物理探査による堤防内部の浸潤過程の可視化

MONITORING OF INFILTRATION PROCESS IN A LEVEE BY USE OF GEOPHYSICAL SURVEY

木佐貫寛¹・小西千里²・川尻峻三³・小笠原明信⁴・西村聡⁵ 島田友典⁶・村椿俊幸⁷・岡部博一⁸ Hiroshi Kisanuki, Chisato Konishi, Shunzo Kawajiri, Akinobu Ogasawara, Satoshi Nishimura Tomonori Shimada, Toshiyuki Muratsubaki, Hirokazu Okabe

 1非会員 応用地質株式会社 技術本部 (〒331-0812 埼玉県さいたま市北区宮原町1-66-2)
2正会員 応用地質株式会社 技術本部 (〒331-0812 埼玉県さいたま市北区宮原町1-66-2)
3正会員 北見工業大学准教授 地球環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)
4学生会員 北見工業大学大学院 寒冷地・環境・エネルギー工学専攻 (同上)
5正会員 北海道大学准教授 環境フィールド工学部門 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)
6正会員 寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34 号)
7非会員 国土交通省 北海道開発局 帯広開発建設部 (〒080-8585 北海道帯広市西5条南8丁目)
8非会員 国土交通省 北海道開発局 河川計画課 (〒060-8511 北海道札幌市北区北8条西2丁目)

Infiltration process in a levee was monitored by resistivity and MASW (Multichannel Analysis of surface waves) survey. The levee consisted of gravelly soil and was covered with cohesive soil. The experiment was carried out during the rise of water level on the riverside. As a result, resistivity survey could delineate water movement from riverside to landside in the levee body. Meanwhile, MASW survey could delineate the area of decreasing of shear wave velocity due to release of insitu stress and decreasing of stiffness which was caused by increasing of volumetric water content. In conclusion, time lapse resistivity survey was useful to image infiltration process in the levee. In addition, time lapse MASW survey could assess the change of stability of the levee. Monitoring by means of geophysical survey was effective to characterize dynamic response in the levee.

Key Words : Time lapse, infiltration process, resistivity, shear wave velocity

1. はじめに

長大な構造物である堤防内部の状態を把握するために は、ボーリングのような点の調査は効率が悪く、局所的 な弱部を見逃す可能性がある.そのため、地下空間の物 性情報を連続的に取得可能な物理探査を適用し、他の手 法と組み合わせた統合的な解釈が、堤防の安全性評価に おいては有効である.また、同じ場所で繰り返し計測す るモニタリング手法は、特定の物性や状態変化に着目し た評価が可能となるため、一回限りの測定と比較して、 より詳細な評価が可能となる.例えば、比抵抗モニタリ ングを実施した場合、地盤の体積含水率の変化を評価す

ることが可能となる.

筆者らは、平成30年6月27日に国土交通省北海道開発 局と寒地土木研究所が実施した十勝川千代田実験水路に おける実物大破堤実験において、河川水位上昇にともな う堤体内部の物性変化を把握するために、物理探査(電 気探査,表面波探査)を用いたモニタリングを実施した. 前報¹⁾は物理探査で得られた一部の結果を報告したが、 本報は、実験全体を通して得られた結果、及び、物理探 査手法を用いた堤体内モニタリング手法の有効性につい て報告する.

2. 物理探査を用いたモニタリング手法

水位上昇にともなう堤体内の物性変化を評価するため に、電気探査と表面波探査を用いたモニタリング手法を 適用した.電気探査は、地盤に電流を流した時の応答を 得て、解析することにより、地盤の比抵抗構造を得る手 法である.一方、表面波探査は、重さ10kg程度のハン マーを用いて地面を打撃し、その時の振動を取得・解析 することによって、地盤のS波速度を得る手法である.

電気探査によって得られる地盤の比抵抗は、体積含水 率、温度、粒度などさまざまなパラメータに依存される が、繰り返し計測することによって、特定のパラメータ に着目した評価が可能である.本計測中は、河川水位上 昇にともない、体積含水率の変化が顕著に生じ、その他 のパラメータは、それほど変化しないものと想定される. そのため、繰り返し計測によって得られた比抵抗変化は、 体積含水率の変化をとらえたものと解釈することが可能 である.

表面波探査によって得られる地盤のS波速度は,地盤 の剛性率と密度の関数によって表される.S波速度の変 化は,これら二つのパラメータの片方,あるいは両方が 変化したことによって生じる.短期的なS波速度モニタ リングによって,不飽和地盤における表層の体積含水率 の増加に伴うS波速度の低下を観測したという報告があ る^{2),3),4)}.これらは,単に密度増分だけで速度低下を解釈 できないことから,地盤の剛性率の低下を観測した可能 性がある.また,不飽和土の剛性率はサクションの関数 で表されることから⁵⁾,体積含水率の増加によって,サ クションの低下が生じ,剛性率の低下が生じたものと解 釈できる.本計測中は,河川水位上昇に伴い,堤体内の 体積含水率が増加した際のS波速度変化を捉えることが 可能である.

地盤中の浸透過程の把握を目的としたモニタリングで は、計測中に地盤物性値が変化していることから、1回 当たりの計測を可能な限り短時間で実施することが必要 である.

3. 計測方法

図-1に測線配置を示す.高さ3mの堤防に対し,堤防 縦断方向に電気探査(電極間隔50cm×37ch,ダイポー ル・ダイポール配置)と表面波探査(受振器間隔1m× 24ch),堤防横断方向に電気探査(電極間隔30cm×48ch, ダイポール・ダイポール配置),計3測線を設定した. 堤防は,電気探査の始点から5m下流側に越水させるた めの切欠部がある.物理探査の計測は,堤外地の水位を 上昇した状態で,電気探査と表面波探査の繰り返し計測 を実施した.



図-1 測線配置図



図-2 縦断・横断方向における比抵抗構造

図-2に実験前日に得られた縦断・横断方向における比 抵抗構造を示す.堤防表層は厚さ50cm程度の粘性土, 堤体内部は礫質土で構成されている.比抵抗構造を見る と,粘性土は相対的に低比抵抗(50Ωm程度)を示し, 礫質土は相対的に高比抵抗(1000Ωm程度)を示した. 得られた比抵抗構造は,土質の違いを適切に反映してい る.

4. 内部物性構造の変化

電気探査と表面波探査は一定の間隔でデータ取得を実施した.それぞれの手法で得られた解析結果から,内部物性構造の変化を評価するためには,実験開始直前に得られた物性構造と比較することが有効である.そこで, 各時刻で得られた比抵抗・S波速度の変化を評価するために,式(1)を用いて堤体内における物性変化率を計算した.



変化率 (%) =
$$\frac{\chi_{3} \times \pi \pi}{\pi} \times 100$$
 (1)

ح 各解析結果における測定時刻は,測定の開始時刻とした.

(1) 電気探査 縦断測線

式(1)における参照モデルを実験直前に得たモデル(実 験開始15分前)とし、各時間における比抵抗変化率を計 算した.得られた比抵抗変化率は、例えば、各時刻の比 抵抗構造が、参照モデルよりも低比抵抗となった場合、 負の変化率を示す.このことは、参照モデルと比較して、 体積含水率が上昇したことを意味する.

図-3に縦断測線における参照モデルと比抵抗変化率断 面を示す.縦断方向における1回当たりの測定時間は6分 程度であった. 測定は安全性を考慮し、上昇させた水位

が越水を始める前(実験開始25分)までとした.比抵抗 変化率断面を見ると、実験開始9分前は、水位を上昇さ せていないため、当然のことながら明瞭な変化は認めら れない.実験開始16分後、25分後の変化率断面から標高 14m付近において変化率-30%以上を示す低比抵抗化が認 められ、時間の経過とともに、低比抵抗領域が拡大して いることが分かる.このことは、堤外地の水位を上昇さ せたことによって、堤体内の体積含水率が上昇している ことを示し、時間の経過とともに、浸潤領域が地表面へ 上昇したものと解釈できる.

(2) 電気探査 横断測線

電気探査横断測線は、縦断測線終了後に測定を始めた. 最初の測定は、実験開始40分後(河川水位16.01m)で あった.一回当たりの測定時間は、11分程度であり、使 用するチャンネル数が増えたことで、縦断方向の測定時 間と比較して長くなった.

図-4に横断測線における比抵抗変化率断面と参照モデ ルを示す. 図中に示した黒点は、後述の土壌水分計と間 隙圧計の設置位置である.変化率を計算するために、式 (1)の参照モデルは、実験開始40分後の比抵抗構造とした. 変化率断面を見ると、全ての時刻において低比抵抗化 (変化率-30%以上)と距離程4m付近に高比抵抗に変化した 領域が認められる. 前者は、堤体内の体積含水率が上昇 したことを意味し、後者は、変化率を計算する際に生じ た偽像であり、物理現象を捉えたものではない.

実験開始56分後の変化率断面を見ると、距離程10m付 近まで低比抵抗に変化した領域が広がっており、70分後 には距離程12m付近まで低比抵抗に変化している結果が 得られた.このことは、河川水位上昇にともない、堤体 内礫質土の体積含水率が上昇したことを示しており、時 間の経過とともに、浸潤領域が堤外地から堤内地へ移動 した過程がとらえられている. 85分後から115分後にか けて、低比抵抗に変化した領域は徐々に地表面に近づく 結果が得られており、浸潤領域の上昇過程がとらえられ ている. 130分後からは、明瞭な変化は認められず、堤 体内は定常状態に至ったものと判断できる.

(3) 表面波探查

表面波探査は、電気探査縦断測線同様、作業時の安全 性を考慮し、切欠部から越水が始まる直前まで3回の計 測と実験終了後に1回の計測を実施した。1回当たりの計 測時間は、4~9分程度であった.S波速度の変化率を計 算するために、式(1)における参照モデルは、実験当日最 初に取得した実験開始6分前とした.得られたS波速度変 化率は,参照モデルよりも低速度を示す領域は,負の値 を示す.

図-5に実験開始6分前に得られたS波速度構造を示す. 距離程0~14mまでが新設の実験堤防,距離程14mから 終点部は既設の三面張堤防である.S波速度構造を見る

(1)





と,深度4m程度までVs=150m/s程度を示し,深度4mよりも深部はVs=200m/sを示す.

図-6にS波速度変化率を示す.式(1)における参照モデ ルは、図-5のS波速度構造を使用して計算した.S波速度 変化率を見ると、実験開始12分後、27分後で、深度3m 付近に変化率-10%程度を示す領域が認められる.図-3 で示した縦断方向における比抵抗変化率断面をみると、 深度3m付近は低比抵抗化を示した領域である.した がって、深度3m付近は体積含水率の上昇が生じた領域 と考えられる.電気探査で得られた結果と組み合わせて 解釈すると、表面波探査で得られたS波速度の低下は、 体積含水率の上昇によって生じたものであり、剛性率の 低下をとらえた可能性がある.また、表層付近において も低速度化が認められるが、これは実験当日の天候が雨 であったことから、表層の体積含水率が上昇したことに よって、速度低下が生じたと考えられる.距離程16~ 18m付近で深度1~2m程度で高速度化が生じているが、 他に参照できるデータが無いため、その要因ははっきり しないものの、現時点では、解析上の問題であり、物理 現象を反映したものでは無いと考えている.



図-6 S波速度変化率断面

次に、実験終了後(410分後)の変化率断面をみると、広範囲で低速度化が認められる.図-4の横断方向の比抵抗変化率断面の結果から、堤体内の礫質土の体積含水率は上昇している.また、実験後は破堤によって片側の堤防法面が削られていた.これらのことから、観測されたS波速度の低下は、堤体内の体積含水率の上昇によって生じたこと、また、応力開放の影響を受けた可能性がある.



(4) 土壌水分計と間隙圧計の測定結果

本実験で得られた比抵抗変化は、地盤の体積含水率の 変化を評価していることから、土壌水分計と組み合わせ て測定・解釈することが有効である.本計測では、横断 測線から4m下流に土壌水分計(Decagon EC-5)と間隙圧計 (内径2.25mmの毛管チューブ)を設置しており、これらの 観測結果から堤体内の浸潤状態を把握することが可能で ある.図-7にセンサの設置位置を示す.図-7の距離程は、 図-4の横断方向変化率断面における距離程と同じである. 二種類のセンサは6か所に設置した.センサの設置は、 先端部を豊浦砂で充填し、残りをセメントミルクで充填 することで、地盤中に埋設した.図-8に観測結果を示す. 土壌水分計の観測結果は、相対的変化のみ着目するため、 較正値ではなく、出力電圧そのものを用いる.

二つの観測結果を見ると,間隙圧計の応答は土壌水分 計の応答よりも遅れて反応している.これは,間隙圧計 が,チューブ先端の砂が飽和(あるいはその直前)した 時点から間隙水圧を計測し始めるためである. 土壌水分 計の結果を見ると、3と4の二つのセンサが応答を示して いないことが分かる. センサ3は、土壌水分計と間隙圧 計の出力値が変化していないことから、浸潤しなかった と解釈できる. センサ4は、間隙圧計が応答し、土壌水 分計が応答していないことから、4の土壌水分計は正常 に動作していなかったか、あるいはセメントミルクがセ ンサ部に付着し応答が極端に遅くなったものと判断でき る.

図-4の横断測線における比抵抗変化率の結果と比較す ると、大局的に見れば、両者は整合しているものの、土 壌水分計の応答を始めた時間と比抵抗が変化し始めた時 間の間に、ずれが生じている. 例えば、堤外地から堤内 地への浸潤領域の進行は、土壌水分計のセンサ6を見る と、55分後から変化を始めており、90分後に急激に変化 し、飽和に近い状態になったことがわかる.一方、電気 探査の結果からは、70分後に比抵抗変化を評価すること ができた. 土壌水分計は、3秒間隔でデータを更新でき るのに対し、電気探査は、1回当たりの測定に11分要し、 測定中にも堤体内の状態が変化したことで、応答の時間 差が生じたものと考えられる. リアルタイム(例えば降 雨中)で物性構造変化を評価するためには、電気探査の 測定時間や測定間隔の短縮化が必要である.一方,短時 間で物性値が大きく変化しない場合、例えば、降雨前後 に得られた物性構造の比較から浸透領域を把握する場合 は、今回のような測定を実施することで、十分評価可能 である.

5. まとめ

河川水位を人工的に上昇させた時の堤体内における物 性・状態変化を把握するために,電気探査と表面波探査 を用いた物理探査モニタリングを適用した.

縦断方向における比抵抗モニタリングとS波速度モニ タリングの結果は、深度3m付近で比抵抗とS波速度の変 化が得られた.両者を組み合わせて解釈することにより、 深度3m付近は、体積含水率の上昇によって剛性率低下 の様子を捉えた可能性がある.二つの手法を組み合わせ たモニタリング手法を適用することにより、比抵抗変化 から体積含水率の変化(浸透性評価)、S波速度変化から 剛性率の変化(安定性評価)を評価することが可能である.

横断方向における比抵抗モニタリングの結果は,堤外 地から堤内地への浸潤領域の動き,及び,浸潤領域の上 昇過程を捉えることができた.しかしながら,礫質土の 透水性が高いことから,計測時間11分の間に,堤体内の 体積含水率が変化していた可能性がある.そのため,よ り詳細な浸透過程を把握するためには,1回当たりの計 測時間の短縮化,及び,測定間隔の短縮化が必要となる. 例えば,同時多点通電法®を用いた比抵抗モニタリング の適用^{2,7}が有効である.

物理探査を用いたモニタリング手法によって、堤体内 の物性変化を連続的に把握することができた.現時点で は、定性的な解釈にとどまっているため、今後は定量的 な解釈をするためにも、比抵抗とS波速度の体積含水率 との関係性のモデル化が必要となる.

謝辞:本研究の一部は,北海道河川財団(研究代表者: 川尻峻三,共同研究者:西村聡)の助成を受けたもので ある.

参考文献

- 川尻峻三,小西千里,木佐貫寛,小笠原明信,西村聡,島田 友典:物理探査による実物大破堤実験の堤防内浸透状況の把 握,第6回河川堤防技術シンポジウム論文集,2018.
- 2) 木佐貫寛, 稲崎富士, 今村杉夫:不飽和地盤における水の浸 透モニタリング,地盤工学会誌, 65(1), pp.20-23, 2017.
- 3) 木佐貫寛, 稲崎富士, 尾西恭亮:繰り返し計測による模擬堤 防における内部物性構造変化の把握,物理探査学会第136回 学術講演会論文集, pp.138-141, 2017.
- 4) 木佐貫寛,小河原敬徳,稲崎富士,尾西恭亮:模擬堤防における基盤浸透過程のモニタリング,物理探査学会第138回学術講演会論文集,pp.67-70,2018.
- Sawangsuriya, A., Edil, T. B. and Bosscher, P.J. : Modulus-suctionmoisture relationship for compacted soils in postcompaction state, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135(10), pp.1390-1403, 2009.
- 6) Imamura, S., Inazaki, T., Kita, T. and Sakanishi, K. : Development and application of improved high-speed resistivity profiling system using code division multiple transmission, Proceedings of the 11th SEGJ International Symposium, pp.68-71, 2013.
- 7) Inazaki, T., Imamura, S. and Sakanishi, K.: 4D ERT monitoring of water infiltration in the vadose zone by means of a high-speed resistivity measurement tool, Proceedings of the 28th Annual Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, pp.177-184, 2015.

(2019.4.2受付)