

サンドマスチック被覆工の設計、施工に関する実験的研究

大野 大明*・手塚 昌信**

1. ま え が き

筆者は、単一斜面堤に施工したサンドマスチック被覆工の破壊が波による揚圧力によるものであることを検証し、各種の波に対して水理模型実験を行い、その結果を集約し次式を得て、第25回海岸工学講演会にその一部を発表した。 $T_h = kH_D + \alpha$, $k = r(H_0/L_0)^{-0.25}$, $r = (0.9 \cot^2 \theta - 6 \cot \theta + 14)^{-1}$ この式は単一斜面堤に対して行った実験に基づくもので混成堤に対してそのまま適用することはできないので、引続き混成堤に対する実用式を求めるべく実験を行い、混成堤においても揚圧力は波形勾配と相関があると判断できる結果を得た。次に、捨石マウンドの捨石層に注入されたサンドマスチックが捨石空げきを流下しながら、冷却され粘性を高めて固結するというサンドマスチックの流動機構はいまだ解明されていない部分が多い。今回、現場サイズの捨石を用いて捨石層の粒径、空げき率、単位体積重量とサンドマスチックの温度、粘性および環境水温をそれぞれパラメーターとして、浸透速度、浸透深さの関係を実験から明らかにしたので、その2つの実験の概要を説明する。

水理模型実験は前回同様、関西電力(株)総合技術研究所の2次元造波水槽によって、また流動特性実験は、大阪市内の野外実験場で実施した。

2. 水理模型実験の概要

サンドマスチック混成堤の基本形は図-1に示すとおりであり、図-1-1に圧力計の位置を、図-1-2には被覆工の斜面上の長さ dc と被覆水深 dc を示す。模型の縮尺は1/25とし、捨石の大きさは実重量30~150kg/個級のものを対象とした。実験に使用した2次元水槽は幅1m、深さ1m、長さ57mの鋼製で、一部肉眼観察のためにガラス板とし、 $H_{max} = 30$ cm、 $T = 0.8 \sim 3$ secの範囲の波を発生することができる。波高計、波圧計等の記録は電磁オシロにより自動的に記録し、また1/100secまで読取り可能なビデオタイマーにより波形を停止し、静水圧を測定することができる。実験の種類は、斜面勾

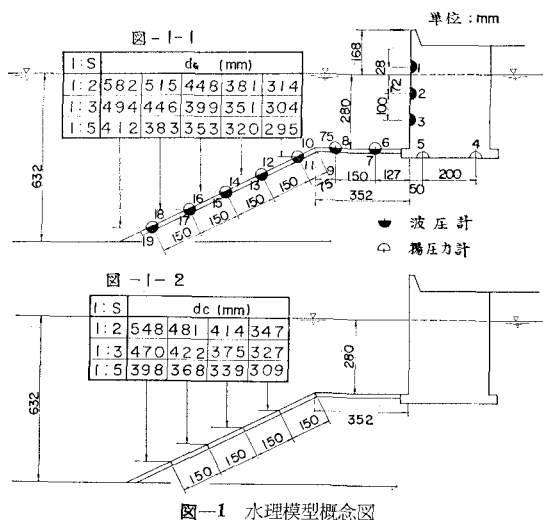


図-1 水理模型概念図

配 1:2, 1:3, 1:5 の混成堤で水平部 35.2cm 全部と、斜面部 0cm, 15cm, 30cm および全長を幅 15cm 単位の鋼板 0~4 枚および斜面全長を被覆し、これに波高 6cm, 12cm, 16cm, 20cm, 周期 1.0sec, 1.4sec, 2.6sec の波を作用させ、鋼板で被覆されていない部分の石塊の崩壊の限界状態および各測定点に作用する波圧および揚圧力を測定した。この報告は被覆工を破壊する支配力が揚圧力であるので波圧についての詳述は避ける。

3. 限界被覆水深

サンドマスチックの必要被覆深度に関する報告はほとんどない。筆者は先に単一斜面堤について模型実験を行

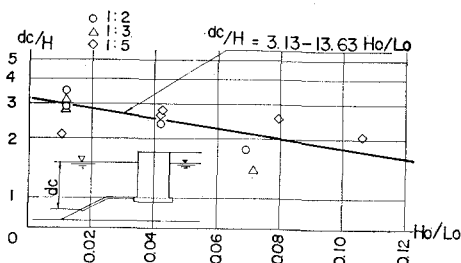


図-2 dc/H と H_0/L_0

* 正会員 (株)新日本技術コンサルタント専務取締役

** 正会員 関西電力(株)建設部土木課副長

い、必要被覆深度 dc は波形勾配との間に $W_p=35\sim50$ kg/個の石塊に対して $dc/H=2.30\sim8.64(H_0/L_0)$ の関係があることを示した。今回、図-1 の混成堤に対して同様の実験を行ったが、その値をプロットすると図-2 の結果が得られた。これを一般式で表わすと $dc/H=3.13\sim13.63(H_0/L_0)$ となる。

4. 混成堤直立堤底部に作用する動揚圧力

揚圧力の測定の結果から次のことが言い得る。①揚圧力の分布は三角形となる。②実験値は各計算値より小さい値を示した。③斜面勾配による揚圧力の変化は小さい。④被覆深度が浅い程揚圧力は大きくなる傾向がある。⑤直立堤底部前端に作用する揚圧力は Sainflou, または合田式による値の 20% 程度、同後端では 30% 程度であった。また入射波 H に対する揚圧力 P_u の比は $P_u=0.1H$ 程度で従来使用されている $P_u=1.25H$ (砕波), $P_u=W_0H/\cosh(2\pi h/H)$ (重複波) に比して極端に小さい。これはマウンド部の被覆による効果と考えられる。⑥直立壁に作用する波圧分布から推定した堤端部の波圧 (P_4) と直立堤底部の揚圧力値より推定した揚圧力 P_u との比は $P_u/P_4=0.8\sim0.9$ でほぼ 1 に近い。

5. 被覆工に作用する最大作用揚圧力

圧力計に示される値は波によって起こる動揚圧力であり、実際の揚圧力は波形によってその点に生ずる静揚圧力との合計値である。したがって、波形変化にともなう静揚圧力の変化について計測する必要がある。この値は前記ビデオを 1/100 sec 間隔で停止しスケッチをとり、その最大値を抽出して求めた。一連の記録を検討した結果、全般に被覆工に作用する最大変動揚圧力は、概ね斜面部における引き波と寄せ波の限界時に発生していることが確認された。また、最大静揚圧力は静水面からの波形の低下が最大である時点であることも確認できたが、両者が同時刻に発生するとは限らない。

被覆工部に発生する最大合揚圧力は全般に動圧最大時より静圧最大時に発生することが多い。動圧最大時に対応する合揚圧力分布は全般に正の値を示すが、この値は静揚圧力最大時のものに比べると小さい。最大動揚圧力の発生する位置は、直立堤直下部(測点7), 法肩付近(測点9, 11)に集中している。直立堤直下部に生起するのは重複波により直立堤直下に波の腹が生じ、また法肩付近に生起するのは砕波直前の引き波により水面が大きく低下し、静揚圧力が大きくなることによると考えられる。図-3 は実験番号 1223 (斜面勾配 1:2, 斜面部 30 cm 被覆, $T=1.0$ sec, $H=12$ cm) の場合の動揚圧力, 波形, 波形から計算した静揚圧力の合計値を動圧最大時, 静圧最大時およびその中間時に分けて図示したものである。これらの値の発生する時刻はかなり微妙であるので、外力として考える場合には静圧の最大値と動圧の最大値とが同時に起こるものとして、両者を合計した値を考える。表-1 は図-3 に相当する数値を示すもので、動圧最大時, 最大合揚圧力は測点 7 で 10.16 g/cm^2 , 静圧最大時のそれは 10.01 g/cm^2 であるが、動圧および静圧のそれぞれの最大値 2.66 g/cm^2 と 9.70 g/cm^2 の合計値 12.36 g/cm^2 を最大作用揚圧力と考える。

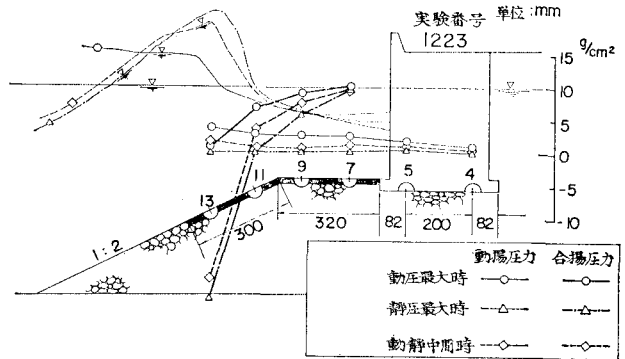


図-3 波形と動揚圧力, 合揚圧力

表-1 に設計動揚圧力値を求める方法を示したが、同様の方法で、条件を変えて算定した結果を表-2 に示す。

表-1 設計に用いる最大作用揚圧力 (単位 g/cm^2)

実験番号 1223, 斜面勾配 1:2, $H=16.39\text{ cm}$, $T=1.01\text{ sec}$, $L=157\text{ cm}$										
測点	動圧最大時			静圧最大時			動静中間時			最大作用
	動圧	静圧	合圧	動圧	静圧	合圧	動圧	静圧	合圧	
4	0.95	—	0.95	0.30	—	0.30	0.47	—	0.47	0.95
5	1.84	—	1.84	0.74	—	0.74	0.92	—	0.92	1.84
7	2.66	7.50	10.16	0.31	9.70	10.01	1.15	8.80	9.95	12.36
9	2.71	6.50	9.21	0.26	6.00	6.26	1.13	7.00	8.13	8.71
11	3.14	4.00	7.14	0.37	0.30	0.67	1.48	2.30	3.78	7.14
13	3.90	-3.00	0.90	0.69	-22.70	-22.01	1.93	-20.70	-18.77	0.90

表-2 被覆工に作用する最大揚圧力 (単位 g/cm^2)

勾配			1 : 2			1 : 3			1 : 5	
$H \text{ cm}$	$T \text{ sec}$	被覆深度 $H_0/L_0 \text{ cm}$	41.5	34.8	28.0	37.5	32.8	28.0	33.9	29.5
6	1.0	0.0394	2.50	4.75	5.27	3.58	3.24	4.12	4.26	3.79
	1.4	0.0213	5.01	4.87	4.75	5.49	4.73	4.97	5.90	4.69
	2.6	0.0057	7.29	*7.44	8.15	8.30	8.28	9.15	*8.16	*8.22
12	1.0	0.0787	7.65	11.45	9.69	14.78	6.43	6.93	6.18	7.01
	1.4	0.0426	10.61	9.30	9.96	9.07	8.03	9.30	9.57	8.70
	2.6	0.0115	13.99	13.17	15.37	*13.00	*13.87	14.43	*15.27	*13.75
16	1.0	0.1049	12.36	14.64	15.30	15.53	13.24	10.37	12.89	9.29
20	1.4	0.0711	16.50	15.29	17.88	16.52	14.47	13.72	17.12	16.00
	2.6	0.0191	19.87	20.44	21.88	20.85	*19.67	23.13	*20.47	*21.37

* 印のついた値は、最大揚圧力が斜面上に発生している場合の値を示す。

6. サンドマスチック被覆工の厚さを決定する 実用式

サンドマスチック工の破壊は、その重量が揚圧力に対して小さい時に浮上りを生じ、捨石の脱落、材料の曲げ破壊などが連続的に発生することによる。したがって、海水およびサンドマスチックの比重をそれぞれ γ_w 、 γ_s とし、斜面勾配を θ 、サンドマスチック被覆厚さを T_h 、とすると $T_h \geq (P_u/\cos \theta)(\gamma_w/\gamma_s - \gamma_w)$ で、 $\gamma_s=2$ 、 $\gamma_w=1$ とすると $T_h \geq P_u/\cos \theta$ となる。いま、 $T_h/H=K$ (揚圧力係数) とすると $K=P_u \cos \theta/H$ となり、 K の値を表-2 から計算すると表-3 を得る。

上表の揚圧力係数 K と波形勾配 H_0/L_0 との関係を斜面勾配ごとにプロットすれば、図-4 が得られる。

表-3 から $K=B(H/L)^a$ として a 、 B を求めると表-4 を得る。

また、斜面勾配を無視して平均値を示すと

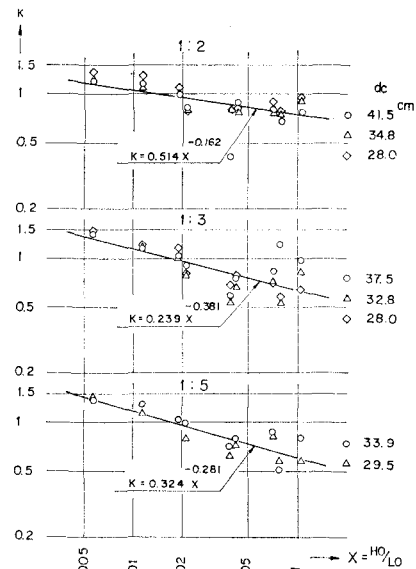


図-4 K と H_0/L_0

表-3 揚圧力係数と波形勾配の相関

勾配			1 : 2			1 : 3			1 : 5	
$H \text{ cm}$	$T \text{ sec}$	被覆深度 $H_0/L_0 \text{ cm}$	41.5	34.8	28.0	37.5	32.8	28.0	33.9	29.5
6	1.0	0.0394	0.417	0.792	0.878	0.596	0.540	0.687	0.710	0.632
	1.4	0.0213	0.835	0.812	0.792	0.915	0.788	0.828	0.983	0.782
	2.6	0.0057	1.215	*1.240	1.358	1.383	1.380	1.525	*1.360	1.397
12	1.0	0.0787	0.638	0.954	0.808	1.232	0.536	0.578	0.515	0.584
	1.4	0.0426	0.884	0.775	0.830	0.756	0.669	0.775	0.778	0.725
	2.6	0.0115	1.166	1.098	1.281	*1.142	*1.218	1.203	1.298	1.169
16	1.0	0.1049	0.773	0.915	0.956	0.971	0.828	0.648	0.806	0.581
20	1.4	0.0711	0.825	0.765	0.894	0.826	0.724	0.686	0.856	0.816
	2.6	0.0191	0.994	1.022	1.094	1.043	*1.037	1.157	*1.044	1.090

* 印以外の値は $\cos \theta=1$ ($\theta=0^\circ$) として算出した。

$$B=0.409, \quad a=-0.221$$

すなわち $K=0.409(H_0/L_0)^{-0.221}$ を得る。

表—4 最大揚圧力係数

斜面勾配	係数	B	a
1 : 2		0.514	-0.162
1 : 3		0.239	-0.381
1 : 5		0.324	-0.281

7. 流動特性実験の概要

使用した捨石, サンドマスチック用材料の性状は表—5, 表—6 に示すとおりであり, 1~500 kg/個級の捨石は水で洗浄した後, 捨石の重量変動幅を 20% 以内とし, 表—7 の実験項目, 条件により実施した。

表—5 捨 石

調達場所	捨石の種類	岩質	比重	吸水量
兵庫県宝塚市	1~10 kg/個	石英斑岩	2.59	0.71%
香川県小豆島	50~500 kg/個	花崗岩	2.60	0.50%
東京都八王子市	1~7 号砕石	硬質砂岩	2.65	0.53%

表—6 サンドマスチック用材料

ストレートアスファルト		石 粉		砂	
針入度	軟化点	比重	0.074mmフルイ通過百分率	比重	F・M
68	48.5°C	1.03	81.5%	2.71	1.95
70	49.0°C		79.2%	2.70	2.73
				1.90%	1.81%
				2.65	2.62

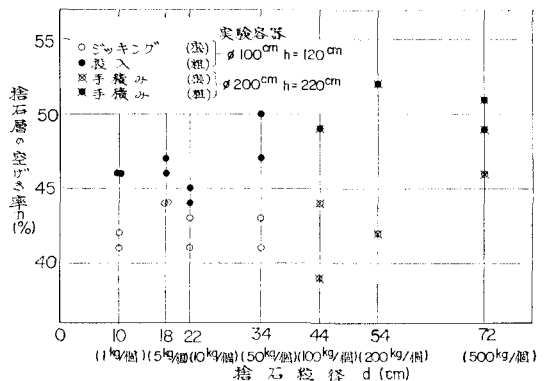
表—7 中, II-1, II-2 は実験容器の中心に熱電対を垂直に設置し, 捨石を詰め, 水張り後にサンドマスチック

クを注入して, マスチックの流動状況を電磁オシログラフに記録すると同時に実験容器の側方に設けた透明アクリライト窓で直接に観察出来るようにしてあり, 流動状況をビデオに収録した。II-3 は実験容器の下部に捨石を詰め, 上部に粘性液を満たし, 捨石層を通過するときの液面降下と時間の関係を測定した。

8. 流動特性実験の結果

(1) 捨石およびサンドマスチックの物理的性質

捨石層の空げき率と捨石粒径の関係を 図—5 に示す。実測値は実験容器が同一の場合, 捨石粒径が大きくなる程, 側壁, 底面の影響が大きくなり, 空げき率が大きくなるので, 補正を行いその値をプロットしている。空げき率と捨石層の単位体積重量, サンドマスチック層の単位体積重量は, 密に積んだ場合と粗に積んだ場合で変わり, 密な場合は, 39~46%, 1.45~1.53 t/m³, 2.35~2.39



図—5 捨石層の空げき率と捨石粒径

表—7 実験内容

実 験 項 目		条 件				摘 要		
I 材 料 実 験	I-1 捨石重量と粒径	1, 5, 10, 50, 100, 200, 500 kg/個級				実 験 容 器 φ 100 cm h=120 cm φ 200 cm h=220 cm		
	I-2 捨石層の空げき率	1, 5, 10, 50, 100, 200, 500 kg/個級						
		粗		密				
	I-3 捨石とサンドマスチック層の単位体積重量	1, 5, 10, 50, 100, 200, 500 kg/個級						
		粗		密				
I-4 サンドマスチックの粘度	アスファルト量 (%)	D/A		サンドマスチックの温度 (°C)		フローコン使用		
	18, 20, 22	1.0, 1.2, 1.4		160, 170, 180, 190, 200				
II 流 動 特 性 実 験	II-1 浸透速度	水深 (cm)	サンドマスチックの配合 (%)	サンドマスチックの温度 (°C)	水温 (°C)	I-2 の材料を使用 実 験 容 器 φ 100 cm h=120 cm φ 200 cm h=220 cm		
		捨石表面上 200	As. 20, F. 25, S. 55	170	20~25			
	II-2 浸透深さ	1	水深 (cm)	サンドマスチックの配合 (%)	サンドマスチックの温度 (°C)		水温 (°C)	使用捨石 1kg/個級
			捨石表面上 0	As. 20, F. 25, S. 55	150, 170, 190		10, 20, 30	
		2	水深 (cm)	サンドマスチックの配合 (%)	サンドマスチックの温度 (°C)	水温 (°C)	使用捨石 1~6 号砕石	
			捨石表面上 0	As. 20, F. 25, S. 55	190	30		
	II-3 浸透係数	水深 (cm)	容 器 内 径 (cm)		流 路 長 (cm)		使用捨石 2~7 号砕石 粘性液使用	
		250	4.6, 9.6, 12.2, 17.0, 24.0		9.2, 19.2, 24.4, 34.0, 48.0			

t/m³ であり、粗な場合は、44~52%, 1.25~1.45 t/m³, 2.32~2.36 t/m³ の値が得られた。

(2) 浸透深さと浸透速度

サンドマスチックの浸透性を支配する主な因子は温度である。図-6 は、捨石粒径 10cm (1kg/個) の場合の

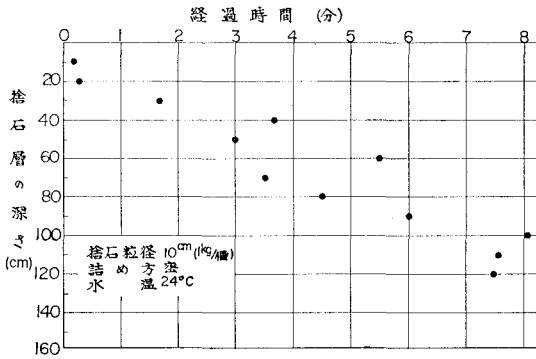


図-6 サンドマスチックの流動性状

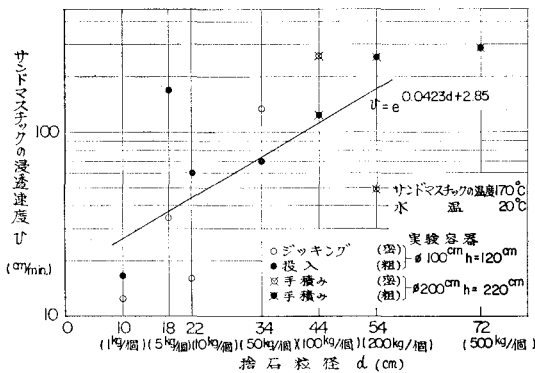


図-7 サンドマスチックの浸透速度と捨石粒径

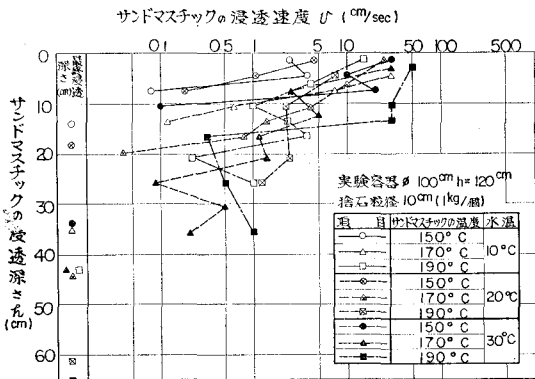


図-8 サンドマスチックの浸透深さと浸透速度

サンドマスチックの流下していくフロントの経過を示したものであって、実験層厚 120cm の捨石までの間でほぼ直線的に浸透しており、マスチックの注入初期温度 170°C がほとんど低下せず、流下速度 0.25 cm/sec を

保ちながら当初の粘性を保持して、固結するまでにはいたっていない。図-7 は、1~500 kg/個級の捨石を密に積んだ場合と粗に積んだ場合の捨石粒径とサンドマスチックの浸透速度の関係を示す。実験容器、材料が大規模なため、若干バラツキが出ているが、積み方の違いによる浸透速度には大きな差はない。図-8 は、捨石粒径 1kg/個の材料を使った場合、サンドマスチックの温度を 150°C, 170°C, 190°C とし、水温を 10°C, 20°C, 30°C に変えて浸透速度と浸透深さの関係を求めたものである。現地で使用されているサンドマスチックの温度 150°C~190°C, 水温 20°C~30°C の範囲では、環境水温が流動性に及ぼす影響はほとんどなく、サンドマスチックの温度により大きく支配される。さらに、ビデオ観測の結果から捨石間の空げき、すなわち、サンドマスチックの通過径の大きさが浸透速度に及ぼす影響が大きいことがわかる。

(3) 浸透限界粒径

図-7, 図-8 からわかるように、サンドマスチックは、浸透性が大きいので、実際の施工にあたっては設計上の被覆厚を管理する必要がある。このため、サンドマスチックが最も流動しやすい条件のもとで、実験 II-2-2 を行い、浸透層数と捨石粒径の関係を求めた。捨石粒径が小さくなる程、浸透深さは減少し、捨石粒径が 3cm 程度になるとほとんど捨石一層分程度しか浸透しない結果が得られた。この結果から、大きな被覆石にサンドマスチックを施工する場合、目潰し石を必要層厚の下部に詰めることによって、必要な設計厚を確保することが出来ることとなり、海中での施工管理が容易に行い得る。

9. あとがき

本研究を行うにあたっては、北海道大学尾崎晃教授に種々有益なご指導、ご助言をいただいた。また、実験の実施、データ整理に多くの労を煩わした(株)ケーエーケー技術研究所、日本海上工事(株)の方々にも厚く感謝の意を表わします。

参考文献

- 1) 沢田敏男・中嶋保治: 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: 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
- 4) 菅原照雄・工藤忠夫・有福武治: 土木材料Ⅲアスファルト, 共立出版(株), 1977
- 5) 尾崎 晃・猪狩興一・平松勝二: 捨石構造における空隙の効果に関する基礎的研究(Ⅰ), 土木学会第 22 回年次学術講演会講演概要 II-112
- 6) 有福武治: マスチック・アスファルトの流動特性とその連続式流し込み工法への応用研究について, ASPHALT Vol. 15, No. 87