

堤防の浸透安定性に及ぼす縦断土質構造の影響

INFLUENCE OF LONGITUDINAL SOIL PROFILE ON STABILITY OF LIVER LEVEE

齋藤由紀子¹・谷中仁志²・小橋秀俊³・古本一司⁴

Yukiko SAITO, Hitoshi TANINAKA, Hidetoshi KOHASHI and Kazushi FURUMOTO

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正会員 工修 (独) 土木研究所材料地盤研究グループ (同上)

³正会員 工博 (独) 土木研究所材料地盤研究グループ (同上)

⁴正会員 工修 前 (独) 土木研究所材料地盤研究グループ (同上)

From 1996, the investigation of river levees has been carried out in order to find relatively weak points against the seepage flow on flood. The stability assessment method of river levee is based on the evaluation of the seepage flow of the cross-section of river levee. However, from three-dimensional perspective, this method could be insufficient for assessing because of the seepage flow.

In this paper, it is shown that the result of the stability of river levee using three-dimensional numerical analysis to reveal the influence of longitudinal soil profile. The result shows that the hydraulic gradient seems to increase by the pervious zone in the ground. In some case of the longitudinal soil profile and the flooding pattern, it is necessary to consider the monitoring and three-dimensional numerical analysis for proper assessment of levee's stability.

Key Words : river levee, seepage, numerical analysis, stability evaluation, three-dimensional flow

1. はじめに

国土交通省では、河川堤防設計指針（平成14年7月）に基づいて、河川堤防の浸透に対する安全性について点検を実施している。堤防のある区間に対し、代表すると考えられる箇所の横断面の土質構造に基づいて照査を行うものである。一方、実際には堤防は長大な線状構造物であり、堤防強化工法を施したにもかかわらず、上下流側の構造に影響を受けて再度漏水するなどの事例も見られている。本報では、三次元浸透流解析により、こうした堤防縦断方向における基礎地盤や堤体の土質構造が浸透に与える影響について基礎データを取得し、現行の照査手法の課題等について検討することを目的としている。

2. 検討内容

過去の漏水等の事例を参考に、つぎの(1)～(4)を検討項目として設定した。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を標準とした。検討に用いた三次元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浸透流解析プログラムはUNSAFである。飽和透水係数および不飽和浸透特性は、表-1に示す値と河川堤防の構造検討の手引き¹⁾に基づいて入力した。また、洪水外力は図-1に示す条件を与えた。

堤防内の浸透水の流向や、堤体内水位、局所動水勾配等の特徴を整理するとともに、二次元浸透流解析（以下、「2D解析」と表記）と比較することにより、現行の照査に加えて三次元浸透流解析（以下、「3D解析」と表記）による検討が必要となる条件等について考察した。

表-1 飽和・不飽和浸透の条件

土質区分		飽和透水係数(cm/s)	飽和体積含水率	比貯留係数(1/m)
堤体1	標準部	3×10^{-3}	0.2	1×10^{-4}
" 2	高透水部	1×10^{-2}	0.2	1×10^{-4}
" 3	難透水部	1×10^{-5}	0.1	1×10^{-3}
基礎地盤1	標準部	1×10^{-4}	0.2	1×10^{-4}
" 2	透水ゾーン	5×10^{-2}	0.2	1×10^{-4}
" 3	難透水部	1×10^{-5}	0.1	1×10^{-3}

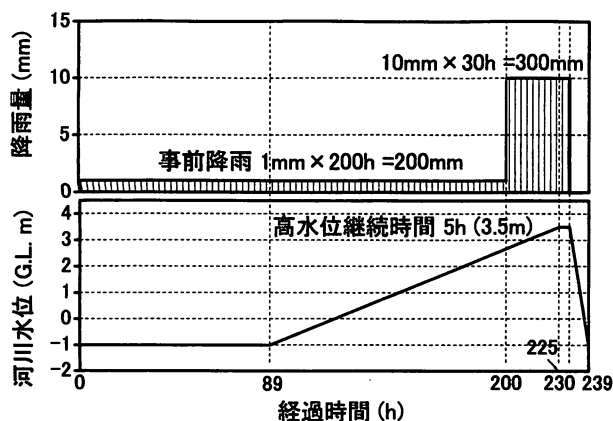


図-1 洪水外力の条件

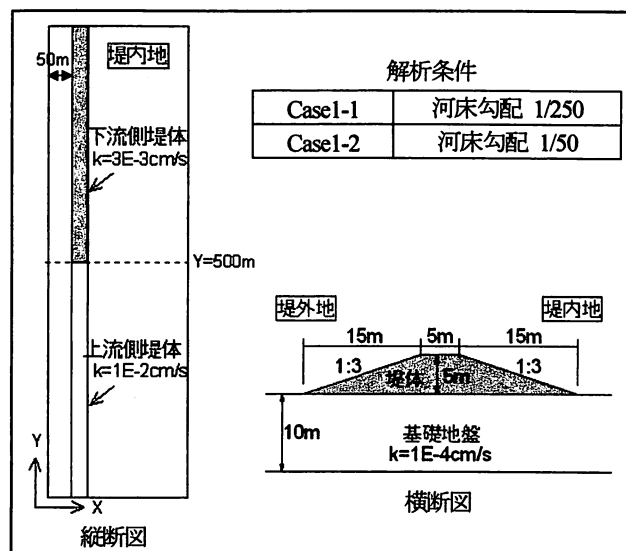


図-2 解析モデル (Case1)

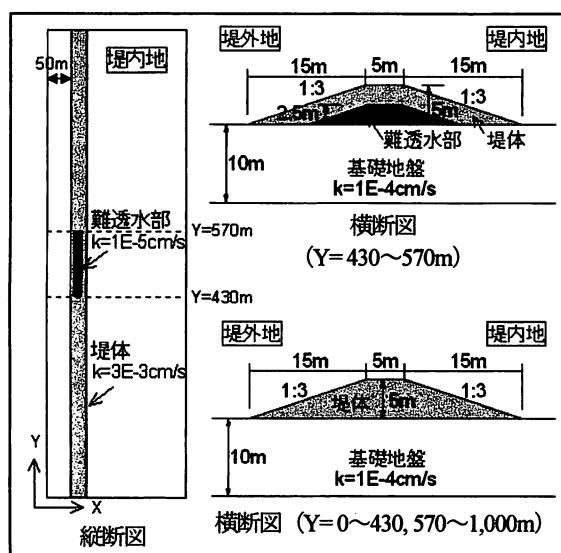


図-3 解析モデル (Case2)

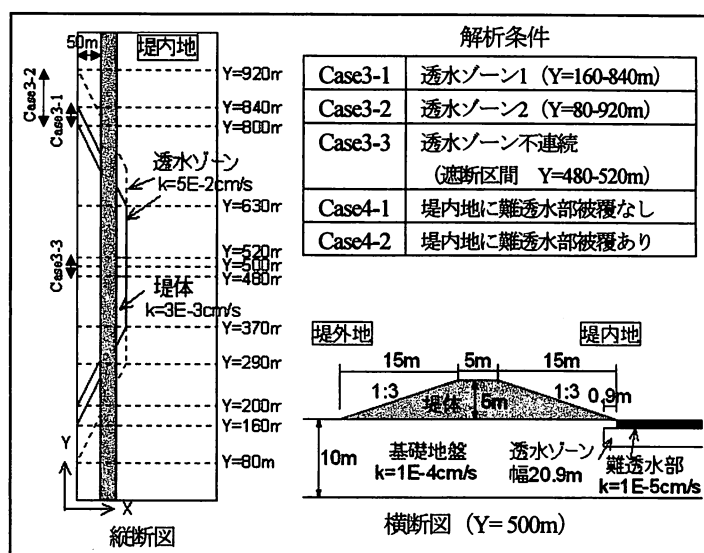


図-4 解析モデル (Case3, 4)

(1) 縦断方向の堤体の透水係数の違いの影響 (Case1)

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と考えられる。そこで、図-2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堤体内水位の状況等について検討した。

(2) 堤体内難透水路の連続性の影響 (Case2)

堤防は築堤履歴が複雑な場合が多く、二次元モデルで検証した場合においても、浸透に対して問題となる土質構成の横断面が存在することがわかっている²⁾。その中の一つとして、堤体中央に難透水路が位置し、透水性の高い土質が被覆、かつ難透水路の高さが計画高水位に達していないような断面が挙げられる。そこで、図-3のように、堤体内の難透水路が堤防縦断方向の一部に存在する解析モデルを設定し、難透水路周辺の堤体内水位の状況等について検討した。

(3) 基礎地盤内の透水ゾーンの影響 (Case3)

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」等の要注意地形において浸透による堤防の被害が多発する傾向が知られている。そこで、図-4のとおり、堤内地の難透水路被覆を前提として、基礎地盤内に旧河道を想定した透水ゾーンを設定し、透水ゾーンの幅や連続性の条件を変化させた際の、局所動水勾配等への影響について検討した。

(4) 堤内地被覆の影響 (Case4)

基礎地盤の透水性が高く、堤防裏のり尻下に難透水路が薄く分布していると、基礎地盤からの漏水やパイピング破壊が生じやすい。そこで、図-4のとおり、透水ゾーンの設定を前提として、堤内地被覆の有無が局所動水勾配等へ与える影響について検討した。

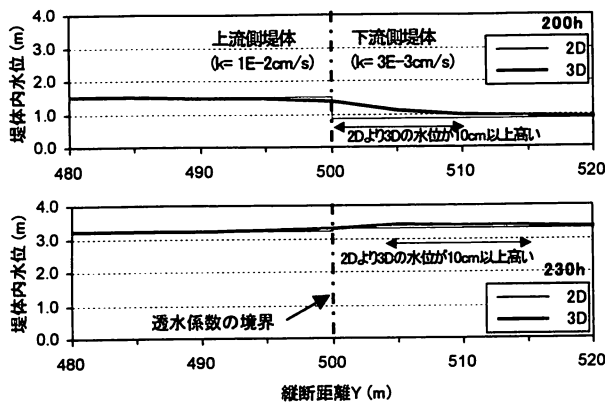


図-5 縦断方向の堤体内水位 (Case1, X=68m)

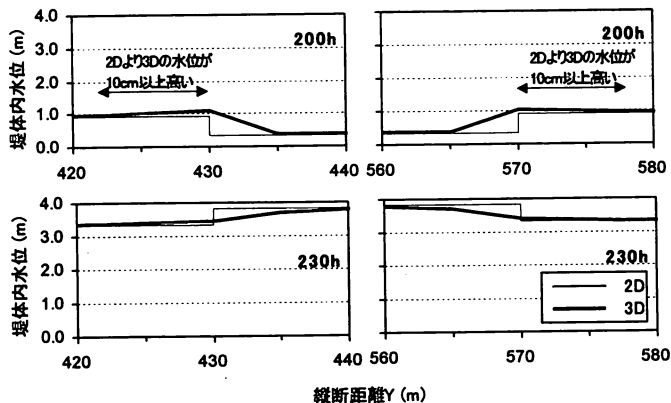


図-7 縦断方向の堤体内水位 (Case2, X=68m)

3. 検討結果

(1) 縦断方向の堤体の透水係数の違いの影響 (Case1)

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-5に示す。3D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。Case1-1において、2D解析より3D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。河床勾配の急なCase1-2では、200時間後でY=500~524m、230時間後でY=500~513mとなり、範囲が広がる傾向が見られた。

洪水開始後230時間における堤体内水位最大地点 (Y=508m) の堤防横断方向の水位を図-6に示す。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-2の結果となり、2D解析と3D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-2に示すとおり2D解析と3D解析で大きな差は認められなかった。

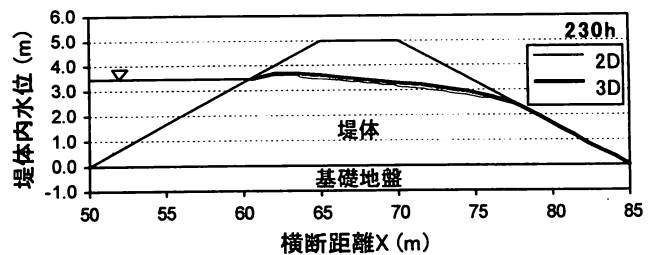


図-6 横断方向の堤体内水位 (Case1-1, Y=508m)

表-2 安全性照査 (Case1, 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 Case1-1 (Y=508m)	1.13	0.34	0.32
3D Case1-2 (Y=508m)	1.12	0.34	0.32
2D (比較対象断面)	1.15	0.34	0.33

表-3 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 (Y=503m)	1.13	0.31	0.31
2D (Y=503mの比較対象断面)	1.13	0.32	0.34
3D (Y=421m)	1.14	0.32	0.32
2D (Y=421mの比較対象断面)	1.15	0.34	0.33

ただし、3D解析の場合、鉛直局所動水勾配は裏のり尻よりやや堤内地側、水平局所動水勾配は逆に裏のり尻よりやや堤外地側の要素に最大値が現れた。

以上の結果から、今回の解析条件では、縦断方向に堤体の透水係数が変化しても堤防横断面の土質構成を正確に捉えられていれば、概ね2D解析による照査で浸透に対する評価は可能と考えられる。

(2) 堤体内難透水路の連続性の影響 (Case2)

堤体内の難透水路の上下流端 (Y=430m, 570m) 付近における縦断方向の堤体内水位を図-7に示す。3D解析の結果、難透水路が存在することにより、その両端で2D解析より堤体内水位が高い区間が確認された。高水位終了時点 (洪水開始後230時間経過) では、難透水路の中央付近 (Y=503m) で堤体内水位が最大であった。2D解析より3D解析の堤体内水位が10cm以上高い結果となったのは、洪水開始後200時間においてはY=422~430m, 570~578mであり、230時間後では見られなかった (Y=421mにおいて最大で7cm程度の差)。

洪水開始後230時間における堤体内水位最大地点 (Y=503m) と2D解析との差が最も大きい地点 (Y=421m) において、Case1と同じ条件 (ただし、難透水路の粘着力が20kN/m²であると仮定) で円弧すべり安全率を算出したところ、表-3の結果となり、2D解析と3D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は、表-3に示すとおり、2D解析の結果の方がやや大きく、出現要素の横断方向

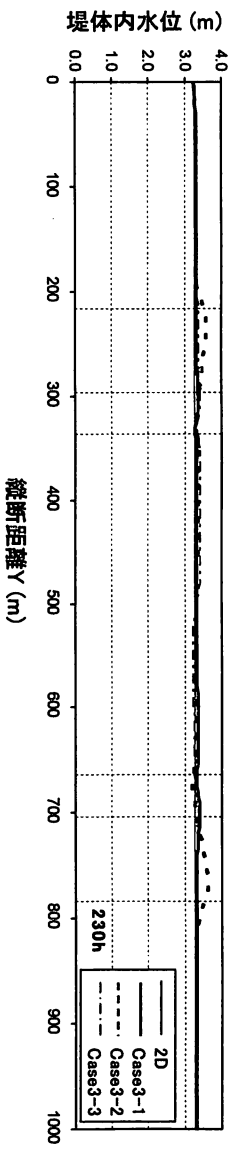
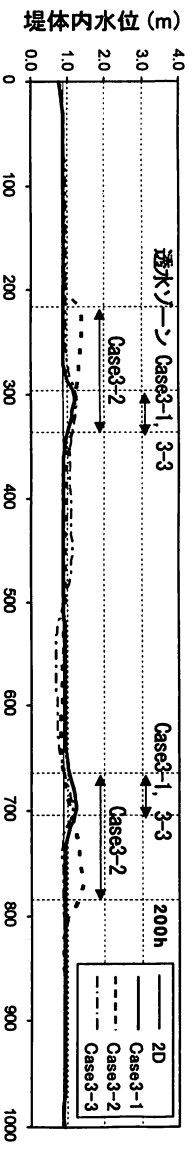


図-8 縦断方向の堤体内水位 (Case3, X=68m)

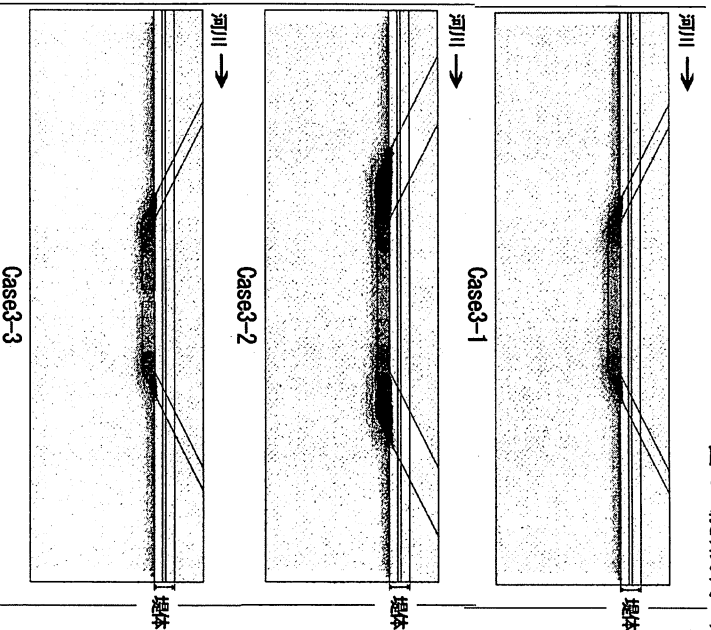


図-9 鉛直局所動水勾配分布 (Case3, G.L.-0.25m)

の位置はCase1と同じ傾向であった。

以上の結果から、堤体内に透水性の低い旧堤等が存在する場合、横断方向に見られる旧堤周辺の水位上昇が、縦断方向でも見られたものの、今回の解析条件では、安全性照査に与える影響は小さく、堤防横断面の土質構成を正確に捉えられていれば、概ね2D解析による照査で浸透に対する評価は可能と考えられる。

(3) 基礎地盤内の透水ゾーンの影響 (Case3)

洪水開始後200時間経過時と230時間経過時点におけるCase3-1～3-3の縦断方向の堤体内水位を図-8に示す。2D解析の結果は、Y=500m地点の横断面で算出したものである。透水ゾーンが堤防の下に位置している区間では、

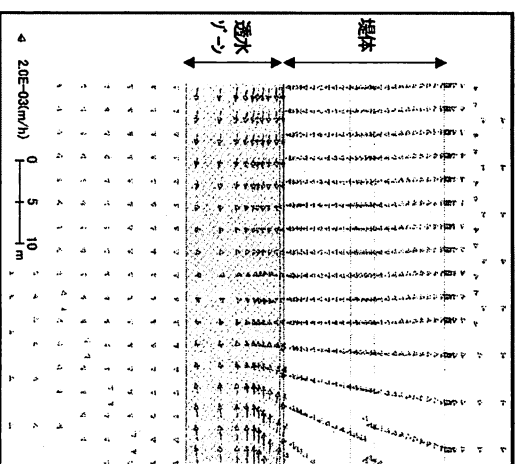


図-10 流速ベクトル (Case3-1, G.L.-0.25m)

表-4 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 Case3-1	1.12 (Y=699m)	2.06 (Y=668m)	0.59 (Y=677m)
2D (Case3-1の比較対象断面)	1.17	2.22	0.35
3D Case3-2	1.10 (Y=769m)	2.69 (Y=748m)	0.75 (Y=757m)
2D (Case3-2の比較対象断面)	1.10	2.94	0.36
3D Case3-3	1.13 (Y=445m)	2.02 (Y=332m)	0.58 (Y=677m)
2D (Case3-3の比較対象断面)	1.17	2.22	0.35

堤体内水位が上昇しており、Case3-1の場合、周辺区間との差は洪水開始後200時間で最大33cm程度、230時間後で最大9cm程度であった。堤体内水位の傾向は、透水ゾーンが不連続のCase3-3でもほぼ同じであったが、上下流で透水ゾーンの幅が3倍になっているCase3-2では、水位の高さと縦断方向の影響範囲が大きくなった。

基礎地盤の表層 (要素中心: G.L.-0.25m) における鉛直局所動水勾配分布を図-9に示す。いずれのケースも透水ゾーンが堤防から堤内地に入る部分と、逆に堤内地から堤防に戻る部分で値が大きくなった。堤体内水位と同

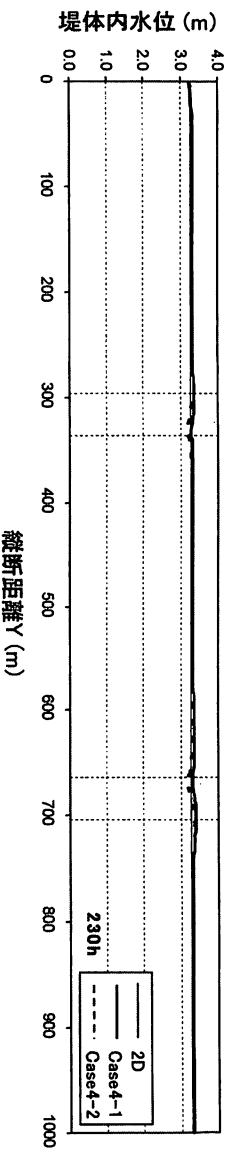
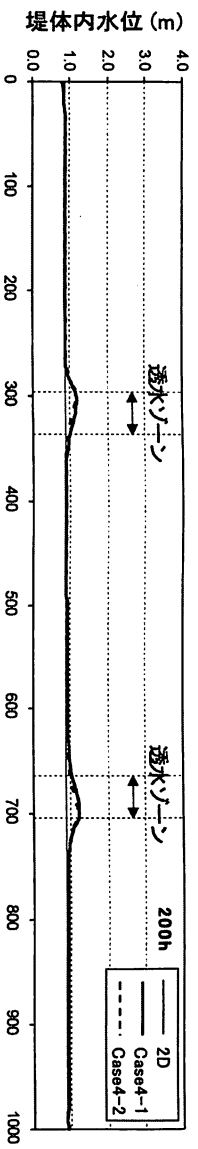


図-11 縦断方向の堤体内水位 (Case4, X=68m)

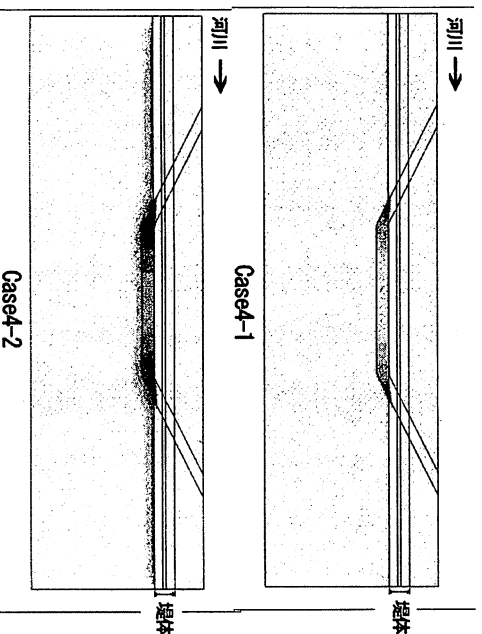


図-12 鉛直局所動水勾配分布 (Case4, G.L.-0.25m)

様に、上下流で透水ゾーンの幅が3倍になっている Case3-2では、鉛直動水勾配の値が大きく、影響範囲も 広がる傾向であった。また、透水ゾーンが不連続な Case3-3では、透水ゾーンが遮断されている区間の上流 側で、Case3-1より動水勾配がやや大きくなった。河川 から透水ゾーンを浸透してきた水が不連続箇所でせき止 められた可能性が考えられる。鉛直・水平局所動水勾配 の最大値は、表-4に示すとおり、透水ゾーンの無い Case1, 2と比較すると大きな値を示した。2D解析と3D解 析を比較すると、鉛直局所動水勾配は2D解析の結果の 方がやや大きく、逆に水平局所動水勾配は3D解析の結 果の方が1.6〜2倍程度大きくなった。

Case3-1のY=580m付近の流速ベクトルを図-10に示す。 透水ゾーン内部では、浸透水の流向が下流側から上流側 を指す区間が一部見られた。今回の解析条件のように、 透水ゾーンが堤内地から下流側の河川に連続している場 合、河川水位の高さによっては、透水ゾーン内を河川水 が逆流する現象が生じるものと考えられる。

洪水開始230時間後における堤体内水位最大地点にお

表-5 安全性照査 (Case4, 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 Case4-1	1.13 (Y=709m)	1.56 (Y=668m)	0.60 (Y=673m)
2D (Case4-1の 比較対象断面)	1.16	1.95	0.35
3D Case4-2	1.12 (Y=699m)	2.06 (Y=668m)	0.59 (Y=677m)
2D (Case4-2の 比較対象断面)	1.17	2.22	0.35

いて、Case2と同じ条件で円弧すべり安全率を算出したところ、表-4の結果となり、2D解析と3D解析に違いは見られなかった。

以上の結果から、今回の解析条件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、2D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。縦断方向の土質構成を十分把握した上で、場合によっては現地における水位モニタリングや、3D解析による照査が必要と考えられる。

(4) 堤内地被覆の影響 (Case4)

洪水開始後200時間経過時と230時間経過時点における Case4-1, 4-2の縦断方向の堤体内水位を図-11に示す。2D解析の結果は、Case4-1のY=500m地点の横断面で算出したものである。Case3と同様に、透水ゾーンが分布する付近で堤体内水位が上昇する傾向が見られたが、堤内地被覆の有無による顕著な違いは認められなかった。

基礎地盤の表層 (要素中心：G.L.-0.25m) における鉛直局所動水勾配分布を図-12に示す。堤内地被覆が存在することにより、全体に裏のり尻の局所動水勾配が大きくなる傾向が見られた。

洪水開始230時間後における堤体内水位最大地点において、Case2と同じ条件で円弧すべり安全率を算出したところ、表-5の結果となり、2D解析と3D解析に大きな違いは見られなかった。鉛直・水平局所動水勾配の最大

値は、表-5に示すとおり、堤内地被覆が存在することにより、鉛直方向は大きくなる傾向であった。また、Case3と同様に、2D解析と比較して水平局所動水勾配の値が1.7倍程度大きくなった。

4. まとめ

三次元浸透流解析により、堤防縦断方向における基礎地盤や堤体の土質構造が浸透に与える影響について検討した結果、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。

- ・堤体の透水係数が縦断方向に変化する場合、変化する境界付近において、堤体内水位が上昇する傾向が見られ、その傾向は河床勾配が大きいほど顕著に現れた。
- ・堤体内に透水性の低い旧堤が存在する場合、横断方向に見られる旧堤周辺の水位上昇が、縦断方向でも見られた。
- ・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る。

なり、従来の二次元解析による照査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。

- ・堤内地が難透水層で被覆されている場合、のり尻付近の局所動水勾配が大きくなる。

今回の検討範囲では、堤防縦断方向の土質構造は、堤体内水位（すべりに対する照査）よりも、局所動水勾配（パイピングに対する照査）に比較的大きな影響を与える結果となった。今後は、ドレーンや矢板等の各種堤防強化工法を導入することによる周辺地盤への影響等を、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) 高田尚秀，齋藤由紀子，森啓年，古本一司，小橋秀俊：内部構造を考慮した河川堤防の浸透特性に関する模型実験，第41回地盤工学研究発表会，pp.1265-1266，2006。

(2008. 4. 3受付)