

捨石防波堤の耐波安定性に及ぼす噛み合わせの効果

Interlocking effects on stability of rubble mound breakwaters

浅野敏之*・満充師**・日笠山努**・梅月誠人***

Toshiyuki. Asano, Atsushi. Mitu, Tsutomu. Hikasayama, Makoto. Umetuki

Interlocking properties affecting stability of rubble mound breakwaters are investigated. Stability tests of ripraps against wave attack are performed by changing disposition patterns. Another stability tests are carried out to examine stabilizing effects by using stuffing stones. These results show that the stability of ripraps strongly depends on the interlocking properties which may be parameterized in terms of void fraction, coordinate number, diameter ratio for two particle system and angle of repose.

Keywords: (Stability of ripraps, Interlocking effects, Stability number)

1. はじめに

最近、余暇時間の増大などを背景として、市民が海に親しむ場としての海浜の役割が重視され、親水性を有する海岸構造物が注目されるようになってきた。捨石護岸や捨石防波堤は古くからある構造形式であるが、水際を有すること、水質浄化に役立つこと、人工の消波ブロックと異なり自然石には景観上の利点もあることなどから、都市のウォーターフロント域にも築造されつつある。また最近では、捨石を海面下に敷設した人工リーフ工法も多く用いられるようになってきた。

しかし、現行の捨石堤の設計法は経験則の域を脱せず、1960年代の設計法から本質的な見直しはほとんどなされていない。現行設計法で指示される安定係数KDの値は、自然石においても2.1から3.5まで大きな幅を持ち、粒子形状・充填率・積層厚・斜面勾配等に依存する事が考えられるが、その力学的機構は必ずしも明確になされていない。

本研究は、上述の安定係数KDの不確定性は捨石粒子間の噛み合わせ特性の差異に起因すると考え、捨石の配置に細かく注意を払った多くの繰返し実験を行うことによって、噛み合わせの耐波安定性に及ぼす効果を調べたものである。

まず、噛み合わせの特性を捨石要素間の接触特性と捉え、捨石群をランダムに置くのではなく、捨石一個一個を一定の配列特性を持つように設置し、その耐波安定性を調べた。次に、捨石群に間詰め石を埋め込み、これによる噛み合わせの変化と耐波安定性の関係について考察した。ここでは、噛み合わせの指標として、間詰め石の混合による空隙率・安息角・接点数の変化などについて、考察を行った。

2. 実験の概要

(1) 実験装置・実験方法

実験は長さ13m、幅40cm、高さ40cmの2次元水槽を用いて行った。水槽の端部には図-1に示す捨石防波堤模型を設置した。コア部を砂とし、その上に鉄板を敷き、さらにその上に厚さ8cmの捨石層を敷設した。すなわち、砕石層内は透水性であるが、砕石層とコア部の間は鉄板によって不透過な構造となっている。法先水深は21.3cmで一定であり、斜面勾配 θ は1/2, 1/3, 1/4と変化させた。波の周期 $T=0.78\sim 1.40$ sec、波高 $H=3.1\sim 8.7$ cmの範囲で変化させた。

実験に用いた捨石は、中央粒径1.59cm、比重2.82、平均重量5.98gWの砕石である。その形状係数Fは、石の長径1、短径b、厚みtから、 $F=1\cdot t/b$ として算出すると、平均値として1.14が得られた。図-2はこの捨石の長短径 $q=1/b$ 、扁平度 $p=b/t$ を調べたもので、この図よりここで用いた捨石は、ほぼ $p>0.6$ 、 $q>0.55$ の範囲

* 正会員 鹿児島大学工学部海洋土木工学科 (890 鹿児島市郡元1-21-40)

** 日立製作所

*** 熊谷組

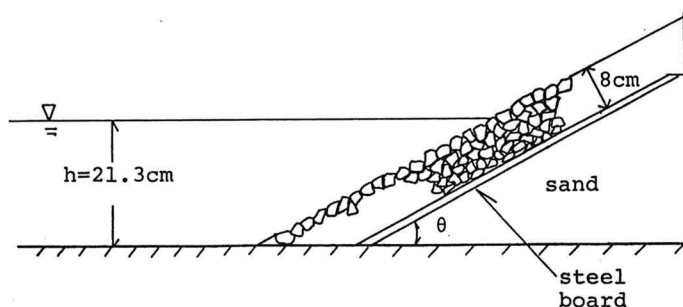


図-1 捨石防波堤模型

にあり、捨石として実用に適するとされる塊状の石である。なお、口田ら(1991)は最近新たな捨石の形状表示法をいくつか提案している。

(2) 捨石の配列特性を変化させた実験(実験Ⅰ)

捨石要素間の噛み合わせは、例えばエポキシ樹脂を捨石集合体に流し込んで固化し、その鑄型を調べたり、カーボン紙などを捨石層間に敷いて粒子間の圧力を可視化すること等で調べられよう。しかし、波の作用によって微妙な配列特性は即座に崩れること、多数の実験を繰り返す必要性などから、ここでは周囲捨石との配列特性を噛み合わせの指標として実験を行った。

1つの表層捨石と周囲の捨石との噛み合わせとして、図-3のような4つのタイプを考え、実験開始前に注意深く捨石堤表面に配置した。ここで、タイプ(a)は隣接するどの捨石とも接触させないで斜面上に置いたもの、(b)は左右(汀線方向)の捨石で挟まれた配置、(c)は前後方向(岸沖方向)の捨石で挟まれた配置、(d)は前後・左右とも挟まれた配置である。接触は面接触で、捨石要素群の上端がすべての実験ケースで同じ平坦さになるよう、すなわち、前後の捨石による流れの遮蔽効果が空間的に一様であるよう注意した。

4つのタイプそれぞれに対して色分けした捨石を汀線より5cm岸側～5cm沖側の範囲内で36個

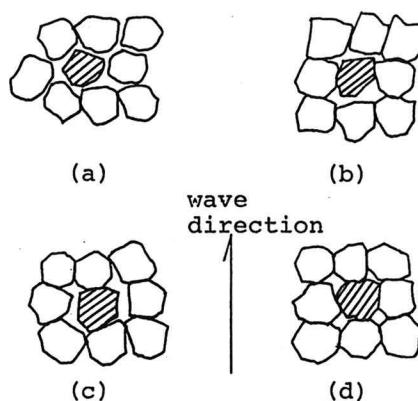


図-3 捨石要素の噛み合わせのパターン



写真-1 実験に用いた捨石

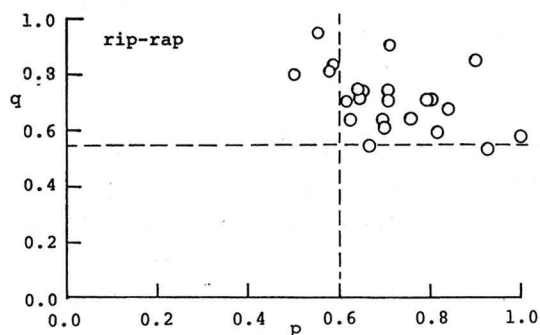


図-2 捨石要素の形状特性

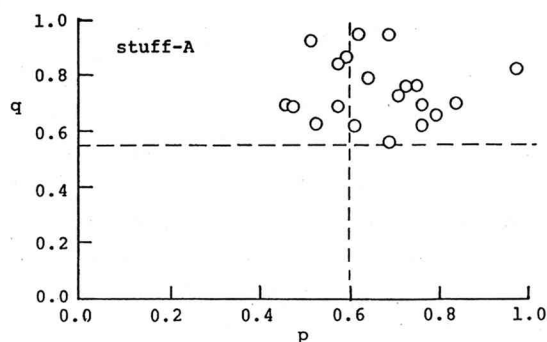


図-4 間詰め石の形状特性

設置し、波による動揺・移動・滑落の様子を上方に設置したビデオカメラで撮影した。後述する実験IIでも同様であるが、1つの実験ケースの終了ごとに、被災の有無にかかわらず、捨石間の噛み合わせ・配置を初期の状態に戻し、全ての実験ケースが同じ条件であるよう注意した。この作業は着目粒子のみならず周辺の粒子についても同様に行った。

(3) 捨石の充填特性を変化させた実験

この実験では2. (1) で示した捨石に、以下に示す粒径比 D_1/D_0 が0.50と0.20となる2種類の間詰め石を間隙に詰め込んだ場合の実験を行った。

(CASE-a) 中央粒径0.79 cm、比重2.64、平均重量0.70gWの間詰め石を重量比3 : 1で混合したもの。

(CASE-b) 中央粒径0.32 cm、比重2.82、平均重量0.04gWの間詰め石を重量比4 : 1で混合したもの。

汀線上に25個の着色した捨石を間詰め石との接触特性に注意しながら配置した。捨石群の配置の作業の最後に再度間詰め石を間隙に埋め込み、接触点数を増加させるようにした。この作業は、汀線付近のみならず、斜面堤体のほぼ全域に対して行った。実験Iと同様、捨石要素群の上端面の均一性には特に注意を払い、1つの実験ケースの終了ごとに初期の状態になるよう、混合粒径捨石堤の整形を行った。

間詰め石(a)の平均形状係数は1.07であり、間詰め石(b)はほぼ球に近いものであった。間詰め石(a)の長短度と扁平度のグラフを図-4に示す。間詰め石(a)は捨石として用いた碎石より、丸み度が大きく、間詰め石(b)はさらに丸み大きい。

捨石と間詰め石の混合体の空隙率 ε を測定した結果、(a)、(b)それぞれについて42%、32%が得られた。碎石のみの場合には $\varepsilon = 45\%$ であった。2種類の粒径を持つ均一球を混合して充填する場合には、大きい方の球径と小さい方の球径の比が0.1716で最も密となる ($\varepsilon = 0.113$) ことが計算されている(三輪:1972)。間詰め石(b)は、粒径比0.20で上述の最密充填率 ($1 - \varepsilon$) に近い状態を設定しようとしたものであるが、後述するように重量が小さいために、波の運動によって間詰め石が吸い出され流出してしまうことがわかった。

表層の1つの捨石要素と下部要素との接点数 n を、捨石表面にペンキを塗布することによって、その周囲粒子へのペンキの付着からカウントしたところ、(a)について平均値で9.3が得られた。捨石のみの場合には4.7であり、間詰めを行うことにより、接点数は顕著に増加した。(b)の間詰めについては、粒径が小さく測定精度が悪いため結果は示せないが、(a)よりさらに接点数は大きくなった。

次いで、捨石と間詰め石の混合体の安息角を測定した。安息角 ϕ_r は水槽の斜面部に、実験時と同様に厚さ約8 cmに捨石を敷き詰め、この斜面の傾斜を徐々に増加し、表層の石が層状に崩れ始める角度をもって定めた。また水平の床に捨石混相体を上方から落下・堆積させ、これ以上の急勾配が形成されないときの斜面角で第2の安息角 ϕ_r' を算定した。間詰めを行うと、間詰め石が”ころ”の働きをするために、捨石のみの場合より安息角は小さくなった。以上の結果を表-1に整理した。

表-1 間詰めを行った場合の捨石の特性値

	riprap	with stuff-A	with stuff-B
粒径比 D_1/D_0	----	0.50	0.20
安息角 ϕ_r	41.3°	39.6°	----
ϕ_r'	53.3°	44.1°	----
接点数 n	4.7	9.3	----
空隙率 ε	45%	42%	32%

3. 結果ならびに考察

(1) 予備実験結果

安定実験に先だって捨石堤による反射率を測定した。図-5は波高の空間的变化の測定結果の一例を示したものである。反射率は斜面勾配1/2, 1/4の捨石堤に対して、それぞれ0.03~0.23, 0.04~0.13が得られた。

次に、捨石の設置位置による被災率の変化を調べるために、堤斜面と静水位との交線上、その交線より斜面に沿って岸・沖方向に5cm離れた線上に着色した捨石を置き、その被災率を測定した。その結果をsurf similarity parameter

$$\xi = \tan \theta / \sqrt{H_0/L_0}$$

を横軸にとって示したものが図-6である。従来、

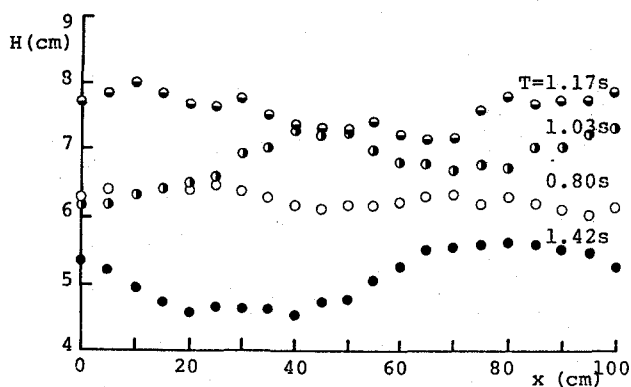


図-5 反射率の測定結果の一例

静水位よりやや下方で捨石の被災率が高くなるとされているが、今回の結果では3つの位置による被災率の顕著な違いは見られなかった。

被災率については崩壊後の捨石堤の断面積の変化から定義する方法もあるが、捨石要素間の噛み合わせ特性が実験中に大きく変化しないことを前提とすると、被災は大規模なものではなく、ごく初期の状態を取り上げるべきである。

本研究では被災率Dの定義として次の2つの方法を考えた。第1は、造波開始から35波が作用した後、粒径以上移動した捨石の割合を被災率とするものである。第2は、やはり35波作用して実験を終了した後ビデオ画像を再生し、移動のみならずその位置での動揺が認められるものも含め、全捨石に対する割合を被災率と定義するものである。結果の特性は被災率の定義によっては変化しなかったため、ここではすべて後者の定義の結果について示す。

(2) 捨石の配列特性と耐波安定性

図-3に示した4つのタイプの捨石の噛み合わせに対して、被災率の結果を示したものが図-7である。

図から被災率は、拘束なし(a)、左右拘束(b)、前後拘束(c)、前後左右拘束(d)の順に小さくなることがわかる。その力学的な説明として、接触面積が増えると隣接粒子との摩擦力が増加し安定化すること、捨石が接触すると流体力の作用する投影面積が減少すること等が挙げられる。前後拘束(c)が両側拘束(b)より安定であるのは、波の水粒子運動が岸沖方向であること、上方の捨石の重量の斜面方向成分が下方に伝達し、摩擦力の増加となることから説明される。

また図-7から、斜面勾配が緩やかにつれて、すなわち $\cot \theta$ が大きくなるにつれて、Dが極大となる ξ の値とpeakは小さくなることわかる。Hudson(1958), Ahrens and McCartney(1975), Van der Meerら(1984)の結果にも共通して同じ傾向が見られ、被災率はだけでは記述できないものであることがわかる。ただし、本結果では斜面勾配が緩やかになるにつれて、 ξ peakがやや大きく減少することなど、定量的にはいくつかの点で従来の結果と相違が見られる。

斜面勾配 $\cot \theta = 3$ の捨石堤模型を用いて、作用波の波高を徐々に増加させ、静水時の汀線上に置かれた4つの捨石要素のうちの1つが動き始める時の波高から、ハドソン公式中の安定係数KDを計算した。その結果を表-2に示す。海岸保全施設築造基準解説(1972)によると、KDは丸みのある石で2層以下のとき2.1~2.6、角ば

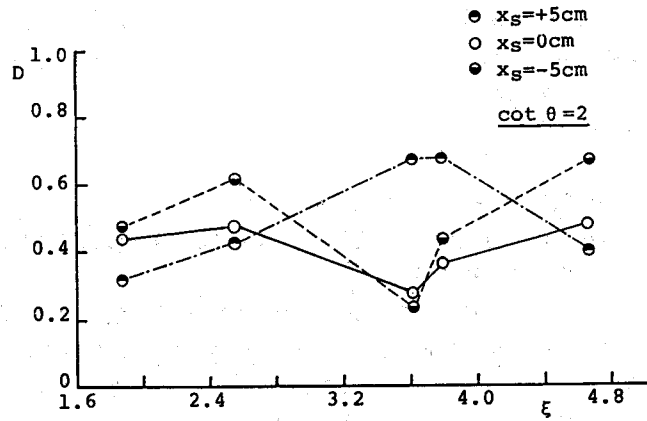


図-6 捨石の設置位置による被災率の変化

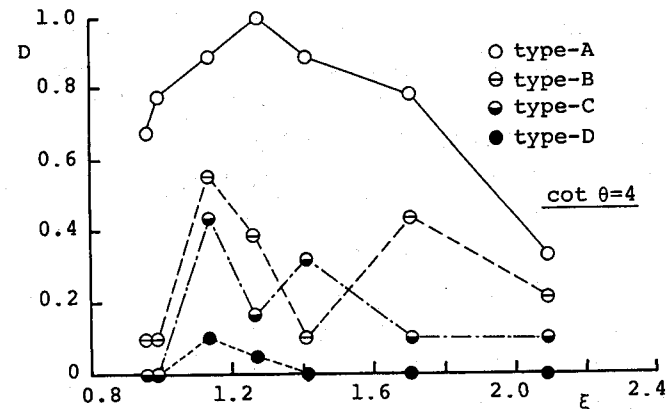
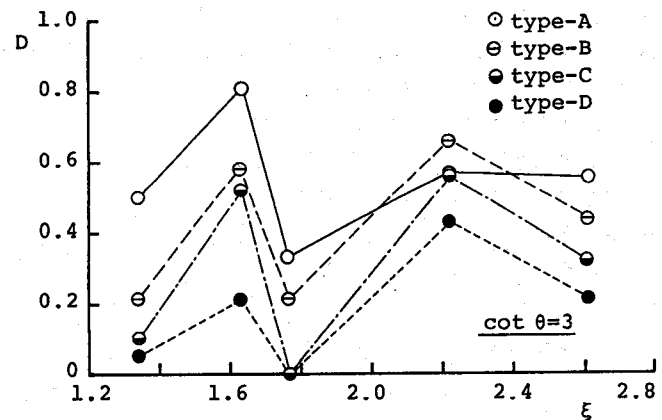
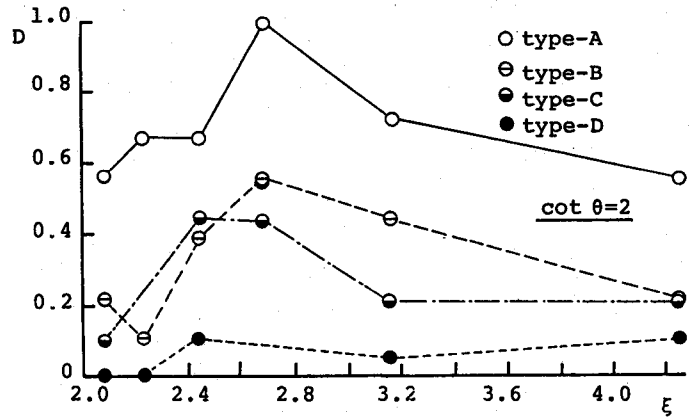


図-7 捨石の配列特性による被害率の変化

表-2 捨石の配列特性によるKD値の変化

(type-A: 拘束なし)				(type-B: 左右拘束)			
	T(sec)	H ₀ (cm)	K _D		T(sec)	H ₀ (cm)	K _D
run-1	0.83	3.05	0.79	run-1	0.81	6.58	7.73
run-2	1.02	3.92	1.66	run-2	1.04	6.32	6.32
run-3	1.18	3.92	1.53	run-3	1.18	6.77	8.55
run-4	1.40	3.24	0.96	run-4	1.42	6.32	6.02

(type-C: 前後拘束)				(type-D: 前後左右拘束)			
	T(sec)	H ₀ (cm)	K _D		T(sec)	H ₀ (cm)	K _D
run-1	0.80	6.55	7.97	run-1	0.80	7.01	8.26
run-2	1.02	6.75	7.80	run-2	1.01	7.67	12.53
run-3	1.18	7.74	12.76	run-3	1.18	8.04	14.20
run-4	1.43	6.67	7.41	run-4	1.36	7.30	9.96

った石で2.8~3.5とされている。またKDの値は被害率によって大きく異なることも知られている。表-2から拘束なしの場合のKD値に比べ、噛み合わせがあるとKD値はきわめて大きくなり、左右拘束、前後拘束、前後左右拘束の順に増加することがわかる。

(3) 捨石の充填特性と耐波安定性

斜面勾配 $\cot \theta = 1/3$ について、捨石のみの時、(a)、(b)の間詰め石を混合した場合の、被災率を示したものが図-8である。丸みの小さい(a)の間詰め石を混合すると、捨石のみの場合より、顕著に安定性が向上していることが読み取れる。2.3で述べたように、(a)の間詰め石を詰めると、安息角はむしろ減少するが、充填率 $(1-\varepsilon)$ が大きくなり、1つの捨石が下方・側方と接触する要素数が増加することによって、支持が強固になることがその理由と考えられる。充填率が大きくなれば捨石堤体内の間隙水の運動も小さくなり、安定化に向かう。

(b)の間詰め石を用いた場合は、充填率そのものは最も大きくなるものの、間詰め石が小さいため波によって吸い出されること、丸み度が大いために噛み合わせに有効でなく、むしろ捨石間に挟まれた場合には”ころ”の役割をするために、安定性が大きく減少する結果となった。図-8の結果は最適な間詰め石の粒径比、丸み度がある事を意味している。

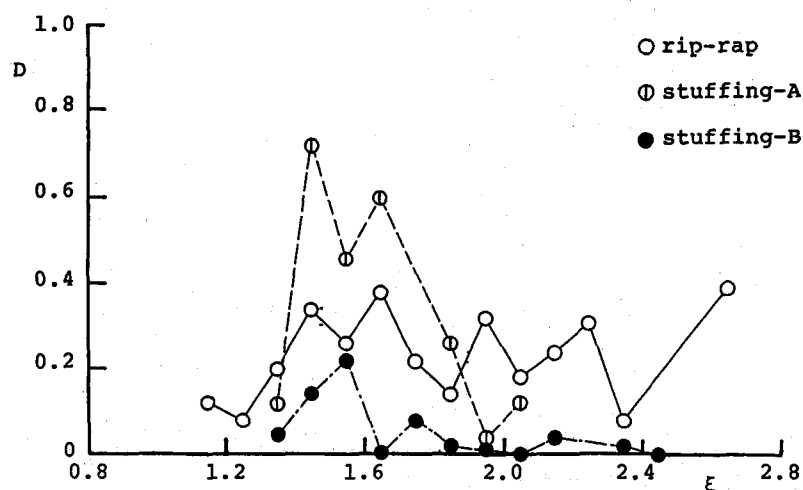


図-8 捨石の充填特性と被害率の関係

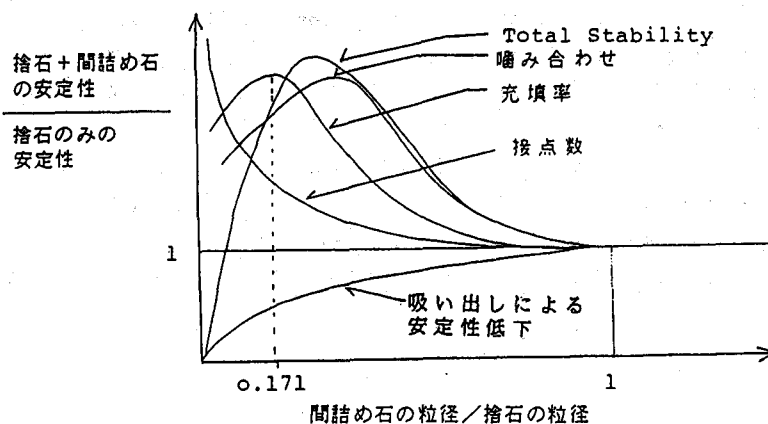


図-9 間詰め石の粒径比と耐波安定性の関係

図-9は最適な間詰め石の粒径比について、力学的な説明を試み

た概念図である。ここで接点数の増加によって要素を支持する面積が広がり、粒径比の減少と共にこの効果は単調に増加しよう。充填率の増加は間隙水の運動が減少することにより、捨石の安定化に作用する。要素間の噛み合わせはここでは安息角の変化で評価しようとしたが、要素の形状特性・配置にも依存し、定量的評価を行うにはさらに検討の余地がある。一方、波が堤体斜面を流下するときにはサクションが作用し、間詰め石が吸い出され、その結果捨石の安定性も低下することになる (Bruun-Johannesson, 1976)。これについては粒径比が小さいほど安定性が低下することになる。以上の効果の重みのついた掛け合わせによって最適粒径比が決定されるものと考えられる。

4. 結論

本研究は、実験水槽内で捨石の配置や噛み合わせに細かく注意を払った実験を繰り返し行い、耐波安定性に及ぼす噛み合わせの効果を調べたものである。本研究で得られた主要な結論は以下の通りである。

(1) 着目した1つの捨石が前後・左右の捨石と一定の配列特性を持つようにした実験から、捨石間の配列によって安定性は大きく変化する。岸沖方向に拘束した方が、汀線方向に拘束するより、高い安定性を示すことがわかった。

これを安定係数KDで評価すると、拘束無しの場合KD=0.8~1.7であったものが、左右拘束でKD=6.0~8.6、前後拘束KD=7.4~12.8、前後左右拘束KD=8.3~14.2の値が得られた。

(2) 粒径比0.5の間詰め石を捨石と混合した場合には、隣接要素との接点数が増加し、充填率も増加するため、間隙水の運動が小さくなって、捨石のみの場合より安定化することがわかった。一方、粒径比0.2の間詰め石を用いた場合には、重量が不足し波の作用で吸い出されてしまうために、捨石のみの場合よりむしろ被害率が大きくなった。このことは耐波安定性が最も大きくなるような最適粒径比が存在することを示唆している。

謝辞

本研究の遂行にあたって、財団法人 米盛誠心育成会より研究費の助成を受けたことを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 口田登・辻垣武彦・森田博史(1991): 捨石による基礎マウンドの形状および力学特性に関する考察、港湾技術研究所報告、第30巻第1号、pp. 347-382.
- 日本港湾協会(1972): 海岸保全施設築造基準解説、p. 231.
- 三輪茂雄(1972): 粉粒体工学、朝倉書店、p. 398
- Ahrens, J. P. and B. L. McCartney(1975): Wave period effect on the stability of riprap, Proc. Civil Eng. in the Ocean III, Vol. 2, pp. 1019-1034.
- Hudson R. Y. (1958): Laboratory investigation of rubble mound breakwaters, Journal of Waterways, Harbours and Coastal Engineering, Proc. of ASCE, Vol. 85, WW3, pp.
- Per Bruun, F. (1985): Design and Construction of Mounds for Breakwaters and Coastal Protection, Elsevier Science Publishing Co., p. 938.
- Per Bruun, F. and P. Johannesson (1976): Parameters affecting stability of rubble mounds, Journal of Waterways, Harbours and Coastal Engineering, Proc. of ASCE, WW2, Vol. 102, pp. 141-164.
- van der Meer J.W. and K. W. Pilarczyk (1984): Stability of rubble mound slopes under random wave attack, Proc. of 19th I.C.C.E., pp. 2620-2634.