

根固め方塊の安定性に関する実験的研究

Laboratory Stability Tests of Foot-Protection Blocks for Upright
Sectinos of Composite Breakwaters

牛嶋龍一郎* 水野雄三** 井元忠博***

Ryuichiro USHIJIMA, Yuzo MIZUNO and Tadahiro IMOTO

混成堤直立部前面の基礎マウンドを保護する根固め方塊の標準とする重量算定は、来襲波高により経験的に重量を推定する方法が用いられているが、その適用範囲が不明確であるのが現状である。本研究は、より合理的な設計方法の確立を目的として根固め方塊の安定性について模型実験を行い、重量算定法について検討を加えたものである。

実験は、まず二次元水路を用いて波が作用したときの根固め方塊の動きを観察し、根固め方塊の安定に關与するパラメータを定めた後、平面水槽を用いて防波堤堤頭部、堤尾部、堤幹部における根固め方塊の耐波安定性を調べるといふ2つの段階に分けて行った。この結果を基に、相対水深 (d/h) と波高 H を用いて堤幹部、堤頭部における根固め方塊の安定重量算定図を作成した。

《根固め方塊；混成堤；ブロックの安定実験》

Foot-protection concrete blocks for rubble mounds of composite breakwaters are mainly being designed on the basis of engineering experience. Here laboratory tests were conducted to determine the stability weight of the concrete blocks.

Movement of concrete blocks was observed by 2-dimensional tests and the stability of concrete blocks was observed by 3-dimensional tests. As a result, the thickness of ordinary sized Foot-protection concrete blocks can be calculated by Hd and a stability number that is expressed by a function of d/h .

Keywords: foot-protection blocks, composite breakwaters, stability test of concrete blocks.

ま え が き

混成堤の安定性を確保するためには、直立部を支える捨石マウンドが波によって散乱しないよう保護する必要がある。このため、基礎マウンドは通常、コンクリート製の被覆ブロックや根固め方塊で覆われている。被覆ブロックの所要重量については、多くの実験研究によりその算定法が提案され実用に供されているが、基本的には Hudson¹⁾ が斜面被覆材に対して導いた周知の式に、Brebner・Donnelly²⁾ が碎石で形成した基礎マウンドおよび根固マウンドに対する安定実験結果を一致させた次

の式を用いて重量算定を行おうとするものである。

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3}$$

ここに、 W ：被覆材の所要重量(t)、

H ：有義波高(m)、

S_r ：被覆材の比重、

γ_r ：被覆材の単位体積重量(t/m)

N_s は被覆材の種類や設置条件から定まるもので、異形ブロックや割石については種々の実験^{3),4),5)} から各々 N_s 値が定められ、実際の設計に用いられている。

*前港湾研究室主任研究員 現下関調査設計事務所建設専門官 **港湾研究室長 ***同室員

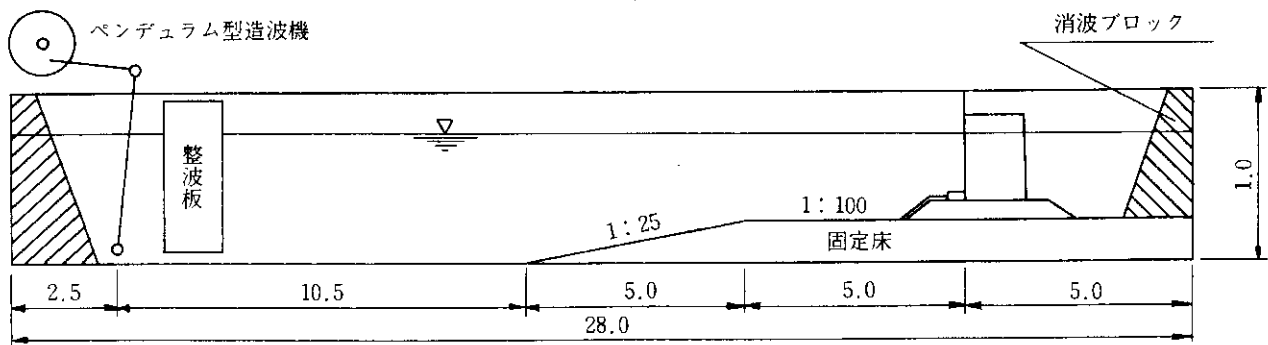


図-1 実験水路(単位m)

しかし、根固め方塊の安定重量に関する実験^{(6), (7), (8)}は、個々の断面に関するものが大半で、系統的な実験によって方塊の重量算定法を求めようとしたものは少なく、重量の決定も来襲波高により経験的に重量を推定する方法が用いられているが、その適用範囲が不明確である。

本研究は、根固め方塊の安定性について模型実験を行うとともに、過去の被災例も参考にして、現在、経験的に行われている根固め方塊の重量算定法について検討を加え、より合理的な方法の確立を目的とするものである。

2. 断面実験の概要

2.1 実験水路

実験に用いた水路は、図-1に示す幅0.8m、深さ1m、長さ28m両面がガラス張りのもので、ペンデュラム型造波機を設置してある。

2.2 実験条件

断面水路実験においては、根固め方塊の安定性に影響する条件としては、防波堤の設置条件(水深 h 、方塊天端水深 d 、マウンド肩幅 B 、マウンド厚 r)、波の諸元(波高 H 、周期 T 、波長 L)および方塊自体の大きさ(幅 b 、長さ l 、厚さ t)、比重などが考えられる。今回は、これらの諸条件について表-1, 2に示すような範囲を設けて各々の条件を適宜組合わせて実験を行った。実験縮尺は1/50で、フルードの相似則を適用した。

表-1 実験条件

項目	記号	実験範囲
前面水深	h	12, 16, 20, 26, 32, 40
マウンド厚	r	4, 6, 8
マウンド肩幅	B	10, 15, 20, 25
波高	H	4.0 ~ 20.0
周期	T	1.2, 1.4, 1.8, 2.2
d/h		0.3~0.8

表-2 根固め方塊諸元

No.	l cm	b cm	t cm	W_g
1	10.0	5.0	1.6	185
2	10.0	5.0	2.4	275
3	10.0	5.0	3.2	370
4	8.0	4.0	1.6	120
5	8.0	4.0	2.4	175
6	5.0	3.0	1.6	55
7	5.0	3.0	2.0	69

実験堤体を図-2に示す。マウンドは径1~1.5cmほどの碎石で形成し、堤体は長さ80cm、高さ80cm、幅50cmの木製の箱で滑動や転倒が生じないように水路に固定されている。マウンドののり勾配は実際と同じ1:3とし、天端は被覆ブロックおよび根固め方塊とも2個並びを標準とし、約5mm間隔で平らになるようにおいた。被覆ブロックには、8t型ブロックの1/50模型を用いている。

実験波は周期が1.2~2.2秒の4種類で、波高を1cmずつ上げていって各波高約20秒間起波し、その際の方塊の動きを目視観察し、記録した。波高は、方塊が移動するかまたは起波限界まで作用させた。

2.3 実験結果の概要

根固め方塊の動きを観察した結果、方塊は前後に動く場合と上下に動く場合があることがわかった。この様子は次のようであった。

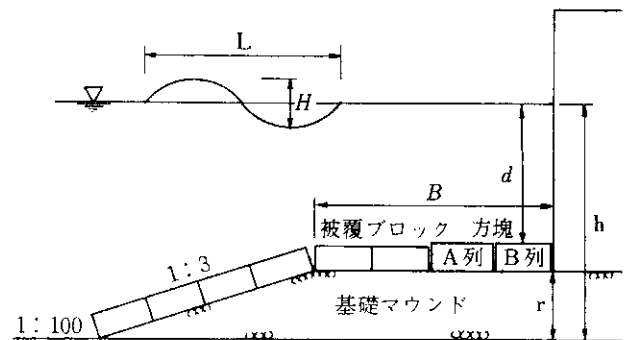


図-2 実験堤体

(1) 方塊が前後に動く場合

方塊は波の峰が方塊上を通過するのに伴って堤体側へ動き、波が堤体で反射するとそれとともに沖に動く。波高が高くなってくると、方塊は堤体側へ少しずつ移動するようになる(図-3)。

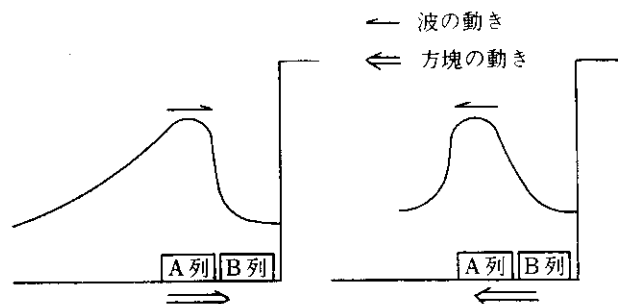


図-3 方塊の前後動の様子

(2) 方塊が上下に動く場合

方塊は波が谷からたち上がる時に浮上がり、波高が高くなってくるとこの動きが大きくなって、不安定になる場合と波の峰が堤体で反射したあと、急激に水位が下がるときに落水水などによる水の乱れに伴って大きく浮上がる場合とがあった(図-4)。

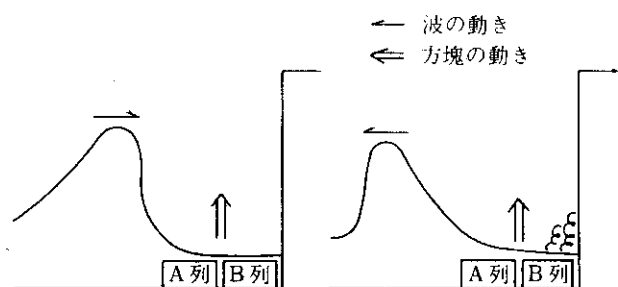


図-4 方塊の上下動の様子

また、水深と方塊の動きの関係では、おおむね次の3つのパターンに大別できる。

(1) $d/h < 0.4$

A列から前後運動が始まり、波高が大きくなるに伴いB列も前後に動きだす。さらに波高が大きくなるとA列は前後動が卓越するが、B列では前後動と上下動が同じ程度となる。

(2) $0.4 < d/h < 0.6$

A列は前後動で始まるが、波高が少し大きくなるとB列は上下動から始まる。さらに、波高が大きくなるとA、B列とも上下動が卓越する。

(3) $0.6 < d/h$

A、B列とも上下動で始まり、波高が大きくなっても上下動が卓越する。

これらの現象から、A列の方塊には波が直接作用して

いるのに対し、B列の方塊は波による方塊周辺の圧力変動の影響を受けて運動することを示していると考えられる。したがって、根固め方塊を設置する際に方塊が突出しないように前面を異形ブロックや、割り石で被覆することは方塊の安定上からも必要なことと考えられる。

3. 平面実験概要

3.1 実験水路および堤体

実験に用いた施設の概要を図-5に示す。水槽は幅15.4m、長さ20.3m、深さ1mのもので、フラップ型造波機を設置してある。水槽には1/50の勾配で斜面を設けており、端部は1/4勾配で碎石をおき反射波を低減させた。

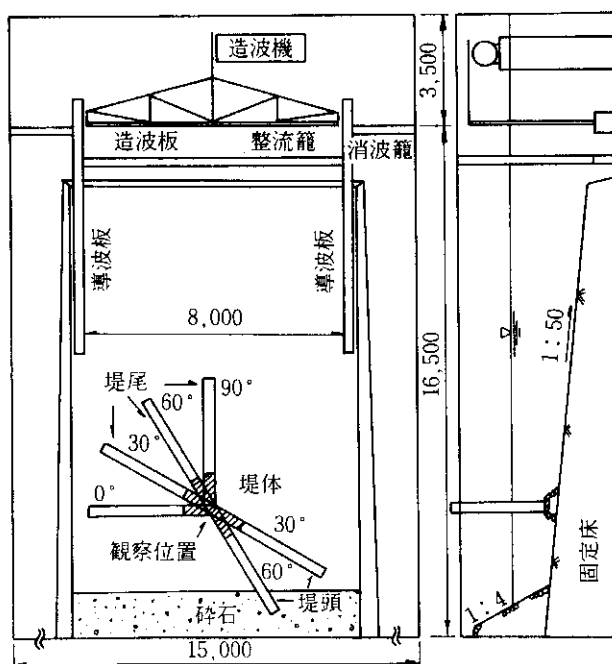


図-5 実験水槽平面・縦断面図

実験に用いた防波堤の断面図および根固め方塊の配置図を、図-6に示した。堤体は根固め方塊を観察する箇所は長さ1m、幅0.32m、高さ0.8mの亚克力製とし、その内部は堤体の安定と観察を容易にする目的で水を充満させた。それ以外の堤体は木製の箱を用い、内部には碎石を充填し安定を図った。マウンドは径1~2cmほどの碎石で形成し、表面は板でたたいてできるだけ平らにした。マウンドののり勾配は1:3とし、天端幅は根固め方塊2個並び、被覆ブロック2個並びを標準とした。被覆ブロックは、8t型ブロックの1/50模型を用いている。根固め方塊は、堤体および方塊間を5mm程度開けて設置した。

3.2 実験条件・実験方法

実験条件を表-3、4に示す。実験縮尺は1/50で、フル

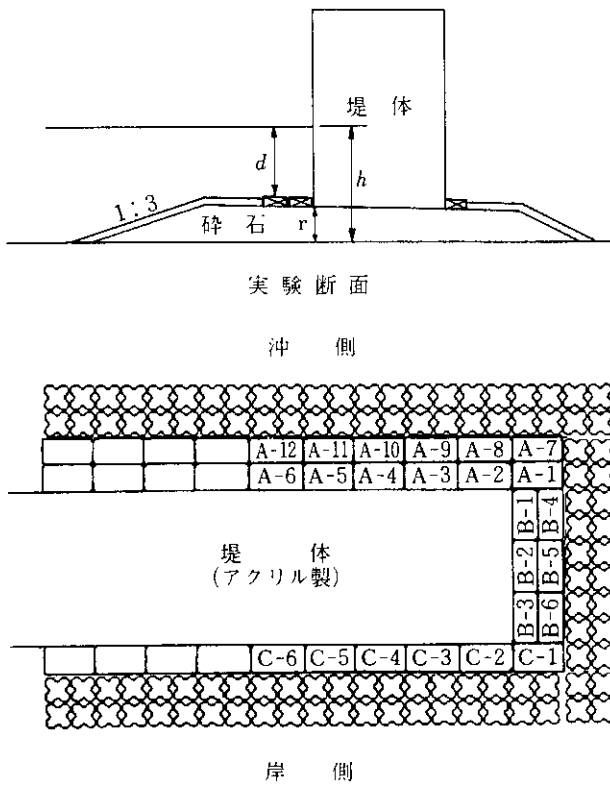


図-6 堤体断面および根固め方塊配置図

表-3 実験条件

項目	記号	実験範囲	項目	記号	実験範囲		
防波堤	長さ	LB	400 cm	基礎マウンド	厚さ	r	4, 6, 8, 10 cm
	幅	BB	32 cm		天端深	d	6.0 cm ~ 18.4 cm
	高さ	HB	80 cm		肩幅	Bm	22 cm
波	水深	h	16, 20, 26 cm	ド	のり勾配	im	1/3
	周期	T	1.2, 1.6, 2.0 s		d/h		0.38 ~ 0.72
	波高	H	4 cm ~ 16 cm				
	入射角	β	0, 30, 60, 90				
	床勾配	i	1/50				

表-4 根固め方塊諸元

No.	l cm	b cm	t cm	W_g
1	10.0	5.0	1.6	185
2	8.0	4.0	1.6	120
3	10.0	5.0	2.0	230
4	10.0	5.0	2.4	275
5	10.0	5.0	2.8	320
6	10.0	5.0	3.2	370

一ドの相似則を適用した。なお、水深は水路床に勾配があるため場所によって変化するので、防波堤の沖側角部を基準とした。

根固め方塊は、表-4 に示したものを適宜選択して用い

た。

実験波高は初期値を 4~5 cm とし、その後波高を 1 cm ずつ上げていったが、根固め方塊の動きが大きく変化したときは波高を 0.5 cm 下げて実験を行った。波高は根固め方塊が飛散するかまたは造波限界まで高くした。波の作用時間は各周期とも約 20 秒間であり、測定有効波数内での方塊の動きを目視観察して移動状況を記録した。また、波を作用させた後、根固め方塊が移動していた場合には、もとの位置に戻した後、波高を上げて実験を続けた。

3.3 実験結果の概要

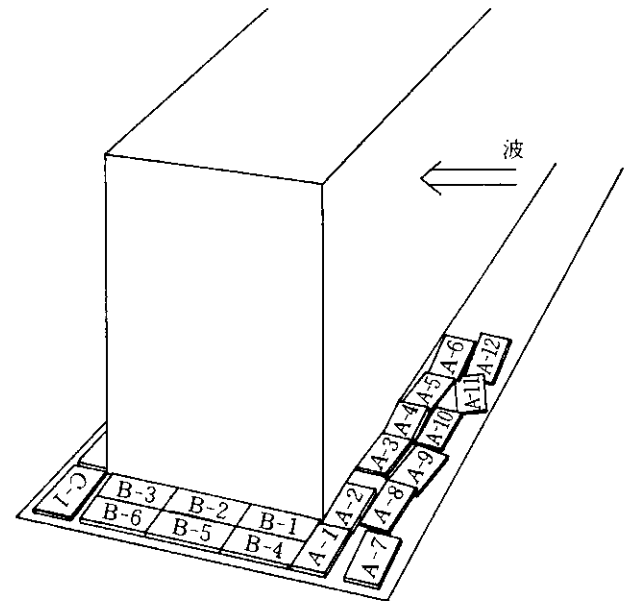


図-7 根固め方塊の移動状況

($\beta = 0, h = 16, \gamma = 6, T = 2.0, H = 11.7$)

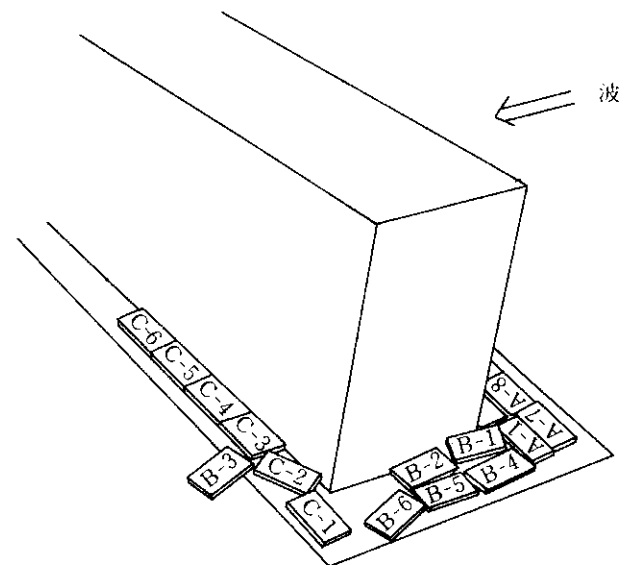


図-8 根固め方塊の移動状況

($\beta = 0, h = 26, \gamma = 6, T = 2.0, H = 16.4$)

根固め方塊の動きを観察した結果、方塊は水平方向では前後・左右・回転といった動き、上下方向ではブロックの片側または全体が浮上るといった動きをすることがわかった。また、前後・左右の動きは主に波の押し引きで、回転は主に堤体角部付近に生じる渦によって、浮上りは堤体角部付近に生じる渦または砕波状の押波によって発生することがわかった。

これらの動きの中で二次元水路による実験結果と異なる点は、実験が三次元であるために堤体に沿った水平移動が大きくなったことと、角部の渦により揚圧力が発生し、これによって方塊が不安定になったことである。

また、断面実験では波の周期の長短で方塊の動きで大きな差は見られなかったが、平面実験では周期が長くなると堤体角部付近に発生する渦の勢いが強くなり、方塊の位置によっては波の周期が長いときに危険となる場合もあった。

波による方塊の動きの概要を、入射角ごとに整理すると次のようになる。また、図-7~10に各条件での代表的な方塊の移動状況を示している。なお、この図は実験終了時の写真をトレースしたものである。

1) 直角入射の場合

(1) 波の作用状況(図-11)

マウンド水深が小さいときは、砕波状の波がマウンドの上を走るような状況となった。マウンド水深が大きくなると堤体前面では重複波となり、堤体角部では渦の発生が見られた。この渦は、波の峰が通過するときは港外に峰が通過した後に、港内側に発生した。渦の規模は港

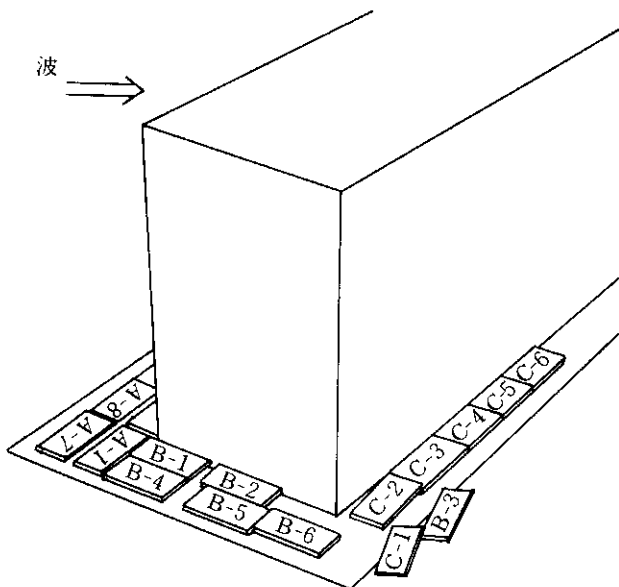


図-9 根固め方塊の移動状況

($\beta = 30, h = 20, \gamma = 8, T = 2.0, H = 14.3$)

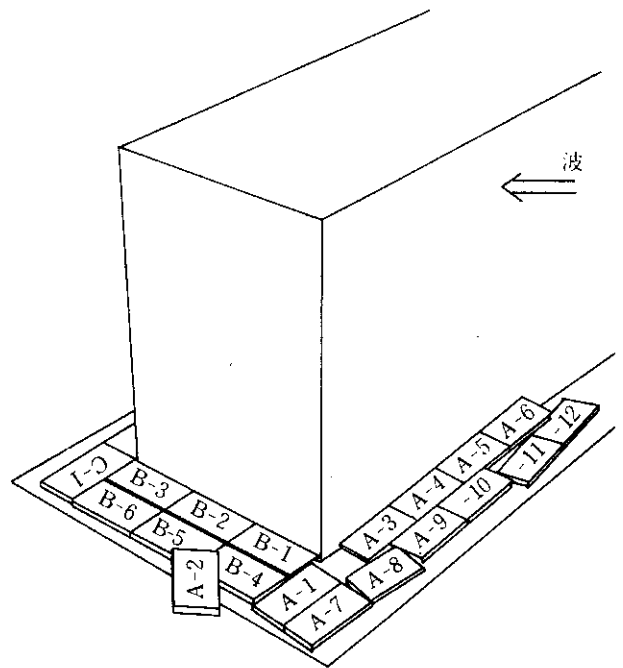


図-10 根固め方塊の移動状況

($\beta = 30, h = 20, \gamma = 8, T = 2.0, H = 14.7$)

内側のものが大きく、また、波の周期が長くマウンド水深が大きいつきほど大きくなった。

(2) 水深が16 cm のときの方塊の動き

d/h の値に関係なく、堤体前面に位置するA列の方塊が、堤体と直角方向に大きく水平移動した。B列の方塊は岸側に少し移動する程度であった。C列の方塊はC-1が岸側へ大きく動く場合があったが、C-2は少し移動した程度で他の方塊には動きが見られなかった。

この条件で危険度が高いのは、堤体前面のA-2~6、8~12であった。

(3) 水深が20 cm のときの方塊の動き

d/h が0.4程度では方塊の動きはA、B、C列とも $h = 16$ cm のときと同じ傾向であり、 d/h が0.5~0.6になるとA、B列は同じ傾向だったが、C-2の動きがやや大きくなった。 d/h が0.7程度になると、すべての方塊の動きが前より小さくなった。

この条件で危険度が高いのは、A-2, 3, 8, 9およびC-2であった。

(4) 水深が26 cm のときの方塊の動き

波の周期の短いときは小さかったが、周期が長くなると d/h が0.55のときはA列は浮上・回転・反転などの大きな動きで、B、C列はそれよりやや小さい動きを示し、 d/h が0.7程度になるとA列は転倒しなくなったが、B、C列の方塊は浮上・回転・反転などの大きな動きをするようになった。これらの方塊の動きは、堤体角部付近に発生する渦によるものである。

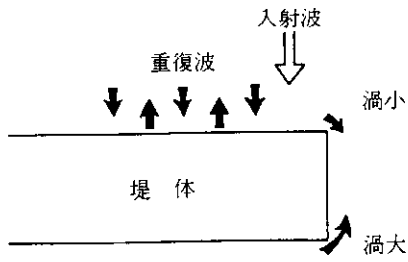


図-11 波の作用状況の概要(直角入射)

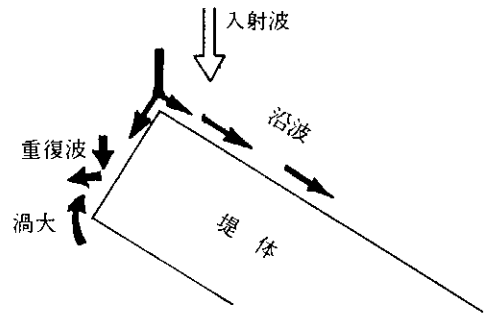


図-12 波の作用状況の概要($\beta = 30^\circ$)

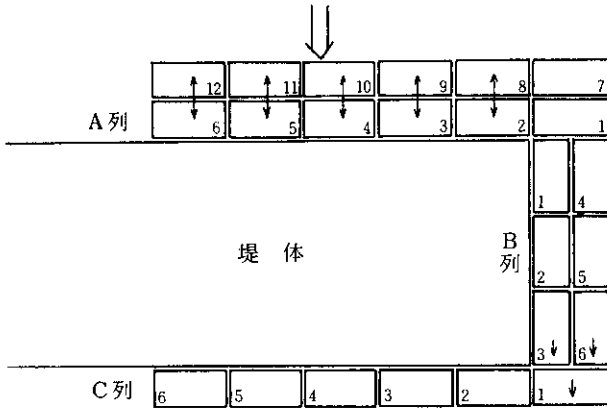


図-11 a 方塊の動きの概要($\beta = 0^\circ, h = 16 \text{ cm}$)

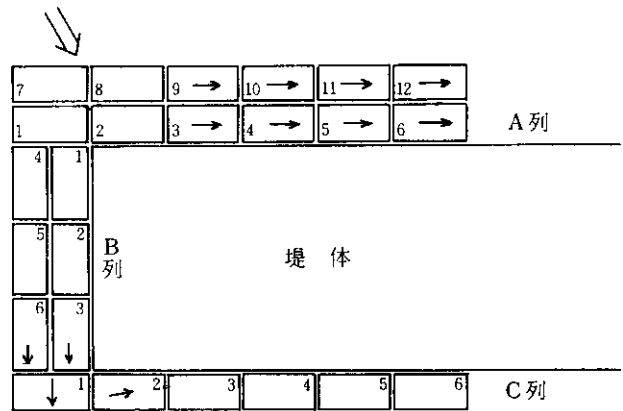


図-12 a 方塊の動きの概要($\beta = 30^\circ, h = 16 \text{ cm}$)

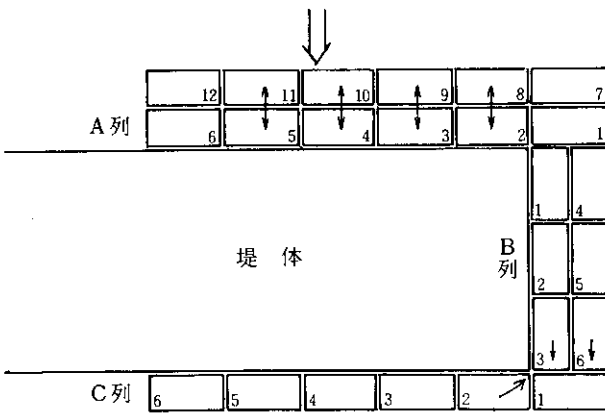


図-11 b 方塊の動きの概要($\beta = 0^\circ, h = 20 \text{ cm}$)

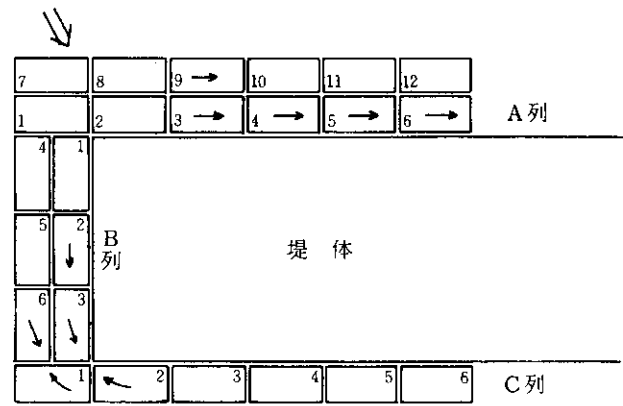


図-12 b 方塊の動きの概要($\beta = 30^\circ, h = 20 \text{ cm}$)

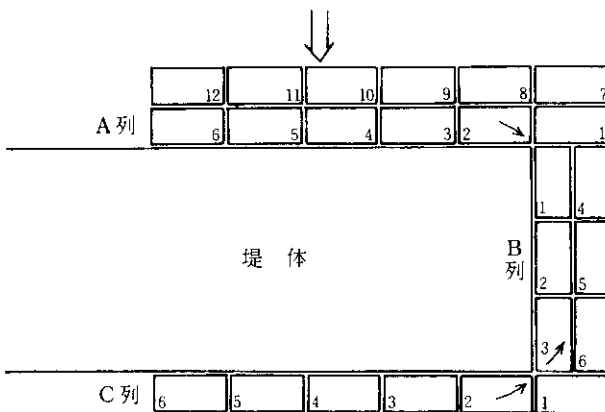


図-11 c 方塊の動きの概要($\beta = 0^\circ, h = 26 \text{ cm}$)

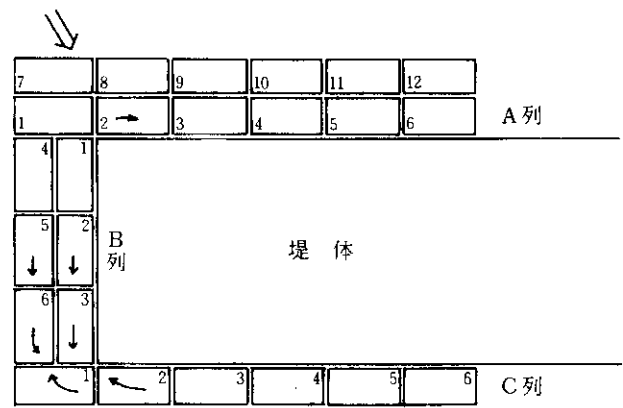


図-12 c 方塊の動きの概要($\beta = 30^\circ, h = 26 \text{ cm}$)

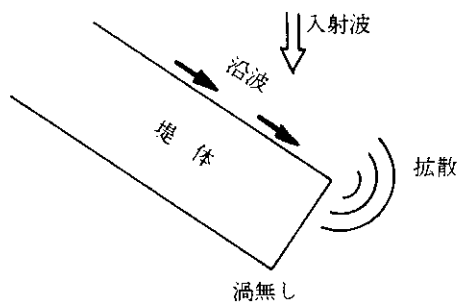


図-13 波の作用状況の概要 ($\beta = 30^\circ$)

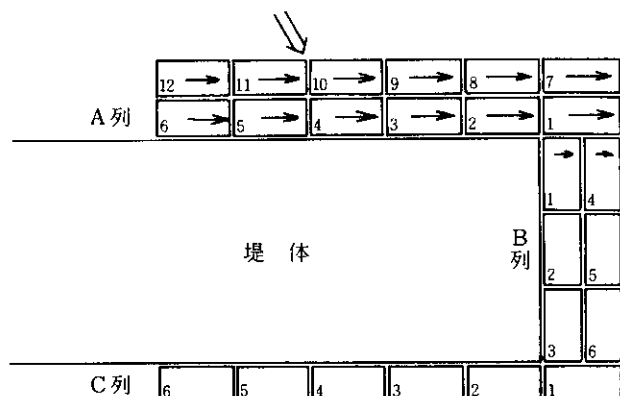


図-13 a 方塊の動きの概要 ($\beta = 30^\circ, h = 16 \text{ cm}$)

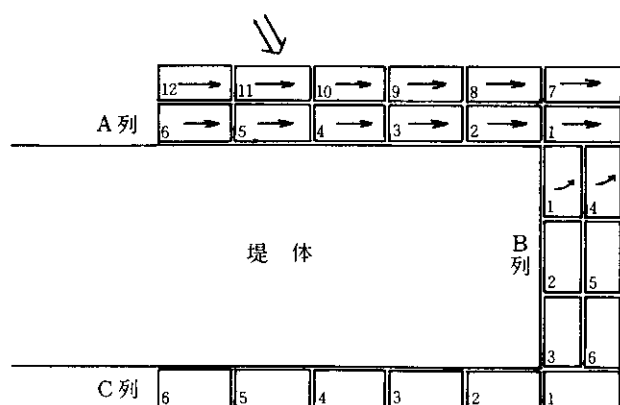


図-13 b 方塊の動きの概要 ($\beta = 30^\circ, h = 20 \text{ cm}$)

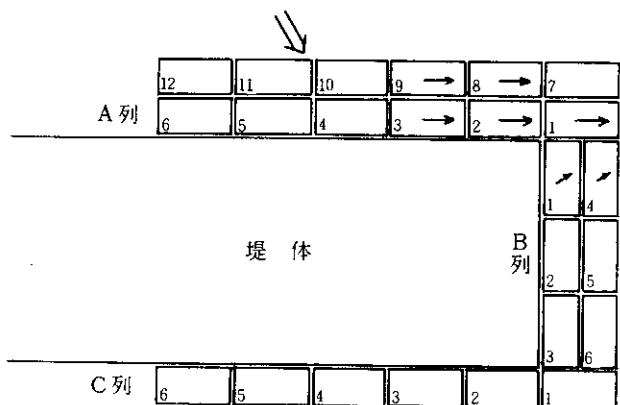


図-13 c 方塊の動きの概要 ($\beta = 30^\circ, h = 26 \text{ cm}$)

この条件で危険度が高いのは、A-2、B-3、C-2 といった堤体の角部に位置する方塊であった。

2) 斜め入射 (入射角 30°) の場合 (堤頭部)

(1) 波の作用状況 (図-12)

堤体前面では斜め重複波が発生し、堤尾部方向への波の動きが見られた。港外側角部では波が切り分けられるような状態となった。港内角部では波の峰の通過後、港外へ向けて渦の発生が見られた。この渦は波の周期が長いほど、マウンド水深が大きいほど規模が大きくなった。

(2) 水深が 16 cm のときの方塊の動き

A列は A-1, 2, 7, 8, 以外の方塊が沿い波に押されて堤尾の方向へ移動した。B列の方塊は B-3, 6 が岸側へ移動し、その量は入射角 0° のときより大きかったが、その他の方塊の動きは小さかった。C列では C-1 が岸側へ移動し、C-2 は押し波より回転したが、その他の方塊はほとんど動かなかった。

この条件で危険度が高いのは、A-3~6, 9~12, C-1 であった。

(3) 水深が 20 cm のときの方塊の動き

A列は堤尾の方向へ移動したが、16 cm のときより動きはやや小さくなった。B列は B-2, 3, 6 が岸側へ移動するとともに B-3, 6 に回転が見られた。C列は C-1, 2 に回転が見られたが、その他の方塊はほとんど動かなかった。

この条件で、危険度が高いのは B-3, 6 であった。

(4) 水深が 26 cm のときの方塊の動き

A列は A-2 が回転したが、その他の方塊の動きは非常に小さかった。B列は B-2, 3, 5, 6 が岸側へ移動し、また、B-3, 6 には回転が見られた。C列は C-1, 2 に回転が見られたが、その他の方塊はほとんど動かなかった。

この条件で、危険度が高いのは B-3, C-2 であった。

3) 斜め入射 (入射角 30°) の場合 (堤尾部)

(1) 波の作用状況 (図-13)

堤尾に向けてかなり強い沿い波が発生した。この波は、堤尾部で急激に拡散し水面の乱れを生じた。

(2) 水深が 16 cm のときの方塊の動き

A列は全体的に堤尾方向へ移動した。B列では B-1, 4 が小さく、動いた程度であった。C列には動きが見られなかった。

この条件で、危険度が高いのは A 列全体である。

(3) 水深が 20 cm のときの方塊の動き

A, C 列の方塊の動きは $h = 16 \text{ cm}$ と同じ傾向であり、B列では、B-1, 4 に大きな回転が見られるようになった。

この条件でも、危険度が高いのはA列全体である。

(4) 水深が26 cm のときの方塊の動き

A列はA-1, 2, 3, 8, 9で水平移動, 回転が見られたが, その他の方塊は動きが小さくなった。B, C列では $h = 20 \text{ cm}$ のときと同じ傾向であった。

この条件で, 危険度が高いのはA-2, 8, B-1であった。

4) 斜め入斜 (入射角 60°)

(1) 波の作用状況

全体に波の作用が穏やかになった。堤頭部では堤体角部に発生する渦の規模も小さくなり, 堤尾部での波の急激な拡散もなくなった。ただし, 堤頭部の港内側角部付近では波が直接作用するようになった。

(2) 堤頭部での方塊の動き

全体に方塊の動きは水深に関係なく小さくなったが, 入射角 30° の場合より波が直接作用するようになった。B-6, C-1の動きが大きくなった。

(3) 堤尾部での方塊の動き

根固め方塊の最後尾にあたるB-4の動きが大きくなったが, その他の方塊の動きは小さくなった。

5) 堤尾部で入射角 90° の場合

(1) 波の作用状況

堤体側面では完全な沿い波となり, 波の作用は穏やか

であった。堤尾部では波の回折が見られ波の乱れが生じた。

(2) 方塊の動き

B列で動きが見られたがその大きさはこのほかの入射角より小さく, A列, B列では動きがほとんど見られなかった。

3.4 堤幹部での安定実験

断面実験結果と比較するため, 堤幹部における根固め方塊の安定実験も数ケース行った。実験ケースを表-5, 図-14に示す。

入射角 0° の場合は, 方塊の動きは断面実験とほぼ同様のものであり, 入射角 30° の場合は, それに加えて堤尾方向への動きが見られた。

しかし, 同じ入射角で堤頭部における実験結果と比較すると, 方塊の動きはかなり小さくなっており, 堤頭部の方塊を大きなものにする必要があることが確認された。

4. 実験結果のとりまとめ

4.1 根固め方塊の安定に影響する要因

根固め方塊の安定性に影響を与えると考えられる要因(マウンド水深 d , 設置水深 h , 波長 L , マウンド肩幅 B)について, その影響度合いを調べるため, 断面実験で方塊が動き始めるときの波高 H と各要因との関係を図-15~18に示した。

図-15には d と H , 図-16には h と H の関係を示した

表-5 実験条件

項目	記号	実験範囲	項目	記号	実験範囲		
防波堤	長さ	LB	500 cm	基礎マウンド	厚さ	r	8 cm
	幅	BB	32 cm		天端深	d	5.6 cm ~ 16.4 cm
	高さ	HB	80 cm		肩幅	B_m	22 cm
波	水深	h	16, 20, 26 cm	のり勾配	im	1/3	
	周期	T	1.2, 1.6, 2.0 s		d/h	0.35 ~ 0.63	
	波高	H	4 cm ~ 16 cm				
	入射角	β	$0^\circ, 30^\circ$				

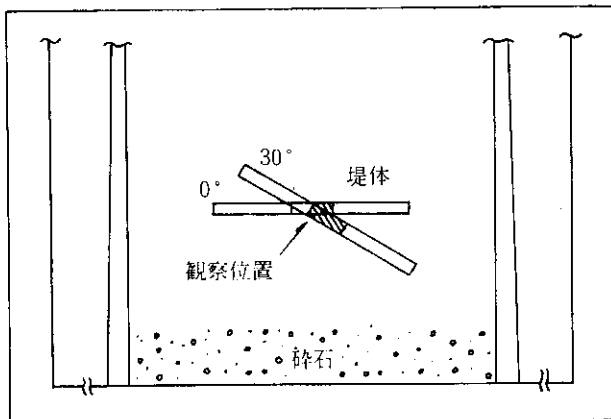


図-14 堤幹部における安定実験

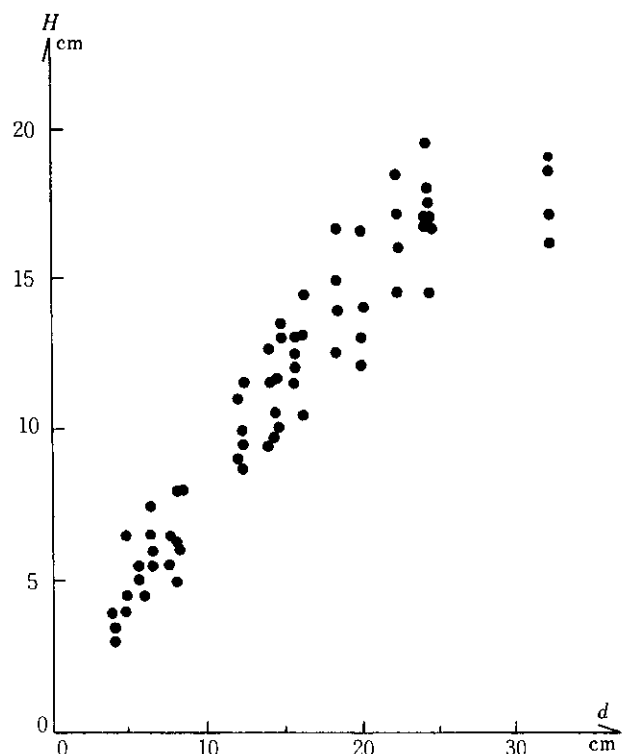


図-15 $H-d$ の関係

が、 d 、 h が増加するに伴い H も増加しており、 d 、 h が方塊の安定に大きな影響を与えていることがわかる。図-17には L と H の関係を示したが、 d 、 h と比較して非

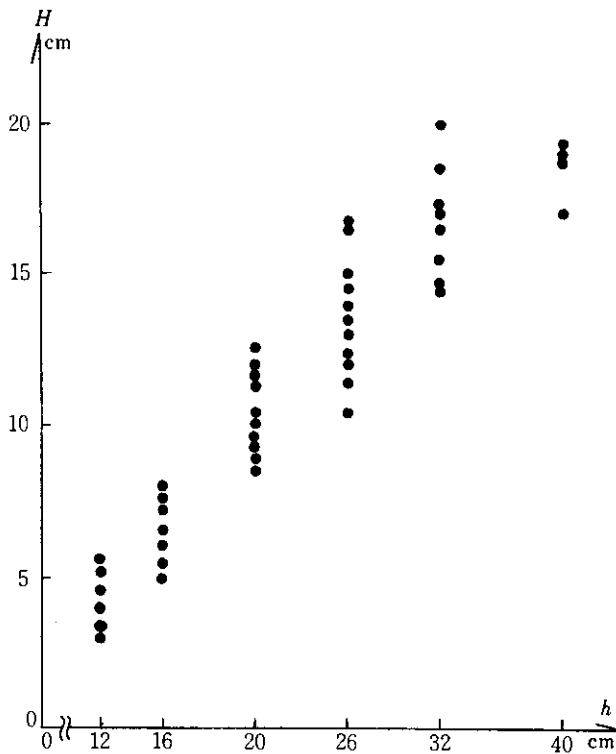


図-16 $H-h$ の関係

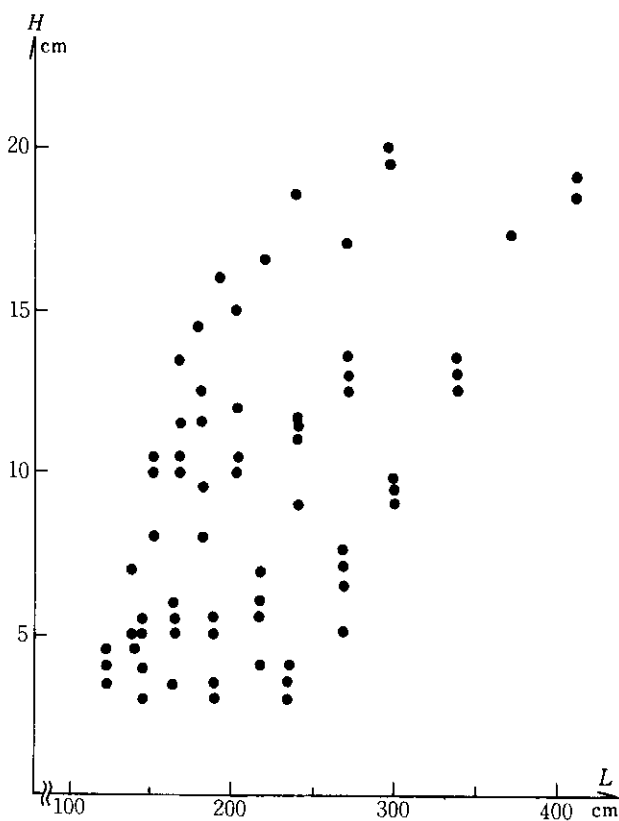


図-17 $H-L$ の関係

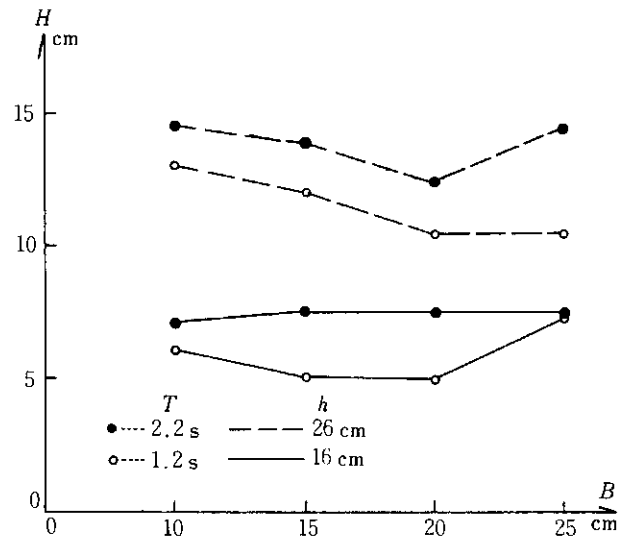


図-18 $H-B$ の関係(B条件)

常にバラツキが大きく L の度合いが低いことがわかる。図-18には B と H の関係を示したが、 B が変化しても H はほとんど変化しておらず、 B の影響は小さいことがわかる。被覆材の安定については、 B 、 L が影響することがいわれている。これは、マウンド形状から見てマウンドのり肩付近の被覆材の安定性が劣っており、マウンドのり肩が水粒子速度が大きい重複波の節近くになるほど危険となるためであり、直立部と接している根固め方塊の場合には、 B 、 L はあまり影響しない結果となったのであろう。

このことから、今回の実験結果の整理は、 d 、 h を中心に行うこととする。

4.2 根固め方塊の安定に影響する無次元量

港湾構造物に用いるブロック類の安定重量を求める図表では、利用上の観点から縦軸に安定指標、横軸にパラメータとなる無次元量をとることが多い。前述の4.1で方塊の安定に影響する要因を d 、 h としたが、これらを用いた無次元量のうち、今後実験結果を整理していく上で、どの無次元量をパラメータとして用いるかについて検討した。

d 、 h を用いた無次元量としては、 d/h 、 d/L 、 h/L 、 d/H 、 h/H などが考えられる。 d/h については、Brebner・Donnelly、鴻上・成田、鹿島・斉藤らの実験によると方塊の安定に強く影響するという結論が得られている。 d/L 、 h/L については、既往の研究でもその評価に違いがでてくる。 d/H については、稲垣・片山がその有効性について示している。これらのことから、無次元量パラメータとしては d/h 、 d/H が有効と考えられるが、縦軸に波高を含んだ安定指標を用いることを考えると、横軸に波高を含んだパラメータをとった場合、縦軸と横軸の独

立性が失なわれることとなる。したがって、ここではこまでの実績も踏まえて d/h を用いることとした。

4.3 本研究で用いた安定指標について

4.3.1 根固め方塊安定重量の基本式

方塊の安定重量に関する基本式は、ハドソンほかによりすでに示されているが、参考のために以下に略記する。

基本的なモデルとして、図-19に示すように水底に単独におかれた方塊に流速 U の流れが作用している状況を考える。

方塊の代表長さを a とすると、方塊の諸元は次のように表わされる。

$$\text{面積} : S = K_A a^2 \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{体積} : V = K_V a^3 \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{空中重量} : W = \gamma_r K_V a^3 \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{水中重量} : W' = (S_r - 1) w_o K_V a^3 \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{ここに、} S_r = \gamma_r / w_o \dots\dots\dots (5)$$

γ_r , w_o は、それぞれ方塊および水の単位体積重量である。また、 K_A , K_V は面積および体積を代表長さ a で表わしたときの無次元係数である。

水の流れによって方塊に作用する力については、水平方向に働く抗力 F_D および鉛直上向きに働く揚力 F_L が主体であると考えられる。これらの力は、次のように表わされる。

$$F_D = (w_o / 2g) C_D \cdot U^2 \cdot K_A a^2 \dots\dots\dots (6)$$

$$F_L = (w_o / 2g) C_L \cdot U^2 \cdot K_A a^2 \dots\dots\dots (7)$$

このとき、方塊が安定を維持する条件は摩擦係数を μ として次のようになる。

$$\mu (W' - F_L) \geq F_D \dots\dots\dots (8)$$

ここで、極限の釣合い状態を考えると、安定限界水中重量は次のようになる。

$$W' = F_D / \mu + F_L \dots\dots\dots (9)$$

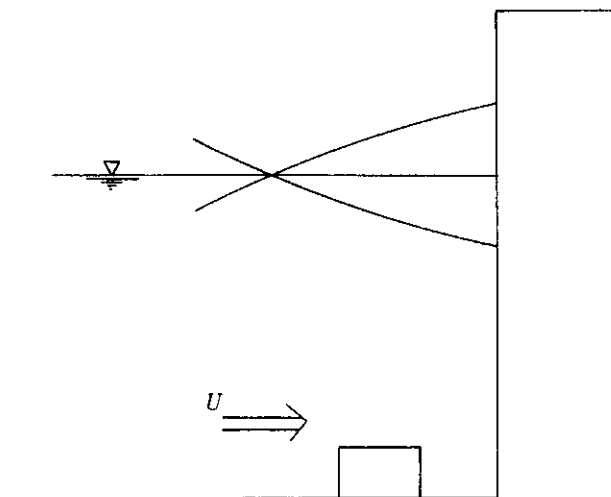


図-19 釣合いの基本モデル

これに、式(4), (6), (7)を代入すると次式を得る。

$$(S_r - 1) w_o K_V a^3 = w_o / 2g C_D U^2 K_A \cdot a^2 / \mu + w_o / 2g C_L U^2 K_A a^2 \dots\dots (10)$$

となつて、

$$a = 1/2g \cdot K_A / K_V \cdot (C_D / \mu + C_L) / (S_r - 1) \cdot U^2 \dots\dots\dots (11)$$

さらに、式(3)を用いると安定空中重量 W は、次式のようにになる。

$$W = N^3 \cdot \gamma_r / (S_r - 1)^3 \cdot U^6 \dots\dots\dots (12)$$

$$N = 1/2g \cdot K_A / K_V^{2/3} \cdot (C_D / \mu + C_L)$$

したがって、安定重量は流速の6乗、すなわち波高の3乗に比例することとなり、Brebner・donnellyが導入した式により安定数 N_s を用いて重量が算定できる。ただし、こうした結果となるのは、方塊が相以形で面積や体積が代表長さ a のみで表現できるときに限られる。つまり、形状がおおむね相以している割石や、寸法比を一定にしてある既成の異形ブロックでは安定数 N_s を用いて重量などが算定できるが、厚さのみの変化の割合が大きく相以形ではないことが多い根固め方塊では、安定数 N_s を用いても正確な重量算定ができないことになる。

4.3.2 本研究で用いた安定指標

方塊の安定は、基本的には個々の方塊に作用する力と方塊重量の釣合いを考えて検討すべきであるが、設計・施工の面から実際に用いられる方塊の大きさはある程度

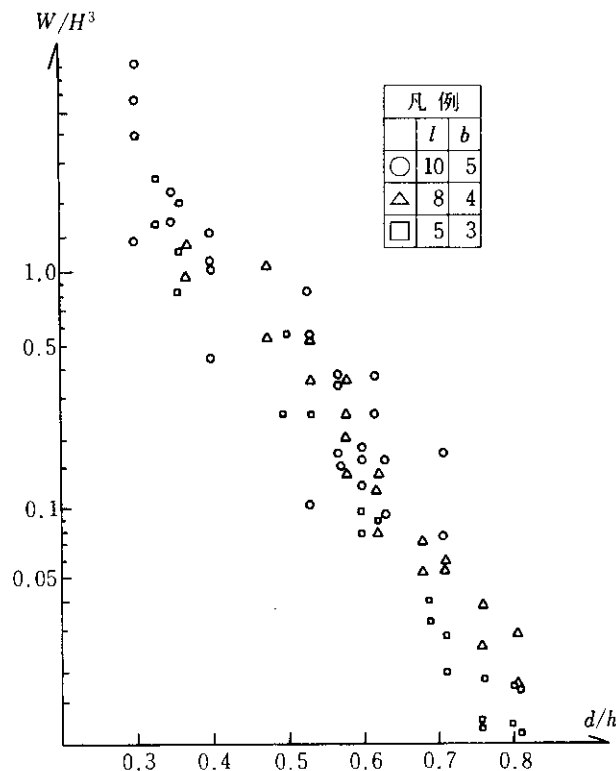


図-20 W/H^3 と d/h の関係

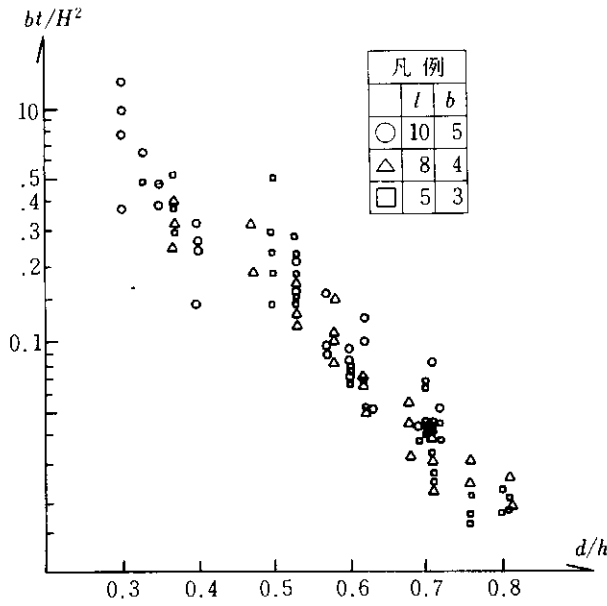


図-21 bt/H^2 と d/h の関係

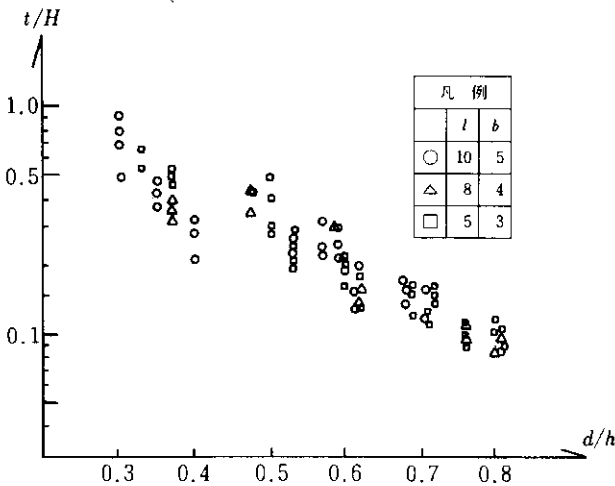


図-22 t/H と d/h の関係

の範囲内に納まっているので、次のように単純化して考えることができる。

根固め方塊の大きさは波長に比較すると非常に小さいので、方塊の長さ方向の作用力は一定と考える。そこで、方塊の単位長さ当たりの力の釣合いを考えると、式(12)は次のようになる。

$$a^2 \cdot \gamma_r = N^2 \cdot \gamma_r / (Sr - 1)^2 \cdot U^4 \quad \dots\dots\dots (13)$$

同様に、

方塊に作用する揚圧力のみ釣合いを考えると、

$$a \cdot \gamma_r = C_L \cdot \gamma_r / (Sr - 1) \cdot U^2 \quad \dots\dots\dots (14)$$

となる。

したがって、根固め方塊の安定指標として考えられるのは、根固め方塊の縦(l)・横(b)・厚さ(t)の比率が大きくなることは変化しないことを前提として、 W/H^3 または lbt/H^3 、

bt/H^2 、 t/H の3つとなる。この3つの指標と無次元量 d/h との関係、断面実験において方塊が移動を始めるときの波高 H を用いて整理したのが図-20～22である。

W/H^3 と d/h の関係を示した図-20を見ると、方塊の寸法が大きいものほど W/H^3 の値が大きくなっており、無次元指標としては適さないと考えられる。 bt/H^2 および t/H と d/h の関係を示した図-21、22では、方塊の寸法によらず点がプロットされており、この2つが安定指標として用い得ることがわかる。

しかし、 bt/H^2 を安定指標とすると、波が直角入射のときは b の値はすぐに決まるが、斜め入射時や堤頭部などの場合、なにを b の値とするのが問題となる。安全側をとって方塊の l 、 b のうち小さいものを b とする方法も考えられるが、ここでは非常に単純化した指標として t/H を採用することとし、適否については実際の被災例を基に検討することにした。ただし、これは根固め方塊の大きさが現在用いられている範囲にあることを前提

表-6 根固め方塊の移動状況の定義(平面実験)

状態	模型移動量	現地換算量	球形と仮定したときの基礎捨石の直径($\gamma = 2.6$)					
			30kg 28cm	60kg 35cm	100kg 42cm	150kg 48cm	200kg 53cm	300kg 60cm
A	0 mm	0 cm	○	○	○	○	○	○
B	0～1 mm	0～5 cm	○	○	○	○	○	○
C	2～5 mm	10～25 cm	○	○	○	○	○	○
D	8～10 mm	30～50 cm	×	△	△	△	○	○
E	11～15 mm	55～75 cm	×	×	×	×	×	△

注) ○印は、方塊が各状態の範囲で移動しても捨石の直径を超えない場合。
△印は、方塊が各状態の範囲で移動すると捨石の直径を超えるときがある場合。
×印は、方塊が各状態の範囲で移動すると捨石の直径を超える場合。

表-7 根固め方塊の移動状況の定義(断面実験)

状態	根固め方塊の動き
I	まったく動かない。
II	微小な動きをする。
III	一定方向に移動する。ブロックの四辺が浮上する。ブロックの片側が厚さの1/4以上浮上する。
IV	ブロックの前後動が非常に大きくなり、堤体に当たってはね返るようになる。ブロックの四辺が厚さの1/4以上浮上する。ブロックの片側が厚さの1/3以上浮上する。
V	ブロックの四辺が厚さの1/3以上浮上する。ブロックの片側が厚さの1/2以上浮上する。
VI	ブロックが完全に移動する。

とした考え方であり、方塊の厚さのみが大きいような場合は想定していない。

4.4 根固め方塊安定重量

堤幹部での根固め方塊の安定重量を調べるため、平面実験と断面実験の結果を用いて検討を行った。平面実験で方塊の安定基準とした移動量は表-6に示すとおりで、ここではD状態となったときに方塊が不安定になったと判定した。方塊安定実験では、安定基準をどこにおくかが重要な問題となるが、今回の実験が規則波を用いたものであり、不規則波を長時間作用させたものではないことを考慮して、少し厳しい条件を設定した。

断面実験では、表-7に示したもので比較検討によりIV状態のときを平面実験のD状態に相当するものと判定し、安定基準とした。

堤頭部での根固め方塊安定重量は、堤幹部と同じく平面実験結果を用いて表-6のD状態となったときを基準として求めた。

これらの基準により求めたのが図-23である。

4.5 被災例による検証

実験によって求めた安定重量基準が的確なものかどうかを調べるため、実際に被害を受けた防波堤の資料^{9),10),11)}を基に比較検討を行った。その結果を図-24に示した。

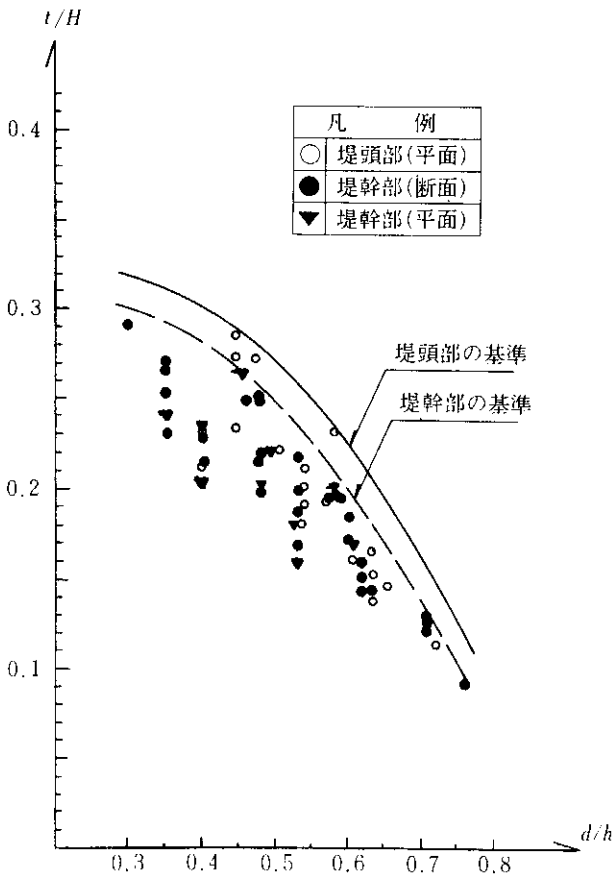


図-23 根固め方塊の安定基準

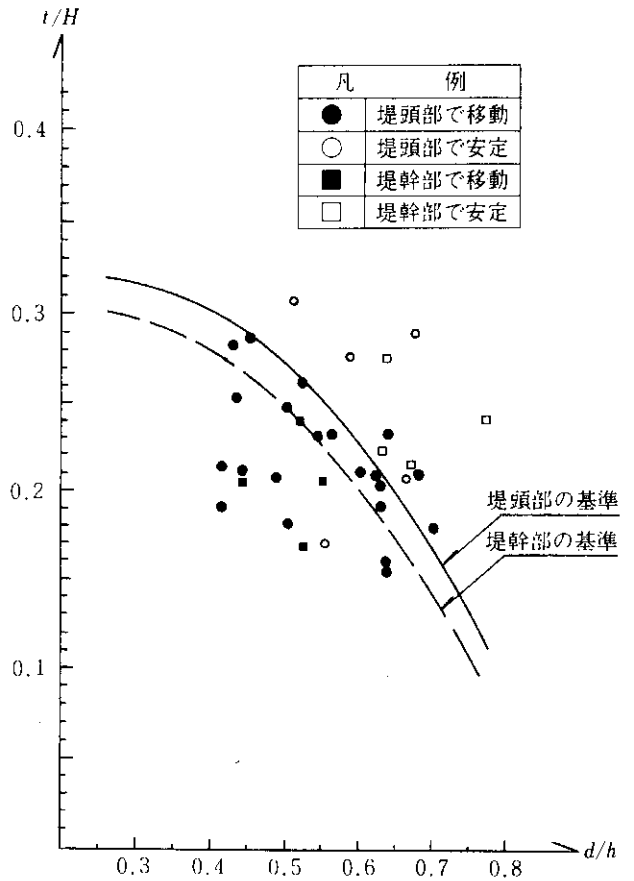


図-24 被災例による安定基準の検証

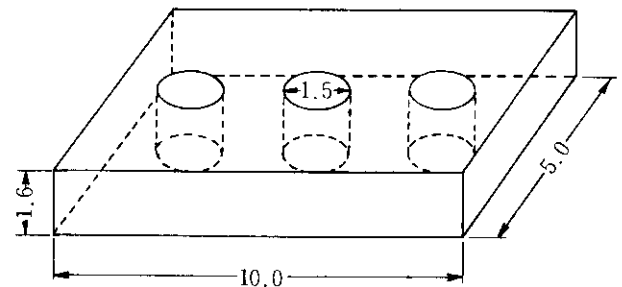


図-25 有孔方塊の形状

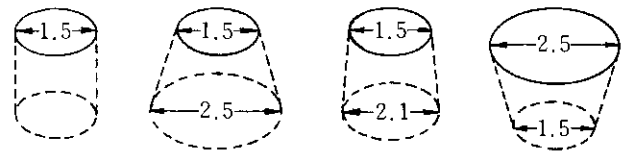


図-26 開口部の形状

これによると、堤頭部、堤幹部とも今回求めた安定基準と被災例がよく一致しているのがわかる。また、堤頭部と堤幹部の基準線の間には堤頭部での被災例が多く集まっていることから、両者の関係もよく表現できていると考えられる。

5. 有孔方塊の安定性について

根固め方塊の安定性を向上させるために、方塊に孔を開けて揚圧力を低減させようとする方法は実施例があり、有効な方法であると考えられるので、その結果を確認する目的で実験を行った。

実験に用いたのは図-25, 26 に示すように、方塊の縦方向に3個の孔を持つもので孔形は3種類とした。孔の大きさは、第一港湾建設局の実験結果より最適な開口率とされる10%を基準として考えた。表-8に有孔方塊の開口率を示す。

表-8 有孔方塊の開口率

ケース	1	2	3	4
上面	10%	10%	10%	30%
下面	10%	30%	20%	10%

断面実験では、これらの方塊4ケースについて安定実験を行ったが、ケース4の安定性が劣っていたほかは明確な差はなかった。しかし、有効方塊では d/h や波高・周期によらず方塊の浮上現象が見られなかったことから、揚圧力の低減効果は認められる。

平面実験では、有孔方塊の基本形を用いて無孔方塊と安定性を比較したその結果を図-27, 28に示した。これによると、条件によって差はあるものの、孔の分だけ重量の軽くなっている有孔方塊のほうが安定性が優れていることがわかる。このことは、孔を開けるだけで経済的に方塊の安定性を向上させ得ることを示すもので、有孔方塊の採用が望ましいと考えられる。ただし、孔の大きさによっては基礎捨石が吸いだされることも考えられるので、孔径や配置については実施時の検討が必要である。

6. まとめ

今回の実験でわかったことは、次のようなことである。

- 1) 根固め方塊の波による動きは、A列は前後方向が、B列は上下方向が卓越している。
- 2) 根固め方塊の安定性は、基礎マウンドの肩幅にはほとんど影響されない。
- 3) 根固め方塊の波の作用による動きは d/h によって左右され、 d/h が小さいときは堤体前面の方塊の動きが大きく、 d/h が大きいときは堤体端部の方塊の動きが大きくなる。
- 4) 堤体端部の方塊は、堤体角部付近に発生する渦によって移動することが多い。
- 5) 堤体角部に発生する渦はマウンド水深が大きく、波高が高く、周期が長いほど規模が大きくなる。この渦は押し波時、引き波時とも生じるが、引き波時に

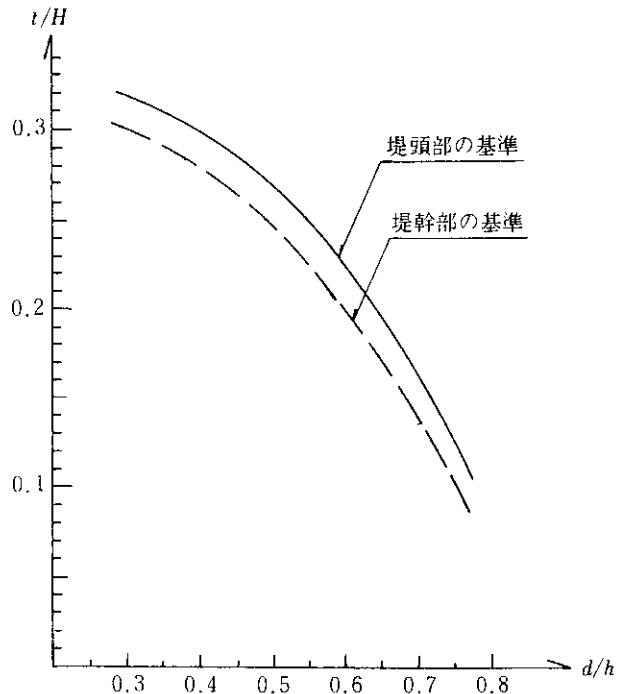


図-29 根固め方塊の安定基準

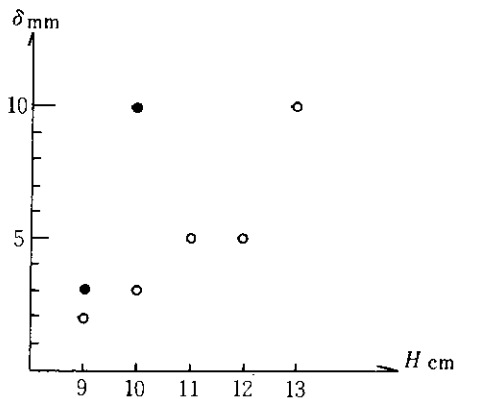


図-27 移動量の比較

($\beta = 30^\circ$, 堤頭部, $h = 20 \text{ cm}$, $\gamma = 8 \text{ cm}$)

凡	例
○	有孔方塊
●	無孔方塊
H	通過波高
δ	方塊の移動量

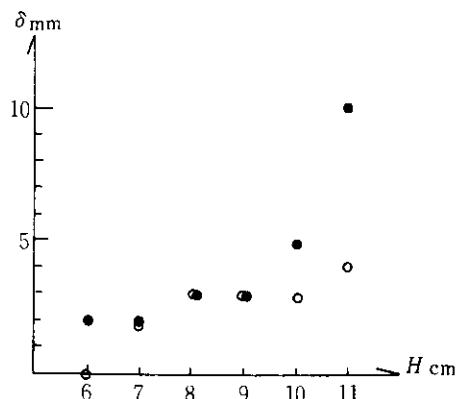


図-28 移動量の比較

($\beta = 0^\circ$, 堤幹部, $h = 20 \text{ cm}$, $\gamma = 8 \text{ cm}$)

岸側角部に生じる渦の規模が大きい。また、堤尾部では渦の発生は見られない。

- 6) 根固め方塊の安定に必要な厚さは、方塊の厚さ t と波高 H を用いた無次元量 t/H と d/h を用いた図-29 によって推定できる。
- 7) 根固め方塊に孔を開けると揚圧力を低減することができ、方塊の安定性が向上する。

あ と が き

根固め方塊に限らず、ブロック類の安定実験ではブロックの移動量をいかに正確に計測するか、安定限界をどのように定めるかが重要な要素となる。今回の実験では、断面の場合は両面ガラス張りの水槽を用いたので方塊の動きをかなり詳しく観察できたが、平面の場合はその観察精度はやや落ちるものと考えられる。しかし、本報文で設定した安定限界による方塊の所要重量と港湾技術研究所資料による被災例とがよく一致していることから、今回の実験結果は信頼できるものと考えているので、今後、この研究結果を実際の設計に反映させていただくことを期待している。

参 考 文 献

- 1) Hudson, R; Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters, Journal of the Waterways and Harbors Division, Proc. ASCE, September, 1959, pp. 93~121.
- 2) Brebner, A. and D. Donnelly; Laboratory study of rubble foundation for vertical breakwater, Proc. 8th Coastal Engg. Conf., New Mexico City, 1962, pp. 408~429.
- 3) 鴻上雄三・成田友弥; 消波ブロックを被覆層とした混成堤マウンドの安定性について, 土木試験所月報, 第232号, 1972, pp. 1~13.
- 4) 鹿島遼一・斎藤昭三・長谷川寛; 混成堤基礎マウンドを被覆するコンクリート方塊の所要重量, 第17回海岸工学講演会論文集, 1970, pp. 169~175.
- 5) 谷本勝利・柳生忠利・村永 努・柴田鋼三・合田良実; 不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第21巻第3号, 1982, 9.
- 6) 高松泰文; 防波堤改良模型実験-根固め方塊の安定について(その2), 調設広報新潟 No. 5, 第1港湾建設局, 1983, pp. 93~96.
- 7) 国栖広志・洞谷邦弘・清水虎重; 混成式防波堤部根固め方塊ブロックの安定性に関する研究, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 437~441.
- 8) 谷本勝利; 防波堤の設計法に関する水工的諸問題, 昭和58年度港湾技研講演会講演集, pp. 1~26.
- 9) 設計基準部設計基準課; 被災防波堤集覧, 港湾技研資料, No. 58~19, 68, pp. 239.
- 10) 設計基準部設計基準課; 被災防波堤集覧(その2), 港湾技研資料 No. 200, 975, pp. 255.
- 11) 服部千佳志・柴田鋼三・大掘晃一; 被災防波堤集覧(その3), 港湾技研資料 No. 485, 1984, pp. 281.