津波の越流に対する海岸堤防の対策法の有効性に関する数値解析

Numerical Analysis of Effectiveness of Countermeasures for Coastal Dikes against Tsunami Overflow

中村友昭¹・根笹裕太²・水谷法美³

Tomoaki NAKAMURA, Yuta NEZASA and Norimi MIZUTANI

The effectiveness of countermeasures to improve the tenacity of coastal dikes against tsunami overflow is investigated numerically in terms of local scouring at its landward toe and wave force acting on armor blocks. Numerical results show that protection blocks and filter units covering the foundation around the landward toe of the dike move the scouring area landward and reduce its maximum depth, suggesting that these countermeasures would be effective to extend the time before beginning the damage of the body of the dike. It is also revealed that air vents created at the armor blocks reduce an increase in air pressure inside the dike, improving the stability of the armor blocks. Furthermore, it is found that there is no effect of a sheet pile against liquefaction during an earthquake on the local scouring and wave force.

1. 緒言

津波に対する海岸保全施設の被害を軽減するためには、設計対象の津波高を超えた場合でも、その効果を粘り強く発揮できる構造が不可欠である。三面張構造の海岸堤防の場合、小竹・磯部（2012）は法肩に生じる圧力低下の観点から被覆工の安定性に対する裏法の緩勾配化の有効性を示している。鳩貝ら（2012）は、裏法の緩勾配化は最大洗掘深の低減の観点からも有効であること、比高を小さくする対策にも最大洗掘深を抑える効果があることを確認している。また、裏法尻に保護工を敷設することには、最大洗掘深の低減に加えて、洗掘の発生範囲を堤体から離す効果があることを示している。以上に加えて、洗掘に対する裏法面一体型基礎工と地盤改良を組み合わせた裏法尻の保護の有効性（国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部，2012）や、その施工用地が確保できない場合、基礎工に矢板を取り付けることで洗掘発生後の基礎工の移動が抑えられること（加藤ら，2013）が確認されている。このように粘り強さの効果の検証が行われてきたものの、粘り強さを発揮するメカニズムに対する検討は十分とは言えない。

本研究では、洗掘対策として保護工とフィルターユニット（以下、FUと略す）、被覆工への作用力低減対策として空気孔、地震によるせん断変形抑制対策として堤体内部の矢板に着目する。そして、津波の越流による海岸堤防周辺の洗掘現象を対象とした水理実験との比較により数値計算モデル（中村・水谷，2013）の再現性が確認されていることから（中村ら，2014）、その計算モデル

と計算条件を用いて対策実施後を想定した数値実験を行い、各対策法の有効性とそのメカニズムを検討する。

2. 計算条件

本研究では、移動床の間隙内部の流体を含む非圧縮性粘性流体からなる全気液相の流体運動を地形の変化を考慮して解析するメインソルバー、気液界面を追跡するVOF法に基づくモジュール、掃流砂・浮遊砂輸送による地形変化の計算と浮遊砂濃度分布の解析を行うモジュール等から構成される流体・地形変化間の相互作用を解析できる数値計算モデル（中村・水谷，2013）を、縮尺1/100を想定した中村ら（2014）の水理実験をモデル化した図-1と図-2に示す計算領域に適用して解析を行った。

図-1に示すように、計算領域内に1/20勾配斜面、1/50勾配斜面、水平床からなる不透過海底床を設定し、水平床の沖側端に設けた掘り込み（長さ1.0 m、深さ0.22 m）内に中央粒径 $d_{50} = 0.17$ mmの移動床を敷き詰めた。そして、図-2に示すように、厚さ10 mmの不透過材料で被覆された海岸堤防（天端幅0.06 m、高さ0.08 m、表法勾配2割、裏法勾配2割、中詰材0.17 mm）を設置した。静水深は水平床の表面と静水面が一致する0.76 mとし、津波をモデル化した造波波高0.115 m、周期37.0 sの引き波初動の長周期波1波を作用させた。以上の条件に対して、図-1と図-2に示すW1、W6、W3の位置での水位変動と、津波作用後の裏法尻での地形変化の観点から、水理実験結果との比較によりモデルの再現性が確認されている。その詳細

図-1 実験装置の概略図と水位計測位置(W1, W6, W3)

1 正会員	博(工)	名古屋大学准教授	大学院工学研究科社会基盤工学専攻
2 正会員	修(工)	東邦ガス株式会社	供給管理部
3 フェロー	工博	名古屋大学教授	大学院工学研究科社会基盤工学専攻

図-2 海岸堤防の概略図

図-5 被覆工の区分け

を含め、計算格子、境界条件、パラメータについては、中村ら（2014）を参照されたい。

図-3に対策実施後を想定した海岸堤防の概略図を示す。洗掘対策として、保護工を想定し裏法尻から長さ0.20 mの移動床を被覆と同じ厚さ10 mmの不透過材料で置換した図-3(a)のケースと、出来形の直径が1.9 m、高さが0.4 m、中詰材の中央粒径が100 mmの2 t型FUを約10列3～4層を想定し長さ0.20 m、深さ15 mmの移動床を $d_{50} = 10$ mmの材料に置換した図-3(b)のケースを対象とした。また、被覆工への作用力低減対策として天端と腰掛け部に幅10 mmの空気孔を設けた図-3(c)のケースと、地震によるせん断変形抑制対策として堤体の内部に矢板を想定した厚さ10 mmの逆U字型の不透過材料を埋め込んだ図-3(d)のケースも対象とした。そして、上述した図-2の未対策時を含めて、計5ケースの計算を行った。なお、FUの中詰材は袋詰めされた状態であることから、FUを構成する $d_{50} = 10$ mmの材料は固定床、すなわち漂砂は生じないものとした。また、洗掘に伴うFUの移動やFUを通じての移動床の吸い出しは生じないものと仮定した。

3. 計算結果および考察

(1) 洗掘対策としての保護工の効果

a) 洗掘への影響

保護工の有無による津波作用後の地形の比較を図-4に示す。同図より、保護工未設置時には裏法尻に洗掘が生じていることが分かる。その一方で、鳩貝ら（2012）と同様に、保護工の設置により、洗掘の発生範囲が岸側にずれ、その最大深さも小さく抑えられていることが確認できる。そのため、保護工には堤防本体が被災するまでの時間を延ばす効果があると示唆される。

b) 被覆工への作用力

被覆工を図-5に示すように表法8箇所（ $S_a \sim S_h$ ）、天端3箇所（ $H_a \sim H_c$ ）、裏法の腰掛け部（ H_d ）、腰掛け部を除く

図-3 対策工の概略図

図-4 保護工の有無による津波作用後の地形の比較

裏法8箇所（ $S_i \sim S_p$ ）の計20箇所に分けし、各箇所には作用する単位長さ、単位奥行き当たりの岸向きを正とする水平力 F_h と上向きを正とする鉛直力 F_v に着目する。

水平力 F_h と鉛直力 F_v の時間変化に関して、未対策時を図-6に、保護工設置時を図-7に示す。

表法では、図-6(a)と図-7(a)より、保護工の有無に関わらず、天端に近づくほど F_h は小さく、 F_v は大きくなる傾向が確認できる。ただし、保護工を設置することで、表法尻の S_d を除いて、 F_h はより小さく、 F_v はより大きくなっている。これは、津波越流時の圧力変動 P の分布の比較を例示した図-8より、保護工の設置により堤体内部の空気圧の増加が大きくなったためと考えられる。

同様の理由で、天端や腰掛け部では、図-6(b)と図-7(b)より、保護工を設置することで F_v が大きくなる傾向が確認できる。

また、裏法でも、図-6(c)と図-7(c)に示すように、裏法尻の S_p を除いて、保護工を設置した方が F_h や F_v が大きくなっている。ただし、堤体を越流した流れの剥離により裏法肩周辺の圧力が低下する現象は保護工の有無の影響を受けなかったことから（図-8参照）、天端において裏法肩の近くの H_c に作用する F_v が他と比べて大きくなる傾向や、裏法において裏法肩や腰掛け部に近づくほど F_h や F_v が大きくなる傾向は変わらないことが分かる。

なお、図-8に示すように保護工の下部の圧力も上昇していることから、鳩貝ら（2012）が指摘しているように、保護工にも上向きの力が作用していたことを確認している。

以上を踏まえて、2 tブロック（縮尺1/100にて寸法13.2

(a) 表法 ($S_a \sim S_h$) (b) 天端 ($H_a \sim H_c$) および腰掛け部 (H_d) (c) 裏法 ($S_i \sim S_p$)

図-6 未対策時の被覆工への作用力

(a) 表法 ($S_a \sim S_h$) (b) 天端 ($H_a \sim H_c$) および腰掛け部 (H_d) (c) 裏法 ($S_i \sim S_p$)

図-7 保護工設置時の被覆工への作用力

(a) 未対策時

(b) 保護工設置時

図-8 津波越流時の圧力変動Pの分布の比較

×13.2×0.5 mm, 重量2 g) が腰掛け部のすぐ下の S_m の位置に設置された状況を想定して、そのブロックに作用する接線方向の力 F_t と最大静止摩擦力 F_f を算出した。図-9に、ブロックと中詰材の静止摩擦係数を0.6としたとき、保護工の有無による F_t と F_f の時間変化の比較を示す。

図-9より、津波の作用に伴い F_t が増加するとともに、 F_f が大幅に低下していることが分かる。このとき、保護工未設置時には F_t が F_f を上回る現象はみられないものの、保護工を設置することで F_t と F_f の差が小さくなっている。特に、42 s から 48 s にかけて F_t が F_f を若干上回っており、被覆工流出の危険性が示唆される。

(2) 洗掘対策としてのFUの効果

a) 洗掘への影響

FUの有無による津波作用後の地形の比較を図-10に示す。同図より、図-4に示した保護工設置時と同様に、洗掘の発生範囲を堤体本体から離し、その最大深さも低減

させる効果があることが分かる。特に、洗掘の最大深さは保護工設置時よりも小さく抑えられており、洗掘の防止効果はFUの方が高いと言える。

b) 被覆工への作用力

被覆工の各箇所に作用する単位長さ、単位奥行き当たりの水平力 F_h と鉛直力 F_v に関して、FU設置時の時間変化を図-11に示す。同図を図-6と比較すると、図-7に示した保護工設置時と同様に、FUを設置することで、表法では F_h の減少と F_v の増加、天端や腰掛け部では F_v の増加、裏法では F_h と F_v の増加が生じる傾向が確認できる。

そこで、2ブロックが腰掛け部のすぐ下の S_m の位置に設置されている状況を想定したとき、そのブロックに作用する接線方向の力 F_t と最大静止摩擦力 F_f の時間変化を図-12に示す。同図より、 F_t と F_f の差は図-9(a) に示した未対策時と比較して小さくなっているものの、図-9(b) に示した保護工設置時のように F_t が F_f を上回ることはな

図-9 腰掛け部のすぐ下 S_m の被覆ブロックに作用する接線方向の力 F_t と最大静止摩擦力 F_f の比較

図-11 FU設置時の被覆工への作用力

く、被覆工の安定性に与える影響は保護工よりも小さいことが示唆される。

(3) 被覆工への作用力低減対策として空気孔の効果

図-13に、被覆工に空気孔を設けたときの F_h と F_v の時間変化を示す。同図と図-6の比較より、表法では、 F_h が増加、 F_v が減少し、力の作用方向が岸向きや下向きに変化したことが分かる。また、裏法では、裏法尻の S_p での変化は認められないものの、 F_h と F_v がともに減少し、岸向きや上向きに作用する力が低減できている。これは、津波越流時の圧力変動 P の分布の比較を例示した図-14より、堤体内部に生じる空気圧の上昇が図-8(a)の未対策時と比較して抑えられたためであると考えられる。以上の傾向は、2 tブロックが腰掛け部のすぐ下の S_m の位置に

図-10 FUの有無による津波作用後の地形の比較

図-12 FU設置時に腰掛け部のすぐ下 S_m の被覆ブロックに作用する接線方向の力 F_t と最大静止摩擦力 F_f

図-13 空気孔設置時の被覆工への作用力

設置されている状況を想定したとき、そのブロックに作用する接線方向の力 F_t と最大静止摩擦力 F_f の時間変化を示した図-15からも確認できる。

その一方で、空気孔の有無による津波作用後の地形の

図-14 津波越流時の圧力変動 P の分布の比較(空気孔設置時) 図-15 空気孔設置時に腰掛け部のすぐ下 S_m の被覆ブロックに作用する接線方向の力 F_f と最大静止摩擦力 F_f

比較を示した図-16より、堤体の岸側に生じる洗掘が若干浅くなっているものの、空気孔が洗掘に与える影響は小さいことが分かる。

(4) 地震によるせん断変形抑制対策としての矢板の効果

矢板設置時の裏法の被覆工に作用する F_h と F_v の時間変化を図-17に例示する。同図と図-6(c)の比較より、堤体内部への矢板の設置による顕著な差は認められないことが分かる。また、図示しないが、矢板の設置が津波作用後の地形に与える影響は小さいことを確認している。

4. 結論

本研究では、津波越流時の海岸堤防を対象に、洗掘対策としての保護工とFU、被覆工への作用力低減対策としての空気孔、地震によるせん断変形抑制対策としての堤体内部の矢板の有効性を数値解析により検討した。その結果、得られた主要な結論を以下にまとめる。

- (1) 保護工の設置には、洗掘の発生範囲を堤体本体から離し、その最大深さも低減させる効果が確認でき、洗掘対策としての保護工の有効性を示した。その一方で、保護工を設置することで被覆工の安定性を低下させる危険性もあることが明らかとなった。
- (2) FUの洗掘防止効果は保護工よりも高く、洗掘対策としてのFUの有効性が明らかとなった。また、FUの設置が被覆工の安定性に与える悪影響は保護工の設置と比較して小さいことが確認できた。ただし、洗掘に伴うFUの移動やFUを通じての移動床の吸い出しは考慮していないことから、今後はそれらを考慮した検討が望まれる。
- (3) 被覆工への空気孔の設置には、堤体内部の空気圧の

図-16 空気孔の有無による津波作用後の地形の比較

図-17 矢板設置時の裏法被覆工($S_i \sim S_p$)への作用力

上昇を抑制し、被覆工を安定化させる効果が確認でき、被覆工への作用力低減対策としての空気孔の有効性を示した。

- (4) 堤体内部への矢板の設置が洗掘や被覆工への作用力に与える影響は小さく、洗掘対策や被覆工への作用力低減対策としての有効性は確認できなかった。

以上の効果は、水理実験との比較により再現性が検証されている条件において確認されたものである。したがって、今後は他の条件に対しても水理実験との比較により再現性の検証を行った上で、各対策法の有効性を幅広い条件に対して確認することが望まれる。

最後になるが、本研究は平成25年度河川砂防技術研究開発(海岸技術分野)(研究代表者:水谷法美)の補助を受けたことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部 (2012): 粘り強く効果を発揮する海岸堤防の構造検討 (第2報), 国総研技術速報, No. 3, 21 p.
- 加藤史訓・鳩貝 聡・諏訪義雄 (2013): 津波の越流に対するコンクリート平張り海岸堤防の粘り強い構造, 土木学会論文集B3 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I_1021-I_1025.
- 小竹康夫・磯部雅彦 (2012): 津波の越流時に海岸堤防の法面に作用する圧力特性に関する実験的研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_891-I_895.
- 鳩貝 聡・諏訪義雄・加藤史訓 (2012): 津波の越流による海岸堤防の裏法底の洗掘に関する水理模型実験, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I_406-I_410.
- 中村友昭・根笹裕太・小竹康夫・水谷法美 (2014): 海岸堤防を越流する津波による洗掘の発生機構と被覆工の安定性に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp. I_501-I_505.
- 中村友昭・水谷法美 (2013): 地形変化の影響を考慮した地盤解析手法の開発とその適用, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I_1026-I_1030.