

河川堤防の模型実験における排水による 盤膨れ対策の効果と変状発生に関する考察

ANALYSIS HEAVING WITH MODEL TEST
ABOUT HEAVE MASURE FOR RIVER LEVEE

吉田直人¹・平林学²・石原雅規³・秋場俊一³・佐々木哲也³

Naoto YOSHIDA, Manabu HIRABAYASHI, Masanori ISHIHARA,
Shunichi AKIBA, and Tetsuya SASAKI

¹正会員 前国立研究開発法人土木研究所 地質・地盤研究グループ土質・振動チーム
現：国土交通省関東地方整備局下館河川事務所水海道出張所
(〒303-0003 茨城県常総市水海道橋本町3526-1)

²正会員 元国立研究開発法人土木研究所 地質・地盤研究グループ土質・振動チーム
現：ライト工業株式会社 技術営業本部 設計部
(〒102-8236 東京都千代田区九段北4-2-35)

³正会員 国立研究開発法人土木研究所 地質・地盤研究グループ土質・振動チーム
(〒305-0035 茨城県つくば市南原1-6)

Sand boil and leak of water occur by rising of the foundation in the river levees. When this phenomenon is developed, there is a possibility that the levee does failure. Sheet pile is often established as the measure. But it can't s sometimes be applied from a cost and a point of building.

In this research, we experimented on the model test by something with different heaving measure by drainage.

As a result, we made it clear about the influential part of an attention point of the ground heaving measure by drainage.

Key Words : Levee, Model test, Seepage, Having, Uplift, Sheet pile with drain

1. はじめに

河川堤防において、河川水位が上昇すると基礎地盤透水層内の水圧が高まり、堤内地の被覆土層に盤膨れにより、漏水、噴砂が生じる場合がある。これらの現象が進行すると破堤の危険性が増すと考えられるため、盤膨れ等の現象に対しては、川表側で鋼矢板等によって透水層を遮水することが多い。ところが、透水層が厚い場合や巨石等を含む地盤条件においては、費用や施工性の面から適用が困難となる場合があることから、このような場合においても安価で効果的に対策ができる工法の開発が望まれている。

そこで筆者らは、川裏のり尻付近で透水層内の水圧を穏やかに抜く対策工として、堤内基盤排水対策の設計法

の確立を目指し、模型実験等を行ってきた¹⁾。ここでは、対策工として円柱縦ドレーンを堤内地側に設置した模型実験で、対策工の効果を検討するとともに、極端な水圧を与え、実験で対策工が機能しなかった場合において確認された盤膨れ現象について、堤体、基礎地盤への影響について調べた結果を報告する。

2. 模型実験の概要

模型実験の模式図を図-1に示す。コンクリートのピット(幅4m×高さ2.5m×奥行き8m)内に盤膨れしやすい構造となるように、基盤層の下部に透水層(厚さ:0.75m)を川砂で作製し、その上部に被覆土層(厚さ:0.5m)を関東ロームで作製した。使用した材料の粒度を

図-2に示す。

堤体は、堤防ののり尻付近を模擬し、被覆土層と同じ材料を用いて、高さ1.25m、のり勾配1:2.0の盛土を築堤した。円柱ドレーンは、のり尻の所定の位置、大きさと被覆土層をくり抜き、その中にジオグリッド（網目28mm×38mm）を型枠として、内部に単粒砕石（C40）を充填した。被覆土層下面に働く揚圧力を測定するため、透水層内に被覆土層下面から5cm下に間隙水圧計を配置した。また、盤膨れによる堤内地側の地表面の鉛直変位を測定するため、変位計を設置した。透水層内部には、給水管（VUφ200）を埋設し盛土部より立ち上げ、そこに水位を与えることで、透水層に水圧を与えられる構造とした。特に、対策工の能力を上回る外力に対する挙動の把握のため、模型の土槽以上に水圧を与えられるようにした。また、被覆土層上面の高さで水位を一週間以上与えて、十分に飽和させてから段階的に給水管の水位を上昇させた。給水管内の水位は、1時間毎に40cmまでは20cmで、それ以降は10cmずつ階段状に上昇させた。対策工は、実験ケースごとに、表-1に示すとおり、円柱縦型ドレーンの大きさ、設置位置、配置を変えている。

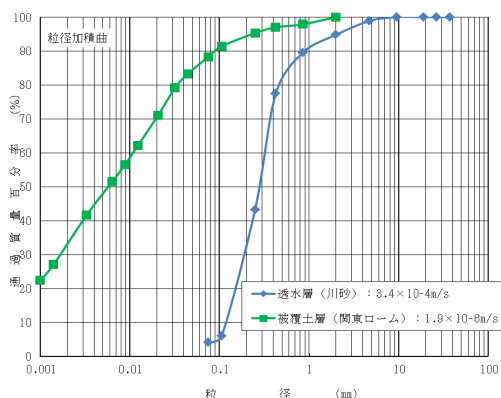


図-2 実験模型の材料

表-1 実験ケース

ケース名	円柱ドレーン径(mm)×箇所	設置位置
Case1	φ300×1	のり尻部中央
Case2	φ1000×1	のり尻部中央
Case3	φ300×1	のり尻部中央から2m堤内地側
Case4	φ300×2	のり尻部
Case5	φ140×3	のり尻部
Case6	φ100×1	のり尻部中央

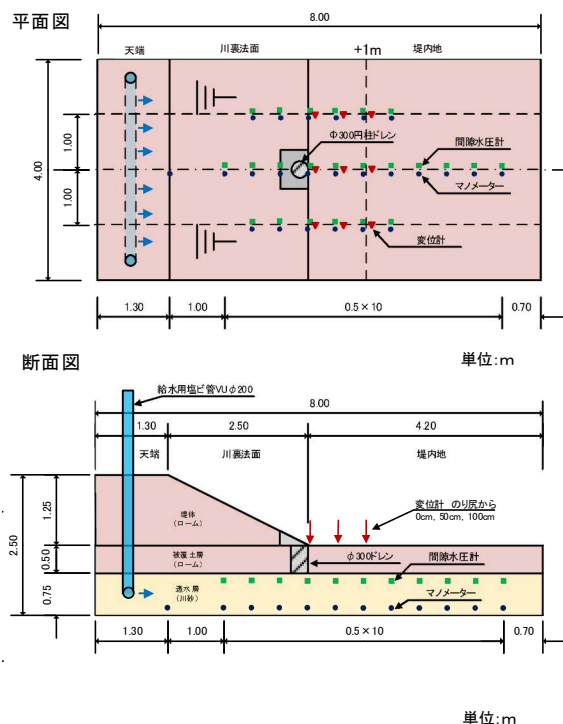


図-1 実験模型の標準図

3. 実験結果

(1) 圧力水頭、鉛直変位、排水量の計測結果

図-3に給水槽の水位とりのり尻から1mの範囲の被覆土層下面に働く圧力水頭の平均値の関係を示す。また、図-4に給水槽の水位とりのり尻から1mの範囲の被覆土層表面の鉛直変位の平均値を示す。なお、ここには過去に土木研究所において、同条件で実施した無対策での実験結果¹⁾を同時に記す。

無対策では、給水槽の水位の上昇に伴い圧力水頭の急激な上昇が見られ、給水槽の水位が0.7mを超えた地点で漏水が発生している。その後、給水槽の水位を上昇させるが、水位が1.1mの時点で漏水量が多いため、給水槽の水位が保てなくなり、実験を終了させている。

対策工を設置したCase1～6と無対策のケースののり尻から1mの範囲の圧力水頭と鉛直変位を比較すると、対策工の設置により、給水槽の水位上昇に伴い、圧力水頭の低減の効果が確認される。鉛直変位については、対策工の規模が大きいCase2と、対策工を短い間隔で設置したCase5は、無対策のケースに比べ大きな低減効果が見られるものの、その他の対策工設置したケースとはほとんど変わらない結果であった。

続いて、対策工の規模や設置位置の違いについて比較した結果を述べる。

まず、対策工をのり尻に設置し、規模を変えたCase1, 2, 6について比較すると、給水槽の水位上昇に伴

い、対策工の大きさに応じて圧力水頭が低減されているのが確認できる。

次に、対策工の規模が同じで、のり尻中央に対策工を設置したCase1と対策工をのり尻から離して設置したCase3を比較すると、対策工をのり尻から離して設置したCase3のほうが、圧力水頭が高い状態が続き、鉛直変位については同程度に増加するが、給水槽の水位が1.9mを超えると急激に増加する結果となった。対策工は、のり尻に近い位置に設置することで安定的に効果があると考えられる。

また、対策工の設置間隔について確認すると、後述するCase4を除いて、実験ケースの中で対策工を設置した間隔が一番短いCase5では、他の実験ケースと比較して対策工の規模が小さいものの、Case2に続いてのり尻から1mの範囲の平均の圧力水頭や鉛直変位を低く抑えられていることが確認された。

円柱縦型ドレーンの対策工について、対策工の規模や、設置位置、適切な設置間隔にすることで、より効果的な盤膨れ対策となると考えられる。

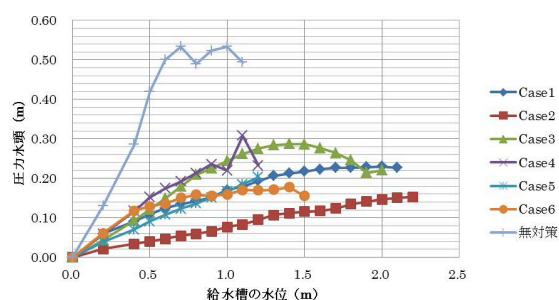


図-3 給水槽の水位とのり尻から1mの範囲の圧力水頭

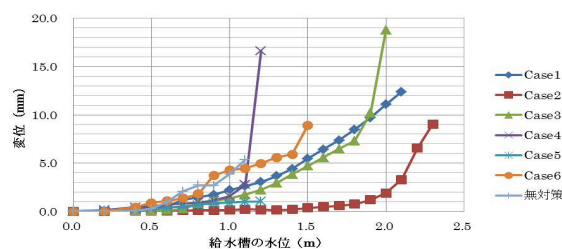


図-4 給水槽の水位とのり尻から1mの範囲の鉛直変位

(2) 対策工が機能しない場合の結果

Case4において、透水層の水位上昇に伴い、盤膨れ箇所からの噴砂、漏水が生じた。図-5にCase4で確認された盤膨れ、噴砂、漏水の発生過程の写真を示す。まず、ドレーンからの排水が濁り、排水に砂が混じりはじめてから、ドレーン表面に砂が堆積する状態となった。その後、のり尻から1.5m離れた位置（図-6）で地表面が膨れ上り、亀裂が生じるとともに、大量の噴砂、漏水が発生した。図-3によると、給水槽の水位が1.0mのとき圧力水頭が少し下がり、給水槽の水位を1.1mにしたとき圧力水

頭が急激に上昇していることから、給水槽の水位が1.0mから1.1mの間で、対策工に目詰まりが生じたものと推測される。また、給水槽の水位が低い段階から、圧力水頭が比較的に高い状態にあり、2つの対策工の片側から濁り水や、噴砂が生じていたことから、片側の対策工しか十分に機能せず、変状に至ったことが考えられる。

本実験ではドレーン周りに吸出し防止シートを設置していない。また、ドレーン材料を大きさを固定したジオグリッドで内に設置したため、地盤と対策工の間にわずかな隙間が生じていたことが考えられる。このため、給水槽の水位の上昇により、大きな水圧が作用した際に、被覆土層と透水層の境界で、大きい流速が生じ、透水層の土粒子が対策工脇から吸出しが生じたことが推定される。その後、実験の給水槽の水位が一時的に低下したことから、圧力水圧が減少することで、吸出しされていた土粒子がドレーン内に目詰まりして、対策工の排水機能を低下したと考えられる。続いて、対策工が十分に機能せず、被覆土層の盤膨れにより噴砂、漏水が生じている。

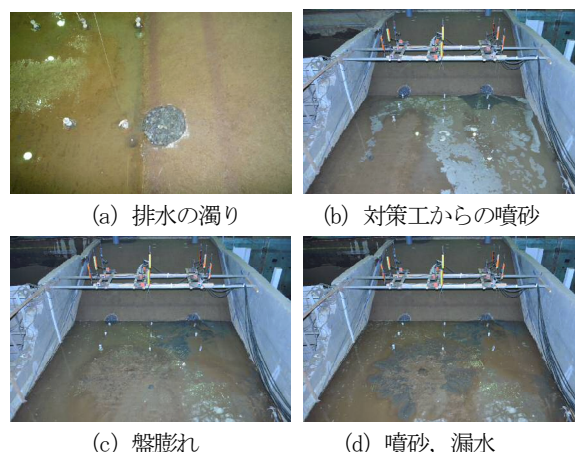


図-5 盤膨れ、噴砂、漏水の発生経過

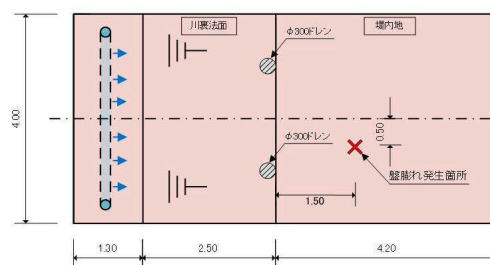


図-6 噴砂の発生箇所

また、図-7に実験後に、噴砂孔、ドレーン周りを掘削し、被覆土層内部を観察した状況を示す。調査は被覆土層内部に生じていた砂脈を透水層まで追跡しながら掘削して行った。噴砂孔周辺では、被覆土層のロームが漏水によって洗掘され、球形の塊になっていものが残留していた。これは、噴砂孔内で対流し、孔壁等にぶつり合うことで球形になったものと推測される。また、砂脈

は噴砂孔から鉛直方向に連続しているのではなく、被覆土層内を不規則に屈折していたことが確認された。

図-8にドレーンの内部に詰まっていた材料、噴砂について、粒度分析した結果を示す。ドレーン上部に比較的大きい粒径の材料のものが、ドレーン中央部、下部については、細粒分が多く詰まっているのが確認された。また、噴砂の粒度については、噴砂が生じた際に細粒分が流された事が考えられるが、0.1～0.4mmの間の粒度が卓越して多く確認された。なお、もう1方の対策工については、透水層の材料が対策工に入り込んでいる状況はほとんど確認されなかった。



(a) 噴砂孔表面の掘削断面 (b) 噴砂孔底部の掘削断面



(c) 実験後のドレーン (d) ドレーン断面

図-7 ドレーン、噴砂孔の実験後の状況

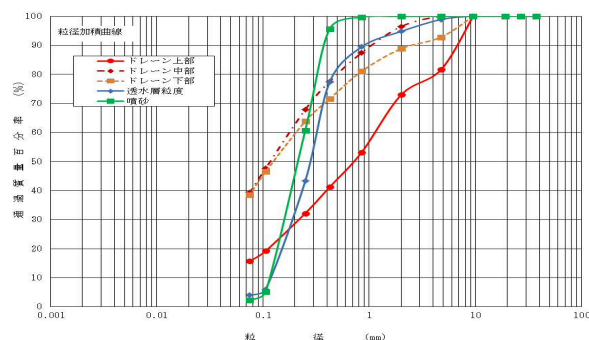


図-8 ドレーン内部、噴砂の粒度

(3) 盤膨れ、噴砂、漏水による堤体、基礎地盤への影響

Case4において、盤膨れ、噴砂、漏水に至った後に模型表面の水準測量を実施し、実験模型の変状の確認を行った。実験前後の鉛直変位量の分布を図-9に示す。盤膨れ、噴砂、漏水が発生した箇所の周りでは、隆起した状況になっている。のり尻付近は、大きな変位の変化はない。続いて、堤体中央部付近が沈下していることが観測された。堤体土、被覆土層を撤去し、基礎地盤の状況(図-10)を観察すると、給水槽を設置した箇所から、噴砂が生じた対策工に続いて透水層の材料の細かい部分

が吸出され、給水槽からの水みちが確認された。水みちには粒子の大きい材料が目立った状態で残っており、土層強度検査棒²⁾で貫入すると、貫入抵抗がゆるい状態であった。粒子が大きく、ゆるんだ状態が平面的に連続している状態が確認されたので、これが水みちであると推測され、概ね水みちが形成されている直上に堤体が沈下している傾向が確認された。

本実験ケースでは、堤体の陥没までには至らなかったが、盤膨れによる噴砂、漏水によって、基礎地盤の水みちの形成や、それに伴って堤体が沈下することが確認された。

この結果より、対策工には吸出し防止シート等の透水層の土粒子を動かさない対策が必要で、対策工として地盤に密着させることが重要であると言える。対策工を地盤に密着させるには、例えば、円柱縦型ドレーンではなく、トレンチ型での設置や連続配置などが有効であると考えられる。

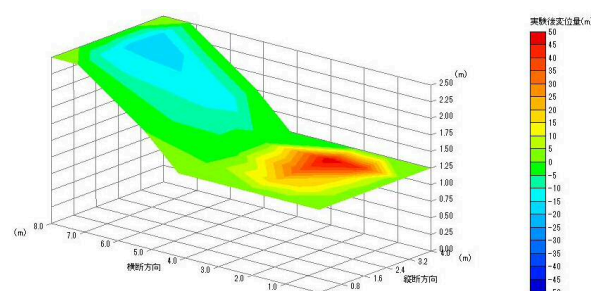


図-9 模型表面の測量結果 (Case4)

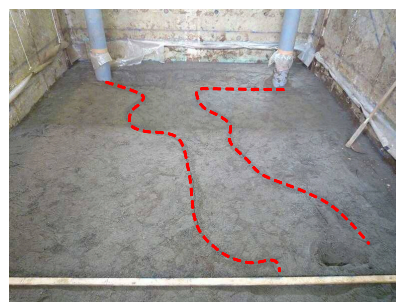


図-10 噴砂、漏水後の基礎地盤の状況 (水みちの範囲)

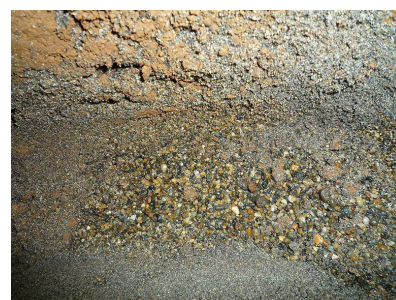


図-11 水みちとなった透水層の表面の状況

3. 三次元飽和・不飽和浸透流解析による再現,

効果の検討

実験を行った各ケースについて三次元のモデル(図-12)を作成し、飽和・不飽和非定常三次元浸透流解析を行った。解析パラメーターは、土質試験結果と、「河川堤防の構造検討の手引き」³⁾にしたがって設定した(表-2)。解析結果の1部を、図-13に示す。また、ドレーン(碎石)と被覆土層(ローム)の透水係数を、変化させ解析を行うことで、実験で計測された圧力水頭を再現できる各透水係数を推定した。解析を行った碎石と被覆土層の透水係数の組み合わせを図-14にプロットし、解析値と計測値が比較的近い値となった組み合わせを○印で示した。

解析結果の流速ベクトルによると、対策工をのり尻から離れたCase3と実験ケースの中で対策工の規模が小さいCase6については、対策工付近の流速ベクトルの集まりが少なく、他のケースに比べて対策工の効果が小さい傾向が確認される。

被覆土層(ローム)の室内試験値は、透水係数が $1.9 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ であるのに対し、整合した透水係数は全体的に10倍程度大きい値となった。碎石(ドレーン)の透水係数は、透水係数が $1.0 \times 10^{-3} \text{ m/s} \sim 1.0 \times 10^{-0} \text{ m/s}$ まで幅広くになっている。

被覆土層の透水係数が室内試験値より大きい値で整合しているのは、模型製作時に行う被覆土層(ローム)転圧の仕上がり状態や土槽壁面からのルーフィングによる漏水によって透水層内の圧力が低下し、その結果が被覆土層の透水性に影響している可能性がある。比較的低い水位でドレーンからの噴砂があり、盤膨れを起こしたCase4の被覆土層の透水係数は、一番小さい値となっている。Case6の実験では、水位上昇に伴い被覆土層表面から漏水がところどころ確認された。このCase6について解析値と計測値が整合した被覆土層の透水係数は一番大きくなっている。解析値と計測値が整合した被覆土層の透水係数の違いは、被覆土層の状態の違いが表れている可能性があると考えられる。

碎石(ドレーン)の透水係数について、ドレーンからの排水量が多く、被覆土層下面に働く圧力が低かったCase2の碎石(ドレーン)の透水係数は透水係数 $k_s = 1.0 \times 10^{-0} \text{ m/s}$ と一番大きい値となった。ドレーンが目詰まりをおこし盤膨れが発生したCase4、被覆土層表面からの漏水が多かったCase6は透水係数 $k_s = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 程度の比較的小さい値となっている。被覆土層の透水係数が小さいCase6は透水層の圧力を抜く対策工としての機能を十分発揮していないため、もしくは排水能力が限界に達しているため解析値と計測値が整合した透水係数が比較的小さい値となった可能性が考えられる。

三次元の浸透流解析では、解析結果と計測値を碎石と被覆土層の透水係数を変化させることで概ね整合させることができた。なお、既往の検討^{4, 5)}において、二次元の浸透流解析にて検証しているが、解析値を透水係数で調整しても実験値と合わせる事が難しい結果が得られている。三次元浸透流解析は、堤防縦断方向に離散配置された排水による盤膨れ対策工の円柱縦型ドレーンの効果を検証する場合など有効だといえる。また、解析値と計測値が整合した各透水係数から被覆土層およびドレーンの状態を推定することができた。

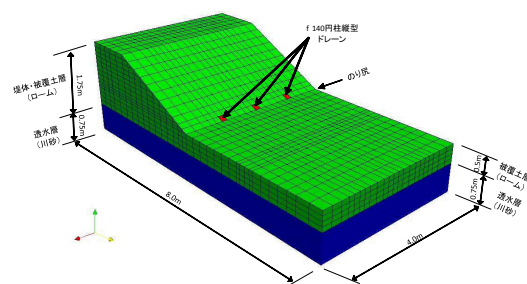


図-12 三次元の解析モデル (Case5)

表-2 解析パラメーター一覧表

	飽和透水係数 (m/sec) 試験値	有効間隙率 手引き参照	比貯留係数 (1/m) 手引き参照	不飽和特性
堤体・被覆土層 (ローム)	変数	0.1	1.0×10^{-3}	手引き 図-2.1.2
透水層 (川砂)	3.4×10^{-4}	0.2	1.0×10^{-4}	
ドレーン (碎石)	変数	0.2	1.0×10^{-4}	

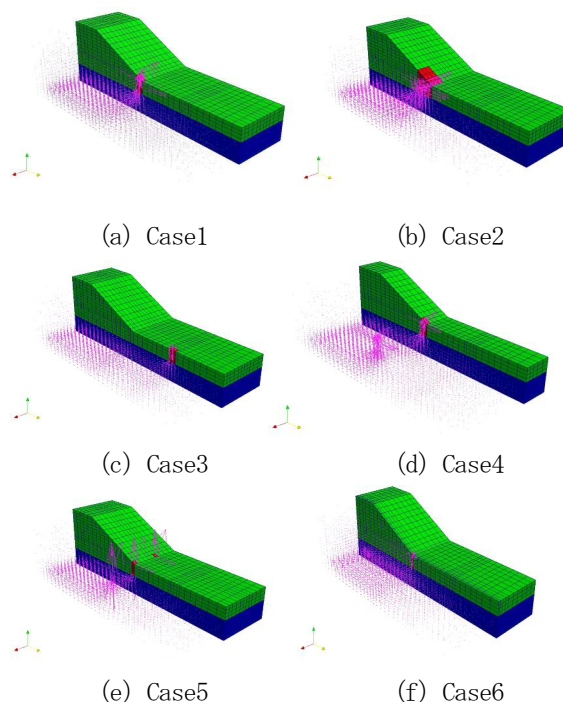


図-13 解析結果の流速ベクトル：水位1m時点
(半断面鳥瞰図)

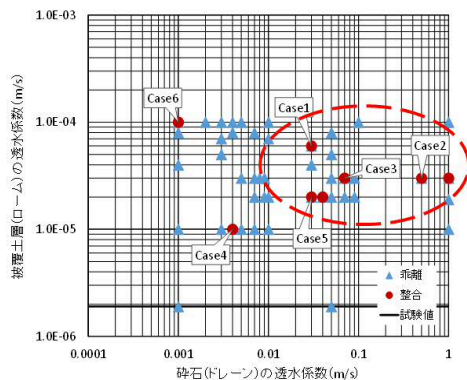


図-14 解析結果

4. まとめ

河川堤防の盤膨れ対策として、透水層内の水圧を穏やかに抜くことで透水層内の水圧を低下させる堤内基盤対策のうち、堤防縦断方向に離散配置させた円柱縦型ドレーンについて、模型実験を行い対策工の効果の検証や、盤膨れにより噴砂、漏水が生じた際の堤体への影響について得られた結果を以下に示す。

- ・基盤排水工法として円柱縦型ドレーンをのり尻に設置することは、被覆土層上面に生じる圧力水頭、鉛直変位を無対策と比較して抑えることができる。
- ・対策工は、規模を大きくすることや、のり尻付近に設置すること、適切な間隔で設置することで特に効果が得られる。
- ・本実験において、対策工が十分に機能しない場合が確認され、対策工脇から透水層の材料の吸出しが要因であったことから、地盤と対策工を密着させ、適切な吸出し防止策が必要である。

- ・被覆土層の盤膨れにより、噴砂、漏水が発生した影響により、透水層と被覆土層の境界に水みちが発生し、堤体が沈下することが確認された。
- ・模型実験のように対策工を離散配置として場合、三次元浸透流解析により再現できる、効果の検証が可能であった。

本研究は、実験土槽内で行いのり尻付近を切り出した模型として、極端な水圧を与えた結果であるが、地盤条件などによって、対策工付近に局所的な水圧、流速が働き目詰まり、吸出される可能性も考えられる。実際の現場において適用する場合は、上記の結果を踏まえ対策工の目詰まりの状態など適切にモニタリング等で管理する必要がある。

参考文献

- 1) 佐々木哲也・増山博之・齋藤由紀子・石原雅規・森啓年・平林学・吉田直人：大型模型を使用した河川堤防の盤膨れ対策に関する研究，土木研究所資料，第4267号，平成26年2月
- 2) 佐々木靖人：土層強度検査棒による斜面の土層調査マニュアル（案），土木研究所資料，第4176号，平成22年7月
- 3) 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（改訂版），平成24年2月。
- 4) 平林学，吉田直人，石原雅規，佐々木哲也：円柱縦ドレーンを使用した堤内基盤排水溝法に関する模型実験の再現解析，第15回地盤工学シンポジウム，P14-2，
- 5) 平林学，吉田直人，石原雅規，佐々木哲也：堤内基盤排水工を離散配置とした盤膨れ対策の効果検討のための模型実験，第50回地盤工学研究発表会，pp65-66，2015年9月

(2016. 4. 4受付)