

解析モデルに応じた基礎構造部材の応力変動に関する研究
(3階建てRC造学校建物の一体モデル、複数杭モデル、単杭モデルの比較)

鉄筋コンクリート造 基礎構造部材 荷重増分解析 準会員 ○中尾優樹*1 正会員 津森崇行*2
解析モデルカテゴリー 一体モデル 分離モデル 正会員 秋田知芳*3 正会員 稲井栄一*4

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震において、杭基礎に被害を受けた建物が多く見られた¹⁾²⁾。現行の法基準では上部構造は大地震に対する設計が義務付けられているのに対し、下部構造は大地震時の安全性の検討が規定されていない³⁾。しかし、杭基礎に被害が生じると建物の継続使用が困難になるため、学校建築など避難場所となる建物で杭基礎の被害を防ぐことが必要である。そのため今後は杭基礎についても大地震に対する設計が必要になるものと考えられる⁴⁾。

建築物の耐震設計を行う場合、上部構造、基礎構造部材、地盤までを含めて一体として扱うことが望ましいと考えられるが、一般に広く行われている状況ではない。『鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震設計指針(案)』⁵⁾(以下指針(案)と略記)では基礎構造部材の設計用応力を求めるための解析モデルが4つ示されている。上部構造と下部構造が分離しているモデルでは、相互作用の影響が考慮されていないため上部構造と下部構造を一体としたモデルに比べて応答値が小さくなる場合があり設計の際には応答値を割増すことが提案されている。解析モデルの違いによって、基礎構造部材に発生する応力がどの程度変動するかについては、指針(案)では伊藤による検討⁶⁾が示されているのみで検討例が非常に

少ない。本研究では、大橋による3階建てRC造学校建物の一体モデルと単杭モデルの解析⁷⁾に加え、複数杭モデルの荷重増分解析を行い、基礎構造部材の解析モデルの違いによる応力の変動について検討する。

2. 基礎構造部材の耐震設計

指針(案)では基礎構造部材の設計応力を求めるための解析モデルは、図1に示すように以下の4つの「解析モデルカテゴリー」に分類されている。

- ・解析モデルカテゴリー①：上部構造・基礎構造一体，多層地盤モデル(または一体型という)
- ・解析モデルカテゴリー②：上部構造・基礎構造分離，多層地盤モデル(または分離型1という)
- ・解析モデルカテゴリー③：上部構造・基礎構造分離，単杭・多層地盤モデル(または分離型2という)
- ・解析モデルカテゴリー④：上部構造・構造基礎分離，単杭・一様地盤モデル(または分離型3という)

一体型は最も適用できる範囲が広い上、相互作用の影響が考慮できるメリットがあるが計算が複雑で難しい。分離型1、分離型2、分離型3の順で適用範囲が限定的になると共に考慮できる要素も限られてくる一方で、計算の手間は軽減される。指針(案)で示されている応力の割増し係数を表1に示す。割増し係数は1.0~2.0であり、変動軸力の大きさで使い分けることが示されている。

表1 指針(案)における割増し係数

| モデル | 検討部位 | 曲げ | せん断 |
|------|------|----------------------------|----------------------------|
| 分離型1 | 杭頭部 | 1.0 | 1.5 (1.0) ^{*3} |
| | 杭中間部 | 2.0 (1.0) ^{*1} | |
| 分離型2 | 杭頭部 | 2.0 (1.0) ^{*2} | 1.5 (1.0) ^{*4} |
| | 杭中間部 | 2.0 (1.0) ^{*1} | |

*1杭中間部の検定において、杭頭部と杭中間部の大きいほうの設計用曲げモーメントに作用する場合
*2軸力の変動の影響が、杭頭回転ばねの曲げモーメント回転角関係に反映できている場合、もしくは設計用地震力より杭に作用する地震時変動軸力が長期軸力の20%以内である場合
*3設計用地震力により杭に作用する地震時変動軸力が長期軸力の50%以下である場合
*4設計用地震力により杭に作用する地震時変動軸力が長期軸力の20%以下である場合

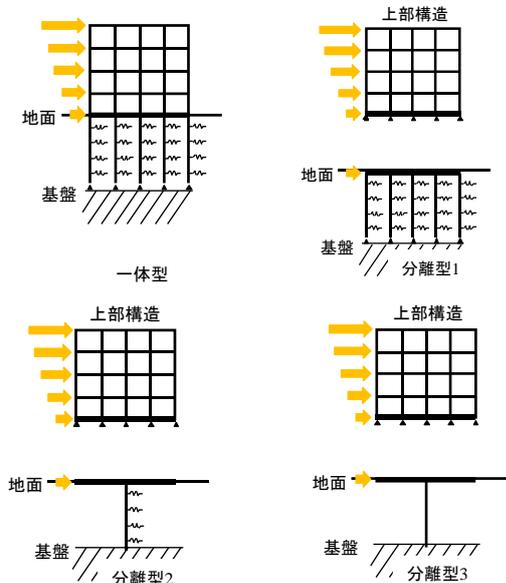


図1 解析モデルカテゴリー

A Study on the Stress fluctuation of the Foundation Structure Members According to the Analysis Model
(Examination of 3-story RC School Building of Super-and-sub Structure Model, Multi Pile Model, Single Pile Model)

NAKAO Masaki, TUMORI Takayuki,
AKITA Tomofusa and INAI Eiichi

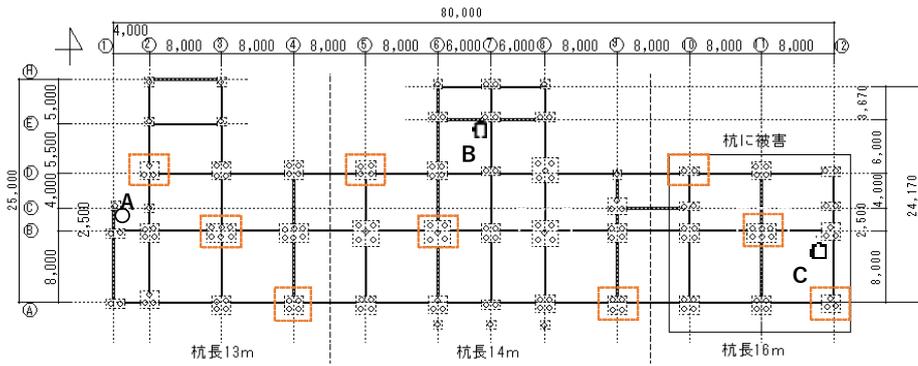


図2 杭伏図

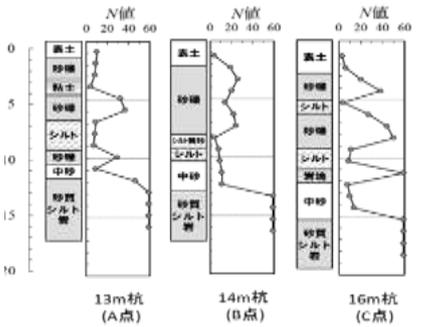


図3 柱伏図

3. 解析計画

3.1 検討対象建物概要

解析対象は、2011年東北地方太平洋沖地震の被害に遭った学校建物で、杭基礎を有する3階建てのRC造建物である。地下階はなく、桁行方向（以下X方向と呼ぶ）が11スパンのラーメン構造（一部耐震壁）、梁間方向（以下Y方向と呼ぶ）が5スパンの耐震壁を含むラーメン構造である。本建物に配置されている壁の大半には開口が設けられている。図2に杭伏図、図3に柱状図を示す。基礎は杭基礎で、杭にはPHC杭（B種）400φが用いられており、現行の技術基準に従った耐震設計（許容応力度設計）が行われていた。杭長は1~4通りが13m（48本）、5~9通りが14m（71本）、10~12通りが16m（36本）となっており、計155本である。地盤は第2種地盤である。

3.2 解析モデル

図4に単杭モデルの概略図を示す。杭は100cmずつの要素に分割してモデル化している。杭断面は標準的なPHC杭（φ400）を参考にし、杭断面を36分割したFiberモデルでモデル化した。杭の要素の節点に水平地盤バネを取り付け、杭先端をピン支持とする。なお、本モデルでは杭長は地表面から杭先端までの長さとした。

図5に一体モデルの概略図を示す。解析モデルは建物上部（基礎梁含む）をモデル化した立体骨組とし、柱部材および梁部材は線材に置換したフレームモデルとしている。梁部材は材端ばねモデルとし、曲げに対するスケルトンカーブは曲げひび割れ、曲げ降伏を考慮したトリリニア型とする。柱部材は曲げと軸に対してはマルチスプリングモデル、せん断に対しては材端ばねモデルとしている。壁部材は、耐力壁をエレメント置換した材端ばねモデル、その他の壁は自重のみを考慮する。ただしその他の壁は側ばりの腰壁・垂壁、側柱の袖壁に置換し、側ばりおよび側柱の剛性と耐力に考慮する。なおここでは開口周比0.4以下の壁を耐力壁としている。スラブは1階が土間であることから、2階と3階のみ剛床と仮定している。また、一体モデルでは、複数本の杭をパイ

ルキャップごとに一本にまとめたものとしている。一体モデルの荷重増分解析に用いる水平力分布は A_i 分布に基づいて設定した。

図6に複数杭モデルの概略図を示す。複数杭モデルは一体モデルから上部モデルを分離させ、上部構造の柱はすべてピン支持とし、下部構造の基礎部分は剛床とし任意で軸力やモーメントを与える。解析は下部構造にあらかじめ与える軸力が0kNのもの（以下複数杭0）、大橋による研究と比較するため、本建物の単杭モデルにおいて軸力を与えた際、最も一体モデルとの対応が良かった数値500kNを杭ごとに与えたもの（以下複数杭500）、上部構造の解析から抽出した軸力とモーメントを与えたもの（以下複数杭上部）を用意した。いずれも、層間変形角が0.02radに到達した時点で終了とした。また、各応力や変位など各モデルカテゴリーで比較する際は、 $(C_B=0.3)$ 時の値を比較している。

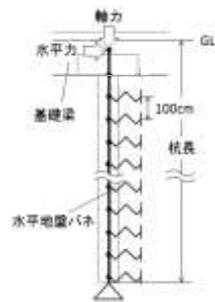


図4 単杭モデル概略図

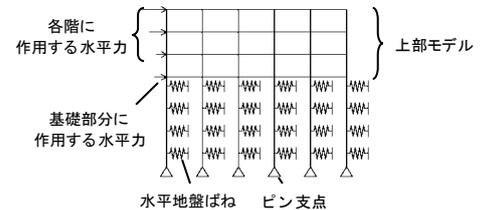


図5 一体モデルの概略図

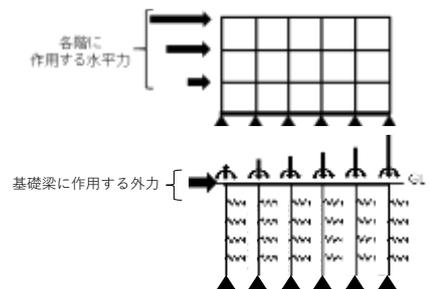


図6 複数杭モデル概略図

4. 解析結果と考察

4.1 基礎梁位置の外力と水平変位の関係

図7に基礎梁位置の外力と水平変位の関係を示す。複数杭0、複数杭500は明らかに一体モデルとの差が大きく、一方で複数杭上部は一体モデルに比べ同じ水平変位における外力は下回っているが一体モデルに一番近かった。

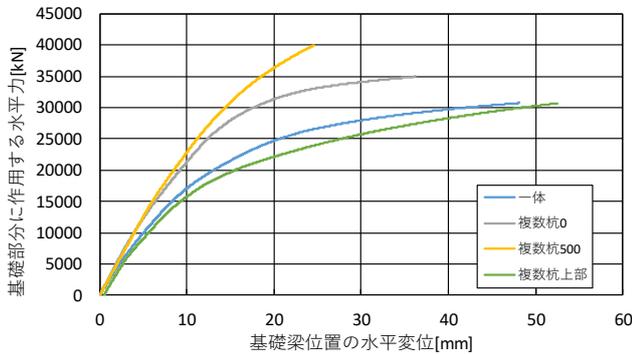


図7 基礎梁位置の外力と水平変位の関係

4.2 杭頭せん断力ー杭頭水平変位関係

図8に複数杭モデルの解析から得られた杭頭せん断力と杭頭水平変位の関係を示す。図2のA4,B6,D10において複数杭500は一体モデルと最も離れた値を取りせん断剛性も高い。複数杭0、複数杭上部においては複数杭の値が大きくなるが多かった。しかし、図2のD10においては一体モデルと複数杭上部は杭頭水平変位の解析終了時の杭頭水平変位の値は異なるが近似したグラフとなった。

4.3 杭の応力変動

図9に $C_B=0.3$ 時の一体モデル、複数杭上部における杭頭曲げモーメント分布図および杭頭せん断力図を示す。単杭モデルとの比較をするため、一体モデル、複数杭モデルの値は各杭の本数で除して杭1本にかかる曲げモーメントとせん断力を示す。単杭モデルにおける基礎梁位置の水平力は、一体モデルにおける $C_B=0.3$ に相当する杭1本の水平力(基礎梁位置の水平力を杭本数で除して換算)としている。

曲げモーメントに関して、複数杭500は杭頭、杭中間部ともに一体モデルと大きく値が異なり、複数杭0、複数杭500よりも一体との差が大きかった。複数杭上部と複数杭0を比較すると杭頭では差はあるが杭中間部では近い値となった。

せん断力に関して、杭頭では複数杭0と複数杭500が近い値をとり、杭中間部含めると一体モデルと複数杭上部に近い値となった。

これらのことから、基礎梁位置の外力と水平変位の関係は複数杭上部が一体モデルと最も近かったが、応力に関しては杭によって一体モデルに近いモデルは異なった。

一体モデルの曲げモーメントおよびせん断力を複数杭モデルの値で割った比率を表2に示す。複数杭モデルの曲げモーメントに対する一体モデルの曲げモーメントの比率は杭頭で0.7~2.0、杭中間部で0.8~1.3となっている。

表1で示した指針(案)の分離型1における割り増し係数と比べると、杭頭では値(1.0)とは大きく差が生じ、杭中間部では最大値が概ね示されている値(2.0)を下回った。複数杭モデルのせん断力に対する一体モデルのせん断力の比率は杭頭で約0.7~1.3、杭中間部で0.8~1.3であり、指針(案)と比べると杭頭では値(1.0)と0.3ほど差が生じ、杭中間部では示されている値(1.5)を下回る結果となった。表3に示した単杭モデルに対する一体モデルの比率と表2を比較すると単杭モデルでは杭中間部にて割り増し係数を上回る杭が多いが、複数杭モデルにおいては杭頭にて割り増し係数を上回ることが多かった。

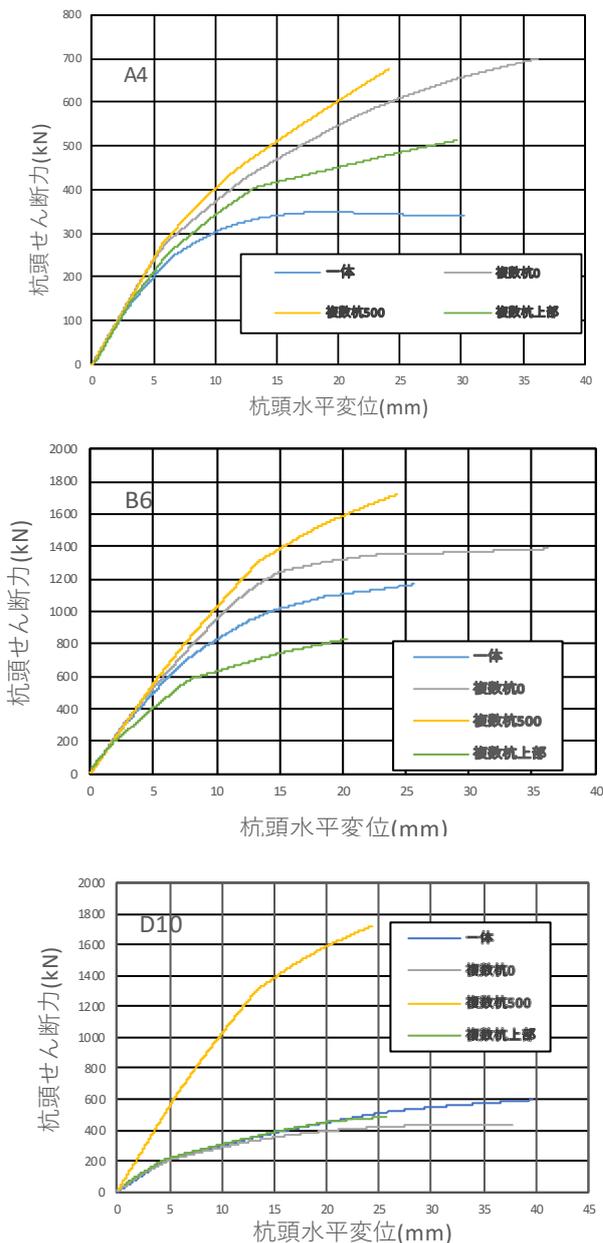


図8 杭頭せん断力ー杭頭水平変位の関係

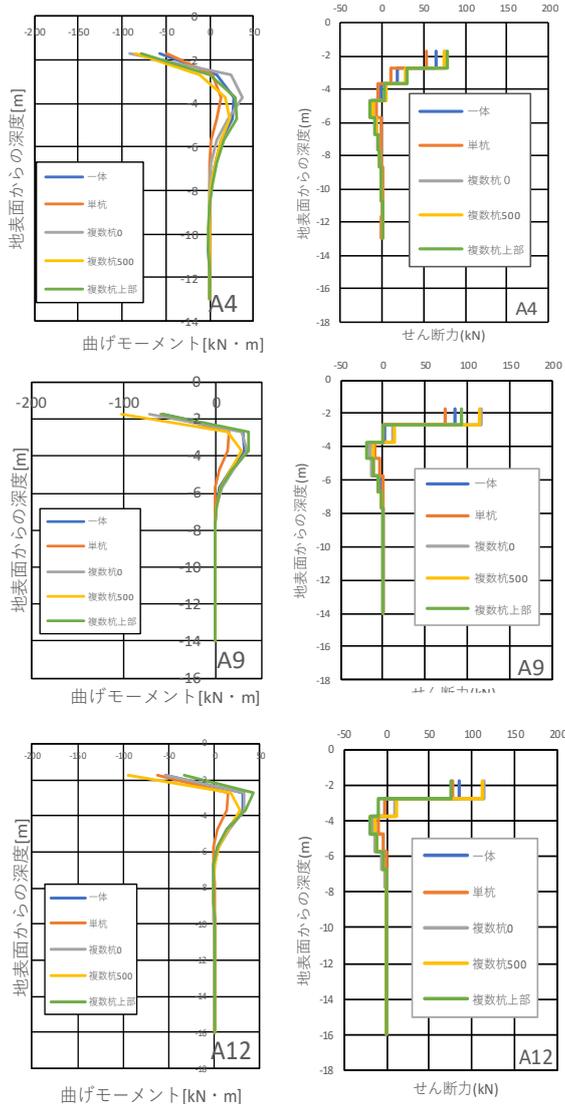


図9 杭の曲げモーメント分布図およびせん断力図

5. まとめ

解析モデルカテゴリーの違いによる応答値の変動を検討するため、複数杭モデル、一体モデルの荷重増分解析を実施した。杭の応力に着目して検討し、以下の知見が得られた。

- (1)基礎梁位置の外力と水平変位の関係は複数杭上部が最も一体モデルと対応しているが、応力に関しては一概に複数杭上部が対応しているとは言えない。
- (2)複数杭モデルの曲げモーメントに対する一体モデルの曲げモーメントの比率は杭頭で0.7~2.0、杭中間部で0.8~1.3であり、各杭の比率にばらつきが見られ、割り増し係数を上回る杭も見られた。

表2 複数杭モデル (複数杭上部) に対する一体モデルの比率

| 位置 | 曲げモーメント | | せん断力 | | |
|-----|---------|-------|-------|-------|-------|
| | 杭頭 | 中間部 | 杭頭 | 中間部 | |
| 13m | A4 | 0.728 | 0.858 | 0.676 | 0.847 |
| | B3 | 1.049 | 1.029 | 0.913 | 1.034 |
| | D2 | 1.919 | 1.03 | 1.217 | 1.095 |
| 14m | A9 | 0.975 | 0.866 | 0.791 | 0.858 |
| | B6 | 1.171 | 1.13 | 0.997 | 1.141 |
| | D5 | 1.532 | 1.18 | 1.254 | 1.095 |
| 16m | A12 | 1.641 | 0.742 | 1.042 | 0.838 |
| | B11 | 1.132 | 1.27 | 1.123 | 1.319 |
| | D10 | 1.007 | 1.101 | 0.975 | 1.104 |

表3 単杭モデル に対する一体モデルの比率

| 位置 | 曲げモーメント | | せん断力 | | |
|-----|---------|-------|-------|-------|-------|
| | 杭頭 | 中間部 | 杭頭 | 中間部 | |
| 13m | A4 | 1.151 | 2.095 | 1.228 | 1.977 |
| | B3 | 1.106 | 1.605 | 1.128 | 1.548 |
| | D2 | 1.063 | 1.631 | 1.091 | 1.365 |
| 14m | A9 | 0.935 | 2.21 | 1.163 | 1.592 |
| | B6 | 1.056 | 1.564 | 1.162 | 1.29 |
| | D5 | 1.122 | 1.321 | 1.079 | 0.982 |
| 16m | A12 | 0.855 | 2.072 | 1.095 | 1.607 |
| | B11 | 1.077 | 1.175 | 1.059 | 1.007 |
| | D10 | 1.225 | 1.544 | 1.057 | 1.679 |

(3)複数杭モデルのせん断力に対する一体モデルのせん断力の比率は杭頭で0.7~1.3、杭中間部で0.8~1.3であり、曲げモーメント同様に比率にばらつきが見られたが、指針の割り増し係数を下回った。

(4)単杭モデルでは曲げモーメント、せん断力ともに杭中間部で指針(案)の割り増し係数を上回るのに対し、複数杭モデルでは杭頭で割り増し係数を上回るものが多かったが、中間部では曲げモーメント、せん断力では割り増し係数を下回った。

- 1) 日本建築学会：2011年東北地方太平洋沖地震被災調査速報、577pp、2011.7
- 2) 日本建築学会文教施設委員会耐震性能等小委員会：文教施設の耐震性能等に関する調査研究報告書、570pp、2012.3
- 3) 国土交通省住宅局建築指導課ほか：建築物の高層関係技術基準解説書、pp.57-67、2007.8
- 4) 日本コンクリート工学会：東日本大震災に関する特別委員会報告書、pp.359-360、2013.3
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震設計指針(案)・同解説、pp.100-103、2017.3
- 6) 伊藤央：ばらつきを考慮した基礎構造部材の応答評価、日本建築学会鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震設計 pp.35-46、2010.9
- 7) 大橋未奈：解析モデルに応じた基礎構造部材の応力変動に関する研究-3階建てRC造学校建物を用いた研究-、日本建築中国支部研究報告集、第43巻、pp.129-132、2020.3
- 8) 間瀬辰也、中井正一：単杭の杭周地盤ばねの評価法に関する検討、日本建築学会構造系論文集、第77巻 第680号、pp.1527-1535、2012.10

*1 山口大学工学部感性デザイン工学科 学部生
 *2 山口大学大学院創成科学研究科 大学院生
 *3 山口大学大学院創成科学研究科講師 博士(工学)
 *4 山口大学大学院創成科学研究科教授 博士(工学)

Student, Dept. of Perceptual Sciences and Design Eng., Faculty of Eng., Yamaguchi Univ.
 Graduate Student, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ. Dr. Eng.
 Lecturer, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ., Dr. Eng.
 Prof, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi Univ., Dr. Eng.