

中央大学博士論文

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

岡田 克寛

博士(工学)

中央大学大学院  
理工学研究科  
都市環境学専攻

平成30年度  
2018年7月



# 目次

1. はじめに.....	1
1.1 地震と津波による港湾の被災と復旧の歴史.....	1
1.2 防波堤の過去の被災.....	3
1.3 現状の設計基準における地震と津波の検討手法.....	6
1.4 地震と津波の重畳の可能性.....	13
1.5 目的と課題.....	23
1.6 本書の構成.....	24
2. 地震と津波の重畳時における現象の確認.....	27
2.1 水理模型実験概要.....	27
2.1.1 実験の目的.....	27
2.1.2 実験施設と実験断面.....	27
2.1.3 実験方法と計測.....	27
2.2 地震と津波の重畳を再現した実験結果.....	32
2.2.1 地震と津波の重畳実験.....	32
2.2.2 加速度の違いによる検討.....	35
2.2.3 加振周波数の違いによる検討.....	49
2.3 地震と津波重畳時における防波堤腹付工の効果.....	65
2.3.1 腹付工の有無における波圧特性の違い.....	65
2.3.2 腹付工の効果の算定.....	67
2.3.3 腹付工の有無における安全率の比較.....	69
2.3.4 腹付工を有する防波堤における破壊過程の確認.....	71
2.4 地震と津波重畳時における構造物への影響要因.....	73
2.5 まとめ.....	75
3. 地震と津波の重畳時の荷重の算定手法の提案.....	77
3.1 地震と津波の重畳における既往外力検討手法の適応性の確認.....	77
3.2 地震と津波の重畳時における検討手法の提案.....	88
3.2.1 防波堤に及ぼす加速度の設定.....	90
3.2.2 防波堤に作用する動水圧及び慣性力の算定.....	92
3.2.3 防波堤に作用する津波による波力の算定.....	92
3.2.4 地震と津波の重畳現象を考慮した安定計算.....	92
3.3 実地形への適用.....	93
3.3.1 条件設定.....	93
3.3.2 ケーススタディ.....	97
3.4 まとめ.....	102

4. 地震と津波重畳時における防波堤の形状の違い .....	104
4.1 実験概要 .....	104
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 .....	107
4.2.1 加振実験による既往検討手法の確認 .....	107
4.2.2 越流実験による静水圧式との比較 .....	107
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 .....	108
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 .....	109
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 .....	111
4.3.1 地震と津波重畳時における防波堤の安定性 .....	111
4.3.2 上部斜面堤の越流とマウンド洗掘 .....	113
4.4 まとめ .....	116
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 .....	117
5.1 数値計算概要 .....	117
5.2 振動に関する計算 .....	117
5.2.1 計算概要 .....	117
5.2.2 計算モデルと計算精度の確認方法 .....	118
5.2.3 最大時間刻みの検討 .....	120
5.2.4 再現計算 .....	124
5.3 越流に関する計算 .....	129
5.3.1 計算概要 .....	129
5.3.2 計算モデルと計算精度の確認方法 .....	129
5.3.3 再現計算 .....	130
5.4 振動と越流の重畳計算 .....	132
5.4.1 計算概要 .....	132
5.4.2 計算モデルと計算精度の確認方法 .....	132
5.4.3 再現計算結果 .....	133
5.5 まとめ .....	137
6. まとめ .....	138
謝辞 .....	142

## 1. はじめに

### 1.1 地震と津波による港湾の被災と復旧の歴史

我が国は、地震や津波で数多くの被害を受けてきた。明治から戦後に至る昭和 20 年までの主な地震津波でも、明治 24 年の濃尾地震、明治 29 年の明治三陸地震津波、大正 12 年の関東大震災、昭和 2 年の北丹後地震、昭和 8 年の昭和三陸沖地震、昭和 18 年の鳥取地震、昭和 19 年の東南海地震が上げられる<sup>1)</sup>。

明治 24 年に発生した濃尾地震は、当時の政府に大きな衝撃を与え、「震災予防に関する事項を攻究し其施工方法を審議する」ことを目的とした<sup>2)</sup>震災予防調査会が明治 25 年に設立された<sup>3)</sup>。この調査会は、昭和 8 年の昭和三陸沖地震の際に、「津波予防に関する注意書き」を提言しており、その中には、高地への移転や防浪堤等の設置などが挙げられた<sup>4)</sup>。明治三陸地震の際は住民の自発的な行動により高台移転を実施しようとして失敗に終わったことから、国・県が主体的となって実施された<sup>5)</sup>。なお、この調査会は、大正 12 年の関東大震災を機に、地震研究所が設置され、業務を引き継ぎ解散している<sup>6)</sup>。

戦時中の昭和 16 年から昭和 20 年においても、昭和 18 年の鳥取地震、昭和 19 年の東南海地震<sup>7)</sup>などの地震や津波によって大きな被害をもたらしたと思われる災害が発生しているが、戦時中であったため、十分な復旧、復興が行われなかったものと思われる<sup>8)</sup>。

戦後直後においても、昭和 21 年に南海地震<sup>9)</sup>、昭和 23 年に福井地震<sup>10)</sup>と大きな地震が頻発している。昭和 20 年代前半は、昭和 23 年に連合国総司令部民間運輸局が示した港湾復興 5 カ年計画に基づき、戦災復興が行われている最中である。防護施設は、戦争により破壊されており、これらの災害による被害は甚大であったものと考えられる<sup>11)</sup>。

戦後は、占領下において我が国の社会制度も大幅な改革が行われた。その結果、港湾の分野は、昭和 25 年に港湾法が制定された。港湾法の制定では、港湾管理者が港湾整備を行うこととしながらも、国は港湾施設の整備に要する費用の一部を負担あるいは補助するものとされた<sup>12)</sup>。時代は、戦後の復興から昭和 30 年代の高度経済成長の時代へと進む過程の中、港湾における取扱貨物量も急激に増大し、港湾整備の遅れが目立ち始めた<sup>13)</sup>。その港湾整備の遅れを解消するため、計画的に港湾整備を促進するために港湾整備緊急措置法が昭和 36 年に制定され、港湾 5 カ年計画を基に事業は実施された<sup>14)</sup>。

一方で、戦後も数多くの災害が発生し、港湾施設に被害を与えている。伊勢湾台風を代表とする高潮被害も発生しているが<sup>15)16)</sup>、地震と津波に関する主な災害では、昭和 35 年のチリ地震津波、昭和 58 年の日本海中部地震、平成 7 年の兵庫県南部地震、平成 23 年の東北地方太平洋沖地震津波が上げられる。

昭和 35 年 5 月 23 日にチリ中部で発生した地震は、この当時では世界最大級の地震であった。この地震により津波も発生し、翌 24 日に北海道から九州に至る日本列島太平洋沿岸に津波が押し寄せ、三陸海岸では最大で 8m を超えた。この津波によって、全国で死者 139 名、住家の流失・全壊 2,830 棟、半壊 2,183 棟、浸水 37,195 棟などの甚大な被害が生じた<sup>17)18)</sup>。この津波の被災により、政府は津波による災害を防止するため、必要な施設の事業計

画の検討がなされた。その検討において、防波堤築造計画と関連のある大船渡港、八戸港、女川港、文里港においては、津波対策としての防波堤築造方式が実施された<sup>19)</sup>。これは、防波堤築造方式は、港湾地区の津波を防ぎ、かつ、港湾機能を阻害しないということで採用された。また、津波防波堤は効果として、津波高の低下による湾内の家屋の倒壊、流失を減少させるとともに、湾内から湾奥への津波到達時間を遅らせることによる避難時間の確保が可能となることが確認された。この時に計画された大船渡港の防波堤は、地形的に最大水深-38mと深く、防波堤全体では40mにも及ぶ構造の防波堤であった。また、津波来襲時の海水流入量を抑制する必要があるため、開口部においては港内に入港可能な水深を-16.3mとして、潜堤が施工された<sup>20)</sup>。戦前までは、「稲むらの火」で有名な広村堤防や<sup>21)</sup>、明治三陸津波と昭和三陸津波で甚大な被害を受けて、建設された田老の防浪堤など<sup>22)</sup>、防潮堤による津波対策が主なものであったが、チリ地震津波によって、防波堤築造方式による津波対策が行われるようになった。

昭和53年には、東海地震の発生が切迫しているとのことから、国民の生命、財産を保護するため、大規模地震対策特別措置法が制定され、地震対策の強化を図ることとされた<sup>23)</sup>。この頃に、過去に昭和南海地震津波や昭和三陸地震津波、チリ地震津波で甚大な被害を受けた須崎港<sup>24)</sup>や釜石港<sup>25)</sup>でも津波防波堤が計画、施工された。特に釜石港の防波堤は、設置箇所の水深が約-65mと世界的にも希な大水深の防波堤で、世界で最も深い防波堤としてギネスに認定されている。

昭和58年5月26日に秋田県沖を震源とした日本海中部地震が発生した。この地震は日本海側では過去最大規模の地震であり、同時に秋田、青森、北海道の日本海沿岸に津波が来襲した。遡上高で見れば、13mを超えている箇所もあり、1960年のチリ沖地震津波以降の津波の中では最大であった。この地震津波によって、死者は100名、津波により護岸や防波堤等が倒壊した<sup>26)</sup>。また、この地震によって秋田港の岸壁等が液状化し、臨海部における産業活動に甚大な被害を与えた。この経験を踏まえ、港湾局は、岸壁背後の液状化対策の基本方針及び要領を策定(昭和59年8月)し、重要港湾等の港湾施設の液状化対策を推進することとした。また、港湾における大規模地震対策施設の整備構想を策定(昭和59年8月)し、耐震性を強化した岸壁を計画的に整備することとした<sup>27)</sup>。

平成7年1月17日に淡路島北部を震源とした兵庫県南部地震が発生した。この地震は1923年の関東地震以降、初めての大都市直下型地震であった。この地震では津波被害は無いものの、埋立地の液状化や、防波堤の沈下等数多くの港湾施設の被害が確認された。また、耐震強化岸壁を除くほとんどの岸壁や臨港道路の多くが被災し、港湾活動が長期間にわたり麻痺した<sup>28)</sup>。そのため、港湾局は、港湾における大規模地震対策施設の整備構想を見直し、大規模地震対策施設整備の基本方針(平成8年12月)を策定し、耐震強化岸壁、臨港道路、橋梁の耐震化を推進することとした<sup>29)</sup>。

平成13年1月には、昭和53年に制定された大規模地震対策特別措置法に基づき東海地震に対して地震対策の充実強化について検討するために中央防災会議に東海地震に関する

専門調査会が設置され、平成 13 年 10 月に、東南海、南海地震等に関する専門調査会が設置された<sup>30)</sup>。

このように、東北地方太平洋沖地震津波が発生するまでも、我が国の港湾施設は度重なる地震と津波によって甚大な被害を受けてきた。その経験から、地震に対しては、液状化対策を主とした、耐震強化岸壁の整備や臨港道路、橋梁の耐震化を進めていた。津波に対しても、防潮堤の整備や、津波防波堤の整備も進められた。また、大規模地震対策特別措置法に基づく地震の予測や調査の研究が進められ、事前の予防対策も検討されていた。

## 1.2 防波堤の過去の被災

これまでににおいても、防波堤は、地震や津波以外でも台風や冬期風浪といった事象が原因で被災することがあった。それらの被災については、比較的資料が整っているものについては、表 1.2-1 に示す被災防波堤集覧<sup>31)32)33)34)35)</sup>にまとめられている。なお、被災防波堤集欄には津波による防波堤の被災事例は記載されていないが、地震津波が要因であるものとして、表 1.2-2 の港湾が挙げられている。

台風や冬期風浪での被災においては、主に消波ブロックや被覆ブロック、根固方塊の飛散や、マウンドの洗掘が多く報告されている。また、堤体の移動も確認されているが、全体的に大きな被災にはなっていない。また、このような被害に対応するため、復旧としては主に防止のための対策や、堤体にかかる波力低減のための消波工の設置等の対策がとられていることが確認できる<sup>32)34)</sup>(図 1.2-1)。

地震のみでの被害についての代表例として、平成 7 年の兵庫県南部地震における防波堤の被災状況を確認した。兵庫県南部地震は、1995 年 1 月 17 日に淡路島北部を震源とするマグニチュード 7.2 の直下型地震である。この地震によって神戸港の防波堤は堤体の沈下が顕著で、1.0m～2.5m 程度の沈下であったが、法線の出入りや、ケーソン間の目地開きや段差の発生量も軽微であった。防波堤の被災については、津波を伴わない地震のみの場合においては、大きな沈下の可能性はあるが、大きな滑動や転倒といった破壊には繋がらないと考えられる<sup>28)</sup>(図 1.2-2)。

津波を伴う地震の被害の代表例として、平成 5 年の北海道南西沖地震における防波堤の被災状況を確認した。北海道南西沖地震は 1993 年 7 月 12 日に奥尻島北方を震源とするマグニチュード 7.8 の地震で、地震発生によって大津波も引き起こされた。この地震津波によって奥尻港の防波堤においては、被覆ブロックや根固方塊の飛散や、マウンドの洗掘や天端の沈下、法線の出入り等が確認された。また、地震のみの被害と異なり、場所によっては堤体が港内側に流失し、最大 130m の移動量が確認された<sup>36)</sup>(図 1.2-3)。

このように、津波被害は、これまでの例において、他の災害と異なり、堤体本体の流失という、港湾機能を著しく損なう被害をもたらす災害であることがわかる。

表 1.2-1 被災防波堤集覧概要<sup>35)</sup>

	資料番号	発行年	調査期間	集録数	抽出方法
被災防波堤集覧	港研資料No. 58	1968年	1947年～64年 (18年)	20港68例	直轄港湾工事年報に記載の災害復旧工事(ただし、北海道は7港とした)
被災防波堤集覧(その2)	港研資料No. 200	1975年	1965年～72年 (8年)	49港63例	おおむね復旧金額が3,000万以上、またはケーソン堤の本体に移動または、破壊等に被災があったもの
被災防波堤集覧(その3)	港研資料No. 485	1984年	1973年～82年 (10年)	39港54例	復旧予定金額が3,000万円以上のもの、比較的図面等资料が整っているもの、および施工中に災害を受けた直轄の災害復旧工事に関する記録のほぼ全数
被災防波堤集覧(その4)	港研資料No. 765	1993年	1983年～91年 (9年)	47港69例	直轄で復旧工事を行ったもの 復旧工事金額が2億円以上のもの 構造形式が混成堤で被災時に本体部の滑動が見られたもの
被災防波堤集覧(その5)	国総研資料No. 717	2013年	1992年～2007年 (16年)	25港40例	直轄工事のうち、被災決定額1億円以上の主要な被災事例

表 1.2-2 過去に地震津波が原因で被災した港湾<sup>31,32,33,34,35)</sup>

発生年	地震名	港湾名
昭和21年	昭和南海地震	和歌山
昭和35年	チリ地震	八戸
昭和43年	十勝沖地震	港名不明(1港被災)
昭和48年	根室半島沖地震	根室
昭和58年	日本海中部地震	青森、大湊、船川、能代
平成5年	北海道南西沖地震	奥尻、瀬棚、函館
平成7年	兵庫県南部地震	洲本、尼崎西宮芦屋、岩屋、神戸
平成15年	十勝沖地震	霧多布

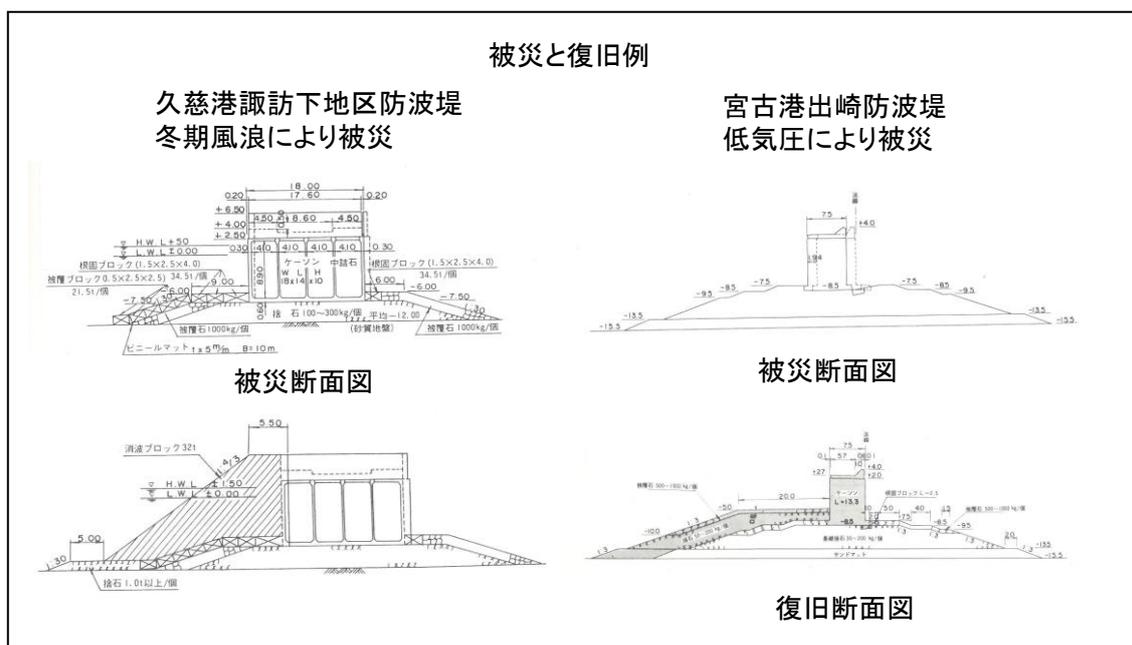


図 1.2-1 防波堤の被災と復旧事例<sup>32)34)</sup>

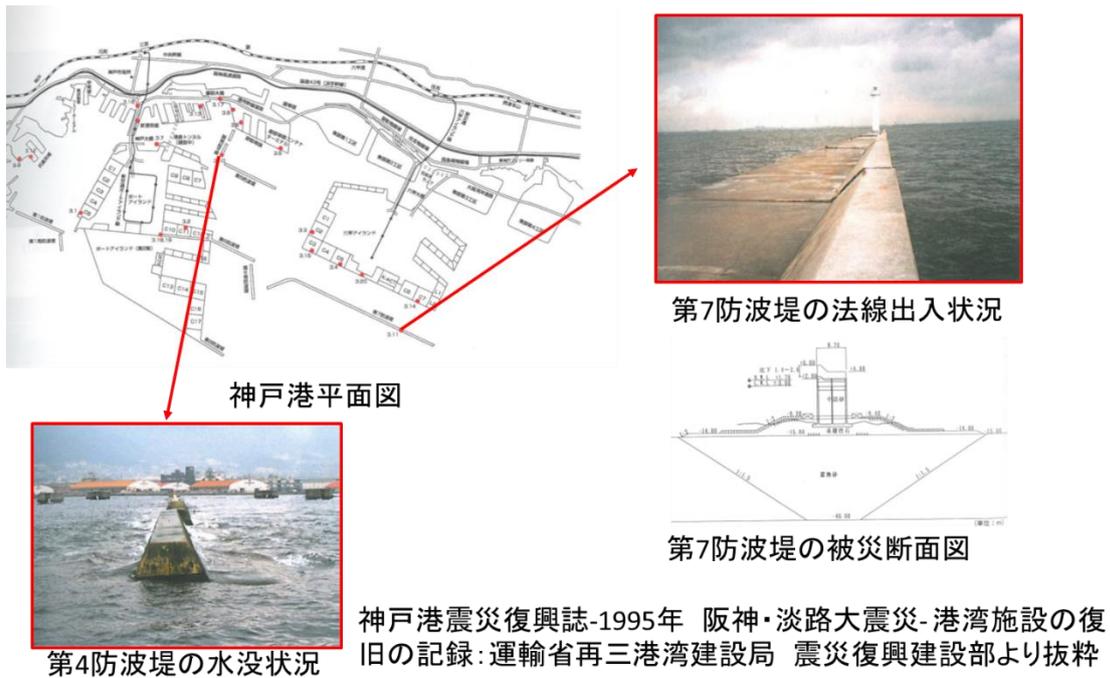
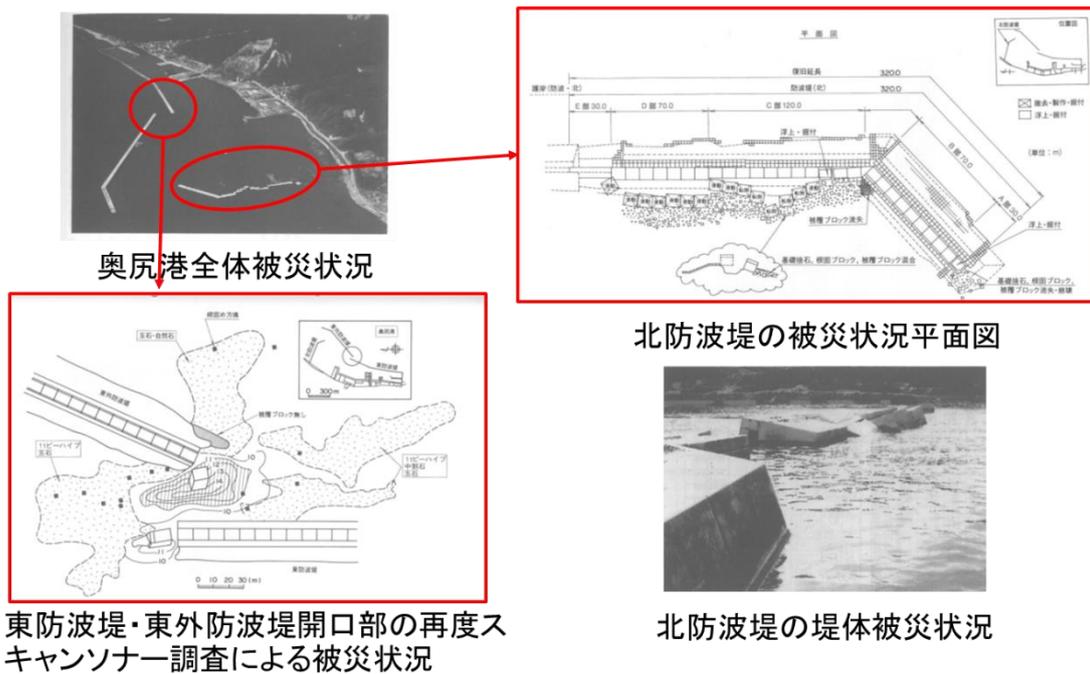


図 1.2-2 平成7年の兵庫県南部地震における防波堤の被災状況<sup>28)</sup>



1993年北海道南西沖地震による港湾施設被害報告:港湾技研資料 No.791より抜粋

図 1.2-3 平成5年の北海道南西沖地震における防波堤の被害状況<sup>36)</sup>

### 1.3 現状の設計基準における地震と津波の検討手法

港湾の設計については、戦後の昭和24年までは法的位置づけのある基準や、各種団体が策定する任意規定等が存在しなかった。港湾における初めての設計の指針となるものは、昭和25年に発刊された港湾工事設計示方要覧である<sup>37)</sup>。その後、昭和48年に港湾法が改正され、これまでに発刊されたものが設計にあたって参考とすべき指針的な性格であったものに対し、法第52条の2に「港湾の施設に関する技術上の基準(以下、基準省令)」に関する条項が追加され、港湾の施設は、基準省令に適合するように、建設し、改良し、又は維持しなければならないことが明記された<sup>38)</sup>。(表1.3-1)

表 1.3-1 港湾の地震と津波の検討に関する歴史

	資料名	津波に関する改訂	地震に関する改訂	改訂の経緯等
昭和25年	港湾工事設計示方要覧	—	・地震力についての算定方法が示された	・港湾における設計法としてはじめて体系化された
昭和34年	港湾構造物設計基準	—	・設計震度は、地域別震度、地盤種別係数、構造物の重要度係数を考慮して設定するとされた ・流動化の予測及び対策が示された	・設計震度の算出方法が確立された ・昭和39年の新潟地震における液状化現象を踏まえて策定された
昭和54年	港湾の技術上の基準・同解説	・外郭施設の設計に当たり、津波の諸元として、最高潮位、津波波高等を考慮するとされた。また、これらの諸元はできるだけ長期間にわたる実測値、既往災害時の痕跡高等を参考にして適切な手法により定めるとされた。	・係留施設は、地震力等に対して、安全な構造であるものとするとしてされた。	・昭和48年に港湾法が改正され、港湾施設の技術上の基準の制定が省令により明記されたことにより、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」が策定された
平成元年	港湾の技術上の基準・同解説（改訂）	—	・地域別震度が改正された ・砂質土の液状化予測判定法が強化された	・昭和58年の日本海中部地震による被災を踏まえて改訂された
平成9年	港湾局通知	—	・阪神・淡路大震災で得られた知見等を踏まえた手法を用いて、液状化の予測・判定を適切に行うこととされた	—
平成11年	港湾の技術上の基準・同解説（改訂）	・津波防波堤について、津波来襲時の特性を勘案して構造の安定を確保するとされた。	・耐震強化岸壁等の耐震強化施設について、レベル1地震動及びレベル2地震動の2段階の地震動が導入された	・平成7年の阪神・淡路大震災を踏まえて改訂された
平成19年	港湾の技術上の基準・同解説（改訂）	・既往の津波記録又は数値解析をもとに、津波高さなどを適切に設定することとされた ・津波防波堤について、津波等に対して修復性を確保することとされた	・信頼性設計法が導入され、耐震強化岸壁等の耐震強化施設は、レベル2地震動の地震作用後に必要とされる機能に対して使用性又は修復性を確保することとされた	・国際化に対応するため、基準の性能規定化が図られた
平成24年8月29日	港湾の技術上の基準・同解説（部分改訂）	—	液状化予測・判定法の改定	—
平成25年9月18日	港湾の技術上の基準・同解説（部分改訂）	・設計津波が定義され、要求性能として、設計津波を超える規模の強さを有する津波等の作用に対して、減災効果の発揮や被災直後から港内の静穏度を確保できるよう、可能な限り施設の安定性を保つこととされた ・発生頻度の高い津波と最大クラスの津波の二つのレベルについて示され、津波波力の算定手順が示された。	—	・平成23年の東日本大震災を踏まえて一部改訂された ・平成24年3月30日以降、新たに得られた知見・検討結果等に基づき、順次、部分的に内容を改訂することとされた
平成26年3月28日	港湾の技術上の基準・同解説（部分改訂）	—	—	—
平成26年6月20日	港湾の技術上の基準・同解説（部分改訂）	—	海溝型地震を対象とする場合の照査用地震動の評価について、SPGAモデル	—

この最初の基準の段階で、津波に関しては、「津波の諸元としては、最高潮位、最低潮位、津波偏差、周期等を考慮するものとする。これらの諸元は、できるだけ長期間にわたる実測値、既往災害時の浸水記録等を参考にして定めるものとする」となっている。一方で、地震に関する外力は、慣性力と動水圧が考えられる。動水圧は Westergaard の近似式が用いられており、慣性力と動水圧を求めるために必要な設計震度は震度法により設定することとされている<sup>39)</sup>。

Westergaard の近似式は、式(1.3-1)で算定することができる。ここで、 $W_0$  は水の単位体積重量、 $\alpha$  は地震の水平震度、 $h$  は水深(m)、 $y$  は水面から任意点までの深さ(m)、 $P_{dw}$  は任意深さ  $y$  の動水圧(kPa)である。

$$P_{dw} = \pm \frac{7}{8} w_0 \alpha \sqrt{hy} \quad (1.3-1)$$

また、動水圧の合力  $P_{dwk}$ (kN/m)は式(1.3-2)、作用位置  $h_{dw}$ (m)は式(1.3-3)、で算定することができる。

$$P_{dwk} = \pm \frac{7}{12} \rho_w g H^2 \quad (1.3-2)$$

$$h_{dw} = \frac{3}{5} H \quad (1.3-3)$$

慣性力については、式(1.3-4)で算定することができ、ここで  $F$  は慣性力、 $k_h$  は震度、 $W$  は重量である。

$$F = k_h W \quad (1.3-4)$$

震度法による考え方では式(1.3-4)のように震度を用い、震度( $k_h$ )は、想定される地盤の最大加速度を重力加速度で除した値とされるが、港湾技術上の基準・同解説においては、必ずしもこの値にする必要は無いとしている。それは、現象として十分解明されているわけでは無いが、最大加速度以上の地震動が作用したとしても、必ずしも残留変位が生じるわけでは無いことが経験的に知られているためである。そのため、現行の港湾の技術上の基準・同解説においては、想定される地震動の加速度時刻歴を用いて、地震動の周波数特性や継続時間を考慮して照査用震度を求める方法が用いられている<sup>39)</sup>。

津波については、平成 11 年の港湾の技術上の基準・同解説の改訂では、昭和 58 年に発生した、日本海中部地震津波の二・三の考察から、谷本らは、津波波力の算定法を提案しており、現在でも採用されている。この式は、直立壁に働く津波力について、水理模型実験で検討した結果より、導出されている<sup>26)</sup>。

また、津波のシミュレーションにも言及されている。地震については、港湾施設の耐震性能について規定され、地震動はレベル 1 とレベル 2 が規定された。また、地震応答解析についても記載され、現在の検討手法として用いられている<sup>39)</sup>。

平成 23 年に発生した，東北地方太平洋沖地震津波は，防波堤に作用した巨大な水平力に加え，防波堤の天端を越流した津波が防波堤背後で強い流れとなり基礎マウンドや海底地盤を洗掘して防波堤の安定性を低下したものと考えられ，これまでの津波対策に対する設計手法について見直す必要があった．そこで，東北地方太平洋沖地震津波の教訓を基に，基本的な防波堤の耐津波設計を記した防波堤の耐津波設計ガイドラインがまとめられ，現在の耐津波設計はこのガイドラインに基づき実施されている<sup>40)</sup>．具体的には，津波の規模や発生頻度について二つのレベルを想定し「発生頻度の高い津波」に対しては，可能な限り構造物で人命・財産を守りきる防災を目指し，発生頻度は低いが沿岸域への影響が甚大な「最大クラスの津波」に対しては，最低限人命を守るという目標のもとに被害をできるだけ小さくする減災を目指すこととされている．また，用いる津波波力においても，津波シミュレーションの有無，波状段波，越流の発生の有無を考慮し適切な波力算定式を用いる事とされている．

津波波力の算定については，図 1.3-1 に示す算定手順をもとにして，適切な波力算定式を

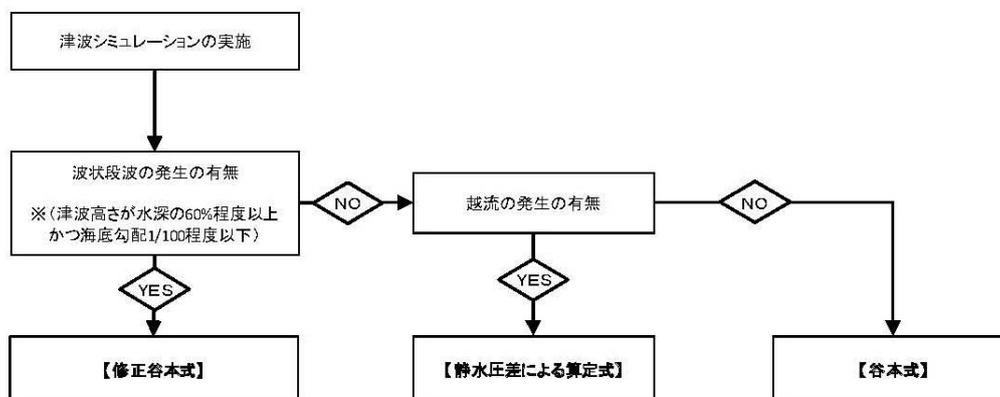


図 1.3-1 津波波力の算定方法<sup>40)</sup>

用いる事となっている．

波状段波が発生する場合は，修正谷本式を用いることとなっており，式(1.3-5)～(1.3-9)を用いる(図 1.3-2)．ここで， $\eta^*$ は静水面上の波圧作用高さ(m)， $\eta_B$ は直立壁背面で静水面から下がった水位(m)， $a_I$ は入射津波の静水面上の高さ(振幅)(m)， $\rho_0 g$ は海水の単位体積重量( $\text{kN/m}^3$ )， $p_1$ は静水面における波圧強度( $\text{kN/m}^2$ )， $p_2$ は直立壁背面における負圧( $\text{kN/m}^2$ )， $p_u$ は直立壁前面下端における揚圧力( $\text{kN/m}^2$ )， $p_L$ は直立壁背面下端における揚圧力( $\text{kN/m}^2$ )である．この式は，池野らによって，実験でソリトン分裂津波の波力が最大になり得るのが，分裂波第一波ピーク時と津波本体重複波ピーク時であることが確認され，その特性をふまえて，分裂波の碎波直前および碎波直後に対する津波波圧式として提案されたものである<sup>41)</sup>．

$$\eta^* = 3.0a_I \quad (1.3-5)$$

$$p_1 = 3.0\rho_0 g a_I \quad (1.3-6)$$

$$p_2 = \rho_0 g \eta_B \quad (1.3-7)$$

$$p_u = p_1 \quad (1.3-8)$$

$$p_L = p_2 \quad (1.3-9)$$

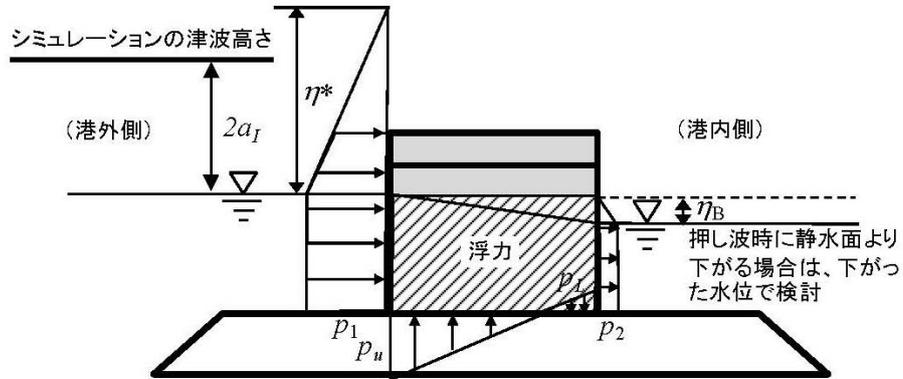


図 1.3-2 修正谷本式を用いる場合の波力の考え方<sup>40)</sup>

波状段波が発生せず、津波が防波堤を越流しない場合は、谷本式を用いることとなっており、式-1.3-10～1.3-14を用いる(図 1.3-3)。ここで、 $\eta^*$ は静水面上の波圧作用高さ(m)、 $\eta_B$ は直立壁背面で静水面から下がった水位(m)、 $a_I$ は入射津波の静水面上の高さ(振幅)(m)、 $\rho_0 g$ は海水の単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>)、 $p_1$ は静水面における波圧強度(kN/m<sup>2</sup>)、 $p_2$ は直立壁背面における負圧(kN/m<sup>2</sup>)、 $p_u$ は直立壁前面下端における揚圧力(kN/m<sup>2</sup>)、 $p_L$ は直立壁背面下端における揚圧力(kN/m<sup>2</sup>)である。

$$\eta^* = 3.0 a_I \quad (1.3-10)$$

$$p_1 = 2.2 \rho_0 g a_I \quad (1.3-11)$$

$$p_2 = \rho_0 g \eta_B \quad (1.3-12)$$

$$p_u = p_1 \quad (1.3-13)$$

$$p_L = p_2 \quad (1.3-14)$$

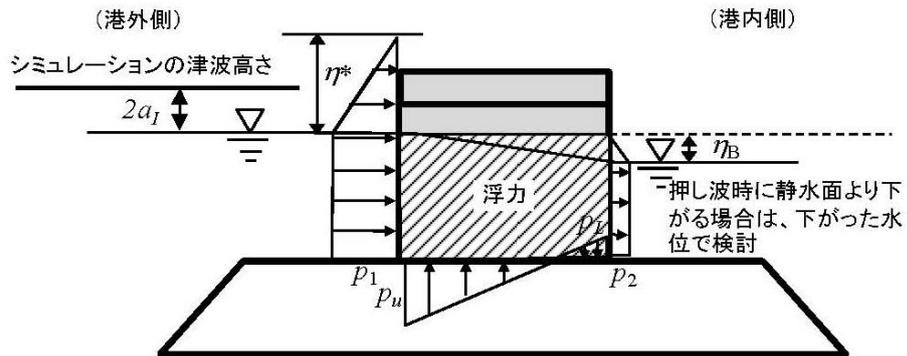


図 1.3-3 谷本式を用いる場合の波力の考え方<sup>40)</sup>

波状段波が発生せず、津波が防波堤を越流する場合は、静水圧差による算定式を用いることとなっており、式 1.3-15～1.3-17 を用いる<sup>42)</sup> (図 1.3-4) . ここで、 $p_1$ は直立壁前面の底面における波圧強度(kN/m<sup>2</sup>)、 $p_2$ は直立壁前面の天端面における波圧強度(kN/m<sup>2</sup>)、 $p_3$ は直立壁背面の底面における波圧強度(kN/m<sup>2</sup>)、 $\rho_0 g$ は海水の単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>)、 $h'$ は直立壁の底面の水深(m)、 $h_c$ は静水面から直立壁天端面までの高さ(m)、 $\eta_f$ は直立壁前面の静水面からの津波高さ(m)、 $\eta_r$ は直立壁背面の静水面からの津波高さ(m)、 $\alpha_f$ は直立壁前面の静水圧補正係数、 $\alpha_r$ は直立壁背面の静水圧補正係数である。

$$p_1 = \alpha_f \rho_0 g (\eta_f + h') \quad (1.3-15)$$

$$p_2 = \frac{(\eta_f - h_c)}{(\eta_f + h')} p_1 \quad (1.3-16)$$

$$p_3 = \alpha_r \rho_0 g (\eta_r + h') \quad (1.3-17)$$

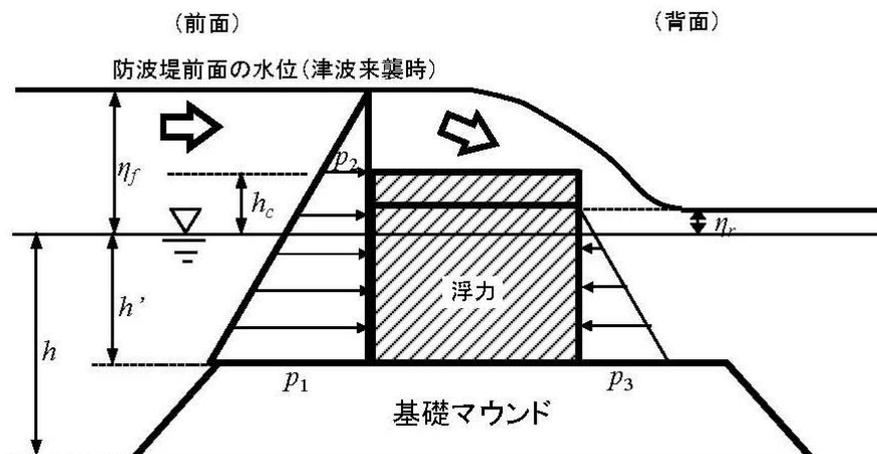


図 1.3-4 静水圧式を用いる場合の波力の考え方<sup>40)</sup>

地震と津波については、以上のような方法で、外力を求め、次に性能照査を行う。防波堤の全体安定性に関する総合的な検証手順のフローを図 1.3-5 に示す<sup>39)</sup>。地震に対しては、レベル1地震動により安定性の照査が行われ、初期断面が設定される。次にレベル2地震動に対する安定性の照査が行われ、断面諸元が検討される。一方で、津波に対しては、設計津波に対しては、防災の観点から防波堤の機能を失わないことが、概ね要求性能として求められ、必要な断面が検討される。次に、設計津波を超える規模の津波については、東北地方太平洋沖地震津波の教訓から、防波堤の機能が可能な限り奪われないよう粘り強い構造とすることが求められ、対策案が検討される。このように、現在では津波を伴う地震に対して防波堤の設計について考えられているが、一方で津波を伴うような大きな地震が発生した後は余震が発生する。余震については、津波来襲時にも発生し、防波堤に影響を与えている可能性も考えられるが、現在の設計の考え方では、偶発作用と偶発作用の重ね合わせの検討は行われていない。しかし、前述のとおり設計津波においては、防波堤の機能を失わないことが要求性能として求められている場合において、本来であれば津波に対する防護機能を発揮するはずの防波堤が、余震と津波が重畳することにより倒壊に至り、背後地域に多大な被害をもたらす可能性も考えられる。また、設計津波を超える津波を検討し、粘り強い対策を行うことにより、想定外の津波に対しても、避難時間の確保等に効果をもたらすことが期待されていたとしても、余震と津波の重畳により、防波堤の粘り強さが発揮されず、多くの人命を危険にさらしてしまう可能性も考えられる。余震については、影響を与える可能性が考えられるものの、本震より小さな加速度であることから、余震と津波の重畳現象に対する対策は、現在実施されている粘り強くする対策に対して、ほんの少しだけ機能をプラスするだけで、余震と津波の重畳時の波力に対して防波堤の機能を損なわず、津波に対する背後地域の安全を守ることができる可能性が考えられる。このような背景を基に、地震と津波の重畳現象に関して、重畳の可能性と重畳した場合における波力の増大について把握し、来るべき大規模な地震津波に備える必要があると考える。

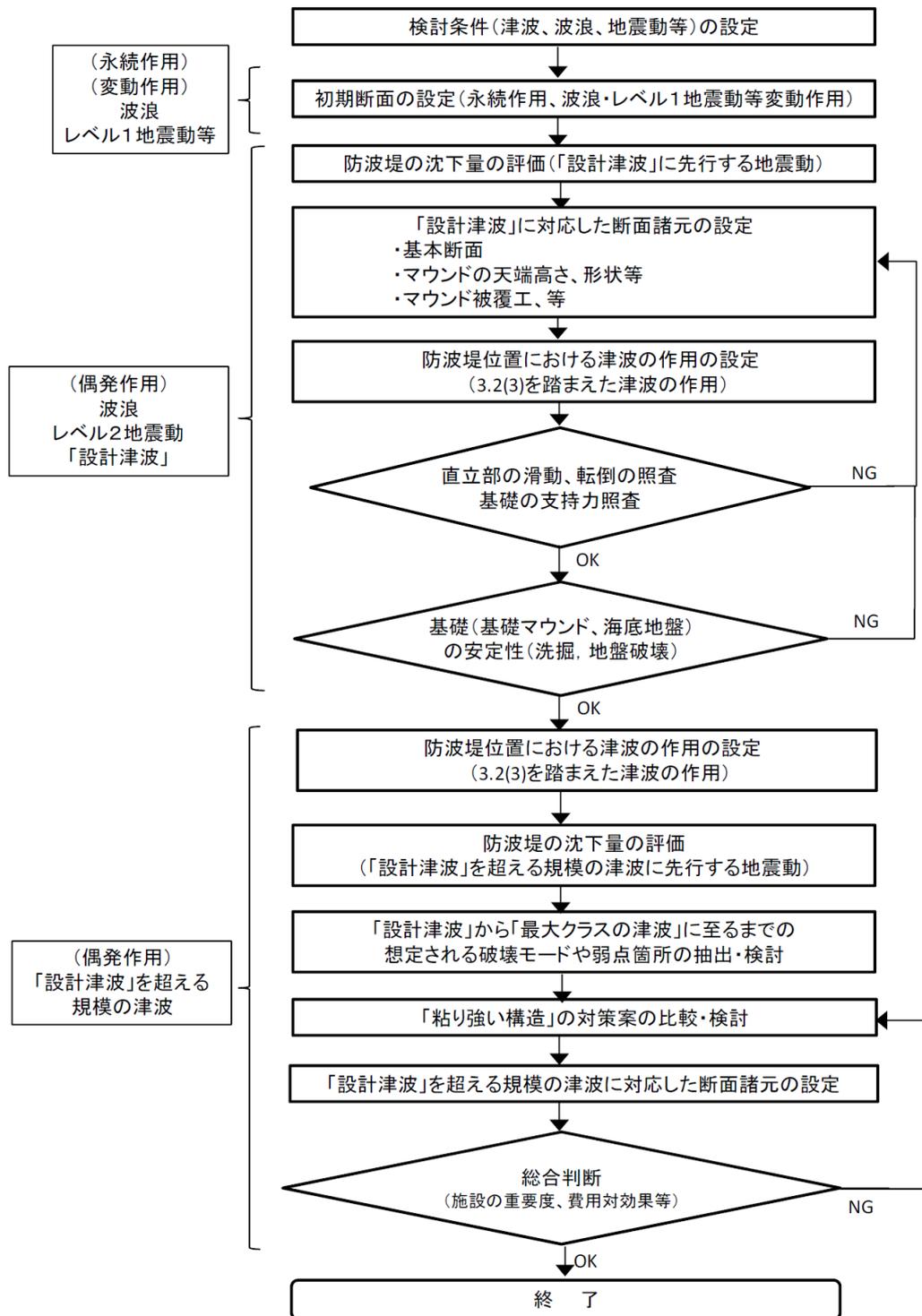


図 1.3-5 防波堤の全体安定性に関する総合的な検証手順のフロー<sup>39)</sup>

#### 1.4 地震と津波の重畳の可能性

平成 23 年 3 月 11 日に太平洋三陸沖を震源として、M9.0 の海溝型地震が発生した。この地震では、宮城県栗原市で震度 7、宮城県、福島県、茨城県、栃木県の 4 県 28 市町村で震度 6 強を観測した。また、余震活動も非常に活発で、2011 年 4 月 21 日の時点では、M7.0 以上の余震が 5 回、M6.0 以上の余震が 73 回、M5.0 以上の余震が 425 回発生している<sup>43)</sup>。

津波は、北は北海道太平洋岸から南は与那国島まで、ほぼ日本全体で観測されている。また、津波は地震発生後早いところでは数分、遅いところでは数時間後に第一波を観測している。津波高は、最大高さの波で、八戸で 4.2m 以上、宮古で 8.5m 以上、大船渡で 8.0m 以上、相馬で 9.3m 以上とこれまでの津波より大きな津波が来たことが、確認されている<sup>44)</sup>(図 1.4-

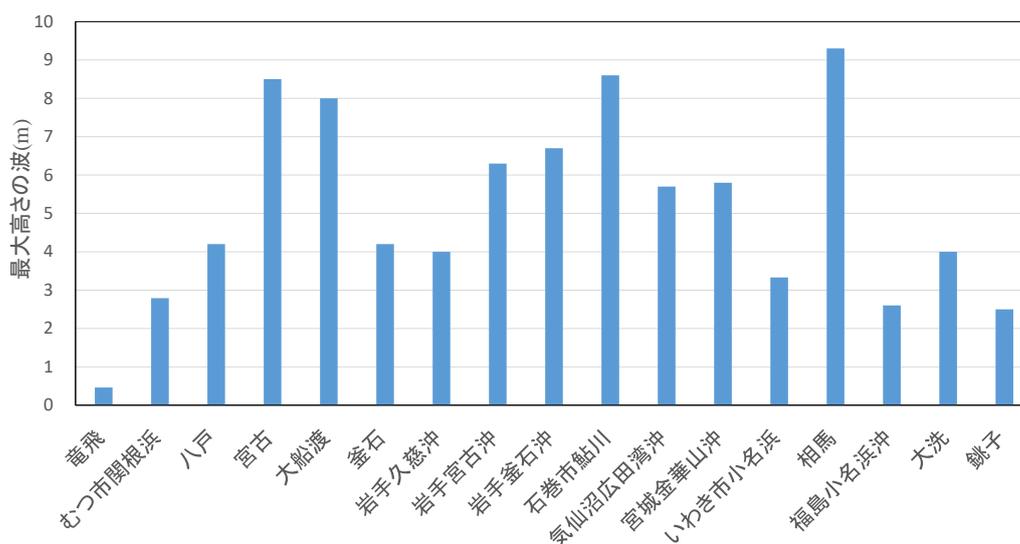


図 1.4-1 東北地方太平洋沖地震津波で観測された最大津波高<sup>44)</sup>

表 1.4-1 津波の第一波の出現時刻と最大高さの波の発現時刻<sup>44)</sup>

	本震震度	第一波の山・谷の出現時刻から最大高さの波の発現時刻までに発生した最大震度	第一波		最大高さの波	
			山・谷の出現時刻	押し・引きの大きさ	発現時刻	高さ
八戸	5 強	4	11 日 15 時 45 分	-0.7m	11 日 16 時 57 分	4.2m 以上
釜石	6 弱	3	11 日 15 時 11 分	-1.19m	11 日 15 時 21 分	4.2m 以上
相馬	6 弱	2	11 日 15 時 32 分	-1.2m	11 日 15 時 51 分	9.3m 以上

1).

このような状況から、港湾施設も数多くの被害が発生した。八戸港、大船渡港、女川港、釜石港の防波堤の大部分が倒壊し、津波が主な被災原因であると考えられているが、前述のとおり、東北地方太平洋沖地震津波発生後の余震活動は活発であった。

地震によって発生した津波は、発生から早いところでは数十分で第一波目が到達している。表 1.4-1 は第一波目の山・谷の出現時刻とその際の押し・引きの大きさ、最大高さの波の発現時刻と高さを気象庁の調査報告資料<sup>44)</sup>より抜粋したものである。第一波目の山・谷の出現時刻は、本震発生から釜石では 25 分後で、八戸では 59 分後であった。その後、最大高さの波は釜石では 10 分後、八戸では 1 時間 12 分後に確認されている。一方で、本震の発生状況と、本震発生後の余震状況を図 1.4-2 に示す。図 1.4-2 は東北地方太平洋沖地震発生以降、20 分毎の地震の発生状況を示したものである。本震発生から 2 時間後までは、余震が平均 0.84 分/回の多い頻度で発生している。そのうち、震度 4 以上の余震は 24%と、高い確率で大きな揺れが観測されている。本震発生から 10 時間後～12 時間後の 2 時間での余震発生回数は減少し、1.88 分/回程度となり、震度 4 以上の余震も 2%程度に減少している。

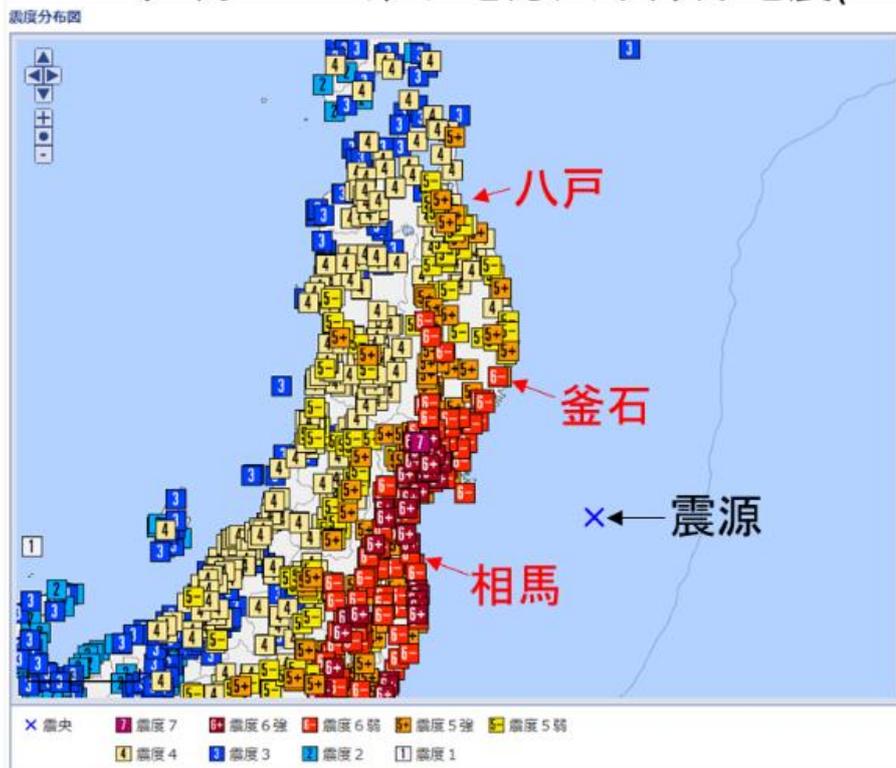
このような状況下で、第一波目の津波到達時から最大高さの波が発現するまでの間も余震による揺れが確認されており、構造物が地震と津波の重畳現象によって被災した可能性も考えられる。図 1.4-3 は第一波の山・谷の出現時刻と最大高さの波の発現時刻が気象庁により確認されている、八戸、釜石、相馬の 3カ所において、余震との関係を整理したものである。第一波の山・谷の出現時刻から、最大高さの波の発現時刻まで、どの地点においても複数回の余震が発生しており、八戸では震度 4 の揺れも確認できる。また、最大高さの波の発現時刻付近においても、釜石では震度 3 の揺れが確認できる。

次に、地震と津波の重畳現象について、余震の加速度について検討した。検討は防災科学技術研究所において公開されているデータを用い、津波と重畳する可能性が考えられる本震から 3 時間後の内の最大値を用いた<sup>45)</sup>。結果を図 1.4-4 に示す。本震は三方向成分の合成値で釜石で 742Gal、八戸で 206Gal であった。一方で本震後 3 時間の余震の最大値は、釜石では 263Gal で本震の 35%程度の大きさであったが、八戸においては 201Gal で本震と同程度の大きさの余震が発生していることが分かった。余震は震源の深さや震源からの距離で加速度も異なるが、確認した 3 地点において、本震後 3 時間の余震の加速度の平均は、震源に近い釜石では 176Gal と大きな加速度となったが、それ以外の地点では 50Gal から 75Gal 程度であった。余震に関しては、場所によっては本震と同程度の大きな揺れを引き起こす場合があるが、平均すると 50Gal から 75Gal 程度の揺れであることが確認できた<sup>46)</sup>。

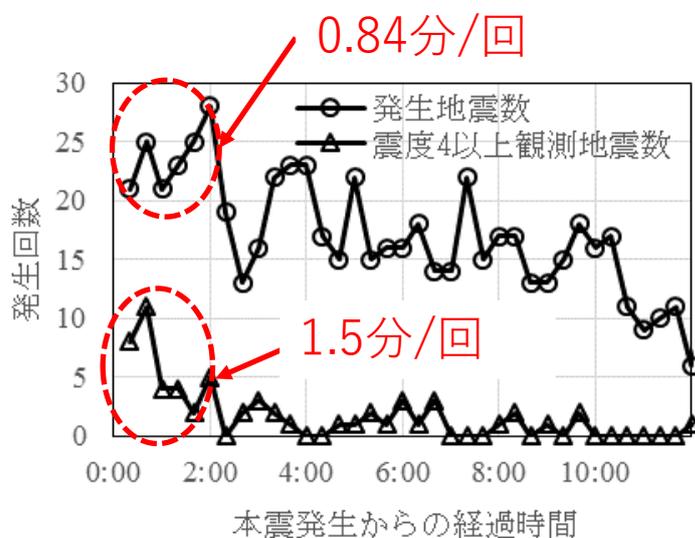
また、東北地方太平洋沖地震津波以前にも、津波を伴う地震が確認されている。明治以降 1995 年までに、我が国で 100 人以上の死者、行方不明者を出した地震・津波について、表 1.4-2<sup>47)</sup>、1996 年以降に日本付近で発生した主な被害地震のうち津波を観測したものを表 1.4-3 に示す<sup>48)</sup>。津波の大小については、様々であるが、このうち津波被害が確認されている、1983 年日本海中部地震、1993 年北海道南西沖地震、2003 年十勝沖地震について、東北

地方太平洋沖地震津波同様，代表地点を抽出し，地震と津波の重畳現象の可能性について検討した．

## 2011年3月11日 東北地方太平洋沖地震(M9.0)



(a) 本震の震度状況



(b) 余震の観測数と本震発生後経過時間

図 1.4-2 東北地方太平洋沖地震津波で観測された本震と余震<sup>43),46)</sup>

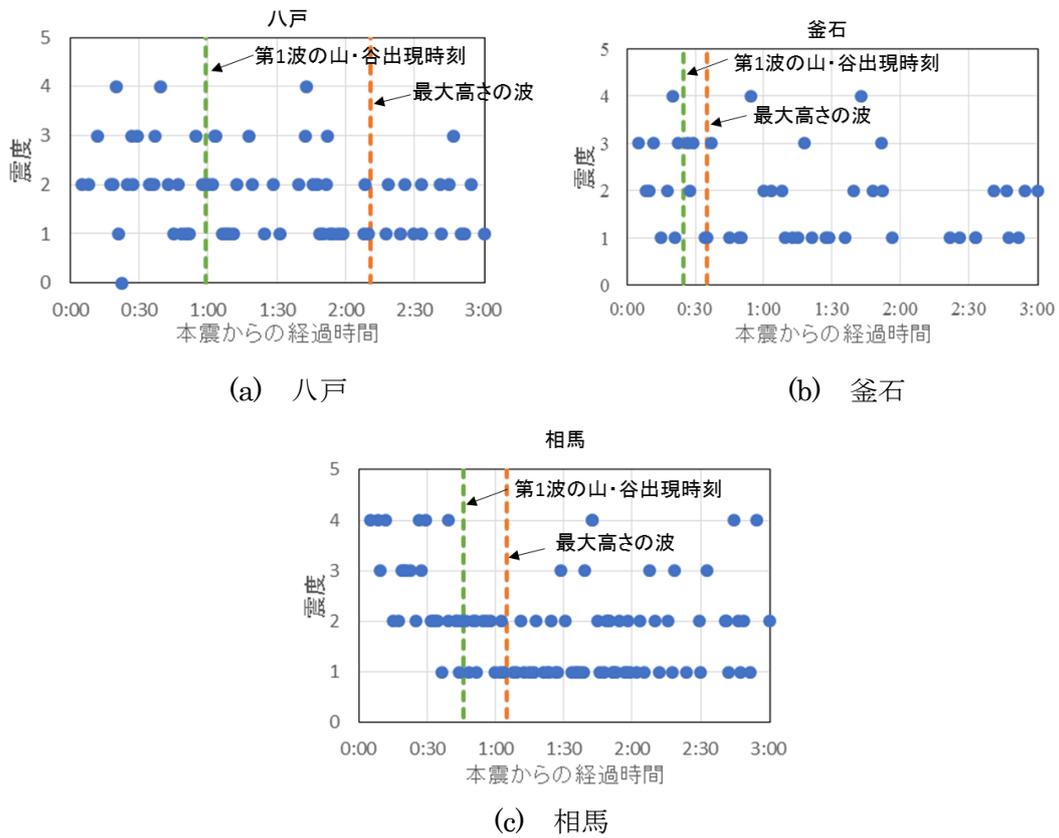


図 1.4-3 東北地方太平洋沖地震津波で観測された  
八戸，釜石，相馬の余震と本震からの経過時間<sup>46)</sup>

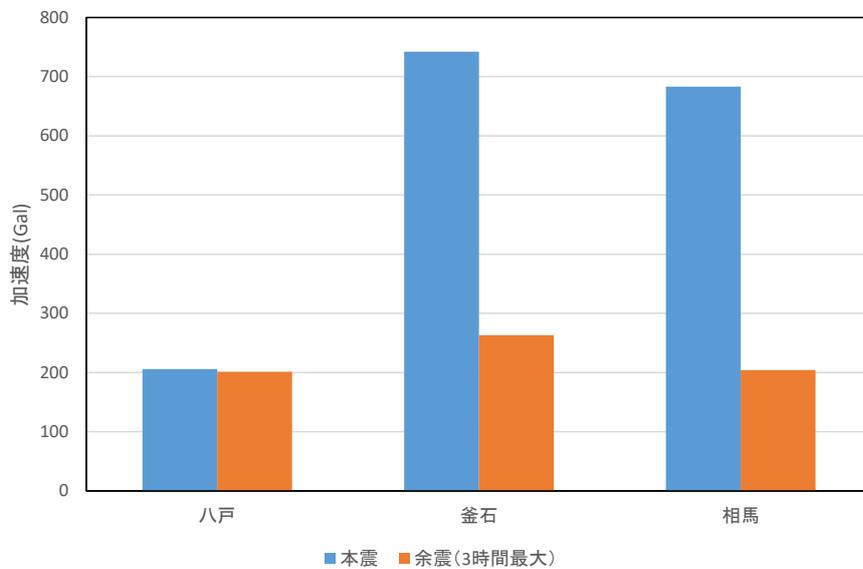


図 1.4-4 各地点の本震と本震発生後3時間以内の最大余震加速度<sup>46)</sup>

表 1.4-2 明治以降 1995 年までに、我が国で 100 人以上の死者、行方不明者を出した地震・津波<sup>47)</sup>

発生年月日	マグニチュード	地震名	死者 行方不明者 (人的被害)	最大震度
1872/3/14	7.1	浜田地震	死者:555	不明
1896/6/15	8.2	明治三陸地震	死者:21959	2~3
1923/9/1	7.9	関東大震災	死・不明10万5千余	6
1927/3/7	7.3	北丹後地震	死者:2912	6
1933/3/3	8.1	昭和三陸地震	死・不明3064	5
1944/12/7	7.9	東南海地震	死・不明1183	6
1945/1/13	6.8	三河地震	死者:1961	5
1946/12/21	8	南海地震	死・不明1443	5
1983/5/26	7.7	日本海中部地震	死者:104	5
1993/7/12	7.8	北海道南西沖地震	死者:202 不明:28	5
1995/1/17	7.3	阪神・淡路大震災	死者:6434 不明:3	7

表 1.4-3 日本付近で発生した主な人的被害を伴った地震(うち津波を伴ったもの)<sup>48)</sup>

発生年月日	マグニチュード	震央地名 地震名	死者 行方不明者 (人的被害)	最大震度	津波
2000/7/1	6.5	新島・神津島近海	死:1 負:15	6弱	7cm
2000/7/15	6.3	新島・神津島近海		6弱	7cm
2000/7/30	6.5	三宅島近海		6弱	14cm
2003/9/26	8	十勝沖地震	死:1 不明:1 負:84	6弱	255cm
2004/9/5	7.1	紀伊半島沖	負:6	5弱	66cm
2004/9/5	7.4	東海道沖	負:36	5弱	101cm
2004/11/29	7.1	釧路沖	負:52	5強	12cm
2005/8/16	7.2	宮城県沖	負:100	6弱	12cm
2007/3/25	6.9	能登半島地震	死:1 負:356	6強	22cm
2007/7/16	6.8	新潟県中越沖地震	死:15 負:2346	6強	32cm
2009/8/11	6.5	駿河湾	死:1 負:319	6弱	36cm
2010/2/27	7.2	沖縄本島近海	負:2	5弱	0.1m
2011/3/9	7.3	三陸沖	負:2	5弱	55cm
2011/3/11	9	東北地方太平洋沖地震	死:19418 不明:2592 負:6220	7	9.3m以上
2012/12/7	7.3	三陸沖	死:1 負:15	5弱	98cm
2013/10/26	7.1	福島県沖	負:1	4	36cm
2014/7/12	7	福島県沖	負:1	4	17cm
2016/11/22	7.4	福島県沖	負:21	5弱	144cm

1983年5月26日11時59分に秋田県沖を震源として、マグニチュード7.7の地震が発生し、同時に津波も発生した。最大震度は秋田県と青森県で震度5を観測している<sup>43)</sup>(図 1.4-5)。津波は最大で能代で194cmを観測しているが、遡上高は峰浜海岸で最大で13mを超える値を記録している<sup>26)</sup>。また、この地震は震源が岸から近く、一番早く津波が到達した深浦では、12時7分に津波の初動が確認されている。この地震と津波の防護施設の被害は、防波堤の倒壊や堤防の崩壊等が発生している。一方で、余震については、本震発生から1時間以内に20回程度発生しており、3分/回程度の割合で発生している(図 1.4-6)。この地震について、震度データベースより地震の発生時刻が確認でき、かつ津波の到達時刻と最大水位時間の記録がある深浦と酒田について地震と津波の重畳現象の有無の確認を行った。



図 1.4-5 日本海中部地震における震源と震度 43)

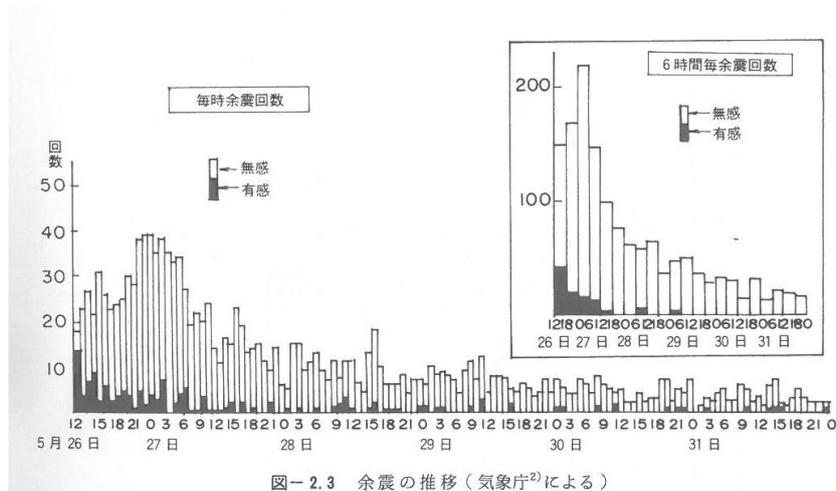


図 1.4-6 日本海中部地震における余震発生状況 49)

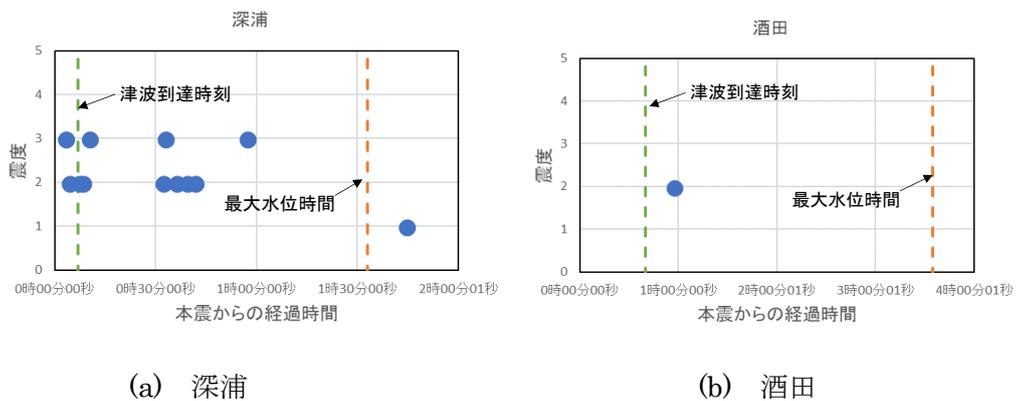


図 1.4-7 日本海中部地震で観測された深浦，酒田の余震と本震からの経過時間 43)44)

深浦については、津波到達時間から最大水位時間までの間に9回の余震が発生していることが確認できる。同様に酒田を見てみると、こちらは余震が1回しか確認できなかったが、津波到達時間から最大水位時間までの間に発生していることが分かる(図 1.4-7)。このことより、この地震においても、津波到達時に余震が発生し、構造物の安定性に影響を及ぼしている可能性が考えられる。

1993年7月12日11時59分に北海道南西沖を震源として、マグニチュード7.8の地震が発生し、同時に津波も発生した。最大震度は檜山江差町や小樽市、寿都町、深浦町で震度5を記録した<sup>43)</sup>(図 1.4-8)。津波の遡上高については、最大で奥尻島西岸で約30m確認されている。この地震と津波による港湾施設の被害については、奥尻港においては、地震と津波の影響で、ほとんどの施設で被害が発生している。被災形態も、滑動、転倒、基礎工の散乱等の壊滅的な被害となっている。一方で、余震については、本震発生から1時間以内に130回程度発生しており、0.46分/回程度と他の事例と比較してかなりの頻度で発生している(図 1.4-9)。この地震について、震度データベースより地震の発生時刻が確認でき、かつ津波の到達時刻と最大水位時間の記録がある江差と函館について地震と津波の重畳現象の有無の確認を行った。函館については、震源地と地形の関係から、津波到達時間と最大水位を確認した時間に広く間隔があり、その間に余震が発生していることが確認できた<sup>36)</sup>。江差については、津波到達時間と最大水位時間のために複数の余震が確認され、かつ最大水位時間とほぼ同時刻に震度3の余震が確認できた(図 1.4-10)。このことより、この地震においても、津波到達時に余震が発生し、構造物の安定性に影響を及ぼしている可能性が考えられる。



図 1.4-8 北海道南西沖地震における震源と震度<sup>43)</sup>

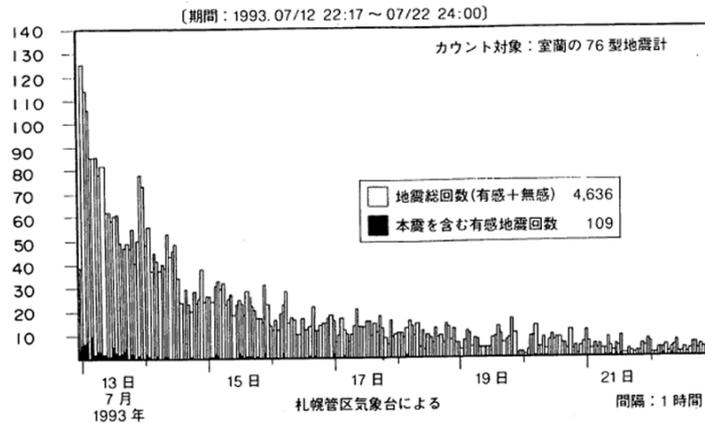


図-2.5 地震回数の日別推移

図 1.4-9 北海道南西沖地震における余震発生状況<sup>50)</sup>

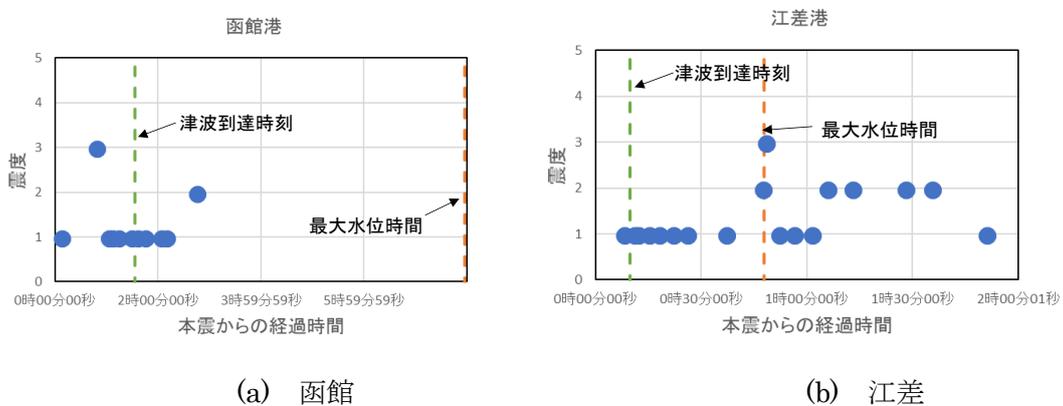


図 1.4-10 北海道南西沖地震で観測された函館，江差の余震と本震からの経過時間

2003年9月26日11時59分に十勝沖を震源として、マグニチュード8.0の地震が発生し、同時に津波も発生した。最大震度は浦河町で震度6弱を記録した<sup>26)</sup>(図 1.4-11)。現地調査結果より、海水面から津波の痕跡までの高さは、高いところで襟裳岬東側の百人浜で約4m確認されている。この地震と津波による港湾施設の被害については、地震により液状化が発生し、岸壁の法線の孕みだし等は確認されたが、津波による目立った被害は確認されていない。一方で、余震については、本震発生から1時間以内に20回程度発生しており、3分/回程度の割合で発生している。この地震について、震度データベースより地震の発生時刻が確認でき、かつ津波の到達時刻と最大水位時間の記録がある十勝と釧路について地震と津波の重畳現象の有無の確認を行った<sup>51)</sup>。十勝及び釧路ともに、津波到達時間と最大水位を確認した時間の間に、複数回の余震が確認でき、十勝では最大震度が3を記録している(図 1.4-12)。このことより、この地震においても、津波到達時に余震が発生し、構造物の安定性に影響を及

ぼしている可能性が考えられる。

このように、余震の規模や回数は、本震の発生位置や大きさによって異なるが、津波を伴う地震が発生した場合は、どのケースでも津波の第一波を観測してから最大高さの波を観測するまでの間に複数回の余震の発生が確認でき、場合によっては最大高さの波を観測した時刻と同時刻に余震が発生していることが確認できた。

このことより、津波を伴う地震が発生した際は、津波来襲時において余震が発生し重畳する可能性は少なくなく、防波堤に影響を与えている可能性が考えられる。

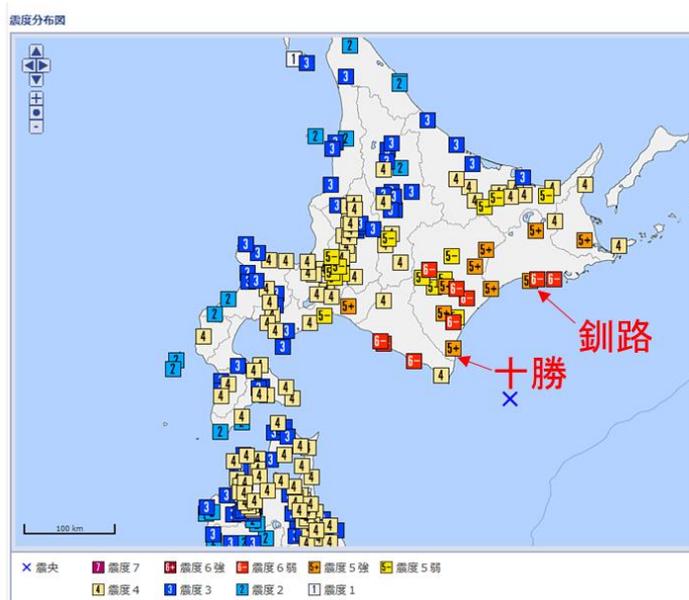
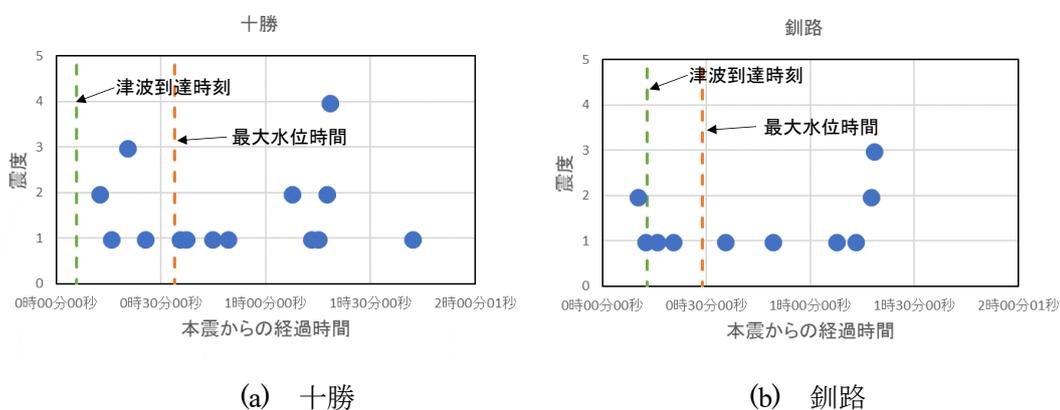


図 1.4-11 十勝沖地震における震源と震度<sup>43)</sup>



(a) 十勝

(b) 鉏路

図 1.4-12 十勝沖地震で観測された十勝、鉏路の余震と本震からの経過時間

## 1.5 目的と課題

これまでも述べているとおり、東北地方太平洋沖地震津波では、数多くの構造物が津波の影響により被災した。この経験を踏まえて、津波に対する防波堤の設計の考え方は見直された。そして、防波堤の耐津波設計に当たっては、設計で対象とする津波レベルを超える規模の津波が来襲する場合であっても、津波の波力や越流等により防波堤の機能が可能な限り損なわれないように付加的に対策を施し、津波に対して「粘り強い構造」を目指すものとする。防波堤の耐津波設計ガイドラインに定義されている。大きい規模の津波が来襲した際には、津波波力が増大するとともに、長時間にわたる一方向の強い流れが発生し、特に、防波堤を津波が越流する場合には、防波堤背後の基礎マウンドや海底地盤が洗掘されやすく、防波堤の直立部の倒壊に至る危険性が増大する。粘り強い構造を実現するためには、このような現象に対して、波力に対する抵抗力と洗掘に対する予防策が重要となる。その方法として、津波設計ガイドラインでは、防波堤のケーソン背後に腹付工を設置し、滑動抵抗力を増したり、背後地盤の洗掘を防止するために洗掘防止工を設置したりすることが提案されている。

しかし、ここで提案されている手法は、あくまでも津波の来襲時の津波越流を検討しての考え方である。1章4節「地震と津波の重畳の可能性」で述べたように、津波来襲時には、余震が発生する可能性が考えられ、その影響により、動水圧と慣性力が津波波力に付加される可能性も考えられる。その影響により、本来、粘り強い構造として設計された防波堤においても、津波来襲時において、その機能を発揮できず、これまで被害をもたらした津波同様、背後地域に甚大な被害が発生してしまう恐れが考えられる。

このようなことから、今後発生する事が予想される、大規模地震津波において、考えられる被害を想定し、本来防波堤が有すべき「粘り強い構造」としての機能が発揮できるように、備えておくことが必要であると考えられる。

そのため、本研究では、地震と津波が重畳する可能性に着目し、地震と津波重畳現象が防波堤にどのような影響を与えているか、水理模型実験を用いて解明し、今後起こりうる可能性がある大規模津波に対する検討手法について提案する事を目的とする。

## 1.6 本書の構成

本書の構成を以下に示す.

- 1章 はじめに
- 2章 地震と津波の重畳時における現象の確認
- 3章 地震と津波の重畳時の荷重の算定手法の提案
- 4章 地震と津波の重畳時における防波堤の形状の違い
- 5章 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
- 6章 まとめ

1章「はじめに」では、今日までの地震と津波による港湾の被災と復旧の歴史を振り返り、これまで、地震と津波の被害に対する対応について整理し、現状における地震と津波の検討手法についての考え方について示す。また、過去に発生した津波を伴う地震について、地震と津波の重畳現象の可能性について、具体的な例を示す。その後、本研究の「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」の目的と課題を述べる。

2章「地震と津波の重畳時における現象の確認」では、水理模型実験を用いて地震と津波の重畳現象を再現し、検討した内容について、実験概要、実験結果を述べ、実験結果をふまえて得られた結果について考察する。

3章「地震と津波の重畳時の荷重の算定手法の提案」では、2章で得られた実験結果を基に、これまで、地震と津波のそれぞれ提案されている検討手法について、地震と津波重畳時における適用性を検証し、地震と津波重畳時における外力の検討手法について提案し、その手法を用いてケーススタディを、釜石港の湾口防波堤と、現在、東南海・南海地震に向けた対策を行っている高知港三里地区東第一防波堤および南防波堤で行い、検討例として示す。

4章「地震と津波の重畳時における防波堤の形状の違い」では、本研究の検討手法について影響があると考えられる、構造の違いについて、水理模型実験を用い、検討した結果を示す。

5章「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、実験結果と粒子法を用いた数値計算結果の比較を行い、地震と津波の重畳現象における数値計算の適用の可能性について考察する。

6章「まとめ」で、本研究の成果を総括し、今後の課題についても示す。

## 参考文献

- 1) 気象庁：過去の地震津波災害, <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/higai/higai-1995.html>
- 2) 国立公文書館デジタルアーカイブ：震災予防調査会官制・御署名原本・明治二十五年・勅令第五十五号, [https://www.digital.archives.go.jp/DAS/meta/Detail\\_F000000000000015303](https://www.digital.archives.go.jp/DAS/meta/Detail_F000000000000015303)
- 3) 内閣府政策統括官・防災担当, 普及啓発・連携参事官室発行, 広報ぼうさい 第10回「1891年(明治24年)濃尾地震」, No.36, 2006.
- 4) 津波デジタルライブラリィ：津波災害予防に関する注意書, <http://tsunami-dl.jp/document/024>
- 5) 元田良孝, 津波災害復興計画の歴史的考察－高台移転と交通問題－, 運輸と経済 71(8), 64-68, 2011-08 運輸調査局.
- 6) 東京大学地震研究所：地震研究所のあゆみ, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/outreach/%e5%9c%b0%e7%90%83%e3%83%88%e3%83%aa%e3%83%93%e3%82%a2/%e5%9c%b0%e9%9c%87%e7%a0%94%e7%a9%b6%e6%89%80%e3%81%ae%e3%81%82%e3%82%86%e3%81%bf/?pid=2649>
- 7) 津波デジタルライブラリィ：昭和19年12月7日発生 東南海地震津波 体験談と記録集, <http://tsunami-dl.jp/document/004>
- 8) 減災を考える会のブログ：地震等の災害の歴史 8【「戦争に隠された地震災害」終戦前後の地震災害】No.1, <https://blogs.yahoo.co.jp/tnarumiya2001/55797750.html>
- 9) 時事通信：【特集】日本の震災 南海地震(1946年), [http://www.jiji.com/sp/v2?id=20100822earthquake\\_disaster\\_of\\_japan\\_07](http://www.jiji.com/sp/v2?id=20100822earthquake_disaster_of_japan_07)
- 10) 時事通信：【特集】日本の震災 福井地震(1948年), [http://www.jiji.com/sp/v2?id=20100822earthquake\\_disaster\\_of\\_japan\\_08](http://www.jiji.com/sp/v2?id=20100822earthquake_disaster_of_japan_08)
- 11) 社団法人日本港湾協会, 日本港湾史, p.5, 1978.
- 12) 社団法人日本港湾協会, 日本港湾史, p.8, 1978.
- 13) 社団法人日本港湾協会, 日本港湾史, p.17, 1978.
- 14) 法令データ提供システム：港湾整備緊急措置法, <http://law.e-gov.go.jp/haishi/S36HO024.html>
- 15) 運輸技術研究所港湾水工部：伊勢湾台風調査報告(愛知県下), 1960.
- 16) 運輸技術研究所港湾水工部：伊勢湾台風三重県調査中間報告書, 1960.
- 17) 独立行政法人・防災科学技術研究所・自然災害情報室：チリ地震津波, <http://dil.bosai.go.jp/disaster/1960chile/lesson01.html>
- 18) 山村武彦：1960年のチリ地震津波災害(50年目の現地調査・2010年2月), <http://www.bo-sai.co.jp/chirijisintunami.html>
- 19) 社団法人日本港湾協会, 日本港湾史, p.231, 1978.
- 20) 運輸省第二港湾建設局：第二港湾建設局のあゆみ, pp.783-788, 1993.
- 21) 津波デジタルライブラリィ：「稲邨の火」と史跡広村堤防, <http://tsunami-dl.jp/document/042>
- 22) 山下文男：三陸海岸・田老町における「津波防災の町宣言」と大防潮堤の略史, 歴史地震(19)165-171, 2003 歴史地震研究会.
- 23) 法令データ提供システム：大規模地震対策特別措置法, <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S53/S53HO073.html>
- 24) 四国災害アーカイブス：昭和35年のチリ地震津波, <https://www.shikoku-saigai.com/archives/9368>
- 25) 運輸省第二港湾建設局：第二港湾建設局のあゆみ, pp.815-821, 1993.
- 26) 谷本勝利, 高山知司, 村上和男, 村田繁, 鶴谷広一, 高橋重雄, 森川雅行, 吉本靖俊, 中野晋, 平石哲也：1983年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察, 港湾空港技術研究所資料, No.470.
- 27) 運輸省港湾局：港湾における大規模地震対策施設の整備構想, 1984.
- 28) 運輸省第三港湾建設局 震災復興建設局：神戸港震災復興誌 -1995年阪神・淡路大震災・港湾施設の復旧の記録.
- 29) 運輸省港湾局：大規模地震対策施設整備の基本方針, 1996.
- 30) 内閣府：中央防災会議 東南海・南海地震等に関する専門調査会, [http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/tounankai\\_nankaijishin/index\\_nankai.html](http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/tounankai_nankaijishin/index_nankai.html)
- 31) 北島昭一, 中野拓治, 堀井修身, 柿崎秀作, 降旗健一, 花木芳雄：被災防波堤集覧, 港湾空港技術研究所資料, No.58, 1968.
- 32) 武山秀夫, 中山種清：被災防波堤集覧(その2), 港湾空港技術研究所資料, No.200, 1975.
- 33) 服部千佳志, 柴田鋼三, 大堀晃一：被災防波堤集覧(その3), 港湾空港技術研究所資料, No.485, 1984.

- 34) 宮井真一郎, 大平勝司, 塩見雅樹: 被災防波堤集覧(その4), 港湾空港技術研究所資料, No.765, 1993.
- 35) 浅井茂樹・宮田正史: 被災防波堤集覧(その5), 国土技術政策総合研究所資料, No.717, 2013.
- 36) 稲富隆昌, 上部達生, 井合進, 風間基樹, 山崎浩之, 松永康夫, 関口信一郎, 水野雄三, 藤本義則: 1993年北海道南西沖地震による港湾施設被害報告, 港湾空港技術研究所資料, No.791, 1994.
- 37) 港湾工事設計示方要覧.
- 38) 東京法令出版: 港湾小六法 平成24年, 2012.
- 39) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 平成19年度版, 2007.
- 40) 国土交通省港湾局: 防波堤の耐津波設計ガイドライン, 2013.
- 41) 池野正明, 松山昌史, 榊山勉, 柳沢賢: ソリトン分裂と砕波を伴う津波の防波堤に作用する波力評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集第52巻, pp.751~755, 2005.
- 42) 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.
- 43) 気象庁: 震度データベース, <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.php>
- 44) 気象庁: 日本国内の津波観測施設で観測された津波の観測値, 気象庁技術報告, 第133号, 2012.
- 45) 防災科学研究所: 強震観測網(K-NET, KIK-net), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 46) 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.
- 47) 気象庁: 過去の地震津波災害, <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/higai/higai-1995.html>
- 48) 気象庁: 日本付近で発生した主な被害地震(平成8年以降), <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/higai/higai1996-new.html>
- 49) 運輸省第一港湾建設局: 秋田港地震災害復旧報告 1983年日本海中部沖地震, 昭和59年3月.
- 50) 高山知司, 鈴木康正, 鶴谷広一, 高橋重雄, 後藤智明, 永井紀彦, 橋本典明, 長尾毅, 細山田得三, 下迫健一郎, 遠藤仁彦, 浅井正: 1993年北海道南西沖地震津波の特性と被害, 港湾空港技術研究所資料, No.775, 1994.
- 51) 富田孝史, 河合弘泰, 柿沼太郎: 平成15年(2003年)十勝沖地震津波による被害と津波の特性, 港湾空港技術研究所資料, No.1082, 2004.

## 2. 地震と津波の重畳時における現象の確認

### 2.1 水理模型実験概要

#### 2.1.1 実験の目的

地震と津波の重畳現象について、地震と津波のそれぞれにおける破壊のメカニズムは確認されているが、地震と津波が重畳した場合に、どのような外力がかり、破壊にいたるかは確認されていない。そのため、地震と津波が重畳可能な実験施設を用いて、地震と津波の重畳現象を再現し、防波堤に働く外力の解明と、破壊に至るメカニズムについて明らかにすることを目的とした。

#### 2.1.2 実験施設と実験断面

##### (1)実験施設

実験は港湾空港技術研究所所有の大規模波動地盤総合水路(長さ184m, 幅3.5m, 高さ12m)で行った(図 2.1-1)。水路には2台の軸流可動翼式ポンプにより最大流量20 m<sup>3</sup>/sの流れを発生させることができる還流装置と最大加速度980Gal(積載重量170t作用時)の地震を発生させることのできる水中振動台があり、それぞれ津波による越流と地震を再現することができる。水中振動台は長さ12m, 幅2.5mで1方向(水路の長手方向)の加振が可能である<sup>1)2)3)</sup>。

##### (2)実験断面

図 2.1-2は水路における模型配置図で、図 2.1-3は実験断面図である。模型は、外洋に面したK港の防波堤の縮尺1/20の断面を製作した。水中震動台の上に厚さ 0.75mの砂地盤を製作し、その上に5号砕石からなるマウンドを設置した。このマウンド上に質量と重心位置を調整した防波堤模型を設置した。防波堤模型は図 2.1-4のとおり、3函用意し、中央部はK港の防波堤の縮尺1/20と同様な延長とし、1.26mとし、両端の防波堤模型は、水路幅との関係により、0.93mとした。相似関係については、実物換算すると、越流に関してはフルード則から、長さは20倍、模型質量は8000倍で、地震に関しては井合<sup>4)</sup>によって1G場での振動実験の相似則が提案されており、時間は9.5倍、加速度は1倍となる。

#### 2.1.3 実験方法と計測

##### (1) 実験方法

津波と地震を同時に作用させる場合には、まず、初期水位を設定し、給水をしておく(図 2.1-5(a))。実験開始時に、還流装置によって流れを起こして防波堤上の越流状態を再現させる(図 2.1-5(b))。還流装置を作動させ、越流状態を2分程度継続し、防波堤前後の水位差が安定し、越流が定常状態となった事を確認した後に(図 2.1-5(c))、水中振動台によって加振を行い、地震と津波の重畳現象を再現した(図 2.1-5(d))。



図 2.1-1 実験施設

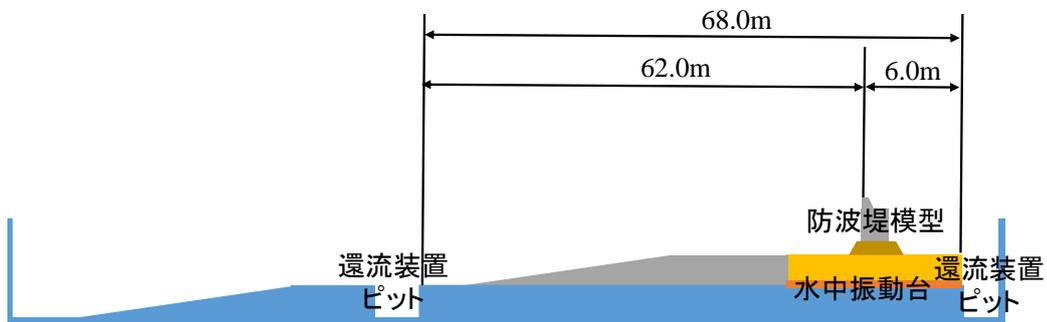


図 2.1-2 模型配置図

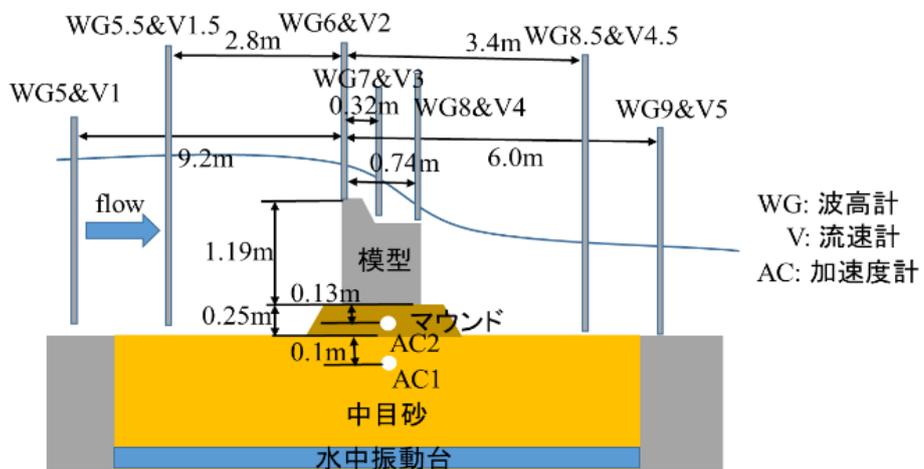


図 2.1-3 実験断面

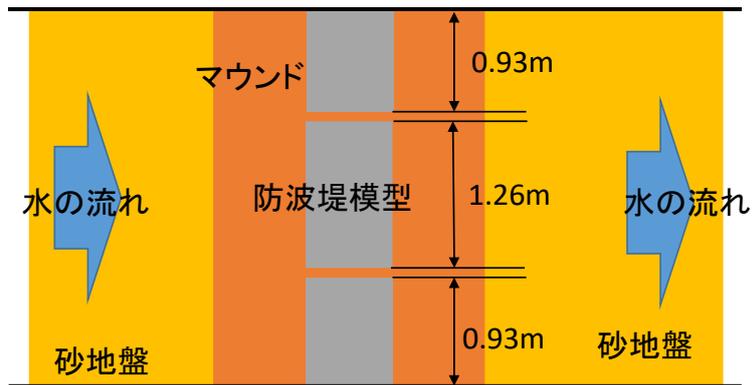


図 2.1-4 実験平面

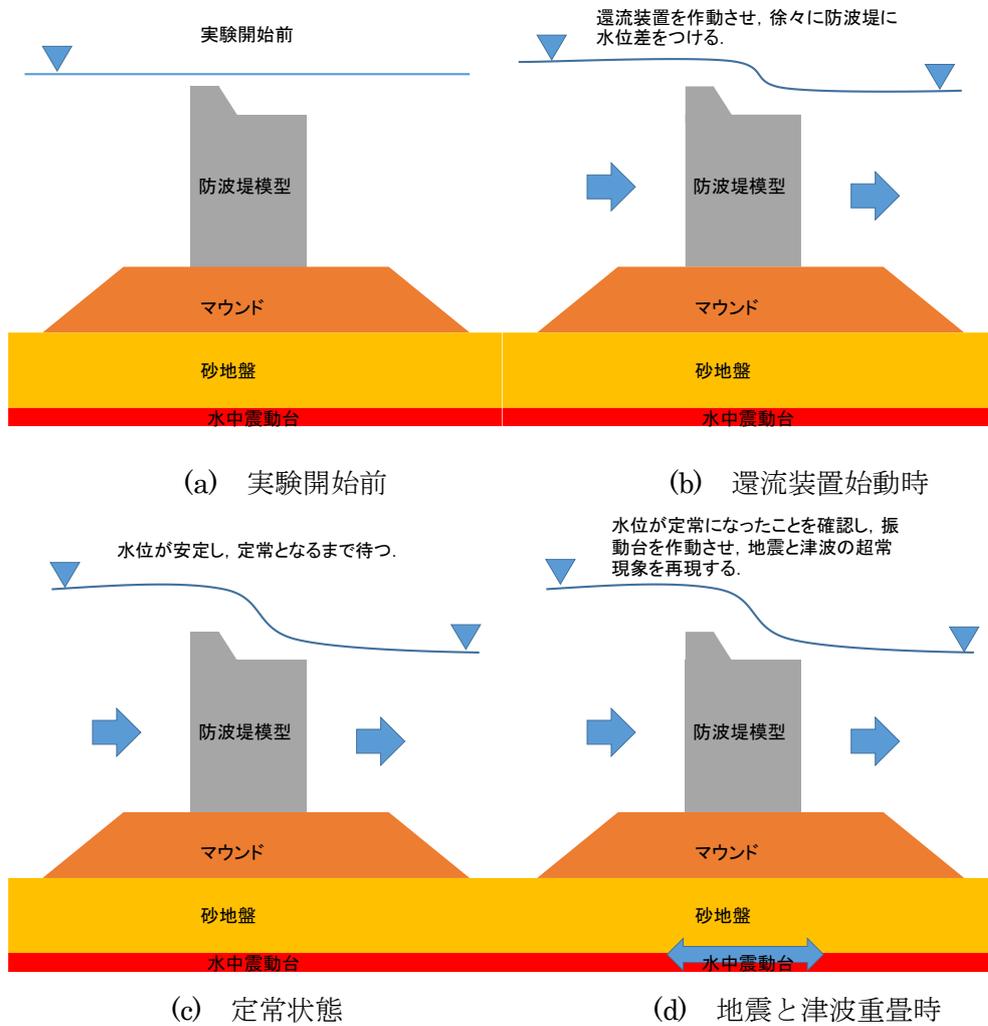


図 2.1-5 実験方法概略図

(2) 計測

沖合と模型の周囲に波高計(WG：ケネック製，CHT6-100)を9本，流速計を5本設置した．流速計(V)は水中部に電磁流速計(ケネック製，VM-801HFS)を，気中になる可能性がある箇所にはプロペラ流速計(ケネック製，VO-301A)を用いた．また，砂地盤とマウンド内部には加速度計(AC)を埋設している．埋設する加速度計については，実験中に計測方向が変わらないように，加速度計に板を設置して埋設した．

図 2.1-6はケーソンへの加速度計，波圧計，間隙水圧計，変位計の設置状況である．防波堤模型には，前面，背面及び天端に波圧計(PG：エスエスケイ製，P310V-02S)を，模型底面には間隙水圧計(UG：エスエスケイ製，P310A-02S)を設置した．また，模型底面と天端からそれぞれ10cmの位置に加速度計(AC：共和電業製，ASW-2A)を設置した．模型の変位を計測するため，天端から10cmと底面から10cmの箇所にワイヤー式の変位計(DT：共和電業製，DTP-D-5KS-P)を設置して変位を計測した．なお，ワイヤー式変位計は越流の流れの影響を極力少なくするために，流れが作用する箇所においては保護管を設置した．計測器の設置状況を図 2.1-7に示す．

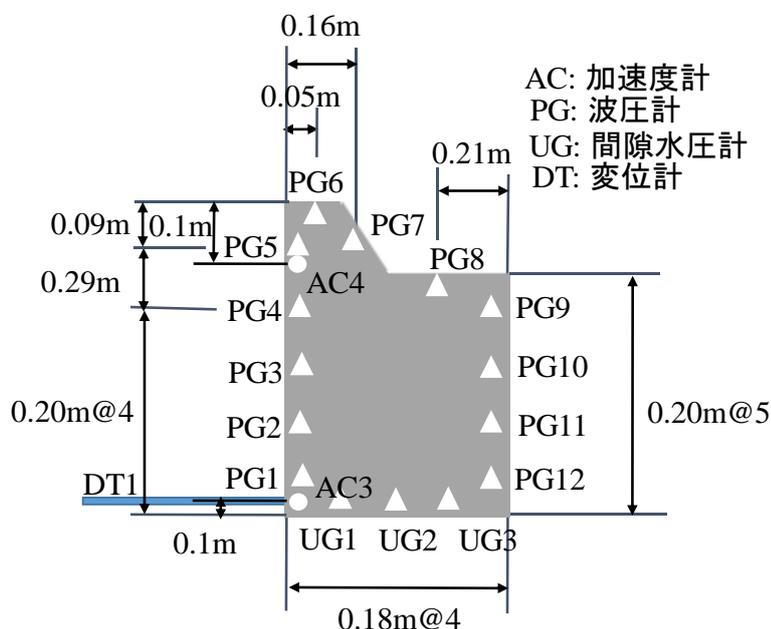
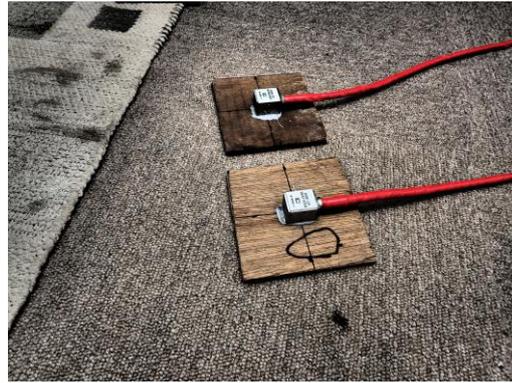


図 2.1-6 計測器配置図



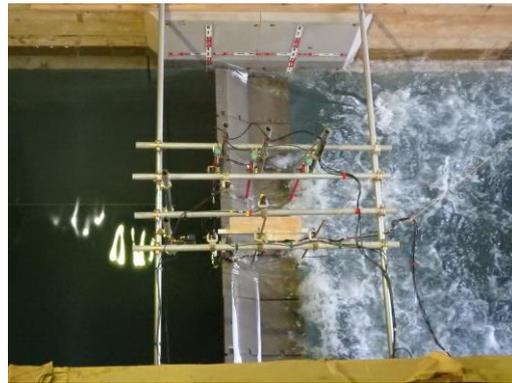
(a) 模型背面



(b) 地中加速度計



(c) 模型前面



(d) 模型上面

図 2.1-7 模型および計測器設置状況

## 2.2 地震と津波の重畳を再現した実験結果

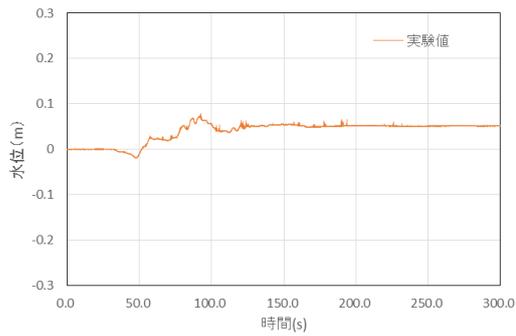
### 2.2.1 地震と津波の重畳実験

地震と津波の重畳実験について、実験時に得られたデータの一例を示す。図 2.2-1 は模型前面と背面の水位の時刻歴である。時刻歴は初期水位を 0 としている。還流装置を起動することにより、模型前面水位(WG5)の水位が上昇し、模型背面水位(WG9)が低下している。また、実験時には、はじめに計測を開始し、計測器が正常に作動していることを確認した後に、還流装置を起動している。そのため、実験データにおいては最初の 30s が初期値となり、おおむね 30s 後に還流装置が作動している。還流装置作動後、120s 程度で水位が一定となっている。水位が一定となった後、還流装置作動後 180s あたりで、水中振動台を起動させ、加振を行い、地震と津波の重畳現象を再現している。なお、越流のみの検討については、地震と津波を重畳させる前のデータを用いて、検討を行っている。

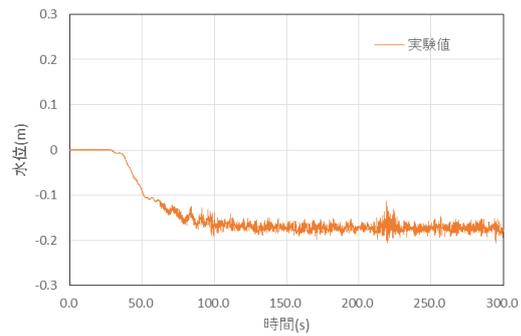
図 2.2-2 は模型下側加速度(AC3)と模型上側加速度(AC4)を示している。図 2.2-2 で示しているケースは 2Hz、50Gal のケースであるが、実験では、1 ケースあたり、30 波の加振を行い、検討している。なお、加振は最初 3 波と最後 3 波は、緩起動および緩停止をおこなっている。

図 2.2-3 は変位計(DT1)の時刻歴である。変位計は、ワイヤー式変位計を用いたが、ノイズが大きい。しかし、加振時における変位や残留変位は確認が可能であった。

図 2.2-4 は波圧の時刻歴の例である。波圧計は初期値を 0 として、動圧を計測している。図 2.2-4(a)に示す模型前面波圧は、模型前面水位が上昇するに従い、波圧が増加し、加振によって、地震の動水圧が発生していることがわかる。また、図 2.2-4(b)に示す模型背面波圧は、模型背面水位の低下に伴い、波圧が低下し、加振によって、地震の動水圧が発生している。図 2.2-4(c), (d)は模型天端の波圧であるが、図 2.2-4(c)は模型前面パラペット上の波圧で、ある程度の水位が確保されていることから、地震と津波重畳時においても地震による動水圧が発生している様子がわかる。一方で、模型背面水位に近い、図 2.2-4(d)においては、水位の低下の影響で、地震と津波重畳時の動水圧の発生は確認できない。図 2.2-4(e), (f)は模型底面の波圧であるが、他の波圧計同様、水位の影響により、波圧が変動した後に、地震と津波の重畳時の地震による動水圧が発生している様子が確認できる。

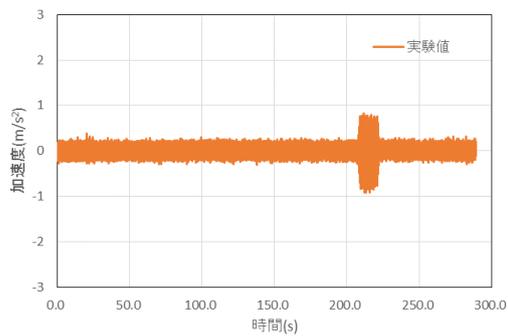


(a) 模型前面水位(WG5)

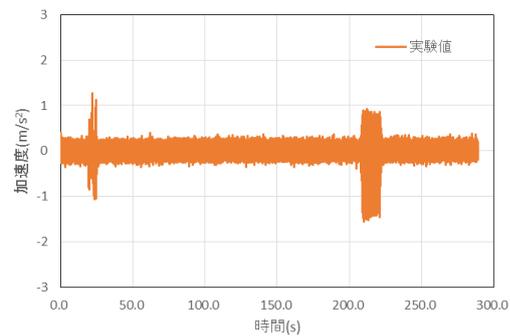


(b) 模型背面水位 (WG9)

図 2.2-1 水位の時刻歴例



(a) 模型下側加速度(AC3)



(b) 模型上側加速度 (AC4)

図 2.2-2 加速度の時刻歴例

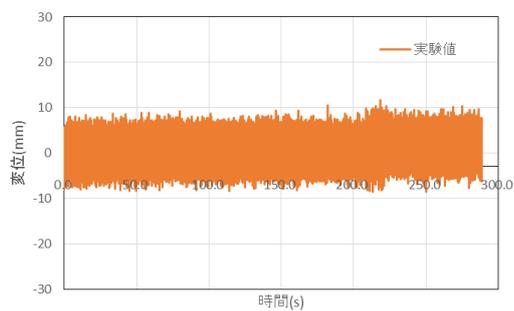
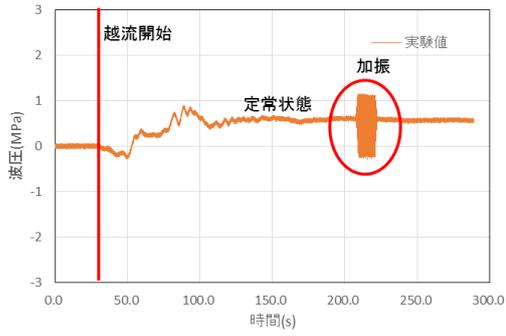
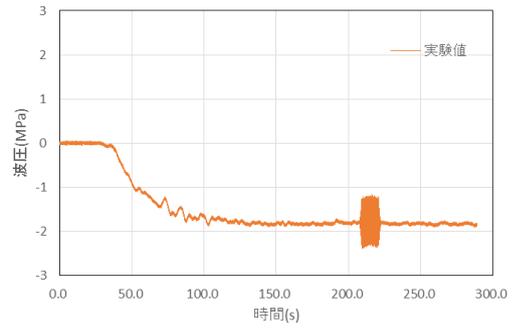


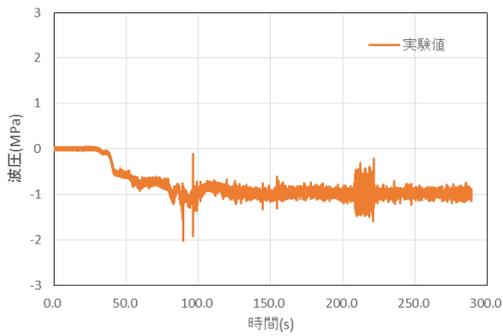
図 2.2-3 変位の時刻歴例



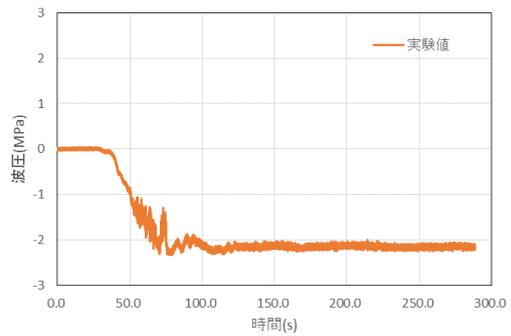
(a) 模型前面波圧(PG1)



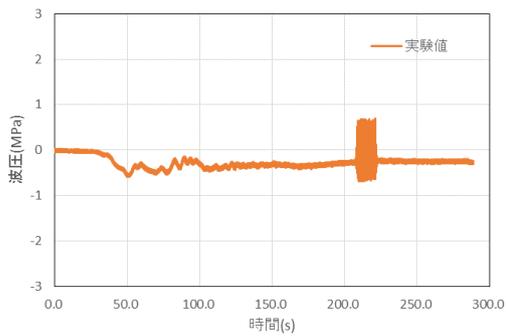
(b) 模型背面波圧(PG12)



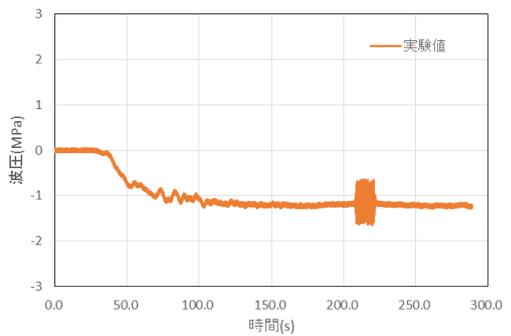
(c) 模型前面天端波圧(PG6)



(d) 模型背面天端波圧(PG8)



(e) 模型前面底面波圧(UG1)



(f) 模型背面底面波圧(UG3)

図 2.2-4 波圧の時刻歴例

## 2.2.2 加速度の違いによる検討

### (1) 地震と津波重畳時における防波堤に作用する加速度への影響

実験は表 2.2-1 のとおり行った。加速度について、岸側変位時(津波と同じ方向の変位)と沖側変位時(津波と逆の方向の変位)の砂地盤の最大加速度(AC1)とマウンドの最大加速度(AC2)、ケーソン下側の最大加速度(AC3)、ケーソン上側の最大加速度(AC4)の関係を図 2.2-5 に示す。なお、時刻歴の加速度については、1 Gal は  $0.01 \text{ m/s}^2$  に相当する。沖側変位時(津波と逆方向の変位)においては、75 Gal で加振した津波がある場合は case-1.6(水位差 0.19 m, 75 Gal)においては砂地盤の加速度に対して模型上側加速度(AC4)が 3.0 倍程度であるのに対し、津波がない場合の case-1.10(水位差 0.00 m, 75 Gal)では 6.5 倍と大きく増大されていた。一方で、岸側変位時(津波と同じ方向の変位)は、75 Gal で加振した津波がある場合は case-1.6(水位差 0.19 m, 75 Gal)においては 2.3 倍程度であるのに対し、津波がない場合の case-1.10(水位差 0.00 m, 75 Gal)では 1.5 倍であった。岸側変位時(津波と同じ方向の変位)と比べて差は小さかったが、これは地震のみのケースにおいては沖側への変位の影響を受けたためと考えられる。

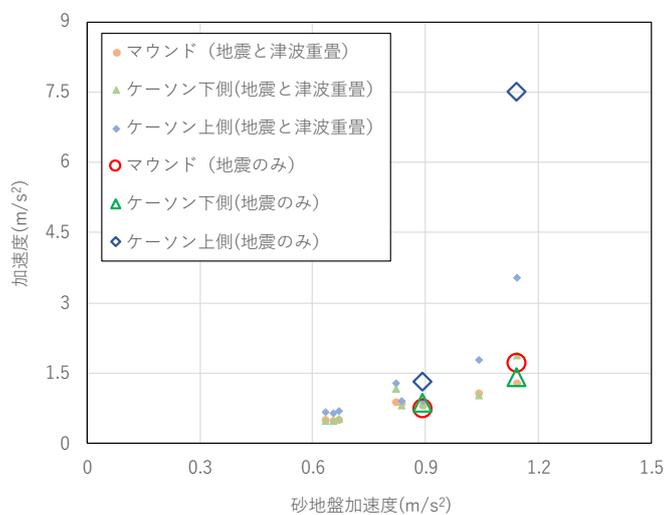
次に case-1.2(水位差 0.14 m, 50 Gal)と case-9(水位差 0.00 m, 50 Gal)の加振時の時刻歴の一部を抽出したものを図 2.2-6 に示す。砂地盤(AC1)、マウンド(AC2)、ケーソン下側(AC3)の加速度については、どちらのケースにおいても同様な挙動を示していることがわかる。一方で、ケーソン上側(AC4)においては、津波が無い case-1.9(水位差 0.00 m, 50 Gal)では地震の方向によらず加速度が増大している。津波がある case-1.2(水位差 0.14 m, 50 Gal)では、岸側に変位

表 2.2-1 実験ケース

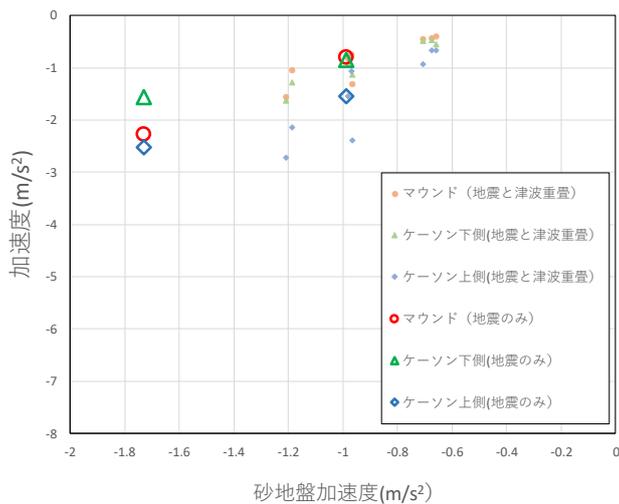
	実験条件	加振(Gal)	水位差(m)
case-1.1	地震と津波(加振と越流)	25	0.16
case-1.2	地震と津波(加振と越流)	50	0.14
case-1.3	地震と津波(加振と越流)	75	0.13
case-1.4	地震と津波(加振と越流)	25	0.19
case-1.5	地震と津波(加振と越流)	50	0.22
case-1.6	地震と津波(加振と越流)	75	0.19
case-1.7	地震と津波(加振と越流)	25	0.26
case-1.8	地震と津波(加振と越流)	50	0.27
case-1.9	地震のみ(加振のみ)	50	-
case-1.10	地震のみ(加振のみ)	75	-

する際は加速度の増大は抑えられるものの、最大値の継続時間が増加している。

これらの結果より、地震と津波の重畳現象における防波堤の加速度に与える影響については、津波が防波堤を越流することにより、その流れの影響を受けて防波堤上側における加速度の増大を抑制する可能性があることが確認できた。

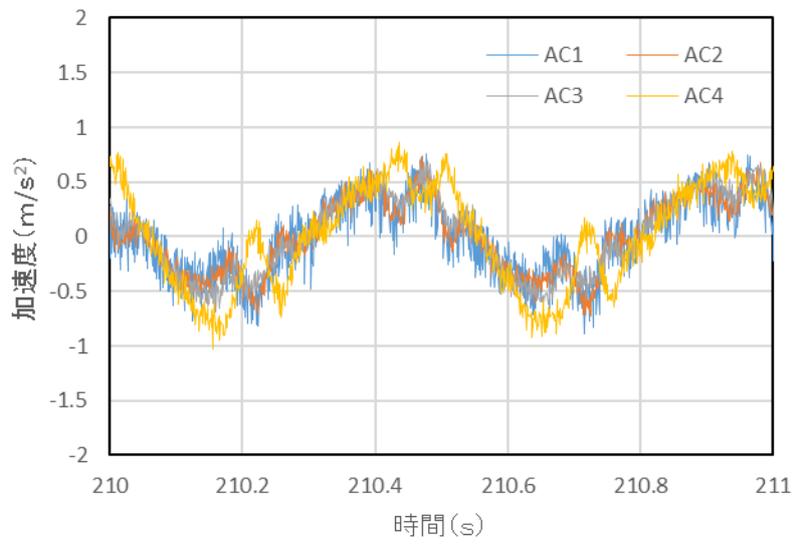


(a) 沖側変位時(津波と逆方向の変位)

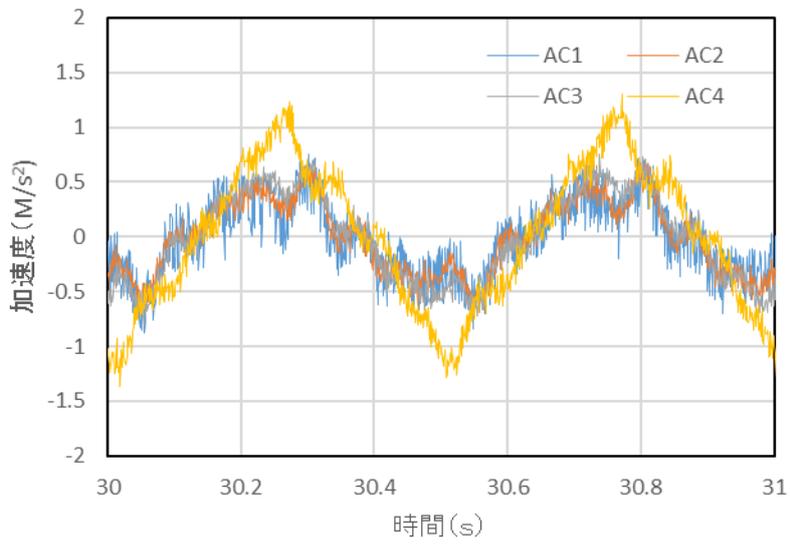


(b) 岸側変位時(津波と同じ方向の変位時)

図 2.2-5 加速度の関係<sup>5)</sup>



(a) case-1.2(水位差 0.14m 50Gal)



(b) case-1.9(水位差 0.00m 50Gal)

图 2.2-6 加速度時刻歴(抜粋)<sup>5)</sup>

## (2) 地震と津波重畳時における水平残留変位への影響

水平残留変位について、最大加速度との関係について確認した。模型最大(最小)加速度はケーソン下側(AC3)とケーソン上側(AC4)を平均した最大(最小)をとり、水平残留変位の方向と同じ向きの最大加速度を用いている。残留変位は沖側(-), 岸側(+)である。結果を図 2.2-7 に示す。地震と津波重畳時には、水平変位は岸側(津波と同じ方向)に発生し、case-1.8(水位差 0.27 m, 50 Gal)で最大水平残留変位が 8.2 mm であった。一方で、地震のみの場合は沖側(津波と逆の方向)に水平変位が発生し、case-1.10(水位差 0.00 m, 75 Gal)で最大水平変位が 7.4 mm であった。case-1.8(水位差 0.27 m, 50 Gal)の模型最大加速度が 1.22 m/s<sup>2</sup> に対して case-1.10(水位差 0.00 m, 75 Gal)の模型最小加速度は -2.05 m/s<sup>2</sup> と大きく異なり、同程度の残留水平変位であったが、地震と津波の重畳時には模型最大加速度が小さく、水平残留変位は津波の影響も受けていることがわかる。次に、時刻歴について、残留水平変位が大きい、case-1.6(水位差 0.19 m, 75 Gal)および case-1.10(水位差 0.00 m, 75 Gal)について確認した。結果を図 2.2-8 に示す。地震のみの case-1.10(水位差 0.00 m, 75 Gal)は、水平変位(DT1)とケーソン下側の加速度(AC3)が同じ挙動を示しているが、ケーソン上側の加速度(AC4)が大きく反応しており、ケーソン上側が大きく振れている様子が伺える。また、使用した模型の重心が、模型中心より沖側にあることから、模型の水平変位が沖側に作用したものと考えられる。一方で地震と津波が重畳した case-1.6(水位差 0.19 m, 75 Gal)では、case-1.10(水位差 0.00 m, 75 Gal)と同様に、水平変位(DT1)とケーソン下側の加速度(AC3)は同じ挙動を示しているが、ケーソン上側の加速度(AC4)は岸側変位時(津波と同じ方向)

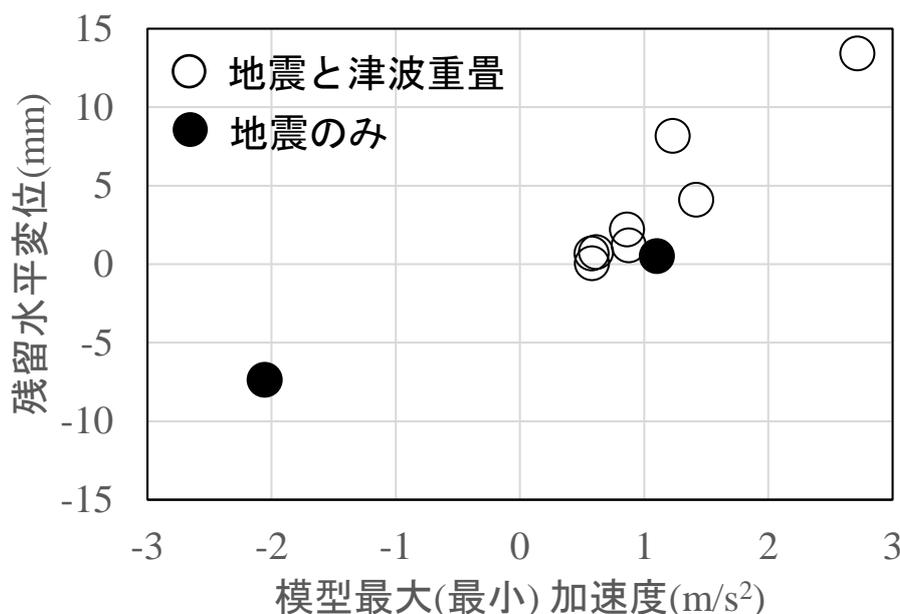
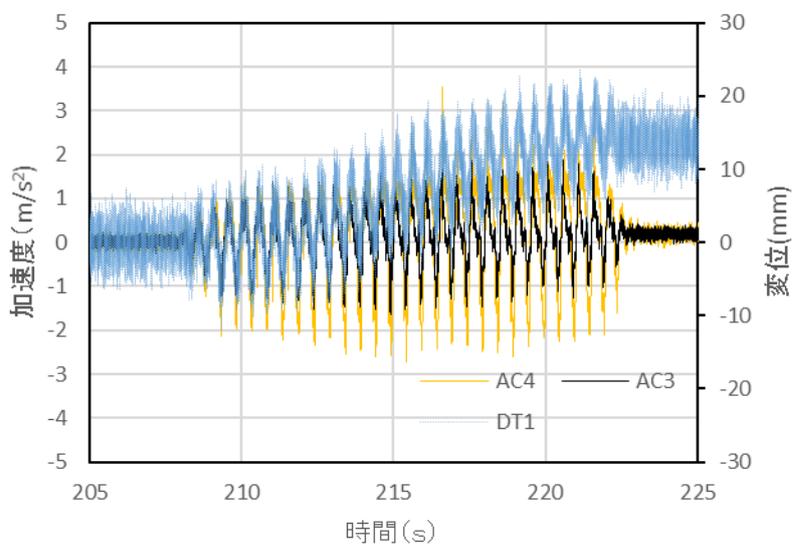
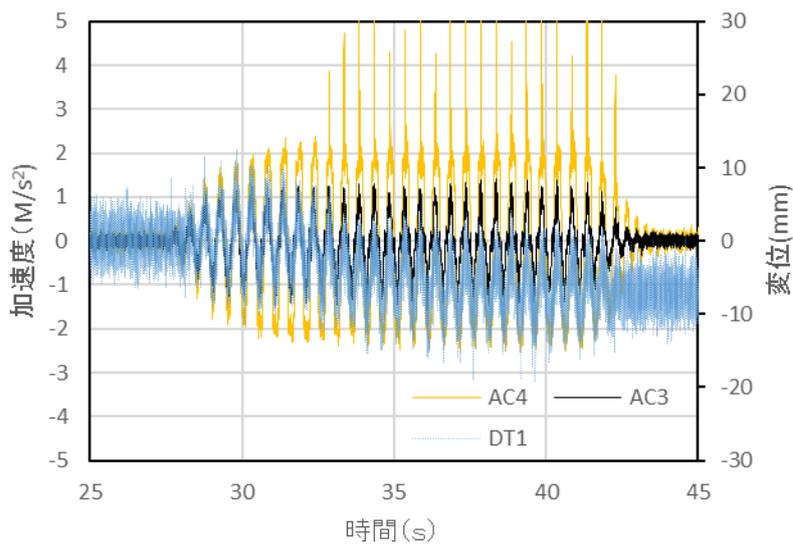


図 2.2-7 水平残留変位と模型最大(最小)加速度の関係<sup>5)</sup>

にピークの時間が長く、水平変位と挙動が一致していない。これは、津波の越流によりケーソンが岸側(津波と同じ方向)に押されているため、沖側(津波と逆の方向)に変位が変わる際に時間差が生じているものと考えられる。



(a) case-1.6(水位差 0.19m 75Gal)



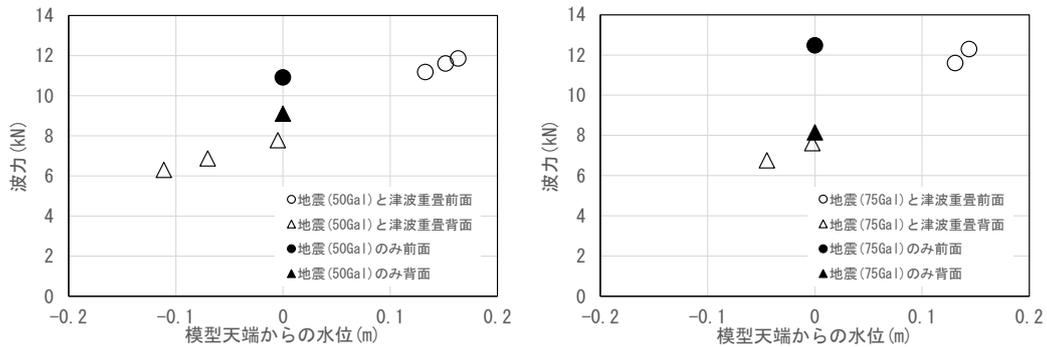
(b) case-1.10(水位差 0.00m 75Gal)

図 2.2-8 加速度と水平変位時刻歴(抜粋)<sup>9)</sup>

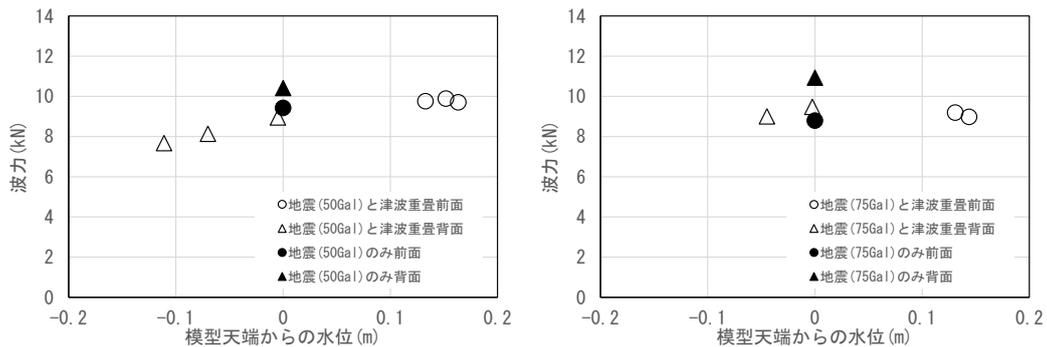
この結果より、地震のみの場合は、地震の影響により、重心のある方向に変位していることが確認できた。一方で、地震と津波が重畳した場合は、地震のみで50Galで加振したケースでは、ケーソンに残留変位がほとんど発生しないが、地震発生時に越流の影響でケーソンが押されることにより、同程度の地震においてもケーソンに残留変位が発生する事がわかった。

### (3) 地震と津波重畳時における波力への影響

波力について、水位と波力の関係について検討した。水位と波力の関係について図 2.2-9に示す。横軸の水位は、模型前面の波力に対して模型前面水位(WG5)、模型背面の波力に対しては模型背面水位(WG9)である。地震のみのケースと、地震と津波が重畳したケースを比較すると、模型前面においては、岸側変位時(津波と同じ方向の変位)は水位の違いによる



(a) 岸側変位時(津波と同じ方向の変位)



(b) 沖側変位時(津波と逆の方向の変位)

図 2.2-9 水位と波力の関係<sup>5)</sup>

波力の違いが確認できたが、沖側変位時(津波と逆方向の変位)は水位による明確な違いは確認できなかった。これは、越流による加速度の低減により地震による動水圧の影響が小さくなったためであると考えられる。一方で、模型背面の波力は、岸側変位時(津波と同じ方向の変位)と沖側変位時(津波と逆の方向の変位)のどちらにおいても、水位の違いの影響で波力が小さい。また、地震のみのケースにおいては、地震の向きが変わると模型に働く波力の向きも変わる。しかし、地震と津波が重畳したケースは、常に水位差の影響により沖側から岸側に波力がかかっているため、地震の動水圧の影響により、波力の増減は確認できたが、模型に働く波力の方向は地震の向きによらず、一定だった。地震と津波の重畳においては、加速度と水位差の大きさの関係にもよるが、越流の影響が加速度の影響より大きい場合においては、常に岸側に波力がかかることを明らかにした。

次に、波力と水平残留変位の関係を図 2.2-10 に示す。波力は水平残留変位の方向と同じ向きの最大波力を用いている。地震のみのケースについては、背面波力が前面波力より大きくなった際に、沖側への残留変位水平変位が発生している。一方で、地震と津波が重畳したケースでは、模型前面と模型背面の波力の差が大きくなるにつれて残留水平変位も大きくなっていることが確認できた。この波力の差については、模型に働く加速度の大きさと越流による水位差の双方が関係していると考えられる。

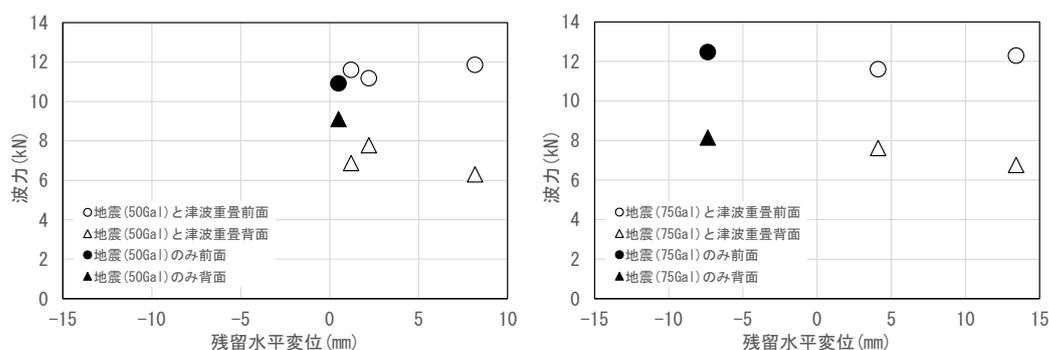
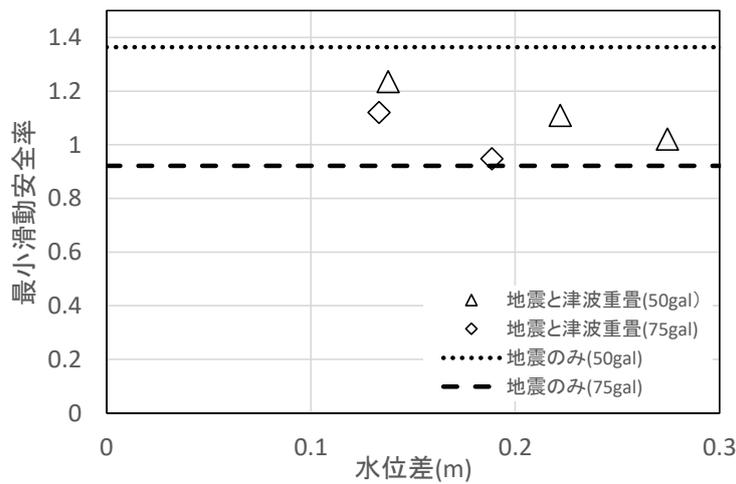


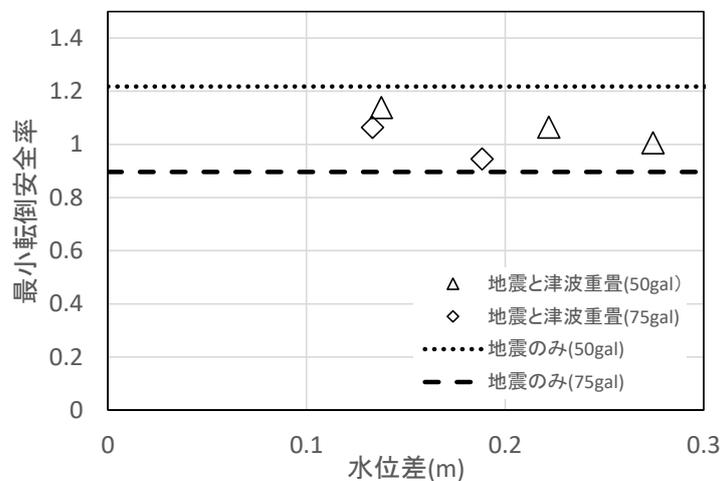
図 2.2-10 波力と残留水平変位の関係<sup>5)</sup>

(4) 地震と津波重畳時における安全率への影響

滑動と転倒の安全率と水位差の関係について検討した。滑動安全率は、外力として模型前面と背面に設置した波圧計のデータに該当する箇所の面積をかけ、越流の波力と地震時の動水圧をとして用い、模型上側と下側に設置した加速度計のデータを平均したものに模型重量をかけたものを模型にかかる慣性力として用いた。抵抗力としては、模型とマウンドの摩擦抵抗を用い、滑動安全率を求めた。転倒安全率については、模型の背面下端を支点とし、外力として模型周囲の全ての波圧計のデータに該当する箇所の面積をかけたものを波力と動水圧によるモーメント、模型上側と下側の加速度計のデータを平均したものに模型重量をかけたものを慣性力として用いた。抵抗力は、模型の背面下端を支点とし、模型の重量を



(a) 滑動安全率



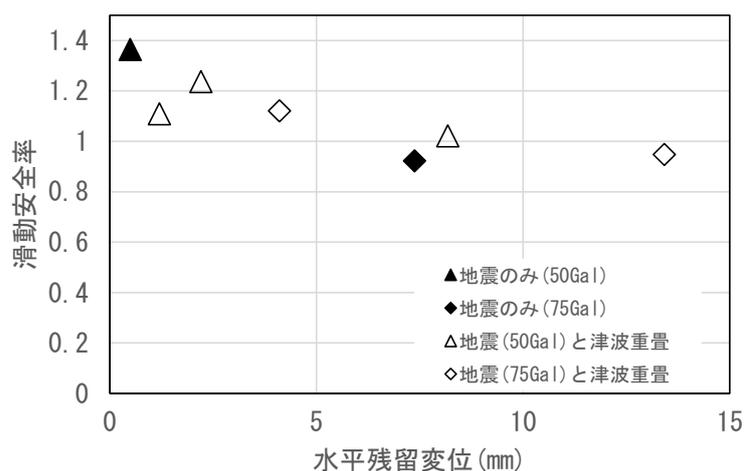
(b) 転倒安全率

図 2.2-11 安全率と水位差の関係<sup>5)</sup>

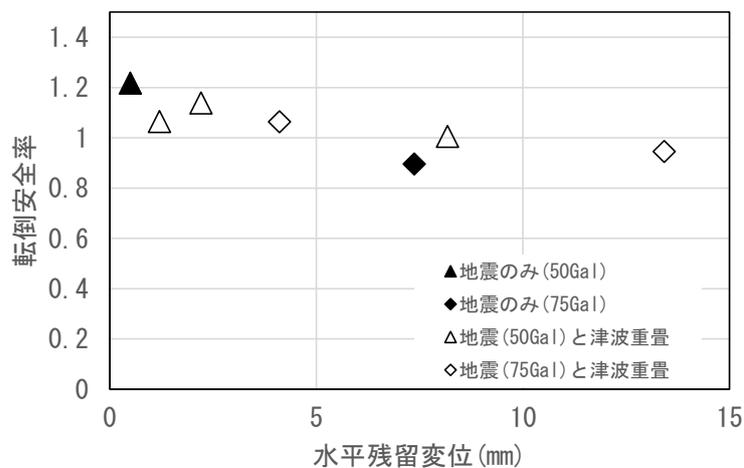
かけて抵抗モーメントとし、転倒安全率を求めた。

結果を図 2.2-11 に示す。縦軸が安全率で、横軸が水位差である。地震と津波が重畳したケースにおいては、滑動安全率と転倒安全率のどちらにおいても、水位差が大きくなるにつれて、安全率が低下していることがわかる。一方で、加速度が大きく地震のみで安全率が 1.0 を下回るケースにおいては、同じ地震の条件で、地震と津波が重畳したケースより、安全率が低い事が確認できた。これは、地震と津波が重畳したケースにおいては、越流の影響により構造物に与える加速度が小さくなるためである。

滑動と転倒の安全率と残留水平変位の関係について検討した。結果を図 2.2-12 に示す。縦軸が安全率で、横軸が残留水平変位である。また、比較のために残留水平変位は絶対値を



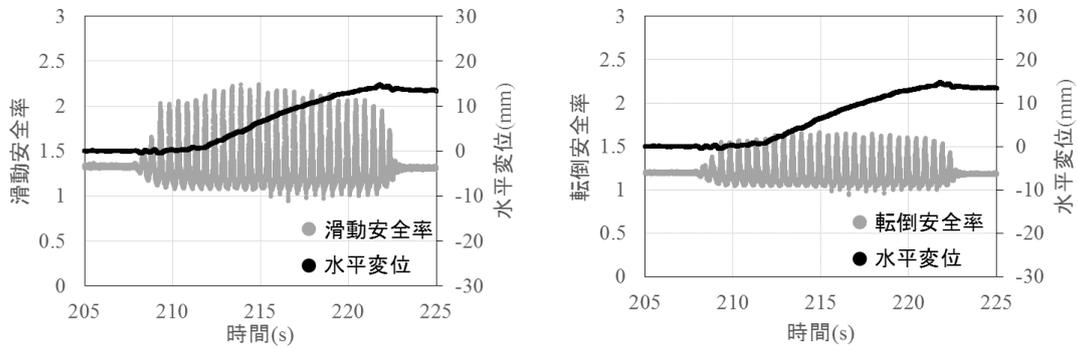
(a) 滑動安全率



(b) 転倒安全率

図 2.2-12 安全率と水平残留変位の関係<sup>5)</sup>

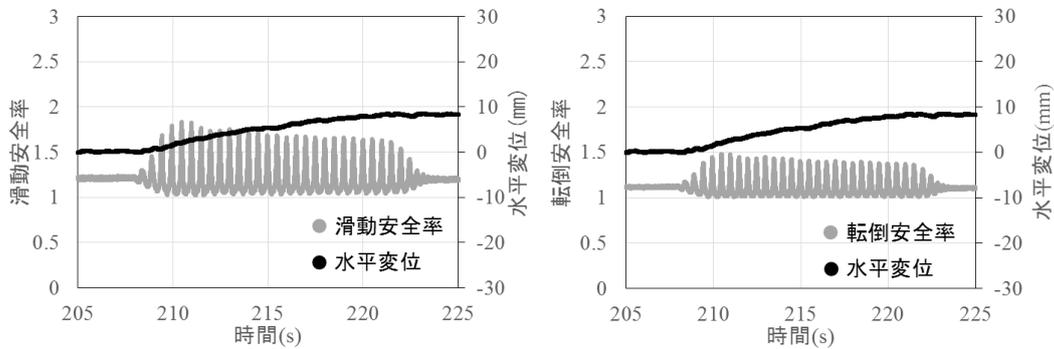
とっている。滑動安全率と転倒安全率の傾向には、大きな違いは無く、安全率が 1.0 以上であつても、4 mm 程度の残留水平変位が発生している。また、安全率が 1.0 程度から下回るケースにおいては、8 mm 以上の残留水平変位が発生している。また、地震のみで安



滑動安全率

転倒安全率

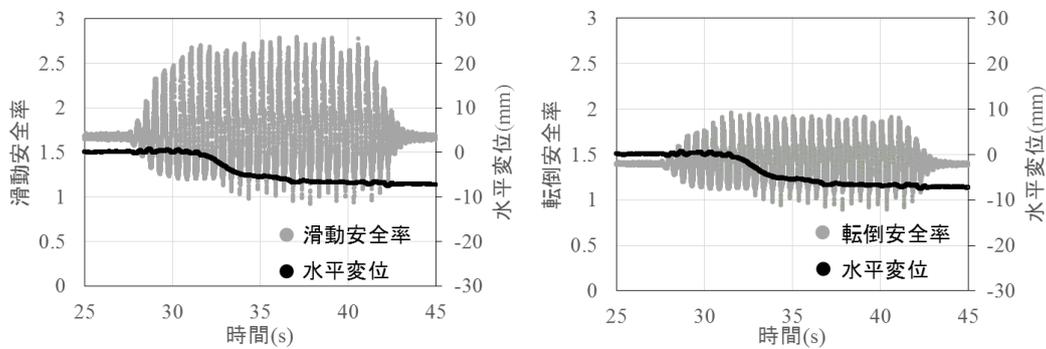
(a) case-1.6(水位差 0.19m 75Gal)



滑動安全率

転倒安全率

(b) case-1.8(水位差 0.27m 50Gal)



滑動安全率

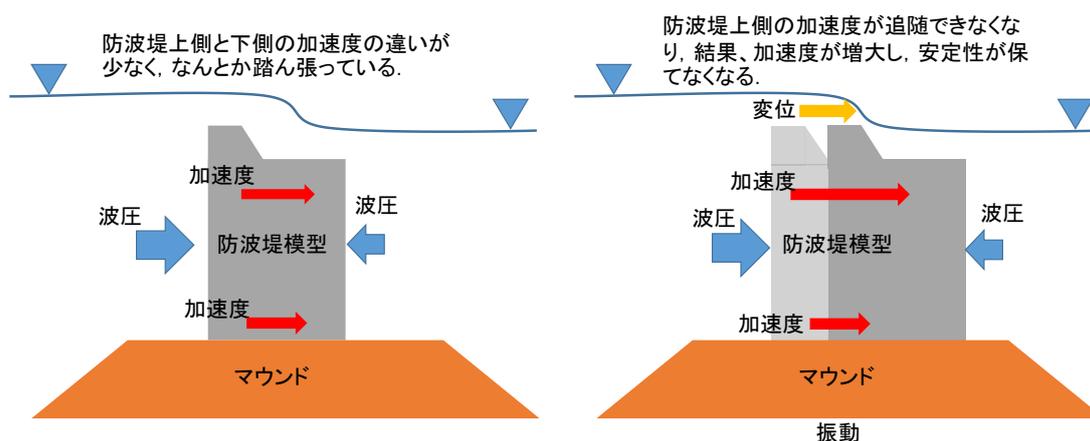
転倒安全率

(c) case-1.10(水位差 0.00m 75Gal)

図 2.2-13 安全率と残留変位時刻歴(抜粋)<sup>5)</sup>

全率が 1.0 を下回るケースでは、残留水平変位が 8 mm 程度であった。一方で、地震と津波が重畳し、安全率が 1.0 を下回るケースでは、安全率は地震のみのケースと同じ程度でも、残留水平変位は 14 mm 程度と大きかった。

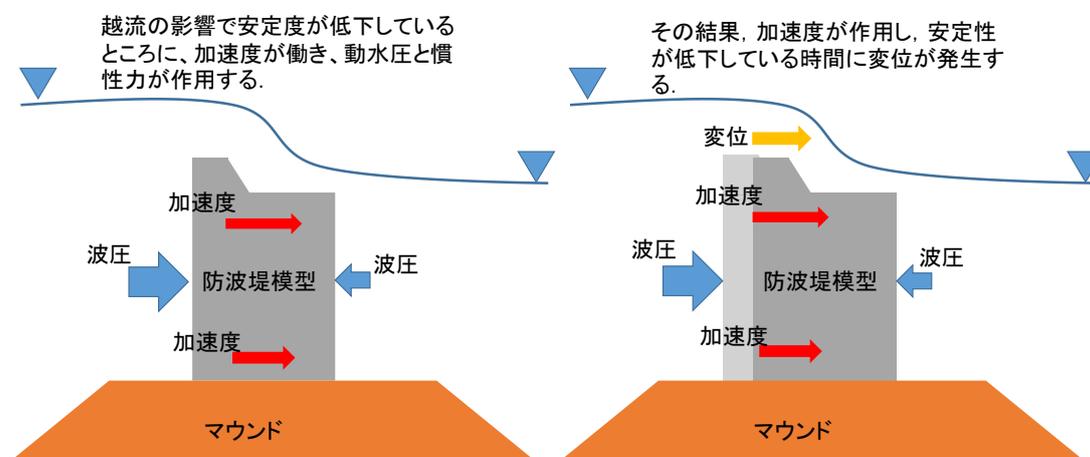
残留変位の大きかった case-1.6(水位差 0.19 m, 75 Gal) および case-1.10(水位差 0.00 m, 75 Gal) について安全率と残留変位の時刻歴を確認した。結果を図 2.2-13 に示す。残留変位は 0.5 s の移動平均により算出している。case-1.6(水位差 0.19 m, 75 Gal) と case-1.10(水位差 0.00 m, 75 Gal) は、地震発生直後は残留変位は発生していないが、加振の途中から残留変位が発生している。これは、どちらも 75 Gal の地震で、ケーソン上側とケーソン下側の加速度の時刻歴における位相の差が大きいため、何度か地震によって振れることにより、位相差の影響で、



地震と津波の重畳直後

変位発生時

(a) 地震の影響が大きいケースの変位の発生原因



地震と津波の重畳直後

変位発生時

(b) 津波の影響が大きいケースの変位の発生原因

図 2.2-14 地震と津波重畳時における変位の発生原因

残留変位が発生しているものと推測される(図 2.2-14(a)). また, 地震と津波の重畳した case-1.6(水位差 0.19 m,75 Gal)については, 津波の影響で水平変位が増大している. 一方で, case-1.8(水位差 0.27 m,50 Gal)は地震発生直後から, 少しずつではあるが残留変位が発生している. これは, 津波の越流の影響により, 安全率が低下しているところに 50 Gal の地震による動水圧と慣性力の影響で, 地震で振れるたびに少しずつ変位が蓄積していったものと推測される (図 2.2-14(b)).

#### (5) 地震と津波の重畳時における破壊メカニズム

以上の検討をふまえ, 破壊のメカニズムについて検討する. 地震のみの破壊については, 地震の揺れが防波堤に伝わり, 防波堤には加速度が発生する事による動水圧と慣性力が発生する. 防波堤の形状や重心位置により破壊方法は異なるが, 徐々に滑動したり転倒したりと変位が蓄積する (図 2.2-15). 一方で, 津波越流のみによる破壊については, 津波越流が発生することにより, 防波堤前後において水位差が生じる. 津波越流による破壊のメカニズムは地震のみの破壊同様, 防波堤の形状や重心位置により破壊方法は異なるが, 破壊については, 作用が継続して続くため, 破壊が始まると一気に変位が増大する (図 2.2-16). 地震と津波の重畳時における破壊メカニズムについては, 津波越流では破壊しない水位差であっても, 小さな揺れが発生する事により, 防波堤に動水圧と慣性力が働き, 働いた瞬間に, 安定性が保てなくなり, 滑動や転倒が発生する. 滑動による破壊については, 地震のみの破壊と同様, 加速度が防波堤に働いている間のみ安定性が保てなくなり, 変位が発生し, 徐々に変位が蓄積し, 破壊するものと考えられる (図 2.2-17). 転倒による破壊については, 地震のみの破壊同様, 徐々に傾きが発生し蓄積する. ただし, この傾きの蓄積により, 防波堤に作用する津波越流の波圧の影響が変わってしまうため, 傾きがある一定蓄積してしまうと, 一気に大きな破壊に繋がるのが考えられる. なお, 実験では転倒モードが卓越する構造で有り, 実験時においては, 地震と津波の重畳の結果, 防波堤がマウンドにめりこみ, 倒壊しなかったケースも確認されたが, 一気に倒壊したケースも確認された (図 2.2-18). この実験結果より, マウンドの変形についても地震と津波の重畳時には影響があることが考えられる.