

河川堤防の盤膨れ・揚圧力対策に関する模型実験

増山博之* 齋藤由紀子** 森 啓年*** 佐々木哲也****

1. はじめに

洪水時に河川の水位が上昇すると、図-1に示すように、堤防周辺の地盤内の水圧（揚圧力）が高まり、地盤が膨らむように変形（盤膨れ）し、地盤にガマと呼ばれる穴が開くなど、堤防の安全性に重大な影響を与えることがある。こうした堤防付近で発生する盤膨れは、堤防の基礎地盤の表面が薄い粘性土で覆われている場所（表層粘性土層）で問題となることが多い。

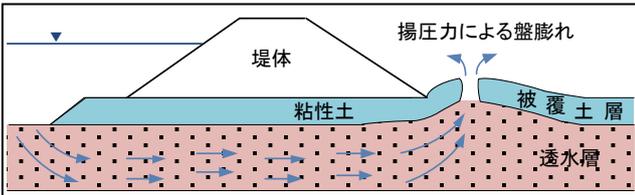


図-1 揚圧力による盤膨れ被害の横断イメージ

盤膨れへの対策には、遮水矢板等を川表側の基礎地盤に施工する川表遮水工法や難透水性材料を高水敷に施工するブランケット工法が用いられる。しかし、川表遮水工法は透水層が深い場合や転石・巨礫が含まれる場合はコストや施工性に、ブランケット工法は幅を十分に取ることのできる高水敷が必要であり設置性に課題が残る。

本研究では、それらの課題に対する解法として堤防の川裏側で揚圧力を緩やかに抜く方策に着眼した。川裏側で揚圧力を軽減する対策やその効果について検証した既往の研究事例は少なく、設計法も定められていない。このため、研究の着手に際して、まず、考えられる対策案を整理した。

図-2に排水機能付き矢板工法の横断イメージを示す。排水機能付き矢板は、鋼矢板に液状化対策として過剰間隙水圧を消散させるための排水部材が付帯しているものである¹⁾。

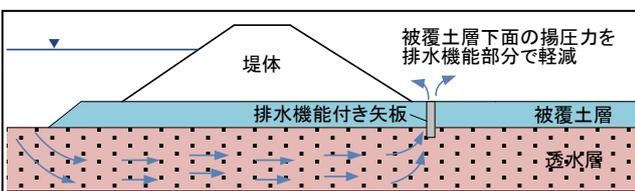


図-2 排水機能付き矢板工法の横断イメージ

図-3, 4に透水トレンチ工法の横断イメージを示す。透水トレンチは地盤の深さ方向に設置する碎石層であり²⁾、図-3は堤体外に設置したもの、図-4は堤体のり尻直下に設置したものである。

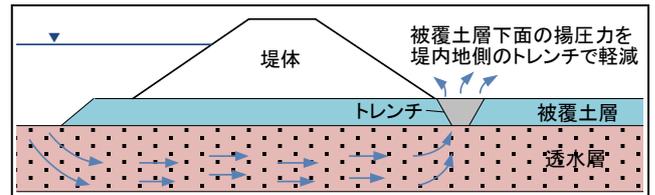


図-3 透水トレンチ工法（堤体外）の横断イメージ

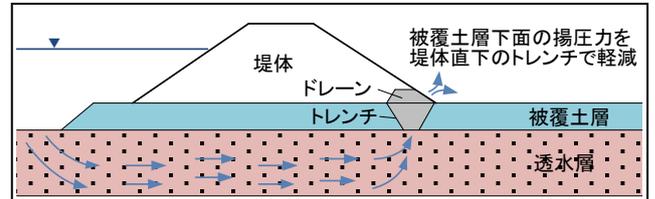


図-4 透水トレンチ工法(堤体のり尻直下)の横断イメージ

図-2～図-4のいずれの工法も薄い難透水性の被覆土層が堆積している箇所に、被覆土層を貫通する形で対策工を施工し、洪水時に被覆土層下面に生じる揚圧力を地上へ緩やかに抜くことで、揚圧力対策としての効果を期待するものである。

本研究では、これらの工法の技術の適用性を確認するために、中型模型実験を実施し、その結果の浸透流解析による再現を行った。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

実験は土木研究所の浸透実験施設内の中型模型土槽を使用して行った。模型形状を写真-1に示す。



写真-1 模型形状（浸透実験棟の2階部分から撮影）

実験の土槽内に基礎地盤と堤体（天端と川裏のり面）の模型を作製し、実験では給水槽から水位を与えて、水圧や堤内地盤の変形状況を確認した。

表-1に実験ケース一覧を示す。実験は無対策を1ケース、対策を3ケース（排水機能付き矢板を設置したケース、透水トレンチを堤体外・堤体のり尻直下に設置したケース）の計4ケース行った。表-2に使用材料の土質特性、図-5に使用材料の粒径加積曲線をそれぞれ示す。

表-1 実験ケース一覧

実験ケース	対策内容
1	無対策
2	排水機能付き矢板
3	透水トレンチ（堤体外）
4	透水トレンチ（堤体のり尻直下）

表-2 使用材料の土質特性

土質材料		ローム	川砂
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.654	2.692
粒度構成	礫分 (%)	5.0	11.4
	砂分 (%)	11.7	87.3
	シルト・粘土分 (%)	86.3	1.3
締固め特性 (繰返し法(A-a))	ρ_{dmax} (g/cm ³)	0.973	1.739
	w_{opt} (%)	56.0	15.4

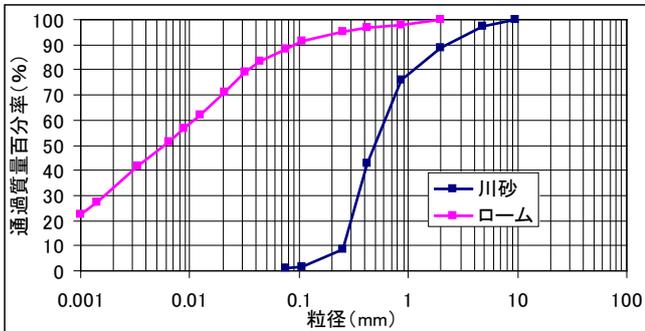


図-5 使用材料の粒径加積曲線

2.2 実験模型

(1) ケース1：無対策

基礎地盤は透水層の上に薄い難透水性の被覆土層が堆積する盤膨れが生じやすい土層構成とした。透水層は川砂（透水係数 $k_s=3.4 \times 10^{-2}$ cm/s、湿潤密度 $\rho_t=1.795$ g/cm³）とし、被覆土層には層厚50cmのローム（透水係数 $k_s=1.9 \times 10^{-4}$ cm/s、湿潤密度 $\rho_t=1.431$ g/cm³）を設けた。堤体は堤防高1.25mとした。堤体および基礎地盤の締固め度はともに層厚15cm毎の盛り立て時に $D_c=90\%$ となるように作製した。

ケース1の模型形状は、対策工（排水機能付き矢板、透水トレンチ）がない点を除き、図-6,7,11～13に示す対策工のケースと同様である。

(2) ケース2：排水機能付き矢板

ケース2の模型横断・平面形状および計測項目・位置を図-6,7に示す。変位計はのり尻付近に設置、間隙水圧計とマンノメーターは揚圧力対策として最も対策効果が少ないと考えられる排水部材間の中心位置かつ模型全体に配置した。

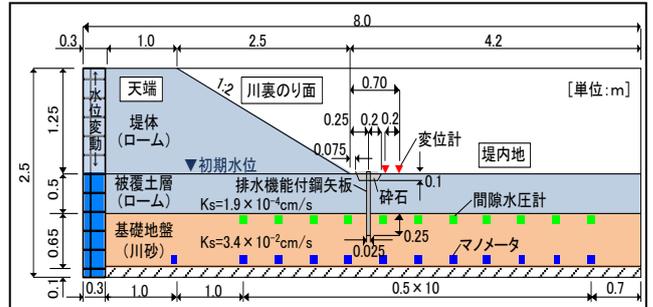


図-6 ケース2（排水機能付き矢板）の横断形状

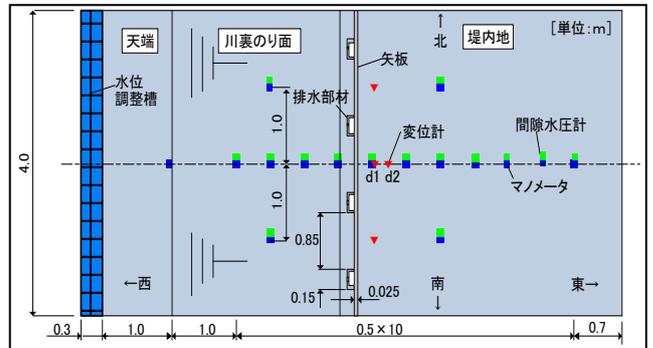


図-7 ケース2（排水機能付き矢板）の平面形状

排水機能付き矢板の平面形は図-8に示すように実際には鋼矢板の台形が波形に連続するが、実験模型では簡便的に直線状に模擬した。排水部材の設置間隔は、矢板1枚の幅を500mm（VL型相当）と想定して1mに1箇所設置した。排水部材の規格、フィルターの開孔率は市場に存在する製品を参考に、平面上の空洞面積を100cm²/部材、開口率を矢板の延長方向の平均で2%として作製した。また、排水部材への土粒子の流入を防止するためのフィルターには吸出防止材を使用した。吸出防止材は透水係数 $k_s=1.5 \times 10^{-1}$ cm/sの材料を使用した。

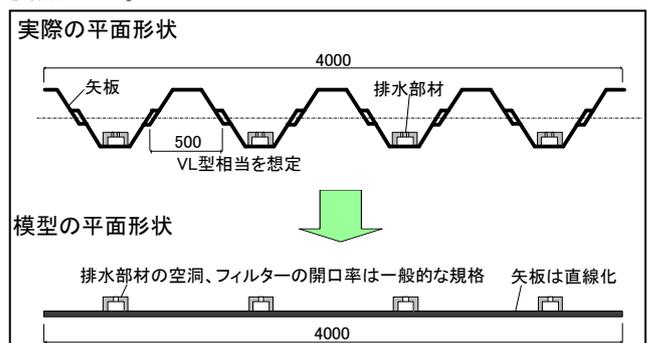


図-8 排水機能付き矢板の模型化（平面形状）

フィルターは実際には図-9に示すとおり小規模な円形が格子状に配列されるが、実験模型では、スリット形式として作製し、開口面積を合わせた。図-10に排水部材の横断形状を、写真-2に作製した排水機能付き矢板の模型の写真をそれぞれ示す。

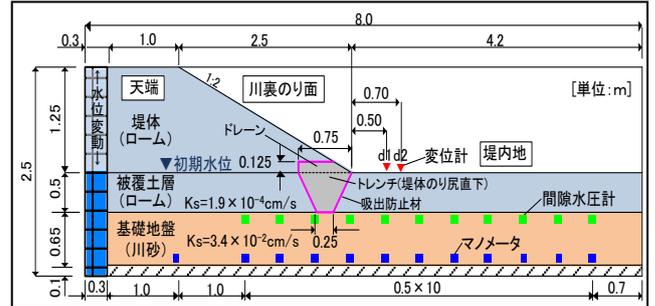
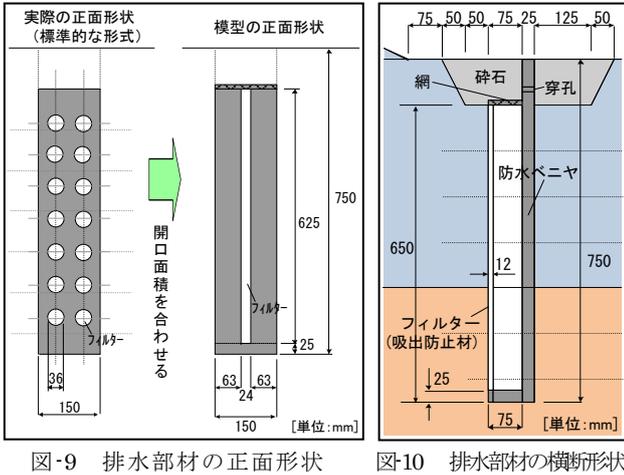


図-12 ケース4 (透水トレンチ(堤体のり尻直下)) の横断形状

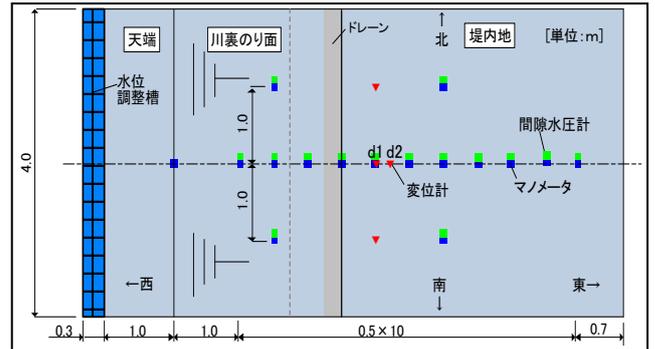


図-13 ケース4 (透水トレンチ(堤体のり尻直下)) の平面形状

透水トレンチ (堤体のり尻直下) の設置状況を写真-3に示す。堤体のり尻直下の透水トレンチは、トレンチ・ドレーンの全体に吸出防止材を覆う構造とした。



写真-2 実験に使用した排水機能付き矢板の模型

(3) ケース3, 4: 透水トレンチ (堤体外、堤体のり尻直下)

ケース3, 4の模型横断・平面形状および計測項目・位置を図-11~図-13に示す。対策工のトレンチには、碎石 (単粒度碎石4号) を使用するとともに、土粒子との境界には吸出防止材 (透水係数 $k_s=1.5 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ の材料) を設けた。トレンチは堤体外、堤体のり尻直下のそれぞれのり尻位置に縦断連続的に設置した。

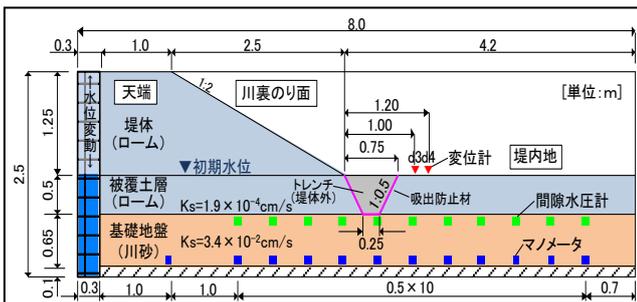


図-11 ケース3 (透水トレンチ(堤体外)) の横断形状

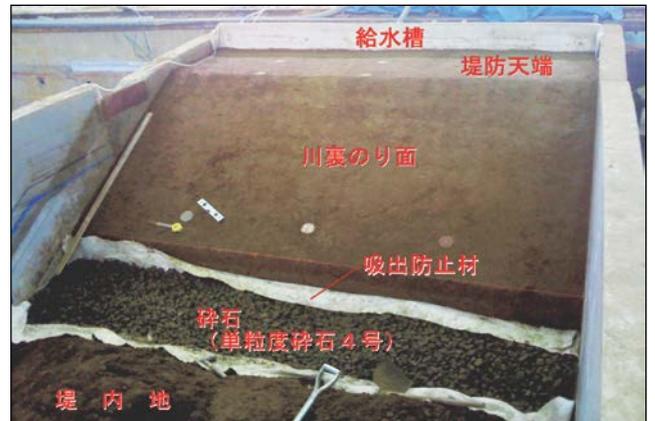


写真-3 ケース4 (透水トレンチ(堤体のり尻直下)) の設置状況

2.3 実験条件

初期条件として、実験前に水位調節槽の水位を被覆土層上面で固定し、48時間以上通水し、基礎地盤全体を飽和させた。

基礎地盤の飽和後に、水位調節槽の水位を図-14に示すように20cmや10cm間隔に概ね1時間毎に段階的に上昇させた。各段階において、地盤の変形状況を目視確認するとともに水位上昇時の実験中の間隙水圧、変位の計測を行った。なお、堤内地側に湛まった水は水中ポンプで随時排水し、その水位が地表面に保持されるようにした。

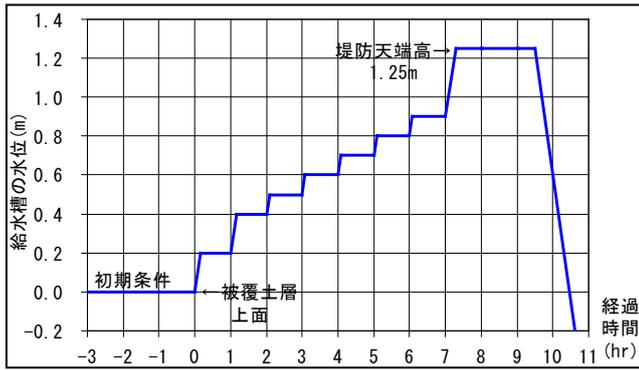


図-14 外力条件

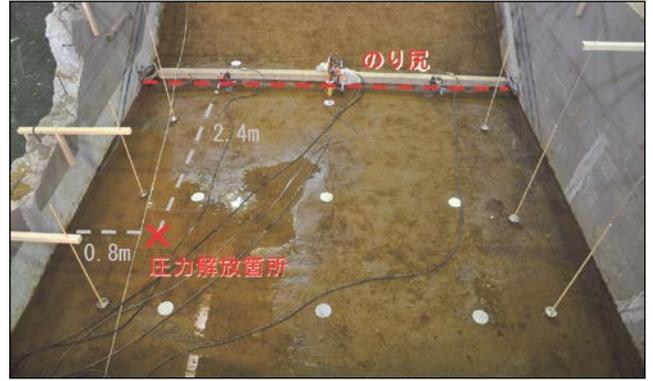


写真-4 盤膨れの状況（無対策：5時間32分後）

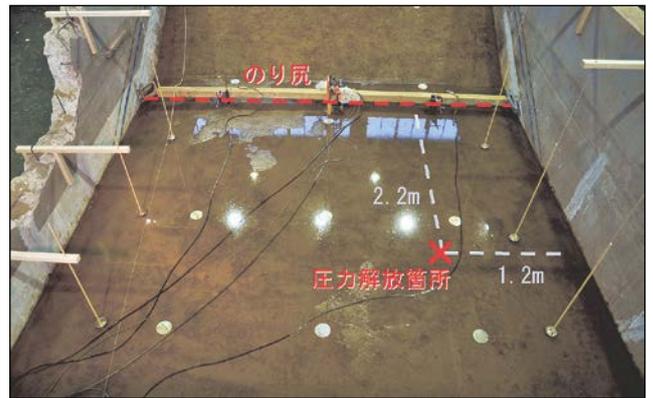


写真-5 盤膨れの状況（無対策：8時間58分後）

3. 実験結果

3.1 のり尻変位と盤膨れ・圧力解放の関係

各ケースののり尻付近の鉛直変位量を図-15、図-16に示す。ケース1の無対策では、鉛直変位量が概ね3mmに達した5時間32分後（給水槽水位：被覆土層上面+80cm）と鉛直変位量が概ね5mmを上回った8時間58分後の2回、模型地盤の写真-4および写真-5の×に示す位置から漏水が発生し、揚圧力の解放が生じた。

一方、ケース2（排水機能付き矢板）やケース3, 4（透水トレンチ）では、排水部材やトレンチが揚圧力を解放している効果により、鉛直変位量が最大1mm程度と小さく、無対策で見られたような地盤の急激な圧力解放は発生しなかった。

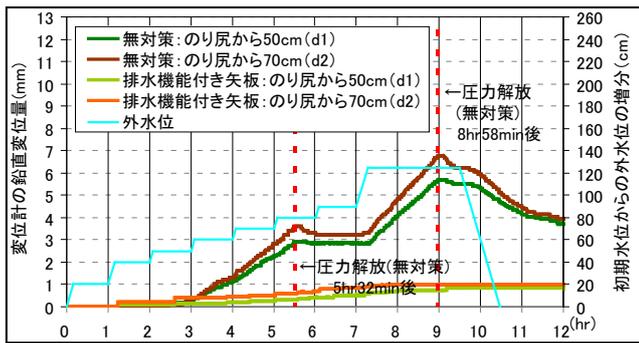


図-15 変位量の時間変化（ケース1, 2）

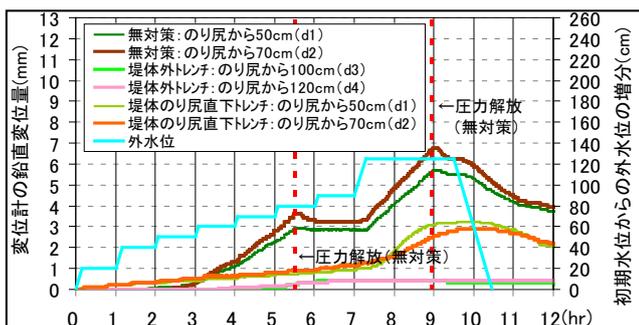


図-16 変位量の時間変化（ケース1, 3, 4）

3.2 圧力解放時におけるのり尻付近の圧力水頭

各ケースののり尻部・被覆土層下面における初期値からの圧力水頭の増分（以下、圧力水頭増分）の時間変化を図-17に示す。図より、ケース1（無対策）において1回目に圧力解放が生じた5時間32分後の圧力水頭増分は41.4cmであった。

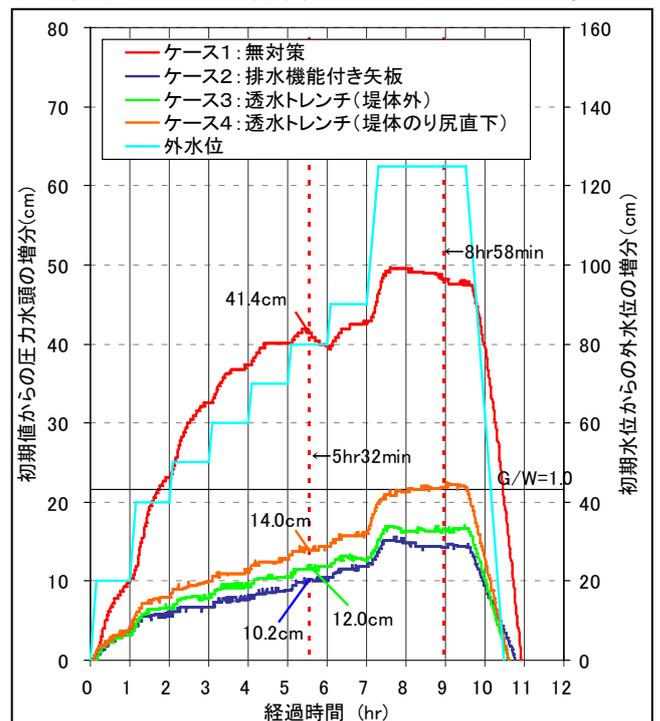


図-17 のり尻部・被覆土層下面の圧力水頭増分の時間変化

一方、ケース2の5時間32分後の圧力水頭増分は10.2cmであり、同じ時間の圧力水頭増分が7割以上低減されていることが分かる。また、同じ時間のケース3、4の圧力水頭増分については、ケース3で12.0cm、ケース4で14.0cmであり、無対策と比較してそれぞれ7割程度低減、6割以上低減されている。

図-18～図-21に各ケースの5時間32分後の圧力水頭増分の平面分布を示す。図より、川裏のり尻位置での圧力水頭の増分はケース1で40～45cm程度であるのに対して、ケース2では10cm以下、ケース3、4では10～15cmとなっており、揚圧力を大きく低減している。また、川裏のり尻から3.5m離れた位置（土槽端部付近）の圧力水頭増分についても無対策が35cm程度にあるのに対して、ケース2、3では10cm以下、ケース4では15cm以下となっており、のり尻付近と同じように堤内地側の揚圧力を低減していることが分かる。

これらケース1とケース2、3、4の圧力水頭増分の比較により、各対策工の揚圧力対策としての効果が確認された。

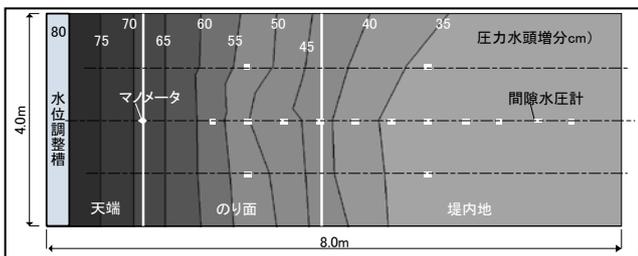


図-18 5時間32分後の被覆土層下面の圧力水頭増分の平面分布（ケース1：無対策）

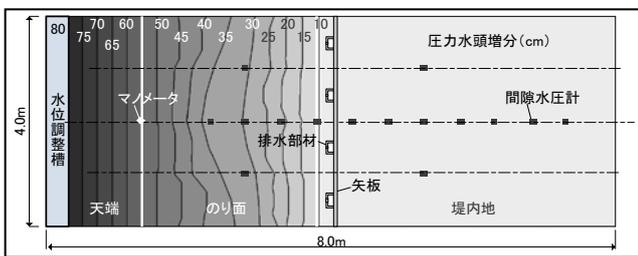


図-19 5時間32分後の被覆土層下面の圧力水頭増分の平面分布（ケース2：排水機能付き矢板）

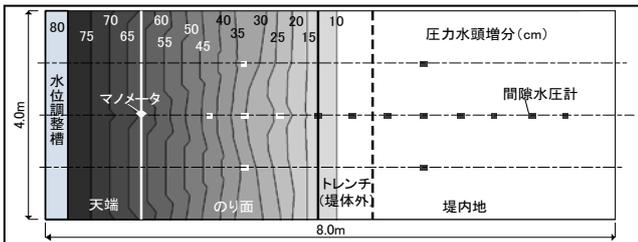


図-20 5時間32分後の被覆土層下面の圧力水頭増分の平面分布（ケース3：透水トレンチ（堤体外））

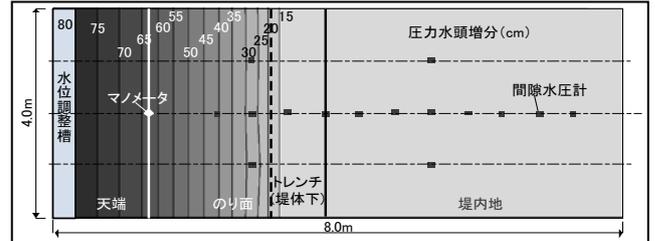


図-21 5時間32分後の被覆土層下面の圧力水頭増分の平面分布（ケース4：透水トレンチ（堤体のり尻直下））

3.3 解析による対策工の透水係数の同定

実験における排水機能付き矢板の排水部材および透水トレンチの透水係数を推定するために、実験時と同様の初期条件・境界条件・外力条件を用いて二次元の飽和・不飽和非定常浸透流解析を行った。土の不飽和特性は、「河川堤防の構造検討の手引き」³⁾（以下、「手引き」）の砂質土・粘性土の不飽和特性に基づき設定した。

解析におけるローム・川砂の透水係数は、室内透水試験結果を用いた。無対策のケース1について、図-22のとおり、被覆土層下面の圧力水頭を解析値と実験値で比較したところ、解析で再現が可能な変形の生じない外力条件の間（0～3時間程度：図-15より変位が殆ど発生していない時間範囲）は、解析値と実験値がほぼ一致しており、ローム・川砂の透水係数の設定は概ね妥当であることを確認した。

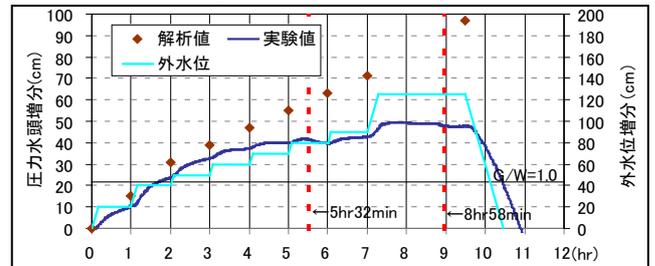


図-22 のり尻部・被覆土層下面の圧力水頭増分の解析値と実験値の比較（ケース1：無対策）

ケース2（排水機能付き矢板）の解析モデル図を図-23に示す。透水係数は、矢板を $ks=1.25 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ （手引きに基づく厚さ12.5cmの換算値）、砕石は $ks=1.0 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ とした。排水部材部分についてはフィルターと空洞部分を一括りに厚さ10cmと設定した。

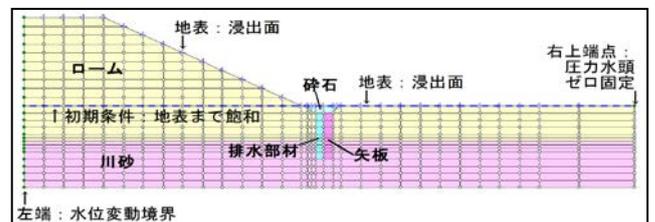


図-23 解析モデル図（ケース2：排水機能付き矢板）

排水機能付き矢板の排水部材および透水トレンチの透水係数はパラメトリック・スタディにより求めた。その結果を図-24～図-26に示す。図-24より、排水機能付き矢板の排水部材の透水係数(二次元換算)は、 $ks=1.0 \times 10^0 \text{cm/sec}$ 程度で解析値と実験値の圧力水頭増分が概ね一致していることが分かる。また、図-25,26からは、透水トレンチの透水係数が堤体外、堤体のり尻直下ともに、 $ks=1.0 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 程度で解析値が実験値と概ね一致していることが確認できる。これらより、対策工の透水係数は、排水機能付き矢板の排水部材(二次元換算)の透水係数が $ks=1.0 \times 10^0 \text{cm/sec}$ 程度、透水トレンチの透水係数が $ks=1.0 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 程度と推定された。

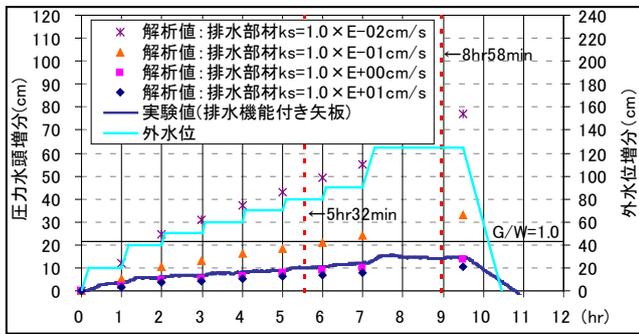


図-24 のり尻部・被覆土層下面の圧力水頭増分の解析値と実験値の比較 (ケース2: 排水機能付き矢板)

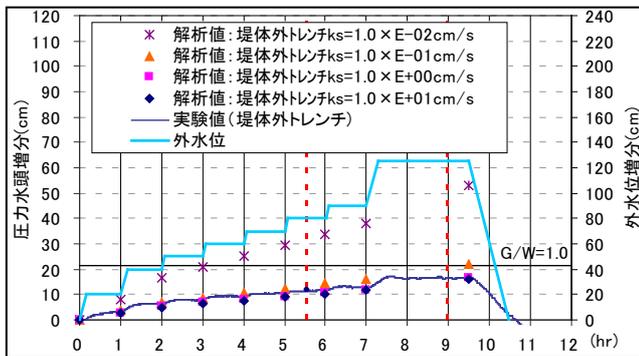


図-25 のり尻部・被覆土層下面の圧力水頭増分の解析値と実験値の比較 (ケース3: 透水トレンチ(堤体外))

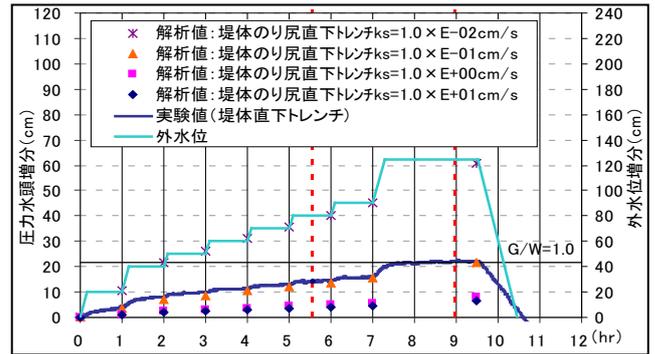


図-26 のり尻部・被覆土層下面の圧力水頭増分の解析値と実験値の比較 (ケース4: 透水トレンチ(堤体のり尻直下))

4. まとめ

河川堤防の揚圧力対策として、排水機能付き矢板、透水トレンチ(堤体外、堤体のり尻直下)の効果を模型実験により検証した。堤防高さ約1.3mの模型実験の結果、のり尻部の揚圧力は排水機能付き矢板により無対策時の7割以上低減、透水トレンチにより無対策時の6割以上低減した。また、実験結果を飽和・不飽和非定常浸透流解析により再現し、実験で使用した排水機能付き矢板の排水部材の透水係数を二次元換算で $ks=1.0 \times 10^0 \text{cm/sec}$ 程度、透水トレンチの透水係数を $ks=1.0 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 程度と推定した。

これらの結果から、排水機能付き矢板および透水トレンチは揚圧力対策として利用可能であることが示唆された。今後は、実規模堤防への適用性、設計方法の検討等を実施したい。

参考文献

- 1) 土木研究所共同研究報告書186号、『液状化対策工法設計・施工マニュアル(案)』、平成11年3月
- 2) US Army Corps of Engineers: Design and Construction of Levees, pp5-3 5-5, April, 2000
- 3) (財)国土技術研究センター、『河川堤防の構造検討の手引き』平成14年7月

増山博之*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 交流研究員
Hiroyuki MASUYAMA

齋藤由紀子**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 主任研究員
Yukiko SAITO

森 啓年***



国土交通省河川局治水課(前 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム主任研究員) 博士(工学)
Dr. Hiroto Mori

佐々木哲也****



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 上席研究員
Tetsuya SASAKI