

津波越流による堤防背後における大溝の形成と 堤防裏のりの吸出し破壊

宇多高明* 酒井和也** 三波俊郎***

1. はじめに

2011年3月11日午後2時46分、宮城県の牡鹿半島の東南東130km沖を震源地とするマグニチュード9.0の大地震（東北地方太平洋沖地震）が発生し、この地震に伴い三陸沿岸や仙台湾沿岸に大津波が襲来した。この大津波により、仙台湾沿岸各地では海岸堤防の陸側に幅約30mの溝が形成されるとともに多くの地点で破堤が起こり、さらに陸域に侵入した津波の押し波と戻り流れによって海岸線近傍に楔状の湾入部が形成された。仙台湾南部、山元海岸でもこの現象が起き、堤防背後に大きな溝ができ、のり枠式堤防の裏のりが破壊された。一方、破堤を免れた海岸堤防の多くはあたかも離岸堤のように消波効果を発揮し、それらの背後にトンボロを発生させた。大津波の作用時破堤を免れた海岸堤防の表のり面はほぼ原形を保ったのに対して、裏のり面では崩壊が進む現象は各所で観察された。ここでは、宮城県山元海岸において2011年8月12日に実施した踏査の結果を基に考察する。調査対象地は、山元海岸の7号ヘッドランド周辺であるが、津波襲来前の2010年8月と津波襲来直後の2011年3月13日、および津波襲来から26日が経過した2011年4月6日撮影の衛星画像を図-1, 2, 3に示す。なお、図-3には2011年8月12日の現地踏査時の写真撮影地点を番号で示す。



図-1 宮城県山元海岸の調査区域
(2010年8月撮影)



図-2 宮城県山元海岸の調査区域
(2011年3月13日撮影)

2. 衛星画像の比較による津波前後の地形変化

山元海岸の7号ヘッドランド（HL）周辺は、図-1に示すように津波襲来前、背後に幅約200mの保安林を有し、直線状に伸びた海岸堤防により防護されていた。それが津波襲来後2日の画像（図-2）では、各所で破堤が起こると同時に、堤防のすぐ陸側には連続的な溝が形成された。また、この溝の陸側では津波の戻り流れによると見られる複雑な形状の縦方向の溝が多数残された。襲来した津波の遡上高は当地の南約6.5kmでの測定によればT.P. 19.5 mであり¹⁾、これは堤防高T.P.6.5 mの3倍もの高さであった。



図-3 宮城県山元海岸の調査区域 (2011年4月6日撮影) と写真撮影地点

このように大津波によって大きな地形変化が生じたが、津波襲来から26日が経過した2011年4月6日撮影の衛星画像（図-3）では、破堤を免れた部分の背後には溝が残されたものの、破堤部からの回折波の作用により不規則な形状の海岸線が滑らかなポケットビーチへと変化した。

3. 現地状況

現地踏査は、図-3の矢印AからBまで堤防上を北向きに移動しつつ行った。踏査区間内には建設途中にあった7号ヘッドランド（現況では突堤）がある。また、Aの南に100m離れた場所には、津波襲来前一続きの海岸堤防であったが、途中が破堤したため残された堤防の残骸（矢印C）がある。2011年4月6日の画像では、堤防の南端・北端のA、Bからそれぞれ陸側に舌状砂州が発達し、破堤を免れた部分では津波越流に伴って形成された溝が連続的に伸びていた。しかし現地踏査を行った8月12日には、これらの舌状砂州の発達状況が逆になり、陸地から堤防端A、Bへ向いたトンボロが発達していた。このことは、当初堤防端を通過して堤防の海側にあった砂が堤防の裏側へと運ばれたが、それらの砂州が陸岸まで到達した後、堤防背後に形成された波の遮域での波高分布にあわせて再度沿岸方向に運ばれて変形したためと考えられる。

(1) 堤防の破壊状況

図-3に矢印Aで示す、破堤せずに残された海岸堤防の南端から南向きに望んだのが写真-1である。A

の南100mには破堤せずに残され、弧立した堤防Cが見えるが、AC間には砂浜が広がり、バームがよく発達していた。図-3によれば、4月6日にはA付近には舌状砂州があったものの、C付近では砂の堆積は起きていなかったことから、4月6日以降8月12日までの波の作用によりこの付近に大量の砂が運び込まれたことが分かる。一方、堤防端Aから北側を望むと、写真-2のように堤防天端のアスファルト舗装はほとんど変形が見られず、のり枠式堤防のため堤防の表のり面に生育していた松が倒伏していたのに対し、裏のりは大きく破壊されていた。また、7号ヘッドランドの陸側には幅が約30mの幅広い溝が残されていた。この溝は堤防を津波が越流する際に形成されたもので、局所洗掘に伴い裏込め土砂が流出したことが裏のりの破壊に繋がったと考えられる。さらに、海岸堤防に沿って北側へ移動して撮影したのが写真-3である。ここでは写真-2と比べて堤防の裏のりの破壊が進み、天端のアスファルト舗装面まで崩壊が進んでいた。さらに図-3に矢印Bで示す堤防の北端に接近すると、堤防の破壊状況がひどくなり、写真-4のように天端のほとんど全部が崩落していた。一方、破堤を免れた堤防の背後には舌状砂州の発達が見られるが、これを汀線側から撮影したのが写真-5である。破堤を免れた部分が不透過性の離岸堤の役割を果たした結果、その端部には規模の大きな舌状砂州が形成されていた。海岸堤防の裏のりでは津波による破壊が著しかったのと対照的に、写真-6のように堤防の表のりには何らの異常も見られ



写真-1



写真-2



写真-3



写真-4



写真-5



写真-6

土研センター



写真-7



写真-8



写真-9



写真-10



写真-11



写真-12

なかった。このように堤防の裏のり面と表のり面の被災状況には大きな差があり、津波時の堤防の破壊は裏側から進むことが分かった。

(2) 海岸堤防端部からの陸向き砂移動

図-3に示したように破堤によって大きな開口部ができると、開口部付近では直角入射条件であっても汀線に対して大きく斜め入射となるために、従来海岸堤防の海側に堆積していた砂が開口部を埋めるよう破堤箇所の両側から陸側へ運ばれる。その場合、海側にあった砂浜は破堤箇所の隣接部を中心として大きく侵食されるはずである。当調査区域でもこの現象が観察された。堤防に沿って南向きに移動すると、堤防南端部でCを望む付近において写真-7のように比高0.9mの浜崖が形成され、この浜崖は破堤箇所に接近すると1.4mまで高まり(写真-8)、その後破壊を免れた堤防Cに接近すると浜崖は消失し、小高いバームへと変化していた。すなわち写真-7、8付近では破堤箇所へと砂が流出した結果浜崖が形成されたが、破堤箇所では一転して砂が堆積してバームが形成されたことが分かった。一連の事実より、破堤に伴って海浜砂が開口部を経て陸向きに運ばれたことが分かった。

(3) 堤防背後に形成された溝の状況

堤防背後で沿岸方向にほぼ一様に溝が発達している場所において、それぞれ南向き、北向きに溝の発達状況を撮影したのが写真-9、10である。海側にはのり枠式海岸堤防が直線状に伸びていたが、その

多くは津波により破壊され、下方にずり落ちていた。また裏込め土砂の流出に伴い陥没が起きていた。さらに、堤防の陸側に広い水面を持つ溝が連続的に伸びていたことから、津波の越流がほぼ二次元的に起きたことが分かった。

沿岸方向にほぼ一様に伸びた溝のほぼ中央部で、破堤部からの砂の侵入がなく、津波が越流時の形状がそのまま残されていると見られる場所で溝の状況を調べた(写真-11)。レベルの位置から海側へ横断して堤防へと近づくと、写真-12に示すよう観測者のほぼ腰までの深さ(約1m)の比較的平坦な溝であった。正面ののり枠式堤防を見ると、裏込め土砂は流出しコンクリート枠は折れていた。壊れた堤防の手前には溝が発達していたことを考慮すると、堤防ののり尻付近の地盤高が急激に低下してのり尻下部に穴が開き、そこから裏込め土砂が流出することによって堤防の裏のりの枠が自重に耐えられず折れたと推定される。

堤防が残されている部分の両端部には砂浜があり、現況では溝は存在していない。元々トンボロがあれば堤防の裏のりも洗掘されず、したがって堤防の裏のりも破壊されないはずである。津波越流時には溝ができて堤防の裏のり面の破壊が起きたが、その後の波の作用でトンボロ形成が進み、破壊された堤防の裏側に砂浜が形成されたことが分かる。

4. 考察

山元海岸の7号ヘッドランド周辺での観察により次の特徴が明らかになった。

- (1) 天端のアスファルト舗装面は、津波が天端をただ単に越える状況では被災を免れる。しかし他の事例¹⁾も考慮すると、堤防背後に敷かれたアスファルト舗装に津波が段落ち流れとなって落ち込む場合、または裏込め土砂が流出して陥没が起こる条件では容易に破壊される。
 - (2) 海岸堤防の表のりと裏のりの被災状況を比較すると、表のりはほぼ原形を保ったが、裏のりでは著しい被災が見られた。津波の堤防越流に伴い、7号ヘッドランドの裏のりの陸側に幅約30mの深掘れが生じ、裏のりの基部から吸出しを受けたことがこの原因と推定される。また、堤防背後に形成された溝の幅は、津波の高さ約20mの1.5倍程度であった。
 - (3) 表のり面では止水工など洗掘防止策が取られているのに対し、裏のりではこのような対策が取られていないことが被災の主要因と考えられる。
 - (4) 山元海岸は津波以前に著しく侵食され、前浜もほとんどなく護岸と消波ブロックが波に曝されていた。そのような場所では破堤が著しかった。
 - (5) 破堤に伴い開口部が形成されると、開口部を経由した海浜土砂の陸側への移動が生じ、海浜部では侵食が進む。いったん陸側に運び込まれ、堤防背後に堆積した砂は海浜部に戻ることはない、その分海浜土砂の損失原因となった。
- 「海岸保全施設の技術上の基準・同解説」のp.3-19には図-4に示す海岸堤防の一般的断面形が示されている。堤防の表のりの基部には止水工が施され

ているが、裏のりには小規模な根留工と、その背後に小規模な排水路が伸びるのみである。このような形式の海岸堤防では外力は主に表のり面に作用し、表のり面は洗掘を受ける可能性があることから止水工が施されることになっている。また、堤防の天端への越波がある場合には、天端の水たたきと裏のり面はコンクリートで被覆することによって越波に耐えられる構造となっている。しかし堤防の裏のりの先に写真-12に示すような大規模な洗掘穴が形成されることは前提としていない。このため規模の大きな溝が背後地にできる場合を考えると、堤体基部の土砂が流出し、ひき続いて堤体の裏込め土砂も流出し、それが裏のり被覆工の破壊に繋がったと考えられる。裏のり被覆工の破壊を阻止するには、少なくとも表のりの基礎と同様の基礎工と止水工が必要と考えられるが、そのような構造となっていなかったため各地で同じパターンで海岸堤防の破壊が起きたと考えられる。

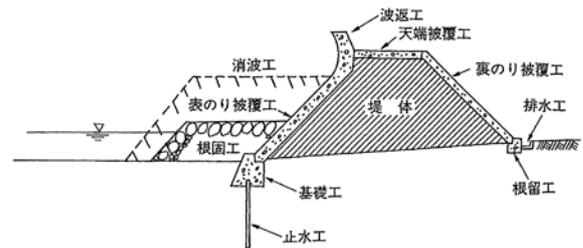


図-4 海岸堤防の概念図 (出典:「海岸保全施設の技術上の基準・同解説」 pp.3~19)

参考文献

- 1) (財) 土木研究センターなぎさ総研ホームページ (2011) : <http://pwrc-nagisa.jp>

宇多高明*



財団法人土木研究センター
常務理事 なぎさ総合研究
室長、工学博士
Dr. Takaaki UDA

酒井和也**



財団法人土木研究センター
なぎさ総合研究室 研究員
Kazuya SAKAI

三波俊郎***



海岸研究室 (有)
Toshiro SAN-NAMI