

# 平成10年余笹川洪水による国道4号橋梁上下流 の河床変動と河岸侵食

BANK EROSION AND BED TOPOGRAPHY NEAR NATIONAL HIGHWAY NO.4 BRIDGE  
BY THE 1998 FLOOD IN YOSASA RIVER

栗山卓也<sup>1</sup>・川口広司<sup>2</sup>・末次忠司<sup>3</sup>・日下部隆昭<sup>4</sup>・最上谷吉則<sup>5</sup>

Takuya KURIYAMA, Hiroshi KAWAGUCHI, Tadashi SUETSUGI

Takaaki KUSAKABE and Yoshinori MOGAMIYA

<sup>1</sup>正会員 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 交流研究員 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 研究官 (同上)

<sup>3</sup>正会員 工博 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 室長 (同上)

<sup>4</sup>正会員 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 主任研究官 (同上)

<sup>5</sup>正会員 (株)建設技術研究所 東京本社水理砂防部 水理室 (東京都中央区日本橋本町4-9-11 第9中央ビル)

In the downstream basin, risk of inundation is lower. Bank erosion often occurs in the upstream basin of rivers due to rapid flood flow. Predicting weak points of bank erosion is also important to improve river efficiently. At a present stage, It is important that mechanism of bank erosion is investigated by the use of field data, model experiments, numerical analysis.

In this paper, it is made clear that causes of bank erosion and bed topography near national highway No.4 bridge by the 1998 flood in Yosasa river.

*Key Words : upstream river, bed topography, bank erosion, field data, hydraulic experiment, 2D-numerical analysis, MacCormack scheme*

## 1. 序論

近年、大規模な市街地が沿川に存在する下流域では多くの区間で河道整備が進んでおり、洪水に対する安全度は高くなりつつある。一方、山間部を流れる上流域については河道改修事業が進捗中の河川が比較的多い。また、上流域では高速の洪水流による大規模な河床変動・河岸侵食が多く見られる。

全流域において河道整備を効果的に進めるには、現況河道の流下能力や堤内地の浸水危険度を評価すると共に、土地や家屋の流失・幹線道路の切断を引き起こす侵食の危険性が高い箇所を予測することも重要である。

侵食を引き起こすメカニズムについては現地調査や現地土塊を用いた実験等により様々な検討が行われている<sup>1)~5)</sup>。比較的上流で発生する侵食に対しては、河岸侵食と砂州の挙動との関連性について実河川における計測データを用いて整理した研究<sup>3)</sup>、砂州の変遷と河岸侵食

発生状況の変化に着目した研究<sup>9)</sup>等がある。上流域の局所的な流れや流木による河積阻害等が顕著な河道では、流れと河床変動、河岸侵食の相互作用を定量的に把握することは困難であるため、被災メカニズムの解明の蓄積が重要となる。

本研究は、平成10年に那珂川の支川余笹川で発生した洪水において大規模な河岸侵食が見られた国道4号橋付近を対象として、現地測量データの解析、水理模型実験及び数値解析により洪水時の流れと河岸侵食を含めた河道の変化との相互作用について定性的に把握することを目的としている。

## 2. 平成10年洪水前後の河道状況

平成10年8月末に栃木県北部で記録的な豪雨(最大時間雨量90mm、総雨量1,200mm以上)が発生、県内では2,846棟の家屋が浸水した。県内を流れる那珂川の支川

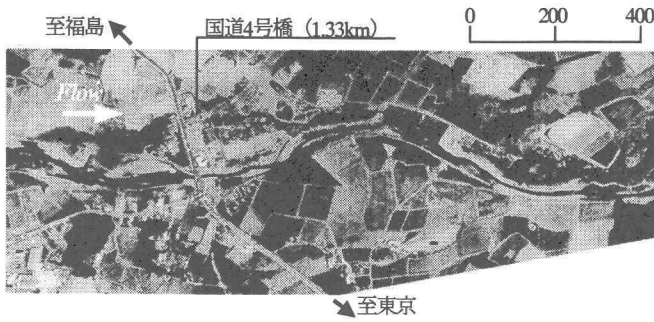


写真-1 洪水前の河道状況 (平成8年、国道4号橋付近)

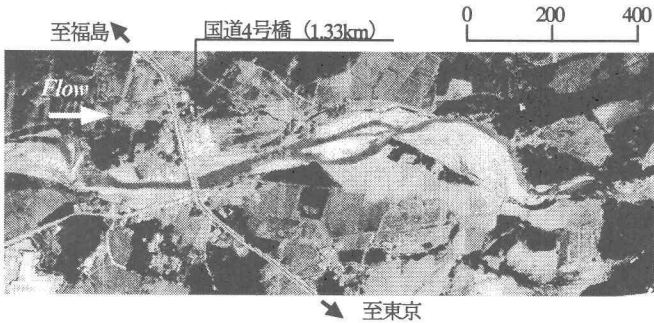


写真-2 洪水後の河道状況 (平成10年、国道4号橋付近)

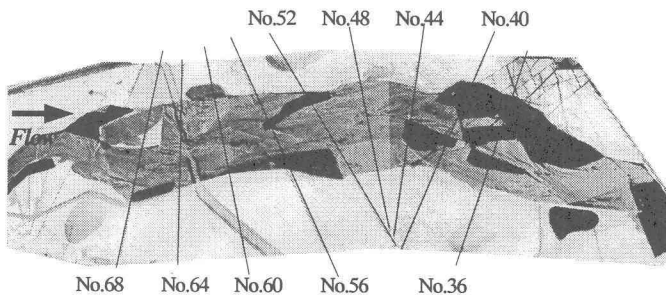


写真-3 実験後河道状況写真

余笹川でも多くの家屋・田畑が浸水したが、高速で流下する洪水流によって引き起こされた橋梁及び取り付け道路の流失（国道橋2橋を含む）、氾濫原の侵食とそれに伴う家屋や田畑の流失被害も多くの箇所で見られた。

写真-1及び2は右支川（四ッ川）合流点付近から国道4号橋付近の区間約1.5km（右支川合流点～上流1.5km）における洪水前後の航空写真である。なお、以降に示す縦断距離は、右支川合流点からの距離とする。同区間は河道拡幅、護岸及び床止めの設置等の河川改修が進捗中であり、国道4号橋上下流（1.0km～1.6km付近）及び0km～0.4km付近は未改修となっていた。国道4号橋上流の改修済み区間の被害はほとんどなかったが、国道4号橋は流失し、左岸取り付け道路及び左岸堤内地が侵食された。また、洪水後には橋脚に多くの流木が堆積していた。田畑が流失した国道4号橋下流右岸では河岸が侵食されて流路が大きく変化し、現地踏査では河岸侵食による被害に加え氾濫流による掃流土砂の堆積による被害も見られた<sup>46)</sup>。以下では、現地観測と水理模型実験により洪水時の国道4号下流の河床変動と下流右岸の河岸侵食につい

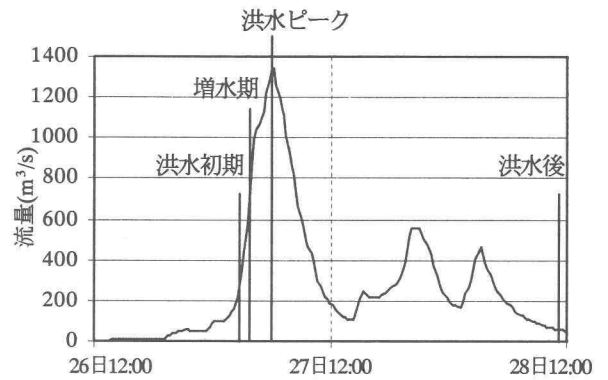


図-1 実験ハイドログラフ

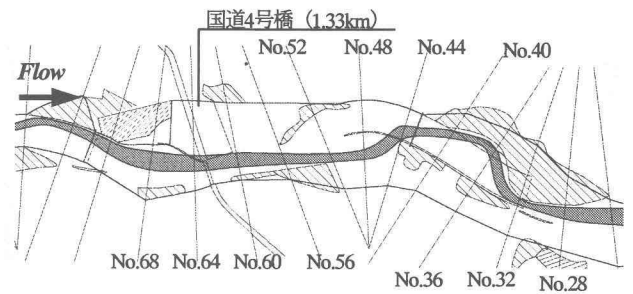


図-2 みお筋の平面位置図 (通水終了後)

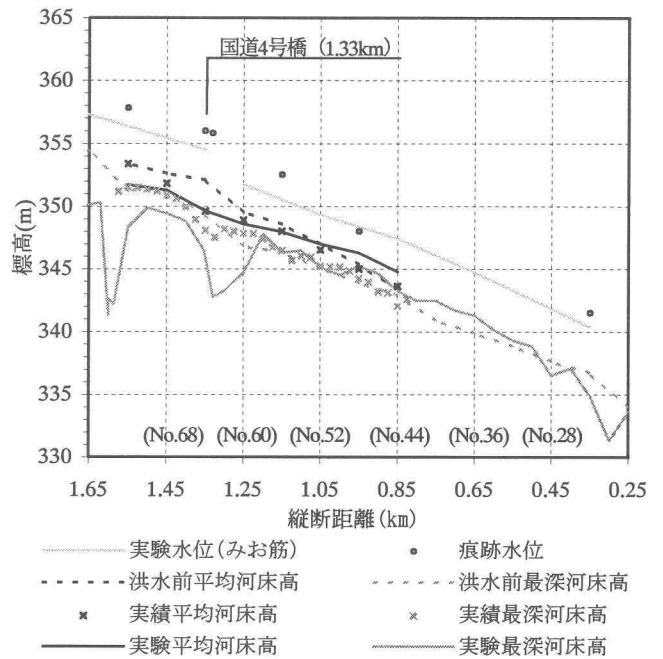


図-3 実験及び実績縦断比較図

て、実験と2次元数値解析により洪水時の流れ場と河岸侵食について考察している。

### 3. 水理模型実験による河道変動の比較検討

#### (1) 水理模型実験の概要

模型縮尺1/70の移動床模型実験により洪水時における流況及び河道の変動を経時的に把握した。洪水時の流況

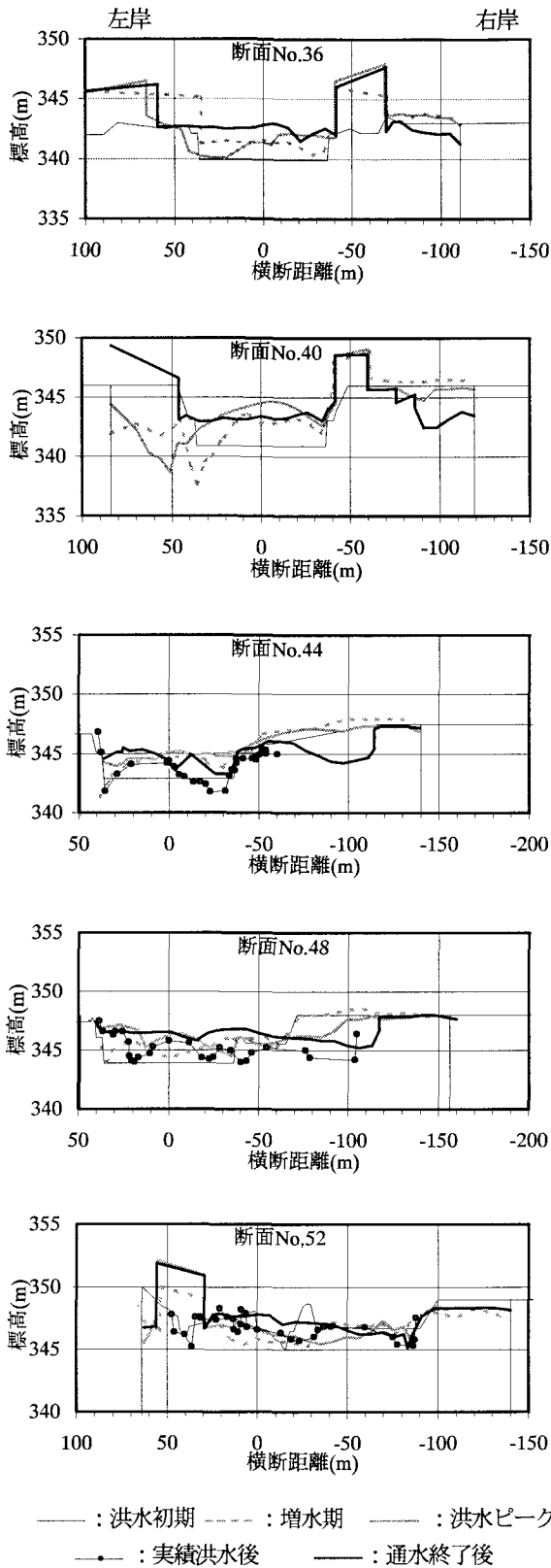


図-4 横断形状の経時変化

は橋梁部における流木による河積阻害、樹木群の流失等の影響を受けるため、洪水後の河道状況が現地測量結果と概ね一致するように植生模型は段階的に除去し、橋梁部は不透過型の阻害を段階的に設置した。植生模型は大部分を多孔質体（プラスチックの糸が絡み合ったスポン

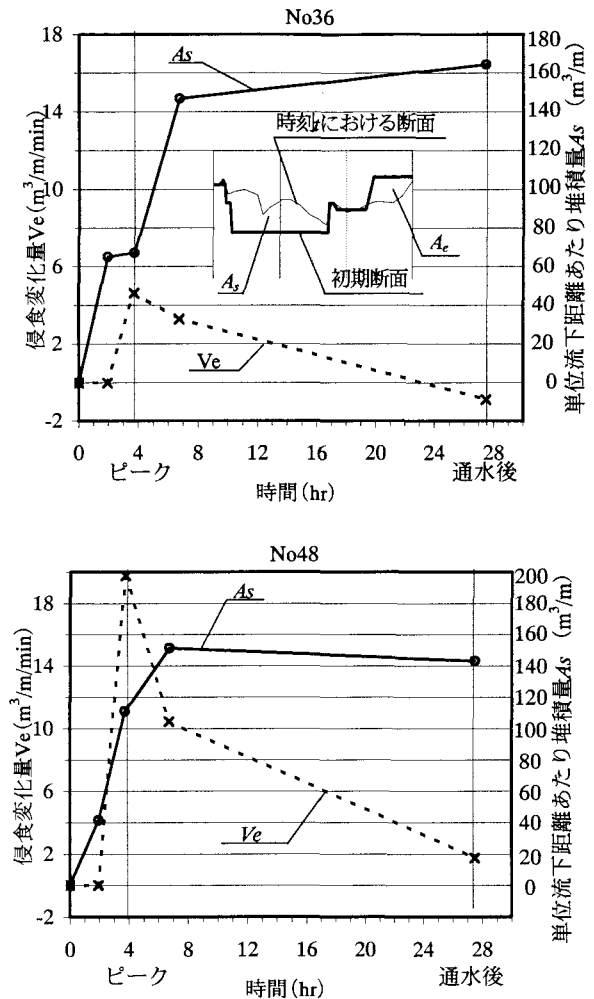


図-5 単位流下距離あたり堆積量及び侵食変化量の経時変化

ジ状のもの、厚さ：5cm、空隙率：91%）を用い、洪水で流失した部分は植生模型を取り外せるようにした。橋梁左岸上流の樹木群については、上流床止め左岸から多くの流水があふれ出し樹木群内部を流れたことが現地調査で確認されていたため、橋梁左岸の洗掘及びその周辺における流況の再現性を考慮して現地で測量した樹木群の平均直径と密度を模型縮尺に縮小し、直径1.0cmの粗度材（円柱状）を1m<sup>2</sup>あたり400本（千鳥配置）設置した。

模型の移動床範囲は河岸侵食を含め河道形状が変化している範囲を航空写真と現地踏査の結果により把握し、これを包括するよう設定した。粒度分布は現地採取試料から河床形態に影響しない細粒分を取り除いたもの（平均粒径=約1.0mm）とした。実験ハイドログラフは検討区間近傍に洪水時の流量データが存在しないため、図-1に示す貯留関数法を用いた既往の流出計算によるハイドログラフ<sup>8)</sup>を縮小したものをを用いた。流出モデルのパラメータについては、右支川より約1.6km下流にある中余笹橋地点において洪水ピーク時の水位より推定した流量と検証を行い、設定されている。なお、以降に示す模型実験結果及び数値解析結果は現地換算値で示している。

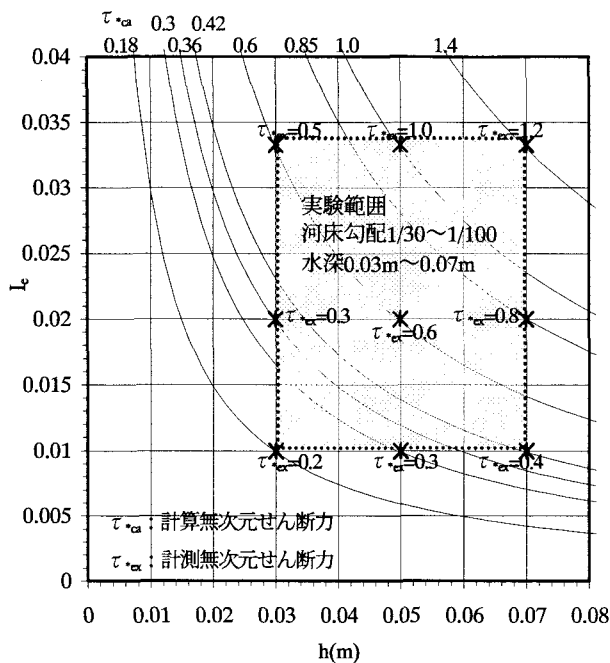


図-6 評価式による無次元せん断力と計測無次元せん断力の比較

## (2) 洪水による河床変動と河岸侵食

写真-3は通水終了後（ハイドログラフにおける洪水後と同時点）の河道状況写真、図-2は通水終了後のみお筋の位置図である。橋梁左岸の取り付け道路及び堤内地が流失し、橋梁下流右岸は河岸が侵食されており、通水終了後の平面形状・河道状況は現地流路と概ね同様の傾向を示していた。

図-3は通水終了後及び実績洪水後の水位・河床高比較縦断図である。痕跡水位と実験でのみお筋における計測水位を比較すると、痕跡水位は橋梁付近上流で計測水位より高くなっているが、橋梁下流では概ね等しい。また、橋梁部に設置した不透過型の阻害により局所的な洗掘が生じたため、国道4号橋地点およびその上流で通水終了後の最深河床が実績洪水後と比較して過大となっている。

実験及び実績の洪水前後の平均河床高を見ると国道4号橋付近で河床が低下し、橋の下流では河床勾配が緩くなっている。これらは、国道4号橋の閉塞が引き起こす急縮流により橋梁部の掃流力が局所的に増加し、これにより大量に発生した土砂が掃流力の低下に伴い下流で堆積したためと考えられる。

図-4は国道4号橋下流における横断形状の経時変化である。断面No48及び断面No36を見ると、増水期に河床高が上昇しており、洪水ピーク以降に侵食が進行していることがわかる。

図-5は国道4号橋下流約400mの断面No48及び国道4号橋下流約700mの断面No36における単位流下距離あたりの堆積量及び侵食変化量の経時変化を示している。これらの断面では実績洪水及び実験において大規模な河岸侵食が発生していた。なお、単位流下距離あたり堆積量 $A_s$ 及び単位流下距離あたり侵食量 $A_e$ は図-5中の横断模式図

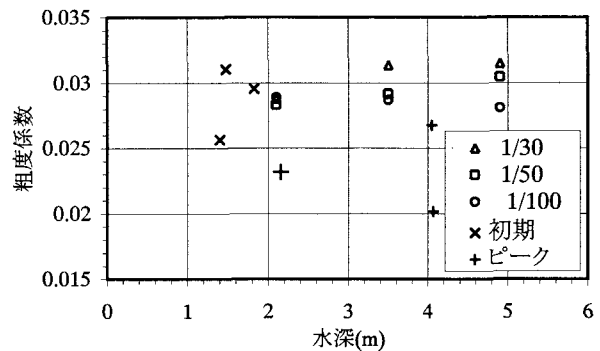


図-7 水深・勾配別粗度係数

に示す通りであり、侵食変化量とはある断面において以下の式で表される量である。

$$V_e = \Delta A_e / \Delta t$$

ここで、 $V_e$ は単位流下距離・単位時間あたりの侵食変化量、 $\Delta A_e$ は同一断面内の時間間隔 $\Delta t$ における単位流下距離あたり侵食量の時間変化である。

図より、これら侵食を受けた断面では洪水の立ち上がりからピークまでの段階で土砂が堆積、河床が上昇している時に侵食変化量が大きくなっていることが分かる。

一般的に河道の変動は流量・水深・せん断力・河道形状・河岸の構成材料等の複合的な要因により決まるが、上記の検討結果から平成10年8月末に発生した余笹川洪水で見られた国道4号橋下流右岸における河岸の侵食は、上流からの掃流土砂が堆積するという縦断的な流砂量の変化が強く影響していると判断できる。

## 4. 洪水時の流れと河床変動・河岸侵食

### (1) 底面せん断力と粗度係数の評価

余笹川の河床変動と河岸侵食の関係を洪水時の2次元流況から説明する場合、底面せん断力と粗度係数の評価が重要となる。そのため、前述した水理模型実験の初期及びピーク時の河床を固定して国道4号下流断面No48付近における底面せん断力の計測を行った。また、水理模型実験の局所水深及び局所河床勾配の範囲において、急勾配固定床水路を用いて底面せん断力の計測も行った。せん断力は、床面にひずみゲージ式センサーを設置して直接計測した。

急勾配水路では河床勾配1/30・1/50・1/100、水深3cm・5cm・7cmの等流状態で実験を行い、流速およびせん断力を計測した。ひずみゲージ式せん断力計の測定面及び水路床については模型実験と同様の河床材料を用いて粗度を調整した。

図-6に水路実験で計測された無次元せん断力 $\tau_{ex}$ と評価式から算出した無次元せん断力 $\tau_{ca}$ の関係を示す。水路実験で計測された値と評価式から求めた値は概ね一致しており、水理模型実験における局所的な水理条件の範

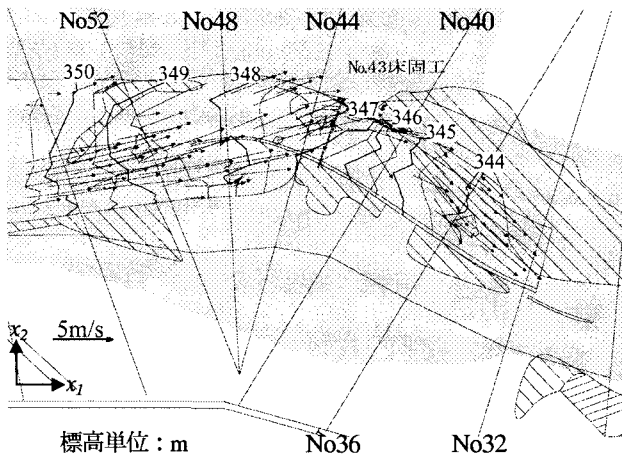


図-8 実験における氾濫域・水位コンター及び流速ベクトル (洪水ピーク)

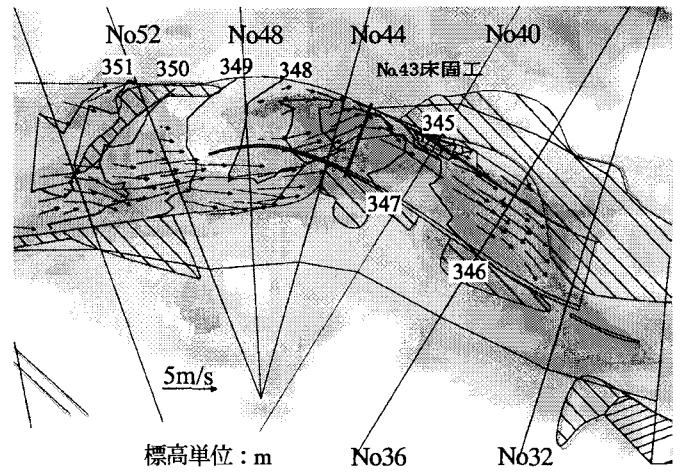


図-9 解析による氾濫域・水位コンター及び流速ベクトル (洪水ピーク)

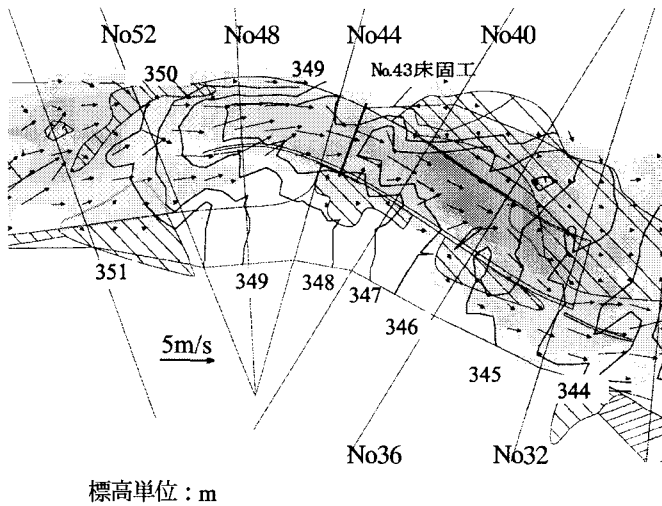


図-10 解析による氾濫域・水位コンター及び流速ベクトル (洪水初期)

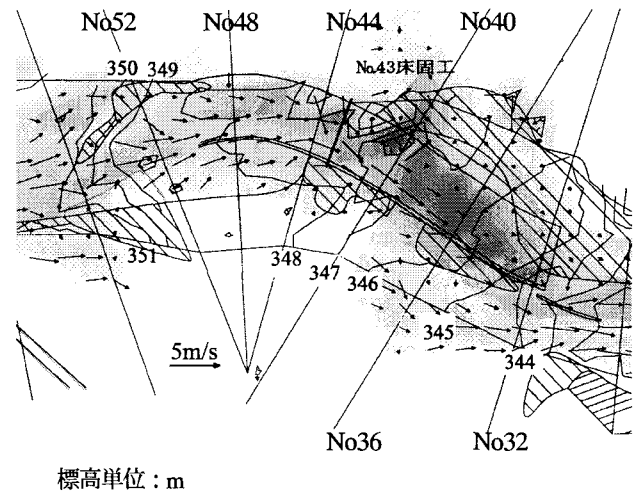


図-11 解析による氾濫域・水位コンター及び流速ベクトル (増水期)

囲でも評価式  $\tau = \rho g h I_c$  により底面せん断力を評価できることが確認された。

図-7は水路実験及び模型実験で計測したせん断力から平均流速公式を用いて算出した水深・勾配別の粗度係数である。全体的に粗度係数は概ね粗度係数0.025~0.032の範囲に分布している。このことより、本実験条件における粗度係数は0.025~0.032程度と考えられる。

## (2) 流れの基礎式

河床変動及び河岸侵食と流れの特性との関係を把握するため、実験において計測された洪水初期・増水期及びピーク時の氾濫原を含む河道の地形を用い平面2次元解析を行った。

対象とする区間は模型実験において河床縦断勾配が大きく、常射流が混在する流れとなっていた。そのため支配方程式は浅水流方程式及び連続式を用い、差分スキームとしてMacCormack法を用いた。

$$\frac{\partial(u, h)}{\partial t} + \frac{\partial(u, u_j, h)}{\partial x_j} = -gh \frac{\partial h}{\partial x_i} - gh I_{0x_i} - gh I_{fx_i} - f_{vx_i} \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(u, h)}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$I_{0x_i} = \frac{\partial z_b}{\partial x_i}, \quad I_{fx_i} = \frac{n^2 u_i \sqrt{u_j^2}}{h^{4/3}} \quad (3)$$

$$f_{vx_i} = \frac{gh}{k_s^2} u_i \sqrt{u_j^2} \cdot \delta(x_1 - x_{1'}) \cdot \delta(x_2 - x_{2'}) \quad (4)$$

ここで、 $x_1, x_2$ は図-8に示す方向であり、 $x_1$ 方向の流速を $u_i$ とする。 $h, z_b, n, k_s$ はそれぞれ水深、河床高、Manningの粗度係数、透過係数である。 $(x_{1'}, x_{2'})$ は植生又は橋梁が存在する座標、 $\delta$ はデルタ関数であり、 $f_{vx}$ は座標 $(x_i, x_j)$ に植生又は橋梁が存在しない場合は0となる。計算格子は直交直線座標とし、格子間隔を約7mとしてい

る。

植生及び橋梁が存在するメッシュはこれらを透過係数 $k_s$ (約3.3m/s)を用いて再現し、粗度係数は前述した底面せん断力の測定結果を考慮し0.030とした。

### (3) 実験結果と解析結果の比較

図-8及び9は、洪水ピーク時における国道4号橋下流での実験及び解析の流速ベクトルと水位コンター及び氾濫域である。解析による流速ベクトルは実験で水位・流速を計測した点についてのみ表示している。本区間は模型実験時に土砂堆積、河床勾配の減少及び右岸の大規模な河岸侵食が見られた区間である。

流速を比較すると全体的に実験における計測値の方が大きく流れもやや直線的になっているものの、右岸の河岸侵食と関係する測線No48付近で流れが右岸を乗り越えNo44～No40付近で左岸側に流心が偏る傾向は実験及び解析とも同様に見ることが出来る。

また、実験及び解析の水面形を見ると、測線No52から測線No48付近で水面勾配が一旦緩くなり、測線No44より下流で再び大きくなる傾向が見られる。

今回用いた解析モデルでは、計算格子及び格子間隔の設定等により定量的な議論をすることは出来ないが、河岸侵食を含む河道の変動を引き起こした洪水中における定性的な流れの特性については概ね再現できていると考えられる。

### (4) 洪水時における河岸侵食箇所の水面勾配と流況

図-10は洪水初期における国道4号橋直下流の水位コンターと流速ベクトル及び氾濫域、図-11は増水期における水位コンターと流速ベクトル及び氾濫域である。洪水初期の水面形状を見ると、断面No48付近から断面No52付近までの区間はほぼ様な水面勾配となっている。また、流速ベクトルを見ても右岸に向かうような流れはほとんど見られず、河道に沿った流れとなっていることが分かる。

増水期における水面形状を見ると、側線No48上下流で水面勾配が急激に小さくなっており、側線No52付近では右岸の水位が河道内の水位に対して低くなっている箇所が見られる。側線No48付近は増水期に土砂堆積により河床が上昇しており、土砂堆積が側線No48付近における水面勾配の急激な減少を引き起こしていると考えられる。

増水期の流速ベクトルを見ると、側線No48付近における水位勾配の減少、さらに側線No52付近左右岸の水位差による横断方向の水面勾配の増加により、側線No52の付近で右岸側に向かう流速ベクトルが生じている。測線No48付近の河床上昇が進行するに従いこの傾向は顕著になり、ピーク時には図-9に見られるように流心が右岸側へ移動する。

## 5. まとめと結論

平成10年の余笹川洪水における流木による橋梁閉塞と河床変動及び河岸侵食についての現地調査、模型実験、数値解析を用いた検討から以下の結論を得た。

- 1) 平成10年の余笹川洪水では、橋梁閉塞による急縮流により橋梁下流の河床が上昇し河床勾配が緩くなった。国道4号橋下流右岸の河岸侵食は、河床の上昇に伴い進行した。
- 2) 国道4号橋梁下流では、河床勾配の減少により流下方向の水面勾配が減少し、横断方向の水面勾配が増加することにより、流れは河岸を乗り越えて流下した。
- 3) 上流からの掃流土砂量が多く、河床が上昇するような箇所では、流心の移動による河岸の侵食が引き起こされる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、栃木県大田原土木事務所から多くのデータ及び情報を頂きました。また実験においては(株)建設技術研究所の中山氏、(株)新土木開発の折本氏に多大なる御協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 福岡捷二・渡邊明英・小俣篤・片山敏男・島本重寿・柏木幸則：河岸侵食に及ぼす土質構造の影響，水工学論文集，第42巻，pp1021-1026，1998
- 2) 服部敦・藤田光一・平舘治・赤川正一・湯川茂夫：粘性土からなる自然河岸の侵食に関する現地観測とその予測計算について，水工学論文集，第43巻，pp713-718，1999
- 3) 辻本哲朗・長田重寿・富永晃宏・関根正人・清水義彦・柿崎恒美：長良川・揖斐川における河岸侵食特性に関する研究，河川技術に関する論文集，Vol.5，pp117-122，1999
- 4) 伊藤和典・須賀堯三：平成10年8月末の那須出水による余笹川の流路変化の特性，水工学論文集，第44巻，pp407-412，2000
- 5) 寺本敦子・中村幸世・辻本哲朗：手取川における河道変遷とそれに伴う河岸侵食の変化，河川技術論文集，Vol.9，329-334，2003
- 6) 土木研究所：平成10年8月末豪雨における福島県・栃木県豪雨災害現地調査報告書，土木研究所資料第3793号，2001。
- 7) 栃木県大田原土木事務所災害対策班：平成10年度 設計委託業務（災害調査費 那須町外分割48号），1999。

(2003. 9. 30受付)