

捨石堤の安定性に関する二、三の問題

鴻上 雄三*・松崎 勝夫*・坪田 健一**・小松 及十**

1. まえがき

静水面上に十分な高さをもつ捨石堤や、消波ブロックを被覆層とする傾斜堤の波力に対する安定性に関しては実用化された研究が多く、設計図表も与えられている。しかし、混成堤マウンドのように静水面下に位置する捨石の挙動については、マウンドの構造、形状が入射波に影響して捨石の安定を支配する要素が複雑となるため不明な点が多い。また、透過性構造物の伝達波高や混成堤の底面に作用する揚圧力の水理実験においては、Froudeの相似律と Reynolds の相似律を同時に満足させて現象の相似を期待することができないので、多くの実験結果は定性的範囲にとどまっている。

この報文は、主として静水面下における捨石の挙動、水理現象に注目しながら筆者らがこれまでに行った実験結果を述べ、あわせて透過率、安定性の水理実験に現われる模型の縮尺効果、サンドマスチック堤に作用する揚圧力など二、三の問題点について考察したものである。

2. 混成堤マウンドの波浪に対する安定性

マウンド被覆体を消波ブロックとし、その安定性に与える堤体の設置条件、マウンド形状の影響を検討した¹⁾。

(1) 実験方法および安定限界の基準

実験は 28×0.8×1m の水路により縮尺 1/20 の模型で行った。マウンドの形状および実験条件は 図-1、表-1 のとおりである。実験はマウンドの 1 形状について初め周期を固定し波高を次第に大きくして被覆体が安定限界に達したときの波高を測定し、次に周期を変えて同じ方法を繰り返した。安定限界の基準としては、マウンドののり肩から斜面にかけて移動または動揺したことが

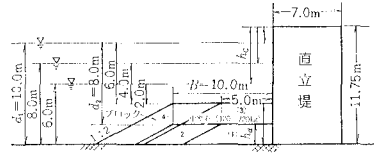


図-1 混成堤マウンドの形状

表-1 実験条件の範囲

特 性 と 諸 元	実 験 条 件 の 範 囲	
	模 型	現 地
波 高 (H)	5.0~30.4 cm	1.0~6.08 m
周 期 (T)	1.35~2.25 sec	6~10 sec
波 長 (L)	2.03~5.03 m	40.6~100.6 m
マウンドのり先水深 (d ₁)	30~50 cm	6~10 m
マウンド天端水深 (d ₂)	10~40 cm	2~8 m
マウンド天端幅 (B)	25, 50 cm	5, 10 m
マウンドの高さ (h _d)	10, 20 cm	2, 4 m
マウンドの勾配 (α)	1:2	
波 形 勾 配 (H/L)	0.017~0.108	
相 対 水 深 (d ₁ /L)	0.064~0.187	
マウンド天端比水深 (d ₂ /d ₁)	0.33~0.80	
波 高 水 深 比 (H/d ₁)	0.158~0.61	
天端幅水深比 (B/d ₁)	0.5~1.66	
マウンド高さ水深比 (h _d /h ₁)	0.2~0.66	
直立堤天端高 (h _e)	10~30 cm	2~6 m
ブロックの単位体積重量 (γ _r)	2.08~2.53 gr/cm ³	
ブロックの平均重量 (W)	112.8~120.0 gr	0.9~8.96 t

はっきり認められる個体数が、被覆層全体の 1% 以下であるときをとり、移動限界波高 $H_{D=0}$ を決めた。

(2) 安定限界重量に与える各要素の影響

Brebner-Donneily は、振動流体中に置かれた捨石個体に作用する慣性力と個体の抗力及び水中重量とのつり合いを考えて限界方程式を導き、式(1)のように Hudson の提案する安定数 N_s の表現で整理した²⁾。

$$N_s = \frac{2 \left[\frac{\beta}{2\pi \tanh md_1} \frac{1}{C_{MH}} \frac{L}{H} \right] - \frac{1}{S_r - 1} \frac{\cosh md_1(1-d_2/d_1)}{\sinh md_1} \{1 + \sigma_2 \tanh md_1(1-d_2/d_1)\}}{\frac{C_{DH}}{C_{MH}} \frac{\cosh^2 md_1(1-d_2/d_1)}{\sinh^2 md_1} \{1 + \sigma_1 \tanh^2 md_1(1-d_2/d_1)\}} \dots\dots\dots (1)$$

* 正会員 日本海上工事(株)技術研究所
** 関西電力(株)総合技術研究所

ここで、 β : 捨石の形状 Δ による係数、 L : 波長、 H : 波高、 $m=2\pi/L$ 、 d_1 : 水深、 d_2 : マウンドの天端水深、 C_{MH} : 水平慣性力係数、 C_{DH} : 水平抗力係数、 σ_1 、 σ_2 : C_D 、 C_M の水平成分と垂直成分の比

さらに検討して N_s に対する有効方程式を次式で示した。

$$N_s = \frac{\gamma_r^{1/3} H}{W_r^{1/3} (S_r - 1)} = f\left(\frac{H}{L}, \frac{d_1}{L}, \frac{d_2}{d_1}\right) \quad (2)$$

ここで、 W_r : 捨石の平均重量、 γ_r : 捨石の単位体積重量

a) 波形勾配 H/L の影響

実験したブロックの種類ごとに周期をパラメーターとして安定限界における重量と波高の関係を求めることにより、 N_s と H/L の関係が 図-2 のとおり得られる。図から一定の d_2/d_1 においては、 H/L は N_s に大きな影響をもたないことがわかる。したがって、各ブロックについて周期別に N_s の平均値を与えることができる。

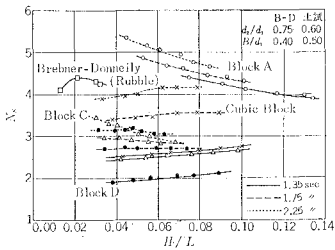


図-2 波形勾配と安定数

b) 相対水深 d_1/L の影響

図-3 は、a) による N_s の平均値を用い d_2/d_1 をパラメーターとし、マウンド天端幅 B と d_1 が一定の場合の d_1/L と N_s の関係をブロック A について求めたもので、 d_1/L の影響はほとんど認められない。

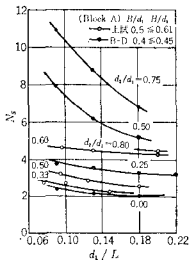


図-3 相対水深と安定数

c) 相対天端幅 B/L の影響

マウンド個体の安定は外力の大きさに左右され、背後の直立壁による反射波の形成を考えれば、マウンドの天端幅によっても安定の状態の異なることが考えられる。したがって天端幅を変えて実験を行い、 B/L と N_s の関係を d_2/d_1 をパラメーターとして整理すると 図-4 が得られる。この図によると d_2/d_1 と B/L による変化

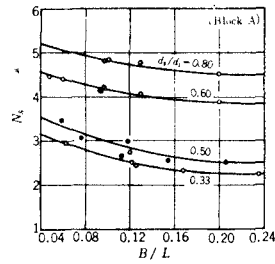


図-4 相対天端幅と安定数

の傾向がよく表われており、 d_2/d_1 が小さく、 B/L が大きければ安定が悪くなる。このことは、 d_2 および B の増加に伴いマウンド上で碎波が促進されることと、マウンドののり肩が直立壁から離れて $L/4$ 点に近づくに従って波による水粒子の水平速度が最大になることによって理解される。

(3) 実験結果の応用

以上の実験により、安定数 N_s は主としてマウンド天端比水深 d_2/d_1 とマウンド相対幅員 B/L の関数となることが示された。すなわち、

$$N_s = f(d_2/d_1, B/L) \quad (3)$$

図-5 は式 (3) の関係を表す。この図を用いれば、設計するマウンドについて d_2/d_1 、 B/L を与えて N_s を求め、式 (2) に代入して被覆体の安定重量が得られる。

図-6 は $B/L=0.08$ の場合の一例である。傾斜堤の場合

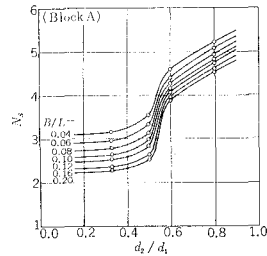


図-5 天端比水深と安定数

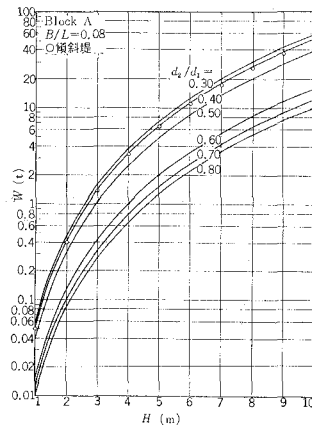


図-6 ブロック重量と波高

合(図中の○印)と比較すれば、マウンド天端水深の影響がよくわかる。

3. 捨石堤の静水面下の個体の安定性

捨石堤の静水面よりかなり下部では波の作用が弱まるので、2.の実験結果からも予想されるとおり被覆重量は小さくてよいであろう。しかし水理公式集では、静水面の上下 $+H \sim -1.5H$ の範囲に適用される Hudson 公式による重量の $1/10 \sim 1/25$ という注記だけで明確でない。そこで、次のような簡単な実験を行って解析した。

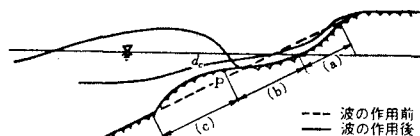
(1) 実験方法

実験は $30 \times 1 \times 1 \text{ m}$ の水路により縮尺 $1/25$ の模型で行った。捨石堤は勾配が $1:2$ で、石の平均重量が異なる2種である。測定事項は、初めに波高、周期の異なる波が作用したのちの斜面の形状変化と捨石の移動限界水深であり、次に捨石堤の静水面付近をサンドマスチック層で被覆した場合の捨石の挙動と被覆限界水深である。サンドマスチック層は長さ 140 cm 、幅 50 cm 、厚さ 4 cm の大きさに整形した蛇籠状の金網に碎石を詰め、表面からマスチック材を流し込んだものである。水路の水深は一律に 60 cm である。

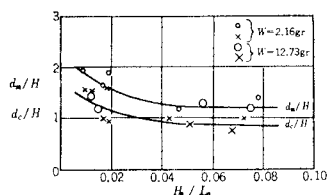
(2) 捨石堤の安定形状と移動限界水深

捨石堤に波浪が作用すると、斜面は初め急激に変形するが、やがてある形状に安定する。安定形状は一般に図—7のような断面を示し、3つに区分される。安定形状に至るまでの挙動は次のとおりである。

- 波が作用すると同時に急激に浸食されるが、斜面の形状変化に伴って波の遡上時の力が弱まり、捨石の崩落がなくなり安定状態となる。
- 波の作用と同時に浸食されるが、やがてaから落下した捨石もここで往復を繰り返すだけで、全般的には安定とみなされる状態になる。
- 波の作用とともに a., b. で浸食された捨石が堆



図—7 捨石堤の安定形状の模式図



図—8 移動限界水深、被覆限界水深と波形勾配

積し、次第に沖側へ移動して安定状態となる。

安定状態における捨石の移動限界水深 d_c を求め、波形勾配との関係で整理すると図—8のとおりである。

(3) サンドマスチック堤下端部の捨石の挙動と被覆限界水深

ある波浪の作用条件のもとでサンドマスチック堤の被覆深度を変えると、マスチック層下端部の捨石の挙動は図—9に示すように3区分され、被覆深度とともに安定状態が表—2のように変化する。表に示すBの状態をサンドマスチック堤の安定限界とし、そのときの先端水深を被覆限界水深 d_m と定義する。 d_m と波形勾配の関係は図—8に示してある。

区分	下端部付近の捨石の挙動	下端部付近の形状変化
A	個々の捨石が移動し、形状変化が認められる。	
B	捨石のロッキングはあるが、移動は認められない。	
C	捨石の移動、ロッキングがまったく認められない。	

図—9 サンドマスチック堤の安定基準

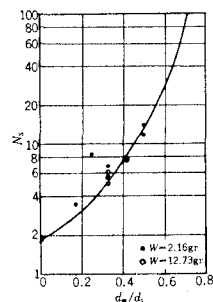
表—2 サンドマスチック堤の被覆深度と安定状態

捨石重量 W (gr)	2.16 gr					12.73 gr			
	1.4		2.6			1.4		2.6	
	5.3	12.9	21.5	10.3	18.3	15.4	20.8	13.7	16.8
波高 H (cm)	5	10	15	20	25	30			
被覆深さ d (cm)	A	A		A			A	A	A
	B	B	A	A			A	A	A
	C	C	B	B	A		B	A	B
			C	C	A				
				C	B				

(4) 実験結果

捨石堤の移動限界水深 d_c とサンドマスチック堤の被覆限界水深 d_m の間には、図—8 から $d_m \div 1.4d_c$ の関係がみられる。すなわち、捨石堤を被覆する場合には、より深いほうの捨石の移動が行われることに注意を要する。

図—10 は、(3)の実験のサンドマスチック堤の安定



図—10 安定数と被覆限界水深

限界における安定数 N_s と被覆深度 d_m/d_1 の関係を示す。この図の N_s 軸上の値 (◇印=1.86) は、Hudson による捨石堤の 1% 被災の $K_D=3.2$ から求めた N_s である。安全側として実験値の下限の適合線を描けば、任意の被覆深度における N_s が得られ、この値を式 (2) に代入することによってサンドマスチック堤被覆部下端の捨石重量の算定が行える。計算結果を図-11 に示す。

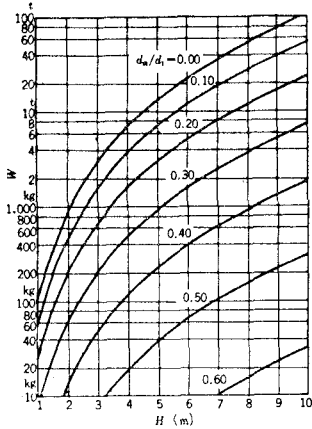


図-11 サンドマスチック堤の捨石重量と波高

4. 捨石堤の安定実験における 模型の縮尺効果

Hudson は、捨石堤の安定に関する多くの実験結果を整理して被覆体の安定数と Reynolds 数 R_N の関係を求め、縮尺効果に対する補正方法を示した³⁾。

$$N_s = \frac{\gamma_r^{1/3} H}{W_r^{1/3} (S_r - 1)} = f(R_N) = f\left(\frac{g^{1/2} H^{1/2} l_r}{\nu}\right) \quad (4)$$

ここで、 $l_r = K_d (W_r / \gamma_r)^{1/3}$: 捨石の代表径、 $K_d \approx 1$: 形状係数、 ν : 水の動粘性係数

図-12 は式 (4) の関係を示す実験曲線で、 N_s に対して縮尺効果を現わさない限界 Reynolds 数 $(R_N)_c$ は 3×10^4 であることがわかる。また、 $R_N = 5 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$ の実験値は Coastal Engineering Research Center で行われた波高 4 ft、重量 162 lb までの個体に対する大縮尺模型による値で、これらの値の平均値を原型の値として

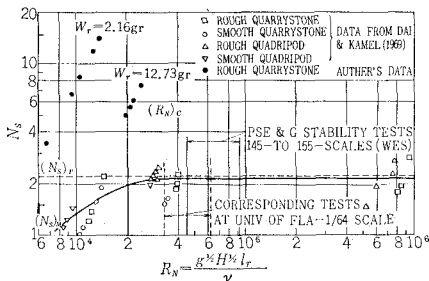


図-12 捨石堤の安定実験における縮尺効果

用いれば、 $(R_N)_c < 3 \times 10^4$ の範囲にあるような小縮尺の実験に対する N_s の補正係数 $(N_s)_p / (N_s)_m$ が求められる。

5. 捨石堤模型による透過波の相似と縮尺効果

捨石堤のような透過性媒質を通過する流れを、空隙が連続する仮想的な管路内の流れとして扱えば、その摩擦による損失水頭は次のように示される⁴⁾。

$$\frac{\Delta H}{\Delta L} = C \left(\frac{Ud}{\nu} \right) F(p) \frac{U^2}{2gd} \quad (5)$$

ここで、 $\Delta H / \Delta L$: 損失水頭の勾配 (ΔH : 損失水頭、 ΔL : 透過性媒質の長さ)、 C : 抵抗係数 (Reynolds 数の関数)、 U : 断面平均流速、 d : 捨石の代表径、 ν : 動粘性係数、 F : 空隙率 p の関数、 g : 重力加速度

いま、実物と模型とにおいて $\Delta H / \Delta L$ を相似にすることができれば

$$\frac{CU^2 F}{d} = \text{const} \quad (6)$$

Froude の相似律によれば

$$U_m^2 = U_f^2 E \quad (7)$$

ここで、 E : 模型の縮尺、添字 m, f : それぞれ模型、実物に関するものを表わす。また、 $F_m = F_f$ であるから

$$E \frac{C}{d} \bigg|_m = \frac{C}{d} \bigg|_f \quad (8)$$

Froude の相似律において Reynolds 数を考慮して捨石の大きさを調整すれば

$$d_m = K E d_f, \quad (K: \text{捨石の拡大率}) \quad (9)$$

$$\nu_m = \nu_f \quad (10)$$

$$\therefore \frac{Ud}{\nu} \bigg|_m = \frac{Ud}{\nu} \bigg|_f K E^{3/2} \quad (11)$$

一方、式 (9) を式 (8) に代入すれば

$$K C_f = C_m \quad (12)$$

$$\therefore K C \left(\frac{Ud}{\nu} \bigg|_f \right) = C \left(\frac{Ud}{\nu} \bigg|_m \right) = C \left(\frac{Ud}{\nu} \bigg|_f K E^{3/2} \right) \quad (13)$$

(1) 乱流領域の場合

透過性媒質を通過する流れが乱流の場合には $C(Ud/\nu) = \text{const}$ であるから、式 (13) は

$$K C \left(\frac{Ud}{\nu} \bigg|_f \right) = C \left(\frac{Ud}{\nu} \bigg|_m \right) \quad (14)$$

$$\therefore K = 1 \quad (15)$$

(2) 層流領域の場合

この場合は $C(Ud/\nu) = \text{const} / (Ud/\nu)$ となり

$$K \frac{\text{const}}{Ud/\nu|_f} = \frac{\text{const}}{Ud/\nu|_m} = \frac{\text{const}}{Ud/\nu|_f K E^{3/2}} \quad (16)$$

$$\therefore K = E^{-3/4} \quad (17)$$

(3) 遷移領域の場合

この場合の抵抗係数 C が次式で表わされるとすれば

$$C(R_e) = \frac{c_1}{R_e} + c_2 \quad \dots\dots\dots(18)$$

ここで, c_1, c_2 : 定数, R_e : Reynolds 数

$$\therefore K \left(\frac{c_1 + c_2 R_e}{R_e} \right) = \frac{c_1 + c_2 K E^{3/2} R_e}{K E^{3/2} R_e} \quad \dots\dots\dots(19)$$

式 (19) を解き, $K \geq 1$ なることを考慮すれば

$$K = \frac{c_2 E^{3/2} R_e + \sqrt{(c_2 E^{3/2} R_e)^2 + 4c_1 E^{3/2} (c_1 + c_2 R_e)}}{2E^{3/2} (c_1 + c_2 R_e)} \quad \dots\dots\dots(20)$$

式 (20) は, Froude の相似律において Reynolds 数を考慮した場合の捨石の拡大率 K が, Reynolds 数 R_e と模型の縮尺 E の関数となることを表わす。しかし, 実際問題として実物や模型において, 捨石空隙内部の流速を測定して Reynolds 数を求めることは困難であるから, これを測定可能な量 $\Delta H / \Delta L, d, p$ に置き換えれば便利である。

式 (5) において $F(p) = (1-p)/p^3$ と表わせば

$$\frac{\Delta H}{\Delta L} = \frac{(1-p)}{p^3} \frac{U^2}{2gd} C(R_e) \quad \dots\dots\dots(21)$$

ここで, $R_e = Ud/(1-p)\nu$

$$\therefore \frac{\Delta H}{\Delta L} \frac{2gd^3}{\nu^2} \frac{p^3}{(1-p)} = \frac{1}{(1-p)^2} \frac{U^2 d^2}{\nu^2} C(R_e) \\ = R_e^2 C(R_e) \quad \dots\dots\dots(22)$$

式 (22) に式 (18) を代入して解き, $R_e > 0$ なることを考慮すれば

$$R_e = \frac{-c_1 + \sqrt{c_1^2 + 4c_2 \frac{\Delta H}{\Delta L} \frac{2gd^3}{\nu^2} \frac{p^3}{(1-p)^3}}}{2c_2} \quad \dots\dots\dots(23)$$

式 (18) における定数 c_1, c_2 は実験的に求められる定数で, 富永・坂本は定常流れにおける礫の透水性に関する検討で次式の関係が成立つことを示している⁵⁾。

$$C(R_e) = \frac{1000}{R_e} + \frac{29.3}{\sqrt{R_e}} + 4.3 \div \frac{1000}{R_e} + 4.3 \quad \dots\dots\dots(24)$$

計算の便利のために式 (24) の定数を用いて式 (20), (23) を数値計算すれば 図-13, 14 が得られ, 捨石の拡

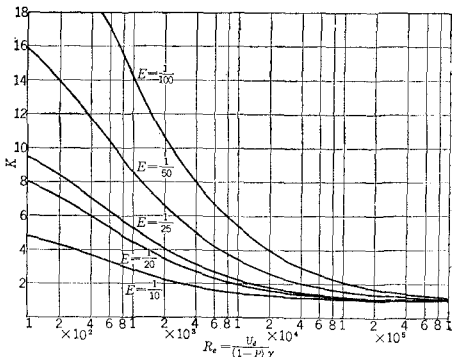


図-13 Reynolds 数と K の関係

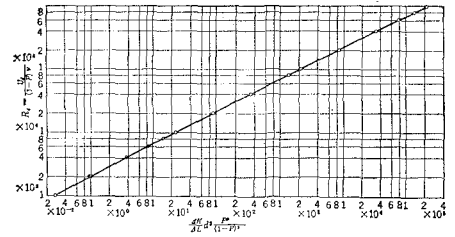


図-14 Reynolds 数と $\frac{\Delta H}{\Delta L} \cdot d^3 \frac{p^3}{(1-p)^3}$ の関係

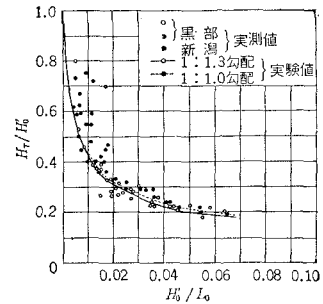


図-15 波高伝達率の実測値と実験値の比較

大率 K が $(\Delta H / \Delta L) d^3 (p^3 / (1-p)^3)$ の関数として求められる。

結果として 図-13, 14 の適用に当たっては, あらかじめ損失水頭を想定しておく必要があるが, これは 図-15 に示す波高伝達率の測定値⁶⁾ などを用いて行える。この方法は, 定常流れの連続とみなせる長波の場合に適用できるのであり, 風波の場合はさらに検討を要する。後者の場合, 実用的には相対水頭を相似にするような手段をとるのが最善と考えられる。

6. サンドマスチック堤に作用する揚圧力

サンドマスチック堤の波力に対する強度については尾崎・菅原・刈谷の研究があり, 砕波のような衝撃的な力が作用する場合でもマスチック層はほとんど弾性体に近い性質を示し, 砕波の最大荷重条件を考慮しても被覆層の破壊は起こり得ないことが明らかにされている⁷⁾。一方, 加川・久保は, サンドマスチック注入捨石層の破壊につながる浮き上がり現象が捨石層内部の揚圧力による考え, 波高に比例するこの力に対抗するマスチック層の重量の算定式を求めている⁸⁾。

$$W = K \gamma_w H \quad \dots\dots\dots(25)$$

ここで, W : マスチック層の単位面積当たり重量 (t/m^2), K : 定数 $= 0.3$, γ_w : 水の比重 (t/m^3), H : 波高 (m)

式 (25) は表現が簡単で実用に便利であるが, 勾配, 層厚, 被覆深度など一定の条件におけるものである。これらの影響を考慮して被覆層の強度を力学的に算定する

ためには、外力となる揚圧力の強度と分布を明らかにする必要がある、次のような実験を行った。

(1) 実験方法

3. の実験と設備、方法は同じであるが、被覆層は波力による変形を避けるため鋼板とし、その水路中心線上に波圧計を下向きに並べ、板に作用する上向き力を測定するとともにビデオコーダーにより入射波を撮影し斜面上の水面形を同時観測した。

(2) 実験結果

一例として斜面勾配 1:2 の場合の波形と圧力の測定結果を示せば 図-16 のとおりである。

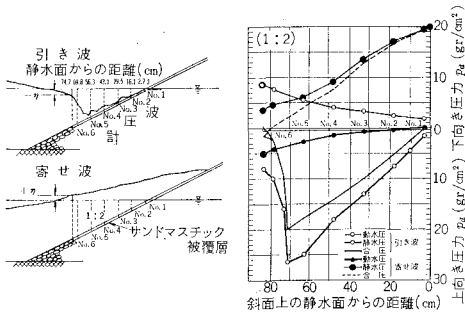


図-16 サンドマスチック堤の前面波形と揚圧力

記録された圧力の値は、斜面上を波が引き終わった瞬間および寄せ上げた瞬間のそれぞれ前後に極大を示し、符号は被覆層下端部上方の水面形の静水面からの上下(η)によって決まる。波圧計は下端部からの動水圧を記録するが、分布はほぼ三角形とみなせる(図中○, ●印)。下端部の圧力の大きさは、微小振幅波の同水深点における水中圧力式(26)にほぼ等しい(○, ●印)。

$$p = \frac{1}{2} \omega_0 H \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kx - \sigma t) \quad \cdots (26)$$

一方、斜面は寄せ波、引き波による静水圧の増減を受ける(○, ●印)。したがって斜面は動水圧、静水圧の合力を下向き、上向きに受け、後者がサンドマスチック堤の設計外力となる揚圧力である。

(3) 揚圧力係数

式(25)の揚圧力係数 $K=0.3$ (安全率は考えない)

は現地の災害例から求められた値であるが、根拠は必ずしも明確でない。いま、図-16の実験値から K を求めると

$$K = \frac{W}{\gamma_w H} = \frac{1}{2} \times \frac{20 \times 25 \times 10^{-2}}{2.19 \times 25 \times 10^{-1}} \doteq 0.46$$

したがって式(25)の K の値の50%増となり問題が残る。今後の検討事項である。

7. むすび

捨石堤について未解決であった二、三の問題、主として静水面下に位置する捨石の挙動を調べ、安定重量に関する設計図表を示し、また、実験結果の信頼度についても検討した。サンドマスチック堤については揚圧力の把握ができたので、新重量算定法誘導の目標をたてることが可能となった。今後は、材料力学的な解析とともに研究をさらに発展させる予定である。終わりに、研究のご指導を頂いた北海道大学尾崎教授に謝意を表わします。

参考文献

- 1) 鴻上・成田：消波ブロックを被覆層とした混成堤マウンドの安定について、北海道開発局土木試験所月報第232号(昭47.9)。
- 2) Brebner and Donnelly: Laboratory Study of Rubble Foundation for Vertical Breakwater, Proc. of 8th Conference on Coastal Engineering (1962.11)。
- 3) Hudson: Reliability of rubble-mound breakwater stability models, Miscellaneous Paper H-75-5, Hydraulics Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station (1975.6)。
- 4) Bernard Le Méhauté: Wave absorbers in harbors, National Engineering Science Company (1965.6)。
- 5) 富永・坂本：透過性構造物による波の変形に関する研究、第16回海講(昭44.12)。
- 6) 服部・堺：ブロック積み防波堤の波高伝達率に関する実験的研究、第20回海講(昭48.11)。
- 7) 尾崎・菅原・荻谷：海岸堤防におけるアスファルト系被覆工に対する波力の影響について、第14回海講(昭42.10)。
- 8) 加川・久保：サンドマスチック注入捨石の安定に関する実験的研究、第12回海講(昭40.11)。