

偶発波浪荷重対策としてのカウンターウェイトブロックの開発

Development of a counter-weight type armor block for accidental wave loads

間瀬 肇¹・平石哲也²・川田達也³・行本卓生⁴・徳永誠之⁵・松下紘資⁵

Hajime MASE, Tetsuya HIRAISHI, Tatsuya KAWATA, Takaki YUKIMOTO
Seishi TOKUNAGA and Hiroshi MATSUSHITA

Sea level change and global warming may cause increasing of external forces due to tides, currents and waves acting on breakwaters. Increase of breakwater weights or additional weight behind of present breakwaters become necessary against such external forces. A counter-weight block is newly developed to increase the resistance against horizontal sliding of breakwaters located at entrance of harbors. In the paper, a physical experiment is carried out to evaluate the friction factor of the counter-weight blocks and to compare with a normal type flat armor concrete block. The friction factor of counter-weight block with rubbles inside the center hole becomes larger than that of the normal one. A simple expectation formula calculating the effect of counter-weight block is proposed according to the experimental result.

1. はじめに

近年、波浪による沿岸構造物の災害が多くなっている。この原因の一つは、波浪外力(土木学会, 2000)そのものが大きくなっているためである(平山ら, 2004)。さらに、地球温暖化によって、海面上昇や異常潮位の発生が懸念され、また、台風の規模が大きくなり、海岸・港湾の防波堤等に作用する波浪もより増大し、当初考えていた設計値を越える可能性が高くなっている(間瀬ら, 2008)。従来の設計波は、1980年代を中心とする既往の波浪観測記録から決められたものが多く、将来的には波浪外力が設計値を越えることが予想される。ここでは、設計値を越える波浪を偶発波浪荷重として定義する(平石ら, 2008)。

1970年から1980年代の高度成長期に建設された施設は老朽化し、設計値が相対的に小さく、偶発波浪荷重が作用すると、防波堤は滑動や転倒破壊を起こして、沿岸部は大きな波浪災害に見舞われる可能性がある。

新設防波堤では新しい外力に対応した設計が可能(日本港湾協会, 2009)であるが、我が国の沿岸に多数存在する既存防波堤の大幅な改良は困難である。大規模な改修工事は費用がかかり、周辺の環境を変化させる要因ともなる。そこで、比較的簡単かつ低価で、既存防波堤の港内側に摩擦力を増大させた新型ブロック等を設置し(カウンターウェイト)、既存防波堤の安定性を高め、将

来の波高増大に対して、十分安定な構造物とするためのカウンターウェイト工法が重要になる。

本研究では、偶発波浪荷重作用時に生じる防波堤の滑動に対して抵抗ができる港内側のブロックとして、カウンターウェイトブロックを提案し、その摩擦係数の増大度を検討する。なお、港内側にあり、水質浄化にもつながるように自然石をできるだけ活用した工法を提案する。すでに、自然石による港内の水質浄化作用は、礫間接触酸化法(堀江ら, 1995)として、その有効性が指摘されている。また、近年では横須賀市馬堀海岸高潮対策護岸が自然礫材層で構成され、その環境への効果によって平成20年度土木学会技術賞を受賞している。

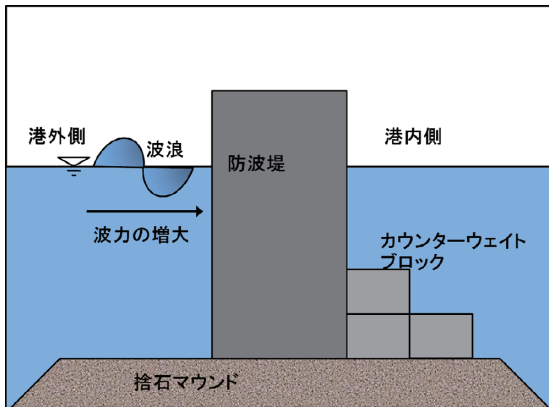
本研究は、模型実験を中心として、必要なカウンターウェイトブロックの形状とその摩擦力増大傾向を調べることを目的とした。また、実際にブロックを設計するために必要な最適形状に関する検討を行い、摩擦抵抗力の増加を予測できる理論を提案することを目的とした。

2. カウンターウェイトブロックの概要

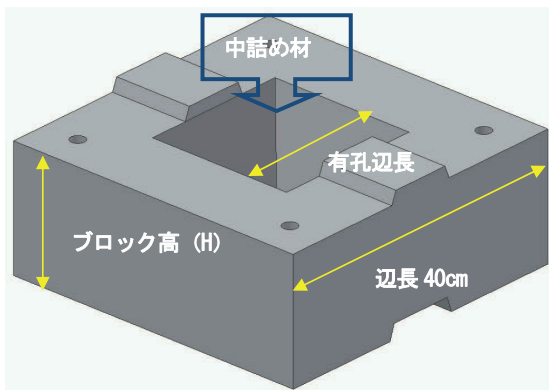
(1) ブロックの特徴

これまでマウンド上に置かれてきた被覆ブロックや根固めブロックは、あくまで捨石マウンドを保護するためのものであり、防波堤の滑動抵抗を増して、波力増大に備える目的は有していない。また、被覆ブロックはモルタル性であり、底面での摩擦抵抗は有しているが、他の抵抗要素は見られない。図-1に本研究で提案したカウンターウェイトブロックの設置概要図を示す。図-1(1)の全体断面図と図-1(2)単体イメージ図のように、開発したブロックは、有孔型平型ブロックに大型の自然石を中詰めとして用いる構造で、ブロックの内部へも碎石を投

1 正会員	工博	京都大学防災研究所
2 正会員	博(工)	京都大学防災研究所
3		京都大学工学研究科
4 正会員		(株)日建工学
5 正会員	工修	(株)日建工学



(1) カウンターウェイトブロックの断面構成



(2) 単体斜視図

図-1 カウンターウェイトブロックの設置イメージ

入ることにより、石の噛み合わせによる抵抗が期待でき、ケーソン滑動時に単体として水平抵抗が大きくなる。したがって、同一質量の従来ブロックと比較して水平抵抗（摩擦抵抗）が大きく、カウンターウェイトブロックとして機能できることが期待される。このブロックを複数（重ねてもよい）既設防波堤の港内側に設置することで、防波堤全体の滑動抵抗や転倒に対する安全性が向上する。

(2) カウンターブロックの利便性

カウンターウェイトブロックは、中央部に空隙をつくり有孔型にすることで、コンクリート使用量も従来ブロックより少なくて済む。さらには、現場の自然石を使用するため、従来ブロックと比べて材料費が安く、製作が簡便であり、港湾工事において、安定性に優れた安価なブロックとして活用できる。また、ブロックの表層が捨石部のために、浅い場所では藻場が形成されやすく、ケーソン直背後の生物環境の向上を図ることが期待できる。現在、広く使われている被覆ブロックには揚圧力を低減する目的で、小さな穴をあけたものもあるが、その

中に充填材として自然石を用いたものはない。

3. 模型実験の概要と結果

(1) 模型実験の内容

実験では、水槽内に水を張らずにマウンドとブロック模型を設置し、ウインチで等速に引っ張ることにより、引っ張りチェーン間に挿入したロードセルで変動張力を測定する。ブロックの摩擦力の比較は、摩擦係数を用いて行った。ブロックが滑りだす直前の移動限界値（最大摩擦力） F を mg で割り、静止摩擦係数 μ を求めた。 F には移動限界の5回測定値平均を使用した。また、ばねばかりの値は kg で読み取るため、 F は読み取り値に重力加速度 g をかけて N 表示に換算した。 m はブロックあるいはブロックと砕石（中詰め石）を加えた質量で、 g は 9.8 (m/s^2)を採用した。

$$\mu = \frac{F}{mg} \dots\dots\dots (1)$$

μ : 静止摩擦係数

F : 移動限界の5回測定値平均 (N)

m : ブロックあるいはブロックと砕石（中詰め石）を加えた質量 (kg)

g : 重力加速度 (m/s^2)

ここでは、静止摩擦係数 μ が大きいものほど抵抗力が大きいと判断した。平型ブロックの μ は、コンクリート面の摩擦係数 μ_c に相当する。

次に、有孔型ブロックの場合には、全体の摩擦力 F からコンクリート面の摩擦係数 μ_c とコンクリート部分質量から、コンクリート部による摩擦力を求める。この値は、全体をコンクリートで製作した水平ブロック部の質量（模型値）と面積を用いて計算できるコンクリートブロック面のみによる摩擦力と考える。有孔型ブロックについては、コンクリート面の摩擦係数は、 μ_c で計算済みの値と同一として、ブロック全体の摩擦力からコンクリートブロック部の摩擦力を引くことにより、中詰め材として用いた砂礫部の摩擦成分を求めて、砂礫部の摩擦係数（中詰め摩擦係数） μ_s を求めた。蓋を載せる場合は、蓋の質量は中詰め材質量に含める。

$$\mu_s = \frac{F - \mu_c m_c g}{m_s g} \dots\dots\dots (2)$$

μ_s : 中詰め摩擦係数

F : 移動限界の5回測定値平均 (N)

μ_c : コンクリート面の摩擦係数

m_c : 模型コンクリート部質量 (kg)

m_s : 中詰め材質量 (kg)

表-1 実験の模型サイズ

Case	ブロックの有孔辺長	ブロック高(H)	中詰め材粒径(D)	中詰め砕石数	蓋の有無
3	26cm	13cm	60mm	54	
5	20cm	13cm	60mm	37	
7	26cm	18cm	60mm	84	
9	20cm	18cm	60mm	62	
10	26cm	13cm	1層敷き (60mm)	18	蓋あり
11	26cm	18cm	1層敷き (60mm)	21	蓋あり
12	26cm	18cm	ブロック高の半分充填 (60mm)	40	
3'	26cm	13cm	90mm	18	
7'	26cm	18cm	90mm	25	

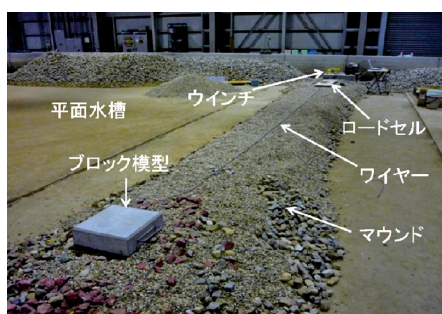


写真-1 模型実験の様子と器材

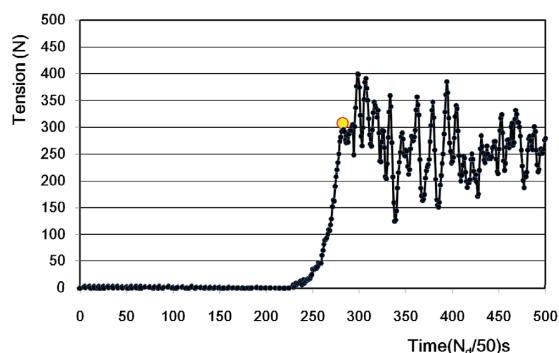


図-2 50Hzでサンプリングされた計測張力値の例

上記で求めた中詰摩擦係数 μ_s から中詰石材による抵抗力の効果が検討できる。中詰材は50個以上の石材を選定して平均粒径を6cmになるように設定した。写真-1に実験の様子を示す。ブロック模型は、2m四方の被覆ブロックの1/5縮尺の実験を想定し、縦・横辺長40cm、高さと同内孔の辺長（有孔辺長）を変化させ、最も中詰材の効果が大きくなる形状を選定するために表-1のケースを実施した。

表-1にはCase1, 2, 4が記載していない。これらのケースは孔が無い平型ブロック、中詰石が無い有孔辺長26cmおよび20cmのブロックにあたる。実験では、ブロックの高さによる抵抗力の違いを評価するために、有孔型ブロックの高さを5cm高くした二段式ブロックも使用した。これは、各有孔型ブロックに高さ5cmの同じ形のブロックを載せて、ネジでとめて簡単に二段式ブロックにできるようにしたものである。二段式の1)孔が大きいブロックは、合計で42.9kg。二段式の2)孔が小さいブロックは、50.1kgである。ウインチの巻き取り速度は低速・定速の6cm/sである。初期に張力を掛けておかないと、衝撃的な力が作用するので、実験の最初にブロック模型を引っ張り、初期張力として、0～10N以下を作用させ、初期値を0として調整を行ってから、ウインチを低速で巻き取り、ブロックを引っ張った。取得されたデータはデジタル値であり、時系列の例を図-2に示す。図

の黄色の点のように初期に鋭いピークが生じ、この値が移動限界になる。各ケース5回の実験を行い、移動限界の平均値を静止摩擦係数の計算に用いた。なお、デジタルデータのサンプリング周波数は50Hzと100Hzで張力を収録して比較を行い、最大値が変化しないことを検証して、50Hzを用いた。データ数 N_d をサンプリング周波数で除したものが、時間Time(s)となる。

(2) 実験の結果

最初に、実験から得られた全体摩擦係数 μ による比較を行う。中詰め材がないケースでは、全体摩擦係数 μ （中詰め材がないケースにおいては、全体摩擦係数 μ_g が、そのままコンクリート面の摩擦係数 μ_c となる）は、ケース1で0.32、ケース2で0.34、ケース4で0.43と、平型ブロックよりも孔大の有孔型ブロック、孔大の有孔型ブロックよりも孔小の有孔型ブロックのほうが、摩擦係数が大きいという結果が得られ、中詰材の効果が確認できた。コンクリートブロックの摩擦係数 μ_c は森平ら（1978）が提案した実験値0.6より小さいが、これまではジャッキによる微動実験での最大値を採択しており、実験手法が異なる。本実験では衝撃的に作用する外力の初期移動限界を抵抗値と考えている。

図-3は孔の大きさや中詰材の粒径を表-1にしたがって変化した場合の摩擦係数を示す。 μ_c は一定であるが、

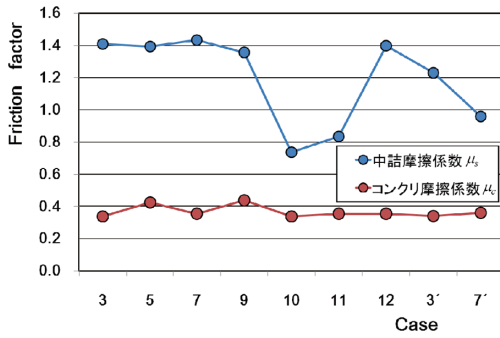


図-3 摩擦係数の変化

中詰摩擦係数 μ_s はケースによって変化する。ケース3で1.41、ケース5で1.39、ケース7で1.43、ケース9で1.36、ケース12で1.40と、マウンド材と同じ粒径の碎石のみを中詰め材に用いたケースでは、ほぼ同等の結果を得ることができた。このことから、有孔部の砂礫層間の噛み合わせによる抵抗力が全体摩擦抵抗の増大につながっていると考えられる。蓋をしたケースでは、ケース10で0.74、ケース11で0.84と、蓋をしても、抵抗力は上がらない。これは、蓋の質量が重くなって、碎石層が少なくなるため、中詰め部の総質量が増えることになり、中詰摩擦係数 μ_s も小さく計算されるためである。二段式の孔大の有孔型ブロックにブロック厚分の半分の中詰材を入れたケース12では1.40という結果が得られたが、二段式の孔大の有孔型ブロックにブロック厚の中詰材を入れたケース7は1.43であり、中詰材を入れた分だけの中詰摩擦係数 μ_s の増大があったと考えられる。

中詰石材に9cm大型碎石を使用したケースでは、ケース3'で1.23、ケース7'で0.96という結果が得られ、大型碎石では、マウンドと同径碎石に比べて、有孔部の砂礫層間の噛み合わせによる抵抗力が上がり、マウンド材と同径に近い中詰材を用いることが適している。

4. カウンターウェイトブロックの効果予測

(1) 中詰材効果の計算

有孔型ブロックに中詰材を投入し、石と石が噛み合うことで、縦方向に抵抗面が生じ、水平抵抗力が増加すると考える。石と石が噛み合う要因は、石の形状による。まず中詰材の碎石を同じ質量を有する完全な直径 d_a の球と考えると、抵抗面の数 N_r を求める。抵抗面の数 N_r は、ブロックの孔が正方形であるので、ブロックの孔の一辺の長さ B を、球と考えた石の代表直径 d_a で割り、二乗し、式(3)で表す。図-4に噛み合わせ効果の模式図を示す。図-5により単純化した計算手法のパラメータを図示する。

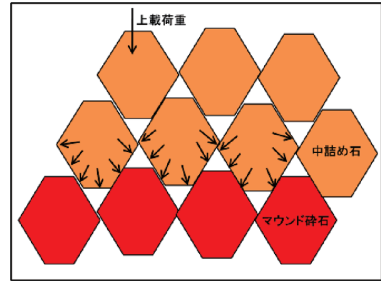


図-4 中詰材の噛み合わせ抵抗のイメージ

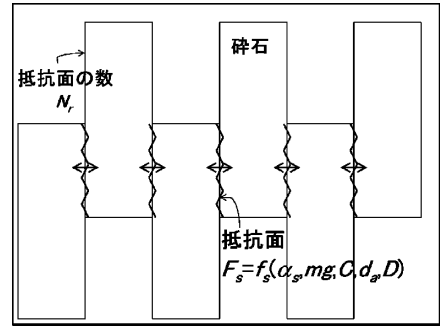


図-5 単純化した水平抵抗計算モデル

$$N_r = \left(\frac{B}{d_a} \right)^2 \dots\dots\dots (3)$$

なお、球と考えた石の直径の求め方は、まず、ブロックの孔に投入した石の総質量 M を投入した石の数 N_s で割る。石一つあたりの質量 m_s を求め、質量 m_s を、測定から求めた石の平均密度 ρ で割り、石一つあたりの体積 V_s を求める。石一つあたりの体積 V_s を、球の体積の公式に代入することで、石一つあたりの半径 r を求め、 r を2倍することで、球と考えた石の代表直径 d_a が計算できる。

$$m_s = \frac{M}{N_s} \dots\dots\dots (4)$$

$$V_s = \frac{m_s}{\rho} \dots\dots\dots (5)$$

$$V_s = \frac{4}{3} \pi r^3 \dots\dots\dots (6)$$

$$r = \left(\frac{3}{4\pi} V_s \right)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (7)$$

$$d_a = 2r \dots\dots\dots (8)$$

水平抵抗力 F_s は、抵抗面あたりの抵抗力 f_s の和になる。

$$F_s = \sum_{n=1}^{N_r} f_{s_n} \dots\dots\dots (9)$$

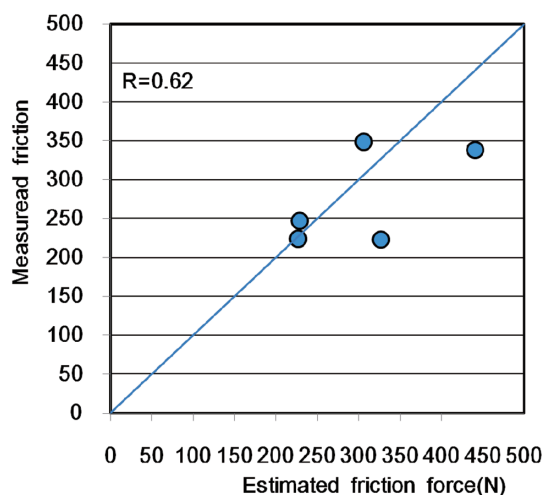


図-6 摩擦係数の計算値と実験値の比較

抵抗面あたりの抵抗力 f_s として、球と考えた石の代表直径 d_a 、石の縦横比 C 、破壊抵抗係数 α_s 、石一つあたりの質量 m_s 、縦方向の石の数、重力加速度 g の積を考える。縦横比 C は石の形状係数の逆数である。縦方向の石の数は、ブロックの高さ（石の層厚） D を球と考えた石の代表直径 d_a で除すことで求める。

$$f_s = d_a \times C \times \alpha_s \times m_s \times \frac{D}{d_a} \times g \quad \dots\dots\dots (10)$$

よって、水平抵抗力 F_s は、(10)式を(9)式に代入することで求めることができる。また、一つの抵抗面あたりの抵抗力 f_s は、それぞれ等しいと考えるので、水平抵抗力 F_s は(10)式に抵抗面の数 N_r をかけたものになる。

α_s が破壊抵抗係数として実験結果から推定する値である。実験ケースごとに α_s を求めると、通常型のカウンターウェイトブロック（ケース3, 5, 7, 9, 12）の場合は、ほぼ0.4から0.7の値をとるので、平均して、噛み合わせによる碎石の抵抗を評価する抵抗係数 α_s を約0.6とした。

(2) 計算値と実験値の比較

α_s を0.6と仮定して、前述の(10)式を使って、ケース3, 5, 7, 9, 12におけるカウンターウェイトブロックの抵抗力を計算した。計算値と実験値を比較して、横軸に実験値、縦軸に計算値を図-6に示した。これらの相関係数 R は、0.62であり、近似的にカウンターブロックの効果を推定できる。

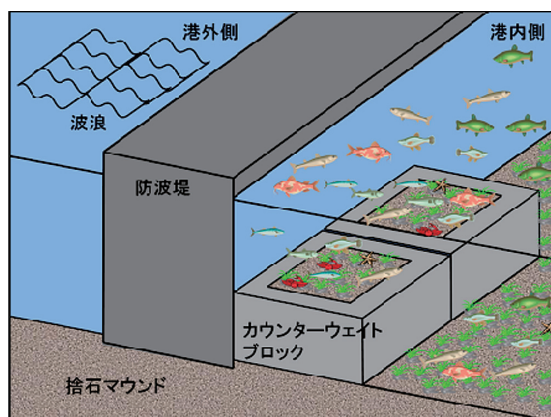


図-7 カウンターウェイトブロックの適用例

5. あとがき

本研究では、有孔型の被覆ブロックを提案し、有孔部に碎石等を中詰めし、水平抵抗を増大させる工法を提案した。そして模型実験でその効果を確認し、実験係数を用いて現地で製作するブロックの適用性を計算できる式を提案した。図-7に設計で予想される、港内側の防波堤背後のカウンターウェイトブロックの適用イメージを示す。この工法はブロックも含む防波堤全体の質量を増し、滑動抵抗を増大させ、防波堤の水平方向の安定性を増大させ、港内の水質浄化や水産施設への活用も計る。

本研究は、中詰め材を用いた有孔型ブロックの開発に関する基礎実験であり、今後、マウンド材の粒径や模型ブロックの大きさを変化させ、実験を続ける予定である。

参 考 文 献

- 日本港湾協会（2009）：国土交通省港湾局「港湾の施設の技術上の基準・同解説」, 1028p.
- 平石哲也・平山克也・加島寛章・春尾和人・宮里一郎（2008）：偶発波浪荷重による被害例とその特性, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.981-985.
- 平山克也・平石哲也・南靖彦・奥野光洋・峯村浩治（2005）：2004年台風による高波災害の被災パターンについて, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.1316-1320.
- 堀江毅・南兼一郎・河澄健輔・大槻忠（1995）：礫間接触酸化法による汚濁海水の浄化能に関する実証実験, 環境システム研究, 第23巻, pp.390-401.
- 間瀬肇・安田誠宏・Tracey H. Tom・辻尾大樹（2008）：富山湾沿岸に災害をもたらした2008年2月冬季風浪の予測と追算シミュレーション, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.156-160.
- 森平倫生・木原力・堀川洋（1978）：混成防波堤捨石マウンドの摩擦係数について, 海岸工学論文集, 第25巻, pp.337-341.
- 土木学会（2000）：海岸施設設計便覧, 2.8波力, pp.89-92.