

機関番号：14301

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20560520

研究課題名 長周期地震動に対する免震建物の杭基礎の耐震性

研究課題名 Response of base-isolated structure and pile stress during long period ground motions

研究代表者

田村 修次 (TAMURA SHUJI)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：40313837

研究成果の概要 (和文)：液状化地盤における免震構造物の応答および杭応力を、遠心載荷実験および数値解析で検討し、以下のことを示した。液状化地盤では杭剛性が高いと基礎部応答は基盤応答に近く、杭剛性が低いと基礎部応答は地表面応答に近くなる。そのため、免震周期が液状化地盤の卓越周期に近い場合、高剛性杭の上部構造物加速度および免震層変位は低剛性杭のそれより小さく、高剛性杭が免震建物に適していると考えられる。

研究成果の概要 (英文)：To investigate the response of base-isolated structures and pile's stress, dynamic centrifuge tests and numerical analysis were performed. The seismic response of the footing supported by the high rigidity piles was more similar to the input motion than that of the footing supported by the low rigidity pies. Therefore, the high rigidity pile reduced the superstructure acceleration amplitude and the shear deformation of the seismic isolator, when the predominant period of the soil was close to the natural period of the superstructure.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：建築基礎構造、地盤地震工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：杭基礎、長周期地震動、免震建物、耐震性、液状化

## 1. 研究開始当初の背景

近年、ウォーターフロントの開発が進み、軟弱地盤における杭基礎の超高層免震建物の建設が増加している。一方、南海・東南海地震等の海溝型巨大地震の発生が切迫していることも指摘されている。これらの海溝型巨大地震では、長周期地震動が長時間継続することが想定されている。このような長周期

地震動では、免震建物の上部構造物のみならず、杭基礎にとっても非常に厳しいことが想定される。例えば、長周期地震動における免震建物の応答は、一般的な短周期地震動に比べて大きくなるため、杭頭に作用する上部構造物慣性力が大きくなることが予想される。また、軟弱地盤では地盤変位も大きくなり、地盤が杭に外力として作用する可能性が高

くなる。さらに、継続時間が長いことは、液状化した状態も長くなることを意味し、ウォーターフロントでは大規模な側方流動が発生しやすくなると考えられる。これらの要因により、免震建物の杭基礎が破壊した場合、免震装置によって上部構造体が健全でも、上部構造物は傾斜し修復困難になる。また、アスペクト比が大きい超高層免震建物の場合、P-Δ効果により、さらに傾斜が進行する可能性がある。以上のように、軟弱地盤における杭基礎の超高層免震建物の建設が進み、海溝型巨大地震の発生が切迫している状況を考えると、長周期地震動に対する免震建物の杭基礎の耐震性の向上が急務である。しかし、免震建物の杭基礎の耐震性に関する研究例は極めて少ないのが現状である。

## 2. 研究の目的

### (1) 長周期地震動における免震建物応答と杭基礎の挙動

杭-基礎部-上部構造物系の遠心載荷実験を、上部構造物の固有周期、杭基礎の剛性、地盤条件（乾燥砂、液状化地盤）をパラメータにして加振実験を行う。これより、長周期地震動における免震建物の応答および杭基礎の挙動を検討する。また、どのパラメータが免震建物の杭基礎に最も影響を及ぼすかを明らかにする。また、免震建物を模擬した1質点系の時刻歴応答解析を行い、杭剛性が上部構造物の応答および免震層変位に及ぼす影響を検討する。

### (2) 基礎部に作用する土圧・側面摩擦力

杭基礎構造物の地震時挙動および耐震設計をするうえで、基礎部に作用する土圧・摩擦力の評価が重要である。本研究では、地震時土圧のみならず壁面摩擦角、摩擦力と側圧を計測し、土圧や摩擦力のメカニズムを明らかにし、既往の地震時土圧モデル、地盤と構造物の摩擦モデルを拡張して、土圧および摩擦力のシュミレーションを可能とする。

### (3) 長周期地震動における杭応力の予測

地震土圧理論、地盤と構造物の摩擦理論を応答変位法に組み込むことで、土圧・側面摩擦力の大きさのみならず、それと構造物慣性力の位相を推定する手法を提案する。それより、基礎部に作用する土圧合力、側面摩擦力を考慮し、長周期地震動における杭応力算定法を確立する。

### (4) 免震建物の応答を考慮した最適な杭基礎

免震建物の杭基礎に最も重要な性能は、地震時に杭が破壊して上部構造物が沈下・傾斜しないことである。それを考慮し、現在の免震建物の杭基礎は一般建物のそれに対して、やや高い剛性にすることが多い。ただし、液状化した地盤では、杭の剛性が高いほど地盤から杭に作用する外力は大きくなる傾向をしめす。一方、液状化地盤のように地盤剛性が

極めて小さい地盤では、杭基礎の剛性が上部構造物の応答に影響する可能性がある。このことは、上部構造物の応答特性を考慮し、杭の設計をすることで、免震建物の応答を減らせることを示唆している。そこで、杭が破壊せずに、上部構造物の応答も減少させる杭基礎の条件を検討する。

## 3. 研究の方法

### (1) 地盤-杭-基礎部-免震建物の動的遠心載荷実験

従来の上部構造物を板バネで支持する模型では、遠心載荷実験用の長周期模型は制作できない。そこで、構造物の底面をローラーで支持し、基礎部に固定したパネルと上部構造物の間に板状のゴムを設置することで、免震建物を模擬した模型を制作した。上部構造物の基礎固定時の固有周期は0.125s(実大スケールで5.0s)である。次に、長周期地震動に対する液状化地盤における免震建物の杭基礎の応答特性を明らかにするため、図1に示すような地盤-杭-構造物模型で遠心載荷実験を下記のパラメータで行い、免震建物の最適な杭条件を検討した。

① 地盤条件（密な乾燥砂、緩い乾燥砂、密な飽和砂、緩い飽和砂）

② 杭基礎（高剛性、低剛性）

③ 上部構造物の固有周期（長周期、短周期）  
また、根入れされた基礎部の主働・受働面および側面に、超小型二方向ロードセルを設置して土圧、壁面摩擦力、側圧および側面摩擦力を計測した。これより、地震時土圧、地震時側面摩擦力のメカニズムを検討した。

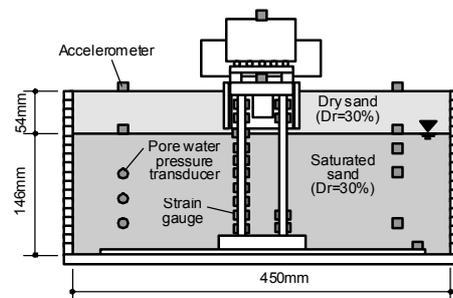


図1 実験模型およびセンサー配置

### (2) 免震構造物を模擬した応答解析

液状化地盤における免震構造物では、免震層に過大な変形が生じる可能性がある。そこで、杭剛性が免震層変位に及ぼす影響を、免震建物を模擬した1質点系の時刻歴応答解析で検討した。図2に示すように免震層はアイソレータとダンパーでモデル化し、アイソレータの復元力特性を弾性、ダンパーの復元力特性を完全弾塑性とした。上部構造物慣性力が基礎部の応答に及ぼす影響は小さいと仮定し、実験で得られた基礎部加速度を入力加速度に用いた。

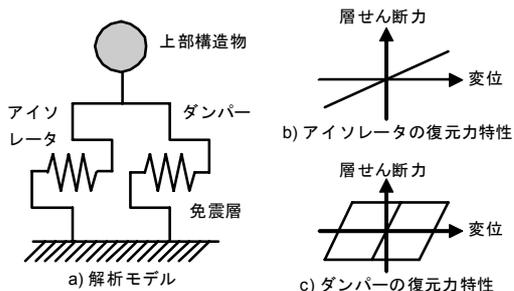


図2 解析モデルおよび免震層の復元力特性

### (3) 基礎の根入れ効果を考慮した免震建物の杭基礎の簡易応力評価法

図3に示すように、基礎根入れ部に作用する土圧・側面摩擦力を考慮し、免震建物における簡便かつ合理的な杭応力算定法を提案した。また、その妥当性を遠心載荷実験で得られた土圧・側面摩擦力、杭応力を比較し、検討する。

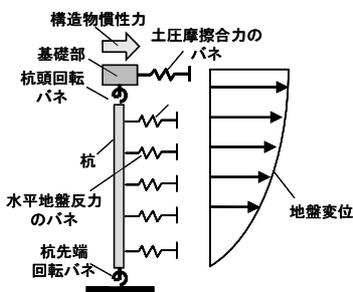


図3 基礎の根入れ効果を考慮した応答変位法

## 4. 研究成果

長周期地震動における免震建物の杭基礎の挙動に関する知見を以下に示す。

(1) 免震周期が地盤の卓越周期と異なる場合、低剛性杭の杭頭および杭先端せん断力は、高剛性杭のそれらより小さくなった。これは、低剛性杭の地盤と基礎部の相対変位が高剛性杭のそれより小さくなり、低剛性杭の基礎部に作用する土圧摩擦合力が高剛性杭のそれより小さくなったためである。

(2) 図4は地盤の卓越周期が3秒における免震周期と上部構造物加速度の関係である。高剛性杭における上部構造物加速度は、低剛性杭のそれより小さくなった。これは、杭剛性が高いほど基礎部の挙動は振動台の挙動

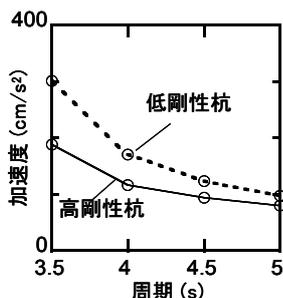


図4 免震周期と上部構造物の最大加速度の関係

に近づき、杭剛性が低いほど基礎部の挙動は地表面の挙動に近づくため、地表面加速度の振幅が大きい2秒から5秒付近の周期帯において、高剛性杭の基礎部加速度の振幅が低剛性杭のそれよりも小さくなったためと考えられる。

(3) 図5は地盤の卓越周期が3秒における免震周期と免震層変位の関係である。免震周期が地盤の卓越周期に近くなると、免震層変位は大きくなった。この傾向は低剛性杭で顕著であった。また、構造物慣性力が大きいと、低剛性杭の曲げモーメントは高剛性杭のそれと同程度となる。これから、免震周期が地盤の卓越周期に近いと想定される場合、高剛性杭が適していると考えられる。

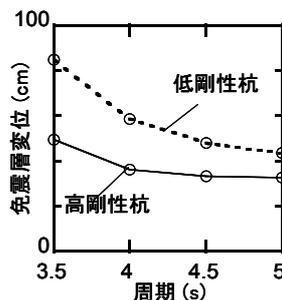


図5 免震周期と免震層の最大変位の関係

基礎部に作用する土圧・側面摩擦力に関する知見を以下に示す。

(4) 繰り返し加振によって、受働側の土圧と壁面摩擦力が増加する。ただし、壁面摩擦係数は概ね一定である。図6、7に基礎部と自由地盤の相対変位と基礎部の左右の主働・受働面に作用する土圧、壁面摩擦力の関係を示す。壁面摩擦力は、主働側で下向き、受働側で上向きに作用し、土圧係数が1のときに、壁面摩擦力はゼロになる。主働側と受働側で壁面摩擦係数は概ね同じである。

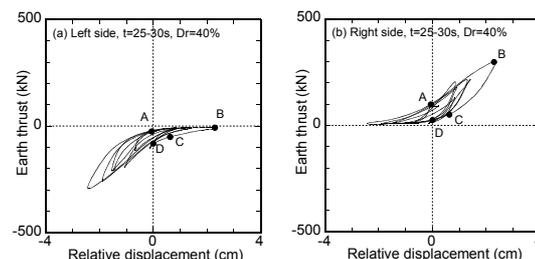


図6 相対変位と土圧の関係

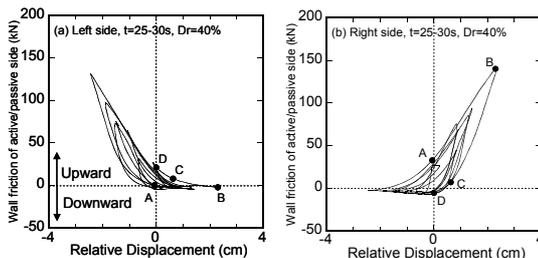


図7 相対変位と壁面摩擦力の関係

(5) 地震土圧理論、地盤と構造物の摩擦理論を応答変位法に組み込むことで、土圧・側面摩擦力の大きさのみならず、それと構造物慣性力の位相を推定する手法を提案した。図8に基礎部と自由地盤の相対変位と土圧合力の関係を示す。土圧合力のみならず側面摩擦力も考慮することで、理論土圧摩擦合力は、遠心載荷実験の結果と良く対応した。また、図9に杭頭曲げモーメント最大時における実験および理論で得られた土圧摩擦合力を示す。なお、杭に作用する水平地盤反力の低減係数 $\alpha, \beta$ は0.01, 0.1, 0.2とした。水平地盤反力の低減係数によらず、応答変位法で土圧摩擦合力が精度良く推定できることが分かる。

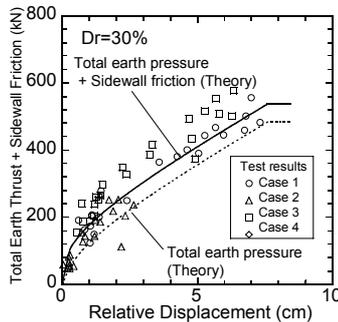


図8 相対変位と土圧摩擦合力の関係

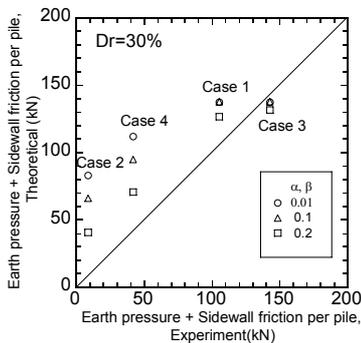


図9 水平地盤反力の低減係数と実験および解析で得られた土圧摩擦合力

長周期地震動における杭応力についての知見を以下に示す。

(6) 図10に示すように地震時土圧と側面摩擦力を無視した場合、水平地盤反力係数の低減係数によらず、杭の曲げモーメントおよびせん断力の実測値を応答変位法で説明することは難しい。図11に示すように地震時土圧と側面摩擦力を考慮した場合、杭頭曲げモーメントの推定値は実測値と概ね対応し、水平地盤反力の低減係数の感度は比較的小さい。一方、杭先端のせん断力を評価するためには、地震時土圧と側面摩擦力のみならず、精度の高い低減係数の設定が必要である。

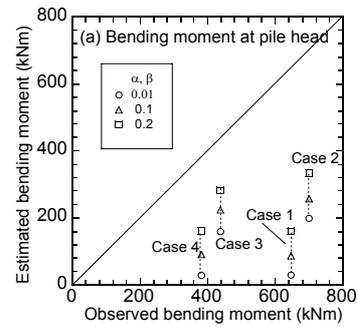


図10 水平地盤反力の低減係数と実験および解析で得られた杭頭曲げモーメント (基礎の根入れ効果を無視)

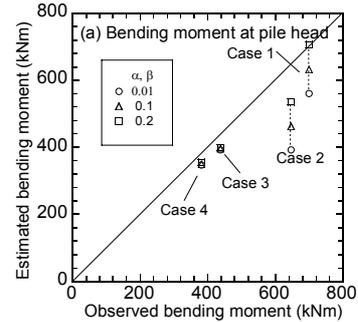


図11 水平地盤反力の低減係数と実験および解析で得られた杭頭曲げモーメント (基礎の根入れ効果を考慮)

免震建物の応答を考慮した最適な杭基礎に関する知見を以下に示す。

(7) 免震周期が地盤の卓越周期より十分長い場合、杭剛性による免震層変位の差は小さい。また、低剛性杭を用いることで、杭の曲げモーメントを低減できる。一方、免震周期が地盤の卓越周期に近い場合、低剛性杭の免震層変位は、高剛性杭のそれより極めて大きくなる。構造物慣性力が大きいと、低剛性杭の曲げモーメントは高剛性杭のそれと同程度となる。これから、免震周期が地盤の卓越周期に近いと想定される場合、高剛性杭が適していると考えられる

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

- ① 肥田剛典, 田村修次: 基礎の根入れ効果を考慮した応答変位法による液状化地盤の相対密度が杭応力に及ぼす影響の検討, 構造工学論文集, Vol. 57B, pp. 101-106, 2011. 3, 査読あり
- ② Hida T. and Tamura, S.: Effects of Pile Rigidity on Response of Base-isolated Structure during Soil Liquefaction Based on Centrifuge Tests, CUEE, Tokyo Institute of Technology, Paper No. 02-006, 2011. 3, アブストラクト査読あり
- ③ 肥田剛典, 田村修次: 液状化地盤における杭剛性が免震構造物の地震時応答と杭の曲げモーメントに及ぼす影響, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集,

pp. 2461-2467, 2010. 10, アブストラクト  
ト査読あり

- ④ 肥田剛典, 田村修次: 液状化地盤における杭剛性が免震構造物の応答と杭応力に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 75, No. 650, pp. 825-830, 2010. 4, 査読あり
- ⑤ Tamura, S., Sakamoto, T., Hida, T. and Maeda N. : Evaluation of seismic earth pressure and wall friction acting on embedded footing based on centrifuge test, Proceeding of the international conference on performance-based design in earthquake geotechnical engineering (IS-Tokyo2009), pp.517-521, 2009. 6, 査読あり
- ⑥ Tamura, S., Sakamoto, T., Hida, T. and Maeda N. : Mechanism of Earth Pressure and Sidewall Friction Acting on an Embedded Footing in Dry Sand Based on Centrifuge Testing, 14th World Conference on Earthquake Engineering, Paper ID 04-01-0076, 2008. 10, アブストラクト査読あり

〔学会発表〕(計 7 件)

- ① 肥田剛典, 田村修次: 基礎の根入れ効果を考慮した応答変位法による液状化地盤の相対密度が杭応力に及ぼす影響の検討, 構造工学進シンポジウム, 2011年4月21日, 京都大学
- ② Hida T. and Tamura, S.: Effects of Pile Rigidity on Response of Base-isolated Structure during Soil Liquefaction Based on Centrifuge Tests, CUEE, 2011年3月7日, 東京工業大学
- ③ 肥田剛典, 田村修次: 液状化地盤の相対密度が杭応力に及ぼす影響, 第45回地盤工学研究発表会, 2010年8月18日, 愛媛大学
- ④ 肥田剛典, 田村修次: 液状化地盤における長周期構造物の杭応力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp. 719-720, 2009年8月27日, 東北学院大学
- ⑤ 肥田剛典, 田村修次: 液状化地盤における杭の剛性が杭応力に及ぼす影響, 第44回地盤工学研究発表会, 2009年8月19日, 関東学院大学
- ⑥ Tamura, S., Sakamoto, T., Hida, T. and Maeda N. : Evaluation of seismic earth pressure and wall friction acting on embedded footing based on centrifuge test, International conference on performance-based design in earthquake geotechnical engineering (IS-Tokyo2009),

2009年6月17日, つくば国際会議場

- ⑦ Tamura, S., Sakamoto, T., Hida, T. and Maeda N. : Mechanism of Earth Pressure and Sidewall Friction Acting on an Embedded Footing in Dry Sand Based on Centrifuge Testing, 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008年10月15日, Jihua Spa & Resort, Beijing

〔その他〕

ホームページ等

<http://sds.dpri.kyoto-u.ac.jp/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田村 修次 (TAMURA SHUJI)

京都大学・防災研究所・田村修次

研究者番号: 40313837