

◆ 報 文 ◆

鋼材を挿入した深層混合処理工法の補強効果

島崎 修* 大下武志** 堤 祥一***

1. はじめに

近年の深層混合処理工法（写真-1）におけるコスト低減や品質向上に向けた取り組みとして、①3～4軸の多軸の施工による方法、②改良杭の大径化による方法、③沈下許容範囲での浮式地盤改良方法が提案・実施されている。また施工機械の攪拌能力や性能が向上し、改良杭の強度のバラツキが抑えられることで、より経済的な地盤改良が可能になっている。

従来方法では、盛土や擁壁の構造物の基礎として使用する場合、ジオテキスタイルや浅層改良工法を地表部に施工し併用する方法が提案されている。しかしながら、この方法は高さのある擁壁の基礎に適用する場合、大きな側方流動圧に対処するには背面盛土部も改良する必要があり、広い改良範囲が必要であること等により、コストの低減が難しいのが現状である。そのため、より改良範囲を下げながら、高盛土や擁壁・橋台基礎といった重量構造物に適用を図るには、改良杭がせん断力や引張り力に対して脆弱であるため、側方流動圧、地震時水平力による、杭の傾斜、せん断、曲げ破壊に対処することが求められる。（図-1）

そこで、側方流動圧、地震時水平力への対策として改良杭に必要な長さだけ鋼材（H型鋼・鋼管等）を挿して、改良杭の抵抗性の向上を図るとともに、他の杭と頭部連結を行い、構造物として一体化させる方法を提案（図-2）し、研究始めの段階として、まず単杭あたりの地震時水平力に対する補強効果の検討を行った。

2. 研究目的

提案した工法の実用化に当たり、図-2に示した3つの変状に対する効果を明らかにする必要があるが、本研究では、研究の始めの段階として、

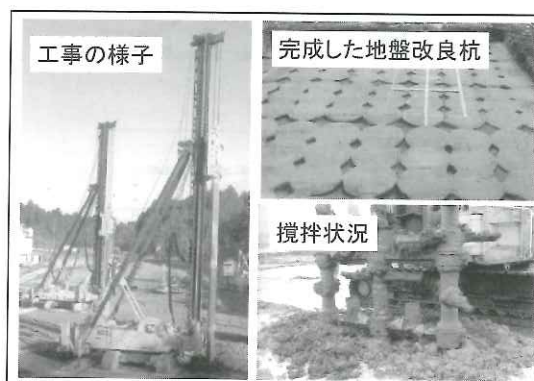


写真-1 深層混合処理工法の様子①

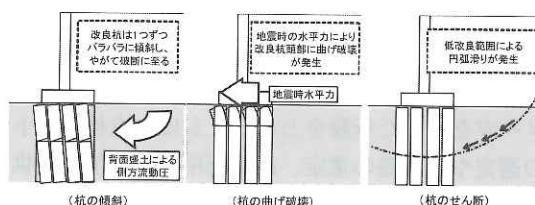
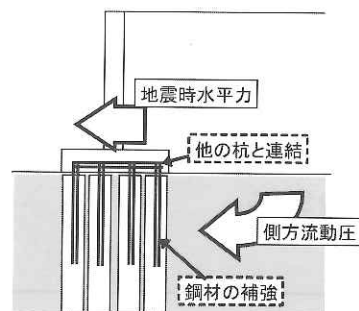
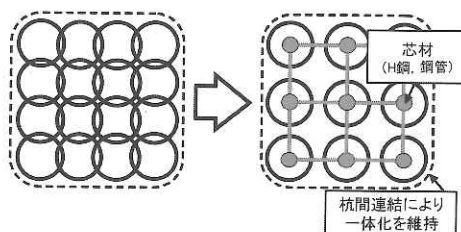


図-1 低改良率化の問題点



提案する地盤改良工法【断面図】



従来の地盤改良工法 提案する地盤改良工法【平面図】

図-2 提案する地盤改良工法

The stiffening effect of the deep mixing method with steel reinforcement

芯材（H型鋼・鋼管等）を挿入して補強した改良杭が、地震時の水平力に対して、どの程度の変形性（荷重－変位の関係）や強度（芯材の降伏ひずみ、改良体の破壊荷重等）を有するかについて、改良体の強度、芯材の長さ、地盤条件をパラメータとして、杭の繰返し水平載荷実験を遠心模型にて実施し検討を行った。

3. 遠心模型実験

3.1 実験の概要

実験では上部構造物フーチングと、芯材を挿入した地盤改良杭が一体化した状態で、地震時水平荷重が作用することを想定した。支持層に着底させた改良杭の中心に設置した芯材の頭部に上部構造物フーチングを固定し、水平載荷装置により、水平方向の載荷を行なった。実験は遠心30G場で行い、模型寸法は1/30スケールとした。実験の概要を図-3に、実験の様子を写真-2に示す。

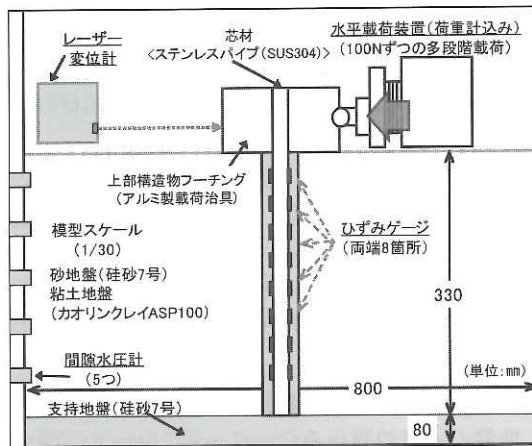


図-3 実験概要図

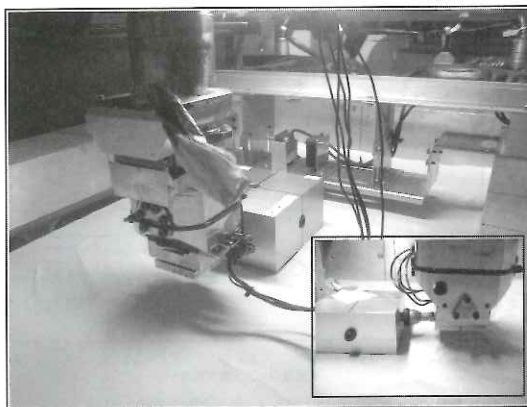


写真-2 実験の様子

計測は、水平載荷装置の載荷部に設置した荷重計により水平荷重を計測し、また芯材に添付したひずみゲージによりひずみ量を、レーザー変位計によりフーチングの変位量の計測を行った。

3.2 改良杭の仕様と実験ケース

改良杭はひずみゲージを貼りつけたH400を想定した芯材（材質：ステンレス SUS304、外径：13mm、内径：10.5mm、ヤング係数：199,000N/mm²）をモールド内に固定し、グラウト（水、砂、セメントの配合体）を流し込む形で改良杭（杭径の実寸法：1.0m、杭径の模型寸法：33mm）の作成を行った。また同配合での供試体にて一軸圧縮試験を行い、目標の強度に到達していることを確認した上で実験を行った。改良杭の寸法とひずみゲージの位置について図-4に示す。また、実験ケースは改良体の強度、芯材長、地盤条件（砂地盤、粘土地盤（低・中・高））をパラメータとして設定を行った。実験ケースを表-1に示す。

3.3 実験地盤

砂地盤は珪砂7号を用い、乾燥密度が1.55g/cm³

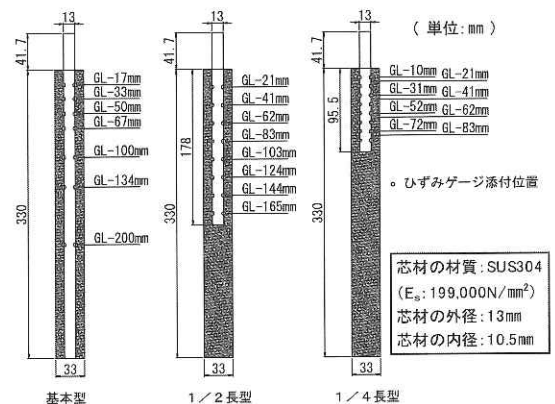


図-4 改良杭寸法とひずみゲージの位置

表-1 実験ケース一覧

実験	芯材長	改良体強度	改良杭径	設置地盤	備考
Case1		3.0N/mm ²			基本型
Case2	1/1長	6.0N/mm ²			改良体高強度型
Case3		1.5N/mm ²	1.0m	砂	改良体低強度型
Case4	1/2長				1/2長型
Case5	1/4長				1/4長型
Case6		—	—		芯材のみ
Case7	1/1長			粘土（低強度）	基本型・低強度粘土
Case8		3.0N/mm ²	1.0m	粘土（中強度）	基本型・中強度粘土
Case9				粘土（高強度）	基本型・高強度粘土

になるように作成を行った。粘土地盤はカオリンクレイ ASP100 を使い、室内試験により得られた強度増加率 0.23 に従い、地表面のせん断強度が 17.4 (低強度)、45.3 (中強度)、80.2 (高強度) kN/m^2 となるように、プレロードは行なわずに重量を調整した真鍮棒を敷き詰め、両面排水の遠心場にて先行圧密を行い地盤の作成を行った。なお、各ケースでの地盤深さ (Z : m) とせん断強度 (C_u : kN/m^2) との関係は (1) 式で表すことができる。

$$C_u = (0.23 \times (\gamma - 1) \times Z) + C_{us} \quad (1)$$

C_u : 地盤のせん断強度、 Z : 地盤の深さ

γ : カオリンクレイ ASP100 の湿潤体積重量

($\gamma = 1.67 \text{ g/cm}^3$ を使用 (室内試験結果))

C_{us} : 地表面のせん断強度

3.4 実験結果

3.4.1 改良体強度の影響

砂地盤において、改良杭径を 1.0m (模型寸法 33mm) とし、改良体強度別 (Case1~3) と芯材のみのケース (Case6) を、水平変位量-水平荷重の関係で表したものを図-5 に示す。これより水平荷重 (実大換算) 0~200kN の範囲までは、改良体があるケースは、芯材のみのケースより剛性が高いので変位量が小さいこと、また改良体の強度に関係なく改良体のあるケース (Case1~3) の水平変位量は同じであることが分かる。(A部) これは、改良杭の破壊がない場合、水平変位は改良杭の強度に関係なく地盤の強度に依存しており、改良杭が曲げに引張破壊し、剛性が低下した後は大きな水平変位量が生じているものと考えられる。

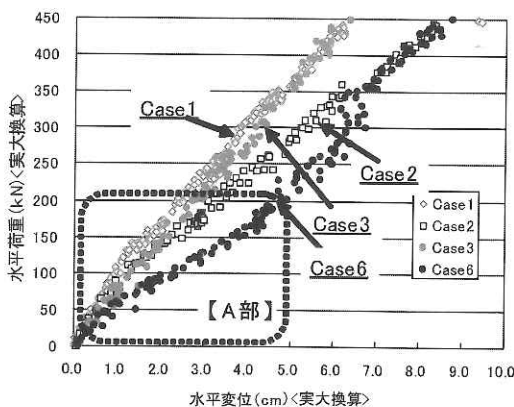


図-5 改良体強度による水平変位量の相違

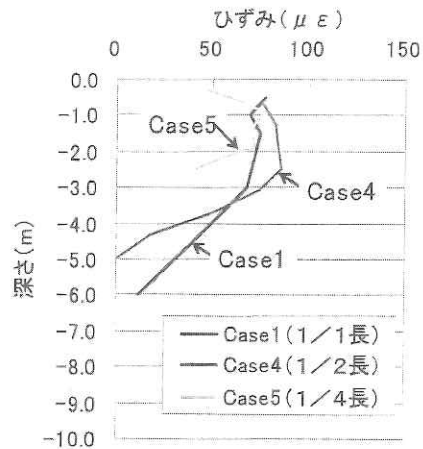


図-6 芯材長によるひずみ分布の相違

これより改良体が剛性を失う改良体の強度の推定が重要であることが分かった。改良体の強度と破壊時の荷重については 3.5 で後述する。

3.4.2 芯材長の影響

芯材長の違いが改良体に与える影響を把握するために、芯材長を変化させたケース (Case1、4、5) で比較を行った。改良体が十分な剛性を有する荷重範囲である水平荷重約 100kN における芯材の深さ方向の曲げひずみ分布を図-6 に示す。

これよりモーメント (ひずみ) の最大値は、いずれの芯材長においても、GL-2.0~3.0m 付近に集中しており、芯材長が 1/4 の Case5 では、芯材が短すぎることで、ひずみが十分に収束せず、芯材の下端部で改良体に対する強い曲げが作用していることが分かる。

3.4.3 粘土地盤での地盤強度の影響

地盤の強度の異なる Case7~9 において、改良杭の水平変位と水平荷重の比較検討を行った。結果を図-7 に示す。

これより地盤強度の違いは、荷重の初期段階か

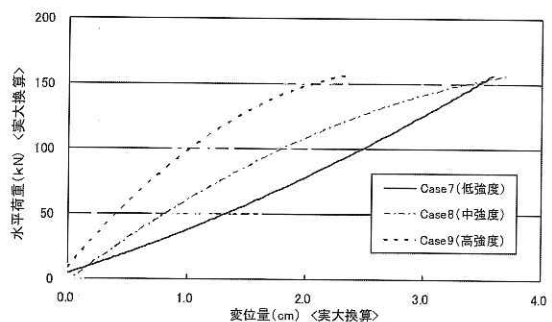


図-7 地盤強度による水平変位量の相違

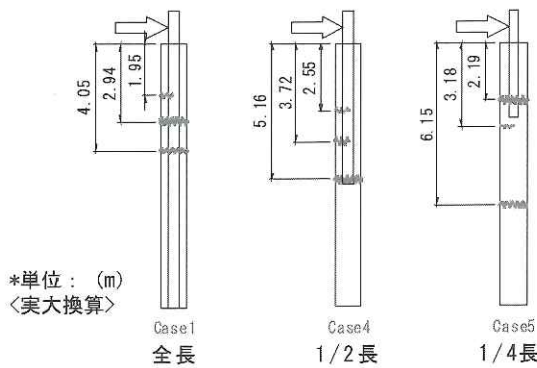


図-8 改良杭の破壊状況 (Case1,4,5)

ら大きな差が出ており、改良杭が大きく破壊しない荷重範囲(実大200kN以下)では、地盤強度の違いが改良杭の剛性に最も強い影響を与えることが分かった。またCase7において、荷重が変位量に比例しているのは、他の2Caseと比較して、載荷に時間が掛かっているため、地盤の圧密による強度増加がデータに反映されたものと考えられる。

3.5 改良杭の破壊時期

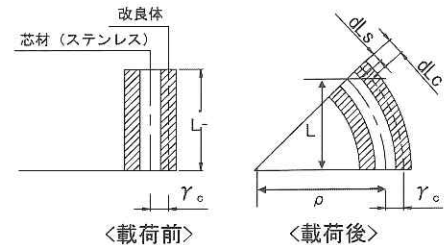
3.5.1 改良杭の破壊状況

載荷実験終了後に破壊状況の確認を行った。(図-8) 結果、芯材長が全長までであるケースでは天端から1/2長、1/4長の所で破壊の亀裂を確認することができ、いずれのケースにおいても曲げモーメントのピーク位置であるGL-2.0~3.0m付近において亀裂が生じていることを確認することができた。

また、芯材長が1/2長、1/4長のケースでは、芯材の末端付近にて大きな亀裂が生じている。これは、過大な荷重により、芯材の末端部において、曲げひずみが収束せず、その地点で改良体が曲げ破壊したものと考えられる。(図-8 Case4, 5)

3.5.2 改良杭の破壊時(亀裂発生時)の推定

芯材を挿入した改良杭の水平耐力を考える際、改良杭に亀裂が発生しない範囲内に作用する水平荷重を抑えて設計することが必要である。本実験では、芯材のひずみ値や改良杭の水平荷重・変位量より、改良杭に亀裂が発生した水平荷重値の推定を試みた。しかしながら、正確な値を読取することは困難であった。そこで、改良体の圧縮強度試験から得られた改良体の破壊ひずみ、弾性係数を用いて、改良杭に亀裂が生じる時の曲げモーメント(M_d)と水平荷重の試算を行った。ここで、試算のモデルは改良杭と芯材とが一体化して変形す



L (改良杭の長さ)	ρ (曲率半径)
γ_c (改良杭径と芯材径の平均値)	γ_s (芯材径)
dL_c (改良杭の変位)	dL_s (芯材の変位)

図-9 試算のモデル図

るものとした。(図-9)

曲げモーメント試算の流れを下記に示す。
 (改良体に亀裂が生じる曲げモーメントの試算)
 改良杭発生時のひずみ

$$\epsilon_{cd} = \sigma_{st} / E_c \quad (2)$$

ϵ_{cd} : 改良杭の引張破壊時のひずみ量 ($\mu \epsilon$)

σ_{st} : 改良杭の引張強度 (N/mm^2)

E_c : 改良杭の弾性係数 (N/mm^2)

微小変形域であるため

$$\epsilon_{cd} = (dL_c - dL_s) / dL_s \quad (3)$$

dL_c : 改良杭の変位 (mm)、 dL_s : 芯材の変位 (mm)

また、幾何学的関係より

$$dL_c / dL_s = (\rho + \gamma_c) / \rho \quad (4)$$

γ_c : 改良杭径と芯材径の平均値 (mm)

ρ : 曲率半径 (mm)

式(4)を式(3)に代入して整理

$$\epsilon_{cd} = \rho / \gamma_c \quad (5)$$

ここで、曲げモーメント

$$M_d = EI \times (1/\rho) \quad (6)$$

M_d : 改良杭に亀裂が生じる曲げモーメント
 (N・mm)

EI : 改良杭と芯材の合成 EI (N・mm²)

下式で示される。

$$EI = (E_s \times I_s) + (E_c \times I_c) \quad (7)$$

E_s : 芯材のヤング係数 (N/mm^2)

I_s : 芯材の断面二次モーメント (mm⁴)

I_c : 改良杭の断面二次モーメント (mm⁴)

式 (5) を式 (6) に代入して整理

$$M_d = EI \times (\varepsilon_c / \gamma_c) \quad (8)$$

式①を式⑦に代入して整理

$$M_d = EI \times ((\sigma_s / E_c) / \gamma_c) \quad (9)$$

(実験により作用した曲げモーメントの試算)

実験における深さごとの曲げひずみ

$$\varepsilon_s = \varepsilon_c \times (\gamma_s / \gamma_c) \quad (10)$$

ε_s : 各深さの芯材に作用した曲げひずみ ($\mu\varepsilon$)

γ_s : 芯材径 (mm)

式 (10) を式 (8) に代入して整理

$$M' = EI \times (\varepsilon_s / \gamma_s) \quad (11)$$

M' : 水平載荷重により発生した曲げモーメント ($\text{N} \cdot \text{mm}^2$)

ここで、 M_d と M' の比較検討を行った。

表-2に曲げモーメントの入力条件と試算結果を

表-2 曲げモーメントの入力条件と試算結果

	記 号	単 位	Case1(6.0MPa)	Case2(3.0MPa)	Case3(1.5MPa)
中心長	γ_c	mm	11.8	11.8	11.8
	ε_{cd}	$\mu\varepsilon$	305.9	379.8	349.8
改良体	σ	N/mm ²	6.0	3.0	1.5
	σ_{st}	N/mm ²	0.63	0.33	0.14
	E_c	N/mm ²	2,049	880	408
	I_c	mm ⁴	5.68E+04	5.68E+04	5.68E+04
芯 材	E_s	N/mm ²	199,000	199,000	199,000
	I_s	mm ⁴	8.1E+02	8.1E+02	8.1E+02
合成杭	EI	N・mm ²	2.8E+08	2.1E+08	1.8E+08
	M	N・mm	5,129	4,839	3,888
試算式	M = EI × (ε_c / γ_c)				
	EI = (E_s × I_s) + (E_c × I_c)				

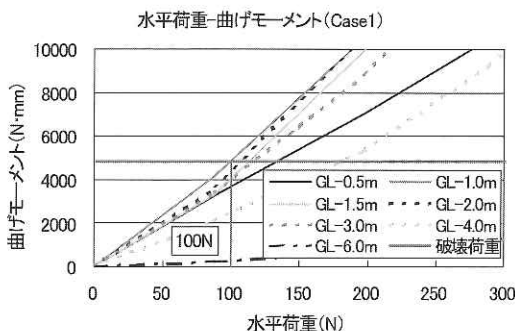


図-10 改良杭に発生する曲げモーメント (Case1)

水平荷重-曲げモーメント(Case2)

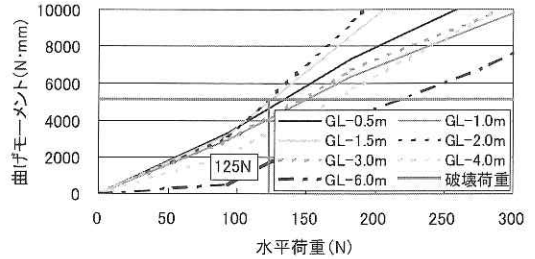


図-11 改良杭に発生する曲げモーメント (Case2)

示す。

試算結果 M と実験結果 M' との重ね合わせた結果、改良杭に亀裂が生じる時の水平荷重はCase1で約100N (実大換算90kN)、Case2で約125N (実大換算112.5kN) となった。(図-10、11)

また、Case1とCase2の改良体の圧縮強度は2倍の強度差があるにも関わらず、水平荷重に対する耐力の向上には大きな効果を得られないことが分かる。これは芯材の剛性が改良地盤の剛性よりはるかに高いこと。改良杭の引張強度は圧縮強度の1/10程度であることから、大きな効果を得られなかったことが考えられる。

5. まとめ

5.1 実験・試算検討結果のまとめ

今回の鋼材の芯材で補強した改良杭の遠心模型実験と設計による検討した結果について以下にまとめる。

- ・改良体の亀裂発生時点の水平荷重を推定した結果、約100～200kN程度であった。
- ・水平変位-水平荷重の関係において、水平荷重が実大換算200kN以下であれば、改良体強度の影響は小さいことが考えられる。
- ・芯材に作用する曲げモーメントのピーク位置はGL-1.0～3.0m程度であり、芯材末端部でのひずみの収束を考慮すると、芯材長は1/2長以上 (実大5m以上) を確保することが望ましい。
- ・芯材を挿入した改良杭の剛性 (荷重-変位の傾き) を上げるには、芯材の大きさ (断面二次モーメント) を増やすことが有効な方法であるものと考えられる。しかしながら、実際の施工では、芯材のコストが大きく上昇するため、改良率を上げる (荷重を受ける改良杭

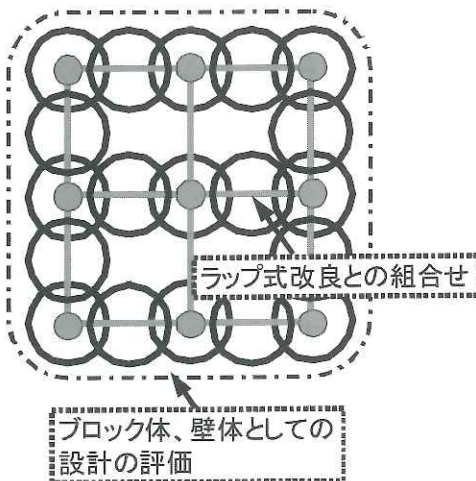


図-12 ラップ改良と芯材挿入の組み合わせ例

の本数を増やす) 方法も考慮に入れる必要がある。

5.2 今後の方針

地盤改良の研究テーマを始めるにあたり、まずは要素的・定性的な傾向を把握するため、地盤改良の単杭のみに注目し、芯材を挿入したケースにおける剛性・耐久性の評価を行った。

しかしながら、地盤改良は、単杭単体としてのみだけでなく、改良体のラップ式改良により複合的に結合した複合体（ブロック体、壁体）として設計評価を行うことが可能であり、よって今後は芯材を挿入したブロック体、壁体として、単杭の場合と比較しつつ、経済性・施工性も考慮に含めた上で、剛性・耐久性の評価を行う必要があるものと考えられる。(図-12)

なお、本報文は「側方流動対策としての地盤改

良技術に関する共同研究」の成果の一部であり、関係各社には謝意を表します。

参考文献

- 1) 川崎、上村、野田、原：CDM-レムニ2/3工法大径三軸型による深層混合処理工法の合理化施工、土木施工、第46巻、第12号、山海堂、pp21-28、2007。
- 2) 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針－セメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法－（改訂版）、日本建築センター、2002。
- 3) 地盤工学会基準 杭の水平載荷試験方法・同解説、地盤工学会、1983。
- 4) 陸上工事における深層混合処理工法設計・施工マニュアル（改訂版）、（財）土木研究センター、1999。
- 5) セメント系固化材における地盤改良マニュアル第3版、（社）セメント協会、2003。
- 6) 堤、大下、島崎：遠心模型実験による芯材を挿入した地盤改良杭の繰返し水平載荷試験、第42回地盤工学研究発表会、Vol447、CD-ROM、2007。

島崎 修*



みらい建設工業（前 独立行政
法人土木研究所つくば中央研究
所技術推進本部施工技術チーム
交流研究員）
Osamu SHIMASAKI

大下武志**



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所技術推進本部施工技
術チーム主席研究員
Takeshi Oshita

堤 祥一***



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所技術推進本部施工技
術チーム研究員
Shoichi TSUTSUMI