

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 29 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25292147

研究課題名(和文)貯水施設および基礎の可視化型健全性監視技術の開発

研究課題名(英文)Development of health monitoring system for irrigation facilities and those basement with visuaization technique

研究代表者

黒田 清一郎(Seiichiro, Kuroda)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門施設工学研究領域・上級研究員

研究者番号：30343768

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：農業水利施設を始めとする構造物についてはその老朽化や地震、豪雨等の外力に対する予防保全的な対策が必要である。そのためには適切な対策法とその時期を判断するための診断技術が必要である。大型の貯水施設に関しては、その構造物本体だけでなく、基礎やその接合部における健全性を評価することが重要である。しかし従来技術では構造物本体や周辺の地盤の診断は可能であるが、その接合部部分については、原位置診断が困難であった。そこで、電磁波や弾性波による可視化技術の応用によって、この領域の物性値を高分解能で可視化し、また長期供用時や大規模地震後等に想定される変化を高感度で検出する技術の開発を行なう。

研究成果の概要(英文)：The preventive maintenance technique for the aging or external force, like heavy rain or earthquake, is needed for management of irrigation and drainage facilities. But it is difficult to assess the degree of the health about the both the structure and its foundations, and their joint part, based on conventional measurement and monitoring technique. We developed the sensing and monitoring technique based on geophysical prospecting like ground penetrating radar and seismic array survey. Based on the concept of interferometry of seismic wave and electromagnetic wave, and employing simultaneous measurements with multiple sensors array, we proposed the monitoring technique with higher speed, repeatability and sensitivity.

研究分野：農業土木

キーワード：物理探査 電磁波探査

## 1. 研究開始当初の背景

農業水利施設を始めとする構造物については、その老朽化による機能低下が懸念されている。その中でも特に大型の水利構造物は重要であるが、そのような構造物において、地盤との接合部は構造上の弱部となりやすく、また漏水等の発生個所ともなりやすいウィークポイントといえる。またひとたび問題が発生した場合に、風化や劣化あるいはみずみちの発達等により、さらに問題の悪化が進行する可能性も高い。

構造物の診断技術については種々のものがあるが、その多くは構造物本体のみをその診断対象としており、地盤あるいはその境界部の診断は一般に困難である。一方、物理探査等の地盤調査技術については、空間分解能や計測可能なセンサ配置位置等の制約から、構造物との境界部分の物性を詳細に診断することは一般に困難である。そのことから現時点で特にこの境界部について定まった調査法、診断技術と一般的に考えられている技術はない。

一方で近年、電子計算機と計測機器の発展に伴い、物理探査分野では波形解析技術またそれに基づく逆解析による可視化技術の高度化、高分解能化が行なわれている。また岩石物理学と呼ばれる分野の発展によって、例えば弾性波伝播の速度構造等物理探査の結果得られる数値を、強度等の地盤の物性に結びつける技術も発展してきた。このことから従来は地質構造の概査技術と考えられて来た物理探査は、超音波探査等の非破壊診断技術と同様な目的にも活用できるもの期待されてきた。特にボーリング孔と孔の間で透過的に探査を行なう電磁波トモグラフィと、音響領域に近い高い周波数を用いる弾性波トモグラフィは、高分解能で物性値評価を行なう技術として認識されている。この技術のさらなる高度化によって構造物-基礎接合部に有効な診断技術を開発することは可能と考える。

一方で、原位置での評価の際にセンサ配置の制限は重要である。例えば構造物の内部には一般的に観測孔を設けることが少ないので上記のトモグラフィの実施は一般的には困難な場合が多い。この制限のもと、分解能や物性値評価の信頼性という特長を活かす技術が開発されれば、構造物-基礎の診断技術として汎用的なものとなると考えられる。

## 2. 研究の目的

農業水利施設を始めとする構造物については、その老朽化や地震、豪雨等の外力に対する予防保全的な対策が必要である。そのためには適切な対策法とその時期を判断するための診断技術が必要である。農業用貯水池の堤体や頭首工等の比較的大型の施設に関しては、その構造物本体だけでなく、基礎やその接合部における健全性を評価することが重要である。しかし従来技術では構造物

本体や周辺の地盤の診断は可能であるが、その接合部部分については、原位置診断が困難であった。そこで、電磁波や弾性波による可視化技術の応用によって、この領域の物性値を高分解能で可視化し、また長期供用時や大規模地震後等に想定される変化を高感度で検出する技術の開発を行なう。

## 3. 研究の方法

(1) 弾性波振動計測による構造物および基礎地盤等の物性値変化の監視の可能性

貯水構造物における弾性波の伝播特性とその変動特性を把握するため、農業用貯水池の堤体を対象としてその基礎諸元を把握するとともに、その振動現象の監視結果から地震波干渉法に基づき振動伝播特性を評価するとともに、中長期監視によりその変動を監視する技術の開発を行った。

(2) 多点センサアレイによる可視化型構造物地盤評価技術の開発

電磁波探査におけるセンサアレイによる同時多点計測の導入効果の検証のため、アレイ型アンテナの電磁波探査装置を用いて地盤の浸透試験を実施した。また弾性波探査についても貯水構造物を対象として実証試験を行った。

(3) 高分解能孔井間探査による長期的監視が可能な健全性評価技術の開発

(2)で開発した多点センサアレイ技術の適用可能性の検証試験のため、実際の貯水施設の構造物および地盤を対象として、弾性波探査試験および電磁波探査試験を行った。また孔井を用いた探査における多点センサアレイ技術の実現のため光センシング技術の導入のための検証試験を行った。

## 4. 研究成果

(1) 弾性波振動計測による構造物および基礎地盤等の物性値変化の監視の可能性

構造物の地震波伝播特性は、構造物の健全性の把握や耐震性を評価する上で重要な指標と考えられている。例えばビルや住宅のような建築物では起振装置を用いて人工的に強制振動を与え、そのときの構造物内部の振動伝播特性や振動特性を原位置で評価することが行なわれてきた。しかし地震波伝播特性の評価のため、一般的には比較的大型で末広がりの形状を持つ堤体等の貯水構造物の全体を、人工的に振動させることは一般に困難であるか高いコストになる。そこで本研究では地震波干渉法に注目した。地震波干渉法では地震波を2点で同時観測し、そのうちの1点を震源として起振したと仮定した場合に、他点で期待される受信波形を、相互相関等の統計解析によって推定し、2点間の地震波伝播特性を評価するものである。本手法は、起振を行わず地震波伝播特性を評価できるという特徴を有し、既設の貯水構造物への

適用には有効である。

そこで本研究においては、地震波干渉法の適用により、貯水構造物での振動観測記録から振動伝播特性を評価する技術、および健全性に関する情報提供のために長期的な観測記録に基づき伝播特性を監視する技術を開発し特許を取得した。これにより振動伝播特性を監視することにより貯水構造物の健全性監視を可能にするという本研究の提案の有効性を検証する。

同手法の有効性を確認するために、遠心载荷模型振動実験を実施した。遠心载荷模型実験は、模型に遠心加速度を作用させることで、小型の模型で実構造物の応力状態の再現を行なうものである。ここでは堤高 30cm, 60G の遠心力を载荷することによって、堤高 18m の堤体の応力状態を再現した。堤体内に複数設置した加速度計の振動観測記録に提案手法を適用することによって、振動伝播時間の推移を確認することができ、構造物内の振動伝播特性を評価することができた。

次に図 1 に遠心力場を 60G にまで上昇させる過程での、底盤-堤頂間の微小振動の伝播速度の変化率を示した。伝播速度 (V) の速度変化量 (dV) を速度の初期値 (V0) に対する割合 (dV / V0) を縦軸に示した。沈下量も同様に相対的な沈下量 (-dH/H) で示した。遠心力場の上昇に伴う自重の増加により圧縮が進行し、沈下量は増大した。それに対応して伝播速度は増加することが確認された。圧縮過程において剛性が増加したため、せん断波速度が上昇したと考える。

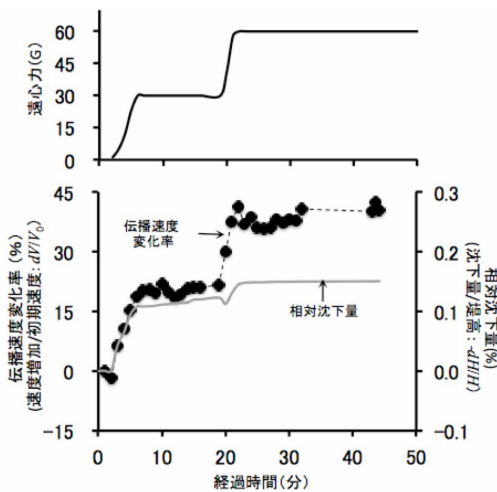


図 1：圧密過程における構造物模型の振動伝播特性の変化

次に地震のような災害によって構造物が影響を受けた状況を想定し、数段回の最大加速度で振動台を強制加振させた前後での、微小振動の伝播速度の変化率を図 2 に示した。加振直後に伝播速度は一時的に低下する傾向があったが、基盤で 200  $\text{cm/s}^2$  程度までの加振の場合は、伝播速度は元のレベルまでほ

ぼ回復する。さらに加振加速度を上げて 300  $\text{cm/s}^2$ , 400  $\text{cm/s}^2$  となると速度低下はより大きなものとなったが、回復過程も依然として認められた。このことから貯水構造物において、振動伝播特性が計測されれば、構造物の力学特性の変化を反映する定量的な指標となると考えられた。

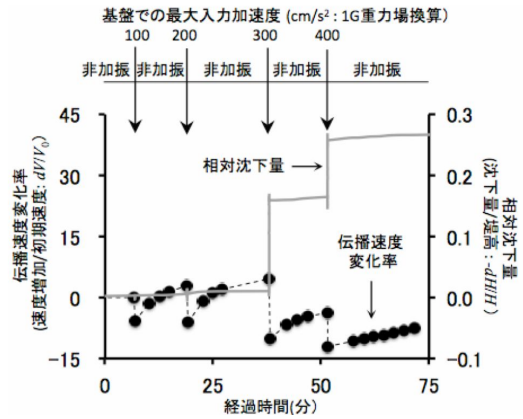


図 2：外力として強制振動を与えた場合の構造物模型内振動伝播特性の変化

このような手法は実際の貯水構造物において計測した振動観測記録についても実証試験を行い、有効性を確認した。

## (2) 多点センサアレイによる可視化型構造物地盤評価技術の開発

貯水構造物や基礎地盤に発生する浸透現象のようなダイナミックな現象やそれによる影響を可視的に評価するためには高速な計測手法が必要である。また長期的な供用による変化を検出するためには再現性の高い観測技術が必要である。前者のためにはできるだけ多点で同時に計測した結果を解析することが必要であり、後者のためにはその計測においては計測のためのセンサ等を動かさずに常設設置することが有効である。

このことを実証的に検証するために、アレイ型アンテナの電磁波探査装置を用いて地盤の浸透試験を実施した。

地盤において不飽和帯に浸透が生じる状況を想定し、浸潤試験を行うとともに、アレイ型地中レーダと呼ばれる装置を導入することによって、その地盤上に 21 個のアンテナをアレイ状に配置し (送信 10 点、受信 11 点) アンテナを動かさず高速に可視化型のトモグラフィ解析に必要な、送受信配置を様々に変えた計測データを取得した。このような配置の場合全 110 種の送受信パターンの取得に 1.5 秒で実施することができ、またアンテナを一切動かさずに固定することによって、浸潤現象にともなう電磁波探査の応答の反応を、継ぎ目なく連続的にかつ高い再現性と感度で監視することができた (図 3)。監視結果から推定される水分率の変化は実際に地盤に生じた水分変化と定量



的にみても調和的なものであることを確認した(図4)。

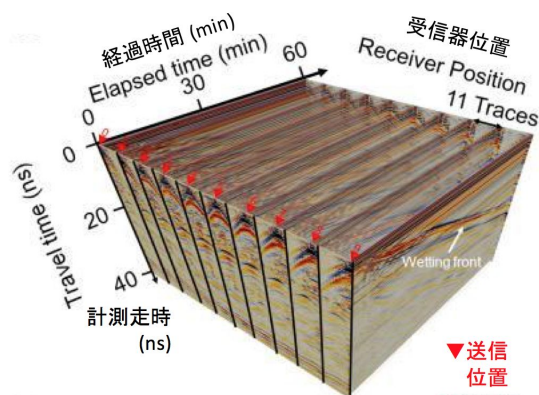


図3：同時多点電磁波計測結果と浸潤現象にもなう応答の変化の追跡

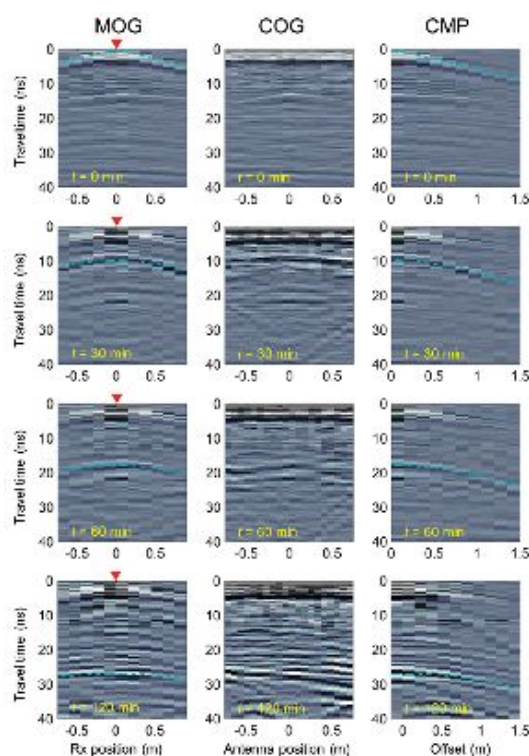


図4：多点電磁波計測結果による波形と水分変化の直接計測から推定される応答波形(水色点線)との比較(計測結果の妥当性の検証)

貯水構造物における振動計測においても、同様に多点同時振動計測により可視的に振動伝播特性を評価監視する技術の開発を行うとともに、現地調査地区として3地区において実証試験を実施した。100点以上の振動センサを構造物および地盤に配置し、1000Hz以上のサンプリングレートで同時計測を行うこと、およびその振動計測結果に提案手法である地震波干渉法概念に基づく解析手法を適用することによって、構造物内の振動伝播特性を可視的に評価できること、またその結果の再現性を確認することにより、構造物部の長期的な供用によって発生す

ると想定される変化を十分検出できることを確認した。現在その成果の公表の方法について関連行政部局と調整中であり、本課題の研究成果として本年度以降公表予定である。

(3) 高分解能孔井間探査による長期的監視が可能な健全性評価技術の開発

孔井間探査の弾性波探査および電磁波探査による構造物および地盤中の弱部や浸透部の評価能を検証する試験を、現地試験および室内試験により実施するとともに、その分解能について種々の設定条件を変えた室内実験によって検証した。

このような高分解能な探査を実現するためには、孔内に電磁波および弾性波を計測するセンサを挿入することが必要であるが、これを可視化にかつ高速・高分解能かつ高い感度と安定性を維持して観測を行おうとしたときに、(2)で示したような多点同時計測が必要となる。

しかしながら電磁波計測においては孔中アンテナと孔中ケーブルの強い干渉から良好な計測結果を得ることは困難であり、弾性波探査においてはコストや電氣的・機械的な機構を持つセンサの耐久性が問題になる。

そこで孔中内の多点同時計測とその長期観測を実現するために、光センシング技術の導入のための技術開発を行った。

電磁波計測においては東北大学が開発してきた光電界センサを用いたボアホールレーダセンシング技術を導入し、これと電磁波干渉法に基づく解析手法を援用した観測技術について開発を行った。弾性波計測においてはボーリング孔内に光ファイバ歪み計測システムを導入することによって、多点同時計測を行う方法について開発を行った。これらの開発成果については本年度、特許申請および学会発表等を行う予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

Toshiki IWASAKI, Seiichiro KURODA, Hiroataka SAITO, Yukio TOBE, Kohei SUZUKI, Haruyuki FUJIMAKI, and Mitsuhiro INOUE (2016) Monitoring Infiltration Process Seamlessly Using Array Ground Penetrating Radar, Agricultural & Environmental Letters, 1:160002, doi:10.2134/ael2016.01.0002

黒田清一郎, 田頭秀和, 増川晋 (2015) 既設地震計の微小振動記録への地震波干渉法の適用による農業用ダム地震波伝播特性評価の試み, 農村工学研究所技報, 216, 101-113

黒田清一郎, 田頭秀和, 増川晋 (2014) 長

期供用農業用ダムにおける地震観測システムの整備とその意義, 農業農村工学会誌, 82(12) 19-22

黒田清一郎, 増川晋, 田頭秀和 (2013) 土構造物の地震波伝播特性評価と経年変化監視への適用性, 農業農村工学会誌 81(8) 627-630

〔学会発表〕(計4件)

Toshiki IWASAKI, Hirotaka SAITO, Seichiro KURODA (2015) Monitoring water infiltration in aggregated volcanic ash soil using multi-offset ground penetrating radar, AGU Fall Meeting, Abstract NS41B-3835, 2015.12.15, San Francisco (United States of America)

黒田清一郎, 田頭秀和, 増川晋 (2015) 農業用ダム既設地震計における微小振動記録への地震波干渉法の適用, 日本地球惑星物理学連合大会講演要旨集, SSS26-21, 2015.05.26, 幕張メッセ(千葉県・幕張市)

Seichiro KURODA, Hidekazu TAGASHIRA, Susumu MASUKAWA, (2014) Estimation for seismic wave propagation property of soil structure based on seismic interferometry, AGU Fall Meeting, Abstract NS41B-3835, 2015.12.17, San Francisco (United States of America)

Seichiro KURODA, Kenichi WADA, Satoshi TOMIMORI, Seiichi IKEDA, Tatsuya SHIBUYA, Gaku SUDANI (2013) Modeling infiltration process of regulating reservoir built for flood-control based on site-characterization using GPR, AGU Fall Meeting, Abstract NS41A-1772, 2015.12.15, San Francisco (United States of America) 2015.12.12, San Francisco (United States of America)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 地震計を用いた堤体の診断方法  
発明者: 黒田清一郎, 増川晋, 田頭秀和, 相澤隆生, 伊東俊一郎  
権利者: 農研機構, サンコーコンサルタント  
種類: 特許出願  
番号: 特願 2013-242161  
出願年月日: 2013年11月22日  
国内外の別: 国内

取得状況(計1件)

名称: 地震計を用いた堤体の診断方法  
発明者: 黒田清一郎, 増川晋, 田頭秀和, 相澤隆生, 伊東俊一郎  
権利者: 農研機構, サンコーコンサルタント  
種類: 特許  
番号: 5636585  
取得年月日: 2014年10月31日  
国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等  
米国農学・作物学・土壌科学学会のニュース誌「CSA News Magazine」に発表論文が紹介された。  
<https://dl.sciencesocieties.org/publications/csa/abstracts/61/6/12/preview>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

黒田 清一郎 (KURODA, Seichiro)  
国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門施設工学研究領域・上級研究員  
研究者番号: 40178778

(2) 研究分担者

佐藤 源之 (SATO, Motoyuki)  
国立大学法人東北大学・東北アジア研究センター・教授  
研究者番号: 40178778