

2.1 河川堤防の弱点箇所抽出・強化技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定（治））

研究期間：平 18～平 20

担当チーム：材料地盤研究グループ（土質・振動）

研究担当者：杉田秀樹、森 啓年、齋藤由紀子

【要旨】

現在進められている堤防詳細点検によると、3割程度が浸透に対し必要な安全性を確保しないことが予想されており、そうした弱点箇所を効率的に把握し、強化する技術の確立が求められている。本研究では、河川堤防管理の高度化を実現するため、弱点箇所の抽出精度を向上させる手法とともに、微地形などの現場条件に応じた適切な堤防強化工法の設計手法について検討した。その結果、微地形判読や統合物理探査を活用した高精度な弱点箇所抽出手法を提案した。また、三次元浸透流解析の結果より、堤防縦断方向の浸透流は、旧河道等が存在する微地形などで局所動水勾配に影響を与えること、矢板等浸透水を遮断する対策は、対策の上下流端に浸透流が回り込む区間が生じる可能性があることなどが明らかになった。

キーワード：河川堤防、浸透、地形、強化工法、三次元浸透流解析

1. はじめに

現在の河川堤防の多くは、古くから逐次強化を重ねてきた長い治水の歴史の産物であり、堤防延長、堤防断面については相当の整備がなされてきているが、現在進められている堤防詳細点検によると、3割程度が浸透に対し必要な安全性を確保しないことが予想されており、そうした弱点を効率的に把握し、強化する技術の確立が求められている。

そこで、河川堤防管理の高度化を実現するため、堤防点検結果を基に、対策区間の絞り込みや弱点箇所の見落とし防止など、弱点箇所の抽出精度を向上させることを目的に研究を実施する。また、微地形などの現場条件に応じた適切な堤防強化工法の設計手法について検討する。具体的には、①河川堤防の弱点箇所抽出手法の検討、②浸透に対する堤防縦断方向の微地形・土質構造変化の影響の検討、③縦断方向の浸透流による堤防強化工法への影響の検討、を実施した。

2. 研究方法

2.1 河川堤防の弱点箇所抽出手法の検討

現行の堤防詳細点検では、治水地形分類図や築堤履歴、被災履歴等の情報を活用し、既往ボーリング調査地点を含めて縦断方向に1～2kmの間隔でボーリング調査を実施し、縦断方向の土質構成をまず把握する。この縦断方向の土質構成に基づいて、区間分けをし、同一区間の中で浸透に対して条件が最も厳しい地点を選定、横断方向に3箇所程度ボーリン

グを実施して横断土質構造を把握する。浸透に対する安全性の照査は、選定された代表断面の横断土質構造に基づいて実施される。

以上のように、現行の手法では、様々な資料やボーリングデータに基づいて弱点箇所の抽出がなされ、浸透安全性に対する評価を与えてきた。しかしながら、この手法は、連続的に取得されたデータを利用するものでないことが課題である。そこで、平成19年9月の豪雨により被災した米代川の事例を対象に、現行の安全性照査手法の課題等を整理した。また、現行の堤防詳細点検に微地形判読や統合物理探査を組み合わせた高精度な弱点箇所抽出手法を検討した。

2.2 浸透に対する堤防縦断方向の土質構造の影響

堤防縦断方向の浸透に影響を及ぼす可能性がある微地形や土質構造として、①落堀を想定し、堤内地の標高が部分的に低い場合、②基礎地盤に旧河道を想定した透水性の高いゾーン（以下、「透水ゾーン」という）が存在する場合、③縦断方向に堤体土質が変化する場合、を対象とし、二次元・三次元浸透流解析で検討した。

解析モデルは、特定の河川を対象としたものではなく、高さ5m、のり面勾配1:3、天端幅5m、縦断方向に直線の堤防、という単純な条件とした。解析範囲は、縦断方向1,000m、横断方向300mとし、河床勾配1/250である。洪水外力は図-1に示す条件を与えた。入力した透水係数条件を、表-1に示す。不飽和浸透特性は、河川堤防の構造検討の手引き（以下、「手引き」という）¹⁾を参考に設定した。

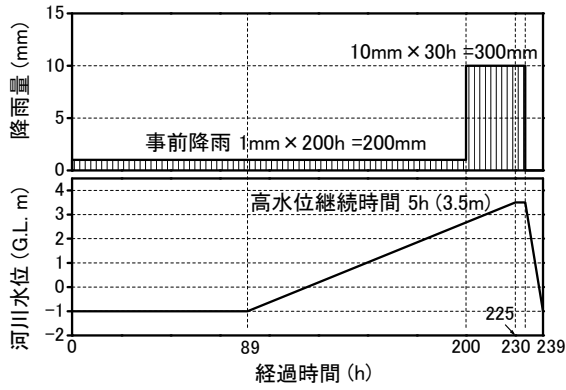


図-1 解析に用いた洪水外力

表-1 検討ケース (Case1~3)

Case	微地形・土質構造	堤体透水係数 (m/s)	基礎地盤透水係数 (m/s)
1	落堀	5E-6	1E-6
2	透水ゾーン	5E-6	1E-6
3	堤体縦断土質	1E-4(上流) 3E-5(下流)	1E-6

2.2.1 落堀の影響 (Case1)

手引きによると、浸透による堤防の被害は、旧河道・旧落堀のように特定の治水地形分類の箇所に多発する傾向が知られており、このような地形を「要注意地形」と呼んでいる。堤内地に旧落堀を想定した標高の低い部分が存在する場合、上下流からの浸透水の集中が予想されることから、図-2の解析モデルを設定し、浸透安全性に対する影響を、二次元・三次元解析により検討した。

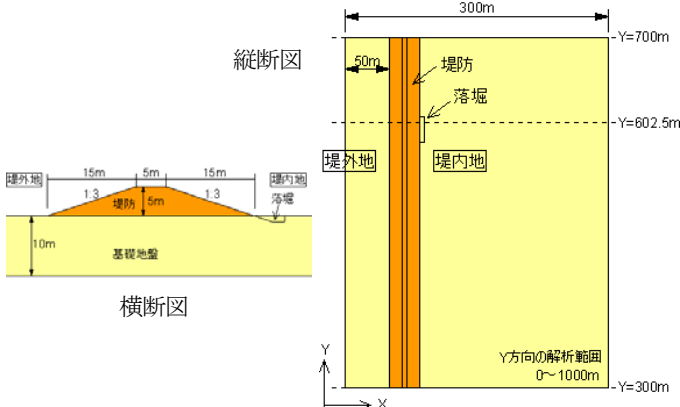


図-2 Case1 三次元解析モデル

2.2.2 基礎地盤内の透水ゾーンの影響 (Case2)

洪水時の氾濫や流路変化を繰り返している河川では、基礎地盤の土質構成が複雑な場合が多い。特に旧河道等、透水性の高いゾーンが存在し、堤防と交差する場合は、縦断方向の浸透流の影響が想定される。そこで、図-3の解析モデルを設定し、浸透安全性に対する影響を、二次元・三次元解析により検討した。

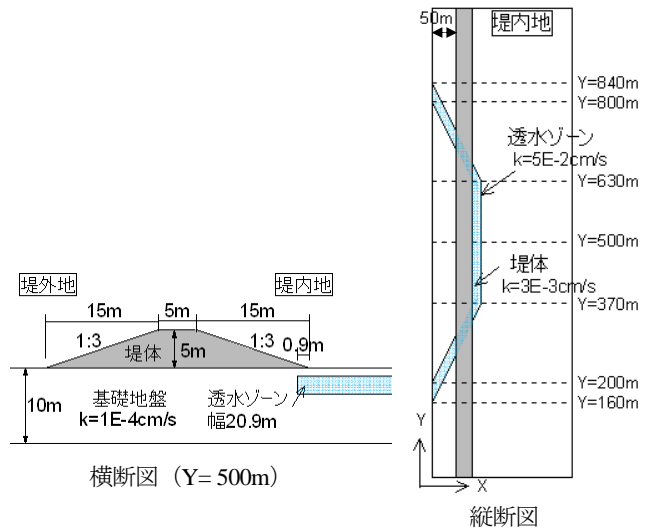


図-3 Case2 三次元解析モデル

2.2.3 縦断方向の堤体土質変化の影響 (Case3)

堤防は長大な構造物であることから、築堤の時期や築堤材料が、区間によって異なる。そこで、図-4のように、縦断方向に堤体の透水係数が異なる解析モデルを設定し、透水係数が変化する境界付近の浸透安全性について、三次元解析により検討した。

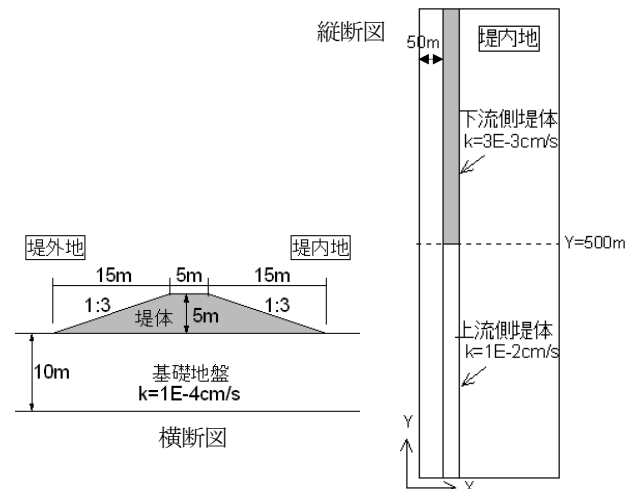


図-4 Case3 三次元解析モデル

2.3 縦断方向の浸透流による堤防強化工法への影響

堤防強化工法の設計は、浸透安全性の照査と同様に、横断面の土質構成に基づいて行われている。しかしながら、堤防強化を実施したにもかかわらず、再度漏水するなどの事例²⁾が見られていることから、効果的な対策を実施するためには、堤防縦断方向の浸透流が堤防強化対策に与える影響を明らかにする必要がある。今回は、川表で遮水する対策として、表のり面被覆工法と矢板工法を、川裏で排水する対

策として、ドレーン工法と透水トレンチ工法を検討対象とし、三次元浸透流解析を実施した。

解析モデルの概要と洪水外力の条件は、2.2と同様である。入力した透水係数条件を、表-2に示す。不飽和浸透特性と各強化工法の透水係数は、手引きを参考に設定した。

表-2 検討ケース (Case4~7)

Case	浸透対策	透水係数	堤体 透水係数 (m/s)	基礎地盤 透水係数 (m/s)
		(m/s)		
4	表のり面被覆	5E-8*	3E-5	1E-6
5	矢板	1E-7*	3E-4	1E-6
6	ドレーン	1E-3	3E-6	5E-4
7	透水トレンチ	1E-3	3E-5	1E-6

※モデルの厚さに応じて換算

2.3.1 川表で遮水する浸透対策の効果

①表のり面被覆工法 (Case4)

表のり面被覆工法は、堤体の表のり面を遮水シート等の難透水性材料で覆うことにより、高水位時の河川水の浸透を抑制する対策である。図-5の解析モデルを用いて、対策効果の把握や二次元解析との比較を実施した。

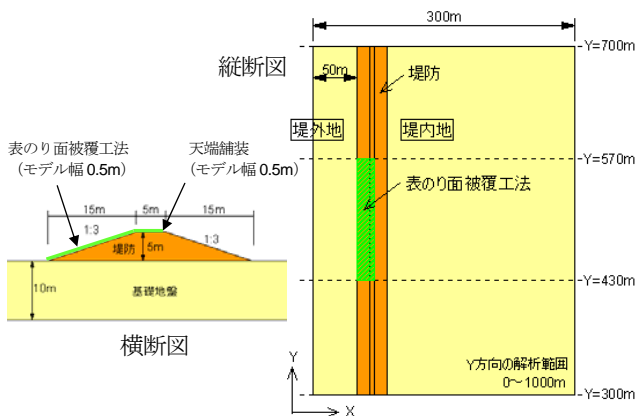


図-5 Case4 三次元解析モデル

②矢板工法 (Case5)

矢板 (川表遮水) 工法は、川表のり尻に止水矢板等の遮水壁を設置することにより、基礎地盤への浸透量を低減する対策である。図-6の解析モデルを用いて対策効果の把握や二次元解析との比較を実施した。

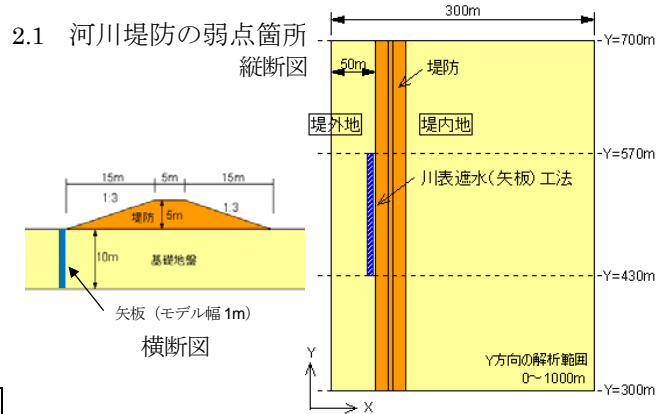


図-6 Case5 三次元解析モデル

2.3.2 川裏で排水する浸透対策の効果

①ドレーン工法 (Case6)

ドレーン工法は、堤体の川裏のり尻を透水性の大きい材料で置き換え、堤体に浸透した水を速やかに排水するものである。図-7の解析モデルを用いて、縦断方向の対策効果の把握や二次元解析との比較を実施した。

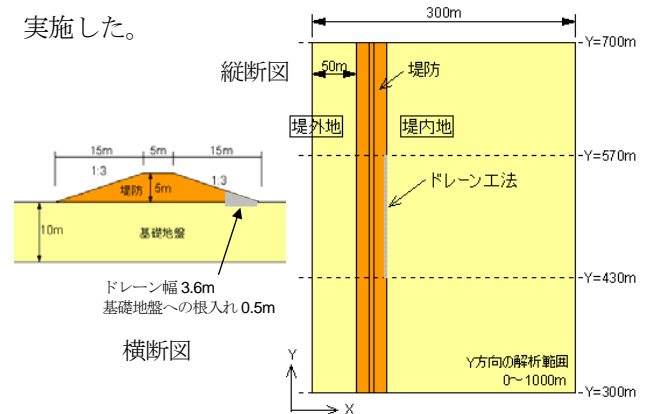


図-7 Case6 三次元解析モデル

②透水トレンチ工法 (Case7)

パイピング対策として、川表側で水の浸透を遮断する方法の他に、堤防裏のり尻付近の基礎地盤を透水性の高い土質材料で置き換える透水トレンチ等がある。浸透水を穏やかに排水し浸透圧を解放する方法で、米国陸軍工兵隊の堤防設計基準³⁾に盛り込まれているものの、我が国での実績は乏しい。そこで、図-8の解析モデルを用いて、対策効果の把握や二次元解析との比較を実施した。

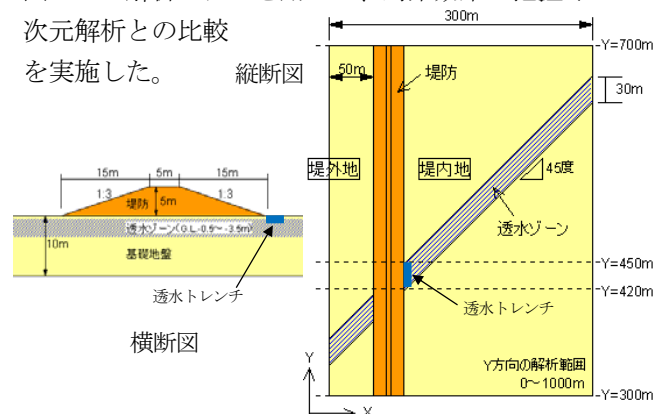


図-8 Case7 三次元解析モデル

3. 研究結果

3. 1 河川堤防の弱点箇所抽出手法の検討

1) 被災事例に基づく現行手法の課題抽出

平成 19 年 9 月 16 日から 18 日にかけて、秋雨前線と台風 11 号から変わった低気圧の影響により、東北地方の秋田県・青森県・岩手県の広い範囲で記録的な大雨が観測された。この豪雨により、米代川や北上川では計画高水位以上またはそれに近い洪水が観測され、河川堤防周辺の数十ヶ所において漏水やのり面のすべり破壊等の被害が発生した⁴⁾⁵⁾。

米代川の左岸 15.5km および左岸 16.0km 付近は、いずれも氾濫平野に位置しており、この区間では 10 箇所以上の漏水が発生した。左岸 15.5km 付近では写真-1 に示すように最大で直径 3m 程度の巨大な噴砂跡が確認された。本箇所は、洪水時に堤内地が広い範囲にわたって水没していたため、水防活動ができず、このように大規模な噴砂跡が形成されたと考えられる。



写真-1 直径 3m 程度の噴砂跡

被災時の水位・降雨データを用いて浸透流解析により、洪水時の堤体内浸透流を再現し、安全性照査を行った。

米代川では、被災直後に被災箇所を対象とした土質調査が行われており、土層構成や土質定数等を解析条件に反映させた。降雨量は近傍の観測所データを用い、水位変動については近傍の観測所での観測結果と現地での水位痕跡から推定した。断面形状は災害調査時の簡易測量結果から設定した。

表-3 に解析結果（能代河川国道事務所提供）を整理して示す。被災箇所の土層構成を考慮した米代川では、局所動水勾配および揚圧力の値が基準値を満足せず、パイピングのおそれがあると判定される結果となった。すなわち、実際の状況をよく表していると考えられる。

一方、水位・降雨データのみを考慮した北上川の被災箇所の解析結果では、局所動水勾配および揚圧力の値が基準値を満足し、パイピングの恐れは小さいという評価結果となった。これは、土質条件が点

検対象断面とは異なる、または堤防縦断方向からの浸透の影響を受けた可能性等が考えられる。

また、この結果と詳細点検結果を比べると、米代川では、詳細点検結果の方が安全性が高くなっているケースが多かった。その原因として、表-3 に示すように左岸 7.8km を除く被災箇所においては基礎地盤表層の土層構成が詳細点検と若干異なっていたことが挙げられる。一例として、米代川左岸 16.6km での土層モデルを図-9、10（能代河川国道事務所提供）に示す。図-9 に示すように、基礎地盤表層に詳細点検時には確認されなかった薄い被覆土層が存在していた。このため、基礎地盤内の水圧が上昇し、漏水が発生した可能性が考えられる。また、左岸 7.8km では、堤内地の地盤高さが検討断面より低かった。

以上のことから、弱点箇所の抽出を高精度化するためには、堤内地の微地形や基礎地盤表層の土質などを適切に把握することが、重要であるといえる。

表-3 被災時のデータを用いた安全性照査結果

河川名	被災箇所	局所動水勾配 (iv, ih)	揚圧力 (G/W)	主な詳細点検との相違点*
米代川	左岸 7.8km	0.65, 1.02	—	堤内地盤高
	左岸 15.5km	0.88, —	—	基礎地盤表層の被覆土層の有無
	左岸 16.6km	0.54, 0.66	—	
	左岸 22.0km	0.50, 0.61	0.49	堤外側表層の高透水層の有無
北上川	右岸 130.8km	—	1.39	特に無し (土層構成・土質定数等は不明)
	左岸 56.2km	—	1.07	
	左岸 47.0km	0.04, 0.08	—	

※断面形状の微細な違いや外力（水位）の違いは除く

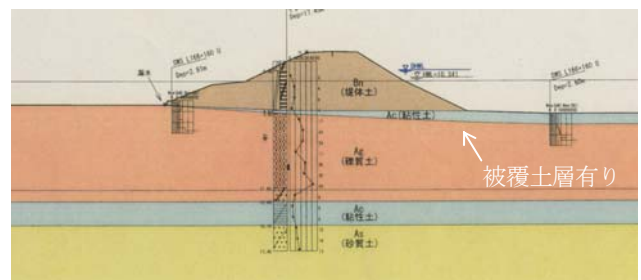


図-9 米代川左岸 16.6km の被災箇所断面

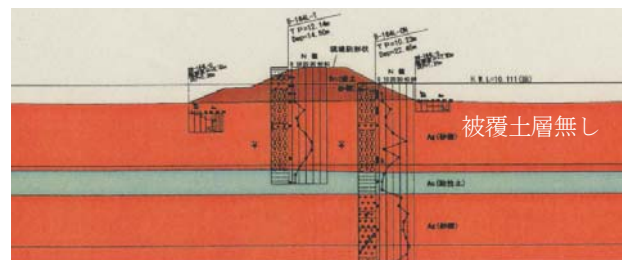


図-10 米代川左岸 16.6km の詳細点検時の照査断面

2) 高精度な弱点箇所抽出手法の検討

詳細点検により、浸透に対する安全性を満たさず要対策と評価された区間について、微地形判読や統合物理探査を活用し、対策箇所を絞り込む手法を図-11にまとめた。要対策区間の見落としの防止も同様に可能であると考えられる。

要対策区間に対し、微地形判読の技術を用いて、被災関連性の高い治水地形を判読し、抽出する。つぎに、堤防縦断方向に統合物理探査を実施し、連続的な土質構造を把握、要対策区間を細分する。細分した区間毎に、必要に応じて横断方向の統合物理探査を実施し、横断方向の土質構造を把握する。得られた横断土質構造に基づいて、浸透安全性の再評価を実施する。

以上のような手順により、数百m～数kmの単位で抽出していた弱点箇所を数十m程度の精度まで細かく絞り込むことができ、堤防強化対策の延長を削減、ひいては質的整備に対するコストを縮減することが可能になると考えられる。

3. 2 浸透に対する堤防縦断方向の土質構造の影響

3.2.1 堤内地の標高の影響 (Case1)

Case1について、堤体内水位が最も上昇する高水位継続時間終了時点(230h)における、落堀周辺の流速ベクトル分布を図-12に、堤体内水位と裏のり尻における局所動水勾配を図-13に示す。流速ベクトルより、堤内地に落堀のような標高の低い箇所が存在する場合、その部分に向かって、周辺部から水が浸透していることがわかる。図-13より、落堀部の横断面(Y=602.5m)と比較すると、三次元と二次元で堤体内水位に違いはほとんど見られない。三次元解析結果で落堀部と周辺部を比べると、堤体内水位はほぼ同じであるが、落堀部の方が鉛直方向の局所動水勾配の方が大きい結果となった。落堀部の断面では、内外水位差が大きくなったためと考えられる。

以上のことから、旧落堀等により周辺部より堤内地の標高が低い箇所では、局所動水勾配が大きくなりパイピング安全性が低下するものの、横断面の形状を把握できていれば、二次元解析で評価可能であると考えられる。

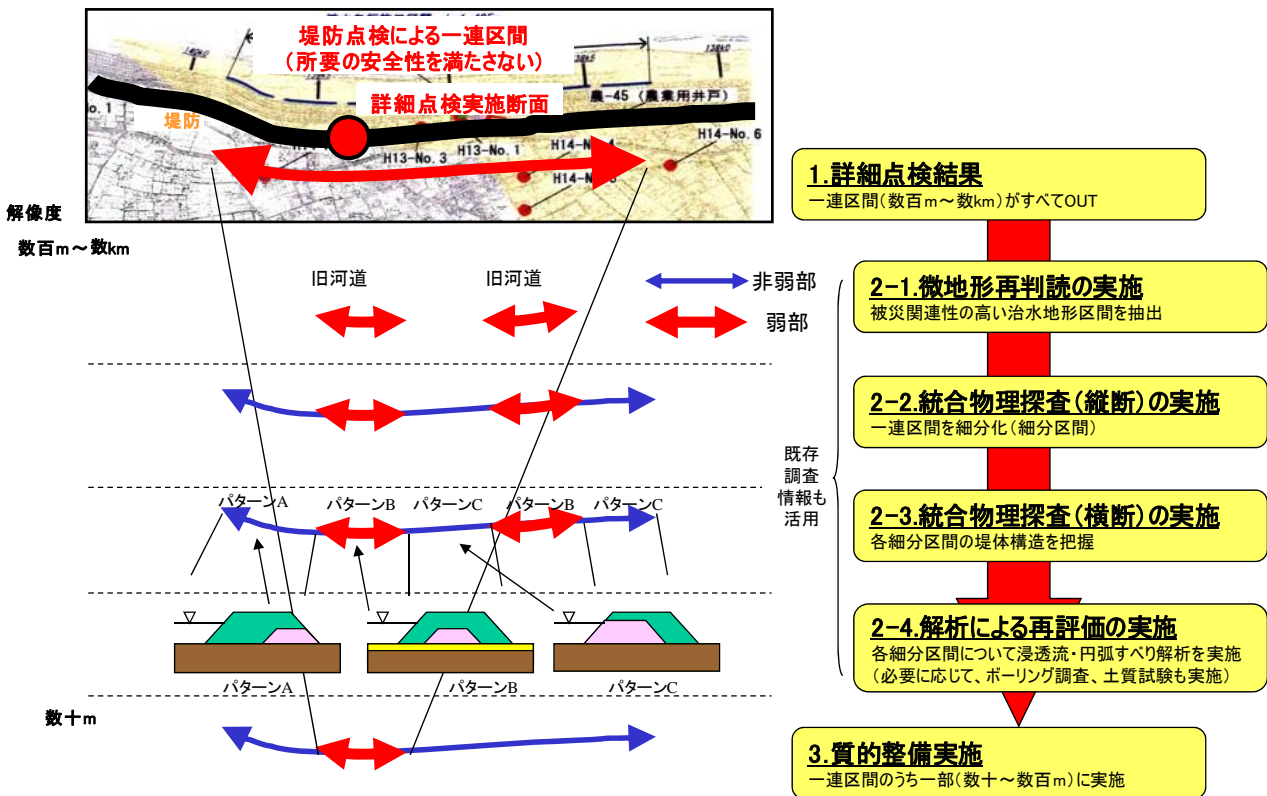


図-11 高精度な弱点箇所抽出手法

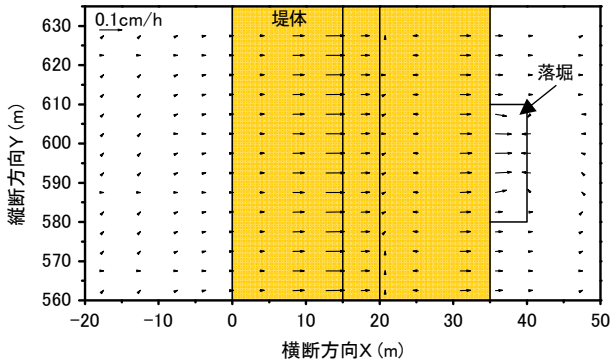


図-1 2 流速ベクトル (Case1, G.L.-0.5m)

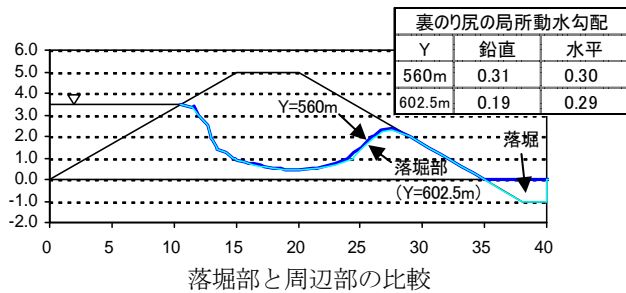
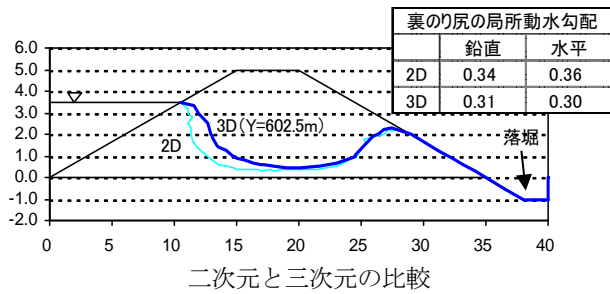


図-1 3 堤体内水位と局所動水勾配 (Case1)

3.2.2 基礎地盤内の透水ゾーンの影響 (Case2)

230h 時点における基礎地盤表層の鉛直局所動水勾配分布を図-1 4に、鉛直・水平局所動水勾配の一覧を表-4に示す。

今回の解析モデルのように基礎地盤の透水ゾーンが堤内地に入り、再び河川に戻るように位置している場合、透水ゾーンと堤防裏のり尻が交差する部分付近で局所動水勾配が大きくなり、二次元解析では水平局所動水勾配を過小に評価している可能性があることがわかった。

以上のことから、基礎地盤内に旧河道のような透水ゾーンが存在する場合、二次元解析のみでは評価が不十分な場合もあるため留意が必要と考えられる。

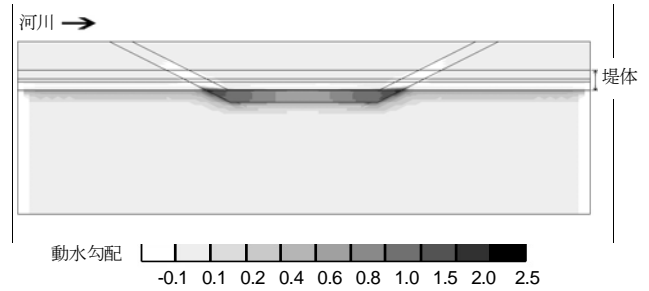


図-1 4 鉛直局所動水勾配分布 (Case2, G.L.-0.25m)

表-4 安全性照査 (Case2, 230h)

	円弧すべり安全率	鉛直局所動水勾配	水平局所動水勾配
3D	1.12 (Y=699m)	2.06 (Y=668m)	0.59 (Y=677m)
2D (比較対象断面)	1.17	2.22	0.35

3.2.3 縦断方向の堤体透水係数分布の影響 (Case3)

堤体の透水係数が変化する地点 (Y=500m) 付近における、縦断方向の堤体内水位を図-1 5に示す。三次元解析の結果、洪水開始後 200 時間の時点では、透水係数の高い上流側の堤体内水位の上昇が速く、その影響を受けて下流側の水位も上昇する現象が見られた。

高水位終了時点 (洪水開始後 230 時間経過) では、透水係数の境界付近からやや下流側 (Y=508m) で堤体内水位が最大となった。二次元解析より三次元解析の堤体内水位が 10cm 以上高い結果となったのは、洪水開始 200 時間後においては Y=500~510m、230 時間後では Y=504~515m の範囲であった。

堤体と基礎地盤の内部摩擦角がそれぞれ 30 度、35 度であると仮定すると、円弧すべり安全率は表-5の結果となり、二次元解析と三次元解析との間に大きな違いは見られなかった。また、鉛直・水平局所動水勾配の最大値も、表-5に示すとおり二次元解析と三次元解析で大きな差は認められなかった。

以上のことから、縦断方向に堤体の透水係数が変化する場合、変化点付近で水位がやや上昇する可能性はあるものの、二次元解析による評価が十分適用できると考えられる。

3.3 縦断方向の浸透流による堤防強化工法への影響

3.3.1 川表で遮水する浸透対策の効果

①表のり面被覆工法 (Case4)

Case4 について、堤体内水位が最も上昇する高水位継続時間終了時点 (230h) における、堤体裏のり

肩水位の縦断形状を図-16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。今回の検討で、表のり面被覆工法は、堤防縦断方向の水の浸透の影響を受けて遷移区間が存在することがわかった。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-16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。

②矢板工法 (Case5)

Case5について、230h時点における矢板周辺の流速ベクトルを図-17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。

Case4とCase5の結果より、川表で河川水を遮断する工法は、いずれも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、堤体や基礎地盤の透水係数の大きさ・組み合わせ等様々な影響因子があると考えられる。

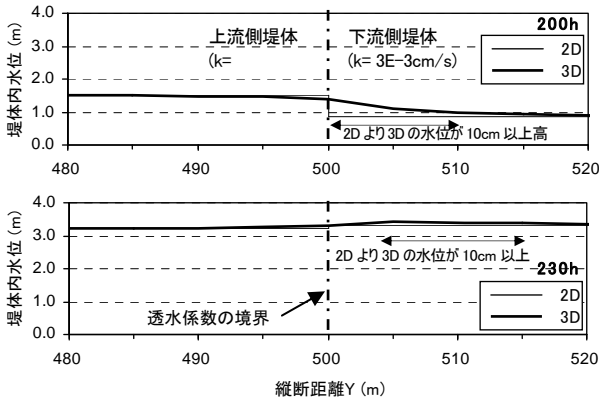


図-15 縦断方向の堤体内水位 (Case3, X=68m)

表-5 安全性照査 (Case3, 230h)

	円弧すべり安全率	鉛直局所動水勾配	水平局所動水勾配
3D (Y=508m)	1.13	0.34	0.32
2D (比較対象断面)	1.15	0.34	0.33

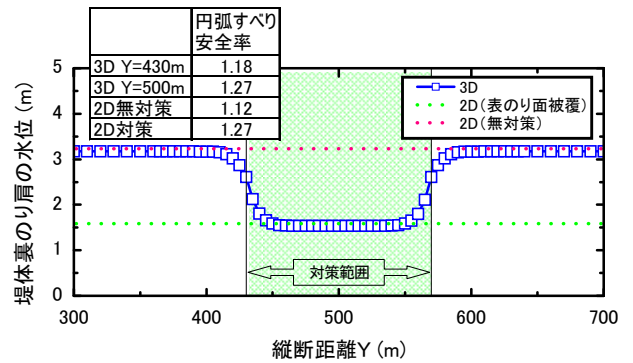


図-16 Case4 裏のり肩水位の縦断形状

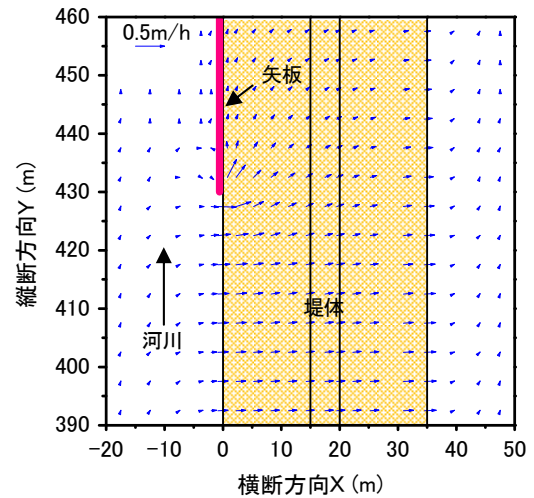


図-17 Case5 矢板周辺の流速ベクトル (G.L.-1.5m~-1m)

3.3.2 川裏で排水する浸透対策の効果

①ドレーン工法 (Case6)

Case6について、230h時点における堤体裏のり尻排水量の縦断分布を図-18に示す。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水位低下効果を示した。Case4と同様に土質定数を設定し、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-18に示すとおり、対策区間の上下流端では、排水量が集中する傾向が見られた。

②透水トレンチ工法 (Case7)

Case7について、230h時点における裏のり尻鉛直局所動水勾配の縦断形状を図-19に示す。無対策の場合、透水ゾーン内の局所動水勾配は照査基準の0.5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、図-20に示すとおり、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。

Case6 と Case7 の結果より、川裏から浸透水を排水する工法は、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、ドレーンや透水トレンチの目詰まりに対する監視等維持管理について特に留意が必要であることが窺える。

4. まとめ

河川堤防管理の高度化を目指して、弱点箇所の抽出精度を向上させる手法と、微地形などの現場条件に応じた適切な堤防強化工法の設計手法について検討した。その結果、微地形判読や統合物理探査を活用した高精度な弱点箇所抽出手法を提案した。また、三次元浸透流解析より、堤防縦断方向の浸透流を考慮した場合でも、現行の横断面の照査が適用できる地形・土質構造の条件を明らかにした。堤防強化工法について、堤体や基礎地盤の透水係数の条件によっては、対策効果発現の遷移区間が生じることなど、対策選定時の対策区間設定の参考となる基礎データを提示した。

今後、弱点箇所抽出手法については現場に適用して検証すること、解析結果については実験や現場観測により検証していくことが必要である。

参考文献

- 1) 国土技術研究センター：河川構造物の構造検討の手引き、2002.7.
- 2) 佐藤宏明、中山修、佐古俊介：利根川堤防で発生した漏水に関する調査事例、河川技術論文集、第 11 巻、2005.6.
- 3) U.S. Army Corps of Engineers：Engineering and Design DESIGN AND CONSTRUCTION OF LEVEES、2000.
- 4) 国土交通省東北地方整備局能代河川国道事務所：H19豪雨による出水（平成19年9月17～19日）米代川出水速報、2007.10.
- 5) 国土交通省東北地方整備局岩手河川国道事務所：平成19年9月洪水北上川上流出水速報（ホームページ）、2007.9.

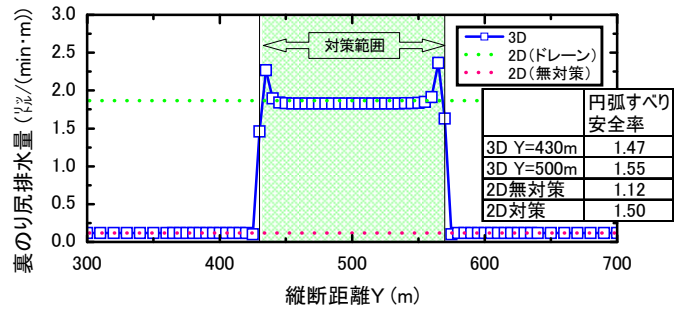


図-18 Case6 裏のり戻排水量の縦断分布

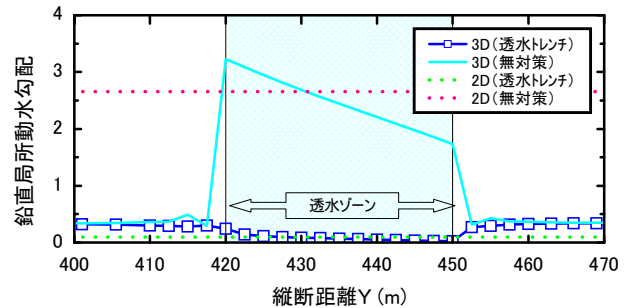


図-19 Case7 鉛直局所動水勾配の縦断形状

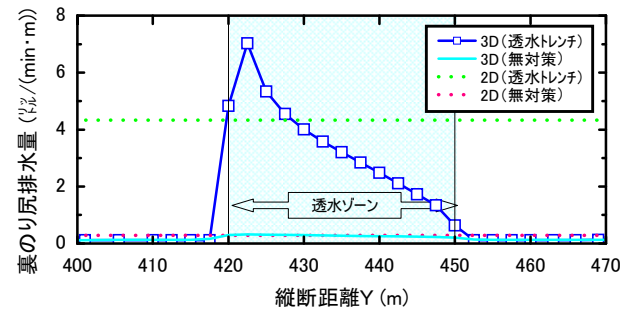


図-20 Case7 裏のり戻排水量の縦断分布

VULNERABLE POINT DETECTION METHOD AND REINFORCEMENT METHOD FOR RIVER LEVEES

Abstract : This research tried to improve the evaluation method of the stability of river levees and develop reliable designing for river levee reinforcement methods against seepage. The precise vulnerable point detection process is proposed combining the micro geomorphology analysis and the geophysical exploration with the conventional evaluation method. In addition, three dimensional seepage analysis was conducted to evaluate the effect of the landform or the reinforcement method. The result indicated that not only the seepage flow of the cross section but also that of the longitudinal section has a possibility to affect the stability of river levees.

Key words : river levee, seepage, topography, reinforcement method, three dimensional seepage analysis