

令和 6 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（黒津波影響）
（令和 6 年度分）

大成建設株式会社

令和 7 年 1 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. 事業概要	1-1
2. 知見調査	2-1
2.1. 有識者ヒアリング	2-1
2.2. 文献調査	2-7
3. 波圧試験	3-1
3.1. 試験概要	3-1
3.2. 試験方法	3-2
3.2.1. 試験装置	3-2
3.2.2. 試験条件	3-4
3.2.3. 計測項目	3-6
3.2.4. 試験手順	3-8
3.2.5. 試験ケース	3-8
3.3. 試験結果	3-10
3.3.1. 粘性評価結果	3-10
3.3.2. 波検定結果	3-11
3.3.3. 通過波試験結果	3-12
3.3.4. 衝突試験結果	3-66
4. 試験・解析の方法調査	4-1
4.1. 断面二次元試験	4-1
4.2. 平面二次元試験	4-2
4.3. シミュレーション解析	4-3
5. 結果の整理	5-1
巻末資料	補-1
波圧試験補足資料	補-1
(1) 通過波試験における各ケースの時系列データ	補-2
(2) 衝突試験における各ケースの時系列データ	補-60
(3) 衝突試験における各ケースの圧力計による波力 ΣpA 最大時の圧力鉛直分布	補-136

1. 事業概要

本事業は、防潮堤等の津波防護施設の耐津波設計評価に関連する内容として、ヘドロ等の泥・シルト性堆積物を含む津波（以下「黒津波」という）に関する文献等を調査・整理する。黒津波の波圧影響に関する水理試験を実施する。底質の設置位置の影響評価に関する試験・解析方法の調査を行う。過去の関連事業も含め、ヘドロ等の巻き上がりや波圧への影響に関するデータを整理・分析することで、黒津波の発生条件やその特性等に係る知見の拡充を実施する。

(1) 知見調査

①有識者ヒアリング

黒津波に関わる知見及び本事業及び関連事業で、これまで実施した試験等で得られた結果に対する整理・分析方法及び課題等について、2名程度の有識者へヒアリングを実施する。得られた結果については、「(2) 波圧試験」「(3) 結果の整理・分析」「(4) 試験・解析の方法調査」の計画やとりまとめに適宜反映する。

②文献調査

「(4) 試験・解析の方法調査」の実施に際し、関連する知見を収集する。東日本大震災後の陸域におけるヘドロ等の堆積物調査に関わる新たな知見についても調査する。成果報告書とは別に、図表等も含めて各文献を1,2ページ程度で文献調査の結果を取りまとめる。

(2) 波圧試験

波圧試験では、ヘドロ等を模した底質を含む水を堤体に衝突させることで、水密度と堤体作用波圧の関係を計測・整理する。最少でも合計120ケース実施する。実施に当たっての条件設定などの詳細については、規制庁担当者と協議することに加え、下記に留意する。

- ・ 「(3) 結果の整理・分析」を適切に実施するに当たり、不足している知見を補完可能な試験条件を選定する。
- ・ 底質は、粒径1 μ m程度のものを含める。
- ・ 底質を含む水の密度・粘性が、波圧・波力に与える影響を確認する。
- ・ 底質を含む水の密度・粘性が、波形（最大波高等）に与える影響を確認する。
- ・ 流速時刻歴においても、可能な限り計測する。
- ・ 撮影した高速度カメラの映像は、堤体近傍の浸水深時刻歴及び堤体に作用する波力時刻歴と時間を同期した上で、一体の動画データとして提出する。

(3) 結果の整理・分析

本事業及び関連事業で得られた試験結果に対して、下記のとおり整理・分析する。

- ・ 堤体に作用する波圧・波力について、底質を含む水の密度以上に増加しうる試験条件を整理し、理由を分析する。
- ・ 水密度による波高低減については、その影響を排除した条件を想定したうえで、整理・分析を実施する。
- ・ 相似則の影響についても分析する。
- ・ 整理・分析結果について、2名程度の有識者へヒアリングを実施する。

(4) 試験・解析の方法調査

①断面二次元試験

ヘドロ等を模した底質の設置位置が変化するときの、汀線付近における津波の水密度を計測・整理するための、断面二次元試験の方法を調査する。実施に当たっては、下記に留意する。

- ・ シルト性堆積物の巻き上がりと海底地形及び波形状等に関する知見を収集し、それらと計画案との対応について示す。
- ・ 海底地形及び波形状等について、シルト性堆積物の巻き上がりの影響が大きい条件を調査する。

②平面二次元試験

ヘドロ等を模した底質の設置位置が変化するときの、汀線付近における津波の水密度を計測・整理するための、平面二次元試験の方法を調査する。実施に当たっては、下記に留意する。

- ・ シルト性堆積物の巻き上がりと防波堤等を有する港湾形状及び海底地形、波形状等に関する知見を収集し、それらと計画案との対応について示す。
- ・ 防波堤等を有する港湾形状及び海底地形及び波形状等について、シルト性堆積物の巻き上がりの影響が大きい条件を調査する。

③シミュレーション解析

①及び②の結果を再現可能かつ実環境に展開可能な、シミュレーション解析方法を調査する。実施に当たっては、下記に留意する。

- ・ 令和3, 4, 5年度実施の過去事業で得られた、底質の巻き上がり及び破壊に関する知見の活用についても検討する。

2. 知見調査

2.1. 有識者ヒアリング

知見調査のうち有識者へのヒアリングについては、3名（A～C）の有識者に2回実施し、意見を頂いた。

- 1回目：黒津波に関わる知見及び本事業及び関連事業について
- 2回目：本事業の整理・分析結果について

2.1.1. 黒津波に関わる知見及び本事業及び関連事業について

(1) 有識者 A

①現地調査

- ・実地での検討をする場合には、どこまでの範囲を調査すべきなのか（どこまでの範囲に底泥やヘドロがあれば黒津波による影響があるのか）や、どのような内容の調査をすべきなのかを明らかにする必要がある。

②巻上試験

- ・巻上げ速度や流動化推定層厚等のデータは数値解析のモデル化に用いることができるため、有用であると考えられる。また、流動化推定層厚の判定に用いたサンドベッド内の圧力分布については、より細かく時間変化を確認した方がよい。

③波圧試験

- ・流体密度、津波高、碎波位置、波形勾配等が波力に影響がある項目について、それぞれの関連性を整理するとよい。
- ・試験結果のばらつきを考慮し、波力の最大値・最小値・平均値としてまとめる。
- ・流体密度に対する最大波力のみでなく、波力エネルギーとしても比較することも検討する。
- ・試験結果と FEMA など基準による海水密度の 1.1 倍を考慮した津波荷重との整合性についても確認する。
- ・本事業の試験内容について了解した。

④最終的なとりまとめ

- ・防潮壁に作用する波力だけでなく、陸上に遡上して堆積する底泥の量、機械類の停止リスク、人体への健康被害などの影響にも着目する。
- ・被災後の早期復旧を目的とし、必要な人員・資機材・工事車両や期間など復旧計画に資する情報を提供することも検討する。

(2) 有識者 B

①巻上試験

- ・底質の種類（降伏せん断応力）に関わらず，流れの圧力勾配が大きくなると底質の流動化推定層厚が頭打ちになっているように見える．

②波圧試験

- ・流体密度が大きくなるほど砕波点が沖側に移動する原因が分からないが，非常に興味深い．
- ・類似実験より，濁水の濃度が低いときの波力は淡水の波力に比重倍掛けた値よりも大きくなることがあった．これは，後続波の微小な水面変動が原因と考えられるため，波圧試験では着目する．
- ・類似実験より，カオリンを混入させた濁水の津波が遡上する際に，波の先端部が横断方向に凸の分布を持っていた（淡水では横断方向の分布はない）．側壁による摩擦の影響とも考えられるが，原因は分かっていない．なお，土石流の流下実験においても同様の傾向があることを確認している．このことから，波圧試験では上面からの映像を記録する方がよい．

(3) 有識者 C

①現地調査

- ・ 今後，採取した現地試料を粘性試験する際には，含水比も併せて確認する．

②巻上試験

- ・ 底質内圧力の時間変化より流動化推定層厚を定義しているが，実際には最大圧力勾配に至るまでに流れで巻き上げられる底質があるため，巻上げ＋水平移動による層厚となる．
- ・ Fluid Mud 層厚を推定する方法として，水・Fluid Mud・底泥それぞれの密度による圧力と得られた圧力分布の比較が考えられる．

③波圧試験

- ・ 本事業の試験内容について了解した．

2.1.2. 本事業の整理・分析結果について

(1) 有識者 A

- ・淡水および塩水と濁水のエネルギー減衰の違いとして、粒子含有の有無＝粘性の影響が考えられる。
- ・黒津波評価の取りまとめとして、密度・粘性（粒子含有）・津波波形等の各要因が、砕波位置や先端波形、波力や波圧分布等にどのような影響があるのかを、空間的に図化して整理する。
- ・海域（ウェット）から陸域（ドライ）に遡上する状況や防潮壁に衝突する状況の違いなど定性的な評価も加える。
- ・試験の方法調査のうち平面二次元試験では、まず港湾内・外にそれぞれ底質を広範囲に配置して、その影響を確認することが必要である。その後、部分的に底質を配置し、その位置による影響を確認することがよい。
- ・試験ケースに限りがあるため、試験結果をキャリブレーションとして用い、数値シミュレーションでの検討を進める。

(2) 有識者 B

- ・津波 W2,W3 の場合、汀線 H6 で波形が同じであっても、その後に淡水および塩水では碎波せずに陸上部を遡上するが、濁水は汀線を過ぎた辺りで碎波する。これは、流体の粘性による影響により、濁水は津波の先端波形が前傾化し碎波したと考えられる。そのことから、塩水の場合に流体密度の増加に伴って波力は増大するが、濁水の場合は碎波によるエネルギー減衰のため波力が減少すると考えられる。
- ・類似実験より、濁水の濃度が低いときの波力は淡水の波力に比重倍掛けた値よりも大きくなることがあった。これは、「後続波の微小な水面変動」が原因と考えられたが、本試験では同じような現象は確認されなかった。
- ・類似実験より、カオリンを混入させた濁水の津波が遡上する際、波の先端部が横断方向に凸の分布を持っていた（淡水では横断方向の分布はない）が、本試験では確認されなかった。
- ・試験の方法調査のうち平面二次元試験では、有光ら(2017)¹⁾、有光・川崎(2018)²⁾による港湾内の砂移動実験で堆積・洗掘しやすい場所が示されているため、底質の設置位置の参考になると考えられる。

参考文献

- 1) 有光剛・川崎浩司・二村昌樹：大規模渦を伴う津波による砂移動・地形変化に関する数値シミュレーション，土木学会論文集 B2(海岸工学)，73 巻，2 号，pp.I_643-I_648，2017.
- 2) 有光剛・川崎浩司：津波来襲時の砂移動・地形変化に及ぼす海域狭窄部の影響，土木学会論文集 B3(海洋開発)，74 巻，2 号，pp.I_216-I_221，2018.

(3) 有識者 C

- ・水平床 F かつ壁位置 P3（汀線から 30cm 陸側）のケースにおける密度の増加に伴う最大波力の変化は、シリカフュームを含む濁水の場合に小さくなり、塩水の場合に大きくなる傾向が確認できた。これは、流体の種類によらず汀線位置で波高と波形を一致させたが、陸上を遡上する際に濁水は粒子を含む分、エネルギー減衰が大きくなり、波力が低減した可能性が考えられる。一方、塩水は溶解して均質な流体で淡水と同質のため、エネルギー減衰が比較的小さく、流体密度が大きい分、最大波力が大きくなったと考えられる。
- ・塩水(SW105, SW110)の最大波力について、すべてのケースで衝撃波力が支配的となっている。しかし、サーボ式波高計による壁前面(H8)の打上り高がうまく捉えられていない可能性があるため、波力の時系列だけでも衝撃波力は抽出できることから再確認する。
- ・試験の方法調査のうち平面二次元試験において、部分的に底質を配置しても巻き上がった底質が汀線付近に到達する可能性は低い（濃度が低いため正しく計測が出来ない）ため、波力の増大もほとんどないと考えられる。
- ・濃度が低い場合には濁度計による計測は可能であるが、どれだけ洗掘したかは巻き上がった底質の再堆積や排水等の問題があり計測が困難と考えられる。

2.2. 文献調査

海底に堆積した底質（土砂やヘドロ等）を含有した黒津波が与える影響について、過去の文献等を調査した。本調査では、以下の内容に主眼を置き、現地調査・水理試験・数値解析の項目に分類して文献を整理した。なお現地調査については、東日本大震災後の陸域におけるヘドロ等の堆積物調査に関わる知見についても調査した。

- ・現地調査；ヘドロ等の分析結果（物性、有機物量等）について
- ・水理試験；ヘドロ等の巻き上げによる密度の変化が波力に及ぼす影響について
- ・数値解析；ヘドロ等の粒径の細かい底質を含む津波の数値シミュレーションについて

以降では、項目ごとに文献調査結果を示す。

2.2.1. 現地調査

北川ら(2012)¹⁾は、東北地方太平洋沖地震津波後における農地復旧のため、海水の流入、ヘドロや海砂などの堆積による農地土壌の理化学性への影響について把握するとともに、津波被災農地の短期から長期にわたる各段階の問題点を整理し、今後の取り組みのための基礎的知見を示した。調査は、津波で被災した宮城県内 15 地点と福島県内 2 地点の農地の土壌等を採取し、土壌理化学性の分析を行った。そのうち土壌物理性は、土性（農学会法）を触感による判定で分析し、津波被災農地に堆積したヘドロと堆砂の土性の分布は、地域別に同質の粒径の堆積物が固まって分布する傾向が見られた。これは、津波により隣接する海底の堆積物が運ばれて堆積した際、海岸の形状や湾、港などの違いによる海底堆積物の粒径の差が影響したものと考えられた。また、津波に対して堤防の役割を果たした高速道路の手前に砂が、奥に行くほど粒径の細かいヘドロが堆積する傾向が現場踏査を含めて確認された。

駒井ら(2012)²⁾は、東日本沿岸における津波堆積物の性状と化学的特性を中心に、津波堆積物に含有する重金属類や塩分の組成について表層土壌や海底堆積物と比較した結果について示した。東日本の沿岸地域で約 200 地点を選定し、多くの地域で津波被害により海岸線の地形が変化している箇所があったが、海岸線から浸水限界までのほぼ中間あるいは特徴的な堆積状態を示す地点で試料を採取した。津波堆積物の試料は、人為的な混在物を除去するなどの前処理を行った後に、実験室において化学分析、微生物分析、粒度分析などを実施した。地質調査により、実際に観察された津波堆積物は砂が中心であるが、砂と泥の数枚の層状の構造を形成することが認められた。このことは、津波が第一波から数波にわたり断続的に陸域方向に押し寄せ、その後陸域から沿岸域に引き波となったことを表している。また、海岸線付近では砂質の堆積物、中間付近では泥質と砂質の互層、浸水限界では塩水のみが存在していることがわかった。津波堆積物の堆積状態は元の地形に依存し、田畑のような窪地や湿地帯では厚く堆積し、市街地では比較的薄い堆積状況になっていた。堆積物の平均厚さは 5~10cm 程度で、最大では 40cm 以上に及ぶ地点もあった。

橘(2011)³⁾は、東日本震災による津波によって被災した仙台平野周辺を対象とし、どの地点でどのような津波堆積物が形成されたのか記録・記載することを目的として行った。2011 年 9 月に仙台平野南部の亘理町南端付近（海岸から約 4km 内陸まで津波が達した）において、海岸から山側に向かう 12 地点での津波堆積物の性状を記録した。その結果、津波で浸水した 4km 区間のうち、明瞭な砂層として津波堆積物が認定できたのは海岸線から 2.5km 程度であった。それより内陸側に行くに従って識別は次第に困難となった。津波堆積物は内陸に向かって薄層化および細粒化する傾向があった。

矢野ら(2020)⁴⁾は、沿岸域で底泥の輸送現象を解析する数値モデルの限界せん断応力などのパラメータ設定を行うため、海中の底泥に対して平行な流れによる巻き上げを測定可能な装置開発を試み、実海域での測定実験から効率的に巻き上げのパラメータが測定できるかを検証した。装置で記録した水中カメラの画像から巻き上げが起こった時刻の流速値に対応する底面せん断応力 τ_b を完全粗面对数則による摩擦速度 u_* から算出し、限界せん断応力 τ_{cr} を求めている。浸食速度パラメータ M は、巻き上げ発生後の懸濁物質濃度(SS)測定値から、各時刻の巻き上げフラックス E を算出し、 E τ_b 図表にプロットして直線勾配より M を求める。現場に適用した結果、既往研究との比較から、 τ_{cr} は小さく M は大きめであった。

参考文献

- 1) 北川巖, 友正達美, 原口暢朗, 塩野隆弘, 若杉晃介, 芦田敏文, 瑞慶村知佳: 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震による津波被災農地の堆積物・土壌の理化学的特徴, 農村工学研究所技報, 第 213 号, pp.39-51, 2012.
- 2) 駒井武, 川辺能成, 原淳子, 坂本靖英, 張銘: 東日本沿岸における津波堆積物の性状に関する緊急調査—津波堆積物に起因する土壌汚染リスク—, GSJ 地質ニュース, Vol.1, No.6, pp.181-184, 2012.
- 3) 橘徹: 堆積物から読み解く津波現象, 平成 23 年度中国地方建設技術開発交流会, 2011.
- 4) 矢野真一郎, 安部哲平, 松山明人, 井手貴仁: 底泥巻き上げに関するモデルパラメータの現地測定装置の開発, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.76, No.2, pp.I_798-I_803, 2020.

2.2.2. 水理試験

志方ら(2024)¹⁾は、波力が増大する事象の有無および発生条件を把握する目的で、砂・シルト・粘土を含む津波を模擬した水理模型実験を行った。本実験では、水路(全長 13.3m, 水路幅 0.2m)の上流側に設けた貯水槽の水深、急開ゲートの開口高を調整して 3 タイプの津波流れを水路内に模擬し、真水・土砂水・シルト泥水・粘土泥水の 4 種類とした。泥水を用いた実験は固定床として流体密度(比重 1.2)を設定し、土砂水を用いた実験は移動床として砂層からの巻上げによって流体密度を増大させた。作用壁は全幅壁と柱状壁の 2 種類とし、計測された圧力は鉛直積分して単位幅当りの水平波力を算定している。実験の再現性を検証するため、同一条件で 3 回実施した。通過波検定の結果より、最大浸水深は真水と泥水で同程度、土砂水の最大浸水深は真水の 1.43 倍と顕著に大きい。これは砂の巻上げに伴うエネルギー減衰が要因である。最大波力の発生時間は、波先端が全幅壁に衝突し、上方へ跳ね上がった水塊が水面に落水して主流と混合する時間と一致しており、既往の研究事例とも整合した。全幅壁に作用する最大波力のばらつきは、粘土泥水のケースで真水の約 2 倍を示すが、その他のケースは真水と概ね同程度の結果が得られた。また、衝撃波圧作用時の波力にややばらつきがみられるが、持続波圧作用時の波力のばらつきは小さい結果となった。全幅壁に作用する最大波力と水面角度・先端流速の関係より、真水は最大波力の大きさに応じて水面角度も大きくなる傾向である。一方、泥水は水面角度が最大波力の大きさに依存せずにばらつく結果が得られた。また土砂水及び泥水の先端速度は、真水に対して約 1.0~1.1 倍と真水に比べやや大きいが、土砂水及び泥水の最大波力に顕著な増大は確認されず、いずれの条件においても流体密度の増加に伴う静水圧の増分程度に収まった。作用壁に作用する最大波圧より、底面近傍で差異が見られ、真水に比べてシルト泥水は大きく、粘土泥水は小さい結果であった。これは、流体の種類によって底面近傍で大きな波圧が生じる可能性を示唆している。

松富・有川(2024)²⁾は、移動床土砂として気乾シルトを用いた水理実験より、シルト床に対する氾濫流抵抗則を検討して氾濫流抵抗則の汎用化を図り、移動床から取り込む土砂体積を考慮し、移動床中に残す流体体積は無いとする津波氾濫流理論を示して理論の汎用化を行った。その理論を用いて氾濫流の遡上や先端部水面形、氾濫流先端部の各横断面での運動量フラックスや比力、先端部での土砂移動を論じている。実験水路は、幅 0.3m のすべり台状の直線開水路で、すべり台斜面下端には土砂を敷くための水平部、その下流端に氾濫流先端部の氾濫水量を調節して採水するための短く緩い上り斜面部等を設けている。津波氾濫流はゲート急開流れで模擬しており、上・下流端に設置した超音波式水位計より入射氾濫水深を測定し、水位計間の距離と氾濫流先端が水位計間を通過に要する時間から氾濫流先端移動速度を評価した。使用土砂は市販のシルトや海岸で採取の天然砂で、炉乾燥後に水路水平部に投入し、水平に均した。実験は各ケース 1 回である。実験結果より、氾濫水比重 ρ/ρ_w は気乾砂質土床では入射フルード数 F_{ri} と相対入射氾濫水深 h_i/d_{50} の両方へ依存し、気乾シルト床では ρ/ρ_w の上限値で大きく散らばっているが、 h_i/d_{50} には依存していないことが分かった。また摩擦損失係数 K は、 F_{ri} に対して気乾の砂質土床とシルト床において同様な依存傾向を示し、 F_{ri} が同じであれば、気乾シルト床に対しては気乾砂質土床に対する K の上限値程度で、 h_i/d_{50} には依存していないことが分かった。

海田ら(1988)³⁾は、底泥の種類や含水比を変えて種々の底面せん断応力のもと、比較的柔らかい底泥を対象にして巻き上げ実験を行い、巻き上げの限界せん断応力、SS の経時変化、水路に残存する底泥の固体分率と粒度の鉛直方向の変化、底泥表層部の流動状況と粒子群の配向性の変化を

明らかにした。本実験の結果より、巻き上げの限界せん断応力は各底泥で異なるが、固体分率の関数として表せることが分かった。また底泥の巻き上げのパターンは、初期の急速巻き上げ期とその後の緩速巻き上げ期に分けられ、2 時間程度通水すると巻き上げが停止し、初期の巻き上げ速度 $E_{t=0}$ は無次元有効せん断応力 $(\tau/\tau_{ce} - 1)$ の関数で表わされることを示した。同一せん断応力の場合には底泥の固体分率が低いほど、同一固体分率の場合はせん断応力 τ が大きいほど急速巻き上げ期の持続時間 T が短くなり、巻き上げが短時間で停止することが分かった。巻き上げ速度の時間的な低下は底泥表層部の固体分率の増加に起因し、選択的巻き上げによる底泥表層部の粒度の粗粒化は 2 次的影響を及ぼすに過ぎないことを示した。底泥表層部の固体分率の増加は、底泥がせん断応力を受けて流動し、表層部の粒子群が流れ方向に配向し、間隙水が排出されるために起こることが分かった。

参考文献

- 1) 志方建仁, 木原直人, 鈴木和磨: 砂・シルト・粘土を含む津波による波力に関する水理模型実験, 土木学会論文集, Vol.80, No.17, 24-17195, 2024.
- 2) 松富英夫, 有川太郎: 移動床斜面を遡上する津波氾濫流理論の汎用化, 土木学会論文集, Vol.80, No.17, 24-17049, 2024.
- 3) 海田輝之, 楠田哲也, 二渡了, 栗谷陽一: 柔らかい底泥の巻き上げ過程に関する研究, 土木学会論文集, 第 393 号, II-9, pp.33-42, 1988.

2.2.3. 数値解析

中村ら(2024)¹⁾は、底質混合による流体の見かけの密度と粘度の変化を考慮可能な 3 次元流体・構造・地形変化・地盤連成数値計算モデル FS3M (three-dimensional coupled fluid-structure-sediment-seabed interaction model)を用いて水理実験の再現計算を行い、水理実験結果との比較によりモデルの再現性を確認した。また底質濃度を変化させた数値実験を実施し、波力に与える底質濃度の影響を検討した。解析モデルでは、水理実験同様、底質を混ぜていない清水あるいは底質のカオリン ($d_{50}=8\mu\text{m}$, $\rho_s=2,650\text{kg/m}^3$)を均一に混ぜた濁水を静水深 100mm で貯水部に設定し、カオリンの体積濃度は実測した 2.3%と 9.7%を用いた。ゲートを 100mm 上方まで急開して段波状の津波を発生させ、ゲートの下流に設置した高さ 80mm の鉛直壁に作用させた。なお同じ条件で実験を 6~7 回実施している。水位に関して水理実験と比較すると、再現計算では WG2 において波の立上り付近の水位を過小評価している。原因として、水理実験では超音波式水位計で水面の位置を計測している一方、再現計算では VOF 関数 F を水路底面から積分して水位を計算しているため、気泡があると水位が低く評価されたと考えられる。これを除けば、底質の混合によらず、水理実験結果と比較的良く一致した結果が得られていた。鉛直壁の水路底面から 12mm 上方の P1 は津波作用開始直後のサージフロント波圧を過大評価しており、その後には生じる持続波圧も P1 ではわずかに過大評価しているがその差は小さいため、水理実験と概ね一致する結果が得られている。貯水部に貯めた水の初期浮遊砂濃度 C_0 を変化させた数値実験より、低濃度の時に計測された最大波力 F_{max} が清水時 ($C_0=0.0\%$)の最大波力 $F_{0\text{max}}$ に底質を含んだ水の見かけの比重 s を掛けた値を上回っている。これは、最大波力が底質を考慮した静水圧分布に概ね従うため、低濃度時の最大水位は水面が小さな変動を繰り返していたことが原因と考えられる。

白ら(2024)²⁾は、実験モデルを原子力規制庁の R5 委託業務で実施した波圧試験に近い形状とし、流れ全体の密度を均一に設定し、数値解析モデルを用いて黒い津波における密度と波力の関係性を検討した。解析手法は、非線形長波理論に基づく平面二次元解析手法と、ナビエーストークス方程式をベースとした三次元数値解析手法を組み合わせたモデルを用いる。二次元領域内で波高 H の孤立波を発生させて斜面下端まで伝播させ、波が三次元領域に入ると浅水過程で碎波が生じ、段波となって鉛直壁と衝突する。底面境界条件は **Free-Slip** としている。鉛直壁が受ける波力の時系列より、実験では一つのピークのみが見られるのに対し、解析では二つのピークが確認され、第二ピークが実験のピークと一致する。第二ピークの波力を対象とし、密度増加率に対する波力の増加率の割合を波力増加率比とした。水位の変化について、流れが鉛直壁にぶつかる前の第一ピーク、壁から戻った後の第二ピークやその後の減少する傾向が良好に再現されている。津波が構造物に与える波力の経験公式について、三つの経験式(朝倉ら, OCADI, Robertson ら)と解析結果を比較してモデルの妥当性を検討した。その結果、解析結果が理論式から計算した結果の -25 %から+15 %の範囲内に収まることが分かり、鉛直壁が受ける波力が 30kN 以下で朝倉公式より過大で、30kN 以上で OCADI 公式よりもやや過大になり、Robertson 公式との一致性が最も高い結果となった。波力の増加率と密度の増加率の関係より、波力増加率比が 0.85~1.25 の範囲内になっていることが確認され、波力増加率が密度増加率以上になる傾向が示された。各波高について密度 1.5, 2.0 倍のケースで波力増加率比の平均値とその標準誤差 SEM を示すと、波力の増加率が密度の増加率を上回る傾向は、波高が高い場合に顕著であり、波力の増加メカニズムについて波高の検討が不可欠と示唆された。全体的には、波力増加率比が 1.02~1.03 になったが、

ばらつきにより最大 1.25 になるケースが確認された。増加メカニズムは、砕波と関係あると考えられるが、詳細は今後の課題とされる。粘性が増加した場合の波力増加率と密度増加率の関係性を示すと、粘性が 10 倍になると波力増加率比が 0.9~1.2 倍となり、粘性の増加で波力のばらつきが小さくなった。これは、粘性の増加で流体内のせん断力が増加し、波力の増加に対する密度の増加の影響が減少したと考えられ、詳細については今後の検討である。

鈴木ら(2015)³⁾は、大阪湾において津波による底質の巻き上げが発生する条件を推定することを目的とし、平成 24 年 8 月に内閣府が公表した南海トラフ新想定 of 津波断層モデルによる津波シミュレーションの結果をもとに、巻き上げの指標となる無次元せん断応力を計算した。大阪湾の水深データは 50m メッシュデータを用い、含水率のデータは大阪府立環境農林水産総合研究所が実施した 2013 年の観測結果を空間補間法によって 50m メッシュに内外挿したものを用いた。大阪湾の東部や湾奥部は水深が浅く、含水率は最大約 75%と高く、淡路島へ向かうにつれて水深が深く、含水率は低くなる傾向にある。津波の流速と波高のデータは TUNAMI-CODE を用いた。解析結果より、大阪湾の西部では現在の含水率 ($W \leq 57\%$)と水深 ($30\text{m} \leq D$)では巻き上げは発生しないことが分かった。一方、大阪湾の東部では、巻き上げの発生とその大きさが含水率と流速に依存し、東部の 9 割の海域では ($60\% \leq W$)、流速が 0.6m/s 以上で水深の浅い海域から巻き上げが発生し始め、1.6m/s 以上になるとどの水深 ($D \leq 30\text{m}$)でも巻き上げが発生することを示した。また、低含水率の関西国際空港の南西海域 ($47\% \leq W \leq 60\%$)でも流速が 1.2m/s 以上になると巻き上げが発生し、2.9m/s 以上になるとどの水深 ($D \leq 30\text{ m}$)でも巻き上げが発生する結果となった。

参考文献

- 1) 中村友昭, 趙容桓, 水谷法美: 底質を含んだ津波による波圧・波力に関する数値解析, 土木学会論文集, Vol.80, No.18, 24-18043, 2024.
- 2) 白皓東, 米山望: 防潮堤に作用する波力に対する津波密度の影響に関する解析的検討, 土木学会論文集, Vol.80, No.17, 24-17059, 2024.
- 3) 鈴木綜人, 林美鶴, 中田聡史, 越村俊一, 小林英一: 津波による大阪湾での底質巻き上げ発生条件の推定, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 20 号, 2015S-GS2-1, pp.143-146, 2015.

3. 波圧試験

3.1. 試験概要

波圧試験は、底質の含有に伴う流体の密度および粘性等の変化が、伝播・遡上する津波の波形や防潮壁に作用する波力に与える影響を検討することを目的に実施した。

本試験では、2次元開水路内に密度を調整した濁水を溜め、護岸汀線における波高および波形を一致させた津波が防潮壁模型に衝突する機構とした。津波の種類は波形の異なる3ケース、流体密度は3ケース（1.00, 1.05, 1.10g/cm³）を設定し、淡水・濁水（底質模型の含有）・塩水を用いた。

本試験は、以下の手順で実施した。

- ①波検定：造波装置内の初期水位および各バルブを開放するタイミングを変えて波形を調整し、淡水による津波を3ケース設定した。
- ②通過波試験：地形模型を設置した防潮壁模型が無い状態で、流体の種類に関わらず汀線位置における津波の高さ・波形を一致させ、堤体位置における波高および流速を計測した。
- ③衝突試験：津波波形・流体密度・海底地形・堤体位置を変化させ、防潮壁に作用する波力および波形変化等を計測した。

以降に詳細を示す。

3.2. 試験方法

3.2.1. 試験装置

波圧試験では、アクリル製の小型二次元水路（幅 0.20m×高さ 0.5m×延長 6.0m）を用い、水路内に高さ 0.03m、擦付け勾配 1:10 の地形を設置し、水深を 0.05m とした。水路陸側には海底地形と防潮壁の模型をそれぞれ設置し、水路内に淡水（水道水）または濁水（底質模型の含有）または塩水を溜めた。水路沖側には津波造波装置を設置し、装置上面のバルブ開放により津波を発生させた。各バルブの開放のタイミングや装置内の初期水位を調整することで波形を変化させた。衝突試験時には、いずれかの流体（淡水・濁水・塩水）による津波を発生させて、遡上する津波の波形変化、陸上の壁模型に作用する波力・波圧を計測した。

本試験は、海底地形を 2 ケース（水平床 F、単純勾配(1/20)S）、堤体位置を 2 ケース（護岸汀線 0, 0.30m ; P1, P3）として設定し、波検定および通過波試験のセットアップを図-3.1 に、衝突試験のセットアップを図-3.2 に示す。

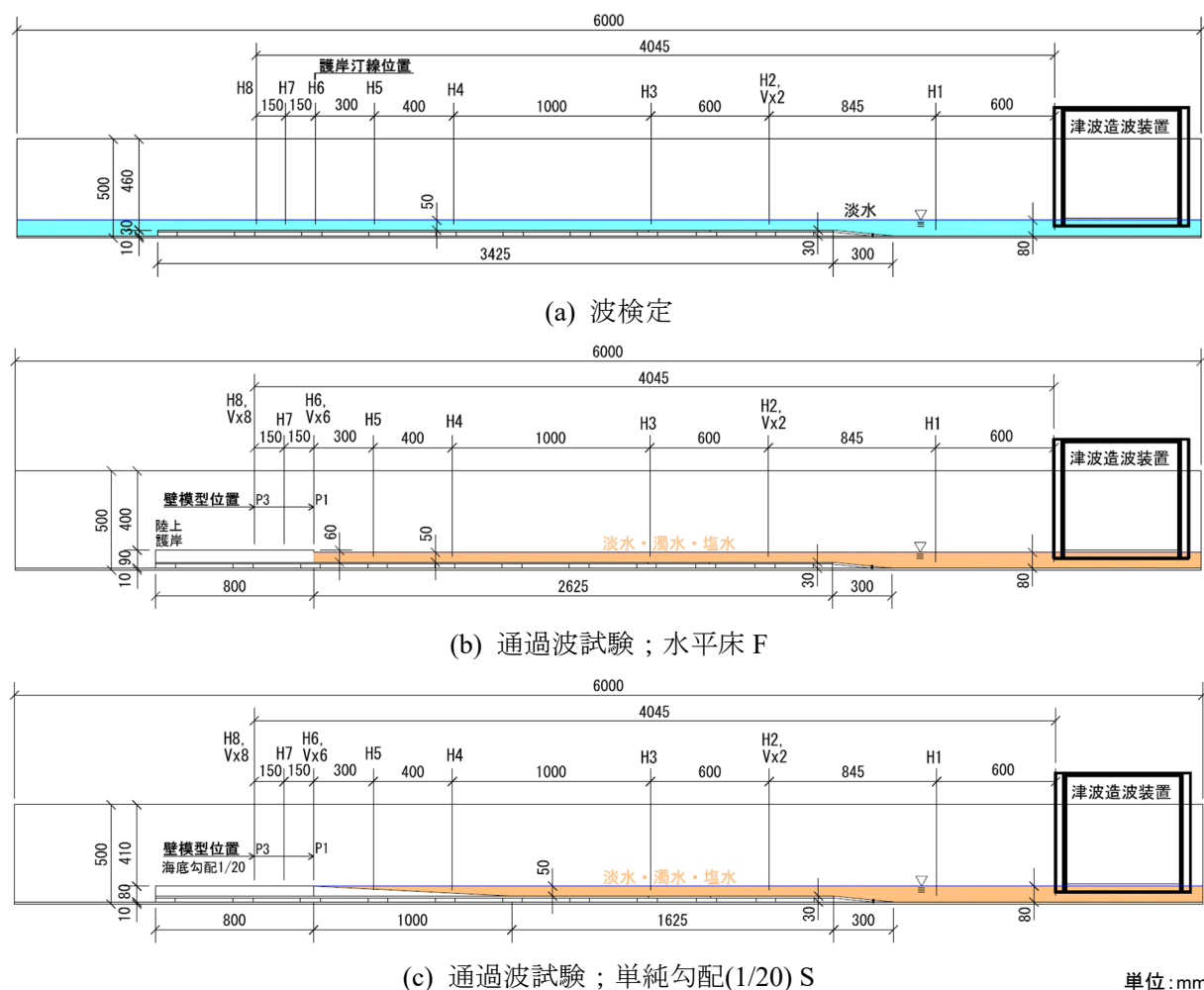
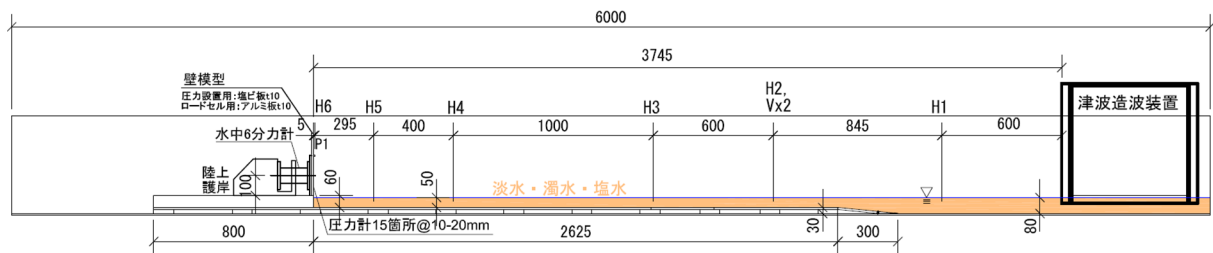
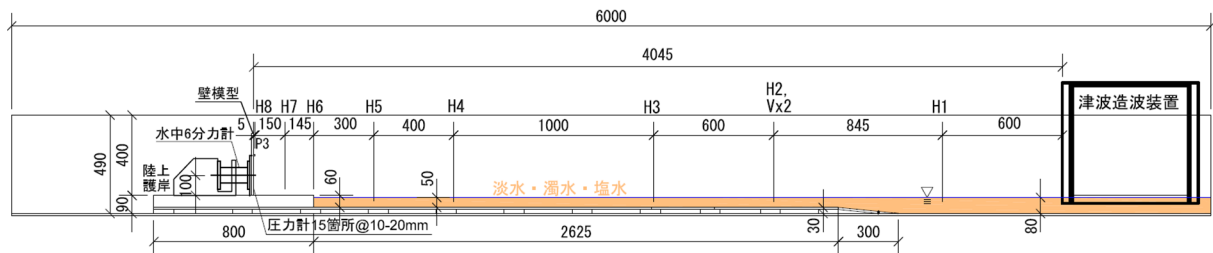


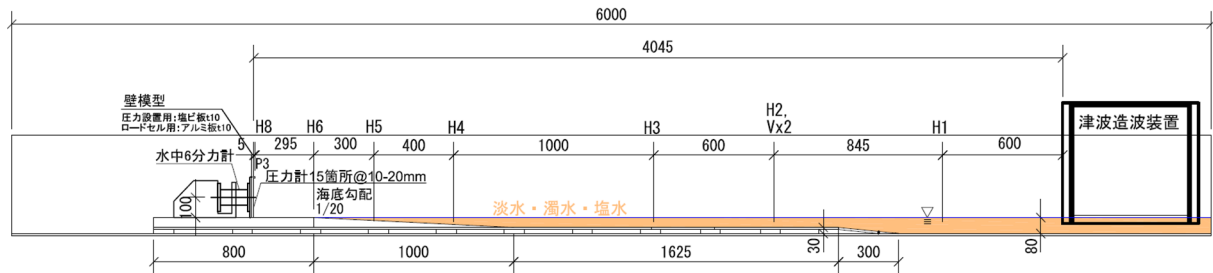
図-3.1 波圧試験のセットアップ；波検定・通過波試験



(a) 衝突試験；水平床 F・堤体位置 P1

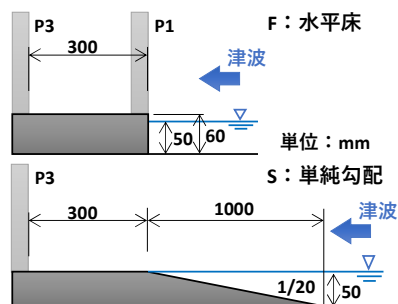


(b) 衝突試験；水平床 F・堤体位置 P3



(c) 衝突試験；単純勾配(1/20) S・堤体位置 P3

単位：mm



(d) 衝突試験；海底地形・堤体位置

図-3.2 波圧試験のセットアップ；衝突試験

3.2.2. 試験条件

(1) 流体条件

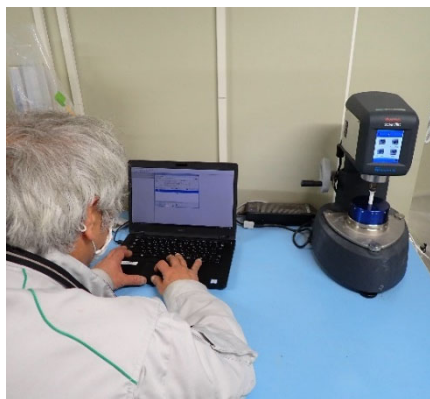
流体条件は、表- 3.1 に示す通り、流体種類および密度を変更した 5 ケースを設定した。なお、濁水および塩水については、別途バケツで所定の密度に調整して作製し、津波造波直前に再攪拌して水路内に溜めて、衝突試験を実施した。

表- 3.1 流体密度の条件

種類	流体密度 ρ [g/cm ³]
淡水	1.00
濁水 (シリカフューム含有)	1.05
	1.10
塩水	1.05
	1.10

写真- 3.1 (a)に示す Thermo Scientific 社製の HAAKE Viscotester iQ Air レオメーター（粘度・粘弾性測定装置）を使用し、事前に粘性を計測した。本装置はアタッチメントを替えることが可能で、写真- 3.1 (b)の二重円筒型粘度計（非ニュートン流体に対して精度良く計測可能。砂粒などが混入する流体は計測不可）を使用した。

本試験は、二重円筒形による粘性試験から濁水密度せん断速度 ρ に対する粘度 η を確認した。粘性試験は、室温 20℃の定温環境下において実施した。



(a) レオメーター（粘度・粘弾性測定装置）



(b) 二重円筒型

写真- 3.1 粘性評価試験装置

(2) 底質模型

底質模型は、シリカフューム（写真-3.2）を使用し、各諸元を表-3.2 に示す。

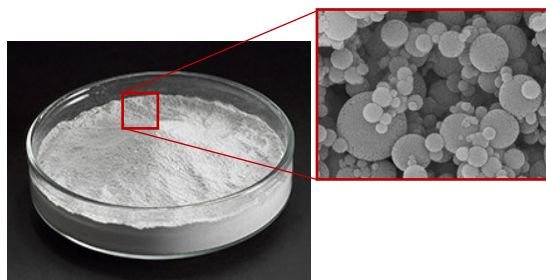
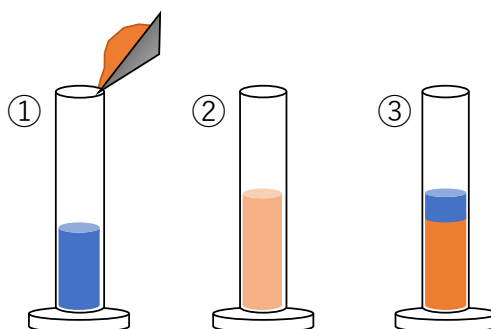


写真-3.2 底質模型（シリカフューム）の材料

表-3.2 底質模型諸元

材料名	粒子径 [μm]	粒子密度 [g/cm^3]	かさ密度 [g/cm^3]	飽和含水比 ^{※1} [%]
シリカフューム	0.536	2.24	0.29	202.4

※1：下図の通り，材料を静水中に自然沈降させた時の含水比（≒飽和含水比）とする。



- ①所定量の水をメスシリンダーに入れ、底質材料を投入する。
- ②底質材料を水と攪拌・混合して蓋で密閉し、そのまま静置する。
- ③底質材料の沈降が完了した後、上澄水を除去した配合比率から含水比を算定する。

(3) 入射津波

入射波形は、以下の3 ケースを基本に設定する。

- W1：段波波形（水平床 F，単純勾配 S とともに沖側で碎波）
- W2：水平床 F は非碎波，単純勾配 S は汀線で碎波する波形
- W3：長周期波形で護岸越流する波形

3.2.3. 計測項目

(1) 水位

淡水および濁水の場合には容量式波高計（写真-3.3 (a)），塩水の場合にはサーボ式波高計（写真-3.3 (b)）を用いて，図-3.1，図-3.2 に示す 8 箇所（H1～H8）の水位を計測した．なお，H1～H6 は初期水位（水深 $h=0.05\text{ m}$ ），H7 および H8 は護岸天端レベルを 0 にセットした．

(2) 流速

電磁流速計（Vx2；写真-3.4 (a)）は淡水のみ，プロペラ流速計（Vx6, Vx7, Vx8；写真-3.4 (b)）は淡水と塩水のみ流速を時系列で計測し，高速度カメラの画像判読（Vx7）は濁水のみ先端流速を計測した．流速の計測位置を図-3.1，図-3.2 に示す．

(3) 波圧

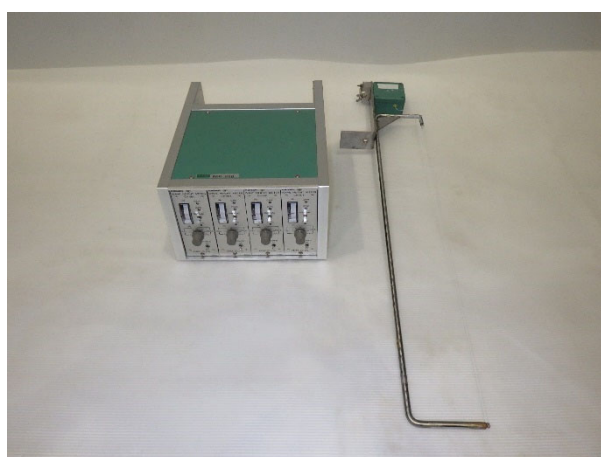
波圧は壁模型より 5mm 前方の床面に 1 箇所（図-3.3 (a)）と壁模型前面に鉛直方向 10～20mm 間隔で 15 箇所（図-3.3 (b)）に設置した超小型圧力計（図-3.3 (c)；エス・エス・ケイ社製 P310-02，計測限界 0.2kgf/cm^2 ）により計測した．なお，サンプリング間隔は 1kHz とし，ノイズ除去のため 100Hz のローパスフィルタを設定した．

(4) 波力

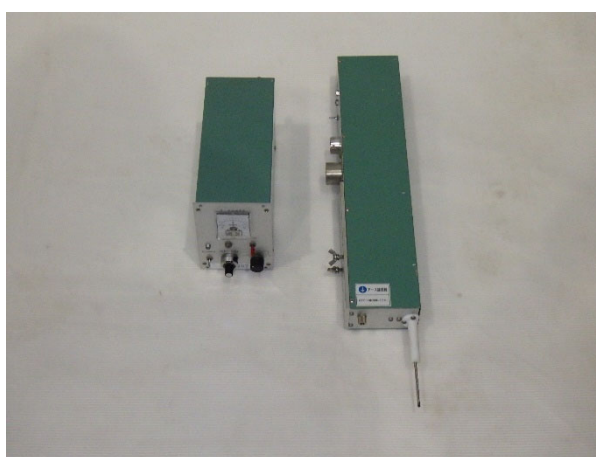
図-3.3 (a)に示す通り，波力は壁模型の背面に設置した水中 6 分力計（図-3.3 (d)；ケネック社製 LB-120；完全防水型，計測限界 50kg）により波力を計測した．なお，サンプリング間隔は 1kHz とし，ノイズ除去のため 100Hz のローパスフィルタを設定した．

(5) 波形変化

水路側面から高速度カメラにより，陸上護岸～壁模型の範囲を撮影した．なお高速度カメラの撮影は 2000fps かつ映像は 15 倍速とし，映像の開始時刻（0 秒）は堤体近傍の浸水深時刻歴及び堤体に作用する波力時刻歴と同期した．



(a) 容量式波高計



(b) サーボ式波高計

写真-3.3 水位の計測装置

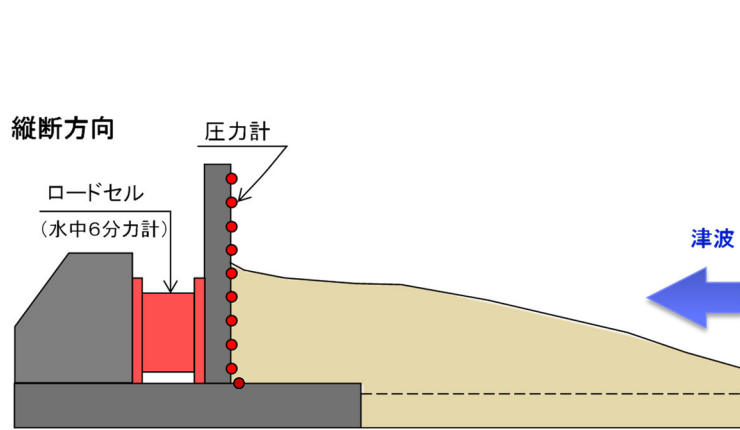


(a) 電磁流速計

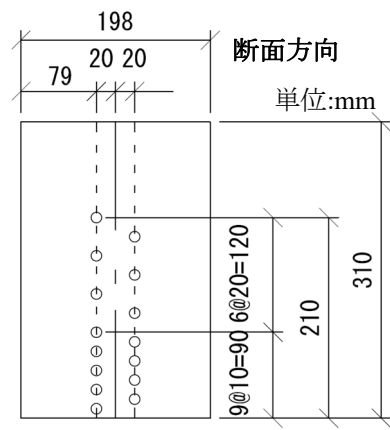


(b) プロペラ式流速計

写真-3.4 流速の計測装置



(a) ロードセル・圧力計の設置位置



(b) 圧力計設置位置



(c) 超小型圧力計



(d) 水中6分力計

図-3.3 波力・波圧分布の計測装置

3.2.4. 試験手順

(1) 波検定

図- 3.1 (a)に示す通り，水路内に淡水のみを溜め，津波造波装置の上面にあるバルブの開放タイミングを調整し，津波 3 ケース（W1～W3）を設定した．

(2) 通過波試験

図- 3.1 (b), (c)に示す通り，水路内に海底地形（水平床 F もしくは単純勾配 S）を設置し，淡水・濁水・塩水のいずれかを溜めて津波を造波し，堤体位置（P1, P3）における通過波の水位と流速を計測した．なお，流体密度によらず汀線位置（H6）における津波高および波形が一致するよう，造波装置の初期水位およびバルブ開放のタイミングを調整した．

(3) 衝突試験

図- 3.2 に示す通り，水路内に淡水・濁水・塩水のいずれかを溜めて津波を造波させ，壁模型に衝突させた．その際の波圧分布及び波力を計測し，津波の波形変化や壁模型との衝突状況を撮影した．

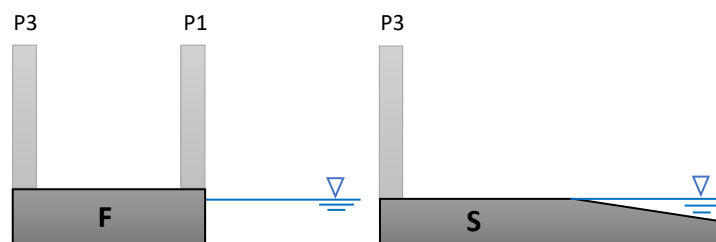
3.2.5. 試験ケース

波圧試験の実施ケースは，以下の方針に基づき，表- 3.3 に示す通り合計 182 ケースを設定した．なお同一条件での繰り返し回数は，通過波試験を 3 回，衝突試験を 5 回とした．

- ・堤体位置 (P1, P3)については，P3 を基本ケースとした．
- ・単純勾配 (S; 1/20)のケースは，海底勾配による影響を確認するためケースを限定した．

表- 3.3 波圧試験ケースの設定

海底地形 (Flat, Slope)	流体種類 (FW,MW,SW)	流体密度 [g/cm3]	津波種類 (W1-W4)	堤体位置 (P1,P2,P3)	繰返 回数	ケース 累積数
F	MW: 濁水 (シリカフューム含有)	1.10	W1	通過波	3	3
				P3	5	8
			W2	通過波	3	11
				P1, P3	5	21
			W3	通過波	3	24
				P1, P3	5	34
		1.05	W1	通過波	3	37
				P3	5	42
			W2	通過波	3	45
				P1, P3	5	55
			W3	通過波	3	58
				P1, P3	5	68
	FW: 淡水	1.00	W1	通過波	3	71
				P3	5	76
			W2	通過波	3	79
				P1, P3	5	89
			W3	通過波	3	92
				P1, P3	5	102
	SW: 塩水	1.10	W1	通過波	3	105
				P3	5	110
			W2	通過波	3	113
				P3	5	118
			W3	通過波	3	121
				P3	5	126
		1.05	W1	通過波	3	129
				P3	5	134
			W2	通過波	3	137
				P3	5	142
			W3	通過波	3	145
				P3	5	150
S	MW: 濁水 (シリカフューム含有)	1.10	W1	通過波	3	153
				P3	5	158
			W2	通過波	3	161
				P3	5	166
	FW: 淡水	1.00	W1	通過波	3	169
				P3	5	174
			W2	通過波	3	177
				P3	5	182



3.3. 試験結果

3.3.1. 粘性評価結果

波圧試験に用いた流体のうち、密度を変化させた濁水（シリカフュームの含有）および塩水と淡水について、二重円筒型粘度計により粘性を確認した。なお粘性試験は、室温 20℃の定温環境下において実施した。濁水および塩水の流体密度に対する粘度の関係を図- 3.4 に示す。この結果から、濁水は 3 次の多項式近似、塩水は指数近似により粘性を近似できることが分かった。

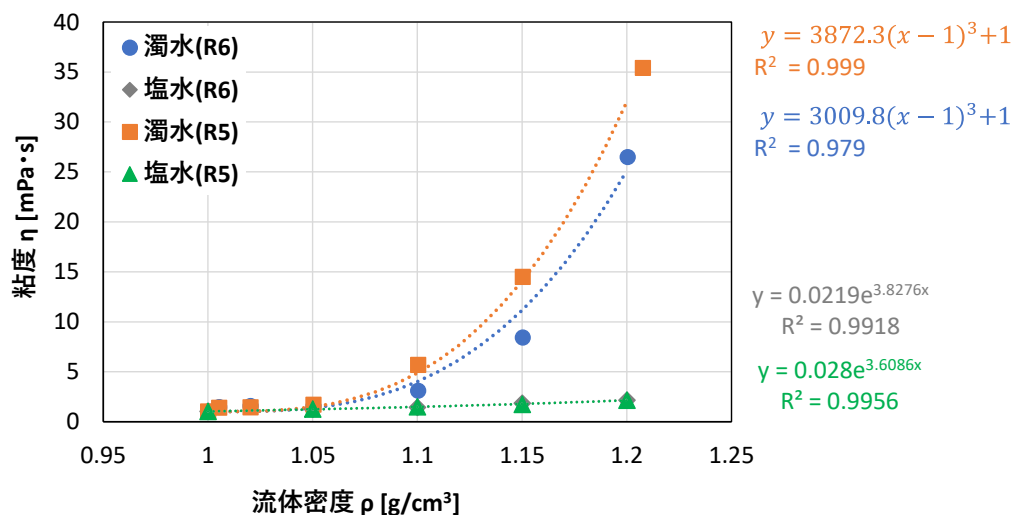


図- 3.4 流体密度に対する粘度（二重円筒型粘度計）

3.3.2. 波検定結果

波検定として、津波造波装置のバルブを開放するタイミングを調整し、淡水($\rho=1.00\text{g/cm}^3$)による津波波形を3種類 (W1, W2, W3)に設定した (図-3.5)。ここで、W1 は全バルブを一斉に開放して段波状の波 (水平床 F, 単純勾配 S とともに沖側で碎波), W2 は各バルブを連続的に開放して徐々に水位が高くなる波 (水平床 F は非碎波, 単純勾配 S は汀線で碎波), W3 は護岸を越流するような長周期の波とした。

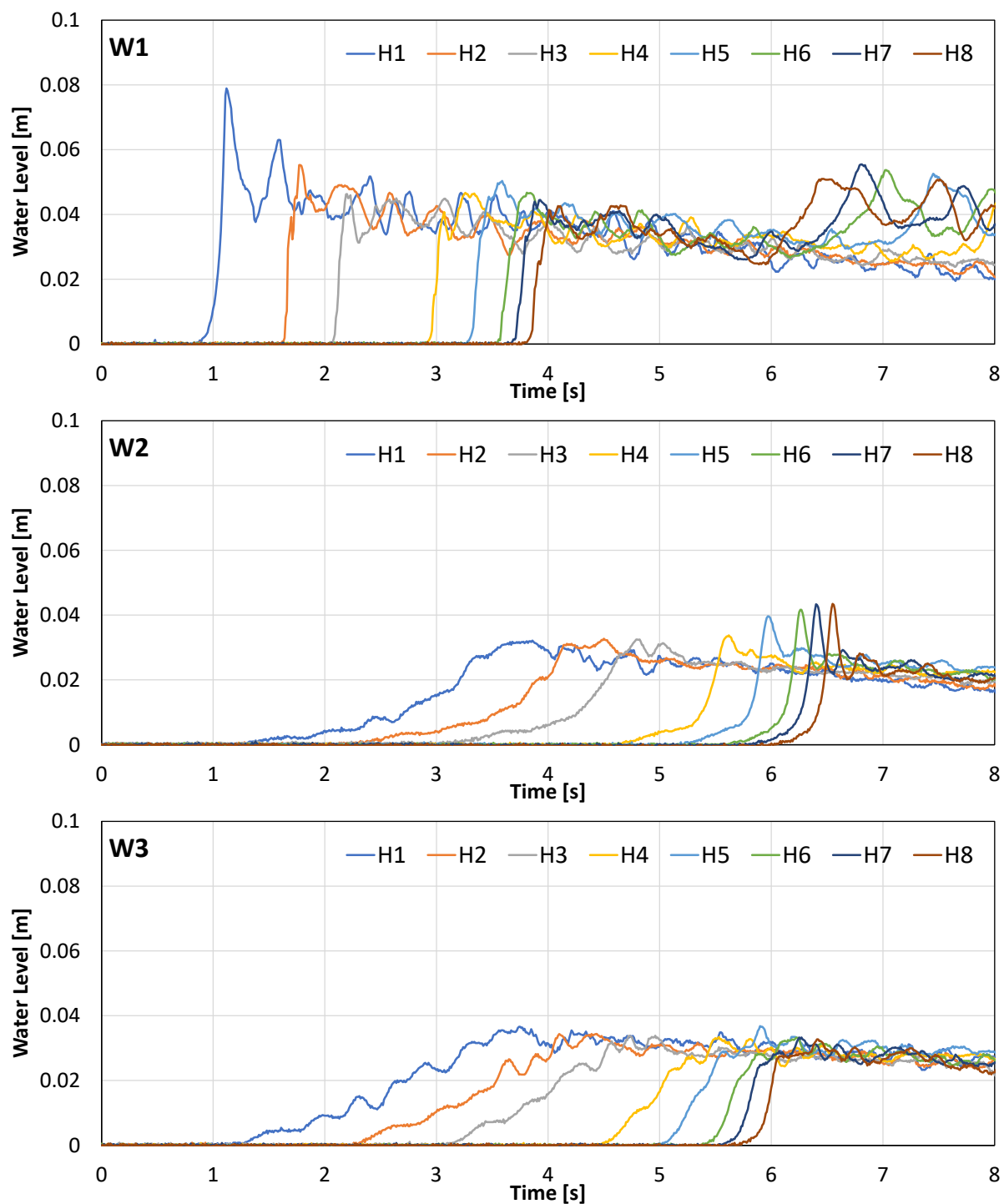


図- 3.5 波検定結果：津波波形の設定 (淡水 $\rho=1.00\text{g/cm}^3$)

3.3.3. 通過波試験結果

通過波試験では、濁水のうち流体密度の高い MW110 ($\rho=1.10\text{g/cm}^3$) の護岸汀線 H6 における最大津波高および波形に合わせるように、他のケース(淡水 FW100, 濁水 MW105, 塩水 SW105, SW110) の造波設定(各バルブの開放タイミングおよび開度, 装置内の初期水位)を調整した。なお、各ケースの繰返し回数は 3 回である。得られた結果のまとめを図- 3.6 に示す。

計測結果の一例として、水平床 F, 淡水 FW, 密度 1.00g/cm^3 , 津波 W1 のケース (F-FW100-W1-T0) における H1~H8 の水位の時系列と Vx2 の流速の時系列を図- 3.7~図- 3.9 に示す。そのほかのケースについては、護岸汀線 H6 における水位時系列を図- 3.10~図- 3.27 に示す。これらの結果より、各ケースのばらつきは小さいことを確認した。全ケースの時系列は巻末資料 1. (1) に示す。

各ケースにおける繰返し 3 回のうち 1 回目を代表とし、H1~H8 の水位時系列を比較した結果を図- 3.28~図- 3.42 に示す。ここで、波形の位相は淡水 (FW100) のケースに合わせて濁水 (MW105, MW110) と塩水 (SW105, SW110) を調整した。これらの結果より、各ケースにおける護岸汀線 H6 の最大津波高および波形が概ね一致していることを確認した。

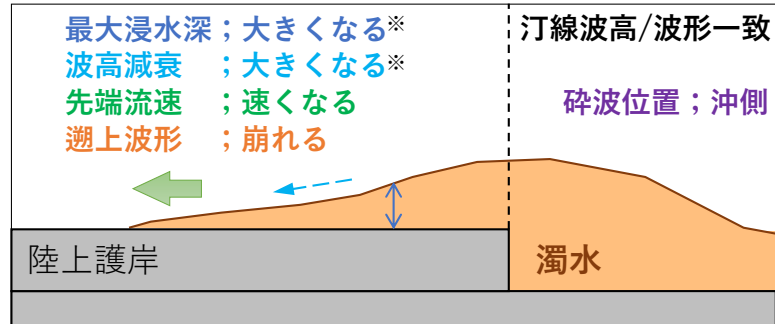
通過波における最大浸水深と最大流速・先端流速を表- 3.4~表- 3.9 に示す。そのうち流体密度による最大浸水深を図- 3.43, 図- 3.44 に示す。護岸汀線 H6 における最大浸水深(最大津波高)が流体密度により若干異なるため、最大浸水深を淡水 ($\rho=1.00\text{g/cm}^3$) の最大浸水深および汀線位置 H6 の最大浸水深で基準化した結果を図- 3.45, 図- 3.46 に示す。得られた結果より、流体密度が大きくなるほど最大浸水深は大きくなる傾向を確認した。

密度による最大津波高の変化を図- 3.47, 図- 3.48 に示す。図中に各ケースの砕波点を下向矢印(↓)で示した。なお砕波点は、水路の側面から撮影したカメラの映像から波が崩れたところを確認・判読した。また、護岸汀線 H6 を基準とした最大浸水深の変化を図- 3.49, 図- 3.50 に示す。これらの結果より、水平床 F の場合には流体密度が大きいと最大浸水深は大きくなる傾向が確認できる。特に、津波 W2 のケースでは、流体密度が大きいほど最大浸水深が大きくなっている。これは、淡水と塩水の場合には陸上部で砕波せずに津波先端が先行して薄く遡上するのに対し、濁水の場合は陸上部で砕波して崩れながら遡上するためである。さらに陸上部 H7 を基準とした最大浸水深の変化を図- 3.51, 図- 3.52 に示す。得られた結果より、淡水と比較して濁水の流体密度が大きいほど最大浸水深比の傾き(H7 から H8 への波高減衰)が大きくなる傾向が確認できる。これは塩水のケースと傾向が異なり、濁水の粘性による減衰が影響したと考えられる。

高速度カメラによる映像から判読した津波の先端流速を図- 3.53, プロペラ流速計による津波の最大流速を図- 3.54 に示す。得られた結果より、濁水 (MW) の場合は流体密度が大きいほど津波の先端流速が速くなる傾向があり、塩水 (SW) の場合は流体密度に関わらずあまり変わらないことが分かった。これは、特に津波 W2 の場合に、淡水と塩水は陸上部で砕波せずに水位がある程度高くなってから津波先端が進むのに対し、濁水は陸上で砕波しながら遡上するためと考えられる。

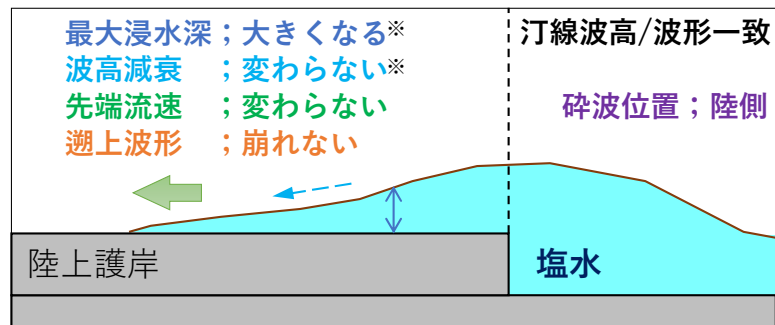
汀線付近における通過波のスナップショットを写真- 3.5~写真- 3.23 に示す。津波 W1 のケースでは、淡水・濁水・塩水のすべてで波が崩れながら遡上していく様子が確認できる。特に濁水は他の流体に比べてスプラッシュの状況が大きくなっている。津波 W2 のケースでは、上述の通り、淡水と塩水は陸上部で砕波せず遡上するのに対して、濁水は陸上部で砕波しながら遡上している。津波 W3 のケースでも、淡水は陸上部で遡上せず、津波 W2 よりも明確ではないが濁水と塩水が少し崩れながら遡上している。

流体密度・粘性が高くなると…



(a) 濁水 (MW；流体密度・粘性変化)のケース

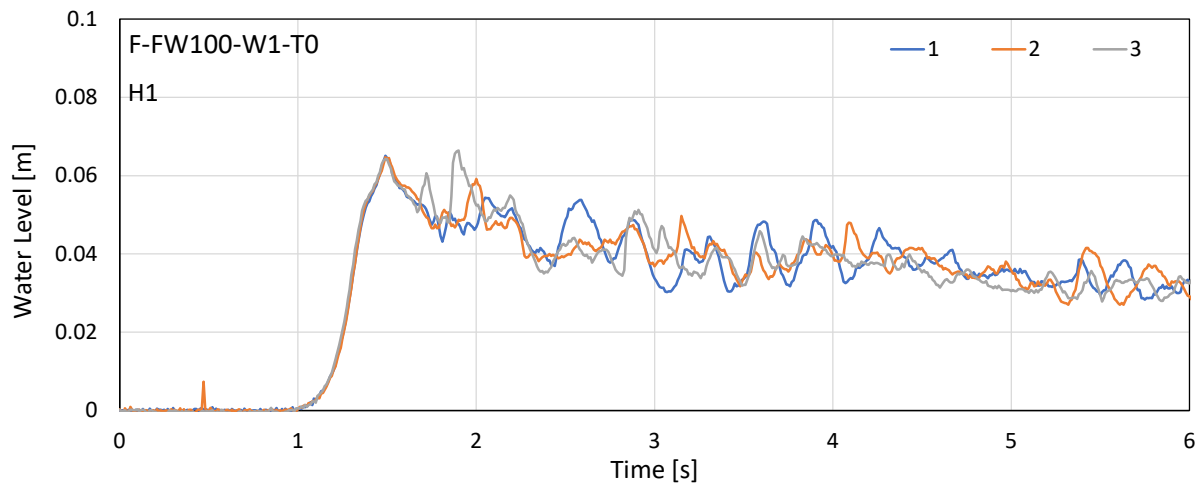
流体密度のみが高くなると…



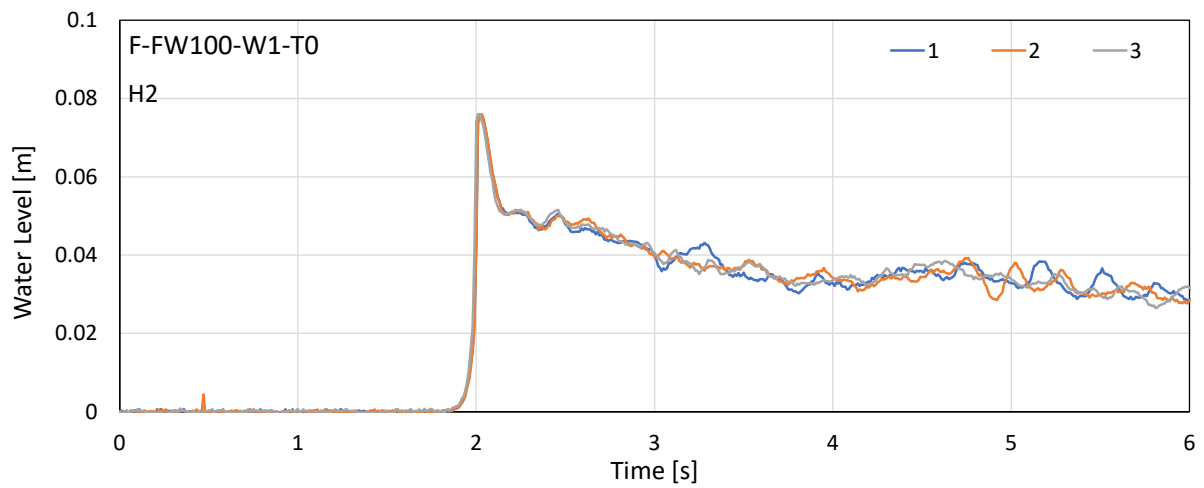
(b) 塩水 (SW；流体密度のみ変化)のケース

※最大浸水深・波高減衰の評価：護岸近傍（本試験範囲）を対象とした場合

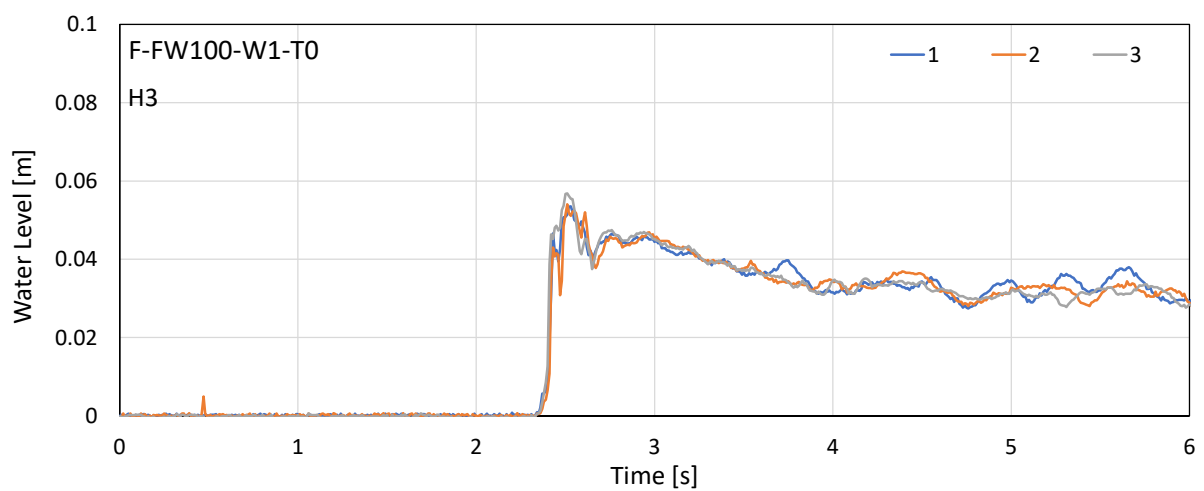
図- 3.6 通過波試験の結果まとめ



(a) H1 の水位時系列

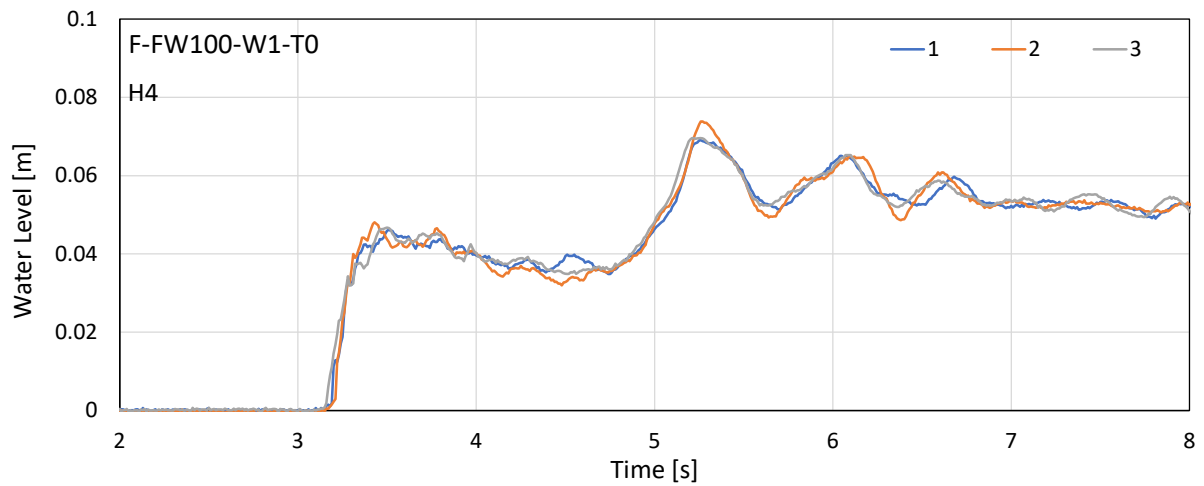


(b) H2 の水位時系列

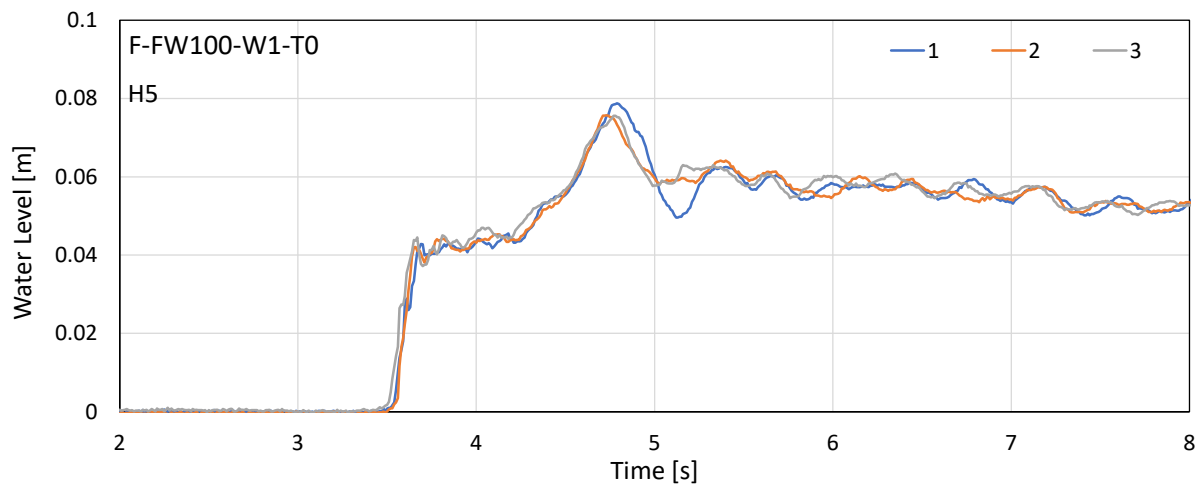


(c) H3 の水位時系列

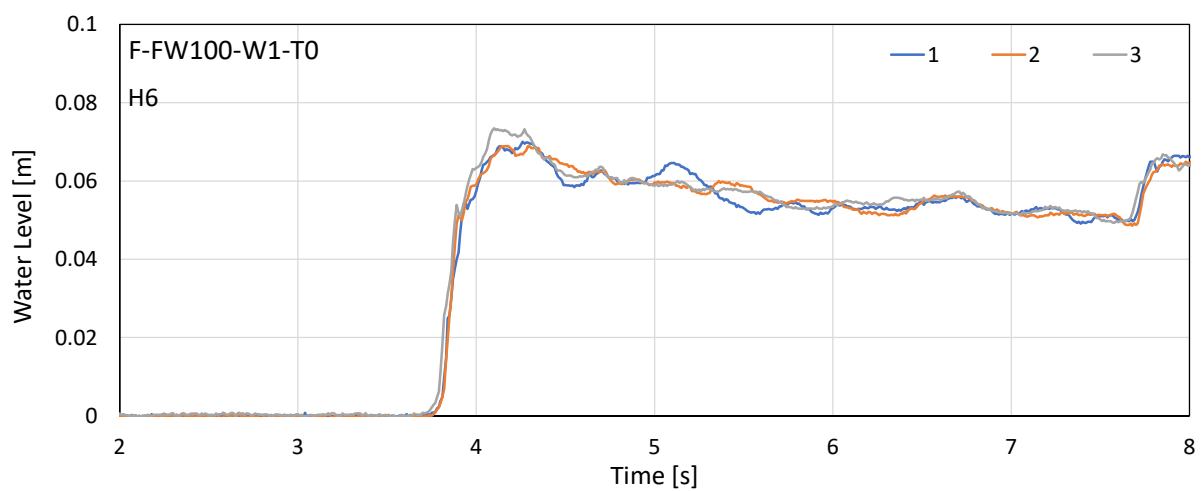
図-3.7 通過波試験の結果（水平床 F，淡水 FW，密度 1.00g/cm^3 ，津波 W1） [1]



(a) H4 の水位時系列

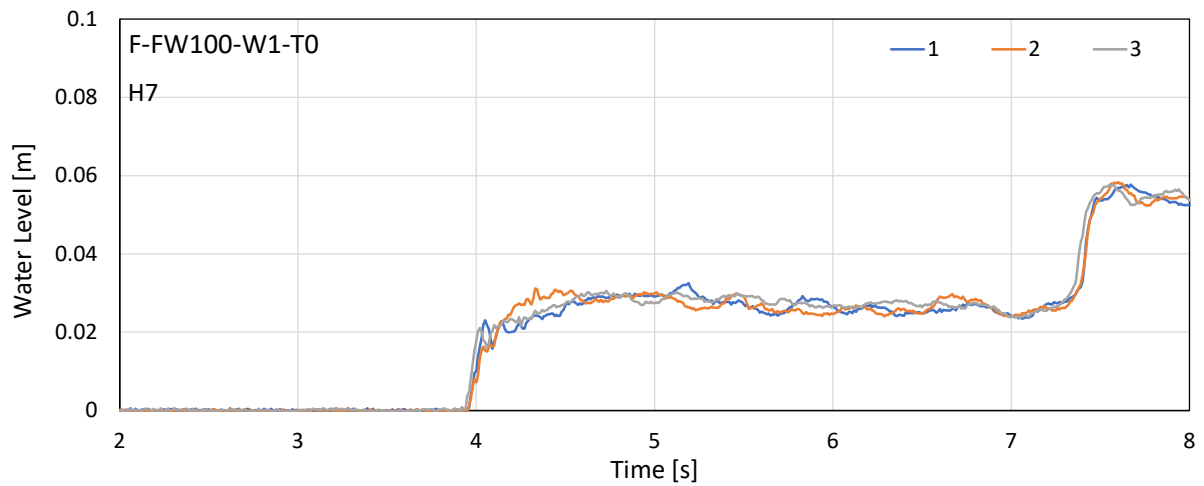


(b) H5 の水位時系列

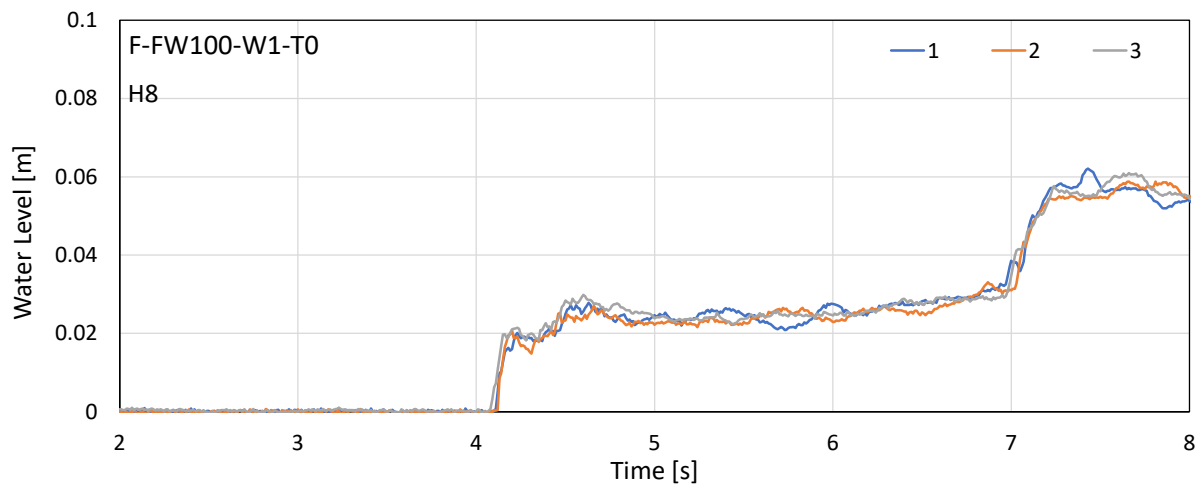


(c) H6 の水位時系列；汀線位置

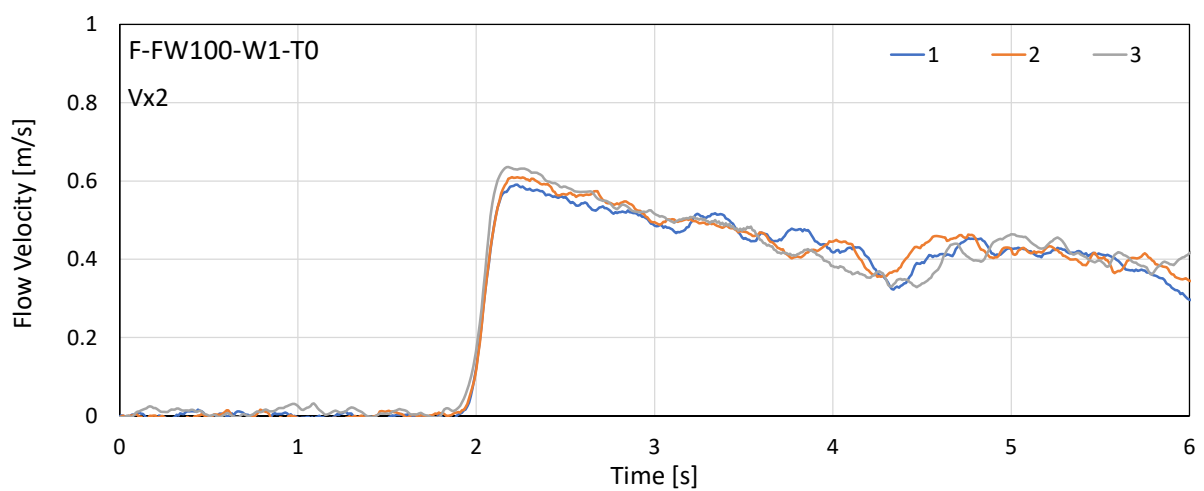
図-3.8 通過波試験の結果（水平床 F，淡水 FW，密度 1.00g/cm^3 ，津波 W1） [2]



(a) H7 の水位時系列



(b) H8 の水位時系列



(c) Vx2 の流速時系列

図-3.9 通過波試験の結果（水平床 F，淡水 FW，密度 1.00g/cm^3 ，津波 W1） [3]

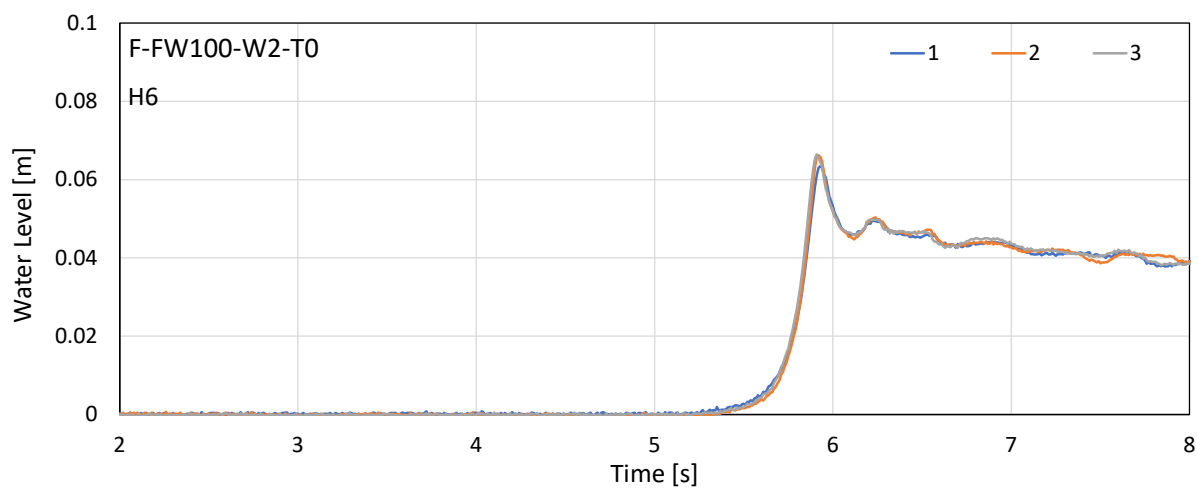


図- 3.10 通過波試験の結果（水平床 F，淡水 FW，密度 1.00g/cm^3 ，津波 W2，水位 H6;汀線）

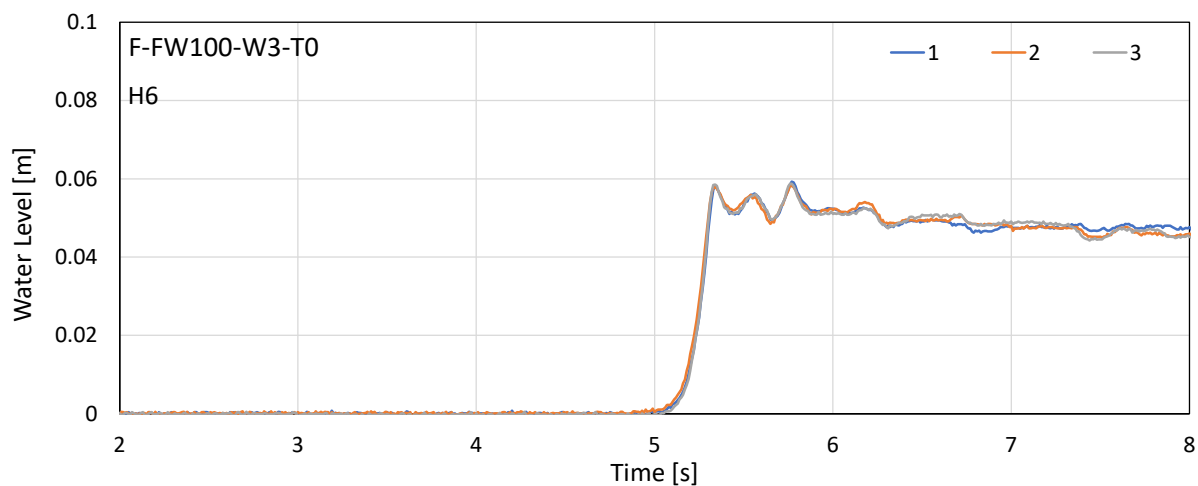


図- 3.11 通過波試験の結果（水平床 F，淡水 FW，密度 1.00g/cm^3 ，津波 W3，水位 H6;汀線）

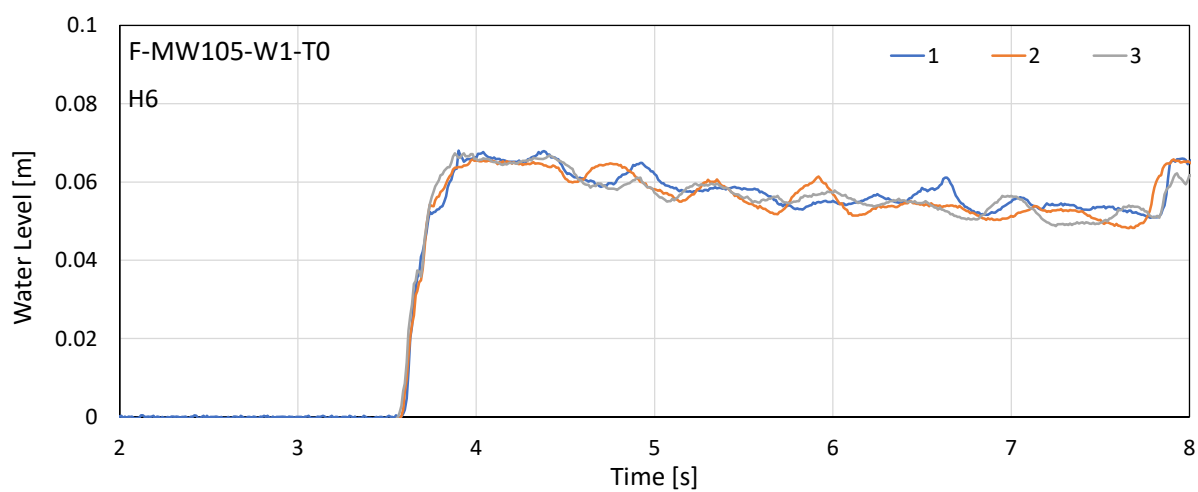


図- 3.12 通過波試験の結果（水平床 F，濁水 MW，密度 1.05g/cm^3 ，津波 W1，水位 H6;汀線）

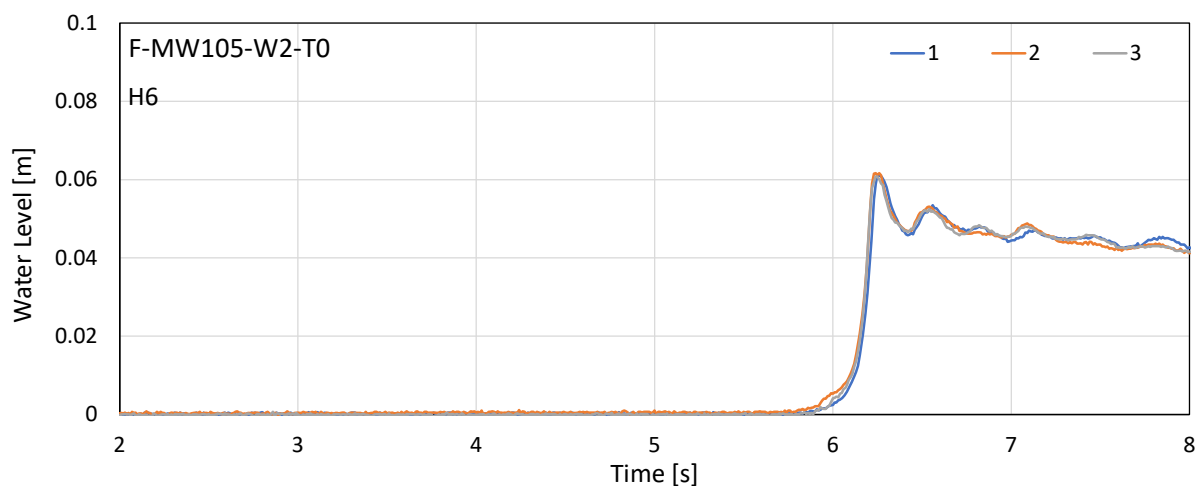


図- 3.13 通過波試験の結果（水平床 F，濁水 MW，密度 1.05g/cm^3 ，津波 W2，水位 H6;汀線）

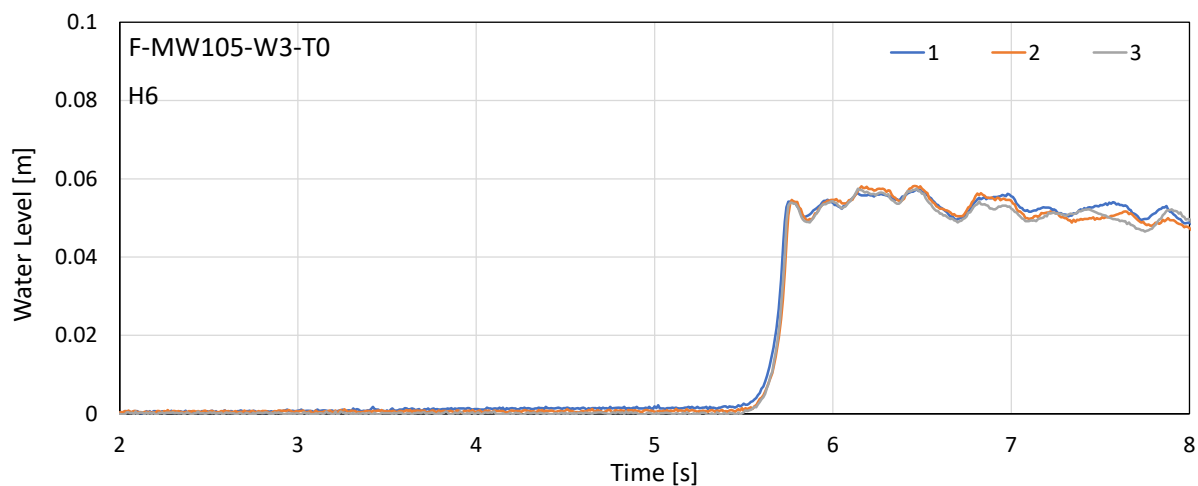


図- 3.14 通過波試験の結果（水平床 F，濁水 MW，密度 1.05g/cm^3 ，津波 W3，水位 H6;汀線）

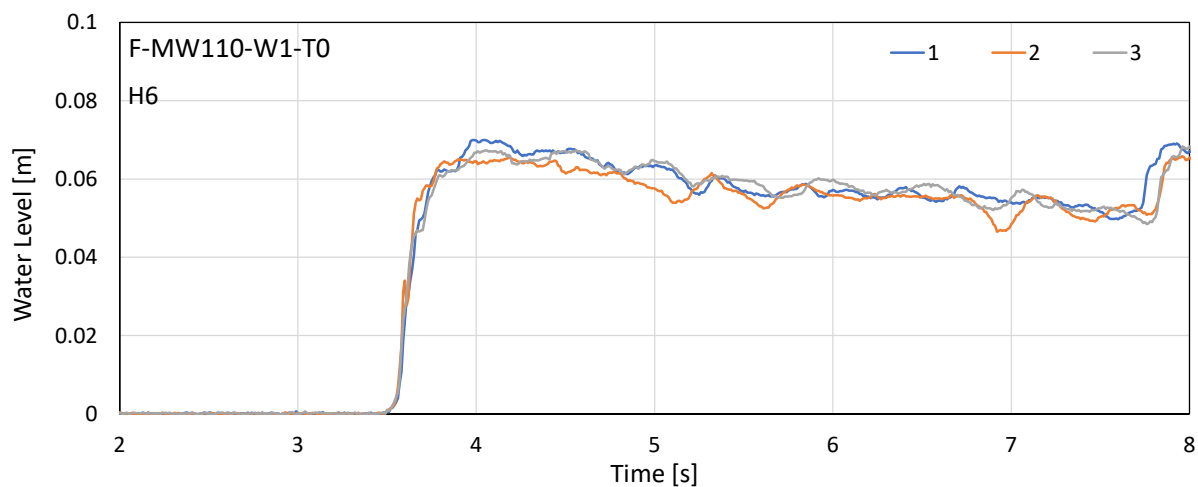


図- 3.15 通過波試験の結果（水平床 F，濁水 MW，密度 1.10g/cm^3 ，津波 W1，水位 H6;汀線）

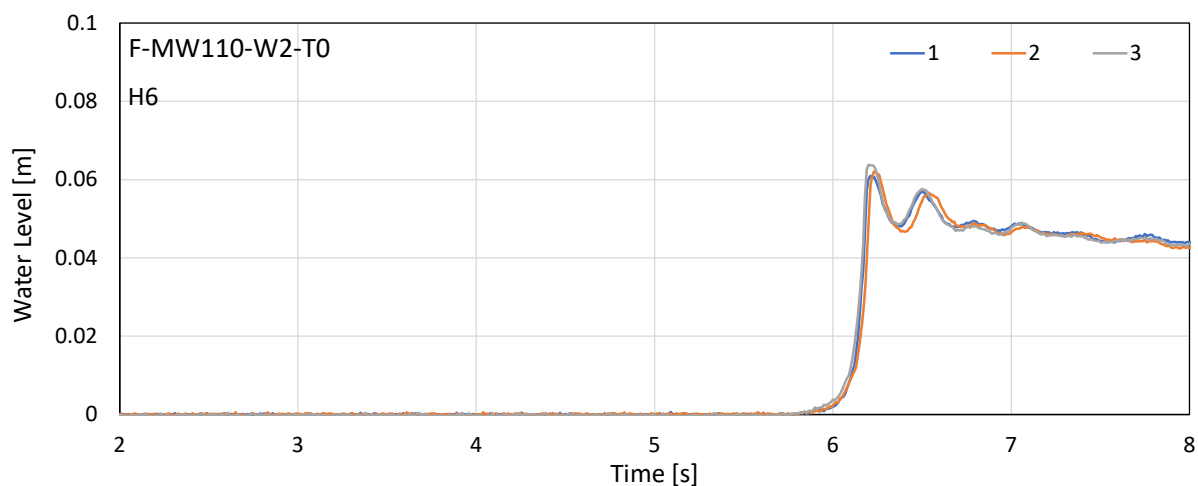


図- 3.16 通過波試験の結果（水平床 F，濁水 MW，密度 1.10g/cm^3 ，津波 W2，水位 H6;汀線）

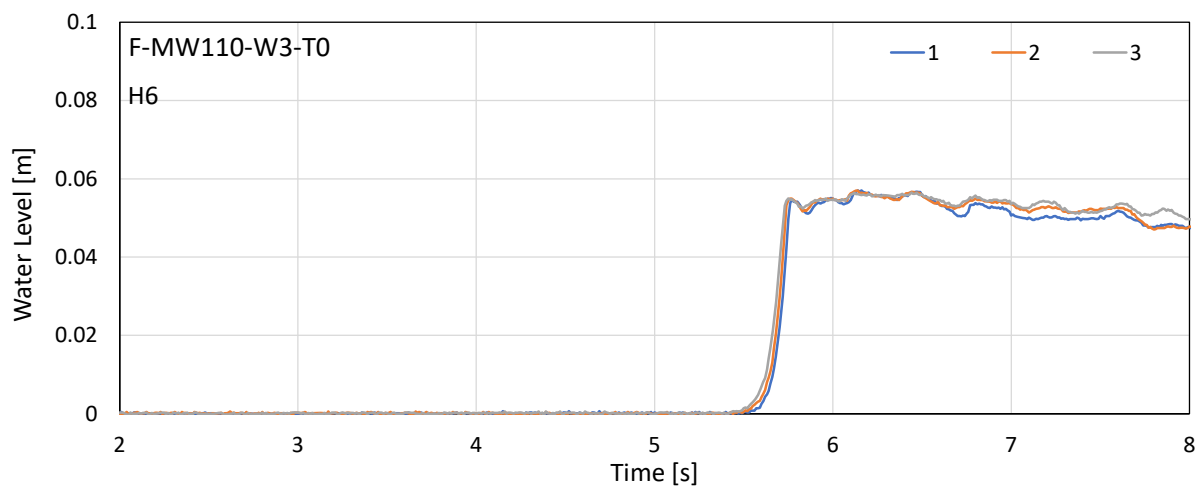


図- 3.17 通過波試験の結果（水平床 F，濁水 MW，密度 1.10g/cm^3 ，津波 W3，水位 H6;汀線）

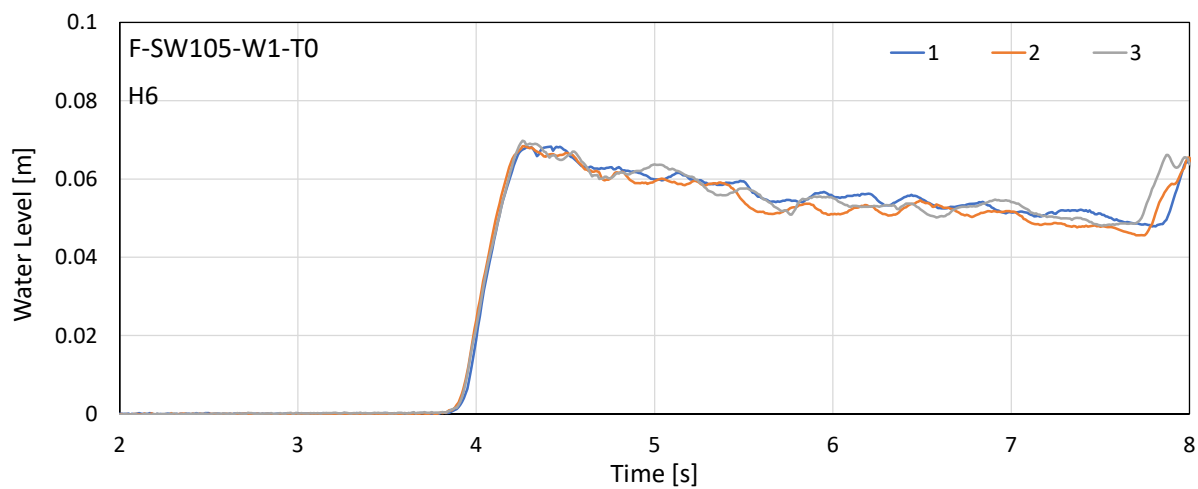


図- 3.18 通過波試験の結果（水平床 F，塩水 SW，密度 1.05g/cm^3 ，津波 W1，水位 H6;汀線）

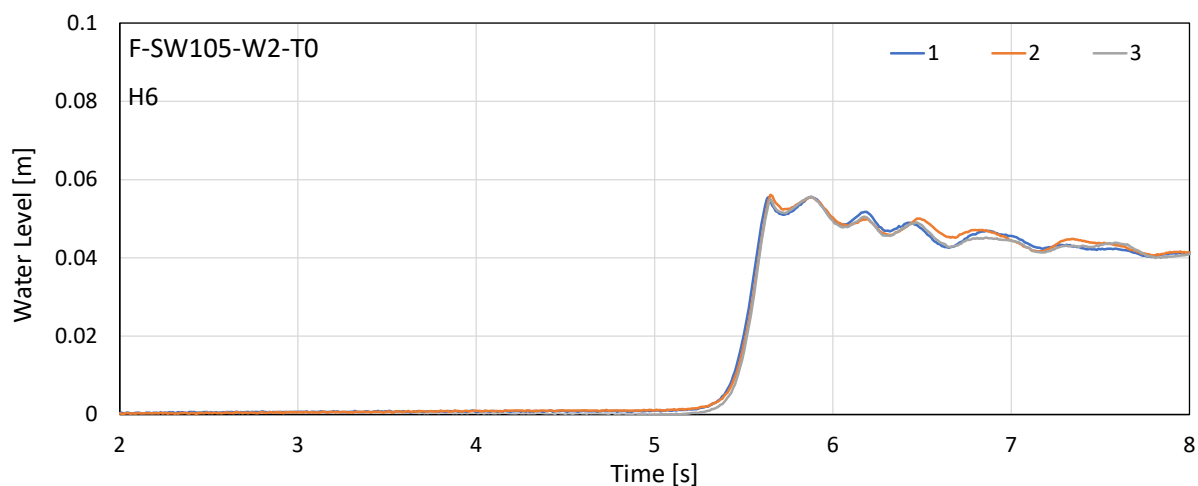


図- 3.19 通過波試験の結果（水平床 F, 塩水 SW, 密度 1.05g/cm^3 , 津波 W2, 水位 H6;汀線）

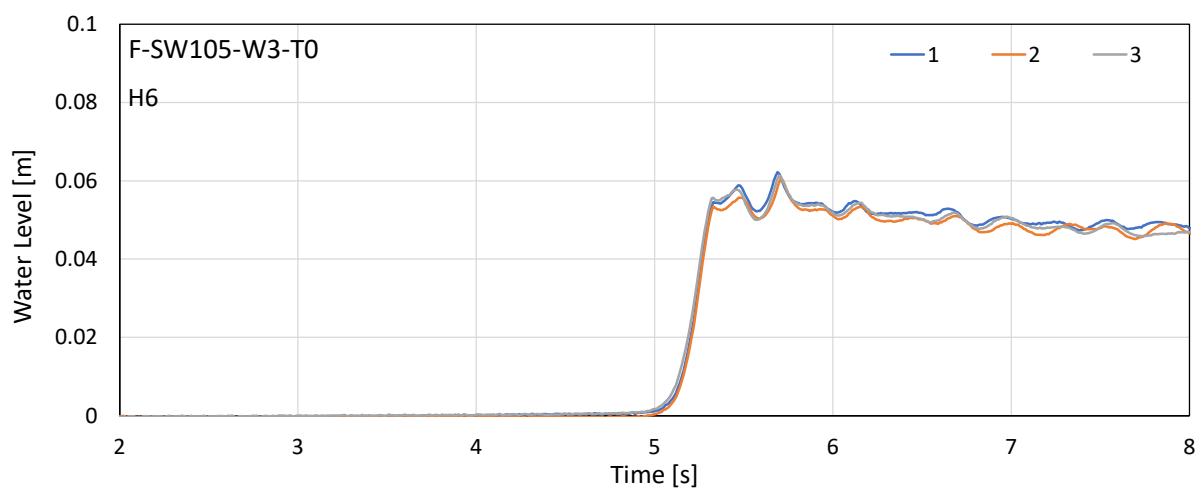


図- 3.20 通過波試験の結果（水平床 F, 塩水 SW, 密度 1.05g/cm^3 , 津波 W3, 水位 H6;汀線）

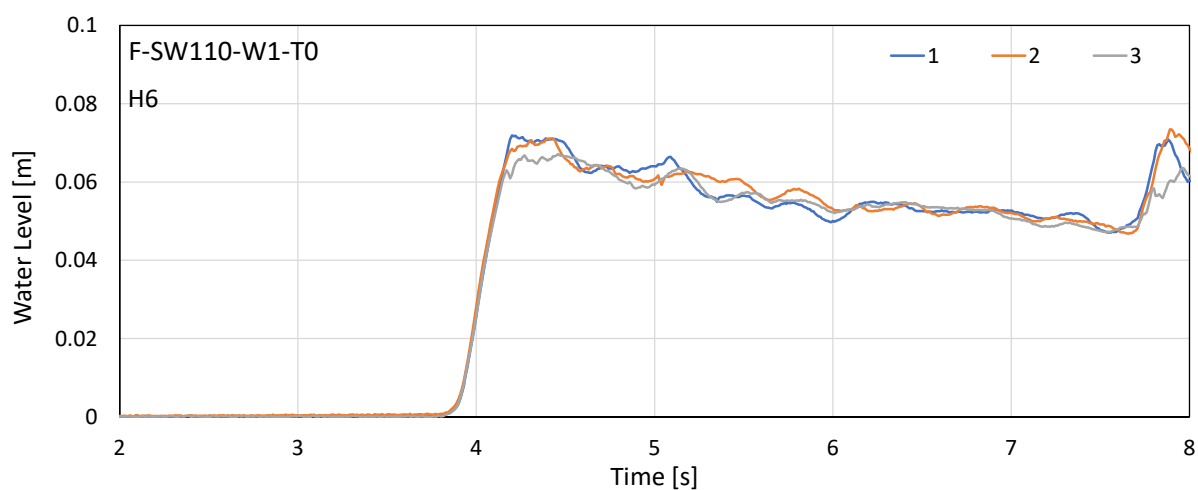


図- 3.21 通過波試験の結果（水平床 F, 塩水 SW, 密度 1.10g/cm^3 , 津波 W1, 水位 H6;汀線）

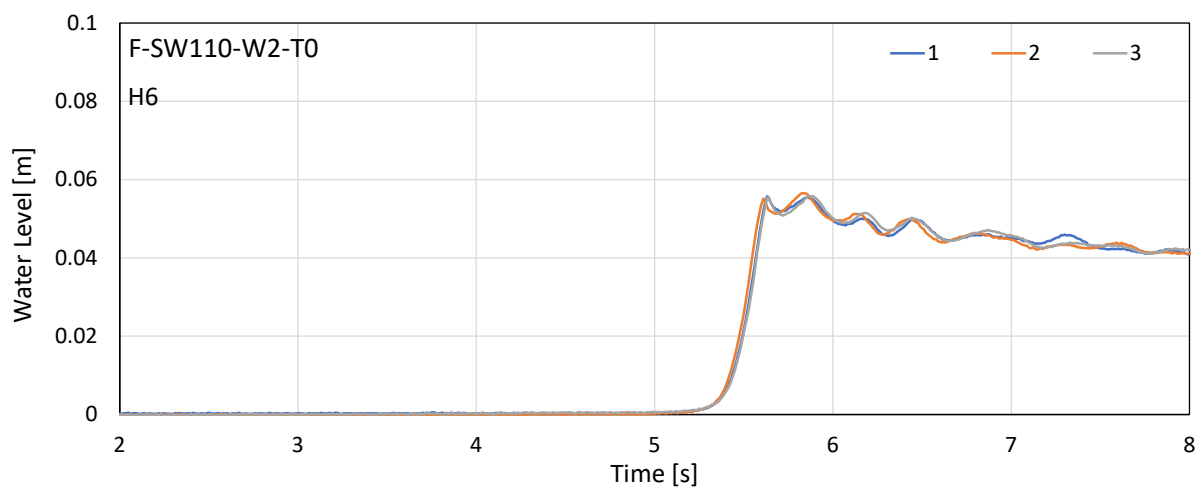


図- 3.22 通過波試験の結果（水平床 F, 塩水 SW, 密度 1.10g/cm^3 , 津波 W2, 水位 H6;汀線）

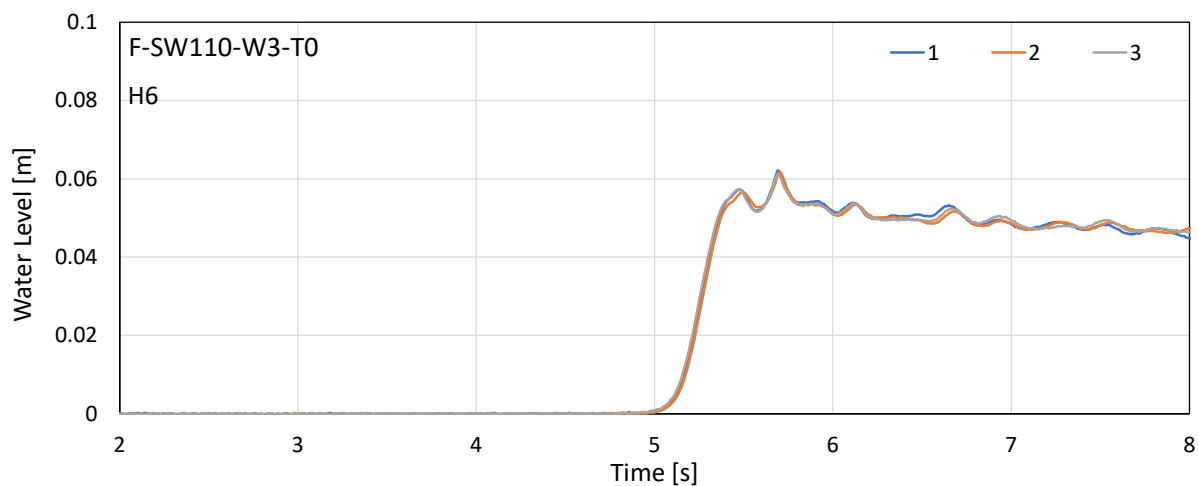


図- 3.23 通過波試験の結果（水平床 F, 塩水 SW, 密度 1.10g/cm^3 , 津波 W3, 水位 H6;汀線）

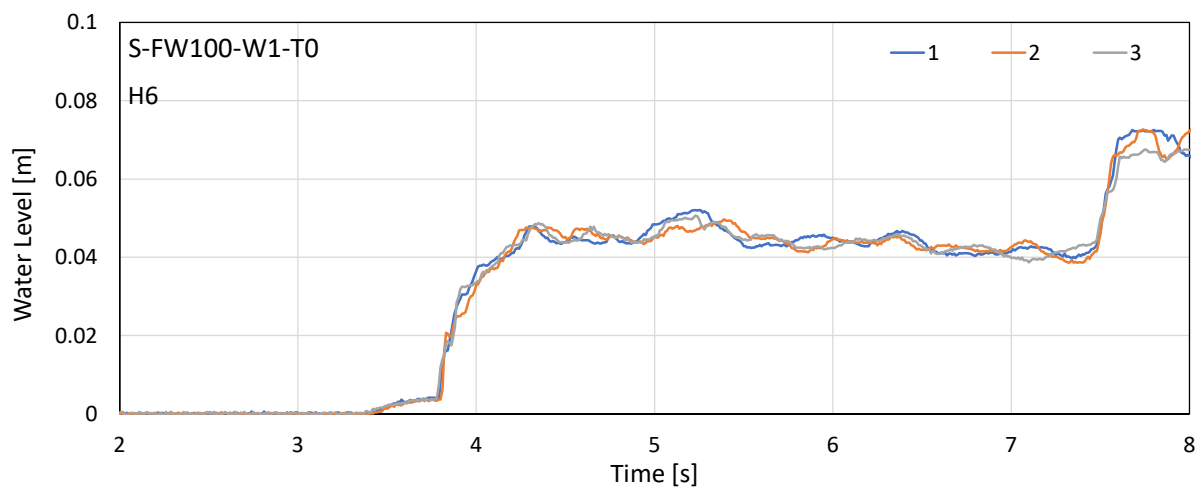


図- 3.24 通過波試験の結果（単純勾配 S, 淡水 FW, 密度 1.00g/cm^3 , 津波 W1, 水位 H6;汀線）

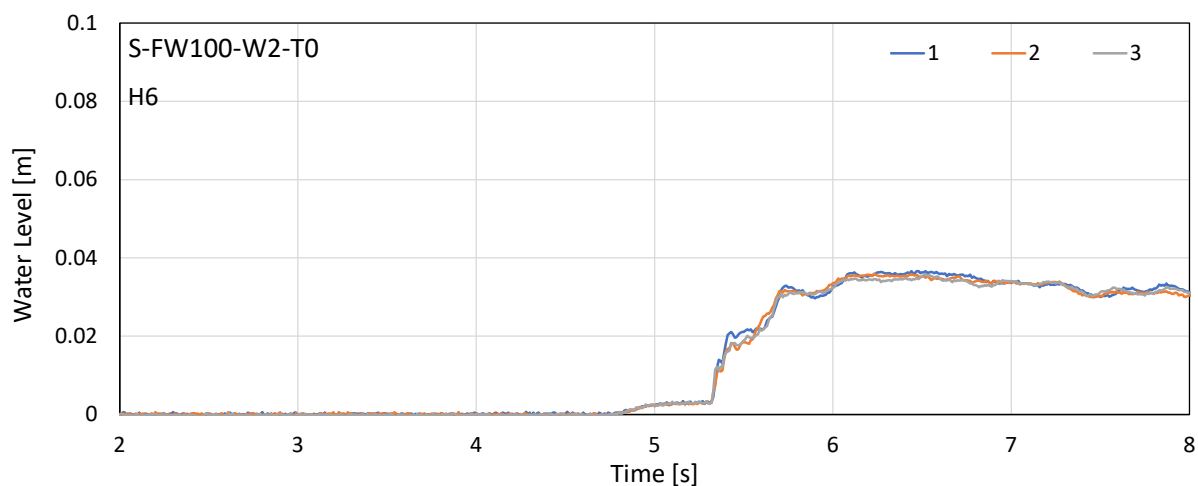


図- 3.25 通過波試験の結果（単純勾配 S，淡水 FW，密度 1.00g/cm^3 ，津波 W2，水位 H6;汀線）

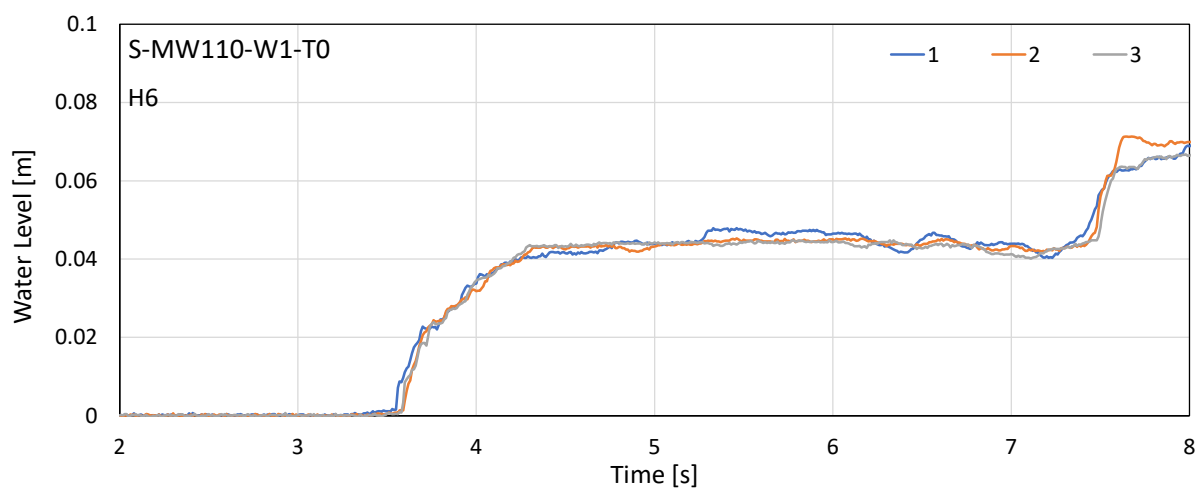


図- 3.26 通過波試験の結果（単純勾配 S，濁水 MW，密度 1.10g/cm^3 ，津波 W1，水位 H6;汀線）

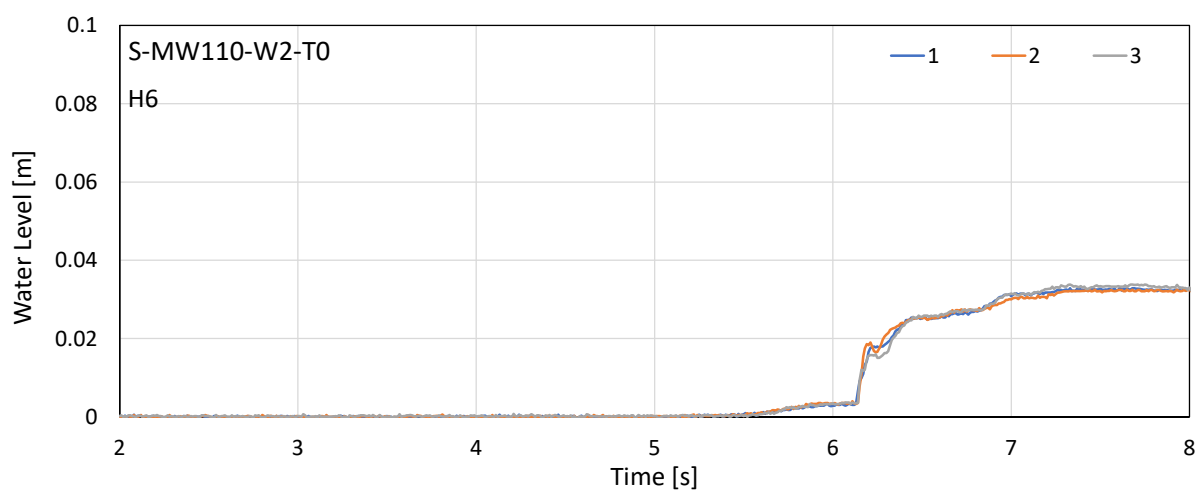
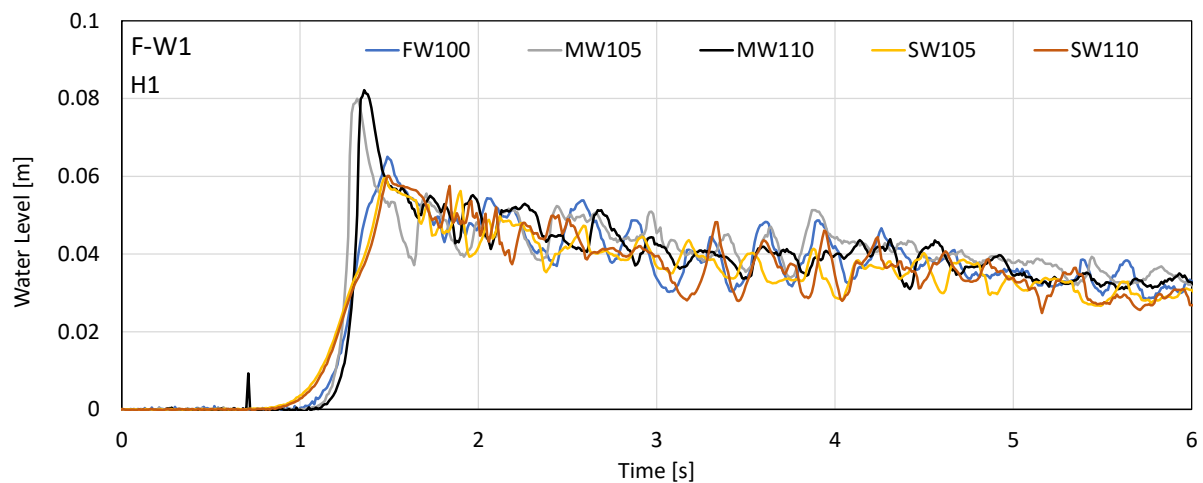
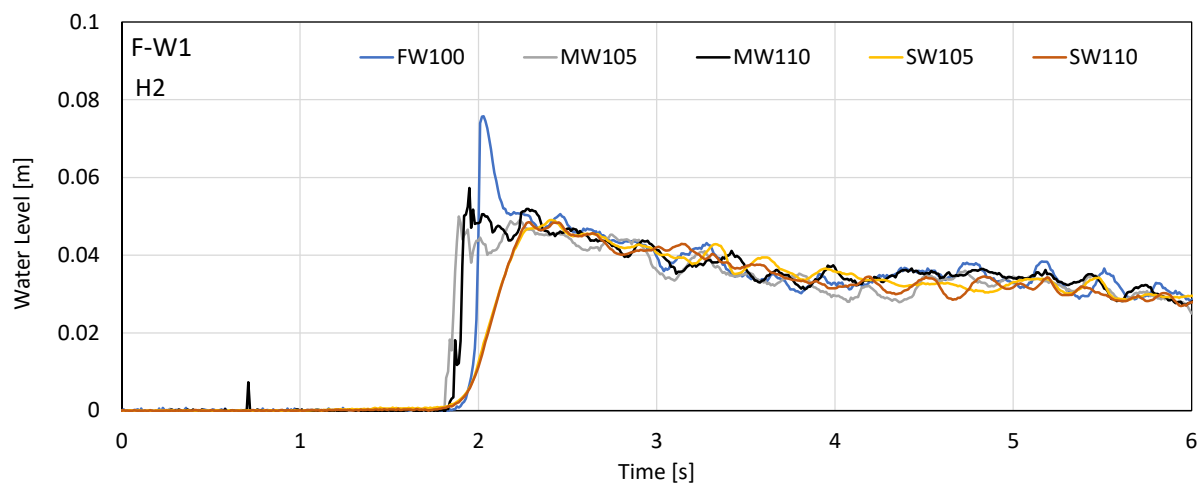


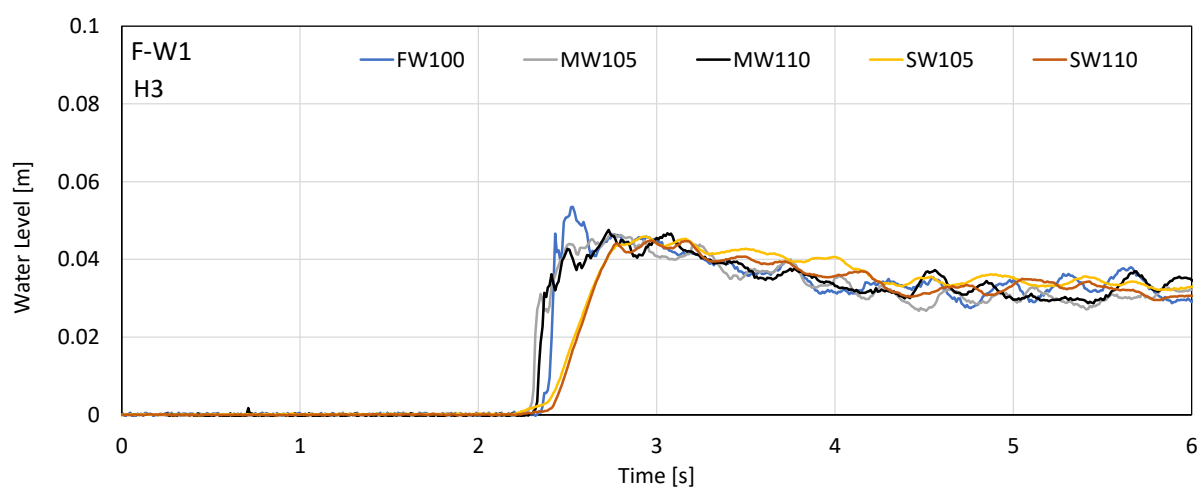
図- 3.27 通過波試験の結果（単純勾配 S，濁水 MW，密度 1.10g/cm^3 ，津波 W2，水位 H6;汀線）



(a) H1 の水位時系列

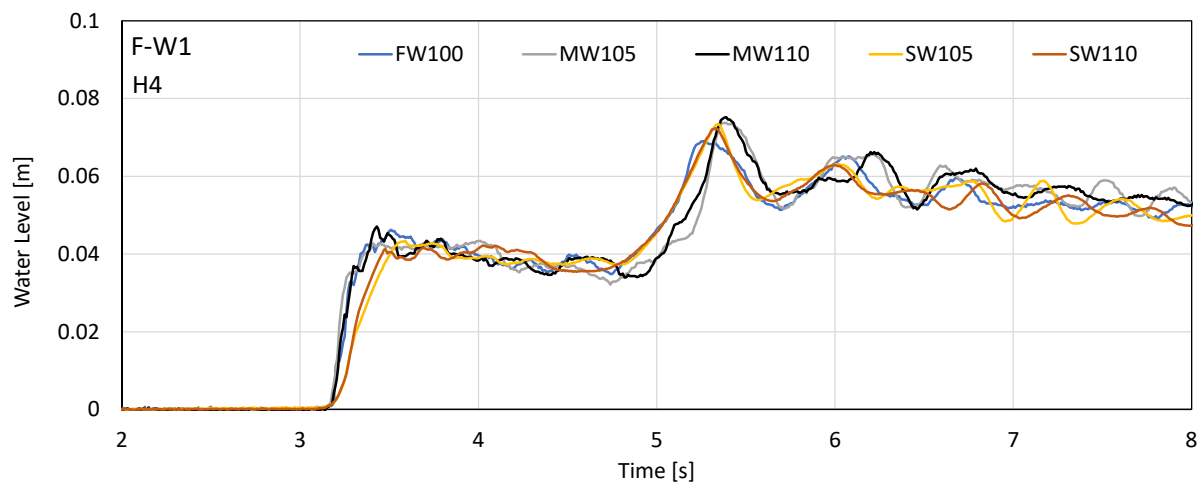


(b) H2 の水位時系列

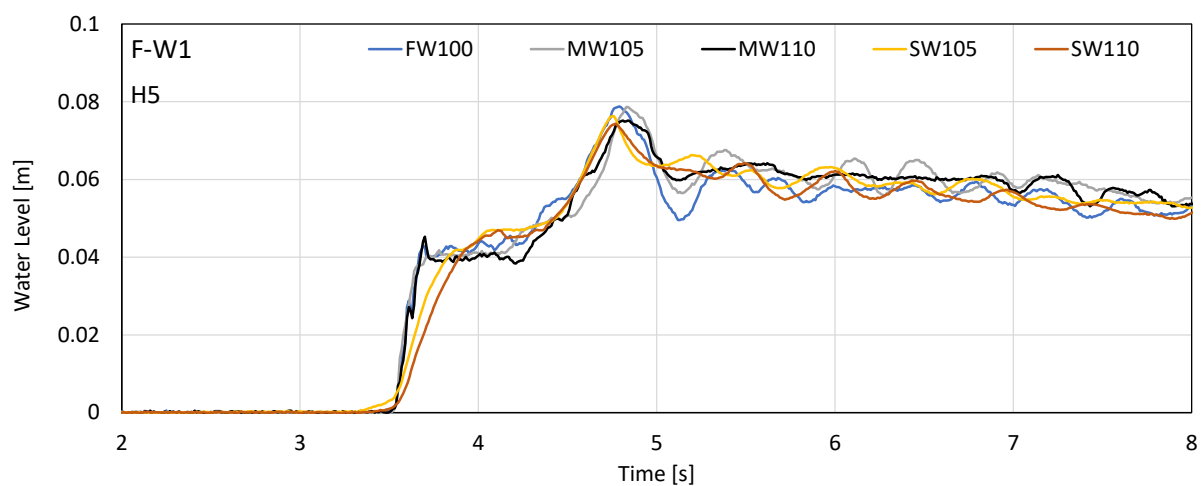


(c) H3 の水位時系列

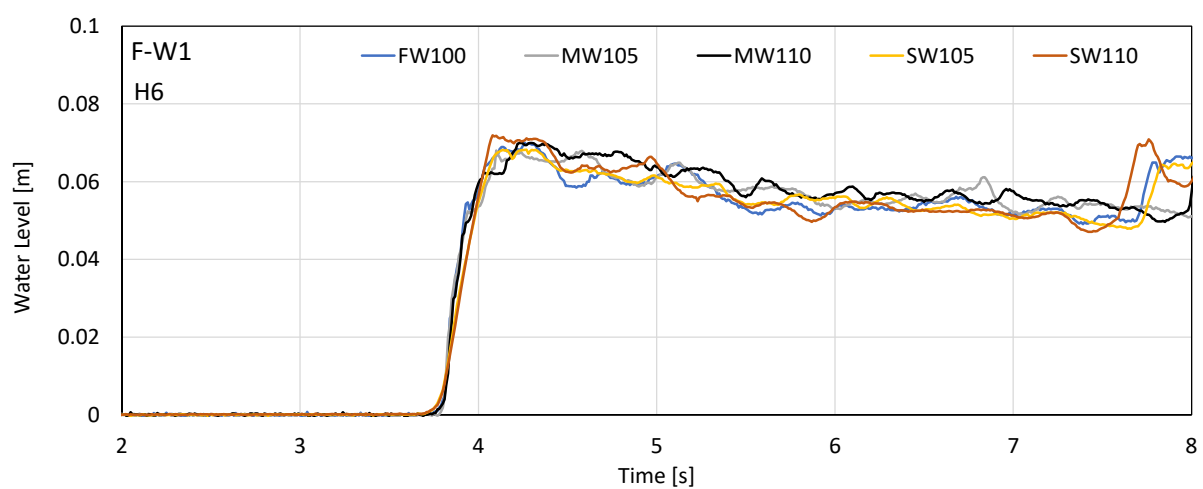
図- 3.28 通過波試験の結果比較（水平床 F，津波 W1） [1]



(a) H4 の水位時系列

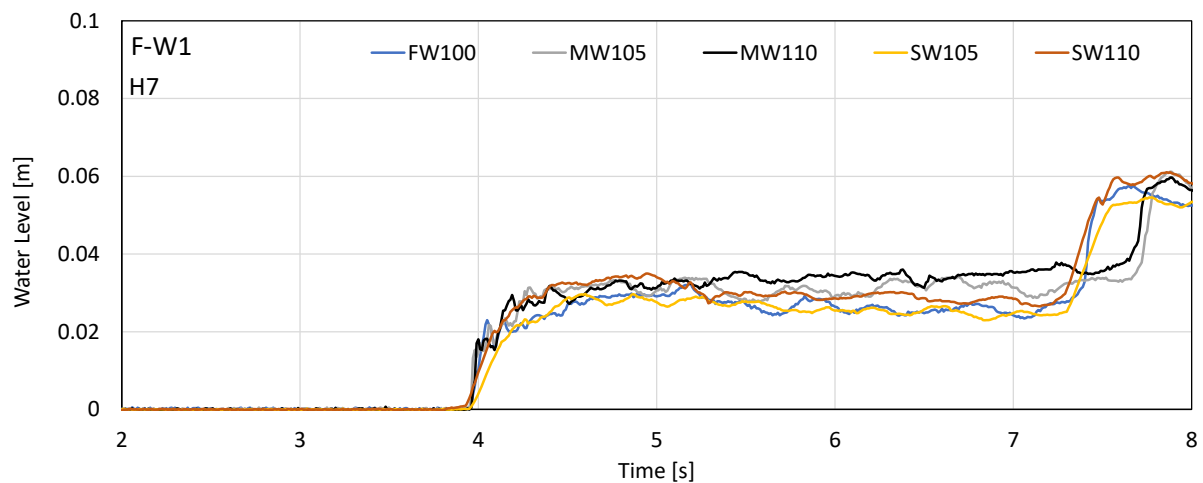


(b) H5 の水位時系列

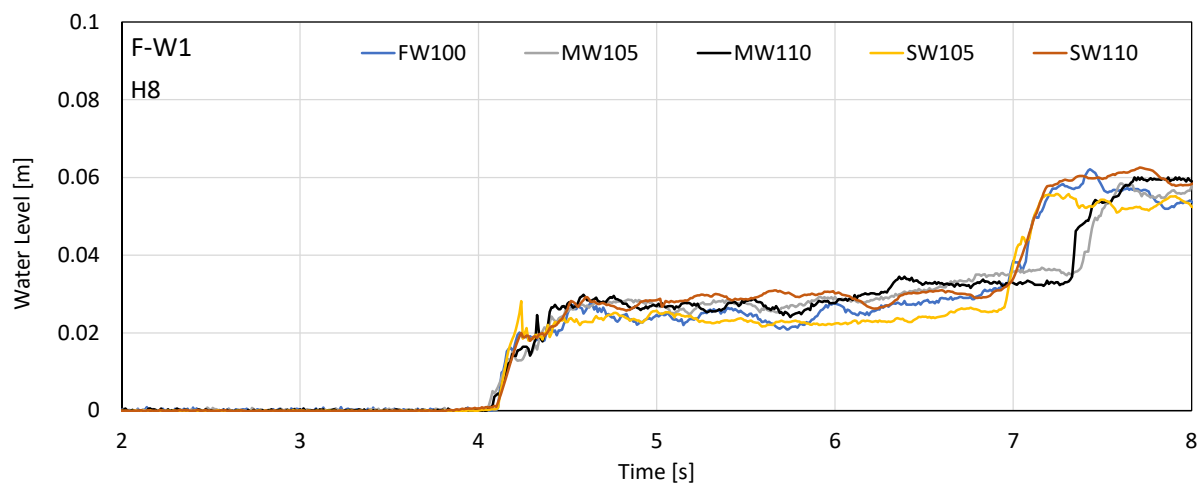


(c) H6 の水位時系列；汀線位置

図- 3.29 通過波試験の結果比較（水平床 F，津波 W1） [2]

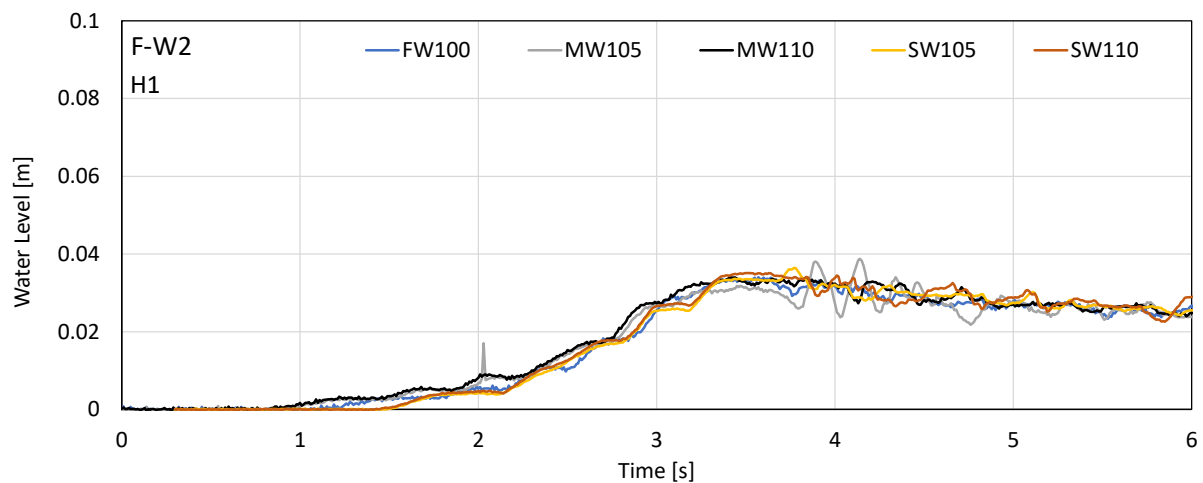


(a) H7 の水位時系列

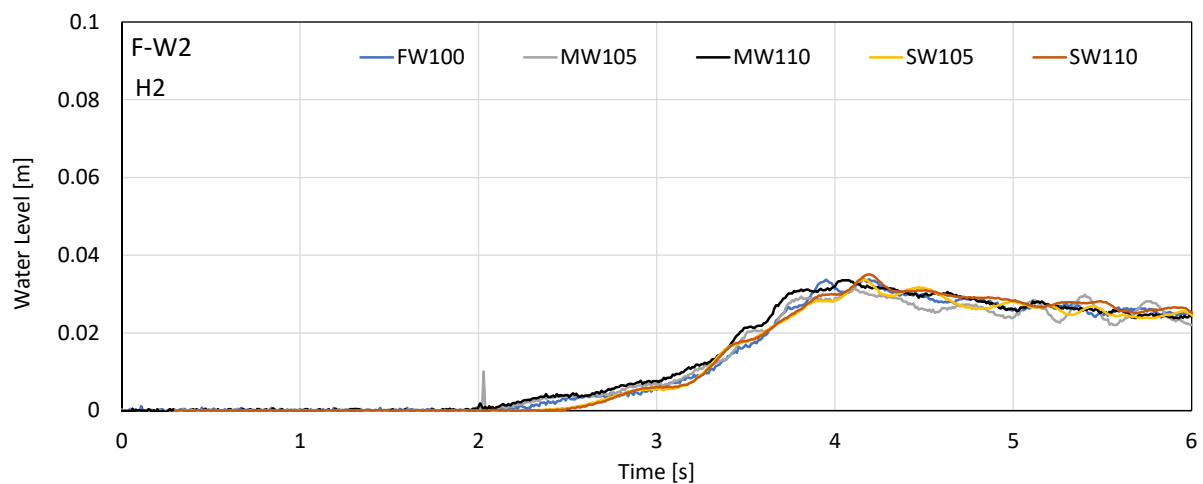


(b) H8 の水位時系列

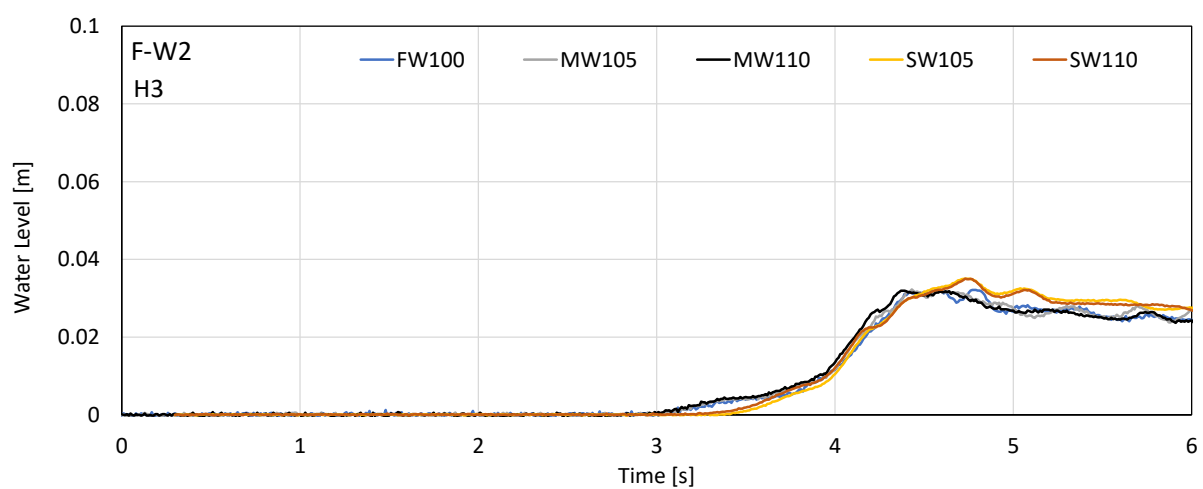
図- 3.30 通過波試験の結果比較（水平床 F，津波 W1） [3]



(a) H1 の水位時系列

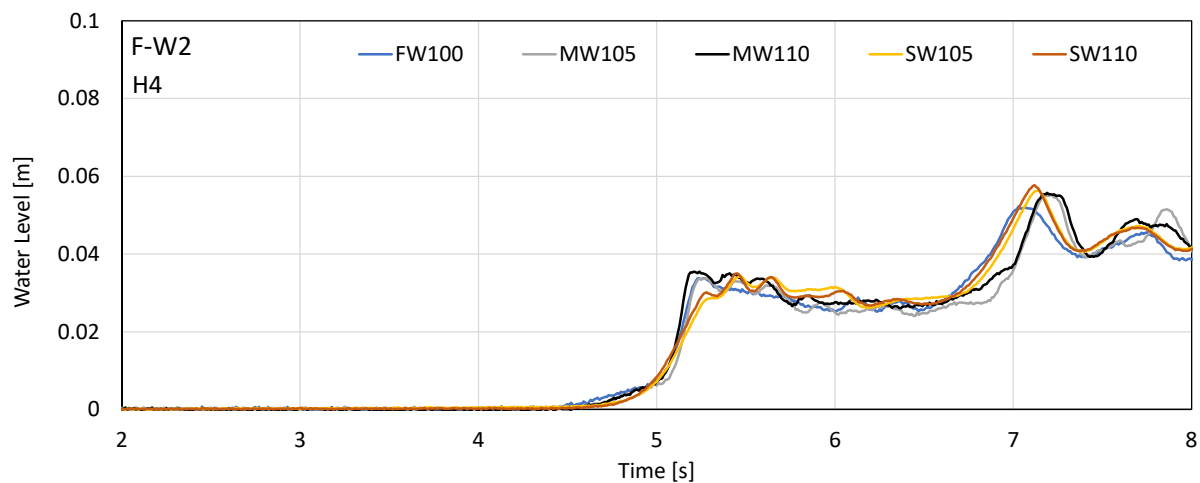


(b) H2 の水位時系列

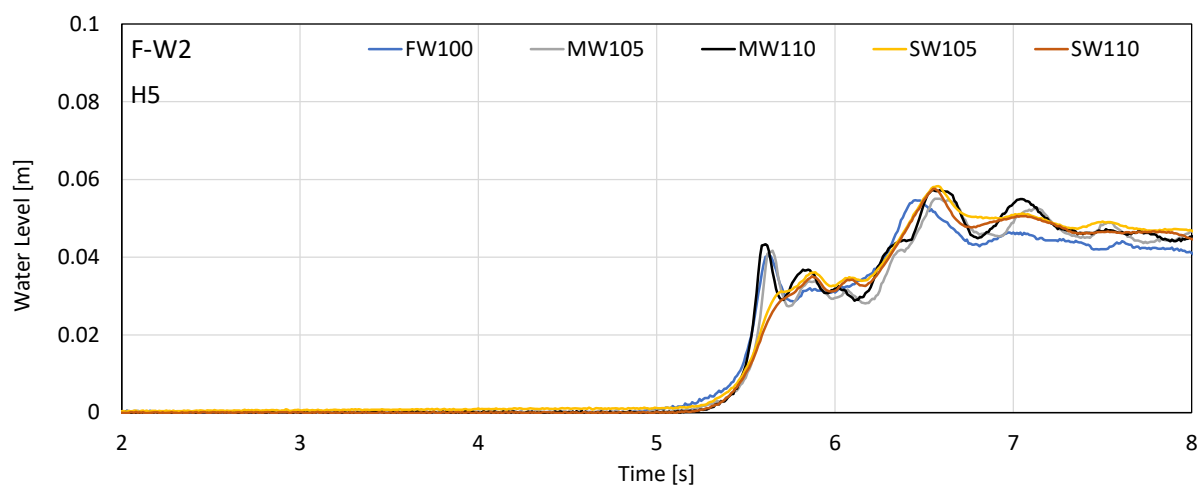


(c) H3 の水位時系列

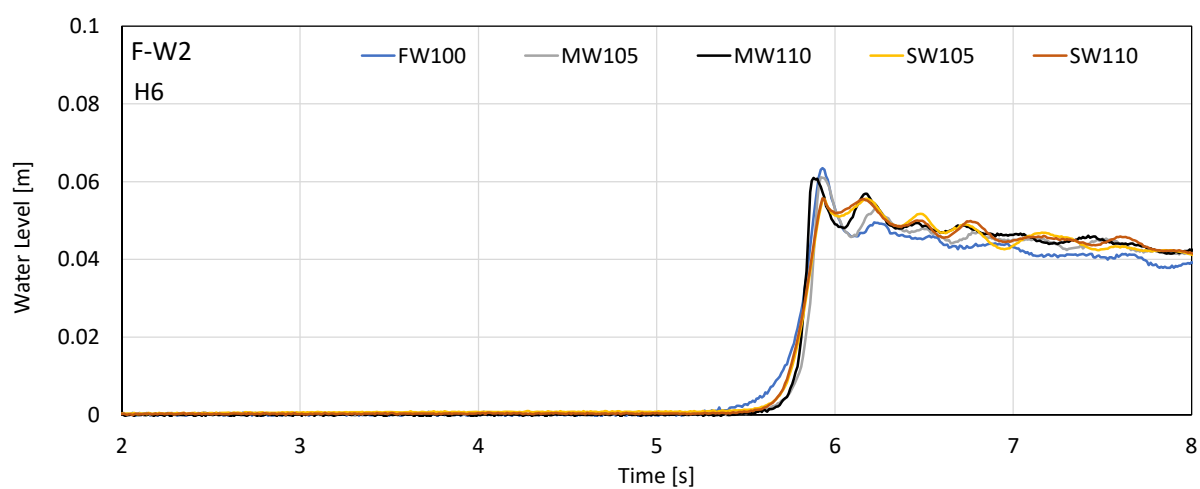
図- 3.31 通過波試験の結果比較（水平床 F, 津波 W2） [1]



(a) H4 の水位時系列

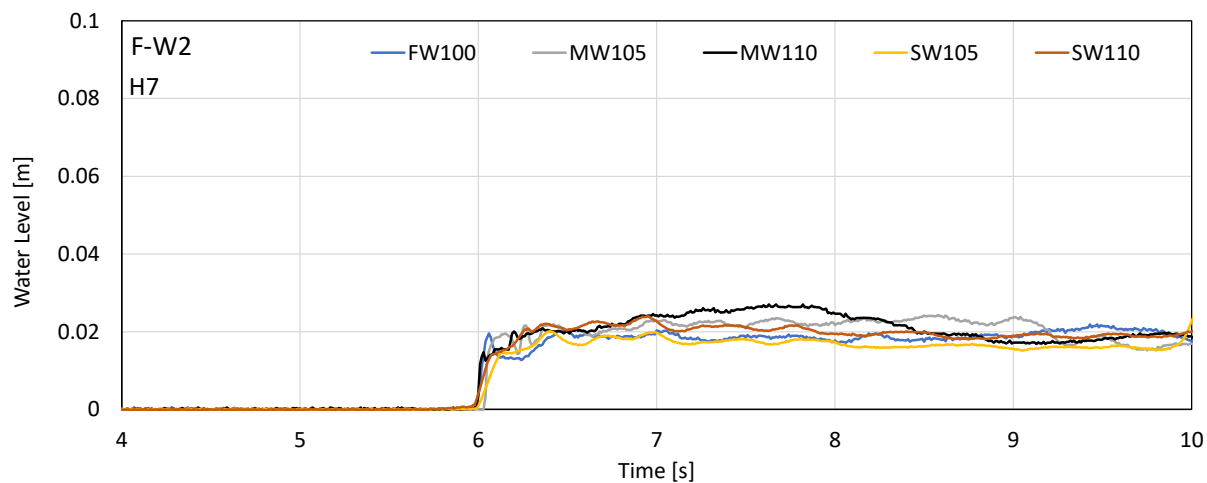


(b) H5 の水位時系列

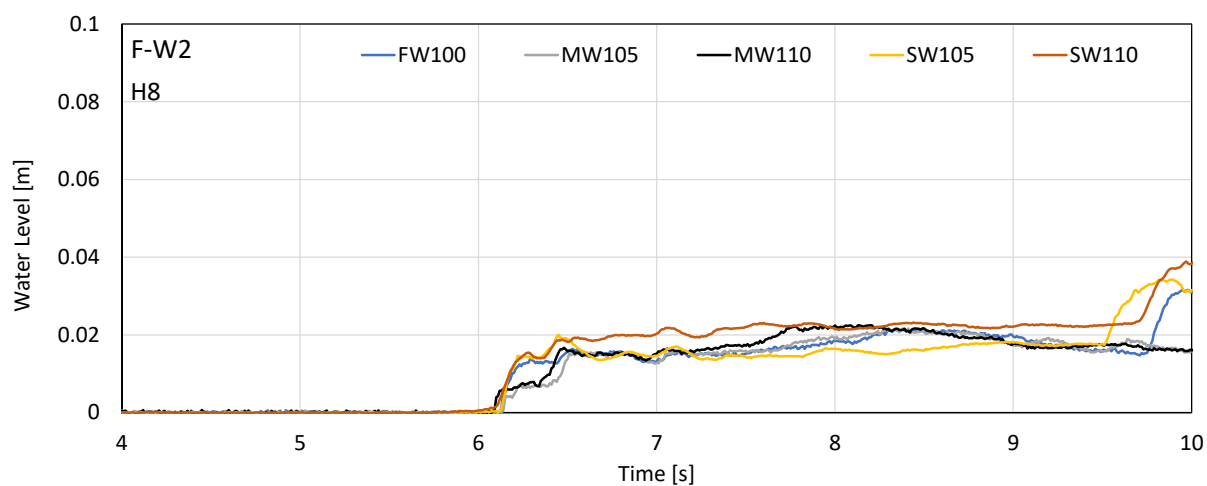


(c) H6 の水位時系列; 汀線位置

図- 3.32 通過波試験の結果比較（水平床 F，津波 W2） [2]

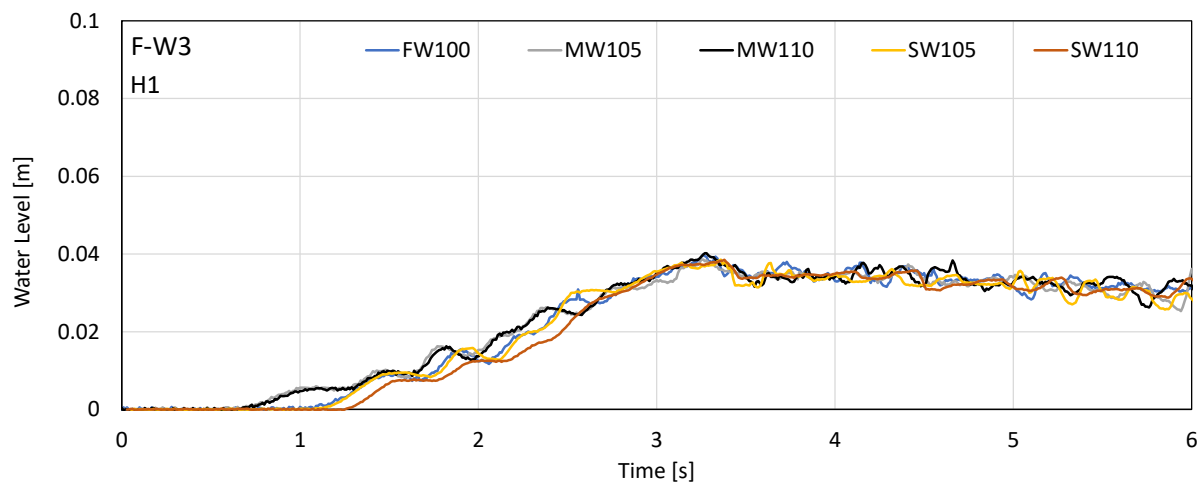


(a) H7 の水位時系列

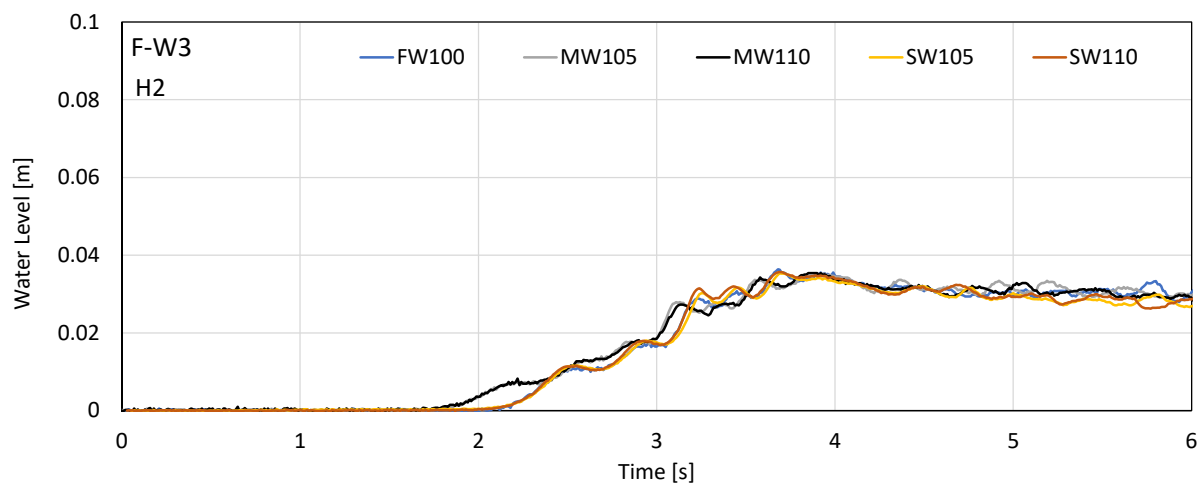


(b) H8 の水位時系列

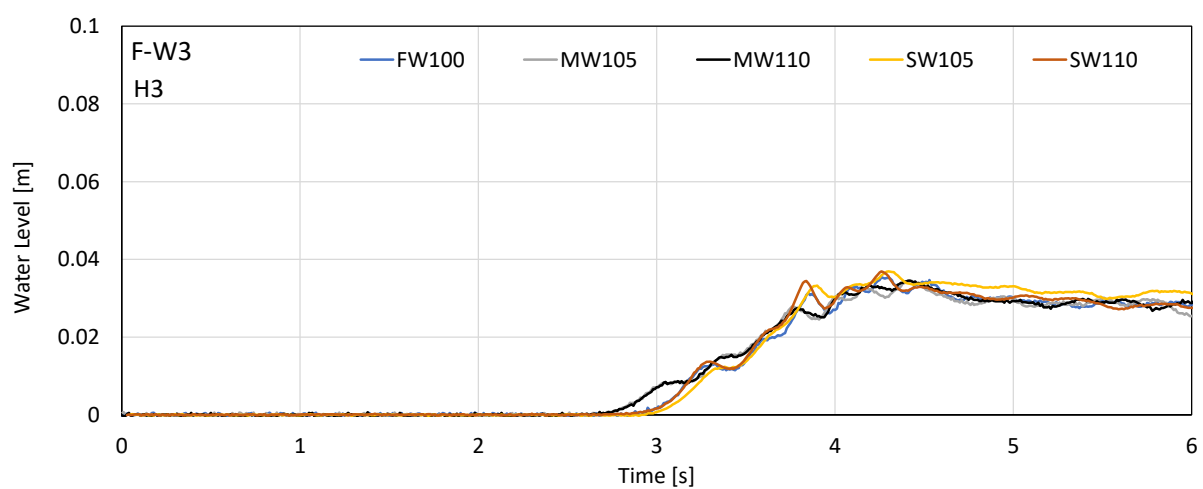
図- 3.33 通過波試験の結果比較（水平床 F，津波 W2） [3]



(a) H1 の水位時系列

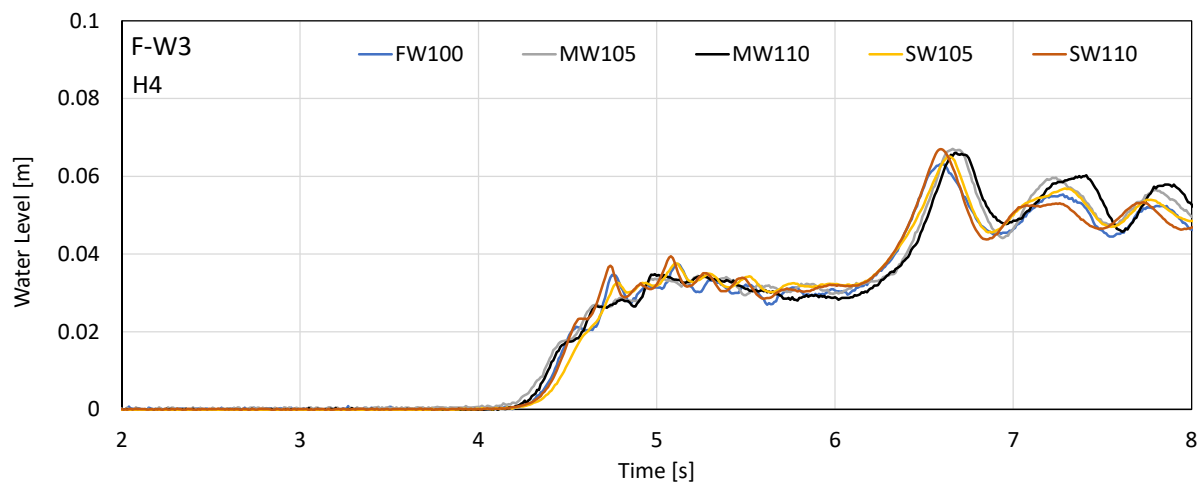


(b) H2 の水位時系列

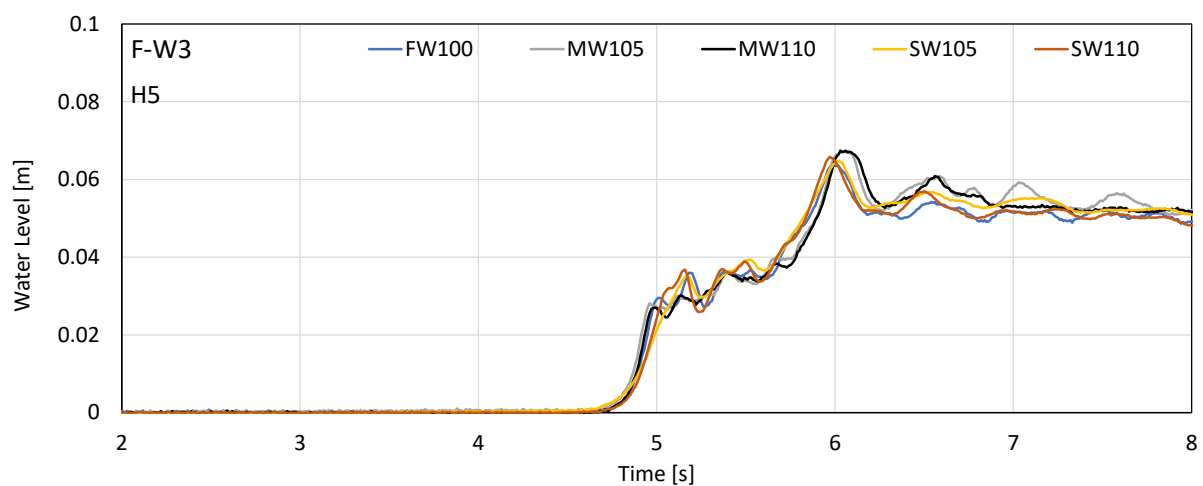


(c) H3 の水位時系列

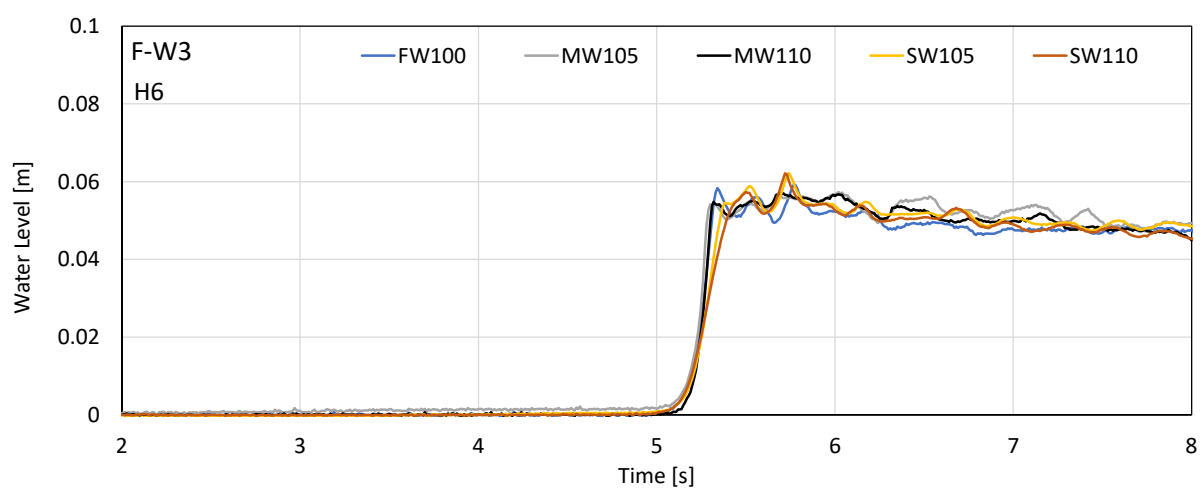
図- 3.34 通過波試験の結果比較（水平床 F，津波 W3） [1]



(a) H4 の水位時系列

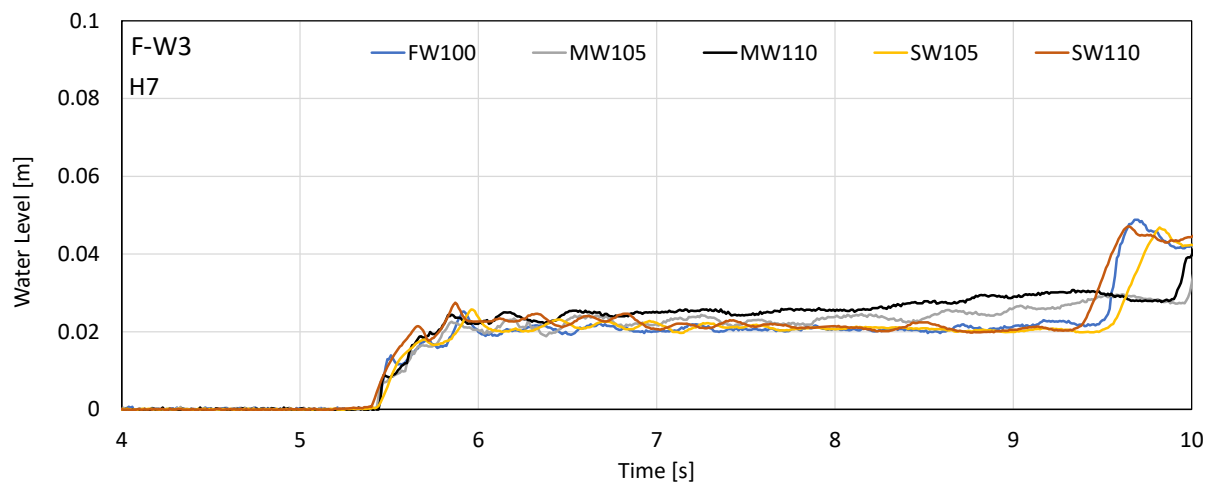


(b) H5 の水位時系列

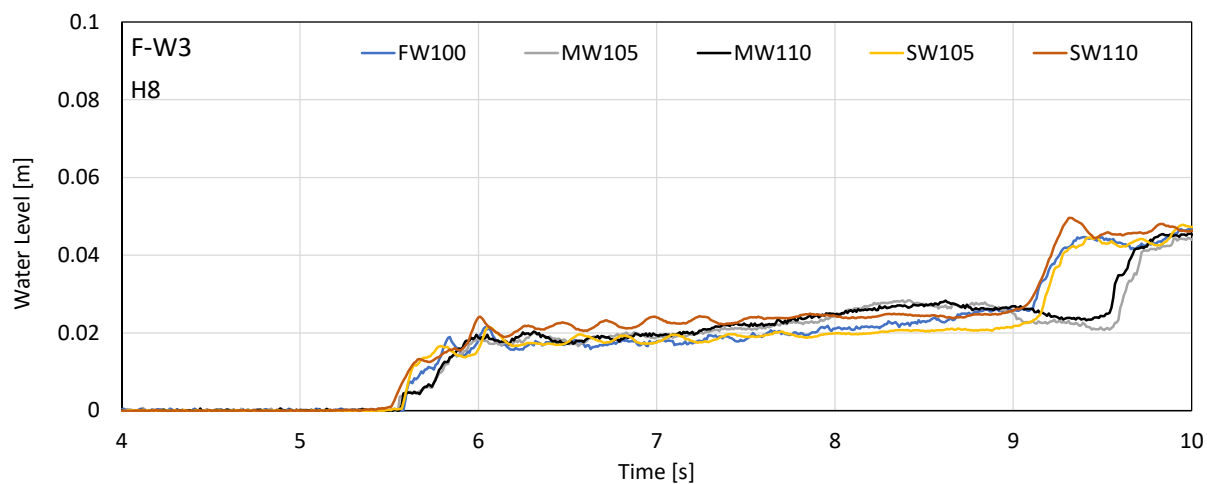


(c) H6 の水位時系列; 汀線位置

図- 3.35 通過波試験の結果比較（水平床 F，津波 W3） [2]

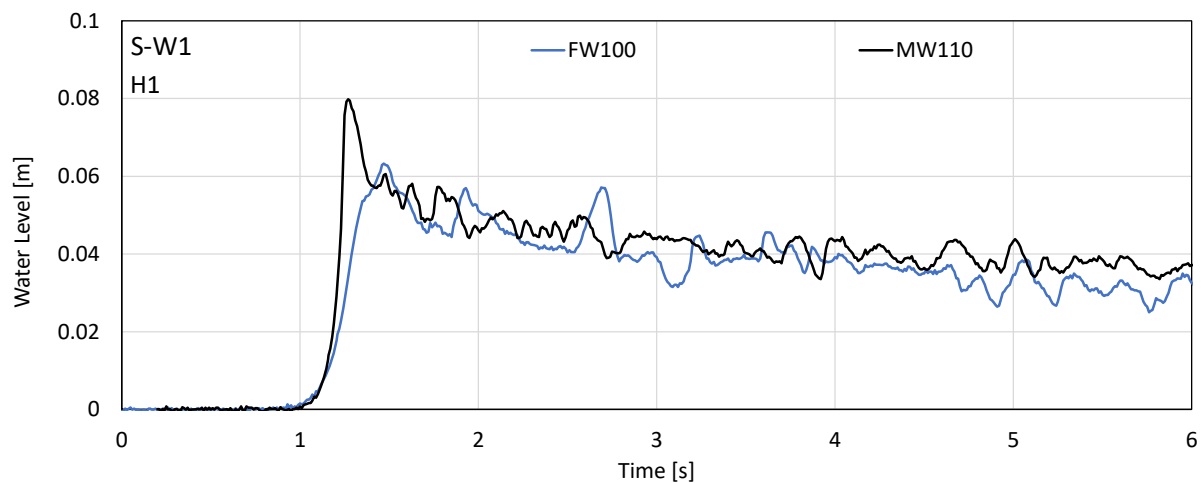


(a) H7 の水位時系列

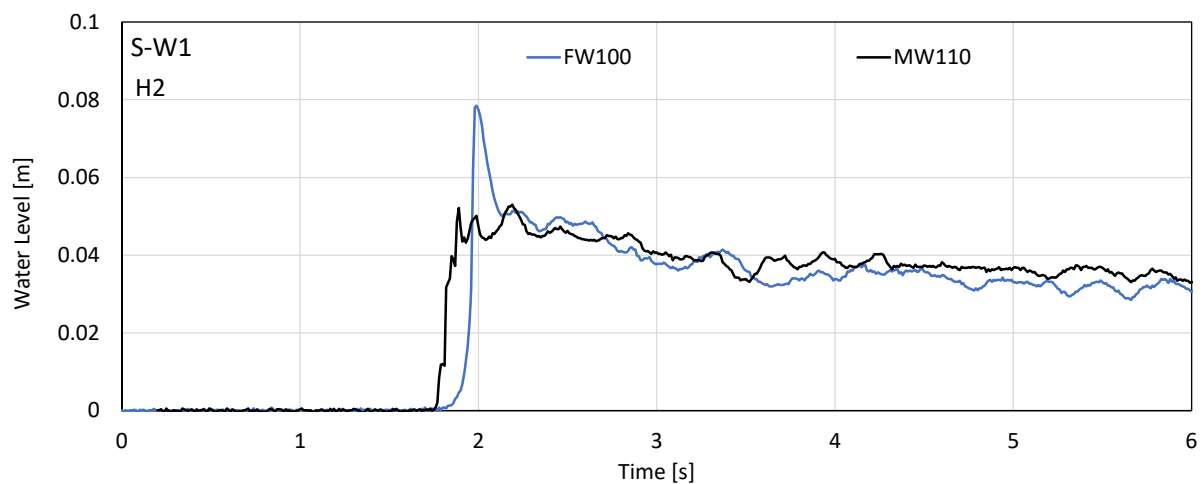


(b) H8 の水位時系列

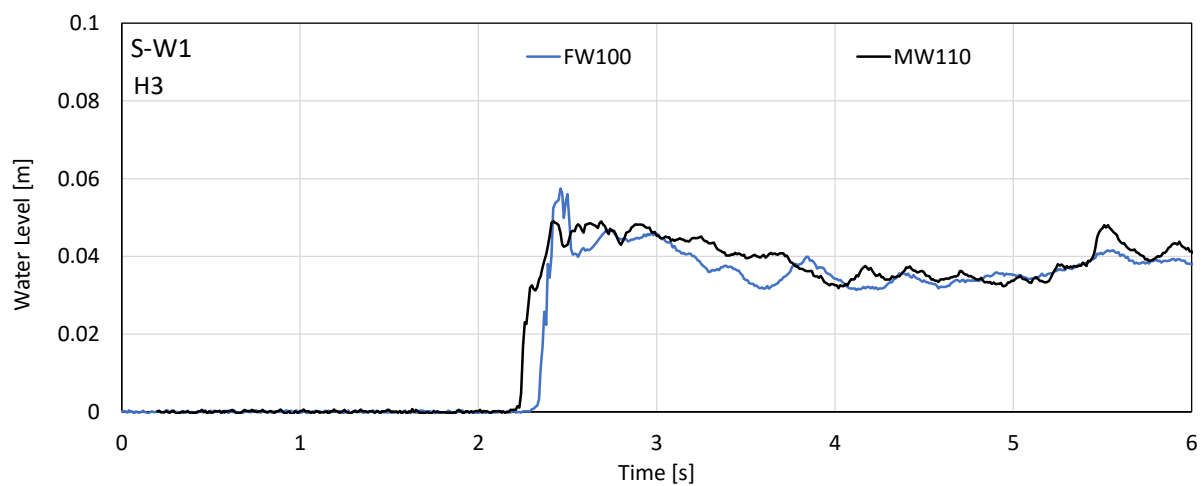
図- 3.36 通過波試験の結果比較（水平床 F，津波 W3） [3]



(a) H1 の水位時系列

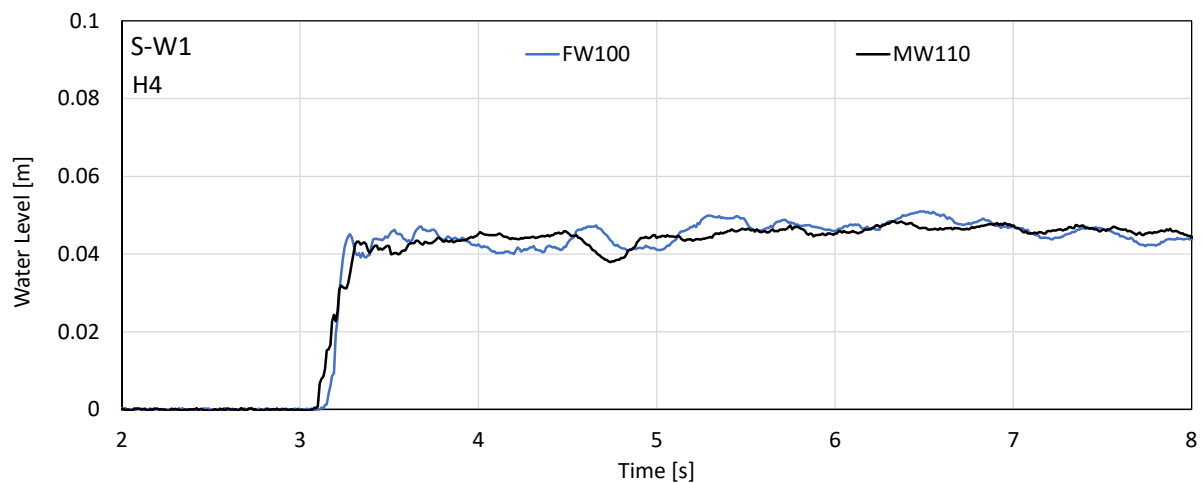


(b) H2 の水位時系列

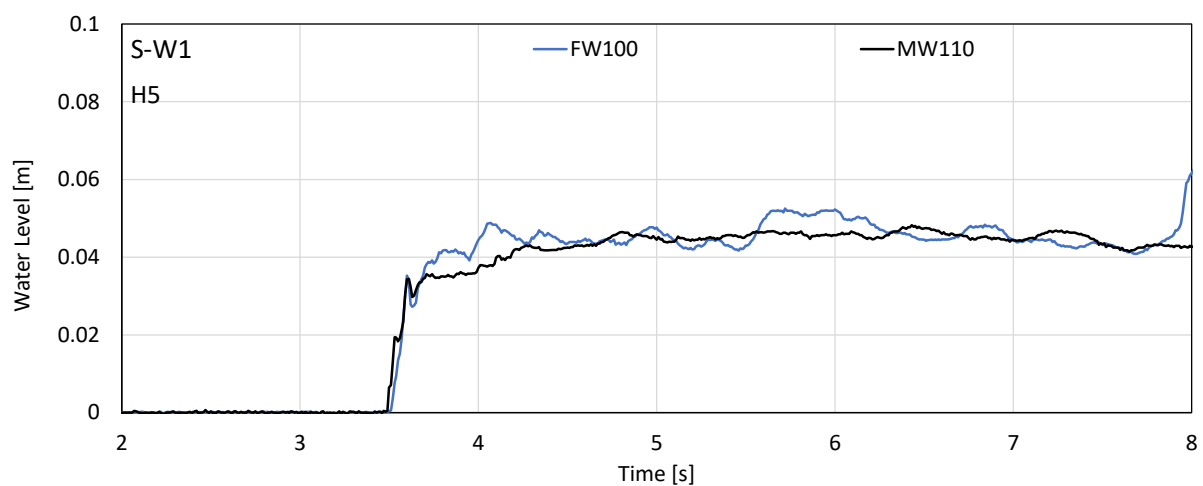


(c) H3 の水位時系列

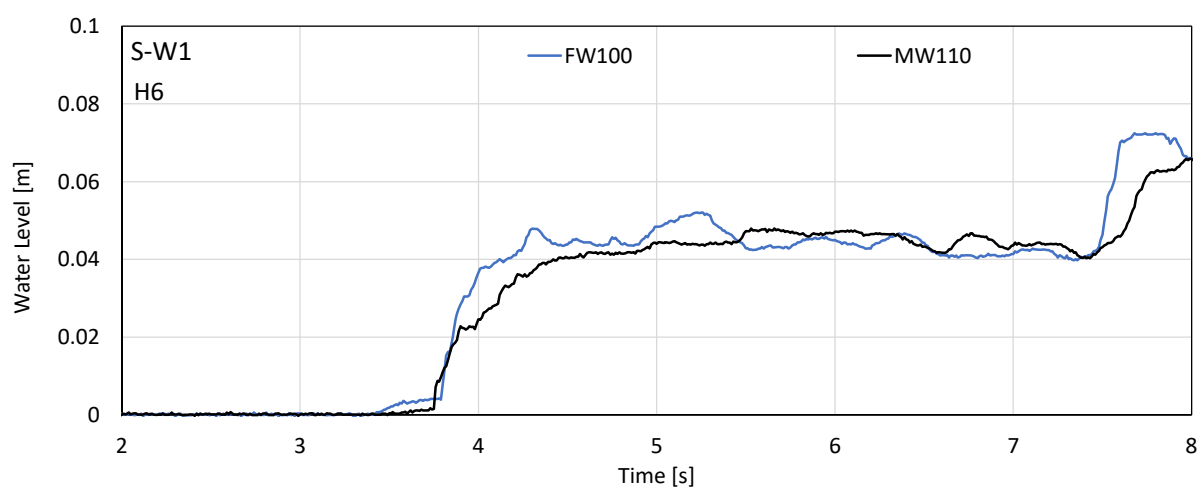
図- 3.37 通過波試験の結果比較（単純勾配 S，津波 W1） [1]



(a) H4 の水位時系列

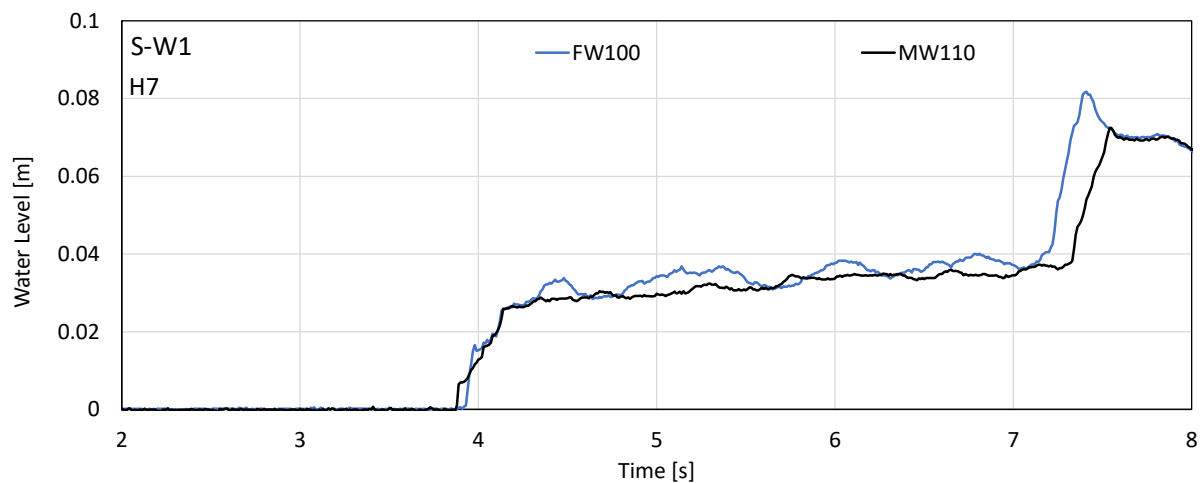


(b) H5 の水位時系列

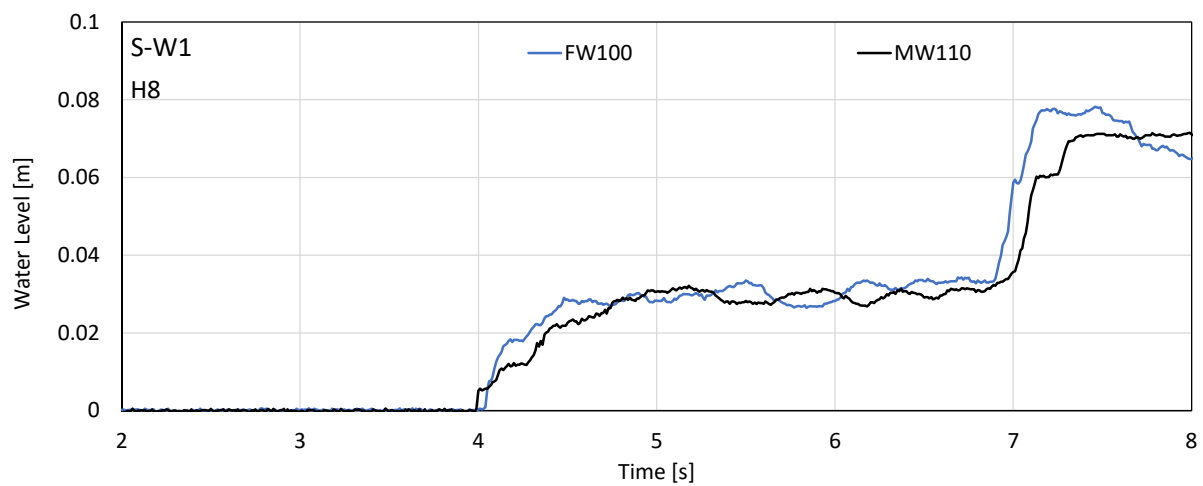


(c) H6 の水位時系列；汀線位置

図- 3.38 通過波試験の結果比較（単純勾配 S，津波 W1） [2]

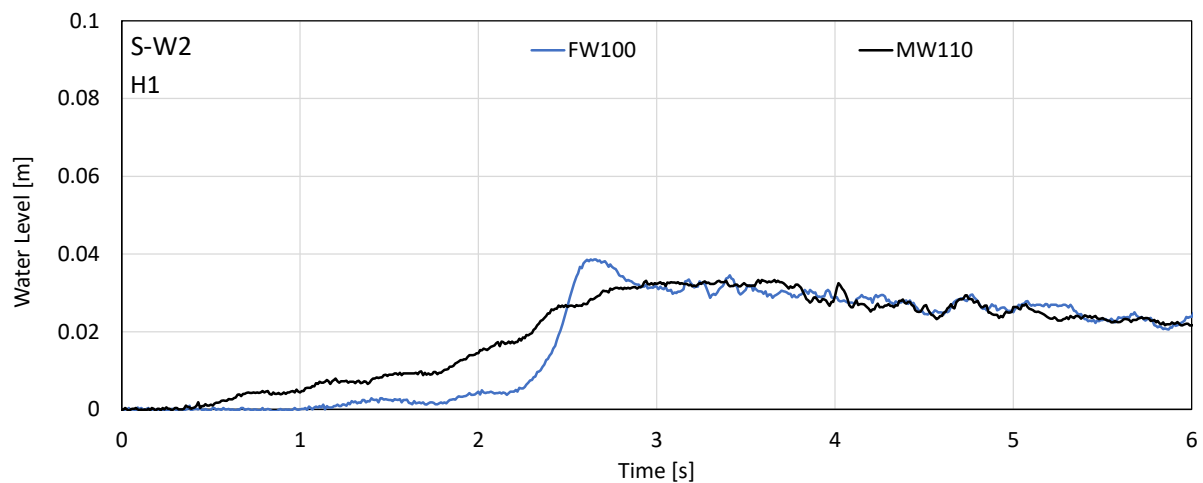


(a) H7 の水位時系列

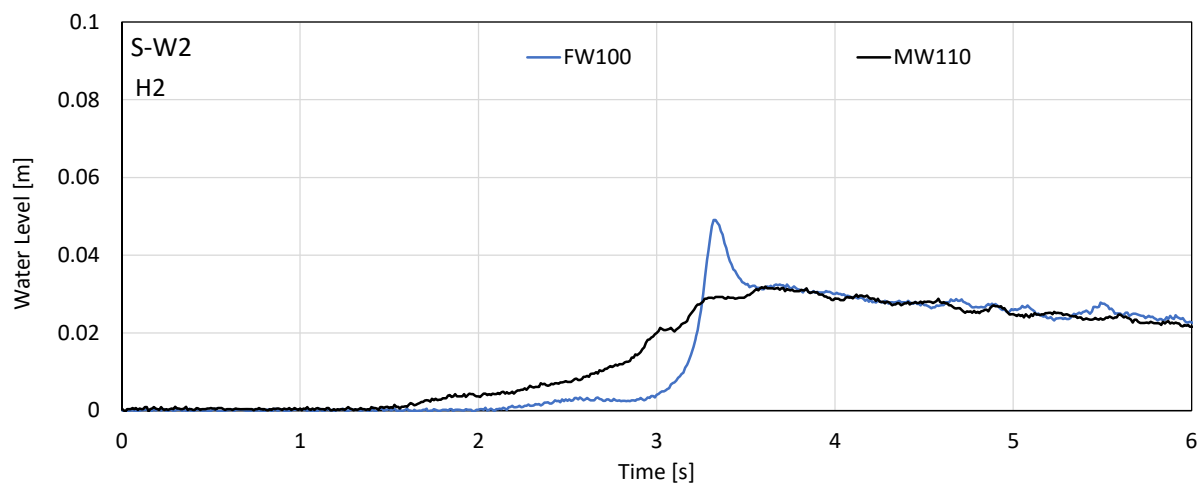


(b) H8 の水位時系列

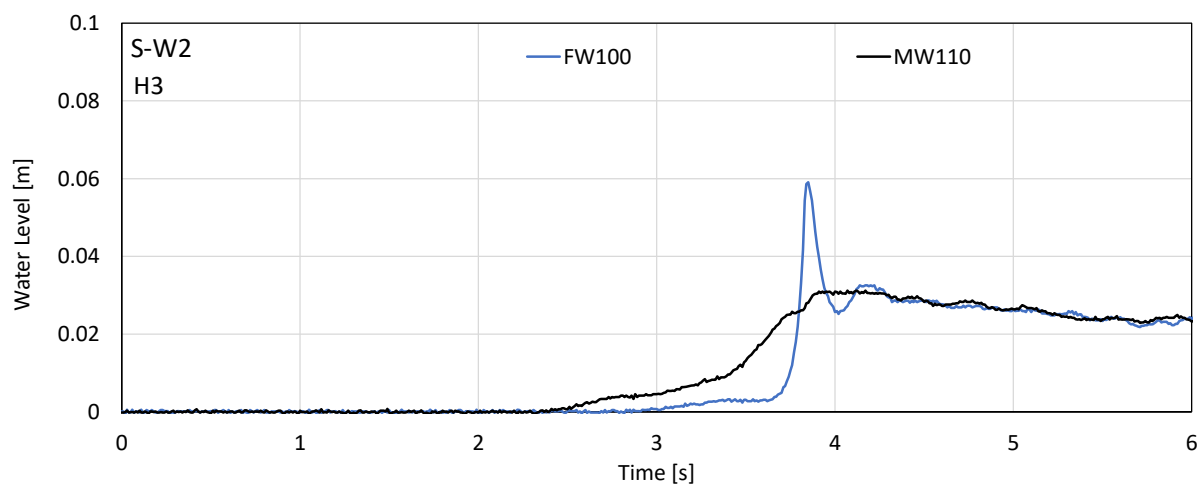
図- 3.39 通過波試験の結果比較（単純勾配 S，津波 W1） [3]



(a) H1 の水位時系列

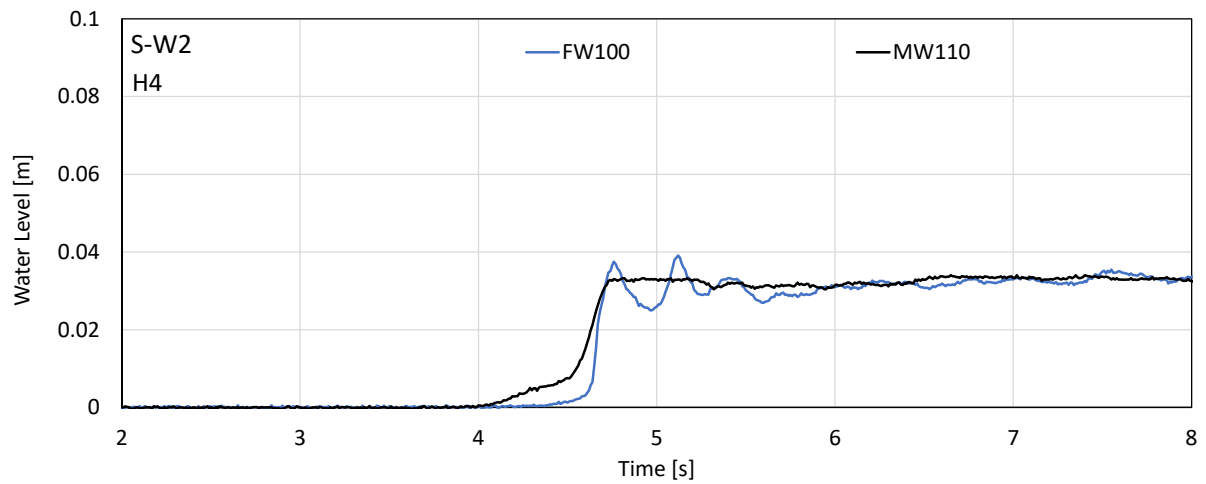


(b) H2 の水位時系列

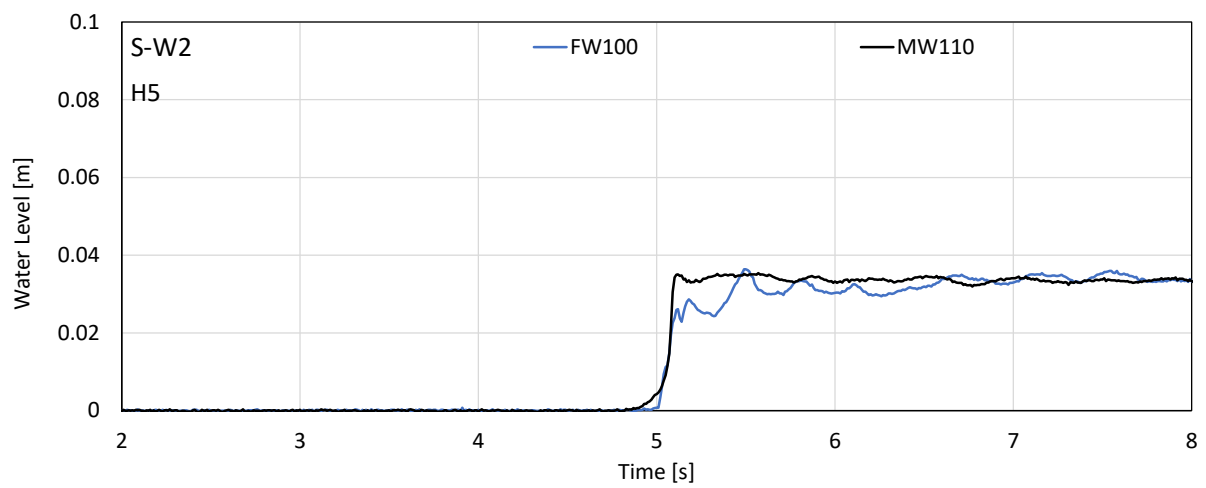


(c) H3 の水位時系列

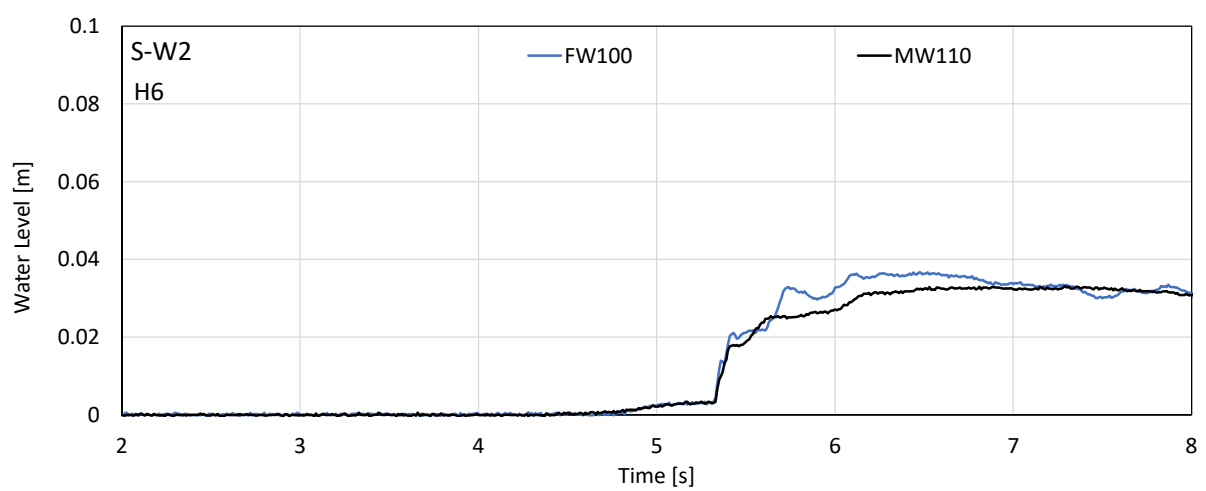
図- 3.40 通過波試験の結果比較（単純勾配 S，津波 W2） [1]



(a) H4 の水位時系列

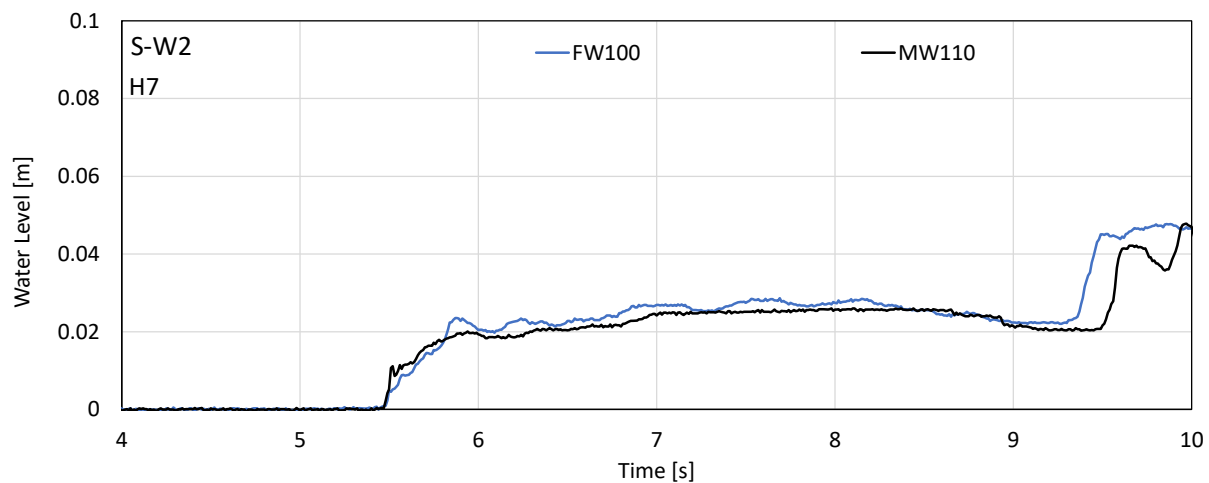


(b) H5 の水位時系列

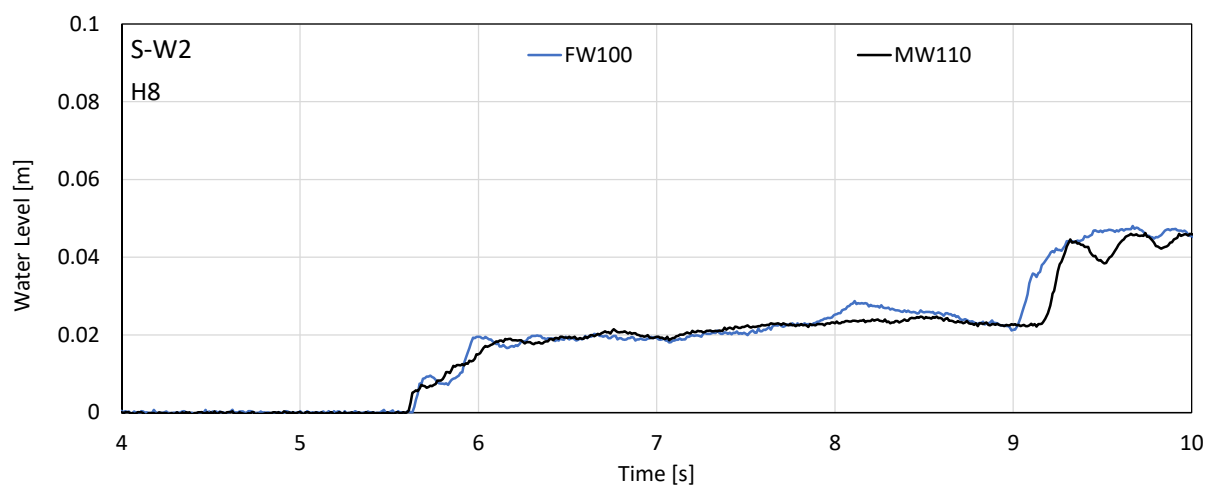


(c) H6 の水位時系列；汀線位置

図- 3.41 通過波試験の結果比較（単純勾配 S，津波 W2） [2]



(a) H7 の水位時系列



(b) H8 の水位時系列

図- 3.42 通過波試験の結果比較（単純勾配 S，津波 W2） [3]

表-3.4 通過波における最大浸水深と最大流速・先端流速（水平床 F, 淡水 $\rho=1.00\text{g/cm}^3$ ）

海底 地形	流体 種類	密度 [g/cm ³]	津波 ケース	位置	No.	最大浸水深			プロベラ流速計			映像判読	
									最大流速			先端流速	
						[s]	[m]		[s]	[m/s]		[m/s]	
F	FW	1.00	W1	H6	1	4.21	0.068	0.069	4.06	0.781	0.825	—	—
					2	4.12	0.069		4.04	0.868		—	
					3	4.13	0.071		4.03	0.827		—	
				H7	1	4.54	0.029	0.030	4.20	1.081	1.061	1.053	1.030
					2	4.83	0.030		4.20	1.022		0.966	
					3	4.99	0.031		4.30	1.079		1.069	
				H8	1	4.63	0.027	0.027	4.45	1.153	1.123	—	—
					2	4.57	0.027		4.44	1.060		—	
					3	4.58	0.026		4.35	1.155		—	
			W2	H6	1	5.91	0.067	0.067	6.00	0.684	0.674	—	—
					2	5.92	0.067		6.02	0.668		—	
					3	5.91	0.066		6.00	0.669		—	
				H7	1	6.99	0.022	0.022	6.14	0.892	0.842	1.010	0.975
					2	6.05	0.021		6.15	0.870		0.961	
					3	6.06	0.023		6.20	0.764		0.952	
				H8	1	6.50	0.016	0.015	6.29	0.823	0.848	—	—
					2	6.55	0.015		6.32	0.878		—	
					3	6.55	0.015		6.31	0.844		—	
			W3	H6	1	5.77	0.056	0.056	5.85	0.637	0.647	—	—
					2	5.76	0.056		5.83	0.647		—	
					3	5.76	0.057		5.80	0.659		—	
				H7	1	5.93	0.023	0.023	5.73	0.846	0.825	1.106	1.097
					2	5.91	0.023		5.97	0.802		1.093	
					3	5.90	0.023		5.71	0.827		1.093	
				H8	1	6.00	0.021	0.021	6.09	0.862	0.854	—	—
					2	6.02	0.021		5.83	0.865		—	
					3	6.03	0.021		6.09	0.835		—	

表- 3.5 通過波における最大浸水深と最大流速・先端流速（水平床 F，濁水 $\rho=1.05\text{g/cm}^3$ ）

海底 地形	流体 種類	密度 [g/cm ³]	津波 ケース	位置	No.	最大浸水深			プロベラ流速計			映像判読	
									最大流速		先端流速		
						[s]	[m]	[s]	[m/s]	[m/s]			
F	MW	1.05	W1	H6	1	3.90	0.068	0.067	—	—	—	—	—
					2	3.98	0.066		—	—		—	
					3	3.88	0.067		—	—		—	
				H7	1	4.96	0.034	0.034	—	—	—	1.449	1.370
					2	4.85	0.034		—	—		1.370	
					3	5.40	0.035		—	—		1.291	
				H8	1	4.64	0.029	0.030	—	—	—	—	—
					2	4.96	0.031		—	—		—	
					3	4.57	0.030		—	—		—	
			W2	H6	1	6.25	0.061	0.061	—	—	—	—	—
					2	6.24	0.062		—	—		—	
					3	6.24	0.061		—	—		—	
				H7	1	8.91	0.024	0.024	—	—	—	1.265	1.252
					2	8.88	0.025		—	—		1.250	
					3	8.50	0.024		—	—		1.243	
				H8	1	8.71	0.022	0.022	—	—	—	—	—
					2	8.68	0.022		—	—		—	
					3	8.64	0.022		—	—		—	
			W3	H6	1	6.47	0.057	0.058	—	—	—	—	—
					2	6.46	0.058		—	—		—	
					3	6.14	0.058		—	—		—	
				H7	1	7.07	0.024	0.024	—	—	—	1.149	1.177
					2	6.97	0.025		—	—		1.177	
					3	7.00	0.024		—	—		1.204	
				H8	1	6.76	0.020	0.020	—	—	—	—	—
					2	6.78	0.021		—	—		—	
					3	6.76	0.020		—	—		—	

表-3.6 通過波における最大浸水深と最大流速・先端流速（水平床 F，濁水 $\rho=1.10\text{g/cm}^3$ ）

海底 地形	流体 種類	密度 [g/cm ³]	津波 ケース	位置	No.	最大浸水深		プロベラ流速計			映像判読		
								最大流速		先端流速			
						[s]	[m]	[s]	[m/s]	[m/s]			
F	MW	1.10	W1	H6	1	3.98	0.070	0.068	—	—	—	—	—
					2	4.18	0.065		—	—		—	
					3	4.05	0.067		—	—		—	
				H7	1	5.19	0.035	0.038	—	—	—	1.258	1.269
					2	5.37	0.038		—	—		1.300	
					3	4.09	0.040		—	—		1.250	
				H8	1	4.34	0.030	0.030	—	—	—	—	—
					2	4.32	0.030		—	—		—	
					3	4.33	0.029		—	—		—	
			W2	H6	1	6.21	0.061	0.062	—	—	—	—	—
					2	6.23	0.062		—	—		—	
					3	6.20	0.064		—	—		—	
				H7	1	7.96	0.027	0.028	—	—	—	1.184	1.258
					2	7.55	0.030		—	—		1.282	
					3	8.20	0.026		—	—		1.307	
				H8	1	8.46	0.023	0.024	—	—	—	—	—
					2	8.53	0.024		—	—		—	
					3	8.36	0.025		—	—		—	
			W3	H6	1	6.14	0.057	0.057	—	—	—	—	—
					2	6.13	0.057		—	—		—	
					3	6.44	0.057		—	—		—	
				H7	1	6.60	0.025	0.025	—	—	—	1.156	1.122
					2	6.62	0.025		—	—		1.123	
					3	6.60	0.025		—	—		1.087	
				H8	1	6.76	0.020	0.020	—	—	—	—	—
					2	6.75	0.020		—	—		—	
					3	6.75	0.021		—	—		—	

表- 3.7 通過波における最大浸水深と最大流速・先端流速（水平床 F, 塩水 $\rho=1.05\text{g/cm}^3$ ）

海底 地形	流体 種類	密度 [g/cm ³]	津波 ケース	位置	No.	最大浸水深			プロベラ流速計			映像判読		
									最大流速			先端流速		
						[s]	[m]		[s]	[m/s]		[m/s]		
F	SW	1.05	W1	H6	1	4.42	0.068	0.069	4.17	0.755	0.768	—	—	
					2	4.26	0.068		4.16	0.789		—		
					3	4.26	0.070		4.23	0.759		—		
				H7	1	4.75	0.030	0.030	4.33	1.116	1.138	0.957	0.984	
					2	5.31	0.030		4.49	1.085		0.901		
					3	5.30	0.030		4.29	1.213		1.093		
				H8	1	4.39	0.028	0.027	4.43	1.188	1.174	—	—	
					2	4.38	0.026		4.46	1.149		—		
					3	4.78	0.026		4.51	1.185		—		
				W2	H6	1	5.88	0.056	0.056	5.71	0.632	0.618	—	—
						2	5.65	0.056		5.70	0.613		—	
						3	5.88	0.056		5.70	0.608		—	
			H7		1	6.10	0.020	0.020	5.89	0.853	0.843	1.088	1.079	
					2	6.10	0.020		5.85	0.848		1.069		
					3	6.10	0.020		5.85	0.827		1.080		
			H8		1	6.15	0.020	0.020	6.24	0.834	0.841	—	—	
					2	6.14	0.019		6.22	0.842		—		
					3	6.14	0.020		6.22	0.845		—		
			W3		H6	1	5.69	0.062	0.061	5.78	0.629	0.629	—	—
						2	5.71	0.061		5.77	0.639		—	
						3	5.70	0.061		5.39	0.620		—	
					H7	1	5.91	0.026	0.025	5.64	0.909	0.883	1.118	1.093
						2	5.89	0.024		5.92	0.867		1.130	
						3	5.90	0.024		5.59	0.871		1.031	
				H8	1	6.01	0.022	0.022	6.04	0.936	0.931	—	—	
					2	5.98	0.022		6.06	0.947		—		
					3	6.00	0.022		6.07	0.912		—		

表-3.8 通過波における最大浸水深と最大流速・先端流速（水平床 F, 塩水 $\rho=1.10\text{g/cm}^3$ ）

海底 地形	流体 種類	密度 [g/cm ³]	津波 ケース	位置	No.	最大浸水深			プロベラ流速計			映像判読	
									最大流速			先端流速	
						[s]	[m]		[s]	[m/s]		[m/s]	
F	SW	1.10	W1	H6	1	4.20	0.072	0.070	4.11	0.854	0.809	—	—
					2	4.42	0.071		4.18	0.759		—	
					3	4.46	0.067		4.13	0.814		—	
				H7	1	5.06	0.035	0.035	4.32	1.131	1.155	0.990	1.058
					2	4.76	0.036		4.36	1.165		1.183	
					3	4.68	0.034		4.37	1.168		1.000	
				H8	1	5.78	0.031	0.032	4.52	1.152	1.160	—	—
					2	5.30	0.034		4.49	1.125		—	
					3	5.47	0.032		4.46	1.203		—	
			W2	H6	1	5.63	0.056	0.056	5.71	0.611	0.615	—	—
					2	5.83	0.057		5.71	0.628		—	
					3	5.87	0.056		5.70	0.606		—	
				H7	1	6.65	0.024	0.023	6.07	0.833	0.825	0.966	1.061
					2	6.60	0.023		5.87	0.826		1.130	
					3	6.64	0.023		5.85	0.817		1.088	
				H8	1	8.14	0.023	0.022	6.21	0.697	0.703	—	—
					2	8.06	0.022		6.25	0.699		—	
					3	7.97	0.022		6.22	0.713		—	
			W3	H6	1	5.69	0.062	0.062	5.40	0.661	0.644	—	—
					2	5.70	0.062		5.39	0.640		—	
					3	5.69	0.061		5.40	0.632		—	
				H7	1	5.84	0.027	0.027	5.89	0.851	0.856	1.081	1.128
					2	5.85	0.026		5.86	0.863		1.184	
					3	5.84	0.026		5.89	0.854		1.118	
				H8	1	7.83	0.025	0.024	6.05	0.877	0.858	—	—
					2	7.50	0.024		6.02	0.860		—	
					3	7.81	0.024		6.03	0.838		—	

表- 3.9 通過波における最大浸水深と最大流速・先端流速（単純勾配 S）

海底 地形	流体 種類	密度 [g/cm ³]	津波 ケース	位置	No.	最大浸水深			プロベラ流速計			映像判読	
						最大流速			先端流速			先端流速	
						[s]	[m]		[s]	[m/s]		[m/s]	
S	FW	1.00	W1	H6	1	5.22	0.052	0.051	4.01	1.078	1.067	—	—
					2	5.39	0.050		4.02	1.062		—	
					3	5.23	0.051		4.09	1.062		—	
				H7	1	5.14	0.037	0.036	4.21	1.248	1.239	1.235	1.201
					2	5.50	0.037		4.16	1.236		1.184	
					3	5.59	0.036		4.17	1.234		1.183	
				H8	1	5.50	0.033	0.033	4.42	1.237	1.284	—	—
					2	5.63	0.032		4.33	1.275		—	
					3	4.93	0.032		4.33	1.340		—	
			W2	H6	1	6.44	0.037	0.036	5.81	0.854	0.856	—	—
					2	6.23	0.036		5.78	0.842		—	
					3	6.52	0.036		5.80	0.872		—	
				H7	1	7.69	0.029	0.029	5.95	0.957	0.955	1.075	0.954
					2	7.57	0.029		5.92	0.962		0.844	
					3	8.10	0.030		5.91	0.945		0.944	
				H8	1	8.11	0.029	0.028	6.07	0.969	0.950	—	—
					2	8.55	0.027		6.05	0.917		—	
					3	8.21	0.027		6.07	0.963		—	
	MW	1.10	W1	H6	1	5.33	0.048	0.046	—	—	—	—	—
					2	5.46	0.045		—	—		—	
					3	5.77	0.045		—	—		—	
				H7	1	6.94	0.037	0.037	—	—	—	1.143	1.133
					2	6.37	0.037		—	—		1.170	
					3	6.64	0.037		—	—		1.087	
				H8	1	4.98	0.032	0.032	—	—	—	—	—
					2	5.02	0.032		—	—		—	
					3	6.32	0.031		—	—		—	
			W2	H6	1	8.09	0.033	0.033	—	—	—	—	—
					2	8.03	0.033		—	—		—	
					3	7.33	0.034		—	—		—	
				H7	1	8.78	0.026	0.027	—	—	—	1.123	1.201
					2	9.00	0.026		—	—		1.282	
					3	8.47	0.028		—	—		1.197	
				H8	1	9.28	0.025	0.024	—	—	—	—	—
					2	9.14	0.024		—	—		—	
					3	9.01	0.024		—	—		—	

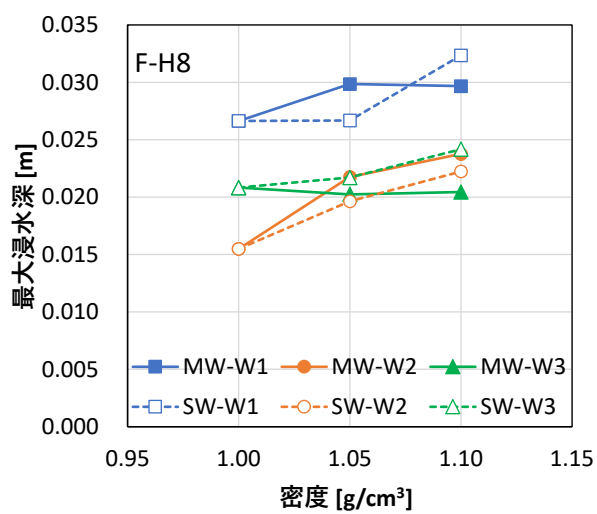
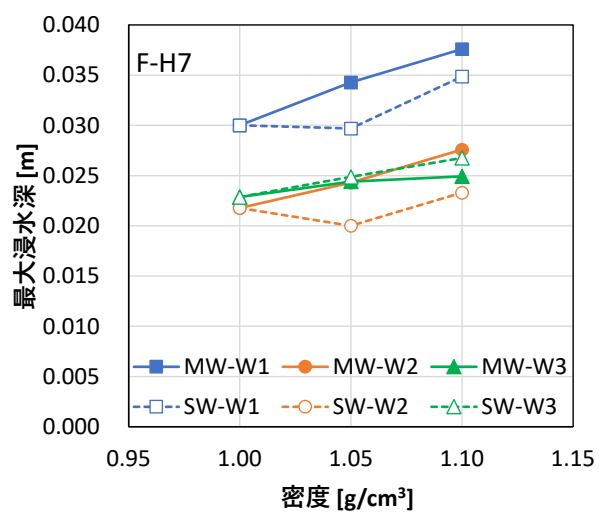
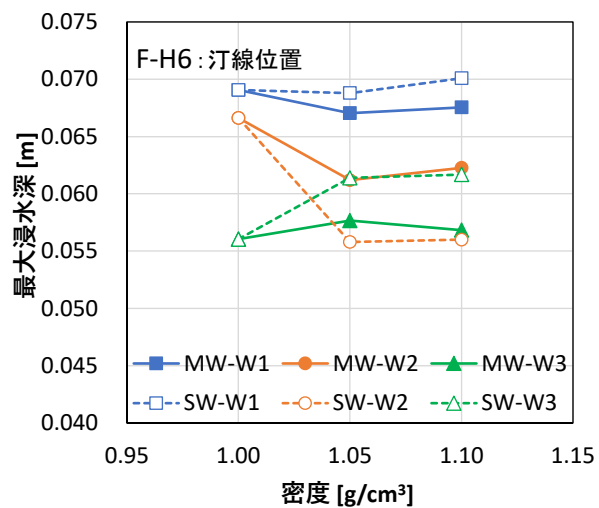


図- 3.43 流体密度による最大浸水深（水平床 F）

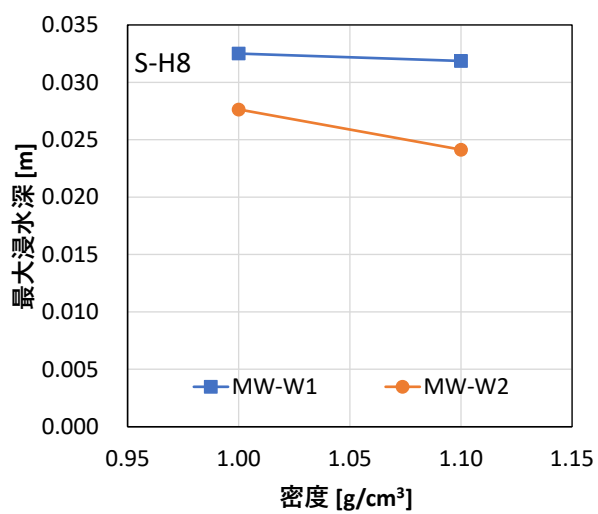
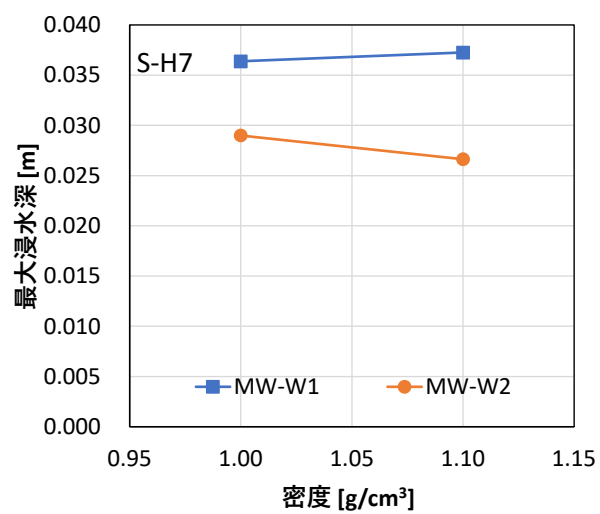
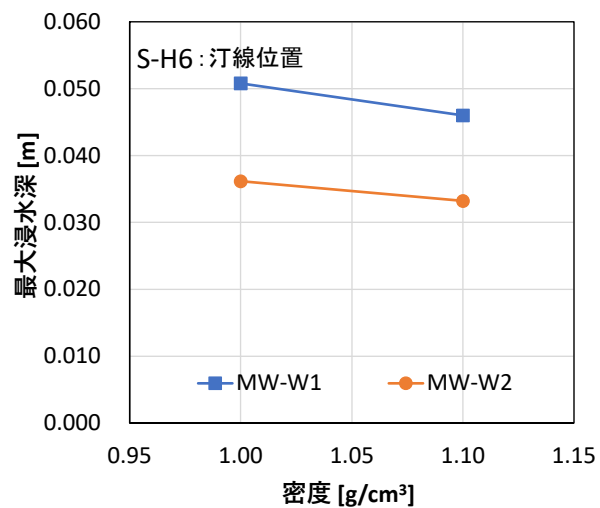
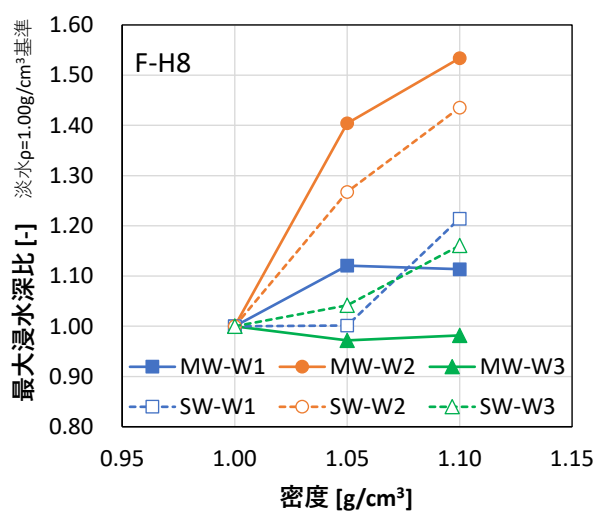
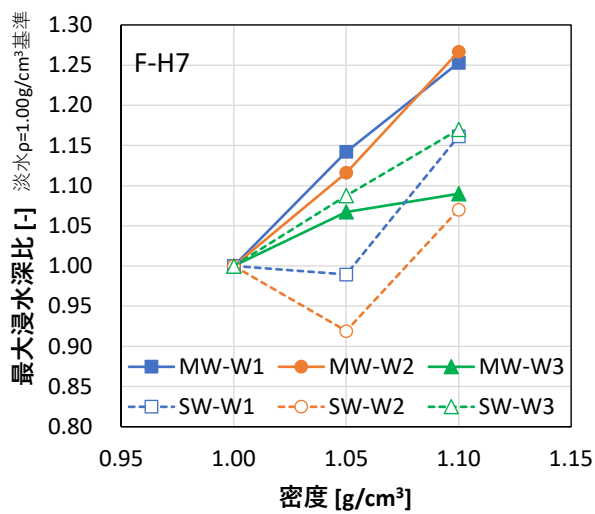
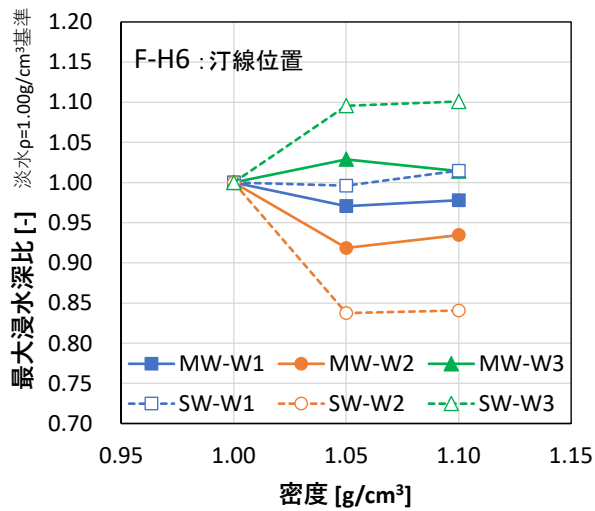
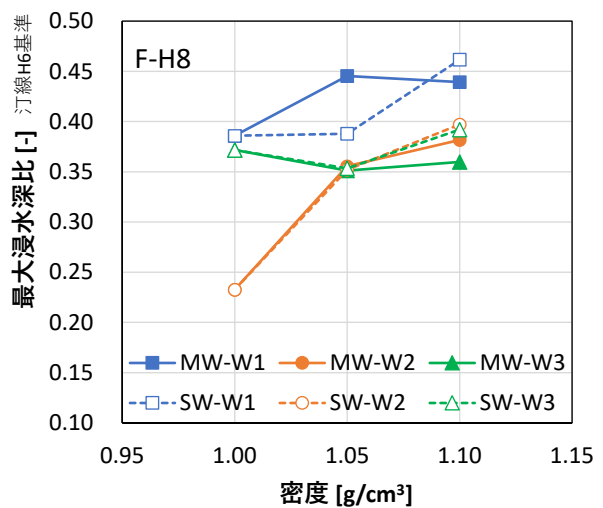
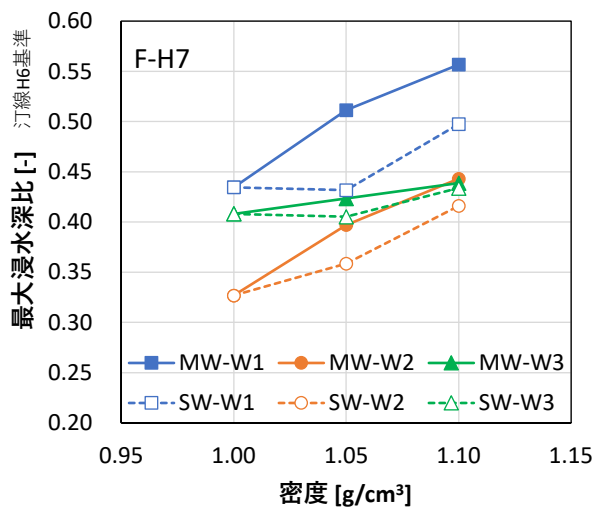


図- 3.44 流体密度による最大浸水深（単純勾配 S）

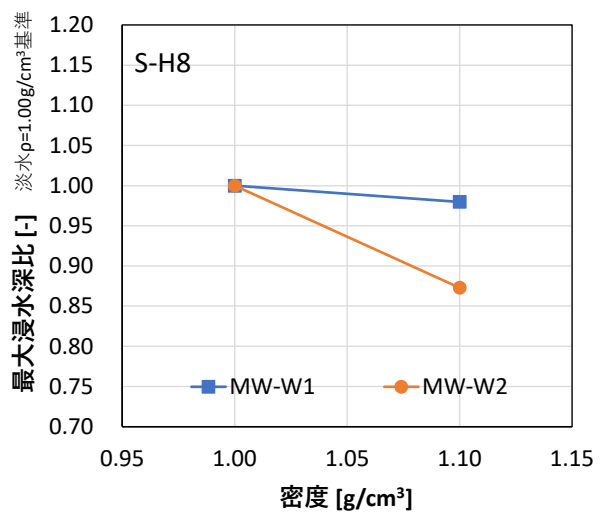
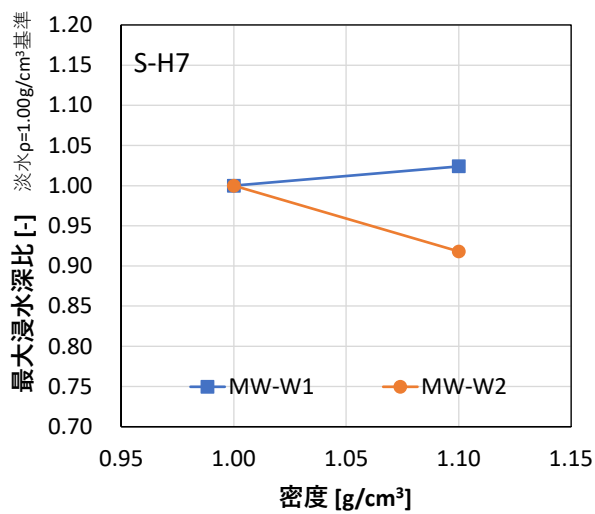
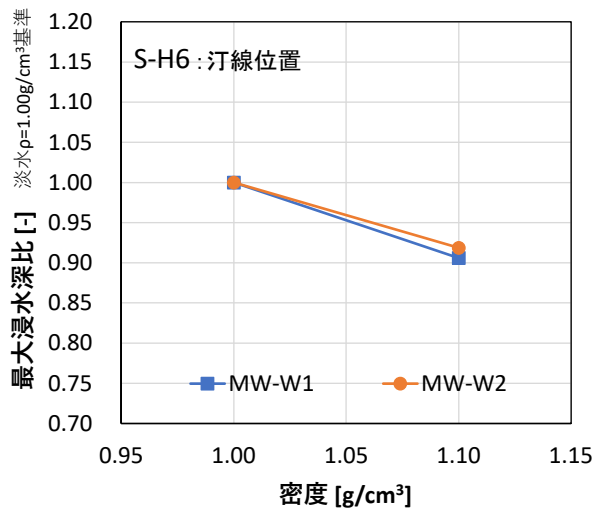


(a) 淡水 $\rho=1.00\text{g/cm}^3$ を基準とした場合

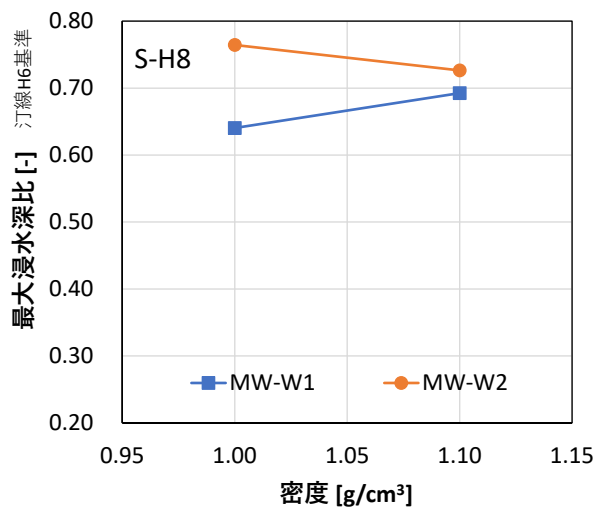
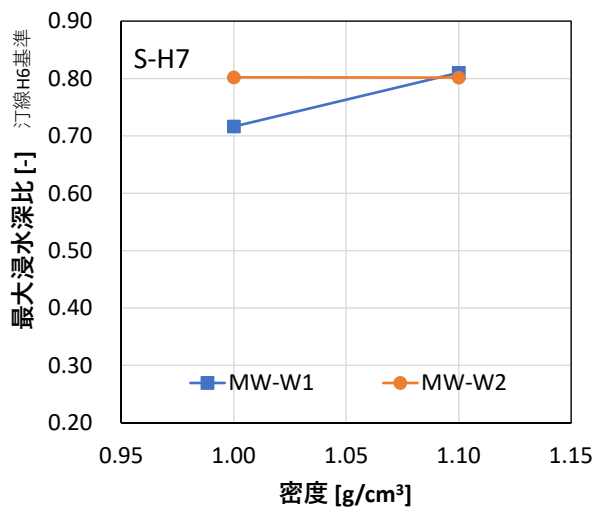


(b) 汀線波高 H_6 を基準とした場合

図- 3.45 流体密度による最大浸水深比 (水平床 F)



(a) 淡水 $\rho=1.00\text{g/cm}^3$ を基準とした場合



(b) 汀線波高 H6 を基準とした場合

図- 3.46 流体密度による最大浸水深比 (単純勾配 S)

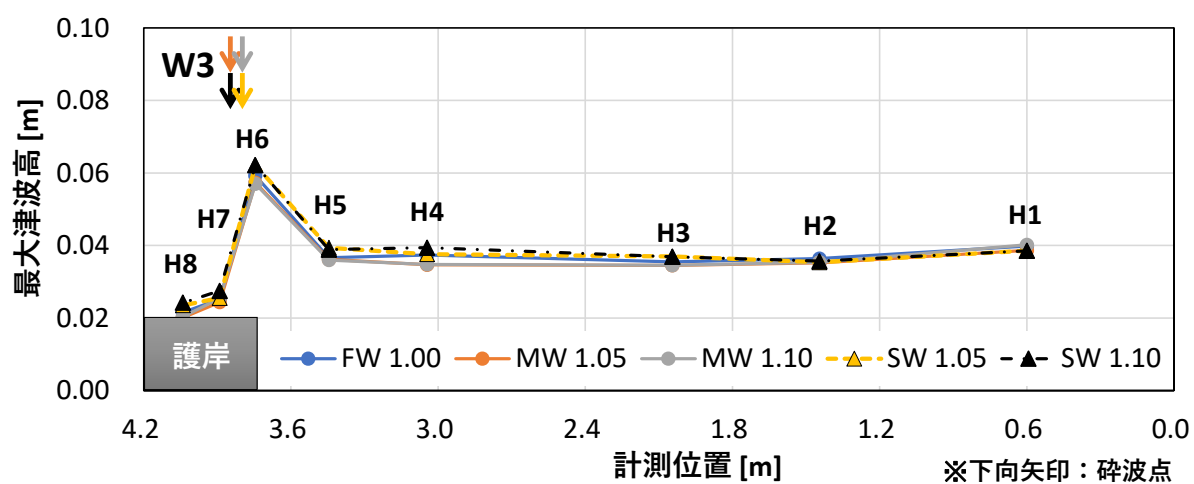
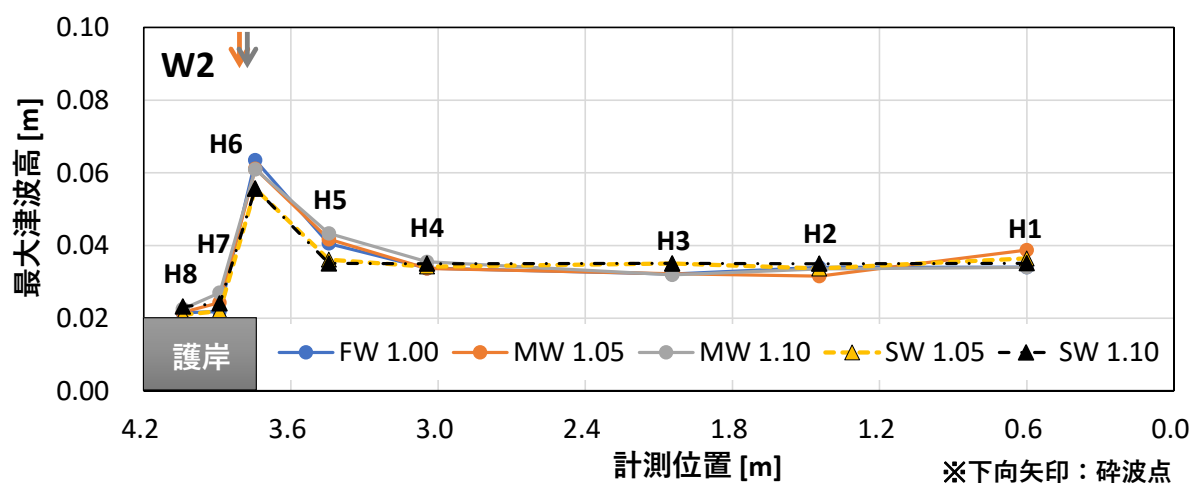
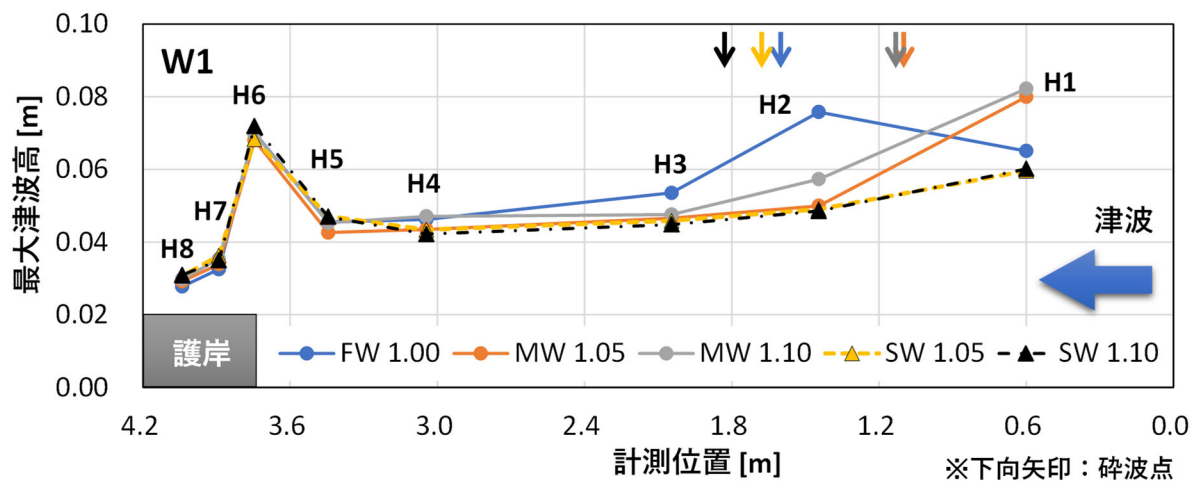


図-3.47 流体による最大津波高の変化（水平床 F）

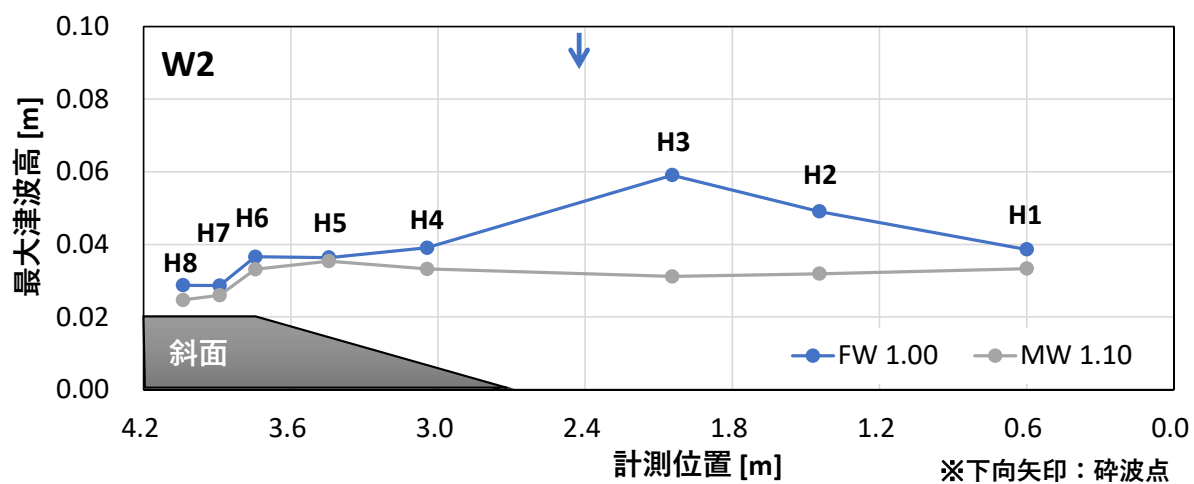
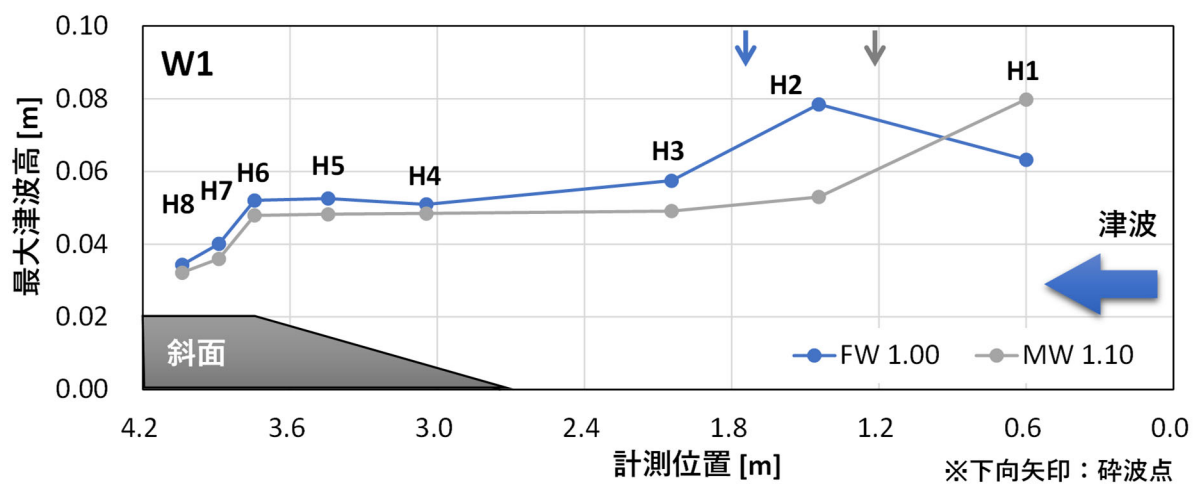


図- 3.48 流体による最大津波高の変化（単純勾配 S）

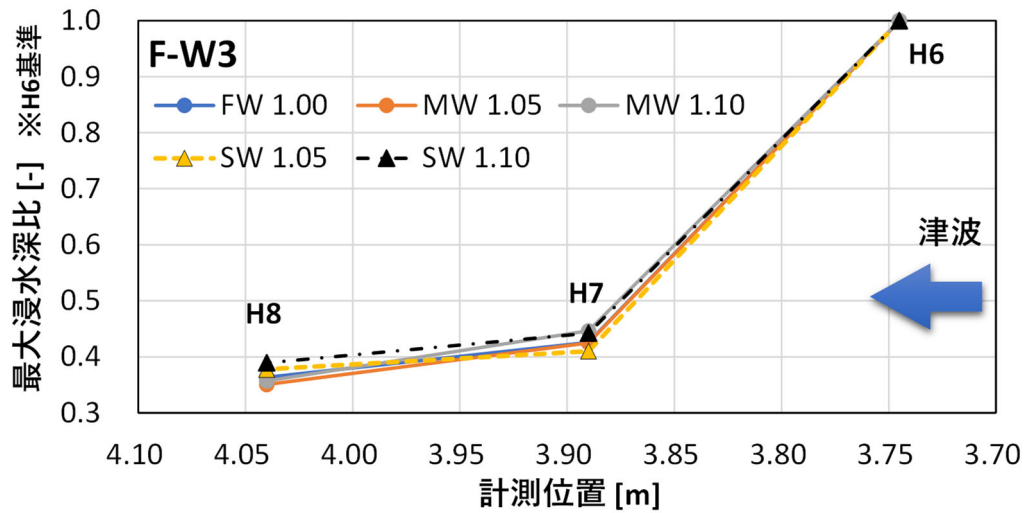
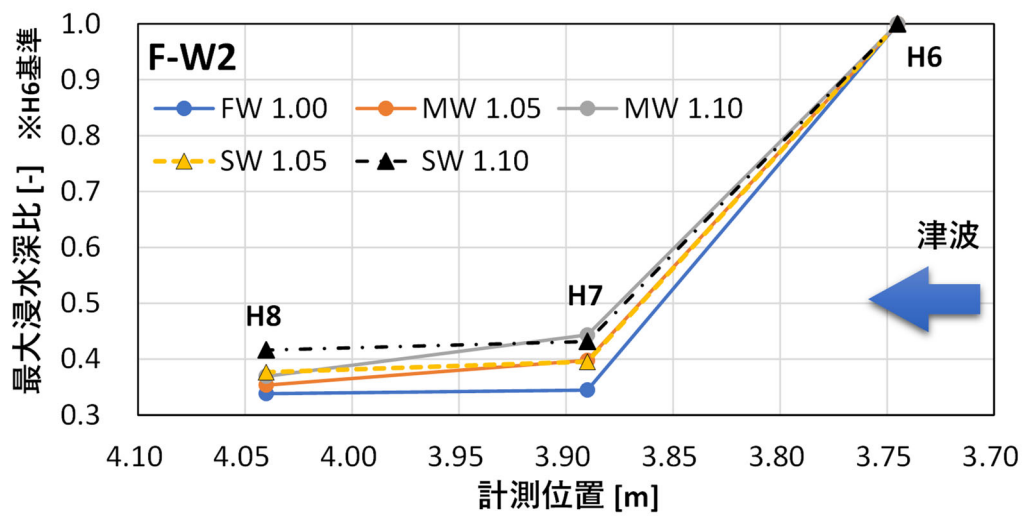
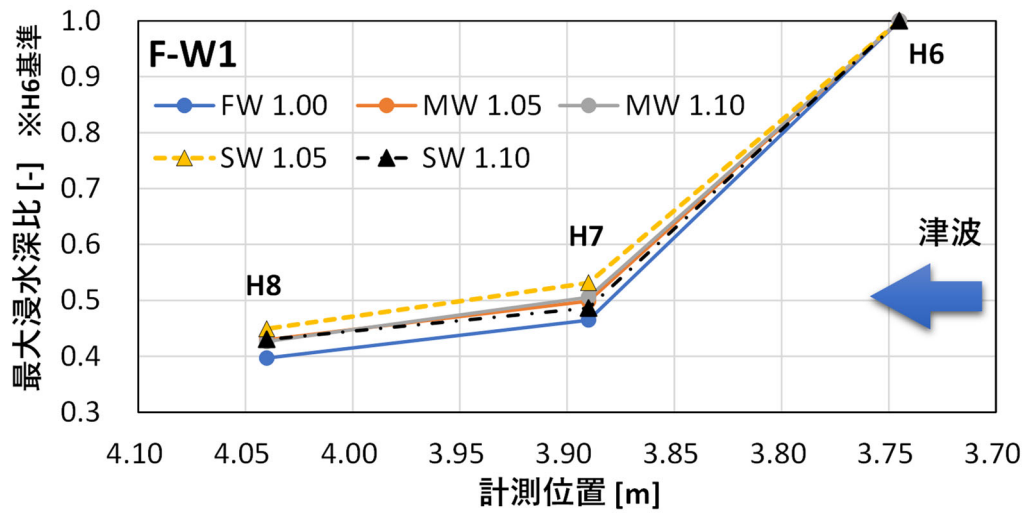


図-3.49 汀線 H6 を基準とした最大浸水深の変化（水平床 F）

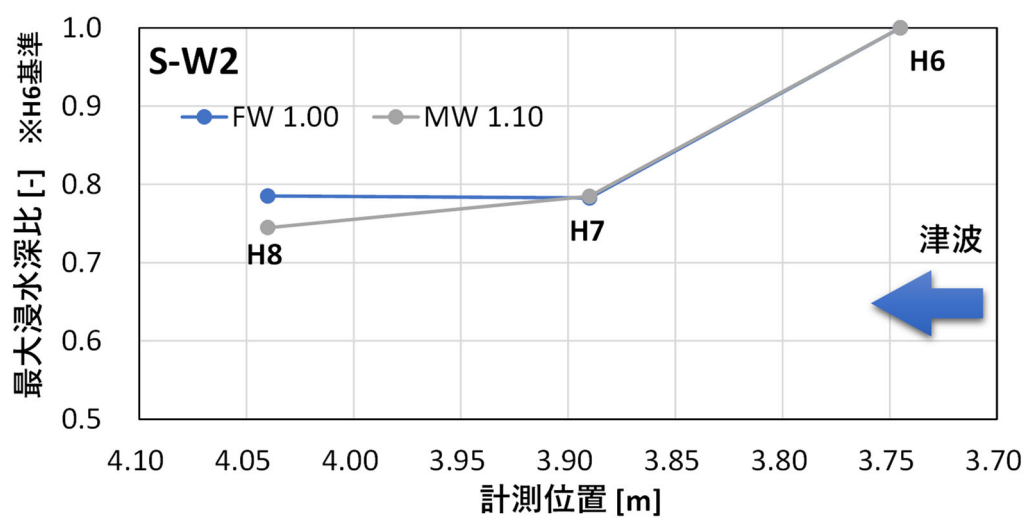
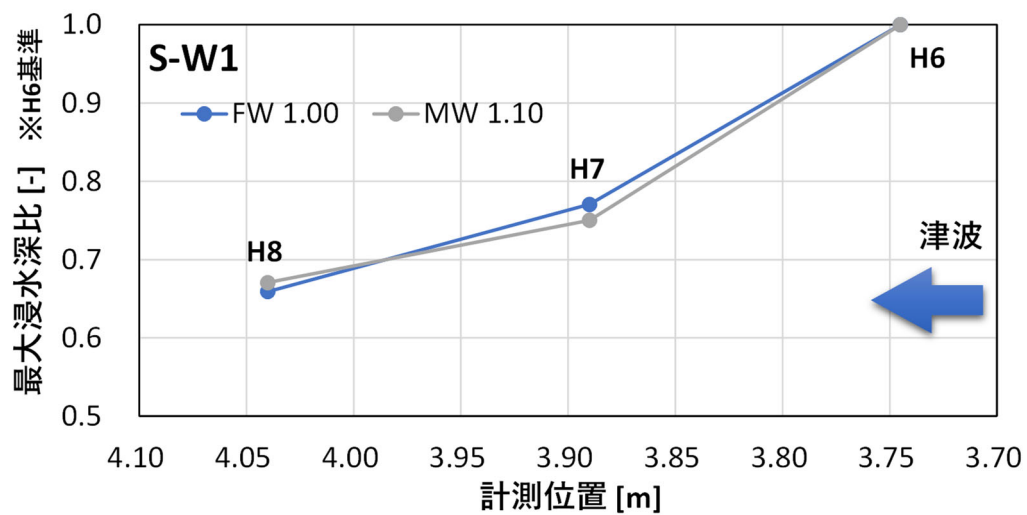


図-3.50 汀線 H6 を基準とした最大浸水深の変化 (単純勾配 S)

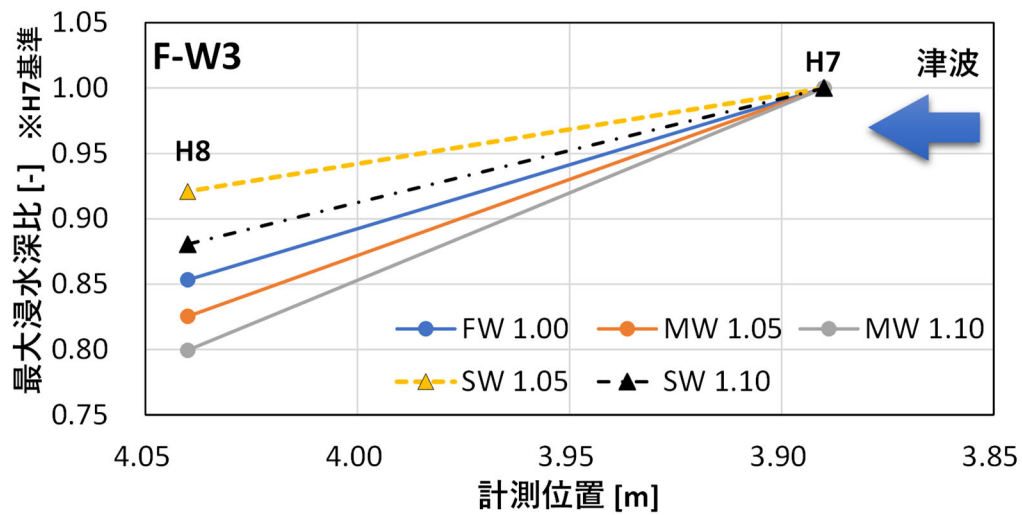
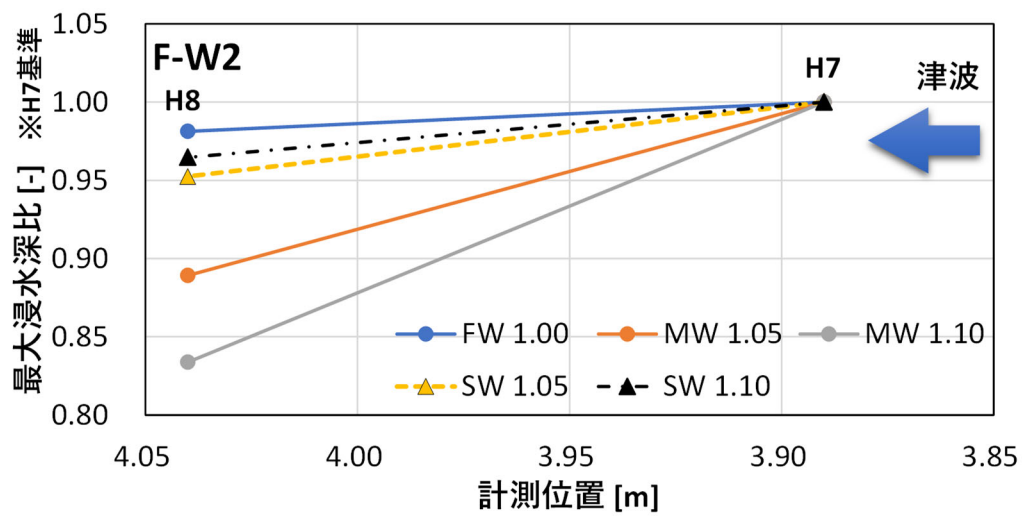
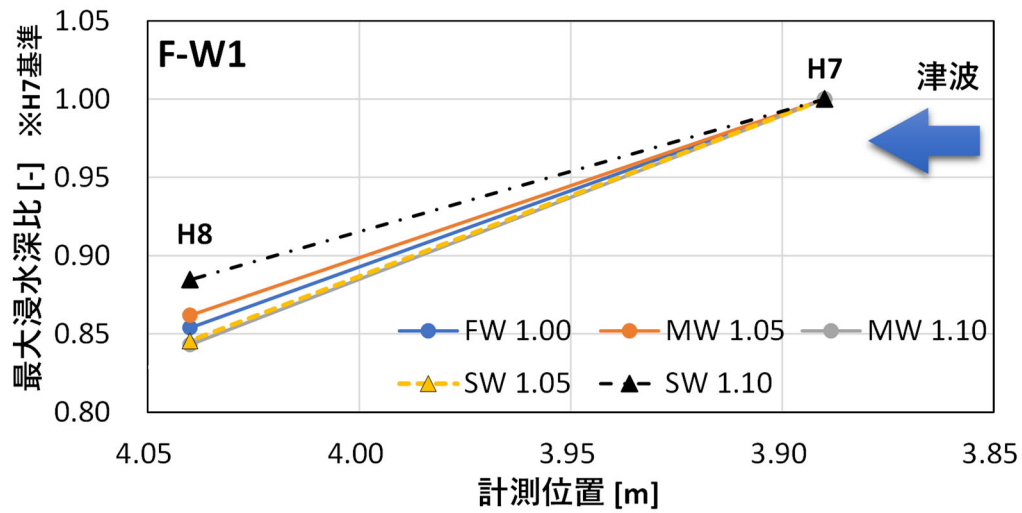


図-3.51 陸上部 H7 を基準とした最大浸水深の変化（水平床 F）

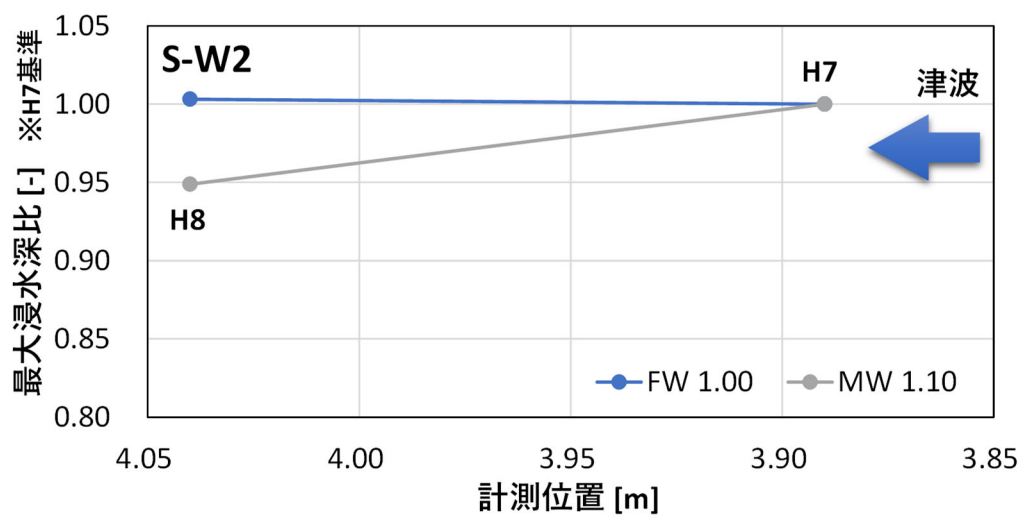
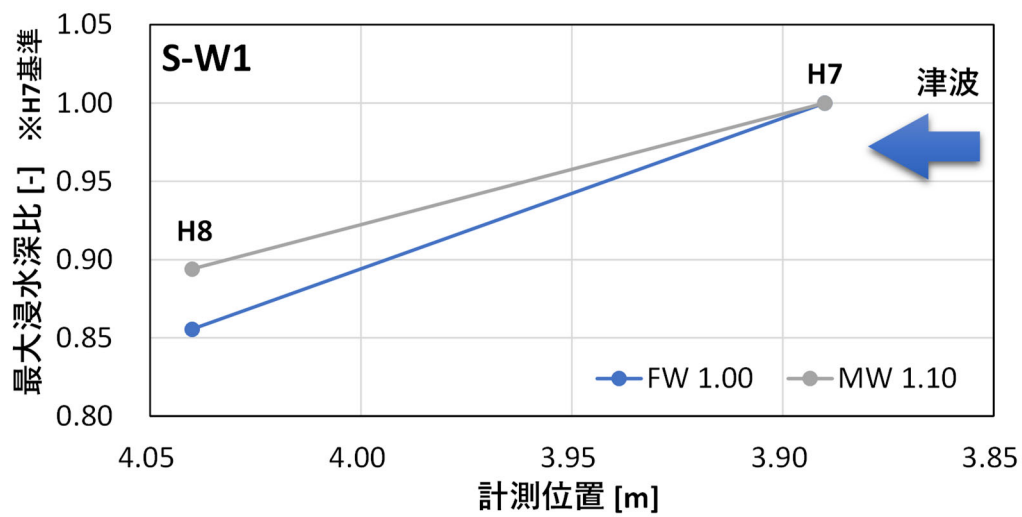
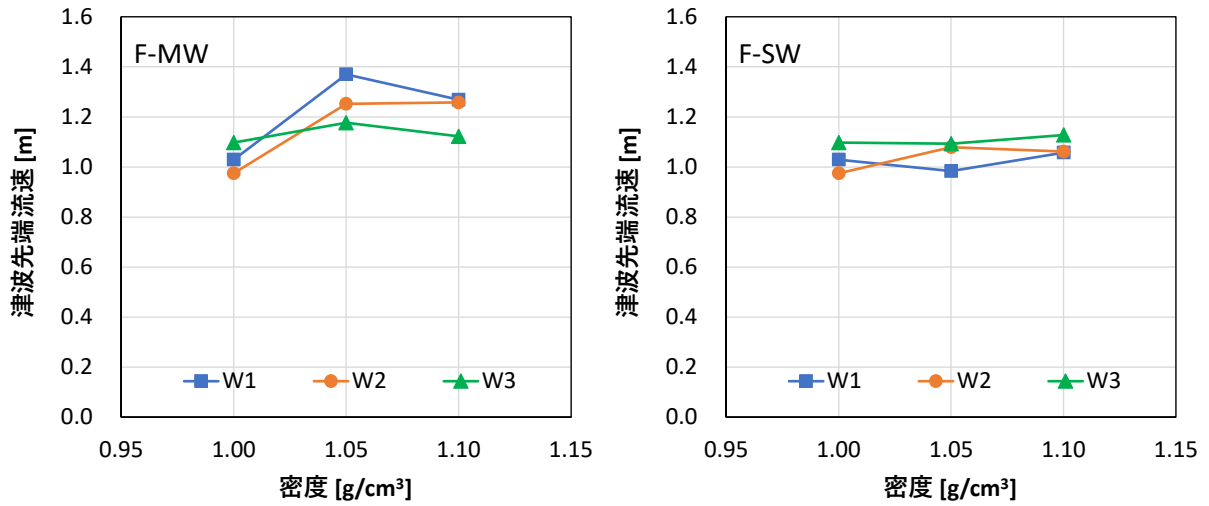
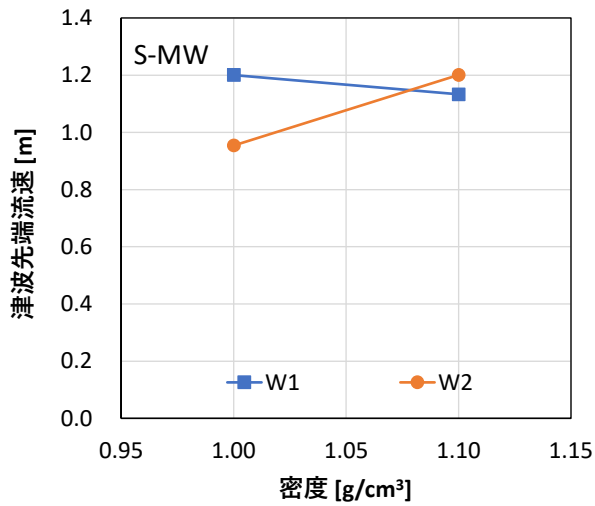


図- 3.52 陸上部 H7 を基準とした最大浸水深の変化（単純勾配 S）



(a) 水平床 F [左；濁水, 右；塩水]



(b) 単純勾配 S [濁水]

図- 3.53 流体密度による津波の先端流速（映像判読）

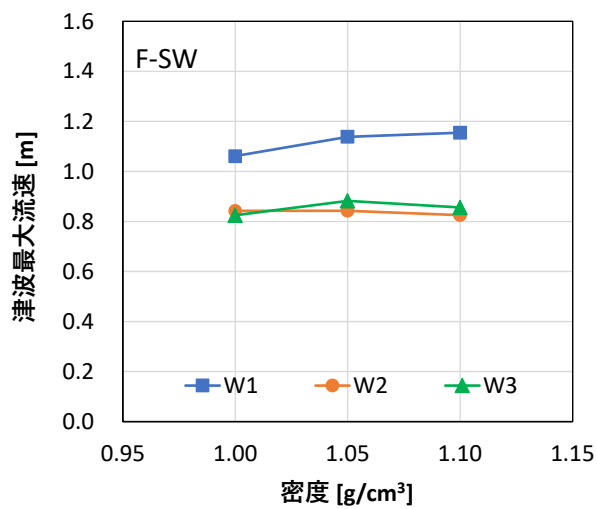


図- 3.54 流体密度による津波の最大流速（プロペラ流速計）

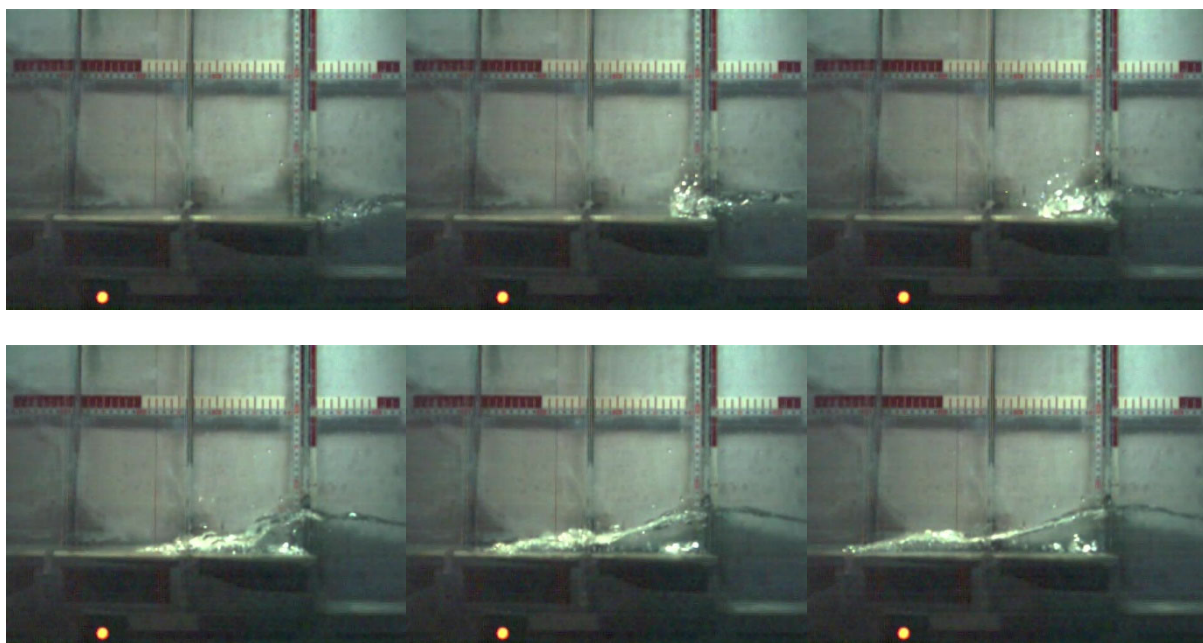


写真-3.5 汀線付近におけるスナップショット（水平床 F, 淡水 $\rho=1.00\text{g/cm}^3$, 津波 W1）



写真-3.6 汀線付近におけるスナップショット（水平床 F, 濁水 $\rho=1.05\text{g/cm}^3$, 津波 W1）

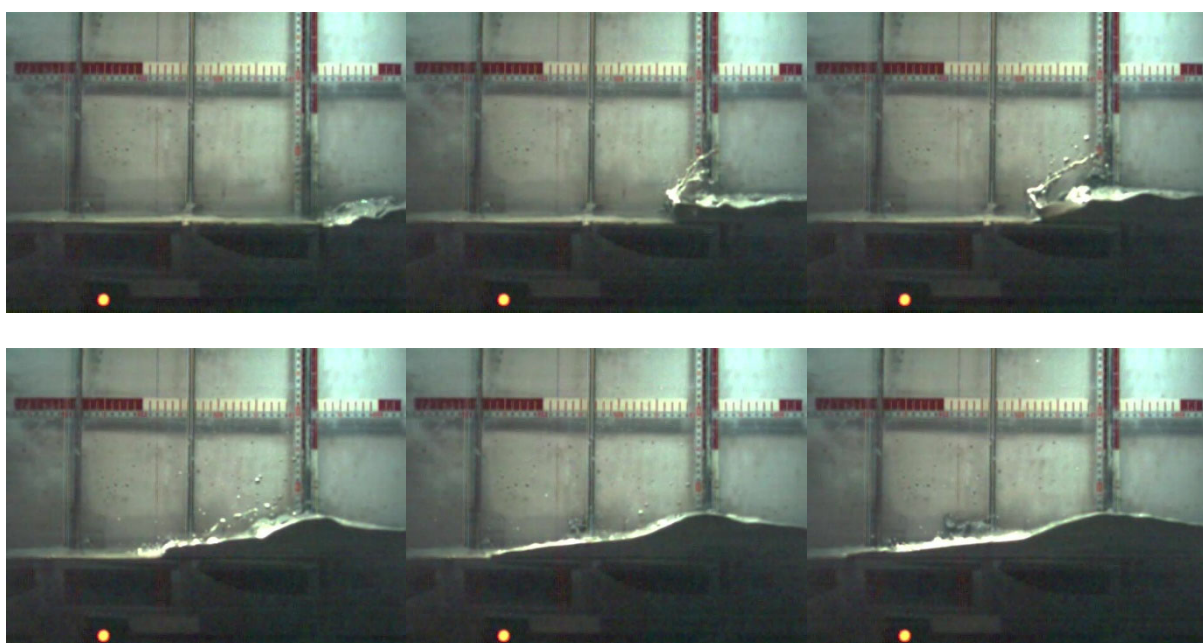


写真-3.7 汀線付近におけるスナップショット（水平床 F, 濁水 $\rho=1.10\text{g/cm}^3$, 津波 W1）

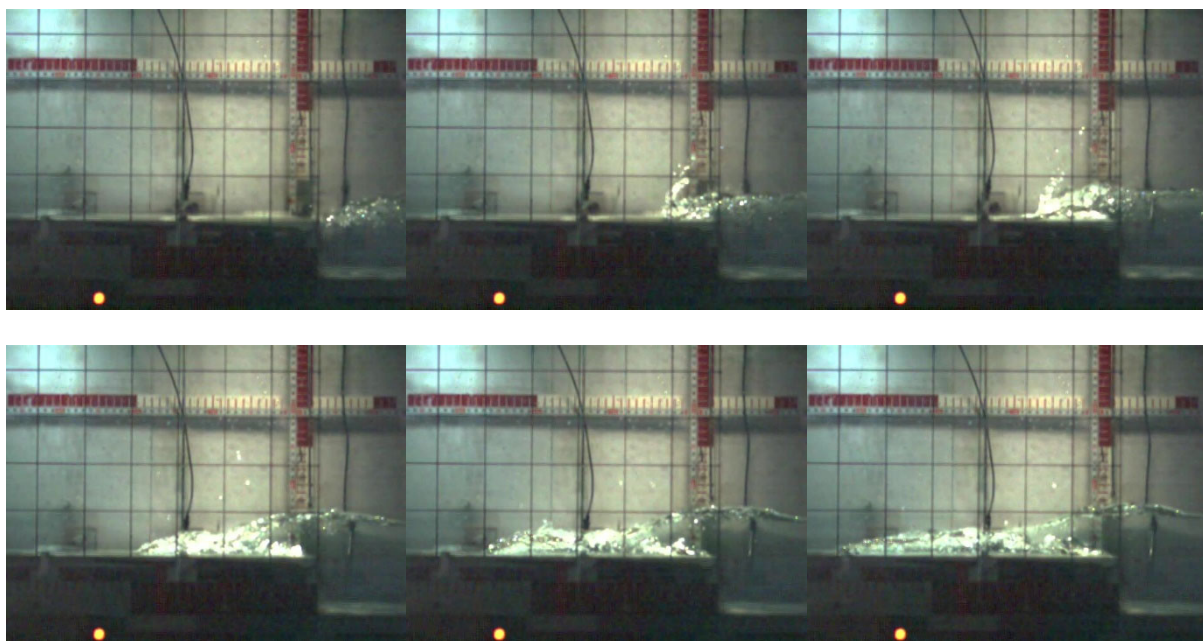


写真-3.8 汀線付近におけるスナップショット（水平床 F, 塩水 $\rho=1.05\text{g/cm}^3$, 津波 W1）

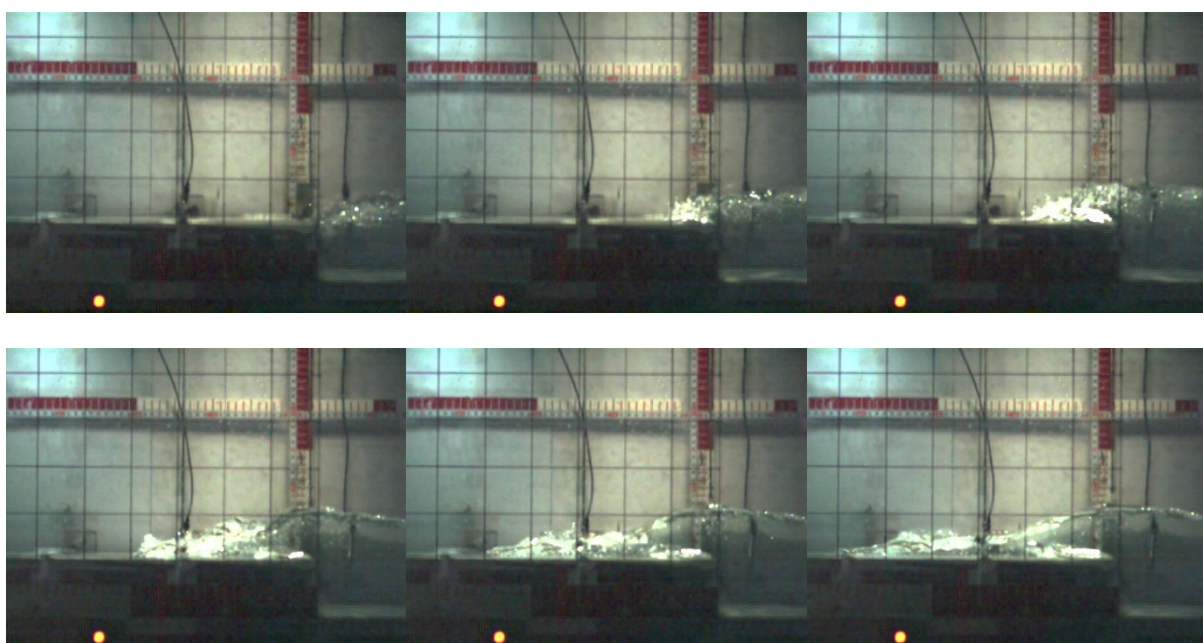


写真-3.9 汀線付近におけるスナップショット（水平床 F, 塩水 $\rho=1.10\text{g/cm}^3$, 津波 W1）

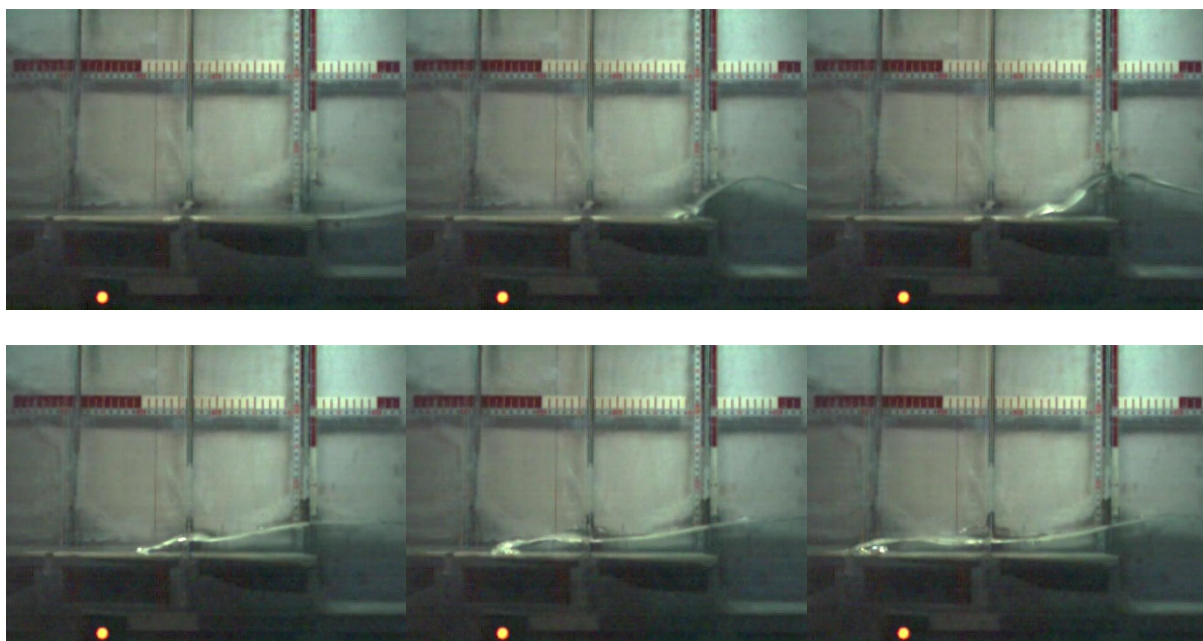


写真- 3.10 汀線付近におけるスナップショット（水平床 F, 淡水 $\rho=1.00\text{g/cm}^3$, 津波 W2）

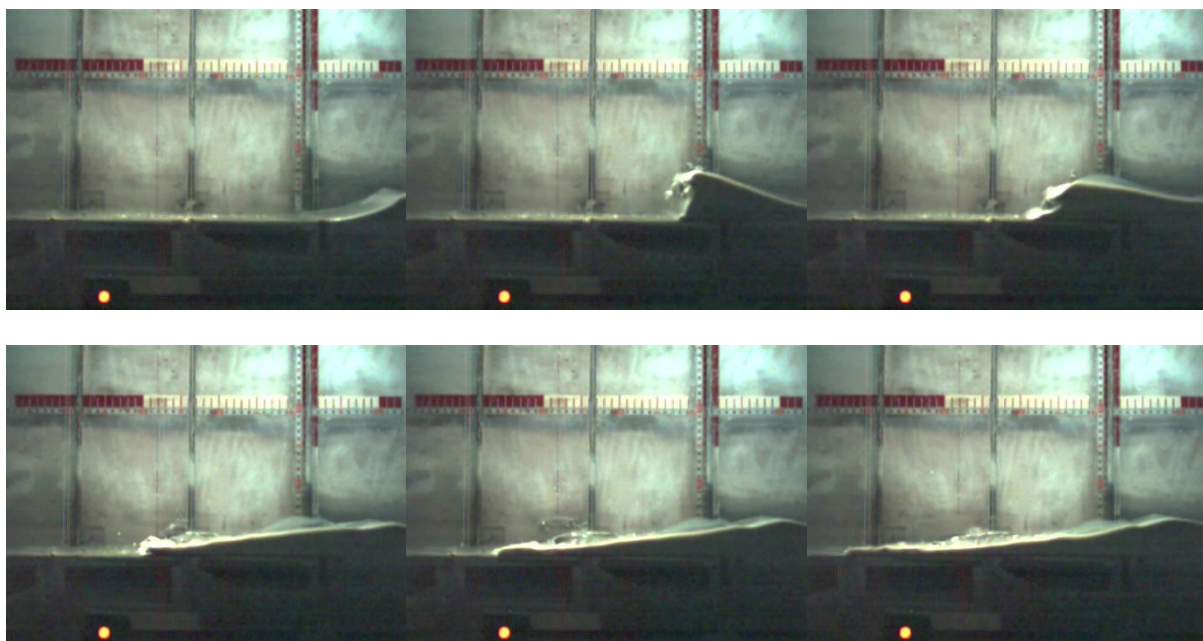


写真- 3.11 汀線付近におけるスナップショット（水平床 F, 濁水 $\rho=1.05\text{g/cm}^3$, 津波 W2）

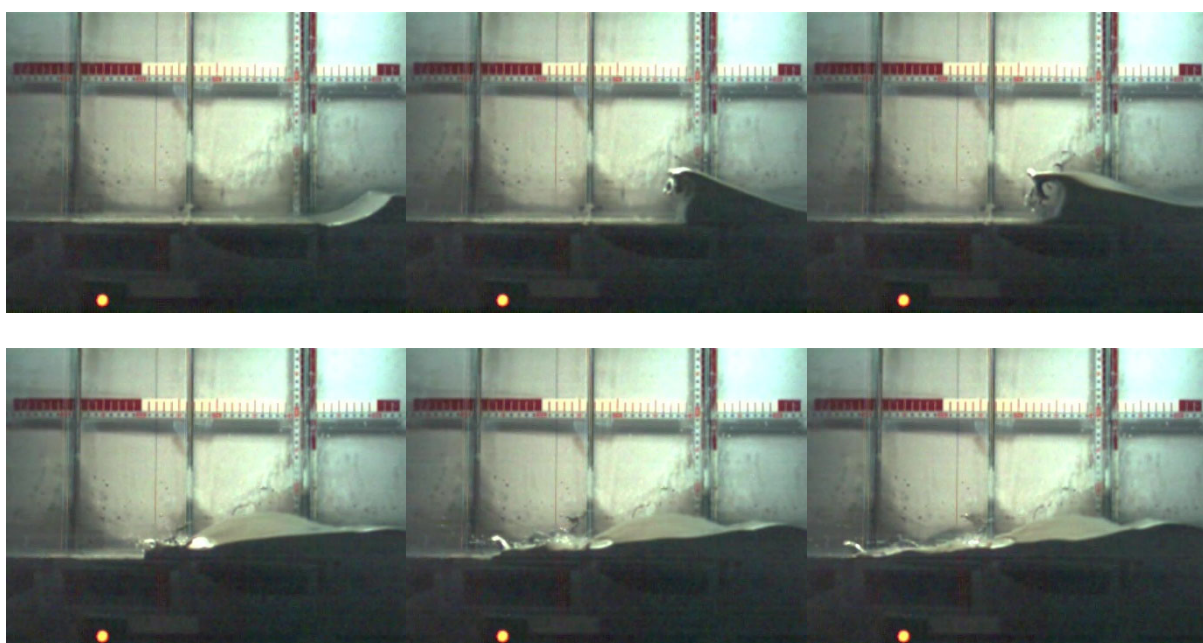


写真- 3.12 汀線付近におけるスナップショット（水平床 F, 濁水 $\rho=1.10\text{g/cm}^3$, 津波 W2）

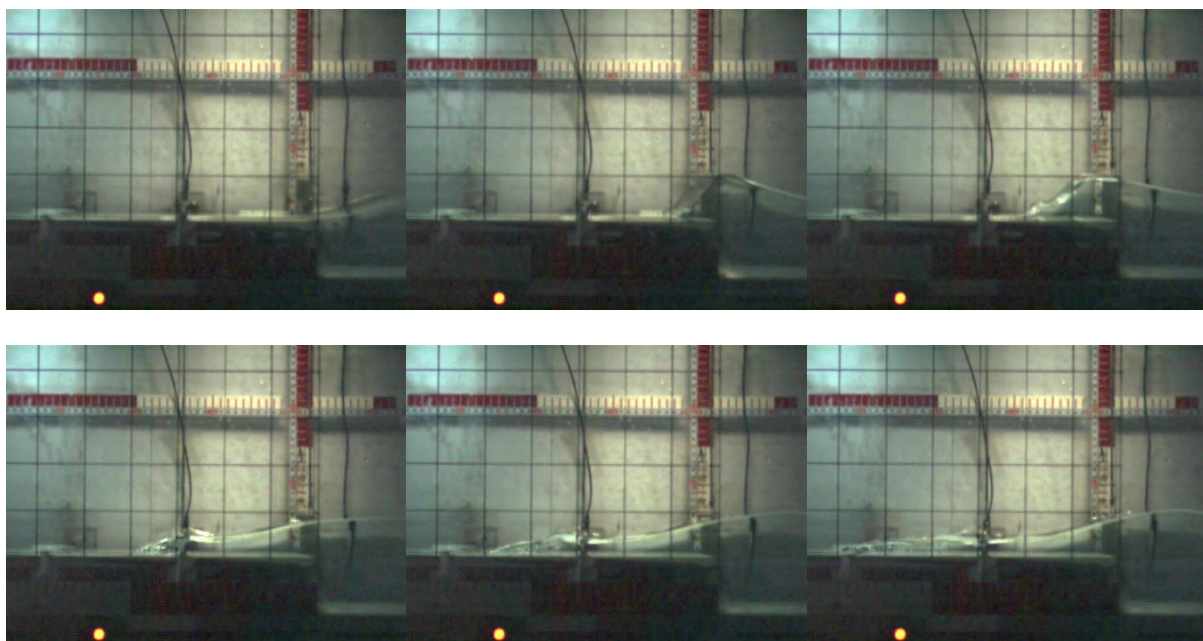


写真- 3.13 汀線付近におけるスナップショット（水平床 F, 塩水 $\rho=1.05\text{g/cm}^3$, 津波 W2）



写真- 3.14 汀線付近におけるスナップショット（水平床 F, 塩水 $\rho=1.10\text{g/cm}^3$, 津波 W2）

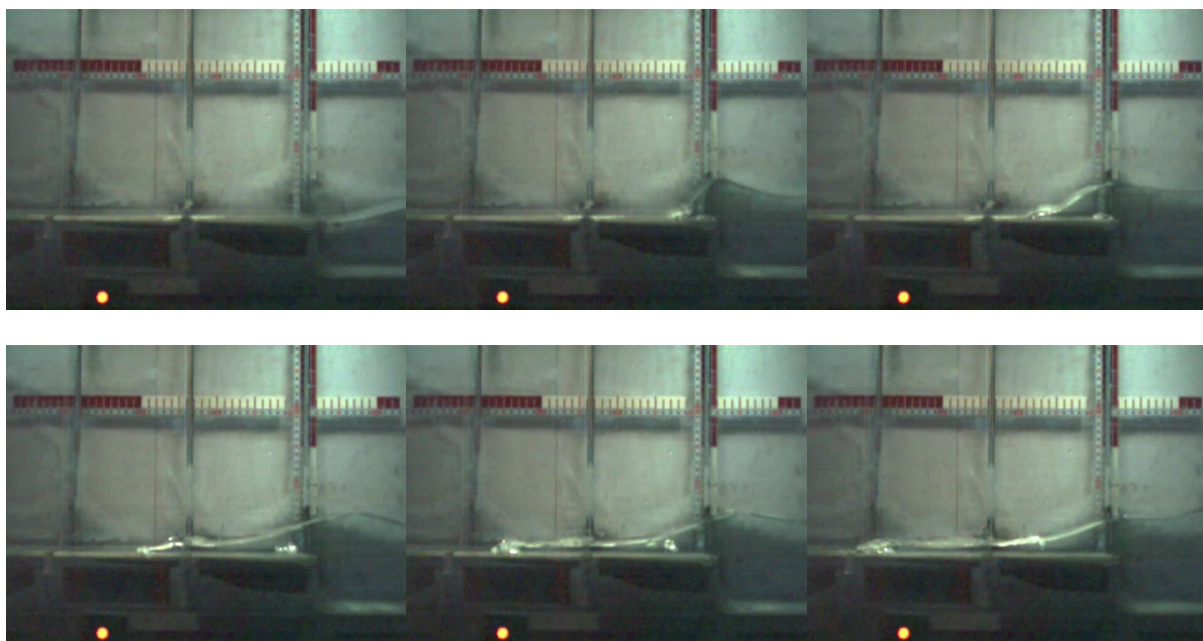


写真- 3.15 汀線付近におけるスナップショット（水平床 F, 淡水 $\rho=1.00\text{g/cm}^3$, 津波 W3）



写真- 3.16 汀線付近におけるスナップショット（水平床 F, 濁水 $\rho=1.05\text{g/cm}^3$, 津波 W3）

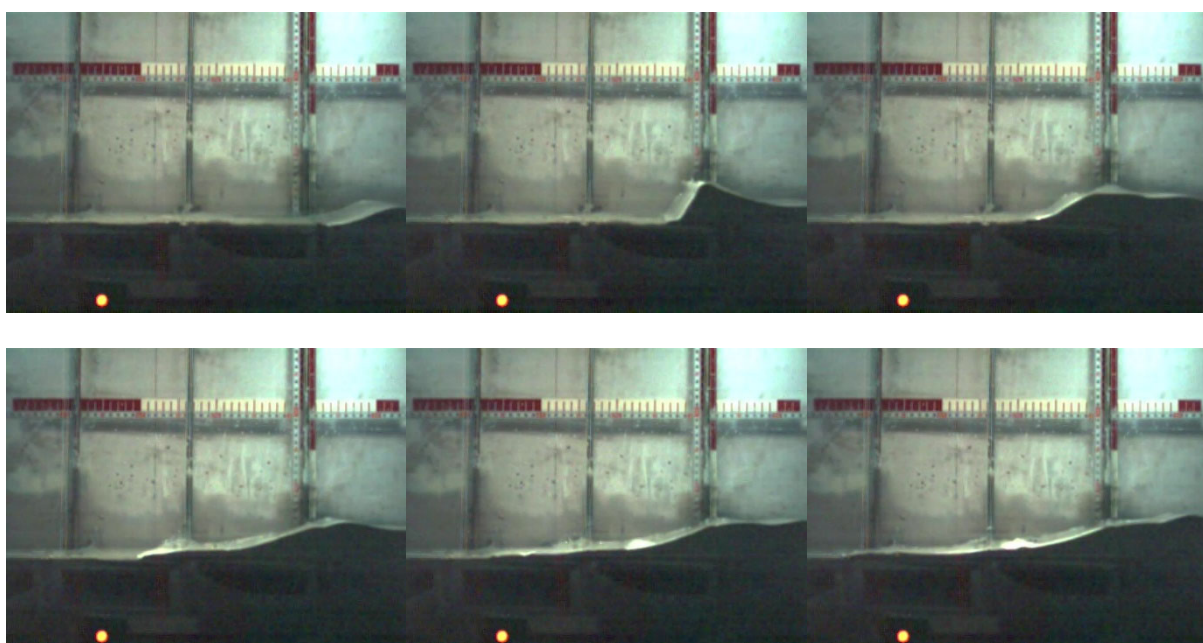


写真- 3.17 汀線付近におけるスナップショット（水平床 F, 濁水 $\rho=1.10\text{g/cm}^3$, 津波 W3）

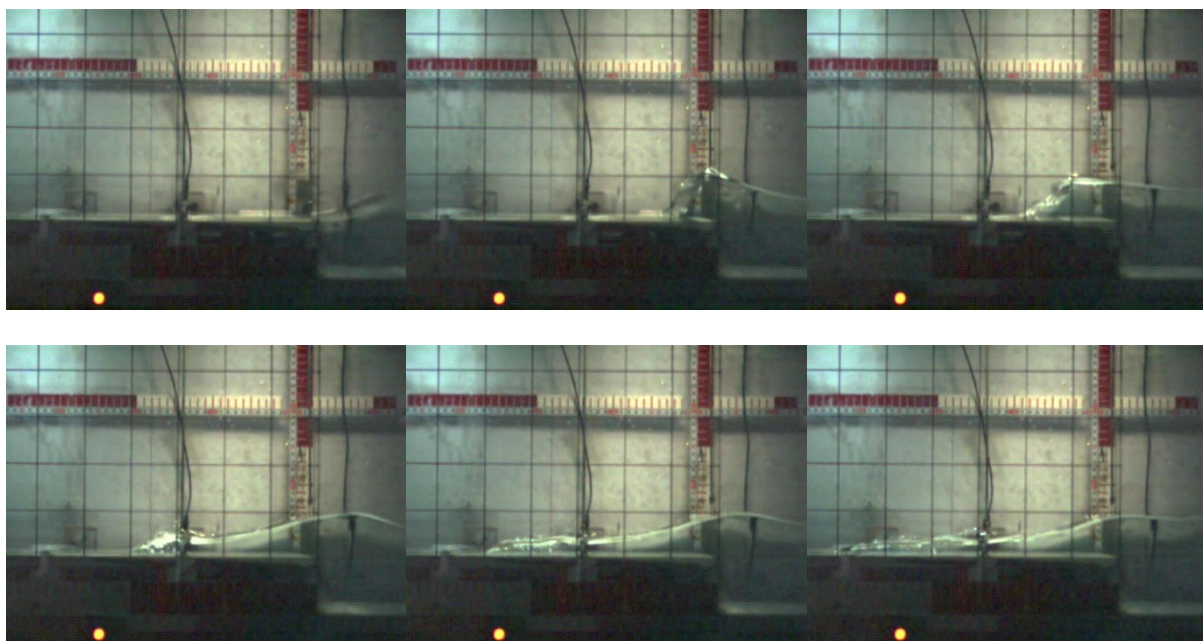


写真- 3.18 汀線付近におけるスナップショット（水平床 F, 塩水 $\rho=1.05\text{g/cm}^3$, 津波 W3）

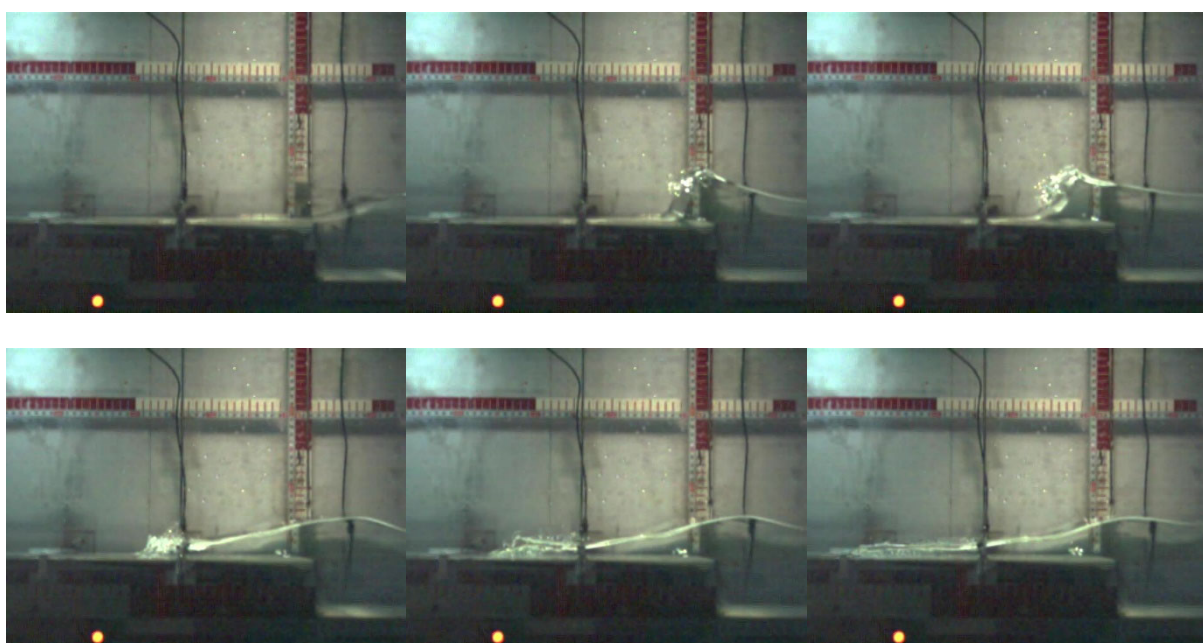


写真- 3.19 汀線付近におけるスナップショット（水平床 F, 塩水 $\rho=1.10\text{g/cm}^3$, 津波 W3）

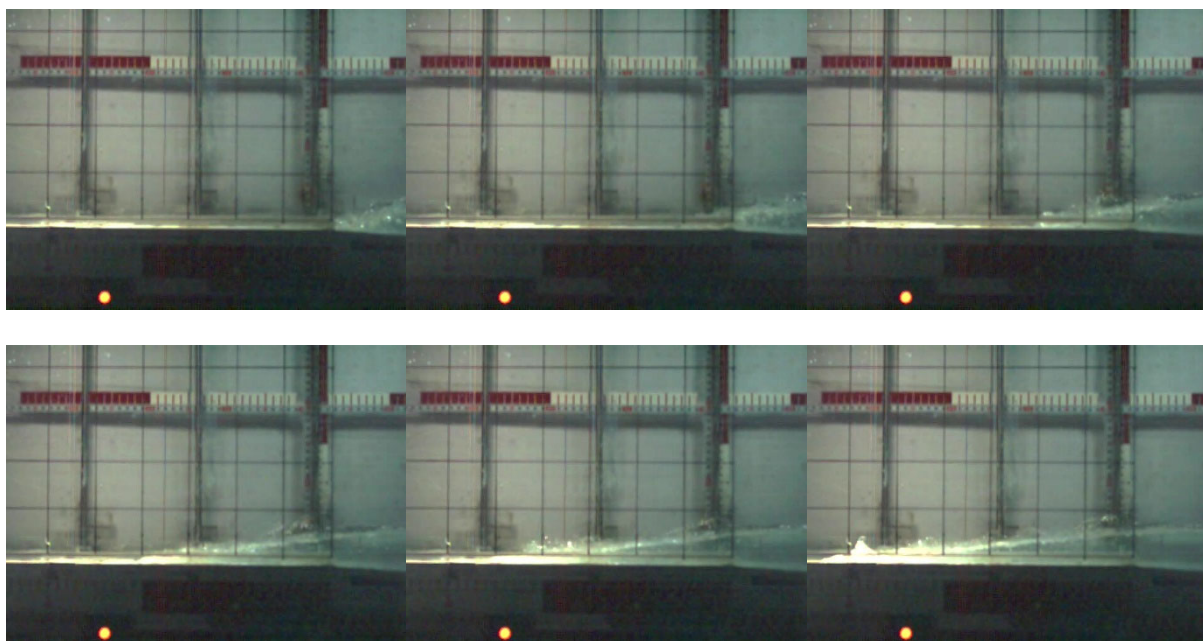


写真- 3.20 汀線付近におけるスナップショット（単純勾配 S, 淡水 $\rho=1.00\text{g/cm}^3$, 津波 W1）

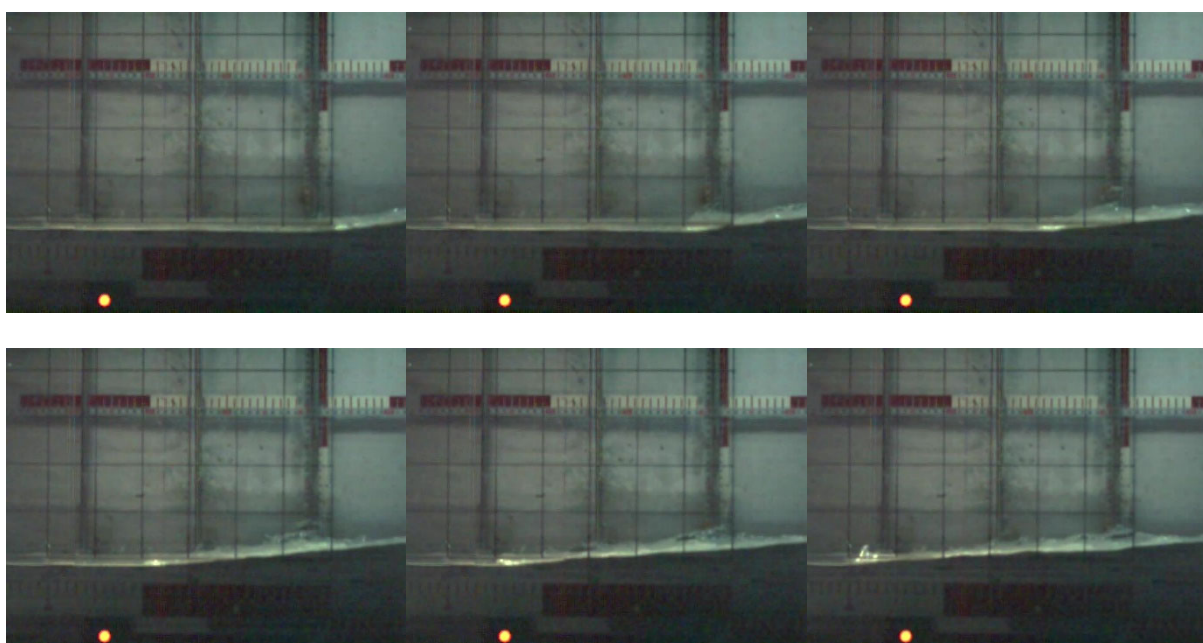


写真- 3.21 汀線付近におけるスナップショット（単純勾配 S, 濁水 $\rho=1.10\text{g/cm}^3$, 津波 W1）

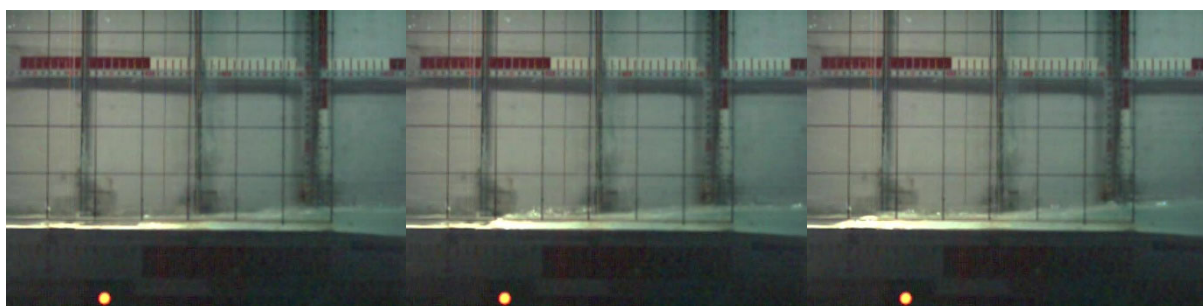
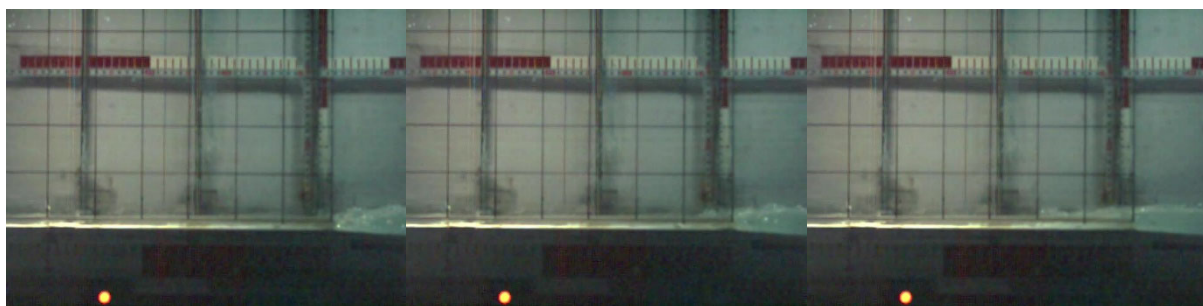


写真- 3.22 汀線付近におけるスナップショット（単純勾配 S, 淡水 $\rho=1.00\text{g/cm}^3$, 津波 W2）



写真- 3.23 汀線付近におけるスナップショット（単純勾配 S, 濁水 $\rho=1.10\text{g/cm}^3$, 津波 W2）

3.3.4. 衝突試験結果

衝突試験では、各ケースで繰返し 5 回実施した。得られた結果のまとめを図- 3.55 に示す。

計測結果の一例として、水平床 F、淡水 FW、密度 1.00g/cm^3 、津波 W2、壁模型位置 P1 のケース (F-FW100-W2-P1) における水位および波力の時系列を図- 3.56～図- 3.58 に示す。そのほかのケースについては、壁模型前面 (H6, H8) の水位の時系列と圧力計による波力 Σp_A および水中 6 分力計による波力 F_x の時系列を図- 3.59～図- 3.82 に示す。これらの結果より、各ケースのばらつきは小さいことを確認した。全ケースの時系列は巻末資料 1. (2) に示す。

各ケースにおける繰返し 5 回のうち 1 回目を代表とし、H1～H8 の水位および波力 Σp_A , F_x の時系列を比較した結果を図- 3.83～図- 3.103 に示す。ここで、波形の位相は淡水 (FW100) のケースに合わせて濁水 (MW105, MW110) と塩水 (SW105, SW110) を調整した。

壁模型前面 (H6, H8) の最大水位 (打上り高)、護岸汀線 (H6) および壁模型前面 (H6, H8) における津波の到達時間、圧力計および水中 6 分力計による最大波力の結果を表- 3.10～表- 3.13 に示す。ここで、壁模型前面 (H6, H8) における最大水位の発生時刻前後でそれぞれ生じる波力を衝撃波力と持続波力と定義し、それぞれの最大値も合わせて示した。表中の最大波力 Σp_A と F_x におけるハッチングの色は、最大衝撃波力が全時刻で最大の場合に「赤」、最大持続波力が全時刻で最大の場合に「青」とした。ただし、塩水 (SW105, SW110) のケースについては、サーボ式波高計による壁模型前面 (H8) の水位上昇を良好に捉えられなかったため、波力の時系列により最大衝撃波力と最大持続波力を判読した。得られた結果より、大半のケースで最大持続波力が支配的であることが分かった。なお、S-FW100-P3-W2 (単純勾配 S、淡水 $\rho=1.00\text{g/cm}^3$ 、壁位置 P3、津波 W2) のケースは最大衝撃波力が支配的であるが、図- 3.103 (a) より壁前面の打上りが 2 段階になっており、2 段階目のピークが最大水位で 1 段階目と 2 段階目の間で最大波力を示したためと考えられる。

各ケースにおける圧力計による最大波力 Σp_A と水中 6 分力計による最大波力 F_x の比較結果を図- 3.104 に示す。この結果から、圧力計による最大波力 Σp_A と水中 6 分力計による最大波力 F_x が概ね一致しており、波力の妥当性を確認した。

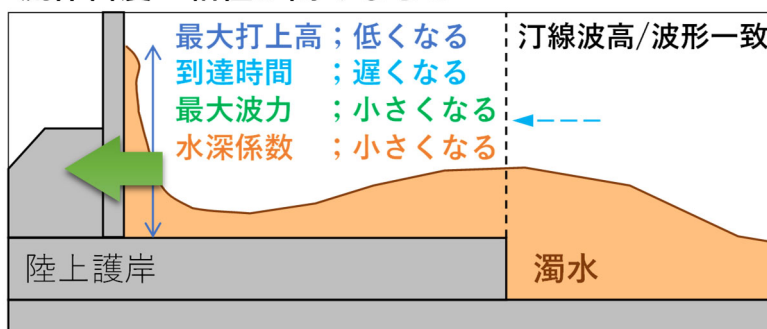
流体密度による結果比較として、各ケースの壁模型前面 (H6, H8) における最大打上り高、護岸汀線 (H6) および壁模型前面 (H6, H8) における津波の到達時間、圧力計および水中 6 分力計による最大波力の平均値を図- 3.105～図- 3.107 に示すように整理した。得られた結果より、濁水 (MW) の場合は流体密度が大きくなると最大打上り高が小さくなり、津波の到達時間が遅くなり、最大波力が小さくなる傾向が確認できた。一方、塩水 (SW) の場合には最大打上り高と津波の到達時間は濁水 (MW) と同じ傾向であるが、最大波力は流体密度が大きくなると大きくなる傾向を示した。塩水 (SW) のケースの中でも水平床 F、壁模型位置 P3、津波 W3 のケースでは、流体の密度以上の波力増大 (密度 1.05g/cm^3 の時に淡水 (FW) の波力の 1.19 倍、密度 1.10g/cm^3 の時に淡水 (FW) の波力の 1.25 倍) となった。この要因の一つとして、淡水 (FW) と塩水 (SW) では護岸汀線位置での波形が厳密に一致しているわけではないため、護岸汀線から浸水する際の越流量が淡水 (FW) よりも塩水 (SW) の方が大きい可能性が考えられる。ただし、越流量については実験で計測できていないため、今後数値解析などによる検討が必要である。また、塩水 (SW) の水位はサーボ式波高計で良好に計測できていない可能性があるため、護岸汀線位置での波形や打上り高の計測結果の評価には注意が必要である。一方、濁水 (MW) は塩水 (SW) よりも粘性が高く陸上部で砕波するため、それに伴うエネルギー減衰が大きいことから最大波力が低減したと考えられる。

壁模型前面 (H6, H8)の最大打上り高と通過波の汀線 (H6)の最大津波高で最大波力をそれぞれ基準化した結果、水深係数を図- 3.108～図- 3.110 に示す。各図の(c)より、流体密度が大きくなるほど水深係数が小さくなる傾向を確認した。

流体密度による最大波力・最大衝撃波力・最大持続波力の比較を図- 3.111～図- 3.113 に示す。

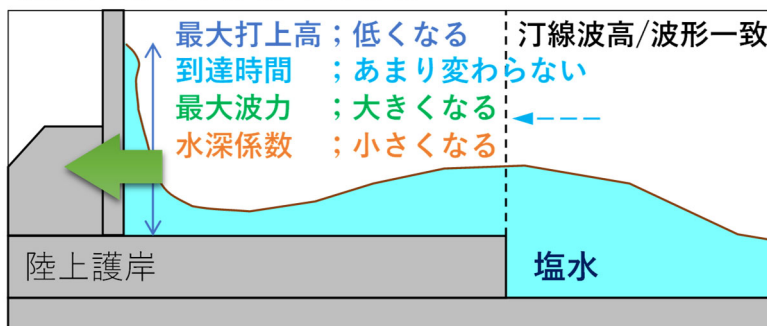
各ケースにおける繰返し 5 回のうち 1 回目を代表とし、圧力計による波力 ΣpA 最大時における圧力鉛直分布を図- 3.114～図- 3.120 に示す。なお、図中に流体密度 $\rho=1.00\text{g/cm}^3$ の静水圧分布と、濁水および塩水については流体密度 $\rho=1.05\text{g/cm}^3$ または 1.10g/cm^3 の静水圧分布を示す。これらの結果より、水平床 F、壁模型位置 P3、津波 W2 のケースにおいては、流体の種類によらず壁模型下方の圧力が大きくなっているが、そのほかのケースでは静水圧分布程度であることが分かった。全ケースの圧力鉛直分布は巻末資料 1. (3)に示す。

流体密度・粘性が高くなると…



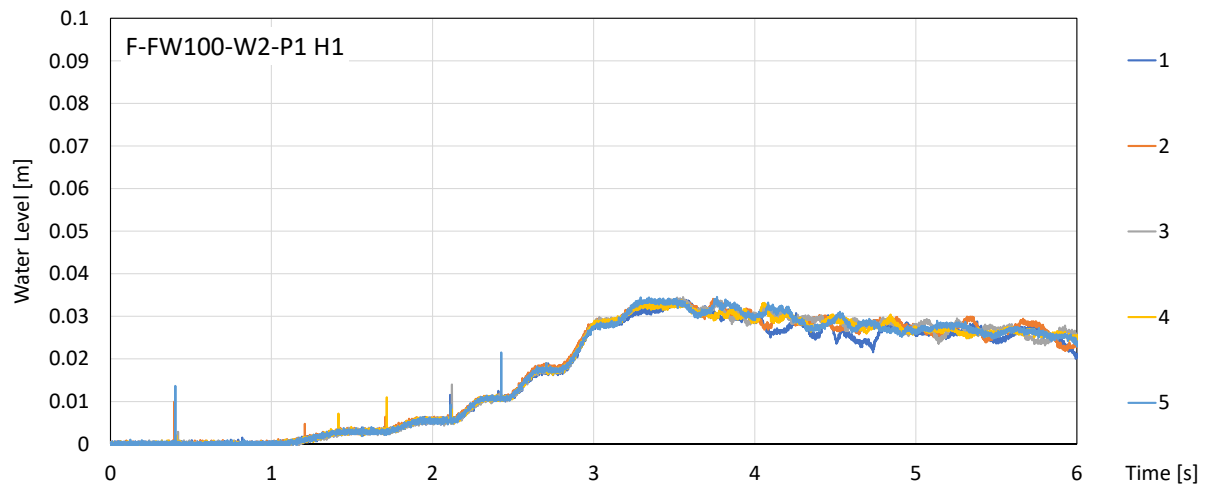
(a) 濁水 (MW；流体密度・粘性変化)のケース

流体密度のみが高くなると…

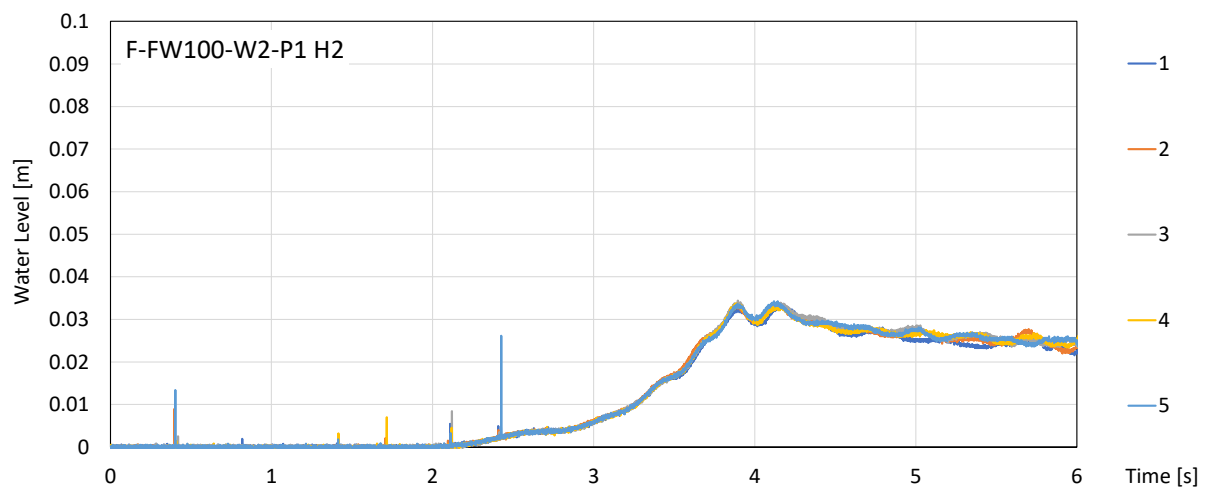


(b) 塩水 (SW；流体密度のみ変化)のケース

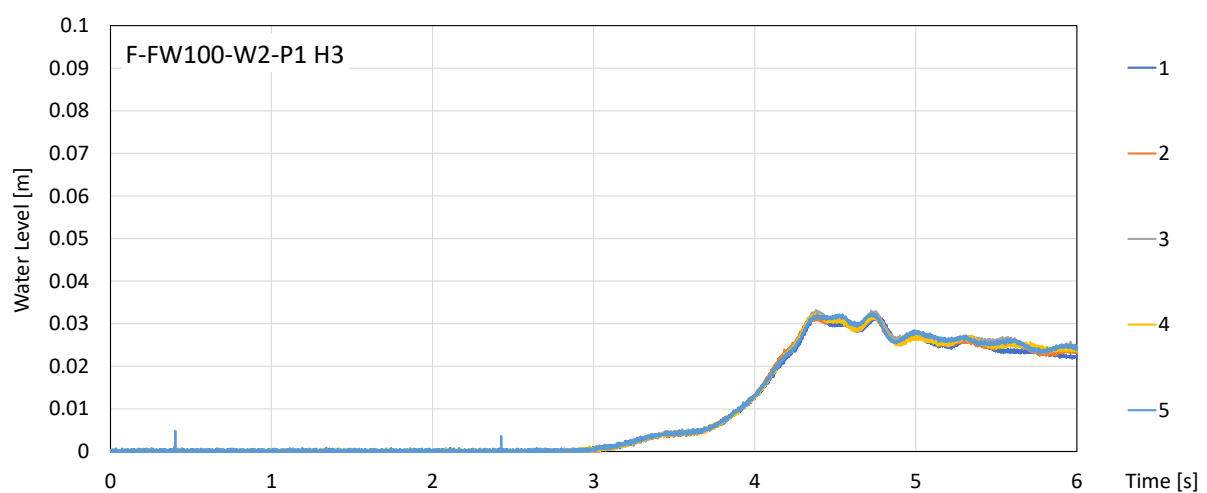
図- 3.55 衝突試験の結果まとめ



(a) H1 の水位時系列

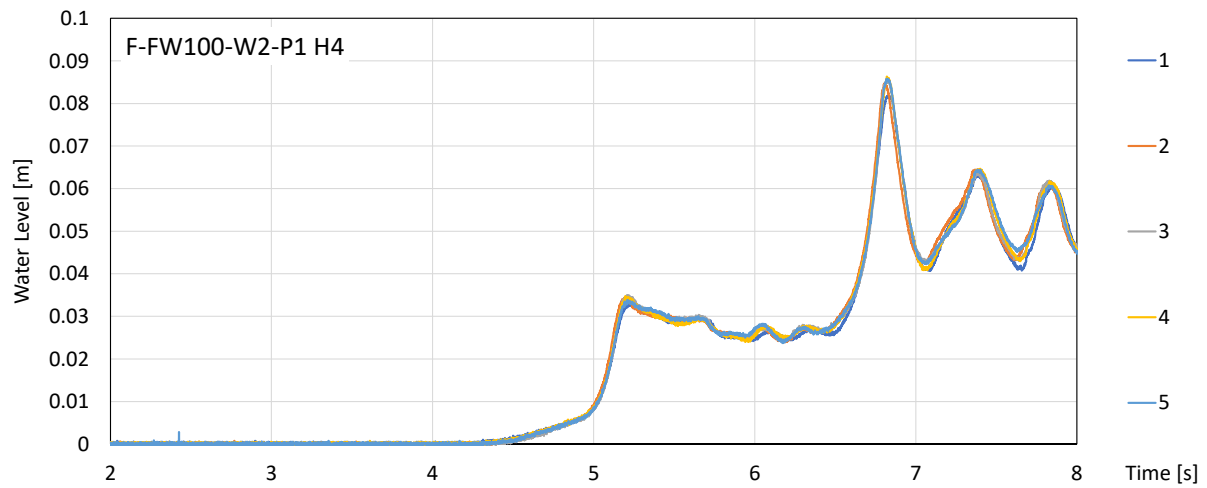


(b) H2 の水位時系列

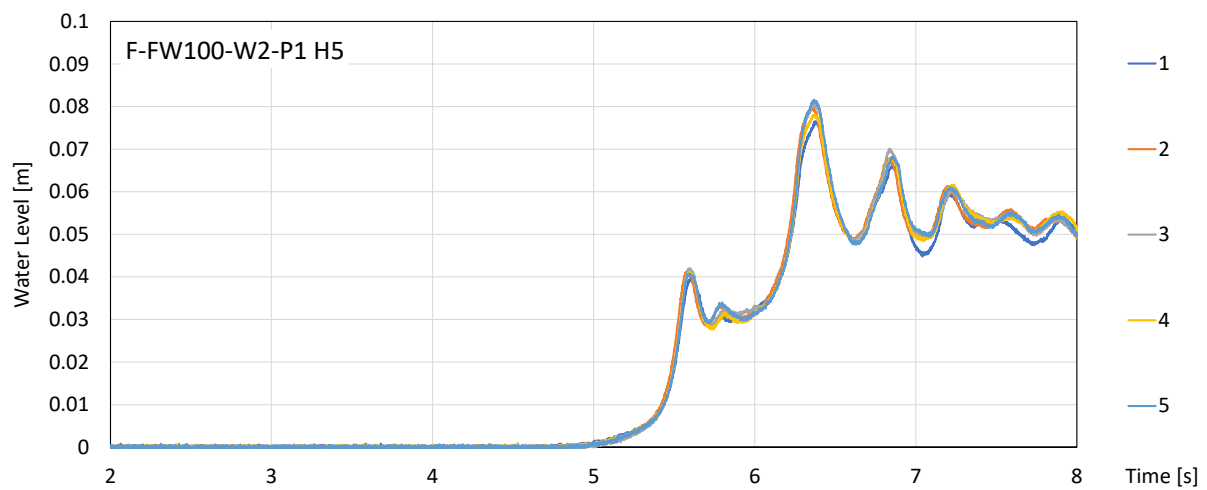


(c) H3 の水位時系列

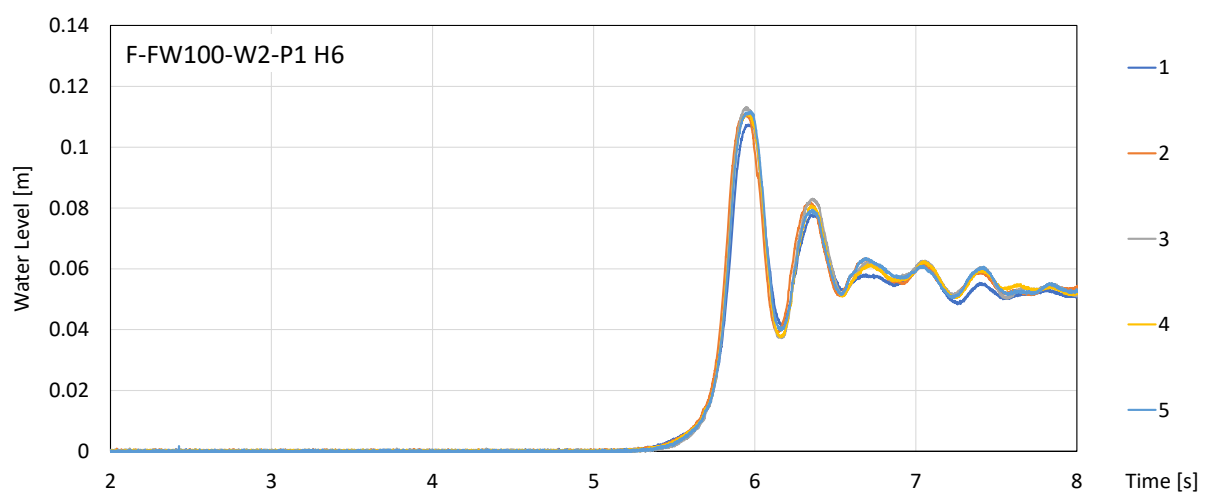
図- 3.56 衝突試験結果 (F-FW100-W2-P1 ; 水平床 F, 淡水 1.00g/cm^3 , 津波 W2, 壁位置 P1) [1]



(a) H4 の水位時系列

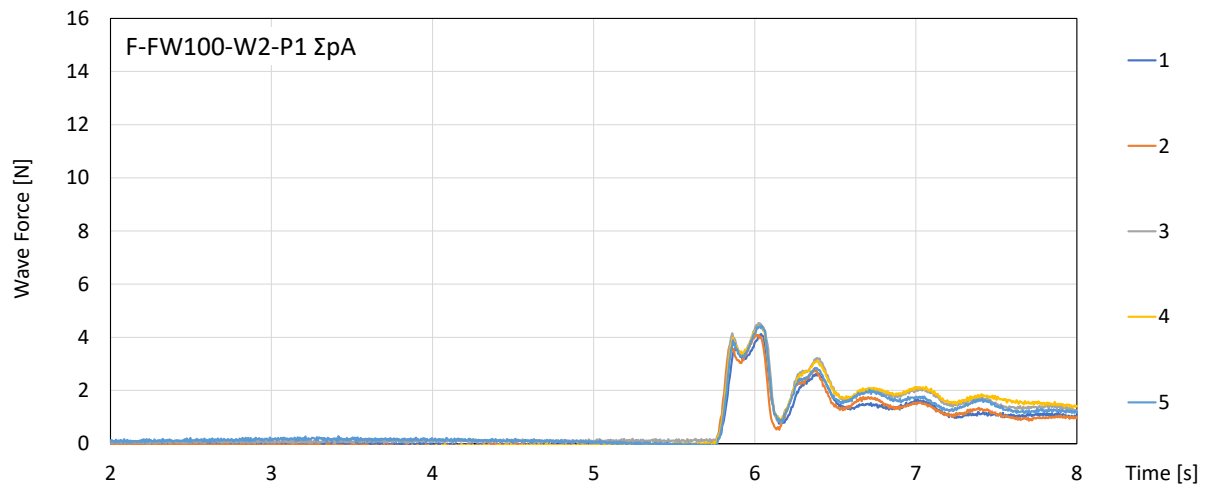


(b) H5 の水位時系列

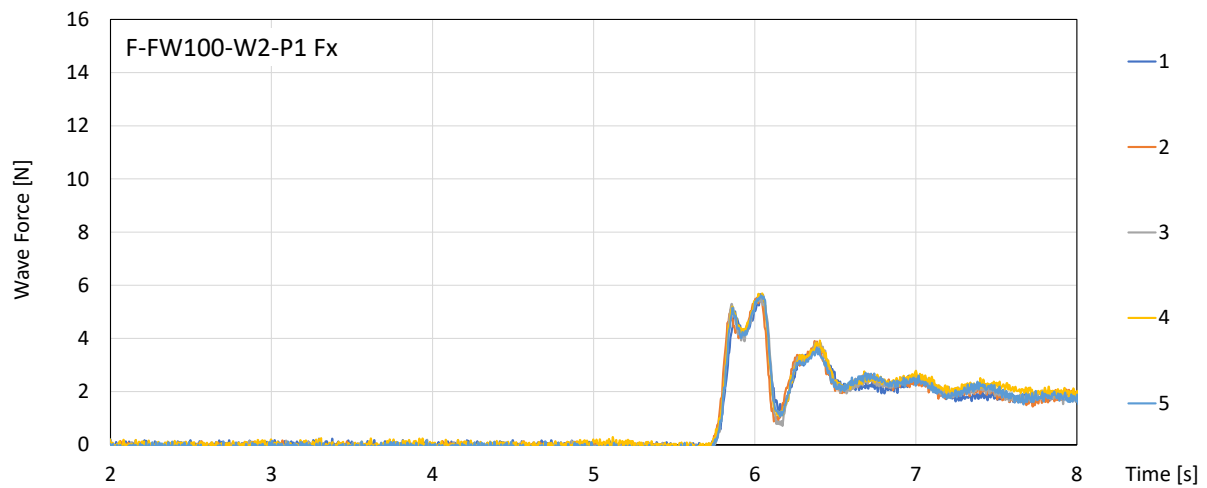


(c) H6 の水位時系列; 壁前面位置

図- 3.57 衝突試験結果 (F-FW100-W2-P1 ; 水平床 F, 淡水 1.00g/cm^3 , 津波 W2, 壁位置 P1) [2]

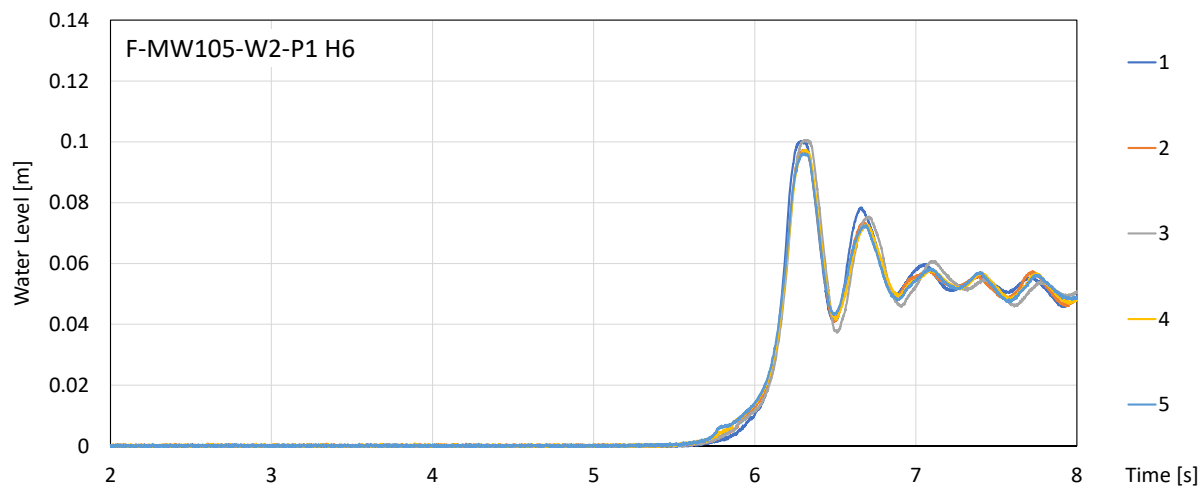


(a) 圧力計による波力 Σp_A の時系列

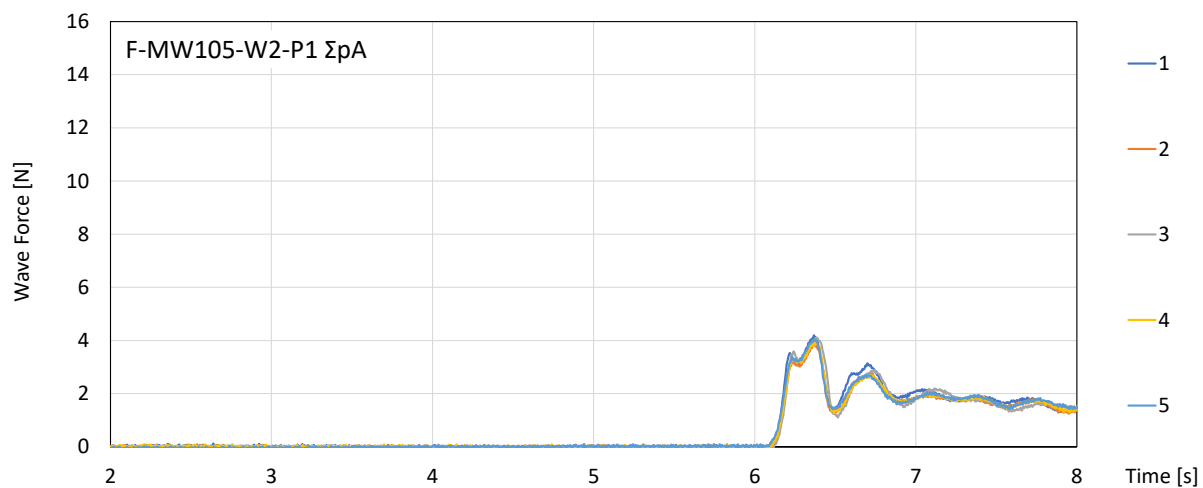


(b) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

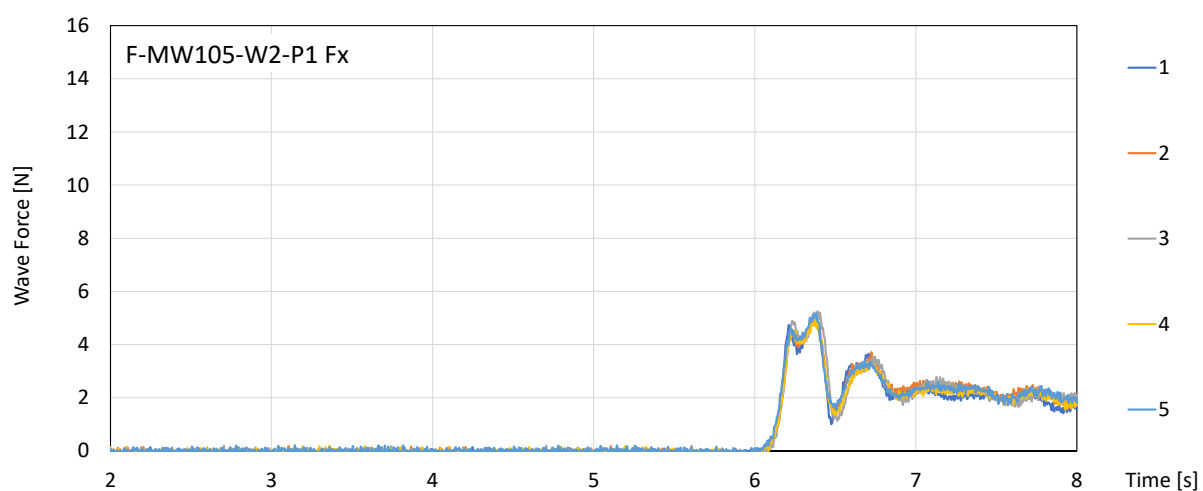
図- 3.58 衝突試験結果 (F-FW100-W2-P1 ; 水平床 F, 淡水 1.00g/cm^3 , 津波 W2, 壁位置 P1) [3]



(a) H6 の水位時系列；壁前面位置

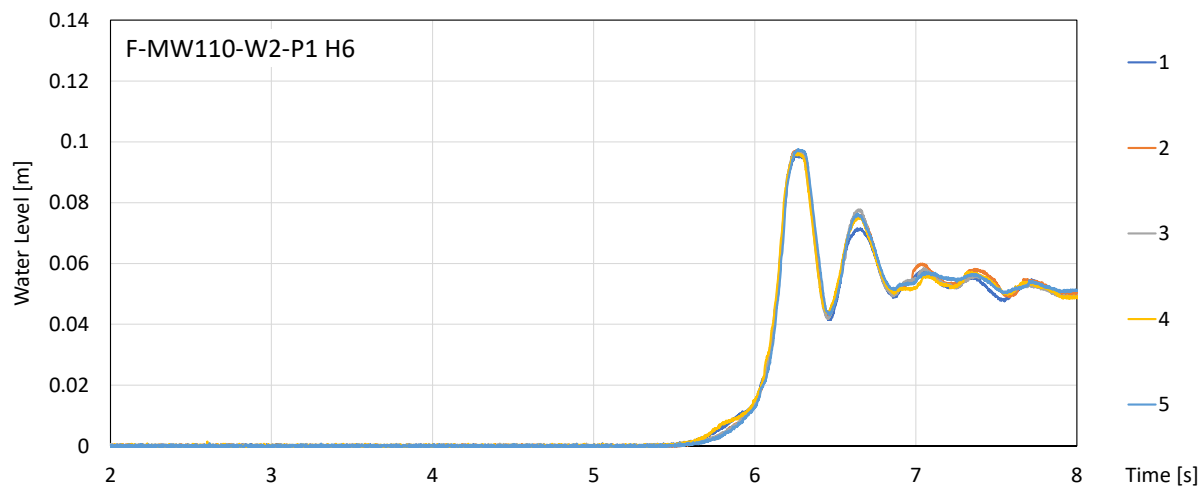


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

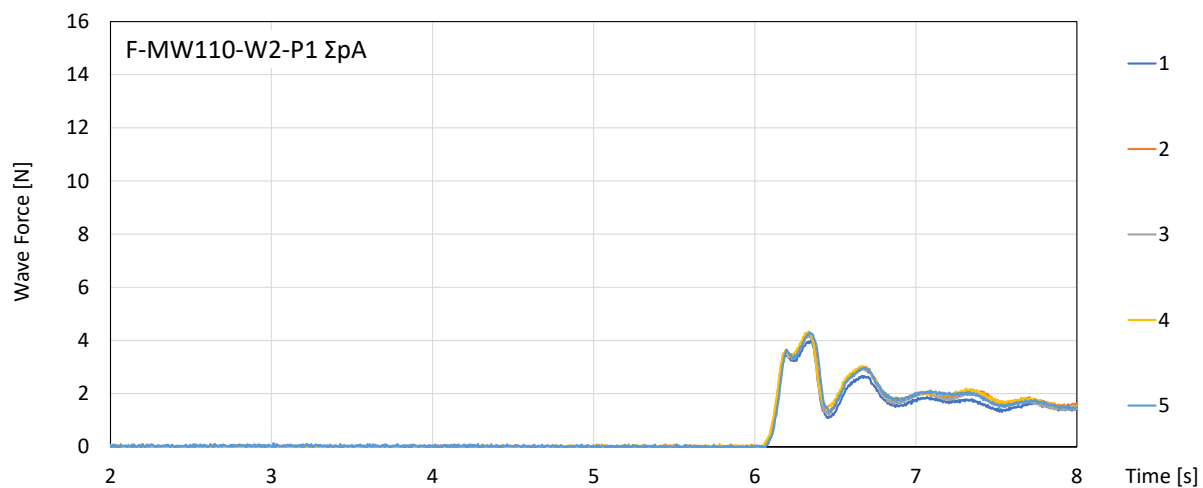


(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

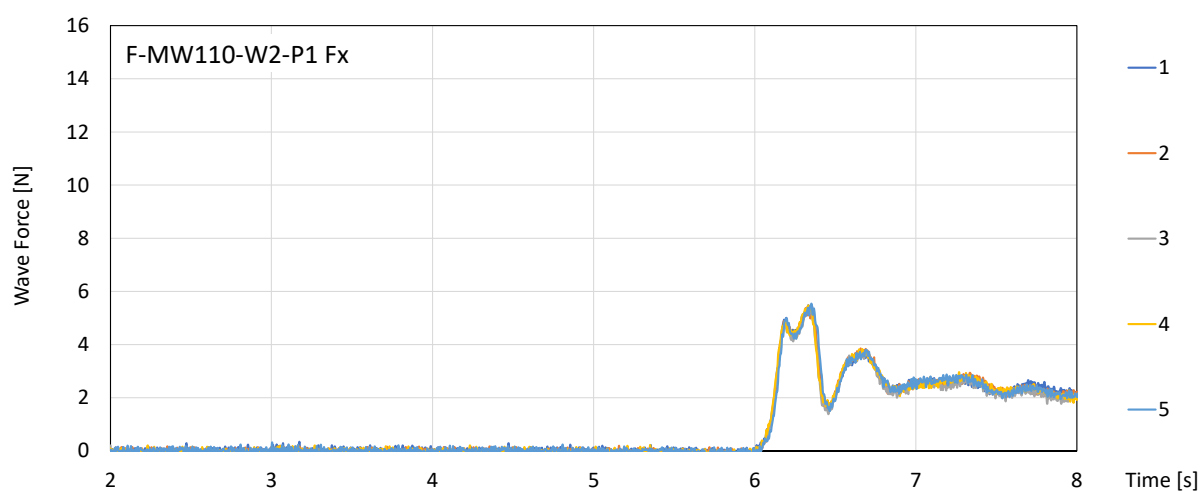
図- 3.59 衝突試験結果 (F-MW105-W2-P1；水平床 F, 濁水 1.05g/cm^3 , 津波 W2, 壁位置 P1)



(a) H6 の水位時系列；壁前面位置

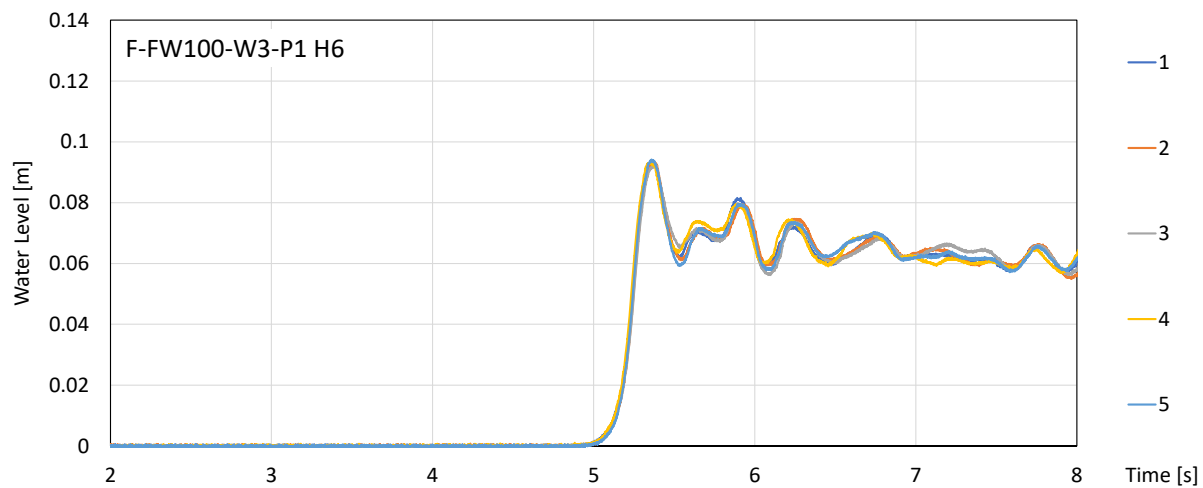


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

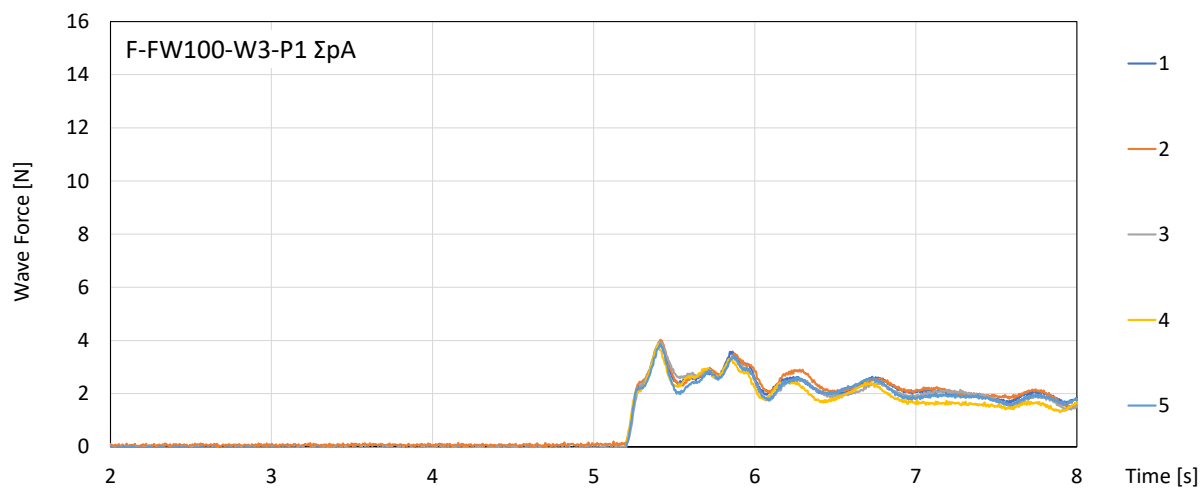


(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

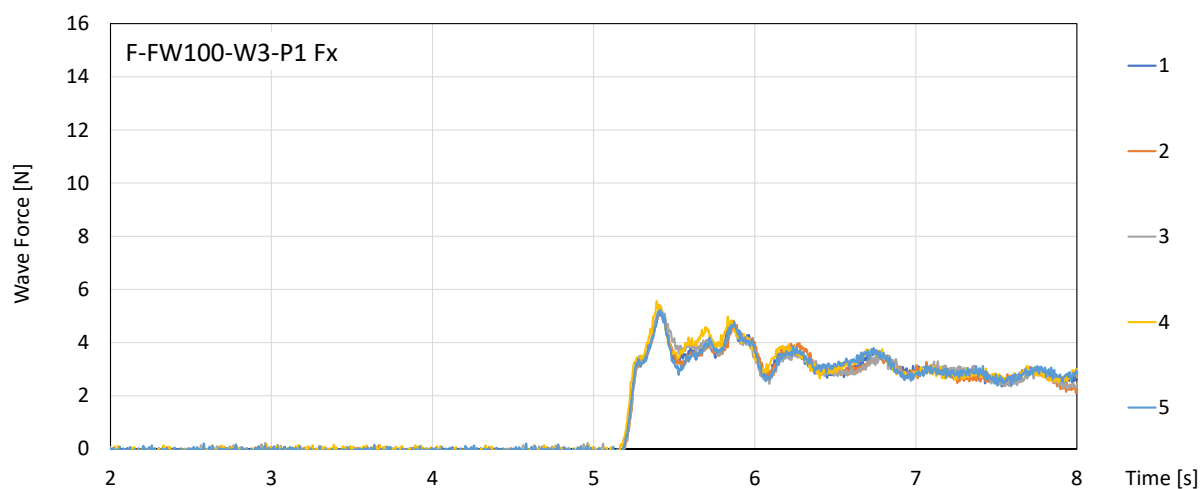
図- 3.60 衝突試験結果 (F-MW110-W2-P1；水平床 F, 濁水 1.10g/cm^3 , 津波 W2, 壁位置 P1)



(a) H6 の水位時系列；壁前面位置

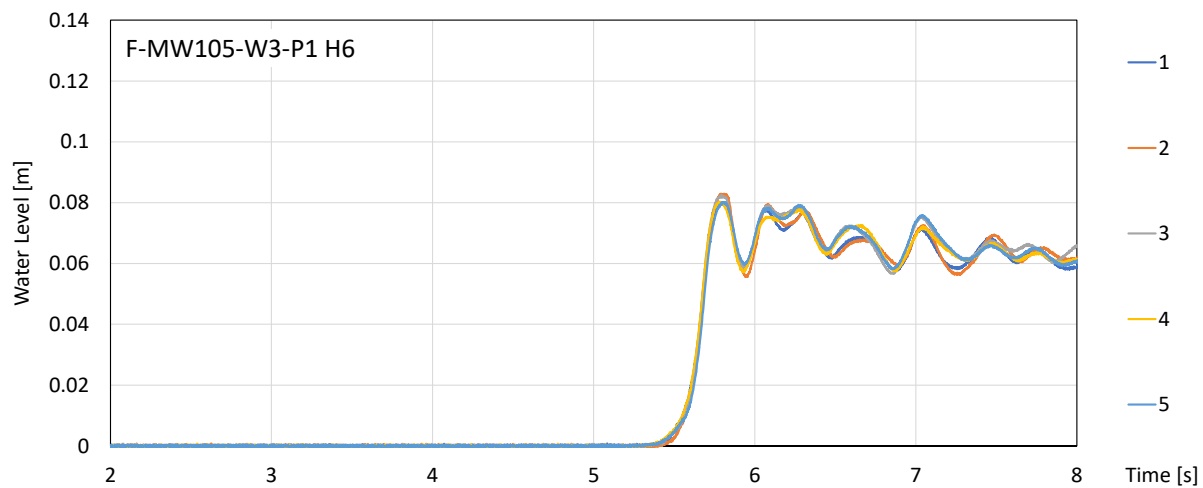


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

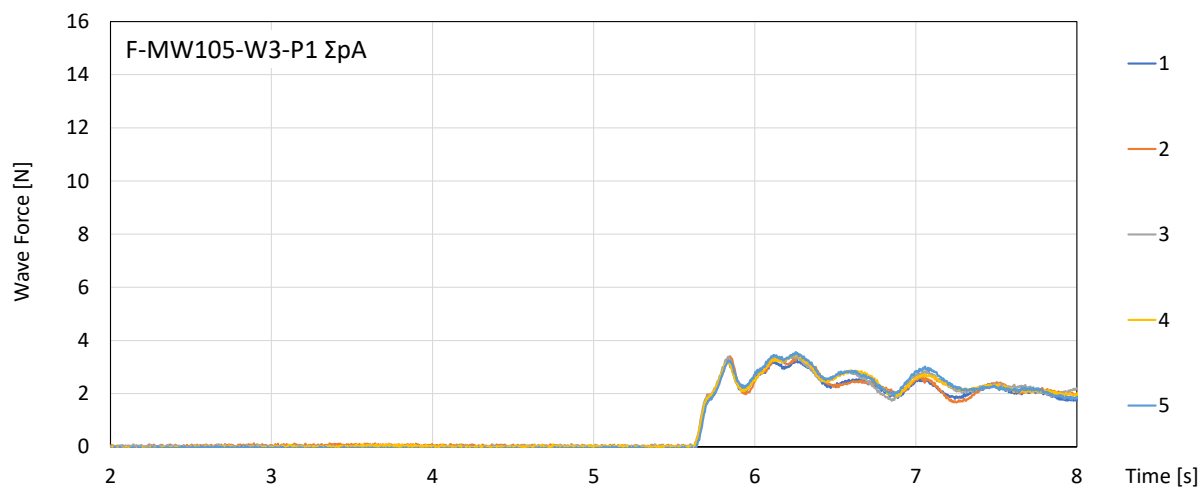


(c) 水中6分力計による波力 F_x の時系列

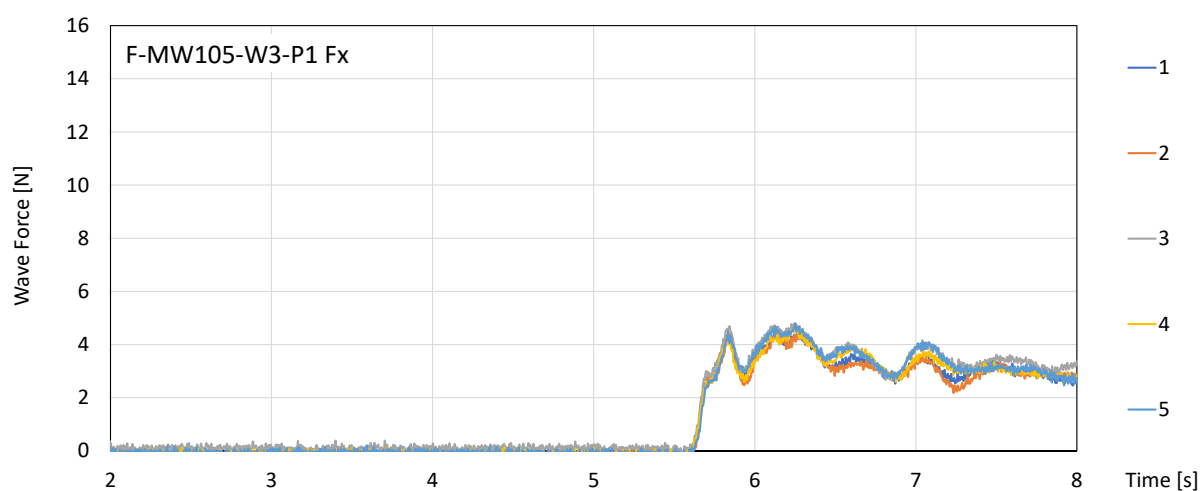
図-3.61 衝突試験結果 (F-FW100-W3-P1；水平床 F, 淡水 1.00g/cm^3 , 津波 W3, 壁位置 P1)



(a) H6 の水位時系列；壁前面位置

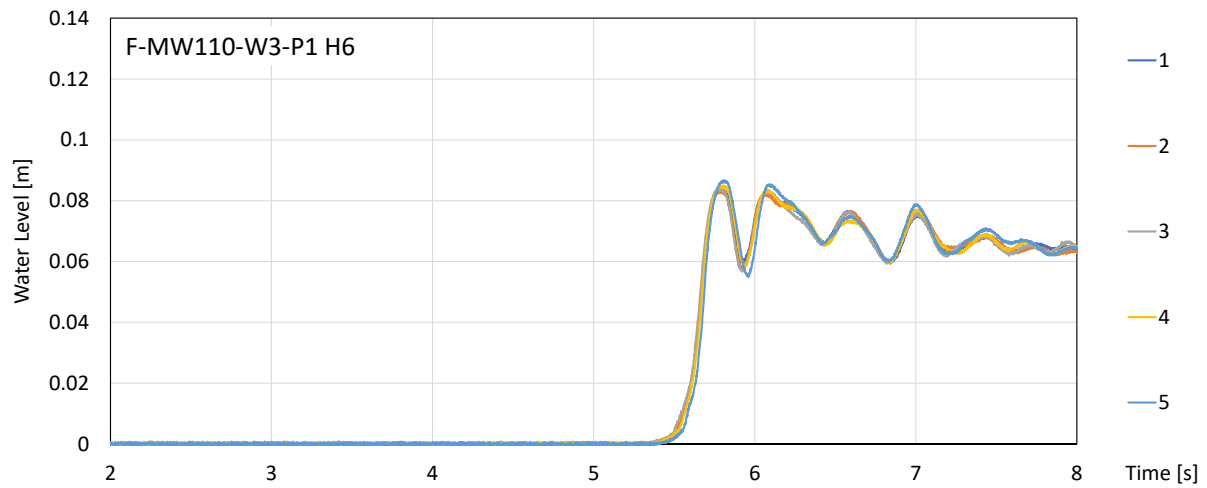


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

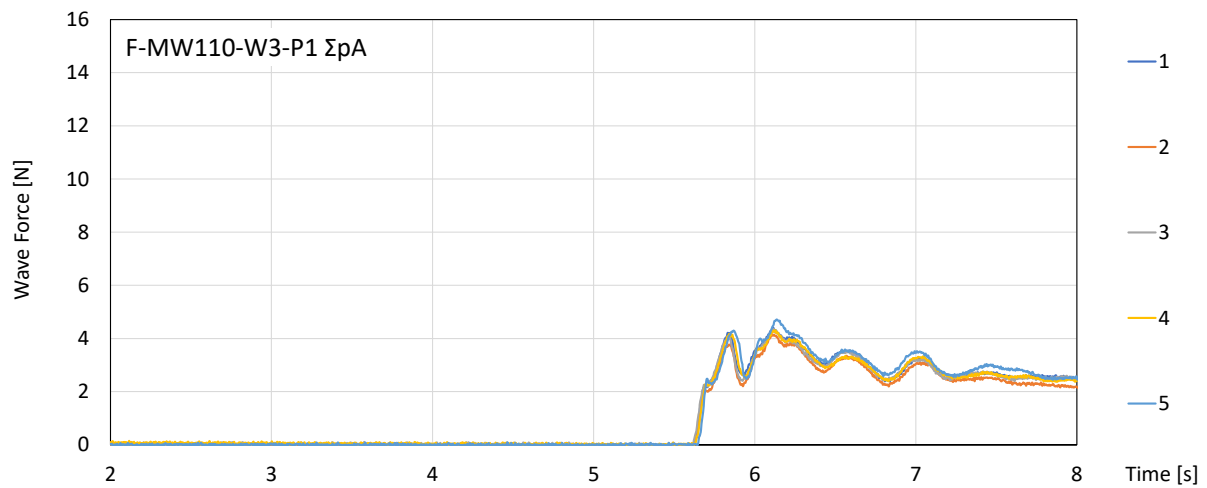


(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

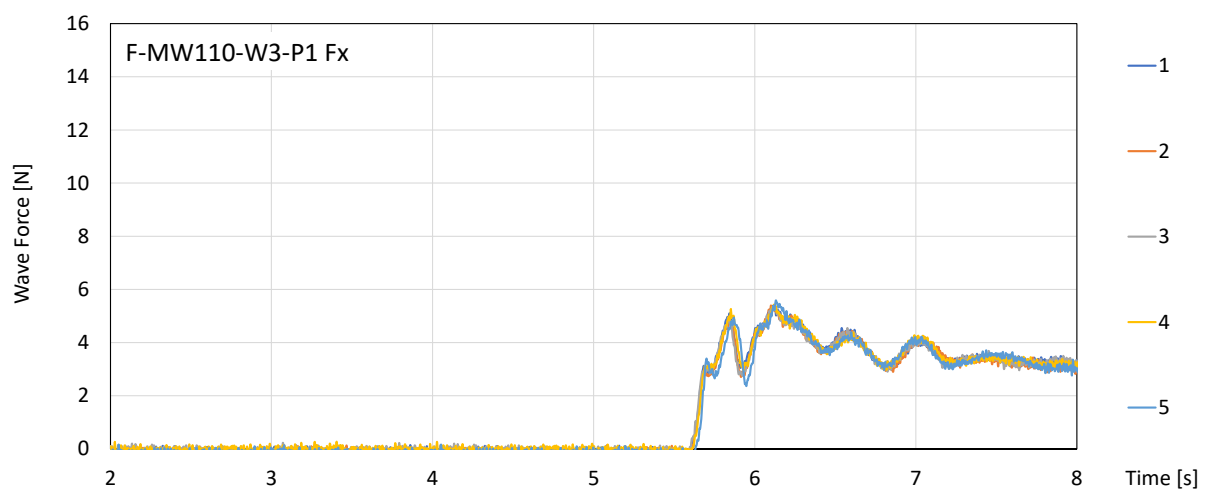
図- 3.62 衝突試験結果 (F-MW105-W3-P1；水平床 F, 濁水 1.05g/cm^3 , 津波 W3, 壁位置 P1)



(a) H6 の水位時系列；壁前面位置

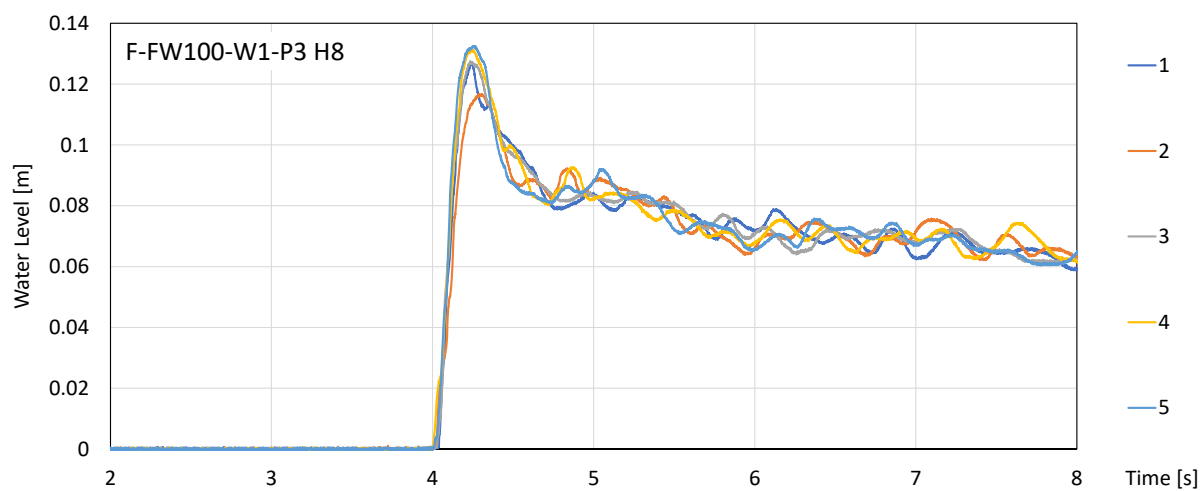


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

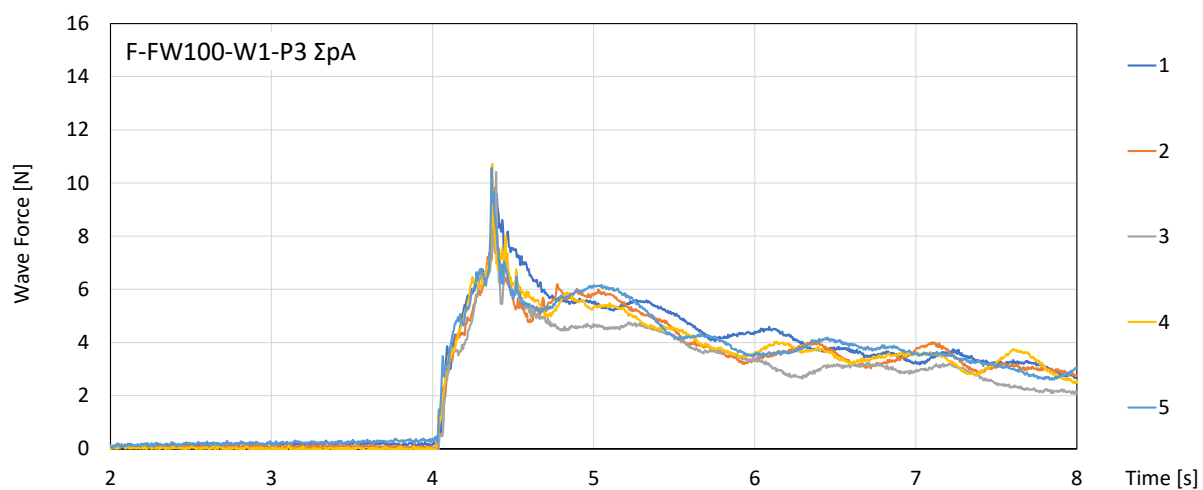


(c) 水中6分力計による波力 F_x の時系列

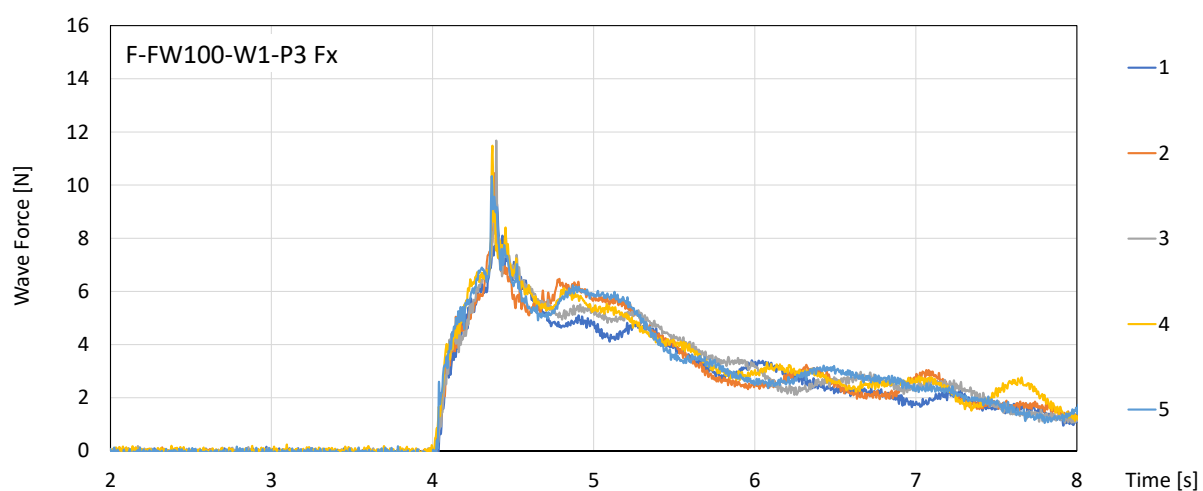
図- 3.63 衝突試験結果 (F-MW110-W3-P1 ; 水平床 F, 濁水 1.10g/cm^3 , 津波 W3, 壁位置 P1)



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

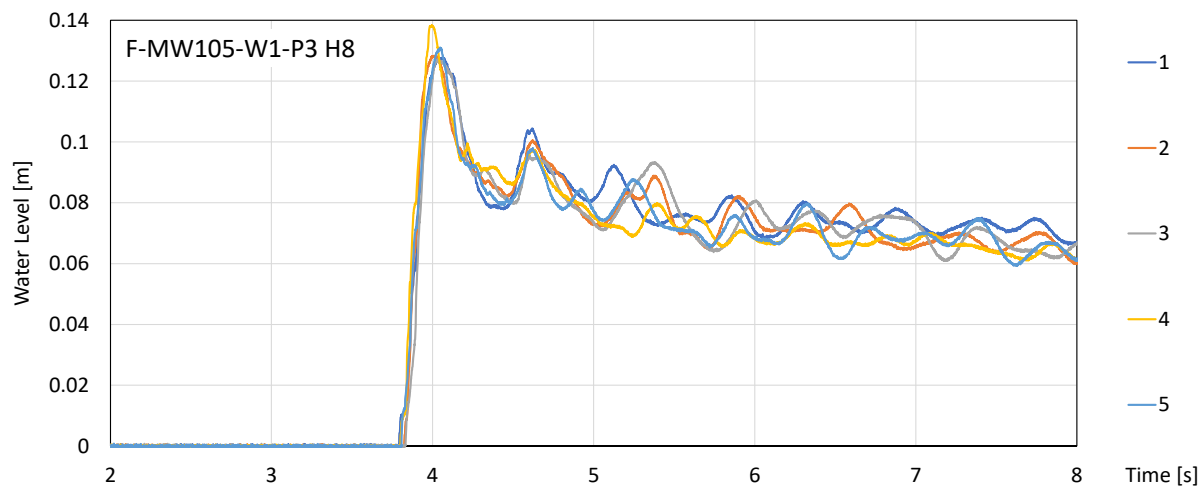


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

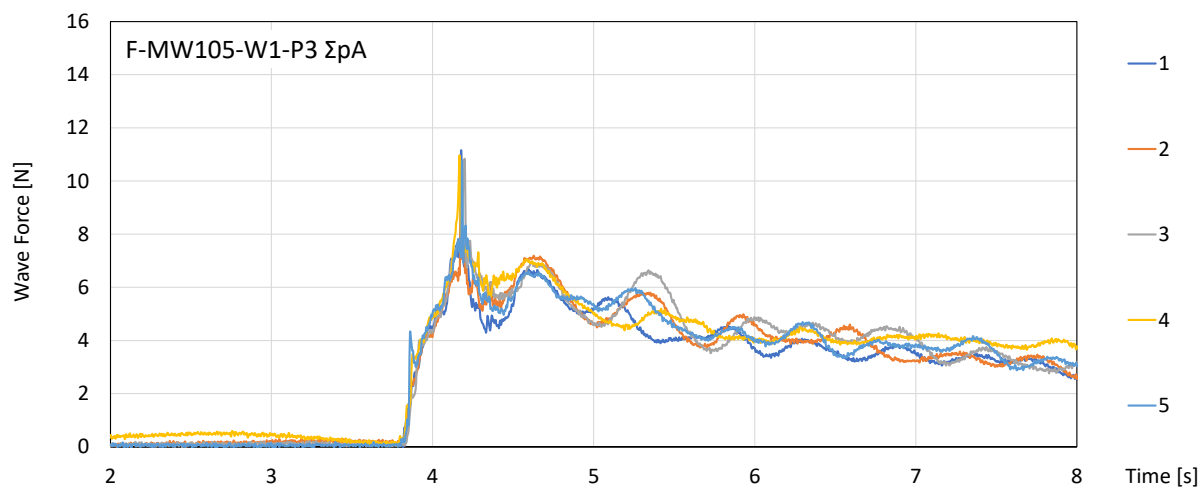


(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

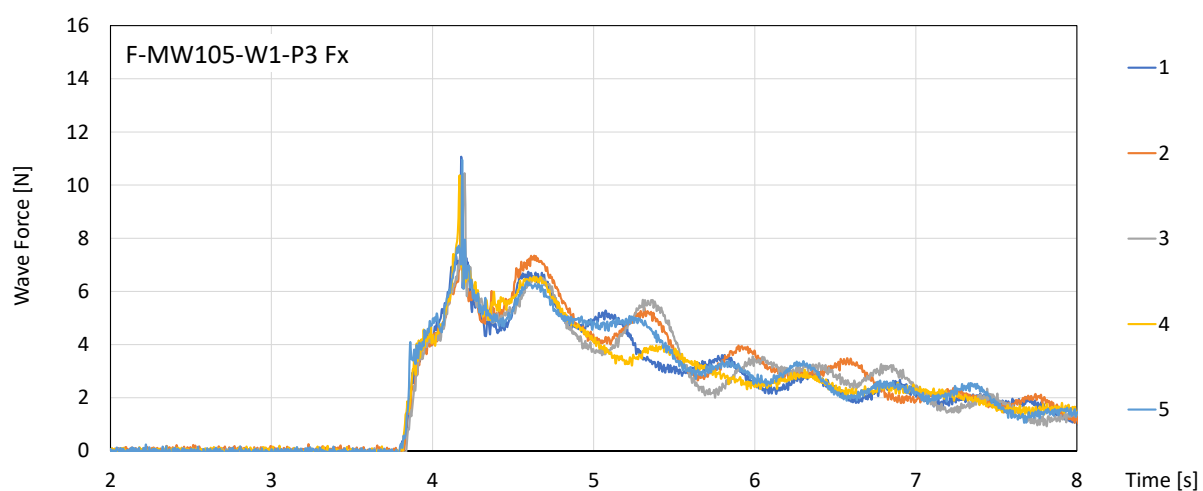
図-3.64 衝突試験結果 (F-FW100-W1-P3；水平床 F, 淡水 1.00g/cm^3 , 津波 W1, 壁位置 P3)



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

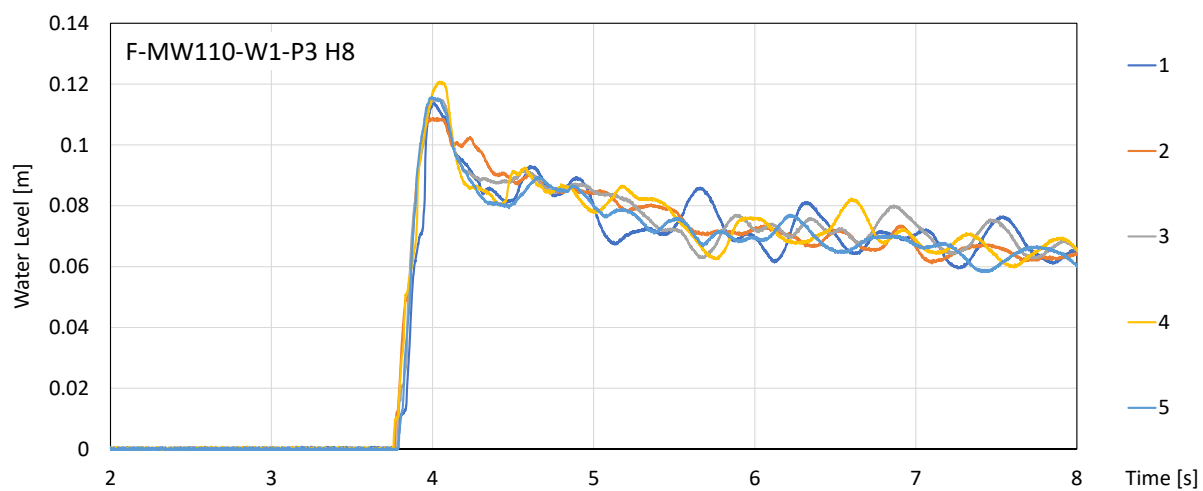


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

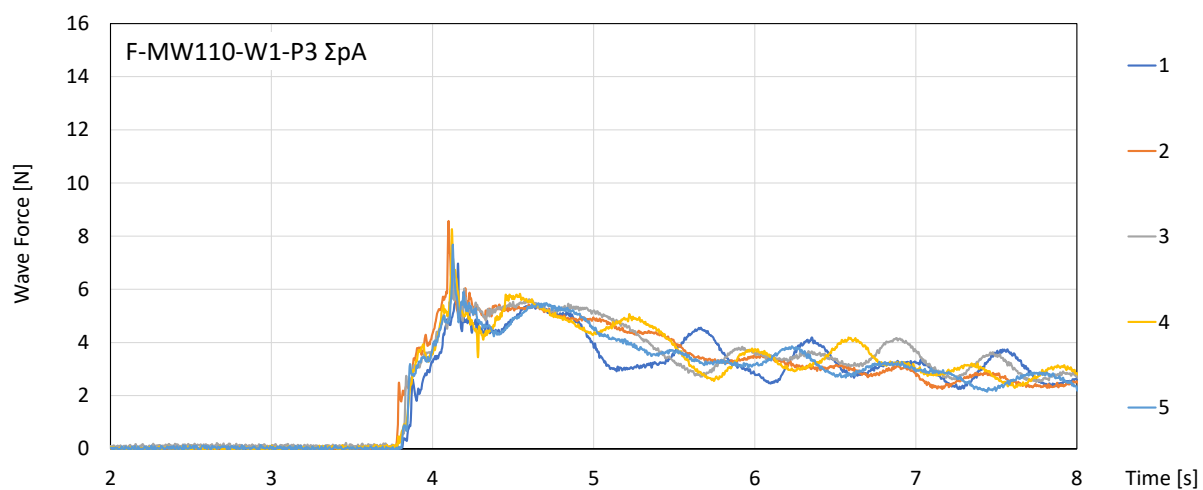


(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

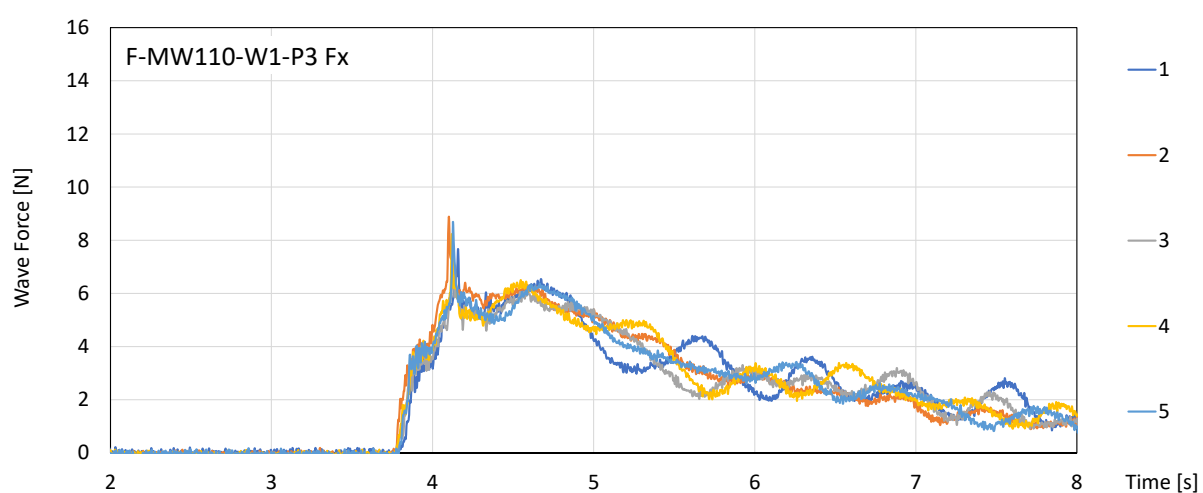
図- 3.65 衝突試験結果 (F-MW105-W1-P3；水平床 F, 濁水 1.05g/cm^3 , 津波 W1, 壁位置 P3)



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

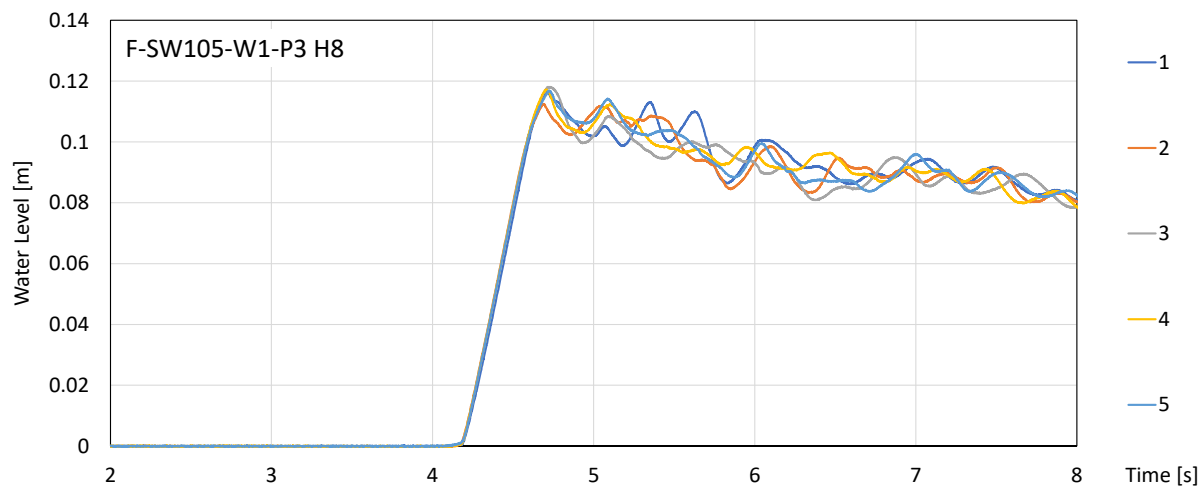


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

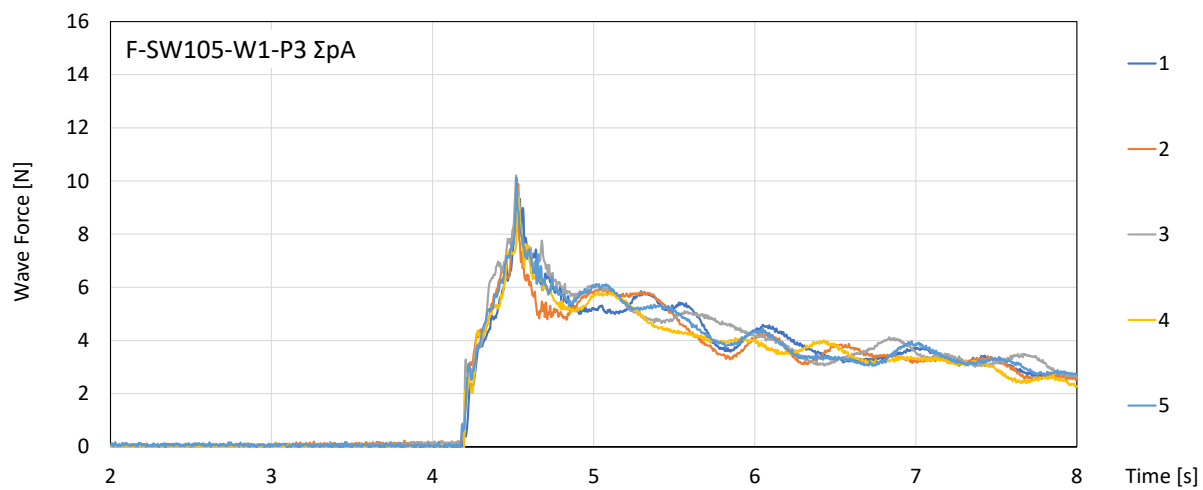


(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

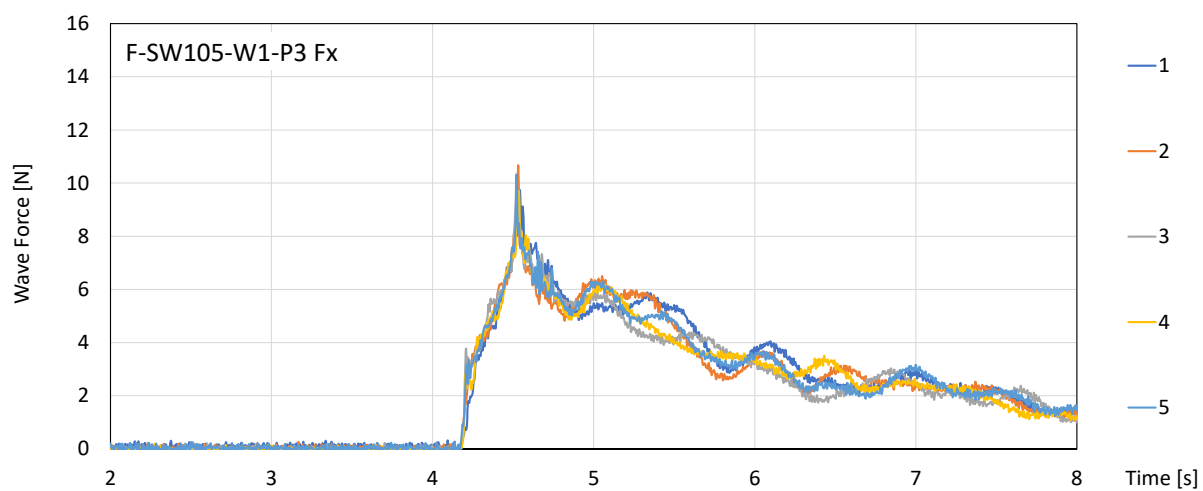
図- 3.66 衝突試験結果 (F-MW110-W1-P3；水平床 F, 濁水 1.10g/cm^3 , 津波 W1, 壁位置 P3)



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

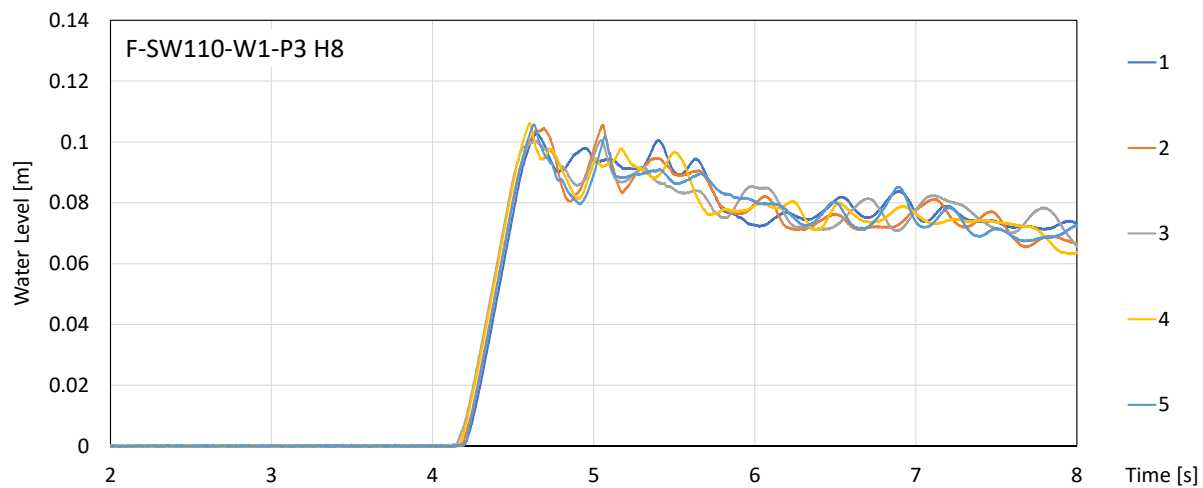


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

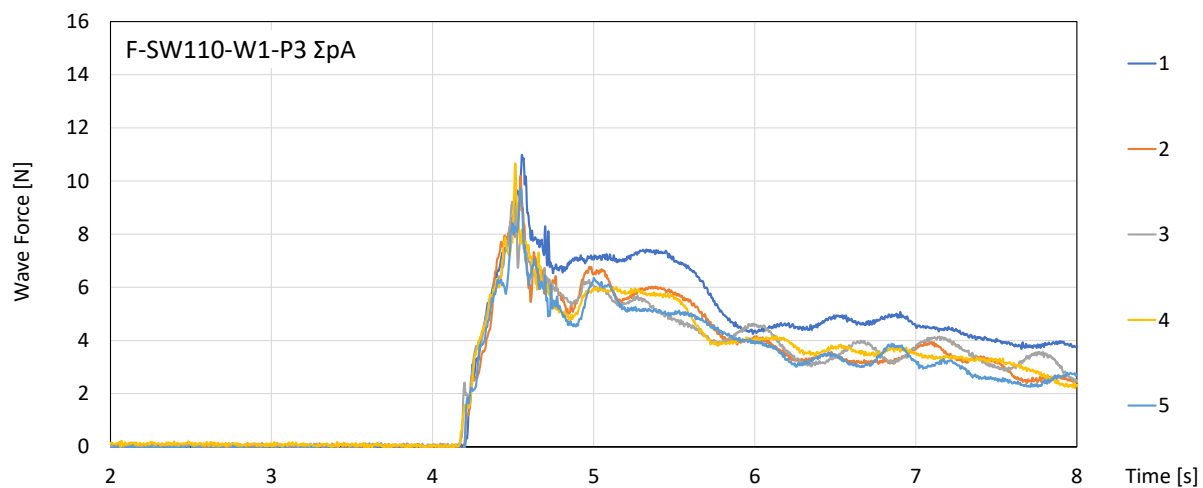


(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

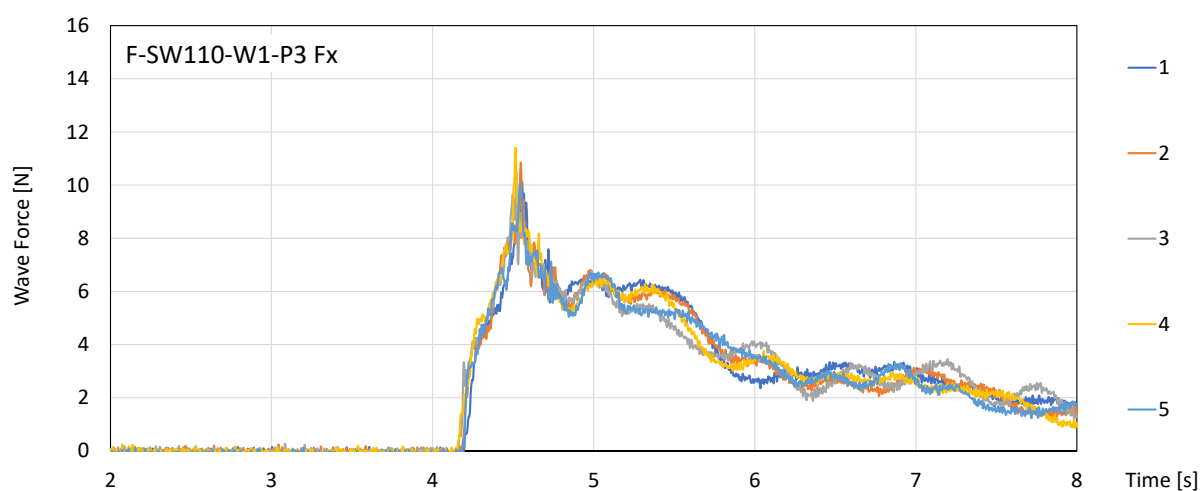
図-3.67 衝突試験結果 (F-SW105-W1-P3；水平床 F, 塩水 1.05g/cm^3 , 津波 W1, 壁位置 P3)



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

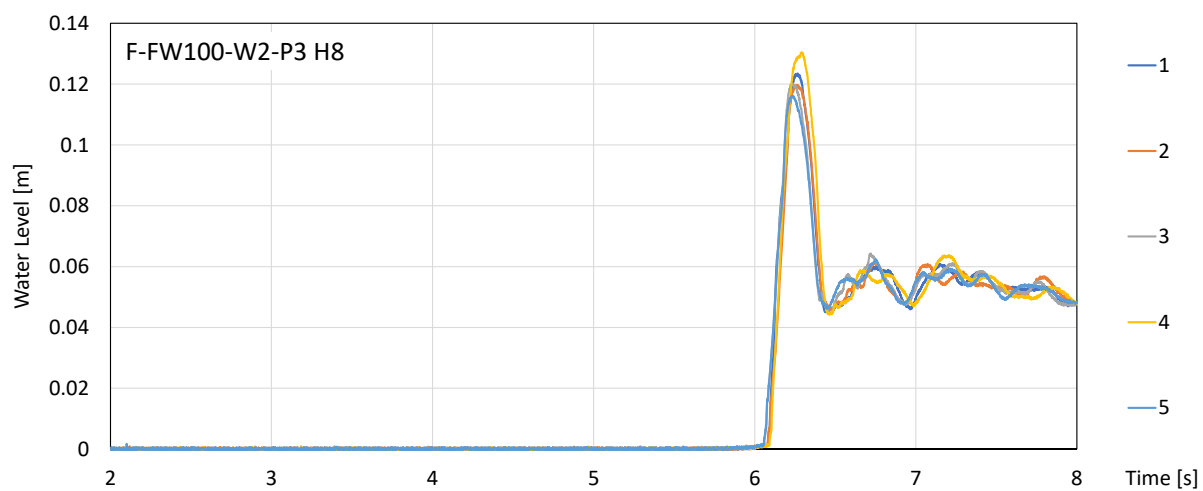


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

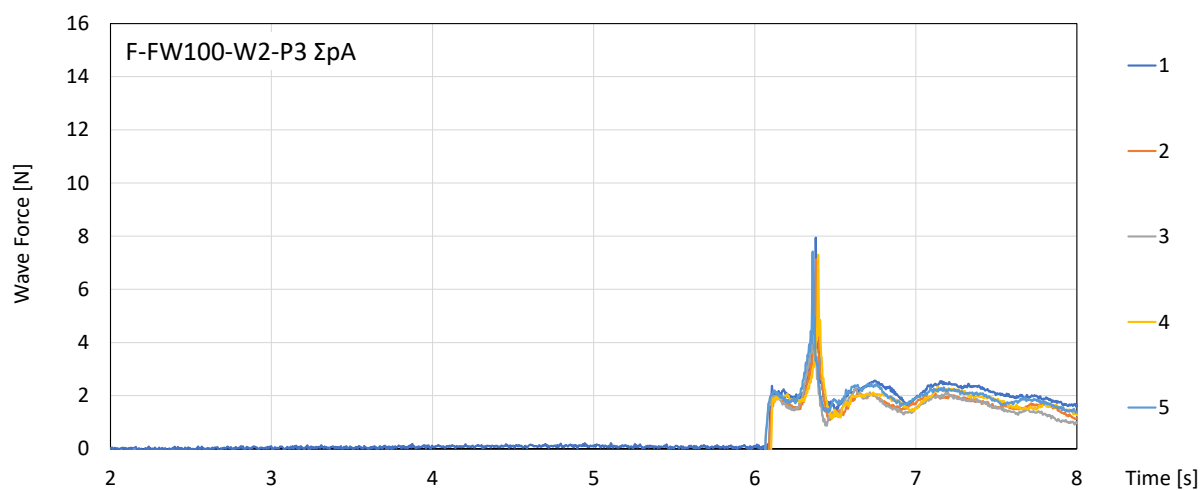


(c) 水中6分力計による波力 F_x の時系列

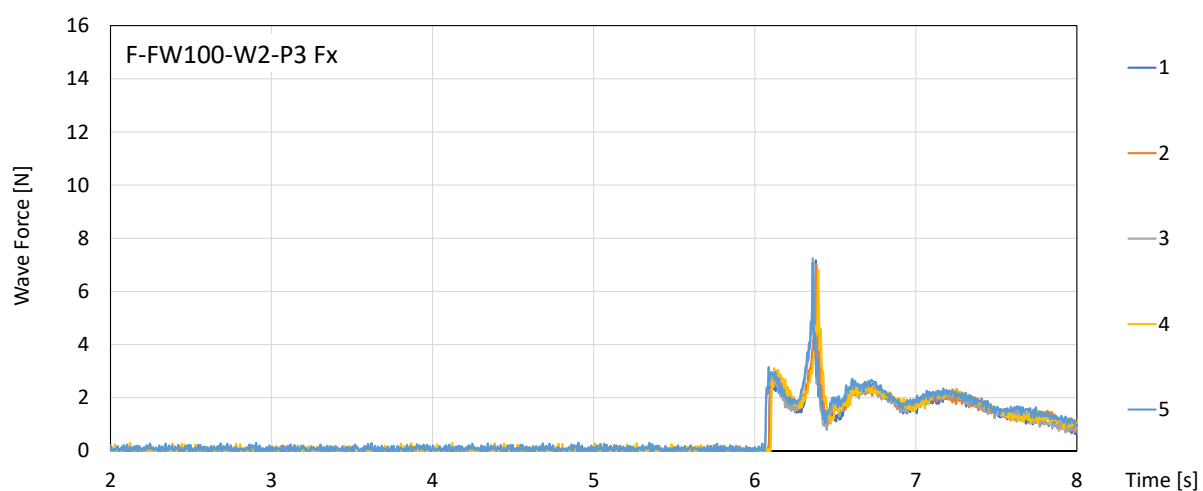
図-3.68 衝突試験結果 (F-SW110-W1-P3；水平床 F, 塩水 1.10g/cm^3 , 津波 W1, 壁位置 P3)



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

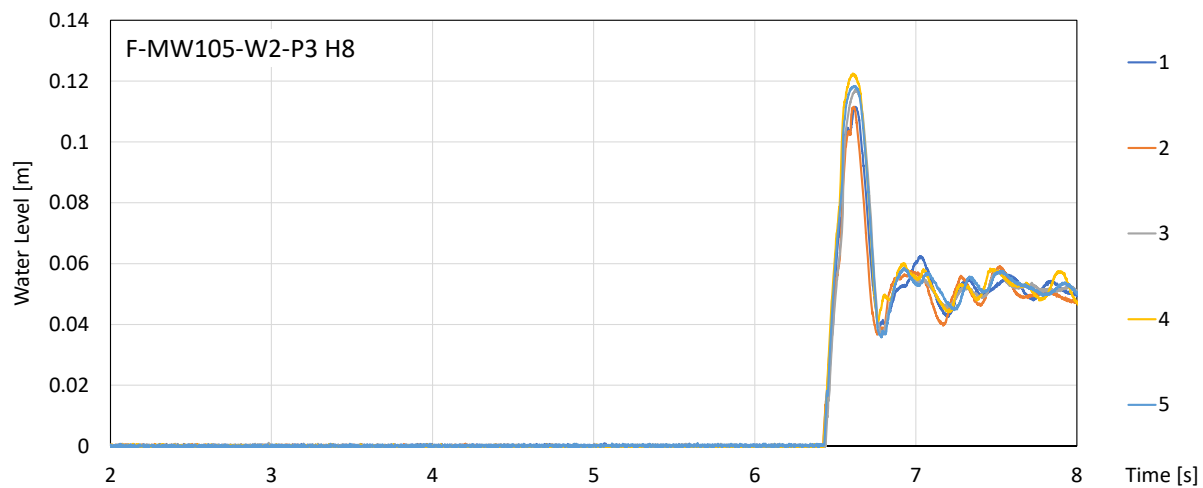


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

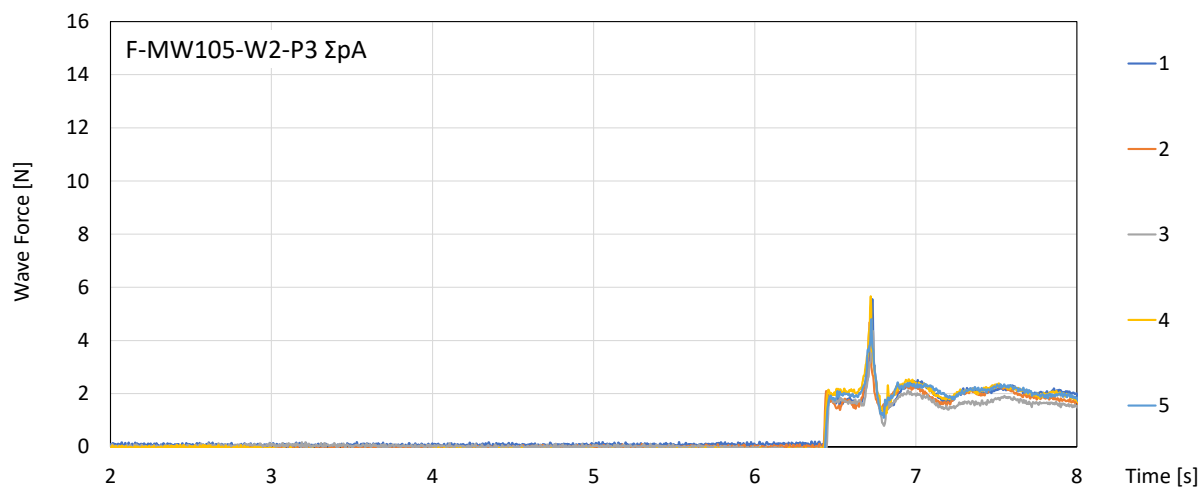


(c) 水中6分力計による波力 F_x の時系列

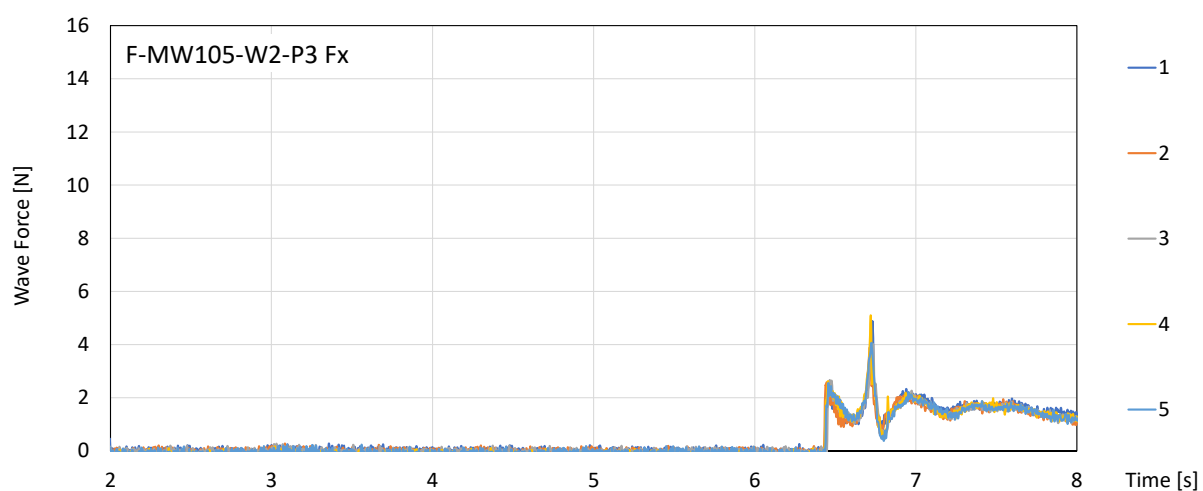
図-3.69 衝突試験結果 (F-FW100-W2-P3；水平床 F, 淡水 1.00g/cm^3 , 津波 W2, 壁位置 P3)



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

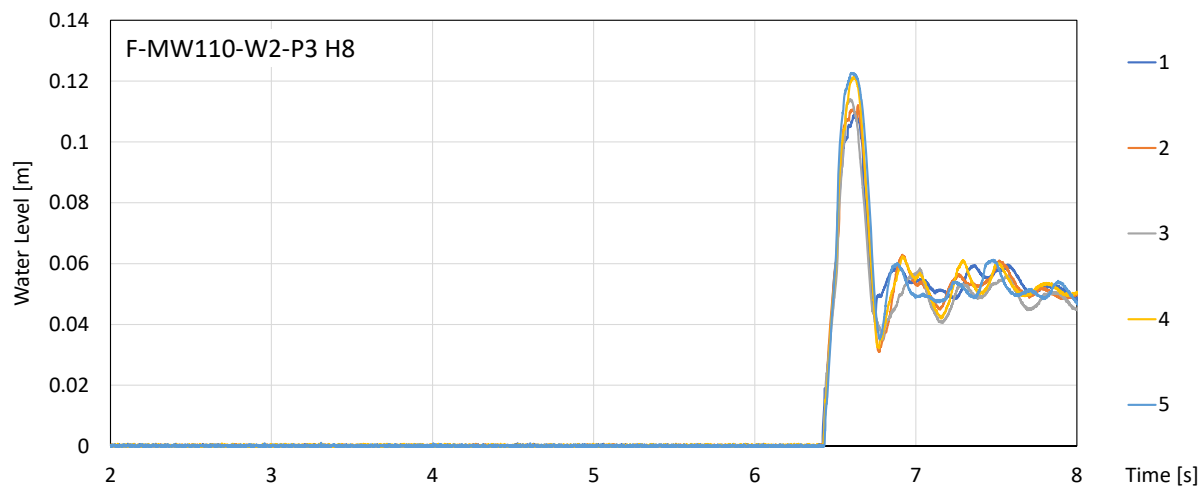


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

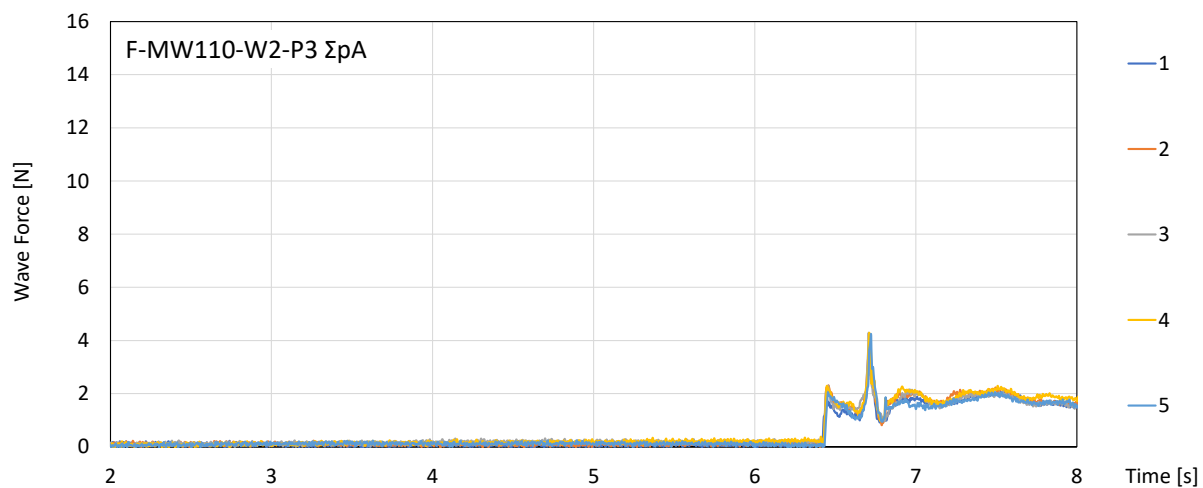


(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

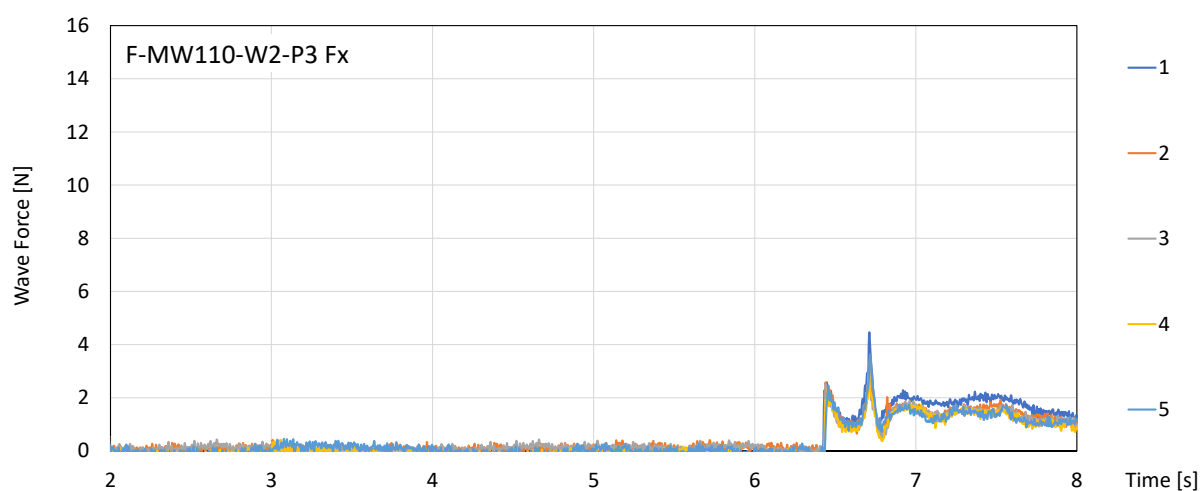
図- 3.70 衝突試験結果 (F-MW105-W2-P3；水平床 F, 濁水 1.05g/cm^3 , 津波 W2, 壁位置 P3)



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

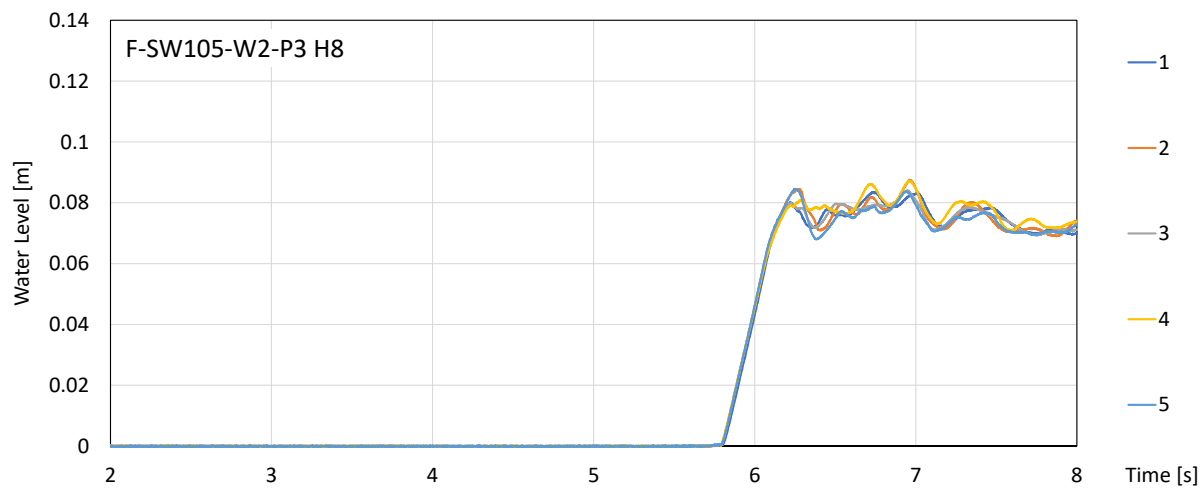


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

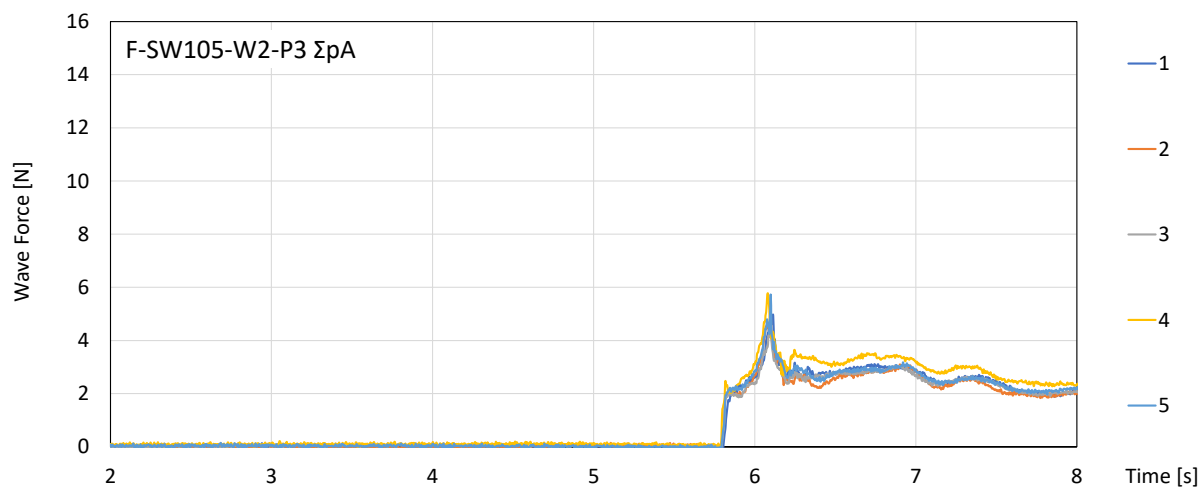


(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

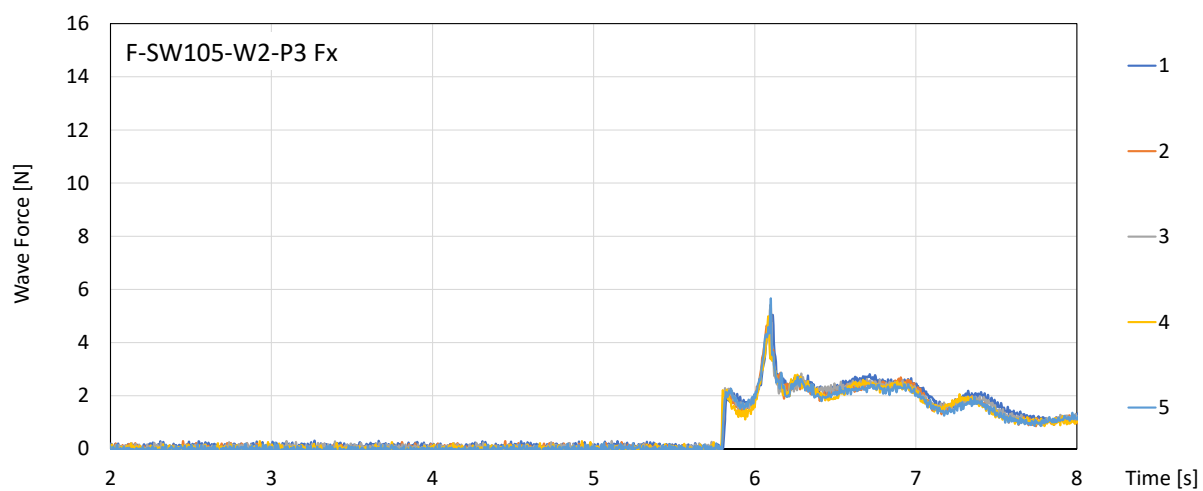
図- 3.71 衝突試験結果 (F-MW110-W2-P3；水平床 F, 濁水 1.10g/cm^3 , 津波 W2, 壁位置 P3)



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

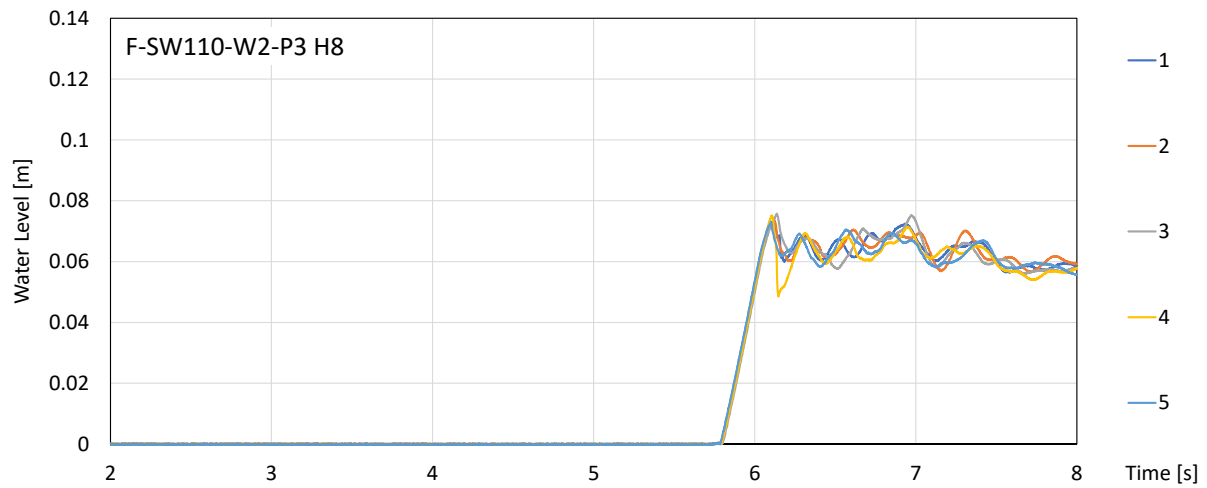


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

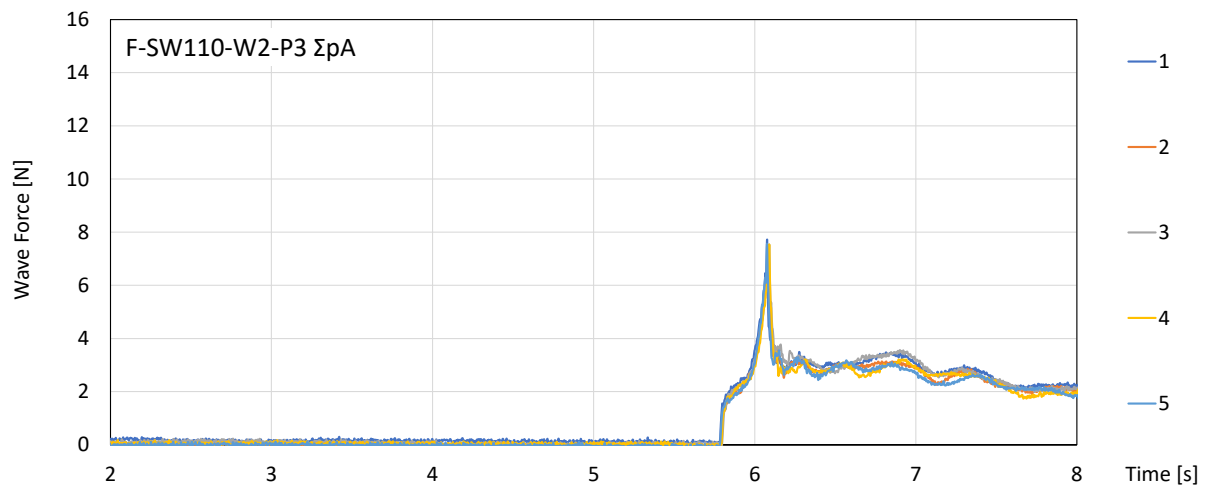


(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

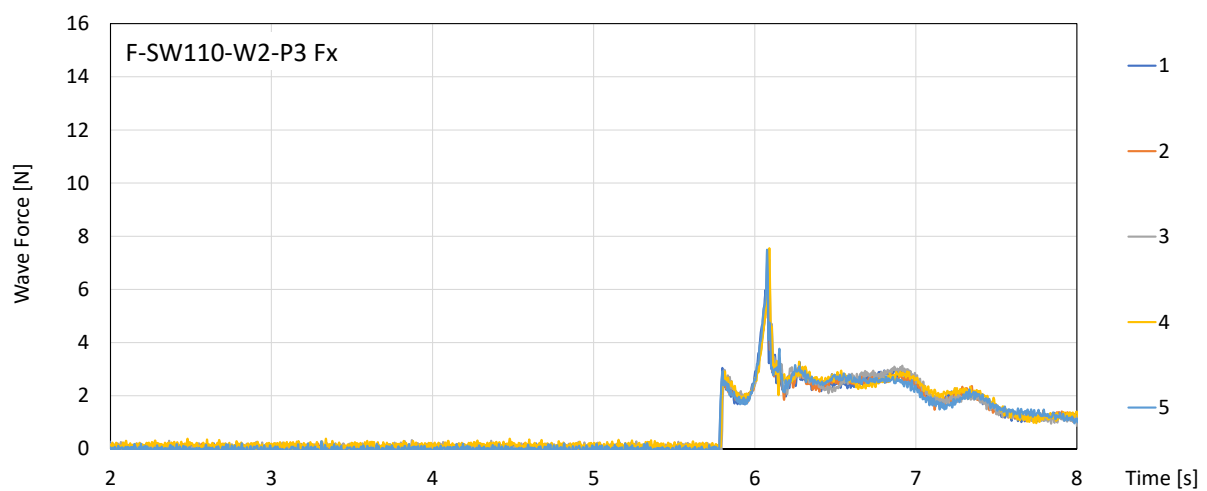
図-3.72 衝突試験結果 (F-SW105-W2-P3；水平床 F, 塩水 1.05g/cm^3 , 津波 W2, 壁位置 P3)



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

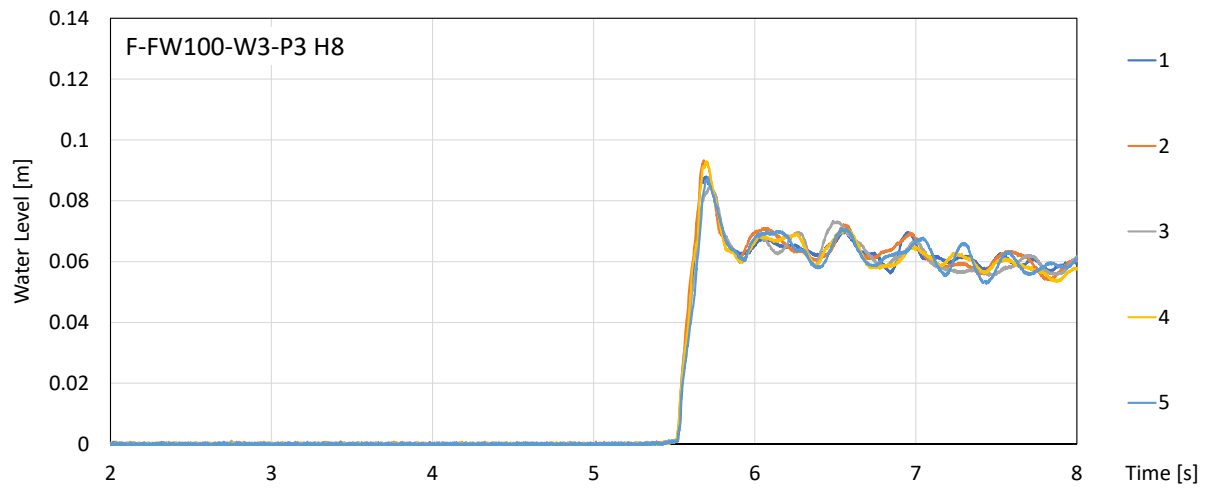


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

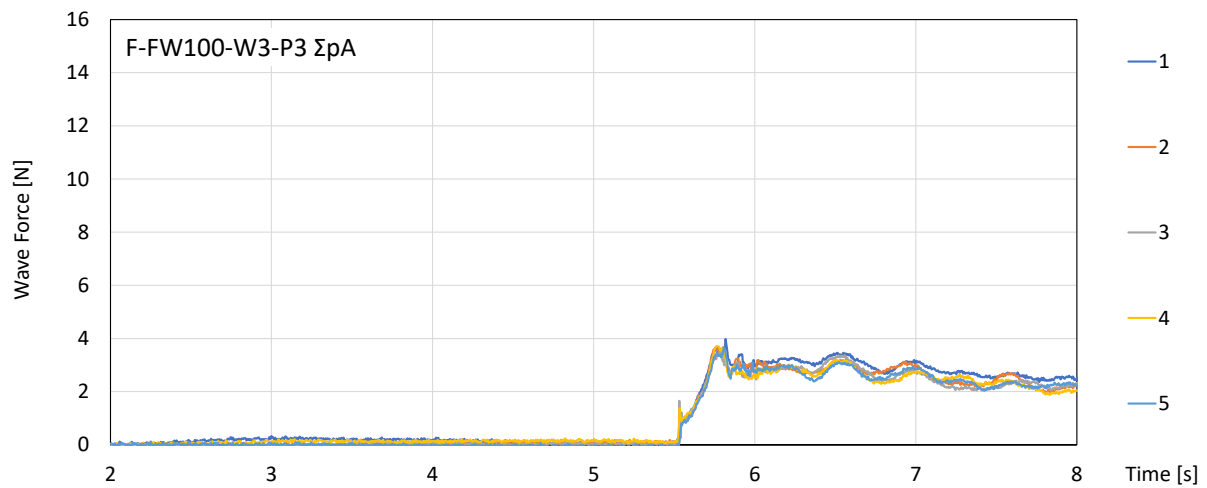


(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

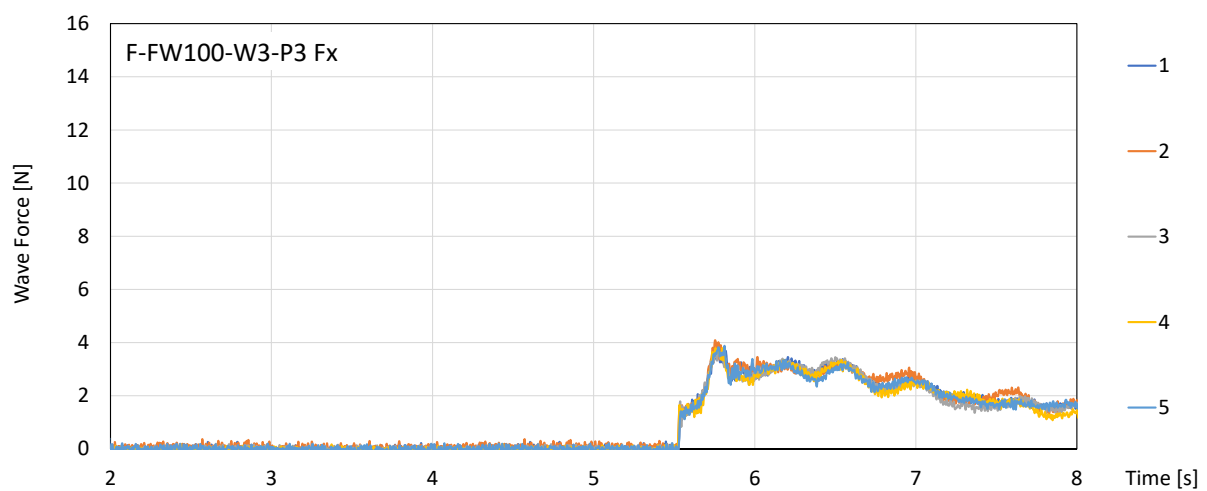
図- 3.73 衝突試験結果 (F-SW110-W2-P3 ; 水平床 F, 塩水 1.10g/cm^3 , 津波 W2, 壁位置 P3)



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

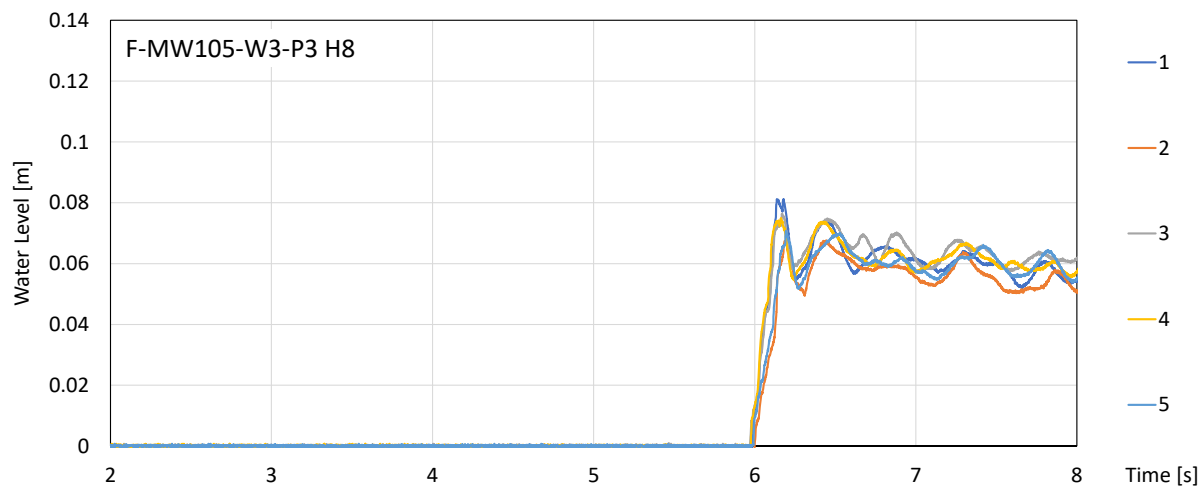


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

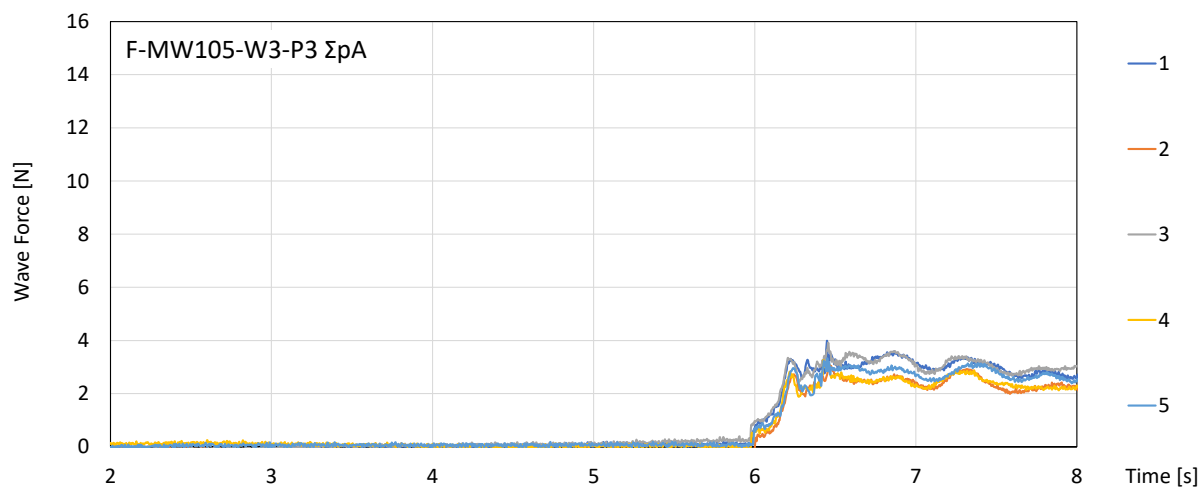


(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

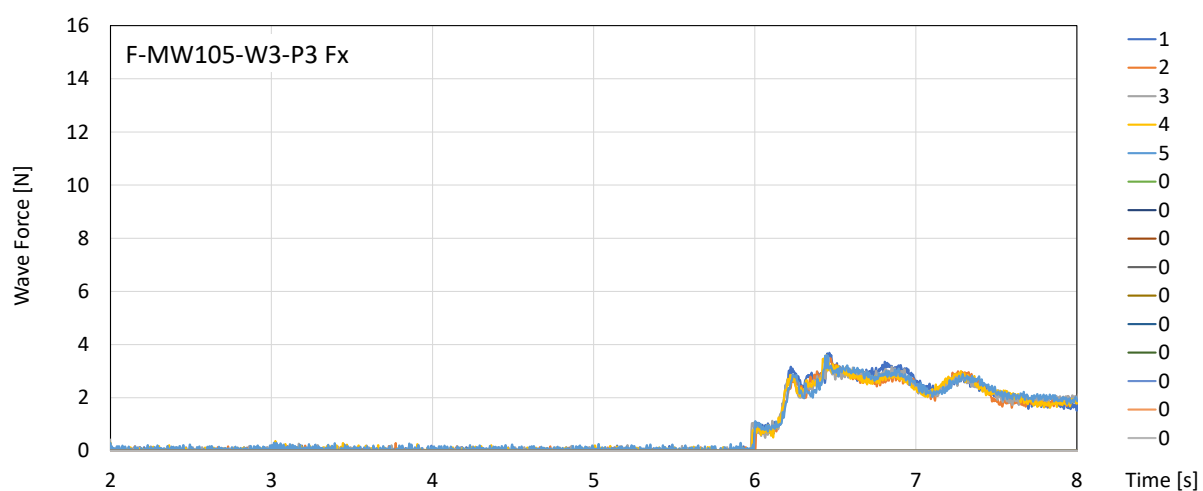
図-3.74 衝突試験結果 (F-FW100-W3-P3；水平床 F, 淡水 1.00g/cm^3 , 津波 W3, 壁位置 P3)



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

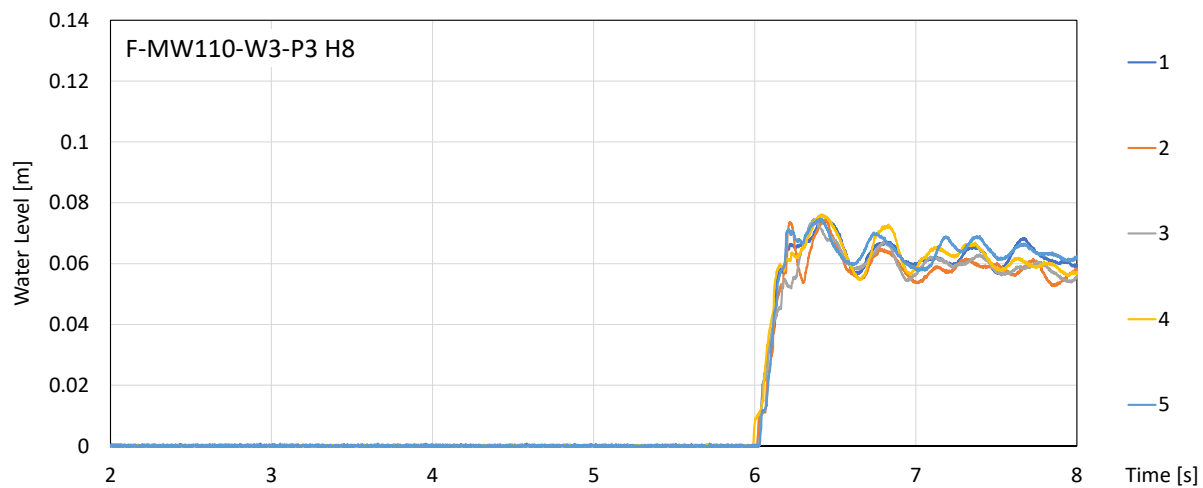


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

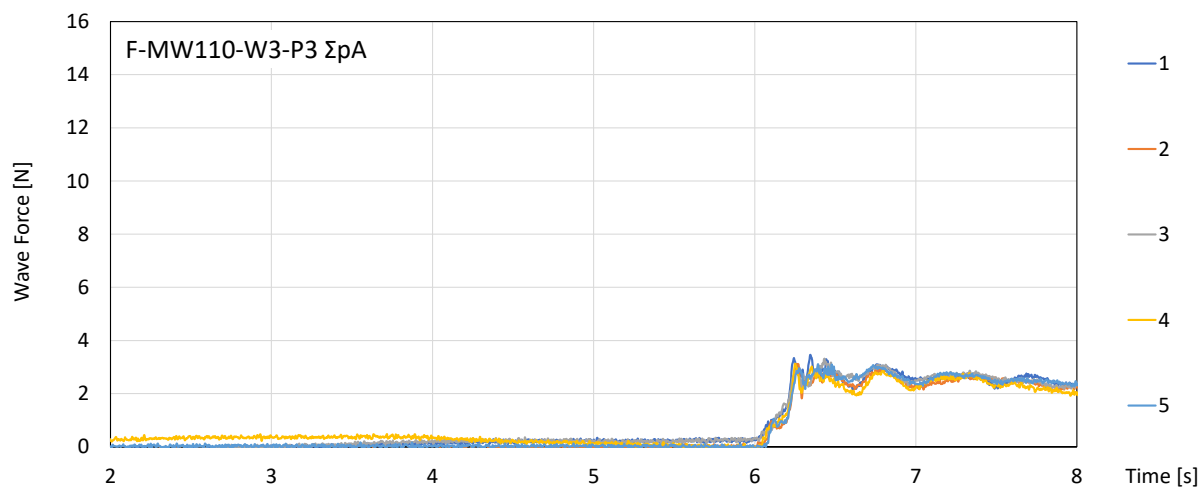


(c) 水中6分力計による波力 F_x の時系列

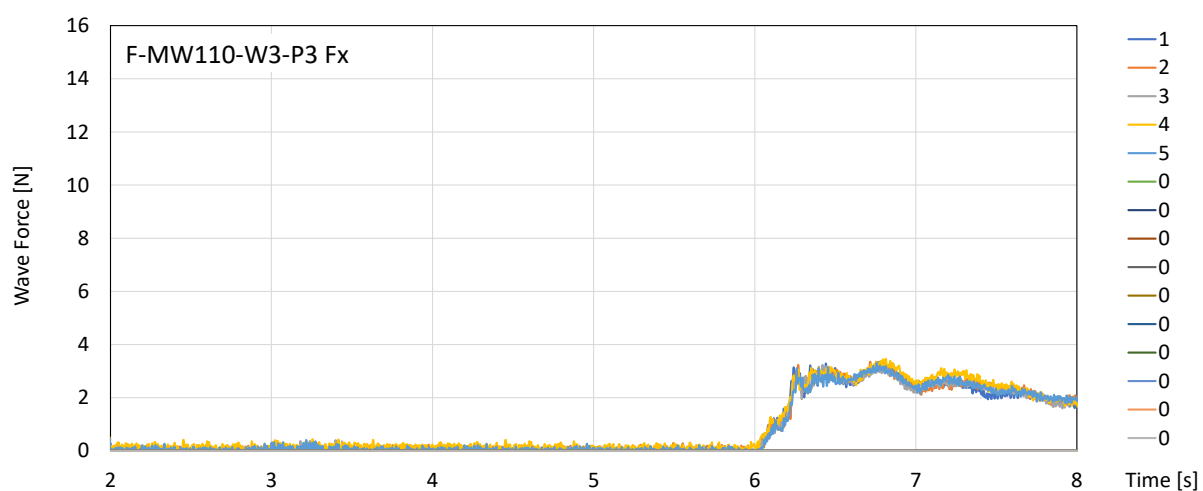
図- 3.75 衝突試験結果 (F-MW105-W3-P3；水平床 F, 濁水 1.05g/cm^3 , 津波 W3, 壁位置 P3)



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

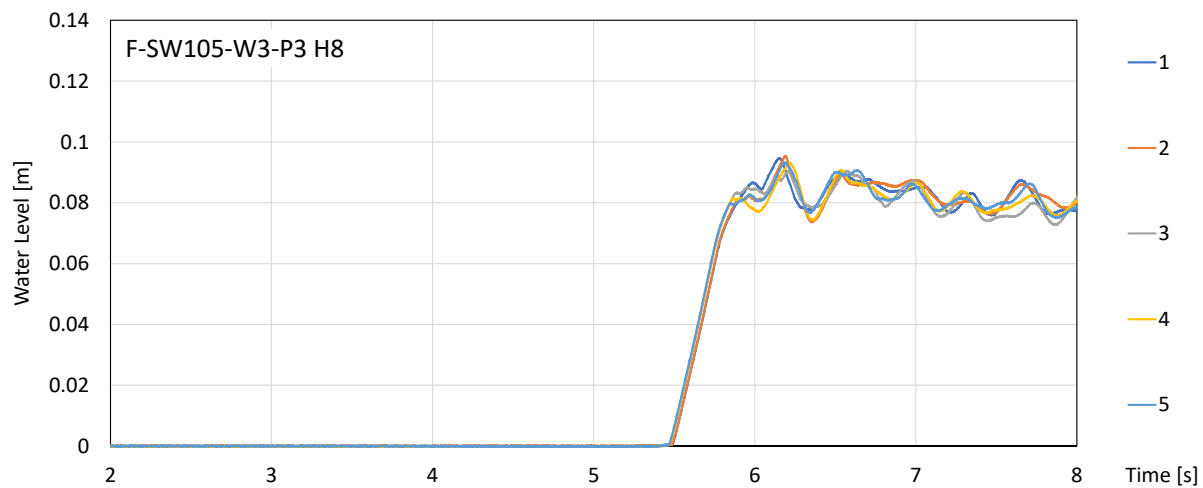


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

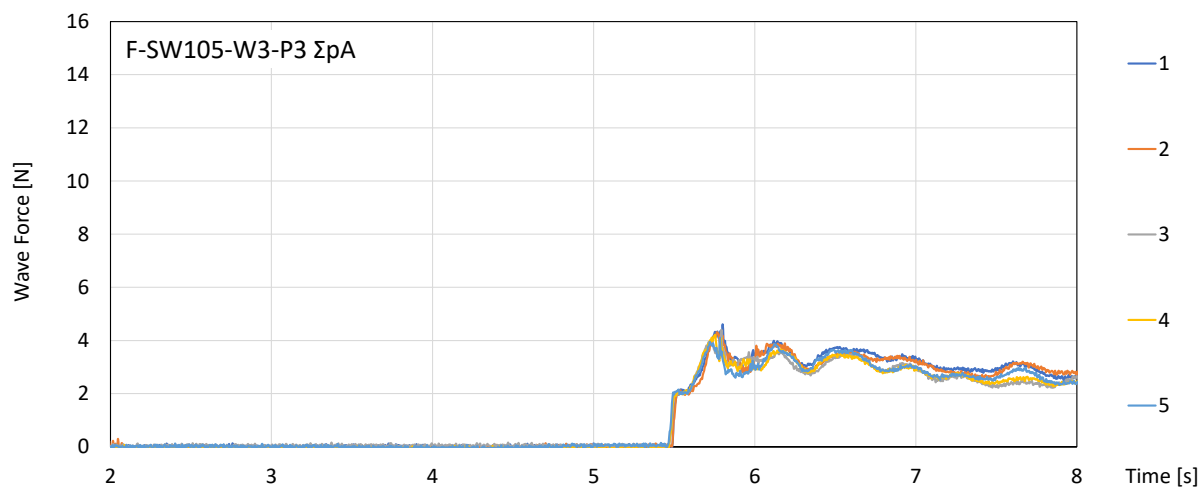


(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

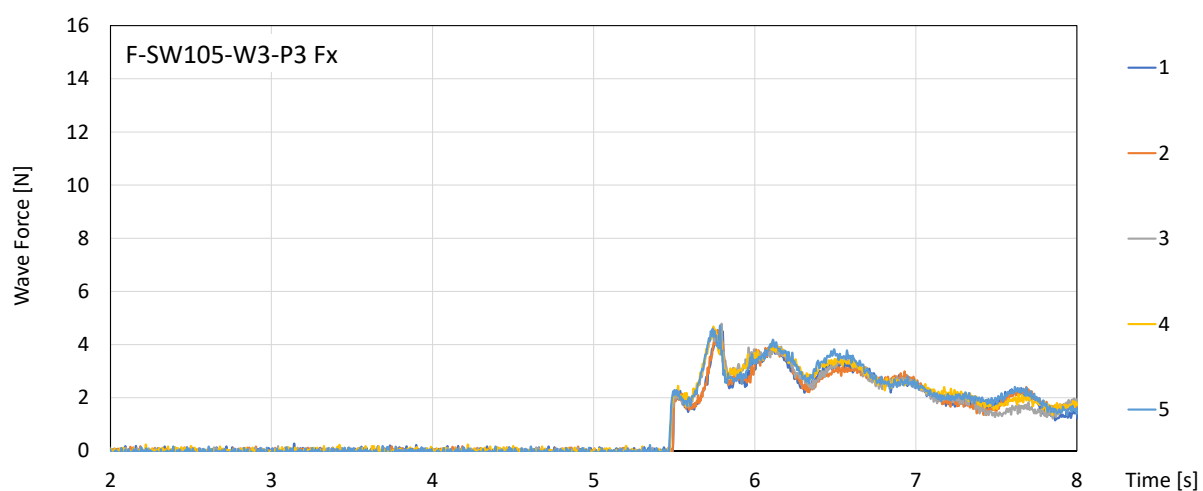
図- 3.76 衝突試験結果 (F-MW110-W3-P3 ; 水平床 F, 濁水 1.10g/cm^3 , 津波 W3, 壁位置 P3)



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

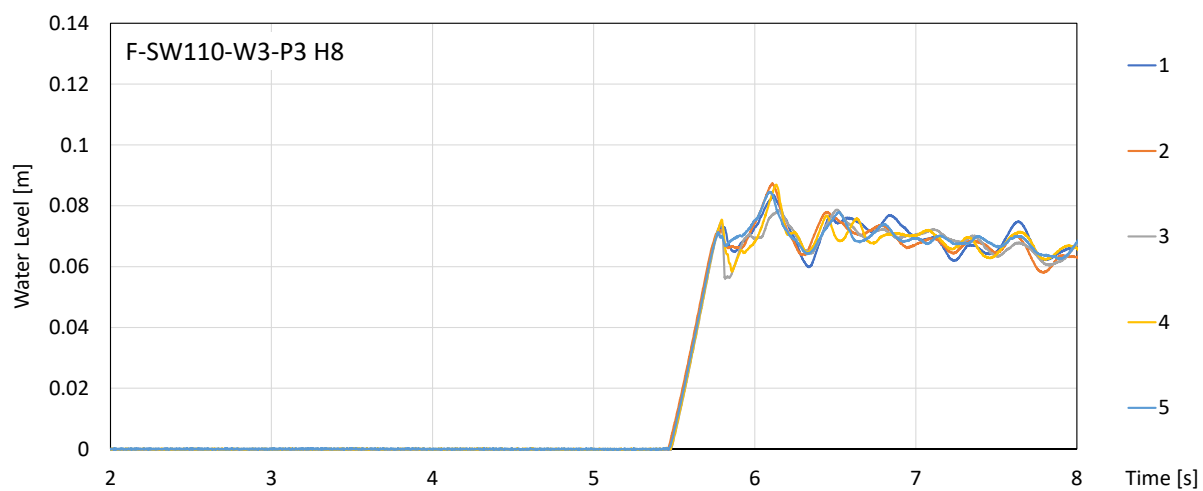


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

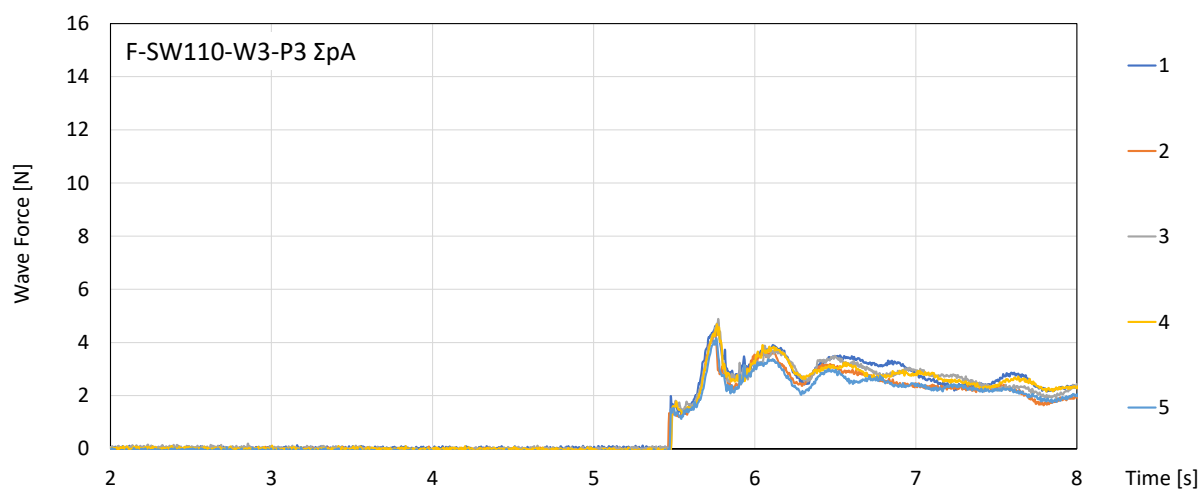


(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

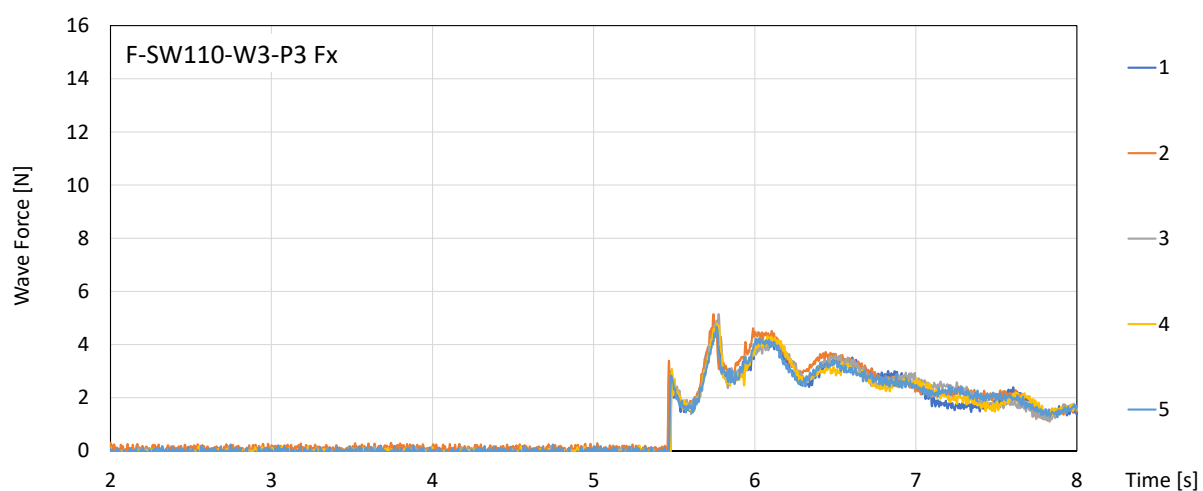
図-3.77 衝突試験結果 (F-SW105-W3-P3；水平床 F, 塩水 1.05g/cm^3 , 津波 W3, 壁位置 P3)



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

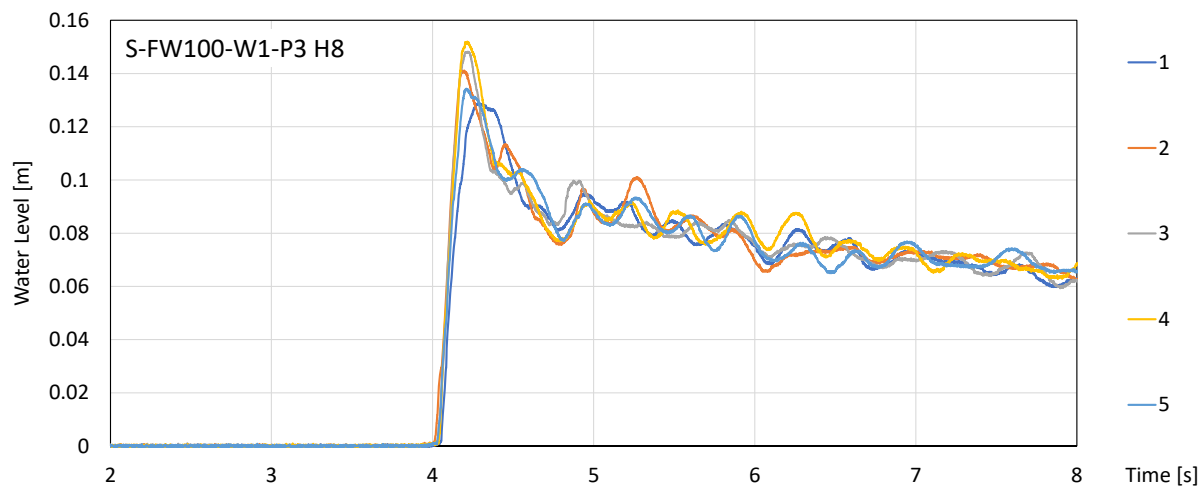


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

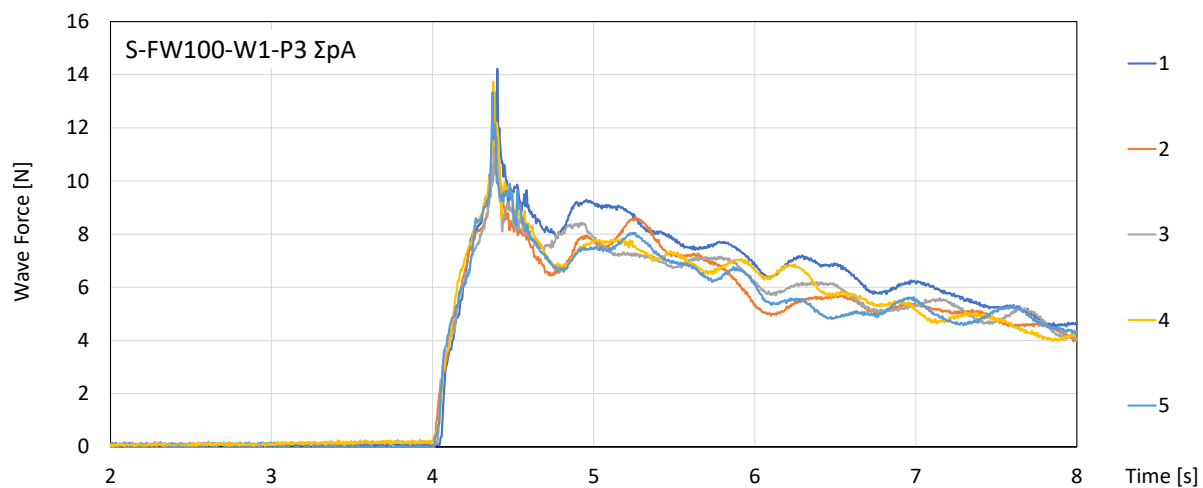


(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

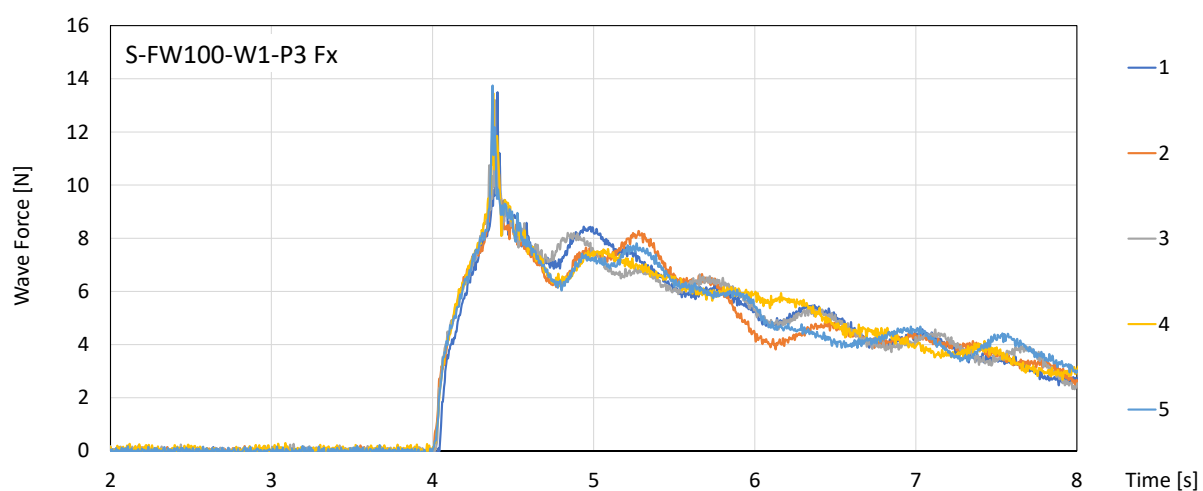
図-3.78 衝突試験結果 (F-SW110-W3-P3；水平床 F, 塩水 1.10g/cm^3 , 津波 W3, 壁位置 P3)



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

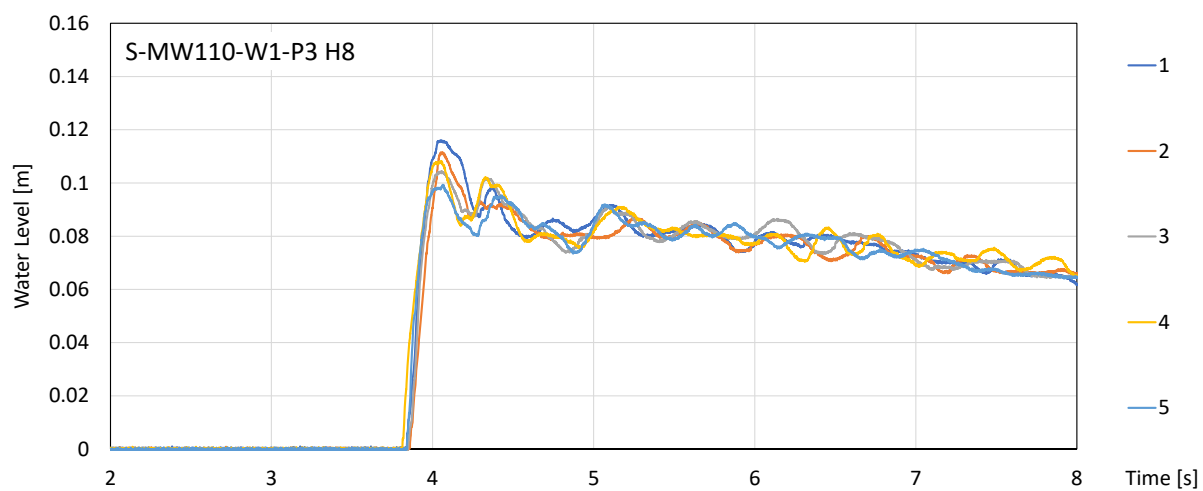


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

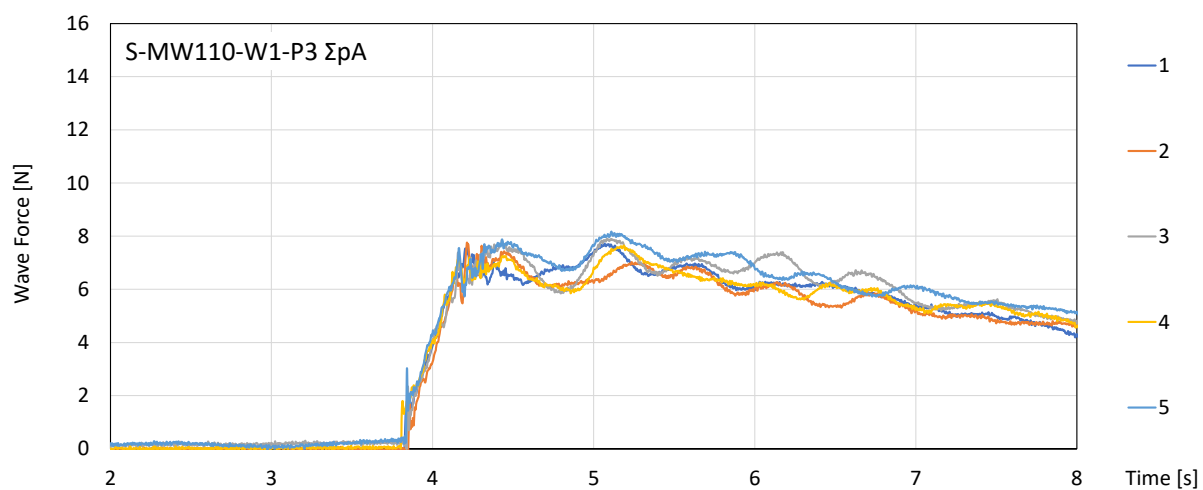


(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

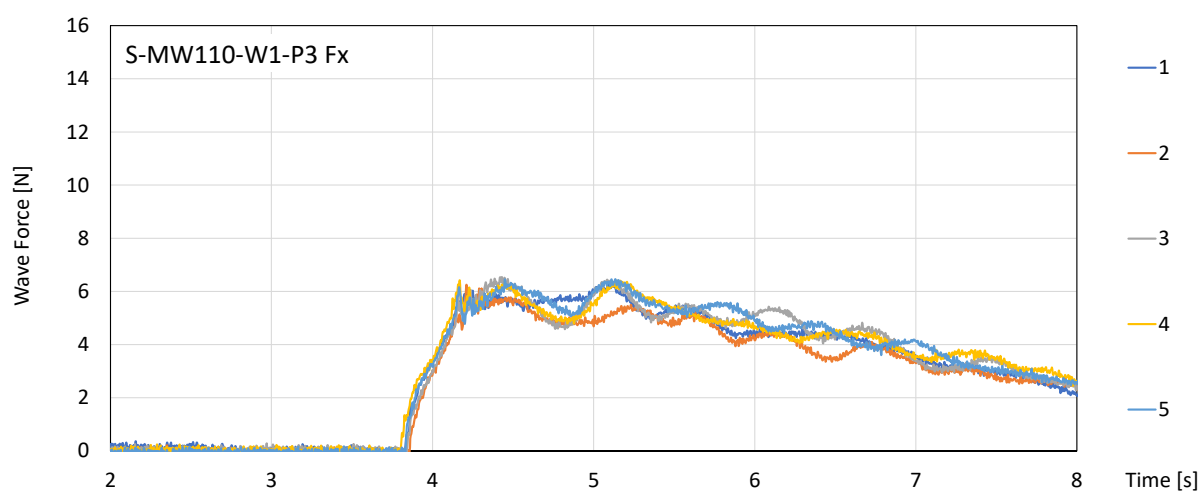
図- 3.79 衝突試験結果(S-FW100-W1-P3；単純勾配 S, 淡水 1.00g/cm³, 津波 W1, 壁位置 P3)



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

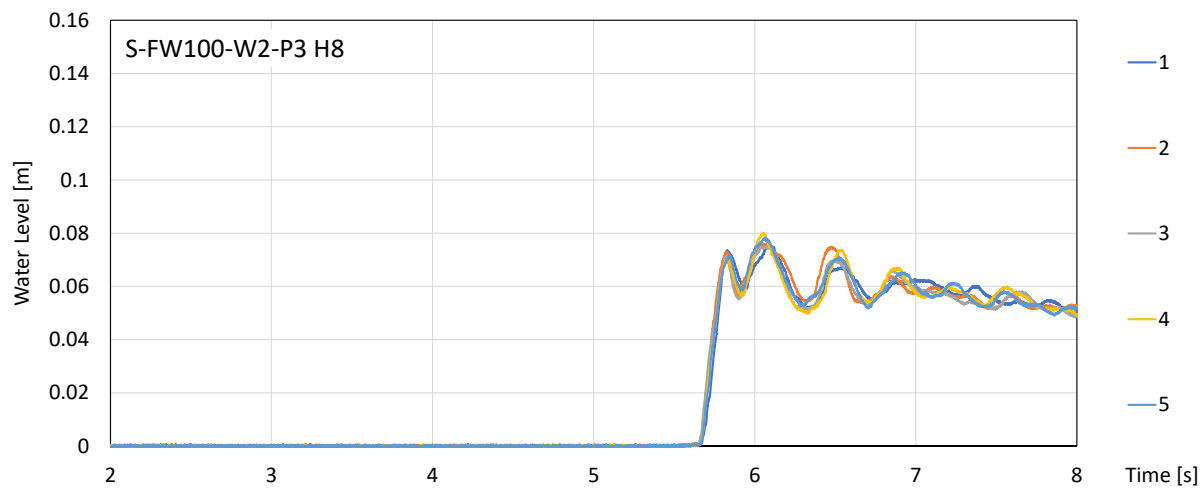


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

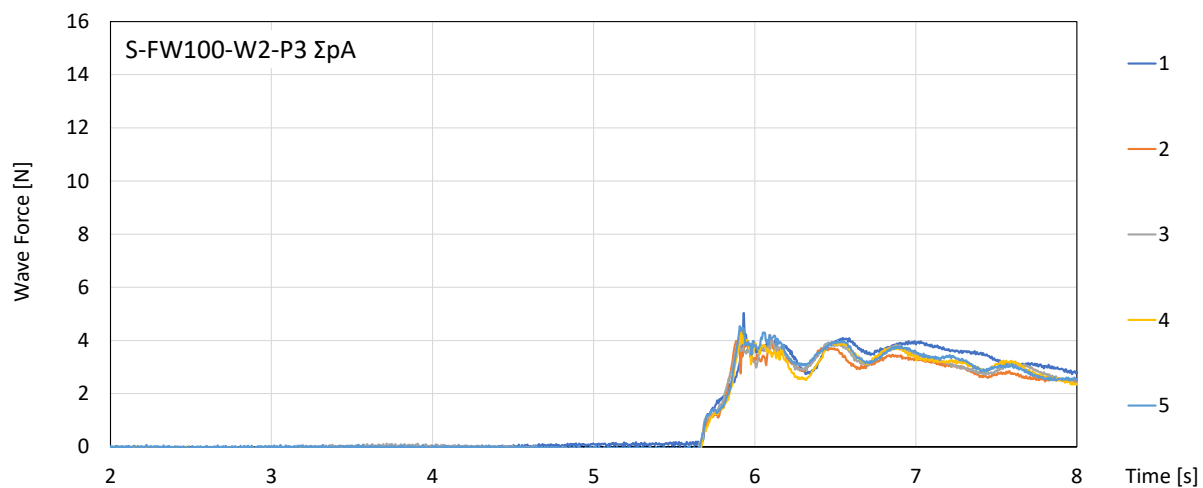


(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

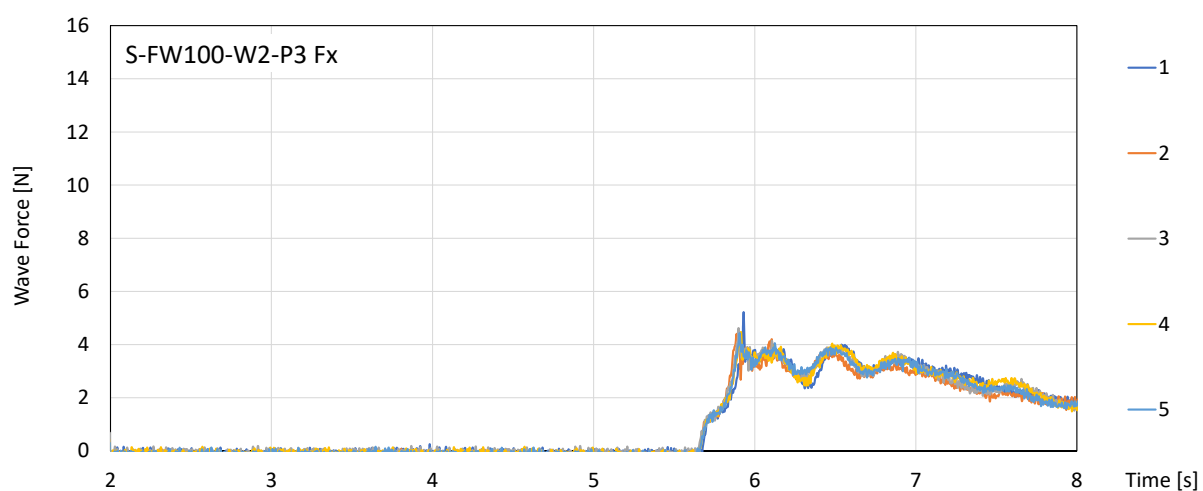
図- 3.80 衝突試験結果(S-MW110-W1-P3；単純勾配 S, 濁水 1.10g/cm^3 , 津波 W1, 壁位置 P3)



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

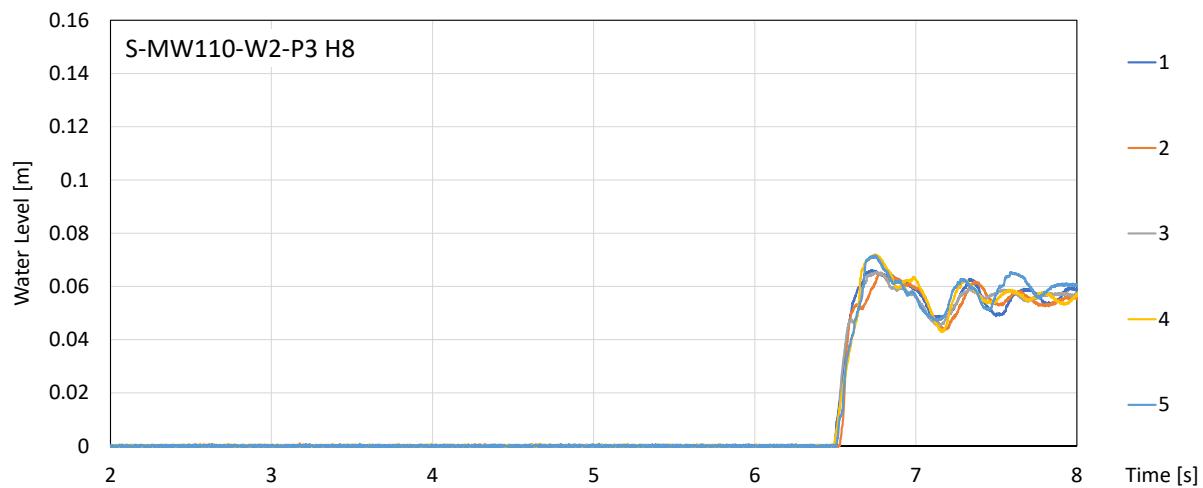


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

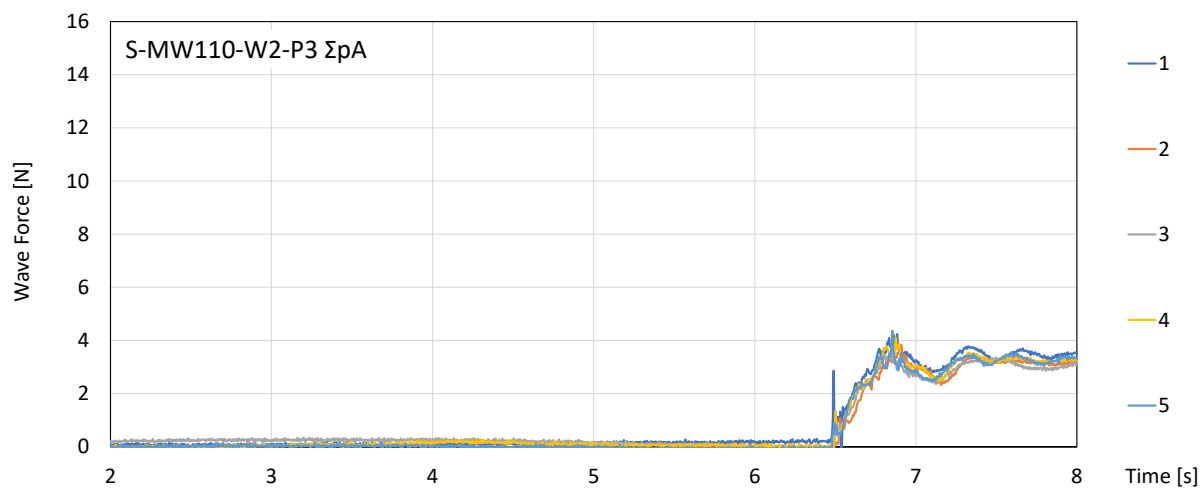


(c) 水中6分力計による波力 F_x の時系列

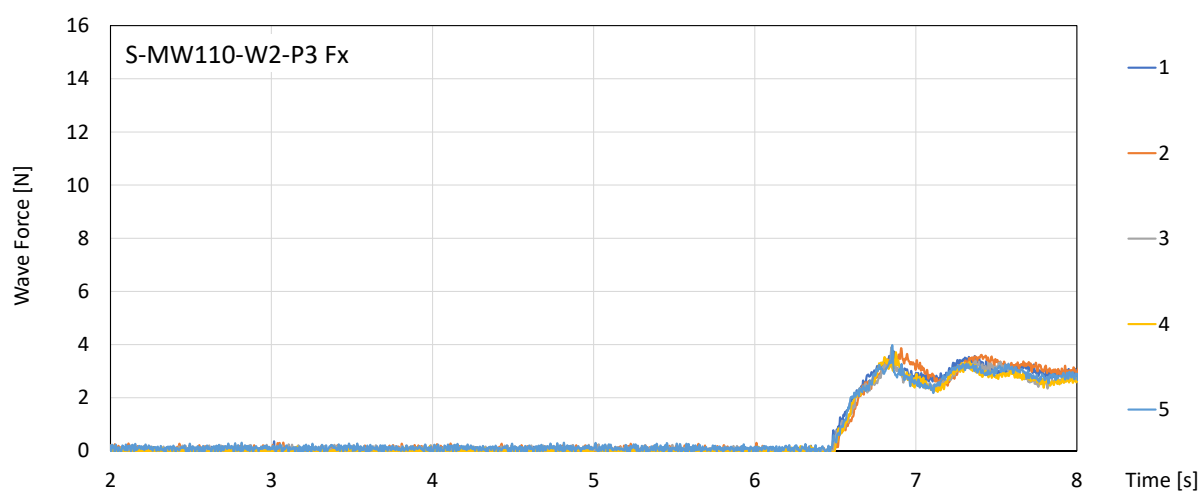
図- 3.81 衝突試験結果(S-FW100-W2-P3；単純勾配 S, 淡水 1.00g/cm³, 津波 W2, 壁位置 P3)



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

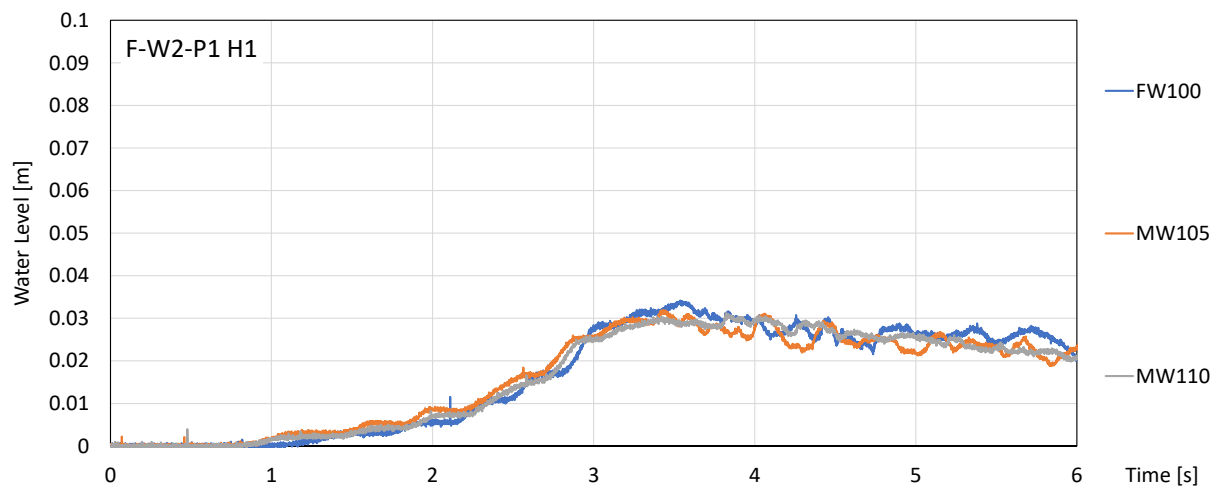


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

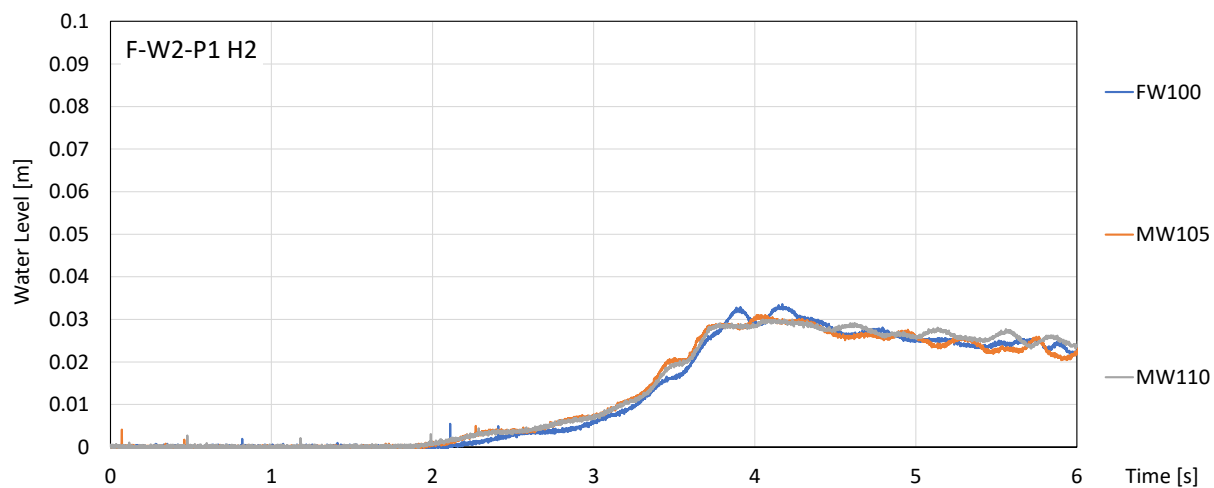


(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

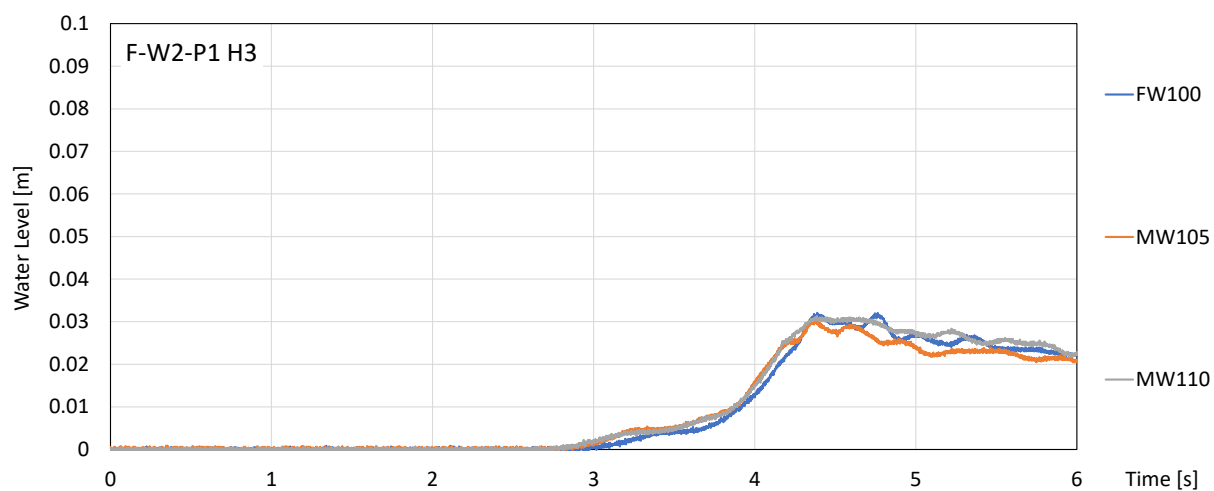
図- 3.82 衝突試験結果(S-MW110-W2-P3；単純勾配 S, 濁水 1.10g/cm^3 , 津波 W2, 壁位置 P3)



(a) H1 の水位時系列

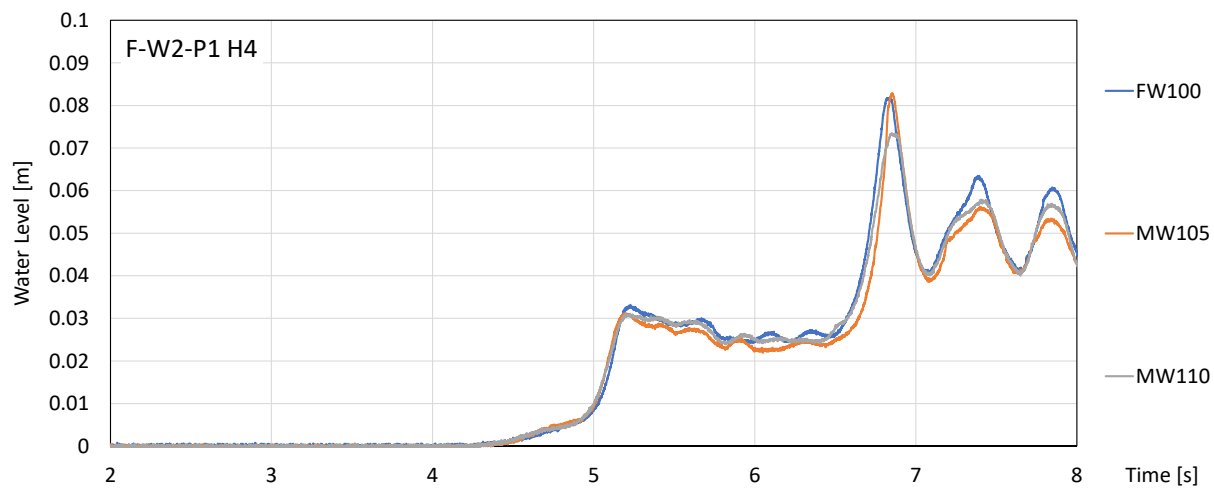


(b) H2 の水位時系列

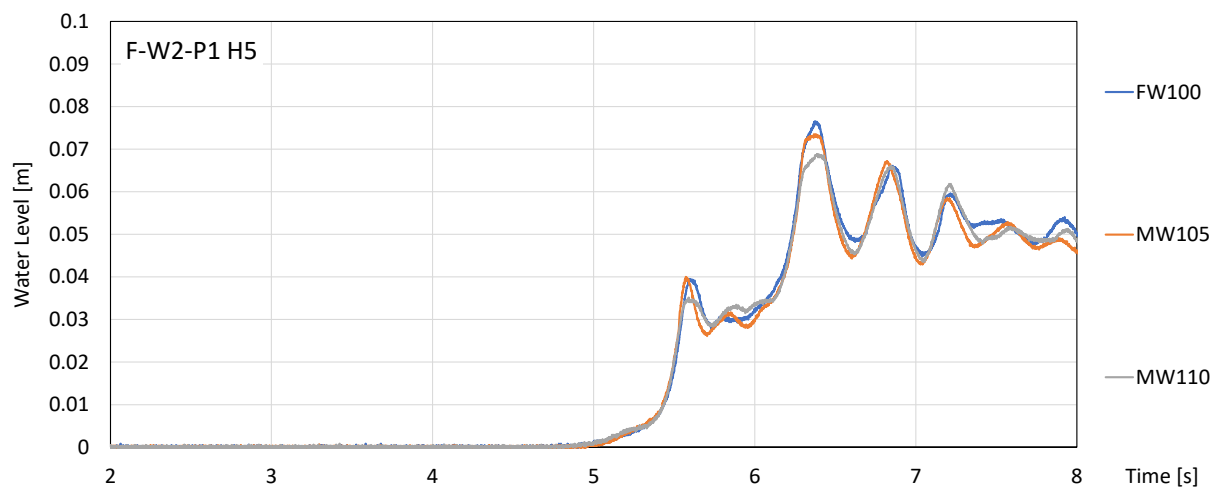


(c) H3 の水位時系列

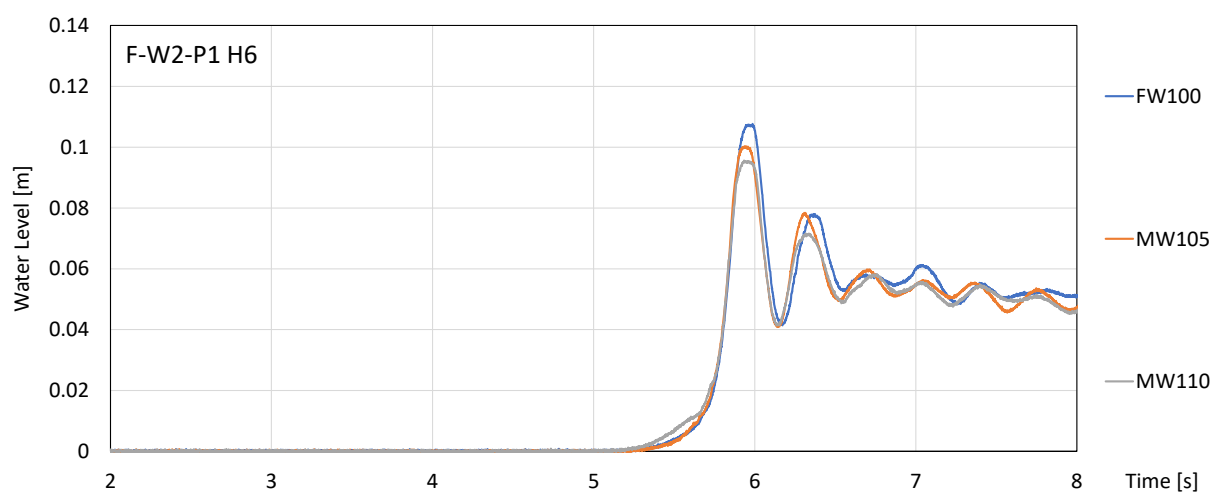
図- 3.83 衝突試験結果比較 (F-W2-P1 ; 水平床 F, 津波 W2, 壁位置 P1) [1]



(a) H4 の水位時系列

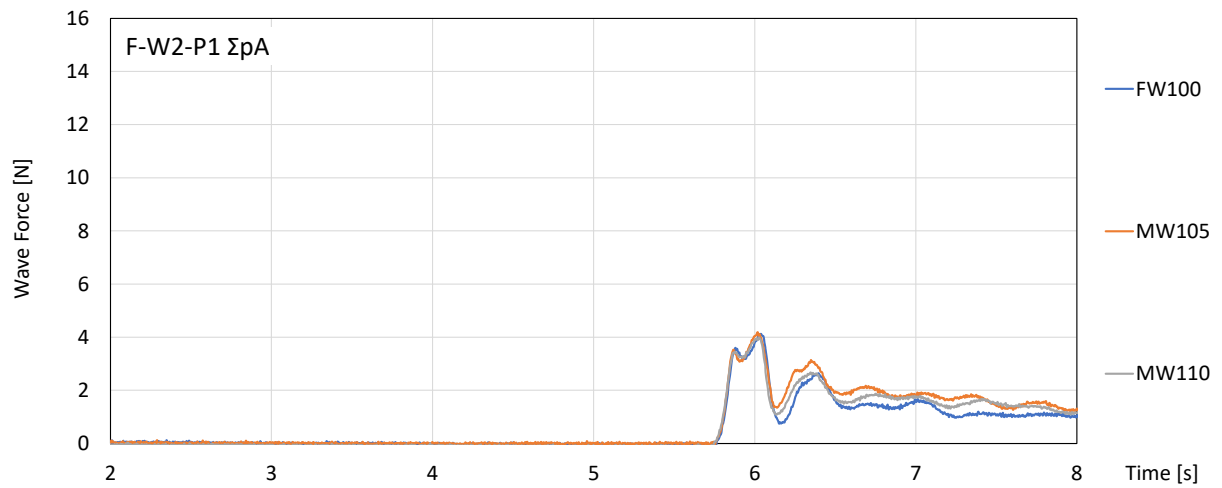


(b) H5 の水位時系列

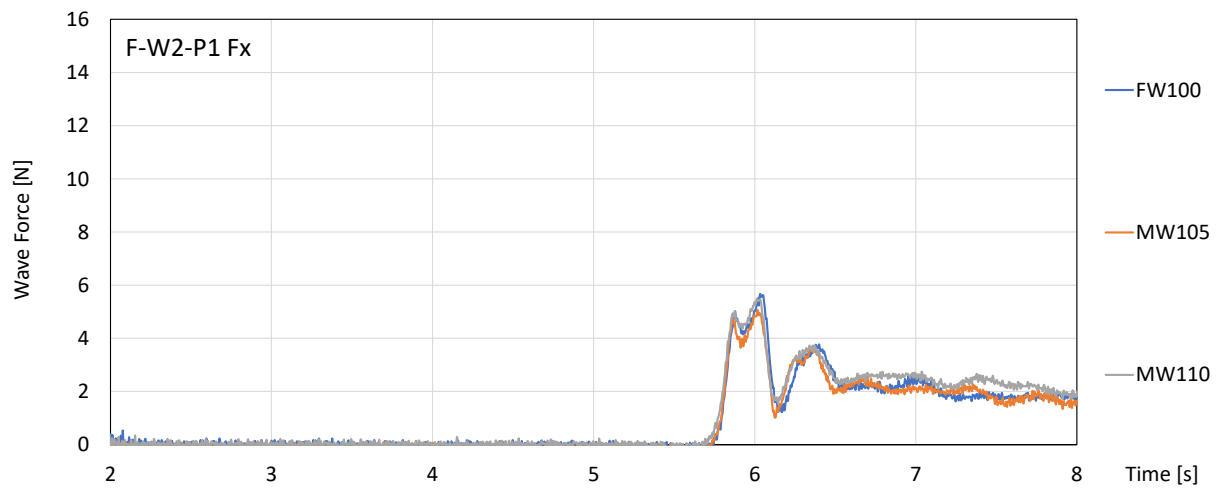


(c) H6 の水位時系列; 壁前面位置

図- 3.84 衝突試験結果比較 (F-W2-P1 ; 水平床 F, 津波 W2, 壁位置 P1) [2]

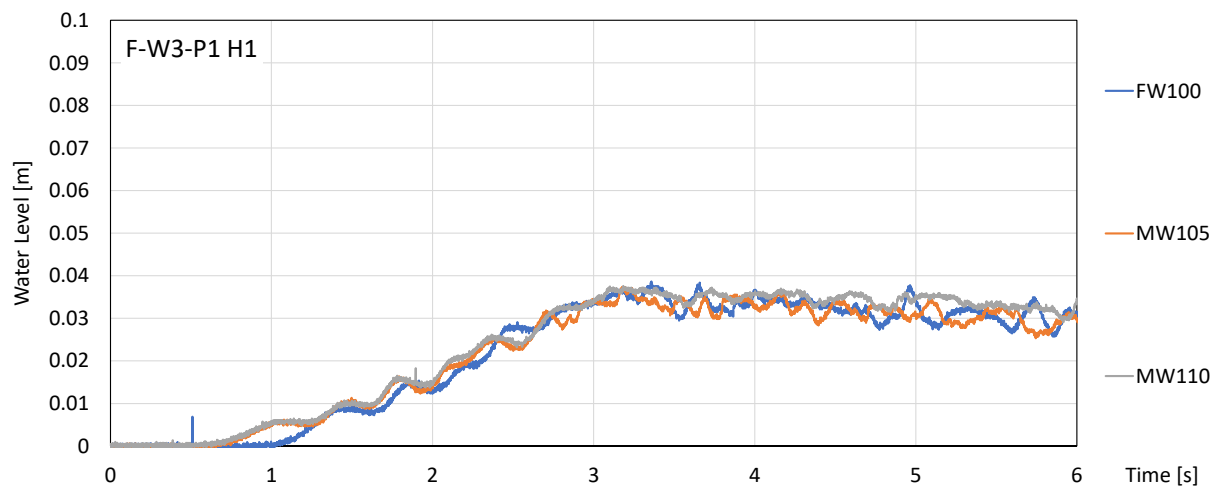


(a) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

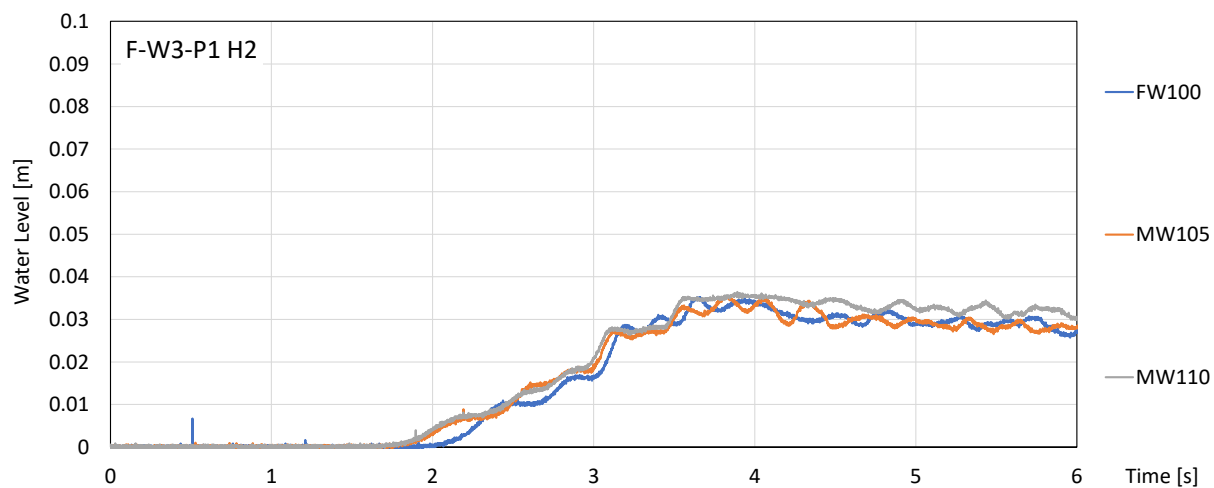


(b) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

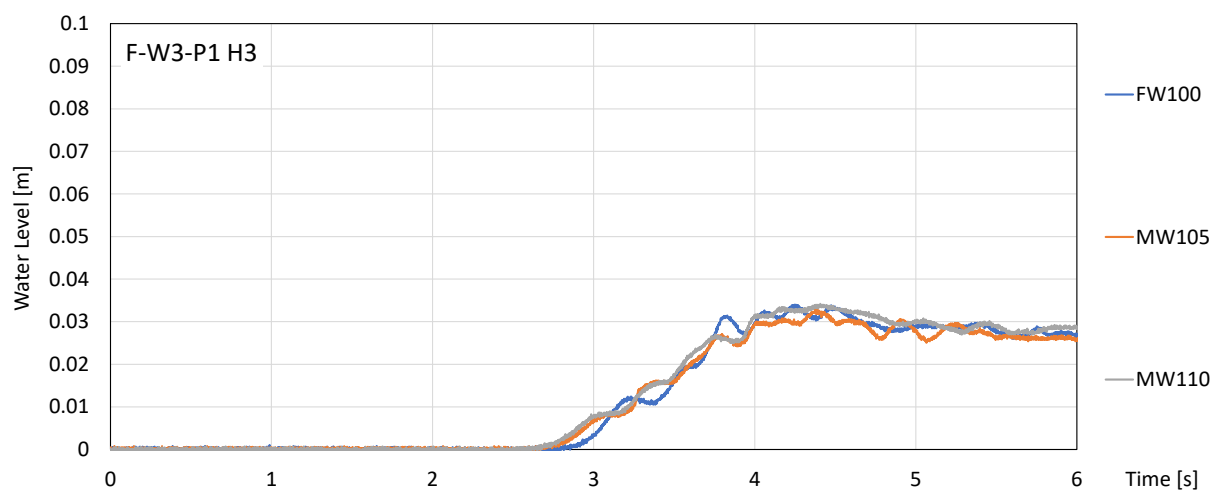
図- 3.85 衝突試験結果比較 (F-W2-P1 ; 水平床 F, 津波 W2, 壁位置 P1) [3]



(a) H1 の水位時系列

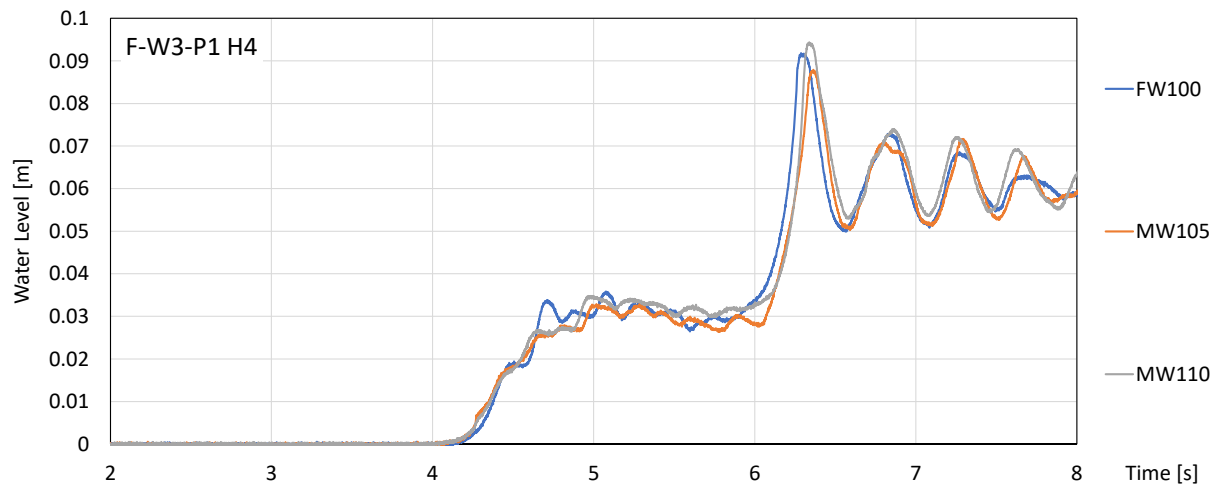


(b) H2 の水位時系列

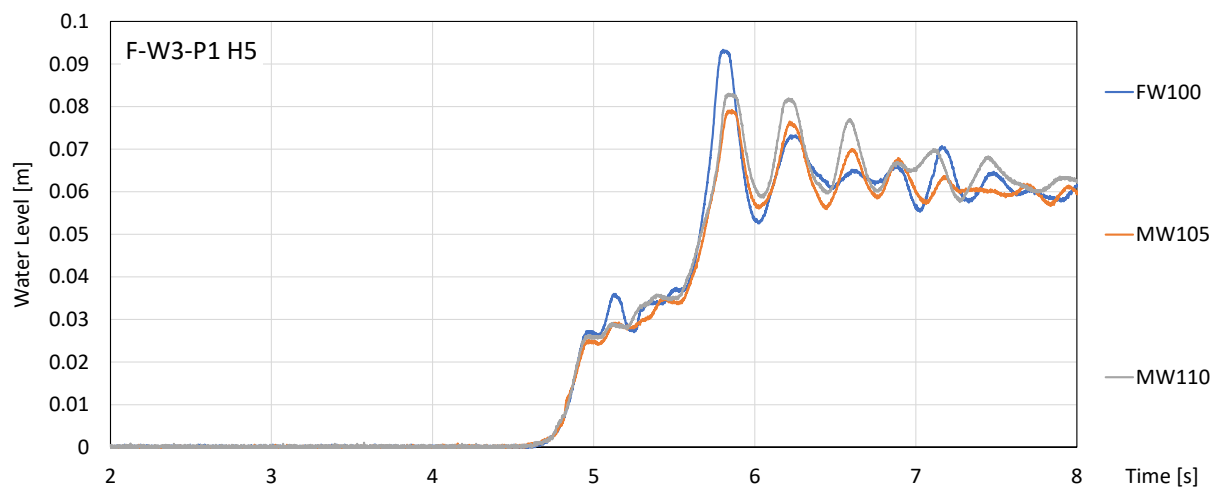


(c) H3 の水位時系列

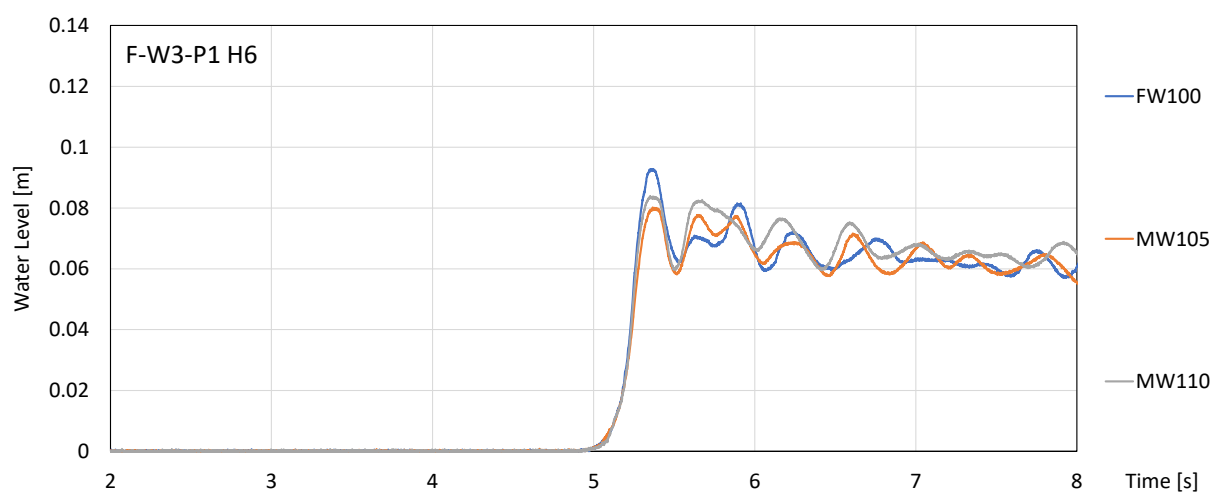
図- 3.86 衝突試験結果比較 (F-W3-P1 ; 水平床 F, 津波 W3, 壁位置 P1) [1]



(a) H4 の水位時系列

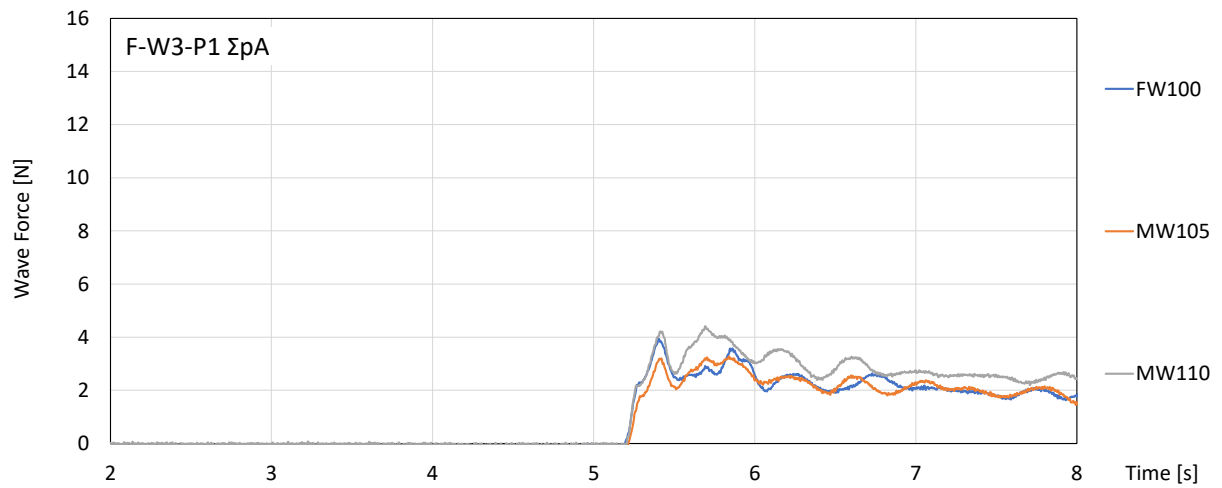


(b) H5 の水位時系列

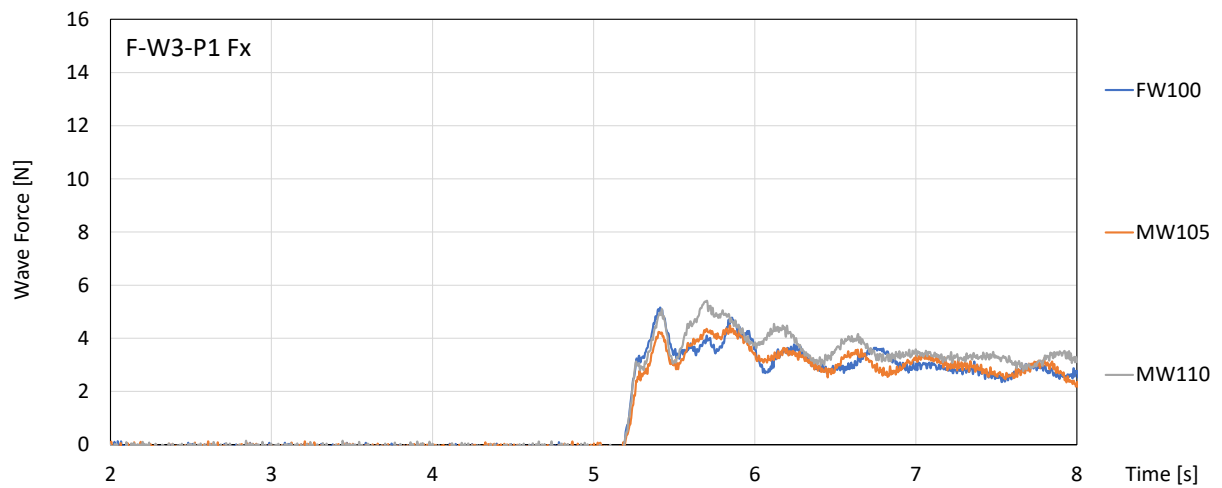


(c) H6 の水位時系列；壁前面位置

図- 3.87 衝突試験結果比較 (F-W3-P1；水平床 F, 津波 W3, 壁位置 P1) [2]

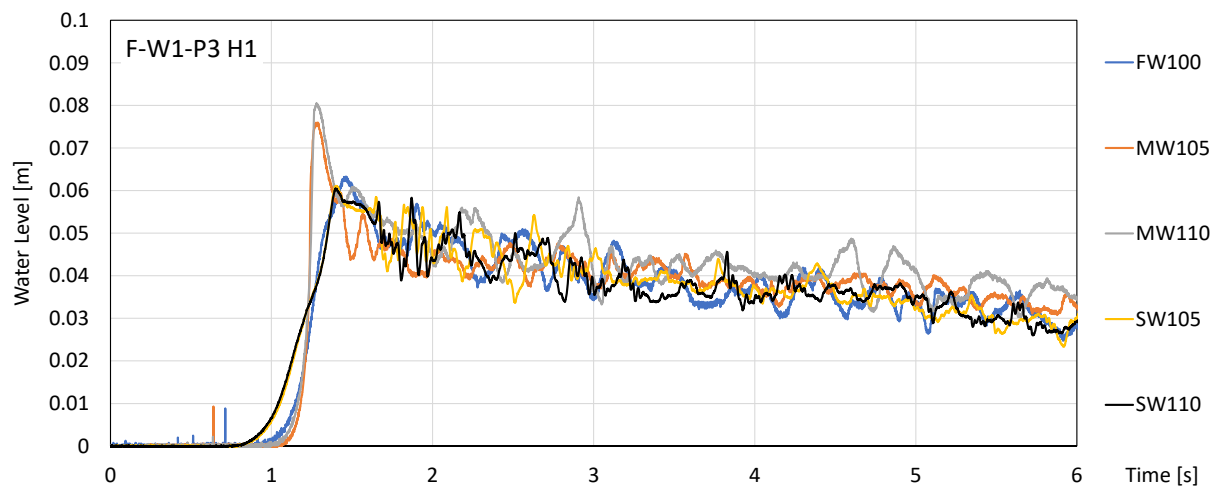


(a) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

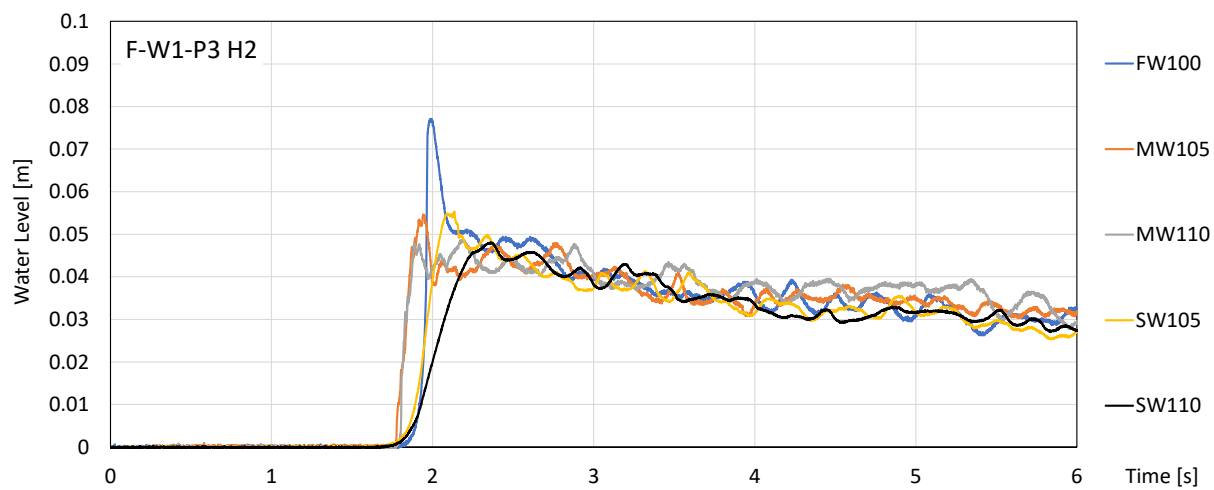


(b) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

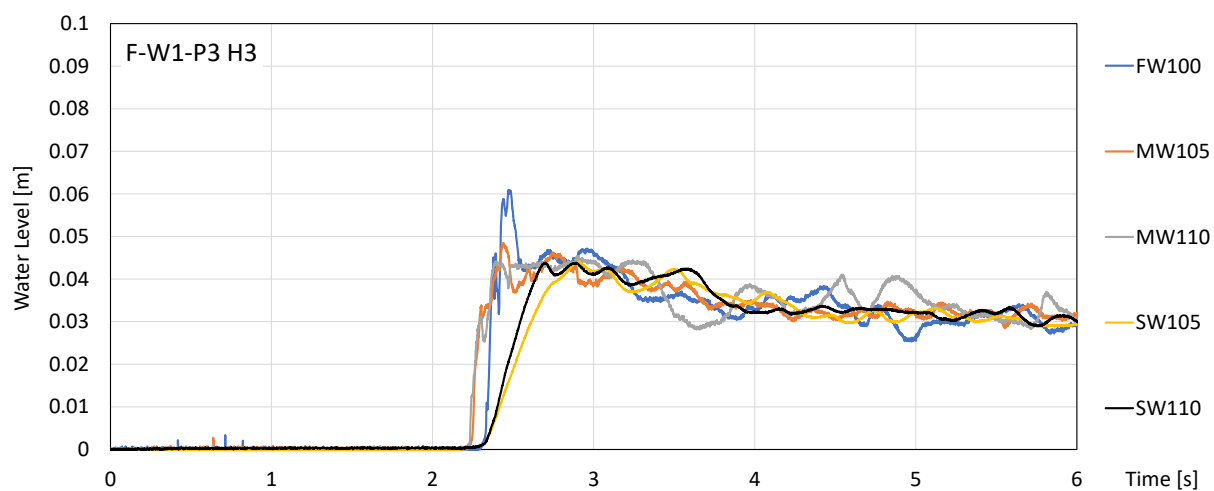
図- 3.88 衝突試験結果比較 (F-W3-P1 ; 水平床 F, 津波 W3, 壁位置 P1) [3]



(a) H1 の水位時系列

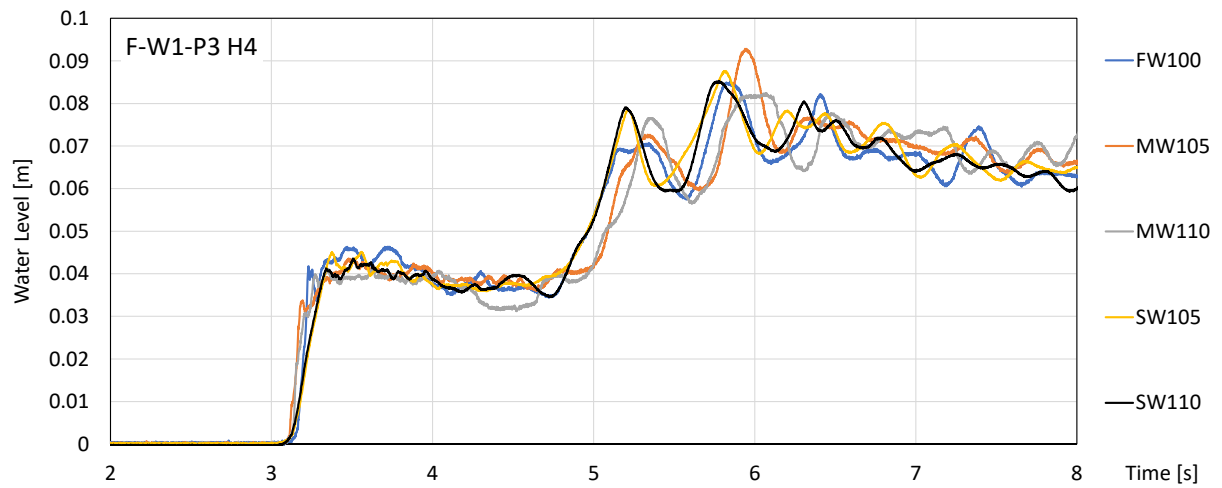


(b) H2 の水位時系列

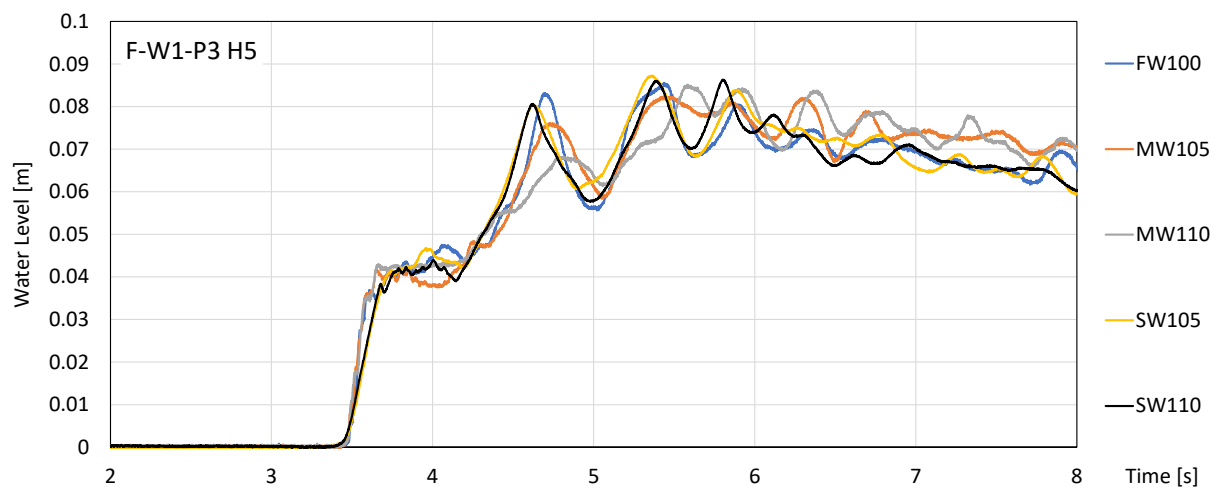


(c) H3 の水位時系列

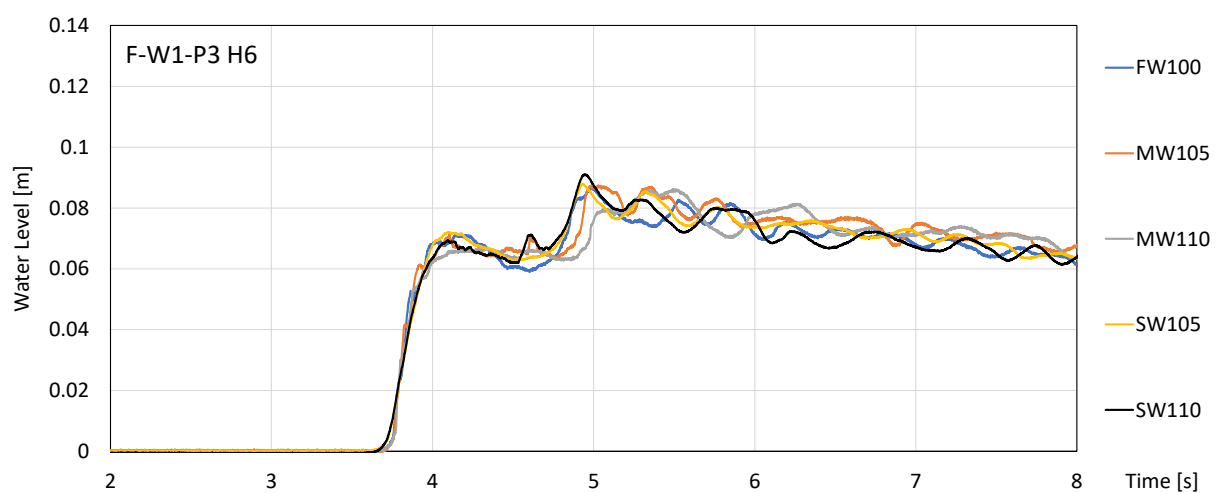
図- 3.89 衝突試験結果比較 (F-W1-P3 ; 水平床 F, 津波 W1, 壁位置 P3) [1]



(a) H4 の水位時系列

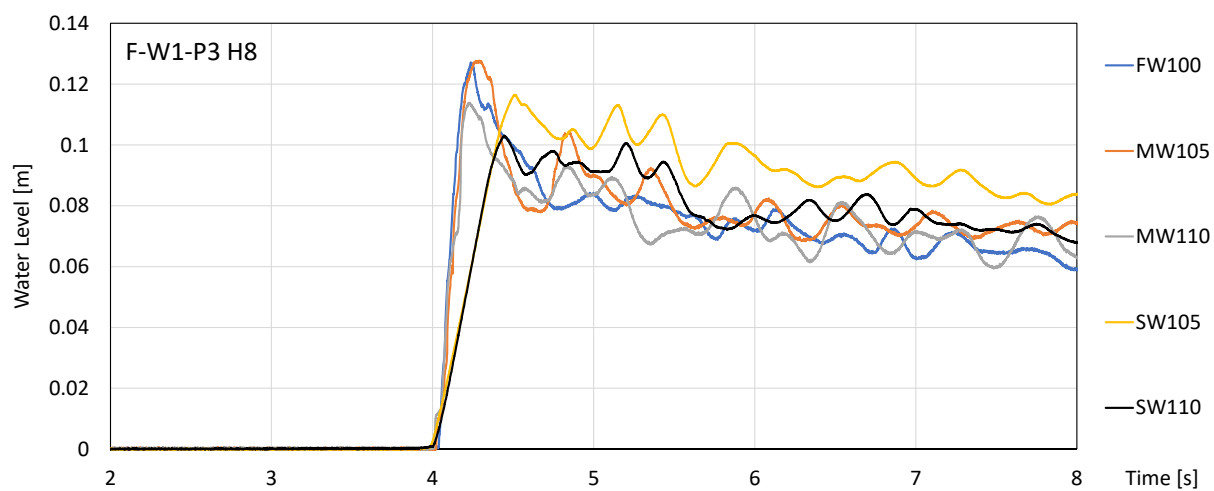


(b) H5 の水位時系列

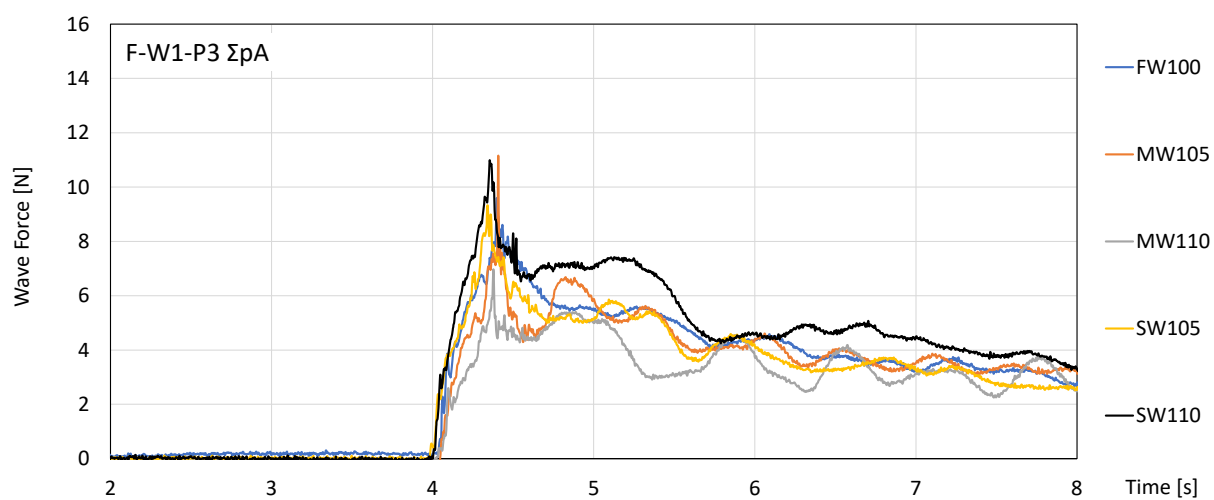


(c) H6 の水位時系列；汀線位置

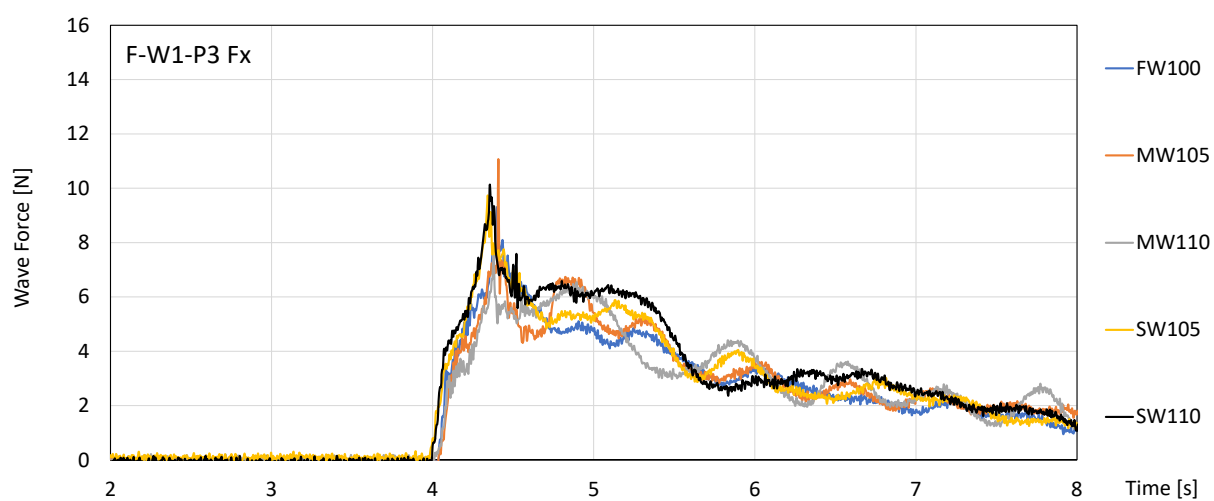
図- 3.90 衝突試験結果比較 (F-W1-P3；水平床 F, 津波 W1, 壁位置 P3) [2]



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

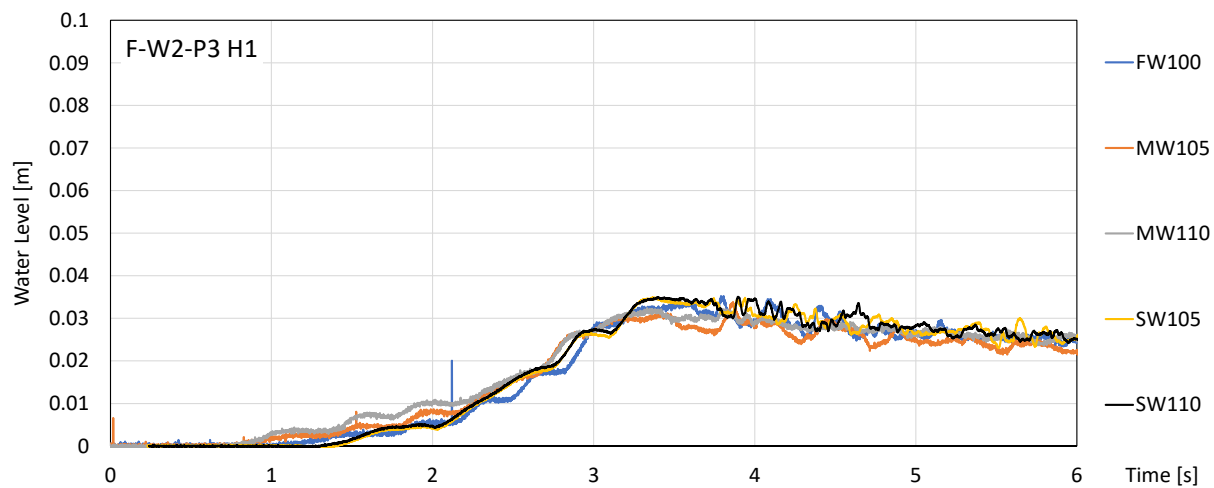


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

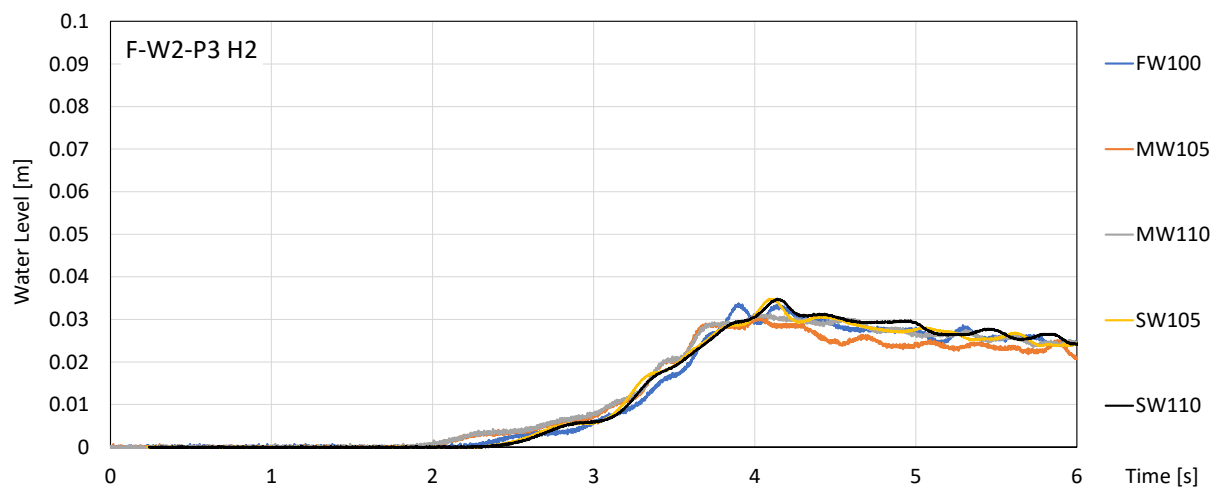


(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

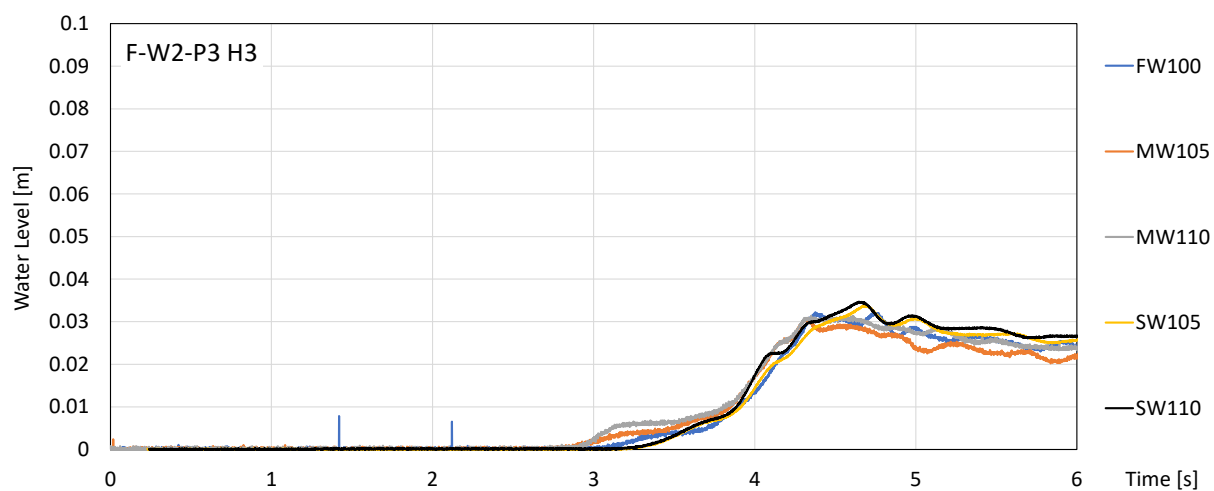
図- 3.91 衝突試験結果比較 (F-W1-P3；水平床 F, 津波 W1, 壁位置 P3) [3]



(a) H1 の水位時系列

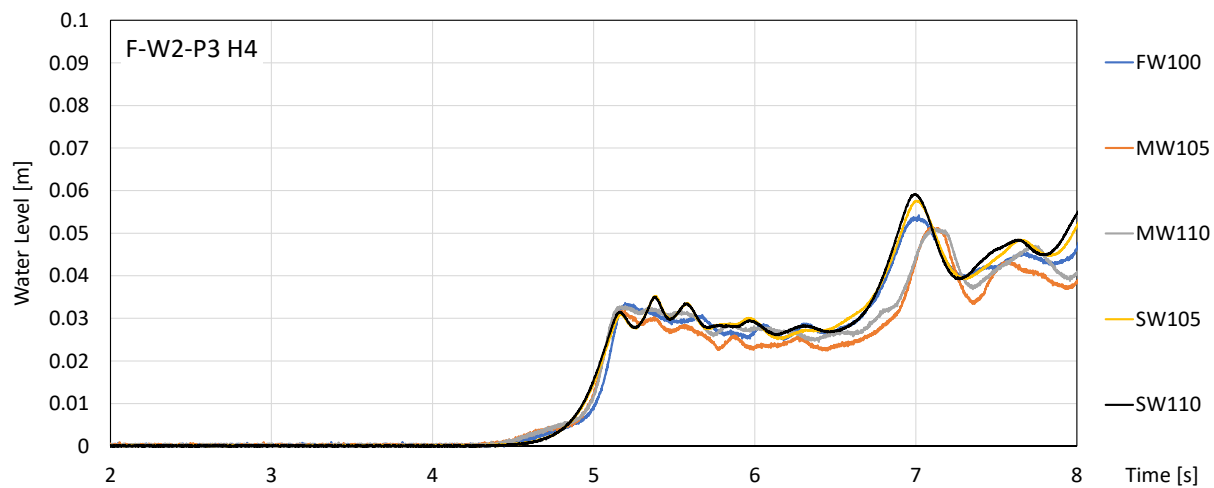


(b) H2 の水位時系列

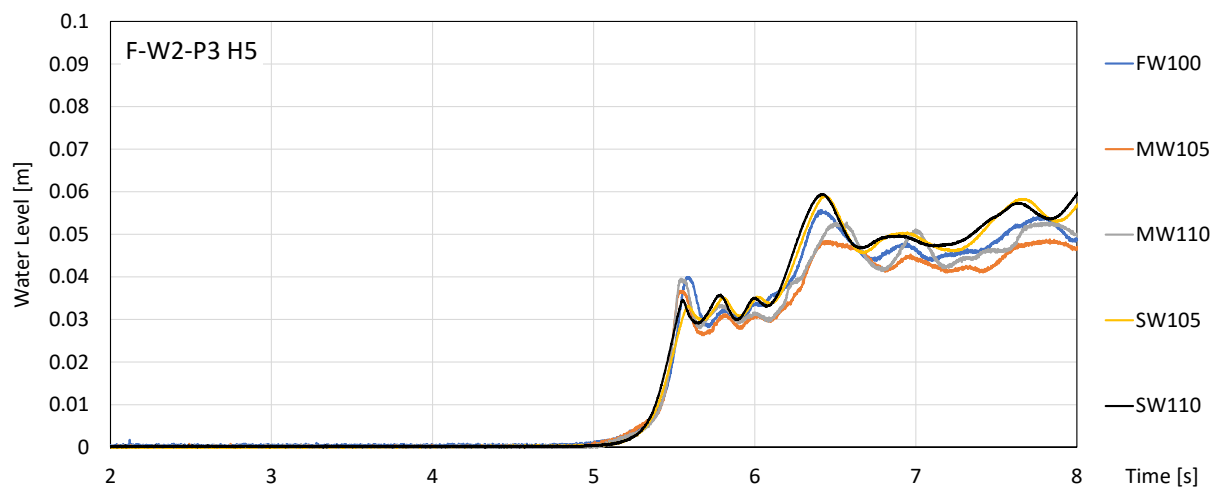


(c) H3 の水位時系列

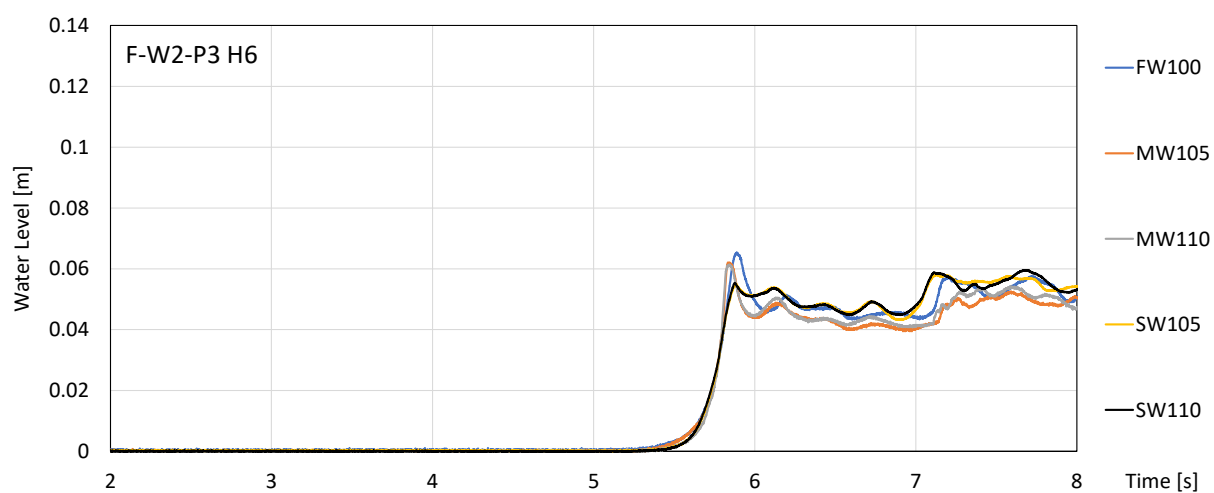
図- 3.92 衝突試験結果比較 (F-W2-P3 ; 水平床 F, 津波 W2, 壁位置 P3) [1]



(a) H4 の水位時系列

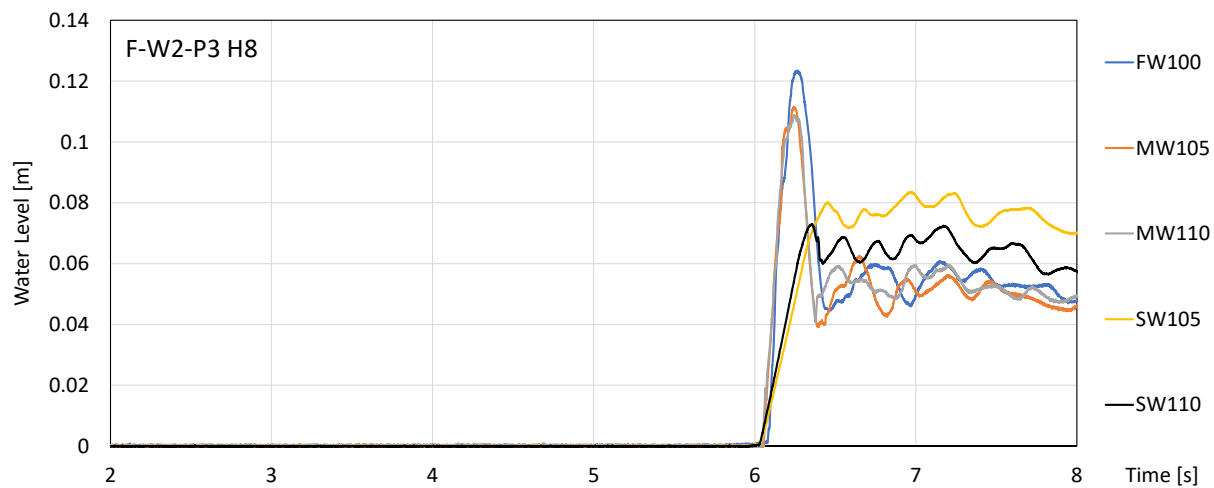


(b) H5 の水位時系列

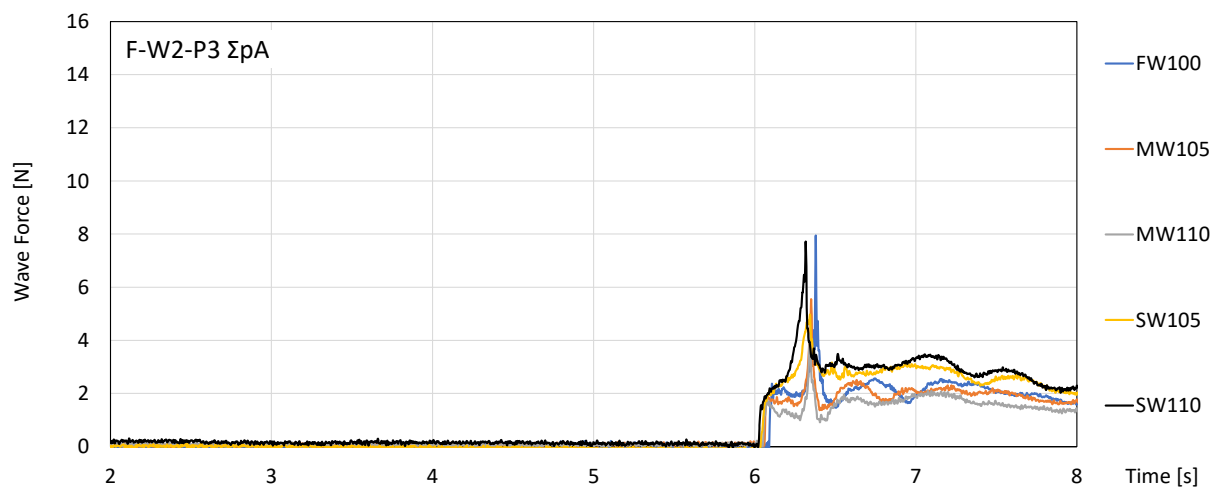


(c) H6 の水位時系列; 汀線位置

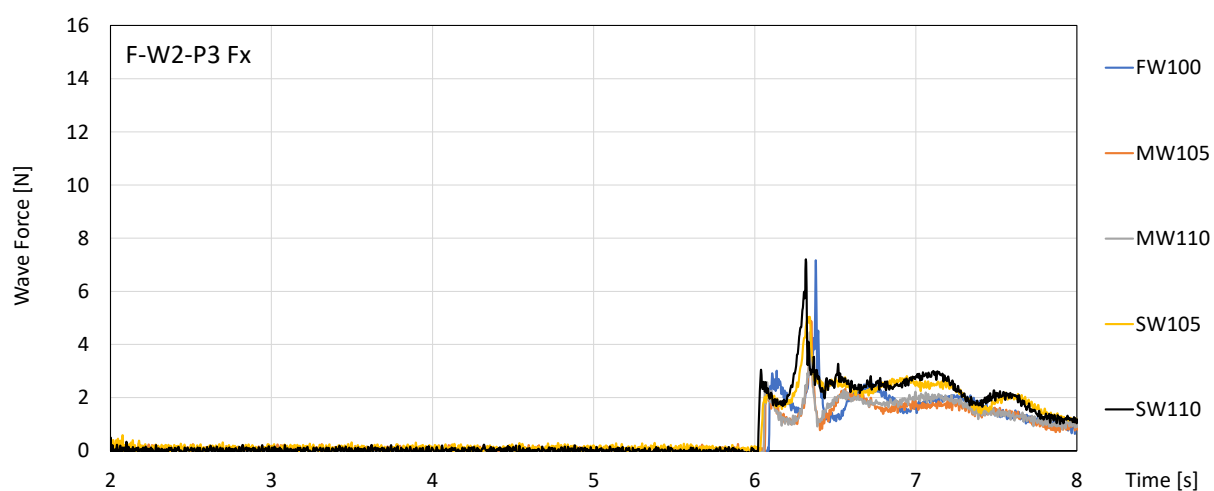
図- 3.93 衝突試験結果比較 (F-W2-P3 ; 水平床 F, 津波 W2, 壁位置 P3) [2]



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

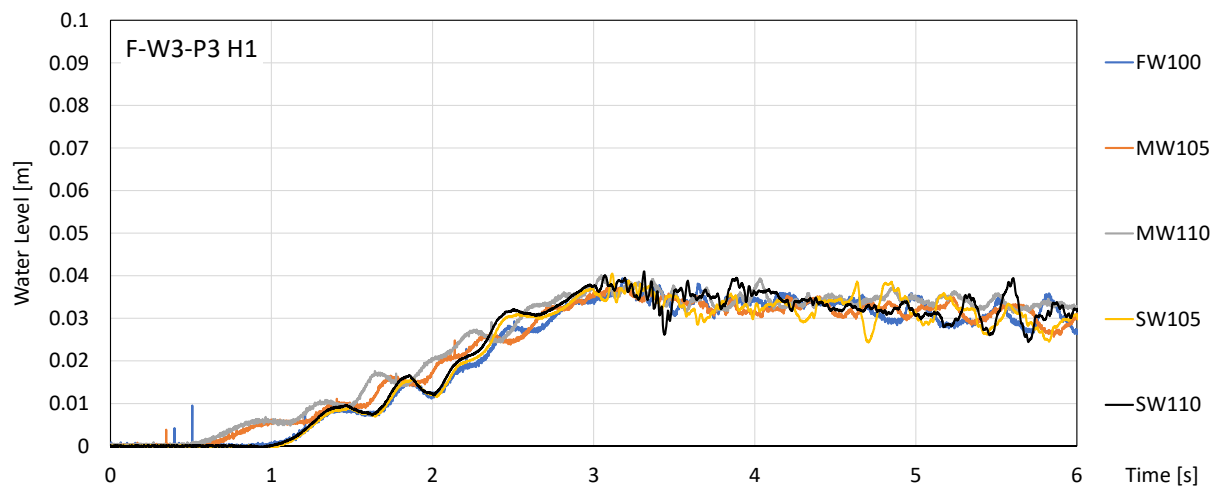


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

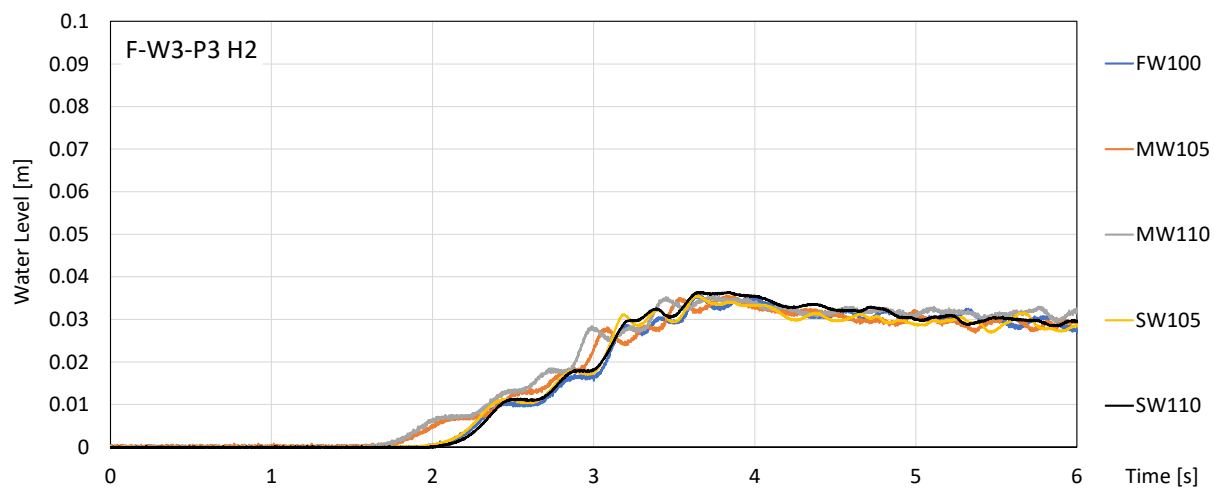


(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

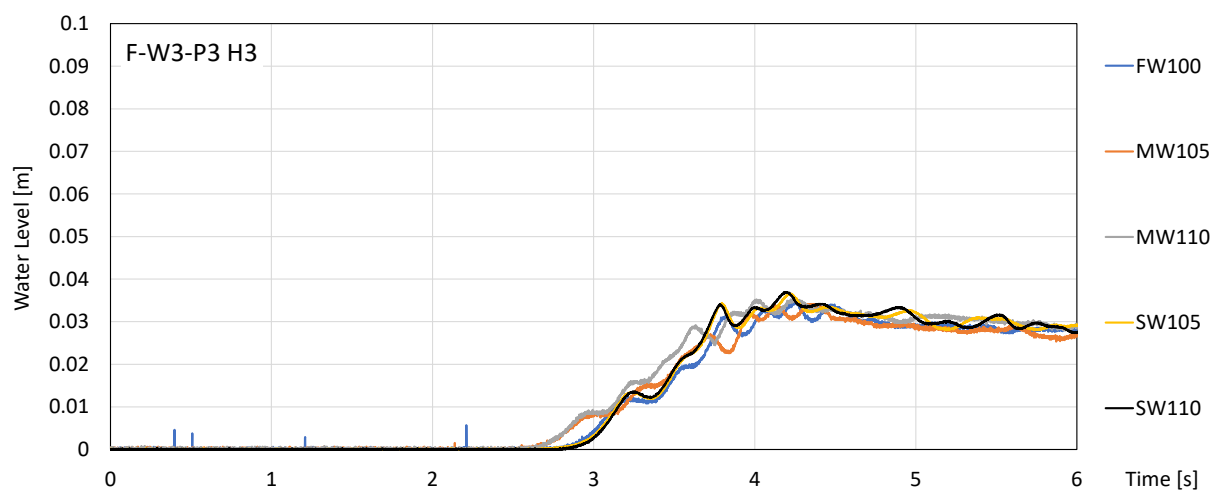
図- 3.94 衝突試験結果比較 (F-W2-P3；水平床 F, 津波 W2, 壁位置 P3) [3]



(a) H1 の水位時系列

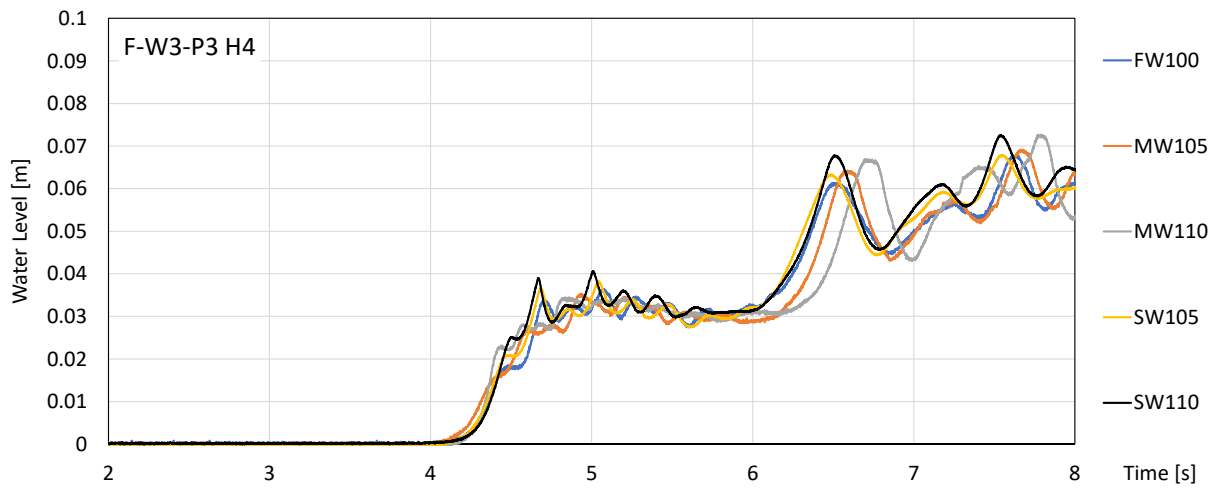


(b) H2 の水位時系列

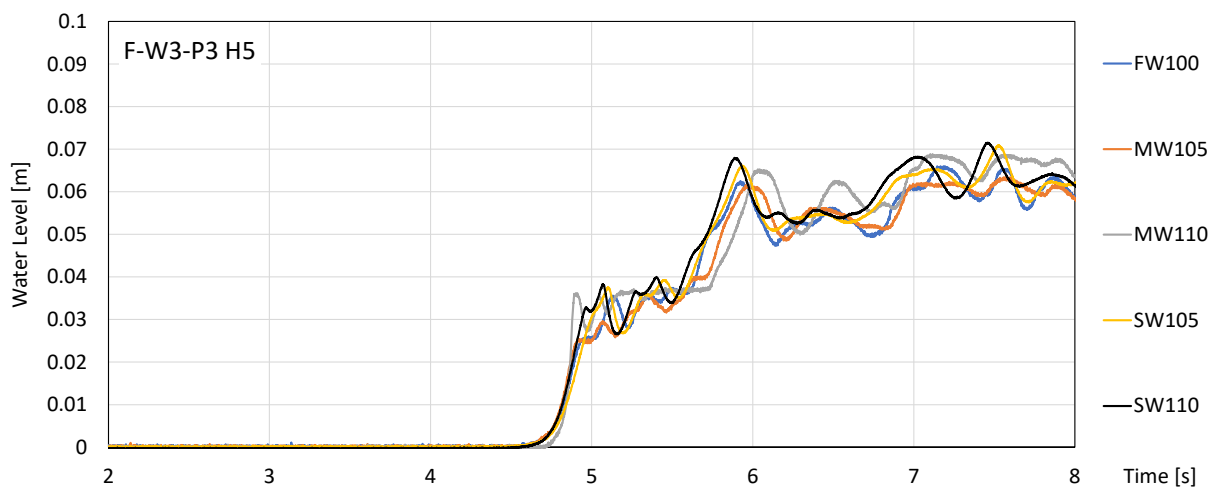


(c) H3 の水位時系列

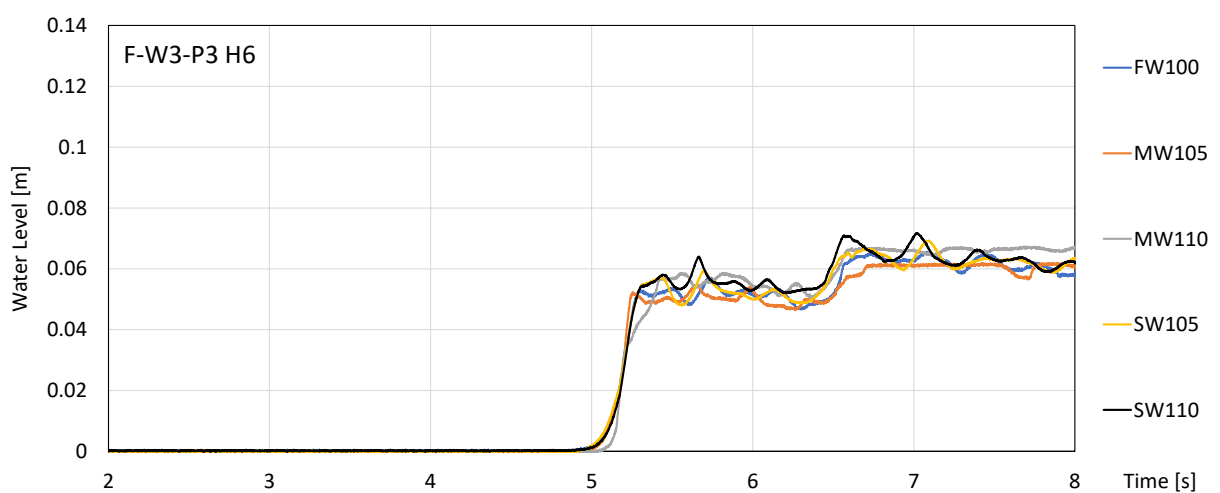
図- 3.95 衝突試験結果比較 (F-W3-P3 ; 水平床 F, 津波 W3, 壁位置 P3) [1]



(a) H4 の水位時系列

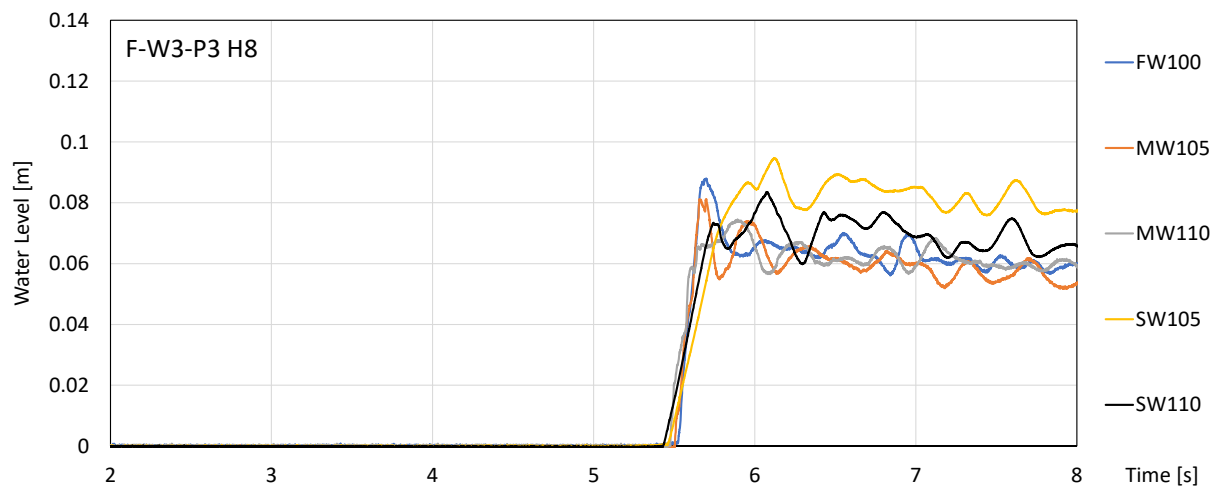


(b) H5 の水位時系列

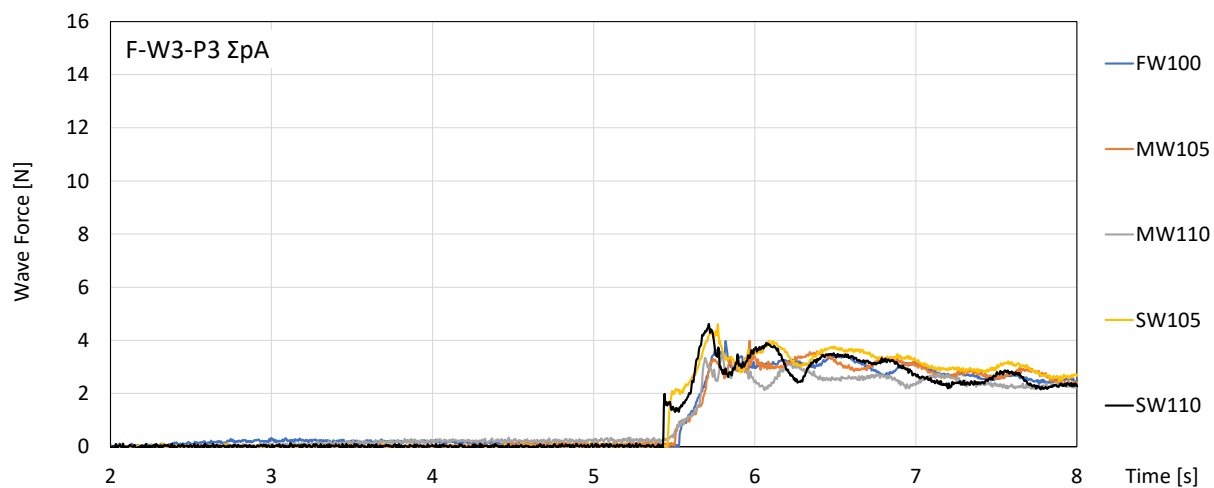


(c) H6 の水位時系列；汀線位置

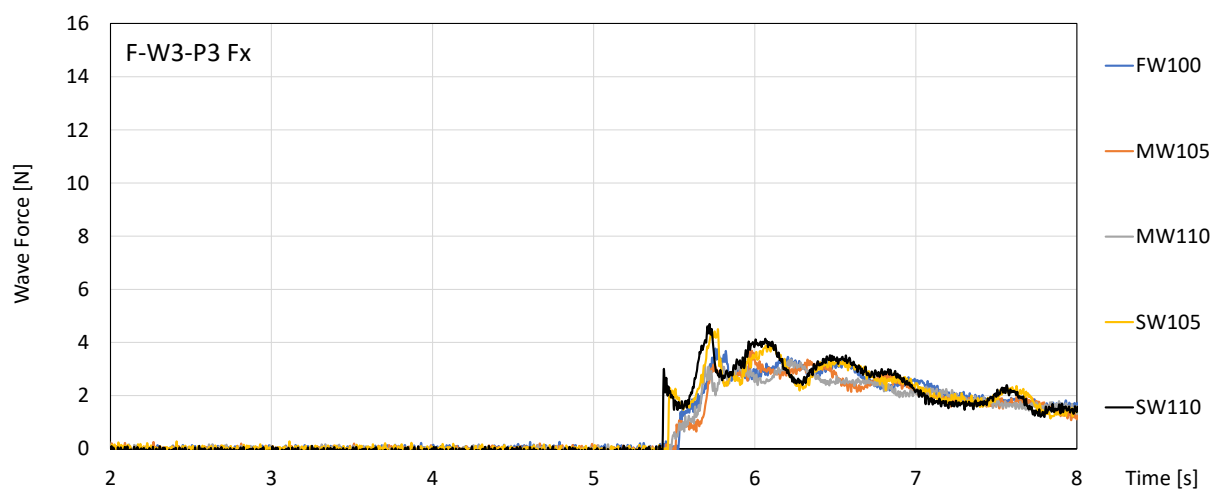
図- 3.96 衝突試験結果比較 (F-W3-P3；水平床 F, 津波 W3, 壁位置 P3) [2]



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

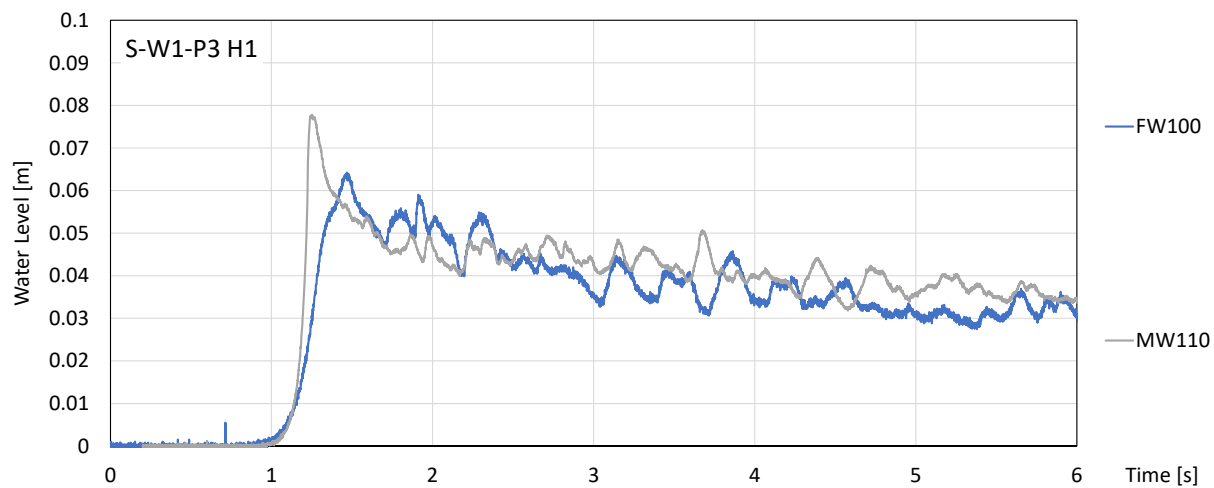


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

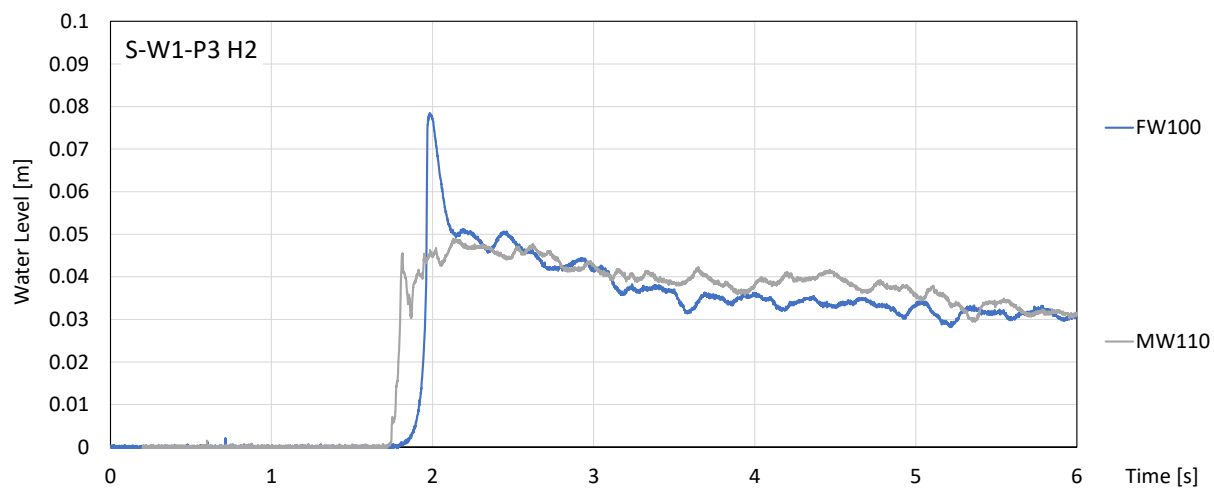


(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

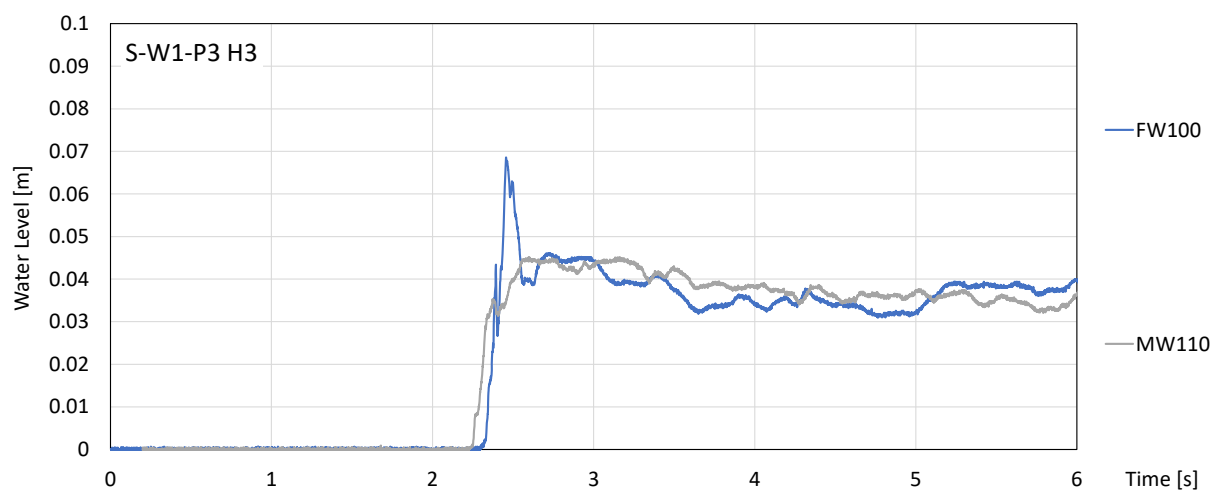
図- 3.97 衝突試験結果比較 (F-W3-P3；水平床 F, 津波 W3, 壁位置 P3) [3]



(a) H1 の水位時系列

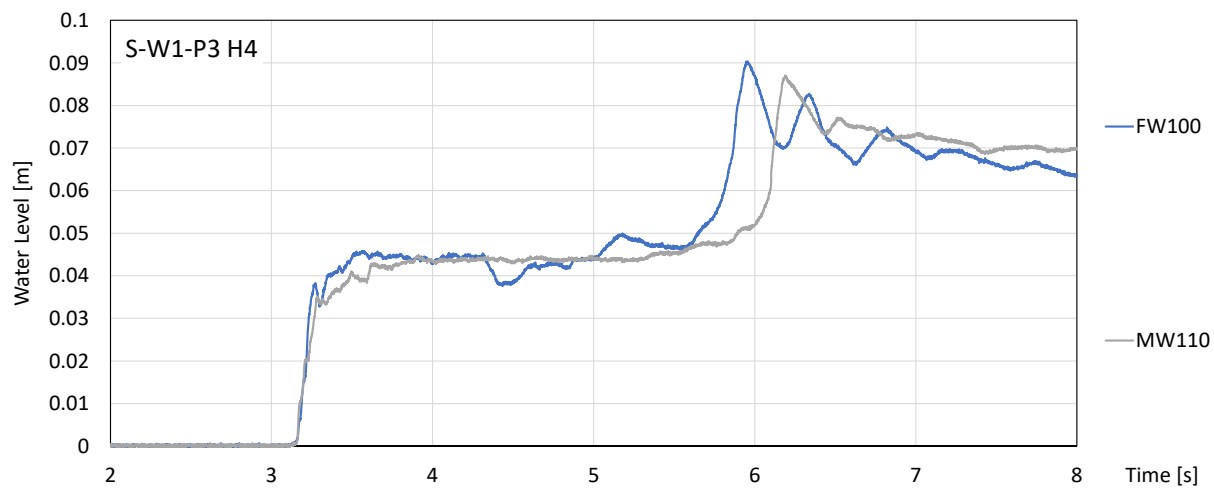


(b) H2 の水位時系列

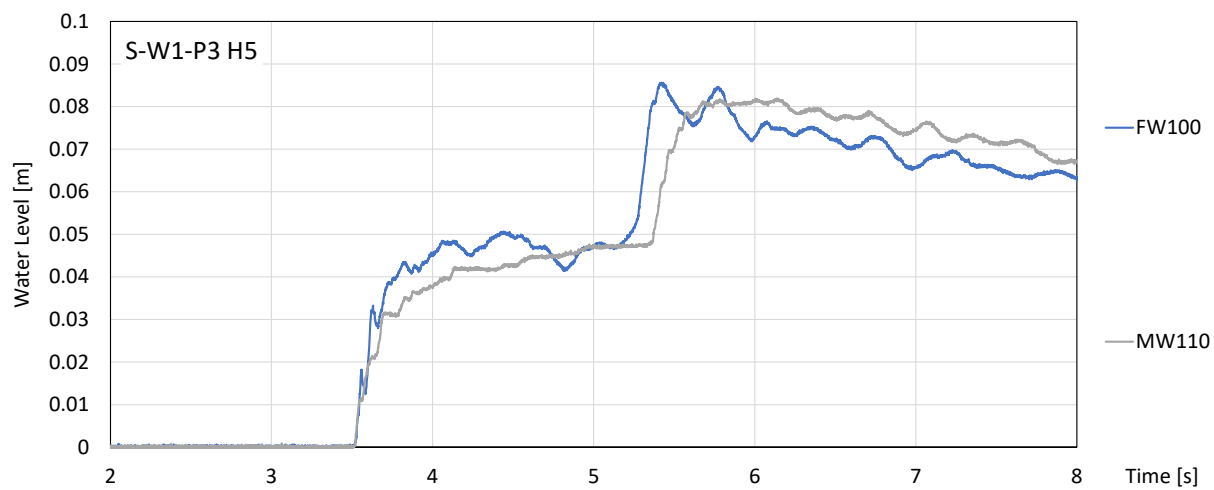


(c) H3 の水位時系列

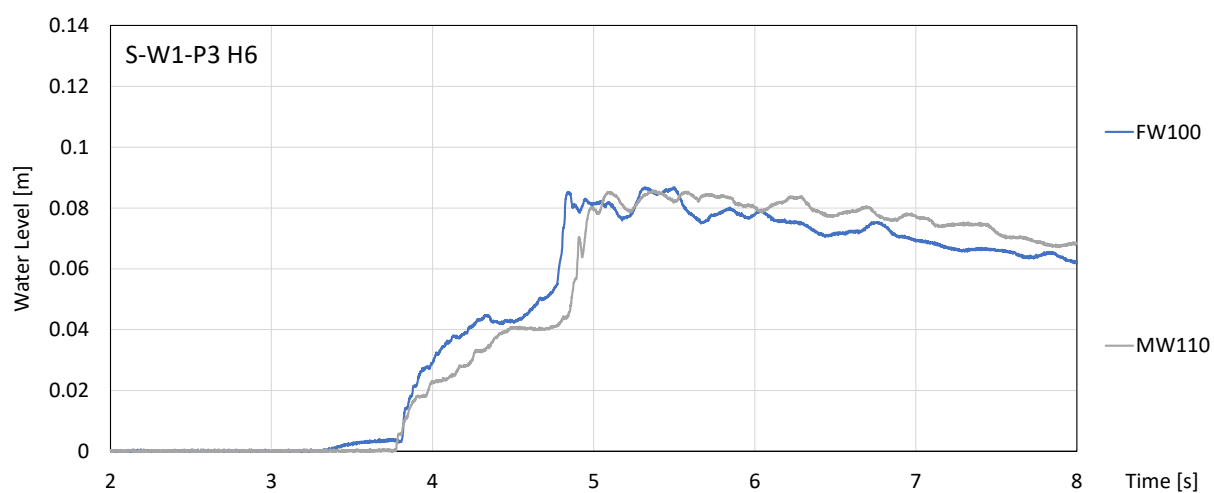
図- 3.98 衝突試験結果比較 (S-W1-P3 ; 単純勾配 S, 津波 W1, 壁位置 P3) [1]



(a) H4 の水位時系列

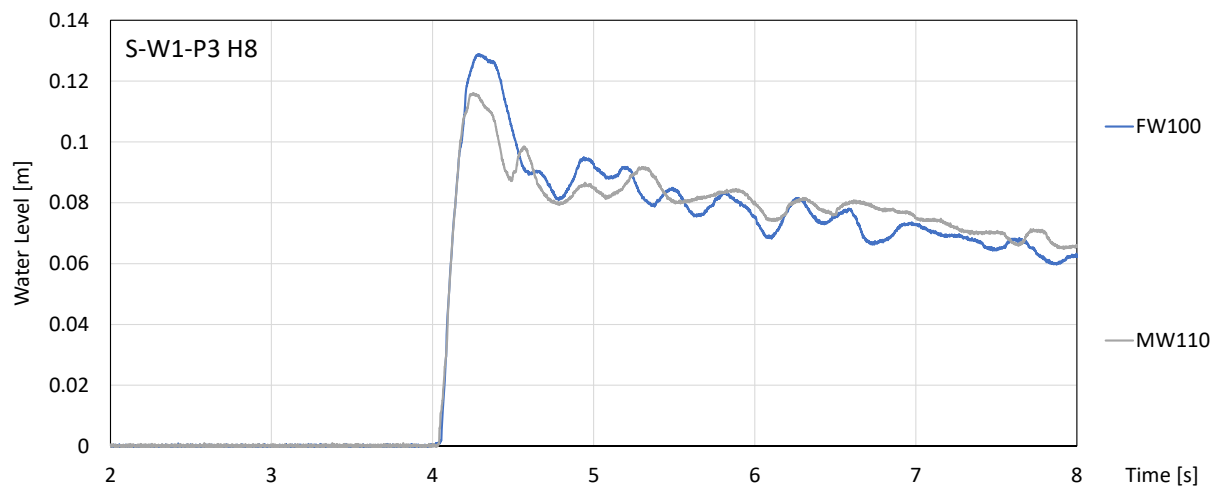


(b) H5 の水位時系列

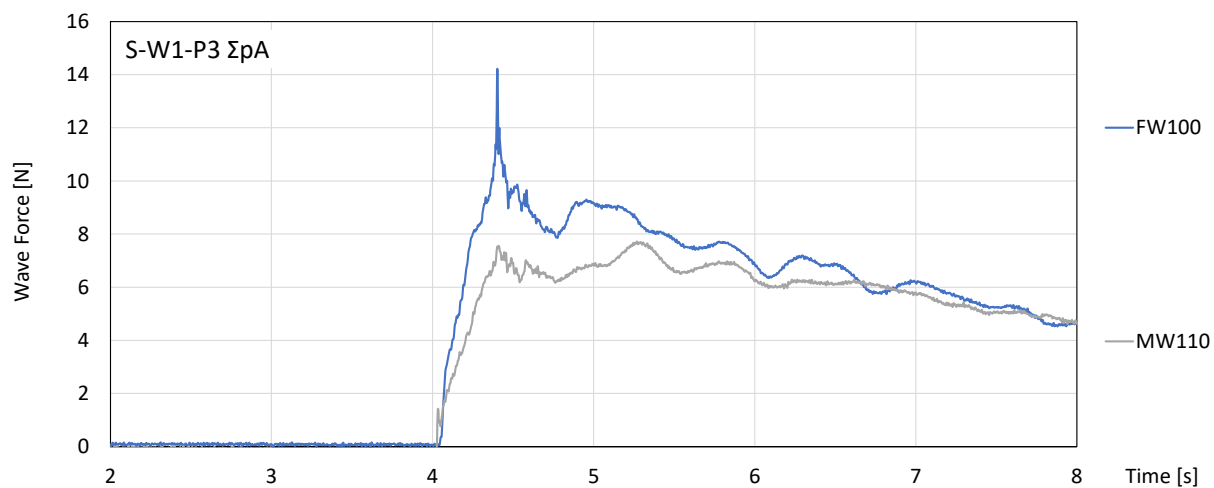


(c) H6 の水位時系列；汀線位置

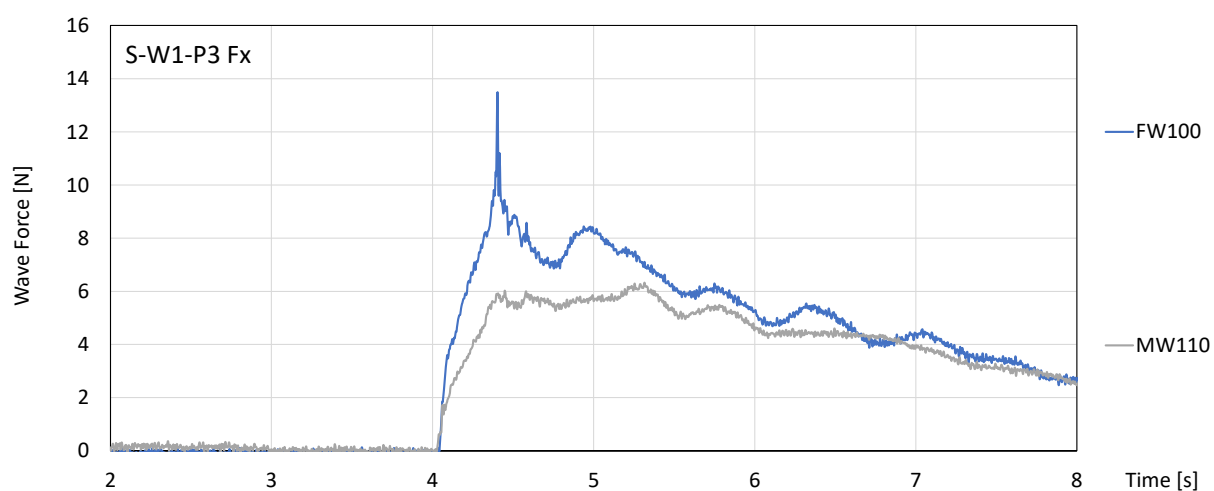
図- 3.99 衝突試験結果比較 (S-W1-P3；単純勾配 S，津波 W1，壁位置 P3) [2]



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置

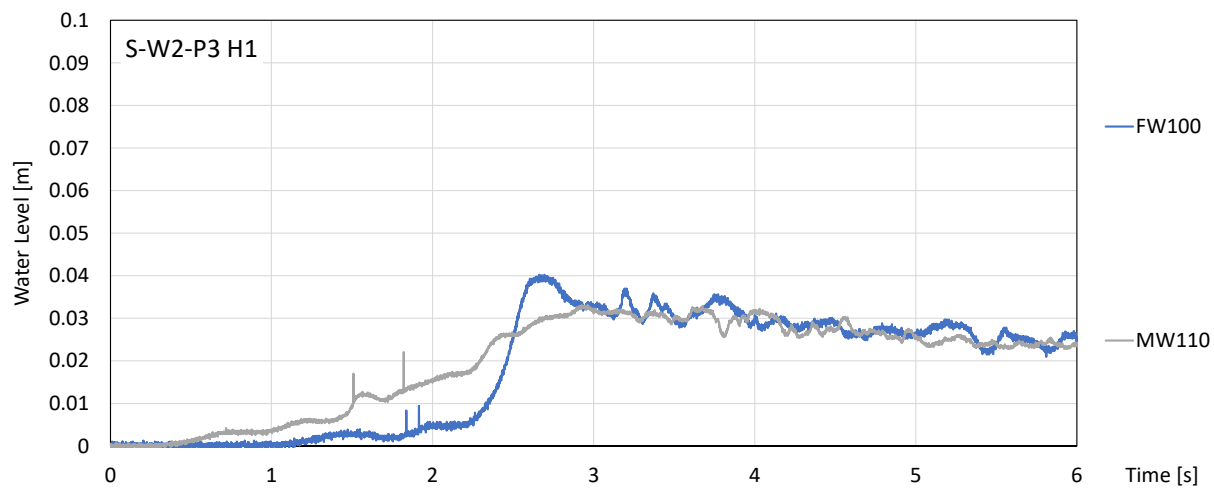


(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列

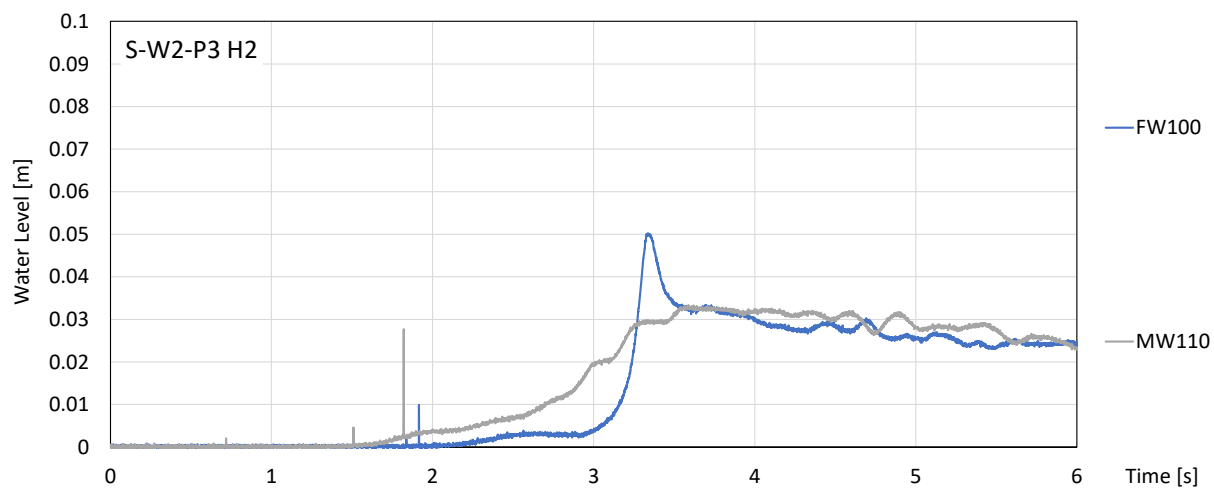


(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

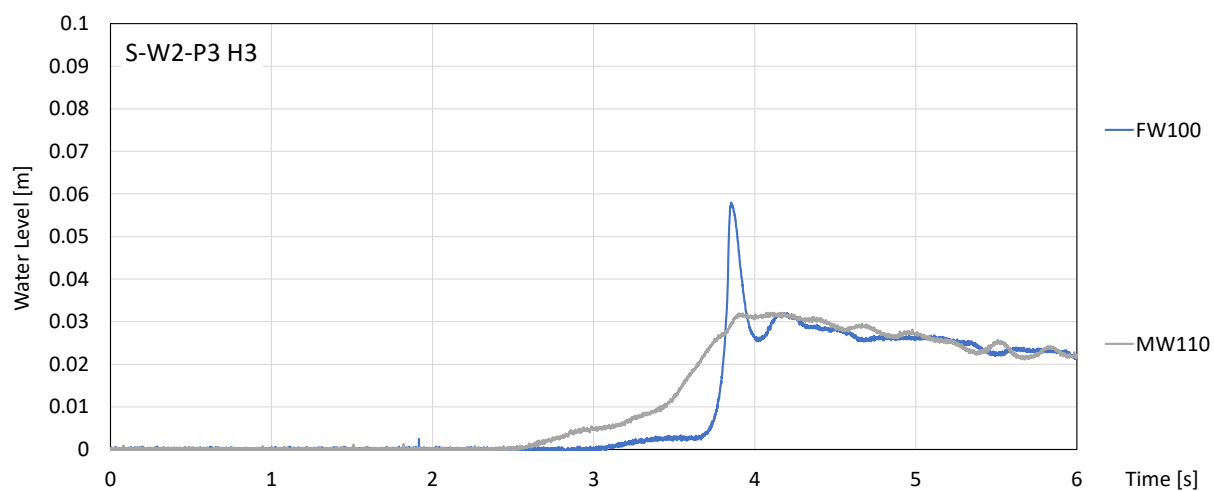
図- 3.100 衝突試験結果比較 (S-W1-P3；単純勾配 S, 津波 W1, 壁位置 P3) [3]



(a) H1 の水位時系列

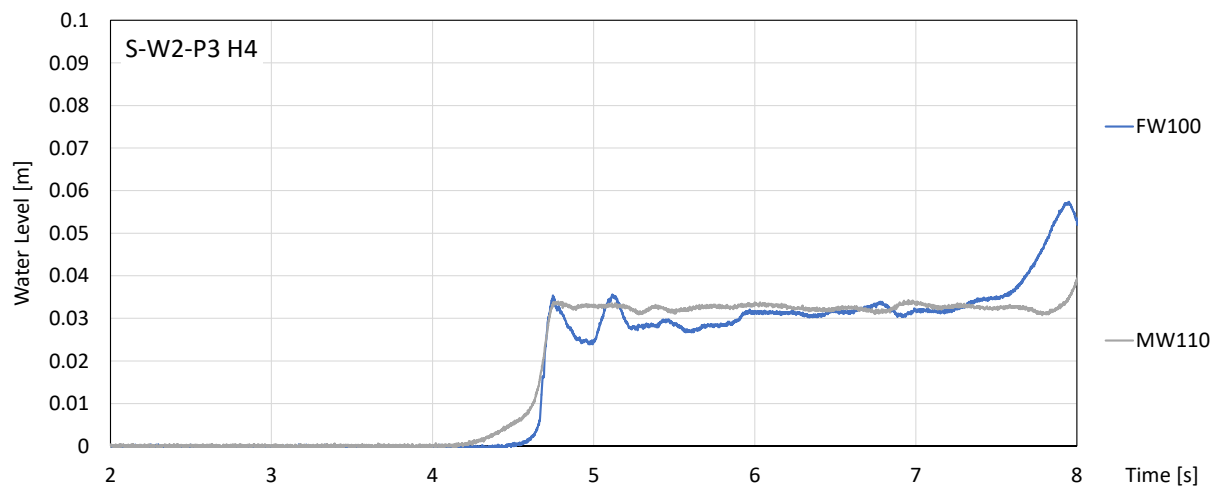


(b) H2 の水位時系列

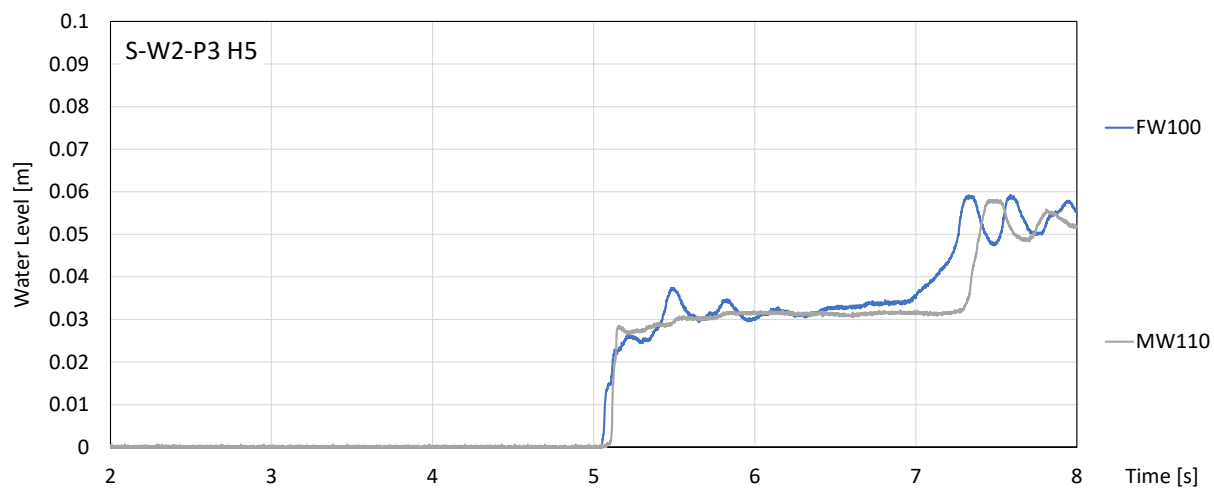


(c) H3 の水位時系列

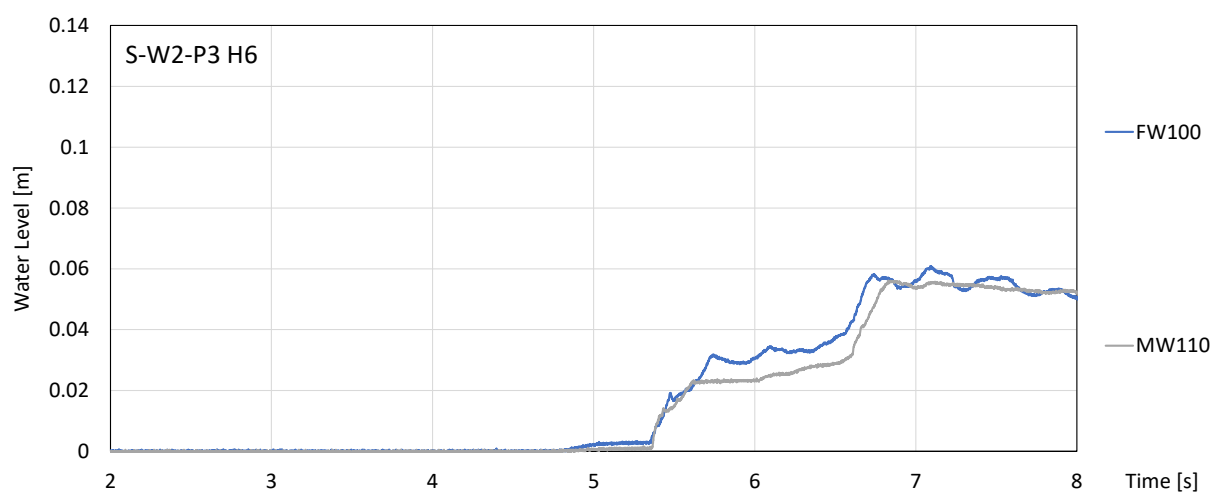
図- 3.101 衝突試験結果比較 (S-W2-P3 ; 単純勾配 S, 津波 W2, 壁位置 P3) [1]



(a) H4 の水位時系列

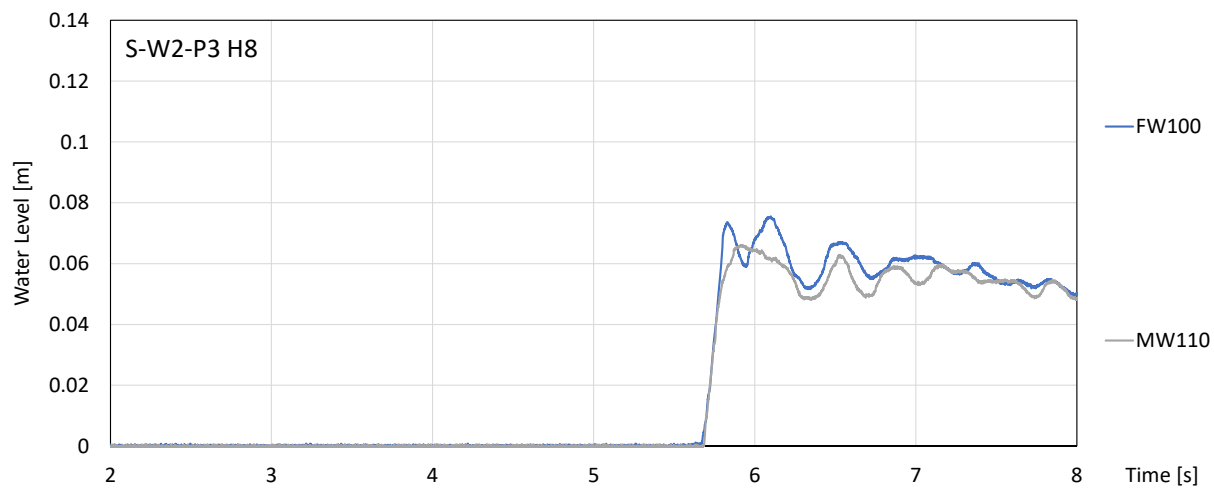


(b) H5 の水位時系列

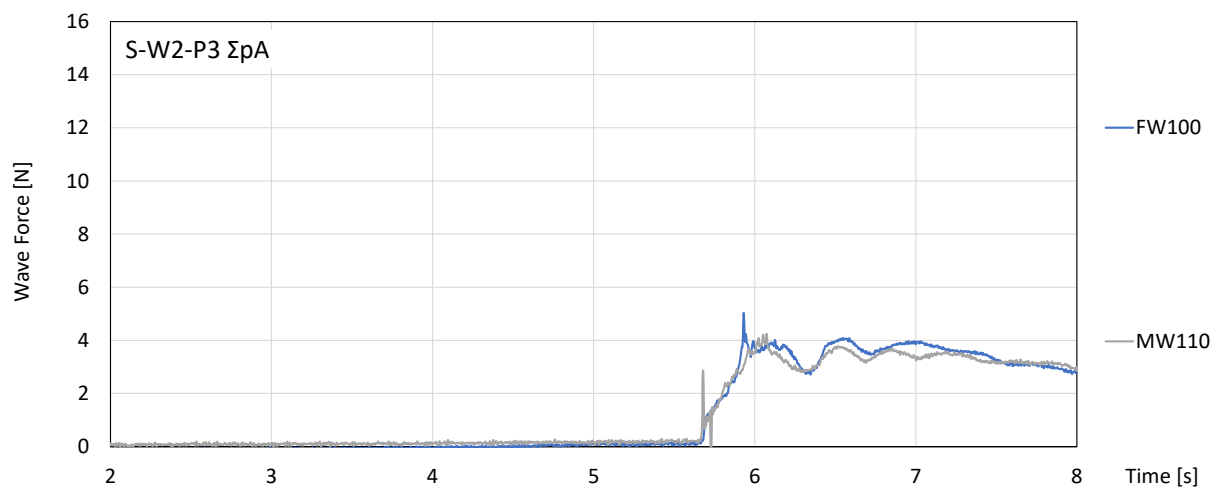


(c) H6 の水位時系列; 汀線位置

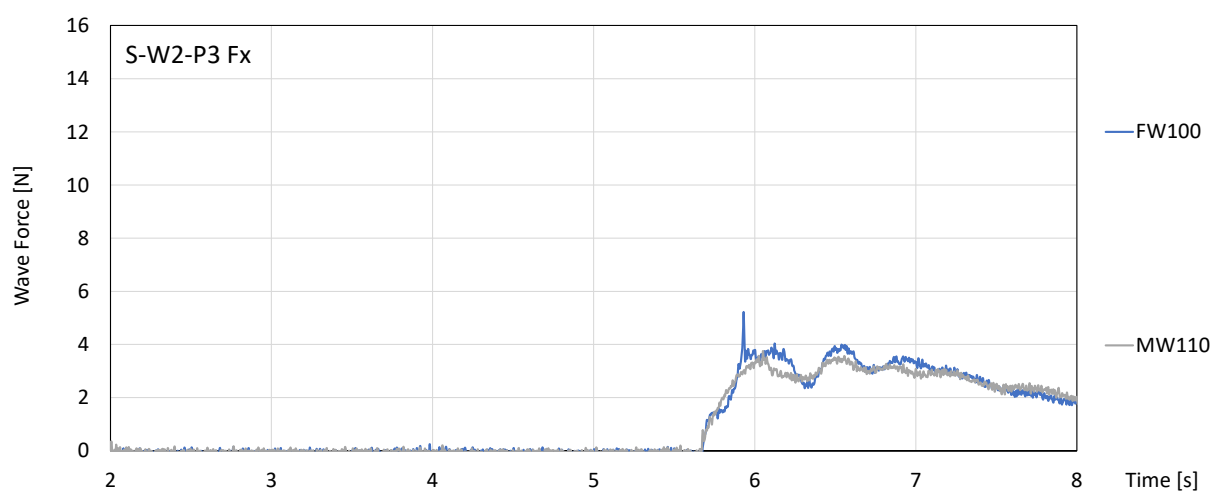
図- 3.102 衝突試験結果比較 (S-W2-P3 ; 単純勾配 S, 津波 W2, 壁位置 P3) [2]



(a) H8 の水位時系列；壁前面位置



(b) 圧力計による波力 ΣpA の時系列



(c) 水中 6 分力計による波力 F_x の時系列

図- 3.103 衝突試験結果比較 (S-W2-P3；単純勾配 S, 津波 W2, 壁位置 P3) [3]

表-3.10 衝突試験結果一覧 (水平床 F, 壁位置 P1)

海底 地形	防潮堤 位置	津波	種類	密度 [g/cm ³]	試験 回数	最大水位 [m]	到達時間 [s]	最大波力 [N]					
						H6	H6	Σ pA	Σ pA(衝撃)	Σ pA(持続)	Fx	Fx(衝撃)	Fx(持続)
F	P1	W2	FW	1.00	1	0.108	5.535	4.125	3.602	4.125	5.670	5.019	5.670
					2	0.111	5.541	4.089	3.751	4.089	5.620	5.103	5.620
					3	0.113	5.587	4.541	4.152	4.541	5.504	5.304	5.504
					4	0.111	5.549	4.431	3.989	4.431	5.693	5.202	5.693
					5	0.112	5.571	4.436	3.887	4.436	5.619	5.158	5.619
			MW	1.05	1	0.100	5.900	4.194	3.529	4.194	5.064	4.738	5.064
					2	0.097	5.854	3.883	3.251	3.883	5.040	4.554	5.040
					3	0.101	5.852	4.097	3.586	4.097	5.250	4.891	5.250
					4	0.097	5.804	3.952	3.462	3.952	4.915	4.535	4.915
					5	0.096	5.764	4.028	3.376	4.028	5.178	4.578	5.178
			MW	1.10	1	0.096	5.763	3.992	3.441	3.992	5.482	5.010	5.482
					2	0.097	5.827	4.183	3.646	4.183	5.371	4.884	5.371
					3	0.097	5.825	4.149	3.538	4.149	5.340	4.738	5.340
					4	0.097	5.739	4.337	3.589	4.337	5.476	4.878	5.476
					5	0.098	5.844	4.288	3.659	4.288	5.543	4.995	5.543
		W3	FW	1.00	1	0.093	5.082	3.935	3.002	3.935	5.164	3.926	5.164
					2	0.093	5.094	4.026	3.175	4.026	5.311	4.108	5.311
					3	0.092	5.089	3.938	3.618	3.938	5.313	4.820	5.313
					4	0.093	5.083	3.871	2.964	3.871	5.563	4.473	5.563
					5	0.094	5.106	3.862	2.962	3.862	5.211	4.078	5.211
			MW	1.05	1	0.080	5.497	3.275	2.531	3.275	4.484	3.480	4.484
					2	0.083	5.526	3.412	2.619	3.412	4.576	3.329	4.576
					3	0.083	5.505	3.413	2.734	3.413	4.791	3.694	4.791
					4	0.080	5.491	3.494	2.573	3.494	4.604	3.523	4.604
					5	0.080	5.503	3.568	2.633	3.568	4.803	3.513	4.803
			MW	1.10	1	0.084	5.514	4.410	3.033	4.410	5.416	3.535	5.416
					2	0.083	5.519	4.167	2.813	4.167	5.395	3.415	5.395
					3	0.084	5.504	4.352	3.587	4.352	5.330	4.245	5.330
					4	0.085	5.534	4.309	3.308	4.309	5.425	3.914	5.425
					5	0.087	5.557	4.713	3.297	4.713	5.589	3.604	5.589

※最大波力 Σ pA, Fx のハッチングの色 : [赤] 最大衝撃波力が全時刻最大

[青] 最大持続波力が全時刻最大

表- 3.11 衝突試験結果一覧 (水平床 F, 壁位置 P3) [1]

海底 地形	防潮堤 位置	津波	種類	密度 [g/cm ³]	試験 回数	最大水位 [m]	到達時間 [s]		最大波力 [N]					
						H8	H6	H8	Σ pA	Σ pA(衝撃)	Σ pA(持続)	Fx	Fx(衝撃)	Fx(持続)
F	P3	W1	FW	1.00	1	0.127	3.756	4.046	9.599	5.997	9.599	9.306	5.730	9.306
					2	0.117	3.742	4.028	9.822	6.033	9.822	10.454	5.899	10.454
					3	0.128	3.755	4.036	10.412	4.667	10.412	11.672	5.479	11.672
					4	0.131	3.732	4.011	10.723	5.844	10.723	11.479	6.163	11.479
					5	0.133	3.744	4.030	10.570	6.081	10.570	10.337	6.117	10.337
			MW	1.05	1	0.128	3.530	3.798	11.156	5.356	11.156	11.074	5.342	11.074
					2	0.128	3.555	3.830	8.982	4.427	8.982	9.453	4.391	9.453
					3	0.127	3.565	3.836	10.837	4.922	10.837	10.447	4.423	10.447
					4	0.138	3.533	3.806	10.966	4.873	10.966	10.371	4.738	10.371
					5	0.131	3.555	3.810	10.785	5.328	10.785	10.955	5.176	10.955
			MW	1.10	1	0.114	3.541	3.794	6.969	3.376	6.969	7.670	4.001	7.670
					2	0.109	3.502	3.770	8.568	4.411	8.568	8.888	4.818	8.888
					3	0.115	3.514	3.784	7.158	4.407	7.158	7.454	4.240	7.454
					4	0.121	3.505	3.761	8.261	4.601	8.261	8.243	5.184	8.243
					5	0.116	3.513	3.794	7.680	3.608	7.680	8.693	4.181	8.693
			SW	1.05	1	0.117	3.928	4.213	9.332	2.374	9.332	9.736	2.184	9.736
					2	0.112	3.917	4.204	9.892	3.217	9.892	10.673	3.573	10.673
					3	0.118	3.924	4.208	10.213	3.283	10.213	10.071	3.774	10.071
					4	0.117	3.937	4.206	9.405	3.087	9.405	9.708	2.772	9.708
					5	0.117	3.923	4.209	10.129	3.125	10.129	10.324	3.353	10.324
			SW	1.10	1	0.103	3.923	4.231	10.985	1.354	10.985	10.134	1.290	10.134
					2	0.106	3.919	4.213	10.192	1.268	10.192	10.849	3.321	10.849
					3	0.101	3.926	4.184	9.226	2.413	9.226	10.512	3.339	10.512
					4	0.106	3.903	4.197	10.664	1.581	10.664	11.407	2.696	11.407
					5	0.106	3.901	4.224	9.731	1.834	9.731	10.051	3.111	10.051
		W2	FW	1.00	1	0.123	5.565	6.086	7.947	2.370	7.947	7.167	3.019	7.167
					2	0.120	5.563	6.086	7.134	1.977	7.134	7.017	2.901	7.017
					3	0.120	5.556	6.065	7.397	1.995	7.397	7.253	2.903	7.253
					4	0.130	5.558	6.097	7.302	2.060	7.302	6.809	3.107	6.809
					5	0.116	5.540	6.063	7.422	2.198	7.422	7.069	3.150	7.069
			MW	1.05	1	0.112	5.939	6.441	5.553	1.941	5.553	4.885	2.442	4.885
					2	0.112	6.000	6.430	4.695	2.103	4.695	3.894	2.590	3.894
					3	0.117	5.894	6.446	4.362	1.955	4.362	4.016	2.671	4.016
					4	0.123	5.841	6.432	5.664	2.194	5.664	5.106	2.628	5.106
					5	0.118	5.839	6.437	4.804	2.100	4.804	4.063	2.555	4.063
			MW	1.10	1	0.109	5.986	6.425	4.237	1.765	4.237	4.461	2.581	4.461
					2	0.112	5.959	6.432	3.913	2.307	3.913	3.349	2.581	3.349
					3	0.114	5.993	6.430	4.290	2.304	4.290	3.068	2.506	3.068
					4	0.121	5.995	6.433	4.293	2.301	4.293	2.955	2.364	2.955
					5	0.123	5.928	6.436	4.251	2.057	4.251	3.622	2.459	3.622
			SW	1.05	1	0.084	5.377	5.832	4.979	2.097	4.979	5.046	2.272	5.046
					2	0.088	5.351	5.822	4.593	2.179	4.593	5.400	2.231	5.400
					3	0.084	5.399	5.820	5.235	2.072	5.235	5.426	2.289	5.426
					4	0.087	5.375	5.818	5.777	2.480	5.777	4.997	2.227	4.997
					5	0.085	5.404	5.821	5.725	2.221	5.725	5.670	2.263	5.670
		SW	1.10		1	0.073	5.369	5.811	7.720	2.508	7.720	7.207	3.047	7.207
					2	0.074	5.344	5.816	7.382	2.217	7.382	7.228	2.795	7.228
					3	0.076	5.354	5.824	7.536	2.409	7.536	7.118	2.979	7.118
					4	0.075	5.349	5.818	7.539	2.370	7.539	7.554	2.915	7.554
					5	0.073	5.343	5.809	7.559	2.248	7.559	7.498	2.925	7.498

※最大波力 ΣpA, Fx のハッチングの色 : [赤] 最大衝撃波力が全時刻最大

[青] 最大持続波力が全時刻最大

表- 3.12 衝突試験結果一覧 (水平床 F, 壁位置 P3) [2]

海底 地形	防潮堤 位置	津波	種類	密度 [g/cm ³]	試験 回数	最大水位 [m]	到達時間 [s]		最大波力 [N]					
						H8	H6	H8	Σ pA	Σ pA(衝撃)	Σ pA(持続)	Fx	Fx(衝撃)	Fx(持続)
F	P3	W3	FW	1.00	1	0.088	5.078	5.533	3.977	2.527	3.977	3.772	2.453	3.772
					2	0.093	5.081	5.524	3.674	2.016	3.674	4.087	2.219	4.087
					3	0.085	5.072	5.528	3.512	2.904	3.512	3.718	3.298	3.718
					4	0.093	5.092	5.525	3.709	2.236	3.709	3.790	2.124	3.790
					5	0.088	5.086	5.532	3.663	2.418	3.663	3.879	2.781	3.879
			MW	1.05	1	0.081	5.565	5.990	3.989	1.554	3.989	3.692	1.095	3.692
					2	0.068	5.555	6.006	3.065	2.724	3.065	3.486	3.059	3.486
					3	0.076	5.570	5.977	3.919	2.226	3.919	3.527	1.544	3.527
					4	0.075	5.556	5.981	3.265	1.488	3.265	3.594	1.320	3.594
					5	0.071	5.561	5.996	3.326	2.041	3.326	3.593	1.800	3.593
			MW	1.10	1	0.075	5.689	6.031	3.465	3.465	3.297	3.356	3.284	3.356
					2	0.075	5.689	6.022	3.116	3.116	2.934	3.356	3.233	3.356
					3	0.075	5.694	6.035	3.315	2.871	3.315	3.281	2.859	3.281
					4	0.076	5.687	5.997	3.127	3.127	2.868	3.466	3.117	3.466
					5	0.075	5.716	6.037	3.109	3.109	3.097	3.308	3.106	3.308
			SW	1.05	1	0.095	5.092	5.515	4.610	2.160	4.610	4.498	2.288	4.498
					2	0.095	5.083	5.515	4.317	2.124	4.317	4.551	2.164	4.551
					3	0.091	5.084	5.499	4.407	2.068	4.407	4.790	2.189	4.790
					4	0.093	5.075	5.497	4.212	2.110	4.212	4.677	2.452	4.677
					5	0.093	5.082	5.494	4.111	2.153	4.111	4.726	2.294	4.726
			SW	1.10	1	0.084	5.125	5.495	4.620	1.985	4.620	4.693	3.011	4.693
					2	0.087	5.092	5.487	4.424	1.522	4.424	5.141	3.387	5.141
					3	0.079	5.124	5.506	4.890	1.811	4.890	5.140	3.007	5.140
					4	0.087	5.090	5.503	4.690	1.788	4.690	4.782	3.080	4.782
					5	0.085	5.084	5.497	4.159	1.522	4.159	4.677	2.825	4.677

※最大波力 Σ pA, Fx のハッチングの色 : [赤] 最大衝撃波力が全時刻最大

[青] 最大持続波力が全時刻最大

表- 3.13 衝突試験結果一覧 (単純勾配 S, 壁位置 P3)

海底 地形	防潮堤 位置	津波	種類	密度 [g/cm ³]	試験 回数	最大水位 [m]	到達時間 [s]		最大波力 [N]					
						H8	H6	H8	Σ pA	Σ pA(衝撃)	Σ pA(持続)	Fx	Fx(衝撃)	Fx(持続)
S	P3	W1	FW	1.00	1	0.129	3.814	4.057	14.218	8.326	14.218	13.494	7.183	13.494
					2	0.141	3.783	4.020	11.506	6.298	11.506	11.772	6.170	11.772
					3	0.148	3.786	4.036	13.347	6.586	13.347	13.209	6.726	13.209
					4	0.152	3.780	4.046	13.743	7.359	13.743	13.462	6.706	13.462
					5	0.134	3.789	4.035	13.332	6.219	13.332	13.748	6.476	13.748
			MW	1.10	1	0.116	3.585	3.843	7.722	4.903	7.722	6.330	3.962	6.330
					2	0.112	3.614	3.865	7.758	4.586	7.758	6.250	3.489	6.250
					3	0.104	3.610	3.856	7.904	4.751	7.904	6.539	3.708	6.539
					4	0.108	3.571	3.820	7.647	4.778	7.647	6.422	4.158	6.422
					5	0.099	3.601	3.844	8.167	5.347	8.167	6.462	4.010	6.462
		W2	FW	1.00	1	0.076	5.362	5.686	5.033	5.033	4.093	5.222	5.222	4.041
					2	0.076	5.355	5.675	4.210	3.982	4.210	4.474	4.474	4.206
					3	0.075	5.345	5.670	4.077	4.077	3.976	4.621	4.621	4.144
					4	0.080	5.363	5.678	4.454	4.454	3.936	4.477	4.477	4.039
					5	0.078	5.363	5.680	4.540	4.540	4.209	4.437	4.437	4.048
			MW	1.10	1	0.066	6.184	6.504	4.244	2.928	4.244	3.753	2.937	3.753
					2	0.065	6.233	6.539	3.838	2.803	3.838	3.863	2.964	3.863
					3	0.065	6.217	6.515	3.645	2.861	3.645	3.908	2.617	3.908
					4	0.072	6.219	6.505	4.102	2.756	4.102	3.718	2.671	3.718
					5	0.072	6.202	6.520	4.364	2.761	4.364	3.980	2.912	3.980

※最大波力 Σ pA, Fx のハッチングの色 : [赤] 最大衝撃波力が全時刻最大

[青] 最大持続波力が全時刻最大

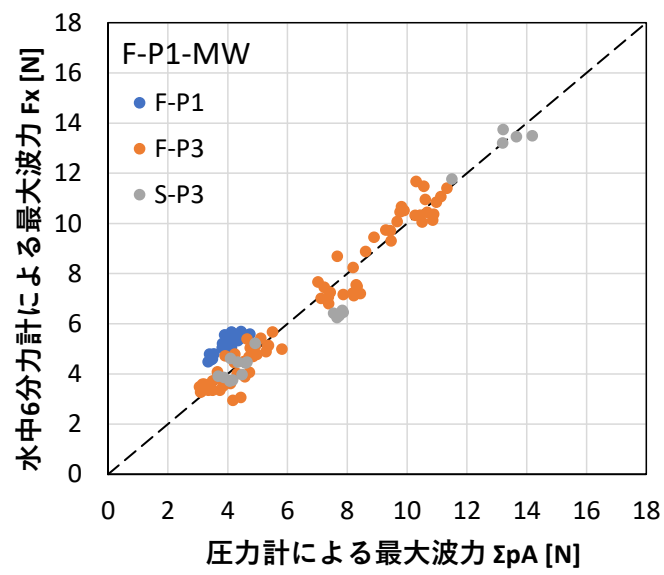
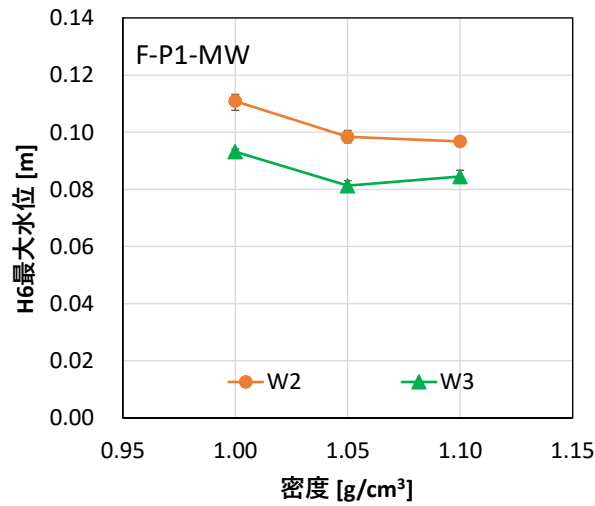
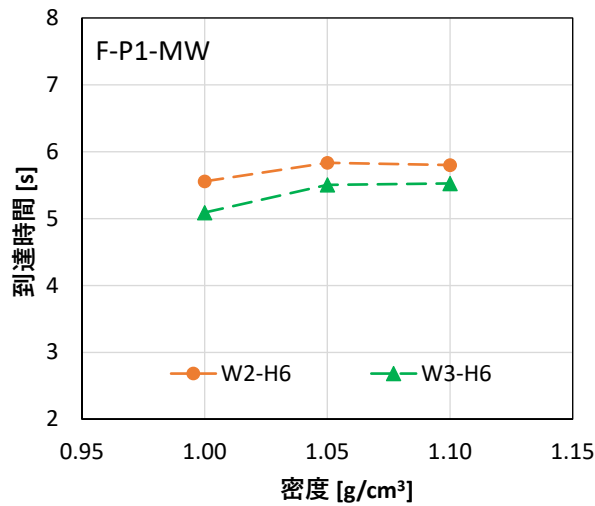


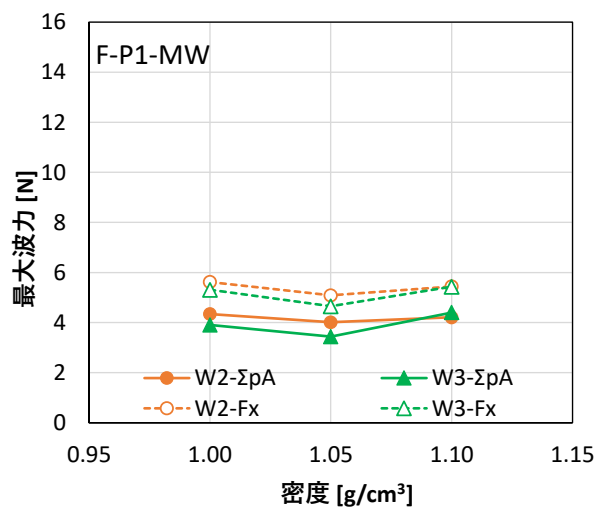
図-3.104 圧力計による最大波力 ΣpA と水中 6 分力計による最大波力 F_x の比較



(a) H6 における最大打上り高 [濁水]

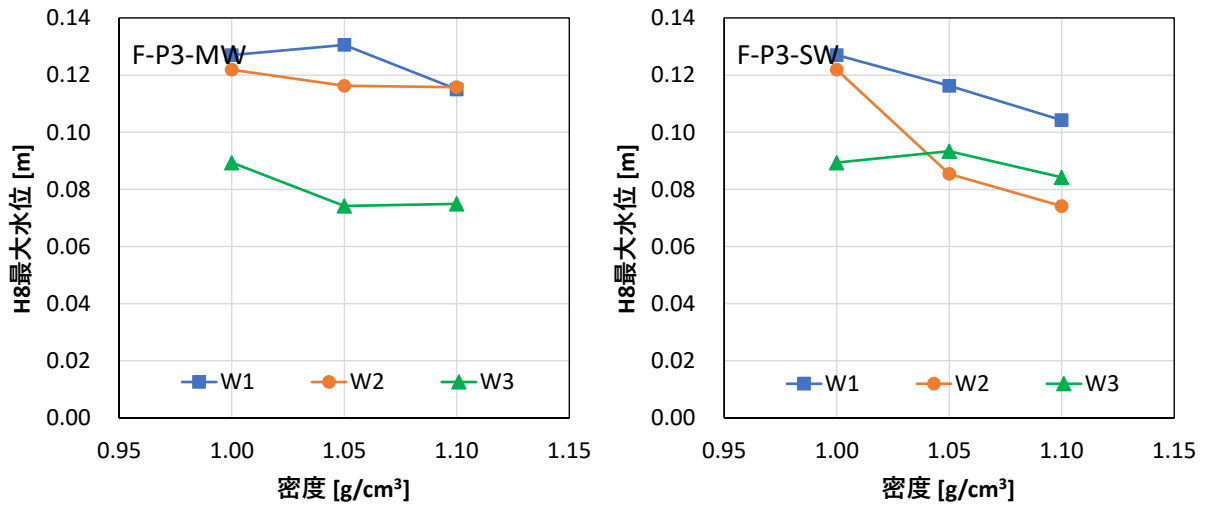


(b) H6 における津波の到達時間 [濁水]

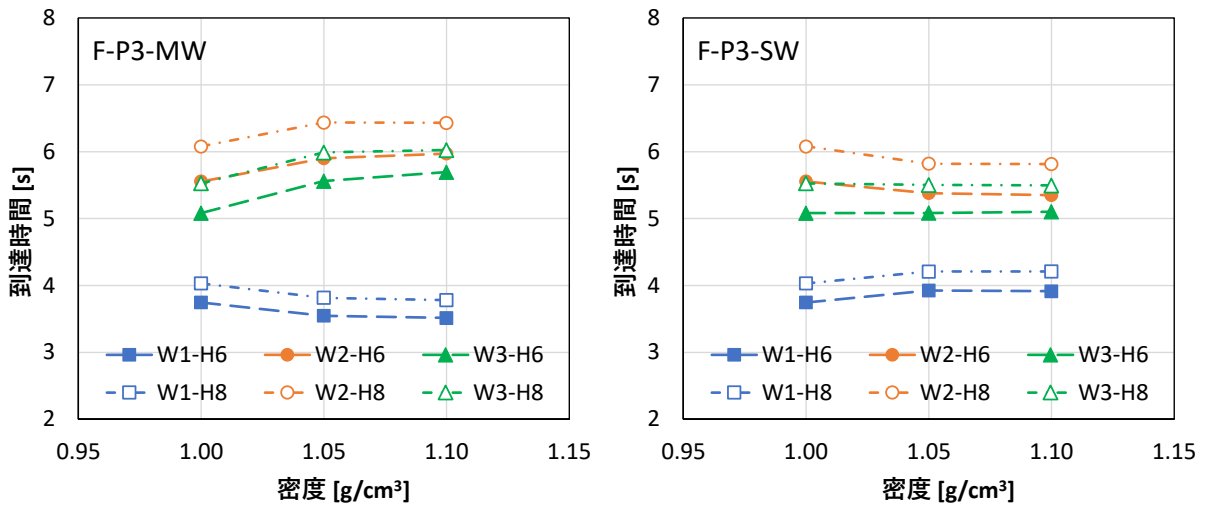


(c) 圧力計 ΣpA , 水中 6 分力計 F_x による最大波力 [濁水]

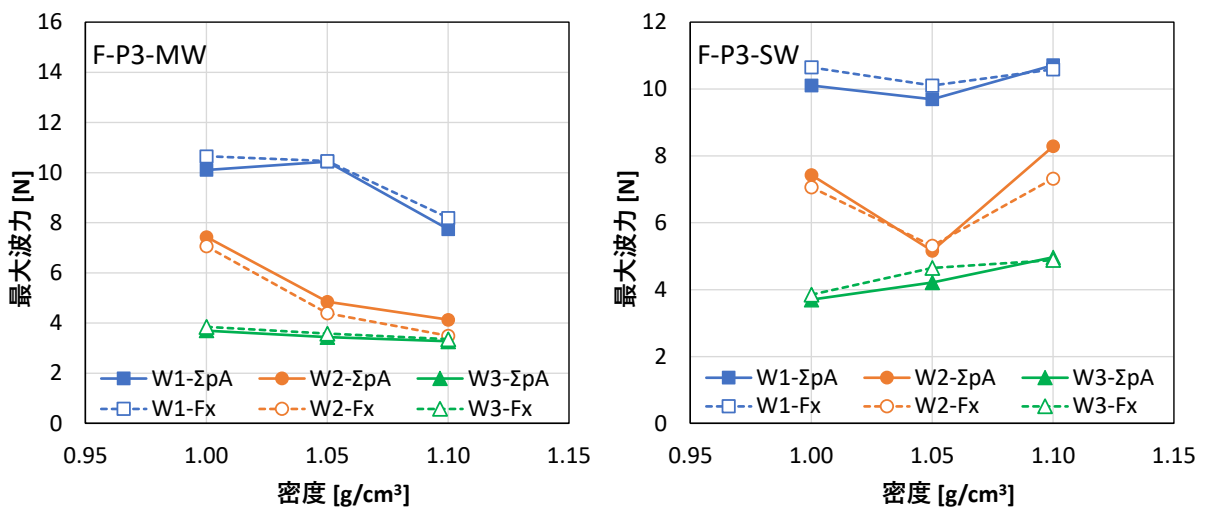
図- 3.105 流体密度による結果の比較 (F-P1 ; 水平床 F, 壁位置 P1, 津波 W2,W3)



(a) H8 における最大打上り高 [左:濁水, 右:塩水]

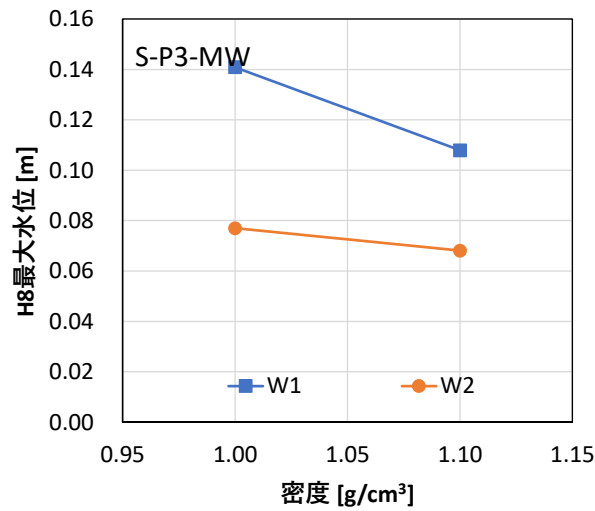


(b) H6, H8 における津波の到達時間 [左:濁水, 右:塩水]

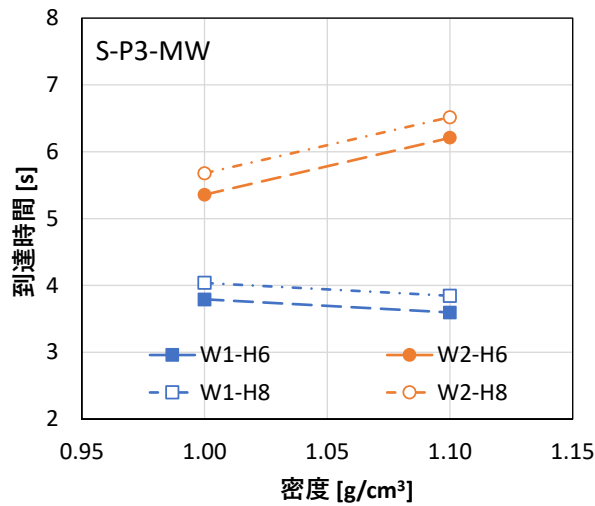


(c) 圧力計 ΣpA, 水中 6 分力計 Fx による最大波力 [左:濁水, 右:塩水]

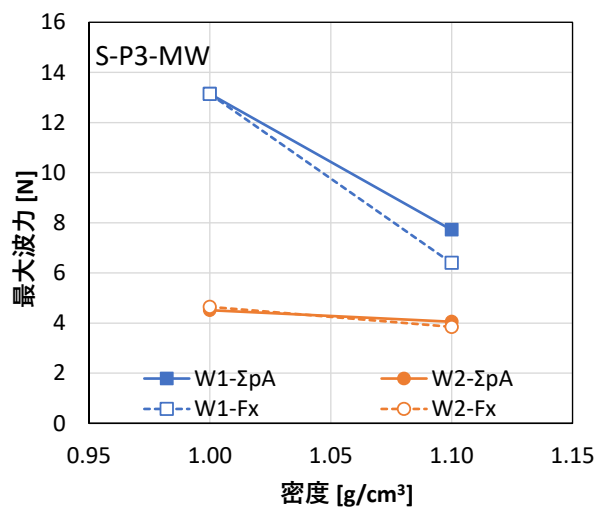
図- 3.106 流体密度による結果の比較 (F-P3 ; 水平床 F, 壁位置 P3, 津波 W1,W2,W3)



(a) H8 における最大打上り高 [濁水]

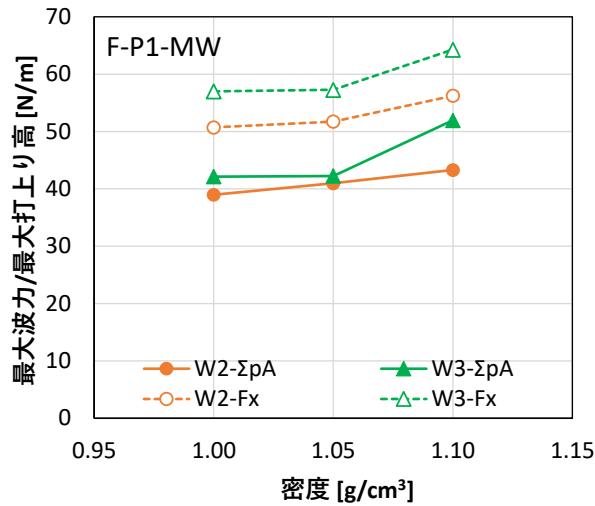


(b) H6, H8 における津波の到達時間 [濁水]

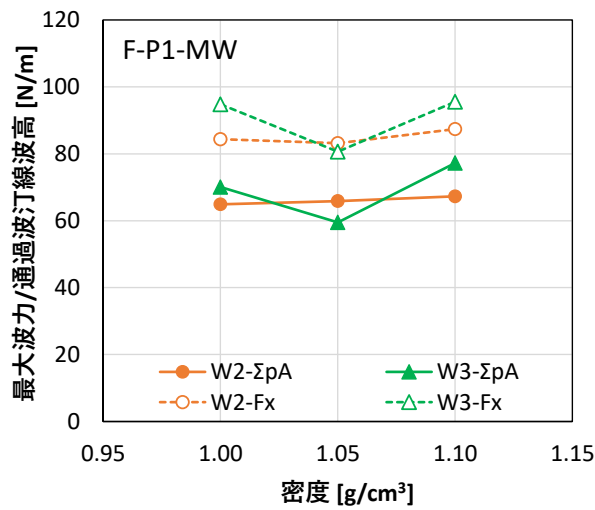


(c) 圧力計 Σp_A , 水中 6 分力計 F_x による最大波力 [濁水]

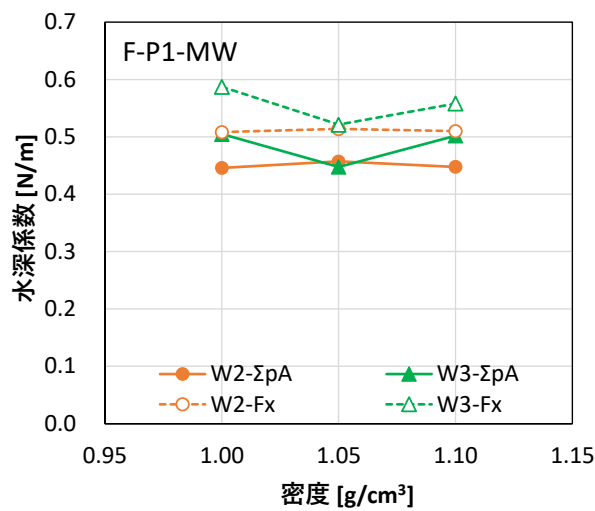
図- 3.107 流体密度による結果の比較 (S-P3 ; 単純勾配 S, 壁位置 P3, 津波 W1,W2)



(a) 最大波力／最大打上り高 H6 [濁水]

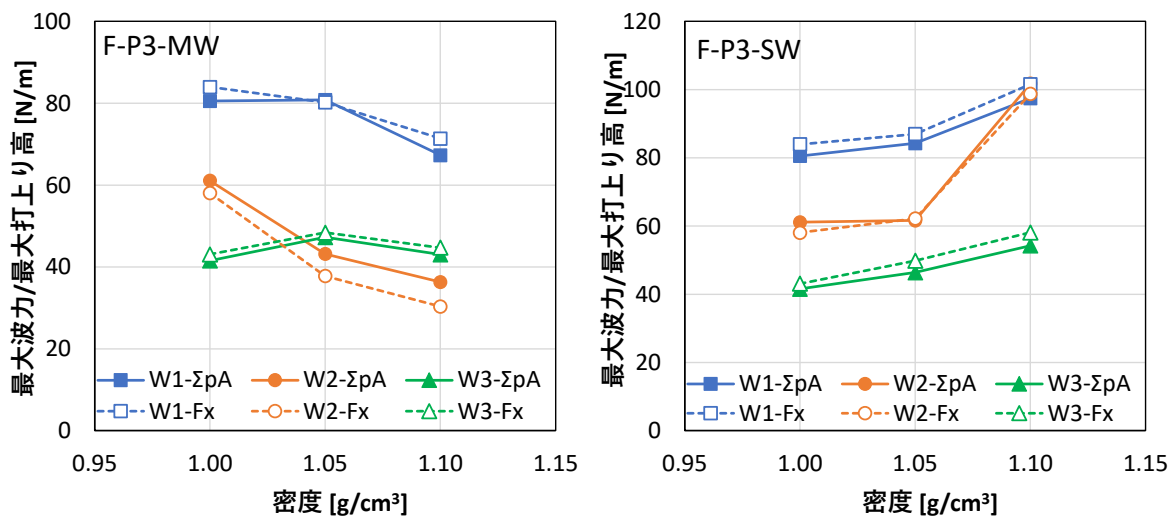


(b) 最大波力／通過波汀線最大津波高 H6 [濁水]

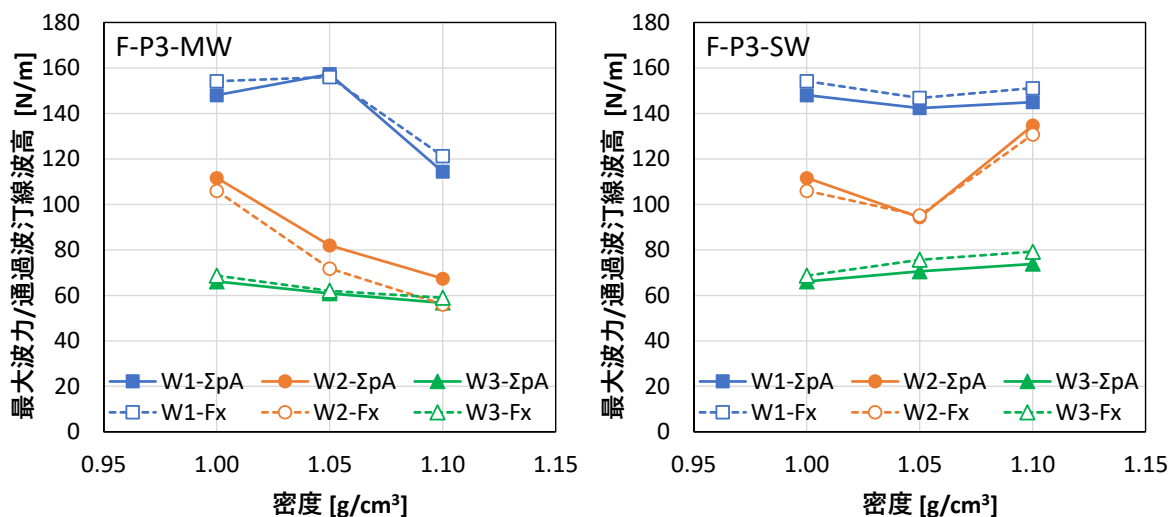


(c) 水深係数 [濁水]

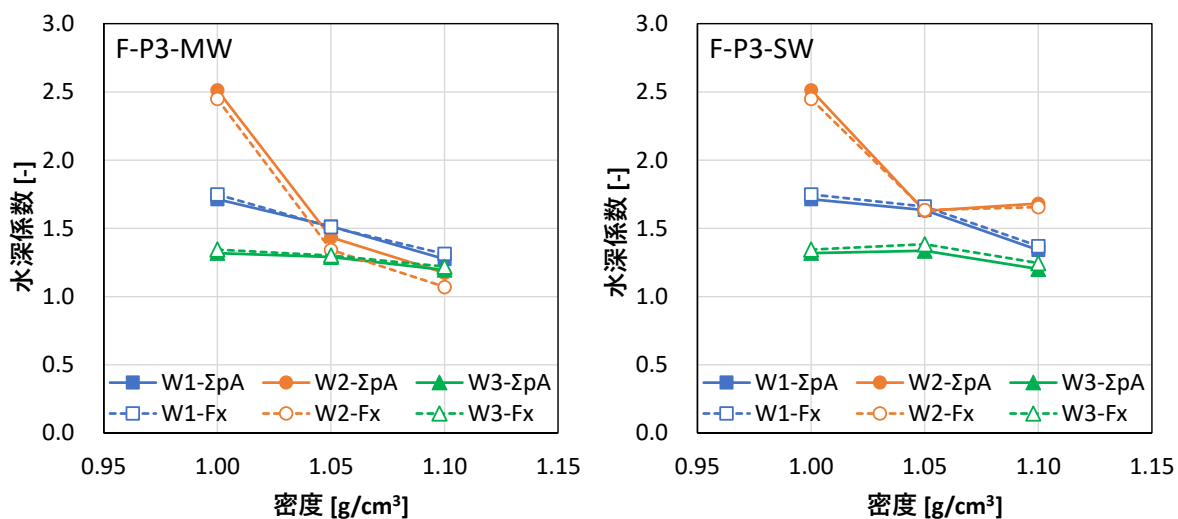
図- 3.108 最大波高／最大水位の比較 (F-P1 ; 水平床 F, 壁位置 P1, 津波 W2,W3)



(a) 最大波力／最大打上り高 H8 [左:濁水, 右:塩水]

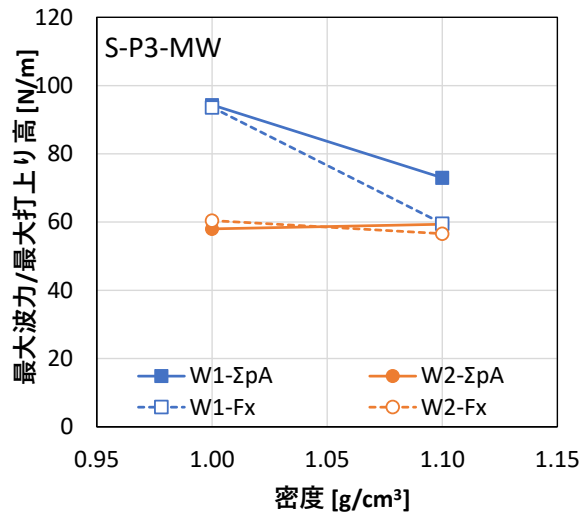


(b) 最大波力／通過波汀線最大津波高 H6 [左:濁水, 右:塩水]

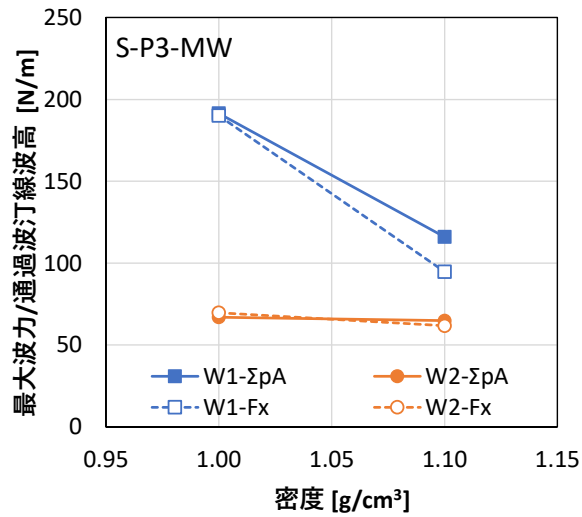


(c) 水深係数 [左:濁水, 右:塩水]

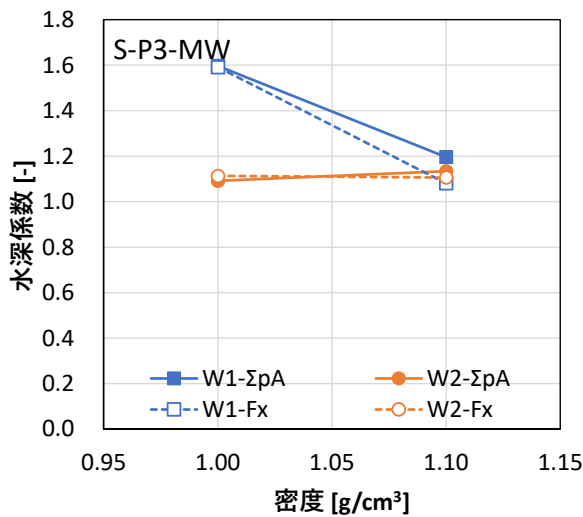
図- 3.109 最大波高／最大水位の比較 (F-P3 ; 水平床 F, 壁位置 P3, 津波 W1,W2,W3)



(a) 最大波力／最大打上り高 H8 [濁水]

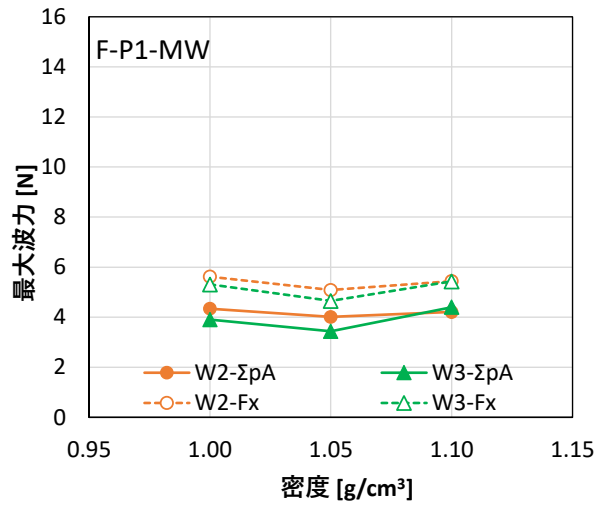


(b) 最大波力／通過波汀線最大津波高 H6 [濁水]

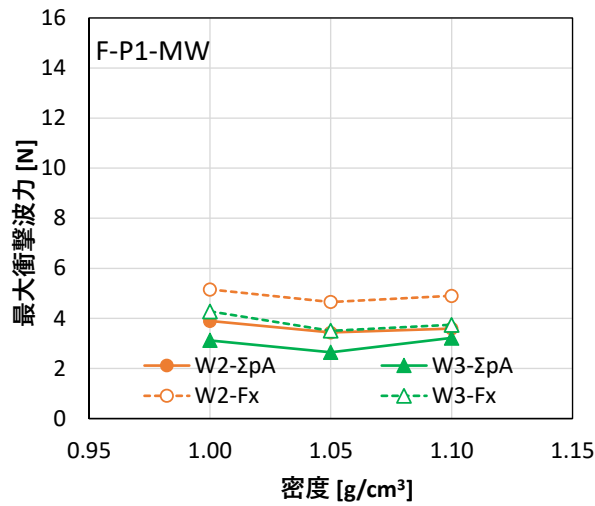


(c) 水深係数 [濁水]

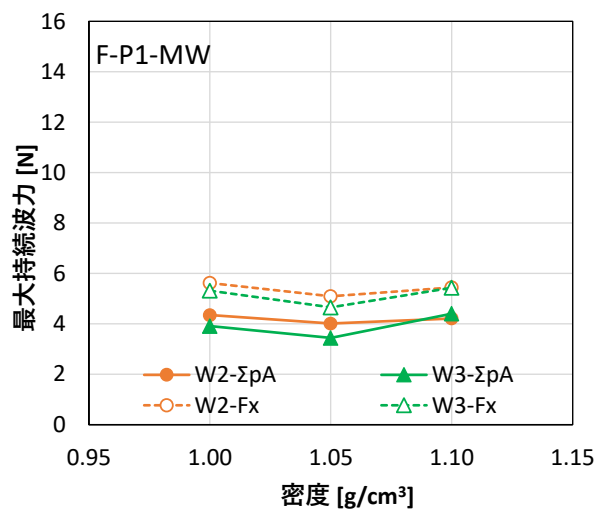
図- 3.110 最大波高／最大水位の比較 (S-P3 ; 単純勾配 S, 壁位置 P3, 津波 W1,W2)



(a) 全時間の最大波力 [濁水]

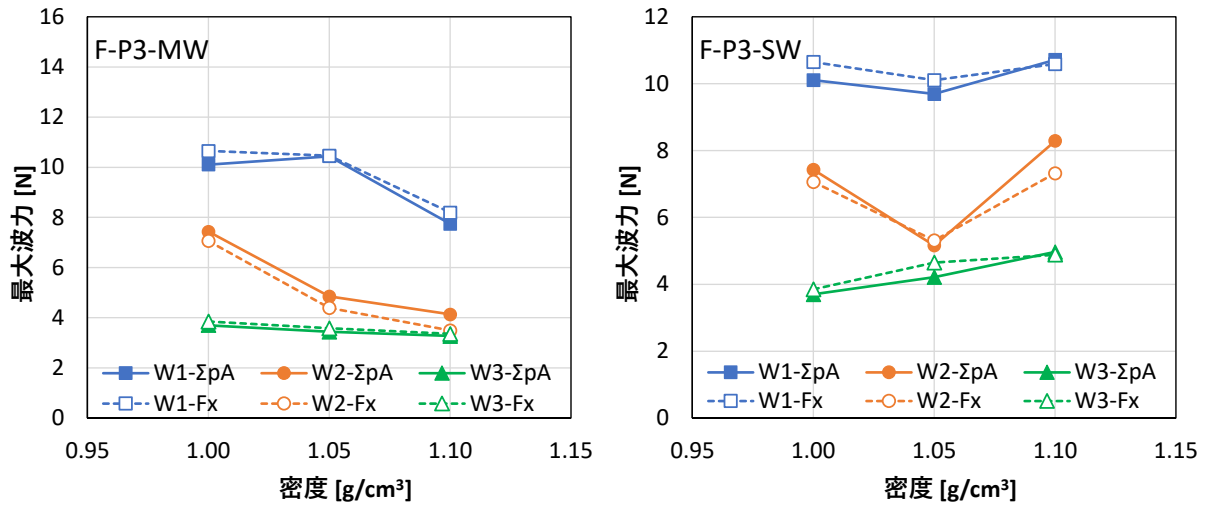


(b) 最大衝撃波力 [濁水]

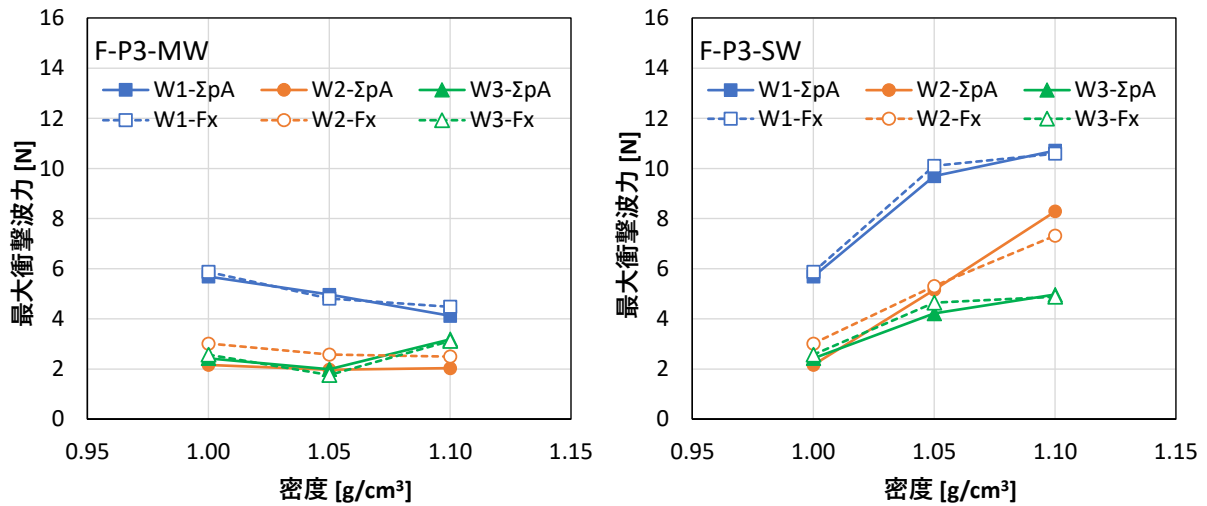


(c) 最大持続波力 [濁水]

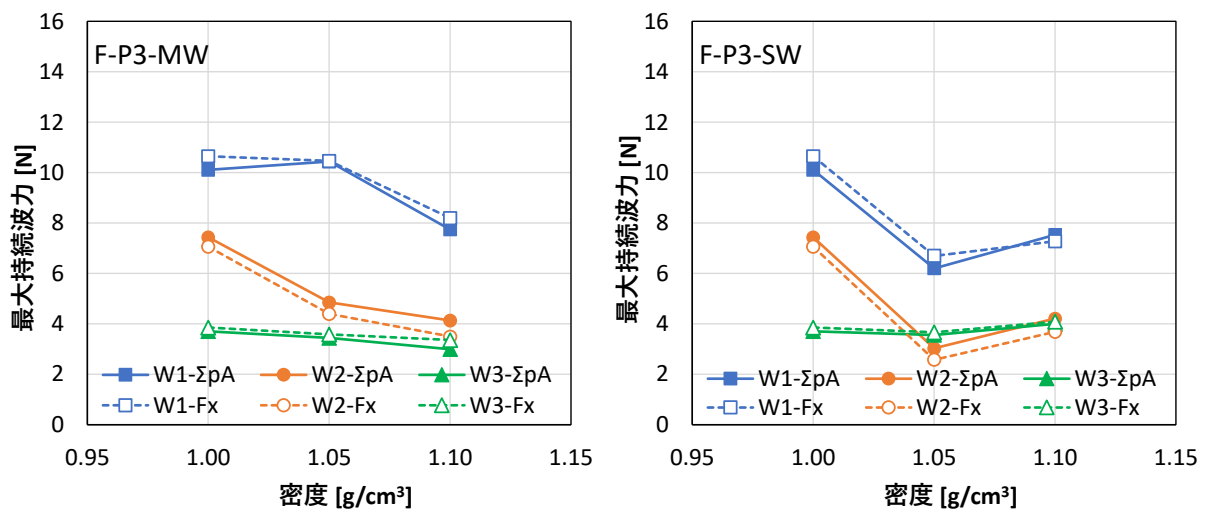
図- 3.111 流体密度による最大波力の比較 (F-P1 ; 水平床 F, 壁位置 P1, 津波 W2,W3)



(a) 全時間の最大波力 [左:濁水, 右:塩水]

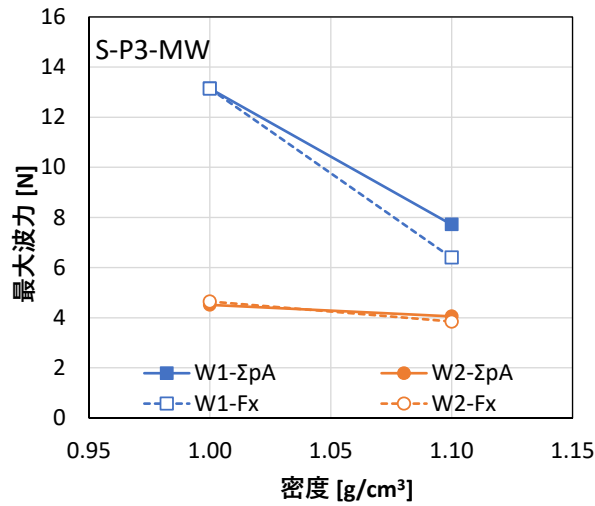


(b) 最大衝撃波力 [左:濁水, 右:塩水]

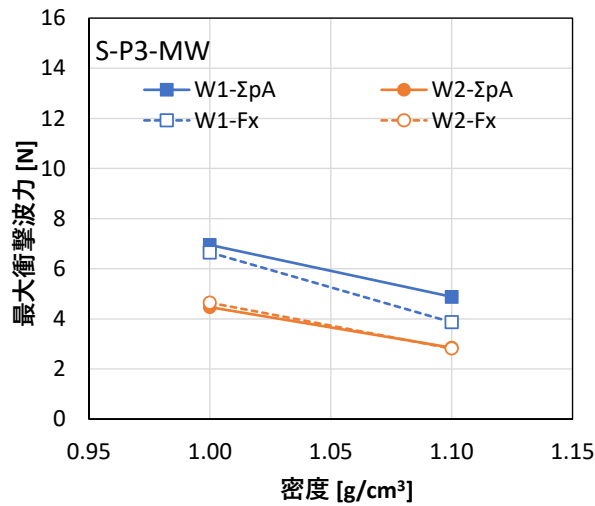


(c) 最大持続波力 [左:濁水, 右:塩水]

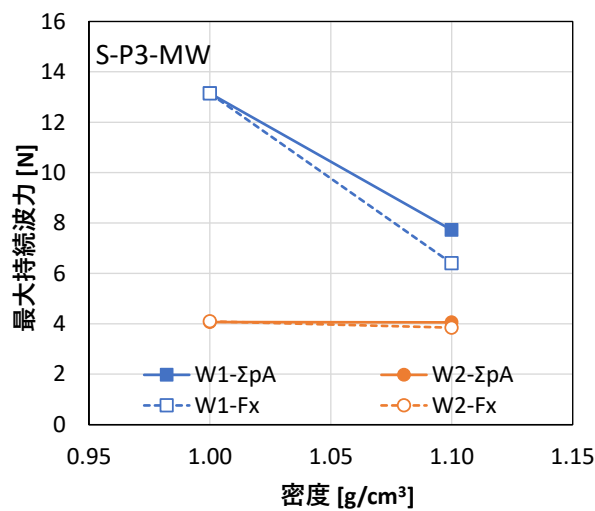
図- 3.112 流体密度による最大波力の比較 (F-P3 ; 水平床 F, 壁位置 P3, 津波 W1,W2,W3)



(a) 全時間の最大波力 [濁水]



(b) 最大衝撃波力 [濁水]



(c) 最大持続波力 [濁水]

図- 3.113 流体密度による最大波力の比較 (S-P3 ; 単純勾配 S, 壁位置 P3, 津波 W1,W2)

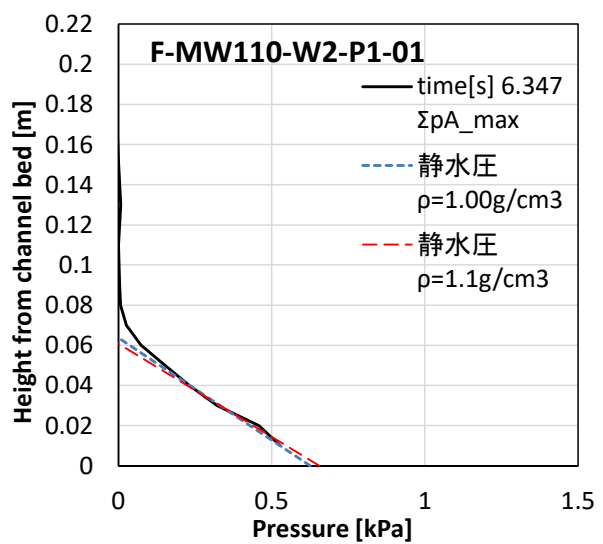
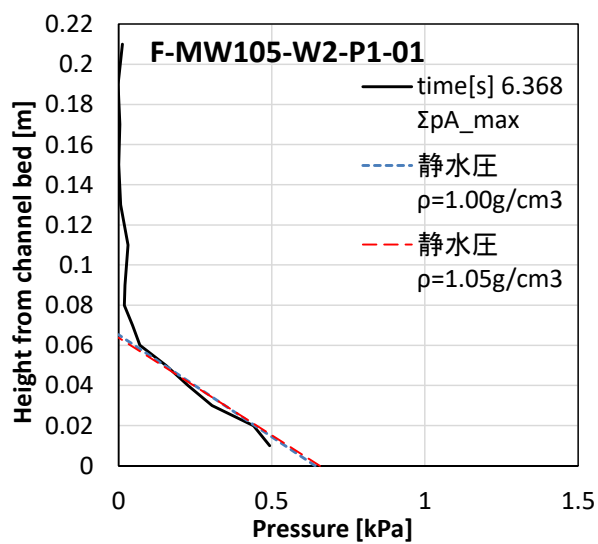
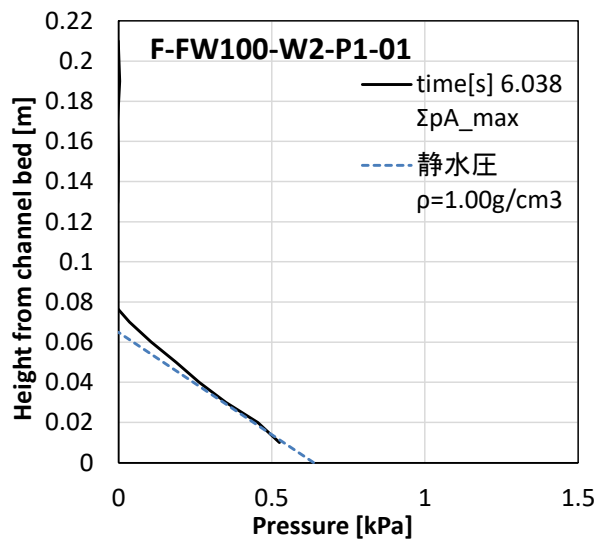


図- 3.114 波力 ΣpA 最大時における圧力鉛直分布（水平床 F，津波 W2，壁位置 P1）

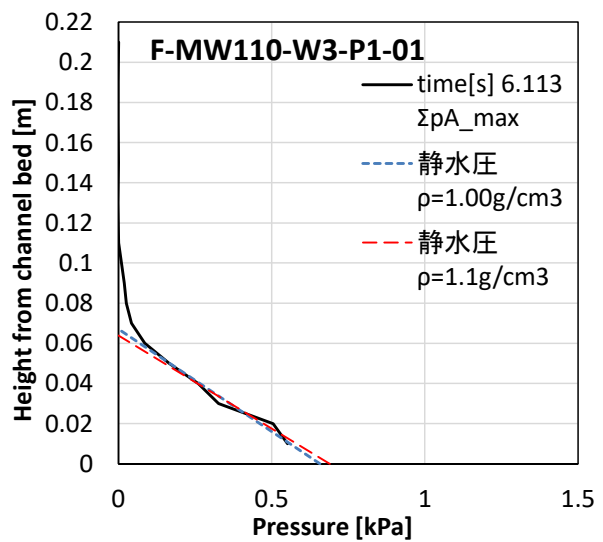
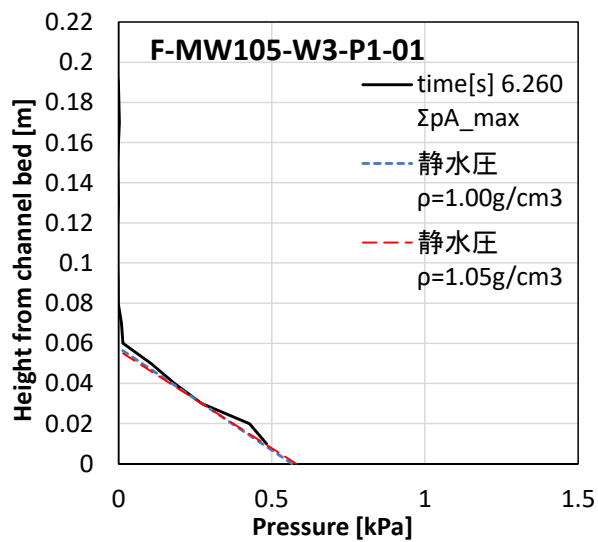
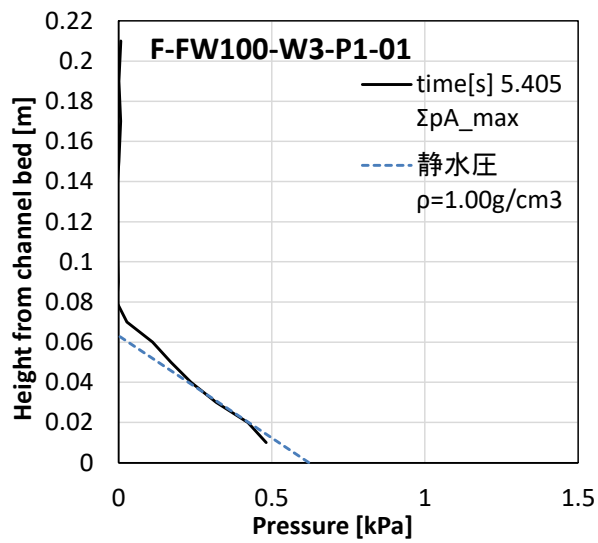


図- 3.115 波力 ΣpA 最大時における圧力鉛直分布（水平床 F，津波 W3，壁位置 P1）

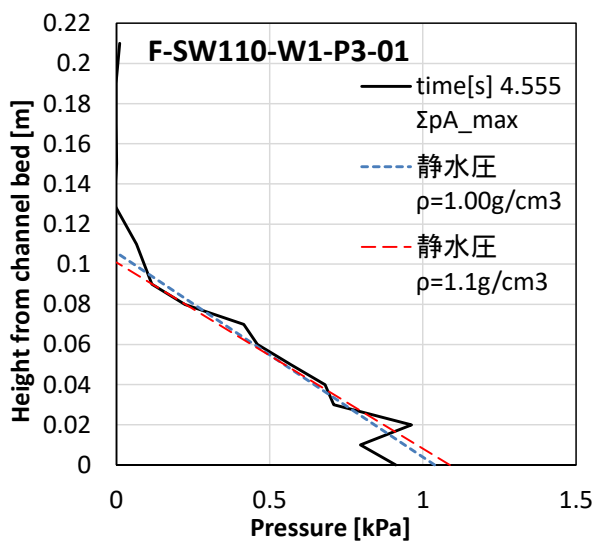
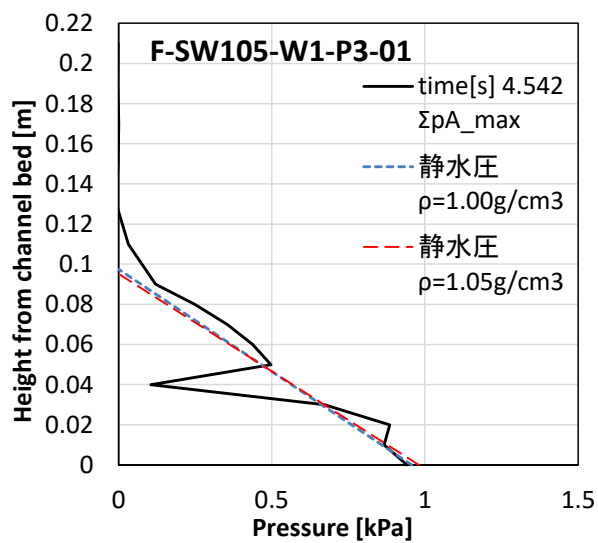
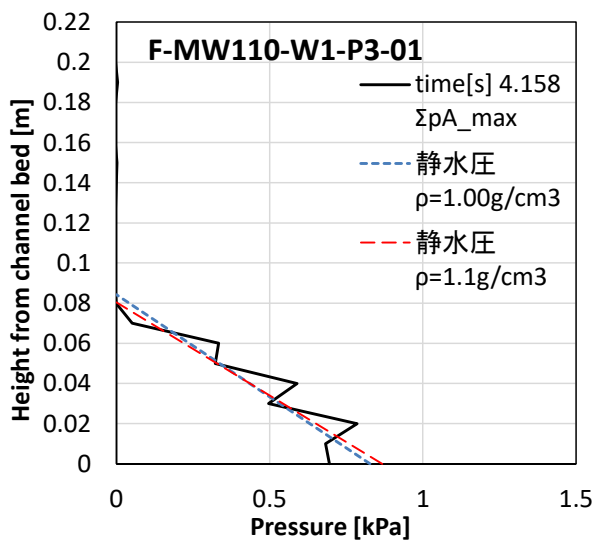
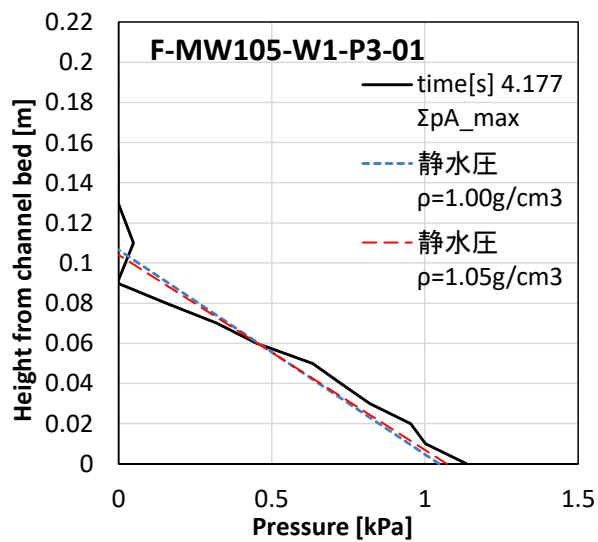
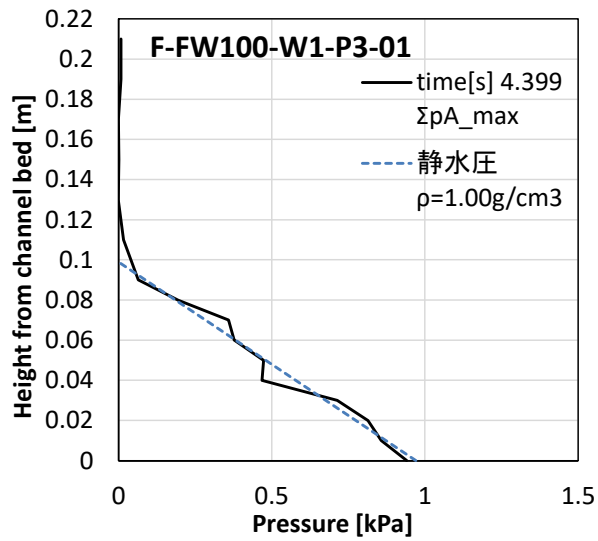


図- 3.116 波力 ΣpA 最大時における圧力鉛直分布（水平床 F，津波 W1，壁位置 P3）

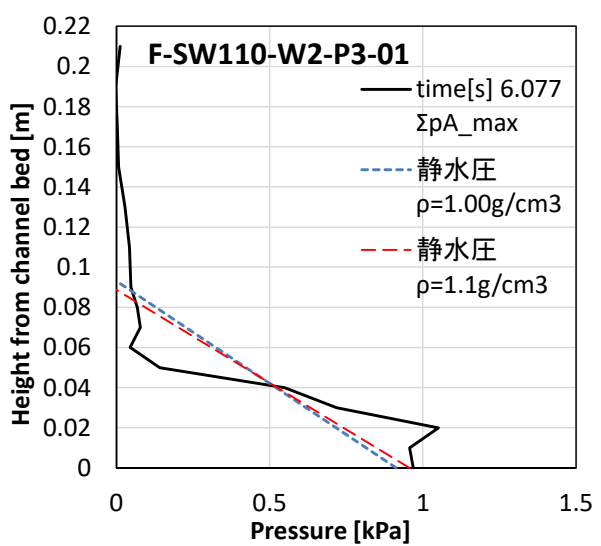
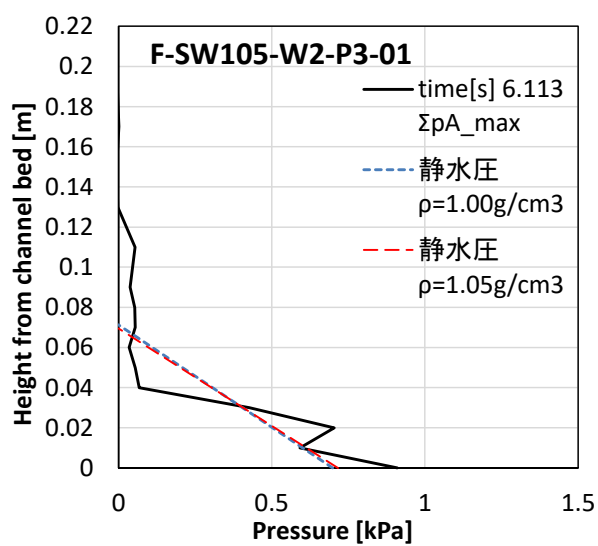
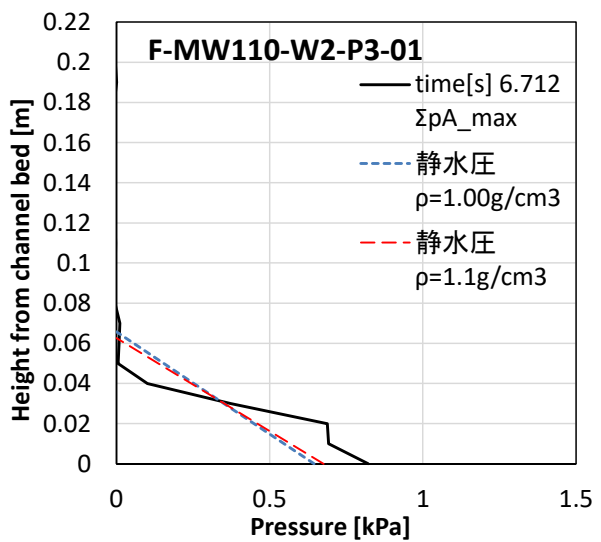
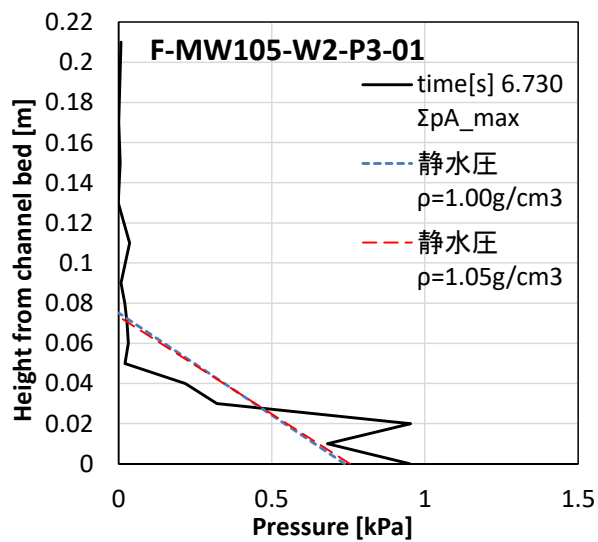
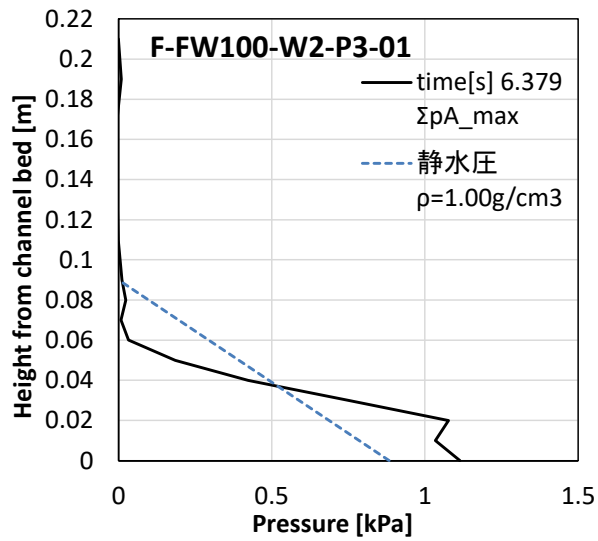


図- 3.117 波力 ΣpA 最大時における圧力鉛直分布（水平床 F，津波 W2，壁位置 P3）

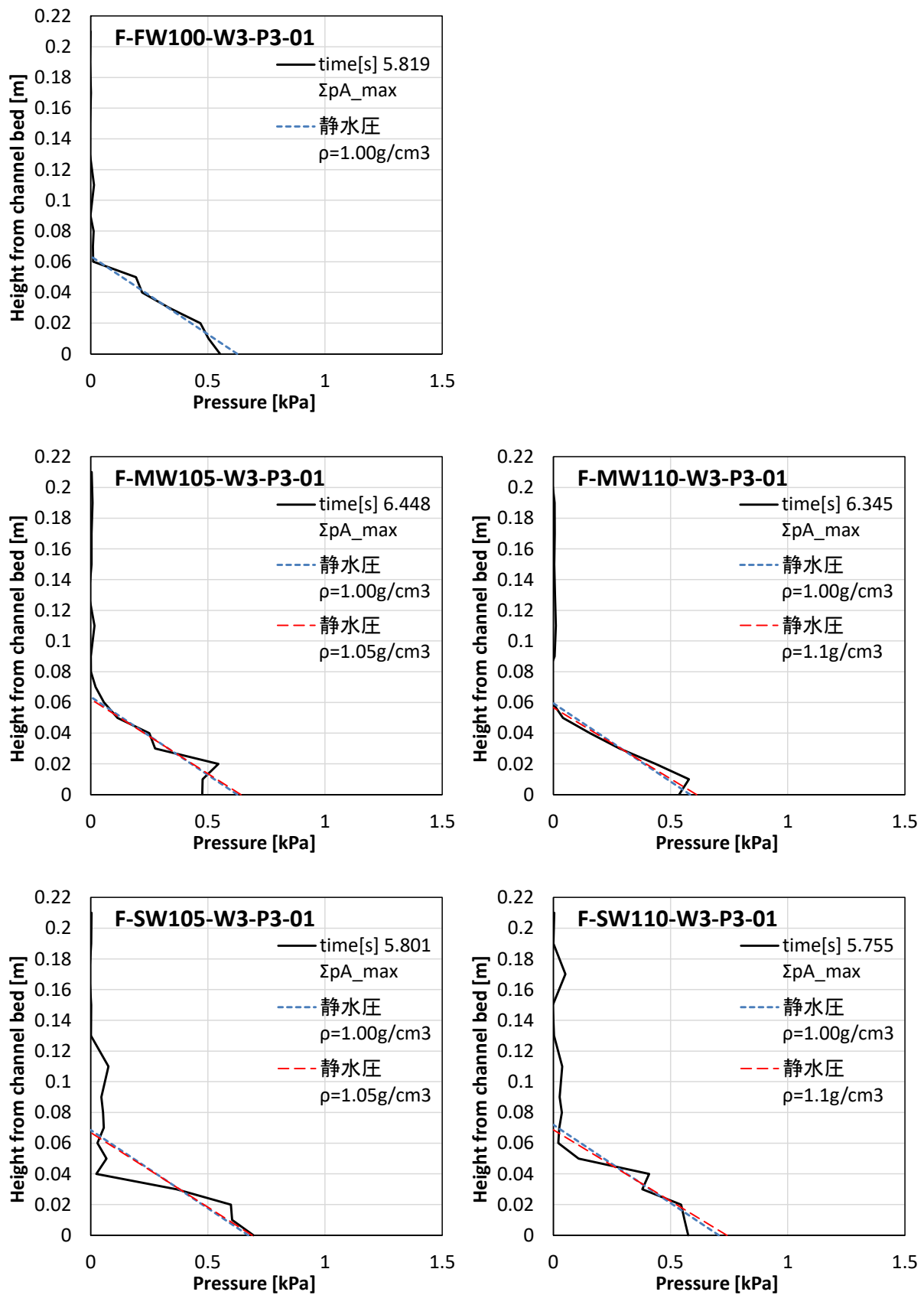


図- 3.118 波力 ΣpA 最大時における圧力鉛直分布（水平床 F，津波 W3，壁位置 P3）

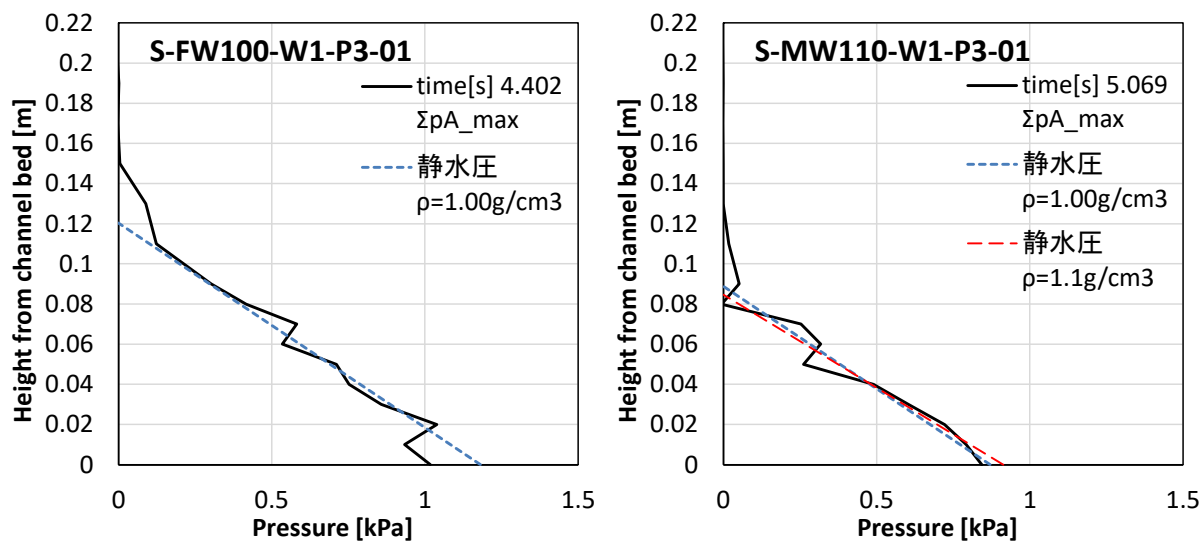


図- 3.119 波力 ΣpA 最大時における圧力鉛直分布（単純勾配 S，津波 W1，壁位置 P3）

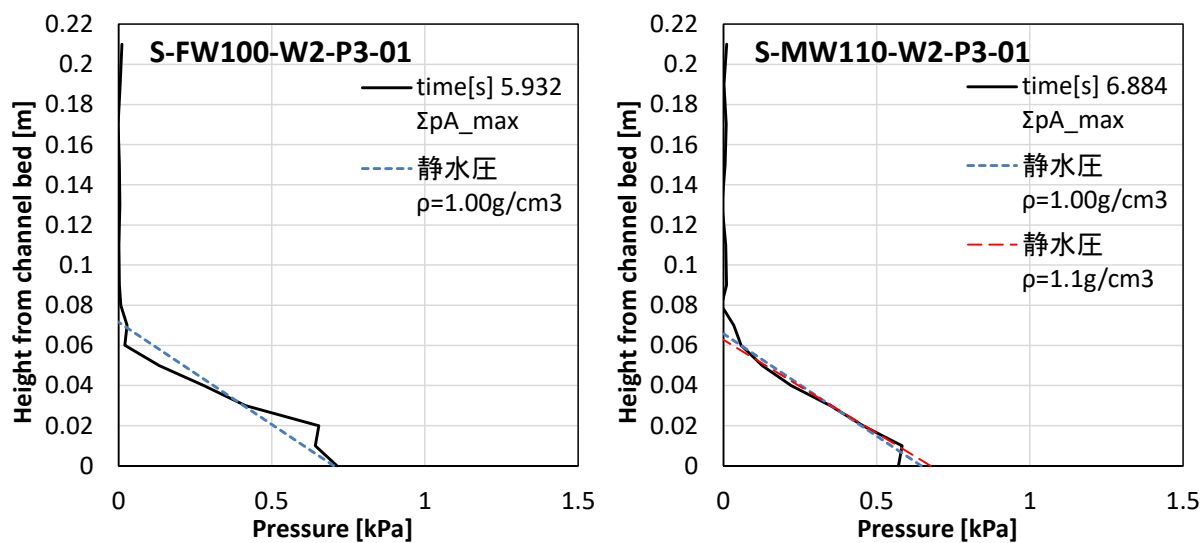


図- 3.120 波力 ΣpA 最大時における圧力鉛直分布（単純勾配 S，津波 W2，壁位置 P3）

4.1. 断面二次元試験

- ・シルト性堆積物の巻き上がりと海底地形及び波形状等に関する知見を収集し、それらと計画案との対応について示す。
- ・海底地形及び波形状等について、シルト性堆積物の巻き上がりの影響が大きい条件を調査する。

[illegible]

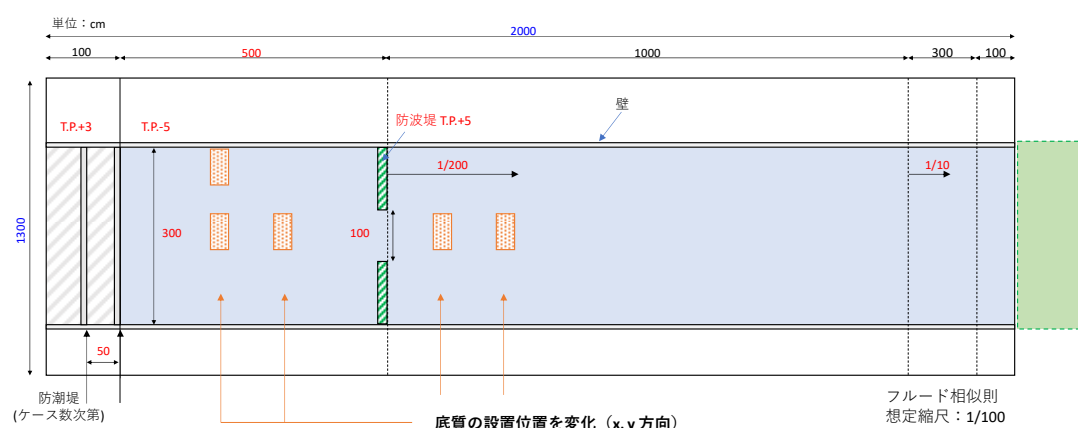
図-4.1 断面二次元試験装置例

4.2. 平面二次元試験

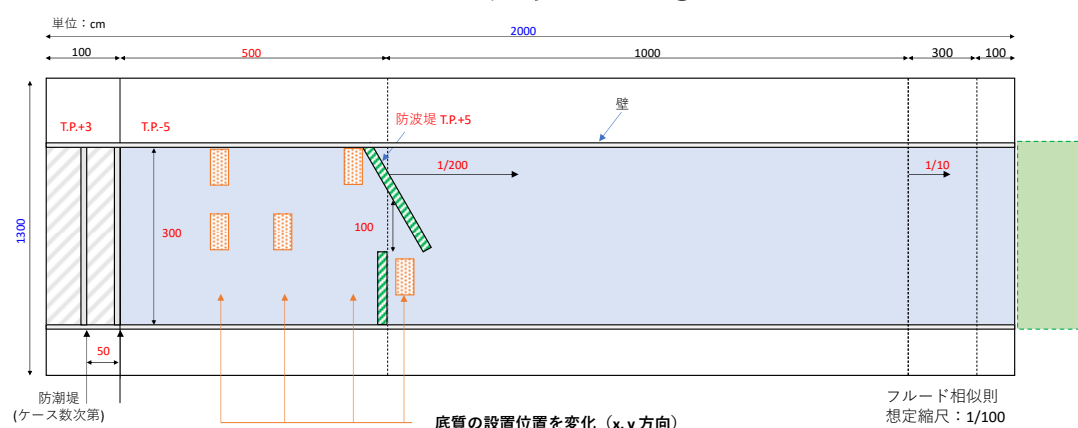
ヘドロ等を模した底質の設置位置が変化するときの、汀線付近における津波の水密度を計測・整理するための、平面二次元試験の方法を調査した。なお本調査にあたり、下記に留意した。

- ・シルト性堆積物の巻き上がりと防波堤等を有する港湾形状及び海底地形、波形状等に関する知見を収集し、それらと計画案との対応について示す。
- ・防波堤等を有する港湾形状及び海底地形及び波形状等について、シルト性堆積物の巻き上がりの影響が大きい条件を調査する。

平面二次元試験装置例を図-4.2に示す。なお、港湾の形状については、過去事業で有識者から頂いた知見を活用し、湾口の縮流により港湾内で対流が発生する条件も設定する。また試験手順として、有識者からの意見の通り、部分的な底質の設置に先立ち、港湾内・外でそれぞれ広範囲に底質を配置し、汀線位置まで巻き上がった底質が到達するかを検討する。そのうえで部分的に底質を配置し、各設置位置による底質濃度の変化を確認する方法が効果的であると考えられる。



(a) 港湾形状パターン①



(b) 港湾形状パターン②

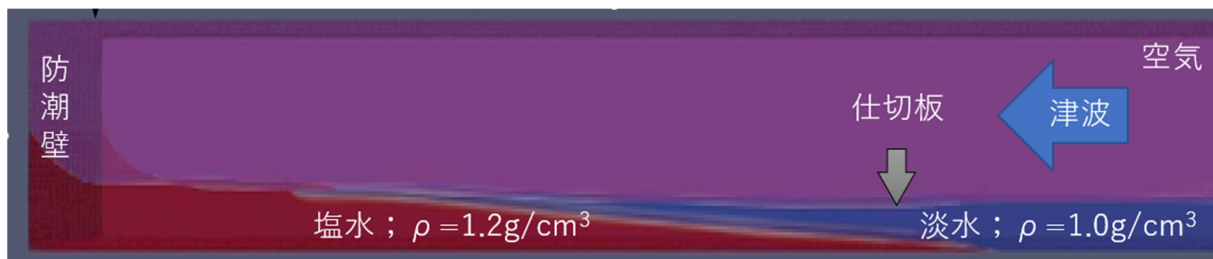
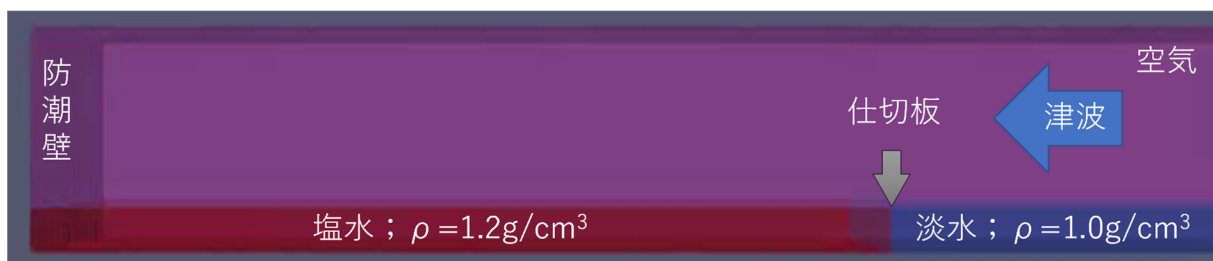
図-4.2 平面二次元試験装置例

4.3. シミュレーション解析

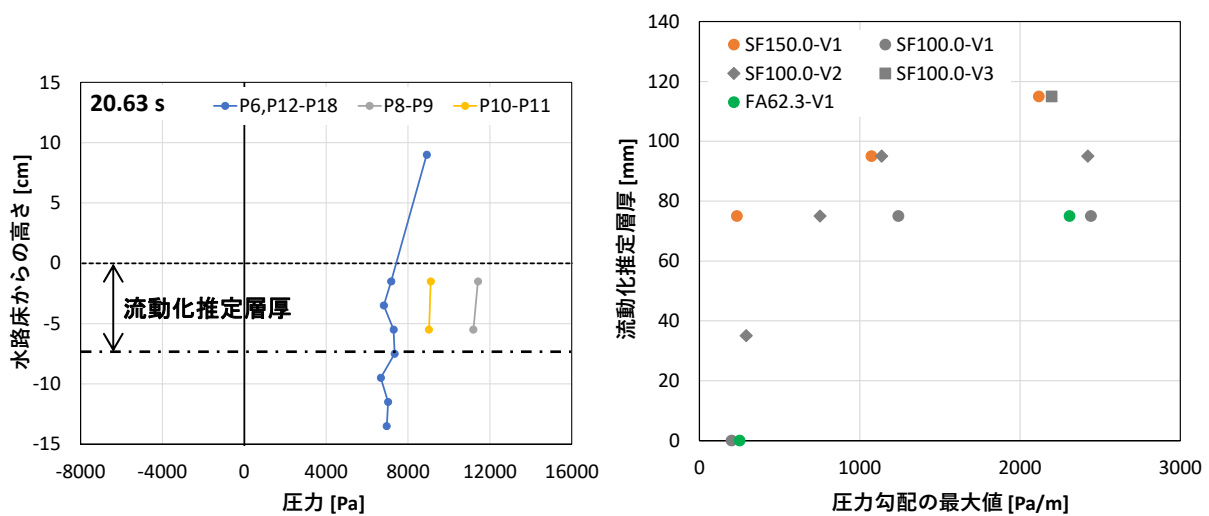
4.1 および 4.2 の結果を再現可能かつ実環境に展開可能な、シミュレーション解析方法を調査した。なお本調査にあたり、下記に留意した。

- ・令和 3, 4, 5 年度実施の過去事業で得られた、底質の巻き上がり及び破壊に関する知見の活用についても検討する。

シミュレーション解析例を図-4.3 に示す。図-4.3 (a)に示す CFD の多層流モデルによる数値シミュレーションでは、過去事業および今年度事業で実施した波圧試験のうち塩水 (SW) のケースを再現し、試験結果と比較することでその妥当性を評価する。さらに、図-4.3 (b)に示す過去事業で実施した巻き上げ試験の結果（流動化推定層厚や巻き上げ速度など）から、底泥の移動・巻上現象を再現するモデルを構築し、上記の数値シミュレーションに導入する案が考えられる。



(a) 多層流モデルによる解析例



(b) 過去事業で得られた底泥破壊に関する知見例

図-4.3 シミュレーション解析例

5. 結果の整理

本事業では、ヘドロ等の泥・シルト性堆積物を含む津波（以降、黒津波とする）に関する文献等を調査して整理し、黒津波の波圧影響に関する水理試験を実施した。また、底質の設置位置の影響評価に関する試験・解析方法の調査を行った。過去の関連事業も含め、ヘドロ等の巻き上がりや波圧への影響に関するデータを整理・分析することで、黒津波の発生条件やその特性等に係る知見を拡充した。本事業で得られた結果を以下にまとめる。

知見調査

- ✓ 有識者のヒアリングを3名に2回実施した。1回目は昨年度の現地調査・水理試験結果の報告および今年度試験内容や方法を、2回目は今年度の試験結果や試験・解析の方法調査の内容について説明し、有識者に頂いた意見を計画や取りまとめに反映した。
- ✓ 文献調査では、現地調査・水理試験・数値解析の項目に分類して整理した。
- ✓ 現地調査に関する既往文献については、東日本大震災後の陸域におけるヘドロ等の堆積物調査に関わる知見を整理した。また、底泥の巻き上げパラメータ（限界せん断応力など）を現地調査により測定する方法に関しても文献を調査した。
- ✓ 水理試験に関する既往文献については、粒径の細かい底質（シルトや粘土など）を対象とした波圧試験および巻上試験を整理した。波圧試験に関しては、固定床の条件でシルトや粘土を含む流体を貯め、ダムブレイクにより津波を発生させて乾燥状態の陸上に遡上させ、壁に衝突させた際の波力を測定している。巻上試験に関しては、移動床の条件でシルトを敷き均し、ヘッドタンクから水を流入させることで底質の巻上げを生じさせ、水位や密度を計測している。
- ✓ 数値解析に関する既往文献については、黒津波を対象とした数値シミュレーションについて整理した。1つは底質混合による流体の見かけの密度と粘度の変化を考慮可能な3次元流体・構造・地形変化・地盤連成数値計算モデルを、もう1つは非線形長波理論に基づく平面2次元解析と3次元解析を組み合わせたモデルを用いて水理試験の再現解析を実施し、モデルの再現性を確認している。

波圧試験

- ✓ 2次元開水路（幅 0.20m×高さ 0.50m）を用いて、流体の密度および粘性等の変化が、遡上する津波の波形や防潮壁に働く波力・波圧の計測試験を実施した。水路内における流体は全て同じ流体とし、護岸汀線の津波高および波形を流体の密度・粘性によらず一致させた。過去事業で実施した波圧試験において、同じ津波の入射エネルギーを密度の異なる流体に伝播した場合に、密度が大きいほど津波高が小さくなり、津波の伝播速度が低減したため、防潮壁に働く波力が小さくなった。そこで過去試験の知見を補うため、護岸汀線で津波高を一致させた場合の流体密度が波力に与える影響を確認するような試験条件を選定した。
- ✓ 淡水 (FW), 濁水 (MW), 塩水 (SW)を用いて流体の密度を3種類 (1.00, 1.05, 1.10 g/cm³)に設定した。濁水 (MW)はシリカフューム ($d_{50}=0.536\mu\text{m}$)を淡水に混ぜて密度を調整した。海底地形は水平床 (F)と単純勾配 (S)の2種類、防潮壁位置は2種類 (P1, P3)とした。同条件において通過波試験は3回、衝突試験は5回繰返し、合計182ケースの試験を実施した。
- ✓ 本試験に先立ち、流体の密度を変化させた濁水 (MW), 塩水 (SW)について、二重円筒型粘度計により粘性試験を実施し、せん断速度に対するせん断応力の変化から粘度を求めた。得られた結果より、流体密度が大きくなるほど粘度は大きくなり、両者の関係は濁水 (MW)の場合に3次の多項式近似、塩水 (SW)の場合に累乗近似で整理できることが分かった。
- ✓ 波検定により、3種類 (W1, W2, W3)の入射津波を設定した。W1は全バルブを一斉に開放して段波状の波（水平床 F, 単純勾配 S とともに沖側で碎波）、W2は各バルブを連続的に開放して徐々に水位が高くなる波（水平床 F は非碎波、単純勾配 S は汀線で碎波）、W3は護岸を越流するような長周期の波とした。
- ✓ 防潮堤（壁模型）の無い状態で実施した通過波試験では、濁水のうち流体密度の高い MW110 ($\rho=1.10\text{g/cm}^3$)の護岸汀線 H6 における最大津波高および波形に合わせるように、他のケース（淡水 FW100, 濁水 MW105, 塩水 SW105, SW110）の造波設定（各バルブの開放タイミングおよび開度、装置内の初期水位）を調整した。
- ✓ 護岸上（H6, H7, H8 位置）における通過波の浸水深および最大流速・先端流速を計測し、フルード数を算定した。濁水についてはプロベラ流速計による流速の計測が困難であったため、映像判読による波先端流速のみを用いてフルード数を算定した。その結果、最大浸水時におけるフルード数は、水平床 (F)の条件で淡水 (FW)は 0.6～1.1 程度、濁水 (MW)は 1.2～1.4 程度、塩水 (SW)は 0.6～1.2 程度であり、単純勾配 (S)の条件で淡水 (FW)は 0.9～1.3 程度、濁水 (MW)は 1.1～1.2 程度であった。
- ✓ 通過波試験の結果より、各水位計測位置 (H1～H8)における最大津波高の変化を流体および密度ごとに整理し、水路側面から撮影したカメラ映像から各ケースの碎波位置を記録した。その結果、護岸汀線 H6 で最大津波高および波形を一致させた場合、流体密度が大きくなると濁水 (MW)は沖側に、塩水 (SW)は陸側に碎波点が移動する傾向を確認できた。
- ✓ 通過波試験結果のうち護岸汀線 H6 を基準とした最大浸水深の変化より、水平床 (F)の場合に流体密度が大きいと最大浸水深も大きくなる傾向が確認できた。特に津波 W2 のケースでは、流体密度が大きいほど最大浸水深が大きくなっている。これは、淡水 (FW)と塩水 (SW)の場合には陸上部で碎波せずに津波先端が先行して薄く遡上するのに対し、濁水 (MW)の場合は陸上部で碎波して崩れながら遡上するためである。さらに陸上部 H7 を基準

とした最大浸水深の変化より、淡水と比較して濁水の流体密度が大きいほど最大浸水深比の傾き（H7 から H8 への波高減衰）が大きくなる傾向が確認できた。これは塩水のケースと傾向が異なり、濁水の粘性による減衰が影響したと考えられる。

- ✓ 通過波試験結果のうち高速度カメラによる映像から判読した津波の先端流速より、濁水 (MW) の場合は流体密度が大きいほど津波の先端流速が速くなる傾向があり、塩水 (SW) の場合は流体密度に関わらずあまり変わらないことが分かった。特に津波 W2 の場合には、淡水 (FW) と塩水 (SW) が陸上部で碎波せずに水位がある程度高くなってから津波先端が遡上するのに対して、濁水 (MW) は陸上部で碎波しながら遡上するためと考えられる。
- ✓ 通過波試験結果のうち汀線付近における通過波の高速度カメラ映像より、津波 W1 のケースでは、淡水 (FW)・濁水 (MW)・塩水 (SW) の全てで波が崩れながら遡上していく様子を確認できた。特に濁水 (MW) は、流体の崩れ状況が大きくなっていた。津波 W2 のケースでは、上述の通り、淡水 (FW) と塩水 (SW) は陸上部で碎波せず、濁水 (MW) は陸上部で碎波しながら遡上していた。津波 W3 のケースでも、淡水 (FW) は陸上部で遡上せず、津波 W2 よりも明確ではないが濁水 (MW) と塩水 (SW) が少し崩れながら遡上していた。
- ✓ 防潮堤（壁模型）を設置した衝突試験では、濁水 (MW) の場合には流体密度が大きくなると、最大打上り高は小さくなり、津波の到達時間は遅くなり、最大波力が小さくなる傾向を示した。一方、塩水 (SW) の場合には流体密度が大きくなると、濁水 (MW) と同様に最大打上り高は小さく、津波の到達時間も遅くなるが、最大波力は大きくなる傾向を示した。塩水 (SW) のケースの中でも水平床 F、壁模型位置 P3、津波 W3 のケースでは、流体の密度以上の波力増大（密度 1.05g/cm^3 の時に淡水 (FW) の波力の 1.19 倍、密度 1.10g/cm^3 の時に淡水 (FW) の波力の 1.25 倍）となった。この要因の一つとして、淡水 (FW) と塩水 (SW) では護岸汀線位置での波形が厳密に一致しているわけではないため、護岸汀線から浸水する際の越流量が淡水 (FW) よりも塩水 (SW) の方が大きい可能性が考えられる。ただし、その越流量については実験で計測できていないため、今後数値解析等による検討が必要である。また、塩水 (SW) の水位は、サーボ式波高計で良好に計測できていない可能性があるため、護岸汀線位置での波形や打上り高の計測結果の評価には注意が必要である。一方、濁水 (MW) は、塩水 (SW) よりも粘性が高く陸上部で碎波するため、それに伴うエネルギー減衰が大きいことから最大波力が低減したと考えられる。
- ✓ 衝突試験による最大波力と通過波試験による最大浸水深より、水深係数を算定した結果、濁水 (MW) と塩水 (SW) とともに流体密度が大きくなると水深係数は小さくなる傾向を示した。
- ✓ 壁模型前面 (H6, H8) での最大水位の時刻前後において、それぞれ生じる波力を衝撃波力と持続波力と定義し、各最大値を整理した。その結果、全体的に衝撃波力よりも持続波力の方が大きく、持続波力が支配的となる傾向であった。
- ✓ 圧力計による波力 ΣpA 最大時における圧力の鉛直分布より、水平床 F、壁模型位置 P3、津波 W2 のケースにおいては流体の種類によらず壁模型下方の圧力が大きくなっているが、そのほかのケースでは静水圧分布程度であることが分かった。

相似則の影響

- ✓ 波圧試験では、フルード相似則を適用した場合の想定縮尺を 1/100 とした。ただし、底質を含む濁水の粘度[Pa・s]は、フルード相似則にしたがうと 1/1000 に小さくする必要があるが、水理試験においてこれを再現することは困難であり、本試験は粘性を過大に評価する傾向にあると考えられる。本試験結果からは、粘性による定量的な影響について詳細は未解明であるため、更なる調査・検討が必要である。
- ✓ 東日本大震災時における宮城県気仙沼市での黒津波の事例を参考にして実際のスケールにおける Reynolds 数（沈降速度に関する相似則： $Re = \rho v L / \mu$ 、ここで L は浸水深、 v は流速、 ρ は流体の密度、 μ は流体の粘性係数を示す）の概略を推定すると、以下の通りとなった。
また、今回の波圧試験における Reynolds 数も推定すると、実際よりも小さい結果となった。
 - ・東日本大震災時に気仙沼市で撮影された映像による推定浸水深 $L=1.5\text{m}$ と流速 $v=2.5\text{m/s}^{1)}$ 気仙沼漁港付近の陸上部で採取された濁水の密度 $^{2)}\rho=1.1\text{g/cm}^3$ 、粘性係数 $^{3)}\mu=0.006\text{Pa}\cdot\text{s}$
→ Reynolds 数 $Re=6.88 \times 10^5$
 - ・波圧試験における通過波の汀線(H6)での濁水(MW110)の最大浸水深 $\eta=0.062\text{m}$ と先端流速 $v=1.216\text{m/s}$ 、濁水(MW110)の密度 $\rho=1.10\text{g/cm}^3$ と粘性係数 $\mu=0.003\text{Pa}\cdot\text{s}$
→ Reynolds 数 $Re=2.70 \times 10^4$
- ✓ 東日本大震災時における宮城県気仙沼市での黒津波の事例を参考にして実際のスケールにおける Dean 数（沈降速度に関する相似則： $\{w/(H/T)\}_r = \{w/(H/T)\}_m$ 、ここで H は波高、 T は波の周期、 w は土粒子の沈降速度、下添え字の r は実際に m は模型を示し、沈降速度は Hallermeier's Relationship に基づき算定）⁴⁾の概略を推定すると、以下の通りとなった。
周期の取り方など多くの仮定に基づく結果であるため、さらに検討が必要である。
 - ・東日本大震災後の気仙沼市で確認された最大浸水深 $^{5)}\eta=16.6\text{m}$ 、推定周期 $T=300\text{s}$ 気仙沼市漁港付近の陸上部で採取されたヘドロの中央粒径 $^{2)}d_{50}=6.74\mu\text{m}$ 過去事業の現地調査により海底で採取された底泥の粒子密度 $^{6)}\rho_s=2.64\text{g/cm}^3$
→ Dean 数 $w=1.36$
 - ・波圧試験における通過波の汀線(H6)での最大浸水深 $\eta=0.062\text{m}$ 、推定周期 $T=20\text{s}$ 底質模型（シリカフューム）の中央粒径 $d_{50}=0.536\mu\text{m}$ と粒子密度 $\rho_s=2.24\text{g/cm}^3$
→ Dean 数 $w=1.23$

試験・解析の方法調査

- ✓ 断面二次元試験では、ヘドロ等を模した底質の設置位置が変化するときの、汀線付近における津波の水密度を計測・整理するための方法を調査した。なお断面二次元試験は、規模の大きい平面二次元試験に先立ち実施することで、シルト性堆積物の特性（密度・粘性等）と津波の特性（津波高・周期等）の関係から巻き上がりの条件をあらかじめ確認することで効率的に試験を進めることができると考えられる。このときの津波の条件については、過去事業で実施した巻き上げ試験の結果（底質の降伏せん断応力と津波の圧力勾配の関係など）を活用することで設定津波高を推定が可能と考えられる。
- ✓ 平面二次元試験では、断面二次元試験と同様に、ヘドロ等を模した底質の設置位置が変化するときの、汀線付近における津波の水密度を計測・整理するための方法を調査した。港湾形状については、過去事業で有識者から頂いた知見を活用し、湾口の縮流により港湾内で対流が発生する条件も設定する。平面二次元試験の手順として、有識者からの意見の通り、部分的な底質の設置に先立ち、港湾内・外でそれぞれ広範囲に底質を配置し、汀線位置まで巻き上がった底質が到達するかを検討する方法が効率的であると考えられる。
- ✓ シミュレーション解析では、断面二次元試験および平面二次元試験の結果を再現可能かつ実環境に展開可能な方法を調査した。CFDの多層流モデルによる数値シミュレーションは、過去事業および今年度事業で実施した波圧試験のうち塩水（SW）のケースを再現し、試験結果と比較することでその妥当性を評価する。さらに、過去事業で実施した巻き上げ試験の結果（流動化推定層厚や巻き上げ速度など）から、津波による底泥の移動・巻上現象を再現するモデルを構築し、上記の数値シミュレーションに導入する案が考えられる。

参考文献

- 1) 久木田駿一，柴山知也：東北地方太平洋沖地震津波における津波襲来時の映像の解析と津波の数値計算，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.68，No.2，pp.I_49-I_54，2021.
- 2) 木瀬晃周，有川太郎：土砂・シルトを含んだ津波の波力に関する実験的研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.76，No.2，pp.385-390，2020.
- 3) 志方建仁，新井田靖郎，木原直人，加藤勝秀：シルト・粘土を含む津波による波力に関する水理模型実験，土木学会論文集，Vol.79，No.17，23-17112，2023.
- 4) 松田達也，三浦均也，佐藤隼可，諫山恭平，澤田弥生：Dean Number を適用した移動床造波水路実験における地盤内水圧応答，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.73，No.2，pp.I_1117-I-1122，2017.
- 5) みやぎ復興のたび：東日本大震災の概況，宮城県震災復興本部，<https://www.pref.miyagi.jp/site/miyagifukkounotabi/overview/index.html>，（参照 2025-01-27）.
- 6) 大成建設株式会社：令和 5 年度原子力規制庁委託成果報告書 耐津波設計・脆弱リティ評価手法の整備に係る防潮堤水理試験（黒津波影響）（令和 5 年分），p.3-11，2024.

