

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289197

研究課題名(和文)大規模3次元非線形モデルによる地盤-基礎-建物連成系の終局レベルの地震時挙動評価

研究課題名(英文) Estimation of ultimate level seismic behavior of soil-foundation-structure interaction system using large scale 3-D nonlinear model

研究代表者

中村 尚弘 (Nakamura, Naohiro)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50416640

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,400,000円

研究成果の概要(和文)：大地震時の建物の挙動，特に上部構造だけでなく杭等の基礎構造も含めた挙動の高精度な評価は，建物の構造設計において極めて重要な課題である。これまで多数の地震観測記録に対して，シミュレーション解析と挙動の分析が行われてきたが，基礎構造に関する検討と分析は不十分である。本研究等々は，既往の地震記録に基づき，詳細な地盤-基礎-建物の3次元FEMモデルによるシミュレーションを実施し，基礎構造も含めて地震時挙動を良好に再現できることを確認した。これに基づき本研究では，設計想定以上の地震動レベルに対して連成系3次元モデルによるシミュレーションを実施し，極限レベルの地建物の挙動を評価した。

研究成果の概要(英文)：It is very important for the structural design of buildings to estimate accurately the behavior of not only the upper structure but also the underground structure including piles during severe earthquakes. Although many simulation analysis and behavior estimation have been done based on the seismic observation records, the study is not enough especially for the underground structure. We performed the simulation analyses of the soil-foundation-structure system based on the observed records using the detailed 3-dimensional FEM model, and confirmed that the accuracy of the analysis result including the underground structure is high. In this study, simulation analyses using 3-dimensional FEM model using input motion beyond the design level earthquake were carried out, then the ultimate behavior of buildings was estimated.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：地震応答解析 地盤-基礎-建物連成系 有限要素法 非線形解析 減衰モデル

1. 研究開始当初の背景

現実の建物は形状や構造が必ずしも単純ではないため、簡易なモデル(例えば質点系SRモデル)では、建物各部の応答精度に課題がある。そこで、建物の形状や構造を詳細に表わせる3次元FEMモデルの適用が望まれる。最近では、上部構造については3次元モデルで地震応答解析を行い構造設計に適用する事例も多くなっている。しかし、建物の地下構造の応答性状や、地盤建物相互作用の影響等を併せて評価するためには、地盤-基礎-建物を一体としてモデル化して応答解析を行う必要がある。

建物の地震時挙動の詳細な評価のためには、この方法により知見を蓄積することが重要であるが、この解析は現在の高性能計算機でも解析負荷が大きいため、実施例は限られている。このためには、現状の課題として以下が挙げられる。

- 1) 解析精度向上と解析負荷軽減のための応答解析理論の高度化
- 2) 計算速度向上のための計算機並列化処理の高度化
- 3) 観測記録との比較による解析精度の確認とそれに基づく地盤モデルの改良
- 4) 設計想定以上の地震に対する建物の破壊性状の高精度な評価

2. 研究の目的

1995年の兵庫県南部地震や2011年東北地方太平洋沖地震では、想定以上の地震が起こり、設計想定以上の入力動が建物を襲う可能性が決して否定できないものであることを示した。一方で、建物の耐震性を際限なく向上させることはできない。経済性、合理性の観点から、どの程度の地震入力に対して建物の健全性を示せばよいか、が我が国の今後の耐震設計に関して重要な課題であると考えられる。

本研究では、建物-基礎-地盤連成系の詳細な非線形3次元モデルを作成し、極限レベルの地震動により建物のどこがどのように破壊し、全体崩壊に至るのかを検討する。特にこれまで、十分に検討されていなかった基礎も含めた全体系の中核で、破壊挙動を詳細に評価することが重要と考える。

3. 研究の方法

上記の目的達成のためには、上記1)の1)~4)で示した課題を解決する必要がある。これらに対応して下記の検討を行った。

1) 応答解析理論の高度化

解析時間低減のため、高精度波動境界モデルを用いた地盤モデルの縮小が考えられるが、これまでは線形および弱非線形場での適用に限られていた。これを強非線形場でも適用可能とする。併せて、地盤-基礎-建物連成系モデルにおいて統一的に使用できる汎用性の高い減衰モデルを検討する。

2) 計算機並列化処理の高度化

クラスターPC上で解析を高速化するためには、多量のCPUへの解析計算の最適な配分が重要となるが、地盤や建物の地震応答解析では、十分な高速化が得られていない。この方法を検討し、大規模地震応答解析における有効性を確認する。

3) 地盤モデルの改良

極稀地震レベルの解析を実施するため、3次元地盤で適用可能であり、かつ強非線形域まで有効な地盤非線形モデルを選定する。これを用いた3次元連成系解析の結果と実地震観測結果と比較することでモデルの有効性を検討する。

4) 建物の破壊性状の高精度な評価

2011年東北地方太平洋沖地震では多数の建物で強震記録が得られたが、多くは稀地震と極稀地震の中間程度であり、設計想定以上の地震に対する建物の終局レベルの破壊性状については不明である。このような地震動に対して地盤-基礎-建物連成系の詳細なモデルにより地震応答解析を行い建物や杭の破壊性状を評価する。

4. 研究成果

上記の各項目に対し以下の成果を得た。

1) 応答解析理論の高度化

解析時間低減のための高精度波動境界モデルとして本研究者が開発した時間領域エネルギー伝達境界がある。これを3次元強非線形地盤でも適用できるように改良した。また、地盤-基礎-建物連成系モデルにおいて統一的に使用できる汎用性の高い減衰モデルとして、本研究者が提案している因果的履歴減衰モデルと修正Rayleigh減衰モデルの検討を行い、非線形問題でも適用可能であることを確認した。

2) 計算機並列化処理の高度化

クラスターPC上の地盤や建物の地震応答解析において、高速化の検討を実施した。まず、応力算定ルーチンの並列化と、MUMPS、Super-LU等の並列用線形方程式ソルバーの効率化方法について検討した。さらに各NodeのCoreとメモリを最適に用いるためハイブリッド型並列化の検討を実施した。いずれも解析プログラムに適用し、計算効率の大きな改善が見られたことを確認した。

3) 解析モデルの向上

極稀地震レベルの解析を実施するため、3次元地盤で適用可能であり、かつ強非線形域まで有効な地盤非線形モデルとして、地震動が1方向入力を想定する場合には石原吉田モデル、多方向入力を想定する場合には、マルチ・ハードニングモデルを選定した。これらの有効性を確認するため、強

震時の建物と基礎の観測記録と、マルチ・ハードニングモデルを用いた解析結果を比較し良好な結果を得た。この解析の例として、格子型改良地盤の地震時応答結果を図1に示す。

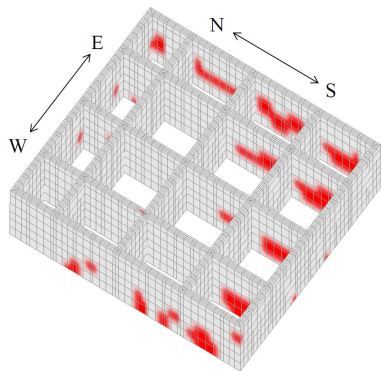


図1 格子型改良地盤の地震時応答性状

4) 建物の破壊性状の高精度な評価、
本研究では、地盤-基礎-建物連成系の詳細な3次元FEMモデルを作成し、設計想定以上(極稀地震の2倍まで)の入力を与えることにより、建物の破壊性状を評価した。地盤は1種~3種地盤の3種類とし、建物はRC造6階、10階、15階の3種類とした。例として図2に15階建物の地盤-基礎-建物連成系モデルを示す。

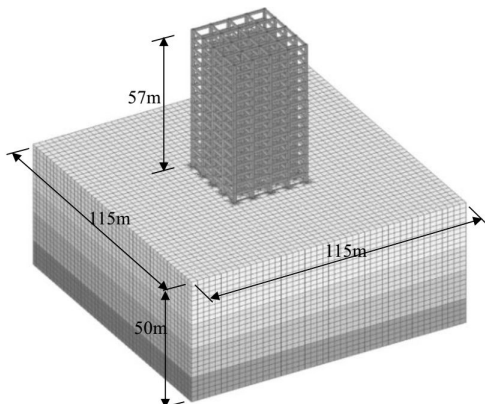


図2 3次元FEM解析モデル(15階)

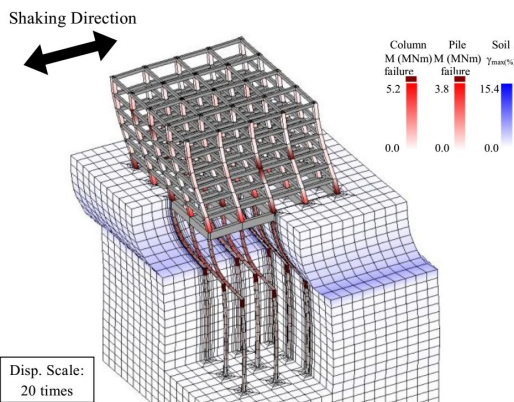


図3 最大応答変形(第3種地盤, 6階)

図3に応答結果の例として、第3種地盤上の6階建物の最大変形時の応答性状を示す。

破壊が基礎で起こるか建物で起こるかは、地盤と建物の特性に依存し、先行した方に破壊が集中し他の破壊は緩和される傾向が見られた。また杭や建物の応答は、地盤が柔らかい場合は杭に、硬い場合は建物に大きく出る傾向が見られ、また建物が高い場合には地盤の影響は小さくなる等の一般的な傾向は得られた。しかし、他の様々な要因の影響を受け、応答性状が複雑となる場合もみられた。

また計算時間の低減を図るため地盤を等価線形とした場合も検討した。上部建物の応答は過大に、杭の応答は過小に評価する傾向があり精度の低い結果となった。今後これらの性状を整理し、設計への提案に向けてさらに知見を蓄積していく予定である。

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4件)

1. N. Nakamura, Extended Rayleigh Damping Model, *Frontiers, Built Environment*, 査読有, 2016, doi: 10.3389/fbuil.2016.00014
2. 重野 喜政, 濱田 純次, 中村 尚弘, 山下 清: Numerical Analyses of a Piled Raft Foundation with Grid-Form DMWs under Large Scale Earthquake, 査読無, 2015, 竹中技術研究報告, Vol.71, pp.35-48
3. N. Nakamura, Three Dimensional Energy Transmitting Boundary in the Time Domain, *Frontiers, Built Environment*, 査読有, 2015, doi: 10.3389/fbuil.2015.00021
4. 濱田 純次, 重野 喜政, 中村 尚弘, 鬼丸 貞友, 谷川 友浩, 山下 清: 地震観測結果に基づく免震建物を支持する格子状地盤改良を併用したパイルド・ラフト基礎の地震時シミュレーション解析, 査読有, 2014, 日本建築学会構造系論文集, Vol.701, pp.941-950

(学会発表)(計10件)

1. N. Nakamura, Dynamic response analysis using extended Rayleigh damping model, *Eurodyn2017*, 2017.9.10, paper No. 151, Rome, Italy
2. N. Nakamura, A Study on energy transmitting boundary for three-dimensional nonlinear analysis, *ACE2017*, 2017.5.9, paper No. 1714, Singapore
3. Y. Shigeno, K. Yamashita, J. Hamada, N. Nakamura: Numerical Analyses of A Piled Raft Foundation with Gridform DMWs Under Large Earthquake Load, *16WCEE*, 2017.1.9, paper No. 904, Santiago, Chile

4. N. Nakamura: Improvement of energy transmitting boundary in the time domain, 16WCEE, 2017.1.9, Paper No. 1714, Santiago, Chile, 2017.1

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 尚弘 (NAKAMURA NAOHIRO)
広島大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：50416640

(2) 研究分担者

山下 清 (YAMASHITA KIYOSHI)
竹中工務店・技術研究所・専門役
研究者番号：00507303

濱田 純次 (HAMADA JUNJI)
竹中工務店・技術研究所・主任研究員
研究者番号：60507292

東条 峻樹 (TOJO TAKAKI)
竹中工務店・技術研究所・研究員
研究者番号：70752103

谷川 友浩 (TANIGAWA TOMOHIRO)
竹中工務店・技術研究所・研究員
研究者番号：40507266

鈴木 琢也 (SUZUKI TAKUYA)
竹中工務店・技術研究所・主任研究員
研究者番号：00470310

重野 喜政 (SHIGENO YOSHIMASA)
竹中工務店・技術研究所・主任研究員
研究者番号：70416642

三浦 弘之 (MIURA HIROYUKI)
広島大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：30418678

宮津 裕次 (MIYAZU YUJI)
広島大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：70547091