# 那賀川長距離区間を対象とした 簡易平面二次元解析法の実用性の検証 VALIDATION OF THE SIMPLE TWO-DIMENSIONAL ANALYSIS METHOD USING FLOOD AND SEDIMENT TRANSPORT DATA IN A LONG-DISTANCE

長田健吾1·青木朋也<sup>2</sup> Kengo Osada and Tomoya Aoki

 <sup>1</sup>正会員 博士(工学) 国立高専機構阿南高専准教授 創造技術工学科 (〒774-0017 徳島県阿南市見能林町青木265)
 <sup>2</sup>非会員 修士(工学) 国土交通省四国地方整備局那賀川河川事務所 調査課長 (〒774-0011 徳島県阿南市領家町室ノ内390)

A model to predict in the Naka River downstream of Nagayasu-Guchi Dam is required for elucidating of sediment transport with replenished sediment. The authors present the simple two-dimensional analysis method which contains the suspended load model and tributary model to predict in a long-distance of the Naka River. This model was validated by using the 2014 flood data and compared with results of the two-dimensional analysis method. This paper shows that this model has the same ability compared with the two-dimensional analysis method on the estimation of the water surface profile, velocity vectors, and sediment transport. Moreover, it was revealed that this model can analyze in one-eighth of the time required with the two-dimensional analysis method.

# *Key Words :* simple two-dimensional analysis method, flood flow, sediment transport , riverbed variation, replenished sediment

# 1. はじめに

長安ロダム(那賀川)では、上流域の土砂生産が活発 であるため、ダム貯水池の堆砂量は、下流への土砂還元 事業(置き土事業)を実施している中で計画堆砂容量を 上回る状況が続いている。新たな堆砂対策として置き土 量を現在の約4倍に増量する日本最大の置き土事業が計 画されている。この新計画による置き土の増量が下流河 道にどのような影響を与えるか、その将来予測が重要課 題となっている。現在、一次元解析法による予測が行わ れているが、ダム下流河道は多くの蛇行・屈曲部を有し、 それらが土砂堆積・水位上昇に影響していることから、 ダムから河口までの平面形状を考慮した長期間・長距離 区間の将来予測が不可欠である。

洪水時の流れと土砂動態を把握する手法として、上述 の一次元解析法に加え、準二次元洪水流解析法<sup>1), 2)</sup>と平 面二次元洪水流 - 河床変動解析法<sup>3), 4)</sup>が一般に広く用い られている.平面二次元解析法は、平面的な流況・土砂 動態などを適切に把握することが出来るが、対象条件に よっては膨大な計算時間を要するため、他の解析法に比 べると容易に利用することができない.そこで、長田ら <sup>5</sup>は準二次元解析法の枠組みの中で流線を活用すること で、平面二次元解析に近い流れと土砂動態の情報を得る ことができる簡易平面二次元洪水流-河床変動解析法を 開発した.この簡易平面二次元解析法を那賀川長距離区 間の洪水・土砂動態を説明できるより実用的な方法とな るよう改良を加え、大規模置き土事業による将来土砂動 態を推定できるモデルを構築することが必要である.

本研究では、簡易平面二次元解析法に、河口からの砂 の流出量算定に必要な浮遊砂モデルと、支川からの流入 量・土砂量を算定できるモデルを組み込み、那賀川長距 離区間に適用できる解析法を構築する.本解析法を那賀 川河口から長安ロダム(約64k)までの区間を対象とし てH26年8月洪水(既往最大洪水)に適用し、実測デー タとの比較から、本解析法の精度検証を行う.また、平 面二次元解析法とも比較を行い、那賀川長距離区間を対 象とした洪水流・土砂動態の見積もりについて簡易平面 二次元解析法の性能を検討する.

## 2. 簡易平面二次元解析法

#### (1) 洪水流の計算方法

簡易平面二次元解析法による洪水流解析について,詳細は長田ら<sup>3</sup>を参照して頂き,ここでは紙面の関係上, 概要のみ示す.

図-1に示すように、本解析法では概略の横断面形状が 捉えられるように、横断面を均一幅で数十個の分割断面 に分ける.また、横断測線の左右岸杭座標を用い、分割 断面の平面位置も計算に取り込むことで、本解析法の平 面的な計算格子を作成する.平面二次元解析では、杭間 も細かく切ることで、より詳細な計算格子を作成するが、 本解析法では横断測量断面のみを用いる.

本解析法に用いる流れ場の連続式および運動方程式を 以下に示す.これらの式は非定常準二次元解析法<sup>3</sup>の基 本式とほぼ変わらないが,運動方程式には流線の曲がり による運動量変化項を付加し,蛇行・屈曲による水位上 昇を算定できるようにした.また,植生は,準二次元解 析では死水域とされてきたが,平面二次元解析と同様に 透過するものとして形状抵抗を付加した.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$
(1)
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial UQ}{\partial x} = -gA\frac{\partial H}{\partial x} - \frac{1}{\rho}\sum_{j=1}^{M} \left(\tau_{bj}s_{j}\right) - \frac{1}{\rho}\sum_{j=1}^{M} \left(\frac{F_{nj}}{\Delta x}\right)$$

$$+ \sum_{j=1}^{M} \left(\frac{\partial u_{sj}u_{j}h_{j}}{\partial x}\Delta y\right) + \frac{1}{\rho}\sum_{j=1}^{M} \left(\frac{\partial \tau_{yxj}}{\partial y}\Delta y\right)$$
(2)

ここに、A:流積、Q:流量、U:断面平均流速、H:断 面平均水位、 $u_j$ :各分割断面の流速、 $h_j$ :各分割断面の 水深、 $\tau_{bj}$ :底面せん断応力、 $s_j$ :潤辺、 $F_{nj}$ :植生などの 形状抵抗力、 $u_{sj}$ :断面前後の曲がりによる上流側流線方 向を基準とした流速変化量( $=u_j \cdot u_c \cos \theta_r$ : $\theta_r$ は流線の曲が り角度)、 $\tau_{ysj}$ :横断流速差によるせん断応力、 $\Delta x$ :縦断 方向格子長さ、 $\Delta y$ :分割断面幅である.

得られた流線をもとに図-2に示すように曲率半径Rを 求め、横断水位差を以下の式ので算定する.

$$\Delta h = \frac{BU^2}{gR_c} \frac{1}{1 - B^2 / 4R_c^2}$$
(3)

ここに、B:水面幅, $R_c$ :各断面の代表曲率半径で, $P_Q$ が5割の流線を用いて算定した.上式により算定された 横断水位差と、下記の連続式より求まる流積を用い、両 者を満たすように断面水位を求める. $\mathbf{2-1}$ に示すように、 水位は横断面内で直線的に変化すると仮定し、求められ た各分割断面の水位から水深を算定する.

各断面の横断流速分布は、準二次元解析法と同様に、 定常流を仮定した力の釣り合い式を用いて求める.

$$\rho gAI = \tau_{bj} s_j + \frac{F_{nj}}{\Delta x} - \rho \frac{\partial u_{sj} u_j h_j}{\partial x} \Delta y - \frac{\partial \tau_{yxj}}{\partial y} \Delta y$$
(4)

上式より各分割断面の流速ujを求め、流線を用いて流速



ベクトルを補正し、平面的な流速分布を算定する.

#### (2) 土砂移動の計算方法 -浮遊砂の組み込み-

長田ら<sup>5</sup>が構築した簡易平面二次元解析法は、芦田・ 道上式<sup>6</sup>による混合粒径の掃流砂のみを扱い、浮遊砂は 取り扱っていない.しかし、置き土材料の中で砂分は浮 遊砂として河口へ到達する可能性があるため、解析法に 浮遊砂モデルの組み込みを行った.浮遊砂の浮上量V<sub>P</sub>, 沈降量V<sub>D</sub>は以下の式<sup>7</sup>で算定した.

$$V_{Pk} = 0.002 P_k w_{0k} \left(\frac{u_*}{w_{0k}}\right)^2 \left(1 - \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}\right)^{1.5}$$
(5)

$$V_{Dk} = w_{0k}C \left\{ \frac{15.0 \, w_{0k}/u_*}{1.0 - \exp\left(-15.0 \, w_{0k}/u_*\right)} \right\}$$
(6)

ここで、 $P_k$ : 粒径割合、 $u_*$ : 摩擦速度、 $w_0$ : 粒子の沈降 速度、 $\tau_*$ : 無次元掃流力、 $\tau_{*c}$ : 無次元限界掃流力、C: 粒子濃度である.河床変動量は、平面二次元解析のよう に流下方向に細かい計算格子を設けていないことから、 従来の計算格子の土砂収支を考える河床変動式を用いる と、図-3上に示すように流線と計算格子の向きが大きく 異なる場合、土砂流下・河床変動を捉えることができな い. 簡易平面二次元解析法では、流下方向の土砂移動は 流線に沿うと考え、流線を用いて河床変動計算を行う方 法を構築した. 図-3上に示すように計算点Jの河床変動 を考える場合、流線の情報から上流側断面のどの範囲か ら土砂が流下してくるか推測し、上流からの流砂量  $\Delta y_{iug} QBXikup$ を求める.河床変動は、掃流砂の流砂量の収 支と浮遊砂の浮上・沈降量を考慮した以下の式により算 定する.

$$\frac{\Delta Z_{b\,j}}{\Delta t} = \frac{-1}{1-\lambda} \left\{ \sum_{k=1}^{N} \frac{\Delta y_j q_{BXk\,j} - \Delta y_{jup} q_{BXk\,jup}}{A_j} + \sum_{k=1}^{N} \frac{\Delta x_j q_{BYk\,j+1} - \Delta x_{jup} q_{BYk\,j}}{A_j} + \sum_{k=1}^{N} \left( V_{Pk\,j} - V_{Dk\,j} \right) \right\}$$
(7)

ここに、A:メッシュ面積である. 浮遊砂濃度Cについて も同様に、流線を活用して浮遊砂の輸送を計算する.図 -3下に示すように、点Jを浮遊砂濃度Cの定義点とし、上 流断面から流線に沿って点Jに流入する浮遊砂量  $(C_{kiun}u_{iun}h_{iun}\Delta v_{iun})$ を算定し、流出量 $(C_{kiu}h_{i}\Delta v_{i})$ との

$$\frac{C_{kj}^{t+\Delta t}h_{j} - C_{kj}h_{j}}{\Delta t} + \frac{C_{kj}u_{j}h_{j}\Delta y_{j} - C_{kjup}u_{jup}h_{jup}\Delta y_{jup}}{A_{j}} \qquad (8)$$
$$-\frac{d}{dx}\left(\varepsilon_{s}h\frac{dC}{dx}\right) - \frac{d}{dy}\left(\varepsilon_{s}h\frac{dC}{dy}\right) = V_{Pk} - V_{Dk}$$

#### (3) 支川の計算方法

区間

17.5k~川ロダム

長安ロダム

河口~17.5k

川口ダム~

差で浮遊砂濃度Cを算定する.

長安口ダム下流には6つの支川が流入するため、支川 からの流入量・土砂量を取り扱えるモデル化が必要であ る.支川からの流入量・土砂量を検討するため、図-4に 示すように、支川の河幅、河床勾配を考慮した一次元水 路を設定した.支川の流量は合流部より下流側の水位観 測値(数箇所)と解析水位の差が出来るだけ小さくなる 量を調整して与え、支川の下流端条件には本川合流部の 水位を与えた. 支川からの流出土砂量は、これら条件を 用いた支川水路の一次元解析により掃流砂量、浮游砂量 を算定した. 支川によっては、岩の露出や小規模ダムの 存在により、流域土砂の流出が抑えられ支川内の堆積層 が薄いと考えられる流域もあるが、本解析では設定した 支川水路の河床は与えた粒度分布の材料で満たされてい るとして解析を行った. 平面二次元解析における流出土

設定した粗度係数

平面二次元

0.030~0.032

0.033~0.039

0.055~0.065

置き十箇所

▲:簡易水位計(H25年設置) 31.2k

桜谷

□:既設水位計

古屋谷川

長安ロダム64.0k

-部岩区間 (0.043~0.055) 簡易平面二次元

0.031~0.034

0.036~0.041 -部岩区間

(0.043~0.045)

0.052~0.057

和食下流

和食

川ロダム

42.5k

谷内川

紅葉川

**小**赤松川

砂の本川への反映方法は、掃流砂は、接続部の本川解析 メッシュに支川掃流砂量を直接与え、浮遊砂は濃度を本 川解析メッシュに与えた. 簡易平面二次元解析法では本 川の合流部下流側の横断面に対して、掃流砂は、河床高 として各メッシュに反映し、浮遊砂は支川からの流出量 を各メッシュの粒子濃度に反映した.



2014/8/9 18:00 2014/8/10 0:00 2014/8/10 6:00 2014/8/10 12:00 2014/8/10 18:00 2014/8/11 0:00

古庄



20

### 3. H26年洪水データを対象とした解析条件

那賀川では、平成26年8月の台風11号による豪雨により、計画流量を上回る約9,500㎡/sの戦後最大出水が発生した.構築した簡易平面二次元洪水流-河床変動解析法を、本洪水データに適用し、実測値および平面二次元洪水流-河床変動解析法による結果と比較し、解析法の検証を行う.解析対象区間は、図-5に示す河口(-0.8k)から長安ロダム直下(63.68k)までの区間とする.

本洪水では、図-5に示すように、既設水位観測所(樋 門含む)10箇所に加え、H25年度に設置した簡易水位計 13箇所において水位時系列データが観測され、縦断的に 密な水位観測データが得られている.図-5右下に観測さ れた水位ハイドログラフを示す.川口ダムにおいて、水 位一定操作が実施されている状況が分かる.川口ダムは 元々堤高が低く、現在では堆積の進行により上流側河床 との比高差はほとんどない(土砂が通過できる)状況と なっている.流量は、長安口ダム、川口ダムの放流量 データ、和食(31.2k)、古庄(7.0k)の観測値が得られ ている.解析では、本川の上流端境界条件に長安口ダム の放流量を与え、下流端境界条件に潮位の観測値(小松 島)を与えた.川口ダムにおいては、水位一定の状況が 再現できるように抵抗を与えた.

解析地形は、H26年洪水前の断面データとして、直轄 区間(河口~17.5k)はH23年測量データ, 17.5k~川口 ダム下流(42k)はH22年~H24測量データ(測量年が場 所ごとに異なる),川口ダム~長安口ダム直下までは H23年測量データをそれぞれ用いて作成した. 平面二次 元解析の解析メッシュは、流下方向を基本50m間隔とし 1324×15点で作成し, 簡易平面二次元解析は, 測量断面 のみで343×15点で作成した. 簡易平面二次元解析のメッ シュは測量断面を直接結ぶため、山間部では格子の折れ 曲がりが大きくなる場合がある. 粗度係数は,水位観測 値および流量ハイドログラフを再現する値として、図-5 左上に示す数値でそれぞれ設定した. 川口ダム~長安口 ダムの区間において,両者の粗度係数の開きが大きく なった. 上述した解析メッシュの形状の相違が要因と考 えられる.計算時間間隔∆tは,平面二次元解析0.1sec (河床変動0.2sec) に対して, 簡易平面二次元解析0.5sec (河床変動0.5sec) で設定した. 簡易平面二次元解析は, 式の構造が準二次元解析に近いため、Atが粗くても安定 した計算が可能である.

置き土は、年平均約14万m<sup>3</sup>の量を、右岸側河岸(高さ 約30m)の斜面に沿うように置かれているが、その置き 土量および形状は洪水の履歴などで変わるため、初期形 状は、洪水前に撮影された写真を参考に与えた.また、 置き土の粒度分布は、ダンプ運搬の制約から、粒径 150mm以上の石が取り除かれた状態で運ばれてくるため、 下流側の粒度分布(長安口ダム直下の河道では平均粒径

100mm)に比べ,最大粒径,平均粒径(置き土の平均粒 径は約10mm)ともに小さいものとなっている. 解析粒度 分布は、観測された粒度分布を表現できるように250mm、 80mm, 20mm, 5mm, 1mm, 0.2mmの6粒径を用いて, 粒度分布を再現した.22kより上流は、縦断的に基岩が 露出し、河床変動に影響を与える.また、長安ロダム下 流の置き土開始前(H19年以前)は、粗粒化の進行によ り河床は粒径の大きな材料で覆われ、その状況からの河 床低下量は少ないことが想定される. そこでH19年あた りに測定された(区間により測定年度が異なる)河床形 状を解析に取り込み、22k~長安口ダム直下の区間に関 しては、この河床高を下回らないように河床変動計算を 実施し、基岩の影響などを考慮できるようにした. ただ し、後述するようにこの設定では十分でないことが河床 変動の検討結果から分かり、基岩の設定については今後 検討する必要がある.

#### 4. 解析結果と考察

図-6に、簡易平面二次元解析法による水面形の時間変 化の解析結果(ライン)と観測値(プロット)との比較 を示す. 図には、平均河床高と痕跡水位も併せて示す. 本洪水では、流量ピーク時と台風通過が重なったことか ら,痕跡水位は暴風の影響を大きく受け全体的に高く なったと考えられる.水位計観測値と解析値を比較する と,水位を再現できていない箇所もいくつか見られるが, 全体的には解析結果は観測値を再現することが出来てい ると考えられる. 図-7に、本川の流量ハイドログラフの 観測値と解析結果の比較と、計算された支川からの流入 流量ハイドログラフを示す.本川流量ハイドログラフの 結果を見ると、洪水の下降期の解析結果は、観測値に比 べ若干大きい状況となったが、上昇期および洪水ピーク 付近については、解析結果は観測値をおおむね再現でき ている.支川からの流入流量ハイドログラフを見ると, 古屋谷川、赤松川の流出量が大きく、両支川は他の支川 に比べて流域面積が大きいことから、この傾向は妥当で あると考えられる. 図-7(c) に支川からの流入土砂量 (掃流砂+浮遊砂)の時間変化を示す.本洪水では古屋 谷川から多くの土砂が流入し、他の支川からはほとんど 土砂が流入していない結果となった. 支川の水位に比べ 本川の水位が高い状況が続いたことが土砂流出に影響し た.

図-8には、水深・流速分布の、平面二次元解析と簡易 平面二次元解析の比較を示す.本解析法により算定され た流速ベクトルは、傾向が若干異なる箇所も見られるが、 平面二次元解析に近い状況で計算されていることが分か る.図-9には、河床変動量の実測値と、平面二次元解 析・簡易平面二次元解析法による結果を示す.実測値 は、平成24年と平成26年の測量データをもとに作成し





たものであり,H26年洪水以外の洪水の履歴も含まれる. 両解析結果を比較すると,平面二次元解析では川ロダ ム直上の堆積量が多く,実測値とも傾向が異なる.そ の他の個所では,両解析法の洗掘・堆積箇所の傾向は ある程度類似していることから,簡易平面二次元解析 法の土砂移動・河床変動は,平面二次元解析に近い結 果が得られることが分かる.実測値と比べると,洗掘 が過大に評価されている箇所があり,基岩の設定が十 分でないことが本検討から明らかとなった.図-10に, 縦断的な掃流砂の各粒径の移動量とその総和,浮遊砂 の全輸送量を示す.平面二次元解析では,上述のよう に川口ダム直上に多くの土砂が堆積し,掃流砂・浮遊 砂ともにダム通過量が大きく減少している.一方,本 解析法では浮遊砂については通過する結果となり,こ





図-9 河床変動量の比較(川口ダム~長安口ダム直下)

図-10 縦断的な土砂移動量(解析終了時までの総和)

の点で両解析結果に違いが生じた.川口ダムの土砂通 過量は,将来的な川口ダムの土砂堆積の進行と下流河 道の土砂動態を知る上で重要な要素となるため,この 点については今後の検討で詰めていく予定である.

本検討における平面二次元解析と簡易平面二次元解 析の計算に要した時間は,同一計算機で平面二次元解 析が約6時間半に対し,簡易平面二次元解析が約50分と, 平面二次元解析に比べて約1/8の計算時間で解析結果が 得られることが分かった. 簡易平面二次元解析の精度 をさらに高め,土砂動態の将来予測モデルとして実用 性・有用性を高めていく予定である.

# 5. まとめ

那賀川の長安口ダム下流から河口までの洪水流・土砂 動態を検討できる簡易平面二次元解析法を構築するため, 既往の簡易平面二次元解析法に浮遊砂モデルと支川流入 モデルを取り入れた新たなモデルを構築した. H26年8 月洪水(既往最大)データに本解析法と平面二次元解析 法を適用し, 観測データおよび平面二次元解析法との比 較から、本解析法の解析精度を示した、両解析結果の比 較から、多少の違いは見られたが、洪水流(水面形の時 間変化、流量ハイドログラフ、支川流入量)・土砂動態 (土砂移動量、河床変動)ともに、平面二次元解析と概 ね変わらない結果となり、那賀川長距離区間の検討ツー ルとして平面二次元解析に近い能力を有することが明ら かとなった.実測値との比較から、河床変動の再現に関 して,解析法の再現精度が低く,基岩の設定に問題があ ることが明らかとなった. 今後, H19年~現在までの一 貫解析を行い、土砂移動計算の精度向上を図り、那賀川 の長距離区間の将来予測が可能な簡易平面二次元解析法 の完成を目指す.

#### 謝辞

本研究は、国土交通省河川砂防技術研究開発地域課題 分野(河川)(代表:長田健吾)の助成を受けて実施し た.ここに記して謝意を表する.

#### 参考文献

- 1) 福岡捷二: 洪水の水理と河道の設計法, 森北出版, 2005.
- 2) 福岡捷二,佐藤宏明,出口桂輔:洪水流の非定常準二次元解 析法の研究,土木学会論文集B,Vol.65 No.2, p.95-105, 2009.
- 3) 長田信寿,細田 尚,村本嘉雄:河岸侵食を伴う河床変動の 特性とその数値解析法に関する研究,土木学会論文集, No.621, II-47, p.23-39, 1999.
- 4) 清水康行:2次元流れと河床変動の計算,水理公式集例題プ ログラム集,土木学会,2001.
- 5) 長田健吾,清水敦司,赤松 薫:流線を活用した簡易平面二 次元洪水流-河床変動解析法の開発,河川技術論文集,第22 巻, pp.121-126,2016.
- 6) 芦田和男,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195号, pp55-65, 1971.
- 7) 辻本哲郎,北村忠紀:植生周辺での洪水時の浮遊砂堆積と植 生域の拡大過程,水工学論文集,第40巻, pp.1003-1008, 1996.

(2019.4.2受付)