

木曾川水系牧田川の河道掘削形状の決定

—横堤を持つ急流土砂河川に対する水理シミュレーション評価—

下館知也¹・石黒陽平¹・鈴木高¹

¹木曾川上流河川事務所 調査課（〒500-8801 岐阜県岐阜市忠節町5-1）

木曾川水系牧田川では整備計画目標流量を流下させるために、河道掘削が検討・実施されてきたが、今後全区間的に掘削を実施する上では床固めと横堤の取り扱いが重要である。本稿では河道掘削形状に関して、床固めを掘り下げ案（掘り下げ案）と横堤を撤去し河道を拡幅する案（拡幅案）について検討し、水理シミュレーションを用いた評価を行った。その結果、基本方針河道では掘り下げと拡幅を組み合わせた混合案が、整備計画では掘り下げ案がそれぞれ最適な掘削形状となった。更に、基本方針河道の検討後に整備計画河道を決定する手順をとったことで、将来計画が手戻りとなることを避けることができた。

キーワード：牧田川、床固め、横堤、河道掘削、河床変動計算

1. はじめに

木曾川水系牧田川は岐阜県大垣市の鈴鹿山地に源を發し、はじめ北流したのちに南東方向に流れを変え、杭瀬川、相川等の支流と合わせながら、養老町付近で揖斐川と合流する、大臣管理区間15.8km、幹川流路延長約37.2km、流域面積約392.7km²の一級河川である。濃尾平野では低地部に木曾・長良・揖斐の木曾三川が集中していたため、この地はたびたび洪水に見舞われてきた。更に、御囲堤の築堤や新田開発に伴う輪中の拡大と相まって、木曾山脈から流出する多量の土砂が水行きを悪化させた結果、江戸年間には洪水が慢性化した。宝暦治水等の治水工事を通じて築堤が進められたものの、堤防内の堆積が進行し河床が上昇して堤防を嵩上げするという悪循環に陥り、牧田川は急勾配かつ卓越した天井川になっていった。明治以降、近代的な社会基盤技術の導入によって治水工事が進んだものの、依然として堆積傾向は続いていると見られている¹⁾。



図-1 牧田川の平面図（7.2k～15.8k）

牧田川の最大の特徴は上流部に設置されている床固めと横堤である（図-1）。これらは岐阜県による改修計画で昭和7年から整備され、地域住民の悲願であった砂防対策の意味合いがあったと考えられている。より具体的には、昭和当初まで分派していた南派川の締め切りによって土砂供給量増大等の負荷がかかる恐れがあった北派川の河道を安定化させることや、狭窄部の拡幅によって発生する上流からの土砂流出を緩和させることを狙って整備されたものであった。設置により一定の治水効果はあったものの、老朽化と河床変動によって出水の度に多額の改修費が必要となったほか、床固めによる土砂捕捉も発生するなど、懸念すべき点もあったと考えられる²⁾。

牧田川の現況を確認すると、まず現況河道に計画高水流量（広瀬橋 $Q=1600\text{m}^3/\text{s}$ ）を流下させた場合、計算水位はほぼ全区間で計画高水位を超越しており、8.6k付近では最大約250cmの超過が見られる。整備計画目標流量（広瀬橋 $Q=1,400\text{m}^3/\text{s}$ ）を現況河道にて流下させた場合もまた、多くの区間で計画高水位を超越しており、最大で約230cm超過しており（8.6k付近）、早期に水位低下のための河道掘削が必要である。また、7k～11kの一部区間では計算水位が多くの箇所にて堤防高を超越している。

これに対して木曾川上流河川事務所は平成27年度までには河道掘削を実施してきたが今後、全区間的に河道掘削を実施するにあたっては、24基の床固めと、その一部に付随する横堤の取り扱いを考慮する必要がある。

以上を踏まえ、本稿では今後の河道掘削実施における床固めと横堤の取り扱いの方針に関して、平面二次元不等流解析と平面二次元河床変動計算を利用して、基本方針河道と整備計画河道それぞれにおける最適な掘削形状を設定した。

本稿の構成は以下の通りである。第2章では河道掘削形状案と、水理諸元を用いたそれぞれの形状の評価手法を紹介する。第3章では掘削形状の計算・評価結果と、最適な河道掘削形状を提示し、第4章では考察、第5章では結論を示す。

2. 河道掘削形状とその評価手法

計画流量を計画高水位以下で安全に流下させる掘削形状の検討にあたっては「床固め・横堤」の扱いがポイントとなる。流下能力を向上させるためには、床固めを撤去・改修し河床を下げるか、横堤を開削し川幅を広げる対応が必要となる。土砂河川である牧田川において、河床掘削によって低水路を大幅に掘削した場合、護岸、河川横断施設の根入れ深さが不足が生じるほか、河床の安定性が損なわれ、土砂の堆積・侵食が懸念されるため、既定計画では、床固め改築は牧田川の河道計画としてはふさわしくなく、横堤撤去が最適であると考えられてきた(表-1)。

表-1 河道改修案のメリット・デメリット

比較案	メリット	デメリット
河床掘削 (既定計画)	<ul style="list-style-type: none"> 洪水時の水位を上げない。 現堤内で洪水を流下可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 護岸、河川横断施設の根入れ不足が生じる。 河床の安定性が損なわれ、土砂の堆積や侵食が懸念。
横堤撤去 (縮小)	<ul style="list-style-type: none"> 洪水時の水位を上げない。 現堤内で洪水を流下することが可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 横堤は堤防保護、河床の安定を目的に設置。 急流河川であり、土砂流量の多い牧田川において、横堤を撤去した場合、上流部での土砂流出抑制、強固な堤防の建設が必要に。

本検討では、既定計画の考え方を踏まえつつ、以下に示す個別の床固めの改修方針について、平面二次元不等流解析と平面二次元河床変動計算モデルによって、河床の安定性等の観点から判断することとする。なお、本稿で検討する整備計画河道の設定に関しては、あらかじめ検討する基本方針河道断面の内数で定めることで検討が将来手戻りとならないようにしている。

(1) 床固め・横堤の改修方針

河道形状の検討については、平面計画、縦断計画、横断計画について方針を示した。なお、堤防整備、床固

め・横堤の改修に対する堤防や護岸等の整備は対象としていない。

a) 平面計画

- 湾曲部は、流況安定のため、原則として床固めを存置または改築する。
- 湾曲部で横堤を全撤去する必要がある場合は、水制を配置する。
- 横堤の開削にあたっては、現状低水路法線を尊重しつつ、不連続部分を整形して滑らかな線形を結ぶ。

b) 縦断計画

- 現況河道の河床変動は比較的安定しているため、現況の縦断勾配を尊重する。
- 床固工を撤去・改修する場合、既定計画の掘削高未滿とする。また、改築に際して、上下流の河床の落差は極力設けず、2m以下とする。
- 床固め工箇所は維持管理上、掃流力が増加しないよう配慮する(上流側の勾配の1/2程度)。
- 現況の床固めの根入れ深さが十分に把握できていない箇所があり、床固め撤去後に埋め戻しが必要になる箇所がある。

c) 横断計画

- 掘削形状は、極力現況の河道形状を維持するため、床固めと横堤の節点から床固めの勾配を踏襲し、斜め掘削を基本とする。

以上を踏まえ、本検討における掘削形状の方針は以下の2案とした。

- 掘り下げ案：横堤を存置し床固めを改築。
- 拡幅案：床固めを存置し横堤を一部撤去。



図-2 掘削形状のイメージ

なお、河道の決定に際しては、シミュレーションの結果を踏まえて個別の床固めに掘り下げ案、拡幅案のいずれか、あるいは両案の組み合わせによって、形状を設定する。

(2) 平面二次元不等流解析を用いた摩擦速度の評価

河床の安定性を評価する方法の1つとして、平均年最大流量流下時の整備前後における摩擦速度の変化状況を評価するものがある。そこで、設定した掘削後河道について、現況の樹木を全伐開したという条件下で計画流量流下時における摩擦速度を算定し、現況河道に対する変化を整理した。

(3) 平面二次元河床変動計算モデルによる計算

局所洗掘や異常堆積を詳細に把握するため、平面二次元河床変動モデルを構築し、仕様は以下の通りとした。

a) 一般座標系の平面二次元河床変動計算モデルの採用
本検討では、複雑な平面形状に対しても容易にメッシュ分割を行うことができる「一般座標系の平面二次元モデル」を採用する。なお、離散化方法は、洪水時の局所的な流れを解析するため「有限体積法」を活用する。

b) 湾曲部の二次流を考慮できるモデルの構築

水理模型実験等の報告から、流線の曲がりによる二次流によって局所洗掘が進行することが分かっている。この洗掘を解析するためには、平面二次元河床変動計算に二次流の影響を取り入れる必要がある。本検討では、図-3に示す方法により、水深平均流速の流向から求めた流線曲率と流速、水深から河床付近の横断方向流速成分を算出し、二次流による横断方向への土砂移動現象を解析する。

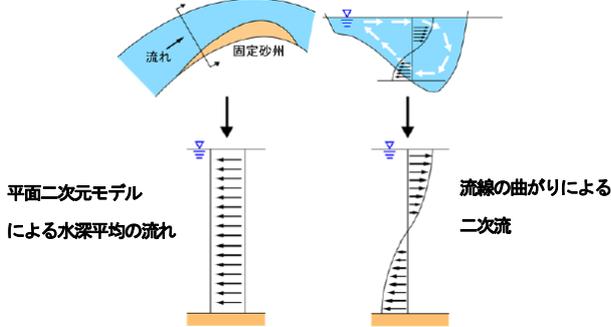


図-3 二次流の考慮方法

c) 計算範囲とメッシュ解像度の設定

計算範囲は杭瀬川合流点上流4.4k～上流端15.8k区間とし、メッシュサイズは、縦断方向には定期横断測定の200mの10倍の解像度である20mピッチでメッシュ分割を行うこととした。

3. 水理シミュレーションを用いた評価結果

(1) 基本方針河道の場合

a) 計算条件の設定

不等流解析・河床変動計算の計算条件を表-2、表-3に示す。

表-2 不等流解析の解析条件

項目	条件
計算区間	杭瀬川合流上流 4.4k～上流端 15.8k 区間
河道条件	CASE 0 : 現況河道 (河道掘削なし) ※樹木のみ伐開 CASE 1 : 掘り下げ案 CASE 2 : 拡幅案
流量条件	1600m ³ /s : 計画高水流量
下流端水位	下流端断面における H-Q 式 (準二次元不等流計算) により設定
粗土計数	計画値
樹木群	樹木伐開後のため考慮しない
計算項目	摩擦速度

表-3 河床変動計算の解析条件

項目	条件
計算区間	杭瀬川合流上流 4.4k～上流端 15.8k 区間
河道条件	掘り下げ案 拡幅案
流量条件	1985年から2014年の30ヶ月を10ヶ月ずつに分割。 CASE 0 : 1985-1994 ※平均年最大流量を大きく上回る洪水を含むケース CASE 1 : 1995-2004 CASE 2 : 2005-2014
下流端水位	下流端断面における H-Q 式 (準二次元不等流計算) により設定
粗土計数	計画値
樹木群	樹木伐開後のため考慮しない
計算項目	初期河床からの変動量

b) 計算結果

解析結果を図-4、図-5、図-6に示す。

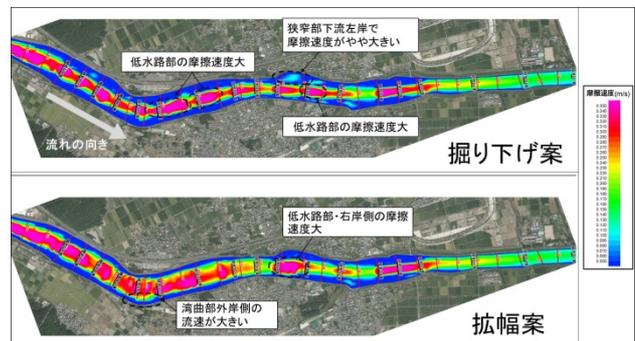


図-4 計画流量摩擦速度平面図

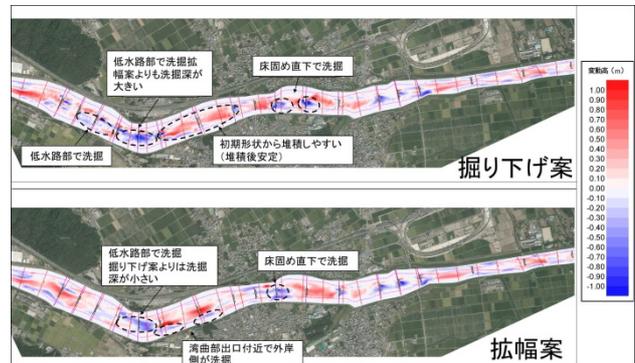


図-5 河床変動計算平面図 (CASE1)

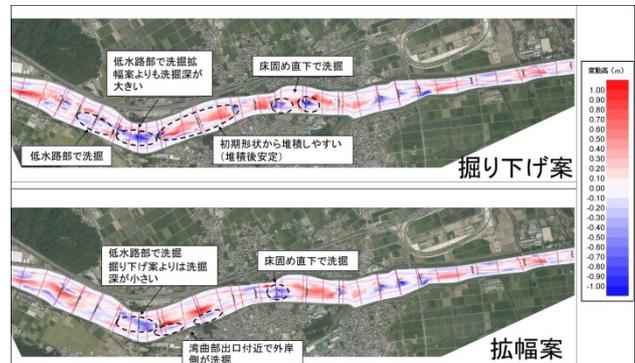


図-6 河床変動計算平面図 (CASE2)

まず、摩擦速度であるが、両案ともに床固め直下流部における摩擦速度が全体的に大きい。比較した場合、掘り下げ案では低水路流心部の摩擦速度が拡幅案に比べて

全体的に大きくなる一方、拡幅案は9号床固め下流右岸や14号床固め付近右岸での堤防付近の摩擦速度が大きい。次に河床変動計算では、CASE1の場合は両案ともに9号床固め直下において洗掘傾向にあり、掘り下げ案では8号床固め直下でも洗掘傾向が見られる。また、13号床固めの上下流区間では、下流において掘り下げ案の堆積傾向が顕著である。一方、湾曲部出口付近では、外岸側の洗掘が拡幅案に見られている。CASE2の場合もCASE1と同様に、13号床固めの下流側では両案ともに堆積傾向にあり、特に掘り下げ案で著しい。一方で、湾曲部では両案ともに洗掘傾向にあり、掘り下げ案のほうがより顕著である。

c) 基本方針河道の決定

以上を踏まえ、掘削形状の掘り下げ案、拡幅案の比較とりまとめ結果を表-4に示す。

この結果から、基本方針河道は、全川の河道が安定する拡幅案（横堤を一部撤去することを主とする）を基本とした。一方で、やや水衝部になる湾曲部や、局部的に洗掘すると想定される湾曲部出口外岸側については、極力横堤を存置することが望ましい。従って、拡幅案を基本に、湾曲部周辺の改修方法を見直して、河道線形、上下流河道特性等を踏まえて調整を行い、混合案を設定した。

表-4 掘削形状の比較とりまとめ結果

		特 徴		方針河道
		メリット	デメリット	
全 般	掘り下げ案	<ul style="list-style-type: none"> 低水路幅が狭く、主流部が集中する。また、横堤が存置されるため、高水敷の安全度が高い 	<ul style="list-style-type: none"> 床固め間の縦断勾配が異なる区間があり、やや不安定である 主流部が集中するため、大洪水時に床固めが被災する可能性がある。また、低水護岸による補強が必要な区間が多い 河床変動解析の結果、11.2k 上流では、拡幅案よりもやや堆積しやすい 	拡幅案を適用
	拡幅案	<ul style="list-style-type: none"> 現況河道と縦断勾配は概ね同じであり、安定的である 	<ul style="list-style-type: none"> 低水路幅が大きく、主流部が広い。また、堤防防護ラインを侵す区間が多く、高水護岸による補強が必要な区間が多い 	
区 間 別 特 徴				
		メリット	デメリット	方針河道
11号 ~ 14号 湾曲部	掘り下げ案	<ul style="list-style-type: none"> 平均年最大流量相当で左岸側の摩擦速度の低下が小さい 計画流量相当で堤防右岸付近の摩擦速度・流速が拡幅案よりも小さい 		
	拡幅案		<ul style="list-style-type: none"> 平均年最大流量相当で左岸側の摩擦速度の低下が大きく、相対的に堆積しやすい 計画流量相当で堤防右岸付近の摩擦速度・流速が大きい 湾曲部出口付近で外岸側が洗掘するおそれがある 	

(2) 整備計画河道の場合

a) 計算条件の策定

不等流解析・河床変動計算の計算条件をそれぞれ表-5、表-6に示す。

表-5 不等流解析の解析条件

項目	条件
計算区間	杭瀬川合流上流 4.4k~上流端 15.8k 区間
河道条件	CASE 1: 掘り下げ案 CASE 2: 拡幅案
流量条件	1400m ³ /s: 整備計画目標流量
下流端水位	下流端断面における H-Q 式 (準二次元不等流計算) により設定
粗度計数	計画値
樹木群	樹木伐開後のため考慮しない
計算項目	摩擦速度

表-6 河床変動計算の解析条件

項目	条件
計算区間	杭瀬川合流上流 4.4k~上流端 15.8k 区間
河道条件	掘り下げ案 拡幅案
流量条件	1985年から2014年の30ヶ月を10ヶ月ずつに分割。 CASE 0: 1985-1994 ※平均年最大流量を大きく上回る洪水を含むケース CASE 1: 1995-2004 CASE 2: 2005-2014
下流端水位	下流端断面における H-Q 式 (準二次元不等流計算) により設定
粗度計数	計画値
樹木群	樹木伐開後のため考慮しない
計算項目	初期河床からの変動量

b) 計算結果

解析結果を図-7、図-8、図-9に示す。

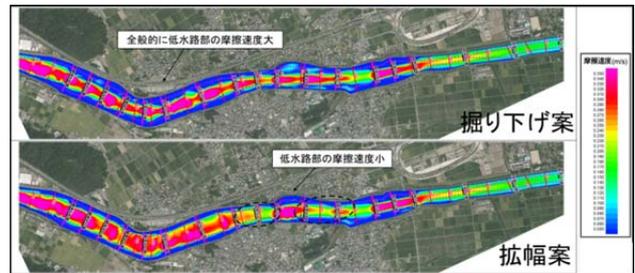


図-7 計画流量摩擦速度平面図

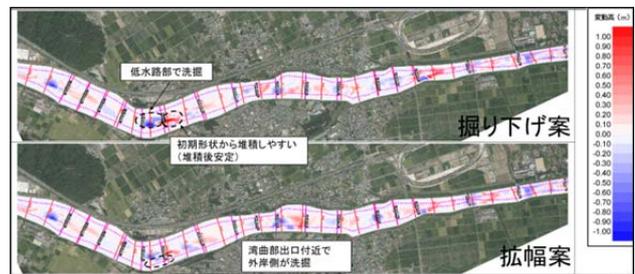


図-8 河床変動計算平面図 (CASE1)



図-9 河床変動計算平面図 (CASE2)

まず、摩擦速度であるが、両案ともに床固め直下における摩擦速度が全体的に大きい。両案を比較した場合、掘り下げ案では低水路流心部の摩擦速度が拡幅案に比べて全体的に大きくなる一方、拡幅案は8号床固め下流や11号床固め下流で摩擦速度が小さく、堤防防護ライン付近の摩擦速度が掘り下げ案よりも大きい。次に河床変動計算であるが、これはCASE1、CASE2において両案ともに床固め直上において堆積、湾曲部で洗掘傾向を示している。局所的にみれば、例えばCASE2において、湾曲部の洗掘が拡幅案ではやや緩やかである。

c) 整備計画河道の決定

以上の検討結果を踏まえ、掘削形状の各案の比較とまとめ結果を表-7に示す。

表-7 掘削形状の比較とまとめ結果

	特 徴		整備計画河道
	メリット	デメリット	
掘り下げ案	<ul style="list-style-type: none"> 低水路幅が狭く、主流部が集中するため、堆積しにくい 現況河道と縦断勾配、平面形状は概ね同じであり、安定的である 横堤が概ね存置されるため、高水敷の安全度が高い 	<ul style="list-style-type: none"> 主流部が集中するため、大洪水時に床固めが被災する可能性がある。また、低水護岸による補強が必要と思われる区間が多い 	掘り下げ案を適用
拡幅案	<ul style="list-style-type: none"> 現況河道と縦断勾配は概ね同じであるが、平面形状が区間によって異なるため、やや不安定である 床固めの改修が含まれるため、費用は高価になるものと想定される 低水路幅が大きく、主流部が広いいため、やや堆積しやすい 堤防防護ラインを侵す区間が多く、高水護岸による補強が必要な区間が多い 	<ul style="list-style-type: none"> 現況河道と縦断勾配は概ね同じであるが、平面形状が区間によって異なるため、やや不安定である 床固めの改修が含まれるため、費用は高価になるものと想定される 低水路幅が大きく、主流部が広いいため、やや堆積しやすい 堤防防護ラインを侵す区間が多く、高水護岸による補強が必要な区間が多い 	

この結果から、整備計画河道は、全川の河道が安定する掘り下げ案を基本とする。これは概ね既定の整備計画河道の踏襲となる。また、掘り下げ案は原則として、横堤の改修を含まないものであり、拡幅案を取り入れた

場合は横堤の改修が発生する。したがって、掘り下げ案の安定性、横堤の改修のコスト等を考慮して、掘り下げ案を整備計画河道に設定した。

4. 考察

水理シミュレーションを行い、牧田川の最適な基本方針河道・整備計画河道の掘削形状を決定した。その結果、基本方針河道では拡幅案を基本とした混合案が、整備計画河道では掘り下げ案がそれぞれ最適とされ、異なる検討結果が導かれた。その理由を考察する。

まず、整備計画河道掘り下げ案では、将来再度床固めを改築することを避けるため、基本方針河道掘削高まで掘り下げることとした。その結果、縦断勾配が現況河道と概ね同じになり、安定的であるとみなすことができる。次に、拡幅案では掘削高を基本方針河道掘削高の内数とした。そのため、縦断勾配が現況河道から変化するとともに床固め間で異なるために不安定となる。また、拡幅案での掘削を方針河道掘削高とした場合、既に横堤箇所は方針河道まで拡幅しているために、整備計画河道と基本方針河道が一致する。この場合、床固めが連続する区間の流下能力は整備計画の目標流量以上となり、上下流バランスが逆転することになると予想される。

5. 結論

本稿では、木曾川水系牧田川の河道掘削形状を、水理シミュレーションを用いて検討し、基本方針・整備計画それぞれについて河道決定を行った。その結果、方針河道の内数とした整備計画河道の掘削形状は、方針河道のそれとは異なっていた。しかしながら、両検討ともに河床勾配を安定化させるという点で、床固め設置当時の設計思想を引き継いでいると見なすことができる。

本検討は具体的な施工過程を考慮した検討ではないため、実際の計画策定時には、工事の順序を視野に入れた検討が必要である。今回の検討では、下流の床固めから着手することを前提としたが、各床固めの掘削形状の水理シミュレーション結果は相互依存的であり、一つの床固めが掘削されれば流況は変化するものと考えられる。工事に着手する順序や過程をも含めた検討結果を比較し、河道を決定することが望ましいと考え、今後の課題としたい。

参考文献

- 岐阜県：一級河川木曾川水系 牧田川圏域河川整備計画、2009。
- 養老町教育委員会：郷土の治水—養老町における水との闘い—、1991。