

# 高基混成堤直立部の期待滑動量について

堀川 清司\*・小沢 保臣\*\*・高橋 邦夫\*\*\*

## 1. 緒 論

堤体が受ける波力の研究は数多く、その成果は枚挙にいとまがないほどである。しかしながらこれを堤体の滑動および転倒の検討にまで押し進めた研究はあまり多くない。

従来、動的荷重を受ける混成防波堤の安定も静力学的な安定条件を用いて設計するのが一般である。また、現地のきわめて不規則な波の特性を統計的な代表値をもって表わし、防波堤の安定性を検討する方法がとられてきた。これに対して伊藤ら<sup>1)</sup>は波の不規則性を考慮し、防波堤の破壊に至る挙動を解明する一つの尺度として期待滑動量なる概念を用い、新たな設計基準を提案している。このように防波堤の総合的な安定性を確認するためには波力などの水理現象だけでなく防波堤の破壊の機構、破壊に至る過程を把握しておくことが必要である。

筆者らは不規則波を用い高基混成堤直立部の滑動量およびロッキング量を独自の測定方法によって精度よく検出し、種々の実験条件で得られた測定結果をもとに伊藤ら<sup>1)</sup>によって提唱された期待滑動量算定式の妥当性を検証した。また、消波工にテトラポッドを使用した被覆混成堤で同様な実験を行ない、堤体の安定効果について考察するとともに、期待滑動量なる考え方が被覆混成堤にも適用しうるかどうかを検討した。さらに防波堤の安定性に対して不規則波のもつ作用が規則波のもつ個々の作用を重ね合わせた場合と等価であるかどうかについて比較を行なってみた。以下にその成果の概要を報告する。

## 2. 実験装置

実験は長さ 22.0 m、幅 0.8 m、高さ 1.5 m の風洞付二次元造波水路を用いて行なった。堤体は風洞出口より 15.0 m 地点に設置した。前面の海底勾配は堤体から沖側 3.0 m を水平床に、さらに沖側を  $i=1/10$  の勾配とした。また、堤体設置部の水平床は水路底より 20.0 cm の高さとし、波高の大きな波が一樣水深部で碎けないよう配慮した。捨石マウンドの高さは 20.0 cm で、中詰石には 5 ~ 10 g 程度の碎石を使用した。

堤体は 図-1 (a) のように設置し、計測器はすべて中

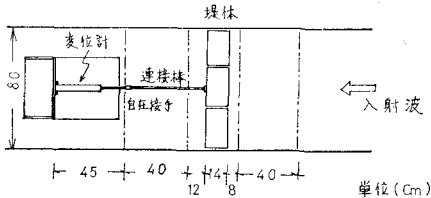


図-1 (a) 測定装置 (平面図)

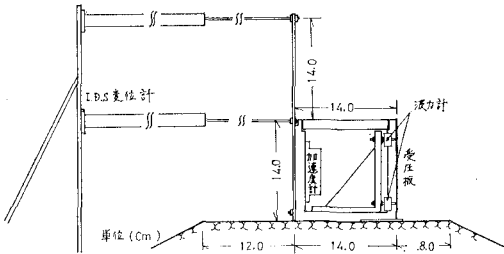


図-1 (b) 測定装置 (断面図)

央堤体にセットしてある。この中央堤体の背後には比重の小さいかつ剛なジュラルミン板を 図-1 (b) のように垂直に固定して、後方の鋼製直立壁にセットされた2つの I.D.S. (Inductance Displacement Sensor) 型変位変換器に接続してある。I.D.S. 型変位計はブリッジの2辺にコイルを置き、コイル中の鉄芯の変位によって生じるインピーダンスの変化をストレインアンプで取り出す仕組である。回路がインダクタンス変化を組み合わせた構成であるため、高い周波数の測定も可能である。本実験では堤体の天端および天端上 14.0 cm の変位量を知ることによって堤体の微小な滑動量ならびにロッキング量を精度よく検出した。また、堤体前面には波力計を、堤体内部に加速度計を取り付け、堤体に作用する波力ならびに堤体の加速度を同時に測定できるようにした。

## 3. 実験方法

実験波は風波と波高 2.0 cm、周期 1.0 sec 程度の規則波との合成波である。入射波は堤体設置前における堤体前面波の諸元をとった。表-1 は本実験に用いた6ケースの不規則波の特性を示したものであるが、現地で観測される波とはかなり異なっている。図-2 は Case 1-3, Case 2-3 における連続 150 波の波高記録から得られた波高の頻度分布である。

\* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科  
\*\* 正会員 日本テトラポッド(株)土浦技術センター  
\*\*\* 正会員 運輸省港湾技術研究所

表-1 不規則波の諸元

| Case | 波 | 水深          | 水深(h)   | $\bar{H}$ | $H_{1/3}$ | $H_{1/10}$ | $H_{max}$ | $H_{1/10}/H_{1/3}$ | $H_{max}/H_{1/3}$ | $H_{1/3}$ の<br>超過確率 | $H_{1/10}$ の<br>超過確率 | $\bar{T}$ | $T_{1/3}$ |
|------|---|-------------|---------|-----------|-----------|------------|-----------|--------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-----------|-----------|
|      |   |             | 堤部水深(d) |           |           |            |           |                    |                   |                     |                      |           |           |
| 1-1  |   | 25.0<br>5.0 | cm      | 4.9       | 7.0       | 8.1        | 9.1       | 1.16               | 1.30              | 0.172               | 0.055                | 0.77      | 0.84      |
| 1-2  |   | 27.0<br>7.0 | cm      | 5.1       | 7.4       | 8.6        | 10.0      | 1.16               | 1.35              | 0.159               | 0.047                | 0.74      | 0.78      |
| 1-3  |   | 29.0<br>9.0 | cm      | 5.4       | 7.5       | 8.6        | 10.0      | 1.15               | 1.33              | 0.152               | 0.044                | 0.78      | 0.83      |
| 2-1  |   | 25.0<br>5.0 | cm      | 6.2       | 7.6       | 8.4        | 9.5       | 1.11               | 1.25              | 0.131               | 0.043                | 0.90      | 0.83      |
| 2-2  |   | 27.0<br>7.0 | cm      | 6.4       | 8.0       | 8.9        | 9.7       | 1.11               | 1.21              | 0.143               | 0.047                | 0.92      | 0.83      |
| 2-3  |   | 29.0<br>9.0 | cm      | 6.4       | 8.3       | 9.3        | 10.0      | 1.12               | 1.20              | 0.147               | 0.033                | 0.89      | 0.83      |

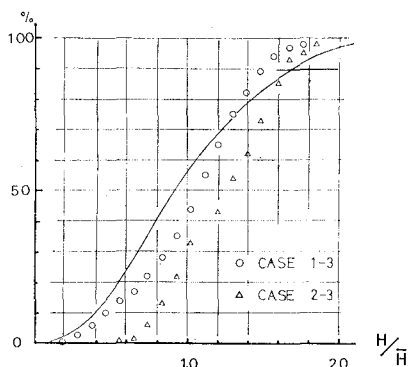


図-2 波高の頻度分布

実験に使用した堤体の形状ならびに重量は表-2に示すとおりである。堤体は水密性のモルタルで外箱を製作し、重心の位置が変わらないよう中詰材料を換えることによって重量調整ができるよう考慮した。また不規則波の実験においては波をかなり長時間連続して作用させる必要上、反射波の処理に関しては十分注意を払い、造波板前面に消波装置を設置した。

表-2 模型堤体

| No. | 高さ<br>(cm) | 幅<br>(cm) | 長さ<br>(cm) | 重量<br>(kg) | 比重   |
|-----|------------|-----------|------------|------------|------|
| 1   | 14         | 14        | 26         | 4.8        | 0.94 |
| 2   | 14         | 14        | 26         | 5.8        | 1.14 |
| 3   | 14         | 14        | 26         | 6.8        | 1.33 |
| 4   | 14         | 14        | 26         | 7.8        | 1.53 |
| 5   | 14         | 14        | 26         | 8.8        | 1.73 |
| 6   | 14         | 14        | 26         | 10.25      | 2.01 |
| 7   | 14         | 10        | 26         | 4.8        | 1.32 |
| 8   | 14         | 10        | 26         | 5.8        | 1.59 |
| 9   | 14         | 10        | 26         | 6.8        | 1.87 |

#### 4. 実験結果および考察

##### (1) 堤体の滑動状況

堤脚の移動量は堤体の天端および天端上 14.0 cm の変位量から簡単な外挿によって容易に求められる。堤体は図-3(a), (b) に示すように衝撃的な波力がピークに達す

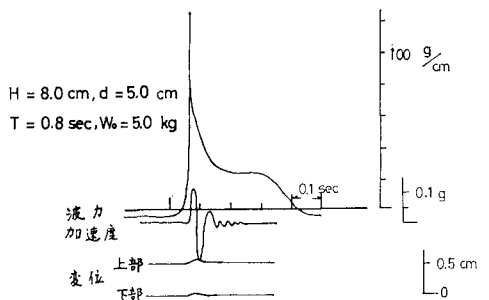


図-3(a) 堤体の滑動状況

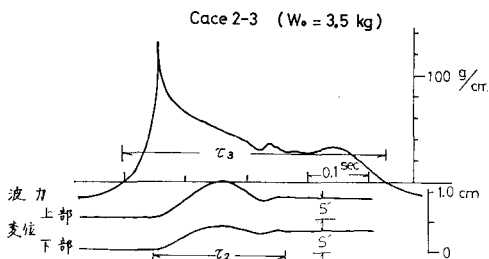


図-3(b) 堤体の滑動状況

る直前に動き始め、波が引くとまた元に戻るような動きを示す。また天端上 14.0 cm の上部変位計の変位量は下部変位計のそれよりも大きく、堤体の示す挙動は単に滑動だけでなく常にロッキング現象をとまなっていることがわかる。このような現象は移動量の大小には関係なくみられるものである。そこで筆者らは滑動量  $S$  を堤脚部の初期位置から波が引いた後の堤脚位置までの距離と定義し、堤体はかなり動揺してもその変位量が 0.5 mm 以上に達しないものは滑動したとみなさないことにした。

図-3(a), (b) は滑動量が比較的小さい場合の堤体の挙動と波力の時間曲線との関係を示したものである。滑動量のたちあがりには上部ならびに下部測定値ともほぼ衝撃波力のピーク時と一致しており、波力の腰掛部が十分現われないうちに安定している。このような場合、堤体はかなり規則的な減衰振動を示し、その固有振動周期はおよそ 0.04~0.05 sec である。この値は現地波を 4.0 m と仮定すれば模型縮尺が 1/50 となり、現地で観測された振動周期 0.20~0.3 sec に比較的近い。堤体の比重が 1.33

と現地の場合と比較してかなり小さいが本実験の領域でも、ほぼ Froude の相似則が満足されているようである。一方、滑動抵抗に比して作用波力が十分大きい時には堤体の動きは滑動が主体でロッキングはあまり顕著に現われていない。

## (2) 不規則波による期待滑動量

期待滑動量すなわち総滑動量はある波群を構成する各波の一波当たりの滑動量と、その波高の出現頻度とを掛け合わせたものの合計量で定義される。伊藤らは波数  $N$  の波群によって期待される滑動量  $S$  を式 (1) で与えている。

$$S = N \int_{H_c}^{H_{\max}} \frac{\mu g k p (p - p_c)}{2 p_c^2} H F(H) dH \quad \dots\dots (1)$$

ここに

$\mu$ : 静止摩擦係数 ( $\mu=0.6$ ),  $g$ : 重力加速度  
 $p$ : 波圧強度,  $H_c$ : 滑動限界波高  
 $p_c$ : 滑動限界時の波圧強度  
 $k$ : 堤体の滑動に有効な作用波力の継続時間

$F(H)$ : 波高  $H$  の出現頻度

式 (1) を用いて期待滑動量を算出するにあたり、まず波圧強度  $p$  の算定が必要である。この波圧強度  $p$  は滑動実験から求められる滑動限界波高と堤体重量との関係をもとに式 (2) から逆算することによって求められる。

$$p \cdot l = \mu \left( W_0 - \frac{B}{2} p \right) \quad \dots\dots (2)$$

$l$ : 堤体の高さあるいは静水面上  $1.25H$  までの高さのどちらか小さい方をとる。

$W_0$ : 堤体水中重量 (単位幅当り)

$B$ : 堤体幅

図-4 は上述した方法によって不規則波 150 波を対象に求めた滑動限界波高と堤体水中重量との関係を表わしたものである。図-5 は式 (2) から求めた波圧強度  $p$  を無次元量で表示したものであり、この方法によって求められる波圧強度の無次元量  $p/wH$  は完全砕波を含む Case-1 でもたかだか 1.05 程度である。もっともこの波圧強度は滑動量の下限をどこにとるかによって違った値をもつわけで、したがってこれらの値は波圧を現象的に記述したものではなくあくまで滑動量を算定するための便宜的な波圧強度にすぎない。一方波力の作用時間に関する係数  $k$  の値は各実験条件によって得られた不規則波 150 波の総滑動量  $S$  から式 (1) を逆算して求められる実験値であり、各

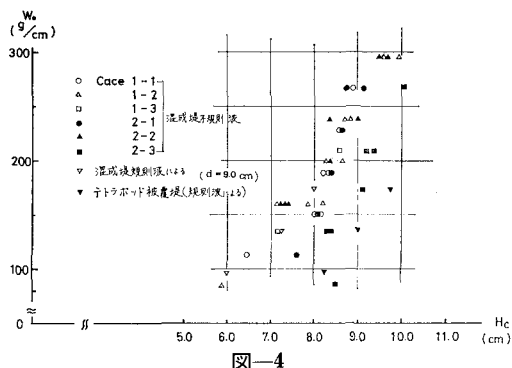


図-4

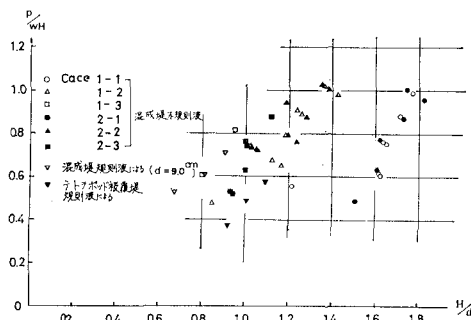


図-5

ケースとも滑動量が大きくなるほど  $k$  の値が小さくなる傾向がある。筆者らは  $k$  の値を  $1.3 \times 10^{-4} \text{ sec}^2/\text{cm}$  として不規則波 150 波の期待滑動量の算定を行なった。図-6

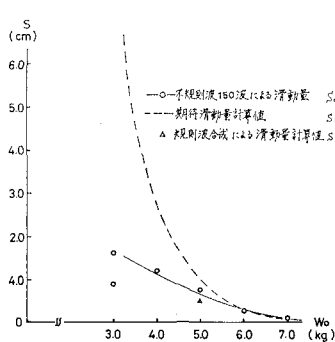


図-6(a) 堤体水中重量と滑動量 (Case 1-1)

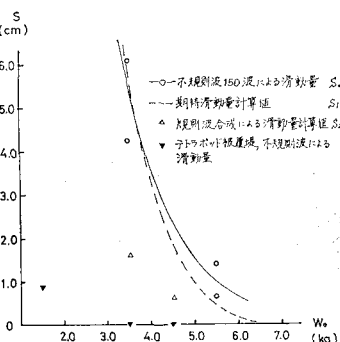


図-6(c) 堤体水中重量と滑動量 (Case 1-3)

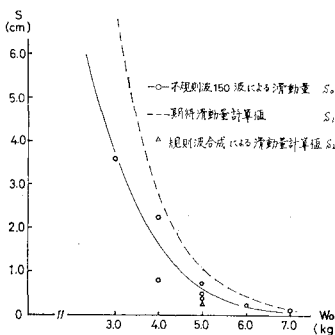


図-6(b) 堤体水中重量と滑動量 (Case 2-1)

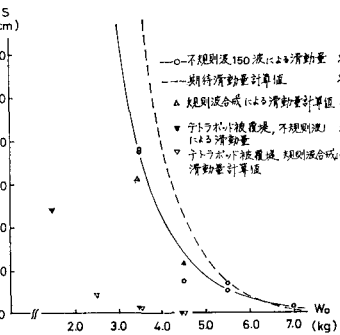


図-6(d) 堤体水中重量と滑動量 (Case 2-3)

表—3 不規則波 150 波の滑動量 ( $S_0$ ) と期待滑動量 ( $S_1$ )  
および規則波合成による滑動量計算値 ( $S_2$ )

a) 混 成 堤 (ただし  $H_c, p_c$  は各ケースの代表値である。)

| Case | 水中重量<br>$W_0$ (kg) | 滑動限界波高<br>$H_c$ (cm) | $H_c$ の波圧強度<br>$p_c$ (gr/cm) | 滑動回数<br>$N_c$ | $N_c/150$ | 実 測 値<br>$S_0$ (cm)  | $S_0/H_c$               | 期待滑動量<br>$S_1$ (cm) | $S_1/H_c$ | $S_2$ (cm)            |
|------|--------------------|----------------------|------------------------------|---------------|-----------|----------------------|-------------------------|---------------------|-----------|-----------------------|
| 1-1  | 3.00               | 7.75                 | 3.70                         | 13            | 0.09      | 3.60                 | 0.465                   | 6.900               | 0.890     |                       |
|      | 4.00               | 8.05                 | 4.97                         | 9             | 0.06      | 0.80<br>2.24         | 0.099<br>0.278          | 2.667               | 0.331     |                       |
|      | 5.00               | 8.30                 | 6.24                         | 6             | 0.04      | 0.40<br>0.50<br>0.75 | 0.048<br>0.060<br>0.090 | 1.069               | 0.126     | 0.25                  |
|      | 6.00               | 8.60                 | 7.50                         | 4             | 0.03      | 0.26                 | 0.030                   | 0.421               | 0.049     |                       |
|      | 7.00               | 8.85                 | 8.80                         | 1             | 0.01      | 0.10                 | 0.011                   | 0.114               | 0.013     |                       |
| 1-2  | 4.25               | 7.60                 | 5.31                         | 20            | 0.13      | 1.70<br>2.20<br>3.05 | 0.224<br>0.289<br>0.401 | 3.310               | 0.435     |                       |
|      | 5.25               | 8.25                 | 6.58                         | 10            | 0.07      | 0.71                 | 0.086                   | 1.060               | 0.130     |                       |
|      | 6.25               | 8.85                 | 7.85                         | 5             | 0.03      | 0.65<br>0.30         | 0.073<br>0.034          | 0.280               | 0.030     |                       |
|      | 7.75               | 9.75                 | 9.75                         | 1             | 0.01      | 0.05                 | 0.005                   | 0.011               | 0.001     |                       |
| 1-3  | 3.50               | 7.25                 | 4.40                         | 28            | 0.19      | *6.10<br>4.25        | 0.84<br>0.59            | 5.550               | 0.765     | 1.57                  |
|      | 5.50               | 8.55                 | 6.93                         | 7             | 0.05      | 0.65<br>1.40         | 0.076<br>0.164          | 0.428               | 0.050     | 0.60<br>( $W_0=4.5$ ) |
| 2-1  | 3.00               | 7.65                 | 3.70                         | 18            | 0.12      | 1.60                 | 0.210                   | 8.150               | 1.060     |                       |
|      | 4.00               | 8.00                 | 4.97                         | 12            | 0.08      | 1.21                 | 0.026                   | 2.650               | 0.330     |                       |
|      | 5.00               | 8.35                 | 6.24                         | 9             | 0.06      | 0.75                 | 0.090                   | 0.990               | 0.119     | 0.51                  |
|      | 6.00               | 8.65                 | 7.50                         | 4             | 0.03      | 0.28                 | 0.032                   | 0.301               | 0.035     |                       |
|      | 7.00               | 9.15                 | 8.78                         | 1             | 0.01      | 0.15<br>0.05         | 0.016<br>0.006          | 0.067               | 0.007     |                       |
| 2-2  | 4.25               | 7.50                 | 5.32                         | 27            | 0.18      | 5.55<br>5.20<br>3.90 | 0.740<br>0.690<br>0.520 | 5.360               | 0.715     |                       |
|      | 5.25               | 8.15                 | 6.58                         | 18            | 0.12      | 0.80<br>0.82         | 0.098<br>0.101          | 1.780               | 0.220     |                       |
|      | 6.25               | 8.75                 | 7.85                         | 9             | 0.06      | 0.55<br>0.75         | 0.063<br>0.085          | 0.486               | 0.056     |                       |
|      | 7.75               | 9.65                 | 9.74                         | 1             | 0.01      | 0.18<br>0.14         | 0.019<br>0.014          | 0.021               | 0.002     |                       |
|      | 3.50               | 8.50                 | 4.40                         | 22            | 0.15      | 3.75<br>3.80         | 0.440<br>0.450          | 7.220               | 0.886     | 3.18                  |
| 2-3  | 4.50               | 8.95                 | 5.66                         | 14            | 0.09      | 0.76                 | 0.085                   | 2.350               | 0.275     | 1.20                  |
|      | 5.50               | 9.40                 | 6.93                         | 8             | 0.05      | 0.70<br>0.55         | 0.075<br>0.059          | 0.711               | 0.079     |                       |
|      | 7.00               | 10.20                | 8.82                         | 1             | 0.01      | 0.16                 | 0.016                   | 0.086               | 0.022     |                       |

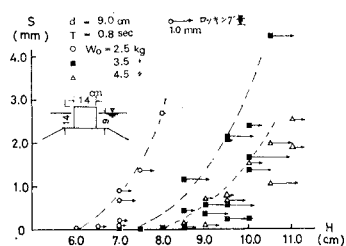
b) テトラポッド被覆堤

| Case | 水中重量<br>$W_0$ (kg) | 滑動限界波高<br>$H_c$ (cm) | $H_c$ の波圧強度<br>$p_c$ (gr/cm) | 滑動回数<br>$N_c$ | $N_c/150$ | 期待滑動量<br>$S_2'$ (cm) | $S_2'/H_c$ |  |  |  |
|------|--------------------|----------------------|------------------------------|---------------|-----------|----------------------|------------|--|--|--|
| 1-3  | 1.5                | 8.50                 |                              | 8             | 0.053     | 0.85                 | 0.100      |  |  |  |
|      | 3.5                | —                    |                              | 0             | 0         | 0.00                 | —          |  |  |  |
|      | 4.5                | —                    |                              | 0             | 0         | 0.00                 | —          |  |  |  |
| 2-3  | 1.5                | 9.10                 |                              | 10            | 0.067     | 2.40                 | 0.264      |  |  |  |
|      | 1.5                | 10.25                |                              | 1             | 0.007     | 0.10                 | 0.010      |  |  |  |
|      | 4.5                | —                    |                              | 0             | 0         | 0.00                 | —          |  |  |  |

は計算値と実測値とを比較したもので、それらの諸量は規則波による実験結果とともに表—3 にまとめて示してある。双方の値には若干の相違が認められるが、これは捨石マウンドと堤体底面間の摩擦係数のとりかたの外に、堤体重量と作用波力によって堤体の示す挙動の機構に違いがあることに起因しているように思われる。しかしながら式 (1) で表わされる期待滑動量の算定式は実験値の安全側をとらえ、ほぼ妥当な推算式といえる。

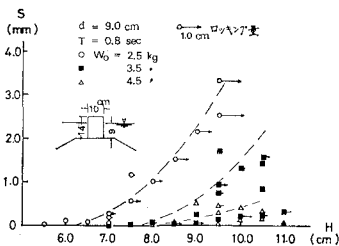
(3) 規則波による期待滑動量

図—7 は規則波 10 波を作用させたときの 1 波当たりの平均滑動量と波高との関係を堤体の水中重量をパラメーターにして整理したものである。各波高の 1 波当たりの平均滑動量はかなりばらついているが安全側を考慮して図中破線でこれを代表した。この 1 波当たりの平均滑動量と波高の頻度分布を用い滑動量を線型的に重ね合わせるによって新たに期待滑動量を算出することがで



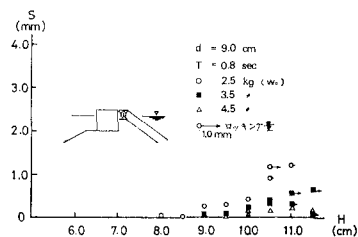
(A) 混成堤

図-7 (a) 規則波による1波当りの滑動量とロッキング量



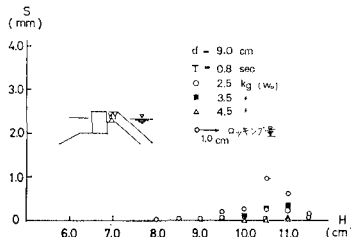
(A) 混成堤

図-7 (c) 規則波による1波当りの滑動量とロッキング量



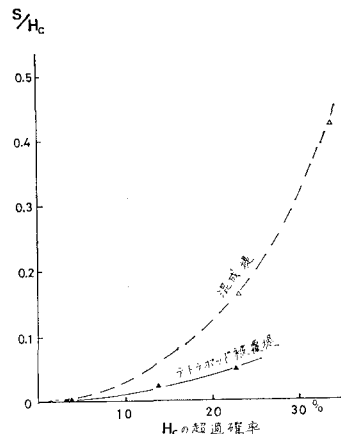
(B) テトラポッド被覆堤

図-7 (b) 規則波による1波当りの滑動量とロッキング量



(B) テトラポッド被覆堤

図-7 (d) 規則波による1波当りの滑動量とロッキング量

図-8 規則波の合成による滑動量と  $H_c$  の超過確率 (Case 2-3 の波高分布より求めた)

きる。その結果を図-6中△印で表示した。規則波による実験値が少なく一概には断定できないが、規則波合成による計算値は不規則波による実験値より若干小さな値を示す傾向がみられる。このような現象は不規則波のもつ波の作用がそれを構成するおのこの波の作用を単純に重ね合わせたものと同等でないことを意味するものである。また、不安定な領域におかれた堤体に連続して波を作用させる効果が規則波合成の場合、まったく無視されていることに起因している。

#### (4) 消波工被覆堤の安定効果

規則波の滑動実験から得られた1波当たりの平均滑動量曲線図-7を用い、混成堤および消波工被覆堤の波圧強度を式(2)から求めてみる。図-5中▽および▼印はこの方法によって求めた波圧強度であるが、ここでは滑動限界波高を図-7の破線で示された滑動量曲線がほぼゼロ線を切る点の波高として整理したものである。図-5で明かなようにテトラポッドを被覆することによって波圧強度は混成堤のほぼ1/2に減殺されることがわかる。たとえば  $H/d \approx 0.9$  での波圧係数 ( $p/wH$ ) は混成堤の場合  $p/wH = 0.72$ 、テトラポッド被覆堤では  $p/wH \approx 0.36$  となっており、このような傾向は堤体の挙動が異なるスレンダーな堤体断面をもつ場合にもみられ、その軽減率は同じく約1/2である。

一方、図-8は滑動限界波高の超過確率と期待滑動量の関係を示したものである。図中△印で表わされる混成堤の計算値は規則波による実験値が少ないため分布の形状は定かでないが、不規則波で求めた値から推定してほぼ破線で近似できるものと考えられる。両断面とも滑動

限界波高の超過確率の増加にともなう期待滑動量は増大しているが、テトラポッドを被覆することによってその量は混成堤の約1/2~1/3に減

少している。この値は先に求められた双方の1波当たりの滑動量曲線の増加率  $\frac{dS}{dH}$  の比較 (約1/2~1/3) にほかならない。

テトラポッド被覆堤における波力減殺効果が堤体の移動にともなう変化しないものと仮定すれば混成堤の期待滑動量算定式(1)がそのまま適用できると思われる。式中  $p$  には先に求めた図-6を用いる。また滑動に有効な波力の作用時間に関する係数  $k$  は規則波によって得られた1波当たりの滑動量を線型的に重ね合わせた総滑動量から求める。その結果  $k$  の値は滑動量の大小によって違うがほぼ  $k = 2.6 \times 10^{-4} \text{ sec}^2/\text{cm}$  が妥当と思われる。式(1)から明らかなように滑動量  $S$  は波圧強度  $p$  の2乗とその作用時間に関する係数  $k$  に比例する。ところで消波工を被覆することによって波圧強度が混成堤の約1/2になり、したがって滑動量  $S$  は約1/4に減少するはずである。一方滑動量は約1/2~1/3に軽減されており被覆堤の波力の作用時間に関する係数は混成堤のそれの約2~3倍になるはずである。このことは堤体に作用する波力の力積が被覆の有無を問わずほぼ一様であることからもうなずける。伊藤らは高基混成堤の場合  $k$  の値として  $1.3 \times 10^{-4} \text{ sec}^2/\text{cm}$  を用いているところからテトラポッド被覆堤の作用時間に関する係数  $k$  は  $2.6 \times 10^{-4} \text{ sec}^2/\text{cm}$  が妥当であると考えられる。しかしながら実験値が少なくテトラポッド被覆堤における滑動量算定式の一般化を進めるためにはさらに多くの実験条件によって検討を行なう必要がある。

## 5. 結 論

本実験によって明らかになった点を列挙すれば次のとおりである。

(1) 伊藤らによって提唱された混成堤直立部の期待滑動量算定式は不規則波による本実験結果とかなりよく一致するものである。

(2) 図-7, 図-8に示されたようにテトラポッドを被覆することによって滑動量  $S$  は急激に減少する。さらに波高  $H$  の増加あるいは堤体重量  $W$  の軽減にともなうて変化する滑動量の増加率  $\frac{dS}{dH}$ ,  $\frac{dS}{dW}$  は本実験に用いた消波工断面の条件下では混成堤の場合と比較して約  $1/2$  になる。

(3) 滑動限界波高と安定重量から求められるテトラポッド被覆堤の波圧強度は本実験の条件では混成堤のその約  $1/2$  に減殺される。

(4) 規則波による滑動量は同一条件で行なった不規則波のそれよりも小さく、いくぶん過小評価される危険性がある。

(5) 波力の減殺効果が作用波数とともに変化しないものと仮定すれば、混成堤の期待滑動量の算定式(1)を準用することによって消波工被覆堤の期待滑動量を推定することが可能である。

## 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, 港湾技術研究所報告, 第5巻14号, 1966.
- 2) 栗林隆・宇田居吾一・村木義男・高橋基次・石田直之: 防波堤に働らく波圧について(第1報), 第5回海岸工学講演会講演集, 1958.
- 3) 堀川清司・野口雄二: 直立壁に作用する碎波の波力と波面との関係, 第17回海岸工学講演会論文集, 1970.