

消波ブロック被覆堤の不規則波力の低減効果

常井公一*・服部昌太郎**・野口雄二***・遠藤泰司****

1. ま え が き

消波ブロック被覆工の波力低減に関しては、これまで数多くの規則波による実験がなされ、構造物の設計施工に貴重な情報を提供してきた。著者らも、次元解析により導かれた低減波力評価指標を用いて、規則波実験によって消波ブロック被覆堤に作用する無次元最大水平波力と波力低減に対する実験式を提案した(1986)。また、線形長波理論により被覆堤の作用波力に関する理論解析を行い、評価指標による計算波力が測定結果と良好な一致を示すことを確認している(1987)。

これら従来の知見を被覆堤の耐波設計に役立てるためには、消波ブロック層の抵抗係数の決定、模型実験の縮尺効果、被覆工天端高さが関係する入射波の越波と強制碎波などの問題に加えて、不規則波に対する被覆工の消波特性を解明する必要がある。不規則波による消波ブロック被覆堤の波力実験は、これまで谷本ら(1985)によるものがあるに過ぎない。本研究では、波の不規則性が消波ブロック被覆工の消波特性に及ぼす効果とともに、規則波による著者らの実験式と理論の不規則波力に対する適用性の検討を行う。

2. 実験装置と測定方法

実験は、波力測定用と入射波測定用の水路に隔壁で二分割された片面ガラス張り二次元波動水槽(1m×1m×50m)内に、勾配1/50の不透過斜面を設置して行った(図-1)。図-2の断面形状の模型被覆堤を、平均粒

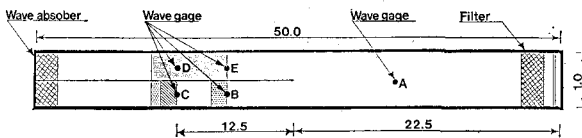


図-1 実験水槽平面図(単位: m)

径13mmの碎石を用いた高さ5cmのマウンド上に設置し、代表寸法 $B=11.3$ cmのテトラポッド(空隙率 $\epsilon=0.5$)を使用して、のり面勾配1:4/3の台形断面の消波ブロック被覆工を形成した。被覆直立堤体(20cm×46.6cm×40cm, 空中重量20kgf)に作用する水平波力は、堤体背後に取り付けられたビーム式波力計(40mm×70mm×1000mmの角鋼, 測定系の水中国有振動数13Hz)で検出した(服部ら, 1979)。水位変動測定は、水槽一様水深部、被覆堤体前面とマウンドのり先の5地点(図-1中A~E)で、容量式波高計を用いて行った。水面と波力の測定出力は、サンプリング間隔0.01sでデジタル記録計(DR-2000)に収録した後、電算処理を行った。なお、測定記録の個々の波は、ゼロダウンクロス法で定義した。

3. 不規則実験波の特性

本実験に使用した実験波は、有義周期を $T_{1/3}=1.25$ sとするBretshneider・光易型スペクトルを目標として作成した不規則波で、数値フィルタ法によって作成した造波用電圧信号を、データレコーダより造波機に入力して発生させた。実験では、波列の異なる3種類の波群(波数740波)を堤体に入射させた。

不規則波を長時間堤体に入射させると、造波板よりの再反射によって実験波の特性が変化する恐れがある。し

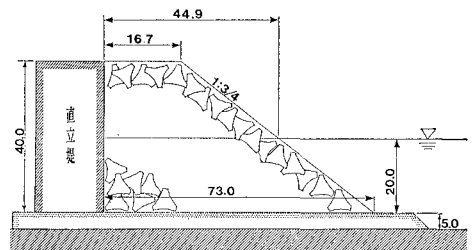


図-2 模型被覆堤断面(単位: cm)

かし、本実験で取り扱う消波ブロック被覆堤は低反射性の構造物(規則波実験によると、反射率 $K_R=0.3\sim0.4$)であり、また一様水深部(A地点、 $h=0.50$ m)での水

* 正会員 工博 中央大学大学院 土木工学専攻科(現在山形県)
 ** 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科
 *** 正会員 日本テトラポッド応用水理研究所
 **** 正会員 理博 日本テトラポッド応用水理研究所 所長

面変動測定データのスペクトルにも僅かな経時変化しか認められないことから、波動水槽内での再反射の影響は比較的低いといえる。以上の事より、本研究では 1/50 勾配斜面による入射波波列の浅水変形と摩擦によるエネルギー損失を考慮して、入射波測定用水路内の堤体設置位置 (D 地点) の通過波諸量を用いて実験結果の整理と検討を行うこととする。

A・D 二地点での不規則実験波と堤体波力の代表波量を表一に、また図一3 は前記二地点での入射波のスペクトル、図一4 は D 地点の波高・周期の確率密度分布の例である。図一3 の破線は目標スペクトル、図一4 の実線は Rayleigh 分布と周期に対する Bretschneider 分布 (1957) である。D 地点の通過波スペクトルのピークエネルギーは、水槽側壁などの摩擦と捨石マウンド上での碎波とによって A 地点に較べて若干低下するが、スペクトルは目標スペクトルと良く一致している。また、各代表波の波高と有義波高との比、 $H_{1/n}/H_{1/3}$ は、Rayleigh 分布を仮定した理論値とほぼ一致していることが確認された、しかし、図一4 に見られるように、造波機特性によって低波高成分の造波率が若干低下している。

3. 波力データの解析法

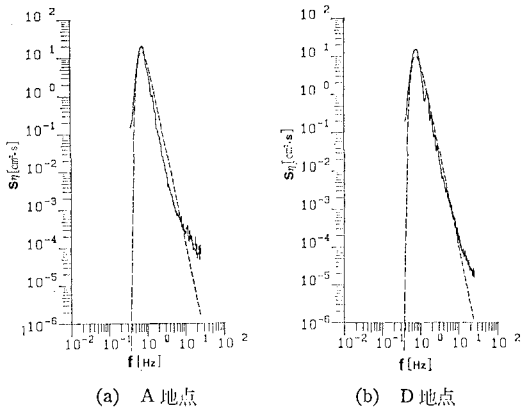
波力データの解析は、ゼロダウクロス法により識別される波力波形の一波一波に対する波別解析法によって行う。図一5 は、被覆堤の作用波力と D 地点の水位変動の同時記録の一部である。図中には、D 地点の通過波順の一波毎に番号を付け、また通過波に対応する入射波による堤体作用波力を測定記録より判定し、通過波と同じ番号が付けられている。波力波番号の欠番から、ブロック被覆工の消波効果によって入射波と波力の波数に差が生じていることがわかる。そこで、谷本ら (1985) と同様に、この波数差だけ波力ゼロの波を波力データに付け加えて、表一1 の不規則波力ピーク値の代表量 ($\hat{F}$) の計算を行った。

図一6 は、波力スペクトルの一例で、波力測定系の固有振動数を考慮して、スペクトル計算では 20 Hz 以上

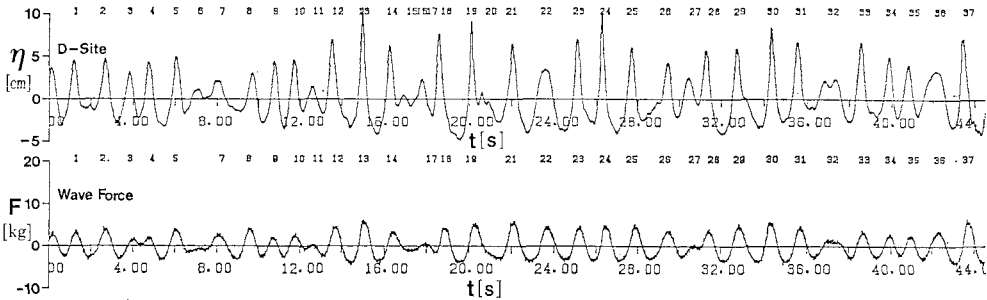
の成分をカットオフフィルターによって除去している。図一3 の D 地点通過波スペクトルとの比較より、波力スペクトルのピーク周波数が若干低周波側に移行してピークエネルギーは増大するが、高周波側の波力エネルギー

表一1 実験波と波力の代表波諸量

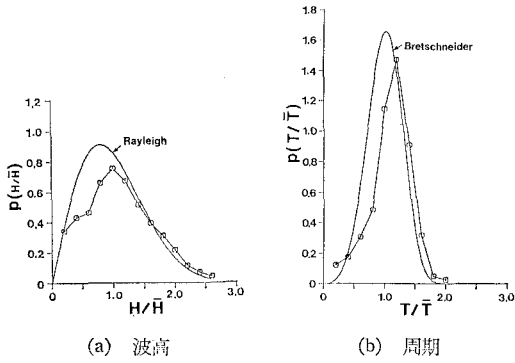
Exp.	地点	平均波		有義波		1/10 最大波		最大波	
		$\bar{H}$	$\bar{T}$	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	$H_{1/10}$	$T_{1/10}$	H_{max}	T_{max}
		(cm)	(s)	(cm)	(s)	(cm)	(s)	(cm)	(s)
1	A	6.77	1.13	11.21	1.28	14.23	1.25	19.38	1.29
	D	6.18	1.15	10.04	1.30	12.71	1.30	16.06	1.41
2	A	6.12	1.10	10.23	1.26	12.94	1.25	20.13	1.17
	D	6.07	1.17	9.56	1.30	12.11	1.29	15.08	1.38
3	A	6.77	1.13	11.21	1.28	14.23	1.28	20.02	1.23
	D	6.69	1.21	10.56	1.32	13.11	1.32	16.06	1.49
Exp.	波力	$\hat{F}_H$		$\hat{F}_{H1/3}$		$\hat{F}_{H1/10}$		$\hat{F}_{Hmax}$	
		(kgf/m)		(kgf/m)		(kgf/m)		(kgf/m)	
1		8.28		11.58		13.39		15.64	
2		6.93		9.89		11.63		14.29	
3		7.36		10.64		12.51		15.53	



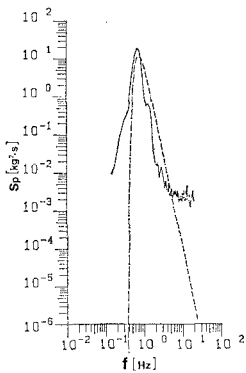
図一3 A・D 地点の入射波スペクトル (Exp. 1)



図一5 D 地点の水位変動と波力の同時記録例



図—4 D地点通過波の波高と周期の確率分布
(Exp. 1)



図—6 波力スペクトル例 (Exp. 1)

ーに顕著な低下が認められる。このことは、一般に認められている消波ブロック被覆工の消波特性を裏づけるものであると言える。

5. 実験結果とその考察

著者らは、規則波による実験を行い、消波ブロック被覆工の低減波力指標 K によって無次元最大水平波力 ϕ_m と波力計算に合田の式を準用する場合に用いられる波力低減率 λ の、実験式 (1) と (2) を提案している (1986)。

$$\phi_m = F_{Hm} / \rho g H^2 = 1.5 K^{-1.22} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\lambda = 1.2 \text{Exp}[-0.63K] \quad \dots\dots\dots (2)$$

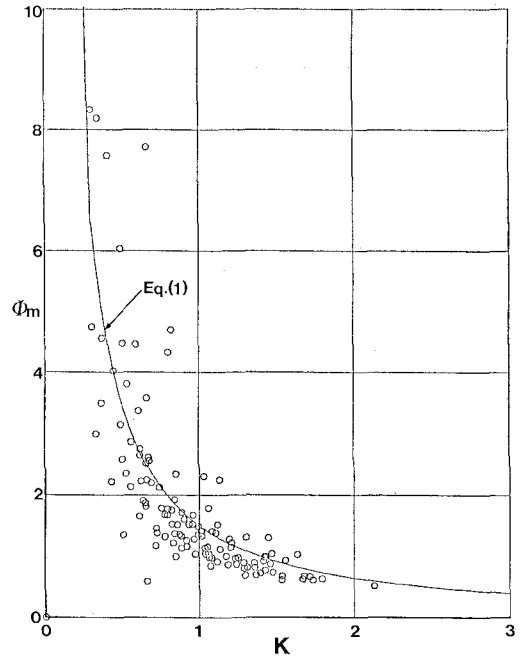
ここで、 $K = \{(\epsilon - 1)/\epsilon\}^{1/3} (Hl/hB) \tanh kh$ 、 H : 波高、 h : 水深、 B : ブロックの代表寸法、 l : 静水面位置での被覆工幅、 k : 波数、 F_{Hm} : 堤体単位幅当りの最大水平波力、 ρ : 水の密度、 g : 重力の加速度。

5.1 波別解析による検討

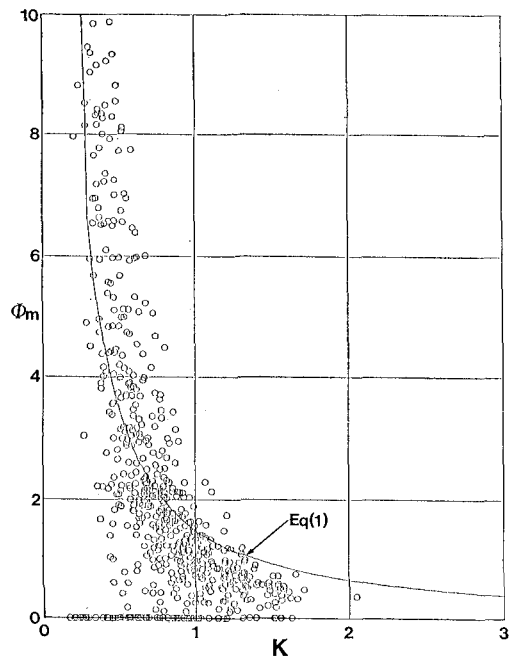
不規則波力の測定結果に対する式 (1) と (2) の適用性を検討するには、波力との一対一の対応が確認できる D 地点の通過波に対する K 値と波力との関係を検討することが必要となるが、測定記録に基づくこの確認処理は非常に煩雑な作業である。

図—7 は、通過波と波力との一対一の対応が付けられた 140 波に対する測定データによる ϕ_m と K との関係を示す。図—8 は対応処理を行わない場合 (740 波) の実験結果例で、実線は式 (1) である。

図—8 では実験値のばらつきが非常に大きい、対応



図—7 ϕ_m と K 関係 (対応処理を行った場合)



図—8 ϕ_m と K の関係 (対応処理を行わない場合)

処理操作を行った図-7では実験結果は式(1)と比較的良好な一致を示している。特に K 値が大きい、すなわち入射波高が大きい場合に一致の傾向は強まる。図-9は、図-7の実験結果に対する λ と K との関係を示したもので、規則波実験と同様に実験値のばらつきは $\phi_m \sim K$ より大きくなっているが、実験値は実線の実験式(2)と比較的良好な一致を見せている。

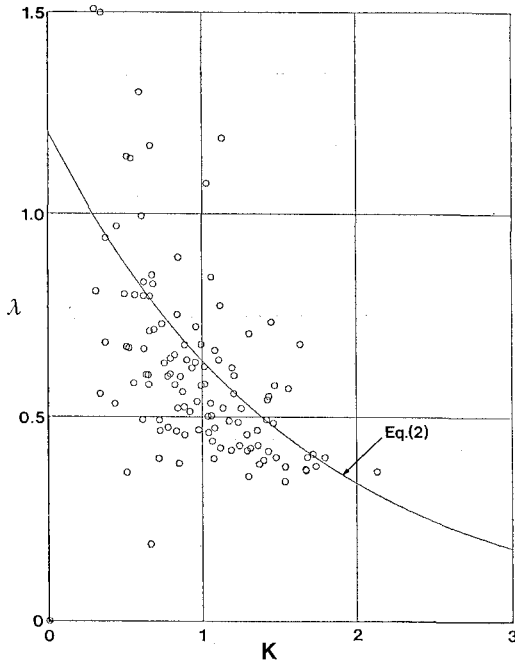


図-9 λ と K の関係(対応処理を行った場合)

5.2 代表波量による検討

図-10は、 D 地点の通過波と波力間のクロススペクトルより計算した両者間の伝達関数 $H_{HF}(f)$ である。通過波周期の分散は $\sigma_T=0.32$ sで、 $(T_{1/3} \pm \sigma_T)$ に対する周波数域は $0.6 < f < 1.1$ となる。この周波数域での $H_{HF}(f)$ は周波数 f によって若干変化するが、1.2

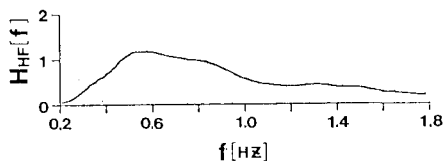


図-10 D 地点通過波と波力間の伝達関数

$> H_{HF} > 0.8$ であり、比較的良好な線形関係が両者間に存在することが認められる。そこで、表-1の各代表波量より計算される値とピーク波力の代表量との関係を、 ϕ_m と λ についてプロットしたものが図-11と12である。この実験結果に見られるように、代表波量による

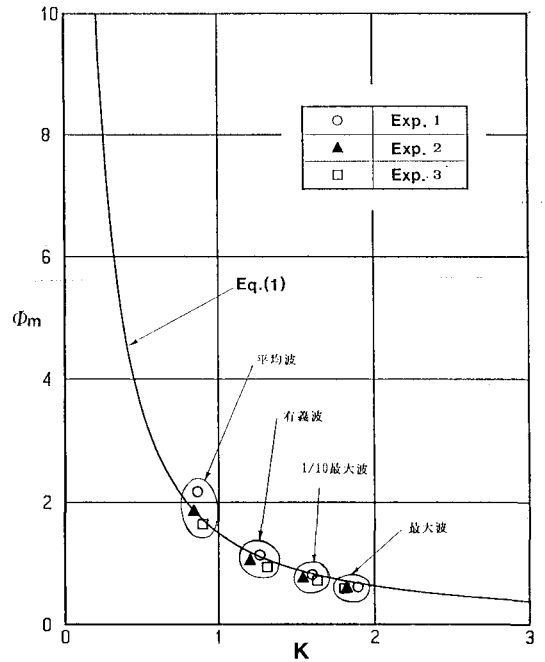


図-11 代表波量による $\phi_m \sim K$

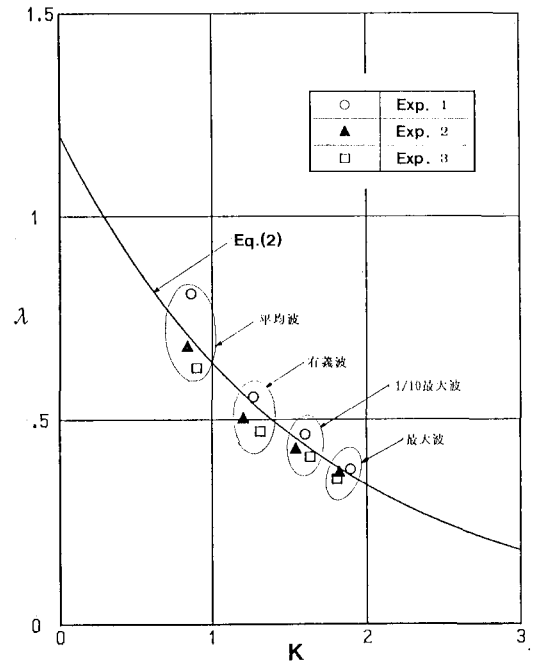


図-12 代表波量による $\lambda \sim K$

$\phi_m \sim K$ と $\lambda \sim K$ は規則波実験よりえられた実験式(1)と(2)と極めて良く一致している。

5.3 理論と実験結果との比較

著者ら(1987)が提案した線形長波理論による被覆堤に作用する最大水平波力の理論の、不規則波力への適用

表-2 ピーク波力の理論値と測定値の比較 (単位: kgf/m)

Exp.	平均波力			有義波力			1/10 最大波力			最大波力		
	理論 $\hat{F}_T$	実験 $\hat{F}_M$	$\hat{F}_T/\hat{F}_M$	理論 $\hat{F}_T$	実験 $\hat{F}_M$	$\hat{F}_T/\hat{F}_M$	理論 $\hat{F}_T$	実験 $\hat{F}_M$	$\hat{F}_T/\hat{F}_M$	理論 $\hat{F}_T$	実験 $\hat{F}_M$	$\hat{F}_T/\hat{F}_M$
1	9.14	8.28	1.10	12.17	11.58	1.05	13.28	13.39	0.99	15.28	15.64	0.98
2	9.31	6.93	1.34	12.04	9.89	1.22	13.20	11.63	1.14	15.62	14.29	1.09
3	9.76	7.36	1.33	12.47	10.64	1.18	13.58	12.51	1.09	15.97	15.53	1.03

性の検討を行う。表-1 の D 地点通過波の代表波諸量を用いて算定した堤体単位幅当りのピーク水平波力 $\hat{F}_T$ と測定値 $\hat{F}_M$ との比較を表-2 に示す。表-2 に見られるように、測定値に較べて計算値は若干過大な波力を与えるが、平均波以外の最大波、1/10 最大波および有義波に対しては、両者間の一致の程度は比較的良好と認められる。

理論計算では、入射波による被覆工内の平均水位上昇 (η_s) を考慮した被覆堤の設置水深 ($h + \eta_s$) に、入射波の波高中分面までの鉛直距離 ($\eta_c - H/2$, η_c : 波峰高) を加算した水深 ($h_E = h + \eta_s + (\eta_c - H/2)$) での台形断面被覆工幅 l_E を使用した。また、被覆層の抵抗係数も、規則波実験よりえられた関係によって算定された。これらの問題に関して、入射波の不規則性がどの様に関与するかまだ十分に解明されていないと言う重要な問題点が残されている。しかし、表-2 に見られるように、有義波より波高の大きい代表波に対しては、計算波力と測定波力とが良好な一致を示すことから、被覆堤波力の設計波に採用される比較的高波条件では、不規則波下でも規則波実験の場合に近い水理現象が発生しているものと推定される。

6. 結 論

消波ブロック被覆堤の波力とその低減効果を検討するため、Bretschneider・光易型スペクトルの不規則波による実験を行った。本研究の範囲内で認められた主な事項を以下に述べる。

1. 被覆工の消波効果により、被覆堤への入射波と波力には波数の差が生ずる。従って、不規則波力の統計量

の算定には、波力ゼロの波を波力データに付加する必要がある (谷本ら, 1985)。

2. 規則波実験による波力と波力低減係数の実験式 (1) と (2) を不規則波力に適用する場合には、入射波と波力との対応処理を行う必要がある。

3. 代表波量に対する実験式 (1) と (2) の算定波力と実験値とは良好な一致を示し、また線形長波理論による理論計算結果も、平均波量以上の入射波と不規則波力に対して十分適用しうることが認められた。

被覆ブロックの安定問題 (例えば 范・渡辺・堀川, 1983) とは異なり、消波ブロック被覆堤の波力低減効果の算定と耐波設計には、規則波による実験式と理論が十分適用できると言う、工学的に興味あることが本研究により明らかとなった。

引用文献

- 1) Bretschneider, C. L. (1959): Wave variability and wave spectra for wind-generated gravity waves, B. E. B. Tech. Memo., No. 118.
- 2) 服部昌太郎ら (1979): 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.
- 3) 范 期錦・渡辺 晃・堀川清司 (1983): 不規則波に対する消波ブロック傾斜堤の安定性に関する実験的研究, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 352~356.
- 4) 稲垣圭二・野口雄二・服部昌太郎 (1986): 消波ブロック被覆工の波力低減率とその評価指標, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 362~366.
- 5) 稲垣圭二・常井公一・服部昌太郎・野口雄二・遠藤泰司 (1987): 消波ブロック被覆堤の波力低減に関する理論的考察, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 536~540.
- 6) 谷本勝利・高橋重雄・明瀬一行 (1985): 消波ブロック被覆堤の直立部に働く不規則波力, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 485~489.