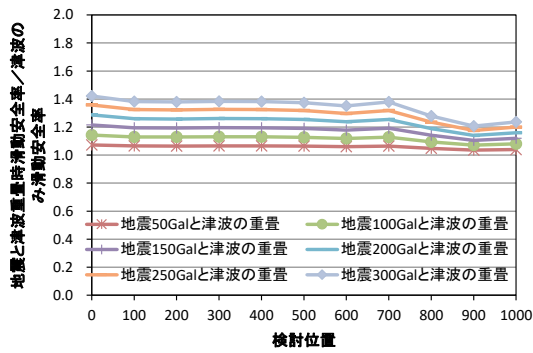


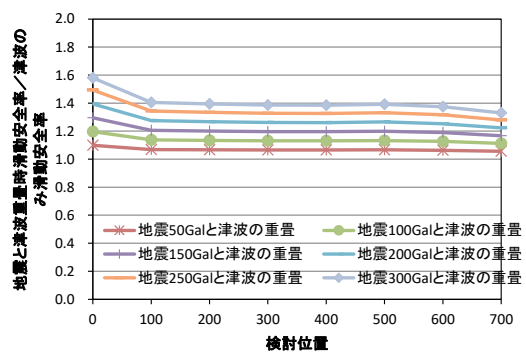
3.3.2 ケーススタディ

(1) 釜石港湾口防波堤

釜石港湾口防波堤についての検討結果を示す。図 3.3-6 は、縦軸に地震と津波重畳時の作用力(波力, 動水圧, 慣性力)と津波のみの作用力(波力)の比をとり、横軸はそれぞれの位置を示している。北堤においては、50Gal で地震と津波が重畳した場合においては、1.04 倍～1.07 倍の作用力の増大であるが、300Gal で地震と津波が重畳した場合は、1.21 倍～1.42 倍と無視できない作用力であることがわかる。同様に、南堤では 50Gal で地震と津波が重畳した場合においては、1.06 倍～1.07 倍の作用力の増大であるが、300Gal で地震と津波が重畳した場合は、1.33 倍～1.58 倍となり、北堤同様無視できない作用力の増大であることがわかる。次に図 3.3-7 は、縦軸に地震と津波重畳時の動水圧とその際の作用力(波力, 動水圧, 慣性力)の比をとり、横軸にそれぞれの位置を示している。動水圧の影響が作用力に占める割合としては、北堤および南堤のどちらも 150Gal では、5%程度と、それほど大きな割合ではない。300Gal では、全体的には 8%程度であるが、最大では 10%程度の割合である。全体の作用力から考えると、動水圧の影響は小さいが、1 割程度作用力が増加する可能性があることが確認できた。以上の結果を基に、地震と津波の重畳時を考慮した際の安全率がどの程度異なるかを確認した。図 3.3-8 は、縦軸に滑動安全率をとり、横軸はそれぞれの位置を示している。北堤において、津波だけで検討した場合に滑動安全率が 1.05 の箇所においても、地震と津波の重畳現象を考慮すると、50Gal の余震が発生した時点で、滑動安全率が 0.99 となり、防波堤が滑動する可能性が考えられる。同様に、南堤で津波のみの場合に活動安全率が 1.39 の箇所においても、地震と津波の重畳現象を考慮すると、250Gal の余震が発生した時点で、滑動安全率が 0.93 となり、防波堤が滑動する可能性が考えられる。東北地方太平洋沖地震津波の際の釜石港湾口防波堤においては、有川ら⁵⁾の検討により、防波堤に発生する最大の水位差の発生時刻のずれにより、早くに発生した箇所において、破壊が先行し、その影響により、それ以外の箇所は水位差が若干低下し、破壊が飛び飛びになっていると考察されている。東北地方太平洋沖地震津波の際の釜石港湾口防波堤においては、津波の水位差によって安全率が 1.0 を下回る箇所が大半を占め、主な要因としては、津波の水位差であることが明確である。しかし、地震と津波の重畳現象を考慮すると、場合によっては作用力が、津波のみでの検討の場合と比べて、1.6 倍程度となる可能性も確認された。

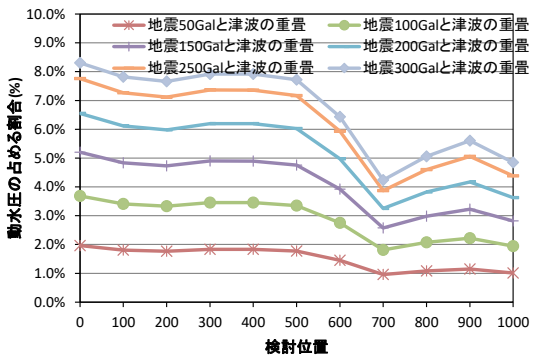


(a) 北堤

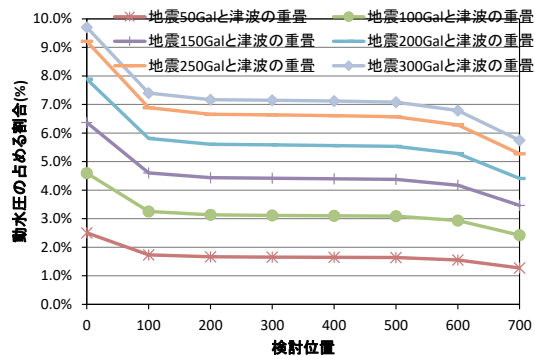


(b) 南堤

図 3.3-6 重畳時における波力の増加率

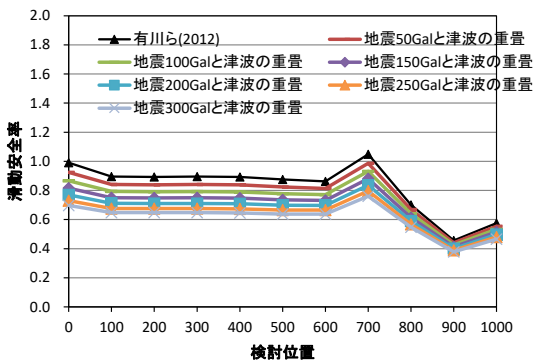


(a) 北堤

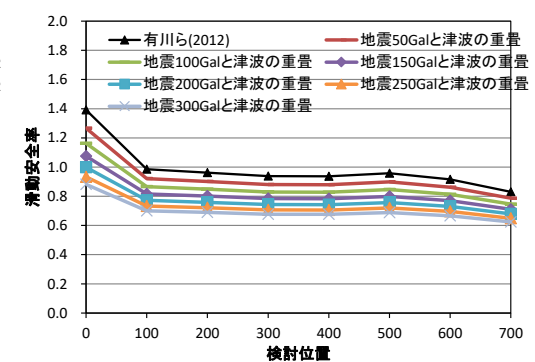


(b) 南堤

図 3.3-7 重畳時における動水圧が占める割合



(a) 北堤



(b) 南堤

図 3.3-8 重畳時における安全率の比較

(2)高知港三里地区防波堤東第一および南

高知港三里地区防波堤東第一⁷⁾⁸⁾⁹⁾と南⁷⁾¹⁰⁾についての検討結果を示す。津波の条件は、設計で用いられている頻度の高い津波である。また、設計において、最大高さの津波来襲時と最大水位差の2ケース検討されていることから、それぞれのケースにおいて地震と津波重畳時における滑動安全率を検討した。表 3.3-2 は検討に用いた防波堤前面及び背面における津波水位を示したものである。最大高さの津波と水位差が最大では、最大高さの津波時の水位差が最大となるケースもあるが、防波堤背面の水位が大きく低下し、水位差の最大時が異なる箇所も確認できる。地震の条件は、50Gal, 100Gal, 150Gal, 200Gal, 250Gal, 300Gal の6ケースを想定した。水位差が最大時における動水圧と慣性力を算出し、検討を行った結果を図 3.3-9 に示す。津波越流のみの場合では、滑動安全率が防波堤東第一の一番小さい箇所では1.8程度、防波堤南で3.2程度であった。高知港の防波堤はどちらも波浪条件で断面が決定されているため、津波に対する安全率が高い傾向にあることがわかる。この結果に地震と津波が重畳した場合を検討すると、防波堤南においては、300Galの余震が重畳したとしても滑動安全率が1.3程度となり、破壊しない事が確認できた。一方で、防波堤東第一においては、250Galまでは滑動安全率が1.0以上であり、破壊しない結果となったが、300Galのケースでは一部区間において、0.95程度となり、破壊の可能性が確認できた。

表 3.3-2 検討に用いた津波水位

(a) 東第一防波堤

	頻度の高い津波				最大クラスの津波	
	水位差最大時		津波最大時		水位差最大時	
	前面津波水位(m)	背面津波水位(m)	前面津波水位(m)	背面津波水位(m)	前面津波水位(m)	背面津波水位(m)
東第一0~20	9.06	8.05	9.23	8.79	9.79	7.63
東第一20~150	9.40	7.81	9.49	8.18	10.10	8.03
東第一150~200	9.65	7.76	9.69	7.87	9.59	7.22
東第一200~300	9.58	7.74	9.59	7.78	9.83	5.29
東第一300~600	9.35	6.83	9.43	7.86	9.83	5.29
東第一600~650	9.35	6.83	9.36	6.86	9.51	4.68
東第一650~992.6	9.91	5.43	9.91	5.43	10.07	4.00
東第一992.6~1080	9.91	5.43	9.91	5.43	12.63	11.87
東第一1080~1100	7.87	5.17	9.29	8.19	12.69	11.95

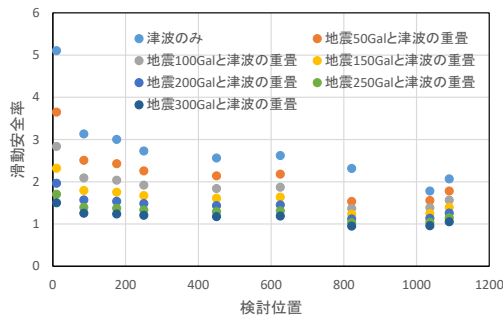
(b) 南防波堤

	頻度の高い津波		最大クラスの津波	
	水位差最大時		水位差最大時	
	前面津波水位(m)	背面津波水位(m)	前面津波水位(m)	背面津波水位(m)
南0~25	9.52	9.42	10.90	8.19
南25~100	6.79	4.78	11.72	9.00
南100~150	6.91	4.97	12.18	9.10
南150~200	9.50	9.38	11.88	9.03
南200~250	9.47	9.26	12.13	9.34
南250~550	9.34	9.36	11.46	8.34
南550~700	9.02	9.10	9.34	5.35
南700~800	8.93	8.82	9.72	5.61
南800~1000	8.86	8.74	9.65	5.38

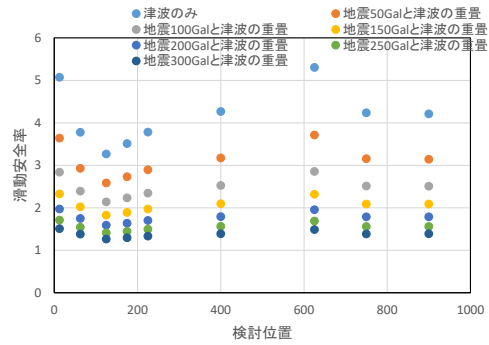
次に、津波最大時と水位差最大時において、どの程度影響が異なるかを防波堤東第一において確認した。結果を図 3.3-10 に示す。縦軸に地震と津波重畳時の滑動安全率と津波越流のみの安全率の比をとり、横軸にそれぞれの位置をとっている。水位差最大時では、50Gal で重畳した場合は 0.71、300Gal で重畳した場合は 0.29 に対して、津波最大時においては、50Gal で重畳した場合は 0.68、300Gal で重畳した場合は 0.26 と、概ね 3%程度、津波最大時の方が水位差最大時のケースと比較して、滑動安全率の低下が大きいことが確認できた。これは、動水圧自体は水位が大きいほど影響が大きいものであり、津波最大時に影響が大きい。水位差最大時は、背面水位の低下により、動水圧の影響が減少するのに対して、津波最大時は防波堤前面および背面水位のどちらも大きくなることから動水圧の影響が大きくなっているためである。

本ケーススタディにおいては、津波最大時の動水圧の低下量より、水位差による影響が大きいため、水位差最大時における地震と津波の重畳現象を検討することが妥当である。しかし、条件によっては、わずかではあるが津波水位最大時における動水圧の低下量が防波堤の安定性の可否を左右する可能性も考えられる。防波堤の安定の検討の際は、動水圧の影響が最も大きくなると考えられる津波水位最大時と、越流の水位差が最大となるケースの両方で検討することが重要である。

最後に、最大クラスの津波の水位差最大時において検討を行った。津波高については、設計で用いられている値を用いた。結果を図 3.3-11 に示す。検討の結果については、頻度の高い津波では、防波堤東第一の一部箇所において 300Gal での倒壊の可能性が確認できたが、最大クラスの津波では、200Gal の余震で滑動安全率が 0.96 となる箇所があり、倒壊の可能性が確認できた。また、防波堤南においては、頻度の高い津波では倒壊の可能性は確認されなかったが、300Gal の余震が津波と重畳した際に、滑動安全率が 0.96 となり、倒壊の可能性が確認された。

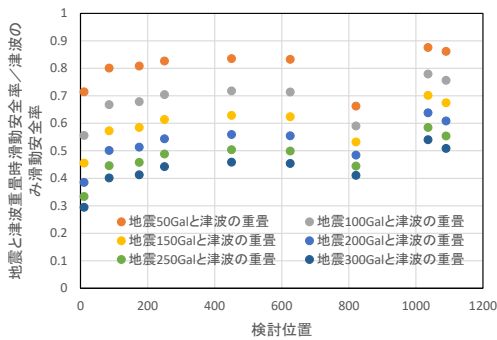


(a) 東第一

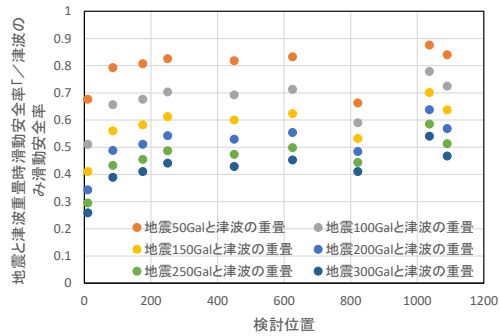


(b) 南

図 3.3-9 頻度の高い津波(水位差最大時)の重畳時における安全率の比較

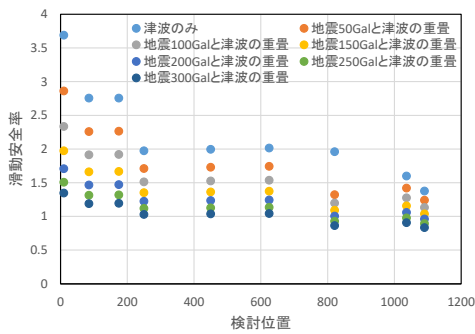


(a) 水位差最大時

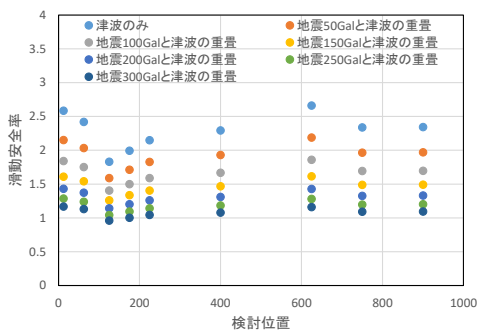


(b) 津波最大時

図 3.3-10 東第一における水位差最大時と津波最大時の重畳時における安全率の比較



(a) 東第一



(b) 南

図 3.3-11 最大クラスの津波(水位差最大時)の重畳時における安全率の比較

3.4 まとめ

地震と津波の重畳時の外力の確認について、現在設計で使われている Westergaard の近似式と静水圧式を用いることによる検討を行い、その結果を踏まえて、防波堤の安定性の検討手法を提案した。結果を以下に示す。

- ・防波堤の変位が小さく加速度の影響が小さい状態では、地震・津波重畳時に防波堤直立部に働く動水圧は、地震単独で発生する動水圧と津波単独で発生する越流水圧の重ね合わせで表現できることが明らかとなった。

- ・縮尺の異なる模型を用いた比較実験結果との比較においても、地震と津波の重畳時における波圧の検討が可能であることを確認した。

- ・加速度の設定については、東北地方太平洋沖地震の加速度の記録より 300Gal を最大として、Westergaard の近似式と静水圧式を用い、地震と津波の重畳時における検討手法を提案した。

- ・釜石港湾口防波堤において、地震と津波が重畳したと想定し、検討を行った結果、300Gal が作用した場合、地震津波の重畳時における、作用力に対して動水圧の占める割合が 10% 程度であることが確認できた。

- ・高知港の東第一防波堤、南防波堤で検討した結果、どちらの防波堤も 200Gal 以上の、ある一定大きな余震が重畳した際に破壊に至ることが確認できた。

- ・余震を適切に設定して検討することにより、地震と津波が重畳した場合においても、防波堤においてどの程度の耐力があるかが確認でき、有効な手法であることが判明した。

参考文献

- 1) Westergaard, H. M. : Water Pressures on Dams during Earthquakes, Journal of ASCE, Transactions, No.1835, pp.418-472, 1933.
- 2) 岡田克寛, 鈴木高二朗, 有川太郎 : 地震と津波の重畳時における防波堤への作用力に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.72, No.2, pp. I_1057-I_1062, 2016.
- 3) 上部達生 : 大水深混成式防波堤の強震記録および動水圧記録に基づく地震応答解析, 港湾空港技術研究所資料, No.746.
- 4) 篠沢巧, 林恒一郎, 平出友信, 井合進, 上部達生 : 大水深混成式防波堤(水深 60m 級)の地震応答観測と解析, 港湾空港技術研究所, No.944.
- 5) 有川太郎, 佐藤昌治, 下迫健一郎, 富田孝史, 辰巳大介, 廉慶善, 高橋研也 : 釜石湾港防波堤の津波による被災メカニズムの検討-水理特性を中心とした第一報-, 港湾空港技術研究所資料, No.1251, 2012.
- 6) 宮島正悟, 小泉哲也, 宮田正史, 竹信正寛, 坂田憲治, 浅井茂樹, 福田功, 栗山善昭, 下迫健一郎, 山崎浩之, 菅野高弘, 富田孝史, 野津厚, 山路徹, 鈴木高二朗, 有川太郎, 中川康之, 佐々真志, 森川嘉之, 水谷崇亮, 小濱英司, 加島寛章, 高橋英紀, 大矢陽介, 遠藤仁彦, 原田卓三, 青木伸之, 佐瀬浩市, 山本貴弘, 早川哲也, 林誉命, 西谷和人, 白井正興 : 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震による港湾施設等被害報告, 国土技術政策総合研究所資料, 第 798 号.
- 7) 四国地方整備局高松港湾空港技術調査事務所 : 平成 25 年度高知港三里地区防波堤津波対策検討業務報告書.
- 8) 四国地方整備局高松港湾空港技術調査事務所 : 平成 25 年度高知港三里地区防波堤(東第一)基本設計報告書.
- 9) 四国地方整備局高松港湾空港技術調査事務所 : 平成 26 年度高知港三里地区防波堤津波対策検討業務報告書.
- 10) 四国地方整備局高松港湾空港技術調査事務所 : 平成 28 年度高知港三里地区防波堤耐津波断面検討業務報告書.

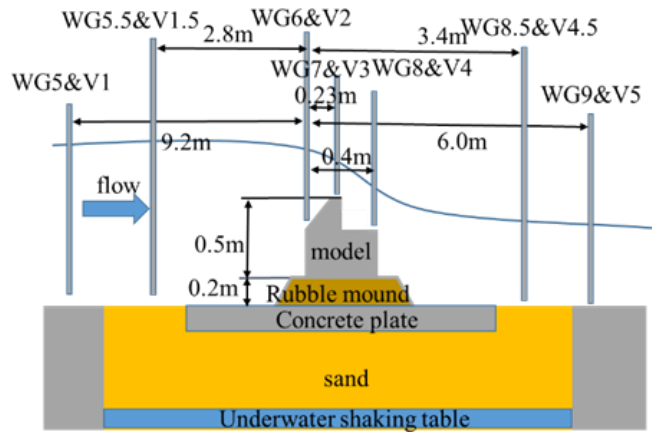
4. 地震と津波重畳時における防波堤の形状の違い

4.1 実験概要

一般的な防波堤の形状については、3章1節「地震と津波の重畳時における既往外力検討手法の適応性の確認」において、Westergaard の近似式と静水圧式を用いることにより、地震と津波重畳時における波圧が表現でき、検討手法として適応が可能であることを確認した。一方で、防波堤は、いろいろな構造形式のものが存在する。そこで、構造の異なる構造物として、上部斜面堤について実験を行い、地震と津波の重畳時における既往の検討手法の確認と、それぞれの構造物に与える影響について検討した。

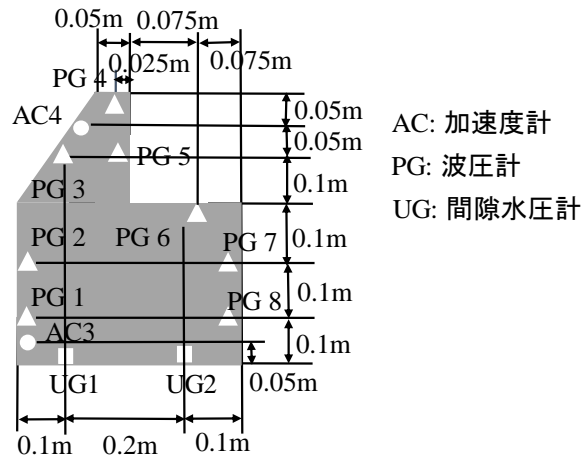
実験においては、パラペットを有する防波堤と同様、大規模波動地盤総合水路で行った。還流装置を用いて、越流状態を再現し、同時に加振を行い、その際における防波堤に与える影響の違いについて波圧等の計測を行い、確認した。模型の状態としては、地震と津波の重畳現象における防波堤に与える影響について確認するため、完全に固定したものと、上部斜面堤においては、実際の破壊過程を確認するため、固定をせず破壊の状態まで行ったものの2つの条件で行った。

上部斜面堤の模型は、固定実験においては高さ 0.50m、幅 0.4m の木製で、エキスパンドメタルで被覆したマウンドと固定し、全体はコンクリート板に固定した状態で行った(図 4.1-1, 図 4.1-2)。非固定実験においては高さ 1.08m、幅 0.87m のコンクリート製の模型を用いた。防波堤模型は 0.25m のマウンド上に設置した(図 4.1-3, 図 4.1-4)。



WG: 波高計
V: 流速計

(a) 実験断面図

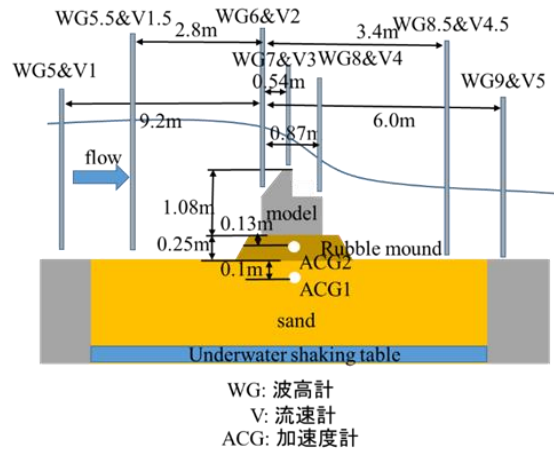


(b) 計測器配置図

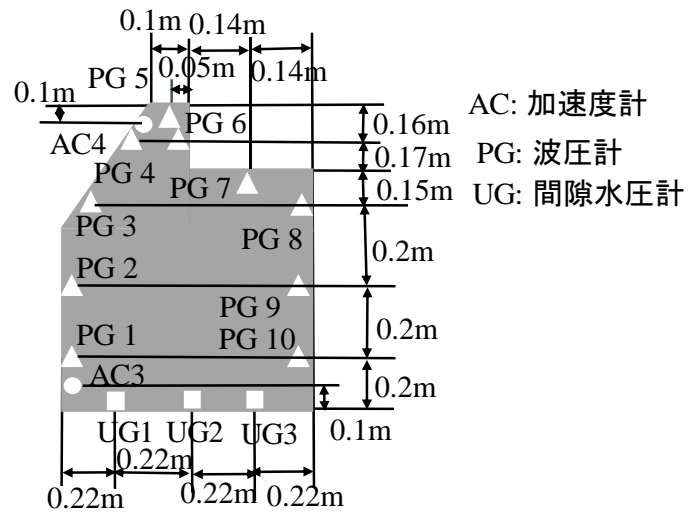
図 4.1-1 上部斜面堤(固定実験)の実験断面図



図 4.1-2 上部斜面堤(固定実験)の模型設置状況



(a) 実験断面図



(b) 計測器配置図

図 4.1-3 上部斜面堤(非固定実験)の実験断面図



図 4.1-4 上部斜面堤(固定実験)の模型設置状況

4.2 上部斜面堤における地震と津波重畳時の荷重の検討

4.2.1 加振実験による既往検討手法の確認

パラペットを有する防波堤同様，それぞれの波圧計位置における動水圧を算出し，比較を行った．結果を図 4.2-1 に示す．図 4.2-1 において，縦軸が模型底面から波圧を確認した鉛直高さで，横軸が Westergaard の近似式より得られた結果を実験で得られた結果で除したものである．結果は，模型前面直立部では 1.04 倍，模型背面では 0.95 倍程度であった．模型前面斜面部は，1.13 倍となり直立部と比較して差が大きい結果となった．斜面部においては直立部と比較して差が大きくなる．

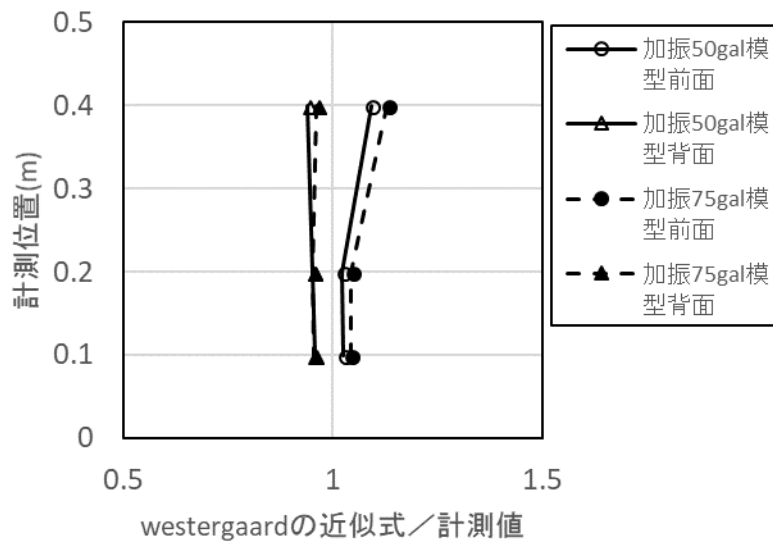


図 4.2-1 上部斜面堤(固定実験)の Westergaard の近似式と実験計測値の関係

4.2.2 越流実験による静水圧式との比較

上部斜面堤の越流時における波圧について，静水圧による検討を行った．結果を図 4.2-2 に示す．縦軸が模型底面から波圧を確認した鉛直高さで，横軸が静水圧式より得られた結果を実験で得られた結果で除したものである．越流における波圧の変化については，模型前面直立部は，実験値に対して計算値は 1.0 倍程度であったが，模型斜面部においては，1.3 倍程度となった．模型背面は，水位が低下するにつれて，計算値と実験値の差が大きくなる結果となった．

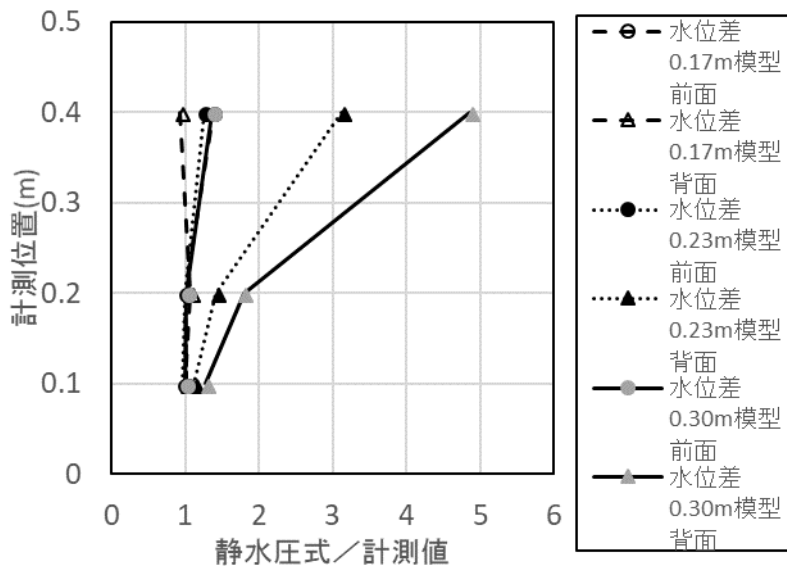


図 4.2-2 上部斜面堤(固定実験)の静水圧式と実験計測値の関係

4.2.3 津波が異なる場合の地震との重畳による防波堤の影響の確認

次に、水位差を変えて、越流条件が異なる場合の地震による影響の違いについて確認を行った。固定実験した模型を用い、加振強度を 50Gal に設定し、越流条件を変えて比較を行った。加振のみの実験と比較した結果を図 4.2-3 に示す。図の縦軸は模型底面から波圧を確認した鉛直高さで、横軸は実験値と Westergaard の近似式と静水圧式で求めた結果について比をとったものである。地震と津波の重畳時においても、加振のみと越流のみの時と同様に、模型前面斜面部は越流と加振による影響が模型直立部よりも小さいことがわかった。

Westergaard の近似式と静水圧式と実験値の関係は、斜面部と背後の水深が低下した場合の背後越流部においては、把握が困難であるが、直立部については、精度よく把握できるものと考えられる。なお、模型背面は水位低下の影響が大きく、模型底面から 0.4m の位置は計算では把握できなかった。これは、背後水位が計測位置より下がったためであると考えられる。

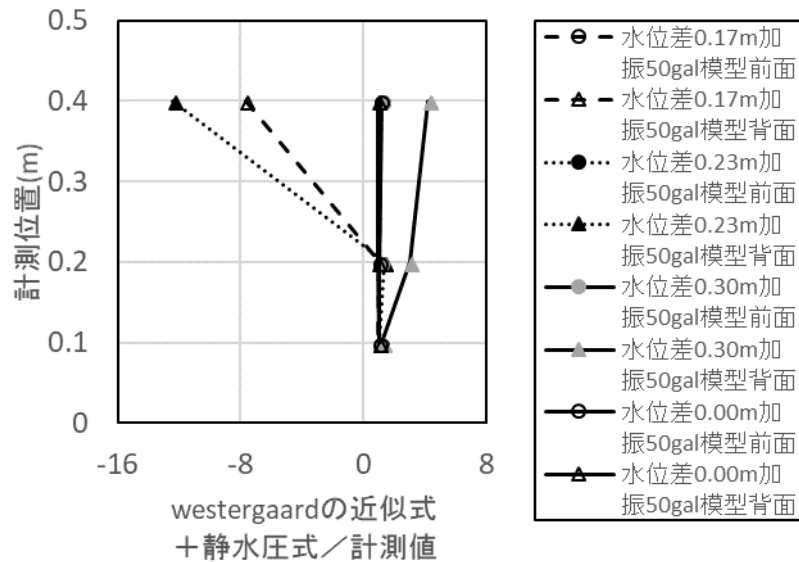


図 4.2-3 上部斜面堤(固定実験)の Westergaard の近似式と静水圧式の
足し合わせと実験計測値の関係

4.2.4 地震と津波が重畳した際の既往の検討手法の適応性の確認

Westergaard の近似式と静水圧式を用いて、地震と津波の重畳現象における検討手法の適応性の確認を行った。結果を図 4.2-4 に示す。縦軸が Westergaard の近似式と静水圧式より求めた、地震と津波の重畳時の最大及び最小波圧で、横軸が実験結果より得られた波圧である。図は各ケースで波圧を計測した箇所について、地震と津波を重畳させた時の最大及び最小の波圧をプロットしたものである。点線は 10%、破線は 20%のラインを示している。上部斜面堤は、パラペットを有した防波堤と比べてばらつきが大きくなったが、概ね 20%の範囲に入る結果となっているが、斜面部の影響や、背面の水位の影響が大きい箇所については、再現ができていない。

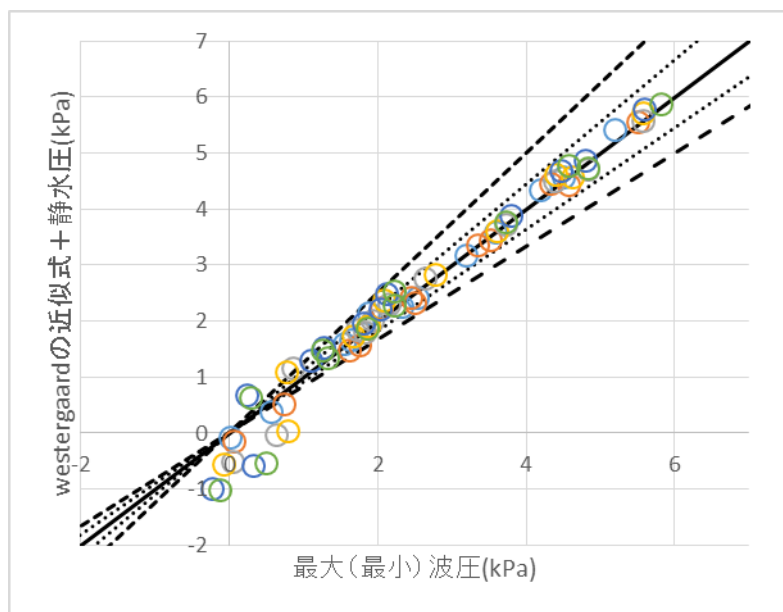


図 4.2-4 上部斜面堤(固定実験)の Westergaard の近似式と静水圧式の
足し合わせと実験計測値の関係

4.3 上部斜面堤における地震と津波重畳時の安定性の検討

4.3.1 地震と津波重畳時における防波堤の安定性

上部斜面堤構造の防波堤の安定性について、計測した水圧の結果を用いて検討した。検討は加振前の越流状態と越流と加振の重畳時の最小安全率を比較した。転倒安全率については、加振前と加振後は安全率が低下したが、1.0を下回ることはなかった(図 4.3-1)。滑動安全率についても、同様に、加振前と加振後においては、安全率が低下したが、1.0を下回ることはなかった(図 4.3-2)。加振前と加振中の安全率の比をとって安全率の変化の比較した(図 4.3-3)。転倒安全率の比は水位差に関係なく 0.9 倍程度であった。滑動安全率の比は 0.6 倍～0.9 倍とばらつきがあった。また、パラペットを有した直立型混成堤と同様に転倒安全率の比は水位差に関係なく 0.9 倍程度であった。滑動安全率の比は 0.6 倍～0.9 倍とばらつきがあった。これは、模型に対して外力が働く際に、抵抗している場合は安全率の比が 0.6 倍程度まで低下し、限界を超えた場合は、変位によって外力が緩和され、安全率の低下が小さくなったものと考えられる。そのため、水位差が増大することにより安全率の低下が軽減される訳ではない。

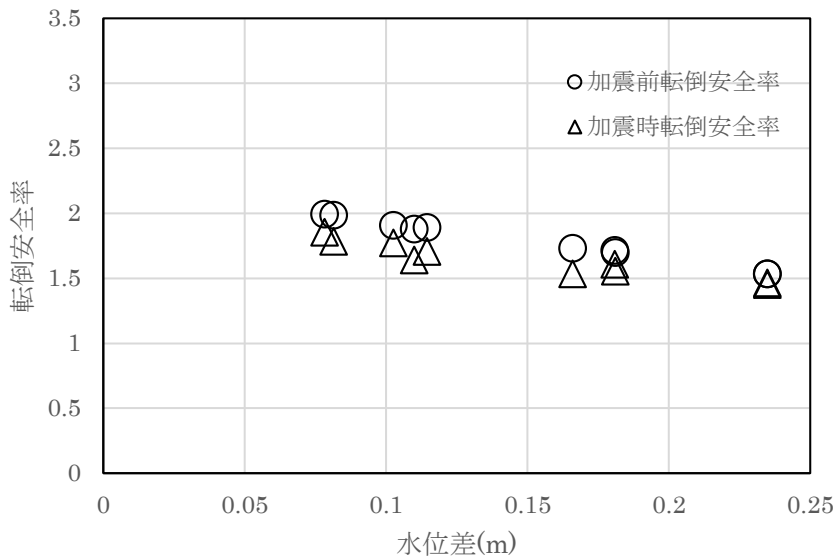


図 4.3-1 加振前と加振中の転倒安全率と水位差の関係¹⁾

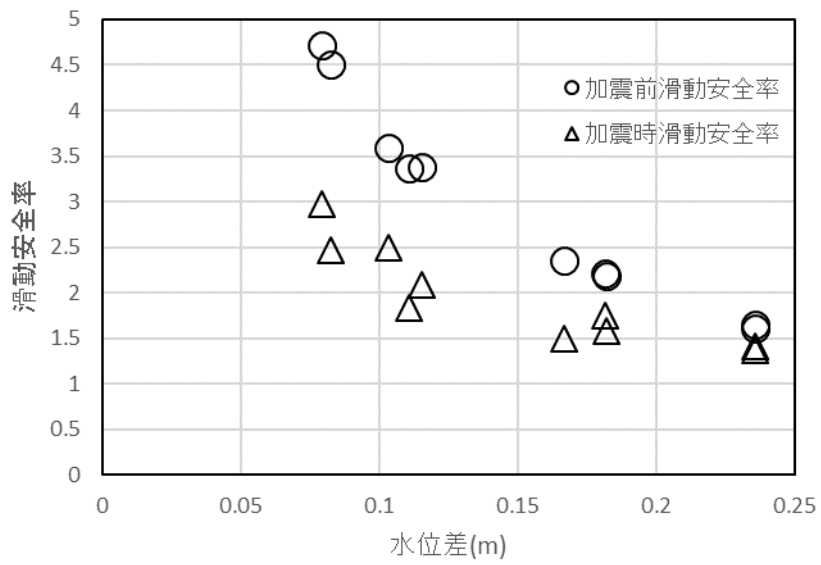


図 4.3-2 加振前と加振中の滑動安全率と水位差の関係¹⁾

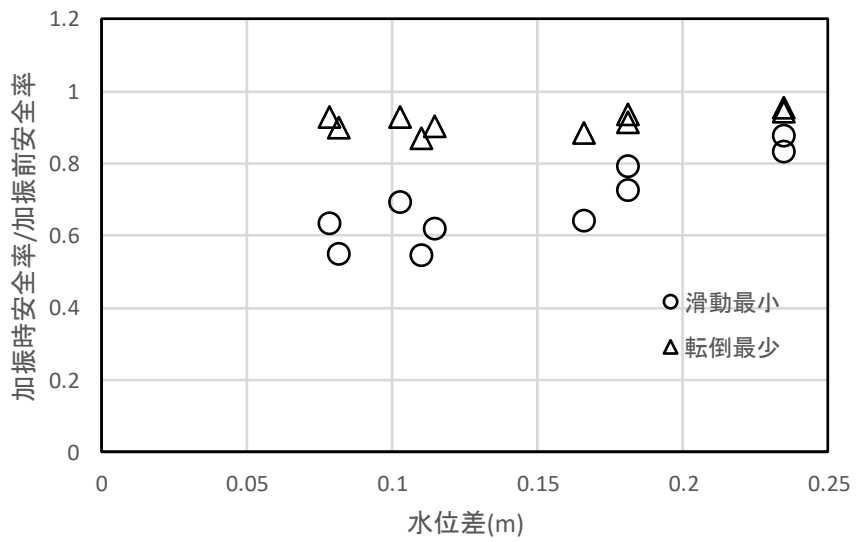


図 4.3-3 加振前と加振中の安全率の比と水位差の関係¹⁾

4.3.2 上部斜面堤の越流とマウンド洗掘

(1) 上部斜面堤における水位と流速

上部斜面堤の越流時における水位と流速について確認した。(図 4.3-4, 図 4.3-5) 模型前面においては, 沖側と比較して水位は最大で 0.01m の低下, 流速は 0.21m/s の増加が確認できたが, 変化量はごくわずかである。上部斜面堤の天端部においては, 沖側と比較して水位は最大で 0.07m 低下し, 流速は 1.47m/s 増加した。模型背面においては, 沖側と比較して最大で 0.25m の低下が確認されたが, 流速は全て岸側から沖側方向の逆向きの流速が確認でき

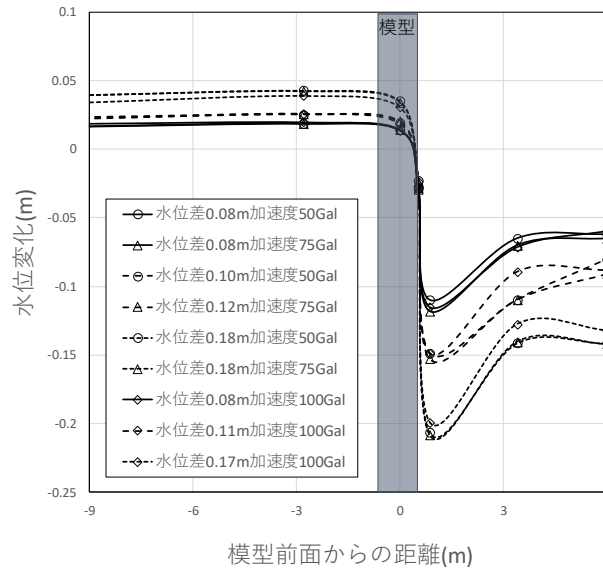


図 4.3-4 上部斜面堤の水位変化

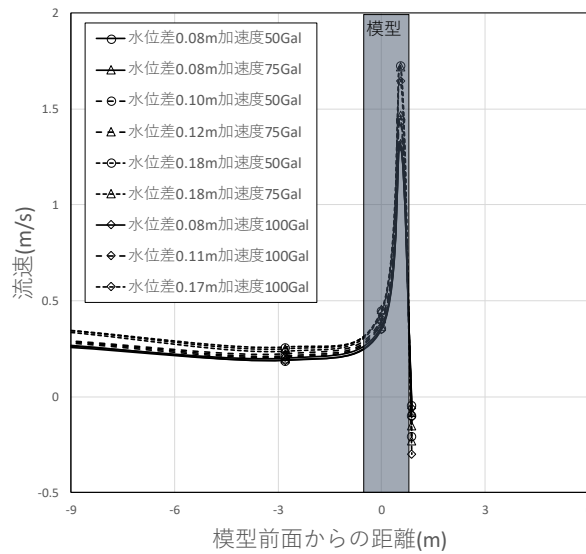
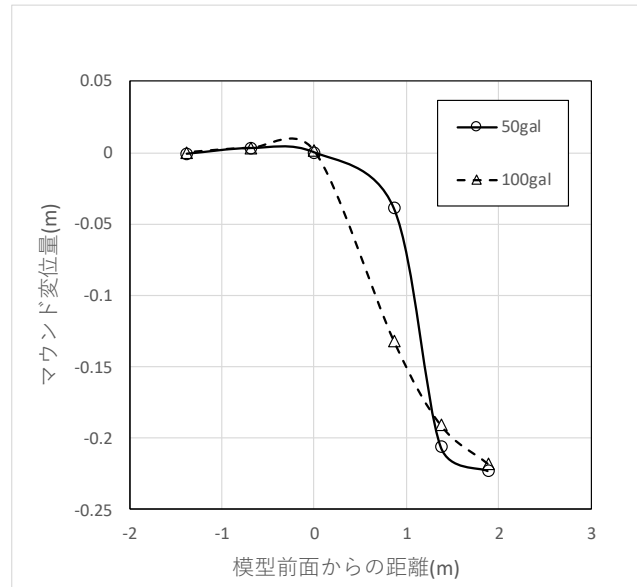


図 4.3-5 上部斜面堤の流速

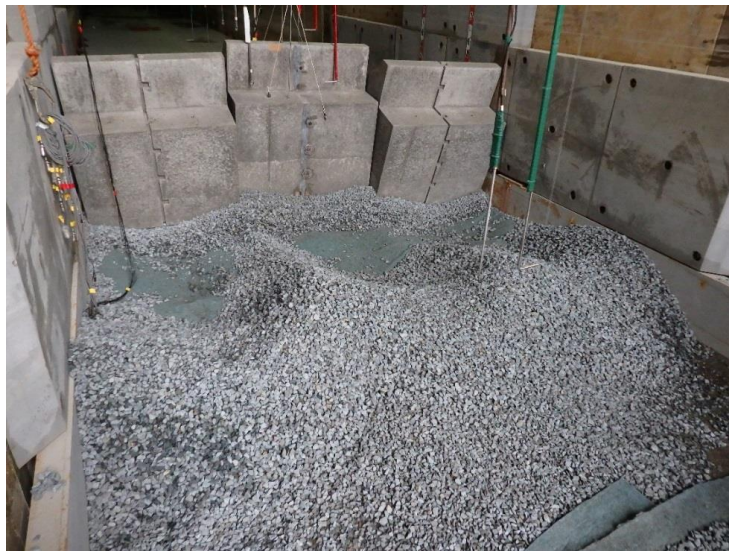
た。これは、上部斜面堤の越流時においては、模型天端部から背面に落水するときに、模型後方のステージ部には落水せず、直接模型後方の水面に落水しているため、模型後方は逆向きの流速が確認できたと考えられる。

(2) 上部斜面堤の越流時における背後マウンドへの影響

上部斜面堤の越流時における背後マウンドへの影響について、実験後の地盤計測を行い確認した(図 4.3-6)。水位差が 0.18m までのケースでは越流時における背後マウンドへの影響は確認できなかった。水位差が 0.23m のケースでは、法肩部において 0.22m の沈下が確認されたが、模型背後においては 0.04m の沈下で、影響が少なかった。同じ水位差が継続すると徐々にマウンドの洗掘が進行し、最終的には模型背後においても 0.13m の沈下を確認できた。この結果より、上部斜面堤においては越流が発生した場合、天端流速が増大することと、水面と天端の高低差が大きくなることにより、模型直背後の洗掘を抑制していると考えられる。しかし、その越流が継続することにより、マウンドの洗掘が徐々に進行し、最終的には模型背後も沈下し、模型に影響を与えたものと考えられる。



(a) 上部斜面堤の越流時におけるマウンド変位量



(b) 実験後状況

図 4.3-6 上部斜面堤の越流時におけるマウンド変位量と実験後状況

4.4 まとめ

地震と津波の重畳時において、防波堤の形状の違いについて上部斜面堤を対象に検討し、以下のような知見を得た。

- ・上部斜面堤のように、前面に斜面部を有する構造においては、斜面部の影響を Westergaard の近似式では再現できない。また、背面の複雑な落水状況を静水圧式では再現できないことが明らかとなった。

- ・上部斜面堤においては、変位の影響も考えられ、越流の影響による、地震と津波重畳時の明確な加速度の低下は確認できなかった。

- ・上部斜面堤においては、形状の影響により、直背後のマウンドに洗掘が発生し、地震と津波の重畳時の少しの変位で、大きく破壊する可能性が確認された。

参考文献

- 1) Okada, K., Suzuki, K. and Arikawa, T. : CONSIDERATION CONCERNING THE INFLUENCE ON A BREAKWATER IN THE SUPERPOSITION OF EARTHQUAKE AND TSUNAMI, INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 2016.

5. 防波堤の地震と津波の重畳時における数値計算の適用性の検討

5.1 数値計算概要

これまでの検討では、水理模型実験を行い、設計式の適用性について検討してきた。一方で、数値計算の適用性が確認できれば、より詳細に防波堤に働く波圧が確認できる可能性が考えられる。そこで、防波堤の地震と津波の重畳時において、数値計算の適用の可能性について検討を行った。数値モデル水槽による検討手法として、粒子法を用いて検討を行った。粒子法は、数値流体シミュレーション手法(Navier-Stokes ソルバー)の一つであり、移流項を介さない完全ラグランジュ型のアルゴリズムにより、水表面の大変形などの砕波問題を含む複雑流の追跡に有効であり、津波と地震の重畳現象という複雑な挙動に対しても再現の可能性が考えられることから、本手法を用いることとした。

本研究では、粒子法では非圧縮性流体を対象とする半陰解法が導入された ISPH 法¹⁾(Incompressible Smoothed Particle Hydraulics)をベースに高精度オプションを導入した CISP-HS-HL-ECS 法を用いる²⁾。

CISP-HS-HL-ECS 法は、以下の連続式および運動方程式が用いられている。

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (5.1-1)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \quad (5.1-1)$$

ここで、 ρ ：密度、 t ：時間、 \mathbf{u} ：流速ベクトル、 p ：圧力、 μ ：粘性係数、 \mathbf{g} ：重力加速度である。

本検討では、地震のみと津波のみのそれぞれの実験に対する再現性を確認し、その後、地震と津波を重畳させ、実験時に得られた波圧との比較を行い、適用性を検討した。

5.2 振動に関する計算

5.2.1 計算概要

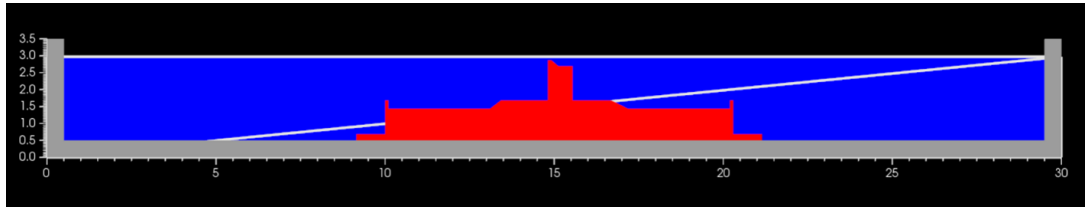
振動の計算について、次に示す流れで計算精度の確認を行った。計算の実施ケースについて表 5.2-1 に示す。初めに、粒子サイズ 0.05m で最大計算時間刻みによる計算精度について確認を行う。次に、粒子サイズ 0.02m で実験で振動のみを確認した 4 ケースについて再現計算を行い、計算精度の確認を行う。

表 5.2-1 振動計算実施ケース

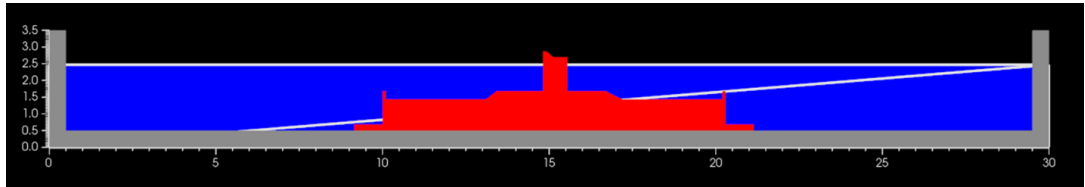
	粒子サイズ	水位	加速度	粒子数	入力変位時間刻み	最大計算時間刻み	備考
case1	0.05m	模型天端 + 10cm	75Gal	35,620	0.01s	0.01s	時間刻み確認計算
case2	0.05m	模型天端 + 10cm	75Gal	35,620	0.001s	0.001s	時間刻み確認計算
case3	0.05m	模型天端 + 10cm	75Gal	35,620	0.0005s	0.0005s	時間刻み確認計算
case4	0.02m	模型天端 + 10cm	75Gal	223,350	0.0001s	0.0001s	再現計算
case5	0.02m	模型天端 + 10cm	50Gal	223,350	0.0001s	0.0001s	再現計算
case6	0.02m	模型天端 - 40cm	75Gal	187,613	0.0001s	0.0001s	再現計算
case7	0.02m	模型天端 - 40cm	50Gal	187,613	0.0001s	0.0001s	再現計算

5.2.2 計算モデルと計算精度の確認方法

計算モデルは、実験時における振動台周辺を振動台枠から前後 10m 程度まで再現した。計算領域全体では、長さ 30.0m、高さ 3.5m とした。図 5.2-1 (a)は模型天端+10cm の計算モデルを示している。図に示すグレーは壁粒子、青は水粒子、赤は振動台粒子として設定している。計算においては、モデルを作成した後に、そのモデルに対する粒子を作成し、振動台粒子に対して、変位の時刻歴データを入力し、変位を与え、動水圧の検討を行った。同様に模型天端-40cm の計算モデルを図 5.2-1 (b)に示す。また、動水圧の確認については、実験時に波圧計において動水圧を計測した箇所と同じ箇所の波圧を抽出し、動水圧の確認を行った。実験時における波圧の計測箇所及び、計算時における波圧の抽出箇所を図 5.2-2 に示す。計算時の振動台粒子に与える変位については、計算の最大時間刻みより大きくする必要があるのである。そのため、それぞれ検討する最大時間刻みに対して、同じ時間刻みで入力変位のマトリックスデータを作成し、計算時に入力条件として使用している。計算では、計算開始から 5s 後に加振を開始し、計算時間 25s まで加振を行うようにデータを作成した。また、加振の最初の 3 波はエンベロープを設定している。今回の計算に用いた、入力変位のマトリックスデータの例をグラフにしたものを図 5.2-3 に示す。



(a) 模型天端+10cm



(b) 模型天端-40cm

図 5.2-1 計算モデル

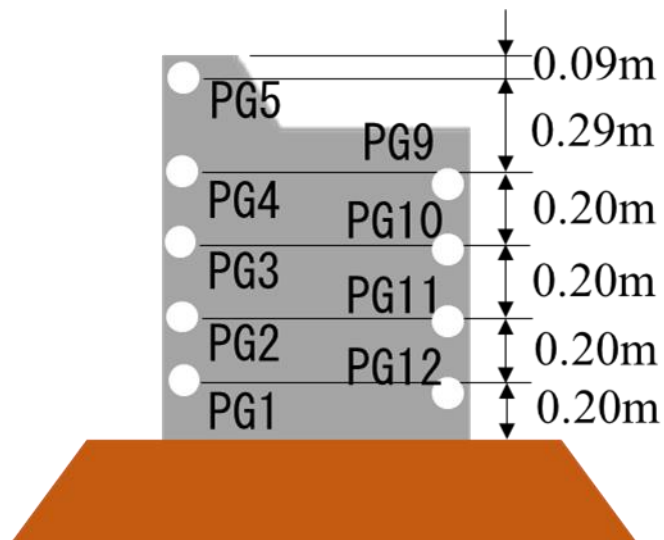


図 5.2-2 波圧検討位置

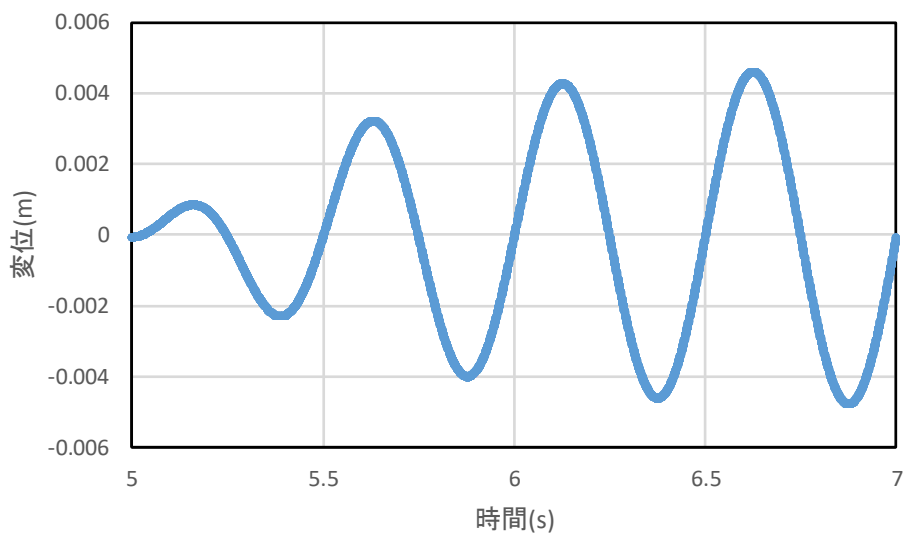


図 5.2-3 入力変位時刻歴(エンベロープ部拡大, 時間刻み:0.0001s)

5.2.3 最大時間刻みの検討

計算する過程において、入力する変位の時間刻みと最大計算時間刻みは、同一にしておくことが、計算精度向上には必要であることが確認された。そのため、入力する変位の時間刻みと最大計算時間刻みは同一とし、時間刻みの違いによる動水圧の計算精度の違いについて検討を行った。検討は粒子サイズ 0.05m、加振強度 75Gal のケースで最大計算時間刻みを変化させて、比較を行った。入力する変位の時間刻みと最大計算時間刻みを 0.01s にしたケース(case1)では、値のばらつきが大きく、時間刻みが粗すぎるのではないかと考えられる(図 5.2-4)。入力する変位の時間刻みと最大計算時間刻みを 0.001s にしたケース(case2)では、case1 と比較して、値のばらつきは小さくなっている。しかし、水面に近い PG5 においては、動水圧の発生が確認できず、このケースにおいても、若干ではあるが時間刻みが粗すぎる可能性が考えられる(図 5.2-5)。入力する変位の時間刻みと最大計算時間刻みを 0.0001s にしたケース(case3)では、全ての波圧計で動水圧が確認できた。

一方で、水面に近い、PG5 に加え、それより 1 つ深い位置にある PG4 と PG9 においても、波圧の時刻歴波形において、ノイズが発生していることが確認できる。これは、水面付近の粒子が振動の影響で激しく動くことにより、その影響が波圧に出ているものと考えられる(図 5.2-6)。

この検討結果より、時間刻みについては細かくするほど精度良く再現できると考えられる。



図 5.2-4 case1(時間刻み 0.01s, 粒子サイズ 0.05m)における実験値と計算値の比較

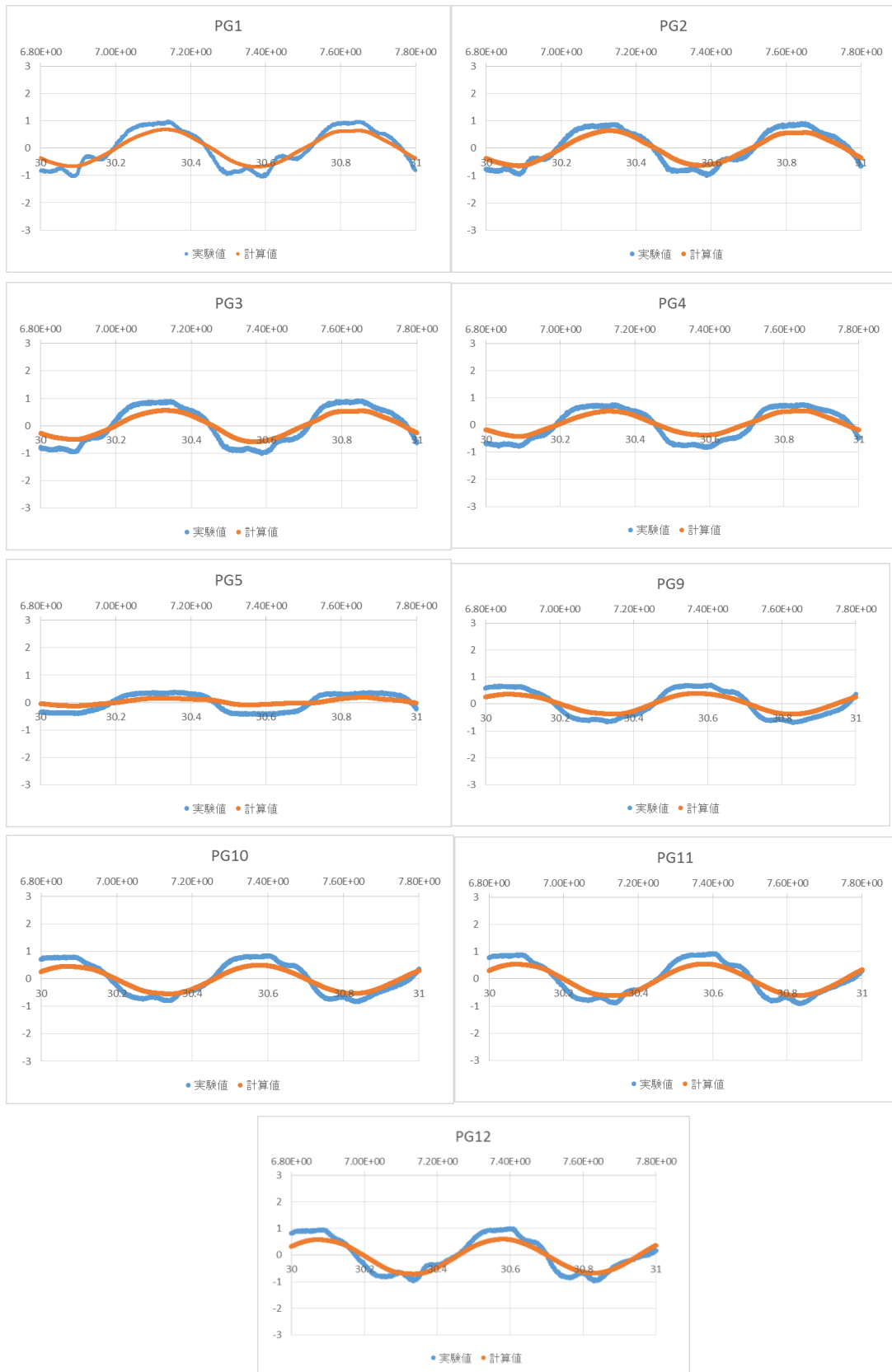


図 5.2-5 case2(時間刻み 0.001s, 粒子サイズ 0.05m)における実験値と計算値の比較

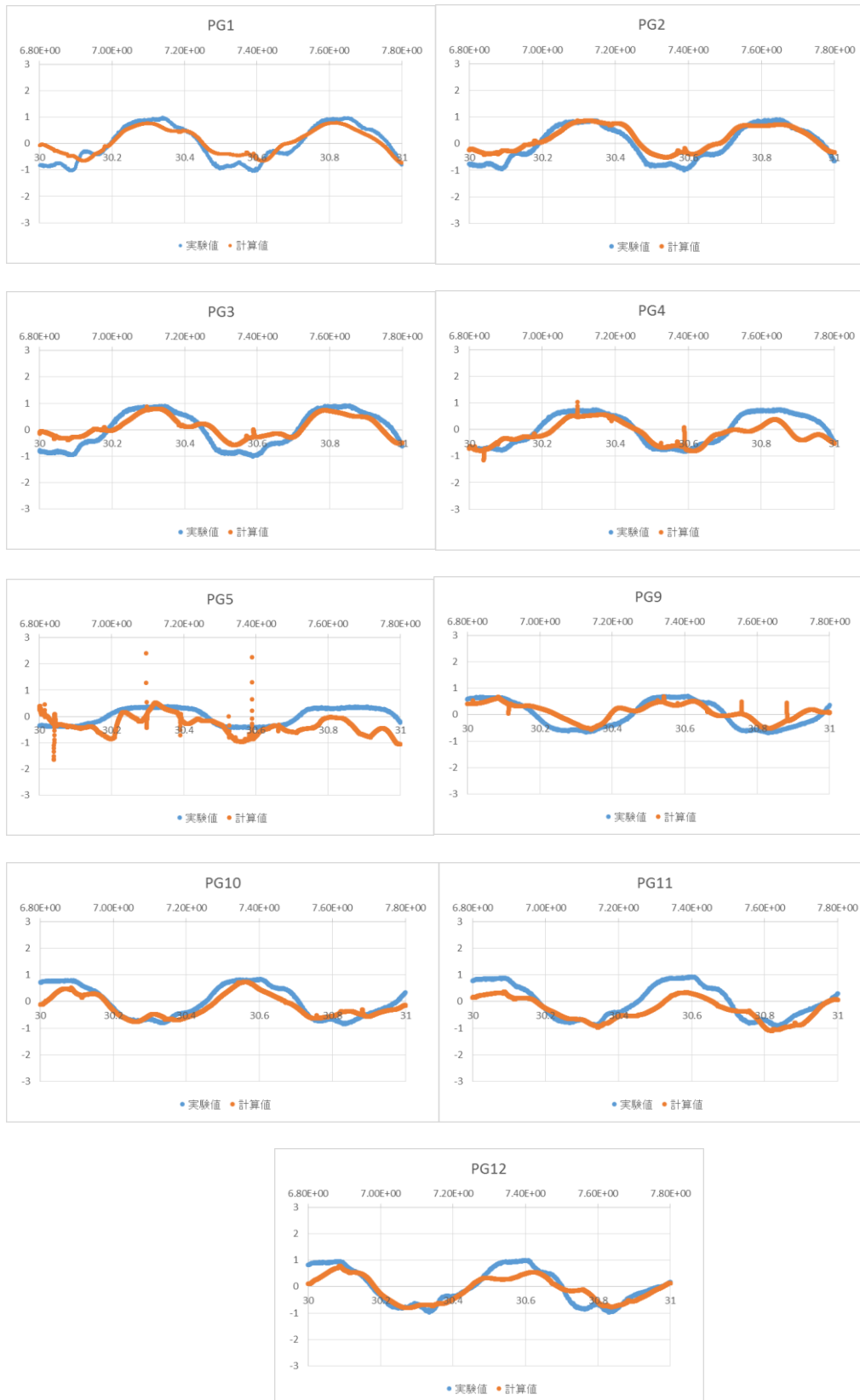


図 5.2-6 case3(時間刻み 0.0001s, 粒子サイズ 0.05m)における実験値と計算値の比較

5.2.4 再現計算

5章2節3項「最大時間刻みの検討」において、入力する変位の時間刻みと最大計算時間刻みについては、細かいほど精度良く計算できる事が確認できた。この検討をふまえ、加振のみの実験で行った4ケースについて、粒子サイズを0.02mとして再現計算を行った。入力する変位の時間刻みと最大計算時間刻みについては、0.0001sとした。模型天端水位+10cm, 加振強度75Gal(case4)の結果を図5.2-7に、模型天端水位+10cm, 加振強度50Gal(case5)の結果を図5.2-8に、模型天端水位-40cm, 加振強度75Gal(case6)の結果を図5.2-9に、模型天端水位-40cm, 加振強度50Gal(case7)の結果を図5.2-10に示す。

粒子サイズ0.05m, 入力する変位の時間刻みと最大計算時間刻み0.0001s(case3)のケース同様、どのケースにおいても、水面に一番近い波圧計においては、ノイズが発生することが確認できたが(case4およびcase5のPG5, case6およびcase7のPG3とPG10), case3とは異なり、その次に浅い位置にあたる波圧計では、ノイズは確認されていない。これは、粒子サイズを0.05mから0.02mに小さくしたことにより、水面変動の影響が深い箇所まで影響しなかったためであると考えられる。また、粒子サイズを小さくすることにより、実験値と計算値の差が少なくなり、精度が向上しているものと考えられる。

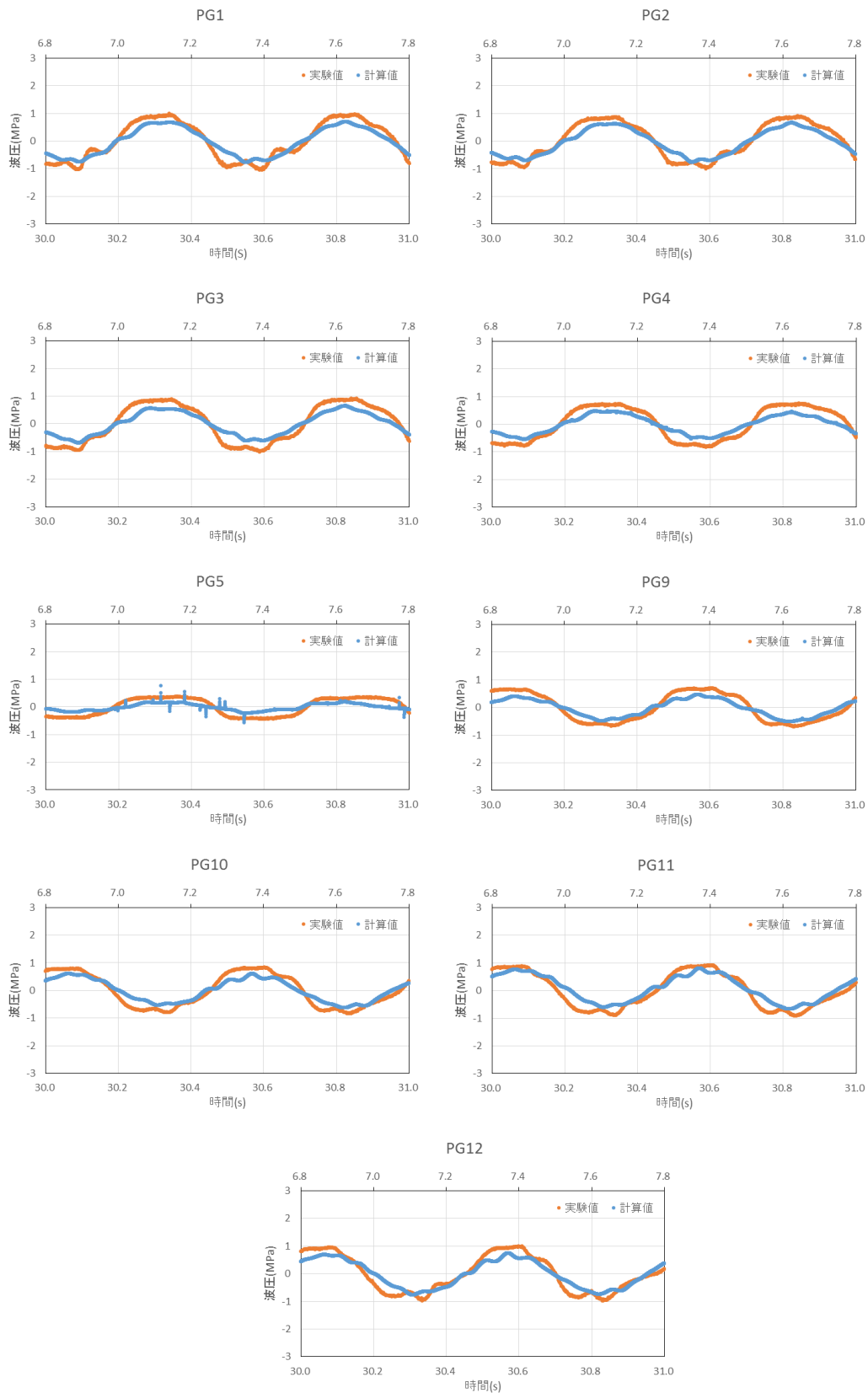


図 5.2-7 case4(模型天端水位+10cm, 加振強度 75Gal)における実験値と計算値の比較

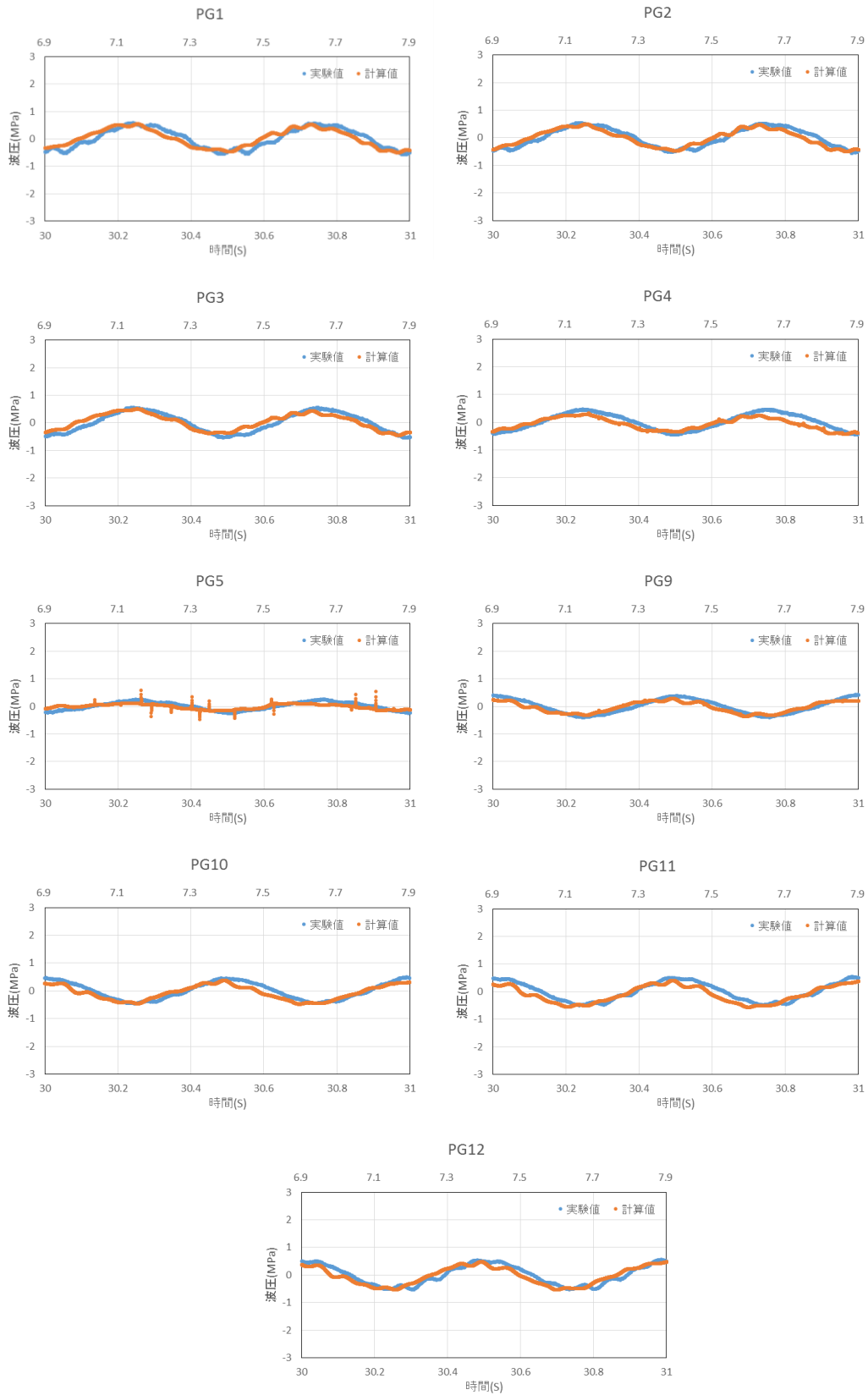


図 5.2-8 case5(模型天端水位+10cm, 加振強度 50Gal)における実験値と計算値の比較

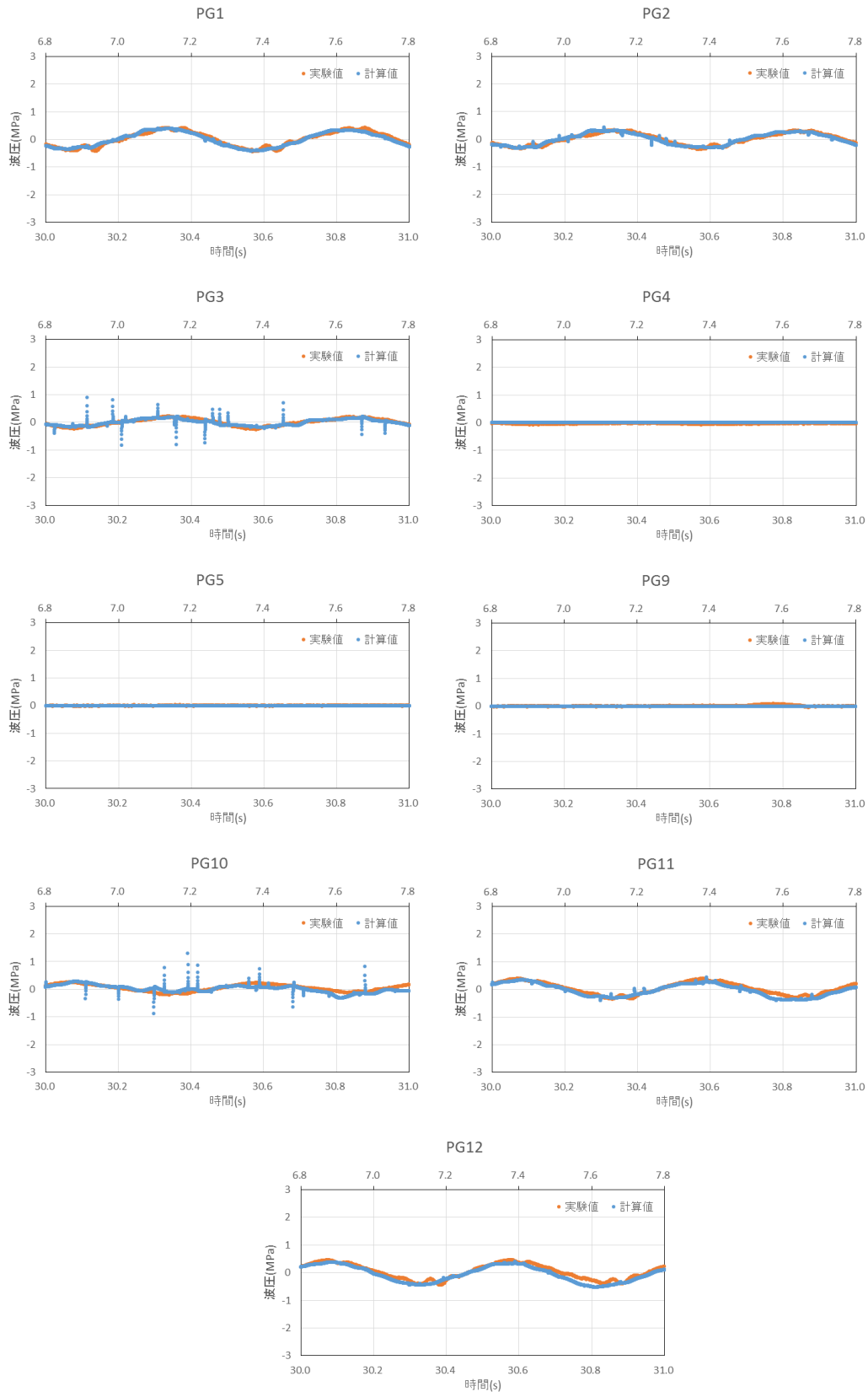


図 5.2-9 case6(模型天端水位-40cm, 加振強度 75Gal)における実験値と計算値の比較

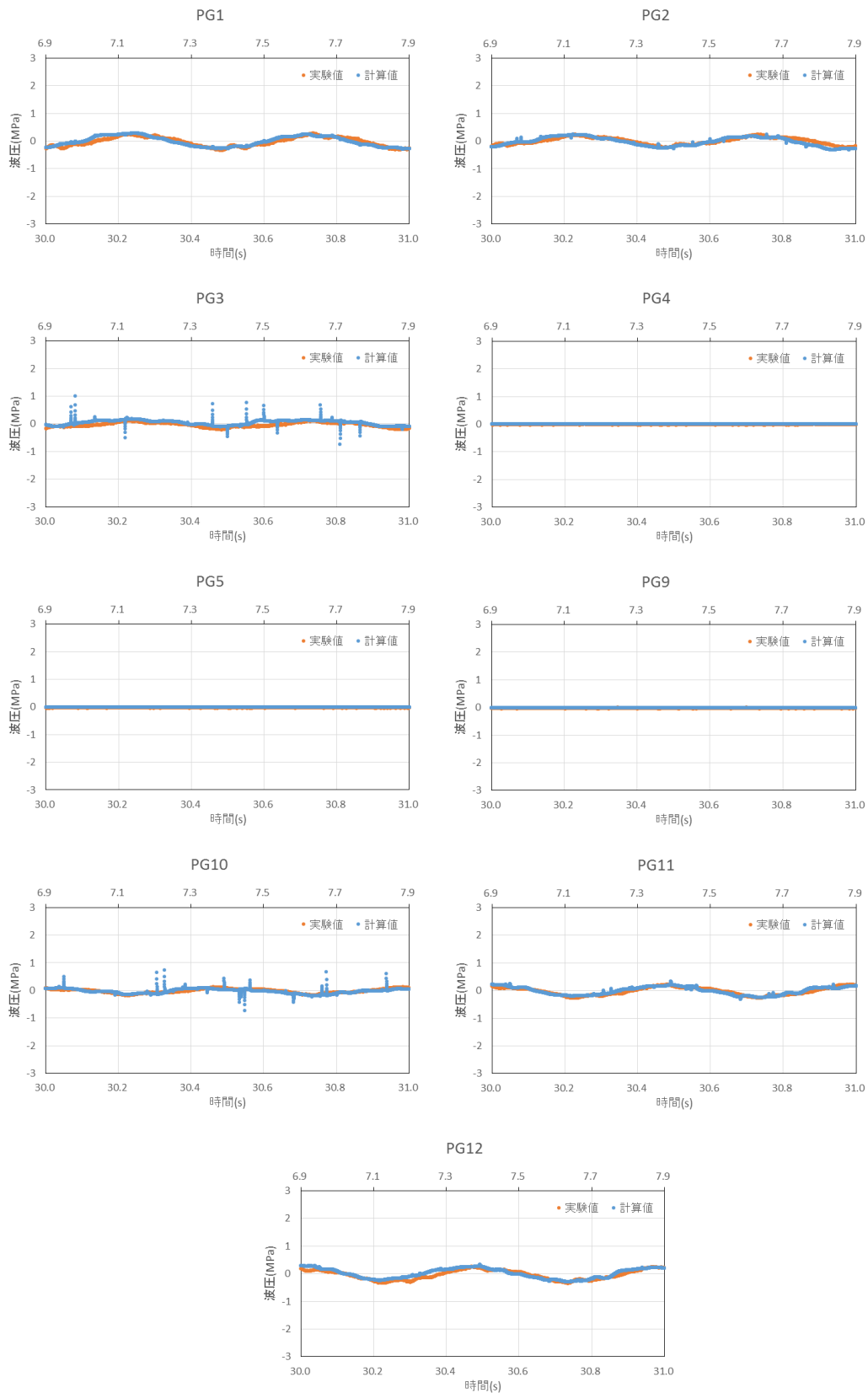


図 5.2-10 case7(模型天端水位-40cm, 加振強度 50Gal)における実験値と計算値の比較

5.3 越流に関する計算

5.3.1 計算概要

越流の計算について、粒子サイズ 0.02m で実験値との比較検討を行った。検討ケースを表 5.3-1 に示す。なお、計算条件は最大計算時間刻みを 0.01s とした以外は 5 章 2 節「振動に関する計算」で検討した加振のみの計算と同条件で行った。

表 5.3-1 越流計算実施ケース

	粒子サイズ	水位	粒子数	入力流速	流入範囲	沖側堰	岸側堰
case1	0.02m	模型天端+10cm	222,675	0.23m	0.40m	2.60m	2.62m
case2	0.02m	模型天端+5cm	219,000	0.23m	0.40m	1.98m	2.62m
case3	0.02m	模型天端-10cm	207,042	0.23m	0.40m	2.07m	2.47m
case4	0.02m	模型天端+10cm	222,675	0.19m	0.40m	2.60m	2.71m
case5	0.02m	模型天端+5cm	219,000	0.19m	0.40m	1.96m	2.69m
case6	0.02m	模型天端-10cm	207,042	0.19m	0.40m	1.77m	2.54m

5.3.2 計算モデルと計算精度の確認方法

計算モデルは、実験時における振動台周辺を振動台枠から前後 10m 程度を再現した。計

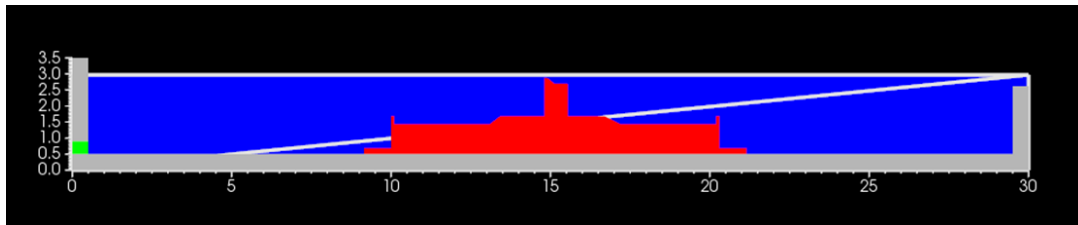


図 5.3-1 計算モデル

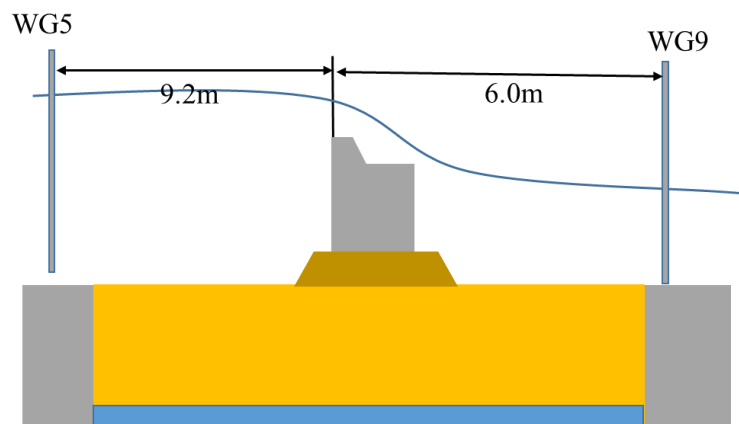


図 5.3-2 水位調整位置

算領域全体では、長さ 30.0m、高さ 3.5m とした。図 5.3-1 は模型天端+10cm の計算モデルを示している。図に示すグレーと赤は壁粒子、青は水粒子、緑は流入粒子である。流入は、水面に影響が出にくいように、下側から流入するように設定し、水位はそれぞれ岸側と沖側の壁粒子の高さを調節し、図 5.3-2 に示す模型から少し離れた位置の WG5 と WG9 の水位を合わせた。

5.3.3 再現計算

越流のみの実験結果 6 ケースについて、再現計算を行った。

case1 の結果を図 5.3-3 に示す。越流計算では、計算モデルにおいて堰高と流入流速を調整することにより実験水位と同様の水位を再現した。越流時の波圧については、水面に近い模型前面の PG5 と模型背面の PG9 は水面の変動の影響が大きく、ノイズが大きい結果となった。これは、水位表面は拘束されていないため、越流による粒子の変動が大きくなり、ノイズが増大しているものと考えられる。一方で、それより水面から深い位置にある波圧の結果は、多少のノイズは見受けられるものの、ある一定の精度で再現できているものと考えられる。

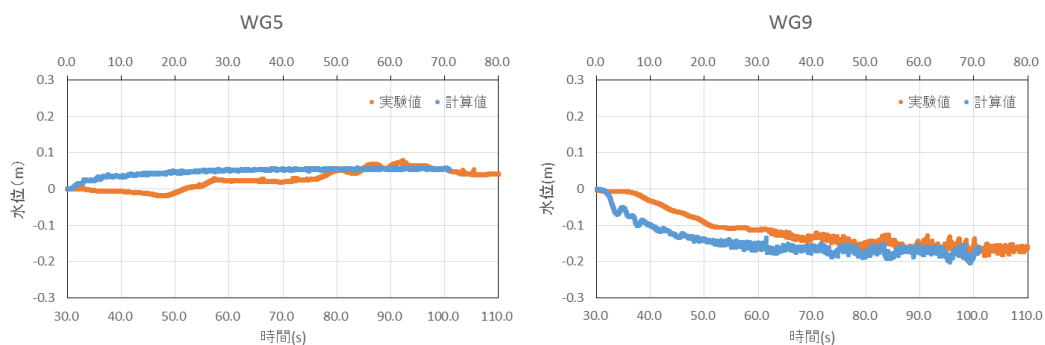


図 5.3-3 case1 における実験値と計算値の比較(水位)

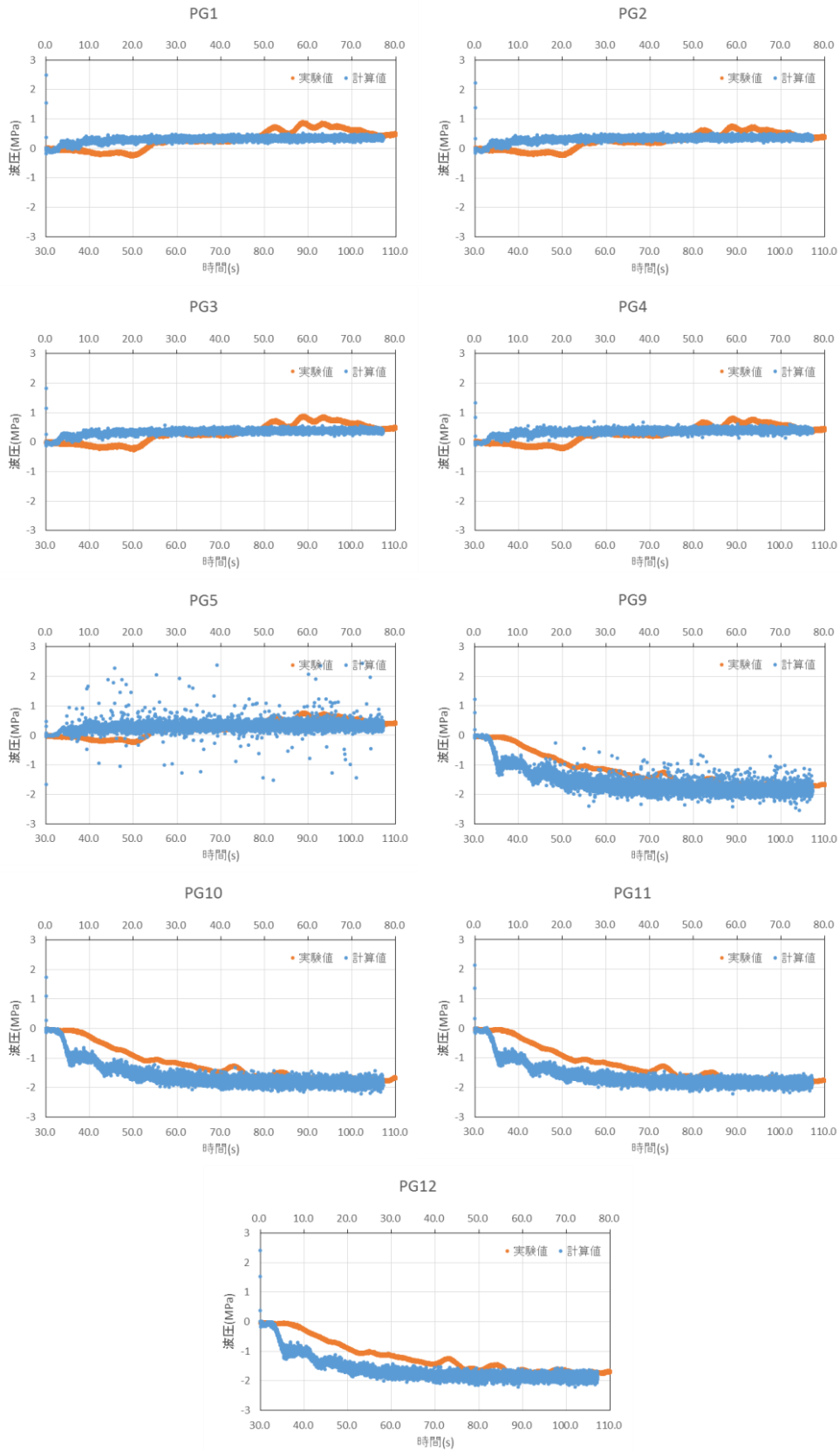


図 5.3-3 case1 における実験値と計算値の比較(波圧)

5.4 振動と越流の重畳計算

5.4.1 計算概要

5章2節「振動に関する計算」と5章3節「越流に関する計算」と同様なモデルで、粒子サイズ0.02mで実験値との比較検討を行った。検討ケースを表5.4-1に示す。なお、計算条件は最大計算時間刻みを0.001sとし、それ以外の設定はこれまでの計算設定と同条件で行った。

表 5.4-1 越流計算実施ケース

	粒子サイズ	初期水位	粒子数	入力流速	流入範囲	沖川堰	岸側堰	入力加速度
case1	0.02m	模型天端+10cm	222,675	0.23m	0.40m	2.60m	2.62m	50Gal
case2	0.02m	模型天端+10cm	222,675	0.23m	0.40m	2.60m	2.62m	75Gal
case3	0.02m	模型天端+5cm	219,000	0.23m	0.40m	1.98m	2.62m	50Gal
case4	0.02m	模型天端+5cm	219,000	0.23m	0.40m	1.98m	2.62m	75Gal
case5	0.02m	模型天端-10cm	207,042	0.23m	0.40m	2.07m	2.47m	50Gal
case6	0.02m	模型天端-10cm	207,042	0.23m	0.40m	2.07m	2.47m	75Gal

5.4.2 計算モデルと計算精度の確認方法

計算モデルは、実験時における振動台周辺を振動台枠から前後10m程度を再現した。計算領域全体では、長さ30.0m、高さ3.5mとした。図5.4-1は模型天端+10cmの計算モデルを示している。図5.4-1に示すグレーは壁粒子、赤は振動台粒子、青は水粒子、緑は流入粒子である。流入は、水面に影響が出にくいように、下側から流入するように設定し、水位はそれぞれ岸側と沖側の壁粒子の高さを調節し、5章3節「越流に関する計算」と同様に模型から少し離れた位置のWG5とWG9の水位を合わせた。計算時間は120sとし、越流水位が定常になった90sから加振を開始し110sまでの20s間加振を行い、その結果について検討した。

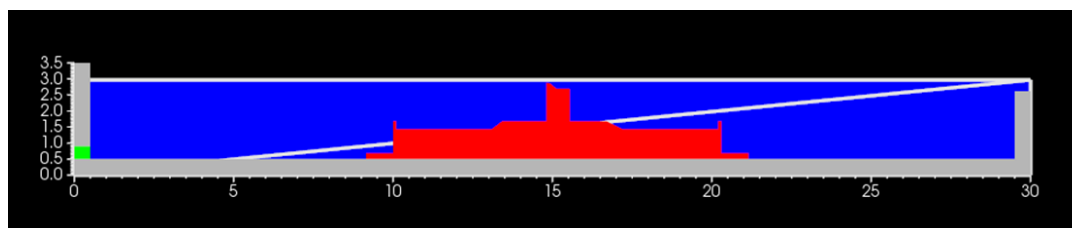


図 5.4-1 模型天端+10cm(case1)の計算モデル

5.4.3 再現計算結果

加振と越流の重畳について実験結果 6 ケースについて、再現計算を行った。

再現計算の結果を用いて各水位の波圧を抽出し、実験値および Westergaard の近似式と静水圧式を用いた計算結果と比較した。case1～case6 の結果を図 5.4-2～図 5.4-7 に示す。

case1～case4(図 5.4-2～図 5.4-7)については、数値計算で求めた重畳時の波圧は、水位表面に近い PG5 と PG9 以外の個所においては、ほぼ実験値と同様な値を示した。一方で、Westergaard の近似式と静水圧式を用いた計算結果は、その値より大きい値を示していることから、数値計算で求めた値は、水位表面以外の個所においては、実験を再現できており、Westergaard の近似式と静水圧式を用いた計算結果は、それより大きい値を示し、安全側の結果となっていることが確認できる。

case5(図 5.4-6)と case6(図 5.4-7)の結果については、数値計算で求めた重畳時の波圧は、実験値と比較して小さい値を示した。一方で、Westergaard の近似式と静水圧式を用いた計算結果は、case1～case4 同様に実験値より大きい値を示している。この原因について検証した。case1～case4 は加振と越流の重畳時においては越流が確認されているが、case5 と case6 の実験においては、加振と越流の重畳時において、初期水位が低く越流が確認されておらず、越流の有無によって、構造物の挙動が異なり、数値計算結果の違いに影響していると考えられる。

構造物の挙動の違いについて、実験時に得られた模型下部加速度(AC3)と模型上部加速度(AC4)について、case2, case4 および case6 の時刻歴を図 5.4-8～図 5.4-10 に示す。越流が確認されている case2(図 5.4-8)と case4(図 5.4-9)については、越流方向に押されている際の最大加速度については、 1m/s^2 程度で模型下部加速度(AC3)と模型上部加速度(AC4)は、ほぼ同様なタイミングで同様な値を示している。一方で、case6(図 5.4-10)は模型上側加速度(AC4)が 1m/s^2 程度であり、case2 や case4 と構造物の挙動が明らかに異なる。これは、越流がある場合は、構造物上部の挙動が抑えられ、構造物全体が、下から伝わってくる振動に対して構造物全体が一体となって挙動していると考えられる。対して、越流が無い場合においては、構造物上部の越流による抑える効果がなく、構造物上部が自由に挙動可能なため、構造物下部からの振動によって、構造物上部が振られてしまい、結果、加速度が増大し、構造物にかかる波圧も上部で増大しているものと考えられる。数値計算においては、構造物の変形は考慮していないため、越流がある場合においては適切に動水圧が評価できるものの、構造物の変形がある場合は、その変形による加速度の増大が考慮できず、小さい動水圧を示したものと考えられる。

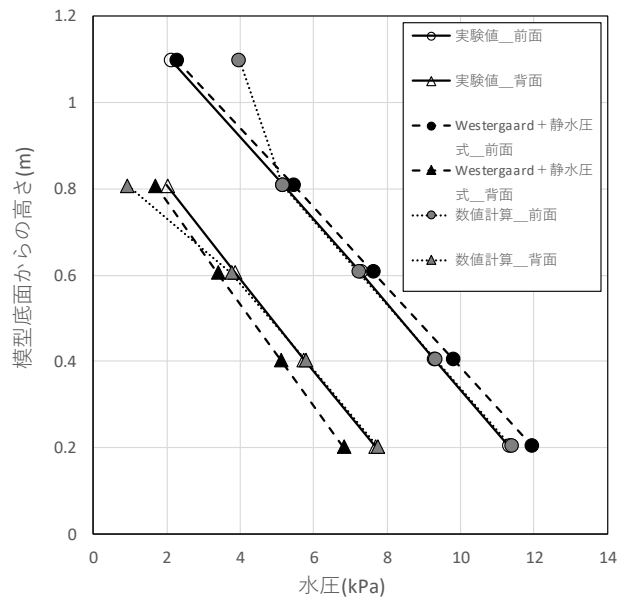


図 5.4-4 case3 における実験値と Westergaard の近似式と静水圧式と数値計算結果

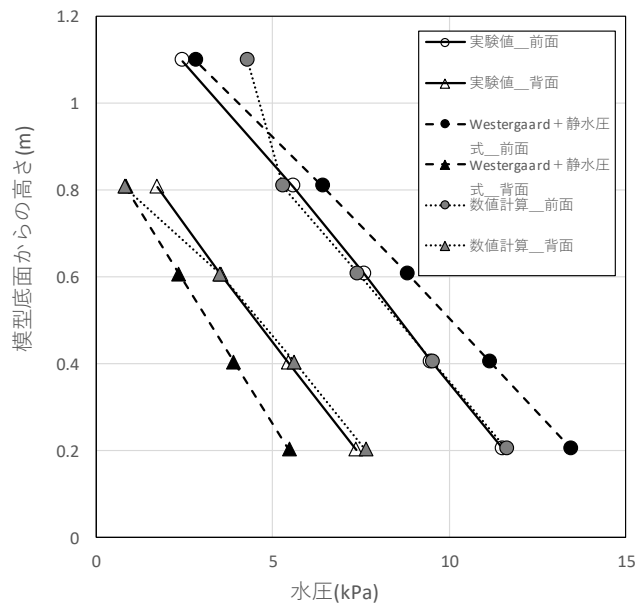


図 5.4-5 case4 における実験値と Westergaard の近似式と静水圧式と数値計算結果

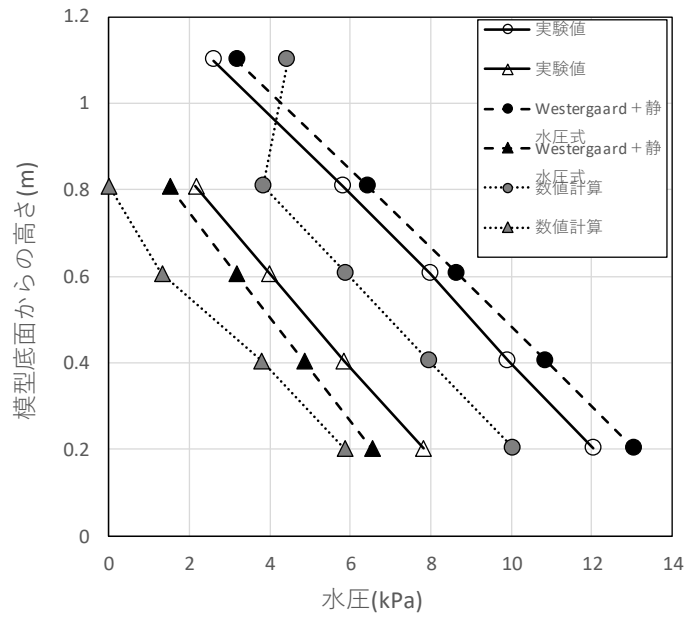


図 5.4-6 case5 における実験値と Westergaard の近似式と静水圧式と数値計算結果

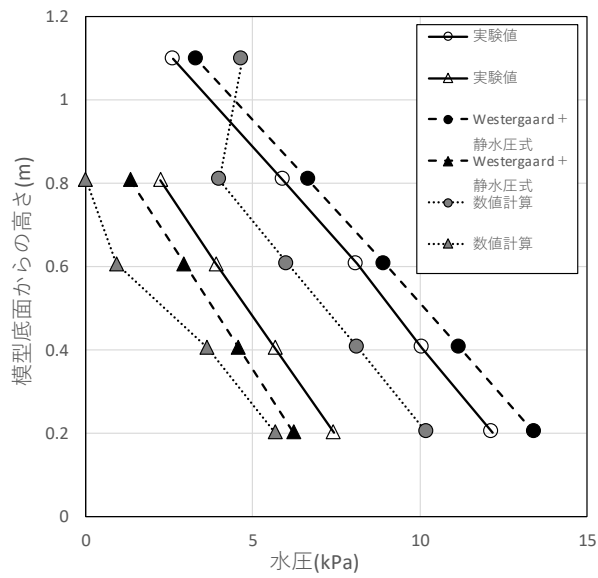


図 5.4-7 case6 における実験値と Westergaard の近似式と静水圧式と数値計算結果

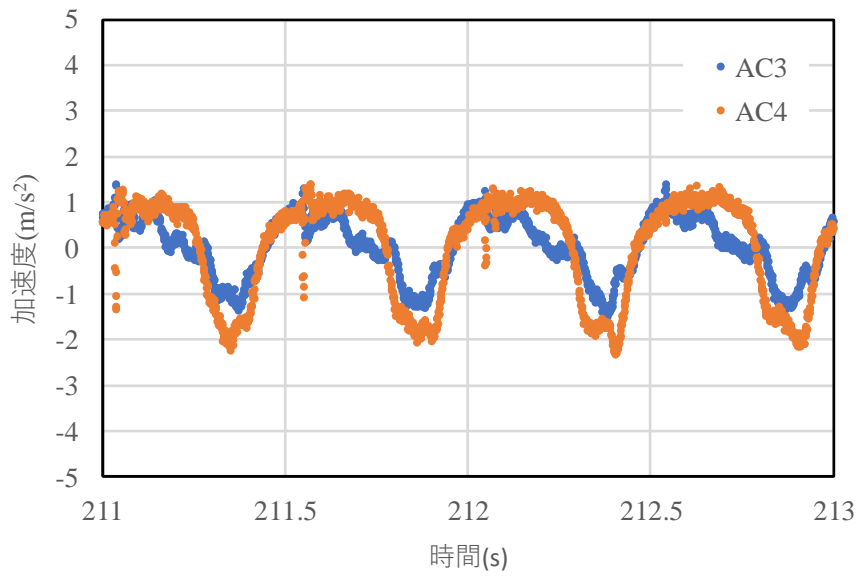


図 5.4-8 case2 における模型下側加速度(AC3)と模型上側加速度(AC4)時刻歴

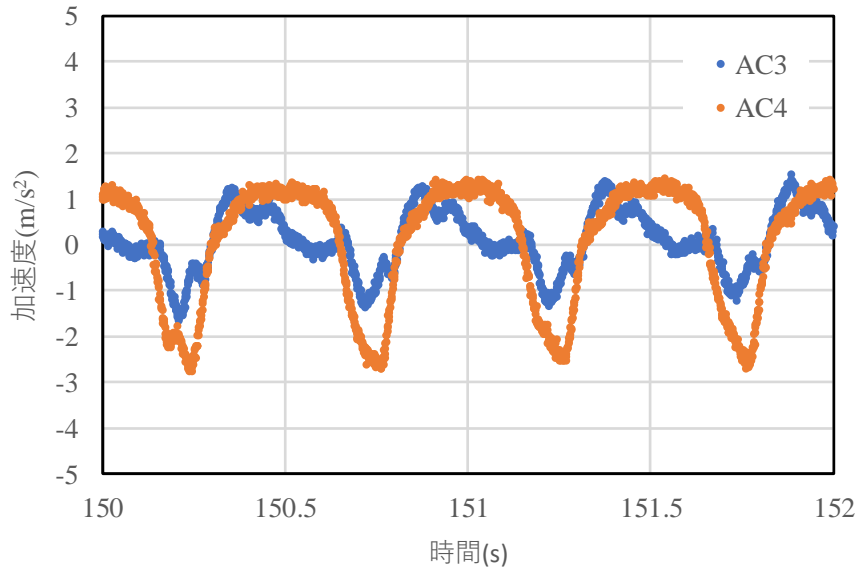


図 5.4-9 case4 における模型下側加速度(AC3)と模型上側加速度(AC4)時刻歴

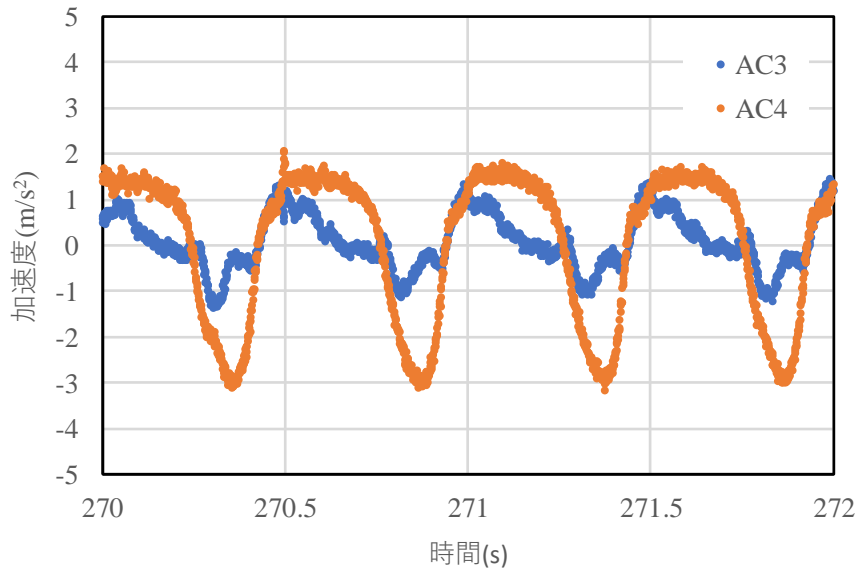


図 5.4-10 case6 における模型下側加速度(AC3)と模型上側加速度(AC4)時刻歴

5.5 まとめ

数値計算として、粒子法を用いて再現計算を実施し、以下の知見を得た。

- ・粒子法を用いた数値計算においては、水位表面付近は適切に評価ができないものの、全体としては、概ね実験値を再現できており、地震と津波の重畳時の検討手法としても適用可能であることが明らかとなった。

- ・越流がある場合は、越流によって構造物上部の挙動が抑えられ、構造物全体がほぼ同様な挙動を示すため、粒子法を用いた数値計算により検討は可能であるが、越流が無い場合においては、構造物上部と下部では挙動が異なり、現時点においては適切に評価ができないことが明らかとなった。

参考文献

- 1) Shao, S.D. and Lo, E.Y.M. : Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface, *Advance in Water Resources*, Vol.26, pp.787-800, 2003.
- 2) Gotoh, H., Khayyer, A., Ikari, H., Arikawa, T. and Shimosako, K. : On enhancement of Incompressible SPH method for simulation of violent sloshing flows, *Applied Ocean Res.*, Vol.46, pp.104-115, 2014.
- 3) 後藤仁志, 鈴木高二朗, 五十里洋行, 有川太郎, Abbas Khayyer, 鶴田修己 : 高精度粒子法を用いた高機能型数値波動水槽の開発, *土木学会論文集 B2(海岸工学)*, Vol73, No.2, pp.I_25-I_30, 2017.

6. まとめ

本研究においては、東北地方太平洋沖地震津波の経験をふまえ、津波来襲時において余震が防波堤に対して影響を与えているのではないかとこの点に着目し、過去の津波発生時における余震の発生と津波来襲時間との関係を確認し、重畳の可能性について検討した。また、地震と津波重畳時における防波堤への影響を、水理模型実験を用いて検証し、地震と津波の重畳時における検討手法について提案を行った。本研究の成果について、ここに記す。

2011年に発生した、東北地方太平洋沖地震津波の際の釜石における、津波の来襲時間と余震発生時刻の関係を確認すると、第一波が観測されてから、最大高さの津波が観測される間にも余震が発生している状況を確認できる(図 6-1)。また、本震発生後3時間以内の余震の加速度については、釜石で263Galが確認されているが、平均すると50Galから75Gal程度であった(図 6-2)。この事例以外にも、1983年の日本海中部地震、1993年に発生した北海道南西沖地震、2003年に発生した十勝沖地震でも同様に、津波の来襲時刻に余震が発生していることが確認でき、津波が防波堤を越流している間においても、余震が発生し、防波堤に影響を与えている可能性が十分に確認された。

一方で、現在、防波堤に働く波圧を検討する際は、地震時の動水圧はWestergaardの近似式(6-1)を用いて算出することが可能で、津波が越流する場合には、静水圧式(6-2~6-4)を用いて算出することが可能である。しかし、津波が防波堤を越流している状況の中で、余震が発生した場合に、防波堤に働く波力については、考え方が示されていない。そのため、津波が越流し、余震が発生した場合に、防波堤にどのような影響があり、破堤する可能性の有無については不明で、津波の越流に対して安全に設計された防波堤においても、余震が作用することによって、被災し、背後地域へ甚大な被害をもたらす可能性があると考えられる。そのため、本研究では、地震と津波の重畳時における防波堤への影響を把握するため、水理模型実験を行い、その結果を基に防波堤に働く波圧の検討手法を確認し、提案を行うことを目的とした。

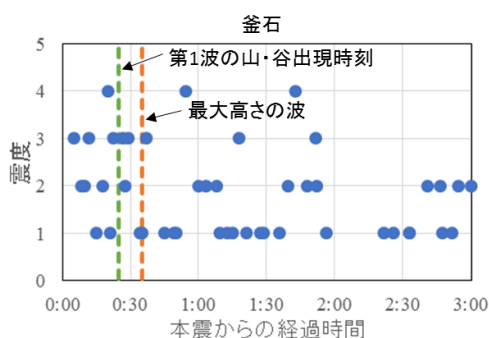


図 6-1 東北地方太平洋沖地震津波で観測された釜石の余震と本震からの経過時間

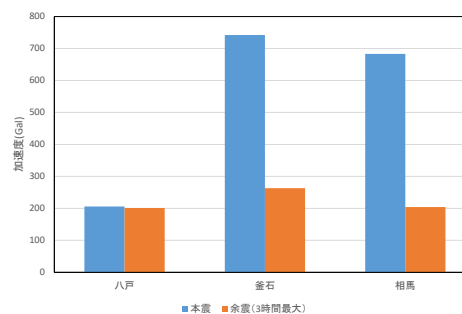


図 6-2 各地点の本震と本震発生後3時間以内の最大余震加速度

$$P_{dw} = \pm \frac{7}{8} w_0 \alpha \sqrt{hy} \quad (6-1)$$

W_0 : 水の単位体積重量, α : 地震の水平震度, h : 水深(m),
 y : 水面から任意点までの深さ(m), P_{dw} : 任意深さ y の動水圧(kPa)

$$P_1 = \alpha_f \rho_0 g (\eta_f + h') \quad (6-2)$$

$$P_2 = \frac{(\eta_f - h_c)}{(\eta_f + h')} p_1 \quad (6-3)$$

$$P_3 = \alpha_r \rho_0 g (\eta_r + h') \quad (6-4)$$

p_1 : 直立壁前面の底面における波圧強度(kN/m²)

p_2 : 直立壁前面の天端面における波圧強度(kN/m²)

p_3 : 直立壁背面の底面における波圧強度(kN/m²)

$\rho_0 g$: 海水の単位体積重量(kN/m³), h' : 直立壁の底面の水深(m)

h_c : 静水面から直立壁天端面までの高さ(m)

η_f : 直立壁前面の静水面からの津波高さ(m)

η_r : 直立壁背面の静水面からの津波高さ(m)

α_f : 直立壁前面の静水圧補正係数, α_r : 直立壁背面の静水圧補正係数

地震と津波の重畳現象を再現できる、港湾空港技術研究所所有の大規模波動地盤総合水路を用いて、地震と津波の重畳現象を再現し、防波堤への影響の把握を行った。地震だけが作用する場合においては、地震の揺れが現地盤から防波堤に伝わり、加速度や変位を発生させる。その際に、防波堤上側においては振動が増幅し、加速度が増大する傾向があり、防波堤全体に働く加速度が大きくなり破壊する。津波の越流だけが発生する場合においては、防波堤前面と背面の水位差により、防波堤の岸側に継続的に波圧が作用し、その波圧に対して抵抗力が下回ると、一気に破壊する。一方で、地震と津波が重畳した場合においては、津波の越流が防波堤上側の挙動を抑え、防波堤に全体に働く加速度を抑えることにより、動水圧の発生を抑制することが明らかとなった(図 6-3)。しかし、この防波堤上側の挙動を抑制する効果は、津波が越流する状態でしか発生せず、津波が越流しない場合では、逆に加速度の増大を招く可能性が確認され、この現象については、今後も解明が必要である。

また、地震と津波重畳時における地震の周波数とマウンドの変形の有無について、検討を行った。地震の周波数との関係については、高周波数側では、防波堤上側まで加速度が伝播せず、影響がほとんどない。一方で、低周波数側では、防波堤上側まで加速度が伝播し、影響を及ぼしていることが明らかとなり、地震と津波重畳時においても、低周波数側の余震が発生する可能性がある場所において注意が必要であることが明らかとなった。また、マウンドの変形の有無においては、地震と津波重畳時にマウンドが変形することも、津波が越流する際に防波堤上側の挙動を抑制するためには必要であることが明らかとなった。しかし、マ

ウンドの固さについて、どの程度の柔軟性があれば津波の越流時において、防波堤上側の挙動を抑制できるかは明らかにできていないため、今後の検討が必要である。

津波対策として現在広く行われている、防波堤の腹付工について、地震と津波の重畳時においても効果を発揮するか検討を行った。腹付工は、防波堤が滑動や転倒しようとしている場合に抵抗として働く効果がある。地震と津波重畳時においても、抵抗として機能し、安定性の向上に寄与していることが判明した。

以上、実験から得られた結果を基に、既往外力の算定手法である Westergaard の近似式と静水圧式について、地震と津波重畳時における適応性について検討を行った(図 6-4)。既往外力の算定手法は設計でも用いられているため、安全側の評価となる。地震と津波重畳時においても、実験結果と比較して、最大で 20%程度の差は出るものの、安全側の評価となるため、この2つの式を用いて、地震と津波重畳時においても、防波堤の安定性の検討が可能であることが明らかとなった(図 6-5)。この検討結果を基に、地震と津波重畳時の検討手法を提案した。検討するにあたっては、重要なパラメータとして防波堤に働く加速度がある。一方で、地震と津波重畳時における防波堤に働く加速度は、越流水位、マウンドの変形の有無、重畳する地震の周波数といった複数の要因が影響しており、本研究では解明に至って

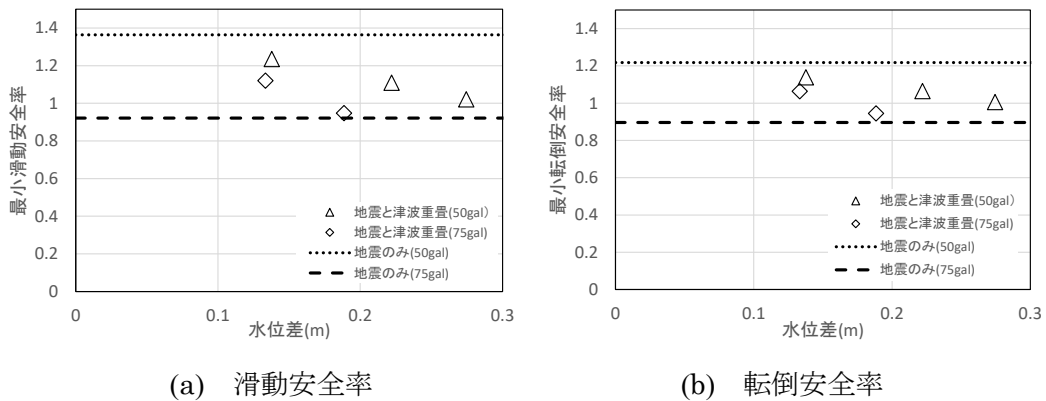


図 6-3 安全率と水位差の関係

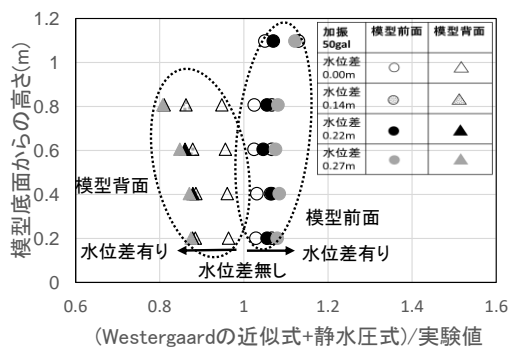


図 6-4 Westergaard の近似式と静水圧式の足し合わせと実験値の関係

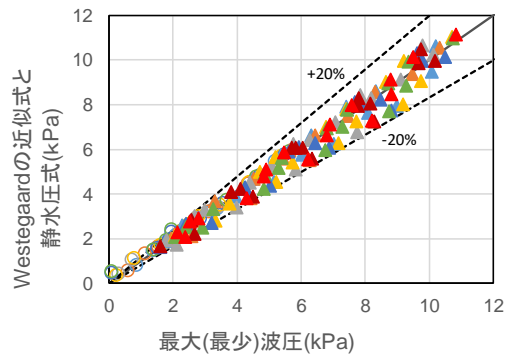


図 6-5 計算値と実験値の関係

ない。そのため、検討手法に用いる加速度については、確認した過去の本震発生後3時間以内に発生した余震の事例において、最大であった釜石の263Galを基に、300Galと考えることとした。この検討手法を基に、実地形への適用検討を行った。東北地方太平洋沖地震津波の際に釜石港の湾口防波堤で50Galから300Galの余震と津波が重畳したと想定し、検討を行った。検討結果においては、津波越流時における余震による動水圧が、作用力全体に対して最大で10%程度を占めることが確認され、地震と津波が重畳していたと考えると、影響が大きいことが明らかとなった(図6-6)。

ここまでの検討においては、防波堤で一般的な構造のパラペットを有する防波堤について行ってきたが、防波堤には様々な形状が存在する。そのため、形状の異なる防波堤への適用性について、上部斜面堤において検討を行った。上部斜面堤において、今回提案した検討手法は、防波堤前面の斜面部や天端部から背後の落水の影響により、検討手法としては用いることができないことが明らかとなった。

地震と津波の重畳時における防波堤への影響について、詳細に把握するためには数値計算を用いることが有効であると考えられる。そのため、数値計算の適用性について検討した。検討手法としては、複雑な挙動に対しても再現が可能と考えられる粒子法を用いた。粒子法を用いた検討の結果、津波越流時の地震と津波の重畳現象においては、水位表面付近の圧力の整合性は難しいものの、全体としては、精度よく再現でき、検討手法として用いることが可能であることが明らかとなった(図6-7)。一方で、津波が越流しない場合での地震と津波の重畳時においては、防波堤の複雑な挙動について再現できないため、適用ができないことが明らかとなった。

本研究では、地震と津波の重畳時における防波堤の安定性検討手法の構築として、地震と津波の重畳の可能性、防波堤に発生する作用力の影響を明らかにし、安定性検討手法を提案した。しかし、地震と津波の重畳時の解明においてはさまざまな要因が影響し、その解明には至っていない。

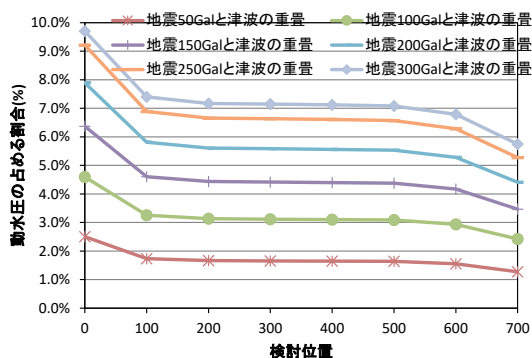


図6-6 釜石港湾口防波堤(南堤)における重畳時における動水圧が占める割合

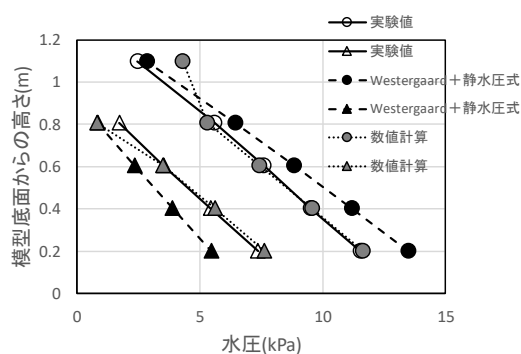


図6-7 実験値と Westergaard の近似式と静水圧式と数値計算結果

謝辞

本論文は、著者が国立研究開発法人 港湾空港技術研究所に在籍し、平成 26 年からの研究成果を取りまとめたものです。

この間に、多くの方からご指導、ご鞭撻、ご助言を賜りました。

中央大学教授 有川太郎先生には、研究の初期のころから、様々なご指導、ご助言をいただき、きめ細かいご指導、ご指摘および、多くの激励をいただきました。未熟な私に、研究だけではなく、今後、技術者として世の中に貢献できるか等もご指導いただきました。また、本研究を博士論文としてとり纏める機会をいただきました。また、津波における水理模型実験について、これまでの経験からくる知識を惜しみなくご教授いただきました。

中央大学教授 山田正先生には、研究全般に対し、ご支援いただき、わかりやすく人に伝える重要性についてご指導いただきました。中央大学 佐藤尚次先生には、2.4 地震と津波重畳時における構造物への影響要因を纏めるにあたり、多くのご指導を頂きました。また、引き波時の地震と津波重畳時における危険性について、ご意見、ご指導を頂き、今後の地震と津波重畳時における、検討の方向性についてご指導いただきました。

中央大学教授 平野廣和先生には、2.2 地震と津波の重畳を再現した実験結果について、先生のご経験からくる知識をご指導いただき、とり纏めの参考にさせていただきました。また、論文全般にきめ細やかなご指導を賜りました。中央大学 辻知章先生には、論文についてのご指導を賜りました。東京大学田島芳満教授には、2.2 地震と津波の重畳を再現した実験結果について、実験データに関するご意見や、ご指導を頂きました。中央大学準教授 関克己先生には、論文全般にあたり、細かく丁寧にご指導を頂きました。

国立研究開発法人 港湾空港技術研究所 栗山善昭所長には、研究に対して多くの激励を頂きました。下迫健一郎特別研究主幹におきましては、研究に関して、常にお気遣いいただき、また、論文全般に対してご指導いただきました。港湾空港技術研究所 海洋研究領域 鈴木高二朗耐波研究グループ長には、上司として実験や論文の計画、実施や取りまとめに対し、丁寧にかつ、多大なご指導を頂きました。

国立研究開発法人 港湾空港技術研究所 耐波研究グループ 鶴田修己研究官には 5. 防波堤の地震と津波の重畳時における数値計算の適用性の検討では、粒子法について丁寧にご指導を頂きました。

(株) エコー 長谷川巖氏、鈴木眞司氏、小沼慎司氏、(株) プライア・コンサルタント 春

川幸久氏, 五洋建設 (株) 藤本英典氏や多くの実験にご協力いただいた方々には, 実験を実施するにあたり, 実験施設の扱い方や実験の方法, 計測器の設置, また, 実験のトラブルの対応に数多くご指導, ご協力いただきました.

本研究は, 東北地方太平洋沖地震津波を契機に, 港湾空港技術研究所に津波越流と地震の両方を再現できる施設が完成したことにより, 地震と津波の重畳現象を再現でき, 本研究の実施が可能となりました. この建設にあたっては, 元港湾空港技術研究所 海洋研究領域 耐波研究グループ 佐藤昌治研究官のご尽力のおかげです.

国土交通省 四国地方整備局 港湾空港事業企画課 宮崎貴司課長, 元港湾空港事業企画課 亀岡知弘課長, 元港湾空港事業企画課 平野智課長, 高松港湾空港技術調査事務所 三野真治所長, 元高松港湾空港技術調査事務所 槇山正所長には, 著者の研究を理解いただき, 人事面で多くの配慮を頂きました.

慣れない学生生活においては, 有川研究室の加島乃梨氏, 坂上美菜子氏, 長谷川遥氏, 元有川研究室大河原千尋氏, 北爪寛子氏に多大なサポートをいただきました. また, 有川研究室の学生の皆さんにも, 応援や励ましを多大に頂戴いたしました.

港湾空港技術研究所 耐波研究グループ 堀井一樹依頼研修員, 岡田清宏依頼研修員, 川原敦子氏, 元港湾空港技術研究所 耐波研究グループ 窪田幸一郎研究官, 竺原宗吾研究官, 喜寿司研究官, 安藤圭依頼研修員, 神田直美依頼研修員, 武部悠一郎依頼研修員, 及川森依頼研修員, 大家隆行依頼研修員, 池田剛依頼研修員, 渡辺裕実氏には, 研究で悩んだりした際に, 多くの励まし, 応援をいただきました.

国立研究開発法人 港湾空港技術研究所に所属し, 実験や研究に関して, 未熟な私に対しまして, 以上のお名前を挙げた方以外にも, 数多くのご指導, ご鞭撻, また, 激励や応援を頂きました. 心より感謝の意を表します. まことにありがとうございます.

これから, ここで得た経験を生かし, 一人の技術者として, 災害に向き合い, 少しでも世の中の役に立てるよう精進したいと思います. まことに, ありがとうございます.

平成 30 年 7 月
岡田克寛