

津波による越流洗掘を低減する 新しい堤防裏法面形状に関する考察

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) 大阪国土保全事業部 (〒530-0004大阪市北区堂島浜1-2-1)

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

²正会員 徳島大学教授 大学院理工学研究部 (〒770-8506徳島県徳島市南常三島2-1)

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

³正会員 徳島大学講師 大学院理工学研究部 (〒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 (〒101-8462東京都千代田区神田錦町三丁目22番地)

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面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、越流した際はできる限りスムーズに陸側へ流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、作用する津波高を変化させ、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、海岸堤防裏法面の洗掘抑制には、裏法面の緩勾配化の他、裏法肩及び法尻部に曲線形を用いた法尻陸側に落堀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. 緒論

東日本大震災以降、設計津波に対する堤防整備が各地で進められている。海岸堤防の粘り強さについては、加藤ら¹⁾は裏法面での越流水の流向を水平に変えることが法尻部での洗掘抑制に対して有効であることを指摘している。実際に、仙台湾南部海岸では堤防復旧工事において、陸側法留コンクリートの補強として法面勾配変化部と基礎とを一体構造化して、津波越流による鉛直流速に対する裏法尻部の弱点を補強する構造形式が採用されている。しかしこれらの断面は、法面勾配を1:2としており従来の一般的な勾配の1:1.5と比べると堤防幅を広くする必要があり、今後予防保全的に整備する海岸においては、背後の土地利用に支障を来す恐れも出てくる。

また常田ら²⁾は今次津波により堤防背後にできた落堀の津波抑制効果の可能性を指摘している。落堀の大きさについても、先の整備と同様に背後土地利用との調整が必要となるケースも考えられる。

一方2015年3月には、「Eco-DRRに関する仙台宣言」が出されるなど、生態系を基盤とした防災・減災

(Ecosystem-based Disaster Risk Reduction)の取り組みの重要性も高まってきている。

このように、堤防の粘り強さに対する工学的研究は進んできているが、防護と環境の両方に配慮した具体的な設計事例は、仙台湾南部海岸³⁾等での“堤体幅の広い堤防形式”以外では、今のところ例を見ない。そこで本研究では、堤防の粘り強さを“越流水の流向を水平方向に変換すること”とし、そのような作用が生じやすい裏法面形状を考案した。その裏法面形状については、今後予防保全的に耐津波整備を実施しようとする地域で現況堤防を改良することを念頭に置き、背後の土地利用に配慮して、裏法尻位置を現況と変えないこととした。特に背後に設けた「落堀」は堤防をより「粘り強く」させ、同時に平時はビオトープとしての活用も期待できる。

本論文では、まず物理面について津波越流時の裏法尻部への作用外力に着目し、津波外力を変化させた場合の裏法面形状の違いによる「粘り強さ」に係る効果について、数値解析をもとに考察を行った。

2. 数値解析

(1) 従来の堤防の弱点と粘り強さに係る課題

津波越流に伴う海岸堤防の被災メカニズムとしては、①裏法尻部の洗掘による破壊（例えば加藤ら⁴⁾）、②裏法肩付近に作用する負圧（例えば小竹ら⁵⁾）、③堤体内から被覆材に作用する浮力（例えば中尾ら⁶⁾）、に大別される。中でも特に重要と考えられる法尻洗掘に対しては、裏法勾配の緩傾斜化（例えば石河ら⁷⁾）、越流水の流向を水平に変える保護工の設置（加藤ら¹⁾）、堤防背後への植樹帯の設置（例えば五十嵐ら⁸⁾）、基礎部への矢板工の打設（例えば吉森ら⁹⁾）等の知見があるが、背後の土地利用への空間的圧迫や矢板を設置した場合の洗掘深の評価など、実現面での課題は残っている。

(2) 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（石河ら⁷⁾）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。

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-1**の通りとした。これは最大クラスのL2津波に相当するが、本検討では他にも発生頻度の高い津波 (L1津波) を超える津波に対する評価も実施した。具体的には、ピーク値をL2津波の0.8倍、0.6倍として解析を行った。なお計算条件は、石河ら⁷⁾と同じ条件とし、堤防法線から沖へ6km地点から津波波形を入射するものとした。

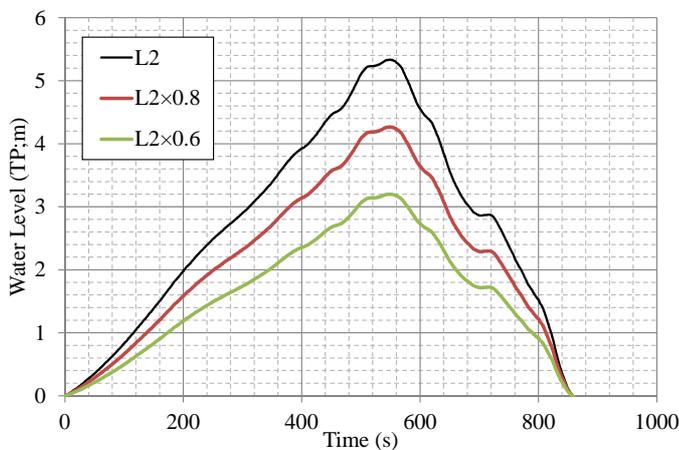


図-1 解析に用いる津波波形

本研究では、**表-1**に示す、Case1（表法勾配を海岸堤防として一般的に良く使われている1:1.5勾配）、Case2（裏法勾配を緩勾配1:4にした）、Case3（堤体幅を従来と変えずに裏法尻での越流水の流向を鉛直から水平にすることができるよう曲線形にした）、Case4（従来の排水溝の形状を工夫し、津波越流後にできていた落堀形状を小型化したケース）の計4ケースについて解析を行った。**図-2**には、各検討ケースの断面形状と解析で求める流速と圧力の出力位置を示す。

表-1 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
Case4	1.5	曲線形+落堀

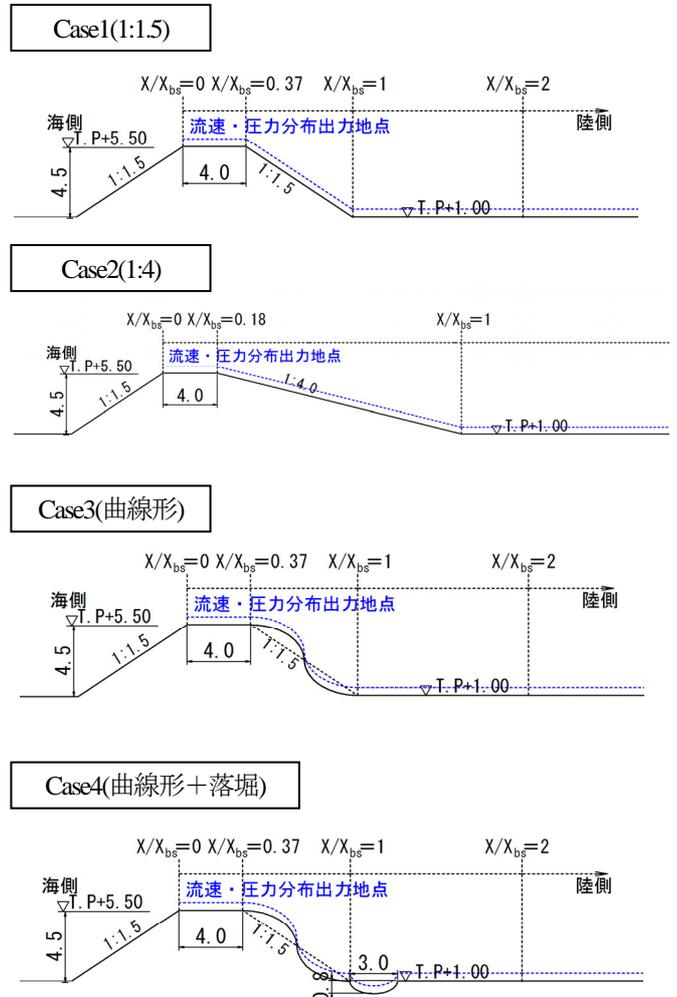


図-2 解析に用いる堤防断面 (単位 ; m)

(3) 解析結果

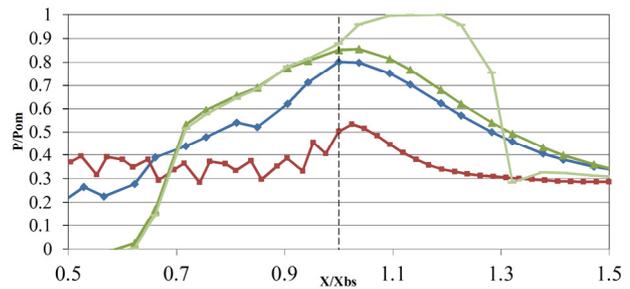
図-3は、堤防に作用する津波最大波圧分布を示す。x軸は堤防法線からの距離 x を天端から裏法尻までの距離 X/Xbs で無次元化したものであり、y軸は波圧について作用波圧 Po を全ての検討ケースでの最大波圧 Pom (Case4)との比で無次元化したものを示す。

津波高L2のケースで、Case 2(裏法勾配が1:4)に着目すると、他のケースと比べて裏法尻($X/Xbs=1.0$)より陸側では作用波圧は小さく、陸側に向かって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。 X/Xbs が1.5以上の陸側部では、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。またCase 4を見ると、裏法尻付近で落堀により波圧が増大し最大値を示していることが分かる。Bernoulliの定理を適用すると、波圧が増大した分、流速が落ちていることが期待できる。波圧の変動幅は、裏法面に形状の変化を持たせたCase 3とCase 4で、基準としたCase 1に比べて大きくなっている。

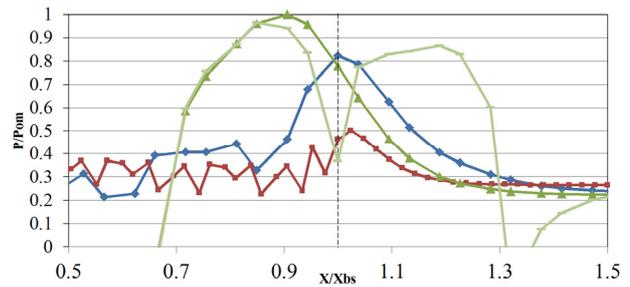
津波高を0.8倍と小さくしたケースを見ると、Case 1およびCase 2では津波高L2のケースと同様に、裏法尻部をピークに陸側に向かって減少しているが、曲線形を用いた場合にはそのピークが裏法尻よりも海側に移動している。またその値は図-3a)と同様にCase 1よりも大きくなっている。Case 4では落堀による波圧増大が見られるが、法尻部において局所的に波圧が減少している。

また、より津波高が小さいL2津波の0.6倍のケースでは、曲線形を用いた場合(Case 3, 4)には、全体的な傾向として波圧のピークをより海側へ移動させることができ、裏法尻部の波圧の低減効果も0.8倍の時と比べてより大きくなることが期待できる。またCase 3では、裏法尻から陸側にかけて、裏法を緩傾斜化したCase 2と同等の波圧の低減効果が期待できる。

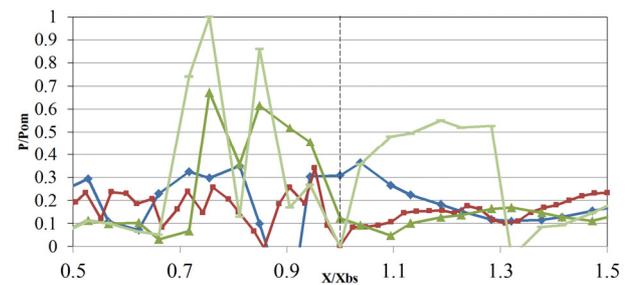
以上より、裏法面を緩勾配にすると、裏法尻部付近に作用する波圧を相当程度低減させることができると思われる。また裏法面に曲線形を用いることで、今次津波のような最大級の津波に対しては法面及び法尻部に作用する波圧を低減することはできないが、発生頻度の高い津波(L1津波)を超える津波、つまりL1津波以上L2津波未満の場合には、裏法尻部における波圧の低減効果も期待できることがわかる。さらに、この波圧低減効果は、曲線形に落堀を付加することで、より大きくなることもわかった。ただし落堀部では、断面形状の急激な変化による波圧増大も見られた。また裏法面を緩勾配化することで、堤防全体に作用する波圧に変動は小さく、波圧の低減効果が最も大きく期待できることもわかった。



a) 津波高 L2



b) 津波高, L2×0.8



c) 津波高, L2×0.6

◆ : Case1(裏勾配1:1.5), ■ : Case2(裏勾配1:4)
▲ : Case3(流線型), - : Case4(流線型+落堀)

図-3 解析結果 (作用波圧比)

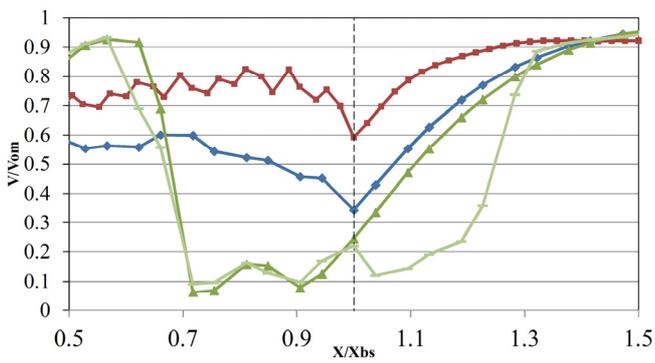
図-4には、最大越流時における堤防に作用する津波越流流速の作用状況を示す。x軸は図-3と同様、堤防法線からの距離 x を天端から裏法尻までの距離 X/Xbs で無次元化したものであり、y軸は流速(鉛直と水平の合成)について作用流速 Vo を全てのケースの最大流速 Vom (Case 4)との比で無次元化したものを示す。

津波高L2のケースを見ると流速は、作用波圧とは逆にCase 2の裏法勾配が1:4の場合が最も大きく、Case 3, Case 4の曲線形を用いた場合が小さくなっている。特にCase 4では、落堀の効果により流速が抑えられた後、陸側に向かって急速に流速が増加している。またその陸側では、裏法形状に関係なく流速は一定となっている。

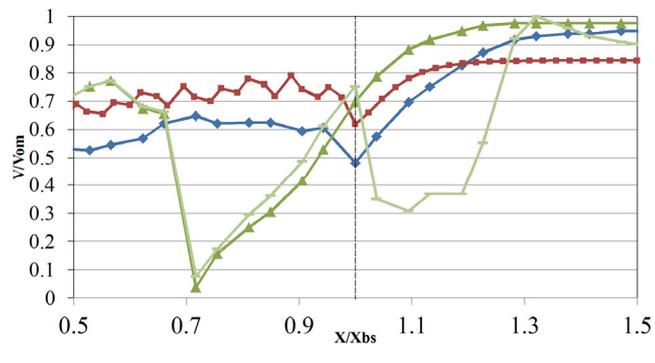
次に津波高が小さいケースのうち0.8倍のケースを見ると、裏法尻付近ではCase 1とCase 2の大小関係は津波高が大きい場合と変わらないものの、Case 3, 4の流速の方が大きくなっており、津波高L2のケースとの傾向は

異なっている。Case 1, Case 2の流速の変動幅は津波高L2のケースと比べて小さい。また陸側を見ると、各ケースによって流速の値が異なっており、特にCase 2が最少となっている。一方、津波高が小さいケースのうち0.6倍のケースを見ると、法尻部ではCase 2が大きくCase 3が最も小さい。陸側部ではCase 1 (勾配1:1.5) が最も大きな流速となっており、曲線形 (Case 3) を用いることでCase 1 (勾配1:1.5) の80%程度にまで低減できている。特にCase 2が最も小さい値を示しており、越流水深の大きさの違いにより緩勾配とした方が流速が小さくなるケースが見られる場合がある。また落堀の効果 (Case 4) による流速の減衰効果も見られた。

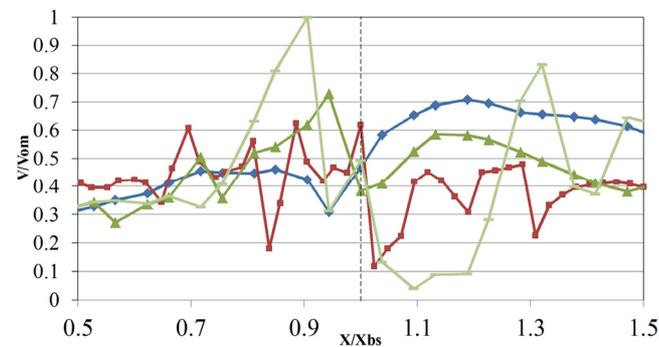
図-5には、各ケースの最大越流時における鉛直流速の分布を示す。裏法尻付近から陸側を見ると、Case 1とCase 3, Case 2とCase 4の流速の変化傾向が似ている。これは裏法面に曲線形を用いるだけでは、今次津波のような最大級のL2津波に対しては鉛直流速を減じることとはできないものの、曲線形に落堀を付加することで緩勾配化と同じ効果が得られることがわかる。今次津波による裏法尻洗掘の主原因であった鉛直流速に対し、裏法面に曲線形+落堀を用いることは緩勾配化と同じ効果が得られ、洗掘抑制効果が期待できることを示唆している。この効果は津波高大小にかかわらず期待できる。



a) 津波高 L2



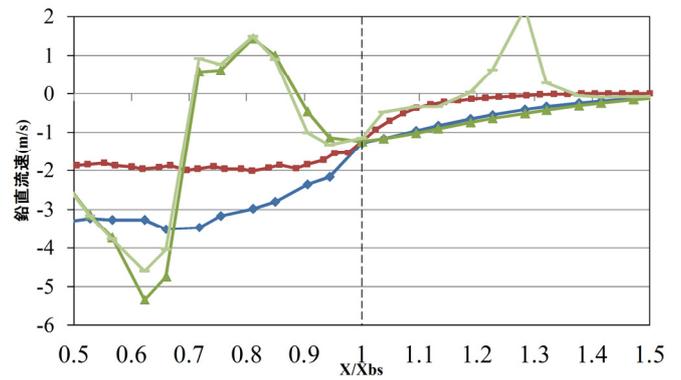
b) 津波高, L2×0.8



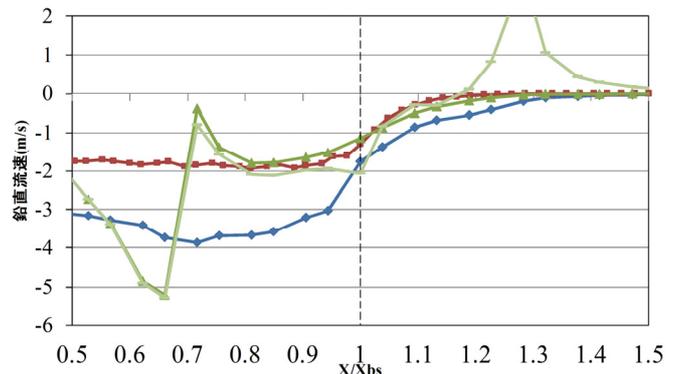
c) 津波高, L2×0.6

◆ : Case1(裏勾配1:1.5), ■ : Case2(裏勾配1:4)
▲ : Case3(流線型), - : Case4(流線型+落堀)

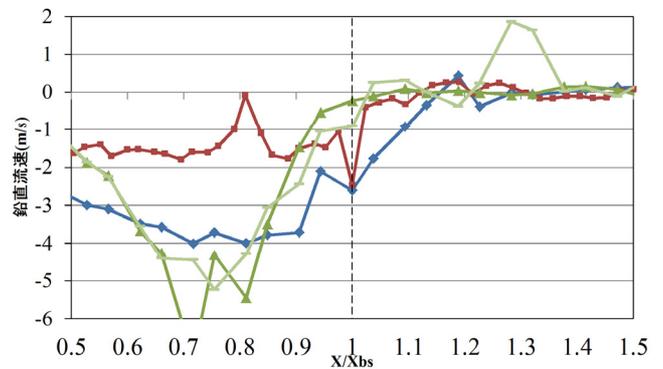
図-4 解析結果 (作用流速比)



a) 津波高 L2



b) 津波高, L2×0.8



c) 津波高, L2×0.6

◆ : Case1(裏勾配1:1.5), ■ : Case2(裏勾配1:4)
▲ : Case3(流線型), - : Case4(流線型+落堀)

図-5 解析結果 (鉛直流速)

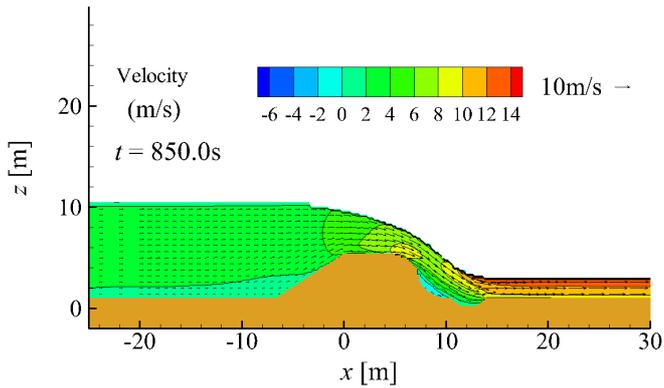


図-6 解析結果（最大流速分布）

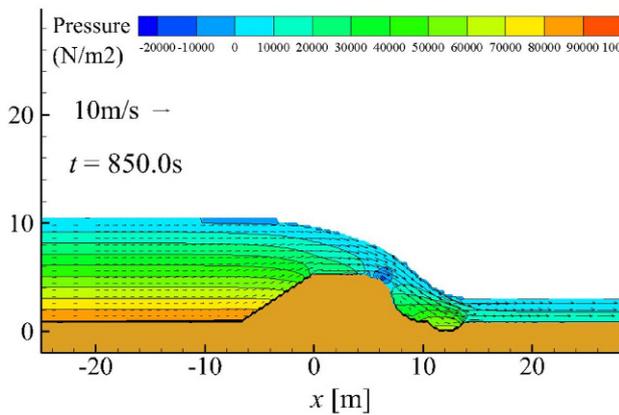


図-7 解析結果（作用波圧分布）

次に図-6及び図-7には、裏法面に曲線形及び落堀を用いた場合（Case 4）の津波越流時における最大流速および作用波圧に関する空間的な分布状況を示す。

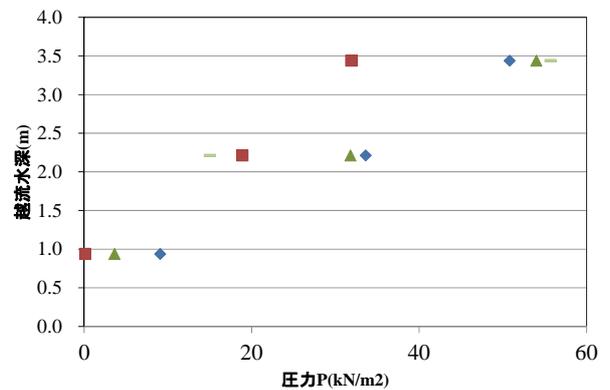
最大流速分布図を見ると、裏法尻付近には陸側から堤防側に向かう弱い流れが発生しており、これは越流による着地点を裏法尻から陸側へ遠ざけたことにより逆向きの流れが形成されたためと推察され、洗掘深の増加を抑制できることを示唆している。このことは、中村ら¹⁰⁾によっても指摘されている。ただし作用波圧分布図を見ると、着地点を遠ざけたことで、落堀部には大きな波圧が作用しており、崩壊しないための留意も必要である。裏法肩部では、流線の曲率半径が小さくなっており（石河ら¹¹⁾）、 20 kN/m^2 程度の負圧が作用していることがわかる。例えば、仙台湾南部海岸⁹⁾の防潮堤では部材厚を従来の 0.2 m から 0.5 m へと大きくしたが、コンクリート部材のみの重量（ $23 \text{ kN/m}^3 \times 0.5 = 11.5 \text{ kN/m}^2$ ）では裏法肩部で負圧に対して不足しており、周辺の法面および天端舗装部との連結を施すなどの対策が必要となっている。

また表-1に示した各ケースについて、裏法尻部に着目して、越流水深の違いによる最大越流時の作用波圧及び

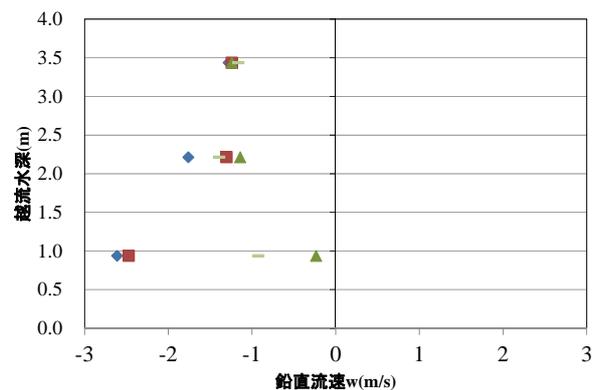
鉛直流速の変化を図-8に示す。

作用波圧との関係図を見ると、グラフが右肩上がりの傾向を示しており、越流水深の増加に伴い作用圧力も増加している。作用波圧については、Case 2を見ると他のケースに比べ全体的に波圧の増加度合いは抑えられており、裏法面の緩傾斜化により波圧軽減効果が期待できることがわかる。またCase 4では、越流水深が 2 m 程度までであればCase 2と同様の傾向を示しており、越流水深が小さい場合には曲線形に落堀を付加することで緩傾斜化と同様の波圧減衰効果も期待できる。

鉛直流速との関係図を見ると、越流水深が 2 m を超える場合は裏法面の構造形式に関係なく下向きに 1.3 m/s 程度の流速となっているが、越流水深が 2 m 未満の場合にはCase 3でほぼ 0 m/s となっている他、Case 4でも 0.9 m/s 程度（越流水深 2 m 以上の場合に比べ約 70% 程度にまで減速）となっており、裏法面に曲線形を用いることで鉛直流速を抑制する効果が期待できる。



a) 作用波圧との関係



b) 鉛直流速との関係

- ◆ : Case1(裏勾配1:1.5), ■ : Case2(裏勾配1:4)
- ▲ : Case3(流線型), - : Case4(流線型+落堀)

図-8 裏法尻における越流水深と作用波圧、鉛直流速の関係

3. 結論

粘り強い構造とするために、裏法面緩勾配とすると、後背地により幅広い空間が必要となり、堤防直背後に民家がある場合などには現況堤防幅での対応が必要となってくる。しかし、本研究で提案した法肩や法尻部に曲線形状とし、落堀を用いると、後背地に用地を必要とせず、下記のように、裏法面緩勾配化と同様に裏法尻部での洗掘の主要因と考えられる鉛直流速を抑制する効果が期待できることがわかった。

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が示唆された。特に、越流水深が小さくなると、他の構造形式よりも陸側の流速が小さくなる傾向にあった。
- (2) 裏法肩部及び裏法尻部に曲線形を採用すると、裏法尻部に作用する流速は、今次津波のような越流水深が大きい場合に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はやや大きくなる。
- (3) 曲線形を採用すると、陸側から海側へ向かう流れを形成され、洗掘の抑制効果が期待できる。
- (4) 曲線形に落堀を付加すると、越流水深に関係なく緩傾斜化と同様に鉛直流速を抑制できることから、より粘り強い構造とすることができる。特に、越流水深が2m以下の場合には緩傾斜化と同様に波圧も軽減された。

今後は、模型実験での検証とともに、汎用性についても検討していく。また今回新たに提案した落堀を湿地化させることで、ビオトープとしての利用が可能となり、新たな環境創造も期待できることから、今後はこの環境面についても検討する。

参考文献

- 1) 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, pp.I_1021-I_1025, 2013.
- 2) 常田賢一, 谷本隆介: 2011年東北地方太平洋沖地震の現地調査による防潮堤などの津波被害特性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp.I_1406-I_1410, 2012.
- 3) 国土交通省: 「仙台湾南部海岸堤防復旧の取り組み」, 2015.
- 4) 加藤史訓, 野口賢二, 諏訪義雄, 木村晃, 河合雅史, 高木利光, 小俣雅志: 東北地方太平洋沖地震津波による仙台湾南部での海岸堤防被災・洗掘に関する調査, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp.I_1396-I_1400, 2012.
- 5) 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, pp.I_891-I_895, 2012.
- 6) 中尾秀之, 佐藤慎司, Harry YEH: 津波の越流による海岸堤防の破壊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, pp.I_281-I_285, 2012.
- 7) 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, pp.I_311-I_316, 2013.
- 8) 五十嵐善哉, 田仲規夫: レベル 2 津波の堤防越流に対する減勢に適した裏法側堤防構造の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp.I_325-I_330, 2015.
- 9) 吉森佑介, 倉上由貴, 二瓶康雄, 森田麻友: 堤防裏のり尻部の洗掘現象の把握と対策工配置条件の基礎的検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp.I_1117-I_1122, 2015.
- 10) 中村友昭, 日比野加奈, 趙容桓, 水谷法美, 小竹康夫: 東北地方太平洋沖地震津波による海岸堤防裏法尻の対策工の有効性に関する数値解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp.I_1099-I_1104, 2015.
- 11) 石河雅典, 上月康則, 山中亮一, 大久保陽介: 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, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 70, No. 2, pp.I_372-I_377, 2014.

(2016.3.16受付)

NUMERICAL ANALYSIS ON NEW DIKE BACK SLOPE SHAPE TO REDUCE SCOURING AT THE LANDWARD TOW CAUSED BY 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 was effective to drain into the landside as possible smoothly in examining the robustness of the dike for 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 restrain scouring at back slope of dikes, excepting method of moderating the back slope, streamline at top of inner slope and back slope were proposed.