

外岸に斜面を有する移動床湾曲流れへの BVC 法の適用性 — 船底形河道設計法に向けて

APPLICABILITY OF THE BVC METHOD TO ALLUVIAL CURVED CHANNELS
WITH THE OUTER-BANK SLOPE — RIVER DESIGN TOWARDS
THE SHIP-BOTTOM-SHAPED CHANNEL

笹木拓真¹・福岡捷二²・内田龍彦³

Takuma SASAKI, Shoji FUKUOKA and Tatsuhiko UCHIDA

¹ 学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 都市環境学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

² フェロー 工博 Ph.D. 中央大学研究開発機構教授 (同上)

³ 正会員 博(工) 中央大学研究開発機構教授 (同上)

River improvements to the ship-bottom-shaped channel are considered as one of effective measures for both flood controls and river environments. However, study on ship-bottom shaped channel in curved channel has not been conducted. For evaluating effectiveness of ship-bottom-shaped channel in curved channel, it is important to investigate mechanisms of flow structures and bed variation around the gently sloped outer bank. From the above reasons, practical calculation model which can estimate three-dimensional flows, bed variations and outer bank erosions is required.

This paper is positioned to a fundamental study for cross-section design of ship-bottom-shaped channel in curved channel. The quasi-three-dimensional numerical model is applied for experimental results on flows and bed variations conducted in curved channels with gently sloped outer bank.

Key Words : *curved channel, ship-bottom-shaped channel, quasi-three-dimensional model bank erosion, gently sloped bank*

1. 序論

我が国の大河川の河道断面形は、一般に複断面形であるが、低水路と高水敷の比高差の増大、滞筋の固定化、河道内の樹林化等の複断面河道がもたらす治水・環境問題が顕在化しており¹⁾、治水と環境の両面から望ましい河道断面形が求められている。福岡¹⁾は自然河川の横断面形は船底形が一般的であることに着目し、治水と環境の調和した、安定な河道は船底形河道であるとしている¹⁾²⁾³⁾。著者ら⁴⁾は実際に複断面河道から船底形河道へと改修された遠賀川において、洪水流・河床変動解析法を適用した結果、船底形河道では改修前の複断面河道と比較して洪水時の流況が改善され、河床変動量が減少することを示している。しかし、検討対象とされた船底形河道区間は、湾曲部や蛇行部を対象としていなかった。このため、複断面形から船底形、または船底形から複断面形に変化する断面区間や船底形蛇行区間では、直線部とは異なった河床や河岸洗掘が生じることから、管理の

しやすい河道はどのようにすべきか、船底形河道は目的にかなう有効な手段になり得るかについてさらに検討が必要である。福岡・山坂ら⁵⁾が行った自由に外岸浸食を許す湾曲水路実験では、緩やかな外岸斜面を有する安定な断面形が形成されており、河道湾曲部を含む区間でも緩やかな外岸河岸を有する船底形河道に改修できる可能性が示されている。著者らは、遠賀川において図-1(a)の複断面蛇行河道の断面形を図-1(b)に示すように船底形に改修した場合に、流れ構造や河床変動、浸食や堆積の面から、維持可能な望ましい外岸斜面勾配や複断面形と船底形断面形の接続部をどうすべきか等を数値計算によって検討している。検討で明らかになった課題は、平面形が縦断的に変化する場における船底形河道の斜面付近の流速分布、河床変動を適切に評価できる実用的な解析手法を確立することである。湾曲部や蛇行水路の流れと河床変動に関するこれまでの多くの数値解析研究⁶⁾⁷⁾⁸⁾は、河岸が鉛直壁で構成された湾曲水路や蛇行水路を対象としている。外岸を緩勾配化した水路を対象とした研究として、大槻ら⁹⁾は護岸の設計法を見出すために、

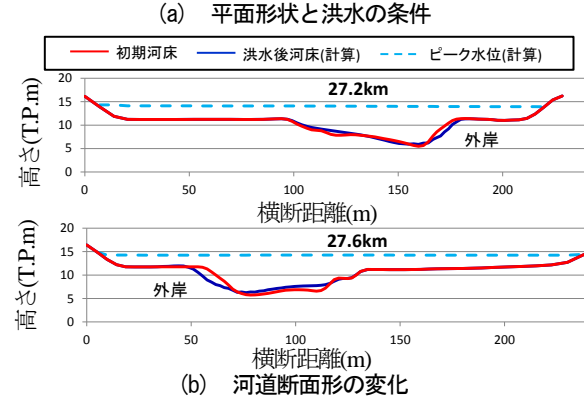
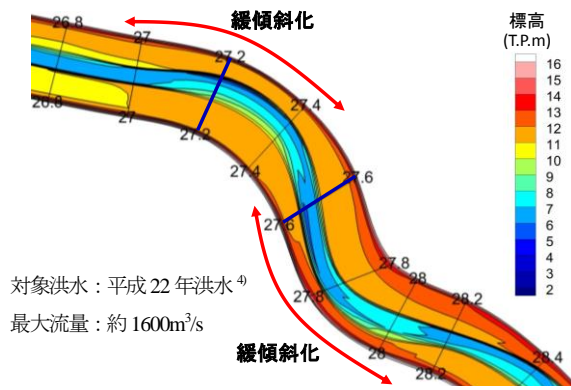


図-1 現地における船底形河道設計の検討

護岸を緩勾配化した単湾曲河道で実験と数値解析を行い、Finnie ら¹⁰⁾は、河岸を緩勾配化した湾曲・蛇行水路を対象に二次流の発達、減衰を考慮した二次元解析を行っているが、斜面付近の主流速鉛直分布や二次流について詳細な検討は行っていない。また、同じ水路に対して三次元解析も行われているが¹¹⁾、実河川に適用するには計算負荷の面から実用的なものとなっていない。福岡・西村ら¹²⁾は船底形河道設計という明確な意志を持って行ったわけではないが、外岸を緩勾配化した水路の流れや河床変動を実験的、数値解析的に検討し、船底形河道の検討に有効に活用出来る研究成果を得ている。しかし、彼等の研究は、一様湾曲移動床水路内で平衡状態を仮定し、数値計算を行っている。船底形河道設計では、水路上流からの流況、河床の縦断的な変化を評価することが重要である。

近年、内田・福岡¹³⁾は水深積分モデルの枠組みで流れの三次元性を考慮した準三次元解析法(底面流速解析法)を開発し、多くの複雑な流れ場でその適用性を検討しており^{例えば14)}、船底形河道の縦・横断面形設計への応用が期待される。

本研究では、まず、内田・福岡の底面流速解析法¹³⁾を福岡・山坂ら⁵⁾の単湾曲水路での外岸の自由な浸食を許す側岸浸食実験に適用し、断面形の形成過程の解析に有効であることを示す。次に福岡・西村ら¹²⁾の外岸に緩傾斜河岸を有する実験水路全体を対象に同解析法を適用し、緩傾斜付近における流速分布、河床変動の再現性を検証し、湾曲区間を有する船底形河道の断面形設計法の基本的理解を深めることを目的とする。

2. 解析手法の概要

底面流速解析法は、水深積分連続式、流速の鉛直分布を考慮した水深積分水平方向運動方程式に加え、水深積分水平方向渦度方程式、水表面流速方程式が解かれることで、底面の流速を渦度の定義式を水深積分した式(1)より評価する。

$$u_{bi} = u_{si} - \varepsilon_{ij3} \Omega_j h \quad (1)$$

ここに、 u_{bi} : 底面流速、 u_{si} : 水表面流速、 ε_{ij3} : Levi-Civita 記号、 Ω_i : 水深平均渦度、 h : 水深である。また、渦動粘性係数は流速の鉛直分布を考慮した局所平衡モデルにより算出されている。なお、流速鉛直分布は、 u_{si} 、 u_{bi} 及び水深平均流速 U_i を用いた三次関数の流速分布を仮定する。湾曲部の流れの圧力は、外岸付近を除いて静水圧分布になることから、本解析には静水圧分布を有する流れの解析に適用可能な底面流速解析法(SBVC3¹⁵⁾)を用いる。解析法の詳細については既往の文献^{13),14),15)}を参照にされたい。

河床変動量は一般座標系に変換された掃流砂のみを考慮した流砂の連続式より求める。掃流力は式(1)の底面流速を用いて算出され、重力の斜面方向成分が考慮されている。限界掃流力は岩垣の式、掃流砂量は芦田・道上の平衡流砂量式が用いられる。

3. 底面流速解析法(SBVC3)の湾曲部の側岸浸食実験への適用

はじめに福岡・山坂ら⁵⁾の実験を対象に湾曲部の側岸浸食への底面流速解析法(SBVC3)の適用性について検討する。一般に湾曲、蛇行水路での側岸浸食及び流路変動を対象とした数値計算では、河岸崩落に対し、河岸浸食(河岸崩落)モデルを用いる方法^{16),17)}や浸食断面形状の仮定¹⁷⁾、幾何学的に崩落土砂量を算定するモデル¹⁸⁾等が用いられている。底面流速解析法は底面と連続する斜面部の底面流速を精度よく計算できること、また実験での浸食は連続的に起きていたことから⁵⁾、河岸は底面と連続する緩やかな底面として扱い、底面流速分布を用いて縦横断面形状を求める。

(1) 実験条件と計算条件

実験は、図-2 に示すような一様湾曲水路に一様粒径 $d=0.72 \times 10^{-3} \text{m}$ の砂を敷き詰め、縦断勾配 1/400、底面幅 5 cm、側岸の角度 30 度の台形断面を切って $2.0 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ の定常流量を通水し、断面形状の時間変化を調べている。初期の流路中心の曲率半径は 4.35m であり、上流端からの給砂は行われていない。実験では、側岸の高さを変えて実験を行っており、本検討では、実験データが多く揃っている側岸の高さが 6cm に設定された

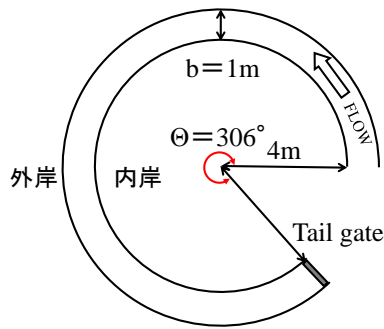


図-2 実験水路平面図^{5), 12)}

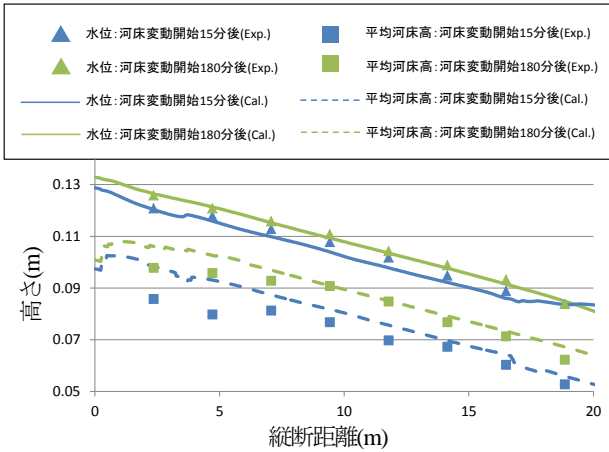


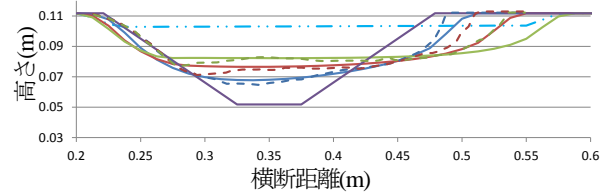
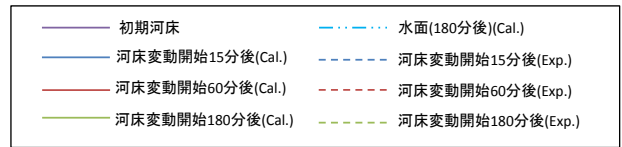
図-3 縦断水面形と平均河床高の比較

ケース(Run1)を対象に底面流速解析法を適用し、湾曲部の河岸浸食の検討を行う。

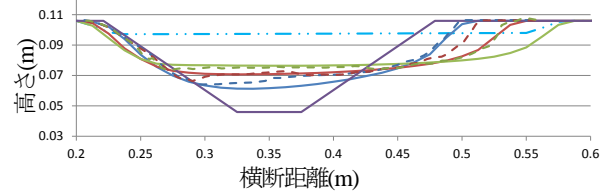
計算区間は湾曲水路全体とし、上流端に実験流量、下流端に実験水位を与えている。計算メッシュは河岸の形状を再現できるように横断方向 $1.25 \times 10^{-2} \text{m}$ 間隔、縦断方向 0.04m 間隔で分割している。

(2) 計算結果

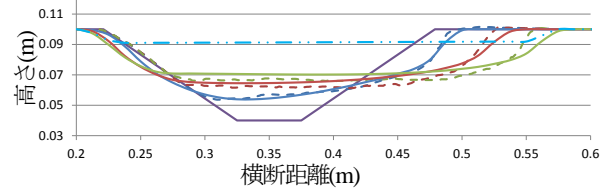
図-3 は、水面形と平均河床高の時間変化の計算結果と実験結果の比較を示している。実験では、上流端に初期河床と同一高さの仕切板が設置されている。このため仕切りによる境界の影響を受けて水流と流砂が生じるため、上流域の平均河床高の再現はできていない。しかし、その影響が小さくなる 10m より下流の計算水位、平均河床高は実験値を再現できている。図-4 は、通水開始位置から 11.8m 、 14.1m 、 16.5m 地点の河床横断面形の時間変化を示している。実験結果から、拡幅が進行するのに従って、外岸付近で緩やかな斜面を形成しながら、浅く、幅の広い断面形へと変化していく様子が分かる。これは外岸の浸食土砂が内岸方向へと輸送され、水路中央での河床上昇を引き起こすためである。計算は縦断的にほぼ一様に拡幅が進行し、実験結果を概ね再現できている。しかし、浸食が進むほど計算結果は実験結果よりやや拡幅が大きく評価される傾向にある。その原因は、次のように推察される。図-5 に通水開始から 115分 、 175分 後の 16.5m 地点における断面内の主流速分布の比較を示す。底面流速解析法では、二次流の発生による運



(a) 上流端から 11.8m

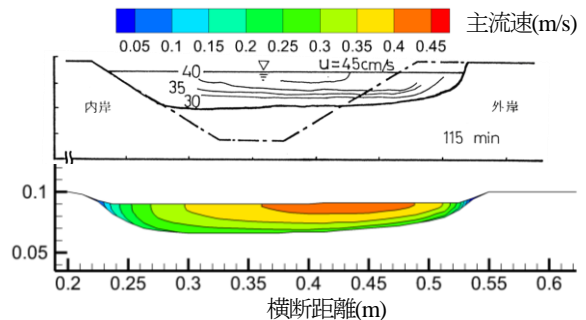


(b) 上流端から 14.1m

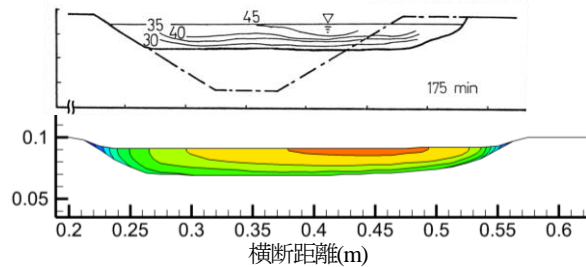


(c) 上流端から 16.5m

図-4 断面形の時間変化



(a) 115分 後 (上: 実験値, 下: 計算結果)



(b) 175分 後 (上: 実験値, 下: 計算結果)

図-5 横断面内主流速分布

動量の輸送が考慮されているため、外岸への主流の偏りを表現することができる。しかし、計算結果は、実験値よりも最大流速の発生位置が外岸側に寄っている。実験では、詳細な二次流の計測が行われていないため、精度について検証することはできないが、二次流が大きく計算されたことで、最大流速が実験値よりも外岸側に発生し、外岸浸食が実験結果よりも大きく評価されたものと考えられる。本解析法では、連続的に生じる河岸浸食を斜面(河岸)上での河床変動として扱い、底面流速解析法

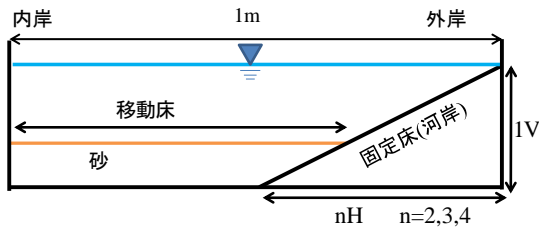


図-6 緩傾斜河岸を有する水路の横断面図¹²⁾

水路長	24m
水路幅	1m
実験流量	$1.8 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$
給砂量	$1.7 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
平均粒径	$0.8 \times 10^{-3} \text{ m}$
平坦な初期河床勾配	1/500
水路中央の曲率半径	4.5m

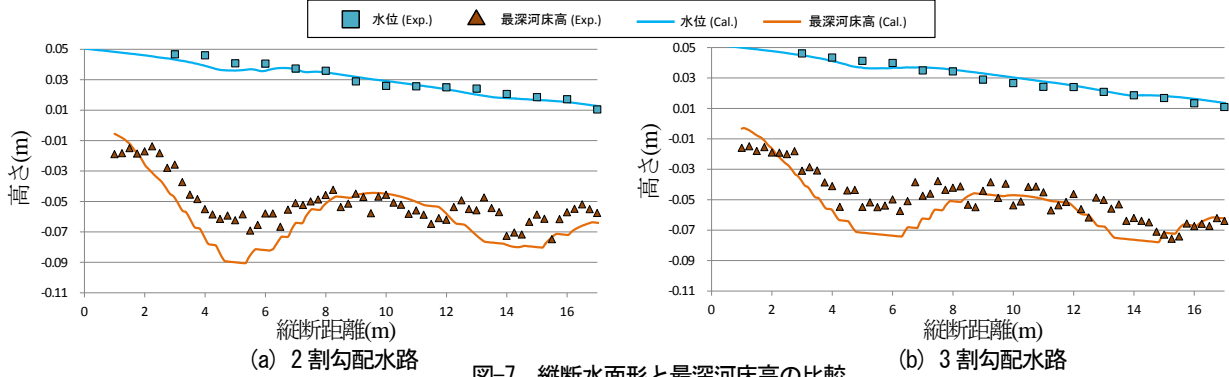


図-7 縦断水面形と最深河床高の比較

により、斜面上における底面の掃流力を精度よく計算することで、河岸浸食モデルや非平衡流砂量式を導入せずに、外岸上で自由な浸食を許す場合における断面形の形成過程を必要な精度で計算できることが明らかになった。

4. 底面流速解析法(SBVC3)の外岸緩傾斜河岸を有する湾曲水路の実験への適用

次に河道湾曲部の外岸を緩勾配化した河道の斜面付近における流況、河床変動へのSBVC3の適用性を福岡、西村らの実験¹²⁾を対象に検証を行う。

(1) 実験条件と計算条件

外岸を緩傾斜化した湾曲水路実験¹²⁾の概要について述べる。実験は、図-2と同じ様湾曲水路を用い、外岸を緩傾斜化した水路の流況、河床変動に対して、詳細な計測と数値解析法を適用し検討している。外岸の緩勾配斜面は、図-6に示すように、鉛直壁、2割、3割、4割勾配の4種類の固定斜面を設置し、これを初期河床形としている。実験は十分長い時間通水し、河床が平衡状態に達した後、河床を固め、再び通水し、流速分布や水位が計測されている。固定床斜面や河床には砂が張り付けられている。船底形河道の湾曲部断面設計にあたっては、前章の側岸浸食実験で示されたような緩やかな外岸斜面にするのが望ましいと考える。しかし、4割勾配のような緩斜面を湾曲部に設計するのは現実的でないため、ここでは2割、3割勾配の実験に底面流速解析法を適用し、平坦な初期河床から発達する河床変動及び緩斜面付近の流況に対し解析法の妥当性を検証する。実験条件を表-1に示す。

計算区間は湾曲水路全体とし、境界条件は実験流量及び実験給砂量を上流端に与え、下流端では、実験下流端水位を再現するように水位を与えている。計算メッ

シユは縦断方向 0.035m 間隔、横断方向 0.020m 間隔で分割している。計算では緩傾斜斜面上は河床低下しないよう処理を行った。

(2) 計算結果

図-7に、縦断水面形と最深河床高の計算結果と実験値の比較を示す。水面形は2割、3割勾配ともに計算結果は、実験結果を説明している。一方、最深河床高の計算結果は上流から2~6m付近で大きく計算されている。これは、実験において水路上流端に仕切り板が挿入されており、上流端境界では流入時の流れと土砂移動が複雑になり、計算ではこれを十分再現出来ないためである。しかし、流速分布等が計測された9m~14m付近では実験値に近い値を示している。図-8は水深平均流速の横断分布を示している。ここでは水路上流端から11.0m、12.0m、12.5m、13.0m地点での値を平均したものを示しており、これ以降に示す流速分布の値は、全て同じ方法で平均したものを示す。実験では斜面中央付近に最大流速が発生し、そこから外岸側では流速が大きく減少する。また、緩勾配化を行うことで、外岸への流速分布の偏倚が小さくなり、最大流速が減少する。計算結果は2割勾配での流速分布をよく再現出来ている。一方、3割勾配では、流速が大きく計算されているものの、緩勾配化による断面内の流速分布の変形を概ね再現出来ている。図-9に主流速の鉛直分布について、実験結果と計算結果(外岸から0.1m、0.2m、0.3m、0.4m、0.5m)の比較を示す。外岸付近では下降流によって水面の速い流体が潜り込むことにより、大きな運動量が河床に輸送され、流速分布が一様化しており、計算結果は実験の主流速分布をよく再現出来ている。図-10は断面平均流速で無次元化した二次流分布の比較を示している。計算結果は、主流部である外岸付近の二次流分布を再現出来ている。一方、内岸側では実験値との対応がよくない。これは、計算で

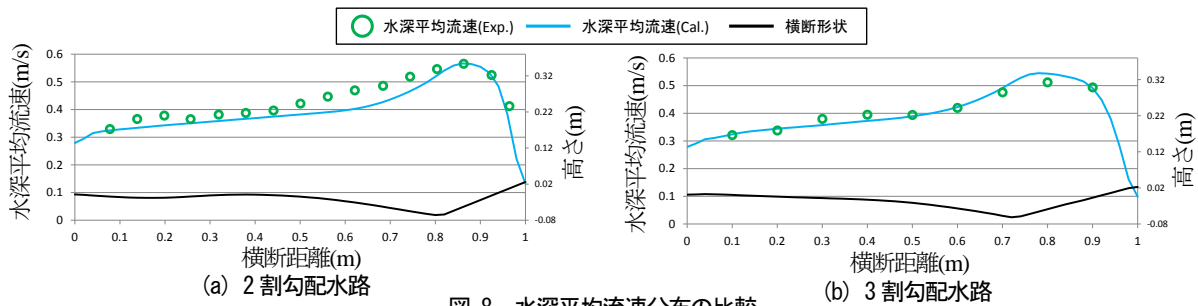


図-8 水深平均流速分布の比較

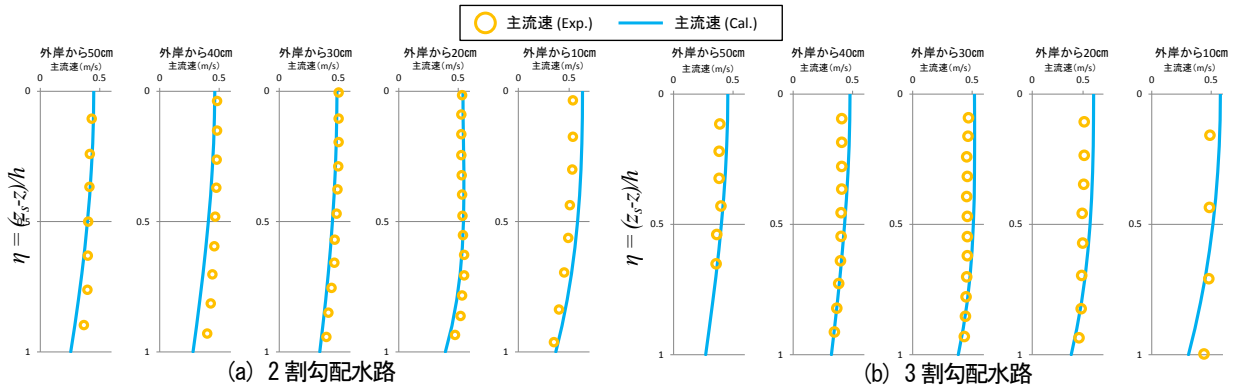


図-9 主流速の鉛直分布の比較 ($\eta=0$:水面, $\eta=1$:底面)

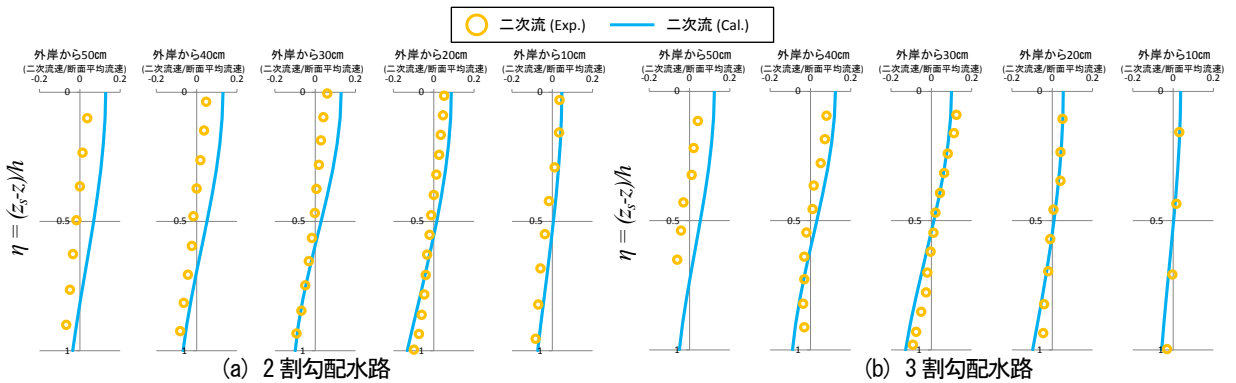


図-10 二次流速の鉛直分布の比較 ($\eta=0$:水面, $\eta=1$:底面)

は上流区間で大きく深掘れが生じ、流速検討区間の内岸に実験では見られなかった砂州が発生し、内岸側の二次流に影響を与えているためである。しかし、本実験結果¹²⁾から得られた河床形状を固定床で計算条件に与え、SBVC3で計算を行った場合¹⁹⁾には、内岸付近でも比較的良好な結果を示していたことから、解析法自体に問題はないと考える。このことはSBVC3を用いて砂州が発生しなかった時間帯での移動床計算で、内岸の二次流分布が実験値をよく説明できていることから明らかである。現地の船底形河道設計においては、長距離区間の流れと土砂移動を対象とするため、実験上流端のような不連続な土砂移動は起こらず、境界条件の影響は実験ほど問題にならないと考えている。図-11は横断形状の実験値と計算結果の比較を示す。実験では、外岸を緩勾配化することにより、最大洗掘深は減少し、洗掘位置は水路中央へと寄っている。計算結果は、内岸の形状が実験と整合しない部分が見られるが、外岸の緩勾配化による実験の河床形状を概ね再現できている。以上のことから、底面流速解析法は、緩傾斜河岸を有する湾曲水路の縦断

的な流況、河床形状の変化を説明できることから、図-1に示すような現地の船底形河道設計に活用することが出来ると考えている。

5. 結論

本研究の結論を以下に示す。

- 1) 湾曲部の側岸浸食を対象とした再現計算において、底面流速解析法と河床変動計算を用いることにより十分な精度で外岸浸食過程を再現可能である。
- 2) 緩傾斜河岸を有する湾曲水路の実験結果と本解析法による計算結果を比較し、本解析法は2割、3割勾配とも外岸の斜面付近における流速分布、河床変動を概ね再現出来る。
- 3) 結論 1), 2)は船底形河道の断面形の検討に必要な基礎的情報であり、本解析法は、現地河川で蛇行部を有する船底形河道の設計法に活用することが出来る。

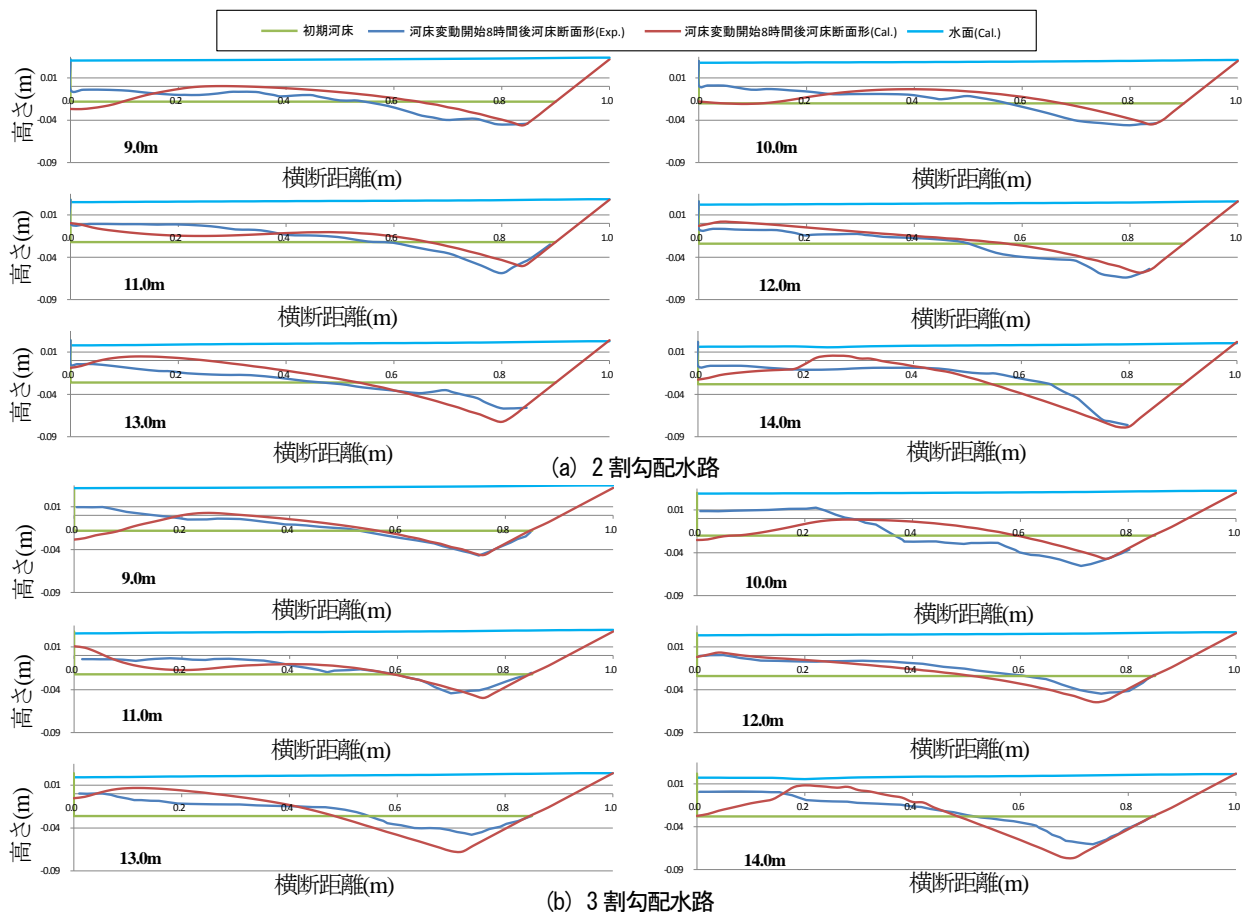


図-11 河床変動後(通水8時間後)の横断形状の比較 (水平鉛直比 1/2)

謝辞：日本下水道事業団三宮武氏には、緩傾斜河岸を有する湾曲水路実験に関する貴重な情報、データを提供していただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 福岡捷二：招待論文、温暖化に対する河川の適応技術のあり方—治水と環境の調和した多自然川づくりの普遍化に向けて、土木学会論文集F, vol.66, No4, pp.471-489, 2010.
- 2) 福岡捷二：札幌川の河道変遷を考慮した治水と環境の調和した安定な河道縦横断面形状に関する研究、北海道河川財団研究所紀要(X XIV), pp.123-164, 2013.
- 3) 後藤岳久, 福岡捷二, 植田彰：太田川放水路下流部に形成された船底形河道の河岸沿い干潟保全のための技術検討, 水工学論文集, 第58巻, I_1093-I_1098, 2014.
- 4) 笹木拓真, 宮原幸嗣, 福岡捷二：複断面から船底形断面河道への改修による洪水流況及び低水路河床高の変化, 河川技術論文集, 第20巻, pp.277-282, 2014.
- 5) 福岡捷二, 山坂昌成, 竹内聡, 古屋晃, 永納栄一：湾曲水路の側岸浸食, 第27回水理講演会論文集, pp.721-726, 1983
- 6) Engelund, F : Flow and Bed Topography in Channel Bend, *J. of Hydraulic Div., ASCE*, Vol. 100, No.HY11, pp. 1631-1648, 1974 .
- 7) 西本直史, 清水康行, 青木敬三：流線の曲率を考慮した蛇行水路の河床変動計算, 土木学会論文集, No.456/II-21, pp.11-20, 1992
- 8) Zeng, J., Constantinescu, G. and Blanckaert, K. : Flow and bathymetry in sharp open-channel bends : Experiments and predictions, *Water Resources Research.*, 44(9), W09401, 2008.
- 9) 大槻英樹, 芦田和男, 劉 炳義, 大本雄二, 藤田暁：湾曲部の河岸保護工設計のための水理的外力評価に関する研究, 土木学会論文集, No.677/II-55, pp. 87-102, 2001.

- 10) Finnie, J., Donnell, B., Letter, J. and Bernard, R. S. : Secondary flow correction for depth-averaged flow calculations, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol.125, No. 7, pp.848-863, 1999.
- 11) Sam, S. Y. Wang, Patrick, J. Roache, Richard, A. Schmalz, Yafei, Jia, Peter, E. Smith : Verification and Validation of 3D Free-Surface Flow Models, *ASCE*, pp.191-205, 2009.
- 12) 福岡捷二, 西村達也, 三宮武, 藤原剛：緩傾斜河岸を設置した河道湾曲部の流れと河床形状：土木学会論文集, No. 509/II-30, 155-167, 1995.
- 13) 内田龍彦, 福岡捷二：底面流速解析法による連続する水没水制群を有する流れと河床変動の解析, 土木学会論文集 B1, Vol.67, No1, pp.16-29, 2011.
- 14) Fukuoka, S. and Uchida, T. : Toward integrated multi-scale simulations of flow and sediment transport in rivers, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1(Hydraulic Engineering)*, Vol. 69, No. 4, pp. II_1-II_10. 2013.
- 15) 内田龍彦, 福岡捷二：種々の水深積分モデルを用いた湾曲部三次元流れ機構と適切な解析法の考察, 土木学会全国大会, 第70回年次学術講演会, Vol.70, pp.123-124, 2015.
- 16) 清水康行, 平野道夫, 渡邊康玄：河岸侵食と自由蛇行の数値計算, 水工学論文集, 第40巻, 921-926, 1996.
- 17) 長田信寿, 細田 尚, 村本嘉雄：河岸侵食を伴う河道変動の特性とその数値解析法に関する研究, 土木学会論文集II, 第621巻, II-47号, pp.23-39, 1999.
- 18) 関根正人：側岸侵食機構を考慮した河川の流路変動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.533/II-34, 51-59, 1996.
- 19) 笹木拓真, 福岡捷二, 内田龍彦：外岸に緩傾斜河岸を有する湾曲水路における底面流速解析法の適用性, 土木学会全国大会, 第70回年次学術講演会, Vol.70, pp.173-174, 2015.

(2015. 9. 30 受付)