

# 波と流れの共存場に設置された低天端高の捨石マウンド 海岸構造物の安定性に関する研究

手賀夕紀子\*・小林信久\*\*・多田彰秀\*\*\*

## 1. 緒言

低天端高の捨石マウンド海岸構造物（以下低捨石マウンドと略記）は、橋脚部の洗掘防止やパイプラインの保護等、極めて広範囲の用途で築造されている。一般に、波浪に伴う流れや波・流れの相互干渉は、低捨石マウンドの安定性に影響を及ぼす重要な要因として考えられている。Vidal ら (1998) は規則波下における低天端高マウンドの被災について研究を行っているものの、波・流れの相互干渉下にある捨石の安定性に関する研究は数少なく、設計に必要となる知見も十分ではない。本研究では、波と流れの共存場（順流と逆流）に設置された低捨石マウンドの安定性に関する水理実験を行うとともに、共存場における境界層理論を用いて低捨石マウンド上の捨石の移動確率を算定する方法を提案し、その有効性を検証する。さらに、低捨石マウンドの存在による波高や流速の変化についても考察を加える。

## 2. 低捨石マウンドに関する水理実験

### 2.1 実験装置および方法

図-1 は実験装置の概要を示したものである。低捨石マウンドは水路のほぼ中央に設置されている。図中の座標は、マウンドの中心を原点として波向方向に  $x$  軸を定義した。波高計はマウンドの中心 (WG4)、マウンド堤頂の両隅部 (WG3, WG5)、マウンドの toe の両端 (WG2, WG6)、およびマウンドの toe から 35 cm の位置 (WG1, WG7) の計 7 点 (黒丸) に配置され、水面変動  $\eta(t)$  を計測した。一方、流速計は水路方向にマウンドの中心から造波板側に向かって、マウンドの中心 (CM4)、マウンドの隅部 (CM3)、マウンドの toe (CM2) とマウンドの toe から 35 cm (CM1) の計 4 点 (白丸) に設置され、流速  $u(t)$  を計測した。なお、流速の測定水深は水路底面より 18.5 cm の高さであり、隣接する流速計と波高計の間隔は 13 cm とした。マウンドに使用した捨石のふるい分けを行なった結果、図-2 に示すような粒径加積曲線を得

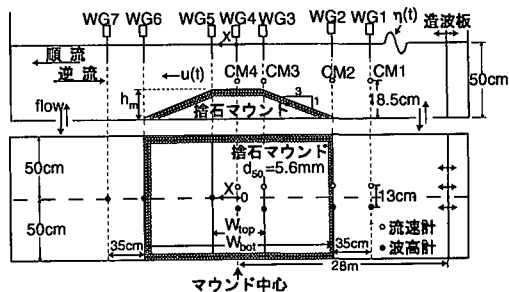


図-1 実験装置の概要

た。この曲線から累加百分率が 50% の粒径を読み取り、捨石の中央粒径  $d_{50} = 5.6$  mm を決定した。捨石の比重は  $s = 2.67$  で、水の密度は  $\rho = 1$  g/cm<sup>3</sup> であった。

水理実験は、マウンド設置後に順流または逆流の流れを発生させ、流れが定常となった後、JONSWAP スペクトルに従う不規則波を造波し、波と流れの共存場における捨石の初期運動を調べた。なお、比較のために流れ場と波動場の場合についても同様の計測を行った。波高計および流速計のサンプリング周波数は 50 Hz である。1 ケース当りの計測時間は約 5 分であった。水深は水路底面から 50 cm で一定とした。マウンド天端部の両端には着色した捨石を配置し、天端部の捨石の動きが分るようにしてある。図中のマウンドの諸量は、 $h_m$  = マウンド高さ、 $W_{top}$  = マウンド断面の堤頂幅、 $W_{bot}$  = マウンド断面の底面幅である。表-1 は、実験に用いた 2 種類の捨石マウンド (マウンド A, B) の諸量を示している。

表-2 は各実験ケースにおけるマウンド高  $h_m$ 、捨石マ

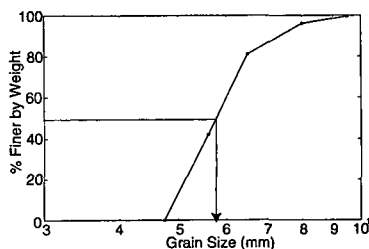


図-2 捨石の粒径加積曲線

\* 正会員 MCE 西松建設(株)技術研究所  
 \*\* 正会員 Ph.D. University of Delaware 教授 Center for Applied Coastal Research  
 \*\*\* 正会員 博(工) 長崎大学助教授 工学部社会開発工学科

表-1 マウンドの型

Mound Type	Mound Parameters		
	$h_m$ (cm)	$W_{top}$ (cm)	$W_{bot}$ (cm)
A	5	30	60
B	10	60	120

ウンドの中心部における (図-1 中の CM4 の流速計) 時間平均流速  $U = \overline{u(t)}$ , 有義波高  $H_{m0}$  およびスペクトルピーク周期  $T_p$  を整理したものである。ただし, 表中の  $L_p$  は, 水深 50 cm での  $T_p$  に対する波長である。なお, 共存場における実験での  $L_p$  は Doppler-shift を考慮して算定したものである。ここで, Doppler-shift とは, 流れの影響を考慮したものであり, 速度  $U$  で移動する相対座標系における角振動数  $\omega_r$  および波数  $k_r$  と静止座標系における角振動数  $\omega_a$  との関係  $\omega_r = \omega_a - k_r U$  を指す。表-2 に示すように, 流れ場での実験を 5 ケース, 波動場での実験を 4 ケース, 共存場での実験を 9 ケースそれぞれ行った。実験ケース名の後ろに併記した括弧内の数値は, 同じ実験条件の下で繰り返し行った実験の回数を示している。数値の併記していない実験ケースについては, 1 ケースのみで実験を終了した。表中の実験ケース名の下線と  $U$  の負号は流れが逆流であることを示している。

捨石の移動が目視観察できたものは, マウンド B の実験ケースのうち, 流れが逆流の場合と波動場の場合であった。マウンド A に関しては, すべての実験ケースにおいて捨石の移動は観察できなかった。なお, 捨石の移動が観察できた実験ケースについては表-2 の実験ケース名の後に \* を付記した。

2.2 実験結果

a) 流れ場のデータについて

ここでは, 流れ場のみのデータを用いてマウンドの存在が流速に及ぼす影響について述べる。図-3 は, マウンド B の実験結果 ( $h_m = 10$  cm) から得られた  $T_p$ ,  $H_{m0}$  および  $|U|$  をそれぞれプロットしたものである。下段の図から, 流速はマウンド上で 3 ケースともに増加していることがわかる。ここで水面が水平であると仮定すれば, マウンドの無い部分 (図-1 中の CM1) とマウンド中央部 (図-1 中の CM4) との間に連続式が成立する。この連続式より, マウンドの中央部における時間平均流速  $U$  とマウンドの無い部分における時間平均流速  $U_0$  との比は以下のように表わすことができる。

$$\frac{U}{U_0} = \frac{d}{d - h_m} \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $d$ : 水深 (=50 cm),  $h_m$ : マウンド高である。式 (1) の右辺は, マウンド A ( $h_m = 5$  cm) と B ( $h_m = 10$  cm) の場合にはそれぞれ 1.11, 1.25 であった。一方, 測定された  $U$  と  $U_0$  の値より式 (1) の左辺は, マウンド A では 1.07~1.12, マウンド B では 1.16~1.26 の範囲となっ

表-2 実験条件

Test	mound height $h_m$ (cm)	current velocity $U$ (cm/s)	$H_{m0}$ (cm)	$T_p$ (sec)	$L_p$ (m)	
Current Only	AC1	5	19.6	no wave		
	AC2	5	-19.5	no wave		
	BC1	10	22.5	no wave		
	BC2	10	-22.6	no wave		
	BC3	10	-33.1	no wave		
Wave Only	AW1	5	0	4.97	1.4	2.6
	AW2	5	0	9.68	1.4	2.6
	AW3	5	0	9.34	2.2	4.5
	BW2*(4)	10	0	9.70	1.4	2.6
Wave and Current	AC1W1	5	19.2	4.29	1.4	3.0
	AC1W2	5	18.9	8.55	1.4	3.0
	AC1W3	5	19.1	8.28	2.2	5.0
	AC2W1	5	-20.0	5.52	1.4	2.2
	AC2W2	5	-20.9	10.1	1.4	2.2
	AC2W3	5	-20.8	10.3	2.2	4.1
	BC1W2(4)	10	22.1	8.30	1.4	2.9
	BC2W2*(6)	10	-23.6	10.3	1.4	2.2
	BC3W2*(6)	10	-34.2	10.9	1.4	1.9

\*は捨石の移動が起ったことを示す

ており, 流速は前者で約 10%, 後者では約 20% 増加することがわかった。また, マウンド B の結果では,  $U$  および  $U_0$  から算定された比のほうがやや小さめの値となっている。これは測定した流速が水深で平均した流速ではないことと, マウンドの天端隅部付近で flow separation が起こり流れが複雑になっているためと考えられる。

b) 波動場のデータについて

図-3 の上段と中段の BW2 の実験ケースに示されるように, 波動場のスペクトルピーク周期はマウンドの有無および流速の強弱にかかわらず一定となっている。一方, 有義波高はマウンド上で増加している。例えば, 波高計 WG1 で測定された有義波高を基準とすると, マウンド上の有義波高は 1~3% 程度増加している。したがって, マウンド高が水深に比して 10~20% の場合には, 波高はマウンドの影響をそれほど受けていないものと考え

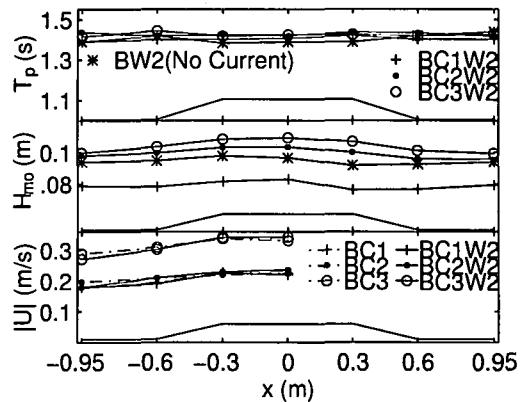


図-3  $T_p$ ,  $H_{m0}$  および  $|U|$  の変化

られる。

c) 共存場のデータについて

共存場の流速は、流れ場での流速とほぼ同様の傾向を示しており(図-3 下段)、波は流れにあまり影響を及ぼさないことが分かる。また、共存場における波高(図-3 中段)は逆流が強くなるに従って増加し、順流では減少している。この現象は、線形理論に Doppler-shift を考慮することによって説明できる(手賀ら, 1998)。共存場におけるマウンド上の有義波高は、マウンド A で 2~4%、マウンド B で 5~10% の範囲で増加しており、波動場における有義波高の増加分よりも多少大きくなっている。特に、逆流の実験において有義波高の増加が顕著である。これはマウンドの存在によって逆流が強くなり、有義波高が増加したためと解釈できる。一方、ピーク周期は波動場の結果と同様に、マウンドの有無にかかわらず一定であった。

上述した全ての実験結果に基づけば、マウンドの存在が波および流れに及ぼす影響は概ね 10% 以下である。このことは、実験に用いた有義波の波長  $L_p$  (表-2 参照) が 1.9 m 以上でマウンド幅  $W_{bot}$  (=0.6, 1.2 m) に比べて長く、マウンド幅は波高変化に影響を及ぼすほどではないことと、またマウンド高は水深の 10~20% であり、流速・波高にも顕著な影響を与えないことに起因しているものと考えられる。

3. データ解析

3.1 波と流れの共存場における解析

捨石の安定性を予測するためには、捨石マウンド上の波や流れの予測を行わなければならないが、前述したように、本研究で扱ったような低捨石マウンド上の波高や流れは、マウンドが存在しない場合と比較して高々 10% 程度の相違しかない。しかしながら、実際には若干のマウンド高の違いや流れの有無・方向によって、捨石の挙動は明らかに異なっている。波や流れの予測を行うに際して、適切な解析手法を提案することも重要である。ここではまず、マウンド上における波高および流速の挙動を把握するため、以下に提案する解析手法によってマウンド上の水面変動  $(\eta(t) - \overline{\eta(t)})$  と流速  $(u(t) - U)$  との関係性を調べる。

フーリエ変換を  $\nabla$  と定義すると、これらの関係性は線形理論を用いて次式で表わすことができる (Hedges ら, 1985)。すなわち、

$$\nabla(u(t) - U) = \nabla(\eta(t) - \overline{\eta(t)}) \times G(f) \dots\dots (2)$$

with  $G(f) = \frac{\cosh k_r h_c}{\sinh k_r (d - h_m)} \omega_r$

ここで、 $u(t) - U$  : マウンド中央で測定した流速の時系列  $u(t)$  から時間平均値  $U$  を引いたもの、 $\eta(t) - \overline{\eta(t)}$  : マ

ウンド中央で測定された水面変動  $\eta(t)$  から平均値  $\overline{\eta(t)}$  を引いたもの、 $k_r$  :  $U$  とともに移動する相対座標系での波数、 $h_c$  : マウンド天端から  $u(t)$  の計測位置までの距離、 $\omega_r$  : 相対座標系での角振動数である。 $k_r$  は共存場における周波数  $f = 2\pi/\omega_a$  に対して以下の分散関係式を満足する。

$$(2\pi f - Uk_r)^2 = gk_r \tanh k_r (d - h_m) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $g$  : 重力加速度である。

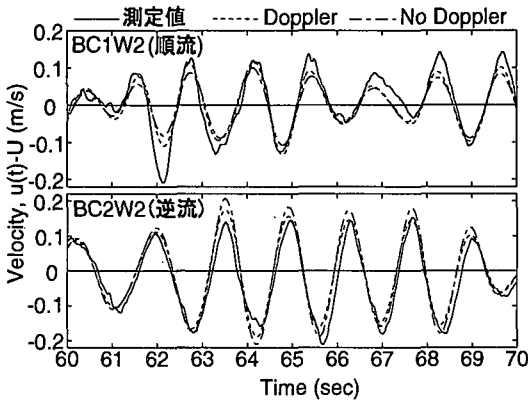
以上より、 $(u(t) - U)$  は式 (2) を逆フーリエ変換することによって簡単に得ることができる。なお、逆流の場合には式 (3) において、 $k_r$  の解が求まらない高周波数領域が存在する。 $k_r$  の解が求まる最大の周波数  $f_{max}$  は、相対座標系での平均流速  $U$  を用いれば  $2\pi f_{max} = -(g/4U)$  を満足する。なお、 $f > f_{max}$  となるような領域では  $G(f) = 0$  とおいて逆フーリエ変換を行った。

さらに  $(u(t) - U)$  の標準偏差を  $U_{rms}$  と定義する。表-3 は  $U_{rms}$  の測定値および式 (2) を逆フーリエ変換した結果を整理したものである。ここでの計算値は、測定した水面変動より線形理論を用いて算定した値である。なお、Doppler-shift を考慮していない場合については、式 (3) の左辺に  $U = 0$  を代入し、流れを考慮していない波数を用いて同様の計算を行った。BC1W2 と BC2W2 の実験ケースはそれぞれ流れの方向を順流から逆流に変えたものであり、BC3W2 は BC2W2 よりも強い逆流を与えている。測定された  $U_{rms}$  の値は順流の場合が最も小さく、逆流が強くなっていくに従って  $U_{rms}$  も増加している。 $U_{rms}$  の測定値は、Doppler-shift を考慮した計算値と考慮しなかった計算値とのほぼ中間の値となっている。これは、波長  $L_p$  がマウンド幅  $W_{bot}$  に比してかなり長く、Doppler-shift の効果が期待できる程の水平距離が十分ではないことを示唆している。しかしながら、Doppler-shift を考慮した計算結果の方が比較的測定値との一致は良好である。さらに、流れが逆流の場合には、 $f > f_{max}$  となるような領域において式 (2) のフーリエ係数をゼロとしているため、Doppler-shift を考慮した場合の計算値がやや小さ目に算定されたものと考えられる。

図-4 は、 $(u(t) - U)$  の計算値と測定値とを比較したものである。流速のピークの部分に着目してみると、計算値は順流の場合(図-4 上段)には測定値より小さく予測されている。一方、逆流の場合(図-4 下段)には測定

表-3  $U_{rms}$  の測定値と計算値

Test	$U_{rms}$ (m/s)		
	Measured	Doppler-shift	No Doppler
BC1W2	0.0788	0.0738	0.0675
BC2W2	0.0835	0.0777	0.0896
BC3W2	0.0878	0.0771	0.0968

図-4  $u(t)-U$ の測定値と計算値

値より大きく計算されている。また、これらの図からも、順流・逆流ともに Doppler-shift を考慮した計算結果 (破線) の方が測定値とよく一致することが分かる。

### 3.2 捨石の移動確率

ここでは、最大シールズ数を算定するに際して、Grant・Madsen (1979) が提案した波と流れの干渉下の境界層理論を適用した。すなわち、個々の波をゼロアップクロス法で定義し、個々の波の周期および波高を用いて最大底面応力  $\tau_{max}$  を算定するとともに、個々の波に対する最大シールズ数  $\phi_m = \tau_{max} / \rho g (s-1) d_{50}$  を計算した。計算に用いた底面粗度の値は  $2d_{50}$  である。算定された  $\phi_m$  から  $\phi_m$  の超過確率  $Pr$  を計算した。表-4 および表-5 はすべての実験ケースに関する  $\phi_{m1}$ 、 $Pr_1$  および  $Pr = 0.03, 0.04, 0.05$  と  $0.06$  のときの  $\phi_m$  の超過確率の値を整理したものである。ここで  $\phi_{m1}$  は  $\phi_m$  の最大値、 $Pr_1$  は  $\phi_{m1}$  の超過確率である。なお、表-4 は Doppler-shift を考慮していない場合、表-5 は式(3)の波数  $k_r$  に Doppler-shift を考慮した場合の超過確率の値である。表中の空欄は、与えられた  $Pr$  に対して  $\phi_m$  が存在しなかったことを意味する。表-4 および表-5 に関連して、図-5 には代表的な実験ケースに対する  $\phi_m$  の超過確率が、Doppler-shift を考慮したもの (破線) と考慮しないもの (実線) とを併せてプロットしてある。ここでは比較しやすいように、0.5 以下の超過確率について示した。

Madsen・Grant (1976) にらえば、捨石が動き始める  $\phi_m$  の値は  $\phi_m \geq 0.05$  である今回の水理実験から、捨石の移動が認められた実験ケースは BW2, BC2W2 および BC3W2 であった。表-4 において、波動場の実験 (BW2) の  $\phi_m$  の最大値は 0.0351 となっており、捨石の移動を示す値にはなっていない。一方、逆流が加わった実験ケース BC2W2 および BC3W2 では  $\phi_m \geq 0.05$  を満足することが確認できた。さらに、BC2W2 での  $\phi_m$  の値は BC3W2 の場合の値と比べて値が小さくなっている。また、捨石

表-4  $\phi_m$  の超過確率 (Doppler-shift なし)

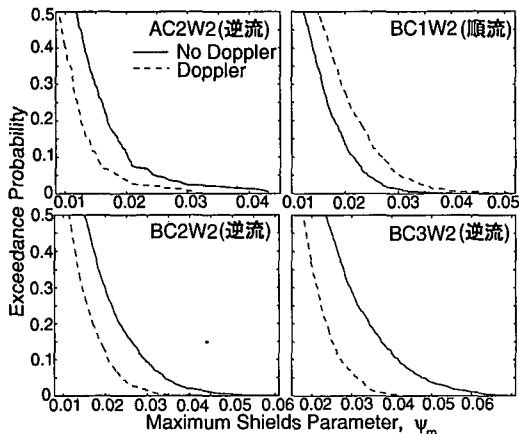
Test	$\phi_{m1}$	$Pr_1$	$Pr$			
			0.03	0.04	0.05	0.06
AW1	0.0095	0.0039				
AW2	0.0308	0.0038	0.0041			
AW3	0.0252	0.0055				
BW2	0.0351	0.0019	0.0096			
AC1W1	0.0138	0.0039				
AC1W2	0.0264	0.0038				
AC1W3	0.0269	0.0054				
AC2W1	0.0226	0.0039				
AC2W2	0.0431	0.0040	0.0242	0.0134		
AC2W3	0.0385	0.0056	0.0459			
BC1W2	0.0398	0.0010	0.0129			
BC2W2	0.0614	0.0007	0.0939	0.0193	0.0035	0.0011
BC3W2	0.0716	0.0007	0.2892	0.1185	0.0375	0.0095

が移動しなかった BC1W2 (順流) の実験では、 $\phi_m$  の最大値が 0.0398 となり、他の 2 ケースに比して全体的にかなり小さめに算定されている。この値は捨石の動きがあった BW2 の実験の  $\phi_{m1}$  よりも大きい。また、マウンド A の実験のように捨石の動きが一切認められなかった場合についても  $\phi_m$  の算定を行なった。このときの  $\phi_m$  の値は上記の実験ケースの  $\phi_m$  よりはるかに小さい。以上より、BW2 を除き、 $\phi_m$  の値から捨石の移動が説明できるものと判断される。加えて、 $\phi_m$  が 0.05 となるときの超過確率を用いると、捨石の移動頻度が算定できる。例えば、BC2W2 および BC3W2 の場合の捨石の移動頻度は、前者でおよそ 286 波に 1 波の割合で、後者でおよそ 27 波に 1 波の割合であった。なお、目視観察からも、BC2W2 の実験で起った捨石移動の頻度が BC3W2 の実験で起った頻度よりも低かったことから、ここで算定された頻度は定性的な傾向を十分に予測できるものと考えられる。

一方、Doppler-shift を考慮した解析結果は、Doppler-shift を考慮していない解析結果とは逆の傾向となっている。すなわち、逆流の  $\phi_m$  の一方が順流の  $\phi_m$  よりも小さくなり、逆流が強くなると  $\phi_m$  はさらに小さくなる。このことは、Doppler-shift を考慮すると順流の場合には波

表-5  $\phi_m$  の超過確率 (Doppler-shift あり)

Test	$\phi_{m1}$	$Pr_1$	$Pr$			
			0.03	0.04	0.05	0.06
AC1W1	0.0170	0.0038				
AC1W2	0.0329	0.0037	0.0142			
AC1W3	0.0312	0.0053	0.0097			
AC2W1	0.0155	0.0042				
AC2W2	0.0313	0.0041	0.0082			
AC2W3	0.0316	0.0056	0.0106			
BC1W2	0.0508	0.0010	0.0503	0.0089	0.0012	
BC2W2	0.0422	0.0007	0.0151	0.0013		
BC3W2	0.0419	0.0018	0.0615	0.0061		

図-5  $\psi_m$  の超過確率

長が長くなって  $\psi_m$  の値は大きくなることに、逆流の場合には波長が短くなり  $\psi_m$  の値は小さくなることに対応している。表-3 の  $U_{rms}$  の測定値を見ても、順流の方が小さくなっており、流速の増加とともに  $\psi_m$  が大きくなることを考慮すれば、Doppler-shift を考慮した解析結果は本実験で観察された捨石の挙動と逆の傾向を示している。また、図-4 で、順流・逆流共に流速のピークの測定値が計算値とかけ離れている個所があるが、これは非線型干渉の影響と解釈できる。このことから、捨石の挙動は波と流れの非線型干渉に伴う流れの変化にも関係するものと考えられる。

逆流が強くなると、Doppler-shift の有無に関係なく  $\psi_m$  の値が大きくなっている。このことは、Doppler-shift の効果だけではなく、逆流による波高の増加とも関係があるものと考えられる。図-6 はマウンド B の実験結果による波高の超過確率をプロットしたものである。同じ超過確率でも、逆流が最も強い実験ケースでの波高が最大で、次いで波動場・順流の順に波高が低くなっており、流れの有無・方向によって波高分布が大きく変化していることが確認できる。すなわち、波高分布の変化に伴って  $\psi_m$  の分布も変化している。また、図-5 と図-6 とを比較すると、最大底面応力  $\tau_{max}$  とそれに対応するシールズ数  $\psi_m$  の値は概ね波高の 2 乗に比例しているといった傾向が確認できる。

#### 4. 結 論

波と流れの共存場に設置された低天端高の捨石マウンド海岸構造物の水理実験を行い、以下のような結論を得た。水深に比してマウンド高の低い、かつ波長に比べて

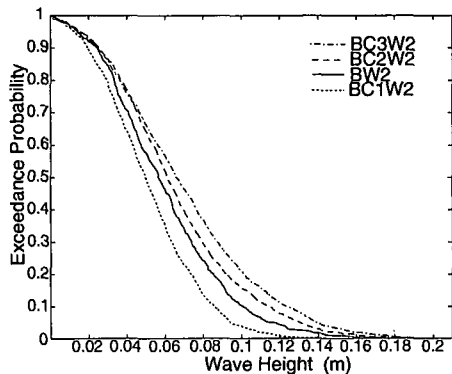


図-6 波高の超過確率

幅の狭いマウンド構造物の設置に伴って、捨石マウンド上の流速および波高の増加は、それぞれ流れ場の流速および波動場の波高の約 10% の範囲内であった。線形理論を用いて共存場に設置された捨石マウンド上の流速を算定した。その結果、Doppler-shift の効果を考慮した場合の計算値の方が、概ね測定値と一致しているものの、共存場における波と流れの相互干渉には、Doppler-shift に加えて非線型干渉もまた重要な要因となっていることが明らかとなった。Grant・Madsen (1979) が提案した波と流れの干渉場の境界層理論を適用し、個々の波に対するシールズ数および捨石移動の超過確率を算定した。その結果、Doppler-shift を考慮しない超過確率の方が実験結果をよく再現していることが分かった。また、流れの強弱によるシールズ数の変化は、逆流による波高増加にも関連していることも明らかとなった。最後に、波と流れの共存場における波の挙動をさらに精度よく予測するためには、Doppler-shift の効果と非線型干渉の両側面を有するモデルの開発が必要であろう。

#### 参 考 文 献

- 手賀夕紀子・小林信久・多田彰秀 (1998): 不規則波と流れの干渉による波動場の変化, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 84-88.
- Grant, W.D. and O.S. Madsen (1979): Combined wave and current interaction with a rough bottom, *J. Geophys. Res.*, Vol. 84, No. C4, pp. 1797-1808.
- Hedges, T.S., K. Anastasiou and D. Gabriel (1985): Interaction of random waves and currents, *J. Waterway, Port, Coast. Oc. Engrg.*, ASCE, Vol. 111, No. 2, pp. 275-288.
- Madsen, O.S. and W.D. Grant (1976): Quantitative description of sediment transport by waves, *Proc. 15th ICCE*, Vol. 2, pp. 1093-1112.
- Vidal, C., I.J. Losada and F.L. Martin (1998): Stability of near-bed rubble mound structures, *Proc. 26th ICCE*, Vol. 3, pp. 1730-1743.