比抵抗トモグラフィ法による ため池の堤体安全監視システムに関する実験的研究

長束　勇[1]・中里裕臣[2]・畑山元晴[3]・森　充広[4]・利岡徹馬[5]・櫻井　健[6]

Development of New Managing System for Maintenance of Irrigation Earth Dam by Using Resistivity Tomography Technique

Isamu Natsuka[1], Hiroomi Nakazato[2], Motoharu Hatakeyama[3], Mitsuhiro Mori[4], Tetsuma Toshioka[5] and Ken Sakurai[6]

Abstract: We are advancing the development of the new managing system for maintenance of the irrigation earth dam by using two-dimensional resistivity tomography technique, which enables us to supplement the limit of traditional maintenance system by using buried meters. It is expected that we successfully estimate two-dimensional distribution of water contents or porosity in the embankment site. Before applying this system to actual embankment site, we made small model embankment and investigated the possibility of resistivity tomography application. We arranged the electrodes for resistivity tomography in order to surround the embankment. Besides, we arranged open piezometers to acquire actual water behavior in the embankment. Then we conducted resistivity tomography measurement to detect the change of water level in the embankment. From the differences between resistivity distributions before and after water storing, we find resistivity decreasing areas caused by water intrusion. This result is well matched to the permeability of the fill and the values of open piezometers.

1 はじめに

全国各地に約21万箇所あるといわれる「ため池」は，農業用水の重要な水源施設であるとともに，地域の貴重な歴史的資産である．しかし，農家の兼業化や高齢化などを背景とする管理主体の弱体化により，必ずしも管理は十分ではなく，豪雨による堤体の被災事例が後を絶たない現状にある．Hori *et al.* (1998)は，堤体の被災は越流破壊，すべり破壊，浸透破壊に分類され，堤体が決壊に至るような大きな被災である越流破壊については数年に一度発生する局地集中豪雨によるものがほとんどであるが，堤体からの漏水などの浸透破壊による被災は毎年多数発生している.1987年から1996年の10年間の被災件数は延べ1万箇所を超えており，これらの被災原因は浸透破壊が最も多い，と指摘している．

この浸透破壊に対する「ため池」堤体の安全性監視が必要な場合には，通常，堤体内に埋設計器を設置し挙動観測を行ったり，堤体や周辺地山にボーリング孔を設け水位観測を行うなどの対策がとられている．漏水量の増加が認められた場合や地震直後の堤体の安全性確認には，これらの観測値は有用である．しかし，従来の埋設計器は，落雷や経年劣化により埋設後数年でその信頼性が落ちる場合がある．また，堤体内部を調べるために堤体に直接ボーリング孔を設けることは，機能上好ましいことではない．さらに，これらから得られるデータは点のデータであり，必ずしも異常箇所を特定するのに十分ではない．

そこで，堤体の安全性を2次元的かつ長期的に監視できるシステムの開発を目的として，比抵抗トモグラフィ法を用いた「ため池」の堤体安全監視システムの開発に関する研究を平成11年度から開始した．本報では，開発予定のシステムの概要，数値実験による現地適用可能性の検討，農業工学研究所内に設けた小規模な試験堤体によるモデル実験の貯水直後までの結果について報告する．

2 堤体安全監視システムの概要

比抵抗トモグラフィ法は，探査対象部分の周囲のボーリング孔やトンネルなどを利用して地中にも電極を設置し，地下の比抵抗構造をより高精度に解析する手法である（図解物理探査，1992）．しかし，地盤調査を目的とした比抵抗トモグラフィ法では，通常は，探査対象部分の全周に電極を設置することは困難な場合が多く，電極を設置できない領域近傍での解析精度に課題があった（物理探査学会，1999）．また，初期モデルは解析結果に大きな影響を与えるが，比抵抗構造こそが求めるべき未知のものであるため，実際とかけ離れた初期モデルを与えてしまうと，良好な解析結果が得られなくなる場合がある．そこで，本監視システムでは，堤体の築造時にあらかじめ電極を埋設し，堤体全体を囲んで電極を設置

[1] 農業工学研究所土木地質研究室長 Chief, Laboratory of Engineering Geology, National Research Institute of Agricultural Engineering, MAFF, 2-1-2 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8609 Japan
[2] 農業工学研究所土木地質研究室主任研究官 Senior Researcher, Laboratory of Engineering Geology, National Research Institute of Agricultural Engineering, MAFF, 2-1-2 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8609 Japan
[3] 農業工学研究所土木地質研究室研究員 Researcher, Laboratory of Engineering Geology, National Research Institute of Agricultural Engineering, MAFF, 2-1-2 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8609 Japan
[4] 東北農政局郡山土地改良建設事業所係長 Chief clerk, Koriyama Agricultural Land Reclamation Project Office, Tohoku Regional Agricultural Administration Office, MAFF, 2-36-20 Kaisei, Kooriyama, Fukushima, 963-8851 Japan
[5] 応用地質株式会社つくば技術開発センター Manager, Tsukuba Technical Research and Development Center, OYO Corporation, 43 Miyukigaoka, Tsukuba, Ibaraki, 305-0841 Japan
[6] 応用地質株式会社つくば技術開発センター Researcher, Tsukuba Tchnical Research and Development Center, OYO Corporation, 43 Miyukigaoka, Tsukuba, Ibaraki, 305-0841 Japan

する方法（中里ら，2000）を採用した．探査対象領域を完全に取り囲むことによって，解析精度の向上が見込まれる．また，遮水材などの築堤材料は比較的均質であり，しかも事前にその物性を室内試験で求めることができることから，築堤材料の比抵抗値などの事前情報を解析に組み込むことが可能であり，部分的で小さな比抵抗変化を精度よくとらえることができる可能性がある（森ら，1999）．さらに，埋設する電極は耐腐食性の金属片であり構造が単純で可動部がないため経年劣化が少なく，現状の埋設計器類と比較すると長期的な使用が可能であると考えられる．

既往の類似の研究には，吉田ら（1999）のアースダム堤体内部の浸透調査を目的とした高密度電気探査事例がある．ダム上下流方向の法面表面に2m間隔で電極を設置し，試験湛水直前，サーチャージ水位，試験湛水終了後の計3回の探査を実施している．この探査結果から，湛水直前の比抵抗分布とサーチャージ水位時の比抵抗分布を比較することによって，堤体内の浸透状況を把握できる可能性があるとしている．しかし，吉田らの探査では既存堤体を対象としているため，設置した電極が堤体表面に限定されており，したがって解析の精度，分解能は電極配置の制約を大きく受けるものと考えられる．

本監視システムの概要を堤体がフィルタイプの場合を例に示すと，図1のとおりであり，堤体の上下流方向および堤軸方向に電極を埋設し，比抵抗トモグラフィ法による計測を実施する．盛土材料は施工時に品質管理を行うため，遮水部の物理的特性はほぼ均質であると考えられ，対象領域における比抵抗分布は，概ね一様になると考えられる．盛り立てが完了した時点で第一回目の計測を実施し，その時の比抵抗分布を基準値とする．その後試験湛水中，供用中に計測を行い，基準値からの変化を経時的にモニターする．

Archie（1942）によれば，計測される岩石や地層の比抵抗値と，その間隙水の比抵抗値には，次の関係式が成立する．

$$\rho_s = a \cdot \phi^{-m} \cdot S^{-n} \cdot \rho_w \qquad (1)$$

ここで，ρ_s ＝岩石や地層の比抵抗値，ϕ ＝間隙率，S ＝飽和度，ρ_w ＝間隙水の比抵抗値，a, m, n ＝定数である．したがって，この(1)式の関係を利用すると，間隙率，間隙水の比抵抗値，および定数値をあらかじめ求めておけば，理論上，計測される比抵抗値から飽和度が求まる．逆に飽和度が一定であれば，比抵抗変化から間隙率の変化を求めることができる．

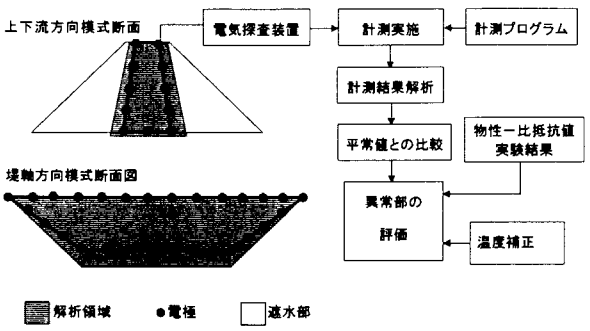

図 1：堤体安全監視システムの概要

堤体内の浸透状況の異常は，大きくは二つの現象としてとらえられる．一つは，例えば埋設された間隙水圧計の計測結果に示される，遮水部内部の浸透状況の変化による浸潤線の変化である．もう一つは漏水量観測からとらえられる遮水部内部もしくは遮水部周辺基礎地盤における漏水経路の形成である．これらの異常は，物性的には前者は遮水部の飽和度の変化，後者は遮水部もしくは基礎地盤の間隙率の変化としてとらえられる．さらには，漏水が増加すると間隙水の起源が地山地下水から貯水にシフトすることから，間隙水の温度や電気伝導度が変化し，間隙水の比抵抗値が変化する．これら飽和度，間隙率，間隙水の比抵抗値は，上述のように比抵抗関数の変数であり，築堤時に堤体周辺に埋設した電極系を使用する比抵抗トモグラフィ法を経時的に実施して比抵抗分布の変化をモニターすることにより，遮水部の異常を長期的に検知することができる．

3 数値実験による現地適用可能性の検討

本システムによる計測実験を行う前に，フィルタイプの堤体を単純化したモデルによる数値実験を行い，比抵抗トモグラフィ法の現地適用への可能性について検討した．実験の目的は，堤体の遮水部に比抵抗変化が生じた時における本システムの検出能を調べることであり，実験は以下の手順によった．

①堤体の上下流方向の断面をモデル化した．各ゾーンの比抵抗値の初期値は，遮水部を30Ω・m，下流側のロック材部および空間部を999,999Ω・m，上流側の飽和したロック材部および貯水部を50Ω・m，基礎地盤部を300Ω・mに設定した．

②遮水部の一部分の比抵抗値が30Ω・mから20Ω・mに減少した場合を想定した．初期モデルの比抵抗ブロックにこの比抵抗変化を与え，差分法による数値モデリング（順計算）によって2極法電極配置で計測されるべき計算値を求めた．

③求めた計算値を計測値と見なし，この計測値に対して平滑化制約付き最小自乗法による逆解析を行った．逆解析は全体に初期値として100Ω・m均一を設定して開始し，10回の順計算，逆解析の反復計算結果を解析結果として比抵抗構造を再構成した．

なお，差分法による数値モデリングに使用した計算領域は，図2に示す59×50メッシュの範囲とし，逆解析の解析領域は2×2メッシュの比抵抗ブロックを単位とする20×21ブロックの範囲とした．電極はダムの上下流方向の遮水部断面全周に64点設置した．2極法電極配置における電極の送受信総組み合わせ数は，2,016である．

逆解析結果を図3に示す．最初のモデリング時に想定した異常箇所は，黒で塗りつぶした二つのブロック部分である．また，各ブロック内の数値は，逆解析により再構成された比抵抗値（Ω・m）を示している．比抵抗変化を想定した二つのブロックが20Ω・mにうまく再構成され，それ以外の遮水部の比抵抗値はほぼ30Ω・mに再構成されている．このように，数値実験では，本監視システムは，堤体に発生した比

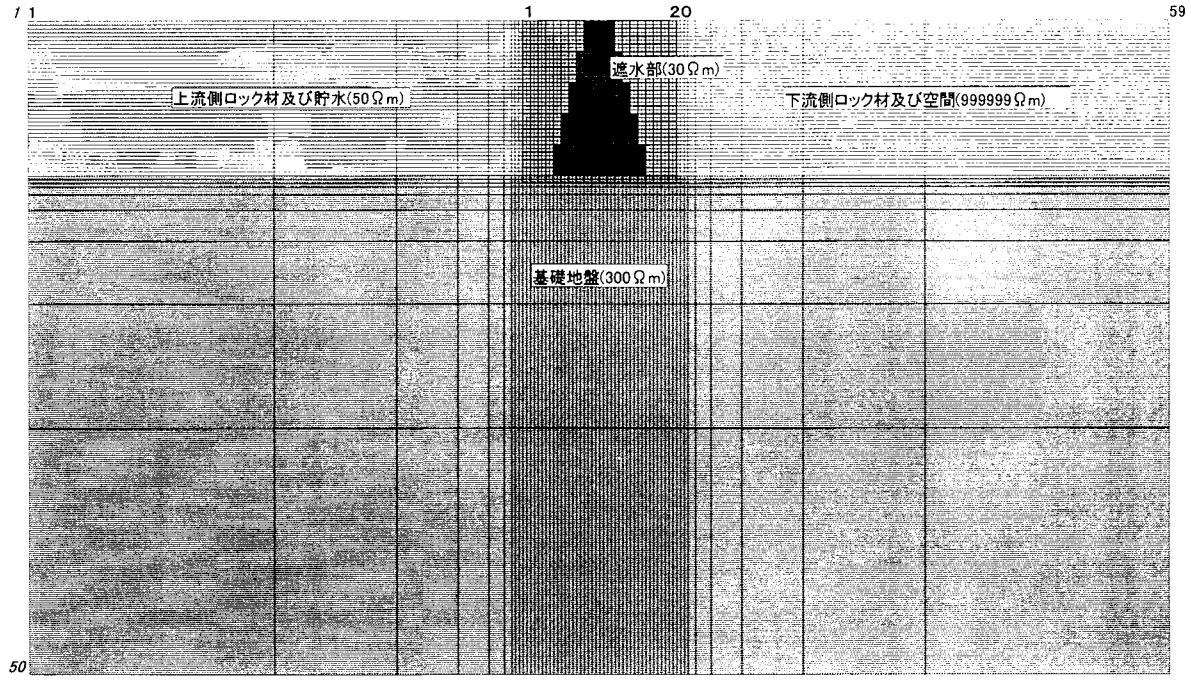

図 2: 数値モデリングの計算領域

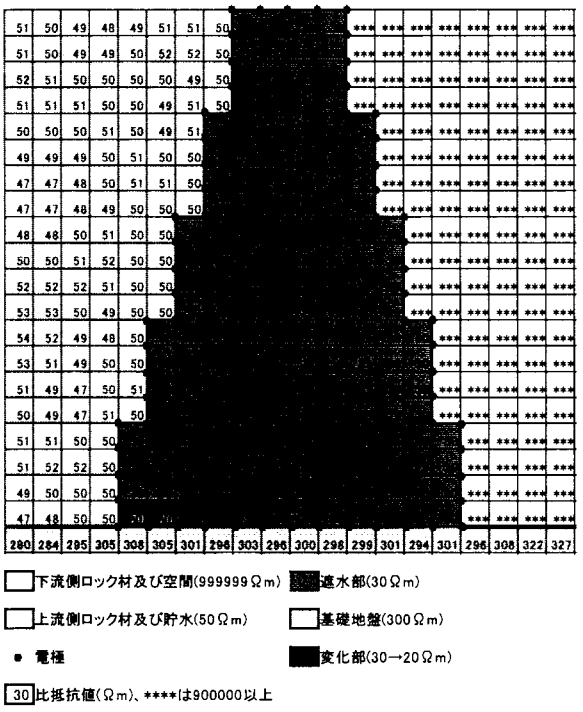

図 3: 比抵抗分布の再構成結果

抵抗の異常箇所を精度よく検出することが可能であることを確認できた.

4 小規模な試験堤体によるモデル実験

4.1 モデル実験の目的

実堤体を対象として，実際に比抵抗トモグラフィ法による監視を行う際には，種々の問題が起こりうる．例えば，通常，比抵抗トモグラフィ法の解析では，解析断面の走向（垂直軸）方向には比抵抗値の変化がないとし，無限遠まで平面が続くと仮定して解析を行っている．ところが，堤軸方向の解析に際しては，垂直軸方向となる上流側には貯水，下流側は空気の層が存在し，この仮定が成り立たない．すなわち堤体の形状に起因する 3 次元効果の影響が現れると推測される．また，中里ら（1999）は，計測される比抵抗値は季節変化による地温変化の影響を受けると報告している．

従って，今後，実証試験を予定するにあたり，どのようなことが問題となる可能性があるのか事前に検討しておく必要がある．そこで，実規模の実証試験を行う予定である T 池の遮水材（風化花崗岩「マサ土」）を用いて野外に小規模な試験堤体を作製し，この堤体に電極を配置して比抵抗トモグラフィ法による計測を行う実験を開始した．

4.2 試験堤体の概要

試験堤体は農業工学研究所敷地内に築造した堤高 105cm，堤頂長 700cm，天端幅 90cm，底幅 300cm の小規模な盛土である．試験堤体近傍において，この盛土材を用いた試験盛土を行い原位置透水係数を求めたところ，1×10^{-5}cm/s 前後であり，T 池の設計透水係数にほぼ等しい値であった．

図 4 に作製した試験堤体の概要を示す．上下流方向の電極は，3 列（各 11 電極）を底盤上に配置し，3 つの上下流断面を計画した．一方，堤軸方向の電極

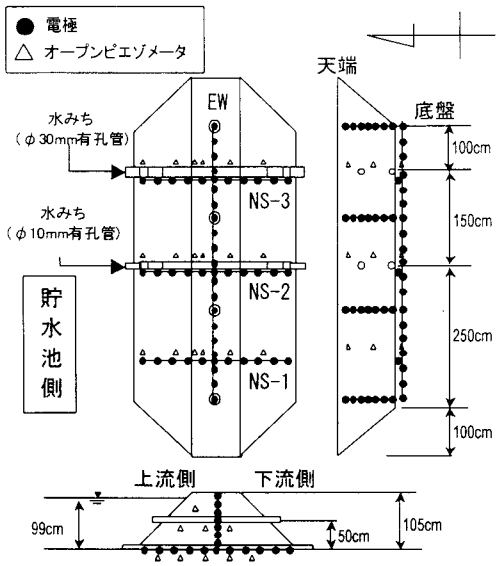

図 4: 試験堤体および埋設電極などの配置概要

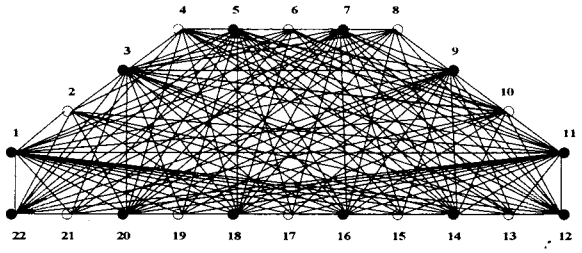

図 5: NS 断面の電極配置および計測パターン

は，1 列（19 電極）を底盤上に，堤体内部に 4 本（各 7 電極）を鉛直方向に配置し，堤軸方向の断面を計画した．水平方向，鉛直方向の電極の間隔は，それぞれ 25cm，15cm を基準とした．また，堤体内部の浸潤状態を把握するために，オープンピエゾメータを埋設した．さらに，水みち発生を模擬化するため，堤体内部の 2 箇所にキャップ付き有孔管（φ30mm，φ10mm）を配置した．これらの電極，計器などを埋設した堤体は，平成 11 年 10 月上旬に完成した．

4.3 比抵抗トモグラフィ法による計測方法

作製した試験堤体の上下流方向の 3 断面（西から順に NS-1,2,3 断面），および堤体中央を通る堤軸方向の断面（EW 断面）において，比抵抗トモグラフィ法による計測を行った．堤体の外周および堤頂に配置する電極は，コンクリートネイルを堤体表面に打設した．

図 5 に NS 断面の電極配置と計測パターンを併せて示す．電極数は，底盤上に配置した 11 個と堤体表面に打設した 11 個の計 22 個である．電流を印加する電極（図中●）は 12 個とし，相反性をチェックする計測パターンを含めて合計 252 個の電位データを計測する．また，図 6 に EW 断面における電極配置と計測パターンを示す．電極数は，底盤上に配置した 19 個と，4 本の鉛直方向の 28 個（7×4），および地表堤軸上に打設した 16 個の計 63 個で，合計 1,860 個の電位データを計測する．

4.4 貯水前後の計測・解析結果

11 月下旬（11/26），試験堤体北側の窪地に堤頂-6cm まで貯水し，この貯水の前後（11/18，12/09）において NS 断面，EW 断面を比抵抗トモグラフィ法により計測した．計測には 2 極法電極配置を用い，計測器は McOHM21 とジオエレクトリックスキャナー2 台を使用した．

計測したデータは，比抵抗逆投影法（Shima，1992）により処理して見掛比抵抗断面を作成し，この見掛比抵抗断面を初期モデルとして非線形最小自乗法を用いた反復逆解析を行った．理論電位データの計算には，アルファセンター法（物理探査学会，1999）を用いた．なお，NS 断面では 10×10 個，EW 断面では 20×10 個のアルファセンターを配置した．

NS 断面の逆解析の代表例として，NS-2 断面の貯水前，貯水後の解析結果を図 7，図 8 に示す．貯水の前後に拘わらず，試験堤体の比抵抗値は，おおよそ 60～140Ω･m の範囲にある．また，全体的に比抵抗値が堤体上部ほど高く，底部ほど低くなる傾向がある．

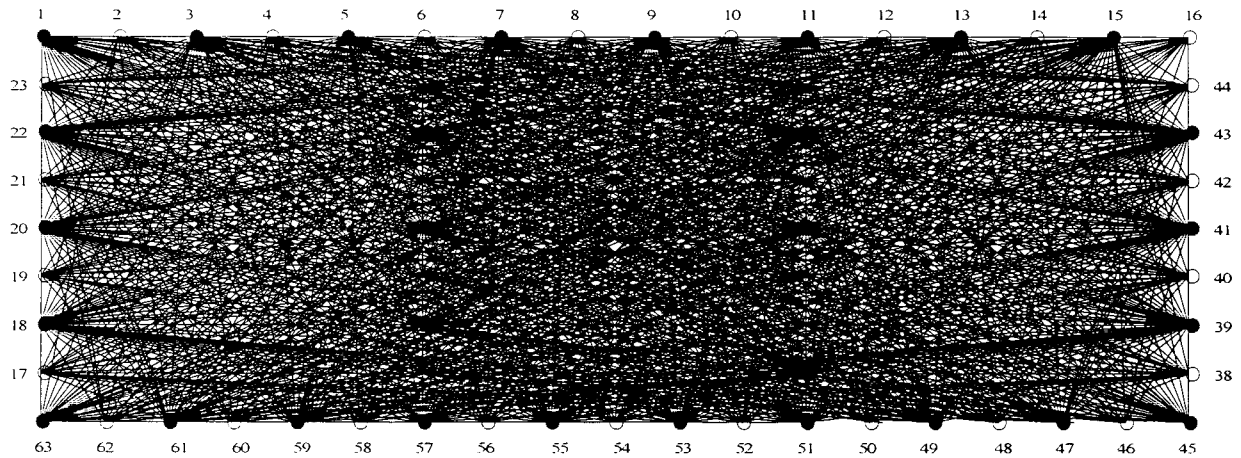

図 6: EW 断面の電極配置および計測パターン

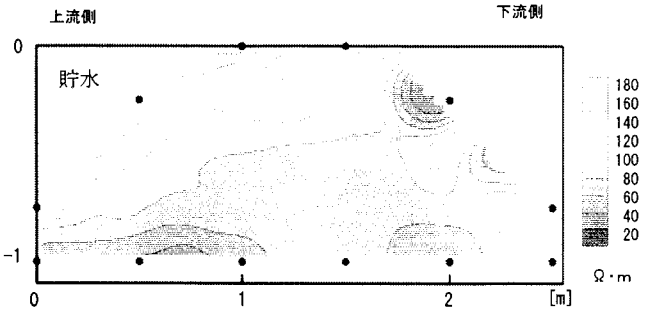

図 7: NS-2 断面の貯水前の解析結果

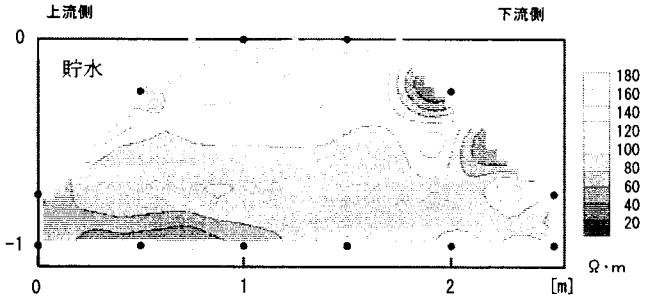

図 8: NS-2 断面の貯水後の解析結果

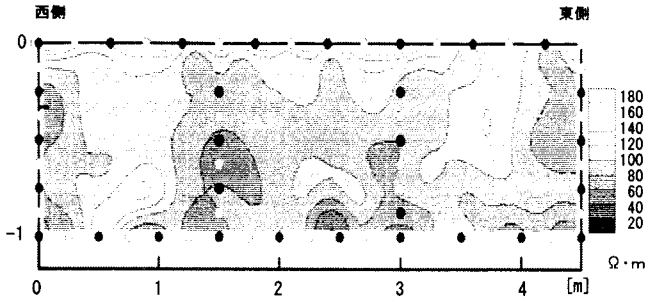

図 9: EW 断面の貯水前の解析結果

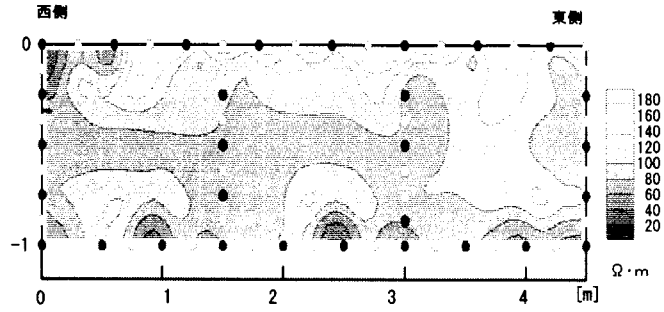

図 10: EW 断面の貯水後の解析結果

築堤時にこの盛土材を採取し，実験室内でモールドに突き固めて作製した供試体の比抵抗値計測結果は，およそ 60Ω・m 前後であったことから，堤体上部の比抵抗が高まる方向へ変化したと判断される．すなわち，貯水前の計測においても試験堤体完成から約 50 日を経過しており，かつ，降雨による堤体法面の侵食を防止するため堤体全体を被う屋根を架けたことから，堤体上部がより早く自然乾燥が進み，比抵抗が増加したものと考えられる．したがって，この比抵抗分布は，自然乾燥による含水比の変化に起因するものと考えるのが妥当である．一方，貯水前後の比抵抗分布を比較すると，上流側の堤体法面表層部の比抵抗値は，貯水前の 100～160Ω・m に対し，貯水後は 40～120Ω・m と，貯水に起因した飽和度の変化による低比抵抗化が現れていることがわかる．なお，下流側法面には貯水の前後共に同様の位置に低比抵抗の異常が見られるが，これらは電極近傍の局所的な異常と考えられる．

その他の二つの NS 断面（NS-1 断面，NS-3 断面）においても，貯水の前後で上流側法面に沿った部分の比抵抗値が低下するという，NS-2 断面と同様の結果が得られた．

図 9，図 10 に，EW 断面の貯水前，貯水後の解析結果を示す．貯水前後の結果を比較すると，堤頂付近の比抵抗値が増加している範囲が広がっていることがわかる．この変化は，堤頂付近の自然乾燥によるものと考えられる．そのほかの部分については，局所的な変化を除けば，比抵抗値が明らかに変化している部分は見当たらない．この結果から，貯水による盛土の飽和度の変化は，堤体軸の断面までは到達していないと推定される．

4.5 比抵抗値の変化率

堤体の安全性監視を比抵抗モニタリングによって行うことが本研究の目的である．そこで，貯水前後の比抵抗変化を調べるため，4.4 の逆解析結果に基づいて比抵抗値の変化率を求めた．変化率 $\Delta\rho$ （%）は，貯水前の比抵抗値，貯水後の比抵抗値をそれぞれ ρ_{before}，ρ_{after} とし，

$$\Delta\rho = \left(\rho_{after} - \rho_{before}\right) / \rho_{before} \times 100 \qquad (2)$$

により定義した．この定義により，貯水後の比抵抗値が貯水前の比抵抗値に比べて低下した場合には，変化率は負の値となる．

図 11 に，NS-2 断面の比抵抗変化率分布を示す．上流側の法面に沿って層状に比抵抗が低下している領域が見られ，この領域が貯水に起因して低比抵抗化したと考えられる．その他の部分においては，下流側法面の一部に局所的な比抵抗異常が見られるほかは，変化率が概ね±2%の間に収まっており，貯水による影響を受けていないものと考えられる．上流側の低比抵抗化した領域を，例えば 2%以上変化した領域とみると，法面表面から 5～15cm まで水が浸透していることになる．一方，電極と同時に埋設したオ

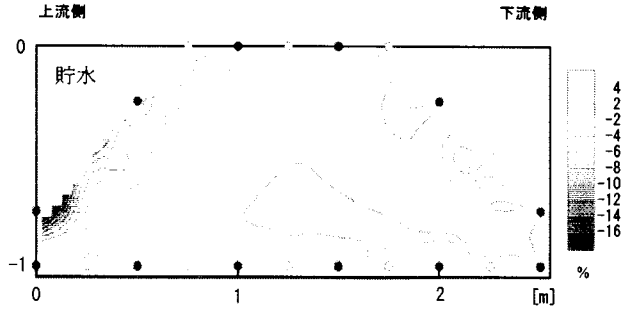

図 11: NS-2 断面の比抵抗変化率分布図

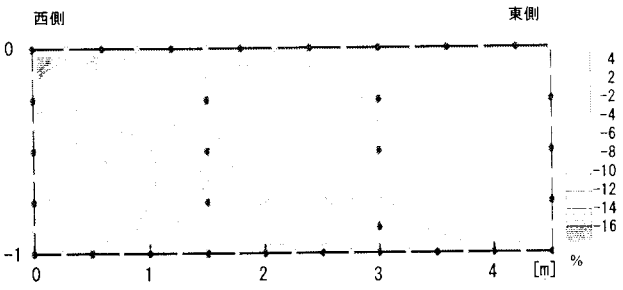

図 12: EW 断面の比抵抗変化率分布図

ープンピエゾメータによる観測では，上流側法面付近の間隙水圧は上昇しているが，その他の堤体内部では有意な変化は見られなかった．今回の比抵抗トモグラフィ法による計測結果は，この間隙水圧の挙動とも調和的である．また，この水の浸透した深さは，現場において計測した盛土材料の透水係数（約 1×10^{-5}cm/s），貯水後の経過時間（14 日間），および動水勾配を考慮すると矛盾しないものである．

図 12 に，EW 断面の比抵抗変化率分布を示す．堤体中央部のこの断面では，西の端から 1m 付近までに比抵抗が低下した部分，東の端から 0.5m 付近までに比抵抗が増加した部分がみられるものの，堤軸中央部のほとんどの部分での比抵抗変化率は概ね±2%となっており，貯水に起因する比抵抗の変化は起きていないと判断される．NS-2 断面の結果と合わせて考えると，堤体中央部付近までは水は浸透してきていないものと考えられる．なお，西端および東端の比抵抗変化は，地面を掘り込んだ窪地に試験堤体を作製したため，周辺地盤の影響を受けたものと考えられる．今後の課題として，堤体自体の地形補正のみならず，周辺の地盤を含む 3 次元効果の影響についての検討が必要である．

5 まとめ

筆者らは,比抵抗トモグラフィ法を利用した新しい「ため池」の堤体安全監視システムに関する研究を開始した．数値モデルによる数値実験により本監視システムは堤体に発生した比抵抗の異常箇所を精度よく検出できる見通しを得たことから，農業工学研究所内に小規模な試験堤体を作製し，貯水前後において比抵抗トモグラフィ法による堤体計測を実施し，堤体内の浸潤線の把握を試みた．その結果，堤体の上下流方向の断面においては，貯水に起因して比抵抗が低下した領域を貯水前後の比抵抗変化率を調べることにより明らかにできた．この低比抵抗化した領域は，間隙水圧計による観測結果，盛土の透水係数・貯水後の経過時間・動水勾配を踏まえた水理学的検討とも矛盾しないものであった．また，堤体軸方向の中央断面においては，比抵抗の低下した部分は確認されず，上下流方向の断面における堤体中央部までは水が浸透してきていないという解析結果とも整合性がとれるものであった．

現在も比抵抗トモグラフィ法による試験堤体のモニタリング実験は継続中であり，浸潤線の挙動は比抵抗変化率分布を時系列的に追跡することにより把握可能であることを，より明確に実証したいと考えている．また，試験堤体には，水みち発生を模擬化するための有孔管を配置しているので，パイピングによる浸透破壊箇所の特定が可能か否かも検証できる予定である．一方，これまでの実験結果から今後検討すべき課題として明らかになった周辺の地盤を含む 3 次元効果の影響，引き続き実験を継続することにより現れるであろう季節変化による地温変化が比抵抗変化に与える影響などについては，新たな補正プログラムの開発や経時データの蓄積により解決を図りたいと考えている．

なお，本研究は，平成 11 年度より農林水産省の「官民連携新技術研究開発事業」として位置づけられ，農業工学研究所および東北農政局が民間 5 社（日本技研株式会社，応用地質株式会社，勝村建設株式会社，株式会社三祐コンサルタンツ，日立電線株式会社）と連携して実施している「比抵抗トモグラフィ法によるダム管理システム技術の開発」の成果の一部を取りまとめたものである．

引用文献

[1] Archie (1942): The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Trans. AIME, Vol.146, pp.54-62.

[2] 物理探査学会 (1992): 4 ジオトモグラフィ,図解物理探査，pp.35-40.

[3] 物理探査学会 (1999): 第 15 章ジオトモグラフィ，物理探査ハンドブック，p.770, pp.798-799.

[4] Hori,T., Tagashira,H., Yasunaka,M., and Tani,S. (1998): Damages to earth dams by typhoon in Japan, 1997,Proceedings 8th International AEG Congress, pp.3241-3248.

[5] 森充広・中里裕臣・竹内睦雄・長束勇 (1997): 局所的な地質構造を調査するための比抵抗トモグラフィ法の検討，平成 9 年度農業土木学会大会講演要旨集，pp.566-567.

[6] 森充広・中里裕臣・長束勇・黒田清一郎(1999): 非破壊探査によるダム管理システムの開発，平成 11 年度農業土木学会大会講演要旨集，pp.96-97.

[7] 中里裕臣・奥山武彦・黒田清一郎・二平聡・下川弘晃 (1999): 地すべり地における比抵抗モニタリング(その 2)，第 38 回地すべり学会講演集，pp.215-218.

[8] 中里裕臣・長束勇・中島賢二郎 (2000): 特許第 30411426 号.

[9] Shima,H. (1992): 2-D and 3-D resistivity image reconstruction using crosshole data, Geophysics, 55, pp.1270-1281.

[10] 吉田等・山口嘉一・今林豊 (1999): 高密度電気探査によるアースダム堤体内浸透調査，土木技術研究 41-2, pp.32-37.