

緩傾斜堤に用いる被覆ブロックの安定性に関する研究

齋藤 正文*・小林 一光**・錦織和紀郎***

1. ま え が き

従来より傾斜堤形式の護岸においては、コンクリート製の被覆ブロックが有効に用いられてきているが、最近では反射波の低減や親水性機能の要請のため、法面勾配が1:5のような緩傾斜堤も増えつつある。これらの構造における平型の被覆ブロックの設計でも、一般的には(1)式で表されるハドソン式による重量算定がなされている(全国海岸協会, 1989)。

$$W = \gamma_c H^3 / \{ K_D (S_r - 1)^3 \cot \alpha \} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、W:ブロックの所要重量、 γ_c :コンクリートの単位体積重量、H:波高、 S_r :コンクリートの海水に対する比重、 K_D :ブロックごとに定まる安定数、 $\cot \alpha$:法面勾配である。この式は、通常 K_D を一定値として用いるもので、法面勾配が1:4/3~1:2程度の消波ブロック傾斜堤構造においては、充分実績のある式である。しかしながら、1:2よりも緩勾配の法面の場合にも、 K_D の値を同一として安定性を評価できるか否かを調べた研究例はない。

このようなことから、本研究は、法面勾配を変化させた条件で被覆ブロックの安定性を水理模型実験により調べ、ハドソン式の適用性を検討したものである。

2. 実験方法

実験には2次元造波水路(長さ50m、幅1.0m、深さ1.3m)を用い、1/30および1/50の一樣勾配斜面上に5~10gの碎石により構築した斜面を平型のブロックで被覆した傾斜堤を実験の対象とした。

実験断面を、図-1に示す。傾斜堤の法面勾配は1:1.5, 1:2, 1:3, 1:4および1:5の5通り、法先水深hは30.0cm、傾斜堤の天端高はある程度の越波を許容する静水面上17.2cmの一定とし、天端幅は被覆ブロック3個並びとした。また、一部のケースでは、天端高を上げ、非越波の条件とした。

実験に用いた被覆ブロック模型は、表-1に示す2種

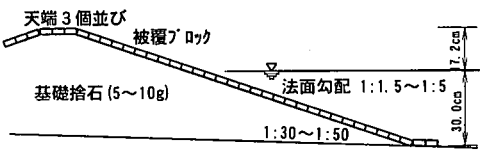


図-1 実験堤体断面

表-1 実験に用いた被覆ブロック模型

ブロック	質 量	単位体積重量
ブロック A	84, 124 g	22.6 kN/m³
ブロック B	38, 64, 82, 129 g	22.8 kN/m³

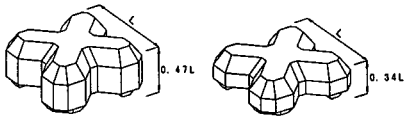


図-2 被覆ブロックの外観形状

類である。各被覆ブロックの外観形状は、図-2に示す通りであり、ブロックAは、ブロックBの厚さを厚くして、単位面積当りの質量を1.5倍にしたブロックである。ここで、本研究では港外側法面の被覆ブロックの安定性に注目したため、港内側の被覆ブロックは固定した。

実験波浪には、プレットシュナイダー・光易型の周波数スペクトルを持つ不規則波を用いた。周期 $T_{1/3}$ は1.2~2.4sとし、各々の周期において、堤体法先位置の波高 $H_{1/3}$ は5cmから被覆ブロックに移動等が生じるまで0.5~1.0cmきざみで徐々に大きくした。実験波浪条件を、表-2に示す。

表-2 実験波浪条件

周 期 $T_{1/3}$ (s)	法先波高 $H_{1/3}$ (cm)	波形勾配 $H_{1/3}/L$	相対水深 h/L
1.2	5.0~11.7	0.03~0.07	0.17
1.5	5.0~16.8	0.02~0.07	0.13
1.8	5.0~18.0	0.02~0.06	0.10
2.4	5.0~21.2	0.01~0.05	0.08

* 正会員 工修 株式会社テトラ技術部
** 正会員 株式会社テトラ技術部部長
*** 工修 株式会社テトラ技術部課長

実験項目は、被覆ブロックの安定性である。ここで、被覆ブロックの被害の定義は、被覆ブロックの厚さの半分以上の浮き上がりが生じた場合とした。また、各実験ケースごとに波高を徐々に大きくしていき、被覆ブロックに被害が生じた波高の条件を被害基準、被害基準の条件よりも1ランク小さい波高（安定であった条件での波高の最大）の条件を無被害基準と呼ぶこととした。なお、図-1のように、実験堤体の天端高は、傾斜堤や傾斜護岸を想定して比較的高くしている。したがって、越波を大きく許容するヘッドランドや突堤における被覆ブロックの安定性については、別途検討を行うべきものと考えられる。

3. 実験結果および考察

3.1 被覆ブロックの安定性評価の基準

通常、かみ合わせを有する消波ブロックの場合、ある被害率を許容した設計が行われている。これは、被害を全く許容しない設計を行うと消波ブロックの重量がかなり大きくなり不経済となることと、かみ合わせの効果により、仮に1個の消波ブロックが移動しても、周辺の消波ブロックが極端に不安定となることが少ないためである。一方、本実験において対象とした被覆ブロックは平型のかみ合わせのないブロックである。その場合、1個の被覆ブロックに移動が生じるとそこから捨石が吸い出される等して周辺の被覆ブロックの安定性が著しく劣るようになり、1個の移動が大きな被害につながる可能性がある。

このようなことから、1層の被覆ブロックの安定性を評価するためには、無被害基準を採用するべきであると考えられ、本研究においても被覆ブロックの安定性は無被害基準で評価した。

3.2 ハドソン式の適用性の検討

Hudson(1959)は、砕波領域において流速 V が $\sqrt{gH}$ に比例するものと仮定し、傾斜堤の法面の被覆材の安定性が(2)式で表される安定数 N_s で評価できるものとして検討を行っている。ここに、 α は法面の角度、 L は波長、 h は水深、 r は被覆材の厚さである。

$$N_s = \frac{\gamma_c^{1/3} H}{W^{1/3} (S_r - 1)} = f(a, H/L, h/L, r) \dots \dots \dots (2)$$

また、傾斜堤の被覆材に被覆石およびテトラポッドを用いて実験を行い、法面勾配 $\cot \alpha$ と実験で得られた安定数 N_s の関係を両対数を取って調べ、両者の間に直線的な関係が認められたことから(2)式を(3)式に置換え、(1)式のハドソン式における $K_D = a^3 = \text{一定}$ としている。ここに、 a は定数である。

$$N_s = \frac{\gamma_c^{1/3} H}{W^{1/3} (S_r - 1)} = a (\cot \alpha)^{1/3} \dots \dots \dots (3)$$

このようなことから、本研究においても、まず法面勾配 $\cot \alpha$ と実験で得られた無被害基準による波高 H の値から算定した N_s の関係を両対数で図-3、4のようにまとめた。

傾斜堤の被覆ブロックの安定性がハドソン式により評価できるのであれば、法面勾配 $\cot \alpha$ の増加に伴い N_s は

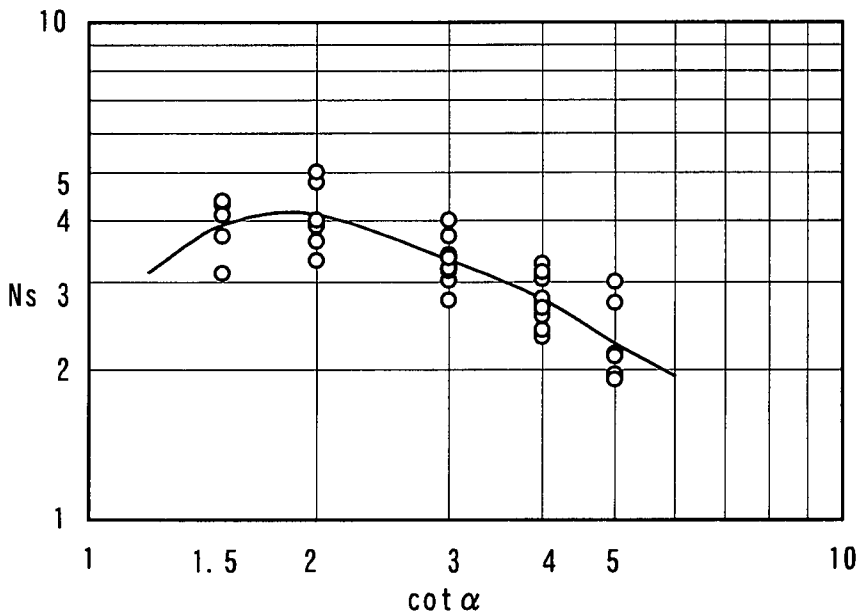
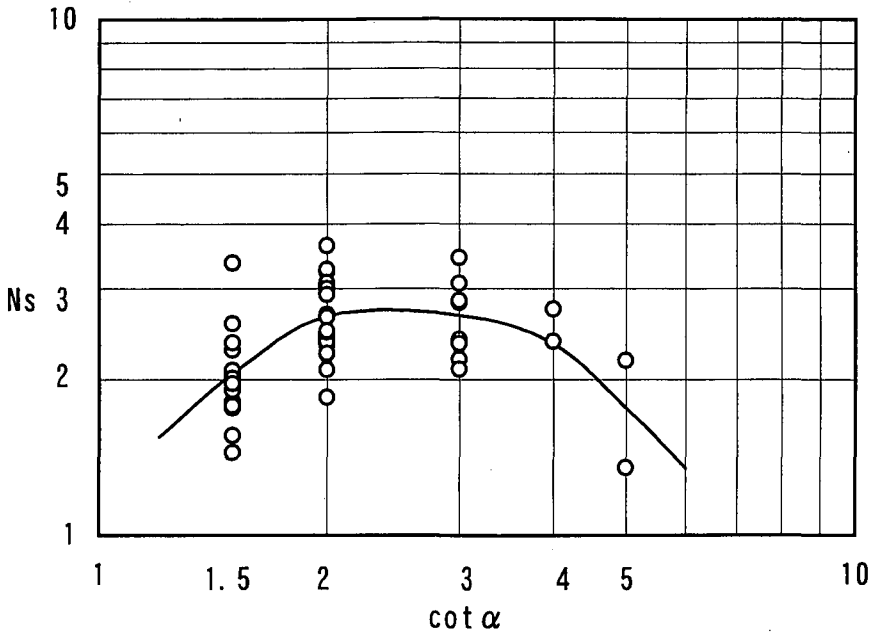


図-3 法面勾配と N_s の関係（ブロックA）


図-4 法面勾配と N_s の関係 (ブロック B)

直線的に増加することになる。しかしながら、図-3, 4より、本実験結果ではいずれの被覆ブロックの場合にも、法面勾配が1:2~1:3よりも緩くなると、 N_s は逆に低下傾向となることが判る。このことは、 K_b の値を一定としたハドソン式により被覆ブロックの重量算定を行う

と、法面勾配が緩くなるほど実際の安定重量との乖離が大きくなることを示すものである。すなわち、1:3程度までの条件で実験的に定めた K_b の値を用いて、法面勾配1:5の条件を対象にハドソン式により設計を行うと、実際の安定重量に比べてかなり過小なブロック重量が算定される可能性がある。

また、図-3, 4より、同一の法面勾配の条件でも、 N_s の値にはかなりバラツキがあることが確認できる。図-5は、ブロックAを例にとって、相対水深 h/L と N_s の関係をまとめたものである。図-5より、いずれの法面勾配の場合にも、周期の長い条件において被覆ブロックは安定である傾向が確認できる。

以上のことより、傾斜堤、特に法面勾配が1:2より緩い緩傾斜堤の設計においては、ハドソン式により K_b を一定として被覆ブロックの重量算定を行うことは困難であると言える。また、傾斜堤の被覆ブロックの設計においては、周期の影響も無視し得ないものと考えられる。

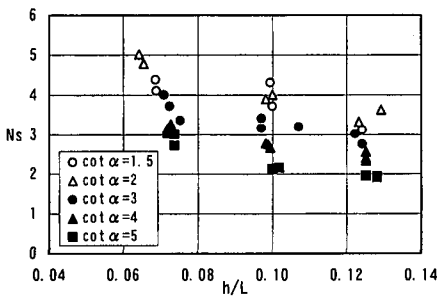
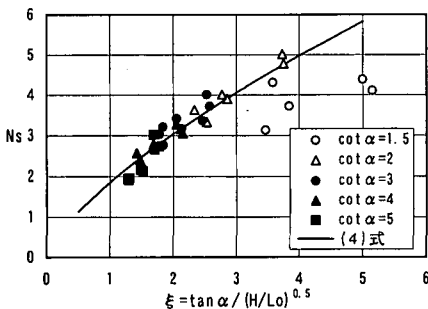
3.3 被覆ブロックの安定性評価の検討

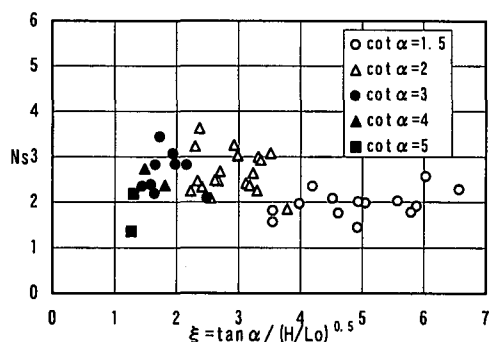
Vander Meer (1987) は、捨石斜面を対象に、碎波相似パラメータ ξ と N_s の関係を調べ、 $\xi < 3.5$ の範囲で N_s が ξ の増加に伴い減少することを確認している。同様に、本実験における無被害基準の ξ と N_s の関係をまとめると、図-6, 7 のようになる。

また、図-6 のデータから N_s を ξ の累乗で近似すると、(4) 式が得られる。

$$N_s = 1.86 \xi^{0.71} \dots \dots \dots (4)$$

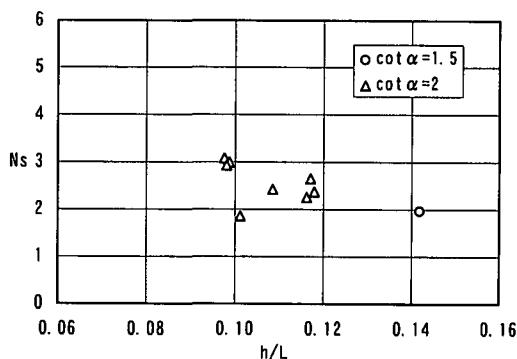
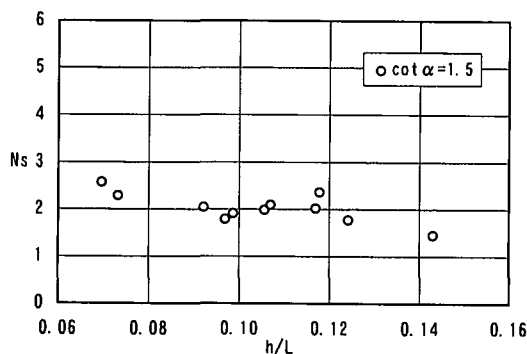
図-6, 7より、被覆ブロックの場合には明らかに傾向


図-5 h/L と N_s の関係 (ブロック A)

図-6 ξ と N_s の関係 (ブロック A)

図-7 ξ と N_s の関係 (ブロック B)

が異なり、巻き波や巻き寄せ波が作用する $\xi < 3$ 程度の領域において、 N_s は ξ の増加に伴い増加傾向にある。一方、ブロックにより多少異なるが、砕け寄せ波が作用する $\xi > 3$ 程度の領域においては、データにバラツキが生じ、被覆ブロックの安定性は ξ のみの関数では表現できない。そこで、ブロック B を例に取ってこの領域における周期の影響を調べた結果を、図-8, 9 に示す。

図-8 より、 $4 \geq \xi \geq 3$ の領域では、周期が短いほど安定性が低下する傾向にあることが確認できる。また、図-9 より、 $\xi > 4$ の領域ではやや周期が短いほど安定性が低下

図-8 h/L と N_s の関係 (ブロック B, $4 \geq \xi \geq 3$)図-9 h/L と N_s の関係 (ブロック B, $\xi > 4$)

する傾向にあるものの、 N_s はほぼ一定となっている。ここで、図-9 に示した $\xi > 4$ のデータは、全て法面勾配が 1:1.5 のデータである。したがって、この領域では、(1) 式のハドソン式における K_D の値も一定となり、ハドソン式が成り立つ範囲と考えられる。

このような捨石と被覆ブロックの安定性の傾向の違いは、両者の被害状況の違いによるものと考えられる。本実験においては、被覆ブロックに移動が生じた時の碎波の状況や移動の状況についても観察した。その概略の結果は図-10 に示す通りであり、法面勾配が 1:3 より緩い場合には、巻き波が直接被覆ブロックに作用し、被覆ブロックが 1 度にめくられるように被害を受けることが多い。それに対して、法面勾配が 1:2 より急な場合には、砕け寄せ波が法面上を遡上し、遡上時あるいは戻り流れによる被覆ブロックの浮き上がりを起因として移動することが多い。一方、捨石の場合には、通常吸い出されるようにして被害を受ける場合が多く、緩勾配時の被覆ブロックに見られたような被害を受けることはない。また、急勾配時の被覆ブロックの被害状況は、捨石のそれに似ているものと見なせる。

このような被害状況の違いにより、 $\xi < 3$ 程度の領域において、被覆ブロックは安定性が低下し、捨石は被害を受け難いという安定性の相違が生じたものと考えられる。

また、最初に移動が生じた被覆ブロックの位置の静水面からの鉛直距離 Z (図-10 参照) を被害基準の波高 H で無次元化し、碎波相似パラメータ ξ との関係ブロック A を例に取って調べたものが、図-11 である。

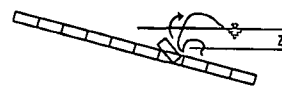
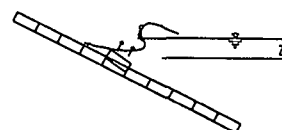
法面勾配	被覆ブロックの移動の状況
緩勾配 $\cot \alpha \geq 3$	巻き波が被覆ブロックに直接作用し 1 度に捲られるようにして移動する 
急勾配 $\cot \alpha \leq 2$	砕け寄せ波の遡上あるいは戻り流れにより被覆ブロックが浮き上がり移動する 

図-10 被覆ブロックの移動の状況

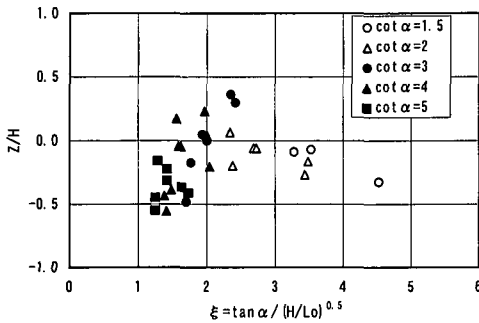


図-11 被覆ブロックに移動が生じた位置

図-11より、 ξ が3程度以下のデータに注目すると、 ξ が小さく巻き波の傾向が強くなるほど、被覆ブロックの移動は静水面より深い位置で生じ、 ξ が大きくなるに伴って移動の生じる位置が浅くなることが判る。すなわち、 ξ が3程度以下の領域で、図-11は碎波が被覆ブロックに作用する位置を示したものであり、傾斜堤における被覆ブロックの安定性は、法面勾配や波の周期による碎波形式の影響を大きく受けることが判る。

以上のことより、傾斜堤の被覆ブロックの設計において、 $\xi < 3$ 程度の条件では、従来の K_D を一定としたハドソン式ではなく、碎波相似パラメータ ξ を用いた設計を行うことが望ましいと言える。一方、 $\xi > 4$ 程度の領域においては、ほぼハドソン式により被覆ブロックの安定性を評価できるものと考えられる。また、 $4 \geq \xi \geq 3$ の領域での被覆ブロックの安定性は、碎波相似パラメータによる整理やハドソン式の適用は困難で、周期の影響をそのま

ま受けるようである。

4. おわりに

法面勾配1:1.5~1:5の傾斜堤を被覆ブロックで被覆した条件で不規則波による系統的な実験を実施し、本実験の条件下で以下のような結果を得た。

(1) 緩傾斜堤の被覆ブロックの設計を、従来の K_D の値を一定としたハドソン式で行うことは困難である。特に法面勾配が1:3より緩い場合にハドソン式で設計を行うと、過小なブロック重量が算定される可能性がある。

(2) 傾斜堤の被覆ブロックの安定性は碎波形式の影響を受け、碎波相似パラメータ ξ が3程度以下の条件において、安定数 N_s は ξ との相関が高い。本研究において、ブロックAを対象に、(4)式の関係を得た。

(3) $\xi > 4$ 程度の条件では、やや周期の影響があるものの、ほぼハドソン式により安定性を評価できる。

(4) 被覆ブロックの安定性は、捨石のそれと傾向が異なる。このことは、被害状況により説明できる。

参考文献

- 全国海岸協会 (1989): 緩傾斜堤の設計の手引き, 48 p.
- Hudson, R. Y. (1959): Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters, Jour. of Waterways and Harbor Div., WW 3, pp. 93-121.
- Van der Meer, J. W. (1987): Stability of breakwater armour layers-design formulae, Coastal Eng., Vol. 11, No. 3, pp. 219-239.