地震と津波重畳時における 防波堤への加振周波数の影響に関する研究

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: taro.arikawa.38d@g.chuo-u.ac.jp

2011年3月11日に発生した、東北地方太平洋沖地震津波では、震源のマグニチュードは9.0と我が国でも最大クラスの大きさの海溝型地震であった。この時に発生した、津波によって多くの防波堤が被災した。津波は、第一波来襲時から最大高さの波を確認するまでに、短いところでは数分、長いところでは何時間もかけて津波が来襲する。その津波が防波堤を越流している時にも、余震の影響が防波堤に作用している可能性が考えられるが、地震と津波が重畳した時に防波堤にどのような影響を与えるかが明確にはわかっていない。そこで、本研究では、地震と津波の重畳現象を再現できる大規模水路を用いて、周波数の違いによる影響と、マウンドの変形の有無による違いについて、明らかにすることを目的とした。

Key Words : earthquake ,tsunami,superposition,breakwater

1. はじめに

2011年3月11日に発生した、東北地方太平洋沖地震津波では、震源のマグニチュードは9.0と我が国でも最大クラスの大きさの海溝型地震であった。この地震の影響で、津波も発生し、高いところでは9.3m以上の高さの津波が観測された。この地震津波では、多くの構造物が被災したが、そのほとんどが津波に起因するものと考えられており、津波の越流に対して対策が検討され、粘り強い構造とすべく、施工されている¹⁾。一方で、津波は大きな地震が発生した後に来襲するが、地震の本震の後には数多くの余震が発生する。津波来襲時においては、同時に余震が発生し、防波堤の安定性に影響を与えている可能性が考えられる。そこで、岡田ら²⁾は地震と津波の重畳現象について、東北地方太平洋沖地震津波の際の津波第一波の山・谷出現時刻から津波最大高さの発現時刻とその間の余震発生状況を代表地点で確認し、津波来襲時において、余震の影響がある可能性について明らかにした。また、地震と津波の重畳現象について、水理模型実験を行い、加速度の影響が小さい状態ではあるが、静水圧式とwestergaardの近似式³⁾の重ね合わせにより、防波堤に与える作用力が表現できることを明らかにした。しかし、地震と津波重畳時における、地震の周波数の違

いによる防波堤への影響については、検討されていない。同じケーソン式構造物について地震動の周波数成分に関して、野津ら⁴⁾によって、実スケールにおいては、2Hz以下の振動数成分から岸壁の実変位を推定できることが確認されており、地震と津波の重畳時においても、周波数によって影響が異なる可能性が考えられる。そこで、本研究は、地震と津波重畳時において、地震の周波数の違いによって防波堤に与える影響の違いについて明らかにすることを目的とした。

2. 水理模型実験概要

実験は、地震と津波の重畳現象を再現可能な大型水路で行った。水路は長さ184.0m、幅3.5m、高さ12.0mの水路で、津波越流が再現可能な還流装置、地震の振動が再現可能な水中振動台を備えた大型の水路である。

防波堤のモデルは、K港の防波堤をモデルとし、縮尺1/20の断面を製作した。図-1に示すとおり、水中振動台の上に地盤製作用の枠を設置し、その枠内に中目砂で砂地盤を0.75m作製した。その上に5号砕石を用いて、マウンド0.25m設置し、マウンド上に重量と重心を調整した、高さ1.19m、幅0.74mのコンクリート製のパラペット構造を有した防波堤模型を設置した。

図-2はケーソンに設置した加速度計，波圧計，変位計の設置状況である．防波堤模型には，前面に波圧計(PG：エスエスケイ製，P310V-02S)を設置した．また，模型底面と天端からそれぞれ10cmの位置とマウンド内に加速度計(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，底面から10cmとパラペット天端から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，計測した．

初期水位は，模型パラペット天端上10cmとし，還流装置を用いて，防波堤の津波越流状態を再現した．還流装置による越流が定常状態となったことを確認した後に加振を行い，地震と津波の重畳現象を再現した．(図-3)．

実験は，地震と津波の重畳時の影響の違いを把握するため，同様な条件で越流が無い場合の実験も行った．また，マウンドの変形の有無による防波堤への影響の違いを確認するため，マウンドは変形しないようセメントペーストで固めたものと，固めていないものの2種類で行

図-1 模型配置図

図-2 計測器配置図

図-3 実験状況図

った．

3. 水理模型実験結果

(1) 加振周波数の違いによる防波堤への影響

地震の周波数によって，防波堤に与える影響が異なる事から，地震と津波の重畳時においても，どのように影響が異なるかを確認するため，周波数を変えて，実験を行った．加振強度を50gal，加振周波数を20Hzから2Hzまで変えて実験を行った．例として，加速度の時刻歴について，加振周波数が4Hzと8Hzのケースについて示す．加速度計は岸側方向が(+)で，沖側方向が(-)である．図-4(a)，(b)は8Hzにおける地震のみと，地震と津波を重畳させたケースを示す．8Hzでの模型下側加速度(AC1)は，どちらも同様な挙動を示しており，地震と津波の重畳現象の影響が小さいことがわかる．一方で，模型上側加速度(AC2)は，模型下側加速度(AC1)同様，ほぼ同様な挙動を示している．地震と津波が重畳したケースの方が，地震のみのケースと比較して，若干ピークの最大値が小さく，ピーク値の時間がはっきりしない．これは，岡田ら²⁾によって，2Hzで加震した加速度時刻歴の比較を行っているが，その結果と同様な傾向であることが確認できる．また，8Hzのケースでは，模型上側加速度(AC2)と模型下側加速度(AC1)の位相が反対になっていることが確認できた．これは，加振周期が短く，加速度の応答が模型上側に伝わる前に，逆向きの加速度が模型下側に作用しているためであると考えられる．

次に，4Hzにおける地震のみと，地震と津波を重畳させたケースについて図-5(a)，(b)に示す．4Hzの地震のみのケースは，模型上側加速度(AC2)と模型下側加速度

(a) 8Hz,50gal, 加振のみ

(b) 8Hz,50gal, 加振と越流の重畳

図-4 加振時時刻歴(マウンド変形あり)

(AC1)のどちらも加振周期に短周期成分がのっている状況であった。これは、8Hzのケースと異なり、模型上側と下側の応答のずれによって、模型下側の加速度応答が、模型上側に作用している加速度の影響を受け、短周期成分が現れたものであると考えられる。

一方で、4Hzにおける地震と津波が重畳したケースにおいては、模型下側加速度(AC1)については、短周期成分がのっているものの、模型上側加速度(AC2)では周期が明確に確認できる。4Hzで加震した地震と津波が重畳したケースにおいては、8Hzで加振したケースと比較して、加振周期が長い影響で、越流による影響が大きく出ている。そのため、越流方向と同様な方向に働く加速度(+方向)の継続時間が長く、逆向きに働く加速度(-)が短い。加速度の最大値については、加振のみのケースと比較して0.5~0.6倍程度小さくなっている。

各実験ケースについて、波圧の最大値と加振周波数の関係を図-6、加速度の最大値と加振周波数の関係を図-7に示す。加振のみの実験について、各地点の波圧と加速度の最大値を確認すると、加振周波数が4Hzの時ピーク

となることが確認できる。地震と津波が重畳したケースで確認すると、こちらも同様に4Hz付近にピークが確認できる。加速度の大きさについては、地震と津波重畳時においては、加振のみの場合と比較して小さいことが明らかとなった。

(2) 加振周波数の違いにおけるマウンドの変形の有無の影響

3. (1)の実験同様、加振強度を50gal、加振周波数を20Hzから2Hzまで変えて実験を行った。マウンドを固めて、変形を抑制したケースについて、一例として、加振周波数が8Hzの加速度時刻歴を図-8に、4Hzの加速度時刻歴を図-9に示す。

8Hzにおける地震のみと、地震と津波を重畳させたケースの、模型上側加速度(AC2)については、加振のみの場合と比較して、地震と津波が重畳したケースにおいては、加速度の最大値が0.3倍程度と小さく、マウンドが変形するケース同様、ピークの最大値がはっきりしない傾向が確認できた。また、模型下側加速度(AC1)と模型

(a) 4Hz,50gal,加振のみ

(b) 4Hz,50gal,加振と越流の重畳

図-5 加振時時刻歴(マウンド変形あり)

図-6 加振時最大波圧と加振周波数の関係
(マウンド変形あり)

図-7 加振時最大加速度と加振周波数の関係
(マウンド変形あり)

(a) 8Hz,50gal,加振のみ

(b) 8Hz,50gal,加振と越流の重畳

図-8 加振時時刻歴(マウンド変形なし)

上側加速度(AC2)の位相の差については、マウンドが変形するケースと比較すると小さいものの、位相差があることは確認できる。

次に、4Hzにおける地震のみと、地震と津波を重畳させたケースについて確認した。4Hzにおける模型上側加速度(AC2)の最大値の出現時刻は、加振のみの場合は模型下側加速度(AC1)が最大値を示した直後に最大値を示している。一方で、地震と津波が重畳したケースは、模型下側加速度(AC1)が低下し始めた際に最大値を示し

(a) 4Hz,50gal加振のみ

(b) 4Hz,50gal加振と越流の重畳

図-9 加振時時刻歴(マウンド変形なし)

図-10 加振時最大波圧と加振周波数の関係
(マウンド変形なし)

図-11 加振時最大加速度と加振周波数の関係
(マウンド変形なし)

ている。これは、地震と津波が重畳した場合においては、越流の影響により、模型上側の挙動が制限されていることが要因であると考えられる。

各実験ケースについて、波圧の最大値と加振周波数の関係を図-10、加速度の最大値と加振周波数の関係を図-11に示す。加振のみの実験について、各地点の波圧と加速度を確認すると、加振周波数が5Hzから6Hzの時ピークとなることが確認できる。次に、地震と津波が重畳したケースで確認すると、こちらは、マウンドが変形するケースと異なり、5Hzから6Hz付近でのピークは確認できず、加振周波数が小さいほど、加振時最大波圧と加振時最大加速度が増大している傾向が確認できた。

(3) マウンドの変形の有無による地震と津波の重畳が構造物に与える影響

地震と津波の重畳がマウンドの変形の有無による構造物に与える影響の違いについて検討した。検討は、8Hzと4Hzのケースについて、マウンド内に設置した加速度計(AC0)と模型下側加速度(AC1)および模型上側加速度(AC2)を比較して行った。

マウンドが変形する場合の8Hzの加速度時刻歴を図-12、4Hzの加速度時刻歴を図-13に示す。8Hzでは、マウンド加速度(AC0)と模型下側加速度(AC1)は、ほぼ同様な挙動を示している。一方で、4Hzでは、マウンド加速度(AC0)の増加開始時刻が模型下側加速度(AC1)の増加開始時刻と比較して、若干早い。また、模型上側加速度(AC2)が最小となる時に、マウンド加速度(AC0)は最大となっており、その時の模型下側加速度(AC1)はほぼ0である。マウンドが変形することにより、マウンドと構造物の挙動に時間差を生み出し、加速度が同じ方向に働く時間が、ずらされているものと考えられる。

次に、マウンドが変形しない場合の8Hzの加速度時刻

図-12 8Hz,50gal 加振時時刻歴(マウンド変形あり)

図-13 4Hz,50gal 加振時時刻歴(マウンド変形あり)

歴を図-14、4Hzの加速度時刻歴を図-15に示す。マウンドが変形しない場合は、8Hzで地震と津波が重畳したケースでは、マウンドが変形するケース同様、マウンド加速度(AC0)と模型下側加速度(AC1)は、ほぼ同様な挙動を示している。一方で、4Hzでも、8Hzで地震と津波が重畳したケース同様、マウンド加速度(AC0)と模型下側加速度(AC1)は、ほぼ同様な挙動を示している。また、マウンドが変形するケースとは異なり、マウンド加速度(AC0)と模型下側加速度(AC1)が越流と同一方向(+)に働く際に、模型上側加速度(AC2)も同一方向に作用している。

以上のことから、地震と津波の重畳時におけるマウンドの変形の有無による、構造物に与える影響の違いは、マウンドが変形する場合は、岸側加振開始時に図-16(a)のように、マウンドに伝わった加速度が構造物に伝わる時に、マウンドの変形により若干の時間差が発生する。その時間差の影響で模型下側と模型上側の加速度の応答が異なり、結果、図-16(b)のように、同じ方向に加速度が作用する時間が短くなり、地震と津波が重畳した際の構造物に与える加速度の影響を抑制していると考えられる。一方で、マウンドが変形しないケースにおいては、岸側加振開始時に図-17(a)のように、マウンドと構造物下端においては同様な挙動を示す。そのため、模型下側から模型上側へ加速度が伝わる時間差が短くなる。よって、図-17(b)のように、加速度が全体的に同一方向に働く時間が長くなり、構造物全体に働く加速度は大きくなる。その結果、構造物に大きな慣性力が発生し、残留変位を蓄積しているものと考えられる。

(4) 低周波数加振における防波堤への影響

マウンドの変形の有無における低周波数加振時の影響について、ワイヤー式変位計のデータで確認した。図-

図-14 8Hz, 50gal 加振時時刻歴(マウンド変形なし)

図-15 4Hz, 50gal 加振時時刻歴(マウンド変形なし)

18, 図-19に示す。データは1000Hzでサンプリングした時刻歴のデータを10データ毎に移動平均をとったものである。2Hzで加震し、地震と津波を重畳させたケースについて、模型上側の変位(DT2)と模型下側の変位(DT1)について、マウンドの変形の有無における違いを確認した。模型上側と下側の変位の差について着目すると、図-18に示すマウンドが変形する場合は、岸側変位時の最大変位は、模型下側の変位(DT1)の方が大きい。しかし、沖側変位時に同様な挙動になり、大きな残留変位が発生していない。一方で、図-19に示すマウンドが変形しない場合は、岸側変位時の最大変位の時間が模型上側(DT2)と模型下側(DT1)で異なる。この結果、沖側変位時

図-16 マウンド変形ありの場合の地震と津波重畳時における構造物の挙動

図-17 マウンド変形なしの場合の地震と津波重畳時における構造物の挙動

図-18 変位時刻歴(マウンド変形あり, 2Hz, 50gal)

図-19 変位時刻歴(マウンド変形なし, 2Hz, 50gal)

図-20 加振時最大変位と加振周波数の関係

に模型下側の変位(DT1)が戻りきらず、残留変位として蓄積しているものと考えられる。この現象は、これまでの検討結果から、加振一波の継続時間が長いほど、影響が大きい。そのため、低周波数加振においては、地震と津波の重畳時においても、変位が増大する可能性が大きい事が明らかとなった。

加振時最大変位について加振周波数との関係を図-20に示す。マウンドの変形が無い場合は、防波堤の変位は

上側(DT2)と下側(DT1)であまり差が無く同様に変位している。一方で、マウンドの変形がある場合は、5Hzより低周波数では、防波堤の上側(DT2)と下側(DT1)での変位の差が大きくなっている。この結果より、防波堤のマウンドは地震と津波重畳時において、ケーソンの加速度を抑制する効果があり、マウンドが変形しない状態の検討をすることにより、安全側の評価が可能であることが明らかとなった。

4. おわりに

本研究では、加振周波数に着目し、地震と津波の重畳時における影響について検討した。模型の縮尺の影響があるものの、地震と津波の重畳時においても、地震のみの場合同様、高周波数領域は変位にあまり影響が無く、低周波数領域が変位に影響を与えることが明らかとなった。また、マウンドの変形の有無により、地震と津波の重畳時において、構造物に作用する加速度の影響が異なり、重畳時における防波堤に与える影響も異なる。マウンドの変形が無い場合においては、低周波数の加振時に加速度と波圧が増大することが明らかとなった。

参考文献

- 1) 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被災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.
- 2) 岡田克寛, 鈴木高二郎, 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) Westergaard, H.M.: Water Pressure on Dams during Earthquakes, ASCE Transactions No.1835, pp.418-472., 1933.
- 4) 野津厚, 井合進, 一井康二, 沼田淳紀: ケーソン式岸壁の変形に挙する地震同の振動数成分, レベル2地震に対する土構造物の耐震設計シンポジウムおよびテキスト, pp.311-318., 2000.

(2017.3.15 受付)

INFLUENCE OF SHAKING FREQUENCY ON A BREAKWATER DURING EARTHQUAKE AND TSUNAMI SUPERPOSITION

Katsuhiro OKADA, Kojiro SUZUKI and Taro ARIKAWA

In subduction-zone earthquakes, which cause a tsunami, it is considered that the influence of aftershocks may act on a breakwater even when wave-overtopping is taking place. However, it is unclear what effect the superposition of earthquake and tsunami will have on breakwaters. In this study, a large hydroflume capable of reproducing the superposition phenomenon of earthquake and tsunami was used. The study revealed the influence due to frequency difference and the difference depending on the presence or absence of deformation of the mound.