河川技術論文集, 第16巻, 2010年6月

三次元的な浸透流による 堤防強化対策効果の発現特性

THE INFLUENCE OF THREE-DIMENSIONAL SEEPAGE FLOW TO THE PERFORMANCE OF COUNTERMEASURES FOR RIVER LEVEES

齋藤由紀子[1]・森　啓年[2]・荒金　聡[3]・佐々木哲也[4]
Yukiko SAITO, Hirotoshi MORI, Satoshi ARAKANE and Tetsuya SASAKI

[1]正会員　（独）土木研究所材料地盤研究グループ（〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6）
[2, 3, 4]正会員　工修　（独）土木研究所材料地盤研究グループ（同上）

The three-dimensional seepage flow affects the safety of river levees because of micro topography, such as the higher hydraulic gradient observed around a pervious zone in the foundation. This paper focuses on the performance of countermeasures for seepage induced failure considering the three-dimensional seepage flow.

The two/three-dimensional seepage analyses are conducted for the cases with/without the permeable zone in the foundation, and compared the performance of countermeasures for the safety factor for slope failures and the hydraulic gradient for pipings. The results clearly show the difference in the results of the two and the three dimensions. The results of three dimensional seepage analyses illustrate transient zones, where the performance of countermeasures is less than the results of two dimensional seepage analyses because of seepage in the lateral direction. Moreover, it is indicated that the permeable zone in the foundation also have an influence on the performance by three-dimensional seepage.

Key Words : *river levee, three-dimensional seepage analysis, countermeasure*

１．はじめに

長大な河川堤防では、堤防沿いの微地形などの影響を受けて三次元的な浸透流が生じる。堤防強化工法を施したにも関わらず、上下流の土質構造の影響を受けて再度漏水するなどの事例も見られている。しかしながら、現行の浸透安全性に関する照査手法では、堤防の横断方向の浸透流のみを考慮し、被災履歴等の経験をもとにいくつかの微地形を要注意地形として指摘するに留まっている[1)]。以上のような背景から、土木研究所では、三次元浸透流解析により堤防の縦断土質構造が浸透流に及ぼす影響を検討し、特に旧河道等を想定した透水ゾーンでは三次元的に複雑な浸透流が発生することを明らかにしてきた[2),3)]。本研究は、その結果を発展させ、三次元的な浸透流の影響を考慮した場合における、堤防強化対策効果の発現特性を把握することを目的として三次元浸透流解析を実施した。

２．検討内容

(1) 検討対象の堤防構造

今回の浸透流解析で対象とする堤防構造は、**図-1**のとおり、堤体と基礎地盤の土質が堤防縦断方向にそれぞれ一様なパターン１と、基礎地盤に旧河道等を想定した透水ゾーンが存在するパターン２の２種類である。パター

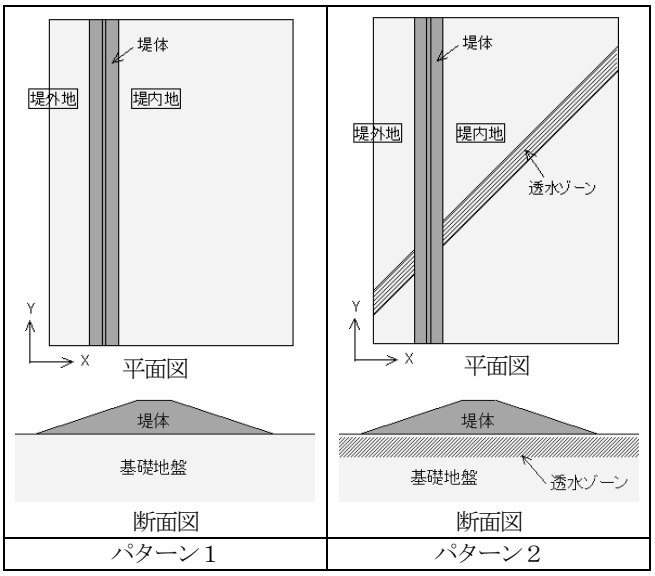

図-1　検討対象の堤防構造

ン１は、最も単純な土質構造であり、微地形の影響等を検討する際の基本ケースとなる。パターン２は、これまでの三次元解析による検討[3]において、透水ゾーンに沿った浸透流や周辺地盤から透水ゾーンに流入する浸透流が顕著に見られたことから検討対象として選択した。

(2) 解析モデル

解析モデルの形状は、結果の比較が可能なように、既往の研究と同じ条件とした[3]。堤体高さ5m、のり面勾配1:3、天端幅5m、基礎地盤厚さ10m、縦断方向に直線、という単純な形状である。パターン２の透水ゾーンは、幅30m、厚さ3m（G.L.-0.5m～-3.5m）、堤体と45度の角度で交差、という条件とした。解析範囲は、縦断方向1,000m、横断方向300mとし、河床勾配を1/250に設定した。なお、個々の解析モデルの平面図・断面図については、**３．検討結果**に掲載した。

検討対象とした浸透に対する堤防強化対策は、川表（堤外地）からの河川水の浸透を遮断する方法と、一旦浸透した水を川裏（堤内地）へ排水する方法に大きく分類される。ここでは、前者の対策として表のり面被覆工法と矢板工法、後者の対策としてドレーン工法と透水トレンチ工法を対象とした。解析モデルは、堤防構造パターン１，２に対し、各堤防強化対策を組み合わせて６ケース設定した。検討ケースの一覧を**表-1**に示す。

表-1　検討ケース一覧

Case	解析モデル	堤防強化対策	
1	堤体と基礎地盤はそれぞれ一様土質	川表で遮水	表のり面被覆
2			矢板
3			表のり面被覆と矢板
4		川裏で排水	ドレーン
5	基礎地盤に透水ゾーンが存在	川表で遮水	矢板
6		川裏で排水	透水トレンチ

(3) 解析手法・パラメータ

検討に用いた三次元定常・非定常浸透流解析プログラムはDtransu-3D･EL、比較のため実施した二次元定常・非定常浸透流解析プログラムはDtransu-2D･ELである[4]。堤体と基礎地盤の透水係数の大きさ・組み合わせにより、各対策の効果は異なると考えられるため、透水係数の条件は、二次元浸透流解析より各対策の効果が明確に現れる条件を抽出して**表-2**のとおり設定した。不飽和浸透特性と堤防強化対策の透水係数は、河川堤防の構造検討の手引き（以下、「手引き」という）[1]に基づいて**表-2**のとおり設定した。境界条件は、**図-2**のとおり、降雨浸透境界、変動水頭境界（河川水位の浸透）等を設定した。透水ゾーンの堤内地側端部の境界条件は、透水ゾーン周辺の地下水位が初期地下水位条件以上となる計算ステップまでは、初期地下水位条件に固定した。これは、初期の計算ステップにおいて、透水ゾーン内の水位を低下させないための処置である。初期条件として、基礎地盤表層から-1mの地下水位（G.L.-1m）を設定し、**図-3**に示す河川水位と降雨を与えて浸透流解析を実施した。

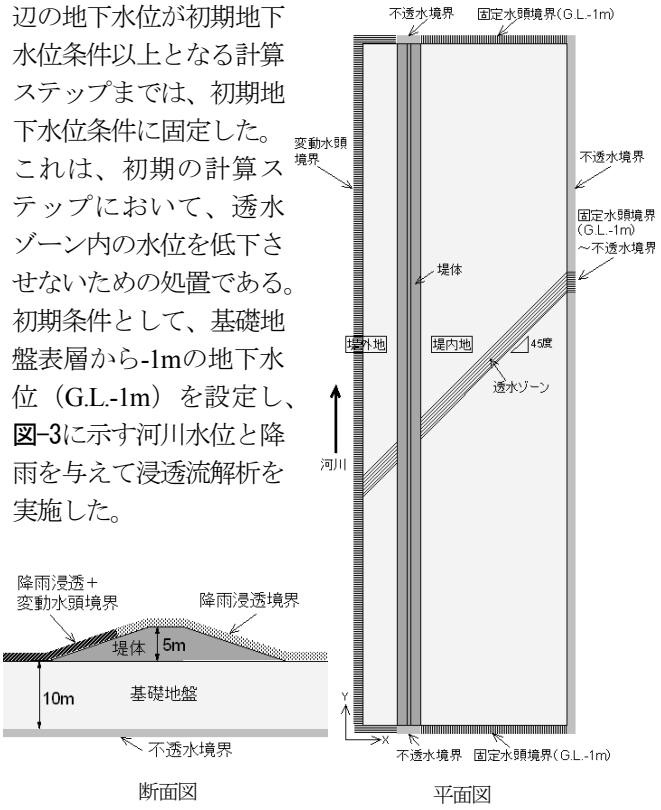

図-2　境界条件

表-2　飽和・不飽和浸透の条件

Case	堤体			基礎地盤（括弧書きは透水ゾーン）			堤防強化対策			
	透水係数(m/s)	飽和体積含水率	比貯留係数(1/m)	透水係数(m/s)	飽和体積含水率	比貯留係数(1/m)	工法	透水係数※(m/s)	飽和体積含水率	比貯留係数(1/m)
1	3E-5	0.2	1E-4	1E-6	0.2	1E-4	表のり面被覆	5E-8	0.1	1E-3
2	3E-6	0.2	1E-4	5E-4	0.2	1E-4	矢板	1E-7	0.1	1E-3
3	3E-6	0.2	1E-4	5E-4	0.2	1E-4	表のり面被覆と矢板	5E-8と1E-7	0.1	1E-3
4	3E-5	0.2	1E-4	1E-6	0.2	1E-4	ドレーン	1E-3	0.2	1E-4
5	3E-5	0.2	1E-4	1E-6 (5E-4)	0.2 (0.2)	1E-4 (1E-4)	矢板	1E-7	0.1	1E-3
6	3E-5	0.2	1E-4	1E-6 (5E-4)	0.2 (0.2)	1E-4 (1E-4)	透水トレンチ	1E-3	0.2	1E-4

※手引きに基づき、モデルの厚さに応じて換算

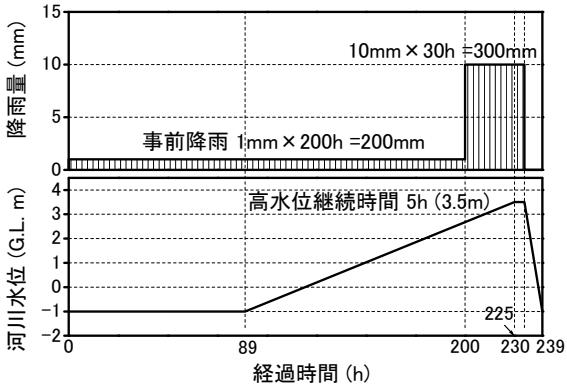

図-3　入力洪水外力

３．検討結果

(1) 堤体と基礎地盤がそれぞれ一様な土質の場合

堤体と基礎地盤の土質が、堤防縦断方向にそれぞれ一様な解析モデルについて、川表で遮水する浸透対策（ケース１，２，３）と川裏で排水する浸透対策（ケース４）の効果を検討した。

a) 川表で遮水する浸透対策の効果（ケース１，２，３）

川表で遮水する浸透対策として、表のり面被覆工法、矢板工法、表のり面被覆工法と矢板工法の組み合わせ、についてそれぞれ検討した。各ケースの解析モデルの概要を図-4に示す。

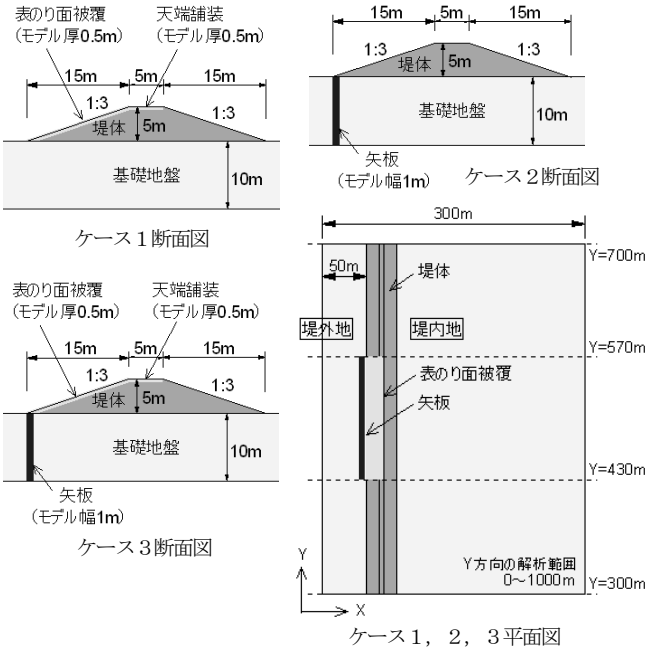

図-4　ケース１，２，３の解析モデル

表のり面被覆工法のケース１について、高水位継続時間終了時点（230h）における堤体裏のり肩水位、裏のりの円弧すべり安全率、裏のり尻の鉛直局所動水勾配の縦断形状を図-5に示す。表のり面被覆の対策を行うことにより、対策区間のやや外側から裏のり肩水位が低下する効果が見られるが、二次元対策断面の解析結果と同程度まで水位が下がるのは、対策区間に入って縦断方向に10m程度の距離を要することがわかる。ここで、対策区間端部から、二次元解析結果と同等の対策効果が得られるまでの区間を、遷移区間と定義する。図-5より、裏のり尻の局所動水勾配についても裏のり肩の水位と同様に遷移区間が見られた。また、堤体と基礎地盤の内部摩擦角を30°、35°と仮定し、粘着力を1kN/m^{2}見込んで円弧すべり安全率を求めたところ、図-5に示すとおり、対策区間の端部と中央では0.1程度の違いが生じた。

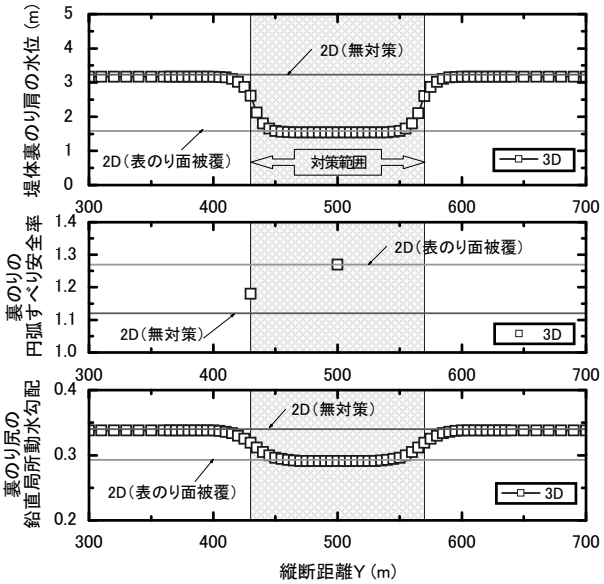

図-5　ケース１の裏のり肩水位、円弧すべり安全率、鉛直局所動水勾配の縦断分布（230h経過時点）

矢板工法のケース２について、高水位継続時間終了時点（230h）における矢板周辺の流速ベクトルを図-6に示す。矢板設置区間の上流側端部において、無対策区間から対策区間へ浸透水の回り込みが生じていることがわかる。この傾向は、下流側端部にも同様に見られた。このように、矢板工法は縦断方向の浸透流の影響を受けることから、表のり面被覆工法と同様に、対策効果発現の遷移区間が生じると考えられる。

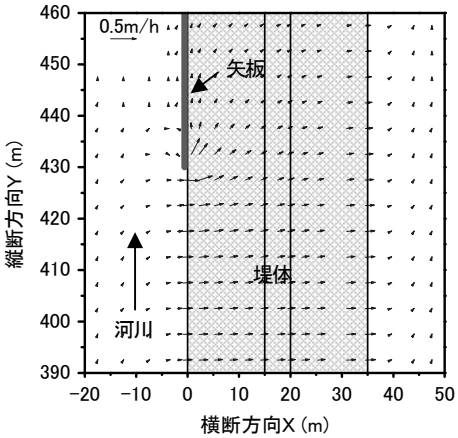

図-6　ケース２矢板周辺の流速ベクトル
(G.L.-1.5m～-1m、230h経過時点)

矢板工法のケース２と、表のり面被覆工法と矢板工法を組み合わせたケース３について、高水位継続時間終了時点（230h）における堤体裏のり肩水位、裏のり尻の鉛直・水平局所動水勾配の縦断形状を**図-7**に示す。対策区間から上下流にそれぞれ30m程度幅広に、裏のり肩水位や局所動水勾配が低下する効果が見られるものの、二次元解析結果と同等の対策効果が得られるまでの遷移区間が存在することがわかった。ケース１と比較してケース２，３の遷移区間が大きいのは、堤体と基礎地盤の透水係数がそれぞれ１桁以上異なることに起因すると考えられる。二次元解析と同様に、対策を組み合わせることにより堤体内水位や局所動水勾配の低下効果は上がるものの、堤体および基礎地盤の透水性の影響を受ける遷移区間の長さはほとんど変わらないことがわかった。

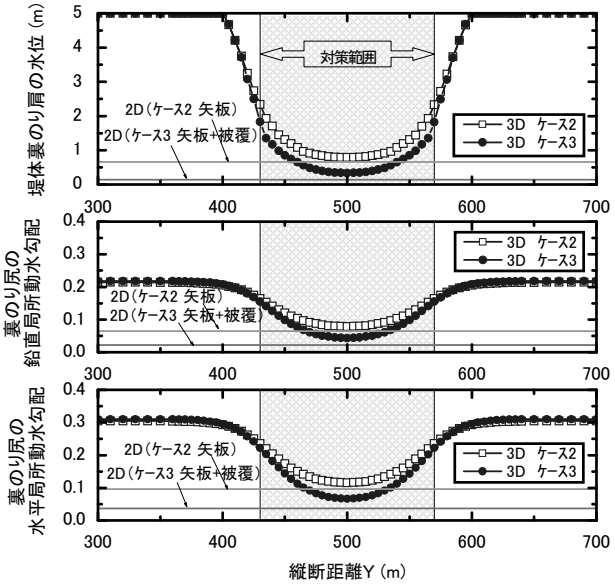

図-7　ケース２と３の裏のり肩水位、
鉛直・水平局所動水勾配の縦断分布（230h経過時点）

ケース１，２，３の結果より、川表で河川水を遮断する工法は、いずれも堤防縦断方向の水の浸透の影響を受けて対策効果発現の遷移区間が存在する可能性があることがわかった。遷移区間の長さについては、堤体・基礎地盤の透水係数の大きさ・組み合わせが主な影響要因と考えられる。

b）川裏で排水する浸透対策の効果（ケース４）

川裏で排水する浸透対策として、ドレーン工法について検討した。検討した解析モデルの概要を**図-8**に示す。

ドレーン工法のケース４について、高水位継続時間終了時点（230h）における堤体裏のり肩水位、裏のりの円弧すべり安全率、堤体裏のり尻排水量の縦断分布を**図-9**に示す。**図-9**より、ドレーン工法は、対策区間内では二次元解析結果とほぼ同等の裏のり肩水位の低減効果を示した。ケース１と同様に堤体と基礎地盤の内部摩擦角を30°、35°と仮定し、粘着力を1kN/m^{2}見込んで円弧すべり安全率を求めたところ、対策区間の端部では二次元対策断面と同程度の安全率を示した。一方で、**図-9**に示すとおり、対策区間の上下流端では二次元解析結果の約1.2倍の排水量がみられた。

ケース４の結果より、川裏から浸透水を排水する工法は、対策区間内においてほぼ一律に裏のり肩水位の低下効果が発揮されるものの、対策区間の端部に水が集中する可能性があることがわかった。対策区間の端部においては、排水処理に対する留意が必要であると考えられる。

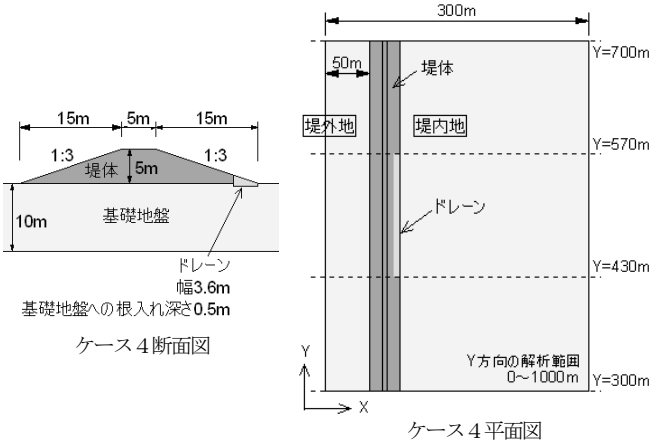

図-8　ケース４の解析モデル

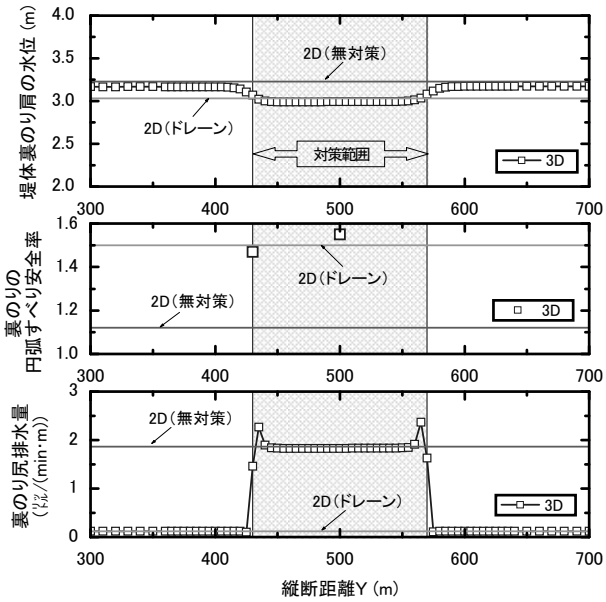

図-9　ケース４の裏のり肩水位、円弧すべり安全率、
裏のり尻排水量の縦断分布（230h経過時点）

(2) 透水ゾーンが基礎地盤に存在する場合

基礎地盤に透水ゾーンが存在し、透水ゾーンに沿った浸透流や周辺地盤から透水ゾーンに流入する浸透流が顕著に見られる解析モデルについて、川表で遮水する浸透対策（ケース５）と川裏で排水する浸透対策（ケース６）の効果を検討した。

a) 川表で遮水する浸透対策の効果（ケース５）

川表で遮水する浸透対策として、矢板工法について検討した。検討した解析モデルの概要を**図-10**に示す。比較のために実施した二次元無対策・対策断面の解析は、**図-10**に示す断面図のように透水ゾーンが解析モデル全体に分布する条件として求めたものである。

矢板工法のケース５について、高水位継続時間終了時点（230h）における堤体裏のり肩水位、裏のり尻の鉛直局所動水勾配の縦断形状を**図-11**に示す。**図-11**より、裏のり肩水位は対策延長68mよりも広い範囲で低減したものの、二次元対策断面の解析結果相当までは低下しなかった。透水ゾーンを川表で遮断した場合でも、透水係数の条件によっては、堤体や上下流の基礎地盤から透水ゾーンへの浸透流により、堤体内水位および鉛直局所動水勾配の低減効果が低下する可能性があることがわかった。二次元解析との差異については、堤体・基礎地盤の透水係数の大きさ・組み合わせの影響も考えられるものの、透水ゾーンの分布状況が大きな要因であると考えられる。

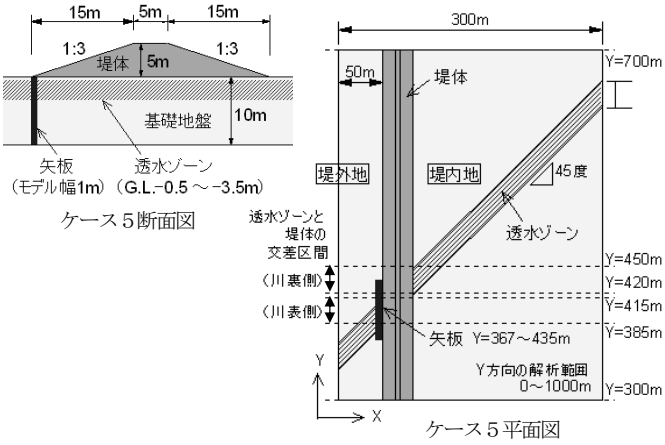

図-10　ケース５の解析モデル

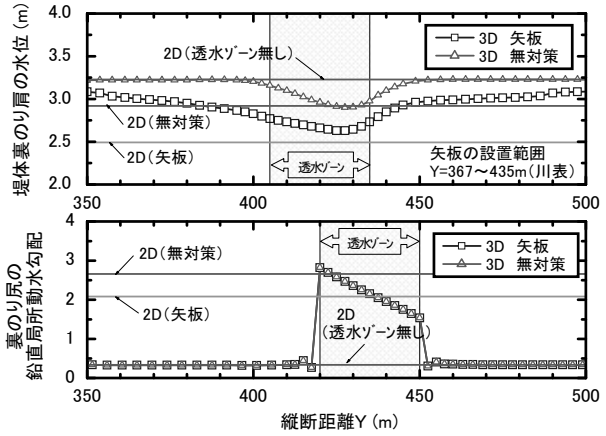

図-11　ケース５の裏のり肩水位、鉛直局所動水勾配の縦断分布（230h経過時点）

b) 川裏で排水する浸透対策の効果（ケース６）

川裏で排水する浸透対策として、透水トレンチ工法について検討した。検討した解析モデルの概要を**図-12**に示す。比較のために実施した二次元無対策・対策断面の解析結果は、**図-12**に示す断面図のように透水ゾーンが解析モデル全体に分布する条件として求めたものである。

透水トレンチ工法のケース６について、高水位継続時間終了時点（230h）における堤体裏のり肩水位、裏のり尻の鉛直局所動水勾配、堤体裏のり尻排水量の縦断分布を**図-13**に示す。透水トレンチの対策を行うことにより、堤体の裏のり肩水位は透水ゾーンの幅30mよりも広い範囲で低下したものの、二次元対策断面の解析結果と同程度まで下がる範囲は限られていた。前述のドレーン工法のケース４は、ケース６と同じ川裏で排水する浸透対策であるが、対策区間内では二次元解析結果と同程度まで水位が低下しておりケース６とは異なる結果である。堤体と基礎地盤の土質が一様なケース４の場合、ほぼ二次元的な浸透流が生じている堤防に対して流末である裏のり尻にドレーンを設置する、という条件であることから、三次元的な浸透水はドレーンの端部の限られた部分にしか生じなかったと考えられる。一方、基礎地盤に透水ゾーンが存在するケース６では、透水ゾーンに沿った浸透流や周辺地盤から透水ゾーンに流入する浸透流が生じる[3]ことから、透水係数等の条件によってはケース６のように対策効果発現までの遷移区間が広く存在する可能性があることがわかった。**図-13**より、鉛直局所動水勾配は、無対策の場合、透水ゾーン内において照査基準（0.5以下）を大きく超過しているが、透水トレンチを設置することにより二次元解析結果と同等の対策効果を示した。一方で、対策区間の上流端では、堤体裏のり尻排水量が集中する傾向が見られた。

ケース６の結果より、川裏から浸透水を排水する工法は、透水ゾーンに沿った浸透流や周辺地盤から透水ゾーンに流入する浸透流の影響を受けて、堤体内水位低減効果発現までの遷移区間が見られることがわかった。裏のり尻の局所動水勾配を低減させる効果は高いものの、対策区間の端部に水が集中する可能性があることがわかった。対策区間の端部においては、排水処理に対する留意が必要であると考えられる。

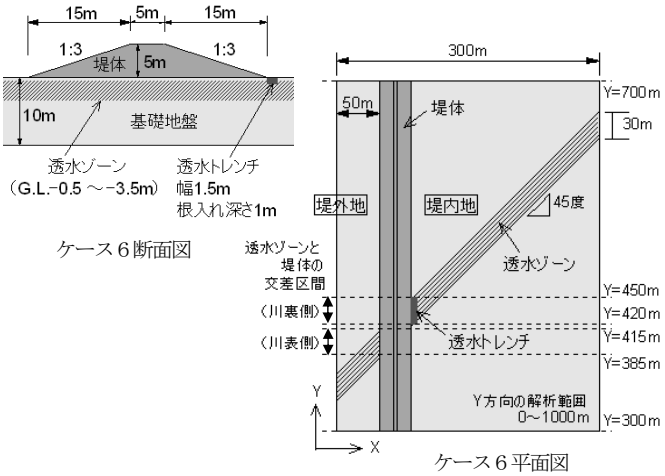

図-12　ケース６の解析モデル

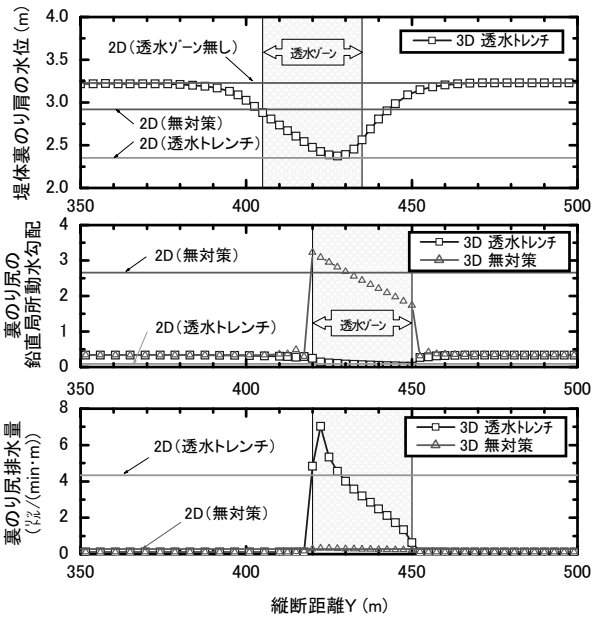

図-13　ケース６の裏のり肩水位、鉛直局所動水勾配、裏のり尻排水量の縦断分布（230h経過時点）

４．まとめ

三次元浸透流解析により、堤防縦断方向の浸透流の影響を考慮し、堤防強化工法の効果を検討した。その結果、限られた解析条件ではあるが、つぎのことが明らかになった。

堤体と基礎地盤の土質が縦断方向に一様な場合、対策周辺における浸透水の回り込みや、対策区間端部の排水の集中がみられたものの、堤体と基礎地盤の透水係数の大きさ・組み合わせ等の条件毎に効果的な対策範囲を示せる可能性があることがわかった。

基礎地盤に旧河道のような透水ゾーンが存在する堤防の場合、透水ゾーンに沿った浸透流や堤体や上下流の基礎地盤から透水ゾーンに流入する浸透流により、二次元対策断面と比べて堤体内水位低下等の効果が落ちる可能性があることがわかった。複雑な地形条件の下における効果的な対策範囲の設定については、三次元照査の必要性も含めてさらに検討が必要と考えられる。

今後は、現場における堤体内水位観測等により、以上の解析結果から得られた成果を検証し、堤防縦断方向の浸透流の影響を考慮した効果的・効率的な対策選定・設計方法を引き続き検討する予定である。

参考文献

1) 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.
2) 齋藤由紀子、古本一司、谷中仁志、小橋秀俊：堤防の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) 齋藤由紀子、谷中仁志、小橋秀俊、古本一司：堤防の浸透安定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) 西垣誠、三菱マテリアル株式会社、株式会社ダイヤコンサルタント：オイラリアン・ラグランジアン・三次元飽和・不飽和浸透流－移流分散解析プログラム Dtransu-3D･EL、http://gw.civil.okayama-u.ac.jp/gel_home/download/index.html 、著作権登録番号 P第4135-1号, P第7169-1号.

(2010. 4. 8受付)