平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震によるため池堤体亀裂に対する緊急的な電気探査

メタデータ	言語: Japanese
	出版者: 独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所
	公開日: 2025-12-26
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 中里, 裕臣, 井上, 敬資, 吉迫, 宏, 堀, 俊和
	メールアドレス:
	所属:
URL	https://doi.org/10.24514/0002001439

〔農工研技報 213
23～28，2012〕

平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震による ため池堤体亀裂に対する緊急的な電気探査

中里裕臣 *・井上敬資 **・吉迫　宏 **・堀　俊和 ***

目　次

Ⅰ　緒　言

平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震は，東北地方や関東地方の多くのため池やダムに被害を生じさせた。灌漑期を控えて満水状態にあった貯水池では，その後の余震や豪雨により 2 次的な被害が生じる恐れがあり，特に堤体に変状が生じたため池では亀裂や表層変形の影響範囲よりも低いレベルに貯水位を降下させる必要があった。このため，緊急的な亀裂範囲の調査法として，電気探査を用いて亀裂への塩水注入前後の比抵抗変化範囲から亀裂の影響範囲を推定する手法の適用を試みた。

現地調査に当たっては，福島県，大玉村土地改良区関係各位の多大なご協力を得た。ここに記して謝意を表する。

Ⅱ　調査地および調査手法

調査地は福島県安達郡大玉村の三ツ森ため池であり，気象庁による本震時の推計震度分布では震度 6 弱のエリアに位置する（**Fig.1**）。堤高 28.8m，堤長 205m の中心遮水ゾーン型の堤体天端には，上流側落ちの段差を伴う縦断亀裂が約 130m にわたって発生した（**Fig.2**）。2011 年 3 月 14 日の農村工学研究所第 3 次派遣による調査時点の貯水は満水状態であり，貯水位の低下範囲の目安を得ることが喫緊の課題となった。このため，亀裂に塩水を注入し，その前後の比抵抗変化範囲から亀裂の影響範囲を推定することとした。

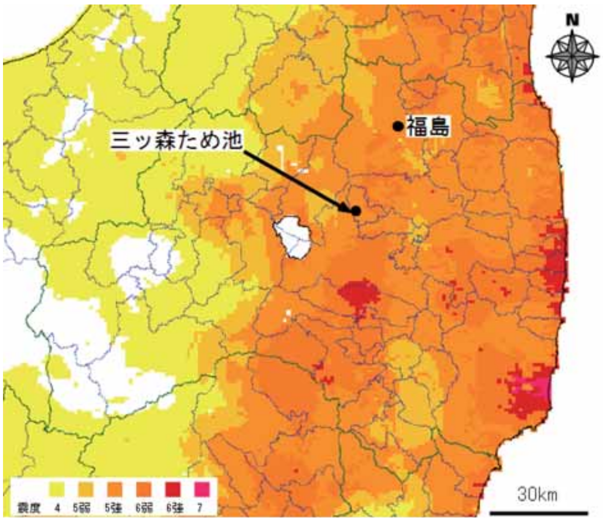

Fig. 1　調査位置図（推計震度分布は気象庁による）
Index map

Fig. 2　三ッ森ため池被災状況（2011 年 3 月 14 日）
Damaged situation of the Mitsumori dam（2011/3/14）

* 企画管理部
** 施設工学研究領域広域防災担当
*** 施設工学研究領域土質担当

平成 24 年 1 月 6 日受理
キーワード：地震，堤体，亀裂，電気探査，比抵抗変化率

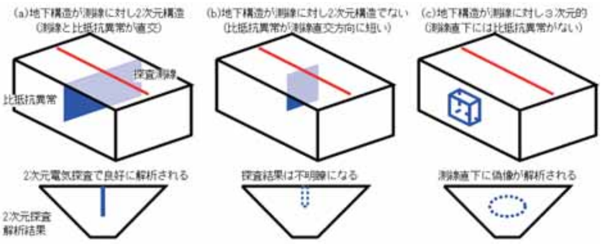

Fig. 3　2 次元解析と偽像

Relation of 2D analysis and artifact

1　調査手法の事前検討

調査に先立ち，以下の点について検討した。

①亀裂形状は未知であり注入水は 3 次元的に流動する

縦断クラックが鉛直に伸びているのか，上流側や下流側へのすべり面に連続するのかが不明であることから，亀裂のある箇所から注入した塩水がどの方向に流下してもとらえられるように，探査測線は 2 次元探査測線を 3 次元的に配置した。

②調査後速やかに結果を示す必要がある

ため池管理者からは調査後速やかに亀裂範囲を概定し，水位降下目安を示すことが求められた。このため，当面現場でも計算可能な 2 次元解析にて対応することとした。しかし，3 次元的な注入水流動範囲を 2 次元解析した場合，解析結果の誤差が大きくなる恐れがある。このため，数値解析により縦断クラックに直交する横断測線の 2 次元解析結果の妥当性を検討した。

③上流側斜面にも電極設置が必要

②の数値解析において，天端地下の探査深度を確保するために上流側斜面にも電極設置が必要であることが判明した。このため，塩ビ管を利用し，貯水池内にも電極を設置することとした。

④堤体への塩水注入の影響

堤体が低比抵抗である場合を考慮し，塩水にて注入前後のコントラストを確保することとしたが，亀裂への塩水注入は堤体のすべりを助長したり，粘性土の強度低下を起こす恐れがある。今回は，調査後には貯水位が低下すること，亀裂範囲は除去の上，再施工されることから，水位低下範囲の目安を得ることを優先し，注水後は亀裂間隔をメジャーでモニタリングしながら電気探査を行った。

2　数値解析

2 次元解析では，探査測線に直交する方向に地下構造や地形は変化しないことを仮定しており，この仮定を満たさない場合，解析結果に偽像が生じることが知られている（佐々木，1993）。たとえば 1 点から注入した塩水が縦断亀裂に沿って十分広がらない場合，2 次元解析結果では比抵抗低下部が不明瞭になる可能性がある（中里ら，2003；**Fig.3**(b)）。このため，数値解析による感度解析を行った。

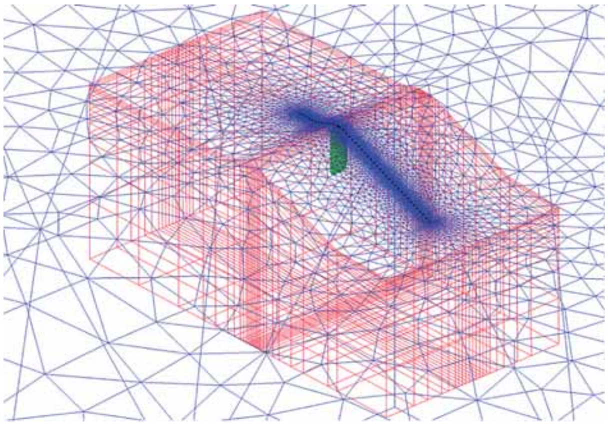

Fig. 4　数値解析地盤モデル

青線は FEM メッシュを，赤線は地盤比抵抗グリッド，緑色は亀裂領域を示す

Ground model for numerical simulation

数値解析では天端標高 32.5m，天端幅 4m の堤体断面を模した 100 Ω m の 3 次元地盤モデル（地表面の境界条件はノイマン条件，それ以外は混合境界条件）を考え，注入塩水が天端中央の幅 1m の縦断亀裂に沿って長さ 10m に広がったモデルとして，比抵抗 1 Ω m の直方体が深さ 2，5，10，20m である場合を設定した（**Fig.4**）。また，貯水面以上に電極を設置する場合，横断測線では貯水位によって上流側斜面に設置可能な電極数が変化する。このため，上流側斜面が標高 25.17 ～ 32.5m の範囲である場合と，標高 28.5 ～ 32.5m の範囲である場合を設定した。これらのモデルおよび測線について観測値（電極間隔：2m，電極配置：ダイポール・ダイポール＋変形 2 極法）を 3 次元順解析により求め，計算観測値について 2 次元差トモグラフィ解析（杉本, 1995）を行った。そして，塩水注入の前後でどのような比抵抗変化率分布が得られるかを検討した。なお，複数の電極配置を用いるのは，地下の比抵抗分布に対して異なる感度を持つ電極配置データを取得して同時に逆解析することにより，解析精度を向上させるためである。

Figs.5, 6 は亀裂モデル深度に応じた比抵抗低下領域を比抵抗変化率で表示したもので，見かけ比抵抗の表示範囲内を有意な探査範囲として表示している。上流側斜面 12 電極の場合ではおおむね亀裂モデル深度に応じた比抵抗低下部下限深度が得られる（**Fig.5**）。上流側斜面 6 電極の場合では，12 電極の場合同様比抵抗低下領域の下限深度はおおむね亀裂モデル深度に応じて増大するものの，変化率は小さくなっており，深度 20m の亀裂に対しては探査範囲外の部分にかかっている。

以上の結果から，堤高 30m 程度の堤体に対し，数値実験に用いた探査条件を適用することにより，2 次元解析によっても深度 20m 程度までの亀裂に相当する比抵抗低下部を得られることが示された。また，上流側斜面の電極数が少ないと比抵抗の低下は不明瞭となり，深い

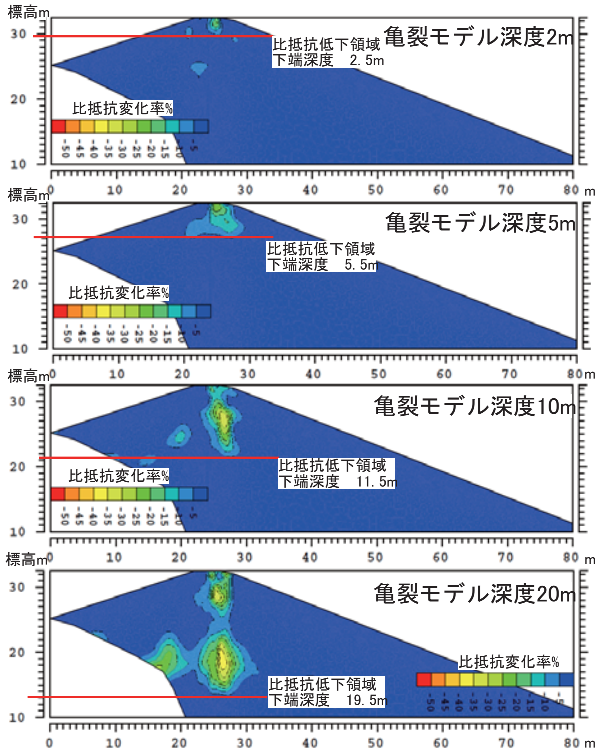

Fig. 5　亀裂モデル深度毎の比抵抗変化率分布
上流側斜面 12 電極の場合
Distribution of Resistivity change ratio of each crack depth model
Case of 12 electrodes in the upstream slop

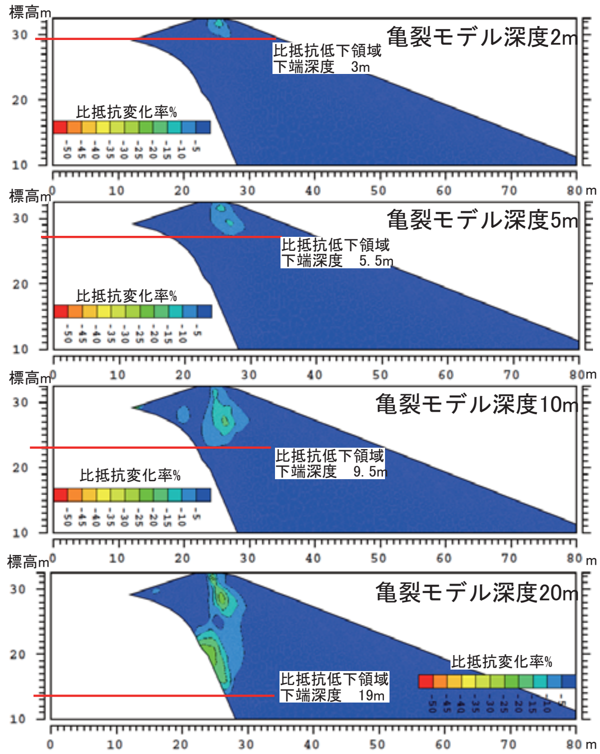

Fig. 6　亀裂モデル深度毎の比抵抗変化率分布
上流側斜面 6 電極の場合
Distribution of Resistivity change ratio of each crack depth model
Case of 6 electrodes in the upstream slop

亀裂に対しては探査深度が不足することが示された。このことから，縦断亀裂調査では上流側の貯水池内まで測線の延長が必要であることが指摘できる。

この結果を踏まえて三ッ森ため池現地では，縦断亀裂のほぼ中央を塩水注入箇所として，それを含む横断測線（電極間隔 2m，40 電極，電極配置：ダイポール・ダイポール＋変形 2 極法，測定データ数：1097 データ）を基本として，堤軸方向に注入箇所の上下流にそれぞれ 1 測線（電極間隔 2m，50 電極，電極配置：ダイポール・ダイポール＋変形 2 極法，測定データ数：1156 データ）を「キ」の字型に設置し，3 次元解析可能な配置とした（**Fig.7**）。また注入塩水は開いた亀裂中と緩んだ間隙中で異なる速度の浸透を示すと考えられるため，注入後 4 回の探査を行い，比抵抗低下部の分布の変化も把握できるようにした。上流側斜面については，ステンレスたわしを電極として取り付けた 2m の VP25 硬質塩ビ管を継ぎ足しながら堤体斜面に沿って貯水池内（貯水位標高約 480m）に挿入し，測線長の確保に努めた。

現地調査は 2011 年 3 月 21 ～ 24 日に応用地質製自動電気探査装置 McOHM Profiler4 とスキャナ 64，2 台を用いて実施した。1 セット 3 測線の測定時間は約 4 時間である。3 月 21 日に初期値を測定し，3 月 22 日の 11:00 ～ 11:40 にかけて 500L タンクに用意した塩水（水 500L，石灰 10kg，並塩 20kg）をポンプにて注入し，その直後

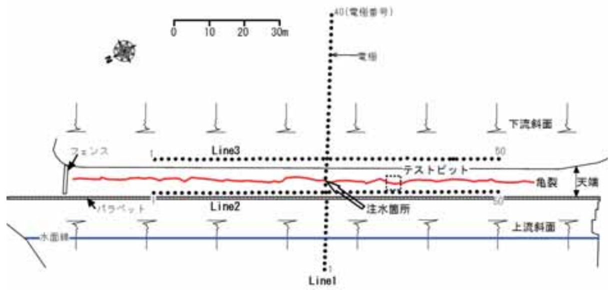

Fig. 7　測線配置図
Arrangement map of survey lines

から同日中に 3 回，翌 3 月 22 日に 1 回の測定を実施した。開削時に亀裂範囲の目印になるように石灰を混入した。電気探査測定中は将来的な 3 次元解析地盤モデル作成のため，堤体及び周辺地形の光波測量を実施した。

Ⅲ　調査結果および考察

1　横断方向断面（Line1）

Fig.8 は低比抵抗化制約付差トモグラフィ解析による初期断面に対する測定値の比抵抗変化率分布を示す。解析された比抵抗の低下率は最大でも -10% で，注入直後から 24 時間後までその下端深度はほとんど変化しない。注入水流動後の周辺浸透による比抵抗低下部の拡大は生

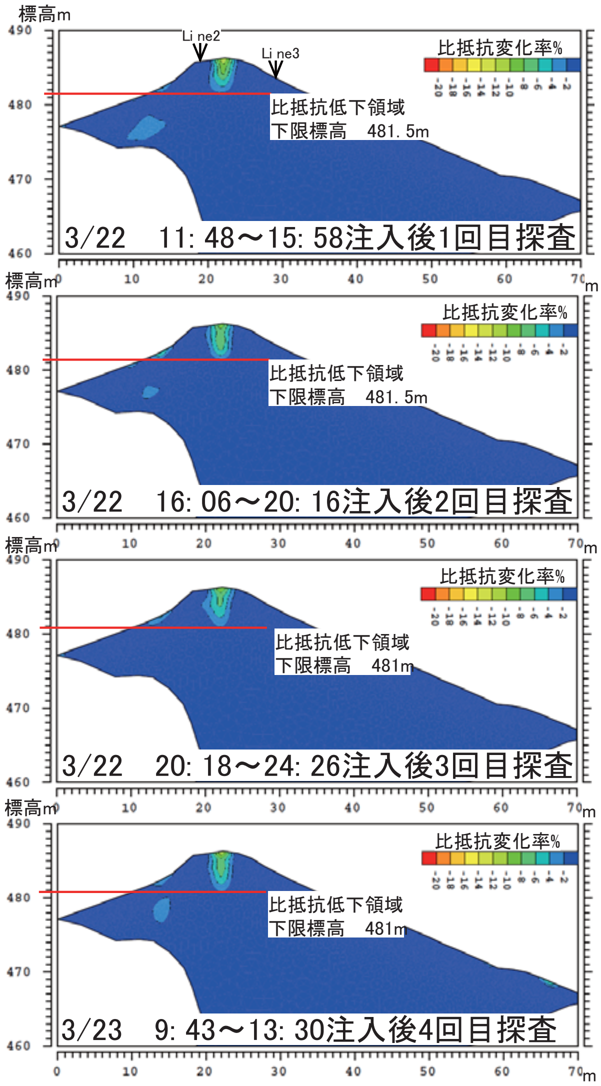

Fig. 8 塩水注入後の比抵抗変化率分布図（Line1）
Distribution of resistivity change ratio after salt water injection（Line1）

じておらず，図示された比抵抗低下領域（天端から深度 5-6m）が注入水の流動した亀裂の主要部分と判断された。このため，堤体亀裂深度の観点からは標高 480m 以下が貯水位低下の目安と考えられた。また，縦断亀裂は上流側落ちの段差を伴っており（**Fig.2**），上流側斜面のすべり破壊の存在が懸念されたが，比抵抗低下領域は鉛直構造を示し，上流や下流に向かう構造はみられない。これは測線周辺に塩水が流下・浸透するような緩んだ領域が開口亀裂部分以外に広く分布しないことを示すが，すべり面は粘性土中で密着している場合もあるので，すべり破壊の有無については法面変状や開削時の調査に基づいて判断する必要がある。なお，上流側斜面の 10 ～ 16m の範囲に分布する -2 ～ -4% の比抵抗低下部は，敷石の間隙に設置した電極の接地抵抗が高いことによる，測定値に対するノイズの影響と考えている。

2 縦断方向断面 1 （Line2）

Line2 は縦断亀裂より約 1.5m 上流側の標高 486m に位

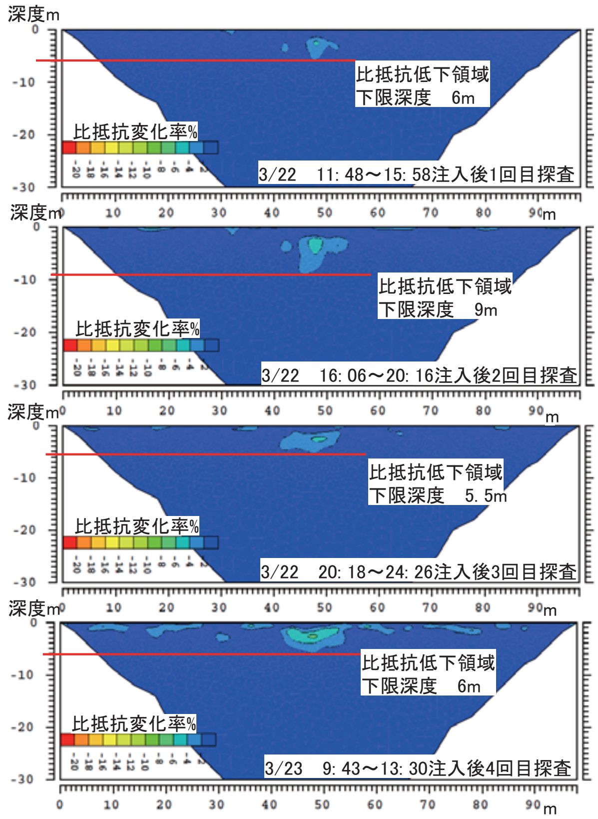

Fig. 9 塩水注入後の比抵抗変化率分布図（Line2）
Distribution of resistivity change ratio after salt water injection（Line2）

置し，注入箇所の投影位置は 49m 地点である。亀裂と平行な測線であり，測線に直交する方向に地下構造が変化しないという 2 次元解析の仮定に適合していないが（**Fig.3**（c）），参考として本測線についても 2 次元差トモグラフィ解析を適用した。Line1 と異なり，時間の経過とともに比抵抗低下部が水平方向に広がっている（**Fig.9**）。Line1 の結果から，比抵抗の低下は Line2 の直下で生じているものではないが，比抵抗低下部の下端深度は，2 回目の 9m 以外は 6m であり，特に 4 回目の結果を見ると，亀裂の下端深度は注入箇所周辺では凹凸が小さい可能性が高い。-2% 比抵抗低下部の下端深度が 2 回目で大きいことは，解析結果に数mのばらつきが含まれることを示唆しており，複数回の探査により比抵抗変化の傾向を把握することの必要性を示している。

3 縦断方向断面 2（Line3）

Line3 は，縦断亀裂より 8.5m 下流側の標高 482m に位置し，注入箇所の投影位置は 49m 地点である。Line2 同様，参考として本測線についても 2 次元差トモグラフィ解析を適用した。**Fig.10** によると，時間経過とともに，注入箇所投影位置において比抵抗低下部が拡大している。Line1 の結果より注入箇所から下流側への比抵抗低下は生じていないので，Line3 の結果は時間経過に伴う亀裂内での塩水分布の縦断亀裂方向の拡大が **Fig.3**（c）のように Line3 でも検知されたものと考えられる。Line2，3

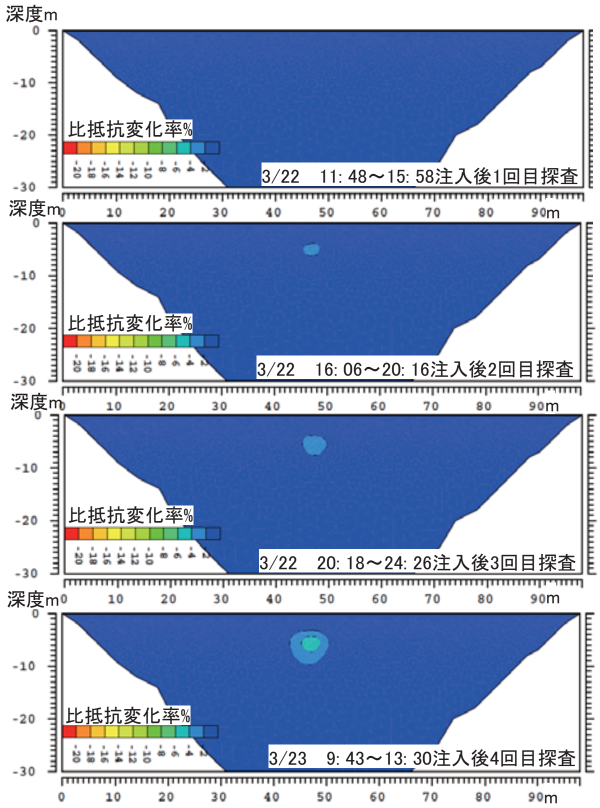

Fig. 10　塩水注入後の比抵抗変化率分布図（Line3）
Distribution of resistivity change ratio after salt water injection（Line3）

の直下における比抵抗変化の正確な評価には 3 次元解析を行う必要がある。

Ⅳ　結　言

東北地方太平洋沖地震により被災したため池堤体の縦断亀裂の性状を緊急に把握するため，電気探査により塩水注入前後の比抵抗変化を検出することで亀裂の可視化を試みた。手法の適用に当たっては，数値解析により 1 点からの注入であっても上流側斜面の測線長をできるだけ確保することにより，横断方向の 2 次元解析により縦断亀裂の深度を把握できることを確認した。その結果，現地調査では注入塩水による深度 5 ～ 6m の鉛直に伸びる比抵抗低下領域を検出し，これを亀裂の主要部分と判断することができ，貯水位低下標高として 480m の目安を得ることができた。現地では 3 月 14 日の農工研の調査以降貯水位を低下させており，3 月 21 日の調査開始時点の貯水位はすでに標高 480m まで下げられていた。しかし，貯水位低下とともに上流側斜面の波除工の敷石に変状が認められたため，貯水位は変状部下端が確認できる水位まで更に下げられた。その結果，天端亀裂の拡大等の二次被害は生じなかった。

その後，福島県が行ったトレンチ調査（注水箇所より約 20m 右岸側：**Fig.7**）では，天端から 4.35m までの掘削範囲では鉛直に伸びる亀裂が確認され，掘削底面から約 40cm のピン貫入深さが得られ，合わせて 4.75m の亀裂深度が確認されたが，下限はさらに深い可能性が残された。Line1 による調査箇所と場所は異なるが，確認深度である 4.75m は探査結果と調和的な値である。また，上流側斜面の開削調査では，上流側斜面の変状が堤体のすべりではなく敷石の滑動にとどまることが確認された。これは，天端の縦断亀裂が鉛直方向の構造をもつと推定した本調査結果を支持する。今後の堤体改修施工時には注水箇所の亀裂状況を確認し，電気探査による緊急的な地震時亀裂調査法の有効性を明らかにする予定である。また，今回の調査では 3 次元配置した測線データを取得しており，3 次元差トモグラフィ解析の適用性評価も行う予定である。

今後の課題としては，堤体への影響が小さい塩水に替わる「造影剤」の検討，探査結果に基づく堤体の安全度評価などがあげられる。また，近年開発が進む高速電気探査装置の採用による繰り返し測定の時間分解能向上と調査期間の短縮および亀裂を考慮したパラメータグリッド分割の最適化など探査システムのハード・ソフトの改良が必要である。今後も緊急対応，復旧復興に役立つ技術開発に努めてまいりたい。

参考文献

1）中里裕臣･黒田清一郎･奥山武彦･朴　美京･金　喜俊･轟木良則（2003）：電気探査連続測定システムによる地盤環境モニタリング，農工研技報，201，173-182.

2）佐々木裕（1993）：比抵抗法の 2 次元インバージョンにおける Pitfall－3 次元構造に起因する偽像－, 物理探査，46，367-371.

3）杉本芳博（1995）：比抵抗トモグラフィによる電解質トレーサーのモニタリング，物理探査学会第 92 回学術講演会講演論文集，57-62.

Case Study of Urgent Resistivity Survey for Cracks in Dam Embankment Caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

NAKAZATO Hiroomi, INOUE Keisuke, YOSHISAKO Hiroshi
and HORI Toshikazu

Summary

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake damaged many small earth dams. Aftershocks and heavy rain might cause further damage. Especially, it was necessary to understand the range of the crack to prevent such secondary disaster, and to decrease the reservoir water level. Therefore, we executed the resistivity survey before and after the salt water injection into the crack, and presumed the range of the crack from the difference of the resistivity distribution. Applicability and the specification of the investigation method were clarified by the numerical analysis. The validity of the presumption depth of cracks was confirmed by the subsequent digging investigation. It is thought that such an investigation method using the resistivity survey is effective for the crack investigation immediately after the earthquake.

Keywords : earthquake, embankment, cracks, resistivity survey, resistivity change ratio