

余呉川における河川改修計画と地盤沈下について

清水 司

長浜土木事務所木之本支所 河川砂防課

木之本管内を流れる余呉川は、これまでに西野放水路から約5.1kmの一次改良が完成している。整備後に地下水位低下の可能性が否めないため、河川改修工事に伴う地下水位の低下量を3次元FEM浸透流解析を用いて予測し、一次元圧密沈下解析により地下水位低下に伴う周辺地盤の沈下予測を実施した。また、近接集落への地盤沈下の影響を低減するため、河道計画の見直しを含めた対策工の検討を実施し、地下水位低下量の低減対策を選定した。

キーワード 地下水位低下，地盤沈下，河道計画，事前対策

1. 余呉川の概要

余呉川は、滋賀県と福井県の県境に位置する大黒山に水源を發し、長浜市余呉町の谷あいを多数の溪流を合流しながら南下し、西野放水路から琵琶湖へ流入する流域面積約65km²の一級河川である。

余呉川の治水事業の歴史は古く、西野放水路では、古くは江戸時代（天保11年～弘化2年）に恵莊上人が開削したといわれる幅1.0m・高さ1.5～4.0m延長約250mの排水トンネルが整備されている。

また、昭和21年～昭和34年にかけてそのすぐ横に放水トンネルが施工された。

その後、琵琶湖総合開発特別措置法の施行により、昭和47年には余呉川中小河川改修工事全体計画が採択され現在の西野放水路トンネルが昭和55年に完成している。

その後、西野放水路や余呉川本川の河川改修が進められ、現在は河口（西野放水路）から約5.1kmまで一次改良が完了している。



図-1 位置図

2. 河川改修におけるこれまでの課題

余呉川の河川改修計画は、図-2 標準断面図に示すように河道計画のセオリーに準じ、堤内地盤高からHWLを設定しており、築堤河川である原川から大きく掘り込む計画となっていた。

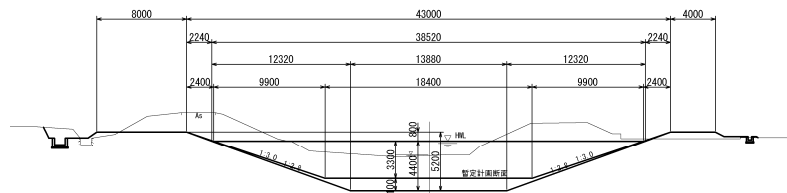


図-2 標準断面図

図-3に整備区間前後の河川整備状況および改修計画を示す。現状では、No49+70より下流は暫定計画高で整備済みで、No49+70～No51は暫定計画高より1.5m高い暫定計画高で整備されている。No51より上流は未改修の状況である。河川整備計画では、暫定計画高での整備を進める計画であり、深いところでは2mを超える河床掘削となる。

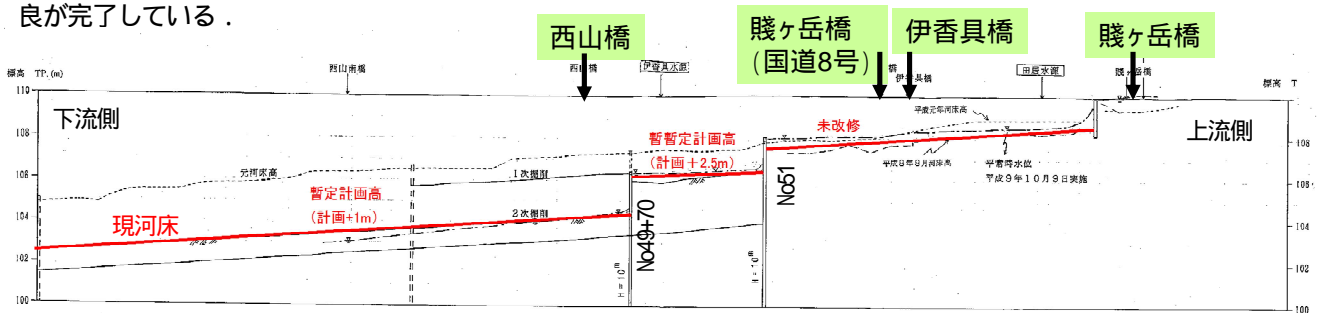


図-3 河川整備状況および改修計画

また、これまでの河川改修において下記の課題が明らかとなっている。

- 隣接する水田の減水深増加
- 簡易水道の枯渇
- 橋梁取付盛土による地盤沈下

これらの課題から『地下水位低下』と『軟弱地盤』というキーワードに着目し、一つの仮説を考えた。

『河川改修に伴い、地下水位低下の影響により地盤沈下が生じ、家屋に近接した地域では大きな事業損失が生じる』というものである。

これから事業実施しようとする区間は、図4 平面図に示すように集落に近接した区間である。

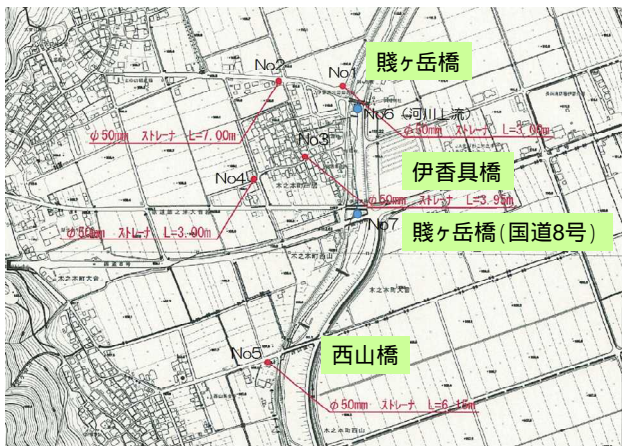


図4 平面図

また、国道8号賤ヶ岳橋架替事業が施工委託により本格的に動き出すタイミングであり、これらの可能性を検証しより効果的な対策を検討するため、地下水位動向解析、地盤沈下予測および河道計画の見直しを同時に進めることとした。

3. 地下水の流動状況

工事後に地下水位低下の問題が生じた場合、工事による影響の有無を検証するためには、施工前の地下水位の変動状況と施工後の変動状況とを比較し、検証が必要であることから、施工前から水位変動状況を把握しておくことが重要となる。

また、事前に工事に伴う水位低下量を予測し、対策工を検討するためには、予測解析モデルが現状の水位変動を精度良く再現できることを確認し、モデルの信頼性を高めることが重要となる。

これらの理由から、対象地周辺に地下水位観測孔を設けて、地下水位および河川水位の連続観測を実施している。図5に水位観測結果を示す。周辺地下水位は右岸側のNo1～No5で観測しており、河川の上流側にあるNo1から下流側のNo5に向かって概ね水位が低くなっている。この地下水は図6の地質断面図及び図7の地質縦断面図に示される、表層の盛土層（B層）から河川下のAg層へ流れる浅い地下水と想定される。

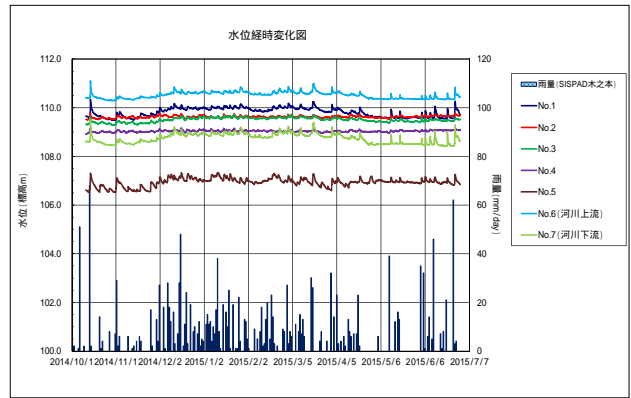


図5 水位観測結果

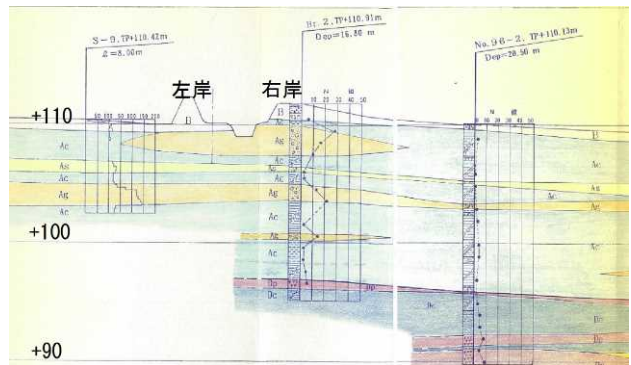


図6 地質断面図 (No.53+70)

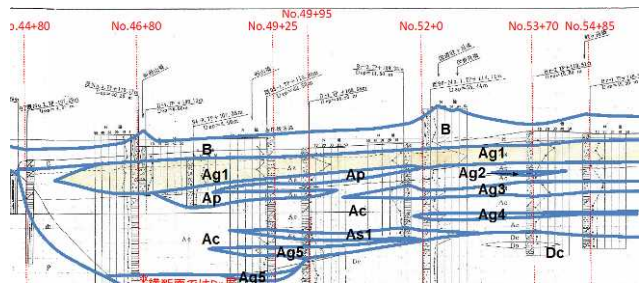


図7 地質縦断面図 (右岸)

4. 地下水位動向解析モデル

河川改修に伴う水位変動量を予測するため、浸透流解析を実施した。解析モデルは、地下水の水平方向・鉛直方向の流動を表現できる三次元FEM浸透流解析モデル（定常解析）を用いた。

(1)解析モデル

三次元FEM浸透流解析では解析モデルの精度向上のため再現解析を行い現状の地下水位を最も良く再現できるモデルを決定した。設定した解析モデルを以下に示す。

a) 解析メッシュ

図8に解析メッシュを示す。左岸側のメッシュ範囲は影響範囲を考慮して1km程度で設定した。

b) 境界条件

再現解析の境界条件は以下のとおりとした。

・河川境界

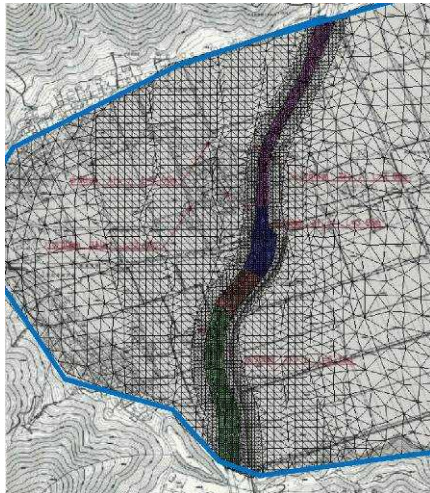
水位観測データを利用（H26年10月平均値）

・メッシュ境界

再現解析によるトライアルでGL-1mに設定。

・降雨量

木之本のH26年10月の平均値（5.2mm/日）に流出係数，蒸発散量を考慮して降雨浸透量を16.7%と設定。



凡例	区間	現状の河川改修状況（河床高）
紫	No. 53 より上流	未改修
青	No. 51～53	未改修
オレンジ	No. 49+70～51	暫定計画高（計画高+2.5m）
緑	No. 49+70 より下流	暫定計画高（計画高+1.0m）

図-8 三次元FEM浸透流解析メッシュ

c) 解析定数

透水係数は既存の土質試験結果をもとに，表-1の通り設定した。盛土については試験結果が得られていないため，Ag層と同等としたが，堤体部については再現解析により表-1のとおりとした。

表-1 透水係数

土層名	記号	透水係数(cm/s)
盛土	B	4.2×10^{-3}
沖積粘性土層	Ac	2.3×10^{-7}
沖積腐植土層	Ap	1.2×10^{-5}
沖積礫質土層	Ag1 - Ag5	$1.6 \times 10^{-2} \sim 4.2 \times 10^{-1}$
沖積砂質土層1	As1 - As3	2.1×10^{-2}
洪積粘性土層	Dc	8.0×10^{-8}

(2)地下水位の再現結果

再現解析では実測の地下水位と整合するよう，盛土の透水係数等のトライアルを実施し，上記の解析モデルを設定した。採用した解析モデルによる地下水位の再現結果として，図-9に地下水位コンター図を示す。図-9では地下水観測孔No1付近で，河川水が堤内地側に浸透する状

況が推測される。この結果は，図-10でNo1地点の水質（ヘキサダイアグラム）が河川水と類似していることから推測され，再現解析結果と水質試験結果とが整合していると言える。

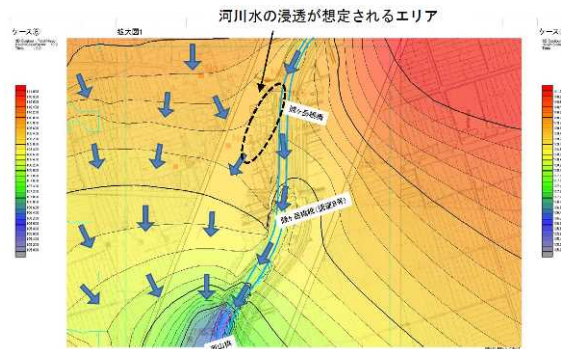


図-9 地下水位の再現解析結果（水位コンター図）

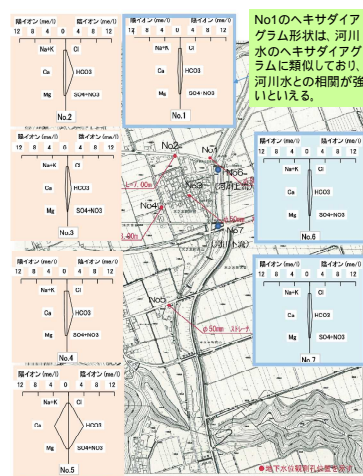


図-10 ヘキサダイアグラム

(3) 河川改修に伴う地下水位低下量の予測

再現解析で設定した三次元FEM浸透流解析モデルを用いて，周辺地下水の水位低下量を予測した。

河川改修に伴う河川水位の低下量は，河床の掘り下げによる水位低下量と川幅が広がることによる水位低下量の和として算定し，三次元FEM浸透流解析により改修後の地下水位を求めた。図-11に河川改修に伴う水位低下量コンター図を示す。同図より，河川改修によって広い範囲で地下水位の低下が生じ，水位低下量は河川近傍で2mを超えるものと予測される。

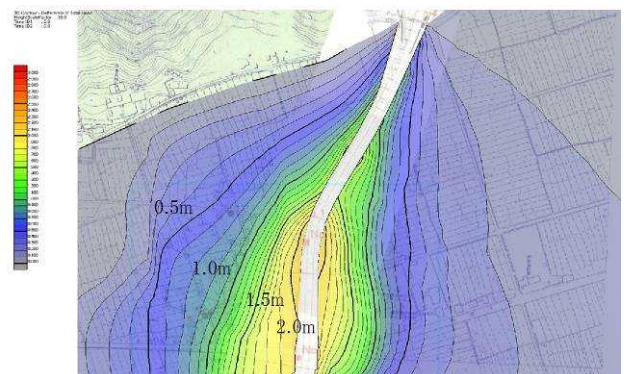
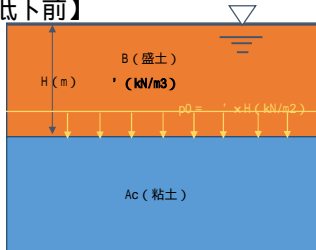


図-11 地下水位低下量コンター図（当初計画）

5. 地下水低下に伴う地盤沈下の発生メカニズム

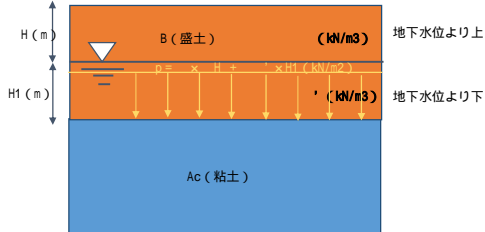
河川水位の低下に伴って、周辺の地下水位が低下する。このとき、粘性土地盤では、図-12に示すとおり、水位低下量（ ΔH ）に応じて、上載荷重が Δp （ $=\gamma_w \Delta H$ ）増加することになるため、この上載荷重の増加に伴って圧密沈下が発生する。

【水位低下前】



【粘性土にかかる有効上載荷重】
 $p_0 = \gamma \times H$

【水位低下後】



【粘性土にかかる有効上載荷重】
 $p = \gamma \times H + \gamma' \times H1$
 $= (\gamma + w) H + \gamma' \times H1$
 $= \gamma' (H + H1) + w \times H$
 $= \gamma' H + w \times H$
 $= p_0 + \frac{w \times H}{p}$

図-12 地下水水位低下に伴う地盤沈下の発生メカニズム

6. 河川改修に伴う地盤沈下量の予測

(1)地盤沈下量の予測解析モデルの設定

地盤沈下量の予測は一次元圧密沈下解析により行った。解析モデルの精度向上のため、西山橋右岸の取付道路盛土工事で実測された沈下計測結果を用いて、沈下量の実測値と解析値がフィッティングするよう再現解析を行い、地盤の圧密パラメータを設定した。図-13に一次元圧密沈下解析モデルの再現解析結果を示す。

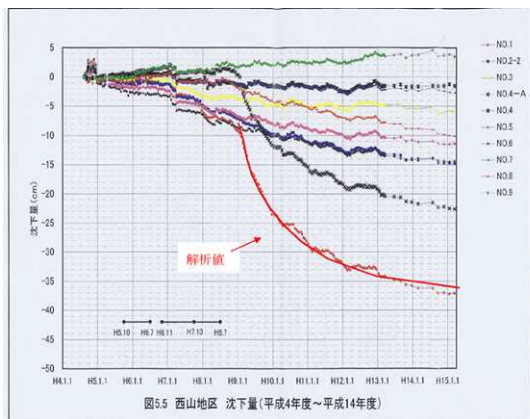


図-13 一次元圧密解析モデルの再現解析結果

(2)河川改修に伴う地盤沈下量の予測

一次元圧密沈下解析による沈下予測解析は図-14に示す4断面で実施した。

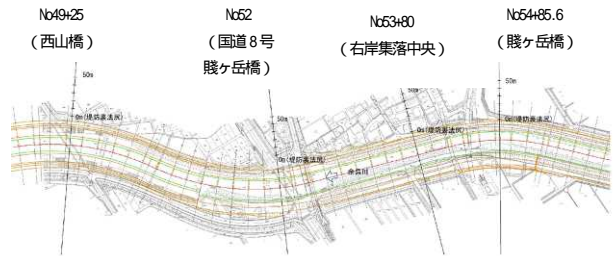


図-14 一次元圧密沈下解析断面

解析では、各断面において図-11で得られた水位低下量に相当する増加荷重を分布荷重として与え、右岸側堤防裏法尻から10mごとの沈下量を求めた。図-15に代表としてNo.53+80断面における解析モデル図を、図-16に沈下量と傾斜角の予測解析結果を示す。

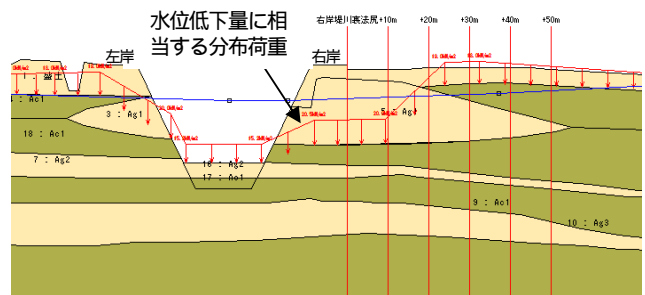


図-15 一次元圧密沈下解析モデル図 (No.53+80断面)

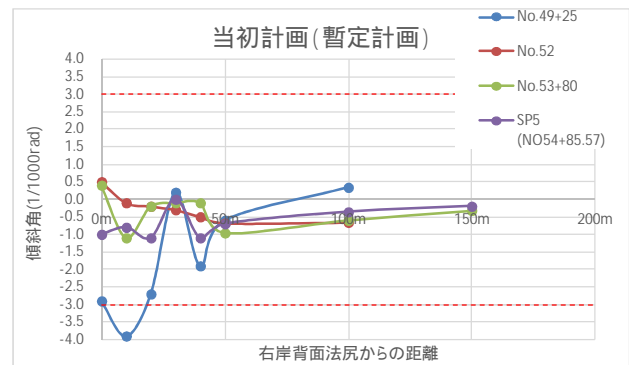
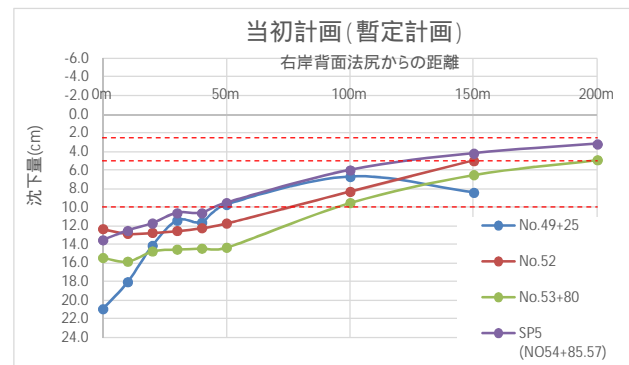


図-16 一次元圧密沈下解析結果 (当初計画)

当初計画では、全4断面が堤防裏50m付近まで、小規模建築物基礎設計指針の布基礎・べた基礎の許容沈下量の標準値である10cm以上の沈下を生じ、集落中央付近（No53+80断面）では裏法尻から100m付近まで沈下量が10cm以上となる。また、傾斜角はNo49+25断面で堤防裏法尻から20mまで、同指針で変形角の限界値の下限値として示される 3×10^{-3} radを超過する箇所がある。

これらの検証結果より、『地下水位低下の影響により地盤沈下が生じる』という仮説が実証された。

7. 事前対策工の検討

沈下予測解析の結果、周辺地盤において10cm以上の沈下を生じ、近接する集落では建物への影響が懸念されることから、事前対策工の検討を実施した。

(1)事前対策工の選定

事前対策工には、地下水位を低下させない遮水工法が一般的である。しかし、国道8号を含めた橋梁が3橋連続する区間であり、遮水工法の連続性の確保について疑問が残る。このため、地下水位を低下させる原因の排除についても広く検討する必要があるが、それは「河床を掘り下げない」ことを意味しており、これまでの河道計画を大きく見直すことであった。

8. 河道計画の見直し

(1)河道計画の課題

河道計画の見直しに向け以下の課題を抽出した。

- 河床を下げない整備ができるか
- 河川用地を満足するか
- 超過洪水リスクを低減できるか
- 多自然川づくりに配慮できるか
- 整備済み区間との縦断的整合と地下水位低下対策工が実施可能か

これらの課題を解消できる最適案を作成すべく検討を行った。

(2)課題解決に向けた河川条件の整理

前述の課題を解決するため、河川条件を整理する。

a)河床高の設定

過去に繰り返し現況最深河床まで河川水位が低下したことがある場合、繰り返し圧密が起こっていた（過圧密）と考えられる。このため、計画河床高は、現況最深河床を繋ぐ縦断計画とすることで、河床掘削による影響を最小限に抑える計画とした。

b)超過洪水リスクと用地幅について

先に設定した河床高では、計画断面は引き堤となる。築堤河川における堤防の高さは、超過洪水による破堤リスクに直結するため現況堤防高を超えた築堤は避ける必

要があった。そこで、用地幅に収まる流下可能な断面を複数検討し、計画堤防高が現況堤防高を下回る計画断面を模索した。

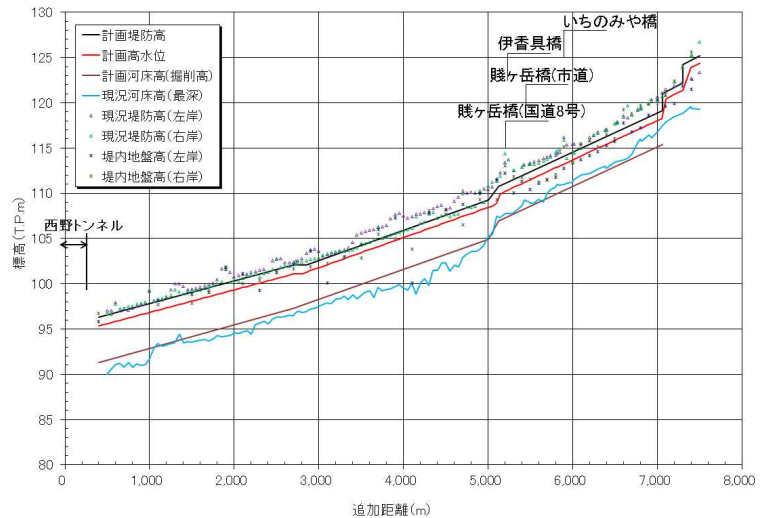


図-17 河川計画縦断図

c)多自然川づくりとハビタットの多様性

多自然川づくりにおいて河道計画に影響のある条件はハビタットの多様性である。淡海の川づくりの目指すべき姿として『川の営力により、河原・瀬・淵・多様な水際が継続的に形成・維持される断面を確保する』と明確に示されており、無次元掃流力と川幅水深比を満足する河道計画を目指した。

河床材料の平均粒径: $dR = 35\text{mm}$	
現況河道	整備計画河道
$\tau^* = 0.30$	$\tau^* = 0.24$
$B/H_L = 8$	$B/H_L = 13$

図-18 無次元掃流力と川幅水深比

(3)河道計画の決定

これらの条件を全て満足する河川断面を選定し、再度課題に照合した上で以下の河川断面を決定した。

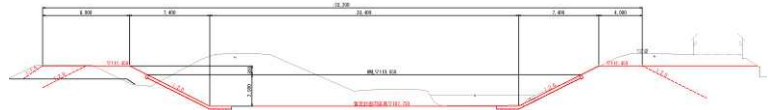


図-19 計画標準断面図

9. 事前対策工の決定

(1)河道計画見直し後の地盤沈下予測

河道計画の見直しにより，図-20に示すとおり当初計画に比べて全体的に水位低下量は減少したが，落差工付近では，1.9m程度地下水位が低下する結果となった．本対策による沈下量は，図-21に示すとおりNo49+25断面で堤防裏法尻から50m付近までは10cmを超える結果となった．

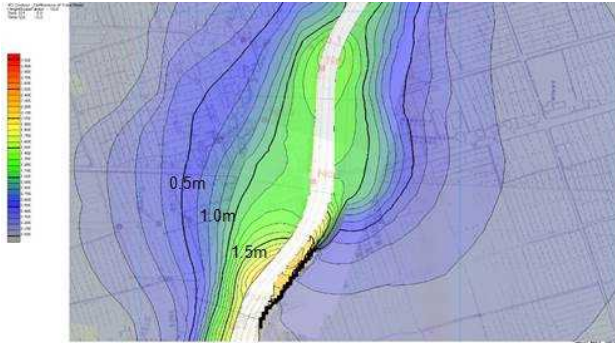


図-20 地下水位低下量コンター図（河床上げ対策）

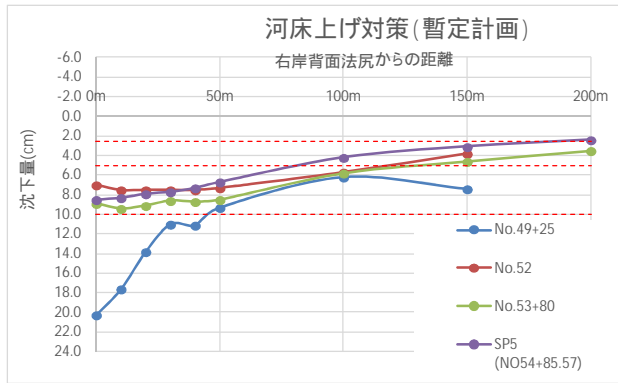


図-21 一次元圧密沈下解析結果（河床上げ対策）

(2) 鋼矢板による遮水対策

No51より下流側では，河床上げ対策を実施しても水位低下量が大きく，10cmを超える沈下量が発生するため，遮水対策として図-22に示す範囲に鋼矢板を設置した．遮水矢板は，図-23に示す堤内地の盛土層から河川部のAg1層に向かう地下水の流動を遮断するよう，Ag1層下のAc層に1m根入れするものとした．本対策の結果，図-24に示すとおり，全ての断面において沈下量10cm以下，傾斜角 3×10^{-3} rad以下となった．

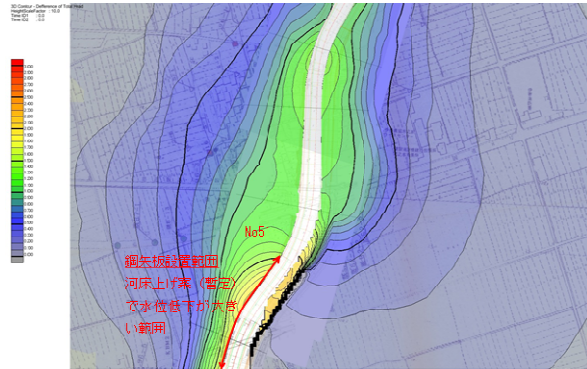


図-22 鋼矢板による遮水対策範囲

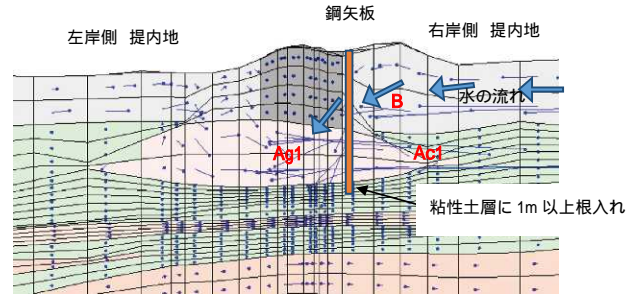


図-23 鋼矢板の打設深度

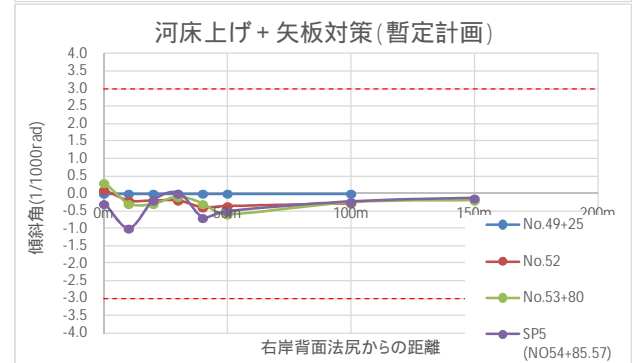
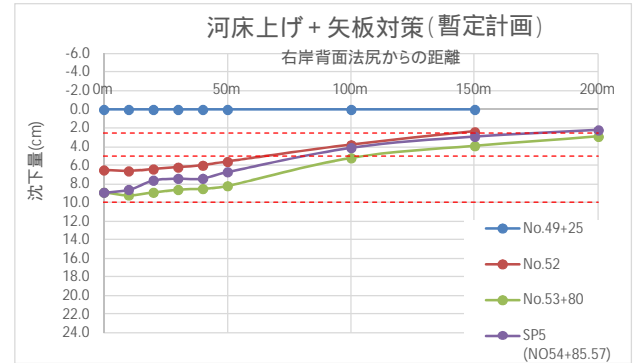


図-24 一次元圧密沈下解析結果（河床上げ＋鋼矢板対策）

10. おわりに

最深河床に設定した河道計画においても許容値内ではあるものの若干の地盤沈下が生じる結果となった．これまでの最低水位による過圧密領域の有無については，本業務では確認できなかったが，現在も地下水位および河川水位の変動を継続観測している．今年のような異常高水時の状況も考慮した地下水位動向解析を行い地盤沈下予測の精度向上を目指したい．

また，今回の発表は，河床切下げによる地盤沈下の課題を有する他の河川でも有効な手法の一つであり，河川整備の推進に寄与するものである．

謝辞：解析業務を行ったパシフィックコンサルタンツ(株)ならびに河道計画業務を行った(株)エイト日本技術開発のご担当者様には，余呉川河川改修事業の進捗にご協力頂きました．ここに感謝の意を表します．