防波堤港内側マウンドの津波による 越流洗掘に関する検討

東山 和博¹・長谷川 巖²・稲垣 茂樹³

¹東北地方整備局 仙台港湾空港技術調査事務所 (〒983-0852 仙台市宮城野区榴岡5-1-35)

E-mail:higashiyama-k82ab@pa.thr.mlit.go.jp

²正会員 株式会社エコー 水理解析部 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

E-mail:ihasegawa@ecoh.co.jp

³正会員 株式会社エコー 水理解析部 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

E-mail:inagaki@ecoh.co.jp

東北地方太平洋沖地震津波によって多くの防波堤が被災した。被災形態の一つとして、防波堤を越流する津波の打ち込みによる港内側マウンドの越流洗掘による被災が確認されている。本研究は、越流洗掘型で被災した防波堤と被災しなかった防波堤に着目して、被災のあり・なしの違いを生じる要因を水理模型実験により検討した。

越流洗掘により被災の生じた防波堤と被災の生じなかった防波堤の水理模型実験を実施した。越流水深により越流水の主流の打ち込み角度が変わり、防波堤マウンドへの作用点が変わることを示した。また、上部工構造の違いの影響も示した。港内側マウンドの被災に対して港内水位が重要であること、最も危険な水位が津波水位ピーク時であるとは限らないことを指摘した。そのため、港内側マウンドの越流洗掘対策を検討する際には、最も危険な水位および港内水位の変化の状況を見極めることが重要である。

Key Words : breakwater, tsunami, overflow, armor concrete block, hydraulic model test

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震津波により多くの防波堤が被災した。被災形態の一つとして、津波波力による被災の他に、防波堤を越流した津波の打ち込みによる港内側マウンドの越流洗掘による被災が確認されている。東北地方太平洋沖地震津波の発生以降に、防波堤の津波越流による港内側マウンドや地盤の洗掘に関する研究がおこなわれている。大井ら¹⁾は二次元水路で防波堤の津波越流実験を実施して、港内側マウンド被覆ブロックの安定性を検討し、安定性を左右する複数の因子について指摘しているが、具体的な分析に及んでいない。三井ら²⁾は二次元造波水路における水理模型実験と数値計算によって、港内側マウンド被覆材の安定性について検討しているが、被覆材の種類の違いによる比較を行っており、津波水位などに着目した被災原因の検討は行われていない。有川ら³⁾は津波越流による混成堤の被災メカニズムについて大規模水理模型実験で検討し、マウンドや地盤の洗掘がケーソンの安定性に与える影響に着目されている。しかし、津波による水位の時間的な変化が港内側マウンドに与える影響については取り扱われていない。

本研究は、津波越流に対する防波堤港内側マウンドの洗掘対策の検討に対する一助になることを目指して、東北地方太平洋沖地震津波により越流を生じた防波堤の中でも、越流洗掘型で被災した防波堤と被災しない防波堤があったことに着目し、被災のあり・なしの違いを生じる要因を水理模型実験によって検討した。

2. 防波堤の選定と整理

東北地方太平洋沖地震による津波が作用した防波堤について、越流洗掘を受けた防波堤と受けなかった防波堤を選定し、津波条件や防波堤断面、被害の状況などを整理した。

越流洗掘による被災を受けた防波堤として八戸港北防波堤を選定し、越流洗掘を受けなかった防波堤として仙台塩釜港沖防波堤を選定した。また、越流洗掘型ではなく、津波波力型の被災を受けた防波堤ではあるが、相馬港沖防波堤も取り上げ、対策工により津波波力に耐えた場合における越流洗掘への影響について検討した。選定した防波堤の断面図を図-1に、構造および津波条件の整

理結果を表-1に示す。さらに、各防波堤に襲撃した津波波形について、STOCモデル⁴⁾による数値計算波形を図-2に、越流水深とマウンド天端水深の時間変化を図-3に示す。各施設の特徴を以下にまとめる。

《八戸港北防波堤》

- ・港外と港内共に-5mの低い水位から水位が上昇する。
- ・港外水位の上昇が緩やかである。
- ・越流水深は比較的小さいが、越流継続時間が長い。
- ・港内水位の上がり方が遅い。
- ・マウンドが浅いのでマウンド天端水深が小さい。

《仙台塩釜港沖防波堤》

- ・港外水位が急激に上昇する。
- ・越流開始の約30s後に港内水位が上昇する。
- ・マウンドが深いのでマウンド天端水深が大きい。

《相馬港沖防波堤》

- ・港外水位が2段階に上昇し、それぞれ上昇速度が速い。
- ・港外水位の最初の上昇後に港内水位が上昇し、2段階目の高い港外水位のときには港内水位が上がっている。
- ・マウンド天端は-8mだが、港内水位の上昇により天端水深が大きくなる。

越流水深が小さい八戸港で越流洗掘が起こり、越流水深が大きい仙台塩釜港で越流洗掘が起こらなかったことから、越流継続時間とマウンド天端水深が、越流洗掘の有無に大きく影響している可能性が見える。

(1) 八戸港北防波堤 (上; ケーソン残存部, 下; 倒壊部)

(2) 仙台塩釜港沖防波堤 (地震による地盤沈下後)

(3) 相馬港沖防波堤 (地震による地盤沈下後)

図-1 選定した防波堤の断面図

表-1 選定した防波堤の構造および津波条件

防波堤名	八戸港 北防波堤	仙台塩釜港 沖防波堤	相馬港 沖防波堤
防波堤延長	3,480m	1,304m	2,700m
上部工構造	矩形	上部 パラベット	矩形
天端高	+5.0m	+4.49m	+5.3m
マウンド天端高	-5.0m	-12.41m	-8.0m
港外水位	+7.5m	+10.1m	+14.39m
港内水位	+1.1m~5.5m	+1.0~4.0m	+2.6~5.2m
越流継続時間	716s	123s	328s
最大越流水深	2.5m	5.61m	9.09m
越流洗掘	あり	なし	確認不可

(1) 八戸港北防波堤 (中央部、ケーソン倒壊部)

(2) 仙台塩釜港沖防波堤

(3) 相馬港沖防波堤

(2') 仙台塩釜港沖防波堤 (拡大)

(3') 相馬港沖防波堤 (拡大)

図-2 数値計算による津波水位の時系列

図-3 数値計算による越流水深とマウンド天端水深の時系列

3. 水理模型実験

水理模型実験を実施して津波越流による港内側マウンドの被災要因を検討した。水理模型実験は、二次元造波水路の中に水中ポンプと越流堰による仮設の循環流装置を設置し、防波堤の天端上を越流させて実施した。模型縮尺は循環流装置の能力の制約により、八戸港を1/40、仙台塩釜港と相馬港を1/70とした。本報告において、実験結果の数値はフルード則で現地量に換算して示した。

防波堤を越流した津波が港内側に落ち込む位置によってはマウンドだけでなく地盤が洗掘する場合もある。しかし小さな模型縮尺では砂地盤の洗掘現象を取り扱うことが難しいので、模型実験は海底地盤を固定床とし、マウンドを1,000kg/個程度に相当する碎石によって整形してマウンドの洗掘を取り扱う実験とした。ケーソン模型は滑動しないように重くして、港内外の水位差により模型ケーソンが倒壊しないようにしてある(図4参照)。

水理模型実験の津波条件は、数値計算の波形を目標とした。模型実験では港外水位や港内水位の時間変化を数値計算と一致させることができないが、港外水位のピーク値と同時刻の港内水位など、時間帯を限定すると数値計算と一致させることができる。

(1) 八戸港北防波堤の実験

図5に数値計算と模型実験の水位および模型実験の流速の波形記録を示す。港外水位のピーク値と、それと同時刻の港内水位を数値計算と一致させてある。ただし、水位の上昇速度や下降速度は一致させられないので、ピークの前後の水位の状態は実験と計算で異なる。港外水位がピークになる前の実験波形は、港外水位はピーク値より低く、港内水位は港外水位ピーク時とほぼ同じである。したがって、実験波形の港外水位ピーク時より前は、港内側マウンドの安定性に対して港外水位ピーク時より緩い条件であると言える。

図6(1)に示すように、港外水位ピーク時には越流による強い流れがマウンドの法先および港内側の模型床に作用している。この位置は図1(1)に示した洗掘箇所と一致している。また、図6(2)に示すように港外水位がピークに至る前にマウンド被覆石の移動を生じていることから、津波越流によりマウンド洗掘を生じることがわかる。なお、港内側マウンド被覆石(1,000kg/個程度)が移動したときの流速は、約3m/sである。

(2) 仙台塩釜港沖防波堤の実験

図2(2)の仙台塩釜港の津波波形を見ると、津波水位ピーク到達時には、港内水位が+1.0mであるが、その後、+4.0mまで上昇している。そこで、仙台塩釜港の実験は、港内水位+1.0mで津波ピーク到達までを対象とした実験

図4 実験模型の設定内容

図5 八戸港北防波堤の実験波形

(1) 港外水位ピーク時 (t=378s)

(2) 港外水位上昇過程 (t=44s)

図6 八戸港の実験における被覆材の移動状況

(実験①)と、港内水位+4.0mで港内水位上昇後を対象とした実験(実験②)の2種類の実験を実施した。なお、港内側水位の上昇は、防波堤堤頭部からの回折波と津波越流によるものである。

図7に仙台塩釜港の実験波形と計算波形を示す。仙台塩釜港の計算波形は港外水位が急激に上昇している。模型実験では、港外水位の上昇速度は合わせられないが、港外水位のピーク値と実験①と実験②のそれぞれで対象

(1) ピーク到達時を対象 (実験①)

(2) 港内水位上昇後を対象 (実験②)

図-7 仙台塩釜港沖防波堤の実験波形

(1) $t=6s$ の越流状況 (マウンド被災なし)

(2) $t=40s$ の越流状況 (マウンド被災あり, 評価対象範囲外)

図-8 越流と被災状況の時間変化 (実験①)

とする港内水位は計算波形と一致させてある。

実験①と実験②のどちらも、各実験で評価対象とする時間範囲内では、マウンド被覆材の移動は生じていない。実験①と実験②のそれぞれの評価対象時間をつなげると、港内側マウンドの安定性に対して計算波形と同じかやや厳しい条件となる。したがって、実験を分割して実施した状態ではあるが、模型実験において港内側マウンドが被災しなかった状況は現地と一致している。なお、図-8

(1) ピーク到達直後 (実験①, 6s)

(2) 実験対象時間超過後 (実験①, 40s)

図-9 越流状態の変化 (PIVによる流速解析結果)

に示すように越流の作用位置は港内側マウンドの水平部であるため、模型実験の海底地盤が固定床であることは実験結果に影響していない。

図-8は実験①の越流状況で、図-9はPIV法による流速解析結果である。港外水位ピーク時 ($t=6s$) の図-8(1)及び図-9(1)は越流による速い流れが港内側マウンドに到達していない。実験①の評価対象範囲外ではあるが、図-8(2)及び図-9(2)に示す $t=40s$ は越流水深はピーク時よりやや低い、越流による速い流れがマウンド表面に作用し、港内側マウンド被覆石が移動している。マウンド被覆材の天端水深は $t=6s$ が13.3m、 $t=40s$ が12.6mであり、その差は0.7mと大きくない。 $t=40s$ で被災に至ったのは、越流の初期には速い流れが深くまで到達しないが、越流の継続と共に速い流れが潜り込んだためである。

港内側水位上昇後を取り扱った実験②では、図-7(2)の $t=100s$ 程度を中心に前後20~30s程度は港外水位がピーク値に近い状態が継続しているが、マウンド被覆材天端水深が16.4mと大きいために、港内側マウンド被覆材が被災していない。実験①の $t=40s$ と実験②の結果の違いから、津波越流による港内側マウンドの安定性に対して、港内側水位が大きく影響していることがわかる。

なお、被覆材移動時の被覆材表面の流速は、約3m/sであり、八戸港と一致している。

(3) 相馬港沖防波堤の実験

相馬港の実験波形と計算波形を図-10に示す。計算波形の港外水位は急激に上昇しているのに対し、実験では水位の上昇が緩やかであるが、港外水位のピーク値を一

(1) ピーク到達時を対象 (実験①)

(2) 港内水位上昇後を対象 (実験②)

図-10 相馬港沖防波堤の実験波形

致させてある。計算波形の港内水位は越流初期の約+1mと港外水位ピーク後の約+5mの2段階になっているので、港内水位が低い状態の実験①と港内水位が高い状態の実験②に分けて実施した。

図-11に相馬港の実験における越流状況および被覆材の移動状況を示す。図-11(1)は越流水深が4.0mで港外水位ピーク時の7.4mと比べるとかなり低いが、港内側マウンド斜面上の被覆材が多量に移動している。図-11(2)は港外水ピーク時で、越流の打ち込みで速い流れが作用している個所のマウンド石材は既に無くなっている。実験の模型床は固定床であるため変形しないが、現地の砂地盤にこのような強い流れが作用すると、八戸港と同様に地盤洗掘を生じると考えられる。図には示していないが、港内水位が高い状態を対象とした実験②では港内側マウンド被覆材の移動を生じていない。これらの結果から、港内側マウンド被覆材の安定性に対して港内側水位の影響が大きいことがわかる。

図-11(3)はケーソンの滑動安定性向上のために港内側に1,000kg/個程度の石材で腹付けを行い、越流による港内側マウンド洗掘防止のために上部パラペット構造とした対策断面の越流状況である。上部パラペットは矩形上部工の上にパラペットをつけるのではなく、矩形上部工の港内側を低くした段落としの断面である。この断面では矩形上部工と比べて被覆材の移動が大幅に減少し、腹付

(1) 相馬港の実験の越流状況(被覆材動き出し, t=104s)

(2) 相馬港の実験の越流状況(港外水位ピーク, t=55s)

(3) 相馬港対策工実験の越流状況(港外水位ピーク, t=55s)

図-11 相馬港の実験における越流状況

工も残存した。このことから、津波に対する粘り強い防波堤構造として、上部パラペットと腹付工の組み合わせの構造が有効であると考えられる。

4. 越流洗掘対策における留意点の検討

図-12に、水理模型実験で得られた越流水深と港内への打ち込み位置の関係の模式図を示す。八戸港北防波堤の矩形上部工構造で越流水深が2.5m以下の条件では、越流水深が大きくなると打ち込み角度が浅くなり、ケーソンから離れた位置へ越流が作用する。一方、仙台塩釜港沖防波堤の上部パラペット構造で越流水深が4.6m以下の条件では、越流水深が大きくなると打ち込み角度が深くなる。これら2断面は上記の条件の他に、ケーソン幅や港内側マウンド天端水深及び天端幅も異なる。このように、さまざまな条件により港内側マウンドに対して危険な状態は異なる。

仙台塩釜港と相馬港の模型実験では、港外水位が高くても港内側の水位が高いと港内側マウンドの越流洗掘を生じず、港内水位が低ければ越流洗掘を生じた。八戸港の模型実験では、港外水位のピーク時ではなく上昇過程において港内側マウンド被覆材の移動を生じた。

これらの結果により、港内側マウンドの越流洗掘に対して港内水位が大きく影響していること、越流洗掘に対

(1) 八戸港北防波堤 (矩形上部工)

(2) 仙台塩釜港沖防波堤 (上部パラペット)

図-12 越流水深の変化と主流の作用位置の関係

図-13 越流水深と打ち込み角度の関係 (相馬港)

して最も危険な水位は津波水位ピーク時とは限らないことが明らかとなった。したがって、津波に対する港内側マウンドの洗掘対策を検討する際に、最も危険な水位および港内水位の変化の状況を見極めることが重要である。

図-13は相馬港の実験における越流水深による打ち込み角度の変化である。越流水深が小さい条件では、上部パラペットの打ち込み角度が矩形上部工より明らかに小さく、上部パラペット構造とすることで越流が港内側マウンドに作用しにくい状態となることがわかる。したがって、越流水深が小さい条件では越流洗掘対策として上部パラペット構造が有効である。しかし、越流水深が大きくなると上部パラペットの打ち込み角度が大きくなり、越流水深が7mになると打ち込み角度が矩形上部工と同

じになる。これは上部パラペット構造の港外側と港内側の天端高の差が越流水深に対して小さい条件では、上部工段落としての効果が弱まるためである。

5. 結論

- ①越流水深の大きさによって、越流が港内側水面に打ち込む角度や速い流れが港内側マウンドに作用する地点が変わることを確認した。
- ②マウンド天端水深の大きさにより、越流水が港内側マウンドに与える影響の大きさが変わる。そのため、港内側水位もマウンドの安定性に大きく影響する。
- ③港内側マウンドに対して最も危険な状態は、港外水位ピーク時とは限らないので、津波に対する港内側マウンドの洗掘対策を検討する際に、最も危険な水位および港内水位の変化の状況を見極めることが重要である。
- ④上部パラペット構造は越流水深が小さい条件では越流洗掘対策として有効であるが、越流水深が大きくなるとその効果が弱まる。

参考文献

- 1) 大井邦昭, 林建二郎, 河野茂樹: 津波越流に対する海岸構造物及び防波堤の強化に関する実験的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) Vol.68, No.2, 2012, 196-1101.
- 2) 三井順, 丸山草平, 松本朗, 半沢稔: 防波堤を越流する津波に対する港内側マウンド被覆材の安定性に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) Vol.68, No.2, 2012, 1881-1885.
- 3) 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資料, No.1269, 2013.
- 4) 高潮津波シミュレータ, Storm Surge and Tsunami Simulator in Oceans and Coastal Areas (略してSTOC), 独立行政法人港湾空港技術研究所, <http://www.pari.go.jp/unit/trc/research/stoc01.html>, 参照日: 2013年4月2日

STUDY OF HARBOR SIDE MOUND SCORING BY TSUNAMI OVERFLOW

Kazuhiro HIGASHIYAMA, Iwao HASEGAWA and Shigeki INAGAKI

Many breakwaters suffered from the huge tsunami caused by the East Japan great earthquake disaster in 2011. It is reported that harbor side mound scoring by the tsunami overflow was one of the main causes of collapse of breakwaters. In this paper, we examined the differences of conditions when collapsing occurred and did not occur by hydraulic model tests. We showed the ramming down angle of overflow and the point of action to breakwater mounds depended on water depth of overflow. And the most dangerous water level was not necessarily the peak level. In addition, we showed the coping of mounds had big effects in collapse of breakwaters. It is very important to know the most dangerous water level precisely in examining countermeasures for preventing harbor side mound scoring by tsunami overflow.