

偶発波浪荷重に対するカウンターウェイトブロックの 活用法に関する研究

平石哲也・松下紘資⁽¹⁾・川田達也⁽¹⁾・安藤明博⁽¹⁾

(1) 京都大学工学研究科社会基盤工学専攻

要 旨

地球規模の気候変動により台風が大きくなり、想定を超える波浪外力が発生するリスクが高まっている。設計で対象としている波を超える状態を偶発荷重とし、防波堤などの沿岸構造物の改良が必須となっている。そこで、既存のケーソン式防波堤の背後に捨石を詰め込める孔を有するブロックを充填して、摩擦抵抗や転倒に対する抵抗を比較的簡単に向上させることを提案した。本研究では、マウンド上の引っ張り試験によってカウンターウェイトブロックの抵抗値の評価を評価し、実際の設計への活用法を提案した。

キーワード：カウンターウェイトブロック，偶発波浪荷重，摩擦係数，模型実験

1. はじめに

昨今、偶発波浪荷重が注目されている。偶発波浪荷重とは防波堤などの設計波浪の荷重を超えるような波浪荷重のことである。東日本震災後、このような想定を超える外力に対する粘り強い構造が求められるようになった。津波だけでなく、台風災害についても、我が国の平成 23 年台風第 12, 15 号災害だけでなく、ニューヨークにハリケーンが来襲するほど異常な海象現象が頻発している。我が国における台風 12 号災害では奈良県上北山村のアメダスで 72 時間雨量がこれまでの観測記録を大幅に上回り、台風 15 号災害においても東京都江戸川区臨海で最大風速が統計開始以来最大の 30.5m/s を記録した。

ニューヨークにハリケーンが近づいたのは 1985 年以来で、ハリケーンの中心部がニューヨークを通過したのは 1893 年以来のことである。このように昨今異常な海象が続いており、偶発波浪荷重に対する防波堤などの改良が必要である。しかし、新たな防波堤の建設や既存の防波堤の大幅な改良は経済的にも困難であるので、既存の防波堤や海岸堤防が想定外の外力に対しても転倒や滑動しないように背後に廉価なサポーターを入れるような方法が現実的かつ効果的である。そのサポーターとして間瀬・平石ら(2011)はカウンターウェイトブロックを提案している。そこで本研究ではカウンターウェイトブロックの模型を用いてその改良を目指す。

2. カウンターウェイトブロックの概要

カウンターウェイトブロックとは防波堤の背後の脚部に設置することにより防波堤全体の摩擦力を増大させ、波力に対する抵抗力を高めるブロックであり、Fig.1 のように方塊ブロックの中に孔をつくりフレーム状にしたコンクリートブロックである。従来のブロックと比べ材料費が安価で施工も簡単であり、港湾工事において優れたブロックである。孔の中に砕石を詰めることでマウンド砕石とのかみ合わせによる摩擦力の増大を期待した形状であり、間瀬・平石ら(2011)によって基礎的な模型実験が行われている。それは簡単なカウンターウェイトブロックの模型をマウンド上でウィンチを用いて引っ張り、摩擦力を測定し摩擦係数を求めるという実験である。孔の有無、孔の大きさ、ブロックの高さ、孔に詰める砕石の量、砕石の大きさの観点から実験を行い、その結果、孔の中に詰めた砕石とマウンド砕石のかみ合わせにより、ブロックの摩擦力の増大を確認している。また、砕石同士のかみ合わせ抵抗は破壊抵抗係数を用いモデル化した。ただし試用的な実験で、サンプリング周期が長いことや、ブロックの形が実際の設計から導かれているわけではなく、直接現場の設計に適用することは難しい。そこで本研究では、模型サイズがより大きく、ブロックの底面にくぼみをつくり、ブロックそのものとマウンド砕石のかみ合わせも期待した現地施工用の足つきブロックを提

案する。この実験ブロックは現場用への設計、施工が可能になるように、製作図面も完成している(松下ら 2011)。すなわち、より実用に即した模型での実験を行い、現場への適用が可能な摩擦力の増大と破壊抵抗係数を用いたモデルの適用性を検証した。

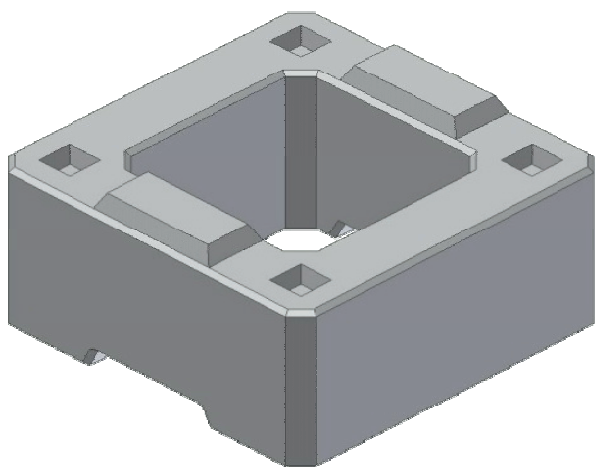


Fig.1 Image of counter-weight type block

3. 摩擦係数の重要性

3.1 防波堤の設計式

波浪に関する変動状態の照査式は堤体の重量 W_d から、堤体が受ける浮力 P_{Bd} と揚圧力 P_{Ud} を減算し堤体底面と基礎との摩擦力を乗算したものが水平波力 P_{Hd} 以上になるものとされている(日本港湾協会 2007)。

$$f_d(W_d - P_{Bd} - P_{Ud}) \geq P_{Hd} \quad (1)$$

f_d : 堤体底面と基礎との摩擦係数

W : 堤体の重量 (kN/m)

P_{Bd} : 浮力 (kN/m)

P_{Ud} : 揚圧力 (kN/m)

P_{Hd} : 水平波力 (kN/m)

よって防波堤を設計する際に、堤体のコンクリートブロックと基礎部の捨て石の間の摩擦係数について考えることは非常に有用なことである。

3.2 各種材料における摩擦係数の変化

(1) 実験装置

カウンターウェイトブロックの摩擦係数がマウンドの条件によってどのように変化するかを調べるため、カウンターウェイトブロックの模型を用いて実験を行った。この実験は間瀬・平石ら(2011)の実験と同じように京都大学宇治川オープンラボラトリーの実験水槽内に粒径 10~30mm の砕石で作成された縦×横×高さが 20m×2m×0.4m のマウンド上でブロックを

用いて引っ張り実験を行った。引っ張りには巻き取り速度 6cm/s の低速ウィンチを使用した。許容値 500N のロードセルをデータロガーに接続し、パソコンにデータを収録し解析を行った。サンプリング周波数は 50Hz で、10 秒間計測し、安定した測定ができるように、計測開始 5 秒後から 5 秒間引っ張った。

実験の様子を Photo.1 に示す。この実験で用いたブロックは平型ブロック、孔小の有孔型ブロック、孔大の有孔型ブロックの 3 種類である。平型ブロックは重さ 45.8kg、縦×横×高さが 40cm×40cm×13cm、比重が 2.4、孔小の有孔型ブロックは重さ 32.8kg、縦×横×高さが 40cm×40cm×13cm、孔の大きさが 20cm×20cm×13cm、比重が 2.4 である。孔大の有孔型ブロックは縦×横×高さが 40cm×40cm×13cm、孔の大きさが 24cm×24cm×13cm、比重が 2.4 である。各ブロックを Photo 2 に示す。この実験で用いた砕石は赤色の砕石材、緑色の砕石材、小石の 3 種類である。各砕石材の重さ、形状は 50 個の平均値として求めた。赤色砕石材は重さ 122.6g、密度 2.7g/cm³、最大横幅 4.7cm、縦長 7.0cm、厚さ 2.7cm、形状係数(横/縦比) 0.67、平均粒径 5.4cm であった。緑色の砕石材の場合は、重さ 69.3g、密度 2.5g/cm³、最大横幅 4.61cm、縦長 5.18cm、厚さ 2.56cm、形状係数(横/縦比) 0.89、平均粒径 4.1cm であった。小石は粒径が 3mm 程度である。各砕石材を Photo-3 に、重さと形状を Table.1 に示す。

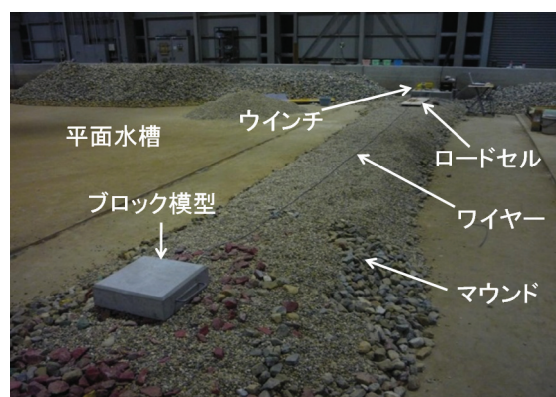


Photo 1 Overview of experimental installation (Rectangular model is block and tension meter can obtain the rolling up force)



Photo 2 Block model with hall



(a) Rubble on mound



(b) Rubble employed to fill the step

Photo 3 Special rubble employed in counterweight block

Table 1 Dimension of rubbles in experiment

	Red (Mound)	Green	Orange(inner)
Weight	122.6g	69.3g	135.4g
Density	2.7g/cm ³	2.5g/cm ³	2.5g/cm ³
Width	4.7cm	4.6cm	5.1cm
Length	7.0cm	5.2cm	7.1cm
Thickness	2.7cm	2.6cm	3.4cm
W/L	0.67	0.89	0.72
Diameter	5.4cm	4.1cm	5.2cm

(2) 実験データの解析方法

Photo 1 の実験装置から、Fig.2 のように時間を横軸に、ウィンチの張力(N)を縦軸にとったデータが得られる。 N_d はデータ数であり N_d をサンプリング周波数で割ったものが時間(s)となる。黄色い点のような引っ張り後の最初のピーク発生時をブロックが動き出す瞬間とし静止摩擦力とした。各ケースにおいて測定を 5 回以上行い、他と大きく異なる値は間引いて、残った 5 回の平均値を摩擦力 F とした。ブロックあるいはブロックと碎石を加えた質量を m とし重力加速度を g として F を mg で除して摩擦係数を求めた。重力加速度は 9.8m/s^2 とした。

$$\mu = \frac{F}{mg} \quad (2)$$

μ : 摩擦係数

F : 摩擦力(N)

m : ブロックあるいはブロックと碎石を加えた質量 (kg)

g : 重力加速度(m/s^2)

(3) 実験ケース

実験ではブロックの有効性だけではなく材料特性などについても基礎的な知見が得られるようにマウンド材の種類を変えて、全部で 6 ケースの実験を行った。

ケース 1 は碎石をボンドで固定したマウンド。

ケース 2 は木枠に赤色の碎石を詰めたマウンド。

ケース 3 は木枠に緑色の碎石を詰めたマウンド。

ケース 4 は目の細かなタイルを引いたマウンド。

ケース 5 は小石を木枠に詰めボンドで固定したマウンド。

ケース 6 はケース 5 のマウンドを釘で下のマウンドに固定したマウンド。

ケース 2 からケース 6 で用いた木枠はそれ自体が動いてしまわないようにマウンド碎石に埋め込み固定した。各ケースの代表写真を Photo.4 に示す。

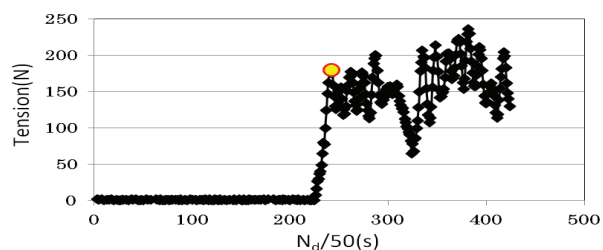


Fig. 2 Variation of measured tension on time



(a) Frame in Case 2



(b) Tile for Case 4



(c) Panel for Case 5 and 6

Photo.4 Variation of mound employer in friction test

(4) 実験結果

実験結果を Table.2 に示す。Fig.3 は平型ブロックでの実験結果を、横軸に実験ケース、縦軸に摩擦係数をとってグラフにしたものである。ケース 4 のタイルのマウンドで 0.66 と最も高い値が得られた。続いてケース 5 で 0.50、ケース 6 で 0.45 と強く固定されたマウンドで高い値が得られ、ケース 1 で 0.37、ケース 2 で 0.29、ケース 3 で 0.23 と固定が完全ではなく、多少動くことのできるマウンドでは小さな摩擦係数が得られた。このことから平型ブロックでは接地面積の大きい、より安定したマウンドで高い摩擦係数が得られることが分かる。

つぎにケース 3、ケース 4、ケース 6 について平型ブロックと有孔型ブロック(孔に砕石をつめたもの)の摩擦係数を比較する。Fig.4、Fig.5、Fig.6 は横軸にブロックの種類、縦軸に摩擦係数をとった各マウンドのグラフである。凹凸のあるマウンドであるケース 3 やケース 6 では中詰め砕石とのかみ合わせが発揮できるため、孔に砕石をつめた有効型ブロックでは平型ブロックより高い摩擦係数が得られた。一方で平らなマウンドであるケース 4 では接地面積が減ったため、平型ブロックより低い摩擦係数となった。

Table 2 Tension test for normal and counterweight block

case1		case2	
case3		case4	
case5		case6	
case7		case8	
case9			

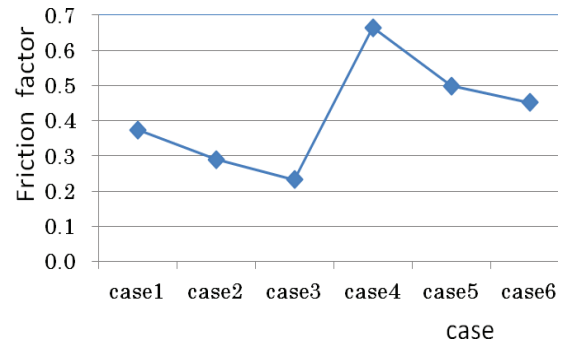


Fig.3 Variation of friction factor of flat type block

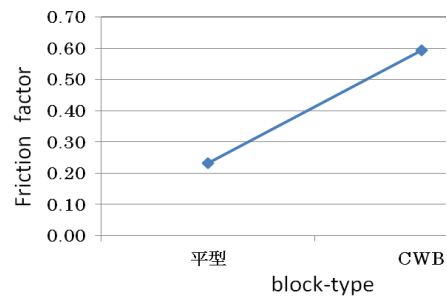


Fig.4 Variation of friction factor for flat and counterweight block(CWB)

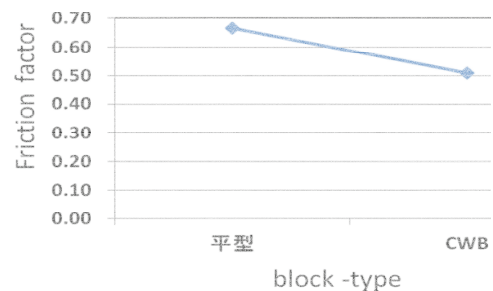


Fig.5 Variation of flat and CWB for case 4

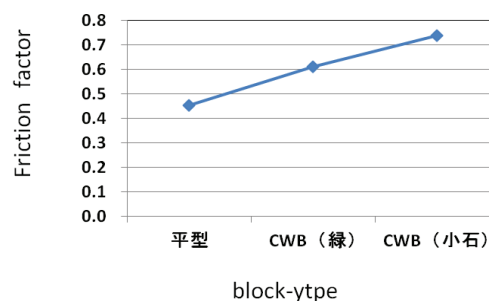


Fig.6 Variation of case with inner rubble side inside foot and bed

4. 実用型カウンターウェイト模型の実験内容

4.1 実験の方法

基本的な実験装置は 3 章の各種材料における摩擦係数の変化に関する実験と同じであるが、ブロックの大型化に対応してロードセルを許容値 1000N のものに変更した。ただし、マウンド砕石の上に 3 章の実験で使用した特殊なマウンドは置かず、現場の状態により近づけるために砕石の上に直接カウンターウェイトブロックを置いて実験を行った。間瀬・平石ら(2011)が行った実験は、3 章の実験のようにブロックが動き出す瞬間の張力を静止摩擦力とみなし、摩擦係数を評価した。その際、サンプリング周波数を 50Hz および 100Hz に設定したが、顕著な差異は確認できなかった。そこで本研究では、サンプリング周波数を 50Hz と設定した。

下迫ら (1998) により防波堤の設計に関しては、耐用期間中の期待滑動量が 30cm 以下となるような設計法が提案されている。本研究で提案するカウンターウェイトブロックは静止時より滑動時に大きな抵抗力を発揮することがわかっている。そこで本研究では下迫ら (1998) により提案されている防波堤の期待滑動量 30cm (実験では 1/5 の 6cm) までブロックの滑動を許容し、期待滑動量以内における張力の最大値を最大摩擦力として定めた。さらに、より正確に最大値を求めるため、サンプリング周波数を 100Hz とした。計測時間を 5 秒間とし、計測開始 2

秒後から 3 秒間の引張り試験を行った。

6cm/s の低速ウィンチで引っ張っているため、引っ張り開始後 1 秒間の最大値を最大摩擦力とする。すなわち、Fig.7 の黄色い点のように、赤い矢印の間の計測値の最大値を最大摩擦力とした。ブロック模型に関して本実験ではより実用に適したブロックを新しく考案し、実験を行った。これは、Photo-5 のように、ブロック底面にくぼみを作り、マウンド砕石とのかみ合わせを期待した形状である。実用するブロックの大きさは縦×横×高さが 2m×2m×1m と仮定し、その 1/5 の大きさの模型を使用した。

実験の実施を促進するため、2 分割し、縦×横×高のブロックを作製して、実験を行った。その際、連結ブロックの大きさは縦×横×高さが 40cm×40cm×20cm となり、現地で施工となるブロックの 1/5 縮尺模型になる。すなわち大きさが 40cm×40cm×10cm のブロックを二段重ねて現地に合わせた、孔の大きさは縦×横×高さ 24cm×24cm×20cm の立方体の角を落とした形状になっている。この足つきブロックの重さは 1 段目のブロックが 23.1kg、二段目のブロックが 23.6kg で合計 46.7kg である。この足つきブロックに加え、この実験では 3.2 の実験で用いた平型ブロック、孔小の有孔型ブロック、孔大の有孔型ブロックも用いた。

この実験で使用した砕石は、マウンドの赤い砕石、中詰めに用いたオレンジ色の砕石、および後述する足部の空間に充当する緑色の砕石である。オレンジ色の砕石の形状は 74 個の砕石の平均値を求めた。その結果は、重さ 135.4g、密度 2.5g/cm³、最大横幅 5.13cm、縦長 7.11cm、厚さ 3.42cm、形状係数 (横/縦比) 0.72、平均粒径 5.2cm であった。赤い砕石、オレンジ色の砕石の形状は 3 章の実験と同じである。



(a) First layer



(b) Completed model with two layers

Photo.5 1/5 Scale prototype CWB

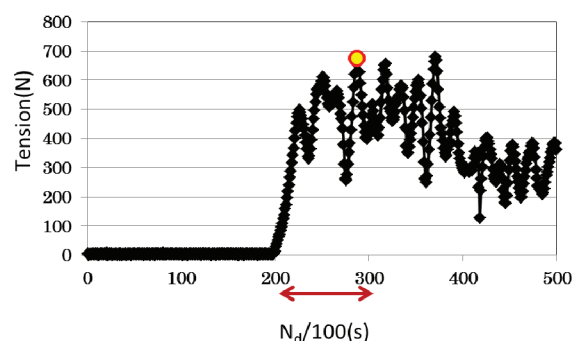


Fig.7 Maximum tension in permeable horizontal displacement

各ケースにつき 7 回測定し、最大値と最小値を取り去って、5 回の平均値をブロックの最大摩擦力とした。平型ブロックに関しては 5 回測定し、その平均値を最大摩擦力とした。つまり本実験で得られた

最大値とは最大値の平均値のことである。測定で得られた最大摩擦力を F 、ブロックあるいはブロックと中詰め砕石の合計の質量を m 、重力加速度を g とする。 F を mg で割った値をコンクリート部分と中詰め砕石部分の合計の摩擦係数という意味で、全体摩擦係数を μ とする。

$$\mu = \frac{F}{mg} \quad (3)$$

μ : 全体摩擦係数

F : 測定で得られた全体摩擦力(N)

m : ブロックあるいはブロックと中詰め砕石の合計質量(kg)

g : 重力加速度(m/s²)

次に砕石を詰めなかったケースにおいて、その時の全体摩擦係数 μ をコンクリート部分のみの摩擦係数という意味でコンクリート摩擦係数 μ_c とする。

最後に孔に砕石を詰めたケースにおいてその最大摩擦力 F から、そのブロックのコンクリート部分の摩擦力、つまりそのブロックの質量を m_c とすれば $\mu_c m_c g$ を引き、中詰め砕石の質量を m_s として、 $m_s g$ で $(F - \mu_c m_c g)$ を割ったものを中詰め砕石の摩擦係数という意味で定義し、中詰め摩擦係数 μ_s とする。

$$\mu_s = \frac{F - \mu_c m_c g}{m_s g} \quad (4)$$

μ_s : 中詰め摩擦係数

F : 測定で得られた全体摩擦力(N)

μ_c : コンクリート摩擦係数

m_c : ブロックの質量(kg)

m_s : 詰め砕石の質量(kg)

g : 重力加速度(m/s²)

この中詰め摩擦係数 μ_s の値から中詰め砕石による抵抗力の効果を評価していく。

4.2 実験ケース

この実験で行ったケースを Table.3 に示す。実験は全部で 9 ケース行った各ケースの内容を以下に示す。

ケース 1 は平型ブロック。

ケース 2 は孔小の有孔型ブロックに中詰め砕石材を入れない。

ケース 3 は孔大の有孔型ブロックに中詰め砕石材を入れない。

ケース 4 は孔小の有孔型ブロックにオレンジの中詰め砕石材を入れる。

ケース 5 は孔大の有孔型ブロックにオレンジの中詰め砕石材を入れる。

ケース 6 は足つきブロック 1 段。

ケース 7 は足つきブロック 2 段。

ケース 8 は足つきブロック 2 段にオレンジの砕石材

を入れる。

ケース 9 は足つきブロック 2 段にオレンジの砕石材を入れ底面のくぼみ部分に緑の砕石材を入れる。

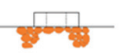
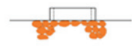
以上のケースから新しく提案した足つき(有孔型)ブロックの性能を評価した。

5. カウンターウェイトブロックの実験結果

5.1 本実験の特徴

足つき有孔型ブロックを用いたカウンターウェイト実験の結果をまとめる。最初に本実験と間瀬・平石ら(2011)の実験の結果を比較する。これはブロックが動く瞬間の値を摩擦力としたときと、30cm の滑

Table 3 Experimental case of prototype block with short foot

case1		case2	
case3		case4	
case5		case6	
case7		case8	
case9			

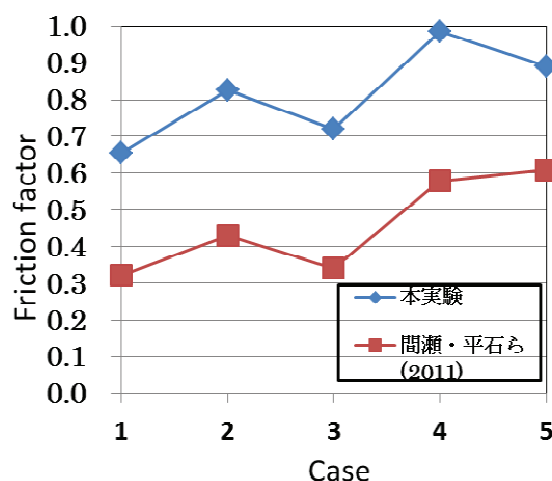


Fig.8 Comparison of friction factor for case using initial(red) and maximum (blue) tension

動範囲内の最大値を摩擦力としたときの違いでの比較である。Fig. 8 は本実験の結果と初期移動時の最大値を摩擦係数とした間瀬・平石ら(2011)の実験

の結果を比較したものである。グラフの縦軸が摩擦係数(Friction factor)で横軸が実験ケースである。実験ケースは本実験でのケース番号で間瀬・平石ら(2011)の実験で対応するケースを本実験でのケース番号に置き換えている。

まずコンクリート摩擦係数 μ_c について比較する。本実験と間瀬・平石ら(2011)の実験の順で比較すると、平型ブロックで 0.65 と 0.32, 孔小の有孔型ブロックでは 0.83 と 0.43, 孔大の有孔型ブロックでは 0.72 と 0.34 であった。

平型ブロックでは 0.65 と通常の港湾施設の設計で用いられているコンクリートと捨て石の静止摩擦係数 0.6 に近い値が得られた。このことから本実験においてブロックの滑動を許容し 30cm としたときの値は、現地において、初期の移動を許容したときの摩擦係数と同等になることがわかる。

孔小の有孔型ブロック, 孔大の有孔型ブロックにおいても、平型より高い摩擦係数が得られており、砕石マウンドの際はブロックが動く瞬間よりもブロックがやや滑動した際に大きな摩擦係数を発揮することがわかった。

次に中詰め摩擦係数について比較する。Fig.9 は中詰め摩擦係数を比較したものである。本実験と間瀬・平石ら(2011)の順で比較すると、孔小のブロックでは 1.73 と 1.39, 孔大のブロックでは 1.37 と 1.41 であり、両実験において中詰め摩擦係数にはそれほど大きな違いは得られなかった。このことから中詰め砕石はブロックが動き出した瞬間にすぐに初期の変形により高い摩擦係数を発揮することがわかる。

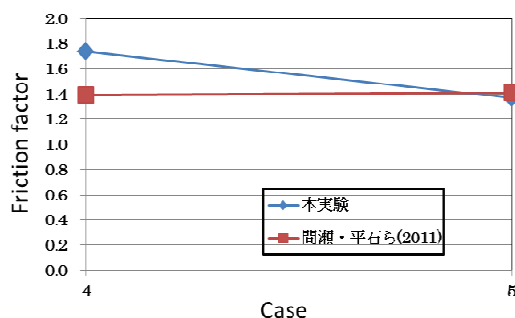


Fig.9 Comparison of total friction in case using initial(red) and maximum(blue) data

5.2 足つきブロックの特徴

標準ブロック(足をつけない)と足つきブロックの実験結果をそれぞれ Fig.10 に示す。まず足つきブロックのコンクリート摩擦係数 μ_c は 1 段では 0.84, 2 段では 0.81 であった。1 段と 2 段での差は、ほとんどなくまた孔小の有孔型ブロックの $\mu_c=0.83$ と孔大の有孔型ブロックの $\mu_c=0.72$ との差もあまりなく、足つきブロックの特徴であった底面のくぼみの効果

はそれほど顕著ではないことがわかる。

次に全体摩擦係数 μ で比較する。Fig.11 ではブロックの孔に砕石を詰めたケースにおいて、ケース 6 では 0.90, ケース 5 では 0.89, ケース 8 では 0.94, ケース 9 では 0.90 となった。この結果から標準ブロック, 足つきブロックともに孔に砕石を詰めないケースより、詰めたケースのほうが高い摩擦係数がでているが、とりわけ足つきブロックで高い値が出るというわけではなく、足つきブロックの底面のくぼみの効果は見られなかった。またケース 8, とケース 9 の比較から足つきブロックのくぼみ部分にあらかじめ砕石を詰めると効果は小さくなることがわかったので、足つきブロックの底面をとがらせても、それほど高い摩擦係数とはならないことがわかった。

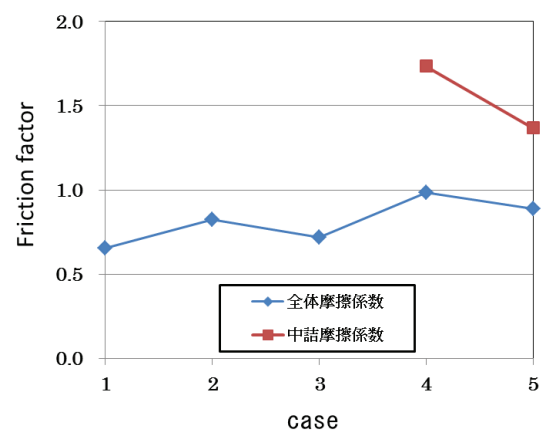


Fig.10 Total(blue) and inner(red) friction factor of counterweight block

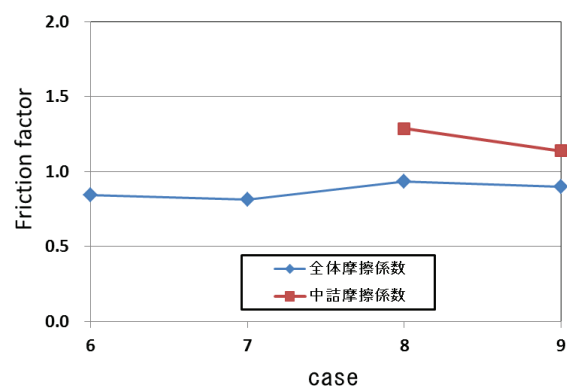


Fig.11 Total (blue) and inner(red) friction factor of counterweight block with foot

最後に中詰め摩擦係数 μ_s を比較する。ケース 4 で 1.73, ケース 5 で 1.37, ケース 8 で 1.29, ケース 9 で 1.14 となった。足つきブロックのほうが中詰め摩擦係数が小さくでているがこれは中詰め砕石の量が足つきブロックのほうが多いため、中詰め砕石の単位質量当

たりの摩擦力でみると小さくなるためと思われる。

6. 破壊抵抗係数の決定

6.1 破壊抵抗係数

前章までにおいて実験によりカウンターウェイトブロックの摩擦力を各ケースについて調べてきた。カウンターウェイトブロックの中詰め砕石と摩擦力の関係は間瀬・平石ら(2011)により破壊抵抗係数を用いた式によって摩擦力を求める推定式として定式化されている。そこで本章では本実験で得られた実験値と破壊抵抗係数を用いた式により得られる推定値とを比較し推定式の評価をおこなう。

6.2 カウンターウェイトブロックの水平抵抗力推定式

まず水平抵抗力はコンクリート面と砕石での抵抗力の合力となるが、本研究では、砕石の抵抗力に比べコンクリート面の抵抗力は小さいので、砕石の抵抗力で代表できる。中詰め砕石を同じ質量を持つ直径 d_a の完全な球体と仮定する。この際マウンド砕石も中詰め砕石と同じ形状であると仮定する。ブロックの孔が正方形であるとして、中詰め砕石が稠密に詰まっており、Fig.12 のように表面のマウンド砕石とかみ合っているとする。この際、中詰め砕石 1 個につきマウンド砕石との抵抗面が 1 つ生まれる。この面により、引っ張り力に抵抗していると考ええる。以上の仮定により、ブロック孔の 1 辺の長さ B を、球と考えた石の代表直径 d_a で割ったものが 1 列あたりの中詰め砕石の数、すなわち 1 列あたりの抵抗面の数であるのでその値を列の分だけ足し合わせたもの、つまり 2 乗したものが全体の抵抗面の数 N_r になる。

$$N_r = \left(\frac{B}{d_a} \right)^2 \quad (5)$$

N_r : 抵抗面の数

B : ブロックの孔の 1 辺の長さ(m)

d_a : 球と考えた石の代表直径(m)

ここで石を球と考えた時の代表直径は以下の式に従い計算した

$$m_s = \frac{M}{N_s} \quad (6)$$

m_s : 石 1 つ当たりの質量(kg)

M : 中詰め砕石の総質量(kg)

N_s : 中詰め砕石の数

$$V_s = \frac{m_s}{\rho} \quad (7)$$

m_s : 砕石 1 つあたりの

V_s : 砕石 1 つあたりの体積

ρ : 砕石の平均密度(kg/m³)

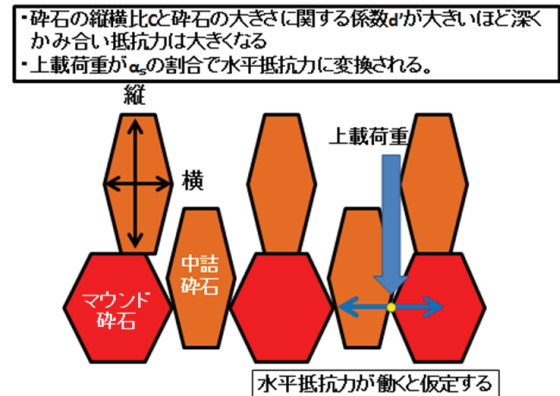


Fig.12 Resistance image of inner rubble against outer rubble on mound

$$V_s = \frac{4}{3} \pi r^3$$

$$r = \left(\frac{3}{4\pi} V_s \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

r : 球と考えた砕石の半径(m)

V_s : 砕石 1 つあたりの体積(m³)

$$d_a = 2r \quad (9)$$

d_a : 球と考えた石の代表直径(m)

r : 球と考えた砕石の半径(m)

抵抗面 1 つあたりの抵抗力 f_s は最下層の中詰め砕石に加わる垂直方向の力と砕石の形状による係数 C と d' に比例すると仮定し、その比例係数を破壊抵抗係数 α_s とする。 C は砕石の形に関する係数で石の縦横比であり、 d' は石の大きさに関する係数であり、球と考えた砕石の代表直径を単位 cm であらわしたときの絶対値で、ここでは無次元量である。砕石のかみ合わせは C と d' が大きいほど、つまり砕石の形状が細長く、大きさが大きいほど強くなり、水平抵抗力は増大する。砕石のかみ合わせにより、上載荷重による垂直方向の力は水平方向の力になる。この砕石のかみ合わせの特性によって、垂直方向の力が水平方向の力に変換される割合が破壊抵抗係数 α_s である。

垂直方向の力は最下層の砕石の上に積まれた砕石の総質量である。ブロック高さ (石の層圧) D を球と考えた石の代表直径 d_a で割ったものが積まれた石の数となるので、石 1 つ当たりの質量 m_s と重力加速度 g をかけたものが垂直方向の力となる。

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

f_s : 抵抗面あたりの抵抗力(N)

d' : 石の直径で定まる係数 (ここでは 5.69 を使っている)

d_a : 球と考えた石の代表直径(m)

C : 石の縦横比

α_s : 破壊抵抗係数

m_s : 石 1 つあたりの質量(kg)

D : ブロックの高さ(m)

g : 重力加速度(m/s^2)

抵抗面あたりの抵抗力 f_s はそれぞれ等しいと考えられるので、水平抵抗力 F_s は f_s に抵抗面の数 N_r をかけたものとなる。カウンターウェイトブロックの全体の抵抗力はこの水平抵抗力 F_s と考えることができる。

$$F_s = N_r \times d' \times C \times \alpha_s \times m_s \times \frac{D}{d_a} \times g \quad (11)$$

F_s : 水平抵抗力(N)

N_r : 抵抗面の数

d' : 石の直径で定まる係数(ここでは 5.69 を使っている)

d_a : 球と考えた石の代表直径(m)

C : 石の縦横比

α_s : 破壊抵抗係数

m_s : 石 1 つあたりの質量(kg)

D : ブロック高さ(m)

g : 重力加速度(m/s^2)

以上がカウンターウェイトブロックの抵抗力推定式である。本実験で得られた値とこの推定式から得られる値とを比較し評価する。

6.3 推定値と実験値の比較

実験ケース 4, ケース 5, ケース 8, ケース 9 のケースごとに求めた α_s は Fig.13 のとおりである。平均すると破壊抵抗係数 α_s を約 0.9 と決定できる。各ケースの実験値と推定値を, Fig.14 に示す。グラフは横軸に実験値, 縦軸に推定値をとったものである。実験値と推定値の相関係数 R は 0.88 であった。

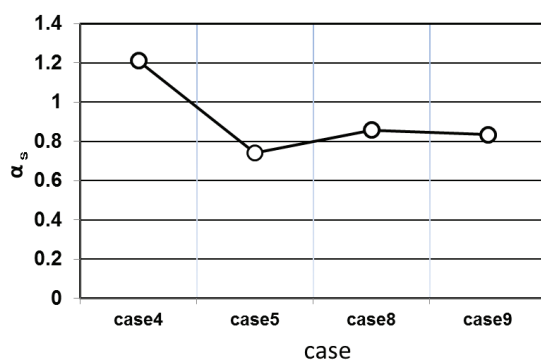


Fig.13 Resistance coefficient α_s obtained in experimental case

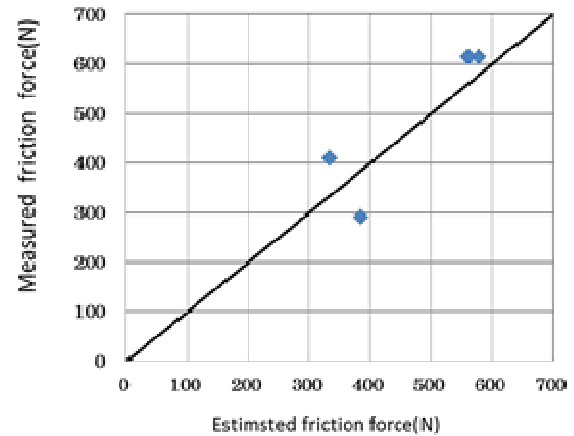


Fig.14 Comparison of measured and expected horizontal friction on mound

間瀬・平石ら(2011)の実験では、破壊抵抗係数 α_s が 0.6, 実験値と推定値の相関係数が 0.62 であり、本実験で得られた値のほうが高い相関が得られた。これは本実験では滑動を 30cm 許容した際の最大値を採用したため、より高い水平抵抗力が安定して得られたものと思われる。

7. 設計フロー

7.1 カウンターウェイトブロックの水平抵抗

本章では水平抵抗力の推定式と 6 章で得られた破壊抵抗係数 α_s の近似値 0.9 をもちいて、実際に用いられるサイズのカウンターウェイトブロックをおくことでどの程度の水平抵抗力の増加が見込まれるかを試算している。なお、ここでは、カウンターウェイトブロックの水平抵抗を支配的である中詰め砕石の抵抗のみで代表させた。

フルードの相似則より相似比 L_r は模型サイズ L_m を実物サイズ L_p を割ったものである。時間比 T_r は相似比 L_r の平方根に比例するので力の比 N_r はコンクリートの密度が一定なら L_r の 3 乗に比例する。ここでコンクリートブロックが受ける浮力を考慮すると式 (11)において m_s を m_s から水の密度 ρ と、球とした石の体積 V_s をかけた浮力を引いたものに置き換えればよい。

$$L_r = \frac{L_m}{L_p} \quad (12)$$

L_p : 相似比

L_m : 模型サイズ(m)

L_p : 実物サイズ(m)

$$T_r = \sqrt{L_r} \quad (13)$$

T_r : 時間の相似比

$$N_r = L_r^3 \quad (14)$$

N_r : 力の相似比

カウンターウェイトブロックの実物の大きさは縦×横×高さが 2m×2m×1m であるとして、後述の Fig. 16 のようにカウンターウェイトブロックを設置する。この時本実験で用いた模型との相似比（縮尺） L_r は 1/5 である。6 章で得られた式を用いてカウンターウェイトブロック 1 個において得られる水平抵抗力 F_s を計算する。中詰め砕石の大きさも 5 倍つまり砕石の代表直径の値 d_a も 5 倍になったとして式(11)を用い F_s を求める。ここで d' は砕石の直径に関する係数であり無次元量ではあるが、式を考慮するとき実験値の直径を使用しているので 5 倍になる。この表現法については、今後もより適切な式形態を考える必要がある。

上記のフルードの相似則と係数 d' の効果を考えると、実物大での推定値は模型実験での推定値に $(1/L_r)^4$ をかけたものになる。また水中での使用となるので砕石の水中重量を用いて計算すれば実物でのカウンターウェイトブロック 1 個当たりの水平抵抗力 F_s は 229.9kN となる。

7.2 防波堤が受ける波力と安全率

防波堤の受ける波圧合力は合田式(合田(2008))を用いて計算し防波堤の例を用い偶発波浪荷重を受けた時、防波堤の安全率を比較する。偶発波浪荷重は設計波の周期を 2 倍にして波高を 1.2 倍、1.4 倍、1.5 倍の 3 段階に変化させる。カウンターウェイトブロックは防波堤の背後に 4 個置いた時と 6 個置いた時の 2 ケースについて検証する。Fig.15 は CWB の活用を示した模式図で上段から、CWB を使用しない、CWB を 4 個使用する、CWB を 6 個使用する場合の断面のイメージを示す。

合田式では以下の諸式で波力が計算できる。

$$\begin{aligned} \eta^* &= 0.75(1 + \cos \beta) \lambda_1 H_D \\ p_1 &= 0.5(1 + \cos \beta)(\alpha_1 \lambda_1 + \alpha_2 \lambda_2 \cos^2 \beta) \rho_0 g H_D \\ p_2 &= \frac{p_1}{\cosh(2\pi h / L)} \\ p_3 &= \alpha_3 p_1 \\ p_u &= 0.5(1 + \cos \beta) \alpha_1 \alpha_3 \lambda_3 \rho_0 g H_D \end{aligned} \quad (15)$$

η^* : 静水面上波圧強度が 0 となる高さ(m)

p_1 : 静水面における波圧強度(kN/m²)

p_2 : 海底面における波圧強度(kN/m²)

p_3 : 直立壁底面における波圧強度(kN/m²)

p_u : 揚圧力(kN/m²)

h_c : 静水面から直立壁天端までの高さ(m)

h : 直立壁前面における水深(m)

h_b : 直立壁全面から沖側へ有義波高の 5 倍だけ離れた点での水深(m)

h' : 直立壁底面の水深(m)

d : 根固め工またはマウンド被覆工天端のいずれか小さいほうの水深(m)

ρ_0 : 海水の密度(t/m³)

g : 重力加速度(m/s²)

H_d : 設計計算に用いる波高(m)

L : 水深 h における設計計算に用いる波長(m)

β : 直立壁法線の垂線と波の主方向から±15°の範囲で最も危険な方向となす角度

λ_1, λ_2 : 波圧の補正係数

λ_3 : 揚圧力の補正係数

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0.6 + 0.5 \left(\frac{4\pi h / L}{\sinh(4\pi h / L)} \right) \\ \alpha_2 &= \min \left\{ \frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H_D}{3h_b} \right)^2, \frac{2d}{H_D} \right\} \\ \alpha_3 &= 1 - \frac{h'}{h} \left(1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h / L)} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

ここで設計値はそれぞれ h_c が 3.4m, h が 10.1m, h_b が 10.4m, h' が 7.1m, d が 5.6m, ρ_0 が 1.03, g が 9.8, H_d が 8.0m, 周期 T は 11.4s, L は $1.56T^2 \tanh(2\pi h / L)$ に等しいとし数値計算からもとめた。設計値では $L=107.5$ m, 周期 2 倍の偶発波浪荷重では $L=224.0$ m となった。 β は 15°, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ は 1 とした。つまり仮定した波浪は周期 $T=11.4$ s, 波長 $L=107.5$ m, 波高 $H_d=8$ m を設計波とし、偶発波浪として $T=22.8$ s, $L=224.0$ m, $H_d=9.6$ m の波浪, $T=22.8$ s, $L=224.0$ m, $H_d=11.2$ m の波浪, $T=22.8$ s, $L=224.0$ m, $H_d=12$ m の波浪の 4 種類である。

防波堤の大きさは縦×横×高さが 15.0m×2.0m×10.5m, 重さが 700t とした。

設計波では α_1 が 0.921, α_2 が 0.314, α_3 が 0.893 となり η^* が 11.8m, p_1 が 96.3kN/m², p_2 が 81.7kN/m², p_3 が 86.03kN/m², p_u が 130.5kN/m² となり波圧の合力 P は上で求めた波圧を積分して 1855.3kN となる。安全率 $S.F.$ は式(13)であらわされる。

カウンターウェイトブロックには孔があるため、揚圧力はカウンターウェイトブロックには作用しないと仮定した。

$$P = 0.5(p_1 + p_3)h' + 0.5(p_1 + p_4)\eta^*$$

$$p_4 = p_1 \left(1 - \frac{h_c}{\eta}\right)$$

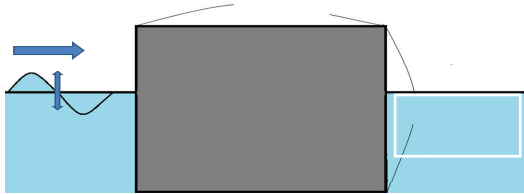
$$S.F. = \frac{\mu(W - U) + N}{P} \quad (17)$$

μ : コンクリート面と砕石の摩擦係数(ここでは 0.6 とした。)

W : 防波堤の静水中重量(N)

U : 揚圧力(N)

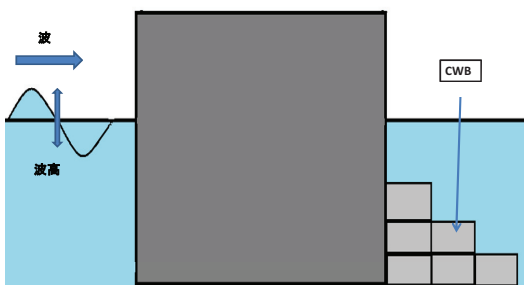
N : カウンターウェイトブロックの水平抵抗力(N)



(a) Original case without CWB



(b) Improved case with CWB(4)



(c) Improved case with 6CWB

Fig.15 Improved caisson employing CWB

このときの各設定における安全率を Fig.15 に示す。カウンターウェイトブロックなし、設計波の時、安全率 $S.F.$ は 1.27 となる。また偶発波浪を想定した時は波高 1.2 倍、1.4 倍、1.5 倍でそれぞれ安全率 $S.F.$ は 0.74, 0.53, 0.45 となる。カウンターウェイトブ

ロックを 4 個置いた時の安全率は設計波、偶発波浪 1.2 倍、1.4 倍、1.5 倍の順で 1.77, 1.07, 0.78, 0.68 であり 6 個置いた時は 2.01, 1.23, 0.91, 0.79 となった。カウンターウェイトブロックを 6 個置いた時は波高 1.2 倍、周期 2 倍の偶発波浪の際にも安全率 1.23 と 1.20 以上の値となり偶発波浪に対しても設計条件を満たす構造物となる。Fig.16 に CWB の設置個数に伴う防波堤の安全率の変化を示す。

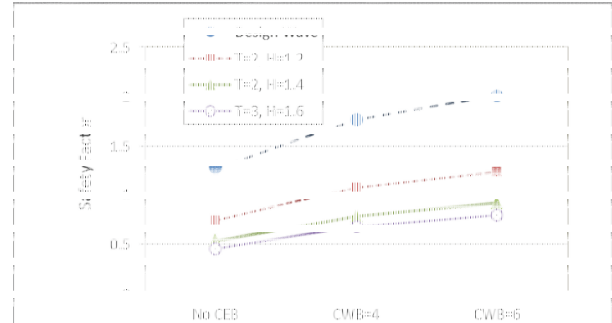


Fig.16 Variation of safety factor due to number of CWB. T=2 indicates that wave period becomes twice larger than original. H=1.2 indicates that the wave height become 1.2times larger than original.

8. まとめ

第 1 章では近年の異常な海象の例をあげ、偶発波浪にたいして粘り強い構造が必要とされていること。粘り強い構造の点で滑動後の摩擦力が重要であることを述べた。

第 2 章では今年の海水浴事故と波形勾配の関係をまとめることで波の周期の重要性を説明した。

第 3 章では防波堤の設計式と様々なマウンド材料での実験から摩擦係数の重要性を説明した。

第 4, 5 章では足つきカウンターウェイトブロックと標準ブロックとの比較からその効果を評価した。その結果、足つきブロックより標準ブロックの方が大きい効果が得られた。そのことからカウンターウェイトブロックは底面にとがった部分がなくても十分効果があることがわかった。またブロックの移動を許容することで大きな効果が得られることが分かった。

第 6, 7 章ではカウンターウェイトブロックの抵抗力の推定式を説明し、本実験との適合性を調べることでその精度を評価し、推定式を用いてカウンターウェイトブロックの設計フローを示した。カウンターウェイトブロックを設置することで偶発波浪荷重が作用した際にも、安全率 1.2 以上を保つことが可能となりカウンターウェイトブロックの有用性が確認できた。

今後は水平抵抗力の推定式を、コンクリート面も含めて評価できるよう改良する。設計フローにおいて、推定式の碎石の大きさに関する係数である d' にフルード則を適用することについての検討、造波水槽などを用いて水中での挙動を解析等が課題である。

参考文献

気象庁 ホームページ :

http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/new/jyun_sokuji_20110915-0922.pdf (参照日 2011. 10. 31)

<http://www.jma.go.jp/jma/menu/h23t12-portal.html>

(参照日 2011. 10. 31)

合田良實 (2008) : 耐波工学 (港湾・海岸構造物の耐波設計), 鹿島出版会, pp. 101-110

財団法人 沿岸技術研究センター (2007) : 港湾構造

物設計事例集, pp. 1-70

下迫健一郎, 高橋重雄 (1998) : 期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼設計法, 港湾技術研究所報告, 第 37 巻, 第 3 号, pp. 3-30

社団法人 日本港湾協会 (1999) : 港湾施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, pp. 310

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

間瀬肇・平石哲也・川田達也・行本卓生・徳永誠之・松下紘資 (2011) : 偶発波浪荷重対策としてのカウンターウエイトブロックの開発, 海岸工学論文集, 第 58 巻, pp. 696-700

(論文受理日 : 2012年5月15日)

Experimental Study on Application of Counterweight Block for Breakwater Improvement

Tetsuya HIRAISHI, Hiroshi MATSUSITA⁽¹⁾, Tatsuya KAWATA⁽¹⁾ and Akihiro ANDO⁽¹⁾

(1) Department of Civil and Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

Wave heights and periods have been increased mainly due to the global warming. The probability of accidental waves larger than the design wave condition increases. The improvement of breakwater needs the large cost and long construction duration. A simple improve method to increase the breakwater stability is proposed. In the implementation, a rectangular concrete block with central hole filled in rubles is installed at the backside of breakwater to increase the horizontal resistance expecting rubble friction. Experimental works with 1/4 scaled mode demonstrate the application of the counterweight blocks (CWB). The safety factor of breakwater sliding due to accidental wave condition is partially improved by employing CWB.

Keywords: counterweight block, model experiment, tension meter, breakwater stability