

河川堤防の浸透対策に関する 現地モニタリングと三次元浸透流解析

ON-SITE MONITORING AND THREE-DIMENSIONAL SEEPAGE FLOW
ANALYSIS ON THE EFFECT OF COUNTERMEASURES FOR RIVER LEVEES

増山 博之¹・齋藤由紀子²・森 啓年³・佐々木哲也⁴
Hiroyuki MASUYAMA, Yukiko SAITO, Hirotooshi MORI and Tetsuya SASAKI

^{1,4}正会員 工修 土木研究所 地質・地盤研究グループ 土質・振動チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 土木研究所 地質・地盤研究グループ 土質・振動チーム (同上)

³正会員 工博 前 土木研究所 地質・地盤研究グループ 土質・振動チーム (同上)

It is necessary to prove the certainty in the effect of countermeasures for river levees to advance the maintenance of the river levee. To verify the effect of measures, the on-site monitoring and the three-dimensional seepage flow analysis were executed in the present study. The effect of countermeasures executed the water side measures and the land side measures.

The water side measures followed sheet pile and the seepage control sheet (vicinity of CHIKUGO river water system JYOBARU river 6.4k points). The land side measures followed the drain (vicinity of KIMOTSUKI river water system AIRA river 5.4k points). As a result, the effect of measures was able to be confirmed to the water side measure by the on-site monitoring and the three-dimensional seepage flow analysis. On the other hand, the effect of measures was able to be confirmed to the land side measures by the three-dimensional seepage flow analysis.

Key Words : river levee, on-site monitoring, three-dimensional seepage analysis, countermeasure sheet pile, seepage control sheet, drain, water side measure, land side measure

1. はじめに

河川堤防の浸透安全性の確保は、安全性照査による要対策区間の抽出、浸透対策工法の選定及び実施の流れで進められている。そのような中、堤体内水位の観測により浸透対策の効果を検証し、効率的な設計方法や維持管理計画を検討することで、河川堤防の信頼性を向上していく必要がある¹⁾。筆者らはこれまでモデル地盤を用いて三次元浸透流解析を実施し、堤防縦断方向の三次元的な浸透流が、浸透対策の効果に及ぼす影響について明らかにしてきた^{2),3),4)}。

本研究では、既往の検討を踏まえて現場の浸透対策の効果を検証することを目的に、川表および川裏対策の現地モニタリングと三次元浸透流解析を実施した。

2. 現地モニタリング

現地モニタリングは、九州地方整備局管内の筑後川水

系城原川左岸6.4k付近において川表対策として実施されている川表遮水工法と表のり面被覆工法、肝属川水系始良川左岸5.4k付近において川裏対策として実施されているドレーン工法を対象として行った。

(1) 堤体内水位のモニタリング方法

現地モニタリングは、堤防強化対策を実施した区間の内側および外側の堤体内に観測孔を設置し、洪水時の堤体内水位を観測する方法を基本とした。図-1に堤体内水位のモニタリング箇所を平面イメージを示す。

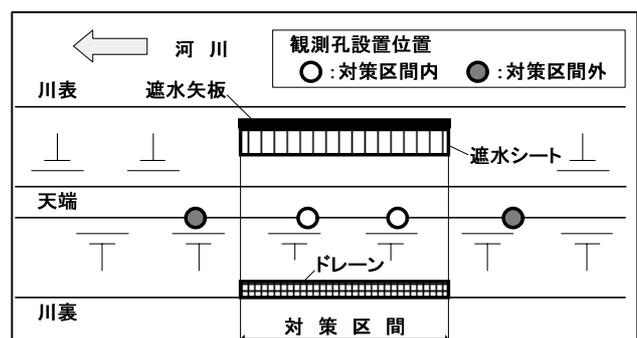


図-1 堤体内水位のモニタリング箇所の平面イメージ

堤体内水位を観測する観測孔は、堤体内を鉛直にボーリング等により掘削し、有孔部のある保孔管を設置して、水圧式水位計を吊り下げる構造を基本とした。図-2に観測孔の基本構造の横断イメージを示す。

今回のモニタリングにおいて、水圧式水位計はデータロガーが内蔵されているものを使用した。定期的にデータを回収するとともに、適宜、孔内洗浄等の維持管理を実施することとした。

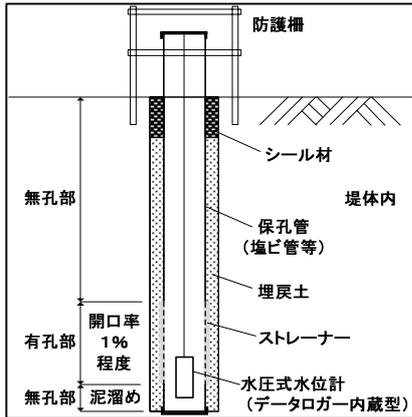


図-2 観測孔の基本構造の横断イメージ

(2) 川表対策効果のモニタリング

現地モニタリングを行う川表対策は、川表遮水工法(遮水矢板)、表のり面被覆工法(遮水シート)の併用工法とした。現地のモニタリング箇所は筑後川水系城原川左岸6.4k付近とした。

a) モニタリング箇所の概要

図-3に城原川左岸6.4k付近の位置図を示す。当該箇所は河床勾配が概ね1/1,000である。モニタリング箇所は平成21年7月26日に計画高水位を超過する洪水により、川裏のり面にすべり破壊が生じ、応急復旧工事として、川表遮水工法と表のり面被覆工法の併用工法が洪水の直後に実施された箇所である。



図-3 城原川のモニタリング箇所の位置図

b) モニタリング方法

図-4～図-6にモニタリング箇所における川表対策および観測孔の設置等に関する状況として、平面図、地質縦断面図、代表横断面図を示す。城原川堤防は厚く堆積した有明粘性土の基礎地盤の上に、中生代の花崗岩が風化したマサ土(Bs1の透水係数 $k_s=7.0E-4m/s$ 、Bs2の透水係数 $k_s=5.0E-5m/s$)で構成されている。

観測は平成21年10月から実施しており、これまでに1年間以上のデータを収集し、平成23年4月時点も継続中である。堤体内水位の観測頻度は1時間に1回としている。加えて、平成22年10月からは土木研究所がモニタリング箇所周辺に河川水位観測用の水位計と、モニタリング箇所内に図-4に示す降雨観測用の雨量計をそれぞれ設置して観測を開始している。モニタリング箇所の現地状

況を写真-1および写真-2に示す。

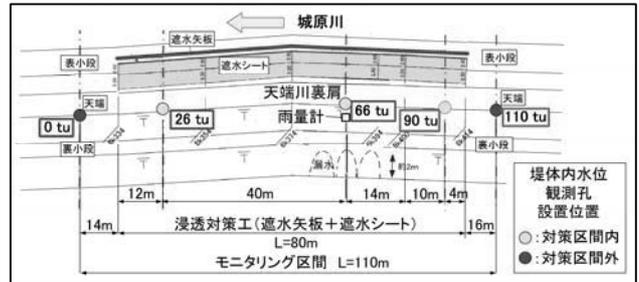


図-4 城原川のモニタリング箇所の平面図

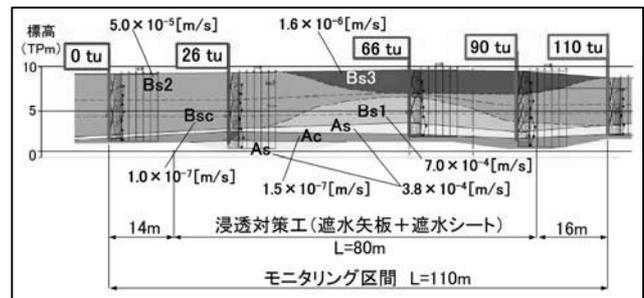


図-5 モニタリング箇所の縦断面図(天端川裏肩の位置)

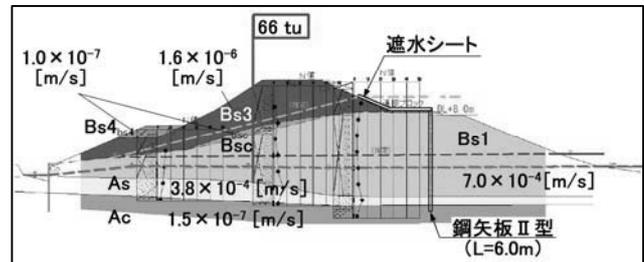


図-6 モニタリング箇所の横断面図(6.4k-14mの断面)



写真-1 現地状況(川表側)



写真-2 現地状況(川裏側)

c) モニタリング結果

図-7に平成22年7月11日～15日の堤体内水位、河川水位、降雨量の時間変化を示す。河川水位は7月14日午前8～9時に計画高水位を超過しており、近傍の日出来橋水位観測所において観測史上2位を記録する大きな出水であった。図-7より、堤体内水位は河川水位に概ね追従していることが確認できる。対策区間に設置した0tu、110tuの堤体内水位が高いとともに、対策区間内であっても、端部付近に設置した90tuの堤体内水位は高くなっていることが分かる。

図-8に河川水位がピーク水位に到達した14日9:00時点における天端川裏のり肩位置の堤体内水位の縦断分布を示す。図-8より、遮水矢板および遮水シートによる対策工を実施した区間の堤体内水位は、無対策区間より1m以上低くなっており、対策工の効果が確認された。また、

対策区内の上流端付近では堤体内水位が低下しなかったことから、浸透水の三次元的な回り込みにより対策効果が低減する区間があることも確認された。

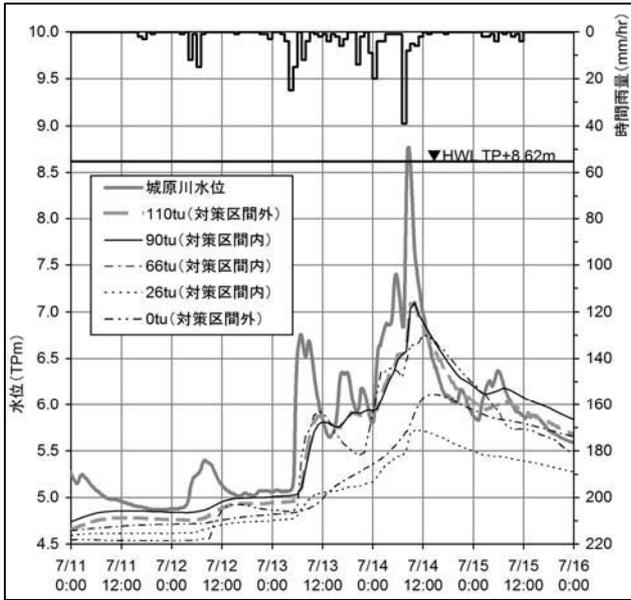


図-7 堤体内水位の観測結果 (H22. 7. 11~15: 城原川)

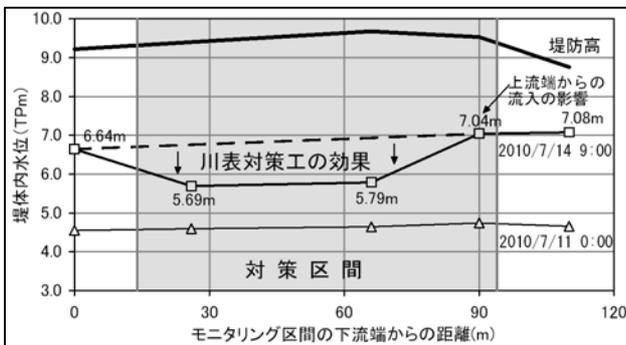


図-8 出水ピーク時の堤体内水位の縦断分布

(3) 川裏対策効果のモニタリング

現地モニタリングを行う川裏対策はドレーン工法とした。現地のモニタリング箇所は図-9に示すとおり肝属川水系始良川左岸5.4k付近とした。始良川堤防は砂層の基礎地盤の上に地域特有の火砕流堆積物であるシラスを含む砂質土（透水係数 $k_s=7.0E-5m/s$ ）で構成されている。



図-9 始良川のモニタリング箇所の位置図

始良川での観測孔の設置とデータ観測は土木研究所が実施した。図-10~図-12 にモニタリング箇所における川裏対策と観測孔の設置等に関する状況として、平面図、地質縦断図、代表横断図を示す。ドレーン工区間の下流側には川裏側のドレーン工と川表側の遮水シートを併用する区間が隣接している。

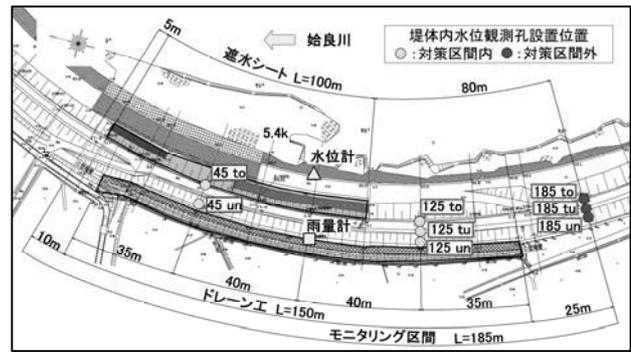


図-10 始良川のモニタリング箇所の平面図

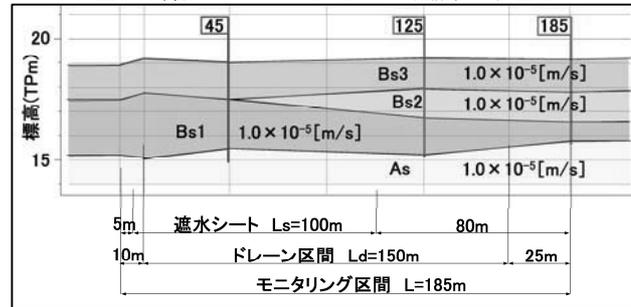


図-11 モニタリング箇所の縦断図(天端川裏肩の位置)

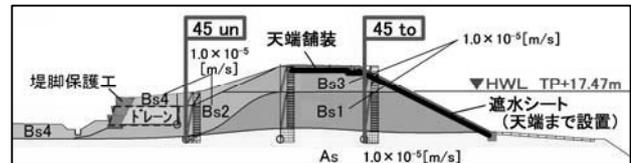


図-12 モニタリング箇所の横断図(5.2k+180mの断面)

観測は平成21年8月から実施しており、平成23年4月時点も継続中である。堤体内水位の観測頻度は6~10月の出水期には2分に1回、それ以外の期間には5分に1回としている。加えて、モニタリング箇所内に河川水位観測用の水位計、降雨観測用の雨量計を設置している。

始良川では、平成21年8月の観測開始以降、堤体内水位に大きな影響を及ぼす洪水は発生しなかった。図-13 に、モニタリング期間中に最も河川水位が上昇した平成21年6月19日の観測結果を示す。堤体内水位は降雨による影響でわずかに上昇しているものの、河川のピーク水位は堤内地盤高相当のTP+15.5m程度であり、河川から堤内地側への横断方向に堤体内水位の動水勾配は生じなかった。今後も継続的にモニタリングを実施し、ドレーン工法の効果を確認していく予定である。

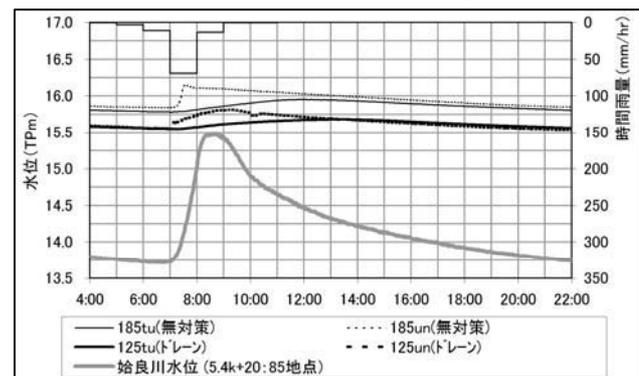


図-13 堤体内水位の観測結果 (H22. 6. 19: 始良川)

3. 三次元浸透流解析

川表対策工および川裏対策工の対策効果について、現地モニタリングを行った箇所を対象に、三次元飽和・不飽和非定常浸透流解析を行い、モニタリング結果との比較を行った。

(1) 川表対策効果に関する三次元浸透流解析

川表対策効果の現地モニタリングを実施した筑後川水系城原川左岸6.4k付近を対象として、三次元浸透流解析を行った。

a) 解析モデル

解析モデルは、現地モニタリングを実施している箇所（堤防縦断方向に延長L=110m、堤防横断方向に概ね50m程度の範囲）を含めて、図-14に示す堤防縦横断方向に600m×300mの範囲とした。解析範囲内には河道の湾曲が見られないため、解析モデルの形状は縦断方向に直線とした。

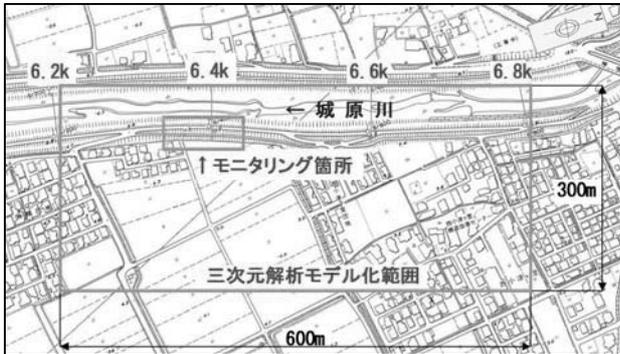


図-14 解析のモデル化範囲

堤体および基礎地盤の土層構成と透水係数はH21.7.26災害の応急復旧時の調査結果を基に作成されている土質縦断図（図-5等）や土質試験結果を元に図-15に示すように設定した。対策工は、平成22年7月現在の現況整備状況を反映して、川表側の遮水シート、遮水矢板を既設の天端舗装とともに図-16に示すとおりモデル化を行った。対策工の浸透特性は『河川堤防の構造検討の手引き』⁵⁾（以下、『手引き』と称す）に基づき、それぞれ厚さ10cmとして設定し、透水係数も厚さ10cmに応じた値に換算した。

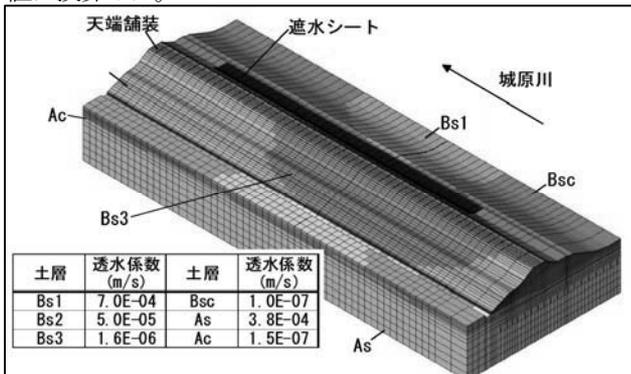


図-15 堤防付近の解析モデル（堤体表面）

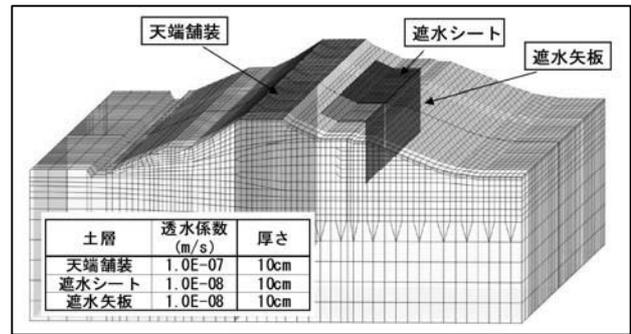


図-16 対策工の解析モデル

b) 解析手法

三次元浸透流解析はDtransu-3D・ELプログラムの実行により行った。初期地下水位は『手引き』に基づき堤内地盤高-0.5mとした。境界条件は、図-17に示すとおり川表側を河川水位境界とし、上流側面、下流側面、底面を不透水境界、川裏側を固定水位境界として設定した。

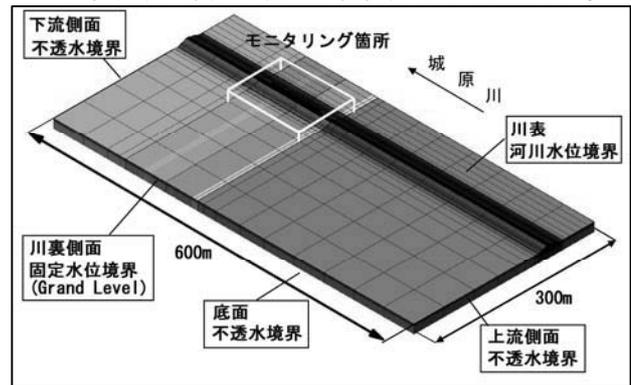


図-17 川表対策効果に関する解析モデルの境界条件

外力条件は、平成22年7月11日～15日の実績河川水位外力を日出来橋水位観測所のデータに基づいて設定した。なお、実績降雨を与えると浸透流が敏感に反応し解析が発散するため、河川水位が高い状態が長く続いた特徴も踏まえて、降雨は与えない条件として解析を実施した。

c) 解析結果

モニタリング箇所の堤体内水位について、解析結果と観測結果の比較を図-18に示す。図-18は対策区間外の0tu、110tuと対策区間内の端部の90tuの堤体内水位の時間変化である。同図より、7/10から1週間の堤体内水位の変動は解析値と観測値で概ね同じ傾向を示している。今回の解析モデル・手法により、堤体内浸透流の経時変化を定性的に捉えられていると考えられる。

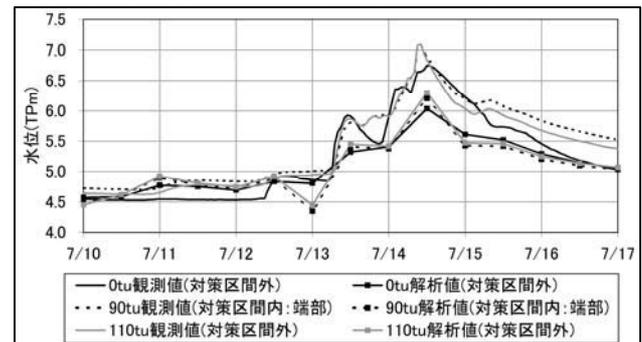


図-18 堤体内水位の時間変化(対策区間外と端部)

図-19に出水ピーク時の堤体内水位の縦断分布を示す。図より、対策区間内の堤体内水位は対策区間外の堤体内水位より相対的に低くなっており、遮水矢板および遮水シートの川表対策効果が確認できる。また、図-20に示す流速ベクトルより、矢板区間の端部では堤防縦断方向の流れが見られた。これらの結果、本解析ではモニタリング結果と同様に浸透対策の効果が確認されるとともに、対策区間端部の三次元的な浸透流の影響も再現できた。

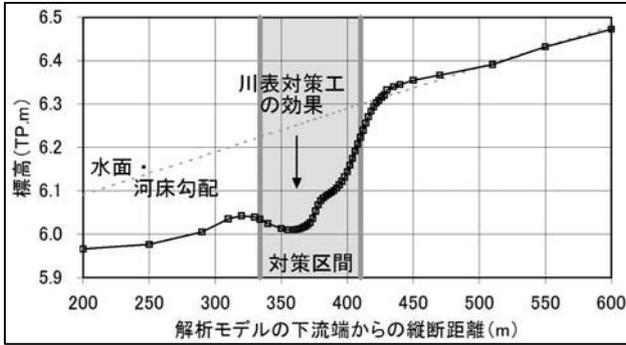


図-19 堤体内水位の縦断図 (川裏のり肩部)

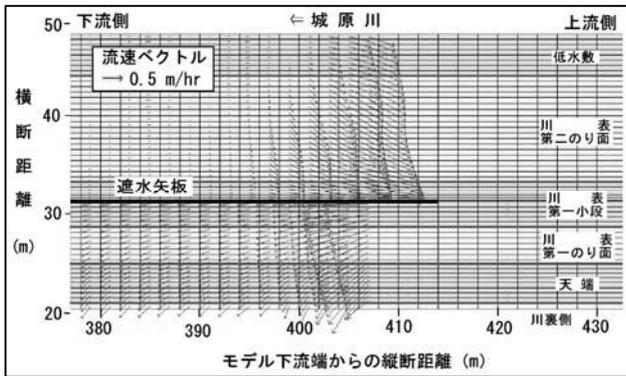


図-20 GL-1.5m付近の矢板上流側の平面の流速ベクトル

(2) 川裏対策効果に関する三次元浸透流解析

現地モニタリングを実施した肝属川水系始良川左岸5.4k付近を対象として、三次元浸透流解析を行った。

a) 解析モデル

解析モデルは、現地モニタリング箇所を含めて、図-21に示すように蛇行する河道線形に合わせて堤防縦横断方向に600m×300mの範囲とした。



図-21 解析のモデル化範囲

堤体および基礎地盤の土層構成と透水係数は既往詳細点検結果、土質調査結果等をもとに設定した。対策工は、川裏側のドレーン、天端舗装 (厚さ10cmと仮定)、川表

側の遮水シート (厚さ10cmと仮定) について、工事竣工図をもとに図-22に示すとおりにモデル化し、透水係数は『手引き』に基づき換算して設定した。

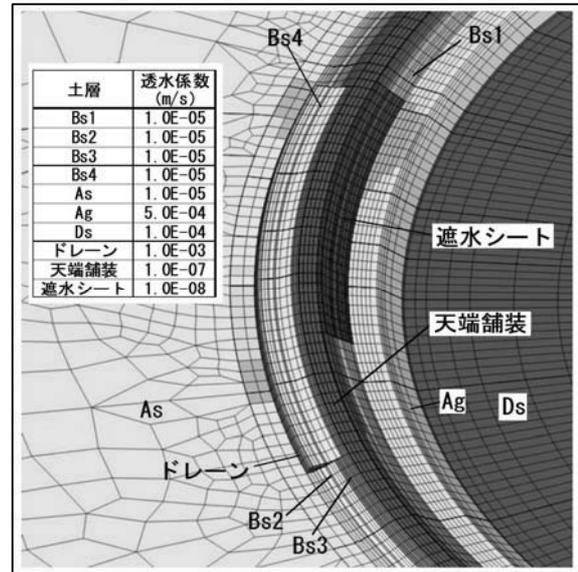


図-22 堤防付近の解析モデル図

b) 解析手法

三次元浸透流解析はDtransu-3D・ELプログラムの実行により行った。初期地下水水位は『手引き』に基づき堤内地盤高-0.5mとした。境界条件は、図-23に示すとおり、川表側を河川水位境界とし、上流側面、下流側面、底面を不透水境界、川裏側を固定水位境界として設定した。

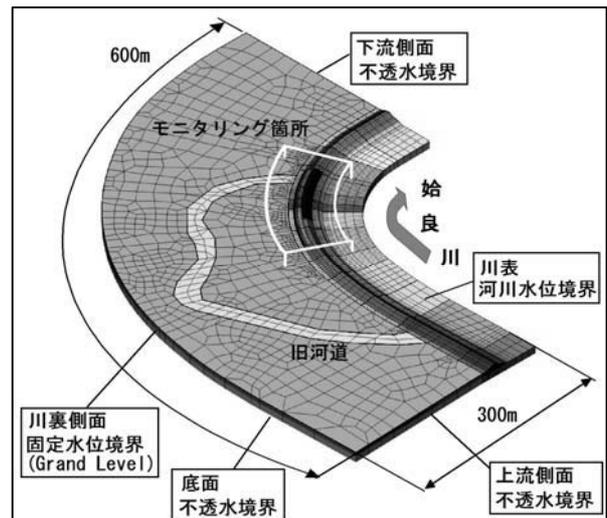


図-23 川裏対策効果に関する解析モデルの境界条件

なお、モデル化範囲内には、旧河道が存在したため、航空写真・古地図より平面位置の判読を行い、旧河道のモデル化も行った。旧河道の深さは旧河道が現存していた写真-3に示す昭和22年の航空写真や図-24に示す圃場整備前の地形図を基に、視差測定棒を用いて堤内地盤高との標高差を算出し、堤内地盤高から-4mと推定した (Ds層に1~2m程度貫入)。旧河道の透水係数はAs層以深のAgと同等 ($k_s=5.0E-4m/s$) として設定した。

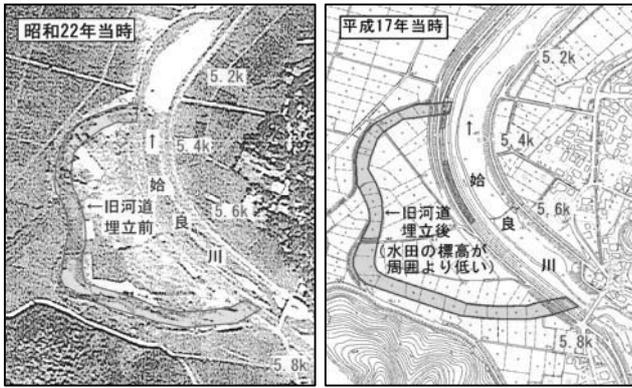


写真-3 昭和22年の航空写真 図-24 圃場整備前の地形図

外力条件は、現地モニタリングにおいて堤体内水位に影響を及ぼすような洪水は発生しなかったことから、図-25に示す既往の堤防詳細点検の照査外力を使用した。河川水位は図-25の河川水位ハイドロを基にして、5.4k地点から上下流方向に計画水面勾配I=1/700の縦断勾配となるように設定した。

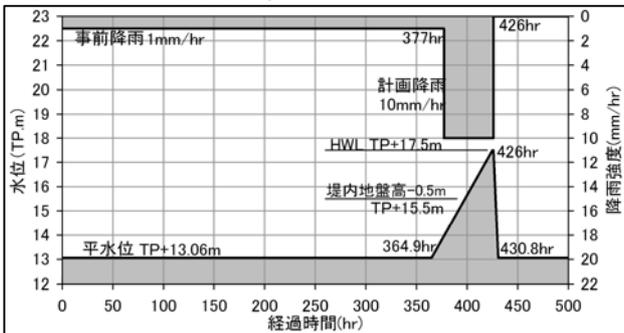


図-25 始良川の外力条件 (5.4k地点)

c) 解析結果

図-26にモニタリング区間およびその上下流の川裏のり面中央部(現地モニタリングun位置)での堤体内水位の縦断分布を示す。図より、ドレーン工区間の川裏のり面中央部の堤体内水位は無対策区間と比較して相対的に40cm程度低下しており、川裏対策工の効果が解析的に確認できた。併せて、図-26からはドレーン工の端部における局所的な水位上昇も確認できる。

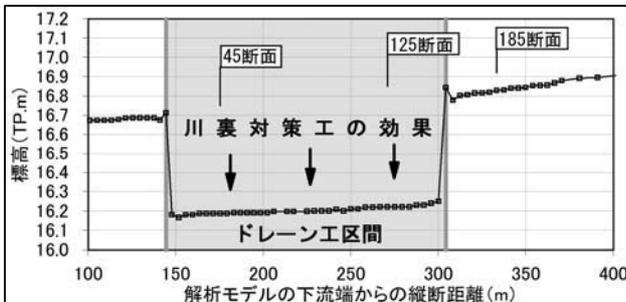


図-26 堤体内水位の縦断分布 (ピーク時)

図-27にピーク時の計画高水位と堤体内水位の横断分布を示す。図は、現地モニタリングにおける無対策の185地点の断面およびドレーン工を実施した125地点の断面を示しており、ドレーン工による堤体内水位の低減効果が確認できる。

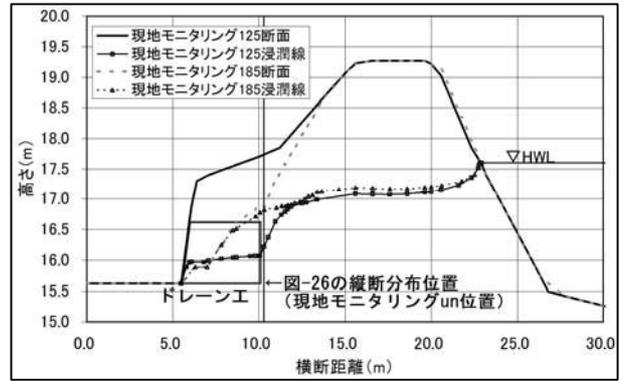


図-27 堤体内水位の横断分布 (ピーク時)

また、遮水シートの上下流の端部では城原川と同様に多少の水位上昇が見られた。一方、旧河道周辺については、透水係数が周辺地盤と大きく変化しないため、複雑な浸透流は発生しなかった。

4. まとめ

河川堤防の浸透対策の効果を検証することを目的に、現地モニタリングおよび三次元浸透流解析を実施した。その結果、川表対策として遮水矢板と遮水シートを併用している箇所については現地モニタリングおよび解析のいずれにおいても、堤体内水位低下効果が得られた。また、対策区間の端部において、三次元的な浸透流が生じている状況が確認された。一方、川裏対策としてドレーンを設置している箇所については、解析によって、堤体内水位低下効果が確認された。

今後も継続的に現地モニタリングを実施し、その結果をもとに長期的な浸透対策の効果を確認するとともに設計方法や維持管理方法に活かしていきたい。

謝辞: 筑後川河川事務所および大隅河川国道事務所には現地モニタリングで協力して頂いた。鹿屋市吾平総合支所には雨量データを提供して頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 「河川堤防における堤体内水位観測マニュアル(案)」堤防管理技術高度化のための堤体内水位観測方法の開発に関する共同研究報告書、第377号、2008.3.
- 2) 斉藤由紀子、古本一司、谷中仁志、小橋秀俊：堤防の浸透安全性に及ぼす上下流の影響、土木学会第62回年次学術講演会、3-284、2007.9.
- 3) 斉藤由紀子、谷中仁志、小橋秀俊、古本一司：堤防の浸透安全性に及ぼす縦断土質構造の影響、河川技術論文集第14巻、pp.79-84、2008.6.
- 4) 斉藤由紀子、森啓年、荒金聡、佐々木哲也：三次元的な浸透流による堤防強化対策効果の発現特性、河川技術論文集第16巻、pp.329-334、2010.6.
- 5) 財団法人国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き、2002.7.

(2011.5.19受付)