

河川堤防における弱点箇所抽出を目的とした組合せ調査法の提案

パシフィックコンサルタンツ(株) 館川逸朗
 パシフィックコンサルタンツ(株) 新村卓也
 パシフィックコンサルタンツ(株) ○ 藤吉秀彰
 神戸大学大学院 工学研究科 齋藤雅彦
 岡山大学大学院 環境生命科学研究所 西村伸一
 岡山大学大学院 環境生命科学研究所 西垣誠

論文要旨

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、水みち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。そこで、著者らは河川堤防の弱点箇所を抽出する手法として、複数の調査法を組み合わせた手法を考案し、実河川堤防を対象に実証実験を行った。さらに、三次抽出手法として抽出された「空気圧による連通試験」については、三次元解析(二相流解析)を用いて、試験結果の評価を行った。本報では、当組合せ手法の有効性や空気圧による連通試験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 空気圧による連通試験 不飽和浸透 気液二相流解析

まえがき

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分布していたこと、堤内地側で行き止まり地形を形成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。そこで、本報では、既往のボーリング調査間に潜在する浸透安定性の観点からの弱点箇所を抽出する手法を提案する。

1. 土層構成による弱点箇所の抽出(一次抽出)

小高ら³⁾の研究によると、河川堤体について、基礎地盤に薄い被覆土層があり、その下部に薄い砂質土・厚い高透水礫質土が堆積する場合(図-1)は、浸透破壊が懸念されると考えられている。そのため、一次抽出としては、机上調査として、既往地質調査結果等を参考に、このような土層区間の抽出を行うことが有効である。

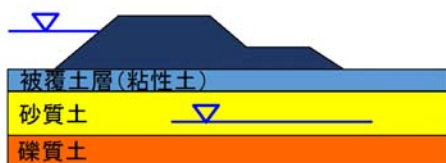


図-1 浸透破壊の懸念される土層断面

2. SWM と CPT による弱点箇所の絞り込み(二次抽出)

地盤の物性を間接的に求める手法としては、線の調査として高密度電気探査や表面波探査(以下、SWM)が挙げられる。高密度電気探査は、比抵抗分布により、地盤の状況を判定する手法であるが、地盤のゆるみ領域を判定できる手法ではない。一方、SWMは表面波よりS波速度分布を推定できるため、地盤のゆるみ領域を検出可能であるが、土層確認が困難である。地盤の土層確認ができる手法としては、点の調査になるが、機械ボーリングや静的コーン貫入試験(以下、CPT)が挙げられる。機械ボーリングは、土質を直接確認できる上、深度方向1m中で30cm(10cm毎)の不連続な強度(N値)が得られるが、仮設が大規模、コスト高で、調査日数が長い。これに対し、CPTは、測定値からの土質判定が可能で、深度方向の連続したデータが取得でき、調査が短時間、かつ低コストで可能となる。したがって、表-1に示すとおり、二次抽出手法としては、精度・迅速性・経済性の面からSWMとCPTの組合せ手法を選定した。

表-1 絞り込み(二次抽出)調査法の比較

	概要	土層判定の精度	適用深度	長所・短所	経済性	迅速性	本調査手法
間接的調査(線的調査)							
高密度電気探査	地盤の比抵抗や地盤構造を推定	不飽和帯は判定困難(x)	50m(O)	・含水率の高い土壌の検出力が高い。 ・探査深度に応じた送電機が必要。	コスト中(O)	迅速に可能(O)	
表面波探査(SWM)	地盤に振動を伝えた表面波速度の分布から線形的な地盤構造を推定	地盤の硬軟を線形的に区分(Δ)	15m(O)	・S波速度からN値の推定可能。 ・周辺振動の対策必要。	コスト中(O)	迅速に可能(O)	
直接的調査							
機械ボーリング(標準貫入試験)	地盤を掘削して、コア・標準貫入試験を採取。直接的に土質判定	直接的であり、精度高(O)	50m以上(O)	・点的な地質境界の区分には最適。 ・全ての土質に対応	コスト大(x)	時間がかかる(x)	○ ↑ 組合せ手法 ↓ ○
静的コーン貫入試験(CPT)	地盤への試験機の貫入抵抗・貫入量から、間接的に地盤の硬軟の線形区分	間接的であるが、精度高(O)	5~7m程度(O)	・ボーリングの補助調査として用いられる。 ・礫地盤は貫入困難	コスト小(O)	迅速に可能(O)	

本組合せ手法の実証実験結果を図-2に示す。本実験は、実際の河川堤防の裏法尻を対象として実施した。まず、縦断方向(延長 300m 程度の一連区間)で SWM を実施し、S 波速度の小さい区間を抽出した。この区間の堤防裏法尻において、5m ピッチで CPT を実施し、N 値 (N<5) を確認するとともに、土層区分を把握した。この結果、抽出区間の一部に緩い砂層が分布することが明らかとなり、弱点箇所をさらに絞り込むことができた。このように、当調査法を活用すれば、大掛かりなボーリング調査等を実施しなくても弱点箇所である緩い砂層を把握できることが明らかとなった。

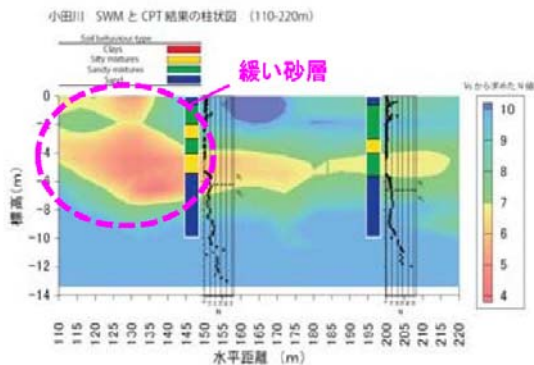


図-2 SWM+CPT による二次抽出(実証実験)

3. 空気圧による連通試験による弱点箇所の絞り込み(三次抽出)

(1) 水みちの有無の調査法の比較

表-2 に示すとおり、不飽和領域にも適用可能である詳細な緩み・高透水性地盤の調査方法としては、比抵抗トモグラフィ、弾性波トモグラフィ、空気圧による連通試験^{4),5)}が挙げられる。このうち、空気伝播のし易さの観点で、水みちを確実に捉えられるのは、空気圧による連通試験と考えられる。当手法は、二次抽出で使用した CPT の調査孔を利用できるため、経済性でも優位と考えられる。

表-2 絞り込み(三次抽出)調査法の比較

手法	対象領域(飽和・不飽和)	原理	長所	短所	総合評価
比抵抗トモグラフィ	飽和・不飽和領域	比抵抗分布により、含水状態や細粒分の大小、固結度合い、等を把握する。 一般的には、低比抵抗・飽和、高比抵抗・不飽和	・含水状態や帯水層の有無を推定できる ・飽和・不飽和領域の境界を推定できる	・ゆるみ域・空洞が間接的にしかわからない(組み合わせで用いる必要あり) ・粘性土と帯水層の区別ができず土層区分の精度が低い(キラブレーションが必要)	△ 緩みの判定精度が低い、不飽和帯では土層区分の精度が低い(キラブレーションが必要)
弾性波トモグラフィ	飽和・不飽和領域	地盤を伝わる表面波速度(S波速度と同等)を二次元的に計測する。速度構造の分布(地盤の硬軟)から線的な地盤構造を推定できる。	・地盤の硬軟を概略区分できる ・S波速度からN値の推定が可能	・土層区分の精度が低い ・ゆるみ域・空洞が間接的にしかわからない(組み合わせで用いる必要あり)	△ ゆるみ域は間接的に分かるが、土層区分の精度が低い。手法を組合せる必要がありコスト高。
音響トモグラフィ	飽和領域	地盤内部を伝播する音の速度より、土層区分を計測することで、緩い砂層を抽出する。	・速度だけでなく、減衰率も考慮するため、土層区分の精度が高い ・飽和・不飽和領域の境界がわかる。	・不飽和領域には適用できない ・2本のボーリング孔が必要 ・特許技術であるため、実施機関が少ない	× 音の速度で土層区分が不明 現時点で緩みの抽出が可能か不明
空気圧による連通試験	不飽和領域	地盤内(地下水位より上)に伝播する空気圧を計測することで、緩い砂層を抽出する。	・直接的に土層区分はできないものの、空気伝播のし易さという形で、緩い砂層を確実に抽出可能 ・CPTの調査孔を再利用できるため、経済的である。	・直接的な土層区分は不可能(CPT試験孔の結果から土層判定) ・CPT孔が試験孔に必要	○ 不飽和領域を対象とした方法として、最も弱部の抽出に適している。
水圧トモグラフィ	飽和領域	地盤内(地下水位より下)に伝播する水圧を計測することで、飽和領域の透水特性を把握する。	・正弦波を使用した注水を行うため、潮汐や温度の影響を受けにくく、水圧応答が捉えやすい。	・3本以上のボーリング孔が必要 ・3次元解析で異方性のある地盤を有した地盤中の地下水の非定常挙動を逆解析する必要があり、解析に多大な時間を要する。	× 飽和領域を対象とした弱部の抽出に適している。

「空気圧による連通試験」のイメージを図-3に示す。同調査は、河川堤防に調査孔を配置するとともに、堤体及び、基礎地盤表層付近の不飽和透水層へ空気を注入し、空気圧の伝播特性(空気圧の低下等)に着眼し、地盤内に部分的に潜在する高透水層や水みちの有無・広がり把握するものである。

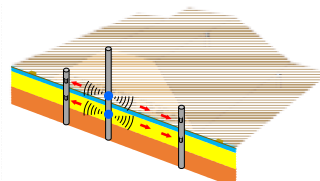


図-3 空気圧による連通試験イメージ図

本手法について、実証実験を行った。観測孔の平面配置図を図-4に、横断配置図を図-5に示す。空気を注入する発信孔は川裏のり肩付近に、受信孔は縦断方向に上流側・下流側にそれぞれ 30m 離れた位置に配置した。また、堤防横断方向について、受信孔は、川裏側(裏のり尻)、及び川表側(遮水矢板前面)に配置した。地下水位は、GL(堤内地盤高)-1.9m であったため、試験は、GL(堤内地盤高)-1.3 ~ 1.9m の不飽和砂質土 (As2) を対象に実施した。

実験結果を図-6に示す。注入空気量の上昇に伴い、発信孔及び、受信孔(川裏側)の空気圧が段階的に上昇した。最大流量時(2,250L/min)における発信孔内空気圧は 9.4kPa、受信孔(川裏側)では 0.049Pa(約 5mm)であった。発信孔と受信孔における空気圧上昇時のタイムラグは 10 秒未満と僅かであった。

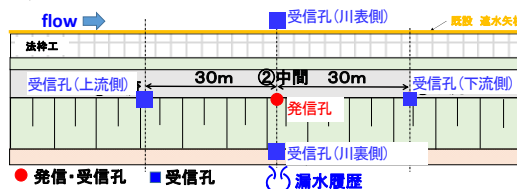


図-4 観測孔の平面配置図

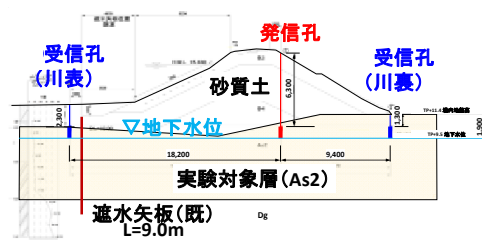


図-5 観測孔の横断配置図(中間位置)

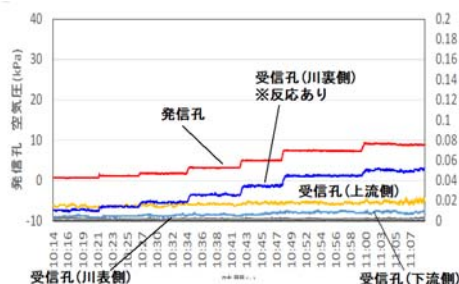


図-6 受信孔及び発信孔の空気圧の変化(実証実験)

(2) 三次元解析(気液二相流)

実証実験の確認のため、三次元解析(気液二層流)を実施した。基礎方程式は式(1)・式(2)に示すとおりであり、解析モデルは、80m×80mの領域とし、弱点箇所として、幅4mの水みちを配置した(図-7)。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。

今回の実証実験では、発信孔について、9.4kPaで最大2,250(L/min)の注入量まで上昇した。モデルを用いた試行計算によると、この発信孔は $k_w=1.0 \times 10^{-3}$ (m/s)程度の水みち上に配置されていたことになる。基礎地盤の透水係数を $k_w=1.0 \times 10^{-4}$ (m/s)、堤体の透水係数を $k_w=1.0 \times 10^{-5}$ (m/s)とし、発信孔と連続する水みち内に受信孔が配置されていたと想定したケースを実施した場合、水みち内の受信孔②の空気圧の上昇量は20mmとなり、実験結果(5mm)のオーダーに近い結果となった。つまり、今回は、発信孔と受信孔(川裏側)の2点が弱点箇所内に位置していたと評価される。このように、三次元解析(気液二層流)を用いることで、空気圧を用いた連通試験の試験結果を評価できることが明らかとなった。

$$\phi C' \left(\frac{\partial p_a}{\partial t} - \frac{\partial p_w}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ k_{rw} k_{ws} \left(\frac{\partial p_w}{\partial x_j} + \frac{\partial x_3}{\partial x_j} \right) \right\} \quad (1)$$

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

ここに、 p_w および p_a はそれぞれ水圧および空気圧(いずれも水頭換算値)、 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_{rs} は比透気係数である。

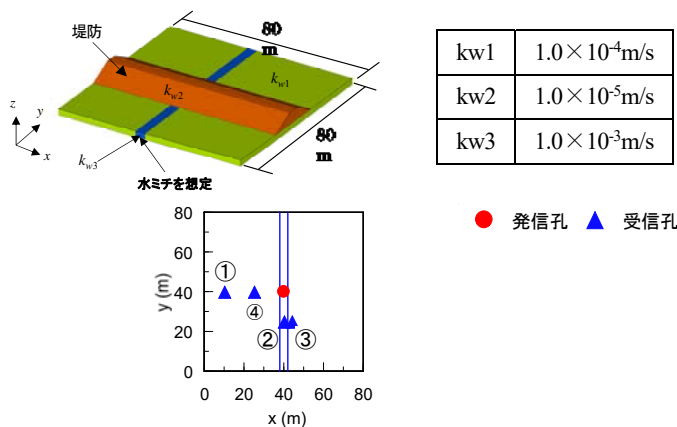


図-7 解析モデル及び出力地点

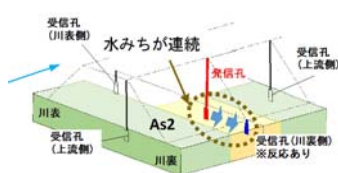


図-8 空気圧の伝播イメージ

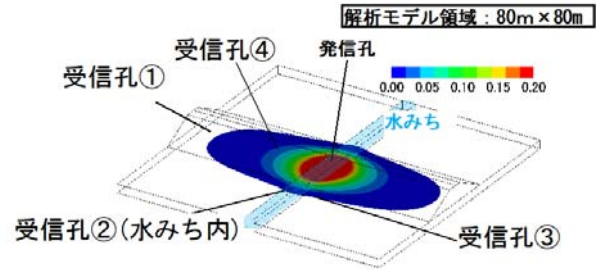


図-9 解析結果(空気圧分布のコンター図)

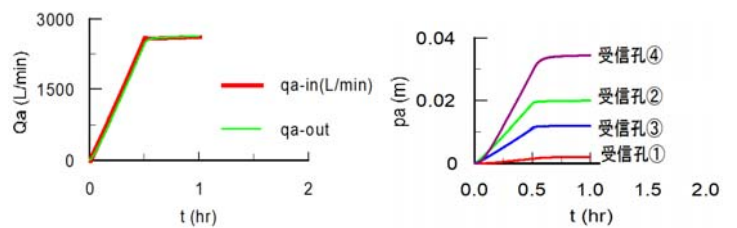


図-10 解析結果(注入量の変化, 発信孔・受信孔の圧力変化)

あとがき

今後は、空気圧による連通試験の実用化を見据えて、様々な土質条件における空気の伝播特性のデータを蓄積し、試験基準の確立及び、三次元解析(気液二相流)を用いて弱点箇所(水みち)の有無や位置・広がりを見極める評価手法の確立が急務である。

本研究は、国土交通省河川技術開発助成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。

参考文献(または引用文献)

- 1) 矢部川堤防調査委員会: 矢部川堤防調査委員会報告書, 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) 2012. 24p
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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