津波越流に対する曲線形海岸堤防の粘り強さに関する数値解析

石河 雅典¹・上月 康則²・山中 亮一³・大久保 陽介⁴

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) 中国水工室 (〒730-0051広島市中区大手町2丁目1番1号)

E-mail: masanori.ishikawa@os.pacific.co.jp

²正会員 徳島大学教授 大学院ソシオテクノサイエンス研究部 (〒770-8506徳島県徳島市南常三島2-1)

E-mail: kozuki@eco.tokushima-u.ac.jp

³正会員 徳島大学講師 大学院ソシオテクノサイエンス研究部 (〒770-8506徳島県徳島市南常三島2-1)

E-mail: ryoichi.yamanaka@tokushima-u.ac.jp

⁴正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) 港湾部 (〒206-8550東京都多摩市関戸一丁目7番地5)

E-mail: yousuke.ookubo@os.pacific.co.jp

2011年3月11日の東日本大震災において、海岸堤防は大きく被災し、その原因は堤防の裏法尻の洗掘を始めとする裏法側での破壊であることが多く指摘されている。著者らは、津波に対する堤防の粘り強さを検討する上で、越流水をできる限りスムーズに陸側へ流すことや越流水の到達点を堤防よりできる限り陸側へずらすことが有効であると考えた。そこで、数値波動水槽(CADMAS-SURF/3D)を用いた数値解析により、構造諸元の違いによる裏法面への津波作用外力の違いを明らかにし、堤防の「粘り強さ」の発生メカニズムと設計上の留意点について考察した。

その結果、海岸堤防裏法尻部の洗掘抑制には、裏法面の緩勾配化の他、裏法肩及び法尻部に曲線形を採用することが有効であることを確認した。

Key Words : coastal dike, streamline, tsunami overflow, robustness, numerical analysis

1. はじめに

先の東日本大震災では、堤防を津波が越流し、裏法尻部が洗掘され、破堤に至ったという被害が多数みられた(石河ら¹⁾)。また、田老町の巨大堤防は一部被災したものの、全壊を免れたために、津波の到達地点と越流水深が制御されたと考えられる。このように堤防が“粘り強く”残存されれば、背後地への津波到達の遅延、越流水深の減衰効果、さらに台風などの複合災害に対しても、ある一定の防災機能が作用することが期待されている。

“粘り強い”堤防については、裏法勾配の緩傾斜化や裏法尻部に矢板を打設することによって裏法尻の洗掘を防止する等の研究が報告されている(加藤ら²⁾)。また、防波堤については、粘り強い構造について、上部工の形状の工夫によって基礎マウンド洗掘を防ぐといった研究が報告されている³⁾。今後はさらに、堤防形状と津波越流に伴う作用外力の関連性を解明し、粘り強い構造上の工夫について検討する必要がある。

これまで、筆者らは海岸堤防の形状と“粘り強さ”の関連について検討を行ってきた(石河ら⁴⁾)。本研究

では、これまで得た知見を発展させ、曲線形を含む形状の堤防を提案し、数値解析で評価した。特に、津波越流時の裏法尻部への作用外力に着目して、裏法面の形状の違いによる空間的分布を明らかにし、堤防の「粘り強さ」の発生メカニズムについて考察を行った。

2. 数値解析

(1) 数値解析手法及び計算条件

数値モデルは、津波への適用事例(松山ら⁵⁾)を考慮し、断面2次元の流体解析モデル数値波動水路(CADMAS-SURF)((財)沿岸開発研究センター)を基に、VOF法による自由表面の解析精度を向上させた数値波動水槽(CADMAS-SURF/3D)((財)沿岸開発研究センター)(以下、C-S/3Dと略記する)を用いることとした。計算領域は、図-1に示すとおり、堤防法線から沖へ6 km地点から堤防背後500 mまでをモデル化した海岸地形である。海底勾配については一般的な勾配として1/100勾配と設定した。C-S/3Dにおける計算条件は、表-1に示すとおりである。

図-1 計算領域図

表-1 数値波動水槽の計算条件

項目		設定値
時間制御	時間ステップ Δt (s)	AUTO
	計算時間(s)	1100
物性値	初期水面の高さ	0
	密度(kg/m ³)	1.0D+3
	分子動粘性係数(m ² /s)	1.0D-6
	重力加速度 g (m/s ²)	9.8
モデル等	造波モデル	造波ソース
	水深(m)	30
	波高(m)	5.3
	周期(s)	858
	開境界	造波側放射境界
	減衰領域	造波側に設定
数値解法	VP-DONOR	0.8
	M-ILUBCGSTAB	0.95
	最大反復回数	500
	収束判定値(絶対誤差)	1.0D-12
	収束判定値(相対誤差)	1.0D-10
格子	Δx (m)	0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0~
	Δy (m)	1.0
	Δz (m)	0.2, 0.5, 1.0
ポララス	ポララスリミット	0.1
境界条件	流速・圧力	SLIP
	VOF	FREE
オプション	気泡の上昇速度(m/s)	0.2
	水滴の落下速度(m/s)	自由落下
	表面セルの流速	勾配ゼロ

計算格子間隔としては、堤防周辺が細かい格子間隔となるように設定した。

解析に用いる津波波形は、今次津波において津波被害の大きかった東北地方沖合にある岩手南部沖GPS波浪計が捉えた波形を基に、平面津波計算で再現計算を行った押波時の結果より、図-2の通りとした。

本研究における検討ケースとしては、表法勾配を1:1.5とし、裏法勾配について通常の法勾配1:1.5に加え、鳩貝ら⁹⁾の研究より、裏法勾配を緩傾斜化することで裏法尻の洗掘が低減されることとしていることから緩勾配として1:4とした。

裏法尻での洗掘対策として、加藤ら²⁾は、裏法尻での越流水の流向を鉛直から水平にすることが有効であるとしている。また竹・磯部⁷⁾は、堤防を越流する流れが、

天端面から裏法勾配に沿った曲線状の流線を描いて裏法面に向けて落下していくことで、それにより裏法肩付近に遠心力が作用し、上向きの圧力が作用することを水理模型実験により確認し、それらが堤防被災の要因の一つとしている。

筆者らは、これらの研究より、堤防を粘り強くするための方策として、裏法尻部での断面変化を小さくして、越流時の流線の曲率半径をできる限り大きくし、越流水の流向をスムーズに水平方向にすることができる構造上の工夫が有効であると考えた。そこで、津波越流時に発生する裏法肩付近の「曲線状の流線」に着目し、越流する津波をスムーズに水平方向に変換する方策として、緩勾配化の他に、裏法肩及び法尻部に半円状の曲線形を採用することを考えた。特に裏法肩部の形状によって、越流時の曲線状の流線形状が変化すると考え、裏法面の midpoint を切る曲線（曲線形1）と裏法面上で法肩から法尻の2/3の地点を切る曲線（曲線形2）のケースも併せて、表-2に示す計4ケースの検討を行った。検討断面を図-3に示す。

天端部のパラペットについては、石河ら⁴⁾は、一般的な堤防断面として多く採用されている表法勾配及び裏法勾配が1:1.5で天端幅3mを基本に、法勾配を変化させた場合とパラペットの有無の検討をC-S/3Dにより行っており、パラペットが無く表法が緩傾斜の場合の方が越流水深が小さく、裏法尻の洗掘を抑制できる可能性を示唆していることから、無しとした。

表-2 検討ケース一覧

検討 Case	表法勾配	裏法勾配
Case1	1.5	1.5
Case2	1.5	4
Case3	1.5	曲線形 1
Case4	1.5	曲線形 2

図-2 解析に用いる津波波形

図-3 解析に用いる堤防断面

(2) 解析結果

図-4 は、堤防に作用する津波最大波圧分布を示す。x 軸は堤防法線からの距離 x を天端から裏法尻までの距離 Xbs で無次元化したものであり、y 軸は波圧について作用波圧 Po を全ての検討ケースでの最大波圧 Pom (Case3) との比で無次元化したものを示す。Case2 の裏法勾配が 1:4 の場合に注目すると、他のケースと比べて全体的に作用波圧は小さく、裏法尻付近で若干大きくなるものの、天端から裏法面及びピーク後の陸側部においては緩やかな減少傾向を示している。これは、津波越流による局所的な流動構造の変化が生じなかったためであると判断される。また、 X/Xbs が 1.5 以上の堤防通過後の陸上部では、堤防形状に関係なく、どのケースもほぼ同じ程度の波圧が作用していることがわかる。一方、裏法勾配が 1:1.5 である Case1, 3, 4 を見ると、グラフの形状が似ているが、裏法面に曲線形を用いた Case3, 4 の方が、裏法勾配が直線形である Case1 と比べて作用波圧の変動が大きい。裏法肩部では、曲線形を用いた方が上向きに作用する圧力が大きくなっているものの、Case4 で

図-4 解析結果 (作用波圧比)

図-5 解析結果 (作用流速 (水平))

は作用波圧のピークを裏法尻よりやや陸側に移動させることができている、裏法尻部での波圧は、Case1, 3 と比べて小さくなっている。

図-5には、最大越流時における堤防に作用する津波越流流速のうち水平成分の作用状況を示す。x軸は図-4と同様、堤防法線からの距離 x を天端から裏法尻までの距離 Xbs で無次元化したものである。Case2では、流速は天端から裏法面にかけて水平流速が増加し、裏法尻部で一旦減少して、再び陸側部に向けて増加するが、他のケースと比べ、その変動幅は小さい。この結果からも、裏法勾配が緩傾斜の場合には、津波は局所的な流動構造の変化を生じずに堤防を通過していることが推察できる。また陸側での水平流速は、どのケースもほぼ同じであり、堤防形状には関係ないことが分かる。Case1を見ると、流速は天端面では増加し裏法面で減少して裏法尻部で下限値となり、陸側に向けて増加している。変動幅を見ると、Case2に比べ大きい。Case3, 4を見ると、両者とも同じような傾向を示しており、裏法尻部付近でマイナスの流速となっていることがわかる。これは越流水が、法尻部で局所的に陸側から海側向きの流れとなっていることを示している。

図-6には、最大越流時における堤防に作用する津波越流流速のうち鉛直成分の作用状況を示す。堤防法線からの距離 x を天端から裏法尻までの距離 Xbs で無次元化し

図-7 解析結果（作用流速比）

たものである。y軸のプラス側が上向きを表し、マイナス側が下向きの流速を表している。Case1では、裏法尻部に着目すると、鉛直方向の流速が若干大きくなっており、検討ケースの中で最も洗掘されやすい構造であると言える。Case2の裏法勾配が緩傾斜の場合は、他の解析結果と同様に変動幅が小さいことが分かる。またCase3, 4を見ると、裏法尻部付近で上向きの流速となっており、図-5の水平流速での陸側から海側の流れと合わせて考えると、裏法尻部付近で時計回りの渦を形成していることを示唆している。このような渦の形成は、裏法尻部での洗掘の抑制効果が期待でき、粘り強い構造を考える上で重要な知見であると言える。図-7には、最大越流時における堤防に作用する津波流速分布を示す。x軸は堤防法線からの距離 x を天端から裏法尻までの距離 X_{bs} で無次元化したものであり、y軸は流速について作用流速 v_0 を最大流速 v_{om} との比で無次元化したものを示す。流速の傾向としては、図-5の水平成分に似ており、Case3, 4の曲線形においては、裏法尻部での流速がかなり抑制されていることが確認できる。

次に図-8には、堤防法線上で越流深が最大となる時点での津波波圧の空間分布を示す。Case2を見ると、小竹・磯部⁷⁾が指摘している裏法肩部での曲線をなす流れがほとんど発生しておらず、曲率半径も大きく、津波が海側から滑らかに乗り越えている現象が確認できる。ま

図-8 C-S3D 計算結果（津波波圧空間分布）

た裏法尻部での流れを見ても、滑らかな曲線をなしており、裏法尻部での波圧が最も小さくなっていると考えられる。Case1, 3, 4を比較すると、裏法尻部での上向きの波圧が作用している状況は同じであるが、その値は曲線形を採用した方がやや大きくなっており、流れの曲率半径が小さい（表-3参照）。裏法尻部に着目すると、曲線形を用いた方が、津波が急速に流れ落ちる形となっており、越流到達点に見られる下向きに凸型の流れの曲率半径が、他のケースに比べて小さいことが分かる。また越流到達点での波圧強度分布をみると、曲線形を用いた方が波圧強度はやや大きくなっている。ただしその現象は、裏法尻から陸側にずれたところで見られており、波圧のピークを陸側へずらすことができていることが分

かる。本研究では、裏法面に曲線形を採用することで、津波が堤防を滑らかに越流し、被災の原因となる裏法尻の洗掘を抑制させることを考えたが、裏法肩部の上向きの作用圧力及び裏法尻部の作用波力の低減効果は期待できないことが分かった。一方、防波堤を対象に上部工の形状を工夫することで、津波越流の到達位置を防波堤の背後から遠くし基礎マウンドの洗掘が抑制できると指摘されており³⁾、本研究での曲線形は、越流到達地点を裏法尻位置より陸側に遠ざけることができている点では、洗掘抑制効果が期待できると言える。

表-3 曲率半径一覧

検討 Case	裏法肩部(m)	裏法尻部(m)
Case1	2.5	9.1
Case2	3.0	18.4
Case3	2.3	8.3
Case4	2.2	7.8

図-9 は、図-8 と同じ時刻の津波流速の空間分布を示す。Case2 では、越流水は裏法面上に沿って流れており、流速が徐々に増加する状況（斜流）が分かる。Case1, 3, 4 では、裏法肩を越えて流れ落ちると状況であり、法尻部で急激に速度が大きくなっている。また同ケースでは、裏法肩部において局所的に流速が大きくなっており、先の作用波力の結果と照らし合わせると、上向きの圧力発生の一因の一つであると考えられる。一方、Case3, 4 の堤防裏法尻部に着目すると、陸側と反対向きの流れが発生しており、時計回りの渦を形成している。これは、越流による着地点を、裏法尻から陸側へ遠ざけたことにより、到達点より海側では逆向きの流れが発生し、渦を形成することとなったものと推察される。この渦により、裏法尻部での洗掘抑制効果が期待できる。

今回解析した津波流速及び津波波圧について、裏法尻部での作用状況を表-4 にまとめた。

表-4 各構造形式ごとの裏法尻部における作用外力の比率

構造形式	作用流速		作用波圧
	水平方向	鉛直方向	
Case1(1:1.5)	1.00	1.00	1.00
Case2(1:4)	1.80	0.97	0.63
Case3(曲線形 1)	0.67	0.80	1.06
Case4(曲線形 2)	0.13	0.69	1.05

東日本大震災において、津波による堤防の被害は、越流による裏法尻の洗掘が原因の一つとされている。洗

掘を起こす要因としては、鳩貝ら⁹⁾の研究等では鉛直流速が大きいこととされている。表-4 を見ると、鉛直流速は裏法勾配が 1:1.5 の Case1 が最も大きくなっており、今回の検討ケースの中では裏法尻が最も洗掘されやすい構造であると言える。曲線形については、鉛直流速が小さく越流時に海側に流れが生じ、時計回りの渦を形成していることから、裏法尻が洗掘されにくいと思われるが、作用波圧は最も大きくなっており、その程度は東日本大震災で被災の多かった法勾配 1:1.5 (Case1) の波圧を上回ることから、波圧が作用する部分に何らかの補強を実施する必要があると考えられる。

図-9 C-S/3D 計算結果（津波流速空間分布）

4. 主要な結論

本研究により得られた結論は、以下のとおりである。

- (1) 裏法面を緩勾配とした場合、越流による洗掘の原因と考えられる鉛直方向の流速や、裏法尻部に作用する波圧を軽減できることから、粘り強い構造であると言える。
- (2) 裏法面を緩勾配とした場合、堤体において津波波圧の局所的な上昇がほとんど無く、通過していくことで堤体が残存する可能性が高い。
- (3) 裏法肩部及び裏法尻部に曲線形を採用する場合、裏法尻部に作用する流速は、相当低減できるが、作用波圧がやや大きくなり、また裏法肩部での上向きの圧力がやや大きくなる。
- (4) 曲線形の採用により、越流後の到達点を裏法尻よりも陸側にずらすことができ、戻り流れのような時計回りの渦を形成することができることで、洗掘抑制効果が期待できる。
- (5) 陸上部での津波越流流速は、堤防の形状に関係なくほぼ一定である。

津波に対する粘り強さは、越流水をできる限りスムーズに陸側へ流すことができることであると考え、断面構造を裏法面に緩勾配を用いる場合に加え、裏法肩及び法尻部に曲線形を用いてその効果を検証した。その結果、一定の効果は認められたが、作用波圧が大きくなるなど課題も確認された。裏法面緩勾配の採用については、堤防直背後に民家がある場合などには適用できないため、現況堤防幅での対応が必要となってくる。その場合、現況堤防に「粘り強い」機能を付加させる方策として、裏法尻の洗掘を抑制する目的として、法肩及び法尻部に曲線形状を用いること等の新たな断面形状を研究していくことは重要である。またこのように断面形状の工夫によ

り、洗掘されにくい堤防構造を検討していくことは、背後の土地利用に合わせて考えていく必要がある。

以上より、今回用いた津波波形に対して、堤防の「粘り強さ」の発生メカニズムと設計上の留意点については整理できたが、段波状の津波に関してはその適用性が確認できていない。堤防の「粘り強さ」を発現するメカニズムは、解明すべき点が多く残っていると認識している。今後は、今回得られた知見が様々な津波波形及び他の海岸堤防の構造形式に対する適用性について検証し、設計の現場において、実際に採用できる断面形状を追及していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 石河雅典・上月康則・山中亮一・大久保陽介：津波に対する緩傾斜堤の粘り強さのメカニズムに関する研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 68, No. 2, ppI_1336 - I_1340, 2012.
- 2) 加藤史訓・鳩貝 聡・諏訪義雄：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 B2 (海岸工学)，Vol. 69, No. 2, ppI_1021 - I_1025, 2013.
- 3) 国土交通省 港湾局：「防波堤の耐津波設計ガイドライン」(案)，2012.
- 4) 石河雅典・上月康則・山中亮一・大久保陽介：津波越流時の海岸堤防への作用外力と構造形式との関連性に関する数値的考察，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol. 69, No. 2, ppI_311 - I_316, 2013.
- 5) 松山昌史・橋 和正・榊山 勉・田中良仁・仲村治朗・須賀康雄：盛土を越流する津波に対する防波壁の効果に関する数値解析，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 67, No. 2, ppI_201 - I_205, 2011.
- 6) 鳩貝 聡・諏訪義雄・加藤史訓：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，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 68, No. 2, ppI_406 - I_410, 2012.
- 7) 小竹康夫・磯部雅彦：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, ppI_891 - I_895, 2012.

NUMERICAL ANALYSIS ON ROBUSTNESS OF STREAMLINED COASTAL DIKES IN THE TSUNAMI OVERFLOW

Masanori ISHIKAWA, Yasunori KOZUKI, Ryoichi YAMANAKA and
Yosuke OKUBO

Most of coastal structures, especially coastal dikes were destroyed by the 2011 Tohoku Tsunami. It was reported that one of the most important causes was the failure of back slope of dikes due to scouring. It is assumed that probability of leading tsunami overflow landward is effective to study robustness of coastal dikes toward the tsunami. In this study, a numerical model using CADMAS-SURF/3D has been applied to clarify the difference of tsunami external force toward back slope of dikes due to structure specification and to make suggestions for mechanism of robustness and design of coastal dikes. As a result, in order to restraint scouring at back slope of dikes, excepting method of moderating the back slope, streamline at top of inner slope and back slope were proposed.