不飽和堤防の急速浸潤化に伴う間隙空気の挙動 と比抵抗モニタリングによる可視化

VISUALIZATION OF THE BEHAVIOR OF AIR BUBBLES ASSOCIATED WITH RAPID INFILTRATION OF THE UNSATURETED DYKE BY RESISTIVITY MONITORING.

> 小林 剛¹ · 前田健一² · 柴田 賢³ Tsuyoshi KOBAYASHI, Kenichi MAEDA, Satoshi SHIBATA

 ¹理修 応用地質株式会社 計測システム事業部(〒305-0841 茨城県つくば市御幸が丘43番地)
²正会員 工博 名古屋工業大学准教授 大学院工学研究科 社会工学専攻 (〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)
³学生会員 名古屋工業大学大学院工学研究科 社会工学専攻 (〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)

Unsaturated soil of dykes becomes get wet rapidly due to heavy rain that happens frequently in recent years. As a result of this saturation, air blowouts are recognized along weak lines in a dyke which reduce stability of the dyke. This air blowout is considered that pore air inside of the dyke becomes to a mass and the air mass goes up by the gravity.

The purpose of this study is confirmation and visualization of the behavior of air bubbles associated with rapid infiltration of the unsaturated dyke by resistivity monitoring. The authors conducted continuous high speed electrical scanning (resistivity monitoring) for both laboratory-scale model and real dyke. As the result, the behavior of the infiltration of rainfall and air bubbles was successfully visualized by resistivity monitoring. Further studies are needed to establish a method to evaluate those phenomena quantitatively.

Key Words : Resistivity monitoring, visualization, air blowout, infiltration

1. はじめに

近年,梅雨末期や台風時期の集中豪雨によって,時間 雨量100mmを超えるような豪雨やこれに伴う河川の急激 な増水による堤防越流浸食現象が発生している.このよ うな中,2000年に発生した東海豪雨では,亀裂の入った 堤体内から気泡を含む水が噴き出す様子が目撃された¹¹. このような外力により,通常不飽和な堤防が時間雨量 30mm程度の日常的降雨と比較して,急激に浸潤化し堤防 が不安定となるケースが増大している.急激な堤体の浸 潤化は,通常降雨のような不飽和から飽和に向かう土・ 水・空気の三相の物理・力学的変化のみならず,間隙空 気や間隙水中に溶存している空気が気泡¹¹⁻³¹として分離 し,堤防の弱線に沿って地表に噴発するエアブロー現象 ³⁰の発生が考えられ,実際に同現象が確認されている. 空気の噴発した箇所は堤体土の骨格構造が乱れ,それが パイプ状に水みち化し堤体の安定性を損なう前兆になる 可能性を有している.

そこで、本研究では、急激な堤体の浸潤化に伴う間隙 空気の挙動と空気の噴発現象(エアーブロー)の有無を確 認するとともに、間隙空気の挙動を可視化することを目 的として、模型堤防および実堤防において、連続高速電 気探査(比抵抗モニタリング)を実施し、その適用性の 評価を試みた.

2. 比抵抗モニタリングの概要

通常,河川堤防で実施される2極法電気探査(比抵抗 影像法)⁴は,測定で得られた見かけ比抵抗データを解 析して真の比抵抗を求め,地盤の比抵抗構造を推定する ことに用いられている.ここで,見かけ比抵抗とは,次 式(1)で表され,地下のすべての物質の影響を含む比 抵抗分布を反映した値(電極周辺の広い範囲の比抵抗の 一種の平均値)として,真の比抵抗と区別される.

$$\rho = K \frac{V}{I} \qquad (1)$$

ここで、 ρは見かけ比抵抗, Kは電極配置係数, Vは 電位差, Iは電流である.

今回実施した比抵抗モニタリングは、2極法電気探査 (比抵抗影像法)を繰り返し行い,得られた見かけ比抵 抗の時系列データを用いて、見かけ比抵抗の経時変化を 調べる方法である.具体的には、繰り返し測定により得 られた見かけ比抵抗断面図を用いて、ある時点の見かけ 比抵抗断面図(基準データ)に対する他の時間の見かけ 比抵抗断面図(測定データ)の見かけ比抵抗差分断面 図・変化率断面図を作成する.

以下に見かけ比抵抗変化率の算出式(2)を示す.

変化率 (%) =
$$\frac{測 \overline{z} \overline{z} - \beta}{\underline{x} \overline{z} \overline{z} - \beta} \times 100$$
 (2)

作成した見かけ比抵抗の差分断面図・変化率断面図を, 時系列的に並べて動画を作成することにより、見かけ比 抵抗の変化の様子や範囲を、経時変化として可視化する ものである.なお、見かけ比抵抗を利用する理由として は、見かけ比抵抗データすべてについて解析を行い真の 比抵抗を求めると、膨大な解析時間を要するため高速な モニタリングを行うことができないことと、比抵抗構造 を求めるために与える解析モデルの影響を受けるため, 見かけ比抵抗に含まれる微小な変化を除去してしまう可 能性があるためである.

本研究では、降雨による堤体内部への雨水の浸潤の様 子や、河川水位の上昇による浸潤線の発達過程、さらに 気泡のトラップ現象を、見かけ比抵抗の変化として捉え られるかどうかを確認することを目的として、比抵抗モ ニタリングを実施した.

3. 模型堤防実験

(1) 実験概要

実験装置の概要図を図-1に示す.実験装置には、降雨 および河川の水位上昇が堤防に作用するときの堤防への 浸潤の様子や、越流による堤体の破壊の様子を観察する ために、底面以外は透明なアクリル面を有する土槽(幅 2000mm, 深さ550m, 奥行き500mm)を用いた. この土槽 内に豊浦標準砂を使用して,底辺長1500mm,天端幅 300mm, 高さ300mm, 法勾配1:2, 土槽幅500mmの堤防模型 を製作した.また、堤体内には水分計を設置し、堤体の 表面に比抵抗モニタリング用の電極を50mmピッチで設置 した. (測線長:1500mm, 電極間隔:50mm, 電極数:31個)

電極配置図および計測システムの外観を図-2に示す. 比抵抗モニタリングに使用した計測システムは、20CH電 気探査装置(応用地質製)と測定制御用PCで構成され、 従来の電気探査装置(応用地質製)と比較して、約10倍 程度高速に測定ができるシステムである. 実験ケースを表-1に示す.

| 表−1 実験ケース | | |
|-------------|--------|--------|
| 実験条件 | ケース1 | ケース2 |
| | 乾燥盛土 | 湿潤盛土 |
| 基盤浸透 | 180min | Omin |
| 降雨 | 45min | 45min |
| 湛水水位 1500mm | 15min | 105min |
| 湛水水位 250mm | 30min | 35min |

2min

2min

越流



図-2 電極配置図および計測システムの外観

実験では、乾燥盛土、湿潤盛土(含水比0.05)の2ケースについて、任意の降雨強度を再現することが可能な降 雨発生装置を用いて、降雨~湛水~越流と条件を変化させ、降雨浸透や河川水位の上昇に伴う間隙空気の挙動を 把握する実験を行った.

各実験ケースの模型状況を図-4に示す.



図-4 各実験ケースの模型状況 左:乾燥盛土,右:湿潤盛土(含水比0.05)

(2) 実験手順

a)ケース1(乾燥盛土)

ケース1では、乾燥した豊浦標準砂を模型内に空中落 下させ、層圧50mmごとに7回/100cmの割合で突き固め、 堤体盛土を作製した.実験手順としては、堤体盛土に電 極及び電極ケーブルを設置した後、比抵抗モニタリング システムの測定間隔を4分に設定し、モニタリングを開 始した.その後、基盤層を浸潤させるために堤外側から 給水を開始し、基盤層が十分に浸潤した時点で、降雨強 度124mm/hrの降雨を開始し45分間継続した.降雨停止後 に堤外側を一定流速で給水し、堤外側の水位が150mmに 達したところで一定時間水位を保持し、堤体内への浸潤 を待った.再び水位を上昇させ、水位が250mmに達した ところで堤体内部が完全に浸潤するまで保持した.最後 に給水の流量を増やし、堤外側から一気に越流させて堤 体を崩壊させ、堤体崩壊後に比抵抗モニタリングシステ ムの測定を停止した.

b)ケース2(湿潤盛土)

ケース2では、乾燥した豊浦標準砂を水中落下させ 10cmの基盤層を作製した後、水分量5%に湿潤させた豊 浦標準砂を準備して堤体部分を作製した. 試験手順とし ては、堤体盛土に電極及び電極ケーブルを設置した後、 比抵抗モニタリングシステムの測定間隔を3分に設定し、 モニタリングを開始した. 降雨開始後の手順は、ケース 1と同じとした. なお、水位を250mmに上昇させる際に、 給水量と堤内側への浸出量が一致したため水位が上昇せ ず、流量を増加させて給水を行った.

ケース1およびケース2の試験状況を,堤防模型の側 面からデジタルカメラで撮影(1分間隔)し,堤体内部 の状況を動画として観察した.

(3) 実験結果および考察

比抵抗モニタリングの実験結果は、実験で得られた見

かけ比抵抗断面図を用いて,見かけ比抵抗差分断面図・ 変化率断面図を作成し,見かけ比抵抗変化の有無を確認 した.本論文では,堤体内部の微小な見かけ比抵抗変化 を表現している見かけ比抵抗変化率断面の結果を示す.

a)ケース1(乾燥盛土)

比抵抗モニタリング結果を、実験状況写真と合わせて 図-5に示す。

見かけ比抵抗断面図の凡例は、暖色系は見かけ比抵抗 が高いこと、寒色系は見かけ比抵抗が低いことを示して いる. ①と②の結果より、降雨とともに乾燥した豊浦標 準砂内に雨水が浸透することにより、堤体表面の見かけ 比抵抗が低下する状況が確認でき、降雨浸透による見か け比抵抗の変化を捉えていることがわかった.

見かけ比抵抗変化率断面図の凡例は、暖色系は見かけ 比抵抗が増加する領域(低飽和度領域)、寒色系は見か け比抵抗が低下する領域(高飽和度領域)を示している. ③と④の結果より、湛水水位を上昇させることにより、 堤体内部に見かけ比抵抗が増加する領域が出現し、その 領域の見かけ比抵抗は、水位が上昇するほど増加するこ とがわかった.これは、降雨により堤体表面から浸透し た雨水と水位上昇に伴う浸潤面の上昇によって、堤体内 部に閉じ込められた砂の粒子間に残っていた間隙空気が 堤体内部に閉じ込められ、それぞれの水圧により砂の粒 子間の間隙が大きくなったため、見かけ比抵抗が高く なったものと考えられる.

実験開始から75分後(湛水時:③に至る途中)の堤体 の状況写真を、図-6に示す.堤外側法面の表面に間隙空 気の影響と考えられるふくらみや噴発(エアブロー)が 見られ、その下部に間隙空気がトラップされている状況 を、土槽の断面で確認した(赤丸印).③と④の結果に おいても、堤体中央部の見かけ比抵抗が増加する領域と は別に、間隙空気がトラップされている領域の見かけ比 抵抗が増加(青丸印)しており、エアブローの兆候を捉 えている可能性が高いことがわかった.



図-6 湛水時の堤体の状況(堤外側法面)

b) ケース2(湿潤盛土)

比抵抗モニタリング結果を、実験状況写真と合わせて 図-7に示す。

①と②の結果より、ケース1と同様に、降雨とともに 豊浦標準砂内に雨水が浸透することにより、堤体表面の 見かけ比抵抗が低下する状況が確認でき、降雨浸透によ る見かけ比抵抗の変化を捉えていることがわかった.



図-5 比抵抗モニタリング結果(ケース1)
①降雨1分後の状況と見かけ比抵抗断面図
②降雨42分後の状況と見かけ比抵抗断面図
③湛水水位1500mmの状況と見かけ比抵抗変化率断面
④湛水水位2500mmの状況と見かけ比抵抗変化率断面



図-7 比抵抗モニタリング結果(ケース2) ①降雨1分後の状況と見かけ比抵抗断面図 ②降雨43分後の状況と見かけ比抵抗断面図 ③湛水水位1500mmの状況と見かけ比抵抗変化率断面 ④湛水水位2500mmの状況と見かけ比抵抗変化率断面

なお、①と②の見かけ比抵抗断面図において、堤体の 下に飽和した基盤層があるにもかかわらず、堤体中央部 の下部に見かけ比抵抗の高い範囲が見られるが、これは 見かけ比抵抗が電極周辺の広範囲な比抵抗の平均値を表 すことから、堤体本体の比抵抗、基盤層の比抵抗、アク リル板の比抵抗の値を含んだ値を示しているために見か け比抵抗が高くなっていると考えられる。

一方,③と④の結果より,湛水水位を上昇させたとき の見かけ比抵抗変化率断面図の変化は、ケース1と異な り、暖色系の見かけ比抵抗が増加する領域が、水位上昇 に連動しながら堤体上部へ押し上げられている様子がわ かった.この現象は、堤体内部に設置した水分計の体積 含水率が、降雨とともに増加した後、水位上昇とともに 低下する現象⁵と調和的であった.これは、降雨により 堤体表面から浸透した雨水と、水位上昇に伴う浸潤面の 上昇によって堤体内部に閉じ込められた砂の粒子間に 残っていた間隙空気が、浸潤面の上昇により堤体表面へ 押し出されている状況を表していると考えられる.

堤防模型実験の結果,堤体盛土の湿潤状態の違いにより,降雨の浸透および浸潤面の上昇の過程は異なるが,いずれのケースにおいても,降雨の浸透状況および堤体内部に閉じ込められた砂の粒子間に残っていた間隙空気の挙動を,見かけ比抵抗の変化として可視化することができた.

4. 実堤防での散水実験

(1) 実験概要

模型堤防実験の成果を踏まえ、実堤防への比抵抗モニ タリングシステムの適応性を検討することを目的として、 庄内川右岸堤防23km地点の川裏法面において散水実験を 実施した.比抵抗モニタリングは、堤防断面方向(測線 長18.5m)に比抵抗モニタリング用の電極を0.5mピッチ で設置し、模型堤防実験と同じ20CH電気探査装置を用い て実施した.

比抵抗抗モニタリングの電極配置図を、図-8に示す.



図-8 比抵抗モニタリングの電極配置図 (測線長20m, 電極間隔:0.5m, 電極数:38個)

(2) 実験手順

実験手順としては、堤体に電極及び電極ケーブルを設 置した後、比抵抗モニタリングシステムの測定間隔を4 分に設定し、モニタリングを開始した.その後、庄内川 の河川水を水中ポンプでくみ上げ、ホースを使用して降 雨強度約200mm/hrの散水を1時間継続した.測線への散 水停止後,堤防小段部の固定位置において10分間散水を 実施し、その後,堤体への浸透状況を確認するため、散 水を停止して比抵抗モニタリングを3時間継続した.

散水実験状況の写真を図-9に示す.



図-9 散水実験状況

(3) 実験結果および考察

散水前の測定データを基準として算出した散水停止時 の見かけ比抵抗変化率断面図を,図-10に示す.



図-10 散水停止時の見かけ比抵抗変化率断面図

散水により,表層の盛土部(層厚1m)の見かけ比抵抗 は低下(寒色系領域)しているが,表層の盛土部より1m 下の盛土(細砂)部においては,散水した水の水圧で地 盤内の砂に含まれる間隙が大きくなった影響により,見 かけ比抵抗が増加(暖色系領域)していると推測した. 散水停止直後の測定データを基準として算出した散水停 止直後から3時間経過した見かけ比抵抗変化率断面図を, 図-11に示す.



図-11 散水停止直後3時間後の見かけ比抵抗変化率断面図

散水停止後,表層が乾燥することにより,表層の盛土 部(層厚1m)の見かけ比抵抗は増加(暖色系領域)して いるが,表層の盛土部より1m下の盛土(細砂)部におい ては,地中に浸透した水分の影響により,見かけ比抵抗 が低下(寒色系領域)していることがわかった.

実堤防での散水実験の結果、模型堤防実験と同様に、 散水した水の浸透状況を見かけ比抵抗が低下する領域の 変化として、また、間隙空気の挙動を見かけ比抵抗が増 加する領域の変化として可視化することができた。

5. まとめ

模型堤防実験の結果,降雨の浸透状況や湛水時の浸潤 面の上昇過程を,見かけ比抵抗が低下する領域の移動変 化として明瞭に可視化できた.また,湛水時に模型堤防 の堤外側法面部において,砂の粒子間の間隙空気による ふくらみや噴発(エアブロー)が確認され,堤体内部や 噴発位置において見かけ比抵抗が増加する領域が発生し, 水位上昇と伴に堤体上部へ時系列的に移動する過程を可 視化することができた.

実堤防での散水実験の結果、模型堤防実験と同様に、 散水した水の浸透状況を見かけ比抵抗が低下する領域の 変化として、また、間隙空気の挙動を見かけ比抵抗が増 加する領域の変化として可視化することができた。

これらの結果から,通常の降雨より急激に堤体が飽和 する豪雨や越水時において,どの場所が堤体の弱線とな るかなどの事前情報を得る上で,この比抵抗モニタリン グシステムが有効である見通しを得た.

今後は、本手法を多くの河川堤防に適用し、実際の降 雨時や出水時の比抵抗変化を捉え、土壌水分計、間隙水 圧計などの他の計測値との相関関係を分析し、降雨浸透 や間隙空気の挙動を定量的に把握する必要がある.

謝辞:本研究は平成21年度国土交通省河川技術開発制度 地域課題研究公募で採択された,平成21~23年の3ヵ年 の研究成果である.

参考文献

- 1) 中日新聞社:中日新聞社朝刊2000年9月15日朝刊, 2000.
- 小高猛司,浅岡顕:砂質地盤での浸透過程での気泡の発生・ 発達現象,土木学会論文集,487/III-26,pp.129-138,1994.
 坂井宏隆,前田健一:浸透破壊現象における気泡のダイナミ
- クスの影響,地盤工学会誌, Vol. 57, No. 9, 2009. 9.
- 4)島 裕正雅,梶間和彦,神谷英樹:建設・防災・環境のための新しい電気探査法 比抵抗映像法,古今書院,1995.
- 5)前田健一,柴田 賢,馬場干児,桝尾孝之,今瀬達也:豪雨 と気泡の影響を考慮した河川堤防における透気遮水シートの 設置効果,ジオシンセティックス論文集,第25巻,pp.107-112,2010.

- 6)柴田 賢, 今瀬達也,石川晴将,馬場干児, 桝尾孝之,前田 健一:豪雨による砂質堤防内の間隙空気の挙動と透気遮水 シートの補強効果,第46回地盤工学研究発表会論文集, No. 536, pp. 1077-1078, 2011.
- 7)神谷浩二,高木英和,石田正利:河川堤防の耐越流シートの 透気・透水特性について,第46回地盤工学研究発表会論文集, No. 536, pp. 1037-1038, 2011.