

混成防波堤の摩擦係数に関する一考察

上 原 泰 正* 時 川 和 夫**

1. ま え が き

港湾施設のうち防波堤や岸壁などは重力式構造物の形式をとる物が多い。これらの断面を検討する際の基本設計としては予想される最大の外力、例えば波力、土圧力に対し堤体の滑動、転倒、耐支圧などの安全性が満足される断面を求めることであるが、一般に滑動に対する安全性が確保されるならば他の条件もほぼ満足されることが多い。

従来の重力式構造物は捨石マウンドの上にコンクリートの堤体をのせ、捨石とコンクリートの摩擦抵抗力で外力に対抗する構造が大部分であり、この摩擦係数は通常0.6を標準値として用いている。しかし、この標準値はなかば経験的に用いられてきたもので、摩擦係数の本来の性質であるバラツキを考えるとこの数値が平均値かあるいは下限値なのか不明な点が多い。一例として港湾研究室で行った防波堤の断面実験¹⁾のとき堤体の滑動試験から摩擦係数を求めた結果、0.486～0.591(平均値で0.540)と従来用いている標準値を下まわる値となっているが、永井らの実験²⁾では0.77～0.89と相当大きな値を得ている。これらの相違はおもに使用材質の物理的性質の相違のほか、捨石マウンドの締固め状況、凸凹の大小および滑動の測定方法の相違、例えば滑動したと認められる滑動量などに依存しているように思われる。

このように断面の設計上大きな要素となっている摩擦係数が案外無関心に取扱われており、また標準値である0.6とかなり異なる実験例があることから従来の実験結

果を整理するとともに、再度コンクリートブロックと各種材質の静止摩擦係数の測定を行ったので、この結果について以下に報告する。

2. 摩擦に関する実験例について

重力式構造物の設計に用いられる静止摩擦係数の標準値は、港湾構造物設計基準³⁾では表—1のように定めており、また擁壁などの陸上構造物の場合は、表—2に示すものを標準値としている。これら標準値を比較するとコンクリートと石材あるいは岩盤の間の静止摩擦係数は、組合わせにより若干の相違はあるが0.5ないし0.6となっている。しかし、この摩擦係数の測定結果の報告例は数少なく、文献調査の結果表—3に示す程度であった。

この表の中から防波堤や岸壁の一般的施工法であるコンクリートと捨石の項についてだけ比較すると図—1に示すとおりで、摩擦係数の値は最小値0.41から最大値0.89まで相当広い範囲にあることがわかる。ただし、表

表—1 摩擦係数の標準値 (港湾構造物)

コンクリートとコンクリート	0.5
コンクリートと捨石	0.6
コンクリートと岩盤	0.5
捨石と捨石	0.8
プレパックドコンクリートと岩盤	0.7～0.8*

* 直接岩盤上に打設した場合で、施工条件、岩質により異なる。⁴⁾

表—2 摩擦係数の標準値 (擁壁など)⁵⁾

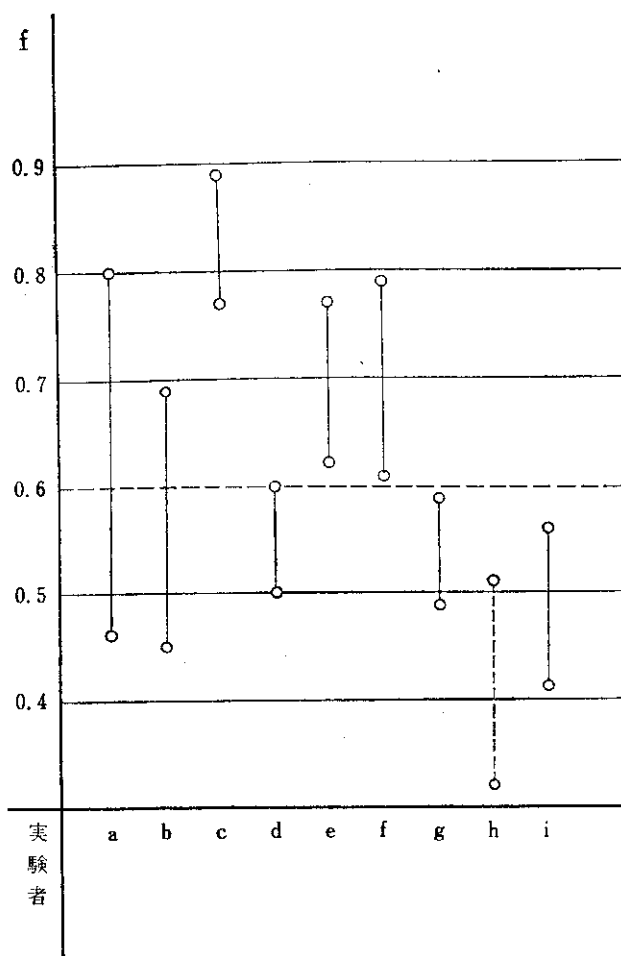
材 質	場 所 打 ち	場所打ちでないもの
コンクリートと土	シルトなしの粗砂 シルトを含む粗砂 シ ル ト	tan ϕ *
		0.55
		0.45
コンクリートと玉石 コンクリートと割石 コンクリートと岩盤	0.5 0.6 0.6	0.35
		0.5
		0.6
		0.6

* ϕ は土の内部摩擦角である。

*港湾研究室主任研究員 **同副室長

表—3 静 止 摩 擦 係 数 に 関 する 測 定 例

実 験 者	材 質	静止摩擦係数	平均値	使 用 砕 石	締 固 め 状 態	滑 動 の 判 定 方 法
a) 広井 ⁶⁾	砕石とコンクリート 割ぐり石とコンクリート 割ぐり石と割ぐり石 コンクリートとコンクリート	0.460～0.801 0.564～0.679 0.720～1.037 0.566～0.692	0.624 0.881 0.645	砕石(径1寸2分) 割ぐり石(径4寸) “(”) “(”)	水平に敷均す	微動と移動 滑車による
b) 山田・福田 ⁷⁾	捨石とコンクリート	0.45～0.69		捨石重量50kg内外	表面凹凸を屑石で均す	2.0～10cm (トランジットに よる目視)
c) 永井・玉井・久保 ⁸⁾	砕石とコンクリート 玉石とコンクリート	0.77～0.89 0.69～0.75	0.82 0.70	砕石径3～8cm 玉石径3～8cm	水平に敷均し一部締固	回転ベネ計りの目盛の回転に よる
d) 加川 ⁹⁾	砕石とコンクリート 玉石とコンクリート コンクリートとコンクリート ラワン材とコンクリート	0.50～0.60 0.39～0.49 0.56～0.63 0.53～0.68				
e) 加川 ⁶⁾	砕石とコンクリート 粗面砂とコンクリート コンクリートとコンクリート	0.62～0.77 0.67 0.50		4号(20～30mm) 5号(10～20mm) 6号(5～10mm) 7号(2.5～5mm)	コンクリートに埋込み	ダイヤルゲージ
f) 合田 ¹⁰⁾	砕石とコンクリート	0.607～0.790	0.725	4号(20～30mm) 比重1.44 1.63	締固め均し	0.5mm移動 測量レベルによる目視
g) 杉本・時川 ¹¹⁾	砕石とコンクリート	0.486～0.591	0.540	砕石重量0.3～2.8g/個 平均粒径 d ₅₀ =10.5mm	締固め均し	0.5～1.0mm移動 測量レベルによる目視
h) 堀川・宮崎 ¹¹⁾	砕石とコンクリート	0.32～0.51	0.40	5～10gr/個		16mmシネカメラによる解析 (摩擦係数は波力を作用させ滑 動した時の値から逆算)
i) 第1港湾建設局 新潟調査設計事務所 ¹²⁾	砕石とコンクリート	0.41～0.56		4号(20～30mm) 5号(13～20mm)	不陸状態に設置	7.5～25mm ダイヤルゲージ



図—1 捨石（碎石）とコンクリートの静止摩擦係数測定値（表—3 より抜粋）

—3 の中で h) による摩擦係数の測定は直接に堤体の滑動抵抗を求めたものでなく、堤体に作用した波力から逆算した値であるため除外した。それぞれの実験例は実験方法の相違から同一に論じることができないが、摩擦係数が 0.6 より小さな実験は捨石粒径の比較的小さなものを使用しており、したがって、滑動の判定も微動ないし残留変位 1.0 mm 以下となっている。一方、使用捨石粒径が比較的大きい場合、または滑動の判定基準を大きくとっている実験値は摩擦係数が 0.6 より大きい場合が多

い。

3. 実験方法と実験装置

(1) 実験方法

実験は 2 種類の方法で行った。1 つは斜面にブロックを載せ斜面角度を増加させ、ブロックのすべりだす角度から摩擦係数を求める方法であり（図—2 参照）、もう 1 つは水平床にブロックを置き水平方向に引張り、滑動したときの引張力とブロック重量の比から係数を求める方法である（図—3 参照）。

防波堤や岸壁の堤体に代わるコンクリート製ブロックとしては、表—4 に示すモルタル製ブロックを使用した。が、表面の状態がほぼコンクリートブロックと同様とみなされるので、以下コンクリートブロックとし取扱うことにする。なお、このブロックには水平に引張るときのために底面から上に 5 cm の位置にフックを埋込み、水平力の作用位置をすべて同一となるようにした（写真—15 参照）。

また、このブロックと接するすべり面の材質としては、木板・モルタル板および碎石を選び、木板は針葉樹の表面をカンナ仕上げとし、モルタル板の配合は砂セメント比 2 : 1 で製作した。これも上記同様コンクリート板として取扱うことにする。碎石については 3 段階にフルイ分けを行い 10% 級 : 5 ~ 15 mm ($d_{50} = 12 \text{ mm}$)、20% 級 : 15 ~ 25 mm ($d_{50} = 21 \text{ mm}$)、30% 級 : 25 ~ 35 mm ($d_{50} = 29 \text{ mm}$) の粒径とし、それぞれの場合について、モルタルの表面に埋込み碎石を無作為に敷均して固定したもの（固定床）（写真—11 ~ 13 参照）と、通常のマウンドのように碎石を積み上げ表面を水平に締め固めたもの（移動床）の 2 種類とした。

滑動の判定基準は水平移動床の場合微動（3 mm 以下）と全面移動（3 mm 以上）の 2 つに分けて測定した。固定床の場合は、現象が単純なため特別な判定基準は設けてない。

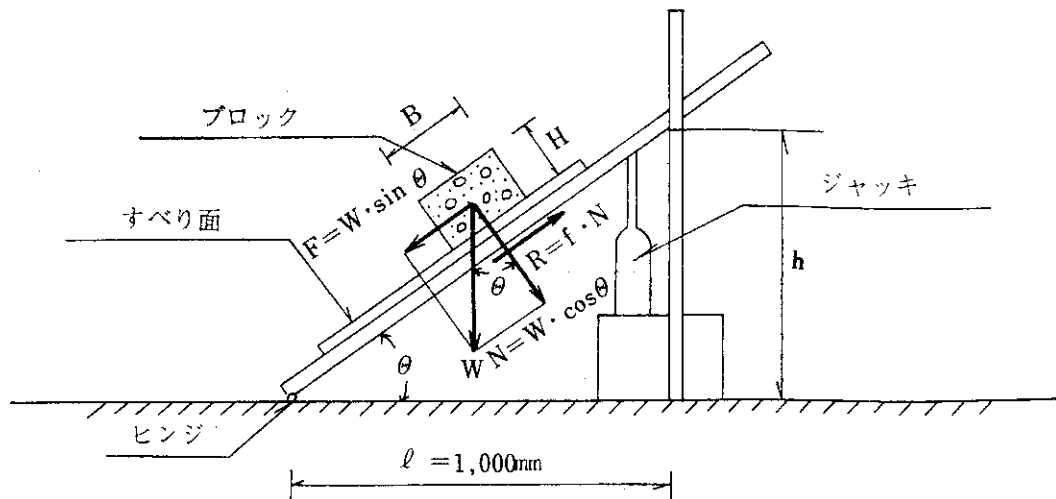
以上、ブロック 5 種類、すべり面の材質 8 種類についてすべり面をそれぞれ乾燥・湿潤・水中の状態とし摩擦係数の測定を行った。

(2) 斜面による実験

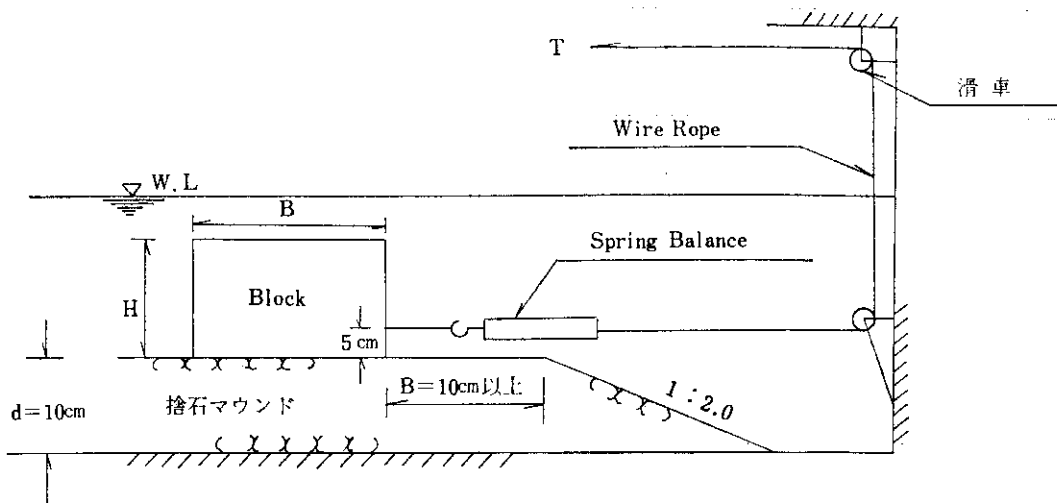
表—4 ブロックの寸法と重量

ブロック 番号	ブロック底面積 $B \times L = A (\text{cm}^2)$	ブロック高 $H (\text{cm})$	空 中 重 量		水 中 重 量	
			全重量(kg)	接地圧(kg/cm ²)	全重量(kg)	接地圧(kg/cm ²)
1	$19.3 \times 26.6 = 513.4$	15.1	16.48	0.032	8.96	0.017
2	$18.7 \times 21.1 = 394.6$	10.5	9.14	0.023	5.10	0.013
3	$19.5 \times 30.5 = 594.8$	10.5	13.56	0.023	7.41	0.012
4	$19.1 \times 21.2 = 404.9$	21.2	18.94	0.047	10.59	0.026
5	$28.3 \times 37.7 = 1066.9$	15.2	34.50	0.032	19.23	0.018

1) 空中重量 ; (乾燥重量) 2) 水中重量 ; (湿潤重量) — (ブロック体積 $\times$ 水の単位重量) (ただし 水の単位重量 $\approx 1.0 \text{ g/cm}^3$)



図—2 斜面による実験装置



図—3 水槽を用いた実験装置

装置の概要は、図—2に示すように摩擦面の角度を増加させ、ブロックのすべり始める角度を求めるようにした。周知のように斜面上に置かれた物体の抵抗力(R)は接触面に垂直な力($N = W \cos \theta$)に比例する。物体のすべりだそうとする力($F = W \sin \theta$)がRより大きくなるとすべりだすのでその直前の状態 $F = R$ のときが静止摩擦係数となる。この係数をfとすると次式のようになる。

$$R (= f \cdot N) = F$$

$$f \cdot W \cos \theta = W \sin \theta$$

$$\therefore f = \tan \theta = \frac{h}{\ell}$$

図—2に示すように、 $\ell = 1,000 \text{ mm}$ としてあるのでブロックがすべり始めたときの斜面の高さh(mm)を直読することにより摩擦係数が求められる。

この装置による実験は、木板、コンクリート板、砕石固定板を対象とし、これらの板を斜面上に取付け測定を行った(写真—14参照)。砕石移動床の場合、斜面角度を増していくと砕石自体が崩れ落ちる現象が見られ、ブロッ

クの滑動を正確に把握することができないので実験対象としなかった。

(3) 水平床による実験

水平床による実験は、2次元水槽の一部を用い概略図—3に示す装置により行い、水中に置かれたブロックの滑動実験を対象とした。すべり面の材質としてはコンクリート板、砕石固定床、砕石移動床を用いた。

移動床の場合、砕石の厚さは10cmとしマウンドを作るとき突固めて表面を均した。マウンドの片側には勾配1:2のり面をつけたが、ブロックはのり肩から10cm以上離し滑動のときのり面崩壊による抵抗力の減少の影響が入らないようにした。滑動試験を行うとマウンド表面は乱され、不陸を生じるがこの場合、再度表面を締固め水平となるよう留意した。またコンクリート板と砕石固定板はマウンドの上に固定し測定を行った。

張力の測定は容量20kg、精度100gのパネばかりにより行い、張力を徐々に増加させ、ブロックが滑動したときの値を読取る方法をとった(写真—15, 16参照)。

(4) 実験内容の種類

実験の内容は、上記(2)、(3)でも若干述べたがここで再度整理すると、まず斜面による実験内容は表—5に示すとおり14種類である。碎石の場合、摩擦面はすべて固定床を用いている。摩擦面の状況のうち湿潤とあるのは、ブロックおよびすべり面を十分に吸水させた状態で、さらに1回ごとの測定直前に水をかけた場合の実験である。またブロック底面の状態を粗面と滑面に分けたが、粗面はブロック製作のときに型枠(木枠)の面に直接あたった部分の表面で、滑面は型枠の内側にビニールフィルムを挿入しなめらかに仕上げた場合の表面である。しかし、2つの表面には顕著な粗滑の差はなく触感として判別できる程度である。

次に水平床による実験内容は、表—6に示すよう7種類について行いすべて水中で測定した。このときのブロック底面の状態はすべて滑面を用いた。

測定回数は1個のブロックにつき、斜面の場合5~18回、水平床の場合19~33回の範囲で行った。なお、ブロック No. 4は重心位置が高く斜面による実験の一部では滑動より転倒の現象が生じる場合があったが、これは実

表—5 斜 面 に よ る 実 験

実験番号	摩 擦 面	摩擦面の状況	ブロック底面の状態
1	木 板	乾 燥	滑
2	木 板	乾 燥	粗
3	木 板	湿 潤	滑
4	木 板	湿 潤	粗
5	コンクリート板	乾 燥	滑
6	コンクリート板	乾 燥	粗
7	コンクリート板	湿 潤	滑
8	コンクリート板	湿 潤	粗
9	10mm級碎石固定床	乾 燥	滑
10	10mm級碎石固定床	湿 潤	滑
11	20mm級碎石固定床	乾 燥	滑
12	20mm級碎石固定床	湿 潤	滑
13	30mm級碎石固定床	乾 燥	滑
14	30mm級碎石固定床	湿 潤	滑

表—6 水 平 床 に よ る 実 験

実験番号	摩 擦 面	状 況
15	コンクリート板	
16	10 mm 級 碎 石	固 定 床
17	20 mm 級 碎 石	固 定 床
18	30 mm 級 碎 石	固 定 床
19	10 mm 級 碎 石	移 動 床
20	20 mm 級 碎 石	移 動 床
21	30 mm 級 碎 石	移 動 床

(モルタル固定)
(締め固め)
(平均数)

験から除外した。

4. 実験結果と考察

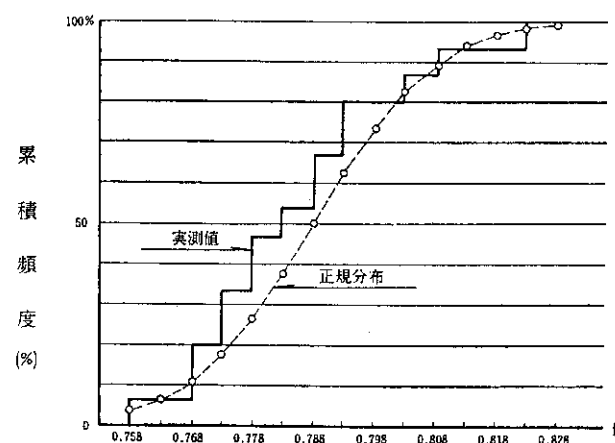
(1) 実験の整理方法

実験は1つのブロックについて数回の測定を繰返して行ったが摩擦係数は1回ごとに異なり、1例として実験番号 No. 1、ブロック No. 1の結果を示すと表—7のようになった。ここで求められた平均値 $\bar{f}$ と標準偏差値 σ を用いて測定結果の累積頻度と正規分布の形状を比較すると表—8、図—4に示すとおりで、摩擦係数のバラツキは正規分布に当てはまるといえる。したがって、結果の整理方法としては測定値の中で最も小さな値 $f_{\min}$ 、平均値 $\bar{f}$ 、最大値 $f_{\max}$ および分散状況を示す標準偏差値 σ と測定回数 n をブロックごとに求める方法をとった。

表—7 測 定 例

実験番号 No. 1 ブロック No. 1

実験番号	f_i	実験番号	f_i
1	0.825	11	0.773
2	0.784	12	0.804
3	0.780	13	0.798
4	0.777	14	0.793
5	0.809	15	0.780
6	0.795		
7	0.760		$\bar{f} = 0.788$
8	0.771		$\sigma = 0.016$
9	0.791		
10	0.775		



図—4 正規分布と実測値の比較

(2) 斜面による測定結果

前項4—(1)により整理した結果を表—9~22に示す。なお、この表中、総平均の値は各ブロックの測定回数ほぼ同数であることからそれぞれの平均値を単純平均したものである。また各々の実験の摩擦係数の総平均値を

表-8

① f_i の 範 囲	② 測定値の累積個数	③ 累 積 頻 度 (%)	④ $t = \frac{f_i - \bar{f}}{\sigma}$	⑤ $\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ (%)
~0.758	0	0.0	- 1.875	3.8
~0.763	1	6.7	- 1.563	5.9
~0.768	1	6.7	- 1.250	10.6
~0.773	3	20.0	- 0.938	17.4
~0.778	5	33.3	- 0.625	26.6
~0.783	7	46.7	- 0.313	37.8
~0.788	8	53.3	0.000	50.0
~0.793	10	66.7	0.313	62.2
~0.798	12	80.0	0.625	73.4
~0.803	12	80.0	0.938	82.6
~0.808	13	86.7	1.250	89.4
~0.813	14	93.3	1.563	94.1
~0.818	14	93.3	1.875	96.3
~0.823	14	93.3	2.188	98.5
~0.828	15	100.0	2.500	99.4

表-9

実験番号 No. 1

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		f_{min}	$\bar{f}$	f_{max}	σ	
1	15	0.760	0.788	0.825	0.016	乾燥・滑面, 材質: 木板
2	15	0.769	0.805	0.894	0.029	
3	15	0.762	0.781	0.814	0.016	
4	12	0.762	0.786	0.808	0.014	
5	15	0.742	0.784	0.822	0.026	
総平均			0.789			

表-10

実験番号 No. 2

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		f_{min}	$\bar{f}$	f_{max}	σ	
1	6	0.830	0.854	0.866	0.024	乾燥・粗面, 材質: 木板
2	7	0.795	0.854	0.876	0.031	
3	9	0.816	0.861	0.888	0.025	
4	5	0.788	0.809	0.830	0.014	
5	5	0.812	0.833	0.865	0.019	
総平均			0.842			

表-11

実験番号 No. 3

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		f_{min}	$\bar{f}$	f_{max}	σ	
1	10	0.779	0.828	0.942	0.045	湿潤, 滑面, 材質: 木板
2	11	0.791	0.860	0.918	0.035	
3	11	0.767	0.830	0.866	0.031	
4	10	0.813	0.826	0.846	0.013	
5	10	0.786	0.822	0.869	0.029	
総平均			0.833			

表-12

実験番号 No. 4

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		$f_{\min}$	$\bar{f}$	$f_{\max}$	σ	
1	8	0.903	0.937	0.954	0.017	湿潤, 粗面, 材質: 木板
2	9	0.798	0.825	0.856	0.017	
3	7	0.878	0.919	0.946	0.027	
4	7	0.776	0.814	0.834	0.017	
5	7	0.858	0.879	0.893	0.012	
総平均			0.875			

表-13

実験番号 No. 5

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		$f_{\min}$	$\bar{f}$	$f_{\max}$	σ	
1	10	0.665	0.733	0.795	0.043	乾燥, 滑面, 材質: コンクリート板
2	15	0.723	0.787	0.826	0.030	
3	15	0.726	0.780	0.855	0.038	
4	17	0.690	0.745	0.827	0.033	
5	11	0.754	0.787	0.840	0.028	
総平均			0.766			

表-14

実験番号 No. 6

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		$f_{\min}$	$\bar{f}$	$f_{\max}$	σ	
1	10	0.690	0.753	0.841	0.045	乾燥, 粗面, 材質: コンクリート板
2	10	0.697	0.760	0.828	0.032	
3	14	0.683	0.751	0.925	0.069	
5	13	0.705	0.766	0.836	0.042	
総平均			0.758			

表-15

実験番号 No. 7

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		$f_{\min}$	$\bar{f}$	$f_{\max}$	σ	
1	15	0.710	0.751	0.811	0.033	湿潤, 滑面, 材質: コンクリート板
2	9	0.714	0.747	0.794	0.029	
3	18	0.651	0.733	0.830	0.051	
4	11	0.691	0.746	0.798	0.030	
5	12	0.676	0.735	0.827	0.036	
総平均			0.742			

表-16

実験番号 No. 8

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		$f_{\min}$	$\bar{f}$	$f_{\max}$	σ	
1	8	0.686	0.750	0.812	0.042	湿潤, 粗面, 材質: コンクリート板
2	8	0.697	0.759	0.791	0.027	
3	8	0.680	0.771	0.824	0.041	
5	8	0.682	0.739	0.775	0.034	
総平均			0.755			

表-17

実験番号 No. 9

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		$f_{\min}$	$\bar{f}$	$f_{\max}$	σ	
1	14	0.749	0.832	0.930	0.061	乾燥, 滑面, 材質; 碎石固定板 (10mm級)
2	14	0.729	0.833	0.945	0.076	
3	10	0.754	0.814	0.929	0.057	
5	10	0.757	0.800	0.897	0.039	
総平均			0.820			

表-18

実験番号 No.10

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		$f_{\min}$	$\bar{f}$	$f_{\max}$	σ	
1	10	0.750	0.788	0.861	0.031	湿潤, 滑面, 材質; 碎石固定板 (10mm級)
2	10	0.711	0.797	0.899	0.060	
3	10	0.769	0.818	0.901	0.045	
5	10	0.743	0.764	0.829	0.026	
総平均			0.792			

表-19

実験番号 No.11

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		$f_{\min}$	$\bar{f}$	$f_{\max}$	σ	
1	10	0.742	0.811	0.864	0.034	乾燥, 滑面, 材質; 碎石固定板 (20mm級)
2	10	0.746	0.793	0.862	0.036	
3	10	0.746	0.816	0.887	0.040	
5	12	0.735	0.787	0.839	0.035	
総平均			0.802			

表-20

実験番号 No.12

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		$f_{\min}$	$\bar{f}$	$f_{\max}$	σ	
1	10	0.725	0.783	0.872	0.040	湿潤, 滑面, 材質; 碎石固定板 (20mm級)
2	11	0.747	0.797	0.903	0.045	
3	11	0.751	0.798	0.885	0.044	
5	11	0.729	0.773	0.862	0.040	
総平均			0.788			

表-21

実験番号 No.13

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		$f_{\min}$	$\bar{f}$	$f_{\max}$	σ	
1	10	0.731	0.798	0.859	0.044	乾燥, 滑面, 材質; 碎石固定板 (30mm級)
2	10	0.746	0.804	0.859	0.036	
3	10	0.736	0.775	0.832	0.027	
5	10	0.705	0.763	0.819	0.040	
総平均			0.785			

表-22

実験番号 No.14

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		f _{min}	$\bar{f}$	f _{max}	σ	
1	10	0.720	0.763	0.795	0.024	湿潤, 滑面, 材質: 碎石固定板 (30mm級)
2	10	0.728	0.811	0.920	0.054	
3	10	0.729	0.813	0.964	0.065	
5	10	0.719	0.749	0.845	0.037	
総平均			0.784			

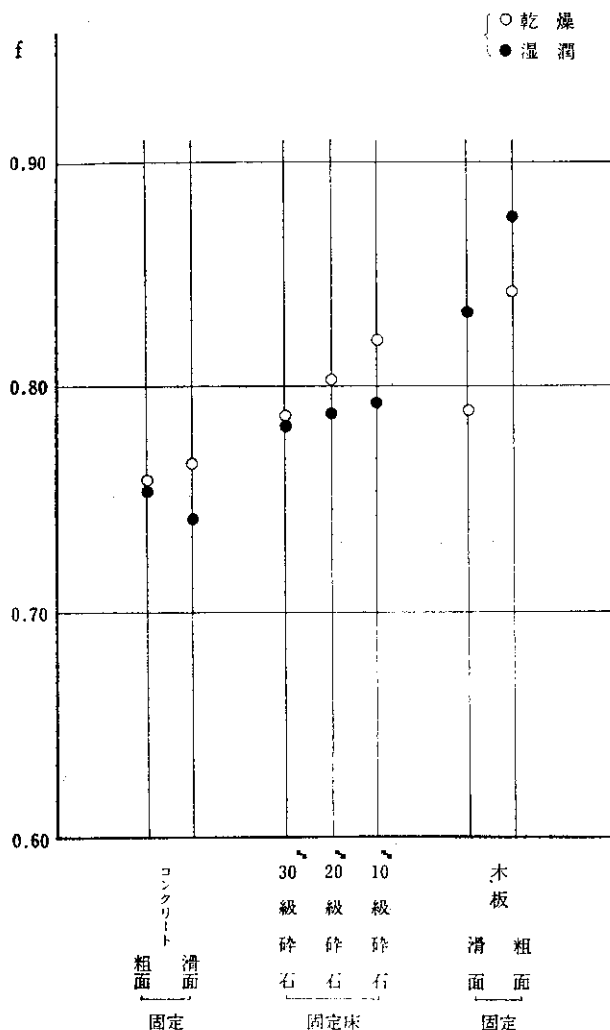


図-5 材質による摩擦係数の差 (斜面)

示すと図-5のとおりである。

- これらの図表から判断される特徴について述べると、
- それぞれのブロックの摩擦係数の最大値と最小値の差はほぼ0.1程度で、大きい場合で0.2程度の差となる。摩擦面を湿潤状態とするとこの差が大きくなる場合もあるが、バラツキの度合は乾燥状態の場合とほとんど変わらない。
 - 同一条件の摩擦面に対する個々のブロックの摩擦係数の平均値は総平均値に対し、 ± 0.03 程度のバラ

ツキを示し、i) で述べたようにそれぞれのブロック自体が示す変動の幅より小さく、ブロックの寸法や重量にはほとんど関係していないといえる。

iii) コンクリート板と碎石板の場合、湿潤状態になると摩擦係数は減少する傾向があるが、木板では反対に増加する傾向が認められた。この一原因として木板表面の油膜の問題が考えられる。

iv) ブロック接触面の粗滑による摩擦係数の差異は木板の場合は、乾燥・湿潤とも粗面のほうがほぼ0.05程度大きい摩擦係数となる。一方、コンクリート板の場合ほぼ同じ値となったが乾燥の場合は、滑面のほうがわずかに摩擦係数は大きくなり、湿潤の場合は逆に粗面のほうがわずかに大きくなる。

v) 接触面の材質の差異による摩擦係数の値をブロック滑面について比較すると、木板は乾燥状態で $f \approx 0.82$ 、湿潤状態で $f \approx 0.85$ 、碎石固定板は乾燥状態で $f \approx 0.80$ 、湿潤状態で $f \approx 0.79$ 、コンクリート板は乾湿ともほぼ $f \approx 0.75$ である。

vi) 碎石の粒径差による摩擦係数は粒径が大きいほど係数値が小さくなる傾向がみられるが、下限値はコンクリート板の場合でほぼ $f \approx 0.75$ となっている。

(3) 水平床による測定結果

水平床ではすべて水中で引張り試験を行っているが、固定床の場合の滑動試験は斜面のときと同様に滑動現象は単純でブロックが滑動するときには大きく移動し、明らかに滑動と判別されるが、移動床の場合は複雑な現象となった。すなわち、引張り試験中ブロックがきわめて微少な変位で止まる場合(マウンドの初期変形と思われる)と大きく移動していく場合の二通りの現象が見られた。

したがって、移動床の場合の整理にあたっては、ブロック移動がわずかも認められたとき(数mm)にはその量の大小にかかわらず滑動とみなす方法(微動)と、微少な移動(2~3mm以下)の測定値を除外し整理する方法(全面移動)の2種類に分けて結果を整理した。使用ブロック底面の状態は滑面である。固定床の結果を表-23~26に、移動床のうち全面的移動を対象としたものを表-27~29に、微動を対象としたものを表-30~32に示す。

表-23

実験番号 No.15

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		f_{min}	$\bar{f}$	f_{max}	σ	
1	25	0.625	0.691	0.770	0.046	コンクリート板
2	25	0.608	0.663	0.784	0.045	
3	25	0.608	0.704	0.797	0.049	
4	25	0.586	0.666	0.765	0.048	
5	25	0.645	0.702	0.770	0.032	
総平均			0.685			

表-24

実験番号 No.16

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		f_{min}	$\bar{f}$	f_{max}	σ	
1	25	0.636	0.749	0.938	0.065	10mm級碎石 (固定床)
2	25	0.647	0.733	0.823	0.046	
3	22	0.635	0.769	0.878	0.053	
4	23	0.671	0.770	0.926	0.053	
5	22	0.666	0.791	0.915	0.063	
総平均			0.762			

表-25

実験番号 No.17

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		f_{min}	$\bar{f}$	f_{max}	σ	
1	28	0.659	0.761	0.871	0.051	20mm級碎石 (固定床)
2	26	0.549	0.706	0.823	0.059	
3	26	0.621	0.742	0.837	0.056	
4	27	0.661	0.733	0.793	0.040	
5	20	0.645	0.714	0.827	0.048	
総平均			0.731			

表-26

実験番号 No.18

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		f_{min}	$\bar{f}$	f_{max}	σ	
1	30	0.681	0.744	0.815	0.030	30mm級碎石 (固定床)
2	28	0.588	0.698	0.745	0.039	
3	30	0.621	0.734	0.851	0.047	
4	30	0.595	0.707	0.765	0.037	
5	20	0.629	0.718	0.796	0.051	
総平均			0.720			

表-27

実験番号 No.19

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		f_{min}	$\bar{f}$	f_{max}	σ	
1	12	0.435	0.608	0.703	0.078	10mm級碎石 (移動床; 全面移動)
2	15	0.372	0.630	0.784	0.125	
3	19	0.513	0.616	0.743	0.073	
4	14	0.378	0.595	0.671	0.064	
5	17	0.489	0.576	0.686	0.087	
総平均			0.605			

表-28

実験番号 No.20

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		f_{min}	$\bar{f}$	f_{max}	σ	
1	16	0.458	0.563	0.659	0.058	20mm級碎石 (移動床; 全面移動)
2	15	0.431	0.667	0.925	0.105	
3	19	0.392	0.591	0.810	0.099	
4	14	0.472	0.585	0.727	0.077	
総平均			0.602			

表-29

実験番号 No.21

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		f_{min}	$\bar{f}$	f_{max}	σ	
1	14	0.469	0.634	0.804	0.086	30mm級碎石 (移動床; 全面移動)
2	19	0.510	0.662	0.882	0.099	
3	14	0.500	0.657	0.851	0.087	
4	16	0.397	0.591	0.756	0.110	
5	12	0.458	0.638	0.718	0.081	
総平均			0.636			

表-30

実験番号 No.19

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		f_{min}	$\bar{f}$	f_{max}	σ	
1	32	0.413	0.566	0.703	0.088	10mm級碎石 (移動床; 微動)
2	22	0.372	0.620	0.784	0.123	
3	31	0.392	0.579	0.743	0.087	
4	31	0.349	0.550	0.671	0.084	
5	31	0.411	0.541	0.686	0.070	
総平均			0.571			

表-31

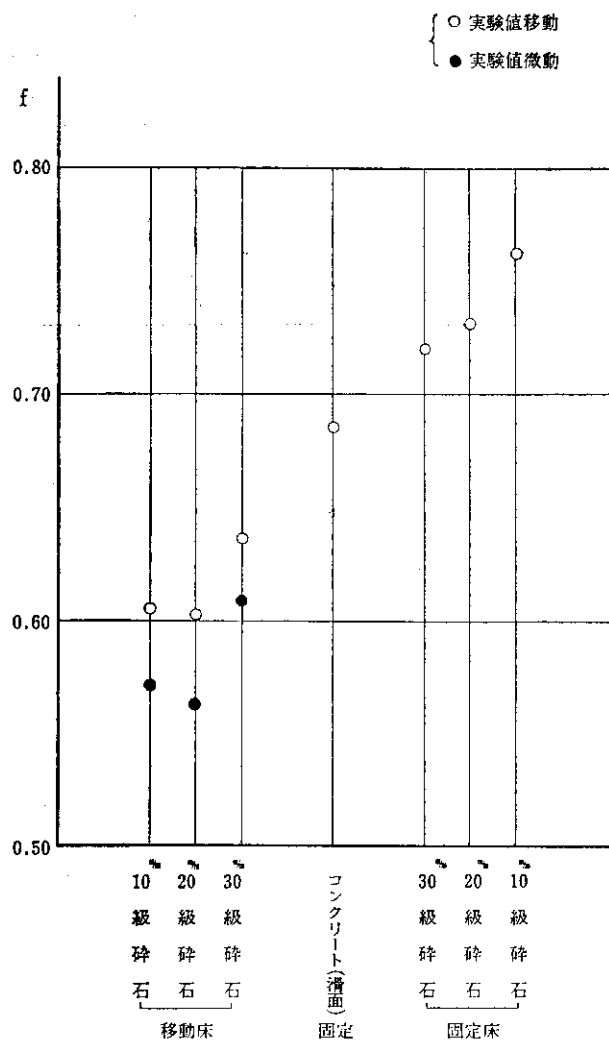
実験番号 No.20

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		f_{min}	$\bar{f}$	f_{max}	σ	
1	25	0.380	0.531	0.659	0.076	20mm級碎石 (移動床; 微動)
2	24	0.431	0.636	0.925	0.108	
3	33	0.311	0.542	0.810	0.113	
4	25	0.350	0.537	0.727	0.091	
総平均			0.562			

表-32

実験番号 No.21

ブロック 番 号	測定回数 n	摩 擦 係 数				備 考
		f_{min}	$\bar{f}$	f_{max}	σ	
1	21	0.391	0.601	0.804	0.101	30mm級碎石 (移動床; 微動)
2	19	0.510	0.662	0.882	0.099	
3	23	0.486	0.626	0.851	0.093	
4	29	0.331	0.550	0.756	0.119	
5	24	0.395	0.608	0.718	0.093	
総平均			0.609			



図—6 コンクリートブロックのマウンドの種類による静止摩擦係数 f の変化 (水中)

また測定摩擦係数の総平均値を示すと図—6のとおりである。

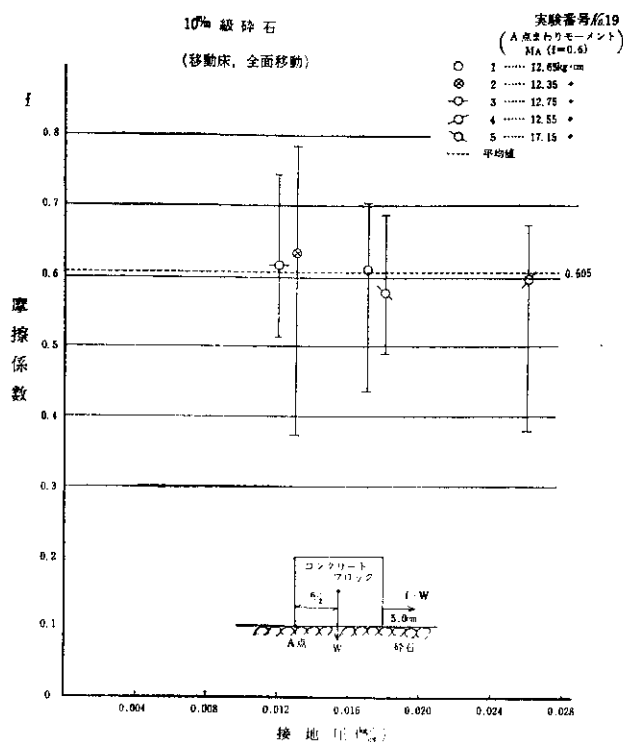
- これらの図表から判断される特徴について述べると、
- i) それぞれのブロックの摩擦係数の最大値と最小値の差は固定床にすると総平均値のほぼ15~20%であるが、移動床にすると約2倍になってほぼ30~40%となる。
 - ii) 個々のブロックの摩擦係数の平均値は固定床の場合は総平均値に対し $\pm(0.02\sim0.03)$ のバラツキを示すが移動床の場合はほぼ2倍となり $\pm(0.03\sim0.07)$ となる。
 - iii) ブロックと砕石の場合の摩擦係数は捨石の砕石が固定床の場合は $f=0.72\sim0.76$ であるが、移動床の場合はほぼ0.1小さくなって $f=0.56\sim0.63$ である。
 - iv) 捨石砕石の粒径による摩擦係数の差異は、固定床の場合は粒径が大きくなるほど f 値は小さくなり、

これは上記斜面の場合の実験値と同様の傾向を示すが、逆に移動床の実験では砕石の粒径が大きいほど摩擦係数は大きくなる傾向を示す。

v) 滑動の判定を微動におくと、その摩擦係数値は全面移動の場合より小さくなり、上記実験では平均値で f 値は0.03程度小さくなった。

(4) 摩擦抵抗に関する考察

以上述べたように、摩擦係数そのものの測定は簡単であるが、その実験結果は実験者によりかなりバラツキがある。試験体の引張り方法について福田らがすでに実験したように滑動抵抗は試験体前趾付近の耐荷力(圧)に影響されているようである。今一例として上記4—(3)の実験 No.19について試験ブロックの接地圧と前面A点のモーメントの摩擦係数に関する関係を示すと図—7のとおりである。



図—7

りて、5個のブロックの総平均摩擦係数は $\bar{f}=0.605$ であるが $\bar{f}_{\max}=0.630$ 、 $\bar{f}_{\min}=0.576$ となって $\bar{f}_{\max}$ はA点まわりのモーメントが一番小さい場合であり、 $\bar{f}_{\min}$ はモーメントが一番大きい場合である。その他の3つのブロックはA点まわりのモーメントがいずれもほぼ同じで、したがって摩擦係数値もほぼ同じである。このことから引張り試験における摩擦係数は接地圧よりもブロック前趾圧に影響を受けやすいといえ、前趾圧が大きいものほど摩擦係数値は小さくなる傾向が認められる。また斜面を用いた実験からも同様の傾向が認められる(表—9~22参照)。

5. 結 論

以上のように、捨石マウンドといった非常に不安定な物体と、コンクリートブロックとの摩擦係数について2, 3の検討を加えた結果次のことが結論としていえる。

- (1) 斜面および水平面を用いた試験結果は、図—5および図—6に示すとおりである。水中マウンド上のブロックの引張り試験からはコンクリートと捨石との摩擦係数は $\bar{f}=0.602\sim0.636$ で、微動したものを滑動すると $\bar{f}=0.562\sim0.608$ となる。上記の測定値は粒径 $d=10\sim30\text{mm}$ の碎石を用いて行われた結果であるが、粒径がこれより大きくなれば f は増加する傾向があり、粒径が小さくなると減少する傾向が認められる。またコンクリートとコンクリートの摩擦係数は $\bar{f}=0.685$ であった。
- (2) 上述の測定値は捨石均し面に平行な水平力がブロックに作用した場合の摩擦係数であるが、実際の防波堤に作用する波圧のように鉛直方向に不均一でケーソン本体に回転モーメントを生じるような場合には、ケーソン底面の接地圧ならびに前趾圧が急激に変化し、それによって摩擦係数そのものも変化することが十分考えられ、上記の数少ない静止摩擦実験からその妥当な値を推定することは非常に問題が多いものと思われる。

終わりに当実験には、大阪市立大学実習生韓在浩君の助力を得た。ここに記してその労に感謝する。

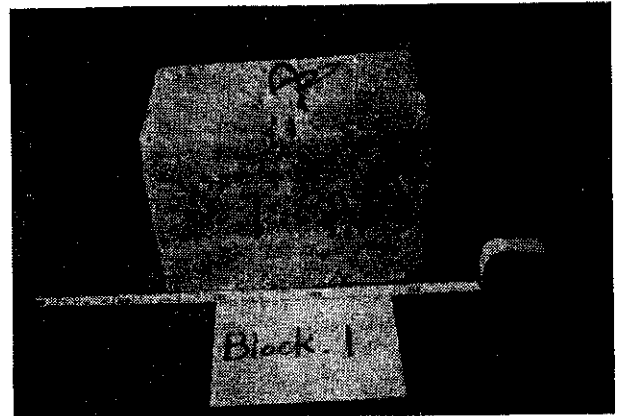
参 考 文 献

- 1) 杉本義昭, 時川和夫; 防波堤の安定性に関する2, 3の考察, 土木試験所月報 No.261, 1975年
- 2) 永井荘七郎, 玉井佐一, 久保 直; 混成防波堤直立部の滑動および底面に働く揚圧力, 第7回海岸工学講演会講演集, 1960年
- 3) 日本港湾協会; 港湾構造物設計基準, 第13章摩擦係数
- 4) 土木学会; 土木工学ハンドブック(1974), p.2307
- 5) 土質工学会; 土質工学ハンドブック, p.845
- 6) 広井 勇; 小樽築港工事報文, 1924年
- 7) 山田, 福田; 港湾技術 No. 2, 北海道開発局港湾部, 1957年
- 8) 前記3)から抜粋
- 9) 加川道男; 重力式構造物の摩擦抵抗増大について, 第11回海岸工事講演会講演集, 1964年
- 10) 合田良実; 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告 Vol.12, No. 3, 1973年
- 11) 堀川清司, 宮崎和行; 混成防波堤直立部の滑動に

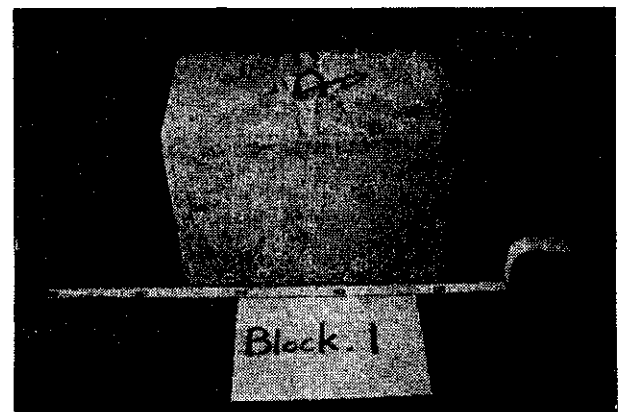
関する実験的研究, 第21回海岸工学講演会講演集, 1974年

12) 第1港湾建設局新潟調査設計事務所; マウンド不陸実験, 第26回直轄港湾技術研究会資料, 1975年

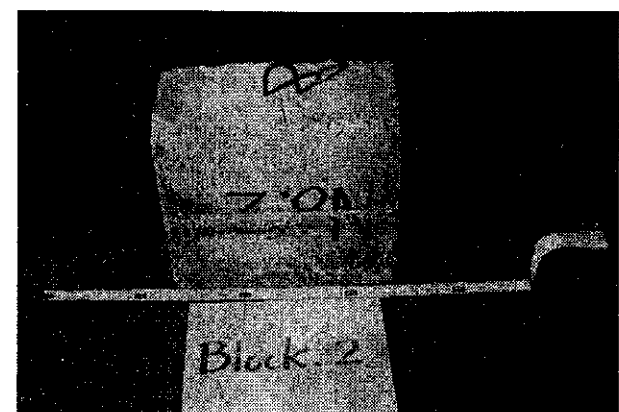
13) 曾田範宗; 摩擦の話, 岩波新書, 1974年



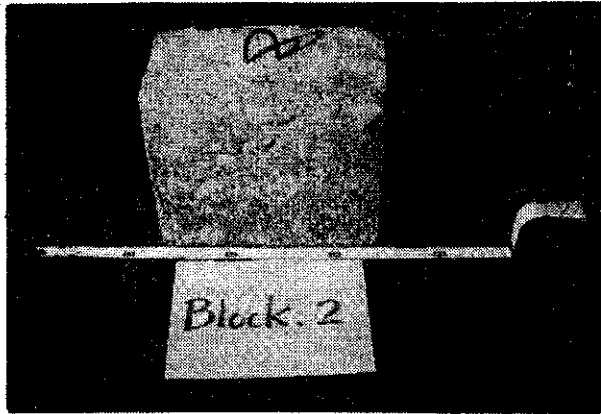
写真—1 ブロック No. 1 (粗面)



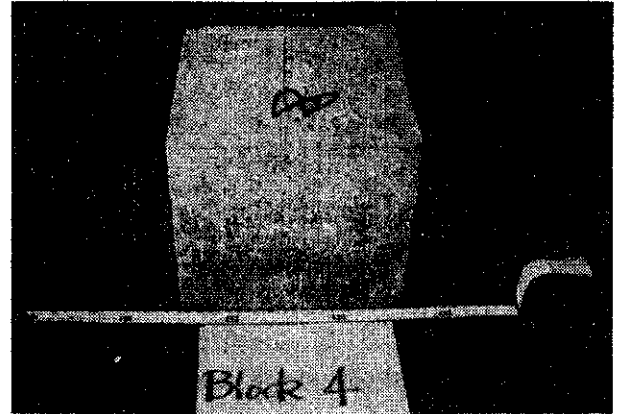
写真—2 ブロック No. 1 (滑面)



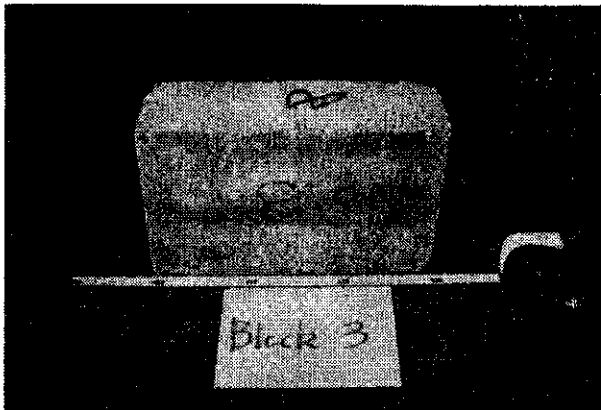
写真—3 ブロック No. 2 (粗面)



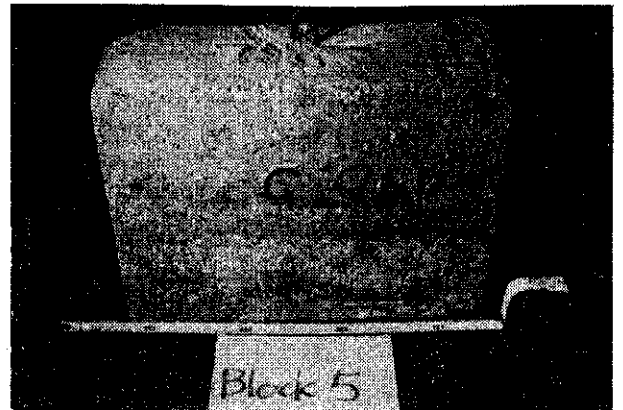
写真—4 ブロック No. 2 (滑面)



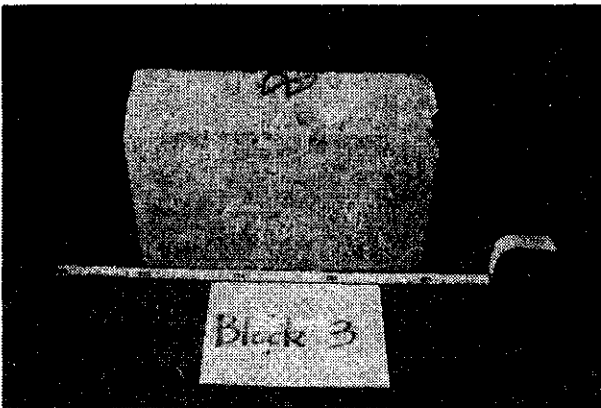
写真—8 ブロック No. 4 (滑面)



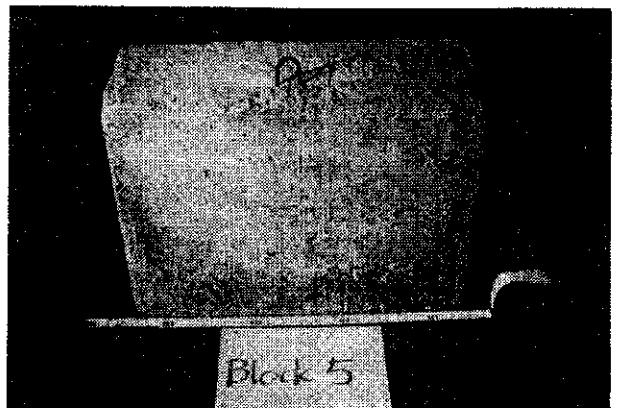
写真—5 ブロック No. 3 (粗面)



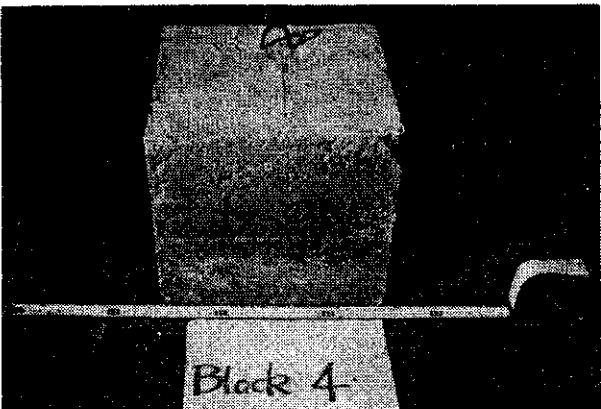
写真—9 ブロック No. 5 (粗面)



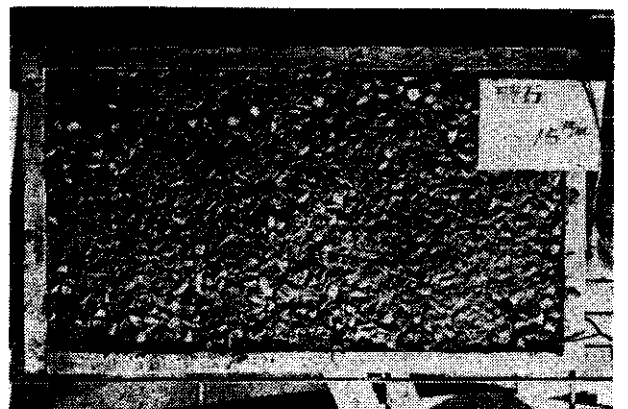
写真—6 ブロック No. 3 (滑面)



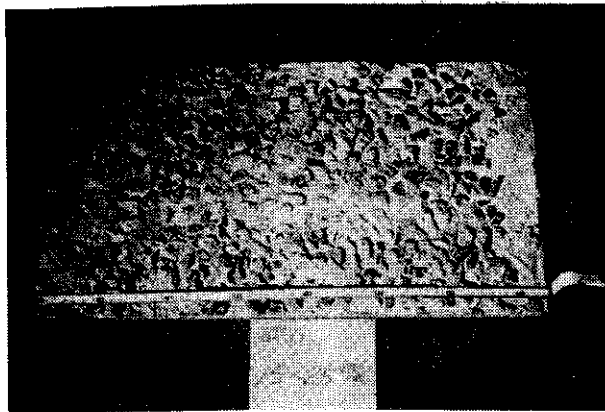
写真—10 ブロック No. 5 (滑面)



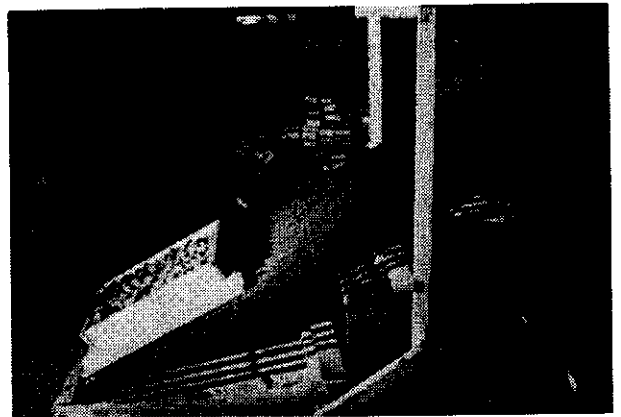
写真—7 ブロック No. 4 (粗面)



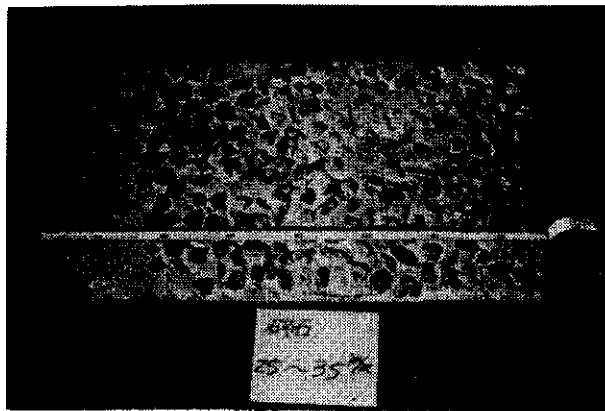
写真—11 砂石固定床 (5~15mm)



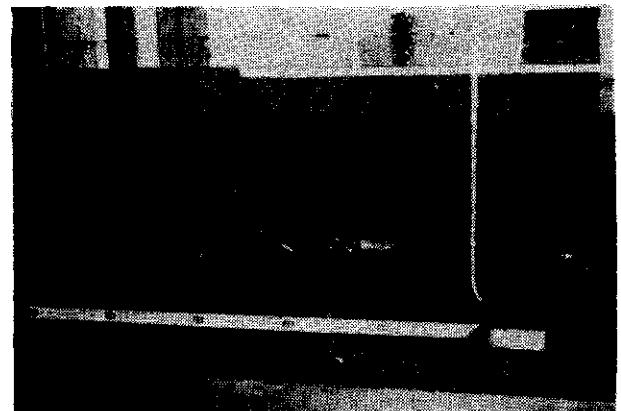
写真—12 碎石固定床 (15~25mm)



写真—14 斜台による測定装置



写真—13 碎石固定床 (25~35mm)



写真—15 水中(移動床)の測定状況



写真—16 水中(移動床)の測定状況

昭和50年12月27日発行

編集兼
発行人 相田 俊 郎

発行所 北海道開発局土木試験所
062 札幌市豊平区平岸1条3丁目2番地
電話 (841) 1111 (代表)

印刷所 合名会社 文栄堂印刷所
札幌市中央区北3条東7丁目
電話 (231) 5560