

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25年 6月 13日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560496

研究課題名（和文） 非破壊探査手法によるため池堤体改修効果評価手法の開発

研究課題名（英文） Development of estimation method for effect of improvement work of pond embankment by non-detective exploration

研究代表者

山中 稔（YAMANAKA MINORU）

香川大学・工学部・准教授

研究者番号：50264205

研究成果の概要（和文）：

本研究では、表面波探査や常時微動測定等の非破壊探査手法を、ため池堤体に適用し、ため池堤体の耐震性評価手法を検討するとともに、改修工事前後の S 波速度を比較することで堤体改修効果の検証方法を開発するものである。

本研究により、表面波探査と常時微動測定を併用することにより、ため池堤体の耐震性の相対的な評価が可能であることを明らかにした。さらに、表面波探査から得られる S 波速度から堤体密度を推定する関係式を用いて、ため池堤体の密度を高精度で推定することができた。

研究成果の概要（英文）：

The surface wave exploration and the microtremor were carried out for some irrigation ponds in order to discuss an earthquake resistance of an irrigation pond embankment, and the surface wave exploration and soil laboratory tests were carried out to develop an estimation method for an earthquake resistance of the pond embankment before/after its improvement work.

As a result of this study, it can be clear that it is possible to estimate relatively the earthquake resistance of the pond embankment by using the surface wave exploration and the microtremor. And more the density of the pond embankment was able to be estimate its density of the embankment with high precision using the expression of relations which presumes from S wave velocity obtained from the surface wave exploration.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地盤防災，物理探査

## 1. 研究開始当初の背景

ため池は農業灌漑用・上水道貯水用などの用途で瀬戸内地域に多数存在し、その多くが盛土によって構築された堤体によって貯水機能を有している。近年、集中豪雨の発生や地震により中山間地域の老朽化ため池が決壊・崩壊する可能性が高まるとともに、下流地域への2次災害の増加が懸念されている。ため池堤体盛土は、地震動によって崩壊を生じる可能性があり、古文書などにも地震で堤が崩れたという記録も見られている。1995年兵庫県南部地震の地震動によって被害を受けたため池は、1372箇所にもおよび、これらの多くの例が、堤体盛土の変状をきたして被害につながったとされている。

ため池堤体の安全性評価のためには、堤体の地質・土質情報が不可欠である。しかし、古いため池ほど地盤調査等は行われておらず、比較的後年のものでも既存資料が存在することは極めてまれである。比較的近年に被災し、復旧のために行った調査資料があれば、これを参照できるが、そのようなケースはごくわずかである。

ため池堤体の調査手法としては、目視による堤体の変状調査がほとんどで、標準貫入試験においても実施されるケースは少ない。この標準貫入試験ですら、得られる $N$ 値に関しては、従来から種々の問題点が指摘されている。さらには、ため池堤体の改修工事における施工管理として、締固め土の密度管理の方法が用いられているが、堤体の延長上あるいは深度方向に断続的な点の情報であり、堤体内部の面的な管理はされていない。したがって、堤体の密度が面的に施工後においても確認できる手法の確立が望まれている。

申請者は、近年、ボーリング調査に代わる新しい地盤調査技術として、土構造物の非破壊調査の一つである高精度表面波探査手法をため池堤体に適用し、ため池堤体土質情報の推定に取り組んでいる。高精度表面波探査とは、地盤中を伝わる表面波を用いて地盤の $S$ 波速度分布を高精度かつ簡便に求める方法である。この高精度表面波探査は、カケヤにより振動を励起し高周波の表面波を発生させ、波長による伝播速度の違いを逆解析し、地盤の $S$ 波速度構造を求める技術である。

## 2. 研究の目的

申請者は、これまで、表面波探査や常時微動等の物理探査を援用して、ため池堤体の物性評価の研究を実施してきた。近年は、改修工事が実施されるため池堤体で表面波探査を実施し、改良前後の $S$ 波速度 $V_s$ を比較することによって堤体改良効果を検証してきた。しかし、表面波探査から得られる $S$ 波速

度 $V_s$ と堤体内部の土質定数との定量的な関係が明瞭でなく、本手法を施工管理に利用するまでには至っていないのが現状である。

本研究は、非破壊探査手法である表面波探査や常時微動測定により、土構造物であるため池堤体の内部情報（密度、一軸圧縮強さ等）を推定する方法を開発するものである。

そのために、主に香川県内のため池堤体から採取した試料を用いて、室内実験により $S$ 波速度 $V_s$ と土質物性との関係式を得たのち、現場での表面波探査から得られた $S$ 波速度 $V_s$ から既存堤体内部の土質物性を推定する。さらには、改修工事前後において表面波探査や常時微動を実施して、堤体改修工事による堤体の物性変化を解析する。この解析結果の検証には、施工時の密度管理報告書を用いる。数多くのため池を対象として本手法を適用して解析精度の向上をはかり、非破壊探査手法によるため池堤体の改修効果評価手法を確立する。

## 3. 研究の方法

研究方法として、まず、現地で採取した堤体土を用いた室内試験により $S$ 波速度 $V_s$ と土質物性（密度、強度）の関係式を得る。改修工事前の堤体物性の評価を、表面波探査で得られる $S$ 波速度 $V_s$ 、常時微動測定による振動特性、簡易動的貫入試験による貫入抵抗深度分布により評価する。さらに、改修工事後の堤体での表面波探査及び常時微動測定を実施する。

堤体改修効果の検討においては、改修工事後に実施する表面波探査による $S$ 波速度 $V_s$ から、 $V_s \sim \rho_t$ や $V_s \sim q_u$ 関係式等を用いて算出した堤体物性の推定値と、施工記録（締固め密度管理）から得た堤体物性の実測値とを比較する。数多くのため池において本手法を適用してデータを蓄積し、本提案手法の高精度化を目指す。

平成22年度～24年度において、以下の項目を実施した。

<平成22年度>

①調査対象ため池の既存データの収集と予備的検討

改修が予定されている老朽化ため池の既存データを収集すると共に、堤体の変状程度を調査した。既往の土質調査報告書から、堤体部のゆるみ域の存在や強度不足が推定される箇所を中心に、各種調査の実施の可否について工事関係者と協議した

②試料採取および室内土質試験の実施

ため池堤体改修に伴う掘削断面より土質試料を採取する。採取した試料を用いて物理試験（土粒子密度、粒度、現場密度、含水比等）を実施した。

③表面波探査によるS波速度構造の解析  
改修工事前の堤体において、高精度表面波探査装置を用いて堤軸方向の表面波探査を実施した。

④常時微動測定によるゆるみ域の検出  
常時微動測定には携帯型記録計とサーボ型速度計を使用し、堤体の天端と下流側地盤上で微動の同時測定を実施した。測定結果を成分ごとのフーリエスペクトルを求めH/Vスペクトル比を算出することにより、堤体の振動特性を把握した。

<平成23年度>

①試料採取および室内土質試験

平成24年度に引き続き、異なるため池堤体において、土質試料の採取及び室内土質試験を行い、ため池堤体を構成する土質物性の詳細な把握に努めた。

②表面波探査および常時微動測定の実施

を実施し、ため池堤体の土質物性について詳細な把握を行った。

<平成24年度>

①改修前の堤体の物性評価

室内試験で得られた  $V_s \sim \rho_t$  や  $V_s \sim q_u$  関係式等に、表面波探査で得られた原位置での  $V_s$  を代入して、堤体内部の物性 ( $\rho_t$ ,  $q_u$ ) を推定する式を構築した。この推定値の妥当性の検討には、原位置で採取した不攪乱試料での物性を用いて、その精度を検証した。さらには、常時微動測定や簡易動的貫入試験の結果を援用して、ため池堤体の堤軸方向ならびに深度方向の物性変化についても検討を行った。

②本研究のまとめ

提案する「非破壊探査手法によるため池堤体改修評価手法」を実用化するための改善点を明確化し、3年度に及ぶ研究成果をまとめる。

4. 研究成果

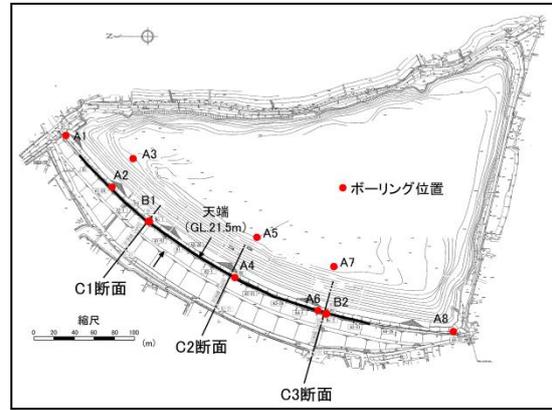
(1) 物理探査手法の適用性の検討

物理探査手法である表面波探査および常時微動測定のため池堤体への適用性を検討するため、図-1 に示すため池 A で物理探査を実施した。このため池は、総貯水容量 576 千  $m^3$ 、堤高 17m、堤頂長約 500m の中央鋼土型のアースダムである。

調査ため池では、これまでにボーリングをはじめ、起振機によるレイリー波探査や電気探査等が行われており、これら調査結果によれば、堤体の土質構成は、上位から、堤体盛土、基礎地盤(沖積河川堆積物)および基礎岩(風化花崗岩)の3層に大別できる。

このうち、堤体盛土は、N値10以下の砂質土主体の上部層とN値10~20の粘性土主体の下部層からなる。基礎地盤を構成す

図-1 調査対象ため池 A の平面図



る沖積河川堆積物は主に砂礫土からなり、N値20以上、層厚は約10~15mである。堤体中央部では基礎岩まで達するボーリングがなく、詳細な基礎深さは不明であるが、レイリー波探査等からGL. -35m程度が基礎深さと推定されている。

左岸側の堤体盛土部は、遮水グラウトによる地盤改良が施されており、未改良部に比べてN値が倍程度大きくなっている。また、レイリー波探査からS波速度が150m/s以下の低速度帯の存在が確認されている。この領域はN値が非常に小さい箇所に対応している。

表面波探査は、図-1に示す堤体天端上の測線(測線長350m)で実施した。地表面に1m間隔で固有周波数4.5Hzの速度型地震計を24個設置し、2m間隔でカケヤによる起振を行った。

図-2に表面波探査の解析結果から得られたS波速度構造を示す。堤体のS波速度は、表層部約2mは170~200m/s程度の低速度であるが、堤体の大部分のS波速度は、おおむね200~300m/sの値を示す。左岸側の盛土部は、S波速度が300m/s以上と大きくなっている。この区間は、地盤改良箇所に相当しており、S波速度構造の変化から地盤改良範囲を推定できる可能性を示している。後述のように、既往のレイリー波探査では、地盤改良部のS波速度は、300~450m/sと推定されており、表面波探査の結果は、これとよい対応を示している。

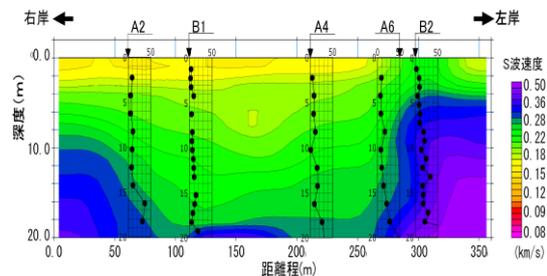


図-2 ため池 A の表面波探査結果

図-3は、国内のさまざまな地盤に対して標準貫入試験から得られたN値とPS検層によるS波速度との関係を示したものである。砂質土(●)と粘性土(○)では若干傾向が異なる

り、同一のN値に対して粘性土は砂質土よりも高いS波速度を示している。図には、表面波探査から得られたS波速度と標準貫入試験によるN値との関係(●)を併せて示した。両者の関係は、土質や調査方法の違いなどもありやや傾向が異なっているが、おおむね既往のデータのばらつきの範囲内にある。

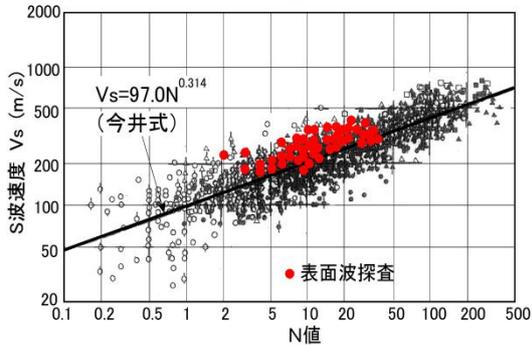


図-3 N値とS波速度の関係

図-4は、常時微動測定の結果と表面波探査による結果を比較したものである。図より、表面波探査の結果は、地表面近くで若干S波速度が大きくなっているが、両者は非常によい対応を示していることが確認できる。

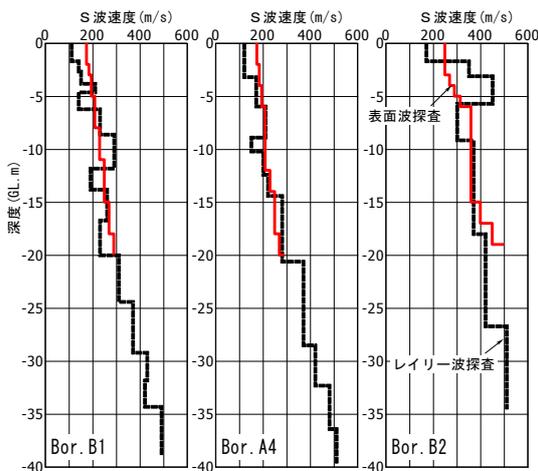


図-4 既往調査結果とのS波速度分布の比較

## (2) 堤体の簡易耐震性評価

堤体の地震被害は、地震動特性と堤体および基礎地盤の振動特性に大きく依存する。振動特性を表す指標として、地盤の平均S波速度、卓越周期および増幅率が考えられる。S波速度は、地盤の締め具合(密度、剛性)を表す指標であり、S波速度が遅い(剛性が低い)ほど地盤は揺れやすく、被害が生じやすい。また、卓越周期は地盤が軟らかいほど、また層厚が厚いほど長くなることから、剛性と層厚を反映した指標と考えられる。そこで、これらの指標を用いれば図-5に示すように

堤体の耐震性について相対的な評価が可能と考えられる。すなわち、平均S波速度が同程度でも、基礎地盤の影響を受けて卓越周期や増幅率に違いが現れることが予想されるため、図の左上にプロットされるものは、右下にプロットされるものより剛性が大きく、層厚も小さいことから耐震性に優れていると評価できる。これにより、堤体ごとあるいは断面ごとの相対的な耐震性評価が可能になる。ため池改修計画や耐震対策立案にあたって優先順位を決める必要がある場合などには有効な手法と考えられる。

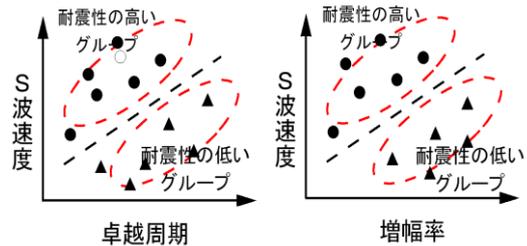


図-5 簡易耐震性評価のイメージ

## (3) ため池堤体密度の推定

ため池堤体の密度を直接的に得るために、改修工事により開削した断面より天端から深さ1m毎に採土円筒モールドを用いて不攪乱試料を採取した。また、ため池堤体土毎の乾燥密度とS波速度の関係式を得るために、室内試験において、締固めにより作製した円筒供試体を用いて乾燥密度とS波速度の関係を得た。

図-6に、計5箇所のため池から採取した堤体土を用いて得た供試体の乾燥密度とS波速度との関係を示す。堤体土の粒径や粒度分布の違いから乾燥密度の分布に差が見られるが、乾燥密度とS波速度との関係は正の相関があることが確認できる。

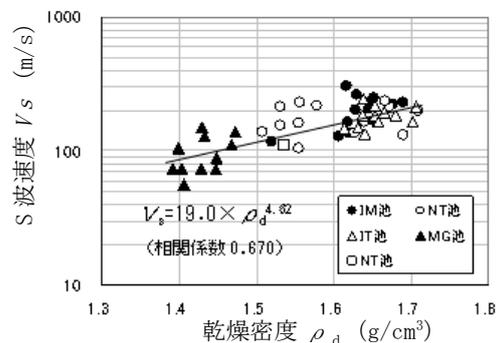


図-6 乾燥密度とS波速度の関係

この関係式  $V_s = 19.0 \times \rho_d^{4.62}$  を用いて、表面波探査により得られるS波速度から乾燥密度を推定することとした。なお、ため池堤体改修工事における堤体構築時の密度が

直接測定されており、本研究では、この値を改修工事後の堤体密度として検討した。

図-7に、一例として調査を実施したため池Bの平面図を示す。このため池堤体の改修工事の前後で、同じA-A'測線で測線長46m、受信点間隔2m、起振点間隔2mで、ランドストリーマ形式で表面波探査を行った。

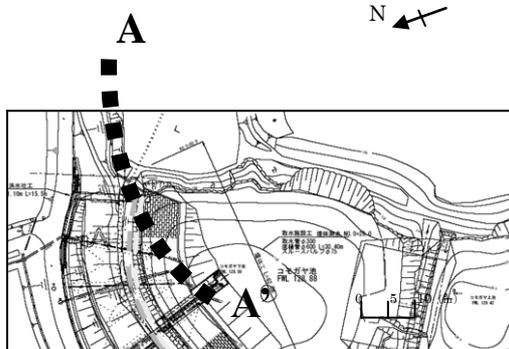


図-7 表面波探査実施ため池の平面図

る。図-8(a)の改修前では表層付近にS波速度が120 m/sと低い箇所が分布することが分かる。一方、(b)図の改修後では、その箇所のS波速度が150 m/sと増加するとともに、堤体全体にわたりS波速度が増加していることが分かる。

改修中の掘削断面より堤体土試料を採取した全体的ため池堤体を対象とし、表面波探査によって得られたS波速度を用いて、上述の関係式より乾燥密度の推定を行なった。

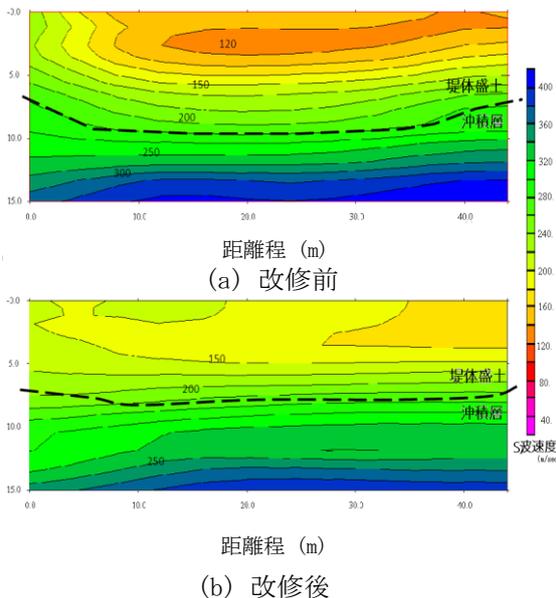


図-8 改修工事前後でのS波速度構造

図-9に、深度方向のS波速度と、S波速度からの推定乾燥密度、不攪乱試料からの現場乾燥密度との関係を示す。現場乾燥密度は深さによらず、 $1.6 \text{ g/cm}^3$  付近で一定

であるが、推定乾燥密度はS波速度の大きさを反映して値が大きくなり、深度4.0m以深で両者の差は拡大している。

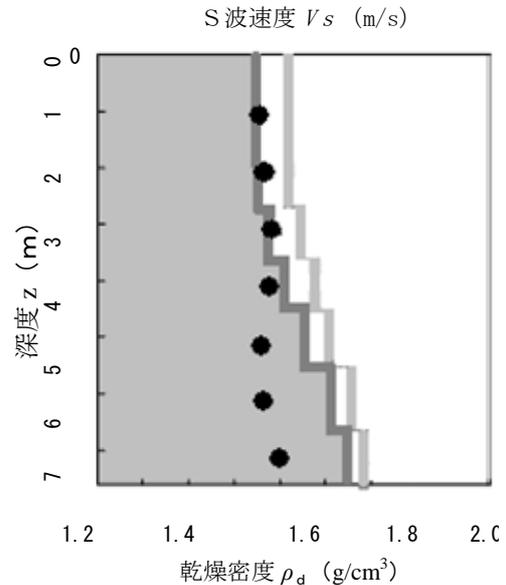
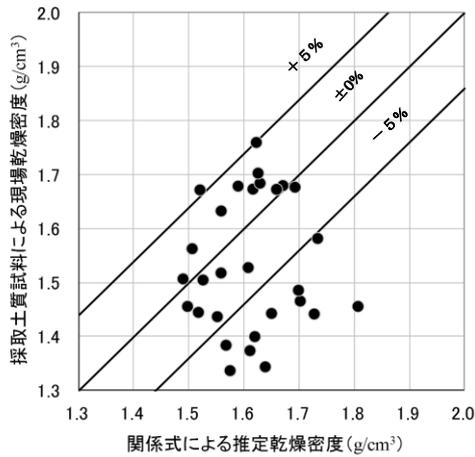


図-9 S波速度と乾燥密度の関係

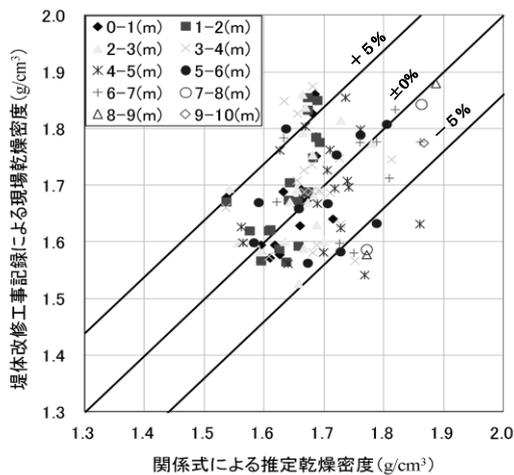
図-10(a)に、改修工事前において現場で採取した乾燥密度と、S波速度より求めた推定乾燥密度との関係を示す。図中には、両者の差が $\pm 5\%$ のラインを記入している。この $\pm 5\%$ のラインの範囲に、約60%の値が分布するが、推定乾燥密度が若干高めに評価されていることが分かる。なお、 $-5\%$ より大きく下回る現場乾燥密度に関しては、不攪乱試料採取時に降雨があり、悪天候の中での試料採取であったことが影響したと考えている。

図-10(b)に、堤体改修工事記録に記載されている深度毎に現場乾燥密度と、改修工事後に実施した表面波探査より推定した乾燥密度との関係を示す。全体の約92%の値が $\pm 5\%$ の間に分布している。深度毎に見ると、深度が深くなるにしたがい、両者の乾燥密度の差が大きくなっていることが読み取れる。これは、図-9で示したように、表面波探査での解析結果では、堤体の下方ほどS波速度が速くなるという傾向によるものと考えられる。

本研究の結果、堤体改修工事後のS波速度の上昇と均一化を確認することができ、堤体改修工事の効果検証に利用し得ることが判明した。また、乾燥密度とS波速度との関係式から求めた推定乾燥密度と、堤体



(a) 改修前



(b) 改修後

図-10 推定乾燥密度と現場乾燥密度の関係

改修工事記録による現場乾燥密度とを比較すると、概ね  $\pm 5\%$  の範囲に分布するとともに、深さ 4 m 程度以浅で高い相関を有していることが明らかとなった。このことを踏まえ、今後の課題としては、堤体深度を考慮した密度の推定式を検討する必要があると考えられる。

### (3) 本研究のまとめ

本研究により、非破壊探査手法である表面波探査と常時微動測定を併用することにより、ため池堤体の耐震性の相対的な評価が可能であることを明らかにした。さらに、表面波探査から得られる S 波速度から堤体密度を推定する関係式を得ることができ、この関係式を用いることで、ボーリングをすることなく堤体の密度を高精度で推定することができた。さらには、改修前後で表面波探査をす

ることで、改修による密度増加の検証手法として用いることの有用性を明らかにすることができた。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 2 件)

- ① 斎藤章彦, 山中 稔, 香川県におけるため池堤体の維持管理調査技術, 地盤工学会誌, Vol. 60, No. 5, Ser. No. 652, pp. 24-27, 2012. 5.
- ② 山中 稔, 原 忠, Hazarika Hemanta, 大角恒雄, 古市秀雄, 上野舞子, 山崎友治, 岡田博之, 東北地方太平洋沖地震における津波越流に対する土構造物の安定性, 日本地震工学会論文集, Vol. 12, No. 5, pp. 89-101, 2012. 11.

〔学会発表〕 (計 2 件)

- ① 山中 稔, 岡吉 大, 長谷川修一, 斎藤章彦: 表面波探査によるため池堤体密度の推定について, 地盤工学会四国支部平成 24 年度技術研究発表会講演概要集, 内子, pp. 1-2, 2012. 11.
- ② 山中 稔, 表面波探査のため池堤体や廃棄物層等への適用事例, 地盤工学会四国支部徳島県地盤工学研究会「平成 24 年度地盤と環境に関するシンポジウム」, 特別講演, 徳島大学工業会館, 2013. 1. 11.

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

山中 稔 (YAMANAKA MINORU)  
香川大学・工学部・准教授  
研究者番号: 50264205

#### (2) 研究分担者

長谷川修一 (HASEGAWA SHUICHI)  
香川大学・工学部・教授  
研究者番号: 00325317