

平成25年度

# 軟岩侵食と砂礫被覆を考慮した 数値解析モデルの構築

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム ○井上 卓也  
(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム 伊藤 丹

北海道内の複数の河川において、軟岩床の露出に伴い、急激な河床低下が進行し、橋脚の根入れ不足、護岸の被災、産卵床の減少など様々な問題が生じている。一般的な河床変動モデルは、砂礫床を対象としているため、軟岩床の変動を十分に予測できない。そこで、本研究は、軟岩の侵食と軟岩床上を移動する砂礫層厚の変動の両方を考慮した河床変動モデルを構築した。

キーワード：軟岩、河床低下、数値解析モデル

## 1. はじめに

北海道では、河床砂礫の流出に伴い、軟岩床が露出する河川が増加している。一般的な岩床河川の侵食速度は遅いため、河川計画において岩床は固定床として扱われることが多い。しかし、軟岩床は、侵食(摩耗)に対して脆弱であり、その侵食速度は驚くほど速い。このため、軟岩床の侵食により、護岸や橋脚の安定性が低下し、それに伴う治水安全度の低下が懸念されている。

軟岩床の主たる侵食メカニズムは、跳躍する流砂の衝突による摩耗と考えられている<sup>1)</sup>。このため、侵食速度は、その場を通過する流砂量に強く依存する<sup>1b)</sup>。流砂量の増加は、軟岩床を摩耗する粒子の個数を増やすため、侵食速度の増大に繋がる。それと同時に、流砂量の増加は、軟岩床を被覆する砂礫面積を増やすため、侵食速度の減少にも繋がる。したがって、侵食速度や、その結果としての侵食地形を評価するためには、軟岩床を被覆する砂礫面積率の把握が重要となる。

これまでに、流砂による軟岩侵食を考慮した平面2次元河床変動モデルがいくつか提案されている<sup>2)3)4)</sup>。これらのモデルにおいて、砂礫による被覆は、計算格子毎の砂礫層厚の有無で判断されている。これを式に表すと、

$$P_c = \begin{cases} 0 & \text{for } \eta_a \leq L_0 \\ 1 & \text{for } \eta_a > L_0 \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $P_c$ は軟岩床の砂礫による被覆率(完全に軟岩床が露出している場合が0、完全に砂礫によって覆われている場合が1)、 $\eta_a$ は砂礫層の厚さ、 $L_0$ は軟岩床が砂礫で完全に覆われる際の閾値であり、既往研究<sup>2)3)4)</sup>では0から最大粒径程度の値が用いられている。

粒径スケールの微視的な面積を想定した場合、砂礫に

よる被覆は、0と1の集合体として捉えることができる。しかし、実河川スケールの計算を行なう場合、粒径スケールの計算格子を用いることは、計算負荷を増加させるため困難である。

そこで、本研究では、Parkerら<sup>5)</sup>、田中ら<sup>6)</sup>によって提案された被覆率モデルを、井上らによって開発された軟岩侵食を考慮した平面2次元河床変動モデルに組み込み、より汎用性の高い新たなモデルを構築する。

## 2. モデル開発

### (1) 流れの基礎式

流れの基礎式には、円筒座標系・定常流れ場における運動方程式および連続式を用いる<sup>7)</sup>。なお、河床変化高の空間的な最大値が粒径を超えた場合、再度流況計算を行い、これを繰り返すことにより時間を進める。

### (2) 流砂の連続式

流砂の保存則は、Luuら<sup>8)</sup>が粘着性河床の研究で提案した以下の式を、軟岩床にも適用する。

$$\frac{\partial V_b}{\partial t} + (1-\lambda) \frac{\partial \eta_a}{\partial t} + \left( \frac{\partial q_{b,s}}{\partial s} + \frac{\partial q_{b,n}}{\partial n} \right) = 0 \quad (2)$$

ここで、 $V_b$ は単位面積あたりの掃流砂の体積、 $t$ は時間、 $\lambda$ は砂礫層の空隙率、 $\eta_a$ は砂礫層厚、 $s$ は流路中心に沿った座標軸、 $n$ は横断方向の座標軸、 $q_{bs}$ 、 $q_{bn}$ はそれぞれ、 $n$ 方向の単位幅流砂量である。なお、 $V_b$ は掃流砂の濃度 $C_b$ と跳躍高さ $h_s$ の積に等しく、長さの次元を持つ変数である(図-1参照)。

砂礫層厚が十分にある河川においては、砂礫層から掃流層へ流砂が絶えず供給されるため、流砂量は飽和流砂

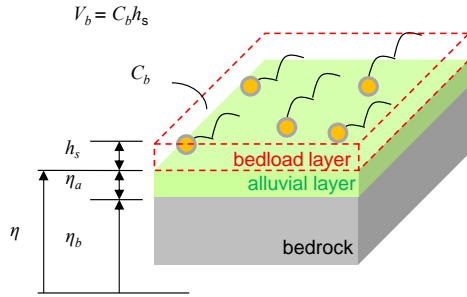


図-1 岩盤層、砂礫層、掃流層の概念図

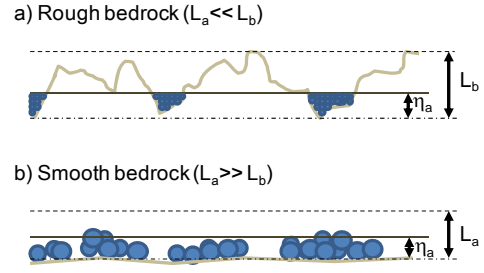


図-2 被覆率と砂礫層厚の概念図

量と等しい。しかし、岩床河川においては、砂礫層厚が十分に存在せず、流砂量が飽和流砂量を下回る場合がある。そこで、Luuら<sup>8)</sup>と同様に、岩床上の掃流砂体積 $V_b$ と十分に砂礫層がある状態(飽和状態)の掃流砂体積 $V_{bc}$ の比を用いて飽和流砂量を補正する。

$$(q_{b,s}, q_{b,n}) = \begin{cases} \frac{V_b}{V_{bc}} (q_{bc,s}, q_{bc,n}) & \text{for } 0 \leq \frac{V_b}{V_{bc}} < 1 \\ (q_{bc,s}, q_{bc,n}) & \text{for } \frac{V_b}{V_{bc}} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $V_{bc}$ は単位面積あたりの掃流砂の飽和体積、 $q_{bc,s}$ 、 $q_{bc,n}$ はそれぞれ $s$ 、 $n$ 方向の単位幅飽和流砂量である。

流線方向( $s$ 軸方向)の単位幅飽和流砂量は、Sklar and Dietrich<sup>1)</sup>が岩床侵食の研究で使用した Fernandez Luque & van Beek<sup>9)</sup>の式によって算出される。

$$q_{bc,s} = 5.7(\tau_* - \tau_{*c})^{1.5} \sqrt{R_b g d^3} \quad (4)$$

ここで、 $\tau_*$ は無次元河床せん断力、 $\tau_{*c}$ は無次元限界せん断力、 $R_b$ は砂の水中比重(=1.65)、 $g$ は重力加速度、 $d$ は砂礫粒子の粒径である。なお、流砂量式は、砂礫床の計算でよく用いられている芦田・道上の式や、Meyer / Peter-Mullerの式を用いても良い。

砂礫の移動限界を表す $\tau_{*c}$ は以下の式で与える。

$$\tau_{*c} = P_c \tau_{*ca} + (1 - P_c) \tau_{*cb} \quad (5)$$

ここで、 $\tau_{*ca}$ は砂礫床の上の無次元限界せん断力、 $\tau_{*cb}$ は軟岩床の上の無次元限界せん断力、 $P_c$ は被覆率である。この式は、被覆率の変化に伴い、流砂の移動限界を表す無次元限界せん断力が変化することを意味する。軟岩床が完全に砂礫で覆われた場合、 $\tau_{*c}$ は $\tau_{*ca}$ と等しくなり、軟岩床が完全に露出した場合、 $\tau_{*c}$ は $\tau_{*cb}$ と等しくなる。

横断方向( $n$ 軸方向)の単位幅飽和流砂量は、長谷川<sup>10)</sup>によって提案された以下の式で算出される。

$$q_{bc,n} = q_{bc,s} \left( \frac{u_{b,n}}{u_{b,s}} - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*} \frac{\partial \eta}{\partial n}} \right) \quad (6)$$

$$\frac{u_{b,n}}{u_{b,s}} = N_* \left( \frac{D}{r_s} \right) \quad (7)$$

ここで、 $u_{b,s}$ および $u_{b,n}$ は流線方向および横断方向の底面近傍流速、 $\mu_s$ および $\mu_k$ は静止摩擦係数(=1.0)および動摩擦係数(=0.5)、 $\eta$ は河床高(すなわち、砂礫層厚 $\eta_a$ と軟岩

床高さ $\eta_b$ の和)、 $N_*$ は2次流強度(=7.0)、 $D$ は水深、 $r_s$ は流線の曲率である。

飽和流砂量の絶対値 $q_{bcm}$ は、掃流砂の飽和体積 $V_{bc}$ と砂礫粒子の跳躍速度 $u_s$ の積で表されるため、 $V_{bc}$ は $q_{bcm}$ を $u_s$ で除した値と等しくなる。

$$V_{bc} = \frac{q_{bcm}}{u_s} = \frac{\sqrt{q_{bc,s}^2 + q_{bc,n}^2}}{u_s} \quad (8)$$

ここで、 $u_s$ は砂礫粒子の跳躍速度であり、Sklar and Dietrich<sup>1)</sup>が跳躍運動の実験データを収集し導いた以下の経験式を用いて算出する。

$$\frac{u_s}{\sqrt{R_b g d}} = 1.56(\tau_* / \tau_{*c} - 1)^{0.56} \quad (9)$$

### (3) 軟岩床の侵食速度

軟岩床の侵食速度は、Chatanantavet and Parker<sup>11)</sup>によって提案された以下の式で算出される。

$$\frac{\partial \eta_b}{\partial x} = -E = -\beta q_{bm} (1 - P_c) \quad (10)$$

ここで、 $\eta_b$ は軟岩床の標高、 $E$ は侵食速度、 $\beta$ は軟岩床の摩耗係数、 $q_{bm}$ は流砂量の絶対値(= $\sqrt{q_{b,s}^2 + q_{b,n}^2}$ )、 $P_c$ は岩床の砂礫による被覆面積率である。なお、井上ら<sup>2)</sup>の実験によると、摩耗係数は、軟岩床の一軸圧縮強度の2乗に依存し、給砂粒径の概ね0.5乗に依存する。

### (4) 被覆率

図-2は、被覆率と砂礫層厚の概念図である。Parkerら<sup>5)</sup>および田中ら<sup>6)</sup>は、被覆率 $P_c$ が砂礫層厚 $\eta_a$ と河床の代表的な凹凸高さ $L$ の比で表されると想定した。 $P_c$ と $\eta_a/L$ の関係は河川毎に多種多様であるが、彼らは $P_c$ が $\eta_a/L$ に対し線形的に変化すると仮定した。

$$P_c = \begin{cases} \eta_a/L & \text{for } 0 < \eta_a/L < 1 \\ 1 & \text{for } \eta_a/L > 1 \end{cases} \quad (11)$$

Parkerら<sup>5)</sup>は、 $L$ は岩床の巨視的な凹凸高さ $L_b$ に等しいと定義し、田中ら<sup>6)</sup>は、 $L$ は砂礫床の凹凸高さ $L_a$ と等しいと定義している。これはParkerら<sup>5)</sup>が研究対象とした河川では、岩床の粗度高さ $L_b$ が砂礫床の粗度高さ $L_a$ を無視できるほど大きかったのに対し、田中ら<sup>6)</sup>の実験では、岩床は非常に滑らかで、岩床の粗度高さ $L_b$ が、

砂礫床の粗度高さ  $L_a$  に比べ、無視できるほど小さかったためである。本研究では、滑らかな岩床と荒い岩床の両方に対応するために、 $L=L_b+L_a$  と定義する。

なお、田中ら<sup>9)</sup>は、滑らかな固定床水路を用いて、給砂量と被覆率の関係を調査し、 $L_a$  は一般的な砂礫床の粗度高程度 ( $L_a=2.5d$ ) であることを示している。一方、 $L_b$  は岩床河川ごとに異なると考えられる。 $L_b$  の計測方法については次章で提案する。

被覆率  $P_c$  を考慮したことにより、砂礫の移動限界  $\tau_c$  [(5)式]、飽和流砂量  $q_{bc}$  [(4) (6)式]、流砂量  $q_b$  [(3)式]、侵食速度  $E$  [(10)式]も、格子における砂礫体積 (すなわち、 $v_b+(1-\lambda)\eta_a$ ) によって変化する。図-3 は、河床せん断力を一定とした場合の、格子における砂礫体積に対する被覆率、移動限界、流砂量、侵食速度を示している。

格子における砂礫体積が掃流層の飽和体積  $V_{bc}$  を超えるまで、被覆率  $P_c$  はゼロ (完全な岩床) である。このため、移動限界  $\tau_c$  は、軟岩床上の移動限界  $\tau_{cb}$  となり、飽和流砂量も軟岩床上の飽和流砂量  $q_{bcb}$  [(4) (6)式の  $\tau_c$  に  $\tau_{cb}$  を代入した場合の値] となる。流砂量  $q_b$  は (3)式に示したように、掃流層の砂礫体積  $V_b$  の増加に伴い線形的に増加し、 $V_b$  が  $V_{bc}$  に至ると岩床の飽和流砂量  $q_{bcb}$  と等しくなる。侵食速度  $E$  は  $q_b(1-P_c)$  に比例するため、格子における砂礫体積が  $V_{bc}$  に至るまで、線形的に増加する。

格子における砂礫体積が掃流層の飽和体積  $V_{bc}$  を超えると、軟岩床上に砂礫が堆積し、軟岩床と砂礫床の混在河床となる。このとき、掃流層の砂礫体積  $V_b$  は常に  $V_{bc}$  に保たれ、被覆率  $P_c$  は砂礫層厚  $\eta_a$  の増加に伴い線形的に増加する。被覆率の変化に伴い、移動限界  $\tau_c$  は軟岩床上の移動限界  $\tau_{cb}$  から砂礫床上の移動限界  $\tau_{ca}$  に線形的に変化する [(5)式]。この結果、飽和流砂量  $q_{bc}$  も軟岩床上の飽和流砂量  $q_{bcb}$  から砂礫床上の飽和流砂量  $q_{bca}$  へ変化する。(3)式より  $V_b=V_{bc}$  の場合  $q_b=q_{bc}$  のため、流砂量  $q_b$  も飽和流砂量  $q_{bc}$  と同じ変化をする。流砂量の減少と被覆率の増加に伴い、侵食速度  $E$  は減少し、格子における砂礫体積が  $(1-\lambda)L$  に至る (つまり  $\eta_a=L$ ) とゼロになる。

格子における砂礫体積が  $(1-\lambda)L$  を超えると、軟岩床は完全に砂礫によって被覆される。このとき、移動限界  $\tau_c$  は砂礫床上の移動限界  $\tau_{ca}$ 、流砂量  $q_b$  は砂礫床上の飽和流砂量  $q_{bca}$ 、侵食速度  $E$  はゼロとなり、通常の砂礫床の河床変動計算が行われる。

図-3 のように砂礫体積によって、岩床の侵食速度がピークを持つ形で変化することは、Sklar and Dietrich<sup>1)</sup>の実験によって明らかにされており、本研究の数値計算モデルは、この影響を含んでいる点に新規性を有する。

### (5) トータルの河床変動

砂礫層厚の変動と岩床侵食を併せたトータルの河床変化高  $\partial\eta/\partial t$  は以下の式で算出する。

$$\frac{\partial\eta}{\partial t} = \frac{\partial\eta_a}{\partial t} + \frac{\partial\eta_b}{\partial t} \quad (12)$$

Takuya Inoue, Akashi Ito

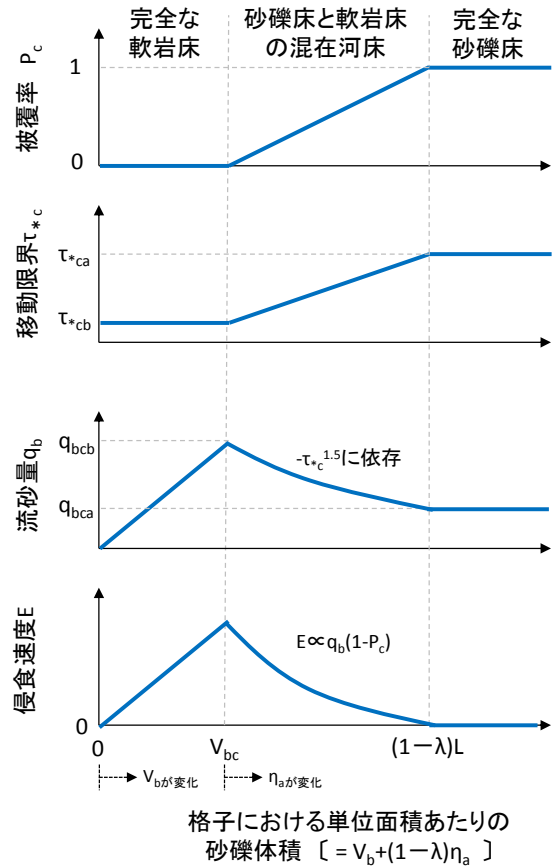


図-3 格子における砂礫体積に対する被覆率、移動限界、流砂量、侵食速度の概念図 ( $\tau_c$ 一定の場合)



図-4 岩床凹凸高さの計測状況

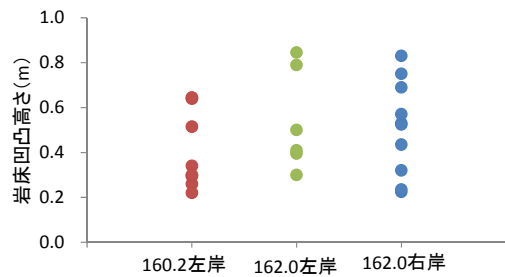


図-5 岩床凹凸高さの計測結果

## 3. 岩床凹凸高さの計測

石狩川の露岩区間 (河口から160km ~ 163km・以後、研究区間と呼ぶ) において、岩床の凹凸高さ  $L_b$  の計測を行った。計測方法は、2本のアルミスタッフを直角に交差させ、岩床凹凸の最も低い箇所と最も高い箇所の差を計

測した。計測箇所と地点数は、河口から160.2km左岸水際で8地点、河口から162.0km左岸水際で6地点、河口から162.0km右岸水際で10地点である(図-4参照)。

計測結果を図-5に示す。これによると、計測した岩床凹凸の最小値は22cm、最大値84.5cm、平均値は48.2cmであった。

## 4. モデル検証

### (1) 計算条件

研究区間を対象にモデルの検証を行った。初期河床は平成13年横断測量、初期軟岩床高は平成20年ボーリング測量より設定した。初期被覆率は、初期砂礫層厚(初期河床高と初期岩盤層高の差)を用いて(11)式より設定した。粒径は50mmの単一粒径とし、マンシングの粗度係数は、低水路0.030、高水敷0.045とした。流量は平成13年～平成18年に観測された時刻流量のうち、研究区間において50mm粒径が活発に移動し始める400m<sup>3</sup>/s以上の値のみを用いた。

摩耗係数は、井上ら<sup>2)</sup>が研究区間で実施した現地実験結果を参考に、0.001m<sup>1</sup>とした。砂礫床の無次元限界せん断力 $\tau_{ca}$ は0.05を用い、軟岩床の無次元限界せん断力 $\tau_{cb}$ は井上らの実験<sup>4)</sup>を基に0.02とした。助走区間は上下流に3kmずつ設定し、助走区間下流端において等流起算、助走区間上流端において動的平衡状態を仮定した。なお、研究区間の上流区間(河口から164km～166km)は露岩しておらず、砂礫層厚は10m以上あり、近年変動は少ない。

岩床の凹凸高さ $L_b$ は、計測結果の平均値程度50cm(=10 $d$ )とし、河床の代表的な凹凸高さ $L$ は、 $L_b$ に砂礫床の凹凸 $L_a$ (=2.5 $d$ )を加えた12.5 $d$ とした。

### (2) 計算結果

図-6a)b)に河床変化高の観測結果と計算結果の比較を示す。これによると、計算結果は、軟岩侵食に伴うみお筋の形成を精度よく再現できていることがわかる。

図-6c)に、被覆率の計算結果を示す、これによると、みお筋に沿って被覆率の低い箇所が連続している。このように、軟岩床が露出しやすい区間とその度合いを予測できる点が、本研究モデルのメリットである。

## 5. まとめ

本研究では、軟岩床の侵食と、軟岩床上に堆積する砂礫の面積率を考慮した、新たな平面2次元河床変動計算モデルを提案した。本モデルによって、石狩川の軟岩床侵食を伴う河床変動を精度よく再現することができた。また、本モデルは、軟岩床の露出度合いとゾーンを予測できる点に、既往モデル<sup>23)4)</sup>に対する優位性を有する。

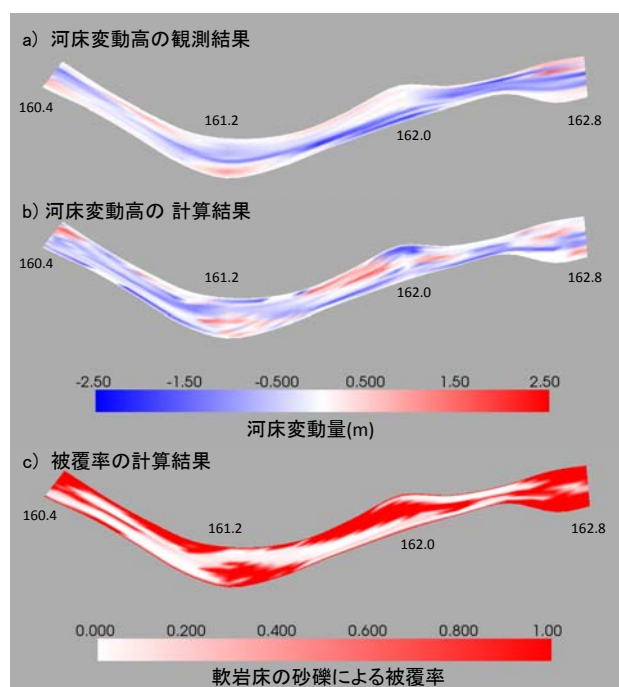


図-6観測結果と計算結果の比較

### 参考文献

- 1) Sklar, L. S., and W. E. Dietrich : A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load, *Water Resour. Res.*, 40, W06301, 2004.
- 2) 井上卓也, 泉典洋, 米元光明, 旭一岳 : 軟岩上の限界掃流力と軟岩の洗掘速度に関する実験, *河川技術論文集*, 第17巻, pp.77-82, 2011.
- 3) 井上卓也, 渡邊康玄, 齋藤大作, 根本深, 松本勝治, 江崎國夫, 濱木道大 : 軟岩の洗掘を考慮した河床変動計算手法の開発, *河川技術論文集*, 第15巻, 321-326, 2009.
- 4) 及川森, 岩崎理樹, 山口里実, 清水康行, 井上卓也 : 河床における岩盤上の流砂の集中度合に関する実験的検討と数値シミュレーション, *土木学会論文集 B1(水工学)*, Vol.68, No.4, I\_949-I\_954, 2012.
- 5) Parker, G., Fernández, R., Viparelli, E., Stark, C. P., Zhang, L., Fu, X., Inoue, T., Izumi, N., and Shimizu, Y. : Interaction between waves of alluviation and incision in mixed bedrock-alluvial rivers, *Proc. of 12th International Symposium on River Sedimentation, ISRS*, 615-622, 2013.
- 6) 田中岳, 泉典洋 : 部分的に覆礫した岩盤河床における掃流砂量と流れの抵抗則, *土木学会論文集 B1(水工学)*, Vol. 69, No. 4, I\_1033-I\_1038, 2013.
- 7) Shimizu, Y. and Itakura, T. : Calculation of bed variation in alluvial channels, *J. Hydraul. Eng.*, 115, 367-384, 1989.
- 8) Luu, L. X., Egashira, S., and Takebayashi, H. : Investigation of Tan Chau reach in lower Mekong using field data and numerical simulation, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, Vol.48, 1057-1062, 2004.
- 9) Fernandez Luque, R., and van Beek, R. : Erosion and transport of bed-load sediment, *J. Hydraul. Res.*, 14, 127-144, 1976.
- 10) Hasegawa, K. : Universal bank erosion coefficient for meandering rivers, *J. Hydraul. Eng.*, 115(6), 744-765, 1989.
- 11) Chatanantavet, P., and Parker, G. : Experimental study of bedrock channel alluviation under varied sediment supply and hydraulic conditions, *Water Resour. Res.*, 44, W12446, 2008.