東北地方太平洋沖地震津波による女川漁港の漁港施設における被災メカニズムの検討

A Study of Damage Mechanism on Port Facilities at Onagawa Fishery Port due to Tohoku Earthquake Tsunami

八木 宏¹・杉松宏一²・中山哲巖³・西 敬浩⁴・奥野正洋⁵・小池 哲⁶・林 健太郎⁷・五十嵐雄介⁸

Hiroshi YAGI, Koichi SUGIMATSU, Akiyoshi NAKAYAMA, Takahiro NISHI, Masahiro OKUNO
Tetsu KOIKE, Kentaro HAYASHI and Yusuke IGARASHI

In order to investigate the damage mechanism on fishery port facilities at Onagawa fishery port, field surveys were conducted and these body stabilities were checked using the tsunami simulation modeled with water overflowing structures. In the survey, caisson and riprap foundations of the north and south breakwater at the mouth of the port collapsed outward and inward of the port, respectively. The modeled results explained that the caisson withstood the pressure of the spilling wave but was broken with the undertow and that riprap foundations were destroyed with the spilling wave. In addition, the modeled results demonstrated the breakwater head destruction which was affirmed in the video that the head part is destroyed finally.

1. はじめに

平成23年3月11日に三陸沖で発生したマグニチュード9.0の東北地方太平洋沖地震は、東北・関東の沿岸部を中心に、揺れによる構造物の倒壊、液状化、地盤沈下等の被害と津波による構造物等の倒壊といった甚大な被害をもたらした。特に、今般の被災地は漁業を地域の基幹産業としたところが多く、約300の漁港が立地していることから、水産業に壊滅的な被害が生じたところである。

本研究は、女川漁港の漁港施設の被災メカニズムを明らかにするために、被災概況を詳細に調査するとともに、津波遡上シミュレーションによって津波来襲時の状況を再現検証し、被災箇所で推定された外力条件により堤体の安定性照査を実施して被災メカニズムを検討した。

2. 現地調査の概要と被災状況

女川町は、地震動と津波の両方によって甚大な被害を

受けた。津波の被害に関しては、湾口にあった防波堤が基部2スパン程度のみを残し、堤幹部、堤頭部が倒壊していた。本調査では、代表的な被災施設を選定し、漁港施設の被災部位や被災状況別の被災延長について測量した(図-1参照)。海中における堤体の飛散状況や洗掘状況などは、三次元的な地形を計測出来るスワス測深器(C3D)で取得した精度の高い測深に加え、水中調査による海底音響画像と被災前後の航空写真から整理した。なお、対象漁港周辺では80cm程度の広域沈下が発生している。以下に、外郭施設として南防波堤、係留施設として大原・女川岸壁の調査結果を取りまとめる。

(1) 南防波堤

南防波堤は、ケーソン式の防波堤と基部の傾斜堤(取り付け部)とで構成されていた。図-2に水中調査結果と断面図を、写真-1に被災状況を示す。取り付け部及び基部側のケーソン2スパンを残し、堤幹部、堤頭部は倒壊、

図-1 調査施設位置

1 正会員	工博	(独法) 水産総合センター水産工学研究所 水産土木工学部 水産基盤グループ長
2 正会員	工博	(独法) 水産総合センター水産工学研究所 水産土木工学部 水産基盤グループ
3 正会員	修(工)	(独法) 水産総合センター水産工学研究所 水産土木工学部 部長
4	修(工)	(独法) 水産総合センター水産工学研究所 水産土木工学部 水産基盤グループ
5 正会員	修(工)	(株) アルファ水工コンサルタンツ 東京本部
6		(株) アルファ水工コンサルタンツ 東京本部
7 正会員	修(工)	(株) アルファ水工コンサルタンツ 東京本部
8	修(理)	(株) アルファ水工コンサルタンツ 東京本部

流出していた。取り付け部の波返工も折損・流出していた。天端沈下量は最大124cmとなっていたが、広域沈下が80cm程度であり、局所的な沈下としては40cm程度であったと考えられる。海底地形測量からケーソン部は、堤外側への堤体の倒壊・飛散が確認された。堤体の移動距離の最大値は120m程度であった。また、捨石マウンドは沖側に崩壊し、マウンド高は5m程度低下した。開口部のマウンドは、被覆されていたが水中調査の結果より天端が約9m浸食しており、被覆ブロック及びプレバッドコンクリートが飛散していた。

被災要因としては、ケーソンの倒壊方向から、主として引き波の作用で流出したと推定される。陸側ケーソン

の飛散距離が比較的短いことから、湾口中央部で最も速い流れが発生していたと推定される。

(2) 大原・女川岸壁

栈橋式の岸壁であり、被害は甚大であった。特に、女川岸壁、取付栈橋付近の隅角部では本体工が流出し、背後地も大きく洗掘されていた。図-3に水中調査結果と断面図を、写真-2に被災状況を示す。大原岸壁はほとんど残存していた区間であるが、前面の水深が7.5m程度で計画水深5.5mに対して2m程度深くなっていた。さらに、残存している背後の建物周辺でも洗掘が顕著であった。なお、建物周辺における洗掘深は最大で3.0mであった。海底地形測量結果から、隅角部前面の水深は4m程度と浅くなっており、南側で水深7.5m程度と深くなっていた。

大原岸壁の土留部では比較的大きなエプロン段差が見られ、埋立土が液状化したものと考えられるが、本施設周辺において流出が広範囲で見られたことから、津波による影響も大きかったと考えられる。陸上部の調査では、倒壊した本体工および洗掘された土砂は、背後地で確認されなかったことから引き波時に沖側に流出したと考えられる。これにより、土砂が岸壁前面に堆積したものと考えられる。一方、南側岸壁の水深変化は、引き波の落水によって岸壁前面が洗掘されたことによるものと考えられる。

3. 痕跡高の分布特性

東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによって

図-2 被災調査結果 (南防波堤) (a) 水中調査結果, (b) 断面図 (ケーソン部), (c) 断面図 (開口部マウンド)

写真-1 南防波堤被災状況 (基部から先端方向を望む)

図-3 被災調査結果 (大原岸壁) (a) 水中調査結果, (b) 断面図

図-6 津波シミュレーション結果と現地調査による津波痕跡高の比較

果であった。

浸水範囲については、大阪市立大学原口准教授によって詳細な観測が行われているため、本検討では実測の浸水範囲として用いた。実際の浸水範囲との整合度が最も大きくなったのは、被災未考慮時は0.9～1.0、被災考慮時は0.9の場合である。

したがって、痕跡高及び浸水範囲を検討した結果、すべり量倍率0.9の場合の再現性が最も高いと考えられる。

(3) 被災メカニズムの検討

a) 南防波堤

防波堤前後の代表点において計算結果より抽出した水位及び流速の経時変化を示した。ケーソン部と傾斜堤部において被災パターンが異なるために別々に検討する。

現地調査結果及び被災時に撮影されたビデオからは、傾斜堤部は押波で倒壊し、ケーソン部は引き波で倒壊したことが推察される。数値解析結果から抽出した防波堤前後の代表点における水位・流速（堤体に垂直な方向成分、陸向きが正）の経時変化を図-7に示す。

ケーソン部では、押波時には水位差が約4m、3m/s以

図-7 南防波堤前後の水位と流速の時系列
(a) ケーソン部, (b) 傾斜堤

上の流速が発生、引き波時には水位差が約10m（施設が未被災とした場合）、2m/s程度の流速が発生しており、押波時と引き波時では異なる外力が作用していた。このことから、ケーソン堤部が押し波時に残存し引き波時に倒壊したという被災実態と、外力の発生傾向が一致していると考えられる。

b) 大原・女川岸壁

計算結果より抽出した押し波時及び引き波時の代表的な流速分布を図-8に示す。湾奥大原岸壁の背後の細長く蛇行した谷状地形を要因として、押し波及び引き波時の速い流速の継続時間が他の地域と比較して長いことが数値計算から確認され、顕著な破堤を発生させたと推察される。

図-8 流況分布 (a) 押し波時, (b) 引き波時

(4) 被災メカニズムを導入した数値解析

本検討では、防波堤の破堤メカニズムに着目し、八木ら(2012)において提案されている越流時の防波堤に作用する波圧式を用いて、時系列で防波堤の滑動及び転倒の安定性照査を行った。演算中で、安全率が1.0を切った瞬間に当該構造物機能が消失すると仮定した計算を実施した。傾斜堤部及び開口部のマウンドについては、イスバッシュの式による安定性照査を採用した。

表-2に、被災した施設に対する安定性照査結果を取りまとめる。湾口に位置する北防波堤及び南防波堤の傾斜堤部及び開口部のマウンドは押し波時に被災する結果となった。一方、北防波堤と南防波堤のケーソン部は引き波時に水位差がおおよそ5m程度発生した時に倒壊する結果となった。この結果は、現地調査結果やビデオの状況をほぼ再現出来ていると判断できる。

越村(2011)により報告されている、ビデオキャプチャーにより取得された女川町沿岸での津波による水位の時系列変化と、計算結果を比較した(図-9参照)。破堤メカニズムを数値計算で考慮した場合、破堤施設をはじめから考慮しない場合と比較して、津波到達時の水位上昇が遅れ、実際の水位変動に対する再現性が向上することが確認された。

表-2 施設別安定性照査結果

施設名	倒壊時 前面水位 (m)	倒壊時 背面水位 (m)	流速 (m/s)	倒壊時間 (発震時基準)
北防波堤 ケーソン部	6.1m	11.9m	—	48分25秒 (引き波時)
南防波堤 ケーソン部	5.6m	11.4m	—	48分15秒 (引き波時)
北防波堤 傾斜堤部	—	—	2.68m/s	40分05秒 (押し波時)
南防波堤 傾斜堤部	—	—	2.75m/s	40分00秒 (押し波時)
湾口部 マウンド	—	—	3.22m/s	32分35秒 (押し波時)

図-9 時系列水位比較

5. 結論

本研究において得られた結論を以下に取りまとめる。

- (1) 女川漁港の漁港施設について被災状況を把握した。湾口の南防波堤のケーソン部は港外側に倒壊しており、捨石堤部は港内側に倒壊していたことを確認した。また、開口部のマウンド及び堤体のマウンド部が大きく浸食していた。また、岸壁施設については港奥の大原岸壁(栈橋式)の破堤状況が顕著であり、背後用地から岸壁周辺が大きく洗掘し、港内へ土砂が流出した。
- (2) キャリブレーションの結果、痕跡高を基準とした最適なすべり量は0.9倍となり浸水範囲も179.6ha(実測166.2ha)と再現性は良好であった。ビデオキャプチャーによる水位の検証結果では、破堤メカニズムを考慮した場合にさらに再現性が向上する結果となった。湾奥大原岸壁の背後の細長く蛇行した谷状地形を要因として、押し波及び引き波の速い流速の継続時間が長いことが数値計算から確認され、顕著な破堤になったと推察される。
- (3) 湾口防波堤ケーソン部は押波の波圧には耐えたが、引き波時に破堤する結果、捨石堤は押波時に破堤条件となり、被災状況調査結果と安定性照査の結果が一致していた。さらに、湾口防波堤の堤頭部の被災のタイミングは、堤間部の被災のタイミングと比較して数分遅いという結果が得られた。湾口防波堤の破堤の状況を記録したビデオ映像に見られる(宮城県提供)の状況と、本研究で想定した破堤メカニズムとの整合が取れていることも確認された。

謝辞：本研究は、平成23年漁港施設等設計条件見直し調査(水産庁)による成果である。ここに感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 原子力安全基盤機構 耐震安全部(2011): 原子力事業者が実施した平成23年東北太平洋沖地震により発生した津波の再現計算結果等に係るクロスチェック解析, 地震・津波3-4.
- 越村俊一(2011): 東北地方における津波浸水範囲および津波被害の調査 一津波来襲状況の解明と被害関数構築に向けて一, 東北地方太平洋沖地震津波に関する合同調査報告会資料.
- Mansinha, L. and D. E. Smylie (1971): The displacement fields of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.61, No.5, pp.1433-1440.
- 八木 宏・杉松宏一・中山哲蔵・三上信雄・大村智宏・佐野朝昭・奥野正洋・五十嵐雄介(2012): 東北地方太平洋沖地震津波による漁港施設(防波堤)の被災状況とその原因について, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.68, No.1, 印刷中.