侵食海岸を襲った2011年地震・津波による護岸 の破壊 -茨城県の成田・上釜海岸の例-

酒井 和也¹・宇多 高明²・清水 達也³・熊田 貴之⁴・
本橋 修二⁵・渡邊 徹⁶

¹正会員 (一般財団)土木研究センターなぎさ総合研究室(〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4)
E-mail:sakai@pwrc.or.jp

²正会員 (一般財団)土木研究センター常務理事なぎさ総合研究室長
兼日本大学客員教授理工学部海洋建築工学科(〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4)
E-mail:uda@pwrc.or.jp

³正会員 (有)アイコムネット 環境コンサルティング部(〒101-0054 東京都千代田区神田錦町3-16-
11エルヴァージュ神田錦町4F)
E-mail:shimizu@icomnet.jp

⁴正会員 (一般財団)土木研究センターなぎさ総合研究室(〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4)
E-mail:kumada@pwrc.or.jp

⁵茨城県土木部河川課主任(〒310-8555 水戸市笠原町978-6)

⁶茨城県水戸土木事務所河川整備課(〒310-0802 茨城県水戸市柵町1-3-1)

2011年3月11日、大地震と大津波が茨城県の大洗港の南側の海岸を襲った。このとき防波堤の延伸に伴って形成された波の遮蔽域へと海浜砂が運び去られて侵食が進んでいた海岸に、強大なエネルギーを持った津波が作用したが、その際、護岸の著しい破壊が生じた。本研究では、侵食海岸では地震・津波により海岸施設が破壊されやすく、その機能を果たすことができない恐れが高いことを茨城県大洗港の南側に位置する成田・上釜海岸の例を基に考察した。

Key Words : 2011 Great Earthquake, tsunami disaster, beach erosion, seawall

1. はじめに

2011年3月11日午後2時46分、宮城県牡鹿半島の東南東約130 kmを震源とするマグニチュード9.0の大地震が発生し、その直後に起きた大津波により岩手・宮城・福島県沿岸のみならず茨城・千葉県沿岸に至る広大な地域において甚大な被害が生じた¹⁾。とくに震源に近い岩手・宮城・福島県沿岸では内陸深くまで侵入した津波により、集落が丸ごと破壊された場所も数多く見られた。津波後の海岸施設の被災状況調査によれば、津波が直接的な外力ではなく、地震動に伴う地盤変動に起因して堤防護岸が破壊された例や、直接的には津波の強大な力によって破壊されたものの、津波襲来以前から侵食が著しく進み、前浜が消失して堤脚水深が大きかったがゆえに津波に抵抗できずに破壊された例も見受けられた。このように過去から進んできた侵食により、海岸構造物の脆弱性が増した上で津波が作用して構造物の破壊に至るという機構は、全国的に侵食が進みつつあるわが国の海岸保全にお

いて重要な問題を提起している。茨城県の海岸での津波被害については、既に信岡ら²⁾が調査結果を報告し、北茨城市から大洗町までの津波痕跡調査結果と、陸上浸水の特徴について述べた。しかし、上記視点に基づく研究は行われていない。本研究では、防波堤の延伸に伴って形成された波の遮蔽域へと海浜砂が運び去られて侵食が進んでいた海岸に、強大なエネルギーを持った津波が作用することによって起きた護岸の破壊現象を取り上げ、侵食海岸では地震・津波により海岸施設が破壊され、その機能を果たすことができなかったことを茨城県大洗港の南側に位置する成田・上釜海岸の例を基に考察する。現地踏査は2011年4月11日に実施した。

2. 空中写真に見る大洗港近傍海岸の変遷

図-1は、研究対象の大洗港と、その南側の成田・上釜海岸の衛星写真を示す。衛星写真は津波襲来直後の2011

年3月12日撮影である。従来、沖防波堤による波の遮蔽域には広大な砂浜(サンビーチ)が形成されていたが、津波により砂浜が大きく侵食され、大洗港内には大量の砂が堆積した。一方、図-1では大洗港の沖防波堤による波の遮蔽域の外側に位置する成田・上釜海岸は沿岸漂砂によって砂が大洗港へと運び去られたため護岸前面の砂浜は消失した状態となっている。

成田・上釜海岸の過去の変遷は、1984、2002、2011年撮影の空中写真により調べることができる(図-2参照)。大洗港の沖防波堤の建設工事は1982年から始まったが、防波堤長が短かった1984年には大洗港に近い大貫海岸では前浜がほとんどなかったが、成田・上釜海岸には狭いながら砂浜が広がっていた。その後、大洗港の沖防波堤の建設とともに、防波堤による波の遮蔽域へと向かう沿岸漂砂が誘起され、これに伴って侵食が進んでいった。

侵食区域では護岸が直線状に延ばされるとともに、ヘッドランド(HL)の建設も進んだが、2011年の画像に示すように、長さの短い136-38号堤ではその付け根に一部砂浜があるのみで大部分の区域では護岸と消波工が波に曝されていた。一方、大貫海岸にある40号堤は、堤長が430 mと長いために南側区域から北向きに運ばれる沿岸漂砂の一部を阻止した結果、その南側に三角形の砂浜を形成させていた。

3. 汀線変化と大洗港における堆積土砂量の変遷

図-3は、ヘッドランド(HL)の設置位置とともに、空中写真を基に算出した成田・上釜海岸の汀線変化を示す。これによれば、40号堤の南側隣接部では2009年までに汀

図-1 大洗港とその南の成田・上釜海岸の衛星画像(2011年3月12日撮影)

図-2 成田・上釜海岸の変遷

図-3 成田・上釜海岸の汀線変化

図-4 護岸と消波工で覆われた成田海岸(2005年7月2日撮影)

図-5 2004年の深浅図と1979～2004年の地形変化量の平面分布

線が前進していることから、北向きの沿岸漂砂によって北側の波の遮蔽域へと砂が運ばれてきたこと、また同じ期間、40号堤の南0.4 km付近から36号堤まで汀線変化がほとんど生じていないことから、この付近は侵食されきり、北向きの沿岸漂砂は護岸前面に安定的に堆積できずにそのまま東北向きに流れる条件にあったと考えられる。この結果、成田・上釜海岸は、最近では図-4に典型例を示すように護岸前面の前浜は完全に消失し、礫が露出していた。侵食が顕在化する前には砂浜海岸であったことから、これらの海岸では波によって移動しやすい砂分はほとんど全て大洗港の沖防波堤の建設によって形成された波の遮蔽域へと流出し、粗粒分のみが急勾配をなして堆積する環境に変わったと推察される。

一方、沿岸漂砂によって砂は沖防波堤による波の遮蔽域へと運び込まれたが、その状況は谷沢ら³⁾に詳しい。研究結果のうち、2004年の深浅図と1979～2004年の地形変化量の平面分布を再掲したのが図-5である。沖防波堤は、2004年までには長さ1300 mまで伸ばされ、これによる波の遮蔽域に大量の砂が堆積すると同時に、南防波堤と沖防波堤の間でも堆砂が進み、先端が南東方向に鉤状に曲げられた南防波堤に沿い、沖防波堤方向へと細長い堆積域が大きく伸びた。さらに、谷沢ら³⁾は、図-5に示すように南防波堤の東西に区域を設定し、これらの区域の堆積土砂量の変化から、沖防波堤による波の遮蔽域(区域)では1979～2004年で $2.8 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ の割合で砂が堆積したこと、そしてこれが南側の防波堤遮蔽域外から遮蔽域へと向かう沿岸漂砂に起因するとした。また、図-5によれば、区域での堆積域は水深ほぼ4～10 mに分布しているが、 d_{50} の水深方向分布との比較によりこの水深帯での堆積砂の d_{50} はほぼ0.12 mmの細砂であることを明らかにした。これより波の遮蔽域に粒径の細かい土砂が選択的に堆積すること、また細砂が流出するため沿岸漂砂によって砂が運び去られた区域では粗粒化が起ると同時に前浜勾配の増加が起きたと推察される。

図-6 調査対象の成田・上釜海岸の空中写真

図-7 36号堤の背後に形成された舌状砂州

図-8 護岸背後の管理用通路(盛土)上の津波痕跡(矢印)

4. 地震・津波に伴う護岸の変状

成田・上釜海岸には現況でヘッドランド(HL)が設置され、海岸線には護岸(農林)が連続的に伸びている。背後地は保安林区域である。成田・上釜海岸での踏査は、図-6に示すように36号堤背後から開始し、北側の37号堤まで約1 kmについて行った。護岸の被災は南部の上釜海岸で著しく、成田海岸では護岸の変状は小さかった。また、踏査時、地盤沈下などの変状が小さいHL背後の護岸天端高(TP.+5.0 m)を基準として津波の遡上高を測定した。図-6に示す点Aが遡上高の計測地点で、遡上高はTP.+7.5 mであった。

図-7は、36号堤の背後に形成された舌状砂州を示す。HLの背後には規模の大きな砂州が形成されていた。このHLのわずかに北側の、護岸背後の管理用通路(盛土)上には図-8に矢印(右端)で示す津波痕跡が残されており、通路上にゴミがうちあがっていた。津波は護岸の背後を遡上し、盛土された管理用通路の頂部へと達し

た．図-9は，図-8のB付近の，消波工の天端高が下がり始める地点付近で護岸の変状を示す．消波工の天端高が低い部分では護岸の法線が陸側にずれており，この付近から北側で被災度が増していた．しかし護岸自体は倒壊せずにほぼ原位置にあった．

護岸に沿って北側へ移動すると，やがて護岸背後の盛土ののり面に多くの地割れが見出され，同時に護岸の表のり面が倒壊していた（図-10）．盛土の滑りによってできた地割れは深く，津波の流動による埋め戻しも見られないことから，この被災は主に地震に伴う地盤災害であることが分かる．ほぼ同じ場所を盛土の基部から望んだのが図-11である．盛土が崩壊し，護岸の表のり面が大きく傾いていた．護岸天端を越えて表のり面に達し，それぞれ北向き，南向きに倒壊した護岸状況を撮影したのが図-12，13である．厚さ0.5 mのコンクリートがきれいに割れ，護岸前面の砂浜上に載っていた．護岸の背後

地盤には円弧滑りがあることから判断して，地震動により直立護岸が破壊され，破壊された護岸の下部が海側へと押されるようにして倒壊したと考えられる．

図-14は，図-12の矢印C付近の状況であるが，護岸が回転しつつ天端が高く持ち上げられた．この護岸（農林）は一定間隔で支柱があり，それに表のり面が載る構造を有していたが，支柱ごと持ち上げられるように変形した．このため表のり面の裏側に張ってあった捨石基礎がほぼそのままの形で残され，表のり面とともに持ち上げられた．護岸の変色状況から判断すると，被災前の護岸裏側の地盤は図-14に示すDの高さにあったと判断できることから，地盤低下と護岸天端の持ちあがりにより，この地点では2.4 mもの落差が生じたことが分かった．また，護岸背後に残された津波の流動痕跡から，遡上した津波は地震動によって破壊された護岸の基部の空洞を通過して海へと流出したことが分かった．

図-9 図-8のB付近の消波工の天端高が下がり始める地点付近で護岸の変状

図-12 護岸の倒壊状況（北向きに撮影）

図-10 護岸背後の盛土ののり面に見られた地割れと護岸の倒壊

図-13 護岸の倒壊状況（南向きに撮影）

図-11 盛土の崩壊と護岸の表のり面の傾動

図-14 図-12の矢印C付近での護岸の破壊

図-15もほぼ同じ場所の状況で、背後の盛土ののり面に地割れができています。地割れの周辺では遡上した津波の戻り流れが手前方向に流れた痕跡が認められるが、流水による地盤の変化は小さかった。さらに盛土の天端に登ると図-16のように管理用通路が原形をとどめないほどに変形し、典型的な地盤災害が起きていた。地割れの幅は約0.8 mに及んだ(図-17)。図-18は護岸が大きく持ち上げられた区域を南向きに撮影したものである。この付近では規模の大きな地盤変動が起きたことが分かる。このように一連海岸の南部では著しい地盤災害が起きたが、図-6にEで示す地点で撮影した図-19によれば、この地点付近では護岸の変状は小さくなった。この付近から北向きに37号堤へと接近して護岸とその前面の消波堤状況を撮影したのが図-20である。背後の管理用通路の海側のり面の植生が海側に倒伏していることから、津波が作用したことが確認できるが、護岸自体にほとんど変状がなかった。

5. まとめ

調査対象の成田・上釜海岸のうち、南部に位置する上釜海岸では盛土が崩壊するとともに護岸の倒壊が著しかったのに対し、北部の成田海岸では護岸の変状は小さかった。この付近の海岸での津波遡上高はTP.+7.5 mであったことから、上釜・成田海岸ともほぼ同じ高さの津波が作用したはずである。また、両海岸とも護岸形状は同じである。したがって上釜海岸と成田海岸での護岸の被災状況の差異は、主に地盤状況の違いに起因すると考えられる。本震時の震度は6強(鉦田)であったから、第一義的にはこの地震動により地盤と護岸の破壊が進んだと考えられる。

成田・上釜海岸と護岸構造が同一で、かつ隣接区域に防波堤が建設された結果砂が波の遮蔽域へと流出し、結果として護岸前面の前浜が完全に消失した状況の下で大津波が襲来した海岸としては、北茨城に位置する神岡上

図-15 背後の盛土ののり面にできた地割れ

図-18 護岸が大きく持ち上げられた区域を南向きに撮影

図-16 管理用通路の変形状況

図-19 図-6にEで示す地点で撮影した変状の小さい護岸

図-17 管理用通路にできた幅約0.8mの地割れ

図-20 37号堤の南側での変形しなかった護岸

海岸の例がある¹⁾。神岡上海岸でも護岸（農林）は一定間隔で支柱があり、それに表のり面が載る構造を有していたが、支柱ごと持ち上げられるように変形し破壊された。その場合、護岸背後にあったU字側溝は全く変状がなく、護岸とその裏込めが破壊されたことから、この場合の護岸の破壊は越流した津波が戻る際、大きな水位差ができて護岸基部から流出し、その際護岸背後の裏込め土砂の流出を招いたと推察された。このように護岸は同じ構造を有していたが、成田・上釜海岸では主として地震に伴う地盤変動により破壊され、神岡上海岸では津波による流水力によって破壊された。このタイプの護岸は背後地（保安林）を防護する上で経済性を重視して造られた護岸であるが、このように地震・津波いずれに対しても抵抗力が弱いことから、全国各地にあるこれと同様な護岸は改築するか強化策を取ることが必要である。

また、上釜海岸では護岸が破壊された後に津波が襲来したことは滑った地面上に津波痕跡が残されていたことから明らかである。このことは、地盤条件が悪い場所にあった津波防護施設が地震動により破壊され、地震の後襲来する津波時に役立たないという事態も起こる可能性がある。通常は護岸や堤防の沈下量を予想し、それを計画に組み込む手法が取られるが、上釜海岸で見られたように沈下量の定量予測には大きな不確定さが伴う。

また、成田・上釜海岸は互いに隣接しているにも関わらず上釜海岸でのみ著しい被災が起きた。この原因の一つとして次の機構が考えられる。すなわち、対象地区では大洗港の沖防波堤背後に形成された波の遮蔽域へと向かう北向きの沿岸漂砂が卓越しているが、この条件を考慮した上で図-6を参照すると、36, 37号堤に挟まれた1 km区間のうち、ほぼ中央より南側（上釜海岸）では、36号堤が北向きの沿岸漂砂を阻止するため北側半分（成田海岸）と比べて従来から沖合の水深が大きかったと推察され、このことが護岸の安定性を損ねる一因になったと考えられることである。深浅測量データがないのでこの実証は現段階ではできないが、今後一考すべき事柄と

考えられる。

6. あとがき

最近の津波防災にかかる論議では、津波対策として護岸（堤防）の高さばかりが強調されるように思えるが、護岸（堤防）が建設される場所の地盤が軟弱であれば上記のように津波の前に地震による構造物が破壊され、その後に襲来するレベル2ではなくレベル1の津波に対してすら所定の高さにより津波を防護できず、護岸（堤防）が破壊された状態で津波を受ける可能性もある。したがって護岸堤防の高さを上げれば事足りるという考え方を改める必要がある。東日本大震災津波災害状況調査¹⁾に示したように、鹿島灘に面した大小志崎海岸でも同じく地盤変動により護岸の沈下も起きたが、そこでは護岸前面に幅50 m程度の砂浜が残されており、それが一種の押さえ盛土の役割を果たした結果、成田・上釜海岸で見られたように大規模な破壊には至らなかった。これより、津波襲来前に侵食により脆弱化した海岸では津波に対する抵抗力が低下すること、したがってただ単に堤防護岸の天端高の嵩上げにのみに目を奪われずに日頃から侵食を防止し、できる限り広い前浜が維持されるような工夫が必要と考える。

参考文献

- 1) (一般財団) 土木研究センターなぎさ総合研究室：東日本大震災津波災害状況調査, <http://pwrc-nagisa.jp>, 2011.
- 2) 信岡尚道, 鶴崎賢一, 松浦健郎, 鍋谷康紀：2011年東北地方太平洋沖地震による茨城県北部の津波, 土木学会論文誌B2, Vol.67, No.2, pp.I_1286-I_1290, 2011.
- 3) 谷沢肇, 宇多高明, 松浦健郎, 菊池泉弥, 福本崇嗣, 熊田貴之：大洗港による那珂川流出土砂のトラップと遮蔽域内堆砂の実態, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.566-570, 2009.

COLLAPSE OF SEAWALL DUE TO THE 2011 GREAT EARTHQUAKE AND TSUNAMI ON ERODING COAST - EXAMPLE OF NARITA AND KAMIGAMA COASTS IN IBARAKI PREFECTURE

Kazuya SAKAI, Takaaki UDA, Tatsuya SHIMIZU, Takayuki KUMADA,
Shiji MOTOHASHI and Toru WATANABE

On March 11, 2011, a great earthquake and tsunami attacked the Ibaraki coasts. In this period, the seawalls of the Narita and Kamigama coasts, where sand was transported toward the wave shelter zone of Oharai Port and severely eroded, were severely damaged and collapsed mainly due to the ground vibration and their function was lost before the tsunami. The function of the seawall against tsunami was reconsidered.