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

A Study of Damage Mechanism on Fishery Port Facilities due to TOHOKU Earthquake Tsunami

八木 宏¹・杉松宏一²・中山哲巖³・西 敬浩⁴・三上信雄⁵・佐々木崇之⁶・林 健太郎⁷

Hiroshi YAGI, Koichi SUGIMATSU, Akiyoshi NAKAYAMA, Takahiro NISHI, Nobuhiro MIKAMI
Takayuki SASAKI and Kentaro HAYASHI

In order to investigate the damage mechanism on fishery port facilities and to revise the external force in the planning of the facilities, field surveys were given in the 12 fishery hub ports. Damaged facilities checked cyclopaedically in these ports, and then 5 facilities were surveyed in particular. In the survey, it is revealed that the breakwaters were damaged by the water-level difference in the undertow and by the scour of the foundations due to overflow in addition to the traditional reason which causes the pressure in the sillling wave under non-overflow condition. Therefore, another wave pressure expression which refers water-level difference in the overflow and can use in the undertow was advanced. The body stabilities of the facilities using the new expression were good corresponding with the damaged facilities in the survey.

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震及び津波により、漁港施設等の多くが壊滅的な被災を受けた。その要因は、従来の設計条件を遙かに越える外力が漁港施設等に働いたためと考えられる。そこで、著者らは、被災県の拠点的な12漁港において、現地調査による被災施設データの収集を実施し、そのデータを基に地震と津波外力による被災メカニズムの解明を行うとともに今後の漁港施設の復旧・復興に向けた設計外力の見直し等を検討した。本論文では、この検討の一環として得られた防波堤における被災の全体的な傾向を整理するとともに、津波に対する防波堤の安定性照査の考え方と適用結果について報告する。

2. 被災状況調査に基づく漁港施設（防波堤）の被災パターンの分類と傾向分析

東北・関東地方の拠点的漁港（第2種、第3種及び特定第3種漁港）を中心に、表-1に示す12漁港を選定して現地調査による漁港施設の被災状況を調査した。

現地調査では、被災状況について網羅的に把握すると

ともに各対象漁港において被災が顕著な5施設を選定し、それらについて重点的に調査を実施し、震災前後の変状について、測量等により定量的に把握した。特に、防波堤の倒壊については、そのメカニズムを把握するため、サイドスキャンソナー等の機器により海中の状況も調査した。併せて、津波については津波痕跡高等の現地調査、地震については常時微動観測等による地震特性の調査・液状化実態把握調査を実施した。ここでは紙面の関係より、漁港の防波堤の被災状況とその原因を中心に報告する。

(1) 被災パターンの分類

ここでは、現地調査結果に基づき、今次津波による漁港防波堤の被災パターンを整理する。被災パターンとしてまず挙げられるのは、津波の押し波によって被災したものである。代表的な事例としては岩手県田老漁港があり、漁港の主防波堤である東、南両防波堤（ケーソン式）

表-1 現地調査対象漁港

三沢漁港	青森県3種
田老漁港	岩手県2種
山田漁港	岩手県3種
大槌漁港	〃
大船渡漁港	〃
気仙沼漁港	宮城県特定3種
志津川漁港	宮城県2種
女川漁港	宮城県3種
石巻漁港	宮城県特定3種
関上漁港	宮城県2種
松川浦漁港	福島県3種
銚子漁港	千葉県特定3種

1	正会員	博(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 水産基盤グループ長
2		博(理)	(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	工修	(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		博(工)	水産庁漁港漁場整備部整備課 課長補佐
6		修(工)	(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

が港内側に最大150m飛散している(図-1)。沖防波堤はケーソン本体の顕著な滑動を見られないものの隣接する傾斜堤部の消波ブロックが港内側に流出しており(岩手県の水中調査による)、これらは津波による強い水平力により被災した典型的なものと推定される(詳細は八木ら, 2012a参照)。一方、津波の引き波によって被災した事例としては、宮城県女川漁港の湾口部の防波堤が挙げられる(図-2)。ここでは防波堤基部のケーソン2スパンを残し、堤幹部、堤頭部は主に堤外側へ倒壊、移動距離は最大120mにも及んでおり、堤体の倒壊方向及び津波シミュレーションに基づく安定性照査解析から津波引き波時に倒壊したことが示されている(八木ら, 2012b)。

これとは別の被災パターンとして津波の強い流れによる海底地盤の洗掘による被災がある。図-3は、宮城県志津川漁港の大森地区防波堤の被災事例であるが、鋼管斜杭式防波堤の先端部分が倒壊・流出しており、水中調査結果(図-3下図)からは先端部側を中心に海底が洗掘されている様子がわかる。洗掘範囲が港外側に広がっていることから、主に引き波の作用時に防波堤先端部を中心として洗掘が発生し防波堤の倒壊に至ったものと考えられる。

今回、著者らが調査対象とした12漁港の防波堤被災箇所については、概ねこのいずれかのパターン「津波波力(水位差)型」「引波水位差型」「堤頭部洗掘型」「越流洗掘型」(洗掘型については2種類に分離)に分類することができる。具体的な被災箇所と被災パターンの関係を表-2に示す。

(2) 漁港防波堤被災箇所の傾向

被災パターンとは別に、漁港の外郭施設で被災が起りやすい場所には一定の傾向が見受けられる。一つは、内湾域にある漁港の防波堤である。これらは、一般に波浪条件が静穏な内海域に位置しているため防波堤の設計波高が小さく、外海に面した海域の主防波堤に比べると施設の規模も小さい(図-4左図:大船渡漁港)。一方、

図-1 田老漁港防波堤の被災状況

図-2 女川漁港の湾口部防波堤の倒壊状況(水中調査結果)

図-3 志津川漁港大森地区防波堤の被災状況(右上図:被災部の写真, 下図:水中調査結果)

表-2 津波による防波堤被災メカニズムの分類

分類	被災概要	主な被災漁港(被災数)
津波波力(水位差)型	内外水位・段波等の直接的な津波力により、施設の安定性が損なわれた被災(滑動, 転倒)	三沢, 田老(2), 山田, 女川(2), 松川浦(2)
堤頭部洗掘型	堤頭部周辺の流れの影響で、基礎マウンドが洗掘され、施設の安定性が損なわれた被災	三沢
引波水位差型	津波波力・洗掘だけでは不安定までに至らない施設が引波時の内外水位差により施設の安定性が損なわれた被災(滑動, 転倒)	女川(2)
越流洗掘型	越流に伴う渦等の影響で施設背後のマウンド・地盤が洗掘され、施設の安定性が損なわれた被災	大槌, 志津川

外海に面した地域でも海岸線に近い防波堤基部や波除堤や導流堤などは、沖側の主防波堤部と比べると波浪条件が小さく、そのような箇所でも今次津波でも被災事例が見られる(図-4右図:松川浦漁港)。

図-5～7は、今次津波による防波堤被災箇所について、施設の耐力の指標となる防波堤設計波高、構造諸元(堤体幅, 天端高)と津波高の関係を調べてみたものである。図中には、著者らが調査した12漁港の被災箇所に加え、岩手県農林水産部漁港漁村課から提供された2種漁港の被

堤体幅の狭い防波堤

図-4 大船渡漁港（左）、松川浦漁港（右）の防波堤被災状況

災害事例も合わせ計121箇所の被災を表示している。ここで、津波高は東北地方太平洋地震津波合同調査グループにより取得された痕跡高を用いている。また、被災箇所延長と施設長の比から定義した被災率が25%以上（被災大）と25%未満（被災小）に分け、施設の構造形式の相違もわかるように表示している（図右には構造形式別の度数分布も表示）。さらに、図中には、被災率25%以上の被災箇所から推定される被災限界も示している。これを見ると、津波高が小さい場合に耐力（設計波高、堤体幅、天端高）の小さい構造部位（ブロック積式等）から壊れ始め、津波高の増大に伴い耐力の大きい構造部位（ケーソン式等）に被災が広がっていく様子がよくわかる。

先に示したように、内湾域にある漁港の防波堤、外海に面した地域でも海岸線に近い防波堤基部、波除堤や導流堤は被災が生じやすい傾向があるが、これらは通常の波浪（短周期波）が比較的静穏な場所に位置し、構造物の耐力が相対的に小さく設計されているため、長波である津波がエネルギーをあまり減衰させることなく進入・作用することで被災が多く発生したことをこの結果は裏付けている。

3. 津波シミュレーションによる外力の推定

防波堤に作用する津波外力を推定するため非線形長波による津波遡上シミュレーションを実施し、防波堤周辺の水位、流速の時系列を計算した。津波遡上シミュレーションの詳細は加藤ら（2012）、八木ら（2012a）、を参照されたい。さらに、2次元数値波動水槽（CADMAS-SURF）を用いて作用波圧の計算を実施し、防波堤に作用する堤体前面波圧の分布を調べた。図-8に岩手県山田漁港南第1防波堤への適用例を示す。計算は、水深40m地点から防波堤前面までを単純化した地形（距離約1900m）に対して、水深40m地点で津波遡上シミュレーション結果の波形を模擬した振幅6.1m、周期30分の正弦波形を境界条件として与えて行った。図-9は数値波動水

槽より得られた防波堤の前面・背面に作用する最大圧力分布を示したものである。図中には比較のため水位の計算結果から推定される静水圧分布を併せて示した。図より前面・背面ともにほぼ深さに比例して静水圧的な直線分布であることが分かる。前面では静水圧の1.03～1.08倍、背面では静水圧の0.95～0.98であり、前面では静水圧より大きく、背面では小さい傾向を示している。

図-5 防波堤被災箇所の津波高と設計波高の関係

図-6 防波堤被災箇所の津波高と天端高の関係

図-7 防波堤被災箇所の津波高と堤体幅の関係

図-8 数値波動水槽による計算結果例
(岩手県山田漁港の防波堤：波圧最大時の流速分布)

4. 防波堤に作用する津波波力算定式と安定性照査

2.の被災パターンの分類と傾向の分析で述べたように、今次津波においては津波が防波堤を越流していることや引き波時の水位差により被災した例が見られたが、これまでの防波堤に作用する津波波力の算定式は、例えば、谷本式（谷本ら，1984）のように、堤体背後を静水時の水位に固定して固定して算定するものが多かった。防波堤背後の泊地・水域が比較的狭い漁港では、越流時の防波堤に作用背後の水位変動を考慮しないと、波力を過大に算定する恐れがある。このため、数値波動水槽による検討結果を踏まえ、堤体前後の波圧分布として静水压分布に動圧力の影響を考慮した波圧分布を仮定し（図-10）、堤体に作用する波力の算定式として波圧係数 α_f 、 α_{IB} を導入した式（1）～式（3）のように定式化した。

・前面波力の算定式

$$\begin{cases} p_1 = \rho_0 g(h' + \eta) \times \alpha_f \\ p_2 = (\eta - h_c^*) / (h' + \eta) p_1 \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

$$h_c^* = \min(\eta, h_c)$$

・背後圧力の算定式

$$\begin{cases} p_3 = \rho_0 g(h' + \eta_B) \times \alpha_{IB} \\ p_4 = (\eta_B - h_{CB}^*) / (h' + \eta_B) p_3 \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

$$h_{CB}^* = \min(\eta_B, h_{CB})$$

・揚圧力の算定式（浮力を含む）

$$P_U = \frac{1}{2}(p_1 + p_3)B - \frac{1}{2}(p_2 + p_4)B \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 η 、 η_B は堤体前面と背面の静水面上の水位（m）、 h' 、 h_c 、 B はそれぞれ堤体の前面水深、天端高、堤体幅（m）、

図-9 堤体に作用する波圧と静水压の関係

図-10 越流時の波圧分布図

$\rho_0 g$ は海水の単位体積重量（ kN/m^3 ）、 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 はそれぞれ静水面上における前面波圧強度、堤体上端部における前面波圧強度、静水面上における背後波圧強度、堤体上端部における背後波圧強度（ kN/m^2 ）、 P_U は浮力を含む揚圧力（ kN/m ）、 α_f 、 α_{IB} は堤体前面と背面の動圧の影響を表す波圧係数である。

堤体前後の波圧係数（ α_f 、 α_{IB} ）の研究事例は少ないが、数値波動水槽の計算結果や「平成23年度 東北港湾における津波・震災対策技術検討委員会資料」では、越流時の施設前面の波圧は $\alpha_f=1.1$ 、背後圧は $\alpha_{IB}=0.9$ が水理模型実験結果と整合が取れると報告している。ここでは、これも考慮して、 $\alpha_f=1.1$ 、 $\alpha_{IB}=0.9$ として式（1）～（3）で表される波圧（以降、提案式と呼ぶ）の適用性を調べた。

図-11に田老漁港の東・南防波堤について、図-12に女川漁港の湾口部の南防波堤について、堤体の安全率の経時変化を提案式より計算した結果を示す。なお、田老漁港は八木ら（2012b）の数値計算結果、女川漁港は八木ら（2012a）の数値計算結果と同じである。これらの図を見ると、田老漁港の東・南防波堤では押し波時（越流時）に、女川漁港湾口部南防波堤は引き波時に安全率が1を下回っており、これは現地調査結果から推定された各防波堤の被災過程と対応した結果となっている。

さらに、他の防波堤89施設（39箇所被災、49箇所未被災）に対し、提案した圧力分布を用いて津波波力を算定し、堤体の転倒・滑動安全率から堤体安定性の照査を

行い、提案式と谷本式の適用性を調べてみた（図-13）。これを見ると、谷本式は提案式よりも全体的に安全率が低く評価されており、被災・未被災の再現率は57%であった。一方、提案式は再現率81%であり、本提案式が実際の被災過程を比較的良好に表現していることがわかる。

5. 結論

本研究において得られた結論は以下の通りである。

- (1) 本研究で対象とした漁港の防波堤被災パターンは、「津波波力（水位差）型」「引波水位差型」「堤頭部洗掘型」「越流洗掘型」におおよそ分類された。

掘型」「越流洗掘型」におおよそ分類された。

- (2) 防波堤が被災した121箇所について防波堤の耐力の指標（設計波高、堤体幅、天端高）と津波高（浸水高）の関係を調べ、津波高が小さい場合に耐力の小さい構造部位（ブロック積式など）から被災し始め、津波高の増大に伴い耐力の大きい構造部位（ケーソン式など）に被災が広がっていく傾向を示した。一方、現地調査結果からは、被災が生じやすい場所として、内湾域にある漁港の防波堤、外海に面した地域でも海岸線に近い防波堤基部、波除堤や導流堤が挙げられる。これらは通常の波浪（短周期波）が比較的静穏な場所に位置していることから、通常の波浪（短周期波）を対象に構造物の耐力が相対的に小さく設計された箇所でも被災が多く発生したことを示している。

- (3) 漁港防波堤を対象とした本研究の提案式から求めた堤体滑動・転倒安全率による被災・未被災の再現率は80%以上であり、提案式の適用性が高いことが分かった。

今後の課題として、提案式の実用化に向けて、水理模型実験・数値流体解析等により前面及び背面の波圧係数についての知見を蓄積する必要がある。

謝辞：本研究は、水産庁が実施した平成23年漁港施設等設計条件見直し調査および漁港施設における地震・津波対策検討専門部会による検討結果の一部である。協力頂いた各委員および多くの関係者に記して謝意を表す。

参考文献

- 加藤広之・林健太郎・中村 隆・中山哲蔵・八木 宏・森健二・五十嵐雄介・鈴木 彰（2012）：東北地方太平洋沖地震津波による漁港海岸保全施設の被災要因の検討，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.68，No.1，印刷中。
- 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ，東北地方太平洋沖地震津波情報共有サイト，<http://www.coastal.jp/tjtj/>，参照2011-12-20。
- 谷本勝利・鶴谷広一・中野 普（1984）：1983年日本海中部地震津波による津波力と埋立護岸の被災原因の検討，第31回海講論文集，pp.257-261。
- 平成23年度東北港湾における津波・震災対策技術検討委員会資料，<http://www.pa.thr.mlit.go.jp/kakyoin/PDF/3shiryu.pdf>，参照2011-12-20。
- 八木 宏・杉松宏一・中山哲蔵・西 敬浩・奥野正洋・小池哲・林 健太郎・五十嵐雄介（2012a）：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，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.68，No.1，印刷中。
- 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（2012b）：東北地方太平洋沖地震津波による田老漁港の漁港施設における被災メカニズムの検討，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.68，No.1，印刷中。

(a) 東防波堤

(b) 南防波堤

図-11 防波堤周辺水位と滑動安全率の経時変化（田老漁港 (a) 東防波堤 (b) 南防波堤）

図-12 防波堤周辺水位と転倒安全率の経時変化（女川漁港 南防波堤）

図-13 防波堤波圧算法による安定性照査結果の比較