

東北地方太平洋沖地震津波で被災した 岩手県山田漁港・防潮堤の被災メカニズム に関する一考察

庄司 学¹・水野 魁人²・高橋 和慎³・木原 直人⁴・松山 昌史⁵

¹正会員 筑波大学准教授 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail: gshoji@kz.tsukuba.ac.jp

³非会員 大林組 (元 筑波大学 理工学群工学システム学類) (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

²学生会員 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail: s1330224@u.tsukuba.ac.jp

⁴正会員 (一財)電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

E-mail: kihara@criepi.denken.or.jp

⁵正会員 (一財)電力中央研究所上席研究員 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

E-mail: matsu@criepi.denken.or.jp

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震津波により被災した岩手県三陸南沿岸山田漁港の防潮堤を対象として、その構造被害をGoogle Earth画像及び構造図面に基づき詳細に把握した上で、防潮堤の被害率と作用した最大浸水深との関係を、滑動安全率及び転倒安全率の指標を介し、力学的な被災メカニズムの観点から考察した。その結果、1) 高い被害率を示した防潮堤ユニットは津波が越流した部分において集中していること、2) 転倒安全率に対して相対的に滑動安全率の数値は低く滑動モードが起点となって破壊が進行した可能性が高いこと、などが明らかとなった。

Key Words : the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, seawall, damage ratio, inundation depth, sliding failure, turning failure

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は、東北地方沿岸の海岸保全施設に甚大な構造被害をもたらした。特に防波堤や防潮堤などの施設は転倒や流出により機能を消失した。その要因としては、設計条件を超える津波波力が作用したためと考えられ、力学的な観点から防潮堤の被災メカニズムを解明することが必要不可欠である。

東北地方太平洋沖地震以前の研究の一例として、谷本ら¹⁾は1983年日本海中部地震津波により被害が生じた埋設護岸を対象として、現地調査、水理実験及び解析的検討を通じ、段波の作用と被災した護岸の滑動及び倒壊のメカニズムとの関係を明らかにしている。

東北地方太平洋沖地震津波による海岸保全施設の被害に関しては数多くの知見が報告されている。国土交通省・港湾局²⁾は被災した10漁港を対象に現地調査を行うとともに詳細な被災事例を示し、耐津波設計を行う上で

の留意点について言及している。また、岩手県の断面が明らかな64施設の胸壁を対象として、滑動および転倒の安全率の観点から耐津波性能を明らかにしている。佐藤ら³⁾は福島県いわき市勿来海岸を対象に現地調査を行い、津波の浸水深と海岸堤防の被害との関係を分析し、その被災要因を分析している。浅川ら⁴⁾は岩手県、宮城県、福島県の海岸保全施設の被災パターンを分類し、パターンごとの被害延長を分析することで、被災要因の傾向を推察している。常田、谷本⁵⁾は多様な海岸保全施設を対象に現地調査を行い、海岸堤防、消波ブロック及び盛土の構造的な被害の特徴を評価している。

一方で、防潮堤を含む構造物に作用する津波波力に関する検討は数多くなされている。有川ら⁶⁾は混成堤を越流する津波の再現実験を行い、その破壊過程を検討し、津波作用指標としての水位の重要性を確認している。三上ら⁷⁾は水理実験及びビデオ映像の分析から堤防を越流する津波の流れの状態を分類し、それらの作用力の特性を分析している。常田ら⁸⁾は東北地方太平洋沖地震津波

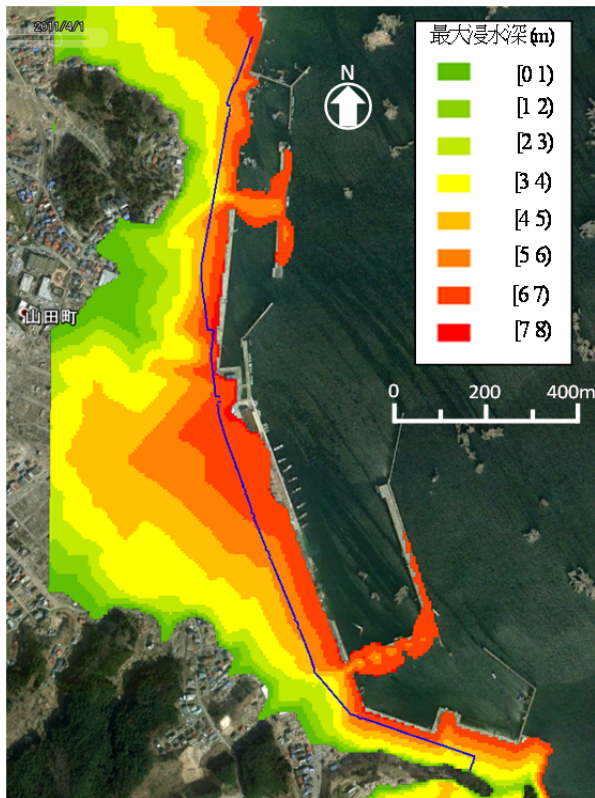
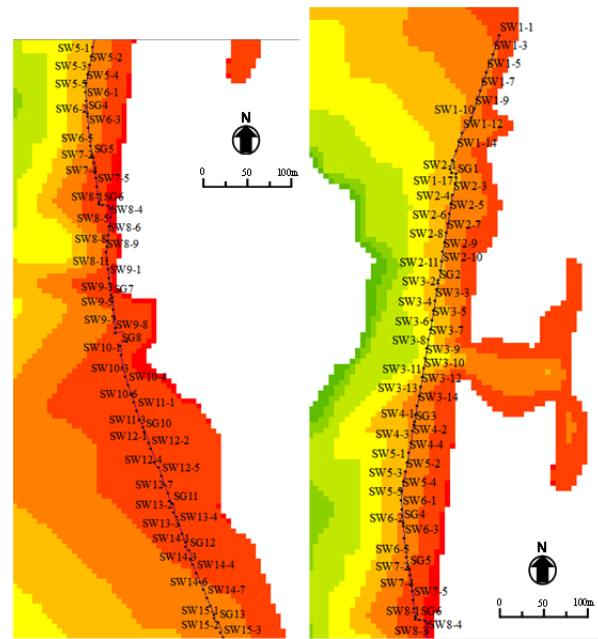


図-1 対象とする防潮堤の全体図

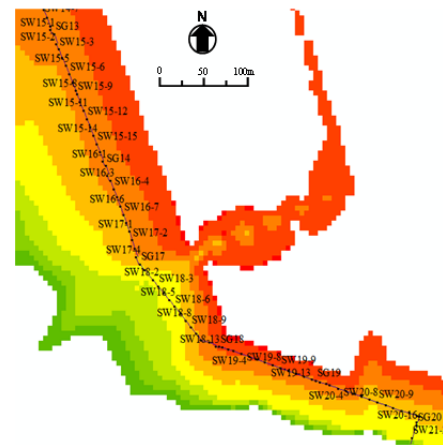
により被害を受けた防潮堤を被害レベルごとに区分・分析し、さらに防潮盛土の津波越流実験を行い、盛土の越流に対する耐侵食性について評価している。八木ら^{9,10)}は、漁港施設の津波痕跡高を対象として現地調査を行い、津波シミュレーションに基づく浸水深と比較することによって、その再現性を確認している。川崎ら¹¹⁾は岩手県釜石市小白浜漁港の防潮堤を対象に3次元流体-構造解析を行い、現地の被災状況の再現性を確認するとともに、被災メカニズムの検討を行っている。

このように、東北地方太平洋沖地震津波による海岸保全施設の被害に関する研究は多くなされている一方で、構造図面等に基づいた詳細な被害情報をもとに防潮堤の被害を無被害事例も含めて把握し、被災メカニズムを検討している研究事例は少ない。そこで、本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震津波により被災した岩手県三陸南沿岸山田漁港の防潮堤を対象に、その被害・無被害の状況をGoogle Earth画像及び構造図面に基づき詳細に把握した上で、防潮堤の被害率と津波作用との関係を、滑動安全率及び転倒安全率の指標を介し、力学的な被災メカニズムの観点から考察する。



(a) 北部のユニット群

(b) 中部のユニット群



(c) 南部のユニット群

図-2 対象とする防潮堤と最大浸水深の分布

2. 分析対象とする防潮堤及びその被害の概要

(1) 分析対象とする防潮堤の構造特性

本研究では、岩手県三陸南沿岸山田漁港海岸保全区域に存在する防潮堤を分析対象とする。図-1に本研究が対象とする防潮堤の全体図を示す。防潮堤と後述する最大浸水深との関係を図-2に示す。また、防潮堤に関する全データをまとめて表-1から表-4に示す。

なお、分析を進めるに当たって、詳細な構造被害の状況と後述するきめ細やかな浸水深データを比較し被害率を論ずるという観点から、防潮堤を分割しユニットを定義することとした。ユニットの定義方法としては、山田漁港海岸保全区域台帳¹²⁾に表記がある場合はそれに従い、表記がない場合は構造の区切りとなる目地の長さをGoogle Earthで測定することで推定した。また、ユニット

表-1 分析対象とする防潮堤の構造諸元、被害状況、及び浸水深（ユニットSW1-1からSW6-5まで）

ユニット 番号	ユニット 長さ(m)	図面 長さ(m)	構造	被害モード	建築物 の有無	浸水深 IDmax (m)	被害 ランク	流出 距離(m)
SW1-1	10.048	不明	矩形断面コンクリート擁壁部と推測	被害が認められず	×	6.16	D	
SW1-2	10.115				×	5.93	D	
SW1-3	10.238				×	5.78	D	
SW1-4	10.071				×	5.76	D	
SW1-5	10.122				×	5.58	D	
SW1-6	10.122				×	5.42	D	
SW1-7	10.090				×	5.57	D	
SW1-8	10.188				×	5.46	D	
SW1-9	10.037				×	5.57	D	
SW1-10	7.900				×	5.40	D	
SW1-11	10.408				×	5.11	D	
SW1-12	10.583				×	4.98	D	
SW1-13	10.096				×	4.99	D	
SW1-14	9.952				○	4.88	D	
SW1-15	9.936				○	4.82	D	
SW1-16	4.781				○	4.74	D	
SW1-17	4.520				○	4.74	D	
合計(m)	159.207							
SW2-1	3.797	115.0	矩形断面コンクリート擁壁部	被害が認められず	×	4.94	D	
SG1	7.570		陸間		×	4.91	D	
SW2-2	11.569		矩形断面コンクリート擁壁部、陸間格納部		×	4.99	D	
SW2-3	10.047		台形断面重力式コンクリート		×	5.08	D	
SW2-4	10.072				○	5.24	D	
SW2-5	10.295				○	5.05	D	
SW2-6	10.110				○	5.14	D	
SW2-7	10.060				○	5.15	D	
SW2-8	10.117				○	4.91	D	
SW2-9	10.064				○	4.98	D	
SW2-10	10.180				○	4.95	D	
SW2-11	10.089				○	4.53	D	
合計(m)	113.970							
SW3-1	2.696	150.0	矩形断面コンクリート擁壁部	被害が認められず	×	4.67	D	
SG2	6.994		陸間		×	4.80	D	
SW3-2	12.066		矩形断面コンクリート擁壁部、陸間格納部		×	4.78	D	
SW3-3	10.027		台形断面重力式コンクリート、中堀鋼管杭有		×	4.62	D	
SW3-4	10.012				×	4.15	D	
SW3-5	10.019				×	3.97	D	
SW3-6	10.026				○	3.77	D	
SW3-7	10.026				×	3.32	D	
SW3-8	9.981				×	3.31	D	
SW3-9	10.049				×	3.66	D	
SW3-10	9.981				×	4.10	D	
SW3-11	10.038		台形断面重力式コンクリート、中堀鋼管杭無		○	4.78	D	
SW3-12	10.040				○	5.48	D	
SW3-13	10.089				○	5.53	D	
SW3-14	9.986				○	5.49	D	
SW3-15	7.187				○	5.23	D	
合計(m)	149.218							
SW4-1	2.785	43.2	矩形断面コンクリート擁壁部	被害が認められず	×	5.25	D	
SG3	6.552		陸間		×	5.25	D	
SW4-2	12.460		矩形断面コンクリート擁壁部、陸間格納部		×	5.05	D	
SW4-3	10.533		台形断面重力式コンクリート		×	5.12	D	
SW4-4	10.062				×	5.18	D	
合計(m)	42.393							
SW5-1	10.062	49.3	台形断面重力式コンクリート	被害が認められず	×	4.98	D	
SW5-2	10.072				○	5.07	D	
SW5-3	10.002				○	5.13	D	
SW5-4	9.994				○	4.92	D	
SW5-5	9.519				○	4.99	D	
合計(m)	49.651							
SW6-1	14.301	61.6	台形断面重力式コンクリート	陸側に転倒。海側には建築物があるため、他のユニットより作用した津波の流速は小さいと考えられる。	○	5.29	A	
SG4	3.411		陸間	陸側に転倒・流出。Google Earthで流出先が見つけられず。Google Earthによると、陸間海側には建築物等が見当たらず、前面の内港防波堤開口部の津波による強い流速が作用したと考えられる。	×	5.31	As	不明
SW6-2	12.588		台形断面重力式コンクリート	上記の被害モード同様、前面の内港防波堤開口部の津波による強い流速が作用したと考えられる。さらに、本ユニットの前後に津波による洗掘跡のようなものが見られ、強い押し波と引き波が生じたと推測される。	×	5.32	As	19.8
SW6-3	11.410				×	5.32	As	28.9
SW6-4	9.263		矩形断面コンクリート擁壁部	陸側に転倒。本ユニット海側には建築物が見当たらないことから、上記の被害モード同様、前面の内港防波堤開口部の津波による強い流速が作用したと考えられる。	×	5.41	A	
SW6-5	9.663				×	5.61	A	
合計(m)	60.635							

註：Google Earth画像をもとに、海岸線から防潮堤までの間に建築物が存在する場合を○、存在しない場合を×とした。

の両端の座標及び流出距離はGoogle Earthで筆者らが目視により読み取ったものである。構造形式は、山田漁港海岸保全区域台帳¹²⁾より、(a) 矩形断面コンクリート擁壁部、(b) 台形断面重力式コンクリート、(c) テラス式の3種類に分類できる。それらの代表的な構造断面を図-3にそれぞれ示す。

(2) 被害の特徴

被害の分析は、詳細な被害報告（水産総合研究センター¹³⁾、東京大学生産技術研究所・中埜研究室¹⁴⁾、岩手県¹⁵⁾）、筆者らによる現地調査結果、及び、Google Earth画像に基づき行った。また、防潮堤の被害状況の傾向を明らかにし、被害ランクを定義した。被害ランクは、防潮堤の流出を As、転倒を A、堤体上部の脱落・流出を

表-2 分析対象とする防潮堤の構造諸元, 被害状況, 及び浸水深 (ユニットSW7-1からSW12-7まで)

ユニット 番号	ユニット 長さ(m)	図面 長さ(m)	構造	被害モード	建築物 ^注 の有無	浸水深 ID _{max} (m)	被害 ランク	流出 距離(m)
SW7-1	2.367	56.6	矩形断面コンクリート擁壁部	被害が認められず*	○	5.72	D	
SG5	6.168		陸間	被害が認められず*	○	6.12	D	
SW7-2	10.859		矩形断面コンクリート擁壁部, 陸間格納部	被害が認められず*	○	6.23	D	
SW7-3	6.590		台形断面重力式コンクリート, 鋼管杭有	被害が認められず*	○	6.33	D	
SW7-4	9.017				○	6.36	D	
SW7-5	9.012				○	6.68	D	
SW7-6	9.000				×	6.68	D	
SW7-7	2.336				×	6.71	D	
合計(m)	55.349							
SW8-1	3.786	89.9	矩形断面コンクリート擁壁部, 陸間格納部	被害が認められず*	×	6.71	D	
SG6	6.347		陸間	被害が認められず*	×	6.89	D	
SW8-2	4.281		矩形断面コンクリート擁壁部, 陸間格納部	被害が認められず*	×	7.09	D	
SW8-3	10.035		テラス式, 避難路有	被害が認められず*	×	7.11	D	
SW8-4	10.064		台形重力式コンクリート	被害が認められず*	×	7.00	D	
SW8-5	10.107				×	6.71	D	
SW8-6	6.348		テラス式	テラスの手すりの部分が一部流出	×	6.54	C	
SW8-7	6.432			陸側に転倒, 流出. 押し波の影響が考えられるが, 倒壊した防潮堤の基礎側破壊断面を見ると, 鉄筋がそのまま上にのびており, 防潮堤が浮上して抜けたことを表している. テラス部(斜路部)が翼のように防潮堤から突き出しており, 上向きの揚力を受けやすい構造が倒壊の原因となったと考えられる. またGoogle Earthより前面に建築物がなく大きい流速が作用したと考えられる.	×	6.34	As	11.76
SW8-8	5.665			上記の被害に加え, 陸側に流出される際に, 建築物に阻まれ, SW8-7及びSW8-8, SW8-9より流出距離が短い.	×	6.08	As	25.92
SW8-9	9.669				×	6.22	As	11.36
SW8-10	9.510				×	6.71	As	4.14
SW8-11	9.661				×	6.90	As	4.4
合計(m)	91.906							
SW9-1	6.573	74.8	テラス式	Google Earthから転倒, 流出が確認された. 上記同様, テラス部が翼のように防潮堤から突き出しており, 上向きの揚力を受けやすい構造が倒壊の原因となったと考えられる. またGoogle Earthより前面に建築物がなく大きい流速が作用したと考えられる. 陸側に流出される際に, 建築物に阻まれ, SW8-7及びSW8-8, SW8-9より流出距離が短い.	×	6.97	As	6.73
SW9-2	12.373		テラス式	被害が認められず*	○	6.85	D	
SW9-3	2.486		矩形断面コンクリート擁壁部	被害が認められず*	○	6.62	D	
SG7	4.603		陸間	被害が認められず*	○	6.50	D	
SW9-4	9.061		矩形断面コンクリート擁壁部, 陸間格納部	被害が認められず*	○	6.27	D	
SW9-5	10.075		台形断面重力式コンクリート, 鋼管杭有	被害が認められず*	○	6.05	D	
SW9-6	10.057				○	6.10	D	
SW9-7	5.594				×	6.20	D	
SW9-8	9.603		台形断面重力式コンクリート, 鋼管杭有	被害が認められず*	×	6.30	D	
SW9-9	6.428				×	6.54	D	
合計(m)	76.854							
SG8	9.872	72.8	陸間	被害が認められず*	×	6.62	D	
SW10-1	13.433		矩形断面コンクリート擁壁部, 陸間格納部	被害が認められず*	○	6.87	D	
SW10-2	10.029		矩形断面コンクリート擁壁部, 基礎杭有	被害が認められず*	○	6.89	D	
SW10-3	10.084				○	6.83	D	
SW10-4	9.998				○	6.73	D	
SW10-5	10.054				○	6.68	D	
SW10-6	10.044				○	6.63	D	
合計(m)	73.513							
SW11-1	9.995	25.4	矩形断面コンクリート擁壁部, 基礎杭有	被害が認められず*	○	6.58	D	
SW11-2	10.067				○	6.53	D	
SW11-3	4.854				○	6.41	D	
合計(m)	24.916							
SG10	13.469	82.7	陸間	被害が認められず*	×	6.40	D	
SW12-1	6.704		矩形断面コンクリート擁壁部	被害が認められず*	×	6.41	D	
SW12-2	14.293		矩形断面コンクリート擁壁部	陸側に流出. Google Earthから流出先は確認できず*. 防潮堤の脚部鉄筋の鉛直方向の破断によって転倒, 流出. 防潮堤外側には建築物がなく津波の流体力が作用したことが推定され, このような構造形式および被災箇所の位置が防潮堤の倒壊を起こした要因として考えられる. なお, 本被災箇所の堤外側用地では大規模な洗掘が発生しており, 引き波時に速い流速が作用したと考えられる. (引き波時の洗掘によって建物も倒壊している).	×	6.46	As	不明
SW12-3	6.002		矩形断面コンクリート擁壁部	被害が認められず*	×	6.46	D	
SW12-4	10.091		台形断面重力式コンクリート	被害が認められず*	×	6.51	D	
SW12-5	10.009				○	6.56	D	
SW12-6	10.017				○	6.56	D	
SW12-7	8.697				○	6.62	D	
合計(m)	79.281							

注: Google Earth画像をもとに, 海岸線から防潮堤までの間に建築物が存在する場合を○, 存在しない場合を×とした.

B, 天端・付属物の流出を C, 被害がないものを D とした. 被害及び無被害の詳細を図-4 のように同定した. 代表的な被害箇所の写真を図-5 に示す. また, 防潮堤から海岸線までの間の建築物の有無を Google Earth 画像から判断した. その理由としては, 建築物によって防潮堤に加わる津波波力が軽減され, より正確な被害の推定には必要となる情報であるからである.

防潮堤の被害の特徴としては, 防潮堤と海岸線の間に建築物がない箇所において, 建築物が存在する箇所に比べて被害が集中していることが明らかとなった. 具体的には, 建築物のないユニット群SW6-1~SW6-5, SW8-6~SW8-11, SW9-1, SW12-2, SW18-1~SW18-2, SW19-1~SW19-2, SW20-4~SW20-5で流出や転倒の被害モードが生じている.

表-3 分析対象とする防潮堤の構造諸元, 被害状況, 及び浸水深 (ユニットSW13-1からSW18-13まで)

ユニット 番号	ユニット 長さ(m)	図面 長さ(m)	構造	被害モード	建築物 ^注 の有無	浸水深 ID_{max} (m)	被害 ランク	流出 距離(m)
SW13-1	4.995	53.5	矩形断面コンクリート擁壁部	被害が認められず*	×	6.61	D	
SG11	8.821		陸間	被害が認められず*	×	6.63	D	
SW13-2	5.226		矩形断面コンクリート擁壁部	被害が認められず*	○	6.50	D	
SW13-3	10.013				○	6.48	D	
SW13-4	10.070				×	6.41	D	
SW13-5	10.019		台形断面重力式コンクリート, H鋼杭有	被害が認められず. 防潮堤の前面背面両方に洗掘跡が見られ, 強い押し波と引き波が生じたと考えられる.	×	6.35	D	
SW13-6	4.048				×	6.26	D	
合計(m)	53.192							
SW14-1	6.048	87.0	矩形断面コンクリート擁壁部	被害が認められず. 防潮堤の前面背面両方に洗掘跡が見られ, 強い押し波と引き波が生じたと考えられる.	×	6.28	D	
SG12	10.047		陸間	被害が認められず*	×	6.28	D	
SW14-2	6.604		台形断面重力式コンクリート, H鋼杭有	被害が認められず*	○	6.15	D	
SW14-3	10.091				○	6.06	D	
SW14-4	10.003				×	6.07	D	
SW14-5	10.083				○	5.94	D	
SW14-6	10.034		矩形断面コンクリート擁壁部	被害が認められず*	○	5.76	D	
SW14-7	10.049				○	5.73	D	
SW14-8	10.034				○	5.68	D	
SW14-9	3.626				○	5.63	D	
合計(m)	86.619							
SW15-1	5.452	158.4	矩形断面コンクリート擁壁部	被害が認められず*	×	5.57	D	
SG13-1	11.196		陸間	被害が認められず*	×	5.48	D	
SW15-2	6.071		矩形断面コンクリート擁壁部	被害が認められず*	○	5.35	D	
SW15-3	10.004				○	5.28	D	
SW15-4	9.995				○	5.27	D	
SW15-5	10.000		台形断面重力式コンクリート, H鋼杭有	被害が認められず*	○	5.35	D	
SW15-6	10.034				○	5.41	D	
SW15-7	10.028				○	5.31	D	
SW15-8	3.801				○	5.38	D	
SW15-9	9.808		台形断面重力式コンクリート, H鋼杭有	防潮堤上部工が堤内側に脱落, 流出, 防潮堤前面には建築物があるので, 作用した流速は小さいと推測される.	○	5.33	B	11.08
SW15-10	10.066				○	5.34	D	
SW15-11	10.088				○	5.37	D	
SW15-12	10.017				○	5.33	D	
SW15-13	10.026		台形断面重力式コンクリート, H鋼杭有	被害が認められず*	○	5.35	D	
SW15-14	10.043				○	5.42	D	
SW15-15	10.022				○	5.47	D	
SW15-16	10.059				○	5.34	D	
合計(m)	156.710							
SW16-1	6.065	84.6	矩形断面コンクリート擁壁部	被害が認められず*	○	5.41	D	
SG14	10.443		陸間	被害が認められず*	×	5.42	D	
SW16-2	6.590		矩形断面コンクリート擁壁部, 陸間格納部	被害が認められず*	×	5.34	D	
SW16-3	10.006		台形断面重力式コンクリート, H鋼杭有	被害が認められず*	○	5.26	D	
SW16-4	10.002				○	5.17	D	
SW16-5	11.326		台形断面重力式コンクリート, H鋼杭有	防潮堤上部工が堤内側に脱落, 流出, 防潮堤前面には建築物が存在していたので, 作用した流速は小さいと推測されるが, 建築物の飛散した部分の衝突によって脱落したことが考えられる.	○	5.05	B	3.14
SW16-6	10.083				○	5.01	D	
SW16-7	10.007		台形断面重力式コンクリート, H鋼杭有	被害が認められず*	○	4.92	D	
SW16-8	10.086				○	4.99	D	
合計(m)	84.608							
SW17-1	10.027	38.6	台形断面重力式コンクリート, H鋼杭有	被害が認められず*	○	5.09	D	
SW17-2	10.037				○	5.06	D	
SW17-3	10.043				○	5.12	D	
SW17-4	9.194		矩形断面コンクリート擁壁部	被害が認められず*	○	4.37	D	
合計(m)	39.302							
SG17	8.414	135.5	陸間	Google Earthより陸間の流出が確認された. 流出先は確認できないため, 飛散したと考えられる.	×	3.96	As	不明
SW18-1	14.917		台形断面重力式コンクリート, H鋼杭有	Google Earthより転倒, 流出が確認された. 本ユニットの前面には建築物がないため, 速い流速の津波が作用したと考えられる.	×	3.16	As	3.2
SW18-2	9.547		台形断面重力式コンクリート, H鋼杭有	Google Earthより, 転倒が確認. 移動距離が小さいことから杭を支点に転倒したと考えられる. また, 本ユニットの前面には建築物がないため, 速い流速の津波が作用したと考えられる.	×	3.05	A	2.35
SW18-3	9.996				○	3.07	D	
SW18-4	10.029				○	3.21	D	
SW18-5	10.012				○	3.44	D	
SW18-6	10.001		台形断面重力式コンクリート, H鋼杭有	被害が認められず*	○	3.37	D	
SW18-7	10.056				○	3.97	D	
SW18-8	10.000				×	4.29	D	
SW18-9	10.095				○	4.64	D	
SW18-10	8.794				○	5.31	D	
SW18-11	10.025				○	5.60	D	
SW18-12	9.175		台形断面重力式コンクリート, H鋼杭有	被害が認められず*	○	6.22	D	
SW18-13	3.750		台形断面重力式コンクリート, H鋼杭有	被害が認められず*	○	6.16	D	
合計(m)	134.812							

注: Google Earth画像をもとに, 海岸線から防潮堤までの間に建築物が存在する場合を○, 存在しない場合を×とした.

3. 被害分析

(1) 津波作用の指標

本研究では, 最大浸水深 ID_{max} を防潮堤に対する津波

作用の指標とする. なお, 最大浸水深 ID_{max} には, 中村, 庄司¹⁶⁾による津波シミュレーションによって算出されたデータを活用する.

これらの最大浸水深 ID_{max} のデータをGIS上で5.56mの

表-4 分析対象とする防潮堤の構造諸元、被害状況、及び浸水深（ユニットSW18からSW21-2まで）

ユニット 番号	ユニット 長さ(m)	図面 長さ(m)	構造	被害モード	建築物 [※] の有無	浸水深 ID_{max} (m)	被害 ランク	流出 距離(m)
SG18	4.191	125.1	陸開	門扉は飛散し、陸開周辺は陸側、海側周辺で大きな洗掘が生じていた。	×	6.16	As	不明
SW19-1	8.067		台形断面重力式コンクリート、H鋼杭有	陸側に転倒、流出。陸側の多くのH鋼杭が破断、海側ではH鋼杭が破断せずにそのまま上部に露出。	×	6.27	As	4.64
SW19-2	6.360				×	6.35	As	5.99
SW19-3	9.524		台形断面重力式コンクリート、H鋼杭有	陸側に転倒、陸側の多くのH鋼杭が破断、海側ではH鋼杭が破断せずにそのまま上部に露出。移動距離は小さく、その場で陸側底部を支点として転倒したものと推定される。	○	6.09	A	1.91
SW19-4	10.007		台形断面重力式コンクリート、H鋼杭有	陸側に転倒、陸側の多くのH鋼杭が破断、海側ではH鋼杭が破断せずにそのまま上部に露出。移動距離は小さく、その場で陸側底部を支点として転倒したものと推定される。	○	6.19	A	2.72
SW19-5	9.992				○	6.08	A	2.72
SW19-6	10.026				○	5.88	A	2.72
SW19-7	10.091				○	6.13	A	2.72
SW19-8	10.050				○	5.98	A	2.72
SW19-9	10.012				○	6.09	A	2.72
SW19-10	10.010				○	5.95	A	2.72
SW19-11	10.019				○	6.05	A	2.72
SW19-12	10.043				○	5.87	A	2.72
SW19-13	5.049				○	6.08	A	2.72
合計(m)	123.442							
SG19	4.936	140.1	陸開	飛散しており、流出距離不明	×	5.82	As	不明
SW20-1	7.458		台形断面重力式コンクリート、H鋼杭有	陸側に転倒、流出。防潮堤前面に建物が存在するため、流速は小さくなったと考えられる。	○	5.93	As	3.51
SW20-2	4.610				○	6.03	As	4.04
SW20-3	10.572		台形断面重力式コンクリート、H鋼杭有	陸側に転倒、移動距離から、その場で陸側底部を支点として転倒したものと推定される。	○	5.76	A	1.22
SW20-4	10.054		台形断面重力式コンクリート、H鋼杭有	陸側に転倒、流出。防潮堤前面には建築物がないため、大きな流速が作用し、転倒、大きく移動したものと考えられる。	×	5.98	As	9.47
SW20-5	10.265				×	5.63	As	5.2
SW20-6	10.022		台形断面重力式コンクリート、H鋼杭有	被害が認められず [※]	×	5.48	D	
SW20-7	10.046				×	4.54	D	
SW20-8	10.039				×	4.24	D	
SW20-9	10.018				×	4.39	D	
SW20-10	10.039				×	4.34	D	
SW20-11	10.024				×	4.42	D	
SW20-12	10.000				×	4.34	D	
SW20-13	10.025				×	4.40	D	
SW20-14	2.391				○	4.20	D	
SW20-15	6.763		台形断面重力式コンクリート	被害が認められず [※]	○	4.20	D	
SW20-16	2.844		矩形断面コンクリート擁壁部	被害が認められず [※]	×	3.93	D	
合計(m)	140.103							
SG20	4.911	23.5	陸開	被害が認められず [※]	×	3.66	D	
SW21-1	10.012		矩形断面コンクリート擁壁部、陸開格納部	被害が認められず [※]	×	3.64	D	
SW21-2	7.681			被害が認められず [※]	×	1.36	D	
合計(m)	22.604							

註：Google Earth画像をもとに、海岸線から防潮堤までの間に建築物が存在する場合を○、存在しない場合を×とした。

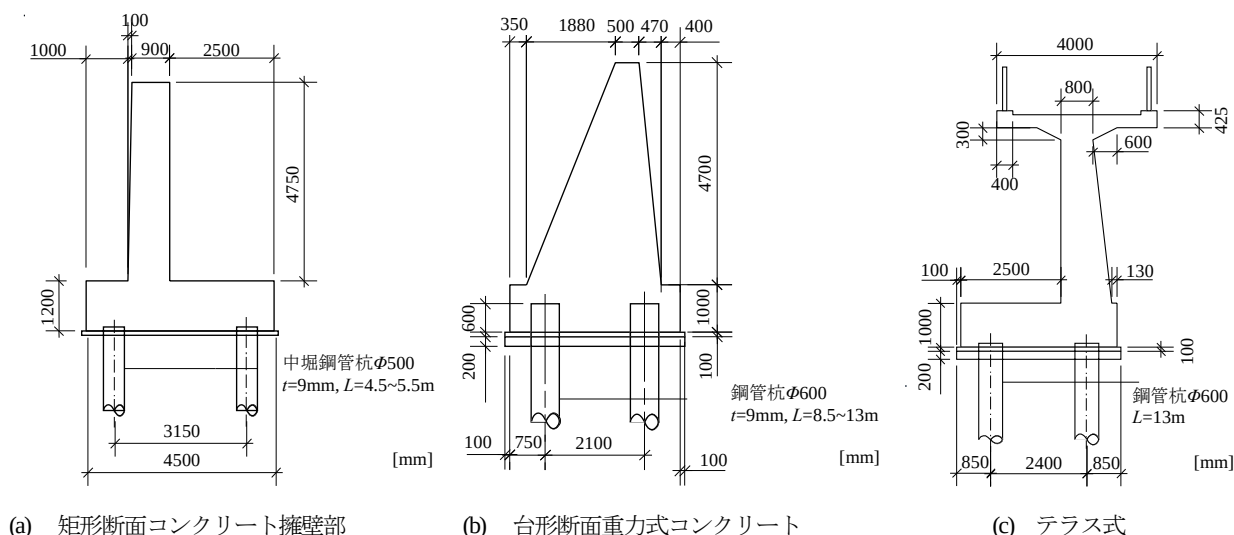


図-3 対象とする防潮堤の構造

格子と結合させた。その格子とユニットを空間結合することで、格子にまたがるユニットの最大浸水深 ID_{max} の推定を行った。なお、複数の格子にまたがるユニットに関しては、ユニットが最長となる格子の最大浸水深 ID_{max} を採用する。以上の過程を経て得られた最大浸水深 ID_{max} を

図-1、図-2及び表-1から表-4に併せて示す。

(2) 最大浸水深 ID_{max} と被害率の関係

最大浸水深 ID_{max} とユニットの被害の有無の関係を図-6に示す。最大浸水深 ID_{max} に対する被災したユニット数の



図-4 対象とする防潮堤の被害及び無被害の詳細

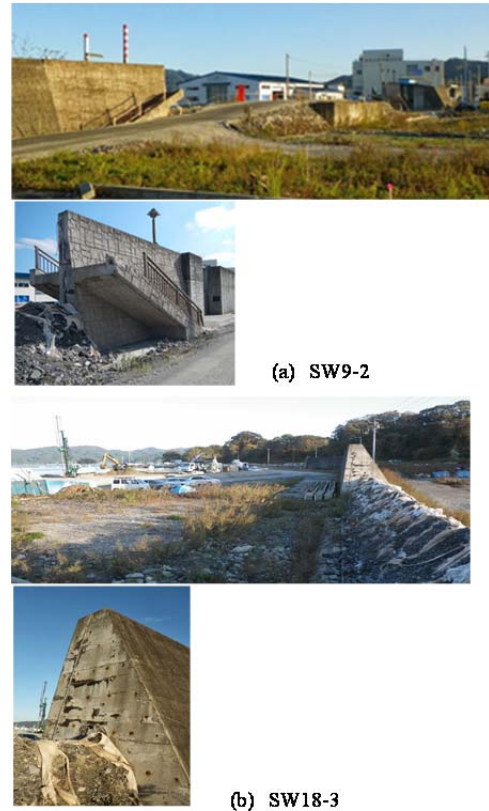


図-5 被災した防潮堤の状況

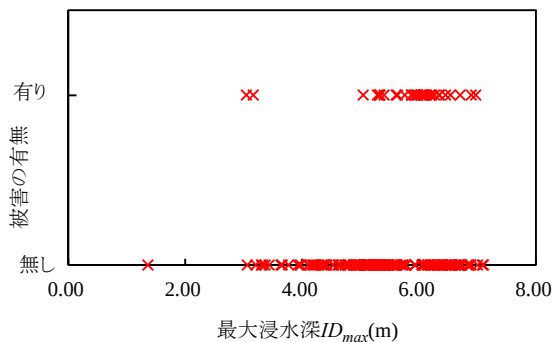


図-6 最大浸水深 ID_{max} と被害の有無の関係

頻度を図-7(a)に示し、さらに、最大浸水深 ID_{max} に対するユニットの被害延長の分布を図-8(a)に示す。ここで、防潮堤ユニット被害率 R_{du} 及び防潮堤延長被害率 R_{dl} [m/m]をそれぞれ以下のように定義した。防潮堤ユニット被害率 R_{du} に関しては、被害ユニット数 N_{du} を全ユニット数 N_u で除し、次式のように定めた。

$$R_{du} = \frac{N_{du}}{N_u} \quad (1)$$

また、防潮堤延長被害率 R_{dl} に関しては、被害延長 L_d [m]を全延長 L [m]で除し、次式のように定めた。

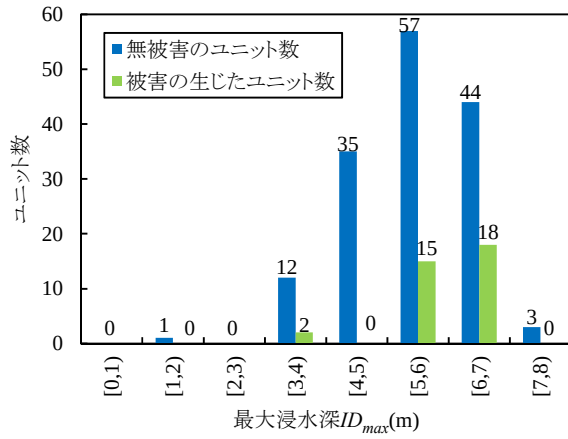
$$R_{dl} = \frac{L_d}{L} \quad (2)$$

これらの式によって算出した被害率をそれぞれ図-7(b)、図-8(b)に併せて示す。

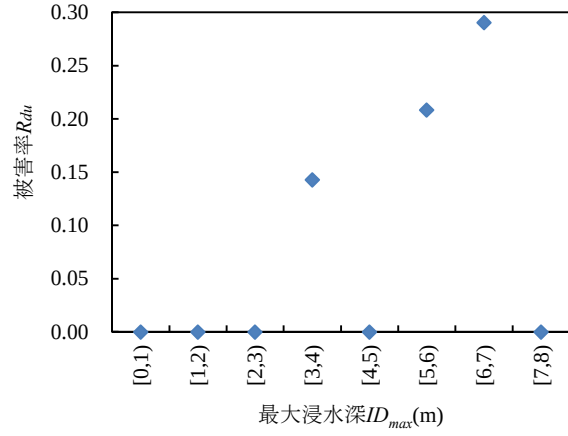
図-6によれば、最大浸水深 ID_{max} が3.06~3.16mにおいて被害が生じているものの、5.05~6.97mにおいて被害が集中していることがわかる。また、図-7及び図-8から、最大浸水深 ID_{max} が5~6mで15個、6~7mで18個のユニットが被災しており、また、 ID_{max} が5~6mで156.8m、6~7mで151.9mが被災していることから、被害が卓越している ID_{max} の分布がわかる。被害率の観点から分析すると、 ID_{max} が6~7mでのユニットの被害率 R_{du} は0.271、被害延長の被害率 R_{dl} は0.268となっており、両指標において最も高い値を示している。以上のことから、最大浸水深 ID_{max} が5.05~6.97mとなり、防潮堤の高さを越流した ID_{max} の領域において、全ユニットに対して18.7%、全延長に対して19.7%の被害が集中していることが明らかとなった。

(3) 防潮堤の安定性の観点からの分析

次に、防潮堤の被災メカニズムを、津波波力を受ける防潮堤の安定性の観点から分析する。それは滑動及び転

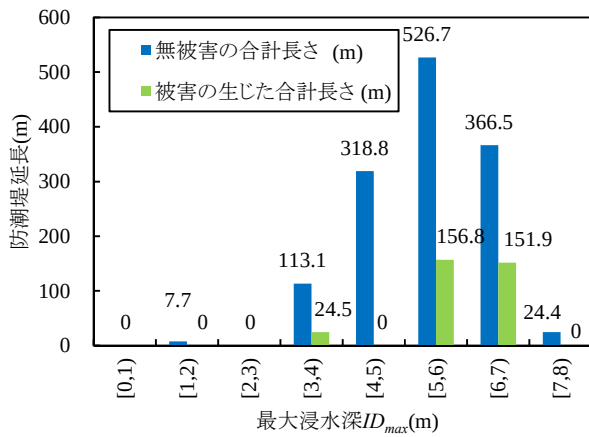


(a) ユニット数の頻度

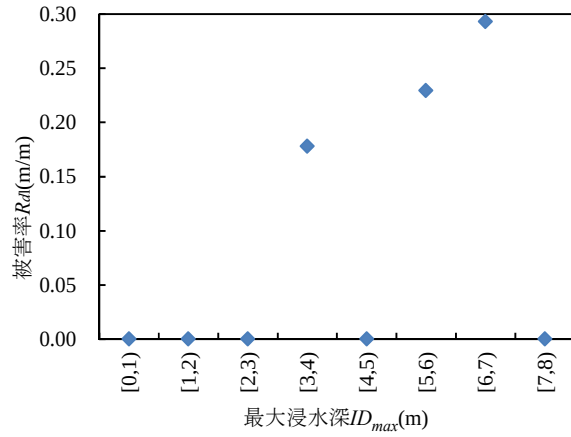


(b) 被害率R_{du}

図-7 最大浸水深ID_{max}と被害ユニット数N_{du}の関係



(a) 防潮堤延長



(b) 被害率R_{dL}

図-8 最大浸水深ID_{max}と防潮堤の被害延長L_dの関係

倒に対する安全率を求めることによって照査できる。本研究では、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」¹⁷⁾において示された、重力式防波堤における性能照査を参考として、滑動安全率SF_s及び転倒安全率SF_tを以下のように算出する。

まず、滑動安全率SF_sは静止摩擦力の水平波力に対する比であり、次式のように求められる。

$$SF_s = \frac{f(W - F_B - F_U)}{F_H} \quad (3)$$

ここで、 f は静止摩擦係数、 W は防潮堤の重量[kN]、 F_B は浮力[kN]、 F_U は揚圧力[kN]、 F_H は水平波力[kN]である。なお、静止摩擦係数 f は、山田漁港・防潮堤の建設の際に用いられた設計基本条件に基づき0.7とした。

式(3)を適用するに当たって防潮堤の重量 W [kN]を次のように算出した。

$$W = \rho_{RC} V_{SW} \quad (4)$$

ここで、 ρ_{RC} は鉄筋コンクリートの単位体積重量[kN/m³]である。 V_{SW} は防潮堤の体積[m³]である。なお、文献17)に基づき $\rho_{RC}=24.0$ [kN/m³]としている。また、浮力 F_B については、次式を用いて算出した。

$$F_B = \frac{1}{2} \rho_{SW} g (h_1 + h_2) A \quad (5)$$

式(5)において、 ρ_{SW} は海水の重量[kg/m³]であり、 1.03×10^3 [kg/m³]とした。 g は重力加速度[m/s²]であり、 9.8 [m/s²]とした。 h_1 、 h_2 はそれぞれ津波作用構面、反対側構面における浸水深[m]である。ただし、浸水深 h_1 については、他の建築物により津波波力の軽減が見込まれる場合で海岸線から500m以上の位置に存在する場合には入射津波の最大浸水深ID_{max}の1.5倍の値を、他の建築物により波

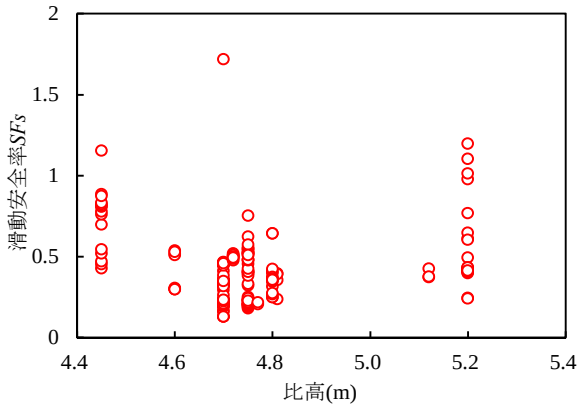


図-9 比高 R_E と滑動安全率 SF_S の関係

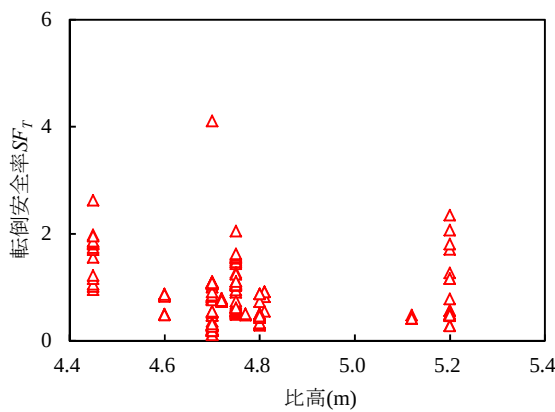


図-10 比高 R_E と転倒安全率 SF_T の関係

力の軽減が見込まれる場合で海岸線から500m以内の位置に防潮堤が存在する場合には最大浸水深 ID_{max} の2倍の値を用いる。その他の場合については最大浸水深 ID_{max} の3倍とする。また、 h_2 に関しては、ここでは押し波による津波作用構面の波力を想定しており、作用反対側の構面の浸水深は0としている。 A は防潮堤の水没部の水平投影面積 $[m^2]$ である。

一方で、式(3)を適用するに当たって、揚圧力 F_U は本来考慮すべき波力であるが、本研究では津波作用構面における動水圧の影響は小さいと考え、0と仮定した。さらに、水平波力 F_H は、段波波力として次式を用いて算出した。

$$F_H = \frac{a^2}{2} \rho_{sw} B g \cdot ID_{max}^2 \quad (6)$$

式(6)において a は水深係数であるが、式(5)における浸水深 h_1 の設定方法と同様の考え方にに基づき定める。他の建築物により津波波力の軽減が見込まれる場合で海岸線から500m以上の位置に存在する場合には1.5を用いる。また、他の建築物により波力の軽減が見

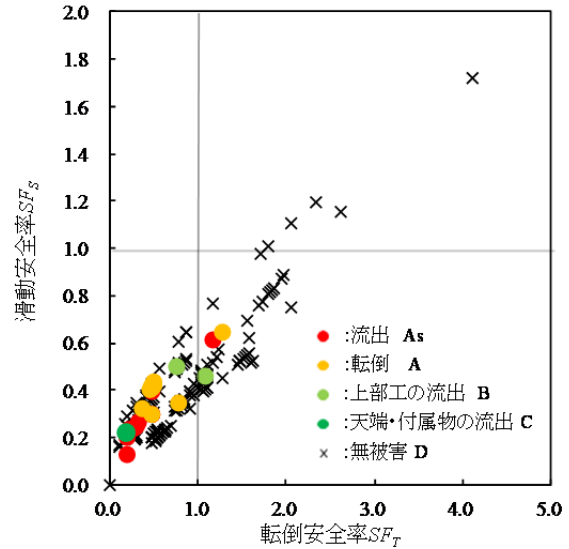


図-11 滑動安全率 SF_S 、転倒安全率 SF_T と防潮堤の被害モードとの関係

込まれる場合で海岸線から500m以内の位置に防潮堤が存在する場合には2を用いる。その他の場合については3とする。 B は見つけ幅 $[m]$ で、本研究ではユニットの長さとして仮定する。なお、防潮堤の受圧部分を超える水平波力に関しては無視する。

防潮堤の裏法面から施設高までを比高 R_E として、それに対する滑動安全率 SF_S との関係を図-9に示す。

次に、転倒安全率 SF_T については、防潮堤に加わる波力のモーメントの比であり、以下のように定められる。

$$SF_T = \frac{a_1 W - a_2 F_B - a_3 F_U}{a_4 F_H} \quad (7)$$

式(7)の適用に当たって、防潮堤の重量 $W[kN]$ 、防潮堤に加わる浮力 $F_B[kN]$ 、揚圧力 $F_U[kN]$ 、水平波力 $F_H[kN]$ については先述した滑動安全率 SF_S の算定の際と同様の値を用いる。なお、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 に関しては、各作用力のアームの長さ $[m]$ である。以上、比高 R_E に対する転倒安全率 SF_T との関係を図-10に示す。また、被害モードにおける滑動安全率 SF_S および転倒安全率 SF_T の関係を図-11に示す。

図-11によれば、流出箇所では滑動安全率 SF_S は0.13~0.61、転倒安全率 SF_T は0.19~1.16となり、両安全率ともにおよそ1より低い値となった。また、転倒箇所では SF_S は0.30~0.65、 SF_T は0.36~1.27となり、同様ににおよそ1より低い値となった。これらのことから、防潮堤の津波波力の抵抗力に対して、津波作用が卓越したと推定される。また、滑動安全率 SF_S と転倒安全率 SF_T を比較すると、多くの防潮堤の断面で滑動安全率 SF_S の数値のほうが相対的に低く、防潮堤の破壊に際して滑動モードが起点にな

ったと推定される。一方で、被害を受けていないユニットにおいても、安全率が1を下回っているデータが見られ、 SF_3 は0.11~0.64、 SF_7 は0.13~0.94となった。この理由としては、防潮堤前面の建築物の有無により防潮堤が実際に受ける水平波力にばらつきが生じ得ること、安全率の算出の際に杭基礎の支持力を考慮していないことなどが考えられ、これらの点については今後検討を行う予定である。

4. 結論

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震津波で被災した岩手県三陸沿岸山田漁港の防潮堤を対象として、Google Earth 画像及び構造図面に基づき詳細な被害把握を行った。最大浸水深と防潮堤の被害率の関係を論ずるとともに、滑動安全率及び転倒安全率を算出することで被災メカニズムについて考察した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 防潮堤の被害率に関する分析を通じて、防潮堤と海岸線の間に建築物がない箇所の方が、建築物が存在する箇所に比べて被害が集中しており、また、津波が越流した部分において被害が集中していることが明らかとなった。
- (2) 滑動安全率及び転倒安全率を算出した結果、両安全率はほぼ1より低くなった。これにより防潮堤の抵抗力を超える津波波力が作用したと推察される。また、転倒安全率に対して滑動安全率は相対的に数値が低く、防潮堤の破壊において滑動モードが起点になったと推察される。
- (3) 被害を受けていない箇所においても、安全率が1より下回っているユニットが多く見られた。この理由としては、防潮堤前面の建築物の有無を考慮するかしないかで防潮堤が実際に受ける水平波力にばらつきが生じ得ること、安全率の算出の際に杭基礎の支持力を考慮していないことなどが考えられ、これらの点については今後検討が必要である。

謝辞：岩手県農林水産部・漁港漁村課復旧チーム及び岩手県山田町水産商工課水産チームの皆様方には、山田漁港・防潮堤の構造や被害に係わる貴重な資料提供を賜りました。また、土木学会・地震工学委員会「地震・津波複合災害の推定手法および対策研究小委員会」（菅野高弘・委員長、今村文彦・副委員長、富田孝史・幹事長）の委員の皆様には防潮堤の被害分析に関する貴重な情報を頂きました。ここに関連する全ての皆様方に謝意を表します。

参考文献

- 1) 谷本勝利, 鶴谷広一, 中野晋: 1983年日本海中部地震津波における津波力と埋立護岸の被災原因の検討, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.257-261, 1984.
- 2) 国土交通省・港湾局: 港湾における防潮堤(胸壁)の耐津波設計ガイドライン, 防潮堤等の地震・津波による被災事例と耐津波設計を行う上での留意点, 2013.11.
- 3) 佐藤慎司, 武若聡, 劉海江, 信岡尚道: 2011年東北地方太平洋沖地震津波による福島県勿来海岸における被害, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, pp.1296-1300, 2011.
- 4) 浅川典敬, 中村隆・加藤広之, 早川光, 佐藤勝弘, 見上敏文, 小玉篤, 鈴木彰: 2011年東北地方太平洋沖地震における漁港海岸保全施設の被災状況, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.69, No.2, pp.1275-1280, 2013.
- 5) 常田賢一, 谷本隆介: 2011年東北地方太平洋沖地震の現地調査による防潮堤などの津波被害特性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.1406-1410, 2012.
- 6) 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, ISSN1346-7840, 2013.3.
- 7) 三上貴仁, 松葉俊哉, 柴山知也: 津波越流時の堤防周辺における流体運動の分析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.991-995, 2013.
- 8) 常田賢一, 竜田尚希, 谷本隆介, 鈴木啓祐: 津波防潮堤の評価および防潮盛土の耐侵食性の確保・向上, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.1016-1020, 2013.
- 9) 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: 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.2, pp.1346-1350, 2012.
- 10) 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: 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.2, pp.1351-1355, 2012.
- 11) 川崎浩司, 松浦翔, 坂谷太基, 本橋英樹, 菅付紘一, 野中哲也: 小白浜漁港防潮堤の津波被災メカニズムに関する3次元流体-構造解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.891-895, 2013.
- 12) 山田漁港海岸保全区域台帳, 2004.4.
- 13) (独)水産総合研究センター: 東日本大地震による漁港施設の地震・津波被害に関する調査報告(第1報), 震災復興に向けた活動報告集1, 2012.3.
- 14) 東京大学生産技術研究所 中埜研究所: 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震による建築物の地震被害および津波被害調査報告, 2012.3.12.
- 15) 岩手県: 市町村管理漁港海岸 東北地方太平洋沖地震及び津波災害に関する漁港海岸の被害状況及び考察, 資料NO.5, 2012.
- 16) 中村友治, 庄司学: 橋梁構造物に入射する津波の時系列波形とその類型化, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.4 (地震工学論文集第33巻), pp.1210-1218, 2014.
- 17) (社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.

CLARIFICATION OF DAMAGE MECHANISM ON THE SEAWALLS AFFECTED
BY THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE
TSUNAMI

Gaku SHOJI, Kaito MIZUNO, Kazunori TAKAHASHI, Naoto KIHARA,
and Masafumi MATSUYAMA

Damage mechanism of seawalls affected by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake tsunami was clarified. Dependency of the damage ratios defined as the number of damaged seawall units divided by total number of exposed seawall units by the associated inundation depths was revealed, with considering the failure and non-failure mechanism on sliding and turning failure modes of seawalls based on computation of safety factors.