

サンドマスチック被覆工の設計に関する実験的研究

大 野 大 明*

1. ま え が き

海岸堤防、護岸または防波堤のように大きい外力を受ける構造物は材料の面から見れば、比重が大きく、また堅硬であることは勿論、材料の構成要素が互いに緊密に連結していることが望ましい。その意味では堤体表面を大塊の石材で被覆しさらにその上を重量の大きい消波ブロックで補強することが理想的ではあるが、現地の状況、経済性の面からは必ずしも可能とは言えない。代案の一つとして現地で発生する比較的小粒径の石塊を適当な緊結材で連結せしめ大塊と同様の抵抗力を持たせる工法が考えられ、その緊結材としてアスファルトが使用されるいわゆるサンドマスチック工法が傾斜堤においてもかなり広範囲に使用されている。わが国でもすでにいくつかの実例があり、その設計に当って数多くの手法が提案されているが¹⁾ その破壊までの挙動については不明な点が多い。

2. サンドマスチック層の安定性検討

傾斜堤におけるサンドマスチック層の設計を論ずる場合、① サンドマスチック層自体の破壊と、② 堤体基礎特性を含めた被覆層の破壊とを考えなくてはならない。

① では、a. サンドマスチックのクリープに伴う破壊、b. サンドマスチックの劣化による破壊、c. サンドマスチックの波浪による破壊。② では、a. 被覆工背面石塊の陥没箇所には波圧が作用した時に材料に発生する応力による破壊、b. 波浪によって生ずる揚圧力による材料の押上げ作用に起因する破壊が考えられる。

上述のようにサンドマスチック層の破壊については、材料の面と外力の面とから検討すべきであるが、ここでは地震力は一応除外して波浪による力についてのみ述べる。波浪に伴う外力としては波圧と揚圧力とを検討しなければならない。波圧に対しては経験式のほかに理論式として、被覆工の下に石塊の脱出による空洞を想定し、等分布水圧荷重を受ける円形板として材料強度と応力との関係から求める方法、揚圧力に対しては理論式として

は波圧の場合と同様、円形板の応力、強度の関係から求める方法、被覆工の自重と揚圧力との釣合い関係から求める方法等があるが、いずれの場合にも合理的な波圧力、揚圧力を推定する必要がある。斜面堤の場合には、波圧、揚圧力を理論的に求める方法は未だ確立されておらず水理模型試験によることが多い。実験から被覆工の厚さを定める方法としては加川道男氏²⁾の方法がある。加川氏によれば水の比重を γ_w 、有義波高を $H_{1/3}$ とした時、被覆工の単位面積当り重量 W は、 $W=K \cdot \gamma_w \cdot H_{1/3}$ 、 $K=0.36$ で示される。筆者は比較的小重量(30~200 kg/個)のずりをサンドマスチックで被覆する場合、斜面勾配、波形勾配、捨石単体重量を変化せしめ、被覆工を必要とする範囲と被覆層の必要厚さを水理実験によって求めてみた。実験は関西電力(株)総合技術研究所の2次元造波水槽によって実施した³⁾。模型縮尺は1/25としフルードの相似則を適用した。

3. サンドマスチック層設計のための水理実験

3.1 揚圧力の算定

傾斜堤に作用する揚圧力については未だその考え方が確定されておらず、揚圧力が設計上重要な構造物に対してはまずその概念を確立しておく必要がある。この研究では直立堤の考え方に準じて次のように考えた。図-1に示すように、まず堤体に作用する力は静水面でバランスしている。次に波高 H の波が作用すると堤体前面に堤内水位との水位差分 h の圧力が生ずる。この圧力の大きさは波の形状により変化するもので堤内水位と水面形との相対的な関係で下向きの波圧または上向きの揚圧力となる。また被覆工下部には波の作用による水面の上下

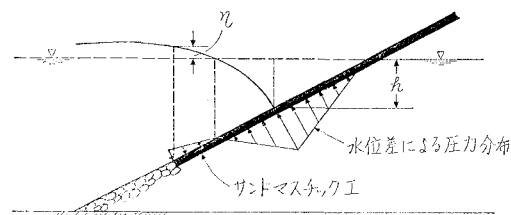


図-1 斜面前面の水位差による圧力分布

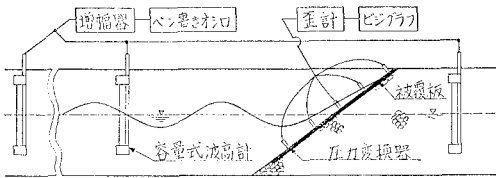
* 正会員 関西電力(株) 建設室担任 支配人

運動により同一周期の圧力変動が生ずるが、これは浅水表面波の水中任意点に生ずる圧力の式⁴⁾

$$\frac{p}{\rho} = \frac{gH}{2} \frac{\cosh k(y+h)}{\cosh kh} \sin(kx - \sigma t) - gy$$

の第1項に相当する動水圧に類似するものである。傾斜堤における変動圧の分布は被覆工先端部の波高 η が静水面より高くなる時に正、低くなる時に負の値となる。この理論から類推してサンドマスチック被覆工の任意点に作用する揚圧力を(斜面前面の水位と堤内水位との差)と(水中任意点に発生する変動圧)との合力であると考えた。この合圧力は傾斜堤の場合、理論から求めることは不可能であるので水理実験によって求めることとした。

(1) 実験概要



実験水槽仕様 幅1m、深さ1m、総長37m。
造波機～沖波観測点 10m、造波機～模型 30m

図-2 揚圧力実験要領図

実験用模型は図-2に示すとおりであるが、模型堤を厚さ6mmの鋼板で、勾配と斜面に沿って鋼板の長さを変化させることができる。鋼板表面には切欠きを作り圧力変換器(共和電業 PG 100GD)を上向き、下向きに同一高さのほぼ同位置に取りつけてある。圧力変換器は、歪計およびビデオカメラに連結し斜面上に各種の波を作用させ変動圧を読みとる。また水面形の変化は 1/100 sec 単位にビデオカメラから読みとり、沖波、斜面前面および後背部の波高は容量式波高計によって計測し電氣的に同時刻測定を行う。実験条件の組み合わせは無数に考えられたが、当面の問題解決のために表-1のように設定した。

表-1 実験条件

岩石の大きさ	30~200 kg/個
斜面勾配	1:2, 1:3, 1:5
水深	15 m
波の諸元	
波高	1, 3, 5, 6 m
周期	7, 13 sec

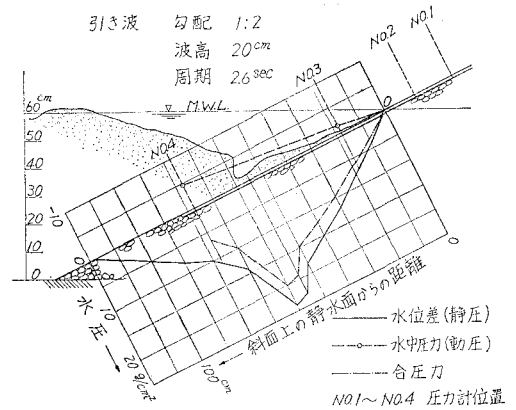
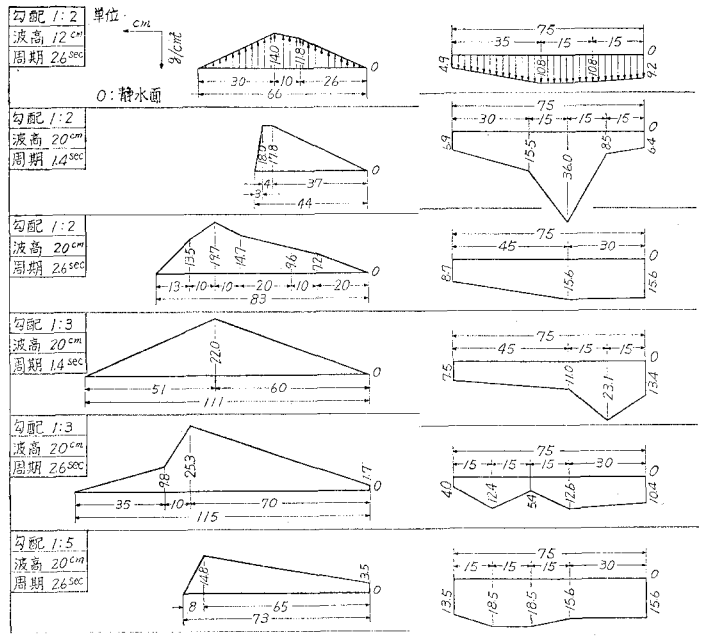


図-3 揚圧力実験結果の代表例

面勾配 1:2, 捨石重量 200 kg ($W_m=12.7$ g), 波高 5 m ($H_m=20$ cm), 周期 13 sec ($T_m=2.6$ sec) の場合の圧力分布を図-3に示す。合計 24 ケースの実験結果から合圧力図を求めた結果⁵⁾, サンドマスチック被覆工に加わる合圧が上向きすなはち揚圧力となるのは斜面上の水面が引き波の時の主であることが確認された。このようにして求めた揚圧力分布を標準化したものの一部を図-4(a)に示す。

上記実験の結果から、斜面上に作用する揚圧力について①周期、波高 ②勾配 ③捨石重量 による影響が図-4(a)から推定できる。これらの結果は層厚決定の際の外力値として使用することができる。



(a) 揚圧力

(b) 波圧

図-4 圧力分布標準化図

(2) 実験結果

実験結果のうち代表的なものとして斜

3.2 斜面に作用する波圧

(1) 実験概要

実験条件および実験方法は揚圧力の場合と同じであるが圧力計は上向きに設置してある。サンドマスチックのような不透水性材料で被覆する場合、捨石の大小による影響は少ないと考え波圧面下部の捨石はすべて 200 kg/個級のものをを使用した。

(2) 実験結果

表-1 の条件で行った合計 24 ケースの実験結果のうち代表的な 6 例を標準化したものを図-4(b)に示す。周期、波高、勾配の中で、波圧に大きい影響を与えるのは波高と斜面勾配であり、上記の実験から、波圧 P_{max} と波高 H との関係を $P_{max}=\alpha \cdot H$ とし α を波圧係数と定義すれば、 α は表-2 の範囲にある。

表-2

斜面勾配	波圧係数 α
1:2	0.72~2.40
1:3	0.53~1.75
1:5	0.57~0.94

3.3 サンドマスチック工の被覆深度

(1) 実験概要

サンドマスチック工の被覆深度（静水面からの垂直深度）については、特に提案されていないが、水深が深く斜面長が長い時は経済性と工期の面から問題となる。実験条件は揚圧力、波圧の場合と同じであるが、被覆長の必要深度を定めるために、表面の鋼板を鉛直高で 0~50 cm の範囲でスライドできるようにしてある。実験波を作用させ、被覆部以下の捨石の状態を観察し、捨石が安定である限界被覆水深を求める。この場合の捨石の安定とは捨石の状態を、捨石が移動する→A、全く移動しない→C、その中間でロッキングする、という 3 クラスに分け、さらにロッキングの状態を、激しいロッキング→AB、普通のロッキング→B、軽いロッキング→BC に分け、BC 状態（表面の捨石 2, 3 個のロッキング）を安定の限界とした。

(2) 実験結果

実験結果 (36 ケース)^{(8), (5)} の一部を 表-3 に示す。波高 1 m ($H_m=4$ cm) 以下の時は影響は現われない。これらの実験において、被覆深度・入射波高比 d/H' と波形勾配 H_0/L_0 との関係を 図-5 に示す。

200 kg/個級の捨石について H_0/L_0 と d/H' の相関を近似的に示すと、

$$d/H' = 1.92 - 7.2(H_0/L_0)$$

いま $1.92 - 7.2(H_0/L_0) = \beta$ とすると $d = \beta H'$ となる。この研究における H_0/L_0 の範囲は 10^{-2} から 10^{-1} であるから $\beta = 1.92 - 7.2(0.1 \sim 0.01) = 1.2 \sim 1.8$ となる。30 kg/個級の時も同様にして $\beta = 1.6 \sim 2.2$ となる。

表-3 被覆深度係数

捨石重量 g W_m	斜面勾配	周期 sec T_m	波高 cm H_m	沖波波高 cm H_{m0}	沖波波長 cm L_{m0}	波形勾配 H_{m0}/L_{m0}	被覆深度 cm d_m	入射波高 cm $H_{m'}$	被覆深度係数 $d_m/H_{m'}$
12.7	1:2	1.4	11.3	12.6	306	0.041	25	11.4	2.19
		1.4	23.6	26.2	306	0.086	35	23.5	1.49
		2.6	19.4	18.5	1054	0.017	30	19.4	1.54
	1:3	1.4	19.8	22.0	306	0.072	25	19.4	1.29
		2.6	24.3	23.1	1054	0.022	40	24.4	1.64
	1:5	2.6	12.5	11.9	1054	0.011	20	12.5	1.60
2.2	1:2	1.4	11.0	12.2	306	0.040	30	11.0	2.73
	1:3	2.6	22.9	21.8	1054	0.021	45	23.0	1.96

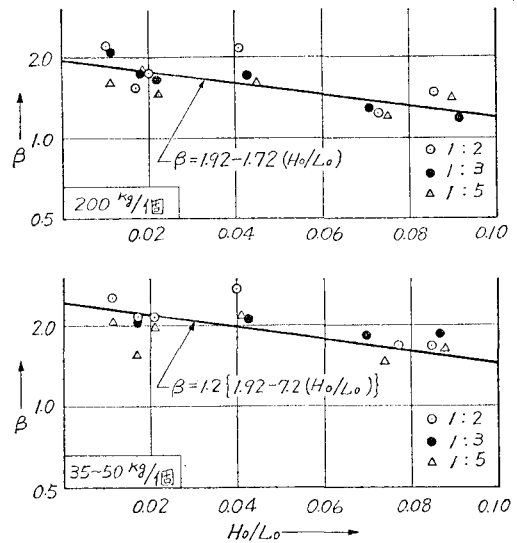


図-5 $H_0/L_0 \sim d/H'$ 相関図

4. サンドマスチック層厚決定の実用式

表-4 は従来から使用されている算定式の名称と¹⁾ これらの式にモデルケースとして $H=5$ m, 斜面勾配 1:2, $T=7$ sec を与えた場合の計算結果を示したものである。これによるとサンドマスチック工の場合、捨石の脱落を考えなければ揚圧力が支配的外力となる。表-4 に示す

表-4 層厚算定法と計算値

算 定 法		層 厚
波 圧	Hetenyi	10 cm 以下 $a < 90$ cm
	中島保治	13.8 cm
	Nijboer	計算不能
	Odemark	$T_{30}=43$ cm, $T_{90}=132$ cm
揚 圧 力	オランダ国土省	計算不能
	円板応力法	$T_{30}=7.9$ cm, $T_{90}=23.7$ cm
	自重揚圧力約合式	232 cm (作用長 2.5 m)
	円板応力法	$T_{30}=5.2$ cm, $T_{90}=15.6$ cm
	加川道男	90 cm

自重揚圧力釣合いの式は結果のみ示せば¹⁾

$$T_h \geq (h/\cos \theta)(\gamma_w/\gamma_b) \dots\dots\dots (1)$$

ここに h : 被覆工上下部の水頭差 (m)

θ : 斜面の傾斜角

γ_w : 海水の単位体積重量 (t/m³)

γ_b : 被覆工の単位体積重量 (t/m³)

T_h : 被覆工の厚さ (m)

上式において, $\gamma_w=1$, $\gamma_b=2$ とすれば

$$T_h \geq (h/\cos \theta)(1/2) \dots\dots\dots (2)$$

斜面上の揚圧力の作用する範囲を直径 90 cm の円形とし, これに相当する矩形面積に相当する長さは単位幅に対して約 2.5 m となる. 図-4 の揚圧力標準図で $P_{u\max}$ から斜面長 2.50 m ($l_m=10$ cm) をとり, その平均揚圧力強度を求めると 表-5 が得られる. この揚圧力値が式 (2) における h に相当する. したがって, これらの h 値を式 (2) に代入すれば T_h を求めることができる. その結果を 表-6 に示す.

表-5 揚圧力値

H_p m	T_p sec	1:2	1:3	1:5
1	7	0.058 (0.580)	0.140 (1.400)	0.040 (0.400)
	13	0.105 (1.050)	0.181 (1.810)	—
3	7	0.243 (0.810)	0.155 (0.517)	0.065 (0.217)
	13	0.323 (1.077)	0.273 (0.910)	0.333 (1.110)
5	7	0.416 (0.832)	0.505 (1.010)	0.225 (0.450)
	13	0.430 (0.860)	0.590 (1.180)	0.350 (0.700)
6	7	0.328 (0.547)	0.429 (0.715)	0.313 (0.522)
	13	0.388 (0.647)	0.583 (0.972)	0.525 (0.875)

表-6 層厚 (T_h) と揚圧力係数

H_p m	T_p sec	H_0/L_0	1:2 T_h cm (k)	1:3 T_h cm (k)	1:5 T_h cm (k)	加川式 cm
1	7	0.015	33 (0.33)	74 (0.74)	20 (0.20)	18
	13	0.004	59 (0.59)	96 (0.96)	—	
3	7	0.044	136 (0.45)	82 (0.36)	33 (0.11)	54
	13	0.011	180 (0.60)	144 (0.48)	170 (0.57)	
5	7	0.073	232 (0.46)	266 (0.53)	115 (0.23)	90
	13	0.018	240 (0.48)	311 (0.62)	178 (0.36)	
6	7	0.087	183 (0.30)	226 (0.38)	160 (0.27)	108
	13	0.022	217 (0.36)	307 (0.51)	268 (0.45)	

表-6 の右欄に加川式による層厚を併記してある. 加川式の揚圧力係数は一律に 0.36 であるが, この実験式から算出した値を加川式における揚圧力係数に換算すれば, 表-5 の () 数字となり 0.217~1.810 の間に分布する. このことは, 波形勾配, 斜面勾配を無視して揚圧力係数を定めることが, 無理であることを示しているものと思う.

この研究では, その点に着目して, 次のようにして層厚を求めた.

まず, 基本式を

$$T_h = kH + \alpha \dots\dots\dots (3)$$

ここに α : 最小必要厚さ (m)

とし 表-6 から波形勾配と揚圧力係数 k とを対数目盛にプロットすると 図-6 を得る. 図-6 によれば多少のバラツキはあるが斜面勾配 1:2, 1:3, 1:5 場合とも

$$k = \gamma / (H_0/L_0)^n \dots\dots\dots (4)$$

で表わすことができる. 表-6 から k と H_0/L_0 との関係を最小二乗法によって整理すると式 (5) を得る.

$$\left. \begin{aligned} \cot \theta = 2 \text{ の場合 } & k = 0.26 / (H_0/L_0)^{0.14} \\ \cot \theta = 3 \text{ の場合 } & k = 0.25 / (H_0/L_0)^{0.25} \\ \cot \theta = 5 \text{ の場合 } & k = 0.13 / (H_0/L_0)^{0.30} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここで 3 式のうち $\cot \theta = 3$ の場合の k の式を基準として 3 式のべき数を同一の 0.25 とし, γ の値をそれぞれ k の大きさに応じて調整すると式 (6) を得る.

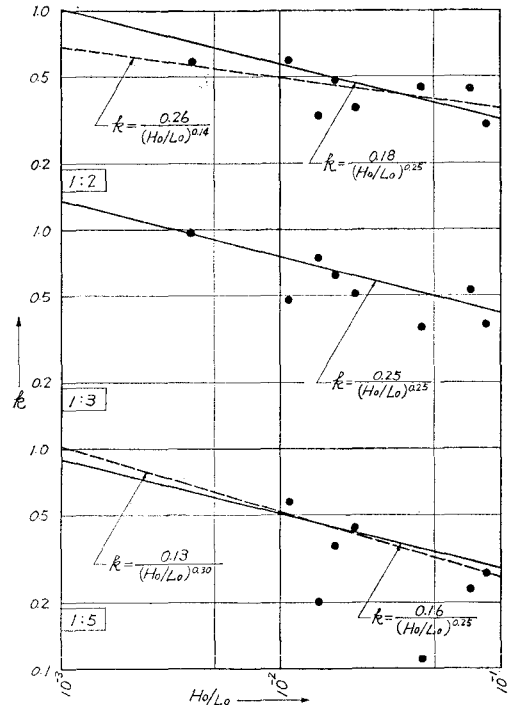


図-6 $H_0/L_0 \sim k (=T_h/H)$ 相関図

$$\left. \begin{array}{ll} \cot \theta = 2 \text{ の場合} & k = 0.18 / (H_0/L_0)^{0.25} \\ \cot \theta = 3 \text{ の場合} & k = 0.25 / (H_0/L_0)^{0.25} \\ \cot \theta = 5 \text{ の場合} & k = 0.16 / (H_0/L_0)^{0.25} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

右辺の係数を簡単に γ とおけば

$$k = \gamma (H_0/L_0)^{-0.25} \dots\dots\dots (7)$$

となり γ は $\cot \theta$ の関数であり, $1/\gamma$ との関係式を導くと

$$1/\gamma = 0.9 \cot^2 \theta - 6 \cot \theta + 14.0 \dots\dots\dots (8)$$

となる.

以上の計算からサンドマスチック層厚の算定式は次のとおりとなる.

$$T_h = \gamma \cdot H (H_0/L_0)^{-0.25} + \alpha \text{ (m)} \dots\dots\dots (9)$$

ここに $\gamma = 1 / (0.9 \cot^2 \theta - 6 \cot \theta + 14.0)$

以上述べたように, 上式は, ①沖波波形勾配から周期

の影響を, ②斜面勾配の変化による層厚への影響を考慮して求めた算定式である.

参 考 文 献

- 1) 沢田敏男・中島保治: 水利アスファルト工学, 土地改良新聞社, 1968.
- 2) 加川道男・久保 直: サンドマスチック注入捨石堤の安定性に関する実験的研究, 第 12 回海岸工学講演会, 1965.
- 3) 大野大明・坪田健一・大西正記外: サンドマスチックの小粒径捨石護岸, 防波堤への適用, 関西電力(株) 総合技術研究所資料 No. 77-019, 1977.
- 4) 岸 力: 水理学演習, 学献社, 1975.
- 5) 大野大明: サンドマスチック被覆工の設計に関する実験的研究, 電力土木 No. 153, 電力土木技術協会, 1978.