

# 波浪越波による堤防盛土の洗掘について

## THE SCOUR OF BANKING SOIL DUE TO OVERTOPPING OF WAVES

加藤重一\*・満田雅男\*\*  
By Jūichi Katō and Masao Mitsuo

### 1. 緒言

波浪越波が海岸堤防の盛土を洗掘，流失し，堤防決潰に至らしめるという事例は非常に多い。近時，堤防計画については多くの研究成果により合理的な設計が進められているが，なお堤防盛土は経済的な観点もあり，現地材料を用いて施工されることが多く，その耐波性を考えた被覆工や盛土の構造工法に関する研究が少ないようである。この点にかんがみ，筆者らは波浪越波による堤防背面盛土の洗掘について考察した。

波浪越波による盛土の洗掘は，外的作用を与える越波水の挙動（越波量，越波の状態）と，作用を受ける盛土の条件（土性，表面状態など）とによって異なるわけであるが，ここでは異なった土性をもつ盛土の強度について，つぎの4つの場合について検討する。

- ① 越波が直接土面に衝撃を与える場合，
- ② 越波が衝撃を与え，かつのり面を流下洗掘する場合，
- ③ 盛土表面に凹凸があり，それによって破壊が誘発される場合，
- ④ 異質物との接触により水侵食が促進される場合。

すなわち，①は最も簡単に波浪の落下衝撃のみによる土の飛散土量について，②はのり面洗掘などにみられる全洗掘量について，③は粘性土についてみられる破壊の危険性について，④は砂質土に特にみられる崩壊の危険性について，それぞれ考慮したものである。

なお，各場合における現象は従来の研究によると，越波による洗掘現象は，まず，水塊と土との衝突にはじまり，土粒子のはく離，かくはん，削土，流送などの現象が連続，反復して行なわれる。これらの現象の基礎的研究には噴流を用いた洗掘の研究<sup>1), 2), 3), 4)</sup>，限界掃流力の研究<sup>5), 6)</sup> etc，水滴侵食の研究<sup>7)</sup>，などがあるが，越波のごとき落下水衝撃力による掘削に関する研究はとほしいようである。本報告では，波浪越波による堤防背面盛土の洗掘量を知るべく，数種の異なった土質について盛土の洗掘量と越波量との関係についてのべる。

### 2. 実験方法および測定値

本報では波浪越波による堤防背面盛土の洗掘効果を調べるため，まず堤防模型による越波洗掘実験を行ない，つぎに越波水の代りに落下水塊を用いて落下高および落

下水量を変化させて数種類の供試土に同一条件の外力を与えて基礎実験を行なった。そして両者の結果を総合して考察した。

#### (1) 堤防模型による洗掘実験

まず，当场施設波浪水槽（表-1）を用い，実際に使われている材料をもって堤防模型をつくり，表-2のごとく波浪越波，洗掘実験を行なった。

模型波および堤防の設置については，ほぼ既報の実験<sup>8)</sup>と同様であるが，沖波幅度は台風時波浪として0.04を選び，堤脚水深は最高潮位あるいは碎波点衝撃が発生

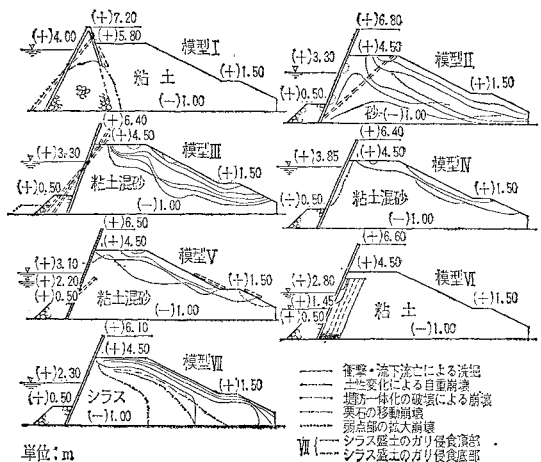
表-1 波浪水槽の諸元

水 槽 部		造 波 装 置	
形 式	鉄わく両面総ガラス張	形 式	Ballistic Pendulum
寸 法	1×1.2×25 m	波 高	0~20 cm 可変
湛 水 深	0.6 m	周 期	0.5~6.3 sec 可変
前浜勾配	1:17	浅 水 度	0.008~0.16 可変

表-2 堤防模型による実験の種類

模型番号	堤防形式	胸 壇 構 造	盛土材料	沖波幅度	堤脚部浅水度	備 考
I	直立型	表裏コンクリート壁 中詰栗石	粘 土	平均 0.04	平均 0.18	模型縮率 1/25
II	"	コンクリート壁	砂	"	"	"
III	"	コンクリート壁	粘土混砂	"	"	"
IV	"	コンクリート壁 捨石マッシュク	粘土混砂 (混合度変化)	"	"	"
V	"	石垣練積	粘土混砂 (混合度変化)	"	"	"
VI	"	石垣練積 栗石四層詰	粘 土	"	"	"
VII	"	コンクリート壁	シラス (平均含水比 37.6%)	"	"	"

図-1 堤防模型の崩壊過程



\* 正員 農博 農林省農業土木試験佐賀支場第三研究室長

\*\* 正員 農林省農業土木試験場 佐賀支場

表-3 堤防模型による実験結果一覧

被型番号	起波数	入射波および越波の状況	崩壊過程
I	1~30	沖波高=2.2m, 砕波高=3.0~5.0m	波浪衝撃により胸壁振動 礫石沈下, 粘土中にやや浸入 胸壁基部のはく脱とともに傾斜倒壊 ——盛土洗掘なし——
	30~60	砕波 steepness=0.06~0.1	
	60~72	10波までクラボチ越波, 11波以後砕波点衝撃または最高点衝撃とクラボチのくり返しによる越波	
II	1~5	沖波高=2.2m, 砕波高=3.4~7.2m	越波落水点の盛土洗掘 のり面流亡始→漸増 胸壁背面の砂陥没 盛土漸次流失 胸壁孤立 胸壁倒壊
	6~13	砕波 steepness=0.06~0.13	
	10~13	10波までクラボチ越波, 11波以後砕波衝突とクラボチのくり返しによる越波	
	14~22		
	22~23 24		
III	1~25	沖波高=2.2m, 砕波高=5.0~8.0m	盛土小段部分洗掘 2段跳波でのり面洗掘→漸増 2段跳波で盛土腰掛状に洗掘 前捨石の崩壊とともに胸壁漸次傾斜 盛土天端部流亡しりのりに堆積
	26~50	砕波 steepness=0.07~0.20	
	51~90	10波までクラボチ越波, 11波以後砕波衝突とクラボチのくり返しによる越波	
	91~129 130		
IV	1~25	沖波高=2.2m, 砕波高=3.0~4.7m	盛土小段部分洗掘 法面もやや洗掘 天端からのり面にわたり洗掘 胸壁背部の砂と粘土分離 盛土洗掘やや増加 ——胸壁異状なし——
	26~42	砕波 steepness=0.06~0.1	
	43~74	10波までクラボチ越波, 11波以降砕波衝突とクラボチのくり返しによる越波	
	75~105 106~180		
V	1~2	沖波高=2.2m, 砕波高=4.0~5.4m	越波落水点の盛土洗掘 のり面にわたり盛土流亡 胸壁上部孤立 盛土部衝撃により振動 胸壁上部折損飛散 盛土流亡, 胸壁下部破壊
	3~8	波砕 steepness=0.06~0.13	
	9~30	10波までクラボチ越波, 11波以後砕波衝突とクラボチのくり返しによる越波	
	31~22 33		
	34~36		
VI	1~16	沖波高=2.2m, 砕波高=2.5~5.3m	衝撃により胸壁振動 壁背礫石少量沈下 ——胸壁異状なし—— ——盛土洗掘なし——
	5~16	砕波 steepness=0.06~0.1	
	17~36	10波までクラボチ越波, 11波以後砕波衝突とクラボチのくり返しによる越波	
VII	1~3	沖波高=2.2m, 砕波高=3.0~7.0m	盛土全面にわたって流亡 盛土 Gully 侵食始→漸増 盛土飽水状態となり, 自然崩壊 胸壁倒壊, 盛土押流される。
	4~18	砕波 steepness=0.06~0.15	
	19~31 32	10波までクラボチ越波, 11波以後砕波衝突とクラボチのくり返しによる越波	

して越波量が最大となるような水深を選んだ。模型波の発生は堤防壁面からの反射波が造波機に到達する以前に停止し, ただちに止水装置をもって消波した。かようにして数波ごとに連続起波をくり返して実験をし, 一波ごとに洗掘量や洗掘崩壊状況を記録, および写真撮影した。この場合, 各洗掘に対応する越波量は, あらかじめ

表-4 供試土の性質

記号	種類	真比重	中央粒径			重量組成(%)			試験時土性		
			(mm)	目数	砂	シルト	粘土	含水比(%)	見掛け比重	空けき率(%)	
A	砂	2.7	0.52	0	99	1	0	14.2	1.73	43.8	
B	粘土混砂	2.7	0.50	0	94	3	3	31.1	1.69	52.3	
C	粘質砂土	2.68	0.45	0	86	5	9	41.8	1.62	57.4	
D	砂質粘土	2.65	0.30	0	62	14	24	52.4	1.50	62.8	
E	砂混粘土	2.62	0.025	5	40	23	32	60.4	1.41	66.5	
F	粘土	2.62	0.0047	6	11	31	52	81.4	1.35	71.6	
H	シラス	2.34	0.27	2	95	3	0	51.3	1.02	71.2	

備考: 上記試料のほか, 砂およびシラスについて, 水締めによる填充試験を記号 A' および H' として試験した。

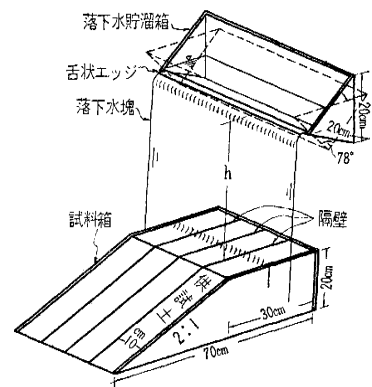
木製模型によって求めておいた越波水脈の高さと越波量との関係から計算した。

いま, 模型堤防の代表的な洗掘崩壊の模様を示せば図-1のごとくで, 入射波との対応をしめせば表-3のごとくである。

(2) 落下水による洗掘実験

各種盛土材料の洗掘抵抗特性をみるため, 筆者らは打ち上げた波を簡単に落下水とみなして, 図-2に示すような装置で各

図-2 落水装置の概要



供試土に同一条件の落下水塊を与え, それによって生ずる洗掘量を測定した。この実験を用いた供試土は, ① 砂と粘土の混合比をかえて6種類, ② シラス, ③ 水締め填充によるもの(砂, シラス)2種類で, 供試土の勾配部分は一応堤防模型と同じく1:2として行なった。いま, 供試土の性質を示せば表-4および図-3のごとくであり, 落下水の諸元(代表的なもの)を示

せば表-5のごとくである。また, 落下水の与え方は始めの数回(表-5(a)においてはNo. 1~6, (b)においてはNo. 1~4)を供試土の天端部分に衝撃波として与え, つぎに((a)におけるNo. 7を与える前に)供試土表面に凹凸をつけて, のち((a)においてはNo. 7以降, (b)においてはNo. 5以降)は天端およびのり面全体にわたって落下水塊を与えのり面洗掘をも行なわし

図-3 供試土の粒度分布

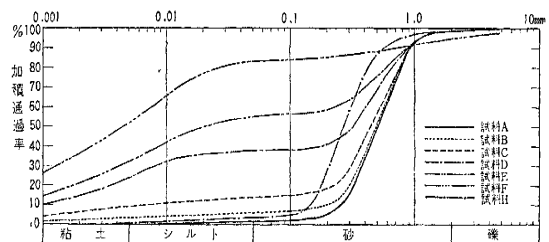


表-5 落下水の諸元

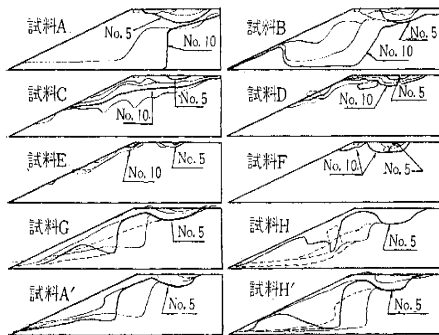
(a) 供試土 A~F に対するもの

No.	落下高 (cm)	流下時間 (sec)	総流出水量 (cm <sup>3</sup> )	落下水厚 (cm)	落下水速 (g/cm <sup>2</sup> )	積算単位 流出量 (cm <sup>3</sup> /cm)	備考
1	64.5	0.6	407.2	0.3	129.3	5.08	衝撃掘削 適用範囲
2	61.5	1.3	3181.6	1.0	124.0	44.90	
3	60.3	2.3	6058.0	1.2~0.6	121.6	120.5	
4	61.7	2.9	10300.6	1.3	124.7	249.5	
5	57.6	3.1	14089.0	1.1~1.0	116.2	425.7	
6	55.8	6.7	14304.0	0.8	112.4	604.0	
7	90.1	2.6	13156.0	1.6	181.8	781.0	
8	87.9	5.2	14304.0	0.8~1.0	176.7	960.0	
9	88.35	8.0	12802.8	1.1	177.8	1118.0	
10	112.9	3.6	14677.2	1.8~0.7	227.2	1305.0	
11	112.9	4.2	15500.0	1.8~0.7	227.2	1498.0	
12	112.9	3.8	15500.0	1.8~0.7	227.2	1690.0	
13	112.9	3.0	15500.0	2.0~1.0	227.2	1885.0	
14	112.9	3.5	15500.0	2.0~1.0	227.2	2080.0	
15	112.9	5.3	15500.0	1.7~0.7	227.2	2270.0	
16	112.9	7.0	15500.0	1.0	227.2	2460.0	

(b) 供試土 H, A', H' に対するもの

No.	落下高 (cm)	流下時間 (sec)	総流出水量 (cm <sup>3</sup> )	落下水厚 (cm)	落下水速 (g/cm <sup>2</sup> )	積算単位 流出量 (cm <sup>3</sup> /cm)	備考
1	85.8	2.5	1836.0	0.5	172.1	22.95	衝撃掘削 適用範囲
2	54.3	3.7	4872.0	0.5	109.1	83.8	
3	54.7	3.0	5852.0	1.0	110.4	157.0	
4	55.6	5.6	11056.4	1.0	112.2	295.5	
5	60.1	3.5	6707.2	0.5	120.7	379.0	
6	54.6	4.5	7903.2	0.5	109.2	478.0	

図-4 供試土の洗掘過程



No. は表-5における落下水番号を示す。  
試料Gは試料Aと同一のもので外力が異なる。

た。つぎに、各供試土の洗掘過程を示すと図-4のごとくである。

### 3. 結果とその考察

#### (1) 測定値整理の方法について

2.にのべた洗掘実験から測定値を整理して、各種盛土材料ごとの洗掘抵抗について検討する。従来、波力現象に関しては、波圧またはその力積などとして考察されることが多かったが、越波による洗掘現象においては被衝撃体が土であるので、この考えでは取り扱いにくいようである。

すなわち、これらの作用は掃流、浮遊の理論などを用いて解析するか、H. Rouse<sup>1)</sup> やその他の実験式を用いることも試みられるがなかなか困難である。ここでは、数種類の試料に関する洗掘抵抗の性質を知るため洗掘量の支配因子を次元解析により考察し、実験係数  $r$  を求める。

いま、関係する物理量として、洗掘土量  $V_s$ 、水の落下高さ  $h$ 、水の粘性  $\mu$ 、水の密度  $\rho$ 、流下断面積  $A$ 、流下継続時間  $t$ 、土の密度  $\sigma_s$ 、粘着力  $c$ 、土の中央粒径  $d_{50}$ 、なる9種のものを考える。これら要素間の一般的関係は

$$f(V_s, h, \mu, \rho, A, t, \sigma_s, c, d_{50}) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

これを  $\pi$  定理によって書き直せば

$$V_s/h^3 = \phi(A/h^2, \mu t/h^2 \rho, \rho/\sigma_s, h^2 \rho c/\mu^2, h/d_{50}) \dots\dots\dots (2)$$

がえられる。

このうち、第3,4,5項が盛土の性質に関するもので、第1,2項が落下水に関するものである。したがって、一定の土に対する洗掘量と落下水との関係を求めるには、第1,2項を考慮すればよいことになる。しかるに、台風時の越波は大部分が水平方向に分布するものでしめられ、衝撃、掘削は瞬間的に行なわれるので\*、ある大きさの連続水塊において、いま平均跳上高さ  $h$ 、および流下継続時間  $t$  を一定と仮定すれば、入射波の性質により変化するのは流下断面積（水平方向の分布面積） $A$  で、これは  $h$  および  $t$  を一定とした場合には越波量に比例する。一方、越波を落下水塊のごとくみなして実験する場合に流下継続時間  $t$  に多少差が生じて、 $h$  と  $A$  が一定ならば  $t$  は流下総水量に比例するので、第2項はやはり落下水量に比例する。したがって、第1,2項を考慮する代りに越波量あるいは落下水量の無次元数  $V_w/h^3$  を考慮しても式(2)の関係は定めることができる。

すなわち、盛土の洗掘量に関する測定値は越波量（落水実験においては落下水量）の無次元数  $V_w/h^3$  を支配因子として整理するのが便利でよいと考えられる。なお、その結果えられた関係が直線で表わされる場合にはその勾配より、洗掘抵抗度を求めることができる。一方、実験によれば、落下水量に対する洗掘土量の比は供試土ごとに一定勾配をもった直線関係であらわされるので、水と土粒子の密度をそれぞれ乗じ、質量の比として洗掘抵抗係数  $r$  を求めることにする。

$$r = \rho V_w / \sigma_s V_s \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $V_w$  : 越波量または落下水量、 $V_s$  : 盛土の洗掘土量。

この値は、主として落下水エネルギーの減殺量と土粒

\* 岩垣らの研究<sup>9)</sup>によれば風をともなった越波実験から、風速がある程度以上大きくなると越波量はほぼ一定値に近づき、水平方向に飛散分布する。また、永井らの研究<sup>10)</sup>によれば、風がある程度強くなると、無風時に比べ跳波の軌跡はすべて大抵近似して行くことが確かめられている。

子の掘削阻止抵抗力とに関係し、現行の土性表現法を用いれば、土粒子の形、分布、含水量、空げき率などの関数として表わされるものと考えられる。ここでは一応、供試土の洗掘抵抗の大きさを示すものと考えておく。

また、落下水のもつ運動量変化は  $\int p dt$  または  $\rho v_1 V_w$  で与えられるが、この値は土粒子間の粘着力が非常に強い場合に、その結合力を破壊する限界力に関係し、その土の洗掘始点をきめる要素となる\*。

(2) 各供試土における洗掘抵抗特性

以上の整理方法にしたがって、堤防模型実験の場合と、落下水実験では緒言にのべた4つの場合についての測定結果をそれぞれ整理し、さらに各供試土間の洗掘抵抗特性について考察する。

a) 堤防模型実験の結果によるもの 堤防模型を用いた波浪実験の結果から越波量と洗掘量とを算出し、各盛土材料における両者の関係を見るため測定値を整理図示すれば 図-5 a) のごとくなる。

しかして、両者の関係は直線で表わされ式 (3) によって盛土材料ごとの洗掘抵抗係数  $r$  が求められる。また、波浪実験の結果は 図-6 にも示されるように②の場合の関係曲線上にのり、一方、越波水は天端、のり面など盛土全体にわたって落下し、のり面洗掘も大部生じているので現象的には②の場合に最も近いといえる。

b) 越波が直接土面に衝撃を与える場合 (①の場合)

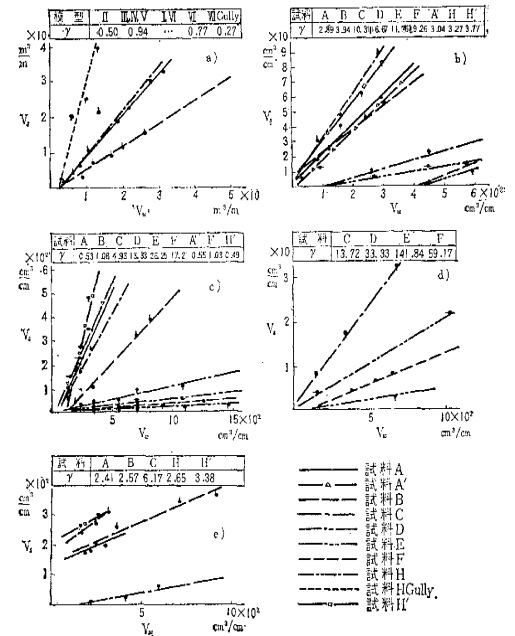
①~④の場合については、落下水による洗掘実験の測定値を落下水塊の与え方に応じて整理し、それぞれ図示する。いま①の場合におけるものとして、表-5 に示す落下水のうち (a) に関しては No. 1~6, (b) に関しては No. 1~4 にかかる測定値を整理すれば、図-5 b) のごとくなる。これより洗掘抵抗係数  $r$  を求め、これと供試土中の含砂率との関係を示せば、図-6 中の①曲線のごとくなる。

すなわち、①の場合における洗掘土量  $V_s$  はこの  $r$  と式 (3) とを用いて求められる。ここに試料中の含砂率を土性の指標としてとったのは、それが流水に対して洗掘抵抗力を与える土の固塊化を阻たげる因子の割合と考えたためである。

c) 越波が衝撃を与え、かつのり面を流下洗掘する場合、(②の場合) 盛土斜面に越波が落下した場合にはいろいろの現象が同時に起こり、はなはだ複雑である。②の場合におけるものとして、表-5 に示す落下水のうち (a) に関しては No. 7, (b) に関しては No. 4 以降の落下水をのり面上に落したので、これに対応する測定値を整理すれば、図-5 c) のごとくなる。これより同様に  $r$  の含砂率による変化を求めると、図-6 中の②曲線

図-5 各供試土の洗掘抵抗特性

- a) 堤防模型実験の結果
  - b) 越波が直接土面に衝撃を与える場合 (①の場合)
  - c) 越波が衝撃を与え、かつのり面を流下洗掘する場合 (②の場合)
  - d) 盛土表面に凹凸があり、それによって破壊が誘発される場合 (③の場合)
  - e) 異質物との接触により水侵食が促進される場合 (④の場合)
- ここに、 $r$  の値は  $r = \frac{V_w}{V_s} \times \frac{\rho}{\sigma_s}$  から算出



のごとくなる。いま②曲線を①曲線に比較すると、含砂率70%以上、とくに90%以上になると、②における抵抗性は①の約1/6と非常に小さく、斜面上における非粘性土の崩壊性の大きなることを如実に示している。これに対して含砂率65%以下では、抵抗性が非常に大となり、曲線は交差して傾斜面での安定性は粘着力の大なる粘土の方がすぐれていることを示している。

すなわち、粘性土 E および F では水平面のときにくらべ約2倍の抵抗性をもち、土壌表面が滑らかであれば斜面上は弾性壁面のごとくなって粘着力が有効に働き、土壌粒子の破壊、移動をさまたげ、洗掘をすくなくらしめている。

d) 盛土表面に凹凸がありそれによって破壊が誘発される場合 (③の場合) 越波の落下するところにきれつや凹凸が既存したり、衝撃力により被覆工や構造物が破壊され、土面にくぼみが生じたりした場合には、その洗掘量は一般に促進される。この点にかんがみ、ここでは表-5 に示す No. 7 以降の落下水に対して、あらかじめ試料面に深さ1cm×幅2cmの切り込みを作り、そこに落下水をあて、切り込みが影響をおよぼしていると考えられる落水回数、範囲内の洗掘土量を測定整理して関

\* 本文 図-5 b) のうち試料 E および F などにおける洗掘始点のずれを意味する。これは、J.E. Prins<sup>(1)</sup> のいう流水に対するシルトの洗掘に関する土粒子輸送の始まる臨界状態に似たもので、今後の研究にまたねばならない。

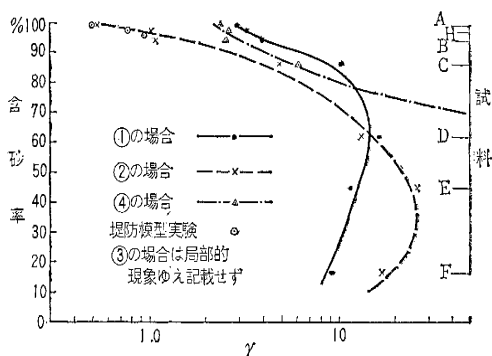
係曲線を求めた。これは図-5 d) に示すごとく直線関係となるので、前項と同様に  $r$  を求め土壌による破壊の誘発性をしらべてみる。砂Aおよび砂B土については切り込みができないので除外すれば、砂質土側よりC→D→F→Eの順序で崩壊性の異なる土はより促進されて、小なる土との洗掘量格差が大となっている。

すなわち、粘着力により粘性土が土塊としてよく一体化している場合は洗掘抵抗も大である。

しかし、きれつの侵入などにより一体化が破壊された場合には、粘土Fは小土塊のまま洗掘されることもあり危険である。

e) 異質物との接触により水侵食が促進される場合(④の場合) 一般に土壌が異物と接触する面は透水性が大きくなるので、侵食されやすい状態にある。これは図-2の装置における隔壁にそった部分がとくに侵食されて溝状となり、つねに、中央断面より大きな洗掘量が測定されたことよりも明らかである。この現象は砂質土、シラスなどに顕著にみられ粘性土にはほとんどみられない。いまこれに関する測定値を整理すると図-5 e)のごとくなる。この場合にはシラスHおよび粘質砂土Cは直線性を保つが、砂を95%以上ふくむAおよびBは曲線となって表われる。この原因として試料HおよびCにおける接触面侵食が鉛直面内に発達していくのに対し、試料AおよびBでは非粘性土壌のため侵食が3次元的に広がって発達し、のちには水平面内に一様な崩壊となるためである。

図-6 洗掘抵抗係数



ちなみに、砂の侵食角度はつねに安息角近傍を保ちながら崩壊し、ガリ (Gully) 侵食の様子は現れない。この場合も同様に一応各試料の  $r$  を求め、含砂率による変化を描くと、図-6中の④曲線のごとく表わされる。供試土D以下の粘性土では異質接触面における洗掘抵抗は非常に小さくなっている。

### (3) 砂質および粘性土における洗掘過程の相違

砂質土と粘性土とはその土性上の違いからくるいろいろな相違点をもっている。流水に対する性質も例外ではなく多くの現象の違いとなって現われる。その根本的な

違いは、砂粒子は単独で移動しうが、粘土粒子はむしろ団塊として移動する点にある。

#### a) 落下衝撃による掘削過程の相違

① 砂は単粒子ごとに移動するので、水塊の当たるすべての面で飛散される。2次元模型波では、明瞭な2次元断面をもった掘削溝が掘られる。

② シラスは適度に湿った状態で垂直以上の安息角をもち、水で飽和するか完全乾燥の状態ですべて小さな安息角になるという特殊土壌である。したがって、その場所の含水量により洗掘状態は異なるが、とくに比重が軽いため落水衝撃に弱く多量の掘削が行なわれる。

③ 粘性土は衝撃力に対して非常に強い。とくに土表面が平滑な場合には相当な洗掘抵抗をもち、図-5 b)における試料EおよびFの洗掘始点のずれとなって現われている。粘性土は通常、土中のきれつ、異質物混入などの弱点に起因して土塊ごとに飛散移動する。

#### b) のり面流下による洗掘掃流過程の相違

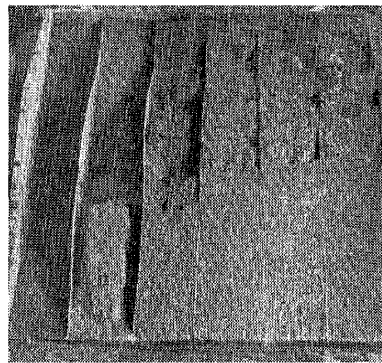
① 砂は一般に安息角にしたがって崩壊し、ついに掃流力によって砂粒が全面的に押し流される。特に透水性が良い場合、数回の越波によって盛土内は飽和に達し、浸出水によるのり面崩壊を生じ、これが順次波及する場合がある。

② シラスは水みちに沿って鉛直方向に侵食が発達し、ついに両側から自重崩壊する。掃流力によっても容易に流亡し、最も侵食されやすいことは図-5にみるとおりである。とくに空けき率が大きいため多量の空気を土中に混じ、侵食初期には泡状となって流下する。

③ 砂とシラスとの洗掘性の相違は粒子形状の差からくるものが多いと考えられる。シラス粒子の形状は彎曲、あるいは突起部を有し、これらがからみあって層をなす。受侵の場合には空けき中への水の侵入とともにからみあいがとけ、崩壊をはじめ。このことは顕微鏡観察によって認められ、シラス粒子の方が砂粒子よりも早く移動をはじめることがわかる。

④ 粘性土は、表面が破壊するまで粘土分を溶解し砂粒を移動させ表面に掻き傷を残して流下する。一度表面

写真-1 洗掘過程における供試土の状態 (左側より試料 A,B,C,D,E,F の順)



が破壊されると、発生したきれつ部から土塊となってはく離し、流水により移動される。土塊の大きさは水よりもむしろ土の条件に支配されるが、水量が多くな

ると大きな土塊をも容易に移動させるので、多く掘られる場合もある。

以上のごとき洗掘過程の一例として、落水水 No. 9 における洗掘状態を写真—1 に示す。

#### 4. 結 言

本報は越波による盛土洗掘に対する考え方ならびに土性の相違による洗掘抵抗の変化について二、三の点を明らかにした。

また、実験は Froude の相似率を用いて行なっているので、洗掘抵抗係数  $\tau$  の値については若干問題が残るが、実際の台風時越波においては、大量の越波水も小水塊に飛散分布して越波することにかんがみ、越波を連続水塊と考える（しぶきを除外する）限りにおいて、この特性はほぼ現地に適用してきしつかえないと思われる。

すなわち、越波による盛土の洗掘量に関しては越波量が最も支配的な要素と考えられるので、入射波の性質がわかり越波量が推算できれば、これと洗掘抵抗係数  $\tau$  とを用いて式(3)から洗掘土量を逆算することができる。

以上の結果は土羽堤防はもちろん、工事中の堤防や被覆工の破壊された堤防に対して適用され、さらに土性の特徴を生かした有効な盛土施工法をみいだすことによって合理的な設計に役立ちうるものと思われる。

なお、水流の性質、土の条件（とくに洗掘始点の条件）について、さらにくわしく表現できればいっそうの確実性が期待できるものと信ずる。

本研究にあたり、貴重なご批判をいただいた京都大学岩垣教授ならびに土屋助教授に厚くお礼申し上げる。ま

た、本実験にご協力下さった、有明干拓、大浦干拓事業所に対して厚くお礼申し上げる。

#### 参 考 文 献

- 1) Rouse, H.: Criteria for similarity in the transportation of sediment, University of Iowa studies, Bulletin 20, Proceedings of Hydraulics Conference, pp. 33~49 (1940).
- 2) 栗原道徳・椿東一郎: 噴流の洗掘作用について, 九大応用力学研究所報第4号 (1954).
- 3) Moore, W.L., Masch F.P.: Experiments on the scour resistance of cohesive sediments, Geophys. Res. Vol. 67, No. 4 (1962).
- 4) 今村正孝: 水平噴流による局所洗掘の実験, 昭和37年度関西支部年次学術講演会概要 p. 109 (1962).
- 5) 栗原道徳: 限界掃流力について, 九大流体力学研究所報告第4巻第3号 (1948).
- 6) 岩垣雄一: 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集第41号 (1956).
- 7) 岩垣雄一・土屋義人: 水滴による地面浸食に関する二、三の実験, 土木学会論文集第35号 (1956).
- 8) 加藤重一: 海岸堤防の断面形状と波浪エネルギーの減殺効果について——特に波のうちあげ高と波圧強度, 第5回海岸工学講演集 pp. 159~168, 土木学会 (1958).
- 9) 岩垣雄一・土屋義人・井上雅夫: 風洞水槽を用いた海岸堤防の越波に関する研究(1)——風洞水槽の特性と鉛直堤の越波に関する二、三の実験, 第9回海岸工学講演集 p. 158 (1962).
- 10) 永井莊七郎・上田伸三: 風と波を考慮した海岸堤防の形状と構造に関する研究, 第7回海岸工学講演会講演集 pp. 252-3 (1960).
- 11) Prins, J.E.: Echelle du temps dans la reproduction d'un affouillement; La Houille Blanche, Vol. 18, No. 2, Mars-Avril (1963), 土木学会誌抄録 Vol. 48, No. 9, pp. 87~88.

(1963.11.29・受付)