

混成防波堤直立部の滑動に関する実験的研究

堀 川 清 司*・宮 崎 和 行**

1. 結 論

混成防波堤を設計する際に、波力を静的な荷重におきかえて、堤体の安定を検討するのが在来の考え方であったが、これに対して伊藤ら¹⁾は防波堤の挙動を動的にとらえ、かつ波の不規則性を考慮に入れて期待滑動量なる概念を想定し、新たな設計条件を提案している。さらに堀川ら²⁾によってこの期待滑動量算定式が高基混成堤の場合について検証され、消波工被覆堤の場合についても若干の検討がなされた。

著者らは昨年度、混成防波堤直立部に作用する波力および揚圧力に関する実験結果³⁾を報告したが、今回はさらに押し進めて堤体の滑動に関する問題を取り扱い、種々の検討を行った。すなわち実際に波を作用させて堤体の滑動限界をとらえ、測定された外力より滑動摩擦係数を評価した場合と従来設計に用いられている値や引張り試験などによって得られた値とどのような差があるのか。滑動限界をこえた場合に、波の条件によって堤体はどのような滑動状況を示すのか。滑動量と外力との対応はどうなっているのか。消波工を被覆した場合に、堤体の滑動に対して安全であるのか。またその際に堤体はどのような滑動状況を示すのかなどの検討を行った。

堤体の滑動実験は、昨年度報告した波力および揚圧力に関する実験におけるものと同じ実験条件で行った。すなわち、水路の水平床部分に模型を設置し、捨石マウン

ドの高さ、堤体の寸法および重量、水深、波の周期および波高を変化させ、波の条件は重複波領域から碎波領域に至るまで、また防波堤の高さは越波の生じない条件から越波の生じる条件に至るまで、広範囲にわたって実験を行った。以下にその成果を述べる。

2. 実験の装置、方法および条件

実験水路、海底勾配、防波堤断面、波力と揚圧力の測定装置および測定方法、実験条件などは、昨年度報告したものと同じであり、参考のため防波堤断面を図-1および図-2に示し、実験条件を表-1に示す。断面1の

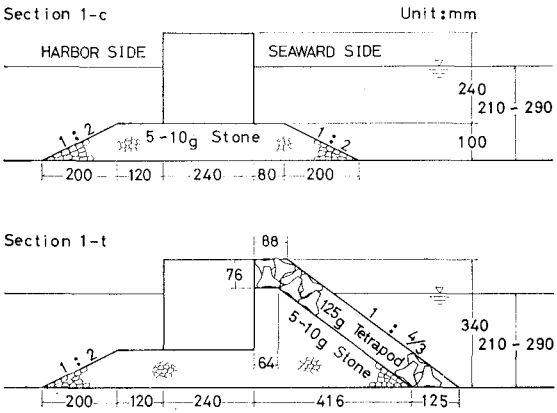
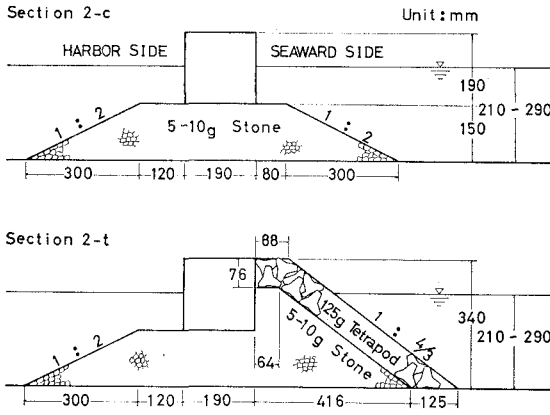


図-1 実験断面図 (I)

表-1 実験条件

模型設置 前の水深 h (cm)	堤体の 天端高 h_e (cm)	断 面	堤体の水中 重量 W_0 (g/cm)	捨石マウ ンドの高 さ (cm)	堤脚水深 d (cm)	波の周期 (sec)	模 型 設 置 位 置 に お け る 通 過 波 高 H (cm)									
							5.4	6.4	6.9	8.1	8.6	9.7	10.1	10.6		
29.0	5.0	1 2	230.9 177.8	10.0 15.0	19.0 14.0	0.80	5.4	6.4	6.9	8.1	8.6	9.7	10.1	10.6		
						1.40	6.0	7.6	9.6	11.9	13.5					
						2.00	6.1	8.4	10.2	11.6	13.9					
25.0	9.0	1 2	326.9 253.8	10.0 15.0	15.0 10.0	0.80	5.5	7.0	8.7	9.4	10.0					
						1.40	6.6	8.5	10.6	11.4	13.6					
						2.00	7.2	8.2	10.4	12.3	13.3					
21.0	13.0	1 2	422.9 329.8	10.0 15.0	11.0 6.0	0.80	6.0	6.9	8.2	8.8	9.8					
						1.40	6.1	7.6	8.5	9.7	11.7					
						2.00	6.5	7.9	10.0	11.8	14.0					

* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 工修 日本テトラポッド(株) コンサルタント事業本部



図一2 実験断面図 (II)

場合の堤体は高さ 24.0 cm, 幅 24.0 cm, 長さ 26.0 cm, 重量 17.86 kg であり, 断面 2 の場合の堤体は高さ 19.0 cm, 幅 19.0 cm, 長さ 26.0 cm, 重量 11.54 kg である。また捨石および中詰石には 5~10 g の砕石を用いてある。

堤体の滑動状況は 16 mm シネカメラを用いて撮影し, 16 mm フィルムアナライザーによって滑動量を読み取った。

3. 実験結果と考察

(1) 滑動摩擦係数

一連の滑動実験により堤体の滑動限界をとらえて滑動摩擦係数 μ を求めたのが表一2である。ここで滑動摩擦係数 μ は $f_*/(W_0 - f_{u*})$ によって算定した。また f は全波力 (静水圧の増加分を含む), f_u は全揚圧力 (浮力の増加分を含む), W_0 は堤体の水中重量, 添字 * は滑動限界時の水理量を示す。

表一2 より平均値 0.40 (0.32~0.51 の平均) を得たが, この値は永井ら⁴⁾ が引張り試験によって得た値 0.82

(0.77~0.89 の平均), および経験的に設計に用いられている値 0.60 (期待滑動量方式には 0.60 を用いている) よりも小さい。これは引張り試験や斜面上の安定試験によって μ を求める方法と, 実際に波を作用させて μ を求める方法とでは, 現象的な違い (後者は連続的な波の作用をとめない, ロッキング現象が存在する) があり, このような差が生じたものと思われる。また波力と揚圧力は堤体を固定してロッキングや滑動が生じない状態で測定されたものであり, 実際には林ら⁵⁾ が指摘しているようにロッキング現象の存在により堤体の慣性抵抗が波力の一部を吸収すると考えられるので, μ を $f_*/(W_0 - f_{u*})$ によって算定することに問題を残している。さらに在来の防波堤直立部の安定計算は, 波力, 滑動摩擦係数および安全率とのかみ合せにより評価されており, この観点からもさらに検討を要すると思われる。

(2) 滑動状況

混成堤および消波工被覆堤の直立部の滑動状況を示したものが図一3 であり, 図中の記号 d は堤脚水深, h は模型設置前の水深, H および L は模型設置位置における通過波の波高と波長, S は滑動量, N は作用波数である。

混成堤の場合の堤体の滑動状況を観察した結果, 以下のような滑動形態に分類される。ただし, ここでいう滑動量とは一波当りの滑動量であり, 以下簡単に滑動量という。

1. 滑動の当初, 重複波が作用しており, 堤体が滑動することによって捨石マウンドの天端幅が広がっても, 重複波が変形しない場合——滑動量はあまり変化しない (図一3 (1), (2))。

2. 重複波が作用しており, 堤体が滑動することによって捨石マウンドの天端幅が広がり, 重複波が変形して碎波的な波になる場合——徐々に滑動量は増加する。しかしながら, 碎波の衝撃力の最も大きくなる点を過ぎて

碎波後の波になると今度は逆に滑動量は減少して行く (図一3 (3), (4))。

3. 重複波領域と碎波領域の遷移領域にあるような波が作用している場合——堤体の滑動によって波がより碎波的になり急激に滑動量は増加するが, すぐに碎波力の最大となる点に達し, 滑動量は減少するようになる (図一3 (5), (6))。

4. 碎波後の波が作用している場合——堤体の滑動

表一2 滑 動 摩 擦 係 数

断 面	模型設置 前の水深 h (cm)	堤体の天 端高 h_e (cm)	堤脚水深 d (cm)	堤体の水 中重量 W_0 (g/cm)	波の周期 (sec)	通過波高 H (cm)	全 波 力 f_* (g/cm)	全揚圧力 f_{u*} (g/cm)	滑動摩擦 係 μ
1	29.0	5.0	19.0	230.9	0.80	8.1	95.7	15.6	0.44
					1.40	6.0	108.7	15.6	0.51
					2.00	6.1	80.4	32.4	0.41
	25.0	9.0	15.0	326.9	0.80	10.0	111.6	15.6	0.36
					1.40	8.5	152.2	24.0	0.50
					2.00	7.2	113.8	25.2	0.38
2	29.0	5.0	14.0	177.8	0.80	8.1	65.2	18.1	0.41
					0.80	9.4	82.7	36.1	0.38
					1.40	6.6	65.9	44.7	0.32
	25.0	9.0	10.0	253.8	2.00	7.2	66.7	45.6	0.32
					2.00	11.8	95.7	76.0	0.38
	21.0	13.0	6.0	329.8	2.00	11.8	95.7	76.0	0.38

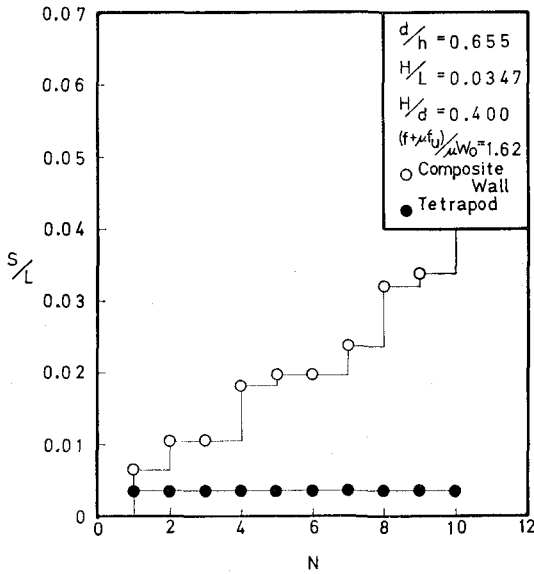


図-3 (1) 堤体の滑動状況

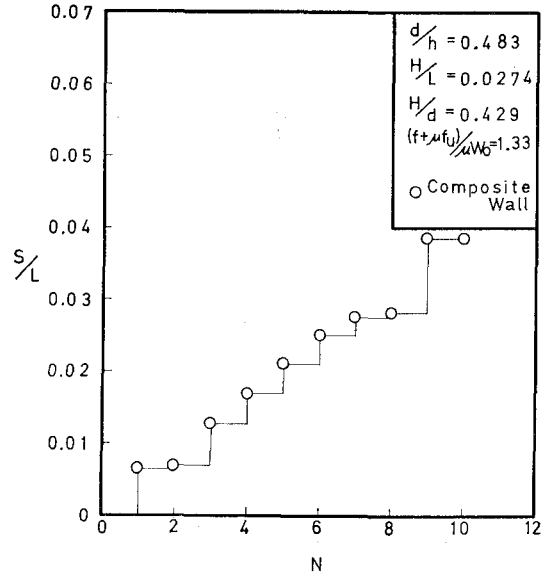


図-3 (2) 堤体の滑動状況

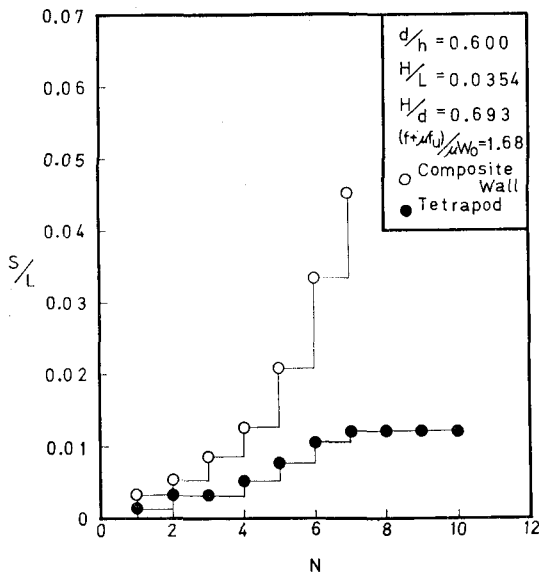


図-3 (3) 堤体の滑動状況

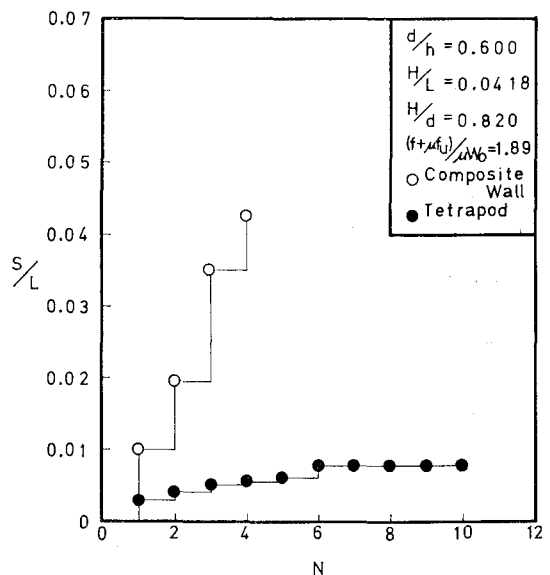


図-3 (4) 堤体の滑動状況

による捨石マウンドの天端幅の広がりによって、碎波が減衰し、滑動量は減少する一方である(図-3(7),(8))。

以上により、最大の滑動量を示す位置(碎波力が最大になる位置と考えられる)によって滑動の形式が決定されると思われる。この最大の滑動量を示す位置は、 d , h , H , L , h_0 (静水面より測った堤体の天端高), i (捨石マウンドののり面勾配)などによって決定されると思われる。すなわち最大の碎波力を示す捨石マウンドの天端幅を B_M とすると、次元解析により、

$$B_M/L = \phi(d/h, H/d, H/L, H/h_0, i)$$

と考えられるが、この B_M の決定が今後の課題となるであろう。なお上記の滑動形態について、滑動による波の変形のため越波量に変化する場合があるが、この影響は明らかでなかった。

一方消波工被覆堤の場合は、滑動の当初、消波工の天端の落下が急激に進行して消波工の波力の減殺効果を失うために当初の滑動量はかなり大きくなるが、消波工の天端の落下がゆるやかになると、落下した消波工が、離岸堤や潜堤のような役割をするようになり、強制的に碎波された波がさらにエネルギーを消耗させられ、

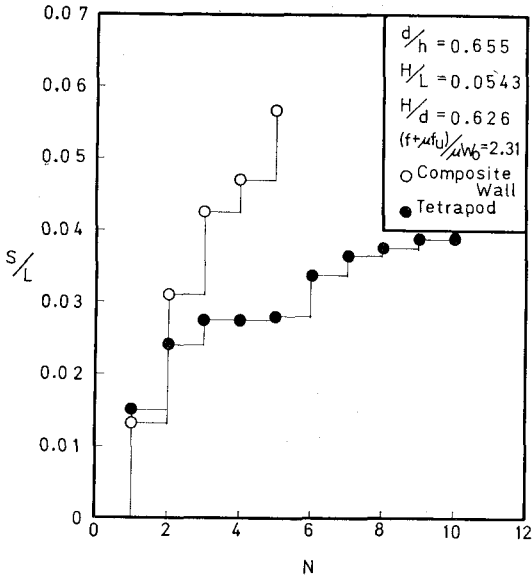


図-3 (5) 堤体の滑動状況

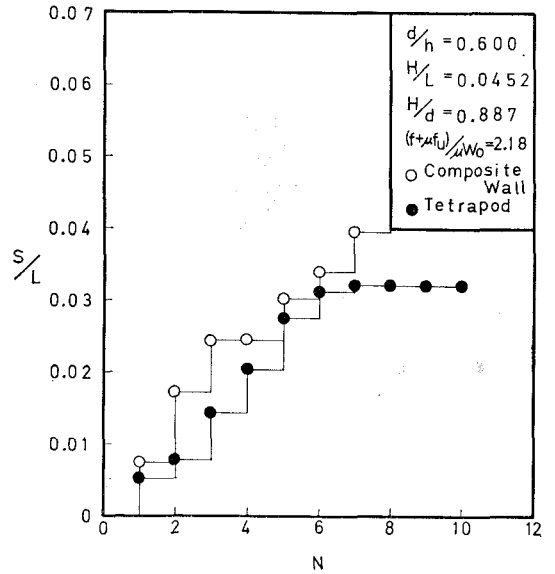


図-3 (6) 堤体の滑動状況

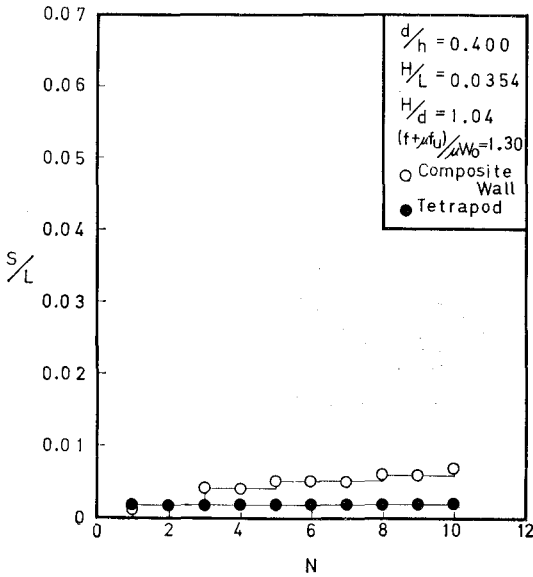


図-3 (7) 堤体の滑動状況

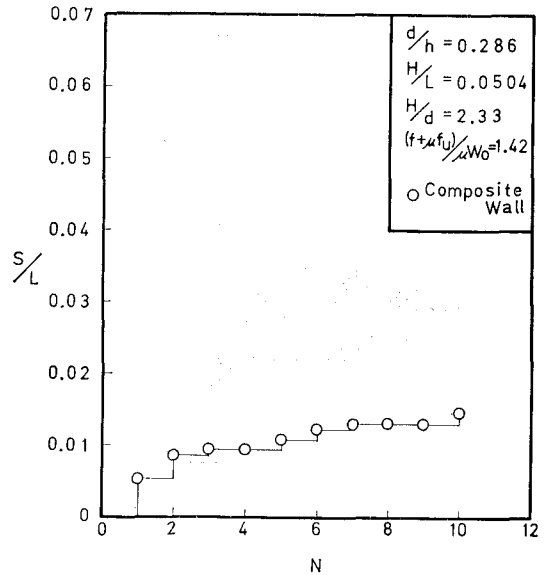


図-3 (8) 堤体の滑動状況

滑動量はあまり増加しなくなるか、または逆に減少してくる。著者らは上記の実験結果を検証するために、消波工被覆堤の場合の堤体の滑動後の波力および揚圧力を測定したが、その結果を図-4および図-5に示す。図中の記号 p は平均波圧強度、 p_u は堤体前趾の揚圧力、 w は水の単位体積重量、添字 t は消波工被覆堤の場合の水量である。なおこの場合の平均波圧強度 p は波力が堤頂まで作用するので、 $p=f/(d+h_o)$ として計算してある。図-4および図-5よりある程度、堤体が滑動した後は、波力と揚圧力はあまり増加しなくなるか、または逆に減少している。

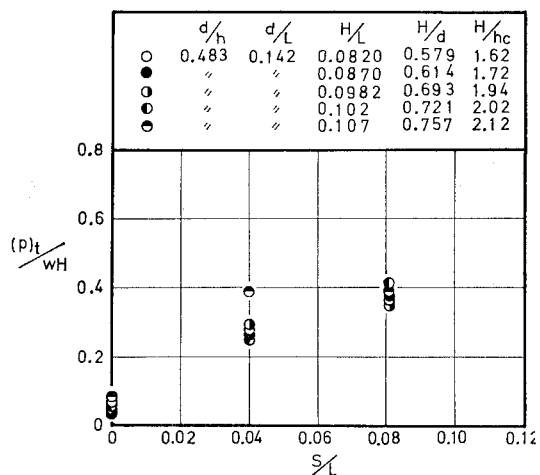
(3) 平均滑動量

一波当りの滑動量を評価するために、次元解析により検討を加えた結果、次のような無次元積の間の関係をえた。

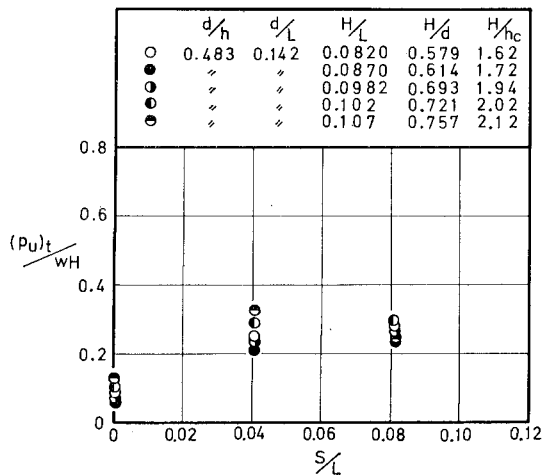
$$\varphi(\bar{S}/L, (f+\mu f_u)/\mu W_0)=0$$

ここで、 $\bar{S}$ は堤体の平均滑動量である。また $(f+\mu f_u)/\mu W_0=1$ の時堤体の滑動限界を与えたと考える。

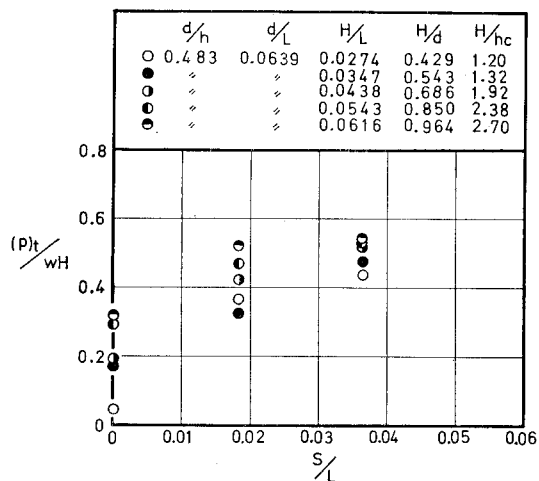
混成堤の場合の $\bar{S}/L$ と $(f+\mu f_u)/\mu W_0$ の関係を示したものが図-6である。消波工被覆堤の場合の平均滑動量 $(\bar{S})_t$ について図-6のように表示する際に、直立部にはすでに静的な消波工の荷重が作用しており、これをど



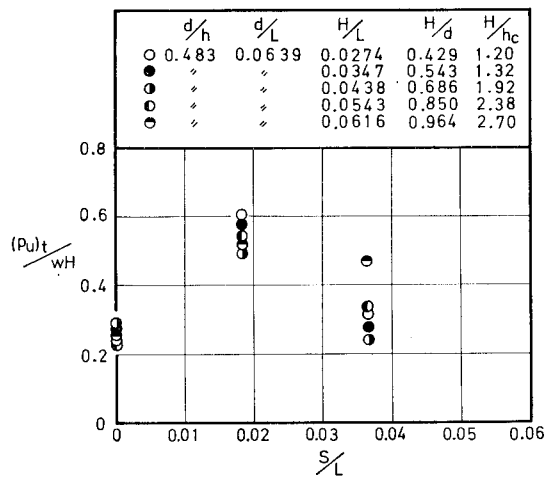
図—4 (1) 滑動後の波力の変化 (消波工被覆堤)



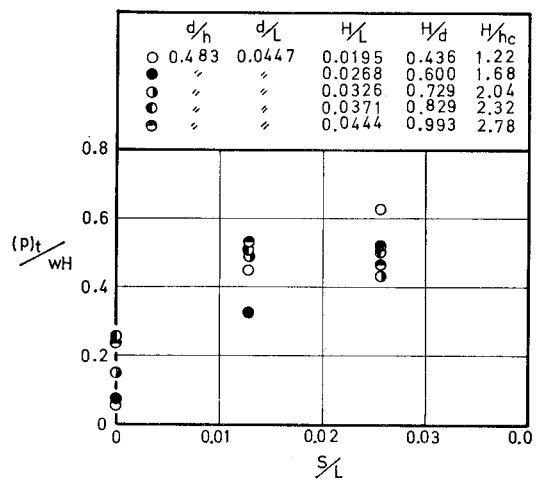
図—5 (1) 滑動後の揚圧力の変化 (消波工被覆堤)



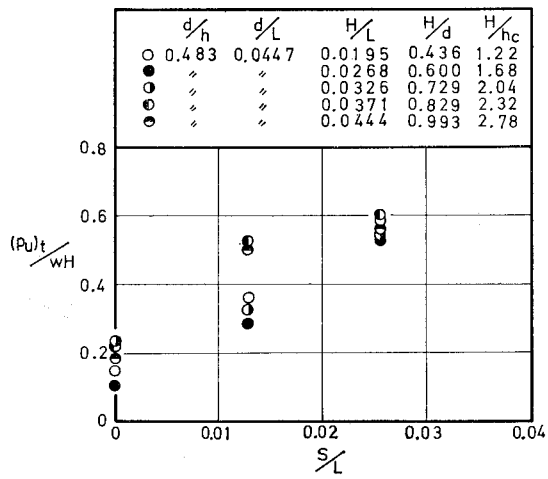
図—4 (2) 滑動後の波力の変化 (消波工被覆堤)



図—5 (2) 滑動後の揚圧力の変化 (消波工被覆堤)



図—4 (3) 滑動後の波力の変化 (消波工被覆堤)



図—5 (3) 滑動後の揚圧力の変化 (消波工被覆堤)

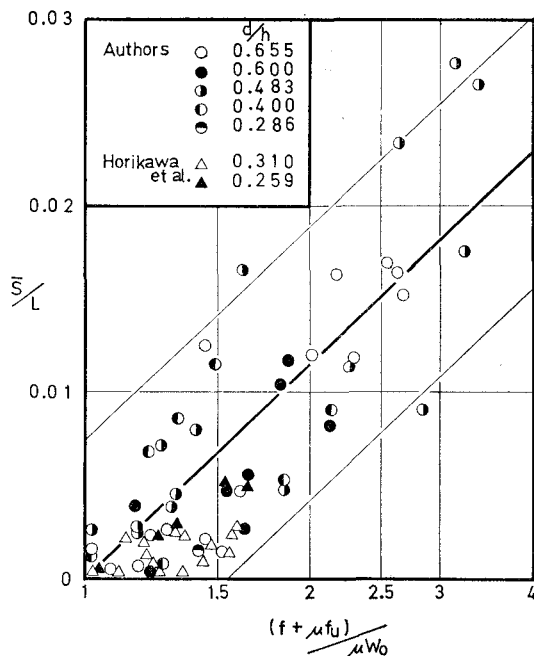


図-6 平均滑動量 (混成堤)

のように波力と対応づけるか問題があるので、消波工被覆堤の場合の外力を用いず、図-1 および 図-2 に示す断面 1-c および断面 2-c の混成堤に $(f + \mu f_u)$ なる外力が作用している時に断面 1-t および断面 2-t のように消波工を被覆すると $(\bar{S})_t$ はどの程度に評価し得るかと考え、 $(f + \mu f_u) / \mu W_0$ の値として混成堤におけるものを用いることにして、平均滑動量を示したのが 図-7 である。図-6 および 図-7 には堀川ら⁹⁾の実験結果を加えてあるが、 $(f + \mu f_u)$ の値は 図-8⁹⁾ および 図-9⁹⁾ を用いて計算した。なお $\bar{S}$ および $(\bar{S})_t$ は堤体の滑動状況を参考にして、滑動の初期において一波当りの滑動量があまり変化しない、つまり外力があまり変化しない

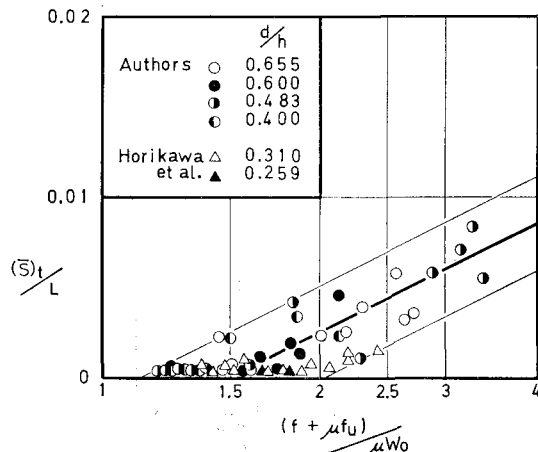


図-7 平均滑動量 (消波工被覆堤)

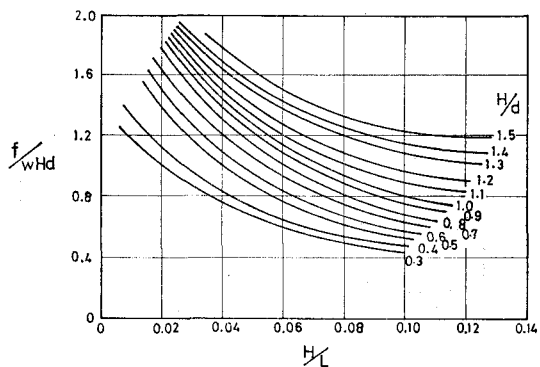


図-8 無次元波力による表示 (混成堤)

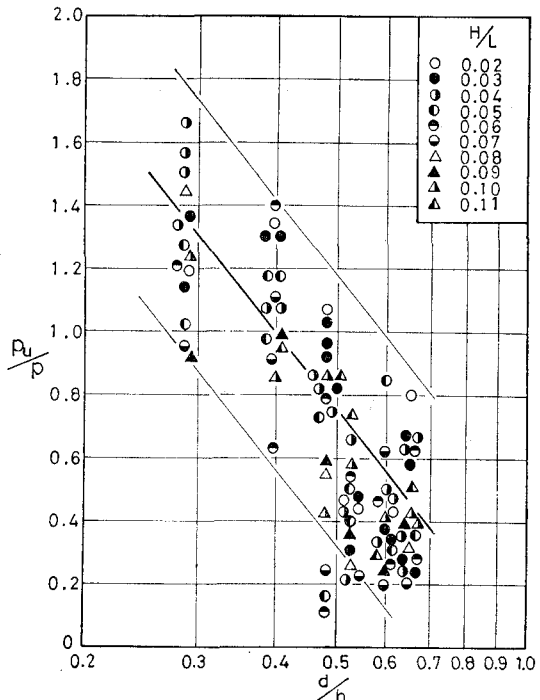


図-9 堤体前趾の揚圧力と平均波圧強度の関係 (混成堤)

いと見なせる範囲における平均滑動量であり、滑動摩擦係数の値としては 0.40 を用いてある。

期待滑動量方式には波長の影響が無視されているのに対し、図-6 から波長が重要な要素となっていることがわかる。図-6 は相当のばらつきがあるが、平均的に考えて、混成防波堤直立部の滑動に関する実験式を求めると次のようになる。

$$\bar{S}/L = 0.038 \log_{10} \{ (f + \mu f_u) / \mu W_0 \} \quad \cdots \cdots (1)$$

$$1 < (f + \mu f_u) / \mu W_0 < 3.4$$

図-7 より消波工被覆堤直立部の滑動に関する実験式を求めると次のようになる。

$$(\bar{S})_t/L = -3.5 \times 10^{-3}$$

$$+ 0.020 \log_{10} \{ (f + \mu f_u) / \mu W_0 \} \quad \cdots \cdots (2)$$

$$1.5 < (f + \mu f_u) / \mu W_0 < 3.4$$

式 (1), (2) より $(f + \mu f_u) / \mu W_0$ を消去すると,

$$(\bar{S})_t / L = -3.5 \times 10^{-3} + 0.53 \bar{S} / L \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\bar{S} / L \geq 0.0066$$

となる。しかしながら、ここで注意しなければならないのは、消波工被覆堤における滑動量を式 (2), (3) のように表示できるのは、図—1 および 図—2 に示した断面 1—t および断面 2—t のように消波工を被覆した場合に限られるということである。

以上規則波による混成堤と消波工被覆堤の場合の堤体の平均滑動量を評価したが、規則波による滑動量を線型的に重ね合わせて不規則波の滑動量を評価すること、堤体の滑動によって外力が変化し、波の条件によって滑動状況に相違のあること、滑動量には波長の効果が重要な要素となることなどの問題があり、期待滑動量方式との直接対比はできない。また消波工被覆堤の場合、果して堤体が滑動してもよいものなのか、滑動してもよいならどの程度までの滑動を許せるのかなどの問題があり、期待滑動量なる概念を適用することに疑問がもたれる。

4. 結 論

得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 堤体に波を作用させて、滑動限界をとらえ、モルタルと碎石との滑動摩擦係数 μ を $f_*/(W_0 - f_{u*})$ によって算定したところ、平均値として 0.40 (0.32~0.51 の平均) を得た。

(2) 混成堤直立部の滑動状況を観察した結果、波の条件によって種々の滑動状況を示すことが明らかになった。すなわち最大の滑動量を示す位置 (碎波力の最大と

なる位置と考えられる) によって滑動の形式が決定されると思われる。

(3) 消波工被覆堤直立部の滑動状況を観察したところ、消波工の天端の急激な落下のために、当初の滑動量は大きい、消波工の天端の落下がゆるやかになると、滑動量はあまり増加しなくなるか、または逆に減少してくる。

(4) 混成防波堤直立部の平均滑動量は、図—6 または式 (1) のように表示される。期待滑動量方式には波長の影響が無視されているのに対し、図—6 または式 (1) から波長が重要な要素となっていることがわかる。

(5) 消波工被覆堤直立部の平均滑動量は、図—7 または、式 (2), (3) のように表示されるが、このように表示できるのは 図—1 および 図—2 に示した断面 1—t および断面 2—t のように消波工を被覆した場合である。

参 考 文 献

- 1) 伊藤喜行・藤島 睦・北谷高雄: 防波堤の安定性に関する研究, 港湾技術研究報告, 第 5 巻, 14 号, 1966, 9.
- 2) 堀川清司・小沢保臣・高橋邦夫: 高基混成堤直立部の期待滑動量について, 第 19 回海岸工学講演会論文集, 1972.
- 3) 堀川清司・宮崎和行: 混成防堤直立部に作用する波力および揚圧力に関する実験的研究, 第 20 回海岸工学講演会論文集, 1973.
- 4) 永井莊七郎・玉井佐一・久保 直: 混成防波堤直立部の滑動および底面に働く揚圧力, 第 7 回海岸工学講演会講演集, 1960.
- 5) 林 泰造・服部昌太郎・林 憲吉: 碎波の圧力と壁体の滑動, 第 7 回海岸工学講演会講演集, 1960.