

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：10103

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18180

研究課題名(和文)建物-地盤連成系のパイルド・ラフト基礎の地震応答評価法

研究課題名(英文)Evaluation on seismic response of piled raft foundation considering soil-structure interaction

研究代表者

永井 宏 (NAGAI, Hiroshi)

室蘭工業大学・工学研究科・助教

研究者番号：70413797

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、建物と地盤を連成したFEMによる地震応答解析からパイルド・ラフト基礎の大地震時応答の定量的な評価を行った。建物応答や杭体応力の抑制効果、基礎の水平・回転動に対する剛性の低下などを評価すると共に、効果的な適用条件を提示した。また、建物と地盤の動的相互作用を考慮した杭の最大曲げ応力分布の簡易算定法を提示した。一方、有限要素法と薄層法を組み合わせた詳細解析法によるパラメトリックな周波数応答解析にて動的地盤ばねを評価し、本基礎を構成するラフトと杭間の動的相互作用係数を振動数領域で分析して定式化を図ることで、本基礎の動的地盤ばねを算出する新たな方法を構築した。

研究成果の概要(英文)：The seismic response analysis was performed to evaluate the response of piled raft foundation during a large earthquake. The analysis was used FEM coupled with the structure and the soil. It is revealed that the effect of suppressing building response and pile stress, the reduction of stiffness against the motion of foundation. From these results, it is also presented the effective condition when this foundation was applied. A simple calculation method also presented for maximum distribution of pile stress considering soil-structure interaction. On the other hand, dynamic impedance of foundation was evaluated by parametric frequency response analysis using the method combining FEM and thin layer method. Based on these impedances, the dynamic interaction factor between the raft and pile group that constitutes this foundation was derived in frequency domain, and formulated by an arbitrary function. The new simplified method is developed for evaluating the impedance of this foundation.

研究分野：基礎構造

キーワード：パイルド・ラフト基礎 地震応答 数値解析 動的相互作用 動的地盤ばね 地震時杭応力

1. 研究開始当初の背景

(1)パイルド・ラフト基礎は、元々、直接基礎と摩擦杭を併用して建物の沈下量を抑制することを目的とした基礎形式であり、従来の杭基礎に比べて基礎の合理化（基礎スラブの厚さ、杭長・杭径・杭本数等の低減）が可能である。海外でも本基礎を採用した建物の沈下量を予測する手法が提案されると共に、沈下量の抑制効果が認知され、超高層建物への実施工例も報告されている。しかし、大地震の発生が少ない国々での研究が多く水平荷重に対する設計法は遅れている。一方、地震が多い日本でも地震時の挙動に未解明な点があり、実施例は比較的中低層の建物または特殊な建物である。

(2)パイルド・ラフト基礎の地震時挙動に関しては、研究当初は地震時の建物慣性力や地震時地盤変位に伴う強制外力を静的荷重にして単独で基礎に作用した場合を想定した数値解析や載荷実験が行われ、基礎の水平抵抗性能や杭とラフトの荷重分担などが検討された。また、ラフト・杭頭部間の接合条件（回転剛性）の相違による杭体応力への影響なども検討されてきた。一方、パイルド・ラフト基礎はその設計コンセプトから軟弱地盤での適用が多く、地震時には建物と地盤の振動特性の影響を大きく受けるため、建物-基礎-地盤を連成して建物と地盤の動的相互作用の効果を適切に考慮することが重要である。建物-地盤連成系でのパイルド・ラフト基礎の地震応答に対する研究としては、建物を含めた振動台模型試験も散見されていたが、実験規模やコスト的な制約が伴うため十分ではなく、数値解析も模型実験のシミュレーションが多く体系的に検討されていなかった。また、実構造物の地震観測の結果に基づく研究も報告され始めたが、特定の特殊な建物に対する地震応答であった。

(3)したがって、高層建物や軟弱地盤に建設される建物の基礎として設計するには耐震設計法の確立が不可欠と言える。更に、基礎構造の分野でも2次設計の必要性が議論され始めるなど大地震に対する検討は不可欠となってきた。

2. 研究の目的

(1)建物と地盤を連成した FEM 解析モデルを用いて、大地震時でのパイルド・ラフト基礎で支持された建物の振動特性を明らかにすると共に、建物応答や杭体応力を定量的に評価する。

(2)地盤抵抗を表現する動的地盤ばねに関して、パイルド・ラフト基礎の特性を検討すると共に、他の基礎形式も含めた分析結果から動的地盤ばねの簡易算定法の構築を図る。

(3)建物-地盤の動的相互作用を考慮した地

震時杭応力に関する既往の算定法の検証・拡張を行う。

3. 研究の方法

(1)建物-地盤連成 FEM 解析モデルによる地震応答解析

検討モデルは、軟弱地盤上に建てられた建物を摩擦杭形式の場所打ち杭を有するパイルド・ラフト基礎で支持するケースを想定した。検討因子は、基礎形式、地盤条件、地震動レベルである。基礎形式はパイルド・ラフト基礎の他に、直接基礎と支持杭形式の杭基礎の3ケース、地盤条件は剛性と地層構成を変化させた4ケース、地震動レベルは中地震動と大地震動の2ケースを設定した。

FEM のモデル化に際しては、地盤は立体要素にて、建物は柱とスラブで剛性と質量を表現した。杭体は梁要素で剛性を評価すると共に、杭体積部分の地盤要素を取り除き杭外周面の地盤と杭体の節点とを多点連結して杭体積を考慮した。また、地盤の剛性と減衰のひずみ依存性（非線形性）は修正 Ramberg-Osgood モデルを、基礎スラブ底面と地盤との境界はクーロン摩擦モデルにて基礎の滑動を評価した。

告示波を工学的基盤に作用させた時刻歴応答解析を行い、パイルド・ラフト基礎の地震時応答の定量的な評価を行った。

(2)有限要素法と薄層法を組み合わせた詳細解析法による動的地盤ばねの算出・分析・モデル化

有限要素法と薄層法を組み合わせた詳細解析法を用いて、種々の基礎形状や地盤条件を検討因子とするパラメトリックな周波数応答解析を行い、パイルド・ラフト基礎の地盤抵抗を表す動的地盤ばね（水平成分、回転成分）を求めた。

パイルド・ラフト基礎の動的地盤ばねの振動数依存性と共に、上記の解析によって得られた動的地盤ばねからパイルド・ラフト基礎を構成するラフト（直接基礎）と群杭（杭基礎）との間の動的相互作用係数（振幅| |, 位相角）を振動数領域にて分析した。

動的相互作用係数を任意関数で定式化し、パイルド・ラフト基礎の動的地盤ばねを直接基礎と杭基礎の動的地盤ばねを用いて評価する新たな方法を構築した。

(3)建物-地盤の動的相互作用の分析と地震時杭応力の評価

FEM 解析結果を基に、建物や基礎の慣性力と地盤変位の時刻歴データをフーリエ変換し、その位相差スペクトルから両者の作用関係を分析した。

建物の加速度応答から慣性力を、また表層の地盤震動を求め、これを基礎への作用地震荷重として与え、各荷重成分によって生じる杭応力を算出する。

基礎への作用荷重による杭応力成分と建

物・基礎の慣性力と地盤変位の位相差を用いて、動的相互作用を考慮した地震時の杭の最大曲げ応力分布を評価した。

4. 研究成果

(1)建物-地盤連成 FEM 解析モデルを用いて大地震動を想定した時刻歴応答解析を行い、パイルド・ラフト基礎の地震応答を定量的に評価した結果、得られた知見のうち主なものは以下の通りである。

大地震動でもラフト底面反力や杭先端支持力によるロッキング剛性が期待できる場合には回転動が抑制され、建物応答を従来の基礎形式と比べて同程度、大きくても 10%程度の増大に抑えられる。

ラフト底面直下の地盤の剛性低下が先行するため、ラフトと地盤との境界で基礎全面に渡って滑動する可能性は低い。

水平動および回転動に対する地盤抵抗を表現する動的地盤ばねの剛性は地盤の非線形挙動により小さくなるが、その低下率は従来の基礎形式と同程度となる。

ラフトが地盤に接地していることで大地震動でも建物慣性の水平成分による杭応力が支持杭形式の杭基礎の場合よりも杭頭付近で大幅に低減されると共に、基礎の回転剛性が小さく地盤の非線形性が進行することで逆符号である回転成分による杭応力は大きくなる。ゆえに、全成分を含む結果として、杭応力は大地震動でも大幅に低減される。

大地震動での建物の振動特性や最大応答の抑制効果、地盤の非線形化に伴う基礎の水平・回転剛性の低下、地震時杭体応力の低減効果を踏まえて効果的な適用条件を提示した。

(2)パイルド・ラフト基礎の動的地盤ばねとパイルド・ラフト基礎を構成するラフトと群杭間の動的相互作用係数

パイルド・ラフト基礎の動的地盤ばねは、杭基礎よりも振動数の増加に伴う変化が抑制される。

動的相互作用係数は、振幅は任意の振動数でピークを示した後 0 に近づく曲線を描く。一方、位相角は振動数の増加に伴い増大して任意の振動数で変曲点を示した後 -1 に近づく曲線となる。また、変曲点を示す振動数は杭基礎のばね剛性がピークを示す振動数とほぼ対応する。これは隣接杭からの地盤を介した伝播波動による変位が加振力によって生じる杭の変位よりも位相の遅れが生じる動的現象を反映している。

動的相互作用係数の振幅と位相角は無次元化振動数を関数とする任意の近似式でフィッティングでき、それぞれの式中の変数は直接基礎と杭基礎の動的地盤ばね比を用いることで一義的に決定可能となる。

定式化した動的相互作用係数、直接基礎と杭基礎の動的地盤ばねを用いることでパイルド・ラフト基礎の動的地盤ばねを簡易評価

が可能となった。本算定法は摩擦杭形式のパイルド・ラフト基礎であれば、基礎層を有する地盤条件でも対応可能である。

(3)建物-地盤の動的相互作用の分析と地震時杭応力の評価

大地震動でのパイルド・ラフト基礎のスペクトルを分析した結果、建物の連成系 1 次固有有機において、地盤変位に対して建物の慣性力の位相は $1/4 \sim 1/2$ 遅れる。一方、基礎の慣性力の位相は地盤変位よりも $0 \sim 1/4$ 遅れる。

建物の水平抵抗による杭応力成分は杭基礎よりも大幅に低減される。ただし、地震動レベルが大きいほど地盤の非線形性が進行するため杭の水平抵抗への寄与率が増加し、応力低減効果は減少する。一方、建物の回転成分による杭応力成分は杭基礎よりも大きく、また表層の剛性が低い地盤条件の場合にその傾向が大きい。更に、地震動レベルが大きいほど地盤の非線形性が進行してその傾向が顕著となる。また、地盤震動による杭応力成分は地震動レベルによらず杭基礎と同程度となる。

杭の最大曲げ応力分布の簡易算定では、パイルド・ラフト基礎と杭基礎では建物・基礎慣性力の成分に異なる位相角を設定して、各杭の応力成分の影響を評価すれば良い。

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)

[学会発表](計 3 件)

三室貴憲, 永井宏, 土屋勉: 建物-地盤連成解析によるパイルド・ラフト基礎の地震応答性状に関する研究 - 地震動レベルの影響 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.473-474, 2016.8

三室貴憲, 永井宏, 土屋勉: FEM 解析によるパイルド・ラフト基礎の地震応答 - 地震動レベルの影響 -, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.89, pp.91-94, 2016.6

村本恵一, 永井宏, 三室貴憲: パイルド・ラフト基礎の動的地盤ばねの簡易算定法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.551-552, 2017.8

[その他]

Takanori Mimuro and Hiroshi Nagai: Seismic response behavior of Piled raft Foundation Considering Soil-Structure Interaction under Strong Earthquake, Joint Seminar on Environmental Science and Disaster Mitigation Research 2017, pp.41-42, 2017

Keiichi Muramoto and Hiroshi Nagai: Calculation method and Estimation on Dynamic Impedance of Piled raft Foundation, Joint Seminar on

Environmental Science and Disaster Mitigation Research 2017, pp.101-102, 2017

Takanori Mimuro, Hiroshi Nagai : Shear Strain Distribution in Soil around Piled Raft Foundation under Severe Earthquake, Joint Seminar on Environmental Science and Disaster Mitigation Research 2018, pp.143-144, 2018

6 . 研究組織

(1)研究代表者

永井 宏 (NAGAI, Hiroshi)

室蘭工業大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：7 0 4 1 3 7 9 7