

# 河川堤防のパイピング発生時の 水位上昇速度と基礎地盤表層の変形に関する模型実験

## MODEL EXPERIMENTS FOR DEFORMATION OF FOUNDATION GROUND SURFACE BY THE SPEED OF WATER LEVEL RISE

疋田彩華<sup>1</sup>・杉田哲哉<sup>2</sup>・倉田大輔<sup>3</sup>・森啓年<sup>4</sup>・下川大介<sup>3</sup>  
Ayaka HIKITA, Tetsuya SUGITA, Daisuke KURATA, Hirotohi MORI and Daisuke SHIMOKAWA

<sup>1</sup>山口大学大学院創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

<sup>2</sup>前山口大学工学部 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

<sup>3</sup>正会員 山口大学大学院創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

<sup>4</sup>正会員 博士 (工学) 山口大学大学院創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

Model experiments of a river levee were conducted to see the surface deformation of the foundation ground by piping. The experiment condition was fixed by the difference in the speed of water level rise and the soil layer of the foundation ground. The tendency was observed that the smaller deformation was observed in the cases which the speed is comparatively low and the permeability of the soil layers was high. These results insist the possibility to find the weak section of river levee by monitoring the surface layer displacement.

**Key Words :** river levee, piping, model experiment, surface deformation

## 1. 序論

### (1) 研究目的

平成24年の矢部川など、河川水位上昇に伴い透水性基礎地盤を有する河川堤防で、堤内地側でパイピングやそれに伴う堤体のすべり等の被災が発生している。そのいずれもがボーリング等の地盤調査では把握が困難な局所的な弱点箇所起因して被災し、その把握が喫緊の課題となっている。

そこで、本研究は、パイピングの予兆となる出水時の基礎地盤表層変位を縦断方向に観測し、弱点箇所を抽出する技術の確立を目指している。のり尻の盤ぶくれ等の進行性破壊の前兆を観測し、パイピングの危険個所の絞り込みの活用や迅速な水防活動の実現に繋がる可能性がある。そこで、本研究は、パイピングの進行過程に応じた基礎地盤の表層変位を、外力や土層構造が異なる模型実験で定量的に把握し、併せてパイピングの発生指標となるGWを湛水の影響も加え考察したものである。

### (2) 既往研究

齊藤・前田らは、堤防模型を用いて、基礎地盤の土層

構造の違いによる堤防の安定性の研究を行っている。その結果、単一の透水層が分布する単一構造より、透水層の上位に透水性の低い透水層が被覆する複層構造の方が噴砂やパイピングが発生しやすいことが把握された<sup>1)</sup>。

その成果を踏まえ、倉田・笹岡らは、透水性基礎地盤における河川堤防の進行性破壊における前兆を捉えるため、堤防模型で堤内地側の基礎地盤の変位量を計測している<sup>2)</sup>。その結果、0.06m層厚の珪砂6号の単一構造透水性基礎地盤では基礎地盤に変位は発生せず、のり尻のすべりによって大変形に至り、一方、複層構造の透水性基礎地盤では、堤内地盤の広範囲で盤ぶくれが確認されたのち、噴砂が発生して大変形に至ることを確認している。

更に、倉田<sup>3)</sup>らは、被覆土層の透水性が低いと基礎地盤の表層変位は大きく、粘性土であると、横断面において、堤内地盤中央部を頂点にして基礎地盤が山なりに全体的に変形することを確認している。

しかし、これまで水位上昇速度の影響を考慮した実験はされていない。よって、本研究では、基礎地盤の表層変位の量及び特徴を、水位上昇速度の影響を考慮して定量的に把握することに新規性がある。

## 2. 実験方法

### (1) 模型実験

河川水の上昇による盤ぶくれに伴う基礎地盤の表層の変形を把握するため、図-1に示すような小型土槽を用いて実験模型を作製した。小型土槽は、給水槽、土槽(内寸:幅600mm, 奥行き150mm, 高さ300mm), 排水槽の3部分から構成され、各部分の境界は多孔アクリル板で仕切られている。基礎地盤より上からの給水を防ぐために給水槽側の通水孔に養生テープを張り付けた。また、基礎地盤を行き止まり地盤とするために養生テープを張り付けて非排水条件とした。また基礎地盤下層の底面に給水槽から50mmの位置を始点に100mm毎に、4本目のマンオメーターのみ50mm間隔でマンオメーターを設置し、計7本設置している。なお、このマンオメーターは難透水層と基礎地盤の境界の圧力水頭に反応するようにしている。

実験模型は矢部川の被災箇所を参考に、透水性基礎地盤上に粘性土主体の堤防が築造された場合を想定した。模型の土層構成は、土槽底面から順に金剛カオリンの難透水層(高さ75mm), 珪砂4号の基礎地盤下層(高さ50mm), ケース毎に異なる試料の基礎地盤上層(高さ10mm), 金剛カオリンの堤体(堤高50mm, 天端幅300mm, 奥行き150mm)を作成し、表層の土質のみを変化させた複層構造とした。実験の進行に伴い堤内地に湛水が発生するため、土槽の縁と基礎地盤の高さを一致させ、可能な限り排水できるような構造とした。

本実験は水位上昇速度、基礎地盤上層の試料を変えて比較を行った。実験を行った5つのケースを表-1に示す。

今回用いた試料の土質定数および施工時の条件を表-2に示す。乾燥密度は土層作製に用いた土量を体積で除して求めた。透水係数は定水位透水試験(JIS A 1218), 平均粒径は土の粒度試験(JIS A 1204)を行って求めた。なお、宇部真砂土は2mmふるいを通り過ぎて粒度を調整したものをを用いた。また、カオリン粘土の透水係数については、河川堤防の構造検討の手引き<sup>9)</sup>の値を用いた。

### (2) 水位条件

全ケースで、実験開始前に給水槽水位を基礎地盤地表面の位置で12時間以上保持して飽和させた。水位の上昇速度を比較するケースでは、目視で給水調整するのが困難なため、水位を上げ数分待機することで水位上昇速度を調整した。10mm上げて5分待機することで毎分2mmの上昇を、10mm上げて10分待機することで毎分1mmの上昇の再現した。その他のケースでは毎分10mmで水位を上昇した。水位は給水槽内に設置している標尺にて常時確認し、基礎地盤からの排水に応じて上昇速度を一定に保つよう調整した。

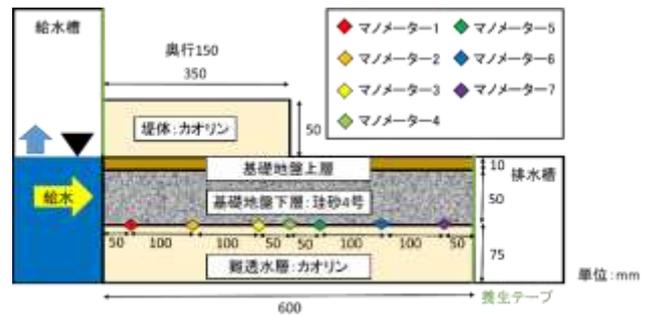


図-1 実験模型

表-1 実験ケース

ケース	堤体	基礎地盤				水位 上昇速度
		上層 (被覆土層)		下層		
		土質	層厚 (mm)	土質	層厚 (mm)	
1	金剛カオリン	9号	10	4号	50	10mm/min
2						10mm上げ 5min待機
3						10mm上げ 10min待機
4		6号	10mm/min			
5		宇部真砂土				

表-2 土質試験結果

試験結果	珪砂4号	珪砂6号	珪砂9号
施工時含水比(%)	10	10	10
乾燥密度(kg/m <sup>3</sup> )	1470	1517	1390
透水係数(m/s)	$4.67 \times 10^{-4}$	$1.07 \times 10^{-4}$	$1.10 \times 10^{-5}$
平均粒径(mm)	1.00	0.30	0.06

試験結果	宇部真砂土	金剛カオリン(堤体)	金剛カオリン(難透水層)
施工時含水比(%)	10	30	20
乾燥密度(kg/m <sup>3</sup> )	1436	1440	1440
透水係数(m/s)	$1.69 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-8}$	$1.0 \times 10^{-8}$
平均粒径(mm)	0.07	-	-

### (3) 計測方法

水位を上昇させた後の基礎地盤の変形等の状況は、目視とスチルカメラ、デジタルカメラで観察した。スチルカメラは、水位上昇速度比較ではケース1~3の順に30秒と300秒と600秒、上層土質比較をしたケース4, 5では30秒毎に撮影した。デジタルカメラは、のり尻付近と模型全体が映るよう設置した。

実験時は、多点の写真撮影によるSfM(Structure from Motion)で地盤変形量の計測を試みたが、堤内地が湛水し、測定が困難な状況だった。そのため、基礎地盤の表層変位は、横断方向からののり尻の定点撮影記録写真の解析を行った。基礎地盤の表層変位量をピクセル換算で

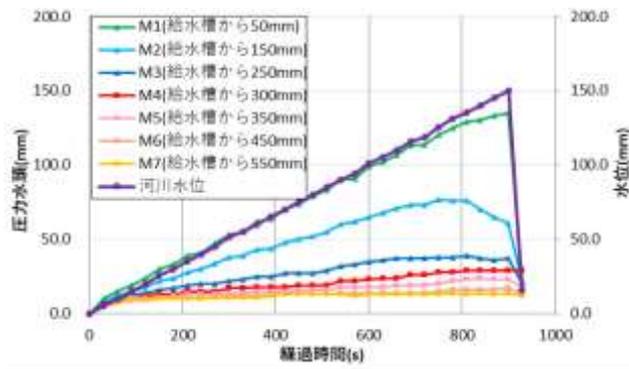


図-2 圧力水頭の経時変化・実験状況写真(ケース1)

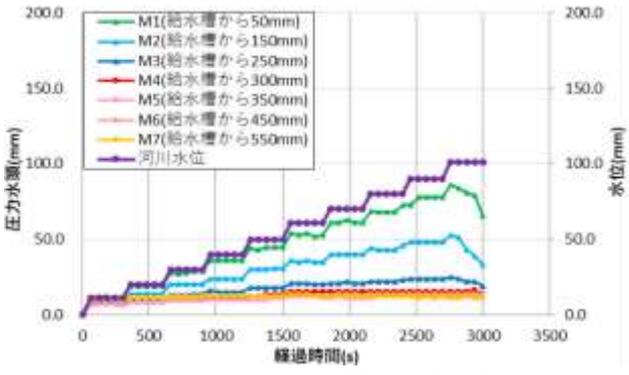
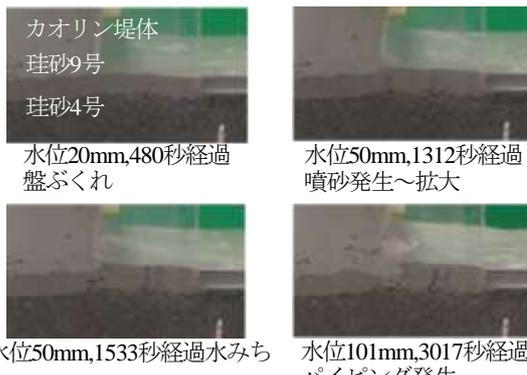
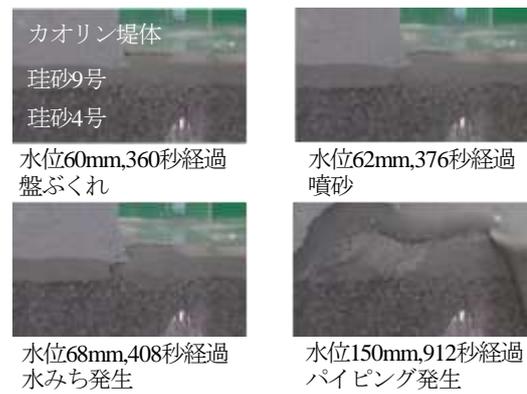


図-3 圧力水頭の経時変化・実験状況写真(ケース2)

算出し、1ピクセル当たりの撮影対象物長さから、写真撮影側の模型側方における基礎地盤の表層変位量を算出した。なお、本研究では基礎地盤上層が実験開始から1.0mm以上変位が発生した時点で、盤ぶくれと判断した。湛水深も同様に、ピクセル換算で算出し、1ピクセル当たりの撮影対象物長さから、写真撮影側の模型側方における湛水深を算出した。この湛水深をG/W値の算出過程で用いた。

水位上昇速度比較では60秒に1枚、土質比較ではマンメーターは30秒に1枚の間隔で写真撮影し、それを読み取った。実験は、パイピングで水みちが給水槽側から堤内側に連通し、圧力水頭と外水位が低下した時点(パイピングによる決壊)で実験終了とした。

### 3. 実験結果

#### (1) 実験状況

各ケースの水位とマンメーターの圧力水頭の関係及び実験状況を図-2～図-6に示す。図-3のグラフでは5分、図-4では10分経過した後のそれぞれの圧力水頭値をグラフにプロットし、水位が連続的に上昇するグラフとした。

#### a) ケース1 (珪砂9号層厚10mm, 水位10mm/分)

図-2の写真のように、湛水状態の堤内地基礎地盤に盤ぶくれ、噴砂、水みちが発生しパイピングに至った。実験開始から360秒後の水位60mmで盤ぶくれが発生し、376秒後の水位62mmでのり尻位置に噴砂が発生した。そ

の後、408秒後の水位68mmで水みちが発生した。その箇所から漏水して水みちは拡大し、外水と連通しパイピング発生に至ったため実験を終了した。圧力水頭は、給水槽からの距離に従って減衰し、水位の上昇に伴い上昇した。グラフと実験状況、図-7より、噴砂や水みちの発生後に圧力水頭の上昇が緩やかになった。

#### b) ケース2 (珪砂9号層厚10mm, 10mm上昇して5分待機)

図-3の写真のように、湛水状態の堤内地基礎地盤に盤ぶくれ、噴砂、水みちが発生しパイピングに至った。実験開始から480秒後の水位20mmでのり尻に盤ぶくれが発生し、1312秒後の水位50mmでのり尻から噴砂が発生して堤内地側に拡大した。その後、1533秒後の同水位で水みちが発生し、パイピング発生に至ったため実験を終了とした。圧力水頭は、給水槽からの距離に従って減衰した。

#### c) ケース3 (珪砂9号層厚10mm, 10mm上昇して10分待機)

図-4のように、湛水状態の堤内地基礎地盤に盤ぶくれ、噴砂、水みちが発生しパイピングに至った。実験開始から1320秒後の水位30mmでのり尻に盤ぶくれが発生している。1620秒後の同水位でのり尻から堤内地側50mm位置で噴砂が発生し、1825秒後の水位40mmでのり尻に小規模な噴砂が発生した。1860秒後の同水位でのり尻から堤内地側50mm位置の小規模な噴砂は拡大し、3420秒後の水位60mmでのり尻噴砂は大規模になる。5880秒後の水位110mmでのり尻に小規模水みちが発生するが、堤体が沈み込み土槽正面から水みちが確認できな

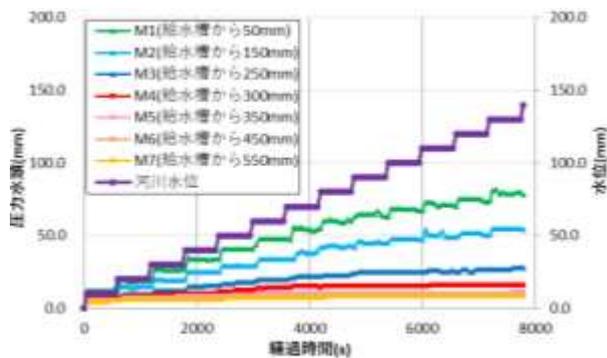


図-4 圧力水頭の経時変化・実験状況写真(ケース3)

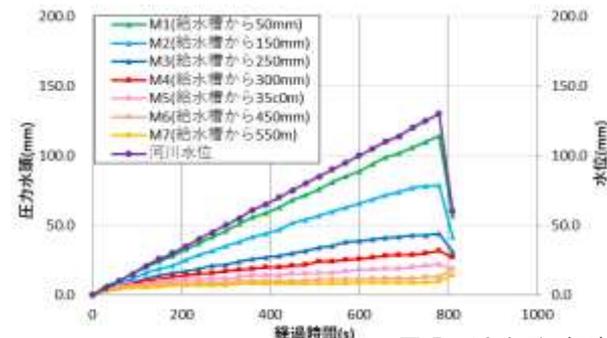
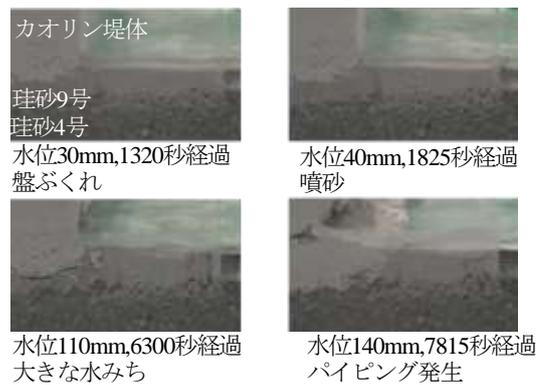


図-5 圧力水頭の経時変化・実験状況写真(ケース4)

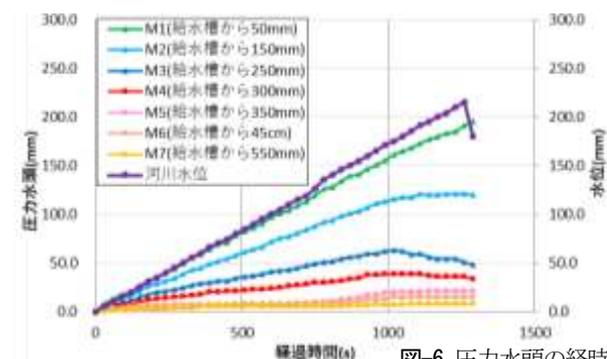
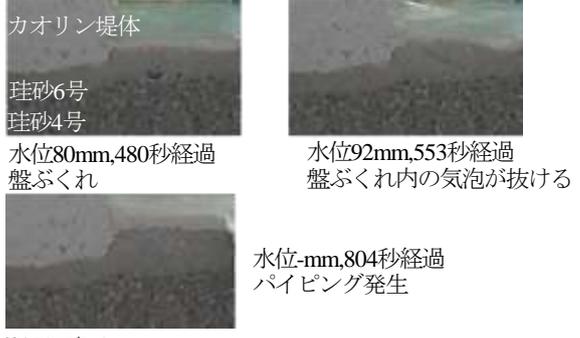


図-6 圧力水頭の経時変化・実験状況写真(ケース5)



なくなった。6300秒後の同水位で再び水みちが発生し、7815秒後の水位140mmで給水槽の外水がカオリン堤体の高さを超え、越水に至ったため実験終了した。堤体直下の圧力水頭は給水槽からの距離に従って減衰している。

#### d) ケース4(上層珪砂6号層厚10mm)

図-5のように、480秒後の水位80mmで盤ぶくれが発生し、515秒後の水位86mmで顕著になった。その後、553秒後の水位92mmで盤ぶくれ内の気泡が抜けた。588秒後の水位97mmでのり尻の漏水量が増加し、パイピング発生に至った。圧力水頭は、給水槽からの距離に従って減衰している。

#### e) ケース5(上層2mmふるい通過宇部真砂土層厚10mm)

図-6のように、湛水状態の堤内地基礎地盤に盤ぶくれ、水みちが発生しパイピングに至った。

実験開始から390秒後の水位66mmでのり尻に盤ぶくれが発生した。その後、680秒後の水位113mmでのり尻か

ら漏水した。1110秒後の水位191mmで漏水の勢いが増して、堤体の崩壊が進み、漏水箇所が外水と連通しパイピング発生に至ったため実験を終了した。圧力水頭は、給水槽からの距離に従って減衰した。噴砂の発生は確認できなかったが、大量の漏水が確認できた時点では圧力水頭の上昇が緩やかになることが確認できた。

#### (2) 圧力水頭分布・堤内地基礎地盤表層変位とG/W

図-7と図-11に、水位とマンメーターM4(のり尻位置)の圧力水頭の関係を示す。図-7は水位上昇速度、図-11は上層土質による圧力水頭の違いを比較できる様まとめたものである。図-8～図-10、図-12と図-13には、各ケースの基礎地盤表層変位と水位とG/Wの関係を示す。

基礎地盤表層変位として、のり尻位置の盤ぶくれと、堤内地側で最大盤ぶくれ量を示した位置の2ヶ所を測定した。このグラフの赤矢印は、実験中に発生した噴砂による堆砂や堤体の崩壊の発生時点を示している。なお、本論文では、堆砂、堤体の崩壊等以前の変形を盤ぶくれ

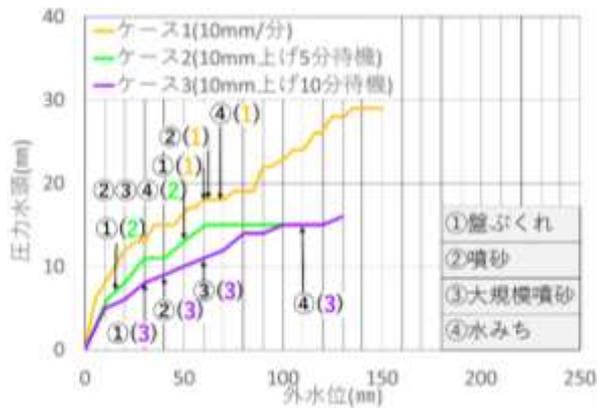


図-7 水位とM4の圧力水頭の関係(水位上昇速度)

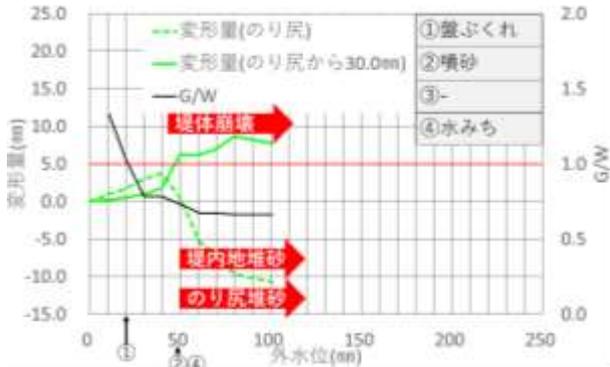


図-9 変形量と水位とG/Wの関係(ケース2, 10mm上げ5分待機)

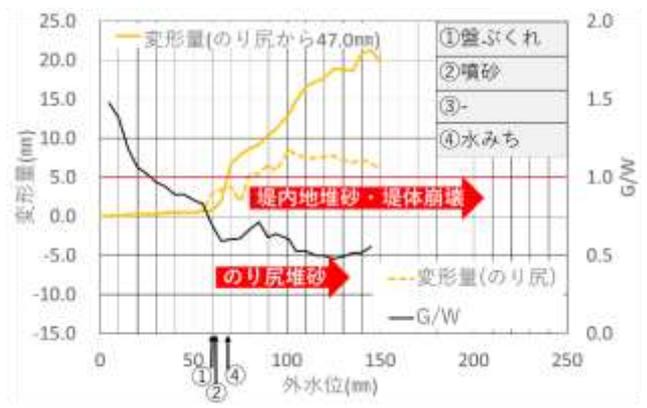


図-8 変形量と水位とG/Wの関係(ケース1, 10mm/分)

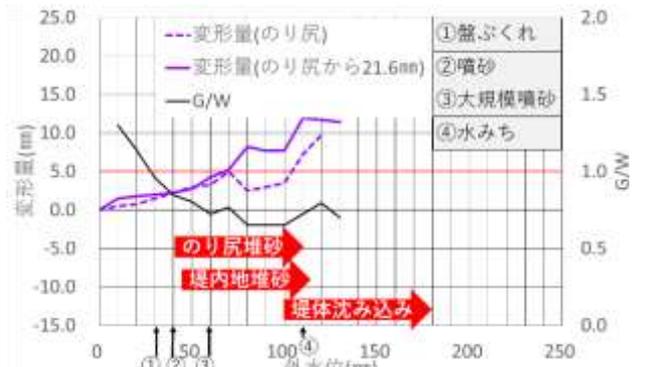


図-10 変形量と水位とG/Wの関係(ケース3, 10mm上げ10分待機)

量と評価した。

G/Wについては、のり戻位置の圧力水頭を基に算出した値の推移を示している。G/Wは式(1)で算出する。一般的に、G/Wが1を下回ると、盤ぶくれの危険性が高まると評価される。本論文では、読み取った圧力水頭値から湛水深を引くことで、湛水の影響を排除したより精度の高いG/Wの値を算出した。

$$G/W = (\rho_t \cdot H) / (\rho_w \cdot P) \quad (1)$$

G:被覆土層の重量(kgf/m<sup>2</sup>)

W:被覆土層底面に作用する揚圧力(kgf/m<sup>2</sup>)

H:被覆土層厚(m)

$\rho_t$ :被覆土層の密度(kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_w$ :被覆土層の密度(kg/m<sup>3</sup>)

P:被覆土層底面の圧力水頭(全水頭と位置水頭の差)(m)

### (3) 水位上昇速度の影響

図-7に水位上昇速度の影響を比較した、水位とM4の圧力水頭の関係を示した。圧力水頭は水位を緩やかに上昇させたほうが低くなるのがわかる。水位上昇速度が遅いケース2, 3では、河川水位が緩やかに上昇した場合を想定しており、より長時間高い圧力水頭を受けていることで、基礎地盤に変形が発生しやすい状態となり、盤ぶくれや噴砂によって漏水して、圧力水頭が低下したためと考えられる。変形量と水位とG/Wの関係を示した図-8～図-10のグラフより、全ケースでG/Wが1を切って盤ぶくれ、噴砂が発生している。また、より早くG/Wが1

を切るのはケース2, 3, 1の順である。本実験条件では、同水位において、上昇速度が遅いほど噴砂が発生しやすい傾向となっている。

10mm上げ5分待機のケース、10mm上げ10分待機のケース、10mm/minのケースの順で、盤ぶくれの発生が早く、変位が大きくなることが確認できる。上昇速度が早いケース1に比べ、水位上昇が遅いケース2、更に遅いケース3では、盤ぶくれ等が発生するタイミングは同水位で比較した場合で早く、かつ、大きく膨れると想定された。本実験では特にケース2の発生が早く、大きな盤ぶくれを生じた。これは、局所的な模型の弱部や残留した空気の影響と考えられる。

### (4) 上層土質の影響

図-11に、上層土質が異なるケース1, 4, 5の、水位とM4の圧力水頭の関係を示した。土質は透水係数が小さい順に珪砂9号、珪砂6号、宇部真砂土(珪砂6号と宇部真砂土の透水係数はほぼ同等)である。上層の透水係数が大きいほど、パイピング発生時の外力が大きい。これは、上層の透水係数が大きいと排水性が良く、圧力水頭が上昇しにくいためである。一方、上層の透水係数が小さいと排水性が悪いいため、圧力水頭が上昇しやすい。また、噴砂発生後、漏水により圧力水頭が緩やかになることがわかる。

変形量と水位とG/Wの関係を示した図-8と図-12、図-13のグラフより、G/Wが1を切る順は、ケース4(珪砂6号

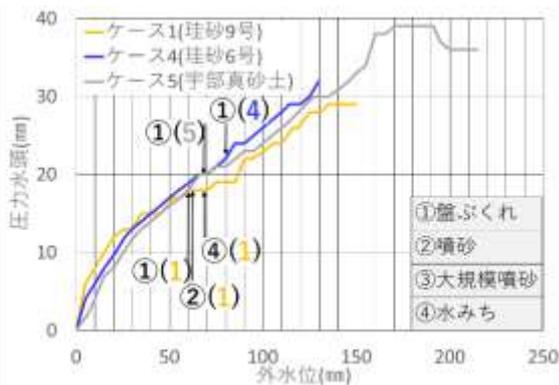


図-11 水位とM4の圧力水頭の関係(上層材料)

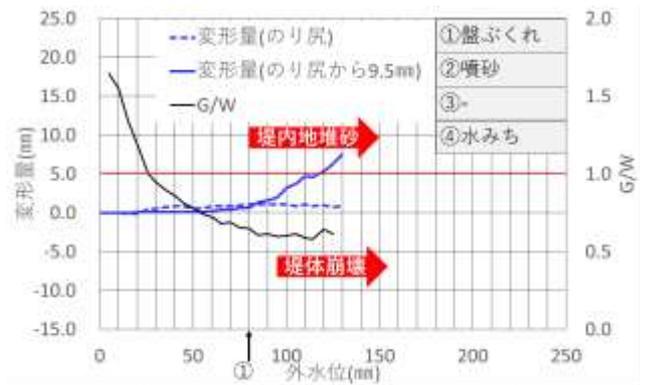


図-12 変形量と水位とG/Wの関係(ケース4, 珪砂6号)

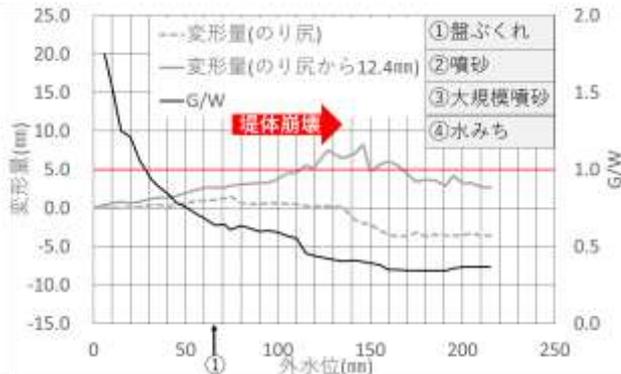


図-13 変形量と水位とG/Wの関係(ケース5, 宇部真砂土)

), ケース1(珪砂9号), ケース5(宇部真砂土)の順であるが、ほぼ同時である。ケース4とケース1を比較した場合、透水係数の大きい珪砂6号であるケース4は僅かに早くG/Wが1を切っている。一方、宇部真砂土は実際の河川現場を想定したケースである。土槽スケールを考慮してある程度の粒度調整は行ったが、均一な粒径の土質ではないため、局所的な細粒分等の影響によって、透水係数の大きさどおりにG/Wが1を切ることが無かったと推測できる。

次に、のり尻位置の盤ぶくれ量が大きいのは珪砂9号のケース1、宇部真砂土のケース5、珪砂6号のケース4の順である。また、上層土質の透水係数が小さいとG/Wが小さい傾向がある。これは、上層の排水性が悪いと水が抜けにくく、基礎地盤内の圧力が高まり変形しやすくなると考えられる。また、透水係数が低い土質のケースでは、最大の盤ぶくれ量がのり尻位置から離れた位置で発生している。一方、透水係数が高いと、のり尻に近い位置で最大の盤ぶくれが発生している。

#### 4. 結論

実験結果、以下のことが明らかになった。

水位上昇速度が遅い場合、高い間隙水圧を長時間受けるため、盤ぶくれや噴砂の発生が早く、各ケースを比較した結果、G/Wが1を下回りやすい傾向が確認できた。一方、盤ぶくれや噴砂の発生により基礎地盤の表層変位は小さくなった。

基礎地盤上層の透水性が高い場合、盤ぶくれ等が発生しにくいため変形量が小さいことが確認できたが、本実験条件では、透水性が大きくG/Wに大きな差は無かった。

以上から、パイピングの予兆となる盤ぶくれ等の表層変位を河川縦断方向に比較することで、弱点箇所を抽出ができる可能性が示唆された。

今後は、対策工の実施時、現場への適用を含めたモニタリング手法やパイピング破壊に至る閾値等について引き続き検討していきたい。

**謝辞:** 本研究は国土技術研究センター研究開発助成を受けたものです。厚くお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 齊藤啓, 前田健一, 李兆卿, 山口敦志: 透水性基盤のパイピングとすべりに着目した河川堤防の安定性, 第2回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム, pp. 23-26, 2014.
- 2) 倉田大輔, 笹岡信吾, 福原直樹, 森啓年, 服部敦, 佐々木哲也, 石原雅規, 吉田直人: 河川堤防の進行性破壊における前兆となる地表変位の把握, 第3回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム, pp. 23-26, 2015.
- 3) 倉田大輔, 森啓年, 山本颯太, 庭田一: 河川堤防のパイピング進行に伴う基礎地盤表層の変形に関する模型実験, 河川技術論文集, pp. 583-588, 2018.
- 4) 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, 2012.

(2019. 4. 2受付)