

軟岩の洗掘を考慮した河床変動計算手法の開発

A NUMERICAL CALCULATION METHOD OF RIVER BED DEFORMATION THAT CONSIDERS SCOUR OF SOFT ROCKS

井上 卓也¹・渡邊 康玄²・齋藤 大作³・根本 深⁴・
松本 勝治⁵・江崎 國夫⁶・濱木 道大⁷

Takuya Inoue, Yasuharu Watanabe, Daisaku Saito, Shin Nemoto,
Shoji Matsumoto, Kunio Ezaki and Michihiro Hamaki

¹正会員 工修 (財)北海道河川防災研究センター (〒060-0807 札幌市北区北7条西4丁目)

²正会員 工博 北見工業大学工学部教授 (〒090-0015 北見市公園町165番地)

³工修 国土交通省北海道開発局旭川開発建設部 (〒078-8513 旭川市宮前通東4155番31)

⁴正会員 工修 国土交通省北海道開発局旭川開発建設部 (〒078-8513 旭川市宮前通東4155番31)

⁵国土交通省北海道開発局旭川開発建設部 (〒078-8513 旭川市宮前通東4155番31)

⁶(財)北海道河川防災研究センター (〒060-0807 札幌市北区北7条西4丁目)

⁷(株)開発工営社 (〒060-0004 札幌市中央区北4条西5丁目1番地)

The area of exposed soft rocks has been increased due to river bed degradation in the vicinity of Asahikawa City of the Ishikari River. According to the soft rocks have a specific feature in which the local scouring can be caused easily due to high flow velocity, there is a possibility of decreasing the stability of the bridge pier and the shore protection. However, the morphology of sand riverbed and the morphology of soft rock riverbed are different phenomenon, the general bed load transport formula cannot reproduce the bed deformation sufficiently in the area of exposed rocks. In this paper, the relational expression of the scouring speed of the soft rock is generated based on the experimental observation, and the numerical calculation of river bed deformation considering the scouring of soft rocks was developed.

Key Words : numerical calculation, riverbed deformation, soft rocks, bed load, The Ishikari River

1. はじめに

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

石狩川本川の旭川市街地付近においては, 河床低下が進行し河床を覆っていた砂礫が一掃され, 低固結の基盤岩(軟岩)が露出する区間が増加している(図-1)。

軟岩は, ある程度の固結度を有しているが, 強い水流に対して脆弱であり, 一度侵食を受けると流水や流砂が集中し, 局所的な深掘れを形成しやすい特徴を有している。このため, 砂礫の消失による魚類の産卵環境及び生息環境の悪化だけではなく, 局所的な深掘れによる橋脚の根入れ不足, 護岸の浮き上がりなどが問題になっている。図-2は, 旭川市街地付近における石狩川の横断面図であり, 局所洗掘が著しいことが確認できる。

河床変動を再現あるいは将来予測しようとする場合, 河床変動計算が用いられるが, 河床変動計算で通常用い

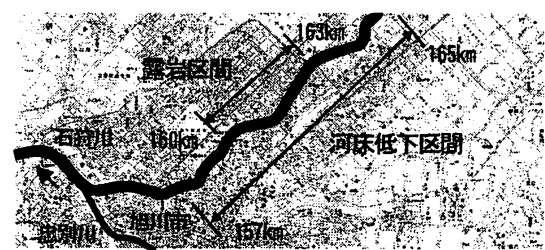


図-1 河床低下区間

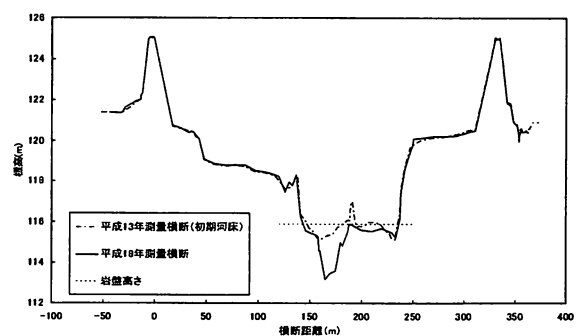


図-2 横断面図(河口から161.6km地点)

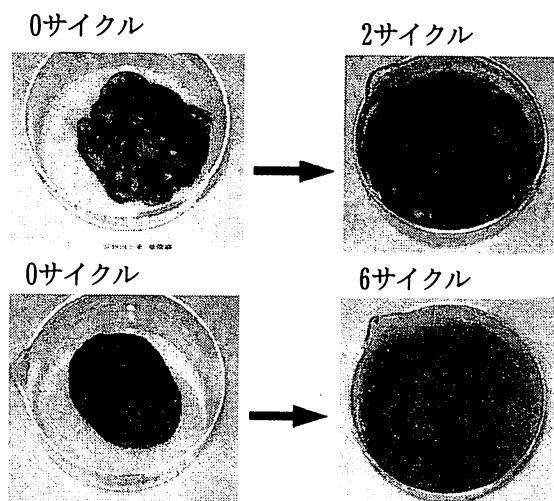


写真-1 乾湿繰り返し試験（上：礫岩，下：シルト岩）

られる掃流砂量式では扱っている現象が異なり、露岩区間の河床変動を正確に再現できない。そこで、将来予測及び河床低下対策の効果検討を行うことを目的に、軟岩の洗掘を考慮した河床変動計算手法の開発を行った。

2. 露岩状況の把握

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。調査結果によると、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、それを覆って分布する現河床堆積物である砂礫層によって構成されていた。また、当該区間の露出している岩盤層としてはシルト岩が最も多く確認された。

岩盤層は、いずれの層においても固結度が低く、強い水流やスレーキングにより容易に細粒分に分解されやすい性質を有している。岩盤層を構成する礫岩・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、礫岩は2サイクル、砂岩・シルト岩は6サイクルで細粒化した（写真-1）。

細粒化した岩盤の平均粒径は、シルト岩0.005mm、砂岩0.13mm、礫岩5.8mmであり、河床に堆積している砂礫（平均粒径40mm～60mm程度）に比べ、非常に細かく、一度侵食を受けて細粒化するとほとんどが下流へ下り、露岩区間には堆積しないと推測される。

3. 現地実験水路による岩盤強度試験¹⁾

流水や流砂による軟岩の洗掘特性について把握するために、石狩川本川（河口から160.2km左岸付近）の低水路内の露岩箇所を掘削して現地実験水路を作成し、給砂条件と流量条件を変化させ計8ケースの実験を行った。

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)	
		範囲	平均値
実験水路内	シルト岩	0.6~1.7	1.0
	砂岩	0.4~0.6	0.5
	礫岩	—	—
石狩川 河口から 160.3km地点 161.0km地点 162.5km地点	シルト岩	0.6~1.4	1.0
	砂岩	0.6	0.6
	礫岩	—	—

実験水路は幅B=1.0m、深さh=1.0m程度、河床勾配 i=1/30とし、本川の平均年最大流量時 (Q=613m³/s) の低水路平均摩擦速度26.5cm/sと同程度の摩擦速度が得られることを目標とした。

実験水路の岩質は、露岩区間において最も広く分布しているシルト岩であった。また、水路の岩盤と本川に露出している岩盤とを針貫入試験による換算一軸圧縮強度にて比較した結果を表-1に示す。これによると、実験水路と本川の岩盤は同程度の強度であった。

(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回行った。

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、本実験のケース設定を行った。

(2) 本実験

予備実験結果を基に給砂量、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。なお、実験ケース毎に水路河床面の整形は行わなかった。

(3) 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-3に示す。これらによると、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、流水による作用よりも、流砂による作用の影響が大きいと考えられる。なお、岩盤の洗掘の要因としては、乾湿の繰り返しも考えられるが、図-2のように最深部が局所洗掘する場合、常に水に浸かっているため、乾湿の繰り返しによる影響は少ないと考え、実験中は低流量を流し続け水路河床面が乾燥しないようにした。

本実験におけるケース毎の実験条件と実験結果（洗掘速度）を表-2に示す。なお、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である。本実験における通水前後の河床変動高コンター図を図-4に示

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 ³ /h)	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/h)	1.10	1.62	1.10	1.06	1.65	1.69	1.62	1.66
粒径	d (mm)	40		25		40			
給砂量	q_b (m ² /h)	0.4	1.2	1.2	2.4	2.0	3.0	3.0	4.8
		(100%)	(40%)	(20%)	(40%)	(65%)	(100%)	(40%)	(65%)
継続時間	T (h)	6	4	4	4	4	3	3	3
測線 0m	D (mm/h)	礫堆積	礫堆積	0.5	礫堆積	礫堆積	礫堆積	礫堆積	礫堆積
測線 2m		0.3	0.9	0.4	0.5	1.8	2.9	0.7	2.6
測線 4m		0.2	1.1	1.0	1.8	2.2	1.3	1.1	礫堆積
測線 6m		0.3	礫堆積	0.3	礫堆積	礫堆積	礫堆積	礫堆積	礫堆積
測線 8m		0.6	礫堆積	0.9	2.2	0.5	1.3	1.3	3.3
測線 10m		1.0	0.5	1.0	1.6	1.1	2.7	2.9	4.2
測線 12m		-	-	0.5	0.8	3.5	1.0	1.3	1.3
測線 14m		-	-	1.3	0.8	0.5	3.0	2.7	1.3
Caseの平均		0.5	0.8	0.7	1.3	1.6	2.0	1.7	2.6
備考		6測線(2mピッチ)		31測線(0.5mピッチ)					
		Dは礫堆積部分を除いた各測線での断面平均値							

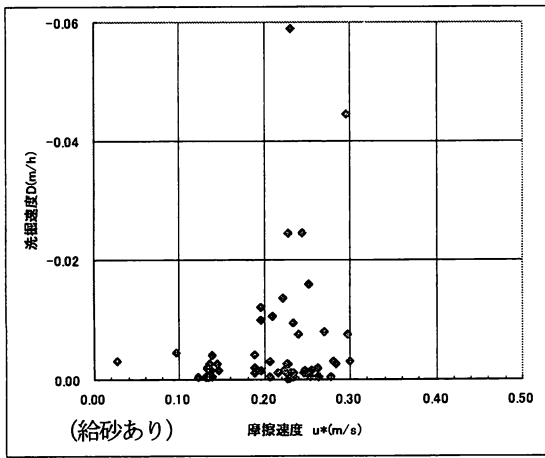
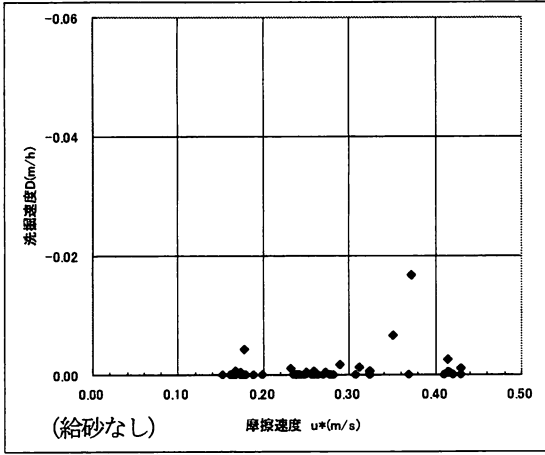


図-3 洗掘速度と摩擦速度の関係 (予備実験)



写真-2 実験終了後の水路 (みずみちの形成)

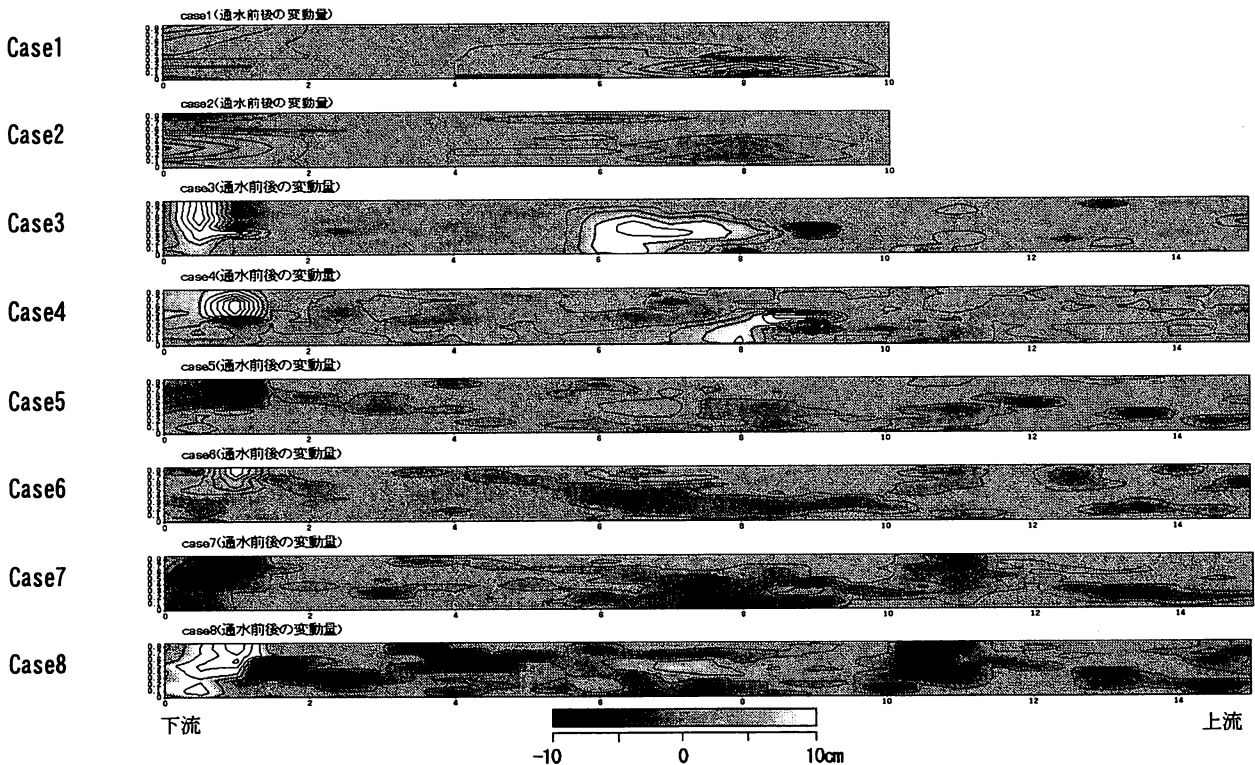


図-4 通水前後の変動量コンター図

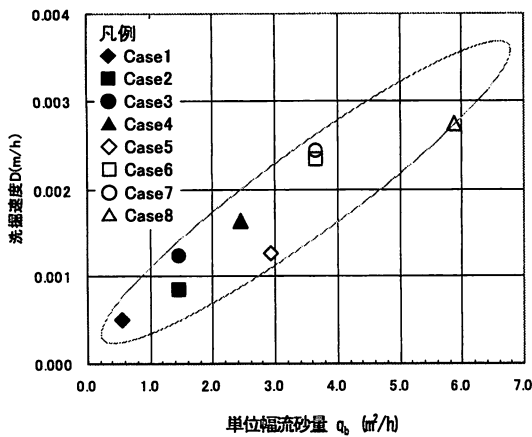


図-5 洗掘速度と単位幅流砂量 q_b との関係

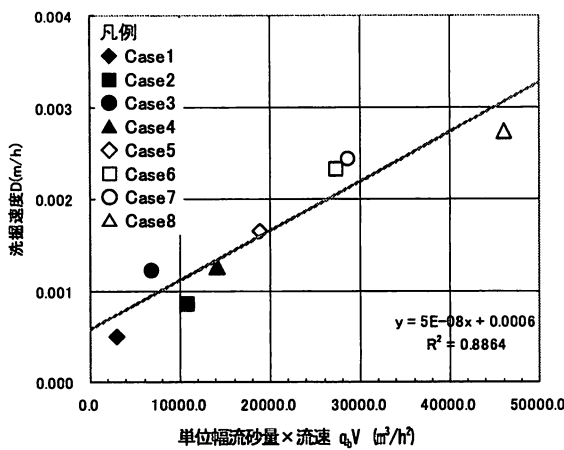


図-6 洗掘速度と単位幅流砂量×流速との関係

す。また、実験水路の河床では、当初平坦であった河床に、写真-2の様な実際の川でも確認されている「みずみち」が形成され、流砂が集中する傾向にあった。

4. 岩盤の洗掘速度と水理量の関係

本実験の結果について、全体の傾向を把握するために実験ケース毎の平均値を用いて、岩盤の洗掘速度 D と各水理量（流速、摩擦速度、無次元掃流力、単位幅流砂量）との関係について整理した結果、単位幅流砂量 q_b

と最も相関が良かった（図-5）。

そこで、既往の文献²⁾を参考に、洗掘速度と単位幅流砂量と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 は式(1)で表される。

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

ただし、 D_0 は単位幅当たりの洗掘深(m)、 α_1 は比例定数、 T は砂礫による衝撃の継続時間(h)、 N は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 は流砂1個当たりの質量(g)、 V_0 は流砂の速度(m/h)とする。

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、以下の式で表される。

$$N = q_b \cdot p / v \quad (2)$$

さらに、流砂の速度 V_0 は流速 V に比例すると仮定する。また、実験中は砂礫を給砂し続けているため、砂礫による衝撃の継続時間は実験継続時間と同じと考え、単位幅当たりの洗掘速度 D (m/h)は以下の式で表される。

$$D = \frac{D_0}{T} = \alpha_1 \cdot N \cdot m \cdot V_0 \quad (3)$$

$$= \alpha_1 \cdot (q_b \cdot p / v) \cdot (v \cdot \rho_s) \cdot (\alpha_2 \cdot V) = \alpha \cdot q_b \cdot V$$

ただし、 ρ_s は砂の密度、 α 、 α_2 は比例定数である。

実験結果から図-6のように、近似直線を用いて洗掘速度 D の関係を表すと、実験を行った範囲内において以下の通りとなる。

$$D = 5.0 \times 10^{-8} \cdot q_b \cdot V + 0.0006 \quad (4)$$

5. 軟岩の洗掘を考慮した平面2次元河床変動計算

手法の開発

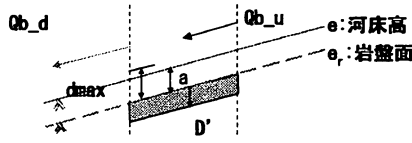
(1) 流れの基礎式

流れの基礎方程式は、2次元のReynolds方程式及び連続式を用いる。

(2) 混合粒径による河床変動モデル³⁾⁴⁾⁵⁾

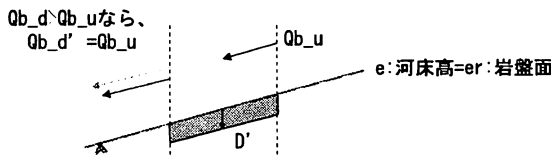
流下方向の掃流砂量式には、芦田・道上の式を用いる。横断方向の掃流砂量式には、長谷川の式を用いる。粒径別限界摩擦速度には、岩垣公式を用い、混合粒径による遮蔽効果は、Egiazaroffによって導かれた式を芦田・道上が修正した式を用いる。

ア) 河床高 - 岩盤面 \leq 砂礫上の交換層厚 (最大粒径) の場合



Qb_u : 上流側全流砂量 (m^3)
 Qb_d : 下流側全流砂量 (m^3)
 岩盤の $r * c'$ を考慮した流下可能な流砂量
 a : 交換層厚 (m) (砂礫上では d_{max})
 d_{max} : 最大粒径 (m)
 D' : 岩盤の洗掘深 (m)

イ) 洗掘 \geq 河床高 - 岩盤面 = 0 (交換層厚なし) の場合



Qb_u : 上流側全流砂量 (m^3)
 Qb_d : 下流側全流砂量 (m^3)
 D' : 岩盤の洗掘深 (m)

図-7 岩盤上の流砂量補正

(3) 岩盤上の河床変動

岩盤上の河床変動量は以下の仮定のもと算出する。

- 1) 河床高と岩盤高の差が交換層厚 (最大粒径) 以下になった場合、混合粒径による遮蔽効果は考慮しない。
- 2) 図-7 ア) の場合、砂礫の河床変動高 (流砂の連続式より算出) と式 (4) より算出した軟岩の洗掘高の合計値を河床変動高とする。
- 3) 図-7 イ) の場合、河床高が岩盤面以下で下流側流砂量が上流側流砂量より大きい (洗掘) とときは、下流側流砂量は上流側流砂量と同じとし、河床変動高は式 (4) より算出する。
- 4) 河床高が岩盤面以下で下流側流砂量が上流側流砂量より小さい場合 (堆積)、砂礫の計算と同じく、流砂の連続式より河床変動高を算出する。

6. 再現検証

軟岩の洗掘を考慮した平面2次元河床変動計算手法の妥当性を検証するために、現況河道の再現計算を行った。

また、軟岩の洗掘を考慮しない場合と比較を行い、洗掘速度の関係式 (4) の導入の効果について考察を行った。

(1) 計算条件の設定

1) 計算区間及び計算メッシュ

計算区間は、露岩の顕著な石狩川本川旭川市街地付近 (河口から160km~163km) とし、計算メッシュは、縦断方向に61測線、横断方向については低水路法尻間9点、左右岸高水敷は各6点の合計21点を設定した。

2) 初期河床形状

初期河床は、平成13年測量時の河床形状とした。

3) 計算流量

計算流量は、計算区間の下流に位置する旭橋流量観測所 (河口から157km地点) における、平成13年から平成18年までの時刻流量のうち、検討区間の平均無次元掃流力が無次元限界掃流力を上回る $500m^3/s$ 以上の流量とした。

4) 河床材料

河床材料は混合粒径で与えるものとし、初期粒度分布は平成8年度河床材料調査結果を基に設定した。

5) 樹木

樹木群は透過とし、透過係数は平成13年度調査結果を基に設定した。また、樹木の範囲は、平成19年度航空写真を基に高水敷のみ設定した。

6) 上下流の条件 (助走区間、起算水位、流入土砂量)

助走区間は上下流に3kmずつ設定し、助走区間の下流端において等流起算とした。また、助走区間上流端において動的平衡状態を仮定し、流入土砂量を与えた。なお助走区間上流端は露岩しておらず、岩盤面の高さは現河床高より10m以上低いいため、今後も露岩する可能性は少ない。

7) 粗度係数

粗度係数は低水路で0.029、高水敷で0.045とした。

(2) 計算結果の考察

図-8に計算結果の平均河床高縦断図と最深河床高縦断図を、図-9に計算結果の横断図をそれぞれ示す。

河床高縦断図を見ると、軟岩の洗掘を考慮した場合 (Case2) は、軟岩の洗掘を考慮しなかった場合 (Case1) に比べ、最深河床高の再現性が向上する結果となった。

また、横断図を見ると、軟岩の洗掘を考慮しなかった場合 (Case1)、初期河床である平成13年横断から、堆積する箇所 (河口から161.2km地点)、ほとんど変化しない箇所 (河口から161.6km地点)、砂州の移動により最深部が移動する箇所 (河口から162.2km地点) といった変化は見られたが、軟岩特有の一度侵食を受けると、みずみちに流砂が集中し、局所的な深掘れが進行する特徴を十分に再現できていない。これに対し、軟岩の洗掘を考慮した場合 (Case2)、局所洗掘の位置は若干ずれるものの、洗掘深は概ね一致する結果となった。

局所洗掘の位置がずれる理由として、本研究で開発したモデルが、粒径や岩質の違いによる洗掘速度の違いを考慮していないことが考えられる。また、岩垣公式による無次元限界掃流力は、砂粒のかみ合いを考慮した力のつり合いを基礎式として理論式を展開し、実験により各係数を定めたものである。そのため、岩盤上に砂粒が一つだけ存在するような場合、砂粒のかみ合いが無い場合、無次元限界掃流力を過大に算定している可能性があるなど、岩盤上の砂礫の移動を正確に表現していないことも原因として考えられる。

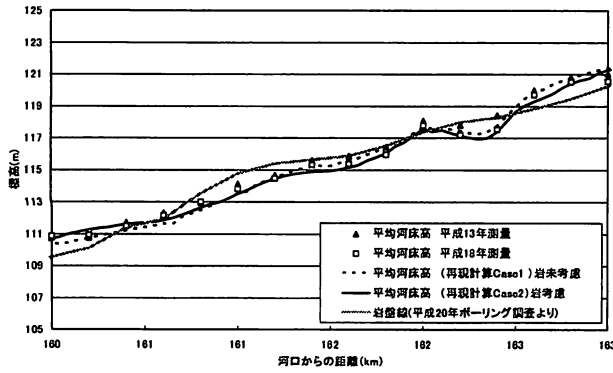


図-8 (1) 平均河床高縦断面

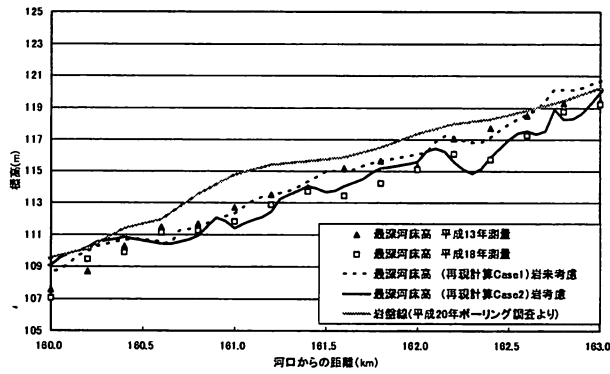


図-8 (2) 最深河床高縦断面

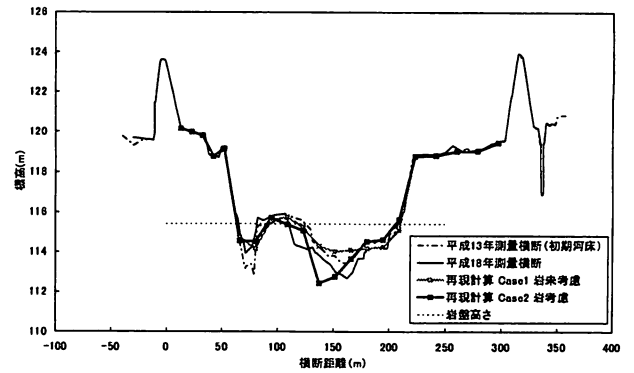


図-9 (1) 横断面 (河口から161.2km地点)

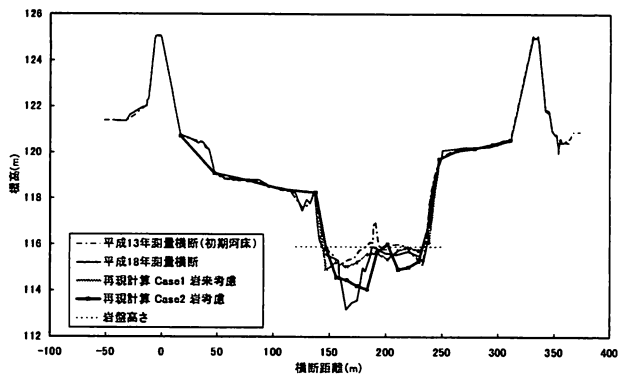


図-9 (2) 横断面 (河口から161.6km地点)

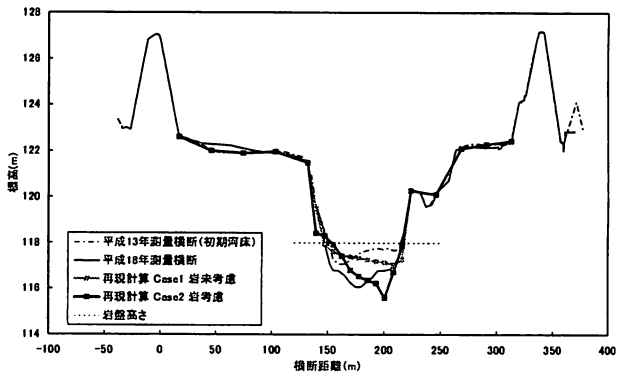


図-9 (3) 横断面 (河口から162.2km地点)

7. まとめ

実験結果より、軟岩の洗掘は流水による影響より流砂による影響が大きいことが判明したため、軟岩の洗掘は運動量に比例すると仮定し、洗掘速度の関係式を作成した。また、軟岩の洗掘を考慮した平面2次元河床変動計算手法の開発を行った。

再現検証より、上記関係式を導入することによって露岩区間の河床変動を十分な精度で表現可能であることが確認された。また、軟岩の洗掘を考慮しない場合に比して、軟岩の洗掘を考慮した場合の方が、露岩区間の再現性が向上することが確認された。

本研究で開発した軟岩の洗掘を考慮した河床変動計算手法により、未解明の部分が多かった露岩区間の河床変動について、定量的な将来予測及び対策の検討が可能となった。

今後は、粒径や岩質の違いによる洗掘速度の違いや、岩盤上の砂礫の移動について研究を進め、より高精度かつ汎用性の高いモデルへと改良を加える必要がある。

謝辞：本研究にあたって、北海道大学黒木幹男先生、泉典洋先生をはじめたくさんの方にご助言を頂きました、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 松本勝治, 田代隆志, 根本深: 石狩川上流における河床低下について, 第52回北海道開発技術研究発表会資料, 2009.
- 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.
- 3) 清水康行, Marco Tubino, 渡邊康玄: 自由砂州と交互砂州の共鳴条件における河床変動計算, 水工学論文集第36巻, 1992.
- 4) 清水康行: 沖積河川における流れと河床変動の予測手法に関する研究, 北海道開発局開発土木研究所 (現寒地土木研究所) 河川研究室編, 1991.
- 5) 渡邊康玄, 清水康行: 樹木の存在する河道の流況計算, 第34回北海道開発技術研究発表会資料, 1991.

(2009. 4. 9受付)