

空気圧を用いた連通試験に関する水平一次元要素試験結果の評価

The Evaluation of Horizontal One-dimensional Element Test Result
on Field Communication Test Using Pneumatic Pressure

西原直也 Naoya NISHIHARA (岡山大学大学院環境生命科学研究科)
小松 満 Mitsuru KOMATSU (岡山大学大学院環境生命科学研究科)

河川堤防でパイピング破壊を生じる可能性のある連続した弱部を検出する方法として、空気圧による連通試験が提案されているが、受信孔で得られる応答挙動から対象とする領域の密度を定量的に評価する手法の開発が課題となっている。そこで、本研究では、水平一次元カラムを用いた要素試験で得られた相対密度と飽和度の違いによる空気圧の応答挙動を整理したデータに基づき、応答時間と応答比から相対密度の違いを推定する手法について検討した。その結果、相対密度を適切に把握するには、これら応答挙動の精度が必要であることが判明した。また、発信孔と受信孔の距離の変化による応答挙動の違いについて、観測スケールを考慮することで評価できる可能性を示した。

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

1. はじめに

地盤内の弱部の連続性を調べる際に、対象とする領域が地下水面以下の飽和状態であれば、水圧トモグラフィ¹⁾を用いることができるが、不飽和状態の場合では、通水による調査は不可能である。河川堤防の基礎地盤を例にとると、普段、地下水より上に位置していることから、この領域において、河川水位の上昇に伴う水みちが形成されるような透水層を事前に把握するための通水による方法は困難である。そのため、既存の物理探査手法に加えて、孔間での空気圧を用いた連通試験を用いて調査する手法が提案されている²⁾。この試験は、図-1に示すように発信孔より空気圧を作用させた際に、受信孔側での圧力上昇の有無より、対象とする不飽和領域内の連続・不連続性を確認する方法である。不飽和領域内では対象領域中に矢板などの遮蔽物がない限り、作用させた空気は透気性の最も高い地盤を流れることとなるため、事前に物理探査などの地盤調査から土層構成を把握するとともに、弱部の有無を確認した上で、適切な箇所に受信孔を設置する必要がある。

また、受信孔で検知される空気圧の減衰量は地盤の透気係数に依存することから、地盤の間隙状況を表す密度と間隙内に含まれる水分量によって変化するものと考えられる。そのため、弱部が存在している調査対象範囲が、将来、洪水などの増水に伴う地下水位の上昇が生じた際に、水みちになる可能性のある連続した弱部かどうかを判定するためには、受信孔で検知される空気圧の応答挙動から地盤内の水分量を考慮した平均的な密度を定量的に評価する必要がある。そこで、これまでに、室内で長さ4mの水平一次元カラムを用いた要素試験を実施し、供試体の飽和度と相対密度の違いに対して、応答時間と圧力減衰量の2つの応答挙動が変化することを示した³⁾。

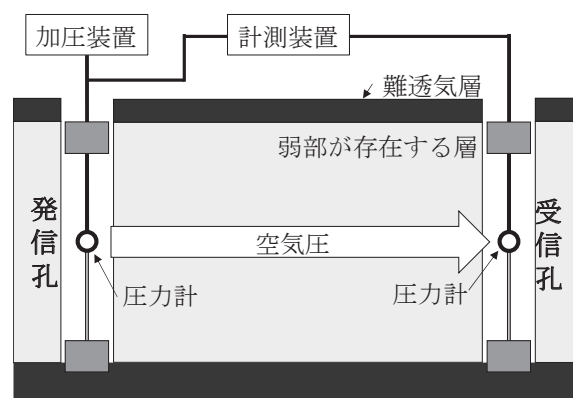


図-1 実現場における空気圧連通試験の概念図

なお、ここでの応答挙動の変化とは、飽和度と相対密度の上昇に伴って応答時間は長くなり、また、圧力減衰量は大きくなる傾向のことであるが、実際に地盤内の水分量と密度を定量的に把握するまでには至らなかった。

これらの現状を踏まえ、本研究では、要素試験の結果に基づいて整理した応答挙動から地盤の飽和度と相対密度の違いを推定する手法について検討した。なお、今回、圧力減衰量の代わりに、設定注入圧を基にした応答比を用いることとした。これは、地盤内の水分量が低く、透気性が極端に高い場合には、発信孔で検出される圧力が低くなることから、受信孔との差で表される圧力減衰量の値が小さくなることで結果の評価が困難となる可能性が懸念されたためである。また、要素試験に用いた水平一次元カラムの長さを従来の4mから1mにスケールダウンした。これは、充填作業を短時間で完了させることで供試体内の密度の均一性を確保するとともに、時間経過に伴う飽和度分布の変化が試験結果に及ぼす影響⁴⁾を極力小さくするように改善を図ったためである。

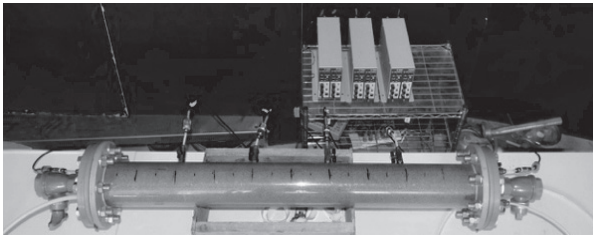


写真-1 水平一次元カラム実験状況

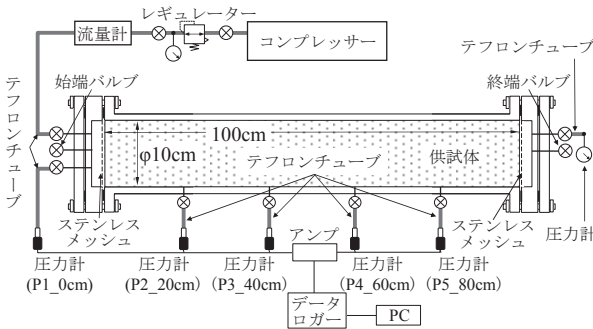


図-2 水平一次元カラム実験装置概略図

2. 実験方法

2.1 実験装置およ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-2に示す。なお、写真-1の左側が供試体の給気側となり、右側が排気側である。供試体容器は両端にフランジが付いた直径10cm×長さ1mのPVC製の円筒カラムであり、ステンレスメッシュを貼りつけた多孔板を有する蓋を給気側と排気側に取り付けた。空気圧の計測は、給気側と20cm間隔で設置した4点とを合わせて計5点とし、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により行った。各センサは、それぞれアンプを介した上で、データロガーにより計測間隔0.1秒でデータの収録を行った。供試体を作製する際は、カラムを水平状態からチェーンブロックで傾けた後、締固め棒を用いた突き固めを行った。なお、供試体が所定の含水比と乾燥密度になるよう、5または10cmごとに突き固めた。

2.2 実験方法

供試体作製後、直ちに2つの試験を以下の順に連続して実施し、試験終了後、速やかに供試体内に充填した土の質量と含水比を測定し、それぞれのケースでの結果を整理した。

2.2.1 加圧試験（終端バルブ開放）

対象とする領域内に矢板などの行き止まりがなく、連続している状況で、かつ、空気が連通する土層の終端が大気に接している状況を模擬した。具体的には、終端バルブを開けて大気圧に開放した状態で、レギュレータで10kPaに設定した空気圧をコンプレッサーからレギュレータを介して60秒間与えた。計測終了時には、瞬時にバルブを開放

表-1 試料の物性試験結果³⁾

試料		川砂
土粒子密度	$\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.682
最大乾燥密度	$\rho_{d\max}(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.759
最小乾燥密度	$\rho_{d\min}(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.449
最大間隙比	e_{\max}	0.851
最小間隙比	e_{\min}	0.525

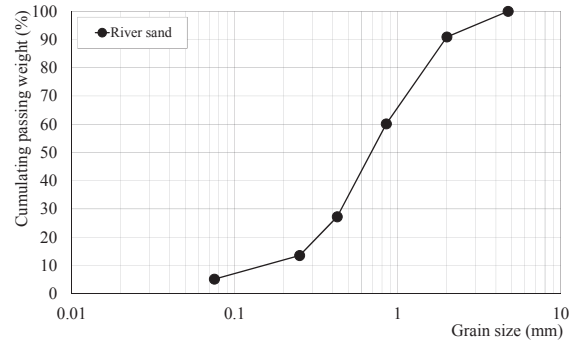


図-3 試料の粒径加積曲線³⁾

すると細粒分が移動し、目詰まりや土粒子の骨格が変化する懸念があったため、始端バルブを閉じたまま、排気用のバルブを手動で調整し、毎秒0.5kPa程度ずつゆっくりと開放し、大気圧まで圧力を下げることを計測毎に行った。

2.2.2 透気試験

レギュレータと始端バルブの間に空気流量計を設置し、一定圧力での定常透気試験を実施した。具体的には、終端バルブ開放時と同じ圧力になるようにレギュレータを固定し、各計測点で計測した圧力が定常状態に至ったことを確認した上で、その値を記録した。

2.3 試料の物理特性

本研究では、岡山県内で販売されている一般的な川砂を材料として用いた。JISA 1202, JISA 1204, JISA 1224に準じて測定した物性試験結果の一覧を表-1に示すとともに、図-3に粒径加積曲線を示す。

2.4 実験ケース

実験ケースを表-2に示す。設定相対密度をCase1では80%、Case2では85%、Case3では90%、Case4では95%、Case5では100%で、それぞれ水分量による応答挙動の変化を確認するために、さらに飽和度を設定して供試体を作製した。なお、表-2中の体積空隙率は供試体中に存在する空気の体積を表すパラメータであり、空隙率と体積含水率の差として求められる。また、表中の乾燥密度は実際に充填した質量、飽和度と相対密度は乾燥密度の値をもとに表-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。これまでに用いた4mの水平一次元カラムにおいては、締固め不足のケースがあった³⁾。しかし、本実験ではカラム長が短くなり、作業量が減ったことに加え、1層あたりのピッチを短くしたことで、締固め不足の程度は小さくなった。しかし、供試体作製時はカラムを傾けて

表-2 水平一次元カラム実験ケース

Case	設定値		実測値				
	相対密度	飽和度	相対密度	体積空隙率	飽和度	含水比	乾燥密度
	D_{rset} (%)	S_{rset} (%)	D_r (%)	$\theta_a(-)$	S_r (%)	w (%)	ρ_d (g/cm ³)
1-1	80	0	80.1	0.367	1.1	0.2	1.687
1-2		10	80.1	0.334	10.0	2.2	1.687
1-3		20	80.1	0.297	20.1	4.4	1.687
1-4		25	80.1	0.278	25.0	5.5	1.687
1-5		30	80.1	0.260	29.9	6.6	1.687
1-6		40	80.1	0.222	40.1	8.8	1.687
1-7		45	80.1	0.204	45.0	9.9	1.687
1-8		50	79.8	0.185	50.0	11.0	1.687
2-1	85	0	84.9	0.361	1.0	0.2	1.704
2-2		10	84.9	0.328	10.0	2.1	1.704
2-3		20	84.9	0.292	19.9	4.3	1.704
2-4		25	84.9	0.273	25.0	5.4	1.704
2-5		30	84.9	0.255	30.0	6.4	1.704
2-6		40	84.9	0.219	39.9	8.5	1.704
2-7		45	84.8	0.201	45.0	9.6	1.704
2-8		50	84.6	0.182	50.0	10.7	1.704
3-1	90	0	90.0	0.354	1.2	0.2	1.722
3-2		10	90.0	0.322	10.0	2.1	1.722
3-3		20	90.0	0.286	20.0	4.2	1.722
3-4		25	90.0	0.268	25.0	5.2	1.722
3-5		30	89.7	0.250	30.0	6.2	1.722
3-6		40	90.0	0.215	39.9	8.3	1.722
3-7		45	89.7	0.197	45.0	9.4	1.722
3-8		50	89.7	0.179	50.0	10.4	1.722
4-1	95	0	94.9	0.349	0.6	0.1	1.740
4-2		10	94.9	0.316	10.0	2.0	1.740
4-3		20	94.9	0.281	20.0	4.0	1.740
4-4		25	94.9	0.263	25.0	5.1	1.740
4-5		30	94.9	0.246	30.0	6.1	1.740
4-6		40	94.9	0.211	40.0	8.1	1.740
4-7		45	94.6	0.193	45.0	9.1	1.740
4-8		50	94.6	0.175	50.2	10.1	1.740
5-1	100	0	100.0	0.341	0.8	0.2	1.759
5-2		10	100.0	0.309	10.1	2.0	1.759
5-3		20	100.0	0.276	19.9	3.9	1.759
5-4		25	100.0	0.258	25.0	4.9	1.759
5-5		30	100.0	0.241	30.0	5.9	1.759
5-6		40	100.0	0.207	39.9	7.8	1.759
5-7		45	99.7	0.189	45.0	8.8	1.759
5-8		50	99.9	0.172	50.0	9.8	1.759

表-3 供試体の始端と終端の水分分布の一例

ケース		全体		乾燥密度 (g/cm ³)	始端			乾燥密度 (g/cm ³)	終端			
		乾燥密度 (g/cm ³)	含水比 (%)		含水比(%)				含水比(%)	上	下	10cm
					上	下	10cm					
S _r 50	D_r80	1.687	11.0	1.687	11.0	11.1	11.1	1.687	10.9	10.8	11.0	
	D_r85	1.704	10.7	1.703	10.6	10.5	10.7	1.704	10.6	10.6	10.7	
	D_r90	1.722	10.4	1.722	10.4	10.2	10.3	1.721	10.3	10.4	10.4	
	D_r95	1.740	10.1	1.739	10.0	10.0	10.2	1.740	10.1	10.0	10.0	
	D_r100	1.759	9.8	1.759	9.7	9.8	9.9	1.760	9.9	9.8	9.9	

いること、試料を容器内に充填する際に、乾燥等により、僅かながら含水量が変化するため、実測値と設定値には若干の差異が認められた。また、飽和度10~50%のケースにおいて、試験後に供試体を解体する際に、カラムの始端側と終端側の10cm分の、鉛直方向と10cm分の平均含水比を

測定することで、供試体内の水分移動が生じていないことを確認した。なお、設定飽和度0%のケースでは水分移動が生じることはないので、乾燥密度のみ計測を行った。最も水分量の高い飽和度50%での結果を表-3に示す。

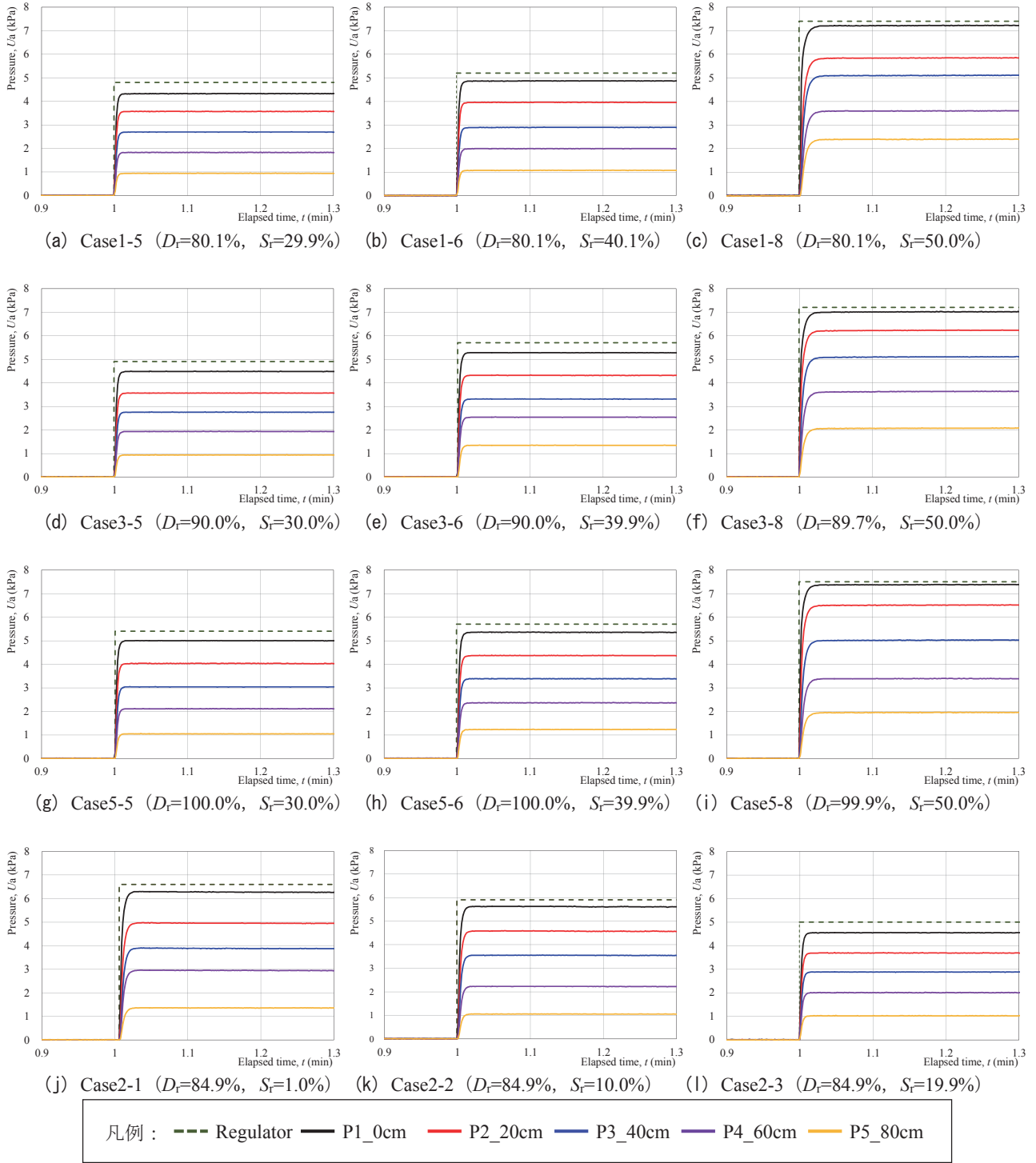


図-4 終端バルブ開放時の飽和度・相対密度に対する応答挙動の変化の一例

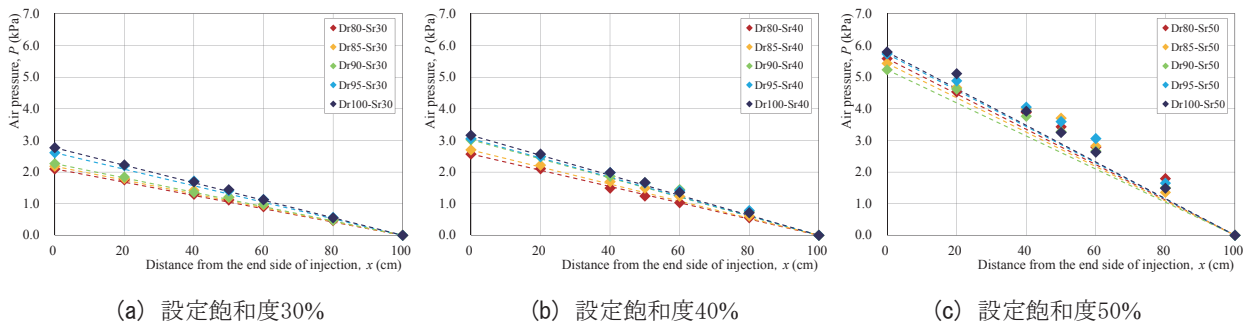


図-5 空気圧と距離の関係

3. 実験結果

3.1 加圧試験（終端バルブ開放）

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、Case1～5の応答挙動の変化を図-4に示す。図-4(a)～(c)の同じ相対密度のケースで比較すると、飽和度が低いものに対しては圧力損失が大きいため、各計測点で計測された圧力の値とレギュレータでの設定圧力である「Regulator」の値は低下するが、飽和度が高くなるにつれて、これらの値は徐々に上昇する状況を確認できる。また、(a) (d) (g)の同じ飽和度のケースにおける各計測点で計測された圧力の値とレギュレータでの設定圧力を比較すると、相対密度が高くなるにつれて計測される圧力と設定圧力の値が上昇する状況も確認された。飽和度30～50%のその他のケースについても上記と同様の傾向を示した。なお、これらはこれまでの研究³⁾で確認されたものと同じ傾向であった。一方で、(j)～(l)の飽和度の低いケースでは飽和度の上昇に伴い、計測される圧力と設定圧力が減少する結果となった。

3.2 透気試験

終端バルブ開放時にレギュレータで設定した圧力での透気試験結果より、各設定相対密度における空気圧と距離の関係を整理した一例を図-5に示す。図-5のグラフの傾きから各ケースの動気勾配が確認できる。同じ透気係数の場合、動気勾配は空気の流量に比例して大きくなり、空気流量が少なくなると小さくなるパラメータである。また、図-5から、相対密度が上昇するにしたがって供給側(x=0cm)での圧力が上昇していることが分かる。なお、排気側(x=100cm)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、(a)と(b)では、空気圧と距離の関係が直線になることが確認できるが、(c)では直線関係から外れ、曲線状に点が分布していることが確認できる。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圧縮性流体として算出することとした⁵⁾。

次に、得られた透気係数は飽和度との関係により次式で示されるYoshimiらの式⁵⁾を用いて近似直線を求めた。

$$\log k_a = A + B \log \{e(1 - S_r/100)\} \quad (1)$$

ここで、変数A, Bは土の状態より決まる定数である。なお、式(1)中の定数は、設定相対密度80%でA=1.98, B=3.01, 85%でA=1.98, B=3.00, 90%でA=2.01, B=3.06, 95%でA=1.99, B=3.04, 100%でA=1.81, B=2.58となった。

透気係数と体積空隙率の関係を図-6に示す。同じ相対密度であっても、体積空隙率が減少するほどに透気係数も概ね減少する傾向が確認できる。また同じ飽和度のケースの場合、相対密度が低くなるに従い、体積空隙率が大きくなることにより、透気係数が高くなることも確認できる。これは、相対密度が低いほど間隙が大きくなり、空気の連続性が高くなることから、透気係数が高くなったものと理解できる。また、飽和度が上昇するにしたがって体積空隙率の変化が小さくなることで透気係数の変化量が小さくな

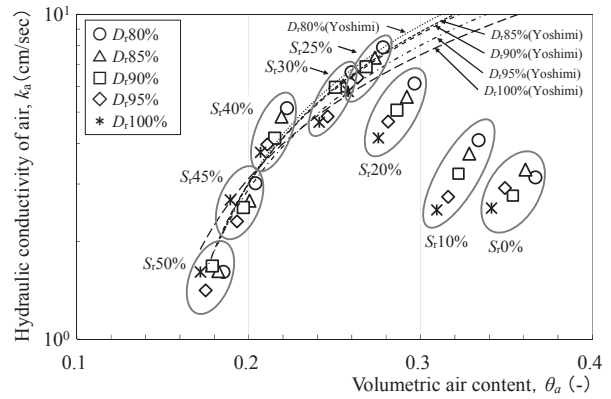


図-6 透気試験結果

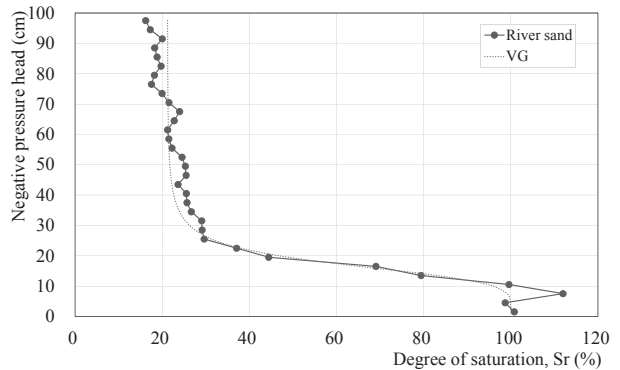


図-7 保水性試験結果

ることも確認できる。これは、相対密度が低いほど間隙が大きくなり、空気の連続性が高くなることから、透気係数が高くなったものと理解できる。一方で、 $\theta_a=0.3\sim0.4$ の範囲にある飽和度0～20%のケースは、Yoshimiらの式から得られた傾向から大きく離れる結果となった。ここで相対密度80%での保水性試験の結果を図-7に示す。試料として用いた川砂では、飽和度0～20%とが残留飽和度未満であることが分かる。これにより、含水量の違いによって形成する土粒子骨格が飽和度25%以降のケースと異なることが考えられる。これらの理由から以降では飽和度0～20%を除外して議論を行うこととした。

4. 考察

4.1 加圧試験結果（応答時間）

応答時間は、P1 (0cm)の圧力が上昇し始めた時間から、P3 (40cm)での圧力が定常状態に至った時間とした。P3以外の計測点では、P2 (20cm)はP1と距離が近く、圧力の減衰量や伝わる時間が小さくなり、反応特性があらわれにくいことが考えられること、また、P4 (60cm)以降については大気圧開放に近くなると計測される圧力が小さくなり、0.1秒ごとの圧力の前後差が小さくなるため、反応特性があらわれにくいと考えられる。したがって、中心付近に位置し、大気圧開放の境界から離れているP3が計測点の中で最も反応特性があらわれやすいと判断した。なお、定常状

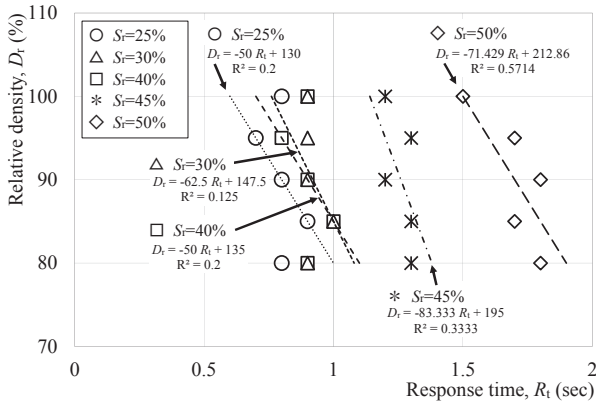


図-8 相対密度と応答時間の関係

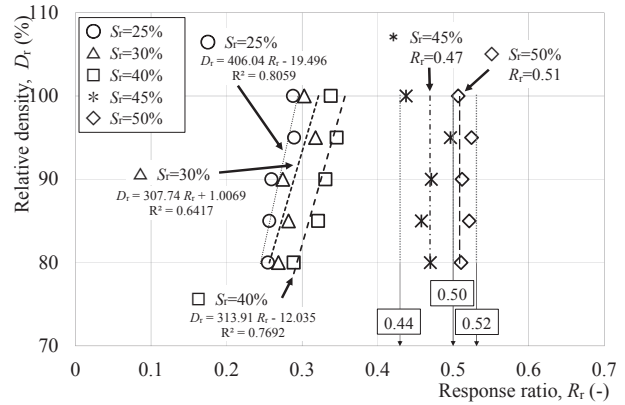


図-10 相対密度と応答比の関係

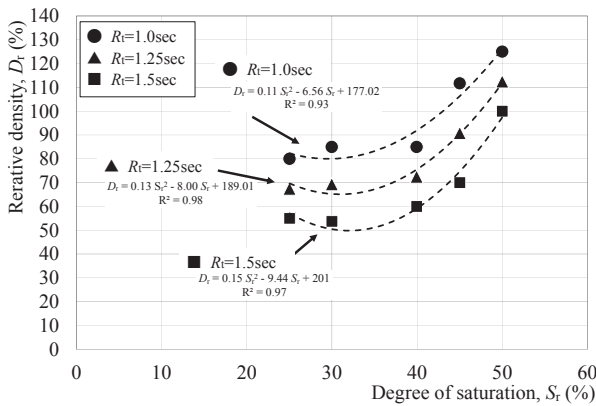


図-9 各応答時間で整理した飽和度と相対密度の関係

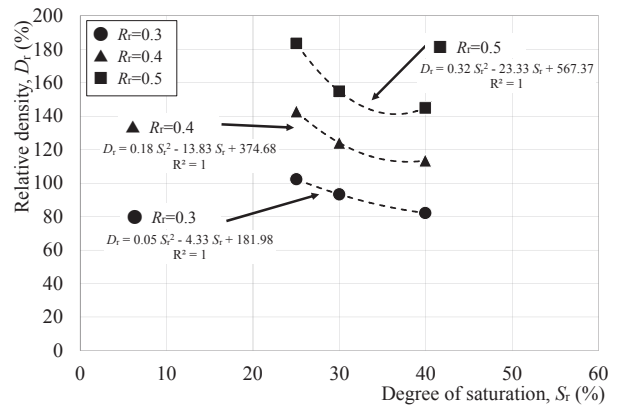


図-11 各応答比で整理した飽和度と相対密度の関係

態の判断は、0.1秒ごとに計測した空気圧力の前後の差が0または初めて値が負に転じた時であり、そのケースにおける時間とした。各飽和度における相対密度と応答時間の関係を整理した結果を図-8に示す。同じ相対密度で比べると、飽和度が高くなるにしたがって概ね応答時間が長くなることが分かる。

一方で、同じ飽和度で比較すると、相対密度の上昇に伴い、応答時間が概ね減少していることが分かる。これは、相対密度の上昇によって、体積空隙率が減少することで、空気の連続面が減少するとともに、空気で満たされる体積が小さくなるため、定常状態に至るまでの時間が短くなったものと理解できる。また、飽和度45%と50%の直線が他のケースと比べ右側にプロットされているのは、透気係数が極端に低く算出された影響であることが考えられる。

次に、図-8の近似直線を基に3つの応答時間 ($R_t=1.0$ 秒, 1.25 秒, 1.5 秒) での相対密度と飽和度の関係を図-9に示す。飽和度25~50%にかけて、右肩上がりの曲線傾向が確認できる。そのため、近似曲線は2次式で表現することとした。すべての近似曲線で相関係数が0.9以上となった。

4.2 加圧試験結果 (応答比)

応答比は、受信孔側で空気圧が定常状態になったときの圧力を設定注入圧力 (10kPa) で除したものとした。各飽和度において相対密度と応答比の関係を整理した結果を図-10に示す。飽和度と相対密度がそれぞれ高くなるにつ

れて、応答比も概ね大きくなる傾向を確認した。一方で、飽和度45%と50%は、相対密度と応答比がほぼ鉛直方向の直線関係を示した。飽和度25~40%までのケースと比べてこれらのケースでは相対密度80%と100%での体積空隙率の差が小さい。つまり、相対密度の変化による空気の連続面の変化量が少ないため透気係数の差が小さくなり、どの相対密度パターンにおいても同程度の圧力が計測されるため、鉛直方向の関係になったことが考えられる。これらの原因として、カラム長が1mと短く、体積空隙率の僅かな変化を捉えることができなかつたため、結果に顕著な傾向があらわれなかつた可能性が考えられ、供試体のスケールについては今後の課題の一つとして挙げられる。ここで、3つの応答比 ($R_r=0.3, 0.4, 0.5$) での相対密度と飽和度の関係を図-11に示す。同じ飽和度で比較した場合、相対密度が上昇するにつれて応答比が高くなっている状況、同じ相対密度で比較した場合、飽和度が上昇するにつれて応答比が高くなっている状況を確認した。

4.3 飽和度と相対密度の推定

以上の結果を基に、応答時間と応答比から相対密度と飽和度を推定する方法を検討した。図-9および図-11で求めた曲線関係を式(2)および式(3)にそれぞれ示す。

$$D_r = a * S_r^2 + b * S_r + c \quad (2)$$

$$D_r = d * S_r^2 + e * S_r + f \quad (3)$$

ここで、変数 a, b, c は応答時間、変数 d, e, f は応答

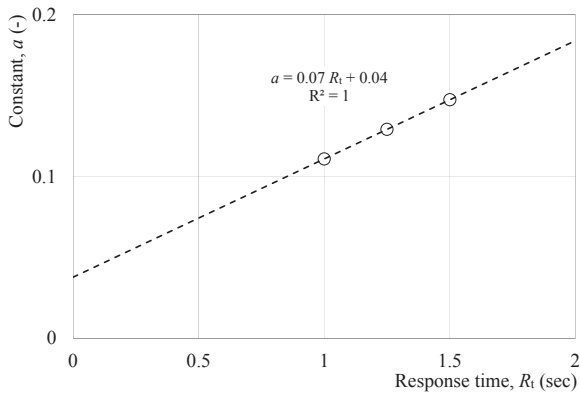


図-12 定数aと応答時間との関係

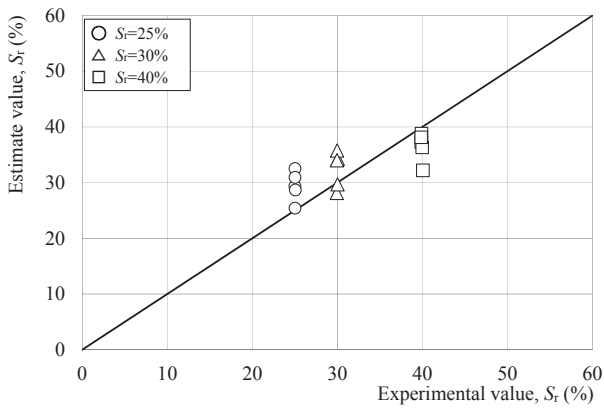


図-13 飽和度の実測値と推定値の関係

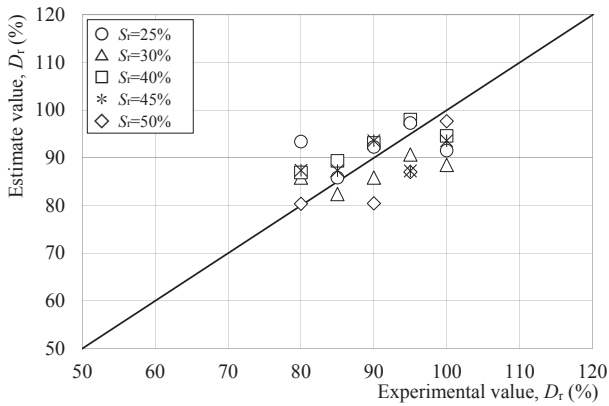


図-14 相対密度の実測値と推定値の関係

比でそれぞれ整理した際に得られる値である。ここで飽和度に関して解くと式(4)、式(5)が得られる。

$$S_r = (- (b - e) \pm D^{1/2}) / 2 / (a - d) \quad (4)$$

$$D = (b - e)^2 - 4 * (a - d) * (c - f) \quad (5)$$

また、式(4)、(5)中の変数には応答時間 (R_t) と応答比 (R_r) に関する以下の式を代入する。

$$a = 0.07 R_t + 0.04 \quad (6)$$

$$b = -5.76 R_t - 0.79 \quad (7)$$

$$c = 47.97 R_t + 129.04 \quad (8)$$

$$d = 1.37 R_r - 0.36 \quad (9)$$

$$e = -95.01 R_r + 24.17 \quad (10)$$

$$f = 1926.95 R_r - 396.10 \quad (11)$$

表-4 4m 水平一次元カラム実験ケース³⁾ (一部抜粋)

Case	設定相対密度 D_{rset} (%)	設定飽和度 S_{rset} (%)	相対密度 D_r (%)	飽和度 S_r (%)
1-1	80	30	71.3	26.3
1-2	80	40	74.9	37.5
1-3	80	50	78.9	49.7
1-4	80	60	78.6	56.7

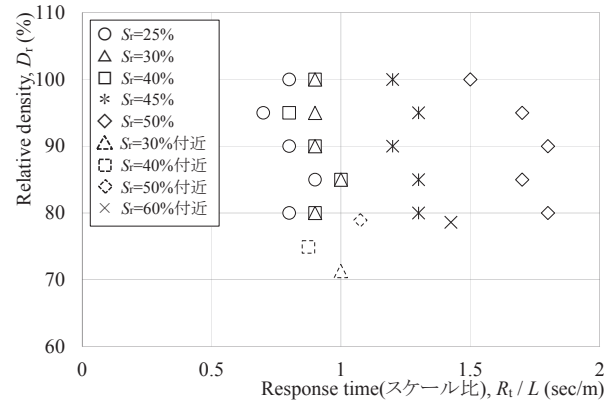


図-15 相対密度とスケールで正規化した応答時間の関係

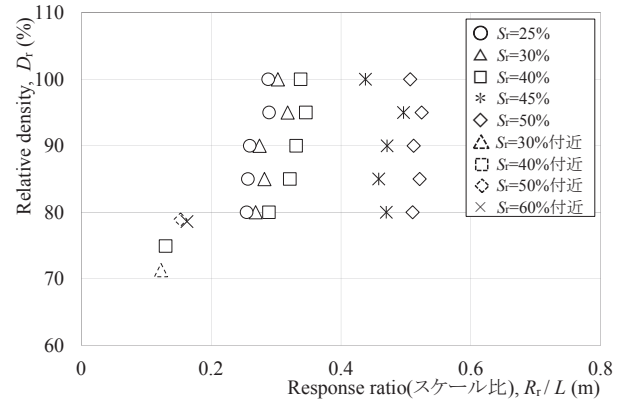


図-16 相対密度とスケールで正規化した応答比の関係

それぞれの定数と応答時間 (R_t) あるいは応答比 (R_r) の関係の一例として、式(6)のグラフを図-12 に示す。試験により得られた応答時間 (R_t) と応答比 (R_r) から各グラフの縦軸を読み取ることによって定数の値を取得することができ、その値をもとに、相対密度と飽和度の推定を行うことができる。作成した推定式に要素実験での応答時間と応答比の計測値を入れ、相対密度と飽和度の推定値を求めることで推定式の誤差を検討した。

推定値を求める際に、それぞれのケースにおいて解が2通り算出され、式(4)中の±が負の場合は、結果のばらつきが大きだけでなく、現実にはあらわれない点を取るものもあらわれた。そのため、式(4)中の±を正の符号として扱い、飽和度と相対密度のそれぞれについて推定値を算出した。また飽和度 45%と 50%については、図-10の「相対密度と応答比の関係」が鉛直方向の関係であるため、上述した連立方程式を用いることができない。そのため、応答時間から作成する式(2)に得られた応答時間を代入して相対密度の推定値を求めることとした。

各ケースの実測値と推定値を比較した結果を図-13 および図-14 に示す。飽和度については推定値と実測値とがかなり近いケースが多数あらわれ、推定値の乖離は最大で10%程度となった。また、相対密度についても同様に推定値と実測値とが近い傾向があらわれている。しかし、推定値と実測値とが15%程度乖離するケースも見られる。実測値と推定値の関係が乖離したケースがあらわれた原因は、推定に用いた応答時間か応答比にあるものと考えられる。ここで、応答比は比較的相関性が高いことから、応答時間に原因があるものと推察される。実際、図-8 に示したように、応答時間にはばらつきがみられたことから、応答時間の取り方を再考することが必要である。また、本手法では飽和度と相対密度を同時に推定することを試みたが、飽和度（あるいは含水比）を既知のパラメータとして取り扱うことで推定値の精度が上がる可能性がある。つまり、応答比のみを用いる手法を適用するなど、さらなる検討を行うことが今後の課題として挙げられる。

4.4 スケール比に関する評価

次に、本研究に用いた1m カラムで得た結果と、これまでの研究で用いた4m カラムでの結果³⁾について比較を行う。表-4 に4m 水平次元カラム実験ケースを示す。両者の応答時間と応答比を直接比較すると、供試体長（以下、スケールと称する）の違いで大きな乖離がみられるため、それぞれのスケールで応答時間および応答比を除いた上で、相対密度と応答時間および応答比の関係を図-15 におよび図-16 にそれぞれ示す。なお、実線枠は本実験で得た結果であり、点線枠の凡例が4m 水平次元カラム実験ケースの結果である。両者の相対密度と応答時間の関係は、概ね近い値に集まっている。また、相対密度と応答比との関係は、ばらつきは認められるものの、概ね同じ傾向を示すことが分かった。結果として、長さの違うカラムにより得られた結果でも、そのスケールで除すことで同じように評価できる可能性が示唆された。

5. まとめ

本研究では、地盤内の弱部の連続性を調査する空気圧連通試験について、室内要素試験で得られた応答挙動より対象とする領域の物性値を把握する手法の開発を行った。具体的には、1m の水平次元カラムでの要素試験結果を基に、空気圧の伝播の程度を表す応答比と伝わる際の時間遅れの特性としての応答時間の二つのパラメータより相対密度と飽和度の推定を行い、実測値との関係に対して考察を加えるとともに、受信孔の位置に対する評価方法を示した。

以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) 加圧過程において、飽和度の上昇に伴って伝播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) 加圧過程において、応答比は飽和度が高くなるほど、また相対密度が高くなるほど大きくなる傾向を示した。その一方、応答時間は相対密度と飽和度による変化に対して、ばらつきの多い結果となったが、飽和度が高くなるほどに時間は長くなり、相対密度が高くなるほど短くなる傾向を示した。
- (3) 応答時間と応答比の計測値に基づき相対密度と飽和度を推定した結果、推定値と実測値とはばらつきはあるものの、比較的近い結果となった。推定値と実測値とが乖離した原因として応答時間と相対密度の関係のばらつきが起因していることが判明した。
- (4) 相対密度と応答比・応答時間の関係において、長さの異なるカラムを用いた際でも、スケールで除すことで同じように評価できる可能性が示唆された。

今後の課題としては、応答時間の取り方を再考すること、地盤の水分量を既知のパラメータとして取り扱い、応答比のみを指標として用いること、要素試験のデータを蓄積することが挙げられる。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費助成事業（16H02577）（土構造物の三次元計測と内部診断技術による高精度性能照査に基づく意思決定法の提案、研究代表者：西村伸一、岡山大学教授）（平成28～31年度）の助成を受けて実施した研究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) Yeh, T.-C.J., and Liu, S.: Hydraulic tomography: Development of a new aquifer test method, *Water Resources Research*, Vol.36, No.8, pp.2095-2105, 2000.
- 2) 新村卓也, 西垣誠, 小松満, 舘川逸朗: 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.
- 3) 小松満, 西原直也, 新村卓也, 舘川逸朗, 西垣誠: 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次元カラムを用いた基礎的実験, 地盤と建設, Vol.35, No.1, 2017.
- 4) 小松満, 西原直也: 水平次元透気試験における供試体の飽和度分布に関する検討, 土木学会中国支部第69回研究発表会, III-44, pp.245-246, 2017.
- 5) Yoshimi, Y. and Osterberg, J. O.: Compression of partially saturated cohesive soils, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol.89, No.SM4, pp.1-24, 1963.

(2018年6月18日 受付)