

土研資料1442号

土木研究所資料

桜島野尻川流路工水理模型実験報告書

昭和53年12月

建設省土木研究所
篠崎試験所

は　じ　め　に

桜島は近年火山活動が活発化し、これに伴う降灰や山地の荒廃化により火山泥流の発生頻度が高くなっている。これら火山泥流による災害防除のため昭和51年度から野尻川、春松川、持木川、黒神川の四河川が直轄区域に編入されている。

桜島の砂防事業は火山泥流対策につきるとも言われており、当面、住宅地、商業地、耕地として土地の高度利用がなされている流域下流部における流路工の整備が緊急を要されている。そこで発生した火山泥流をいかに無害に流下させるかが、下流部の流路工計画の重要な問題となっている。

以上のような現状にかんがみ流下する泥流の特性及び泥流流下に対応できる流路工の設計等に必要の諸事項を把握するべく野尻川をモデルとして昭和52年度、53年度の両年度にわたって基礎的な水理実験を実施した。

本報告はこれら水理実験の結果をとりまとめ若干の考察をおこなったものである。桜島火山泥流対策の一助となれば幸いである。なお、実験に際して御協力いただいた建設省大隅工事事務所の皆様、ならびに実験に対する御示唆をいただいた土木研究所 砂防研究室 泉 岩男室長、阿部宗平研究員に対し謝意を表します。

昭和53年12月

土木研究所 篠崎試験所

主任研究員 池谷 浩
上原 信司

目 次

は じ め に

1. 実 験 目 的	1
1-1 泥流における流れの機構に関する項目	1
1-2 泥流を安定して流下させるための項目	2
1-3 実験泥流の相似性の項目	2
2. 従来の研究・実験とその問題点	3
3. 実 験 装 置	4
4. 実験方法と実験条件	9
4-1 実 験 方 法	9
4-2 実 験 条 件	9
5. 実験結果と考察	17
5-1 泥流の相似性の検討	17
5-2 泥流の機構に関する検討	24
5-3 泥流を安定して流下させるための検討	32
6. まとめと提言	41
お わ り に	42
参 考 文 献	43

1. 実 験 目 的

野尻川砂防流路工の計画諸元及び設計諸元を把握するため基礎的水理模型実験において検討および検証することを要求される項目は下記のものである。

1-1 泥流における流れの機構に関する項目

砂防流路工の計画・設計上、流下してくる泥流を掃流と同様な流体として取り扱えるのかどうかを知る必要がある。具体的な検討事項は次の各項である。

- ① 泥流の掃流力と堆積条件の検討
 - ② 泥流先端部の河床洗掘力の検討
 - ③ 堆積基準面の検討
 - ④ 海での土砂拡散の検討
- ① 泥流の掃流力と堆積条件の検討

泥流は掃流として取り扱えるのかどうかを検討するもので、流出土砂量、その堆積の場、泥流の濃度による泥流特性への影響等を検討することにより流路工計画の縦断勾配の検討の資料とするものである。同時に流路工の断面計画に必要な流速の検討資料にもなる。なお、ここで掃流として取り扱えるかどうかということは泥流イコール掃流という意味ではなく、流路工計画上掃流としての性質を用いた検討でよいかどうかを知るための検討であることは言うまでもない。

② 泥流先端部の河床洗掘力の検討

泥流の先端部は大きな河床洗掘力を持っているという説がある。もし泥流先端部に大きな洗掘力があるとすれば、流路内に存在する堆積土砂は次の泥流による生産土砂（移動土砂の源）となりうることになり、下流での危険度がより高くなる。またこの検討結果は底張りの検討資料ともなる。

③ 堆積基準面の検討

火山泥流が一般的に言われている土石流と同一であれば、土石流としての特性を有する。たとえば、土石流の堆積条件には従来の研究から 10° 以下の勾配を有すること⁽¹⁾、河幅が3倍に変化すること⁽²⁾、河床勾配が $\frac{1}{20}$ 以下に変化すること⁽²⁾などがあげられている。野尻川流路工の現在河床勾配は約 $\frac{1}{20}$ であり、土石流の堆積条件の 10° 以下とは約 $\frac{1}{20}$ よりも緩勾配のところをさすから、野尻川流路工部は土石流で言えば堆積の場にあたる。そこで実際の泥流や、実験上の泥流がどこで堆積をするか、どこから堆積がはじまるか等の堆積状況を検討する必要がある。実際の泥流においては、泥流は海まで流下しているものの、泥流通過後には流路工の上部まで土砂の堆積が発生していることが建設省大隅工事々務所の河床変動測量結果から知られており、これらの事実をふまえて、泥流を従来の土石流として流路工計画に取り扱いかどうかの検討も必要である。

④ 海での土砂拡散の検討

現地の泥流は海にまで流入しているが、海によってどのような影響を受けるかを調べ、流路工の河口部処理の検討資料とする。

1-2 泥流を安定して流下させるための項目

泥流の流れの取り扱い方が判明すれば、次には構造物によって泥流を無害に流下、停止させる検討が必要となる。一般的な流路工に関する検討事項は下記の各項である。

- ① 計画縦断勾配の検討
- ② 計画横断形状の検討
- ③ 平面形状（法線形）に関する検討
- ④ 構造物の安定性に関する検討

① 計画縦断勾配の検討

現流路工の縦断勾配、建設省大隅工事々務所の計画案等の勾配を置いて、最も泥流対策に対応がよい縦断となるかを実験的に検討する。

② 計画横断形状の検討

過去の泥流では断面不足による泥流災害はほとんど発生していないので、今回は検討の対象としない。

③ 平面形状（法線形）に関する検討

現状流路は一般的流路工における法線形の概念からすると法線形状には問題がないと考えられるので、今回の検討対象としない。

④ 構造物の安定性に関する検討

今回の実験は流路工計画のための基礎的な水理実験を主としておこなうもので、構造物に関する検討は別途実施することとする。

1-3 実験泥流の相似性の項目

1-1, 1-2の検討を実験的に実施する場合、実験泥流が現地泥流とどれくらい同一かが問題となる。ここでは従来の水理実験における相似律（たとえばフルードの相似律等）とは別に現地で観測されている泥流の特性と実験上の泥流とを比較検討し、実験上の泥流がどの程度現地の泥流に類似できたかをまず最初に検討する。

以上の各項の検討を水理実験において実施し桜島火山泥流対策としての流路工計画の基礎的資料を得ることを実験目的とする。

2. 従来の研究・実験とその問題点

火山泥流に関する研究は十勝岳泥流に関する研究⁽³⁾をはじめ焼岳⁽⁴⁾、桜島⁽⁵⁾、インドネシア国メラビ火山⁽⁶⁾等において泥流に関する研究が実施されているが、主に野外での現地調査による発生、流動および堆積に関する研究である。しかし、実際に発生している泥流の調査は、発生する日時の予測の困難さ、泥流発生継続時間の短かさ、発生確率の小さいことなどから調査・観測に困難さがある。

そこで泥流の発生、流動および堆積のメカニズムを把握し、泥流対策のための諸資料を得るため水理模型実験が必要となる。

これまでに発表された泥流実験は主に定常的な泥流実験⁽⁷⁾（その挙動特性がビンガム体と近似できる流体としての実験）であり、現実の泥流のような非定常流としての取り扱いをした実験は少ない。建設省大隅工事事務所は昭和50年12月～51年10月に、非定常的な流れを取り扱った予備実験⁽⁸⁾を実施している。この実験において、泥流の段波波形を再現させたこと、流速が実際の流速に換算して1.0～1.4倍の範囲に入っていること、水平固定床により堆積作用が促進されたこと等現実の泥流によって確認された現象が再現できたが、対策工法に大きな影響力を与える泥流先端部の洗掘メカニズムと洗掘量が不明であること、後流の時間スケールが非現実的でありかつ後流の影響が不明であること、水平固定床がない水路実験の場合の方がより長い堆砂区域を有しているにもかかわらず、水平固定床の堆積作用を強調して河床勾配との関係の検討がなされていないこと、近似流体自身にまだ問題があること（泥流の発生のさせかた等）など桜島泥流対策に必要な諸事項の把握は不完全である。そこで、特に桜島野尻川の泥流を対象として、その対策に必要な諸事項の把握のための基礎的な水理実験を実施したものである。

3. 実 験 装 置



写真-1 実験装置全景

実験装置としては、できるだけ模型縮尺を大きくすることを目標とし、模型製作を考えて縮尺 $S = 1/40$ と決め、野尻川流路工の末端より 800m 地点から、海中 400m までを模型として作製した（写真-1）。

模型流路部は全長 $L = 20.0\text{m}$ （現地 800m）、水路断面 0.5m、片面アクリル片面板製でアクリル面側から計測、写真撮影が可能である（写真-2）。なお、水路横断形状は現地流路にあわせて複断面をとっている。

海については 10m（現地 400m）四方とし、水深は 1m（現地 40m）とした（写真-3）。これは泥流による影響は、海水部ではほぼ 400m 位までと判断したこと、また海底勾配の変化で緩になる地点がほぼ D.L. -40m 附近であることなどによっている（図-2 参照）。海中の模型は大隅工事々務所測量の野尻川河口深浅図

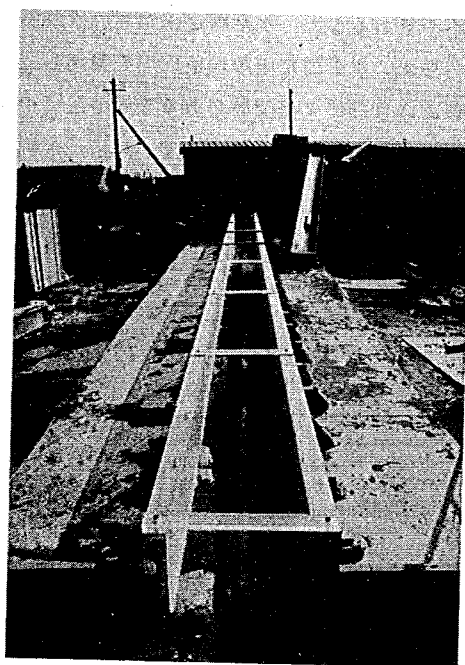


写真-2 模型流路部

($S=1/2500$, $S_{51.5}$ 測量) をもとに作製した。

模型によると泥流観測が実施されている国道橋は上流端から 875m (現地 350m) の位置にあり、上流から発生させる泥流が定常になる位置であって、実験計測値と現地観測値との検討の意味があるので、泥流特性を検討するための模型として充分であると判断した。

流路最上流端には泥流段波の発生装置 (写真-4) および後流の給砂・給水装置を作製して実験を実施した。

模型として作製した現地の範囲を図-1, 図-2 に示した。また模型水路の平面図および側面図を図-3 に示した。

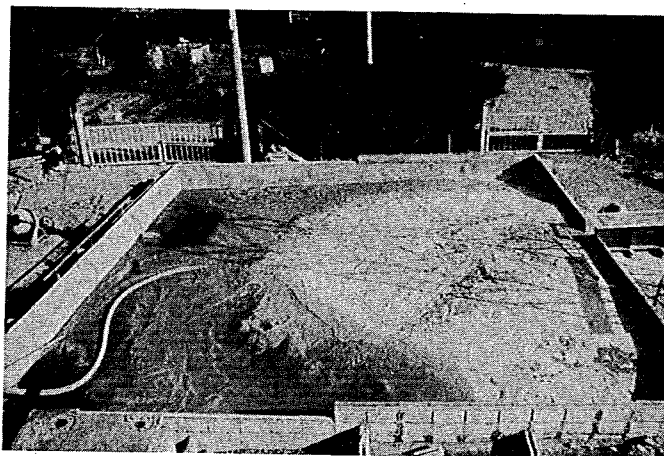


写真-3 海 の 模 型

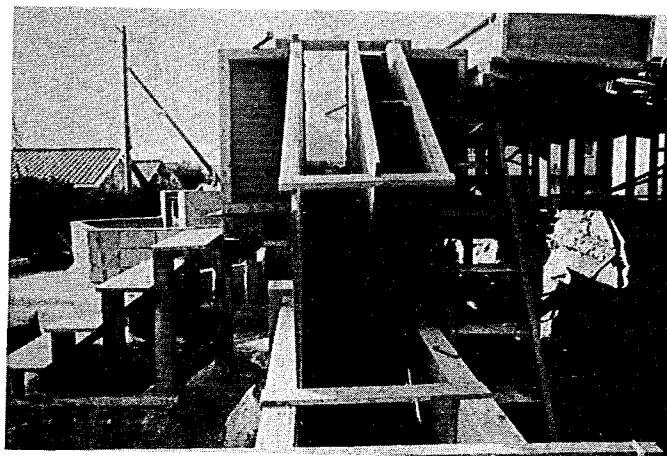


写真-4 段波発生装置

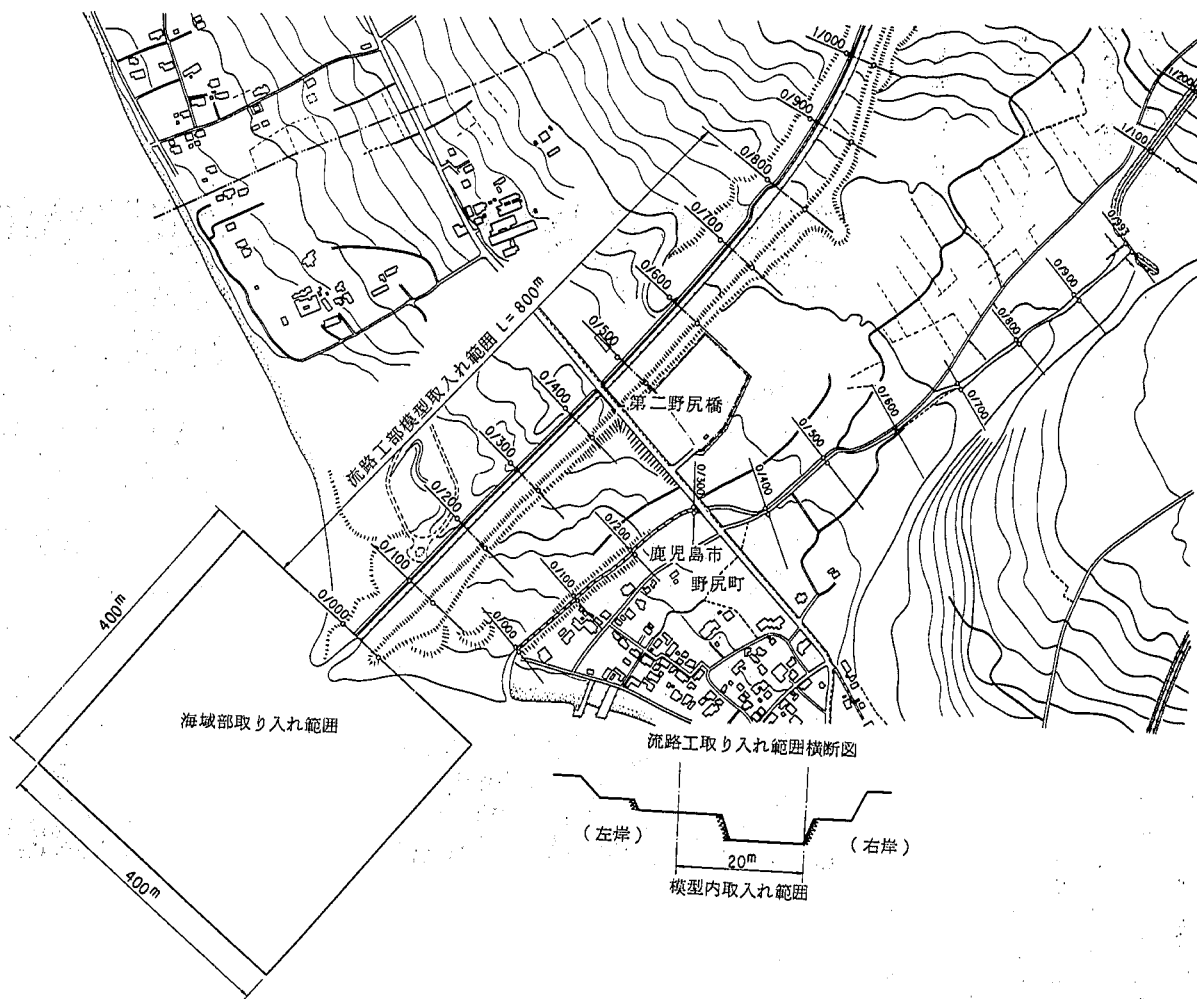


図-1 実験区間位置図

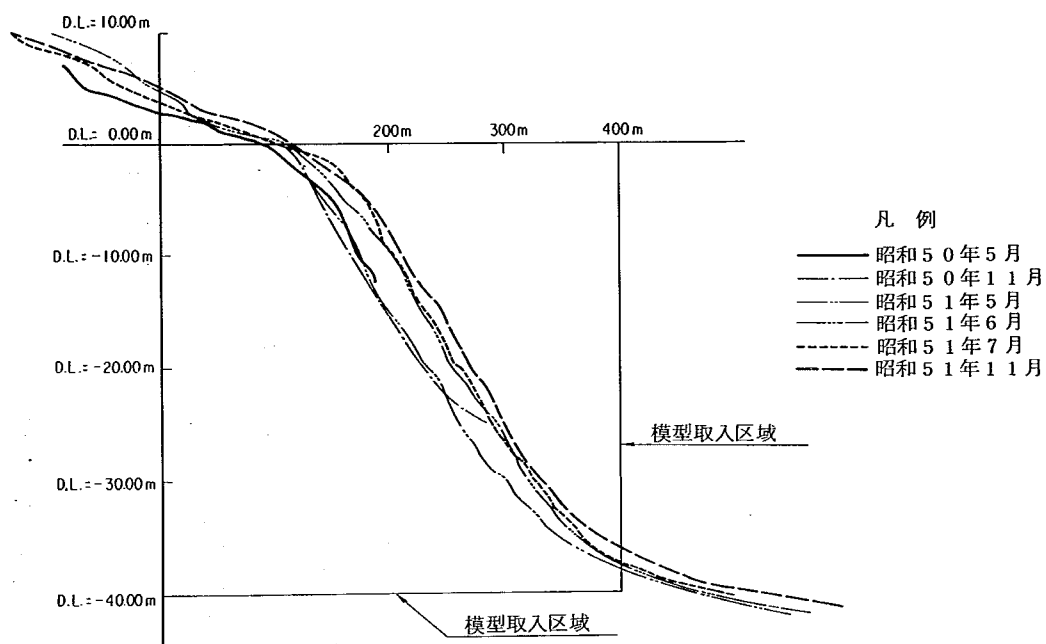


図-2 野尻川河口汀浅図

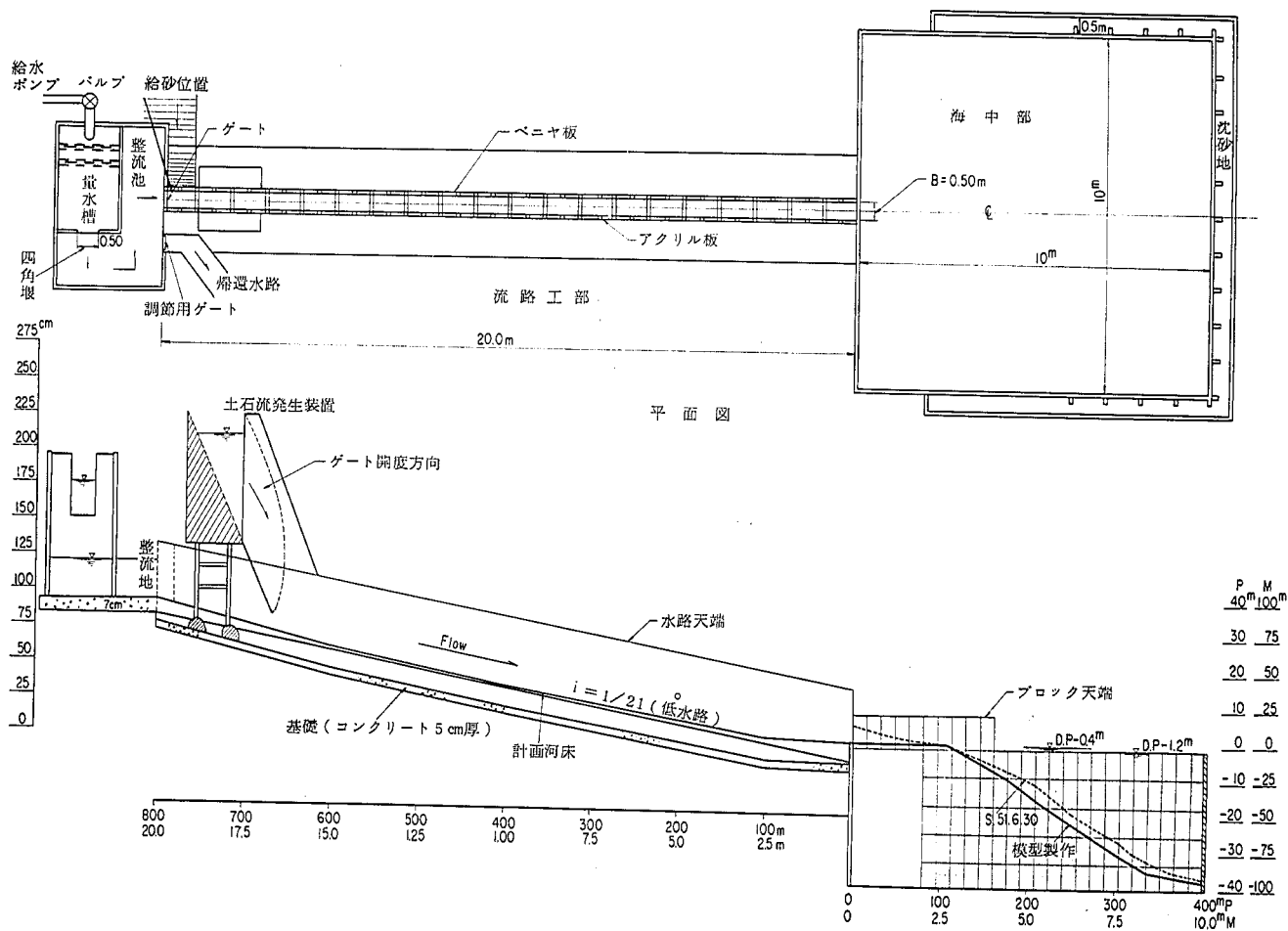


図-3 実験用水路概要図

4. 実験方法と実験条件

4-1 実験方法

① 実験方法

模型最上流に設置した段波発生装置から泥流の先端部を作り、同時に水路上流末端から後続流を流下させて、両者を合成させ一回の泥流として流下させた。なお、これら合成に際しては事前に次節でのべる実験条件による一定流を流下させ、現地観測ハイドログラフに合うよう予備実験をおこなっている。

② 計測項目と計測方法

実験中および実験終了後において測定する項目とその計測方法は表-1のとおりである。また表-1にはこれら計測項目と解析検討事項との関係を示してある。

表-1 計測項目と測定方法

計 測 項 目	計 測 時	測 定 方 法	解 析 と の 関 係
① 段 波 高	実 験 中	5カ所の8mmカメラ水位計	I 相似性の検討 ①~⑨
② 段 波 形 状	実 験 中	5カ所の8mmカメラ水位計	
③ 段 波 速 度	実 験 中	5カ所の8mmカメラ, 人為(ストップウォッチ)	II 掃流機構の検討 ①~⑤, ⑧
④ 洗掘メカニズム	実 験 中	8mm高速カメラ	
⑤ 土砂堆積高	実験終了後	50cmピッチの横断測量	III 計画勾配の検討 ⑤~⑧
⑥ 海中の堆積高	実験終了後	海中1mピッチの横断測量	
⑦ 海での拡散	実 験 中	10秒ごとのメモモーションカメラ	
⑧ 流 況	実 験 中	観察, 35mmカメラ	
⑨ 単 体 重 量	実 験 前	土砂の量と水量からの計算	

4-2 実験条件

① 模型実験の相似則

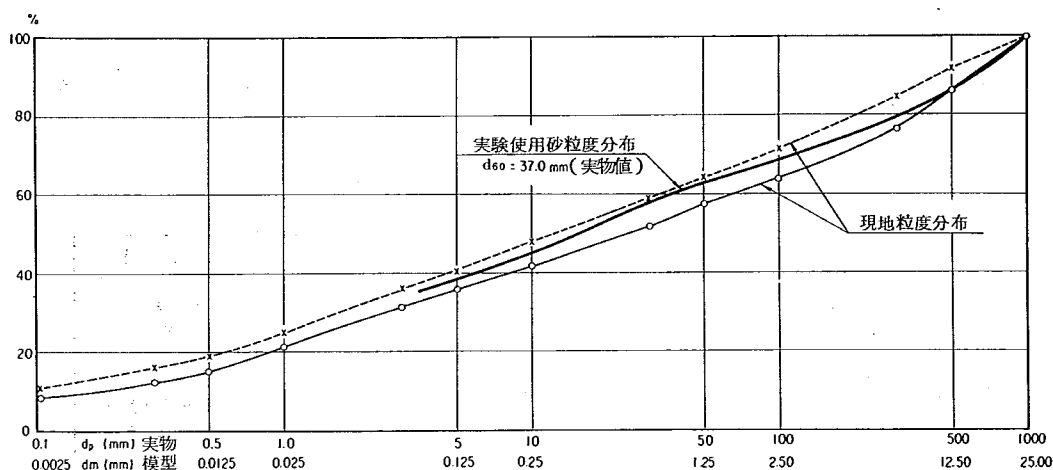
本実験においては泥流をとりあつかうところから、模型実験に用いる相似則は決められたものがない。流れが急勾配河川での掃流はフルードの相似則が用いられておりまた流れが土石流のように重力の項の影響が卓越している場合にもフルードの相似則の適用が考えられるところから本実験に

においてもフルードの相似則を用いた。

② 河床材料および流下土砂

模型実験に用いた材料は現地調査資料（図－４）をもとに数種の粒径の土砂を混合し現地河床材料の粒径分布に近い粒径分布を作成した。また野尻川の粒度特性として火山灰を含む粒径の小さい部分が多いため、現地において 3.5 mm 以下の粒径の材料についてはフライアッシュを用いて、細粒分の表現および火山灰の影響を表現した。

泥流は先端部のみ段波形状を作るため土砂の配合比を砂：フライアッシュ：水＝１：２：３として先端段波を形成し、後続流は実験土砂濃度で図－４の粒度分布で流下させた。



図－４ 野尻川粒径加算曲線図

③ 実験条件

実験条件は表－２にまとめた。ここでは各実験条件の決定根拠を述べる。

流量：泥流の先端部と後続流部とに分離して各々フルード相似則による 1/40 スケールで予備的に流下実験をし、特に先端部については後続流部に対して水位が低かったので、現地 V.T.R にみられる段波水位に近い高さになるように先端部を調節している。先端部流量は現地観測における最大流量 $476 \text{ m}^3/\text{s} \div 500 \text{ m}^3/\text{s}$ (S50.4.8 発生)、最頻度流量 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ およびその中間値の $250 \text{ m}^3/\text{s}$ をとって限界勾配、先端部の洗掘状態、計画勾配、土砂濃度による影響に関して検討をした。泥流の相似性の検討については表－３、図－５に示した昭和 51 年 5 月 16 日および昭和 51 年 6 月 9 日発生の泥流（この 2 回の泥流は現地の観測値が最も整備されている）を対象として実験をおこなった。

表-2 実験条件一覧表

実験名称	Case No	流量 (m ³ /s)		土砂 濃度(%)	海水位 D.p(m)	実験時間 (模 型)	河 床 形 状	備 考
		先端	後端流					
1. 清水段波による 検討	1-1	124	70	0	-1.20	6分	移動床 (S 51.5 の河床)	清水による段波形状、段波速度、段波による洗掘力等清水段波の性質を検討する。
	1-2	124	70	0	-1.20	6分	移動床 (S 51.5 の河床)	
	1-3	124	70	0	-1.20	6分	移動床 (S 51.5 の河床)	
	1-4	124	70	0	-1.20	6分	移動床 (S 51.5 の河床)	
	1-5	124	70	0	-1.20	6分	移動床 (S 51.5 の河床)	
2. 流れの相似性の 検討	2-1-A	312.6	70	46	-0.40	1分10秒	固 定 床	S 51.5.16 (A実験) および S 51.6.9 (B実験) を相似させて、泥流を流下 させている。 B実験は、A実験終了計測後重ねて流している。
	2-1-B	124	70	25	-1.20	3分20秒	移動床 (A実験終了形)	
	2-2-A	312.6	70	46	-0.40	1分10秒	固 定 床	
	2-2-B	124	70	25	-1.20	3分20秒	移動床 (A実験終了形)	
	2-3-A	312.6	70	46	-0.40	1分10秒	固 定 床	
	2-3-B	124	70	25	-1.20	3分20秒	移動床 (A実験終了形)	
3. 堆積勾配の検討	3-1-1	100	70	25	-0.40	3分	固 定 床	泥流の電的变化と堆積・停止する勾配との検討をする。
	3-1-2	100	70	25	-0.40	3分	固 定 床	
	3-2-1	250	100	25	-0.40	3分	固 定 床	
	3-2-2	250	100	25	-0.40	3分	固 定 床	
	3-3-1	500	250	25	-0.40	3分	固 定 床	
	3-3-2	500	250	25	-0.40	3分	固 定 床	
	3-3-2	500	250	25	-0.40	3分	固 定 床	
4. 土砂濃度の変化 による検討	4-1-1	250	100	10	-1.20	3分	固 定 床	泥流の濃度による泥流特性への影響を検討する。
	4-1-2	250	100	10	-1.20	3分	固 定 床	
	4-2-1	250	100	20	-1.20	3分	固 定 床	
	4-2-2	250	100	20	-1.20	3分	固 定 床	
5. 計画勾配の検討	5-1	100	70	25	-0.40	3分	固 定 床	5-1～5-6の実験の河床形は現河道河口～150m附近までの平坦部 および 海中を150～250m附近の平均勾配 (1/21) に合わせ掘削して一定の勾配の 流路とした実験であり、 5-7～5-10は大隅工事事務所が計画した4号計画 河床勾配案によっている実験である。
	5-2	100	70	25	-0.40	3分	移動床 (5-1終了形)	
	5-3	250	100	25	-0.40	3分	固 定 床	
	5-4	250	100	25	-0.40	3分	移動床 (5-3終了形)	
	5-5	500	250	25	-0.40	3分	固 定 床	
	5-6	500	250	25	-0.40	3分	移動床 (5-5終了形)	
	5-7	100	70	25	-0.40	3分	固 定 床	
	5-8	250	100	25	-0.40	3分	固 定 床	
	5-9	250	100	25	-0.40	3分	移動床 (5-8終了形)	
	5-10	500	250	25	-0.40	3分	固 定 床	
6. 連続泥流の検討	6-1	なし	100	20	-0.40	60分	固 定 床	河床勾配を大隅工事事務所計画案としとき何回の泥流が処理できるかを検討する。

注 この他予備実験を10回実施している。

表-3 相似性の検討に用いた泥流の諸元

発生年月日	先端部 流量	ハイドロ	継続時間	当該泥流による 堆積土量(A)	全流量(B)	A / P 土砂濃度	泥流発生 時海水位	備 考
昭和51年5月16日	m ³ /s 312.6	図-5	図-5	m ³ 26,000	m ³ 56,000	% 46.4	m -0.40	泥流発生前に流 路内堆積なし
昭和51年6月9日	m ³ /s 124.0	図-5	図-5	m ³ 22,000	m ³ 86,000	% 25.5	m -1.20	流路内堆積あり

土砂濃度：昭和51年5月16日、6月9日の二回の泥流の土砂濃度を流路工内堆積土砂量(流出土砂量)と泥流の総流量との比から求め、相似性の検討を実施している。縦断勾配の検討では上記の泥流のうち土砂濃度25%となった6月の泥流の値を用いている。これは、予備実験時に土砂濃度が25%をこすと一部上流給砂地に堆積をはじめることがわかったからである。また土砂濃度による影響の検討には、現地泥流にはもっと水ばいさらった泥流があるという証言から、より濃度のうすいものを想定して土砂濃度を10、20%と決め実験をおこなった。

海水位：海水位は泥流発生時の潮位(大隅工事々務所より観測された値)に設定した。

実験時間：現地で計測された二回(前述)の泥流の継続時間をフルードの相似則によってスケールダウンして設定した(図-5参照)。

河床形：昭和51年5月16日の泥流発生前は流路工に土砂堆積がなかったという大隅工事々務所の報告に基づいて、固定床で実験をおこなった。また清水段波での洗掘力を調べる実験においては、昭和51年5月16日の泥流通過後の堆積形状に河床を整形した移動床で実験をおこなった。相似性の検討実験ではまず固定床で昭和51年5月16日の泥流を流下させ、その上に6月9日の泥流を流下させるいわゆる重ね実験をおこなった。

河床縦断形：昭和51年5月泥流通過前の河床縦断形とした。勾配の検討実験では、大隅工事々務所の計画縦断形および河口部の平坦部を堀削して一様勾配とした縦断形を作製して実験をおこなった(図-6)。

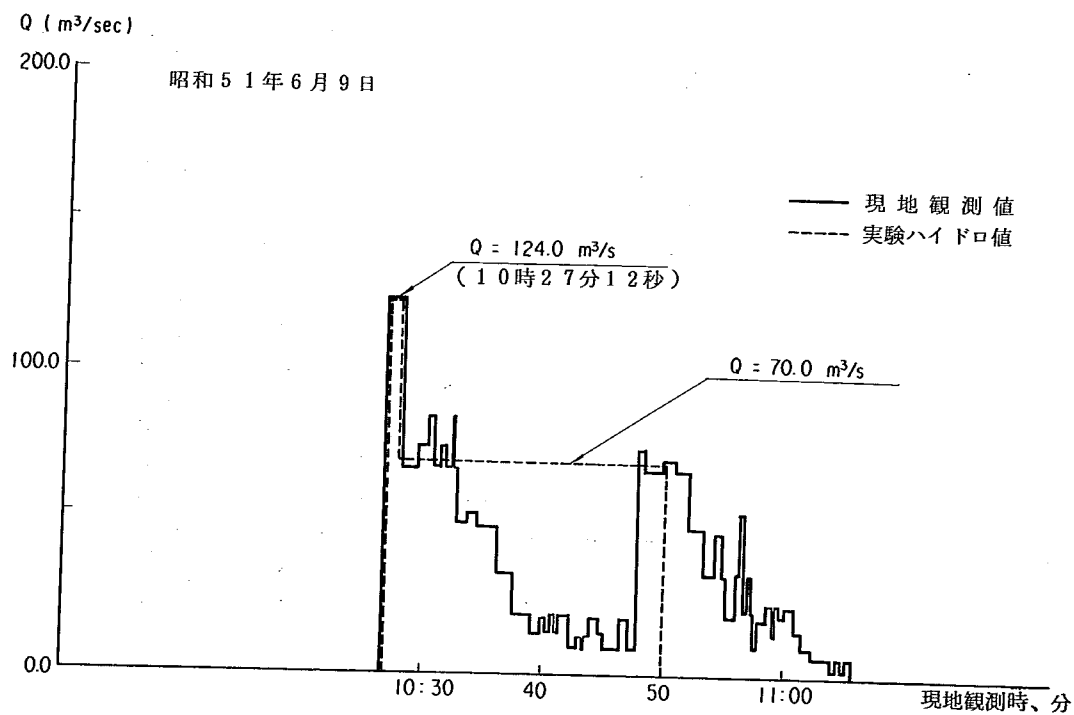
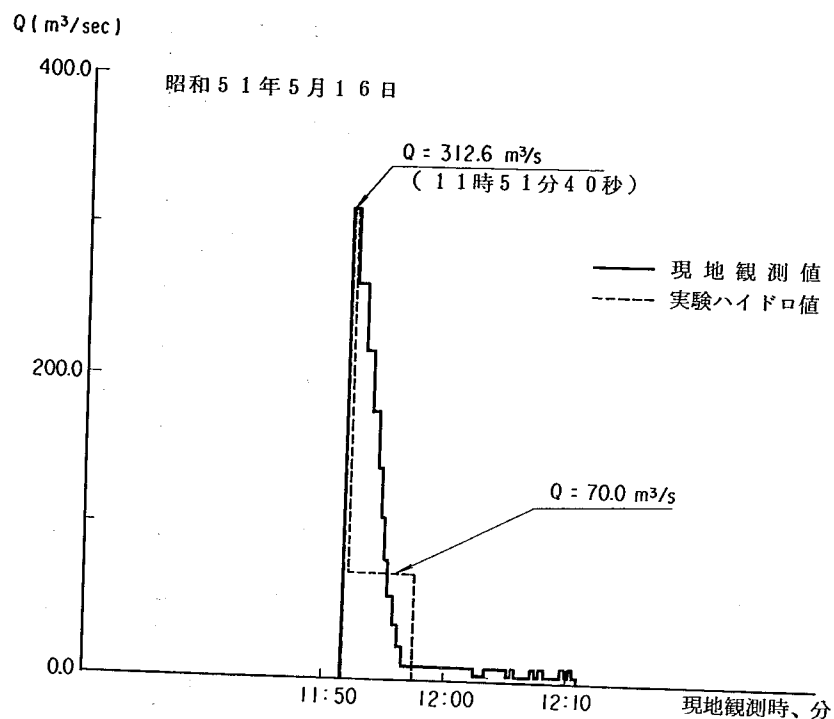


図-5 昭和51年5月16日、6月9日の泥流ハイドログラフ

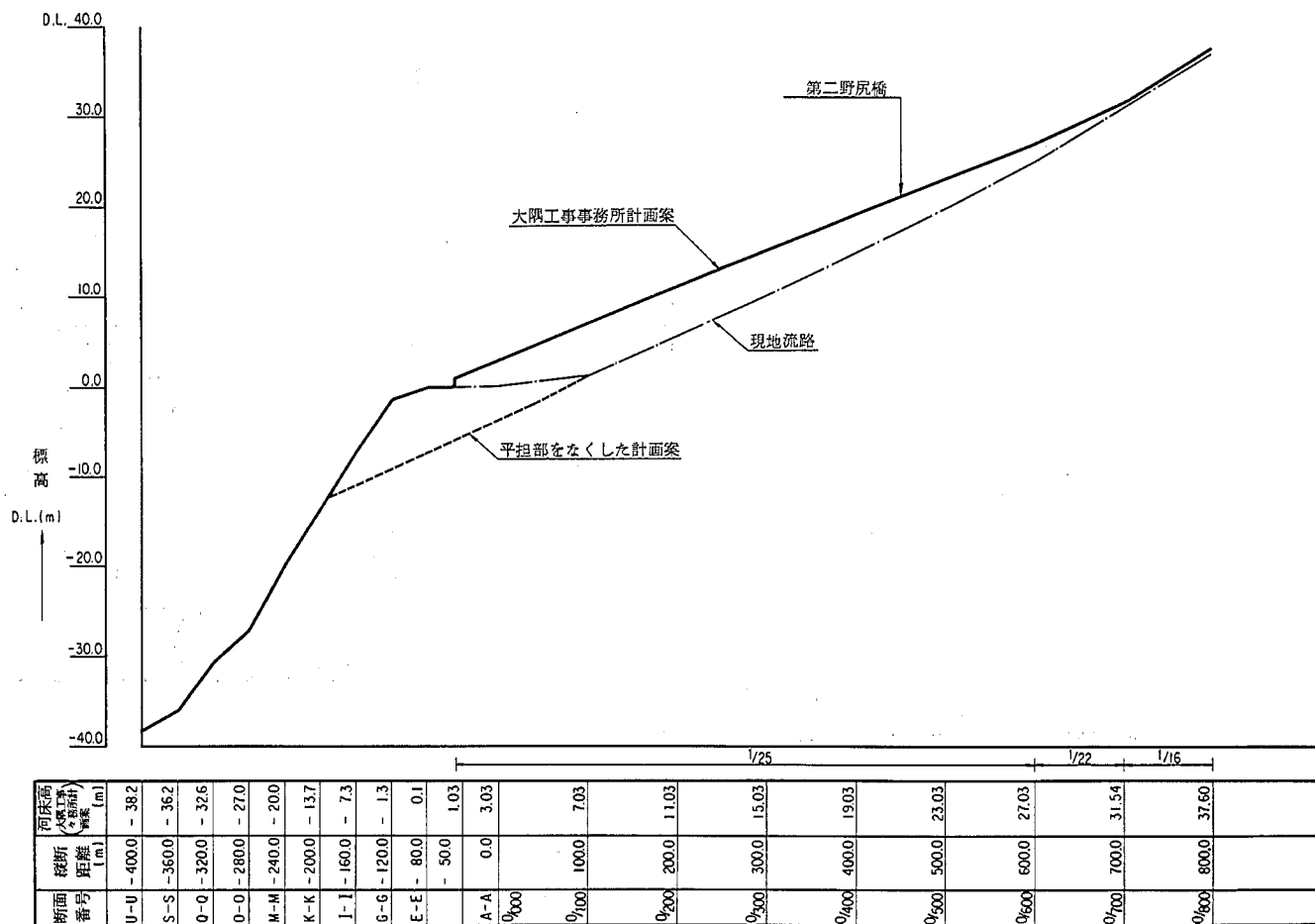
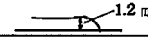
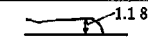
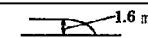
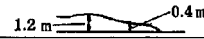
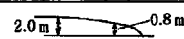
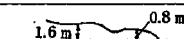
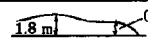
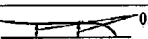
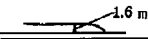
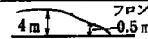
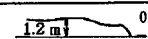
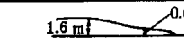


図-6 河床縦断面図

表-4 測定結果

Case. No	段波・先端部 速度 (m/s)	段 波 高 (m)					後続流表面 流速 (m/s)	段波 40 m 附近 流速 (m/s)	400 m 附近の段波 形状 (スケッチ)	実験時流下実測 流量 (m³/s)	流速係数 $\varphi(v/u^*)$	摩 擦 速 度 $u^*(m/s)$ ($i=1/6$ とする)	備 考
		400 m 附近		200m	120m	40m							
		H ₁	H ₂										
1-1	—	1.20	—	0.80	—	—	6.5	—		—	—	—	
1-2	15.04	1.20	—	2.00	1.90	2.00	4.5	5.2		144	19.6	0.7668	
1-3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
1-4	22.67	1.12	—	1.76	1.60	1.56	7.7	4.8		203	30.6	0.7408	
1-5	—	1.60	—	2.00	1.60	1.60	5.3	3.9		—	—	—	
2-1-A	22.84	0.40	1.20	—	1.20	1.20	10.5	—		219*	29.7	0.7668	
2-1-B	15.40	0.40	1.20	—	2.00	3.20	10.4	9.1		147*	20.0	0.7668	
2-2-A	18.65	0.80	2.00	1.20	1.20	—	7.0	—		298*	18.8	0.9899	
2-2-B	20.15	0.80	1.60	2.00	2.40	—	7.9	—		258*	22.7	0.8854	
2-3-A	19.34	—	—	0.80	—	—	7.9	—	—	—	—	—	
2-3-B	11.43	0.40	0.80	2.00	—	—	8.8	—	図-13.1	73*	18.2	0.6260	
3-1-1	12.55	2.50	—	1.00	1.20	1.32	9.0	6.9	スケッチなし	251	11.3	1.1067	
3-1-2	18.83	1.00	—	1.00	1.00	1.24	11.4	—	〃	150	26.9	0.7000	
3-2-1	—	—	—	2.00	1.24	1.50	6.5	—	〃	—	—	—	
3-2-2	17.47	0.92	—	0.92	1.04	1.56	7.0	9.7	〃	128	25.3	0.6714	
3-3-1	21.24	—	—	1.28	1.32	1.50	11.1	—	〃	—	—	—	
3-3-2	18.13	—	—	1.76	1.08	1.56	10.0	—	〃	—	—	—	
4-1-1	10.10	0.40	1.20	1.60	—	2.00	11.9	—	図-13.2	96*	13.1	0.7668	
4-1-2	18.56	0.40	1.80	—	1.20	1.20	11.2	17.8		267*	19.7	0.9391	
4-2-1	14.84	0.40	1.60	1.60	1.20	1.60	9.1	6.9	—	189*	16.7	0.8854	
4-2-2	14.76	0.40	1.20	—	1.20	2.00	9.4	—	図-13.3	141*	19.2	0.7668	
5-1	16.66	0.80	0.80	0.60	1.00	—	9.2	—		106	26.6	0.6260	
5-2	12.19	2.00	—	1.60	—	—	8.6	—	図-13.4	195	12.3	0.9899	
5-3	—	1.60	—	1.20	1.60	—	12.2	—		—	—	—	
5-4	—	0.50	4.00	2.40	1.20	—	10.5	—		—	—	—	
5-5	—	0.80	1.20	1.20	—	2.20	12.6	—		—	—	—	
5-6	16.71	—	—	—	—	4.00	9.7	—	—	—	—	—	
5-7	—	0.80	2.80	1.20	2.00	2.60	11.3	—		—	—	—	
5-8	—	0.60	1.60	1.20	1.40	2.80	11.5	—		—	—	—	
5-9	—	0.60	3.20	2.80	1.60	1.20	7.5	—		—	—	—	
5-10	19.23	0.40	3.20	—	2.00	1.20	10.3	14.7	図-13.5	492*	15.3	1.2521	

*二段後部

5. 実験結果と考察

5-1 泥流の相似性の検討

野尻川流路工の水理模型実験においては火山泥流をどのように評価して実験をおこなうかが重要な問題となる。模型の基本量は前述のごとくフルードの相似則によっているが、泥流流れには火山灰による粘性効果が入っていたり、段波をとまなう特殊な流れであるため、単にフルードの相似則で基本量を決定した実験ですべての考察をするのには問題があると筆者は判断した。そこで実験結果(表-4)について現地で計測されている泥流の諸性質と比較検討することによって泥流として現地で発生する泥流と実験上同一流れと取り扱えるかどうかを検討した。

① 段波先端部の速度

現地観測結果は表-4 のようである。実験による流速は流量との関係として図-7 に示した。

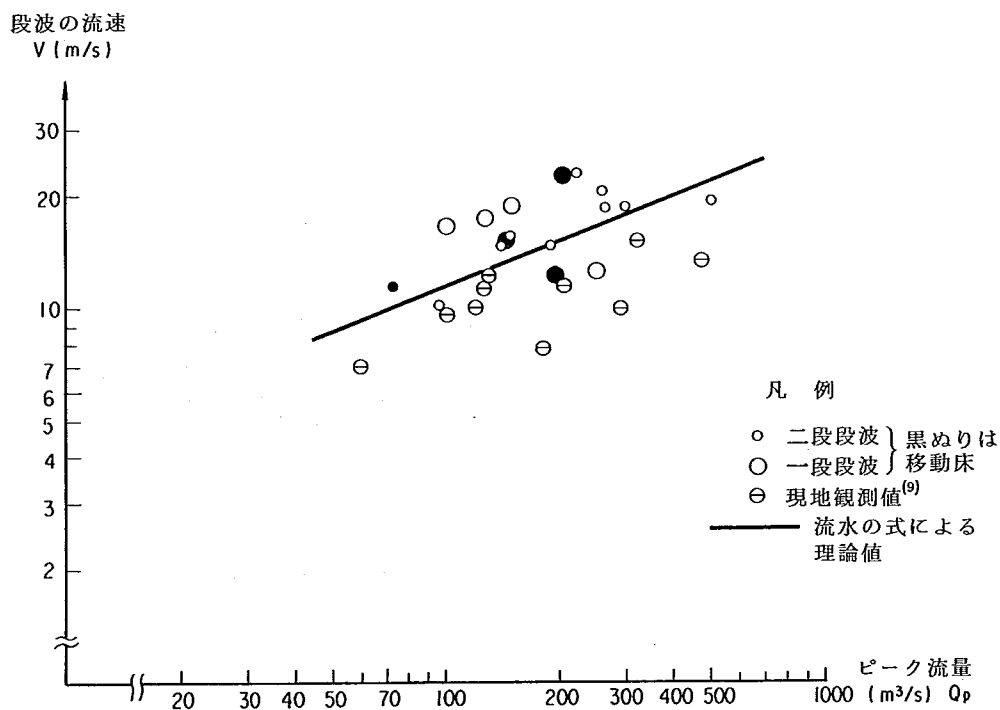


図-7 流量-流速との関係

流速の測定点は現地が野尻橋（河口から450～500m）付近で実施しているので、実験では河口から500～600m間の平均流速を整理した。図および表から移動床においてはやや水理実験の方が大きくなっているが、order的にはよく一致する。若干現地観測値が実験値より下まわっているのは底面の粗度に関係していると考えられる。現地の流路工が三面張りであることから固定床（モルタル仕上げ）としているが、粗度の点ではかならずしも相似しているとは言い難い。現地においても完全な固定床条件（河床堆積土砂が完全にとりのぞかれ、コンクリート面が露出している状態）になっているかどうかの疑問ものころ。また、同じ泥流でもその速度には大きな差異があることは各地の観測結果⁽¹⁰⁾（表-5）からも判明していて、野尻川の泥流の流速もかなり異なることが予想される。

表-5 土石流の速度

速 度 (m/sec)	測定場所および発表者		摘 要
0.6～3.8	Wrightwood	Morton and Campbell	Mudflow
4.3～7.7	浦 川	松本砂防	土石流先端・最高速度、センサー
4.5	Wrightwood	Sharp and Nobles	先頭速度
5.0	芦屋川	遠 藤	推 定
5.4～8.9	焼 岳	松本砂防	土石流先端・最高速度、センサー
7.8～13.6	桜 島	田 原	土石流先端速度、センサー
約9	濁 沢	山 崎	通過時間から推定
11～16	Enterbach	Aulitzky	勾配1/50～1/100
13	十勝岳	村 野	平均速度であり、火口部では400 m/sec、元山事務所では218 m/sec、新井牧場66 m/sec 等の参考速度がある。
13.6～14.3	猪野山	高 野	8mmフィルム
15～16	Tenmile Range	Curry	流れとしてはNewton流体として いる。Mud flow

以上から段波速度に関しては、ほぼ現地泥流と相似できると考えた。

② 段波形状と段波高

現地で観測された段波高は $1\text{ m} \sim 3\text{ m}$ ⁽¹¹⁾ であり実験上でも、現地換算スケールで $1\text{ m} \sim 3\text{ m}$ になっていて、比較的相似している。段波の形状は撮影されたものでは段波形状が一段の段波（図-8，Type-1）型となっているが現地の目撃者の話では図-8におけるType-2が多いと言われている。一方、妙高土石流ではType-3が目撃者により確認されていて、実験上に表われたTypeは全て現実の現象として存在している。その意味では段波形状も現地の泥流と相似していると言えよう。

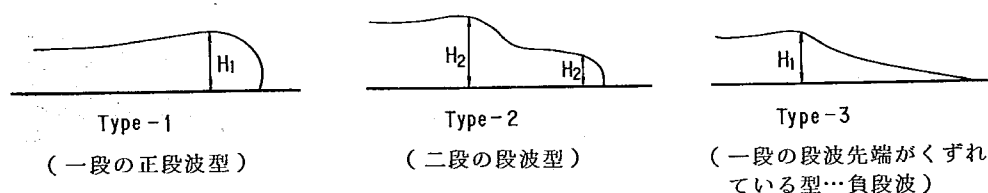


図-8 段波先端部の形状模式図

③ 単位体積重量

現地泥流の単位体積重量⁽⁵⁾は $1.81 \sim 1.95$ とされている。今回の実験では約 1.80 となり単位体積あたりの重量からみた相似性は高い。

④ 堆 積 状 況

図-9は昭和51年6月9日泥流通過後大隅工事々務所測量の平均河床高と相似性の検討をおこなったCase.2-1～2-3実験終了後の平均河床高とを比較したものである。図から現地測量結果と実験結果がほぼ近似される。

⑤ 流 況

現地野尻川を流下する泥流はV.T.Rによって見る事ができるが、本実験と比較すると流況そのものは、主観的に言って非常によく類似していると思われる。特に実験では最大粒径 2.5 cm （現地縮尺 100 cm ）の巨礫を混入させているが、泥流先端部にこれら巨礫が集中するという現象もおこらず、V.T.Rで見られる後続流で流下する現象によく一致している。流れの状況を写真に示した。

以上、いくつかの項目によって、現地で観察、観測されている火山泥流と実験における泥流はほぼ流れとして相似している流れであると考えられる。

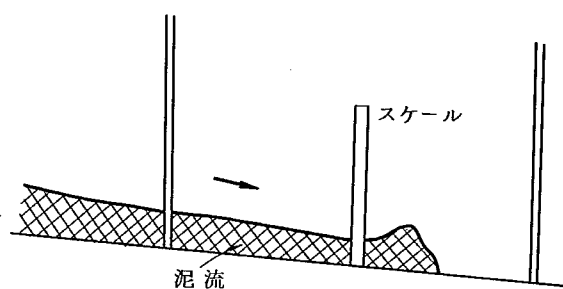


写真-5の模式図

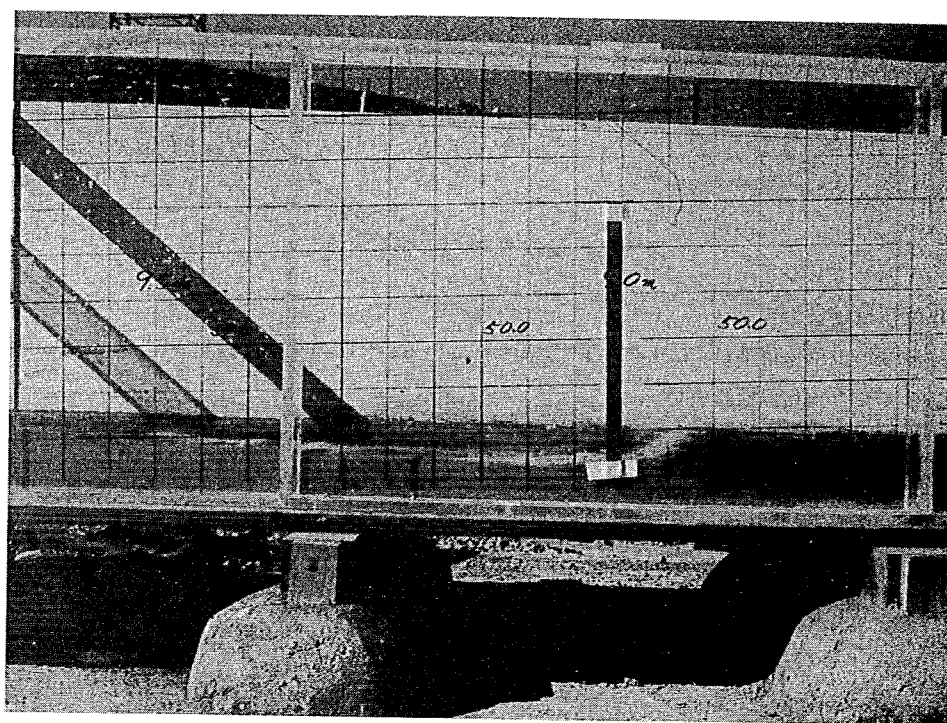


写真-5 Type-1 一段段波形 (明瞭な先端部を有する段波)

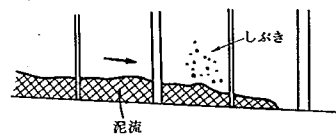
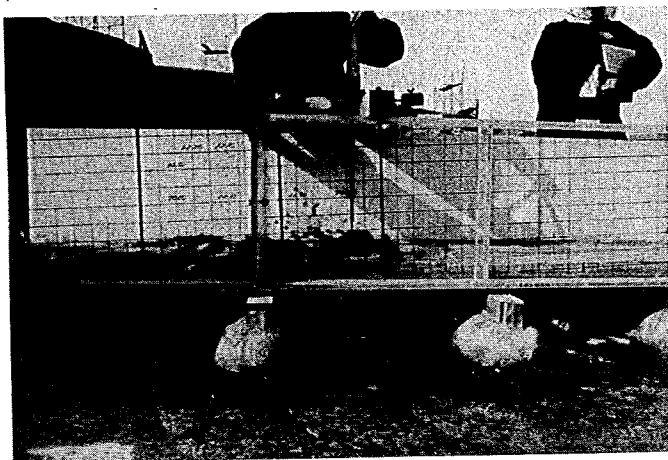


写真-6の模式図

写真-6 Type-2

明瞭な先端部がなく、少し後にピークが存在する。

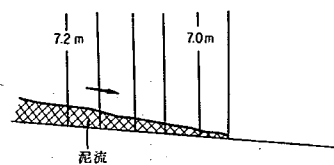
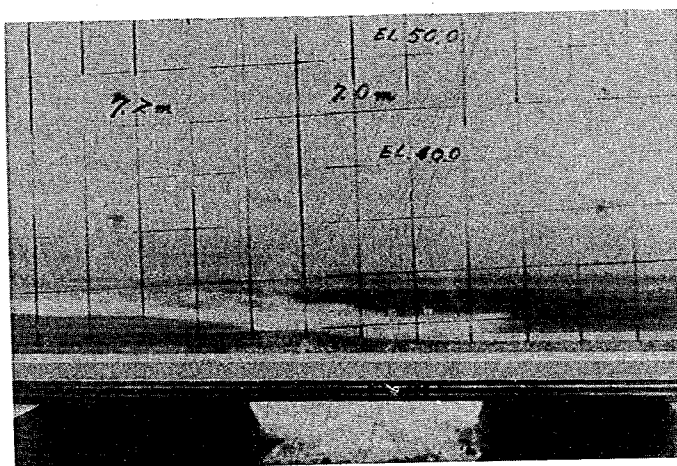


写真-7の模式図

写真-7 Type-3

先端部が三角形のような形を程する

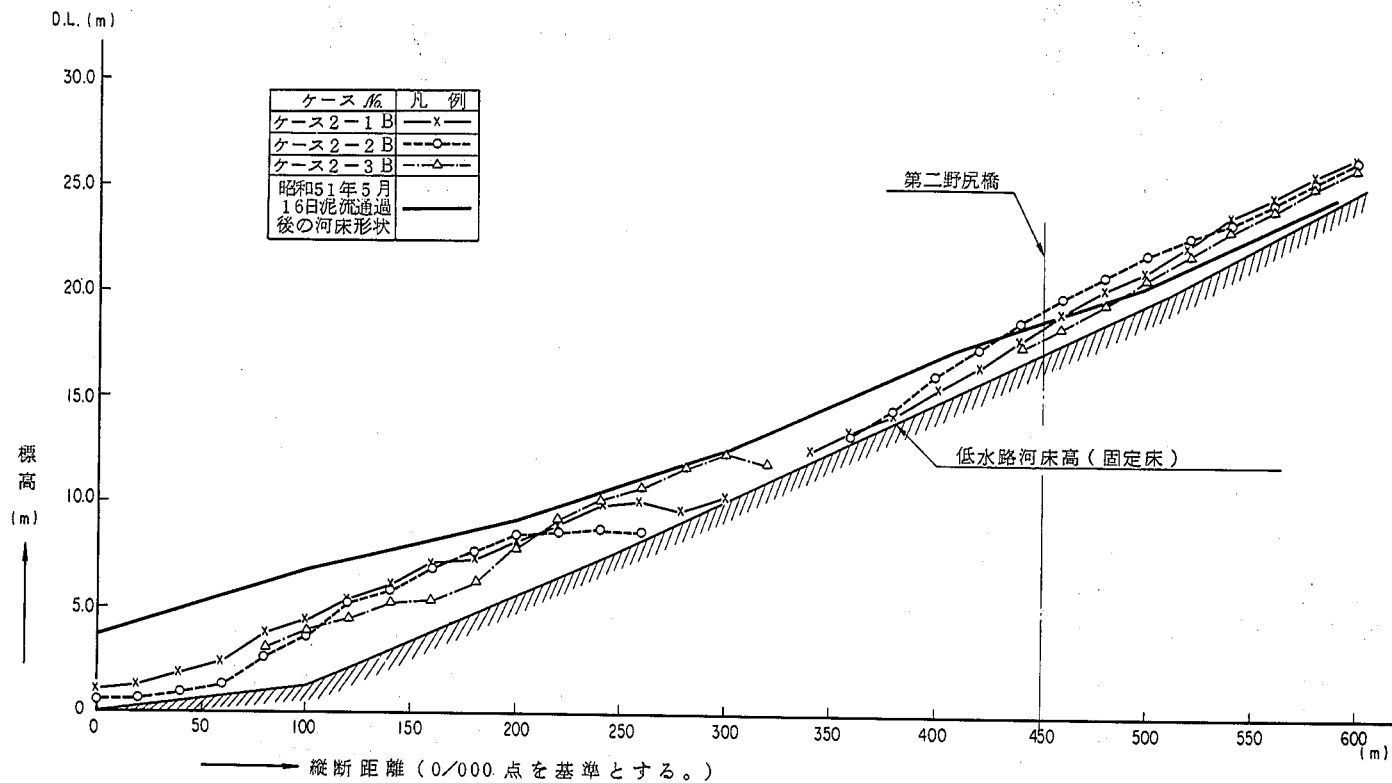
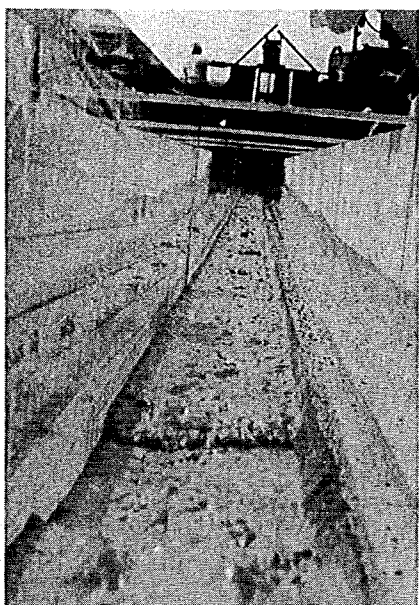


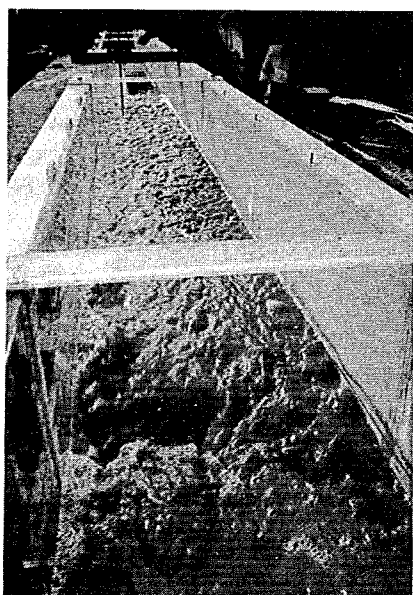
図-9 平均河床高縦断図



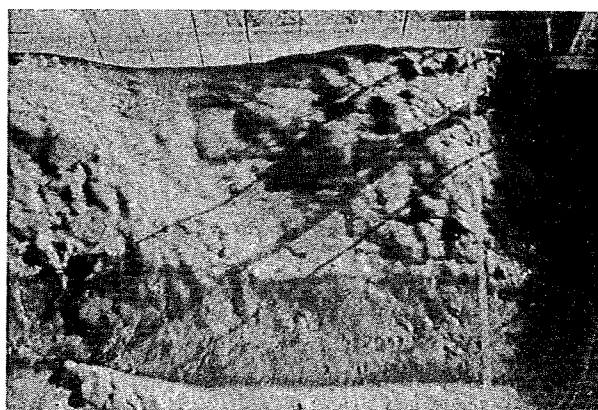
写真—8



写真—9



写真—10



写真—11

5-2 泥流の機構に関する検討

泥流の流れが防災工事の計画・設計上どのような流れの領域として取り扱えるかを検討した。

① 泥流の掃流力と堆積条件

流れの掃流力に関係する因子として流速を考える。通常の粗面水路や河川では流速と平均摩擦速度との比である流速係数 $\varphi (v/u_*)$ が 8~25 の範囲で示されている。⁽¹²⁾ 本実験値および現地の観測値⁽⁵⁾ から流速係数を求めてみると、(表-4, 表-6) はほとんどが $\varphi = 8 \sim 25$ の範囲に入っている。流れの掃流力から見ると掃流として取り扱えいと思われる。

図-7 は泥流ピーク流量と流速との関係を示したものである。ここで泥流ピーク流量が掃流的取り扱いで示せると仮定すれば

$$Q = A \cdot v = B \times h \times v \quad (1)$$

ここで v をマンニングの式で示せるとすれば、河幅 B が一定、河床勾配 I 、粗度係数 n を一定とすれば、

$$v \propto Q^{0.4} \quad (2)$$

で示せる。図-7 において、式(2)に $n = 0.02$, $h = 1.2\text{m}$, $i = 1/20$ として計算された流速と流量との関係を実線で示した。

また図-10 は泥流ピーク流量と波高との関係を示したもので、同様に掃流的取り扱いをすれば(1)式を変形して

$$Q \propto h^{5/3} \quad (3)$$

で示せる。図中の実線が式(2)と同じ条件で計算した(3)式を示したものである。

図-7, 図-10 から桜島泥流は現地観測における値、実験値ともに掃流として取り扱えそうである。

次に土砂濃度による流速への影響を検討しようとしたが先端部は土砂濃度を变化することによって流れの形が段波形状をなさないため後続流のみ土砂濃度を变化させた実験をおこなっている。

堆積の場として検討してみると池谷・米沢谷⁽¹³⁾ は小豆島における土石流はほとんどが 4° (約 $1/14$) より急な地形勾配で停止していることを示している。また全国的にみても土石流の停止末端の勾配は 3° ($1/20$) と言われている。⁽¹⁴⁾ 野尻川の流路工は国道橋附近ですでに約 $1/20$ と土石流の停止勾配区域となっている。すなわち、野尻川の泥流を一般に言う土石流と考えれば国道橋附近に堆積末端を有する堆積物が存在してもよいはずであるが、現地においても本実験においてもそのような事実はみられなかった。堆積を開始する点はむしろ後述するように勾配が急に緩く ($i \approx 0.012$)

表-6 現地観測値における流速係数

流速 ⁽⁵⁾ m/s	u_* m/s	流速係数 φ	備考
11.5	0.966	11.90	8.50.4.8
13.6	1.222	11.13	4.17
7.8	1.058	7.37	4.29
10.0	1.143	8.75	6.4

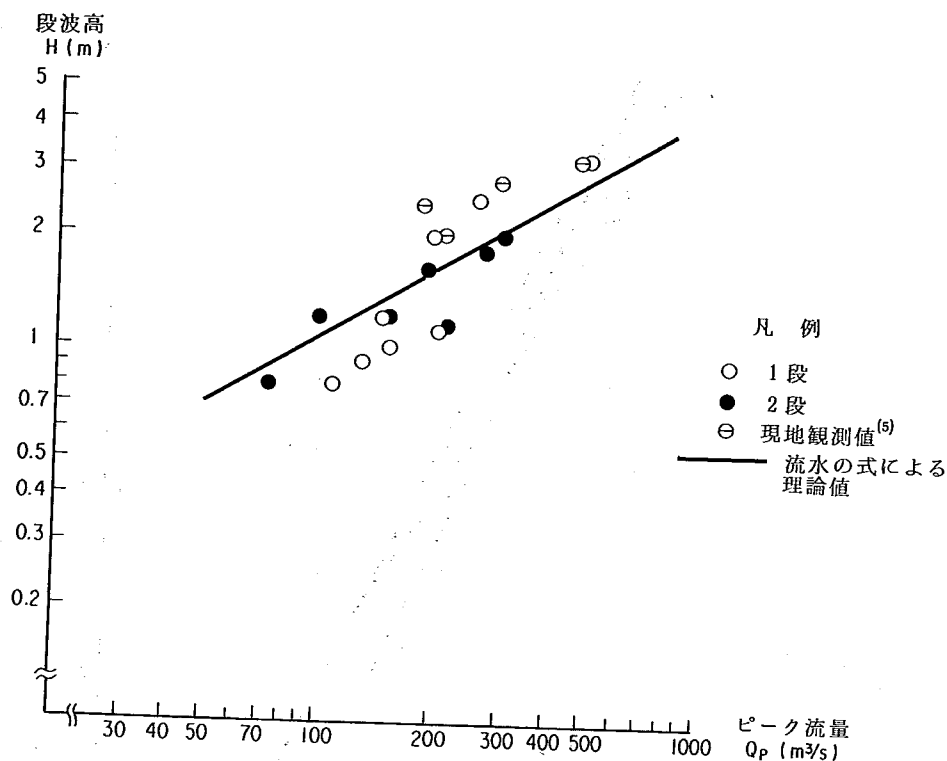


図-10 400m附近段波高と流量との関係

なる地点や海水との接点附近から堆積は上流に上がってくる結果が水理実験から把握された。

堆積形状は相似形の検討 5-1-④図-9 で示した形を一般にとる。ここで土砂濃度（重量比）による差異を検討したが図-9 は土砂濃度 25% および 46% の流れであり、図-11 は同じく 10% と 20% のものであるが傾向としては大差ない。

次に流出土砂量を従来の流砂量式から検討してみる。モデルとして相似性の検討をおこなった昭和 51 年 6 月 9 日発生の泥流をとる。後続流量 $70 \text{ m}^3/\text{s}$ ，継続時間 40 分，平均河床勾配 $1/17$ (5.8%)⁽⁵⁾，平均粒径 37 mm (d_{60} 値) を上流端の条件として，掃流可能な土砂量はどれくらいになるかをブラウン式により求める。

$$q_B / u_* d = 10 \left\{ u_*^2 / (\sigma / \rho - 1) \cdot g \cdot d \right\}^2 \quad (4)$$

ここで $\sigma / \rho - 1 \div 1.6$ ， $h = 1.2 \text{ m}$ とし，土砂堆積空隙率を 0.5（大隅工事々務所測定）とすれば流出して堆積する土砂量は約 $17000 \text{ m}^3/1$ 泥流となる。実験時の堆積土砂量は約 24600 m^3 であり，計算値が 1.5 倍以内に入る値を示している。現地での実測では 22000 m^3 の土砂堆積があったことを勘案すると，実験値は現地測量値とよく一致しているしまた掃流による土砂の流送を，流砂量公式からも検討できそうであった。

以上の各項目の検討から，防災工事の設計計画に対する流れとしては掃流として検討を加えることが可能である。

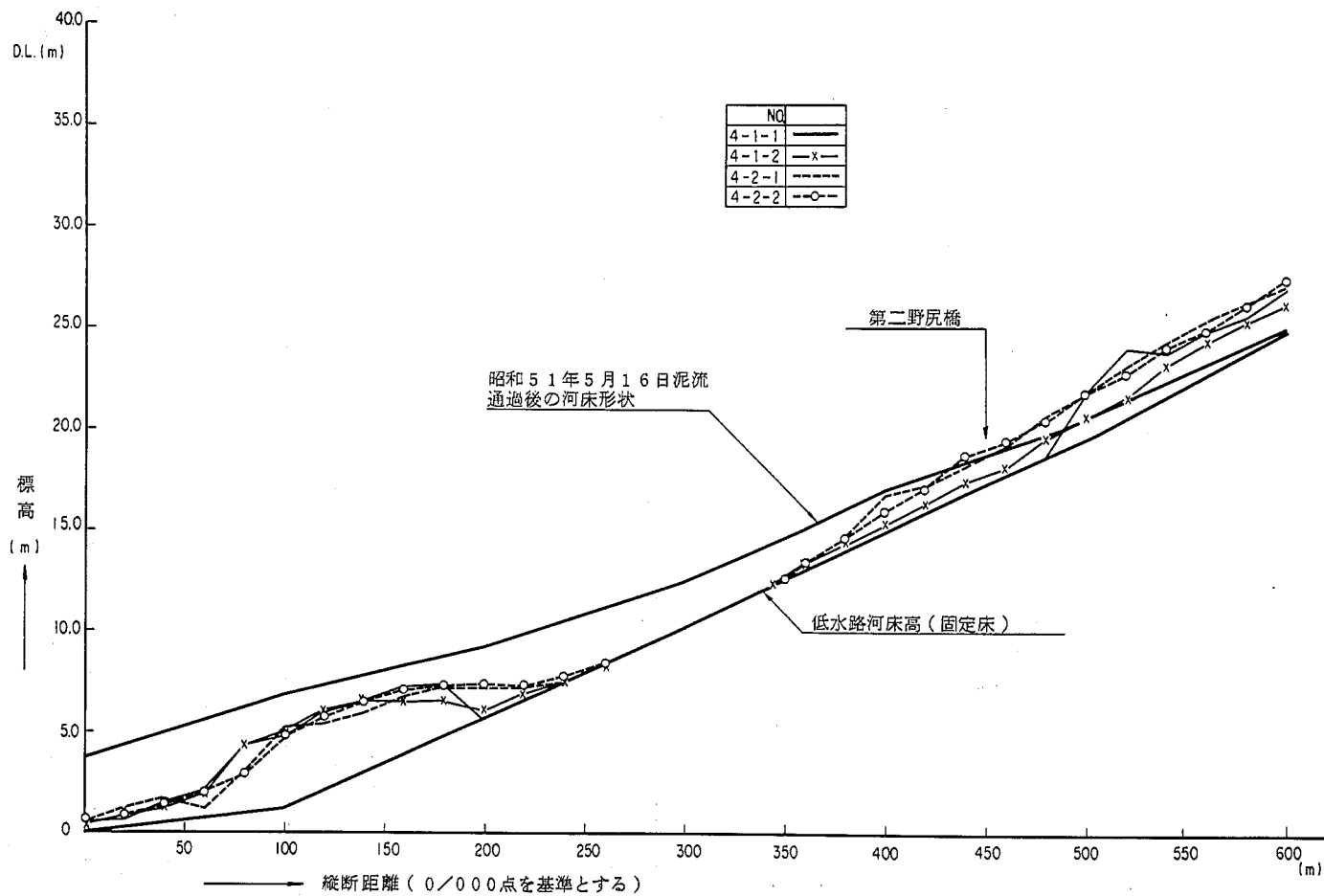


図-11 平均河床高縦断面図

② 泥流先端部の河床洗掘力

泥流先端部は段波形状をなしており、その摩擦速度も大きいことから泥流先端部の河床洗掘力はかなり大きいと予測する考え方があった。そこで実験において段波先端部の洗掘力を検討した。表-4にみられるように摩擦速度 u_* は大きい値を示してはいるが、泥流段波の先端部による河床洗掘は生じていない(写真-12,13)。すなわち、土砂の洗掘、堆積現象に関係するのは泥流の先端部より後続流部によるものと考えられる。

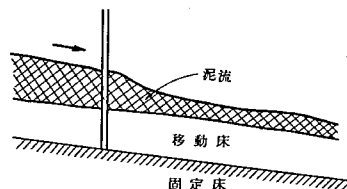
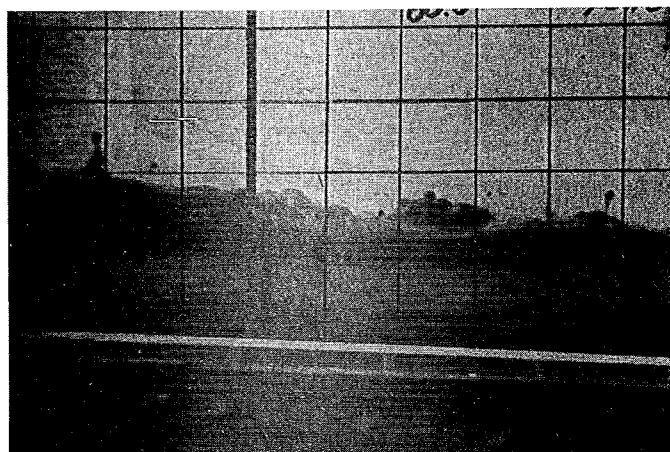


写真-12の模式図

写真-12 先端部通過後
元河床はまったく洗掘されていない。

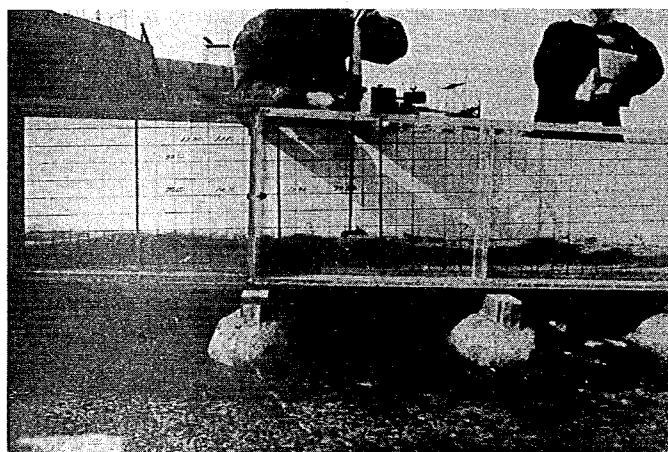


写真-13 先端部通過後
堆積土砂の洗掘は後続流部(写真左端)において生じはじめている

③ 堆積基準面

本実験による堆積基準面は下流緩勾配流路が存在する場合には緩勾配流路への勾配変化点附近から、また勾配変化点を除いた実験では海水との接点から堆積が開始され、堆積は上流へと上っていく。模式図を図-12に示した。流下した泥流は勾配変化点で流速を低減して掃流力を低下させ土砂を堆積させる。このメカニズムは掃流の土砂堆積パターンと同じである。一度土砂堆積が生じた区域での泥流は流速を低減させ土砂の堆積をくりかえす。段波先端部のこれら一連の変化を形状および段波高の変化として図-13-1～図-13-5および表-4に示した。

同じ桜島内で泥流の発生をみながら河口部流路工内に異常堆積を生じていない長谷川（昭和52年災）について縦断勾配を調べてみると国道橋上流部約100m区間のNo.6～No.11では約1/16、No.14～No.16では約1/13であり、橋の下流No.0～No.2の40m区間は約1/30である。

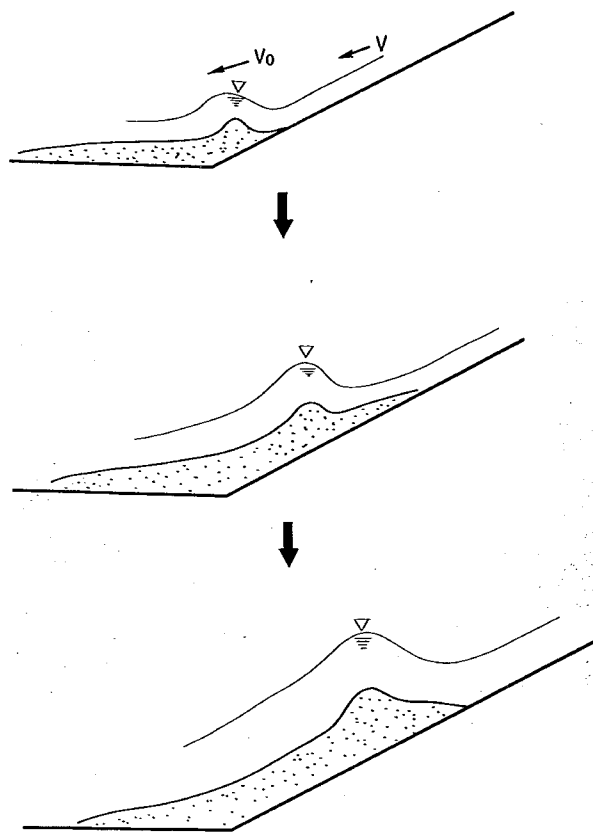


図-12 堆積パターンの模式図

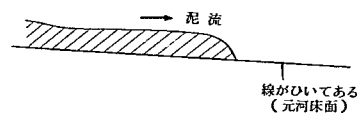
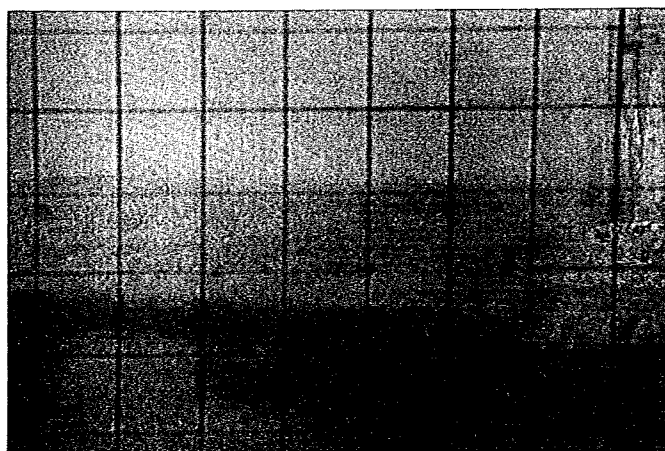


写真-14の模式図

写真-14 泥流先端部（洗掘なし）

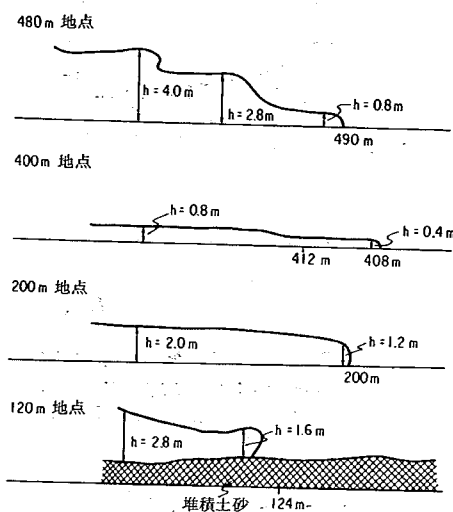


図-13-1 Case 2-3-B

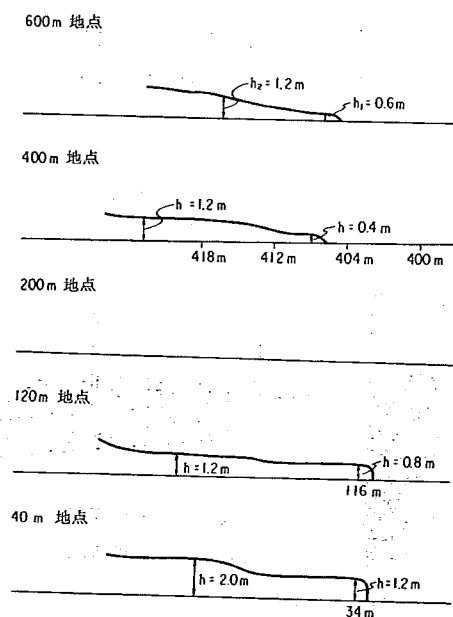


図-13-3 Case 4-2-2

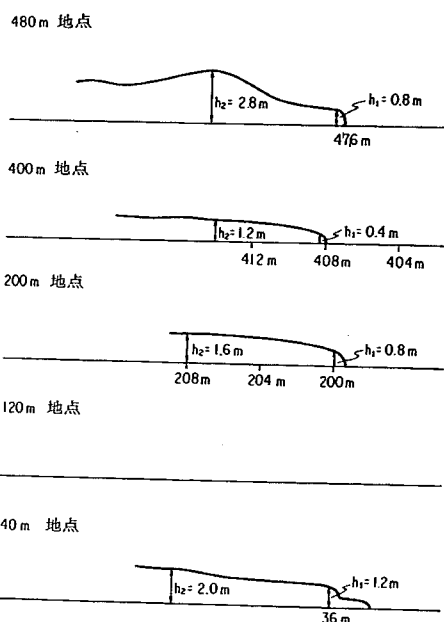


図-13-2 Case 4-1-1

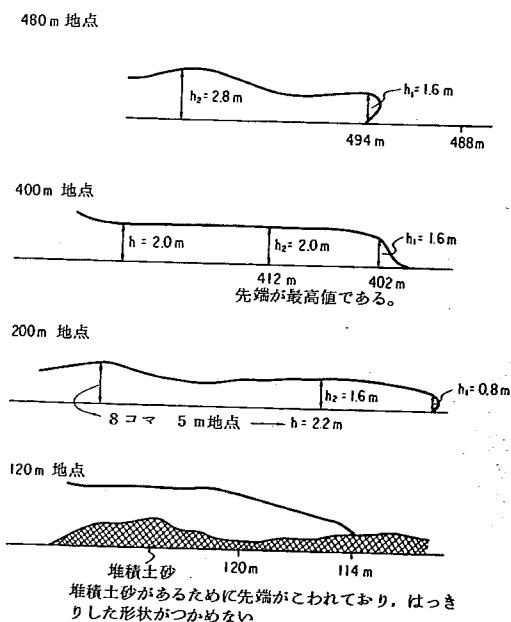


図-13-4 Case 5-2

図-13 段波高の縦断的变化図(スケッチ)

すなわち勾配的には野尻川より緩勾配を有しながらも流路工内に土砂の異常堆積がなかったということは野尻川河口部にみられる緩勾配部がなかったこと、流路末端で1 m以上の段差を有していたことにより土砂の堆積基準面が存在しなかったためと考えられる。長谷川ではその後昭和53年に発生した泥流により（昭和52年の泥流で段差がなくなっていたため）河口部流路工内に土砂の堆積がみられている。本実験においても大隅工事事務所の計画した縦断勾配では（Case 5-7～5-10）一回の泥流では流路工内に土砂の堆積はみられなかったことから、平坦部や海水が土砂の堆積基準面として作用していたことが判明している（写真-15）。

以上から堆積基準面から考えても泥流の流れは掃流として取り扱えそうである。

④ 海での土砂拡散

野尻川河口部には大きな砂洲が形成されて

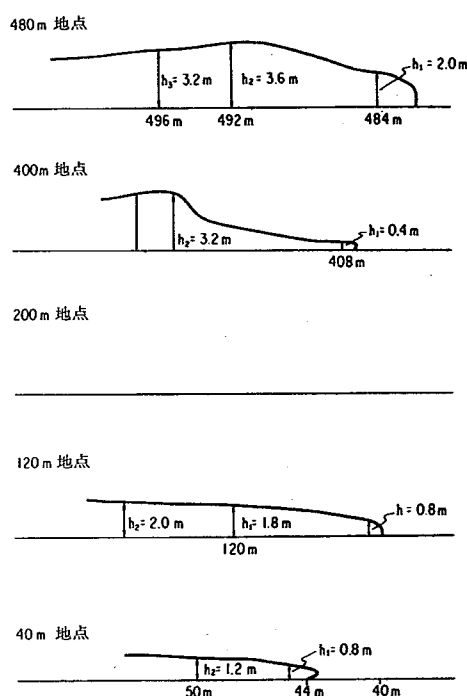


図-13-5 Case 5-10

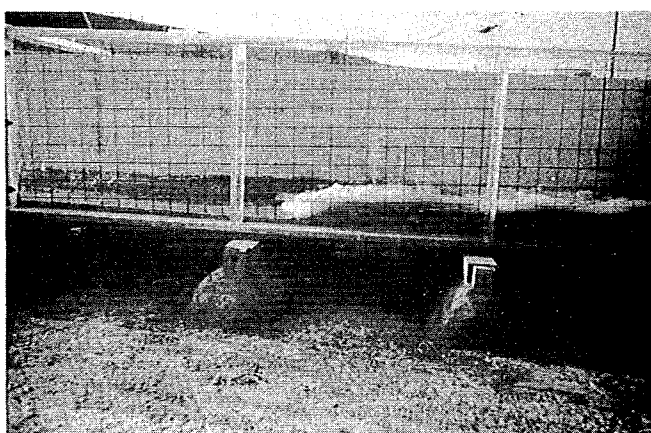


写真-15

流路末端部から堆積は上流へさかのぼる

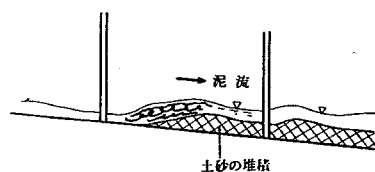


写真-15の模式図

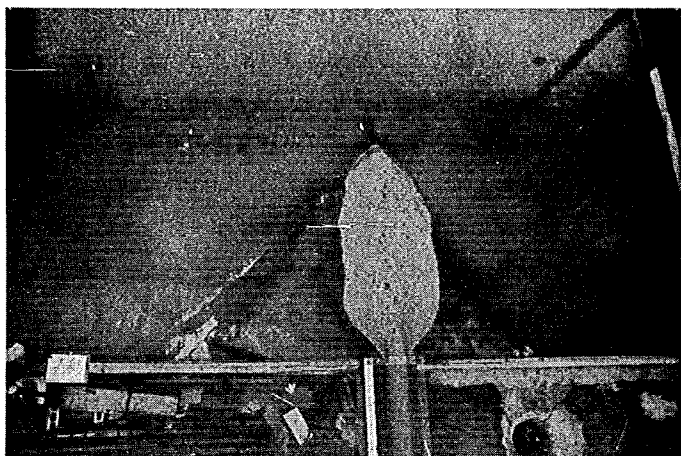


写真-16の模式図

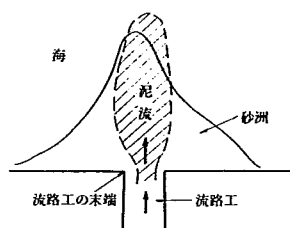


写真-16

(ケース2-2-A)

1 秒 後

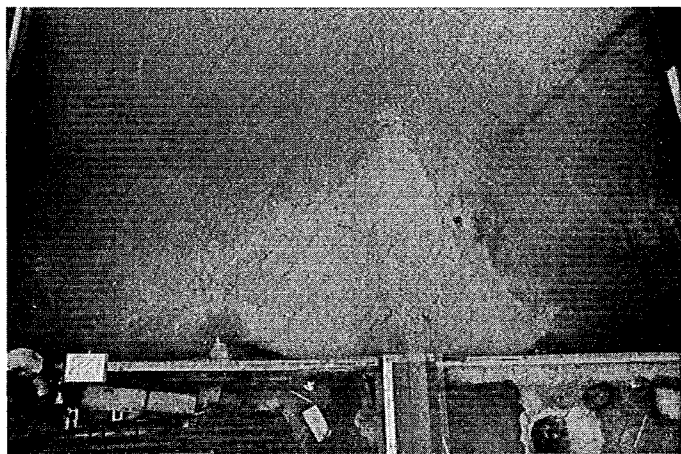


写真-17

(ケース2-2-A)

30 秒 後

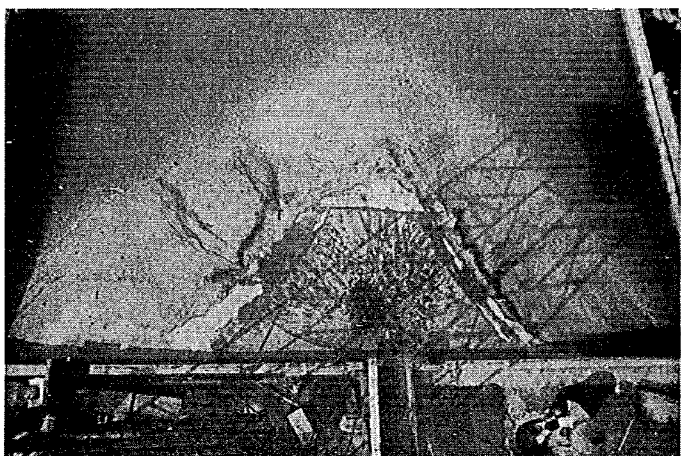


写真-18

(ケース2-2-A)

終 了 後

いて、この砂洲が泥流流下にどのような影響をおよぼすか、また、たとえば野尻川の法線形を変化させたとき河口部はどのように変化するか等を把握するため、泥流が河口部でどのような動向を示すかを検討した。写真(16~18)に示すように最初は直進性を有しているが洲の上での土砂堆積によりしだいに流れは拡散する。しかしより土砂の堆積が進行すると、土砂堆積部の最も低いところを流れ、場合によっては堆積土砂を流送してしまう例もあった。一般的にはいわゆる扇状地形の形成と同じ動向を示している。すなわち、河道を新たにに取りつけても、海岸部が土砂の堆積基準面となって(前述)そこから上流に向かって土砂堆積が開始されることが判明した。ただし、実験においては砂洲の部分固定床となっているため、時間的な土砂堆積の速度の相似にはなっていない。海岸部での土砂の堆積状況は図-14に示した。

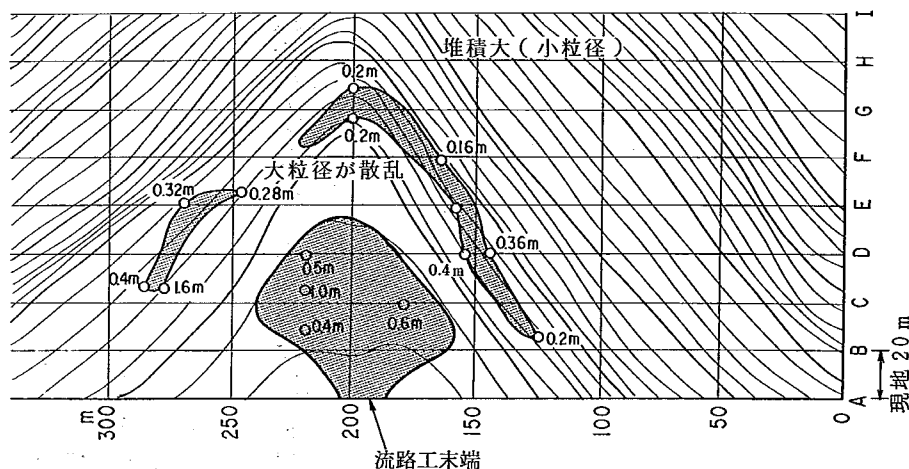


図-14 海中部での堆積状況 (Case 4-1-1)

5-3 泥流を安定して流下させるための検討

5-1, 5-2 から野尻川の火山泥流は防災対策上土石流として取りあつかうよりも掃流として取りあつかえることを述べた。そこで、次に問題となるのは、対策工法の検討となる。ここでは第1章でも述べたように構造物に関する検討は別の機会にゆずるとして、流路工計画上の検討をおこなった。

流路工計画の検討には1-2で述べた①~③までであるが平面形状と横断形状は一応現在の形状を適当と考えて計画縦断勾配の検討のみを実施した。

具体的には従来の流路工縦断形状では河口部周辺の勾配変化点が土砂の堆積基準面となるため

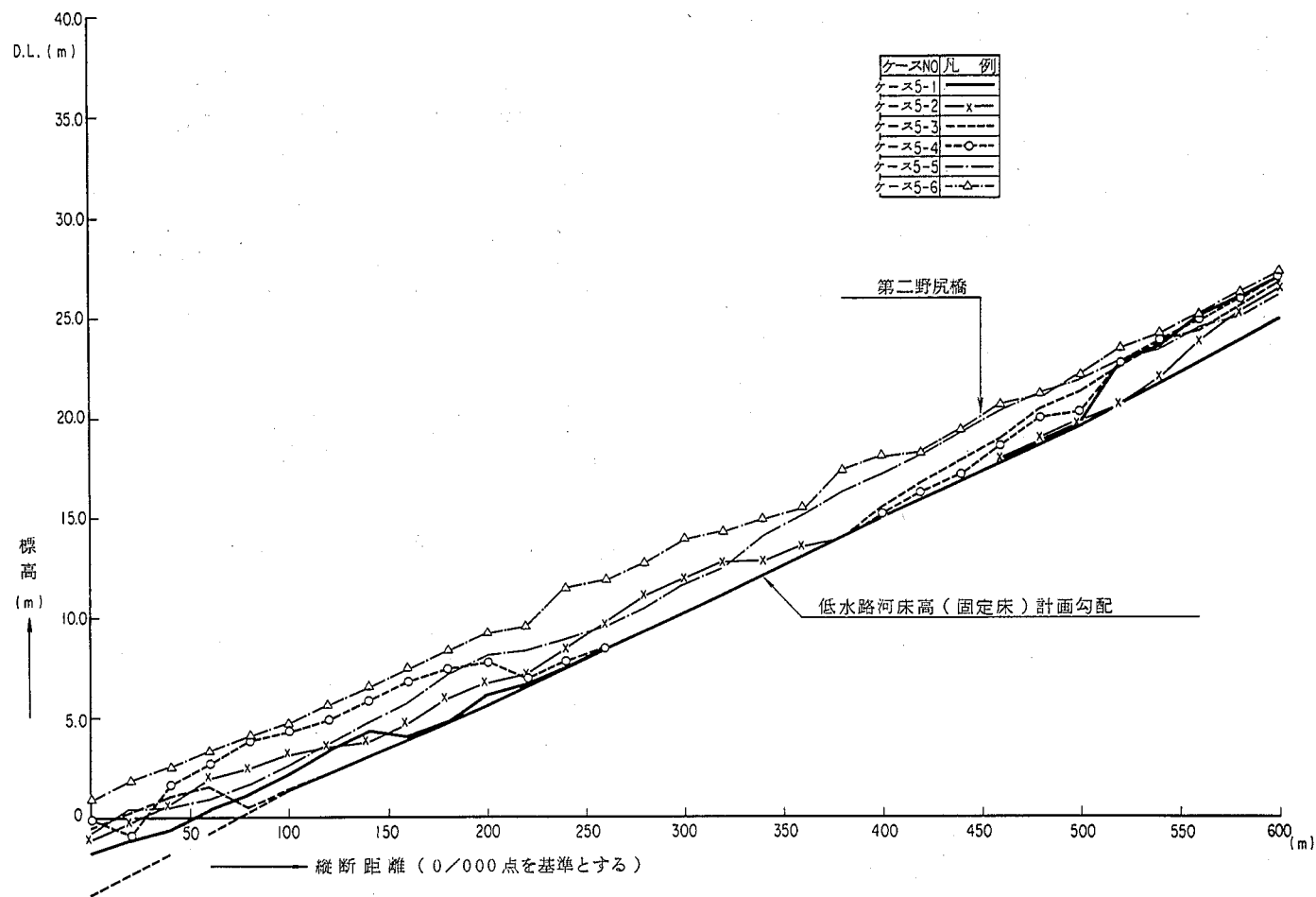


図-15 平坦部をなくした計画勾配による土砂堆積図

の緩勾配部をなくす方法として、

①流路工末端より200m地点を基準にそれより上流の平均河床勾配約1/20で海に至る縦断勾配（図-6）とする計画。

②大隅工事務所が防災対策として計画した案で、海岸部に段差（約1m、現地スケール）をつけ、流路は約1/25の一定勾配にする（図-6）計画。

について実験的に検討を加えた。両実験ともに流路の横断形状、平面形状は現状と同じとしている。また流路内に床固工のような落差工は設置していない。

①のCaseはいわゆる縦断勾配を考慮することだけで泥流を安定して流下させようとする考え方の検討である。前述のように海水による抵抗で土砂の堆積が開始されることは予想されるが、海中にも流路を設定することにより、より遠くまで海中に土砂を流しこむことが可能かどうかを調べた。

泥流の諸性質（表-4参照）は、資料がうまく得られず、詳細な分析はできなかったが、段波高、後続流速度などをみるかぎり、従来の流路工との差はみられない。

土砂の堆積状況は図-15に示してある。図からも判明するように、一回の泥流でほとんど従来と同じ堆積形を形成してしまうことがわかった。

海中での土砂の移動は図-16、写真-19で示すように海水中には流路長にして約180m程度までしか流下せず海中で土砂を分散させる効果を期待することはむずかしい。

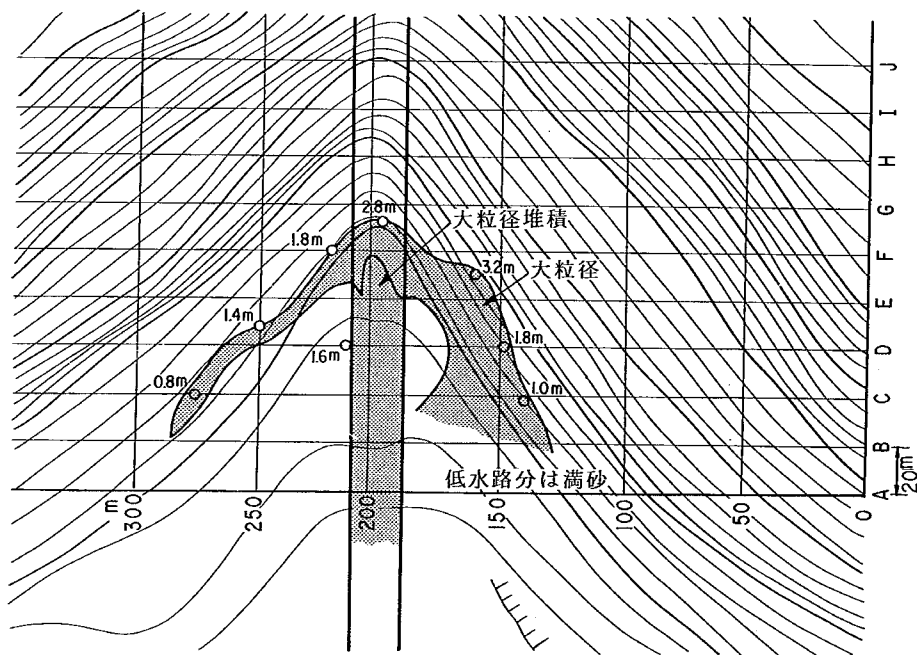


図-16 海中部での土砂堆積形状 (Case 5-6)

②の実験は、段差により、土砂の堆積基準面をなくし泥流を海岸部まで安定して流下させようとするもので、泥流の諸性質は従来の泥流との差異はみられない。ただし、一回の泥流ではほとんど流路工内での土砂堆積が見られず、条件を一定と仮定すれば最も泥流を安定して流下させる工法と考えられる。

しかし、上記の工法には次の三つの問題点が残る。

- (i) 河床高が現状よりかなり高くなる（国道橋付近で約4 m）ため、予想以上の泥流が流下してくると破堤し現在より土砂災害の危険度を高めることとなる。
- (ii) 実験では一回の泥流について安定して流れることが示されたが、堆積基準面となる海岸部の砂洲が国定床のため、砂洲の上の水理条件は現状とは逆に土砂を流送させやすくしている。
- (iii) 何回も泥流がある期間内に発生した場合、安全性はどうなるか

以上の問題点のうち、(i)は現在発生が予想される泥流の規模（特に最大規模）の予測が困難であるため、今後の検討事項とする。

(ii)は、砂洲の部分を移動床で実験をすることも考えられたが、砂洲すべてを移動床とするには無理があり、一部を移動床とすると、砂洲の強度の相似が困難なことから実験をおこなっていない。すなわち、今回の実験結果からは、危険側の考慮が必要であることを示している。

(iii)の何回の泥流まで安全であるかという問題を検討するべく、後続流量 $100\text{ m}^3/\text{s}$ （先端段波部なし）、土砂濃度20%、実験継続時間60分の実験を実施した。この実験による継続時間は、現地で継続時間約40分の泥流が20回発生したと同じ条件としている。

実験結果は最初の5回の泥流により、土砂の堆積面が流路末端の約1 mの段差をうめ、一部流路工内に土砂の堆積が開始された。一度上流側に堆積が上りはじめたが実験開始20分ごろ、砂洲の部分に流路が形成され流水により堆積土砂が再流送されはじめ、30分終了時（泥流にして10回分）には、流路内の堆積土砂がなくなった。引き続き、実験を継続したところ、砂洲の部分から、土砂の堆積が再開され48分頃には段差がなくなって、流路工内に土砂の堆積がはじまり、54分頃には河口より200 m地点より上流に土砂の堆積が上っている（写真20、21）。60分の実験終了時には図-17のような堆積形状を示し、段差による泥流基準面対策も、ある範囲の泥流にしか有効でな

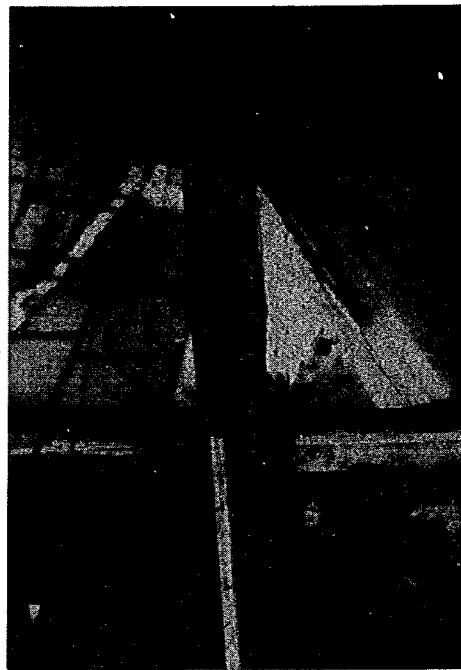


写真-19 掘削流路内の土砂堆積状況

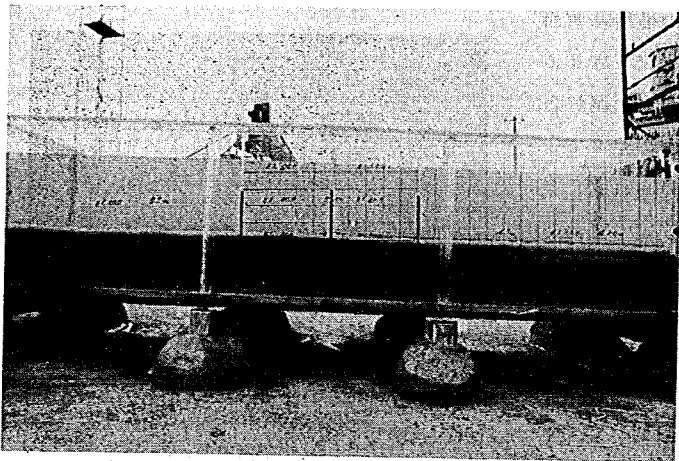


写真-20-1

Case 6 流路の堆積状況
実験開始54分 (泥流
18回分目)後の河床
(河口より200m地点)

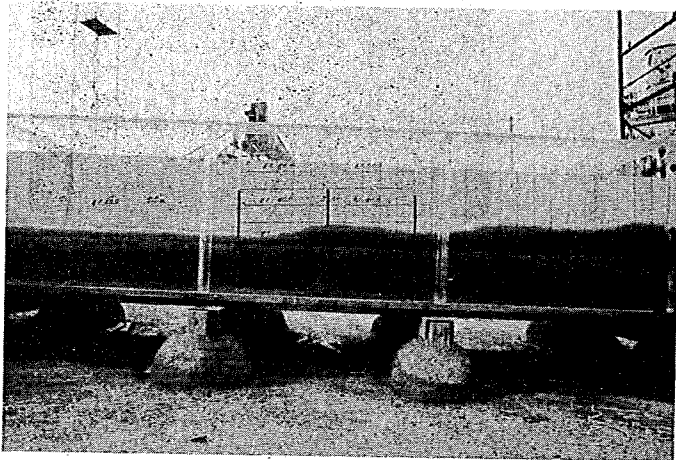


写真-20-2

実験開始後57分後
堆積が上流側にあがりは
じめている

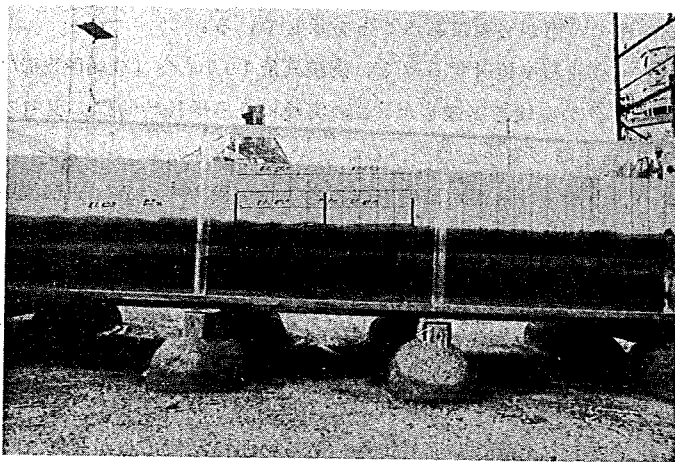


写真-20-3

実験開始後60分後
完全に流路内が堆積する

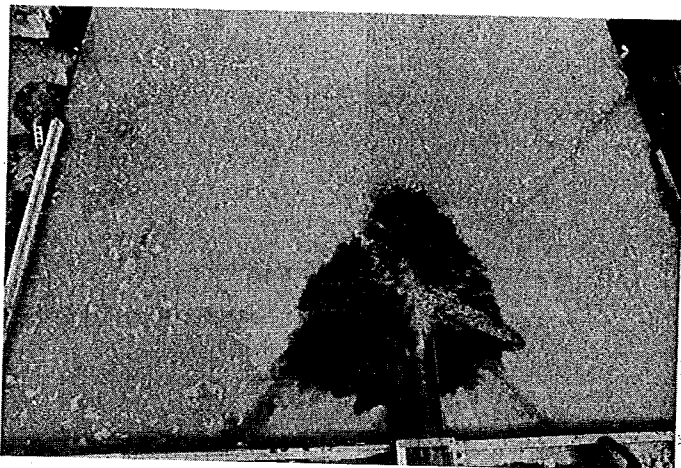


写真-21-1

海岸部での土砂堆積状況
(Case 6)

実験開始後

39分後 海岸部全面
に堆積し泥流は分散しは
じめる

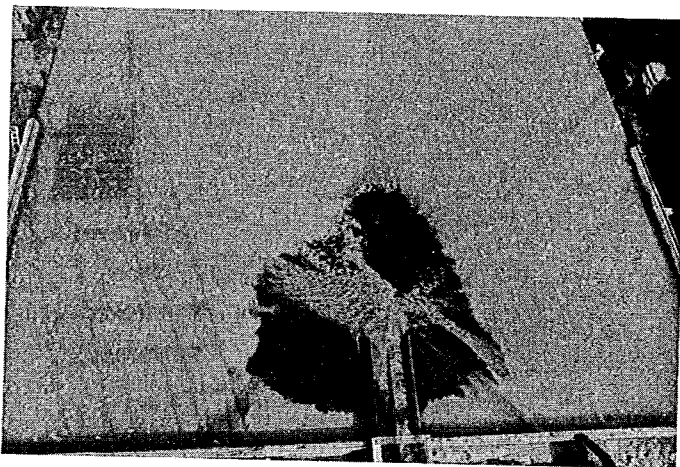


写真-21-2

45分後 堆積基準面が
流路末端にとどく



写真-21-3

48分後 泥流は堆積土
砂を洗掘して新しい流路を
形成するが、左にまがって
いるため堆積基準面点は上
流にあがる

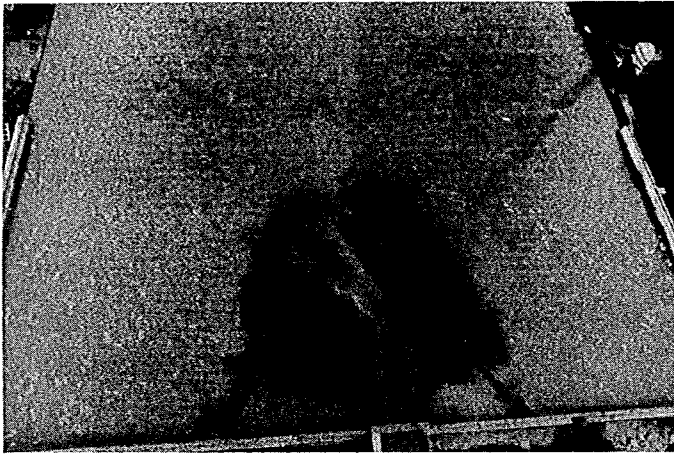


写真-21-4

54 分後 流路はやや
右にふれる
堆積基準面は上流にあが
る



写真-21-5

60 分後 流路は直す
ぐとなったが流路工部の
低水路は全面堆積して泥
流は高水敷をはしるため
堆積土砂は固定されている

いことを示した。

ではどれくらいの泥流は安全に流せるかという点、前半の実験においてみられた、堆積土砂が再移動することは、移動床の砂洲を有する現地では考えにくい。むしろ砂洲の部分の土砂の洗掘・堆積により、より早く段差が効果を失う危険がある。泥流流下量を $100\text{m}^3/\text{s}$ 、現地での継続時間を 40 分と考えて、早ければ 5 回程度、多くとも 10 回の泥流で、流路工は土砂堆積が異常となると考えられる。なお、参考までに流路末端の土砂の堆積平面図（図-18）および、そこでの粒度分析結果（図-19）を示した。

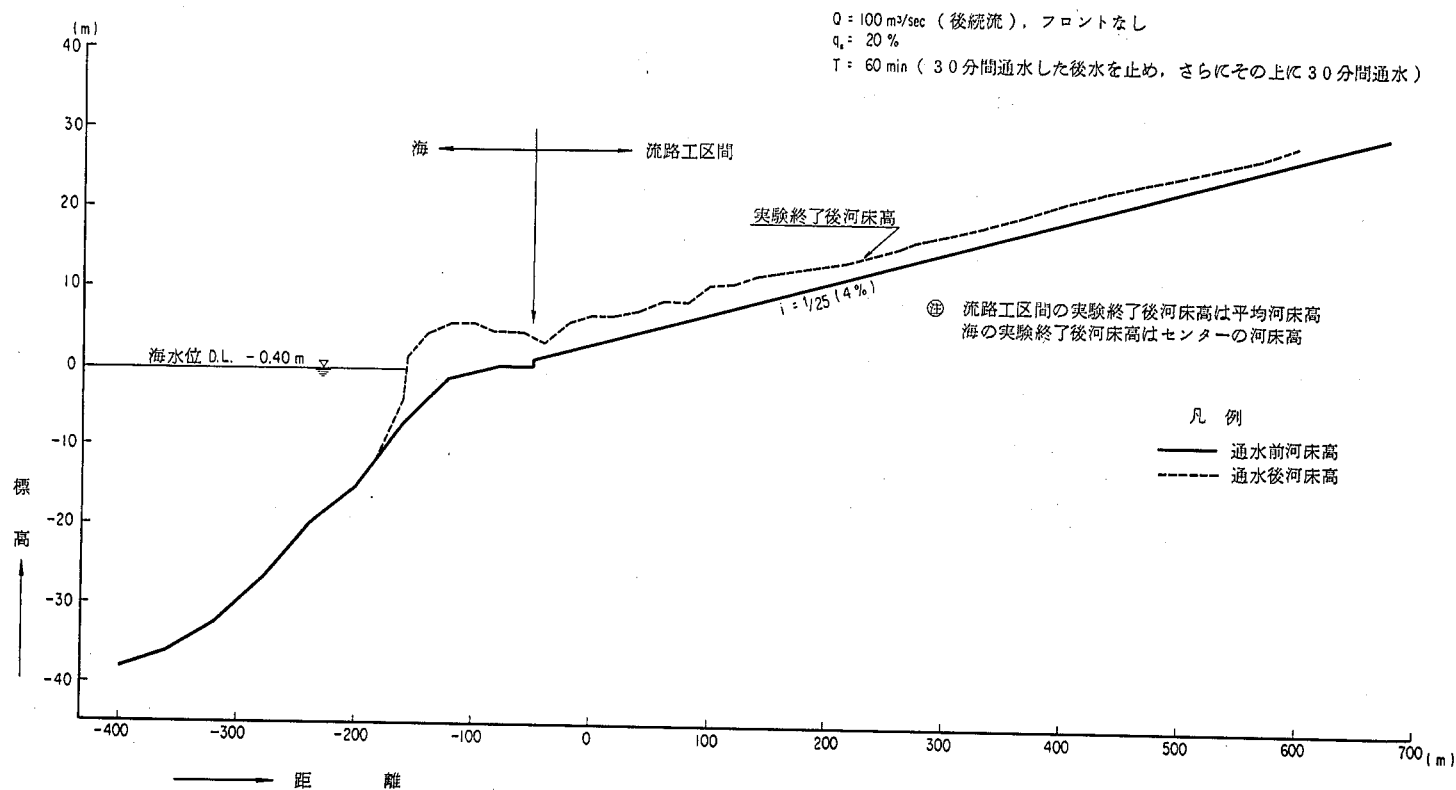


図-17 野尻川実験終了後河床高縦断面図

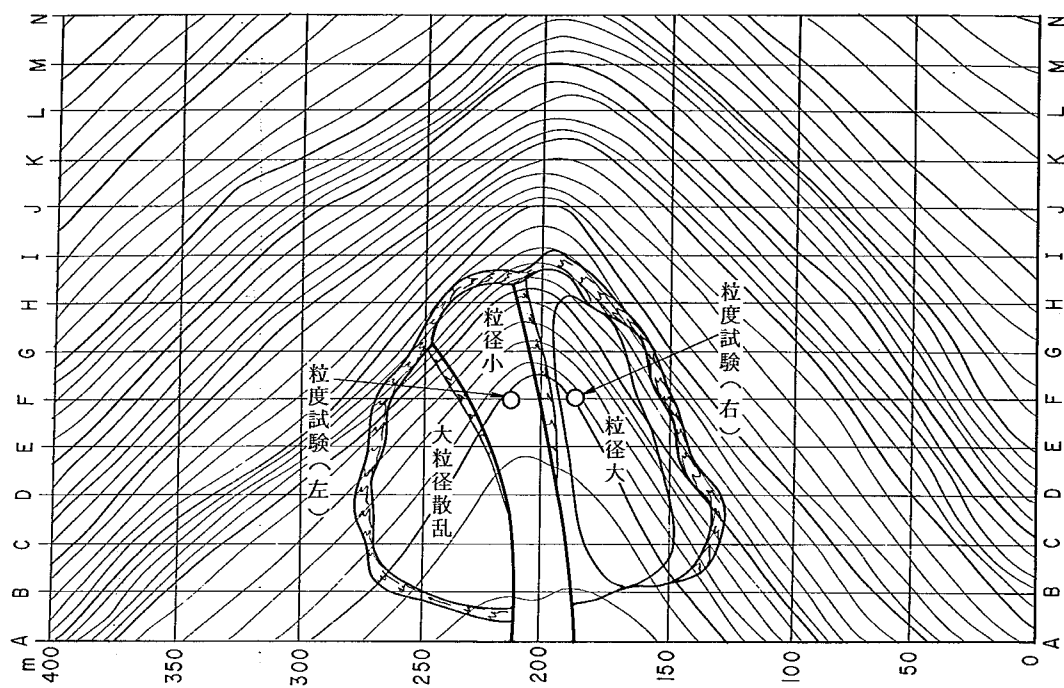


図-18 Case 6 実験終了後の堆積平面形

野尻川

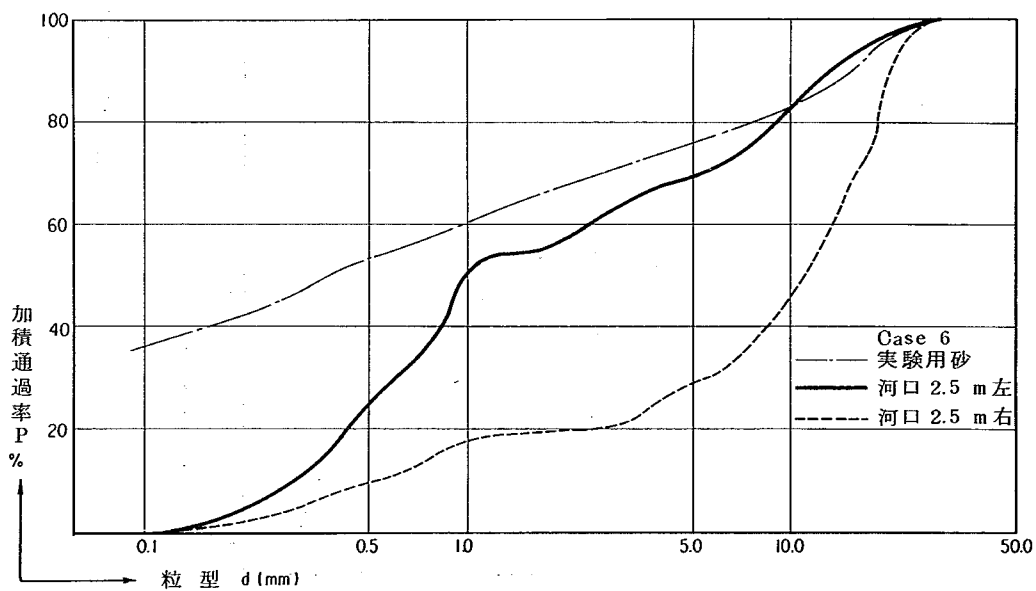


図-19 粒径加算曲線図

6. ま と め と 提 言

- ① 実験での泥流は流速、段波高、段波形状、単位体積重量、堆積形状、流況などからみて、現地で発生している泥流にはほぼ相似していると考えてよい。
- ② 泥流の諸性質（流速係数、流量と流速の関係、先端部の河床洗掘力のないこと、堆積開始点、流出土砂量等）から、野尻川に発生する泥流は流路工計画上、掃流としての取りあつかいが可能であろう。
- ③ 流路工計画上問題となる土砂の堆積基準面は緩勾配（約 $1/40$ よりも緩）が勾配変化を伴って存在する場合、海岸の砂洲、海水位等が考えられる。特に海での拡散は大礫が河口部で停止堆積するためあまり効果を期待できない。
- ④ 堆積基準面をなくし泥流をできるだけ海に流下させようという考えにおいては、流路工部は $4\% \sim 5\%$ の河床勾配で充分であり海水や海岸砂洲との接点を不連続にするため流路工下流末端部に段差をつける工法が有効である。
- ⑤ ④で述べた段差は少ない場合 $3 \sim 5$ 回、多くても 10 回程度の泥流（泥流規模は先端部流量 $100 \sim 250 \text{ m}^3/\text{s}$ 、後続流量平均 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 、継続時間 40 分、土砂濃度 20% 程度）によって、その効果を失なう。
- ⑥ 野尻川流路工にて、年間 10 数回 ~ 20 回も発生する泥流を全て安全無害に流下させるには無理であろう。すなわち、泥流を流下させるという工法としての流路工においても流路内の堆積を防止することは困難であり、流路工内の堆積土砂の排土等、維持管理が必要不可欠の要素となろう。

お　わ　り　に

これまでに、水理実験から得られた泥流対策に必要な諸元の結果ならびに考察を加えてきた。しかし、火山泥流に対する研究は最近になってはじめられたばかりで、現在の段階では理論上の定説はない。今後より研究がすすみ、泥流の理論的解明が必要である。そしてその結果をもちいて泥流の諸性質を再検討し、泥流対策の資料とする必要があろう。

また現状では、とりあえず一回の泥流の量的把握をし、その泥流がどれくらいの期間（時間）に何回ぐらい発生を防災工事の一応の目安とするかを決定する必要がある。それから、流路工による泥流対策の概要が決定されるであろう。この他、今回実験的に検討をしなかった事項に泥流による工作物への影響の検討が必要である。具体的には、泥流による衝撃力、摩耗力等の検討である。

以上の検討および本実験報告が桜島野尻川の泥流対策の基礎的資料となることを願って結びとしたい。

参 考 文 献

- (1) 山内 修；土石流に関する調査研究の現状 土技資 18-5 S.51.5
- (2) 田畑茂清，市ノ瀬栄彦；尾鷲土石流災害発生の要因について 新砂防86 S 48.1
- (3) 村野義郎；十勝岳の土石流について 新砂防59 S 40.12
- (4) 榎本政雄，榎本 真，中島 彬；土石流調査について 第26回建設省技術研究会報告 S 48.12
- (5) 田原正清；桜島の土石流とその調査 新砂防99 S 51.4
- (6) 水原恒士；インドネシアの「幻」 新砂防104 S 52.7
- (7) たとえば 谷口義信；土石流の基礎的研究 宮崎大学農学部演習林報告第7号 S 49.3
- (8) 肝属川工事々務所；桜島土石流模型実験 S 51.5, 51.10
- (9) 歳田正夫；桜島の砂防事業 土木技術 32巻10号 S 52
- (10) 池谷 浩；土石流の分類 土技資 20-3 S 53.3
- (11) 現地観測値（田原，歳田の論文）の他 V.T.R から筆者らの読みとり値を含んでいる。
- (12) 土木学会・水理公式集 P155 S 46
- (13) 池谷 浩，米沢谷誠悦；土石流危険区域設定に関する考察 土技資 19-12 S 52.12
- (14) 泉 岩男，池谷 浩；土石流危険区域調査および警戒避難基準雨量の想定方法に関する一試案
新砂防108 S 53.7