

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24360228

研究課題名(和文) 激震域における直接基礎の水平抵抗・支持力と上部構造物の極限応答

研究課題名(英文) Ultimate superstructure response, lateral resistance and bearing capacity of a shallow foundation during strong shaking

研究代表者

田村 修次 (TAMURA, SHUJI)

東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授

研究者番号：40313837

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、遠心載荷実験で極大地震における直接基礎建物の極限応答を検討した。極大地震では上部構造物の加速度が頭打ちになった。これは、基礎端部直下の地盤が極限支持力に達し、転倒モーメントが極限に達したためである。加振後の基礎の傾斜・沈下は小さく、直接基礎建物は転倒しなかった。常時の極限支持力の安全率が十分に大きければ、大地震で直接基礎建物の転倒リスクは少ないと考えられる。また、根入れが深いと上部構造物応答が根入れの浅いケースより大きくなった。これは、根入れが深いと転倒モーメントに対し、基礎底面の鉛直支持力のみならず主働・受働面の土圧および壁面摩擦力が抵抗したためである。

研究成果の概要(英文)：Geotechnical centrifuge tests were performed on soil-footing-superstructure models to investigate response of shallow foundation structures during strong shakings. Superstructure acceleration amplitudes tended to reach the limit, although ground surface acceleration amplitudes increased with increasing input motions. The ultimate response of the superstructure depends on the overturning moment limitation that was caused by local soil failure under the footing edge. Risk of overturn of a structure is small when the safety factor of the bearing capacity is large. Centrifuge tests are also performed to examine the dynamic response of structures supported by shallow foundations on soft clay reinforced by soil-cement grids. Soil-cement grids were effective at controlling foundation settlements in most cases. The more significant foundation settlements were caused by extensive crushing of the soil-cement when footing rotations were extremely large.

研究分野：地盤地震工学

キーワード：直接基礎 水平抵抗 極限支持力 極限応答 大地震 格子状地盤改良 地震時土圧

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災では、2.7g(NS)の大加速度がK-NET 築館で計測された。このように、近年、1g を越える大加速度や 100kine を超える大速度が多く観測されている。一方、観測点近傍の建物被害が、地震動から想定される被害よりも小さいことが指摘されている。その要因として、地震動の周波数特性および地盤と構造物の動的相互作用が挙げられる。

近年、欧米では直接基礎構造物に対する多くの動的遠心载荷実験や数値解析が行われ、大地震時における直接基礎構造物の水平加速度、ロッキング、沈下が検討されている。その結果、大地震時における直接基礎構造物の水平加速度がロッキングによって軽減されるとともに、ロッキングに伴う基礎の不同沈下の可能性は低いと報告されている。ただし、既往の研究の多くが、根入れが無いモデルや根入れ深さが1m以内であり、根入れが深い直接基礎構造物に関する知見は極めて少ない。また、激震域における建物や地盤破壊の検討例は極めて少ない。

2. 研究の目的

基礎の水平抵抗に極限值が存在し、基礎と建物の慣性力の和に上限値が存在するならば、大地震における建物の極限慣性力が、地震動ではなく地盤・基礎によって決定されることを意味する。ただし、建物の極限応答を、基礎の極限水平抵抗の観点で体系的に検討した例は無い。そこで、本研究では、パラメトリックな遠心载荷実験を行い、激震域における基礎周辺地盤の破壊と建物の極限慣性力(水平加速度)・直接基礎のロッキング(転倒)の関係を根入れの深いケースおよび浅いケースについて検討する。また、地震時受働土圧の評価の際、重要なパラメーターである壁面摩擦角を計測し、地震時土圧のメカニズムを明らかにする。

近年、軟弱地盤において、地盤改良して直接基礎を採用する事例が増えている。しかし、地盤改良が地震波増幅特性にどのような影響を及ぼすのか、また、改良地盤上の直接基礎建物がどのような応答をするのかは不明である。そこで、格子状地盤改良が軟弱粘性土の地震波増幅特性に及ぼす影響、格子状地盤改良に支持された直接基礎建物の極限応答特性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 根入れの無い直接基礎建物の応答と極限支持力

まず、地盤 - 直接基礎 - 上部構造物系モデル(図1)に対し、遠心場振動実験を行った。さらに、振動実験と同じ地盤および基礎モデルに対し、加力点を上部構造物の重心高さとし水平交番载荷実験(図2)を行った。いずれのモデルも直接基礎の底面に2軸ロードセルを設置し、水平力と鉛直力の計測を可能にした。

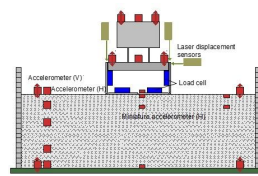


図1 直接基礎の振動実験

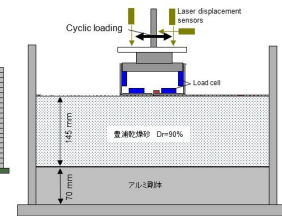


図2 直接基礎の水平交番载荷実験

(2) 深い根入れの直接基礎建物の極限応答

遠心実験は図3に示すように直接基礎建物モデルに対して40g場で振動実験を行った。基礎の根入れ深さは、根入れ無し、1.3m、6mである。各モデルの上部構造物は1質点系モデルとし、RC造5階建を想定した。基礎部主働・受働面には2方向ロードセルを設置し、プレートに作用する土圧および側面摩擦力を計測した。基礎部の側面にも2方向ロードセルを設置し、側面摩擦力および土圧を計測した。根入れ深さ6mのモデルでは、基礎部を3段に分けて土圧等を計測した。

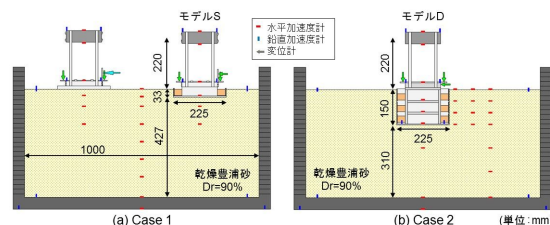


図3 直接基礎の振動実験(根入れのあるケース)

(3) 格子状地盤改良上の直接基礎建物の極限応答

本研究では、まず、格子状地盤改良した粘性土の地震時応答を、改良の有無、改良率、改良深さをパラメーターにして遠心場振動実験を行い検討した。さらに、図4に示すような格子状地盤改良体のうえに、薄い砂層を介して直接基礎構造物を設置し遠心場振動実験を行い、直接基礎の沈下・傾斜および改良体の破壊性状について検討した。

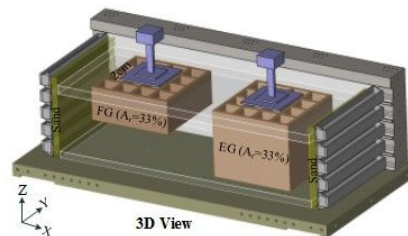


図4 格子状地盤改良体上の直接基礎構造物の振動実験

4. 研究成果

(1) 根入れの無い直接基礎建物の応答と極限支持力

振動実験で極大地震動を入力したところ上部構造物の加速度が極限に達した。この時、基礎底面の水平荷重と鉛直荷重の比は、静的摩擦係数よりも十分に小さく、滑りは発生していなかった(図5)。一方、基礎のロッキ

ング角と転倒モーメントの関係(図6)は極限に達していた。したがって、上部構造物の応答が極限に達していたのは、転倒モーメントが極限に達していたためと思われる。水平載荷試験における転倒モーメントの極限值は振動実験とほぼ同じであった。

振動実験および水平載荷試験における水平力と転倒モーメントから建築基礎構造設計指針(2001)で大地震時の極限支持力を算定したところ、それは自重よりも小さいものとなった。しかし、直接基礎建物は転倒せず、振動実験終了時における基礎の残留傾斜や静的載荷試験終了時における基礎の沈下は小さかった。

常時の極限支持力の安全率が小さいケースでは、極限転倒モーメントにおける基礎の接地率は大きい。常時の安全率が2のケースでは、極限転倒モーメントにおける接地率は1/2程度と考えられる。この場合、大地震時に基礎幅1/2程度の地盤が破壊することになり、建物の転倒するリスクが高い。一方、常時の極限支持力の安全率が十分に大きいケースでは、極限転倒モーメントにおける接地率は小さい。例えば、常時の安全率が10のケースでは、極限転倒モーメントにおける接地率は1/10程度と考えられる。基礎幅1/10程度の地盤が破壊しても建物の転倒するリスクは少ない。したがって、常時の極限支持力の安全率が十分に大きいケースでは、大地震時に基礎部端部の地盤が極限支持力に達しても、建物は転倒しないと考えられる。

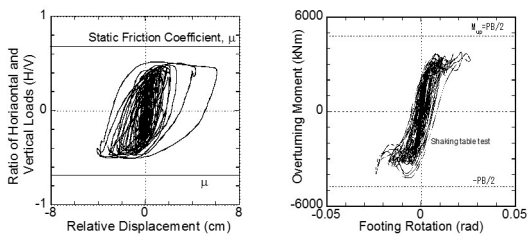


図5 相対変位と基礎底面の水平力と鉛直力の比 図6 基礎のロッキング角と転倒モーメント

(2) 極大地震動における深い根入れの直接基礎建物の応答と地震時土圧

一般的に基礎の根入れが深いと入力損失が大きくなり、上部構造物の応答は小さくなると考えられている。一方、本実験における大加振では、根入れが深いと上部構造物の加速度応答が、根入れの浅いケースより大きくなった。これは、図7(a)に示すように根入れが浅いと構造物慣性力による転倒モーメントが極限に達し、上部構造物加速度が頭打ちになったためである。一方、根入れの深いと転倒モーメントは極限に達しなかった(図7(b))。そのメカニズムを検討するため、図8に上部構造物慣性力最大時における基礎部に作用する水平力を示す。根入れが浅いと底面摩擦力が大きいのにに対し、根入れが深いと主働・受働面の地震時土圧が大きい。抵抗モーメントの内訳を図9に示す。根入れが浅いと底面鉛直力で転倒モーメントを負担す

るのにに対し、根入れが深いと底面鉛直力のみならず、主働・受働面の土圧および壁面摩擦力が抵抗している。そのため、根入れが深いと転倒モーメントが極限に達しなかったと考えられる。

浅い根入れの相対変位と地震時土圧のループの傾きは、深い根入れの上部のそれよりも大きい。これは、浅い根入れの受働土圧に至る相対変位が、深い根入れのそれよりも小さいためである。深い根入れの上部の相対変位は中部よりも大きい。そのため、深い根入れの基礎に対しては、地震時土圧を深さ方向に分割して評価する必要がある。任意の深さの地下壁に作用する地震時土圧は提案手法を用いて、ある程度の精度で推定できる可能性がある。

根入れの深い直接基礎に作用する地震時土圧の壁面摩擦角は砂の内部摩擦角の8~9割に達することが分かった。比較のため、スウェーデンが卓越する杭基礎の根入れ部についても、地震時土圧を計測したところ、壁面摩擦角は砂の内部摩擦角の5割程度であった。これから、直接基礎の大きい内部摩擦角は、ロッキング動が卓越したためであることが分かった。

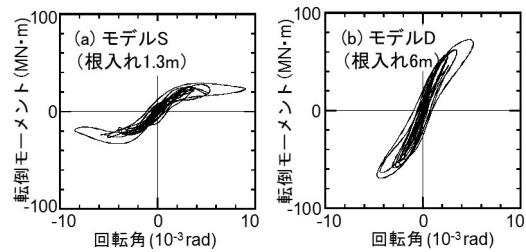


図7 基礎のロッキング角と転倒モーメント

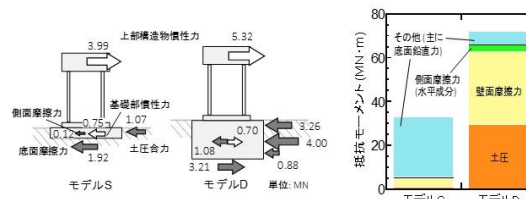


図8 構造物慣性力および基礎に作用する水平力(上部構造物慣性力最大時)

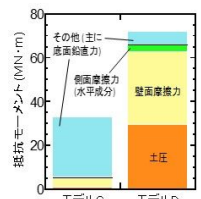


図9 抵抗モーメントの内訳(上部構造物慣性力最大時)

(3) 格子状地盤改良における地震波増幅特性と直接基礎建物の極限応答

未改良の場合、粘性土地盤の非線形性は顕著であり、地表面加速度は入力波よりも小さくなった。改良率24%では、未改良地盤より地盤の非線形性は弱くなった。直交方向の改良壁と加振方向の改良壁の応答は異なり、改良壁にクラックが生じた。

改良率33%で全層改良の場合、地盤の非線形性は明らかに弱くなり、地表面加速度は入力波よりも大きくなった。加振方向および直交方向の改良壁と改良内の地盤の応答は極めて近く、改良壁にクラックは生じなかった。改良率33%で粘性土上部のみ改良の場合、改良地盤下における粘性土の非線形性が顕著であり、改良内の地盤の応答の非線形性は弱かった。

格子状地盤改良体の上に設置した直接基

礎構造物は、大加振で転倒モーメントが極限に達した。改良率 33%では、直接基礎の沈下は 15 mm 以下とわずかであったが、改良率 24%では、改良体上部が圧壊し、直接基礎は 230 mm と大きく沈下した。そのメカニズムを検討したところ、直接基礎のロッキングで接地面積が減少し、接地圧が増加し、それによって改良体上部が破壊したことが分かった。地盤改良体に作用する接地圧の影響を図 10 のように想定したところ、直接基礎の接地圧と改良体の一軸圧縮強度から、改良体の破壊の有無を説明できることを示した。

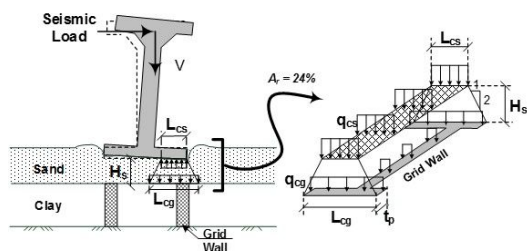


図10 地盤改良体に作用する接地圧の概念図

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

S. Tamura, D. Odaka, H. Mano and Y. Shamoto: Evaluation of seismic earth pressure acting on footing embedded in cohesive soil based on centrifuge tests, 16th World Conference on Earthquake, 査読有, Paper No. 3940, 2017. 1.

田村修次、林和宏、時松孝次: 極大地震動における直接基礎建物の応答と極限支持力, 日本地震工学会論文集, 査読有, Vol.16, No.8, pp.82-87, 2016. 7.

http://doi.org/10.5610/jaee.16.8_82

Khosravi, M., Boulanger, R., Tamura, S., Wilson, D., Olgun, C., and Wang, Y.: Dynamic Centrifuge Tests of Soft Clay Reinforced by Soil-Cement Grids, J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, 査読有, Vol. 142, No. 7, 2016

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001487](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001487)

Tamura, S., Khosravi, M., Boulanger, R. W., Wilson, D. W., Olgun, C. G., Rayamajhi, D., Wang, Y.: Site Response of Soft Clay Reinforced by Deep Soil Mixing Grids based on Dynamic Centrifuge Tests, 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 査読有, Paper No. 305, 2015, 11,

https://secure.tcc.co.nz/ei/images/ICEGE15%20Papers/Tamura%20319.00_.pdf

Khosravi, M., Tamura, S., Boulanger, R. W., Wilson, D. W., Olgun, C. G., Rayamajhi, D., Wang, Y., Dynamic Centrifuge Tests on Soft Clay Reinforced by Soil-Cement Grids, 7

ブストラクト査読有, IFCEE 2015, San Antonio, TX, 2349-2358., 2015,

<https://doi.org/10.1061/9780784479087>

Tamura, S. and Hida, T.: Pile Stress Estimation Based on Seismic Deformation Method with Embedment Effects on Pile Caps, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 査読有, Vol. 140, No. 9, pp. 04014049-1-12, 2014,

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001150](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001150)

〔学会発表〕(計 9 件)

川上綾太、田村修次、奥村豪悠: 深い根入れの直接基礎に作用する地震時土圧に関する検討, 日本建築学会大会学術講演会, 2017. 8. 31-9.4, 広島工業大学

田村修次、淵崎仁智、奥村豪悠、本多剛: 直接基礎の根入れ深さが大地震時の建物応答に及ぼす影響, 地盤工学研究発表会, 2017. 7.12-14, 名古屋国際会議場

S. Tamura, D. Odaka, H. Mano and Y. Shamoto: Evaluation of seismic earth pressure acting on footing embedded in cohesive soil based on centrifuge tests, 16th World Conference on Earthquake, 2017. 1. 12., Casa Piedra convention center, Santiago, Chile

淵崎仁智、田村修次、奥村豪悠、本多剛: 遠心載荷実験における直接基礎建物の根入れ部に働く地震時土圧, 地盤工学研究発表会, 2016. 9.13-15, 岡山大学

Tamura, S., Khosravi, M., Boulanger, R. W., Wilson, D. W., Olgun, C. G., Rayamajhi, D., Wang, Y.: Site Response of Soft Clay Reinforced by Deep Soil Mixing Grids based on Dynamic Centrifuge Tests, 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 2015. 11. 5. Air Force Museum, Christchurch, New Zealand

淵崎仁智、田村修次: 遠心載荷実験における動的相互作用が直接基礎の応答に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演会, 2015. 9. 4-6, 東海大学(藤沢市)

淵崎仁智、田村修次、奥村豪悠、本多剛: 遠心載荷実験における地盤 - 構造物の動的相互作用と上部構造物応答, 地盤工学研究発表会, 2015. 9. 1-3, 北海道科学大学

田村修次、林和宏、時松孝次: 極大地震動における直接基礎建物の応答と極限支持力, 第 14 回日本地震工学シンポジウム, 2014. 12.5, 幕張メッセ

田村修次: 水平震度の向きが基礎根入れ部の地震時土圧に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演会, 2014. 9. 12-14, 神戸大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページによる研究成果公開

1) 格子状地盤改良した粘性土地盤の地震
時応答報告書 小型遠心実験
<https://ucdavis.app.box.com/s/iaid0onj0nfp162222m7sqq5br0wdxmr>

2) 格子状地盤改良した粘性土地盤の地震
時応答報告書 大型遠心実験
<https://ucdavis.app.box.com/s/jh6thoxjv13n0m1uti xvwtgrr0oym4bn>

3) 粘性土地盤における格子状地盤改良に
おける直接基礎応答報告書 大型遠心
実験
<https://ucdavis.app.box.com/s/ivexgkl sxkyw6z5kzmuhwkbvg3b5orvm>

6. 研究組織

(1)研究代表者

田村 修次 (TAMURA Shuji)
東京工業大学・環境・社会理工学院・准教
授
研究者番号：4 0 3 1 3 8 3 7

(2)研究分担者

時松 孝次 (Tokimatsu Kohji)
東京工業大学・環境・社会理工学院・名誉
教授(現 東京ソイルリサーチ技術顧問)
研究者番号：5 0 1 3 4 8 4 6

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

Ross W. Boulanger
University California, Davis, Professor