

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 5 月 22 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2011

課題番号：20246089

研究課題名（和文）激震域での地盤の超非線形応答と変状が建物・基礎に与える影響と性能設計への反映

研究課題名（英文）Effects of non-linear response and failure of the ground subjected to strong shaking on soils and structures and their implementation into performance based design

研究代表者 時松 孝次（TOKIMATSU KOHJI）

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：50134846

研究成果の概要（和文）：本研究では、地盤の超非線形応答と変状が建物・基礎被害に与える影響を評価することを目的に、地震時に強震記録が得られている地点、建物被害のあった地点を対象として、現地調査、室内試験、数値解析を行うとともに、直接基礎・杭基礎の室内振動実験を行い、慣性力・地盤変位の影響、根入れ効果、群杭効果などを評価し、成果を組込んだ応答変位法・非線形有効応力解析の有効性を振動実験と実挙動のシミュレーションにより示した。

研究成果の概要（英文）：In order to properly estimate the effects of non-linear response and failure of the ground on the damage to buildings and foundations during recent earthquakes, in situ boring, sampling, laboratory cyclic tests and site response analyses were conducted for several sites where damage to soil and foundation was available together with recorded ground motions. Also performed were 1g and centrifugal shaking table tests on soil-structure systems with or without pile foundations to examine the effects of super-structure inertia and ground deformation as well as embedment and pile group effects. Simplified pushover analysis using p-y springs and non-linear effective analysis taking into account the above significant findings could simulate the shaking table test results and compiled field case histories of soils and foundations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
2009年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2010年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2011年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
年度	-	-	-
総計	24,700,000	7,410,000	32,110,000

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：地震、杭基礎建物、直接基礎建物、地盤の非線形性、地盤変状

1. 研究開始当初の背景

建築基準法の改正に伴い、「限界耐力計算法」が施行され、性能設計法の考え方が導入された。しかし、激震時の構造物の終局限界状態を考えると、上部構造物に入力される地震動を正確に予測することが難しい。さらに、上部構造を支える基礎構造は、地盤と構

造物との非線形動的相互作用の影響により、地震荷重が複雑となり、それに対応する保有耐力を適切に評価することが難しい。また、基礎構造は上部構造を支えるため、水平耐力に加え、鉛直支持力不足による不同沈下、液状化などの地盤変状による基礎損傷の評価も重要な課題である。そのような背景から、

申請者らは、地盤の地震時非線形性状、基礎根入れ部に働く土圧特性、杭に働く水平地盤反力の特性、地盤特性が木造被害に与える影響、液状化・側方流動などの地盤変状が杭基礎に与える影響、それらの影響を考慮した地盤モデルの構築とその非線形有効応力解析への適用、基礎の耐震設計法の向上などについての研究を推進してきた。

図らずも、平成19年に発生した能登半島地震ならびに新潟県中越沖地震では、激震域での地盤の超非線形化による増幅特性の変化と液状化などを含めた地盤変状が建物被害に与えた影響が極めて大きかったことが改めて示されている。その中には、大加速度が生じたにもかかわらず、建物被害が軽微であった事例、新潟県中越沖地震での、K-NET 柏崎の強震記録に見られるサイクリックモビリティ現象、建物被害に与えた不整形地盤の応答と地盤変状の影響、杭頭が損傷して直接基礎建物より沈下した杭基礎建物の事例、原子力発電所を含めた基礎周辺埋め戻し土の挙動とその建物への影響など、未だ共通認識が成立しておらず、早急に原因究明が必要な現象や被害が多数存在している。これらは、激震動を受けて超非線形化した地盤と基礎の相互作用の影響（基礎と地盤の滑りや基礎のロッキングなどの影響を含む）が少なからずあると考えられるが、これを定量的に評価するための資料はほとんど見あたらない。

2. 研究の目的

本研究では、平成19年能登半島地震ならびに新潟県中越沖地震で提示された課題を含めて、激震域での地盤の超非線形応答と変状が建物・基礎被害に与える影響を評価するとともに、その成果を、より信頼性の高い防災対策、性能設計へ反映させることを目的とし、以下の項目を計画年度内に明らかにする。

- (1) 実地盤の超非線形性状が地表で観測される地震動に与えた影響の評価
- (2) 実地盤の超非線形応答と変状が木造建物と基礎の被害に与えた影響の評価
- (3) 実地盤の超非線形応答と変状が非木造建物被害に与えた影響の評価
- (4) 遠心模型振動実験による地盤の超非線形性状と変状が直接基礎建物に与える影響の評価
- (5) 模型振動実験による地盤の超非線形応答と変状が杭基礎建物に与える影響の評価
- (6) 簡便な地盤の3次元構成則とそれを組み込んだ非線形有効応力解析の開発
- (7) 地盤の超非線形応答と変状が建物と基礎に与える影響を適切に評価した設計手法の提案
- (8) 研究のまとめと総括

3. 研究の方法

本研究では、激震域での地盤の超非線形

応答と変状が建物・基礎被害に与える影響を適切に評価するための基礎資料を整備し、より信頼性の高い性能設計、防災対策へ反映させることを目的とする。このため、平成19年能登半島地震および新潟県中越沖地震の激震域における実地盤の超非線形性と地盤変状が地表で観測された地震動と建物被害に与えた影響について現地調査、室内試験、数値解析から詳細に検討し、これを解明する上で必要となるが研究資料の少ない直接基礎・杭基礎の地震時鉛直・水平支持力と地盤変状が直接基礎に与える影響について、室内実験に基づいて検討し、その成果を反映させた実用的で信頼性のある地盤の3次元構成則モデルとそれを組み込んだ非線形有効応力解析の開発ならびに検証を行う。

4. 研究成果

(1) 柏崎市内等の被災地で、表層地盤のボーリング、サンプリング、PS検層を行い、得られたサンプリング試料の室内動的変形強度試験を行って、当該地点の地盤の応力ひずみ関係を求め、さらに、その結果に基づいて、実地震記録のシミュレーション解析を行ない、近年の強震記録に見られるサイクリックモビリティ現象、周期変動の原因が液状化に起因することを明らかにした。簡便な土の3次元構成則を組み込んだ非線形有効応力解析を開発し、その有効性を同様の強震記録により検討した。

(2) 東北地方太平洋沖地震での地盤の液状化が木造建物と基礎の被害に与えた影響を現地調査から明らかにし、液状化の程度と建物被害の経験式を示した。また地盤改良などの対策等を施して被害を免れた事例調査から、その有効性について検討した。

(3) 振動による木造建物の被害の大きかった輪島市門前町を対象に、同様の地盤調査をおこない、地盤および建物の応答解析を含めて詳細に検討し、被害分布が、直下の二次元構造と地盤の非線形性状による地盤の固有周期の延びに依存することを示した。

(4) 近年の地震で被害を受けた杭基礎建物について、地盤特性と建物基礎被害の詳細調査を行い、既開発した簡易解析な解析を含めて検討し、被害要因を明らかにした。

(5) 直接基礎の根入れ、アスペクト比、上部構造の固有周期などをパラメータとした遠心振動実験を行い、激震時の直接基礎のスウェイに伴う極限水平支持力特性とロッキングに伴う鉛直支持力特性ならびにその発現メカニズムを把握した。その結果、高重心モデルの最大応答加速度は、低重心モデルよりも小さくなった。これは、地盤の支持力が極

限に達し、両者の転倒モーメントの最大値が同じになったためと考えられる。また、基礎の浮き上がりと着地に伴い、鉛直加速度が発生し、その値は、着地時の方が大きくなること、着地時の鉛直加速度は基礎の回転角に応じて大きくなることを示した。

(6) 地震時受働土圧は、最大加速度 6 m/s^2 レベルで、物部岡部式と概ね整合するが、それ以下では、かなり小さいこと、振動方向の相互作用による基礎周辺部の沈下は、根入れ深さの 0.4-0.5 倍程度の範囲で生じること、これにより生じた基礎周辺の地盤傾斜は、1/5 から 1/2 程度で、地盤密度が高い方が大きいこと、地震後の土圧は、終了時の壁面周辺の応力状態により、増加または減少する可能性のあることを示した。

(7) 上部構造と地盤の固有周期の関係、入力地震動の卓越周期、基礎の根入れ、地盤の非線形性の程度などを变化させた既往の大型振動台実験結果、遠心振動実験結果の再吟味から、地盤の超非線形時における群杭効果、慣性力と地盤変位が杭基礎に与える影響について検討した。

(8) 液状化後の地盤の剛性低下が杭応力に与える影響を考慮するため、液状化後の地盤の損傷度を定義し、地盤のバネ剛性低減係数を評価し、提案モデルを組み込んだ簡便解析により、振動台実験における杭応力を算定し、その有効性を示した。

(9) 研究成果を反映させた応答変位法、3次元非線形有効応力解析により、乾燥地盤-杭-構造物系模型を用いた大型振動台実験のシミュレーションを行ない、上部構造物の有無、上部構造物の固有周期、基礎部の根入れの有無によって変化する構造物の応答、杭の応力分布の違いをある程度の精度で再現することができた。

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 5 件)

1) Kohji Tokimatsu, Shuji Tamura, Hiroko Suzuki and Kota Katsumata: Building Damage Associated with Geotechnical Problems in the 2011 Tohoku Pacific Earthquake, Soils & Foundations, 有, Vol. 52, No.5, 2012

2) 周友昊, 時松孝次, 吉田洋之, 鈴木比呂子, 貫井泰: 大型振動台実験における地盤-杭-構造物系の 3次元動的挙動に関する解析的検討, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, Vol. 77, No. 677, 2012

3) Shuji Tamura, Keisuke Adachi, Kohji Tokimatsu: Centrifuge Tests of Impulsive

Vertical Acceleration Generated by Foundation Uplift during Strong Shaking, Soils & Foundations, 査読有, Vol.51, No.3, pp.411-422, 2011.

4) 鈴木比呂子, 時松孝次, 新井洋, 翠川三郎: 2007年能登半島地震における K-NET 穴水・JMA 輪島の強震記録から推定した粘性土地盤の非線形性状, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, Vol.74, No.645, pp.2003-2010, 2009.

5) 時松孝次, 新井洋, 簗和健太郎: 柏崎刈羽原子力発電所サービスホールの鉛直アレイ強震記録から推定した地盤の非線形性状と基盤路頭波, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, Vol.74, No.630, pp.1273-1280, 2008

[学会発表](計 20 件)

1) Kota Katsumata and Kohji Tokimatsu: Relationship between Seismic Characteristics and Soil Liquefaction of Urayasu City Induced by the 2011 Great East Japan Earthquake, Proc., 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering and 4th Asia Conference on Earthquake Engineering, Vol.1, pp. 601-606, March 6-8, 2012, Tokyo, Japan

2) Youhao Zhou, Hiroyuki Yoshida, Hiroko Suzuki, Yasushi Nukui and Kohji Tokimatsu: Numerical Study of Three-Dimensional Dynamic Behavior of Soil-Pile-Structure System in Large Shaking Table Tests, Proc., 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering and 4th Asia Conference on Earthquake Engineering, Vol.1, pp.637-644, March 6-8, 2012, Tokyo, Japan

3) Kohji Tokimatsu, Shuji Tamura, Kazushi Tohyama, Hiroko Suzuki, and Hiroyuki Yoshida: Ground Settlement and Earth Pressures around Embedded Foundations subjected to Strong Ground Shaking, Proc., 8th International Conference on Urban Earthquake Engineering, pp.305-310, March 7-8, 2011, Tokyo, Japan

4) Kohji Tokimatsu, Kota. Katsumata, Hiroshi Arai: Simulations of Strong Ground Motions at Kashiwazaki City during the 2007 Niigata-Ken Chuetsu-Oki Earthquake, Proc., 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 9pp, Jan 10-13, 2011, Santiago, Chile.

5) Youhao Zhou, Hiroyuki Yoshida, Hiroko Suzuki, Yasushi Nukui, Kohji Tokimatsu: Simulation of Soil-Pile-Structure Interaction through Multi-Dimensional Shaking Table Tests Using E-Defense Facility, Proc., 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 9pp, Jan 10-13, 2011,

Santiago, Chile.

6) Hiroko Suzuki and Kohji Tokimatsu: Effects of Soil-Structure Interaction on Stress Distribution within a Pile Group Under Multi-Dimensional Loading, Proc., 5th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 8pp, May 24-29, 2010, San Diego, California, USA.

7) Shuji Tamura, Keisuke Adachi, Kohji Tokimatsu: Effects of Roughness of Shallow Foundation Surface on Superstructure Response During a Strong Earthquake, Proc., 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering (7CUEE) & 5th International Conference on Earthquake Engineering (5ICEE), pp.413-424, March 3-5, 2010, Tokyo, Japan.

8) Hiroko Suzuki and Kohji Tokimatsu: Effects of Spatial Variation of Laterally Spreading Ground on stress Distributions Within Pile Groups, Proc., 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering (7CUEE) & 5th International Conference on Earthquake Engineering (5ICEE) pp.507-512, March 3-5, 2010, Tokyo, Japan.

9) Hiroko Suzuki, Kohji Tokimatsu, Ross Boulanger: Effects of ground displacement on piles with different strength during laterally spreading in centrifuge test, Proc., International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, pp. 1755-1762, Jun 15-18, 2009, Tsukuba, Japan.

10) Kohji Tokimatsu and Hiroko Suzuki: Seismic soil-pile-structure interaction based on large shaking table tests, Proc., International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, pp. 77-104, June 15-18, 2009, Tsukuba, Japan.

11) Kohji Tokimatsu and Yoshiaki Ibaraki and Hiroshi Arai: Dynamic soil properties back-calculated from strong motions recorded at two downhole arrays during the 2007 Niigata-ken Chuetsu-Oki earthquakes, Proc., 6th International Conference on Urban Earthquake Engineering, pp.485-489, March 3-4, 2009, Tokyo, Japan.

12) Hiroko Suzuki, Kohji Tokimatsu, Masayoshi Sato, Kentaro Tabata: Soil-Pile-Structure Interaction in Liquefiable Ground Through Multi- Dimensional Shaking Table Tests Using E-Defense Facility, Proc., 14th World Conference on Earthquake Engineering, 04-01-0177, Oct. 12-17, 2008, Beijing, China.

13) Kohji Tokimatsu: Geotechnical problems during the 2007 Niigata-Ken Chuetsu-Oki

Earthquake, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, GSP 181, ASCE, Proc., Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV, 30pp, may 19-21, 2008, Sacramento, USA.

14) 時松孝次, 勝間田幸太: 2011年東北地方太平洋沖地震における浦安市での液状化による戸建住宅被害, 第47回地盤工学研究発表会, 2012.7.14-16, 八戸.

15) 勝間田幸太, 時松孝次: 2011年東北地方太平洋沖地震における浦安市での液状化被害と地震動特性の関係, 第47回地盤工学研究発表会, 2012.7.14-16, 八戸.

16) 稲村溪, 時松孝次, 鈴木比呂子, 丸山栄: 遠心場における正負交番鉛直載荷実験による杭の支持力特性の一考察, 第47回地盤工学研究発表会, 2012.7.14-16, 八戸.

17) 鈴木比呂子, 時松孝次, 田村修次, 栗木周, 富安祐貴: 遠心載荷実験に基づく根入れ深さが直接基礎構造物の挙動に及ぼす影響, 2012年度日本建築学会大会学術講演梗概集, 2012.9, 名古屋.

18) 周友昊, 吉田洋之, 鈴木比呂子, 時松孝次, 貫井泰: E-ディフェンス大型振動台実験における杭基礎構造物3次元非線形挙動の解析的検討, 2012年度日本建築学会大会学術講演梗概集, 2012.9.12-14, 名古屋.

19) 坪井友宏, 時松孝次: 2011年東北地方太平洋沖地震による浦安市での杭被害とその要因分析, 2012年度日本建築学会大会学術講演梗概集, 2012.9.12-14, 名古屋.

20) 富安祐貴, 時松孝次, 田村修次, 鈴木比呂子, 栗木周: 根入れを有する直接基礎建物のスウェイ・ロッキング動と周辺地盤の非線形挙動の関係, 2012年度日本建築学会大会学術講演梗概集, 2012.9.12-14, 名古屋.

〔図書〕(計1件),
時松孝次(共著): 地震・津波ハザードの評価, 朝倉書店, 2011, .

6. 研究組織

(1) 研究代表者

時松 孝次 (TOKIMATSU KOHJI)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 50134846

(2) 研究分担者

田村 修次 (TAMURA SHUJI)
京都大学・防災研究所・准教授
研究者番号: 40313837
鈴木 比呂子 (SUZUKI HIROKO)
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 60401527