

消波ブロック被覆工の波力低減率とその評価指標

稲垣 圭二*・野口 雄二**・服部 昌太郎***

1. ま え が き

消波ブロック被覆工の波力低減効果は、被覆堤と直立堤の最大波力、 F_m と F_{0m} との比で定義される、波力低減率 $\lambda(=F_m/F_{0m})$ によって通常評価される。 λ には入射波特性、被覆工断面形状、消波ブロック特性に加えて種々の現象が関係するため、従来の実験的研究の多くは case study 的色彩の強いものとなっている。

これらの研究成果によると波力低減率は 0.8~1.0 と報告されているが^{1),2),3)}、消波ブロック寸法や被覆工断面形状等の λ に及ぼす効果は十分には解明されていない。本研究は被覆工の波力低減効果に対する評価指標を提案し、これによって被覆工の波力低減率を総合的に検討すること目的としたものである。

2. 波力低減評価指標の決定

透過体内を進行する波の波高低減に関する理論的研究は、近藤、Madsen・White 等によってなされている⁴⁾。これらの研究成果に基づき、以下の関係要素を取上げて次元解析により評価指標を導く。

- (1) 入射波特性〔波高： H ，周期： T ，水深： h 〕
- (2) 被覆工断面形状〔天端高： h_e ，捨石マウンド上水深： h_d ，静水面位置での幅： l ，のり面勾配： i_b 〕（図-1 参照）
- (3) 消波ブロック〔代表寸法： B ，空隙平均寸法： B_v ，空隙率： ϵ ，形状係数： S （無次元）〕

被覆堤の作用波力が被覆工内の重複波（非越波）によるものとし、堤体の平均最大波圧 $p_m(=F_m/h_d, F_m$: 堤体単位幅当りの波力) の表示式として、次元解析より式 (1) をうる。

$$\begin{aligned} \phi_m &= \frac{p_m}{\rho(H/T)^2} \\ &= f\left(\frac{h}{H}, \frac{h_d}{H}, \frac{gT^2}{H}, \frac{l}{H}, \frac{B_v}{H}, \frac{\mu T}{\rho H^2}, \epsilon, S\right) \end{aligned} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 ϕ_m : 無次元最大波力、 ρ と μ : 水の密度と粘性

係数、 g : 重力加速度。海底勾配の効果は、被覆堤設置地点での波高を使用すること、被覆工のり面勾配 i_b は後述の実験で一定 ($i_b=1:4/3$) としていることから、式 (1) では考慮されていない。式 (1) で $(H/B_v)(\mu T/\rho H^2)$ は $\nu/(B_v U)$ [ν : 水の動粘性係数、 U : 代表流速] と書け、ブロック寸法に対するレイノルズ数の逆数となることから、ブロック形状係数 S に含まれると考える。式 (1) に長波近似を適用すると、

$$\phi_m = \frac{F_m}{\gamma^0 H^2} = \alpha(\epsilon) S(R_e) \frac{H}{h} \frac{h_d}{h} \frac{l}{B_v} \frac{L}{L_0} \dots\dots(2)$$

ここで、 $\alpha(\epsilon)$: 空隙率の関数、 L と L_0 : 水深 h と深海域での波長。被覆工空隙の平均寸法 B_v は、 ϵ と B によって $B_v \sim [\epsilon/(1-\epsilon)]^{1/3} B$ と表わされ、また $L/L_0 = \tanh kh$ (k : 波数) の関係によって式 (2) は、

$$\begin{aligned} \phi_m &= A \cdot S(R_e) \cdot \left(\frac{1-\epsilon}{\epsilon}\right)^{1/3} \frac{H h_d}{h^2} \frac{l}{B} \tanh kh \\ &= A \cdot S(R_e) \cdot K \dots\dots(3) \end{aligned}$$

ここで、 A : 比例定数、上式で $[(1-\epsilon)]^{1/3}(l/B)$ は、被覆工空隙の水平方向の平均数、すなわち透過波高低減に関係する被覆工内流路の屈曲度数⁵⁾に相当する因子と、また $\tanh kh$ は波力の平均化に対する補正とみなせる。 $S(R_e)$ は実験より決める。

波力低減評価指標として式 (3) の K を提案するが、後述の実験範囲内では h_d/h の効果が明確に認められないため、 h_d/h の項は考慮しないこととした。

3. 実験装置と実験方法

片面ガラス張り二次元波動水槽 (1 m×1 m×50 m) 内に、勾配 1/50 の不透過斜面を設置して実験を行った。実験水槽は、波力測定用と入射波測定用に隔壁で二分割

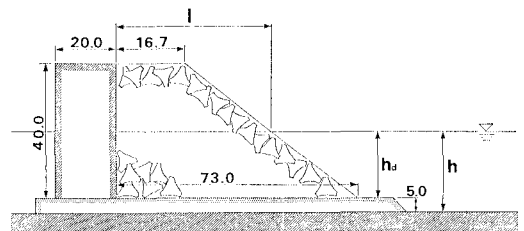


図-1 模型被覆堤形状 (実験-2・3) (単位: cm)

* 中央大学大学院土木工学専攻科
** 正会員 日本テトラポッド(株)
*** 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

した。模型被覆堤（図-1）は、平均粒径 13 mm の砕石マウンド（高さ 5 cm）上に設置した。直立堤体（20 cm×46.6 cm×40 cm、空中重量 20 kg）の背面にビーム式波力検出装置を取付けた。波力検出ビームは断面 40 mm×70 mm、長さ 100 cm の角鋼で、堤体着装時の固有振動数は 13 Hz ($h=25$ cm) である。この装置の詳細は、文献 6) に記載されている。

被覆堤への入射波高は、捨石マウンドのり先と堤体前面の同一断面の入射波測定用水槽内と、一様水深部の三地点で容量式波高計によって測定した。実験結果の解析には、捨石マウンドのり先での進行波の波高を用いた。波力測定は、模型被覆堤前面での水面変動がほぼ定常となる、被覆堤への入射実験波の第 6～12 波の範囲で行うこととした。

本研究での実験内容と実験条件を以下に記す。

(1) 実験-1 被覆工の波力低減効果の評価基準となる直立堤の作用波力

(2) 実験-2 被覆ブロック寸法（重量）の効果

表-1 の実験条件に示す、大きさの異なる 4 種類の同一形状のブロックを用いた実験を行う。被覆ブロックの安定を重視して、計算重量より大型のブロックが使用される傾向がある。しかし、ブロックの大型化によって生ずる波力低減効果の低下に関しては、十分な検討がなされていない。被覆工断面形状は図-1 に示される。

(3) 実験-3 被覆ブロック形状と空隙率の効果

形状と空隙率が異なる 4 種類のブロックを用い実験を行う。この実験により本研究で提案する評価指標の妥当性が確かめられるとともに、ブロック代表長 B の決定法が定まる。被覆工断面は実験-2 と同じである。表-1 中の Re は、本実験でのレイノルズ数の範囲である。

表-1 実験条件と使用ブロック

	h (cm)	T (s)	H (cm)	Re ($\times 10^3$)	種類	ϵ	B (cm)
実験-1	20		2~15	—	直立堤	—	—
	25		1.5~19				
実験-2	20	1.46	2~17	8~80	A	0.50	11.3
	25	2.20	2~20	3~76			
実験-3	20	1.83	2~18	5~68	A	0.50	7.7, 11.3
					B	0.56	8.2
					C	0.58	8.4
	25		2~22	5~68	D	0.60	7.0

4. 実験結果

4.1 直立堤の波力（実験-1）

直立堤に作用する最大波力 F_{0m} と入射波波高 H と関

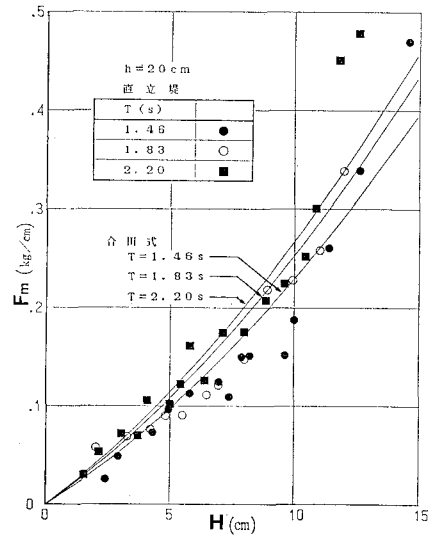


図-2 直立堤の作用波力と入射波高 ($h=20$ cm)

係を、 $h=20$ cm の場合について示したものが図-2 である。図中の実曲線は、合式⁷⁾による計算結果である。実験結果は合式より若干大きい波力を示している。入射波高が $H>10$ cm ($H/h>0.5$) では波力形態の変化による実験波力の増大が認められるが、両者の一致の程度は比較的良好といえる。

4.2 ブロック寸法と入射波周期の効果（実験-2）

ブロック代表長 B の効果を示す実験結果例として、 $h=25$ cm, $T=1.83$ s の場合を図-3 に示す。図-3 は無次元波力 ϕ_m と相対波高 H/h との関係を示し、直立堤の実験結果と合式の計算結果とが比較のため記入さ

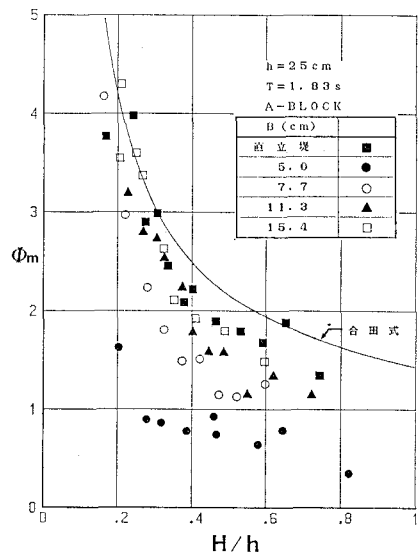


図-3 ブロック寸法の効果 ($h=25$ cm, $T=1.83$ s)

れている。直立堤の実験結果は合田式とほぼ良好な一致を示し、また被覆堤の実験結果は合田式と同様の傾向を示す。図-3より、ブロック代表長 B が減少すると ϕ_m も減少することが認められる。

図-4は、入射波周期の ϕ_m に及ぼす効果を検討するため、 $B=11.3\text{ cm}$ 、 $h=25\text{ cm}$ に対して3種類の入射波周期について、 ϕ_m と H/h との関係をプロットしたものである。図-4の実験結果より、入射波周期とともに被覆堤波力が増大すること、いいかえれば被覆工の波力低減効果が減少することが認められる。

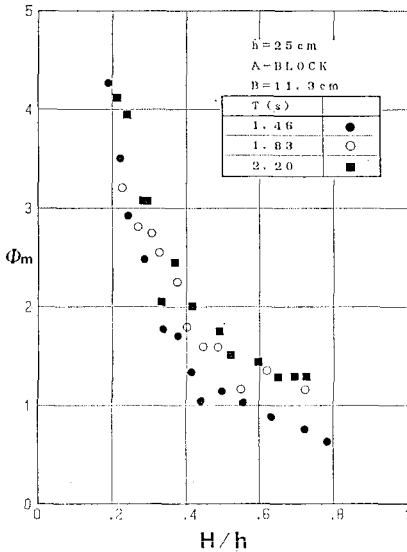


図-4 入射波周期の効果 ($B=11.3\text{ cm}$, $h=25\text{ cm}$)

4.3 ブロック形状と空隙率の効果 (実験-3)

実験結果例として、 $h=25\text{ cm}$ 、 $T=1.83\text{ s}$ の場合を図-5に示す。図中には直立堤の実験結果と合田式の計算結果が示される。各ブロックの代表長がほぼ等しい場合の ϕ_m と H/h の関係には明瞭な差が見られない。これは、図-5ではブロック形状と空隙率の違いが考慮されていないことによる。空隙率の効果を出すため、式(3)の評価指標 K より ε の効果を除いた $K_1=(H/B)/(l/B) \tanh kh$ と ϕ_m との関係をプロットしたものが、図-6である。ブロック代表長として各ブロックの公称ブロック高を用いると、実験結果の整合性が弱まる。この欠点を除くため、ブロック代表長として $B=(a \cdot b \cdot c)^{1/3}$ [a , b , c : ブロックの長・中・短長] で定義される平均長を使用している。実験結果より空隙率 ε が小さいブロックほど ϕ_m が小さくなることが認められ、ブロックの平均長を採用したことから本実験の範囲ではブロック形状の効果は僅かであると考えられる。

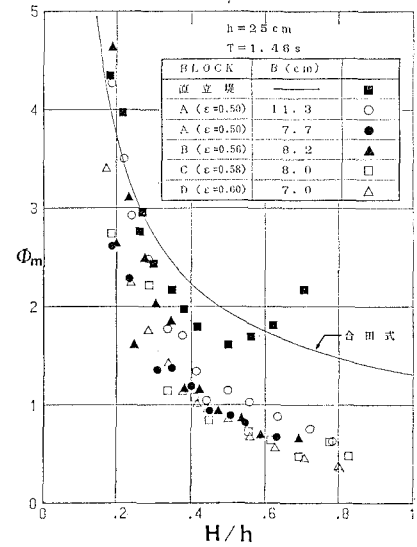


図-5 ブロックの種類が異なる場合の実験結果

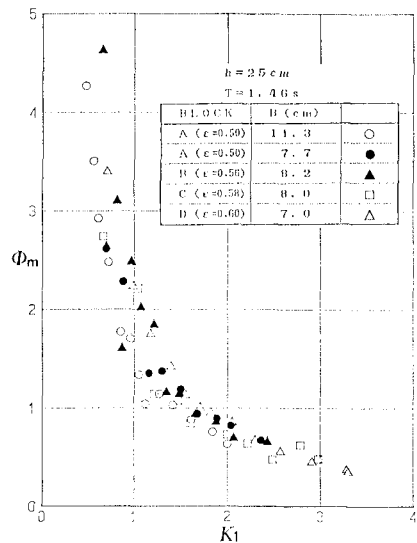


図-6 空隙率の効果に対する実験結果

5. 無次元波力 ϕ_m と評価指標 K

被覆堤に作用する波力に関する入射波特性、被覆工断面形状、および消波ブロック特性を取上げ、その効果について検討を行う。

これらの諸要素を包括した被覆堤波力の評価指標 K [式(3)]の妥当性を検討するため、 ϕ_m と K との関係を前出の図-3と図-5の実験結果に対して示したものが、図-7と8である。図-7, 8には微弱な組織的傾向が残存しているが、図-3, 5と比較すると実験値は非常によくまとまっている。被覆堤に対する ϕ_m と H/h の

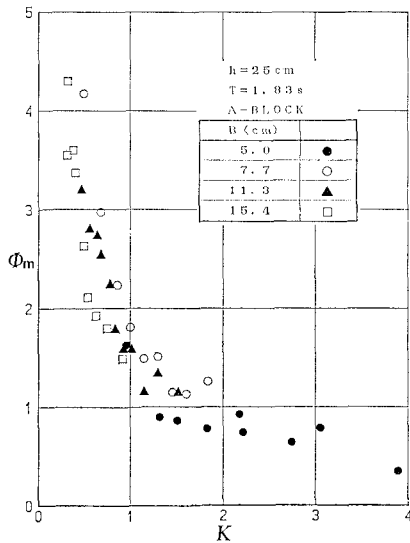


図-7 無次元波力と評価指標 (実験-2)

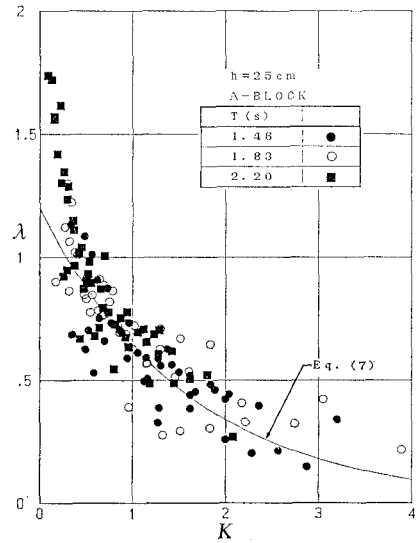


図-9 波力低減率と評価指標 (実験-2)

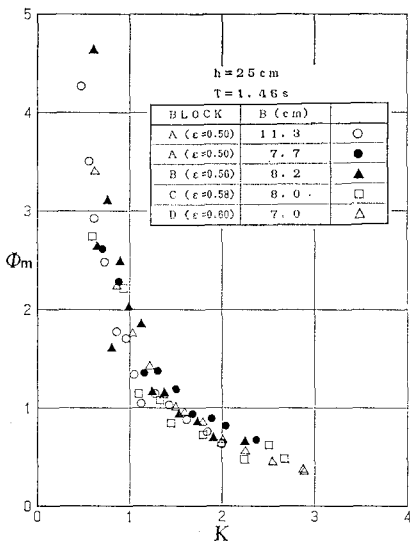


図-8 無次元波力と評価指標 (実験-3)

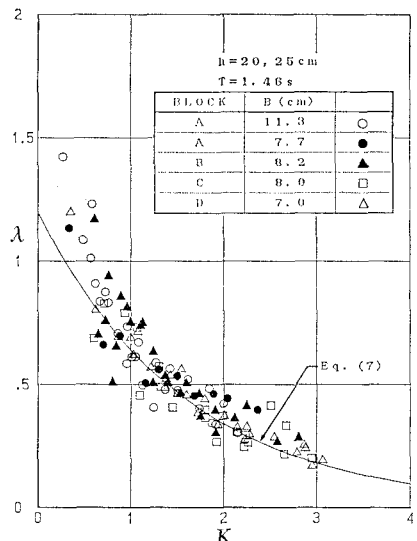


図-10 波力低減率と評価指標 (実験-3, T=1.42 s)

実験結果に見られた。波力低減効果に関与する各要素のもたらす傾向が統一され、被覆工の波力低減効果は評価指標 K によって総合的に評価しうることが認められる。

6. 被覆工の波力低減率

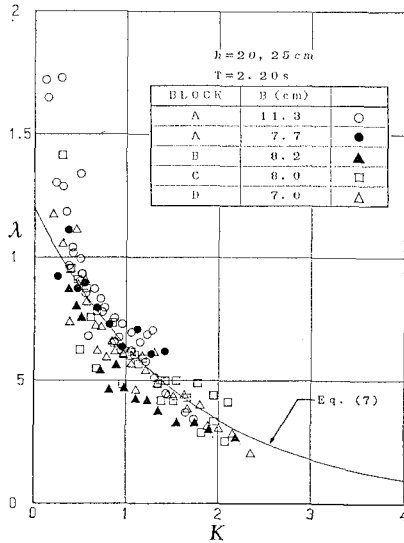
4節で示した直立堤の無次元波力の実験結果と合田式による計算結果とが良好な一致を示したことから、被覆堤の波力計算が合田式の準用によりなされていることから、 ϕ_m の実験値と合田式による計算値との比で計算される波力低減率 λ に対して検討を行う。

図-9は実験-2の $h=25$ cm の場合の実験結果を入

射波周期によって分類し、 λ と K との関係をプロットしたものである。図-10と11は、実験-3の $h=20$ cm と 25 cm の実験結果をまとめて、 $T=1.43$ s と 2.20 s の場合の λ と K との関係を示している。

本実験では、 $h=20$ cm に対して $h_a/h=0.75$ 、また $h=25$ cm では $h_a/h=0.80$ と h_a/h の変化が僅かであるため、評価指標 K に及ぼす h_a/h の効果は図-10, 11に見られるように明確でない。したがって、 K の算定ではこの項の効果は考慮されていない。

透過体内を進行する波の波高は、進行距離とともに指数関数的に低減する。この透過波が堤体前面で完全反射

図-11 波力低減率と評価指標 (実験-3, $T=2.20$ s)

する場合、堤体に作用する最大波力 F_m は微小振幅長波を仮定すると、式(4)のように近似される。

$$F_m = \gamma_0 (1 - K_R) H h e^{-K_S l} \left[1 + \frac{(1 - K_R)}{2} \frac{H}{h} e^{-K_S l} \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 K_R : 被覆工前面での反射率、 K_S : 波高減衰係数で被覆工の間隙率、抵抗係数等の関数、 l : 被覆工幅、 γ_0 : 水の単位体積重量。

同様に直立堤の最大波力 F_{0m} は、

$$F_{0m} = \gamma_0 H h \left[1 + \frac{1}{2} \frac{H}{h} \right] \quad \dots\dots\dots (5)$$

したがって、被覆工の波力低減率 λ は $H/h \ll 1$ とすると、

$$\lambda \doteq \beta (1 - K_R) e^{-K_S l} \quad \dots\dots\dots (6)$$

β : 比例定数

となる。

図-9～11の実験結果によると、 $0 < K < 0.6$ では波力低減率が $\lambda > 1$ となっている。この原因を検討した結果、(1) 入射波高が小さい場合には、波力測定値の SN 比による誤差が若干関係したこと (ブロック寸法が小さい場合)、(2) l/B の値が小さい場合には、被覆工表面よりの流入水塊が堤体に衝突することにより $\lambda \doteq 1.2$ 程度まで

λ 値が増大することが確められた。

以上の事項を考慮し、また本研究で提案した波力低減評価指標が波高減衰係数にほぼ相当するものとして、式(7)で与えられる実験曲線が実曲線で図中に示されている。

$$\lambda = 1.2 \exp[-0.63 \cdot K] \quad \dots\dots\dots (7)$$

7. 結 論

消波ブロック被覆工の波力低減効果の評価指標を提案し、波力低減率との関係を検討した。以下に本研究でえられた主要な結果を示す。

- (1) 次元解析により、入射波特性、被覆工形状、ブロック特性を包括した式(3)で与えられる評価指標を提案し、実験結果より被覆堤の無次元波力と被覆工の波力低減率はともに、評価指標によって十分評価しうることが認められた。
- (2) 被覆工の波力低減率と評価指標との実験式(7)を提案した。この実験式を用いることにより、被覆四ブロック寸法(重量)に応じた被覆工幅が算定できる。
- (3) 波力低減には、被覆工幅と消波ブロック寸法との比、つぎに空隙比が関係し、ブロック形状の効果は顕著ではない。

本研究では、非越波時の消波ブロック被覆工の波力低減効果に着目したが、越波時に対しては捨石マウンドの効果とともに、被覆工の天端高と天端幅等が波力低減に関係する。現在、この条件下に対しても検討を行っている。

参 考 文 献

- 1) 広本文泰ら: 消波ブロック被覆堤に働く波浪時のブロック荷重について, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 347～351, 1983.
- 2) 谷本勝利ら: 消波ブロック被覆堤の直立部に働く不規則波力, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 485～489, 1984.
- 3) 田中寛好ら: 消波ブロック被覆堤ケーソンに作用する水平荷重の評価, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 490～494, 1984.
- 4) 服部昌太郎: 沿岸開発と波浪制御, 第11回水工学に関する夏期研修会講義集, 土木学会水理委員会, B-2-1～24, 1975.
- 5) 近藤俊郎: 透過性防波堤の伝達波, 第16回海岸工学講演会, pp. 321～327, 1969.
- 6) 服部昌太郎ら: 直立消波堤に作用する波力に関する実験, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 396～400, 1973.
- 7) 合田良実: 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技研報告, 第12巻, 第3号, pp. 31～69, 1973.