

## 地盤内の弱点箇所を調査する空気圧連通試験に関する 水平一次元カラムを用いた基礎的実験

### A Basic Experiment on Field communication Test to Investigate Weak Zone on Unsaturated Ground Using a Horizontal One-dimensional Column

小松満 Mitsuru KOMATSU (岡山大学大学院環境生命科学研究科)  
西原直也 Naoya NISHIHARA (岡山大学大学院環境生命科学研究科)  
新村卓也 Takuya NIIMURA (パシフィックコンサルタンツ株式会社)  
館川逸朗 Itsurou TATEKAWA (パシフィックコンサルタンツ株式会社)  
西垣誠 Makoto NISHIGAKI (岡山大学大学院環境生命科学研究科)

河川堤防の基礎調査技術の一つとして、従来、亀裂性岩盤の評価に用いられてきた空気圧トモグラフィ手法を地盤に適用することで透水層の連続性を把握し、水みちとなり得る弱点箇所の有無を判定する手法の開発を目的とした。具体的には、水平一次元カラムによる要素実験で空気圧の伝搬状況と段階的な加圧・除圧時の応答挙動を整理し、飽和度及び相対密度の違いによる結果の差異について考察した。その結果、飽和度や相対密度の違いにより伝搬挙動や応答時間が変化する状況を確認したことから、本手法の適用性について指標となり得る一定の有用性を示すことができた。その一方で、水平一次元透気試験での供試体内の密度や飽和度の変化に対する問題点も判明した。

キーワード：河川堤防，水みち，水平一次元カラム，連通試験，透気係数 (IGC : D04)

#### 1. はじめに

近年、河川堤防の破堤への対策が急務となっている。河川堤防の破堤の要因<sup>1)</sup>のうち、全体に占める浸透の割合は少ないものの、近年では「浸透」による被災事例が目立っており、浸透に対する堤防詳細点検では全体の3～4割ほどで強化が必要であるとの報告がある<sup>2)</sup>。

河川堤防の浸透による被災事例の要因として高透水性の基礎地盤の存在が指摘されている<sup>3)</sup>。河川堤防設計指針<sup>4)</sup>では、浸透に対する照査として、滑り破壊に対する安全性とともに、この基礎地盤のパイピング破壊に対する安全性が挙げられている。具体的には、透水性地盤で堤内地に難透水性の被覆土層がない場合は、裏の尻近傍の基礎地盤の局所動水勾配の最大値を0.5以下、透水性地盤で堤内地に難透水性の被覆土層がある場合は、被覆土層の重量が被覆土層基底面に作用する揚圧力を下回らないように設定されている。

平成24年7月の矢部川における破堤事例では、高透水性の基礎地盤を通じてパイピング現象が発生し、進行性破壊に至ったものとの指摘がなされている<sup>5)</sup>。そこで、最近、この高透水性の基礎地盤に起因するパイピング現象及び噴砂の発生から破堤に至る現象を実験により把握しようとする研究が進められている<sup>6)~7)</sup>。

基礎地盤内の高透水性の箇所を原位置で特定するには物理探査技術<sup>8)</sup>が用いられるが、中でも三成分コーン貫入試験 (CPT) では、先端抵抗値、周面摩擦力、間隙

水圧の情報により、堤体内の弱点部の把握が可能となってきている<sup>9)</sup>。これらの手法により明らかになった弱点部の存在箇所において、さらに詳細な調査による危険度判定を行うには、実際に透水層の連続性を確認する必要がある。

調査対象とする地盤が地下水面より下に位置する場合は水圧の伝播挙動<sup>10)</sup>により把握することが可能であるが、出水期以外は地下水面より上に位置している場合も多い。そのため、不飽和領域であらかじめ透水層の連続性や水みちを調査する手法の開発が必要である。そこで本研究では、亀裂性岩盤の貯留量や不均質性の評価に用いられてきた空気圧トモグラフィ<sup>11)</sup>による調査技術に着目し、水みちとなり得る弱点箇所の有無を判定する手法の開発を目的とした。この空気圧トモグラフィは、単孔での試験に加えてクロスホール試験としても実施されており、空気透過性および空気充填度を評価対象としている。また、試験結果の解釈のための3次元数値逆解析手法も構築されているが<sup>12)</sup>、これまでに多孔質媒体を対象とした既往の研究事例は皆無である。そこで、本論文では、その基礎的な研究として、空気圧トモグラフィによる現場連通試験<sup>13)</sup>の要素実験としての位置付けで、現場での調査ピッチを鑑み、長さ4mの水平一次元カラムを用いて、圧力の伝搬状況と段階的な加圧・除圧時の応答挙動を整理するとともに、飽和度及び相対密度の違いによる結果の差異について整理した。

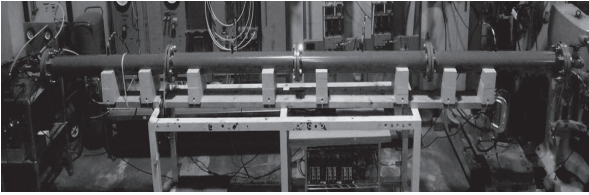


写真-1 水平一次元カラム実験状況

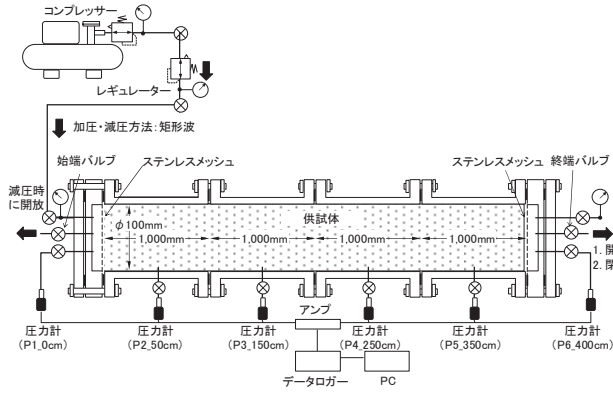


図-1 水平一次元カラム実験装置概略図

表-1 試料の物性試験結果 (一覧)

試料	川砂	小田川砂	
土粒子密度	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.682	2.676
最大乾燥密度	$\rho_{d\max}(\text{g/cm}^3)$	1.752	1.421
最小乾燥密度	$\rho_{d\min}(\text{g/cm}^3)$	1.444	1.184
最大間隙比	$e_{\max}$	0.858	1.260
最小間隙比	$e_{\min}$	0.530	0.884
相対密度	$D_r(\%)$	79.9	80.1
間隙比	$e$	0.596	0.959
乾燥密度	$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	1.681	1.366
間隙率	$n$	0.373	0.490
透水係数 (15°C)	$k_{T15}(\text{m/s})$	$3.01 \times 10^{-5}$	$2.25 \times 10^{-5}$
	測定時 $\rho_d(\text{g/cm}^3)$	1.687	1.366

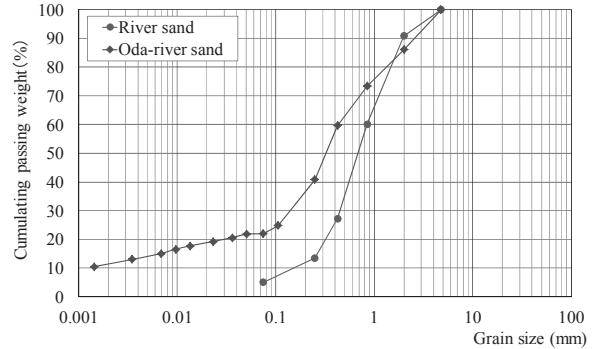


図-2 試料の粒径加積曲線

## 2. 実験方法

### 2.1 実験装置及び供試体の作製方法

本研究で用いた水平一次元カラムによる要素実験の状況を写真-1, 概略図を図-1に示す. 供試体容器は両端にフランジが付いた直径10cm×長さ1.0mのPVC製のカラムを4本接続し, ステンレスメッシュを貼りつけた多孔板を有する蓋を供給側と排気側に取り付けた. 空気の圧力計測には, バルブを介してテフロンチューブと接続したダイヤフラム式圧力センサを用い, 両端の蓋と併せて各カラムの中央部に計6個の計測点を設け, それぞれアンプを介して計測間隔1秒でデータロガーによるサンプリングを行った.

供試体の作製は, 容器の片端をチェーンブロックにより傾けた上で, あらかじめ所定の含水比に調整した試料を設定した飽和度と相対密度が得られるような乾燥密度になるように, カラムの周辺をハンマーで叩くとともに, 締め棒により1層20cmピッチで仕上げた.

### 2.2 実験方法

実験方法は, 以下の3種類の試験により行い, 試験終了後に各カラム1本あたりの含水比と乾燥密度を測定することで結果を整理した.

#### (1) 加圧・除圧試験① (終端バルブ開放)

現場で弱点箇所が連続している状況を想定し, 終端バルブを開けて大気圧に開放した上で, 空気圧をコンプレッサーからレギュレータを介して矩形波 (周期600s) 0~100kPaで段階的に10kPa毎に手で上昇させた. なお, 除圧時は始端バルブを閉じると同時に排気用のバルブを瞬時に開けて大気圧開放した.

#### (2) 加圧・除圧試験② (終端バルブ閉塞)

現場で弱点箇所が行き止まりになっている状況を想定し, 終端バルブを閉めて, 上記(1)と同様の試験を実施した.

#### (3) 透気試験

空気流量計をレギュレータと始端バルブの間に設置し, 3L/min, 5L/min, 10L/minの三段階の流量になるようにレギュレータを調整し, 各計測点の空気圧力により定常状態に至ったことを確認した上でこれらの値を記録した. なお, 空気は圧縮性流体であることから, 透水係数を算出する際に用いる連続の式を適用する際には, 密度と粘性と併せて圧縮性を考慮する必要がある. ここでの空気圧力の勾配から圧縮性流体として透気係数を求めることとした.

### 2.3 試料の物理特性

岡山県内で建材用に販売されている一般的な川砂(以降, 単に川砂と称する)と岡山県倉敷市内の小田川において過去に噴砂の発生が確認された地点で採取された砂(以降, 小田川砂と称する)を試料として用いた. なお, 試料採取現場付近では, 原位置試験(空気圧作用による砂層の連通試験調査)が実施されている<sup>13)</sup>. 各試料について下記の物性試験を実施した<sup>14)</sup>.

#### (1) 粒度及び土粒子密度測定

JIS A 1202及びJIS A 1204に準じて測定した土粒子密度を表-1, 粒径加積曲線を図-2にそれぞれ示す.

#### (2) 砂の最小密度・最大密度試験

JIS A 1224に準じて測定した現場採取砂の測定結果を表-1に併せて示す.

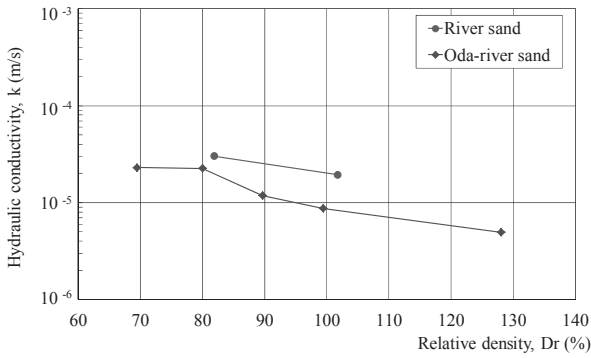


図-3 各試料の透水試験結果

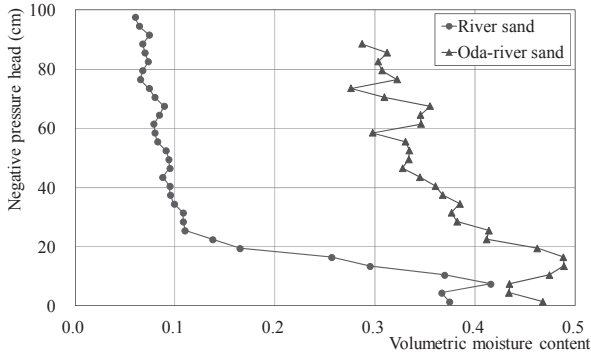


図-4 保水性試験結果

(3) 室内透水試験 (変水位法)

JIS A 1218の変水位法に準じて室内透水試験を実施した。φ10cm×H10cmの亚克力容器内に自然含水比状態で所定の乾燥密度になるよう突き固めて供試体を作製し、下部より脱気水を通水して飽和度を高めた後に試験を実施した。試験結果を先の結果と併せて表-1に一覧を示すとともに、図-3に測定した透水係数を相対密度との関係としてそれぞれ示す。

(4) 保水性試験 (土柱法)

次に、鉛直一次元カラムを用いた土柱法により川砂及び小田川砂の保水性を調べた結果を図-4に示す。供試体解体時における試料の採取状況により若干のばらつきが見られるものの、概ね川砂に比べて小田川現場採取試料の方が高い保水性を示した。これは、粒径加積曲線からも分かるように、細粒分を多く含んでいることが要因である。一方、相対密度約80%の透水性は、ほぼ同程度となっている。

2.4 実験ケース

川砂と小田川現場採取砂に対して実施した実験ケースを表-2に示す。Case1を飽和度による違い、Case2を相対密度による違いにより供試体を作製した。なお、表中の乾燥密度は実際に充填した重量、飽和度と相対密度は乾燥密度の値を基に表-1の土粒子密度、最大乾燥密度、最小乾燥密度の値を用いてそれぞれ算出した。結果として、川砂のCase1-3~1-5において、締固め不足により所定の乾燥密度で供試体を仕上げるができなかったため、設定よりも低い相対密度となった。

表-2 水平一次元カラム実験ケース

[Case1 : 飽和度, Case2 : 相対密度による違いを表す]

(a) 川砂

Case	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$S_r$ (%)	$D_r$ (%)	備考	
1	1-1	1.681	2.1	78.3	Case2-1兼ねる
	1-2	1.697	11.6	82.9	相対密度設定以下 (締固め不足)
	1-3	1.643	17.0	67.1	
	1-4	1.657	26.3	71.3	
	1-5	1.669	37.5	74.9	
	1-6	1.683	49.7	78.9	
	1-7	1.682	56.7	78.6	
2	2-1	1.681	2.1	78.3	Case1-1兼ねる
	2-2	1.812	3.0	113.7	

(b) 小田川砂

Case	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$S_r$ (%)	$D_r$ (%)	備考	
1	1-1-1	1.365	9.3	79.5	
	1-1-2	1.366	10.2	80.0	Case2-1-1兼ねる
	1-1-3	1.366	25.2	79.8	
	1-1-4	1.366	39.3	79.8	Case2-2-1兼ねる
	1-2-1	1.684	11.1	177.9	Case2-1-3兼ねる
	1-2-2	1.684	31.1	177.9	
2	2-1-1	1.366	10.2	80.0	Case1-1-2兼ねる
	2-1-2	1.389	10.3	88.5	
	2-1-3	1.684	11.1	177.9	Case1-2-1兼ねる
	2-2-1	1.366	39.3	79.8	Case1-1-4兼ねる
	2-2-2	1.421	39.2	99.9	
	2-2-3	1.480	39.4	120.0	

3. 実験結果

3.1 加圧・除圧試験①終端バルブ開放時

終端バルブ開放時における空気圧の経時変化の一例として、異なる飽和度に対するCase1-1, Case1-6の測定結果(各段階での応答挙動及び10kPa作用時における変化挙動)を図-5(a)及び(b)に示す。飽和度が低いものに対しては圧力損失が大きく、計測される圧力は小さくなるが、飽和度が高くなるにつれてこの計測値は徐々に上昇している状況を確認した。また、加圧及び除圧において圧力の変化開始から一定値に至るまでに要する時間(以下、反応時間と称する)は、飽和度が高くなるにつれて特に除圧側で長くなる傾向が分かる。次に、異なる相対密度に対する結果を図-5(a)及び(c)に示す。相対密度が高くなると飽和度の変化と同様に計測される圧力が高くなる傾向が分かる。また、相対密度が高い方が除圧時に反応時間が長くなる傾向が示唆された。

3.2 加圧・除圧試験②終端バルブ開放時

次に、終端バルブ閉塞時の空気圧力の経時変化の一例として、異なる飽和度に対する結果を図-6(a)及び(b)に示す。飽和度が低いものに対しては圧力損失が大きく、計測される圧力は小さくなるが、飽和度が高くなるにつれてこの計測値は徐々に上昇している状況を確認した。

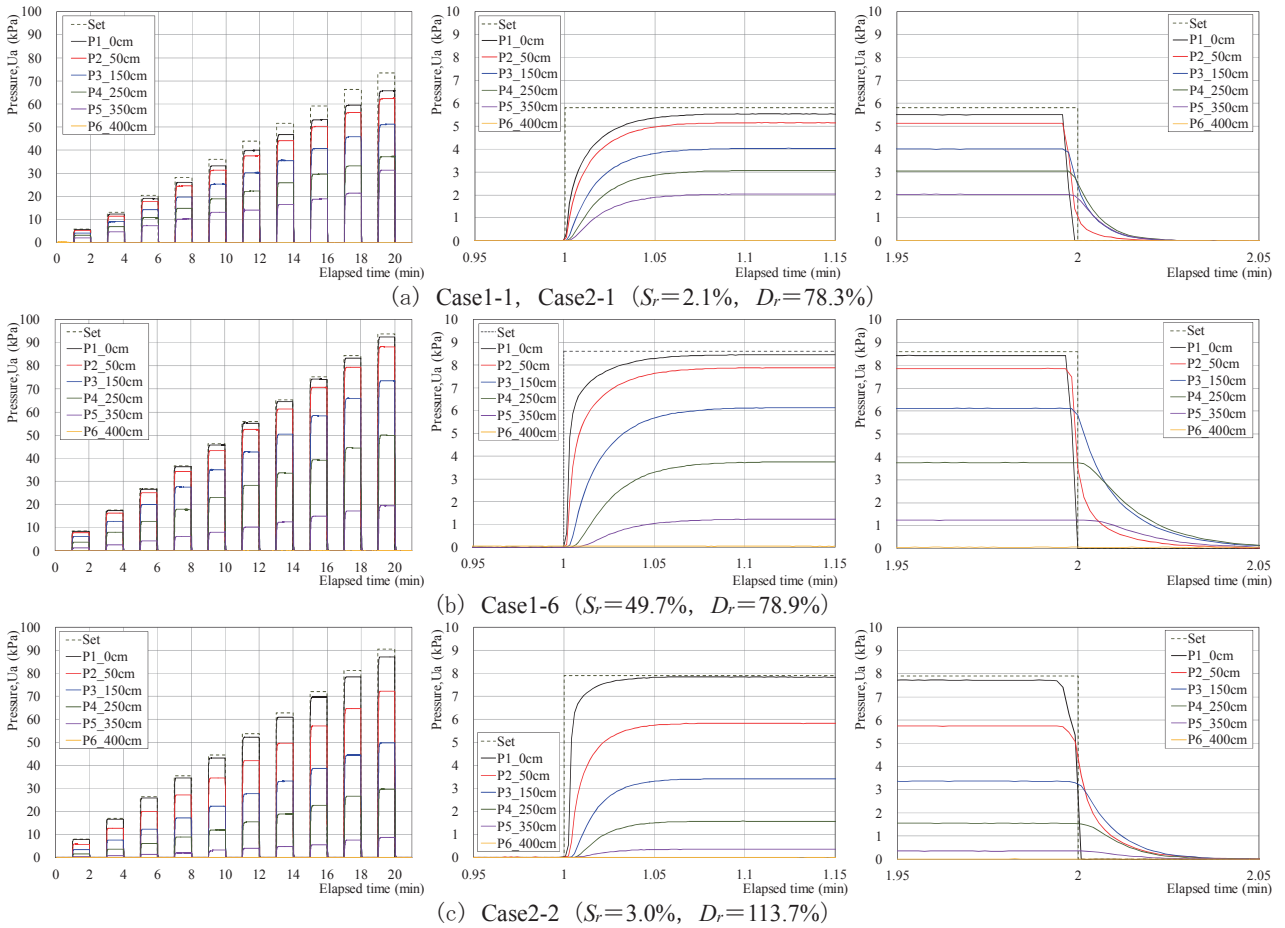


図-5 終端バルブ開放時の圧力変化 [川砂, Case1: 飽和度の違い, Case2: 相対密度の違い]

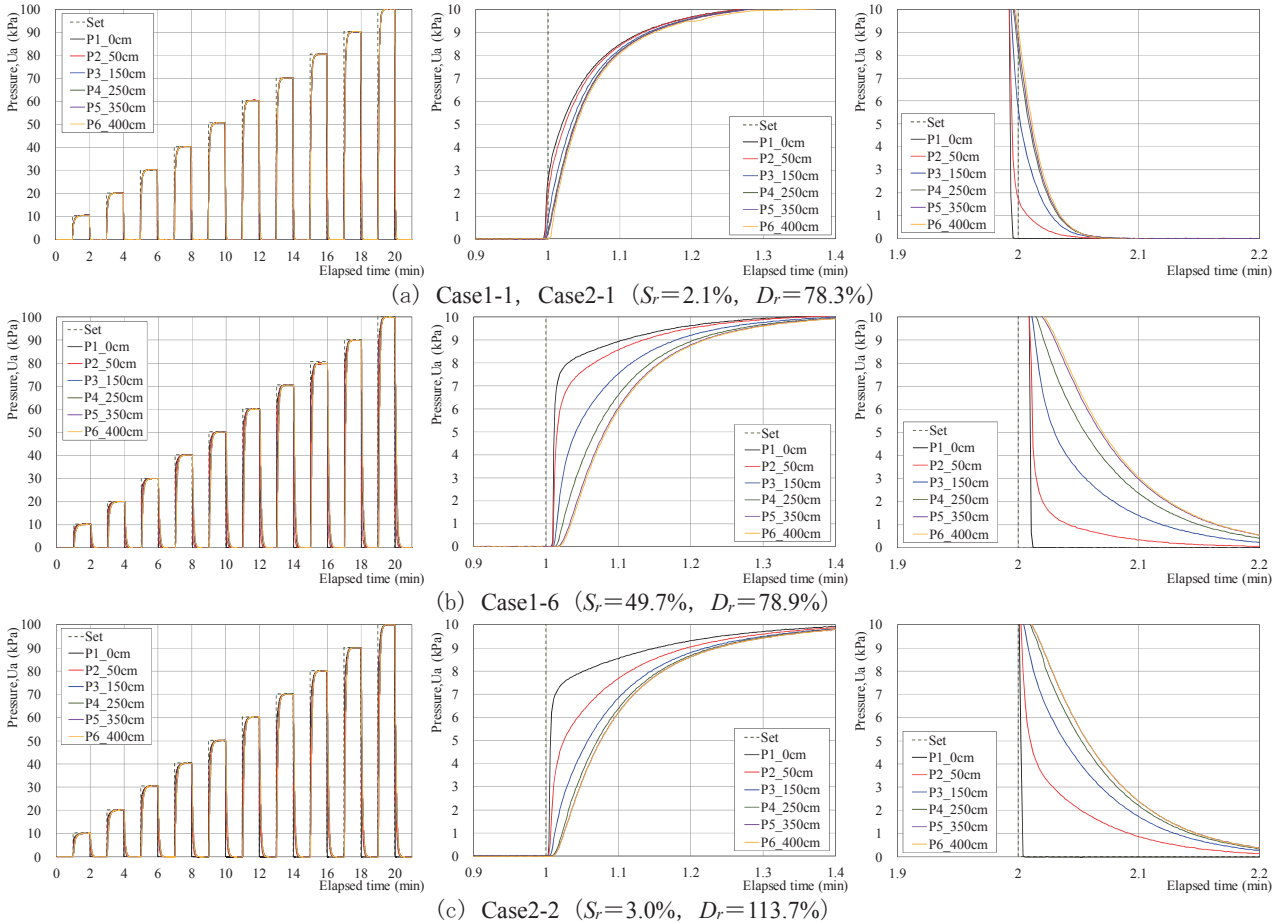


図-6 終端バルブ閉塞時の圧力変化 [川砂, Case1: 飽和度の違い, Case2: 相対密度の違い]

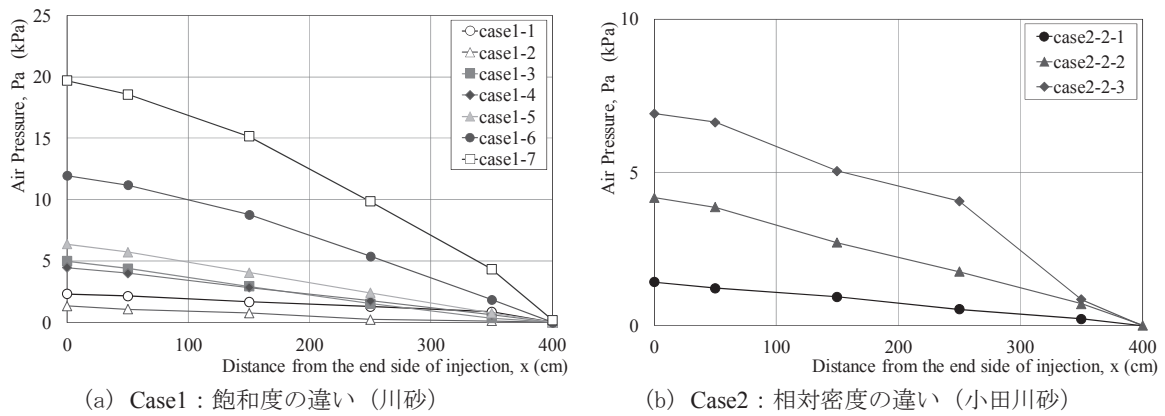


図-7 各計測点での空気圧計測結果 [ $Q=5(L/min)$ ]

また、飽和度が高くなるにつれて反応時間が長くなる傾向が分かる。さらに、異なる相対密度に対する結果を図-6(a)及び(c)に示す。相対密度が高くなると飽和度のよう計測される圧力が高くなる傾向が分かる。

### 3.3 透気試験

実験結果の一例として、異なる飽和度の供試体において空気流量 $Q=5(L/min)$ での各計測点の空気圧力を始端からの距離の関係として整理したものを図-7に示す。これらの結果から、飽和度が高くなるにつれて注入側の圧力が高くなっていることが分かる。なお、Case1において終端側では大気圧に開放されているため、圧力の増加はない。また、流量が大きくなるにつれて、各計測点を結んだ圧力の分布は直線から外れ、曲率が大きくなる傾向を示した。これは空気の圧縮性の影響であることから、透気係数の算定においてはダルシー則での算出と併せて圧縮性流体として算出することが必要である<sup>15)</sup>。

次に、相対密度の違いに対しても、飽和度と同様に供試体の相対密度が高くなるにつれて圧力勾配が大きくなる傾向が表れている。つまり、飽和度と相対密度がそれぞれ高くなるにしたがって、透気係数が低下するものと推察される。

## 4. 考察

### 4.1 供試体内の不均質性の影響

前述の試験結果では、供試体作成後の水分移動に伴うカラム内の飽和度分布の変化と空気圧の作用に伴う土粒子の移動(カラム内での間隙率の変化、特に頂部での空気みちの発生)が懸念される。そこで、前者に対しては4.2において、異なる直径のカラムに対して、供試体作成後のカラムの頂部及び底部の含水比と飽和度の経時変化を調べた。また、後者に対しては4.3において、カラム内の透気係数を測定することで供試体内での不均質性の有無を判断する。これらの結果を踏まえて、空気圧の加圧・除圧過程における挙動に対して飽和度と相対密度の違いから考察を加えることとした。

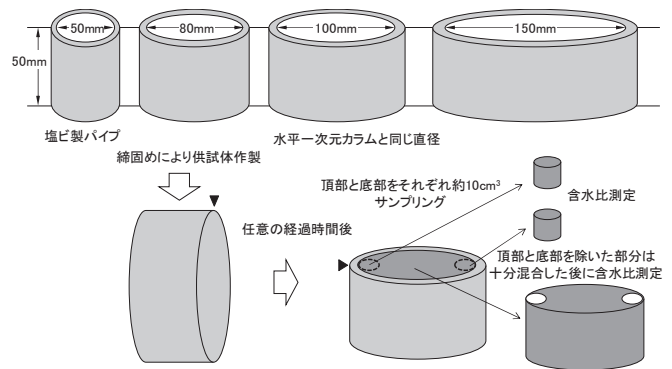


図-8 供試体内の飽和度分布の測定方法

### 4.2 供試体内の飽和度分布

透気試験は通常、鉛直方向で実施されるが<sup>16)</sup>、本研究では、水平方向に4mの長さで実施したことから、供試体を作製する試料の充填作業に時間を要した。そのため、供試体の作製中において水分移動に伴うカラム内の飽和度分布の変化が懸念された。そこで、図-8に示すように4種の異なる直径のカラムを用い、供試体作成後のカラムの頂部及び底部の含水比と飽和度の経時変化について整理した。

初期含水比からの変化量を経過時間で整理した川砂及び小田川砂の結果を図-9及び図-10にそれぞれ示す。これらの結果から、川砂の直径が10cmカラムで含水比の変化量の最大値が $\pm 2\%$ 程度であることが分かる。さらに、直径が15cmになると、下部の含水比が顕著に大きくなる結果を示した。そのため、水平一次元試験は、飽和度の変化を考慮して、10時間程度で上下を反対にし、水分の均一化を図った。一方、小田川砂は、保水性試験の結果からも判断できるように、川砂よりも高い保水性を有していることから、供試体内での大きな水分変化は生じていない、しかし、供試体作成後の時間が長くなるにつれて特に、供試体下部での水分量の増加が顕著になることが判明した。

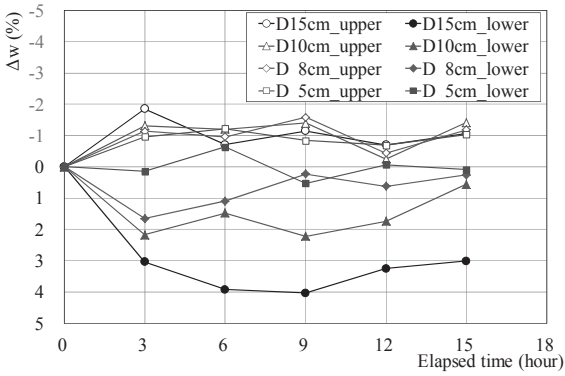


図-9 初期含水比からの変化量と経過時間の関係  
[川砂, 含水比 11%, 飽和度 50%, 相対密度 80%]

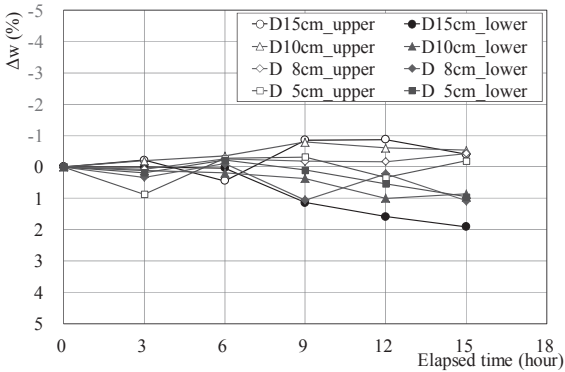


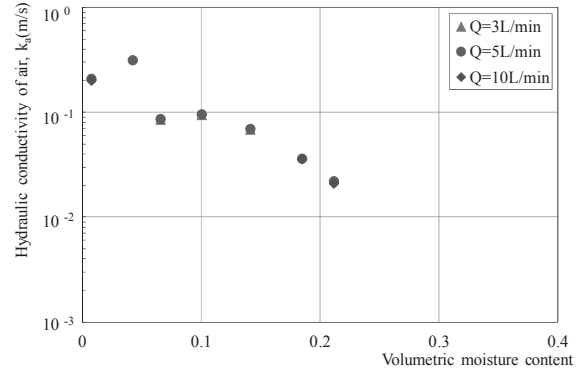
図-10 初期含水比からの変化量と経過時間の関係  
[小田川砂, 含水比 18%, 飽和度 50%, 相対密度 80%]

### 4.3 透気係数

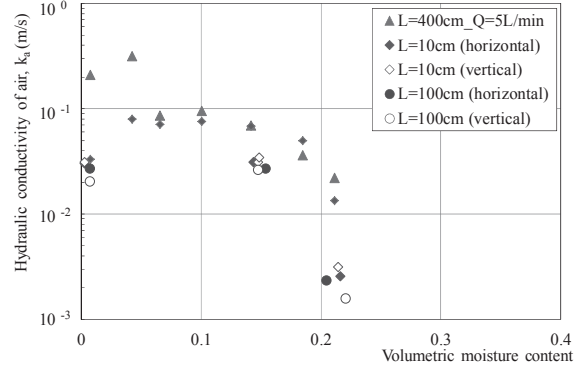
供試体内の空気圧力の分布を基に、圧縮性流体として固有透過度を求め、空気の粘性係数と密度から透気係数を算出した<sup>15)</sup>。図-11(a)に川砂の各流量における透気係数と体積含水率との関係、図-11(b)及び図-11(c)に $Q=5\text{L}/\text{min}$ 、 $Q=10\text{L}/\text{min}$ の各流量に対して $L=10\text{cm}$ 、 $L=100\text{cm}$ でそれぞれ水平方向と鉛直方向で透気試験を行った結果を示す。また、図-11(d)に非定常法<sup>16)</sup>で測定した透気係数の値、透水係数からの推定値と図-4に示した水分特性曲線を用いてVGモデル<sup>15)</sup>により推定した透気係数を飽和度との関係として示す。なお、透気係数及び透水係数は $15^\circ\text{C}$ での換算結果として示した。

これらの結果から、 $L=400\text{cm}$ での試験結果は、乾燥状態でわずかに高い値を示しているものの、 $L=10\text{cm}$ 及び $L=100\text{cm}$ の結果と概ね整合している。また、水平方向と鉛直方向の顕著な差異も認められない。そのため、 $L=400\text{cm}$ における供試体内の密度のばらつき、特に供試体上部での密度低下が懸念されたが、その影響は小さいものと判断した。

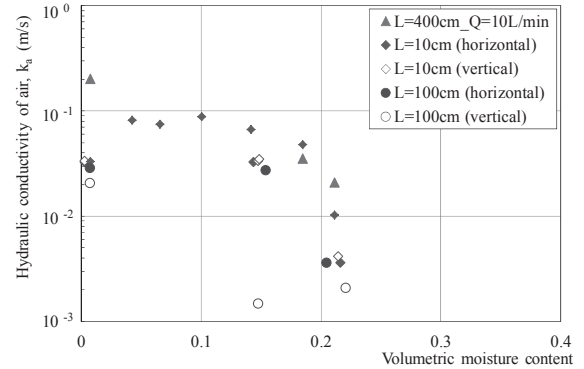
一方、非定常試験の結果からは、3オーダー程度大きな値を示しており、従来の研究<sup>16)</sup>での指摘と同様の傾向を示した。この値は透水試験の結果から推定した値と比べても2オーダー程度大きくなっている。このように定常法で求めた透気係数が非定常法よりも高くなる要因については現時点では明らかになっていない。



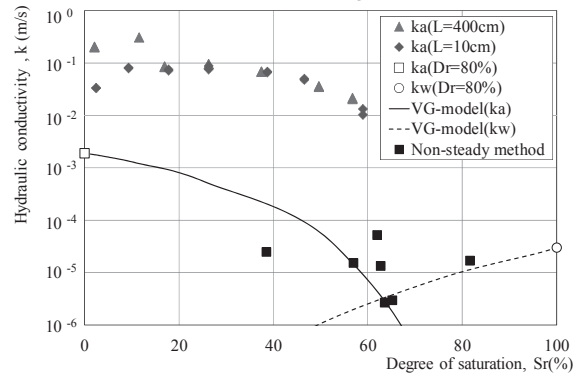
(a) 各流量における透気係数と体積含水率の関係



(b) 定常法との比較 ( $Q=5\text{L}/\text{min}$ )



(c) 定常法との比較 ( $Q=10\text{L}/\text{min}$ )

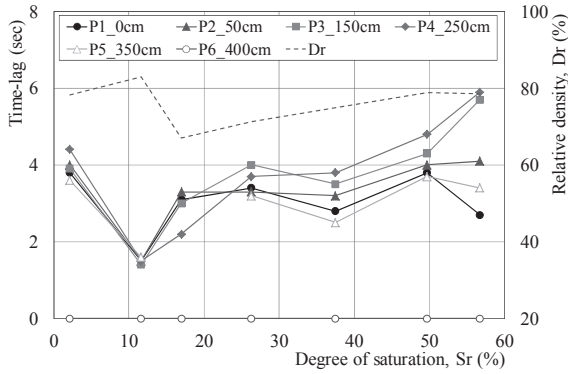


(d) 透水係数からの推定値との比較

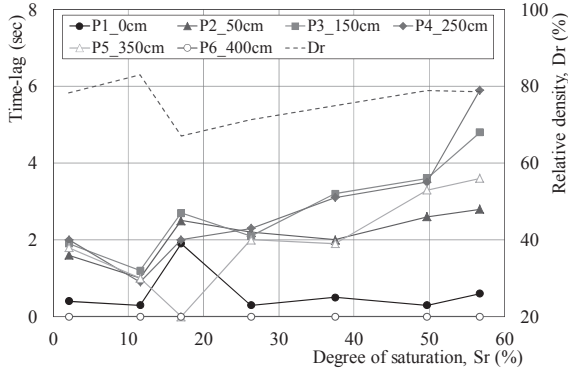
図-11 透気係数の算定結果 (川砂)  
[ $15^\circ\text{C}$ 換算結果, 相対密度 80%]

### 4.4 応答時間

川砂の試体作成時に設定した相対密度 (以下、設定相対密度と呼ぶ) 80%に対して、終端バルブ開放時の $10\text{kPa}$ の加圧時・除圧時における応答時間 (タイムラグ: 空気圧作用時並びにバルブ開放時から各点の空気圧が一定値になるまでの時間を表したものを) を図-12に示す。

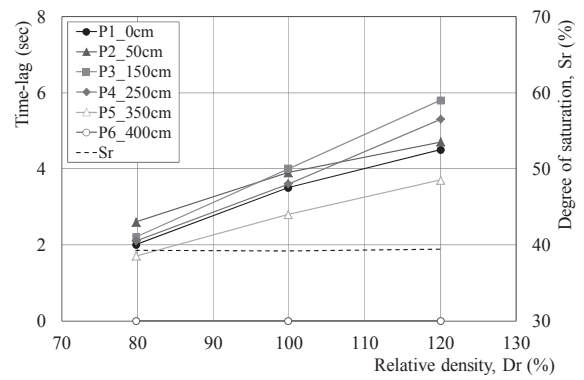


(a) 加圧過程 (10kPa)

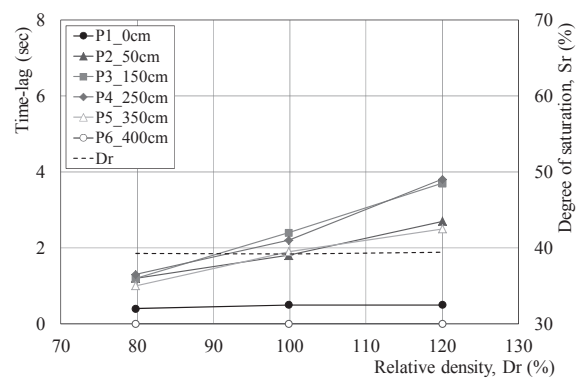


(b) 除圧過程 (10kPa)

図-12 終端バルブ開放時の圧力変化 [川砂, Case1: 飽和度による違い, 設定相対密度 80%]



(a) 加圧過程 (10kPa)



(b) 除圧過程 (10kPa)

図-13 終端バルブ開放時の圧力変化 [小田川砂, Case2: 相対密度による違い, 設定飽和度 40%]

透気試験において供試体上部での透気性の増加が懸念されたが、飽和度の上昇に伴い、特に除圧過程において概ね応答時間が長くなる傾向が表れていることが確認できた。同様に小田川砂の供試体作成時に設定した飽和度（以下、設定飽和度と呼ぶ）40%に対して、終端バルブ開放時の10kPaの加圧時・除圧時における応答時間を図-13に示す。相対密度が高くなるにつれて応答時間が長くなることから、この応答時間を現場の相対密度を把握する指標として用いることが有効であることが示唆された。ただし、現場での相対密度を把握するには、あらかじめ飽和度を求めておく必要がある。現場での飽和度測定は非常に困難であるため、飽和度と相対密度を分離するための指標がもう一つ必要である。

#### 4.5 圧力減衰量（発信孔と受信孔の空気圧の比）

発信孔と受信孔の空気圧の比を圧力減衰量として透気試験時の結果を整理したものを図-14、図-15に示す。これらの結果から、観測距離250cm以内の範囲で圧力減衰量は飽和度と相対密度に依存していることが明らかとなった。

#### 4.6 水みちの判断指標

上述の考察から、飽和度と相対密度の違いが特に除圧過程での応答挙動に影響していることが分かった。また、応答時間と併せて伝搬する空気圧の大きさも影響を受けている。

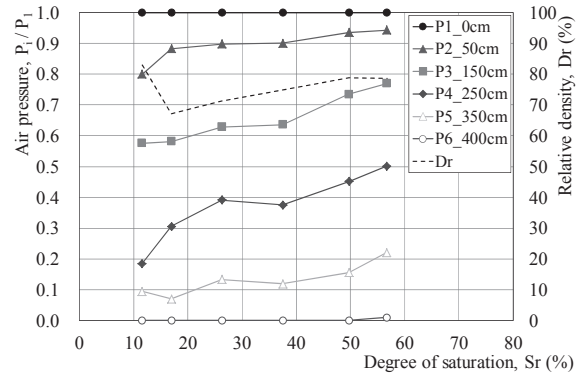


図-14 透気試験時の圧力減衰量

[川砂,  $Q=5L/min$ , 設定相対密度 80%]

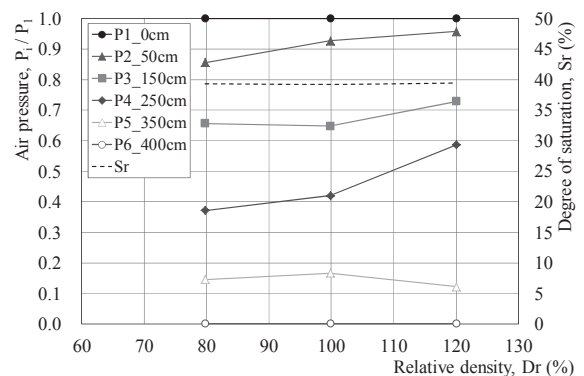


図-15 透気試験時の圧力減衰量

[小田川砂,  $Q=5L/min$ , 設定飽和度 40%]

つまり、現場での水みちの調査に関しては、これら応答時間と発信孔と受信孔の空気圧の比として示される

圧力減衰量の2つの指標を用いることができることが示唆された。そのため、あらかじめ飽和度を把握した上でこの応答時間を用いれば、相対密度の評価が可能である。ただし、現場の圧力伝搬状況は発信孔を中心として軸対称方向に伝播することから、受信孔で計測される圧力は大きく低下する可能性がある。

## 5. まとめ

本研究では、河川堤防の基盤調査技術の一つとして、亀裂性岩盤中の貯留量や不均質性の評価に用いられてきた空気圧トモグラフィーを多孔質媒体である地盤に適用することで透水層の連続性を把握し、水みちとなり得る弱点箇所の有無を判定する手法の開発を行った。

以下に本研究の内容をまとめる。

- (1) 段階的に空気圧を上昇させると、飽和度の上昇に伴って伝搬する圧力が上昇することを確認した。また、相対密度を変化させた場合においても同様の傾向を示した。
- (2) 段階的な加圧・除圧時における応答時間に関しては、飽和度が高くなるほど、また相対密度が高くなるほど、長くなる傾向を示し、特に除圧過程においてこれらとの相関性が高い結果を得ることができた。
- (3) 現場での水みちの調査に関しては、これら応答時間と発信孔と受信孔の空気圧の比として示される圧力減衰量の2つの指標を用いることができることが示唆された。

今後の課題としては、現場試験の結果を評価するために軸対称場実験モデルを拡大した上で更なるデータの蓄積が求められる。

## 謝辞

本研究は国土交通省国土技術政策総合研究所委託研究「透水性基礎地盤に起因する河川堤防の変形に関する技術研究開発：弱点箇所の抽出技術の開発」（研究代表者：西垣誠）（平成27～29年度）の一環として実施された成果に基づくものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 福島雅紀, 石原雅規: 講座・河川堤防, 2. 河川堤防の整備の歴史と被災形態, 地盤工学会誌, Vol.62, No.10, pp.46-53, 2014.
- 2) 国土交通省: 堤防詳細点検, [http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/05/050928\\_.html](http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/05/050928_.html), (閲覧日2017.6).
- 3) 中島秀雄: 図説 河川堤防, 技報堂出版, pp.102-104, 2003.
- 4) 国土交通省河川局治水課: 河川堤防設計指針, 8p.,

- 2002.
- 5) 土木学会九州北部豪雨災害調査団: 平成24年7月九州北部豪雨災害調査団報告書, 103p., 2013.
- 6) 倉田大輔, 福原直樹, 森啓年, 服部敦, 吉田直人, 石原雅規, 佐々木哲也: 透水性基礎地盤に起因する河川堤防の進行性破壊に関する模型実験, 河川技術論文集, 第21巻, pp.361-366, 2015.
- 7) 崔瑛, 小高猛司, 李圭太: 高透水性基礎地盤の基礎漏水に起因する堤体の進行性破壊に関する模型実験, 第70回土木学会年次学術講演会講演概要集, III-165, pp.329-330, 2015.
- 8) 林宏一: 統合物理探査を利用した河川堤防調査, 地盤工学会誌, Vol.65, No.1, pp.24-27, 2014.
- 9) 西村伸一, 柴田俊文, 珠玖隆行, 今出和成, 西垣誠: CPT による河川堤防の弱点箇所の同定, 第51回地盤工学研究発表会, C-03, 0108, pp.215-216, 2016.
- 10) Yeh, T.-C.J., Mao, D., Zha, Y., Hsu, K.-C., Lee, C.-H., Wen, J.-C., Lu, W., and Yang, J.: Why Hydraulic Tomography Works?, *Groundwater*, Vol.52, No.2, pp.168-172, 2014.
- 11) Illman, W.A., Thompson, D.L., Vesselinov, V.V., Chen, G., and Neuman, S.P.: Single-and cross-hole pneumatic injection tests in unsaturated fractured tuffs at the apache leap research site near superior, Arizona, phenomenology, spatial variability, connectivity, and scale, NUREG/CR-5559, U.S. Nucl. Regul. Comm., Washington, D.C., 186p., 1998.
- 12) Vesselinov, V.V., Neuman, S.P., and Illman, W.A.: Three-dimensional numerical inversion of pneumatic cross-hole tests in unsaturated fractured tuff 1. Methodology and borehole effects, *Water Resources Research*, Vol.37, No.12, pp.3001-3017, 2001.
- 13) 新村卓也, 西垣誠, 小松満, 館川逸朗: 空気圧を用いた連通試験の河川堤防への適用, 第52回地盤工学研究発表会, 0477, pp.951-952, 2017.
- 14) 地盤工学会: 土質試験—基本と手引き一, pp.17-102, 2009.
- 15) 地盤工学会: 不飽和地盤の挙動と調査, pp.31-33, 2004.
- 16) 神谷浩二, Rully Bakrie, 本城勇介: 保水性を制御した不飽和土の透気係数の測定, 土木学会論文集C, Vol.62, No.3, pp.670-688, 2006.
- 17) 西垣 誠, 瀬尾 昭治: 非定常法による不飽和土の透気係数の室内での計測法に関する研究, 土木学会論文集C (地圏工学), Vol.70, No.1, pp.83-95, 2014.

(2017年6月19日 受付)