

潜堤のマウンド材およびプレパックド堤に作用する 定常流流体力に関する実験的研究

岩崎 敏夫*・真野 明**・中村 武弘***・堀越 伸幸****

1. ま え が き

津波防波堤は津波の堤内への侵入を抑制し、堤内の津波波高を減少させることを目的に建設され、その効果は数値解析や水理模型実験により確かめられている。近年大船渡津波防波堤にみられるように、津波防波堤が大水深の所に建設されるに伴い、防波堤開口部は開口部面積を縮小するため潜堤構造がとらえるようになった。しかし、津波のような流れが潜堤におよぼす流体力に関する研究は数少なく、不明な点が多い。

そこで著者らは、まず潜堤を捨石堤とした場合についてマウンド被覆材の安定性に関して、次に捨石マウンド上にプレパックド堤を置き混成堤とした場合についてプレパックド堤に作用する流体力に関する開水路定常流水理模型実験を行った。

本論文はそれらの実験結果について述べるものである。

2. 実験方法

2.1 実験装置

本実験に用いた開水路定常流実験装置の概略を図-1に示す。開水路は片面ガラス張りで内法巾 1.2m、高さ 1.4m、長さ 11.8m であり、水路下流端には水位調節の

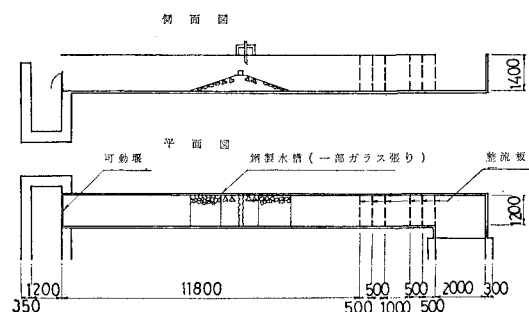
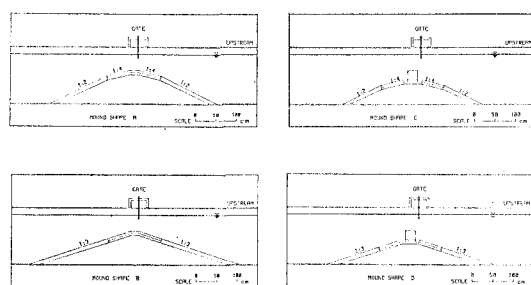


図-1 開水路定常流実験装置 (単位: mm)

* 正会員 工博 東北大学名誉教授
 ** 正会員 工博 東北大学講師 工学部土木工学科
 *** 正会員 長崎大学助手 工学部土木工学科
 **** 学生員 東北大学大学院 工学研究科

ための可動堰が設置されている。潜堤の模型は開水路の中央に築き、可動水門を捨石マウンド天端上流端の上に設置し、天端上の流速を制御するために用いた。

潜堤の形状は、捨石堤と混成堤の2種類とし、さらにそれぞれについて捨石マウンド傾斜部の勾配が 1:3 および 1:4 と 1:2 を組み合わせたもの2種類の計4種類であり、図-2に示されている。すべて断面形状は上・下流側で対称であり、天端高は水路床より 82cm である。



a) 捨石堤

b) 混成堤

図-2 潜堤の形状

模型マウンドの構成は、どの場合も中詰には砂を用い、被覆材としては、マウンド上部の天端付近は上・下2層とし、上層は模型テトラポッドの2層乱積みで、下層には平均粒径 1.5cm の砕石を用いて上・下2層の総厚を 10cm とし、マウンド裾部は単層で平均粒径 2.3cm の砕石を用い厚さ 10cm とした。ここでテトラポッドの2層乱積みとは、1層目は図-3に示すように規則正しく並び、2層目は1層目の隣り合う4本の上向き突起の間に1つのテトラポッドを落し込むような積み方である。また、模型テトラポッドは 14.7g と 29.4g の2種類を使用した。

混成堤のプレパックド堤の形状は、高さが 22cm で、半径 12cm の円筒セル2個を中心間距離 29.82cm で配置し、その間を半径 9cm の円筒セル2個を中心間距離 3.28cm で結合したものを1ブロック(図-4)とし、それらを並べて作られている。

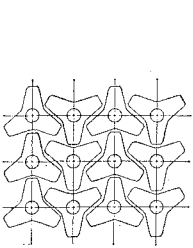


図-3 テトラポッドの1層目の配列

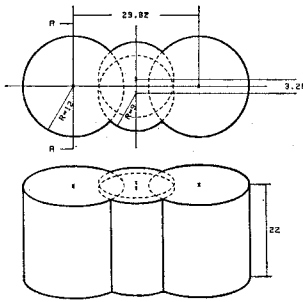


図-4 プレバックド堤(単位: cm)

2.2 実験条件

本実験においては、流量は一定とし、水門の開度を調節して天端上の流速を所定の流速値に設定した。流速の設定値は各ケースについて2種類とし、そのうちの一つは全ケースについて同一で、天端中央上の一様流速の値が116 cm/sの基準流速である。他の1つは、捨石堤に対しては、被覆材の所要安定重量算定のためのもので、水門を下げて徐々に流速を増して行き、テトラポッドの初動が起きた時の流速とし、混成堤に対しては、本実験水路の最大流速とした。

実験水位は、水門を使用しているため水門の前後で水位差が生じ、実験ケースごとにその水位差も異なるため、潜堤の天端中央点より上・下流側にそれぞれ3.7 mの地点での水位差(ΔH)の中心水位が、天端上で42.8 cmとなるように、すべての実験ケースに対して下流堰を用いて設定した。

2.3 実験項目および測定方法

実験ケースと実験項目をまとめて表-1に示す。Case 4では初動時流速と基準流速が一致したため、Case 4-2は基準流速より少し大きい122 cm/sの流速で行った。他のケースでは初動時流速は基準流速より小さい。

(1) 流速分布

全実験ケースについて求めた。

流速は、径1 cmのプロペラ流速計を用いて水平流速およびそのR.M.S.を測定した。測点は水深方向には5 cm間隔を標準としマウンド表面近くでは密にとった。それから流れ方向には、潜堤天端中央を基準として上・下流側に20 cm間隔を標準とした9鉛直断面の流速分布を求めた。また水平流速の各測点における流向を木綿糸を写真撮影して求めた。

(2) 被害率

捨石堤の全ケースについて求めた。

彩色したテトラポッドを配置し、各実験条件のもとに5分間水を流し、その前後におけるテトラポッドの位置を写真撮影して移動個数を判別し、配置個数に対する割合として被害率を算出した。なおテトラポッドの積み方は乱積みであるため、被害率は積み方に大きく左右され

ると予想されるので各ケースともテトラポッドの2層目をすべて積み変え、同じ水理条件に対して3回の実験を行った。

(3) 浸透流

捨石堤の4ケースについて天端中央部で計測した。

2本の塩分濃度計を水平方向に5 cm間隔で配置し、上流側3 cmの点より塩水をパルス状に流し、濃度分布の重心の移動時間を計測して平均流速を算出した。

(4) 抗力・揚力

混成堤のプレバックド堤に作用する抗力・揚力は、受感部径5 mm、100 g/cm² F.S.の超小型圧力センサーを用いて圧力分布を測定し、積分して算出した。プレバックド堤は円筒を継ぎ合わせた形状をしているので、半径12 cmの円筒と残りの部分および半径9 cmの円筒と残りの部分の2種類の模型を製作し、円筒の上面の動径方向に3本、側面の上半部鉛直方向に3本計6本の圧力センサーを取り付けた。測定は円筒を軸の廻りに30°おき回転させてまず上半分の圧力分布を求め、次に逆さ吊りにして下半分の圧力分布を測定した。またそれ以外に接合部での圧力分布も測定した。

表-1 実験ケース

ケース番号		流 速	被 覆 材 質 量	マウンド形状	実 験 項 目			
					a	b	c	d
Case 1-	1	初動時	14.7 gr	捨 石 堤 A (勾配 1:4+1:2)	○	○	○	
	2	基 準			○	○		
Case 2-	1	初動時	29.4 gr		○	○		
	2	基 準			○	○		
Case 3-	1	初動時	14.7 gr	捨 石 堤 B (勾配 1:3)	○	○	○	
	2	基 準			○	○		
Case 4-	1	初動・基準	29.4 gr		○	○	○	
	2	>基準			○	○	○	
Case 5-	1	基 準	14.7 gr	混 成 堤 C (勾配 1:4+1:2)	○			○
	2	最大時			○			○
Case 6-	1	基 準	29.4 gr		○			○
	2	最大時			○			○
Case 7-	1	基 準	14.7 gr	混 成 堤 D (勾配 1:3)	○			○
	2	最大時			○			○
Case 8-	1	基 準	29.4 gr		○			○
	2	最大時			○			○

注: 実験項目

- a. 流速分布 c. 浸透流速
b. 被害率 d. 抗力・揚力

3. 実験結果および考察

3.1 捨 石 堤

(1) 流速分布

水理条件を表-2に示す。これより、基準流速を出す

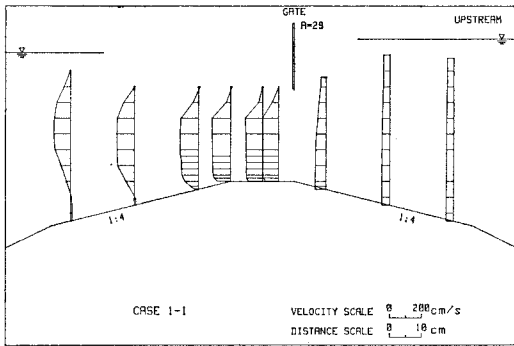
表-2 捨石堤の水理条件

CASE		水位差 ΔH (cm)	水門高 A (cm)
1-	1	4.4	29.0
	2	5.7	26.0
2-	1	5.9	26.0
	2	7.0	24.5
3-	1	4.7	29.0
	2	6.1	25.0
4-	1	6.8	24.0
	2	7.8	23.0

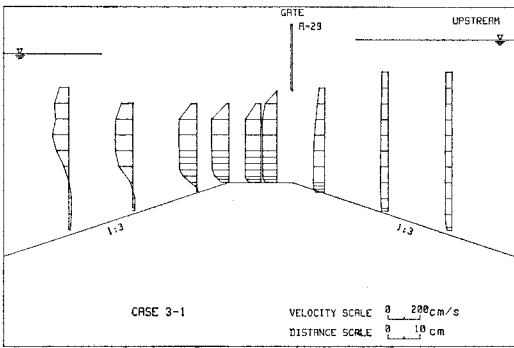
表-3 被害率

CASE	斜面	斜面別被害率(%)				被害率 (%)
		第1回	第2回	第3回	平均	
1-2	U	5	5	1	3.7	13.5
	M	28	31	11	23.3	
	D	—	—	—	—	
2-2	U	0	2	4	2	4.7
	M	14	6	12	10.7	
	D	0	0	2	0.7	
3-2	U	16	7	11	11.3	18.8
	M	57	27	34	39.3	
	D	11	5	1	5.7	
4-2	U	0	2	0	0.7	3.1
	M	14	8	4	8.7	
	D	0	0	0	0	

注: U: 上流側斜面, M: 天端上, D: 下流側斜面



(1)



(2)

図-5 捨石堤の水平流速分布

ためには, Case 1 より Case 2, Case 3 より Case 4, またマウンド形状AよりBの方が水門の高さを下げて水位差を大きくしなければならないことがわかる. すなわち, 被覆材が大きい程, またマウンドの勾配が大きい程損失が大きいことを示している.

水平流速分布を 図-5 に示す. これより, マウンド下流側に後流域が形成され, また, 勾配の急な方が後流域が発達し易いことがわかる.

(2) 被害率

初動時の被害率は各ケースとも, 斜面別で 5% 以内, また全斜面平均で 2% 以内におさまっていた.

基準流速時の被害率の値を 表-3 に示す. これより 14.7g より 29.4g の方が明らかに小さいことがわかる. しかし, マウンドの勾配による被害率の違いについては, 各ケースとも値のばらつきが大きいことや, 14.7g と 29.4g では傾向が逆になっていることから勾配による有意な差は認められなかった. 表-3 を見るかぎりでは, 上流側で 0.7~11.3%, 下流側でも 0~5.7% の平均被害率があるが, その移動の機構は異なっている. 上流側では移動のほとんどが天端との境界の勾配不連続点近くで生じており, テトラポッド間のかみ合わせが小さいような所での移動である. また下流側の移動の多くは天端上から飛ばされてきたテトラポッドが下流側に当たって動いたものであり, これも機構が異なっている.

(3) 被覆材の所要重量算定式の検討

流れに対する被覆材の所要重量の算定式としては, C.E.R.C.¹⁾ の次式がある.

$$W = \frac{\pi w U_0^6}{48 y^6 g^3 (w/w_0 - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \dots \dots (1)$$

ここに W : マウンド材所要重量 (t)

U_0 : マウンド材に当たる流速 (m/s)

w_0 : 流体の単位体積重量 (t/m³)

w : マウンド材の単位体積重量 (t/m³)

g : 重力加速度=9.8m/s²

θ : マウンドの傾斜角

y : イスパッシュ定数

埋め込みの場合 1.20

埋め込みでない場合 0.86

ここでは上式を捨石堤に適用した場合のイスパッシュ定数 y について検討する. 本実験においてはテトラポッドの初動はすべて天端水平床上で起った. そこで天端の傾き $\theta=0$, テトラポッドの単位体積重量 $w=2.3$, また流

表-4 イスパッシュ定数

CASE	U_0 (cm/s)	イスパッシュ定数 y
1-1	85.7	1.12
2-1	91.9	1.07
3-1	70.4	0.92
4-1	104.3	1.21

速 U_0 としてテトラポッド上面の流速すなわち天端上の流速を用いて (1) 式より各ケースについて y の値を求めると表-4のようになる。イスパッシュ定数 y の平均値は、1.08 となり、この値は埋め込みの場合と埋め込みでない場合との中間の値となった。

(4) 被覆材の中の浸透流

捨石堤は空隙が大きいため、マウンド内に浸透流が存在すると予想される。4つのケースについて得られた浸透流の分布を図-6に示す。これより被覆層(テトラポッド2層積)内で非常に大きな速度勾配が生じている様子がわかる。この大きな速度勾配が被覆材の初動と密接に関係していると思われるが現段階ではまだ明らかでない。また、天端上の流速分布も浸透流と密接に関係しており、(1) 式中のマウンド材に当たる流速を知るためにも、浸透流のより詳細な研究が必要である。

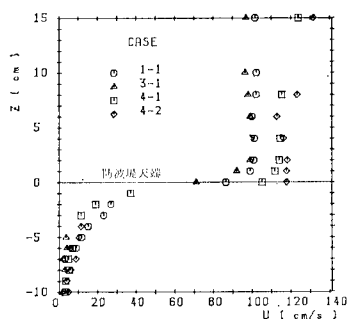


図-6 浸透流速分布

3.2 混成堤

(1) 流速分布

水理条件を表-5に示す。これにより、マウンド形状およびテトラポッドの大きさによる流れに対する影響はほとんどないことがわかる。すなわち混成堤では、プレバクド堤により流れが支配されると考えられる。また被覆材の被害率はゼロであった。

水平流速分布および R.M.S. 分布の一例をそれぞれ図-7, 8に示す。これより、プレバクド堤天端上流端よりはく離が生じ、下流側は後流域になっている様子がよくわかる。

表-5 混成堤の水理条件

CASE	水位差 ΔH (cm)	水門高 A (cm)
5-	1	5.4
	2	7.4
6-	1	5.4
	2	7.4
7-	1	5.6
	2	7.5
8-	1	5.6
	2	7.5

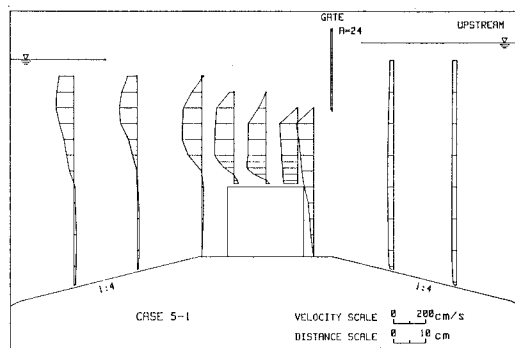


図-7 混成堤の水平流速分布

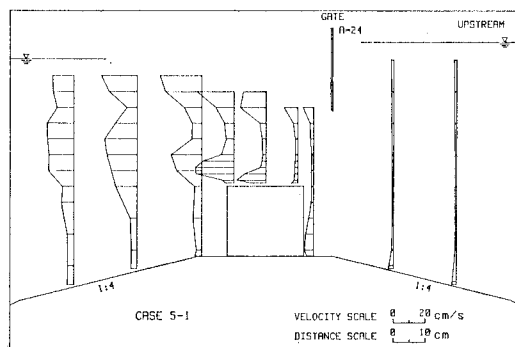


図-8 混成堤の R.M.S. 分布

(2) 圧力分布

圧力分布の一例を図-9, 10に示す。ここで圧力の値は、プレバクド堤上流端での水位からきまる静水圧をすべての測定値から差し引き、動圧力水頭の形で示した。図-9は半径12cmの円筒セル部の流れに平行で中心軸を通る縦断面(図-4のA-A断面)内の圧力分布であり、プレバクド堤表面をゼロとして表わしている。これより、プレバクド堤の上面および下流側面の圧力はほぼ同程度の小さな値となっており、後流域の中にあることとよく対応している。上流側面は大きな動圧を受けており、中でも測点5で大きく、流れが上下に分

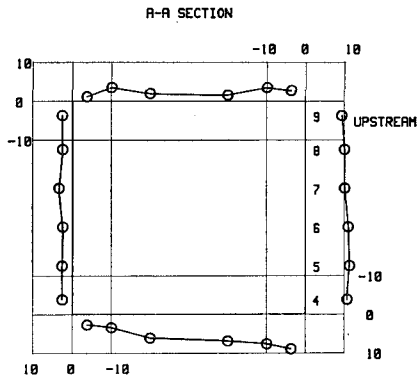


図-9 縦断圧力分布 Case 5-1 (単位: cm)

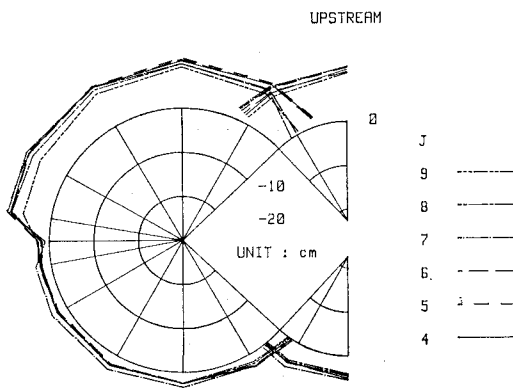


図-10 水平圧力分布 Case 5-1 (単位: cm)

かれるよどみ点と対応している。全体として上流側の圧力は下流側より大きく抗力が作用しており、下面の圧力は上面より大きく揚力が作用している様子がよくわかる。図-10は、プレバックド堤側面の水平面内の圧力分布であり、プレバックド堤表面をゼロとし、動径方向に値をとって示している。図中の J の値は図-9の測定番号に対応した高さを表わしている。これより、抗力が働いている様子がより明確にわかる。また円筒セルの結合部の圧力は他に比して少し大きな値を示しており、応力の集中がみられる。

(3) 抗力係数および揚力係数

圧力分布を積分して得られた抗力および揚力の値から天端上の一様流速の値を代表流速として求めた抗力係数、揚力係数の値および Re 数を表-6に示す。抗力係数の全平均値は0.94である。この値は、一般にプレ

 表-6 抗力係数 (C_D)・揚力係数 (C_L)

CASE	U (cm/s)	C_D	C_L	Re ($\times 10^5$)	
5-	1	119	1.00	0.44	1.75
	2	133	0.98	0.49	1.95
6-	1	113	1.00	0.59	1.66
	2	138	0.87	0.52	2.02
7-	1	118	0.87	0.36	1.73
	2	135	0.91	0.47	1.98
8-	1	118	0.97	0.46	1.73
	2	136	0.93	0.48	1.99

バックド堤の設計に用いられている立方体に対する値1.20よりも小さい。また揚力係数の全平均値は0.48である。一般に設計では揚力係数の値として抗力係数の値1.20を流用しているようであるが、それと較べると1/2以下の値である。

4. あとがき

潜堤を捨石堤とした場合についてマウンド被覆材の安定性に関して、次に混成堤とした場合についてプレバックド堤に作用する流体力に関する開水路定常流実験を行ない以下の結論を得た。

(1) 捨石堤の場合

C.E.R.C.の被覆材の所要重量算定式を捨石堤の被覆材に適用し、イスバッシュ定数を検討したところ、埋め込みの場合の1.20と埋め込みでない場合の0.86との中間の値1.08を得た。なおここで用いる流速は被覆材天端での流速であり、その値を知るためには、主流とマウンド内の浸透流との関係を明らかにする必要がある。

(2) 混成堤の場合

プレバックド堤に作用する流体力に関して、抗力係数および揚力係数としてそれぞれ0.94, 0.48を得た。これらの値は一般に設計に用いられている値1.20に比し、かなり小さい値である。

謝 辞： 本研究は、運輸省第二港湾建設局と東北大学との間の委託契約にもとづいて行なわれた実験によるものである。ここに記してあつく謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Coastal Engineering Research Center: Shore Protection Manual, Vol. II, 1973.