東日本大震災における釜石湾口防波堤の被災メカニズムに関する研究

Failure Mechanism of Kamaishi Breakwaters due to the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami

有川太郎¹・佐藤昌治²・下迫健一郎³・長谷川 巖⁴・稲垣茂樹⁴・佐藤正勝⁵・下澤 治⁶

Taro ARIKAWA, Masaharu SATO, Ken-ichiro SHIMOSAKO, Iwao HASEGAWA
Shigeki INAGAKI, Masakatsu SATO and Osamu SHIMOZAWA

Many breakwaters were damaged by the March 11, 2011 Tohoku Earthquake off the Pacific coast. The majority of the breakwaters were destroyed or deformed under tsunami overflow; however, the failure mechanism under tsunami overflow is not clear. It is supposed that caissons slid from the mound under tsunami overflow from video analysis of Kamaishi breakwaters, of which about half were damaged. Therefore, with the main objective of this report being to clarify the stability of breakwaters under tsunami overflow, hydraulic model experiments and numerical simulations were conducted with Kamaishi Bay breakwaters as the subject, and disaster mechanisms of the trunk of the breakwaters were examined.

1. はじめに

東日本大震災による津波により多くの防波堤・防潮堤等が倒壊した。その様子は、ビデオ撮影がなされていた場所も多く、津波が防波堤等の高さを越えた後、破壊されたと推測されるものも多いと考えられる。

防波堤の津波による破壊メカニズムの解明に絞って検討事例を見ると、堀口・横田（1968）は、十勝沖地震津波によって破壊された八戸港河原木防波堤の倒壊原因を調べており、港内外の水位差、前面部の動水圧の影響で滑動したのではないかと推測している。谷本ら（1983）は、日本海中部地震津波によって建設中の能代港外港埋立護岸の被災について、段波津波の影響があったことを示唆している。

一方で、今次津波による被災事例のように、越流してある程度時間が経過している際の防波堤の安定性についての研究例はこれまでにない。そこで、本研究では、津波越流時における防波堤の被災メカニズムを解明することを目的として、釜石を例として、堤幹部に対して水理模型実験ならびに数値計算を用いて研究するものである。

2. 釜石湾口防波堤の被災メカニズムの検討状況

(1) 既往の検討

高橋ら（2011）は、釜石湾口防波堤の被災状況について、ナローマルチビームによる海底地形状況を詳細に示し、さらに、釜石湾における数値計算を実施した。その

際、数値計算による水位差ならびにビデオ映像を用いて、防波堤の滑動状況について検討し、数値計算による港内外水位差による水平力を計算したところ、防波堤の滑動安全率は、深部では1.19、浅部では0.95であることを計算している。そのようななか、ビデオ映像から、ケーソン目地部の速い流れを観察し、目地部の流速による基礎マウンドの洗掘が主要な要因と推定した。

一方で有川ら（2012）は、縮尺1/60の水理模型実験を行い、深部における防波堤の滑動実験を行い、水位差による水平力に加えて、前面波圧が静水圧より若干大きく、背面波圧が静水圧よりも若干小さくなることで、水平力が増大した結果滑動したのではないかと推測している。また、目地部の洗掘については、洗掘が生じる程度の流速が生じなかった可能性が高く、また、実験の越流洗掘状況から、釜石では、越流洗掘による影響は小さかったと推測された。

(2) 考えられる被災要因

津波が防波堤に作用する際、考えられる外力は、引波初動であれ、押波初動であれ、まず、津波により港外側の水位が上昇し、その後、越流もしくは防波堤開口部からの流入により、港内側の水位が上昇し、そして、津波が港外側から引いていく。この動作を繰り返す。

一方で、防波堤は、基礎捨石部およびケーソンから主に構成され、外力に対して、滑動、転倒そして支持力破壊が生じなければ、変形なく残るのである。滑動はほぼ水平に外力が作用した際に生じ、転倒は、モーメントが大きいときに生じるため、ケーソンが軽く背面水位が低い場合に生じやすい。その状況のなかで、基礎捨石部の支持力が小さければ、ケーソンが基礎捨石部にめり込むように変形していく（小林ら、1987）。このように3つの破壊モードがあるが、波浪による被災でもほとんどの場

1 正会員 博(工) (独)港湾空港技術研究所 上席研究官
2 正会員 工修 (独)港湾空港技術研究所 研究官
3 正会員 博(工) (独)港湾空港技術研究所 海洋研究領域長
4 正会員 (株)エコー
5 正会員 前仙台港湾空港技術調査事務所長
6 東北地整塩釜港湾・空港整備事務所 課長

合が滑動モードによる破壊と推定されている。

考えられる被災原因を列挙すると、

- ① 波力としての動水圧
- ② 港外、港内の水位差
- ③ 越流および目地部流速による基礎マウンドの洗掘
- ④ 間隙水圧の増大による支持力の低下

が考えられる。越流時においては、①は小さいと考え、特に、②と③について水理模型実験を用いて検討する。

3. 水理模型実験

(1) 実験模型

図-1に実験の全体断面図を示す。模型縮尺は、釜石深部の1/20とした。波高計を図に示すようにとりつけた。環流装置のある区間70m程度の間に、模型を設置した。ケーソンの天端高さを3.7mで合わせるように、基礎マウンドを設置した。図中の数字は、基準線からの距離を示している。ケーソンの形としては、深部で使用されている台形および矩形(図-2)とした。ケーソンの高さは台形が1.65m、矩形が1.4mである。前面・背面・上面には波圧計(PG)をとりつけ、底面には間隙水圧計(UG)を取りつけた。ケーソン幅は、両方とも1.5mとした。水路幅は3.5mであるため、1.5m幅のケーソンを中央に設置

図-1 実験模型全体断面図 (矩形モデル, 単位m)

図-2 実験模型詳細図 (矩形モデル, 単位mm)

表-1 実験ケース

ケース	回数	初期水位(m)	マウンド 砕石	沖側水位 変化量 (WG5, m)	陸側水位 変化量 (WG10, m)	水位差 (m)
1	1	3.85	3号	0.040	-0.770	0.117
	2			0.078	-0.154	0.232
	3			0.214	-0.391	0.605
2	1	3.85	3号	0.080	-0.155	0.235
	2			0.111	-0.220	0.331
	3			0.213	-0.382	0.595
3	1	3.85	6号	0.038	-0.064	0.102
	2			0.080	-0.150	0.230
	3			0.209	-0.398	0.607

し、その両端には、幅0.9mのダミーケーソンを設置した。1.5m幅のケーソンの質量は台形4.5トン・矩形4.0トン、ダミーケーソンの質量は、台形3.0トン・矩形2.6トンとし、ダミーケーソンは、1mあたりの質量を10%重くした。目地幅は2.5cmとした。

(2) 実験ケース

実験は環流装置の沖側扉(図-1の左側)から水を排出し、岸側扉(図-1の右側)から吸入することで、港外側と港内側の水位差を作り、津波による越流状態を擬似的に再現することを試みた。なるべく現地の水位差や水位とあうようにポンプの出力を調整する。実験ケースを表-1に示す。それぞれ水位差を変えて3回ずつ行い、最初の2回は少し小さい水位でマウンドの状態などを調べ、3回目でケーソンが滑動ををすると思われる水位差をつけた。初期水位は全ケース3.85mとした。砕石3号は現地換算600kg程度、砕石6号は現地換算10kg程度となる。釜石では10kgから800kg程度の砕石を使用していたことから、砕石の大小による違いを比較するために、ケース3を行った。

(3) 実験結果

a) 実験時の様子と実験後

ケース1の3回目の実験時の様子を写真-1に示す。初期水位から徐々に水位差が大きくなるに従い、背後の越流の影響が大きくなり、最後の状態はケーソンが抜けた後の状態であり、抜けることによって水位差が戻り始めることがわかる。なお、窓から観察できるケーソンはダミーケーソンであるため、質量が10%程度重く、滑動しなかった。

写真-2から写真-4に、各ケースの3回目実験前と実験後の様子を示す。ケーソン本体が抜けると、水位差が小さくなることから、変位する距離が短くなり、有川ら(2012)で示されているように、マウンドの下部まで滑落していない。現地の測量結果からは、ケーソンはマウンド下部まで滑落していることから、長い時間ケーソン

写真-1 実験時の様子 (ケース1の3回目)

写真-2 実験後の様子 (ケース1の3回目)

写真-3 実験後の様子 (ケース2の3回目)

写真-4 実験後の様子 (ケース3の3回目)

が移動するだけの力が作用していた可能性があることがわかる。また、ケース3のマウンドの碎石が小さいケースにおいても目地の洗掘痕はみうけられなかった。また実験中の観察から、越流水塊によってケーソン後趾まで到達するような洗掘は認められなかった。

b) 目地流速および滑動安全率の結果

目地部における流速は、ケース3の場合で最大水位差のときに3.0m/s程度生じており、水位差 Δh を用いて計算される $\sqrt{2g\Delta h}$ と比較すると約0.9倍程度となり、ほぼ等しかった。

表-2 滑動安全率と摩擦係数

ケース	滑動安全率	摩擦係数
1	1.02	0.59
2	1.06	0.56
3	1.05	0.57

次に各ケースの波圧から滑動安全率を計算したものを表-2に示す。ここで、滑動安全率の列は、摩擦係数を0.6と仮定したときの値を示し、摩擦係数の列は、滑動安全率を1.0としたときの係数である。これを見ると、ほぼ0.6付近で変位しており、滑動モードが卓越していたことが示唆される。また、碎石大小による違いがないことがわかる。

c) 波圧の結果

有川ら(2012)においては、越流時において前面の波圧は静水圧より若干大きくなり、背面の波圧は、背面水位における静水圧よりも10%程度下がることを指摘している。

今回の実験においても、前面波圧は、ほぼ静水圧から変化がなく、数%に満たないことが確認された。一方で、

図-3 減少率の時系列（上からケース1、ケース2、ケース3の3回目、グレー線は0.5sの移動平均）

図-4 減少率と越流水位との関係

背面波圧を、WG10の水位を用いて静水圧との比率を調べた。背面の各地点の圧力を代表面積で積分し、その平均の減少率を C_b とすると、各ケースの3回目の時系列は図-3のようになる。

図-4は全ケースのすべての回における減少率について、0.5sの移動平均の後に得られた最小値をプロットしたものである。横軸は、ケーソン天端からの水面高さを表している。これを見るとわかるように越流量が増加していくとともに、背面の静水圧に比べ最大で6%程度減少していることがわかる。

d) 支持力破壊との関係

少なくともビデオで見る限り、ケース1、ケース2では支持力の破壊線が見られず、砕石の小さいケース3において、ケーソンが若干水平に変位したあと、基礎マウンドの内部に破壊線が見られた。一方で、表-2に示すとおり、滑動安全率はケース2もケース3も変化しないことから、ケーソンが滑動後に基礎マウンドが破壊されたものと考えられる。

(4) 気中における引張り試験

a) 試験方法と条件

摩擦係数を確認するために、気中において引張り試験を行った。気中において基礎マウンドを作り、ケーソンの下から1/3の高さの場所をウィンチで引張った。ケーソンは矩形型と台形型と行い、洗掘との関係を見るため、目地洗掘ならびに越流洗掘をあらかじめ掘っておくケースと比較した。各ケースを表-3に示す。なお、%の表示は、目地洗掘の場合、ケーソン幅に対する目地幅の割合であり、両端に円形に掘り、両方を合わせた幅との割合とした。一方で越流洗掘幅の割合は、ケーソン長さ（引張る方向）との比であり、下部全体にわたって掘っている。また砕石の大きさによる違いも行った。写真-5に洗掘を作って行う初期の状態の例を示す。

表-3 引張り試験のケース

ケーソン	目地洗掘	越流洗掘	砕石
矩形	なし	なし	3号, 6号
	20%, 30%, 40%	なし	3号
	なし	10%, 20%	3号
台形	なし	なし	3号, 6号

写真-5 初期状態（左：目地洗掘30%，右：越流洗掘20%）

図-5 見かけ上の摩擦係数と洗掘幅との関係

b) 試験結果

それぞれ、3回ずつ行った結果を図-5に示す。数cm程度安定して動き出したときの摩擦係数として整理した。かなりゆっくりと動いているため、動摩擦係数ではないと考えている。摩擦係数そのものは設置面積によらないと考えられるが、洗掘幅を増大すると、摩擦係数が変化したため、ここでは「見かけ上の摩擦係数」として整理した。メカニズムについては今後詳細に調べるべきであろう。結果は平均を白抜きで示した。3回から4回行い、黒点はそれぞれの回のものであり、白抜きはその平均である。これを見ると、見かけ上の摩擦係数は、目地洗掘幅にも影響を受けるが、越流洗掘幅においては、10%程度の洗掘でも25%程度減少することがわかる。

4. 数値実験

(1) 数値計算条件

CADMAS-SURF/3D（沿岸センタ，2010）を用いて、計算格子を5cmに区切り、水路と同じ大きさにして計算を行った。水路幅も水路と同じ長さとし、目地については、50%の空隙率を有する格子として与えた。基礎マウンドは、不透過とした。

ケーソンモデルは矩形と台形をそれぞれ対象とし、初期水位を3.85m、流入・流出境界の流速を0.025, 0.05, 0.075, 0.100, 0.125, 0.150, 0.175, 0.20 m/sの8ケースを行った。

(2) 計算結果

a) 計算の状況

図-6は、初期水位から徐々に変化していく矩形ケーソンを使用した一例（流出・流入0.1m/s）を示すものである。写真-1と同様の状況が計算できているのがわかる。

図-7は、矩形モデルの0.1m/sのケースである。65s付近で実験ではケーソンが滑動したため、計算と大きくずれているが、その付近では、計算と実験とが水位ならびに波圧が一致していることがわかる。台形では0.125m/sのケースで一致した。

b) 背面波圧の減少率

図-8は、ケーソン前面の水位を η_f 、背面の水位を η_b 、基礎マウンドから背面水位までの距離を h_b とし、前面と

図-6 計算の状況の一例

図-7 前面・背面水位(WG7,8)と前面・背面波圧(PG5,8)の比較

背面の水位差 ($\eta_f - \eta_b$) と h_b との比を水位差・背面水位比とする。

図-9は、各ケースにおける減少率ならびに水位差・背面水位比の時系列データから、減少率が最小になる時刻における水位差・背面水位比と減少率 (C_b) との関係プロットしたものである。黒が実験、白が計算を示している。

全体的には概ね一致しているものの、水位差・背面水位比が大きくなると数値計算のほうが実験よりも C_b は小さくなっている。これは、ケーソン背後の圧力変動の乱れが、計算のほうが大きいことから、越流水塊が実験よりも背面近くに着水していると推測され、その影響が一要因と考えられる。

一方で、必ずしも、水位差・背面水位比が大きくなったときに、減少率が最小になるわけでもないことがわかる。これは、水位差・背面水位比が大きくなると、越流速度が大きくなり、着水場所が背面から遠ざかるため、背面水圧に対する影響が小さくなっていくためである。これらの結果から、釜石の場合、減少率としては11%程度が最小であることがわかる。

図-8 ケーソン周辺の水位の定義

図-9 減少率と水位差・背面水位比の関係

5. まとめ

縮尺1/20の模型を用いて釜石をモデルとして、津波越流時における防波堤の安定性について検討した。その結果、背面の静水圧からの減少率が10%程度となりうる可能性があり、かつ、特に越流洗掘によって見かけ上の摩擦係数が大きな影響を受けることがわかった。既往の研究結果も踏まえると、釜石湾口防波堤が倒壊した主たる要因は水位差であり、越流の際の背面圧力の低下や、洗掘によるマウンドの不安定性の増大が、より倒壊しやすくするとともに、倒壊のばらつきを生んだと考えられる。

参考文献

- 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 (2012): 釜石湾口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, p. 52.
- 沿岸センター (2010): CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発, 沿岸技術ライブラリーNo.39.
- 小林正樹, 寺師昌明, 高橋邦夫, 中島謙二郎, 小谷 拓 (1987): 捨石マウンドの新しい計算法, 港湾技術研究所報告, Vol. 26, No. (1), pp. 371-412.
- 高橋重雄 ほか34名 (2011): 2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報, 港湾空港技術研究所資料, No.1231, p. 200.
- 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): 1983年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察, 港湾技術研究所資料, No.0470, p. 299.
- 堀口孝男・横田基紀 (1968): 十勝沖地震津波調査報告, 第15回海岸工学講演会論文集, pp. 243-253.