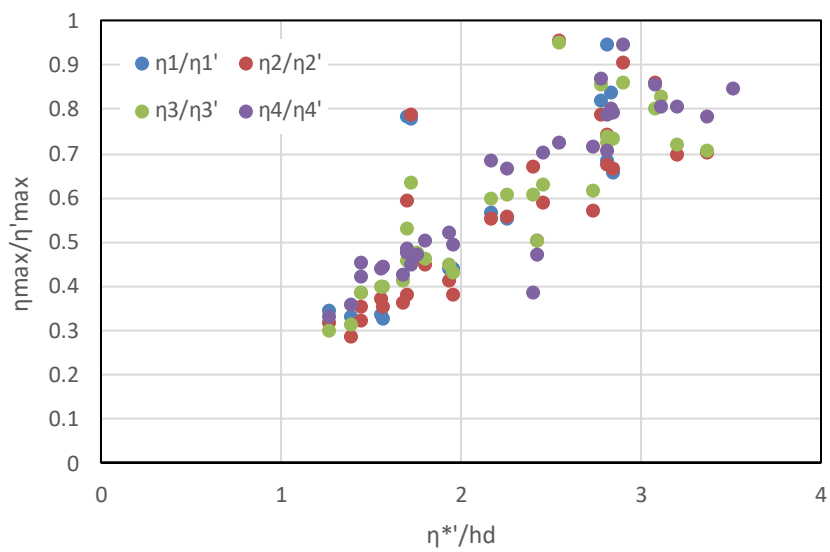
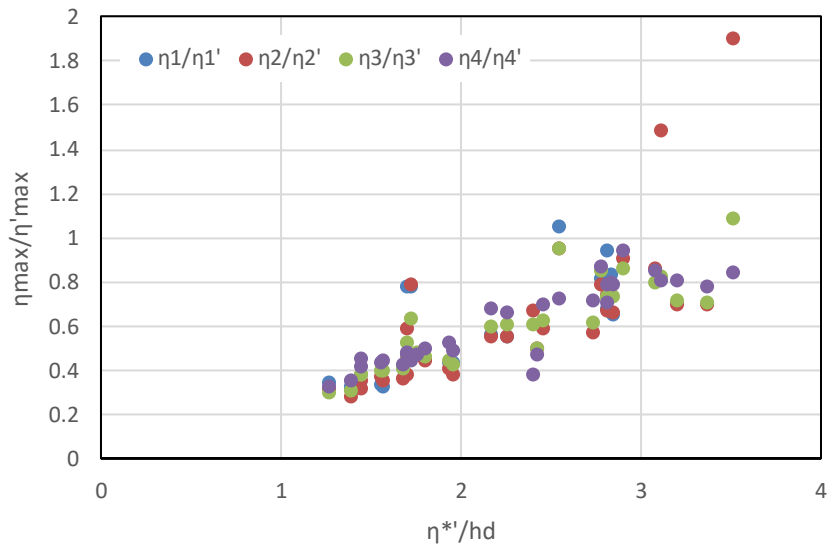


図- 5.5.4 越流度合いと最大浸水深比の関係 (OpenFOAM, 単純勾配, 下段は縦軸 1 以下のみ)

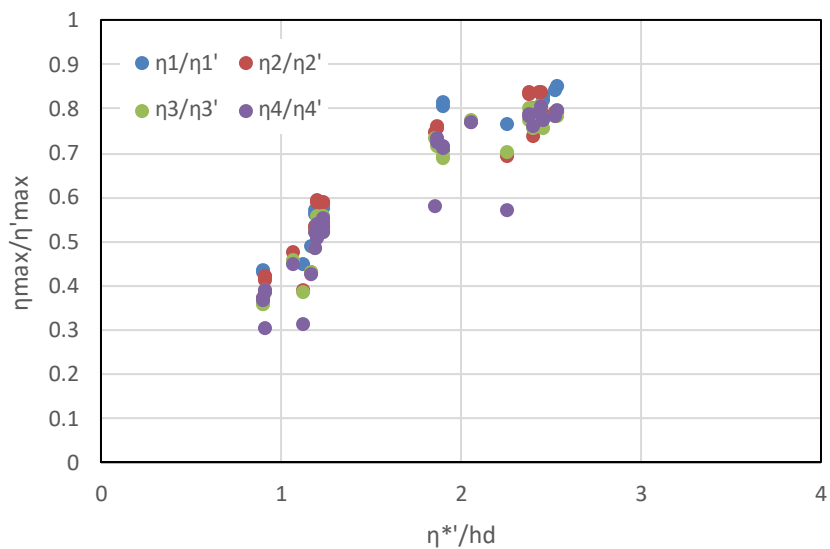


図- 5.5.5 越流度合いと最大浸水深比の関係 (T-STOC, 単純勾配)

6. 越流時における津波波圧評価手法の検討

6.1. 堤体位置の通過波

図-6.1に、堤体設置位置における通過波の、最大浸水深、最大浸水深の95%浸水深、比エネルギー最大時の浸水深 η と、同時刻の流速 V および浸水深と流速から求めたフルード数 Fr をそれぞれ示す。ここで比エネルギー E は、

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

によって定義される。

入射波の津波高が同じ Wd20, Wd21, Wd30, Wd31 については、浸水深と流速がほぼ同じになっており、また、Wd30 と周期特性が同じ Wd40 と Wd41 も、互いにほぼ同じ値を示している。これに対し、Wd10, Wd11 は、同じ津波高の Wd20 等に比較して相対的に浸水深が小さくなっている。このことから、周期特性が短い場合には周期の通過波への影響があるが、本試験の範囲で Wd20 の周期よりも長くなると、周期特性の通過波への影響がなくなることが分かる。

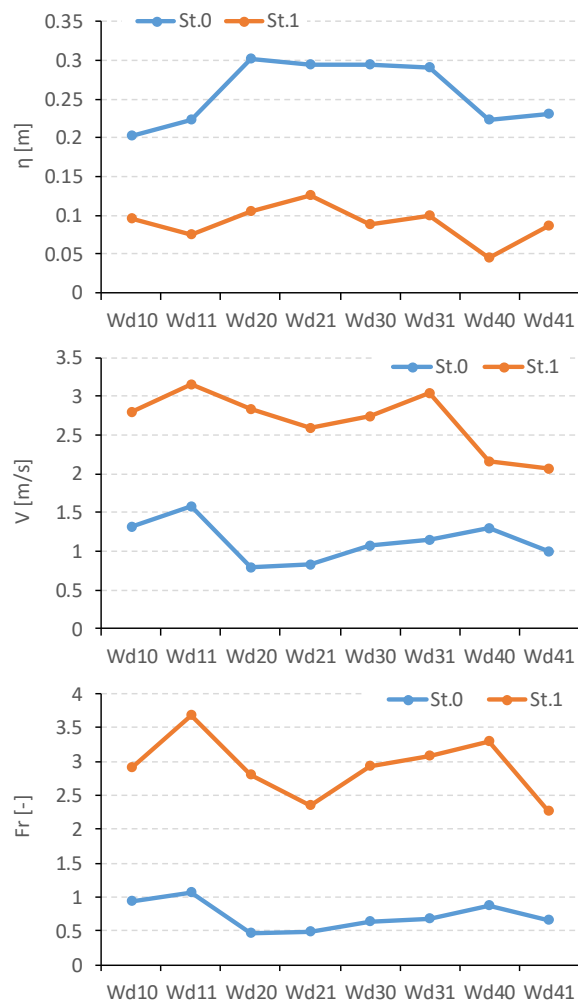
St.0 と St.1 を比較すると、浸水深は St.0 から St.1 にかけて低下しており、流速およびフルード数は、St.0 よりも St.1 の方が大きくなることが分かる。直立護岸の汀線位置では、護岸の反射により水位が上昇し、そのためフルード数は小さくなる。またこの時、汀線近傍に支配断面が生じていると考えられるため、フルード数は1以下となっている。

最大浸水深と95%最大浸水深を比較すると、ケース毎の変動特性は両者で類似している。ただし、95%最大浸水深の方が、最大値が早い時間に生じるため、流速が大きくなり、フルード数も大きくなっている。

比エネルギー最大を基準とした場合、最大浸水深を基準にする場合に比べて、流速やフルード数のケース毎の変化が大きくなっている。比エネルギーの最大値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する。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変動しており、比エネルギー最大の発生時刻が少しずれるだけで、フルード数が大きく違ってくるのが要因と考えられる。



図- 6.1 防潮堤設置位置における最大浸水深と流速，フルード数



(c) 比エネルギー最大時

図- 6.1 防潮堤設置位置における最大浸水深と流速，フルード数

6.2. 越流時の越流最大浸水深

6.2.1. 越流浸水深最大時のフルード数

4章に示した、越流時最大浸水深が発生した時刻の浸水深と流速から求めたフルード数と、越流度合い η^*/h_d の関係を、図-6.2 に示す。堤体背後に位置し越流水塊の落下点近傍となる計測点 (St.1, St.2) の計測結果の一部は、フルード数が小さくなっているが、これを除くとフルード数は概略 1.5~3.0 であり、また、 η^*/h_d に対して、右下がりの傾向であることが分かる。ここでは、このフルード数について、モデル化を試みる。

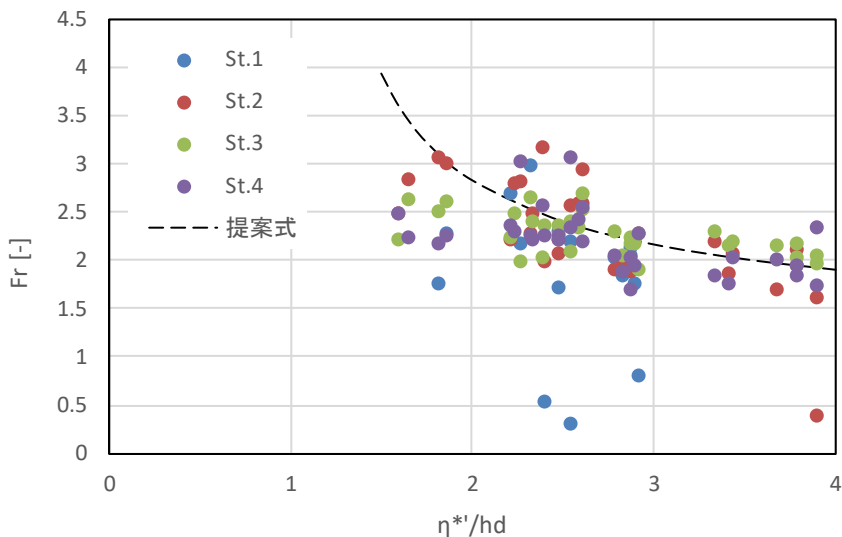


図-6.2 越流度合いと越流浸水深最大時フルード数の関係

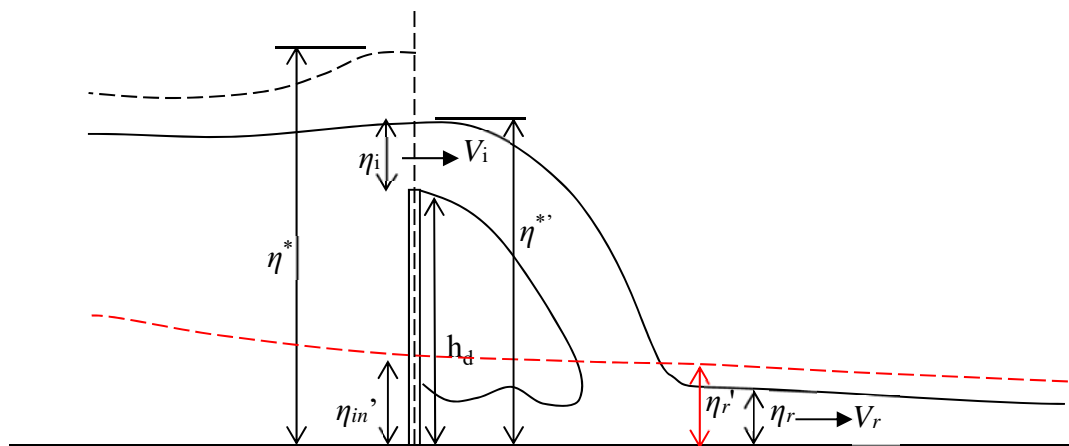


図-6.3 越流最大浸水のモデル概要図

越流後、越流水が着水した付近の浸水深と流速を η_r, V_r 、堤体上の越流時の越流水深と流速を η_i, V_i とする (図-6.3 参照)。また η^* は、堤体が十分に高く非越流の場合の堤体前面せり上がり高を示す。越流後の浸水深は、下流側 (陸上側) の影響を受けないとし、エネルギー損失が無視できると仮定すると、エネルギー保存と流量の保存から次式が成り立つ。

$$\frac{V_i^2}{2g} + \eta_i + h_d = \frac{V_r^2}{2g} + \eta_r, \quad \eta_i V_i = \eta_r V_r \quad (6.2.1)$$

ここから、 V_r を消去し、無次元化すると、

$$\frac{V_i^2}{2g\eta_i} + 1 + \frac{h_d}{\eta_i} = \frac{V_i^2}{2g\eta_i} \left(\frac{\eta_i}{\eta_r}\right)^2 + \frac{\eta_r}{\eta_i} \quad (6.2.2)$$

となる。またフルード数は

$$Fr_r = \frac{V_r}{\sqrt{g\eta_r}}, \quad Fr_i = \frac{V_i}{\sqrt{g\eta_i}} \quad (6.2.3)$$

であるから、

$$\frac{Fr_i^2}{2} + 1 + \frac{h_d}{\eta_i} = \frac{Fr_i^2}{2} \left(\frac{\eta_i}{\eta_r}\right)^2 + \frac{\eta_r}{\eta_i} \quad (6.2.4)$$

$$\left(\frac{Fr_i}{Fr_r}\right)^2 = \left(\frac{\eta_r}{\eta_i}\right)^3 \quad (6.2.5)$$

が成り立つ。両式を用いて η_i を消去すると、

$$Fr_i^2 + 2 + 2\frac{h_d}{\eta_i} = Fr_i^2 \left(\frac{Fr_r}{Fr_i}\right)^{4/3} + 2\left(\frac{Fr_i}{Fr_r}\right)^{2/3} \quad (6.2.6)$$

が得られる。ここで、越流時に支配断面が生じているとし、 $Fr_r=1$ とすると

$$3 + 2\frac{h_d}{\eta_i} = Fr_i^{4/3} + 2Fr_i^{-2/3} \quad (6.2.7)$$

となり、整理すると最終的に次式が得られる。

$$Fr_r^2 - \left(3 + 2\frac{h_d}{\eta_i}\right) Fr_r^{2/3} + 2 = 0 \quad (6.2.8)$$

ここで、

$$\eta_i = \eta^{*'} - h_d \quad (6.2.9)$$

であるから、 η^{*}'/h_d とフルード数の関係は、

$$Fr_r^2 - \left(3 + 2\frac{1}{\eta^{*}'/h_d - 1}\right) Fr_r^{2/3} + 2 = 0 \quad (6.2.10)$$

となる。図-6.2には、提案式として、本式により求めた Fr_r を示した。なお、解析的に解くのは困難なため、数値解析により解を求めた。図-6.2によれば、フルード数の試験結果に流速計測結果の乱れの影響を受けたばらつきが大きいことを考慮すると、本式が試験結果を概略再現していることが分かる。ただし、越流度合い η^{*}'/h_d が小さいほど、本式はフルード数を過大評価する傾向にある。これは、越流後の着水時におけるエネルギー損失を無視していることが主な要因と考えられる。 η^{*}'/h_d が小さいほど、越流時の水平流速は小さくなるため、着水時には着水角度が大きく（鉛直に近く）なり、エネルギー損失が無視できなくなる。本式の適用には、特に越流度合い η^{*}'/h_d が小さい場合に注意が必要である。

なお式(6.2.10)は、 $\eta^{*}'/h_d \rightarrow \infty$ で $Fr_r=1$ に漸近する。上述の式は、越流浸水深が下流側の影響を受けない条件、すなわち射流を対象としているため、 $Fr_r > 1$ の場合に成立する。なお下流側の地形や底面摩擦の影響により越流した流れが常流となる場合、浸水深が下流側の条件により変化するため、越流浸水深は等流解析等により算出する必要がある。

6.2.2. 越流最大浸水深

単位幅当たりの越流量を q 、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）とすると、

$$q = C(\eta^{*'} - h_d)^{3/2} \quad q^2 = C^2(\eta^{*'} - h_d)^3 \quad (6.2.11)$$

となる。また、

$$q = \eta_i V_i = \eta_i \sqrt{g \eta_i} Fr_i = \sqrt{g \eta_i^3} Fr_i \quad (6.2.12)$$

であり、越流時に支配断面が発生しているとする、

$$q = \sqrt{g \eta_i^3} \quad (6.2.13)$$

となる。越流浸水深についても同様に、

$$q = \sqrt{g \eta_r^3} Fr_r \quad (6.2.14)$$

であるから、

$$\sqrt{g \eta_i^3} = \sqrt{g \eta_r^3} Fr_r \quad (6.2.15)$$

$$\eta_i^3 = \eta_r^3 Fr_r^2 \quad (6.2.16)$$

となり、式(6.2.9)を代入すると、

$$(\eta^{*'} - h_d)^3 = \eta_r^3 Fr_r^2 \quad (6.2.17)$$

が得られ、これを無次元化すると、

$$\frac{\eta_r}{h_d} = \frac{1}{Fr_r^{2/3}} \left(\frac{\eta^{*'}}{h_d} - 1 \right) \quad (6.2.18)$$

となる。一方、後述するように、同じ入射津波に対する、越流時と非越流時の堤体位置浸水深 η^* 、 η^* の関係は、次式で表される。

$$\eta^{*2} = \eta^{*'}^2 + \frac{2C^2}{g} (\eta^{*'} - h_d)^2 \quad (6.2.19)$$

これを h_d で無次元化して η^*/h_d について解くと、次式が得られる。

$$\frac{\eta^*}{h_d} = \sqrt{\left(\frac{\eta^{*'}}{h_d} \right)^2 + \frac{2C^2}{g} \left(\frac{\eta^{*'}}{h_d} - 1 \right)^2} \quad (6.2.20)$$

式(6.2.18)と式(6.2.20)から、

$$\frac{\eta_r/h_d}{\eta^*/h_d} = \frac{1}{Fr_r^{2/3}} \left(\frac{\eta^{*'}}{h_d} - 1 \right) / \sqrt{\left(\frac{\eta^{*'}}{h_d} \right)^2 + \frac{2C^2}{g} \left(\frac{\eta^{*'}}{h_d} - 1 \right)^2} \quad (6.2.21)$$

$$\frac{\eta_r}{\eta^*} = \frac{1}{Fr_r^{2/3}} \left(\frac{\eta^{*'}}{h_d} - 1 \right) / \sqrt{\left(\frac{\eta^{*'}}{h_d} \right)^2 + \frac{2C^2}{g} \left(\frac{\eta^{*'}}{h_d} - 1 \right)^2} \quad (6.2.22)$$

となり、ここで、 $C = \sqrt{g} = 3.13$ 仮定すると、

$$\frac{\eta_r}{\eta^*} = \frac{1}{Fr_r^{2/3}} \left(\frac{\eta^{*'}}{h_d} - 1 \right) / \sqrt{3 \left(\frac{\eta^{*'}}{h_d} \right)^2 - 4 \frac{\eta^{*'}}{h_d} + 2} \quad (6.2.23)$$

となる。ここで Fr_r は、式(6.2.10)により与えられる。

式(6.2.23)は、水深係数 α を導入すると、 $\eta^* = \alpha \eta_{in}'$ (η_{in}' は、堤体位置の通過波浸水深) であり、

$$\frac{\eta_r}{\eta_{in}'} = \frac{\alpha}{Fr_r^{2/3}} \left(\frac{\eta^{*'}}{h_d} - 1 \right) / \sqrt{3 \left(\frac{\eta^{*'}}{h_d} \right)^2 - 4 \frac{\eta^{*'}}{h_d} + 2} \quad (6.2.24)$$

の関係となる。

上式の中で、 η_r は越流後の堤体背後に着水した付近の浸水深であり、また η_{in}' は堤体位置の通過波浸水深である (図- 6.3 参照)。図- 6.4 は、 η_r/η_{in}' と η/η' の関係を示したものである。越流浸水深と通過波浸水深は、いずれも陸上側 (下流側) の観測点ほど浸水深は低下する傾向にあるため、その低減率が同程度であれば、その比は 1 に近い値となる。図- 6.4 で、 η/η' は概略傾き 1 の直線よりも小さくなっていることが分かる。ここでは、安全側の近似として $\eta_r/\eta_{in}' \cong \eta/\eta'$ とすると、最終的に式(6.2.24)より、次式が得られる。

$$\frac{\eta}{\eta'} = \frac{\alpha}{Fr_r^{2/3}} \left(\frac{\eta^{*'}}{h_d} - 1 \right) / \sqrt{3 \left(\frac{\eta^{*'}}{h_d} \right)^2 - 4 \frac{\eta^{*'}}{h_d} + 2} \quad (6.2.25)$$

図- 6.5 に、4 章に示した試験結果に、式(6.2.25)による算出結果を合わせて示した。本式の適用には、水深係数 α が必要となる。本試験に用いた試験ケースの水深係数は、類似事業の結果を参考にすると、 $\alpha=1.5 \sim 3$ 程度と想定されるが、一般に用いられる $\alpha=3$ を適用した場合、本式は試験結果の上限値を適切に評価していることが分かる。なお、併記した Fr は、 $\alpha=1+0.5Fr^2$ の関係を用いた場合のフルード数である。図- 6.5(a)は、計測点別に示したものであるが、St.1, St.2 の η^*/h_d が大きくなる傾向にある。これは堤体近傍の点であるために、越流最大浸水深 η_{max} の計測値が大きめになることが影響している。一方、St.3, St.4 は同程度の範囲に分布しており、 η^*/h_d と η_{max}/η'_{max} の関係は堤体からの距離に関わらず、一定の関係があることが分かる。図- 6.5(b)は、波種別に示したものである。Wd10, Wd11 は、周期が短く他のケースと特性が異なるため、 η^*/h_d と η_{max}/η'_{max} の関係も他のケースとは異なっている。一方、これよりも周期の長いその他のケースでは、波の周期特性や津波高に関わらず、同じ η^*/h_d と η_{max}/η'_{max} の関係を示していることが分かる。

試験結果のばらつきの要因としては、それぞれのパラメタが浸水深計測結果の最大値を取っていることから、水面の擾乱等による瞬間的な水位の上昇値を計測して場合があることに加え、次のことが考えられる。横軸の η^* をここでは越流時せり上がり高の最大値としているが、越流最大浸水深が発生する際の越流時せり上がり高は必ずしもこれに一致せず、これよりもいくらか小さいと考えられる。また、水理試験での η^* の計測点は堤体前面であるが、支配断面の発生位置はこれよりも陸側 (下流側) であると考えられるため、 η^* は大きめの計測結果になっていると考えられる。これらのことから、水理試験結果の η^*/h_d は、過大に評価されていることが考えられ、本来の試験結果はこれよりも左にプロットされると考えられる。特に St.3 や St.4 の陸側の観測点ほど、越流最大浸水深の発生時刻が遅れているため、越流時せり上がり高の発生時刻と越流最大浸水深の発生時刻のずれが大きくなり、 η^*/h_d をより過大に評価していると考えられる。

水深係数 α の評価については、堤体位置の通過波のフルード数から評価する既往の提案式を 1 章に示した。ただし、これらの式は最大波圧を対象としたものであり、越流最大浸水深の発生時刻と最大波圧の発生時刻は異なる。本式の結果から、水深係数については安全側の 3 を見込むことが適切と考えられる。

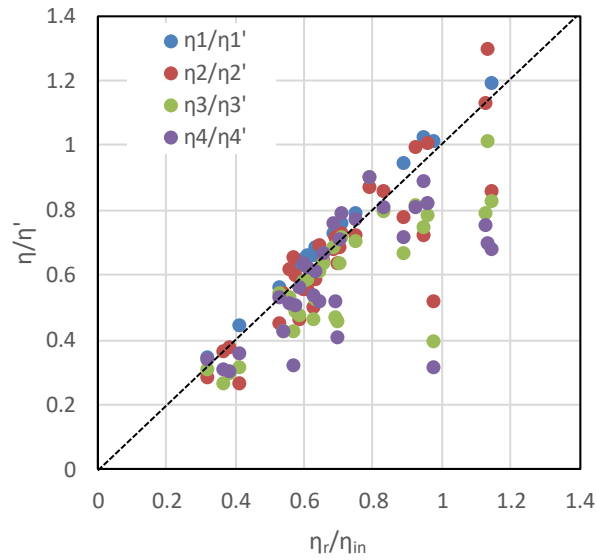


図-6.4 越流度合いと最大浸水深比の関係の試験結果と提案式の比較

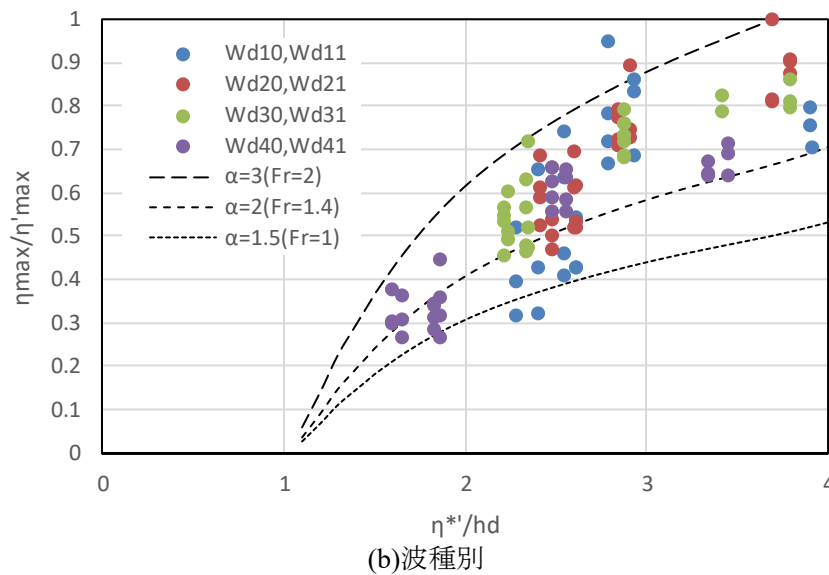
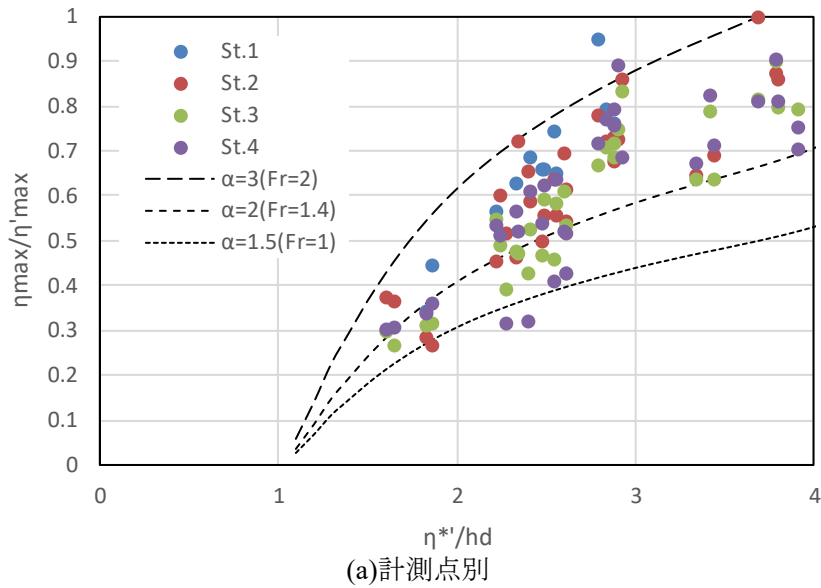


図-6.5 越流度合いと最大浸水深比の関係の試験結果と提案式の比較

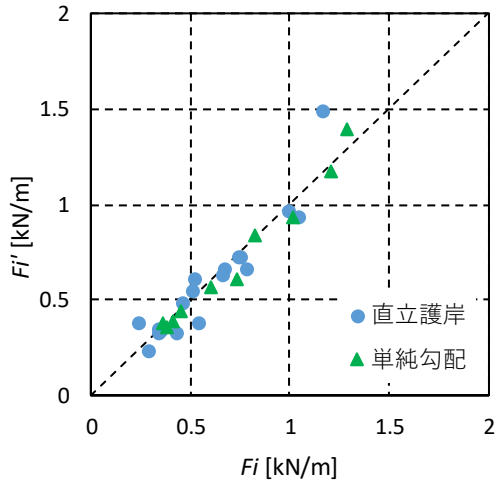
6.3. 越流時の波圧評価

6.3.1. 段波波圧と持続波圧

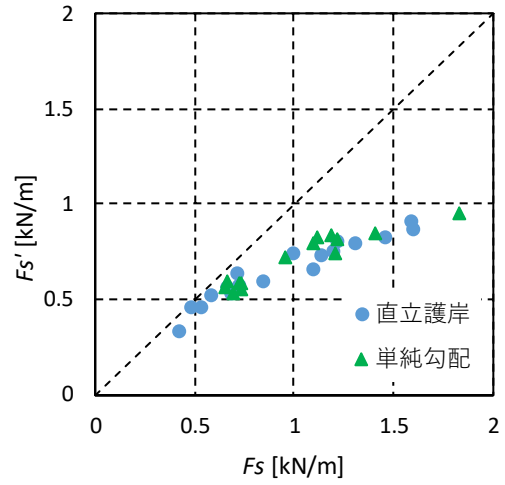
本事業においては、越流後の浸水深に着目した試験を実施したため、越流時に堤体に働く波圧に関する計測は実施していない。ここでは、類似事業（「平成29年度原子力施設等防災対策等委託費（耐津波設計・フラジリティ評価手法の整備に係る防潮堤水理試験（波圧影響）事業）」で取得されたデータに基づき、越流時の波圧評価手法について検討し、その適用性を検証する。

一般に津波波圧は、津波衝突時に働く衝撃的な段波波圧と、その後準定常的に働く持続波圧とに分けられる。段波波圧では、段波波圧発生時の堤体前面せり上がり高に対する静水圧分布ではなく、水面近くまで大きな圧力が働く。このため、せり上がり高が小さくても大きな津波波力となる場合がある。ただし、一般にそのせり上がり高は入射波の津波高よりも低いため、類似事業においても段波波圧の作用高さよりも低い堤体高は試験ケースとして考慮おらず、段波津波に対しては津波波力の低減効果は確認されていない。図-6.6は、堤体が十分に高く越流しない場合の津波波力 F_i, F_s と越流する場合の津波波力 F_i', F_s' を、段波波圧（添え字 i ）と持続波圧（添え字 s ）についてそれぞれ比較したものである。持続波圧については、越流することにより波力が明確に低減しているが、段波波圧ではほとんど波力は低下していないことが分かる。図-6.7は、堤体前面せり上がり高と、これを通過波最大浸水深で除することにより求めた水深係数について、持続波圧最大時と段波波圧最大時の値を比較したものである。両者はともに段波波圧に対する値の方が小さく、勾配0.7の直線を下回る。このことから、ある想定津波に対し適切な防潮堤高を設定した場合、想定を超える津波に対し持続波圧発生時は越流するが、段波波圧発生時には想定のおよそ1.4倍以上の津波が来襲した場合に越流が生じることになる。

以上の理由から、以下では段波波圧については越流影響の評価方法の検討対象としないこととする。段波波圧の作用高さよりも低い堤体高を対象とした場合には、その波圧分布への越流の影響は小さいと考えられるため、堤体高が十分に高い場合に働く段波波圧分布に対し、実際の堤体高部分の圧力を考慮することにより、安全側の評価が可能になると考えられる。

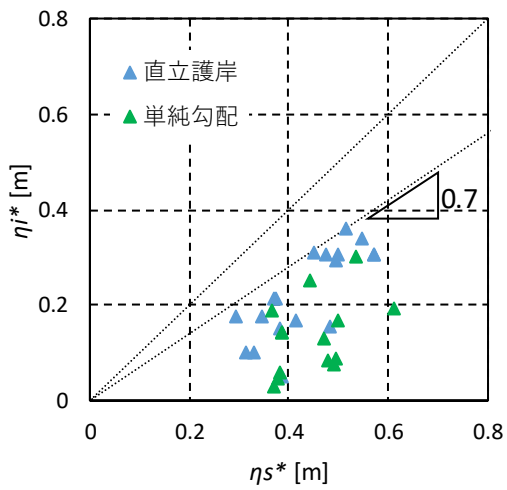


(a)段波波圧

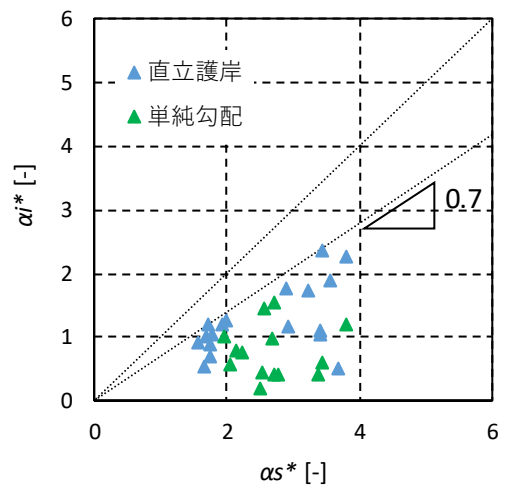


(b)持続波圧

図-6.6 越流による波圧低減効果の比較



(a)せり上がり高



(b)水深係数

図-6.7 持続波圧と段波波圧の比較

6.3.2. 越流時の持続波圧評価

越流する場合の波圧は、堤体が十分に高く非越流の場合の圧力分布に対し、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する。ここでは、図-6.8に示すパラメタを考える。静水圧分布を仮定し、越流時の堤体高さを h_d とし、非越流の場合の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、これと通過波深水深との比を α' とする。また、越流時と非越流時で圧力分布が仮に等しい場合にも、堤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を仮定しているが、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、試験ケースによっては値がばらつき、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。

$$\alpha = \frac{\eta^*}{\eta} \quad \eta^* = \sqrt{\frac{2F}{\rho g}} \quad (6.3.1)$$

$$\alpha' = \frac{\eta^{*'}}{\eta} \quad \eta^{*'} = \frac{F'}{\rho g h_d} + \frac{1}{2} h_d \quad (6.3.2)$$

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、水深 $\alpha\eta$ の静水圧を積分して得られた波力が、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与える α となるため、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よりも低い場合があることに注意が必要である。

上述のパラメタを用いて、越流時の波力評価を以下に定式化する。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、

$$\frac{1}{2} \rho g \eta^{*2} = \frac{1}{2} \rho g \eta^{*'^2} + \rho \frac{q^2}{\eta^{*'} - h_d} \quad (6.3.3)$$

の関係が成り立つ。また、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、

$$q = C(\eta^{*'} - h_d)^{3/2} \quad q^2 = C(\eta^{*'} - h_d)^3 \quad (6.3.4)$$

とする。これを式(6.3.3)に代入して整理すると、

$$\eta^{*2} = \eta^{*'^2} + \frac{2C^2}{g} (\eta^{*'} - h_d)^2 \quad (6.3.5)$$

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。

$$1 = \left(\frac{\eta^{*'}}{\eta^*}\right)^2 + \frac{2C^2}{g} \left(\frac{\eta^{*'}}{\eta^*} - \frac{h_d}{\eta^*}\right)^2 \frac{\eta^{*'}}{\eta^*} = \frac{\frac{2C^2}{g} \frac{h_d}{\eta^*} + \sqrt{\frac{2C^2}{g} \left\{1 - \left(\frac{h_d}{\eta^*}\right)^2\right\}} + 1}{1 + \frac{2C^2}{g}} \quad (6.3.6)$$

$$\frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{\eta^{*'}}{\eta^*} = \frac{\frac{2C^2}{g} + \sqrt{\frac{2C^2}{g} \left\{\left(\frac{\eta^*}{h_d}\right)^2 - 1\right\}} + \left(\frac{\eta^*}{h_d}\right)^2}{\left(1 + \frac{2C^2}{g}\right) \frac{\eta^*}{h_d}} \quad (6.3.7)$$

また、堤体に働く波力は

$$F' = \frac{1}{2} \rho g \eta^{*'}{}^2 - \frac{1}{2} \rho g (\eta^{*'} - h_d)^2 \quad (6.3.8)$$

$$F^* = \frac{1}{2} \rho g h_d (2\eta^* - h_d) \quad (6.3.9)$$

であるから、これを式(6.3.5)に代入して整理すると、

$$\left(1 + \frac{2C^2}{g}\right) \left(\frac{2\eta^*}{h_d} - 1\right)^2 \left(\frac{F'}{F^*}\right)^2 + 2 \left(1 - \frac{2C^2}{g}\right) \left(\frac{2\eta^*}{h_d} - 1\right) \frac{F'}{F^*} + 1 + \frac{2C^2}{g} - 4 \left(\frac{\eta^*}{h_d}\right)^2 = 0 \quad (6.3.10)$$

となる。また、式(6.3.8)より

$$\eta^{*'} = \frac{F'}{\rho g h_d} + \frac{h_d}{2} \quad (6.3.11)$$

であるため、これを式(6.2.5)に代入して整理すると、

$$\left(\frac{F'}{\rho g h_d^2} + \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2C^2}{g} \left(\frac{F'}{\rho g h_d^2} - \frac{1}{2}\right)^2 = \left(\frac{\eta^*}{h_d}\right)^2 \quad (6.3.12)$$

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(6.3.7)、式(6.3.10)、式(6.3.12)に代入すると、それぞれ以下の式となる。

$$\frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{\eta^{*'}}{\eta^*} = \frac{2 + \sqrt{3 \left(\frac{\eta^*}{h_d}\right)^2 - 2}}{3 \frac{\eta^*}{h_d}} \quad (6.3.13)$$

$$\frac{F'}{F^*} = \frac{1 + 2 \sqrt{3 \left(\frac{\eta^*}{h_d}\right)^2 - 2}}{3 \left(\frac{2\eta^*}{h_d} - 1\right)} \quad (6.3.14)$$

$$\frac{F'}{\rho g h_d^2} = \frac{1}{6} \left(1 + 2 \sqrt{3 \left(\frac{\eta^*}{h_d}\right)^2 - 2}\right) \quad (6.3.15)$$

なお、式(6.3.15)は、 $\eta^*/h_d \rightarrow \infty$ で、 $0.58\eta^*/h_d$ に漸近する。

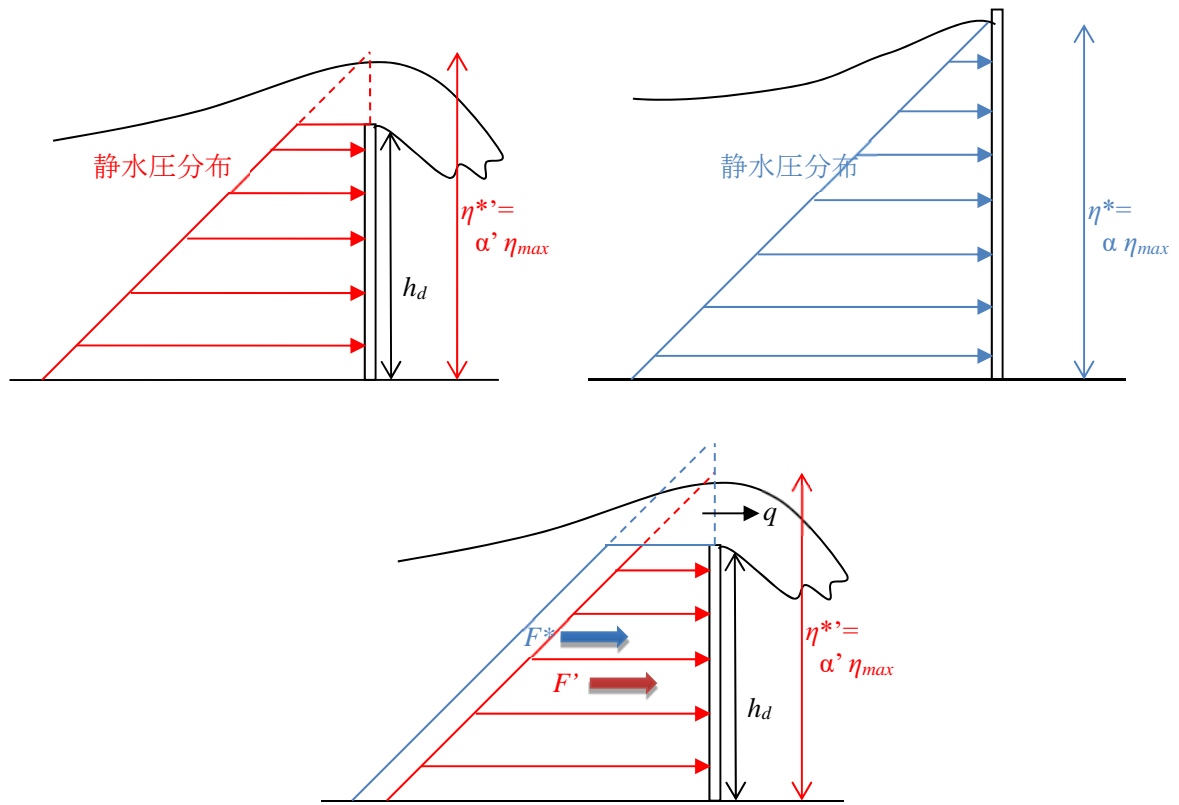
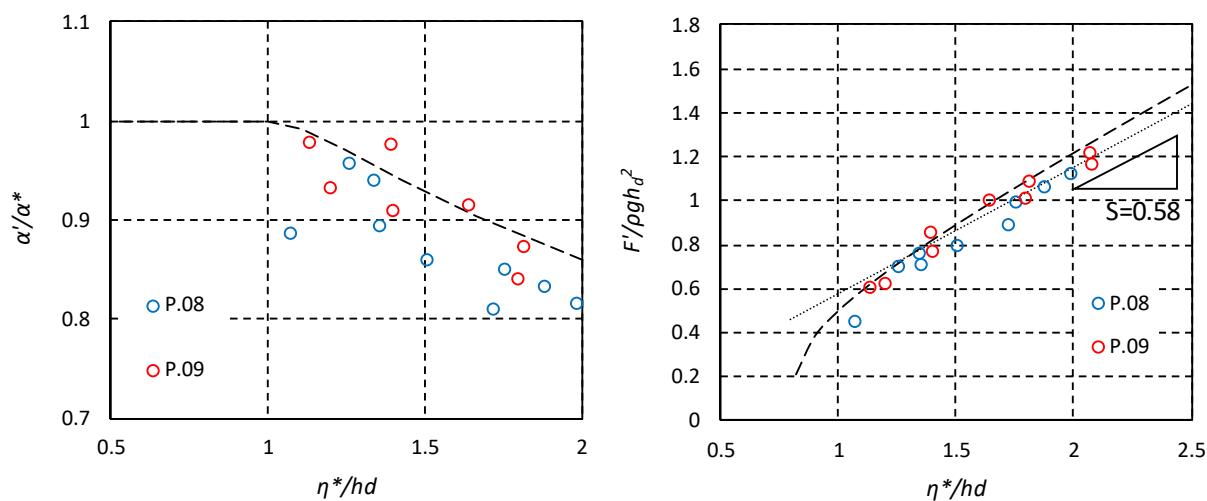


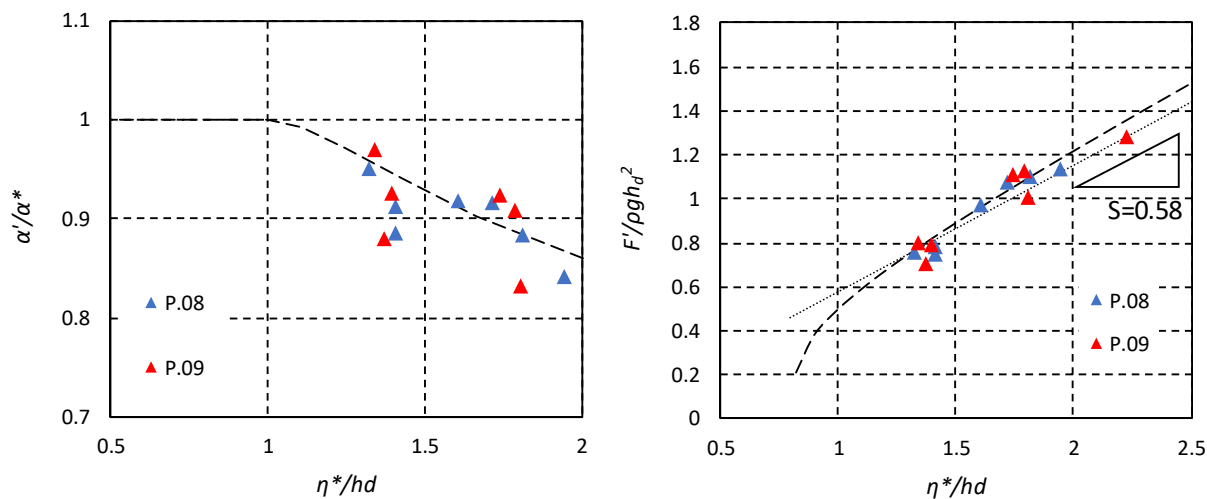
図- 6.8 越流時の津波波力の各パラメタの定義

図- 6.9 に、越流の有無による水深係数の比と越流による波力の低減効果と、津波の規模を示す非越流時の堤体前面せり上がり高 η^* と堤体高 h_d の比 η^*/h_d の関係を示す。図中には、式(6.3.15)の値を破線で示した。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。

本試験ケースでは、非越流時の水深係数は $\alpha=2\sim4$ に分布している。水深係数比の図によれば、水深係数の大きさに関係なく、同じ η^*/h_d との関係を示している。一般に、水深係数は通過波のフルード数の関数となることから、入射津波のフルード数が異なっても、図- 6.9 に示す関係が成り立っていることが分かる。



(a) 直立護岸



(b) 単純勾配

図- 6.9 越流水深と水深係数比・無次元波力の関係

※「平成29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（波圧影響）事業）で取得されたデータを適用

7. 漂流物試験方法

7.1. 試験装置

7.1.1. 試験縮尺

想定する模型縮尺は越流試験と同じ、1/80とした。

7.1.2. 試験水槽と地形模型

水理試験は、越流試験と共通の試験水槽を用い、海底地形についても越流試験と同じとした。

7.1.3. 防潮堤模型

衝突力を測定するための防潮堤模型を、汀線位置と汀線から0.625mの2種類の位置に設置し、堤体の高さは越流の生じない0.6mとした。漂流物の衝突力は、堤体模型に設置したひずみゲージにより計測したが、堤体全体（幅0.8m）に働く波力に対して衝突力が小さいため、堤体全体のひずみを計測した場合、衝突力によるひずみが明確に生じないこと、および、堤体のひずみが幅方向にも分布するため、堤体全体の広範囲のひずみを計測する必要があることから、以下のような堤体模型により衝突力を計測した（図-7.1参照）。

堤体模型は、堤体衝突位置で幅4cmの4本の帯状の壁体をわずかな隙間（0.1mm程度）で並べ、それ以外は固定した壁体で作成した。なお、この隙間にはテープ等を設置していないため、津波作用時には少量の水が漏れるが、水圧への影響は多少考えられるが、衝突力計測への影響はほとんどないと考えられる。帯状の壁体それぞれにひずみゲージを設置して、漂流物がこれらのうちのいずれか1本に衝突するように漂流物の初期位置を決めて実験を実施した。この方法によると、衝突力は幅4cmの壁体模型に作用するため、比較的大きなひずみが生じ、ひずみの幅方向の分布の影響も小さくなる。ひずみ計測結果のイメージを図-7.3に示すが、衝突していない3枚の帯状壁体に生じるひずみに対し、衝突した1枚には衝突によるひずみが加算されたひずみが生じる。したがってひずみの線形性を仮定すると、衝突した1枚のひずみの計測結果から、その他の3枚のひずみを減ずることにより、漂流物の衝突の影響のみによるひずみを算定することが出来る。

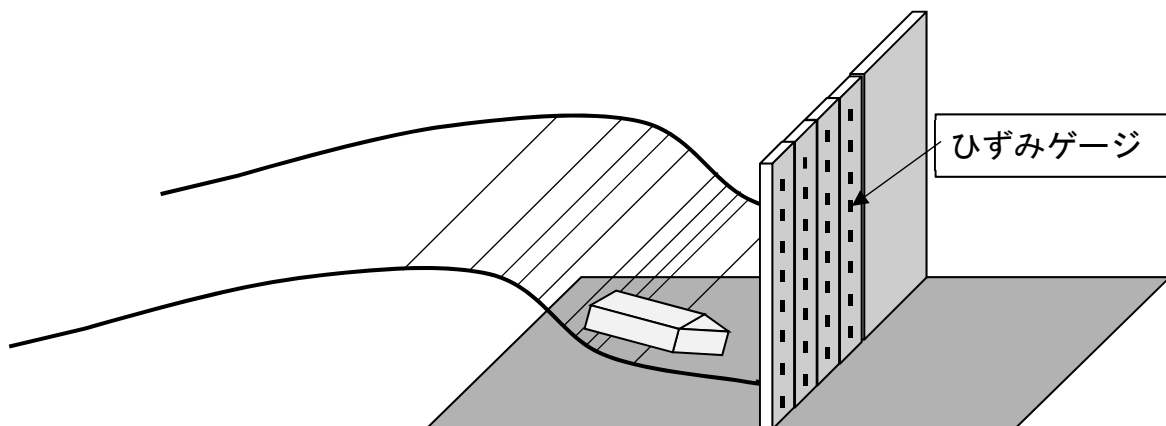


図-7.1 防潮堤模型のイメージ図

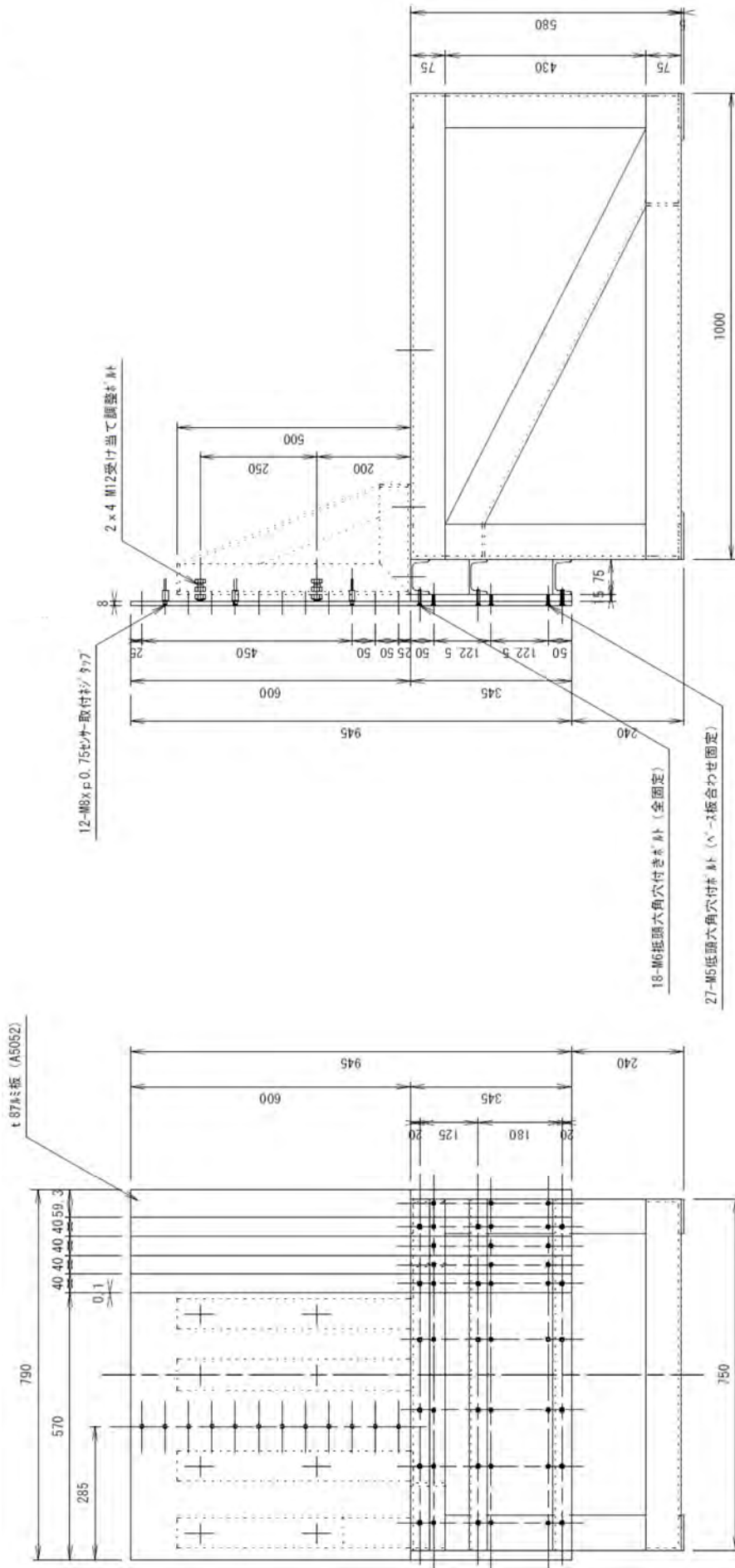


図-7.2 防潮堤模型

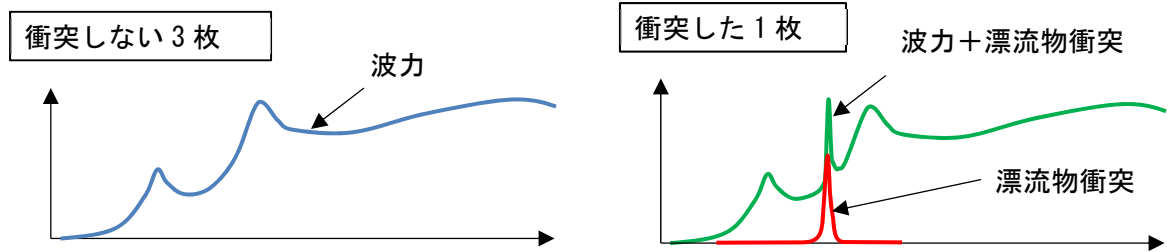


図- 7.3 ひずみ計測結果のイメージ図

7.1.4. 漂流物模型

漂流物は、流木や小型船舶を対象に、3種類を製作した(図-7.6)。漂流物模型はアクリル製とし、図-7.4に示すように、内部に電池とLEDを組み込むことにより、画像による移動軌跡の取得を容易にすることを試みた。

後述するように、実験は同じ条件で15回繰り返したが、実験毎の漂流開始時の漂流物初期位置を同じ位置にするため、電磁石により微弱な力で漂流物の初期位置を保持し、津波が入射するタイミングで電流を遮断して、漂流物が自由に移動できる状態とした。



図- 7.4 漂流物模型の構造

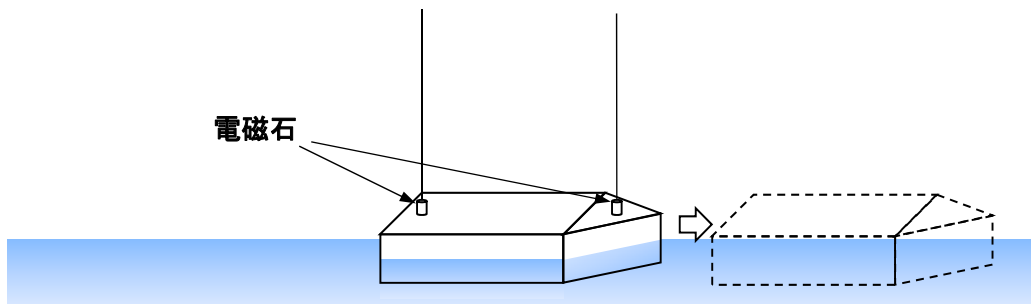
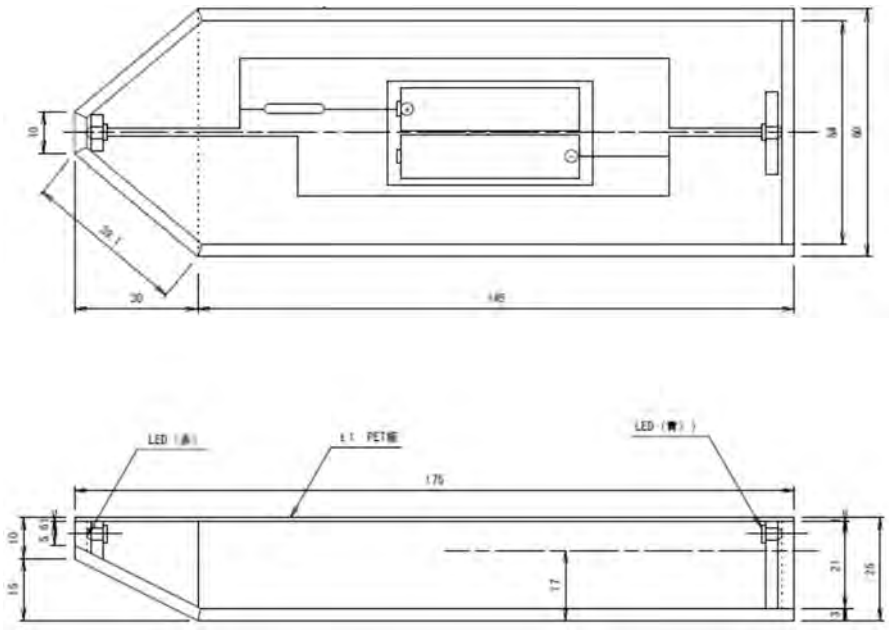
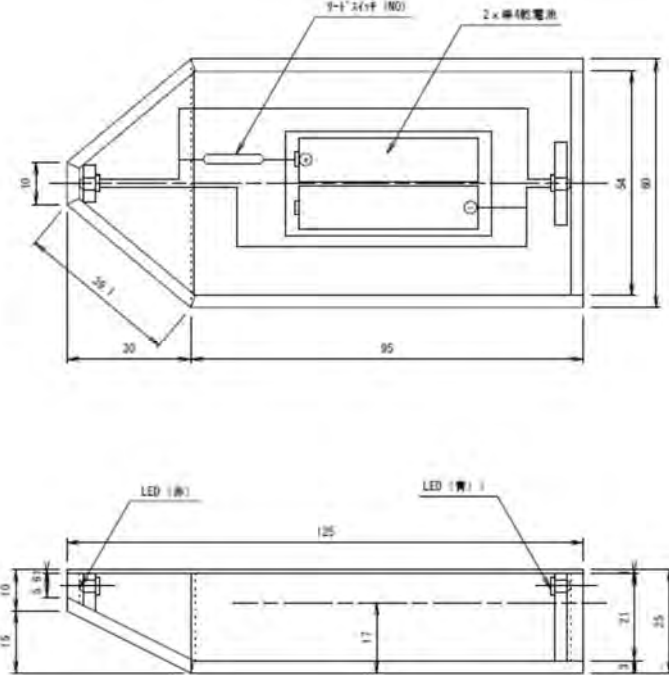


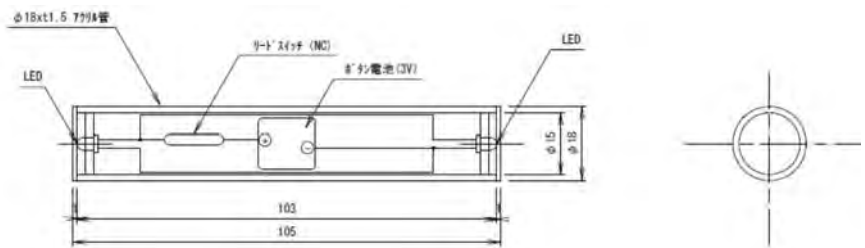
図- 7.5 漂流物初期位置の保持方法



漂流物 A (151.8g)



漂流物 B (106.0g)



漂流物 C (23.0g)

图- 7.6 漂流物模型

7.1.5. 計測項目及び計測方法

計測項目は、水位、堤体前面圧力、ひずみ鉛直分布および衝突時の動画撮影とした。圧力とひずみの計測位置を、図-7.7に示す。水位と圧力計測のサンプリング間隔は1ms、ひずみは0.1msとし、各計測項目を同期させて計測した。

(1) 水位

水位は、入射波の計測として、計測点 A, B, C (越流試験参照) の3点において、また、堤体前面水位として側壁より24cmの位置で、容量式水位計により計測した。

(2) 圧力

圧力の計測点は、側壁より29cmの位置とし、高さ方向に5cmまたは10cm間隔で小型の水圧計(エス・エス・ケイ, P208-02)を設置して計測した。

(3) ひずみゲージ

ひずみは、堤体の裏側に高さ方向5cm間隔(ε10のみ10cm間隔)でひずみゲージ(共和電業, KFG-5-120-C1-23)を貼付して計測した。

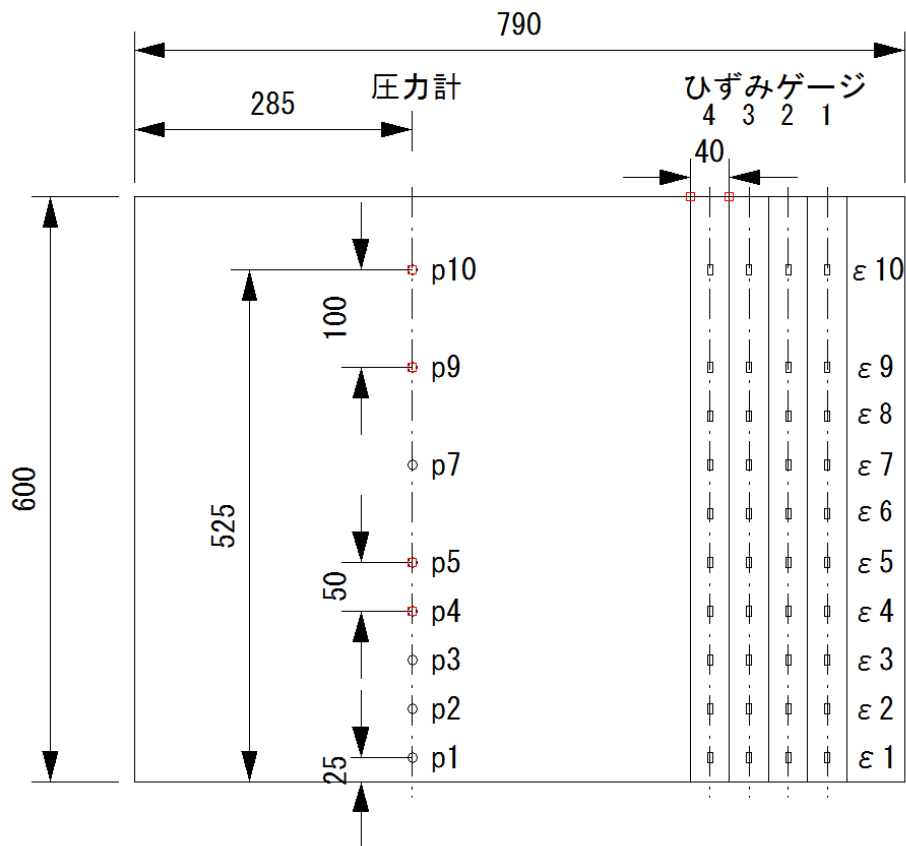


図-7.7 防潮堤模型の圧力・ひずみ計測位置

7.2. 試験ケース

7.2.1. 予備試験

試験に先立ち、漂流物の衝突が顕著に確認される波形を設定するため、表-7.1に示す4種類の対象波形（越流試験参照）について、堤体位置を汀線より0, 0.625mの2種類、漂流物の初期位置を0.5, 1.0, 2.0mの3種類、漂流物模型を3種類の72ケースについて試験を実施した。なお計測結果の確認のため、同じ試験を3回繰り返した。

表-7.1 通過波検定試験の試験ケース

No	ケース名	波形	堤体位置	漂流物	漂流物位置	繰り返し		
1	F-Wd10-0-□-05	Wd10	0	A, B, C	0.5m	3		
2	F-Wd20-0-□-05	Wd20						
3	F-Wd30-0-□-05	Wd30						
4	F-Wd40-0-□-05	Wd40			1.0m			
5	F-Wd10-0-□-10	Wd10						
6	F-Wd20-0-□-10	Wd20						
7	F-Wd30-0-□-10	Wd30			2.0m			
8	F-Wd40-0-□-10	Wd40						
9	F-Wd10-0-□-20	Wd10						
10	F-Wd20-0-□-20	Wd20			0.625m		A, B, C	0.5m
11	F-Wd30-0-□-20	Wd30						
12	F-Wd40-0-□-20	Wd40						
13	F-Wd10-1-□-05	Wd10	1.0m					
14	F-Wd20-1-□-05	Wd20						
15	F-Wd30-1-□-05	Wd30						
16	F-Wd40-1-□-05	Wd40	2.0m					
17	F-Wd10-1-□-10	Wd10						
18	F-Wd20-1-□-10	Wd20						
19	F-Wd30-1-□-10	Wd30	0.5m					
20	F-Wd40-1-□-10	Wd40						
21	F-Wd10-1-□-20	Wd10						
22	F-Wd20-1-□-20	Wd20	1.0m					
23	F-Wd30-1-□-20	Wd30						
24	F-Wd40-1-□-20	Wd40						

※□は、A,B,Cのいずれか。

試験数：216

7.2.2. 漂流物試験

後述する予備試験の結果から、漂流物の衝突が比較的顕著なケースを選択し、表-7.2に示す32ケースについて漂流物試験を実施した。なお、試験毎のばらつきを確認するため、同じ試験を15回繰り返した。

表-7.2 漂流物試験の試験ケース

No	ケース名	波形	堤体位置	漂流物	漂流物位置	繰り返し
1	F-Wd10-0-A-05	Wd10	0m	A	0.5m	15
2	F-Wd20-0-A-05	Wd20				
3	F-Wd30-0-A-05	Wd30				
4	F-Wd40-0-A-05	Wd40				
5	F-Wd20-0-A-10	Wd20			1.0m	
6	F-Wd30-0-A-10	Wd30				
7	F-Wd10-0-A-20	Wd10				
8	F-Wd20-0-A-20	Wd20			2.0m	
9	F-Wd30-0-A-20	Wd30				
10	F-Wd20-0-B-05	Wd20				
11	F-Wd30-0-B-05	Wd30		B	0.5m	
12	F-Wd40-0-B-05	Wd40				
13	F-Wd20-0-B-10	Wd20				
14	F-Wd30-0-B-10	Wd30			1.0m	
15	F-Wd10-0-B-20	Wd10				
16	F-Wd20-0-C-05	Wd20				
			C	0.5m		
17	F-Wd10-1-A-05	Wd10	0.625m	A	0.5m	15
18	F-Wd20-1-A-05	Wd20				
19	F-Wd30-1-A-05	Wd30				
20	F-Wd40-1-A-05	Wd40				
21	F-Wd20-1-A-10	Wd20			1.0m	
22	F-Wd30-1-A-10	Wd30				
23	F-Wd10-1-A-20	Wd10				
24	F-Wd20-1-A-20	Wd20			2.0m	
25	F-Wd30-1-A-20	Wd30				
26	F-Wd20-1-B-05	Wd20				
27	F-Wd30-1-B-05	Wd30		B	0.5m	
28	F-Wd40-1-B-05	Wd40				
29	F-Wd20-1-B-10	Wd20				
30	F-Wd30-1-B-10	Wd30			1.0m	
31	F-Wd10-1-B-20	Wd10				
32	F-Wd20-1-C-05	Wd20				
			C	0.5m		

試験数：480

7.3. 試験手順

津波の造波準備が完了後、漂流物保持装置の電源を入れて、漂流物を電磁石により固定した(図-7.8)。造波後、波が近接してきた段階で電源を切り、漂流物が漂流可能な状態とした。漂流状態は、水槽側壁のガラス面より高速ビデオカメラにより撮影した。この時、撮影画像と各計測値とは、同期させて計測した。各計測項目を計測するとともに、撮影した動画から衝突時の漂流物の衝突速度を取得した。



図- 7.8 漂流物の初期位置保持状況

8. 漂流物試験結果

8.1. 予備試験結果

予備試験の結果を、表-8.1に示す。3回の繰り返しのうち、漂流物の衝突が確認されたケースを○で示している。これによると、Wd10, Wd20のような津波波形としての周期特性が短い波形ほど、また漂流物の初期位置が堤体に近いほど、衝突しやすい傾向にあることが分かる。また、より質量の大きい漂流物 Aの方が Bよりも衝突しやすい傾向にある。なお漂流物 Cについては、ひずみゲージの反応から衝突していると考えられるものを、衝突ありと判断したが、そのひずみは極めて小さく、いずれのケースも顕著な衝突力は生じていないと考えられる。

予備試験の結果から、前述の漂流物試験（本試験）の試験ケースを決定した。選択したケースをグレーで網掛けしている。もっとも衝突が顕著なのは Wd10 であるが、Wd10 は巻波タイプの砕波を伴って堤体に津波が衝突し、漂流物が砕波に巻き込まれているため、より津波波形が一般的と考えられる Wd20 を基本とし、漂流物の種類や初期位置の影響が比較できるように試験ケースを選択した。

表- 8.1 予備試験結果

波形	漂流物	初期位置	堤体位置 0m			繰返し			堤体位置 0.625m			繰返し		
			ケース名			1	2	3	ケース名			1	2	3
Wd10	A	0.5m	F-Wd10-0-A-05	○	○	○	F-Wd10-1-A-05	○	○	○				
Wd20			F-Wd20-0-A-05	○	○	○	F-Wd20-1-A-05	○		○				
Wd30			F-Wd30-0-A-05	○	○	○	F-Wd30-1-A-05	○	○	○				
Wd40			F-Wd40-0-A-05	○		○	F-Wd40-1-A-05	○	○					
Wd10		F-Wd10-0-A-10	○		○	F-Wd10-1-A-10			○					
Wd20		F-Wd20-0-A-10	○	○	○	F-Wd20-1-A-10	○		○					
Wd30		F-Wd30-0-A-10	○	○	○	F-Wd30-1-A-10	○		○					
Wd40		F-Wd40-0-A-10	○			F-Wd40-1-A-10								
Wd10		F-Wd10-0-A-20	○	○	○	F-Wd10-1-A-20	○	○	○					
Wd20		F-Wd20-0-A-20	○	○	○	F-Wd20-1-A-20	○	○						
Wd30		F-Wd30-0-A-20	○			F-Wd30-1-A-20		○	○					
Wd40		F-Wd40-0-A-20				F-Wd40-1-A-20								
Wd10	B	0.5m	F-Wd10-0-B-05	○	○	○	F-Wd10-1-B-05	○						
Wd20			F-Wd20-0-B-05	○		○	F-Wd20-1-B-05		○					
Wd30			F-Wd30-0-B-05	○	○	○	F-Wd30-1-B-05	○	○	○				
Wd40			F-Wd40-0-B-05	○	○	○	F-Wd40-1-B-05	○	○	○				
Wd10		F-Wd10-0-B-10	○	○	○	F-Wd10-1-B-10			○					
Wd20		F-Wd20-0-B-10	○	○	○	F-Wd20-1-B-10	○		○					
Wd30		F-Wd30-0-B-10	○	○	○	F-Wd30-1-B-10	○	○	○					
Wd40		F-Wd40-0-B-10				F-Wd40-1-B-10			○					
Wd10		F-Wd10-0-B-20			○	F-Wd10-1-B-20		○	○					
Wd20		F-Wd20-0-B-20			○	F-Wd20-1-B-20			○					
Wd30		F-Wd30-0-B-20				F-Wd30-1-B-20								
Wd40		F-Wd40-0-B-20				F-Wd40-1-B-20								
Wd10	C	0.5m	F-Wd10-0-C-05	○	○		F-Wd10-1-C-05	○						
Wd20			F-Wd20-0-C-05				F-Wd20-1-C-05							
Wd30			F-Wd30-0-C-05	○		○	F-Wd30-1-C-05			○				
Wd40			F-Wd40-0-C-05	○			F-Wd40-1-C-05							
Wd10		F-Wd10-0-C-10				F-Wd10-1-C-10			○					
Wd20		F-Wd20-0-C-10				F-Wd20-1-C-10		○						
Wd30		F-Wd30-0-C-10	○			F-Wd30-1-C-10			○					
Wd40		F-Wd40-0-C-10				F-Wd40-1-C-10								
Wd10		F-Wd10-0-C-20				F-Wd10-1-C-20								
Wd20		F-Wd20-0-C-20	○			F-Wd20-1-C-20	○							
Wd30		F-Wd30-0-C-20				F-Wd30-1-C-20								
Wd40		F-Wd40-0-C-20				F-Wd40-1-C-20								

8.2. 漂流物衝突試験

8.2.1. 水位・圧力の計測結果

漂流物試験における、水位と圧力、および圧力の積分から求めた波力の計測時系列結果を図-8.1, 図-8.2 に示す。なお、圧力計測は漂流物の衝突位置に対して水路横断方向に離れた位置で計測しているため、漂流物衝突の影響をほとんど受けないと考えられる。ここでは代表として、漂流物 A、漂流物初期位置 0.5m の結果を示した。また、15 回の繰り返し計測のうちの 1 回目を示している。

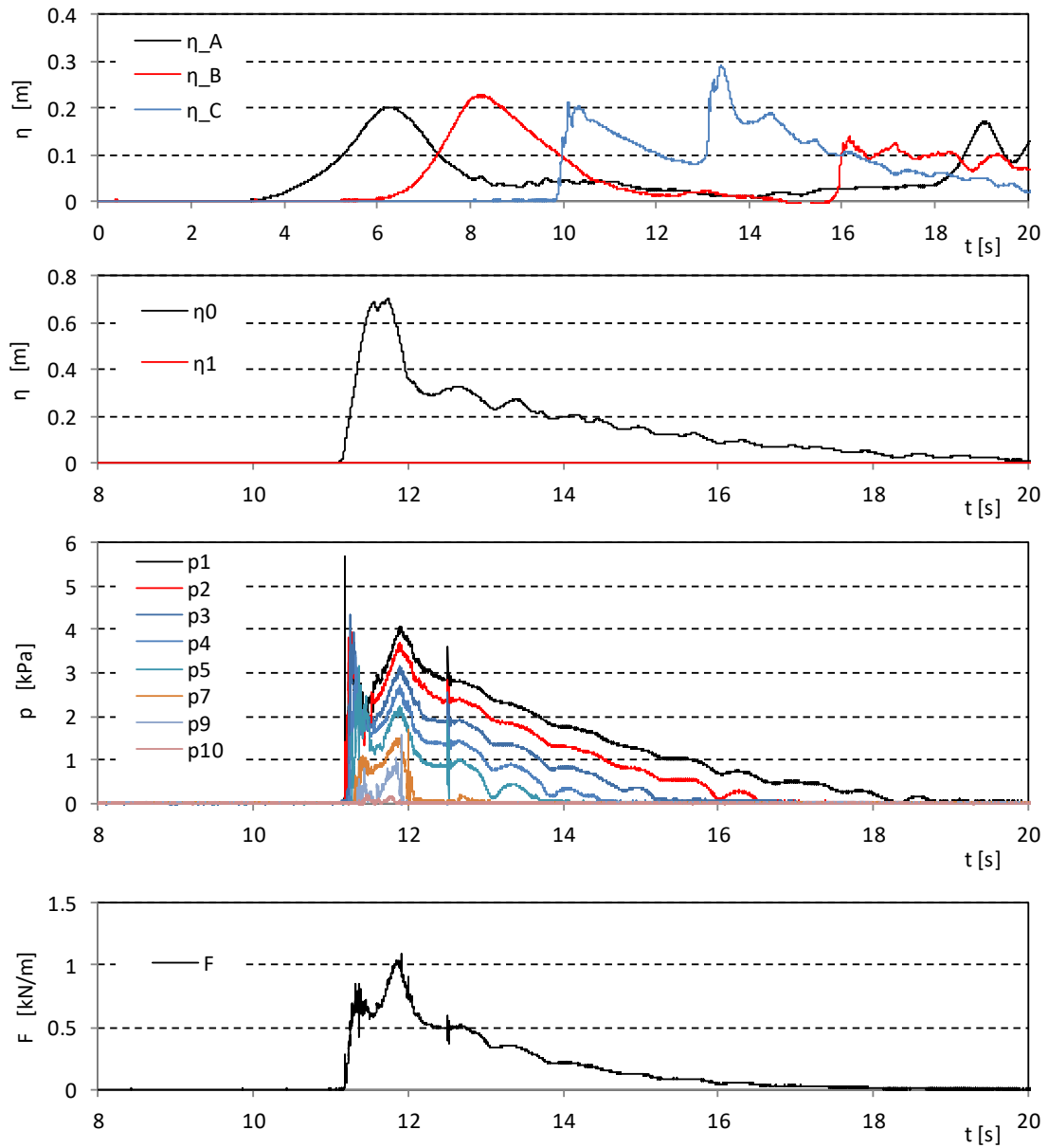


図- 8.1 水位, 圧力, 波力の計測結果 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd10)

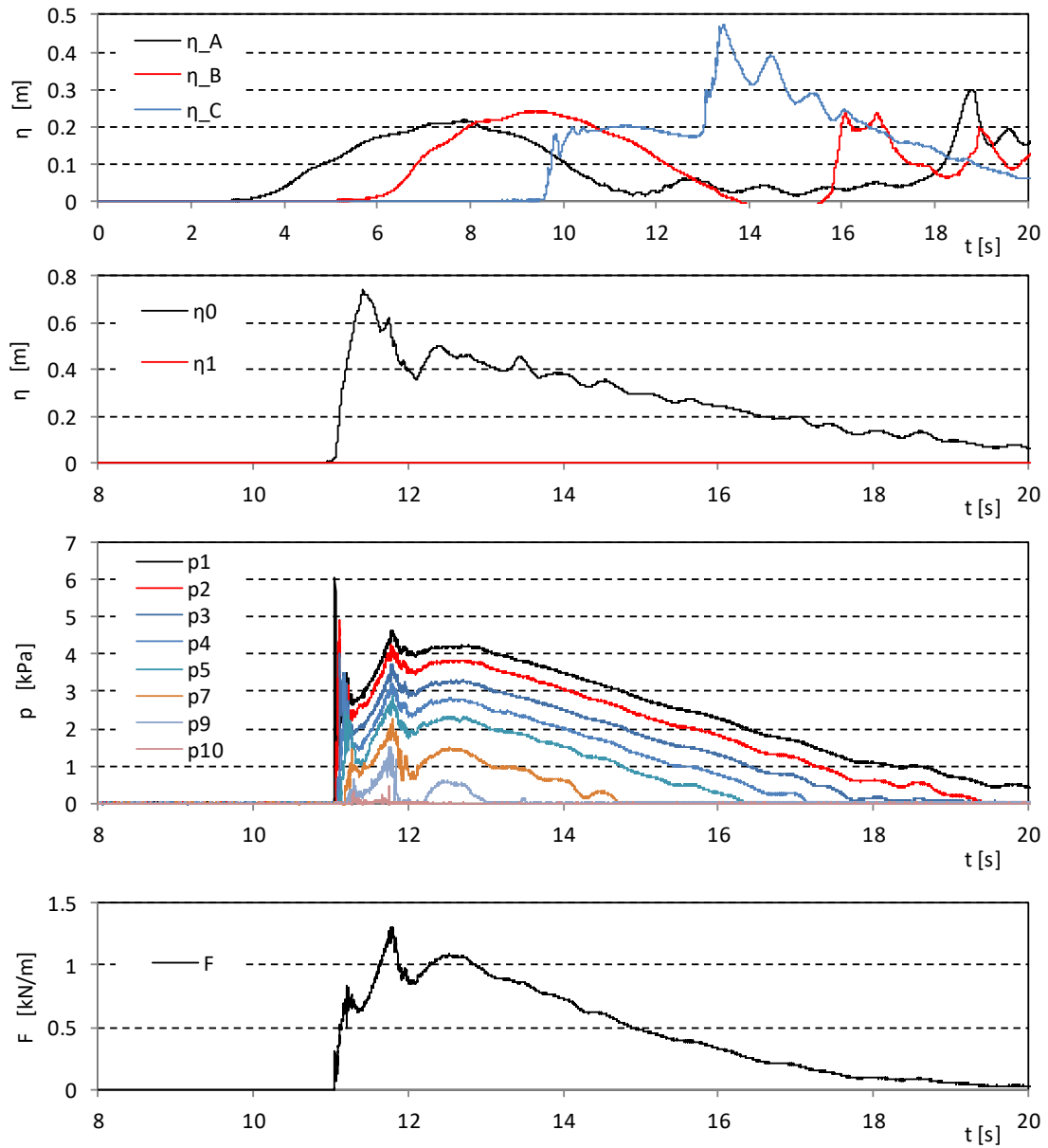


図- 8.1 水位, 圧力, 波力の計測結果 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd20)

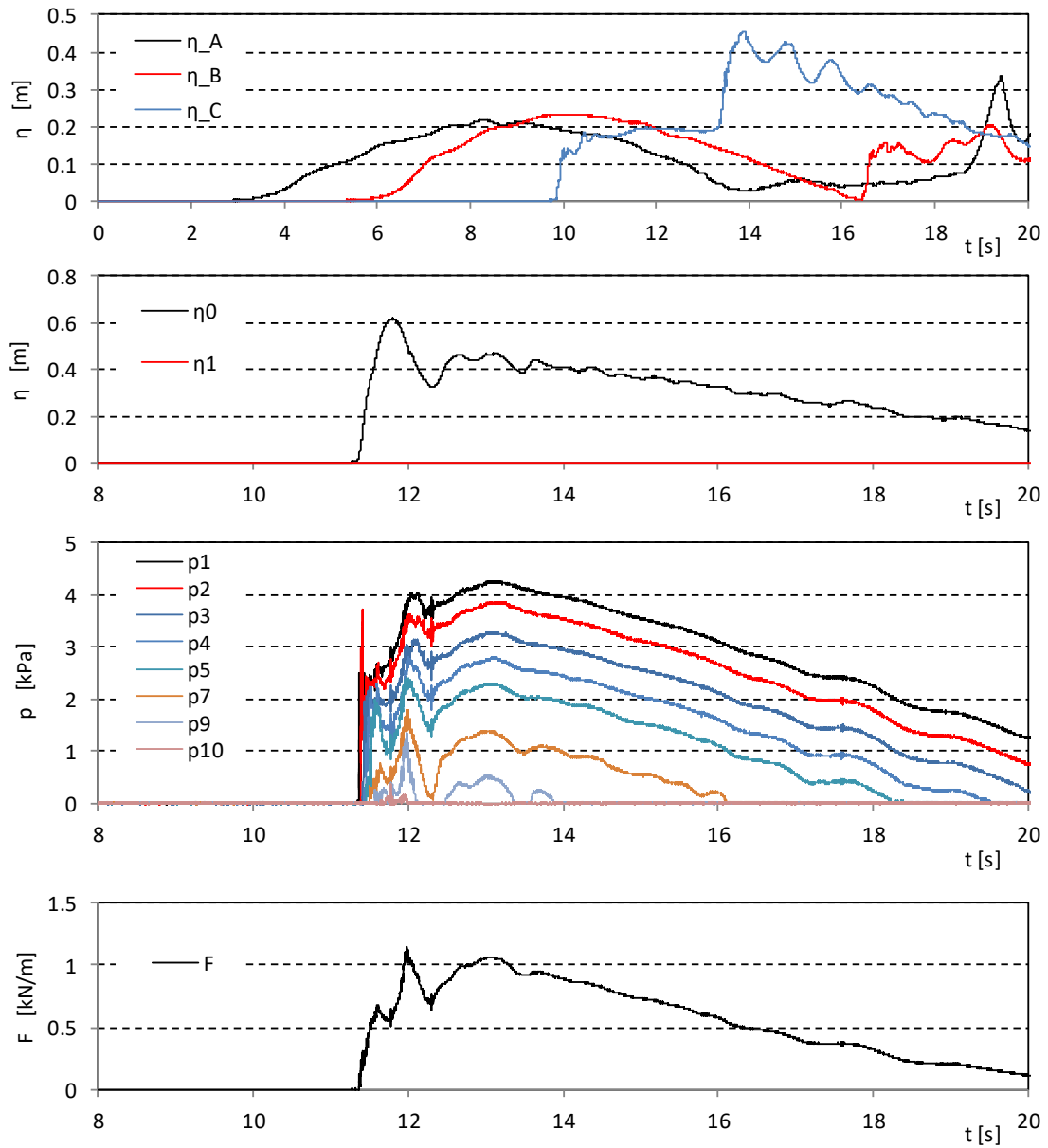


図- 8.1 水位, 圧力, 波力の計測結果 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd30)

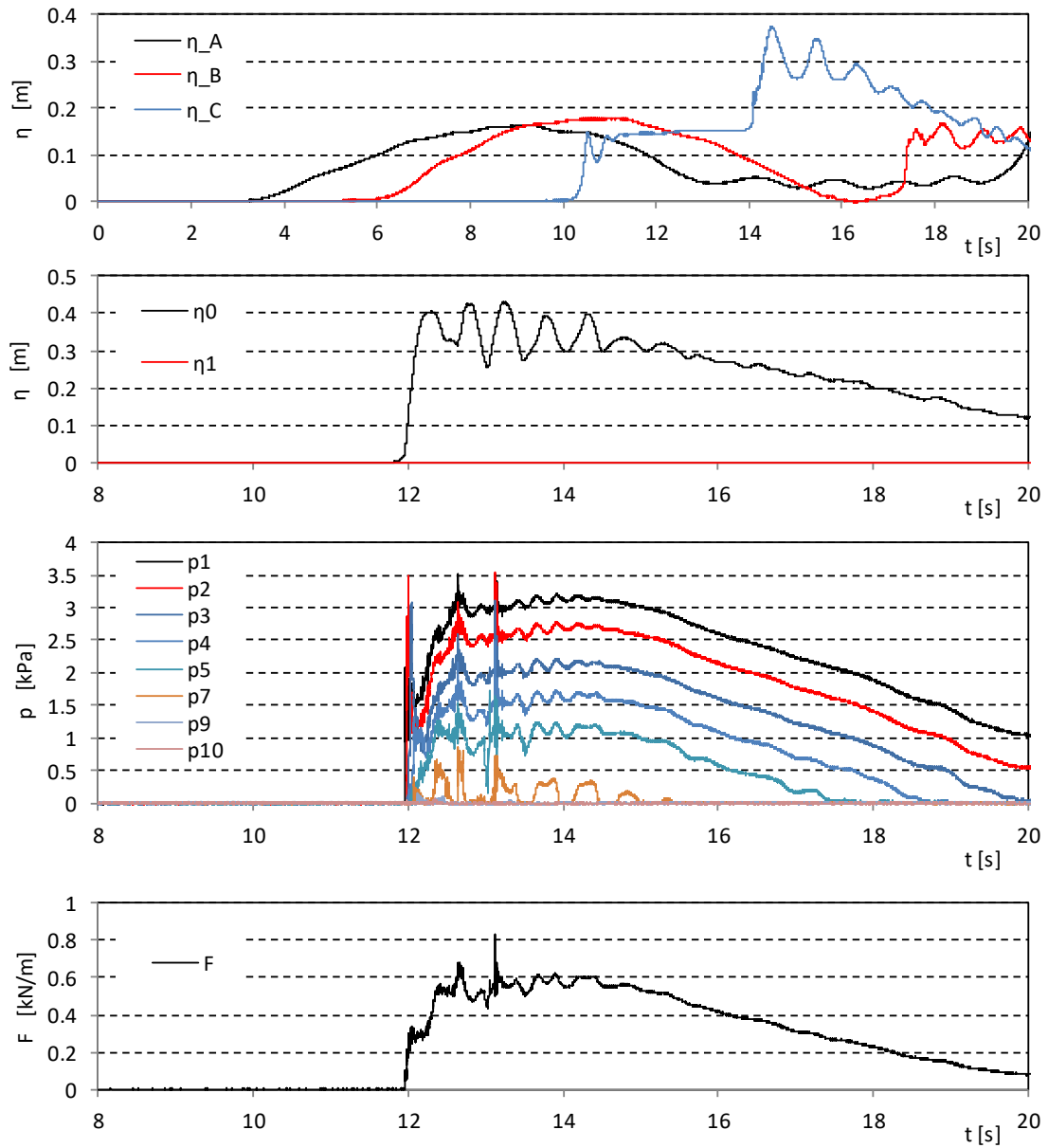


図- 8.1 水位, 圧力, 波力の計測結果 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd40)

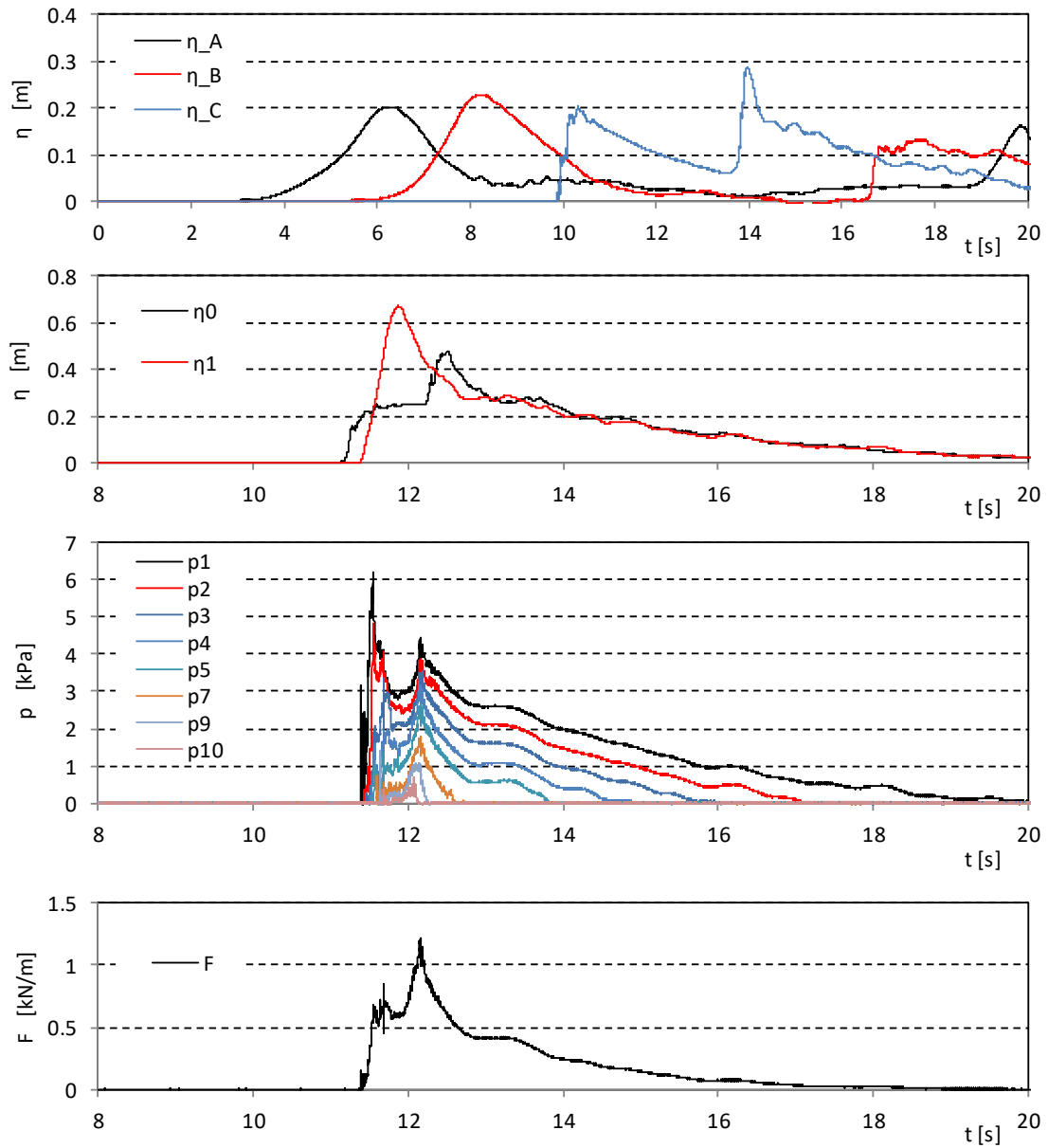


図- 8.2 水位, 圧力, 波力の計測結果 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd10)

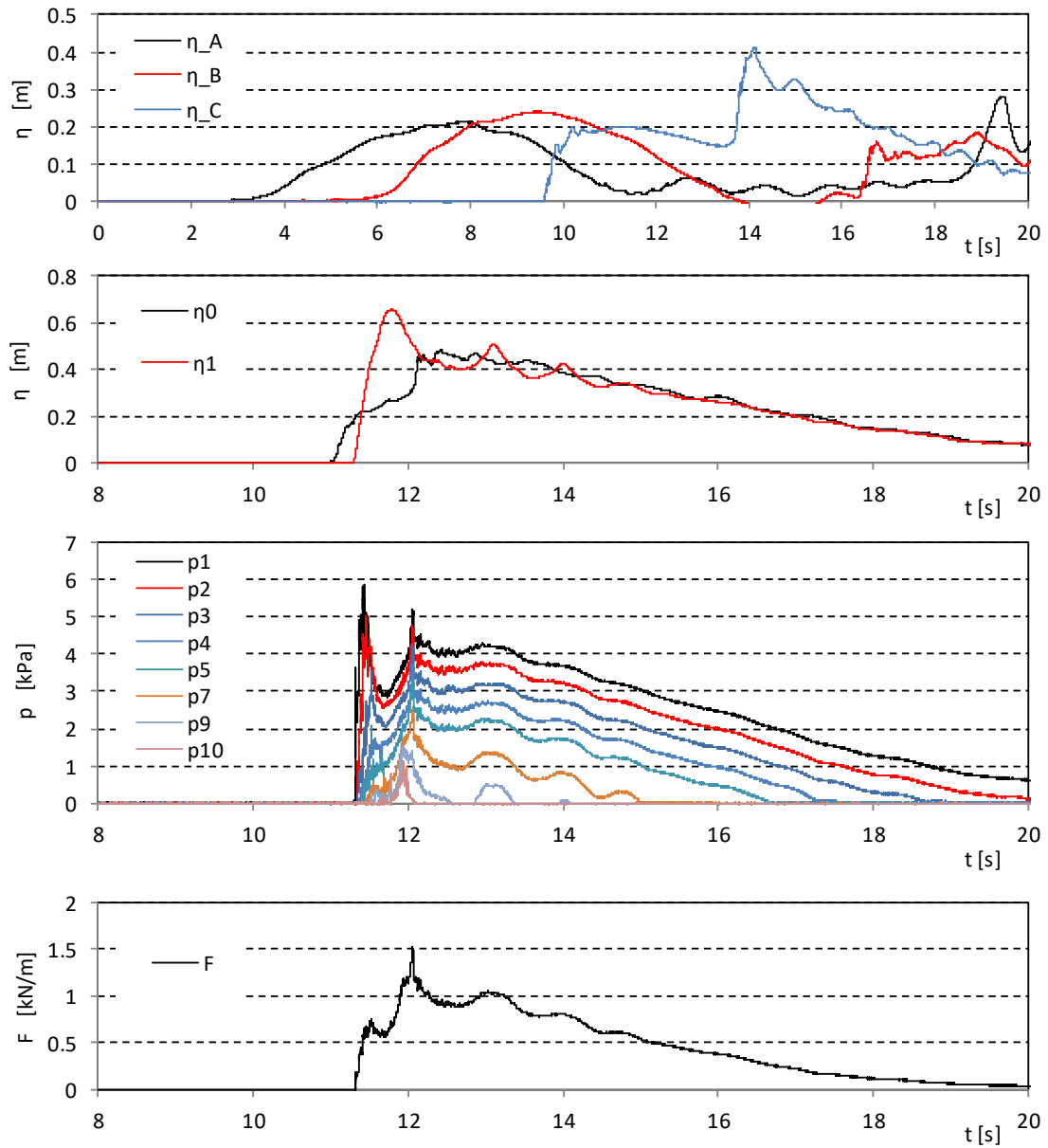


図- 8.2 水位, 圧力, 波力の計測結果 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd20)

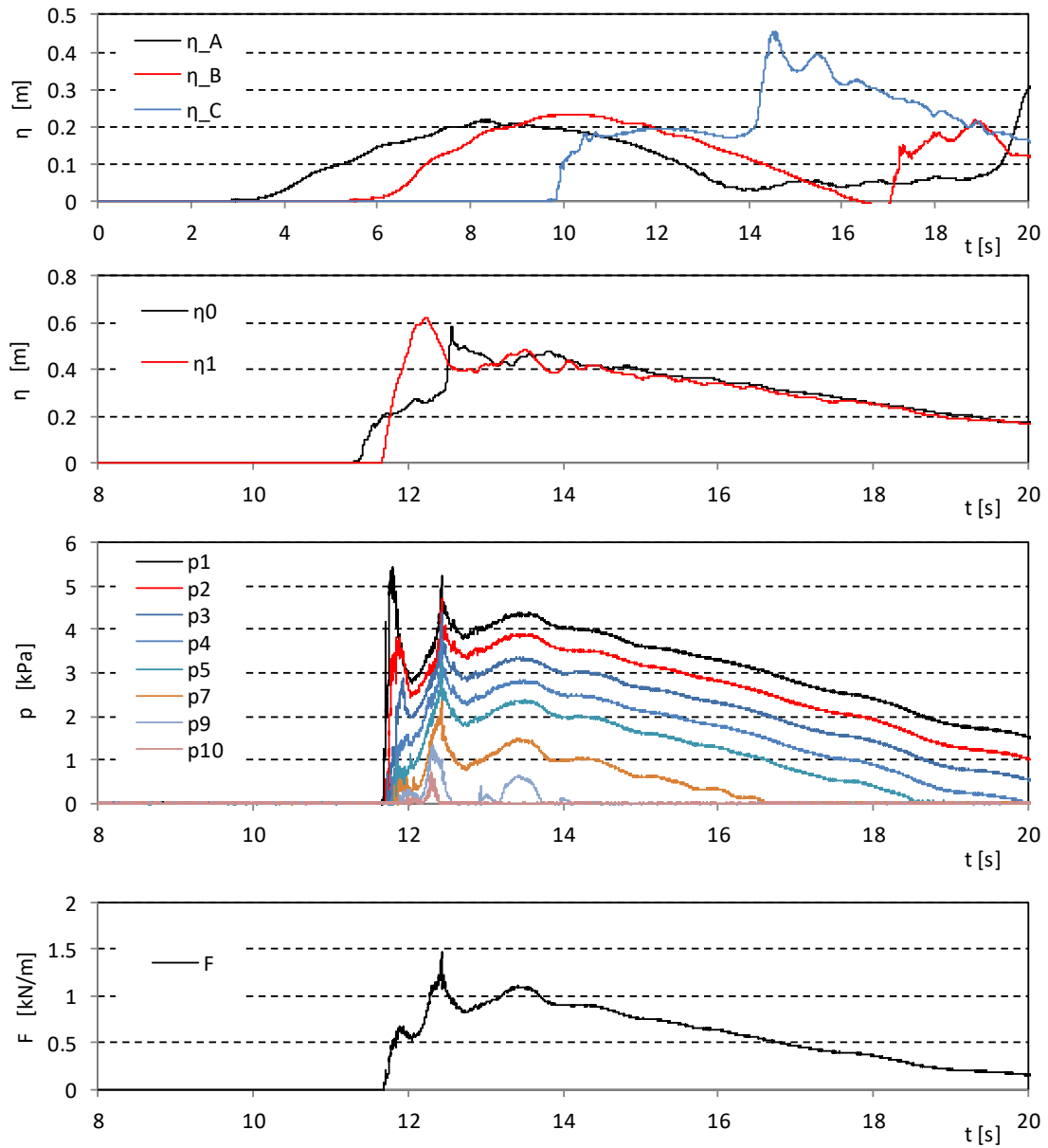


図- 8.2 水位, 圧力, 波力の計測結果 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd30)

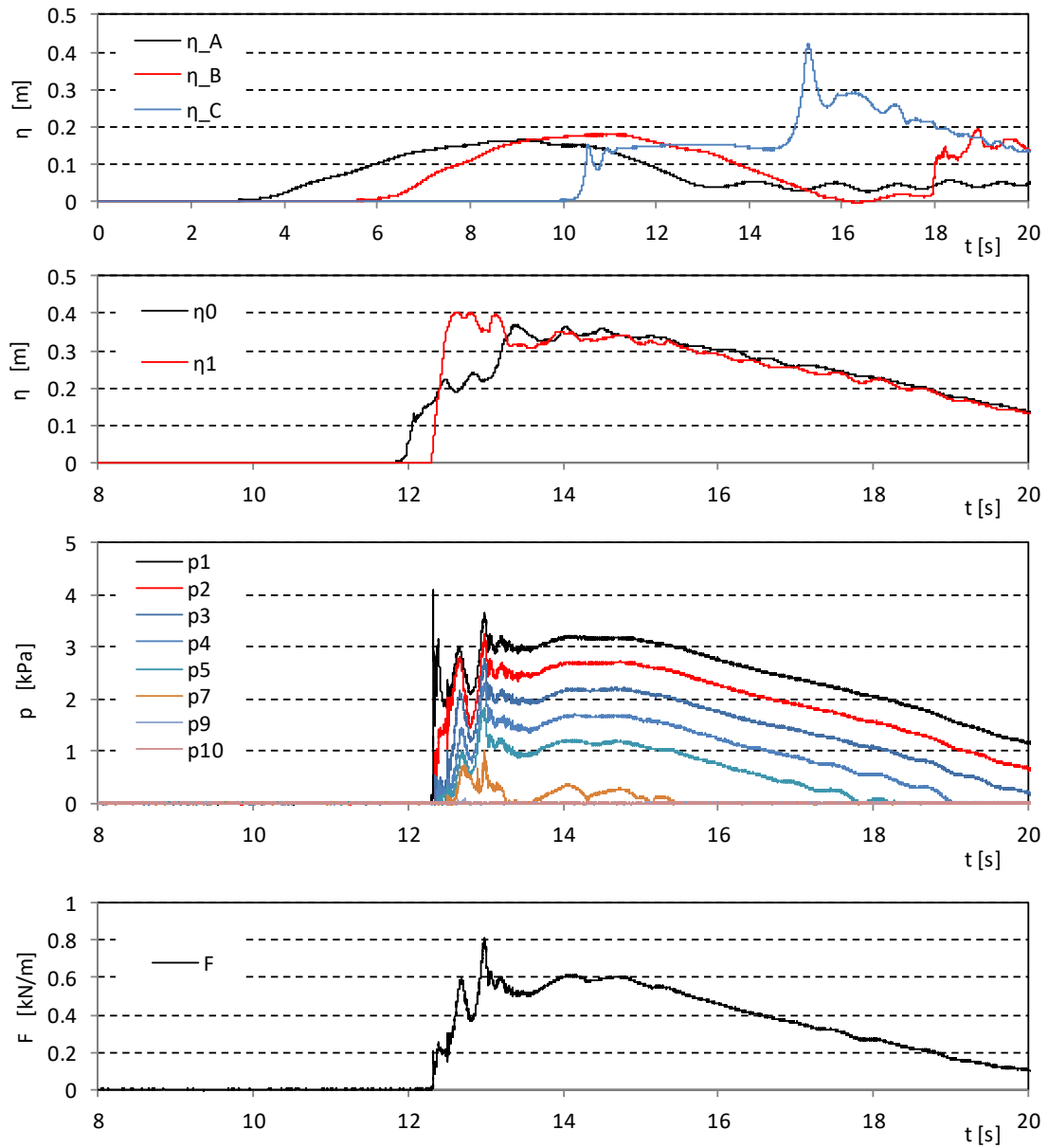


図- 8.2 水位, 圧力, 波力の計測結果 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd40)

8.2.2. ひずみの時系列計測結果

図- 8.3～図- 8.10 に、漂流物の衝突が確認されないケースも含めて全ケースの、ひずみの時系列計測結果を示す。ただし、漂流物が衝突あるいは堤体にもっとも近づいたと考えられる時間付近の 1s 間の時系列を拡大して示している。なお、負値が圧縮ひずみである。また、15 回の繰り返し計測のうちの 1 回目を示している。

これらの試験結果のうち、津波波力のみにより生じるひずみは、すべて負の値となることから、正のひずみは漂流物の衝突により生じたものと考えられる。漂流物が衝突した場合には、非常に周期の短い振動成分（周期 1/100s 以下）が生じている。一方、このような短周期成分が確認できないものは、漂流物が衝突していないことを意味する。なお、衝突していない列の壁体にも短周期の振動が生じているが、この要因については後述する。

漂流物の顕著な衝突が確認出来るケースを見ると、衝突は津波到達から概略 0.1～0.2s 後に生じている。したがって、津波波形の先端部分に連行するように漂流物が移動した場合には衝突が確認されるが、先端部分に遅れると顕著な衝突が生じていないことが分かる。漂流物が津波先端部分に遅れて移動した場合、津波波形の先端部分が先行して堤体に到達し、漂流物が近接する時には堤体前面の水位が上昇しているため、この水塊の影響により漂流物の衝突が抑制されると考えられる。

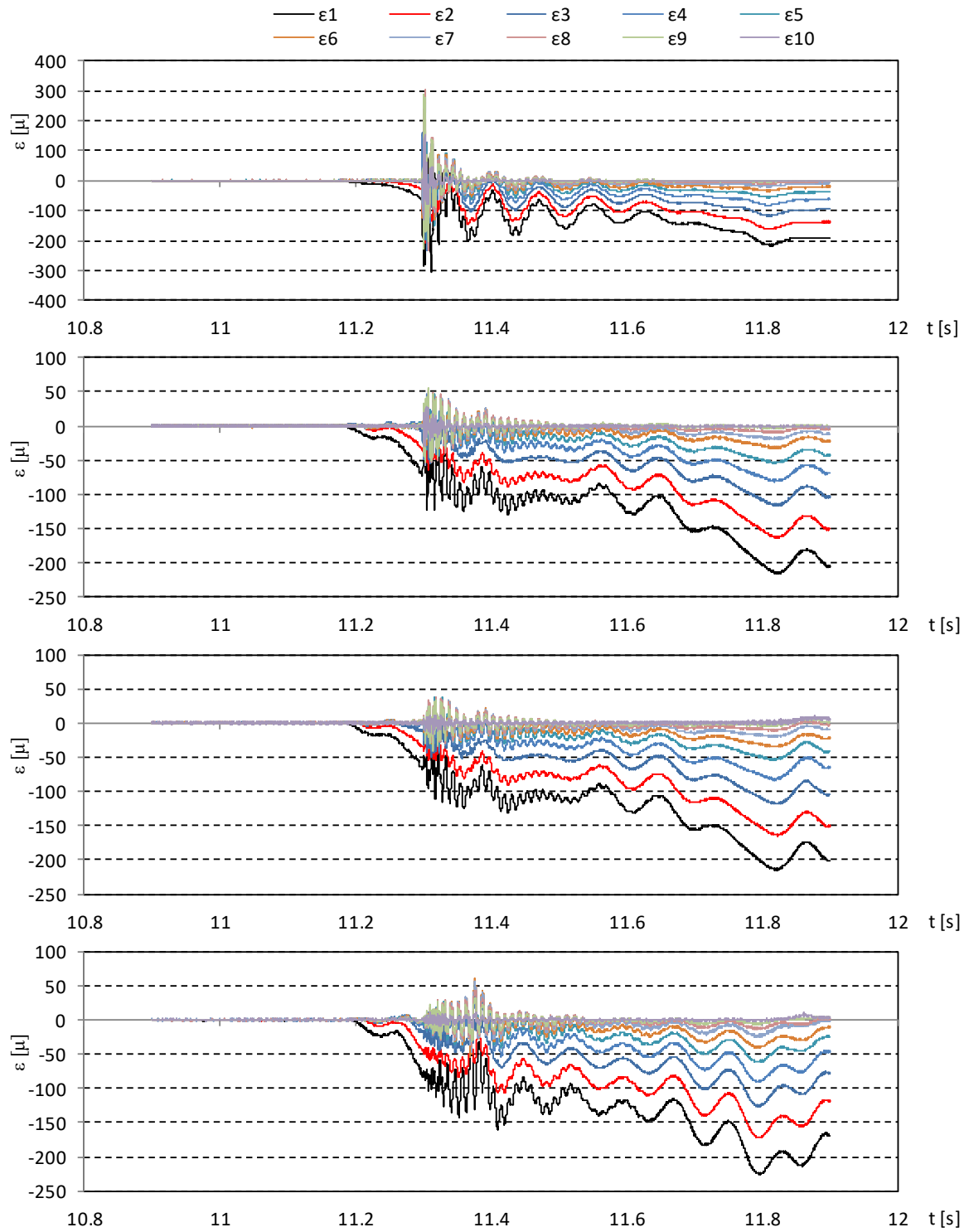


図- 8.3 ひずみの計測結果 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd10)

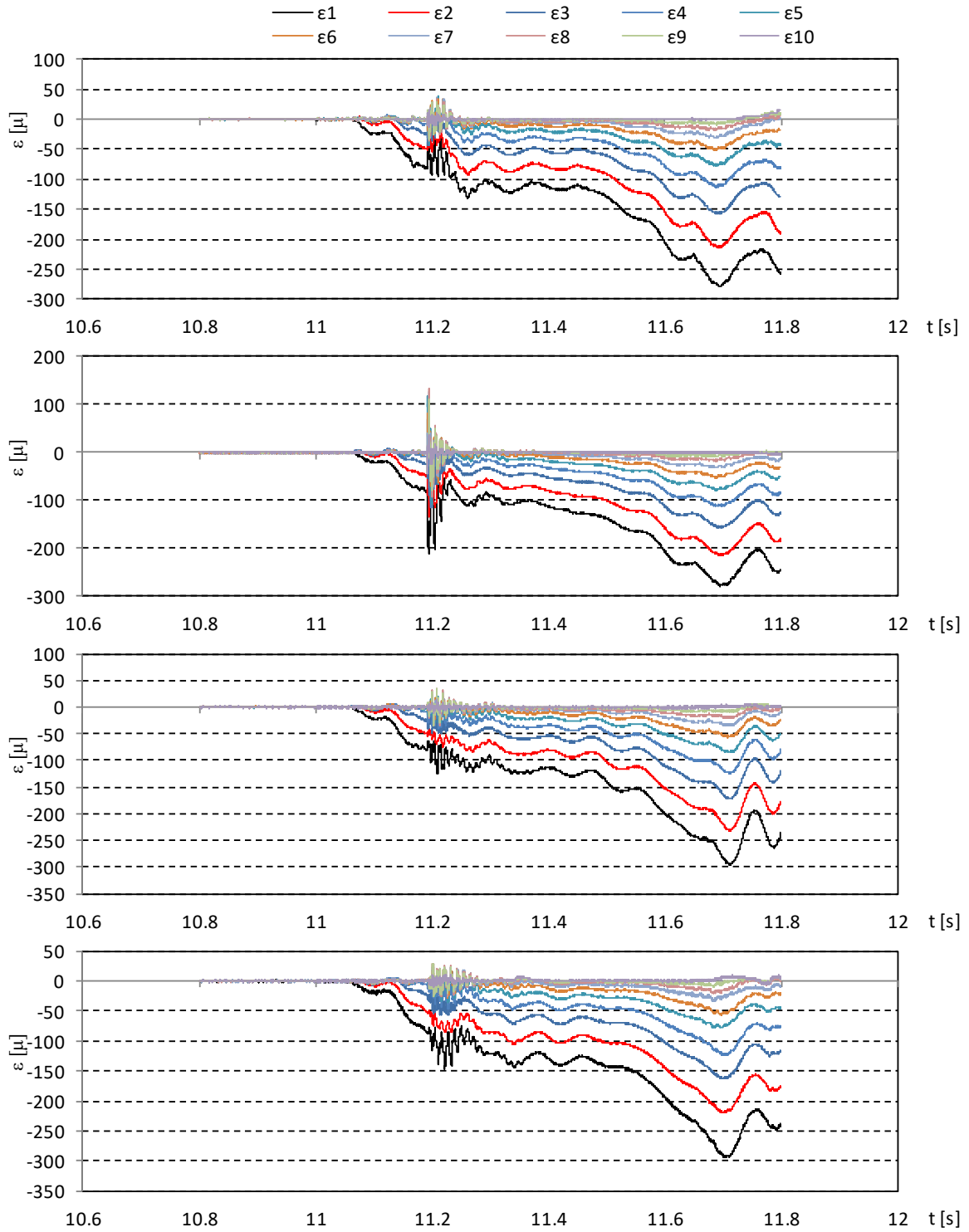


図- 8.3 ひずみの計測結果（漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd20）

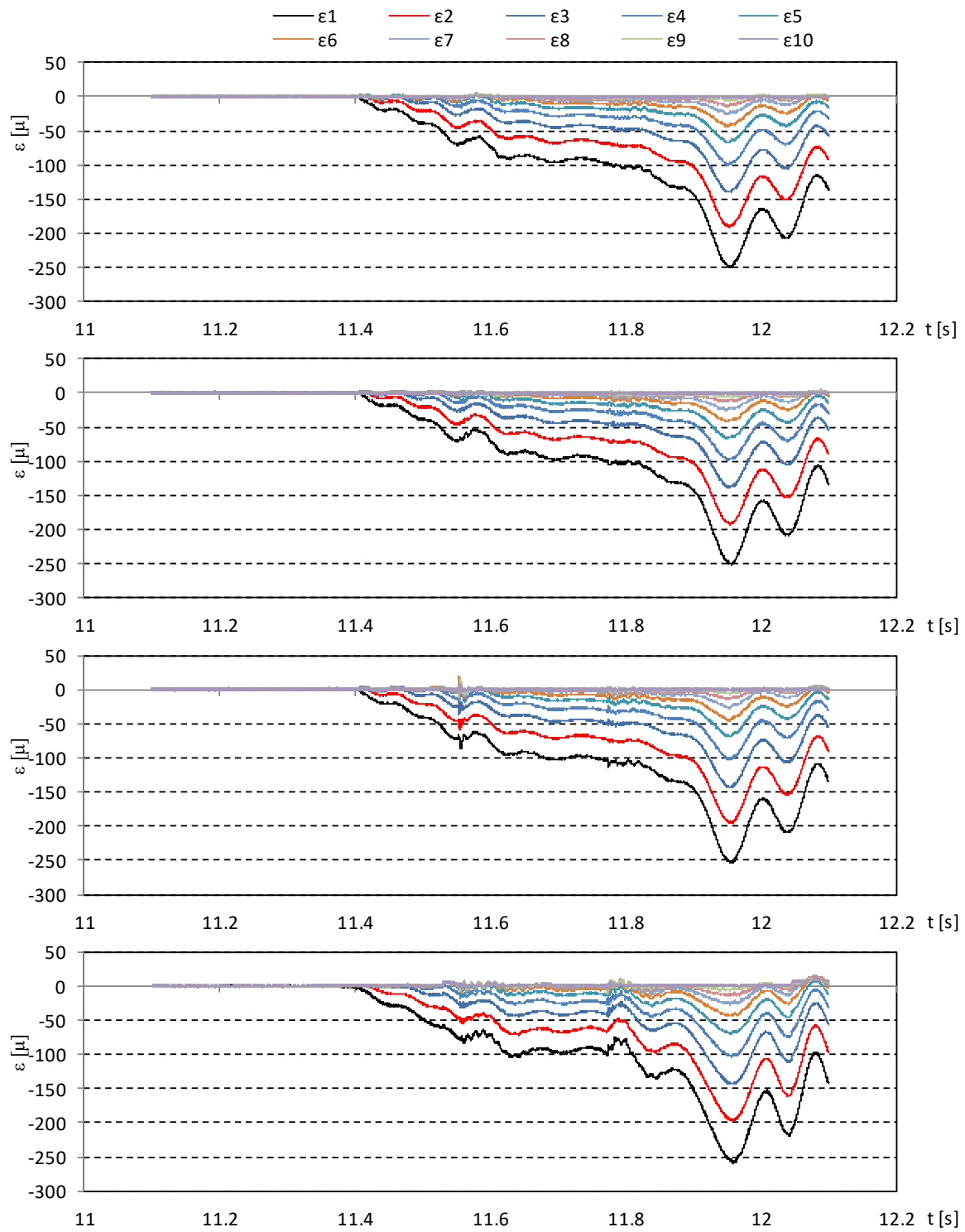


図- 8.3 ひずみの計測結果 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd30)

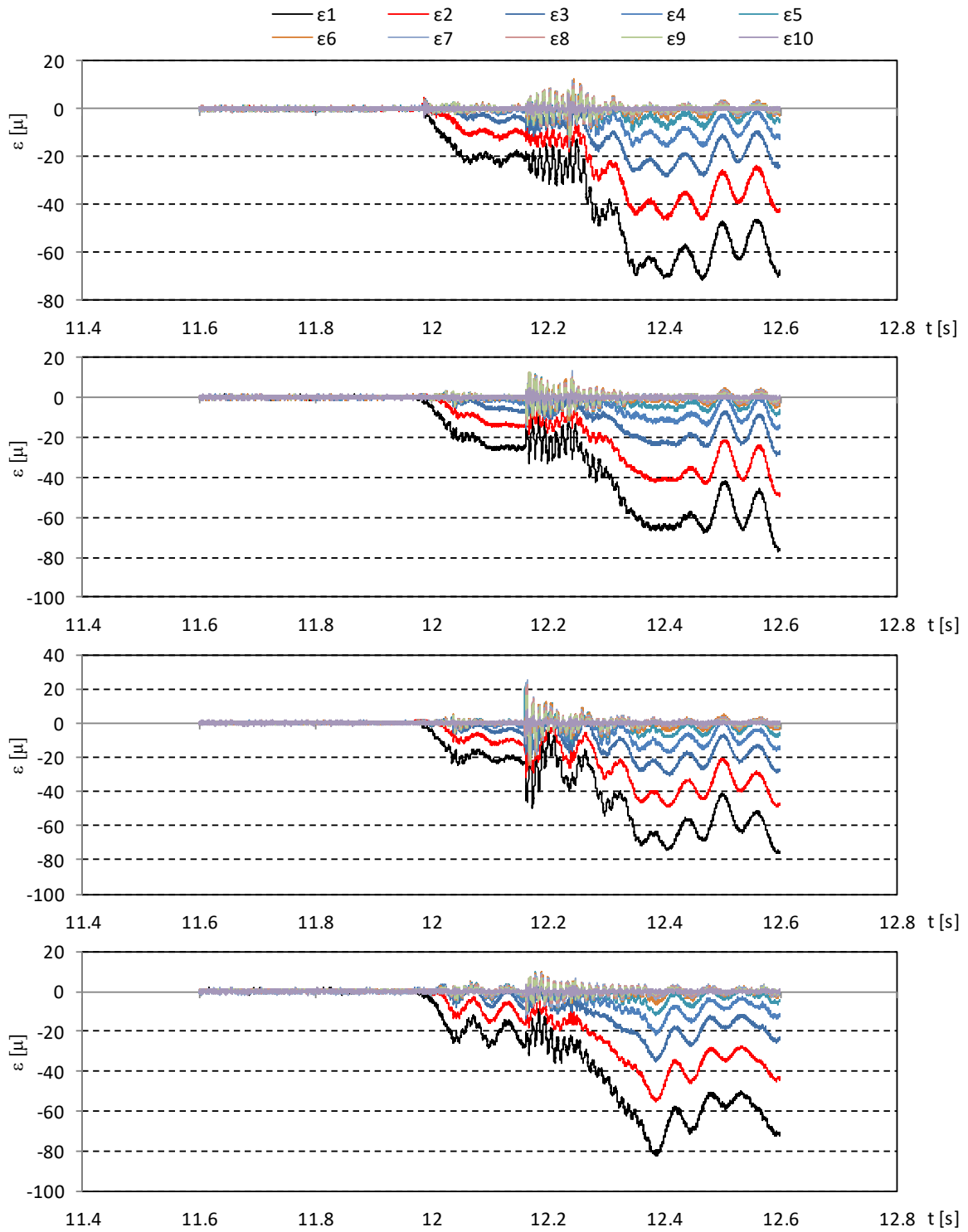


図- 8.3 ひずみの計測結果（漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd40）

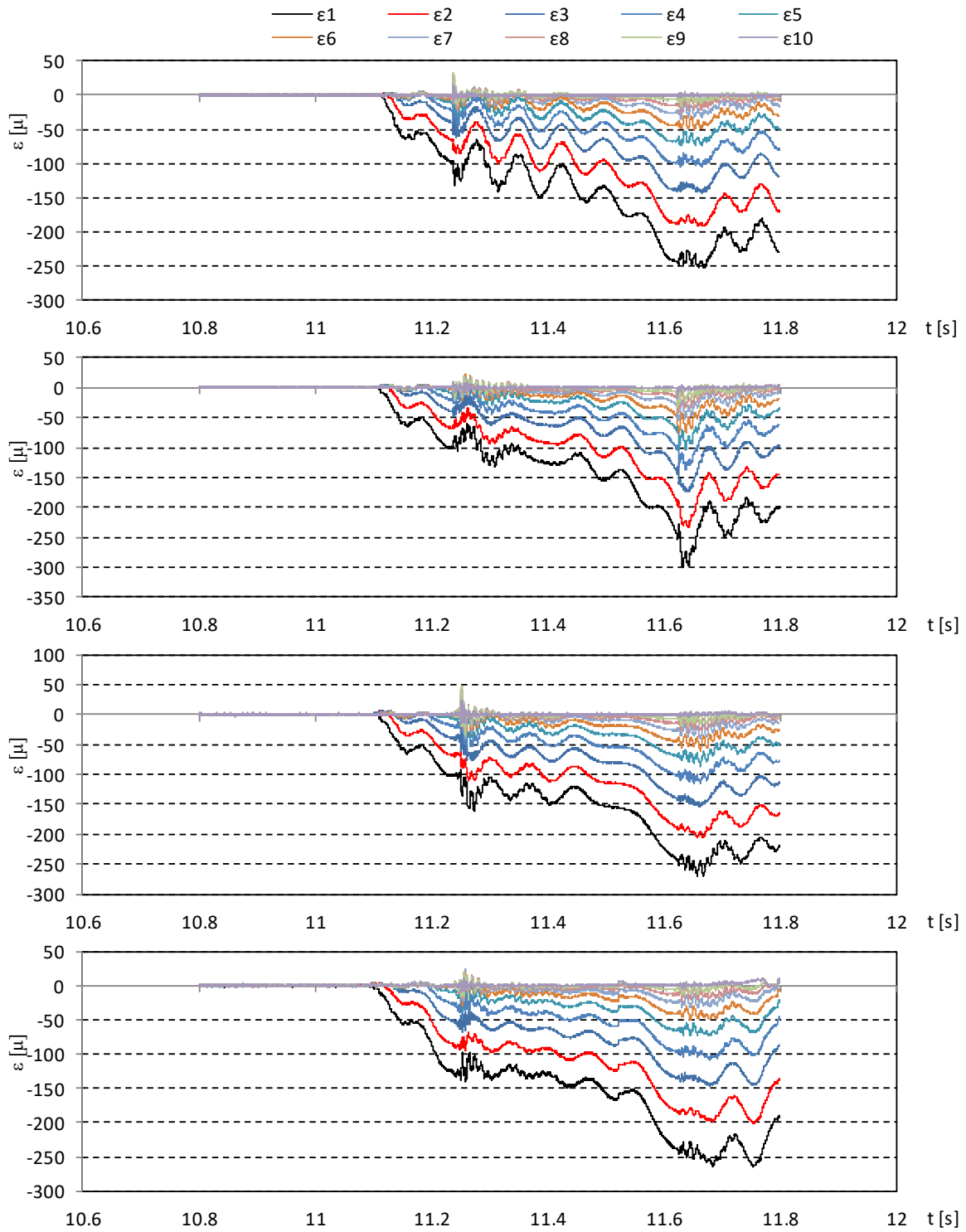


図- 8.3 ひずみの計測結果（漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 1.0m, Wd20）

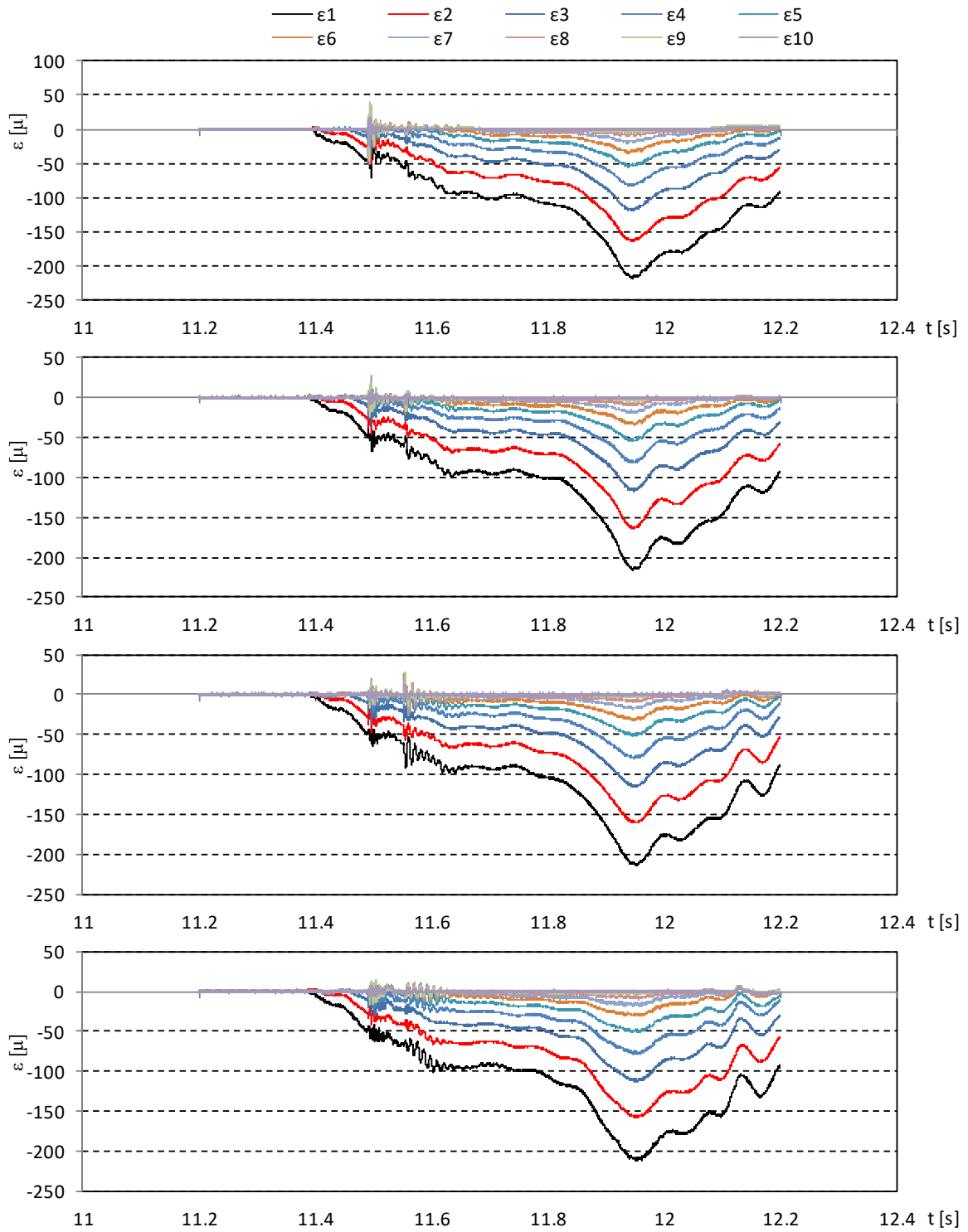


図- 8.3 ひずみの計測結果（漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 1.0m, Wd30）

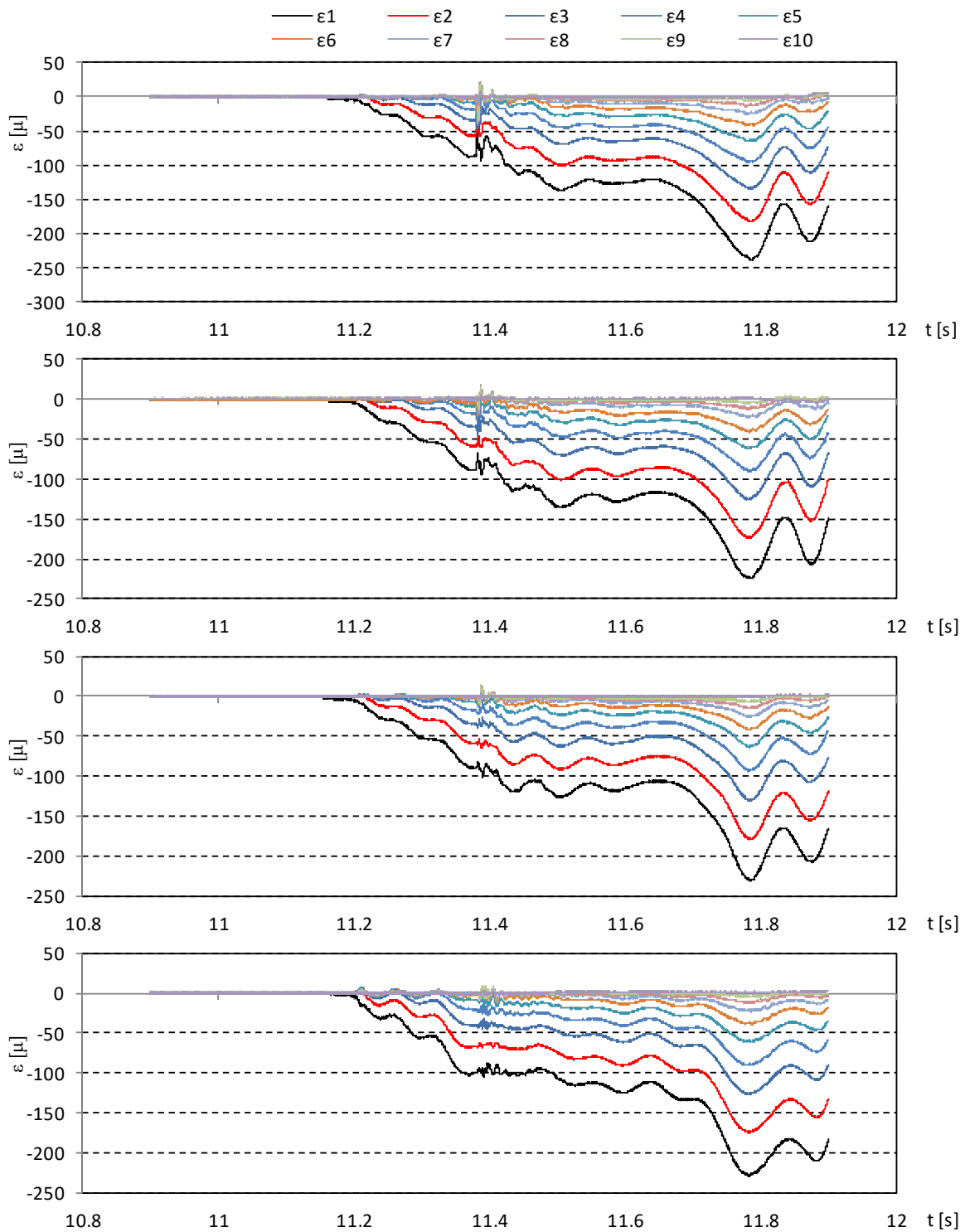


図- 8.3 ひずみの計測結果（漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 2.0m, Wd10）

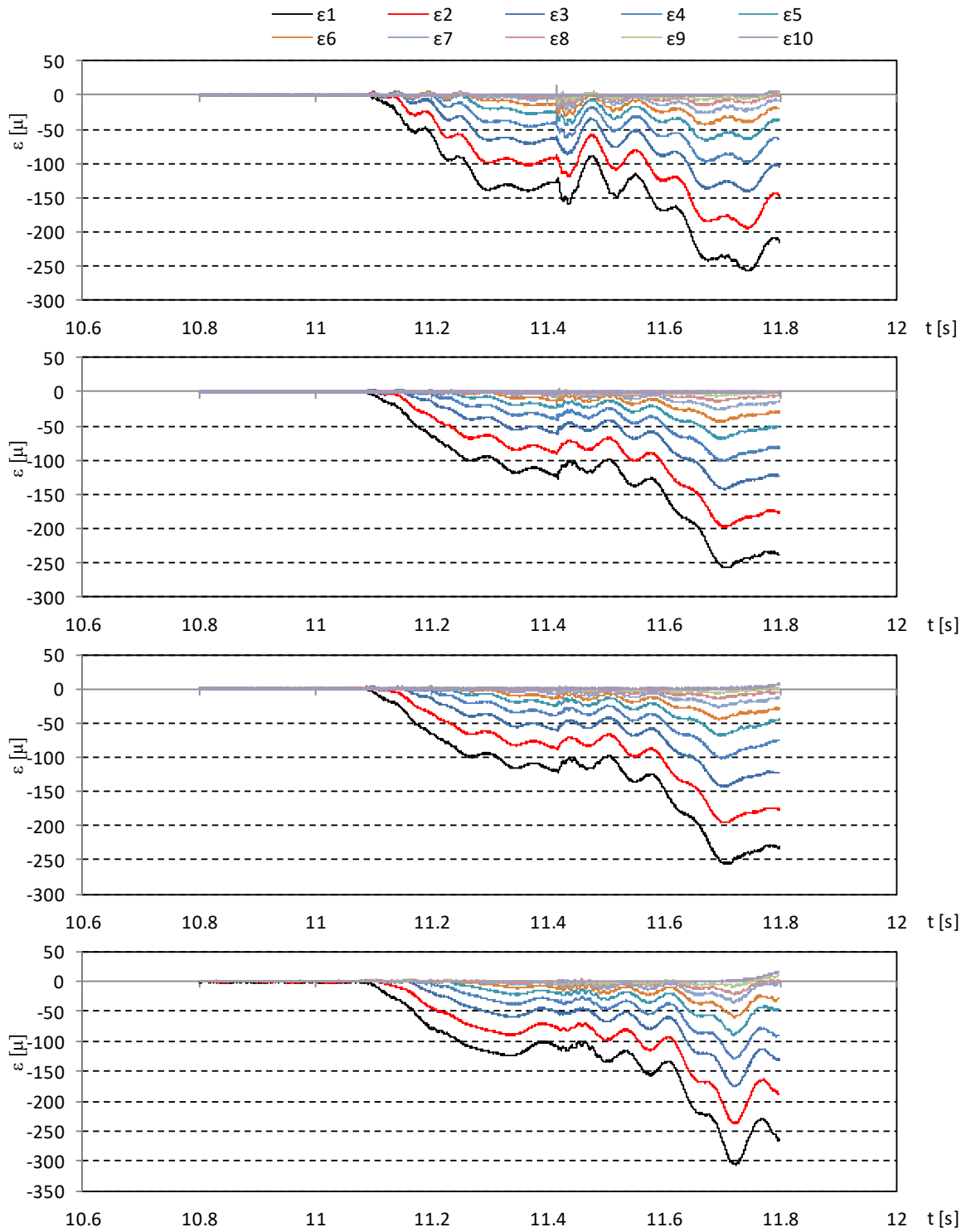


図- 8.3 ひずみの計測結果 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 2.0m, Wd20)

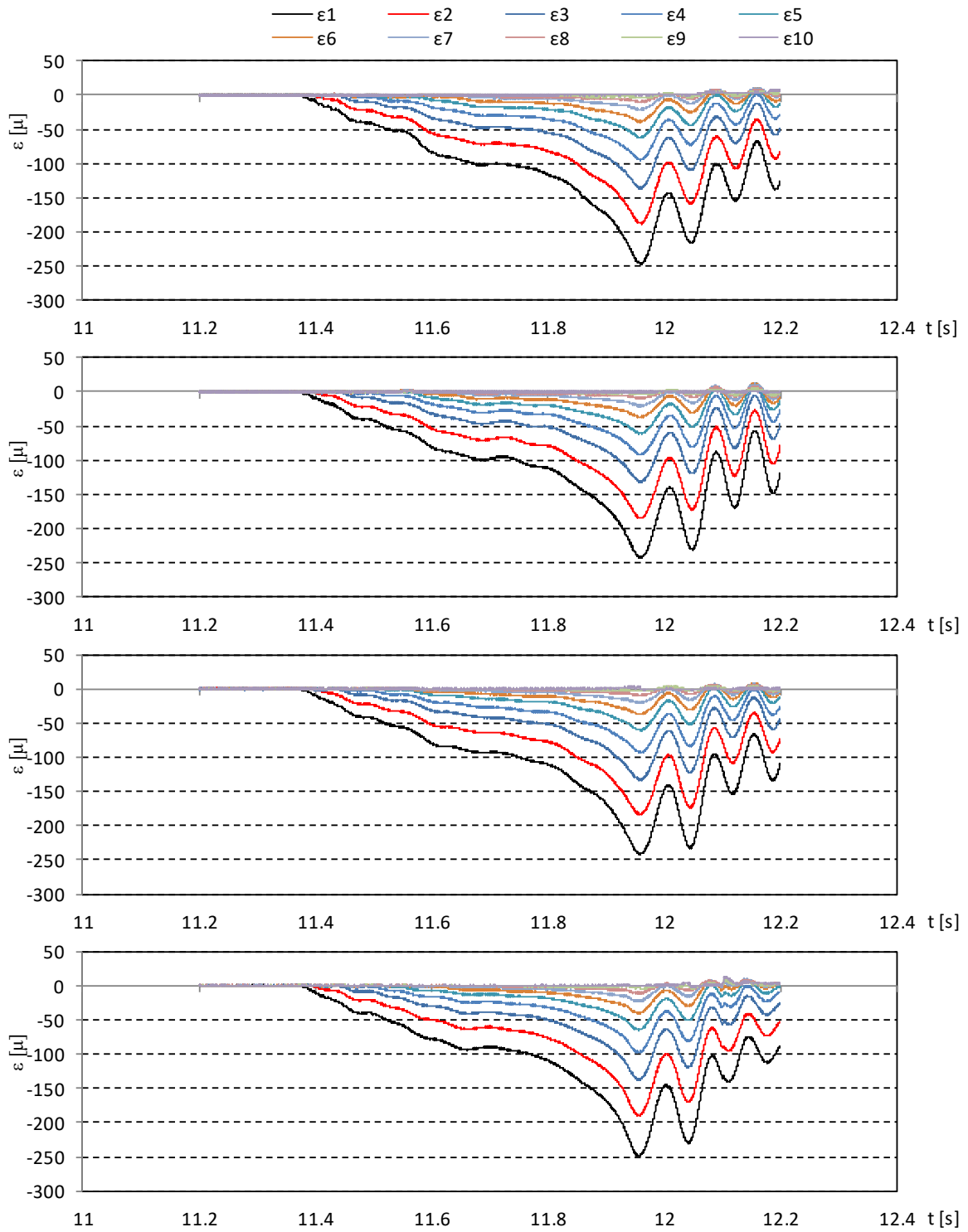


図- 8.3 ひずみの計測結果 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 2.0m, Wd30)

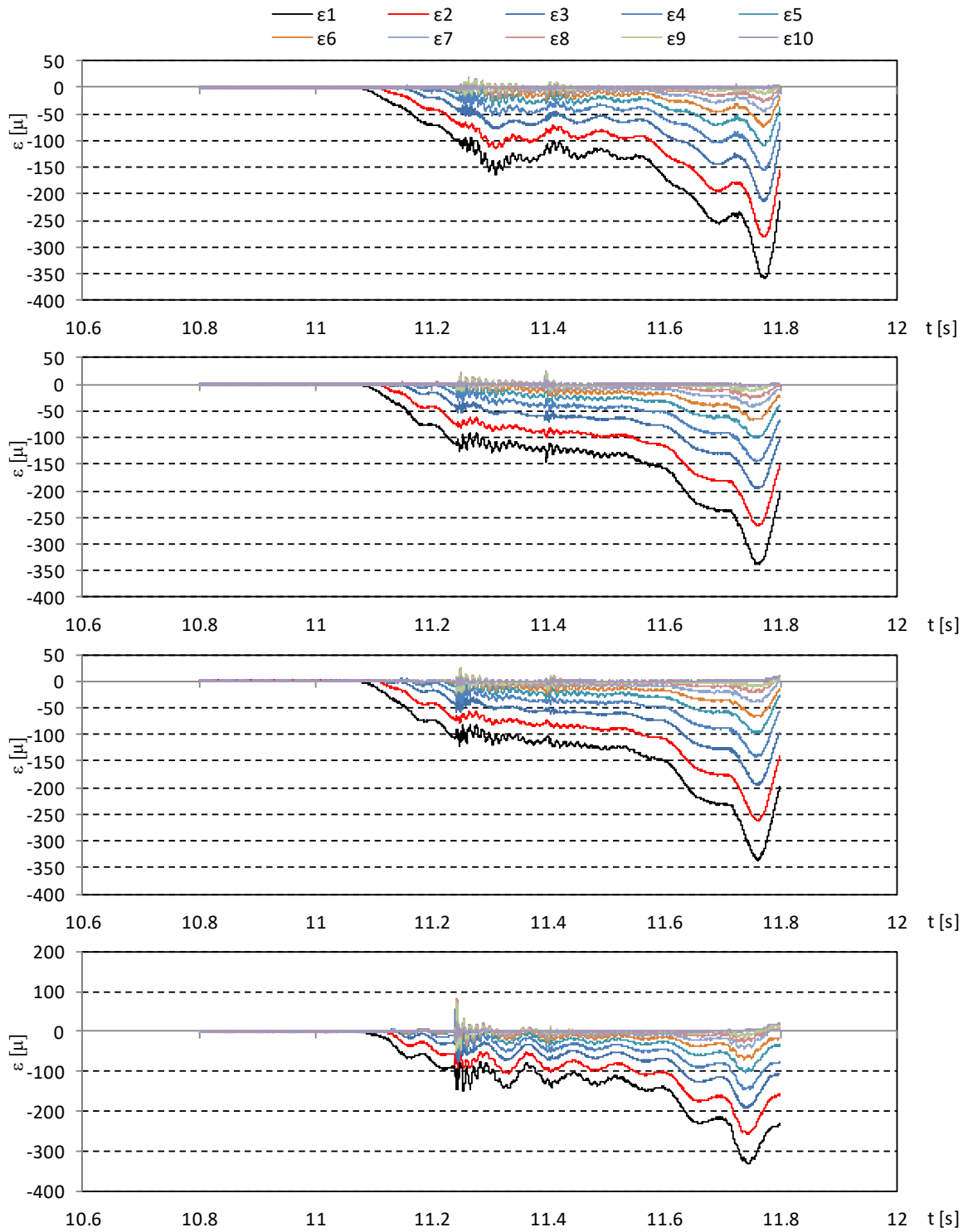


図- 8.4 ひずみの計測結果 (漂流物 B, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd20)

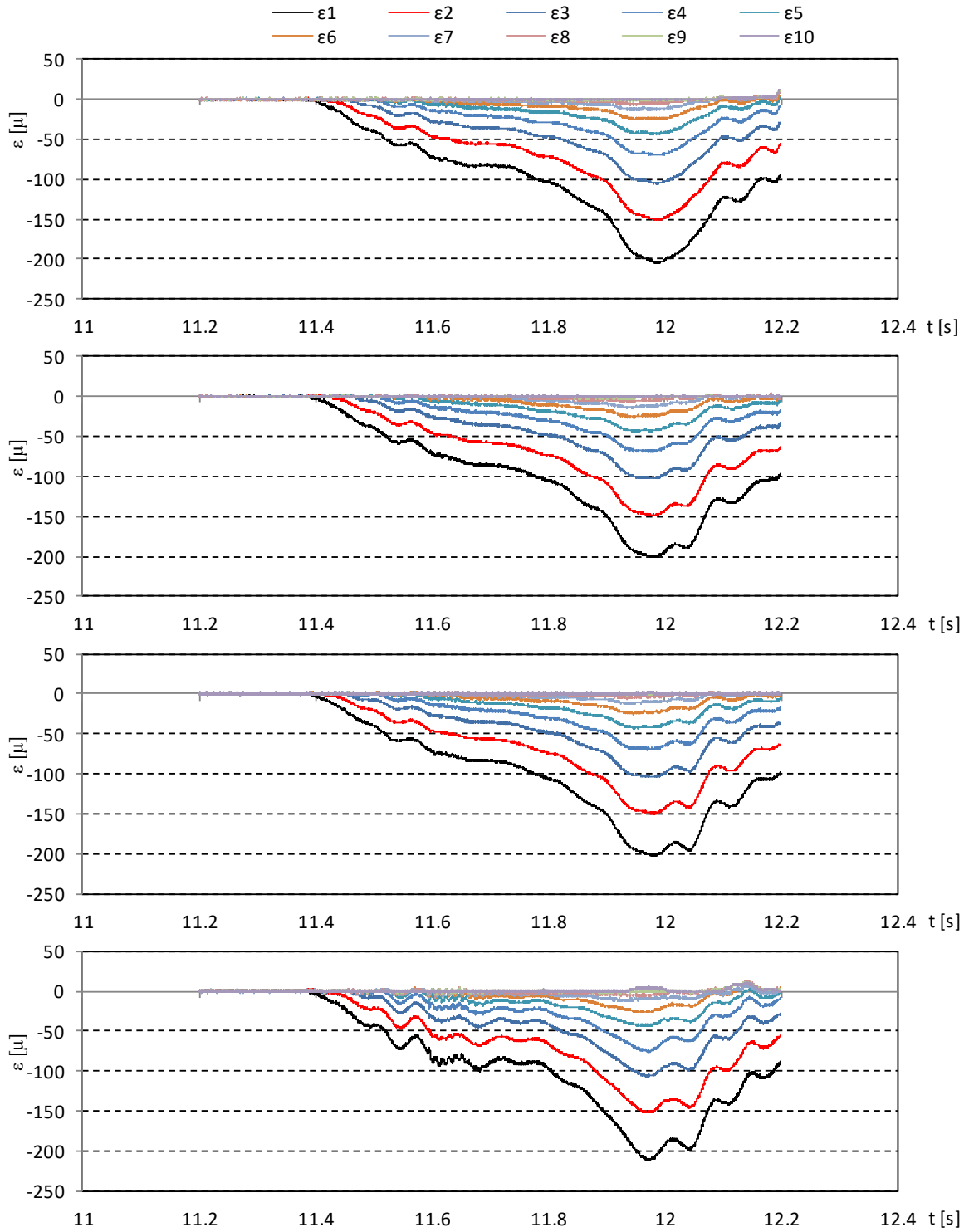


図- 8.4 ひずみの計測結果（漂流物 B, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd30）

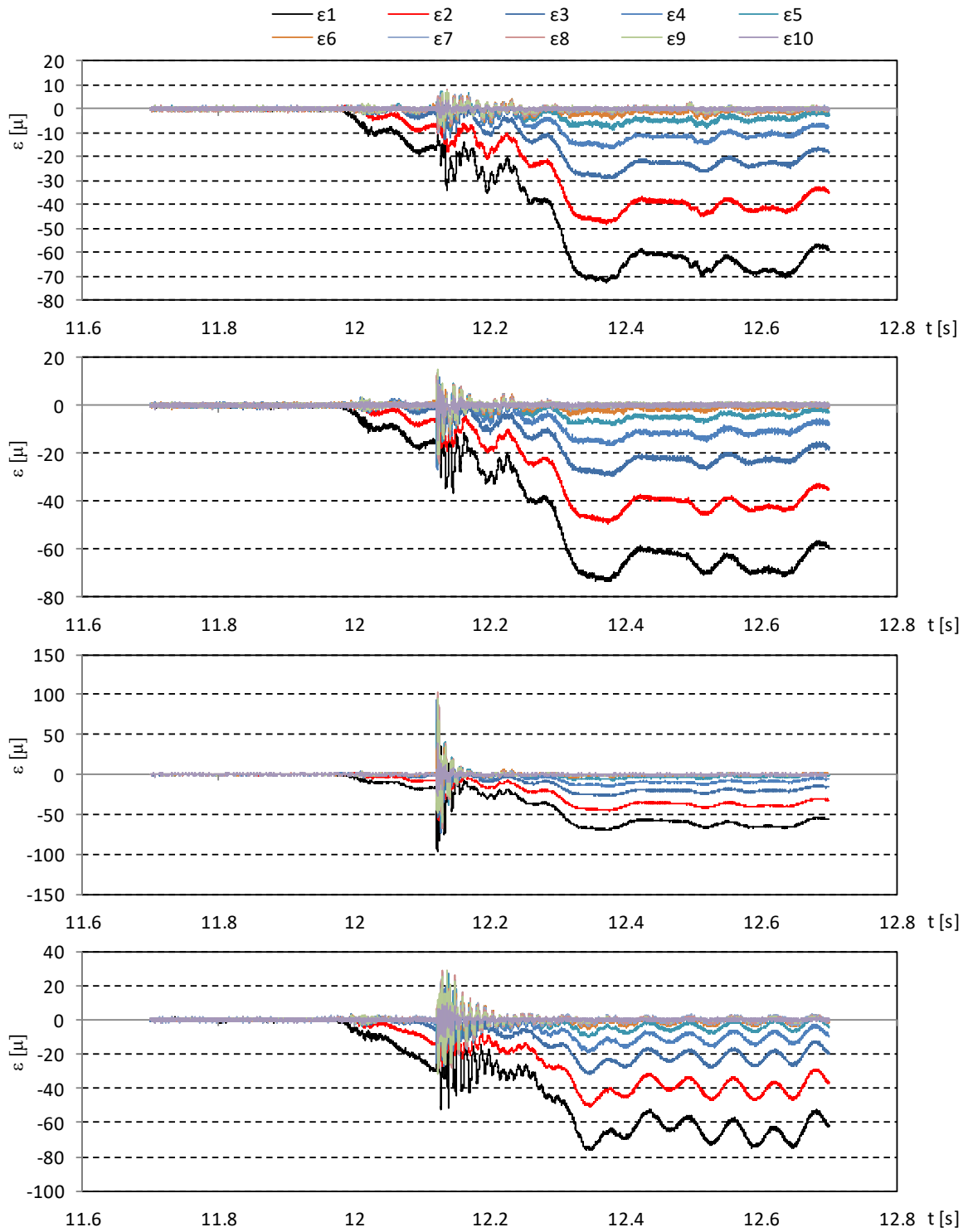


図- 8.4 ひずみの計測結果 (漂流物 B, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd40)

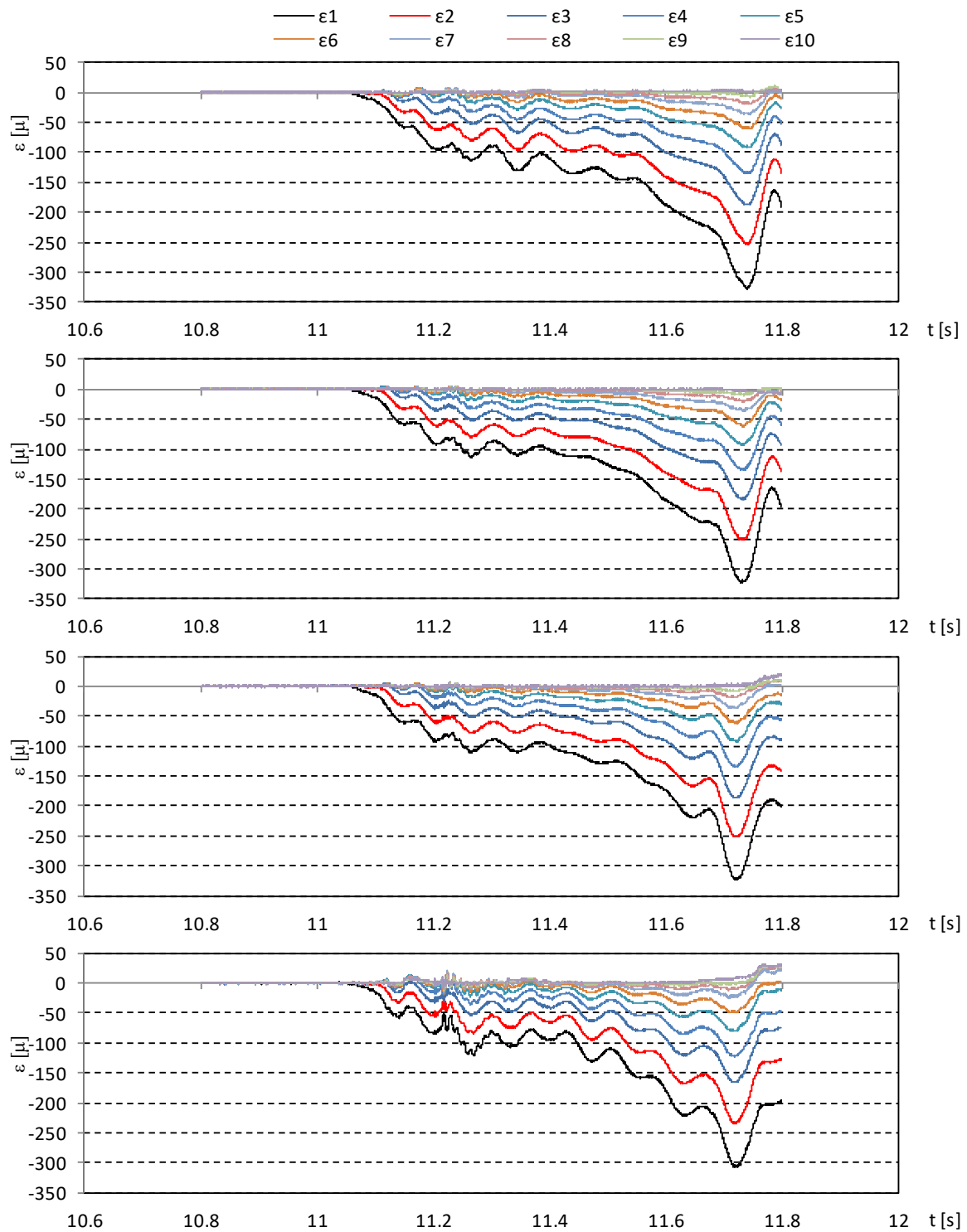


図- 8.4 ひずみの計測結果 (漂流物 B, 堤体位置 0m, 漂流物位置 1.0m, Wd20)

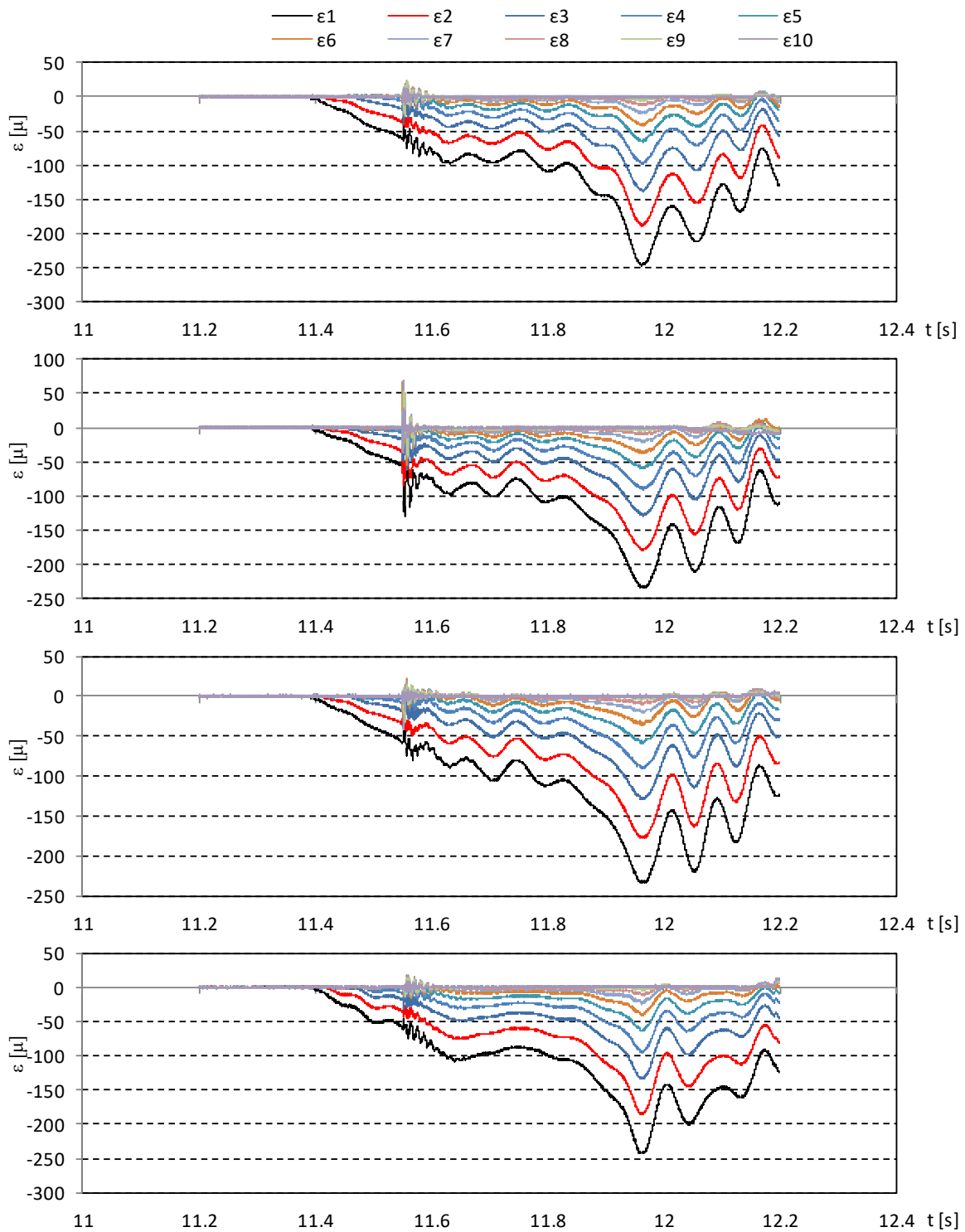


図- 8.4 ひずみの計測結果（漂流物 B, 堤体位置 0m, 漂流物位置 1.0m, Wd30）

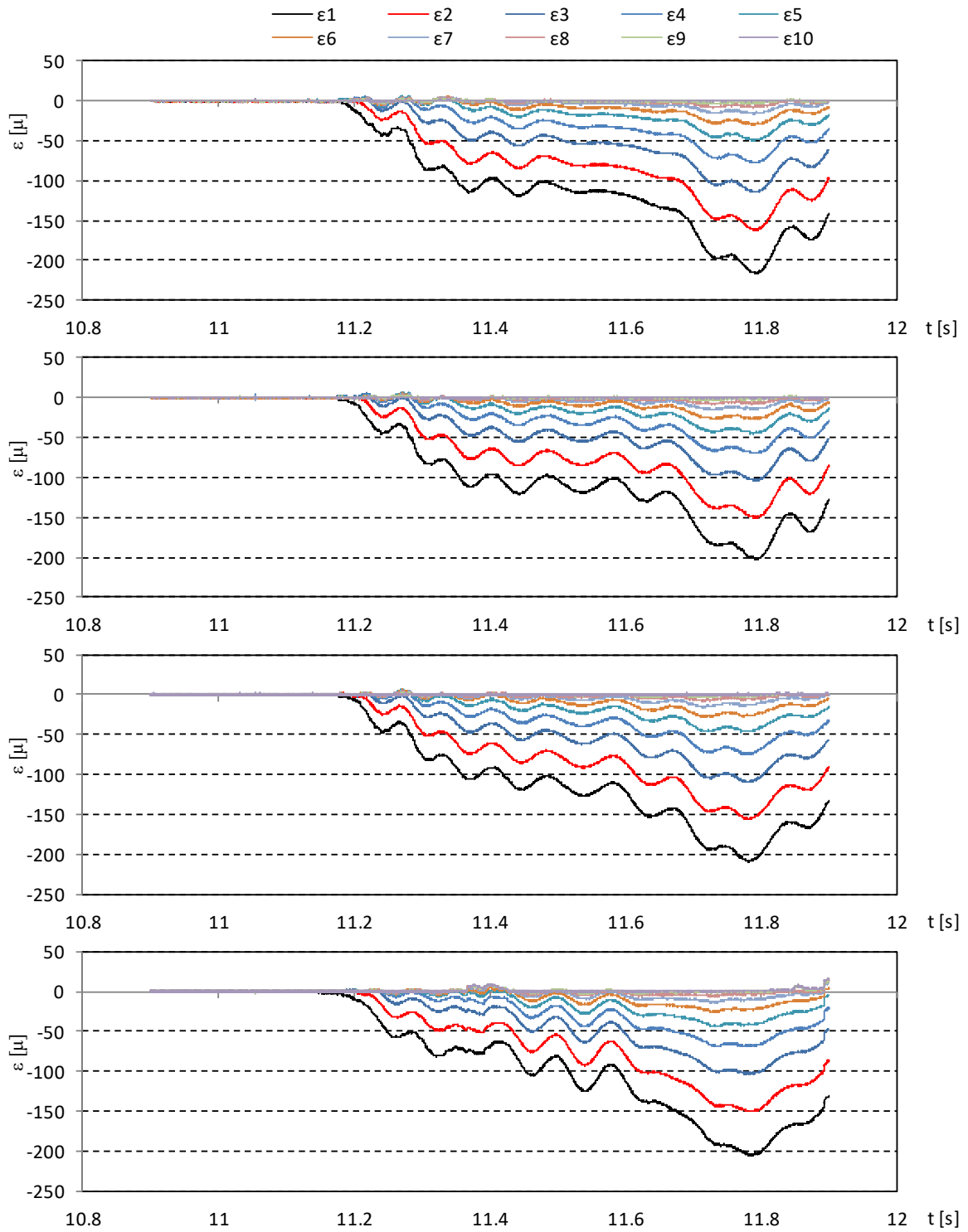


図- 8.4 ひずみの計測結果 (漂流物 B, 堤体位置 0m, 漂流物位置 2.0m, Wd10)

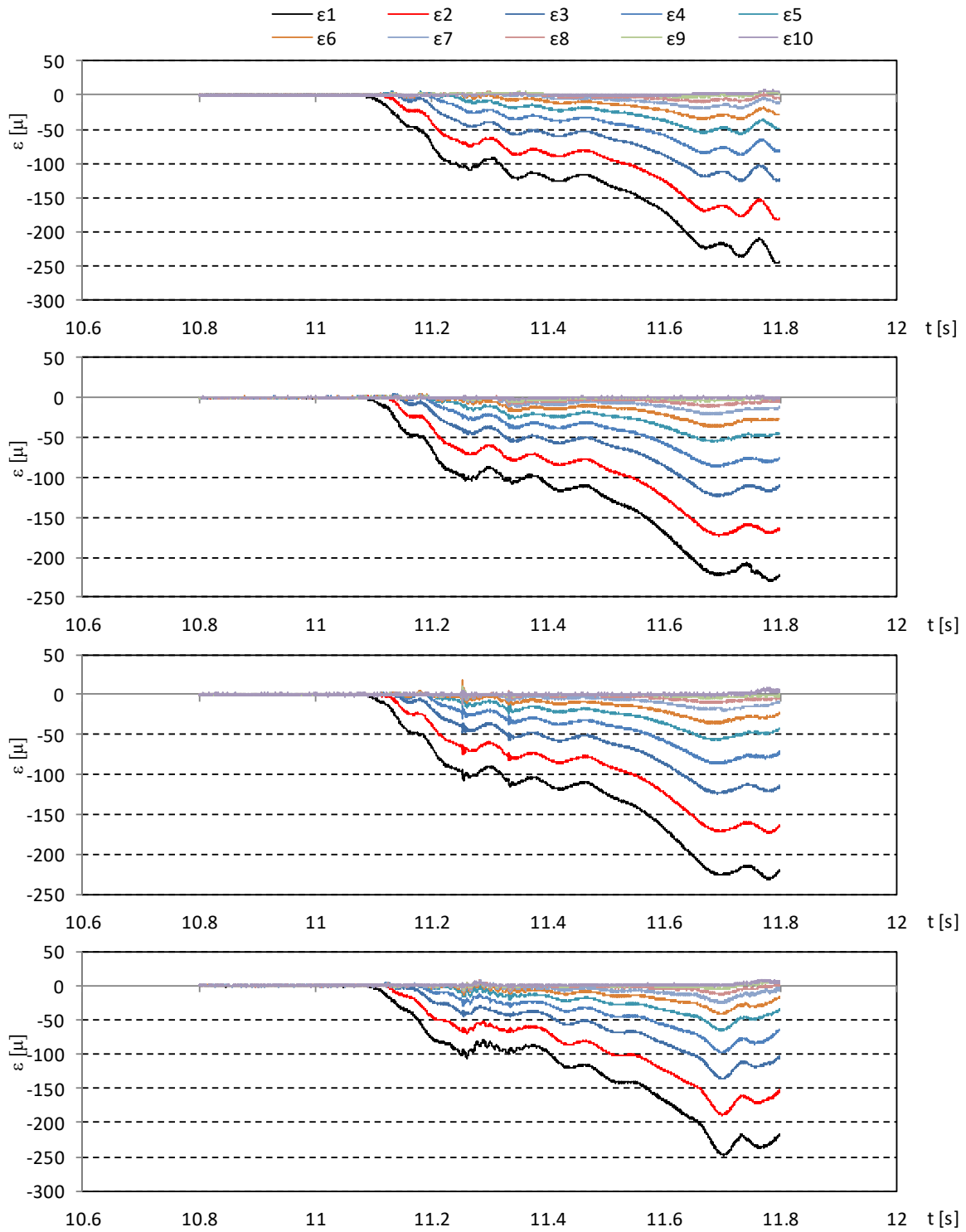


図- 8.5 ひずみの計測結果 (漂流物 C, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd20)

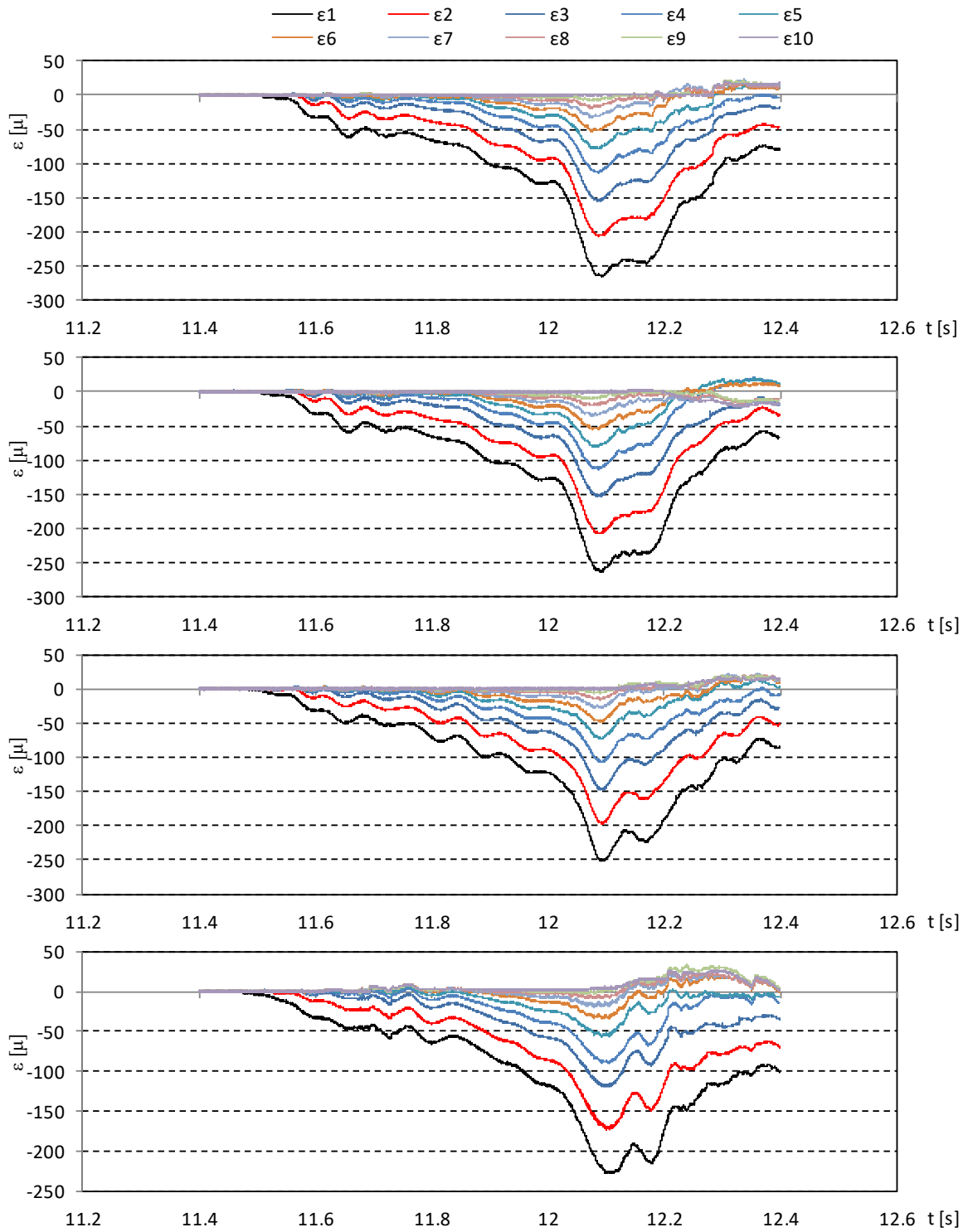


図- 8.6 ひずみの計測結果 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd10)

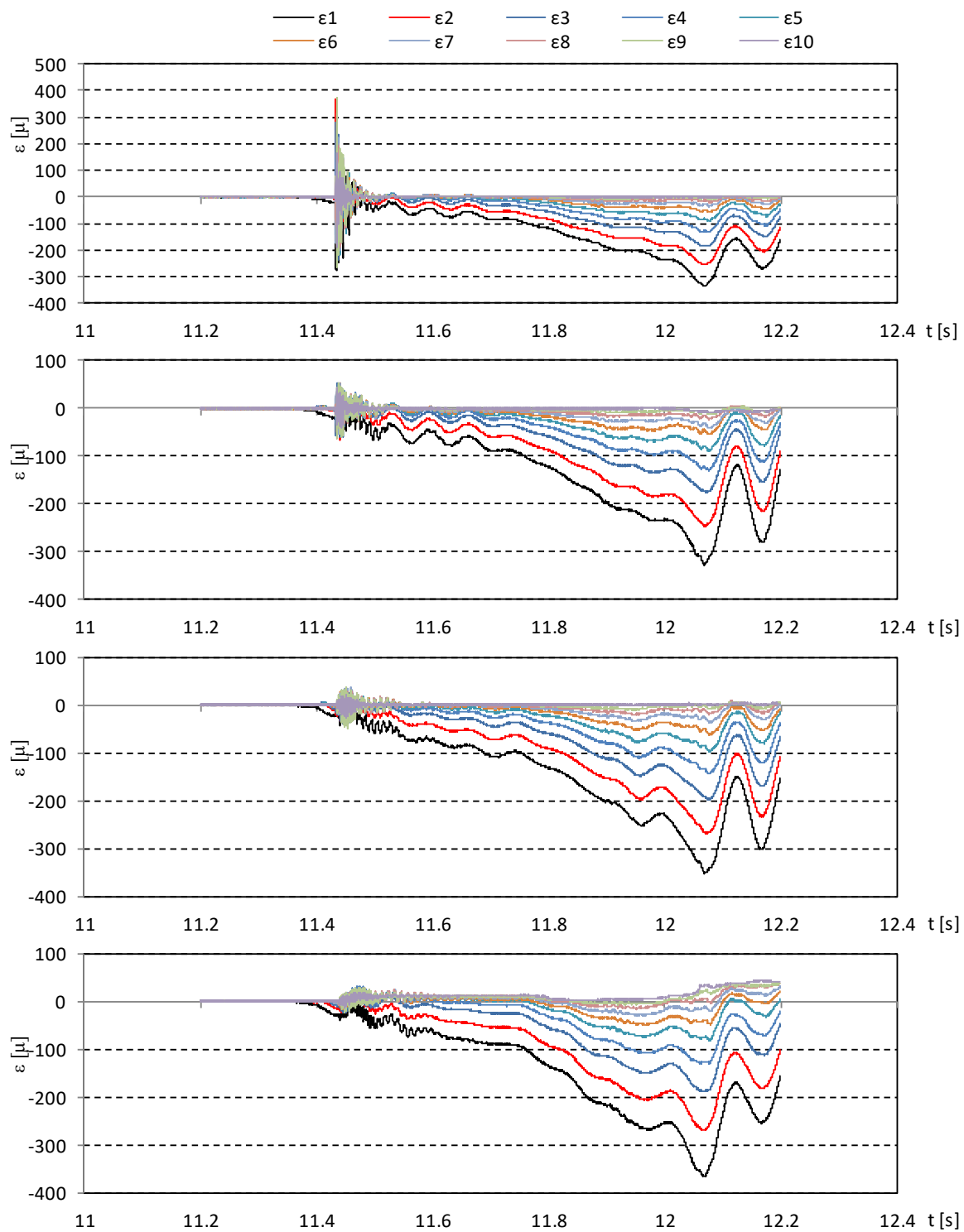


図- 8.6 ひずみの計測結果 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd20)

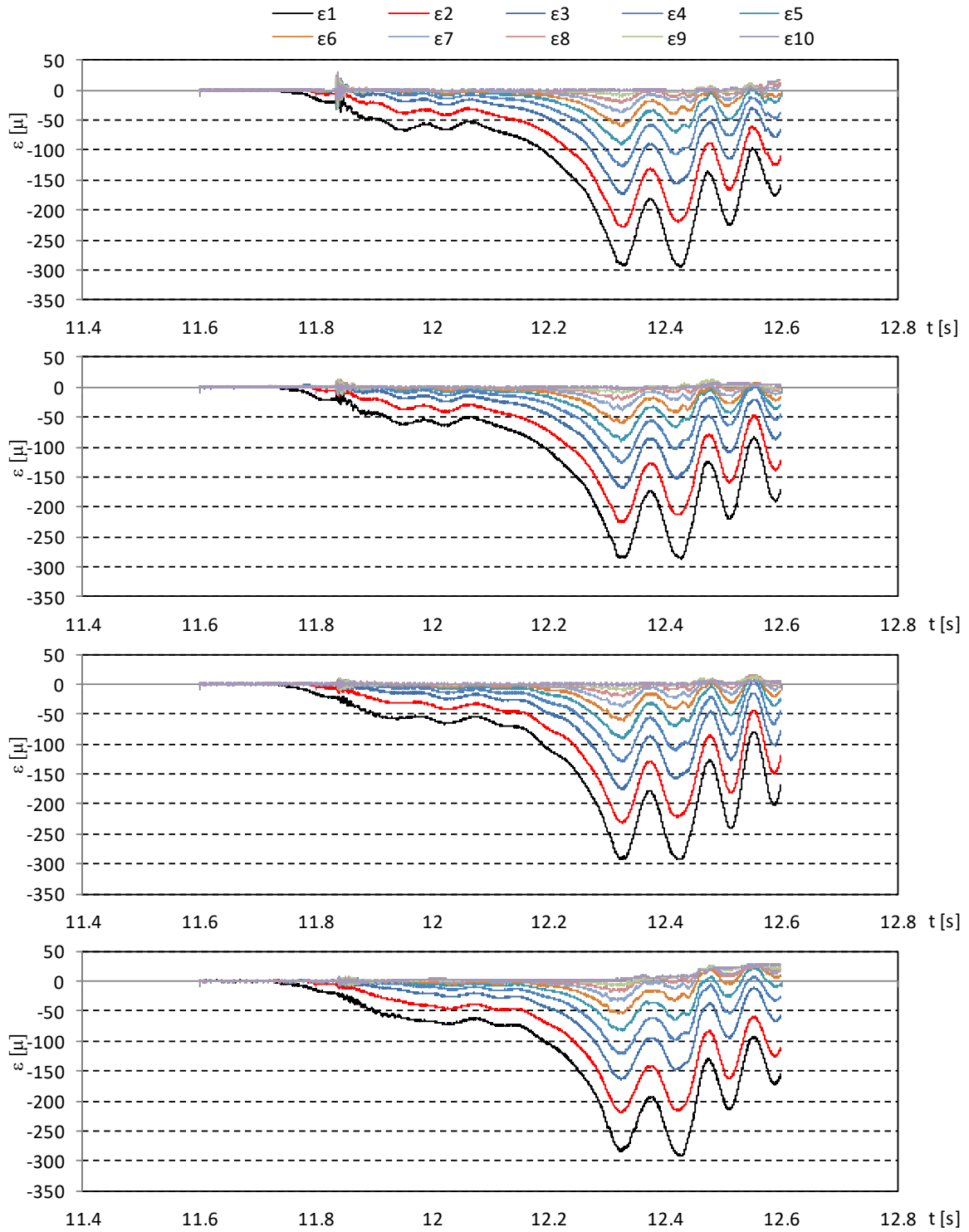


図- 8.6 ひずみの計測結果 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd30)

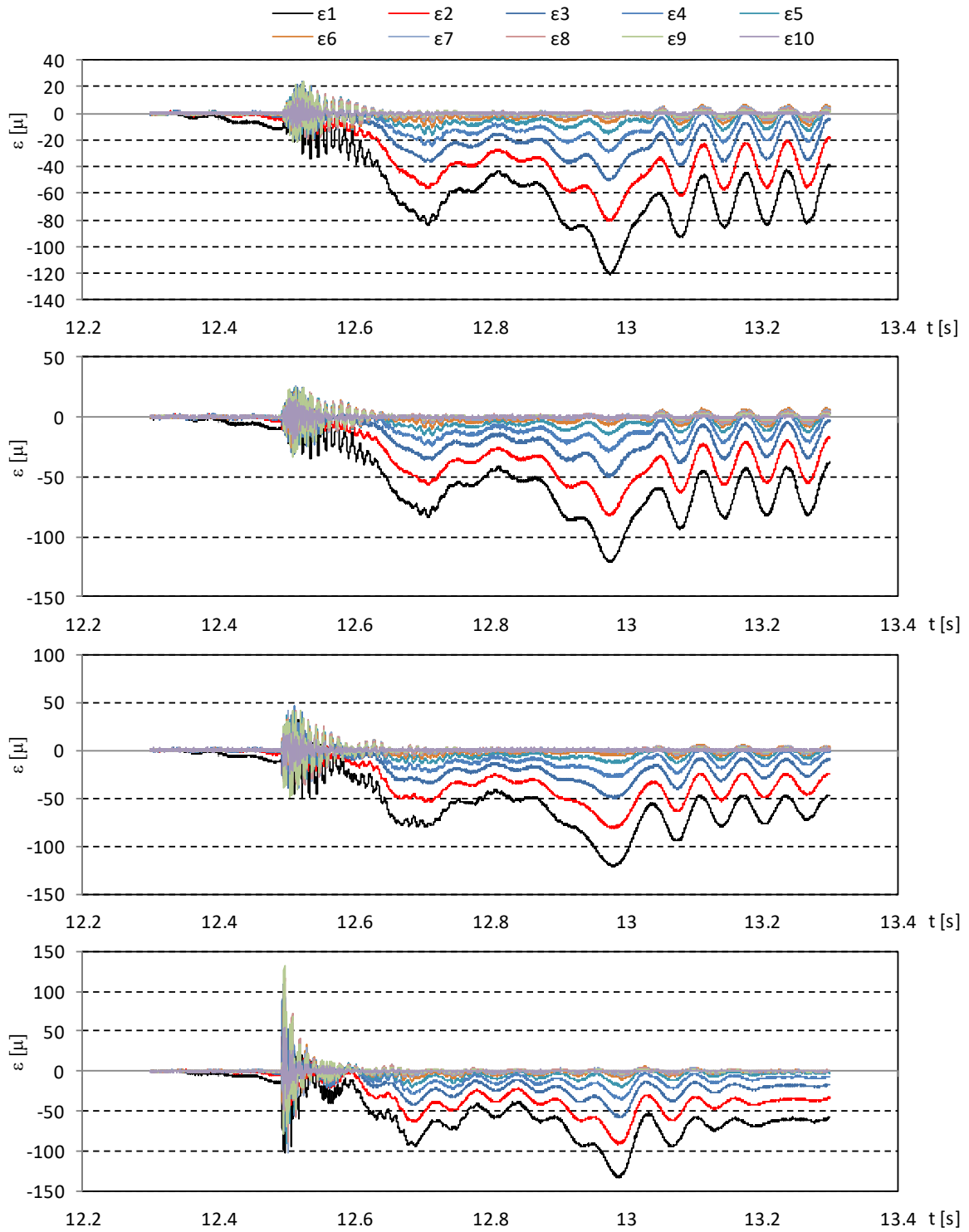


図- 8.6 ひずみの計測結果 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd40)

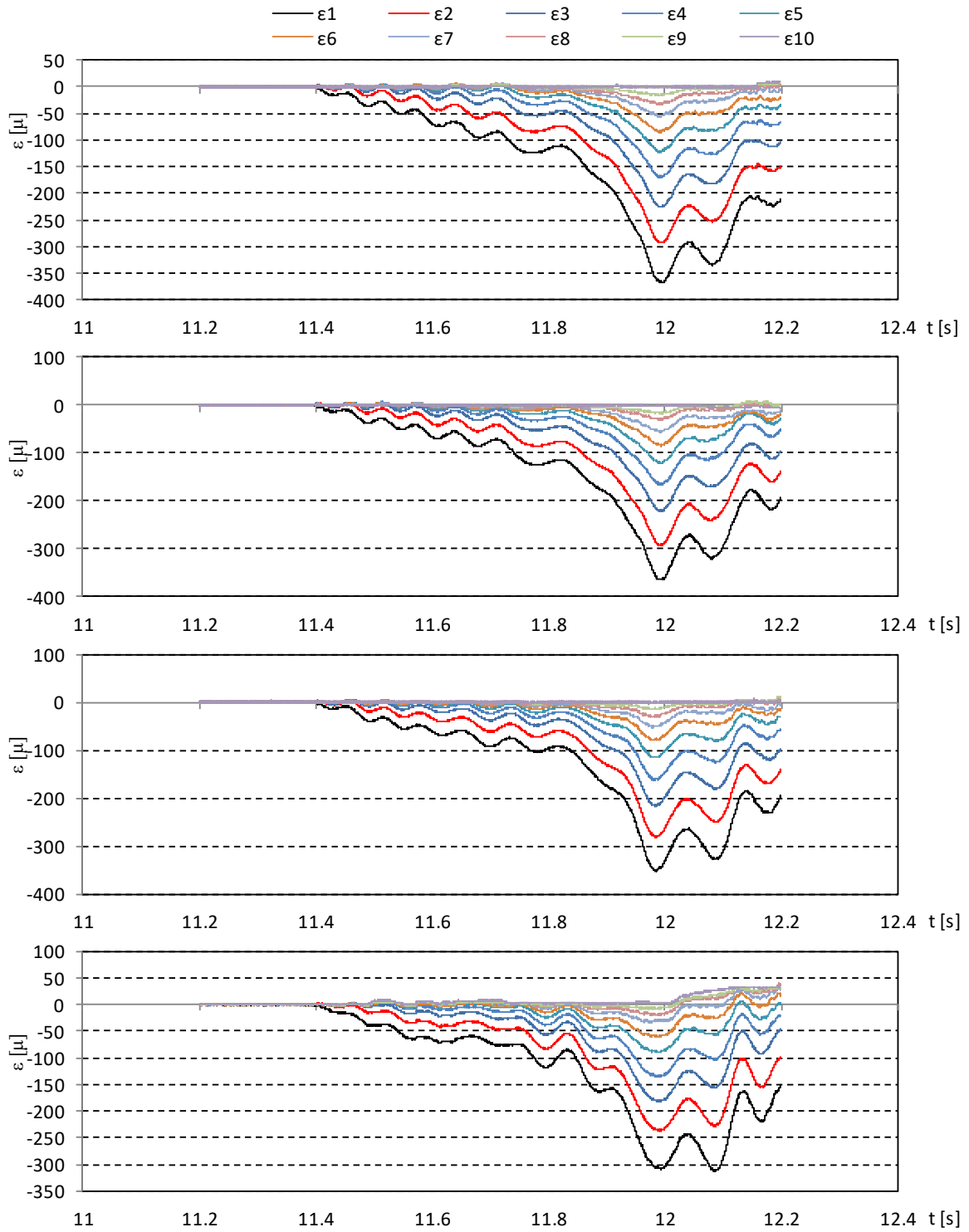


図- 8.6 ひずみの計測結果 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 1.0m, Wd20)

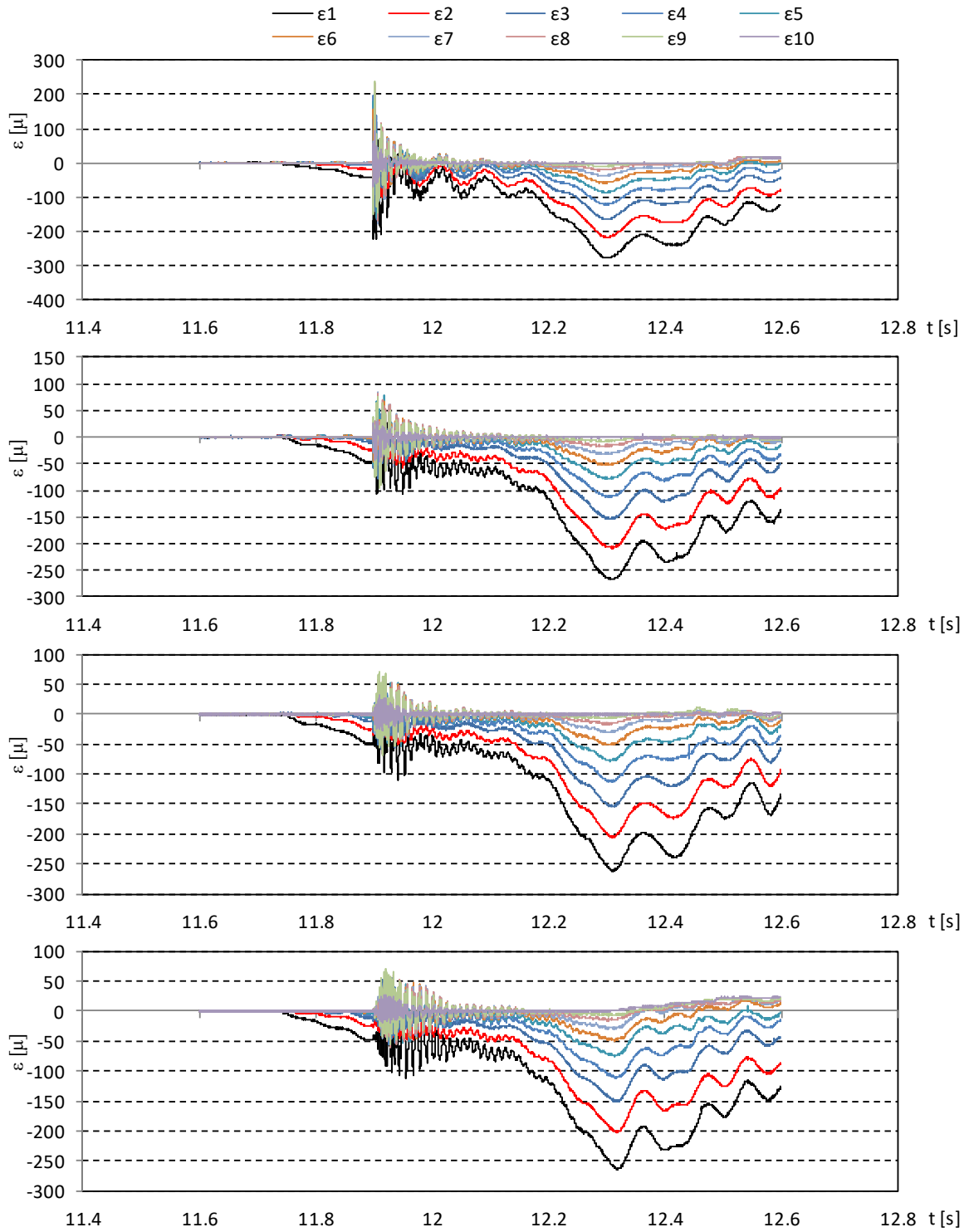


図- 8.6 ひずみの計測結果 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 1.0m, Wd30)

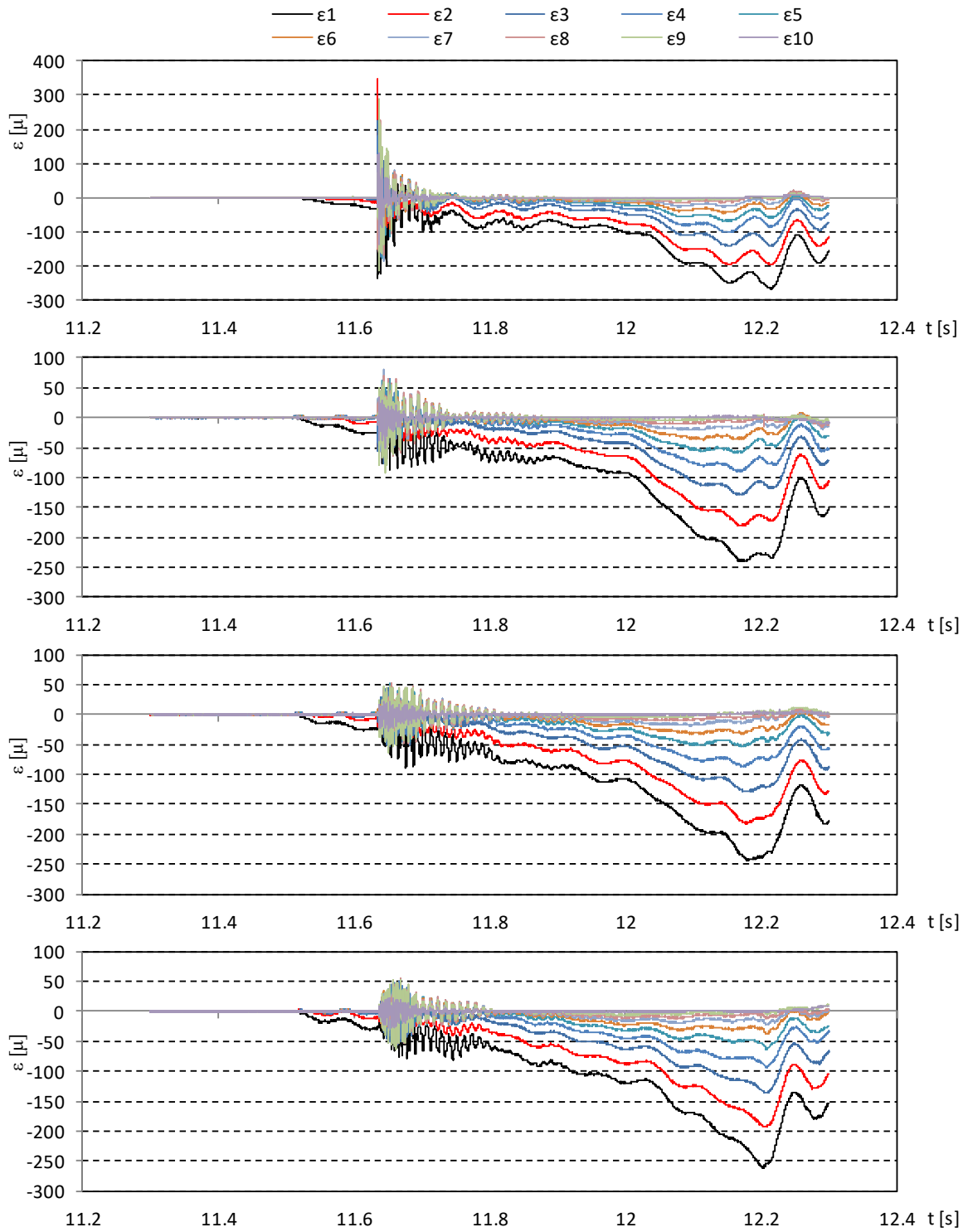


図- 8.6 ひずみの計測結果 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 2.0m, Wd10)

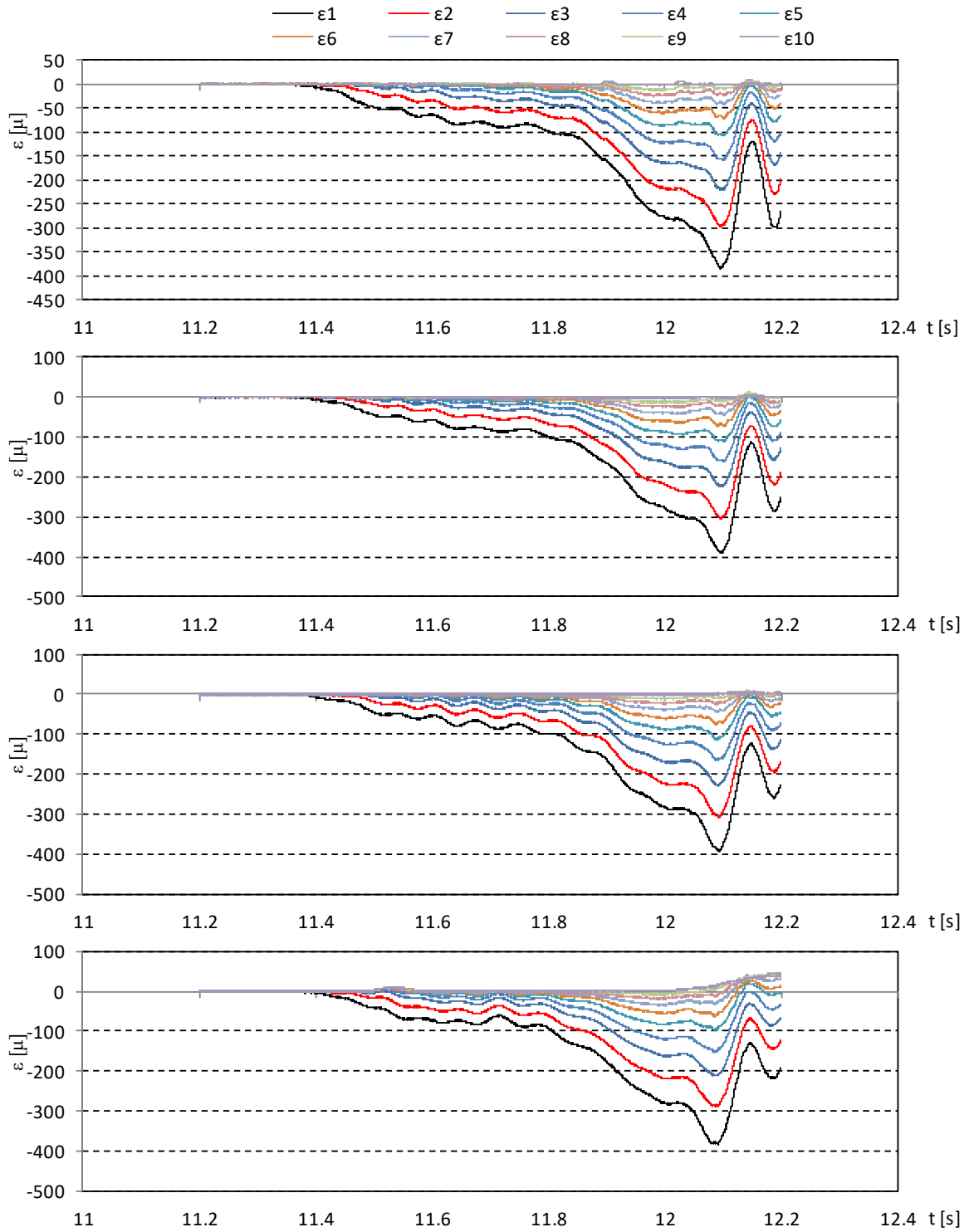


図- 8.6 ひずみの計測結果 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 2.0m, Wd20)

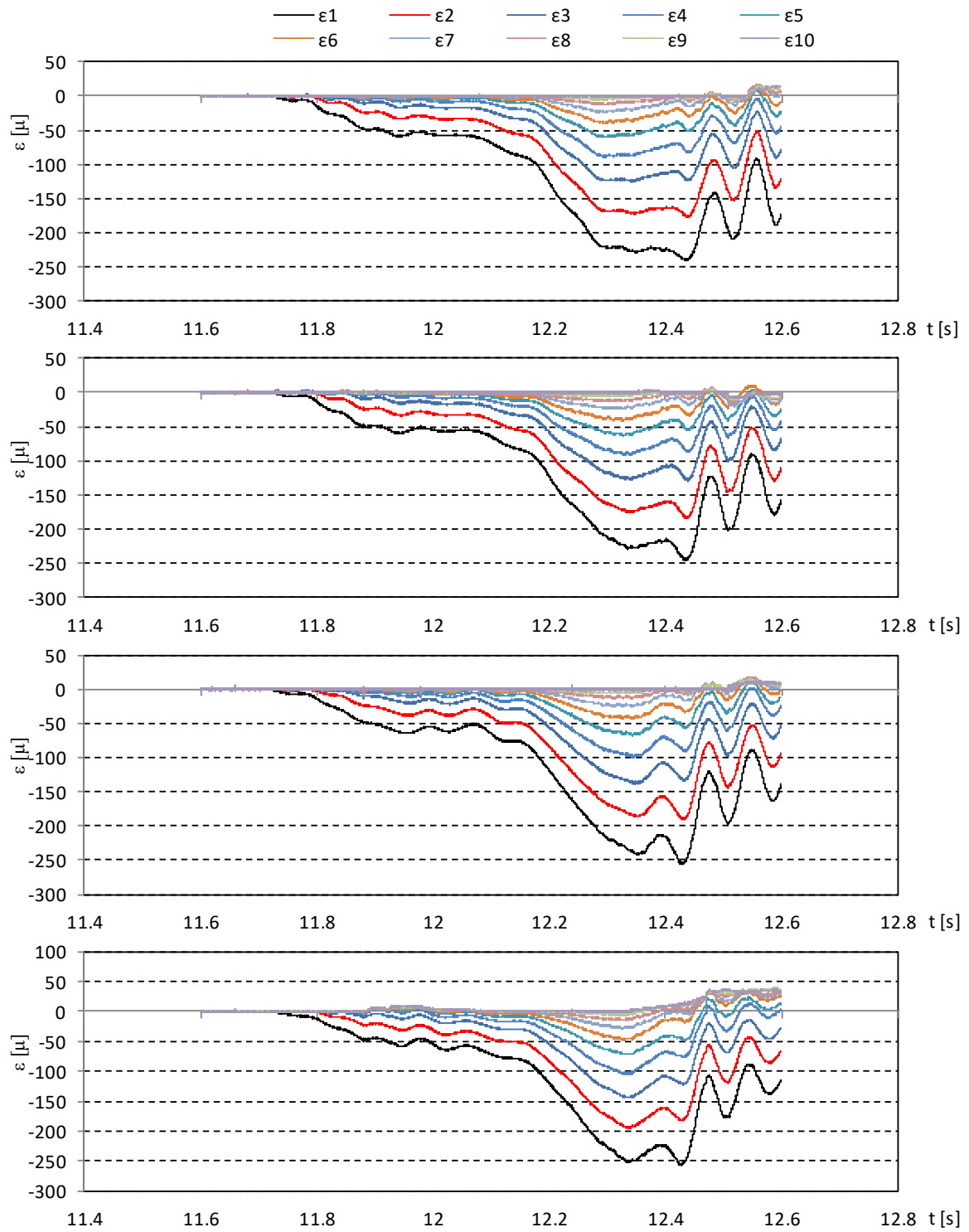


図- 8.6 ひずみの計測結果 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 2.0m, Wd30)

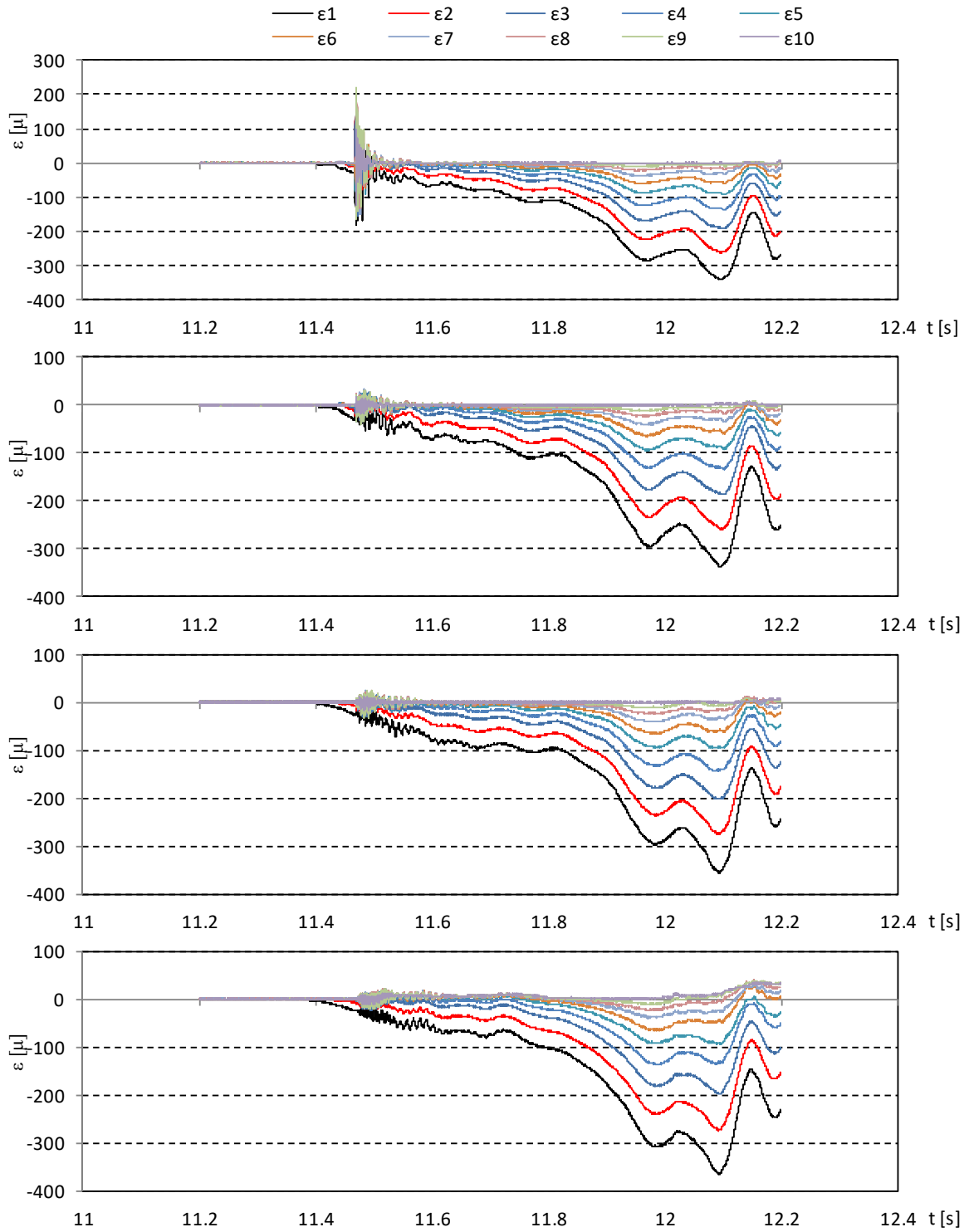


図- 8.7 ひずみの計測結果 (漂流物 B, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd20)

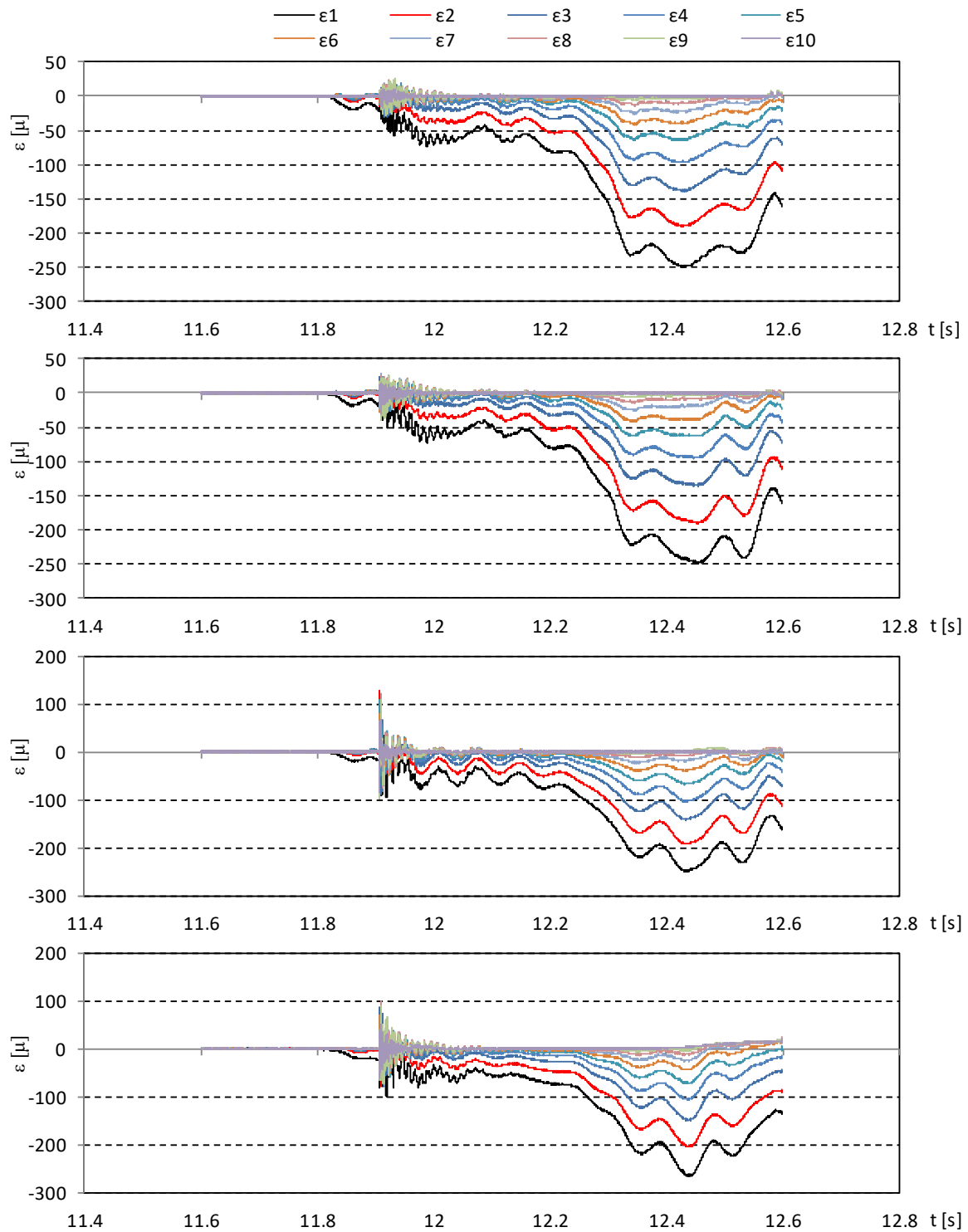


図- 8.7 ひずみの計測結果 (漂流物 B, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd30)

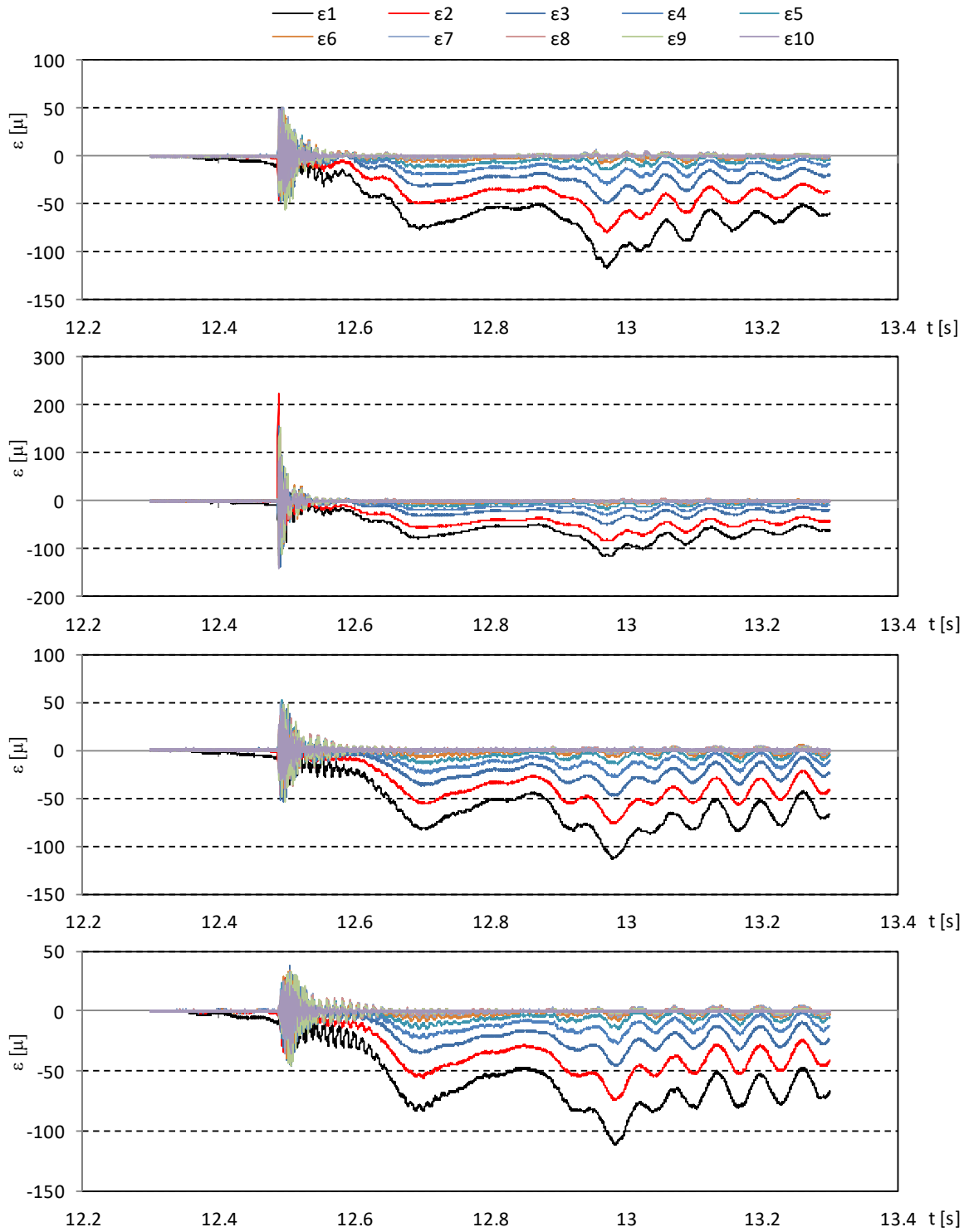


図- 8.7 ひずみの計測結果 (漂流物 B, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd40)

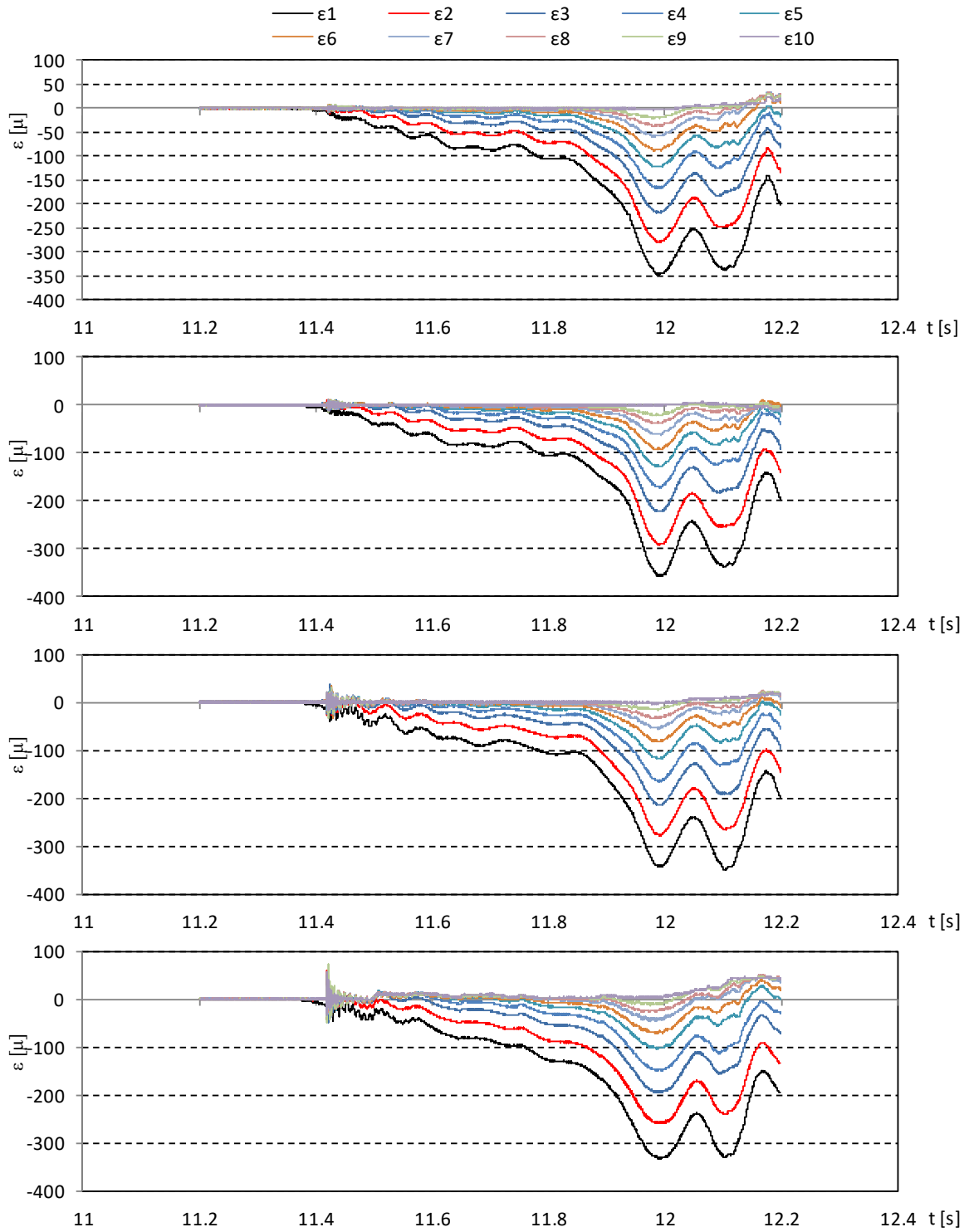


図- 8.7 ひずみの計測結果 (漂流物 B, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 1.0m, Wd20)

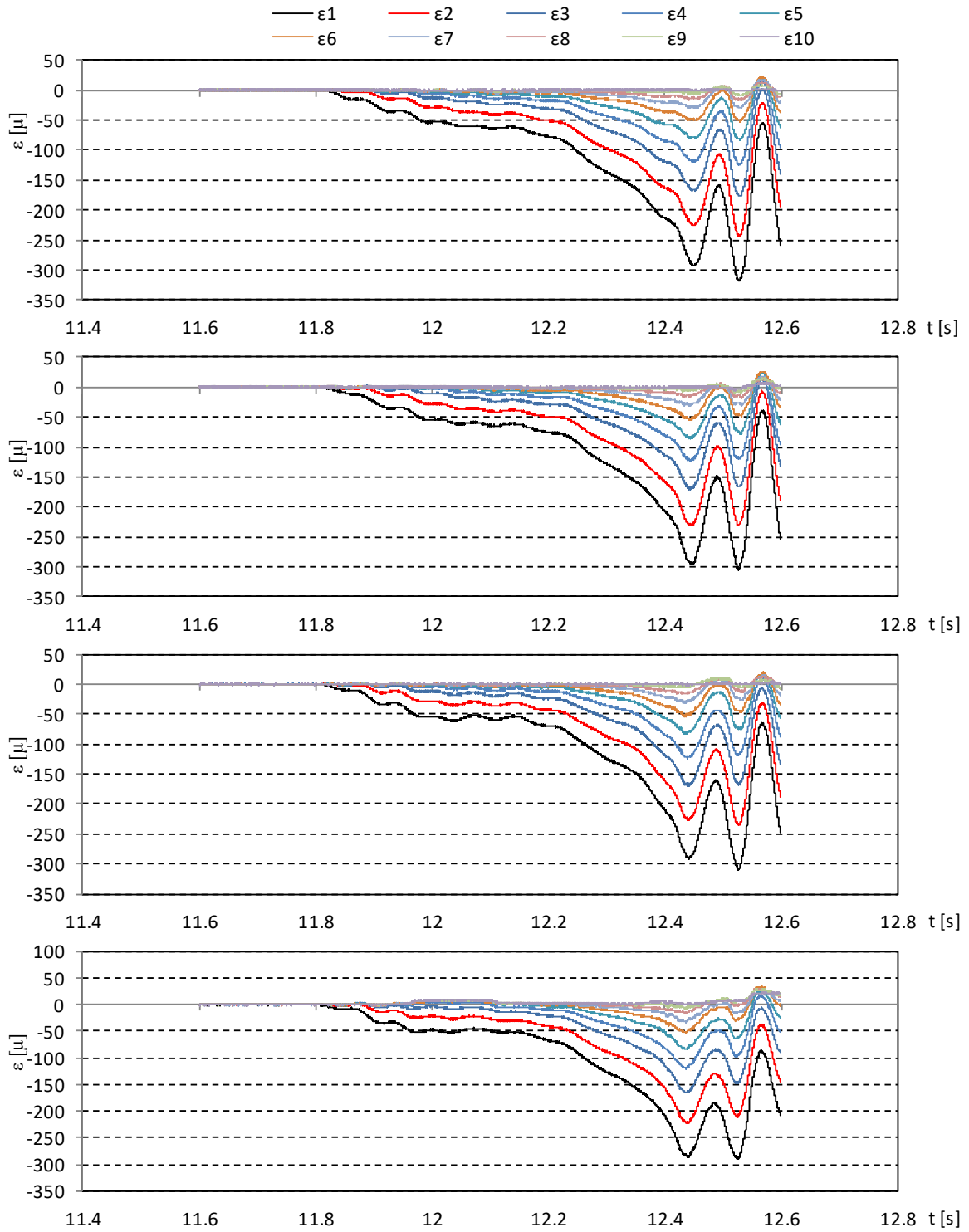


図- 8.7 ひずみの計測結果 (漂流物 B, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 1.0m, Wd30)

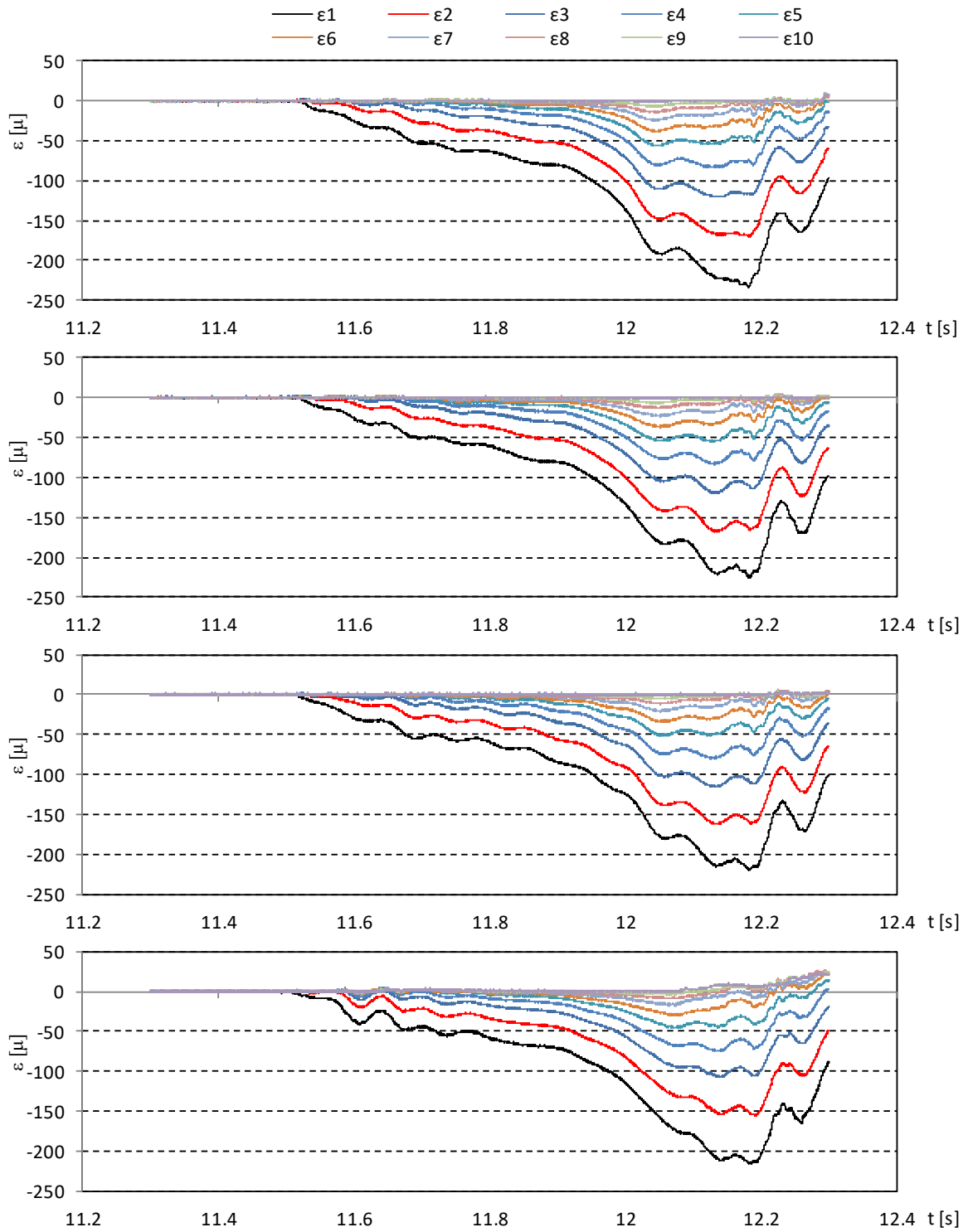


図- 8.7 ひずみの計測結果 (漂流物 B, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 2.0m, Wd10)

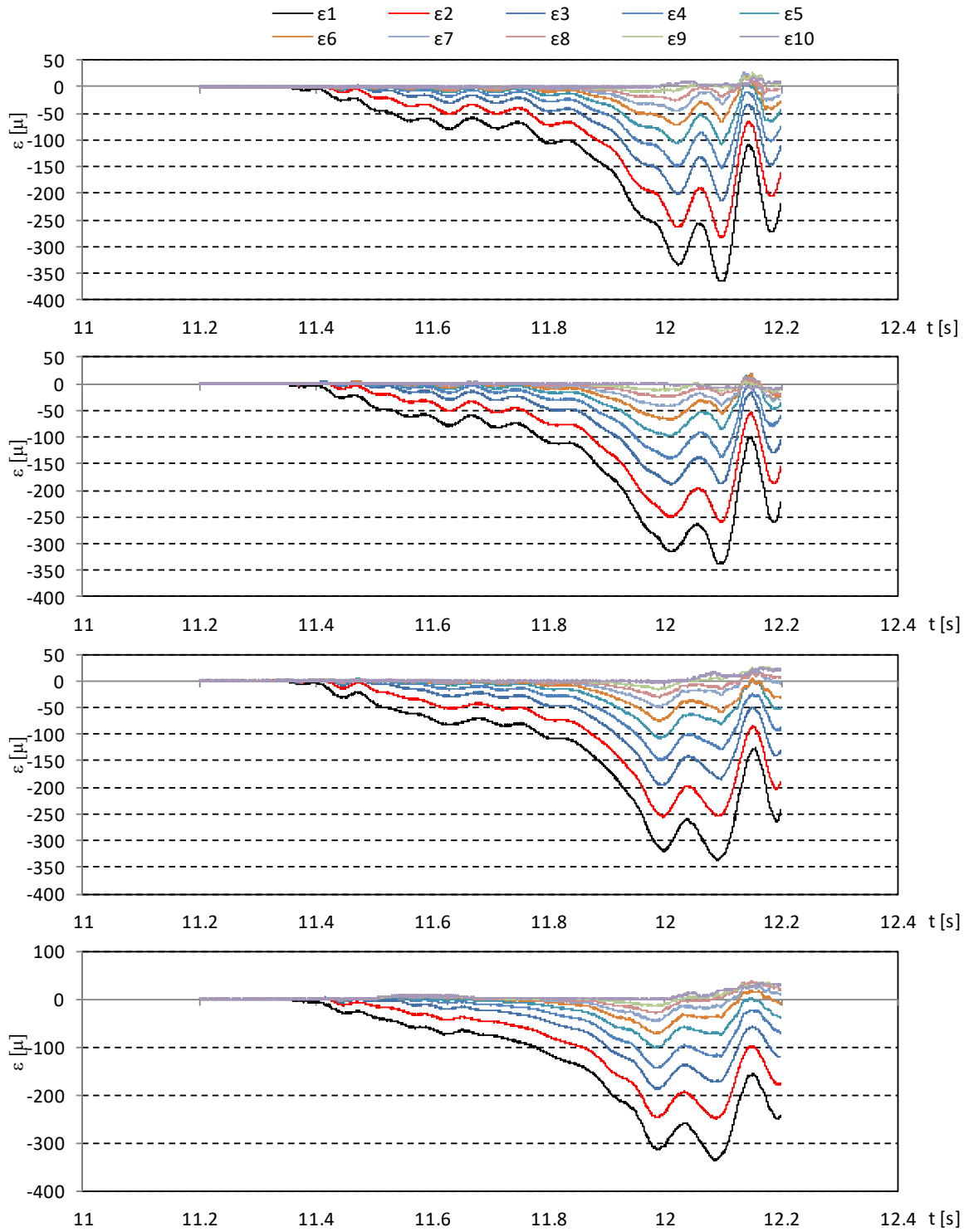


図- 8.8 ひずみの計測結果 (漂流物 C, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd20)

8.2.3. 漂流物衝突衝突時のひずみ鉛直分布

表- 8.2, 表- 8.3 に, 漂流物衝突時の最大ひずみの発生位置 (上段) と, その発生時間 (下段) を示す. ここで, 発生位置の L は漂流物が衝突した板の番号, ε はひずみゲージの高さを示している (越流試験方法参照). 例として図- 8.10 に, 図- 8.3 の時間軸を伸ばしたもの (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd10 のケース) を示すが, 1 列目の 11.3s において, ε_3 に正のひずみの最初のピークが生じており, この時, 2 列目~4 列目のひずみには大きなひずみは生じておらず, 遅れてひずみの振動が生じている. これは, 漂流物の衝突位置にもっとも近いひずみ計が, 1 列目の ε_3 であることを示している. 衝突していない板にもひずみが生じているのは, 振動が架台を通して伝播していることと, また板がひずむことにより局所的な動水圧が生じ, これにより他の板もひずんでいることが要因として考えられる. なお, 本試験における漂流物の衝突時間は, 図- 8.10 におけるひずみの開始から最大ひずみ発生までの時間とすると, 0.001s と非常に短時間であることが分かる.

表- 8.2, 表- 8.3 に示した衝突時間におけるひずみの鉛直分布を, 図- 8.11~図- 8.42 に示す. 図- 8.11~図- 8.42 には, 15 回分の繰り返し試験の結果をすべて示しており, それぞれが表- 8.2, 表- 8.3 に示した時間の鉛直分布を示している. また, 値が -1μ で一定となっているものは, 衝突が確認されなかったものである. 2 種類の図をそれぞれ示しているが, ①~④は 1~4 列目のひずみ鉛直分布である. 例えば図- 8.11 の 1 回目の場合, ②③④のひずみ分布はほぼ同じであり, ①のみ異なっていることから, ①に漂流物が衝突していることが分かる. この場合, ②③④のひずみ分布を平均したものを“平均”とし, ①のひずみ分布からこの平均を減じたものを“衝突”として示している.“平均”は, 津波波圧によって生じたひずみ分布と考えられるため, これを①のひずみ分布から減ずることにより, 漂流物の衝突のみによって生じたひずみ成分が“衝突”として算出できる.

“平均”のひずみ分布は, 底面付近がもっとも大きく, 上方に向けて小さくなり, 先端部は常に 0 となっている. これは, 津波波力によるひずみの分布特性と整合する. 一方“衝突”のひずみ分布は, 漂流物が衝突したと考えられる高さのひずみが正の極値となり, その上下のひずみは, 堤体模型板の慣性力の影響で負値となっている (図- 8.9 参照).

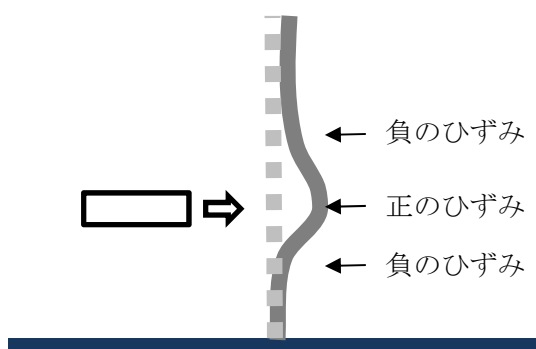


図- 8.9 漂流物衝突時のひずみ特性

表- 8.2 衝突位置と衝突時間（堤体位置 0m）

No	ケース名	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	F-Wd10-0-A-05	L1-ε3	L1-ε5	-	-	L1-ε4	-	L4-ε5	L3-ε6	L2-ε5	-	L2-ε5	-	L4-ε5	L4-ε6	L4-ε4
1		11.300	11.342	-	-	11.260	-	11.321	11.358	11.436	-	11.282	-	11.324	11.329	11.315
2	F-Wd20-0-A-05	L2-ε5	-	L1-ε4	L2-ε5	-	-	L2-ε5	-	L2-ε6	-	-	-	L1-ε4	L2-ε5	-
2		11.193	-	11.177	11.183	-	-	11.189	-	11.234	-	-	-	11.184	11.218	-
3	F-Wd30-0-A-05	L3-ε6	L4-ε4	L1-ε5	L1-ε3	L1-ε6	L2-ε4	L2-ε5	L3-ε4	-	L1-ε4	L4-ε6	L4-ε5	L3-ε3	-	L4-ε6
3		11.554	11.495	11.521	11.546	11.540	11.507	11.516	11.607	-	11.490	11.578	11.550	11.500	-	11.569
4	F-Wd40-0-A-05	L3-ε5	L3-ε4	L4-ε5	L1-ε4	L4-ε5	L3-ε5	-	L4-ε5	L3-ε5	L3-ε4	-	L1-ε3	L3-ε5	L2-ε3	L2-ε4
4		12.161	12.124	12.188	12.195	12.190	12.214	-	12.153	12.170	12.140	-	12.170	12.144	12.063	12.134
5	F-Wd20-0-A-10	L3-ε7	-	L3-ε7	L2-ε7	L1-ε4	L4-ε4	L1-ε4	-	L4-ε5	L2-ε7	L3-ε9	-	L1-ε5	L2-ε4	L2-ε4
5		11.251	-	11.277	11.291	11.195	11.237	11.201	-	11.219	11.282	11.352	-	11.217	11.209	11.204
6	F-Wd30-0-A-10	-	-	-	-	-	-	L3-ε8	L4-ε5	L2-ε5	L2-ε8	-	L1-ε9	L3-ε4	L3-ε5	L3-ε9
6		-	-	-	-	-	-	11.663	11.528	11.519	11.617	-	11.597	11.493	11.528	11.686
7	F-Wd10-0-A-20	-	L1-ε4	L1-ε4	-	L3-ε4	-	L1-ε4	L3-ε6	L2-ε2	L3-ε3	L1-ε4	L3-ε4	-	L2-ε3	-
7		-	11.257	11.369	-	11.391	-	11.232	11.401	11.172	11.243	11.315	11.299	-	11.264	-
8	F-Wd20-0-A-20	-	-	L4-ε9	-	-	-	-	-	L2-ε7	L4-ε4	L4-ε3	-	-	L3-ε2	-
8		-	-	11.404	-	-	-	-	-	11.296	11.228	11.148	-	-	11.140	-
9	F-Wd30-0-A-20	-	-	L1-ε6	-	-	-	-	-	-	-	-	L1-ε6	-	-	-
9		-	-	11.579	-	-	-	-	-	-	-	-	11.556	-	-	-
10	F-Wd20-0-B-05	L4-ε4	L2-ε8	-	L3-ε5	L2-ε4	L3-ε5	-	L3-ε4	-	L3-ε4	-	-	-	L4-ε4	L2-ε5
10		11.241	11.296	-	11.197	11.185	11.208	-	11.193	-	11.205	-	-	-	11.186	11.187
11	F-Wd30-0-B-05	-	-	L3-ε5	-	-	L4-ε4	L2-ε6	L4-ε4	-	L3-ε4	L1-ε6	L2-ε6	L4-ε3	L4-ε8	L4-ε5
11		-	-	11.533	-	-	11.552	11.604	11.496	-	11.526	11.555	11.534	11.451	11.676	11.543
12	F-Wd40-0-B-05	L3-ε4	L2-ε4	L2-ε4	L1-ε5	L2-ε4	L2-ε7	-	L1-ε4	-	-	-	L2-ε5	-	L3-ε6	-
12		12.122	12.089	12.102	12.212	12.116	12.221	-	12.150	-	-	-	12.248	-	12.269	-
13	F-Wd20-0-B-10	-	-	L3-ε5	-	-	-	L2-ε2	L2-ε4	L2-ε5	L3-ε6	L4-ε4	L1-ε9	-	L3-ε5	-
13		-	-	11.191	-	-	-	11.130	11.194	11.198	11.238	11.179	11.292	-	11.218	-
14	F-Wd30-0-B-10	L2-ε6	-	L3-ε3	L3-ε7	-	L4-ε5	-	L3-ε5	L4-ε4	L3-ε5	L3-ε5	-	L4-ε8	-	-
14		11.551	-	11.468	11.603	-	11.543	-	11.546	11.527	11.552	11.534	-	11.614	-	-
15	F-Wd10-0-B-20	-	-	-	L2-ε3	L4-ε4	L2-ε3	L2-ε2	L1-ε2	-	-	-	-	L1-ε3	L1-ε3	L2-ε5
15		-	-	-	11.283	11.289	11.256	11.182	11.216	-	-	-	-	11.274	11.275	11.336
16	F-Wd20-0-C-05	L3-ε6	-	-	-	L2-ε4	-	-	-	-	L4-ε5	L2-ε4	L4-ε6	L2-ε6	-	-
16		11.253	-	-	-	11.186	-	-	-	-	11.201	11.236	11.269	11.243	-	-

表- 8.3 衝突位置と衝突時間（堤体位置 0.625m）

No	ケース名	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
17	F-Wd10-1-A-05	-	-	L3-ε8	-	L1-ε3	-	L3-ε2	L2-ε3	-	-	-	L3-ε2	-	-	L3-ε2
17		-	-	11.761	-	11.566	-	11.617	11.592	-	-	-	11.540	-	-	11.575
18	F-Wd20-1-A-05	L1-ε2	L2-ε2	L2-ε4	-	L1-ε2	L1-ε6	-	L2-ε3	L4-ε2	L1-ε2	L4-ε2	L4-ε8	L3-ε2	-	L4-ε3
18		11.434	11.438	11.500	-	11.462	11.532	-	11.514	11.437	11.492	11.422	11.531	11.490	-	11.440
19	F-Wd30-1-A-05	-	-	-	-	-	L3-ε2	L4-ε2	-	L2-ε3	L3-ε3	L2-ε2	L2-ε4	-	L1-ε5	-
19		-	-	-	-	-	11.831	11.802	-	11.813	11.856	11.782	11.873	-	11.934	-
20	F-Wd40-1-A-05	L4-ε3	-	L4-ε3	-	-	-	L3-ε3	L4-ε3	L1-ε3	L4-ε2	-	L3-ε3	-	-	L2-ε2
20		12.495	-	12.547	-	-	-	12.535	12.522	12.564	12.441	-	12.521	-	-	12.489
21	F-Wd20-1-A-10	-	L3-ε3	L4-ε4	-	-	-	L1-ε1	L4-ε4	-	L3-ε2	-	L4-ε2	-	-	-
21		-	11.503	11.539	-	-	-	11.386	11.543	-	11.443	-	11.435	-	-	-
22	F-Wd30-1-A-10	L1-ε4	L1-ε5	-	L1-ε2	L1-ε4	-	L4-ε3	L1-ε4	-	L2-ε3	L2-ε3	L2-ε3	L2-ε4	-	-
22		11.900	11.924	-	11.809	11.878	-	11.840	11.921	-	11.862	11.875	11.858	11.896	-	-
23	F-Wd10-1-A-20	L1-ε2	L4-ε1	-	-	L2-ε3	-	L2-ε4	L1-ε3	L3-ε3	L2-ε1	L2-ε3	-	-	L4-ε3	L2-ε1
23		11.635	11.431	-	-	11.615	-	11.650	11.705	11.665	11.511	11.597	-	-	11.564	11.457
24	F-Wd20-1-A-20	-	L4-ε5	L2-ε2	-	L4-ε3	L2-ε2	-	-	L3-ε2	-	-	L1-ε5	L2-ε2	L3-ε6	-
24		-	11.566	11.480	-	11.496	11.394	-	-	11.423	-	-	11.617	11.493	11.624	-
25	F-Wd30-1-A-20	-	-	-	L3-ε2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	L1-ε3
25		-	-	-	11.765	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.938
26	F-Wd20-1-B-05	L1-ε3	L2-ε3	L2-ε7	L4-ε3	L2-ε3	L2-ε3	L1-ε2	L4-ε3	L4-ε1	L2-ε2	-	-	L4-ε2	L2-ε4	L2-ε3
26		11.469	11.491	11.607	11.485	11.475	11.526	11.451	11.540	11.386	11.474	-	-	11.479	11.535	11.496
27	F-Wd30-1-B-05	L3-ε2	L3-ε2	L3-ε2	L2-ε3	L2-ε2	-	L2-ε4	-	L2-ε4	L1-ε2	-	L1-ε2	-	L4-ε3	L4-ε4
27		11.907	11.890	11.893	11.940	11.913	-	11.961	-	11.986	11.884	-	11.867	-	11.829	11.901
28	F-Wd40-1-B-05	L2-ε2	L3-ε2	-	L1-ε3	L1-ε3	-	-	L2-ε2	-	-	-	-	-	L3-ε2	-
28		12.488	12.498	-	12.564	12.541	-	-	12.518	-	-	-	-	-	12.489	-
29	F-Wd20-1-B-10	L4-ε2	L3-ε2	L3-ε4	-	-	L2-ε3	-	L4-ε2	L2-ε3	-	L3-ε2	-	L1-ε2	-	-
29		11.419	11.440	11.564	-	-	11.457	-	11.493	11.495	-	11.432	-	11.509	-	-
30	F-Wd30-1-B-10	-	L1-ε3	-	L1-ε2	-	L1-ε3	-	L2-ε5	L3-ε6	L1-ε1	L1-ε3	L3-ε3	L1-ε3	-	-
30		-	11.968	-	11.933	-	11.880	-	12.042	11.981	11.945	11.961	11.902	11.958	-	-
31	F-Wd10-1-B-20	-	-	L4-ε1	L3-ε2	-	-	-	-	-	-	-	L3-ε2	-	-	-
31		-	-	11.403	11.528	-	-	-	-	-	-	-	11.533	-	-	-
32	F-Wd20-1-C-05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

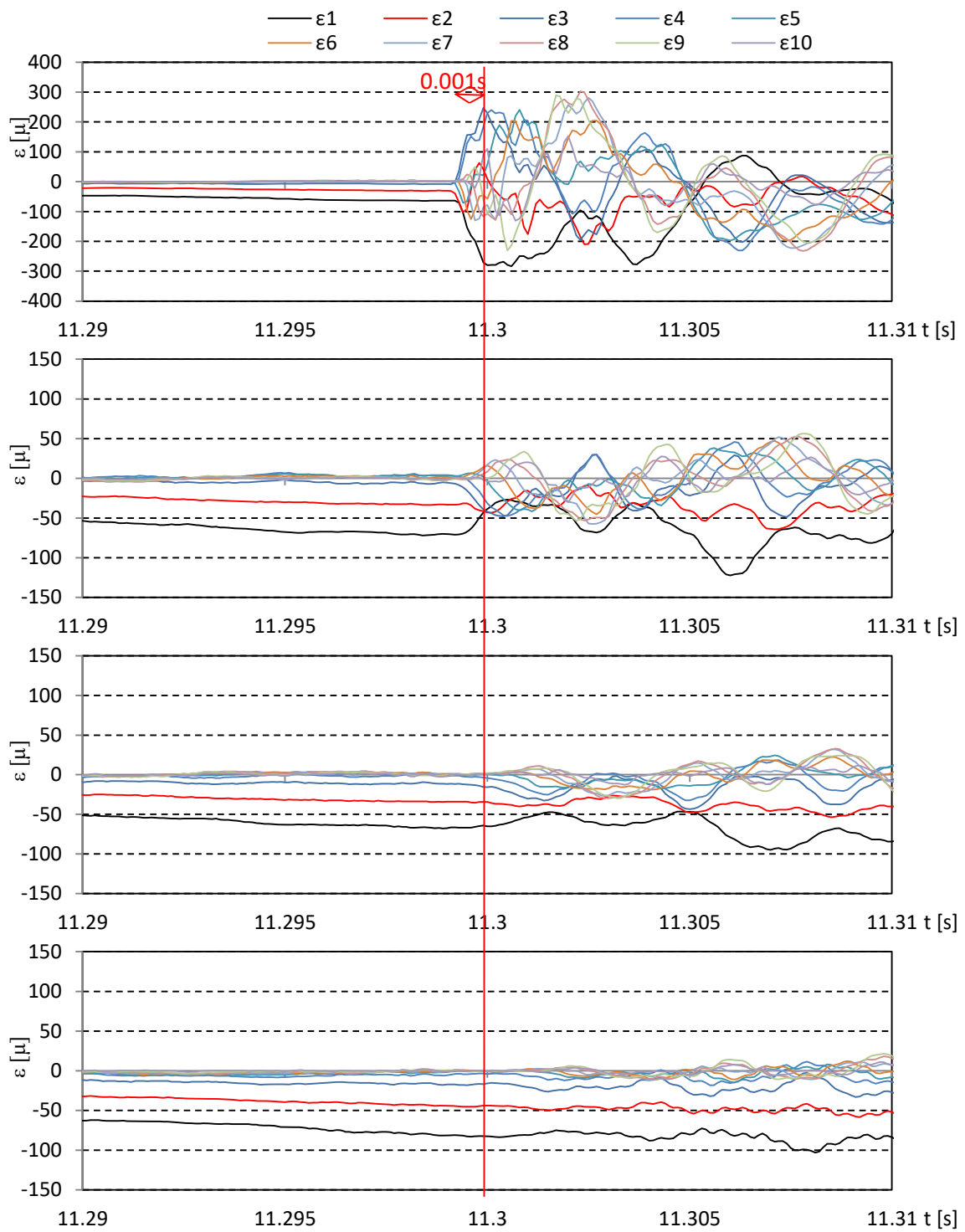


図- 8.10 ひずみの計測結果 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd10)

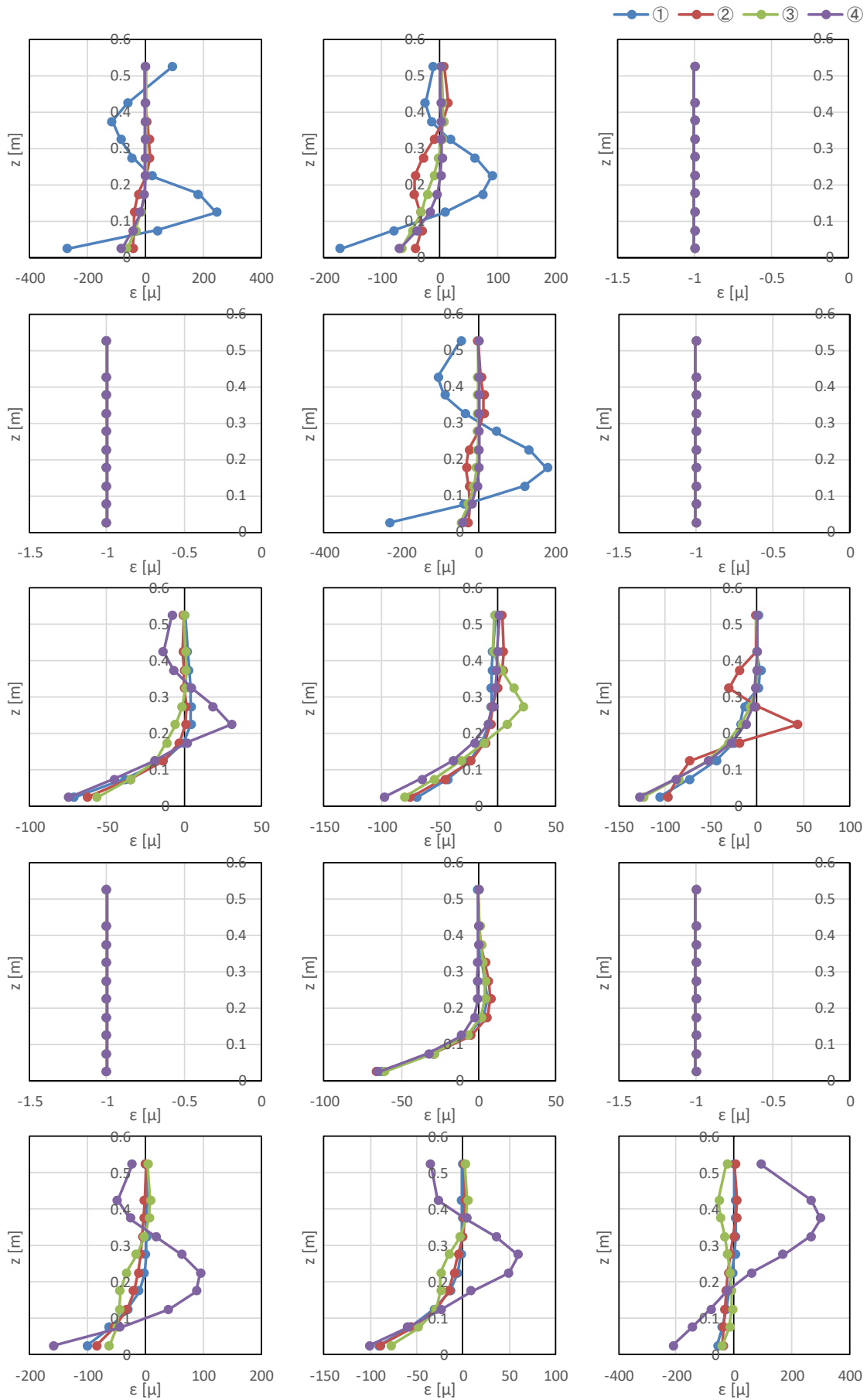


図- 8.11 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd10)

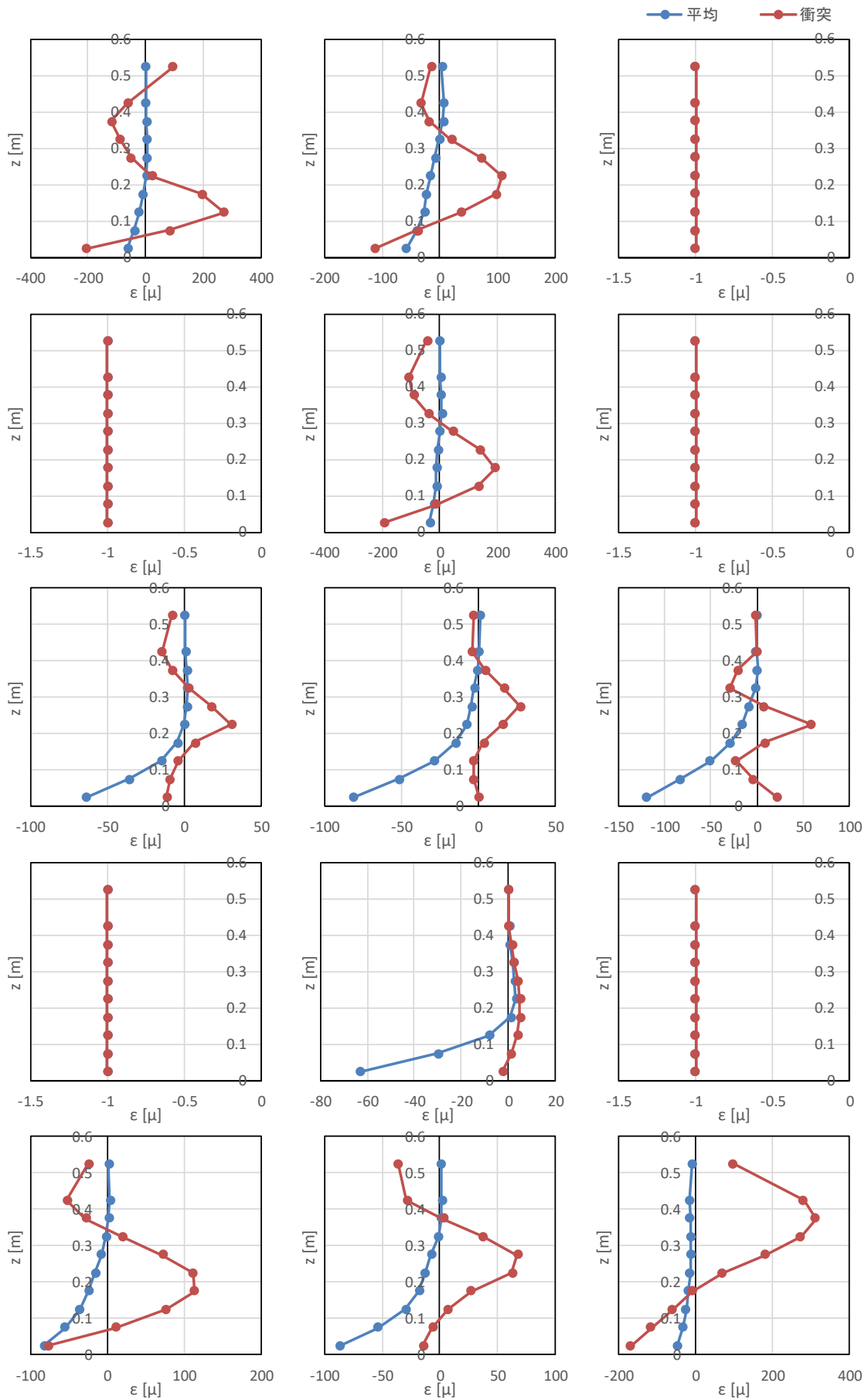


図- 8.11 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd10)

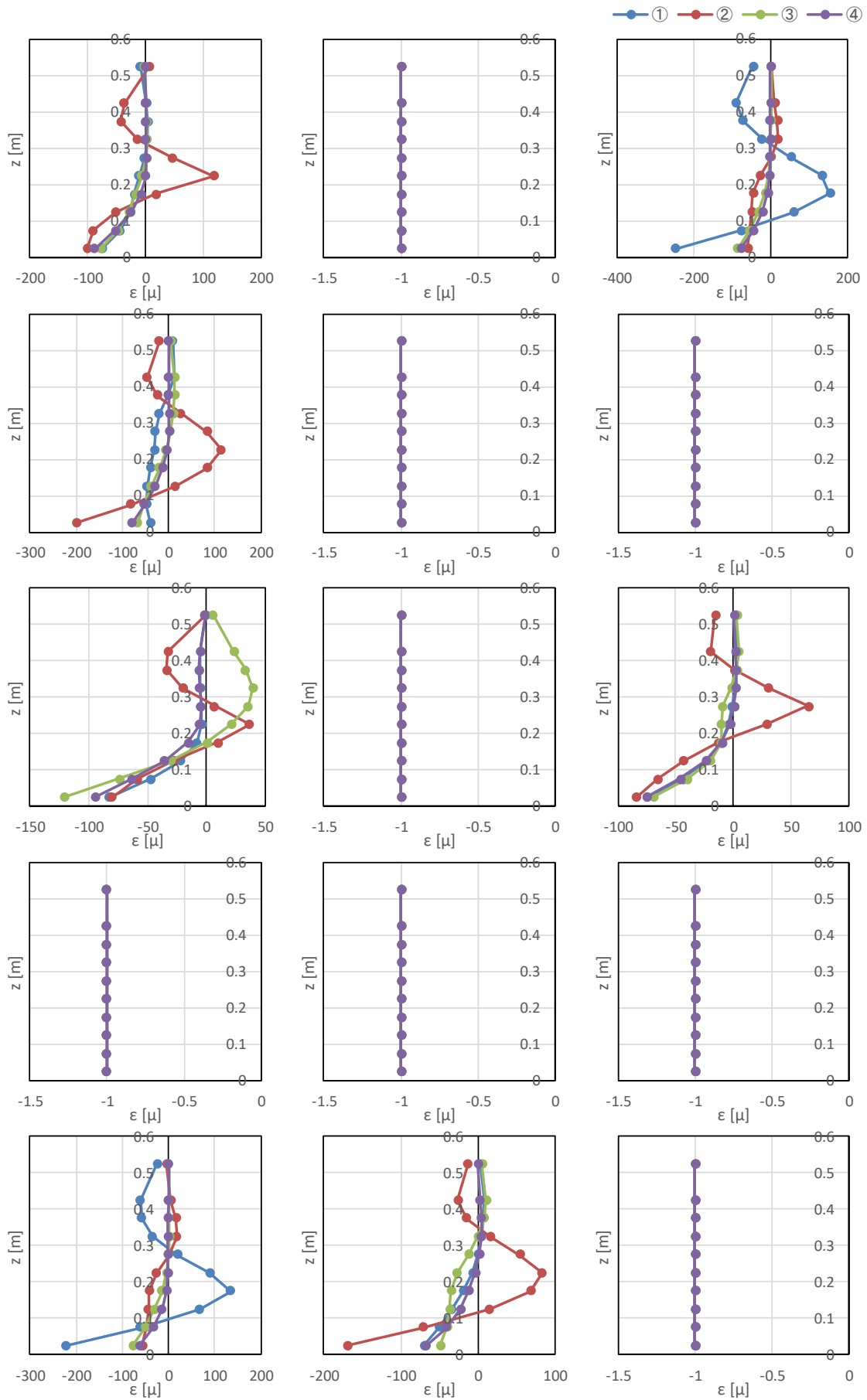


図- 8.12 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd20)

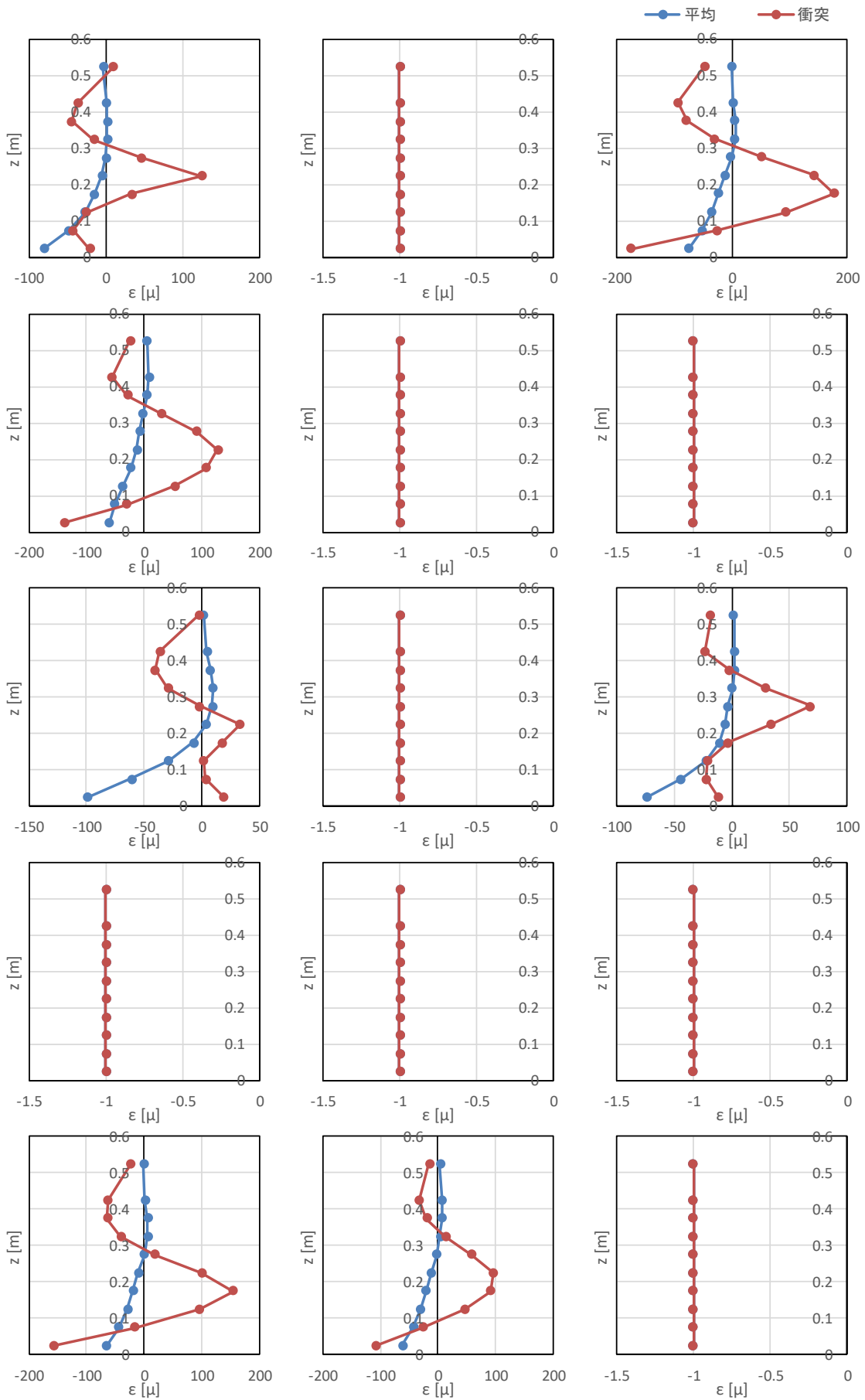


図- 8.12 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd20)

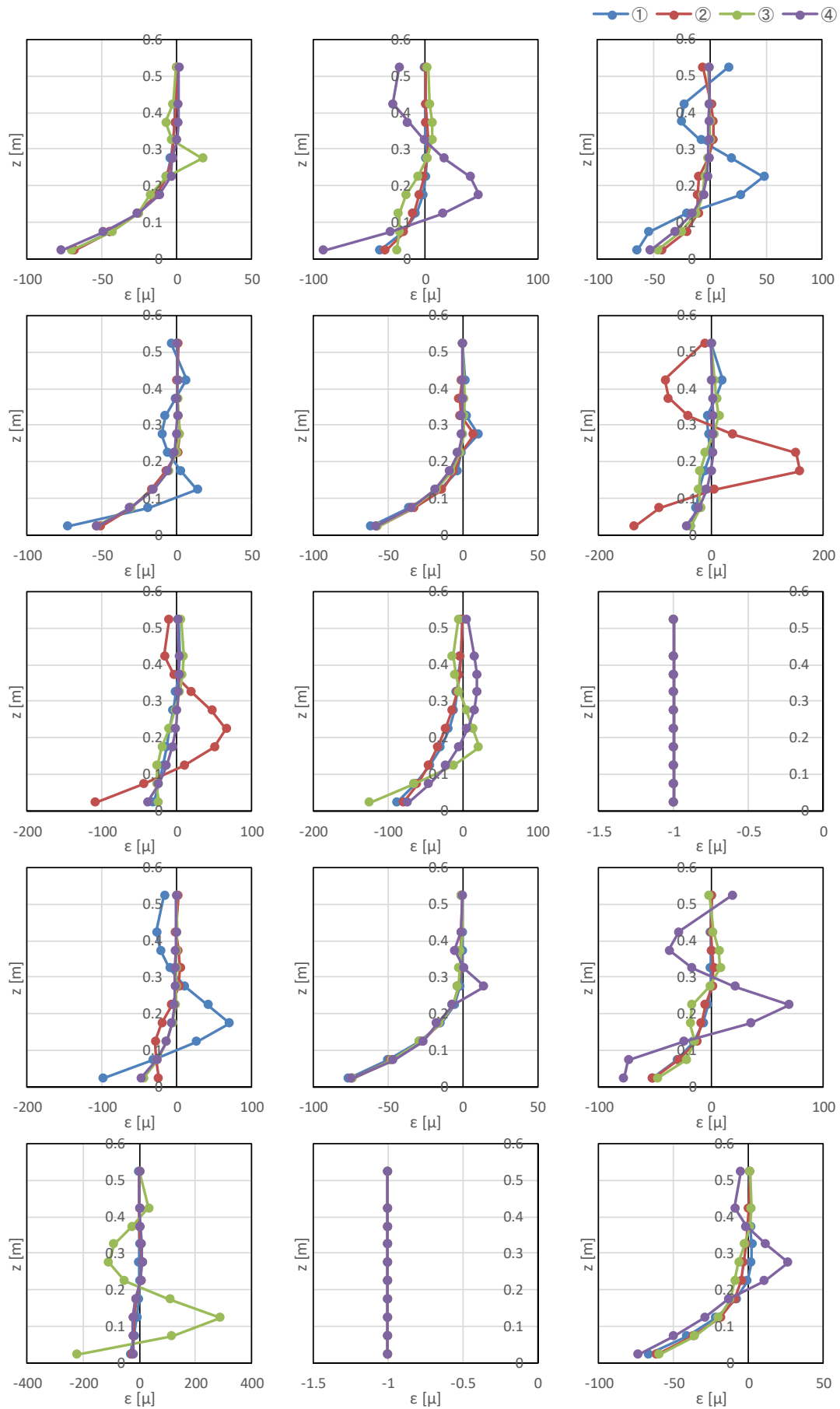


図- 8.13 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd30)

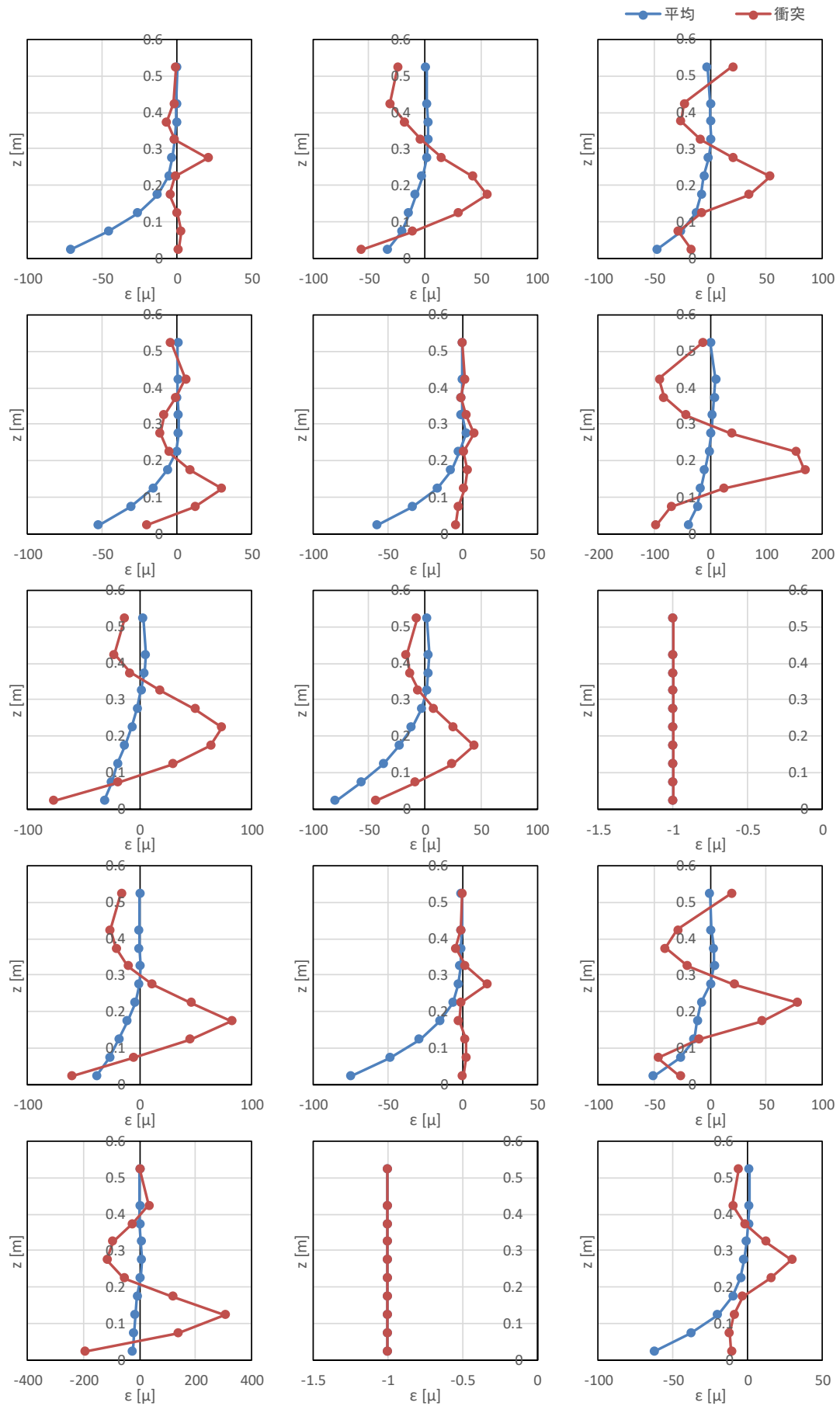


図- 8.13 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd30)

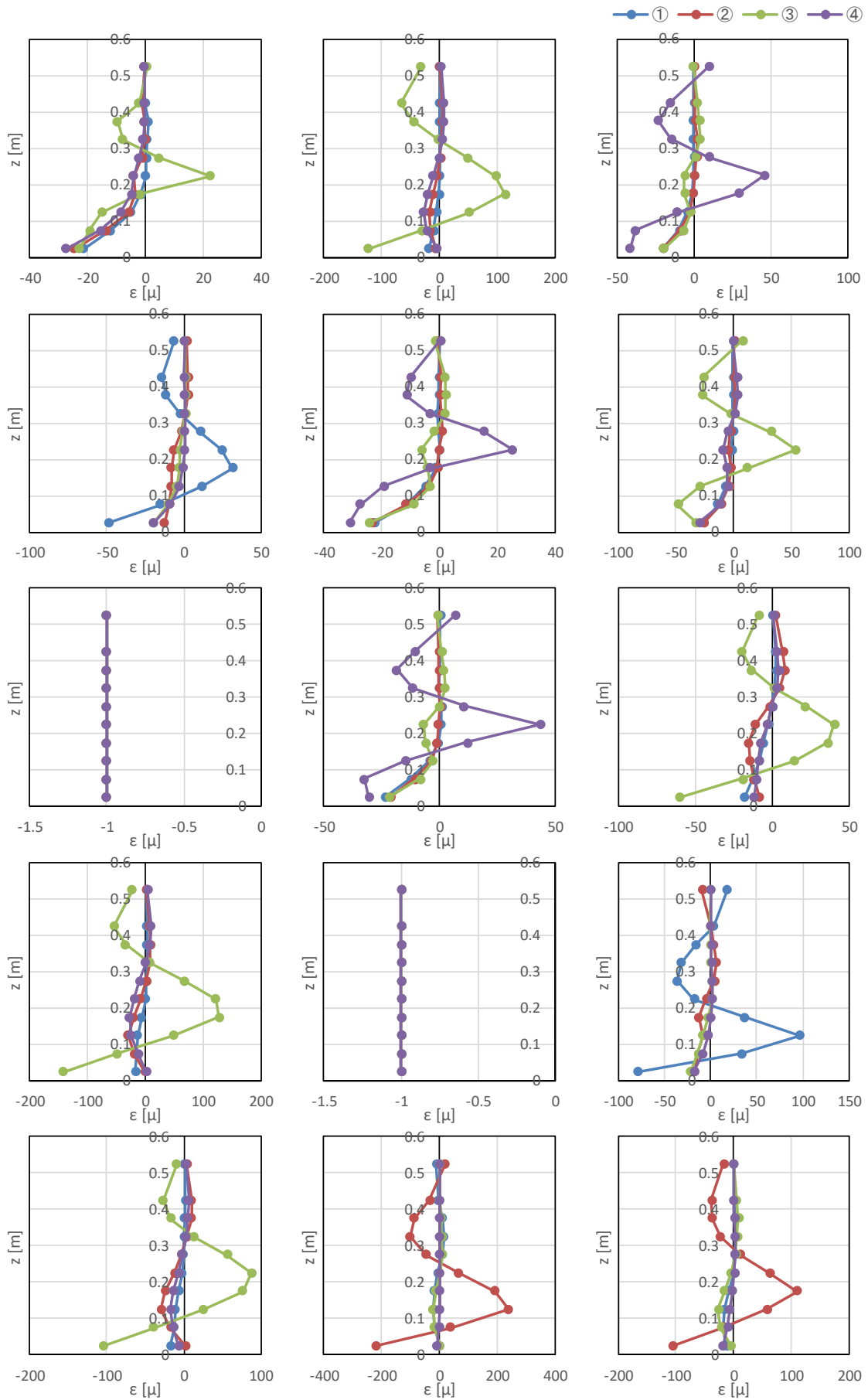


図- 8.14 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd40)

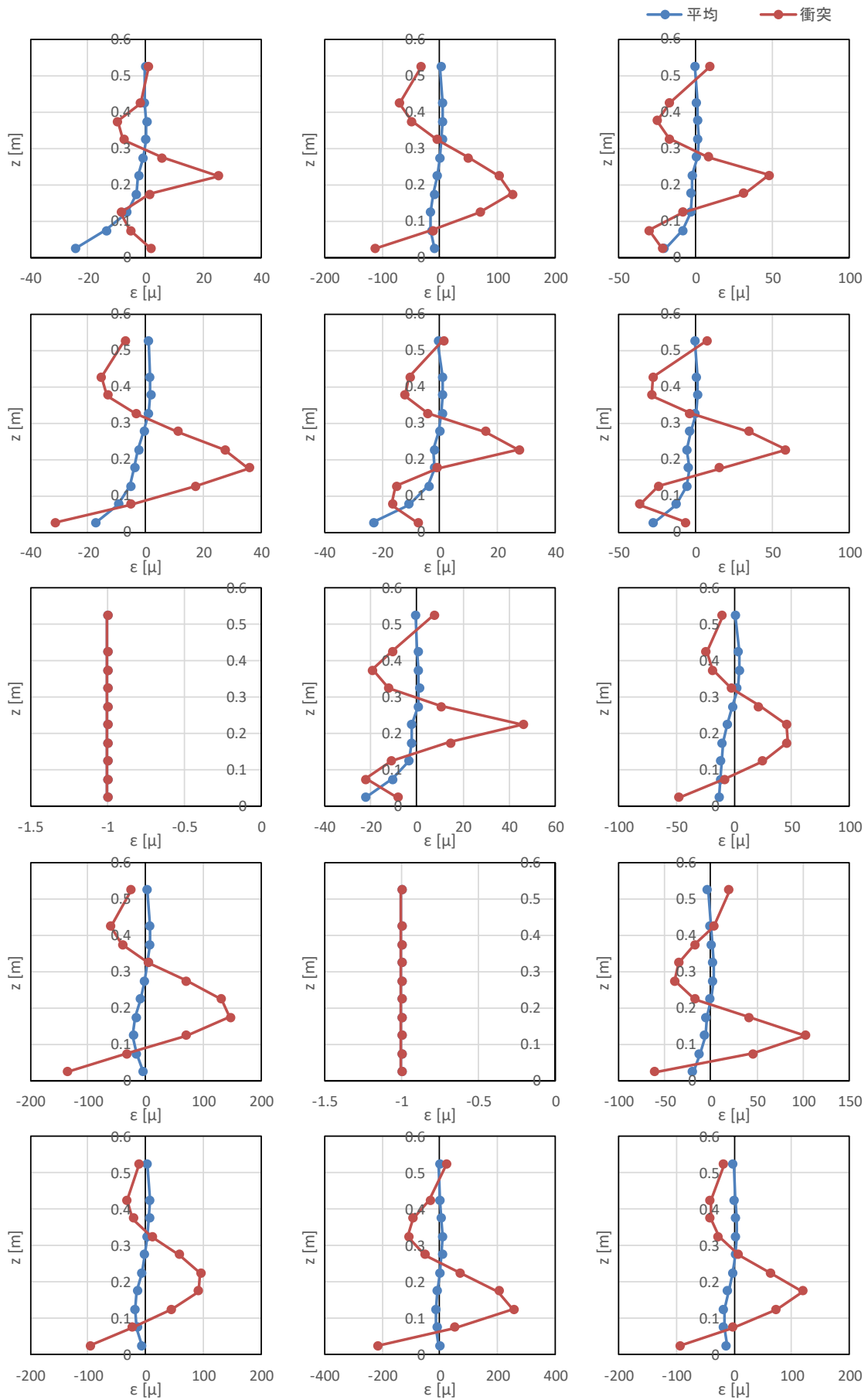


図- 8.14 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd40)

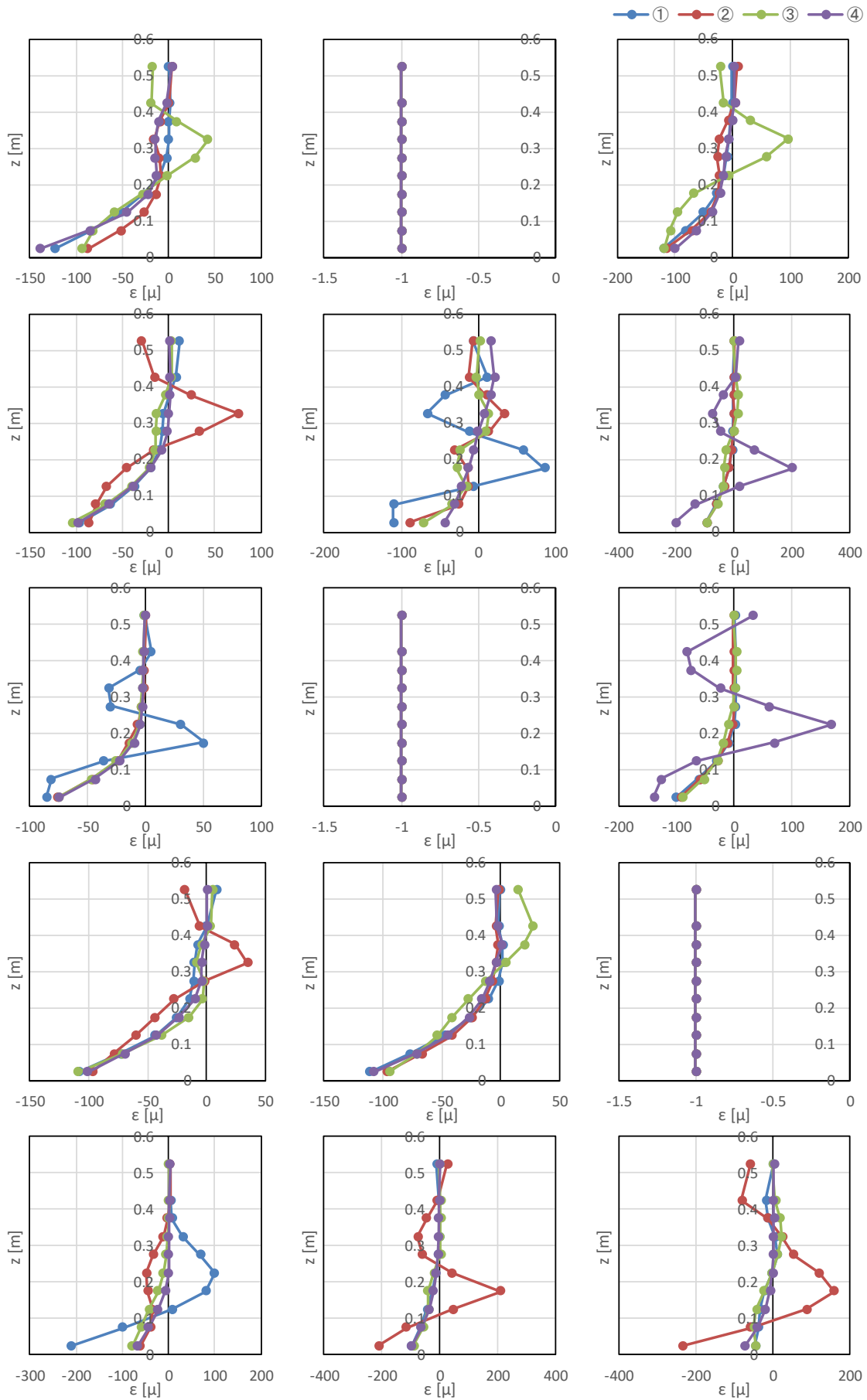


図- 8.15 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 1.0m, Wd20)

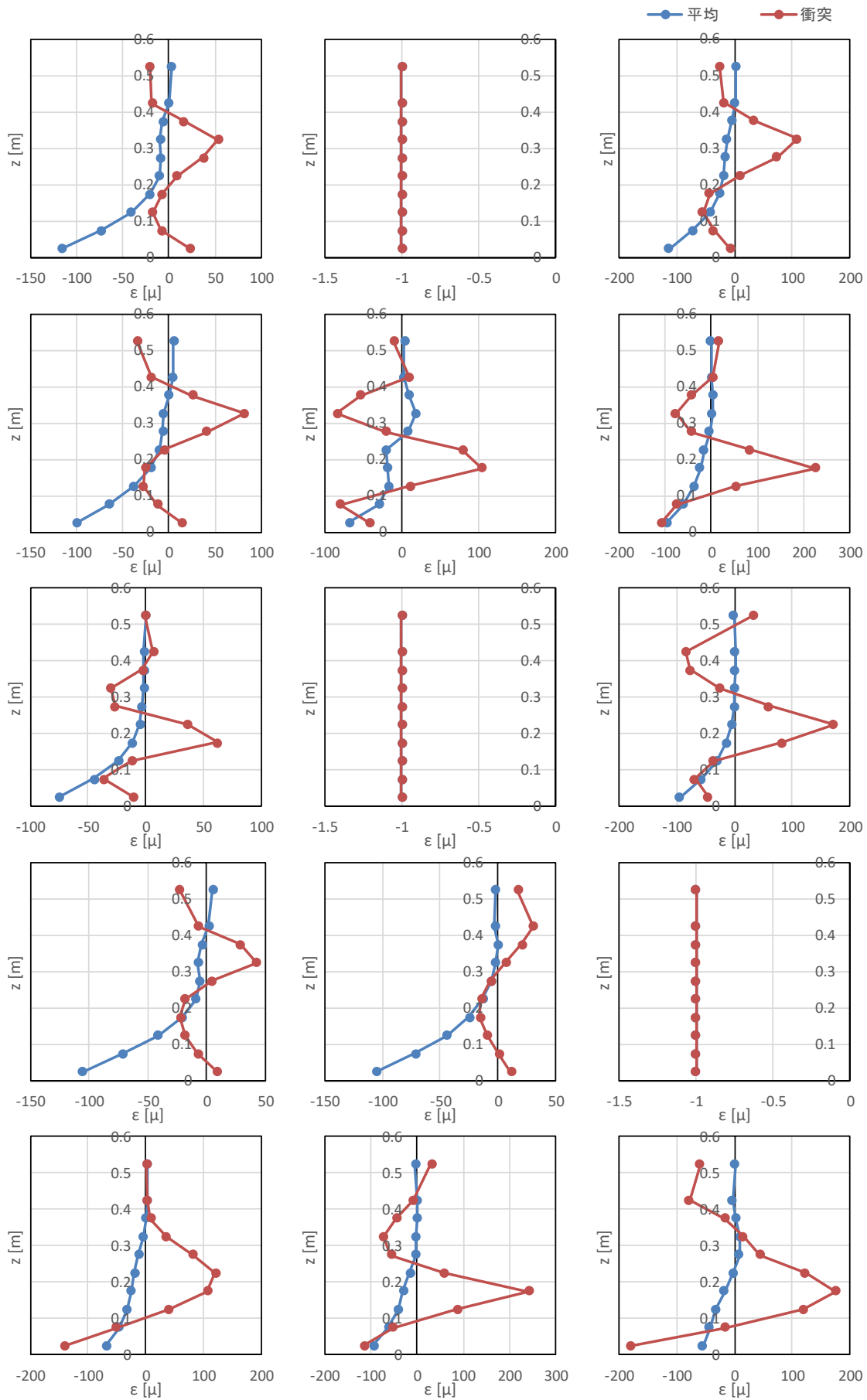


図- 8.15 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 1.0m, Wd20)

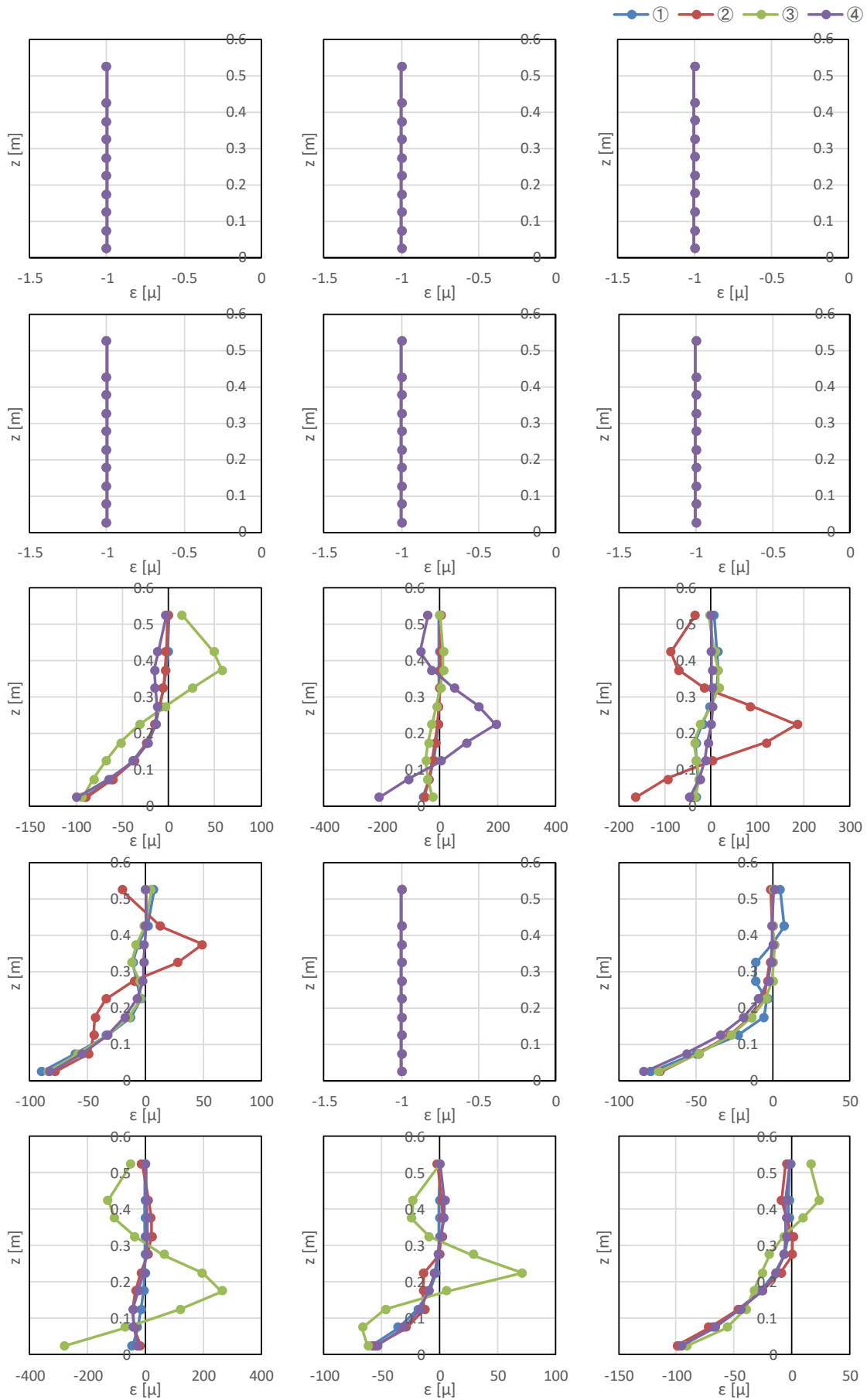


図- 8.16 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 1.0m, Wd30)

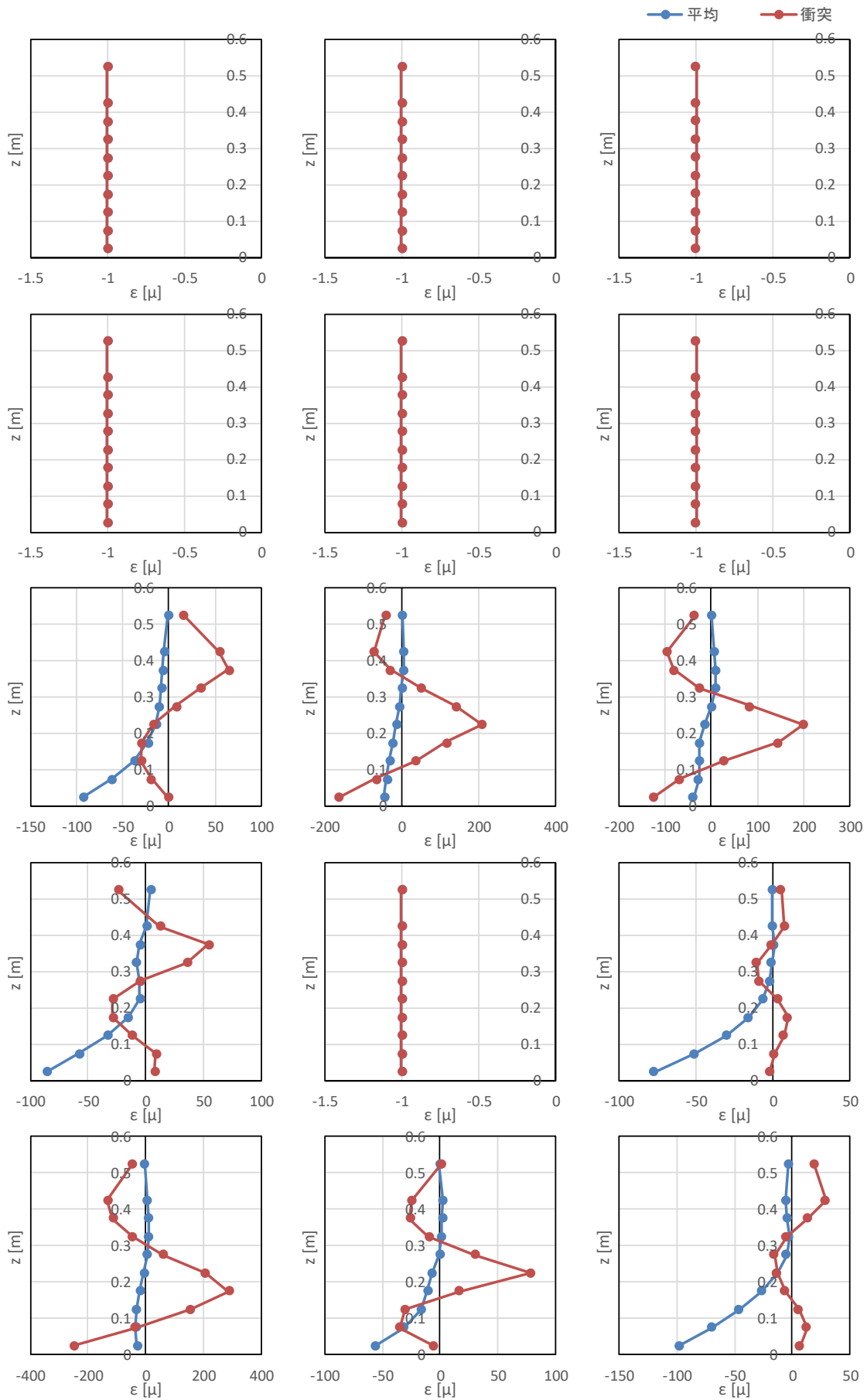


図- 8.16 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 1.0m, Wd30)

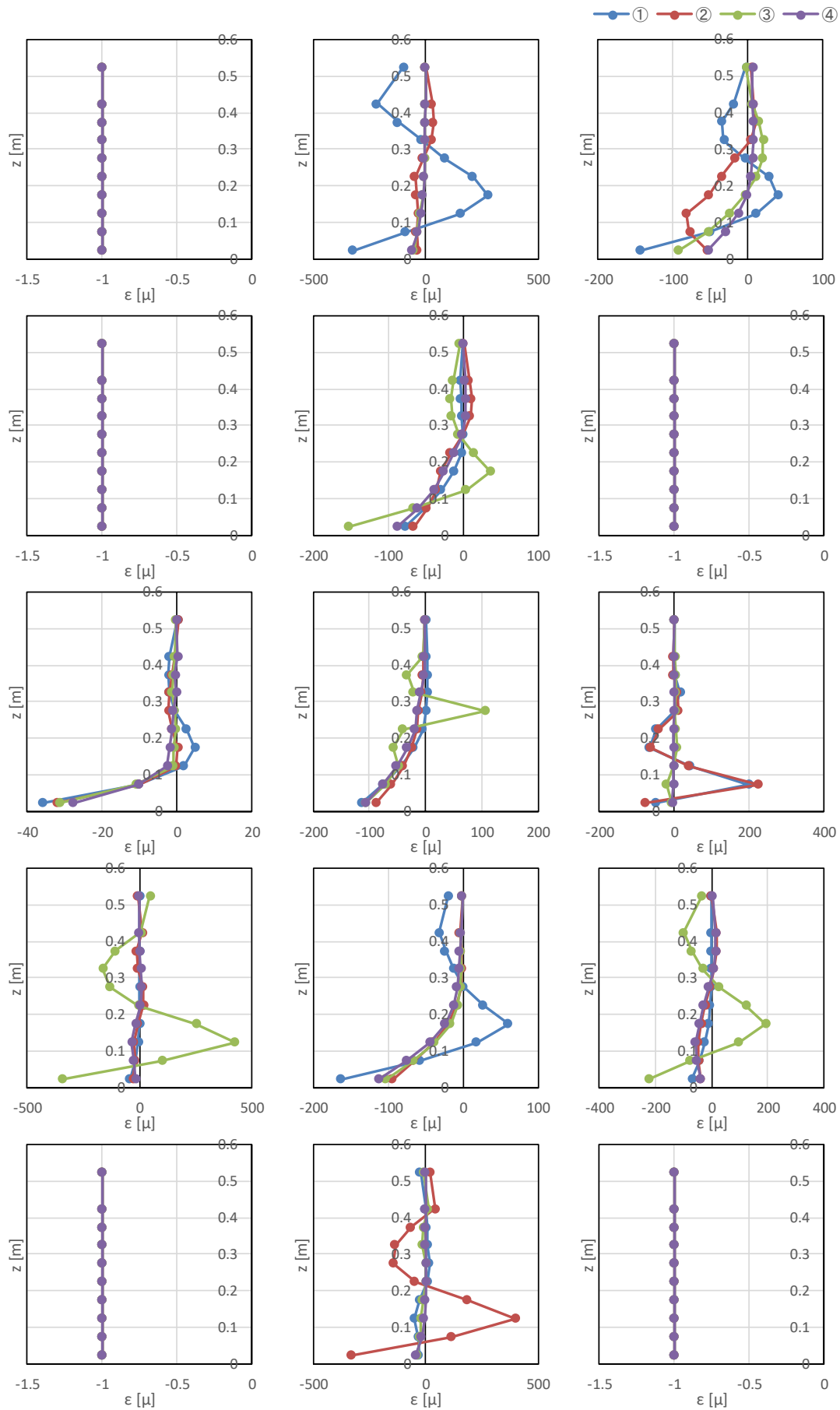


図- 8.17 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 2.0m, Wd10)

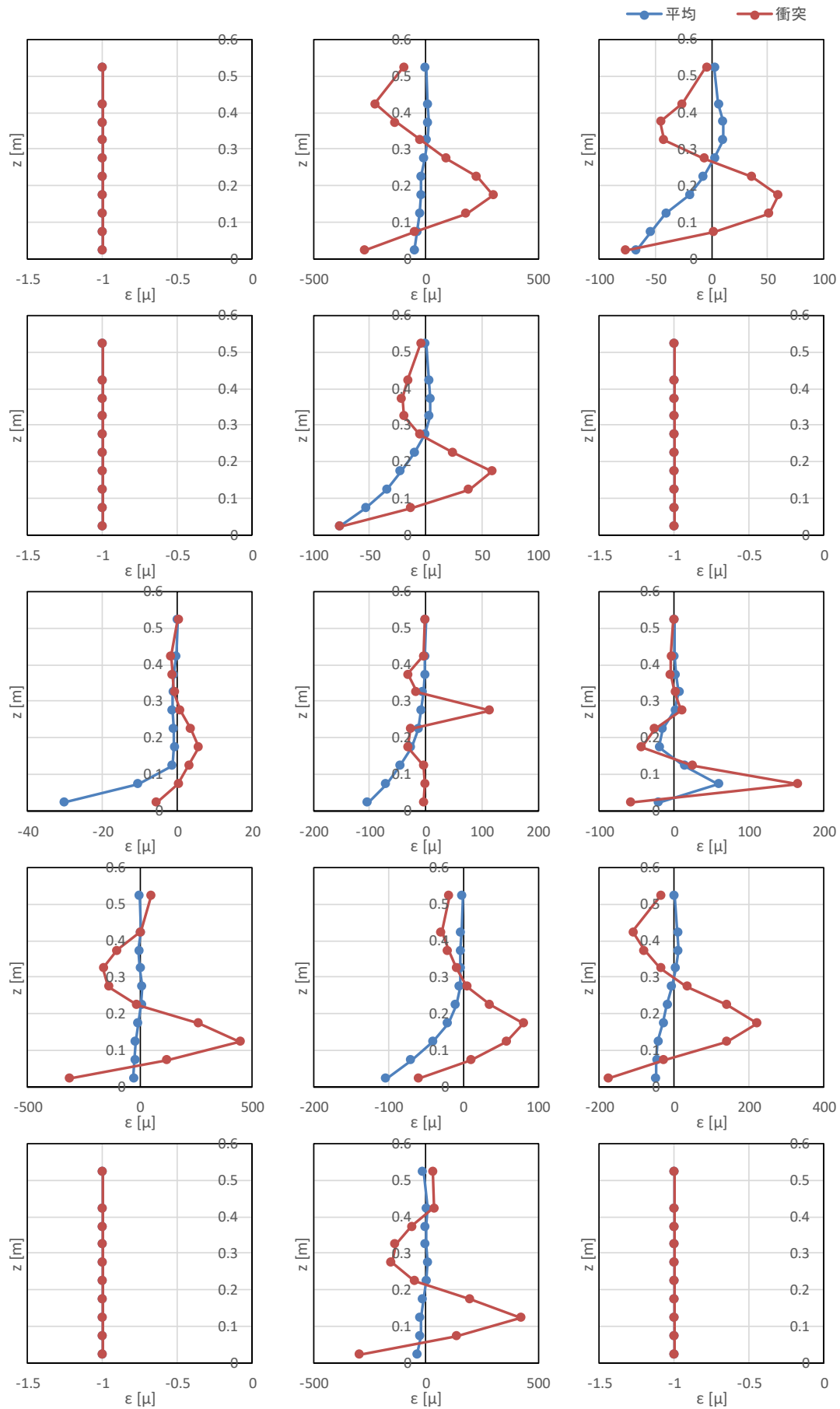


図- 8.17 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 2.0m, Wd10)

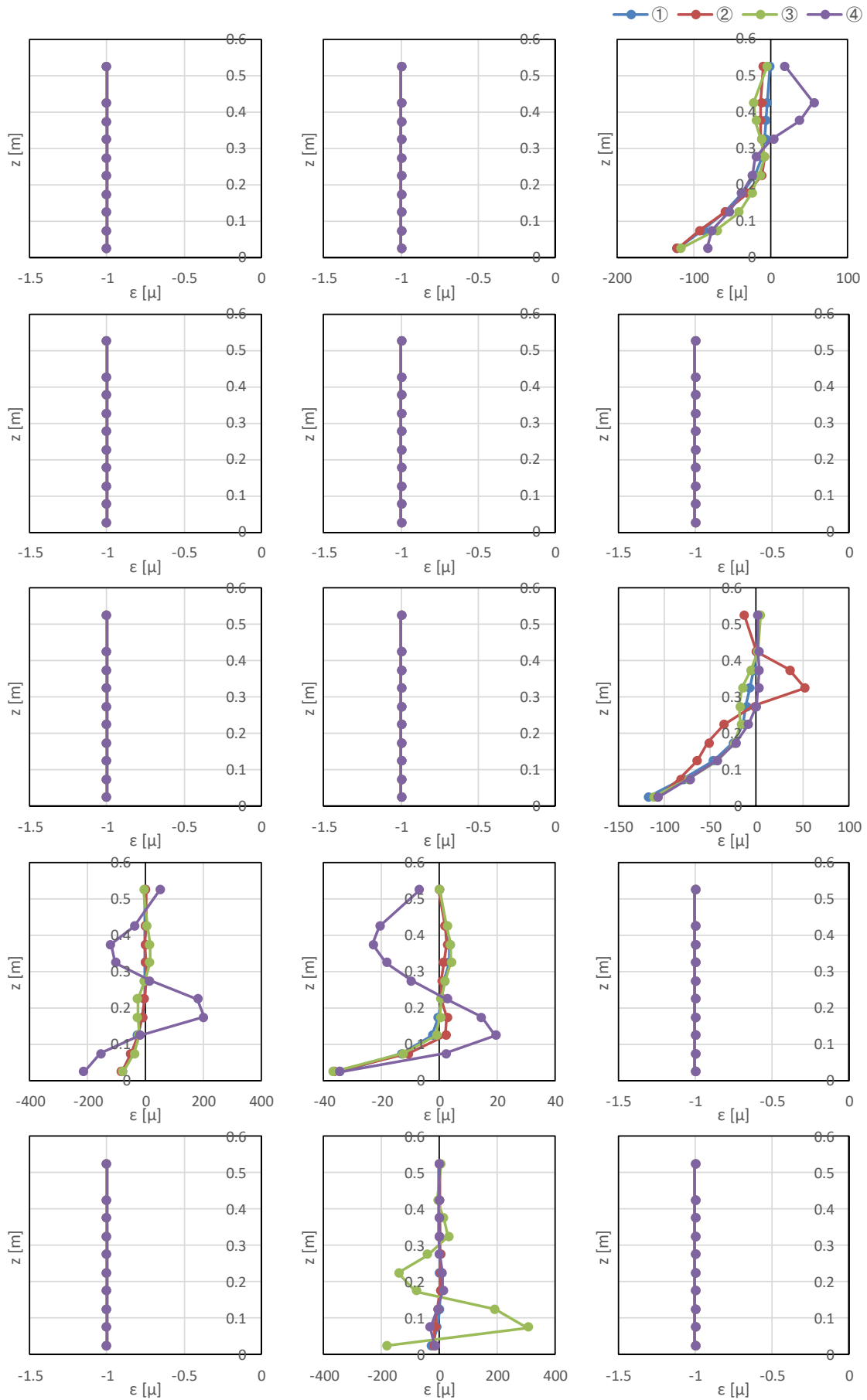


図- 8.18 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 2.0m, Wd20)

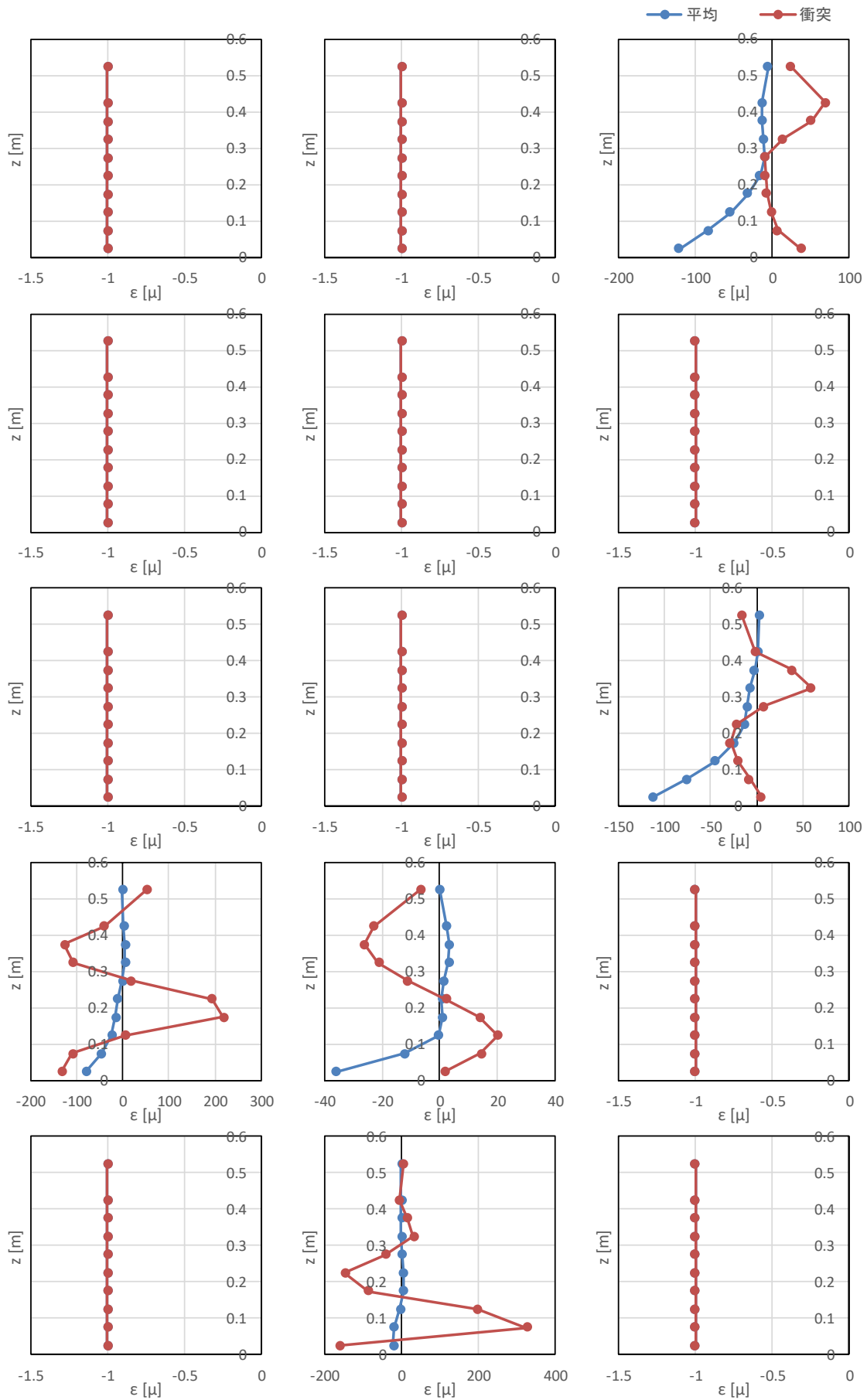


図- 8.18 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 2.0m, Wd20)

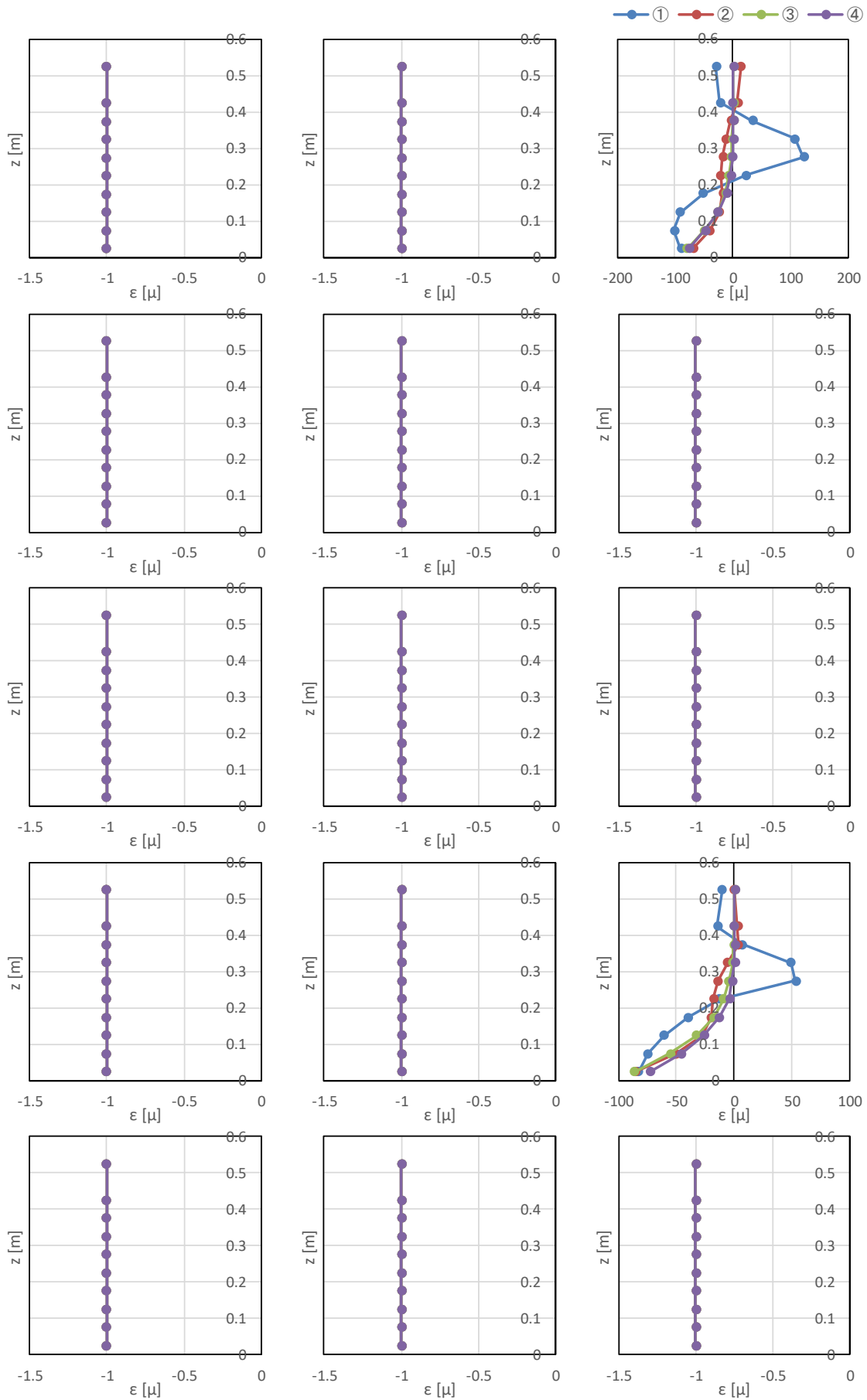


図- 8.19 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 2.0m, Wd30)

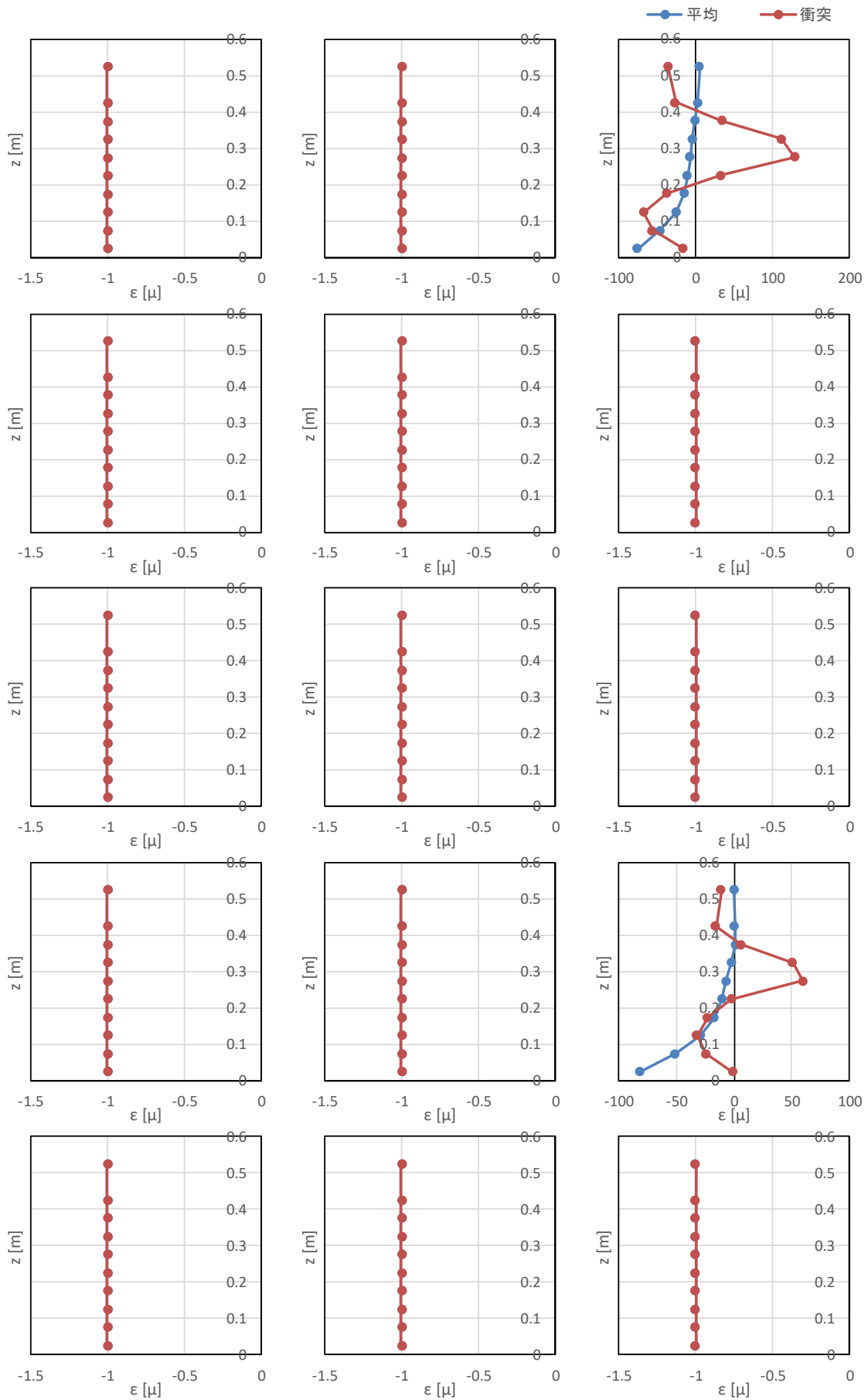


図- 8.19 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0m, 漂流物位置 2.0m, Wd30)

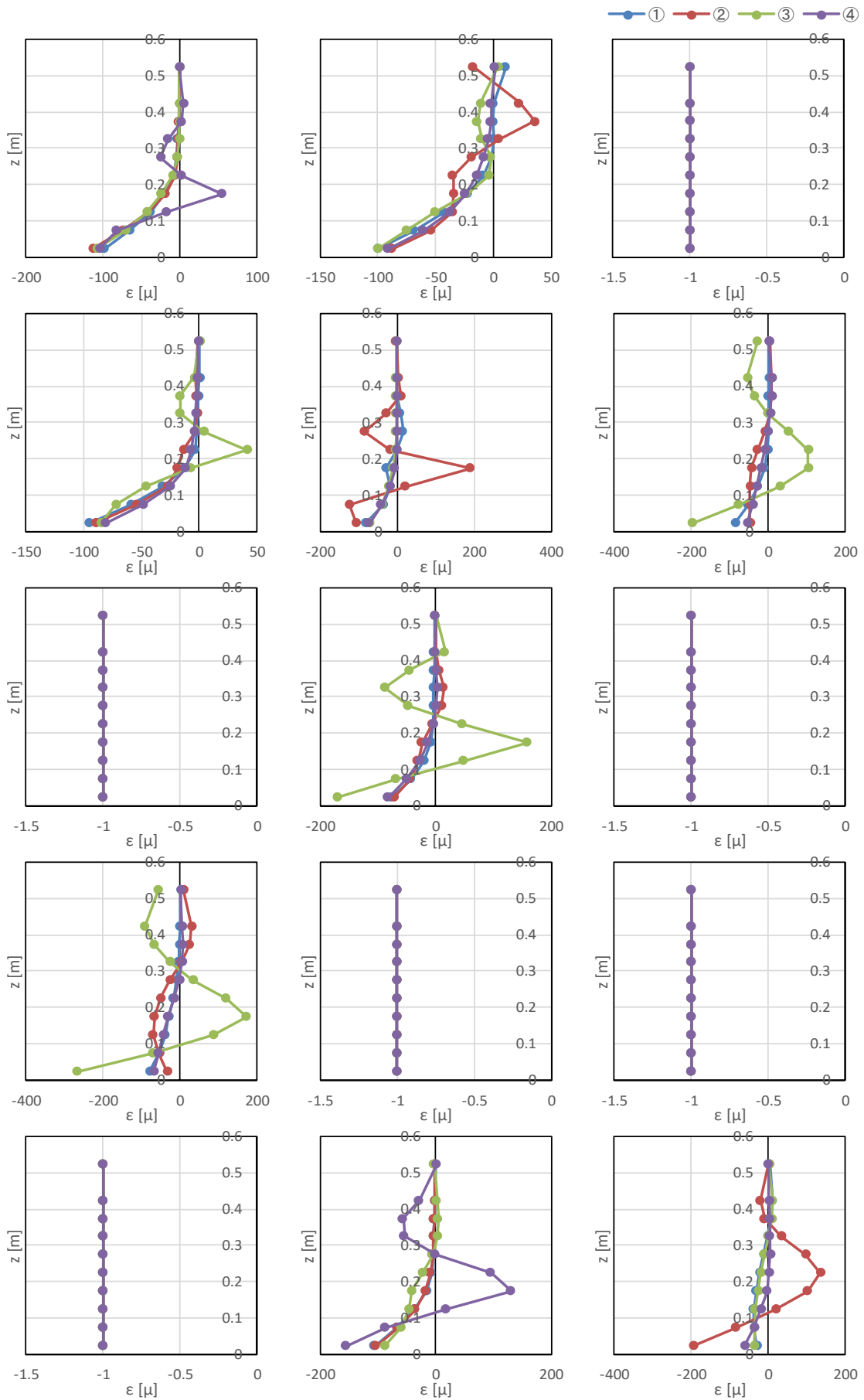


図- 8.20 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd20)

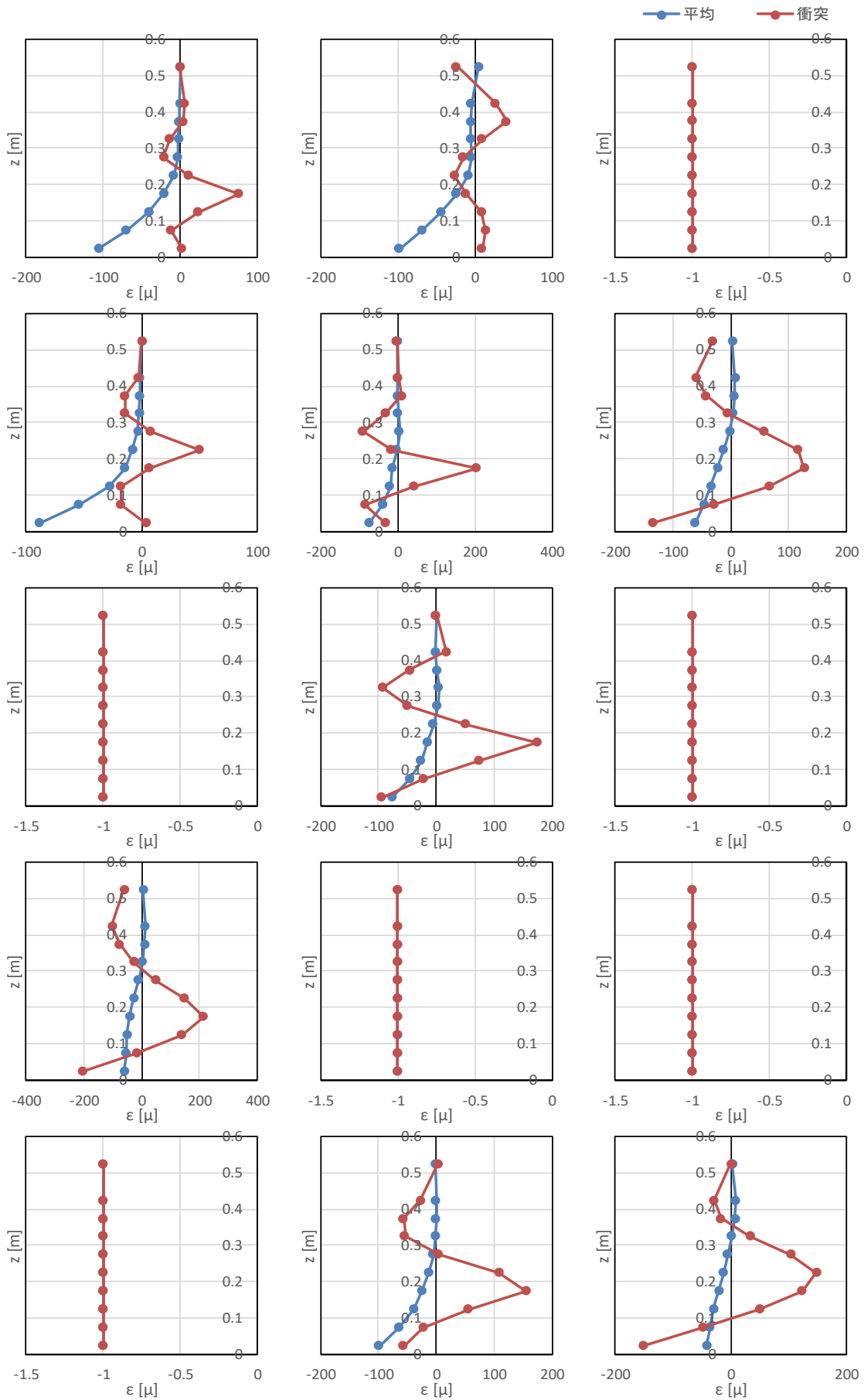


図- 8.20 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd20)

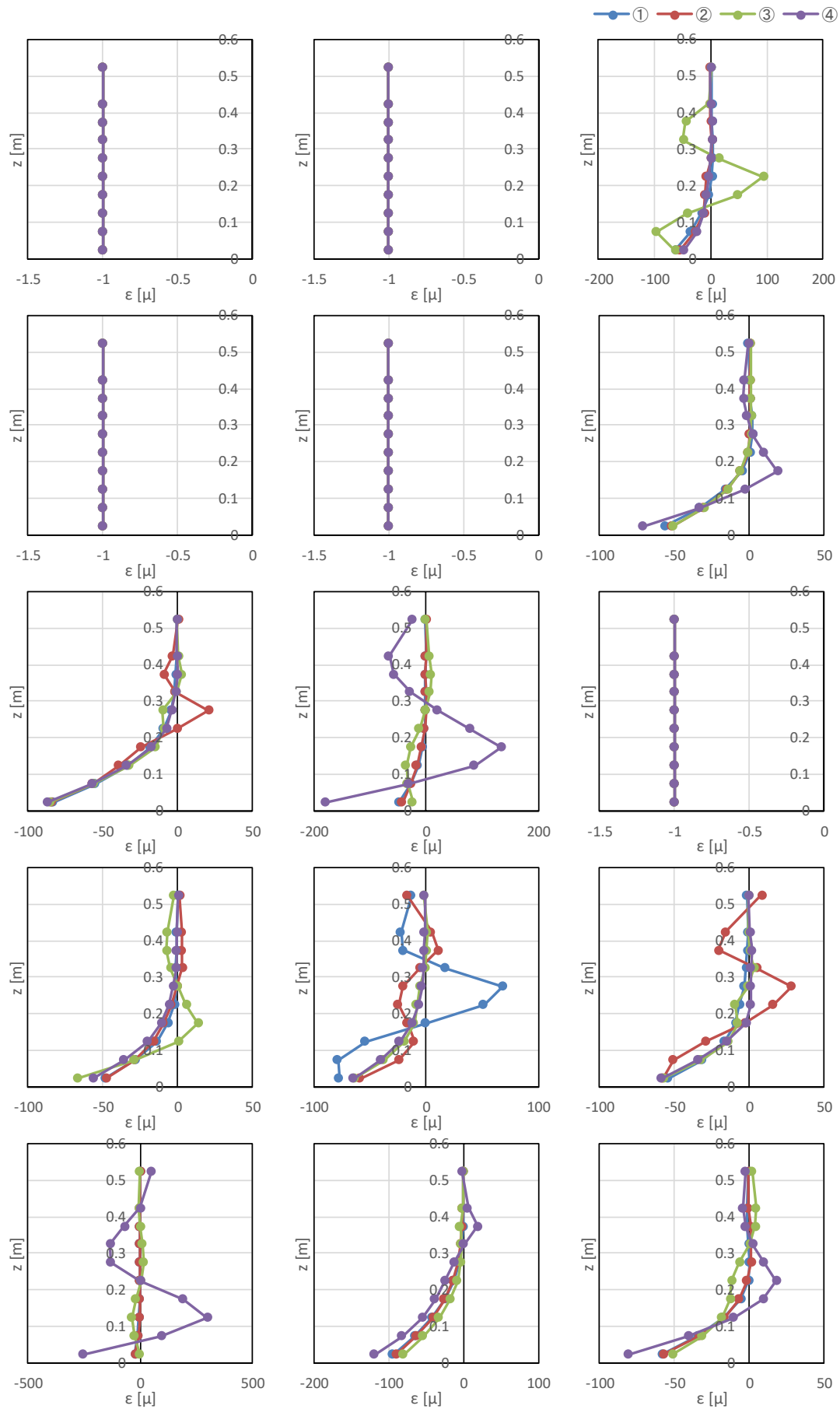


図- 8.21 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd30)

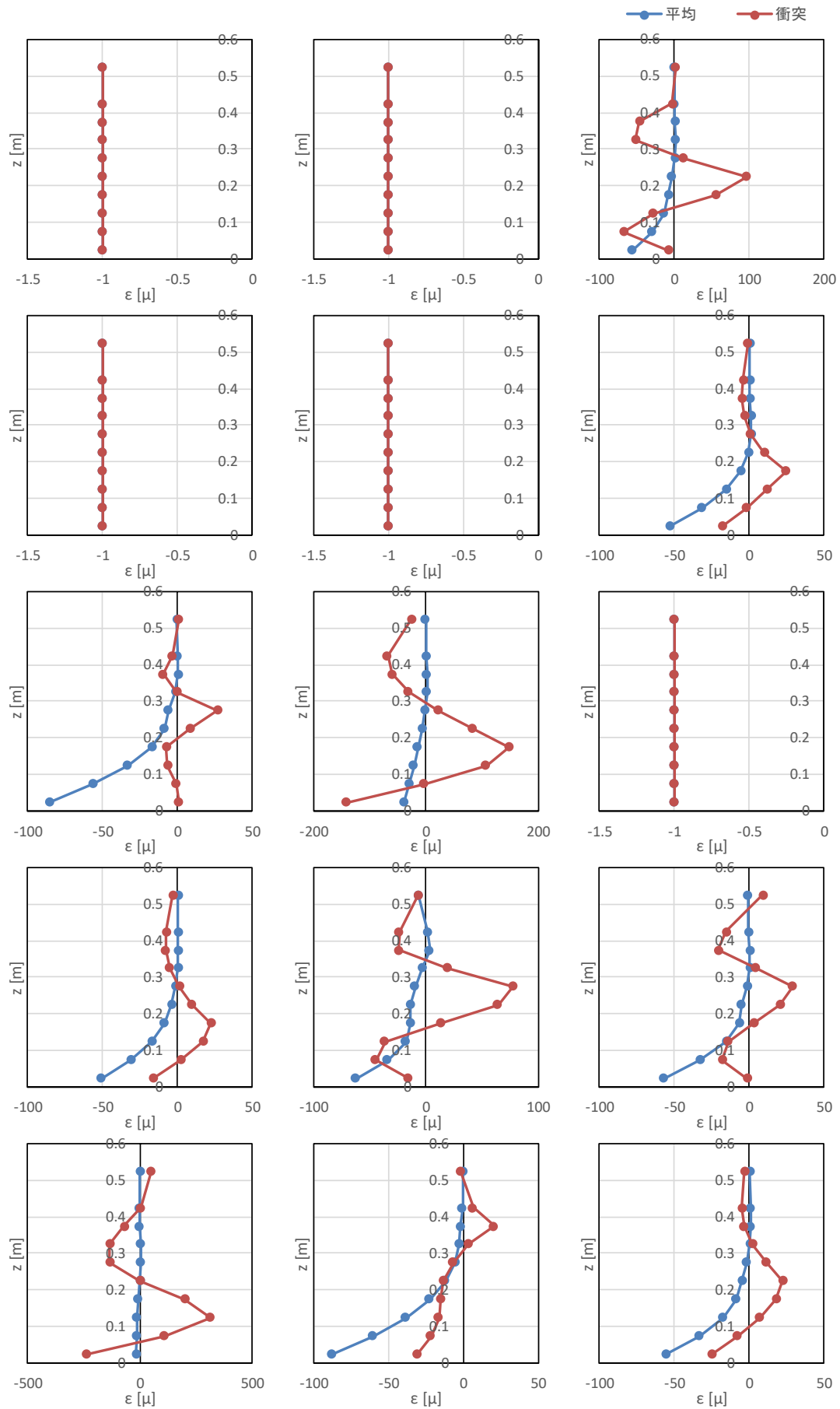


図- 8.21 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd30)

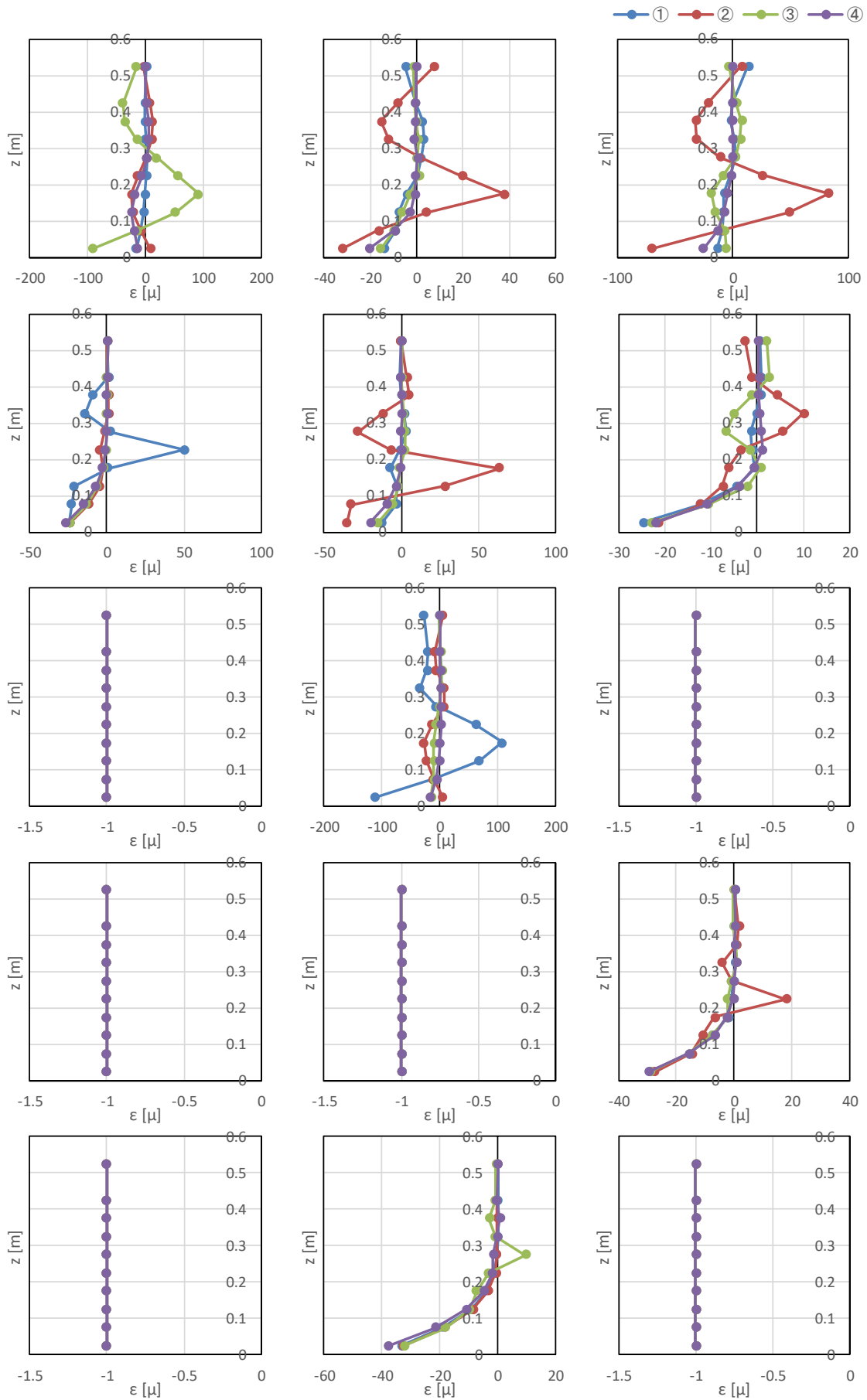


図- 8.22 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd40)

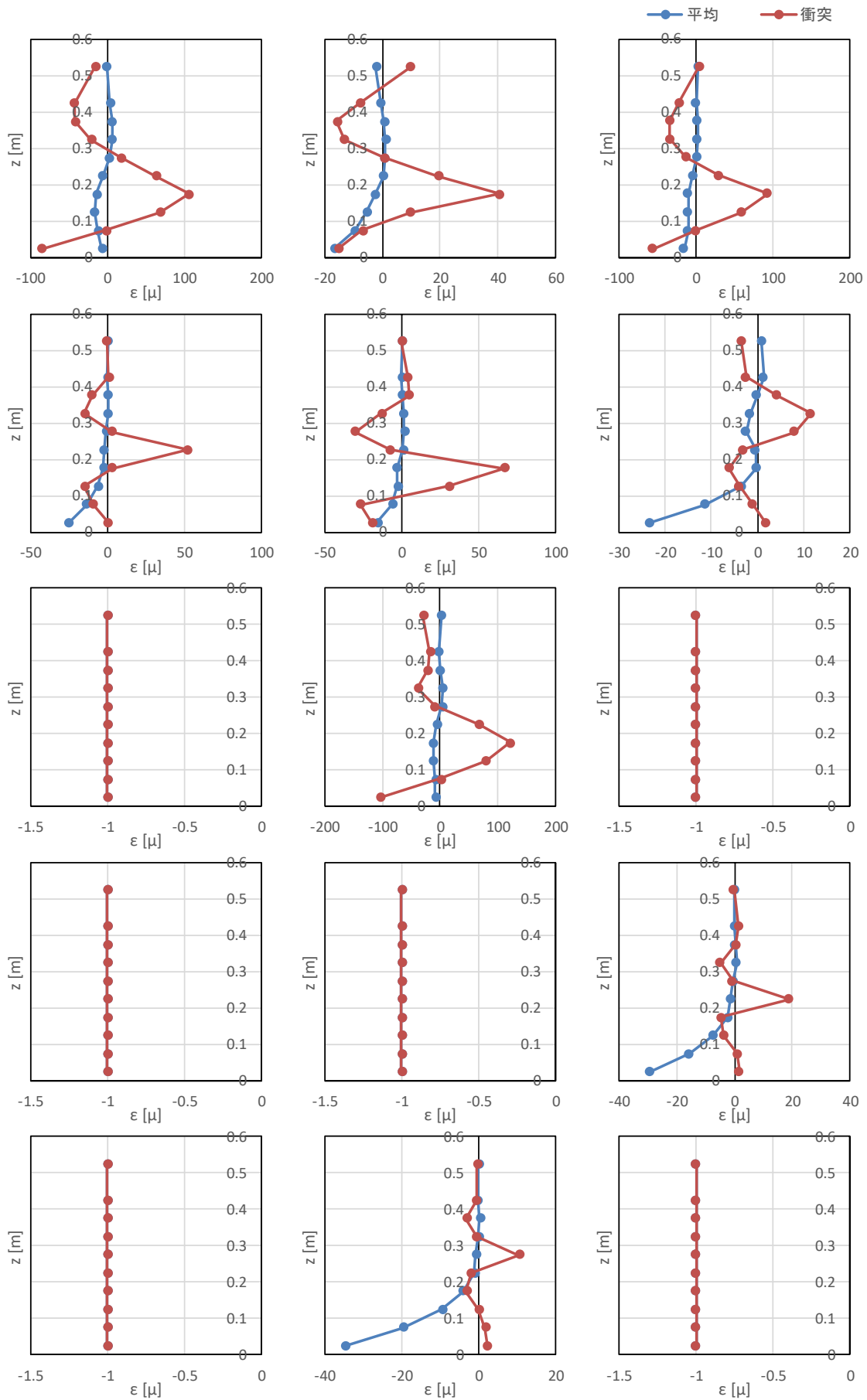


図- 8.22 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd40)

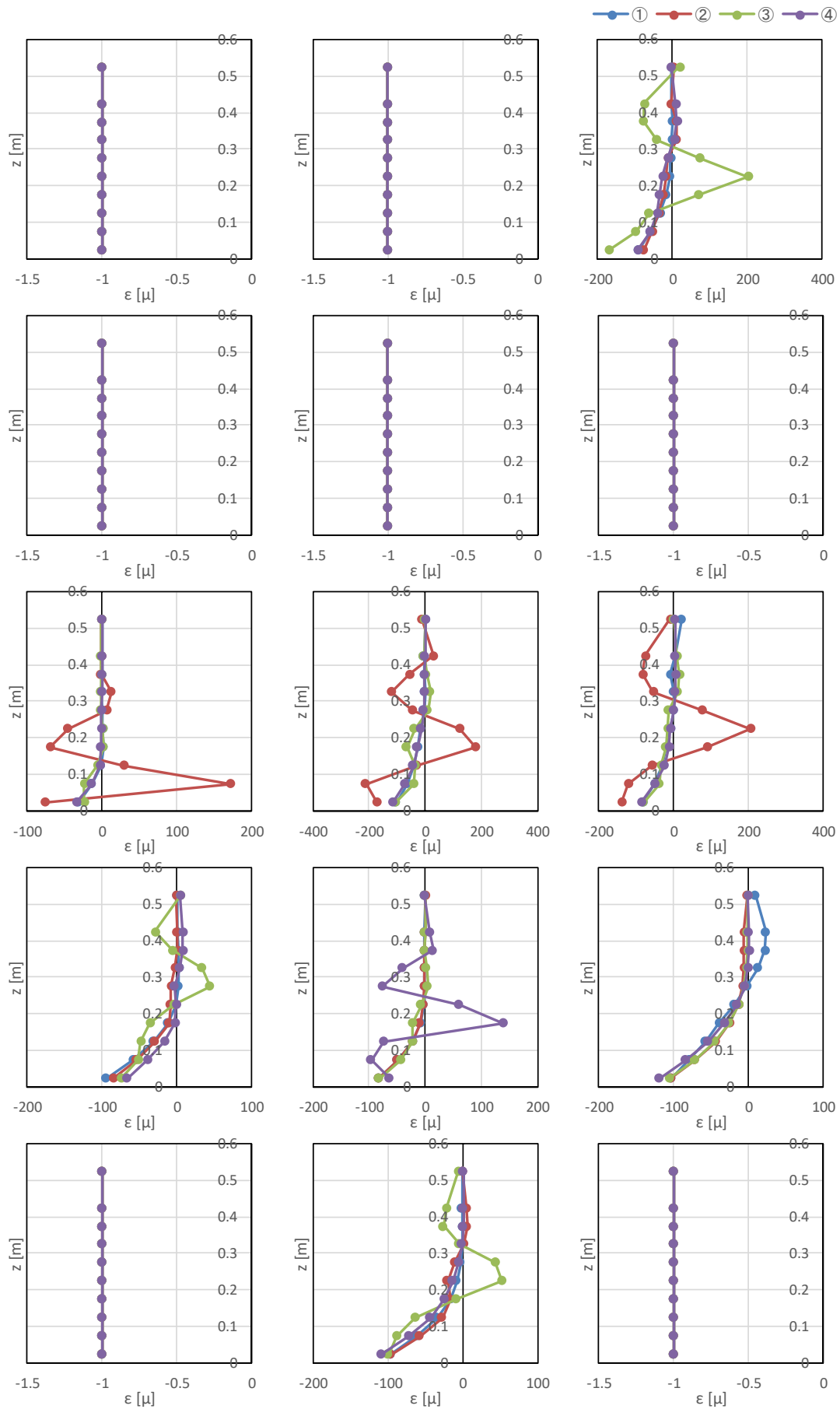


図- 8.23 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0m, 漂流物位置 1.0m, Wd20)

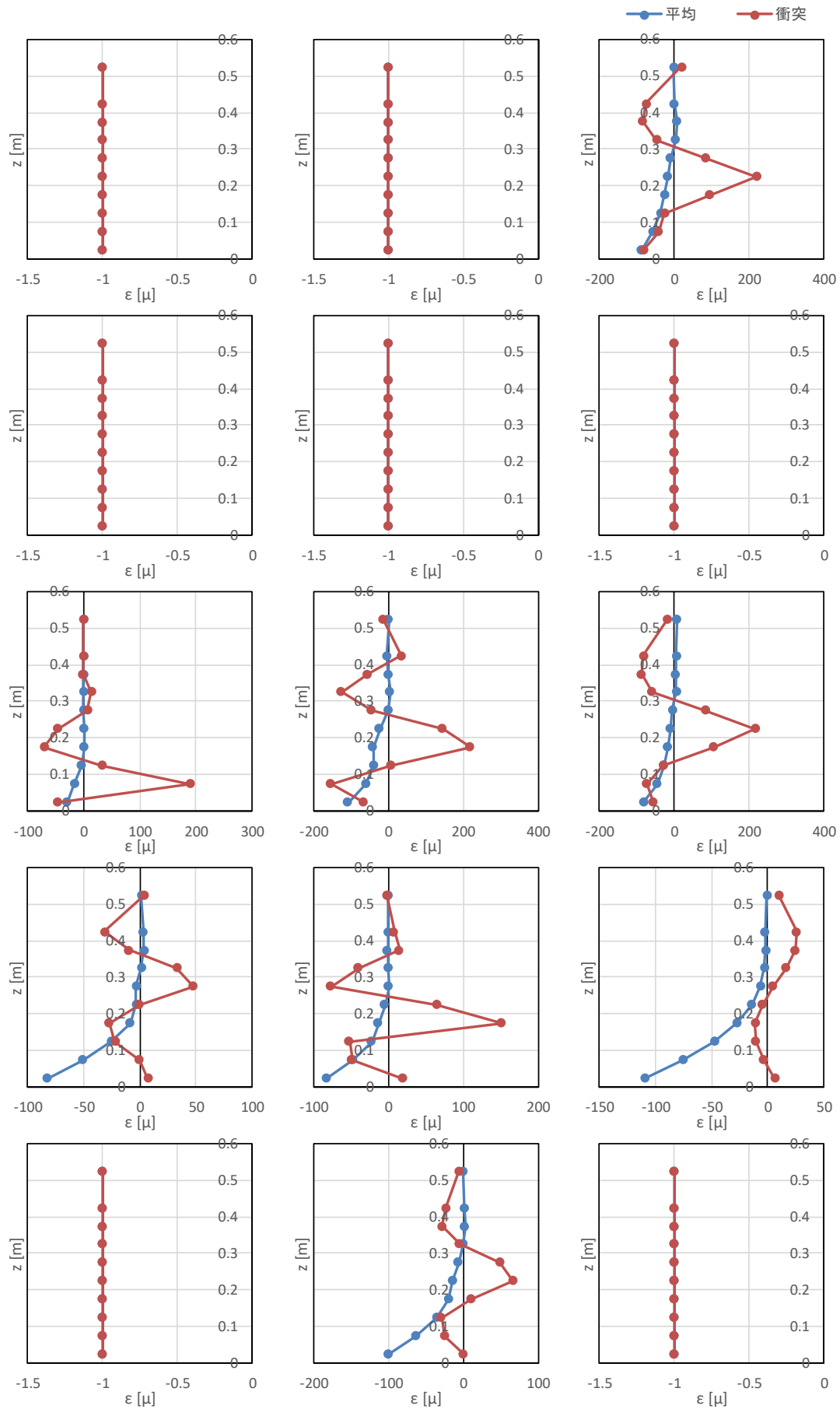


図- 8.23 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0m, 漂流物位置 1.0m, Wd20)

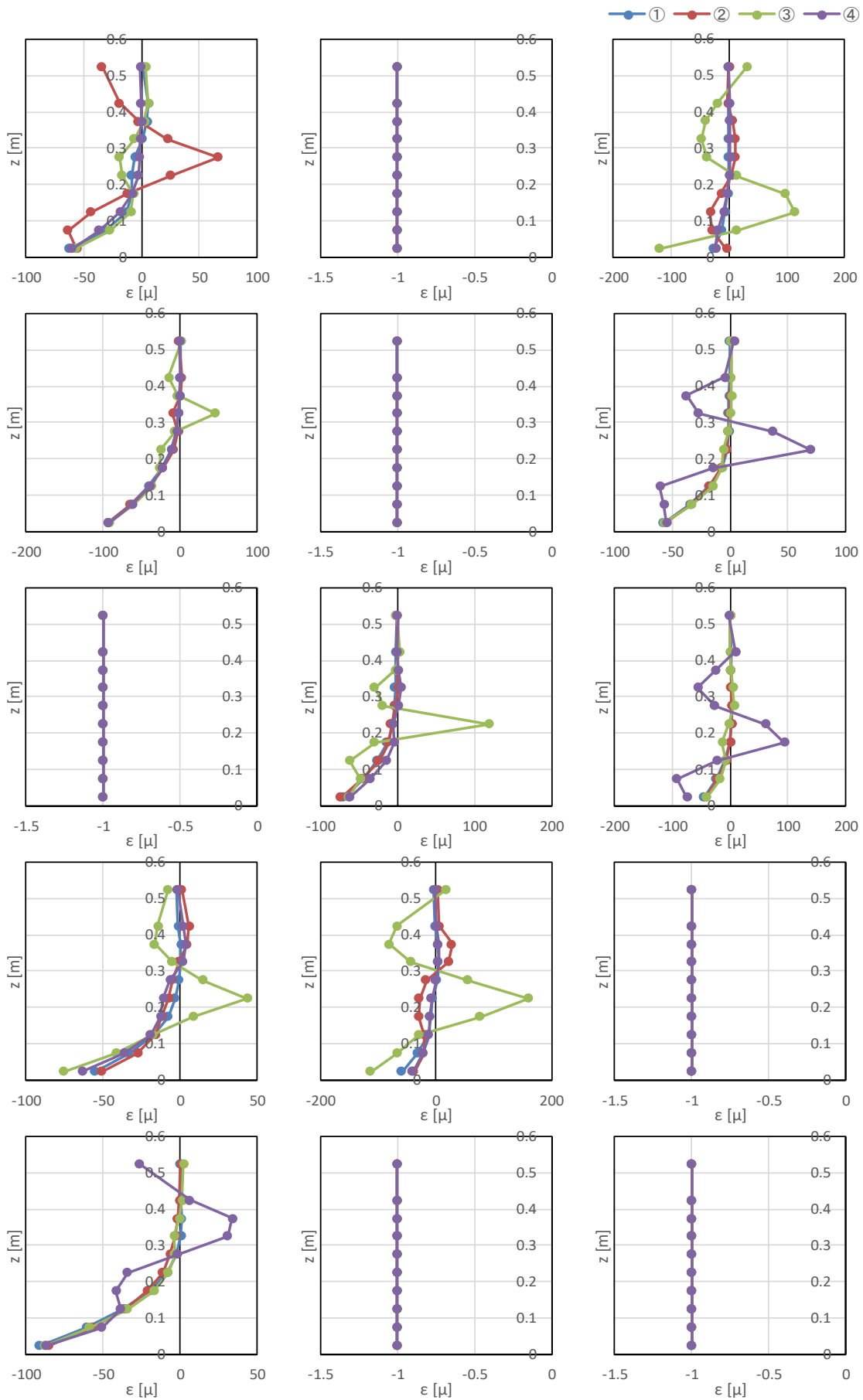


図- 8.24 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0m, 漂流物位置 1.0m, Wd30)

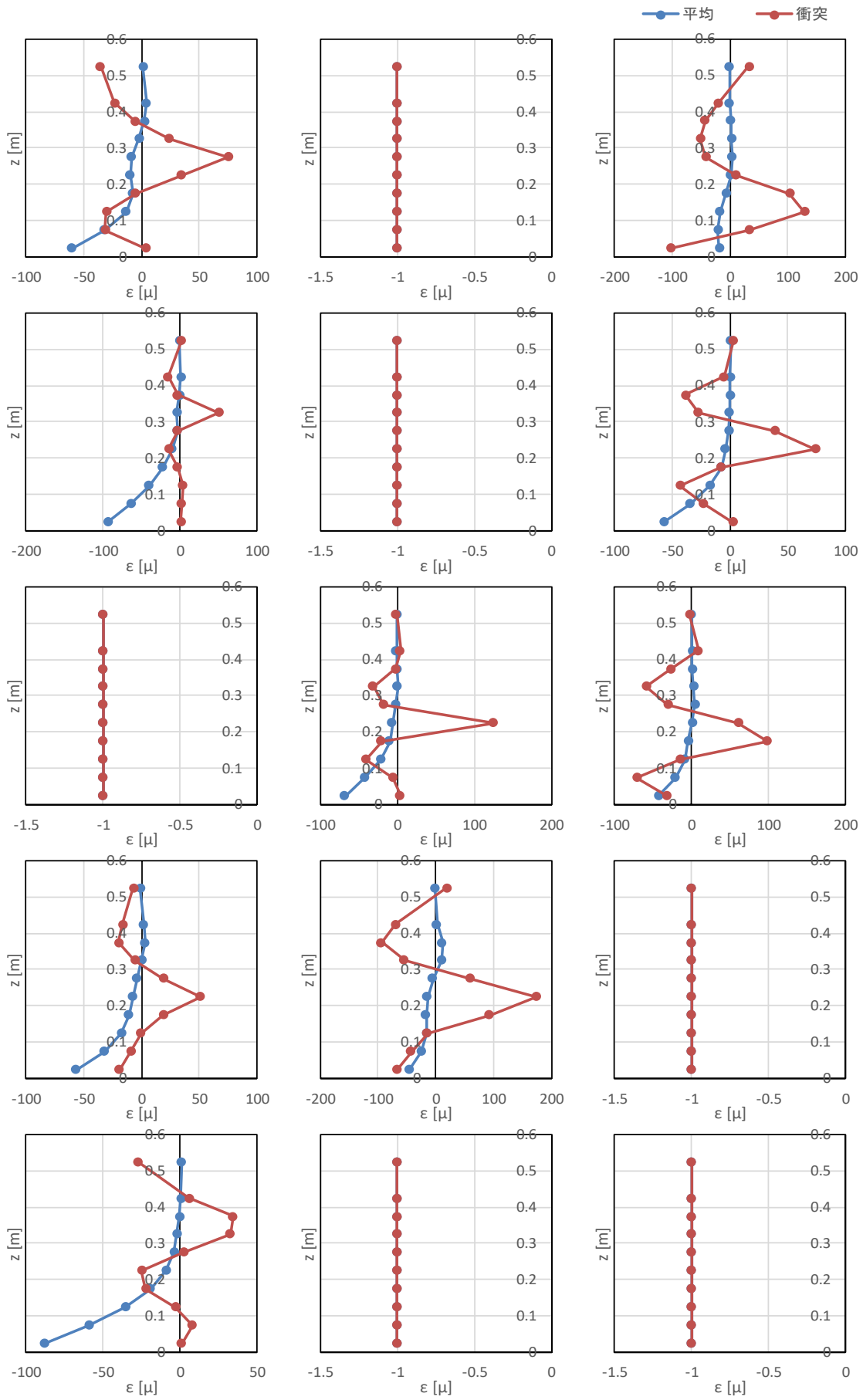


図- 8.24 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0m, 漂流物位置 1.0m, Wd30)

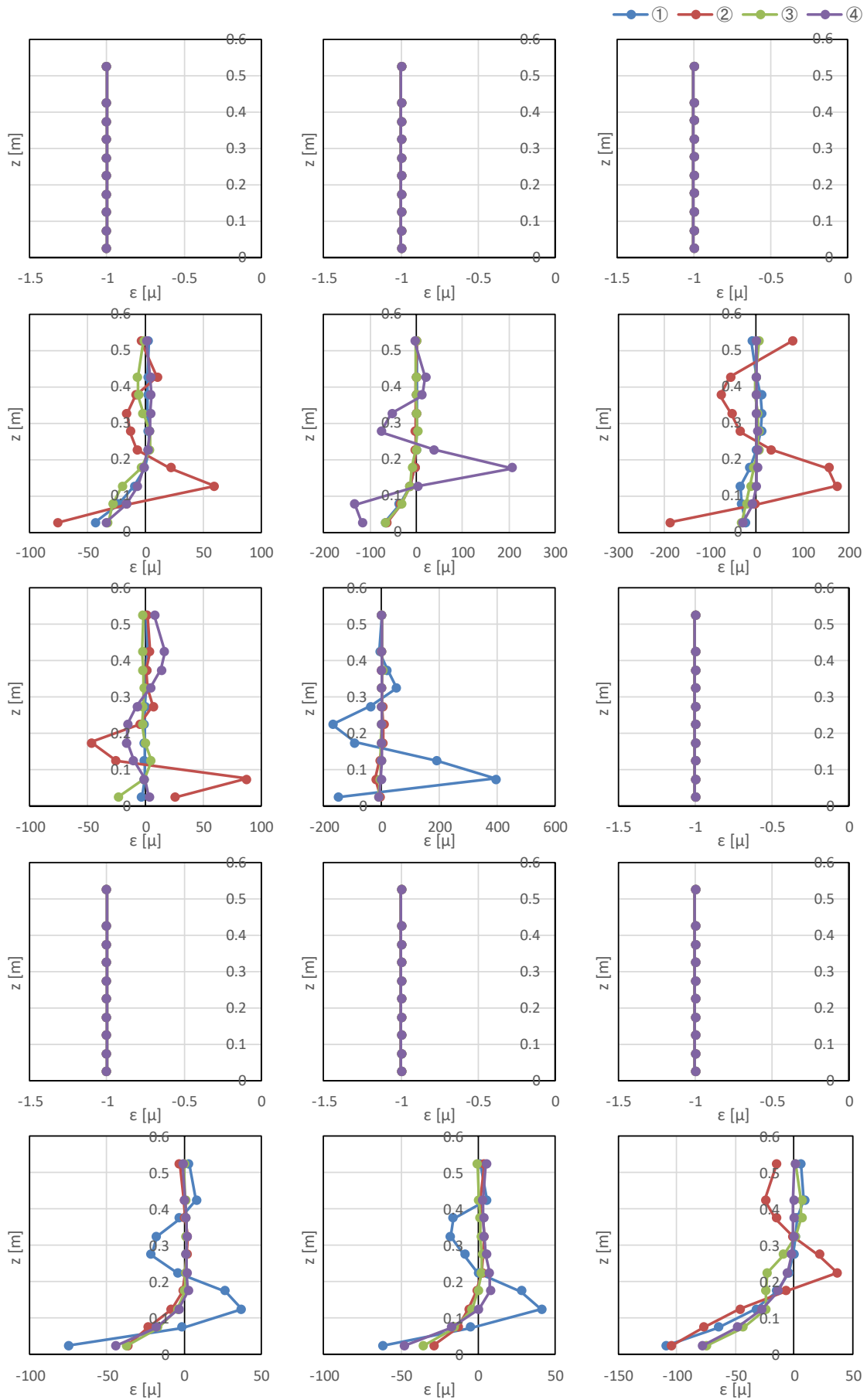


図- 8.25 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0m, 漂流物位置 2.0m, Wd10)

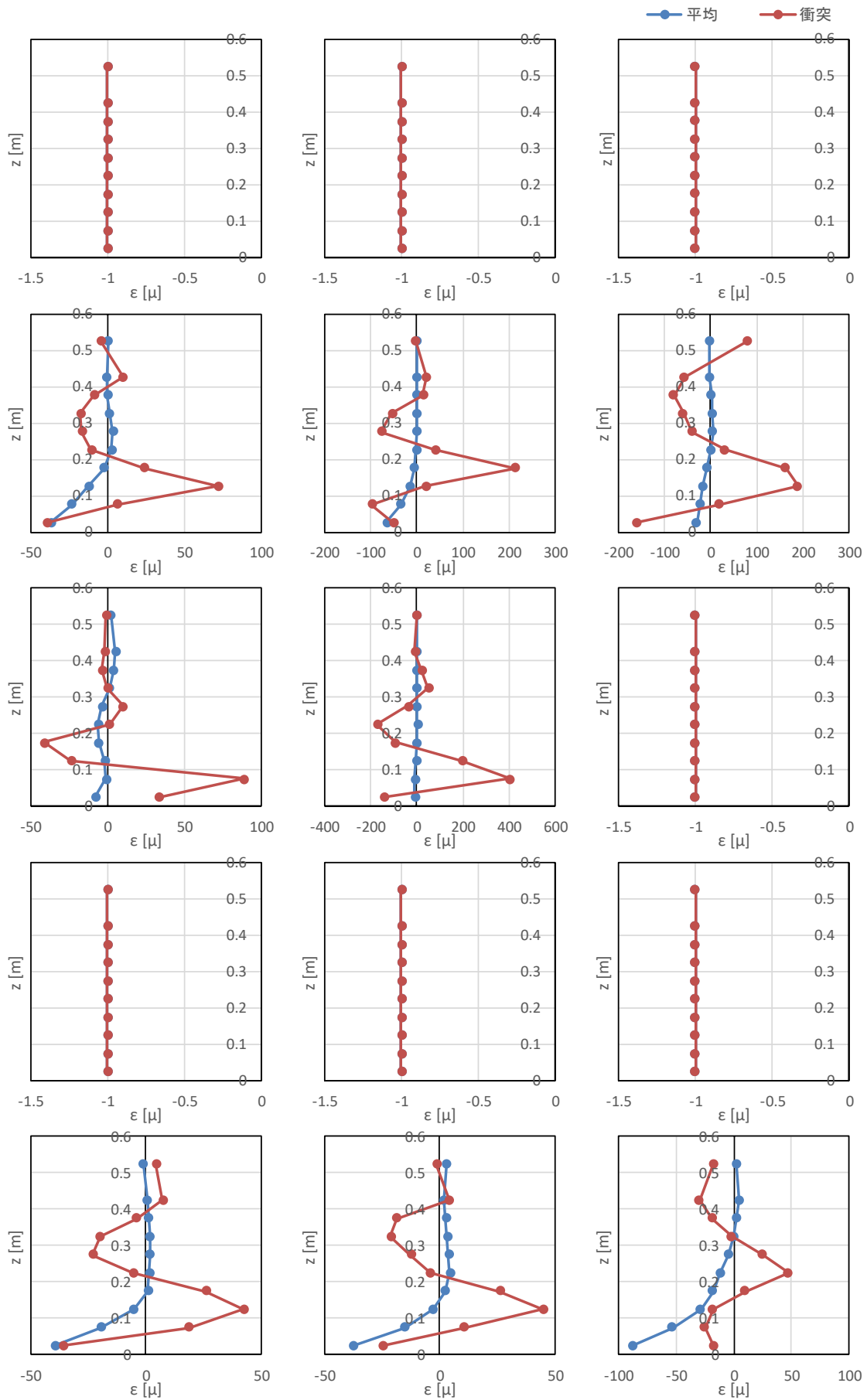


図- 8.25 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0m, 漂流物位置 2.0m, Wd10)

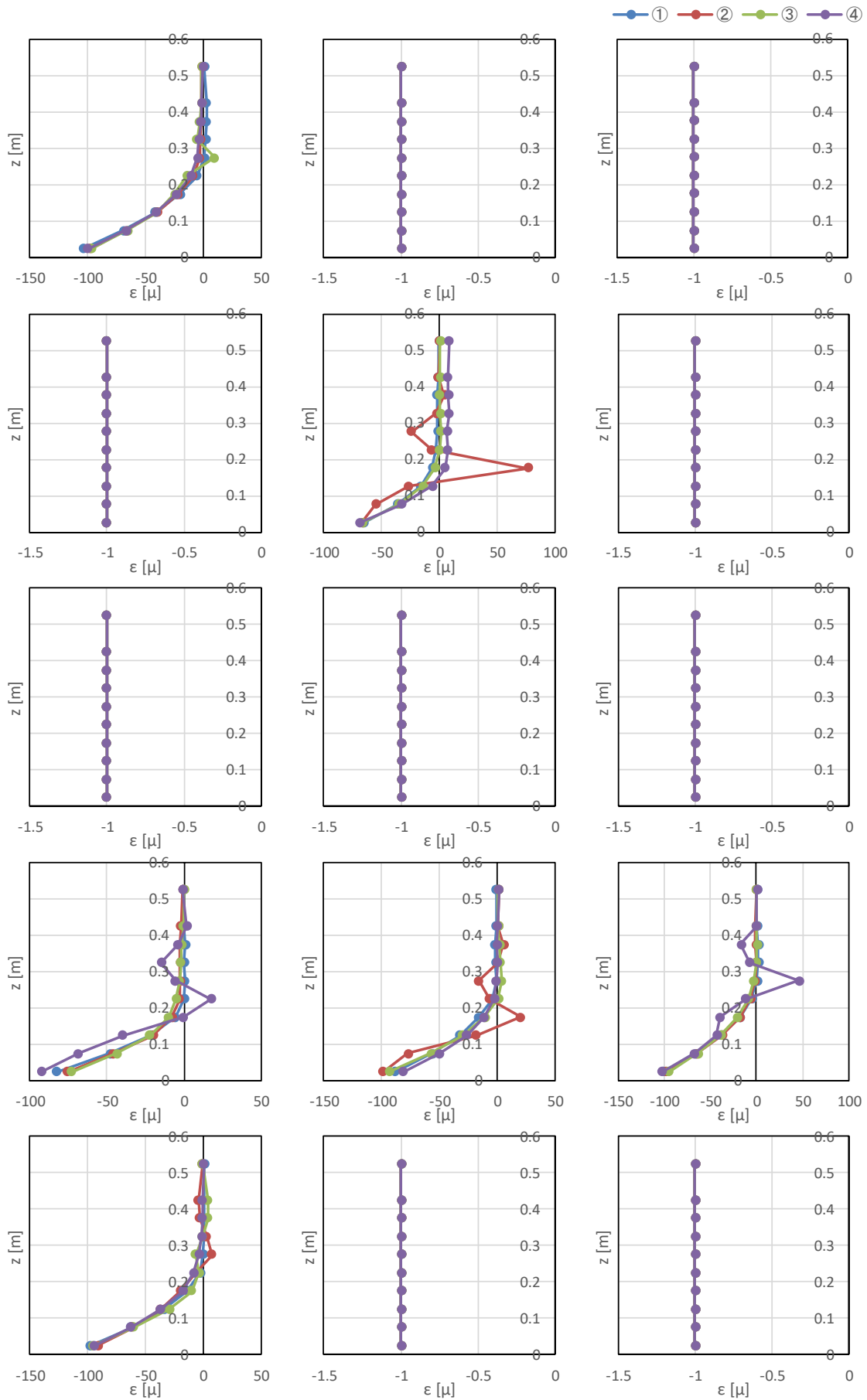


図- 8.26 ひずみの鉛直分布 (漂流物 C, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd20)

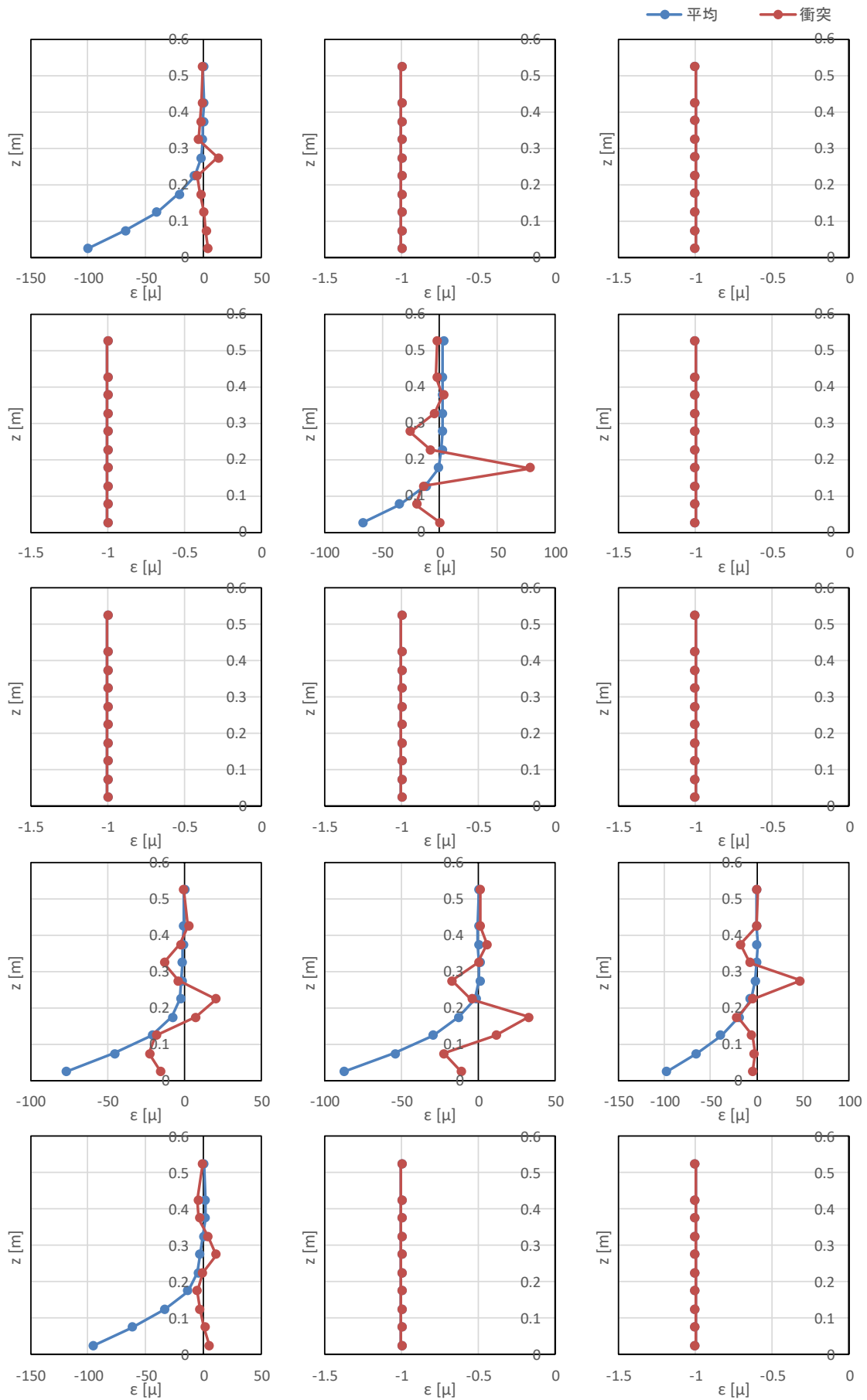


図- 8.26 ひずみの鉛直分布 (漂流物 C, 堤体位置 0m, 漂流物位置 0.5m, Wd20)

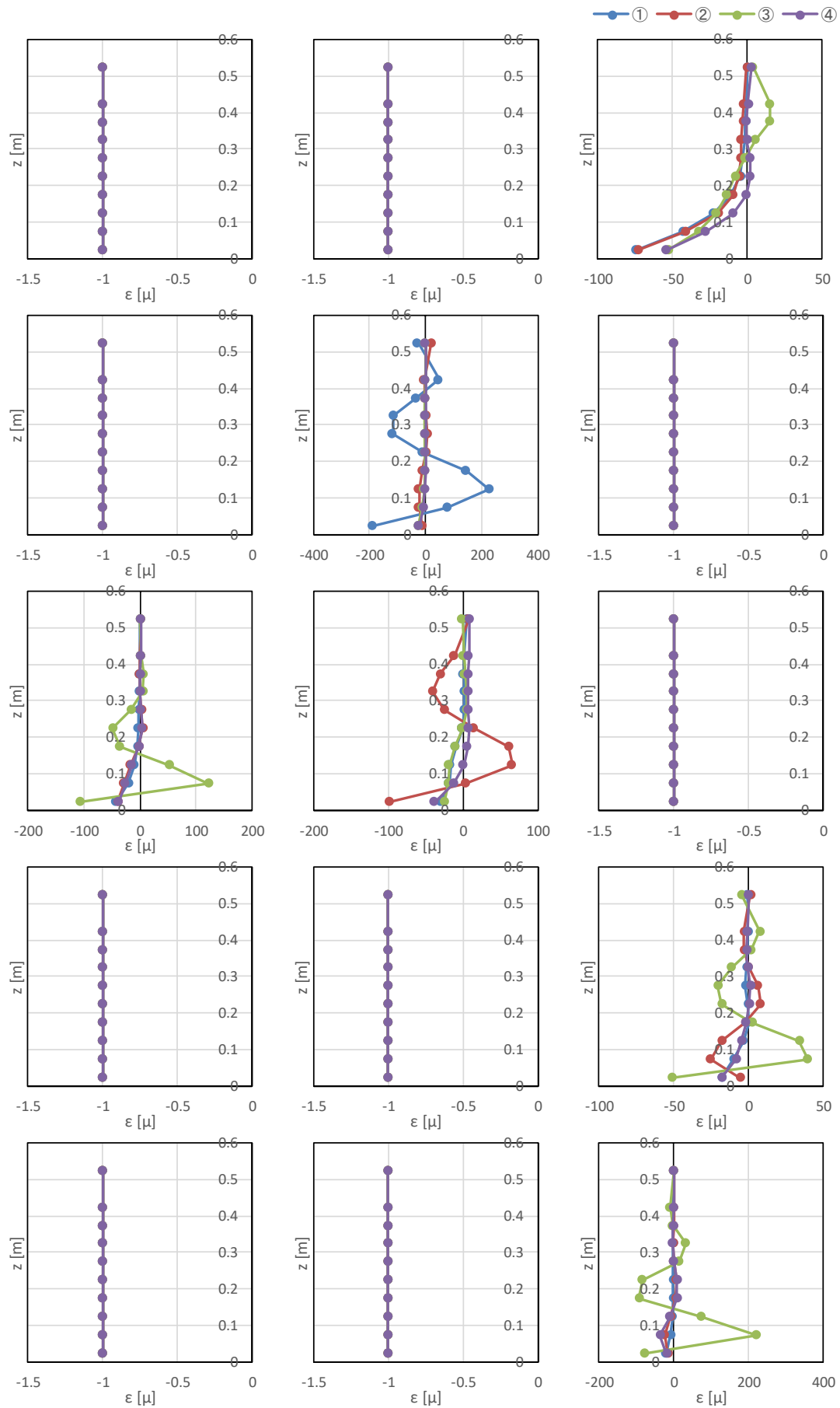


図- 8.27 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd10)

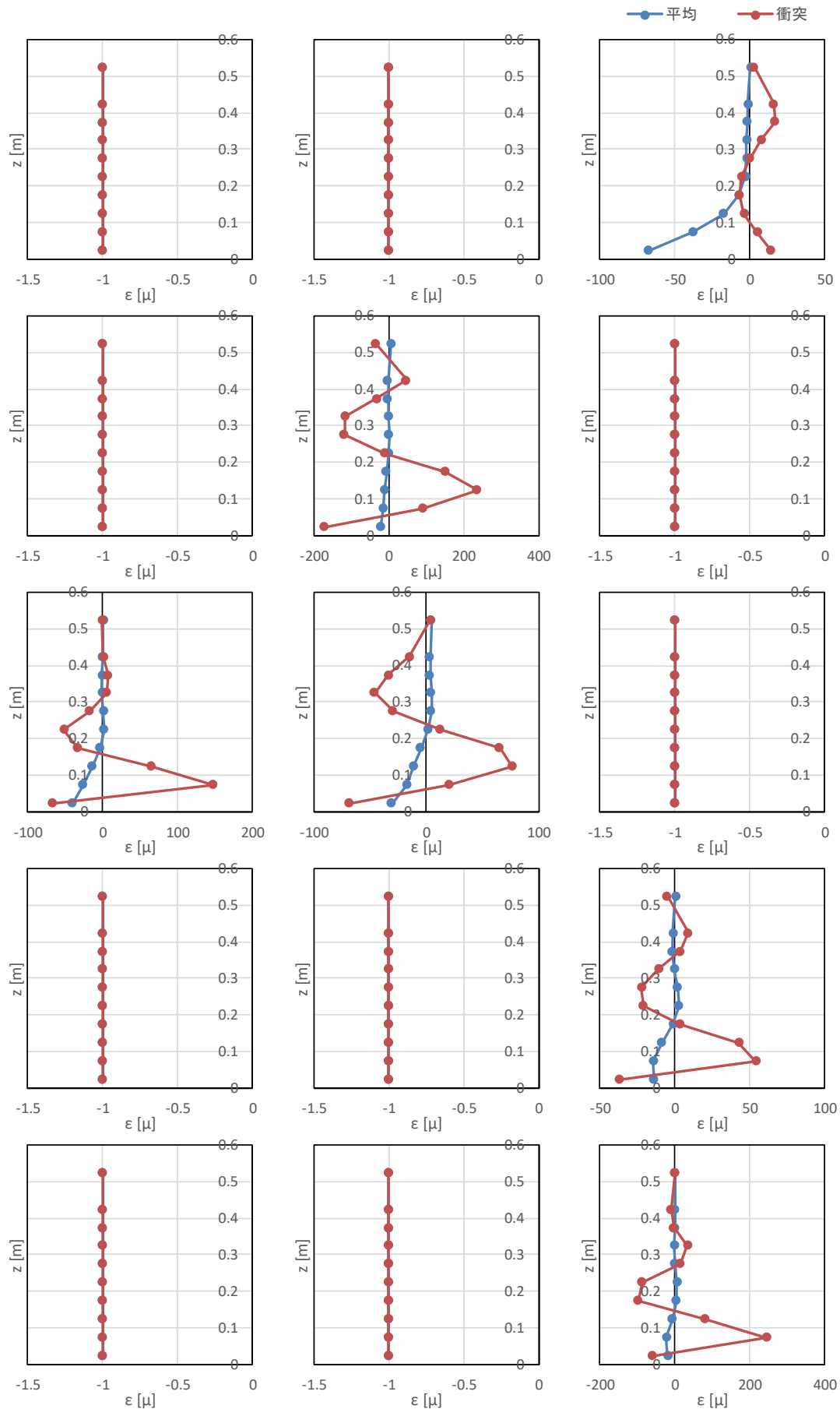


図- 8.27 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd10)

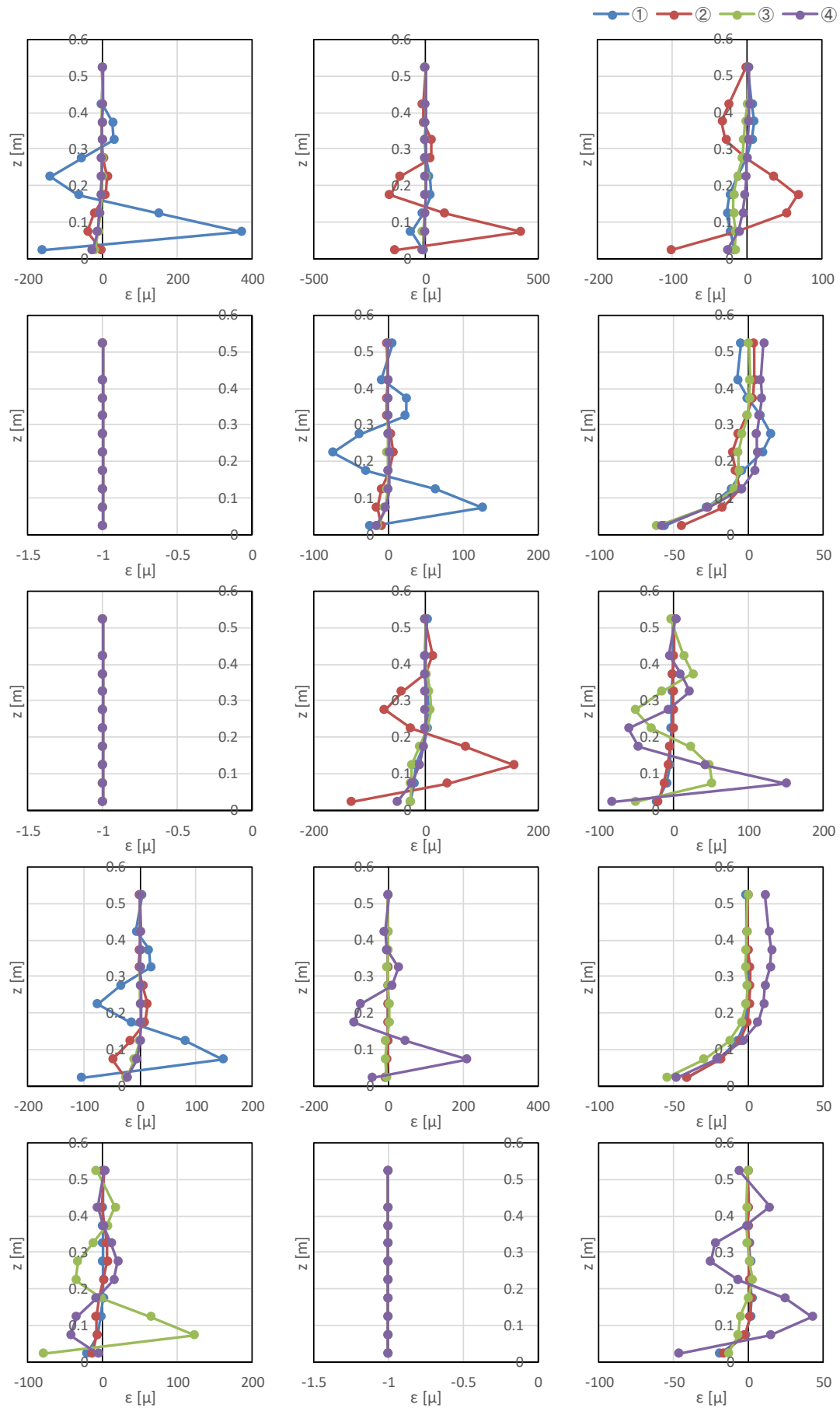


図- 8.28 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd20)

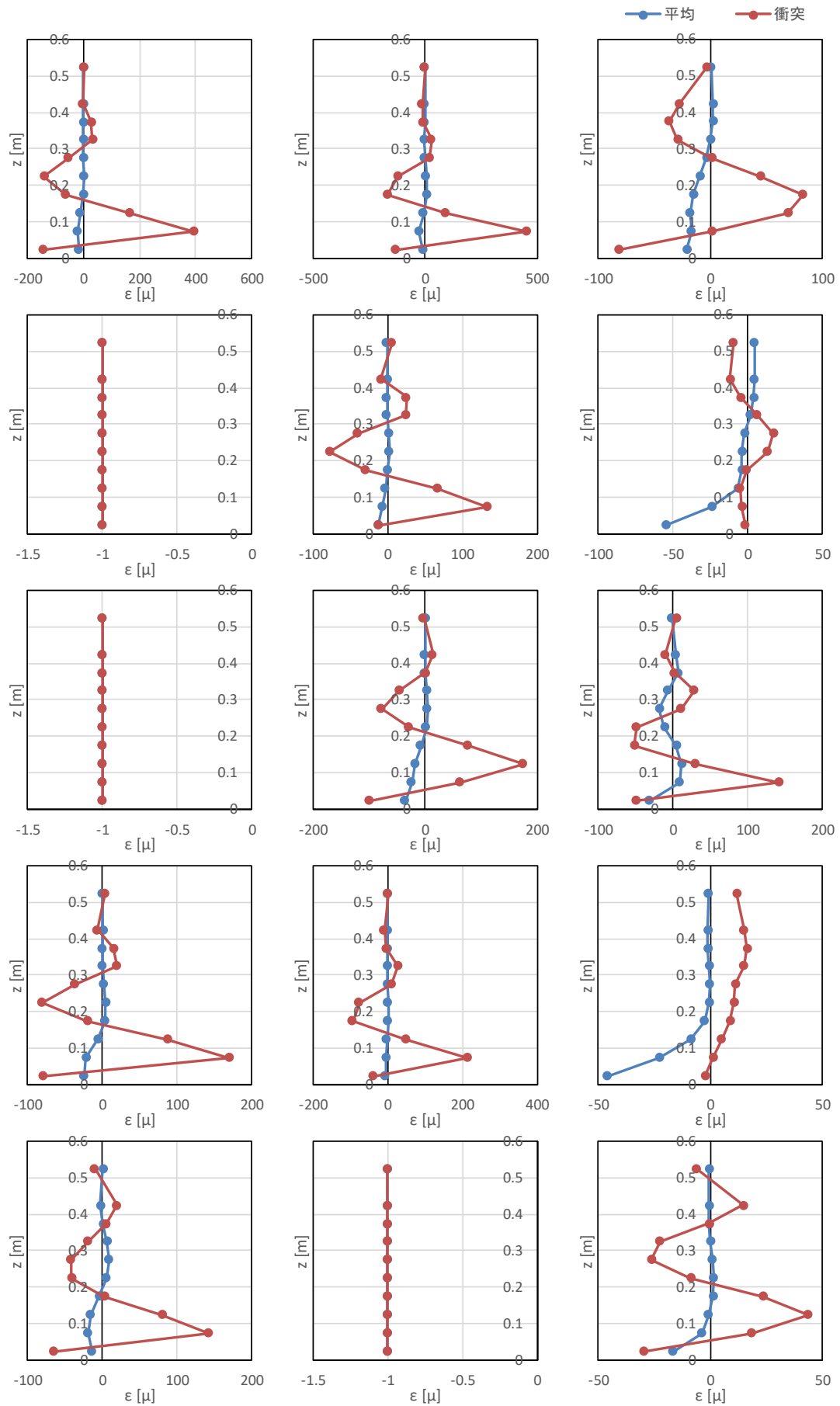


図- 8.28 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd20)

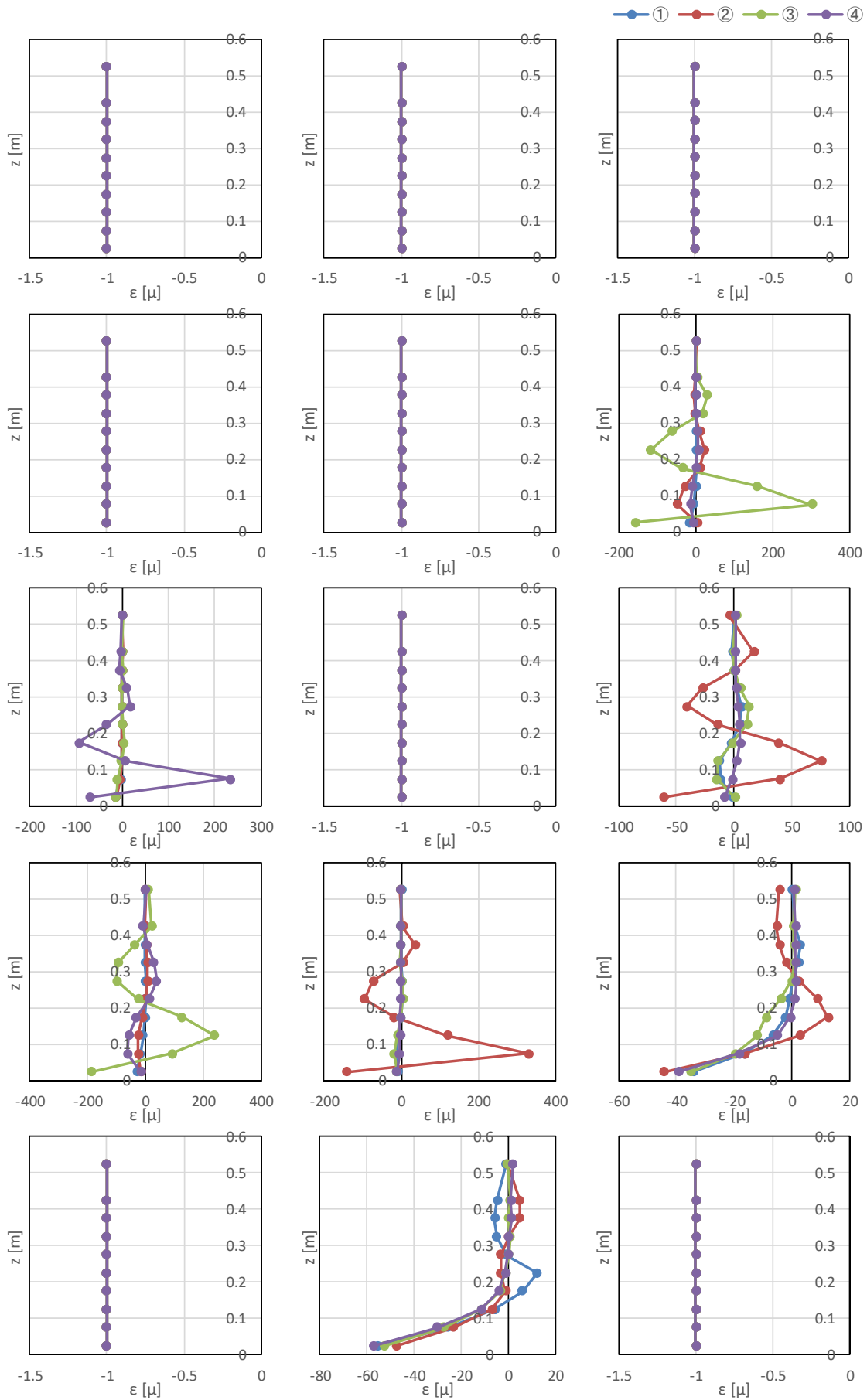


図- 8.29 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd30)

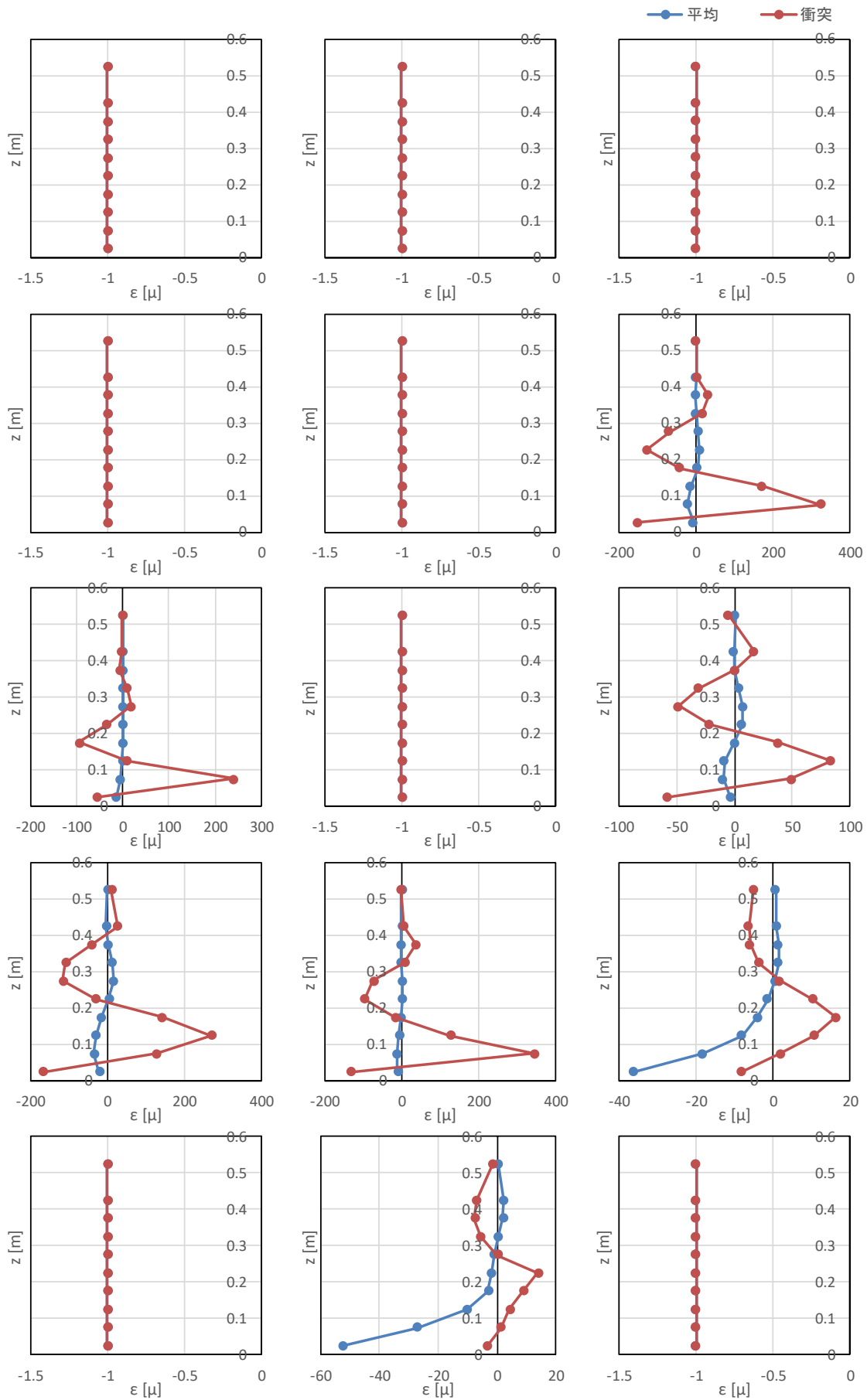


図- 8.29 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd30)

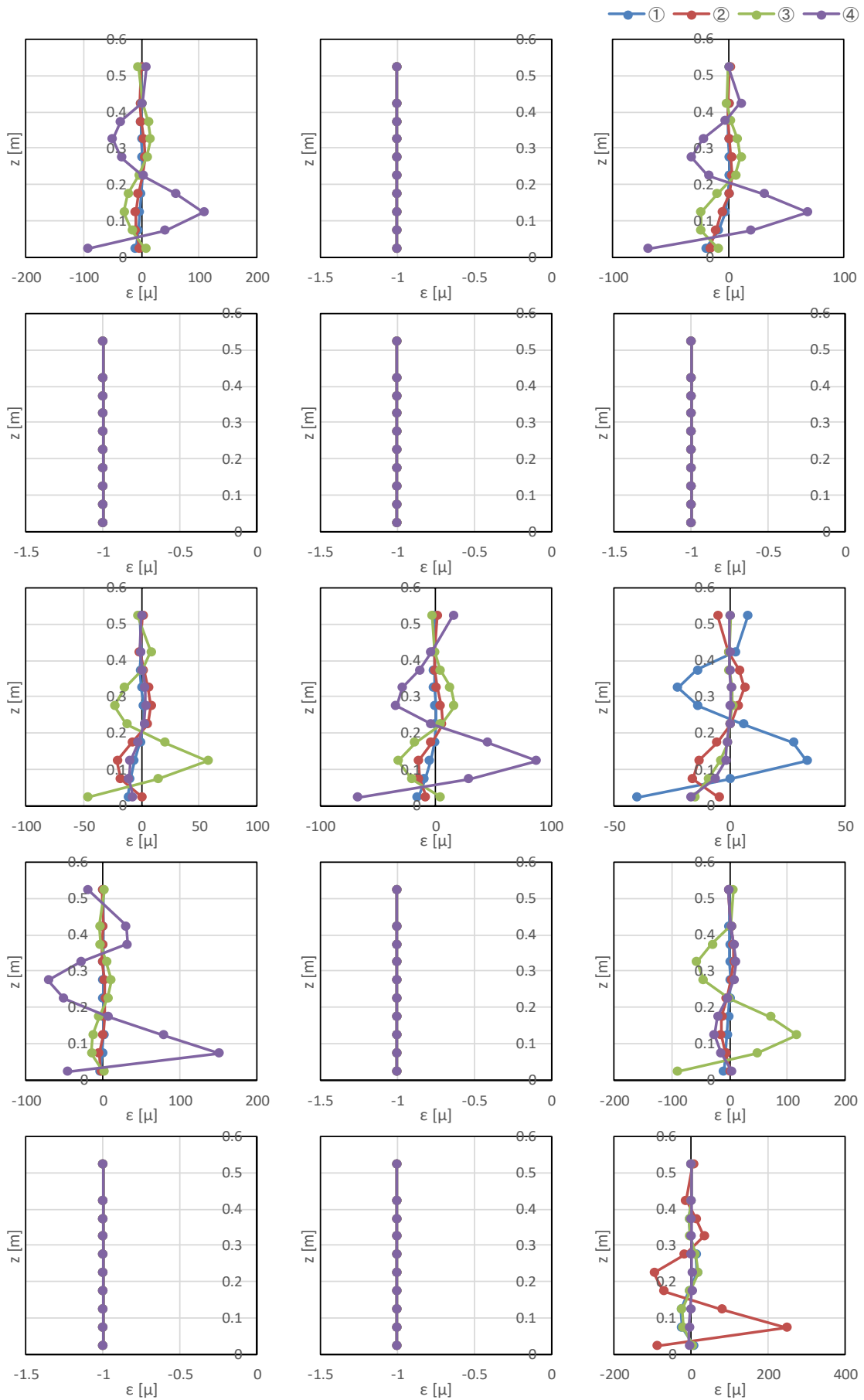


図- 8.30 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd40)

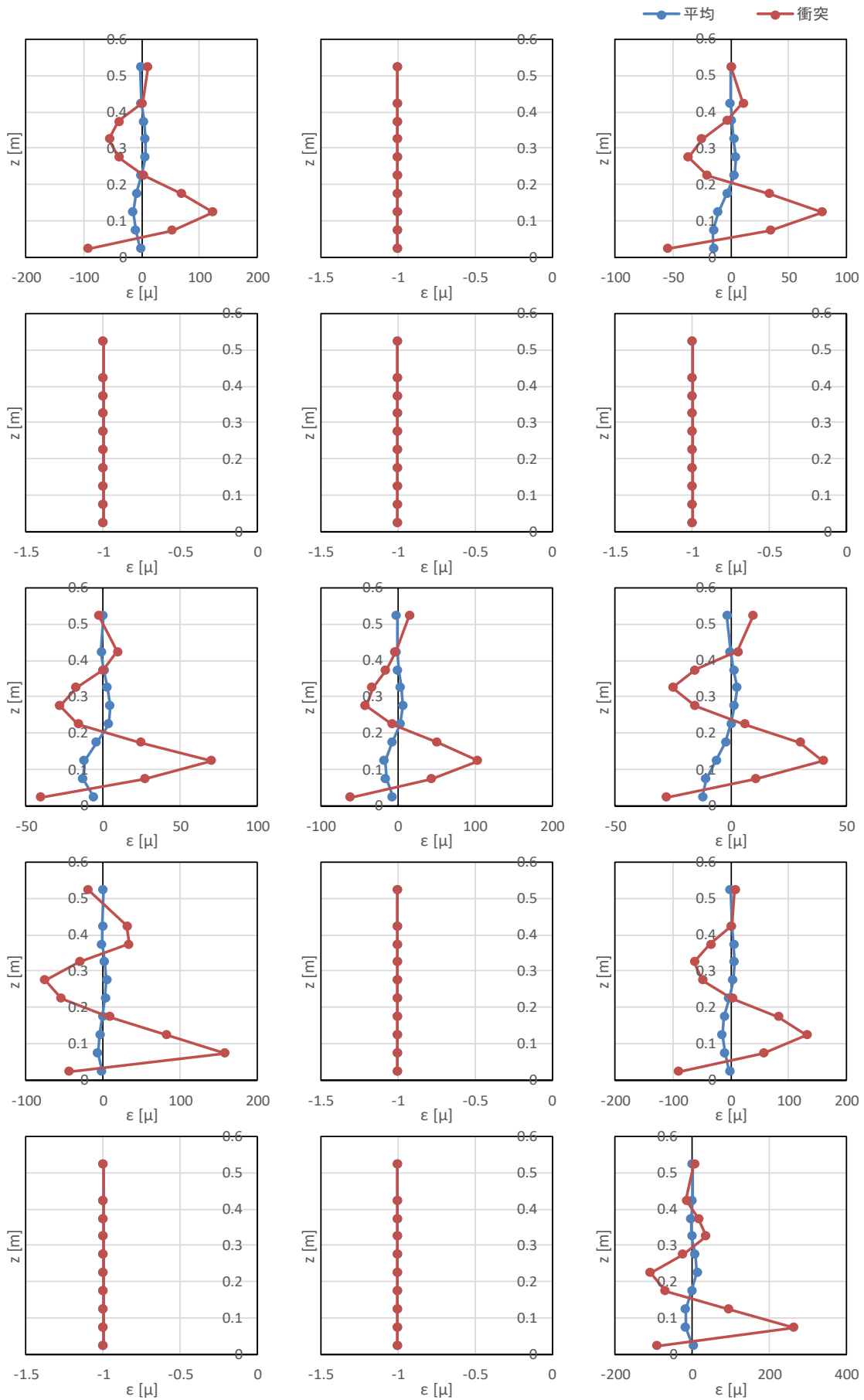


図- 8.30 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd40)

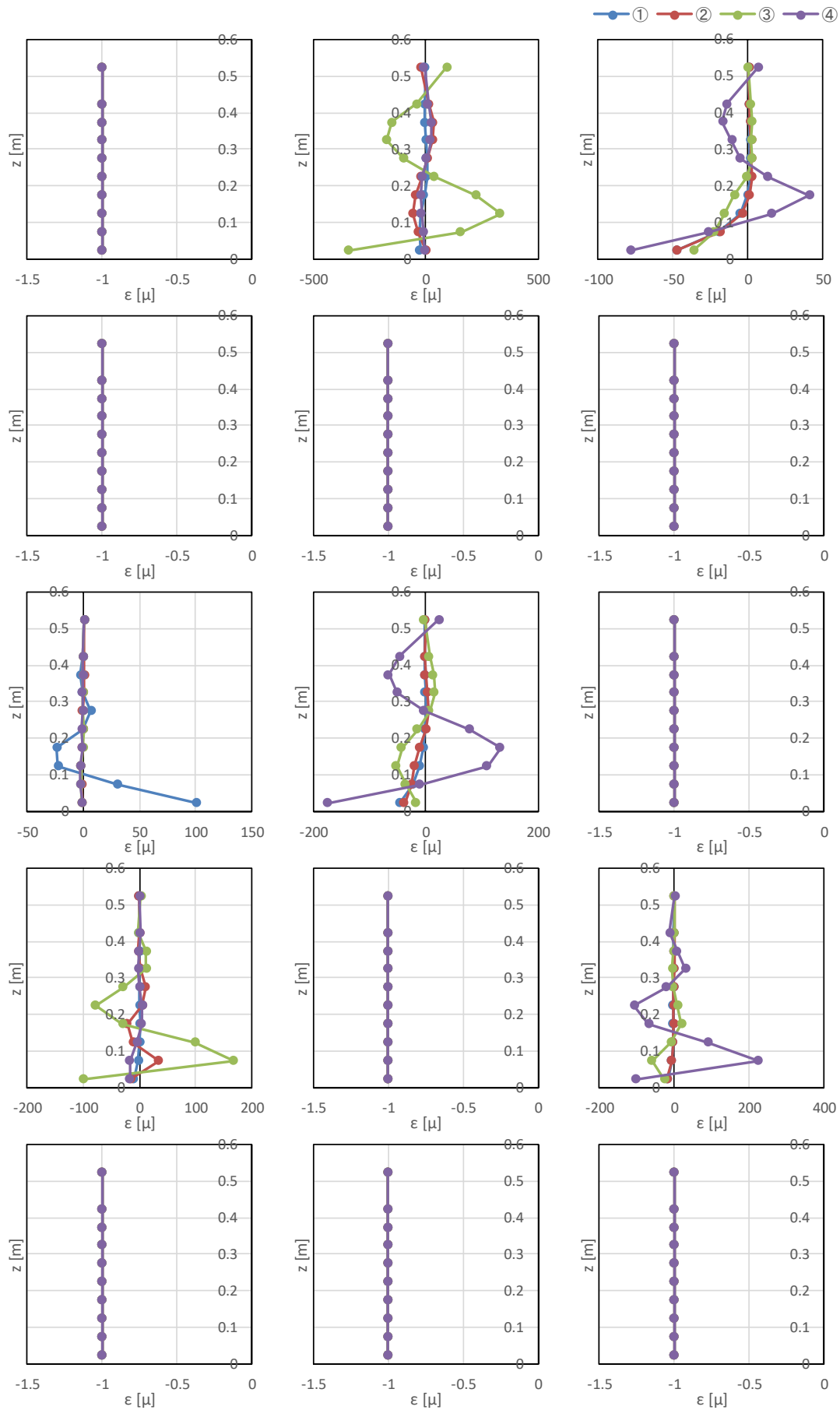


図- 8.31 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 1.0m, Wd20)

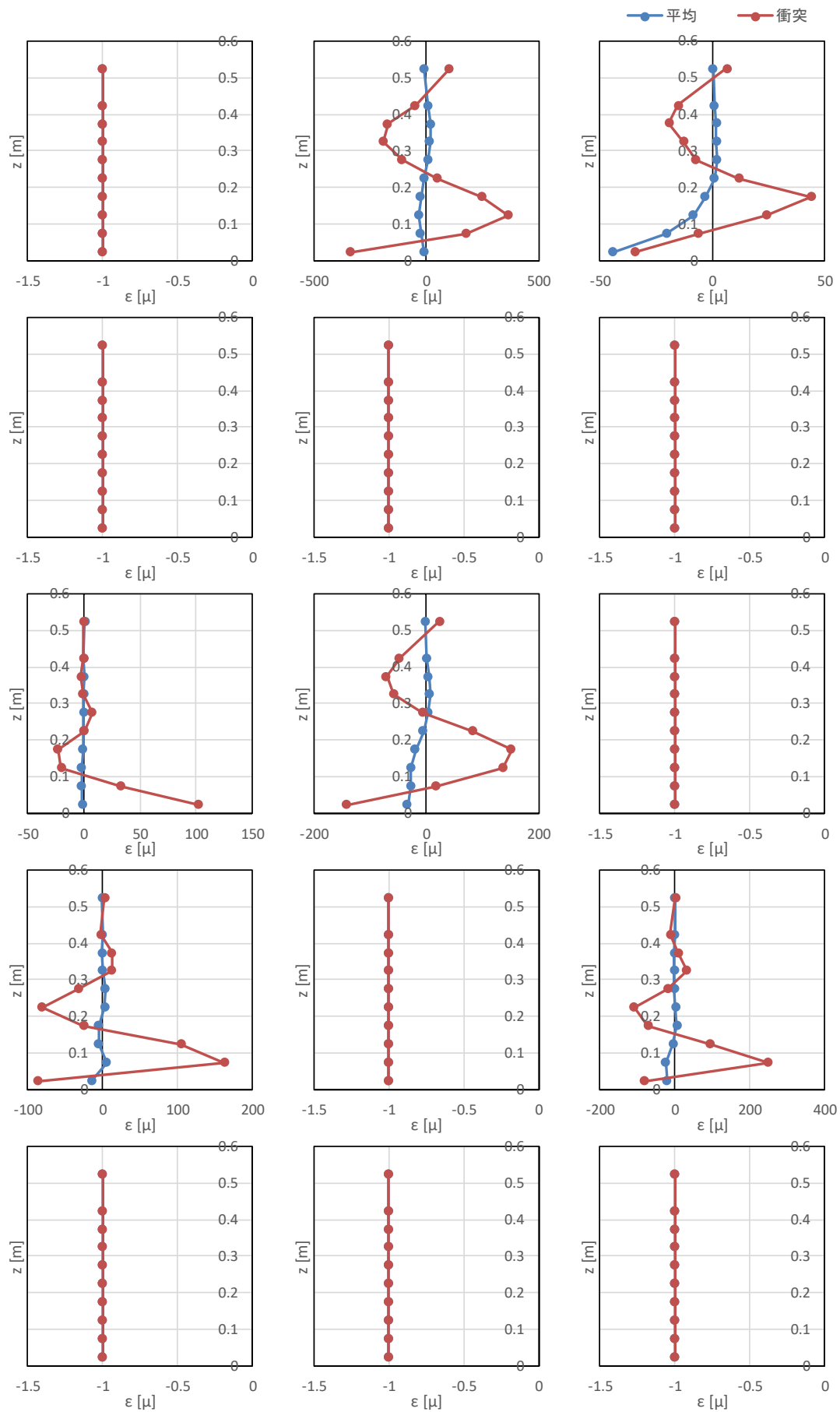


図- 8.31 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 1.0m, Wd20)

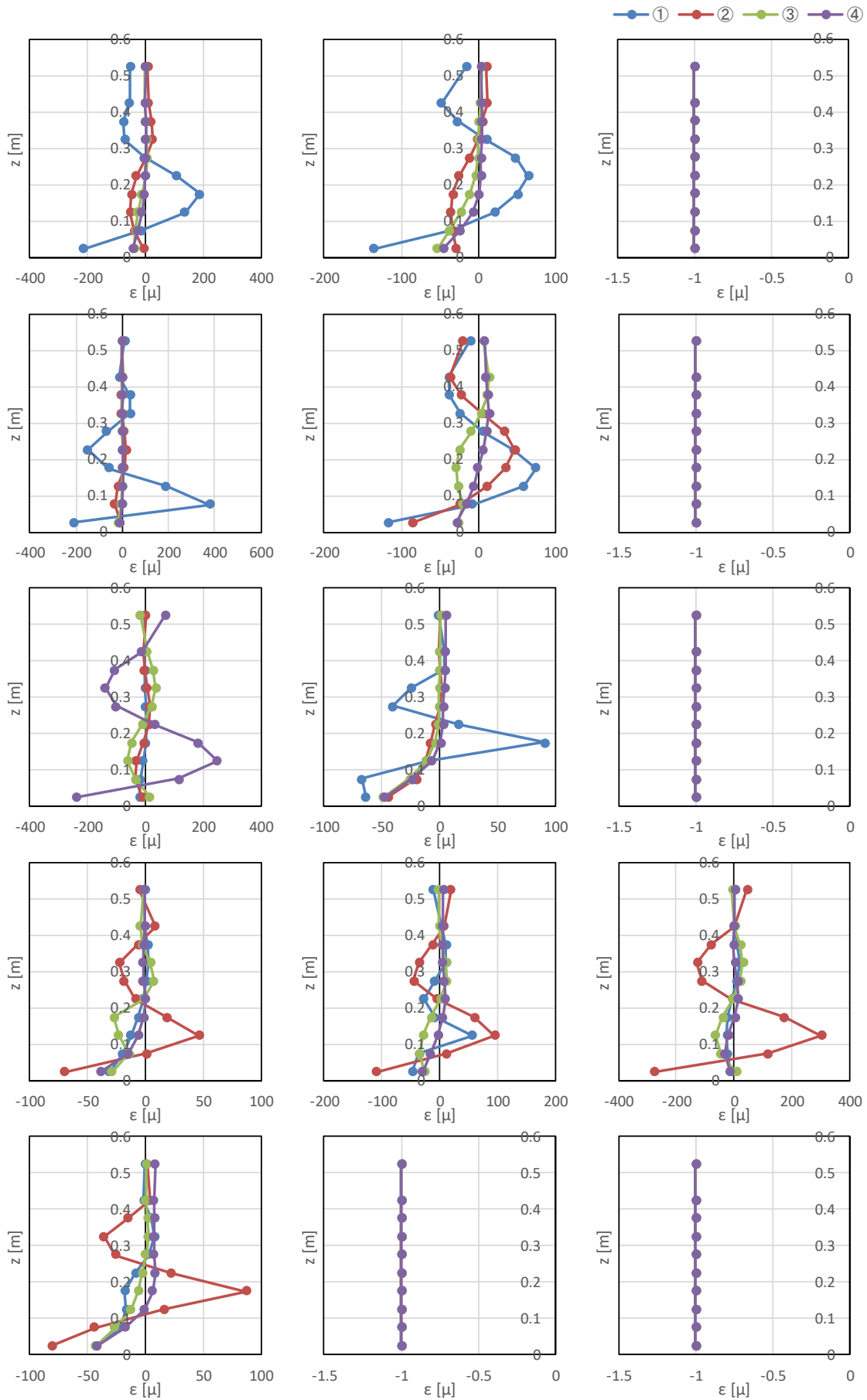


図- 8.32 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 1.0m, Wd30)

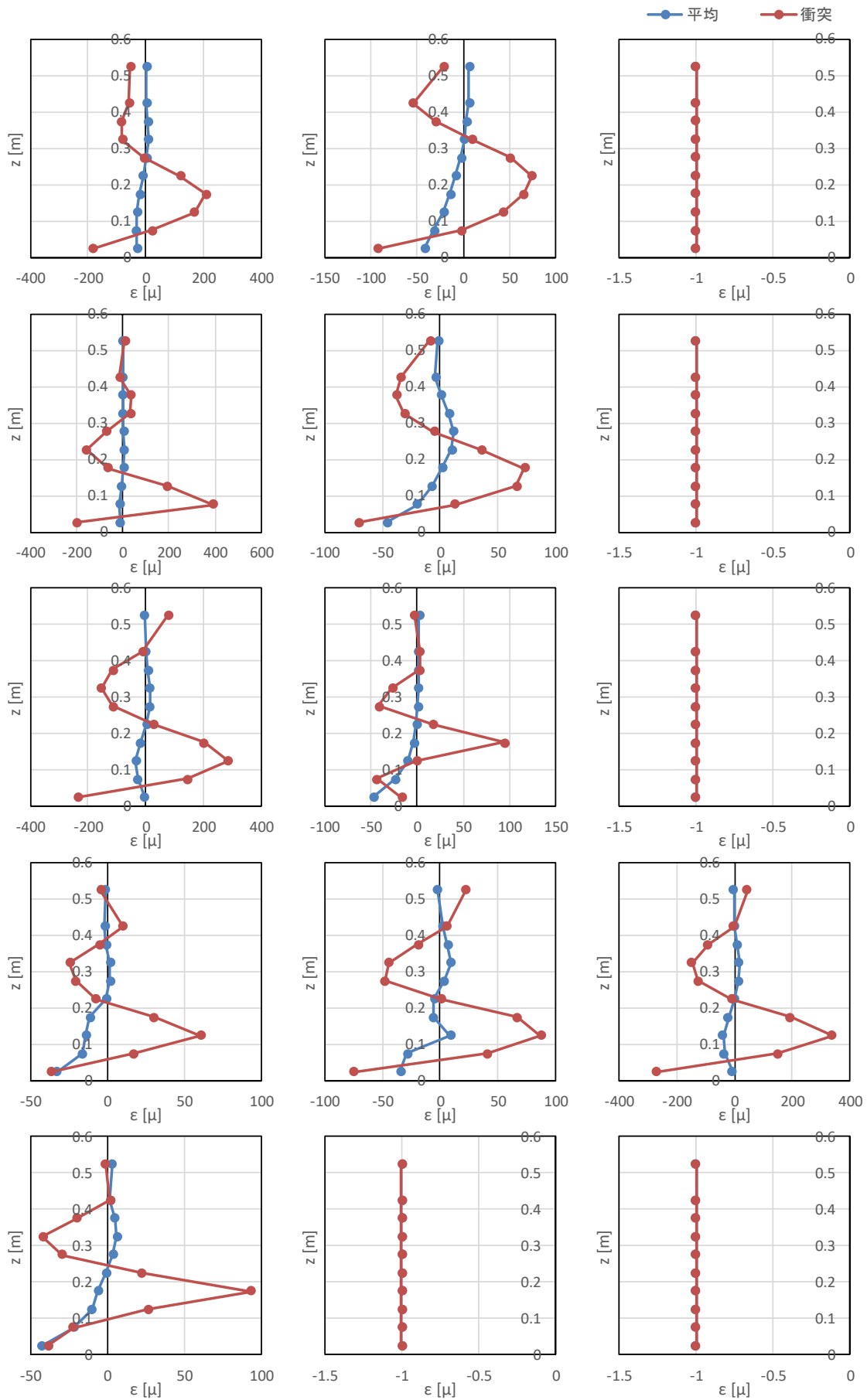


図- 8.32 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 1.0m, Wd30)

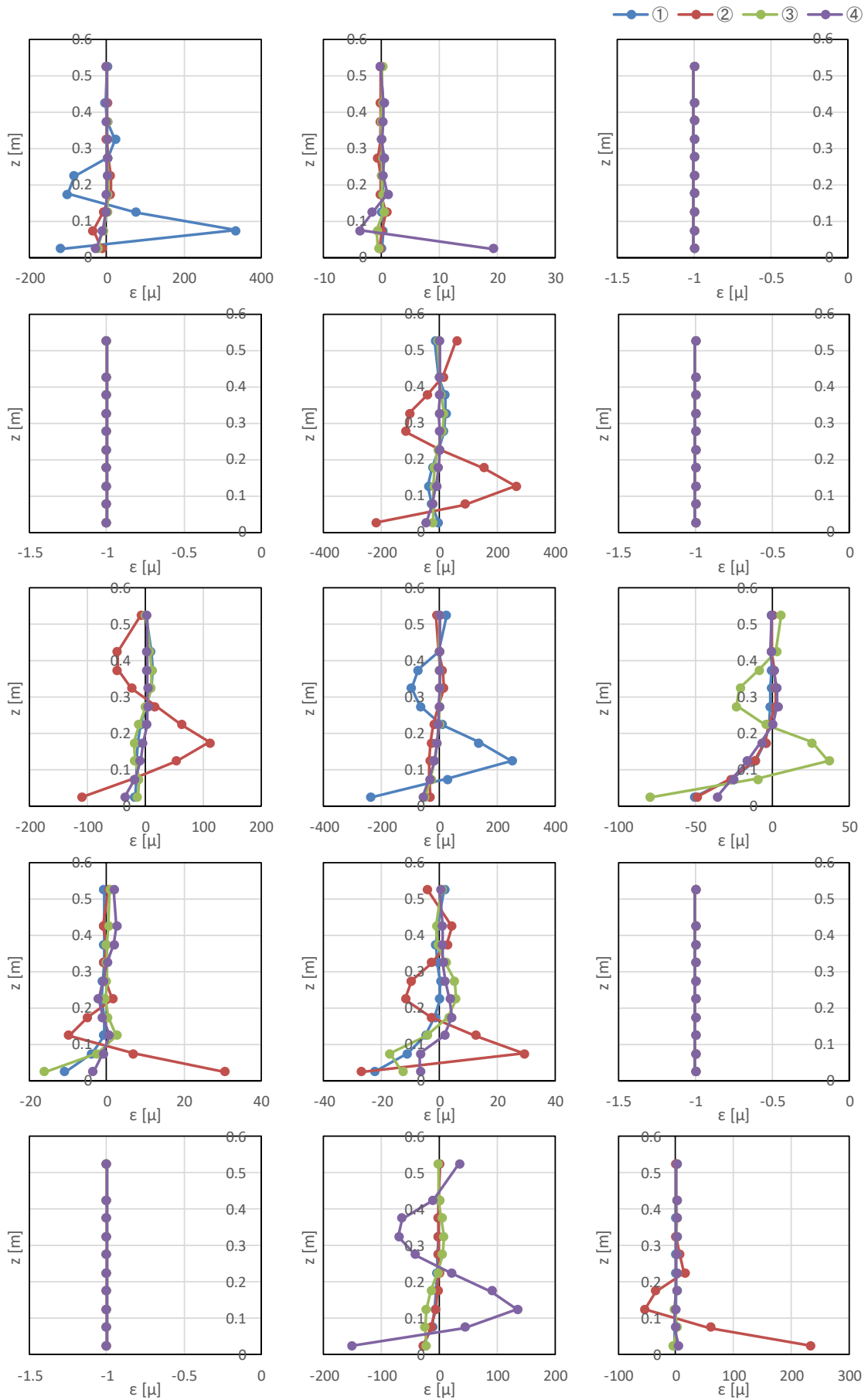


図- 8.33 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 2.0m, Wd10)

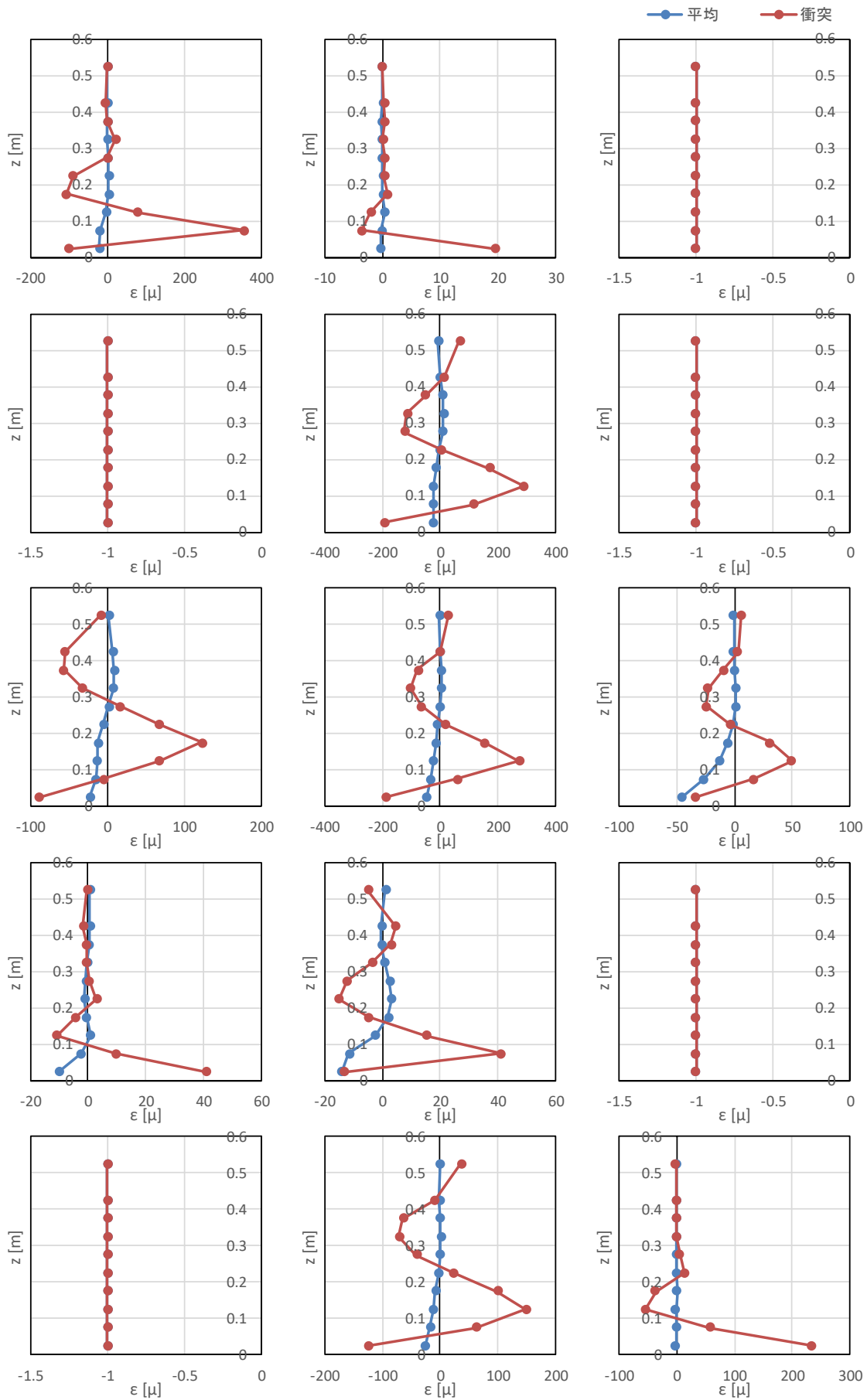


図- 8.33 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 2.0m, Wd10)

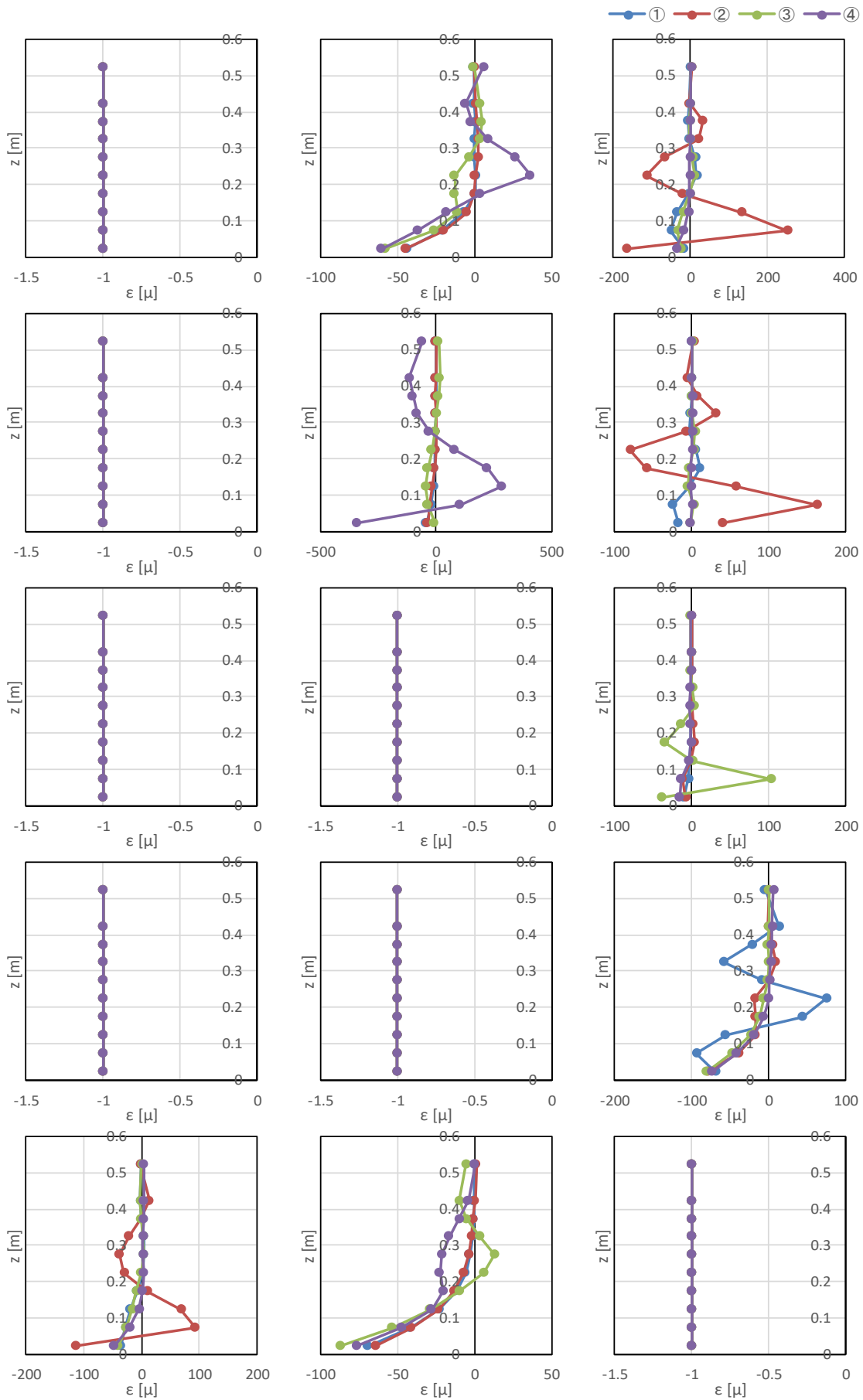


図- 8.34 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 2.0m, Wd20)

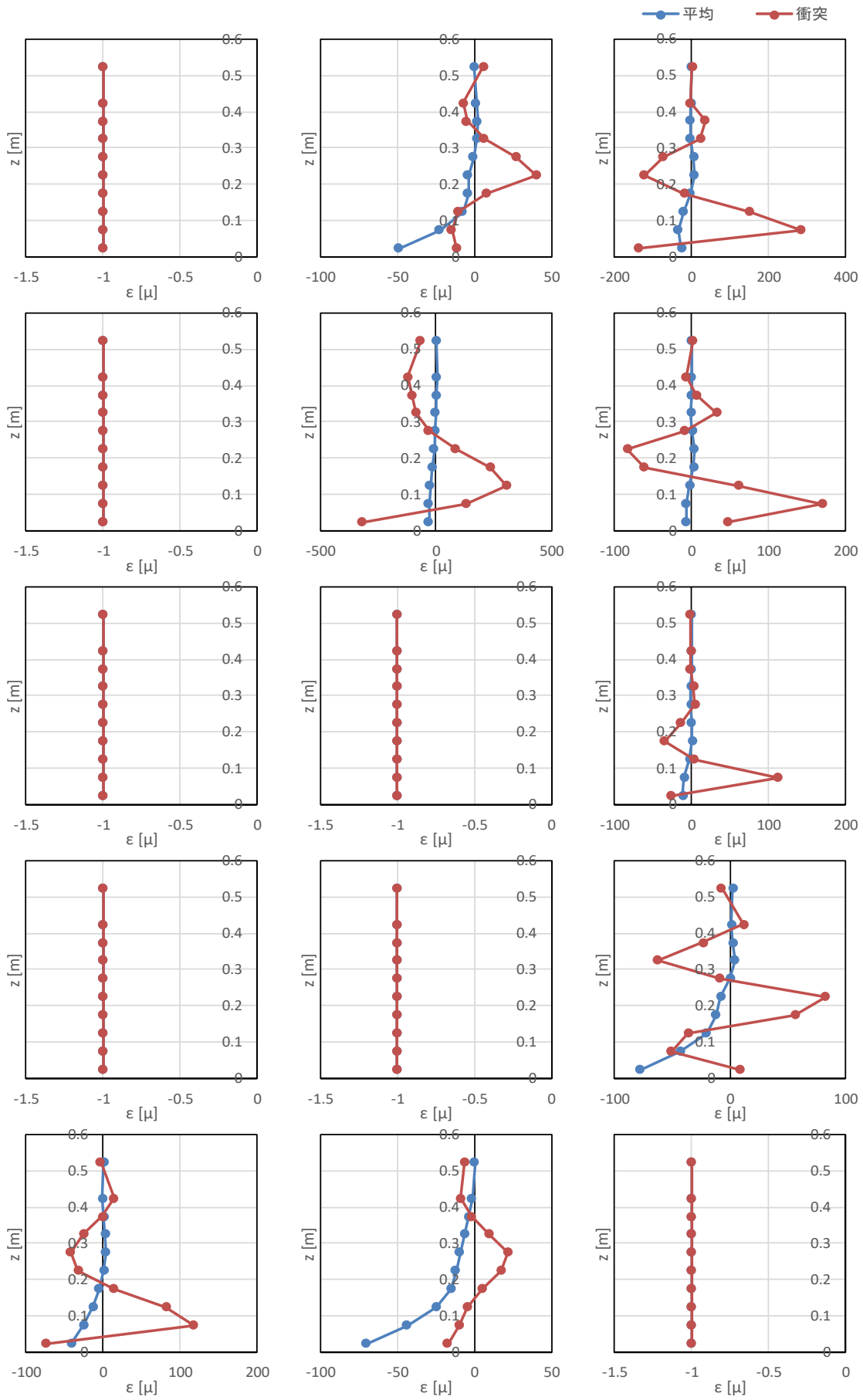


図- 8.34 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 2.0m, Wd20)

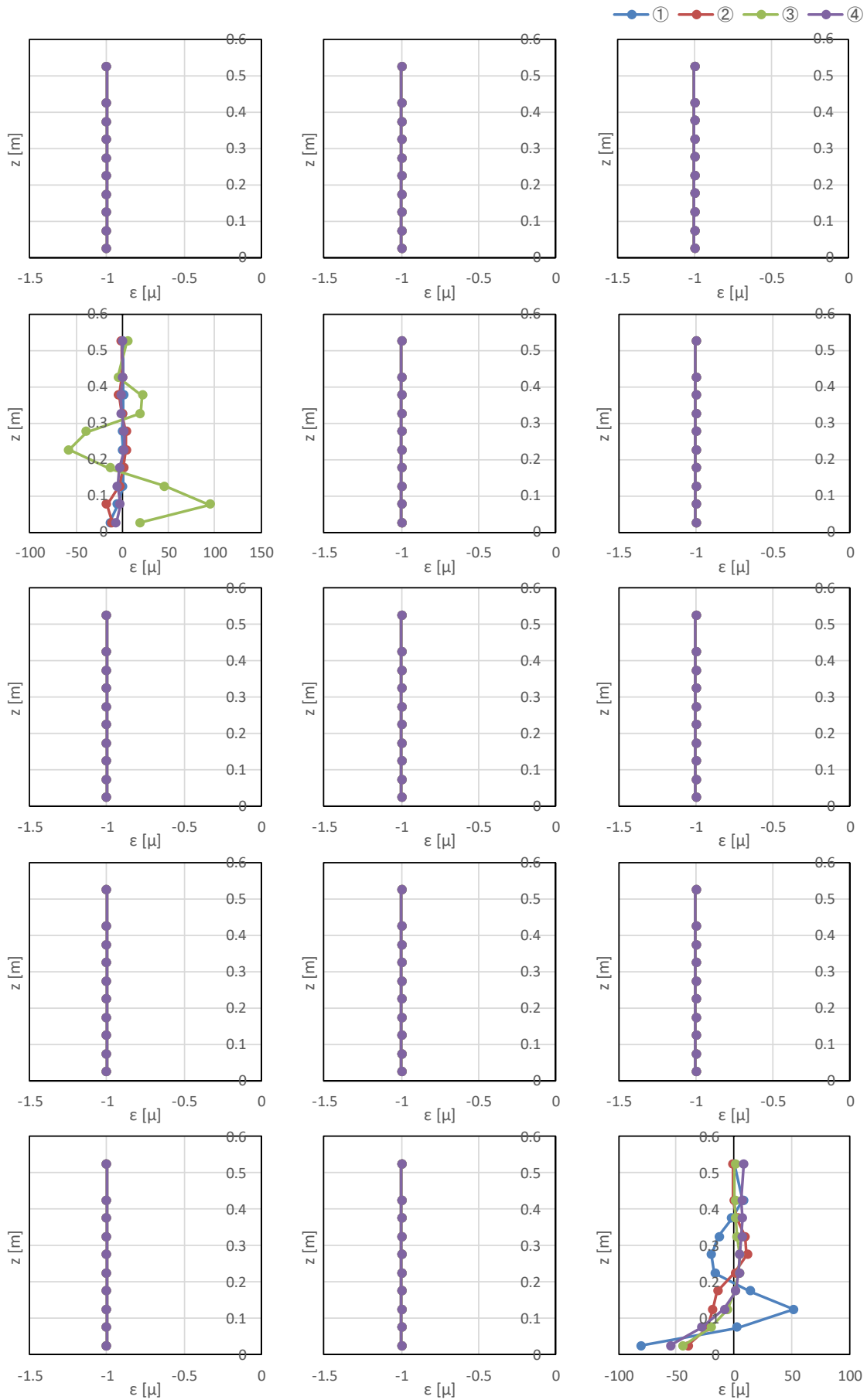


図- 8.35 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 2.0m, Wd30)

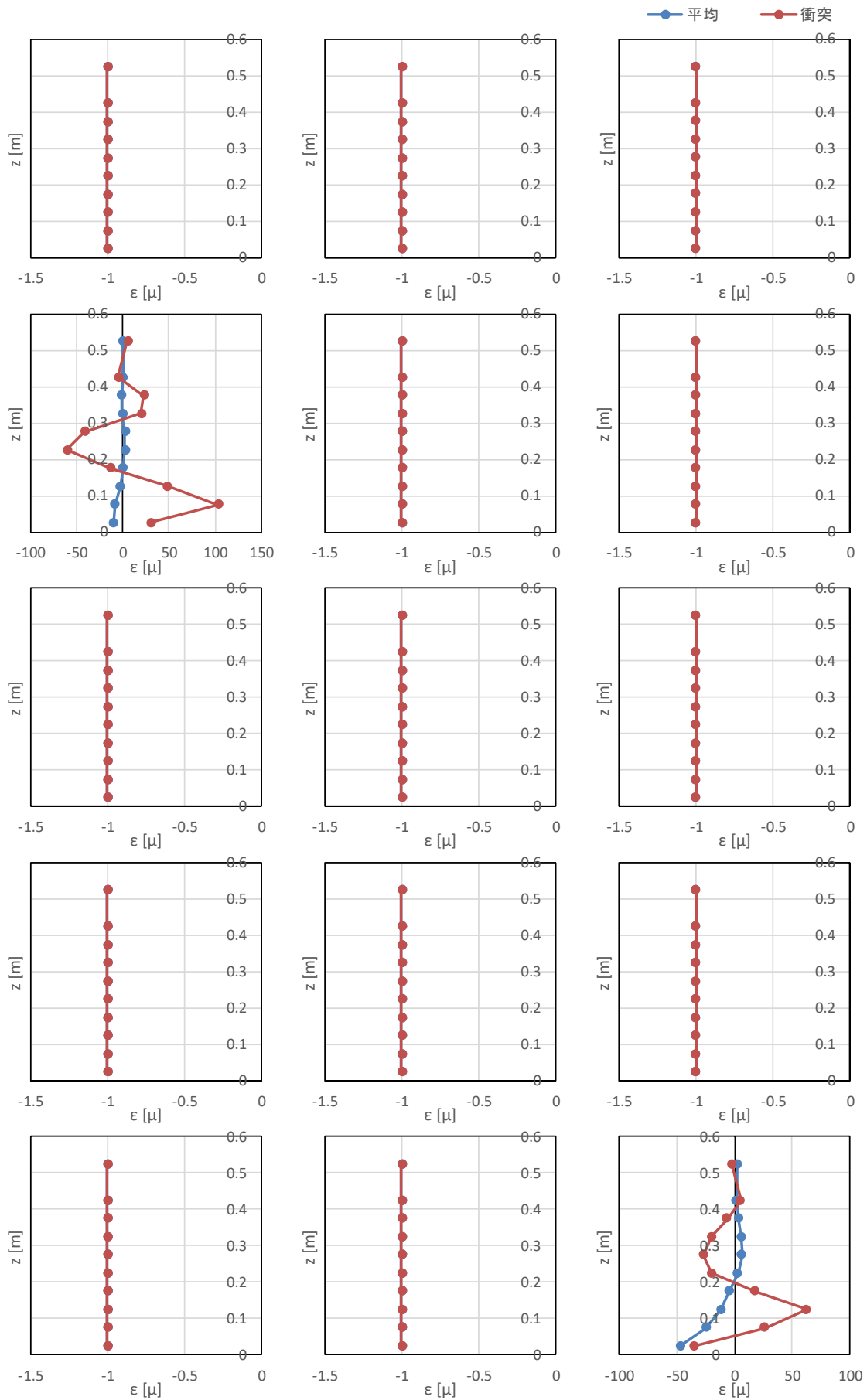


図- 8.35 ひずみの鉛直分布 (漂流物 A, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 2.0m, Wd30)

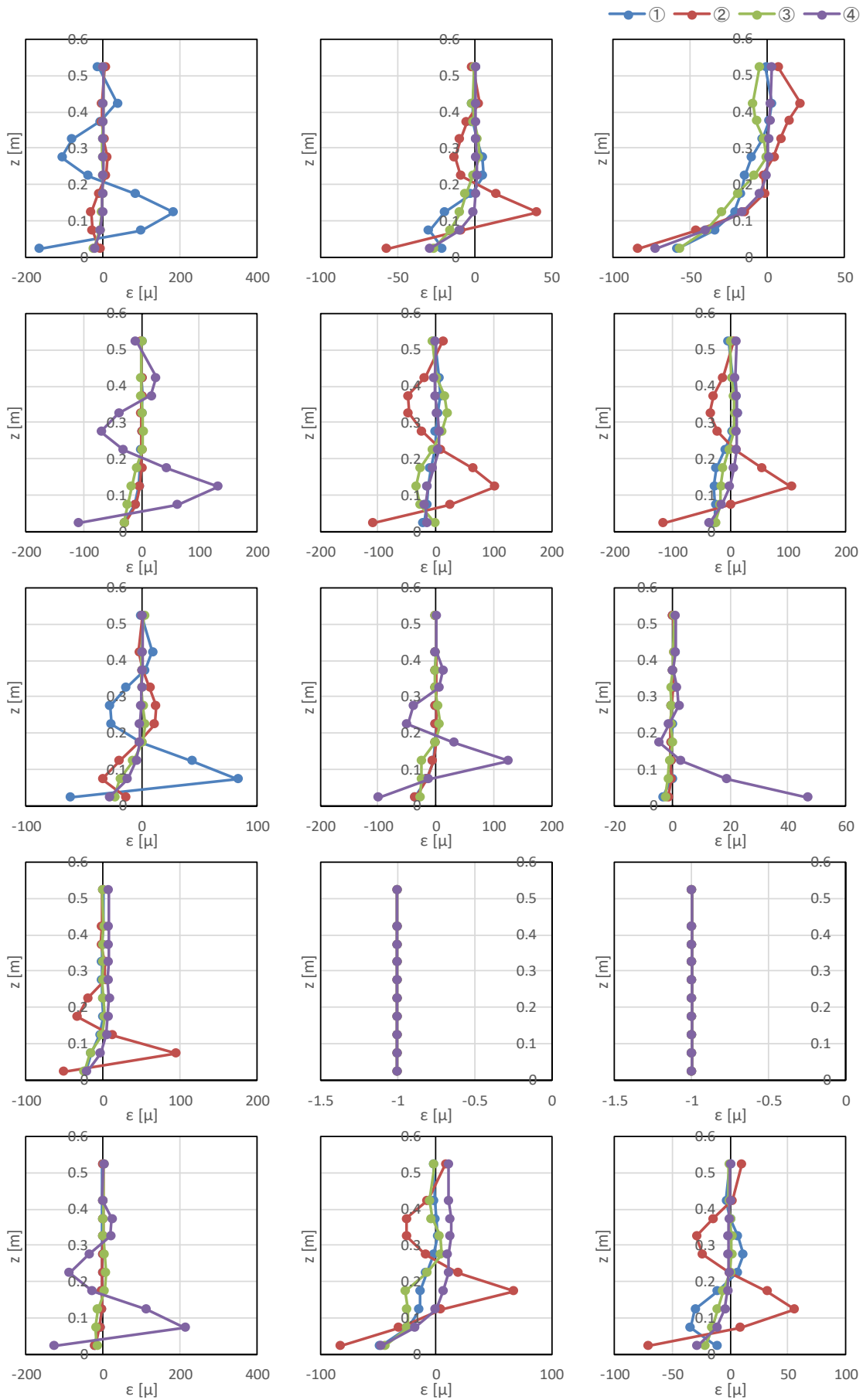


図- 8.36 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd20)

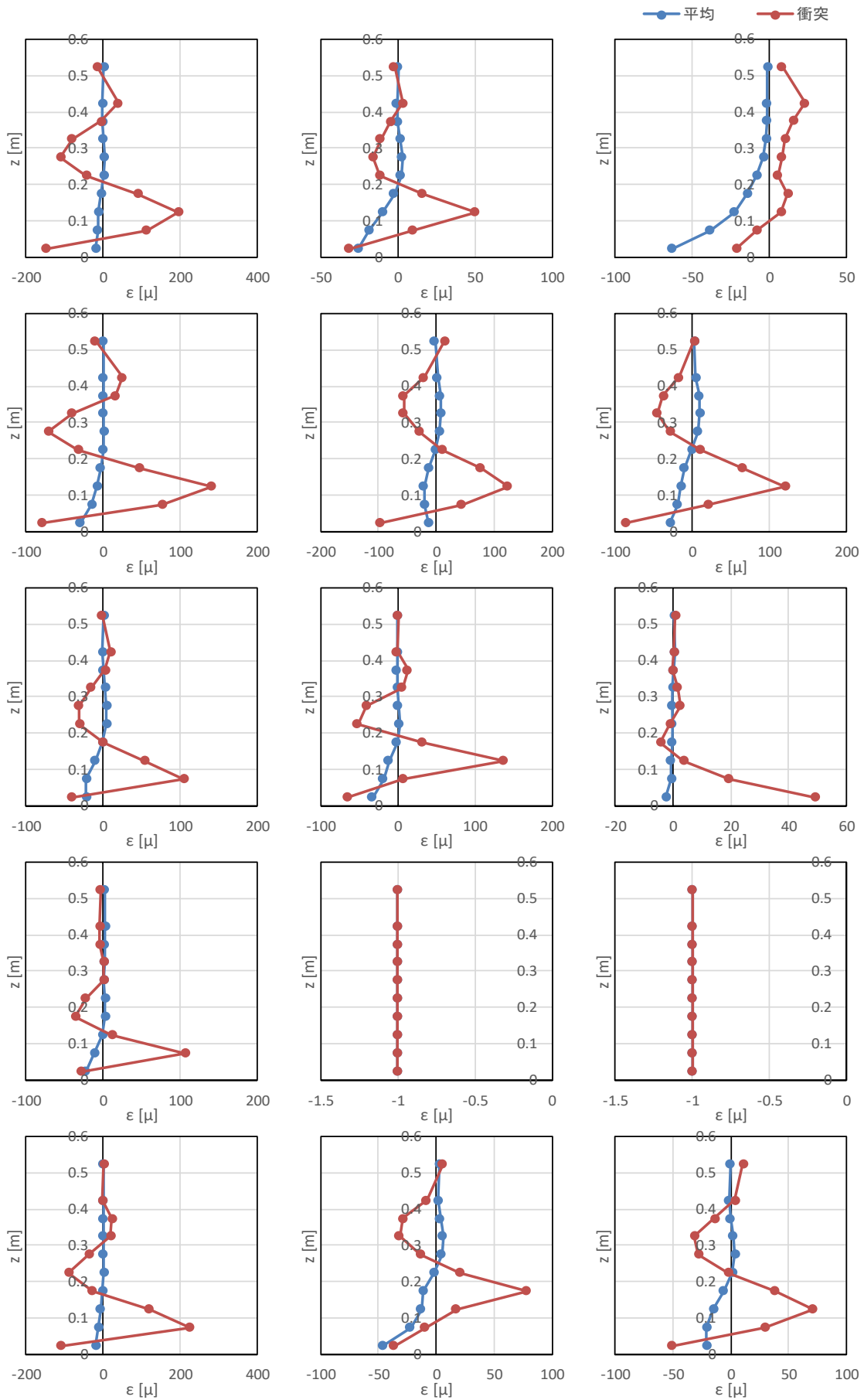


図- 8.36 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd20)

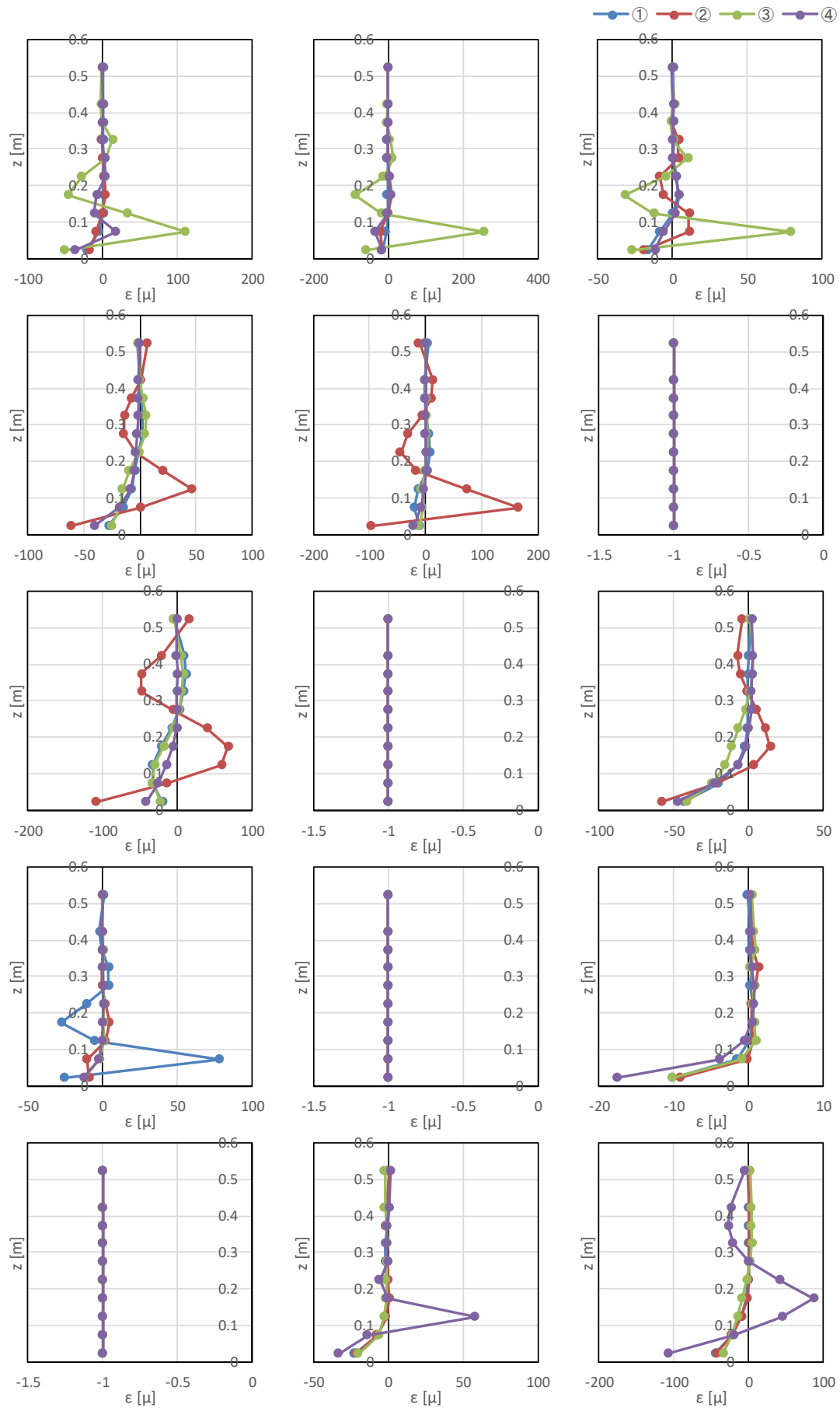


図- 8.37 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd30)

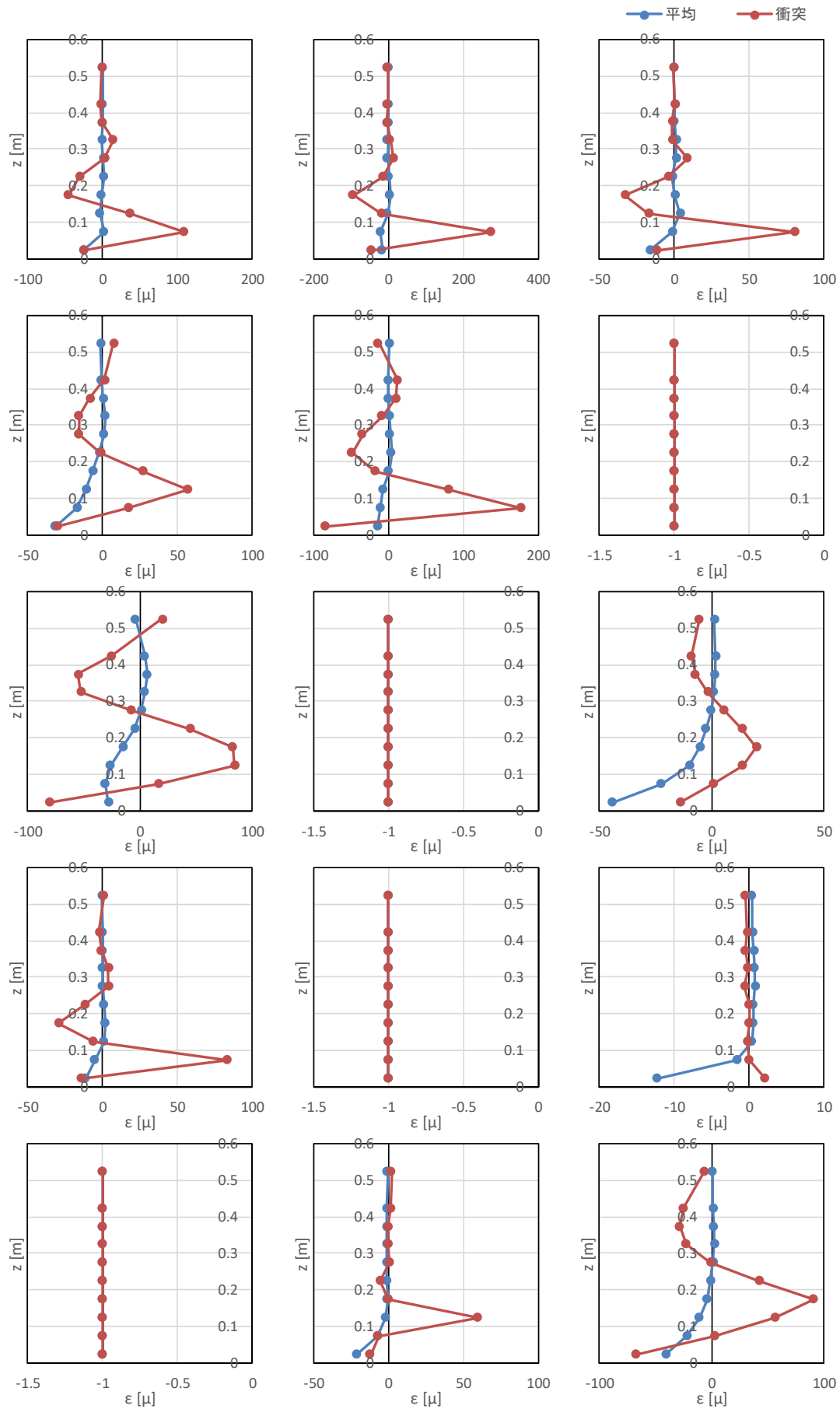


図- 8.37 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd30)

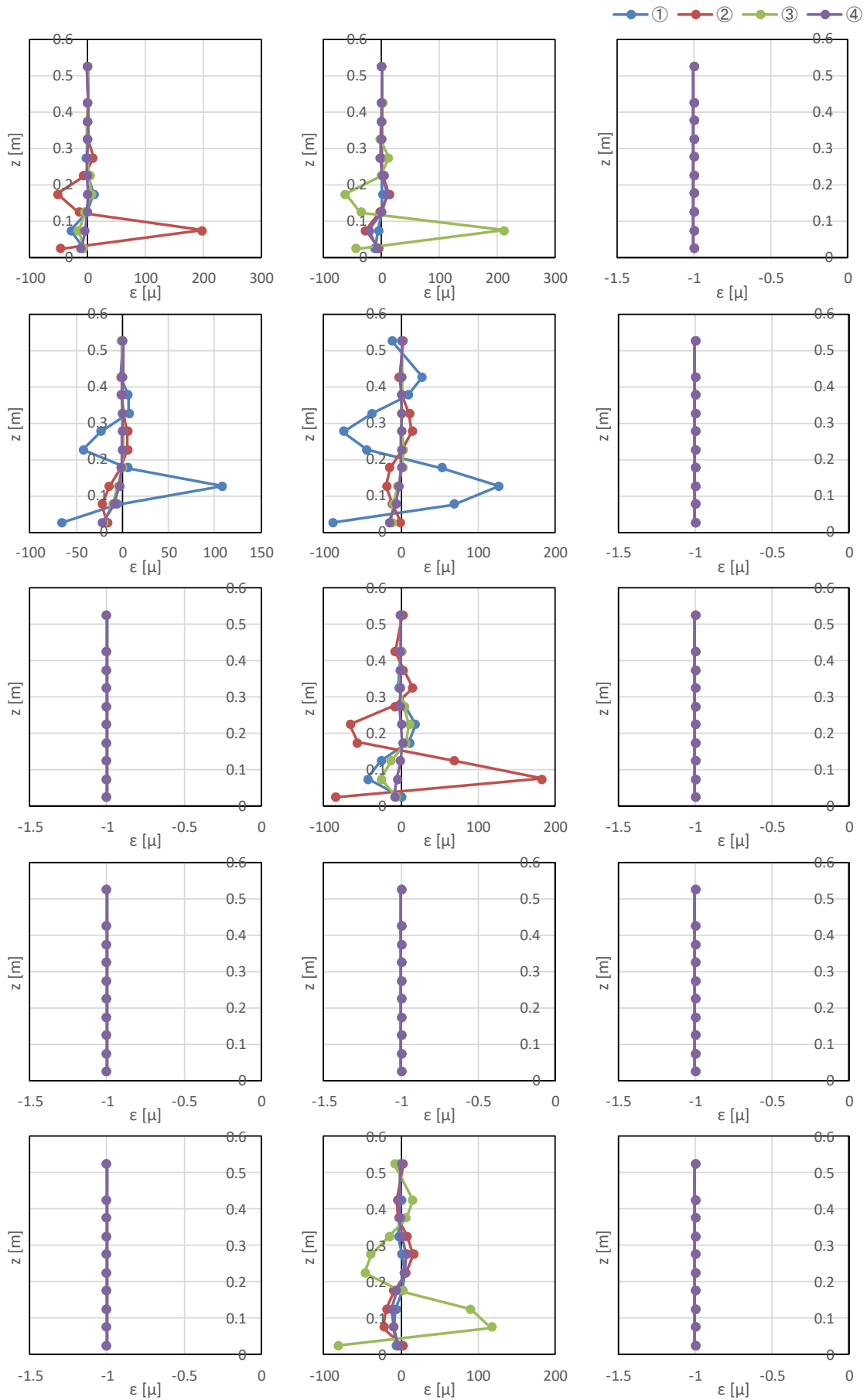


図- 8.38 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd40)

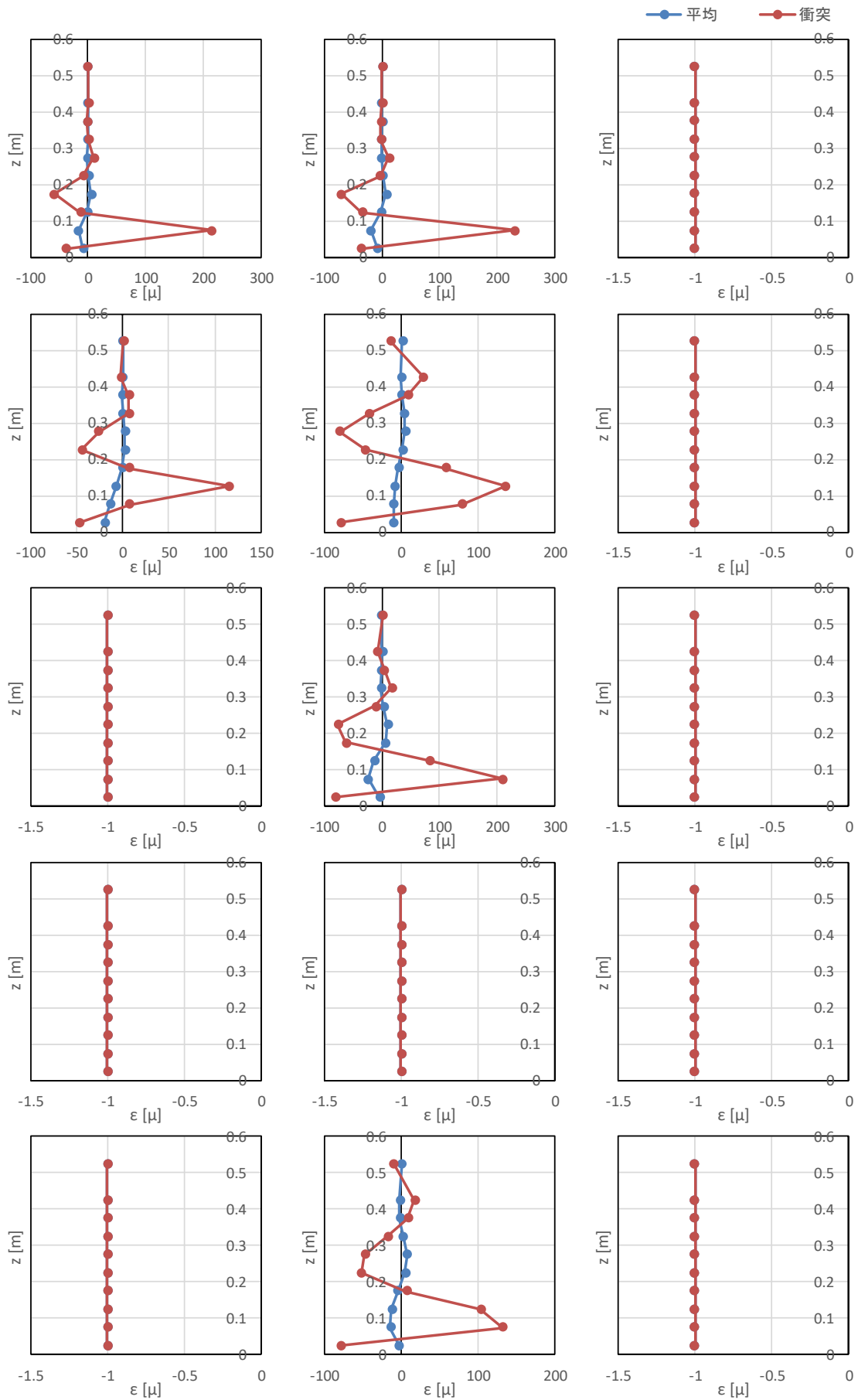


図- 8.38 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd40)

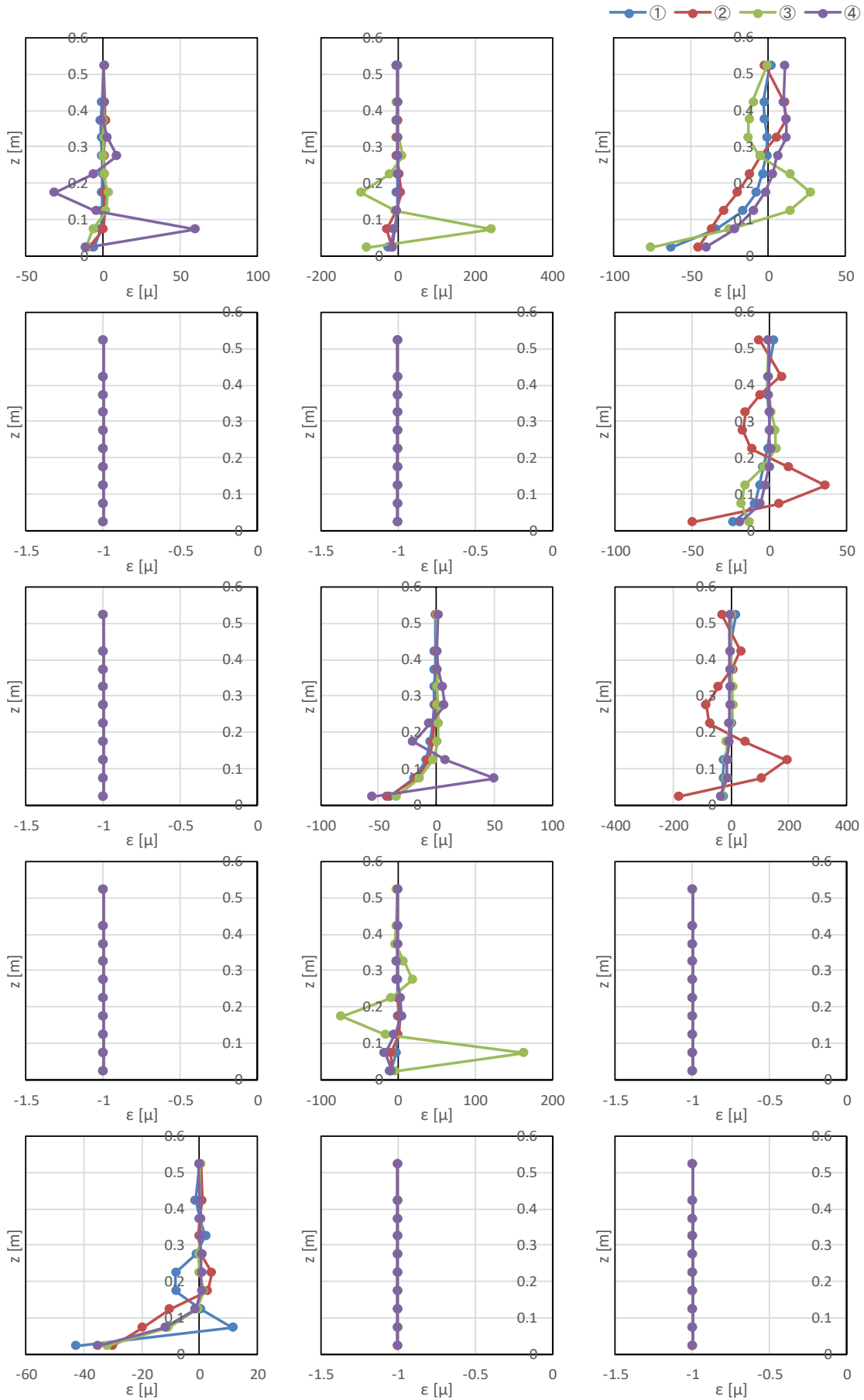


図- 8.39 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 1.0m, Wd20)

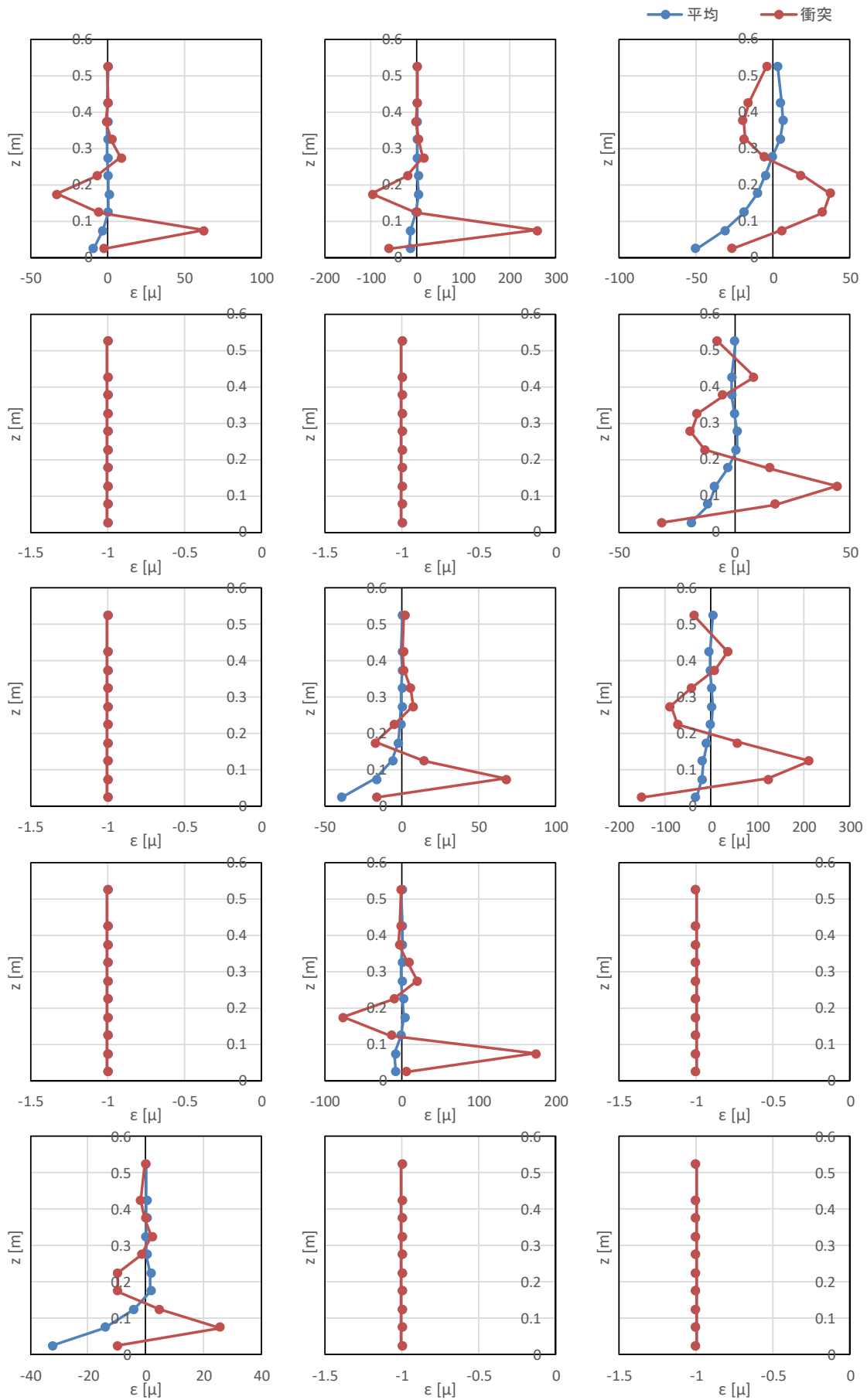


図- 8.39 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 1.0m, Wd20)

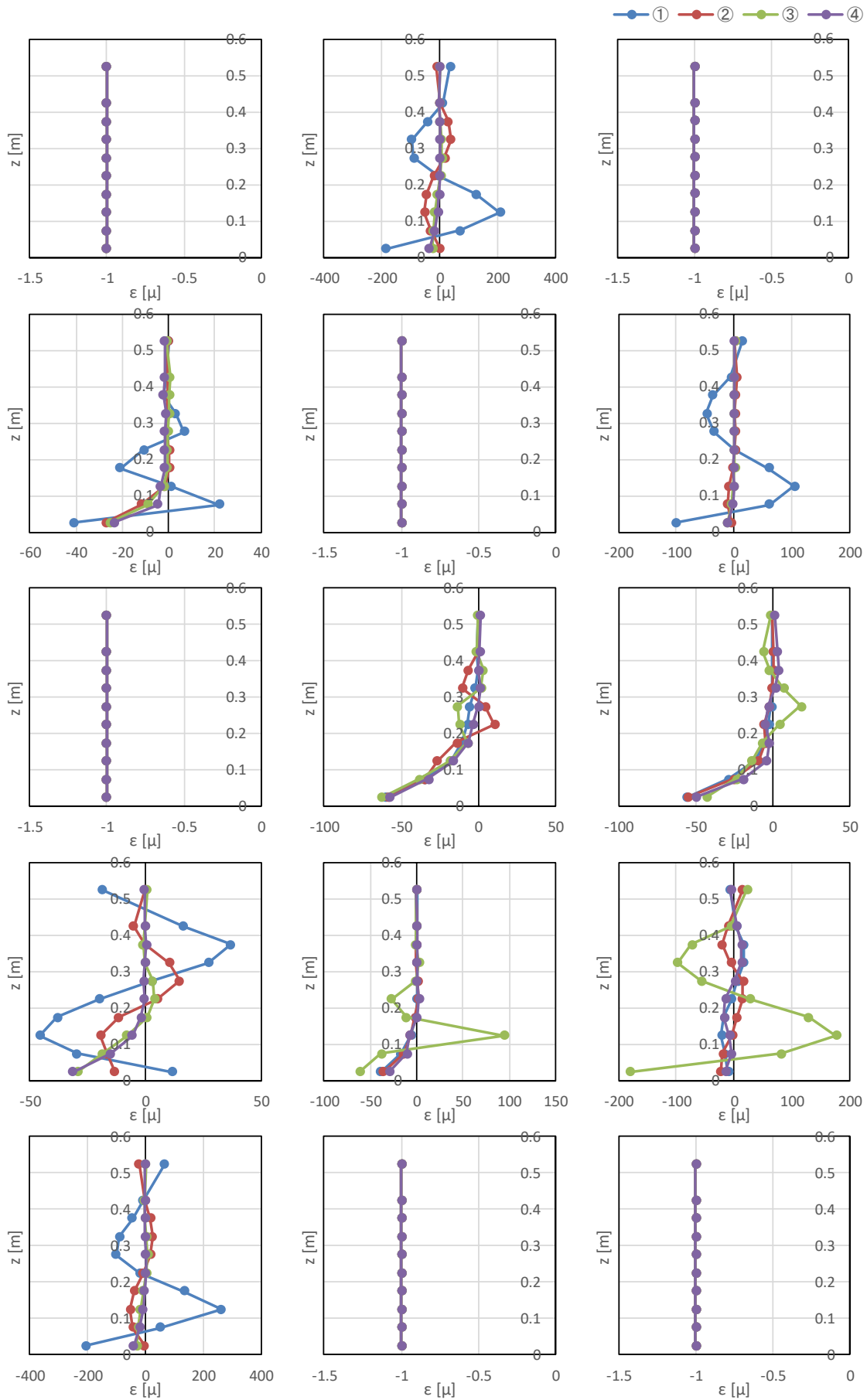


図- 8.40 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 1.0m, Wd30)

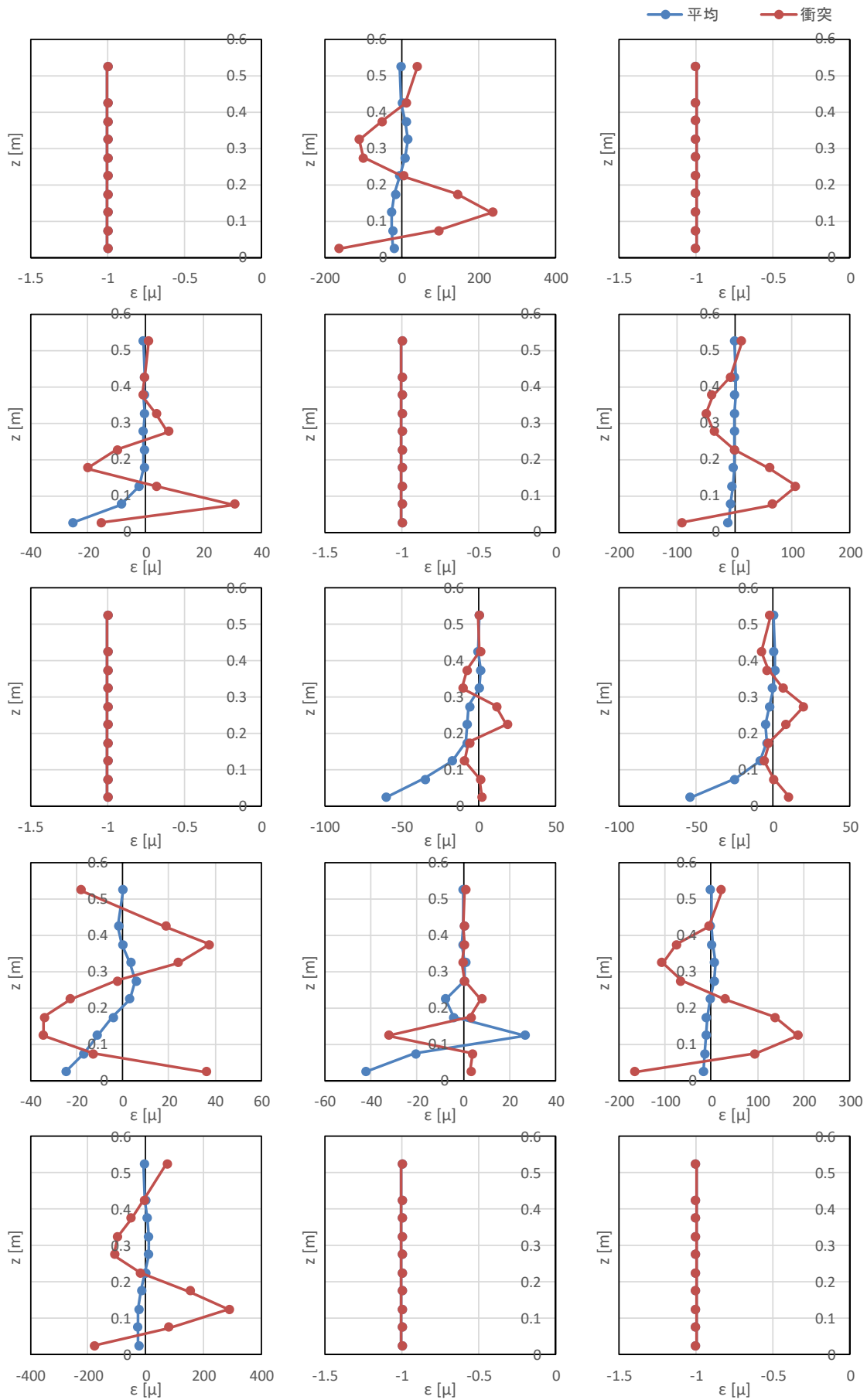


図- 8.40 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 1.0m, Wd30)

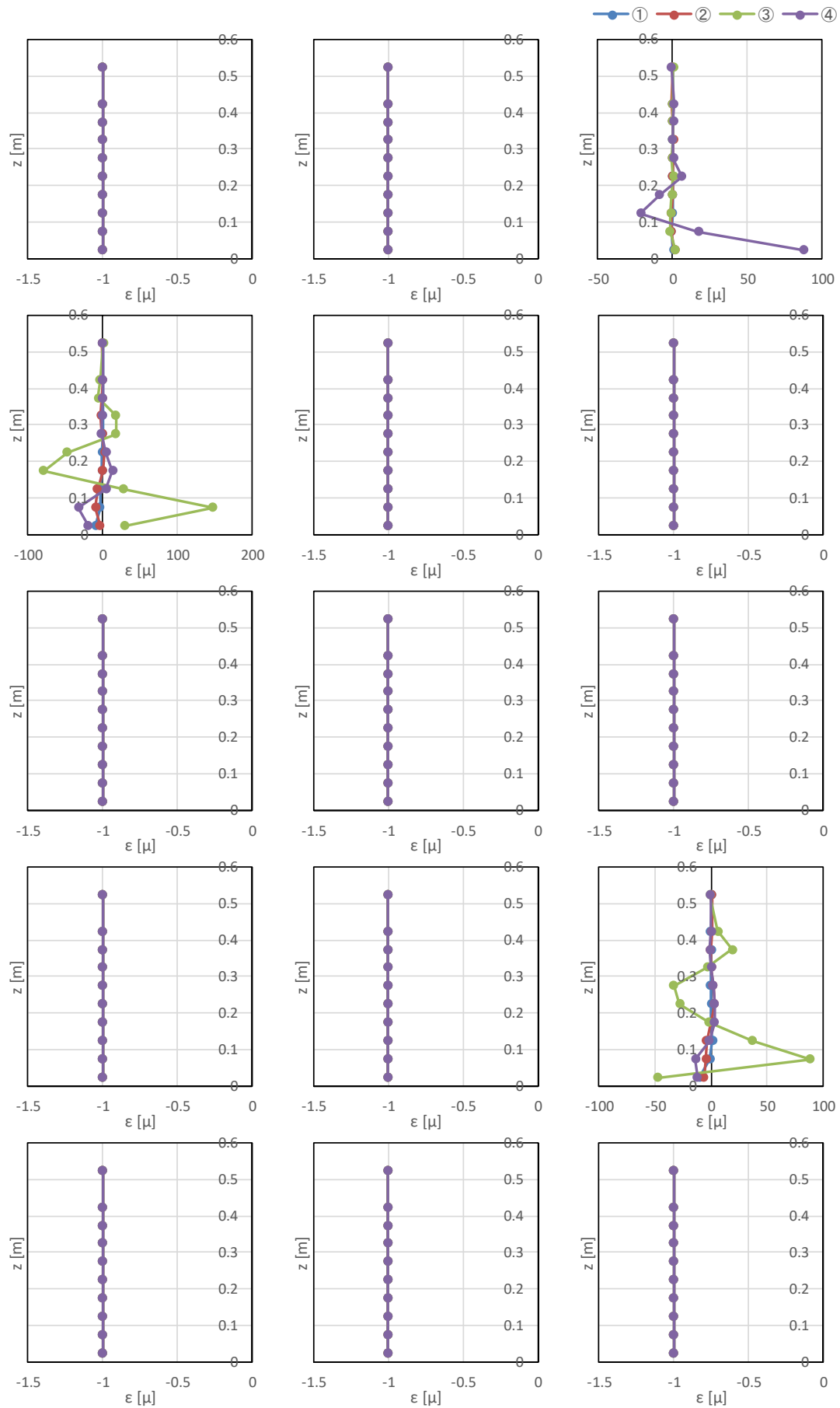


図- 8.41 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 2.0m, Wd10)

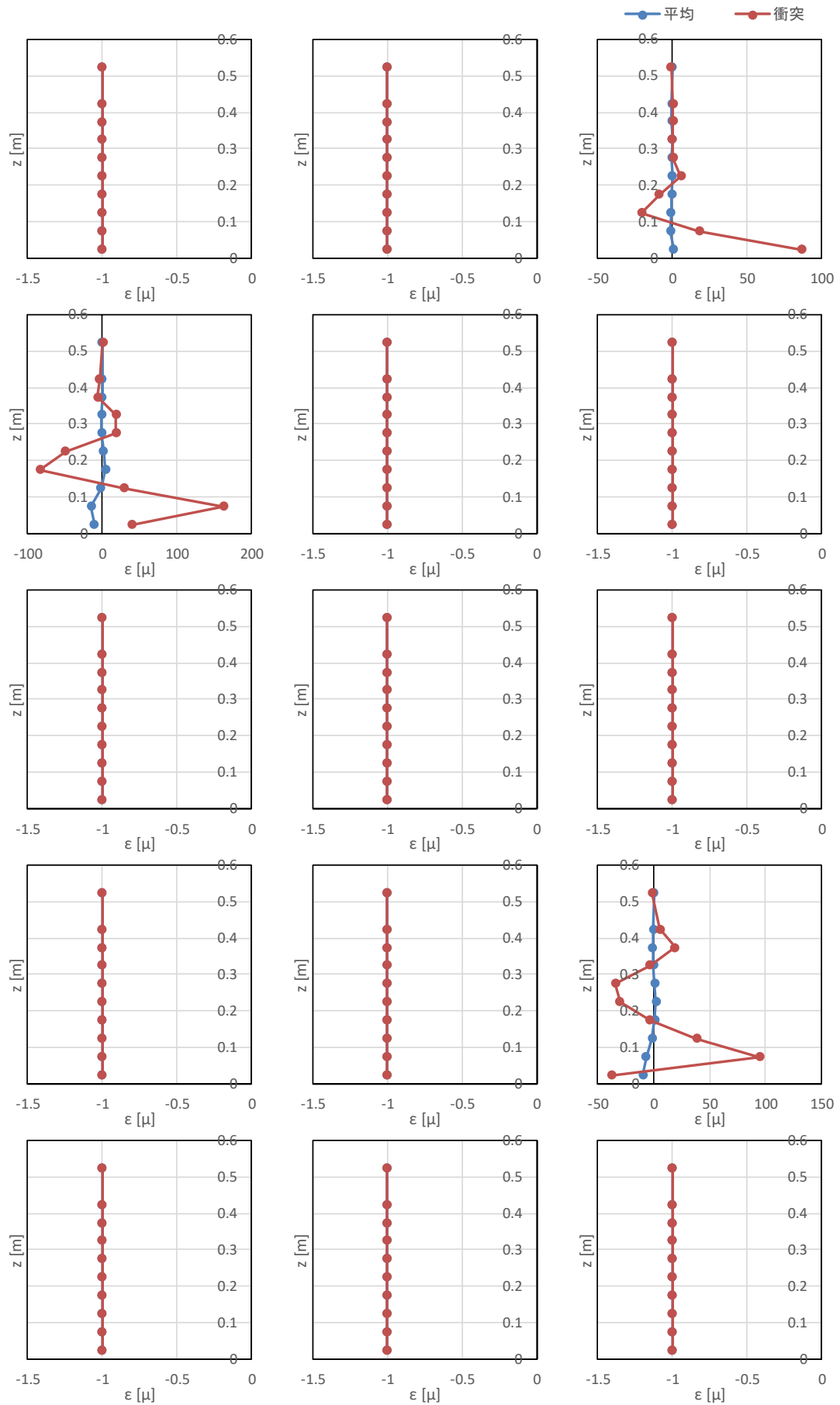


図- 8.41 ひずみの鉛直分布 (漂流物 B, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 2.0m, Wd10)

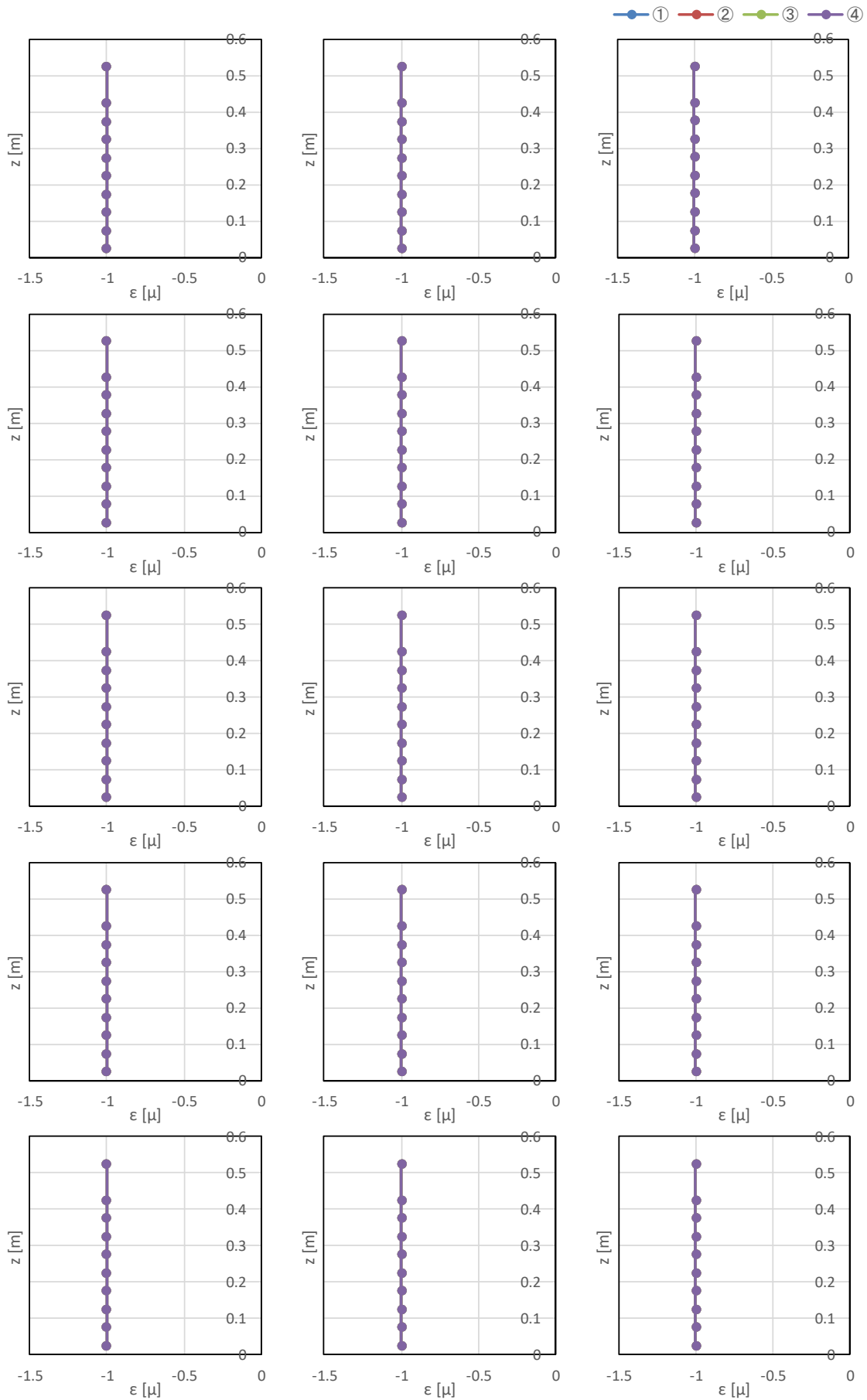


図- 8.42 ひずみの鉛直分布 (漂流物 C, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd20)

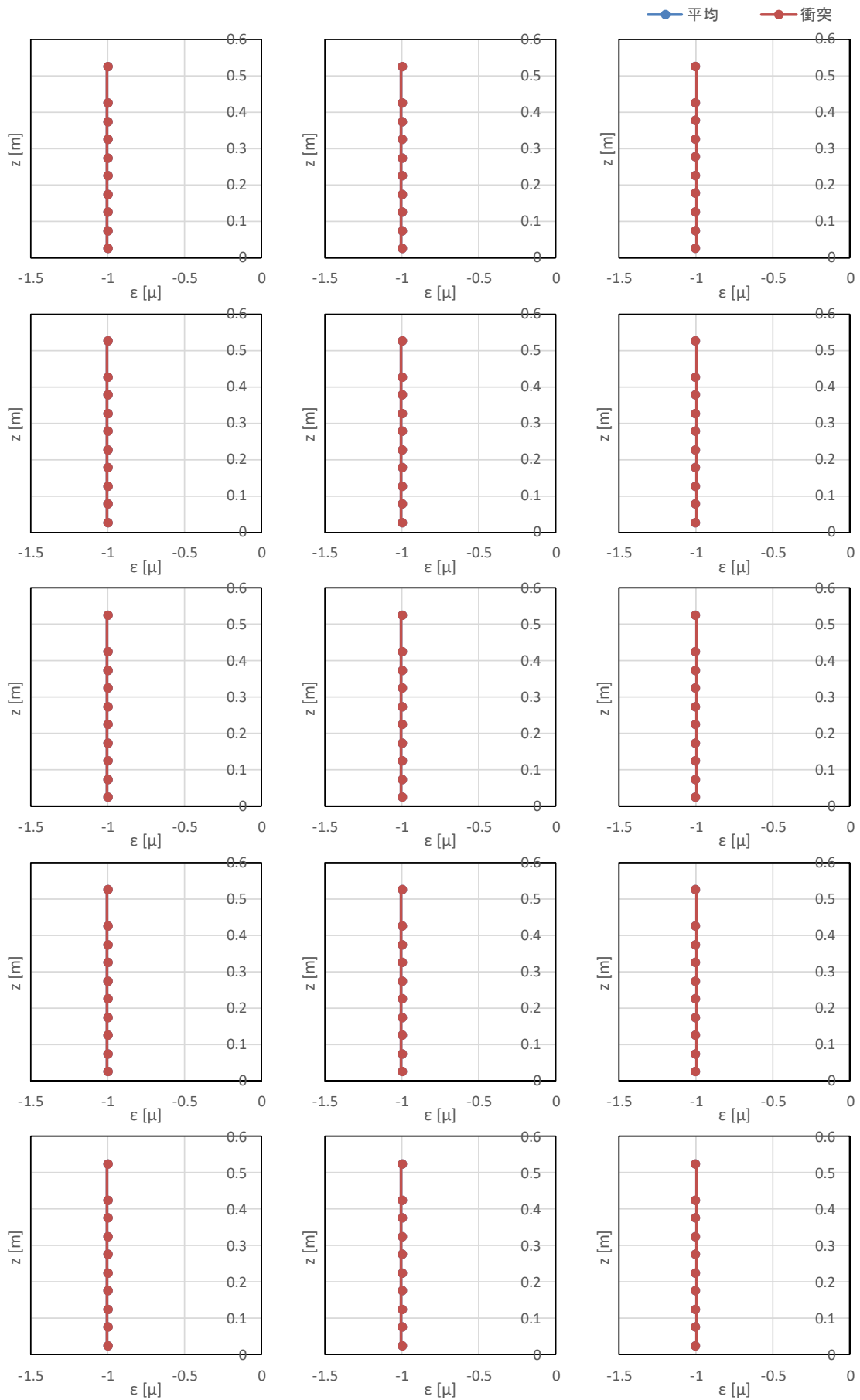


図- 8.42 ひずみの鉛直分布 (漂流物 C, 堤体位置 0.625m, 漂流物位置 0.5m, Wd20)

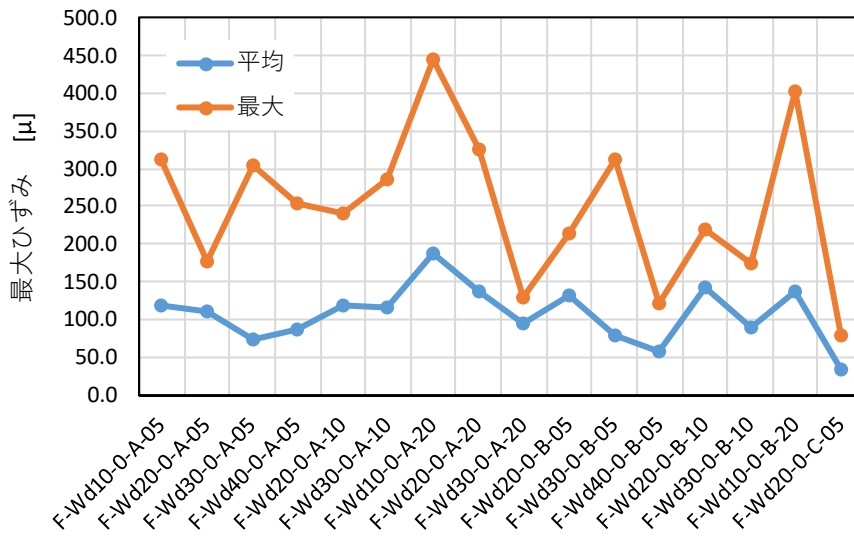
8.2.4. 最大ひずみ

表- 8.4, 図- 8.43 に, 水理試験において計測されたひずみの最大値をまとめて示す. ここでひずみは, 前項に示した, 波力によるひずみ成分を除いた衝突成分のみ(図中の”衝突”)の値である. また, 0.0 となっているのは衝突が確認できなかったケースであり, 平均はこれらの値を除いた平均を示す.

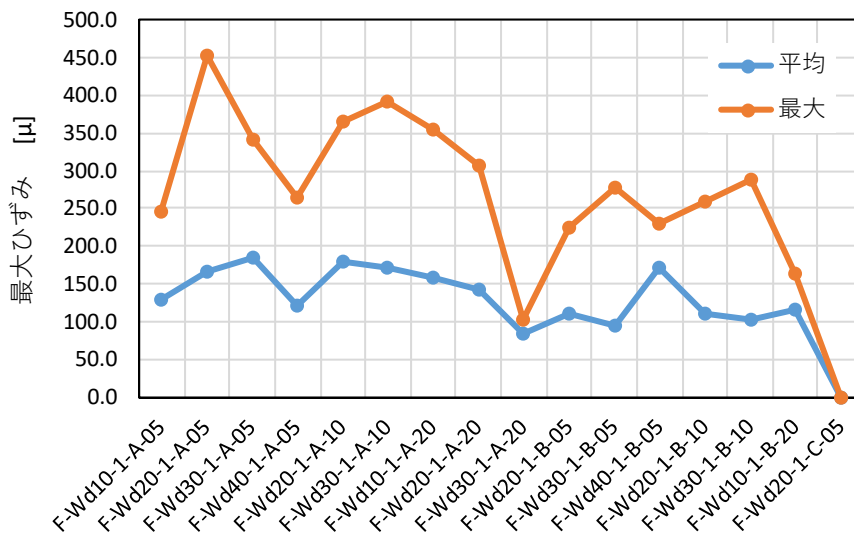
表- 8.4 最大ひずみ

unit: μ

No		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均	最大
1	F-Wd10-0-A-05	270.6	107.0	0.0	0.0	189.6	0.0	30.8	26.9	59.3	0.0	4.9	0.0	112.8	66.9	311.4	118.0	311.4
2	F-Wd20-0-A-05	124.3	0.0	177.0	127.4	0.0	0.0	32.7	0.0	68.1	0.0	0.0	0.0	154.1	95.4	0.0	111.3	177.0
3	F-Wd30-0-A-05	20.6	55.7	53.3	29.9	7.9	169.1	73.1	44.2	0.0	81.8	16.9	77.7	304.1	0.0	29.3	74.1	304.1
4	F-Wd40-0-A-05	25.1	123.9	47.7	35.7	27.3	58.8	0.0	45.8	46.0	146.3	0.0	102.5	95.0	253.4	118.8	86.6	253.4
5	F-Wd20-0-A-10	52.7	0.0	108.9	81.2	104.3	225.2	62.1	0.0	172.1	42.4	30.4	0.0	119.7	241.0	175.7	118.0	241.0
6	F-Wd30-0-A-10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	64.5	207.4	199.0	54.3	0.0	9.9	286.8	78.2	28.9	116.1	286.8
7	F-Wd10-0-A-20	0.0	301.0	59.2	0.0	59.3	0.0	5.6	114.9	165.6	445.1	81.0	222.0	0.0	424.2	0.0	187.8	445.1
8	F-Wd20-0-A-20	0.0	0.0	69.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	59.0	217.6	20.0	0.0	0.0	325.0	0.0	138.1	325.0
9	F-Wd30-0-A-20	0.0	0.0	129.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	59.7	0.0	0.0	0.0	94.4	129.2
10	F-Wd20-0-B-05	75.8	41.6	0.0	49.6	205.1	127.1	0.0	174.6	0.0	214.6	0.0	0.0	0.0	155.7	147.8	132.4	214.6
11	F-Wd30-0-B-05	0.0	0.0	96.8	0.0	0.0	24.5	26.7	148.3	0.0	22.4	78.0	29.2	313.3	20.9	22.5	78.3	313.3
12	F-Wd40-0-B-05	106.0	40.4	92.8	52.1	66.5	11.5	0.0	120.6	0.0	0.0	0.0	19.1	0.0	10.5	0.0	57.7	120.6
13	F-Wd20-0-B-10	0.0	0.0	218.9	0.0	0.0	0.0	189.0	220.1	216.7	47.6	152.3	25.7	0.0	66.9	0.0	142.1	220.1
14	F-Wd30-0-B-10	75.1	0.0	129.5	50.2	0.0	73.6	0.0	125.6	98.4	50.9	174.5	0.0	34.4	0.0	0.0	90.2	174.5
15	F-Wd10-0-B-20	0.0	0.0	0.0	71.8	212.9	189.3	88.9	402.8	0.0	0.0	0.0	0.0	42.4	44.5	47.5	137.5	402.8
16	F-Wd20-0-C-05	12.1	0.0	0.0	0.0	78.1	0.0	0.0	0.0	0.0	20.4	32.7	47.2	10.8	0.0	0.0	33.5	78.1
17	F-Wd10-1-A-05	0.0	0.0	16.6	0.0	238.0	0.0	147.7	77.0	0.0	0.0	0.0	54.1	0.0	0.0	244.6	129.7	244.6
18	F-Wd20-1-A-05	392.7	452.9	82.6	0.0	133.4	17.2	0.0	175.4	141.0	169.9	215.3	16.4	142.0	0.0	43.6	165.2	452.9
19	F-Wd30-1-A-05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	323.9	239.4	0.0	83.4	269.0	342.0	16.3	0.0	13.9	0.0	184.0	342.0
20	F-Wd40-1-A-05	122.9	0.0	79.3	0.0	0.0	0.0	70.1	104.8	39.8	158.0	0.0	131.2	0.0	0.0	264.3	121.3	264.3
21	F-Wd20-1-A-10	0.0	365.0	43.8	0.0	0.0	0.0	102.2	152.0	0.0	162.5	0.0	250.2	0.0	0.0	0.0	179.3	365.0
22	F-Wd30-1-A-10	208.4	73.5	0.0	391.8	72.6	0.0	283.6	94.1	0.0	60.3	86.6	339.5	93.1	0.0	0.0	170.4	391.8
23	F-Wd10-1-A-20	354.3	19.5	0.0	0.0	288.2	0.0	123.0	272.9	49.5	41.0	40.8	0.0	0.0	147.5	234.7	157.1	354.3
24	F-Wd20-1-A-20	0.0	40.6	284.8	0.0	307.4	169.6	0.0	0.0	112.8	0.0	0.0	82.8	118.2	22.2	0.0	142.3	307.4
25	F-Wd30-1-A-20	0.0	0.0	0.0	103.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	62.7	82.9	103.2
26	F-Wd20-1-B-05	195.3	50.6	23.0	140.9	123.9	120.1	104.5	138.2	49.1	106.4	0.0	0.0	224.9	78.7	70.7	109.7	224.9
27	F-Wd30-1-B-05	109.3	276.4	80.2	57.0	177.1	0.0	84.6	0.0	19.9	83.3	0.0	2.2	0.0	60.2	90.9	94.7	276.4
28	F-Wd40-1-B-05	214.5	230.7	0.0	115.5	135.7	0.0	0.0	207.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	131.6	0.0	172.6	230.7
29	F-Wd20-1-B-10	62.5	258.7	37.4	0.0	0.0	44.4	0.0	67.4	211.5	0.0	173.3	0.0	25.7	0.0	0.0	110.1	258.7
30	F-Wd30-1-B-10	0.0	234.7	0.0	30.5	0.0	106.6	0.0	18.3	20.2	37.3	7.8	186.9	287.6	0.0	0.0	103.3	287.6
31	F-Wd10-1-B-20	0.0	0.0	86.6	162.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	94.7	0.0	0.0	0.0	114.6	162.6
32	F-Wd20-1-C-05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



(a)堤体位置 0m



(b)堤体位置 0.625m

図- 8.43 最大ひずみ

8.2.5. 漂流物の接近速度

表- 8.5, 図- 8.44 に, 漂流物の接近速度を高速度カメラの映像より読み取ったものを示す. 接近速度は, 堤体から 30cm~10cm の 20cm の間の移動時間で距離を除いて求めることを基本としたが, 映像が不鮮明な場合には, これになるべく近い範囲で漂流物が確認出来る映像を選択して算定した. なおいくつかのケースでは, 映像による確認が不可能なものがあった.

堤体位置 0m と 0.625m を比較すると, 各ケースの接近速度の大小の傾向が類似であることが分かる. 図- 8.45 は, 堤体位置による接近速度の違いを比較したものであるが, 汀線までの接近速度と, 陸上部の遡上する時の接近速度には強い相関があることが分かる. 堤体位置 0m よりも 0.625m の場合の方が, 接近速度は大きい, 堤体位置 0m における接近速度が 2.0m/s 程度以上になると, 堤体位置 0.625m の接近速度が 2.2m/s 程度を上限値として, 低下傾向にある. 表- 8.5 によれば, これらの試験ケースは, 波種が Wd10 あるいは Wd20 の, 周期特性の短いケースである. 堤体位置 0.625m の場合, 汀線位置で入射波は部分反射するが, 周期特性が短いほど, この反射率が大きく, 陸域に遡上するエネルギーは小さくなる. このため, 周期特性の短い波形では, 陸域に遡上した場合の接近流速が小さくなっていると考えられる.

図- 8.44 には, 初期水深より \sqrt{gh} として求めた波速, および Wd10, Wd20, Wd30 に対し波高 0.2m, Wd40 に対し波高 0.1m を考慮した見掛けの水深で求めた波速を示した. これによると, 堤体位置 0m の場合は, Wd30, Wd40 については波高を考慮した波速と概略一致している. 一方, Wd10, Wd20 については, これよりも接近速度は大きい. 周期特性が短い場合には, 非線形性が強く, 波形の前面が前傾化するため, 水深から求めた波速よりも大きな流速で, 津波波形前面が進行していると考えられる. また Wd10 と Wd20 では, Wd20 の方が接近速度は大きい, Wd10 は沖合で碎波しているため, 碎波減衰により津波が低減していることが要因として考えられ, これらのことから, 津波の周期特性が短く, ただし沖合で有意な碎波をとまなわない場合に接近流速が大きくなることが分かる.

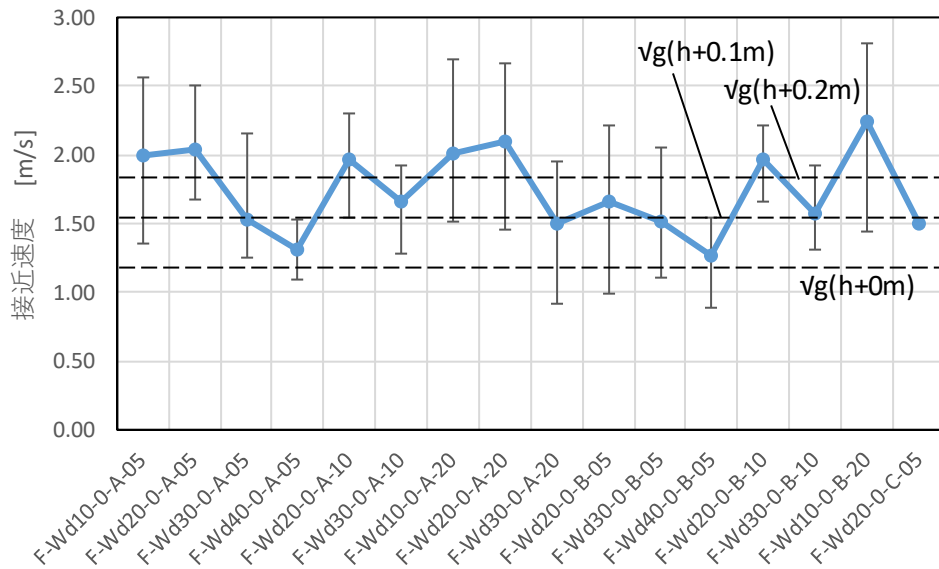
漂流物の違いによる接近速度の違いを比較すると, 顕著な傾向は確認できない. このことから, 漂流物の動き出しについては, 漂流物の違いの影響は小さいと推察される.

表- 8.5 漂流物の接近速度

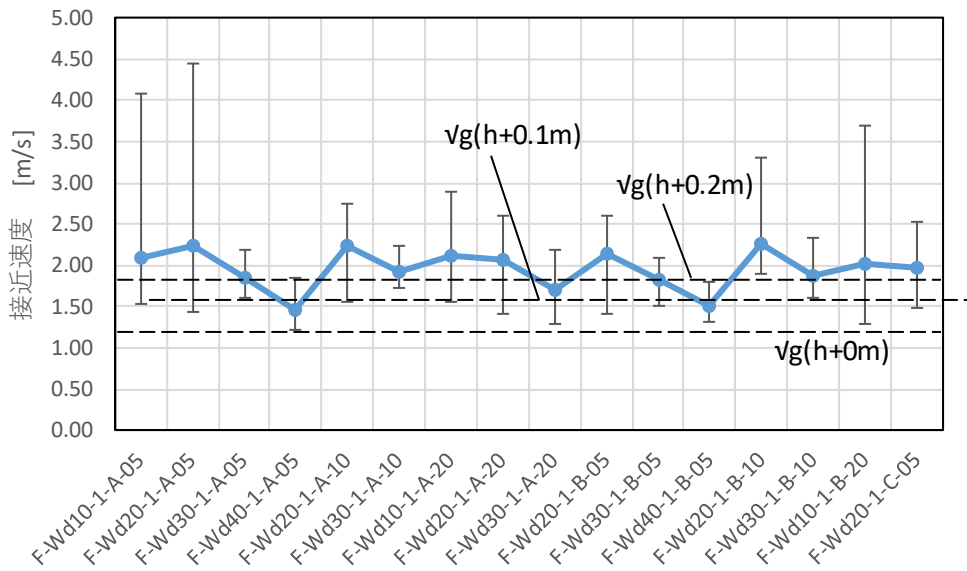
unit:m/s

No	ケース名	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均	最大	最小
1	F-Wd10-0-A-05	1.71	2.56	1.49	1.98	2.25	1.82	1.98	1.35	2.25	2.50	2.33	2.20	2.06	1.89	1.53	1.99	2.56	1.35
2	F-Wd20-0-A-05	2.02	1.94	2.30	2.50	1.89	2.02	2.15	1.68	1.94	1.92	1.90	1.94	2.22	1.92	2.35	2.05	2.50	1.68
3	F-Wd30-0-A-05	1.68	1.50	1.52	1.31	1.64	1.28	1.89	1.26	1.69	2.15	1.39	1.30	1.48	1.40	1.56	1.54	2.15	1.26
4	F-Wd40-0-A-05	1.33	1.27	1.50	1.54	1.23	1.10	1.33	1.44	1.27	1.20	1.36	1.28	1.20	1.33	1.29	1.31	1.54	1.10
5	F-Wd20-0-A-10	1.80	1.68	1.55	1.79	2.22	1.94	2.25	1.85	1.80	2.08	2.15	2.06	1.94	2.13	2.30	1.97	2.30	1.55
6	F-Wd30-0-A-10	1.75	1.92	1.71	1.28	1.54	1.82	1.61	1.71	1.65	1.68	1.49	1.61	1.64	1.68	1.72	1.66	1.92	1.28
7	F-Wd10-0-A-20	1.64	2.53	1.77	1.69	1.65	1.52	1.61	1.69	2.47	1.75	2.70	1.74	2.35	2.47	2.53	2.01	2.70	1.52
8	F-Wd20-0-A-20	2.53	1.98	1.80	2.67	1.69	1.46	2.27	2.53	1.59	2.27	2.17	2.11	2.00	2.44	2.08	2.11	2.67	1.46
9	F-Wd30-0-A-20	1.32	1.54	1.87	1.63	1.72	0.92	1.35	1.67	1.77	1.11	1.22	1.96	1.87	0.97	1.56	1.50	1.96	0.92
10	F-Wd20-0-B-05	0.99	1.72	1.89	1.72	1.19	1.92	1.28	1.36	2.13	2.15	1.48	2.02	1.04	1.89	2.22	1.67	2.22	0.99
11	F-Wd30-0-B-05	1.68	1.68	1.69	1.45	1.45	1.11	1.65	1.18	1.44	1.32	1.83	1.60	2.05	1.16	1.49	1.52	2.05	1.11
12	F-Wd40-0-B-05	1.32	1.42	1.37	1.36	1.39	1.33	1.33	1.55	0.89	1.27	1.29	1.04	1.23	1.19	1.09	1.27	1.55	0.89
13	F-Wd20-0-B-10	1.74	2.06	2.13	1.87	2.13	1.89	2.13	2.22	2.04	1.74	1.98	1.92	1.67	1.92	2.00	1.96	2.22	1.67
14	F-Wd30-0-B-10	1.85	1.45	1.92	1.40	1.79	1.59	1.45	1.68	1.65	1.42	1.55	1.56	1.46	1.63	1.31	1.58	1.92	1.31
15	F-Wd10-0-B-20	2.02	1.79	2.22	2.30	2.53	2.11	2.67	2.78	2.15	1.85	1.68	1.45	2.63	2.63	2.82	2.24	2.82	1.45
16	F-Wd20-0-C-05	1.43	1.37	1.04	1.39	2.08	1.20	1.38	1.98	1.25	1.74	1.77	1.55	1.59	0.69	1.98	1.50	2.08	0.69

No	ケース名	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均	最大	最小
17	F-Wd10-1-A-05	1.53	2.56	1.64	1.94	2.17	1.89	4.08	1.83	2.02	2.08	1.79	2.11	1.60	2.27	1.90	2.09	4.08	1.53
18	F-Wd20-1-A-05	2.25	1.43	4.44	2.33	2.17	1.82	2.25	2.17	2.30	1.92	2.25	1.98	2.41	1.71	2.20	2.24	4.44	1.43
19	F-Wd30-1-A-05	1.74	2.17	1.64	1.99	1.90	1.79	2.06	1.63	1.75	1.98	1.72	1.61	2.20	1.82	1.67	1.84	2.20	1.61
20	F-Wd40-1-A-05	1.69	1.30	1.21	1.52	1.36	1.54	1.53	1.39	1.35	1.85	1.37	1.52	1.26	1.41	1.54	1.46	1.85	1.21
21	F-Wd20-1-A-10	2.35	2.50	2.11	2.04	2.44	2.25	2.74	1.85	1.56	2.27	2.38	2.41	2.25	2.17	2.21	2.24	2.74	1.56
22	F-Wd30-1-A-10	1.98	2.00	1.75	2.11	1.75	1.72	2.04	2.00	2.25	2.11	1.85	1.74	1.83	1.79	1.89	1.92	2.25	1.72
23	F-Wd10-1-A-20	2.13	2.50	2.04	1.55	2.15	2.02	2.67	1.68	1.79	2.90	2.50	1.80	1.75	1.83	2.50	2.12	2.90	1.55
24	F-Wd20-1-A-20	1.69	2.17	2.35	1.98	2.60	2.30	1.41	1.64	2.50	1.92	2.30	2.04	1.71	2.08	2.38	2.07	2.60	1.41
25	F-Wd30-1-A-20	1.30	1.94	1.56	2.20	1.85	1.52	1.63	1.71	1.68	1.79	1.35	1.57	1.71	1.63	2.13	1.70	2.20	1.30
26	F-Wd20-1-B-05	2.22	2.33	1.41	2.16	2.07	1.74	2.53	1.92	2.60	2.40	1.96	2.35	1.96	2.27	2.27	2.15	2.60	1.41
27	F-Wd30-1-B-05	1.89	1.77	1.89	1.80	1.69	1.92	1.92	1.79	1.64	1.92	1.83	2.00	1.65	2.08	1.52	1.82	2.08	1.52
28	F-Wd40-1-B-05	1.43	1.50	1.36	1.59	1.49	1.63	1.52	1.31	1.59	1.80	1.39	1.45	1.60	1.50	1.44	1.51	1.80	1.31
29	F-Wd20-1-B-10	2.27	2.53	2.00	3.30	1.94	2.44	2.33	2.17	2.04	2.06	2.44	1.89	1.96	-	2.13	2.25	3.30	1.89
30	F-Wd30-1-B-10	1.80	1.87	1.61	2.04	1.85	2.33	1.89	1.68	1.77	1.74	1.83	1.72	2.11	1.89	1.96	1.87	2.33	1.61
31	F-Wd10-1-B-20	1.75	1.53	2.82	1.49	1.72	1.80	1.65	2.30	1.94	1.69	-	3.70	1.30	2.78	1.77	2.02	3.70	1.30
32	F-Wd20-1-C-05	1.49	2.08	-	1.69	1.98	2.53	1.96	2.38	1.92	1.52	1.83	2.53	1.79	1.92	1.83	1.96	2.53	1.49



(a)堤体位置 0m



(b)堤体位置 0.625m

図- 8.44 漂流物の接近速度

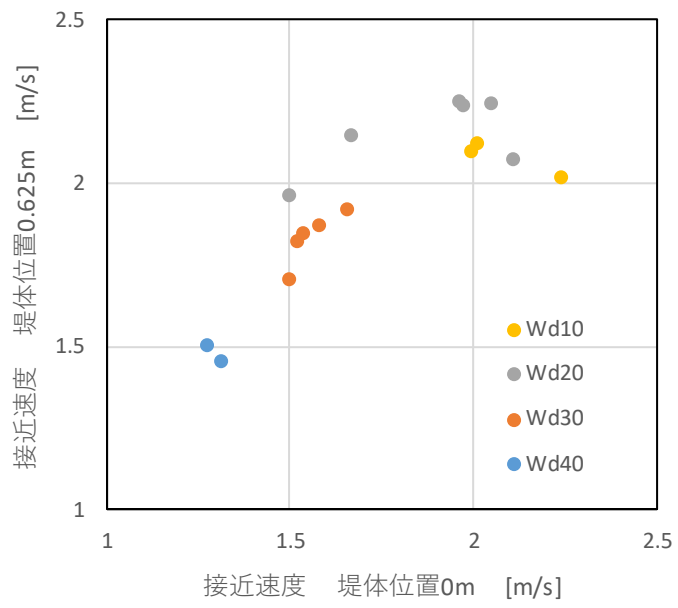


図- 8.45 堤体位置による接近速度の比較