

石狩川上流における河床低下について

旭川開発建設部 治水課 ○松本 勝治
田代 隆志
根本 深

石狩川上流は旭川市を貫流する急流河川で、河床低下が顕著となっており、洗掘による既設護岸の沈下や河川構造物の根入れが不足する等の影響がでている。急速な河床低下により砂礫河床から堆積岩が露出した河床へと変化してきているが、河床は安定する傾向にはなく、滯筋の固定化により局所洗掘や砂州の樹林化が見られ、河川環境の様相も大きく変化している。

本発表では、露岩区間に現地実験水路を設置し、岩河床の流れに対する洗掘強度について検討を行った結果について報告する。

キーワード：河床低下、治水

1. まえがき

近年、全国的に源流から河口までの土砂動態の変化から河床低下が問題となっている河川が多く見られている。

石狩川の上流部は、支川も含めて河床勾配が 1/100～1/400 の急流河川であり、河床材料は扇状地性の堆積物（砂礫）で構成されている。

旭川市街部を貫流する石狩川や支川の忠別川などは、かつては振幅の大きな蛇行を伴う網状を呈していたが、旭川市の発展に伴う河道整備により、川が以前の蛇行流路幅より狭い堤間内に集約されたため、現在の低水路内では複列砂州形状を呈している。近年、石狩川本川では河床低下が顕著となっており、急流河川特有の洪水時の強大なエネルギーによる河床の洗掘・浸食が激しく、様々な問題を引き起こしている。（図-1、図-2）

また、著しい河床低下により河床を覆っていた砂礫が一掃され、岩盤が露出している区間も多く、このように露岩した箇所では滯筋が固定化し、河床が局所的に洗掘されている。さらに露岩した箇所では河底の砂礫の消失

によって魚類の産卵環境の減少、水生生物の生息環境の悪化など生物環境への影響も大きく、環境面も踏まえた対策の実施が急務となっている。

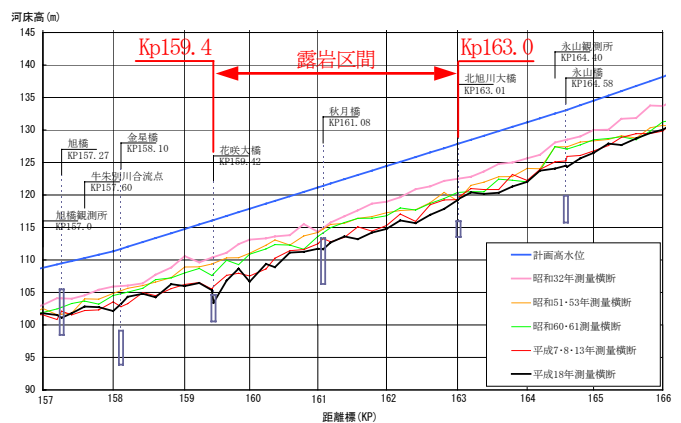


図-2 河床高経年変化図（最深河床高）

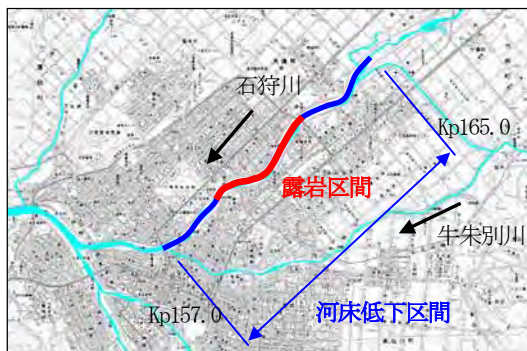


図-1 河床低下区間



写真-1 洗掘による護岸の浮き上がり（上）
橋脚の根入れ不足（下）

2. 河床低下の要因と現状

石狩川上流部において河床低下が顕著である石狩川本川 Kp157.0～Kp165.0（牛朱別川合流～永山新川合流：L＝約8 km）の区間における河床低下の要因としては、昭和30～50年代に行われていた砂利採取による直接的な河道掘削の影響や、ダムや砂防施設等による流入土砂量及び流況の変化、市街部付近の高水敷の造成、護岸による低水路の固定化、またこれらが引き起こす砂州の固定化とそれに伴う樹林化の影響等が考えられる。

現在の最深河床高では昭和32年測量時よりも5m以上下がっている箇所もあり、橋脚の根入れ不足、護岸脚部の浮き上がりなどが見られ、河川管理上の問題となっている。（写真-1）

また、砂利採取が全面禁止（昭和52年）となってからも河床低下は進行し、平成年代以降では河床が基盤岩層にまで達し、特に露岩箇所（Kp159.4～Kp163.0）では低水路内の局所的な洗掘により低々水路が形成されている。これは岩盤層特有の局所洗掘現象であると考えられ、河床低下を助長させている要因であると考えられる。

3. 露岩状況と課題解決に向けて

岩盤の種類と分布状況を把握するために、河床低下区間において、ボーリング調査を実施した。（図-3）

調査結果より、地質は固結度が低く脆い礫岩・砂岩層と、固結度が低く軟質なシルト岩層とが互層状態で形成されている基盤岩と、それを覆って分布する現河床堆積物である砂礫層より構成されていた。また、当該区間の露出している基盤岩としてはシルト岩がもっとも多く、表面におう穴やみずみち等が確認された。（写真-2、写真-3）

前述のとおり露出している岩盤層は、いずれの層においても固結度が低く、スレーキングにより容易に土砂・細粒分に分解されやすい性質と言える。基盤岩を構成する礫岩・砂岩・シルト岩について乾湿繰り返し試験を実施した結果では、礫岩においては2サイクル、砂岩・シルト岩では6サイクルで土砂・細粒化した（写真-4）。

河床の低固結の岩盤層は、ある程度の自立性を有してはいるが、強い流れに対しては脆弱であり、一度侵食を受けると流水や流砂が集中し、局所的な深掘れが形成されやすい岩質であると推測される。

岩盤層における局所洗掘については、その原因やメカニズム、岩盤の流水（流砂）に対する強度など、未解明な部分も多く河床変動を考える上でも取り扱いが課題となっている。将来の河道特性を把握するためには、河床変動解析等による河床低下量の予測を行うが、通常の河

床変動解析では、岩盤の局所洗掘を適切に評価することが出来ない。

そこで、岩河床における洗掘のメカニズムを把握するため、露岩区間において現地実験水路による岩盤の流水（流砂）に対する洗掘強度の調査を実施することとした。

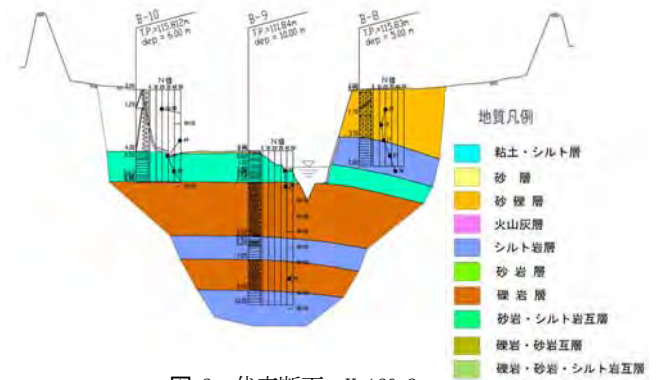


図-3 代表断面：Kp160.3



写真-2 露岩状況（礫岩）：Kp160.2付近



写真-3 露岩状況（シルト岩）：Kp162.8付近

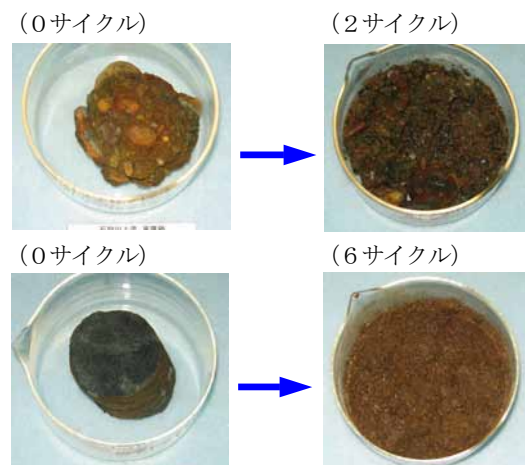


写真-4 乾湿繰り返し試験（上：礫岩、下：シルト岩）

4. 実験水路による岩盤強度試験

河床低下区間において露出している岩盤の流水（流砂）に対する強度を把握するため、実際の流況に近い状態を再現することを目指した。そのため、水路において本川の平均年最大流量時（ $Q=613\text{m}^3/\text{s}$ ）の低水路平均摩擦速度 26.5 cm/s と同程度の摩擦速度が得られること、実験に必要な流量が安定的に確保できることを条件に現地を選定した。

実験水路は石狩川本川（Kp160.2左岸付近）の低水路内の露岩箇所、幅 $B=1.0\text{m}$ 、深さ $h=1.0\text{m}$ 程度、河床勾配 $i=1/30$ の水路を掘削した（図-4、図-5）。掘削後、実験水路底面の岩盤はシルト岩が露出した。シルト岩は露岩区間で広く表層に分布しており、水路の岩盤と他の露岩している場所とを針貫入試験による換算一軸圧縮強度にて比較調査した結果、ほぼ同程度の強度であった（表-1）。このことから、実験水路における岩盤の洗掘強度は、当該区間の岩盤の強度を代表できるものであると判断した。

既往の知見等が少なく、有意な洗掘量が得られる条件がどの程度の流量・流砂量であるか不明であるため、本実験を始める前に図-6 に示すフローにより予備実験を行い、条件を絞り込み、本実験での諸条件（流量・給砂量・粒径等）を決め実験を行った。

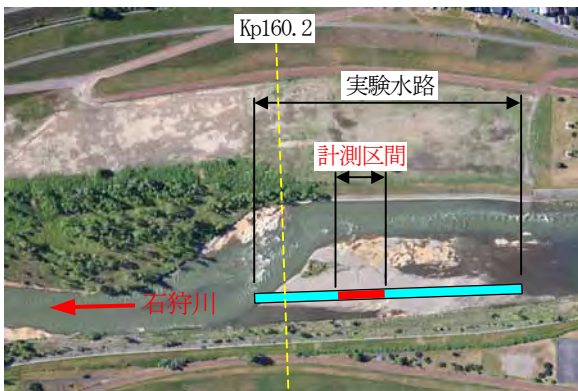


図-4 実験水路（位置図）

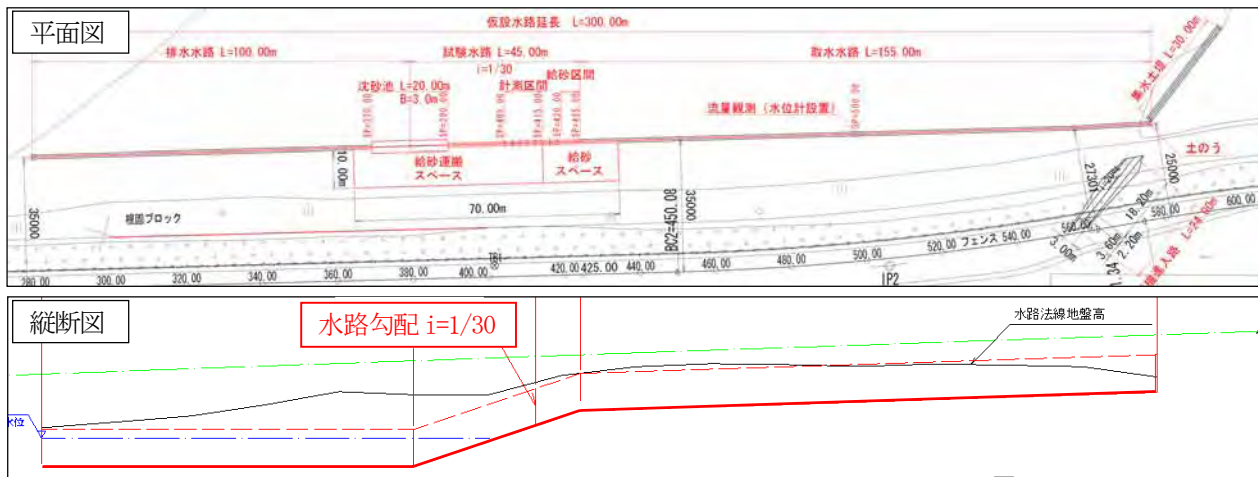


図-5 実験水路（平面図・縦断面図）

(1) 予備試験

a) 予備実験（給砂無し）

給砂無し（流水のみ）での河床洗掘量の把握と合わせて、実験水路全体の流況の確認、観測方法及び観測位置の設定、水位・流速観測による H-Q 式の作成のため、6 時間通水を 2 日間行った。

b) 予備実験（給砂有り）

給砂方法の確立、継続時間と洗掘深の概略を把握するため、給砂量を変えたケースで予備実験を行い、本実験でのケース設定を行った。

表-1 針貫入試験による換算一軸圧縮強度の比較

計測箇所	岩種	換算一軸圧縮強度 (kN/m ²)	
		測定結果	平均値
実験水路内	シルト岩	0.6~1.7	1.0
	砂岩	0.4~0.6	0.6
	礫岩	—	—
石狩川上流(低水路内) Kp160.3, Kp161.0, Kp162.5	シルト岩	0.6~1.4	1.0
	砂岩	0.6	0.5
	礫岩	—	—

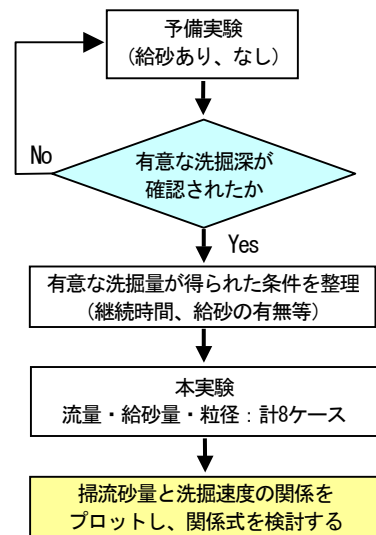


図-6 実験フロー（予備実験・本実験）

給砂条件は、芦田・道上の掃流砂量式¹⁾で求められる流砂量をもとに設定した。供給土砂はなるべく単一粒径となるよう給砂材料を用意し、人力により一定速度での連続給砂をこころがけた。

(2) 観測方法

a) 流量観測

給水施設を設けず自然取水で行ったため、水路内の試験区間の上流で安定している断面を基準断面とし、流速・水位を計測して H-Q 式を作成した。基準断面には自記水位計を設置して連続観測を行った。

b) 水位観測

実験水路の計測区間 (L=15m) を縦断方向 0.5mピッチ 31 測線に分割し、土研式ポイントゲージを設置して観測した。通水中の河床変動による水位変動が考えられるため、1 時間間隔で計測した (写真-5)。

c) 洗掘量計測

水位観測と同一断面 (31 測線) について横断方向 0.1 mピッチ・11 測線を計測した。また岩盤表面がスレーキングを起こさないように、少量の通水により湿潤状態を維持しながら河床高の変化を計測した。

d) 粒度試験

流砂の粒度分布を把握するため実験水路下流端に堆積した土砂を採取し、粒度試験を行った。

(3) 本実験

予備実験結果をもとに給砂量、通水継続時間等を決定し、流量・給砂量・粒径の組み合わせにより実験ケースを 8 ケース設定した。また作業手間を考え、各実験ケース毎に水路河床面の整形はせず、実験を行った。

5. 実験結果

予備実験における洗掘速度と摩擦速度の関係を図-7 に示す。

予備実験の結果、給砂無し (流水のみ) ではほとんど岩盤の洗掘が見られなかった。このため岩盤の洗掘は、流水の作用よりも、流砂による作用の影響が大きいと考えられる。

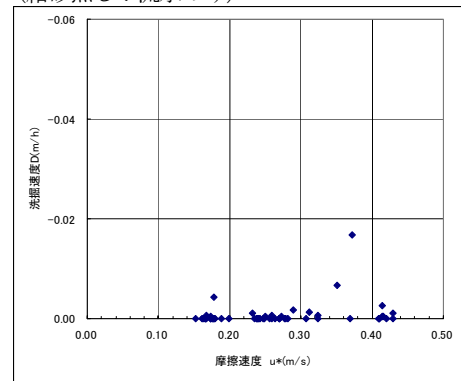
本実験における各ケース毎の実験条件と実験結果 (洗掘速度) を表-2 に示す。表中の洗掘速度 D は、砂礫堆積部分を除いた各測線での断面平均値として扱った。これは、図-8 の様に水路内においても実河川と同様に局所的な深掘れ現象が見られ、掃流砂が滞筋に集中するなど厳密な横断方向の流砂量を捉えられないため、全断面での平均の洗掘量として取り扱うこととした。

また、全実験ケースを終えた時点で実験水路の河床では、当初平坦であった河床が写真-6 の様に、実際の川



写真-5 実験水路 (計測状況)

(給砂無し：流水のみ)



(給砂有り)

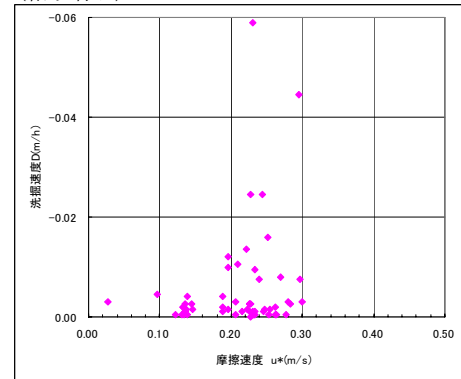


図-7 洗掘速度と摩擦速度の関係 (予備実験)

表-2 本実験の条件と結果 (洗掘速度)

ケース	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8
平均流量	Q=(m ² /s) 0.15	0.24	0.15	0.14	0.30	0.30	0.40	0.42
平均水深	H=(m) 0.13	0.15	0.13	0.13	0.18	0.18	0.25	0.25
平均流速	V=(m/s) 1.10	1.62	1.10	1.06	1.65	1.69	1.62	1.66
粒径	d=(mm) 40	40	25	25	40	40	40	40
給砂量	Qb=(m ² /h) 0.4 (100%)	1.2 (40%)	1.2 (20%)	2.4 (40%)	2.0 (65%)	3.0 (100%)	3.0 (40%)	4.8 (65%)
継続時間	T=(h) 6	4	4	4	4	3	3	3
洗掘速度	測線 0m D=(mm/h) D=	礫堆積	礫堆積	0.5	礫堆積	礫堆積	礫堆積	礫堆積
	測線 2m D=(mm/h) D=	0.3	0.9	0.4	0.5	1.8	2.9	0.7
	測線 4m D=(mm/h) D=	0.2	1.1	1.0	1.8	2.2	1.3	1.1
	測線 6m D=(mm/h) D=	0.3	礫堆積	0.3	礫堆積	礫堆積	礫堆積	礫堆積
	測線 8m D=(mm/h) D=	0.6	礫堆積	0.9	2.2	0.5	1.3	1.3
	測線 10m D=(mm/h) D=	1.0	0.5	1.0	1.6	1.1	2.7	2.9
	測線 12m D=(mm/h) D=	-	-	0.5	0.8	3.5	1.0	1.3
	測線 14m D=(mm/h) D=	-	-	1.3	0.8	0.5	3.0	2.7
	Caseの平均 D=(mm/h)	0.5	0.8	0.7	1.3	1.6	2.0	1.7
	備考	6測線(2mピッチ)			31測線(0.5mピッチ)			
	平均洗掘速度Dは礫堆積部分を除いた各測線での断面平均値							

でも確認されている「おう穴」や「みずみち」が形成されていた。

6. 岩盤の洗掘速度と水理量の関係

本実験結果について、全体の傾向を把握するため実験ケース毎の各測線における平均値を用いて、岩盤の洗掘速度 D と各水理量（流速 V 、摩擦速度 u_* 、無次元掃流力 τ_* 、単位幅流砂量 q_b ）との関係について整理した結果、洗掘速度 D と単位幅流砂量 q_b との関係でもっとも相関が良かった（図-9）。

そこで既往の文献²⁾を参考に、洗掘速度 D と流砂量 q_b の関係について以下のように仮定した。

- ①岩盤の洗掘は、主として水流中の砂礫の衝突による。
- ②岩盤の洗掘量は、岩盤面に衝突する砂礫の運動量に比例する。

上記の仮定により、洗掘深 D_0 は、

$$D_0 = \alpha_1 \cdot T \cdot N \cdot m \cdot V_0 \quad (1)$$

となる。ただし、

- D_0 : 単位幅当たりの洗掘深 (m)
- α_1 : 比例定数
- T : 砂礫による衝撃の継続時間 (h)
- N : 単位時間幅当たりの洗掘現象に関与する砂礫の数 (個/h/m)
- m : 流砂1個当たりの質量 (g)
- V_0 : 流砂の速度 (m/h)

よって、単位幅当たりの洗掘速度 D (m/h) は、

$$D = D_0 / T = \alpha_1 \cdot N \cdot m \cdot V_0 \quad (2)$$

と表される。

ここで、単位時間幅当たりの洗掘現象に関与する砂礫の数 N は、単位幅当たりの通過掃流砂量を q_b (m^2/h)、流砂1個当たりの体積 v (m^3)、流砂が衝突する確率を p とすると、

$$N = q_b \cdot p / v \quad (3)$$

と表せ、また流砂1個当たりの質量 m は砂の密度を ρ_s とすると、

$$m = v \cdot \rho_s \quad (4)$$

となり、さらに流砂の速度 V_0 は流速 V に比例すると仮定すると、

$$V_0 = \alpha_2 \cdot V \quad (5)$$

Shouji Matsumoto, Takashi Tashiro, Shin Nemoto

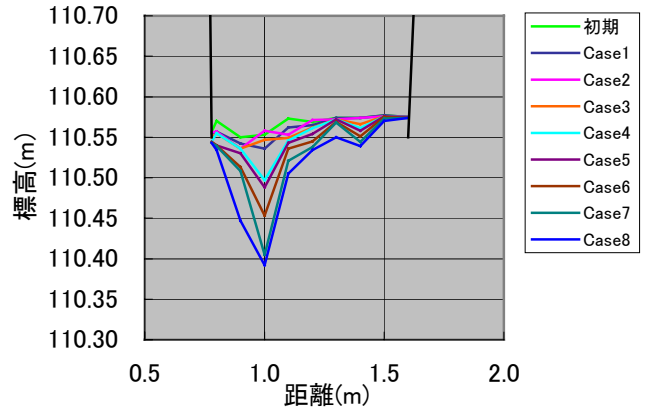


図-8 代表的な深掘れ箇所（測線 10）



写真-6 実験終了後の水路（おう穴、みずみちの形成）

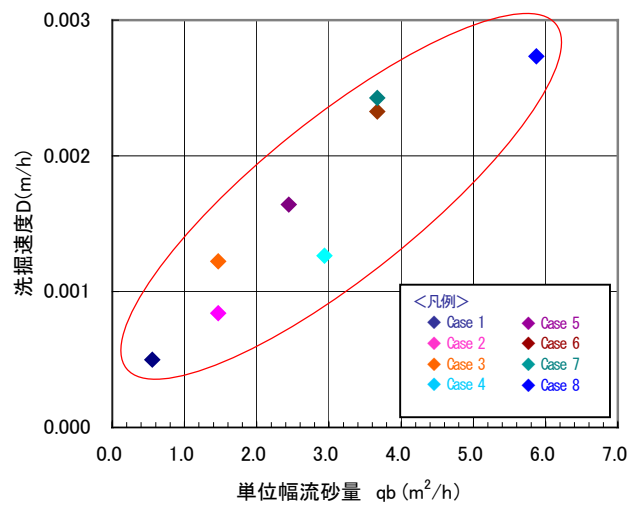


図-9 洗掘速度と単位幅流砂量 q_b との関係

となる。ただし、 α_2 : 比例定数
 以上より、(2)式に(3)~(5)式を代入すると、

$$D = \alpha_1 \cdot (q_b \cdot p / v) \cdot (v \cdot \rho_s) \cdot (\alpha_2 \cdot V) \quad (6)$$

となり、岩盤の洗掘速度 D は、

$$D = \alpha \cdot q_b \cdot V \quad (7)$$

と表すことが出来る。ただし、 $\alpha = \alpha_1 \cdot p \cdot \rho_s \cdot \alpha_2$

以上より、岩盤の洗掘速度 D と単位幅流砂量 q_b × 流速 V との関係プロットすると、図-10 の通りとなり、洗掘速度 D は $q_b \cdot V$ に比例していることが解った。

よって、近似直線にて洗掘速度 D と流砂量 q_b との関係を表すと、以下の通り比例関係となる。

$$D = 5.0 \times 10^{-8} \cdot q_b \cdot V + 0.0006 \quad (8)$$

7. まとめ

河床低下の要因分析や対策工を検討する場合、実現現象の把握や将来予測において河床変動解析における岩盤の取り扱いが課題となっており、今回、現地実験水路による調査を実施することとなった。

本報告では、岩河床における洗掘のメカニズムの把握のため、露岩区間において現地実験水路を設置し、以下の検討を行った。

- 1) 現地実験水路において、岩盤の流水（流砂）に対する洗掘強度の調査を実施し、岩河床における河床低下の要因として、流砂による影響が大きいことを確認した。
- 2) 実験結果より、流砂に対する岩盤の洗掘速度と流砂量との関係を整理した。

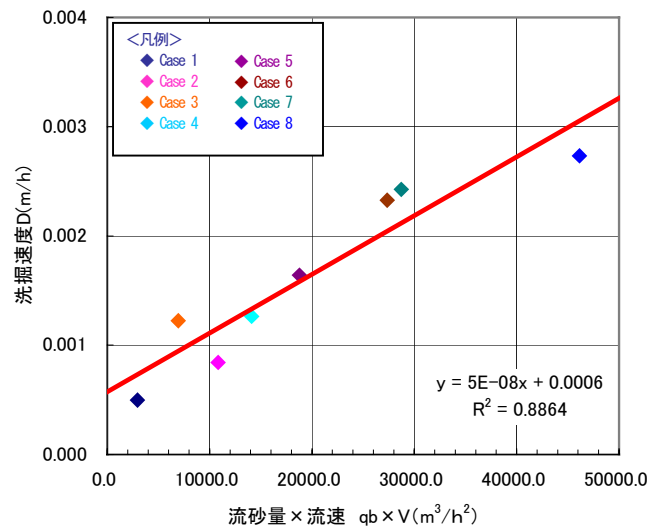


図-10 洗掘速度の流砂量×流速との関係

今後の課題としては、実験結果の検証をさらに行うとともに、岩河床における河床変動解析への取り込みを検討していく必要があり、これらの結果を基に、河床低下の将来予測及び対策工の設計に活用していきたい。

8. 謝辞

本実験を行うにあたり、北海道大学黒木幹男先生、泉典洋先生、北見工業大学渡邊康玄先生に有益な御助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 芦田道夫, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第206号, 1972.
- 2) 大野善雄, 林 栄港: コンクリート河川構造物の摩耗予測の一手法, 電力土木, No211, 1987.