

津波越流時の海岸堤防背後に生じる流れ場に関する水理模型実験*

東北大學 大學院工学研究科 三戸部 佑太
東北大學 大學院工学研究科 Nguyen Xuan Dao
東北大學 大學院工学研究科 Mohammad Bagus Adityawan
東北大學 大學院工学研究科 田中 仁

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震津波により数多くの海岸堤防が被災し、半壊や全壊に至ったケースについても多く報告されている。その主要な要因として指摘されているのは、堤防を越流した津波による堤防裏法尻の局所洗掘である。堤防を越流した流れは裏法面を流下し、強い流体力の働く堤防裏法尻の地面が局所的に洗掘されることで、その洗掘孔から堤体の裏込め土が吸い出され、裏法面が崩壊するというものである。このような堤防裏法尻における洗掘孔は東北地方太平洋沿岸部の多くの地域で確認されており、その幅は数mから100m以上に及ぶことが報告されている (Kato et al., 2012)。この洗掘孔の発達過程を明らかにし、津波越流条件および堤防形状と洗掘孔形状の関係を定量的に評価することは津波越流を考慮した「粘り強い」海岸堤防を設計する上で重要な課題であると言える。そこで、このような海岸堤防裏法尻における洗掘性状を調べるため、鳩貝ら (2012) や著者ら (2013) により水理模型実験が行われている。ただし砂を移動床に用いた実験では流砂に関する相似則を満たすことが困難であり、これらの結果を単純に模型縮尺で現地換算し、津波越流高さや堤防高さ、法面勾配など諸条件に対する洗掘孔の大きさを直接定量的に評価することはできない。しかしながら、重力に起因する流れが支配的であると考えられる裏法尻近傍においては流れ場の相似性については概ね満足するはずであり、洗掘孔形状と流れ場の相互作用を明らかにする上でこれらの水理実験は有用であるといえる。

一方で、Tanimoto and Tokida (2012)は海岸堤防裏法尻に生じる洗掘孔により陸側での津波の遡上流速が低減される可能性を指摘し、数値実験による検討を行っている。この論文では裏法尻に洗掘孔を模した矩形の溝がある場合とない場合での海岸堤防背後における水平流速を比較しており、約40%の流速の低減効果があることを述べている。しかしながら、実際の洗掘孔形状での比較や津波越流条件に対する変化は検討されておらず、その効果についてより詳細な検討が必要である。

以上のような背景から、津波越流時の海岸堤防周辺の流れ場に関する調査は不可欠であるが、移動床を用いて実験を行う場合、時間に伴い流れ場が大きく変化するとともに大量の砂が巻き上がるため、流速分布の計測が困難である。そこで本研究では、移動床を用いた洗掘実験および小型水路における固定床実験での流速分布計測の結果から津波越流時に海岸堤防周辺に生じ

*Hydraulic experiments on velocity-fields behind coastal dikes during tsunami overflow by Yuta Mitobe, Nguyen Xuan Dao, Mohammad Bagus Adityawan and Hitoshi Tanaka

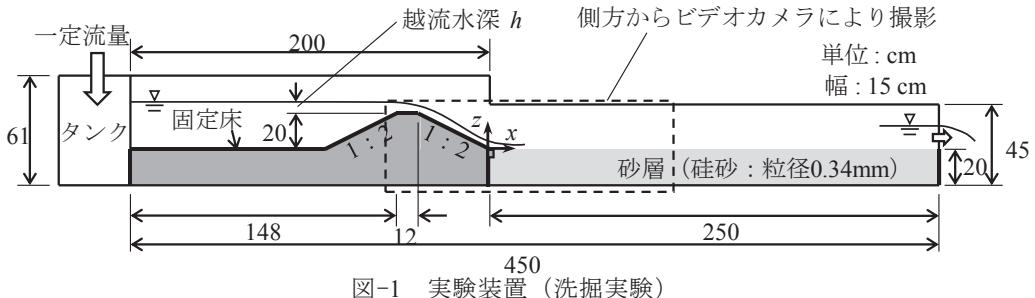


図-1 実験装置（洗掘実験）

る流れ場、およびその洗掘過程との関係について調査を行う。

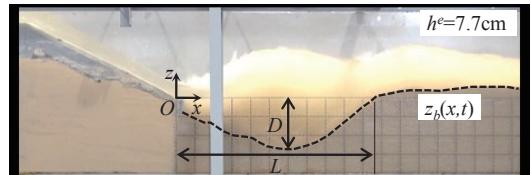
2. 移動床を用いた洗掘実験

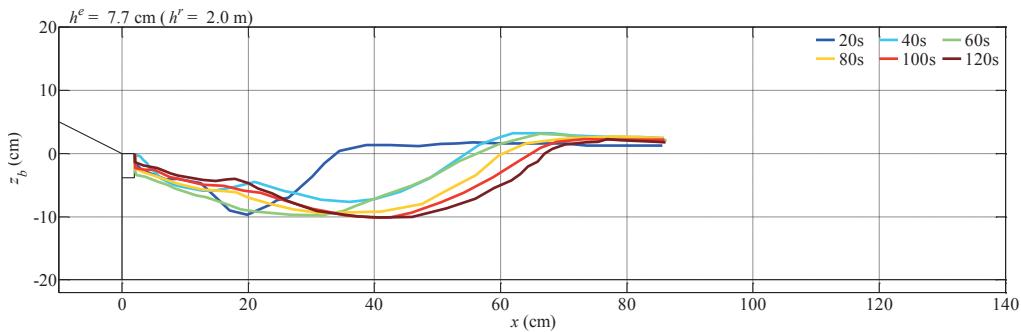
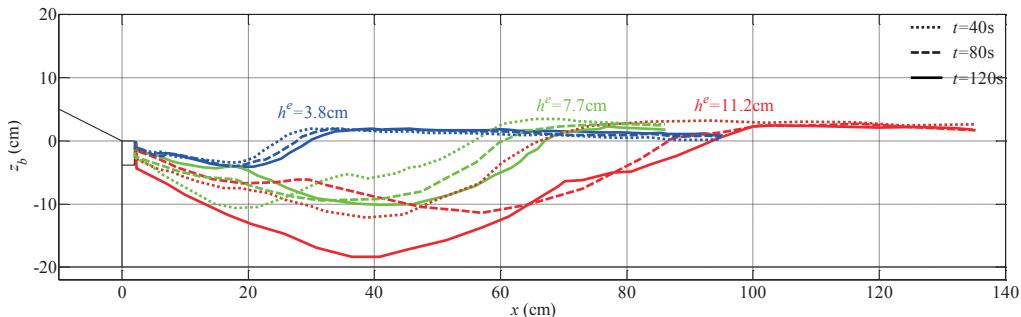
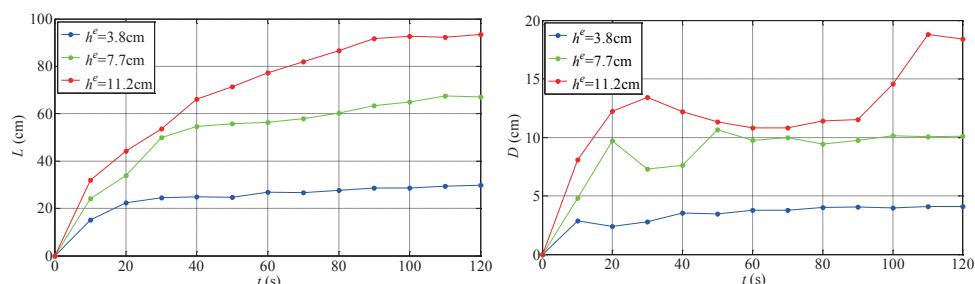
2.1 実験方法

縮尺 1/26 の海岸堤防模型を設置した延長 4m、幅 15cm の水路の堤防下流側に粒径 0.34mm の硅砂を用いた砂層を設置し、一定流量下で生じる洗掘の様子を水路側方からビデオカメラにより撮影した（図-1 参照）。水槽側壁に設置した 5cm 間隔の格子の実座標と撮影画像座標の関係から決定する射影変換行列に基づいて撮影した画像を実座標系へ変換し、変換後の画像から砂層表面位置を検出して洗掘孔形状を取得した（図-2 参照）。海岸堤防模型は宮城県仙台海岸における堤防諸元である天端高 T.P.7.2m、法面勾配 1/2 を参考とし、地盤高 T.P.2.0m を仮定して高さ 5.2m、法面勾配 1/2 の海岸堤防を対象に作成した。また通常、法尻部において高さ 1m、幅 1m の基礎工があるため、本実験ではその半分である高さ 1m、幅 0.5m が法尻外側に突出しているものとして法尻部の形状を再現した。津波の越流条件は現地における越流水深 $h^e=1, 2, 2.9m$ 、越流継続時間 $T^e=10min$ を対象として、実験での越流水深越流 $h^e=3.8, 7.7, 11.2m$ 、越流継続時間 $T^e=2min$ として実験を行った。

2.2 結果

図-3 は越流水深 $h^e=7.7cm$ （現地越流水深 $h^r=2m$ ）のケースの洗掘孔形状の時間変化を示したものである。越流開始初期 ($t < 20s$) は法尻部から椀状に洗掘孔が発達するが、その後次第に水平方向へ洗掘孔が伸張し横長な洗掘孔が発達する（図-3: $t=40s$ ）。この時、洗掘孔内の法尻付近($x=20cm$)に小規模なピークが形成されていることがわかる。この直後に法尻部近傍で急激に洗掘が進み、このピークも消失するが（図-3: $t=60s$ ），その後徐々に法尻近傍において洗掘孔の埋め戻しが生じており、新たなピークが形成されている（図-3: $t=80\sim120s$ ）。越流水深 $h^e=3.8, 7.7, 11.2cm$ の 3 ケースでの洗掘孔形状を比較すると（図-4），越流水深の増加に伴い洗掘孔が大きくなり、またいずれのケースでも上述のような法尻付近における堆積・小規模ピークの形成および急激な浸食を交互に繰り返す洗掘過程が確認された。

図-2 射影変換後の撮影画像例. D : 最大洗掘深, L : 洗掘孔の幅

図-3 洗掘形状計測結果 ($h^e=7.7\text{cm}$)図-4 洗掘形状計測結果 ($h^e=3.8, 7.7, 11.2\text{cm}$)図-5 洗掘孔の幅 L および最大洗掘深 D の時間変化

洗掘孔の幅 L (図-2) は時間に対して単調に増加し、洗掘孔の発達に伴いその増加率は減少する (図-4 左)。一方で最大洗掘深 D (図-4 右) は概ね洗掘孔の幅と同様な傾向があるが、法尻近傍における急速な浸食やその後の埋め戻しに伴い、大きく値が変動している。海岸堤防裏法尻における洗掘過程は洗掘形状と流れ場の相互作用により、時間とともにその特徴が変化するものであり、洗掘孔形状と流れ場の関係についてより詳細な検討を行う必要がある。

3. 固定床での流速計測実験

3.1 実験方法

長さ 1.1m、幅 5cm のアクリル製小型水路において洗掘実験と同一形状の堤防を対象とした縮尺 1/100 の模型を設置し、固定床かつ一定流量下での堤防模型周辺の水平流速および鉛直流速を LDV (レーザードップラーフロー計、後方散乱式、レーザー径 1.3mm) を用いて計測した (図

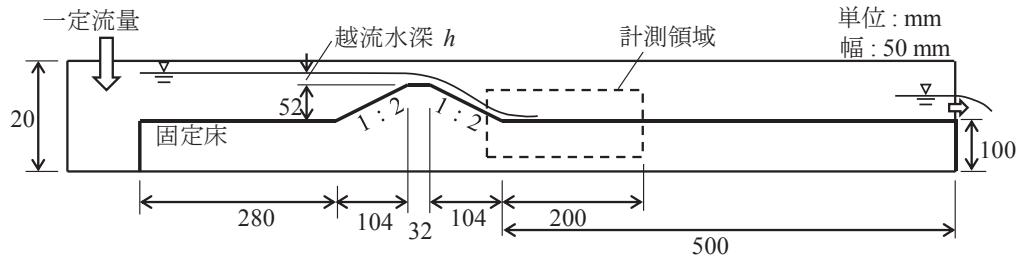


図-6 実験装置（流速計測実験）

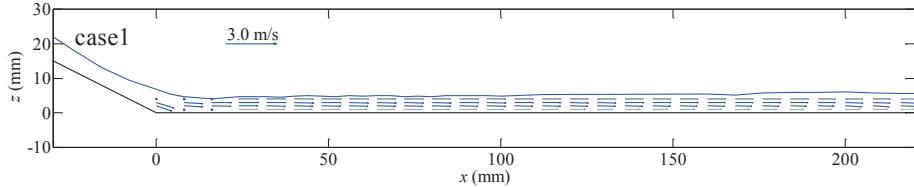


図-7 平均流速分布（水平床・越流水深 $h^e=2\text{cm}$ ）。ただし、装置の都合上、鉛直流速を計測できなかった点については鉛直流速をゼロと仮定し、灰色のベクトルで示している。また青色の実線はポイントゲージにより計測した水位分布を示している。

-6)。計測間隔は流下方向 (x 方向) に 8mm 間隔、鉛直方向に 1~4mm とし、法尻から 20cm ($x=20\text{cm}$) までを計測範囲とした。また奥行方向については手前側の壁面から 1cm の断面で計測を行った。予め設定した越流水深になるよう流量を調節し、越流開始後十分な時間が経過した後の準定常な状態において各点につき約 1 分間ずつ計測を行った。現地越流水深 $h^e=2\text{m}$ を対象とし、堤防下流側地形は洗掘孔を考慮しない水平床のケース (case1) および縮尺 1/26 の洗掘実験で計測した越流後 1 分 ($=T^e/2$) および 2 分 ($=T^e$) の洗掘孔形状を再現したケース (それぞれ case2, 3) の計 3 ケースで実験を行った。

3.2 結果

図-7 に洗掘孔がない水平床の場合の平均流速分布を示す。ただし、レーザー光が底面または水面により遮られるため、水槽底面や水面近傍については水平流速のみ計測を行った。図-7 の灰色のベクトルはこれらの点について鉛直流速を 0 と仮定したものである。水平床 (case1) のケースでは法尻から 16mm の点において水平流速が最大となり、その後下流側に行くにつれて徐々に流速が小さくなるが、跳水の発生は確認できなかった。

越流開始後 1 分における洗掘孔形状を再現したケース (case1) では法尻部において跳水が発生し、流れの方向が斜め上向きに変化している (図-8上)。また、法尻から跳ね上がった水の落下点においてその大半が下流側へ流れしていく一方で、一部の水は上流側へ流れしており、法尻部の跳水に起因して大規模な渦が形成されている。これを洗掘形状計測結果 (図-3) と比較すると、越流開始後 1 分以降は跳水で跳ね上がった水の落下点付近で浸食が進む一方で、法尻付近では次第に土砂が堆積し小規模なピークが形成されており、上述の跳水に起因する大規模渦により落下点付近で削られた土砂の一部が上流方向へ輸送され洗掘孔の埋め戻しおよび小規模ピークの形成を生じていることがわかる。

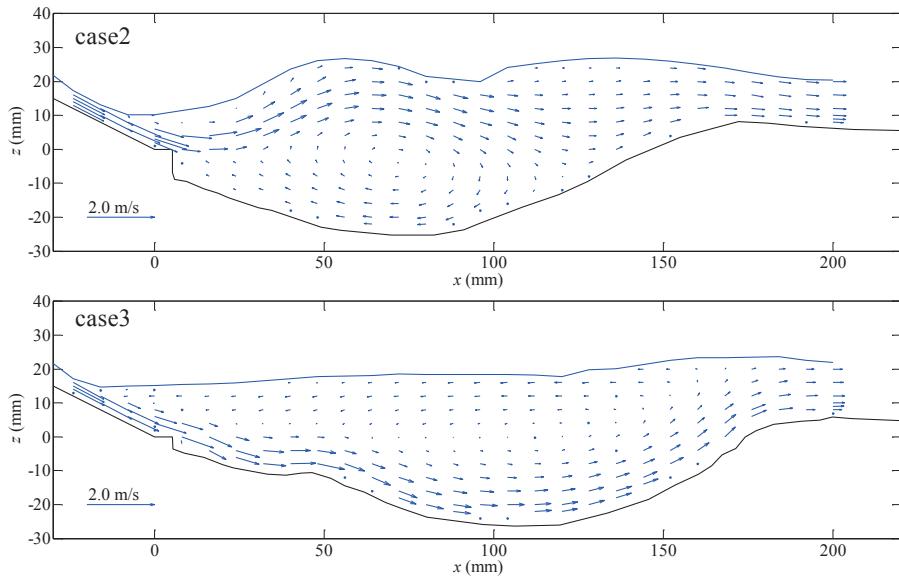


図-8 平均流速分布（越流水深 $h^e=2\text{cm}$, 現地越流水深 $h^r=2\text{m}$ ）。洗掘実験結果から再現した底面形状を用いたケース。上：1分後の形状（case1），下：2分後の形状（case2）

上述のような小規模ピークの形成後の越流開始2分後の洗掘孔形状を再現したケース（case3）では、斜面を流下してきた流れが水面に突入し潜り込む、全く異なる流れ場が形成された（図-8下）。法尻部において流れの方向がほとんど変化せず、斜面を流下してきた流れは底面に沿って洗掘孔内部に直接流入している。その後、流れは洗掘孔下流側の斜面に沿って上昇し、その一部が上流方向へ流れることで、跳水が生じる場合と反対方向の大規模渦が形成されている。法尻付近の底面近傍で流速が大きく、これにより法尻付近において急速に浸食が進むものと考えられる。

ここで、跳水による水平大規模渦が支配的である前者の流れ場を跳水型、斜面を流下してきた流れが水面下に潜り込み、反対方向の水平渦が生じる後者の流れ場を潜水型と呼ぶこととする。椀状の洗掘孔が形成されている場合（図-8上）、跳水型の流れ場が生じ、跳水に起因する水平渦により上流方向への土砂の輸送が生じることで、徐々に法尻付近において洗掘孔の埋め戻しが生じ小規模ピークが形成される。一方で小規模ピークが発達した洗掘孔形状では（図-8下）、流れが潜水型に転じ、越流してきた流れが直接洗掘孔に流入するため、法尻付近で急速に浸食が進み、法尻付近で洗掘深が最大となる椀状の洗掘孔形状に遷移するものと考えられる。その後さらに跳水型へ流れ場が変化し、このような流れ場の変化を繰り返すことで、図-4に見られるような洗掘深の変動を生じている。

図-9は各ケースの計測領域下流端（ $x=20\text{cm}$ ）における水平流速の鉛直方向分布を示している。水平床のケース(case1)では最大水平流速が $U_{max}=1.0\text{m/s}$ であるのに対し、洗掘孔を再現したケース（case2,3）ではそれぞれ $U_{max}=0.38, 0.34\text{m/s}$ であり、洗掘孔直下流部での最大水平流速が40%以下まで減少している。海岸堤防裏法尻における局所洗掘過程が海岸堤防陸側に面する海岸林や

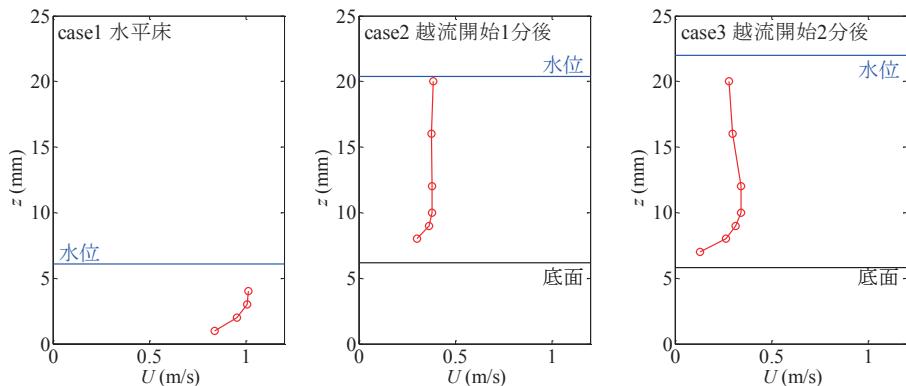


図-9 各ケースの平均水平流速の $x=20\text{cm}$ における鉛直方向分布（越流水深 $h^e=2\text{cm}$, 現地越流水深 $h^r=2\text{m}$ ）。

構造物へ作用する流体力に多大な影響を与える可能性がある。

4.まとめ

津波越流時に海岸堤防裏法尻における洗掘孔の発達過程およびその流れ場との相互作用について水理模型実験を通して検討を行った。海岸堤防裏法尻において、洗掘孔形状に応じて跳水型と潜水型の2種類の流れ場が生じることを明らかとし、その洗掘過程との関係について議論した。また、洗掘孔の存在により海岸堤防背後における水平流速が減少し、海岸堤防背後に位置する海岸林や構造物に与える流体力が低減される可能性がある。今後、より多くの条件で実験を行い、洗掘孔形状および流れ場の相互作用および洗掘孔による陸側での流速への影響について詳細な検討を行う。

謝辞：本研究に対して(財)河川環境管理財団河川整備基金、東北大学特定研究プロジェクトの助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 鳩貝 聰, 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.
- 2) 三戸部佑太, Mohammad Bagus Adityawan, 河原俊哉, 黒澤辰昭, 乙志和孝, 田中仁: 津波越流により生じる海岸堤防背後の洗掘に関する水理実験, 第32回日本自然災害学会学術講演会要旨集, pp.135-136, 2013.
- 3) Kato, F., Y. Suwa, K. Watanabe and S. Hatogai: Mechanism of coastal dike failure induced by the Great East Japan Earthquake Tsunami, Proceedings of 33rd International Conference on Coastal Engineering, 9 pages, 2012
- 4) Tanimoto, R. and K. Tokida: Study on structure of dug pool eroded by tsunami flood and its tsunami-reduction function, International Symposium on Earthquake Engineering, Vol.1, pp.143-150, 2012.