

機関番号：55201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20760318

研究課題名(和文) プレキャストコンクリートを使用したポール基礎の構造-地盤相関問題

研究課題名(英文) Soil-structure interaction problems of the pole foundation using precast concrete

研究代表者

柴田 俊文 (TOSHIFUMI SHIBATA)

松江工業高等専門学校 環境・建設工学科・准教授

研究者番号：30342546

研究成果の概要(和文)：

本研究で扱うポール基礎は、プレキャストコンクリートのパーツをポールに設置するものである。この基礎は複雑な形状をしているため、荷重が作用した際の挙動を確認する必要がある。本研究では、水平荷重及びねじり荷重が作用した際の、ポール基礎に作用する土圧を把握する。また、ポール基礎の解析への適用性を検討するため、安定化項を付加した Element-free Galerkin method の数値解析結果を示す。

研究成果の概要(英文)：

In this study, a pole with precast concrete parts is adopted. The mechanical behavior of the pole and the soil has not been clarified because of the uneven shape of the pole foundation. This study aims at clarifying the characteristic of the earth pressure under horizontal and torsional load. Moreover, Element-free Galerkin method with stabilization term is presented for the analysis of the pole foundation. In order to validate the method, some numerical results are given.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	400,000	120,000	520,000
2010年度	300,000	90,000	390,000
総計	1,800,000	540,000	2,340,000

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：プレキャストコンクリート、ポール基礎、EFG

1. 研究開始当初の背景

財政事情が厳しく、かつ地球環境問題に密接に関係している公共事業においては、コスト削減・環境負荷の軽減などを取り入れた新技術・新工法の積極的な活用が非常に大きな意味を持つ。特に建設業の占める割合が大きい地域では、土木系の新技術の開発・情報発信が経済的にも非常に重要となっている。

さて、道路標識や照明柱として用いられる

ポールは使用総数が極めて多いため、従来技術の改良によるコスト削減や環境負荷軽減効果は著しいものとなる。また、このポール基礎から杭基礎等への適用の可能性も大きいことから応用範囲においても非常に大きなものがある。本研究はこれらの点で有望である基礎部分の新技術について基礎的研究を行うものである。

従来の道路標識や照明柱の基礎部分が直

方体状のコンクリートであるのに対し、本研究で扱うポール基礎はブロックを組み合わせた形状を成す。このポール基礎の主な特徴として次のものが挙げられる。(a)コンクリートがパーツに別れており、かつポール基礎周辺を土で締め固めるため、人力でかつ短期間で施工することができる。(b)パーツが大量生産できると、現場でのコンクリート養生が不要であることより、低コスト化の可能性が高い。(c)ポール破損時には周辺地盤を掘り起こし、基礎を付け替えるだけで再利用ができる。(d)コンクリートが少量で済むことと、現場の土を積極的に活用していること（建設廃土軽減）から、環境面でも良好である。(e)骨組み基礎や災害時の仮設構造物の基礎への適用も期待でき、特に仮設構造物については、施工が簡単な点でのメリットが非常に大きい。

ポール基礎の設計は、「道路附属物の基礎について（昭和 50 年 7 月 15 日付け道路局企画課長通達）」に基づいて運用されており、以後、各自治体はその指針に準じて設計を行っているのが現状である。この指針では直方体の基礎を基本に設計していることから、本研究で示すポール基礎のような形状に対しては、基礎と土との相互作用をある程度無視して計算を行わなければならない。結果として過度に安全側に設計することになり、経済的にも学術的にも好ましいとは言えない。一方で、設計に関する国際的な動向に目を向けると、2005 年に承認された国際規格「ISO23469」の中で、性能設計体系をベースとした地盤基礎構造物の耐震設計指針が示されている。このポール基礎も将来的には ISO23469 を考慮に入れ設計方法確立に向けて内容を整理することが重要である。以上より、本研究ではプレキャストコンクリートを用いたポール基礎の基礎的な力学的性質と設計に用いるパラメータを明白にすることを目的とする。

2. 研究の目的

本研究では、以下の基礎的な力学的性質を明らかにする。

(1) 載荷時のポール基礎と周辺地盤の土圧特性

ポール基礎は土と基礎が入り組む複雑な形状をしており、荷重載荷時には相互に影響を及ぼすことが考えられる。そのため、ポール基礎の変位と周辺地盤の応力（土圧）状態の定量的な把握を第一の課題とする。載荷荷重は、水平荷重とねじり荷重の二種類用意し、それぞれの土圧分布について把握する。

(2) Element-free Galerkin method

ポール基礎が劣化した場合、地盤を掘削してポール基礎を交換する。掘削解析時にメッ

シュ再分割が不要で、かつ節点再配置が容易である Element Free Galerkin Method (EFG) を適用することを目指す。本研究では、水～土連成有限変形解析における数値不安定現象を回避する方法について記述する。

3. 研究の方法

本研究では、荷重載荷実験で荷重・土圧・変位を測定し、地盤 - 構造物の相関的な挙動を把握する。並行して、メッシュの分割が不要である EFG の開発とそのアルゴリズムの改良を進める。

(1) 水平荷重とねじり荷重の載荷実験

本研究では、ポールに寸法が 1/4 のパーツを取り付けてポール基礎とし、幅 800mm×奥行き 800mm×深さ 500mm（既往の実験条件を考慮）の容器に入れて実験を行う。コンクリートパーツは早強ポルトランドセメントを使用し、鉄筋は入れずに作製した。また、パーツは合計 4 段（8 個）用い、一段毎に直角方向を向くように設置した。実験には 6 号珪砂（粒径 0.4～0.05mm）を用い、空中落下法によって地盤を作製した。

① 水平荷重の載荷実験

図 1 に示すように根入れ深さは 290mm とし、最上段のパーツの上に 90mm 土を入れ、さらに地表から 95mm の位置に水平方向に荷重を作用させた。また、載荷速度は 0.167mm（パーツの長軸長さの 0.1%）/min. として実験を

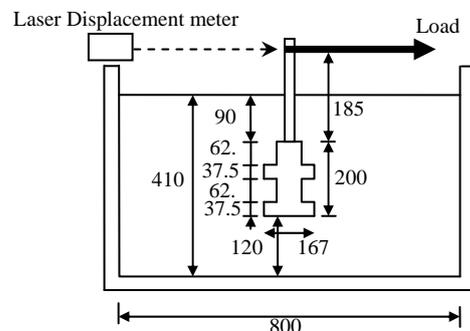


図 1 実験概略図（水平荷重載荷）

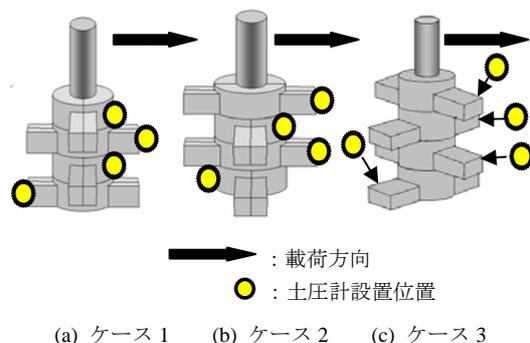


図 2 荷重載荷方向と土圧設置位置

行い、荷重位置にレーザー式変位計、コンクリートパーツに土圧計を設置した。図2に荷重方向と土圧設置位置を示す。

② ねじり荷重の荷重実験

図3に示すように根入れ深さは315mmとし、最上段のパーツの上に115mm土を入れ、さらに地表から215mm、回転軸から250mmの位置に水平荷重を速度1.67mm(パーツの長軸長さの1.0%) /min.で作用させた。また、比較対象として、従来の直方体の形状のポール基礎(167mm×167mm×200mm)を用意し、新たなポール基礎と同様の条件にして実験を行った。その際、コンクリートパーツには土圧計、ポールの回転軸から200mmの位置にレーザー式変位計、荷重作用位置には荷重計を取り付けて計測を行った。図4に荷重方向と土圧設置位置を示す。

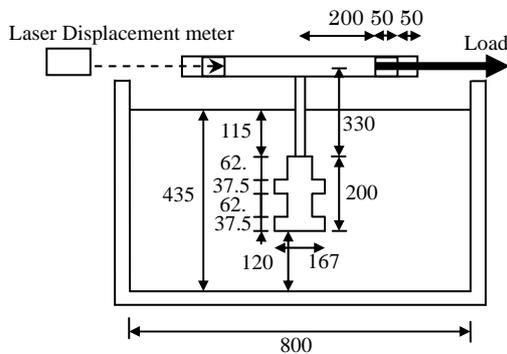


図3 実験概略図(ねじり荷重荷重)

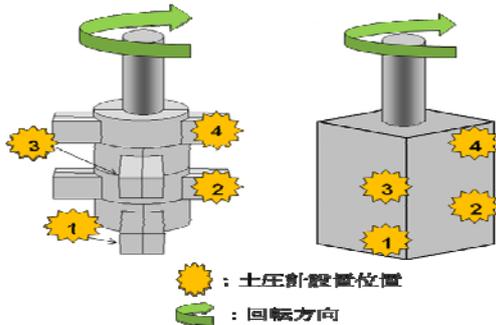


図4 荷重荷重方向と土圧計設置位置

(2) 安定化項を考慮したEFGのプログラムの作成

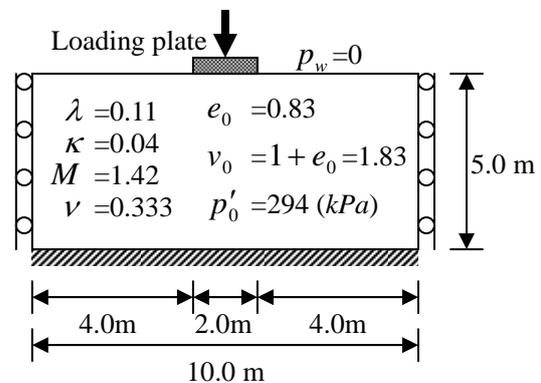
Element Free Galerkin法(EFG)を用いて水～土連成有限変形解析を行う。水～土連成解析では、間隙水圧の空間振動という問題が圧密初期に発生する。この振動を抑え解の安定性を確保するために、FEMでは間隙水圧に関する形状関数の次数を変位よりも一次下げの方法を採用することが多い。しかしEFGMではMLSによって形状関数を求めているため、

変位と間隙水圧の節点数を異なるものにして形状関数の次数を変化させるのは不自然である。以上の理由より、EFGに安定化項を付加して解析を行う。安定化項は、連続式を弱形式で表した式に付加する。下式の左辺最終項が安定化項である。

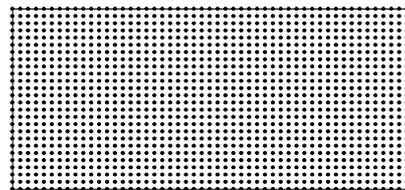
$$\begin{aligned}
 & - \int_V (\text{tr } \mathbf{D}) \delta h dV + \int_V v_w \cdot \text{grad} \delta h dV \\
 & - \int_{\Gamma_q} \bar{q} \delta h dS - \int_{\Gamma_h} \beta (p_w - \bar{p}_w) \delta h dS \\
 & + \delta \int_V \alpha \cdot (p'_w)^2 dV = 0
 \end{aligned}$$

ここで、安定化項の δ は変分、 α は安定化パラメータ、 p'_w は間隙水圧の空間微分、 V は領域の体積を示す。また、 \mathbf{D} はストレッチング、 h は全水頭、 v_w は土骨格に対する間隙水の相対速度、 \bar{q} は流量、 S は領域の面積、 β はペナルティ数である。

以上の方法で、飽和地盤における基礎押し込みの解析を行う。図5(a)に解析諸元と境界条件、(b)に初期節点配置図を示す。ここで構成モデルには有限変形Cam-Clayモデル、差分は前進差分を用いて解析を行う。なお、透水係数は粘土を想定して $k=1.0 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ とし、時間間隔 Δt は0.01とした。EFGの領域積分に用いるバックグラウンドセルは $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ とし、 5×5 のGauss積分を使用する。なお、解析モデルの変形状況に応じ、境界部分のバックグラウンドセルは



(a) 解析諸元と境界条件



(b) 初期節点配置図

図5 基礎押し込みの解析モデル

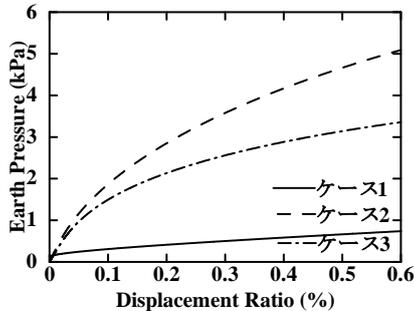
0.1m×0.1mに分割して解析する。境界条件の処理にはペナルティ法を用い、ペナルティ数は 1.0×10^6 を用いて解析を行った。節点数は、縦26個×横51個の合計1326個としており、境界部は、モデル下部で完全固定、側部で水平方向を拘束している。形状関数は変位・間隙水圧ともに一次基底のQuartic spline weight functionを採用し、サポート半径は1.0を使用する。ここでスケールファクター（バックグラウンドセルの長さとのサポート半径の比）は1.5として解析を行った。また、Loading plateで0.1%/minの変位制御とし、基礎部は端面摩擦を考慮している。ここで上面のみ排水を許容し、他は非排水条件とした。なお、安定化パラメータは0.01を用いて解析を行った。

4. 研究成果

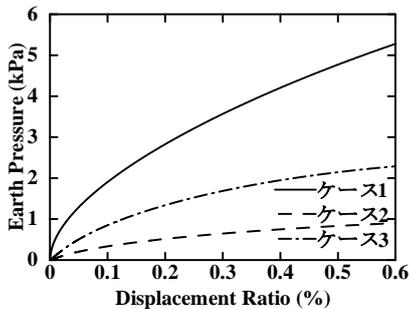
(1) ポール基礎の土圧特性

① 水平荷重の荷重実験

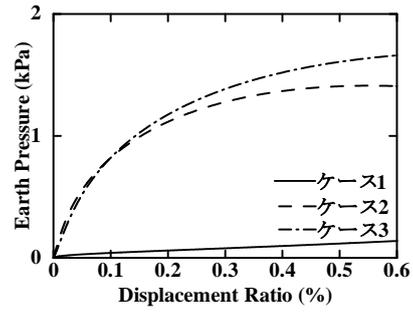
図6(a)～(d)にケース1～3の土圧-変位率を、図7に水平荷重-変位率を示す。ここでケース3については、水平荷重荷重方向に対し45°の向きに土圧計を設置しているので、荷重方向に直角になるよう計測値を換算して結果を整理した。図6より、1段目と3段目ではケース1の土圧が一番低く、2段目と4段目では、ケース1の土圧が一番高くなっている。このことより凹部で土圧が低くなっていることがわかり、基礎と砂が一体となっている影響が出ていると考えられる。また図6(c)より、ケース1でのみ土圧がほぼ0になっているのがわかる。この結果より、ケース



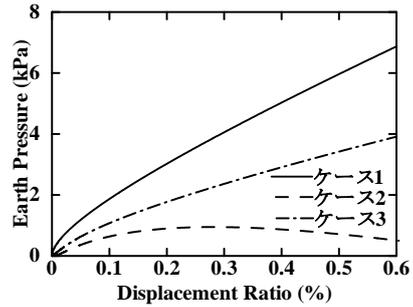
(a) 1段目の土圧



(b) 2段目の土圧



(c) 3段目の土圧



(d) 4段目の土圧

図6 土圧-変位率の関係

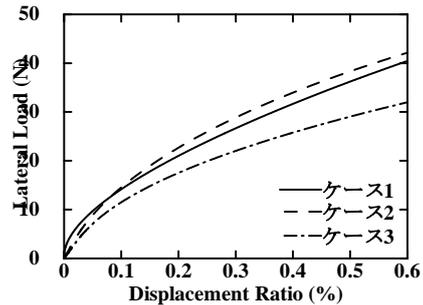
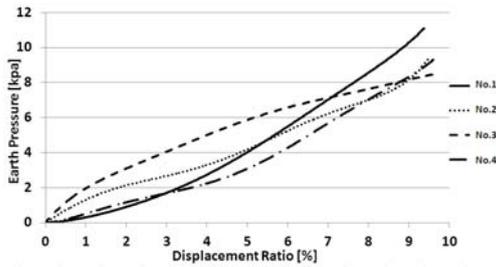


図7 水平荷重-変位率の関係

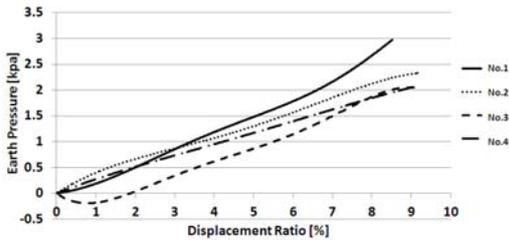
1では3段目近傍にある回転中心が、他のケースでは移動していることが考えられる。次に図7より、ケース3では他のケースよりも小さい荷重で同等の変位が測定されていることがわかる。荷重方向に対して直角方向を向いているパーツがないことが荷重に対する抵抗力を低くさせていると考えられる。

② ねじり荷重の土圧特性

図8(a), (b)はコンクリートパーツを用いたポール基礎（新しいポール基礎と称する）と従来のポール基礎（矩形基礎と称する）の変位率（変位をパーツの寸法で除した値）と土圧の関係を土圧計ごとに表したものである。今回はねじり荷重のみを作用させたため、いずれもNo.1からNo.4の土圧の値が突出することなく、類似した値になっている。

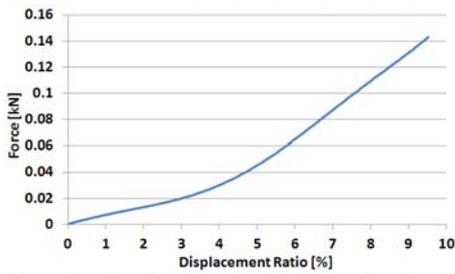


(a) 新たなポール基礎の結果

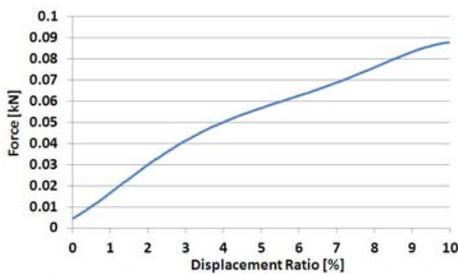


(b) 矩形基礎の結果

図 8 変位率と土圧の関係



(a) 新たなポール基礎の結果



(b) 矩形基礎の結果

図 9 水平荷重と変位率の関係

図 9(a), (b)は新たなポール基礎と従来のポール基礎の変位率と荷重の関係を表している。図より新たなポール基礎の方が最終値が高い値を示しており、同じ変位を得るためにはより大きい荷重が必要であることが分かる。また、両者のグラフの勾配が異なっており、新たなポール基礎はねじりによって、より地盤とかみ合い、徐々に耐力を増すことが

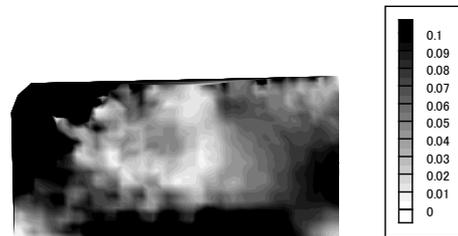
わかる。

(2) 基礎押し込みの解析結果

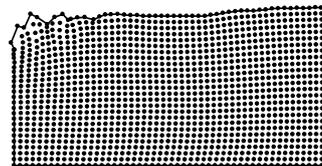
EFG を用いた基礎押し込みの解析結果を示す。図 10, 図 11 にそれぞれ安定化項を考慮していない結果と安定化項を考慮した結果を示す。ここで、(a)は間隙水圧の分布図、(b)はひずみ分布図、(c)は節点配置図を表す。



(a) 間隙水圧の分布図

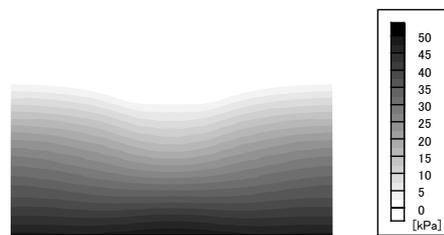


(b) ひずみ分布図

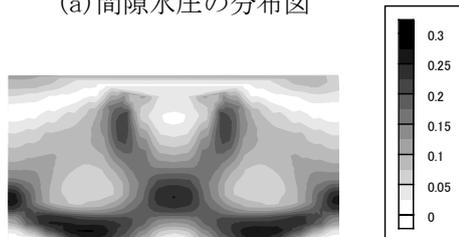


(c) 節点配置図

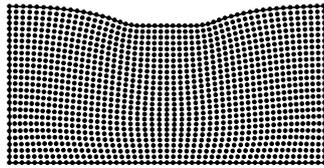
図 10 解析結果 (安定化項なし)



(a) 間隙水圧の分布図



(b) ひずみ分布図



(c) 節点配置図

図 11 解析結果 (安定化項考慮)

図 10(a)より, 安定化項を考慮していない場合間隙水圧が非常に高い値を示しているのがわかる. また, 図 10(a) (b)のモデル全体からも, 縞目状の分布図が得られており, 特に左側面で不安定な結果が生じているのがわかる. 一方, 図 11 の安定化項を考慮している結果を見ると, モデル全体で良好な結果が得られていることが確認できる. 特に図 11(c)より, 載荷板の角 (エッジ) のところで, 非常になめらかな変位分布が得られていることがわかる. これは EFG が移動最小二乗法によって形状関数を作成しているのためと考えられ, FEM にない大きな長所の一つであることが確認できる.

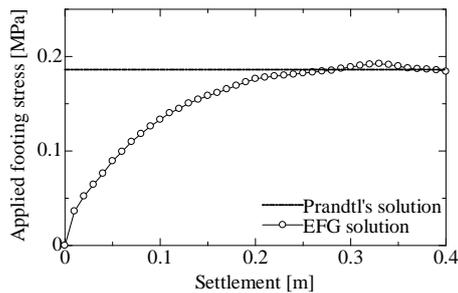


図 12 Prandtl 解との比較

図 12 は EFG による基礎押し込みの解析結果と Prandtl の解とを比較したものである. 図より, EFG の結果が Prandtl の解に徐々に漸近しているのがわかる. この結果からも, 安定化項を考慮した EFG の解析の適用性を確認することができる.

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 1 件)

- ① T. shibata and A. Murakami : A stabilization procedure for soil-water coupled problems using the element-free Galerkin method, Computers and Geotechnics, doi:10.1016/j.compgeo.2011.02.016, 2011.

[学会発表] (計 18 件)

- ① 柴田俊文, 林 芳信, 高田龍一, 桑垣早希 : プレキャストコンクリートを用いたポール基礎の地盤反力係数に対する逆解析, 第 60 回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, CD-ROM, 2008.
- ② 村上 章, 西村伸一, Anneke HOMMELS, 笠松 諭, 柴田俊文, 地盤解析に対するデータ同化, 第 43 回地盤工学研究発表会平成 20 年度発表講演集, pp. 805-806, 2008.
- ③ 柴田俊文, 林 芳信, 高田龍一, 長岡千晴, 田中美菜 : 新しい形状のポール基礎に対する安定計算法の適用性, 第 5 回土木学会中国支部島根会 研究・事例報告会, pp. 7-8 2009.
- ④ 村上 章, 西村伸一, 笠松 諭, Anneke HOMMELS, 柴田俊文 : Unscented/Ensemble カルマンフィルタによる逆解析とデータ同化, 第 57 回理論応用力学講演, pp. 120-121, 2008.
- ⑤ T. Shibata and A. Murakami : A Stabilization Procedure for Soil-water Coupled Problems Using the Mesh-free Method, 12th IACMAG, pp. 64-70, 2008.
- ⑥ A. Murakami, S. Kasamatsu, S. Nishimura, T. Shibata and R. Takata, Inverse analysis for nonlinear problem by Unscented Kalman filter, 4th international conference on advances in Structural Engineering and Mechanics, pp. 1134-1141, 2008.
- ⑦ 柴田俊文, 林芳信, 高田龍一, 田中美菜, 長岡千晴, ポール基礎支持部の土圧分布特性, 第 64 回年次学術講演会講演概要集, III-112, pp. 223-224, 2009.
- ⑧ 柴田俊文, 林芳信, 高田龍一, 砂地盤におけるプレキャストコンクリートポール基礎の土圧特性, 平成 22 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 2010.
- ⑨ 柴田俊文, 高田龍一, 三代江里子, 三谷泰礼, 水平載荷が作用するポール基礎の砂地盤土圧分布, 平成 22 年度第 7 回土木学会中国支部島根会研究・事例報告会概要集, pp. 13-14, 2011.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴田俊文 (TOSHIFUMI SHIBATA)
 松江工業高等専門学校 准教授
 研究者番号 : 3034254