

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18758

研究課題名(和文) 地盤の状態変化を考慮した津波による海岸堤防の洗掘量評価と対策工法の提案

研究課題名(英文) Scour evaluation and countermeasures for coastal dikes subjected to tsunami overflow under various ground conditions

研究代表者

澤田 豊 (SAWADA, YUTAKA)

神戸大学・農学研究科・助教

研究者番号：60631629

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：

東日本大震災では、巨大津波により海岸堤防に甚大な被害が発生した。現地調査の結果、海岸堤防陸側地盤の局所的な洗掘が破堤原因として報告されている。今後、巨大地震の脅威が迫る中、海岸堤防背後地盤の洗掘現象を解明し、有効な対策を確立することが喫緊の課題である。

本研究では、水理模型実験、鉛直噴流実験を実施し、液状化が洗掘に与える影響を明らかにするとともに、液状化を考慮した洗掘対策を提案し、それらの効果を検証した。また、津波越流により生じる洗掘形状の簡易予測手法を提案した。調査結果と比較したところ、概ね予測値と一致することから、当推定手法の妥当性が検証された。

研究成果の概要(英文)：In the Great East Japan Earthquake, a massive tsunami caused severe damage to coastal structures. It has been reported from field surveys that a local scour at the ground behind coastal dikes was one of causes to a dike failure. Since huge earthquakes are expected in recent future, it is essential to reveal scour process and to suppose effective countermeasures.

In this study, flume experiments and vertical jet flow experiments have been conducted to clarify effects of liquefaction on scour characteristics and to verify the effects of the proposed countermeasures. In addition to the model tests, simple equations have been suggested to predict a scour profile. Since the predicted values are approximately corresponding with field data, the proposed methods have been verified to be effective.

研究分野：農業農村工学

キーワード：海岸堤防 津波 洗掘 水理模型実験 数値解析

## 1. 研究開始当初の背景

東日本大震災では、巨大津波により防潮堤や海岸堤防等の海岸施設に大きな被害が生じた。海岸堤防の破堤に関しては、越流した津波による堤防陸側地盤の局所的な洗掘が要因の一つであると考えられている。今後、大地震の脅威が迫る中、津波越流による海岸堤防陸側地盤の洗掘現象を解明し、有効な対策工を確立することが喫緊の課題である。

## 2. 研究の目的

東日本大震災では、津波の到達と最大余震による地震動の到達が重なった可能性が指摘されている。すなわち、余震による再液状化と津波による洗掘が同時に生じる可能性が考えられる。既往研究の多くは、飽和地盤での洗掘が対象とされており、液状化が洗掘に与える影響については未解明である。

洗掘対策工に関しては、建設費用を抑えることは言うまでもなく、液状化地盤中での安定性も同時に求められる。既往の研究で提案ならびに検証されてきた洗掘対策工は液状化の影響が考慮されていない。さらに、小型模型実験の結果に基づくため、実現象と比較して圧力レベルが著しく低く、結果を定量的に評価することが難しい。

また、洗掘孔が陸側へ向かう津波の流速を低減する効果を持つことが現地調査や既往研究で報告されており、本研究で新たに提案される対策工では、このような特徴を考慮することも重要となる。

さらに、我が国における海岸堤防の総延長を考慮すると、全ての海岸堤防に対策工を施すことは困難であり、背後の重要度や堤防の安定性を総合的に検討し、対策工の要否を判断することが望ましい。堤防の安定性を検討する上で津波により生じる洗掘量の予測が不可欠である。しかしながら、現状では海岸堤防陸側地盤の洗掘予測は高度な数値解析に限られ、容易な手法とは言えない。

本研究では、液状化地盤を含めた洗掘過程の解明と洗掘対策工の提案・検証、ならびに簡易な洗掘被害予測手法の提案を目的に以下の5項目に着目し、研究を遂行した。

- (1) 液状化が海岸堤防陸側地盤の洗掘に与える影響
- (2) シート状軽量土木資材を用いた対策工の提案ならびに洗掘孔の特徴とその効果
- (3) 洗掘孔が持つ流速の低減効果
- (4) 実規模レベルの圧力下での洗掘と対策工法の効果
- (5) 津波越流により生じる洗掘形状（洗掘長および洗掘深）の簡易推定手法

## 3. 研究の方法

本研究では、上記に示す5つの解明事項に

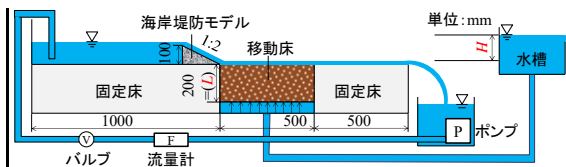


図1 小型アクリル製水路

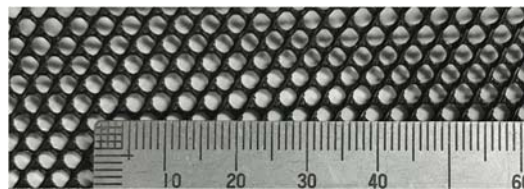


図2 ジオグリッド（目合い：2.5 mm）

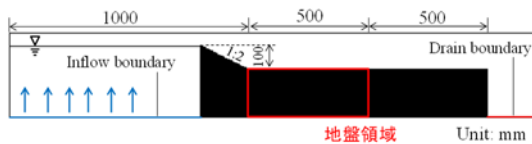
対して、それぞれ(1) 液状化時における海岸堤防陸側地盤の洗掘に関する水理模型実験、(2) ジオグリッドを用いた海岸堤防陸側地盤の洗掘対策に関する水理模型実験、(3) 洗掘孔が有する津波流速低減効果に関する数値解析、(4) 海岸堤防を越流する津波を想定した鉛直噴流実験、(5) 津波越流により生じる海岸堤防陸側地盤の洗掘形状の簡易推定法の提案を行った。以下、それぞれの研究方法について具体的に述べる。

### (1) 液状化時における海岸堤防陸側地盤の洗掘に関する水理模型実験

図1に示す奥行き300mmのアクリル製水路を用いて津波越流による海岸堤防陸側地盤の洗掘を模擬した実験を実施した。水路内には6・7混合珪砂を用いて相対密度約30%の砂地盤を作製し、海岸堤防下流側斜面を模擬した構造物を設置した。水槽と地盤の水頭差により地盤内に動水勾配  $i (=H/L)$  を作用させ、地盤の有効応力、すなわち、液状化程度を制御した。実験条件として、事前実験より求めた水頭差と過剰間隙水圧比の関係から動水勾配を  $i=0.0$  と  $i=1.0$  の2種類に決定した。 $i=1.0$  の時、過剰間隙水圧比は約1.0であった。実験時は、水中ポンプにより60 L/minの循環流を発生させ、アクリル前面での洗掘過程を1分間撮影した。

### (2) ジオグリッドを用いた海岸堤防陸側地盤の洗掘対策に関する水理模型実験

先に述べたように、洗掘対策工は、液状化時に沈下や浮上が生じてはならない。また、コスト縮減を図るためには、優れた施工性が不可欠で、面状の土木資材等を用いることが考えられる。本研究では、盛土を補強するために用いられるジオグリッドを洗掘対策として考えた（図2）。対策工の効果を検証するため、図1に示すアクリル製水路を用いて模型実験を実施した。なお、本実験では地盤内に動水勾配  $i$  を作用させた条件で実施していない。ジオグリッドは斜面構造物尻端部でのみ固定され、地盤表層に設置した。実験条件として、ジオグリッドの目合いは3種類（2.5 mm、6.0 mm、8.0 mm）を用意し、各種におい



(a) 洗掘孔なし



(b) 洗掘孔あり

図3 数値解析モデル

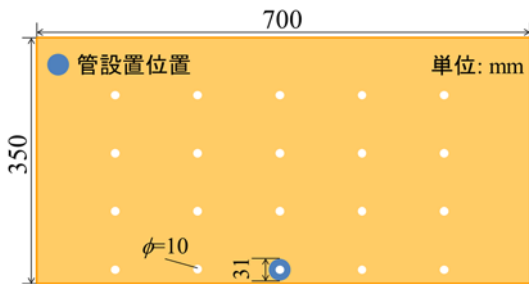


図4 メンブレンを用いた洗掘対策工

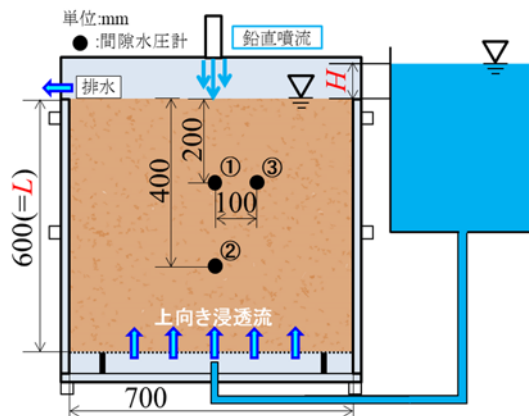


図5 鉛直噴流実験装置

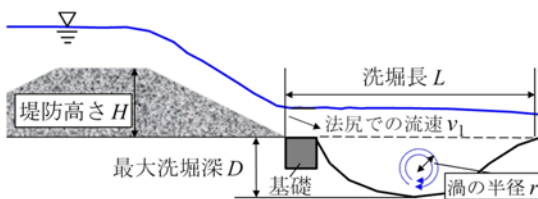


図6 洗掘形状予測に必要な各諸元概念図

て斜面構造物法尻部分から対策範囲を 10 cm, 20 cm, 40 cm とした。実験時は、水中ポンプにより 160 L/min. の循環流を発生させ、アクリル前面での洗掘過程を 10 分間撮影した。

### (3) 洗掘孔が有する津波流速低減効果に関する数値解析

後述するように、(2)の実験結果から、ジオグリッドにより海岸堤防近傍での洗掘が抑制され、洗掘孔が海岸堤防より離れた位置で生じることが確認された。当実験において形成された洗掘孔が有する流速低減効果について

検証するため、2次元数値波動水路 (CADMAS-SURF) による数値解析を実施した。海岸堤防背後地の減災において重要とされる津波の遡上速度すなわち、洗掘孔背後の水平流速変化に着目した。

本解析モデルを図3に示す。座標軸は、斜面構造物裏法尻を原点とする陸側方向を x 軸、鉛直方向下向きを y 軸とした。計算格子は、5 mm×5 mm の等間隔直交格子を用いた。実験と同様に流入境界から 1 分間に 160 L/min. の水を発生させ、越流現象を再現した。洗掘孔による減勢効果を評価するために、実験終了時の洗掘形状 (目合い: 2.5 mm, 対策範囲: 10 cm) を地表面形状としてモデル化した。本解析において斜面構造物、模型地盤、固定床は不透水性とした。また、海岸堤防裏法尻をコンクリート等で完全に被覆した場合、すなわち、洗掘孔が存在しない場合についても同様の解析を行った。本解析では、洗掘孔内の流況が安定した越流開始より約 30 秒後の水平流速を算出した。

### (4) 海岸堤防を越流する津波を想定した鉛直噴流実験

後述するように、(2)の実験結果より、ジオグリッドの目合いが小さいほど、洗掘抑制効果が得られたことから、洗掘対策工に関しては、液状化時の過剰間隙水圧を消散する機能を備えた上で可能な限り消散孔の面積を抑えたシートが望ましい。そこで、間隙水圧の消散に必要な孔の面積を算出し、図4に示すような直径 1 cm の水圧消散孔を有するメンブレンを新たに提案した。本実験では、メンブレンに加え、ジオグリッド (目合い 2.5 mm)、碎石 (平均粒径 15 mm) の合計 3 種類の対策工について検証を行った。

実験装置の概要を図5に示す。模型地盤は、高さ 600 mm、幅 700 mm、奥行き 350 mm で、6・7 混合珪砂を用いて相対密度が約 30% になるよう作製した。(1)の実験と同様の手法で液状化地盤を再現した。実験条件として、動水勾配は、 $i=0.0$  と  $i=1.0$  の 2 種類とした。 $i=1.0$  の時、過剰間隙水圧比は約 0.75 であった。実験時は、地盤上方に設置した管より流速 4.2 m/s の鉛直噴流を地盤表層に 1 分間作用させた。

### (5) 津波越流により生じる海岸堤防陸側地盤の洗掘形状の簡易推定法の提案

本研究では、水理模型実験を実施し、得られた実験結果と既往研究<sup>1), 2)</sup>の結果から洗掘長  $L$  および最大洗掘深  $D$  を簡易に推定する手法について検討した。洗掘形状の推定は、護岸の戻り流れを対象に定在渦から最大洗掘深を算定した野口ら<sup>3)</sup>の手法を参考に行った。渦によるエネルギー散逸量と越流水の落下により供給されるエネルギーの釣り合いから洗掘孔内に発生する渦の半径は式(1)で表される。ここで、 $r$ : 渦の半径、 $g$ : 重力加速度、 $Q$ : 流量、 $H$ : 堤防高さ、 $v_1$ : 海岸堤防裏法尻にお

表1 推定式導出に用いた実験の条件

	堤防高さ	地盤材料の平均粒径	海岸堤防の法面勾配
本実験	0.10 m	0.3 mm	1:2
三戸部ら <sup>2)</sup>	0.10 m	0.3 mm	
	0.20 m		
鳩貝ら <sup>1)</sup>	0.20 m	0.34 mm	
	0.24 m		
	0.36 m		
	2.5 m		
	3.0 m		

る津波の流速である。図6に洗掘形状予測に必要な各諸元の概念図を示す。式(1)の右辺を渦の大きさ $R_v$ と定義し、この洗掘孔内で生じる渦の大きさより洗掘形状の推定を実施した。

$$r \propto g^{\frac{1}{2}} Q^{\frac{1}{2}} v_1^{\frac{1}{2}} H \quad (1)$$

上記の考え方にに基づき、得られた本実験結果と既往研究結果から、法尻に基礎を設置した場合と設置しない場合について、実時間換算10分後の洗掘形状を推定した。各実験条件を表1に示す。さらに、本研究で提案された推定式と東日本大震災の現地調査の結果<sup>4)</sup>についても比較を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 液状化時における海岸堤防陸側地盤の洗掘に関する水理模型実験

図7に $i=0.0$ と $i=1.0$ における実験開始より1分後の洗掘形状を示す。実験時の様子から、 $i=1.0$ では、液状化の進行に伴い洗掘孔下流側の斜面が崩壊し、洗掘孔内で埋戻りが生じる様子が確認された。その結果、 $i=0.0$ と比較して、洗掘孔が下流側へ拡大、洗掘深が減少することがわかる。このことから、液状化による洗掘形状の変化が海岸堤防の安定性に与える影響は小さいと考えられる。しかしながら、液状化に伴う海岸堤防全体の劣化や機能低下については、別途評価を行う必要がある。

##### (2) ジオグリッドを用いた海岸堤防陸側地盤の洗掘対策に関する水理模型実験

図8に時間経過に伴うアクリル前面での洗掘形状の変化を示す。対策工なしとの比較より、ジオグリッドを地盤表層に設置することで、斜面構造物近傍での洗掘が大幅に抑制されることが明らかとなった。また、越流水がジオグリッドにより上方へ跳ね上がり、落下地点において洗掘が発達することがわかる。

洗掘抑制効果を定量的に評価するため、実験終了時におけるアクリル前面での洗掘面積を算出した。既往研究<sup>2)</sup>では、しばしば初期地

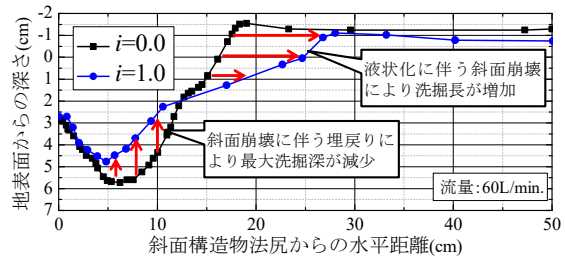
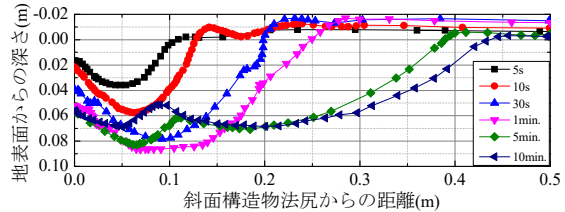
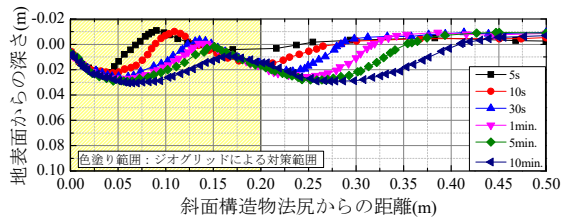


図7 洗掘形状 (1分後,  $i=0.0, 1.0$ )



(a) 対策工なし



(b) 対策工あり

(目合い: 6 mm, 対策範囲: 20 cm)

図8 時間経過に伴う洗掘形状の推移

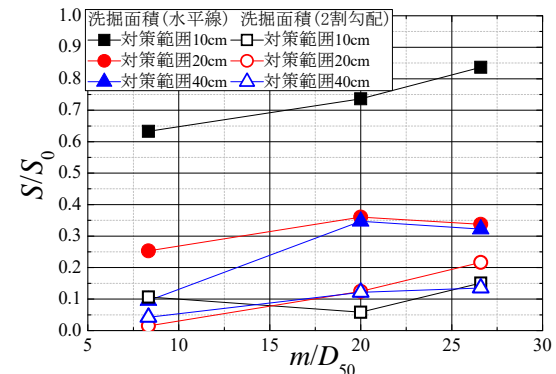


図9 ジオグリッドの目合いと洗掘面積の関係

表面(水平線)より下部の洗掘面積が用いられる。しかしながら、基礎や被覆工の流失に影響を与えるのは、堤防から離れた位置での洗掘ではなく、法尻近傍地盤の洗掘であることは言うまでもなく、法尻近傍に着目した洗掘量評価を行うことに意義があると考えられる。本研究では、国土交通省が定める「2Hルール」<sup>5)</sup>を参考に、堤防の安定性に関する地盤の範囲を2割勾配線の内側と決定した。図9にそれぞれの評価方法に基づいた、洗掘面積を示す。ここで、 $m$ :ジオグリッドの目合い、 $D_{50}$ :地盤材料の平均粒径(0.3 mm)、 $S$ :各ケースにおける洗掘面積、 $S_0$ :対策なしにおける洗掘面積である。初期地表面(水平線)より下部の洗掘面積では、目合いの減少および対策範囲の拡大に伴い洗掘面積が減少しているこ

とがわかる。一方、2割勾配線より下部の洗掘面積では、目合いの減少に伴い洗掘面積は減少するものの、対策範囲の拡大に伴う洗掘面積の減少は確認されない。したがって、対策範囲の拡大が2割勾配線内での洗掘を抑制する効果は小さいことが明らかとなった。これらの結果から、洗掘対策工には液状化時の水圧を消散する機能を有した上で可能な限り目合いの小さなシートを用いて、海岸堤防近傍に局部的に配置することが合理的であると考えられる。

### (3) 洗掘孔が有する津波流速低減効果に関する数値解析

数値解析により得られた水平流速分布結果を図10に示す。流速の低減効果として、 $x=0.4$  m以降の水平流速を評価する。洗掘孔が存在しない場合、最大水平流速は0.80 m/sであった。実験で確認された実験終了時の洗掘形状を用いた場合、最大水平流速は0.54 m/sであり、洗掘孔による流速低減効果は約32%であった。このことから、海岸堤防陸側地盤に洗掘孔が形成されることで、水平流速が低減されることが明らかとなった。本実験において、対策範囲により斜面構造物近傍での洗掘面積に差異が見られないことから、背後地での減災を考慮した洗掘対策として、ジオグリッドによる対策範囲を海岸堤防近傍に限定することが考えられる。これにより、海岸堤防より離れた位置において減勢効果を持つ洗掘孔が形成され、津波流速の低減が期待される。

### (4) 海岸堤防を越流する津波を想定した鉛直噴流実験

図11に各対策工を用いた場合の $i=0.0$ と $i=1.0$ における洗掘深の変化を示す。メンブレンとジオグリッドを用いた場合、 $i=0.0$ における実験終了時の洗掘深は、対策なしと比較してそれぞれ48%、24%減少した。碎石を用いた場合、実験開始より5秒後以降、周囲の碎石が洗掘孔内に埋め戻ることによって洗掘深は減少した。局所的な洗掘に伴う大規模な埋め戻りは、実際の津波越流による洗掘現象において確認されないため、碎石を用いた場合では洗掘深を過小に評価している可能性がある。

$i=1.0$ の場合、対策なしおよびメンブレンを用いた場合では、洗掘深は $i=0.0$ の値と同程度を示している。この理由として、過剰間隙水圧は地表面で完全に消散するため、液状化が地表面の土粒子に与える影響は小さいことが挙げられる。ジオグリッドを用いた場合、 $i=1.0$ の洗掘深は $i=0.0$ よりも小さい。これは、地盤内の有効応力が低下することで、洗掘孔で斜面崩壊が発生し、大規模な埋め戻りが生じたためである。一方、碎石を用いた場合、液状化に伴う有効応力の減少により、碎石が砂地盤に沈み込み、洗掘深は液状化地盤の方が大きくなった。

上記の結果より、水圧消散孔を設けたメンブレンが洗掘対策としても最も有効であるこ

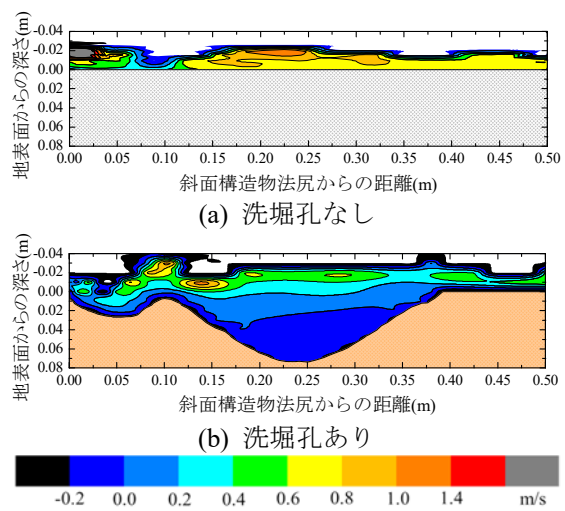


図10 堤防陸側の流速分布

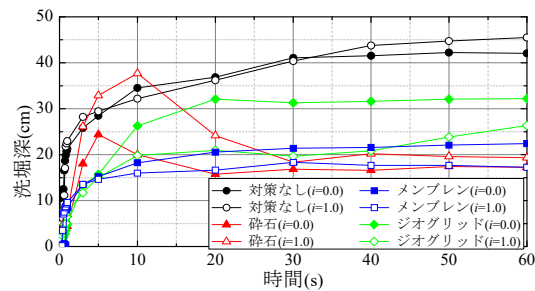


図11 洗掘深の時系列

とがわかった。また、碎石を用いた場合、流亡や沈み込みが生じることから、ジオグリッド等で一体化する必要があることがわかった。

### (5) 津波越流により生じる海岸堤防陸側地盤における洗掘形状の簡易推定法の提案

図12および図13に渦の大きさと洗掘長 $L$ および最大洗掘深 $D$ の関係を示す。法尻の基礎は、上部構造物の滑動や沈下を防止する役割を担い、波による一時的な洗掘に耐えられるように十分な根入れで設置されるが、通常、津波による洗掘を考慮されていない。既往研究では、津波越流による洗掘が基礎により抑えられることが報告されている。また、その効果は基礎の幅に依存すると考えられる。本研究では、基礎幅 $B$ を堤防高さ $H$ で除した値を基礎幅比 $B/H$ と定義した。図12および図13から、基礎幅比の違いによる洗掘長および最大洗掘深の変化は確認されない。このことから本研究で提案した基礎を設置した場合の推定式には、基礎幅の影響を無視した。推定式と各実験結果のプロットは、実験規模に関わらずよく一致していることが分かる。さらに、現地調査の結果は、概ね推定式線上に位置していることが確認される。

推定式の係数より、法尻に基礎を設置した場合の方が、設置しない場合よりも、洗掘長が約1.2倍に増加、最大洗掘深が約0.47倍に減少することが分かる。これは、法尻に基礎を設置することで越流水の方向が水平に変化

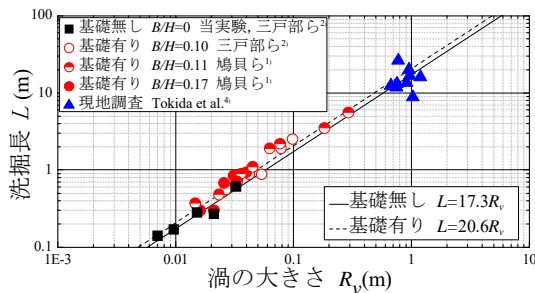


図 12 渦の大きさと洗掘長の関係

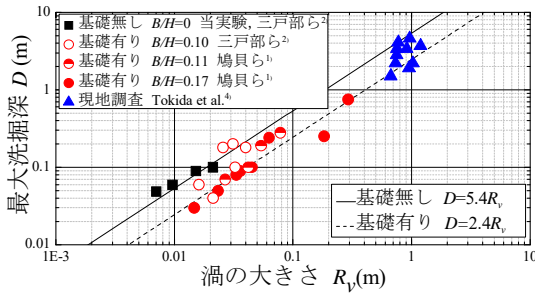


図 13 渦の大きさと最大洗掘深の関係

し、洗掘が水平方向に進行するためであると  
考えられる。

<引用文献>

1. 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, **68** (2), 406-410, 2012.
2. 三戸部佑太, 乙志和孝, 黒澤辰昭, Adityawan, M.B., 盧敏, 田中仁, 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, **70** (4), 1147-1152, 2014.
3. 野口賢二, 佐藤慎司, 田中茂信, 津波遡上による護岸越流および前面洗掘の大規模模型実験, 海岸工学論文集, **44**, 296-300, 1997.
4. Tokida, K. and Tanimoto, R., Lessons for countermeasures using earth structures against tsunamis obtained in the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Soils and Foundations*, **54** (4), 523-543, 2014.
5. 国土交通省 (参照 2018.3.25), 許可工作物技術審査の手引き～チェックリスト～(オンライン), 入手先 <[https://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guidelin/e/kasen/pdf/kyokakousakubutu\\_tebiki.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guidelin/e/kasen/pdf/kyokakousakubutu_tebiki.pdf)>

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Takegawa, N., Sawada, Y., Murai, K. and Kawabata, T., Influence of Liquefaction on Scour behind Coastal Dikes due to Tsunami Overflow, *International Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.12, No.1, 40-45, 2018.
- ② 竹川尚希, 澤田豊, 河端俊典, 津波越流により生じる海岸堤防裏法尻の洗掘形状の

簡易推定法, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.73, No.2, pp.I\_1045-I\_1050, 2017.

- ③ Takegawa, N., Sawada, Y. and Kawabata, T., Effect of Scour Protections against Tsunami Overflow at a Landward Toe of Coastal Dikes, *Proceedings of the 27th International Society of Offshore and Polar Engineering Conference*, pp.976-980, 2017.
- ④ Takegawa, N., Sawada, Y., Murai, K. and Kawabata, T., Model experiments and simulations on influence of liquefaction on scour at a landward toe of coastal dykes due to tsunami overflow, *Proceedings of the 8th international conference on scour and erosion*, pp.343-348, 2016.
- ⑤ Sawada, Y., Takegawa, N., Murai, K. and Kawabata, T., Influence of Effective Stress of Soil on Scour at Landward Toe of Coastal Dykes under Tsunami Overflow, *Proceedings of the 26th International Society of Offshore and Polar Engineering Conference*, pp.843-847, 2016.

[学会発表] (計 4 件)

- ① 竹川尚希, 堀尾有加, 澤田豊, 河端俊典: ジオグリッドを用いた海岸堤防背後地盤の洗掘対策に関する模型実験, 平成 29 年度農業農村工学会大会講演会, 2017.08, 藤沢市.
- ② 竹川尚希, 澤田豊, 河端俊典: 津波越流により生じる海岸堤防背後における洗掘形状の推定について, 平成 29 年度農業農村工学会大会講演会, 2017.08, 藤沢市.
- ③ 竹川尚希, 澤田豊, 村井和樹, 河端俊典: 津波越流による海岸堤防裏法尻の最大洗掘深の予測について, 平成 28 年度農業農村工学会大会講演会, 2016.08, 仙台市.
- ④ 澤田豊, 竹川尚希, 村井和樹, 河端俊典: 海岸堤防背後地盤の液状化が津波越流による洗掘に及ぼす影響, 平成 28 年度農業農村工学会大会講演会, 2016.08, 仙台市.

6. 研究組織

(1)研究代表者

澤田 豊 (SAWADA Yutaka)  
神戸大学大学院農学研究科・助教  
研究者番号: 60631629