津波の越流による海岸堤防の裏法尻の洗掘に関する水理模型実験

Hydraulic model experiments on scour landward of the coastal dike induced by tsunami overflow

鳩貝 聡¹・諏訪義雄²・加藤史訓³

Satoshi HATOGAI, Yoshio SUWA and Fuminori KATO

Coastal dikes in prefectures of Iwate, Miyagi and Fukushima were damaged by tsunami of The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake in March 11, 2011. We focused on the damage from scour landward of the coastal dike induced by tsunami overflow, and examined the process of scour and the effects of landward toe protection on scour by hydraulic model experiments. The results of the experiments show that landward toe protection with high watertightness can keep scour away from coastal dike by surely bouncing overflowed water.

1. はじめに

平成23年3月11日発生の東北地方太平洋沖地震の津波により、岩手・宮城・福島県の海岸堤防約300kmの内、190kmもが全壊若しくは半壊の被災を受けた。この東日本大震災を受けて開催された海岸省庁の「海岸における津波対策検討委員会」の報告では、粘り強く効果を発揮する海岸堤防等の構造検討の必要性が謳われている。

津波の戻り流れによる護岸法先の洗掘については西村・堀川（1979）や野口ら（1997）が検討しているが、津波が海岸堤防を越流する際に生じる裏法尻での洗掘については詳細な検討事例がない。

そこで本研究では、海岸堤防の被災パターンの内、押し波による海岸堤防の裏法尻の洗掘からの被災パターンに絞り、水理模型実験により洗掘過程及び洗掘を軽減する保護工等の効果を検討した。

2. 実験内容

(1) 実験装置

実験は、国土技術政策総合研究所の構造物実験水路（写真-1）と高落差実験水路（写真-2）を用いて行った。構造物実験水路（長さ40m、幅1m、高さ1.5m）は、側面がガラス張りになっているため洗掘過程を視覚的に確認できるとともに、縮尺1/25では現地スケールで越流水深約10mまでの外力で検討可能である。一方、高落差実験水路（長さ45m、幅1m、高さ4m）では、実現象に近いスケール（縮尺1/2）での実験が可能である。

両水路とも堤防模型（図-1）は表法、天端、裏法を固

定床とし、天端幅は現地スケールで3mとした。また、堤防陸側は移動床の平場とし、移動床には平均粒径0.3mmの砂を使用した。越流時間は現地スケールで約10分間とし、給水口のバルブ操作の可能な範囲で越流開始

写真-1 構造物実験水路（縮尺1/25）

写真-2 高落差実験水路（縮尺1/2）

図-1 堤防模型（寸法は現地換算値）

1	国土交通省国土技術政策総合研究所
河川研究部海岸研究室 研究官
2 正会員	国土交通省国土技術政策総合研究所
河川研究部海岸研究室 室長
3 正会員 工修	国土交通省国土技術政策総合研究所
河川研究部海岸研究室 主任研究官

図-2 実験水位波形（数字は現地換算値）

からピーク水位までの時間を極力短くした。高落差実験水路における実験の水位波形を図-2に示す。

(2) 裏法尻洗掘実験

裏法勾配，比高，越流水深の条件を変え，裏法尻での洗掘について構造物実験水路で小規模実験を行い，越流後の地形を測量した。実験ケースを表-1に示す。また，小規模実験と高落差実験水路での大規模実験を比較するため，同じ条件で実験を行い，越流後の地形を測量した。実験ケースを表-2に示す。

(3) 裏法尻保護工効果確認実験

堤防模型の裏法尻に保護工を敷設し，敷設しない場合と比較して洗掘をどの程度低減するかを，裏法勾配2割とした小規模実験および大規模実験で確認した。保護工は，現地スケールで質量2t，厚さ50cmのコンクリートブロック（図-3）と，現地スケールで舗装厚10cm，上層路盤厚15cm，下層路盤厚15cmのアスファルト舗装（図-4）の2パターンとした。アスファルト舗装の路盤材には，セメントを攪拌した安定処理を施している。表-3のように，保護工敷設幅，フィルター層の有無，土被り（現地スケール1m）の有無等の条件を変えたケースを設定した。越流後の地形は，水路中央で測定している。

なお，大規模実験では，保護工がいつ流出したか把握するため，加速度センサーを保護工周辺地盤だけでなく保護工内にも埋め込み，地盤の洗掘状況および保護工が流出するタイミングを測定した。

また，小規模および大規模実験とも保護工間には，現地スケールで16mmの隙間がある。

図-4 保護工(アスファルト舗装)の構造(寸法は現地換算値)

表-1 実験ケース（裏法尻洗掘実験）

Case	実験	裏法勾配	比高	越流水深
1	小規模実験	2割	9m	1m
2		〃	〃	2m
3		〃	〃	3m
4		〃	〃	6m
5		〃	〃	10m
6		3割	9m	1m
7		〃	〃	2m
8		〃	〃	3m
9		〃	〃	6m
10		〃	〃	10m
11		2割	6m	1m
12		〃	〃	2m
13		〃	〃	3m
14		〃	〃	6m
15		〃	〃	10m

表-2 実験ケース（裏法尻洗掘実験）

Case	実験	裏法勾配	比高 ()は実験値	越流水深 ()は実験値
16	小規模実験	2割	6m (24cm)	0.5m (2cm)
17		〃	〃	1m (4cm)
18		〃	5m (20cm)	2m (8cm)
19	大規模実験	〃	6m (3m)	0.5m (0.25m)
20		〃	〃	1m (0.5m)
21		〃	5m (2.5m)	2m (1m)

表-3 実験ケース（裏法尻保護工効果確認実験）

Case	実験	越流水深 ()は実験値	比高 ()は実験値	保護工 種別	保護工幅 ()は実験値	フィルター層		土被り
						割栗石	再生砕石	
22	小規模実験	2m (8cm)	5m (20cm)	ブロック3列	4.275m (17.1cm)	無	有	有
23		〃	〃	ブロック3列	〃	有	有	有
24		〃	6m (24cm)	アスファルト	4.4m (17.6cm)	—	—	無
25	大規模実験	2m (1m)	5m (2.5m)	ブロック3列	4.28m (2.14m)	無	有	有
26		〃	〃	ブロック3列	〃	有	有	有
27		〃	6m (3m)	アスファルト	4.4m (2.2m)	—	—	無

図-3 保護工(コンクリートブロック)の構造(寸法は現地換算値)

図-5 越流後の地形 (Case1～10, 寸法は現地換算値)

図-6 越流後の地形 (Case1～5, 11～15, 寸法は現地換算値)

図-7 越流後の地形 (Case16～21, 寸法は現地換算値)

3. 裏法尻洗掘実験の結果

Case1～10の越流後の地形を図-5に, Case1～5と11～15の越流後の地形を図-6に示す。図-5, 6のように越流水深が大きくなると最大洗掘深も大きくなる。図-5のように裏法勾配が2割と3割を比較すると, 3割の方が基礎工直近での洗掘深および最大洗掘深は若干小さい結果となった。図-6のように裏法勾配2割における比高9mと6mを比較すると, 比高が大きい方が基礎工直近での洗掘深および最大洗掘深が大きい結果となった。なお, 越流

水深10mの場合, 水路床まで洗掘されているため, 最大洗掘深が過小評価となっている。

図-7にCase16～21の越流後の地形を, 図-8にCase16～21における基礎工直近での洗掘深と越流水深の関係を示す。

図-7のように最大洗掘深及び基礎工直近における洗掘深は, 越流水深0.5m (Case16, 19)を除いて, 大規模実験 (Case20, 21)の方が大きい結果となった。大規模実験の越流水深2mの場合は, 水路床まで洗掘されているため, 最大洗掘深は過小評価となっている。

図-8 越流水深と基礎工直近の洗掘深との関係（寸法は現地換算値）

図-8のように越流水深が大きくなると大規模実験と小規模実験における基礎工直近での洗掘深の差が大きくなり、越流水深1mの時の差16cmに対し、越流水深2mの時の差は56cmと3.5倍となった。この結果は、小規模実験および大規模実験の両方とも堤防陸側の移動床は平均粒径0.3mmの同粒径の砂を用いており、平均粒径を現地スケールに換算すると小規模実験は7.5mm、大規模実験は0.6mmとなることから、現地スケールでの粒径の違いが影響しているためである。

基礎工周辺地盤に埋め込んだ加速度センサーの測定結果を元に作成したCase21の地盤面の時間変化を図-9に、電波流速計で計測した裏法尻付近の流速を図-10に示す。図-9の加速度センサーの横に記載している数字は、加速度センサーが越流開始から流出するまでの時間を表している。図-9より越流開始から80秒までは地盤面の時間変化が速く、80秒以降は変化が比較的緩やかになっている。

図-9 洗掘の進行状況 (Case21, 寸法・時間は現地換算値)

図-10 裏法尻における流速 (Case21, 数字は現地換算値)

これは、図-10に示すとおり越流開始から76秒後のウォータークッション形成時に、裏法尻の流速が小さくなったことにより洗掘の進行が低減されたためである。ウォータークッションとは、洗掘が発達し水深が大きくなったことにより、基礎工陸側で越流水が射流で走る区間が消失する現象である。

4. 裏法尻保護工効果確認実験の結果

保護工内および保護工周辺地盤に埋め込んだ加速度センサーの結果を元に作成した地盤面の時間変化を図-11 (Case25)、図-12 (Case26)、図-13 (Case27) に示す。

Case25では、図-11のように越流開始から60秒後までに保護工を覆っていた砂が流出し、その後は保護工先の周辺地盤が鉛直下方に徐々に洗掘され、一番陸側寄りの保護工が越流開始から55秒後に、陸側から2番目の保護工は62秒後に、3番目は61秒後に動いた。保護工が動いた時の地盤を図-11に破線で示す。結果として保護工が側壁に挟まり数10cm程度しか移動しなかったため、保

図-11 洗掘の進行状況 (Case25, 寸法・時間は現地換算値)

図-12 洗掘の進行状況 (Case26, 寸法・時間は現地換算値)

図-13 洗掘の進行状況 (Case27, 寸法・時間は現地換算値)

写真-3 越流後の堤防陸側の状況 (Case26, 実験水路上面から撮影)

写真-4 越流後のアスファルト舗装の状況 (Case27, 実験水路上面から撮影)

護工下面の洗掘が抑えられた。

Case26では、図-12のようにCase25と同様の洗掘過程を経て、保護工中央下面の加速度センサーNo.6は越流開始から109秒後に、保護工は115秒後に流出した。保護工流出時の地盤を図-12に破線で示す。保護工周辺地盤の洗掘および保護工の隙間からの吸い出しにより保護工が変形し、流体力が大きく作用する面が増加したことが保護工流出につながった。越流後の堤防陸側の状況を写真-3に示すが、保護工は連結されたまま2m以上移動している。Case25と比べると、フィルター層の割栗石により吸い出しが抑制され、保護工流出の開始時間が遅くなったと考えられる。

Case27では、図-13のようにアスファルト舗装から1m以上離れた陸側から洗掘が始まり、時間が経過するにつれ洗掘範囲が徐々にアスファルト舗装に近づいてきている。結果としてアスファルト舗装は残存したが、これは水路側壁とアスファルト舗装が密着していたためであり、このような現象は実験特有のものである。水密性の高い保護工であれば堤体土の吸い出しによる保護工の変形が生じないとともに、越流水をしっかりと跳ねることが可能となり、実験上堤防本体まで洗掘が及ばないことが

わかった。越流後のアスファルト舗装の状況を写真-4に示す。

Case21および25～27の越流後の地形を図-14に示す。保護工を敷設したCase25～27の基礎工直近の洗掘深は、保護工を敷設しないCase21の洗掘深と比較して小さくなり、保護工敷設により基礎工直近の洗掘深が低減されることがわかった。

5. 結論

本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- (1) 裏法の緩勾配化および比高を小さくすることにより堤防陸側での最大洗掘深がやや低減される。
- (2) 裏法尻に設置された保護工は、周辺地盤の洗掘および保護工の隙間からの吸い出しにより変形し、流体力が大きく作用する面が増加すると保護工が流出する可能性が高まる。フィルター層の割栗石は、保護工の隙間からの吸い出しを若干抑制できる。
- (3) ウォータークッション形成時に越流水の流速が小さくなり、洗掘の進行が低減される。
- (4) 水密性の高い保護工で越流水をしっかりと跳ねることにより、最大洗掘深が低減されるとともに、洗掘を堤防本体から遠ざけられる。ただし、水密性を高めると保護工に揚圧力が働き安定性が低下する可能性があり、今後の検討が必要である。

参考文献

- 海岸における津波対策検討委員会 (2011)：平成23年東北地方太平洋沖地震及び津波により被災した海岸堤防等の復旧に関する基本的な考え方, http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/kaigantsunamitaisaku/kangaekata/kangaekata111116.pdf, 参照2011-11-16.
- 西村仁嗣・堀川清司 (1979)：遡上津波の戻り流れによる護岸法先の洗掘, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 210-214.
- 野口賢二・佐藤慎司・田中茂信 (1997)：津波遡上による護岸越波および前面洗掘の大規模模型実験, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 296-300.

図-14 越流後の地形 (大規模実験, 寸法は現地換算値)