

越流による直立型堤防背後の洗掘についての検討 Study on Scour behind the vertical seawall due to overflow

都市人間環境学専攻 鈴木 滉平
Kohei SUZUKI/ Coastal Engineering Lab.

Key Words : scour, tsunami overflow, vertical seawall, law of similarity, prediction equation

1. はじめに

2011年3月に発生した東日本大震災では、津波越流による構造物背後地盤の洗掘により地盤支持力が低下した結果、防波堤が転倒する事例が見られたり、今後発生しうる最大クラスの津波は防潮堤を越流する事を前提として、粘り強い構造物の計画・設計が必要であり、そのような構造物を設計するためには、越流時における背後洗掘の影響を加味した検討が必要となる。

本研究では直立堤背後洗掘の模型実験を行い越流量と洗掘深の関係を検討するとともに、洗掘深の時系列変化の式を考案することを最終目標として検討を行った。

2. 実験について

(1) 実験の概要

実験は、中央大学の長さ25m、幅0.3m、高さ0.6mの断面水槽内に模型（1/100スケール）を設置して行った。図-1に示すように、直立堤模型は高さ0.45m、天端長さ0.60mである。ポンプを用いて水槽内の水を循環させることにより長時間の越流を再現した。落下高さは0.15mとし模型の上に台を乗せることにより落下高さを変えられるようにした。砂層の厚さは0.30mとし、掘られた砂がポンプに吸い込まれないように、砂層の背後に砂貯めを設置した。実験に使用した砂は、東北珪砂8号（中央粒径0.12mm）、東北珪砂6号（中央粒径0.34mm）及び、珪砂1号（中央粒径4.6mm）である。実験ケースを表-1に示す。

(2) 実験の結果

ケース1の実験の様子を図-2、東北珪砂6号の実験であるケース1の洗掘深の時系列変化のグラフを図-3に示す。ケース1に関しては実験のばらつきを見るために同じ条件で3回実験を行った。

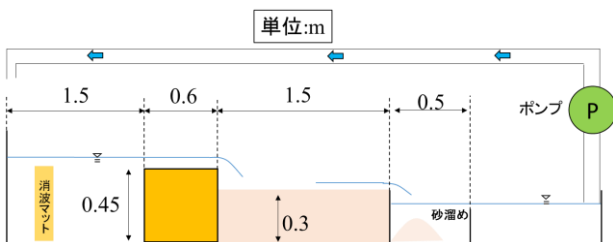


図-1 平面実験概略図

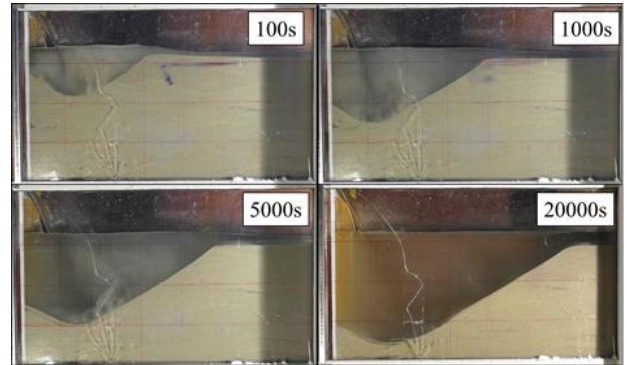


図-2 ケース1の実験の様子

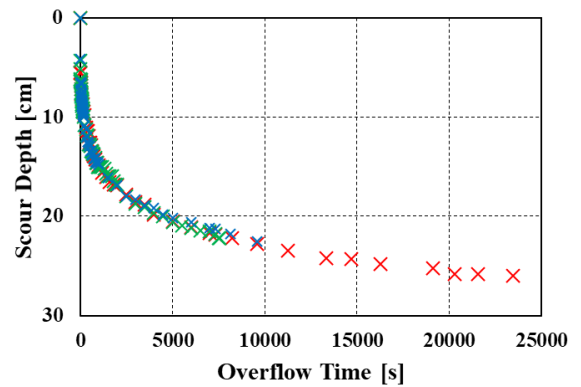


図-3 ケース1の洗掘深の時系列変化

表-1 実験条件

ケース	d (cm)	Z_f (cm)	v (cm/s)	η (cm)	q (m ² /s)
1	0.034	15	46.4	1.1	0.0049
2			58.7	1.8	0.0104
3			75.7	2.0	0.0151
4		20	46.4	1.1	0.0049
5			46.4	1.1	0.0049
6			58.7	1.8	0.0104
7	0.012	15	46.4	1.1	0.0049
8			58.7	1.8	0.0104
9			75.7	2.0	0.0151
10		25	46.4	1.1	0.0049
11			46.4	1.1	0.0049
12			58.7	1.8	0.0104
13	0.46	15	75.7	2.0	0.0151
14			46.4	1.1	0.0049
15		25	58.7	1.8	0.0104
16			75.7	2.0	0.0151

た。図-2に示す通り、各実験におけるばらつきはほとんどないことがわかる。洗掘メカニズムに関しては、越流開始直後は落水塊により生じた渦により砂地盤は勢いよく掘られる。(例えばケース1では越流開始から100秒で約9.0cm掘られる。) その際、舞い上がった砂は沖側に運ばれて行き、図-1に示してある砂溜めに沈降していく様子が見られた。またこの際の砂の移動形態は図-2からもわかるように浮遊形態である。越流開始後数十秒以降は、舞い上がった砂が渦の流れによって再び最大洗掘深付近に帰着する状態と、舞い上がった砂が沖側に流されるが途中で斜面上に沈降する状態と、舞い上がった砂がそのまま沖側に流される状態が確認できた。砂の安息角は約30度なので、それ以上の角度に帰着した砂は最大洗掘深位置に向かって流下していき、ある程度まで下るとまた舞い上がる様子が確認できた。最大洗掘深が深くなるにつれて沖側に流される砂も少なくなり、舞い上がった砂は大部分が斜面上に沈降する様子が見られた。越流開始後2000秒が過ぎても、最大洗掘深付近の砂は舞い上がる様子が確認できたが、舞い上がった砂は斜面上で沈降してしまい、沖に流される砂はほんのわずかである様子が確認できた。

越流規模が同じで使用した粒径が異なるケース1、ケース7、ケース11の洗掘深の時系列変化のグラフ図-4を示す。珪砂6号と珪砂8号を比べると、珪砂8号の実験は珪砂6号の洗掘深の約1.50倍であることが実験より判明した。また、珪砂1号の実験では越流開始後数十秒で洗掘深が定常状態になっている様子が見られた。これは粒径が砂に比べて大きく、ある程度まで掘られると礫が浮遊しなくなったためである。

3. 既往研究との比較

(1) 既往の最大洗掘深の評価式

構造物背後の洗掘の既往研究として、野口ら³⁾は孤立波を用いた戻り流れによる護岸前面洗掘に関する実験を行い、洗掘深が着水後の渦の大きさに関係することを明らかにし、渦の大きさ(以下、理論渦 R)を式(1)で表した。また、最大洗掘深を式(2)で評価した。有川ら³⁾は2種類の砂を用いて洗掘実験を行い、砂の沈降速度を用いて相似則を適用した結果から最大洗掘深の式(3)を提案している。

$$R = g^{-1/4} q^{1/2} Z_f^{1/4} \quad (1)$$

$$D_{max} = 2.1R \quad (2)$$

$$D_{max} = 5.83R \quad (3)$$

本研究では本実験のデータ及び有川ら³⁾が行った実験の結果を用いて、既往の洗掘評価式、洗掘深の時系列変化式の検討を行う。

(2) 相似則について

本実験及び有川ら³⁾が行った実験では、用いた粒径及び越流流量が異なるため一概にそのままと比較ができない。そのため相似則を用いて検討を行う。直立堤背後の地盤が洗掘を受ける際、砂の移動形態は浮遊移動であることが実験の結果からわかっている。そのため山野ら⁴⁾の手法に習い、砂の沈降速度を用いて相似をする。

(3) 縮尺の考え方

山野ら⁴⁾の手法にならい、式(4)のように底質の沈降速度を用いて相似した。

$$w_{0m}/w_{0p} = \left(l_m/l_p \right)^{1/2} \quad (4)$$

ここに、 w :沈降速度、 l :代表長、 m :模型、 p :原型である。

砂の沈降速度は以下の式から求めた。

$$w_0 = \sqrt{sgd_N} (0.954 + \frac{5.12}{s_*})^{-1} \quad (5)$$

$$s_* = \frac{d_n}{4\nu} \sqrt{sgd_N} \quad (6)$$

ここに、 s :砂の水中比重、 g :重力加速度、 d_n :名目粒径 (=d0.9; ここに、 d :底質粒径)、 ν :動粘性係数である。

本実験及び有川ら³⁾の実験の沈降速度をまとめたものを表-2に示す。ここで本実験の珪砂8号のスケールを1/100として、

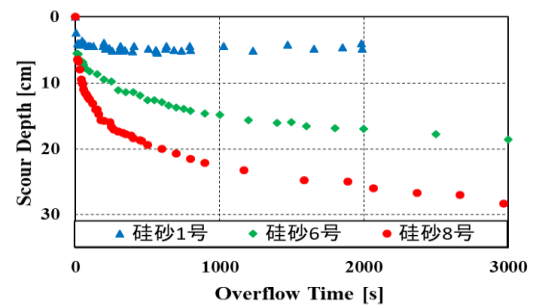


図-4 ケース1, 7, 11の実験の様子

表-2 各実験の沈降速度とスケール

	本実験		有川ら(2014)	
	珪砂8号	珪砂6号	小規模実験	大規模実験
砂の粒径[cm]	0.012	0.034	0.021	0.043
沈降速度[cm/s]	1.09	4.74	2.58	6.10
スケール	1/100	19/100	5.6/100	31.3/100

他の実験のスケールを式(4)を用いて相似した。

(4) 既往の最大洗掘深評価式について

次に、ある時間での洗掘深と野口ら²⁾が提案した理論渦 R との関係性を比べてみる。図-5に現地スケールで200秒と2000秒時点の洗掘深と理論渦 R のグラフを示す。相似則を用いた時間スケールと理論渦 R の関係には比例関係が見られる。

現地スケール200秒の洗掘深は $2.24R$ で表され、野口らの式(2)と係数が近い。また、現地スケール2000秒の時の洗掘深の式は $5.99R$ であり、有川らの式(3)と係数が近い値である。このことから野口らの式は現地スケールでは越流開始後200秒付近の洗掘深を評価しており、有川らの提案した式は現地スケールだと越流開始後2000秒程度の洗掘深を評価している式だと考えられる。

4. 洗掘深の時系列変化について

(1) 既往の洗掘深経時変化特性の研究について

洗掘深の経時変化特性については橋脚周りやゲート直上流部の洗掘についての研究がなされてきているが、直立堤背後の洗掘についての研究は未だに行われていない。例えば、太田ら⁹⁾は堰のゲート直上流で生じる洗掘の経時変化特性を示す関数型について検討を行っており、対数関数、累乗関数、ワイブル累積分布関数の中ではワイブル累積分布関数が最も適合性が高いという結論を出している。その理由は、ワイブル累積分布関数は1に近づく関数であり、1つの変曲点を持っている点が良いとされている。また、Franzettiら⁶⁾やCardosoら⁷⁾も橋脚や橋台まわりの洗掘の経時変化特性にワイブル累積分布関数型の式を用いている。このことから洗掘現象を表すのに、ワイブル累積分布関数を用いるのは有効であると考えられる。本章でもワイブル累積分布関数を用いて、直立堤背後の洗掘深の経時変化特性を検討する。

(2) ワイブル累積分布関数について

本研究で検討するワイブル累積分布関数を式(7)に示す。

$$\frac{D(T)}{D_{max}} = 1 - \exp[-A_1 T^{A_2}] \quad (7)$$

ここで D_{max} は最大洗掘深、 T は無次元時間、 A_1 と A_2 は実験定数である。

(3) 最大洗掘深 D_{max} の評価について

式(7)の D_{max} を考案する際、粒径の違いによる影響を評価できる方が望ましい。ここで洗掘深は理論渦 R と比例関係にあることが実験より分かっているので最大洗掘深の評価式も理論渦 R との比例式とし、最大洗掘深の式を式(8)のように考える。

$$D_{max} = \alpha [f(d)] R \quad (8)$$

ここで、 α : 実験定数、 $f(d)$: 粒径を考慮できる関数、 R : 理論渦である。

a) $f(d)$ について

砂の移動のし易さを表す指標に無次元限界掃流力 Ψ がある。 Ψ は式(9)のように表される。

$$\Psi = \frac{u_*'^2}{sgd} \quad (9)$$

ここに、 $u_*'^2$: 限界摩擦速度、 s : 砂の水中比重、 g : 重力加速度、 d : 粒径である。 $u_*'^2$ については岩垣⁸⁾の公式を用いた。

図-4の結果より、珪砂8号と珪砂6号では洗掘深の差が1.50倍であることが求まっている。また珪砂8号で $\Psi=0.0949$ 、珪砂6号で $\Psi=0.0479$ であり、珪砂8号の方が珪砂6号よりも約1.98倍値が大きい。よって無次元掃流力と実験との洗掘深には以下の関係式ができる。

$$1.98^x = 1.50 \quad (10)$$

式(10)を x について解くと、 $x=0.594$ という値になる。つまり Ψ の0.594乗した値が洗掘深の差となる。ここでは珪砂6号を基準にしているので、最終的に $f(d)$ は以下の式(11)のようになる。

$$f(d) = \left[\frac{(u_*'^2 / sgd)}{0.0479} \right]^{0.594} \quad (11)$$

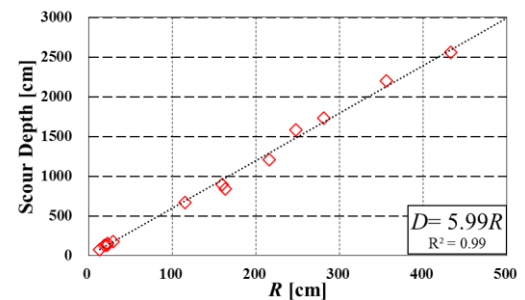
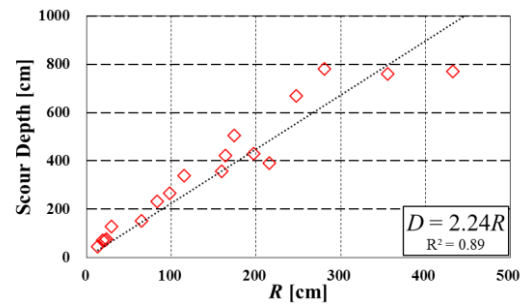


図-5 現地スケールでの洗掘深と理論渦の関係

(上：現地スケール200秒，下：現地スケール2000秒)

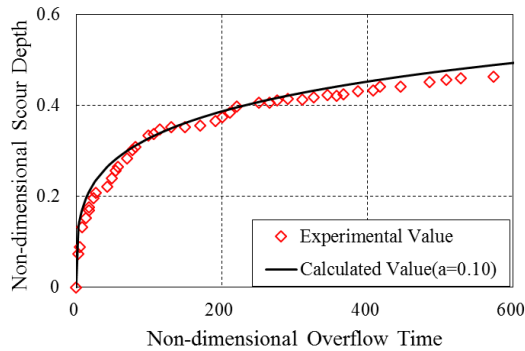
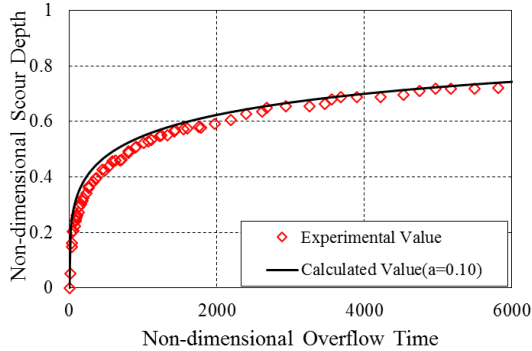
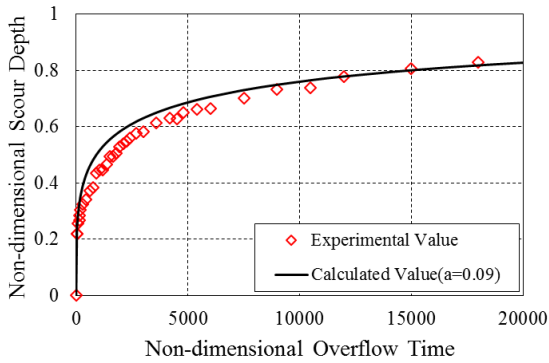


図6 推定式と実験値の比較

(上からケース1, ケース7, 有川ら小規模ケース6)

b) α について

本実験ではケース1のように越流開始後20000秒を過ぎても洗掘深が定常にはならなかった。しかし、現実問題を考えた際、津波などの越流時間は（例えば八戸港の北防波堤での越流時間は500秒程度であった）、本実験で行った越流時間よりも短い。そのため本検討ではケース1の越流開始後20000秒の洗掘深である25.8cmを最大洗掘深とした。ケース1の理論渦 R は2.5cmであるため、 $\alpha=25.8/2.5$ より、 α は以下の式(12)のようになる。

$$\alpha = 10.3 \quad (12)$$

c) D_{max} について

式(11), 式(12)より、本検討での最大洗掘深 D_{max} の式は以下のようになる。

$$D_{max} = 10.3 \left[\frac{(u^*_c)^2 / sgd}{0.0479} \right]^{0.594} R \quad (13)$$

(4) 無次元時間 T について

本検討では無次元時間 T を以下のように定義した。

$$T = \frac{\sqrt{sgd}}{R} t \quad (14)$$

ここに、 s : 砂の水中比重、 g : 重力加速度、 d : 砂の粒径、 R : 理論渦、 t : 越流時間である。

(5) 洗掘深予測式と実験結果の比較

式(7)の推定式と実験値との比較を行った。ここで、式(7)の係数 A_1 と A_2 の値をそれぞれ、0.09~0.11、3/10とすることで概ね、実験値と推定式の値が一致する結果となった。図6に各実験での推定式と実験式を比較したグラフを示す。

5. まとめ

洗掘実験を行い、直立堤背後洗掘の検討を行った。その結果、無次元洗掘深と無次元時間を定義しワイブル累積分布関数を用いることにより、洗掘深の時系列変化を予測することが可能となった。今後は、シルトなどの珪砂よりもより細かい粒径の場合の洗掘現象がどのようになるかの検討を行うことである。また、流量を実スケールまで近づけた時の模型スケール実験との比較を行うことにより、本検討で提案した予測式の適用範囲についてを今後の課題とする。

参考文献

- 1) 富田孝史, 丹羽竜也: 八戸港における東北地方太平洋沖地震津波の再現計算, 土木学会論文集 B2(海岸工学), vol.69, No.2, pp.236-240, 2013.
- 2) 野口賢二, 佐藤慎司, 田中茂信: 津波遡上による護岸越波及び前面洗掘の大規模模型実験, 海岸工学論文集, 第44巻 pp296-300, 1997.
- 3) 有川太郎, 池田剛, 窪田幸一郎: 越流による直立型堤防背後の洗掘量に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, ppL926-L930, 2014.
- 4) 山野貴司, 藤原隆一, 野村浩二, 白木孝一: 杭周辺の局所洗掘に関する現地観測およびその再現実験, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.69, No.2, L874-L879.
- 5) 太田一行, 佐藤隆宏: ダム・堰のゲート直上流で生じる洗掘に関する研究(その1)-洗掘孔形状の経時変化特性-, 電力中央研究所報告, N12002, 2012.
- 6) Silvio Franzetti, Enrico Larcari, Paolo Mignosa: Influence of Tests Duration on the Evaluation of Ultimate Scour Around Circular Piers, Int.Conf.Hydraulic modeling of civil.eng.structures, 1982.
- 7) A.H.Cardoso, R.Bettess: EFFECTS OF TIME AND CHANNEL GEOMETRY ON SCOUR AT BRIDGE ABUTMENTS, Journal of Hydraulic Engineering Vol.125, Issue4, 1999.
- 8) 岩垣雄一: 限界掃流力に関する基礎的研究 (I)限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集第41号, p.1-21, 1956.