

根固め方塊の安定性に関する実験的研究

北海道開発局開発土木研究所 正会員 水野 雄三
 同 上 同 上 谷野 賢二
 同 上 井元 忠博
 下関調査設計事務所 正会員 牛嶋龍一郎

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⁾が砕石で形成した基礎マウンド及び根固マウンドに対する安定実験結果を一致させた式を用いて重量算定を行っている。

しかし、根固め方塊の安定重量に関する実験^{3), 4), 5)}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過去の経験や実績に基づいて行われている。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。

1. 断面実験の概要

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、ベンデュラム型造波機を設置してある。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、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 ）及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み合わせる実験を行った。実験縮尺は、1/50で、フルードの相似則を適用した。実験堤体を、図-2に示す。マウンドは径1cm～1.5cm程の砕石で形成し、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水路に固定されている。マウンドの法勾配は実際と同じ1:3とし天端は被覆ブロック及び根固め方塊とも2個並びを標準とし、約5mm 間隔で、平らになるように置いた。被覆ブロックには、8 t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、方塊が移動するか又は起波限界まで作用させた。

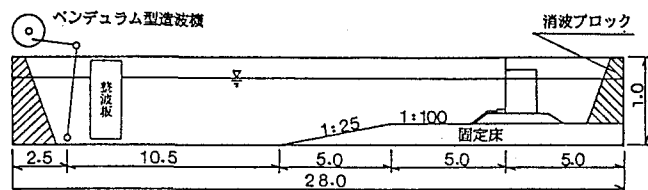


図-1 実験水路（単位；m）

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 根固め方塊の諸元

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

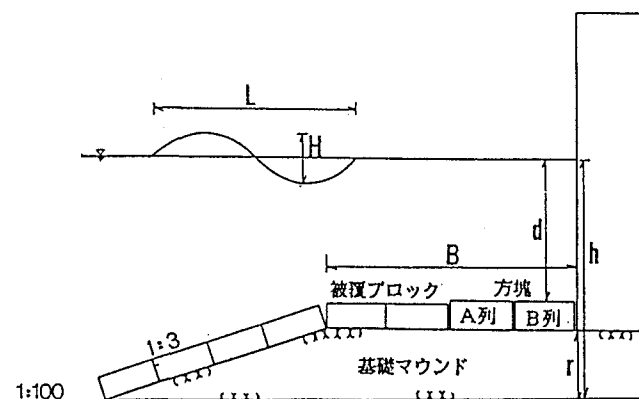


図-2 実験堤体

2. 平面実験の概要

実験に用いた施設の概要を図-3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 勾配で碎石を置き反射波を低減させた。

実験に用いた防波堤の断面図及び根固め方塊の配置図を図-4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1cm～2cm 程の碎石で形成し表面は板で叩いて出来るだけ平らにした。マウンドの法勾配は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、8 t 型ブロックの1/50模型を用いている。根固め方塊は、堤体及び方塊間を5mm 程度開けて設置した。

実験条件を表-3、4に示す。実験縮尺は、1/50で、フルー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4cm～5cm とし、その後波高を1cm 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時は波高を0.5cm 下げて実験を行った。波高は、根固め方塊が飛散するか又は造波限界まで高くなった。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、元の位置に戻した後、波高を上げて実験を続けた。

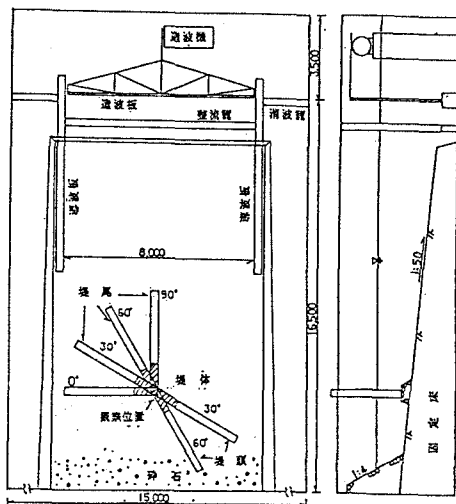


図-3 実験水槽（平面・縦断面図）

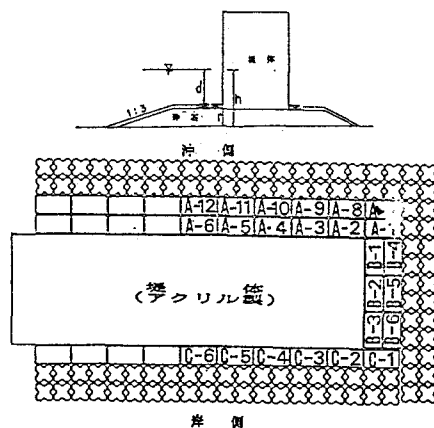


図-4 堤体断面及び根固め方塊配置図

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 m
	高 さ	HB		80 cm					
波	水 深	h		16, 20, 26 cm	マウンド	肩 幅	Bm		22 cm
	周 期	T		1.2, 1.6, 2.0 s		のり勾配	im		1/3
	波 高	H		4 cm~16 cm					
	入射角	β		0, 30, 60, 90					
	床勾配	i		1/50		d/h			0.38~0.72

3. 実験結果の概要

3.1 断面実験の結果

断面実験での方塊の動きは、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。また、水深と方塊の動きの関係については概ね3つのパターンに大別できる。①d/h が0.4 より小さい場合は、A列から前後運動が始まり、波高が大きくなるに伴いB列も前後に動き出す。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。②d/h が0.4 以上0.6 以下の場合は、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。③d/h が0.6 より大きい場合は、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。従って、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。

3.2 平面実験の結果

平面実験での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又は全体が浮き上がるといった動きをすることが分かった。また、前後・左右の動きは主に波の押し引きで起こり、回転は主に堤体角部付近に生じる渦によって起こる。また、浮き上がりは堤体角部付

表-4 根固め方塊の諸元

No.	l cm	b cm	t cm	Wg
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

近に生じる渦または碎波状の押し波によって発生することが分かった。

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つ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時に危険となる場合もあった。また、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。その実験ケースを表-5に、堤体観察位置を図-5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。

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			基礎		
長さ	L	500 cm	厚さ	r	8 cm
幅	B	32 cm	天端深	d	5.6 cm ~ 16.4 cm
高さ	H	80 cm	肩幅	B _m	22 cm
水深	h	10, 20, 26 cm	法勾配	i _m	1/3
波周期	T	1.2, 1.6, 2.0 s			
波高	H	4 cm ~ 10 cm			
入射角	β	$0^\circ, 30^\circ$			
			d/h		0.35 ~ 0.63

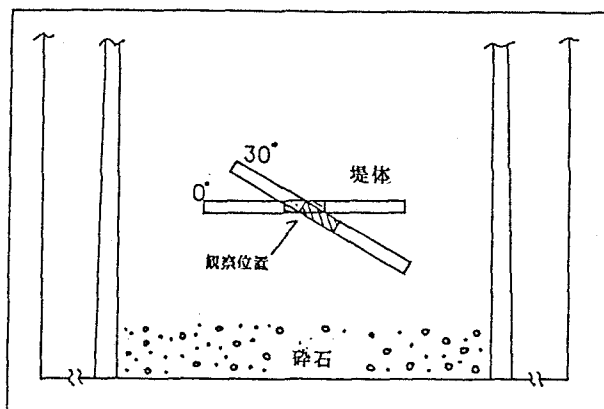


図-5 堤幹部における安定実験

4. 考察

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時の波高 H と各要因との関係を検討した。その結果、 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った。被覆材の安定については、 B ， L が影響することが言われているが、これはマウンド形状から見てマウンド法肩付近の被覆材の安定性が劣っており、マウンド法肩が水粒子速度が大きい重複波の節近くになる程危険となる為であり、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取ることが多い。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行く上で、どの無次元量をパラメータとして用いるの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・斎藤らの実験によると方塊の安定に強く影響すると言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出ている。 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取った場合、縦軸と横軸の独立性が失われることとなる。従って、ここではこ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

根固め方塊の安定重量は、Brebner・donnellyが導入した式により安定数 N 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形状が概ね相似している割り石や、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 を用いて重量等が算定出来るが、厚さのみの変化の割合が大きく相似形ではないことが多い根固め方塊では安定数 N を用いても正確な重量算定が出来ないことになる。

従って、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 ）の比率が大きくは変化しないことを前提として、 W/H^3 または lb/H^3 ， bt/H^2 ， t/H の3つとなる。この3つの指標と無次

4.4 根固め方塊安定重量

断面実験では、表一七に示したもののなかで比較検討により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一六のD状態となった時を基準として求めた。これらの基準により求めたのが図一六である。

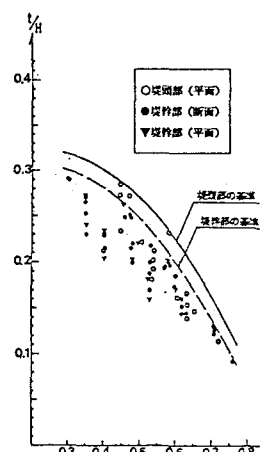


図-6 根固め方塊の安定基準

4.5 被災例による検証

5. まとめ

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。

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	現場換算量	球形と仮定した時の基礎積石の直径 ($\gamma=2.6$)					
			30kg 28cm	60kg 35cm	100kg 42cm	150kg 48cm	200kg 53cm	300kg 60cm
A	0mm	0cm	○	○	○	○	○	○
B	0 ~ 1mm	0 ~ 5cm	○	○	○	○	○	○
C	2 ~ 5mm	10 ~ 25cm	○	○	○	○	○	○
D	6 ~ 10mm	30 ~ 60cm	×	△	△	△	○	○
E	11 ~ 15mm	55 ~ 75cm	×	×	×	×	×	△

(注) ○印は、方塊が各状層の範囲で移動しても拾石の直径を超えない場合。
△印は、 " すると " 超える時がある場合。
×印は、 " すると " 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	制御方法の動き
I	全く動かない。
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 ブロックの前後動が非常に大きくなり。
IV	媒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。

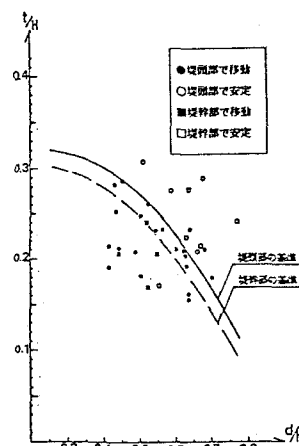


図-7 被災例による安定基準の検討

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 が小さい時は堤体前面の方塊の動きが大きく、 d/h が大きい時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-8 によって推定出来る。

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研資料による被災例とが良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。

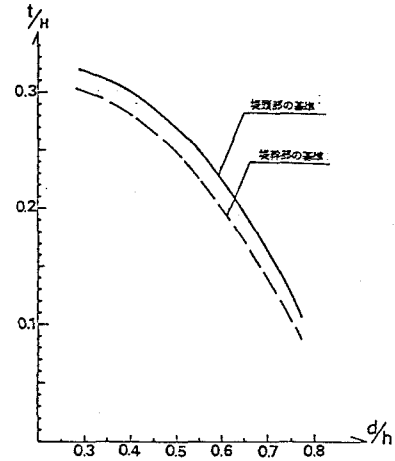


図-8 根固め方塊の安定基準

参考文献

- 1) Hudon, R.; Laboratory investigation of rubblemound 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) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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, 1968, pp. 239
- 7) 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, 1975, pp. 255
- 8) 服部千佳志・柴田鋼三・大堀晃一; 被災防波堤集覧(その3), 港湾技研資料No. 485, 1984, pp. 281