

消波ブロックの安定性に関する模型縮尺効果について

島田 真行* ・ 藤本 稔美**・ 斎藤 昭三***
榊 山 勉****・ 平口 博丸*****

1. ま え が き

近年、臨海に立地される火力・原子力発電所の大型化に伴い、港湾の外郭施設としての防波堤・護岸は水深 20 m 以上の大水深部に建設される趨勢にあり、より合理的経済的な設計がのぞまれている。特に波力、反射波の軽減化に用いられるコンクリート製消波ブロックは防波堤・護岸の主要な構成材料であり、大水深部になるほど多大な量を必要とし、工事費に占める割合も大きい。この消波ブロックの設計にあたっては、

- (1) 耐波浪安定性および反射率の水理特性
- (2) 消波ブロック形状とコンクリート強度との関係
- (3) 設置地点の海底土質地盤特性

を総合的に検討して形状、重量を決定すべきであるが、

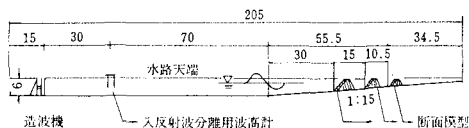
(1) にあげた消波ブロックの安定性に関しては、従来、その所要重量の算定には Hudson¹⁾ が小規模水路で捨石を主として行った水理模型実験結果から提案した式がよく用いられてきた。しかし提案 (1959) してから四半世紀経たず、実際に設計波高以上の高波をうけた防波堤・護岸の被災例からの逆推定によりハドソン式における K_D 値が被害率の観点から重量を安全側に見過ぎる傾向にあることが指摘されている。また Thomsen²⁾ らは捨石やある種の消波ブロックを用いて安定性に関する模型縮尺効果の確認を行っているが我が国の防波堤・護岸に広く用いられている消波ブロックの安定性に関する模型縮尺効果の研究はきわめて少ない。また、Alf. T. Ørum³⁾ らの現地の被災例を模型実験を用いて再現した検討では縮尺効果は無視されたとしている。このように、消波ブロックの安定性に関する縮尺効果の一般的なコンセンサスはいまだ得られておらず、模型縮尺効果に関するより多くの研究が待たれている⁴⁾。

本研究は、すでに行ってきた中小規模水路による実験に加えて、大型造波水路を用いて実規模大での波浪による消波ブロックの挙動を明らかにし、従来から指摘のあ

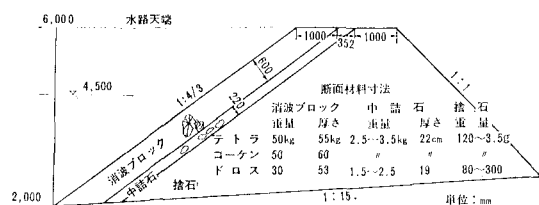
る消波ブロックの安定性に関する模型縮尺効果を系統的に検討したものである。

2. 実験方法と実験諸元

すでに行った実験には小型水路、長さ 20 m、高さ 0.6 m、幅 0.3 m、中型水路、長さ 77 m、高さ 1 m、幅 0.9 m に重さ 16 g から 300 g の消波ブロックを用いたが、今回の実験は、図—1 に示すような長さ 205 m、高さ 6 m、幅 3.4 m、最大造波波高 2 m、の大型造波水路に図—2 に示す消波ブロック被覆堤断面模型を設置し、二層乱積に被覆した三種類、重量 2 kg から 50 kg の消波ブロックの波による斜面上における安定性の検討を行った。



図—1 大型造波水路概要図 (単位: m)



図—2 設置模型断面 (例)

実験波は設置模型の法先で碎波する規則波であり、波の多重反射の影響をさけるために波当て時間を 1 回約 2 分間とした。沖側の一定水深部で入射波分離法による測定から入射波高のモニタリングを行い、同時に反射率を求めた。実験諸元および実験に用いた消波ブロック形状を 図—3 に示す。

また、消波ブロックの安定性の判定基準として波が作用する断面部分の消波ブロック総数に対する 1 回転以上の転落ブロック数の割合と定義した被害率を用い、この被害率 0% (1 個移動) ~ 数%を生ずる碎波波高 H_b (断

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所水理部構造水理研究室

** 正会員 (財)電力中央研究所水理部構造水理研究室

*** (財)電力中央研究所水理部構造水理研究室

**** 正会員 工修 (財)電力中央研究所水理部構造水理研究室

***** 正会員 工修 (財)電力中央研究所水理部構造水理研究室

実験諸元

大型造波水路 205 m (長さ) 6 m (高さ) 3.4 m (幅)
 実験波 波高 砕波まで (最大波高 1.85 m)
 周期 2.3 sec~6 sec

実験に用いた消波ブロック

テトラポッド 2.16 kg 6.81 kg 20.85 kg 49.34 kg
 ドロス 1.99 kg 9.66 kg 29.37 kg
 コーケンブロック 2.05 kg 6.61 kg 19.65 kg 49.58 kg

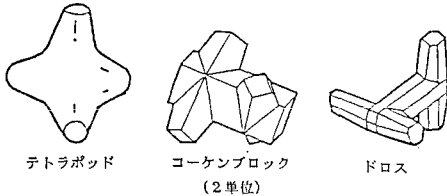


図-3 実験諸元と実験に用いた消波ブロック形状

面がない場合における進行波高)を系統的にもとめた。

なお、消波ブロックの転落現象の確認は目測とビデオカメラで行い、同時に断面模型斜面上にとりつけた波高計により断面表層における遡上高を観測した。

3. 実験結果と考察

(1) 実験波の特性

大型造波水路内の模型断面設置点における海底勾配は 1:15 であり、安定実験に先立って行った造波特性実験による砕波波高 H_b と砕波水深 h_b の関係をプロットしたものが 図-4 であるが、進行波の限界波高比理論曲線⁵⁾とほぼ一致し、その比 H_b/h_b は 0.8~1.2 の間に分布している。

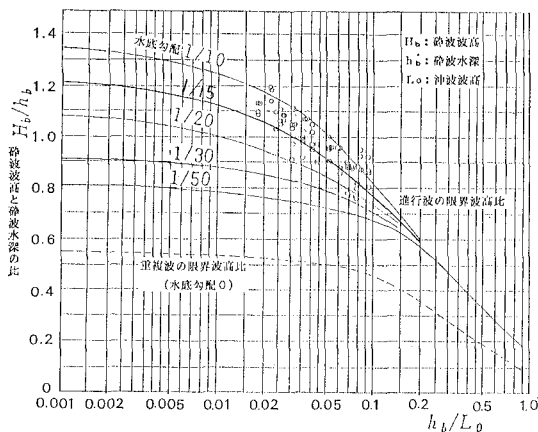


図-4 実験に用いた砕波の特性

(2) 波の遡上高

大型造波水路における断面で消波ブロックの被害率 0~2% を生ぜしめる波の静水面より上の遡上高が 図-5 に示される。図中の曲線は、T. Saville⁶⁾ の仮想勾配法

による滑面および消波工を被覆した勾配 $\tan \theta = 3/4$ の断面への遡上高である。図より、本実験による遡上高は Saville の滑面における値よりもほとんど下まわっているが、消波工で被覆した場合の値よりもかなり大きい。Saville の消波工断面の値が小規模実験の結果であることを考慮すると、遡上高に関する縮尺効果の影響がみとめられるが、この斜面遡上高は消波ブロックの耐波浪安定性に関連する主要な要因であり、今後さらに検討を加える必要がある。

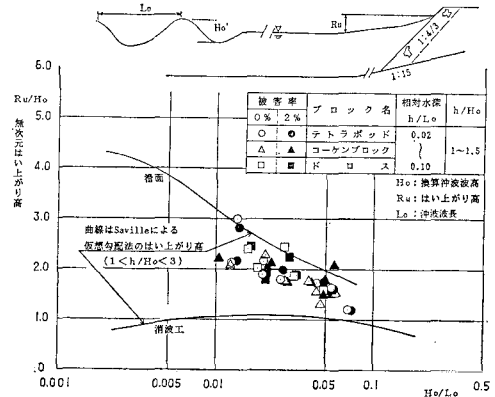


図-5 実験断面における遡上高

(3) 消波ブロックの安定性

消波ブロックの安定性に関する実験結果を 図-6 に示す。図の縦軸は消波ブロックに作用する波力と消波ブロックの抵抗力との比をあらわすスタビリティナンバー N_s の値であり、次の式で定義される。

$$N_s = \frac{H_b \cdot \gamma^{1/3}}{W^{1/3}(S-1)} \quad (1)$$

ここに、 H_b : 断面法尻箇所での断面がない場合での砕波波高 (cm), γ : 消波ブロックの単位体積重量 (g/cm³), W : 消波ブロック 1 個あたりの重量 (g), S : 消波ブロックと流体との比重で通常 2.3 である。なお、断面勾配を θ とした場合のハドソン式における K_D 値は次式で定義される。

$$K_D = \frac{N_s^3}{\cot \theta} \quad (2)$$

また、横軸には、消波ブロックのまわりの流体粘性力の影響を示すレイノルズ数 Re をとったものである。この場合のレイノルズ数の速度の項は砕波における水粒子の流速を長波の波速近似とし、さらに長波の波速 $C = \sqrt{gh}$, h : 砕波水深, g : 重力加速度の h を砕波波高にほぼ等しいとしておきかえたものである。また、長さの項に消波ブロックの重量の 1/3 乗として求められる長さを代表させている。したがって、レイノルズ数 Re は次式で定義される。

テトラポッド

コーケンブロック

ドロス

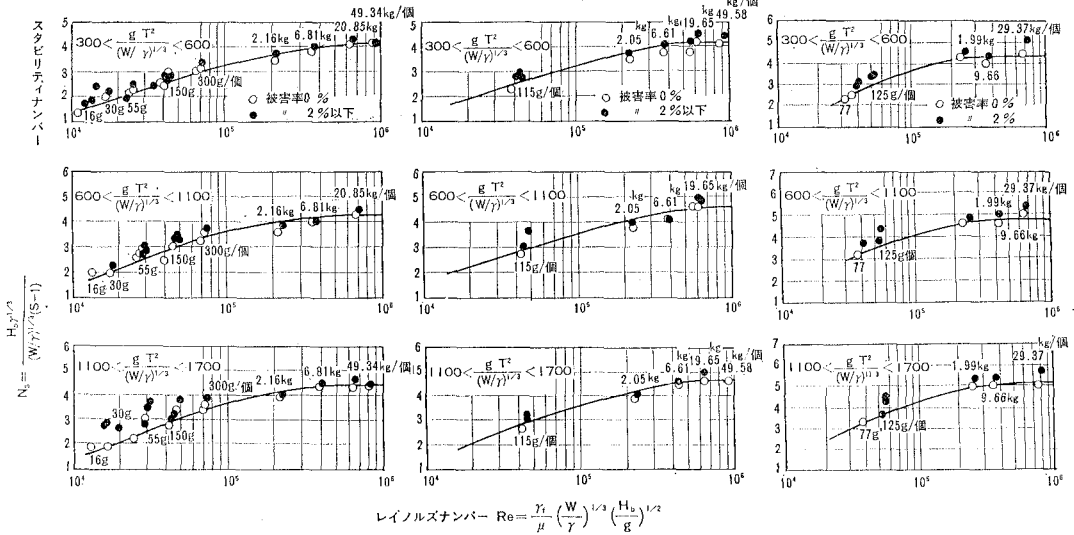


図-6 スタビリティナンバーとレイノルズ数との関係

$$Re = \left(\frac{\gamma_f}{\mu} \right) \left(\frac{W}{\gamma} \right)^{1/3} \left(\frac{H}{g} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 γ_f : 流体単位体積重量 (g/cm^3)、 μ : 流体の粘性係数 ($\text{g}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$)、 g : 重力加速度 (cm/sec^2) である。また、波の周期 T は無次元周期 $gT^2/(W/\gamma)^{1/3}$ で示されている。図中には消波ブロック重量 16 g/個から 50 kg/個までの各種消波ブロックの実験結果がプロットされているが、300 g/個までの結果は著者らの一人⁷⁾が小中型水路ですで行ったものである。図より各消波ブロックともレイノルズ数 Re の増加とともにスタビリティナンバー N_s の値も増加し、縮尺による影響が見られる。しかし、 Re 数がほぼ 4×10^5 以上、本実験では消波ブロック重量 6 kg 以上になると、 N_s 値の増加傾向はにぶり、一定値に近づくことが見出される。

また、波の周期による差異は顕著ではなく、むしろ長周期波に対する方が安定性は大きい傾向を示す。これは、今回の実験波が法先で碎波する波に限定しているため、造波特性からみても長周期波の方が浅い設置水深で碎波することになり、断面における作用エネルギーも小さくなっているものと思われるが、今後さらに検討する必要がある。

また、図-6 における縦軸のスタビリティナンバー N_s のかわりに、安定限界波高 H_b を各消波ブロックの乱積二層厚で除した H_b/D を用いて、三種の消波ブロックの安定度をまとめて表わした例が図-7である。図より、今回の三種の消波ブロックに関して、縮尺効果を示す変化量も同一曲線上に集合している。このことから、消波ブロック間のかみ合せの問題も含んでいるものの、消波ブロックの安定度には捨石の場合よりもさら

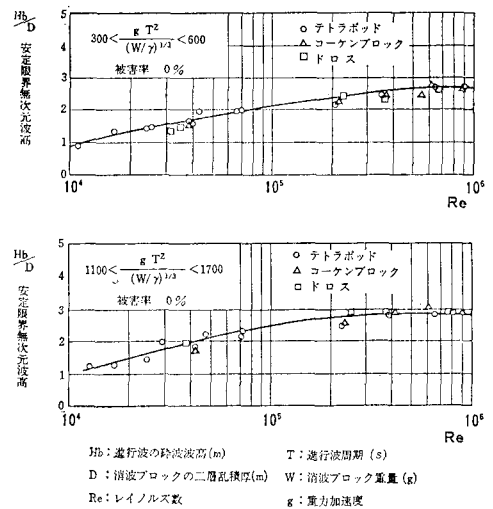


図-7 消波ブロックの乱積二層厚を考慮した場合の安定限界波高

に、消波ブロック形状が関与していることが知られる。また、設計における概算値を知る上で H_b/D の値は簡易的な目安となる。

また、小規模実験におけるスタビリティナンバー値 N_s を現地に適用する場合の補正値を求めるために、図-6 を書きあらためた結果が図-8である。例として 100 g の消波ブロック模型を実験に使用した場合は、実験結果の 1.45 倍の N_s を設計に用いればよいことになる。図中に CERC における捨石堤の結果が示されるが、今回実験結果と同様の傾向がみられる。この結果より、小規模実験の結果の評価がより適切なものとなる。

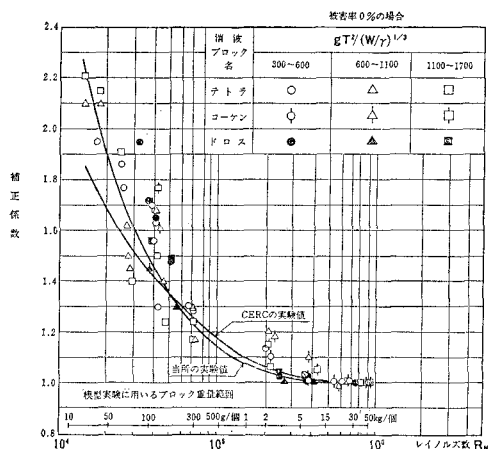


図-8 模型縮尺の影響がない範囲のスタビリティナンバーに対する補正係数

(4) K_D 値の見直し

著者らの一人が実施した不規則波による消波ブロックの安定性に関する実験的検討⁸⁾から、同一の安定性を有する規則波高 H と不規則波の有義波高 $H_{1/3}$ との間には、

$$H = 1.2H_{1/3} \quad \dots\dots\dots (4)$$

の関係があるという結果がえられている (図-9)。

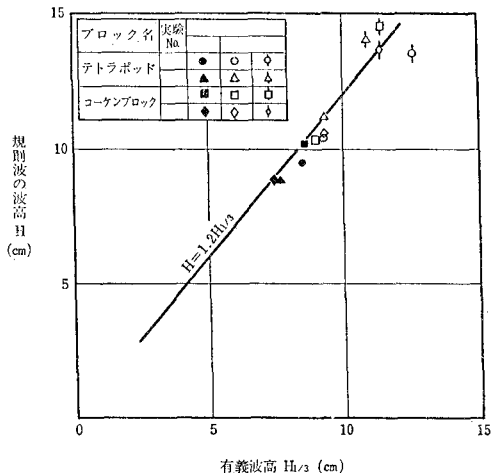


図-9 規則波と不規則波の波高の関係 (藤本の実験値による)

そこで、今回の実験結果をこの関係式により補正し、

(1) のハドソン式の定数 K_D 値の見直しをした結果が、表-1 であり、消波ブロックによっては 1.6~3.6 倍程度の K_D 値の増加、すなわち所要重量の軽減化がはかられる。

このように、安定性に関する模型縮尺効果およびその

表-1 実験結果と不規則性を考慮して見なおした K_D 値 (被害率 0%)

ブロック名	H/D	N_s	K_D	不規則波補正	現行の K_D
テトラポッド	2.71	4.05	49.8	28.8	8
コーゲンブロック	2.64	4.05	49.8	28.8	8
ドロス	2.64	4.4	63.9	36.9	22

N_s : スタビリティナンバー $N_s = H_b / (W/\gamma)^{1/3} (S-1)$

影響度合が明らかになったので、消波ブロック所要重量の合理的な算定法と、種々の縮尺模型における実験結果の評価法が得られた。

4. 結 論

(1) 大型造波水路を用いた実験により消波ブロックの安定性に関する模型縮尺効果が確認された。

(2) 安定性に関する模型縮尺効果は、消波ブロック形状と作用する波の挙動に関するレイノルズ数 Re が、 4×10^5 (対象消波ブロックで約 6.6 kg 以上) であれば、無視することができる。

(3) それ以下のレイノルズ数における値に対しては図-8 の示す補正係数を用いて、模型縮尺の影響がおよばない範囲のレイノルズ数における値に、補正することができる。

(4) 以上の結果から、波の不規則性を考慮しても、現行の消波ブロック所要重量算定式から得られる値を 1/2 程度以下に見直すことができる。

参 考 文 献

- Hudson, R. Y.: Laboratory investigation of rubble mound breakwaters. Proc. of the Amer. Soc. of Civil Eng. Journal of the Waterways and Harbours Division, Vol. 85, No. WW3, Sept. 1959.
- Thomsen, A. L., P. E. Wohnt and A. S. Harrison: Rip-Rap stability on earth embankment tested in large and small scale wave tanks. CERC Technical Memorandum No. 37, June 1972.
- Tørum, A., B. Mathiesen and R. Escutia: Scale and model effects in breakwater model tests. P.O.A.C., 1335 pp., 1979.
- Sorensen, T. and O. J. Jensen: Reliability of hydraulic models of rubble-mound breakwater as proven by prototype measurements. The Dock & Harbour Authority, Vol. LXV, No. 768, 155 pp., March 1985.
- 土木学会編: 水理公式集, 510 p., 1985.
- 土木学会編: 水理公式集, 530 p., 1985.
- 藤本稔美・阿部宣行・長谷川寛: 消波ブロックの水理特性に関する実験的研究, 電力中央研究所研究報告, 382001, 1982.
- 藤本稔美: 不規則波による消波ブロックの安定性に関する実験的研究, 電力中央研究所研究報告, 385008, 1985.