

河川堤防の弱点箇所を抽出する空気圧による連通試験手法の開発

Development of Cavity-Detecting Test Method Using Pneumatic Pressure to Identify Weak Parts of River Levee

新村卓也 Takuya NIIMURA (パシフィックコンサルタンツ (株))
 藤吉秀彰 Hideaki FUJIYOSHI (パシフィックコンサルタンツ (株))
 舘川逸朗 Itsuro TATEKAWA (パシフィックコンサルタンツ (株))
 齋藤雅彦 Masahiko SAITO (神戸大学大学院工学研究科)
 珠玖隆行 Takayuki SYUKU (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)
 西村伸一 Shinichi NISHIMURA (岡山大学大学院環境生命科学研究科)
 西垣 誠 Makoto NISHIGAKI (岡山大学大学院環境生命科学研究科)

長大な河川堤防において堤体直下の基礎地盤に局所的に潜在する高透水層、水ミチ等の弱点箇所を抽出することは、連続堤としての安全性を把握する上で、極めて重要である。著者らは堤体直下の不飽和透水性地盤を対象に、弱点箇所の連続性を把握する新たな調査法として「空気圧を用いた連通試験」を考案し、試験装置プロトタイプを製作した。また、実証実験を繰り返し実施し、試験装置の改良を行ってきた。本報では改良前後の試験結果、試験装置の改良点、同手法の実用化に向けた今後の課題について報告する。

キーワード：河川堤防 パイピング 連通試験 間隙空気 (IGC : D04)

1. はじめに

2012年8月の九州北部豪雨において、矢部川では基礎地盤の浸透破壊が主な原因で堤防が決壊した。その後の地質調査の結果から、被災箇所付近には限定的に砂層が堆積し、堤防横断方向では砂層を堤内地側で閉塞するように粘性土が堆積していたことなどが、原因と推定されている。

一方、現行基準²⁾では、浸透に対して問題があると想定される区間における河川縦断方向のボーリング調査の間隔目安として最低限1kmとなっており、矢部川決壊事例のように局所的に存在した砂層を事前に把握することは困難である。

著者らは既往のボーリング調査間に潜在する浸透安定の観点からの弱点箇所を抽出する手法として、図-1に示すように、複数の調査法を組合せて絞込む手法を提案³⁾し、実河川堤防を対象に実証実験を行っている。

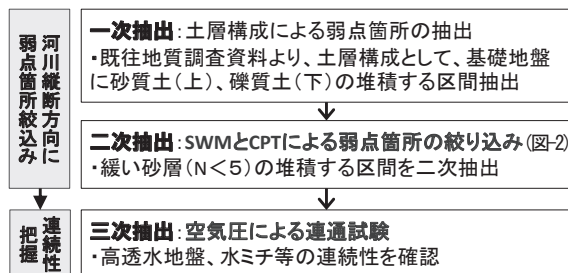


図-1 河川堤防の弱点箇所を抽出する手法

弱点箇所を合理的かつ経済的に抽出する手法として、土層構成による一次抽出、表面波探査(SWM) + 電気式静的コーン貫入試験(CPT)による二次抽出、空気圧による連通試験による三次抽出、という流れで絞り込む。

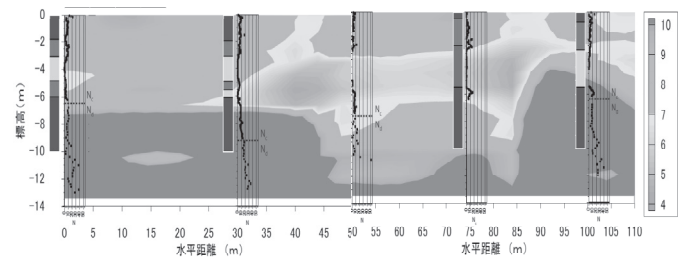


図-2 SWM+CPTによる二次抽出

この中で、「空気圧による連通試験」とは堤体直下の不飽和領域を対象に、局所的に存在する高透水範囲、水ミチ等の連続性を把握するために考案した、全く新しい調査手法である。飽和領域では水圧による連通試験、音響トモグラフィ等、土層の連続性を把握する技術が存在するが、不飽和領域を対象とした調査手法は存在しない。

過年度の研究では試験装置プロトタイプの製作および実証実験を行い、2m程度の調査孔間隔で空気圧の伝播を確認⁴⁾している。一方、本調査法を河川堤防へ適用するためには、計測可能な調査孔間隔を広げるなど、試験装置の改良が課題であった。本報では改良後の試験装置を用いた実証実験結果について考察すると共に、本調査法の実用化に向けた、今後の課題について整理を行った。

2. 空気圧による連通試験

2.1 測定原理

「空気圧を用いた連通試験」イメージを図-3 に示す。

小高ら⁹⁾の研究によると、河川堤防の基礎地盤において砂質土が堆積し、その下が高い透水性を有する土層構成の場合、決壊に至るような堤体変形が発生する可能性が指摘されている。本手法はこのような堆積構造を対象に、空気を注入し、空気圧の伝播状況から連続性を把握するものである。

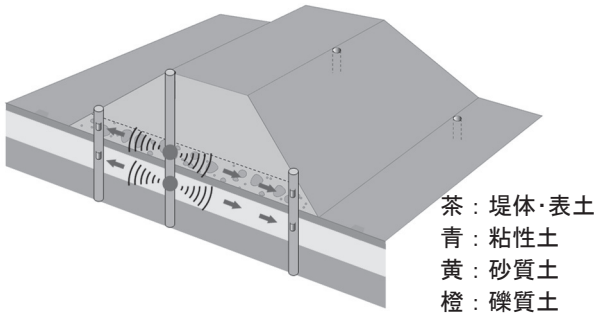


図-3 空気圧を用いた連通試験イメージ図

2.2 試験装置

本手法は図-4 に示すように、発信孔から対象層へ直接空気を注入すると共に、周辺に配置した受信孔における空気圧の伝播状況の相対比較により、地盤内に潜在する高透水層や水ミチ等の連続性を把握するものである。試験装置はCPTの調査孔φ36mmへ挿入可能な装置とし、地盤内へ空気注入する発信孔、および、注入空気圧を検知するための受信孔で構成する。写真-1 は実証実験で行った際の発信孔および配置機器の事例を示したものである。

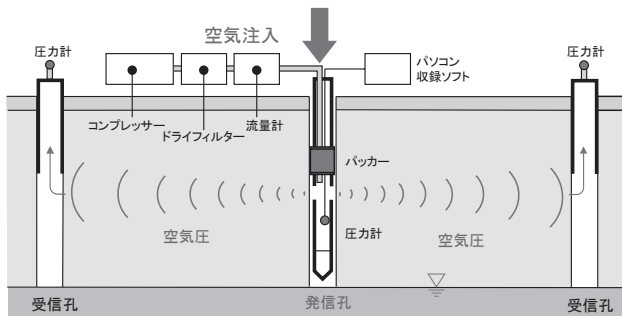


図-4 調査孔の配置イメージ

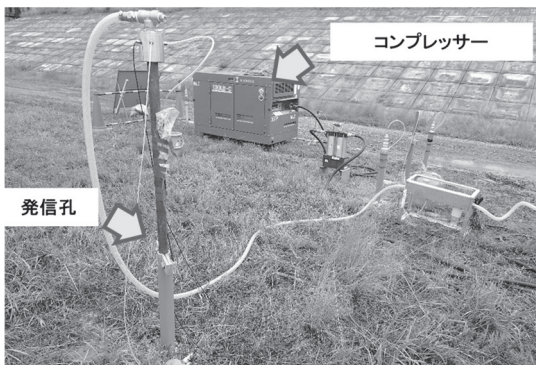


写真-1 発信孔および配置機器

3. 現地実証実験

3.1 実験対象堤防

本調査手法の河川堤防への適用性を検証する目的から、実河川堤防を対象に実証実験を行った。

実証実験は堤防高 H=5.6m、天端幅 3m、のり勾配 2 割の中規模堤防で行った。河川縦横断方向の土層構成を図-5、6 に示す。堤体は砂質土主体、基礎地盤は表層に砂質土(As2層)、その下に礫質土(Dg層)が堆積している。

3.2 実証実験ケース

表-1 に示す 2 ケースは、河川堤防の内部に空気を注入した際の空気圧伝播の計測可否を把握する目的で行ったものである。実証実験(1)では、注入空気が周辺地盤へ広がっていることを確認しているものの、受信孔での空気圧は計測できていない。一方で、実証実験(2)では試験装置の改良により、受信孔の計測データを取得することができている。

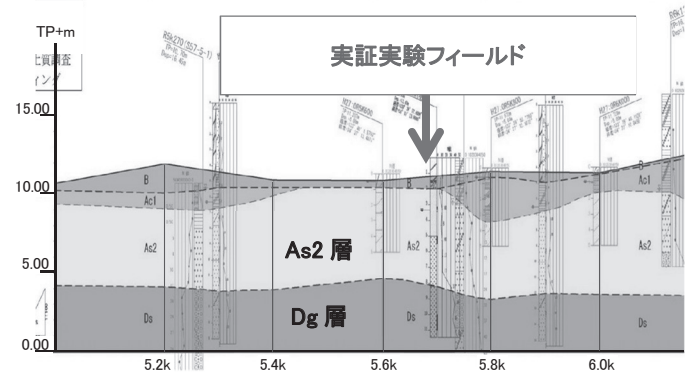


図-5 想定地質縦断図

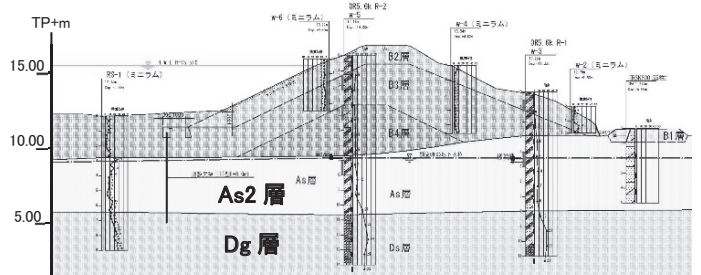


図-6 想定地質横断図

表-1 実証実験ケース

ケース	観測孔間隔	調査結果
実証実験(1)	横断:5, 10m 縦断:1m	1m間隔で、空気を検知 ただし、計測不可
実証実験(2)	横断:9, 18m 縦断:30m	9m 間隔で、空気圧 を計測

3.3 実証実験 (1)

3.3.1 観測孔の配置

観測孔の配置平面図を図-7に示す。観測孔は過去に漏水の発生した地点とした。空気を注入する発信孔は川表のり肩付近に、空気の伝播を受信する受信孔は発信孔から堤防の横断方向に5mおよび10mの離隔を取った地点、および縦断方向に1mの離隔を確保した地点に配置する計画とした。

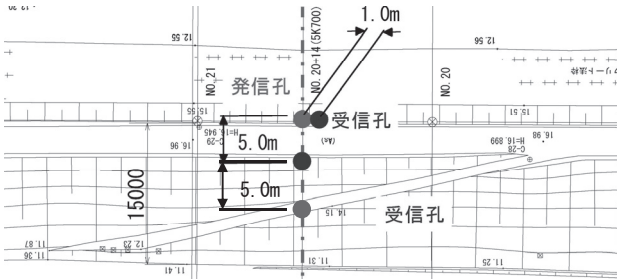


図-7 観測孔の平面配置図

観測孔の横断配置図を図-8に示す。観測孔内において堤内地盤高程度で深では飽和度の高い状況が確認されたことから、空気を発信・受信する深度は堤体盛土下部程度に設定した。地下水位は堤内地盤高-1.0m程度の深度に確認した。空気注入深度における堤体材の粒径加積曲線を図-9に示す。旧堤にあたるB4は細粒分質砂に分類され、透水係数(D₂₀推定)⁶⁾は、 $k_s=1 \times 10^{-5}$ m/s程度である。

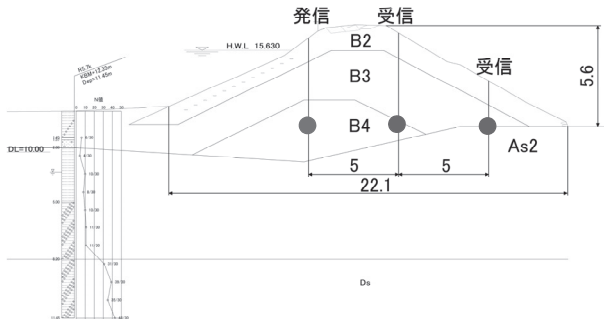


図-8 観測孔の横断配置図

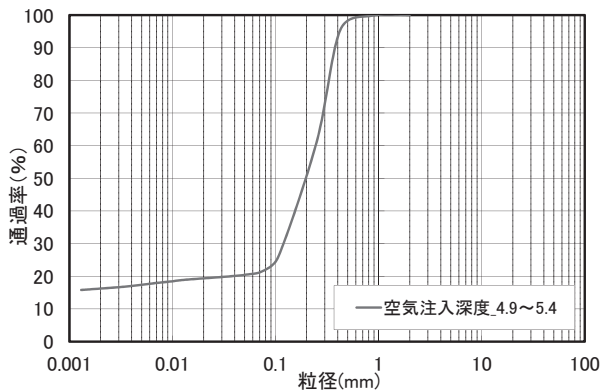


図-9 空気注入深度における粒度試験結果

3.3.2 計測結果

発信孔から注入空気量の時間変化を図-10に示す。実験開始とともに段階的に注入空気量を上昇させ、最大 1,500 L/min まで実験を行った。

図-11に発信孔および受信孔における空気圧の経時変化を示す。注入空気量の上昇に伴い、発信孔(下)の空気圧も段階的に上昇していることがわかる。発信孔内の空気圧が40kPaに到達した時点で、注入空気量を一定に維持し、受信孔側の空気圧に変化がみられるか、計測を継続したもの計測機器の測定精度の問題で受信孔の空気圧は計測できなかった。ただし、受信孔(離隔1m)頭部に繋いだホースを写真-2に示すように色水に入れると、空気が出ていることは認ることができた。なお、計測期間中で発信孔および受信孔における空気圧が急激に上昇、或いは下降する現象は確認されていないことから、空気注入に伴う水ミチの拡大や土骨格への影響等はなかったもの判断している。

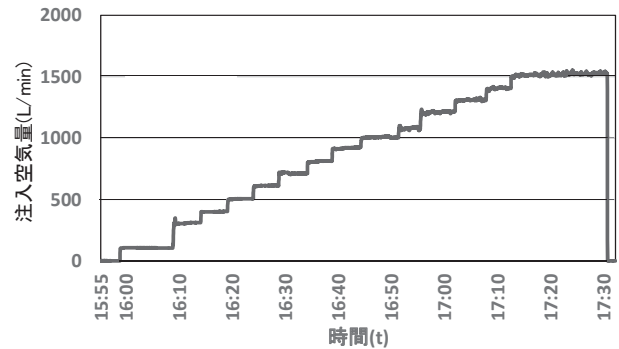


図-10 注入空気量の経時変化

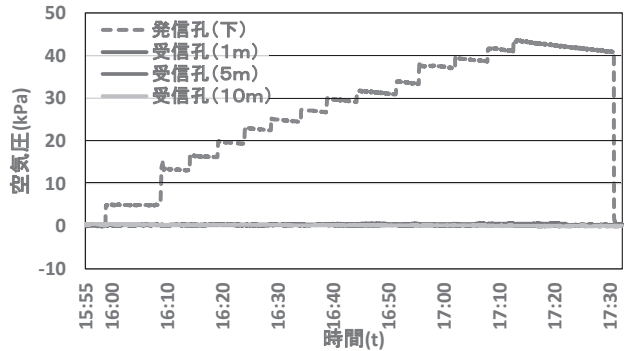


図-11 観測孔における空気圧の経時変化



写真-2 受信孔(1m)に到達した空気

3.4 計測機器の改良

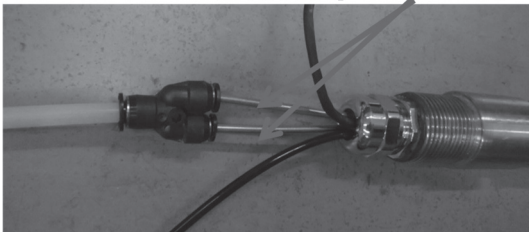
3.4.1 解決すべき課題

本調査法は「空気」を媒体としており、地中へ注入した空気は地表面より大気中へも発散する。実堤防規模での調査を想定した場合、調査孔を数十メートル間隔で配置した計測が想定される。そのためには、①注入する空気量を大幅に増やす必要性、②微小な空気圧を感知する必要性がある。また、注入空気は圧縮された状態で発信孔へ注入し、孔内で解放される。体積変化に伴い空気中の水蒸気が凝結し液体となり、調査孔の孔壁を覆ってしまうと調査を行うことができなくなる。これらの課題を解決するため、次に示す4点について、試験装置の改良を行った。

3.4.2 空気注入ケーブルの改良

注入可能な空気量を増やす目的から、注入ケーブル径をφ3.18×2本からφ10に変更した。本試験装置はCPT調査孔を活用するため機器の外形がφ32と細く、またパッカーとの交差部がネックとなっていた。

改良前 接続部φ3.18×2本



改良後 接続部φ10

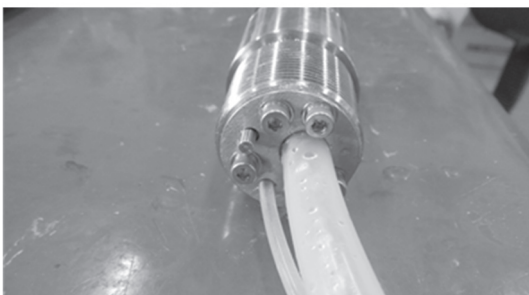


写真-3 空気注入ケーブルの改良

3.4.3 流量計の変更

注入空気量を最大 Q=4,000l/min まで、計測可能な流量計に変更した。

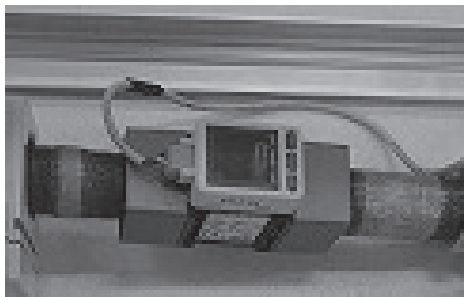


写真-4 気体流量計

3.4.4 水分除去装置〔ドライフィルタ〕の配置

注入空気はコンプレッサーを活用し、0.1Mpa 程度以上で圧送した後、発信孔の下部で圧力が解放され、1kPa 未満の圧力で周辺地盤へ浸透する。その間の体積変化に伴い、空気中の水蒸気が液体になるため、発信孔内の孔壁の湿潤化が生じ、空気の浸透を抑制してしまう。そのため、事前に水分除去装置で注入空気中の水分を除去する必要がある、水分除去装置を通じた空気を浸透させた。

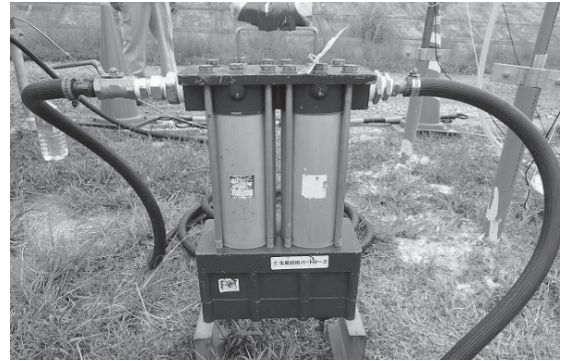


写真-5 水分除去装置

3.4.5 圧力計の交換

実証実験では写真-6 に示すミリ単位での空気圧を確認している。後述の実証実験(2)では、表-2 に示すように、受信孔側に数 mmH₂O 単位の空気圧が計測可能な機器に変更した。



写真-6 マノメータによる計測（受信孔）

表-2 受信孔における圧力計の見直し

用途		変更前	変更後
写真			
	型式	HSCDANT030PAAA5	HSCDANN004NGAA5
測定範囲	[Pa]	-103500 ~ +103500	0 ~ +996
	[mmH ₂ O]	-10554.1 ~ +10554.1	0 ~ +101.6
タイプ		絶対圧	ゲージ圧

3.5 実証実験 (2)

3.5.1 観測孔の配置

改良した計測機器を用いた現地実証実験を実施した。

観測孔の配置平面図を図-12に示す。実証実験(1)と同様、観測孔は過去に漏水の発生した地点とした。空気を注入する発信孔は川裏のり肩付近に配置し、河川縦断方向に30m間隔で3箇所配置し、受信孔としても兼用した。また、堤防横断方向には漏水地点の堤防裏のり尻、及び川表側の遮水矢板前面に配置する計画とした。

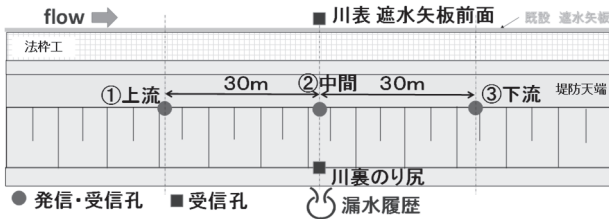


図-12 観測孔の平面配置図

観測孔の横断配置図を図-13に示す。冬季に実施したため地下水位が堤内地盤高-1.9m程度まで低下したことから、実証実験はGL(堤内地盤高)-1.3~1.9mの不飽和砂質土(As2層)を対象に実施した。

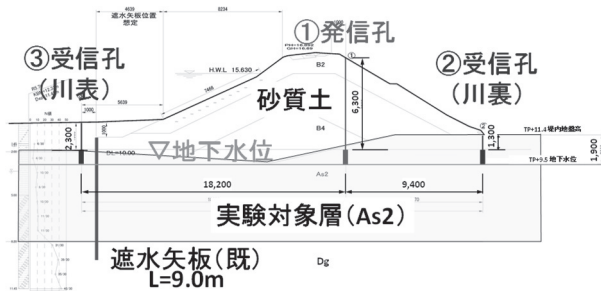


図-13 観測孔の横断配置図(中間位置)

空気注入深度におけるAs2層の粒径加積曲線を図-14に示す。30m間隔で配置した発信孔の空気注入深度付近の細粒分含有率は、上流41.6%、中間10.3%、下流21.9%であった。裏のり尻受信孔では発信孔中間と同様10.6%であった。

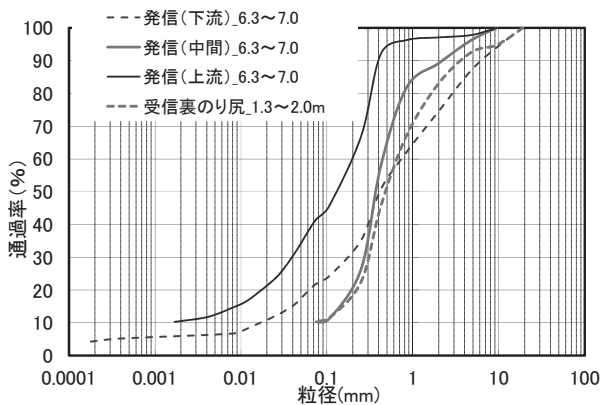


図-14 空気注入深度における粒度試験結果

3.5.2 計測結果

堤防天端に配置した3箇所の観測孔をそれぞれ発信孔とし、表-3に示す、3ケースの実証実験を行った。

表-3 実証実験ケース

ケース	発信孔位置	透水係数(m/s) D ₂₀ より推定	備考
1	上流側	3×10^{-7}	
2	中間	1×10^{-4}	漏水履歴
3	下流側	6×10^{-6}	

実験開始とともに段階的に注入空気量を上昇させ、ケース2の場合で最大2,250 L/min, 9.4kPaまで実験を行った。なお、10:19に注入空気量が突出しているのは、手動による操作を誤ったものである。

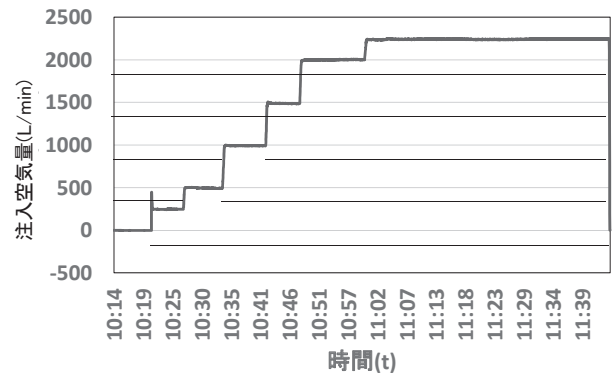


図-15 注入空気量の経時変化

(1) 上流側発信孔より注入時

図-16に発信孔および受信孔における空気圧の経時変化を示す。13:33に空気を注入すると、発信孔内の空気圧が急激に上昇したため終了した。注入深度におけるD₂₀より推定した透水係数は 3×10^{-7} m/sであり、透水性(透気性)が低いために、発信孔から周辺地盤へ空気が浸透ができない状況と推定する。

(2) 中間発信孔から注入時(漏水地点)

図-17に発信孔および受信孔における空気圧の経時変化を示す。注入空気量の上昇に伴い、発信孔および、受信孔(川裏)の空気圧も段階的に上昇していることがわかる。最大流量時における発信孔内における空気圧は9.4kPa、川裏受信孔内では0.049kPaであった。また、発信孔と受信孔における空気圧上昇時のタイムラグは、ほとんど生じていない。これは砂分含有率の高い土層が連続していたことから、速やかに注入空気が到達したものと考える。

(3) 下流発信孔から注入時

実験開始とともに段階的に注入空気量を上昇させ、最大500 L/minまで実験を行った。図-18に発信孔および受信孔における空気圧の経時変化を示す。注入空気量の上昇に伴い、発信孔の空気圧は段階的に上昇したものの、受信孔では有意な圧力変化は見られなかった。

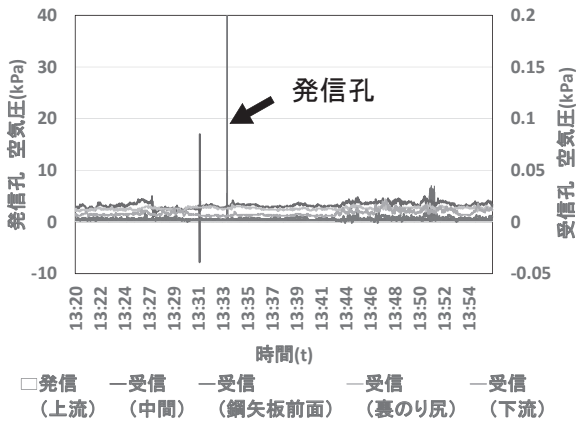


図-16 発信孔から注入した空気流量の経時変化
(上流発信孔から注入時)

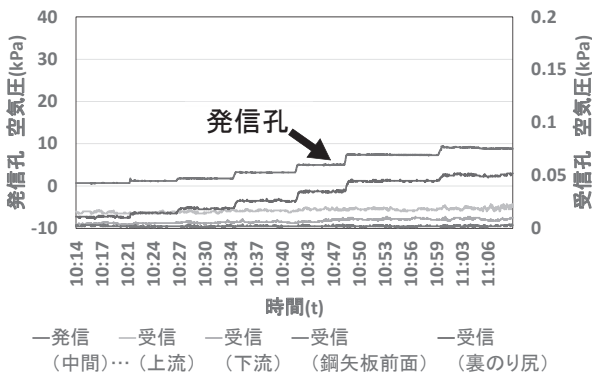


図-17 発信孔から注入した空気流量の経時変化
(中央発信孔から注入時)

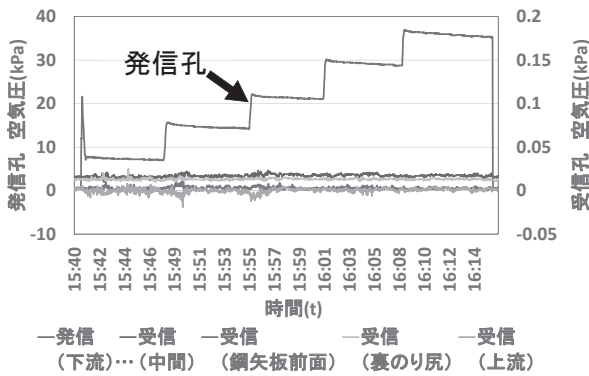


図-18 発信孔から注入した空気流量の経時変化
(下流発信孔から注入時)

4. 考察

4.1 発信孔における応答

実証実験(2)の3ケースでは発信孔位置における透水係数に1オーダー以上の開きがあり、発信孔内の空気圧変化にも違いが見られた。

ケース1では空気の注入が不可能であり、調査法の適用限界を超えていると考えられる。ケース2は高透水性地盤が堤内地側へ連続していると考えられる場合であり、他ケースと比べ空気注入量は多いものの、孔内の空気圧は上昇しにくい反応がみられた。注入空気が高透水性地盤へと浸透している場合の反応と考えられる。ケース3では空気注

入は可能であるが、注入可能な空気量は $Q=500\text{l/min}$ と少なく、受信孔では空気圧を検知することができなかった。

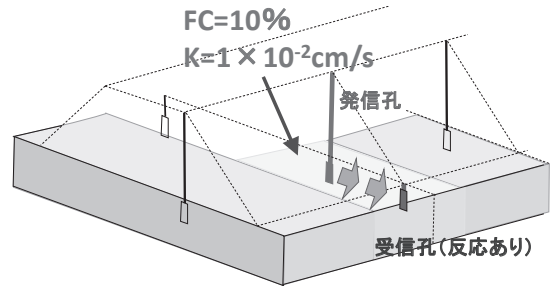


図-19 空気圧の伝播イメージ
(中央発信孔から注入時)

4.2 三次元気液二層流解析との比較分析

水ミチ等、高透水範囲の有無、及び、発信孔と水ミチとの位置関係により、堤防内に発達する空気圧の分布形態が異なる。本検討では中規模堤防を想定した堤防モデルを構築すると共に、実証実験(2)結果との比較分析を行った。

4.2.1 基礎方程式

水および空気の基礎方程式は、連続式とダルシー則に基づき、式(1)および式(2)となる。

$$\phi C' \left(\frac{\partial p_a}{\partial t} - \frac{\partial p_w}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ k_{rw} k_{ws} \left(\frac{\partial p_w}{\partial x_j} + \frac{\partial x_j}{\partial x_j} \right) \right\} \quad (1)$$

$$\phi \left\{ (1 - S_w) B' - \frac{C'}{\beta_a} \right\} \frac{\partial p_a}{\partial t} + \phi \frac{C'}{\beta_a} \frac{\partial p_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k_{ra}}{\beta_a} k_{as} \frac{\partial p_a}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

ここに、 t は時間、 x_i は空間座標、 p_w および p_a はそれぞれ水圧および空気圧、 ϕ は間隙率、 S_w は水の飽和度、 β_a は構成体積率、 k_{rw} は比透水係数、 k_{ra} は比透気係数である。

また、 $k_{ws} = \rho_w g \frac{k}{\mu_w}$ 、 $k_{as} = \rho_w g \frac{k}{\mu_a}$ 、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度、 k は固有透過度、 μ_w および μ_a はそれぞれ水と空気の粘性係数であり、 $B' = \frac{d}{dp_a} \left(\frac{1}{\beta_a} \right)$ 、 $C' = \frac{dS_w}{dp_c}$ 、 $p_c = p_a - p_w$ である。

ある。

4.2.2 解析モデル

解析モデルは x および y 方向に $80\text{m} \times 80\text{m}$ の領域とし、後述のケース 1, 2 では表-5 に示す位置に幅 4.0m の水ミチを配置した。堤体部や注入孔周辺を除いた基礎地盤のメッシュサイズは、水平方向は $1.0\text{m} \times 1.0\text{m}$ 、鉛直方向は $0.125\text{m} \sim 0.5\text{m}$ に設定した。

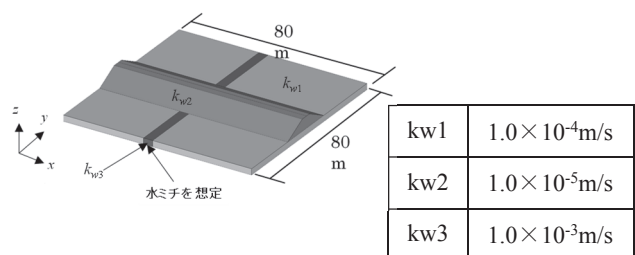


図-20 解析モデル

4.2.3 初期条件・境界条件

地下水位は堤内地盤高-2.0mに設定し、地下水面以下は静水圧分布とした。地表面、堤体表面における空気圧は大気圧 ($p_a=0$) とした。空気注入箇所は、堤内地盤高-1.0~1.5mの深度とし、平面的には0.04m×0.04mとした。



図-21 初期水圧分布

4.2.4 解析ケース

解析ケースは受信孔で空気伝播を確認した実証実験(2)におけるケース2との比較分析を行う目的から、表-4に示す3ケースを行った。解析ケース1は、実証実験(2)ケース2と類似条件である。また、比較ケースとして、発信孔を水ミチの外側へ配置した場合(解析ケース2)、また、水ミチが存在しない場合(解析ケース3)の解析結果を合わせ表-5に示す。

表-4 解析ケース

ケース	水ミチ有無	発信孔の位置	備考
1	あり	水ミチ内	実証実験(2)ケース2
2	あり	水ミチ外	
3	なし		

4.2.5 解析結果

ケース1は約2,600L/minで空気を注入した際の、空気圧分布を示す。堤防天端中央から注入した空気により、水ミチを想定した高透水層の方向(y方向)に沿って相対的に高い空気圧の範囲が広がる傾向を示している。堤防のり尻付近で0.098~0.196kPa程度の空気圧を示している。

実証実験(2)ケース2では、 $Q=2,250\text{L/min}$ で注入時に裏のり尻で0.049kPaの空気圧分布を示した。

ケース2は約700L/minで空気を注入した際の、空気圧分布を示す。水ミチを想定した高透水層から2m離れた地点から空気を注入した結果、同高透水層の方向(y方向)に沿って空気が抜ける傾向を示している。ただし、堤防のり尻付近では0.05kPa以下の空気圧に留まった。

ケース3は約600L/minで空気を注入した際の、空気圧分布を示す。水ミチが無い場合、堤防縦断・横断方向にそれぞれ線対称な楕円状の空気圧分布を示している。

次に、図-22は堤防縦断方向におけるケース1~3の空気圧分布を示す。水ミチを想定した高透水範囲に直接空気を注入したケース1、および水ミチの無いケース3の場合、注入地点を中心に上下流方向に対称な空気圧分布を示す。

一方、注入地点の脇に水ミチがあるケース2の場合、同水ミチに沿って堤防横断方向に空気が流出する。そのため、堤防縦断方向の空気圧分布をみると、水ミチ付近で、空気圧が低下する傾向を示している。解析で得られる空気圧分布と、対称に配置した受信孔で計測する空気圧を比較し、相対的に空気圧が低下する傾向にある領域に水ミチのある可能性が示唆された。

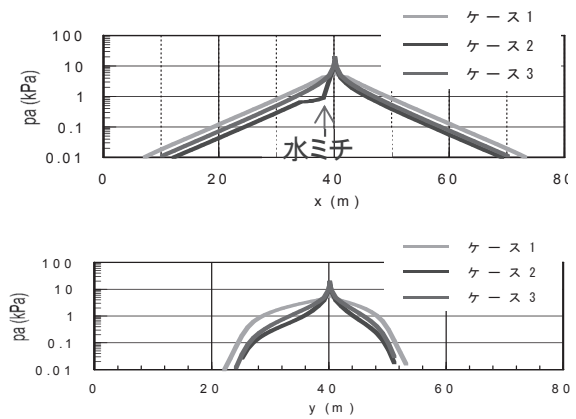


図-22 堤防縦横断方向における空気圧分布 (上: x方向, 下: y方向)

表-5 解析結果

ケース1	ケース2	ケース3
<p>(z=1.25 断面)</p>	<p>(z=1.25 断面)</p>	<p>(z=1.25 断面)</p>
<p>単位: kPa (z=1.25 断面の空気圧分布)</p>	<p>単位: kPa (z=1.25 断面の空気圧分布)</p>	<p>単位: kPa (z=1.25 断面の空気圧分布)</p>

5. まとめ

本研究は河川堤防の弱点箇所を抽出する組合せ調査の1手法として「空気圧による連通試験」について、試験装置の改良、および実証実験を行うと共に、気液二層流解析結果との比較分析を行った。

以下に、本研究の内容をまとめる。

- (1) 実河川堤防で行った実証実験では調査対象地盤の透水性(透気性)の違いと、発信孔および受信孔における空気圧の応答特性との関係を把握することに成功した。また、空気注入時における発信孔内の空気圧の変化の違いからも、高透水層の連続性の把握ができる可能性が示唆された。
- (2) 気液二層流解析では水ミチ等が無く、比較的均質な地盤条件の場合は堤防縦断方向に卓越した楕円状の空気圧分布が形成され、水ミチ等がある場合は無い場合と比較し、水ミチへの空気の流れが卓越することで水ミチ等の周辺では局所的に空気圧が低下する傾向を確認した。また、水ミチ等へ直接空気を注入した場合は現地実証実験結果と同様、空気注入量が増加し、水ミチを伝う空気の流れが卓越することを確認した。

6. 今後の課題

本研究では試験装置を改良し現地実証実験を実施し、空気圧の伝播を計測することに成功した。また、発信孔内における空気圧変化、発信孔と受信孔における空気圧の伝播特性に着眼することで、弱点箇所が抽出できることが示唆された。一方、本調査法の実用化に向けての課題を、以下に整理した。

6.1 「空気圧による連通試験」実績の積重ね

本研究では $k_s=1.0 \times 10^{-4}$ (m/s) オーダの砂地盤を対象に、現地実証実験を行った。一方、実用化に向けては、例えば次に示す実績を蓄積する必要がある。

- (1) 本試験の適用可能地盤の明確化
本調査法は不飽和の透水性地盤を対象に提案するものである。実証実験では $k_s=3 \times 10^{-7}$ m/s 程度の砂質土層では空気注入が不可能であり、 $k_s=7 \times 10^{-4}$ m/s の地盤では局所的な高透水層の連続性を確認することができた。今後は解析手法等を用いて、透水性(透気性)の観点で適用可能な地盤条件を明確にすると共に、適用可能地盤における応答特性を体系的に整理する必要がある。
- (2) 弱点箇所の有無による反応の違いの把握
実証実験では局所的に存在する高透水性地盤の連続性を把握することができた。一方、堤内地における行き止まり地形、すなわち堤防直下に堆積する透水

層が、堤内地側で粘性土層により閉塞された状況は河川堤防の弱点箇所と考えられる⁷⁾。行き止まり地形の有無による空気圧の伝播特性の違いについては現地確認ができておらず、今後、実証実験による検証が必要である。

6.2 面的な調査手法との組合せ

本研究では点の情報としての発信孔と受信孔を堤防に配置し、弱点箇所を抽出する新たな調査手法を提案した。一方、水ミチ等は、脈列的に発達することが一般的に知られている。そのため、局所的に流れる空気を面的に把握する調査法と組合せて、水ミチ等の広がり把握する手法を検討する必要がある。

謝辞

本報は国土交通省国土技術政策総合研究所からの委託研究「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」(平成27～29年度)の一環として実施された研究成果に基づくものである。また、実施にあたっては国土交通省岡山河川事務所よりフィールドを提供して頂いた上に、貴重な資料を提示して頂いた。ここに厚く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 矢部川堤防調査委員会: 矢部川堤防調査委員会報告 http://www.qsr.mlit.go.jp/chikugo/site_files/file/torikumi/01-plan_course/tyosa/saisyu/houkokusyo.pdf, 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) p.24, 2012.
- 3) 藤吉秀彰, 新村卓也, 館川逸朗, 西村伸一, 西垣誠: 河川堤防における弱点箇所を抽出する組合せ調査法についての一考察, 第53回地盤工学研究発表会, 2018.
- 4) 新村卓也, 館川逸朗, 小松満, 西垣誠: 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, 2017.
- 5) 林愛実, 小高猛司, 崔瑛, 森三史郎, 森智彦, 李圭太: 基礎地盤の被覆構造が河川堤防の浸透破壊に及ぼす影響, 第52回地盤工学研究発表会, 2017.
- 6) 改訂 地下水ハンドブック編集委員会: 改訂 地下水ハンドブック pp.290-291, 1998.
- 7) 西村征哉, 前田健一, 櫛山総平, 高辻理人, 泉典洋: 透水性基礎地盤を有する河川堤防のバイピング条件に基づく簡易な点検フローの提案, 第5回河川堤防技術シンポジウム, pp.13-16, 2017.

(2018年6月18日 受付)