

論文 分離解析モデルによる鉄筋コンクリート造建築物の杭基礎の耐震性能評価に及ぼす基礎梁剛性の影響

秋田 知芳*1・木谷 圭一*2・和泉 信之*3

要旨: 本論では、鉄筋コンクリート造杭基礎建築物を対象として、分離解析モデルを用いた非線形荷重増分解析による杭基礎の耐震性能評価を行う。分離解析モデルの精度に関わる因子として基礎梁の剛性に着目し、基礎梁剛性を変動させた一体解析モデルと分離解析モデルとの比較により杭基礎の耐震性能評価に及ぼす基礎梁剛性の影響を検討した。その結果、本論の検討範囲において分離解析モデルで基礎固定とした場合、一体解析モデルと比較して、杭のモーメントに関して2倍程度のばらつきが生じることが分かった。

キーワード: 場所打ちコンクリート杭, 基礎梁, 一体解析モデル, 分離解析モデル, 杭応答, 適用範囲

1. はじめに

杭基礎を有する建築物は、上部構造と下部構造を分けた分離解析モデルによって設計することが一般的である。その際、上部構造は保有水平耐力による2次設計で設計されるが、下部構造については許容応力度による1次設計で設計されることが多い。これは下部構造では大地震に対する設計が要求されていないこと、下部構造が壊れても上部構造が崩壊する可能性が低いことが主な理由である。しかしながら、下部構造についても上部構造と同じく性能を明確にすることが望ましく、2次設計に相当する設計が必要であると考えられる。

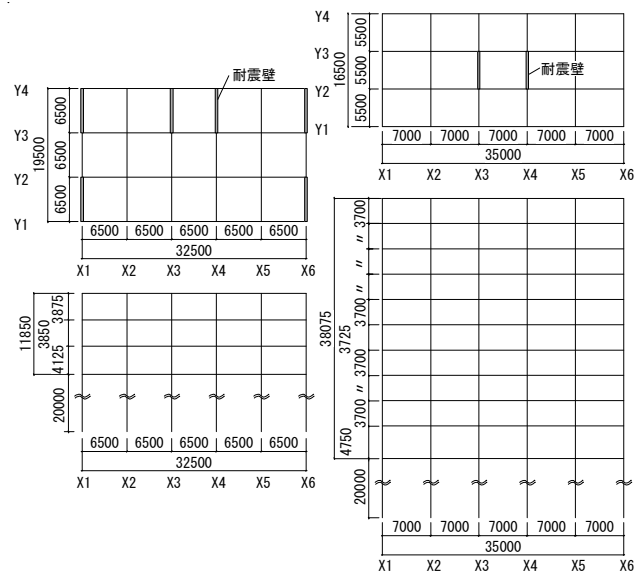
一般に、杭基礎建築物の耐震性能評価においては一体解析モデルを用いることが望ましいと考えられるが、分離解析モデルと比較して複雑なものとなるため、設計手法として広範に用いるにはやや難がある。設計においては、目標とする性能あるいは設計する建築物の特性等に合わせて、分離解析モデルを適切に適用することが合理的である。そのためには、同一の建築物に一体解析モデルと分離解析モデルを適用した場合の耐震性能の差異を把握し、分離解析モデルの適用範囲を明確にしておくことが必要である。

一体解析モデルと比較した場合に、分離解析モデルの精度に関わる因子として基礎梁の剛性が挙げられる。基礎梁の剛性は杭頭の固定度に影響し、地震時に杭に作用する応力に影響を及ぼす。本論では、鉄筋コンクリート造（以下、RC造）杭基礎建築物に対して一体解析モデルと分離解析モデルによるモデル化をそれぞれ行い、基礎梁の剛性をパラメータとした静的非線形荷重増分解析を実施して、基礎梁の剛性が一体解析モデルと分離解析モデルによる杭基礎の耐震性能評価に及ぼす影響について考察する。

2. 解析概要

2.1 解析対象建築物

解析対象とした建築物は図-1に示すような、杭基礎を有する3階建てのRC造低層建築物と10階建てのRC造中層建築物である。いずれも桁行方向は純フレーム構造、梁間方向は耐震壁付フレーム構造となっており、杭



(a) 3階建てモデル (b) 10階建てモデル

図-1 解析対象建築物

表-1 地盤条件

深度(m)	地盤種別	N値	E (MN/m ²)	V _S (m/s)	V _P (m/s)
0~8	粘土	3	4	130	340
9~12	シルト混じり細砂	10	7	150	360
13~18	細砂	20	28	200	400
19~20	砂礫	50	420	400	1220

*1 千葉大学 大学院工学研究科 建築・都市科学専攻 建築学コース 助教 博士（工学）（正会員）

*2 千葉大学 工学部 デザイン工学科

*3 千葉大学 大学院工学研究科 建築・都市科学専攻 建築学コース 教授 博士（工学）（正会員）

は場所打ちコンクリート杭である。表-1に地盤条件を示す。地盤は文献1)で用いられている地盤を参考に作成した。3階建て、10階建てともに同じであり、2種地盤を想定している。地表面から支持層まで20mとなっており、杭長は3階建てで約19m、10階建てで約18.5mである。また杭径は3階建てで1.2m、10階建てで1.9mである。両モデルとも全ての杭が同一のものとなっている。本論では、桁行方向（純フレーム構造）のみを対象として検討を行った。

2.2 解析方法

静的非線形荷重増分解析を実施して、RC造杭基礎建築物の耐震性能を検討する。表-2に解析ケースの一覧を、図-2に一体解析モデルおよび分離解析モデルのモデル図を示す。一体解析モデルについては基礎梁の剛性をパラメータとして、3階建ておよび10階建てモデルの基本モデル（3T-Bおよび10T-B）に対して基礎梁の剛性を0.5倍にしたモデル（3T-Lおよび10T-L）および2.0倍にしたモデル（3T-Hおよび10T-H）をそれぞれ作成し、計6つのモデルとした。分離解析モデルについては3階建ておよび10階建てモデルについて一体解析モデルに対応した上部構造モデルをそれぞれ3つずつと、図-2(b)に示すような基礎梁を剛とした下部構造モデル（3P-Rおよび10P-R）をそれぞれ1つずつ作成した。

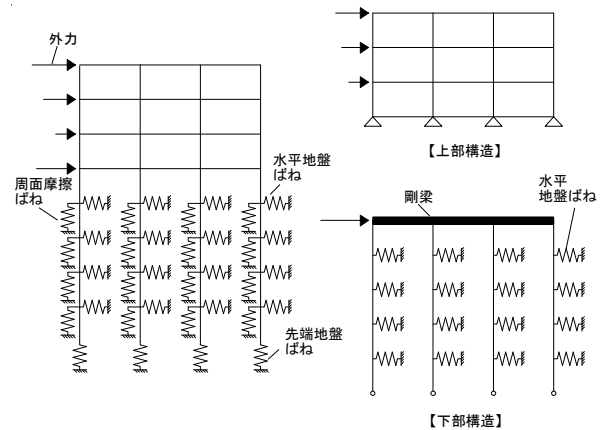
一体解析モデル（図-2(a)）は立体フレームとしてモデル化し、柱および梁には材端ばねモデルを用い、耐震壁は柱置換して材端ばねモデルとした。杭は100cmずつの要素に分割してモデル化し、 $M-\phi$ 関係は曲げひび割れおよび曲げ降伏を考慮したトリリニアのスケルトンカーブとした。本解析では、それぞれ杭の要素の節点に水平地盤ばねおよび周面摩擦（鉛直）ばねを取り付け、杭先端の要素には先端鉛直ばねを取り付けた。水平地盤ばねには「建築基礎構造設計指針」²⁾に示されている載荷試験の杭頭荷重-杭頭変位関係に基づく式を修正した図-3に示すモデル³⁾を用い、周面摩擦ばねおよび先端鉛直ばねは同じく文献2)に示されている極限先端支持力の評価式および周面摩擦力-沈下関係等を参考にトリリニア型のスケルトンカーブにモデル化した。荷重増分解析の際には上部構造の慣性力に加えて、下部構造に作用する外力として基礎梁位置の慣性力のみを考慮し、杭体の慣性力および地盤の強制変位による外力は考慮していない。基礎梁位置の慣性力については、既往の研究⁴⁾に基づいて基礎震度をベースシア係数の0.75倍として基礎に作用する外力を設定した。

分離解析モデル（図-2(b)）も立体フレームとしてモデル化し、上部構造モデルについては一体解析モデルと同様なモデル化を行っている。下部構造モデルについては、図-2(b)に示すように基礎梁を剛とし、水平地

盤ばねのみ有するモデルにモデル化した。外力として一体解析モデルより得られた杭頭位置のせん断力のみを作用させる。3階建ておよび10階建てともに、全ての杭が地盤ばねを含めて同一であるため、実質的に一本杭モデルにモデル化したこととなっている。

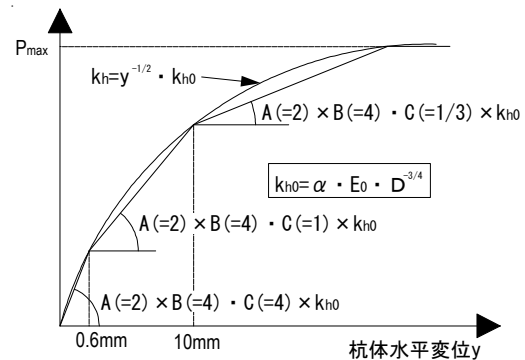
表-2 解析ケース

	一体解析モデル	分離解析モデル	
		上部構造	下部構造
3階建てモデル	3T-L	3B-L	3P-R
	3T-B	3B-B	
	3T-H	3B-H	
10階建てモデル	10T-L	10B-L	10P-R
	10T-B	10B-B	
	10T-H	10B-H	



(a) 一体解析モデル (b) 分離解析モデル

図-2 一体解析モデルおよび分離解析モデル



- k_h : 水平地盤反力 (kN/m^3)
- k_{h0} : 基準水平地盤反力係数 (kN/m^3)
- E_0 : 地盤の変形係数 (kN/m)
- α : 定数 (m)
- D : 無次元化杭径 (杭径50cmの場合50)
- P_{max} : 塑性地盤反力 (kN/m)
- A・B・Cは以下の影響を表す係数
 - A : 載荷試験時のクリープの影響
 - B : 地盤の応答ひずみによる影響
 - C : 杭近傍の相対変位の影響

図-3 水平地盤ばねのモデル

3. 解析結果および考察

3.1 層せん断力-層間変形角

図-4は一体解析モデル(3T-Bおよび10T-B)の層せん断力-層間変形角と分離解析における上部構造モデル(3B-Bおよび10B-B)の層せん断力-層間変形角を示したものである。一体解析モデルと分離解析モデルは概ね同じ曲線を示している。基礎梁の剛性を変えたケースについても同様である。一方、図-5は3階建てモデル(3Tおよび3B)および10階建てモデル(10Tおよび10B)の各解析ケースにおける上部構造のベースシア係数と代表変形角との関係を示したものである。代表変形角は3階建てモデルでは3階床位置、10階建てモデルでは8階床位置の地表面からの相対変位から求めている。また図中の実線は基本ケースを表し、破線は基礎梁の剛性を0.5倍したものおよび一点鎖線は基礎梁の剛性を2.0倍したものを表している。

3階建てモデルではベースシア係数と代表変形角の曲線上において剛性の差が認められるものの大きな差はなく、概ね同じであると言える。それに対して10階モデルでは基礎梁の剛性の影響はほとんど認められない。したがって、本解析で対象とした建築物については、上部構造の耐力および変形性能に関して、一体解析モデルと分離解析モデルによる差異および基礎梁の剛性による差異は認められない。

3.2 崩壊メカニズム

図-6(a)および(b)に一体解析モデルによる3階建ての基本モデル(3T-B)および分離解析における基本モデルの上部構造モデル(3B-B)の崩壊メカニズム形成時の様子を示す。崩壊メカニズム形成時のベースシア係数(C_B)は3T-Bで0.380、3B-Bで0.382となっており、ほぼ等しくなっている。一体解析モデルおよび分離解析モデルともに明快な全体降伏機構を示しており、両者に違いは見られない。10階建てモデルは崩壊メカニズムを形成しないが、最大層間変形角が1/50rad($C_B=0.33$)をもって保有水平耐力に達するものと判断した。本解析で対

象としたRC造杭基礎建築物は分離解析モデルの上部構造においても、一体解析モデルにおいても基礎梁が降伏に至らないものとなっている。

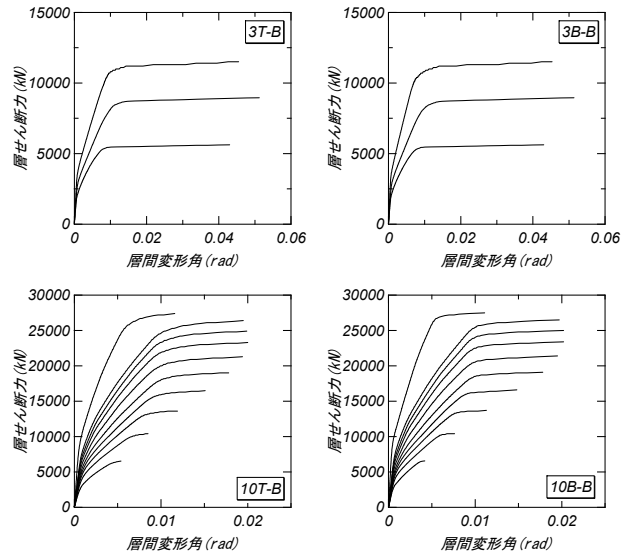


図-4 層せん断力-層間変形角

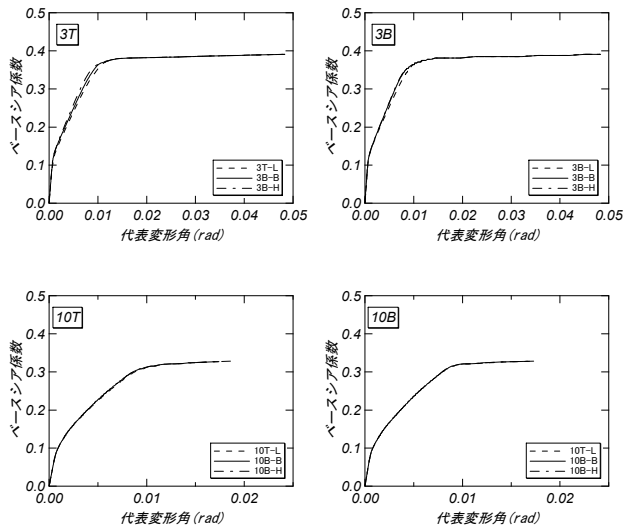
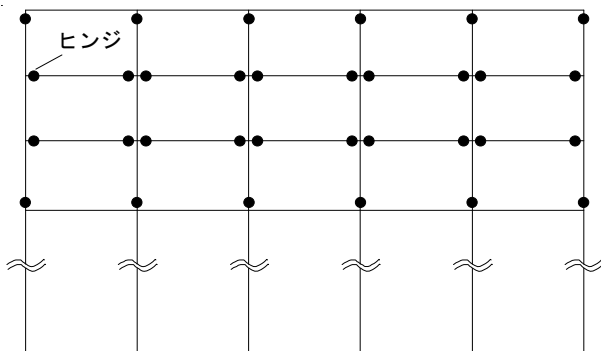
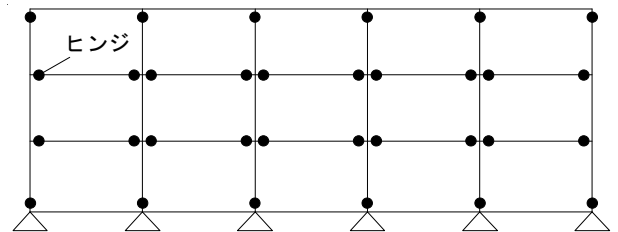


図-5 ベースシア係数-代表変形角



(a) 一体解析モデルの崩壊メカニズム



(b) 分離解析モデルの崩壊メカニズム

図-6 崩壊メカニズム(3階建て)

3.3 杭頭せん断力－杭頭水平変形

図－7に3階建てモデルおよび10階建てモデルの各解析ケースにおける杭頭せん断力と杭頭水平変形との関係を示す。杭頭せん断力は全ての杭に作用する杭頭せん断力の合計であり、杭頭水平変形は杭先端位置に対する1階床位置での変形である。図中の太実線は分離解析における下部構造モデルの結果を示している。本解析で用いた分離解析における下部構造モデルは、基礎梁を剛としたモデルであるため、杭頭が固定となっている。したがって、一体解析モデルの結果と比較して非常に剛性が高い結果となっている。一体解析モデルにおいて基礎梁の剛性を変動させた場合、3階建てモデルでは基本モデルに対して基礎梁の剛性を2.0倍としたものおよび0.5倍とした影響が、杭頭水平変形の差となって表れている。一方、10階建てモデルでは基礎梁の剛性を0.5倍とした場合には、基本モデルと比べて杭頭水平変形の増大が認められるが、2.0倍とした場合には基本モデルとの差は小さい。これは、10階建てモデルでは基本モデルの基礎梁の剛性が杭の剛性に対して比較的大きく、基礎梁の剛性を2.0倍してもそれほど固定度が上がらないことに起因する。ここで示した杭頭水平変形は建築物のスウェイ挙動の大きさを表すものであるが、3階建てモデルと10階建てモデルで杭径は異なるものの、両者とも上部構造の降伏が先行するため、スウェイ挙動に大きな差は認められない。

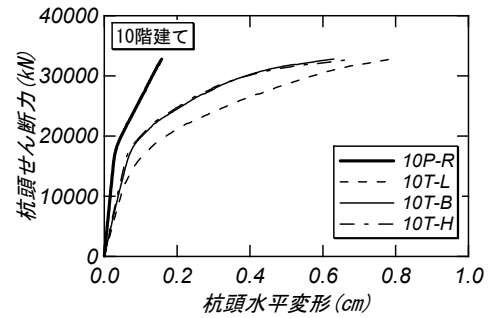
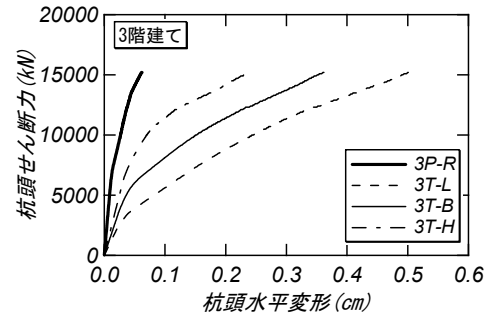
3.4 杭頭モーメント－杭頭回転角

図－8に3階建てモデルおよび10階建てモデルの各解析ケースにおける杭頭モーメントと杭頭回転角との関係を示す。杭頭モーメントには転倒モーメントを用い、杭頭回転角 θ_0 （図－9）は杭頭位置での杭の鉛直変位より式(1)により算出したものを用いている。

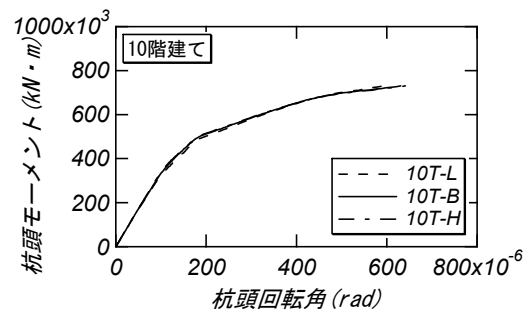
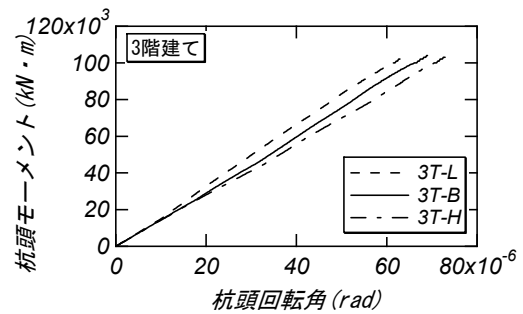
$$\theta_0 = \frac{\sum_{j=1}^N \text{Span}_j \cdot \Delta v_j}{\left(m \cdot \sum_{j=1}^N \text{Span}_j \right) \cdot \text{Span}_N} \quad (1)$$

ここで、 Span_j は杭頭位置における基準点から j 番目の杭までの距離、 Δv_j は杭頭位置における基準点の杭の鉛直変位と j 番目の杭の鉛直変位との差、 m は構面数をそれぞれ表す。

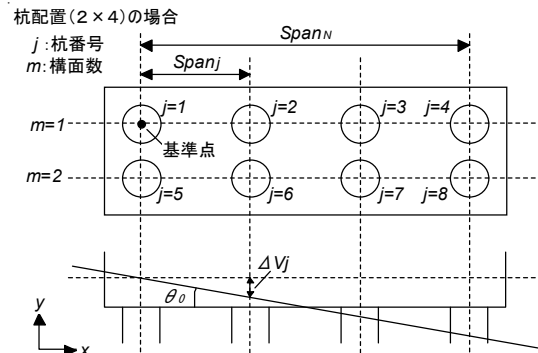
ここで示した杭頭回転角はロッキング挙動の大きさを表すが、3階建てモデルおよび10階建てモデルともに基礎梁の剛性による差は小さい。これは式(1)が杭の鉛直変位から杭頭回転角を算出するものとなっており、杭頭の固定度が杭の鉛直変形に及ぼす影響が小さいために、差異が現れないと考えられる。杭頭回転角の回転量は3階建てモデルに比べて10階建てモデルで10倍ほど大きくなっており、軸力変動の大きさの影響が表れている。



図－7 杭頭せん断力－杭頭水平変形



図－8 杭頭モーメント－杭頭回転角



図－9 杭頭回転角の算出

3.5 杭のモーメント分布および変形分布

図-10 (a)および(b)に3階建てモデルおよび10階建てモデルの一体解析モデルによる引張側杭 (X1,Y1),

中杭 (X3,Y1), 圧縮側杭 (X6,Y1) のモーメント分布を、図-11 (a)および(b)に変形分布をそれぞれ示す。なお分離解析における下部構造モデルによる結果を太実線

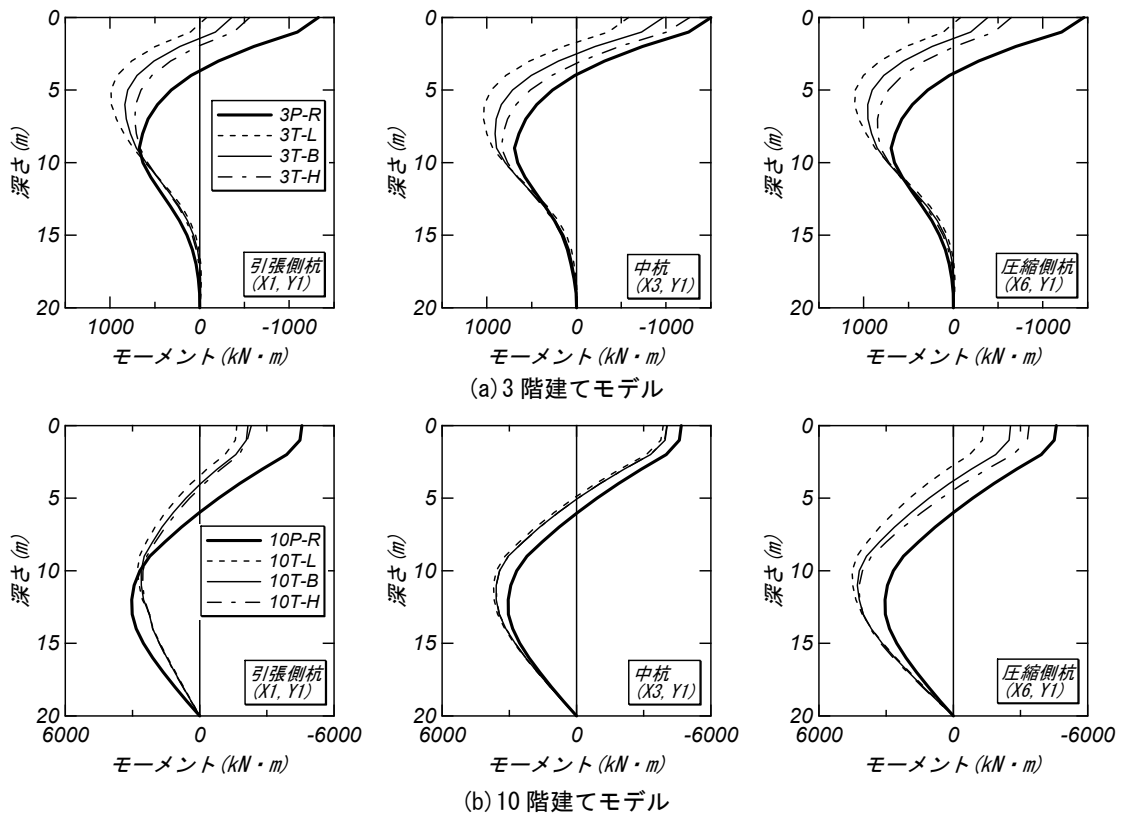


図-10 各杭における解析モデルの違いによるモーメント分布の比較

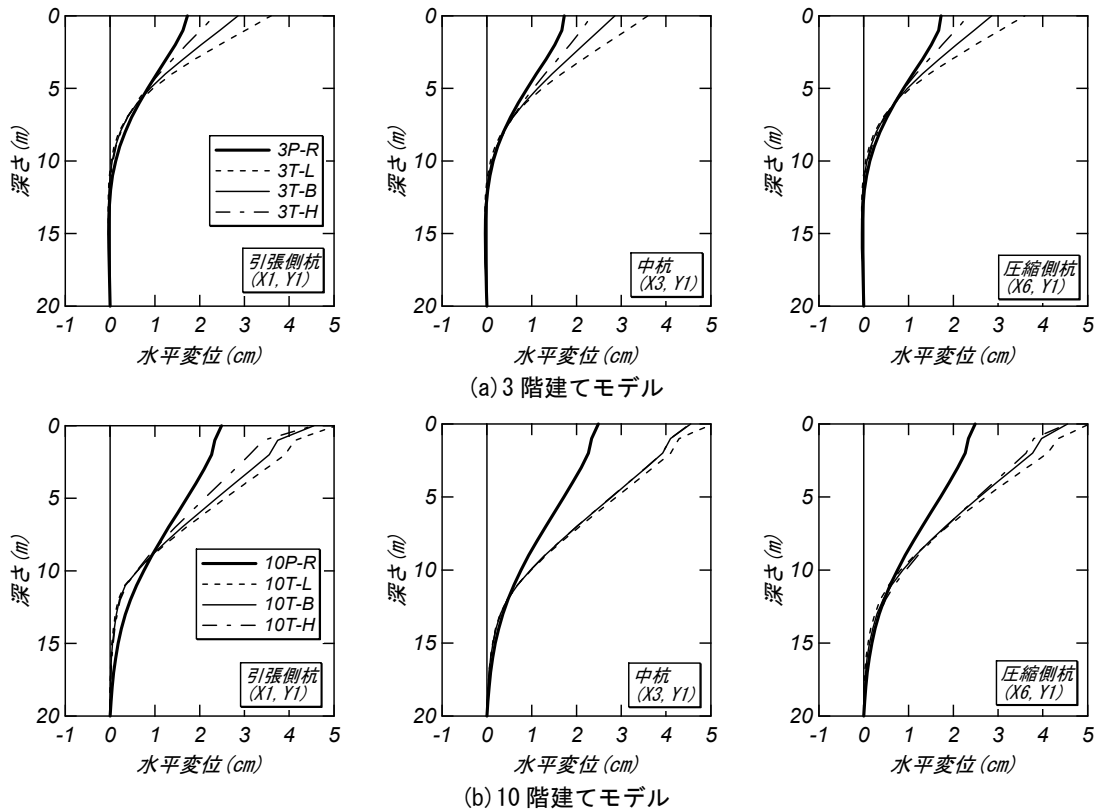


図-11 各杭における解析モデルの違いによる変形分布の比較

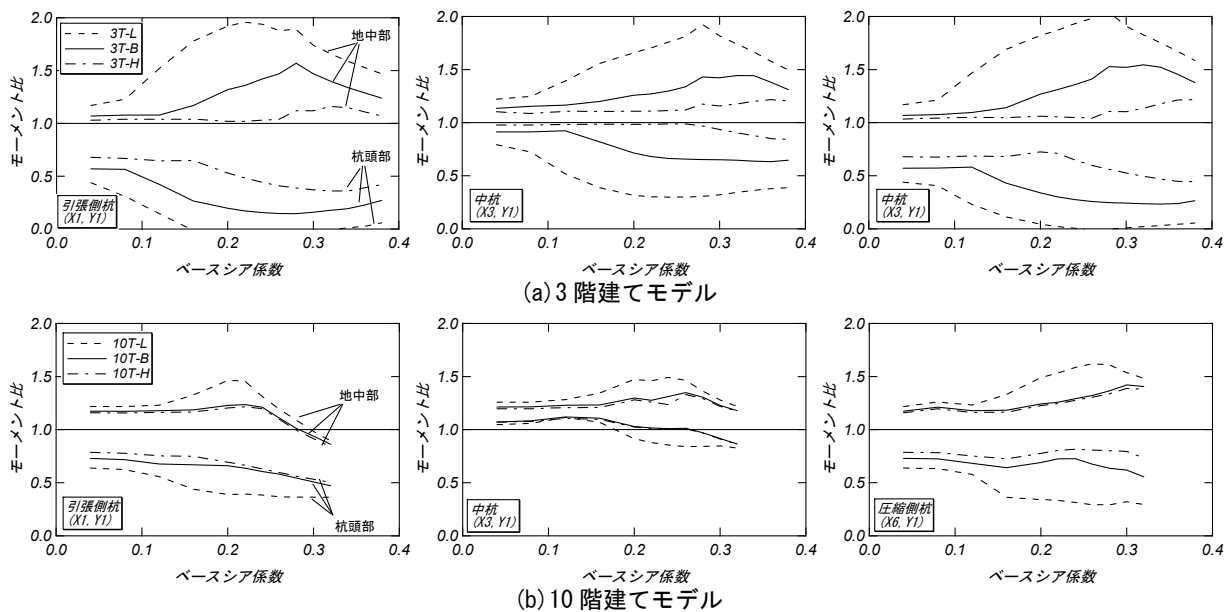


図-1.2 杭頭モーメントーベースシア係数

で併せて示している。モーメントは3階建てでは上部構造が崩壊メカニズムに達した時 ($C_B=0.38$) のものを、10階建てでは最大層間変形角が $1/50\text{rad}$ ($C_B=0.33$) のものをそれぞれ示している。本論で用いた杭頭固定の下部構造モデルでは、モーメント分布については中杭において一体解析モデルとの対応が比較的良好だが、軸力変動のある引張側および圧縮側の杭では特に杭頭部において差が大きい。杭頭固定であるので一体解析モデルの各解析ケースと比較すると、杭頭部でモーメントが大きく地中部で小さい分布形となっている。変形分布では杭頭部で変形が小さく地中部で大きい分布となっているが、引張側杭、中杭、圧縮側杭で一体解析モデルとの一致状況に大きな差はなく、基礎梁の剛性を0.5倍したモデルでは、杭頭においていずれも約2倍の差がある。

3.6 モーメント比ーベースシア係数

図-1.2 (a) および図-1.2 (b) はモーメント比とベースシア係数の関係を示したものである。モーメント比は、3階建てモデルおよび10階建てモデルの一体解析モデルによる杭頭モーメントおよび地中部の最大モーメントを、分離解析における下部構造モデル (3P-R および 10P-R) の杭頭モーメントおよび地中部の最大モーメントでそれぞれ除したものである。すなわちモーメント比が1.0に近いほど下部構造モデルによるモーメントが一体解析モデルによるモーメントに近いことを表している。3階建てモデルよりも、10階建てモデルのほうがモーメント比は平均的に1.0に近く、分離解析モデルによっても一体解析モデルと大きく変わらない結果が得られていることが分かる。分離解析モデルで設計することを想定した場合、1.0以下は一体解析モデルに対して安全側となるので、地中部の比率だけに着目すると、基礎

梁の剛性の影響を踏まえて10階建てモデルでは1.5倍程度、3階モデルでは2.0倍程度のばらつきが生じる。

4. まとめ

本論では、RC造杭基礎建築物を対象として、一体解析モデルおよび分離解析モデルに及ぼす基礎梁の剛性の影響について、非線形荷重増分解析の結果に基づいて考察を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 軸力変動の大きい杭 (引張側または圧縮側の杭) においては、杭頭モーメントに関して一体解析モデルと分離解析モデルの差が大きい。
- 2) 10階建てモデルでは、3階建てモデルと比較して基礎梁の剛性が杭のモーメントに及ぼす影響は小さい。
- 3) 地中部の最大モーメントに関して、10階建てモデルでは1.5倍程度、3階モデルでは2.0倍程度のばらつきが生じる。

参考文献

- 1) 飯場正紀・梅村美孝ほか：一体モデルの静的増分解析結果を用いた応答スペクトル法による集合住宅建物の地震応答算定(その1)~(その4), 日本建築学会学術講演梗概集 (九州), B-2, pp.99-106, 2007.8
- 2) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, 485pp., 2001.10
- 3) 渡辺一弘ほか：一体解析による耐震性能評価手法の検討(その1 地盤ばねの設定), 日本建築学会学術講演梗概集 (北海道), B-1, pp.509-510, 2004.8
- 4) 梅村美孝・栗本修ほか：RC共同住宅の耐震設計における外力分布に関する研究(その1)~(その2), 日本建築学会学術講演梗概集 (北海道), B-1, pp.217-220, 2004.8