

由良川堤防漏水対策による 地下水影響検討について

吉田 衛¹・岸本 昌之²¹近畿地方整備局 福知山河川国道事務所 調査第一課 (〒620-0875福知山市字掘小字今岡2459-14)²近畿地方整備局 六甲砂防事務所 調査課 (〒568-0052 兵庫県神戸市東灘区住吉東町3-13-15) .

福知山市街地に面する由良川左岸では、平成25年台風18号出水時に堤防法尻および堤内地の20箇所超で漏水または噴砂痕が確認された。既往堤防点検では盤ぶくれや局所動水勾配に対する安全性不足区間が指摘されているが、大半は未対策となっている。特に36.4k上流は“岩沢堤”と呼ばれる特殊堤で、堤内には井戸を利用する住宅・寺社が密集する区間となっている。

本報告は、岩沢堤区間の漏水対策（鋼矢板遮水）施工に先立ち、地下水の利用・流動実態調査ならびに影響予測解析を行い、災害復旧（最優先）区間における施工時モニタリングおよび影響検証を行ったものである。影響予測は三次元飽和－不飽和モデルにより矢板周りの複雑な地下水流動を解析し、施工者・地元関係者との情報共有を図りつつ円滑な施工を実現した。

キーワード 河川堤防，地下水利用，遮水鋼矢板施工，三次元モデル解析

1. はじめに

由良川は京都府、滋賀県、福井県境の三国岳に発し、山間部を西流したのち福知山市内で流路を北東に転じ日本海に注ぐ幹線流路延長146kmの一級河川である(図-1)。

平成25年9月に発生した台風18号による出水では、福知山地点で5時間にわたり計画高水位を超過し、由良川の水位と堤内地盤の比高差が約5mに達した。これにより、堤防法尻や堤内地で噴砂痕（水田・畑地）や漏水（堤脚・擁壁）が複数確認されたほか、井戸からの噴砂も発生している(図-2)。

平成16年10月台風23号以来の大規模出水を背景に、特に36.4k上流の特殊堤（カミソリ堤）区間では堤防強化への地元要望が強く、対応が急務となっている。同時にこの区間は寺社・古民家が密集し、約1kmの区間で約250の井戸が存在（約3割で飲用利用）する特徴がある。



図-1 由良川流域および検討地区位置図

こうした地域特性をふまえ、浸透対策による地下水への影響を定量的に予測・評価し、モニタリング情報をリアルタイムに共有し慎重な施工を行った事例を紹介するものである。

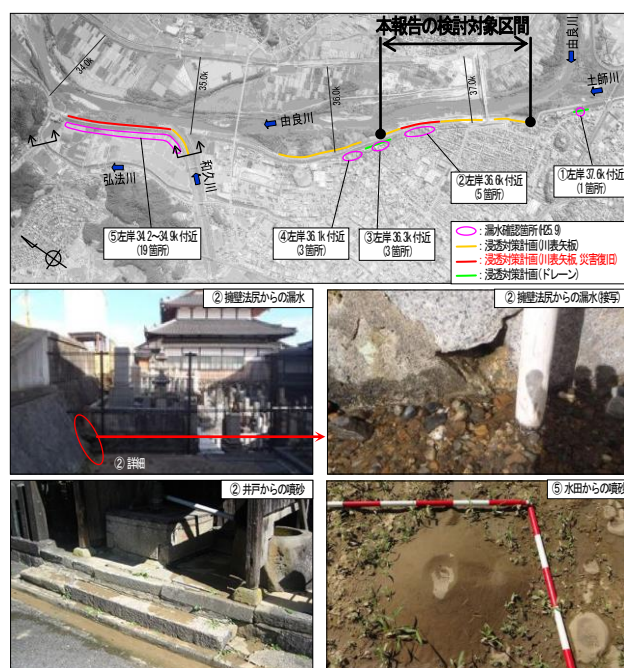


図-2 平成25年9月台風18号時の漏水・噴砂状況

2. 基本条件の整理

(1) 堤防地盤モデル

検討区間では堤防下に高透水性を示す層厚8～10mの沖

積砂礫層が、その下位に低透水性の洪積粘土質砂礫層が広範囲に分布する。また、堤防直下に低透水性の粘土～シルト層が薄く分布する特徴がある。これにより、出水時には由良川からの沖積砂礫層へ高い水頭差による浸透に起因して、堤内側での噴砂、盤ぶくれあるいは漏水（一部堤脚）が発生するため、堤防の安全性を損なう恐れがある（図-3）。

この浸透対策として、護岸コンクリート（特殊堤）のクラック補修と張コンクリート先端から洪積砂礫層に達する鋼矢板打設による遮水対策を講じる計画となった。

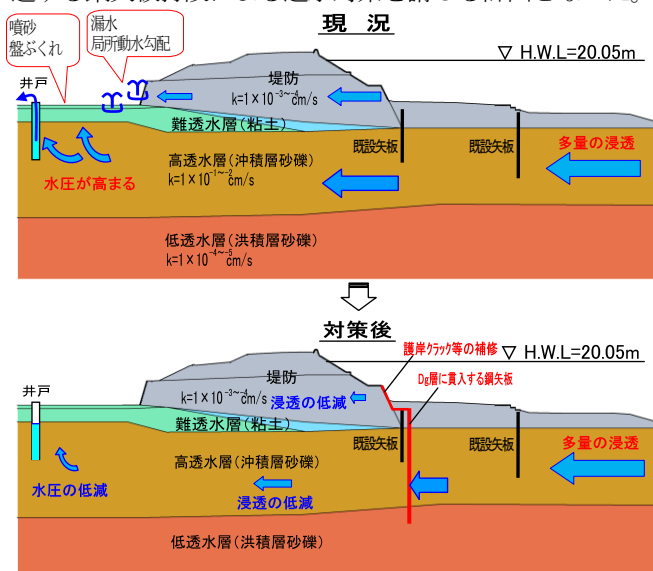


図-3 現況の漏水機構および対策工法（左岸 36.4k）

(2) 地下水利用実態

対策計画区間である寺町地区周辺は寺社・古民家が密集する旧市街であり、多くの井戸利用が想定されたため、保全対象を明確にするため公共井戸の資料調査および民生井戸の聞き取り調査を実施した。調査範囲の設定には、*Seichardt*（ジハルト）式を援用した概算により由良川から400m範囲を目安とし、自治会境界や主要な道路を境とした（図-4）。

聞取り調査の結果、寺町地区(災害復旧区間)のみでも111箇所の民生井戸が確認され、井戸の約4割が飲用利用されていること(図-5)、当地区ではすべて深度10m以内の沖積砂礫層中の浅井戸であり、由良川と一連の水面を形成する地下水の可能性が高いことが判明し、この時点で矢板施工による影響リスク(重要度と影響発生の可能性)が比較的高いと考えられた。

$R = 3000 \cdot \Delta s \cdot \sqrt{k} = 380\text{m} \div 400\text{m}$ 【Seichardt 式】
 k (透水係数) = 堤防調査 Ag 層最大 $= 1 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{sec}$
 Δs (水位低下量) = 上下流端的管理河床高差異
 $= 11.73\text{m} [37.2\text{k}] - 10.46\text{m} [36.2\text{k}] = 1.27\text{m}$

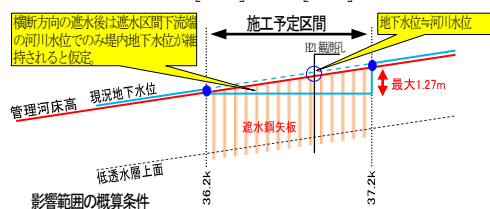


図-4 地下水利用実態調査範囲の概定方法

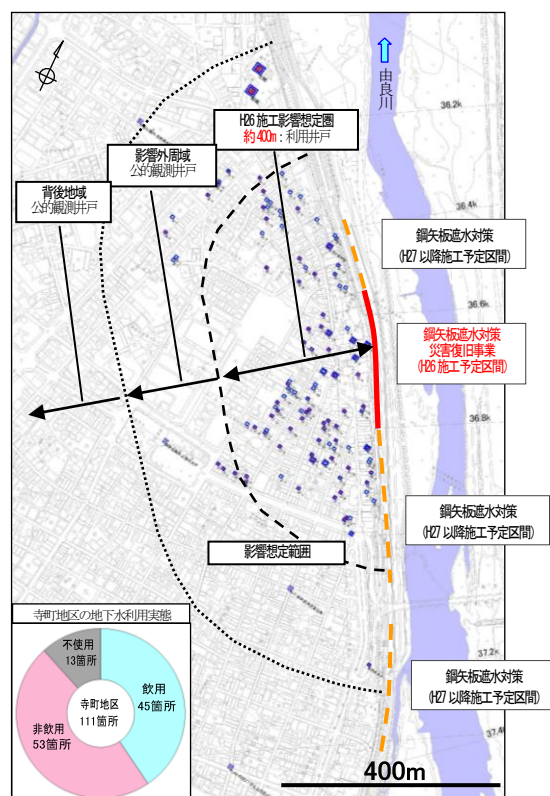


図-5 寺町地区(災害復旧区間)周辺の井戸分布

(3) 帯水層構造（地下水流動層）の検討

文献地質図および既往堤防調査資料から、本地域の地質構成は上位から①沖積砂礫層(高透水)、②第三紀層や洪積層(低透水地盤)、③基盤岩(難透水)に区分される。主要な帯水層は平野表層に広く分布する沖積砂礫層に特定され、由良川および各支川と一連の浅層地下水(不圧)であり、地下水の分布や流動を評価・解析する際には沖積砂礫層底面の構造(不陸)を面的に把握することが重要となる。

沖積砂礫層底面の分布を把握するため、まず上下水道等他事業を含む既存の166本の柱状図を収集し、帯水層としての統合再区分を行った。次に、地形と地質の関連に着目し、治水地形分類図および航空写真判読により山地（基盤岩）、段丘・丘陵（洪積層）、旧河道（沖積層中の水みち）を区分し（図-6）、各柱状図による「点」情報を「面」に展開した（図-7）。

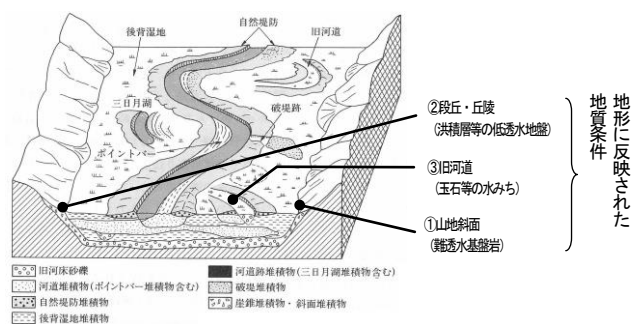


図-6 谷底平野の河川微地形と地質層序
(「河川地理学」大矢(1992)に一部加筆)

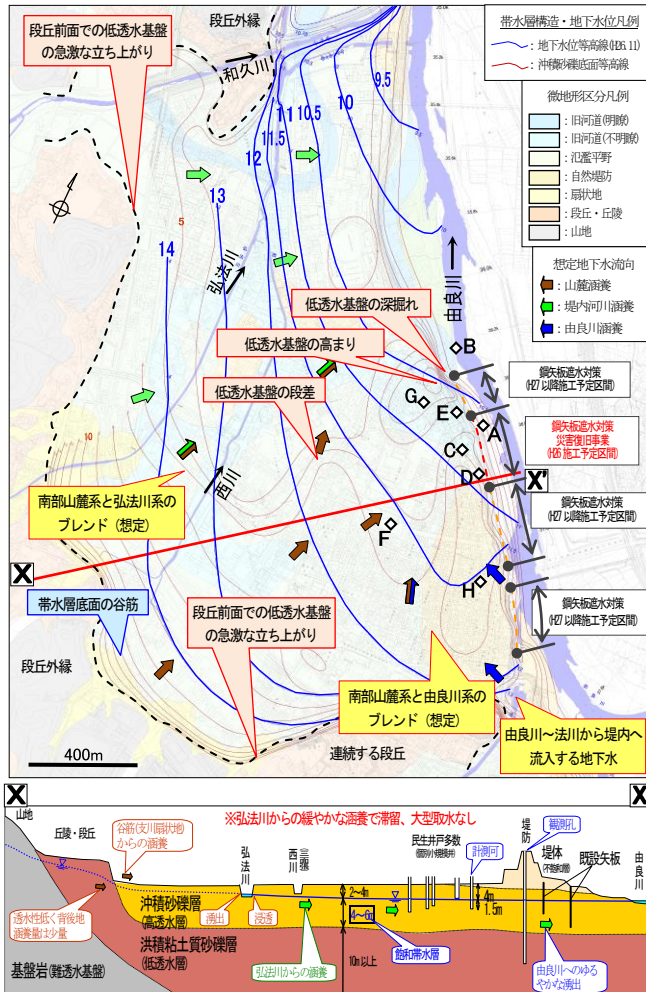


図-7 帯水層構造および地下水流動概略評価

(4) 地下水位の分布と流動状況の把握

水位観測には既存井戸（民生及び公共）、ボーリング観測孔（既往・新規）および各河川での一斉観測を行い、施工前の地下水位および水質の分布を把握した。

その結果、寺町地区及び周辺の地下水位は西または南の段丘・丘陵地から由良川へ向かう流れが支配的であり、弘法川からの涵養も受けているものと推定された。ただし、上流側の音無瀬橋近傍では一部由良川から流入する動水勾配も認められた（図-7）。

また、連続水位観測により由良川（施工区間）から200m圏内で河川水位との連動性が高いことが確認された（図-8）。

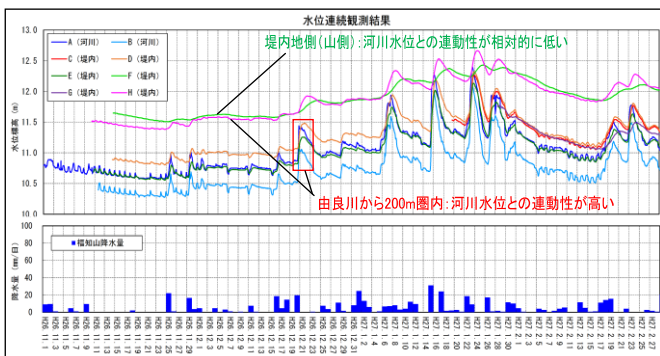


図-8 寺町地区に連続水位変化（施工前）

3. 地下水影響の定量的予測

地下水の『利用実態』『帯水層構造』『地下水流動』の基本条件から、寺町地区における鋼矢板遮水により、由良川から200m程度の範囲で地下水位のダムアップと、流速の低下に伴う水質変化の可能性が指摘される。

検討地区では①水みちとなり得る旧河道が複雑に分布、②帯水層底面の不陸が激しい、③音無瀬橋付近で河川～地下水の水位（湧出～浸透）が逆転する、④洪積層に達していない既設矢板下側の迂回浸透を正確に再現する必要がある等から、三次元モデルを採用した。

(1) 解析モデルの構築

モデル化範囲は、東側は水位境界としての由良川、北側を弘法川放水路とし、南側・西側は解析精度を十分に確保するため洪積層（低透水層）が表層露出する段丘崖まで広範囲に設定した。なお、弘法川は透水性護岸のため水位の内部境界とした（図-9(b)）。

境界条件として帯水層構造、由良川（水位）、背後丘陵（涵養）を設定し、解析対象範囲の境界は河川法線に沿うものとなるため、格子形状や大きさを自由に設定することができる有限要素法を採用し、飽和不飽和非定常浸透流解析を実施した（図-9(b)）。

メッシュの平面分割は堤内地および河道内は30～50m、矢板計画ライン付近は流下方向20m、川幅方向に1m程度と詳細に設定した。鉛直方向の分割は、帯水層（沖積砂礫層）では実層厚の1/10以下で細密間隔とし20層とし、基盤となる低透水層（洪積砂礫層）は透水係数が3桁程度低く計算の安定上細分割の必要はないと判断した（図-9(a)）。

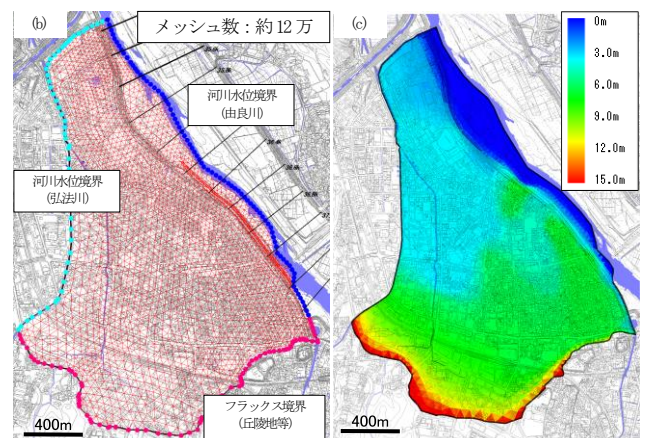
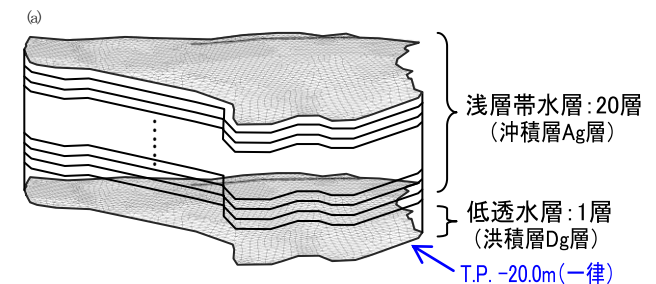


図-9 モデルメッシュ区分

(2) 解析モデルの再現性の検証

作成したモデルの計算値と実際に観測した地下水位（観測日：2014年11月13日・14日）を比較することにより、作成したモデルの再現性を検証した。検証の結果、計算値と観測値の相関が高いことから、モデルの信頼性は十分に確保されていることを確認した（図-10）。

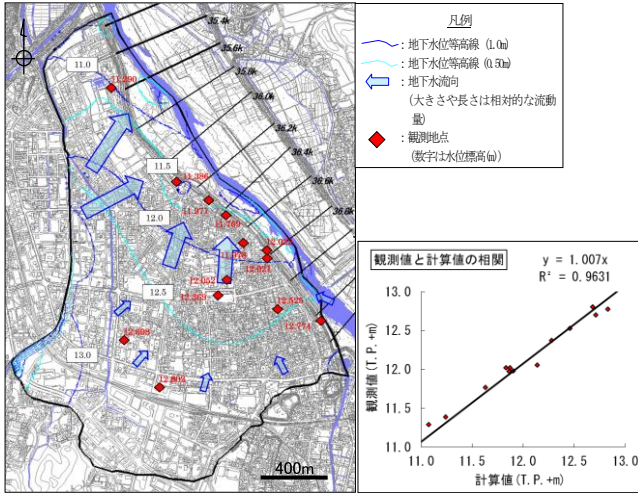


図-10 実測地下水の面的再現計算結果

4. 三次元モデルによる地下水影響予測

(1) 2014年度（平成26年度）施工堤防漏水対策（36.6k-60～36.8k）に伴う地下水影響予測

構築した三次元地下水解析モデルを用いて、2014年度（平成26年度）施工区間である36.6k-60から36.8kの区間に漏水対策（鋼矢板）を行った場合の影響予測を行った。予測の結果、矢板設置箇所から約30mの範囲で地下水位が最大で0.20m程度上昇する予測となった（図-11）。

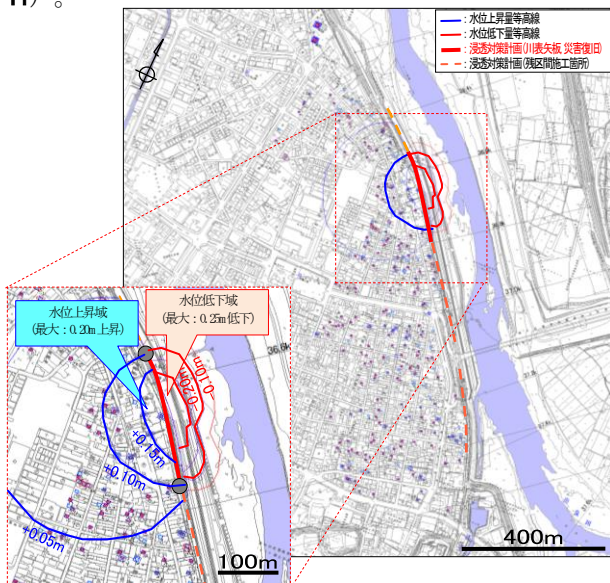


図-11 影響予測結果（H26年度施工区間）

(2) 残区間施工後の地下水影響予測

残施工区間についても同様に、三次元モデル解析による地下水影響予測を行った。由良川左岸一連の漏水対策

区間において、浸透安全性照査を行ったところ、いずれの断面においても鋼矢板による対策を行うこととなったため、一連区間を遮水した場合の地下水影響予測を三次元解析モデルを用いて行った。その結果、矢板設置箇所を中心として放射状に広がり、地下水位が最大で0.45m程度上昇する予測結果となった（図-12左図）。

一方、音無瀬橋の上下流区間について矢板遮水対策の必要性について詳細検討を行ったところ、堤内側裏法尻はコンクリート擁壁構造となっているため、音無瀬橋周辺の鋼矢板打設が不要と判断された（図-13）。音無瀬橋周辺に鋼矢板を打設しない場合によるモデル解析を行った結果、全区間を遮水した場合と比較すると、0.10m以上水位上昇する範囲が面積割合で10%程度縮減することが明らかとなった（図-12右図）。

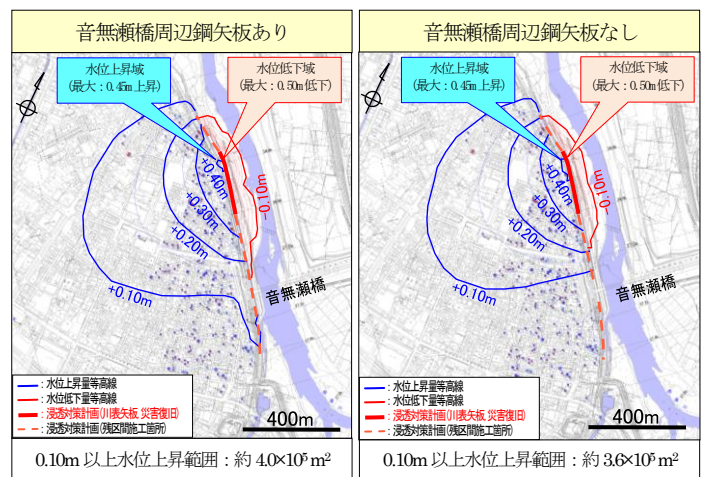


図-12 地下水影響予測結果（残区間施工後）

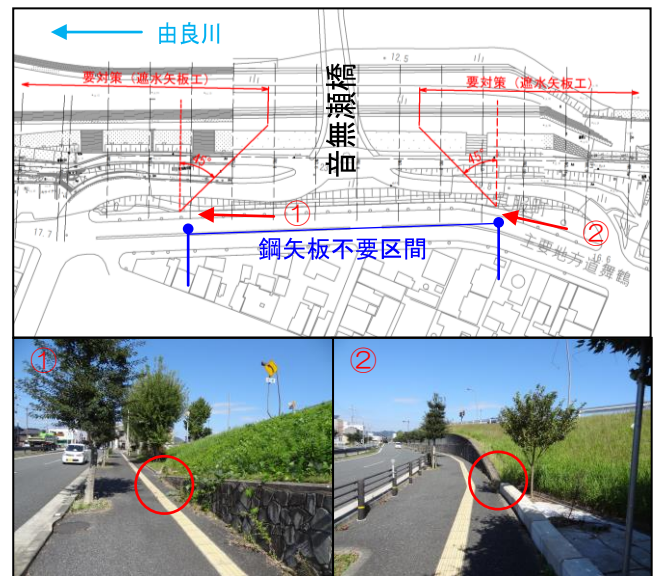


図-13 音無瀬橋上下流部の対策範囲

(3) 解析結果の評価

鋼矢板遮水により、由良川から200m程度の範囲に生ずる地下水位のダムアップと流速の低下より想定される地下水影響とその評価について表-1に示す。

表-1 想定される地下水影響と評価

対象・現象	想定される影響	評価
地下水利用	量的影響	堤内地観測地点において最大 0.31m の水位上昇が予測される。地下水利用上は揚程軽減となるため問題ないが、予測以上の水位変化が生ずる可能性があるため、水位の定期観測が必要。
	質的影響	流速の変化による水質変化が否定できないため、水質の定期監視が必要。
地下水位上昇	(宅盤) 湿潤化	地表付近の土壌水分量増加が生じても、当該地区の地盤特性が砂～砂礫であるため、地盤表層付近の含水率は大きく変化しないため問題なし(図-14)。

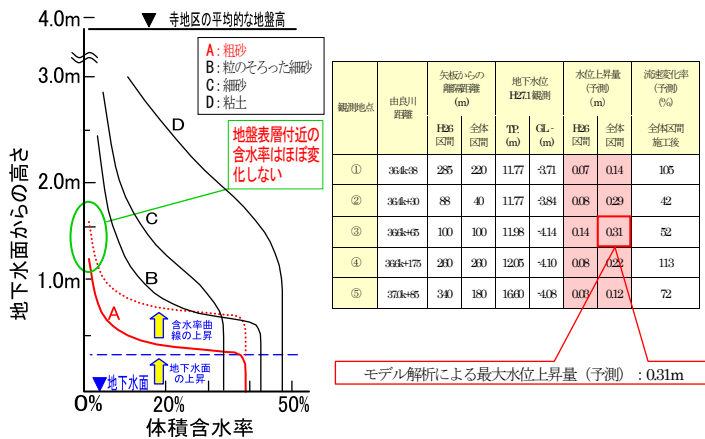


図-14 地下水面上の土壌水分量曲線と予測水位上昇量 (開発ほか(2001) 一部加筆)

5. 施工モニタリング

(1) 施工時モニタリング

施工時(2015年2月2日～3月11日)の地下水モニタリングは、水位・水質監視とした。また、地下水への顕著な影響は予測されなかったが、飲用を含む井戸が多数分布するため、代表地点として鋼矢板打設区間の中央に位置する観測孔にて、水位と濁度のリアルタイム観測を行い、ウェブシステム上にて設計・施工会社とリアルタイム通信により情報共有しつつ、慎重に施工を行った。

モニタリングの結果、矢板打設前(2015年1月)と矢板打設後(2015年3月)では由良川水位と代表地点(36.6k+50-堤内)の地下水位の水位差が施工前に比べ0.20m増加した(施工前+0.15m、施工中+0.25m、施工後0.35m)(図-15、図-16)。堤内地の地下水の濁りは施工中において発生しなかった。

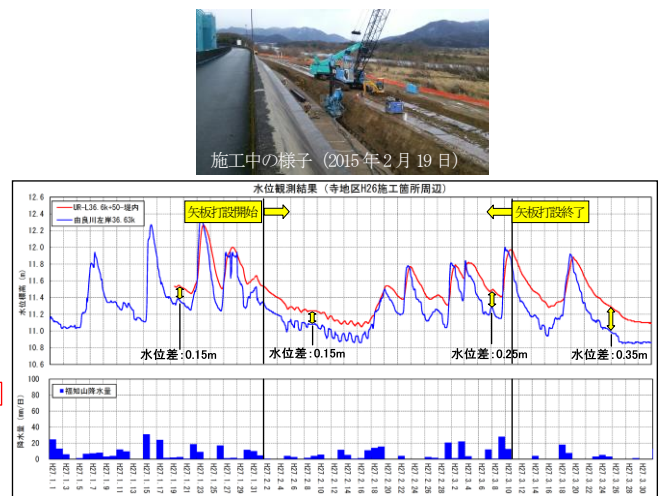


図-15 モニタリング観測結果

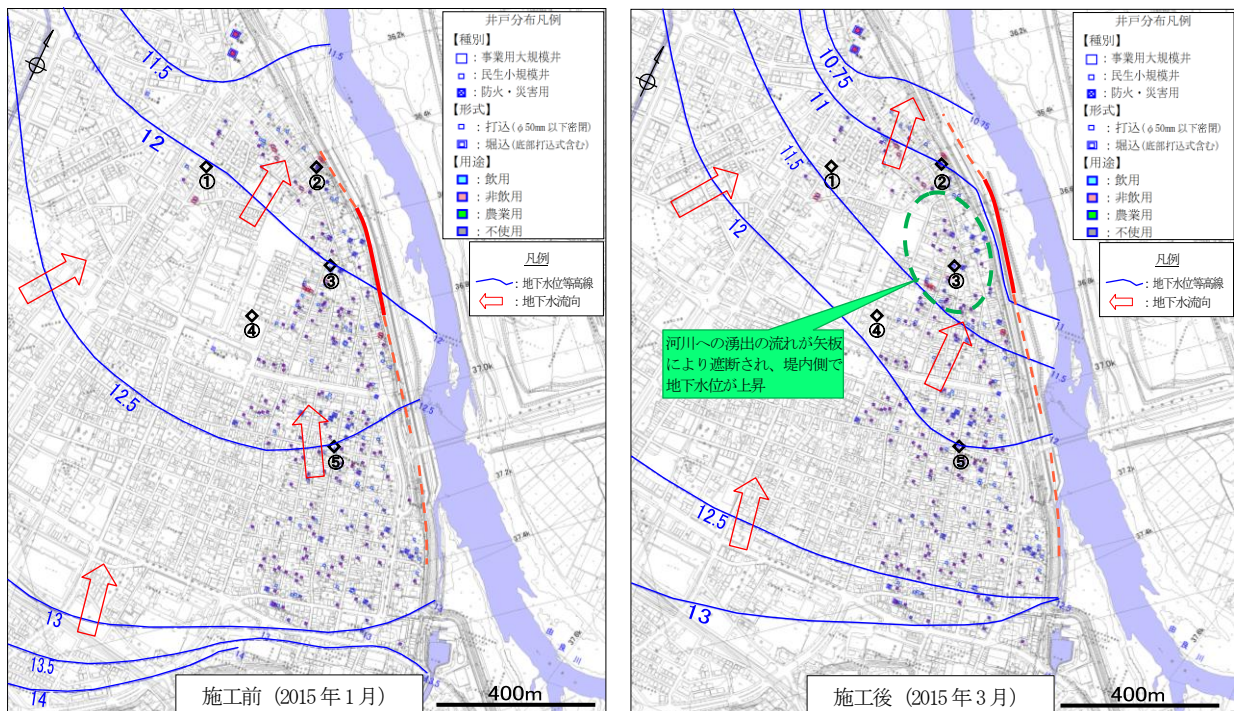


図-16 矢板打設前後における地下水コンターの变化

(2) 影響の収束

2014年度（平成26年度）対策区間施工から1ヵ年が経過したことにより、施工前（2014年11月）と施工後（2015年11月）の水位および水質を比較し、定性的な影響評価を行った。2014年度（平成26年度）施工区間に対して当該地区における地下水位および水質の大きな変化が見受けられないことにより施工影響が収束したことが考えられる（図-17）。

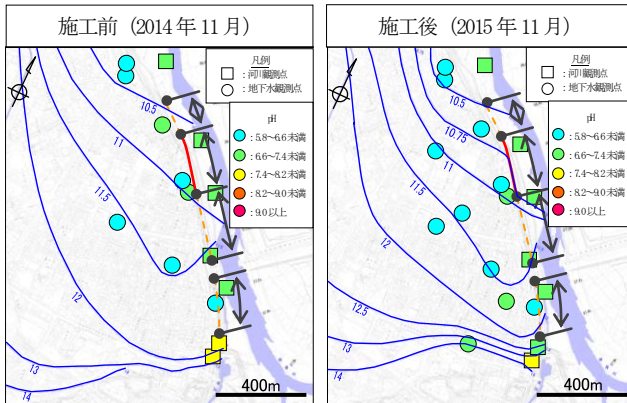


図-17 施工前と施工後1ヵ年における地下水コンターと水質の変化

6. 施工影響の再現計算

残施工区間による影響予測精度向上を目的に、寺町地区より南側に位置する内記地区についても、由良川から400m範囲における民生井戸の聞き取り調査を実施した。寺町～内記地区の地下水観測結果をもとにモデル解析へ反映し、施工後の再現計算を行った。

施工後において、各流況の一斉観測結果に対して、計算値の相関が高いことから、施工影響を十分に再現できていることを確認した（図-18）。

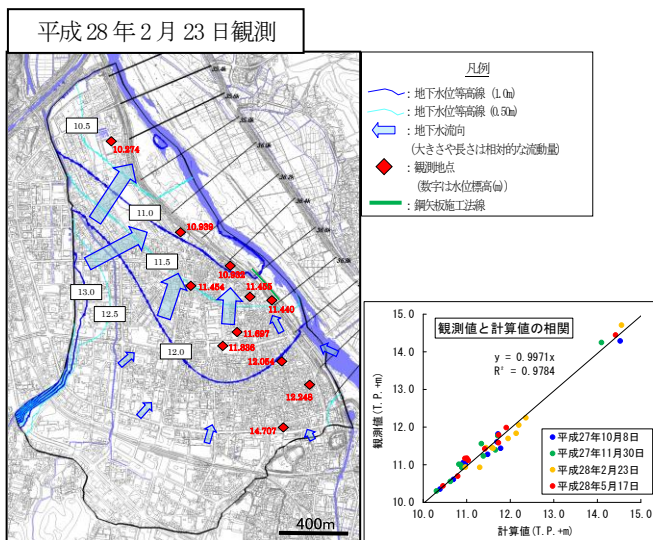


図-18 実測地下水の面的再現計算結果

7. まとめ

寺町地区～内記地区における由良川堤防漏水対策（鋼矢板遮水）による地下水影響について、水文地質構造および三次元解析モデルを用いて予測検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- ・地下水への影響を定性的・定量的に予測・評価を行ったうえで、水位・水質に関してモニタリング情報をリアルタイムに共有し慎重な施工を行った。
- ・2014年度（平成26年度）対策区間施工前後において施工影響の収束を確認した。
- ・音無瀬橋周辺に鋼矢板を打設しない場合、一連区間を遮水した場合と比較すると、0.10m以上水位上昇する面積が10%程度減となり、地下水位影響範囲の縮減が予測された。

残区間施工後においても地下水への大きな影響は懸念されないと予測されるが、今後もモニタリングを継続する必要がある。寺町地区では施工後データを1ヵ年蓄積し、内記地区では施工前データを1ヵ年蓄積する。また、残区間の施工が開始した際は、本検討と同様にリアルタイム監視を含め各関係者と情報共有を図ると同時に慎重かつ着実な漏水対策を進める。

8. 謝辞

本稿の作成にあたり多くのご指導及びご助言をいただきました平成26年度「由良川左岸地下水調査業務」の担当者様、受託者である建設技術研究所（株）に感謝の意を表します。