

6.5 各水路の河床低下量の予測

分流施設の安全性を考えた場合、構造物を設計する上で河床低下量を予め予測しておく必要がある。ここでは、水平縮尺1/150、鉛直縮尺1/37.5（歪み度4、粒径歪み1.835）の条件の流砂量式の検討実験で得られた修正流砂量式を用いて、各水路の河床低下量の予測を行った。対象流量は、3次元歪み模型の実験から得られた最大の分流量（約70%）に基づき、計画流量 2,500m³/secの70%流量（1,750m³/sec）とした。対象流量の継続時間は一洪水の総量（現地量：約60,000,000m³）を対象流量で除した時間として各流路の河床低下量について計算した（対象流量の継続時間は現地量で34,300sec、歪み模型上で1,400secに相当する。ただし、時間縮尺はフルードの相似則を使用しており $t_r = \alpha h_r^{1/2} = 24.5$ である）。なお、本計算に使用する流砂量式は上記の歪み模型上で成立する式であるので、計算はまず歪み模型上での河床低下速度ならびに河床低下量を求めて現地量に換算した。計算条件は表-6.9のとおりである。

表-6.9 計算条件

対象水路	対象流量	流路幅	流路長	河床勾配
北側水路	50.8ℓ/s (1,750m ³ /s)	1.60m (240m)	18.0m (2.7km)	1/63 (1/250)
南側水路	50.8ℓ/s (1,750m ³ /s)	1.88m (282m)	16.0m (2.4km)	1/55 (1/220)
エスケープ	50.8ℓ/s (1,750m ³ /s)	1.38m (207m)	18.67m (2.8km)	1/54 (1/215)

下段の（ ）内は現地量を示す。

<計算条件>

- ①各流路の河床低下量は、対象流量が1本の流路に集中した場合を想定する。
- ②各流路に流入する流砂量は、模型取り入れ範囲上流端の流路において動的平衡河床が再現できる流砂量とし、下に示す予備実験から得られた修正流砂量式からの流砂量とする。

$$q_s / u_* d = 8.37 \tau_*^{1.78}$$

- ③計算に使用する流路の幅は、北側流路と南側流路は対象とする流量50.8ℓ/s（現地流量 1,750m³/s）が上流から流下したときに、流量と流砂量が均等に各流路へ流入した場合に平衡河床が維持できる幅（計算値）とし、エスケープは

現況の流路幅を用いる。

④流路長は各流路が分岐する断面から模型取り入れ範囲の各流路下流端までの距離とする。表-6.9に示す条件と上記の仮定から各流路に流れが集中した場合の河床低下量を表-6.10に示す。なお、流入砂量と流出砂量は空隙率 $\lambda = 0.4$ を考慮した値である。

表-6.10 河床低下量

対象水路	流入砂量	流出砂量 ¹⁾	河床低下速度 ²⁾	河床低下量 ³⁾
北側水路	0.66 l/s 空隙を含む砂の量	3.03 l/s	-0.0067cm/sec	9.4cm (3.5m)
南側水路		3.03 l/s	-0.0067cm/sec	9.4cm (3.5m)
エスケープ		3.50 l/s	-0.0110cm/sec	15.4cm (5.8m)

¹⁾本検討では、仮定の③で記したように北側流路と南側流路は河床の平衡を維持するように各河床勾配に見合った幅を設定した。そのために北側流路と南側流路での摩擦速度は、流量が等しければ等しくなる。したがって今回の検討では流出砂量は等しくなっている。

²⁾河床低下速度は下記のように計算した。

$$(\text{河床低下速度}) = \{ (\text{流入砂量}) - (\text{流出砂量}) \} / (\text{流路面積})$$

³⁾河床低下量は下記のように計算した。

$$(\text{河床低下量}) = (\text{河床低下速度}) \times (\text{対象流量の継続時間:1,400sec})$$

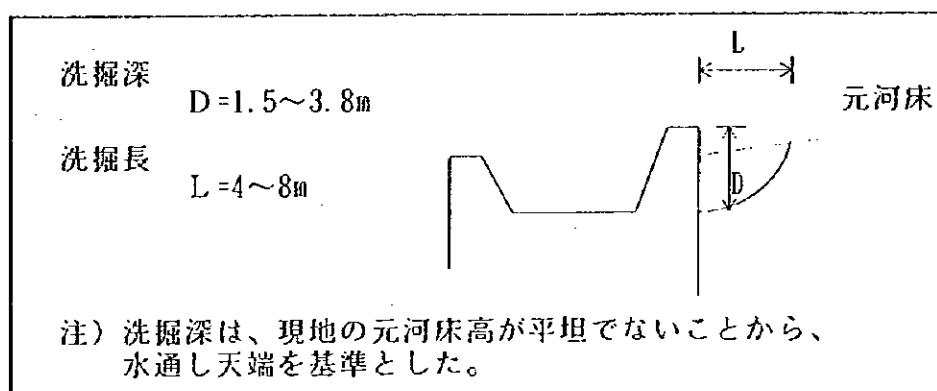
⁴⁾下段の()内は現地量。

6.6 分流施設周辺の洗掘対策に関する考察

(1) 分流堰直上流側の局所洗掘

分流堰の本堤は、流れを均等化するために越流部は元河床よりも平均で0.5m突出するように計画されている。このため、堰の直上流では二次流が発生して局所的に洗掘が生じる。この洗掘は全幅で生じるのではなく、堰上流の水理条件によって異なり、また洗掘の規模も場所によっても異なるため、洗掘範囲を予測することは難しい。この洗掘は、上流から土砂が到達した時点で埋め戻され、その後は堰上流側の洗掘は消える。

堰上流側の洗掘規模は次のとおりである。



(2) 分流堰直下流の局所洗掘

図-6.9に堰下流での最大洗掘深の時間的变化を、図-6.10に堰下流での最大洗掘長の時間的变化を示す。

図より、洗掘深と洗掘長は分流堰の下流側の河床低下量に伴って大きくなる傾向が認められる。分流堰の下流側で河床低下が生じない条件では、最大洗掘深は2.5m程度、最大洗掘長は15m程度であるが、水路内の河床変動によって河床低下が進行すると、洗掘深と洗掘長は急激に増加する。しかし、前庭部に護床工（蛇かご）を設置すると、河床低下量が同一条件（3.75m）の場合、最大洗掘深は1/2以下、最大洗掘長は1/6以下（ただし、護床工の長さ35mを加えると大差はない）となる。

分流堰下流の河床低下が進行すると洗掘規模が大きくなる原因は、分流堰通水後の流向ベクトルが河床低下によって鉛直方向に変わる（落下水となる）ため

である。したがって、分流堰を守るためには護床工を設置して流向ベクトルをなるべく水平方向に維持することが必要となる。しかし、下流の河床低下や局所洗掘によって屈とう性のある護床工は沈下するが、その影響が分流堰に及ばないような護床工の長さが必要となる。

ここでは、必要な護床工の長さを次のように考えた。

図-6.11 は最大洗掘深が生じる地点と分流堰の越流部を結んで流向ベクトルを示したものである。図より、河床低下が生じていない状態では、流向ベクトルは水平方向が鉛直方向に比べて卓越した形になっているが、河床低下が生じると流向ベクトルは鉛直方向が卓越するため洗掘深が大きくなる。このことから、護床工の長さは下流側で河床低下が生じて護床工が沈下したとしても、河床低下前の流向ベクトルと交差する長さ以上を取っておけば安全と思われる。したがって、6.5項で検討した最大の河床低下量を5.8mとすると、護床工の長さは18mとなるが、さらにその直下流で2m程度河床洗掘が予測されるため、護床工の長さは最低25mは必要となる。

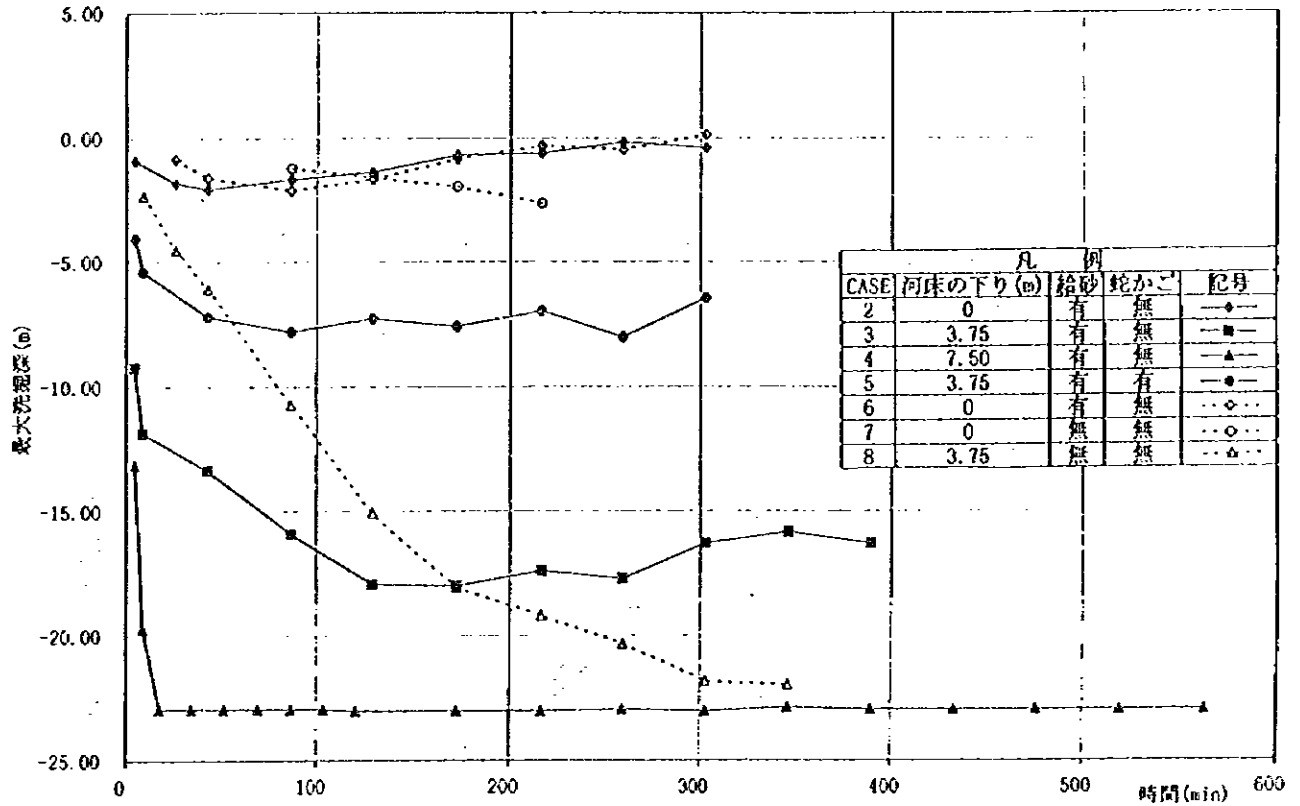


図-6.9 堰下流での最大洗掘深の時間的变化

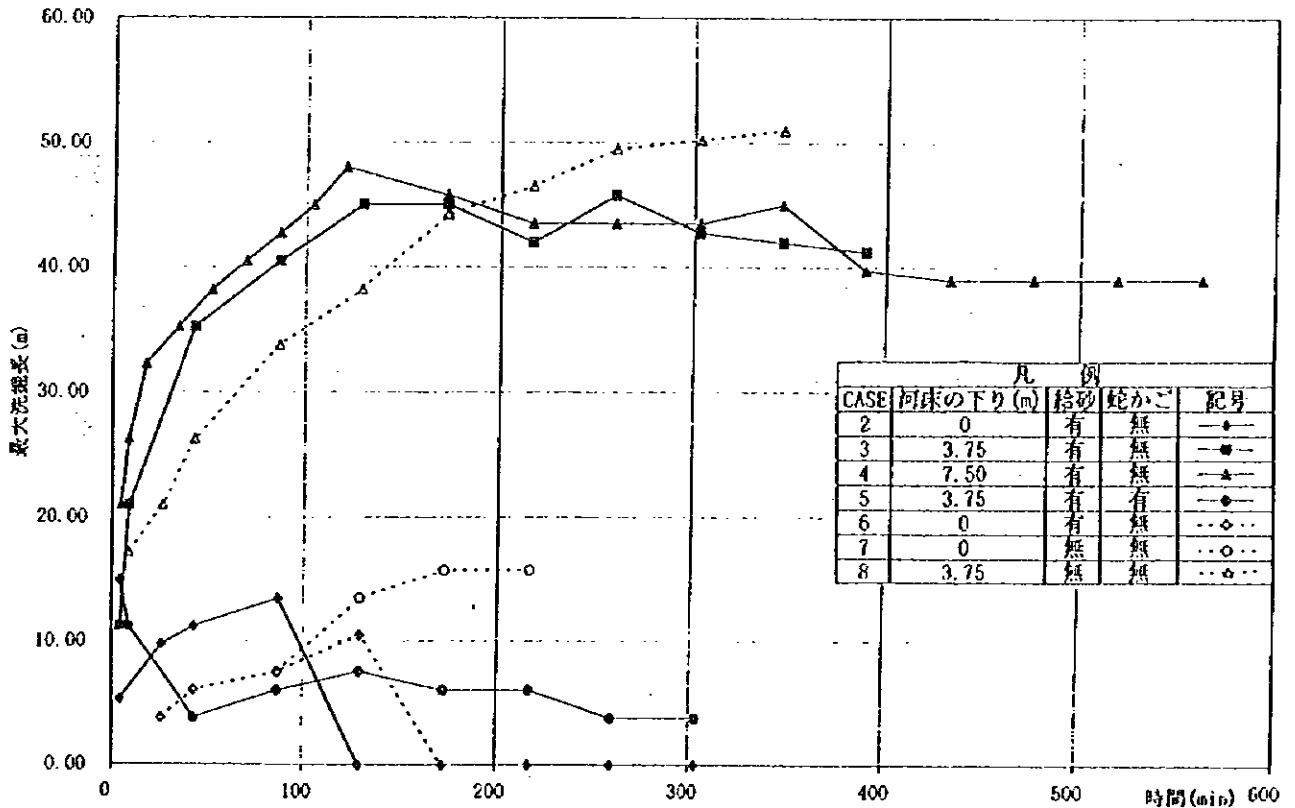


図-6.10 堰下流での最大洗掘長の時間的变化

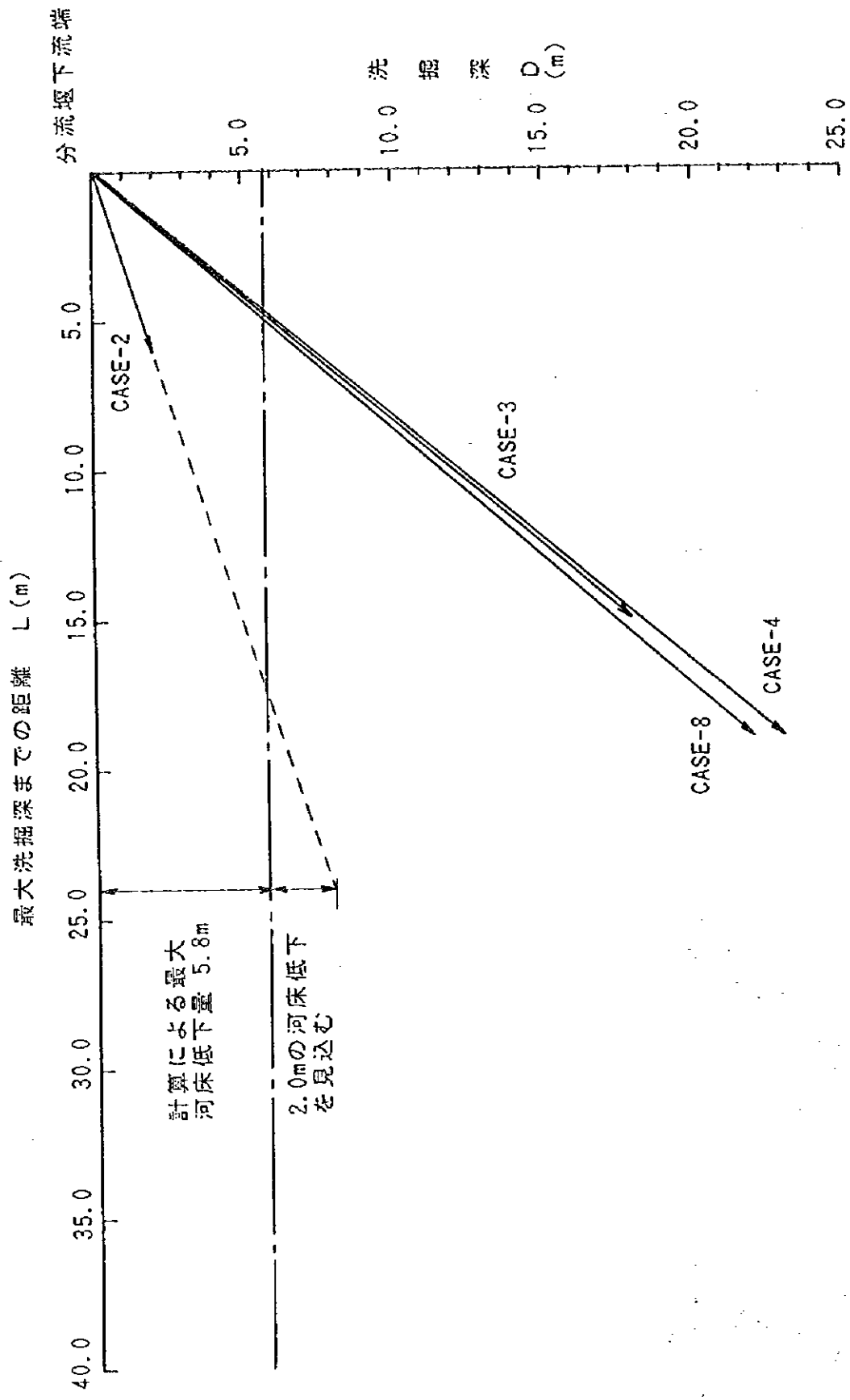


図-6.11 分流堰直下流の流向ベクトルの比較

第7章 まとめ

7.1 歪み模型上の流砂量式

- ① 歪み模型上で、河床を動的平衡状態に維持するための給砂量は次式によって得られることが確認された。

$$q_s / u_* = 8.37 \tau_*^{1.78}$$

ここに、 q_s ; 単位幅当たりの流砂量 ($\text{m}^3/\text{sec}/\text{m}$)

u_* ; 摩擦速度 ($= (ghI)^{0.5}$, m/sec)

d ; 河床平均粒径 (m)

τ_* ; 無次元掃流力 ($= u_*^2 / sgd$)

s ; 河床材料の水中比重 ($= (\sigma / \rho - 1)$, g/cm^3)

- ② 3次元歪み模型の対象流量 $1,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ で、模型上流区間 ($I=1/143$) の河床を動的平衡状態に維持するための給砂濃度は1.1% (空隙率 $\lambda=0.4$ を含む) である。

7.2 分流施設の機能比較

ミタワン地区では、洪水により灌漑用水を確保する洪水灌漑が伝統的に行われており、洪水が重要な水資源となっている。しかし、この地区では洪水を制御する施設が完成していないため、毎年のように洪水による農業の被害が発生しており、地域住民にとって洪水被害は深刻な問題となっている。

このため、灌漑のための安定した水量の確保と洪水による被害を減少させることを目的に分流施設の検討を行った。設計流量は、下流の主要な支線水路の流下能力を考慮して $1,500 \text{ m}^3/\text{sec}$ となっている (表-7.1、図-7.2参照)。計画流量と設計流量及び分流割合は下記のとおりである。

① 計画ピーク流量	2,500 m^3/sec (25年確率流量)
② 設計流量	1,500 m^3/sec (5年確率流量)
1,500 m^3/sec 時の幹線水路への分流量	
北側水路 : 南側水路 : エスケープ = 450 m^3/sec : 600 m^3/sec : 450 m^3/sec	
= 30% : 40% : 30%	

ここでは、実験で検討した分流施設の配置と分流機能の比較を表-7.2にまとめてみた。この結果、分流量は扇頂部の河床変動の影響を受けて周期性を持って変化することが明らかとなった。効果的な分流施設の基本形状は、ケース3のように扇頂部に堰を設置して河床をある程度固定し、導流堤によって各水路まで水を導く方法が適切と考えられる。この形状の特徴は、扇頂部での急激な河床変動が抑制されるため河床変動の周期が長いことであり、次に洪水が発生した場合に流れが集中する水路の予測が容易なことである。言い換えれば、堰の上流側の河床整理の維持管理が適切であれば、分流機能は恒久的に維持できると言える。

今回の実験では、現地の土砂の移動現象を模型で再現するために歪み模型を用いて検討を行った。このため、時間縮尺の考え方としては流量を基本としたフルードの相似則対応時間と、土砂量（河床変動）を基本とした河床変動相似則対応時間のどちらを基本とするのか判断が必要となるが、前述のように分流量は河床変動の影響を強く受けることから、この場合には河床変動相似則対応時間で考える方が適切と思われる。

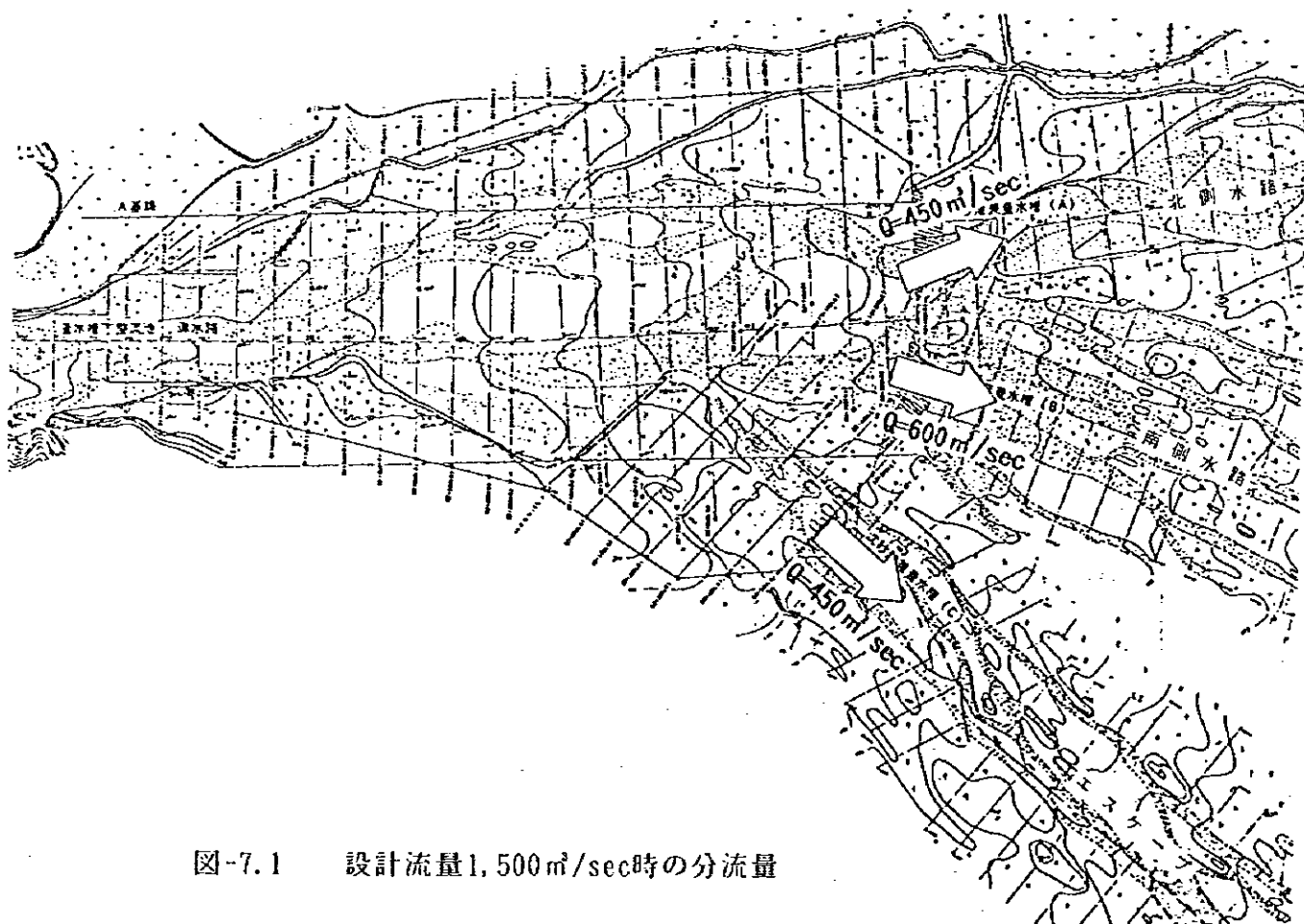


図-7.1 設計流量1,500 m³/sec時の分流量

表-7.1 主要水路（ワー）の流下能力の算定

幹線水路名	水路の名称	水路幅 (m)	深さ (m)	河床勾配	マンニングの粗度係数	流速 (m/s)	流量 (m ³ /s)
北側水路	クルハワー	15	1.5	1/300	0.025	2.68	60
	モルティワー	40	1.5	1/300	0.025	2.88	173
	ベフワー	25	1.5	1/300	0.025	2.81	105
	シャルティワー	100	0.8	1/300	0.025	1.97	158
南側水路	グレイルワー	30	1.0	1/300	0.025	2.21	66
	シラージュワー	300	0.8	1/300	0.025	1.98	476
エスケープ	バツカルワー	150	0.8	1/300	0.025	1.98	237
	ガネハルワー	150	0.8	1/300	0.025	1.98	237
合計							1.513

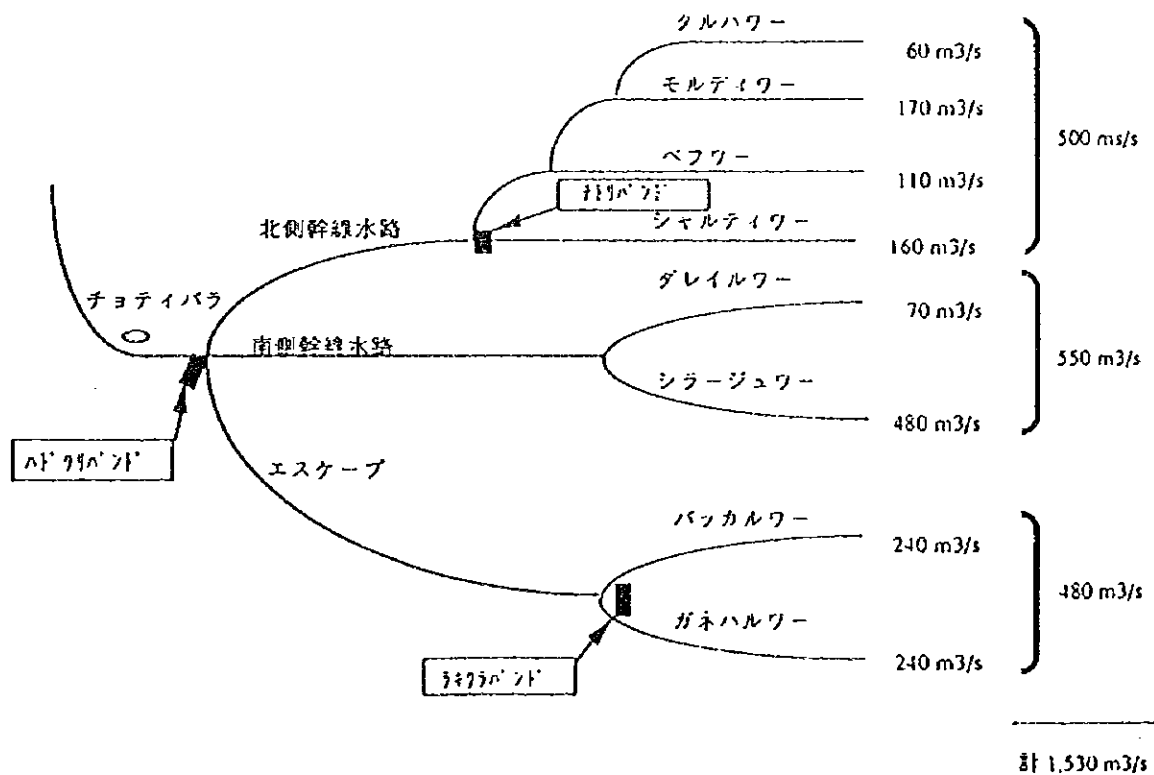


図-7.2 主要支線水路（ワー）の流下能力水系図

表-7.2

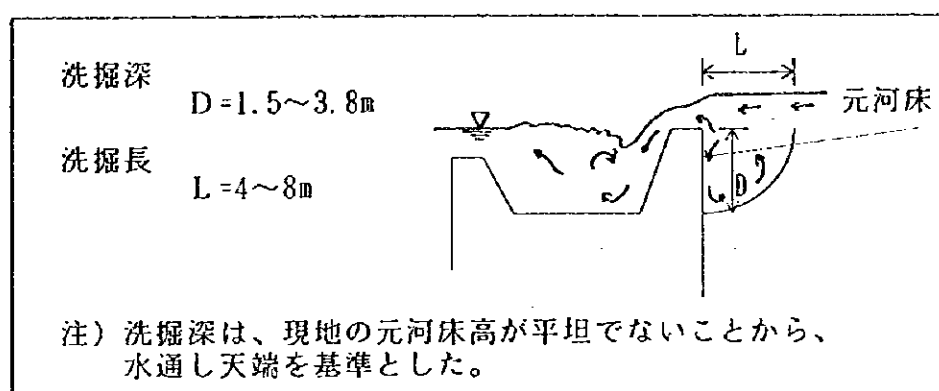
分流施設の配置と分流機能の比較検討

	ケース 2 無 施 設	ケース 3 分流堤 + 導流堤	ケース 4 導 流 堤	ケース 5 分 流 堤
施設配置図				
分流量の時間変化	<p>フルード相似則対応時間: 2年超過確率洪水 2.5回分に相当</p> <p>河床変動相似則対応時間: 2年超過確率洪水 6.25回分に相当</p> <p>ケース 2 (無施設)</p>	<p>フルード相似則対応時間: 2年超過確率洪水 2.5回分に相当</p> <p>河床変動相似則対応時間: 2年超過確率洪水 6.25回分に相当</p> <p>ケース 3 (分流堤 + 導流堤)</p>	<p>フルード相似則対応時間: 2年超過確率洪水 2.5回分に相当</p> <p>河床変動相似則対応時間: 2年超過確率洪水 6.25回分に相当</p> <p>ケース 4 (導流堤)</p>	<p>フルード相似則対応時間: 2年超過確率洪水 2.5回分に相当</p> <p>河床変動相似則対応時間: 2年超過確率洪水 6.25回分に相当</p> <p>ケース 5 (分流堤)</p>
分流機能	<p>無施設の場合には、上流の河床変動によって流向が左右されるため、分流量を制御することは難しい。下流の主要支線水路（ワ）の流下能力を考えると、設計流量を 1,500 m³/sec 前後に制御できなければ、下流域では氾濫が生じることになる。上図の河床変動相似則対応時間で考えれば、2年確率洪水であれば5回の洪水が発生すると3本の水路の内どこかで毎回氾濫が生じることが予測される。</p>	<p>この形状の特徴は、分流量の変化すなわち河床変動の周期が長いことである。上図の河床変動相似則対応時間で考えると、施設完成後は2年確率洪水であれば2回程度は所定の分流量に分流することができる。また、河床変動の周期が長いので、流れが集中する水路の予測が容易である。さらに、堰は比較的川幅の狭い場所に設置されるため、河床整理を行うことにより分流量を一定に保つことが可能と思われる。</p>	<p>分流量の変化すなわち河床変動の周期は無施設に比べて長い。しかし、河床高を固定する施設がないため、施設完成時からどの水路に流れが集中するかの予測が難しい。最大流入量は無施設に比べると小さく、流入量を制御する効果は認められるが、3本の水路の内どこかでは下流域で氾濫が生じることが予測される。</p>	<p>分流量の変化は、無施設の状態に似ている。これは、流向は扇頂部の河床変動（首振り）によって決まるため、この位置に堰を設置するだけでは分流機能は期待できない。最大流入量も無施設状態に近い。</p>
評価	<p>無施設のままでは洪水時の氾濫は免れないため流域の安定した耕作は難しく、何らかの対策が必要である。</p> <p style="text-align: right;">×</p>	<p>分流機能を維持するためには、堰上流の河床整理などの維持管理が必要となるが、分流機能は他の形状に比べて最も高い。</p> <p style="text-align: right;">○</p>	<p>無施設に比べると、分流量は幾分平均化されるが、確実性が高いとはいえない。</p> <p style="text-align: right;">△</p>	<p>分流機能が低く、投資効果は低い。</p> <p style="text-align: right;">×</p>

7.3 分流堰上下流の護床工

(1) 分流堰直上流側の局所洗掘に対する対策

分流堰の水通し天端高は、流れを平均化させるため元河床高から平均で0.5m高く計画されている。このため、洪水が流下すると堰の直上流側で二次流が発生し、局所洗掘が生じる。局所洗掘が生じる位置は固定されておらず、河床地形、土砂の移動状況、流速などによって変化するため洗掘範囲を特定することは難しい。抽出実験から得られた分流堰直上流の洗掘規模は下記のとおりであり、洗掘長から考えると分流堰直上流の護床工の長さ（L）は10m程度は必要と思われる。



(2) 分流堰直下流の局所洗掘に対する対策

抽出実験の結果、分流堰下流の河床高と分流堰の垂直壁の水通し高とがほぼ一致（上流からの流入土砂量が適切で河床のバランスがとれている状態）している場合には、洗掘深は2m程度である（図-6.9参照）。ところが、河床のバランスが崩れて下流側の河床高が低下すると洗掘深は急激に増加（18～23m）するため、分流堰が破壊する恐れがある。これを防ぐためには、分流堰の下流側に護床工を設置して、分流堰を守る必要がある。6.5項で検討した各水路の河床低下量の予測では、エスケープの5.8mが最も大きいことから、護床工の長さは下流の河床高が5.8m低下しても分流堰を守ることができる長さが必要となる。

ここでは抽出実験の結果（図-6.11）を参考に、分流堰下流の河床が5.8m低下した場合に必要な護床工長を求めた（図-7.3参照）。図より、分流堰完成後の河床低下の可能性を考えると、護床工の長さは45m以上必要と思われる。

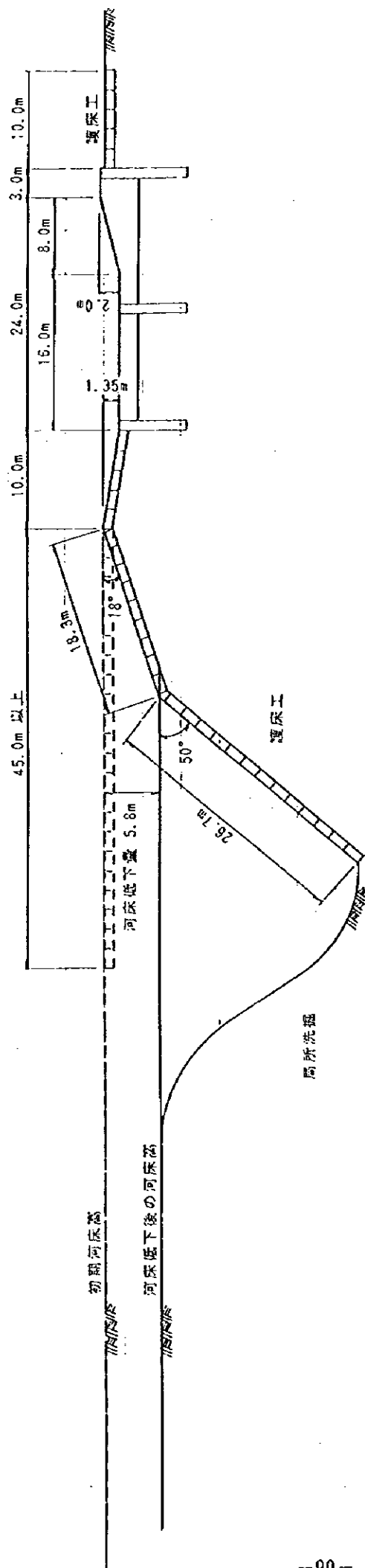


図-7.3 分流堰上下流の護床工の長さ

7.4 導流堤沿いの根固工

導流堤沿いの洗掘は、流れが蛇行し始めると顕著になる。実験の流況から判断すると、導流堤沿いの洗掘深は水路全幅を流下するような大きな洪水よりも、水路幅よりも狭い幅で蛇行しながら流下するような中規模洪水の方が大きくなるようである。このため、3次元歪み模型で対象とした2年確率規模の洪水 ($Q=1,000\text{m}^3/\text{sec}$) 程度が危険であると思われる。

歪み模型では、実際の現象に比べて流れの集中が顕著になる傾向があるが、施設対策を行う場合には危険側を想定することから、ここでは、最大洗掘深3.0m、水衝部の最小流路幅30mに対して施設対策を考えてみた。

最大洗掘深を3.0m、砂の安息角を 30° と仮定すると、図-7.4より根固工の幅は最低でも5.2m ($\approx 6.0\text{m}$) は必要となり、これに余裕を加えて10m程度は必要と思われる。

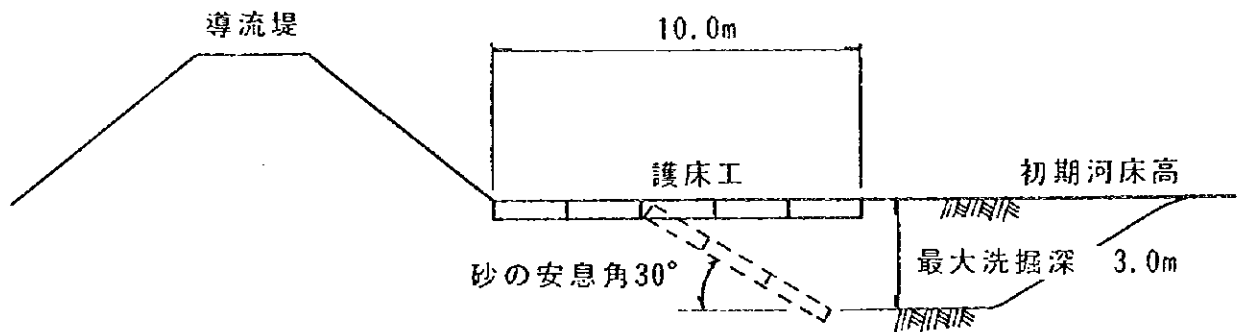
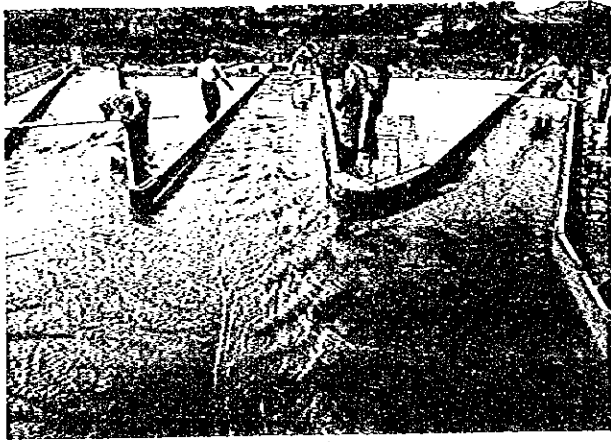
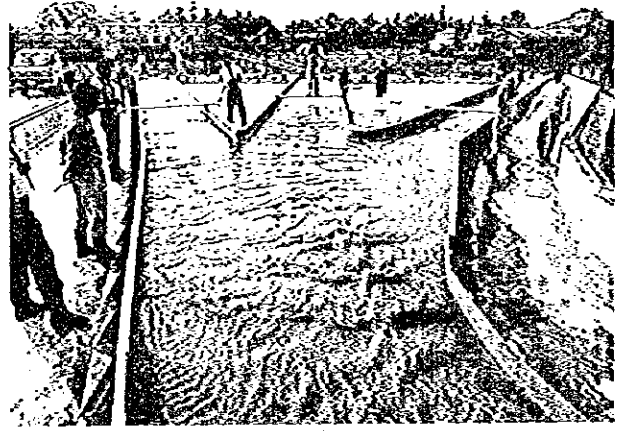


図-7.4 導流堤沿いの根固工の設置

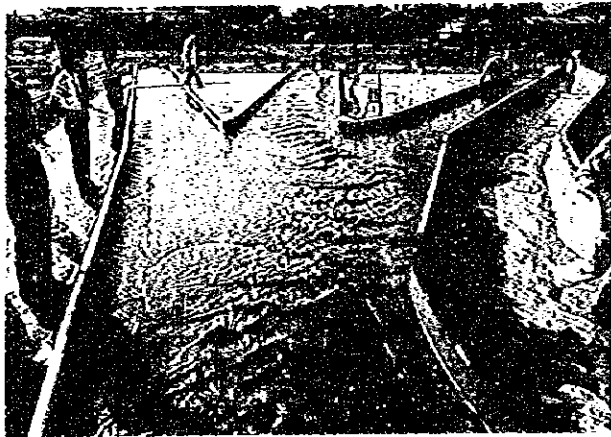
3 次元歪み模型実験流況写真



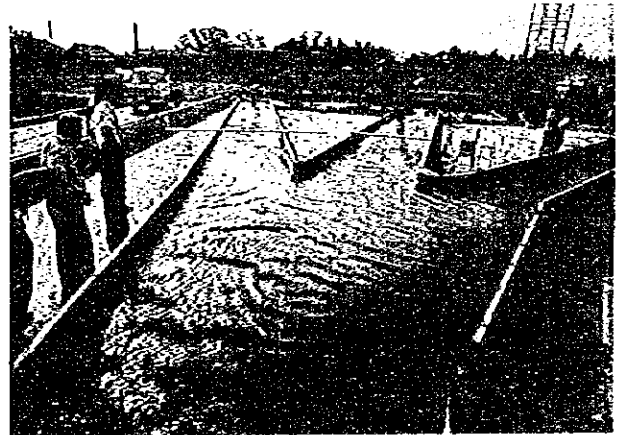
① 9分、南側水路に流れが集中する。



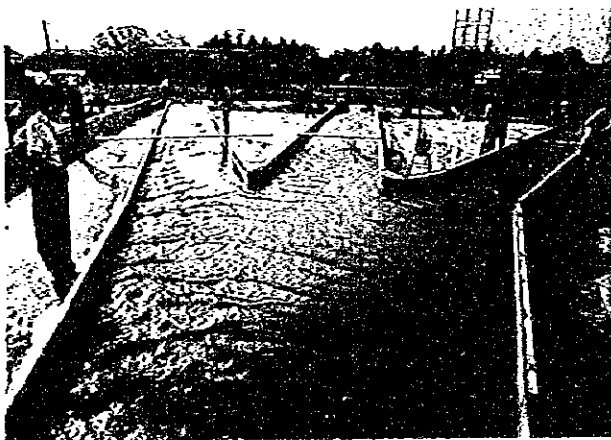
② 19分、北側水路と南側水路に流れが分かれる。



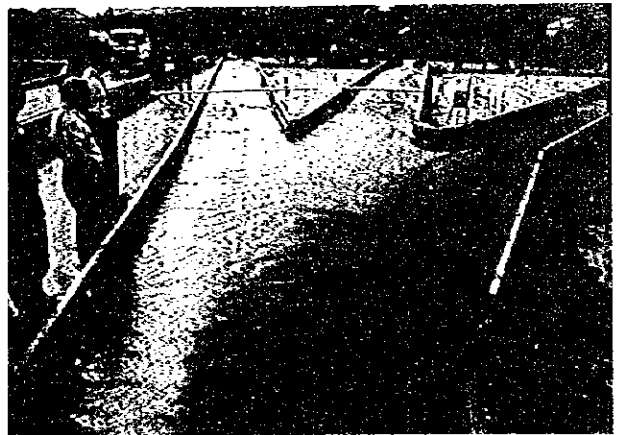
③ 27分、南側水路に流れが集中する。



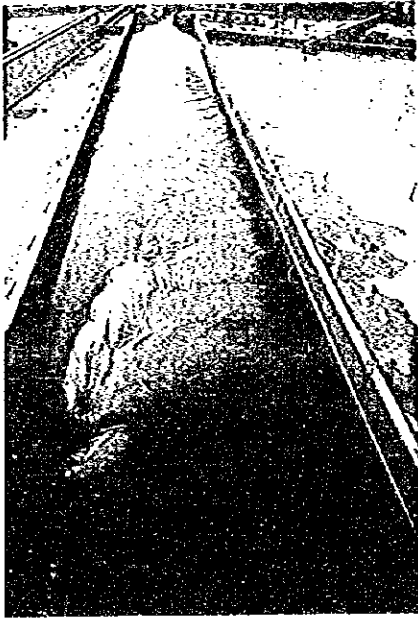
④ 35分、3本の水路にほぼ均等に流れる。



⑤ 38分、北側水路に流れが集中する。



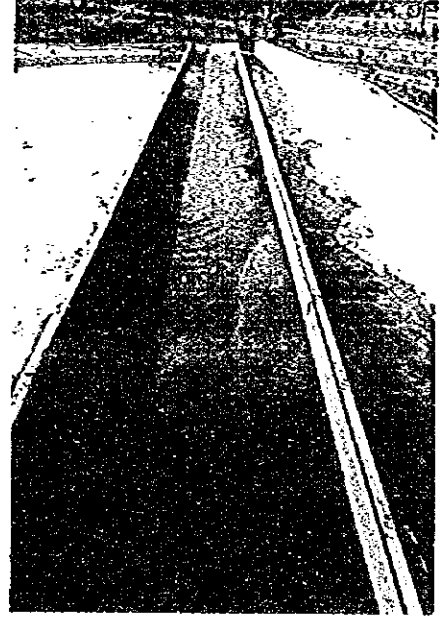
⑥ 実験終了後



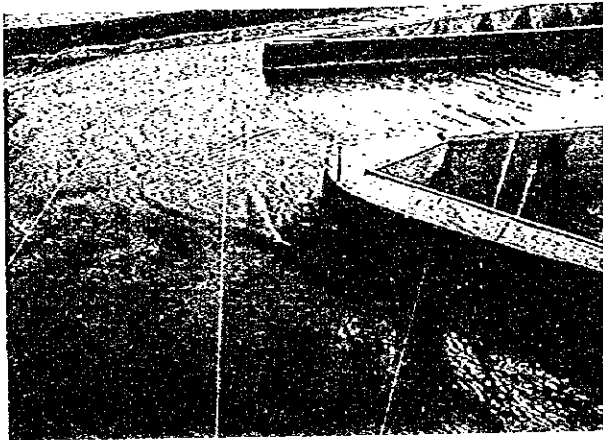
⑦実験終了後、北側水路の河床状況。



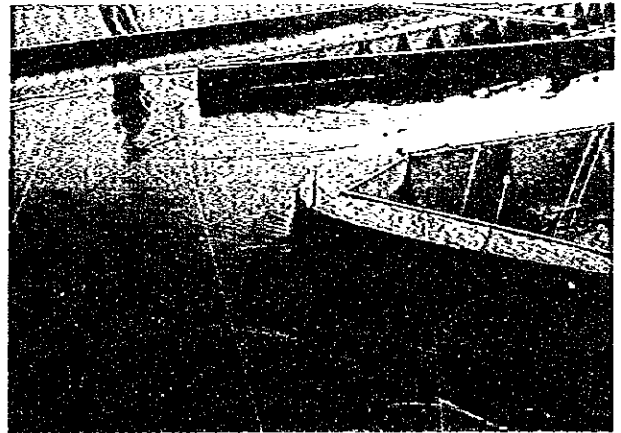
⑧実験終了後、南側水路の河床状況。



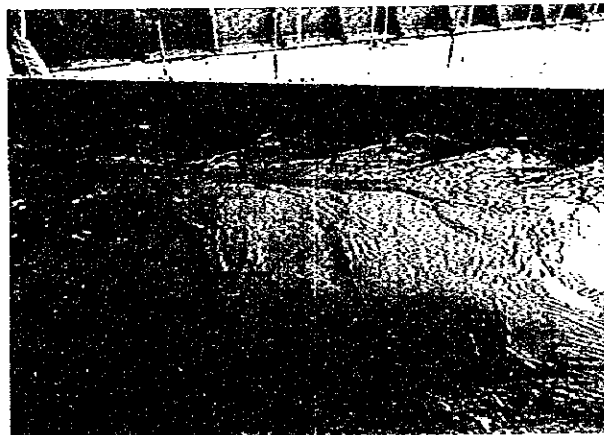
⑨実験終了後、エスケープの河床状況。



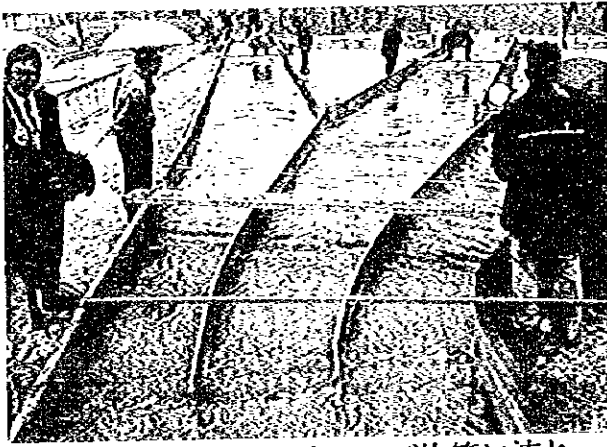
⑩導流堤の先端部では最大7mの洗掘が生じる。



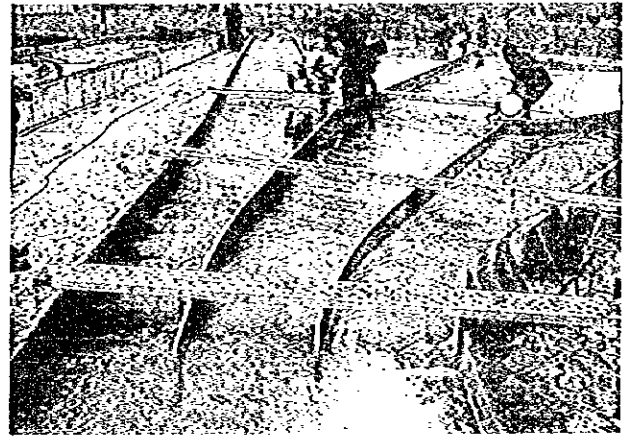
⑪実験終了後には洗掘箇所は埋め戻される。



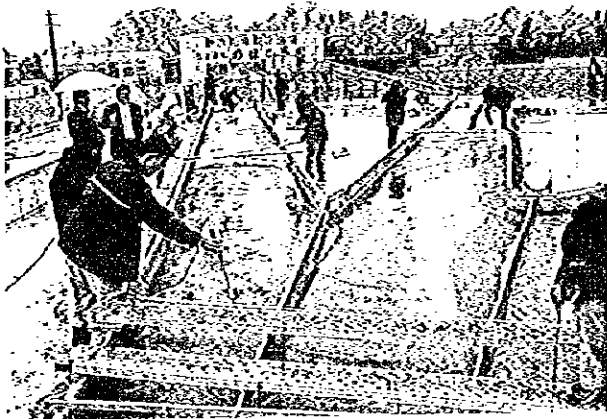
⑫導流堤沿いでは最大4mの洗掘が生じる。



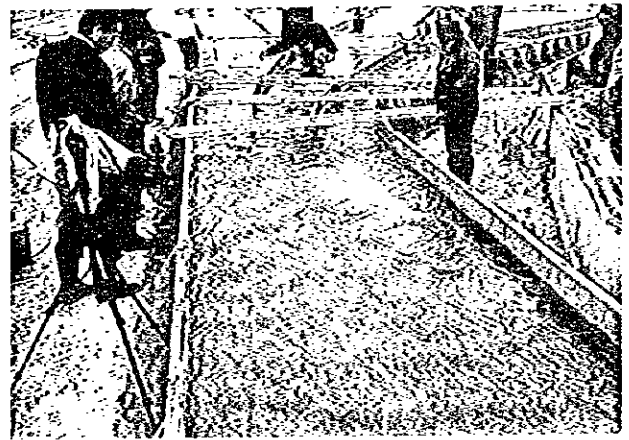
① 5分、3本の水路にほぼ均等に流れる。



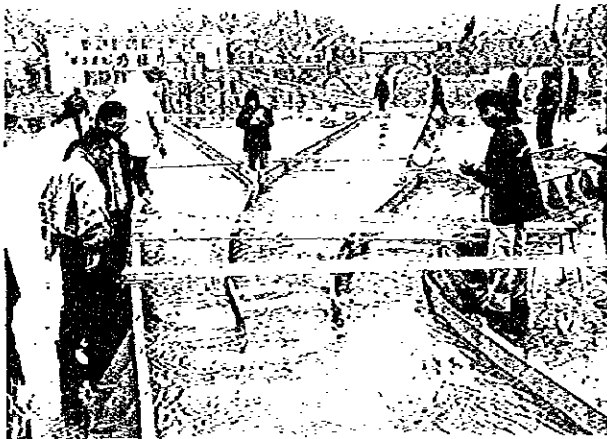
② 10分、エスケープへの流入量がやや少なくなる。



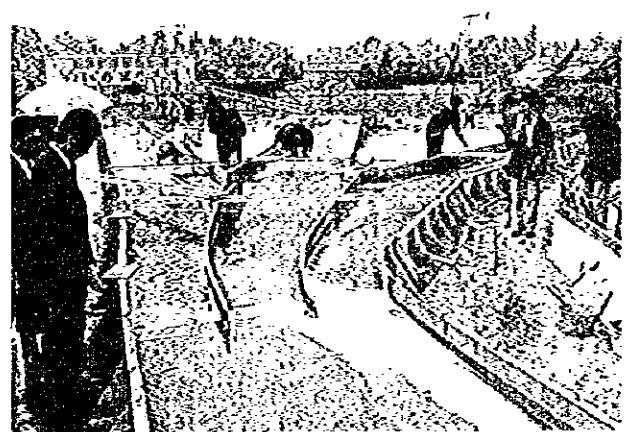
③ 20分、北側水路に流れが集中する。



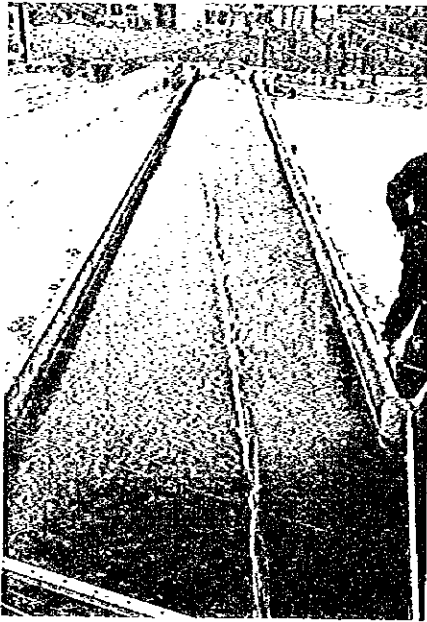
④ 25分、北側水路に流れが集中する。



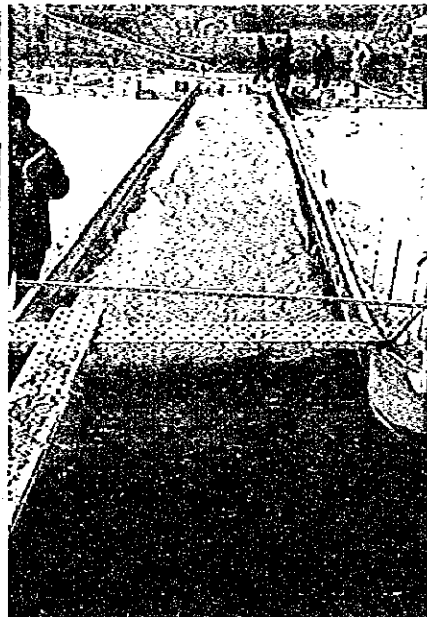
⑤ 39分、エスケープに流れが集中する。



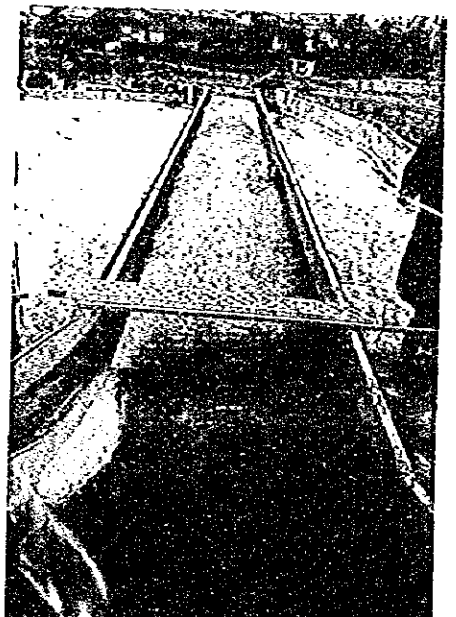
⑥ 実験終了後



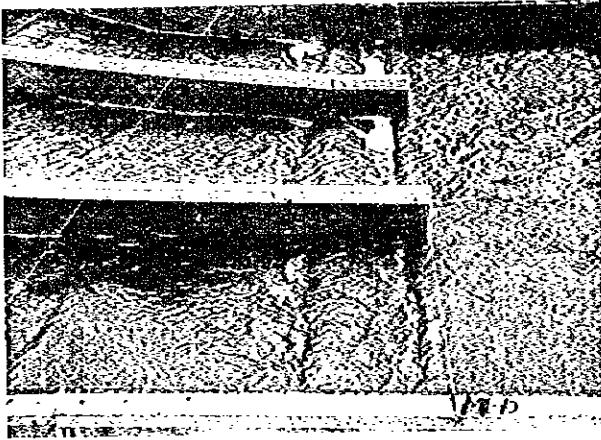
⑦実験終了後、北側水路の河床状況。



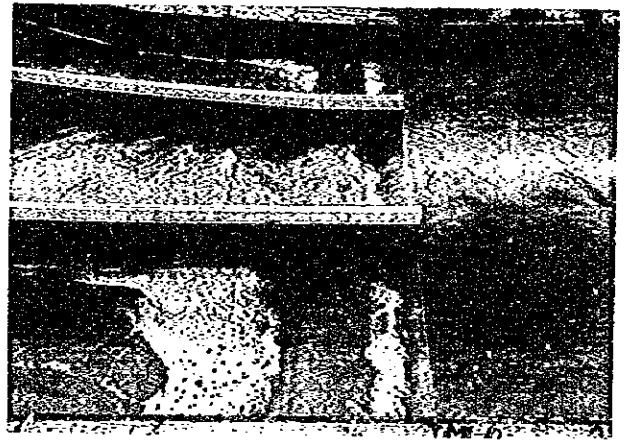
⑧実験終了後、南側水路の河床状況。



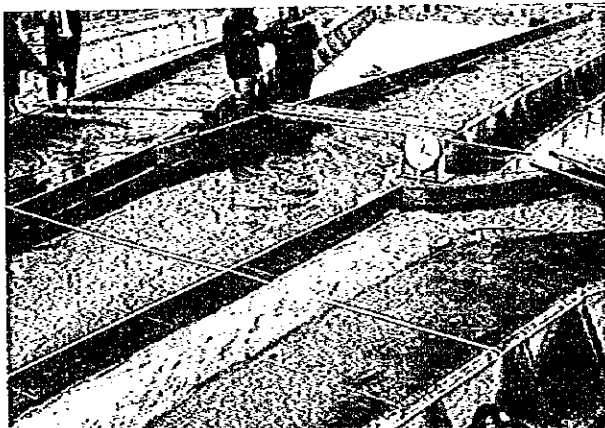
⑨実験終了後、エスケープの河床状況。



⑩流れが均等な時の分流堰の状況。



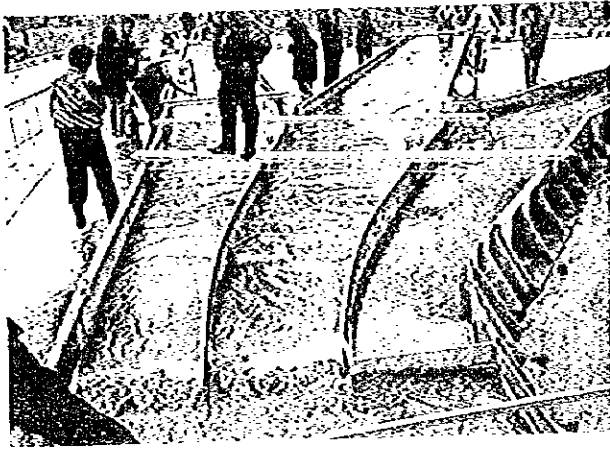
⑪流れが南側水路に集中した時の分流堰の状況。



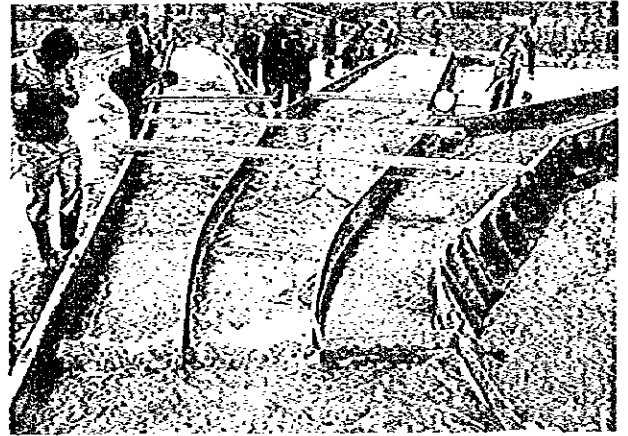
⑫導流堤沿いで最大3mの洗掘が生じる。



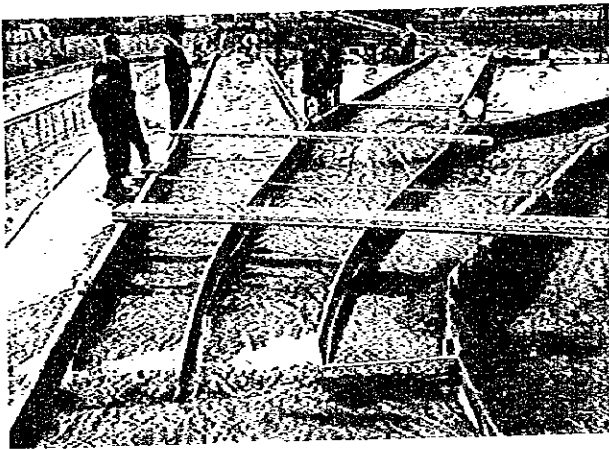
⑬実験終了時の分流堰直下流の洗掘状況。



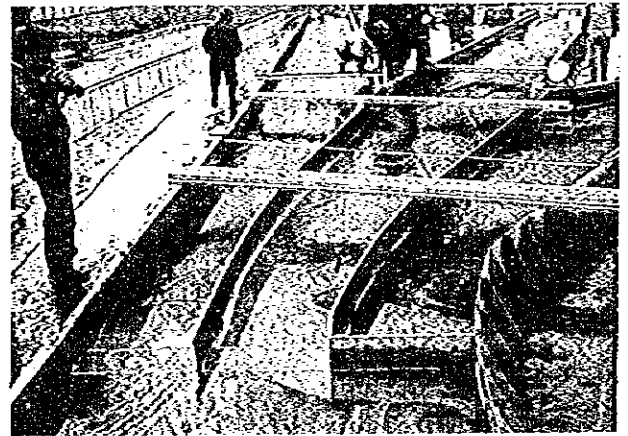
① 10分、2本の水路にほぼ均等に流れる。



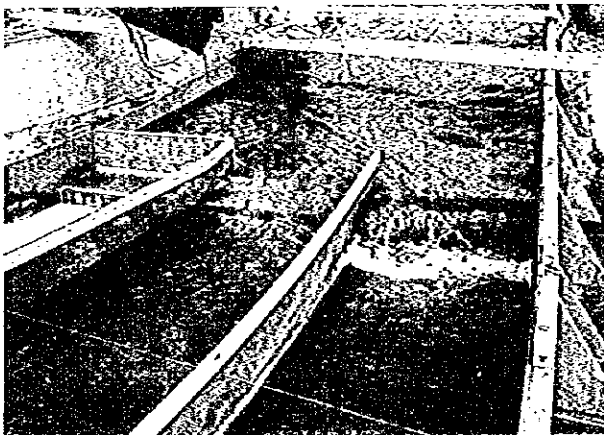
② 35分、2本の水路にほぼ均等に流れる。



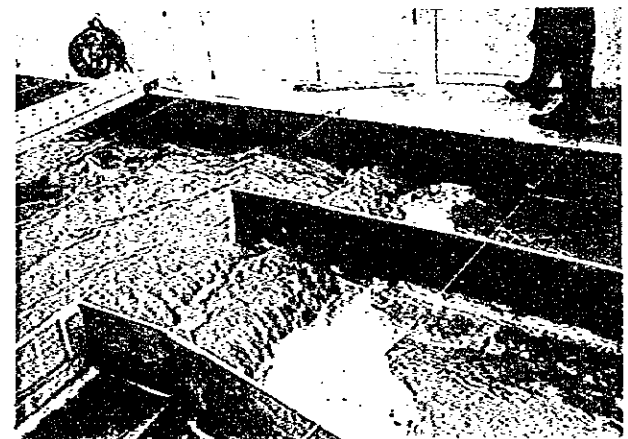
③ 40分、2本の水路にほぼ均等に流れる。



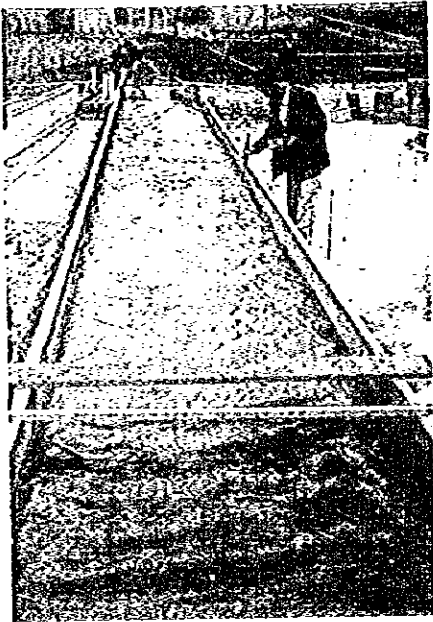
④ 実験終了後



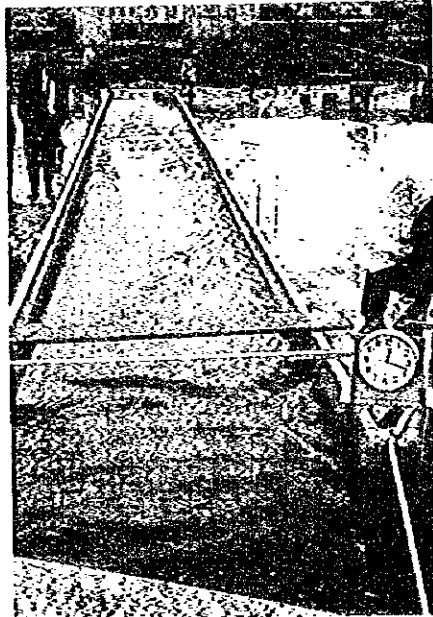
⑤ 下流水路の河床低下に伴い、分流堰直下流の洗掘が始まる。



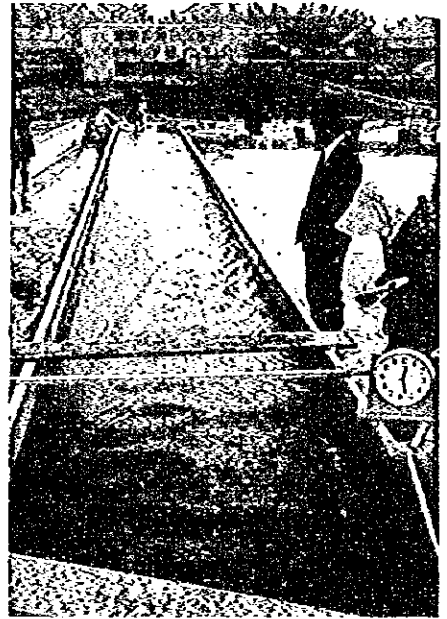
⑥ 下流水路の河床低下が進むと、分流堰直下流の洗掘深は加速的に大きくなる。



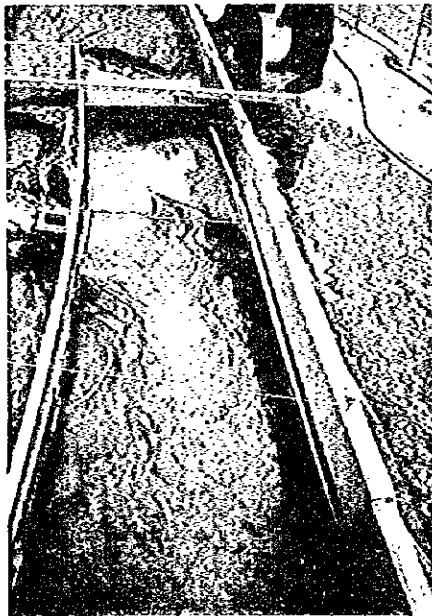
① 10分、水路全幅を流下する。



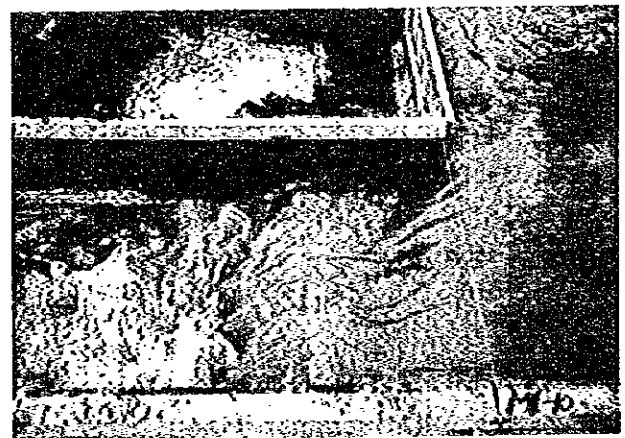
② 17分、砂堆が水面上に現れる。



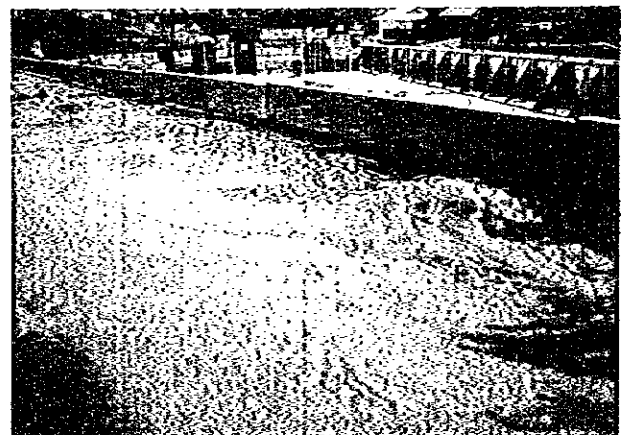
③ 26分、右岸沿いの河床低下により、砂堆がより明確になる。



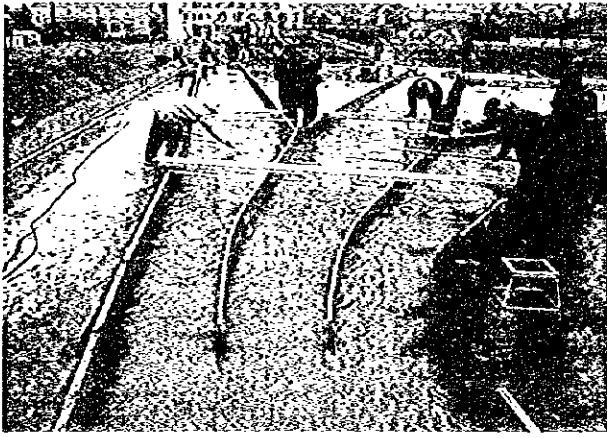
④ 実験終了時の分流堰直下流の洗掘状況。



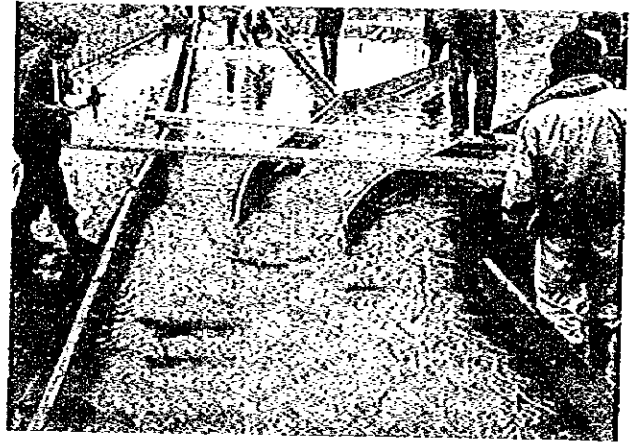
⑤ 分流堰の流下状況。



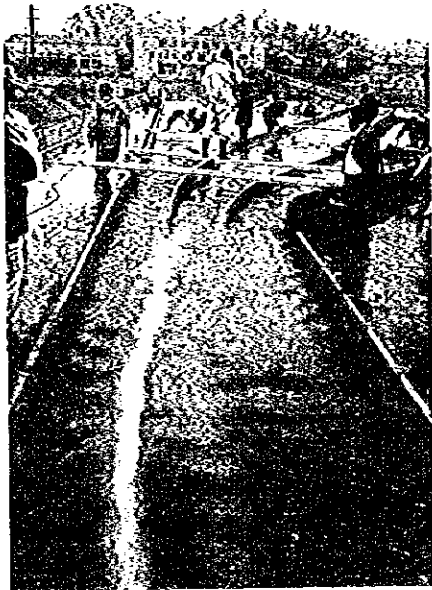
⑥ 導流堤沿いでは最大3.5mの洗掘が生じる。



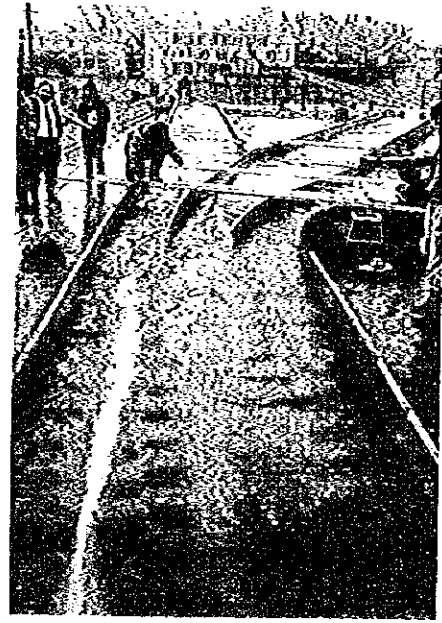
① 5分、エスケープに流れが集中する。



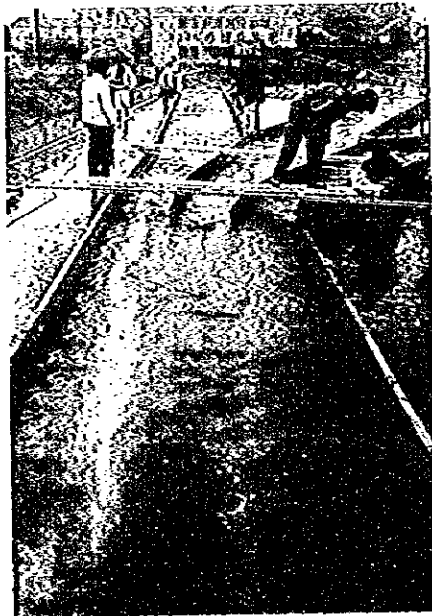
② 10分、エスケープに流れが集中する。



③ 15分、北側水路と南側水路への流入量が多くなる。



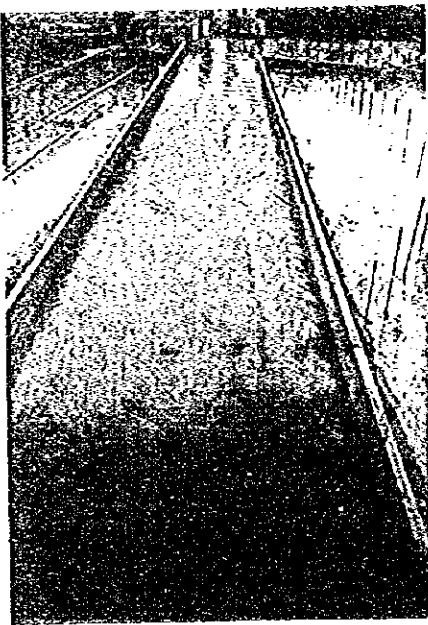
④ 30分、北側水路とエスケープの流入量が多い。



⑤ 37分、南側水路への流入量が多くなる。



⑥ 実験終了後



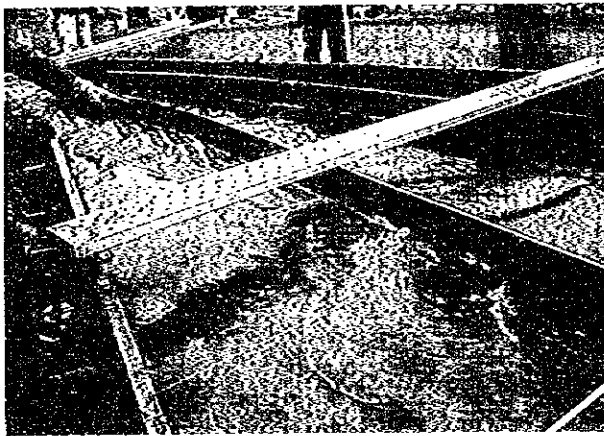
⑦10分、北側水路の河床状況。



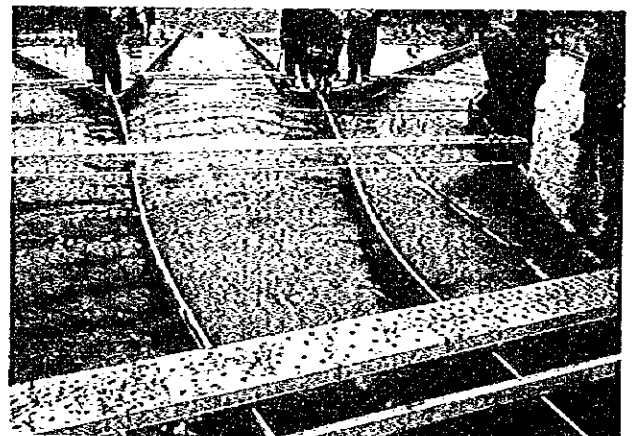
⑧10分、南側水路の河床状況。



⑨10分、エスケープの河床状況。



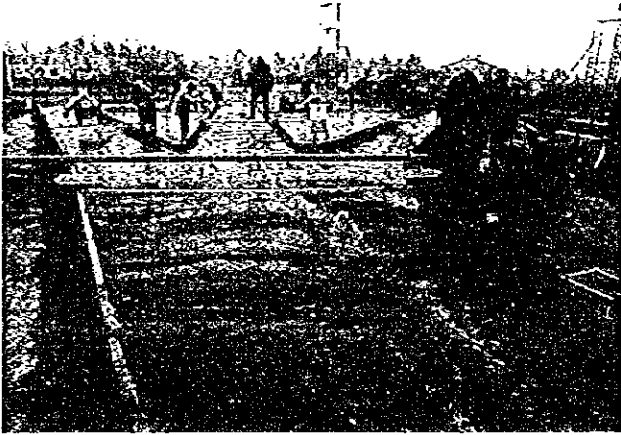
⑩導流堤沿いに流れが集中し、最大3mの洗掘が生じる。



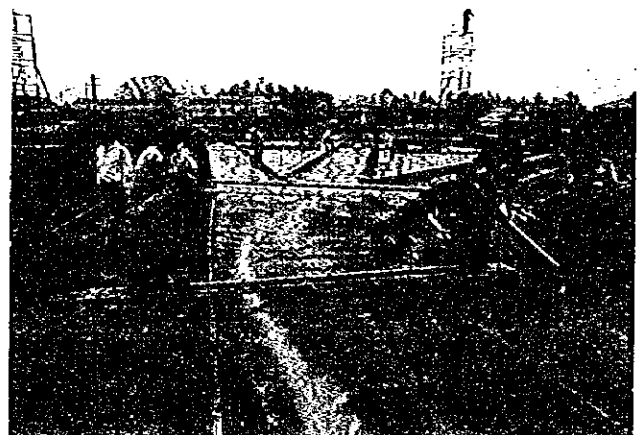
⑪エスケープの内湾側(右岸)には砂堆が固定される。



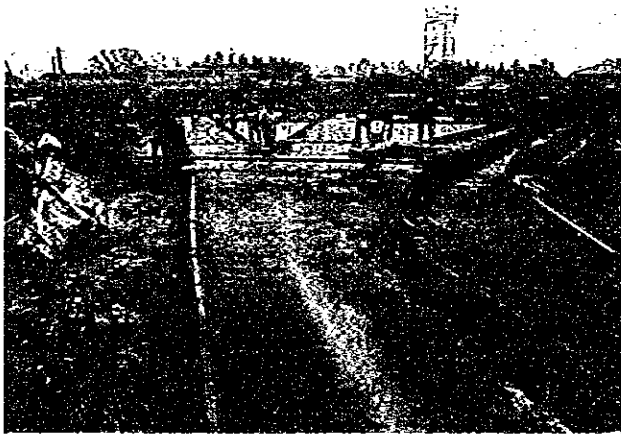
⑫導流堤の先端部で約4mの洗掘が生じる。



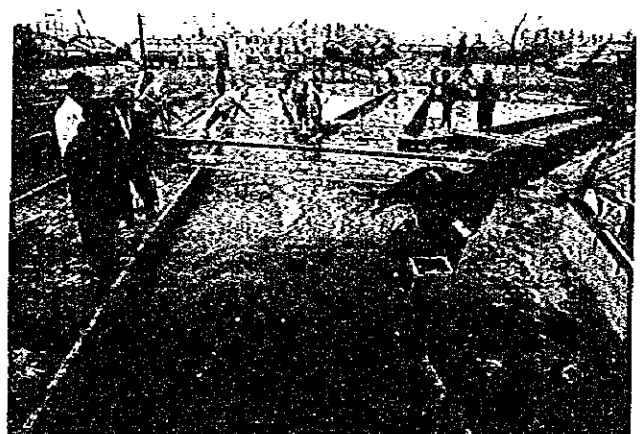
① 5分、エスケープに流れが集中する。



② 14分、エスケープに流れが集中する。



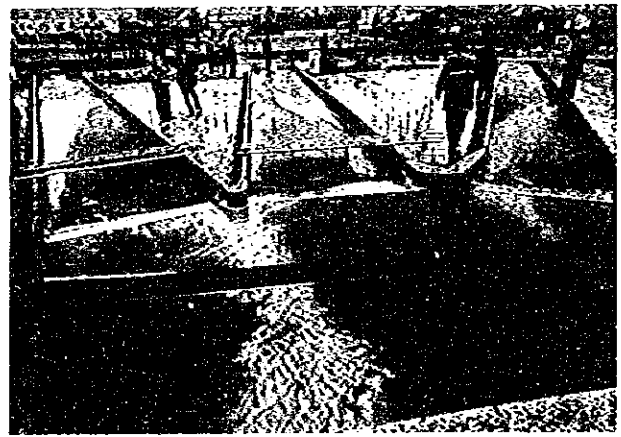
③ 25分、北側水路に流れが集中する。



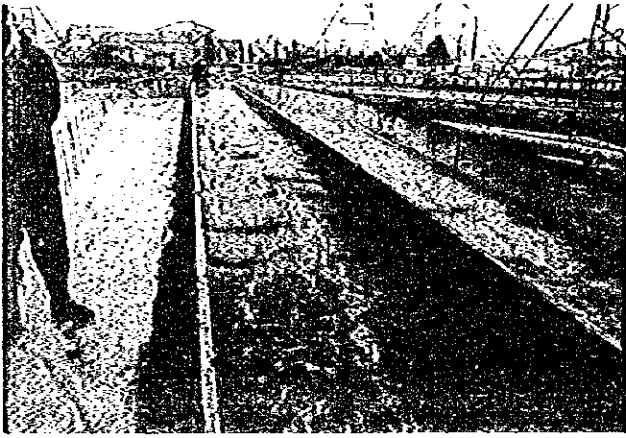
④ 35分、北側水路とエスケープに流れが集中する。



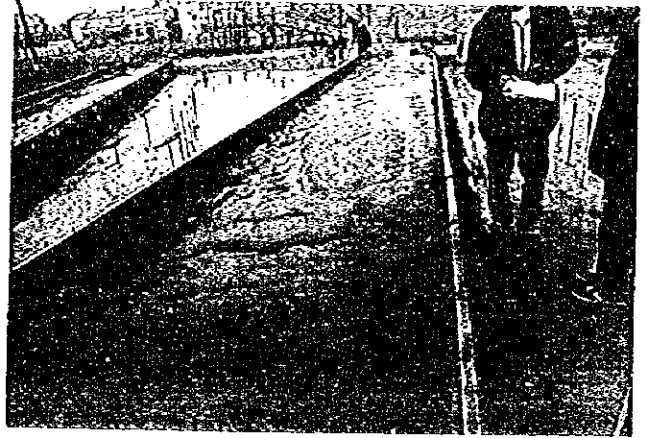
⑤ 実験終了後



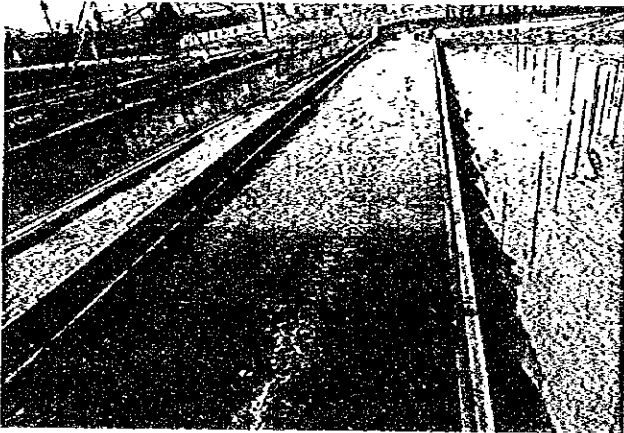
⑥ 実験終了後



⑦10分、エスケープの状況。



⑧10分、南側水路の状況。



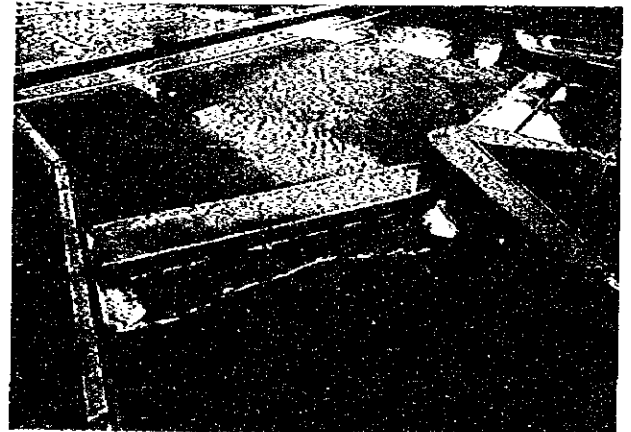
⑨10分、北側水路の状況。



⑩5分、北側水路にはほとんど土砂の流入がない。

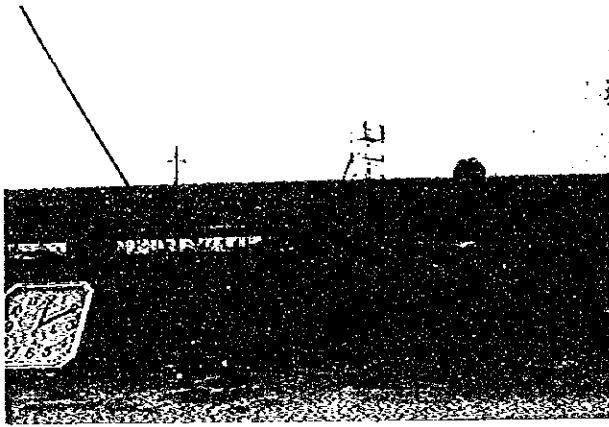


⑪18分、北側水路に大量の土砂が流入する。

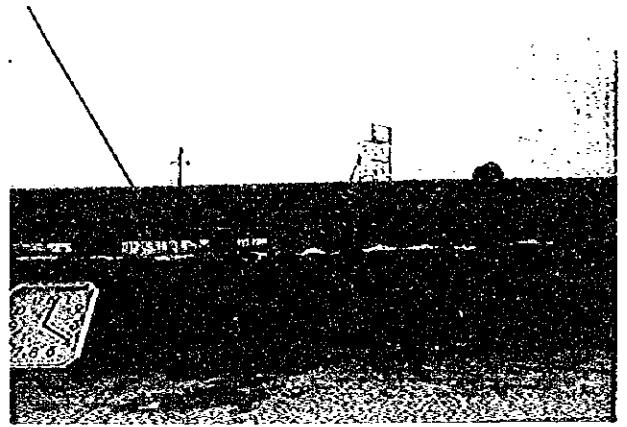


⑫実験終了時の分流堰直下流の洗掘状況。

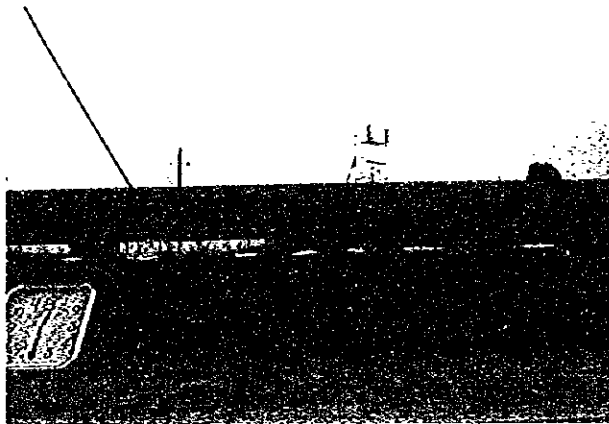
抽出実験流況写真



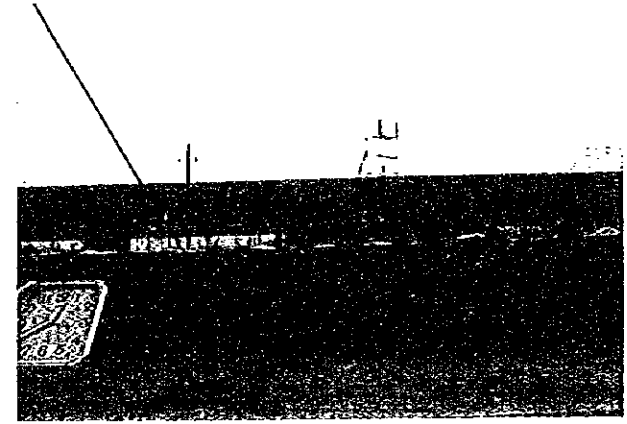
① 10分経過時



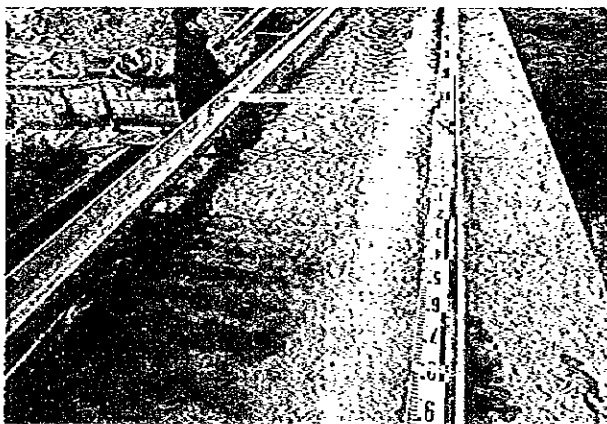
② 20分経過時



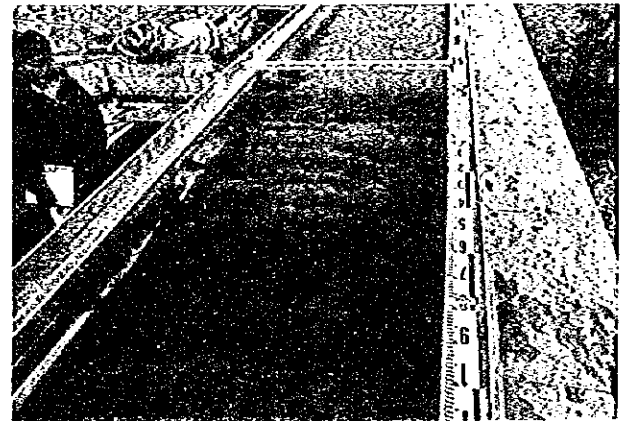
③ 30分経過時



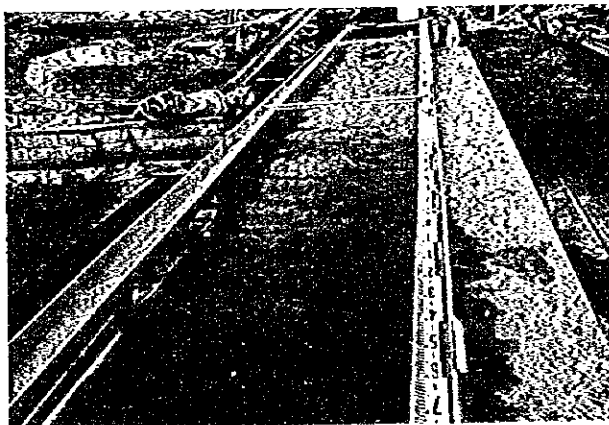
④ 40分経過時



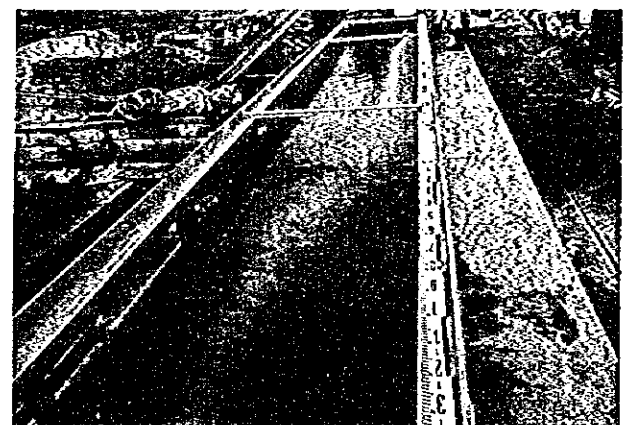
⑤ 10分経過時



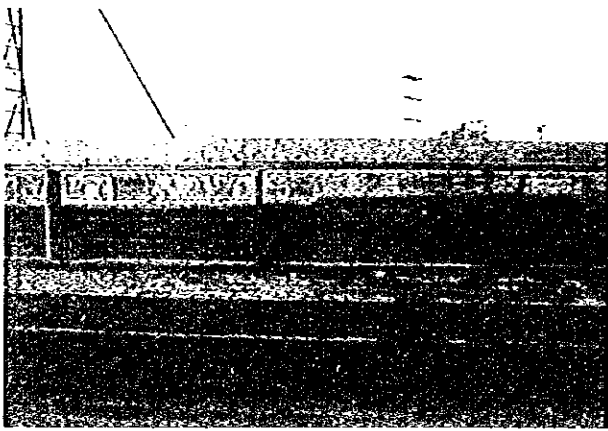
⑥ 20分経過時



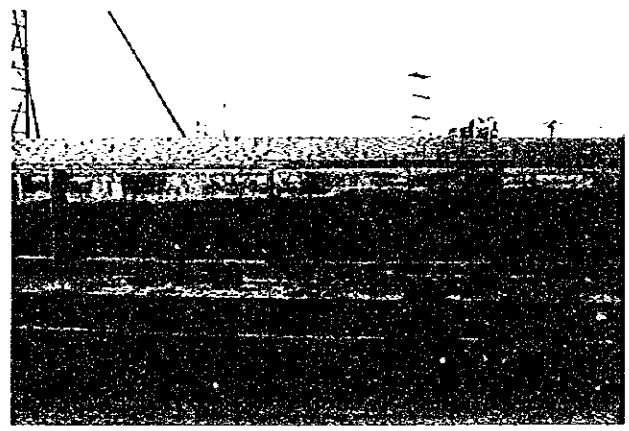
⑦ 30分経過時



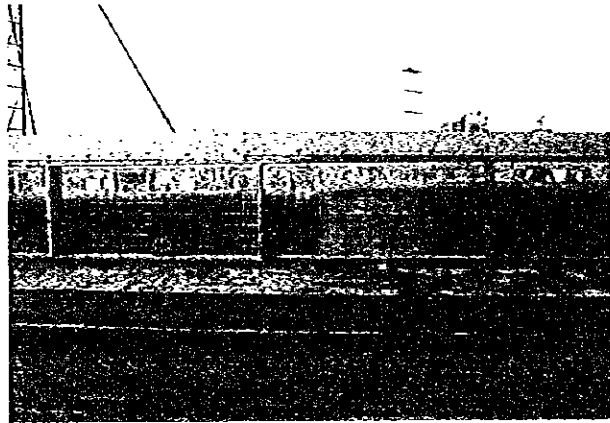
⑧ 実験終了後



① 30秒経過時



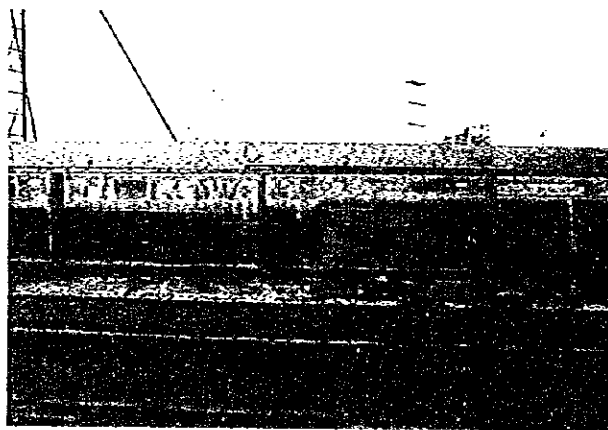
② 1分経過時



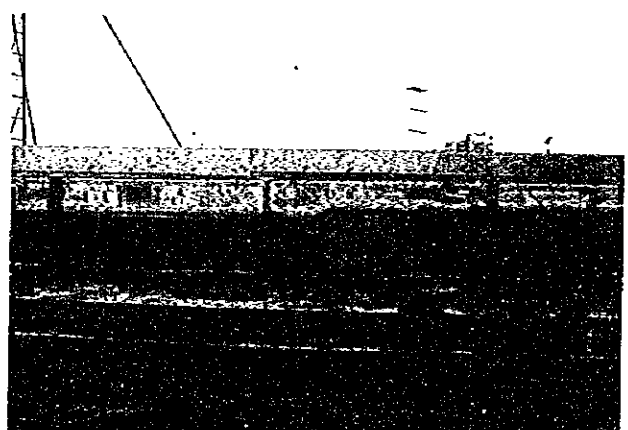
③ 2分経過時



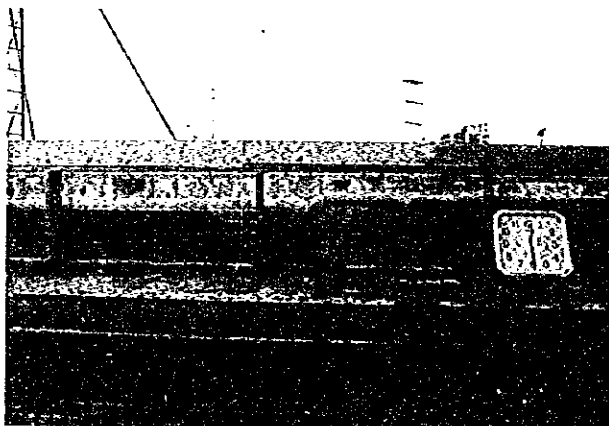
④ 5分経過時



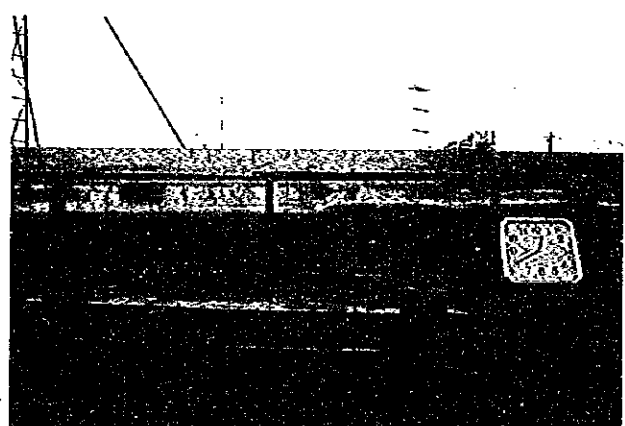
⑤ 10分経過時



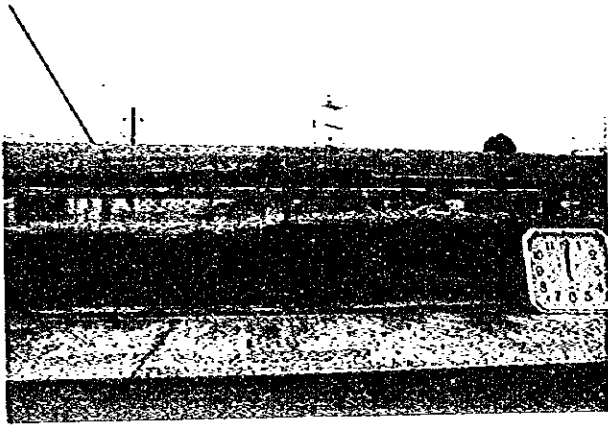
⑥ 20分経過時



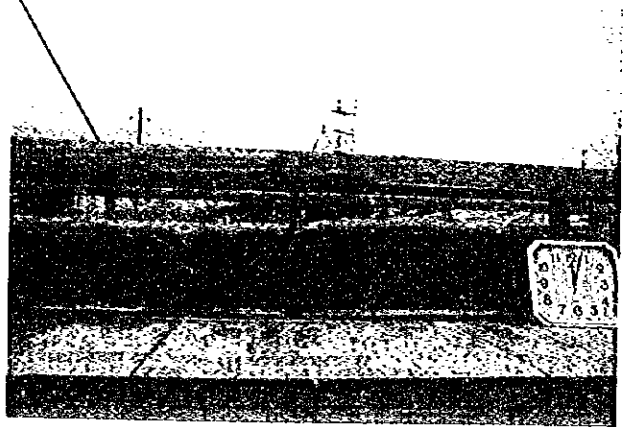
⑦ 30分経過時



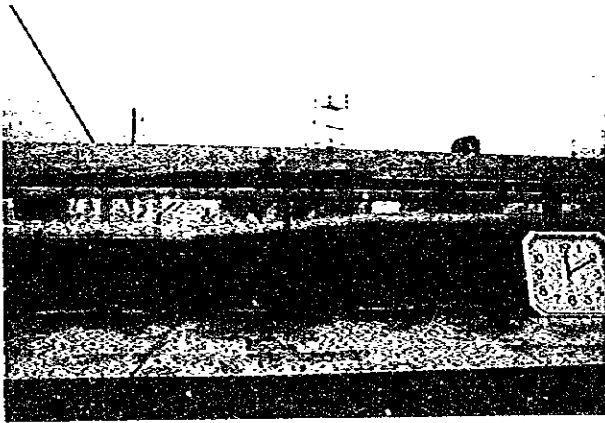
⑧ 40分経過時



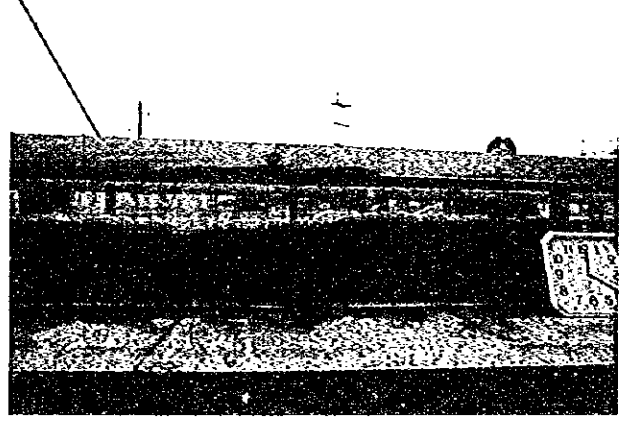
① 1分経過時



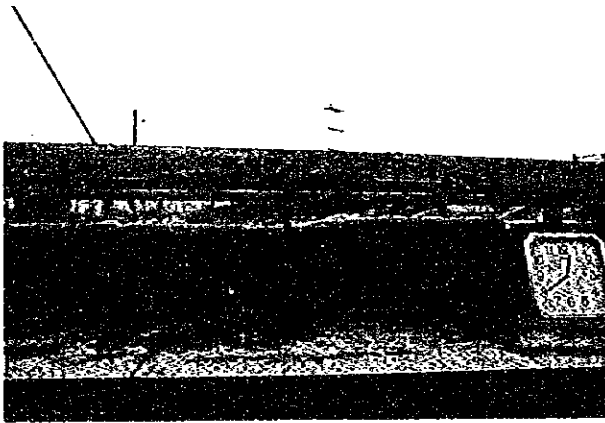
② 3分経過時



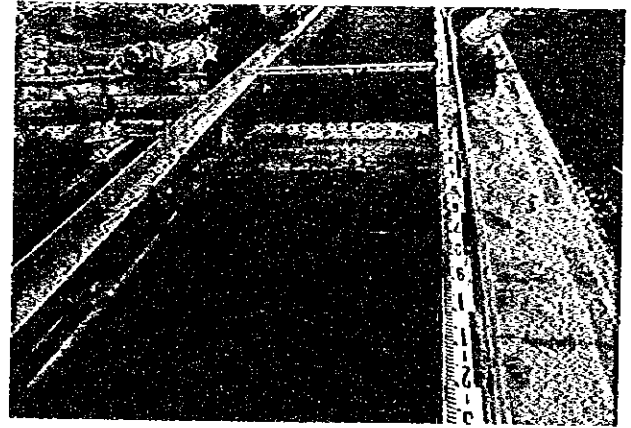
③ 10分経過時



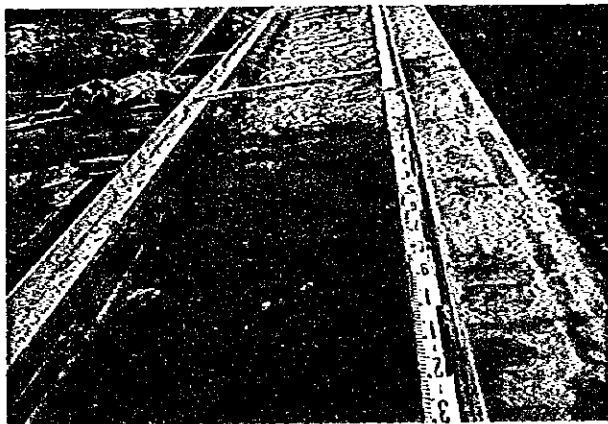
④ 20分経過時



⑤ 40分経過時



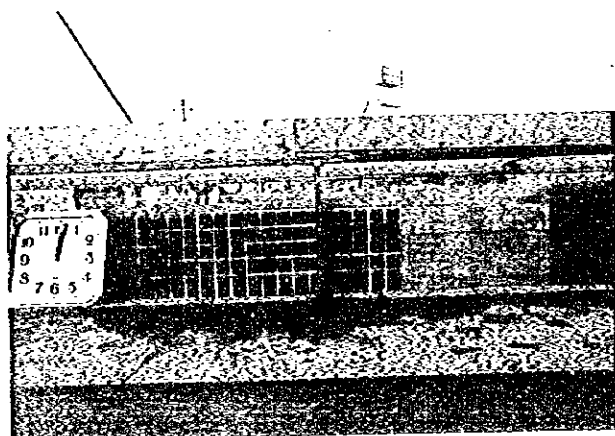
⑥ 実験开始前



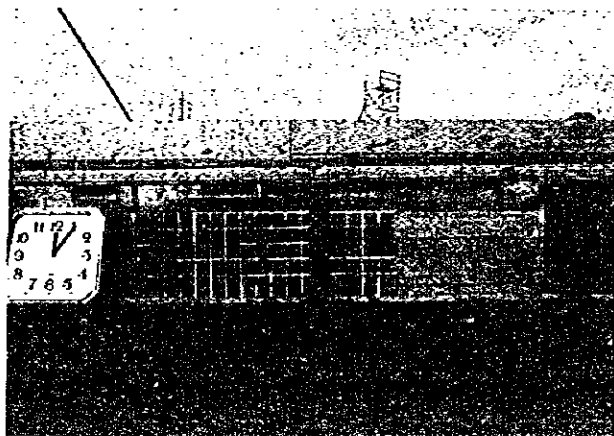
⑦ 15分経過時



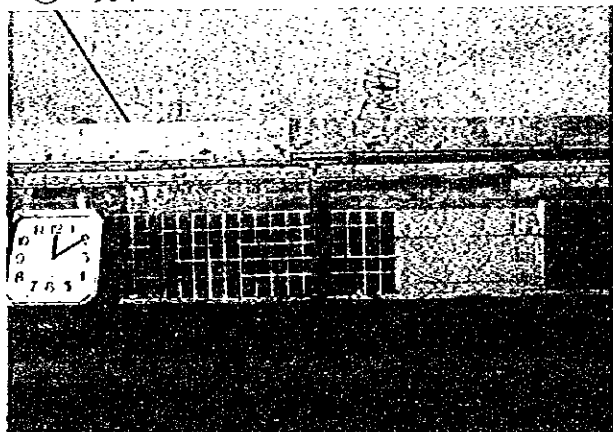
⑧ 実験終了後



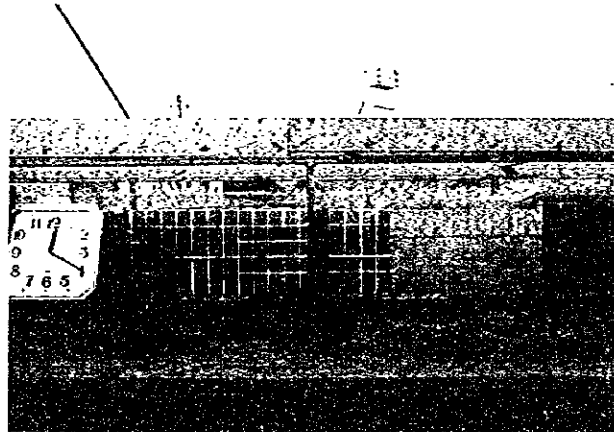
① 1分経過時



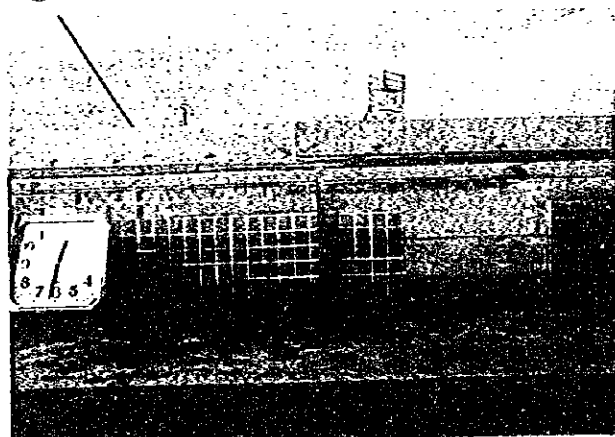
② 5分経過時



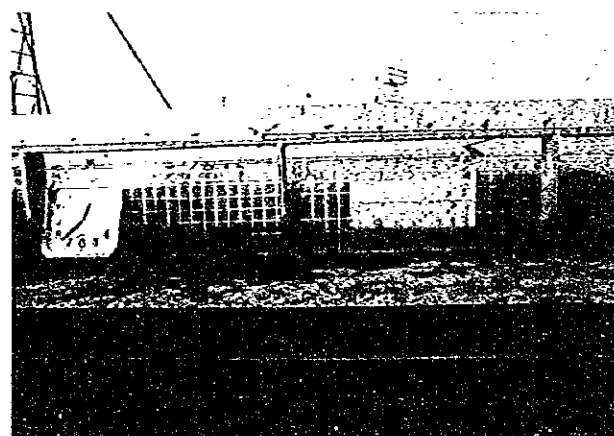
③ 10分経過時



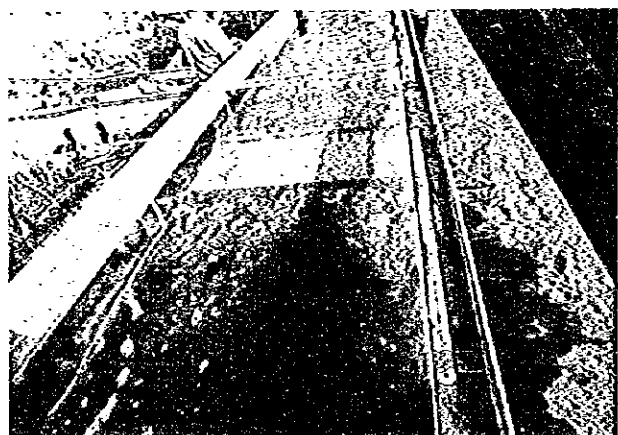
④ 20分経過時



⑤ 32分経過時



⑥ 38分経過時



⑦ 10分経過時



⑧ 38分経過時