地震と越流津波の複合作用による防波堤の残留水平変位に関する研究

岡田　克寛[1]・鈴木　高二朗[2]・有川　太郎[3]

[1]正会員　港湾空港技術研究所　海洋研究領域　耐波研究グループ　研究官
（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3丁目1-1）
E-mail:okada-k88s3@pari.go.jp
[2]正会員　波港湾空港技術研究所　海洋研究領域　耐波研究グループ長
（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3丁目1-1）
E-mail:suzuki_k@pari.go.jp
[3]正会員　中央大学教授　理工学部　都市環境学科
（〒112-8551 東京都文京区春日一丁目13-27）
E-mail:arikawa@civil.chuo-u.ac.jp

東北地方太平洋沖地震津波においては，地震と津波によって，多くの防護施設が被災した．その原因の多くは，津波越流時によるものと推定されている．一方で，地震の発生後には，数多くの余震が発生している．津波来襲時の構造物の被災に余震が影響していた可能性がある．そこで，津波と地震の重畳が構造物の被災に及ぼす影響を明らかにするため，地震と津波を同時に作用させる大型水理模型実験を実施した．その実験結果の時刻歴データを詳細に検討し，地震と津波の重畳時における防波堤への影響と残留水平変位の関係について検討した．

Key Words: *earthquake ,tsunami,superpotision,breakewater*

1.　はじめに

東北地方太平洋沖地震津波においては，地震と津波によって，多くの防護施設が被災した．地震では，最大2933galの揺れを計測した地点もあったが，その原因の多くは，津波越流時によるものと推定されている．この経験を踏まえて，東北地方太平洋沖地震の後では，津波越流による被害のメカニズムが研究され，今日では防波堤に対しては，腹付け工を設置し，越流に対する抵抗力を上げ，津波被害を低減する対策がとられてきている[1)]．

一方で，平成23年3月11日14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震直後には，数多くの余震や長野県北部沖地震や静岡県東部地震等の誘発地震と思われる地震も発生している[2)]．津波到達時にも地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[3)]．現在では，地震と津波のそれぞれに対して，検討手法が提案されているが，地震と津波が重畳した際の検討手法は提案されていない．そこで，本研究においては，地震と津波の重畳現象を水理模型実験で再現し，防波堤への影響を波圧，加速度、変位の時刻歴データを詳細に検討することにより，地震と津波の重畳時における防波堤への影響を明らかにし，残留水平変位の関係を把握することを目的とした．

2.　水理模型実験概要

(1)　実験水路と実験断面

実験は大規模波動地盤総合水路（長さ184m，幅3.5m，高さ12m）で行った．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^3/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）の加震が可能である．

津波と地震を同時に作用させる場合には，まず，還流装置によって流れを起こして防波堤上の越流を発生させ，越流が定常状態となった後に加震した．

図−1は実験断面図であり，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

m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ケーソンを設置した．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(ACGG)を埋設している．

図-2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(ACGG：共和電業製，ASW-2A)を設置した．模型の変位を計測するため，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，模型天端部にはターゲットを取り付けてレーザー変位計(DL：キーエンス製，LK-2500)を用いて天端部の変位を計測した．

(2) 実験条件

表-1は実験条件である．地震と津波がそれぞれ単独に作用するケースと，それらが重畳して作用する．それぞれのケースについて実験した．実験はケーソン天端が0.1m没水した状態（初期水位1.54m，ケーソン天端高1.44m）から開始し，津波が作用した場合にはケーソン前面（背面）の水位が上昇（低下）する．表中，水位差は津波越流時のケーソン前面と背面の水位差を示している．

3. 水理模型実験結果

(1) 加速度の影響の違い

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（ACG1）とマウンドの最大加速度(ACG2)，ケーソン下側の最大加速度(ACG3)，ケーソン上側の最大加速度(ACG4)の関係を図-3 に示す．岸側変位時（津波と同じ方向の変位）においては，75gal で加震した津波がある場合は case-6(水位差 0.19m,75gal)においては 3.0 倍程度であるのに対し，津波がない場合の case-10(水位差 0.00m,75gal)では 6.5 倍と大きく増大されていた．一方で，沖側変位時（津波と逆の方向の変位）は，75gal で加震した津波がある場合は case-6(水位差 0.19m,75gal)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-

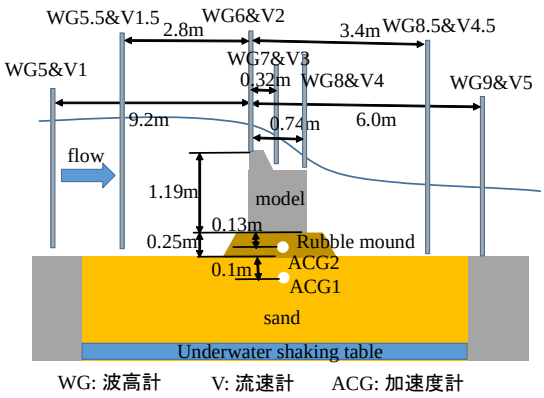


図-1 実験断面図

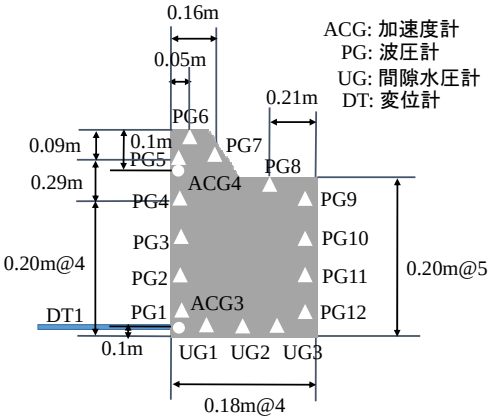


図-2 計測器配置図

表-1 実験条件

	実験条件	加振 (gal)	水位差 (m)	砂地盤 最大加速度 (m/s2)	マウンド 最大加速度 (m/s2)	ケーソン下側 最大加速度 (m/s2)	ケーソン上側 最大加速度 (m/s2)	残留水平変位 (mm)
case-1	地震津波	25	0.16	0.66	0.49	0.49	0.66	0.69
case-2	地震津波	50	0.14	0.84	0.87	0.82	0.90	2.21
case-3	地震津波	75	0.13	1.04	1.07	1.04	1.80	4.11
case-4	地震津波	25	0.19	0.64	0.50	0.48	0.67	0.06
case-5	地震津波	50	0.22	0.89	0.82	0.83	0.92	1.20
case-6	地震津波	75	0.19	1.14	1.28	1.89	3.54	13.42
case-7	地震津波	25	0.26	0.67	0.51	0.52	0.70	0.77
case-8	地震津波	50	0.27	0.82	0.88	1.17	1.28	8.18
case-9	地震	50	－	0.89	0.76	0.88	1.33	0.49
case-10	地震	75	－	1.14	1.72	1.43	7.51	-7.37

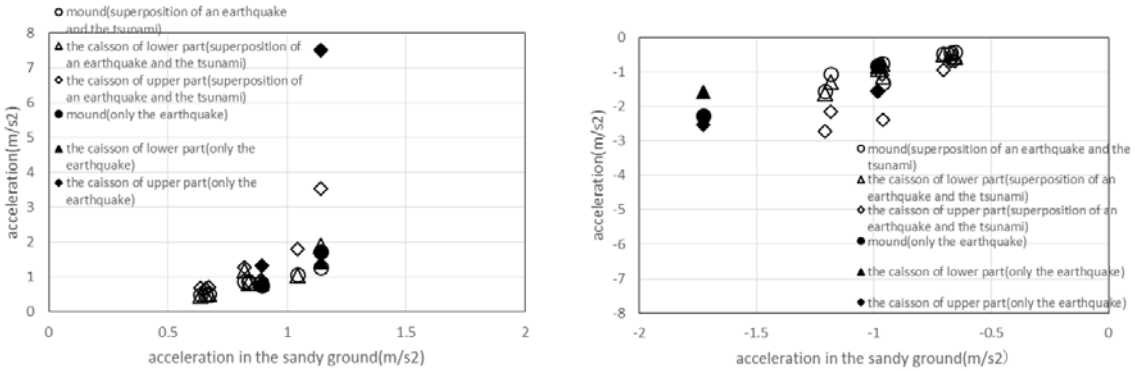
10(水位差 0.00m,75gal)では 1.5 倍と若干の差はあるものの，岸側変位時（津波と同じ方向の変位）と比べて差は小さかった．

次に Case-2(水位差 0.14m,50gal)と case-9(水位差 0.00m,50gal)の加振時の時刻歴の一部を抽出したものを図-4 に示す．砂地盤(ACG01)，マウンド(ACG02)，ケーソン下側(ACG03)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(ACG04)においては，津波が無い case-9(水位差 0.00m,50gal)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-2(水位差 0.14m,50gal)では，水位差が大きいほど岸側に変位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．

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．しかし，越流水位と加速度の大きさの関係は不明のため，今後検討が必要である．

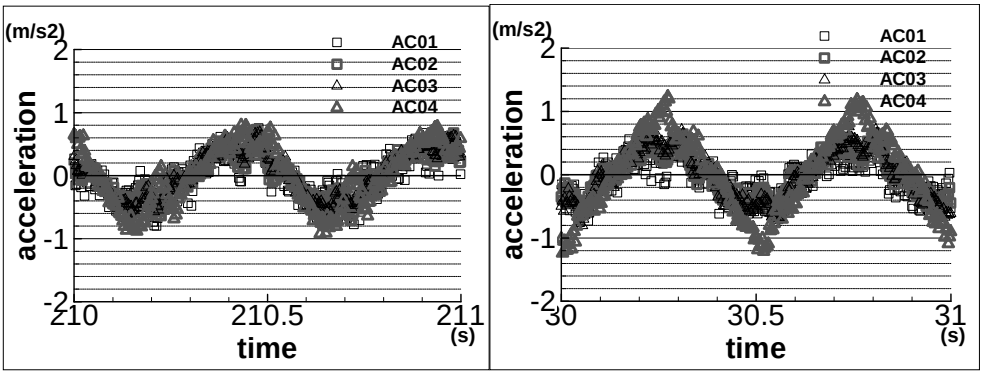
(2) 水平残留変位の影響の違い

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(ACG3)とケーソン上側(ACG4)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．結果を図-5 に示す．地震と津波重畳時においては，水平変位は岸側（津波と同じ方向）に発生し，case-8(水位差 0.27m,50gal)で最大水平残留変位が 8.2mm 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-10(水位差 0.00m,75gal)で最大水平変位が 7.4mm であった．case-8(水位差 0.27m,50gal)の模型最大加速度が 1.22m/s2 に対して case-10(水位差 0.00m,75gal)の模型最小加速度は-2.05m/s2 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おいて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．　時刻歴について，残留水平変位が大きい，case-6(水位差 0.19m,75gal)および case-10(水位差 0.00m,75gal)について確認した．結果を図-6 に示す．地震のみの case-10(水位差 0.00m,75gal)は，水平変位（DT01）とケーソン下側の加速度（ACG3）が同じ挙動を示しているが，ケーソン上側の加速度（ACG4）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．一方で地震と津波が重畳した case-6(水位差 0.19m,75gal)，では，case-10(水



(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-3　加速度の関係



(a) Case-2(水位差 0.14m,50gal)　(c) case-9(水位差 0.00m,50gal)

図-4　加速度時刻歴（抜粋）

位差 0.00m,75gal)と同様に，水平変位（DT01）とケーソン下側の加速度（ACG3）は同じ挙動を示しているが，ケーソン上側の加速度（ACG4）は岸側変位時（津波と同じ方向）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であると考えられる．

また，実験前後におけるケーソン及びマウンドの計測を行い，変形の状況を確認した．マウンドの形状は，各実験終了後に各地点の高さを計測している．そのため，水平変位は考慮されていない．結果を図-7 に示す．図において実線が実験前，破線が実験後の計測結果である．地震と津波が重畳した case-6(水位差 0.19m,75gal)，では，ケーソン背面では沈下し天端高さが下がっている

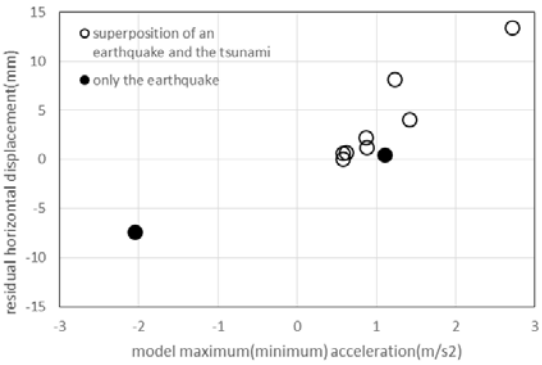
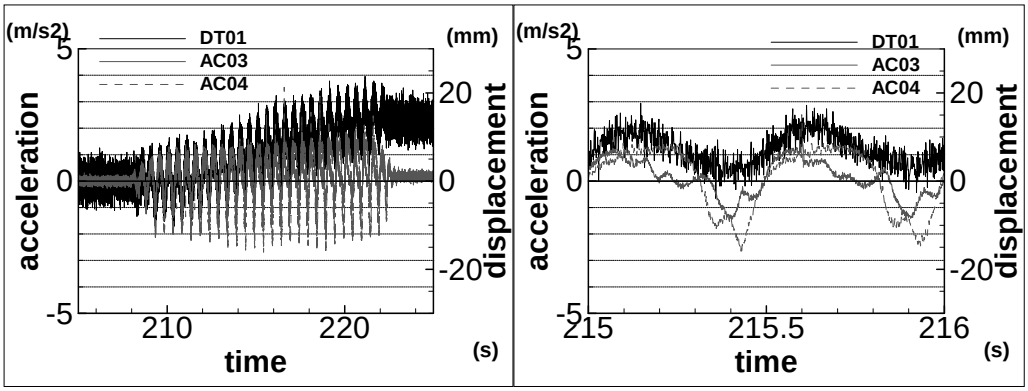
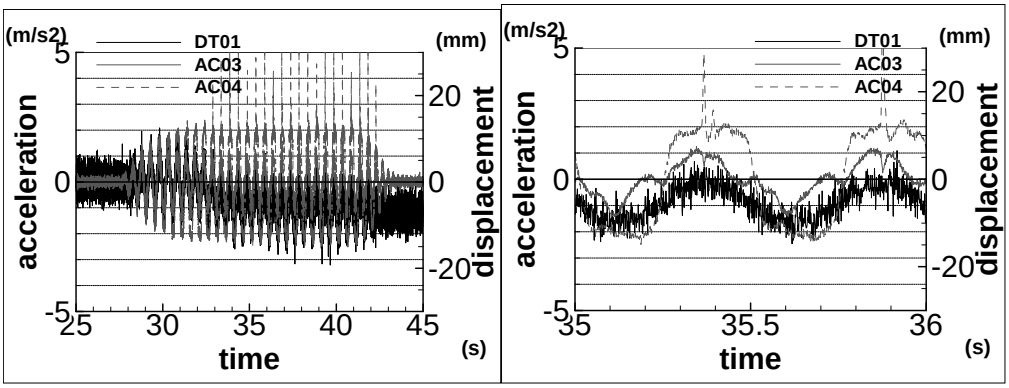


図-5 水平残留変位と模型最大（最小）加速度の関係

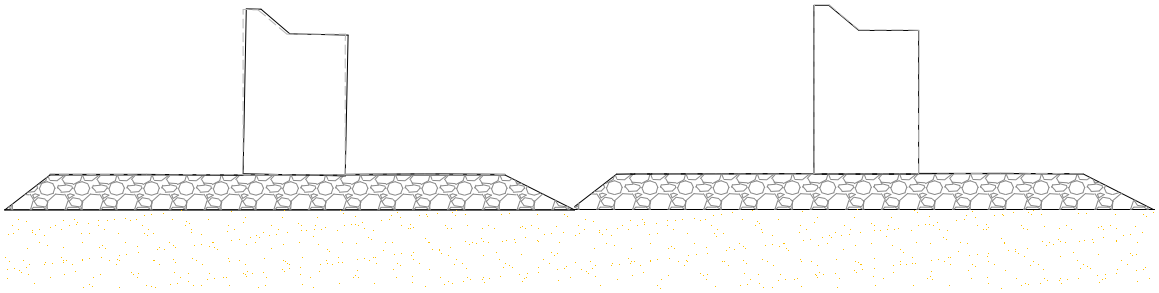


(a)　case-6(水位差 0.19m,75gal)



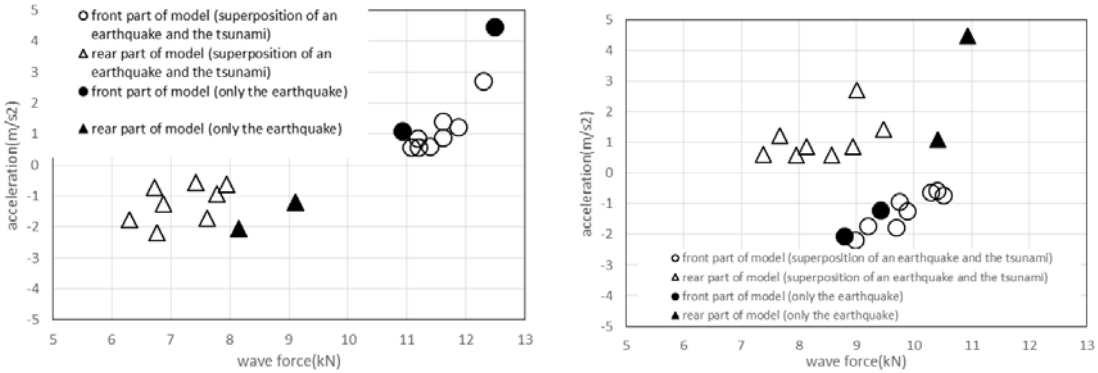
(c)case-10(水位差 0.00m,75gal)

図-6　加速度と水平変位時刻歴（抜粋）



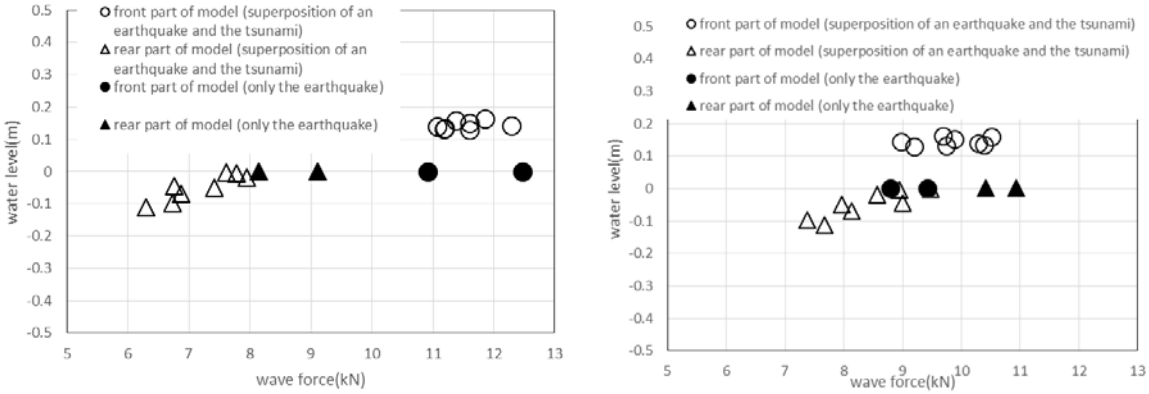
(a) case-6(水位差 0.19m,75gal)　　(c)case-10(水位差 0.00m,75gal)

図-7　実験前後の断面図



(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-8　加速度と波力の関係



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-9　水位と波力の関係

のに対し，ケーソン前面では天端高さが上がっている．この結果より，図に示したとおりケーソン自体が傾いていることが推測される．一方で，地震のみ case-10(水位差 0.00m,75gal)のケースは，模型前面及び背面ともに同様に沈下しており，ケーソンの傾きは見られなかった．この結果より，地震のみの場合は，地震の影響により沈下は発生するが，大きな地震で無い場合は，ケーソンの傾きは発生しない．一方で，地震と津波が重畳した場合は，地震のみでケーソンが傾かない場合においても，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傾きが発生する事がわかった．

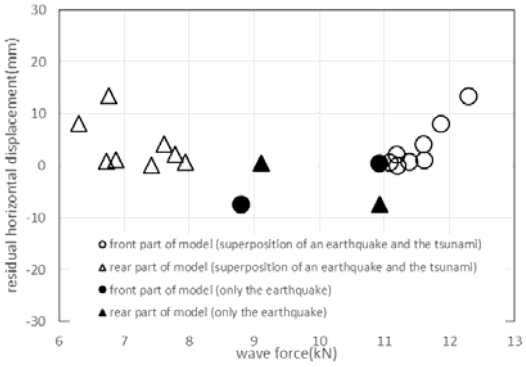


図-10　残留水平変位と波力の関係

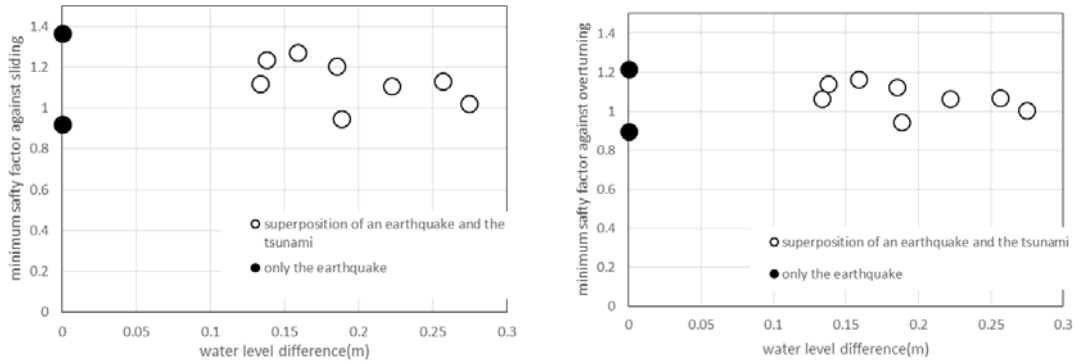
(3)　波力の影響の違い

波力について，加速度と水位の関係について検討した．波力と加速度の関係について図-8 に示す．縦軸は模型上側と下側を平均した加速度で，横軸は波力である．模型前面の波力は，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，地震のみのケースと比較して地震と津波の重畳時のケースの方が若干大きい．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，同程度の加速度であっても波力が小さい．

次に，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-9 に示す．縦軸の水位は，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．模型前面

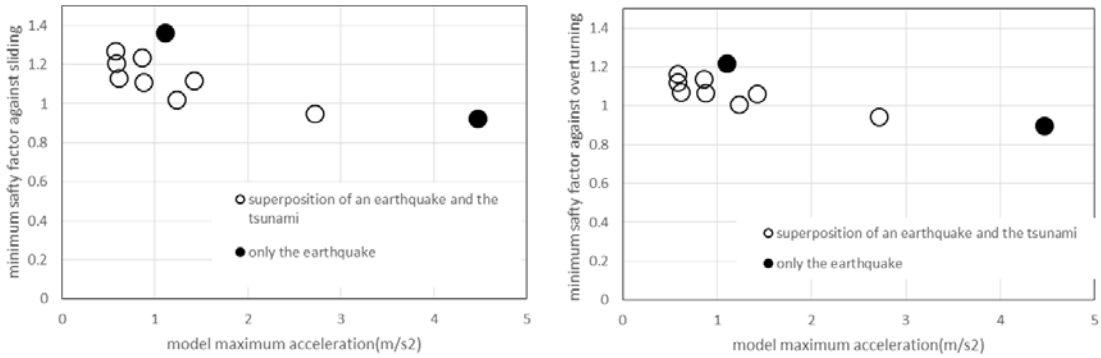
においては，岸側変位時（津波と同じ方向の変位）は水位による明確な違いは確認できなかったが，沖側変位時（津波と逆の方向の変位）は水位の違いによる波力の違いが確認できた．一方で，模型背面の波力は岸側変位時（津波と同じ方向の変位）と沖側変位時（津波と逆の方向の変位）のどちらにおいても，水位の違いの影響で波力が小さい．また，沖側変位時（津波と逆の方向の変位）においては，水位差が小さく，加速度の影響が大きい場合は，水位差が０ｍの時と同様に沖側に波力がかかる瞬間があることがわかった．

波力と残留水平変位の関係を図-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，沖側への残留変水平変位が発生して



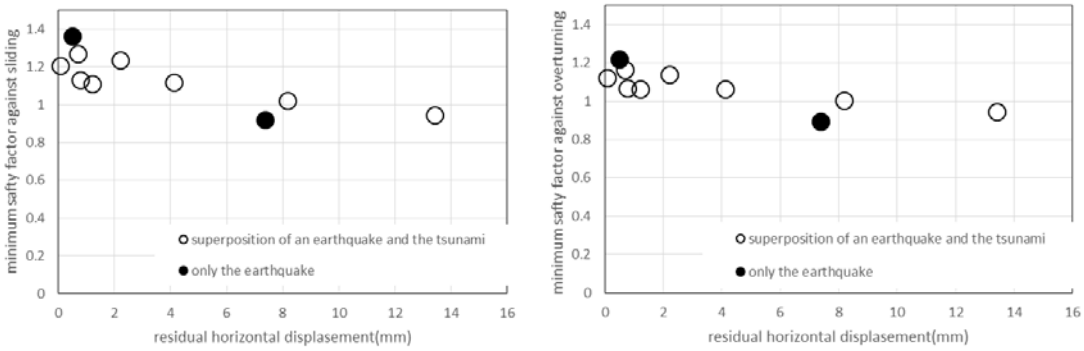
(a)滑動安全率　　(b)転倒安全率

図-11　安全率と水位差の



(a)滑動安全率　　(b)転倒安全率

図-12　安全率と加速度の



(a)滑動安全率　　(b)転倒安全率

図-13　安全率と水平残留変位の関係

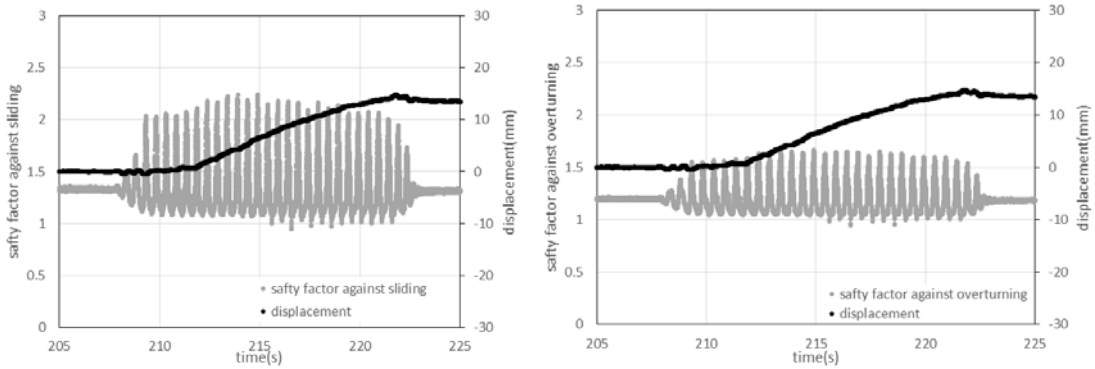
いる．一方で，地震と津波が重畳したケースでは，模型前面の波力と残留水平変位の関係は概ね一定であるのに対して，模型背面においては，同程度の波力低減でも，残留変位が発生しているケースと発生していないケースが確認できた．このことより，津波の越流による水圧低下と，地震により発生する慣性力の影響の双方が構造物の残留水平変位に関係していることがわかる．

(4)　安全率の影響の違い

滑動と転倒の安全率と水位差の関係について検討した．結果を図-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，3.(1)の加速度の検討の際に，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．

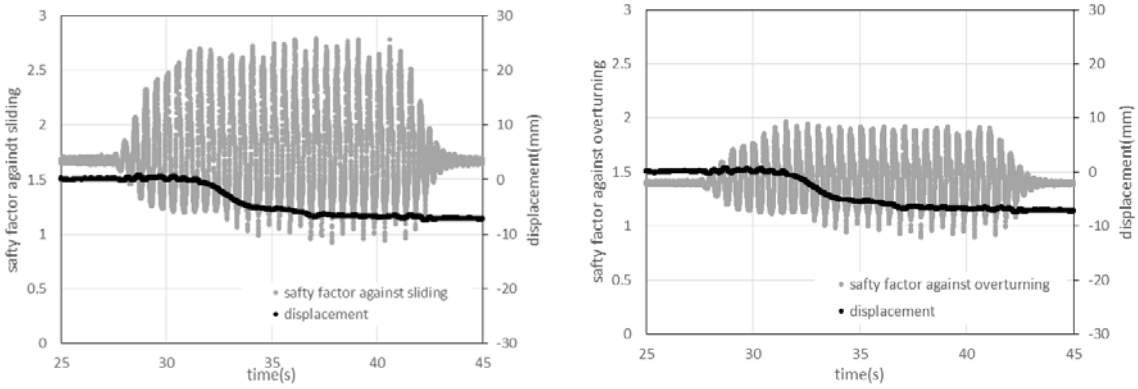
滑動と転倒の安全率と模型に作用する加速度の関係について検討した．結果を図-12 に示す．縦軸が安全率で横軸は模型に作用する加速度である．地震のみのケースと地震と津波が重畳したケースを比較すると，地震と津波が重畳したケースの方が安全率が小さい．これは，津波の水位差の影響で，地震のみのケースと比べて安全率が低下したためである．

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-13 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 以上であっても，4mm 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，8mm 以上の残留水平変位が発生している．また，地震のみで安全率が 1.0 を下回るケースでは，残留水平変位が 8mm 程度であった．一方で，地震と津波が重畳しあ，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



滑動安全率　　転倒安全率

(a)　case-6(水位差 0.19m,75gal)



滑動安全率　　転倒安全率

(c)case-10(水位差 0.00m,75gal)

図-14 安全率と残留変位時刻歴（抜粋）

程度でも，残留水平変位は 14mm 程度と大きかった．

残留変位の大きかった case-6(水位差 0.19m,75gal)および case-10(水位差 0.00m,75gal)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-14 に示す．残留変位は 0.5s の移動平均により算出している．case-6(水位差 0.19m,75gal)，と case-10(水位差 0.00m,75gal)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 75gal 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，残留変位が発生しているものと推測される．一方で，case-8(水位差 0.27m,50gal)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 50gal の地震による付加質量と慣性力の影響で，不安定となり，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．

4. おわりに

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について以下の結果を得た．

・地震と津波の重畳時における防波堤に作用する加速度については，津波の越流の影響により，防波堤上流側の加速度を抑制する可能性が確認された．しかし，越流水位と加速度の関係は解明できなかったため，今後検討が必要である．

・地震と津波重畳時における残留水平変位については，津波の影響を受けることにより，地震のみで残留水平変位が発生しない場合においても，地震と津波の重畳時においては残留水平変位が発生する可能性がある事が確認できた．

・地震と津波の重畳時における安定性については，地震のみで安全率が 1.0 を下回る場合の残留変位より，津波と地震が重畳した場合に安全率が 1.0 を下回る場合の残留変位の方が大きかった．これは，地震と津波が重畳する事により，加振の度に残留変位が発生し，蓄積したため，最終的な残留変位が大きくなったものと考えられる．

参考文献

1) 国土交通省港湾局: 防波堤の耐津波設計ガイドライン，35p., 2013.
2) 気象庁:震度データベース，http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.php, 参照 2016-05-10
3) 気象庁：【気象庁技術報告】平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震調査報告，pp. 94-99, 2012

STUDY ON RESIDUAL HORIZONTAL DISPLACEMENT TO A BREAKWATER BY THE COMPOUND OF EARTHQUAKE AND OVERFLOW TSUNAMI

Katsuhiro OKADA, Kojiro SUZUKI and Taro ARIKAWA

A large-scale hydraulic model experiment was conducted to confirm it about the influence on breakwater in the superposition of an earthquake and the tsunami, and residual horizontal displacement.

In superposition of an earthquake and the tsunami of the breakwater, it was affected by the tsunami and confirmed that different residual displacement was produced only in the case of an earthquake.