

河川データによる河床洗掘の水理要因に関する検討

Influence of Hydraulic Factors on Bed Erosion

北海道開発局開発土木研究所 渡 邊 康 玄 Yasuharu WATANABE
北海道大学 長谷川 和 義 Kazuyoshi HASEGAWA
北海道開発局河川計画課 北 條 紘 次 Kouji HOUJYOU

It is one of the most important subject in river improvement works to predict bed erosion. However, there have been few theoretical studies and the qualitative measurements on bed erosion especially in actual rivers. In this paper, the relationship between hydraulic factors and the bed erosion is studied using river data. It is found that the tendency of the bed erosion can be expressed by two factors, which are the hight of bar and degree of meander. Using this expression, the bed erosion can be predicted very easily even at local offices at the site.

Keywords: bed erosion, bar, secondary flow, river data

1. はじめに

近年河道の整備が進み、破堤等による洪水の堤内地への氾濫は減少してきている。しかしながら、堤外地へ閉じこめた流水が護岸をはじめとする河道内施設への被害を大きくする結果を生み出している。このため、治水事業費に対する河道の維持費の占める割合は増加の傾向にある。このことから、堤内氾濫の防止もさることながら、河道内災害の防止についての積極的な取り組みも重要になっている。河道内災害の原因は様々であるが、主たる原因の一つである河床洗掘は、最も重要な現象であると思われる。すなわち、河岸近傍に発生する場合、河岸侵食による堤防への危険度の増加あるいは水位流向に影響を与え構造物や護岸根固めへの被害を助長する。このため河床洗掘防止については、従来より計画的に対策を推進し一定の効果をあげているが、完成に至るまでには今後更に年月を必要としており、今後ともその必要性緊急性に応じて計画的に河床洗掘防止対策を実施していく必要がある。しかし、河床洗掘の発生・防止のメカニズムを河川観測と対応づけて行った研究は少なく、河川計画策定においては従来経験に頼る部分が大きなウエイトを占めてきた。河川計画特に段階施工計画を立案する上で合理的かつ簡単に洗掘深を求め得る手法の開発が急がれている。本検討は、河川のデータをもとに流れおよび基礎水理量と河床洗掘との関係について把握し、誰もが簡単に河床洗掘による河道災害防止対策を立案出来るようにすることを目的とする。

表-1 水理諸元

2. 検討対象河川

本研究で取り扱う河川の水理諸元を表-1に示す。なお北海道内の一級河川の河道形状はその継続時間から年平均最大流量程度である融雪出水で決定されている。このことから河道災害の主要な要因となる河床洗掘について、融雪出水時の河川データを用いて検討を行うこととした。これらの河川は北海道内の一級河川であるが、図-1に示す砂州領域区分¹⁾でも分かるように砂州非発生領域から複列砂州領域まで分布しており、河床形状に対し、一般的な検討が可

河 川 名	区 間 キロポスト	流 量 m ³ /s	水面幅 m	水深 m	水面勾配	河床材料 mm	表示 記号
後志利別川	16.0-16.4	517	103	2.98	1/825	16.9	○
"	16.6-16.9	517	89	3.01	1/714	16.9	○
"	17.0-17.6	517	110	2.96	1/903	17.0	○
"	17.8-18.6	517	114	2.93	1/907	18.9	○
"	18.8-19.8	517	128	2.44	1/478	20.8	○
"	20.0-21.0	517	124	2.51	1/661	19.6	○
声 間 川	16.0-21.6	385	20	2.70	1/1116	20.0	●
天 塩 川	65.0-74.0	2971	215	3.85	1/1813	14.1	◎
忠 別 川	9.0-20.0	397	175	2.07	1/515	122.0	◎
鶴 川	9.0-17.8	836	225	2.47	1/880	9.7	□
十 勝 川	72.0-79.0	603	218	1.80	1/305	30.0	■
雨 竜 川	7.0-25.0	360	101	3.21	1/1200	17.8	□
尻 別 川	3.2- 8.2	894	113	2.95	1/2310	1.1	◎
湧 別 川	9.0-13.0	280	165	1.11	1/300	36.4	△
豊 平 川	1.8-10.8	530	84	3.56	1/1321	0.2	△
"	11.0-21.0	500	100	2.40	1/143	73.4	△
釧 路 川	60.6-62.4	130	54	1.18	1/327	16.2	▲

能と思われる。

3. 流況と河床洗掘の関係

河道の形状および特性は流れによって規定され、逆に流れは河道の形状に規定されている。そこで河床洗掘を考える場合、まず流況と河床洗掘の関係を見いだす必要がある。図-2は、尻別川昭和62年融雪出水時の航空写真から得られた表面流速ベクトル図および出水直後の河床コンター図である。表面流速と河床形状を直接結び付けることは非常に乱暴であるが、出水時の流速を把握した例は航空写真解析を除けばほとんど無い。このため、流速と河床形状との概略的な関係を表面流速ベクトルから算出した流速の成分と河床形状とを比較することにより把握することとした。縦断方向の河床変動量は、ある地点に流入する土砂量と流出する土砂量との差で規定される。実際にこのことを扱うには河床近傍の掃流力の流下方向に対する微分量を考える必要がある。掃流力は(1)式に示すように流速と結びつけられることから、縦断方向の河床変動は近似的に縦断方向流速の流下方向変化量 $\partial u / \partial s$ として捉えることが可能と考えられる。同様に、横断方向の河床変動は、横断方向流速の横断方向変化量 $\partial v / \partial n$ によって捉えることが可能と考えられる。

$$\begin{aligned}\tau_o &= \rho g h i. \\ &= \rho g n^2 h^{1/3} U^2\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 s, n ; 河道流下方向、横断方向の距離、 u, v ; s, n 方向の流速、 τ_o ; 河床せん断力、 ρ ; 水の密度、 g ; 重力加速度、 h ; 水深、 i ; エネルギー勾配、 n ; マニングの粗度係数、 U ; 流速である。図-3に、算出した縦断方向流速の流下方向変化量と横断方向流速の横断方向変化量のコンター図を示した。図-2で明瞭に判読し得る砂州の前縁との対応を見ると、河床形状を規定する縦断方向流速の流下方向変化量と横断方向流速の横断方向変化量は、砂州の位置と密接な関係があることがわかる。

図-4は、河床洗掘で災害に結び付くという点で最も重要な河岸の出水前後での河床洗掘変化量 $\Delta \eta / h$ と河岸近傍の流速成分との関係を見たものである。なお、比較のため出水前の河床洗掘量 η

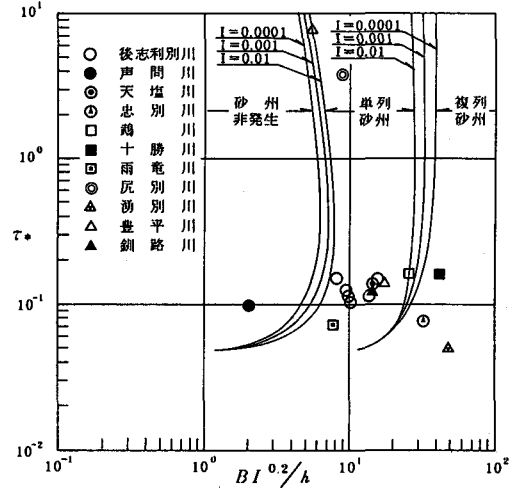


図-1 中規模河床形態領域区分

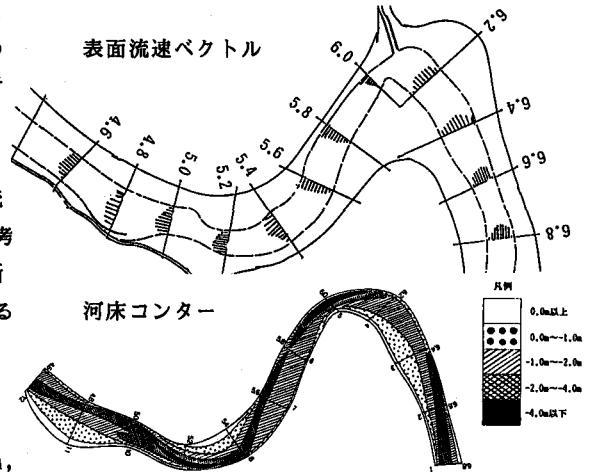


図-2 表面流速ベクトルおよび河床コンター

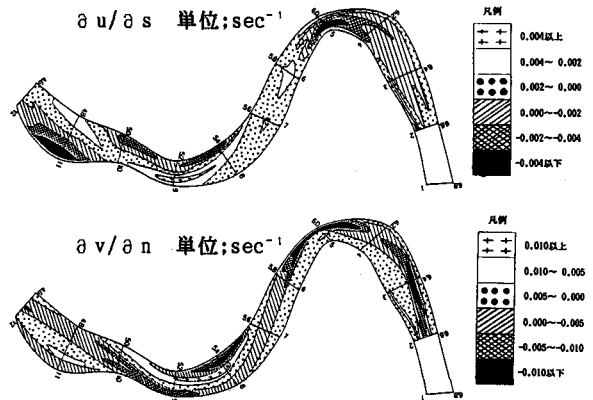


図-3 流速成分コンター

/hも示した。ここで、 η ；断面平均河床高からの河床洗掘深である。河床形状と河道曲率 $1/r$ および流速の変化量との間に密接な関係があることが確認できる。概略の河床形状は河道曲率で規定され、またK.P 6.6左岸、K.P4.8左岸およびK.P6.4～K.P6.2右岸付近等で見られるように、流速の変化量で洗掘（堆積）と判断され出水前の河床が堆積（洗掘）傾向にある箇所において、出水前後の河床洗掘（堆積）量が大きくなる傾向がある。このことは、筆者の一人が行った二次元浅水流モデルによる流速解を用いた流速成分と河床の変化量との関係²⁾からも同様の結果を得ている。

すなわち河床洗掘ひいては河道災害を予測する場合、流速の変化量を規定する砂州および河道曲率の流速におよぼす影響を、把握すればよいことになる。

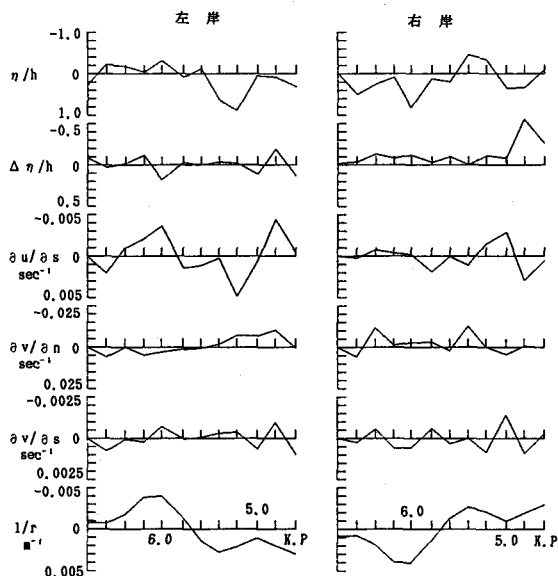


図-4 河岸における河床洗掘と流速成分

4. 河床洗掘深の簡易推定式

河床洗掘深を推定することは、護岸の根入れ等を決定する上で河川計画上非常に重要な問題である。そこで前項の結果を踏まえ、河床洗掘の発生要因としての流速成分が、砂州の存在および河道の湾曲の両者により規定されるものとし、河床洗掘深を簡易的に求める方法を検討した。

任意の河川の水量がそれほど変化しない区間について、縦軸に η/h 、横軸に B/r を取り現地データをプロットすると、ある傾きをもって帯状に並ぶ。図-5に河川データの一例を示した。ここで、 B ；川幅（水面幅）である。河川毎に、プロットされた各点について最小二乗法により回帰直線を引くことが可能である。このことは、回帰直線と縦軸との交点を α 、傾きを β で表すと、 α および β の値を河川毎に変化させることで、近似的に河床洗掘深を（2）式で表現できることを示している。すなわち、 α および β の性質が把握できれば、河床洗掘深を推定することが可能となる。

α は、河道の曲率が無限大すなわち河道が直線でも掘れる量を示しており、砂州波高に近い値を示していると考えられる。また、一樣湾曲水路の河床洗掘深を表現する理論式は（3）式で与えられ、 η/h と B/r を結び付ける N_s の値が研究者により異なっているだけである。このことから、 B は、二次流の強さを示す係数である N_s と同様の意味をもつと考えられる。すなわち、河床洗掘深を簡易的に表す（2）式は、砂州に起因する量と河道の湾曲に起因する量との重み付き線形和の形になっている。

$$\frac{\eta}{h} = \alpha + \beta \left(\frac{B}{r} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\eta}{h} = N_s \left(\frac{\mu_s \mu_k \tau_{s0}}{\tau_{sc}} \right)^{0.5} \left(\frac{B/2}{r} \right) \quad (3)$$

$$N_s = \begin{cases} 11 \sim 11.5 & ; \text{Rozovskii} \\ 7 & ; \text{Engelund} \\ (4.52 + 8 \sqrt{2C_r}) / (3.83 \sqrt{2C_r} + 27.12 C_r) & ; \text{Zimmermann} \\ 1.226 (\sqrt{1/C_r} - 1.584) & ; \text{Ikeda} \end{cases}$$

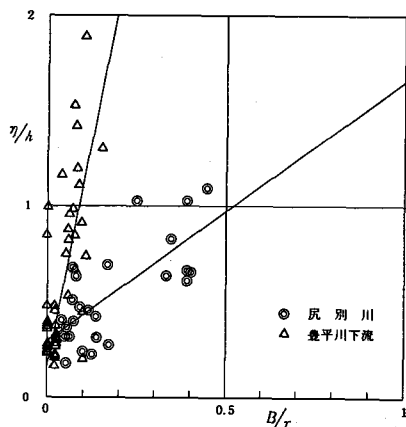


図-5 河床洗掘深と河道局率の関係

ここで、 μ_s ；砂粒の静止摩擦係数、 μ_k ；砂粒の動摩擦係数、 τ_{s0} ；無次元掃流力、 τ_{s0} ；限界掃流力である。 α および β の性質を調べるため、 α は砂州の領域区分のパラメータである $BI^{0.2}/h$ により、 β は二次流の強さが摩擦係数 C_f に関係する^{3), 4)}ことから C_f で整理することとした。なお β は、 N_s に換算するため $2\beta/\sqrt{\mu_s\mu_k\tau_{s0}/\tau_{s0}}$ の値で整理することとした。この結果をそれぞれ図-6、図-7に示す。

α は、 $BI^{0.2}/h$ とともに大きくなる傾向があり、非砂州領域でほぼ0であり単列砂州領域から複列砂州領域へといくに従い大きくなる。各河川の値を二次曲線であてはめると、(4)式となり、この式で各河川の α の値をほぼ再現することができる。

$$\alpha = 0.361 x^2 - 0.0224 x - 0.0394 \quad (4)$$

$$x = \log_{10}(BI^{0.2}/h)$$

α は、平均河床高からの掘れの量を水深で無次元化した各断面値を平均したものであることから、砂州波高 Z_b について α と同じ意味を持たせるには、次の処理を行う必要がある。すなわち、砂州波形を近似的に余弦カーブとみなし砂州一波長の平均の波高を求めると、(5)式となる。

$$\left(\frac{Z_b}{2h}\right)_{\text{mean}} = 0.64 \left(\frac{Z_b}{2h}\right) \quad (5)$$

図-6に、直線水路実験⁵⁾による砂州波高 Z_b を(5)式で処理した値を示した。この値を二次曲線であてはめると(6)式となる。

$$\left(\frac{Z_b}{2h}\right)_{\text{mean}} = 0.601 x^2 - 0.173 x + 0.0615 \quad (6)$$

α は $(Z_b/2h)_{\text{mean}}$ と同様の傾向を示すものの、その傾きは若干小さなものとなっている。河川において砂州発生領域はほぼ $BI^{0.2}/h > 5$ であり、図-8に示すようにこの範囲で $(Z_b/2h)_{\text{mean}}/\alpha$ の値は1.6程度の一定値となる。黒木ら⁶⁾は、河床勾配の影響は不明であるが解析的に砂州波高を求めており、 $BI^{0.2}/h$ により単列砂州領域と判断される領域で、 Z_b/h の値が1.0~3.0となり複列砂州領域に向かう程大きな値となることを示している。この値を $(Z_b/2h)_{\text{mean}}$ の値に直すと、0.3~0.9の値となりほぼ(5)式で示す値となる。このように砂州領域区分のパラメータである $BI^{0.2}/h$ によって α の値が整理されたことは、非常に興味深い結果である。

また、池田⁷⁾は、次元解析により砂州波高を(7)式で与えている。(7)式を砂州一波長の平均洗掘深として書き直すと(8)式となる。各河川の α の値と(8)式とを比較したものが図-9である。各河川の α の値は、多少のばらつきはあるもののほぼ(8)式で表し得る。

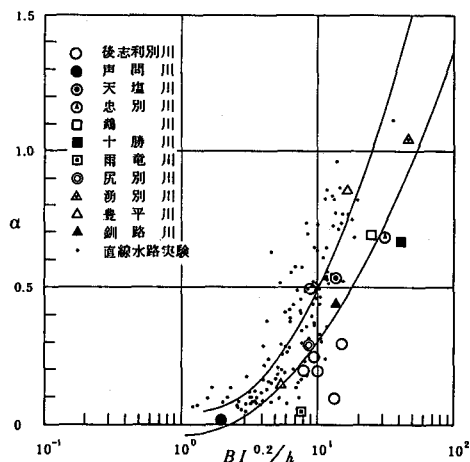


図-6 α と砂州領域区分パラメータ

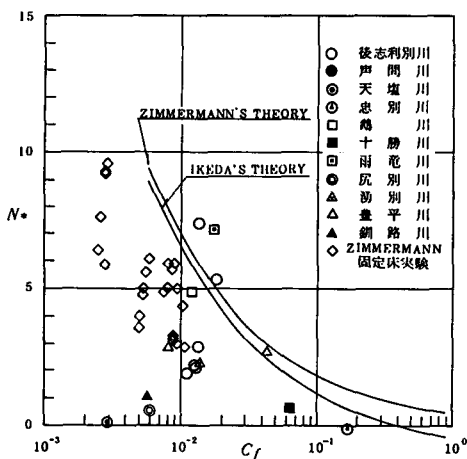


図-7 β と摩擦係数

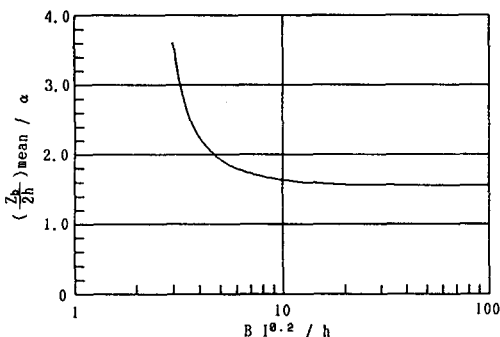


図-8 砂州波高と α との関係

$$\frac{Z_b}{h} = \left(\frac{B}{d}\right)^{-0.45} 9.34 \exp \left(2.53 \operatorname{erf} \frac{\log_{10} B/h - 1.22}{0.594} \right) \quad (7)$$

$$\left(\frac{Z_b}{2h}\right)_{\text{mean}} = 2.97 \left(\frac{B}{d}\right)^{-0.45} \exp \left(2.53 \operatorname{erf} \frac{\log_{10} B/h - 1.22}{0.594} \right) \quad (8)$$

ここで、 d ；河床材料の粒径である。

以上の検討から、 $BI^{0.2}/h$ で整理した場合 α は砂州波高より若干小さい値になる傾向はあるが、砂州波高と同様の性質を持つと言え、ほぼ砂州波高で表現し得るようである。ここで、 α の値が砂州波高より若干小さな値となった理由は、河床材料の粒径を考慮しなかったことにあると思われる。しかし、河川の河床洗掘を概算的に見積る場合(4)式でも十分な精度は期待できる。また、河川に形成される砂州波高を精度よく算定することができる場合、さらに α の精度は上がることになり、 α として安全側の値とするならば、砂州波高の1/2を用いればよい。

一方 $2\beta/\sqrt{\mu_s \mu_k \tau_s / \tau_{sc}}$ は、摩擦係数である程度整理がつき、Zimmermannによる固定床実験の実測 N_s の延長線にくる傾向がある。池田ら⁸⁾は、蛇行水路における N_s の値を解析的に(9)式のように見積っている。 β も α と同様各断面の平均的な値を示していることから、(9)式の値を一蛇行で平均した(10)式と比較することとした。(10)式の値を(3)式におけるZimmermannの理論値とともに図-7に記した。

$$N_s = 1.226 \left(\frac{1}{\sqrt{C_r}} - 1.584 \right) \chi \cos \left(\frac{2\pi}{L} s - \sigma \right) \quad (9)$$

$$\chi = \frac{1}{1.5 C_r \left(1.11 / \sqrt{C_r} - 1.42 \right) \sin \sigma + \cos \sigma}$$

$$\sigma = \tan^{-1} \left[1.5 C_r \left(\frac{1.11}{\sqrt{C_r}} - 1.42 \right) \right]$$

$$N_{s, \text{mean}} = \frac{2}{\pi} 1.226 \left(\frac{1}{\sqrt{C_r}} - 1.584 \right) \chi \quad (10)$$

ここで、 L ；河道の蛇行長である。両理論値とも β から求めた N_s の傾向をよく表現していると思われる。しかし、理論値で算出される N_s に比べ β から求めた N_s がかなり小さな値を示す場合もある。この理由としては、河川は蛇行しており、一様湾曲の二次流ほど発達しないこと、また逆に蛇行波長が充分長いと流速の水深方向流速が一様化し、二次流が弱まる⁹⁾こと等が考えられる。すなわち、二次流の大きさには蛇行長が関係するものと思われる。 β の値から見積った N_s と(10)式で得られる N_s の値との比 $N_s \beta / N_{s,1}$ と、河道の蛇行長を川幅で無次元化したものとの関係をみたが、 L/B が20程度で大きな値を示し、 L/B がそれより大きくあるいは小さくなるに従って $N_s \beta / N_{s,1}$ は小さくなる傾向がうかがえた。しかし、2次流の発達と蛇行長の関係は明確には不明であり、さらに検討を要するものと思われる。

つぎにこの簡易式により河床洗掘深の推定を行い、実測値との比較による再現性について確認を行う。図-10は、縦軸に河床洗掘深 η/h 、横軸に流下距離をとり、豊平川K.P21~K.P7における実測値と再現値をプロットしたものである。再現値は、① $\alpha = (4)$ 式、 $\beta = (10)$ 式によるもの、② $\alpha = (8)$ 式、 $\beta = (10)$ 式によるものおよび③ $\alpha = (7)$ 式/2、 $\beta = (10)$ 式によるものの三種類で算定した。また用いた基礎水理量は、昭和63年融雪出水時の流量を用いて不等流計算により算出したのものである。K.P21~K.P17の範囲は、河床低下傾向にあり流れがみおすじに集中している区間であり単純に砂州と河道曲率だけで河床洗掘が発生していないため、再現性が悪くなっている。また、K.P8付近は蛇行長の長い曲がりであり、 β の値が実際よりも大きく算定され、再現性が悪くなっているものと思われる。しかし、再現値はこれらの区

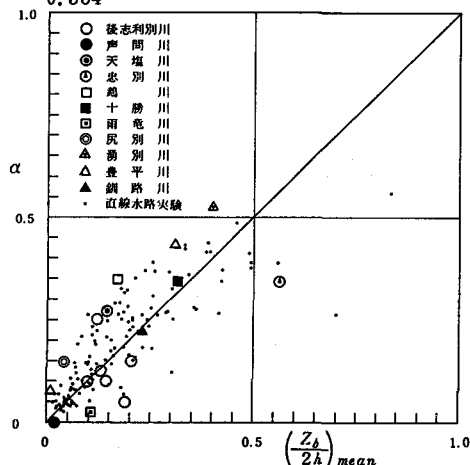


図-9 池田による砂州波高と α

間を除けば比較的精度よく実測値を再現している。①、②による再現値はほぼ同程度の傾向を示し、③による再現値は α の値に砂州波高の1/2を用いているため砂州に関しては安全側と考えられるが、今回の豊平川による再現においてもその傾向を示した。

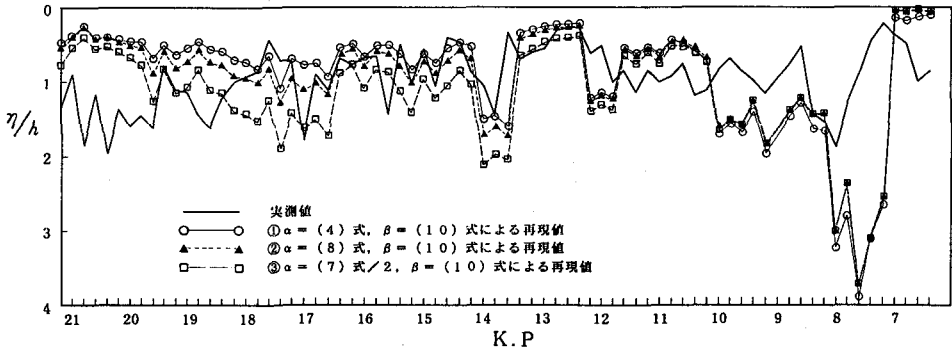


図-10 簡易手法による河床洗掘深の再現

5. おわりに

河川の実測流況による流速成分分析の結果、局所洗掘と関係のある流速成分は主流方向流速の主流方向変化量、横断方向流速の横断方向変化量および河道曲率であり、特に、両者がともに影響を与えている箇所、洗掘量が大きくなる傾向がある。また、河床洗掘深の簡易推定式は、

$$\eta/h = \alpha + \beta (B/r)$$

で表され、河床洗掘の概略はこの式でほぼ表現し得る。また、 N_s と蛇行長の関係について不明な点があるものの、未知数 α 、 β はそれぞれ砂州の領域区分に用いられるパラメータ $BI \cdot \omega^2/h$ と二次流の強さ N_s を規定する摩擦係数 C_r で概略整理できる。

河川のデータを用いた河床洗掘の研究は従来よりなされているが、これらの研究は、砂州によるものと湾曲に起因するものとを分離していないため、河道が湾曲しかつ砂州が存在するような河川での適応は困難であった。しかし、河床洗掘の要因として砂州と河道の湾曲に分けたことにより、より明確に河床洗掘の傾向をつかむことができると思われる。

近年コンピューターの発達に伴い河床変動計算手法も開発され比較的簡単に河床洗掘量が算定されるようになったが、護岸の根入れ等を決定する場合、河床変動計算を全川にわたって計算する必要があり、時間と労力が非常にかかることとなる。しかし、本手法を第一近似として区間を選定することにより、かなりの時間と労力を節約することが可能となる。また、本手法は、式が単純であるため現場においても簡単に河床洗掘の値を算出できるものと思われる。

参考文献

- 1) 黒木幹男, 岸力; 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文報告集第342号, 1984.
- 2) 高橋公浩, 渡邊康玄, 畑敏夫; 河道災害発生 of 要因に関する調査, 第43回建設省技術研究会論文集, 1989.
- 3) 長谷川和義; 沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究, 北海道大学博士論文, 1984.
- 4) 吉川秀夫, 池田駿介, 北川明; 弯局水路の河床変化について, 土木学会論文報告集第251号, 1976.
- 5) 土木学会水理委員会; 洪水流の三次元流況と流路形態に関する研究, 1982.
- 6) 岸力, 板倉忠興, 黒木幹男, 森明巨; 砂州の形状特性と流れに関する研究, 北海道開発局北海道大学委託研究報告, 1989.
- 7) 池田駿介, 単列交互砂州の波長と波高, 第27回水理講演会論文集, 1983.
- 8) 池田駿介, 西村達也; 砂床蛇行河川の三次元流れと河床形状, 土木学会論文集第369号, 1986.
- 9) 森明巨, 岸力; 横断勾配を有する一様曲率湾曲部の流れの構造, 第28回水理講演会論文集, 1984.