

II-19

火山灰流路の側岸浸食に及ぼす材料・天端高・掃流力の影響

北海道開発局	正 員	金高 州吾
北海道開発局	正 員	渡邊 康玄
北海道大学	正 員	長谷川和義
北海道大学大学院	学生員	亀田 裕二

1. はじめに

近年、河川環境への配慮から近自然工法が注目されるようになり、あらためて河岸浸食の実態に焦点があてられてきている。河岸浸食は洪水時に発生すると災害に直接関係する現象であり、河岸浸食の防止あるいは抑制のため、従来より研究が行われている。しかしながら、実河川での現象は複雑多様であり、実験で把握された現象がそのまま現地にあてはまるとは限らないのが現状である。実験と現地の現象の違いが発生する大きな要因としてはスケール効果がある。室内実験では小規模であることから見過ごされている現象があるにもかかわらず、それらを考慮した大型の水路を用いた浸食実験はこれまでにほとんど行われてこなかった。河川工事を行う際、自然性を生かした工法が要求される中で現実的な浸食要因とその発生機構を把握するために、実河川に近い河床構成材料とスケールを有する実験が必要とされる。

本研究は、室内実験レベルでは再現しきれない浸食過程における土砂の挙動、実河道の浸食における河道横断形状に影響を及ぼす因子を把握することを目的とし、天端高、河床材料、掃流力を変えて大型の直線水路により浸食実験を行った。天端高、河床材料、掃流力の3点の違いに焦点をあて、それぞれの実験について比較検討を行った結果を報告するものである。

2. 実験条件

本実験は写真-1に示す、屋外に設置された幅約4m、長さ約40mのコンクリート製直線大型水路により行った。実験装置の流下能力は最大流量が $1.0\text{m}^3/\text{s}$ を若干上回る程度である。流量は全ケースとも $1.0\text{m}^3/\text{s}$ を流している。また、等流状態を保つように下流端に設けたゲートにより水位の調節を行なった。なお、各ケースについての初期条件及び実験河床材料を表-1に示す。

実験河床材料には支笏火砕流堆積物(*Spfl*)を現地付近の地山から採取し、そのまま実験河床材料として用いている。河床材料はcase1、case2、case3では同じものを用い、case4では最大粒径の値が25.4mm程度で他のケースより大粒径のものが少ない河床材料を用いた。

天端高は水際線からの高さで表わし case1、case2で10cm、case3、case4では30cmに設定した。

掃流力がcase1、case3、case4でほぼ等しくcase2でその2倍程度になるように水面勾配をcase1、case3、case4で1/1500にcase2で1/500に設定した。

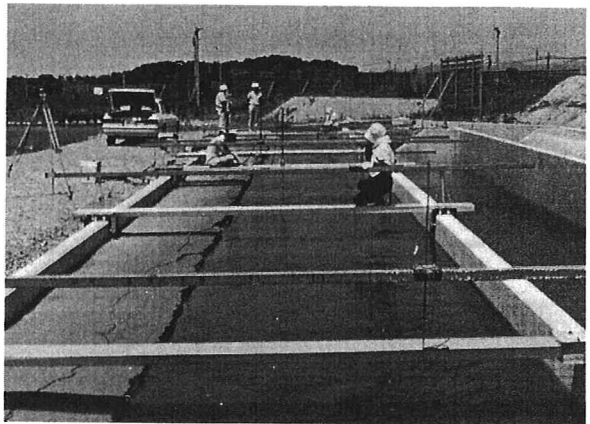


写真-1 実験水路（通水時）

表-1 各ケースの初期条件及び河床材料

実験ケース	Q t/s	I	天端高 cm	初期傾斜角	湿潤密度 t/m ³	含水比 (%)	空隙率 (%)	d_m mm	d_{50} mm	d_{max} mm
case1	1.0	1/1500	10	34.7°	1.363	17.7	54.8	8.56	0.28	50.8
case2	1.0	1/500	10	35.2°	1.395	31.4	58.5	4.66	0.23	50.8
case3	1.0	1/1500	30	35.2°	1.500	30.4	55.1	6.98	0.14	50.8
case4	1.0	1/1500	30	35.2°	1.434	23.4	54.5	2.72	0.303	25.4
現地	—	—	—	—	1.344	29.4	60.8	—	—	—

実験河床材料の締固まり状態を現地の自然状態に近づけるためにR I 試験器 (密度水分量計) により計測し、湿潤密度から実験河床材料の空隙率を求めている。各ケース毎に土質の締固まり状態 (密度、含水比) に若干の違いが見られているが、現地の状況を概ね再現していると思われる。各ケースにおける実験時の土質の状態を表-1 に合わせて示している。なお、参考のため火山灰採取地点近傍の値についても示した。

実験流路は池田ら³⁾の式を用いて流路幅及び水深を決定し河床材料を台形断面状に形成した。流水時の計測項目は水面勾配・断面測定・拡幅変化・粒度分布・流砂量・流速について昨年度の予備実験の結果を踏まえて行った。それぞれの測定項目についての測定地点、測定時間等の詳細事項を以下に記す。

- (1) 水面勾配：上流端から 4、12、20、28、36m の 5 ポイントについて 50 分毎に水位を計測。
- (2) 断面測定：浸食の断面変化過程、そのときの流砂量及び安定断面形状を把握するため上流端から、20、25m の 2 測線について、case1、case3 及び case4 では 50、150、300、500 分経過時に、case2 では 30、70、130、200 分経過時に停水させ、横断方向に 10cm 毎に測定。
- (3) 流路拡幅変化：浸食速度を把握するため上流端から、20、25m の 2 測線について、5 分毎に計測。
- (4) 粒度分布：浸食過程及び安定河床に至るまでの粒子の移動機構を明らかにするため上流端から 30m の地点で横断方向等間隔に 6 点において、断面測定のため停水させた際河床材料を採取して行った。この内、右岸のコンクリート壁寄りの 3 地点については、鉛直方向に 10cm 毎の 3 層に分けて河床材料の採取を行っている。採取したそれぞれの試料についてふるいわけ試験により計測。
- (5) 流速：流速コンター図、及び河床におけるせん断力を求めるため水路のほぼ中央上流端から 20m の地点において横断方向に 30cm 毎、鉛直方向に実験河床から 3、6、9、15、25、40cm の高さの流速を 2 次元電磁流速計により測定。

3. 実験結果と検討

浸食機構が異なる要因と考えられる河床材料、天端高、掃流力の 3 点の違いで実験結果 (断面形状・浸食速度・粒度

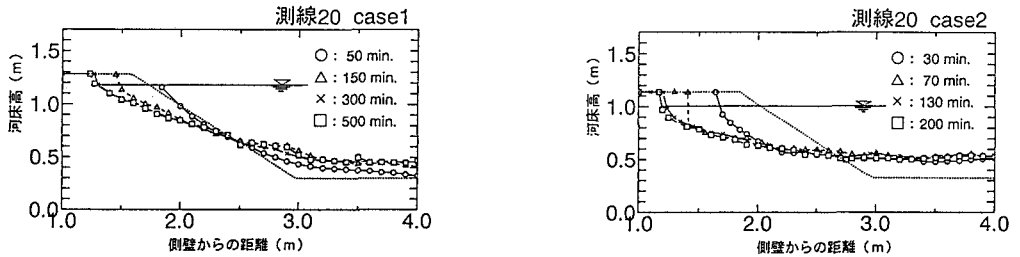


図-1 浸食断面変化図

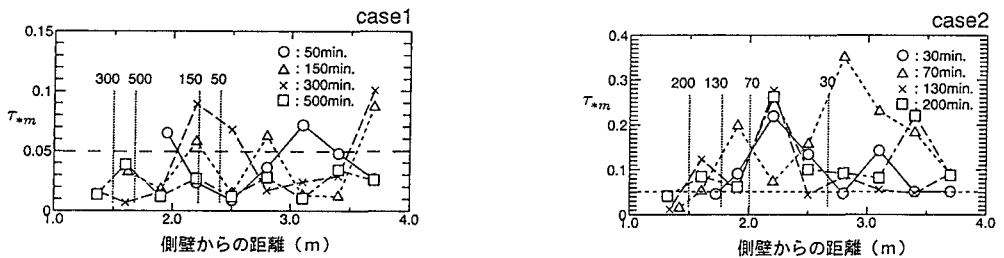


図-2 掃流力と時間変化

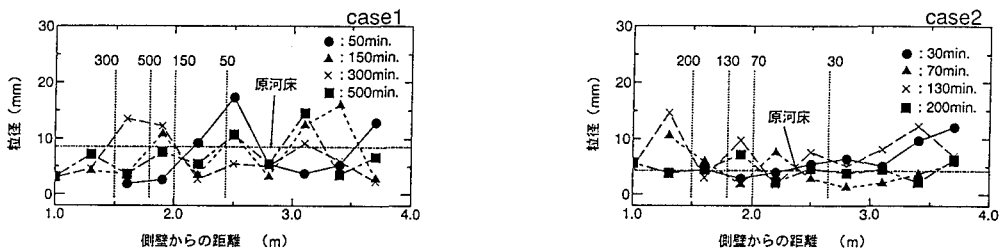


図-3 表層土砂の平均粒径

分布)の比較検討を行う。検討は他の要因が等しいケースについて比較している。

河床材料の違いは case3 とこれに比べ最大粒径の値が小さい case4 について、天端高の違いは case1 とこれより天端高が 20cm 高い case3 について、掃流力の比較は case1 とこれより 2 倍程度大きい掃流力を持つ case2 について行った。なお、表-2 に河床材料、天端高、掃流力の比較対象とした各ケースを明記した。

表-2 比較ケース

検討項目	比較ケース
河床材料	case3 と case4
天端高	case1 と case3
掃流力	case1 と case2

3.1 断面形状

水路全体を通して一様状態の水際線の侵食をみせていることから実験水路ほぼ中央である測線 20 の図-1 に示した断面形に着目し各実験ケースにおける断面形状の比較を行った。河床材料のみ違う case3 と case4 では断面形状にほとんど差は現れていない。天端高のみ違う case1 と case3 の断面の侵食部と堆積部を分ける境界点は同一変位をみせるが、case3 については天端高が 20cm 高いことから平坦部における堆積量も多い。図-2 は掃流力のみ異なる case1 と case2 について、掃流力の時間変化を示したものである。図-1 及び図-2 から掃流力の大きい case2 における 30 分通水経過時の断面形状はすでに安定断面に近い断面形を示し、侵食速度が速いことを表している。また、平坦河床部における土砂の堆積が著しいため安定断面形状はかなり扁平な形状となっている。一方、case1 の安定断面は一様な傾斜角を持つ直線状斜面があらわれている。このように掃流力の違いにより断面はかなり異なった形状を示すことが明らかとなった。case2 の円弧形状断面は、斜面下部では水深が増えるので掃流力は水平河床に近づくほど増大し、横断方向流砂量が多くなる。その結果、侵食箇所での横断方向流砂量に斜面上部からの流砂供給が追いつかなくなることからこの断面形状が生じるものと推定される。これは従来の室内規模の実験結果と類似しており、室内規模では侵食現象を顕著に現わせないことから掃流力を大きくして実験を行っていたため円弧形状断面が多く見られていると考えられる。

これらの結果より、侵食による侵食断面形状において掃流力の影響がかなり大きいことが推定される。図-2 に各箇

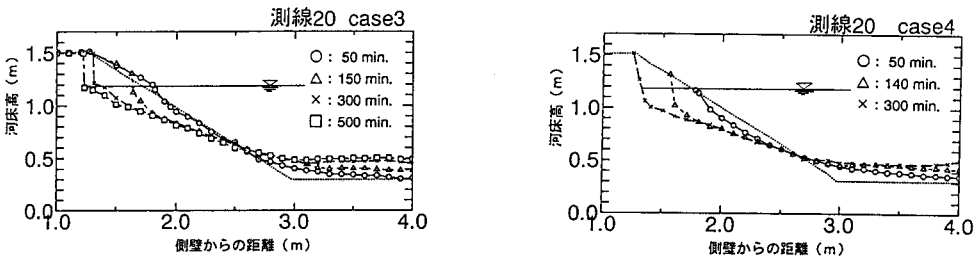


図-1 侵食断面変化図

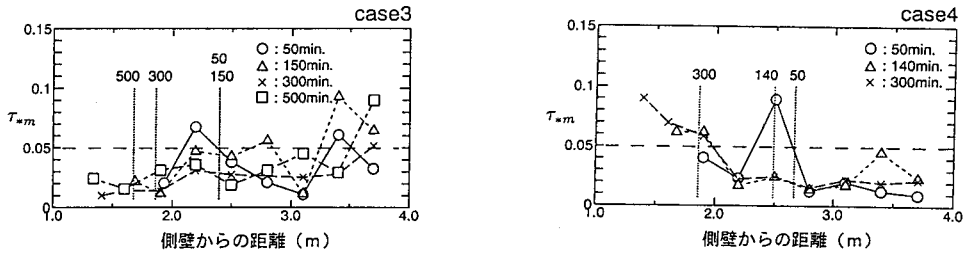


図-2 掃流力と時間変化

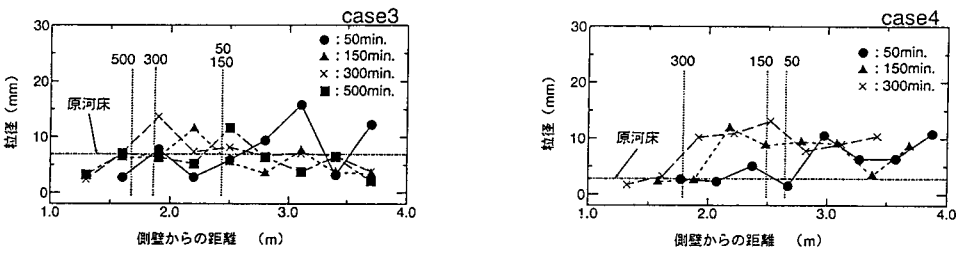


図-3 表層土砂の平均粒径

所における横断方向各箇所での無次元掃流力の変化を示す。この掃流力は流速測定の結果から流速コンター図を描き、流速コンターラインに直交する法線間の流水断面積を横断方向河床面で除し、各箇所における平均粒径の値で無次元化して求めている。図-1 から case1、case2、case3 の安定断面に至った時点の無次元掃流力はほぼ横断方向に一定値を示し、かつその値が限界掃流力以下にまとまっている様子が確認できる。しかし、case4 は例外で通水経過後 300 分経過時においても浸食部で掃流力の値が 0.09 と限界掃流力を上回る値を示しこの後もさらに浸食が進む様子を伺わせている。

3.2 表層粒度の時間変化

図-3 に表層の平均粒径の時間変化を示す。この図では縦軸に粒径を、横軸に左岸側壁からの距離をとり、時間経過に伴う浸食横断面において前断面より減少した断面を浸食部とし増加した断面を堆積部として、この境界点を破線で図示した。この境界点より左側が浸食部分で右側が堆積部分である。各ケースの原河床における平均粒径の値も示している。また、図-4(a)(b)(c) に全ケースの浸食斜面 (a)、平衡斜面 (b)、平坦河床 (c) についての表層採取土砂の粒径加積曲線を示す。これらの指標をもとに粒子の移動を考慮しながら各ケースの比較を行う。case1、case3 及び case4 に共通して以下のような現象が認められる。初期の通水経過時において右岸コンクリート壁寄りの平坦河床で平均粒径が大きな値を示し平坦河床部での粗粒化が明確に現れている。これは初期状態における浸食において掃流力の大きい平坦河床での細粒子の溶け出しにより粗粒子のみが残るため生じる。水際線付近の浸食部では急斜面で細粒子の抜け出しにより粗粒子が残され、150 分通水経過時にこの影響が現れている。300 分通水経過時に崩壊土砂の供給で急斜面部の粗粒化がほとんど見られなくなり、やがて 500 分通水経過時には平均粒径が横断方向に一律な値を示し安定断面に至る。また、図-4(c) の case4 に特徴的な階段状の粒径加積曲線が現れ、堆積土砂は 2 種類の均等粒径にまとまろうとしている傾向が現れた。case3 についても case4 ほど明らかではないが似たような傾向がみられる。

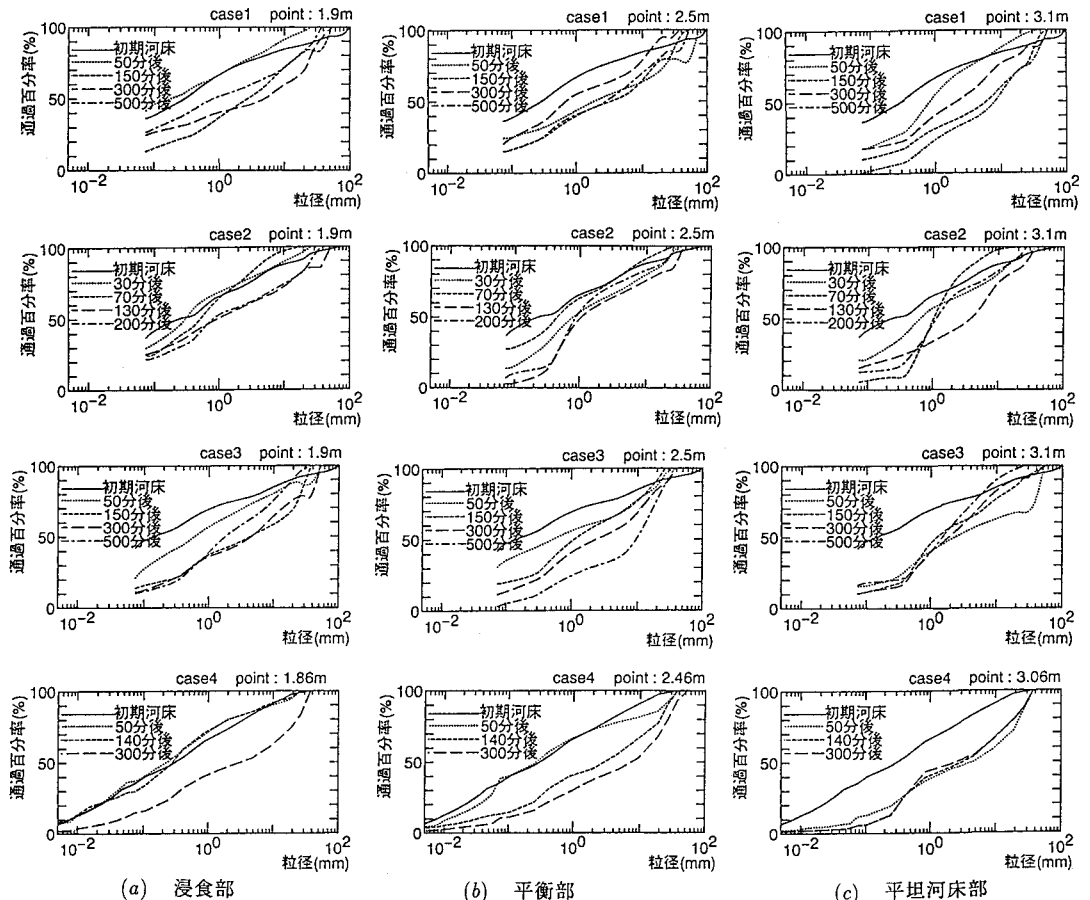


図-4 粒度分布と時間変化

天端高に違いのある *case1* と *case3* に着目する。図-4から *case1* は安定断面に至るまで徐々に粗粒径に近づく様子が確認できる。しかし、*case1* 以外の 50 分通水以降は粒径加積曲線の時間経過に伴う顕著な変化は現れていない。*case1* は天端高が *case3*、*case4* に比べ小さく横断方向流砂量も少ないことから、土粒子の分級に抑制作用が働くことが考えられる。

case2 は掃流力が大きい粗粒径の粒子が流され易く、他のケースに比べ平均粒径が大きい箇所が顕著に現れていない。特に図-4(b)の平衡部に粒子の均一化が顕著にみられる。このことは細粒子は堆積せず下流へ流され、大粒径の粒子もまた周辺の細粒径の土砂の抜け出しにより孤立し、流水の抵抗面積が大きいため下流へ流されることが起因し、他のケースよりも堆積部における粒子の均一化が進むものと思われる。掃流力の大きい *case2* は図-4(b) 平衡斜面部で細粒分のみ抜け出す割合が他のケースより大きくなる傾向があるが 0.5mm から 10mm の粒径は浸食部からの給砂でほとんど変化しないのが特徴的である。しかし、全体の傾向は他のケースと以下のような類似点が見られる。30 分通水経過時には平坦河床で粗粒径のものが多く現れ、時間経過に伴いこの部分に細粒分の堆積が生じる。水際線付近に着目すると 70 分経過時には細粒分の抜け出しによる粗粒化がみられ、*case3*、*case4* の 150 分通水経過時と同一傾向を示す。

これらのいずれのケースにも共通する一連の現象を整理する。まず、通水経過初期には水際線以下の浸食、特に掃流力の大きい平坦河床部で細粒分の溶け出しによる粗粒化現象が顕著に現れている。次に、水際線付近の浸食部の急勾配斜面では掃流力が小さく細粒子を送り出す働きが小さいため粗粒化が目立つ。しかし、時間経過に伴い水際線付近の浸食が進み天端崩壊土砂の供給で粗粒化が抑えられる。

このとき平坦河床部において抜け出した細粒分の堆積で初期にみられた粗粒子が埋め戻されることで原河床の平均粒径に近づき、平均粒径が横断方向に一定値を示し安定断面に至る。

3.3 浸食速度

図-5(a)(b)(c)に水路の上流端からの距離が 20m、25m の測線における流路拡幅量を縦軸に、経過時間を横軸に示し浸食速度の比較を行う。

図-5(a)は河床材料のみ違う *case3* と *case4* の比較図である。図からほとんど同速度で浸食が進む様子がみられているが、最大粒径が大きな値を持つ *case3* の拡幅線には大きな階段形状が現れ、最大粒径の値が小さい *case4* は小刻みに浸食が進むため *case3* ほど大きな階段状の拡幅線は現れていない。しかし、浸食は天端高が等しいことから同程度で進む。

天端高のみ違う *case1* と *case3* の比較を図-5(b)に示す。測線 20、25 の両者の平均による浸食速度の比較は *case3* が天端高が高いため一度に崩壊する量が多いが崩壊土砂が流されるのに時間がかかるため浸食速度は *case1* より遅く拡幅線にも大きな階段形状が現れる。

図-5(c)は掃流力のみ違いのある *case1*、*case2* の比較図である。掃流力が *case1* より 2 倍程度大きい *case2* は通水開始直後から後即、浸食が流路の水際線の拡幅として現れるが、*case1* は掃流力が小さく細粒分の抜け出しが活発に行われないため徐々に浸食は進んでいるが、通水開始後 50 分経過時まで直接水際の拡幅として影響が現れてこない。流路拡幅量は 200 分経過時には *case2* で 1m 程度、*case1* で 0.5m 程度で約 2 倍の拡幅量の違いが現れ、*case2* では *case1* より約 2 倍の浸食速度を持つことが分かる。

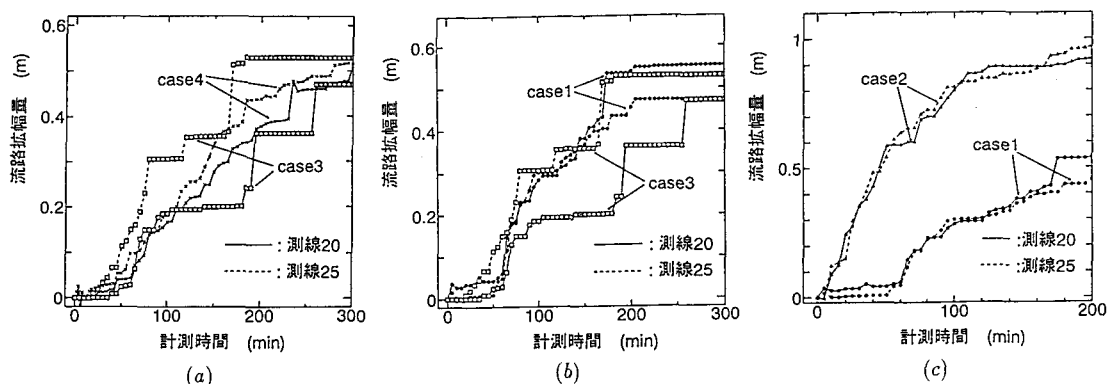


図-5 拡幅変化図

4. 総合検討

図-6は浸食断面の通過する浸食砂量を算定し、浸食砂量は場所毎の平均粒径 d_m と斜面傾斜角 θ を用いて無次元化したパラメーターを縦軸に、無次元掃流力と限界掃流力との比である掃流力比 τ_{*m}/τ_{*cm} を横軸に使った図により各ケースの総合検討を行う。

case4はcase3に比べ全体的に上部に点が位置している。このことはcase4は掃流力がcase3とほぼ同程度であるにもかかわらず流砂量の多いことを意味し、case3に比べ最大粒径の値が小さく粗粒子の遮蔽による影響が少ないことに起因した結果が現れていると思われる。

また、case3及びcase4は、case1より天端高が高いため流砂量も多く、掃流力の値が同程度であるcase1より上方に点が位置、case2は掃流力が大きく流砂量も多いため上方に点が位置し、掃流力のみ違いがあるcase1との間に顕著な違いをみせる。今回の実験条件では図-6から河床材料、天端高の違いによる影響が若干現れている。しかし、掃流力のみ異なるcase1とcase2の顕著な実験結果、違いに比較するとその程度は小さく、掃流力が浸食に及ぼす影響が主要因であることが推定できる。

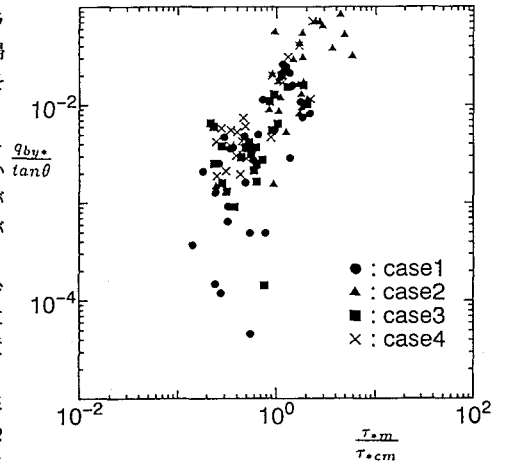


図-6 流砂量と掃流力の関係

5. おわりに

浸食機構が異なる要因と考えられる河床材料、天端高、掃流力の3点の違いを意識し、それぞれの変化に着目して検討を行った結果、天端高の違いは浸食機構にさほど影響を与えていないことが明らかとなり、総合的に掃流力が浸食現象の主要因であることが判明した。掃流力の違いは直接浸食断面に顕著な変化を与え、この値が大きいと円弧形状を示し、逆に限界掃流力付近では一様勾配を持つ直線斜面形状が現れる。今回の大型水路で限界掃流力に近い掃流力を与えた実験で、これまでの室内規模実験では再現することのできなかった自然河川にもみられる一様勾配を持つ直線状斜面をはじめて再現することが可能となった。

経過時間における河床構成材料の平均粒径の値に着目することで、河岸浸食に伴い掃流力と河床材料は互いに影響を受け浸食が進み原河床の平均粒径の値に近づき、横断方向に一定値でまとまっていく様子がみられた。無次元掃流力もまたこの影響を受け横断方向に限界掃流力以下の一定値でまとまり、安定断面に至るという一連の浸食過程を把握することができた。今後はさらに現実的な植生の影響や成層等を考慮した実験を行い、詳しい土砂の移動機構や浸食現象の解明を進めていく必要があると考えている。

謝辞：本研究は、平成4年度文部省試験研究費(B)(1)「最近の移動床水理学研究に立脚した多自然型親水性河道の設計指針の確立」(代表村本嘉雄)による補助を受けておこなわれた。

参考文献

- 1) 福岡捷二；河岸浸食と植生護岸，土砂移動現象に関するシンポジウム論文集，1992,3
- 2) 諏訪義男・山本晃一；河岸浸食に関する現地調査，水工学論文集 第35巻 1991,2
- 3) 池田駿介・Gary PARKER・千代田将明・木村善孝；直線礫床河川の動的横断安定形状とそのスケール，土木学会論文集，第375号/2-6，1986,11
- 4) 竹本成行・渡邊康玄・長谷川和義・亀田祐二(1992)；火山灰流路の側岸浸食過程に関する研究，土木学会北海道支部論文報告集 第48号 1992,2
- 5) 亀田裕二・長谷川和義・渡邊康玄・金高州吾；水工学論文集 第37巻 1993,2 (抜橋中)
- 6) Parker,G.(1986)；粗粒化について，土木学会論文集 第375号/2-6, 17-27