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

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 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おり、津波来襲中にも余震が発生していたことが分かった。津波来襲時の構造物の安定性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安定性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。その結果、地震津波重畳時に発生する動水圧は、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概ね表現できることがわかった。

Key Words : earthquake ,tsunami,superposition,breakwater

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。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。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、防波堤への作用力を明らかにすることを目的とした。

2. 東北地方太平洋沖地震津波における地震と津波の重畳について

ここでは、東北地方太平洋沖地震での地震と津波の同時発生状況を調べた。図-1は地震発生後の余震の発生状況を示したものである²⁾。本震発生から2時間後までは、余震が平均0.84分に1回と多く発生している。このうち震度4以上の余震も15分に1回と高い確率で発生しているのが分かる。本震発生から12時間後には、余震発生回数が1.88分に1回程度に減少し、震度4以

図-1 東北地方太平洋沖地震地震以降の余震の発生状況

表-1 津波第一波と津波最大高さの出現時刻

	本震震度	津波第一波の山・谷の出現時刻から、津波最大高さの発現時刻までに発生した最大震度	津波第一波		津波最大高さ	
			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

上の余震も2%程度に減少している。

一方で、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-1³⁾は津波第一波目の山・谷の出現時刻とその際の押し・引きの大きさ、津波最大高さの発現時刻とその高さを気象庁の調査報告資料より抜粋したものである。津波第一波目の山・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分後だった。その後、津波の最大高さは釜石では10分後、八戸では1時間12分後に確認されている。

津波第一波の到達時から最大高さが発現するまでの間に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-2は八戸、釜石、相馬における、津波到達時刻と余震の発生とその震度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、八戸と釜石では震度3の余震が発生している。

次に防災科学技術研究所において公開されているデータ⁴⁾から、本震と余震の加速度を調べた。図-3は八戸、釜石、相馬における本震と余震の最大加速度であり、余震は本震から3時間以内に発生した最大の余震である。本震は三方向成分の合成値で釜石で742gal、八戸で206galだった。一方、本震後3時間以内の余震の最大値は、釜石では263galで本震の35%程度、八戸では201galで本震と同程度の大きさの余震が発生していたことが分かる。

本震後3時間以内の余震の加速度の平均は、震源に近い釜石では176galと大きいのにに対し、八戸と相馬では50galから75gal程度だった。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一方、平均すると50galから75gal程度の揺れになっていることが分かる。

図-2 代表地点の津波到達時刻と余震の関係

図-3 代表地点の本震と余震の加速度
(余震は本震発生後3時間以内に発生した地震)

3. 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20m³/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-4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(ACG)を埋設している。

図-5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(ACG：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-2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（以下，地震・津波重畳と表記する）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。

4. 水理模型実験結果

(1) 地震単独と地震・津波重畳時の比較

図-6は地震単独作用時(Case1:赤)と地震・津波重畳時(Case3:青)のケーソンに働く水圧，加速度および変位の時系列波形であり，地震の入力加速度は50gal，津波によるケーソン前後の水位差は0.22mの場合である。地震による変化量を比較

図-4 実験断面図

図-5 ケーソンへの各種センサーの配置図

表-2 実験条件

実験ケース	初期水位 (m)	加速度 (gal)	加速度周期 (Hz)	水位差 (m)
Case1 (地震単独)	1.54	50, 75	2	
Case2 (津波単独)	1.54			0.14, 0.22, 0.27
Case3 (地震・津波重畳)	1.54	50	2	0.14, 0.22, 0.27

するため、Case3の時系列波形は津波によるケーソン前面の水位上昇および背面の水位低下による水圧増加（低下）分を差し引いて表示している。

模型前面と背面の水圧は、Case1とCase3ともに、ほぼ同じ振幅で変動しているものの、詳細に見るとCase3では津波によって押されることで、ケーソン前面では最大波圧、ケーソン背面では最小波圧を受ける時間が長くなり、ケーソンが岸向きに動きやすく（滑動・転倒しやすく）なっていることが分かる。

このようなCase1とCase3での違いを見る前に、まず、水圧と加速度、変位の基本的な挙動について述べる。水圧等の位相を見ると、図-7のようにケーソン前面水圧の最大値①（最小値②）は水平加速度(ACG3, ACG4)と変位(DL1)がともに最大となり、背面水圧はその逆の位相となっている。ケーソンが前面背面の水塊（付加質量）を加速させる際の反作用としての水圧が発生していることが分かる。

一方、ケーソン底面の水圧は鉛直変位に呼応している。鉛直変位（DL2）と比較すると最大鉛直変位発生時に位相

③で最大となっていることが分かる。

また、ケーソン天端では、地震・津波重畳時(Case3)の時のみ、天端前面（PG6）だけに水圧変動が見られる。この場合も、ケーソンの鉛直加速度に呼応している。なお、Case3の天端後方（PG8）の水圧には変化が見られない。この現象は、PG6では越流が常流状態であるのに対し、PG8では射流状態となっているためではないかと推定されるが、現在のところ明確ではない。

図-7 動水圧とケーソンの変位、加速度の模式図

図-6 地震単独作用時(Case1: 赤)と地震・津波重畳時(Case3: 青)のケーソンに働く波圧、加速度および変位

次に、地震単独作用時(Case1)と地震・津波重畳時(Case3)の違いを詳細に見てみる。前述したように、Case3では津波が作用している分だけケーソン前面では最大波圧、ケーソン背面では最小波圧を受ける時間が長くなり、ケーソン下端を支点とした転倒モーメントが発生する時間が長くなり、ケーソンが岸向きに動きやすく(滑動・転倒しやすくなる)ことが分かる。

地震・津波重畳時(Case3)には、地震単独時(Case1)と比較して、水平加速度最大時(水平変位最大時)の加速度が若干小さく、かつ、滑らかになっている。このためケーソン前面の波圧(特にPG4)はプラス(沖向き加速度最大)時に変化量が小さく、マイナス(岸向き加速度最大)時に変化量が大きくなっている。このことは、津波によってケーソンが押されることで沖向きに動きにくく(岸向きに動きやすくなる)になっていることを示しているものと考えられる。

なお、Case3では地震が継続するに従って、岸向きの変位量が徐々に増加し、12mmの残留変位が見られており、地震と津波が重畳することで変位が大きくなったことが分かる。

(2) 地震単独時(Case1)のWestergaard式の適応性

前節(1)で述べたように、地震によるケーソン前面、背面の水圧変動(以後、地震による動水圧)はケーソンの加速度に比例しており、一般に式(1)に示すWestergaard式⁹⁾で表現される。式中、 ρ は水の密度(kg/m^3)、 h は水深(m)、 y は水面から任意点までの深さ(m)、 P_{max} は動水圧(kPa)であり、 a は加速度(m/s^2)である。なお、式(1)はWestergaard(1933)式の近似式であり、一般に使用されているものである。

$$P_{\text{max}} = \frac{7}{8} \rho a \sqrt{hy} \quad (1)$$

図-8は地震単独時(Case1)の実験値とWestergaard式の比を深さ方向に示したものであり、この比が1に近いほどWestergaard式の適応性が高いことを示している。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の近似式で求めたものを実験で得られた模型背後は最小、模型前面は最大値で除したものである。計算値は実験値に対して約1割ほどずれており、堤体天端に近いほどそのずれが大きくなっている。Westergaard式はダムに働く地震時の動水圧を求める式であり、堤体が没水することを想定して求めた式ではない。そのため、Westergaard(1933)では、 y は水面から任意点までの深さとして定義されているが、本実験のように堤体が没水した状況では、堤体天端上水深が大きい場合に過大な値になってしまうものと推定される。

(3) 津波単独時(Case2)の静水圧式(越流式)の適応性

津波越流時の防波堤に作用する波圧は、ケーソン前面

と背面の水位から求められる静水圧とその補正係数 α_f 、 α_r で表され¹⁾、この補正係数はそれぞれ1.05と0.9である。

図-9は、津波単独時(Case2)の実験値と計算値(静水圧式)の関係である。静水圧式では、水面に近い位置においては概ね1.0倍だった。それ以外の箇所では、水位差によらず模型前面では静水圧式による計算値が実験値よりも大きく、模型背面では約1割弱、実験値よりも小さかった。

静水圧補正係数は全般に安全側に設定されており、ケーソン前面の補正係数 α_f は全般に大きめ、背面の補正係数 α_r は越流水深が小さい場合に小さめとなるため²⁾、実験値と計算値の比が1からずれたものと考えられる。

図-8 地震単独時(Case1)のWestergaard式と実験値の関係

図-9 津波単独時(Case2)の実験値と静水圧式の関係

(4) 地震・津波重畳時(Case3)の設計式の適応性

図-10は地震・津波重畳時(Case3)の計算値(Westergaard式と静水圧式の和)と実験値の比較であり、地震の加速度が50galと比較的小さいケースである。

模型背面では全体に計算値が実験値よりも1割ほど小さく、前節(3)で述べた静水圧式のずれが、地震・津波重畳時(Case3)にも同様に現れている。一方、模型前面も深さ方向全般に静水圧式のずれが影響しており、さらに模型天端付近は図-8で見られたWestergaard式のずれが現れているものと推定される。

図-10 地震・津波重畳時(Case3)の計算値 (Westergaard 式と静水圧式の和) と実験値の比較

(5) 地震・津波重畳実験と地震, 津波単独実験の比較

図-11 は地震・津波重畳時(case3)の水圧と, 地震時単独時(case1)の水圧と越流単独時(case2)の水圧を足し合わせた水圧との比較である。模型天端付近においては若干の差はあるものの, ほとんど一致している。このことは地震と津波の重畳時の水圧は, 地震単独時と津波単独時の水圧を足し合わせることで表現できることを示している。それぞれの推定式の精度を上げることで, 地震・津波重畳時の波圧を算定できることが明らかとなった。

図-11 地震・津波重畳時(case3)の水圧と, 地震時単独時(case1)の水圧と越流単独時(case2)の水圧を足し合わせた水圧との比較

5. おわりに

(1) 東北地方太平洋沖地震の津波と余震の発生を調べたところ, 本震発生から2時間後以内に, 余震が平均0.84分に1回と多く発生し, 津波作用時にも震度3~4の余震が発生していた。その加速度は相馬と八戸で平均50~75gal, 釜石で176galであり, 地震と津波が重畳して構造物に作用していたことが明らかとなった。

(2) 地震と津波越流を同時に発生する大型水理模型実験を実施した。その結果, 防波堤の変位が小さく加速度の影響が小さい限られた状態では, 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。現状ではWestergaard式と津波越流式それぞれに推定精度の誤差があり, 今後, それぞれの精度を上げることで, 地震・津波重畳時の水圧を精度よく推定できるようになるものと考えられる。

謝辞: 本研究では防災科学技術研究所のK-NET及びKiK-NETのデータを使用させていただきました。また, 気象庁の震度データベースのデータを使用させていただきました。記して謝意を示します。

参考文献

- 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.
- 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
- 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.
- 防災科学技術研究所: 強震観測網(K-NET, KiK-NET) <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>, 参照 2016-05-10
- Westergaard, H.M.: Water Pressure on Dams during Earthquakes, ASCE Transactions No.1835, pp.418-472., 1933
- 有川太郎, 佐藤昌治, 下迫健一郎, 富田孝史, 廉慶善, 丹羽竜也: 津波越流時における混成堤の皮脂メカニズムと腹付工の効果, 港湾空港技術研究所, No.1269, 37p., 2013.

(2016.3.16 受付)

STUDY OF A FORCE TO ACT ON A BREAKWATER AT THE SUPERPOSITION OF AN EARTHQUAKE AND THE TSUNAMI

Katsuhiro OKADA, Kojiro SUZUKI and Taro ARIKAWA

The recent 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake earthquake and tsunami generated huge tsunamis, and many protective facilities were destroyed. Most of the damage was caused by the tsunami overflow. On the other hand, many aftershocks occurred after the main shock and attacked the coastal facilities combined with tsunami. In order to clarify the superposition phenomenon of an earthquake and the tsunami, large hydraulic experiments were conducted. As a result, it was clarified that the hydraulic pressure acting on the caisson is basically expressed as a superposition pressure of earthquake and tsunami.