

## 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\*

東北大学大学院環境科学研究所

金子 祐人, 小森 大輔

東北大学大学院工学研究科

三戸部 佑太, 田中 仁

新日鐵住金株式会社

乙志 和孝, 黒澤 辰昭

### 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、太平洋沿岸の各地で津波の越流による海岸堤防の被災が生じた。特に被害の大きかった岩手、宮城、福島の3県では、海岸堤防300kmのうち約190kmが全壊、または半壊したと報告されている。堤防破壊の主要な原因として、津波越流により海岸堤防裏法尻に発生した洗掘孔から堤防内の土砂が吸い出されることにより、裏法面が破壊され、全壊に至ることが報告されている(Kato et al.2012)。一方で、洗掘孔により陸側の津波流速が低減する効果が指摘されている(常田・谷本.2012)。そこで、海岸堤防を建設する際に、洗掘を防止するか否かを議論する必要があり、津波越流時における海岸堤防背後での現象について明らかにしなければいけない。本研究では、小型水路における水理実験を行い、粒子画像流速計測法(Particle Image Velocimetry, PIV)を用いて洗掘孔内部の流れ場を可視化し、海岸堤防背後における流れ場とその分類に加え、洗掘孔による流速の低減効果について検討を行う。

### 2. 研究方法の概要

縮尺1/100の海岸堤防模型(高さ:5.2cm, 法面勾配:2:1)を設置した延長110.4cm、幅5cmの水路の堤防下流側に、洗掘形状を再現した固定床を設置した(図-1)。固定床で再現する底面は、津波越流時の海岸堤防背後に生じる洗掘に関する移動床実験(三戸部ら, 2014)の洗掘過程の底面形状データより、越流水深および越流開始からの時刻が異なる14ケース(表-1)を採用した。また、堤防法尻から40cm(現地換算:40m)の場所において、ポイントゲージを用いて水位を計測し、水路下流端にて計測した流量から、洗掘孔背後における各ケースでの断面平均流速 $U$ を求め、洗掘孔が発生していないケースの断面平均流速 $U_0$ と比較し、流速

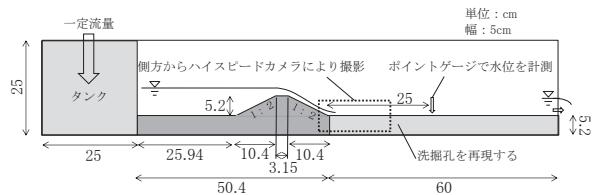


図-1 実験水路

表-1 各ケースの実験条件

ケース	越流水深(m)	時刻t(min)
1	2	0
2		2.5
3		3.4
4		4.2
5		5.1
6		7.6
7		10.2
8	2.9	0
9		2.5
10		3.4
11		4.2
12		5.1
13		7.6
14		10.2

\*Classification of Velocity Field around landward toe of Coastal Dikes induced by Tsunami Overflow, by Kaneko Yuto,

Mitobe Yuta, Otsushi Kazutaka, Kurosawa Tatsuaki, Komori Daisuke, Tanaka Hitoshi.

の低減率( $(U_0 - U)/U_0$ )を算出した。洗掘孔内部の流れ場はPIV法を用いて計測し、可視化した。洗掘孔内部の流れ場の決まり方や、洗掘孔形状、流速の低減率との関係について検討した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 流れ場の分類

堤防法尻周辺における流れ場は3タイプに分類することが出来る(金子ら. 2015, 図-2)。タイプ1は、法尻通過後に流れが沈み込み、洗掘孔の底面形状に沿って流下する。その後、洗掘孔後部においてそのまま下流へと向かう流れと、小さい流速を持ち上流へと戻る流れに分岐する。タイプ2は法尻通過後に跳水を起こし、斜め上方向の大きい流速を持ち、跳ねた水が落下する地点においてそのまま下流へと向かう流れと、洗掘孔の底面形状に沿う様に上流へと戻る流れに分岐する。タイプ3は洗掘孔が無く、水平方向のみの流速を持つタイプである。ここで、タイプ1と2では洗掘孔内で反対方向の水平渦が生じており、底面近くの流れの向きが反転している。このことは、流れ場のタイプが洗掘形状の発達の仕方

図-2 各タイプの流れ場と模式図

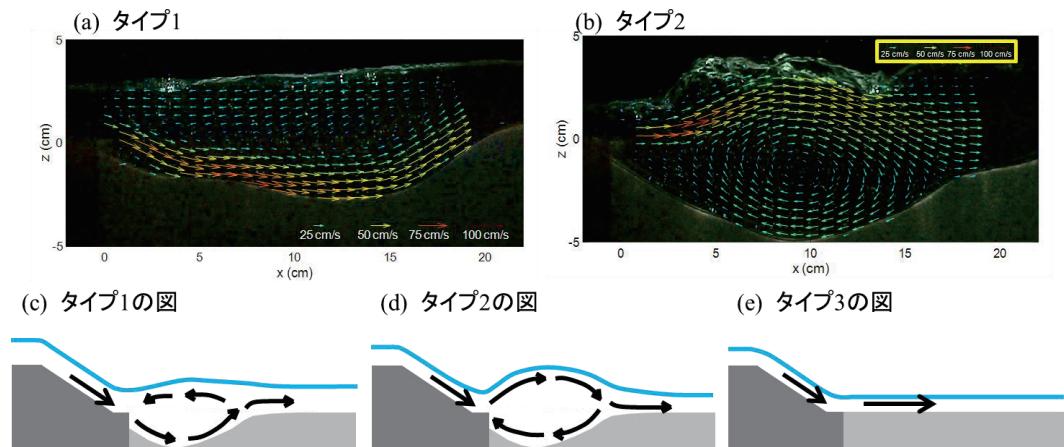


表-2 法尻での水位と洗掘孔内部の最大水位とその比、及び洗掘形状

ケース	タイプ	ht	hm	hm/ht	幅	深さ	深さ/幅
2	1	1.50	1.80	1.20	12.1	1.78	0.147
3	1	2.20	2.15	0.98	14.0	2.01	0.143
4	2	1.10	3.10	2.82	13.6	2.76	0.203
5	2	1.30	2.20	1.69	13.5	2.55	0.189
6	1	1.60	1.90	1.19	16.1	2.52	0.156
7	1	1.70	2.10	1.24	17.1	2.69	0.157
9	2	0.90	2.00	2.22	13.2	3.18	0.240
10	2	1.30	3.40	2.62	16.5	3.16	0.191
11	1	2.40	3.20	1.33	18.0	2.99	0.167
12	1	2.50	3.60	1.44	19.7	2.60	0.132
13	1	2.50	3.20	1.28	22.8	2.97	0.130
14	2	1.70	3.40	2.00	23.7	4.66	0.197

を決めているということを示しており、洗掘過程を明らかにする上で法尻における流れ場のタイプと洗掘形状の相互作用を明らかにする必要がある。

### 3.2 流れ場を表すパラメータ

堤防背後における流れ場を表現するパラメータとして、法尻以降における最大水位 $h_m$ と、法尻における水位 $h_t$ 、及びその比である $h_m/h_t$ を用いる。 $h_m/h_t$ は法尻を通過した流れが洗掘孔内部を流れるときにどれだけ跳ね上がっているかを示し、タイプ2の流れのときに大きく、タイプ1のとき、タイプ2における $h_m/h_t$ の値よりも小さくなる。 $h_m/h_t$ をタイプ毎に色を分けてプロットしたものを作成したものを図-3に示す。これより、1.5付近がタイプ1とタイプ2の分かれの境となっていることが読み取れる。また、表-2に $h_m$ 、 $h_t$ 、 $h_m/h_t$ の値と、以下で示す深さと幅、及びその比である深さ/幅の値を示す。

### 3.3 洗掘孔形状を表すパラメータ

洗掘孔の形状を表す値として、深さと幅、深さ/幅を用いる。深さは洗掘孔の初期底面からの最大深さ、幅は法尻から洗掘孔が再び初期底面の高さに戻るまでの距離、深さ/幅はこれらの比である。深さ/幅の値をタイプ毎に色を分けてプロットしたものを、 $h_m/h_t$ を示した図-3に併せて示す。これより、0.18付近がタイプ1とタイプ2の分かれの境となっている。深さ/幅の値が、0.18より小さいとタイプ1の流れ場をとり、0.18より大きいとタイプ2の流れ場をとることが読み取れ、深さが幅に対し一定以上大きくなると法尻を通過した流れが跳水を起こすということが分かる。同様に、深

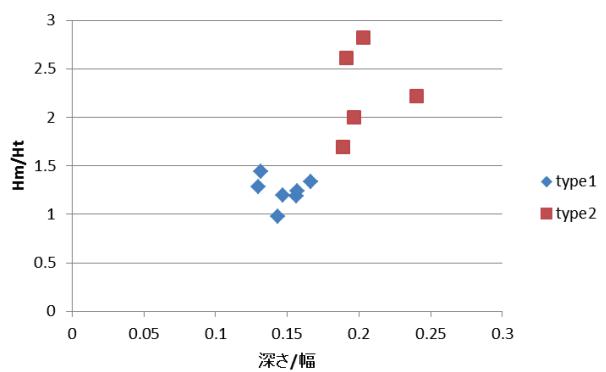


図-3 各タイプと深さ/幅、 $h_m/h_t$ の関係

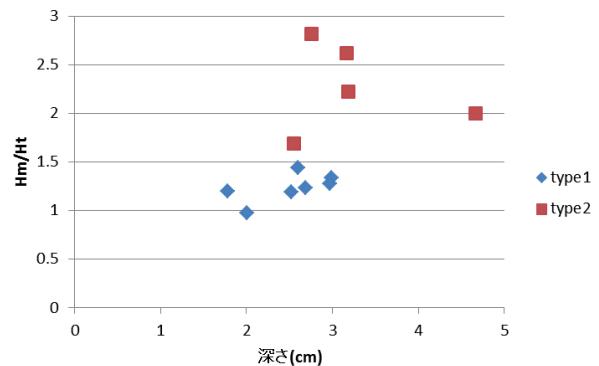


図-4 各タイプと深さ、 $h_m/h_t$ の関係

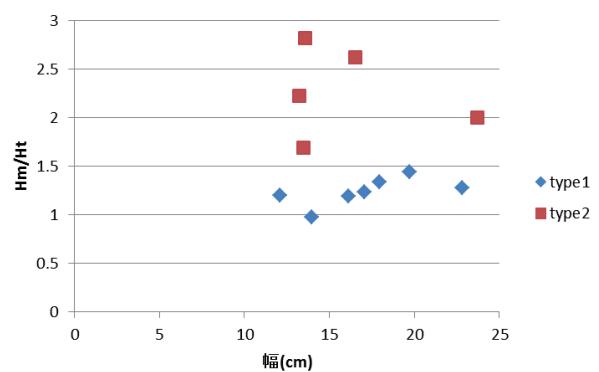


図-5 各タイプと幅、 $h_m/h_t$ の関係

さと幅の値についてそれぞれタイプ毎に色を分けてプロットしたところ、相関は確認できなかった（図-4, 5）。

移動床実験（三戸部ら、2014）の洗掘孔の発達過程を観察すると、はじめはタイプ1の流れにより洗掘孔が発達していき、幅に対し深さの値が大きくなるとタイプ2の流れに遷移する。今回の実験により、流れ場のタイプが遷移するときの洗掘孔の形状を確認することが出来た。

### 3.4 低減率と洗掘孔形状の関係

#### 3.4.1 幅と深さ

図-6は洗掘孔の幅と低減率の関係を表した図である。タイプ1の流れについて、負の相関があることが分かる。底面近くの流れが大きい流速をもったまま洗掘孔の後部にぶつかることで流れが堰き上げられ、洗掘孔

背後の水位が大きくなり、低減効果につながっていると考えられる。次に、図-7は洗掘孔の幅と低減率の関係を表した図であり、負の相関を確認することが出来る。深さが小さいことで法尻を通過した流れが強い勢いで底面にぶつかることにより、流速が低減されると考えられる。

#### 3.4.2 深さ/幅

図-8は低減率と洗掘孔の深さ/幅の関係をタイプ毎に色を分けてプロットした図である。タイプ1については、低減率と深さ/幅との間に関係性は見られないが、タイプ2に関して

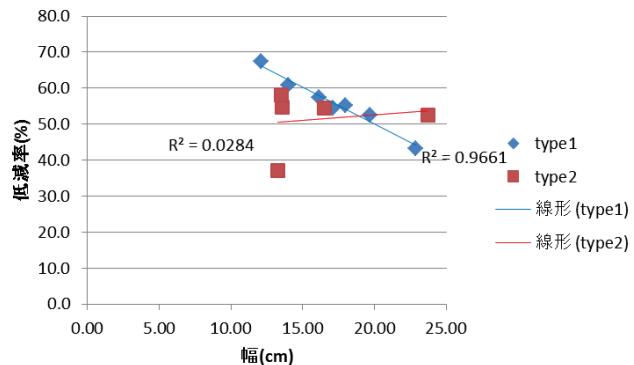


図-6 各タイプの幅と低減率の関係

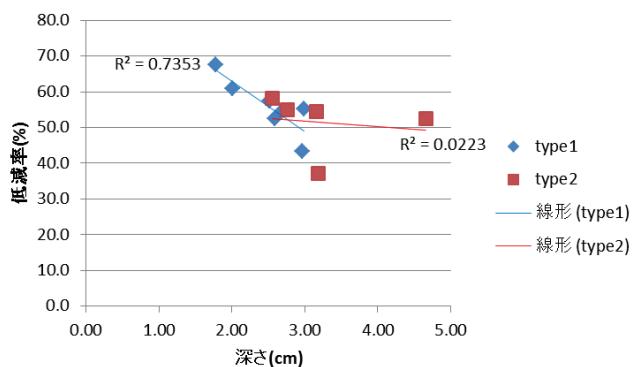


図-7 各タイプの深さと低減率の関係

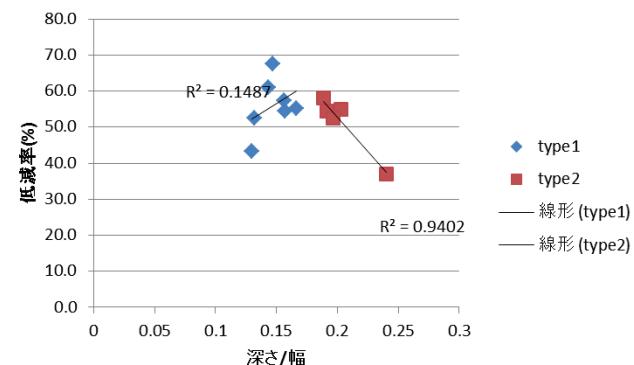


図-8 各タイプの深さ/幅と低減率の関係

は相関を確認できる。また、図-9は、洗掘孔の深さ/幅と低減率の関係を表したものであり、相関があることが確認できる。図-10は法尻通過後の流速ベクトルと低減率の関係を表したものであり、相関が確認できる。以上三つの図よりタイプ2の流れ場では、深さ/幅の値が小さくなると、法尻通過後の流速ベクトルの水平からの角度が大きくなる。その流れが洗掘孔通過後の水位の上昇に影響しており、結果として低減率が大きくなるということが分かる。

#### 4. おわりに

津波越流による海岸堤防裏法尻に発生する洗掘孔内部の流れ場を計測し、それらの違いにより3ケースに分類出来る。また、 $h_m/h_t$ を堤防背後における水位を表現するパラメータとして採用し、1.5付近を閾値に、タイプ毎に分けられることが分かった。

洗掘孔形状を表すパラメータとして、深さと幅、深さ/幅を採用し、それぞれ流れ場のタイプ、低減率との関係を比較した。その結果、深さ/幅の値が0.18より小さいとタイプ1の流れ場を持ち、0.18より大きいとタイプ2の流れ場を持つことが分かった。タイプ1については、幅が小さくなると低減率が大きくなる。その理由として考えられるのが、法尻を通過し、沈み込んだ流れが大きい流速をもったまま洗掘孔後部にぶつかることで、流れが堰き上げられるためであると考えられる。また、深さが小さくなると低減率が大きくなかった。その理由として考えられるのが、深さが小さいことで法尻を通過した流れが勢いよく底面にぶつかることに加え、上流へと向かう流れとのせん断力を受けやすいためであると考えられる。タイプ2について、深さ/幅が小さくなると法尻通過後の流速ベクトルの水平からの角度が大きくなり、低減率が大きくなることが分かった。今後の展望として、これまでの実験では、越流水深は2.0m、2.9mのみであるので、今後の実験でより大きい越流水深のケースについて行う予定である。またより詳細な流れ場の分類や、洗掘形状からの流れ場の決定について検討し、洗掘孔の発達過程について明らかにしていく。

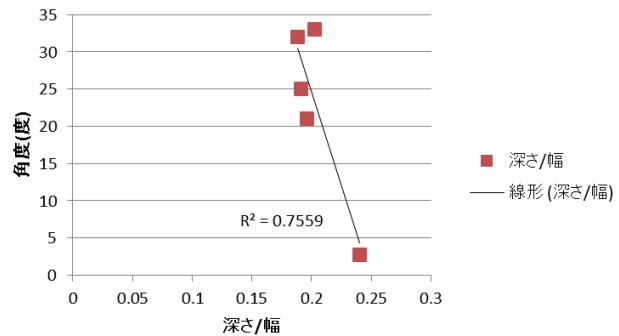


図-9 タイプ2の深さ/幅と流速ベクトルの角度の関係

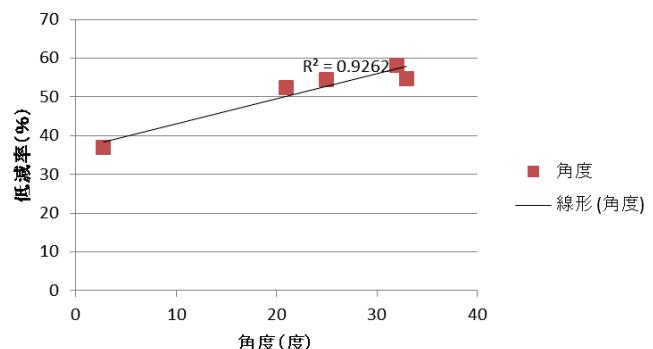


図-10 タイプ2の流速ベクトルの角度と低減率の関係

## 参考文献

- 1) 常田賢一, 谷本隆介 : 2011 年東北地方太平洋沖地震における土盛構造の耐津波特性および落掘の形成特性, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.68, pp.I\_1091-I\_1112, 2012.
- 2) 金子祐人, 三戸部佑太, 田中仁 : 海岸堤防裏法尻の洗掘孔の津波流速低減効果に関する水理実験, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集, II -186, 2015.
- 3) 三戸部佑太, 乙志和孝, 黒澤辰昭, Mohammad Bagus Adityawan, Min Roh, 田中仁 : 津波越流に対する綱矢板壁構造の堤防補強効果に関する実験的検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, pp.I\_976-I\_980, 2014.
- 4) 三戸部佑太・Mohammad Bagus Adityawan・田中 仁・河原俊哉・黒澤辰昭・乙志和孝 (2014) : 津波越流により生じる海岸堤防裏法尻の洗掘現象に関する実験, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.70, No.4, pp. I\_1147-I\_1152
- 5) 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, pp.I\_406-I\_410, 2012.
- 6) Kato, F., Y. Suwa, K.Watanabe and S. Hatogai (2012): Mechanism of coastal dike failure induced by the Great East Japan Earthquake Tsunami, Proc. of 33rd Int. Conf. on Coast. Eng., 9 pages.
- 7) 加藤史訓, 野口賢二, 諏訪義雄, 木村晃, 河合雅史, 高木利高, 小俣雅志 : 東北地方太平洋沖地震津波による仙台平野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, pp.I\_1396-I\_1400, 2012.