

機関番号：14401

研究種目：研活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21860056

研究課題名（和文） 極大地震下における杭基礎の耐震性能評価に関する実証・解析研究

研究課題名（英文） Analytical and experimental study on behavior of structure supported by piles subjected to very large earthquakes

研究代表者

柏 尚稔 (KASHIWA HISATOSHI)

大阪大学・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－地盤系の非線形性を考慮した杭基礎の耐震性能評価法の構築を目指して、杭・地盤の非線形性が建物及び杭の地震挙動に及ぼす影響について、遠心載荷実験及び動的解析・3次元有限要素解析による実験・解析の両面から検討した。その結果、実験より杭が塑性化した場合の建物応答の定性的傾向を明らかにし、3次元有限要素法によって実験をシミュレーションできることを示した。さらに、応答変位法を用いた杭応力の簡易評価法を構築した。

研究成果の概要（英文）：

In order to construct the design method of structure supported by piles considered with nonlinear soil-structure interaction, we analytically and experimentally study the influence of the nonlinearity of pile damage on building response. The following conclusions were obtained: (1) The reduction of predominant frequency is mainly caused by the nonlinearity of the soil around piles. (2) The nonlinearity of pile damage has a very small effect in the building response in aftershock. (3) The behavior of piles in inelastic state can be explained in terms of the seismic deformation method.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,080,000	324,000	1,404,000
2010年度	980,000	294,000	1,274,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,060,000	618,000	2,678,000

研究分野：工学

科研費の分科・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

## 1. 研究開始当初の背景

近年、南海地震、東南海地震をはじめとするプレート境界型の巨大地震の発生が確実視されているが、その発生前後には各地で活断層による内陸直下の地震が多発すると言われている。そのような地震の代表例が兵庫県南部地震、新潟県中越地震に当たる。これらの震源域では現行の設計で考慮されているレベルをはるかに上回る高レベル地震動

が観測、推定された<sup>例え1)</sup>。さらに、大阪府域の活断層に対する地震動予測が様々な機関によって精力的に行われているが、提案されている予測地震動は設計用地震動よりもはるかに大きい<sup>例え2)</sup>。このような地震動が建物に入力された場合、上部構造－基礎－地盤連成系には非線形性が強く現れると考えられる。

一方、1995年の兵庫県南部地震を契機とし

て、建物の耐震設計は仕様規定型設計から性能規定型設計へ移行しつつある。性能規定型設計の際に重要なことは建築構造物が持つ限界状態（保有性能）が地震動を受けた時の建物応答（要求性能）を超えて満足する様に設計することであり、保有性能・要求性能を明確な数値で示すことによって建物の耐震性能を保障する必要がある。発生しうる地震動のレベルが飛躍的に増大している中で、建物の要求性能を明確にするためには、非線形性の中でも特に基礎―地盤連成系の強非線形性を適切に考慮した地震応答解析を行う必要がある。しかし、現状では基礎―地盤連成系の強非線形性に関する実験データが乏しいことから、それらを適切に評価することが非常に難しく、巨大地震に対する建物の耐震性能を明確に保障できない事態となっている。

杭の水平抵抗に着目すると、杭―地盤系の非線形性に取り組んでいる実験的研究は近年増えつつある<sup>例えば 3)</sup>。しかし生じる現象を把握する目的で、通常的设计で考慮されているレベルを超えるような杭頭変位まで群杭に関する水平載荷実験を行っている研究は非常に少ない。基礎―地盤連成系の強非線形性を適切に評価して耐震設計に合理的に反映させるためには、さらに実験データを蓄積することが必要不可欠である。

## 2. 研究の目的

以上の背景を鑑み、研究代表者は杭基礎に着目し、杭―地盤系の強非線形性が杭の水平抵抗に及ぼす影響を明らかにするため、乾燥砂地盤に設置した杭の大振幅水平載荷実験を行ってきた<sup>4)</sup>。実験は重力場での水平載荷実験で、単杭、群杭について実験した。この実験より、杭周囲の地盤で生じる現象を把握し、それらが杭頭せん断力に及ぼす影響を明らかにした。さらに 3 次元有限要素解析 (ABAQUS) を用いて実験のシミュレーション解析を行い、実験結果をシミュレーション可能な解析モデルを構築した。また、実験・解析の両側面から分析することにより、現象に則して杭の水平抵抗を評価するために必要な杭・地盤の非線形性はどのようなものなのかを明らかにするとともに、群杭効果の変位振幅依存性についても分析した。

これら一連の実験、解析は杭―地盤系の強非線形性を一から把握するための基礎的研究である。そこで本研究では一連の実験、解析の次の段階として、実験をシミュレーション可能な 3 次元有限要素解析によるパラメトリックスタディにより群杭の水平地盤ばねの評価式を構築し、提案した水平地盤ばねを用いた質点モデルによる動的解析を通じて、杭―地盤系の強非線形性が構造物の地震時挙動に及ぼす影響を分析し、それらを考慮し

た杭基礎の水平抵抗評価式を新たに構築することを旨とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、杭―地盤系の非線形性を考慮した杭基礎の耐震性能評価法の構築を目指して、遠心載荷実験及び動的解析・3次元有限要素解析による実験・解析の両面から検討する。研究の方法は次のとおりである。

### ①動的実験（遠心場振動実験および重力場振動実験）の実施と実験データの分析

遠心場振動実験は、京都大学防災研究所の遠心力載荷装置を用いて 40g 場で行った。図 1～3 に実験装置概要図と模型杭の詳細図を示す。杭基礎模型は、真鍮製の基礎構造・板バネ・上部質量で構成されて、基礎部を 4本の杭で支持し、杭頭と基礎は剛接合、杭先端は土槽底面に剛接合されている。杭は直径 8mm、肉厚 2mm、長さ 176mm（実寸大直径 320mm、肉厚 80mm、長さ 7040mm）のアルミ製の中空杭を用いており、塑性化を早めるために杭頭部を削っている。地盤材料として豊浦砂を使用し、地盤の相対密度  $D_r$  は 60% に設定して地盤を製作する。計測方法として、地盤にはせん断土槽の底部と地表面に水平方向加速度計を設置、杭基礎模型には基礎と上部質量に水平方向加速度計を設置し、杭にはひずみゲ

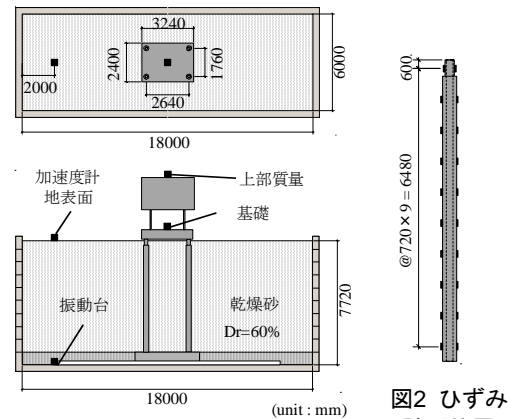


図1 実験装置概要 (プロトタイプ)

図2 ひずみ計測位置

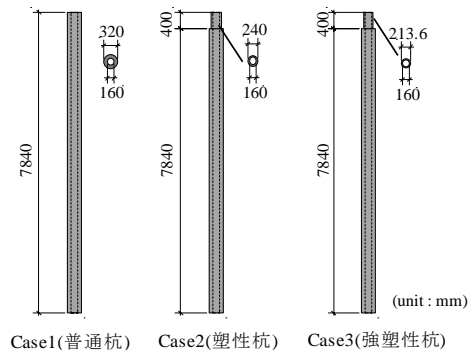


図3 杭詳細図 (プロトタイプ)

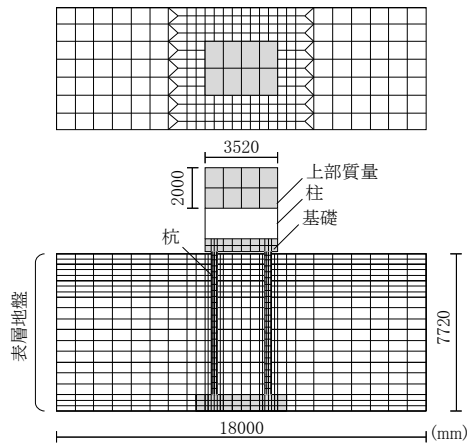


図4 シミュレーション解析モデル

表1 構造物の解析諸元

	密度(t/mm <sup>3</sup> )	ヤング係数(N/mm <sup>2</sup> )	材料モデル
上部構造	9.37 × 10 <sup>-9</sup>	-	剛体
柱	8.40 × 10 <sup>-9</sup>	1.03 × 10 <sup>5</sup>	弾性体
基礎	8.40 × 10 <sup>-9</sup>	-	剛体
杭	2.70 × 10 <sup>-9</sup>	6.55 × 10 <sup>4</sup>	弾性体
基盤	8.40 × 10 <sup>-9</sup>	-	剛体

表2 地盤の解析諸元

	密度(t/mm <sup>3</sup> )	せん断弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )	材料モデル
地盤 (α=80)	1.50 × 10 <sup>-9</sup>	6.7	弾塑性体
		10.5	
		12.9	
		15.7	
		18.7	
	1.80 × 10 <sup>-9</sup>	284.2	

ージを 10 レベル貼付する。入力地震動は八戸波八戸 1968 NS) で、最大加速度を調節して小加震(最大加速度 30gal)、大加震(最大加速度 250gal)の順序で加震する。この条件で、加震力の違いが上部質量の地震応答に及ぼす影響を分析した。

重力場振動実験は、遠心場振動実験で得られた知見を確認するために、大阪大学所有の振動台で行った。

## ②杭の非線形性を考慮した3次元有限要素解析による遠心載荷実験のシミュレーション解析

上部構造、柱、基礎、杭および地盤を、それぞれ三次元 FEM を用いてモデル化し、汎用ソフトである LS-DYNA を用いてシミュレーションを行う。図4にシミュレーション解析モデルを示す。上部構造および基礎はソリッド要素で剛体、柱はビーム要素で弾性体、地盤はソリッド要素で弾塑性体、また、杭はシェル要素で杭頭部を弾塑性体、杭頭部以外を弾性体としている。杭と地盤の要素サイズは加振振動数の通過を考慮し、杭および杭周辺地盤では杭全長の剥離を考慮した接触条件を採用するため、要素サイズをより細かく

した。構造物および地盤の材料定数を表1、2に示す。地盤および上部構造を含めた杭支持建物には、それぞれ一次固有振動数に対して5%となるような質量比例型の各部減衰を設定した。また、地盤の外周上の節点については、深さが等しい節点の x,y 方向の変位が同一となるように設定した。

地盤のせん断弾性係数は、各層の S 波速度は深さの平方根に比例するとし、重複反射理論による次元波動論(Shake)を用いて、小加震時の加速度応答波形が実験結果と対応する係数を求めることで S 波速度を算出した。地盤の非線形特性は、地盤内の応力がモール・クーロンの破壊基準に達することで塑性するような弾塑性体とし、標準的な砂地盤を想定して内部摩擦角 35°、膨張角 5° とした。杭はシェル要素でモデル化を行っている。各杭頭部の初期曲げ剛性は単調載荷実験により得られた曲げモーメント M-曲率φ関係の実験結果の値と等価になるようにヤング係数を設定した。降伏応力や降伏後の塑性硬化係数は、実験結果と整合するように材料定数を設定した。なお、本解析では主要動による応答を把握するため、入力地震動の主要動を含む 23 秒間の解析を行った。以上の条件で、①の遠心載荷実験をシミュレーションし、3次元 FEM 解析の有効性を検討し、杭頭の塑性化の有無が上部構造の地震時挙動に及ぼす影響を分析する。

## ③杭頭が非線形化する場合の応答変位法を用いた杭応力の算出法

図5に解析モデルと地盤のせん断波速度を示す。解析モデルは Penzien 型多質点モデルである。上部質量および基礎は集中質点、柱(板ばね)は線形ばねとしてモデル化する。地盤は 20 層に分割し、地層境界に質量を集中させており、質点同士を非線形せん断ばね(周辺地盤ばね)でつなぐ。杭は曲げ非線形せん断棒でモデル化し、杭と地盤の質点は同じ深さ位置において非線形ばね(杭周地盤ばね)でつなぐ。なお、杭質点に対しては付加質量を考慮していない。上部質量、柱、基礎の質量および上部構造物の基礎固定時の固有振動数は実験を同じ(固有振動数: 2.63Hz)とする。周辺地盤について、建物系の地震応答が地盤応答に影響を及ぼさないような支配面積として 100m × 100m の土柱モデルの質量を設定し、ばねの非線形特性は修正 RO モデルとする。ばねの剛性は図5に示す地盤のせん断波速度から算出する。杭周地盤ばねについて、非線形特性は修正 HD モデルとし、ばねの剛性および耐力はそれぞれ Francis の初期剛性と Broms の極限水平地盤反力とする。杭をモデル化した曲げせん断棒の剛性および耐力は、別途行った杭模型の曲げ試験の結果を用い、トリリニア型の弾塑性モデルと

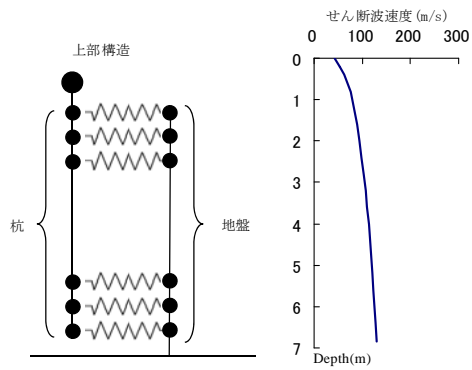


図5 Penzien型モデルと地盤のせん断波速度

する。以上の条件で、杭・地盤が塑性化する条件において、杭応力を算定する方法としてよく用いられる応答変位法の有効性を検討する。

#### 4. 研究成果

##### 1) 杭-地盤系の非線形性が杭基礎建物の地震挙動に及ぼす影響の分析と設計への適用

まず、遠心载荷実験の結果について示す。上部質量の応答について杭頭条件の違いで比較して示す。図6に減衰定数5%における上部質量の加速度応答スペクトルを示す。加震力によらず、周期約0.5秒にスペクトルのピークが見られる。このとき、小加震では杭頭条件が異なってもピーク値に差が見られないが、大加震ではCase1、Case2、Case3の順でピーク値が小さくなっている。図7に地表面に対する上部質量のフーリエスペクトル比(伝達関数)を示す。加震力によらず、Case1、Case2、Case3の順でピーク振動数が小さくなっている。これは杭頭の剛性がCase1、Case2、Case3の順で小さくなることによると考えられる。ここで図7のピーク振動数である約2Hz付近を見ると、小加震では杭頭条件による違いが小さいが、大加震ではCase1、Case2、Case3の順で小さくなっている。

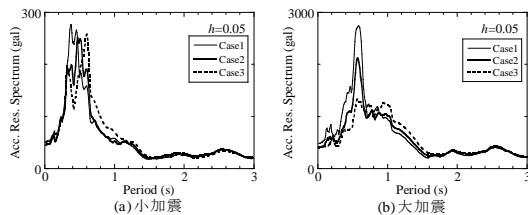


図6 上部質量の加速度応答スペクトル

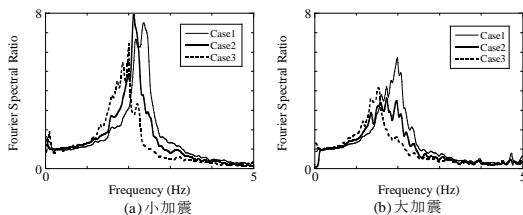


図7 地表面と上部質量のフーリエスペクトル比

る。大加震において図7のピーク振動数付近でフーリエスペクトル比が異なることは図7のピーク値に違いが生じた一因と考えられる。

次に、杭のひずみ状態について示す。図8に杭の最大曲率分布を示す。加震力によらず、杭頭部で曲率が大きくなっている。図9に振動実験における杭頭でのM- $\phi$ 関係を示す。なお、弾性域での杭頭曲げモーメントは曲率に曲げ剛性を乗じることで算出し、塑性域での杭頭曲げモーメントは弾性域にあるひずみ計測値の中で最も浅いものを用いて算出した。大加震ではCase2、Case3で杭頭が塑性化しており、M- $\phi$ 関係はループを描いている。

以上より、入力地震動が大きい場合に杭頭が塑性化すると共に、杭頭条件の違いによって上部質量の応答に違いが生じることを示した。この傾向は重力場振動実験でも認められた。

次に、3次元有限要素法によるシミュレーション解析結果を示す。図10に小加震と大加震により得られた上部質量の加速度応答スペクトルを示す。小加震、大加震共に、解

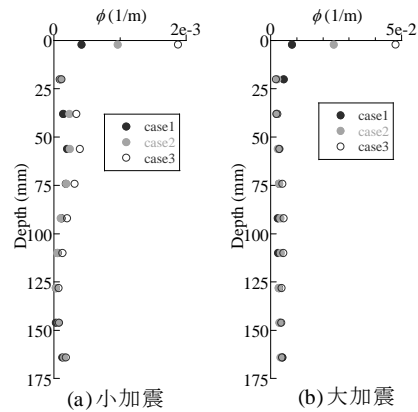


図8 最大曲率分布

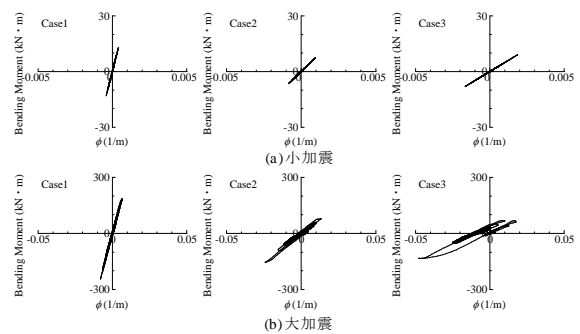


図9 振動実験における杭頭でのM- $\phi$ 関係

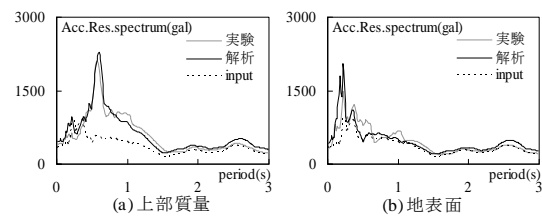


図10 上部質量の加速度応答スペクトル



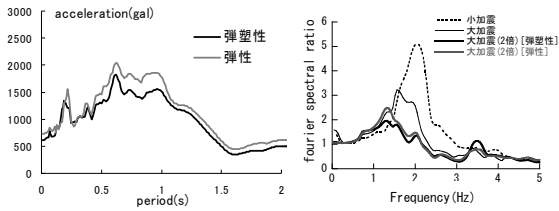


図11 上部質量の加速度応答スペクトル

図12 地表面と上部質量のフーリエスペクトル比

析結果は実験結果と概ね対応している。大加震について、杭頭部を弾塑性とした解析モデルと、弾性とした解析モデルの2つを比較し、杭頭の塑性化が上部質量の地震応答に及ぼす影響について検討する。図11に上部質量の加速度応答スペクトルを示す。加速度の最大値は、弾塑性の場合で約610gal、弾性の場合で約730galとなった。加速度応答スペクトルでは、周期0.5~1.0s近傍において、弾塑性と弾性で約400gal程度の差が見られた。図12に、地表面に対する上部質量の伝達関数を示す。まず、小加震と大加震、大加震の2倍で行った3つの弾塑性の解析結果に着目する。入力地震動が大きくなることで、ピーク振動数や応答倍率が小さくなっていることが確認できる。次に、大加震の2倍で行った弾塑性と弾性の解析結果に着目する。ピーク振動数は弾塑性と弾性の場合でどちらも約1.3Hzとなり、大きな変化は見られない。入力地震動が同じ場合、杭頭部の塑性化を考慮してもピーク振動数は変わらない結果となったが、ピーク振動数における応答倍率は、弾性の場合に比べて約2割低減されている。これは、杭頭部が塑性化し変形が大きくなったことで、杭体自身の減衰が大きくなったと考えられる。以上より、実験に対して三次元FEMを用いてシミュレーションを行い、解析モデルの有効性を確認し、さらに、杭頭の塑性化が建物応答に及ぼす影響を明らかにした。

最後に、杭頭が非線形化する場合の応答変位法の有効性を検討する。遠心振動実験で用いた地盤で静的解析を行った結果を、動的解析の結果と比較する。杭の最大曲率分布を図13に示す。慣性力と地盤変位を同時に作用させて杭曲率を算出した場合において、杭頭部では、同方向に作用させた結果が動的結果を上回っている。地中部では、逆方向に作用させた結果が動的結果を上回っている。よって、同時に作用させた静的解析の結果は、同方向と逆方向の両者の最大値をとることで、動的解析の結果を包絡する分布となっている。一方、個々に作用させて算出した場合において、杭頭部では、単純和とSRSSによる杭曲率は動的解析の結果より小さくなっている。以上より、同時に作用させた静的解析の結果は、動的解析の結果を包絡する分布となった。このことから、同位相と逆位相の両者の最大値より、杭曲率を評価することは十分可能である。また、

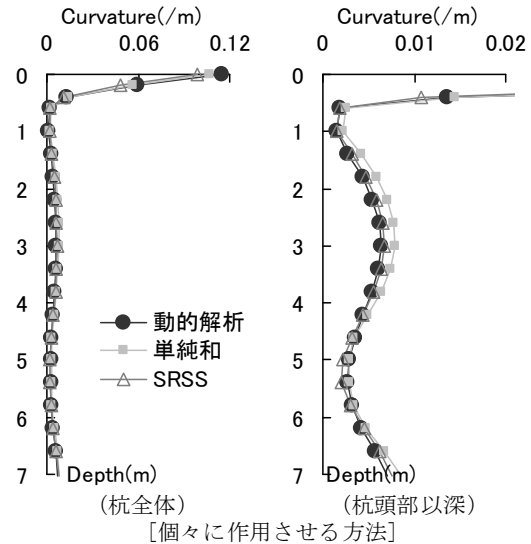
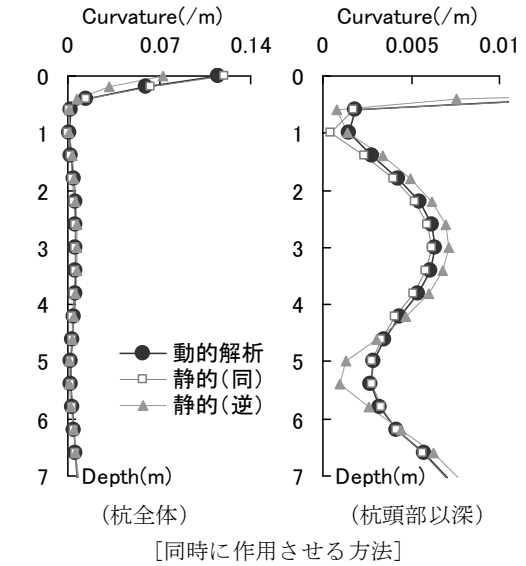


図13 杭の最大曲率（遠心振動実験）

杭頭慣性力と地盤変位を個々に作用させて重ね合わせる場合、杭頭部では、非線形性の進行具合の異なるものを重ね合わせるため、動的解析よりも過小評価となる恐れがあることを明らかにした。

(参考文献) 1)建設省建築研究所：平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書，1996。2)大西良広：大阪府・市による内陸地震の予測地震動，シンポジウム「大阪を襲う内陸地震に対して建物をどう耐震設計すればよいか？」資料，日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会，pp.1-8，2008.3。3) 富永晃司、山本春行、染川常二：鉛直力を受ける群杭の水平挙動に関する模型実験，日本建築学会構造系論文報告集，No.394，pp.130-140,1988.12。4)勝二理智，柏尚稔，林康裕，吹田啓一郎，倉田高志：大振幅水平載荷実験に基づく杭-地盤系の非線形挙動のシミュレーション解析，構造工学論文集，Vol54-B，pp.37-44，2008.3。

## 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2件)

- 1) 秀川貴彦,岸本美季,柏尚稔,宮本裕司,田村修次: 杭-地盤系の非線形性を考慮した杭基礎建物の地震応答性状, 日本建築学会構造系論文集, No.661, pp.491-498, 2011.3. (査読あり)
- 2) 柏尚稔, 勝二理智, 林康裕:砂質地盤における杭-地盤系の強非線形性を考慮した群杭の杭頭水平地盤ばね評価手法, 日本建築学会構造系論文集, No.651, pp.957-966, 2010.5. (査読あり)

〔学会発表〕(計4件)

- 1) 柏尚稔, 秀川貴彦, 岸本美季, 宮本裕司: 杭-地盤の非線形性を考慮した杭基礎建物の地震応答性状 その1: 遠心載荷実験, 日本建築学会大会(富山), 2010.9.9.
- 2) 岸本美季, 秀川貴彦,柏尚稔,宮本裕司: 杭-地盤の非線形性を考慮した杭基礎建物の地震応答性状 その2: 三次元有限要素解析による実験シミュレーション, 日本建築学会大会(富山), 2010.9.9.
- 3) 秀川貴彦, 岸本美季,柏尚稔,宮本裕司: 杭-地盤の非線形性を考慮した杭基礎建物の地震応答性状 その3: 杭の非線形性が地震応答に及ぼす影響, 日本建築学会大会(富山), 2010.9.9.
- 4) 柏尚稔, 勝二理智, 林康裕, 吹田啓一郎: 乾燥砂地盤における群杭の大振幅水平載荷実験 その9: 杭-地盤系の非線形性を考慮した群杭の水平抵抗力の評価, 第43回地盤工学研究発表会(横浜), pp.1163-1164, 2009.8.19.

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

柏 尚稔 (KASHIWA HISATOSHI)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号: 40550132