

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24年6月14日現在

機関番号：82102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560531

研究課題名（和文） 建設費の増大を必要としない高耐震性を有する斜杭基礎工法の研究開発

研究課題名（英文） Research of high seismic performance of batter-pile foundation method without a rise in construction cost

研究代表者 佐藤 正義（SATO MASAYOSHI）

独立行政法人防災科学技術研究所・社会防災システム研究領域・総括主任研究員

研究者番号：80450261

- (1) 研究成果の概要（和文）：本研究では、斜杭基礎を有する構造物-地盤系のモデルを作成して遠心振動実験およびその数値シミュレーションにより、その耐震性能を評価する。そして、斜杭基礎を用いることによりコスト的に優位性があるかどうかを検討した。研究の結果、斜杭基礎による耐震性能の向上に関して、フーチングの地震時応答は、直杭基礎の場合よりも小さくなるため、これにより上部構造物に対する耐震設計は好条件となることが分かった。

研究成果の概要（英文）：It was carried out dynamic centrifuge tests and numerical simulations to evaluate the seismic behavior of soil-structure systems with batter-pile foundations. And, it was examined whether the systems would be predominant in cost by using the batter-pile foundation. Through a comparison of displacement response of the footing, the displacement response of the batter-pile foundation was smaller than that of the vertical pile. Therefore, The super structure systems of the batter-pile is good condition on a aseismic deign.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：地震、地盤工学、耐震、斜杭基礎、直杭基礎、遠心振動実験

1. 研究開始当初の背景

軟弱地盤における構造物の基礎工法としては、工期と工費の利点から杭基礎が最も良く用いられる。杭基礎に斜杭を用いれば水平剛性を向上させることができることから、大きな水平外力が作用する地震時の耐震性は向上するはずである。しかし、杭基礎のほとんどが直杭であり、斜杭が採用されることは非常に少ない。斜杭が採用されない理由としては、第一に地盤沈下が生じた場合、それに伴う曲げや軸力が作用して、基礎構造としての安全性を脅かす、第二に地震時に大きな押

し込み・引き抜き力を生じさせる可能性がある、第三に都市部の建物では隣地境界の制約で、斜杭を用いることが困難な場合がある、第四に斜杭基礎の地震時挙動の解明が十分でなく、斜杭を用いることの長所・短所が明確になっていない、といったことが挙げられる。一方で、近年、耐震性に優れ、しかも安価でかつ施工が容易な杭基礎工法が強く要望されており、これらを満足する工法の一つとして斜杭が注目されはじめ、斜杭の精度の良い施工法の開発と同時に、斜杭に関する地震時挙動特性に関する研究が行われてきて

いる。地震観測とその数値解析に基づくもの、3次元のFEM解析や遠心振動実験によるもの等も見られるが、直杭基礎の耐震性の研究が過去30年以上にわたって精力的に実施されてきたのに対し、斜杭基礎については十分に研究がなされていると言い難い面がある。

2. 研究の目的

斜杭基礎を有する構造物-地盤系のモデルを作成して遠心振動実験およびその数値シミュレーションにより、その耐震性能を評価して、斜杭基礎を用いることで発生断面力によりコストが優位となるかどうかを検討する。

3. 研究の方法

(1) 実験ケース 1

実験ケース1の遠心振動実験の試験体外観を写真1に、実験モデルと計器配置を図1に示す。斜杭基礎の地震時挙動特性を明らかにするには、同じ入力地震動の下で、直杭基礎との地震時応答と対比することにより、定量的かつ定性的な議論が可能となる。そのため、本研究では写真2に示すように、直杭基礎と斜杭基礎をせん断土槽内に並行に設置し、二つの実験モデルを同じ土槽内で同時に加振するという方法を採用した。ここで、想定する実物に対する模型の縮尺比は1:30であるため、遠心加速度は30gである。遠心振動実験に用いたせん断土槽は、内寸法で長さ807mm、幅475mm、高さ320mmで、杭本数は直杭基礎・斜杭基礎ともに4本、杭頭および杭先端は、それぞれフーチング・土槽底面に剛接合とした。斜杭の傾斜角度は10度である。地盤



写真1 遠心振動実験の試験体外観

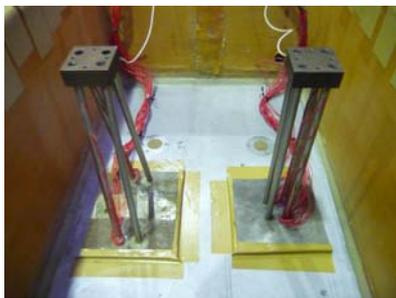


写真2 斜杭基礎（左）と直杭基礎（右）の模型

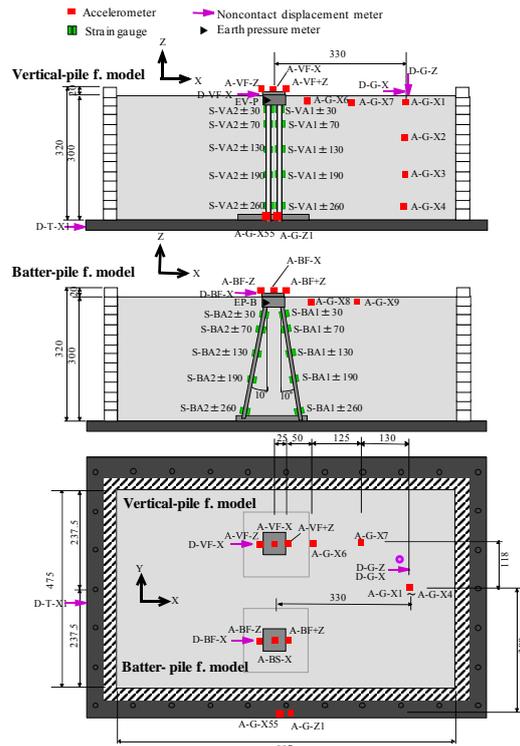


図1 実験モデルと計器配置

は、7号珪砂を乾燥砂で作成し、相対密度 $Dr=60\%$ 、地盤深さは300mm（実寸法で9.0m）の一層地盤とした。

図2は直杭基礎と斜杭基礎のフーチングの回転特性を調べるため、3.5Hzの正弦波10波加振、目標最大加速度200Gal入力で加振した場合のフーチングの水平変位と回転角の時刻歴を示している。図によると、直杭基礎はフーチングが水平方向に変位すると、その方向にお辞儀するような回転動を呈するのに対し、斜杭基礎は直杭基礎の場合とは逆の回転動になっていることが分かる。図3は正弦波箒掃引加振における基礎加速度に対するフーチングの周波数伝達関数である。斜杭基礎は直杭基礎よりも、周波数伝達関数の全周波数領域において小さくなっており、斜杭基礎の耐震性能が向上していることが分かる。

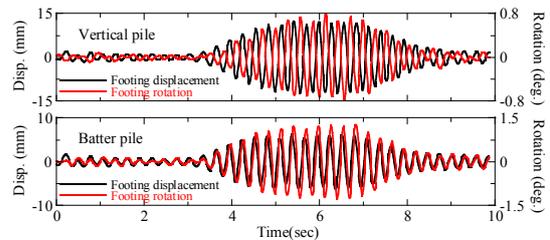


図2 直杭と斜杭のフーチングの水平変位と回転角

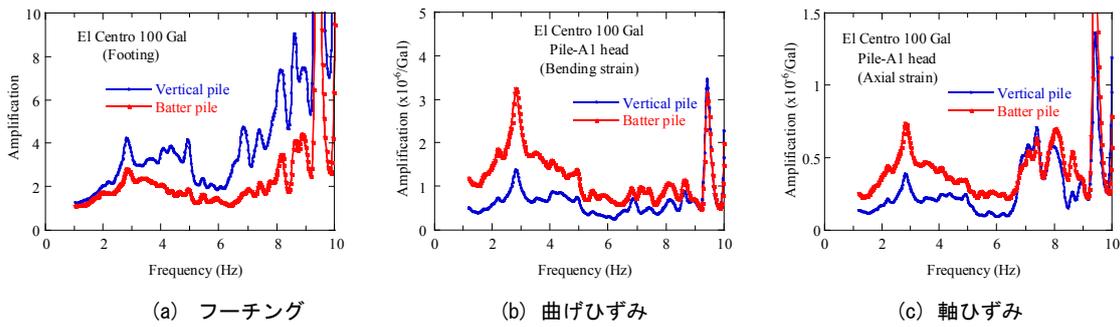


図3 基盤加速度に対するフーチングおよび杭頭ひずみの周波数伝達関数

図3は、EL-Centro 波100Gal加振における基盤加速度に対するフーチングおよび杭頭ひずみの周波数伝達関数である。(a)はフーチングにおける直杭基礎と斜杭基礎の比較であるが、斜杭基礎は直杭基礎よりも、周波数伝達関数の全周波数領域において小さくなっており、斜杭基礎の耐震性能が向上していることが分かる。(b)は杭頭における曲げひずみ、(c)は軸ひずみの比較であり、直杭基礎および斜杭基礎の基盤入力に対する杭頭における曲げひずみと軸ひずみの周波数応答関数である。曲げひずみ、軸ひずみともに斜杭基礎の方が直杭基礎より全周波数領域において大きく、特に周波数伝達関数がピークを示す2.8Hzにおいて曲げひずみは約3倍、軸ひずみは約2倍になっていることが分かる。

(2) 実験ケース2

実験ケース2は、基本的にはケース1と同様であるが、実験に用いたせん断土槽は、内寸法で長さ770mm、幅475mm、高さ379mmで、杭本数は直杭基礎・斜杭基礎ともに9本、杭頭はフーチングとに剛接合、杭先端は土槽底面にピン結合とした。斜杭の傾斜角度はすべて15度である。地盤は、7号珪砂を乾燥砂で作成し、相対密度 $D_r=60\%$ 、地盤深さは322mm(実寸法で9.66m)の一層地盤とした。主な違いは写真3に示すように、杭本数は直杭基礎・斜杭基礎ともに9本としたこと、上部構造物の条件を4種類変化させ、(a)構造物無し、(b)長周期の構造物、(c)短周期の構造物、(d)剛体構造



写真3 斜杭基礎(左)と直杭基礎(右)の模型

物の場合としたことである。

図4は、正弦波掃引加振(1~10Hz、加速度15Gal)の基盤加速度に対するフーチングの周波数伝達関数である。(a)の約3.0Hzに見られるピークは地盤の1次固有振動数、(b)の約1.6Hzのピークは構造物の固有振動数によるものである。(c)は地盤の固有振動数位置ではなくそれより低い振動数位置、直杭基礎は約1.9Hz、斜杭基礎は約2.2Hzにピークが見られる。共通して約6~7Hzに見られるピークは、杭-地盤系の固有振動数によるものではないかと考えられる。

構造物無しにおける正弦波5Hz加振の時刻歴を図5に示す。上から、(a)フーチング加速度、杭頭の(b)曲げひずみ及び(c)軸ひずみ、(d)直杭基礎及び(e)斜杭基礎のフーチング水平変位と回転角である。同様に、剛体構造物における正弦波3Hz加振の時刻歴を図6に示す。

直杭基礎と斜杭基礎のフーチングの水平加速

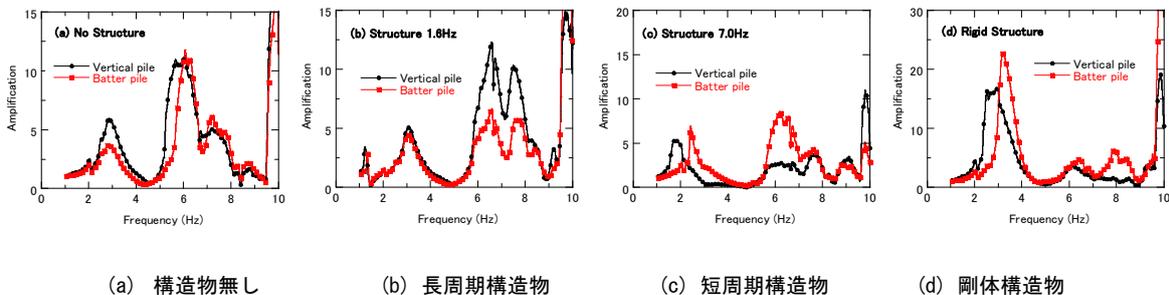


図4 基盤入力波に対するフーチングの加速度応答の周波数伝達関数(正弦波掃引加振1~10Hz、加速度15Gal)

度応答に関しては、図5、図6ともに概ね同じであるため、フーチングの水平変位による杭頭の曲げひずみは両者で同程度である。図5の曲げひずみは斜杭基礎のほうが直杭基礎よりもかなり大きい。図6では斜杭基礎と直杭基礎は同程度である。軸ひずみに関しては、図5と図6ともに、斜杭基礎と直杭基

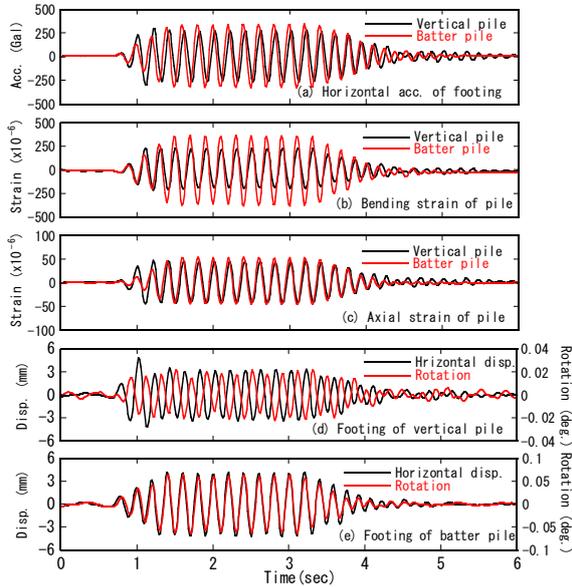


図5 構造物無しにおける正弦波 5Hz 加振の時刻歴

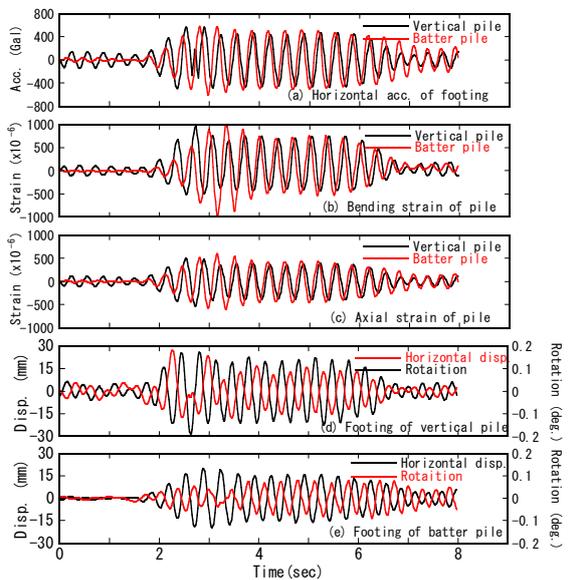


図6 剛体構造物における正弦波 3Hz 加振の時刻歴

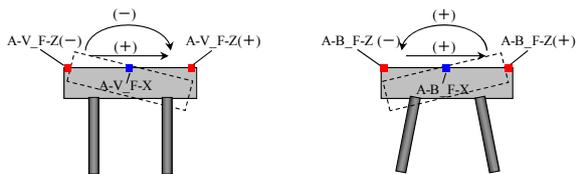


図7 直杭と斜杭のフーチングの水平変位と回転角の符号

礎は同程度である。図7にフーチングの水平変位と回転角の符号の定義を示す。図5の(d)では直杭基礎のフーチング水平変位と回転角は逆位相であり、フーチングが変位した方向にお辞儀するような回転になるのに対し、(e)の斜杭基礎では直杭基礎の場合とは逆の回転でフーチングは反りあがる回転になっていることが分かる。一方、図6の(d)直杭基礎と(e)斜杭基礎では、フーチング水平変位と回転角は両者ともに逆位相となっている。これにより、構造物無しの場合、斜杭基礎はフーチングが変位した方向にお辞儀するような回転になるのに対し、剛体構造物の場合は、構造物の慣性力により、フーチングが反りあがる回転を押さえ込んで、直杭基礎と同じ方向の回転になっている。一般に、フーチングが変位した方向にお辞儀するような回転になると杭頭曲げモーメントは緩和されるので、剛体構造物の場合、斜杭基礎で曲げモーメントが緩和されて、曲げひずみが小さくなったものと考えられる。

(3) 実験ケース1の数值解析

実験ケース1の数值解析モデルを図8に示す。解析は、2次元FEM動的解析手法を用いており、直杭基礎と斜杭基礎をそれぞれモデル化し、2断面で実施した。フーチングは

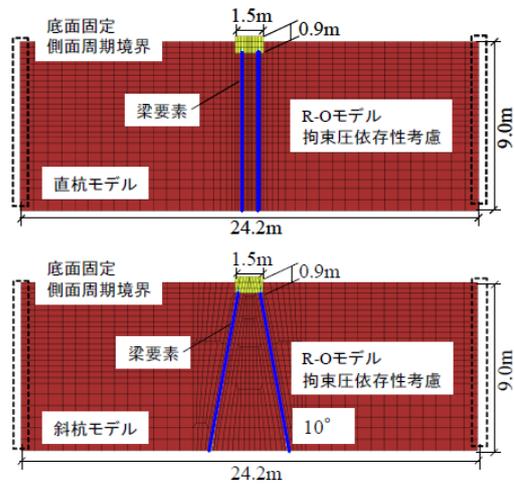


図8 実験ケース1の数值解析モデル

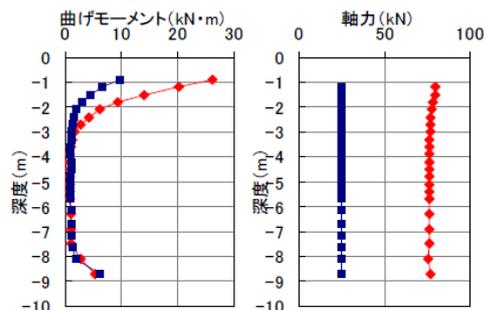


図9 曲げモーメントと軸力の深度分布

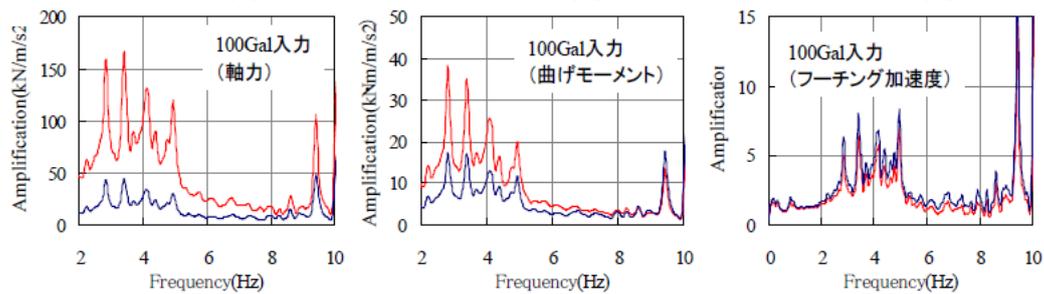


図10 軸力と曲げモーメントおよびフーチングの周波数応答関数

ソリッド要素、模型杭は梁要素でモデル化し、模型杭の非線形性は特に考慮しなかった。解析モデルの底面境界条件は固定とし、側面の境界条件は遠心振動実験ではせん断土槽を用いていることから、周期境界（側面の節点と同変位）を用いた。地盤は、初期せん断剛性の拘束圧依存性と非線形性が考慮できるモデルとした。地盤の拘束圧依存性は、珪砂7号の中空ねじり試験から得られた初期剛性 G_0 と平均主応力の関係から、 $K_0=0.3$ 状態の試験結果に準じた。地盤の非線形特性は、Ramberg-Osgoodモデルにより表現した。

杭基礎の最大曲げモーメントと軸力の深度分布を図9に示す。直杭基礎に対比し回転動が卓越する斜杭基礎の断面力が大きくなっている。これは、斜杭の地盤変形に対する抵抗が増すためである。図10はEL-Centro加振($\alpha_{max}=100Gal$)における入力加速度に対する杭頭の軸力と曲げモーメントおよびフーチングの周波数伝達関数で、それぞれ直杭と斜杭基礎について比較したものである。図によれば、入力加速度に対するフーチングの応答加速度の周波数伝達関数は、全周波数領域において斜杭基礎が小さくなっており、斜杭基礎は直杭基礎と比較し、加速度応答を低減する効果が得られている。これは、斜杭基礎は地盤変形に対する水平抵抗が増加することによって解釈できる。一方、杭頭における軸力と曲げモーメントの周波数伝達関数は、全周波数領域において斜杭基礎が直杭基礎を上回っている。これらの結果は、遠心振動実験と整合性のある結果である。

4. 研究成果

本研究により、以下の成果が得られた。

- (1) 斜杭基礎による耐震性能の向上として、フーチングの地震時応答は、直杭基礎の場合よりも小さくなるため、これにより上部構造物に対する耐震設計は好条件となることが分かった。
- (2) 上部構造物が剛体構造物のように大きな慣性力が発生する場合、直杭基礎はフーチングが水平方向に変位すると、その方向にお辞儀をするような回転をするのに対し、斜杭基礎は直杭基礎の場合と

同じの回転をして、曲げひずみを緩和し、杭の断面力が小さくなるので、経済的な杭の設計ができる可能性があることが分かった。

- (3) 斜杭基礎の数値解析は、構造物の地震時応答と杭の断面力において、遠心振動実験と整合性のある結果が得られており、斜杭基礎の耐震性を検討するのに有効な手段であると言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

- ① 佐藤正義、田地陽一、張 至鎬、田蔵 隆、直杭基礎との比較による斜杭基礎の耐震性能に関する遠心振動実験、防災科学技術研究所 研究報告、査読無、No.79、2012、1-8、http://dil.bosai.go.jp/publication/nied_report/index.html
- ② Masayoshi Sato and Kentaro Tabata, LATERAL SPRADING DAMAGE TO SHEET-PILE WAALLS AND PILE FOUNDATIONS REPRODUCED BY TSUKUBA LARGE-SCALE SHAKE TABLE, Journal of Earthquake and Tsunami, 査読有、Vol.5、No.3、2011、231-240、DOI: 10.1142/S1793431111001078
- ③ 佐藤正義、地盤一杭一構造物系の大型せん断土槽実験を対象とした遠心振動実験による再現、防災科学技術研究所 研究報告、査読無、2010、No.77、7-18、http://dil.bosai.go.jp/publication/nied_report/index.html
- ④ 田蔵 隆、佐藤正義、張 至鎬、護岸背後の杭基礎構造物の被災原因と斜杭による側方流動対策法に関する遠心振動実験研究、地盤工学会誌、査読有、58-11(634)、2010、29-32、<http://ci.nii.ac.jp/naid/110007880389>
- ⑤ 佐藤正義、田端憲太郎、阿部秋男、大型土槽による護岸矢板と杭基礎の側方流動実験及び遠心振動実験による再現、土木学会論文集 C、査読有、Vol.65、No.4、2009、834-845、

<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jscejc/65/4/contents/-char/ja/>

- ⑥ 佐藤正義、田端憲太郎、矢板護岸と杭基礎の側方流動による破壊メカニズムに関する大型土槽実験、地盤工学ジャーナル、査読有、Vol.4、No.4、2009、259-271、https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jgs/4/0/_contents/-char/ja/

〔学会発表〕(計14件)

- ① T. Tazoh, M. Sato, J. Jang & Y. Taji, SEISMIC BEHAVIOR OF BATTER PILE FOUNDATION: KINEMATIC RESPONSE: Centrifuge Tests and Analytical Study, Proc. 4th Greece – Japan Workshop on Seismic Design, Observation and Retrofit of Foundations, 2011.10.06, Kobe, Japan.
- ② 佐藤正義、田地陽一、張至鎬、田蔵隆、直杭基礎との比較による斜杭基礎の耐震性能に関する遠心振動実験、第46回地盤工学研究発表会、2011.07.05、神戸。
- ③ Masayoshi Sato, Kentaro Tabata and Abe Akio, REPRODUCTION BY DYNAMIC CENTRIFUGE MODELING FOR E-DEFENSE LARGE-SCALE SOIL STRUCTURE INTERACTION TESTS, The 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 2011.01.12, Santiago, Chile.
- ④ 佐藤正義、張至鎬、田蔵隆、遠心振動実験による斜杭基礎のキネマチック地震時挙動特性、土木学会第65回年次学術講演会Ⅲ、2010.09.02、札幌。
- ⑤ 佐藤正義、張至鎬、田蔵隆、直杭基礎との比較による斜杭基礎の耐震性評価(その1 遠心振動実験によるキネマティックインターアクションの検討)、第45回地盤工学研究発表会、2010.08.19、松山。
- ⑥ 張至鎬、佐藤正義、田蔵隆、直杭基礎との比較による斜杭基礎の耐震性評価(その2 数値解析によるキネマティックインターアクションの検討)、第45回地盤工学研究発表会、2010.08.19、松山。
- ⑦ Masayoshi Sato and Kentaro Tabata, THE BEHAVIOR OF LIQUEFACTION INDUCED LATERAL SPREADING OF LARGE-SCALE MODEL GROUND AND A PILE-FOUNDATION STRUCTURE USING E-DEFENSE, 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering, 2010.07.27, Tronto, Canada.
- ⑧ Kentaro Tabata and Masayoshi Sato, E-DEFENSE SHAKING TABLE TESTS ON THE BEHAVIOR OF A PILE-FOUNDATION STRUCTURE IN FULL-SCALE MODEL GROUND UNDER MULTI-DIMENSIONAL MOTIONS, 9th

U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering, 2010.07.27, Tronto, Canada.

- ⑨ T. Tazoh, M. Sato and J. Jang, SEISMIC BEHAVIOR OF BATTER PILE FOUNDATION: KINEMATIC RESPONSE, Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 2010.05.26, San Diego, USA.
- ⑩ M. Sato and K. Tabata, Lateral spreading damages to sheet-pile wall and pile foundation using Tsukuba large-scale shake table, Proc. International Symposium on Advances in Urban Safety, 2010.03.28, Kobe, Japan.
- ⑪ T. Tazoh, M. Sato, J. Jang, Y. Taji & G. Gazetas, Kinematic interaction of seismic behavior of batter pile foundation using centrifuge tests, Proc. International Symposium on Advances in Urban Safety, 2010.03.28, Kobe, Japan.
- ⑫ M. Sato and K. Tabata, Large-scale Shake Table Tests on Lateral Spreading of Sheet-pile Quay Wall and Pile Foundation, Proc. 3rd Greece – Japan Workshop on Seismic Design, Observation and Retrofit of Foundations, 2009.09.23, Santrini, Greece.
- ⑬ T. Tazoh, M. Sato and Y. Taji, Kinematic Nature on Seismic Behavior of Batter Pile Foundation: Centrifuge Tests, Proc. 3rd Greece – Japan Workshop on Seismic Design, Observation and Retrofit of Foundations, 2009.09.23, Santrini, Greece.
- ⑭ 佐藤正義、田地陽一、田端憲太郎、E-ディフェンス大型円筒形土槽を用いた地盤-杭-構造物系実験に関する遠心振動実験による再現、土木学会第64回年次学術講演会Ⅲ、2009.09.03、福岡。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 正義 (SATO MASAYOSHI)
独立行政法人防災科学技術研究所・社会防災システム研究領域 災害リスク研究ユニット・総括主任研究員
研究者番号：80450261

(2) 研究分担者

田端 憲太郎 (TABATA KENTRO)
独立行政法人防災科学技術研究所・減災実験研究領域 兵庫耐震工学研究センター・主任研究員
研究者番号：30282958