

数値計算を用いた粘り強い耐津波海岸堤防 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パシフィックコンサルタンツ(株) 中部国土保全事業部 (〒451-0046名古屋市西区牛島町2-5)
E-mail:masanori.ishikawa@os.pacific.co.jp

²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、裏法面に流線形を用いその背後に落堀を設置することが最も有効であり、津波外力の大きさによって最適な落堀形状が異なることを確認した。

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⁾は津波越流による裏法尻部の圧力上昇範囲を保護することで基礎下面までの洗掘を抑制できるとして、裏法基礎部を幅 5m 深さ 2m の範囲で地盤改良等により補強することとしている。今後の南海トラフ巨大地震津波等の超大な外力に対する整備において、加藤ら¹⁾の提案する断面を活用した場合には、法勾配が緩くまた地盤改良により堤体幅が広がることから、現存する砂浜や植生などの環境及び背後地の土地利用への影響が出ることとなる。一方石河ら²⁾は、粘り強さを持つ海岸堤防整備に対して、現状の砂浜幅を確保しつつ背後の土地利用に配慮するため断面幅を現状と同一として、堤防裏法尻に作用する津波波力を逃がす新しい構造形式を数値計算をもとに提案している。このような周辺の環境や利用に配慮しながら“作用外力に逆らわない状態でできる限り逃がす構造形式”，つまり津波外力に逆らわず“防護・環境・利用の調和のとれた堤防”という新しい設計

思想については、これまでの研究事例は今のところほとんどない。そこで本研究では、堤防の粘り強さを“津波越流水の作用外力をうまく逃がすことで基礎部の洗掘量を低減すること”とし、石河ら²⁾の研究を発展させることとして、大久保ら³⁾の地形変化モデルを用いて、裏法面形状の違いによる堤防の「粘り強さ」と津波外力の違いによる裏法面形状の効果について考察した。

2. 数値解析

(1) 粘り強い堤防断面を他地域へ展開する場合の課題

現行の粘り強い堤防断面(例えば加藤ら¹⁾)を南海トラフ巨大地震津波の襲来が危惧されている地域に適用しようとした場合、以下の課題がある。

①一般的に堤防の法勾配は1:15のものが多く、1:2とすることで堤体幅が広くなり、前面に広がる砂浜や背後にある植生等の環境及び住居等の土地利用に支障を来す可能性がある。

②基本的に越波はある程度許容(例えば0.01m³/m/sec)することから、排水溝が必要となる。

(2) 数値解析手法及び計算条件

石河ら²⁾は、数値波動水槽(CADMAS-SURF/3D) (財)沿岸開発研究センター)を用いて、法肩や法尻基礎部を曲線形状(以下“流線形”と表記する)としその背後に落堀を用いることで、堤体幅を現状と同じとし後背地に用地を必要とせず、裏法面緩勾配化と同等以上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を解明している。しかしこれは固定床による解析であることから、実際に起こり得る洗掘現象を考慮し切れていない。従って本研究では、大久保ら³⁾が開発した CADMAS-SURF/2D に掃流砂及び浮遊砂による地形変化モデルを組み込んだ洗掘モデルを用いて、石河ら²⁾が提案している堤防の新しい構造形式の津波越流に対する洗掘抑制効果を検証する。

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と、そのピーク値を0.8倍及び0.6倍した波形(L1津波以上L2津波未満の津波を想定)とする。

(図-1参照)。なお計算条件は、石河ら²⁾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させるものとした。

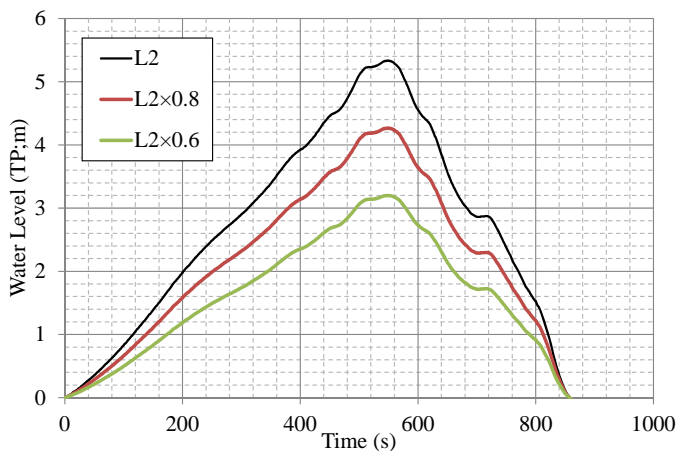


図-1 解析に用いる津波波形

本研究では、堤防形状の構造的工夫による裏法尻基礎部付近での洗掘抑制効果を見るため、全ケースとも表法勾配を1:1.5として表-1に示す裏法面形状について比較検討を行った。Case1は裏法勾配を海岸堤防として一般的によく使われている1:1.5勾配、Case2は裏法勾配を緩勾配1:4、Case3は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流線形、Case4は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固定床としたケース、Case5はCase4の落堀を移動床としたケースの計5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ま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	裏法面形状
Case1	1:1.5 勾配
Case2	1:4 勾配(緩傾斜)
Case3	流線形
Case4	流線形+落堀(固定床)
Case5	流線形+落堀(移動床)

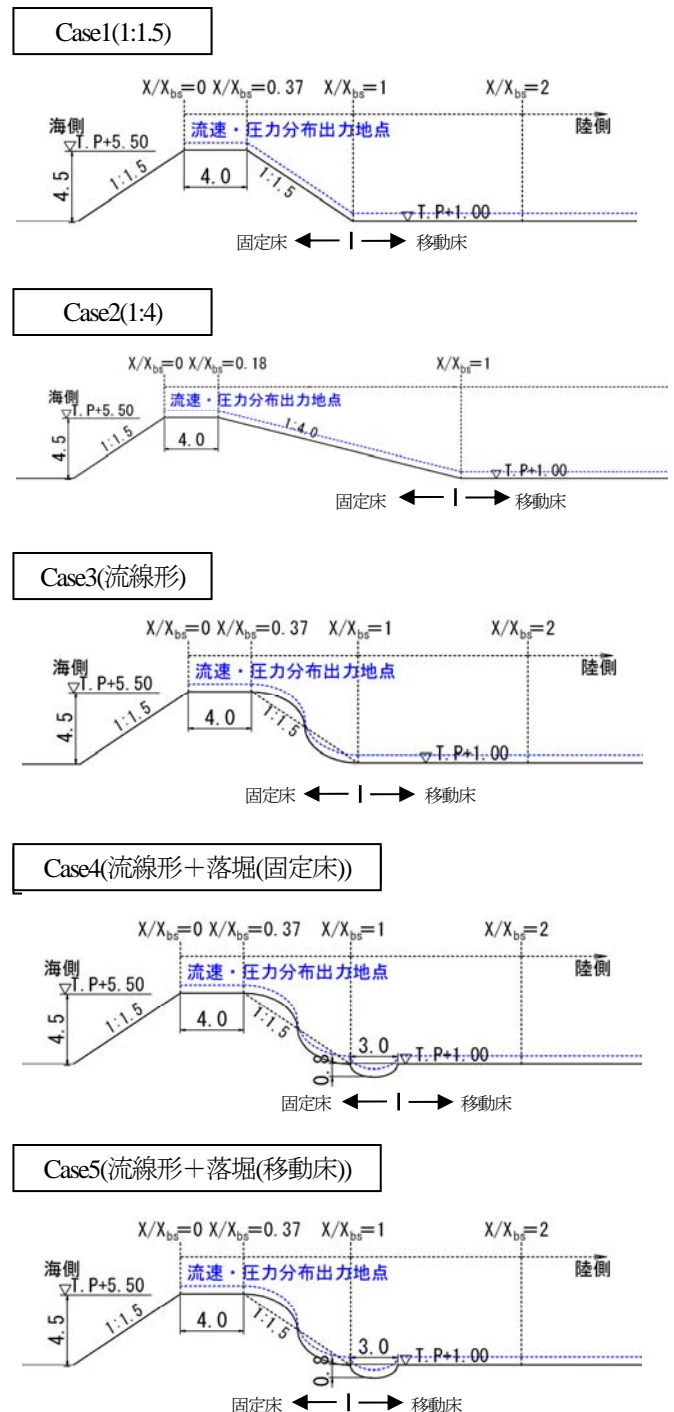


図-2 解析に用いる堤防断面 (単位 ; m)

(3) 解析結果

加藤ら⁷⁾は、津波越流による裏法尻部の圧力上昇範囲を保護することで基礎下面までの洗掘を抑制できることが、堤防の粘り強い化に有効であるとしており、基礎部直近での洗掘深に着目した評価を行っている。

図-3には、解析結果に基づく洗掘状況の最終形を示す。この結果より、裏法尻基礎直近の洗掘量に着目して、各々の津波外力における Case1(裏法勾配 1:1.5)に対する各 Case の比を津波外力別に表-2にまとめた。

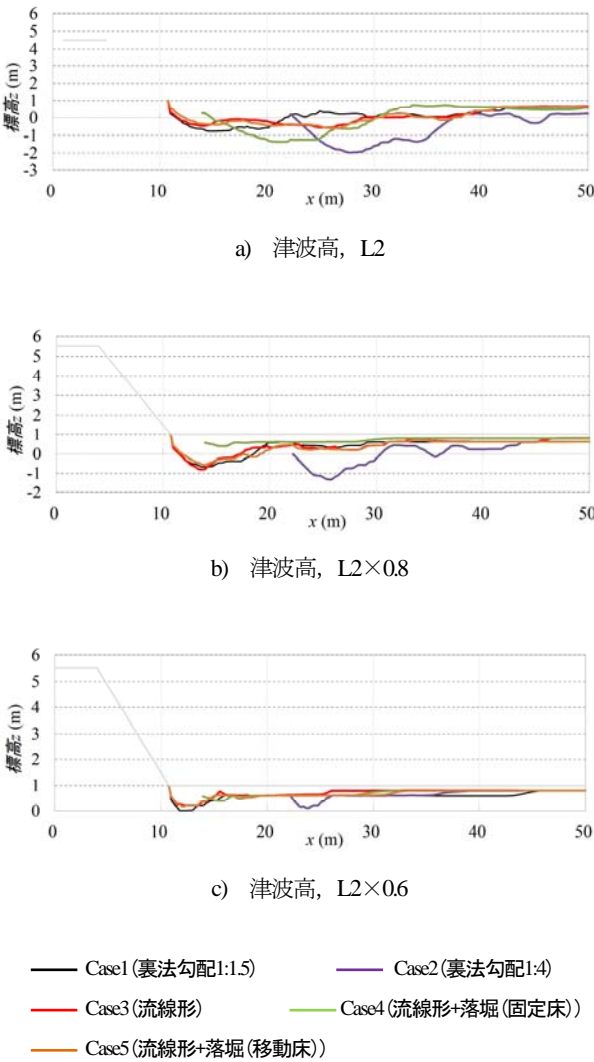


図-3 解析結果 (作用波圧比)

表-2 津波外力の違いによる裏法基礎部の最大洗掘量比

	L2 津波	L2 津波×0.8	L2 津波×0.6
Case2	0.9	1.43	0.75
Case3	1.4	1.0	0.95
Case4	0.88	0.57	0.88
Case5	0.8	0.86	0.88

ケースごとに見ると、Case2 では、裏法勾配を 1:4 の緩傾斜とすることで、L2 津波のような強大な外力に対しては、基礎洗掘抑制効果がある程度は期待できるものの、L2 津波×0.8 のケースでは、逆に洗掘深が大きくなっており、津波外力の条件によってその洗掘抑制効果にバラつきが大きい。Case3 では、裏法面に流線形を用いることで、L2 津波×0.6 において僅かではあるが洗掘抑制効果が期待できることが分かる。Case4 では、津波外力の大きさに関わらず、洗掘抑制効果がかなり期待できることが分かる。その効果は、L2 津波×0.8 のケースで最も顕著である。Case5 では、Case4 に次いで津波外力の大きさに関わらず、洗掘抑制効果が期待できることが分かる。その効果は、L2 津波時で最も顕著であり、外力が大きいかほど効果が発揮されていることがわかる。

次に比較的洗掘抑制効果があると考えられるCase4(流線形+落堀(固定床))に着目して、その空間的な流速の分布状況(最大越流時)を図-4に示す。

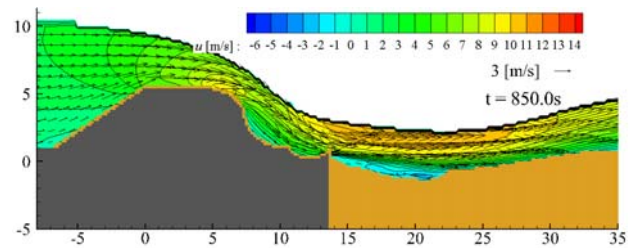


図-4 Case4における津波越流時の流速の空間分布 (L2津波) (洗掘開始時)

図より、越流後のベクトルの方向は、越流した波が直接的に落下する形で堤体背後の現地盤に作用し、洗掘を引き起こしていることが分かる。しかしその最も洗掘されている位置は、基礎からかなり離れたところにあることが分かる。これはベクトルの向きに着目すると、越流後から落堀に当たるまでは比較的急な角度でほぼ直接的に落下しているが、背後地の右側では落堀に当たった波の反射作用によりやや右上向きの流れに変化しており、この流れの向きの変化に起因して基礎洗掘が抑制されていると考えられる。

また図-5には最大洗掘時の空間分布を示すが、背後地の洗掘部分上側では、陸側に向かってほぼ水平方向の流れとなっているのに対し、洗掘された箇所では陸から堤防基礎部への弱い流れが発生していることが分かる。これにより、裏法尻基礎部の洗掘は抑制されることとなり、堤体が粘り強い状況になっていると言える。

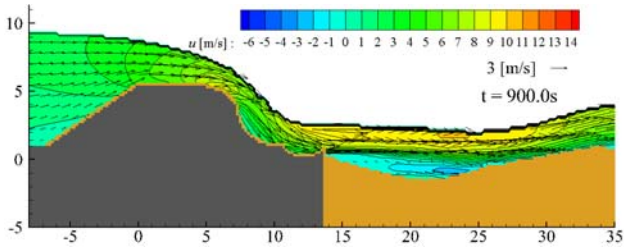
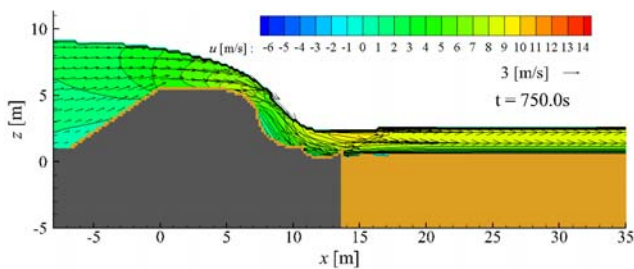


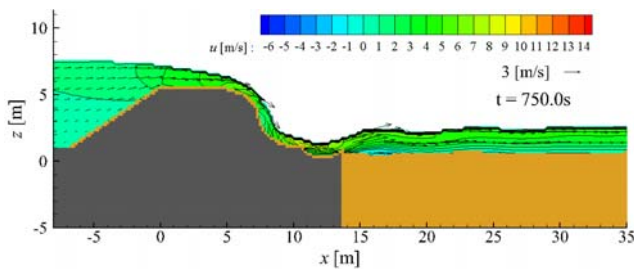
図-5 Case4における津波越流時の流速の空間分布 (L2津波) (最大洗掘時)

一方国総研技術速報⁴⁾には、津波越流に伴い発生する跳水の位置が基礎に近づいたり離れたりする現象により砂の移動に影響することが示されており、今回の計算でも同様な跳水の現象が確認でき(図-5 参照)、跳水の発生によって浮遊した砂が洗掘によってできた落堀部分に沈降し、時間の経過とともに埋め戻される現象が起こっている。またこの跳水については、金子ら⁵⁾が水理模型実験により、津波越流に伴う堤防裏法尻周辺の流れ場をタイプ分けし、その中で跳水が発生する場合は底層部での戻り流れの発生を確認しており、これは図-4 及び図-5 に示す現象と合致しているものと考えられる。

次に図-3 b)を見ると、Case4では洗掘深が極端に小さくなっている。これは、図-6に示すa) 津波高、L2とb) 津波高、L2×0.8の洗掘が始まる時間での流速の空間分布状況を裏法尻部に注目して見ると、a) 津波高、L2では天端裏法肩から落堀方向に向かう大きな流向ベクトルが存在するが、b) 津波高、L2×0.8では落堀部付近を見ると陸側右上方向に向かう大きな流向ベクトルが存在している。



a) 津波高, L2



b) 津波高, L2×0.8

図-6 津波越流時の流速の空間分布図

これはL2津波の場合、流線形の形状には関係なく津波が落下するように越流し落堀の存在によって水平方向の流速に変化はあるものの、その鉛直流速抑制効果は小さく裏法基礎陸側の地盤を洗掘する流れが生じているのに対し、L2津波×0.8の場合では、裏法天端肩を越流した津波が流線形に沿う形で津波が流下し、落堀の形状の効果により上向きの流れに変わること、鉛直方向の流速がなくなり洗掘が発生しにくくなっているものと考えられる。従ってL2津波を下回る津波(L1以上L2未満の津波)の場合には、流線形+落堀(固定床)とすれば、裏法基礎部での洗掘を抑制でき、粘り強さを相当程度期待できると言える。

次に表-2のCase5に関し、落堀形状の大小による粘り強さの違いについて解析した。検討する落堀形状を表-3に示す。検討ケースは、落堀幅 10.0m で落堀深 3.0m と落堀幅 30.0m で落堀深 1.5m の場合において、通常の海岸堤防の裏法勾配である 1 : 1.5 と加藤ら⁶⁾が提案している法勾配 1 : 2 のケースを追加で実施することとした。

表-3 検討ケース一覧

	落堀幅(m)	落堀深(m)	裏法面形状
Case1	3.0	0.8	流線形
Case2	3.0	1.5	流線形
Case3	3.0	3.0	流線形
Case4	10.0	0.8	流線形
Case5	10.0	1.5	流線形
Case6	10.0	3.0	流線形
Case6-2	10.0	3.0	勾配 1:1.5
Case6-3	10.0	3.0	勾配 1:2.0
Case7	30.0	0.8	流線形
Case8	30.0	1.5	流線形
Case8-2	30.0	1.5	勾配 1:1.5
Case8-3	30.0	1.5	勾配 1:2.0
Case9	30.0	3.0	流線形

また検討ケースイメージを図-7に示す。

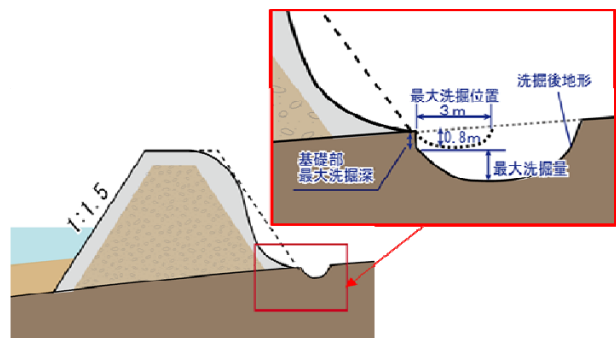


図-7 解析ケースイメージ図

各ケースに対し、堤防の粘り強さを比較するため、裏法尻基礎部最大洗掘深、全体での最大洗掘深、最大洗掘位置及び法尻部における鉛直方向の流速について解析した結果を表4.6にまとめる。

これまで検討してきた Case1(落堀幅 3.0m, 落堀高 0.8m)での計算結果を基本に各ケースでの比を合わせて算出した結果を表-4に示す。なお Case3 については、落堀幅と落堀深が 1:1 となり解析上形状が安定しないため、検討から除外することとした。

表-4 洗掘状況比較解析結果一覧(Case1 に対する比率)

ケース	基礎部 最大洗掘深	最大 洗掘深	最大 洗掘位置	法尻鉛直 最大流速
2	1.76	0.74	0.87	0.90
3				
4	0.99	1.00	1.00	1.00
5	1.25	0.41	0.99	0.99
6	1.84	0.07	1.04	1.26
6-2	1.84	0.00	1.05	1.07
6-3	1.55	0.00	1.07	0.88
7	1.00	1.00	1.01	1.00
8	0.97	0.48	1.96	1.29
8-2	1.00	0.42	0.99	1.13
8-3	0.89	0.45	2.11	1.24
9	1.37	0.26	2.35	0.83

表内の着色は、Case1(落堀幅 3.0m, 落堀高 0.8m)と比較して、粘り強くなっているものが青色、脆弱化しているものを赤色とした。

津波越流に伴う堤防の崩壊メカニズムを考える場合、最も着目すべきは裏法尻基礎部の洗掘であり、その洗掘量を抑えることが堤防を粘り強くすることに繋がる。また津波の越流は、ある程度の時間継続して起こることから、最大洗掘深とその発生位置にも着目する必要がある。

落堀幅ごとに、落堀高を変化させた場合について考察する。

①落堀幅 3.0m の場合(Case2, 3の比較)

Case2 を見ると、Case1 と比較して基礎部における最大洗掘深が大きく、最大洗掘深は小さいが最大洗掘位置が基礎に近く、落堀の形状が急勾配になっていることを勘案すると、Case1 の方が粘り強い形状であると言える。

②落堀幅 10.0m の場合(Case4, 5, 6の比較)

先ず Case4~6 を比較する。Case1 と Case4 に明瞭な差は見られないことから、落堀高が 0.8m の場合は落堀幅の違いによる洗掘への影響はほとんどないものと考えられる。Case4 に対し Case5 及び Case6 ともに基礎部最大洗掘深は大きく、特に Case6 が顕著である。一方最大洗掘深は Case6, 5 の順で小さくなり、Case6 が極端に小さい。また最大洗掘位置については各ケースで大差は無いが、Case6 が基礎から最も離れた位置で最大

の洗掘が起こっていることとなる。以上を勘案すると、裏法尻基礎を大きくできれば、Case6 が最も粘り強い形状であると言える。

③落堀幅 30.0m の場合(Case7, 8, 9の比較)

先ず Case7 を見ると、Case1 との明瞭な差は見られないことから、落堀高が 0.8m の場合は落堀幅の違いによる洗掘への影響はほとんどないものと考えられる。次に Case7~9 を比較する。Case7 と比べ基礎部最大洗掘深は Case8 がやや小さく、Case9 が大きくなっている。一方最大洗掘深は Case9 の方が小さく、最大洗掘位置は Case9, 8 の順で大きい。以上を勘案すると、Case8 でも Case1 に比べて粘り強いが、裏法尻基礎を大きくできれば Case9 が最も粘り強い形状であると言える。

次に落堀高ごとに各ケースを比較する。

①落堀高 0.8m の場合(Case4, 7の比較)

基礎部最大洗掘深、最大洗掘深、最大洗掘位置はいずれもほとんど差がない状況である。

②落堀高 1.5m の場合(Case2, 5, 8の比較)

基礎最大洗掘深と最大洗掘位置を見ると、Case2, 5 と 8 では傾向が異なっている。また最大洗掘深については、各ケースともに Case1 と比べて小さくなっている。以上より、Case8 が最も粘り強い形状であるといえる。

③落堀高 3.0m の場合(Case3, 6, 9の比較)

Case6 と Case9 を比較する。基礎部最大洗掘深を見ると、Case9 の方が Case6 に比べ 75%程度となっているものの最大洗掘深は Case6 が極端に少ないことから、基礎の大きさに制限がある場合には Case9 の方が粘り強いが、大きさに制限がない場合には Case6 の方が粘り強いと言える。また最大洗掘深では Case6 が極端に小さく、最大洗掘位置は Case9 が極端に大きいものの、いずれの場合も基礎への安定性に支障をきたさない。以上を勘案すると、基礎の大きさに制限がない場合は Case6 が粘り強い形状であると言える。

次に落堀形状を同じとして、裏法形状を変化させたケースを比較する。

①落堀幅 10m, 落堀高 3.0m の比較(Case6, 6-2, 6-3)

いずれのケースも傾向は似ており、裏法形状の違いが粘り強さにあまり影響しないことが分かる。

②落堀幅 30m, 落堀高 3.0m の比較(Case8, 8-2, 8-3)

基礎部最大洗掘深を見ると、裏法勾配 1:1.5 の場合を除くケースで小さくなっている。また最大洗掘位置も同様に、裏法勾配 1:1.5 の場合を除くケースで基礎から離れていることから、流線形及び裏法勾配 1:2 の場合が粘り強いと言える。以上より、落堀形状の大小と裏法形状の違いによる粘り強さの検証については、裏法勾配を 1:2 とした場合と流線形とした場合で同様な効果が期待できることが分かった。

3. 結論

本研究の主な結論は、以下のとおりである。

- ①流線形+落堀(固定床)場合は、基礎部直近での洗掘量は最少となり、堤防崩壊の最大の要因である基礎の洗掘による堤防の崩壊を抑制できることから、最も粘り強い構造であることが分かった。
- ②流線形+落堀(移動床)場合においても、法尻基礎部での洗掘深が小さくなっていることから粘り強い構造であると言える。
- ③落堀形状の違いによる堤防の粘り強い効果(移動床)については、堤防基礎形状を通常のまま変えない場合は、落堀幅 30m で落堀高 1.5m が、基礎形状を大きくできる場合は、幅 10m で高さ 3m が最も粘り強い形状であると言える。よって粘り強さを考える場合、落堀幅と落堀高さの關係に留意が必要である。
- ④裏法面形状による粘り強さについては、勾配を 1 : 2 とした場合と流線形とした場合で同様の効果が期待できることが分かった。
- ⑤本研究の成果として、粘り強い構造は、流線形+落堀(固定床)、流線形+落堀(移動床)、裏緩勾配、流線形、裏法勾配 1 : 2 の順となった。

これまで鳩貝ら⁹⁾を始め、数多くの研究者が津波越流に対する堤防の粘り強い構造として裏法緩勾配を推奨してきているが、現状の堤体幅を変えることなく、環境と利用との調和のとれた粘り強い海岸堤防の新しい構造形式を提案することができたものとする。

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していく。

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) 石河雅典, 上月康則, 山中亮一, 大久保陽介: 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, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 72, No. 2, pp.I_1141-I_1146, 2016.
- 3) 大久保陽介・熊谷健蔵・辻尾大樹・永澤 豪・加藤史訓: 津波越流時における海岸堤防の洗掘に関する数値解析モデルの構築, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 70, No. 2, pp.I_991-I_995, 2014.
- 4) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部: 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, 2010.
- 5) 金子祐人・小森大輔・三戸部佑太・田中 仁・乙志和孝・黒澤辰昭: 津波越流による堤防法尻における流れ場の分類に関する水理実験, 東北地域災害科学研究, 第 52 巻, 2016.
- 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, pp.I_406-I_410, 2012.

(2017.5.29受付)

NUMERICAL ANALYSIS ON NEW DIKE BACK SLOPE SHAPE TO REDUCE SCOURING AT THE LANDWARD OVERFLOW 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, using a streamline for the back slope and canal in the direct rear is most effective to show robustness.