出水時の変位モニタリングによる 河川堤防の弱点箇所抽出に関する研究

山口大学大学院 創成科学研究科 准教授 森 啓年

概要:

本研究では、パイピングによる河川堤防の決壊の前兆となる出水時の基礎地盤の表層変位(盤ぶくれ) 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.今年度は、水位上昇速度や土層構 造が異なる模型実験により、パイピングの進行過程に応じた基礎地盤の表層変位を、水位との関係と合わ せて定量的に把握し、堤防決壊に至る進行的なパイピングの発生に至るまでの変位量を確認した.また、 これらの模型実験を対象に、非定常飽和不飽和浸透流解析による圧力水頭分布から盤ぶくれの安定性の評 価指標である G/W を算出し、実験におけるパイピング進行状況との対応を検討した.

模型実験の結果,パイピングの進行が促進される水位上昇速度が遅い場合,被覆土層の透水係数が下層 より小さいパイピングに脆弱な土層構造の場合,基礎地盤の表層変位が比較的低い水位でも発生する傾向 が確認された.特に上層が粘性土の場合は粘着力が作用し,局所的な破壊に至らず,基礎地盤の広い範囲 に表層変位が発生することが確認された.また,再限解析の結果,水位上昇とG/Wの関係は確認出来なか ったが,被覆土層の透水係数が下層より小さいパイピングに脆弱な土層構造の場合はG/Wが1を下回り盤 ぶくれが発生しやすい傾向が確認された.これらから,表層変位を観測し上下流と比較することで,相対 的な弱点箇所として抽出できる可能性が示唆された.

キーワード: 河川堤防, 浸透, パイピング, モニタリング

1. 序論

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¹⁾. 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に起因して被災し,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、パイピングの危険箇所の絞 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. 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.また土槽底面には給水槽から 50mm の位置を始点に 100mm 毎に、4本目のマノメータ ーのみ 50mm 間隔でマノメーターを設置し、計7本設置 している.なお、このマノ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)を作製し、土層の構成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

発表6

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 ふるいを通過させて粒度を調整した ものを用いた.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 4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5mm の上昇を、10mm上げて10分待機することで毎分5mm 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.

(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順に30秒と300 秒と600秒, 上層土質比較は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,土質比較ではマノ 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.



図-1 実験模型

表-1実験ケース

	堤休	基礎地盤					
ケー		上層 (被覆土層)		下層		水位	
ス	144	土質	層厚 (mm)	土質	層厚 (mm)	上昇速度	
1	金剛					10mm/min	
2		9号				5mm 上げ	
2						10min 待機	
2	力		10	4 旦	50	10mm 上げ	
3	オ		10	45	50	10min 待機	
4	リン	6号					
5		宇部 真砂土				10mm/min	

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/m³)	1470	1517	1390
透水係数(m/s)	4.67×10^{-4}	1.07×10^{-4}	1.10×10^{-5}
平均粒径(mm)	1.00	0.30	0.06

	宇部	金剛	金剛
試験結果	古 <u>小</u> 十	カオリン	カオリン
	来の工	(堤体)	(難透水層)
施工時含水比(%)	10	30	20
乾燥密度(kg/m³)	1436	1440	1440
透水係数(m/s)	1.69×10^{-4}	-	-
平均粒径(mm)	0.07	-	-

3. 実験結果

(1) 実験状況

各ケースの実験状況を図-2~図-6に示す.

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.



図-2 実験状況写真(ケース1)

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.



図-3 実験状況写真(ケース2)

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.





水位 140mm.7815 秒経過 パイピング発生

図-4 実験状況写真(ケース3)

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.





水位 92mm,553 秒経過 盤ぶくれ内の気泡が抜ける



図-5 実験状況写真(ケース4)

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.



図-6 圧力水頭の経時変化・実験状況写真(ケース5)

(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、水位とマノメーター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 は上層の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量 と評価した.

G/Wについては、のり尻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.

 $G/W = (\rho_t \cdot H)/(\rho_w \cdot P) \tag{1}$

G:被覆土層の重量(kgf/m²)

W:被覆土層底面に作用する揚圧力(kgf/m²)

H:被覆土層厚(m)

ρ:被覆土層の密度(kg/m³)

ρ":被覆土層の密度(kg/m³)

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 たほうが低くなることがわかる. これは,一定の水位に より高い間隙水圧を長時間受け,盤ぶくれ,噴砂が発生 したことで,漏水により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1、2、3 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 G/W が1を切りやすく盤ぶく れが発生しやすい傾向となっている.



図-7 水位とM4の圧力水頭の関係(水位上昇速度)











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,発生が早く,盤ぶ くれの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.しかし,本実験ではケース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-7 と図-12,図 -13 のグラフより, G/W が 1 を切る順は透水係数の大き いケース 5(宇部真砂土),ケース 4(珪砂 6 号),ケース 1(珪 砂 9 号)の順である.これは、上層の透水係数が大きいと 圧力水頭の上昇が緩やかになり、G/W が大きくなるため G/W に影響を及ぼしていると考えられる.

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.よって、上層の透水係数が小さいと盤ぶく れ量が大きい傾向がある.これは、上層の排水性が悪い と圧力水頭が上昇し変形しやすいからである.また、透 水性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、透水性が 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.



図-11 水位と M4 の圧力水頭の関係(上層材料)





図-13 変形量と水位と G/W の関係(ケース 5)

4. 解析方法

(1)解析モデル

実験模型をモデル化し、2次元飽和・不飽和浸透流解 析ソフト D-transuPP_2D¹⁾を利用した.実験で作製した土 層をメッシュ間隔 5mm として、モデル化を行った.一 例として作製した解析モデルを図-14に示す.



境界条件として外水位を上昇させることで圧力水頭が 変動する点を変動水頭として設定した.堤内地の浸出面 では浸出点を指示した.基準となるゼロ点として,初期 水頭位置を図-14に示す位置に設定した.

(2)解析ケース

解析ケースは実験ケースと同様の5ケースであり,解 析で用いた土質定数も表-3に示す通りである.なお,不 飽和浸透特性として,河川堤防の構造検討の手引き(改訂 版)Pに示されるものを用いた.

表-3 土質定数

材料	透水係数 (m/s)	乾燥密度 ρd(g/cm³)	施工時 含水比w (%)	湿潤密度 ρt(g/cm³)	飽和単位体積重量 γ sat
珪砂4号	4.672×10 -4	1.47	10	1.62	1.72
珪砂6号	1.069×10^{-4}	1.52	10	1.67	1.77
珪砂9号	1.101×10 -5	1.39	10	1.53	1.63
真砂土	1.698×10^{-4}	1.44	10	1.58	1.68
金剛カオリン(提体)	1.000×10^{-8}	1.44	30	1.87	1.97
金剛カオリン(難透水層)	1.000×10^{-8}	1.44	20	1.73	1.83

5. 解析結果

G/W 評価基準付近となる M4 位置における圧力水頭の 再現性を高めるため、一部の土質の透水係数に対し、パ ラメトリックスタディを行った.そのため以下の解析結 果から透水係数を珪砂 9 号 1.333×10^5 (m/s), 珪砂 6 号 1.500×10^5 (m/s),真砂土 9.167×10^6 (m/s) とした.

ケース1,2,3の,GWと外水位の関係を示したグラフを図-15 に示す.本実験の条件下では、解析結果に水位上昇速度による有意な差は得られなかった.

ケース1,4,5の,G/W と外水位の関係を示したグラフを図-16に示す。全ケースG/Wが1を下回ってから噴砂,盤ぶくれが確認され,基礎地盤上層の透水性が低い程,同じ外水位でも解析値のG/Wは1を下回りやすい傾向が解析でも評価できた。





図-16 異なる上層材料による比較

6. 結論

本研究では、模型実験及び再現解析により得られた成 果は以下の通りである.

- 水位上昇速度が遅い場合、高い圧力水頭を長時間 受けるため、パイピングが進行し、盤ぶくれや噴 砂の発生が早くなる傾向があり、G/Wも1を下回 りやすいことが確認できた。一方、大規模で広範 囲の噴砂の発生により、漏水が発生し、基礎地盤 の表層変位は小さくなった。一方、解析では特に 差が出なかった。
- ② 基礎地盤を被覆する上層の透水性が低い場合、パイピングの前兆として盤ぶくれや噴砂が発生する傾向があった.特に上層が粘性土の場合は粘着力が作用し、局所的な破壊に至らず、基礎地盤の広い範囲に表層変位が発生することが確認された.また、同じ外水位でも、基礎地盤を被覆する上層の透水性が低い場合、G/Wの値は実験及び解析の両方において1を下回りやすくなり、盤ぶくれ、噴砂が発生しやすくなるという評価となった.

以上の結果から、パイピングの進行が促進される水位 上昇速度が遅い場合、被覆土層の透水係数が下層より小 さいパイピングに脆弱な土層構造の場合、表層変位を観 測し上下流と比較することで、相対的な弱点箇所として 抽出できる可能性が示唆された.

今後は、長大な実際の堤防を面的に観測する技術についてさらなる検討を行うとともに、パイピング対策の健 全性評価に同様の技術の適用を試みるなど、適用範囲の 拡大を検討していきたい.

参考文献

- 国土交通省九州地方整備局: 矢部川堤防調査委員会報告書, 2013
- 2 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),2012.