

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	粘り強い防波堤構築のための被覆ブロックの形状に関する考察と模型実験
Title(English)	HYDRAULIC MODEL EXPERIMENTS ON THE DIMENSIONS OF ARMOR BLOCKS FOR THE RELISIENT BREAKWATERS
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, Kouki Zen, Zentaro Furukawa, Yuichi Yahiro
出典(和文)	土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol. 72, No. 2, pp. I_521-I_526
Citation(English)	Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering), Vol. 72, No. 2, pp. I_521-I_526
発行日 / Pub. date	2016, 8
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) 2016 Japan Society of Civil Engineers.

粘り強い防波堤構築のための被覆ブロックの形状に関する考察と模型実験

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

¹学生会員 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

E-mail:shotainoue74@gmail.com

²正会員 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

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

³正会員 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

⁴フェロー会員 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

⁵正会員 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

⁶正会員 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

津波による防波堤の被災要因には3つあるといわれているが、なかでも越流・浸透流による港内側マウンドの洗掘については研究がなされてこなかった。そこで、筆者ら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、港内側マウンドを形成する捨石の安定重量を算出する式を提案した。越流・浸透流による港内側マウンドの洗掘を防止するためには、浸透流を逃がしつつ、越流に耐えうる被覆ブロックを港内側に設置することが有効だと考えられるため、本研究はその最適な形状を、提案した式を用いて求めることを目的としている。本論文ではまず理論的に開口部を持つ被覆ブロックの最適な形状や配置を求め、その形状を持つ模型被覆材を用いて水理模型実験を行い、その妥当性を検証した。

Key Words : armor blocks, seepage flow, overflow, breakwater

1. はじめに

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・浸透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。なかでも越流・浸透流による港内側マウンドの洗掘については現在盛んに研究が行われている¹⁾²⁾。筆者ら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、港内側マウンドを形成する捨石の安定重量 W_s を算出する式を提案した³⁾。安定重量とは、津波を受ける物体が安定であるために必要な最低の重量であり、これが小さい物体ほど、耐津波性能が高く、経済的であるといえる。

越流・浸透流による港内側マウンドの洗掘を防止する

ためには、浸透流を逃がしつつ、越流に耐えうる被覆材を港内側に設置することが有効だと考えられる。そこで本論文では、図-1のような開口部をもつ中空円筒形状の新たな被覆材を想定し、最適な形状について考察した。さらに、水理模型実験を通じて、中空円筒形状の被覆材の安定性を実験的に調査した。本研究の目的は、これらのプロセスを通して、防波堤の耐津波性能を向上させるために最も効果的な被覆材の形状を提案することである。

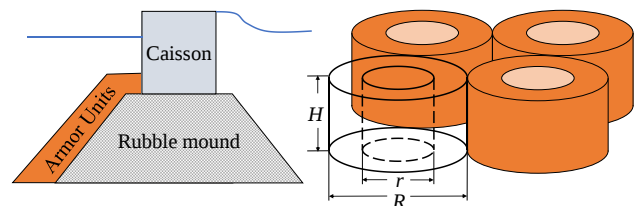


図-1 防波堤の被覆イメージと検討した被覆材の形状

2. 被覆材の最適な形状に関する考察

(1) 被覆材の浸透破壊と安定重量の計算式

図-2に示すように、津波作用時に防波堤の港内外に水位差が生じると、捨石マウンド内に浸透流が発生する。そこで、最初に浸透流に起因する被覆材の浸透破壊を判定した。浸透破壊の発生メカニズムは、被覆材の重量を浸透力が上回ることで、次々に被覆材が安定性を失うということが考えられる。そこで、このメカニズムに基づき、理論的に浸透破壊が発生する限界動水勾配 i_c を計算したものが式(1)である。

$$i_c = \frac{G_s - 1}{1 + e} \cos \theta \quad (1)$$

ここで、 e : 被覆材の間隙比, θ : マウンド勾配, G_s : 被覆材の比重である。

また、津波越流発生時の港内側の被覆材の安定条件についてHudson式の誘導を参考にしながら再検討した。図-2, 3に示すような港内側マウンドの被覆材一個に関する力の釣合から、津波が発生した時に被覆材が動く限界の重量（安定重量 W_s ）を算出する式を理論的に提案した。この式は、Hudson式が浸透流を考慮していないことを改善するため、浸透流に起因する一個の被覆材が受ける浸透力を導入して再計算したものである。以下にその式を示す。

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

ここで、 C_D : 抗力係数, u : 越流水が港内側マウンドに突入するときの流速, g : 重力加速度[m/s²], f_r : 被覆材のかみ合わせおよび摩擦係数, γ_s : 被覆材の単位体積重量[kN/m³], i : 動水勾配, k_v, k_a はそれぞれ被覆材の形状より決まる体積係数, 面積係数である。

津波越流時は、樫木ら⁴⁾の仮定にもとづいて定常状態であると仮定し、慣性力を無視した。この式(2)を被覆材の安定重量算出式とした。

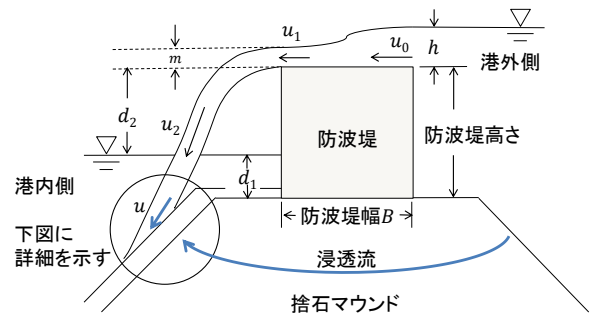


図-2 津波作用時の防波堤まわりの越流・浸透流

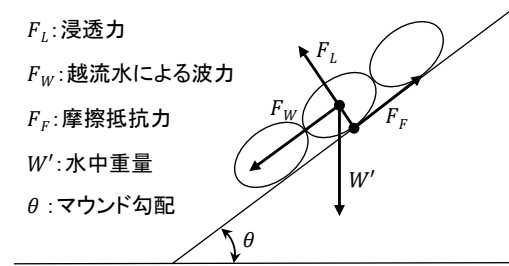


図-3 被覆材に作用する外力の模式図

(2) 被覆材の最適な形状に関する考察

図-1の被覆材の外径 R を一定とし、間隙比を計算する。被覆材は、防波堤捨石マウンドの港内側に設置したと仮定し、その配置方法は図-4に示す、2種類の方法とした。

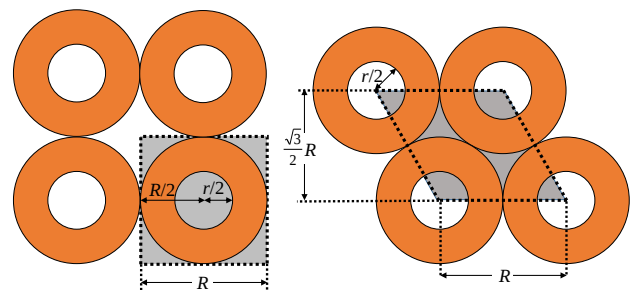


図-4 配置方法（左：正方形配置，右：三角形配置）

間隙比は固体の体積に対する間隙の体積との比で表されるため、次のようになる。

$$e_{\text{正方形}} = \frac{4}{\pi} \frac{1}{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2} - 1 \quad (3)$$

$$e_{\text{三角形}} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{1}{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2} - 1 \quad (4)$$

$$W_{s\text{三角形}} = \frac{\pi \gamma_s C_D^3 u^6}{32 \left[g_f \left\{ (G_s - 1) - \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{i}{1 - (r/R)^2} \right\} \right]^3} \left(\frac{R}{H} \right)^2 \left\{ 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right\} \quad (5)$$
$$\frac{r_0}{R} = \sqrt{1 - \frac{8\sqrt{3}i}{\pi(G_s - 1)}} \quad (6)$$

3. 被覆材の形状に着目した水理模型実験

図-5に実験装置の概略と計測器の配置図を示す。また、実験に用いた碎石等の条件を表-1に示す。捨石マウンドは粒径 2mm~19mm、重量 0.004~0.027[N/個] のものを使用している。捨石マウンドの作成は、碎石を 150mm 積んだらランマーで上部を締め固め、この作業を 3 回繰り返すという手順で行った。津波を模擬するために、港内側の水位を一定に保ち、港外側のゲートの高さを 10 秒ごとに 1mm ずつ徐々に上昇させて水位差を発生させ、防波堤が崩壊する様子をビデオカメラにより撮影した。水圧計と流速計の測定結果は、後述する実験結果の解析に利用した。模型被覆材は、中空円筒形状とし、平ワッシャーを複数枚重ねて接着して、高さ比 H/R による違いが分かるように 3 種類作成した。その諸元を表-2に、実験のケースを表-3に示す。被覆材を並べたときの単位面積当



モデル	釜石湾口防波堤南堤 (縮尺 1/100)	
模型防波堤 ケーソン	寸法	高さ 195mm 幅 185mm 奥行き 190mm
	密度	2.03g/cm ³
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~19mm
	飽和密度	1.81g/cm ³
設定水位差	0~300mm (上昇率 1mm/10s)	
港内側水位	25mm (マウンド天端の高さを基準とする)	

形状		中空円筒		
密度[g/cm ³]		7.66		
高さ比 H/R		1/4	1/2	3/4
高さ H [mm]		7.2	9.6	13.2
外径 R [mm]		30	22	18
内径 r [mm]		15	10.5	8.5
重量 [N]		0.250	0.235	0.186
開口率 O	正方形配置	0.411	0.394	0.390
	三角形配置	0.320	0.300	0.295

	高さ比 H/R	模型配置
CASE 1	1/4	正方形配置
CASE 2		三角形配置
CASE 3	1/2	正方形配置
CASE 4		三角形配置
CASE 5	3/4	正方形配置
CASE 6		三角形配置

(2) 実験結果

図-6, 7 に、港内外における水位差と被覆材の被害率 D を、それぞれの配置方法についてまとめたものを示す。なお水平方向に変位を確認した時点で被災したと定義し、被害率 D は、以下の式(6)を用いて計算した。

$$D = \frac{\text{被災した模型被覆材の数}}{\text{模型被覆材の総数}} \times 100[\%] \quad (6)$$

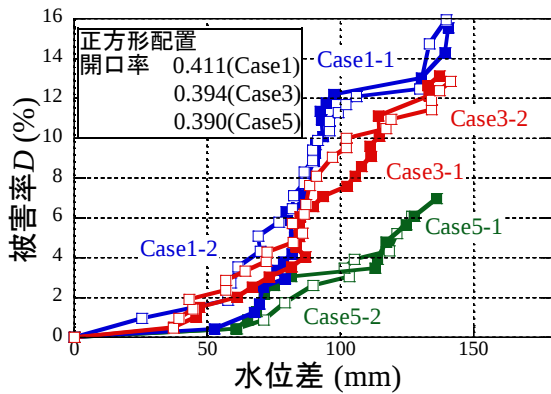


図-6 正方形配置での被害率 D と水位差

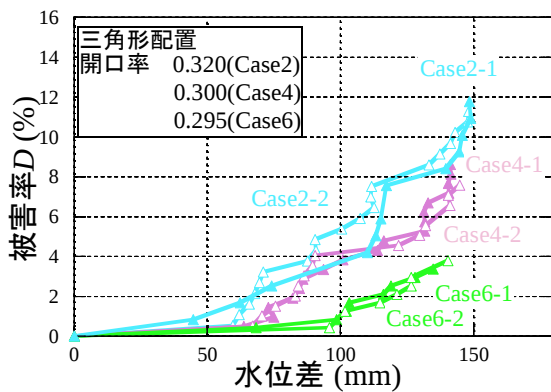


図-7 三角形配置での被害率 D と水位差

正方形・三角形配置の違いによらず、高さ比 H/R が大きくなるほど被害率が小さくなるのがわかる。どのケースにおいても、越流が発生した水位差 120mm 程度となる以前から法面上の模型被覆材が一部滑り落ちるように移動する現象が見られた。これは捨石マウンド内に発生した浸透流により、模型被覆材が浮き上がったためと考えられる。さらに、越流が生じてからは被害率の増加が顕著であり、越流水の打ち込み位置付近で大きく模型被覆材が被災した。

(3) 浸透流破壊に対する安全性評価

図-8 に、水位差 40, 80, 120, 140mm の時点における浸透破壊に対する安全率を求めたコンター図をそれぞれ示す。なお、浸透破壊の判定は、式(1)に示す捨石マウンド表面における被覆材に作用する力の釣合から求めた限

界動水勾配 i_c と、実験によって得られたマウンド内の動水勾配 i との比をとり、安全率を算出することで行った。ここでは、安全率が 1 を下回ったときに浸透破壊が発生するとしている。

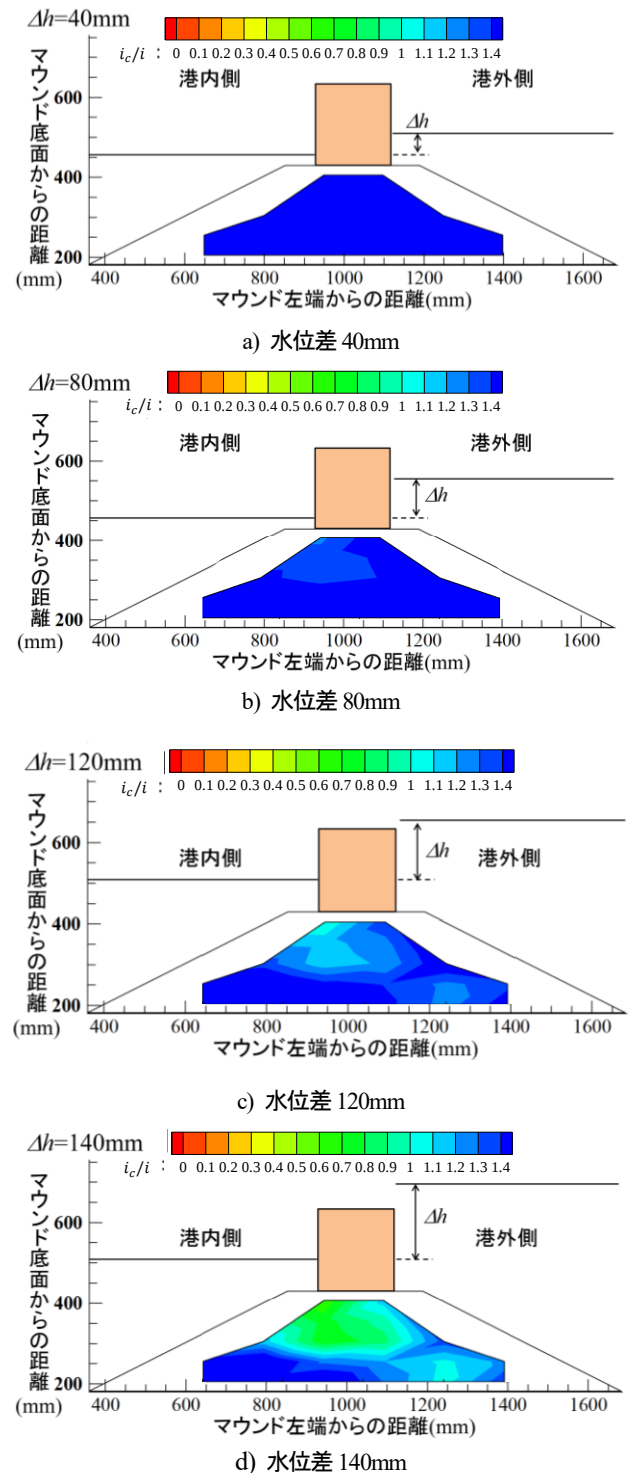


図-8 浸透破壊に対する安全率(Case6-1)

水位差 80mm の時点では越流は発生していないにも関わらず、港内側天端付近で安全率が 1 を下回っていることがわかる。このことから、越流発生以前に浸透流のみによる破壊が発生していることが裏付けられた。

(4) 越流・浸透破壊に対する安全率

図-9に越流発生時の模型被覆材の安全率と越流水深の関係を示す。ここでの安全率は式(2)を用いて求めた安定重量と模型被覆材の重量の比であるとした。ここでも、安全率が1を下回ったときに崩壊するとしている。

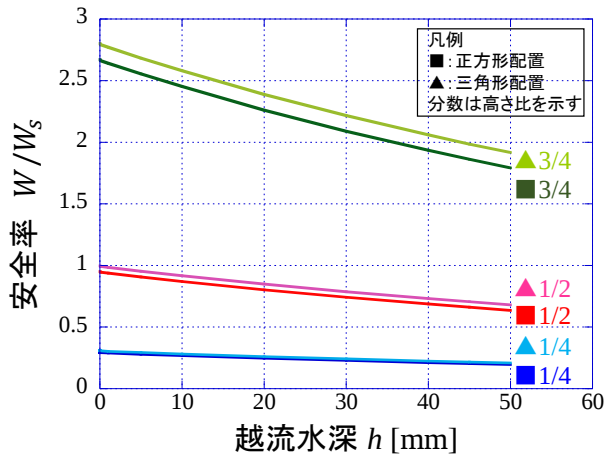


図-9 被覆材の形状による安全率の比較

この図より、高さ比が大きくなるほど越流・浸透破壊に対してより安定であるということがわかる。これは前節で述べた理論式の考察や水理模型実験の結果と一致している。また、同じ高さ比の被覆材は比較的近い安全率を示していることから、越流・浸透破壊に対する安定性は配置の違いよりもその高さ比に大きく影響されていることがわかる。高さ比 3/4 の模型被覆材は安全率が 1 を上回っているが、実験では被災している。高さ比 3/4 の被覆材は他のものに比べて斜面に設置した際の安定性が悪く、滑動や転倒が発生しやすいが、理論式ではその点を考慮していないためであると考えられる。

今回の実験では、高さ比 3/4 のブロックが単位体積当たりの重量が最も大きいため、安定したと考えることもできる。したがって、今後は同じ重量で高さ比を変えた模型被覆材を用意して実験する等の追加実験をして被覆材の安定性に最も寄与する要因を明らかにする必要があると考えられる。

4. まとめと結論

本論文では、開口部分を有する被覆材の安定重量を求める式から、より小さな重量で津波に対して安定であるためには、一定の外径に対して可能な限り高さを大きくすることが有効であることを示した。さらに、越流・浸透流に対応するために最適な外径と内径の比が存在することを示した。

3種類の形状の模型被覆材を用いて行った実験では高さ比 3/4 のブロックを三角形配置で設置した際に被害率が最も低くなる結果となった。また、越流が発生する以前にも浸透破壊が発生していることを明らかにした。提案式を用いた分析においても、同様の結果を示した。

結論として、提案式は被覆材の最適な形状を決定するために有効であり、今後さらなる詳細な検討を行うことによって、防波堤の耐津波性能を向上させる理想的な被覆材を設計することができるといえる。

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。また、本研究は、一般財団法人港湾空港総合技術センターの研究開発助成を受けた。関係者各位には深甚の謝意を表したい。

参考文献

- 1) 有川 太郎・佐藤 昌治・下迫 健一郎・富田 孝史・辰巳 大介・廉 慶善・丹波 竜也：津波越流時における混成堤の被災メカニズムと腹付工の効果，港湾空港技術研究所資料，No.1269，2013
- 2) 丸山 草平・松本 朗・半沢 稔：防波堤港内側マウンド被覆材の津波に対する安定性に関する実験，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol.68, No.2, 1_7-I_12, 2012.
- 3) 井上翔太・笠間清伸・平澤充成・善功企・古川全太郎・八尋裕一：越流・浸透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，土木学会論文集 B3 (海洋開発) Vol. 71 (2015) No. 2 p. I, 2015.
- 4) 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.

(2016.2.4 受付)

HYDRAULIC MODEL EXPERIMENTS ON THE DIMENSIONS OF ARMOR BLOCKS FOR THE RELISIENT BREAKWATERS

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

The Tohoku-Pacific Ocean Earthquake and tsunami gave serious damages to many breakwaters in Tohoku region, Japan. The major cause of failure is the tsunami wave force. However, a new type of failure is confirmed: caused by scouring of the harbor side mound by overflow and seepage flow. In fact, the cause of failure of 9 among the 22 destroyed breakwaters was scouring of the mound and any effective measurement against that cause has not been invented. Therefore, in the previous research we developed a new method to calculate the stable weight of an armor block in consideration of the overflow and seepage flow from the view point of the geotechnical engineering. In this paper, using this method, the most effective shape of the armor block will be described. Furthermore, some sort of hydraulic model experiments with Kamaishi bay breakwater as a subject have been done in order to see the difference of damage in terms of different 3 height ratio (given by height divided by radius of blocks) shapes of blocks and 2 ways of laying blocks. Thorough this methodology the optimum proportion of the block which has a hole like annulus was found. The hydraulic model experiments also revealed that the most effective height ratio was 1/2 out of 1/4, 1/2 and 3/4. In conclusion, it can be reasonable to use this methodology to determine the optimum shape of armor blocks only under the situation of overflow, however when it comes to the time of only seepage flow, more investigation must be done.