

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	越流・浸透流を考慮した捨石マウンドの安定重量に関する水理模型実験
Title(English)	A HYDRAULIC MODEL EXPERIMENT FOR THE STABLE WEIGHT OF RUBBLE-MOUND CONSIDERING THE OVERFLOW AND SEEPAGE FLOW
著者(和文)	井上 翔太, 笠間 清伸, 平澤 充成, 善 功企, 古川 全太郎, 八尋 裕一
Authors(English)	Shota Inoue, Kiyonobu Kasama, Mitsunari Hirasawa, Koki Zen, Zentaro Furukawa, Yuichi Yahiro
出典(和文)	土木学会論文集B3 ( 海洋開発 ), Vol. 71, No. 2, pp. I_1059-I_1064
Citation(English)	Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering), Vol. 71, No. 2, pp. I_1059-I_1064
発行日 / Pub. date	2015, 9
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は土木学会に帰属します。 Copyright (c) 2015 Japan Society of Civil Engineers.

# 越流・浸透流を考慮した捨石マウンドの安定重量に関する水理模型実験

井上 翔太<sup>1</sup>・笠間 清伸<sup>2</sup>・平澤 充成<sup>3</sup>・  
善 功企<sup>4</sup>・古川 全太郎<sup>5</sup>・八尋 裕一<sup>6</sup>

<sup>1</sup>学生会員 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻  
(〒819-0385 福岡県福岡市西区元岡 744)

E-mail:s74.mt.31@gmail.com

<sup>2</sup>正会員 九州大学准教授工学部地球環境工学科 (〒819-0385 福岡県福岡市西区元岡 744)

E-mail:kasama@kyushu-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 九州大学大学院工学研究院海域港湾環境防災共同研究部門  
(〒819-0385 福岡県福岡市西区元岡 744)

<sup>4</sup>正会員 九州大学 (〒819-0385 福岡県福岡市西区元岡 744)

<sup>5</sup>正会員 九州大学助教授工学部地球環境工学科 (〒819-0385 福岡県福岡市西区元岡 744)

<sup>6</sup>正会員 九州大学大学院工学研究院 (〒819-0385 福岡県福岡市西区元岡 744)

平成23年東北地方太平洋沖地震による津波により、東北地方各地の防波堤が被災し甚大な被害が生じた。津波による防波堤の被災要因は大きく分けて3つあり、越流による捨石マウンドの洗掘、防波堤の背面と前面の水位差と津波波力によるケーソンへの水平力、捨石マウンド内に発生する浸透流による支持力低下が挙げられる。これらを複合的に考慮した防波堤の安定性評価は研究が進んでいない。本文では、防波堤の越流ならびに捨石マウンド内に発生する浸透流に着目し、理論的な捨石の安定重量算出式を提案する。この式は、越流・浸透流を考慮することにより、より精度の高い結果を求めることができ、実際の防波堤の設計や改良の際に用いることができると考えられる。また、その妥当性を釜石港湾防波堤を対象とする水理模型実験により検証した。

**Key Words :** Breakwater, overflow, seepage flow, rubble mound, stable weight

## 1. 研究の目的

平成23年東北地方太平洋沖地震による津波により、東北地方各地の防波堤が被災し甚大な被害が生じた。この震災による死者14,576人(2012.3.11現在)のうち90%以上が水死によるものであった。また、東北沿岸の5つの防波堤が1km以上も転倒・滑落するなどして被災した。これらのことから、津波越流時における防波堤の安定性に関する研究が必要とされている。津波による防波堤の被災要因は大きく分けて3つあり、越流による捨石マウンドの洗掘、防波堤の背面と前面の水位差と津波波力によるケーソンへの水平力、捨石マウンド内に発生する浸透流による支持力低下が挙げられる。しかしながら、これまではこれらの要因を複合的に考慮して安定性を確認することはなされてこなかった<sup>1)</sup>。そこで本研究では、防波堤の越流ならびに捨石マウンド内に発生する浸透流を考慮して、捨石の安定重量を算出する手法を、風波に対する消波ブロックの安定重量を算出する既存の式であるハドソン式

を参考にしながら提案した。また、釜石港湾口防波堤(南堤)を対象とする室内模型実験を行い、津波を再現することによって、提案した式の妥当性を検討するとともに、破壊時の防波堤の状態を明らかにした。これらを通して、津波時の越流と浸透流を考慮して、防波堤の安定性を評価することを目的とした。

## 2. 捨石マウンドの安定重量の計算

港内側の捨石の安定条件について榊山らの研究<sup>2)</sup>を参考にしながら再検討する。捨石1個に働く波力 $F_w$ と捨石の自重による抵抗力 $F_b$ との関係を図-1, 2に示す。捨石の代表長さは、波長に比べて小さいので、越流により防波堤斜面方向に作用する波力 $F_w$ は次式で表すことができる。

$$F_w = \frac{1}{2} \frac{\gamma_w}{g} C_D A u |u| + \frac{\gamma_w}{g} C_M V \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

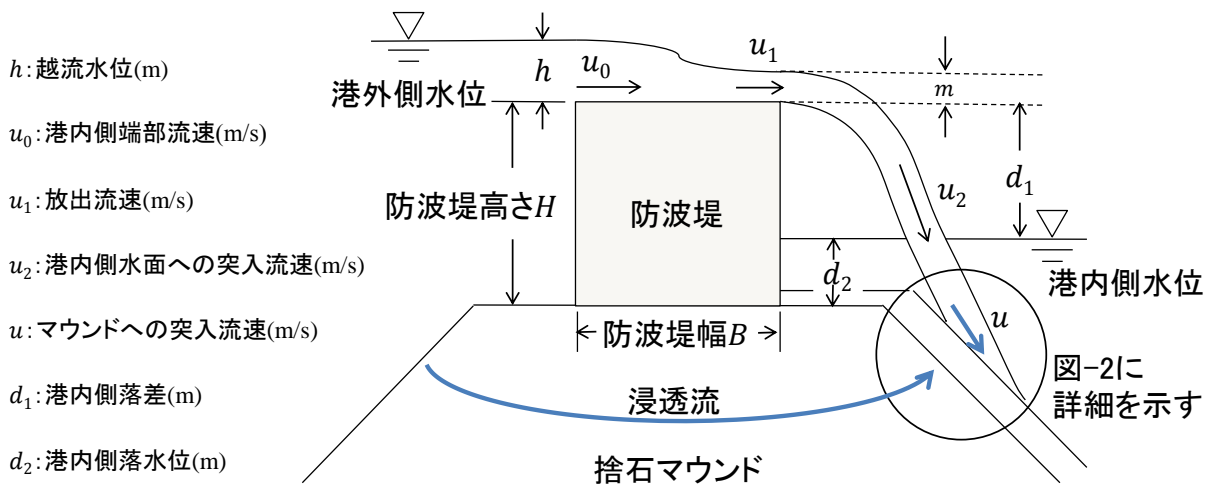


図-1 津波作用時の防波堤まわりの越流・浸透流

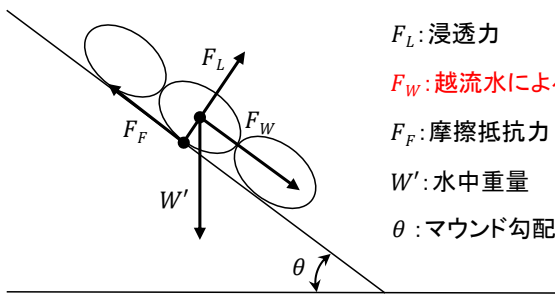


図-2 捨石マウンドに作用する外力の模式図

上式の右辺第1項は、抗力、第2項は慣性力である。また、 $C_D$ ：抗力係数、 $C_M$ ：慣性力係数、 $\frac{\partial u}{\partial t}$ ：捨石周辺の流体の加速度[m/s<sup>2</sup>]、 $u$ ：越流水が港内側マウンドに突入するときの流速、 $A$ ：流速 $u$ に垂直な面への捨石の投影面積[m<sup>2</sup>]、 $V$ ：捨石の体積[m<sup>3</sup>]、 $g$ ：重力加速度[m/s<sup>2</sup>]、 $\gamma_w$ ：流体の単位体積重量[kN/m<sup>3</sup>]である。

一方、1つの捨石が受ける上向き浸透力は、その位置における動水勾配  $i$  を用いて、

$$F_L = \gamma_w V (1+e) i \quad (2)$$

で表される。ここで、動水勾配  $i$  はその時点での水位差と動水距離から計算、または、実験において間隙水圧から計算するものとした。この式より、捨石の抵抗力  $F_b$  は、次式で与えられる。

$$F_b = f_r \{ W' \cos \theta - \gamma_w V (1+e) i \} - W' \sin \theta \quad (3)$$

ここに、 $f_r$ ：捨石間のかみ合わせおよび摩擦係数、 $W'$ ：捨石の水中重量[kN]、 $\gamma_s$ ：捨石の単位体積重量[kN/m<sup>3</sup>]、 $e$ ：捨石の間隙比である。式(3)右辺第1項は、捨石の

水中自重によるかみ合わせと摩擦力、第2項は水中自重の斜面方向成分である。

捨石の安定限界は、波力  $F_w$  と抵抗力  $F_b$  がバランスした瞬間で与えられるので、 $F_w = F_b$  として、式(1)と式(3)を代入すると式(4)を得る。

$$\frac{1}{2} \frac{\gamma_w}{g} C_D A u |u| + \frac{\gamma_w}{g} C_M V \frac{\partial u}{\partial t} = f_r \{ W' \cos \theta - \gamma_w V (1+e) i \} - W' \sin \theta \quad (4)$$

さらに、 $W' = \gamma_w V (G_s - 1)$ 、 $G_s = \gamma_s / \gamma_w$  を用いて捨石の形状特性、即ち、捨石1個の体積  $V$ 、投影面積  $A$  についてまとめると式(5)を得る。

$$\frac{V}{A} = \frac{\frac{1}{2} C_D u |u|}{\left\{ f_r \left( \cos \theta - \frac{1+e}{G_s - 1} i \right) - \sin \theta \right\} (G_s - 1) g - C_M \frac{\partial u}{\partial t}} \quad (5)$$

ここで、捨石の体積  $V$ 、投影面積  $A$  を式(6)のように表す。

$$V = k_s q^3, \quad A = k_a q^2 \quad (6)$$

$k_s$ 、 $k_a$  はそれぞれ捨石の形状より決まる体積係数、面積係数である。また、 $q$  は捨石の代表長さを表し、捨石の自重  $W$  を用いて式(7)のように表される。

$$W = \gamma_s V = \gamma_s k_s q^3 \quad \therefore q = \left( \frac{W}{\gamma_s k_s} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

よって、式(5)は式(7)より、式(8)のように変形できる。

$$\frac{V}{A} = \frac{k_v q^3}{k_a q^2} = \frac{k_v}{k_a} \left( \frac{W}{\gamma_s k_v} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{1}{2} C_D u |u| \quad (8)$$

$$= \frac{1}{2} C_D u |u| \left\{ f_r (\cos \theta - \frac{1+e}{G_S - 1} i) - \sin \theta \right\} (G_S - 1) g - C_M \frac{\partial u}{\partial t}$$

さらに、両辺を3乗し、捨石の自重  $W$  について解くと式(9)を得る。

$$W = \frac{k_a^3 \gamma_s C_D^3 (u \cdot |u|)^3}{8k_v^2 \left\{ f_r (\cos \theta - \frac{1+e}{G_S - 1} i) - \sin \theta \right\} (G_S - 1) g - C_M \frac{\partial u}{\partial t}} \quad (9)$$

津波越流時は、定常状態であるとし、慣性力は無視する。この過程の妥当性は榎木ら<sup>2)</sup>や中村ら<sup>3)</sup>によって検討されている。よって、式(9)は次のようになる。

$$W = \frac{k_a^3 \gamma_s C_D u^6}{8k_v^2 g^3 \left\{ f_r (\cos \theta - \frac{1+e}{G_S - 1} i) - \sin \theta \right\} (G_S - 1)} \quad (10)$$

この式が、本研究において、津波越流時の捨石マウンドの安定重量をもとめる式として提案するものである。

### 3. 既存の安定重量算出式

従来、捨石（または、消波ブロック）の安定重量を求めるために、用いられてきた式を紹介する。

(1) ハドソン式

$$W = \frac{\gamma_s H^3}{K_D \cot \theta (G_S - 1)^3} \quad (11)$$

(2) イスパッシュ式

$$W = \frac{\pi \gamma_s u^6}{48 g^3 (y_d)^6 (G_S - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \quad (12)$$

ここに、 $y_d$  はイスパッシュ係数と呼ばれる実験定数であり、埋め込まれた石にあっては 1.20、露出した石にあっては 0.86 を採用する。

本文では、提案式(10)との比較のため、イスパッシュ式(12)を利用する。

### 4. 提案式と既存の式の比較

図-3 に平成 23 年東北地方太平洋沖地震に被災する前の釜石港南堤深部の断面図、表-1 にその材料定数を示す。

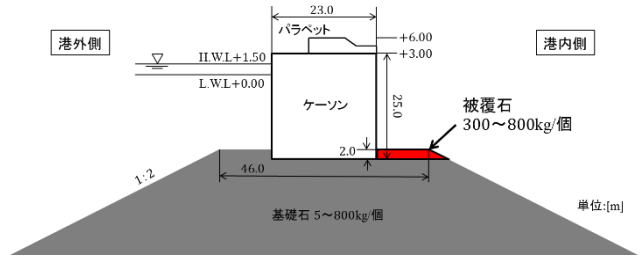


図-3 釜石港南堤深部標準断面図（被災前）

表-1 計算に用いた材料定数

名称	抗力係数	単位体積重量	摩擦係数	マウンド勾配
記号	$C_D$	$\gamma_s$	$f_r$	$\theta$
単位	-	kN/m <sup>3</sup>	-	rad
設定値	0.1	22.54	0.7002	0.4637

この条件のもと、設計当時使われていたと考えられるイスパッシュ式と、本文の提案式との両方で安定重量の算出を行った。その結果が図-4である。

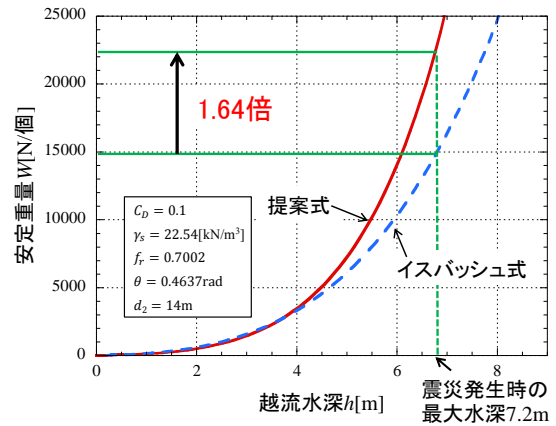


図-4 釜石港湾口防波堤の安定重量と越流水深の関係

この図において、震災発生時の津波による最大越流水深 7.2m のときの安定重量の計算結果を比較すると、提案式はイスパッシュ式の安定重量の 1.64 倍となったことがわかる。また、越流水深 4m まではどちらの値も大きな差がないことが読み取られる。これは、特に大水深時において、提案式で考慮した浸透流の効果が表れているからであり、津波に対する捨石の安定重量を算出する際には、浸透流の影響は無視することができないといえる。逆に、イスパッシュ式は浸透力を考慮していないことによって、安定重量を過少に評価する、つまり、防波堤の安定性を過大に評価する可能性がある。

## 5. 釜石港湾口防波堤を対象とした水理模型実験の概要

図-5 に実験装置の概略と計測器の配置図を示す。模型防波堤は釜石湾口防波堤南堤をモデルとし、縮尺は1/100とした。また、表-2 に実験に用いた材料定数などの条件を示す。

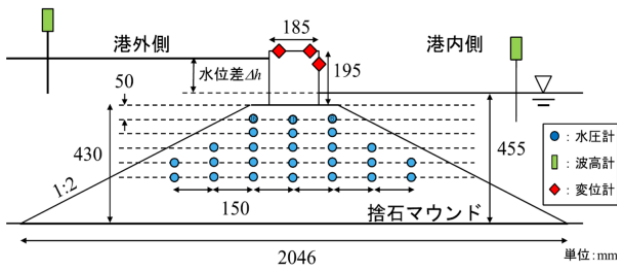


図-5 実験装置の概要と計測器の配置図

表-2 実験条件

モデル	岩手県釜石湾口防波堤南堤(縮尺1/100)		
模型防波堤	寸法	高さ195mm×幅185mm×奥行き190mm	
	密度	2.03g/cm <sup>3</sup>	
捨石マウンド	寸法	上底326mm下底2046mm 高さ430mm 法面の勾配1:2	
	碎石の粒径	2mm~4.75mm	2mm~19mm
	飽和密度	1.86g/cm <sup>3</sup>	1.81g/cm <sup>4</sup>
発生させた水位差	0mm, 40mm, 80mm, 120mm, 145mm, 185mm, 210mm		
港内側水位	25mm (捨石マウンドの天端高さを0mmとする)		

捨石マウンドは、2mm~4.75mm(Case1), 2mm~19mm(Case2)の碎石を用い、その他の条件は表-2 に示した。津波を模擬するために、循環流により防波堤の前後に水位差を発生させ、ゲートを上下させて水位を制御した。この実験は、提案式の妥当性を小スケールで確認するものであり、2種類の碎石は重量の違いによる安定性の変化を比較するためのものであるため、実際の捨石の寸法や重量は1/100の縮尺に沿うものではない。

## 6. 釜石港湾口防波堤を対象とした水理模型実験の結果

上記の実験時の様子を示す写真を写真-1, 2 に示す。また、実験の結果を表-3 に示す。Case1 の実験の様子を示した写真-1 からは、越流が発生することなく、ケーソンの直下を通る浸透流のみによる破壊が発生した様子がうかがえる。Case2 の写真-2 からは、越流の影響もあり、港内側のマウンドが洗掘されていることがわかる。

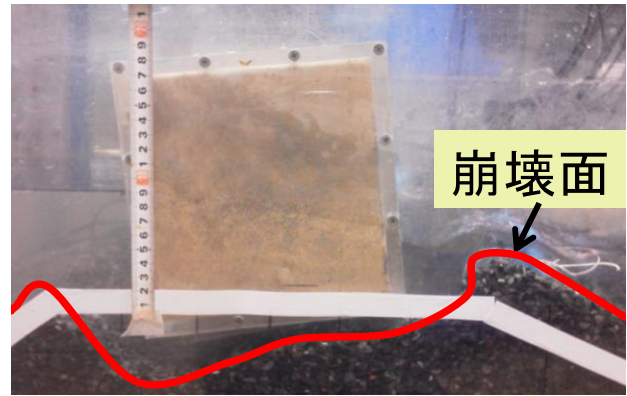


写真-1 実験時の様子(Case1)

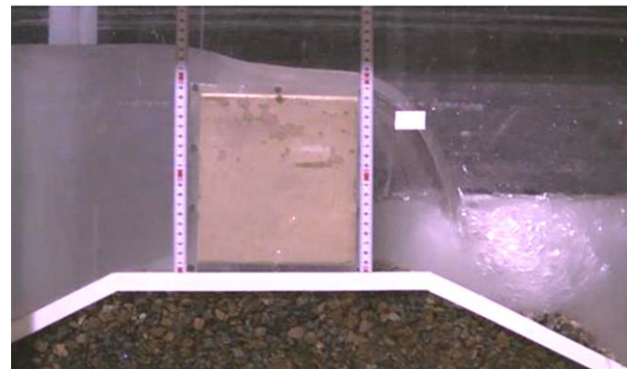


写真-2 実験時の様子(Case2)

表-3 実験結果

Case	捨石の重量 [N/個]	破壊時の水位差[mm]	破壊時の越流水深[cm]	破壊要因
1	0.002~0.005	145	0	浸透流
2	0.004~0.027	185	3.5	越流・浸透流

表-3 に示すように、Case1 では、水位差が145mmの時点で浸透破壊が発生した。越流が発生していないため、式(10)を用いることはできず、浸透流のみによる破壊(ポップアウト)が発生していることがわかった。Case2 では、水位差が210mmの時点で越流と浸透流による破壊が発生した。このことから、Case1 よりもCase2の方が平均の重量が大きいため安定性が高まり、より大きな水位差に耐えられたことがわかる。

## 7. 実験結果の考察

Case2 の条件で式(10)を用いて安定重量を計算した結果を図-6 に示す。ここで、越流水深は実験での水位を用いたものではなく、0mから0.4mまで、任意に変化させているものであることに注意されたい。

## 8. 結論

本研究では、防波堤の越流ならびに捨石マウンド内に発生する浸透流を考慮して、捨石の安定重量を算出する手法を、風波に対する消波ブロックの安定重量を算出する既存の式であるハドソン式を参考にしながら提案した。その提案式を用いて実際の防波堤の津波に対する安定性の解析を行った。また、釜石港湾口防波堤（南堤）を対象とする室内模型実験を行い、津波を再現することによって、提案した式の妥当性を検討するとともに、破壊時の防波堤の状態を明らかにした。また、粒径の異なる2種類のマウンド材料を用いて実験を行い、結果の比較を行った。本研究によって、得られた結論を以下に示す。

- (1) ハドソン式の導出を参考にして、津波によって防波堤における越流が発生したときの捨石の安定重量を求める提案式を導出した。（式(10)）
- (2) 被災前の釜石港湾口防波堤の条件で、提案式とイスバッシュ式を用いて計算を行った。震災時の最大越流水深である7.2mにおける安定重量は、提案式で算出したものがイスバッシュ式のその1.64倍になっていた。このことから、越流水深が大きいとき、浸透流の効果が無視できないものであるということを示した。
- (3) Case2 の重量が 0.004~0.027[N/個]であったことから、捨石が安定性を失い始めたのは、越流水深が 0.74~1.37cm（実スケールでは0.74~1.37m）のときであると計算された。しかし、実際にケーソンが滑落したのは越流水深が 3.5cm（実スケールでは3.5m）のときであった。これは、提案式では捨石1個の安定性に注目しているが、実際には捨石が1個動いたときに、直ちに防波堤が崩壊するわけではないからであり、改善の余地がある。

**謝辞：**本研究は科学研究費補助金基盤研究(B)：研究課題25289149「浚渫土防災ブロックを活用した新形式津波防波堤の開発研究」（研究代表者：笠間清伸）の成果の一部である。

## 参考文献

- 1) 榊山勉・鹿島遼一：消波ブロックに作用する波力に関する実験スケール効果，pp.2-12，電力中央研究所報告書，1989.
- 2) 榎木亨・柳青魯・大西明德：捨石防波堤斜面上の共振現象による破壊機構，第35回海岸工学講演会論文集，pp.428-432，1982.
- 3) 中村孝幸・小野塚孝：異形ブロック堤における部材波力の特性とエネルギー逸散機構について，第35回海岸工学講演会論文集，pp.792-716，1988.

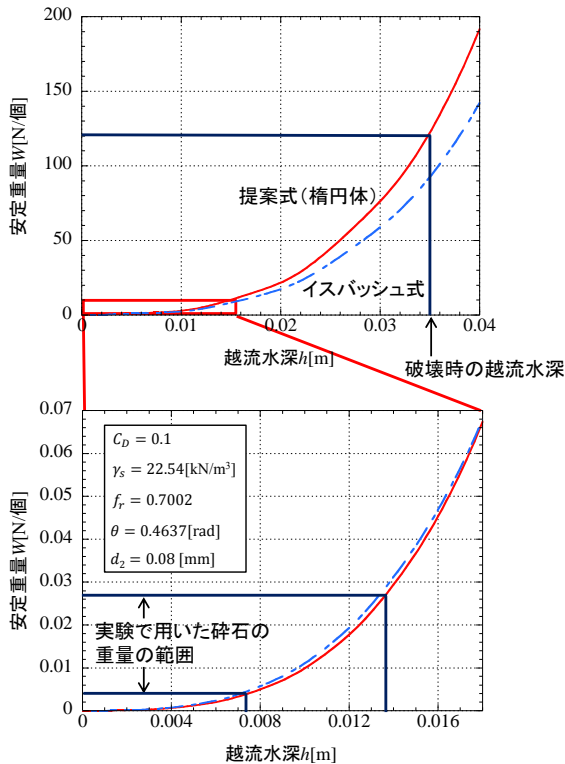


図-6 計算結果と実験結果の比較

越流水深が大きくなるにつれて、必要な安定重量も大きくなる。実験からわかったように、模型防波堤が破壊した時点での越流水位は3.5cmであったため、それに対応する安定重量を計算すると約120[N/個]であった。一方、実験で用いた捨石の重量は0.004~0.027[N/個]の範囲にあり、平均重量は0.024[N/個]であった。これらより、Case2で用いた捨石では越流水深3.5cmの津波（実スケールでは3.5m）に耐えることができないということがわかる。図-6の下には越流水深が小さな範囲を拡大したものを示しており、実験で用いたCase2の捨石の重量を記載する。この重量から、捨石が安定限界を迎えるのは越流水深が約0.74~1.37cm（実スケールでは0.74~1.37m）のときであるということが計算される。捨石はこの範囲内の越流水深に達したときに安定性を失い始め、越流水深が3.5cmとなったときに崩壊に至ったということがわかる。

提案式を用いて理論的に計算した結果、少なくとも越流水深が1.37cmとなったときに防波堤が崩壊すると考えられるが、実際は3.5cmであった。これは、提案式では捨石1個の安定性に注目しているが、実際には捨石が1個動いたときに、直ちに防波堤が崩壊するわけではないからである。捨石が動き始める瞬間を計算することはできるが、いつ崩壊するかということは計算できないことがわかった。マウンドの被災率がどれほどになると崩壊が始まるのかということなどを調べることを今後の課題としたい。

## A HYDRAULIC MODEL EXPERIMENT FOR THE STABLE WEIGHT OF RUBBLE-MOUND CONSIDERING THE OVERFLOW AND SEEPAGE FLOW

Shota INOUE, Kiyonobu KASAMA, Mitsunari HIRASAWA,  
Koki ZEN, Zentaro FURUKAWA and Yuichi YAHIRO

When The Tohoku-Pacific Ocean Earthquake occurred on 11th March, 2011, harbor facilities, such as breakwaters and tide embankments, suffered serious damages from the TSUNAMI. The following three mechanisms are considered to be related to the collapse of the breakwater: 1) scouring of the mound due to overflow, 2) the horizontal force originated from the difference of water level between the sea side and the harbor side on the breakwater, and 3) reduction of bearing power of the mound resulting from seepage flow. However, the mechanism of the instability of the rubble-mound by overflow and seepage flow induced by TSUNAMI is not fully clarified. In this study, the formula to calculate the stable weight of rubble-mound was proposed in consideration of the overflow and seepage flow, and hydraulic model experiments were conducted on Kamaishi Bay breakwaters as the subject in order to confirm the effectiveness of the proposed formula. Using the results, the stability of the breakwater was evaluated from the view point of the geotechnical engineering.

As the result from this study, following conclusions were obtained.

- (1) More accurate stable weight of the rubble-mound can be calculated than the existing formulas by considering the seepage flow.
- (2) The validity of the proposed formula was revealed from the results of the hydraulic experiments.