

不規則波を考慮した消波ブロック被覆堤の新設計手法について

奥野敏彦*・佐藤啓二**

1. ま え が き

消波ブロック被覆堤の耐波浪設計においては、消波ブロックの所要重量の算定が重要である。その算定式は従来より多く提案されているが、規則波実験からの誘導がほとんどである。最近ではブロックの安定性に対する波の不規則性の影響の重要性が指摘され、柳・樺木ら(1986)、Van der Meer(1987)は不規則波を考慮した新算定式を提案した。

消波ブロックを含む斜面被覆材の所要重量を求める場合、入射波条件に対する被覆材の安定性の評価、すなわちその安定性指標の概念が最も重要となる。Hudson(1959)は被覆材の安定定数として N_s を提案した。一方、Gravesen ら(1979)は波の周期効果を導入した安定定数 N_s^* を提案し、Ahrens(1984)が不規則波実験結果より N_s^* の有効性を指摘した。しかし、これらの安定定数の関連性や理論的な根拠については明らかでない。

そこで、本研究の目的は、(1) 不規則波を用いた水理実験よりブロックの安定性に及ぼす入射波の波群効果、堤体設置水深の影響を把握すること。(2) N_s と N_s^* の関係を明らかにし、この結果を用いて波形勾配、相対水深および海底勾配等の効果を導入した新ブロック重量算定式を提案すること、の2点である。

2. 実験装置と堤体模型

本実験に用いた水路と堤体模型の配置を図-1に示す。長さ35.2m、深さ1.0m、幅0.7mの二次元水槽中に、造波板から19.6mの位置より勾配1/30、長さ10mの斜面を設け、図-2に示す堤体模型を水深 h に設置し

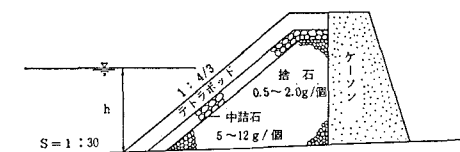


図-2 堤体模型

た。消波ブロックには2種類のテトラポッドを用い、法面勾配1:4/3上に二層乱積で被覆した。被覆層の空隙率は50%であった。テトラポッド模型の諸元を表-1に示す。

表-1 テトラポッド模型の諸元

重 量	標準偏差	体 積	比 重
118.9 (gf)	2.29 (gf)	51.7 (cm ³)	2.30 (gf/cm ³)
306.0 (gf)	4.42 (gf)	133.0 (cm ³)	2.30 (gf/cm ³)

造波機は、電動油圧サーボ弁式ピストン型である。波高計は、容量式(測定範囲±30cm)を用い、造波板から約13m地点の一樣水深部に入・反射波の分離用としてNo.1~3の3本、堤前にデータ解析用としてNo.4とNo.5の2本計5本を設置した。

また、消波ブロック被覆斜面上への遡上波流速を調べるために規則波による遡上実験も実施した。斜面堤はテトラポッド模型(118.9g/個)を二層乱積で被覆した不透過粗面(水深 $h=35$ cm, 斜面勾配 $\cot \theta=4/3$)である。遡上実験では、長さ1.5mの遡上計をブロック二層目の中心に斜面と平行に設置し、遡上波形を取得し遡上波形先端の流速を求めた。これは、真の遡上波水粒子速度とは異なるが流速の1つの代表量と考えられる。

3. 実験の条件と方法

実験条件を表-2に示す。実験波の有義波周期 $T_{1/3}$ は、1.59、1.81および2.44 secの3種類を目標とし、各周期に対し波群性の異なる波を2種類計6波作成した。

実験波は、Brietschneider・光易型スペクトルを持つ一様波群210秒の駆動信号を磁気テープに連続11回記録した

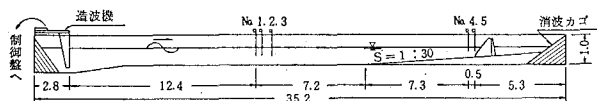


図-1 実験水路(単位:m)

* 正会員

東北電力(株) 電力技術研究所
(株)東北開発コンサルタント

**

表-2 実験条件

実験波の周期	1.59, 1.81, 2.44 sec.			
実験ケース	堤体の設置水深 h (cm)	一様水深深部水深 h' (cm)	ブロック重量 W (g)	ブロック個数 N (個)
I	17.5	45.0	118.9	290
II	20.0	50.0	118.9	318
III	27.5	50.0	118.9	418
IV	35.0	60.0	118.9	480
V	35.0	60.0	306.0	290

約40分間の波である。

実験は非越波条件とし、ブロック移動時の波が非碎波～碎波領域を含むように堤体設置水深を4ケースとした。本実験の実験範囲は、波形勾配 $H_m/L_m=0.02\sim0.07$, 相対水深 $h/L_m=0.05\sim0.14$, 水深波高比 $h/H_m=1.3\sim3.8$ である。 H_m , L_m は堤体位置での実験波の有義波高, 有義波長である。

実験におけるブロックの被害率 n は, 次式で定義した。

$$n = (n_d/N) \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに, N は堤体斜面上への波の最大週上高を考慮して決定した検査区間内に含むブロック数, n_d はブロック1個長以上移動したブロックの累積数である。

4. 消波ブロックの安定定数

Hudson の提案した安定定数 N_s は次式で与えられる。

$$N_s = \frac{H_m}{D(S_r - 1)} = (K_D \cot \theta)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで, $D = (W/\gamma_r)^{1/3}$ はブロックの代表長さ, W はブロックの実重量, γ_r はブロックの比重である。 $S_r = (\gamma_r/\gamma_w)$ はブロックの比重と淡水 (または海水) の比重 γ_w の比である。 K_D は実験定数, $\cot \theta$ はブロック被覆層の法面勾配である。

一方, Gravesen は, 次式の安定定数 N_s^* を提案した。

$$N_s^* = \frac{(H_{m0}^2 L_p)^{1/3}}{D(S_r - 1)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに, H_{m0} はスペクトルの0次モーメントの波高, L_p はピーク周期に対応する波長である。

なお, ブロックの安定性の検討では式 (2) を用いた。

5. 消波ブロックの安定性について

(1) 実験時の碎波状況

ブロックの被害率 $n \leq 5\%$ の時の沖波波形勾配は, $H_0'/L_0 = 0.012\sim0.054$ であった。 H_0' は換算沖波波高, L_0 は沖波波長である。表-3 は, 各実験ケースの被害率 $n \leq 5\%$ の時の h/H_0' を示す。海底勾配 1:30 の場合, 水深波高比 $h/H_0' > 2.0$ の時不規則波群の碎波の発

表-3 被害率 $n \leq 5\%$ の時の水深波高比

実験ケース	堤体水深 h (cm)	h/H_0'
I※	17.5	1.05~1.57
II	20.0	1.02~1.80
III	27.5	1.52~2.82
IV	35.0	2.08~3.38
V※※	35.0	1.58~2.85

※印: $n=0\%$ の時

※※印: $n=0\sim3\%$ の時

生頻度は少ないことから, ケース I と II は碎波条件, ケース IV は非碎波条件であり, ケース III と V は非碎波～碎波条件の遷移期の波と区別できる。

(2) 入射波の波群性に対する影響

ブロックの安定性と入射波の波群性との関係では, 有義波高 $H_{1/3}$ に対する平均連長 $\overline{J(H_{1/3})}$ について検討した。 $\overline{J(H_{1/3})}$ は, $H_{1/3}$ を超える波が連続して出現する波数 J の一波群当りの平均値 $\overline{J}$ である。図-3 は, ケース I ~ IV に対する $n=0, 2$ および 5% の時の $\overline{J(H_{1/3})}$ と安定定数 N_s の関係である。これより, ケース I, II および IV の場合平均連長が長い程 N_s は減少しており, 波群性の高い波程ブロックの不安定化を助長させると考えられる。ケース IV の場合は非碎波の高波が連続的に堤体に作用する“高波の連の効果”, またケース I と II の場合は高波の連内の個々の波の大部分が碎波する“碎波の連の効果”と考えられる。

一方, ケース III の場合は他のケースと異なり平均連長が長い程 N_s は増加傾向を示す。このケースは非碎波～

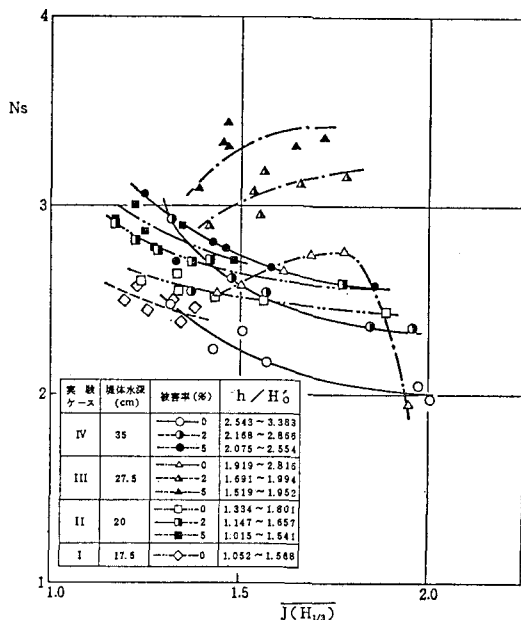


図-3 安定定数と平均連長の関係

砕波条件への遷移期の波であり、高波の連を形成する波群でも砕波する波と砕波しない波が混在した状況と考えられる。よって、この場合は波群の効果というより砕波限界に達した高波一波一波の衝撃力の方がブロックの安定性を左右するのではないかと考える。

(3) 堤体の設置水深に対する影響

図-4 は、 h/H_0' と N_s の関係である。 N_s は $h/H_0' \approx 2$ でピークを持つ山形の変化を示す。この結果は、不規則波の代表波高との関係から説明できる。図-5 は、海底勾配 $1/30$ 、 $H_0'/L_0=0.02$ の時の水深変化に伴う最大波 $H_{\max}$ 、 $H_{1/3}$ および $H_{\max}/H_{1/3}$ の変化を示す。 H_0' が一定の時、 $H_{\max}$ は $h/H_0' \approx 2.5$ で、 $H_{1/3}$ は $h/H_0' \approx 2$ でピークを持つ。このピークのズレは、最大波が砕波した後もそれ以外の波は浅水変形を受け波高が増大するために生ずる。 $H_{\max}/H_{1/3}$ は $1.0 < h/H_0' < 2.5$ で h/H_0' の減少に伴ない急激に低下する。そこで図-5 より h/H_0' と N_s の関係を考察する。

a) $2 < h/H_0'$ の場合

ブロックの被害は、不規則波群中の最大波や $1/10$ 最大波を含む波群により発生し始まる。水深が浅くなって h/H_0' が 2 に近づくと $H_{\max}/H_{1/3}$ が急激に低下する。よって、入射波の H_0' が増加しないとブロックの被害は発生しにくい。 H_0' の増加は堤体位置の波高 $H_{1/3}$ の増加となり、式(2)より N_s も増加する。

b) $1 < h/H_0' < 2$ の場合

この領域では、 $h/H_0' \rightarrow 1$ の時 $H_{1/3}/H_0'$ が急激に減少する。 H_0' が一定の時、水深が浅くなると入射波の砕波頻度が高くなり $H_{1/3}$ も低下する。この時、ブロックは連続的に過大な砕波力を受け被害に及ぶと考えられる。この $H_{1/3}$ の低下により N_s は減少する。

また、図-4 より N_s は非砕波領域 ($h/H_0' > 2.5$) の方が砕波領域 ($h/H_0' < 2$) より小さいため、波高に比べ堤体の設置水深が大きい場合、ブロックの安定性を過大に評価する恐れがあるので注意を要する。

6. Hudson と Gravesen の安定定数の関係

ブロックの挙動は斜面上の流体の運動に起因し、流体の作用力は遡上波の流速 V の2乗に比例する。ブロックの安定定数はこの流体力とそれに抵抗する重力との比、すなわち Froude 数 F_r と密接な関係があると考えられる。

Froude 数は次式で定義される。

$$F_r = V / \sqrt{D(S_r - 1)g} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 g は重力加速度である。微小振幅波理論による静水位の最大水平水粒子速度 $U_{\max}$ は次式である。

$$U_{\max} = C \cdot \pi \frac{H}{L} \coth \frac{2\pi h}{L} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $C = \sqrt{gL/2\pi \cdot \tan h(2\pi h/L)}$ は波速である。まず、斜面上の遡上流速 V を $U_{\max}$ と仮定し F_r と N_s の関係を調べる。Hudson 式の誘導過程は水深 $h \rightarrow 0$ を扱っているため、 $C = \sqrt{gh}$ 、 $\cot h(2\pi h/L) = L/2\pi h$ となり、 F_r は

$$F_r = \frac{\sqrt{gh}}{\sqrt{D(S_r - 1)g}} \cdot \frac{H}{2h} = \frac{H}{\sqrt{2h} \sqrt{D(S_r - 1)}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。Hudson によると $h \rightarrow 0$ の時 h が波高 H に比例すること、式(2)より斜面勾配 $\cot \theta$ が一定の時 N_s も一定であることから、 H は $D(S_r - 1)$ に比例する。よって、この場合 $h = aD(S_r - 1)$ (a : 定数) となり、これを式(6)に代入すると、次式が得られる。

$$F_r = \frac{H}{\sqrt{2aD(S_r - 1)}} = \frac{1}{\sqrt{2a}} N_s \quad \dots\dots\dots (7)$$

従って、Hudson の仮定では F_r は N_s に比例する。

一方、規則波による遡上実験で得られた遡上波先端部の平均最大流速 $\bar{V}_{\max}$ の変化を図-6 に示す。ここに、 $\bar{V}_{\max}$ は遡上波の最大遡上流速と最大流下流速の平均値である。縦軸は $\bar{V}_{\max}$ を波速 C で無次元化し、横軸は $A = \pi(H/L) \cot h(2\pi h/L)$ をとった。これより、 $\bar{V}_{\max}/C$ は h/L が大きい時若干大きくなるが、 A の増加とともに増加し、その関係は最小自乗法により次式で近似で

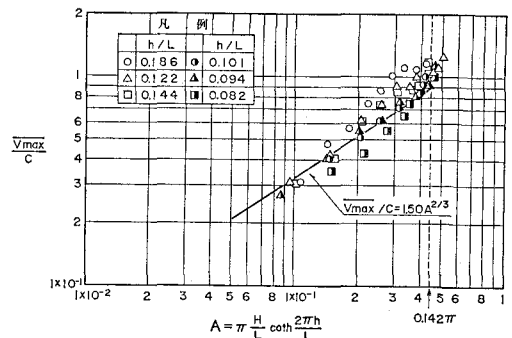


図-6 平均最大遡上波流速の変化(規則波)

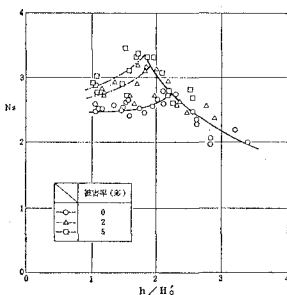


図-4 N_s と h/H_0' の関係

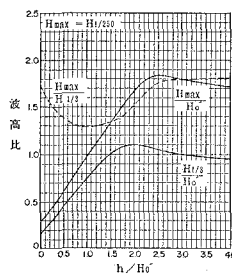


図-5 代表波高の変化

きる。

$$\begin{aligned}\overline{V_{max}} &= 1.50C \left(\pi \frac{H}{L} \coth \frac{2\pi h}{L} \right)^{2/3} \\ &= 1.06 \sqrt{gH} \left(\pi \frac{H}{L} \coth \frac{2\pi h}{L} \right)^{1/6} \dots (8)\end{aligned}$$

図より、 $A > 0.142\pi$ では $\overline{V_{max}}/C$ が急激に増加するが、これは波が斜面堤の直前で碎波するためである。また、 $A = 0.142\pi$ の場合、Miche の与えた規則波の碎波限界式と一致する。ここで $A_0 = 0.142$ とする。

式(8)を式(4)に代入し、式(7)の関係より、

$$N_s = b \left(\frac{H}{D(S_r - 1)} \right)^{1/2} \left(\pi \frac{H}{L} \coth \frac{2\pi h}{L} \right)^{1/6} \dots (9)$$

が得られる。そこで、著者らの不規則波によるブロック安定実験結果について、被害率 $n = 1\%$ の時の安定定数 $(N_s)_{exp}$ と、式(9)の右辺から求まる $(N_s)_{cal}$ を比較すると、定数 $b(1.06 \sqrt{2a})$ の平均値は2.03であり、この時の $(N_s)_{exp}$ と $(N_s)_{cal}$ の関係は図-7 となった。図中には、沓・堀川⁽¹⁹⁸³⁾と谷本⁽¹⁹⁸⁵⁾のデータも挿入した。両者の誤差は $\pm 5\%$ 以内に全データの約86%が含まれ、良好な一致を示した。

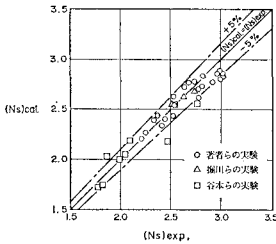


図-7 $(N_s)_{exp}$ と $(N_s)_{cal}$ の比較
(被害率 $n = 1\%$ の場合)

この結果から式(9)は不規則波の場合も成り立つと仮定し、式(9)の H, L を H_m, L_m に置き換え、左辺に $H_m/D(S_r - 1)$ を代入し変形すると、

$$\frac{H_m}{D(S_r - 1)} \left(\frac{L_m}{\pi H_m} \tanh \frac{2\pi h}{L_m} \right)^{1/3} = 4.12 \dots (10)$$

となる。この左辺を新たに N_s^* と置く。

$$N_s^* = \frac{H_m}{D(S_r - 1)} \left(\frac{L_m}{\pi H_m} \tanh \frac{2\pi h}{L_m} \right)^{1/3} \dots (11)$$

式(11)において、 $h \rightarrow 0$ の場合、 h が H_m に比例することも考慮すると、

$$N_s^* = \frac{H_m}{D(S_r - 1)} \left(\frac{2h}{H_m} \right)^{1/3} = c \frac{H_m}{D(S_r - 1)} \dots (12)$$

となる。ここに、 c は定数である。右辺は Hudson の N_s の形と一致する。一方、式(11)において $h \rightarrow \infty$ の場合、

$$\begin{aligned}N_s^* &= \frac{H_m}{D(S_r - 1)} \left(\frac{L_m}{\pi H_m} \right)^{1/3} \\ &= \frac{1}{\pi^{1/3}} \cdot \frac{(H_m^2 L_m)^{1/3}}{D(S_r - 1)} \dots (13)\end{aligned}$$

となり、Gravesen の N_s^* の形と一致する。これより、Hudson の N_s は堤体位置で碎波が発生する極浅海域を、Gravesen の N_s^* は非碎波領域となる深海域を対象とした、極限における安定定数であると考えられる。一方、式(11)は浅海域を対象とする安定定数と言える。

式(11)は規則波の非碎波条件から求めた式である。碎波条件の場合には前述のように Hudson の安定定数が適当と考えられるが、この場合両式の適用範囲を決めなければならない。規則波に対する非碎波条件の上限は $A_0 = 0.142$ である。一方、不規則波の場合 $F = A/\pi = (H/L) \cot \theta (2\pi h/L)$ において波長 L は L_m とする。波高 H については、著者⁽¹⁹⁸⁷⁾ が求めた、同じ被害率を与える規則波と不規則波との波高比の平均値 $(H/H_{1/3})^* \approx 1.3$ より $H = 1.3H_m$ を用いる。不規則波の有義波高相当の碎波限界として、 $A_0 = 0.142/1.3 = 0.11$ となるが安全側にとり $A_0 = 0.1$ とする。そこで、被害率 $n = 1\%$ に対するブロックの安定定数は、

(i) $F \leq 0.1$ の時

$$N_s^* = \frac{H_m}{D(S_r - 1)} \left(\frac{L_m}{\pi H_m} \tanh \frac{2\pi h}{L_m} \right)^{1/3} = S_{D=1} \dots (14)$$

(ii) $F > 0.1$ の時

$$N_s^* = \alpha_{D=1} \frac{H_m}{D(S_r - 1)} = S_{D=1} \dots (15)$$

となる。ここで、 $S_{D=1}$ は式(10)より4.12であるが安全側にとり $S_{D=1} = 4.00$ とする。 $\alpha_{D=1}$ は1.47である。

また、 $n = 0\%$ の場合は、 $A_0 = 0.093$ 、 $S_{D=1} = 3.80$ 、 $\alpha_{D=1} = 1.51$ であった。式(14)、式(15)より $n = 1\%$ の時の N_s^* と F の関係を示すと図-8 となり、実験値と N_s^* とは良く一致している。

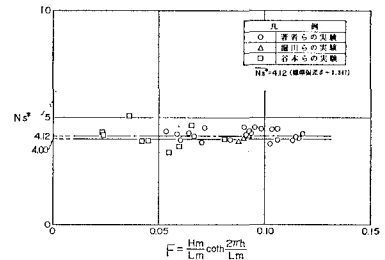


図-8 N_s^* と F の関係 ($n = 1\%$ の時)

7. 消波ブロック重量の新算定式の提案

前章で誘導した N_s^* を基に斜面勾配 $\cot \theta$ と海底勾配 $\tan \alpha$ を取り入れ、被害率 $n = 0, 1\%$ に対する新ブロック重量算定式への拡張を試みた。著者らの実験では、 $\cot \theta = 4/3$ 、 $\tan \alpha = 1/30$ で固定した。そこで、斜面勾配の効果は Hudson の実験結果を基に N_s が $\cot \theta$ の $1/3$

乗に比例する関係を式(14)、式(15)に導入する。

また、海底勾配の効果については日本テトラポッド例などで行なった36例の規則波実験結果(1976)から検討した。実験時の堤体断面はほぼ施工断面であるため、ブロックの安定性と被害率の関係が明かでないケースが多い。

これらの実験結果から、実験より求まる N_s^* と海底勾配 $\tan \alpha$ の関係は図-9 となった。縦軸は実験結果の N_s^* と $n=0\%$ の時の $(N_s^*)_{cal}$ との比である。 $n \geq 0\%$ の黒丸のデータについて見ると、海底勾配が急な程 $N_s^*/(N_s^*)_{cal}$ は低下しており、ブロックは不安定となると言える。そこで、 $\tan \alpha < 1/30$ の場合に安全側となるように次式で近似した。

$$\left. \begin{aligned} \frac{N_s^*}{(N_s^*)_{cal}} &= 0.57 \tan \alpha^{-1/6} \quad (\tan \alpha \geq 1/30 \text{ の場合}) \\ \frac{N_s^*}{(N_s^*)_{cal}} &= 1.0 \quad (\tan \alpha < 1/30 \text{ の場合}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

そこで、 $\cot \theta$ の効果と式(16)を式(14)、式(15)に考慮すると、次式のブロック重量算定式が得られた。

(i) $F \leq A_b$ の時

$$W = \frac{\gamma_r H_m^3 L_m}{K_{D1} (S_r - 1)^3} \cdot \frac{(\cot \alpha)^{0.5}}{\cot \theta} \tanh \frac{2\pi h}{L_m} \dots\dots\dots (17)$$

(ii) $F > A_b$ の時

$$W = \frac{\gamma_r H_m^3}{K_{D2} (S_r - 1)^3} \cdot \frac{(\cot \alpha)^{0.5}}{\cot \theta} \dots\dots\dots (18)$$

ただし、 $\cot \alpha > 30$ の場合 $\cot \alpha = 30$ とする。 $n=0\%$ の時 $A_b=0.093$ 、 $K_{D1}=708$ 、 $K_{D2}=65.5$ 、 $n=1\%$ の時 $A_b=0.10$ 、 $K_{D1}=826$ 、 $K_{D2}=82.8$ である。図-10 は有義波高とブロック重量の関係の一例である。

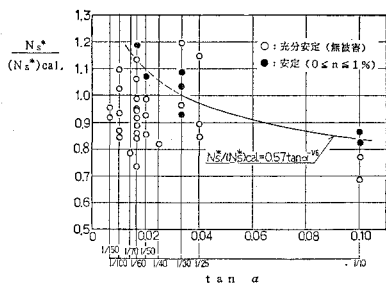


図-9 海底勾配の影響

8. あとがき

本研究では、消波ブロック安定実験およびブロック被覆斜面の遡上実験より、ブロックの安定性やその安定定数について検討した。検討結果は、以下のとおりであ

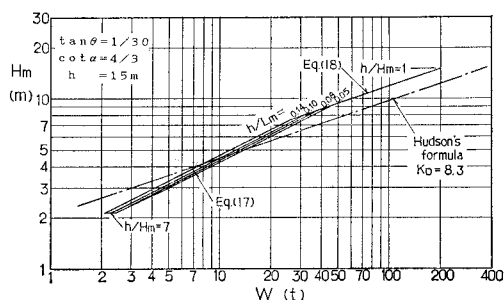


図-10 波高 H_m とブロック重量 W の関係 ($n=1\%$)

る。

(1) 入射波に対する碎波・非碎波領域では波群性の高い波程ブロックの不安定性を助長する傾向にあるが、碎波～非碎波の遷移領域では1波1波の碎波による衝撃力がブロックの安定性を左右すると考える。

(2) 堤体の設置水深に対するブロックの安定性は、碎波領域と非碎波領域で傾向が異なることがわかった。

(3) Hudson の N_s は極浅海域条件、Gravensen の N_s^* は深海域条件を対象とした安定定数であり、本研究で求めた安定定数はこれら結び付ける浅海域に対するものであると考えられる。

(4) 今回求めた安定定数 N_s^* を基に、海底勾配やブロック被覆斜面の勾配の効果を取り入れた、新たな消波ブロック重量算定式を誘導した。

参考文献

- 奥野敏彦・佐藤啓二 (1987): 消波堤被覆ブロックの安定性に及ぼす入射波の波群効果に関する実験的研究, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 512~516.
- 谷本勝利・原中祐人・山崎一雄 (1985): 不規則波に対する消波ブロックの安定性に関する実験的考察, 港研報告, 第24巻, 2号, pp. 85~121.
- 日本テトラポッド(株) (1976): テトラポッドの所要重量について (水理模型実験例からの統計的考察), 27 p.
- 沱 期綿・渡辺 晃・堀川清司 (1983): 不規則波による消波ブロック被覆堤の安定実験, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 352~356.
- 柳 青魯・榎木 亨・金 崇慶・張 善徳 (1986): 不規則波力を導入した捨石堤の新設計手法, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 372~376.
- Ahrens, J. P. (1984): Reef type breakwaters, Proc. of the 19th Coastal Eng. Conf., pp. 2648~2662.
- Gravensen, H., Jensen, O. J., and Sorensen, T. (1979): Stability of rubble-mound breakwaters, Conf. on Coastal Structures'79.
- Hudson, R. Y. (1959): Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters, Jour. of Waterways and Harbor Div., WW3, 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.