

直積消波ブロック堤の波力に関する実験的研究

北海道開発局開発土木研究所	正会員	水野 雄三
北海道開発局留萌開発建設部		井元 忠博
北海道開発局開発土木研究所	正会員	柳瀬 知之
北海道開発局小樽開発建設部		岸 哲也

1. 緒言

直立消波構造としては、スリット式或多孔式ケーソン式の構造及び直積消波ブロック式の構造などがあるが、ブロック式はその製作及び施工の簡便性などから波除堤や岸壁に広く用いられている。直立消波構造に用いられている直積消波ブロックには様々な種類があり、その安定性、反射特性などについてはブロック開発各社の資料に示されているが、直積消波ブロックの種類によって設計波圧式が異なるなど問題点もある。このことから、開発土木研究所においては昭和57年度より3種類の直積消波ブロックの模型を用いて、直積消波ブロック堤の設計法に関する実験的研究^{1)~8)}を系統的に実施してきた。

本研究は、水理模型実験により波圧計を用いて測定した上部工に作用する揚圧力分布及び2分力計により測定した水平波力と揚圧力との関連より、合田式の揚圧力分布を矩形に修正した設計波圧式を提案した。この設計波圧式には、波圧修正係数 λ_p と揚圧力修正係数 λ_u を含んでおり、この波圧修正係数は、滑動安定実験の結果を用いて、 H/d の関数として表すと共に、設計波圧式の適合性について検討を行ったものである。

2. 実験方針及び内容

(1) 実験方針

直積消波ブロック堤に関して合田式を準用した設計波圧式を検討するため、①上部工に作用する揚圧力に関する実験（「①の実験」という。）②堤体に同時に作用する水平波力及び揚圧力に関する実験（「②の実験」という。）③ブロックの滑動安定に関する実験（「③の実験」という。）の3実験を実施した。これは合田式を準用するに当たり、①の実験より揚圧力の分布を調べ、②の実験より水平波圧強度と揚圧力強度との関係を調べて設計波圧式を仮定し、式の適合性について③の実験結果を用いて検討するためであり、以下に実験内容について概説する。

(2) 実験装置

実験水路は長さ28m及び24m、幅0.8m、高さ1mの水路2本を使用した。水路は両側面ガラス張りで、水路両端に消波ブロックが、造波板前面に整波装置が設置されている。造波機は規則波造波機のベンジラム型で周期0.8~3sec、波高20cm程度の波を発生させることができる。3実験とも水路のほぼ中央部に所定の勾配の海底を設け、その途中に堤体を設置して実験を行った。実験縮尺は1/25で、相似則はフルード則によった。

(3) 堤体模型

実験に用いたブロックは現地での実績が多いブロックから選んだ3種類（ここではA、B及びCブロックと呼ぶ。）で、3ブロックとも不透過型で公称40トンタイプのモルタル製の1/25模型を製作して実験に使用した。実験堤体は、砕石を用いて成形したマウンド上に、モルタル製の床板を設置し、ブロックを数段だけ積み上げ、その上に木製の上部工を設置し、最上段のブロックと上部工とを一体化したものである。

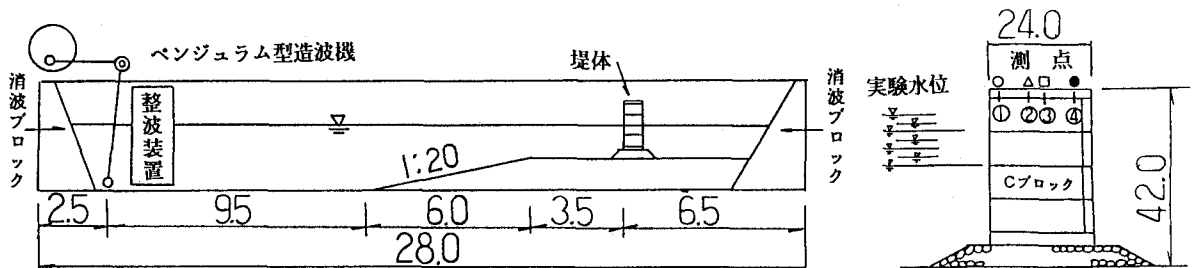


図-1 実験水路及び堤体(①の実験)

(4) 実験内容

(a) 上部工に作用する揚圧力に関する実験¹⁾

実験はCブロックを用い、図-1に示すとおり勾配1/20の海底上に高さ5cmのマウンド、高さ3cmの底版、ブロック4段及び高さ2cmの上部工を設置した。最上段のブロックと一体化した上部工に波圧計(PGM-2KC:共和電業KK)を4本設置し、水位を7ケース、周期3ケース(1.2, 1.8, 2.4sec)計21ケースについて規則波で実験し、揚圧力を測定した。

実験で作用させた波高は、周期1.2secの時、11.2～12.6cm、1.8secの時13.3～15.6cm、2.4secの時13.5～17.9cmで、波を作用させた時の揚圧力値を、動ひずみアンプを通してビジグラフに出力した。各ケースとも有効波のうち大きい順に3波を選び、ピーク波圧及び腰掛け部波圧を読み取り、解析にはピーク波圧を用いた。

(b) 堤体に同時に作用する水平波力及び揚圧力に関する実験⁸⁾

実験は図-2に示すとおり水路のほぼ中央部に勾配1/25の海底を5m設け、それより港内側に勾配1/100の海底を7m製作し、3種類のブロック毎に図中に示した諸元の3段積み直積消波ブロック堤を設置した。2分力計(SV-231 防水型：電子工業KK)による測定箇所は、同図の斜線で示した箇所、上部工から2段目のブロック(水路幅方向はブロック3個分)までを細い針金で一体化して2分力計の架台に取り付けた。

実験ケースは表-1に示すとおり3種類のブロック毎に、水位を30.0cm、33.8cmの2ケース、波高を約6cmから約17cmの間の内から3ケース、周期を1.26sec、1.74sec、2.21secの3ケースの計54ケースとし、規則波により実験した。2分力計では水路法線方向の水平力と水深方向の鉛直力を測定できるように設置し、水平力は(上部工天端からブロック2個目の下面までの高さ×ブロック3個分の幅)の面積に作用する力を測定し、鉛直力は(ブロック3個分の幅×ブロックの奥行き)の面積に作用する力を測定し、出力は動ひずみアンプを通してデータレコーダに収録し、オフラインでA/D変換を行い電算機により解析した。A/D変換の際のサンプリング周波数は50Hzとした。測定波は、有効波数のうち連続する5波を選び、1波毎に水平力が最大となる時刻の水平力及び鉛直力を算出し、5波の平均値を解析に用いた。なお鉛直力が最大となる時刻のデータについても解析しているが、本報告では省略する。

(c) ブロックの滑動安定に関する実験^{3) 7)}

実験は2度実施した。一つは図-3(1)に示すとおり、水路のほぼ中央部に勾配1/20の海底を設け、その法肩部に6段積みから2段積みの直積消波ブロック堤を設置した。他の一つは図-3(2)に示すとおり、水路のほぼ中央部に勾配1/50の海底を設け、その法肩部に4段積みから2段積みの直積消波ブロック堤を設置した。

実験ケースは表-2に示すとおりで、3種類のブロック毎に水位を4ケース、周期を3ケース(1.2, 1.8, 2.4sec)、捨石マウンド高4ケース(0.5, 1.3, 2.1cm)について波高を徐々に上げて堤体ブロックの挙動を観察し、次に定義する安定限界波高を求めた。

ブロック	A	B	C	D	E	F	(単位: cm)
A	72.0	24.0	26.50	20.4	1.9	4.20	
B	76.2	24.4	28.64	23.3	1.9	3.44	
C	76.8	24.0	28.90	24.0	1.9	3.00	

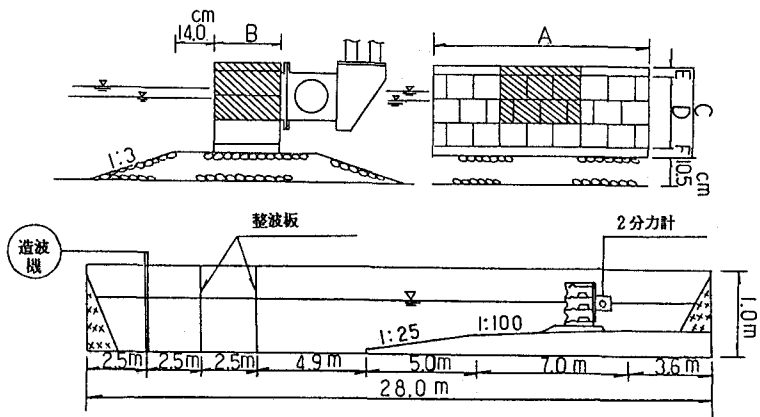


図-2 実験水路及び堤体諸元 (②の実験)

表-1 実験ケース (②の実験)

水 位 (cm)	周 期 (sec)	波 高 (cm)		
		Aブロック	Bブロック	Cブロック
30.0	1.26	6.10	5.94	5.97
		8.09	8.60	8.73
		13.46	13.73	13.01
	1.74	6.00	6.90	6.02
		7.79	7.74	8.24
		12.41	12.79	13.31
33.8	2.21	6.46	6.41	6.63
		8.83	8.26	8.40
		13.99	13.33	13.48
	1.26	10.34	9.75	7.90
		11.94	12.20	12.80
		16.65	16.47	17.40
33.8	1.74	8.11	8.35	8.94
		13.68	12.47	13.14
		16.46	16.34	15.82
	2.21	8.11	8.32	8.30
		10.93	11.03	10.52
		14.95	16.53	14.93

- 微動限界波高：ブロックが上下動又は滑動を始める時の波高で、ブロック間のかみ合わせの悪さによる微小動揺は含まない。
- 滑動限界波高：ブロックがホゾを乗り越える時の波高又は乗り越えないまでも、ホゾ高さ以上に浮き上がる時の波高である。

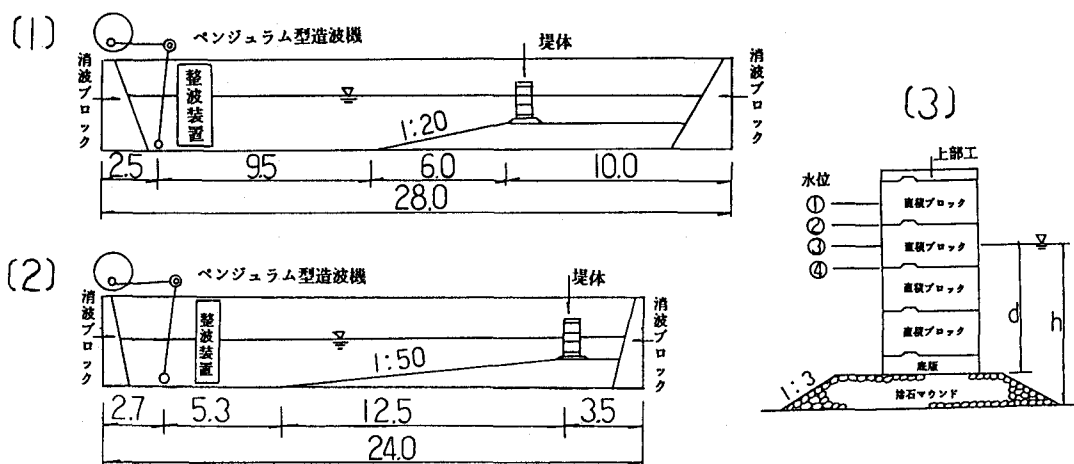


図-3 実験水路及び堤体 (③の実験)

3. 実験結果の解析

(1) 上部工に作用する揚圧力の分布について

4段積み直積消波ブロック堤の上部工に作用する揚圧力分布を把握するため、水位をブロック高さの $1/4$ づつ7ケース変化させながら、ほぼ一定の波高を作用させて4個の波圧計で揚圧力を測定した。図-4は、各周期毎に相対クリアランス d_0/h_B (d_0 : 静水面上上部工下端までの高さ, h_B : ブロックの高さ) を横軸に、揚圧力強度 $P_{max}/\omega_0 H$ (ω_0 : 水の単位体積重量, H : 波高) を縦軸にとって示したものである。各周期共に、測点①～測点④の最大揚圧力値 P_{max} は、相対クリアランスが0.5の時で2～3 $\omega_0 H$ 程度作用しているが、相対クリアランスが大きくなるに伴って揚圧力は低減している。測点①～測点④の揚圧力強度の分布を見ると、一部測点①の値に他の測点の値とかけ離れたデータがあるが、これはクリアランス d_0 が大きいため波頂近くの水平方向の運動による力が受圧面に作用したことによるものと考えられる。この現象を除くと測点①～測点④の値はほぼ同じ値で推移していることから、揚圧力分布は一様分布であると考えられる。

表-2 実験ケース (③の実験)

水深 (cm)			マウンド高 (cm)				
ブロック			0	5		1 3	2 1
A	B	C	勾配1/50	勾配1/20	勾配1/50	勾配1/20	勾配1/20
46.6	51.1	52.0		6-1		5-1	4-1
43.2	47.2	48.0		6-2		5-2	4-2
39.8	43.4	44.0		6-3,5-1		5-3,4-1	4-3,3-1
36.4	39.5	40.0		6-4,5-2		5-4,4-2	4-4,3-2
33.0	35.6	36.0	4-1,3-1,2-1	5-3,4-1	3-1,2-1	4-3,3-1	3-3,2-1
29.6	31.7	32.0	4-2,3-2,2-2	5-4,4-2	3-2,2-2	4-4,3-2	3-4,2-2
26.2	27.8	28.0	4-3,3-3	4-3	3-3	3-3	2-3
22.8	24.0	24.0	4-4,3-4	4-4	3-4	3-4	

注) ①表中の数字は、前がブロック段数、後が水位番号を示す。

②マウンド高0cm及び5cmの2、3段積み場合は、ブロック高2個及び1個分の高さだけ底版を厚くして調整している。

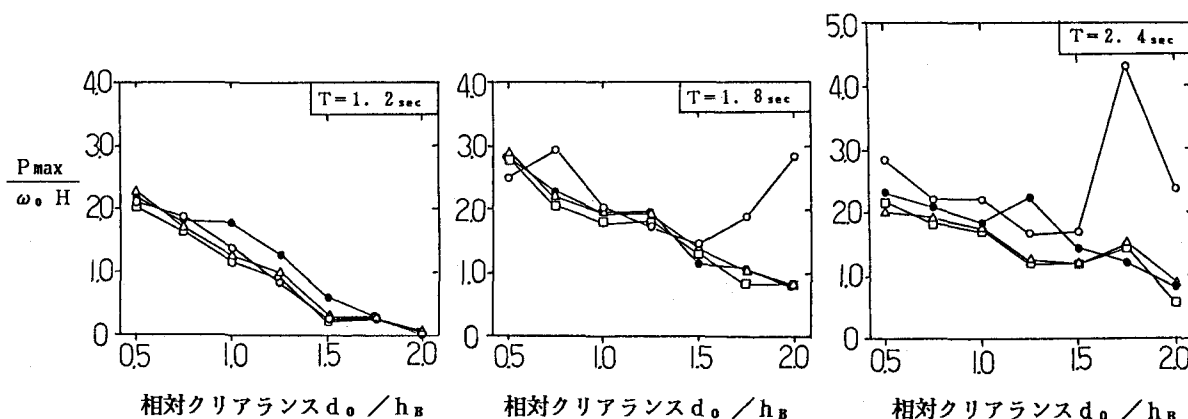
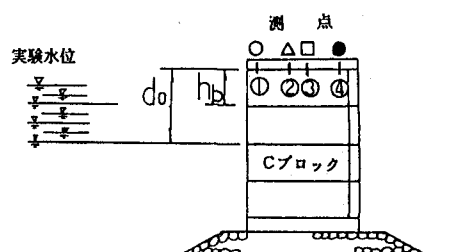


図-4 上部工に作用する揚圧力分布

(2) 堤体に同時に作用する水平波力及び揚圧力について

(a) 解析方法

上記結果を参考に揚圧力を矩形分布として、合田式に波圧修正係数 λ_p と揚圧力修正係数 λ_u を導入した以下に示す設計波圧式を仮定した。初めに測定波を入射波分離して求めた入射波高を設計波高 H として、2分力計で測定した水平力と計算で求まる水平波圧とが等しくなるように波圧修正係数 λ_p を計算し、水平波圧分布を求める。次に、図-5に示したように、この波圧分布より揚圧力を検討する高さでの水平波圧強度 p_x を求め、この水平波圧強度に揚圧力修正係数 λ_u を掛けた強度の揚圧力が矩形に分布すると仮定して、計算で求まる揚圧力と2分力計で測定した鉛直力とが等しくなるように揚圧力修正係数 λ_u を計算する。

$$\eta = 1.5 \lambda_p H \quad (\eta: \text{波の打上げ高さ}, \lambda_p: \text{波圧修正係数}, H: \text{設計波高})$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left\{ \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right\}^2 \quad (\alpha_1: \text{波圧係数}, h: \text{水深}, L: \text{波長})$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h_b - d}{3h_b} (H/d)^2, (2d/H) \right\} \quad (\alpha_2: \text{波圧係数})$$

$$(\text{h}_b: 5 \text{ 倍沖出し水深}, d: \text{マウンド水深})$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right\} \quad (\alpha_3: \text{波圧係数})$$

$$(\text{h}': \text{本体内下面水深})$$

$$p_1 = (\alpha_1 + \alpha_2) \lambda_p \omega_0 H, \quad p_2 = \frac{p_1}{\cosh(2\pi h/L)}$$

$$(p_1, p_2: \text{波圧強度}, \lambda_p: \text{波圧修正係数}, \omega_0: \text{単位体積重量})$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (p_3: \text{波圧強度})$$

$$p_u = \lambda_u p_x: \text{底版以外の揚圧力で矩形分布} \quad (p_u: \text{揚圧力強度}, \lambda_u: \text{揚圧力修正係数})$$

$$p_u = p_x: \text{底版の揚圧力で三角形分布} \quad (p_x: \text{揚圧力検討面での波圧強度})$$

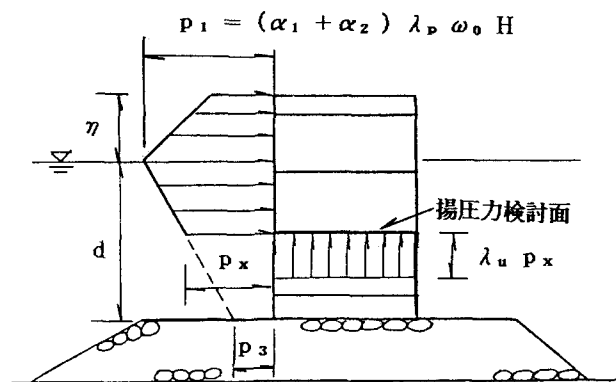


図-5 揚圧力分布の仮定

(b) 解析結果

図-6は各実験ケース毎に、水平力（波圧）が最大となる時刻のデータを上記手法により計算して、縦軸に波圧修正係数 λ_p を、横軸に揚圧力修正係数 λ_u を図示したものである。同図より、3種類のブロック毎に違いがあるものの、一つ一つのブロックに着目すると波圧修正係数 λ_p が変化しても揚圧力修正係数 λ_u は変動が少なくほぼ一定値をとっていると考えられる。図中に、各ブロック毎及び3種類のブロック全体の平均揚圧力修正係数を示したが、本研究は、個々のブロック特性を明らかにするのではなく、直積消波ブロック堤の汎用的な設計法を検討することに主眼を置いているので、これからの解析は3種類のブロックの平均値である0.65を揚圧力修正係数 λ_u として用いる。

(3) 波圧修正係数の推定について

(a) 解析方法

直積消波ブロック堤のブロック間及びブロックと底版との間の揚圧力分布を矩形とし（底版下面で検討する場合は、三角形分布としている。）、揚圧力修正係数 λ_u を一定値とした場合、波圧修正係数 λ_p の推定方法を明らかにすることによって、上記設計波圧式が実用化できることとなる。このため、③の実験結果より、安定限界波高の種類別に、各

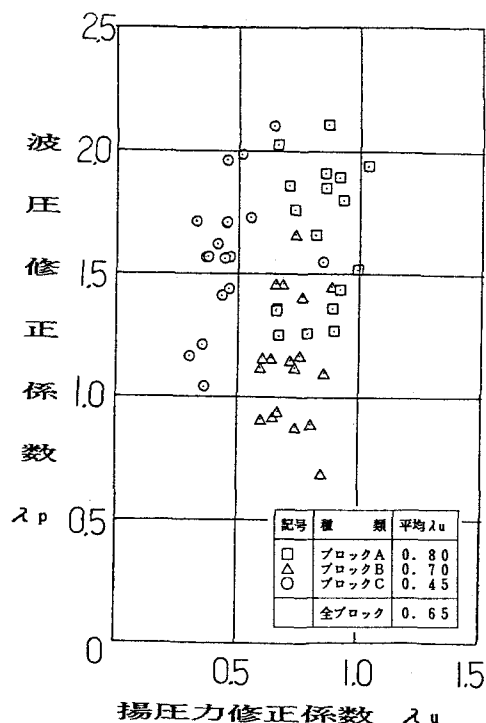


図-6 $\lambda_p - \lambda_u$ の関係

実験ケース毎の限界波高を設計波高として前述の設計波圧式により、堤体の滑動安全率及び転倒安全率の小さい方の安全率が1となるような波圧修正係数 λ_p を繰返し計算により求める。但し、摩擦係数は実験の結果よりブロック間を0.63、マウンド底版間を0.65とした。

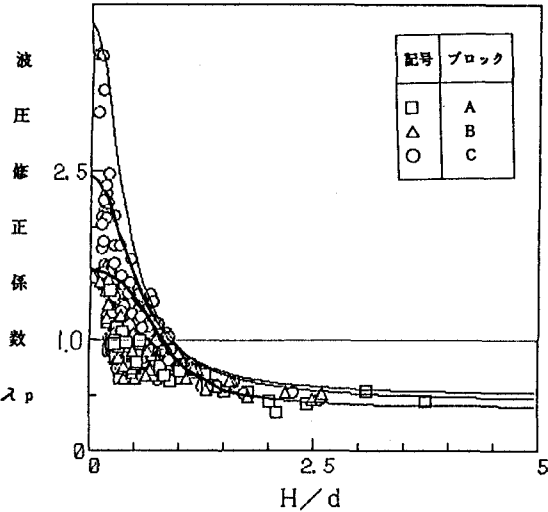


図-7 $\lambda_p - H/d$ の関係 (全段数)

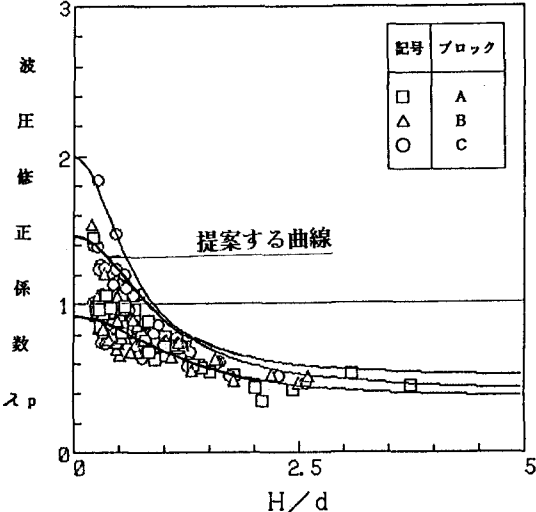


図-8 $\lambda_p - H/d$ の関係 (2, 3段積み)

図-7, 8に、微動限界波高を用いて計算した波圧修正係数 λ_p と H/d との関係を図示した。図-7は、全実験ケースを解析した結果を、図-8はブロック段数が2, 3段積みの実験ケースを解析した結果を図示したものである。図中に示した3本の曲線のうち、上の曲線は微動限界波高を用いた解析結果をほぼ包絡した曲線で、下の曲線は滑動限界波高を用いた解析結果をほぼ包絡した曲線で、中の曲線は構造物の安定性及び経済性より考えて波圧修正係数の推定に採用するように提案する曲線で、これらの曲線は次式で表現でき、表-3に示した係数A, B, C, nで計算できる。

$$\lambda_p = \frac{A}{(H/d)^n + B} + C$$

実験を行ったブロック段数は6段積みまでであるが、図-7と図-8を比較すると、 H/d が小さい範囲でのバラツキは3段積みまでの実験結果をまとめた図-8の方が小さく、2分力計により測定した②の実験も3段積みの堤体で実施したことから、本研究で提案する設計波圧式は3段積みまでの直積消波ブロック堤を適用範囲とする。

4. 適合性の検討

図-8に3本の曲線を示しているが、直積消波ブロック堤を設計するに当たり、波圧修正係数として上の曲線を用いるとほとんどのケースが安全サイドになり、下の曲線を用いると堤体は滑動しないが微動するという設計になる。経済的で安全性のある設計とするための曲線は上下の曲線の間にあることとなり、データのバラツキを考慮して中の曲線を提案した。この曲線を用いた場合の設計波圧式の適合性について検討するため、同図に示した実験ケースについて、滑動安全率が最小となるブロック面における計算波力 P_c を縦軸に、滑動抵抗力 $(f \times (W' - U))$ (f :摩擦係数, W' :浮力を引いた堤体重量, U :揚圧力)を横軸にとって結果を示したのが図-9である。図中に安全率1.0と1.2の直線を示したが、データが安全率1.0の直線付近に多く分布し、かつ安全率1.2の直線より右側にデータが少ない方が、経済的で安全性のある設計法といえるが、図の結果からみて本提案の設計波圧式は適合性があると考えられる。

表-3 波圧修正係数推定式の係数

	係数	微動上の曲線	滑動下の曲線	提案中の曲線
3段で積み	A	0.60	0.80	0.95
	B	0.40	1.40	0.90
	C	0.50	0.35	0.40
	n	2	2	2
全段数	A	0.50	0.60	0.60
	B	0.15	0.50	0.30
	C	0.50	0.40	0.45
	n	2	3	2

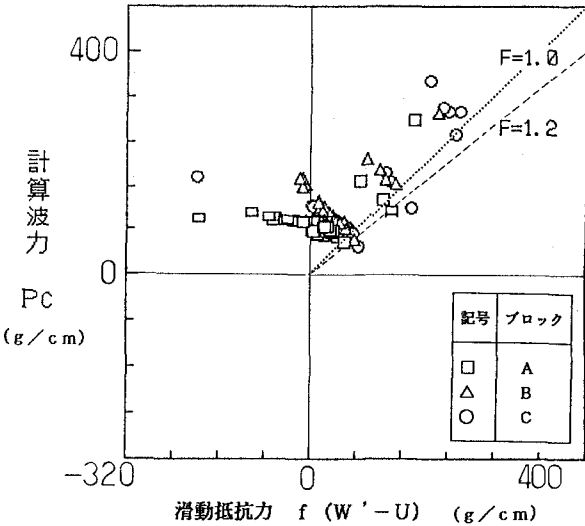


図-9 設計波圧式の適用性の検討

5. まとめ

実験に使用した3種類のブロックを用いた直積消波ブロック堤の波力に関し、本研究で得た知見は次のとおりである。

- (a) 上部工に作用する揚圧力は、相対クリアランス d_0/h_B が小さい場合大きな圧力を生じるため、経済性等を考慮しつつできるだけ d_0/h_B を大きくするのが望ましい。
- (b) 提案した設計波圧式を用いる場合、波圧修正係数 λ_p は H/d の関数で表現できる。しかし、 H/d が小さい範囲でのデータのバラツキからみて、3段積みまでの直積消波ブロック堤に適用するのが妥当と考える。その場合の波圧修正係数 λ_p 及び揚圧力修正係数 λ_u は、次式を用いることができる。

$$\lambda_p = \frac{0.95}{(H/d)^2 + 0.90} + 0.40, \quad \lambda_u = 0.65$$

- (c) 微動限界波高と滑動限界波高との違いによる波圧修正係数 λ_p の差は、 H/d の小さい重複波領域で大きい。

6. あとがき

直積消波ブロック堤の設計法の一例として、合田式の揚圧力分布を一部矩形に修正した波圧式に波圧修正係数及び揚圧力修正係数を導入した設計法を提案した。しかし、直積消波ブロック堤の水理機構は複雑で、今回提案した設計法も3段積みまでの直積消波ブロック堤に適用するもので、今後多段積みの直積消波ブロック堤に適用できる設計法の検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 上西, 高田: 直積消波ブロックの安定性に関する実験的研究(第1報): 第26回北海道開発局技術研究発表会論文集, 1983
- 2) 上西, 梅沢: 直積消波ブロックの安定性に関する実験的研究(第2報): 第27回北海道開発局技術研究発表会論文集, 1984
- 3) 岸, 林, 梅沢, 上西: 直積消波ブロックの安定性に関する実験的研究(第3報): 第28回北海道開発局技術研究発表会論文集, 1985
- 4) 岸, 林: 直積消波ブロックの安定性に関する実験的研究(第4報): 第29回北海道開発局技術研究発表会論文集, 1986
- 5) 岸, 林: ブロック式直立消波構造の反射率について: 土木学会北海道支部論文集第41号, 1985
- 6) 岸: ブロック式直立消波構造の波圧低減率について: 北海道開発局土木試験所月報NO.403, 1986
- 7) 岸: 直積消波ブロックの安定性に関する実験的研究(第5報): 第30回北海道開発局技術研究発表会論文集, 1987
- 8) 水野, 岸: 直積消波ブロック堤の波力について: 第32回北海道開発局技術研究発表会講演概要集, 1989