

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760526

研究課題名（和文） 地盤改良を用いた杭頭損傷低減基礎の開発と構造性能の把握

研究課題名（英文） Development of high seismic performance foundation composited pile and ground improvement and study of structural behavior of the foundation

研究代表者

柏 尚稔 (KASHIWA HISATOSHI)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40550132

研究成果の概要(和文):本研究では、杭周囲の地盤に対して地盤改良を適用することによって、建物が大地震を被った場合に、杭頭部の損傷を低減させるとともに、改良地盤および杭周地盤の変形により地震エネルギーを吸収させることで、上部建物の地震応答も合わせて低減させる高い耐震性能を有する杭基礎形式を提案することを目的として、模型振動実験と原位置静的水平載荷実験を実施し、杭周囲の改良地盤が杭基礎建物の地震応答及び水平抵抗性状に及ぼす影響を把握した。

研究成果の概要(英文): The purpose of this study is the suggestion of the high performance foundation composited pile and ground improvement in order to reduce the damage of pile foundation and the seismic response of upper-structure subjected to very large earthquake like KOBE EARTHQUAKE, the seismic energy may be dissipated by the deformation of improved ground. In this program, the shaking table test and the in-situ lateral loading test were conducted and the conclusion was obtain that the seismic response of pile foundation was strongly affected by the ground improvement.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：基礎構造、杭の水平抵抗、振動実験、水平載荷実験

1. 研究開始当初の背景

杭基礎は多くの構造物に用いられている基礎形式であり、上部建物の足元を支える重要構造物である。杭基礎が破壊されれば上部建物を支持する機能を失って上部建物は倒壊し、人命の損失に繋がる可能性がある。また、杭基礎が破壊に至らずとも損傷すれば、上部構造の不同沈下を招き上部建物が継続使用できなくなるため、速やかに修復する必要がある。つまり、杭基礎は大地震後も上部建物を継続して支持する能力を保持する必要がある。兵庫県南部地震では杭基礎に被

害が生じた事例が見られ、杭頭が損傷した例は多数あった。従来の杭頭部の設計方法は、杭頭の主筋をパイルキャップに定着させる工法が一般的であり、杭頭接合部は剛接合に近い状態であった。そのため、兵庫県南部地震のような大地震時に大きな建物慣性力が杭に作用した場合には杭頭部に曲げモーメントが集中し、杭頭部に被害が集中すると考えられる。兵庫県南部地震以降、杭の耐震性能を向上させるために、杭頭部に被害を集中させない杭頭半剛接合構法など、杭の新工法が数多く提案されている。しかし、新設杭を

対象としている工法が多く、既存杭の耐震性能を向上させる工法の数はい少ないのが現状で、低コストで簡易な杭基礎の耐震補強法の開発が急務である。

2. 研究の目的

本研究課題では、兵庫県南部地震などの過去の大地震において杭の被害として多くみられた杭頭の損傷を低減するため、杭周囲の地盤に対して地盤改良を適用する杭基礎の耐震補強法に着目し、地盤の水平抵抗力を増大させることによって杭頭部の損傷を低減させるとともに、改良地盤と杭周地盤の変形による履歴減衰により地震エネルギーを吸収させ、上部建物の地震応答も合わせて低減させる地盤－杭基礎建物連成機構を提案することを旨とする。

3. 研究の方法

本研究は次に示す項目について実施する。
 ・杭周地盤への地盤改良を適用した杭基礎建物の模型振動実験・・・振動台を用いた模型実験を行い、小地震から兵庫県南部地震波のような過大地震までの地震動において、杭周地盤の地盤改良が杭の水平抵抗に及ぼす影

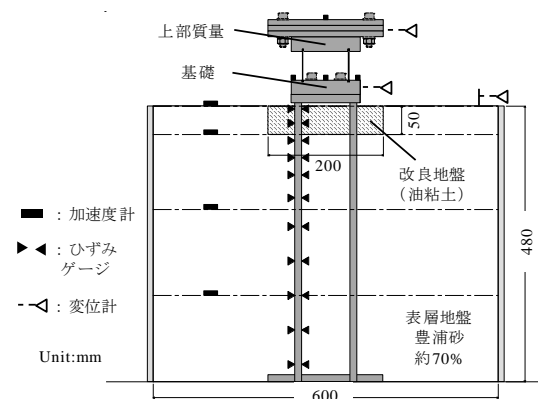


図1 試験体概要(改良地盤あり)

表1 加震ケース

入力波	告示波		兵庫県南部地震波
	0.2倍	0.4倍	
加震ケース	1倍 (330.68gal)	1倍 (281.36gal)	
	1.7倍		
	2.3倍		
	3.0倍		

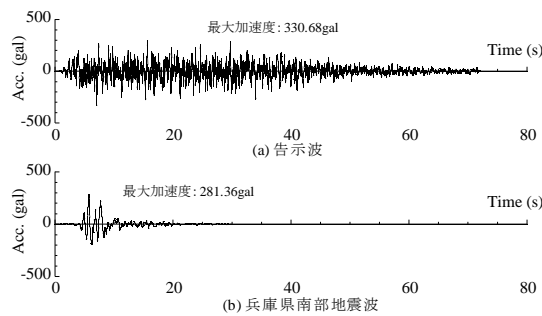


図2 入力地震動時刻歴(最大速度を50kineに基準化)

響を分析する。

・杭周地盤への地盤改良を適用した杭基礎建物の模型振動実験・・・杭周地盤の改良が杭の水平抵抗性状に及ぼす影響を実証することを目的として、実地盤における静的水平載荷実験を実施する。

4. 研究成果

(1)杭周地盤への地盤改良を適用した杭基礎建物の模型振動実験

①振動台実験の概要

図1に実験装置の概要図を示す。実験は表層地盤をすべて豊浦砂で作製したケース、杭周の地盤を深さの異なる改良地盤模型で置換したケースを2種類の計3ケースを実施した。改良地盤の有るケースでは GL. から50mmと100mmの厚さで、200×200mmの範囲の砂地盤を油粘土に置換することにより試験体を作製した。本実験では、油粘土による改良地盤模型は豊浦砂による表層地盤模型と比較すると、十分に剛とみなすことができる。本実験で模型に対する実物の長さの相似比を25とする。地震波には(a)告示波(ラ

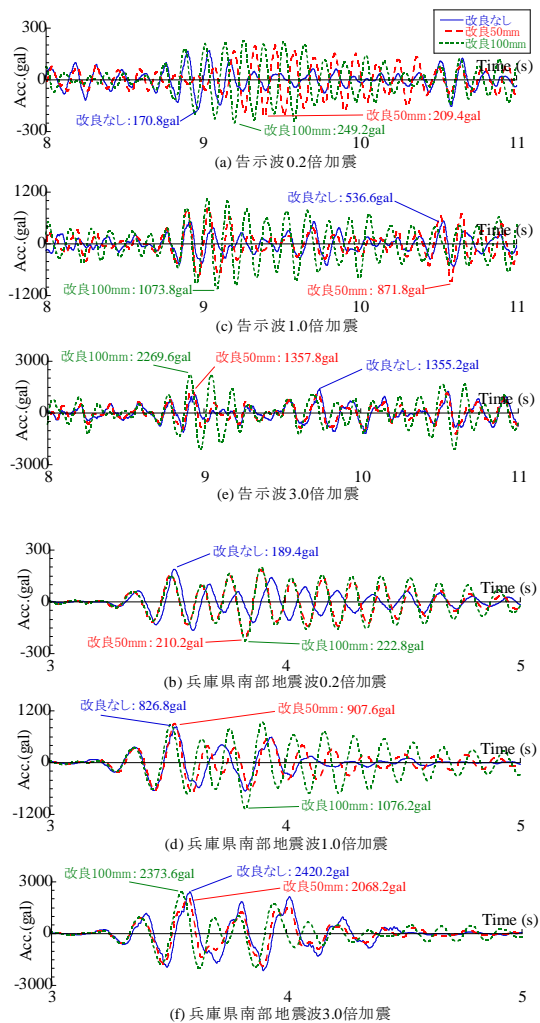


図3 上部質量の加速度応答時刻歴の比較

ンダム位相)、(b)兵庫県南部地震推定基盤波²⁾を用いた。図2に最大速度応答を50kineに規準化した地震動の加速度時刻歴を示す。時間軸を1/5倍して振動台に入力した。実験順序は表1に示すように、図2の地震動を規準として加速度倍率を徐々に大きくしながら、告示波→兵庫県南部地震波の順に連続して加震した。

② 上部質量の加速度応答

図3に上部質量の加速度応答時刻歴を、図4に入力に対する上部質量のフーリエスペクトル比を示す。図4(a)~(d)に示すように、0.2倍加震および1.0倍加震では、地震動のタイプに関わらず、全ての実験ケースで入力に対する上部質量のフーリエスペクトル比のピークが1つだけ見られる。また、そのピーク振動数は、改良地盤なし、改良地盤50mm、改良地盤100mmの順で大きく、上部構造の固有振動数に近い。これより、改良地盤を設置したことによって、杭に対する地盤の水平抵抗力が増大し、基礎固定時により近い状態で上部質量が応答したと考えられる。その結果、図3(a)~(d)に示すように、改良地盤なし、改良地盤50mm、改良地盤100mmの順で、上部質量の応答加速度は大きくなっている。一方、図4(e)、(f)に示すように、3.0倍加震では、地震動のタイプに関わらず、入力に対する上部質量のフーリエスペクトル比のピークがいくつも見られる。図3(e)、(f)を見ると、兵庫県南部地震では、改良地盤なしの最大加速度が最も大きく、改良地盤50mmが最も小さい結果となっており、0.2倍加震および1.0倍加震と異なり、改良地盤の厚さと上部質量の応答加速度には相関関係は見られない。

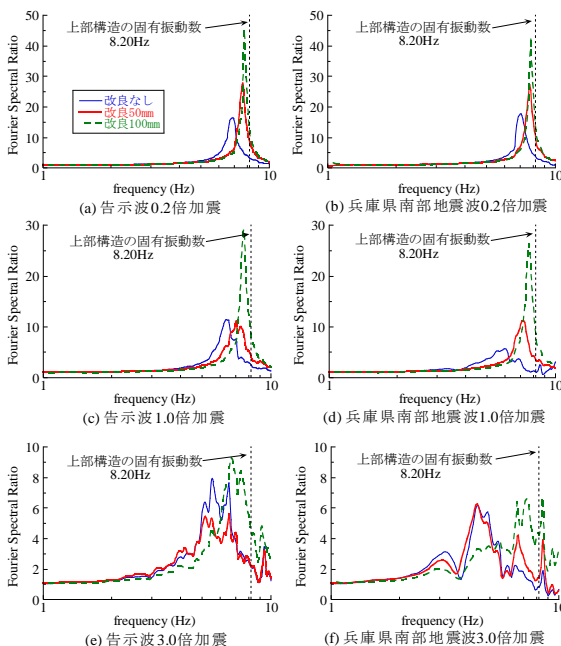


図4 改良地盤の有無・厚さによるフーリエスペクトル比の比較 (上部質量/入力)

③ 深さ方向の杭の最大曲げモーメント分布

図5に深さ方向の杭の最大曲げモーメント分布を示す。図5(a-1)、(a-2)、(b-1)、(b-2)に示すように、0.2倍加震および1.0倍加震では、地震動のタイプに関わらず、改良地盤なしに比べて改良地盤ありの杭の最大曲げモーメントは小さい。また、改良地盤50mmと改良地盤100mmを比較すると、両者の曲げモーメントの差は小さい。一方、図5(a-3)、(b-3)に示すように、3.0倍加震では、地震動のタイプに関わらず、改良地盤の厚さによって杭の最大曲げモーメントに差が見られる。改良地盤100mmでは、0.2倍加震時および1.0倍加震時と同程度の杭の最大曲げモーメントの低減率が見られるのに対し、改良地盤50mmでは、改良地盤なしに比べると杭の最大曲げモーメントが小さくなってはいるものの、改良地盤100mmに比べて杭の最大曲げモーメントの低減量は小さい。

④ まとめ

- ・1.0倍加震までは、改良地盤の厚さが厚くなるほど、入力に対する上部質量のフーリエスペクトル比のピークが上部構造の固有振動数に近くなり、上部質量の加速度応答は大きくなる。一方、3.0倍加震では、改良地盤の厚さと上部質量の応答加速度には相関関係が見られない。
- ・杭周に改良地盤を設置すると、杭の最大曲げモーメントも小さくなる。ただし3.0倍加震では、改良地盤の厚さによって杭の最大曲げモーメントの低減量が異なり、改良地盤100mmに比べて改良地盤50mmの杭の最大曲げモーメントの低減量は小さい。

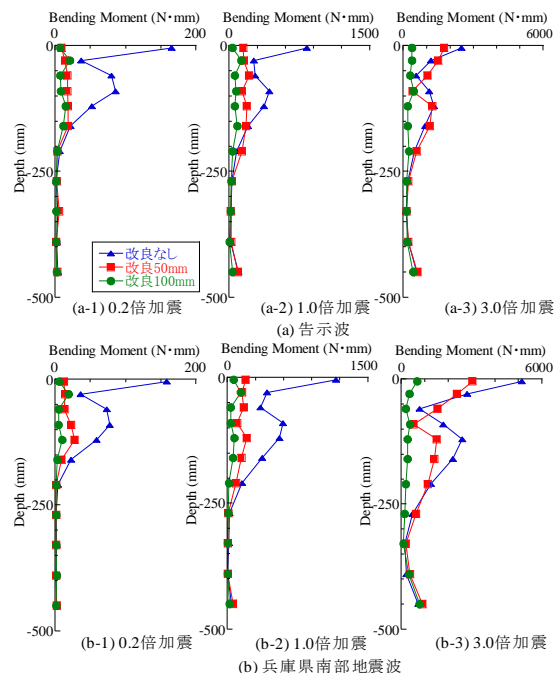


図5 改良地盤の有無・厚さによる最大曲げモーメント分布の比較

(2)杭周地盤への地盤改良を適用した杭基礎建物の模型振動実験

①実験概要

本実験は東大阪市の原位置地盤で行った。図6に実験敷地の深さ方向のN値分布及び土質柱状図を示す。敷地地盤は地表面からGL.-1.8mまでが盛土、GL.-1.8mからGL.-2.5mまで砂質土、GL.-2.5m以下は非常に柔らかい粘性土で構成されている。図7に実験装置の概要図を示す。実験装置は試験杭、油圧ジャッキと、油圧ジャッキを支持する反力体で構成される。試験杭はφ190.7×7.0mmの鋼管杭で、長さは6000mm、杭頭突出量は250mmである。油圧ジャッキは押出側最大荷重500kN、引込側250kNで500mmのストロークを持つ。反力体はφ267.4×12.7mmの鋼管杭2本に支持された反力梁と称するH形鋼であり、載荷時に生じる反力体の変位を極力小さくするために、反力杭の周囲の地盤を地盤改良している。打設した試験杭の杭頭部には円形の鋼板を溶接しており、加力梁と称するH型鋼を高力ボルト接合する。加力梁と反力梁は油圧ジャッキを介してピン接合されており、試験杭の杭頭は回転自由条件である。

試験杭には、杭先端に羽根と呼ばれる鋼板を取り付けた鋼管杭を使用し、以後この鋼管杭を羽根付き杭と呼ぶ。なお、本実験では羽根の直径が560mmのものを用いる。図8に実験ケースを、表1に実験ケースの一覧を示す。実験は全て単杭の実験とし、地盤改良の

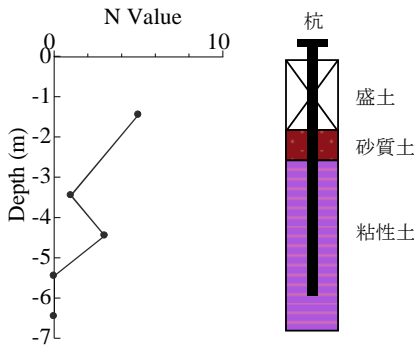


図6 N値分布及び土質柱状図

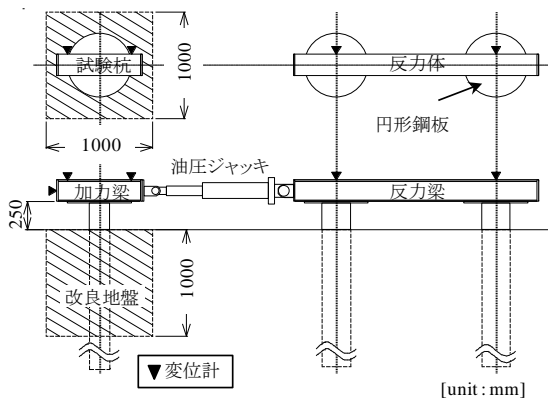
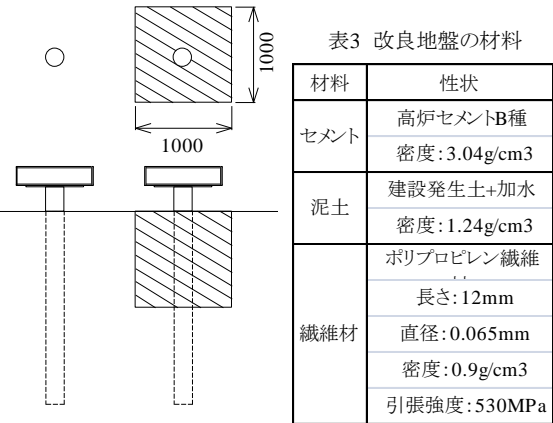


図7 実験装置概要図

有無、改良地盤の物性、地盤改良の範囲をパラメータとして合計3ケースを実施する。図8(a)に示すように、杭周囲に地盤改良を施さず、敷地地盤に羽根付き鋼管杭を設置したものを基本ケースW-Nとする。杭周囲に地盤改良を施す実験ケースは4ケース実施する。表2に実験で用いる改良地盤の使用材料を、図9に一軸圧縮試験の結果を示す。改良地盤には、強度が0.5MPaの低強度セメント系改良地盤、強度が0.5MPaの複合改良地盤の2種類を用いる。ここでセメント系改良地盤とは、建設発生土と水とセメントで構成された固化処理土であり、複合改良地盤とは固化処理土に写真1に示す繊維材(ポリプロピレン系短繊維)を、体積1m³あたり3%の重量分添

表2 実験ケース

実験ケース名	改良地盤	改良範囲
W-N	—	—
W-C05	セメント系	方形1.0×1.0×1.0m
W-F05	複合	方形1.0×1.0×1.0m



(a)W-N (b)W-C05,F05

図8 試験杭の概要図

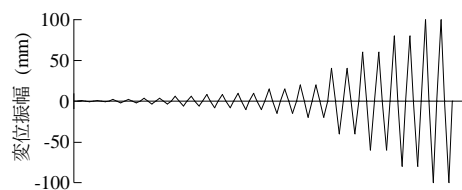
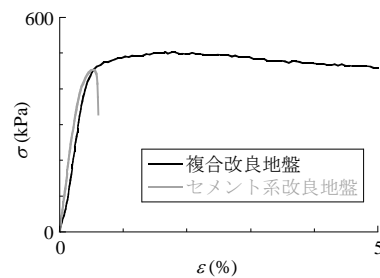


図10 荷重スケジュール

加したものである。実験では、図 8(b)に示すように、強度 0.5MPa の複合改良地盤を用いて杭周地盤を $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \text{ m}^3$ の範囲にわたって地盤改良した W-F05、W-F05 と同じ形状で強度 0.5MPa のセメント系改良地盤を用いて杭周地盤を $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \text{ m}^3$ の範囲にわたって地盤改良した W-C05 を実施する。

計測計画として、試験杭および反力体の変位を変位計（図 7）で、水平荷重をロードセルで、杭に発生する曲げモーメントをひずみゲージで計測する。実験の载荷スケジュールを図 10 に示す。本実験では試験杭の地表面位置における変位計によりジャッキの変位振幅を制御し、変位振幅 ±1, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 40, 60, 80, 100mm の順に漸増振幅で 2 回ずつ繰返し载荷を行う。

②地盤改良が杭の水平抵抗に及ぼす影響

各変位振幅 1 サイクル目における正載荷最大変位時の水平荷重を抽出し、図 11 に繊維材の有無による比較として、W-N、W-C05、W-F05 における水平荷重－変位振幅関係を示す。同一の変位振幅で比較すると、W-C05 及び W-F05 の水平荷重は W-N に比べて大きく、杭周囲に地盤改良を施すことで水平荷重は増大する。また、W-F05 の水平荷重は W-C05 よりも大きく、改良地盤を複合改良地盤とすることで、杭の水平抵抗力の増大が顕著となる。図 12 に変位振幅 20mm と 40mm における深さ方向の曲げモーメント分布を繊維材の有無により比較して示す。いずれの変位振幅でも W-C05 と W-F05 の最大モーメントは W-N よりも大きく、地盤の水平抵抗力が増大している。さらに、W-C05 と W-F05 の最大モーメント発生深さは W-N よりも浅く、杭周囲

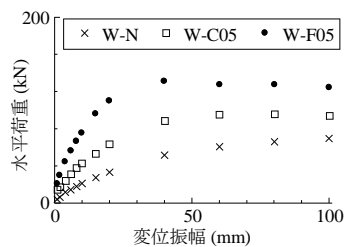


図11 水平荷重－変位振幅関係

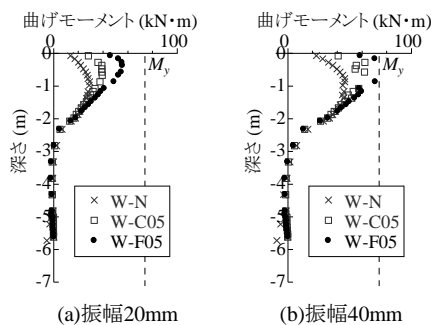


図12 曲げモーメント分布

を地盤改良することによって、地盤は浅い位置で杭変位に抵抗するようになる。W-C05 と W-F05 を比較すると、W-F05 の最大モーメントは W-C05 より大きく、最大モーメント発生深さは浅くなっており、複合改良地盤とすることで、より浅い位置で地盤は杭変位に抵抗するようになる。図 13 に変位振幅 20mm と 40mm の正載荷時(矢印方向)における W-C05 との改良地盤のひび割れを繊維材の有無により比較して示す。W-C05 では小さな変位振幅から改良地盤にひび割れが発生し始め、図 13(a) に示すように変位振幅 20mm においてかなりの数のひび割れが発生した。一方、W-F05 では変位振幅 40mm まで改良地盤に明瞭なひび割れが見られず、繊維材によってひび割れが抑制されている。以上より、杭周地盤を地盤改良することにより、杭の水平抵抗力は増大する。さらに、改良地盤に繊維材を混入することによって改良地盤のひび割れが抑制され、繊維材を混入しない場合に比べて改良地盤による杭の水平抵抗力の増大効果が大きくなる。

③まとめ

- ・杭周地盤を地盤改良することにより、杭の水平抵抗力は増大する。さらに、杭に生じる地中部の曲げモーメントは大きくなり、杭周地盤は浅い位置で杭に抵抗するようになる。
- ・改良地盤に繊維材を混入することによって改良地盤のひび割れが抑制され、繊維材を混入しない場合に比べて改良地盤による杭の水平抵抗力の増大効果が大きくなる。

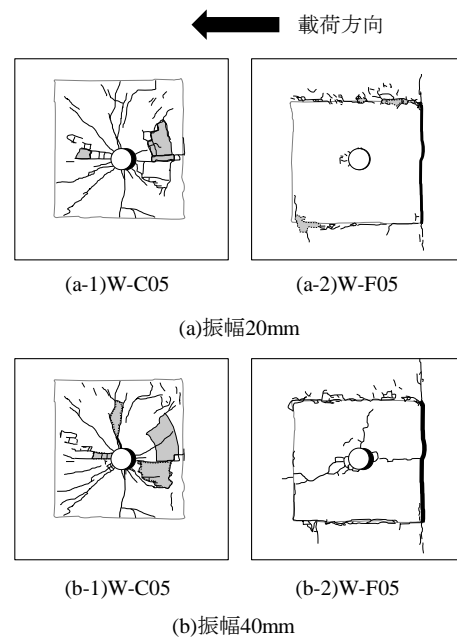


図13 改良地盤のひび割れの様子

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)

〔学会発表〕(計7件)

- ① 加藤祐子, 高田光真, 柏尚稔, 小林俊夫, 小田達哉, 宮本裕司 : 杭周囲に地盤改良を施した鋼管杭の静的水平載荷実験 その1: 実験概要, 平成25年度日本建築学会学術講演会梗概集, 2013.8.
- ② 高田光真, 加藤祐子, 柏尚稔, 小林俊夫, 小田達哉, 宮本裕司 : 杭周囲に地盤改良を施した鋼管杭の静的水平載荷実験 その2: 実験結果, 平成25年度日本建築学会学術講演会梗概集, 2013.8.
- ③ 柏尚稔, 高田光真, 小林俊夫, 小田達哉, 宮本裕司 : 杭周囲に地盤改良を施した鋼管杭の静的水平載荷実験 その1: 実験概要, 平成25年度地盤工学研究発表会梗概集, 2013.7.
- ④ 高田光真, 柏尚稔, 小林俊夫, 小田達哉, 宮本裕司 : 杭周囲に地盤改良を施した鋼管杭の静的水平載荷実験 その2: 実験結果, 平成25年度地盤工学研究発表会梗概集, 2013.7.
- ⑤ 加藤祐子, 三善亮介, 柏尚稔, 宮本裕司 : 杭周地盤への地盤改良を適用した杭基礎建物の模型振動実験 その1: 地盤変状の様子, 平成24年度日本建築学会学術講演梗概集, 2012.9.
- ⑥ 三善亮介, 加藤祐子, 柏尚稔, 宮本裕司 : 杭周地盤への地盤改良を適用した杭基礎建物の模型振動実験 その2: 改良地盤が杭基礎建物の地震応答性状へ及ぼす影響, 平成24年度日本建築学会学術講演梗概集, 2012.9.
- ⑦ 加藤祐子, 三善亮介, 柏尚稔, 宮本裕司 : 乾燥砂地盤における杭周地盤への地盤改良が杭基礎建物の地震応答性状に及ぼす影響, 平成24年度日本建築学会近畿支部研究発表会梗概集, 2012.6.

6. 研究組織

(1)研究代表者

柏 尚稔 (KASHIWA HISATOSHI)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 40550132