

スリットケーソン防波堤の滑動波圧

高田 稔年* 竹田 英章**

目 次

ま え が き

1. 堤体に作用する波力
2. 実験施設および実験方法
 - (1) 実験施設
 - (2) 実験方法
3. 実験結果
 - (1) 縮尺 1/25 の実験
 - (2) 縮尺 1/13 の実験
4. 実験結果の考察
 - (1) 混成堤、消波ブロック被覆堤、オープン型スリットケーソンの滑動波圧係数について
 - (2) 混成堤の滑動安定性について
 - (3) 合田の波力式による滑動限界波高
5. スリットケーソンにおける合田の波力式の準用
6. 結 論
 - あ と が き
 - 文 献
 - 付 録

ま え が き

防波堤の滑動は、堤体に作用する波力がその滑動抵抗力をうわまわったときに発生する。しかし、この単純な関係においてさえ、波力は重複波力、碎波力、異常碎波力と構造物の設置状態により変化し、一律に論じることができない。ことに構造物そのものが特殊な形状であればなおさらである。したがって、特殊防波堤の滑動安定性を評価するためには、その挙動を実験的に把握することが必要である。

港湾研究室での直立消波構造物に関する研究は、昭和44年度のスリットケーソン岸壁の研究が最初である。昭和49年度から多孔式ケーソンの研究が行われ、昭和51～52年度に室蘭港船溜防波堤として建設された。また、根室港本港地区中防波堤に採用されて、昭和53年度から工事が進められている。

多孔式ケーソンの研究成果をふまえ、昭和51年度から、低反射で安定性のすぐれた防波堤をめざしてスリッ

トケーソン防波堤の研究が開始された。これまで種々の型式の模型を試作して、反射率、伝達率および作用波圧に関して実験を実施してきた。その結果、下部が不透過壁で遊水部内に突起版を有するスリットケーソンが、水理特性において最もすぐれていることが明らかになった。

本報告は、現在まで試験した模型のうち、最良と考えられる模型の滑動安定性を述べたものである。すなわち、滑動実験を実施して滑動限界波高を求め、従来の混成堤と比較した。

あわせて、滑動実験における縮尺の影響を検討するため、縮尺を変えた模型を製作して、大型造波水路で同様の実験を実施したので、それについても言及した。

1. 堤体に作用する波力

いま、堤体形状を定めた場合、堤体に作用する波力 P は、波高 H 、波長 L 、水深 h に支配される。堤体に作用する波力 P の無次元表示としては、 P/Aw_0H (A : 波圧の作用面積、 w_0 : 水の単位体積重量) を考えることができる。 $\alpha = P/Aw_0H$ は波圧を等分布と仮定したときの波圧係数、すなわち広井式にあつては $p = P/A = 1.5w_0H$ の係数 1.5 に相当する値である。以後、滑動実験におけるこの係数 α を滑動波圧係数と呼ぶことにする。滑動実験では、ある波長 L (ある周期 T) に対して滑動限界波高 H_c が唯一つ定まるので、その他の無次元量として考えられるのは相対水深 h/L である。

スリットケーソンに作用する波力を図-1に示す。これらの力の間には、時間差、作用時間、その性質に差が

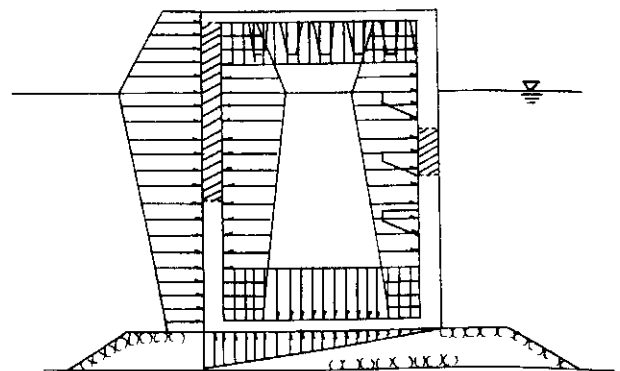


図-1 スリットケーソンに作用する波力

*港湾研究室員 **同 室長

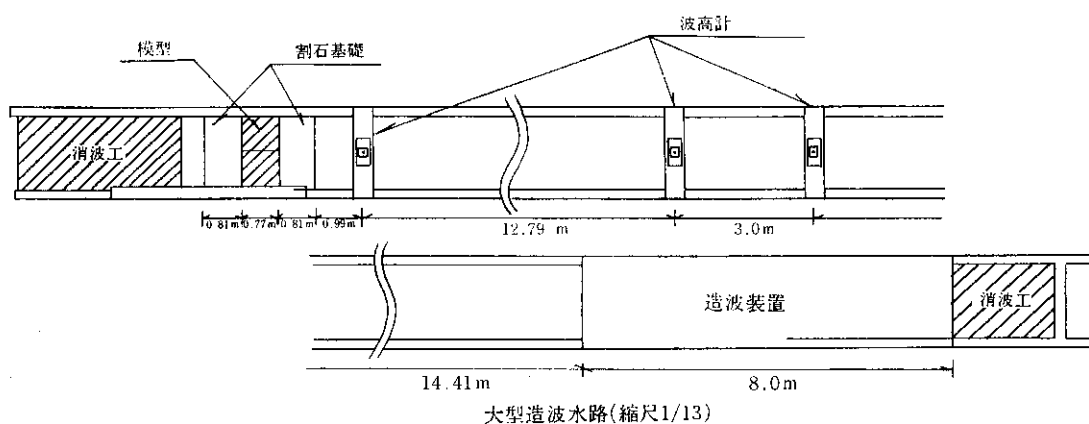
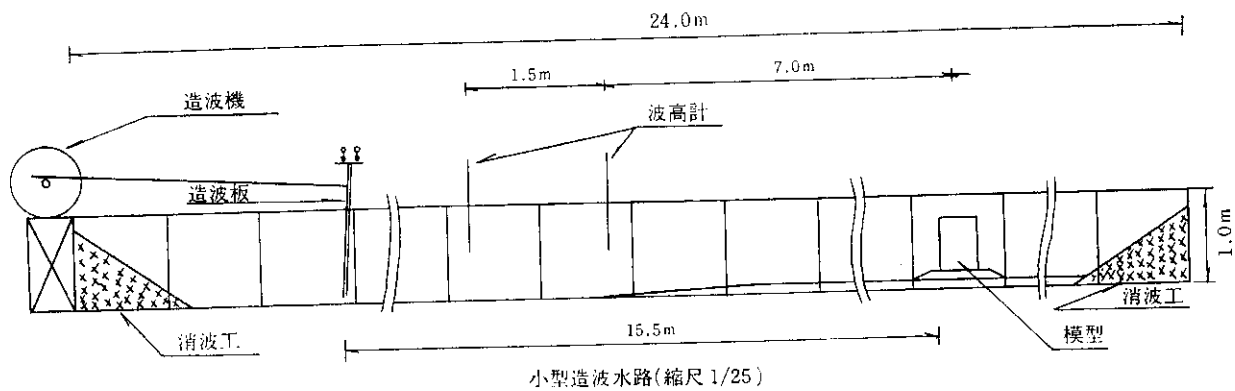


図-2 実験施設

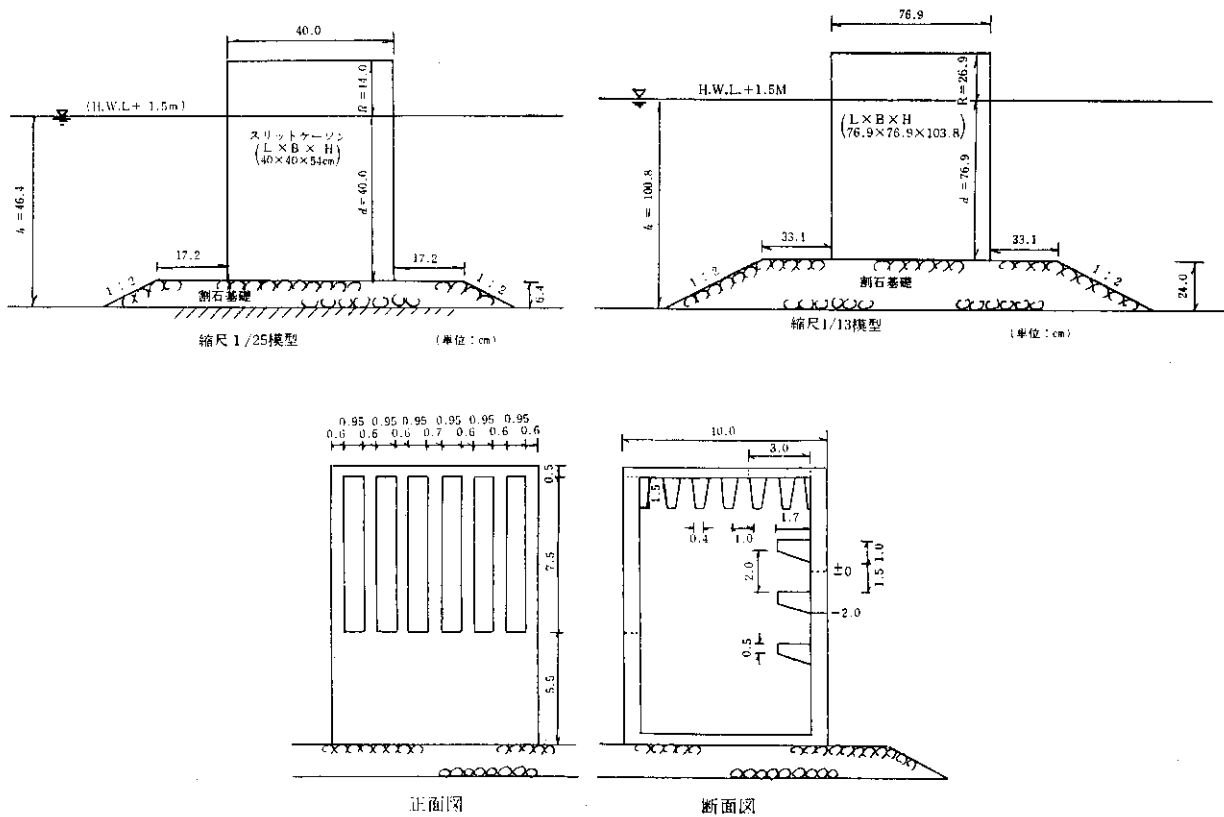


図-3 模型断面図

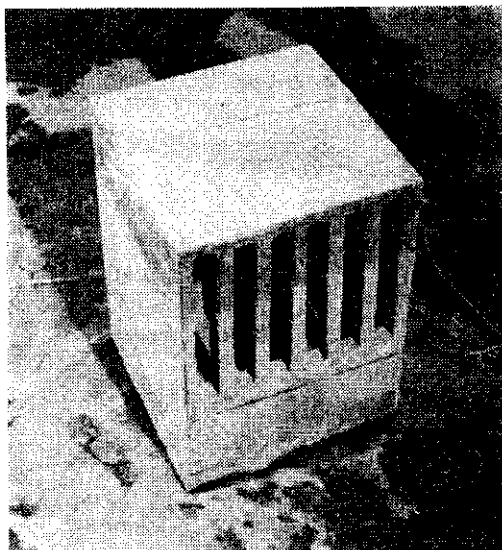


写真-1 クローズ型

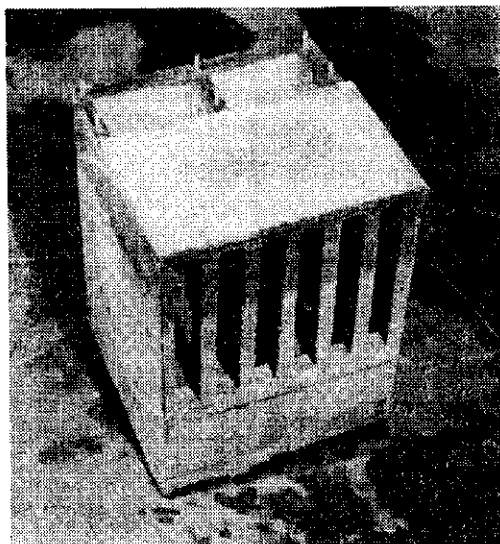


写真-2 オープン型 (港外側)



写真-3 オープン型 (港内側)

ある。しかし堤体の滑動という観点からは、滑動を生ぜしめる水平外力 P で代表することができよう。一方、堤体の滑動抵抗力は、堤体と割石基礎との静止摩擦係数を f 、滑動を生じるときの堤体水中重量を W' とおけば、 fW' で表示することができる。もっとも堤体水中重量 W' は浮力、揚圧力、越波水などに左右される。現象面はともかく、堤体水中重量は堤体の空中重量から静水時の浮力を差引いた値と定義すれば設計での取扱いが簡単になる。

2. 実験施設および実験方法

(1) 実験施設

実験は縮尺 1/25 と 1/13 とで行った。実験に使用した水路は図-2 に示すとおり、縮尺 1/25 の場合は、小型造波水路 (長 24.0 m × 幅 1.0 m × 高 1.0 m) を、縮尺 1/13 の場合は、大型造波水路 (長 50.0 m × 幅 1.6 m × 高 2.4 m) を使用した。

実験は図-3 および写真 1~3 に示す模型について行った。なお、混成堤については、写真-1 の前面および後面を板で覆って実験した。縮尺 1/13 の模型は、滑動量を測定する関係上、割石基礎の厚みをやや厚くしたが、他はすべて相似である。

(2) 実験方法

堤体を滑動させるため、模型が水路側壁に触れない程度の隙間を設けた。

滑動量は、小型造波水路では模型背後に 2 台の変位計を取付けて測定した。大型造波水路では、トランシットにより測定した。

模型と割石基礎との間の静止摩擦係数の測定は、縮尺 1/25 の模型について行った。図-4 に示すように秤量 50 kg、読取り精度 500 g のバネばかりを用いて張力を徐々に増加させ模型が滑動した時の値を読取って静止摩擦係数を求めた。測定はスリットケーソン 2 函について、上蓋を密閉した場合と上蓋の一部を取り除いた場合、それぞれ 5 回ずつ行った。なお、模型重量を表-1 に示す。

摩擦係数の測定結果は、表-2 のとおりである。測定は $f=0.504 \sim 0.616$ とばらついている。しかし、測定回数にしたがい漸増あるいは漸減するような傾向はみられなかったので測定値の平均 $\bar{f}=0.562$ を用いることにした。

今回の実験で採用した周期は、縮尺 1/25 の場合、1.1 秒、1.3 秒、1.5 秒、1.7 秒、2.0 秒、2.2 秒、2.4 秒の 7 種類、縮尺 1/13 の場合、1.5 秒、2.0 秒、2.8 秒、3.3 秒の 4 種類である。

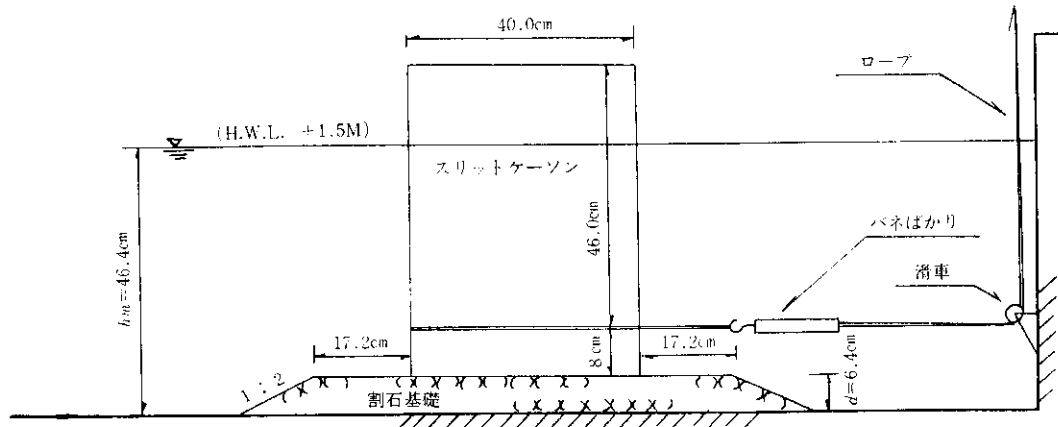


図-4 摩擦係数の測定

3. 実験結果

滑動を生じない小さな波高から少しずつ波高を大きくして堤体の動揺量と滑動量を測定した。実験データより

表-1 模型重量

模 型	縮尺	空 中 重 量 (kg)	水 中 重 量* (kg)
クローズ型	1/25	80.0	57.6
	1/13	590.0	426.0
オープン型	1/25	76.0	53.6
	1/13	551.0	387.0

* 水中重量=空中重量-(堤体の静水面以下の体積×水の単位体積重量)

滑動限界波高 H_c を取りだしたものが表-3 である。表中には、相対水深 h/L および滑動波圧係数 $\alpha = (fW')/(Aw_0H)$ の値も併記した。 α の算出にあたっては、波圧の作用面積 A を定めなければならないが、滑動限界波高に対しては、混成堤では越波状態であり、スリットケーソンでは、水面が上部床版に達していたので堤体全体に作用するものとした。

(1) 縮尺 1/25 の実験

相対水深 h/L を横軸にとって滑動波圧係数 α をプロットしたものが図-5 である。同図によれば、 α は h/L が小さいほど大きい。すなわち、実験水深は $h=46.4$ cm と一定にしたので、波長いいかえると周期が長いほど α が大きくなっている。

混成堤とオープン型は同傾向を示しており、オープン型の α は混成堤のほぼ 0.8 倍である。

表-2 スリットケーソンの摩擦係数

模 型		空 中 重 量 W (kg)	水 中 重 量 W' (kg)	張 力 T (kg)	摩 擦 係 数 ($f = T/W'$)	模 型		空 中 重 量 W (kg)	水 中 重 量 W' (kg)	張 力 T (kg)	摩 擦 係 数 ($f = T/W'$)
		(kg)	(kg)	(kg)	($f = T/W'$)			(kg)	(kg)	(kg)	($f = T/W'$)
A	上蓋密閉 (クローズ型)	80.0	57.6	32.0	0.556	B	上蓋密閉 (クローズ型)	79.0	56.6	34.0	0.601
				31.5	0.547					34.5	0.610
				33.0	0.573					31.5	0.557
				31.5	0.547					32.0	0.565
				34.0	0.590					32.0	0.565
	上蓋一部開放 (オープン型)	76.0	53.6	27.0	0.504		上蓋一部開放 (オープン型)	75.0	52.6	26.5	0.504
				33.0	0.616					28.0	0.532
				32.0	0.597					27.0	0.513
				29.0	0.541					32.0	0.608
				27.0	0.504					32.0	0.608

平均摩擦係数 $\bar{f} = 0.562$

表-3 滑動限界波高 H_c および滑動波圧係数 α

縮尺	混 成 堤					ク ロ ー ズ 型					オ ー プ ン 型				
	T (sec)	H_c (cm)	L (cm)	h/L	α	T (sec)	H_c (cm)	L (cm)	h/L	α	T (sec)	H_c (cm)	L (cm)	h/L	α
1/25	1.53	17.0	283	0.16	0.89	1.54	17.5	285	0.16	0.87	1.57	滑動せず	—	—	—
	1.72	14.25	328	0.14	1.07	1.72	14.25	328	0.14	1.07	1.74	19.75	333	0.14	0.72
	1.98	13.75	389	0.12	1.11	2.02	12.25	398	0.12	1.24	2.07	17.0	410	0.11	0.83
	2.27	13.0	455	0.10	1.17	2.24	12.0	448	0.10	1.27	2.25	16.25	450	0.10	0.87
	2.42	12.5	489	0.09	1.22	2.42	11.5	489	0.09	1.32	2.50	16.25	507	0.09	0.87
1/13	2.13	32.3	572	0.178	0.93	2.04	36.2	540	0.189	0.83	2.15	38.5	579	0.176	0.71
	2.80	26.9	808	0.126	1.11	2.75	26.9	791	0.129	1.11	2.85	30.8	825	0.124	0.88
	3.47	23.8	1,035	0.099	1.26	3.26	23.8	965	0.106	1.26	3.35	33.0	994	0.103	0.82

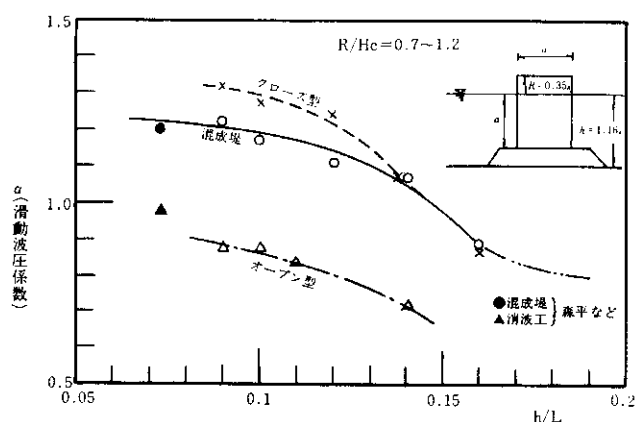


図-5 滑動波圧係数 (縮尺 1/25)

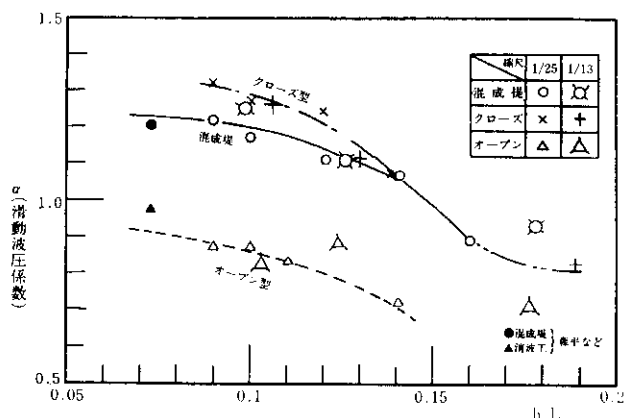


図-6 滑動波圧係数

クローズ型の α は h/L の大きい場合、すなわち周期の短い場合には混成堤と同じであるが、 h/L が小さい場合、すなわち周期の長い場合は、混成堤より大きくなっている。しかし、この図でみる限り、混成堤の $\alpha=1.2$ に対しクローズ型のそれは 1.3 とわずかに 0.1 うわまわる程度なので、設計の点からはそれほど問題にならないと考えられる。

オープン型とクローズ型の違いは、上部床版の一部を

密閉しているか否かの違いであり、それゆえ上部床版に作用する揚圧力が堤体有効重量に大きな影響を及ぼしていることがわかる。

(2) 縮尺 1/13 の実験

表-3 の縮尺 1/13 の滑動限界波高および滑動波圧係数の値を図-5 に書き入れたものが図-6 である。同図によれば、縮尺 1/13 の実験と縮尺 1/25 の実験とは混成堤の $h/L=0.178$ の値を除けば傾向においても値においても良好な一致を示している。

したがって、縮尺の違いによる滑動安定性の相違はみられず、通常縮尺の断面で滑動実験を実施してもさしつかえないことが判明した。

4. 実験結果の考察

(1) 混成堤、消波ブロック被覆堤、オープン型スリットケーソンの滑動波圧係数について

表-3 における縮尺 1/25 の滑動限界波高は $H_c=11.5\sim 19.75$ cm で、実験水深は $h=46.4$ cm であるから、 $H_c/h=0.25\sim 0.43$ である。堤体前面の割石基礎上の水深についてみても、最も大きい滑動限界波高は 19.75 cm なので前面水深は波高の 2 倍以上となっている。したがって、実験は重複波領域で行ったことになる。

森平など¹⁾の実験結果より、 $H_c/h=0.27$ および 0.37 における滑動波圧係数 α を求めたものが表-4 である。

また堤体前趾で波圧強度に等しく、後趾で零となる三角形分布の揚圧力を考慮した伊藤など²⁾の実験的研究によれば、波高水深比 H_c/h の小さい領域での平均波圧係数は 0.6 である。この値を揚圧力を考慮しない場合に換算すると $\alpha=0.78$ (計算値) となる。

したがって、混成堤の重複波領域における滑動波圧係数の範囲は $\alpha=0.8\sim 1.2$ 程度と考えられる。

赤塚など³⁾によれば、重複波前面に消波工を設置する

表—4 森平などによる滑動実験値
($i=1/50$, $h=20$ cm, $T=2.0$ sec, $h/L=0.073$)

H_c/h	h/H_0	$\alpha = F/wHA$	
		混成堤	消波工
0.27	3.2	1.2	1.1
0.37	2.5	1.2	0.85

と、波力は8~26%減少するとの実験結果が得られている。

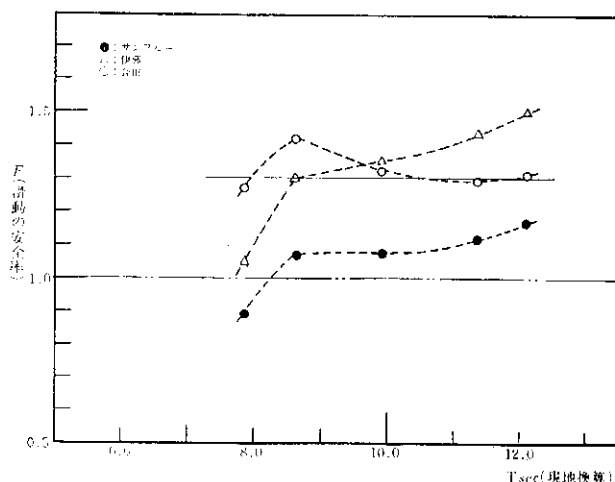
(1) で述べたように、オープン型の滑動波圧係数 α は混成堤に比べて20%減少している。また、図-6からオープン型の最低滑動波圧係数は0.7程度と考えられる。

以上より、オープン型は消波ブロック被覆堤に劣らない滑動抵抗力を有しているといえる。

(2) 混成堤の滑動安定性について

混成堤について、サンフルーの波力式、伊藤による期待滑動量の式および合田の波力式を用いて、滑動限界波高における安全率を計算⁴⁾した結果が図-7である。同図の安全率は、今回の実験から得られた滑動限界波高を用いて計算したものであるから、安全率1.0が評価の基準となる。サンフルーの周期7.85秒を除いて、すべて安全率が1.0より大きい。すなわち、もし今回の実験結果を基準にするならば、これらの波力式は堤体に明らかな滑動が認められる状態を指すものであると解釈される。

図-5では滑動波圧係数 α は h/L が小さくなるほど、すなわち周期が長くなるほど大きな値になっている。図-7では合田の波力式で8.6秒の場合を除けば、横軸に平行な直線で近似できる。したがって、合田の波力式は実験結果をよく説明している。



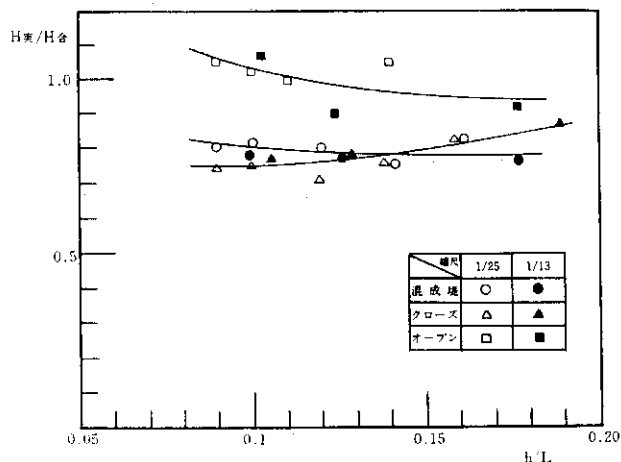
図—7 サンフルー、伊藤、合田の波力式による混成堤の滑動安全率

(3) 合田の波力式による滑動限界波高

今回の実験で得られた滑動限界波高は、合田の波力式において滑動安全率1.3に相当する波高となったが、滑動安全率1.0になる波高を合田の波力式から逆算すると、表-5のようになる。図-8は混成堤、クローズ型、オープン型の実験値の滑動限界波高を表-5の値との比で示したものである。クローズ型と混成堤は、合田の波力式による滑動限界波高のほぼ0.8倍、オープン型はほぼ1.0倍になっている。

表—5 合田の波力式による滑動限界波高

	T (sec)	L (m)	h/L	H (m)
1/25	7.65	70.75	0.16	5.15
	8.60	82.00	0.14	4.70
	9.90	97.25	0.12	4.28
	11.35	113.75	0.10	3.97
	12.10	122.25	0.09	3.85
1/13	7.68	74.36	0.178	5.41
	10.10	105.04	0.126	4.45
	12.51	134.55	0.099	3.99



図—8 実験値と合田の滑動限界波高値との比較

5. スリットケーソンにおける合田の波力式の準用

現行の設計にあっては、混成堤直立部に作用する波力は、合田の波力式により算定するのを標準としている。

また、消波ブロックで被覆された直立壁に使用する波力についても合田の波力式が準用されている⁴⁾。したがって、スリットケーソンについても合田の波力式を準用する方法を検討する。

図-8で混成堤の波高を基準にすれば、スリットケーソンの混成堤に対する滑動限界波高の比が求まる。したが

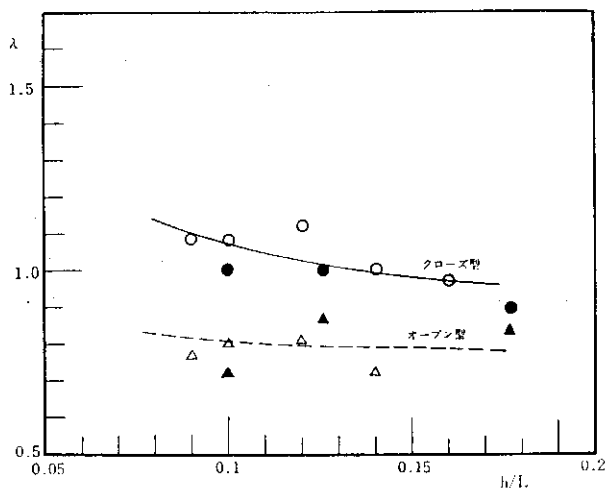


図-9 設計波高 H_D を求めるための係数

って、その逆数は設計波高の低減率になる。それを図-9に示す。すなわち、設計波高を H_D とし、それに図-9の係数を乗じたものを換算設計波高 H_D' とする。 H_D' を合田の波力式に代入すれば、スリットケーソンに作用する波力が算定される。

6. 結 論

1) 縮尺 1/25 の実験と縮尺 1/13 の実験とを比較した結果、縮尺の違いによる滑動安定性の相違はみられなかった。したがって、通常縮尺の断面で滑動実験を実施することができる。

2) クローズ型は、周期の短い場合には混成堤と同

じ安定性を有するが、周期が長くなると混成堤の場合よりやや小さな波高で滑動する。

3) オープン型とクローズ型の実験により、スリットケーソンにあっては、上部床版に作用する揚圧力が堤体有効重量に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

4) オープン型は、消波ブロック被覆堤に匹敵する安定性を有している。

5) スリットケーソンに作用する波力は、設計波高に図-9の係数を乗じて得た値を合田の波力式に代入して算定することができる。

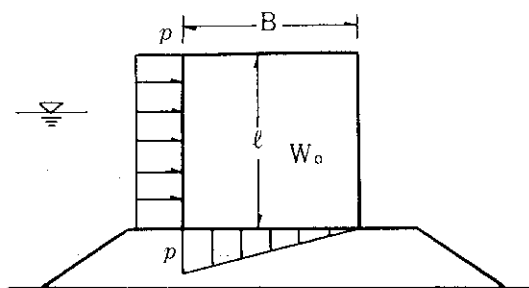
あ と が き

本実験の実施にさきだち、時川和夫前港湾研究室長(現 釧路港湾建設事務所長)の指導を得た。ここに記して深謝する次第である。

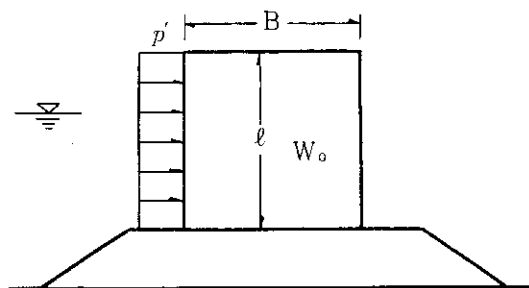
文 献

- 1) 森平, 柿崎, 菊谷; 異型ブロックの波力減殺効果に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第6巻4号, 1967年。
- 2) 伊藤, 藤島, 北谷; 防波堤の安定性に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第5巻14号, 1966年。
- 3) 赤塚, 竹田, 蓮見; 重複波堤前面に消波工を設置した場合の波力, 第22回海岸工学講演会論文集, 1975年。
- 4) 運輸省港湾局監修; 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 1979年。

付 録



伊藤の場合



揚圧力を無視した場合

伊藤による期待滑動量の式

$$pl = f \left(W_0 - p \frac{B}{2} \right)$$

$$p = 0.6 w H, \quad f = 0.6$$

$$0.6 w H l = 0.6 W_0 - 0.18 w H B \quad (\text{付-1})$$

揚圧力を無視した場合

$$p' l = f W_0$$

$$p' = \alpha w H$$

$$\alpha w H l = 0.6 W_0 \quad (\text{付-2})$$

式(付-2)を式(付-1)に代入して

$$\alpha = 0.6 + 0.18 \frac{B}{l}$$

伊藤の研究では $B/l=1$ だから

$$\alpha = 0.78$$