

論文 一体モデルと分離モデルを用いた静的非線形解析による RC 造建築物の地震時応力評価

木谷 圭一^{*1}・江田 拓也^{*1}・秋田 知芳^{*2}・和泉 信之^{*3}

要旨：杭基礎を有する建築物の耐震設計では、地震時の安全性を検討するため、その簡便さから上部構造と杭基礎を分けた分離モデルを用いた静的解析が行われているが、分離モデルについては設計的な検証が十分に行われていない。そのため、杭基礎を有する3階建と10階建のRC造建築物に対し、一体モデルと分離モデルを用いた解析を行い、上部構造と下部構造に関して地震時応力などを比較する。その結果から、一体モデルと分離モデルにおける上部構造の応力や変位、崩壊形、1階柱や耐力壁のせん断力、杭頭部の負担せん断力や曲げモーメントなどに関する評価の違いを明示し、分離モデルが持つ設計上の課題を考察する。

キーワード：鉄筋コンクリート造建築物、杭基礎、解析モデル、静的非線形解析、一体解析

1. はじめに

一般に、杭基礎を有する建築物の耐震設計では、中小地震時の安全性を検討するため、上部構造と杭基礎を分けた分離モデルを用いた静的解析が行われている。大地震時の安全性を検討するには、上部構造と下部構造の応力伝達が明確であり、相互作用の影響を考慮できる一体モデルを用いる解析が望ましいが、通常の建築物の実務設計では、その簡便さから分離モデルが用いられている。しかし、分離モデルの課題について設計的な検証が十分とは言えない。そのため、著者らは一体モデルと分離モデルを用いた鉄筋コンクリート造(以下、RC造と略記)建築物の耐震性能評価について研究している(例えば¹⁾)。

本研究では、一体モデルと分離モデル(図-1)を用いたRC造建築物の応力、変位、塑性化の推移等を比較することにより、静的非線形解析に分離モデルを採用する場合の設計上の課題を抽出する。その際、部材の塑性化の進展に影響を与える上部と下部構造の耐力バランスに着目するとともに、相互作用の影響等も考察する。

2. 解析計画

2.1 解析対象建築物

解析対象は、杭基礎を有する3階建及び10階建のRC造建築物である。地下階が無く、桁行方向(X方向)は5スパンの純ラーメン構造、梁間方向(Y方向)は3スパンの連層耐力震壁付きラーメン構造(表-1, 図-2)である。地盤は第二種地盤(表-2)であり、杭には場所打ちコンクリート杭(杭先端GL-20m)を用いる。なお、部材の材料特性値は、鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説²⁾に準拠する。また、部材断面は表-1に示すが、その配筋詳細は参考文献³⁾を参照されたい。

2.2 解析モデル

上部構造の解析モデルは、柱部材や梁部材を線材に置換したフレームモデルとし、壁は3本柱モデル(壁谷沢モデル)⁴⁾で線材置換する。杭部材は杭体と等価な剛性を持つ線材に置換し、軸方向に対して部材を垂直に分割する材軸直交分割モデルを用いる。本解析では、杭体は1m毎の要素に分割する。また、杭周面地盤との境界には地盤ばね(水平地盤ばね、杭周面摩擦ばね、杭先端地盤ばねの3種類)⁵⁾を設定して杭周面の局所的な地盤の非線形性を考慮する(図-3)。一体モデルは、上部構造と下部構造を一体に構築した解析モデルとする。一方、分離モデルは、上部構造と下部構造では別の解析モデルとする。上部構造は基礎梁下をピン支持とした上部モデルとし、下部構造は杭と基礎梁で構成され、基礎位置の鉛直変位を拘束した下部モデルとする。上部構造の水平力分布はAi分布に基づく値とし、下部構造の水平力には上部構造と基礎の慣性力(基礎部分の水平震度はベースシア係数の0.75倍)を考慮する。なお、本解析では地盤変形による杭応力は考慮しない。

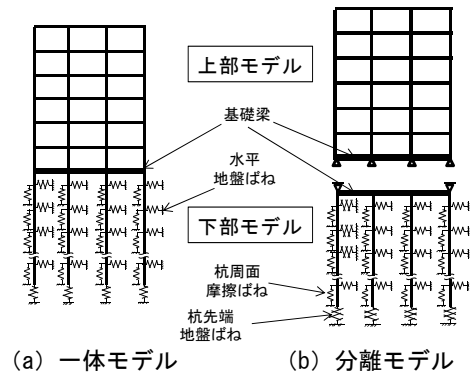


図-1 モデル概念図

*1 千葉大学大学院 工学研究科建築・都市科学専攻博士前期課程 (正会員)
 *2 千葉大学大学院 工学研究科建築・都市科学専攻助教 博(工) (正会員)
 *3 千葉大学大学院 工学研究科建築・都市科学専攻教授 博(工) (正会員)

表-1 使用材料及部材断面

(a) 3階建建築物

使用材料	コンクリート	Fc24	
	鉄筋	主筋	SD345(D表示) SD390(MD表示)
補強筋		SD295A	
柱	断面	650×650	
	主筋	16-D22~20-D25	
	帯筋	2~4-D13@80,100	
梁	断面	400×700~750	
	主筋	(3+5)-D22~(8+7)-D22	
	肋筋	2~3-D13@150	
基礎梁	断面	400×1300	
	主筋	(5+5)-D25~(8+8)-D25	
耐力壁	壁厚	200~300	
	鉄筋	D13@200~D16@150	
杭	材料	Fc24, SD345	
	断面	1200φ	
	主筋	12(頭部)8(軸部)-MD35	
	帯筋	OD13@300(頭部)150(軸部)	

注: Fcはコンクリートの設計基準強度を表す

(b) 10階建建築物

使用材料	コンクリート	Fc30~48	
	鉄筋	主筋	SD390(MD表示) USD785
補強筋		SD295A	
柱	断面	750×750~850×850	
	主筋	12-MD32~16-MD38	
	帯筋	3~4-D13@100	
梁	断面	500×750~600×800	
	主筋	(4+4)-MD25~(6+6)-MD38	
	肋筋	4-D10@200~4-D13@200	
基礎梁	断面	850×2900	
	主筋	(6+6)-MD35~(9+9)-MD35	
耐力壁	壁厚	200~300	
	鉄筋	D10@200~D13@100	
杭	材料	Fc30, SD390	
	断面	1900φ	
	主筋	18(頭部)12(軸部)-MD35	
	帯筋	OD13@300(頭部)150(軸部)	

注: Fcはコンクリートの設計基準強度を表す

表-2 解析対象地盤

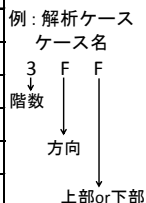
地盤種別	深度 (m)	層厚 (m)	N値	Vs (m/s)	Vp (m/s)
粘土	0~8	8	3	130	340
シルト混じり細砂	8~12	4	10	150	360
細砂	12~18	6	20	200	400
砂礫	18~50	-	50	400	1220

2.3 解析ケース

各建築物のX方向,Y方向別に荷重増分法による静的非線形解析を行う。解析ケースの名称を表-3に示す。

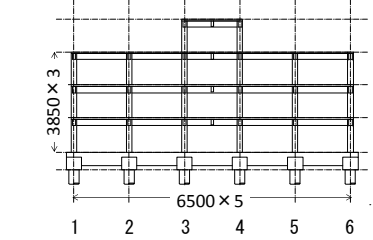
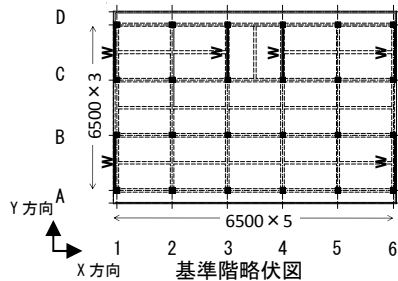
表-3 解析ケース

建物	解析モデル	X方向 (フレーム)	Y方向 (壁)	
3階建	一体	3F	3W	
	分離	上部	3FF	3WF
		下部	3FP	3WP
10階建	一体	10F	10W	
	分離	上部	10FF	10WF
		下部	10FP	10WP



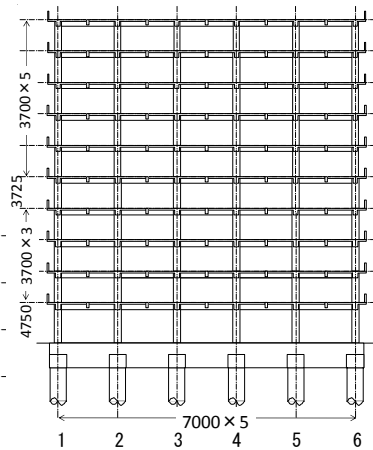
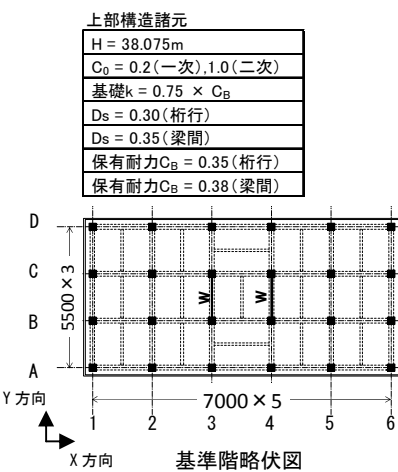
上部構造諸元

H = 11.55m
C ₀ = 0.2(一次), 1.0(二次)
基礎k = 0.75 × C _B
D _s = 0.30(桁行)
D _s = 0.45(梁間)
保有耐力C _B = 0.42(桁行)
保有耐力C _B = 1.02(梁間)



注: Wは耐力壁を表す

(a) 3階建建築物



注: Wは耐力壁を表す

(b) 10階建建築物

図-2 解析対象建築物

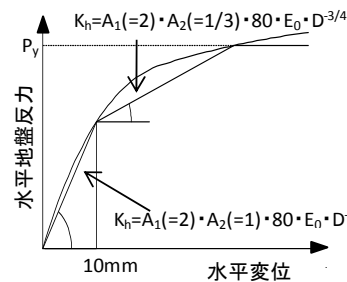


図-3 水平地盤ばねのモデル

3. 解析結果

3.1 層せん断力-層間変位関係

上部構造の層せん断力 (Q) - 層間変位 (δ) 関係について、上部モデルと一体モデルを比較したものの例を図-4に示す。X方向 (以下、フレーム方向と呼ぶ) では、保有水平耐力は両モデルに大きな差は見られないが、層間変位は、上部モデルが一体モデルに比べて小さい。Y方向 (以下、壁方向と呼ぶ) では、3階建の保有水平耐力が異なり、上部モデルと一体モデルの塑性ヒンジの発生位置が異なることが推測される。

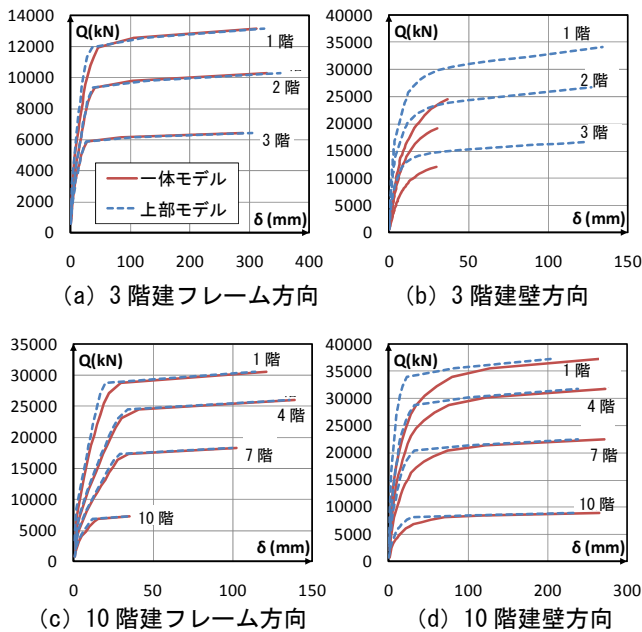


図-4 層せん断力-層間変位関係

3.2 塑性ヒンジの発生状況

塑性ヒンジの発生状況の例を図-5, 図-6に示す。なお、図中の●は塑性ヒンジを表す。発生状況は、全体変形角 (R_T) がフレーム方向では1/67, 壁方向では3階建1/200, 10階建1/100の時点を示す。全体変形角とは、水平力の重心に相当する床の水平変形をその床の高さで除した変形角である。フレーム方向では、一体モデルは基礎梁に塑性ヒンジが発生しているが、上部モデルは杭頭曲げを考慮していないので基礎梁には塑性ヒンジが発生していない。一方、壁方向では、10階建は杭が降伏しないが、3階建は杭が降伏しているため、上部モデルの崩壊形は一体モデルと異なっている。

3.3 杭の曲げモーメント

杭の曲げモーメントの例を図-7に示す。下部モデル

は、一体モデルに比べて杭頭部では大きく、杭中間部では小さく曲げモーメントを評価する傾向がある。3階建壁方向では、モデルによる違いが小さいが、これは一体モデルの壁付き基礎梁の剛性が高いためである。一方、10階建壁方向では、杭頭固定度に対する壁の曲げ変形の影響が大きいので、モデルによる違いが大きい。10階建フレーム方向では、3階建に比べて基礎梁の剛性が高いため、モデルによる違いが小さい。

4. 考察

4.1 上部構造と下部構造の水平耐力

ベースシア係数 (C_B) と全体変形角 (R_T) について、上部モデルと一体モデルを比較したものを図-8に、ベースシア係数 (C_B) と杭頭水平変位 (δ_p) の関係を図-9に示す。上部モデルの水平耐力は、3階建壁方向を除き、一体モデルにほぼ同等である。3階建壁方向の水平耐力は、上部モデルが一体モデルに比べて大きく評価している。これは、一体モデルでは杭の水平耐力により上部構造の水平耐力が決まっているためである。

10階建壁方向では、上部モデル, 下部モデルとも等価な水平剛性 ($C_B/R_T, C_B/\delta_p$) を一体モデルより大きく評価している。これは、上部モデルでは杭の鉛直方向の変位による基礎回転変形の影響, 下部モデルでは上部構造からの変動軸力による杭変形の影響が大きいと考えられる。また、フレーム方向でも、同様の傾向があるが、比較的その影響が小さいことがわかる。

4.2 杭頭水平変位と全体変形角

杭頭水平変位 (δ_p) と全体変形角 (R_T) の関係を図-10に示す。分離モデルでは、上部モデルの R_T と下部モデルの δ_p の値を用いる。3階建壁方向では、杭が曲げ降伏するため、 R_T に対して δ_p が大きいことがわかる。また、他のケースでは基礎回転変形の影響が大きい10W

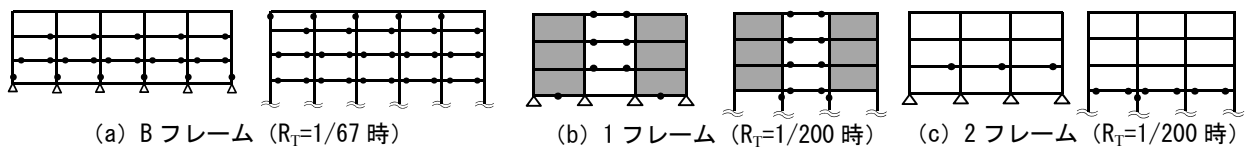


図-5 3階建建築物の塑性ヒンジ発生状況

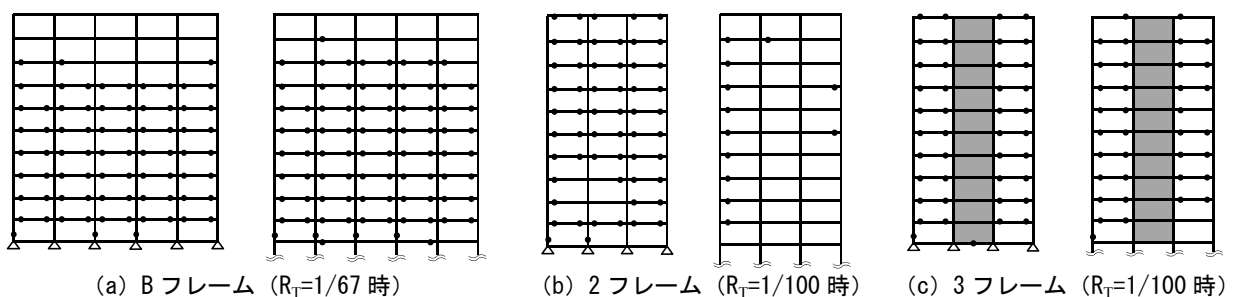


図-6 10階建建築物の塑性ヒンジ発生状況

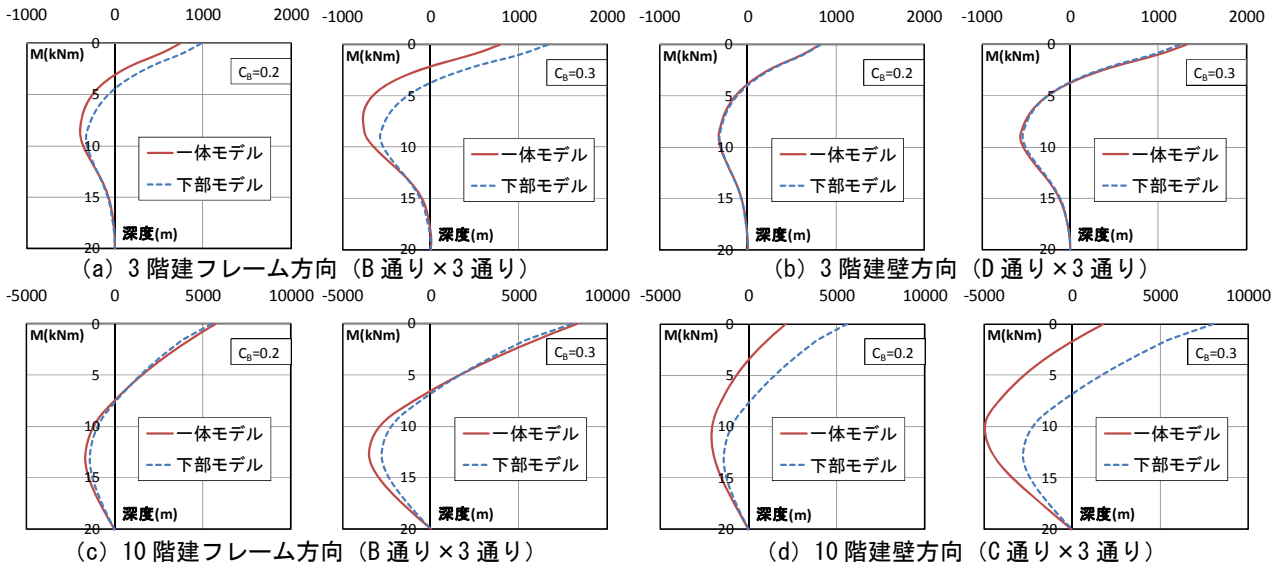


図-7 杭の曲げモーメント

を除き、 δ_p は上部構造の降伏により増大していない。

4.3 基礎回転角と全体変形角

基礎回転角 (θ) と全体変形角 (R_T) の関係を図-11に示す。ここで、基礎回転角は各杭の杭頭位置の鉛直変位を平均化し算出した、基礎部分の回転角である¹⁾。

基礎回転角は、10Wが最も大きい、壁方向がフレーム方向より大きく、10階建が3階建より大きいことがわかる。これは、基礎回転角には上部構造から作用する杭への軸力変動の影響が大きいためである。

4.4 基礎回転による全体付加変形角

ベースシア係数 (C_B) と基礎回転角 (θ) を考慮した全体変形角 (R_T) の関係を図-12に示す。点線は、上

部モデルの全体変形角に、基礎回転角を加算した全体付加変形角 (補正 R_T) である。10階建壁方向では、補正 R_T は一体モデルの R_T に比べてやや小さいが、よく対応しており、全体変形角に対する基礎回転の影響が大きいことがわかる。一方、フレーム方向においても、その傾向は見られるが、壁方向に比べて基礎回転の影響は小さい。これは、壁方向では連層壁の回転変形の影響が大きいためと考えられる。なお、3階建では基礎回転の影響はほとんど見られないことがわかる。

4.5 1階柱及び耐震壁の負担せん断力

フレーム方向のベースシア係数 (C_B) と1階柱のせん断力との関係を図-13に示す。10階建の上部モデルで

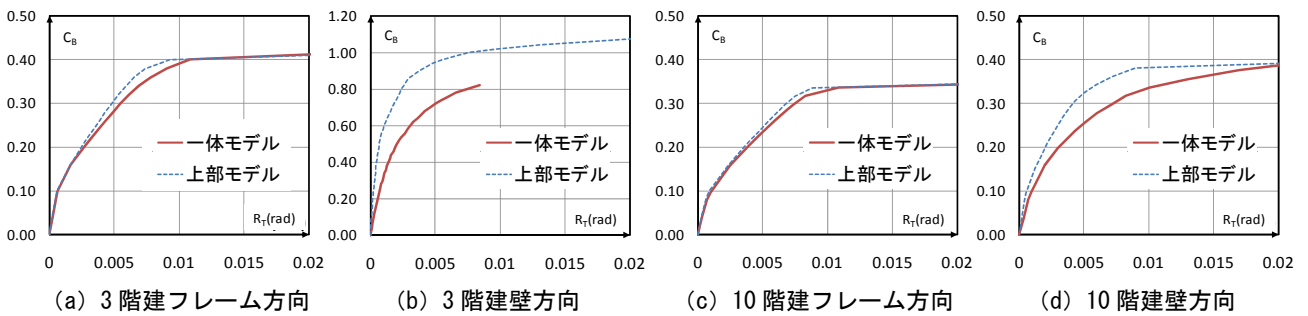


図-8 ベースシア係数-全体変形角関係

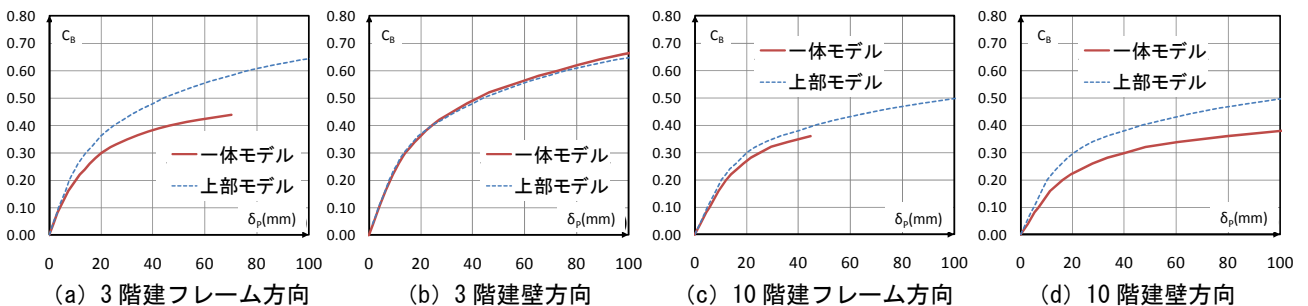


図-9 ベースシア係数-杭頭水平変位関係

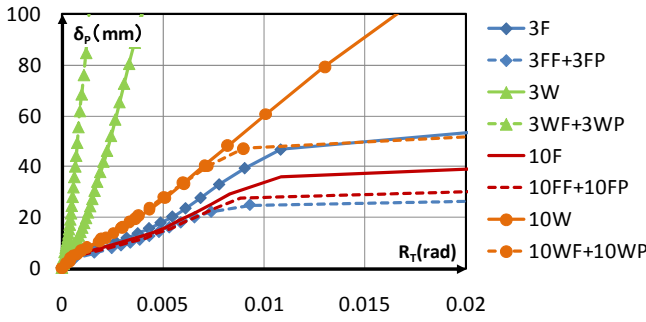


図-10 δ_p-R_T関係

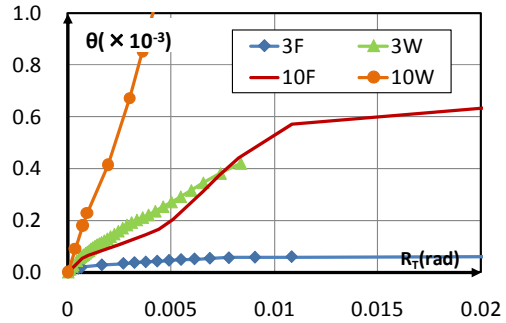


図-11 θ-R_T関係

は、一体モデルに比べ中柱せん断力に対する外柱せん断力の比率が小さい傾向が見られる。これは、上部モデルでは杭頭曲げによる基礎梁剛性低下及び基礎回転による外柱の剛性低下を考慮していないためと考えられる。

次に、壁方向の耐力壁の負担せん断力 (Q) と全体変形角 (R_T) の関係を図-14に示す。上部モデルでは、一体モデルに比べて壁せん断力を大きく評価している。これは、上部モデルが耐力壁の回転変形を考慮していないためと考えられる。なお、10階建では、壁の降伏後せん断力が減少しているが、これは1階壁脚部の曲げ降伏により応力の再配分が生じたためと考えられる。

4.6 杭頭部の負担せん断力

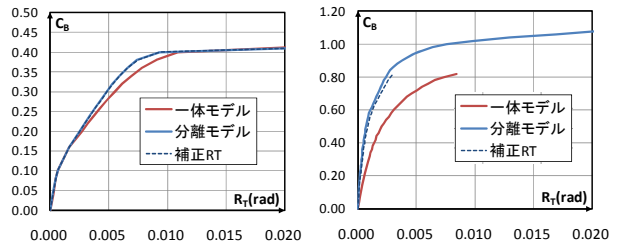
ベースシア係数 (C_B) と杭頭部のせん断力 (Q) の関係を図-15に示す。3階建フレーム方向を除き、下部モデルでは、一体モデルに比べて中杭せん断力に対する外杭せん断力の比率が小さい傾向が見られる。この傾向は、1階柱せん断力と同様の傾向であり、C_Bの増大に伴い顕著になっている。これは、下部モデルでは1階柱脚曲げによる基礎梁剛性低下及び基礎回転による外杭の剛性低下を考慮していないためと考えられる。

4.7 杭頭部の曲げモーメント

杭頭部の曲げモーメント (M) と杭頭水平変位 (δ_p) の関係を図-16に示す。図中の▲印は、一体モデルにおける基礎梁の曲げひび割れ発生点を示す。この時点以降、下部モデルの杭頭部の曲げモーメントは一体モデルと大きく異なる。これは、下部モデルでは、1階柱脚の曲げによる基礎梁の剛性低下を考慮していないためと考えられる。

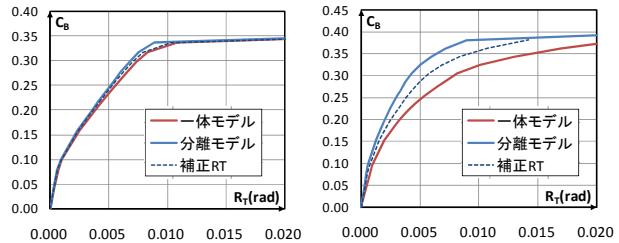
4.8 地盤ばね

水平地盤ばねの影響を考察するため、3階建フレーム方向の引張側外杭についてばね剛性を2倍に増大した解析を行ない、その比較の例を図-17に示す。地盤ばねの剛性を増大した杭の杭頭曲げモーメントや杭頭水平変位は、原モデルに比べて小さく評価されているが、一体モデルと分離モデルに見られる応力評価の特徴には同様の傾向が見られる。地盤ばねが分離モデルの解析に及ぼす影響の評価については、今後の課題としたい。



(a) 3階建フレーム方向

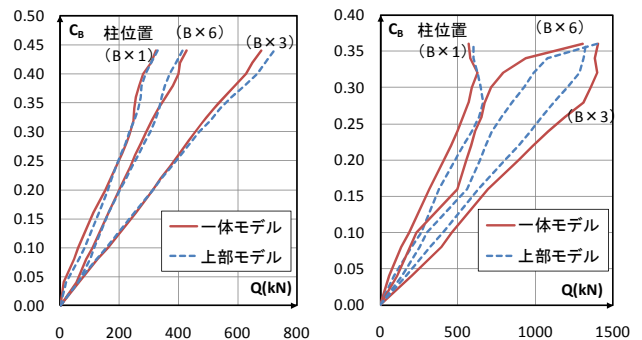
(b) 3階建壁方向



(c) 10階建フレーム方向

(d) 10階建壁方向

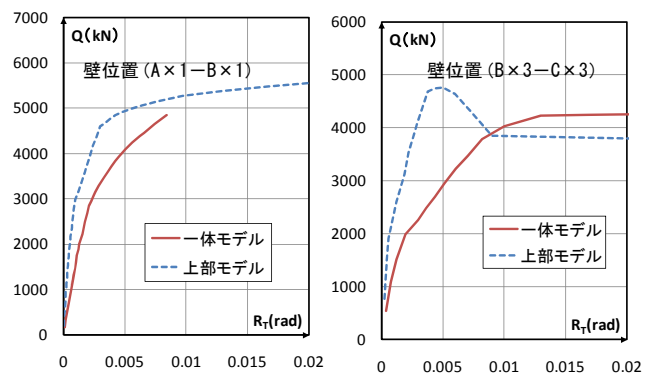
図-12 ベースシア係数-全体変形角関係



(a) 3階建

(b) 10階建

図-13 ベースシア係数-1階柱の負担せん断力



(a) 3階建

(b) 10階建

図-14 1階耐力壁の負担せん断力-全体変形角関係

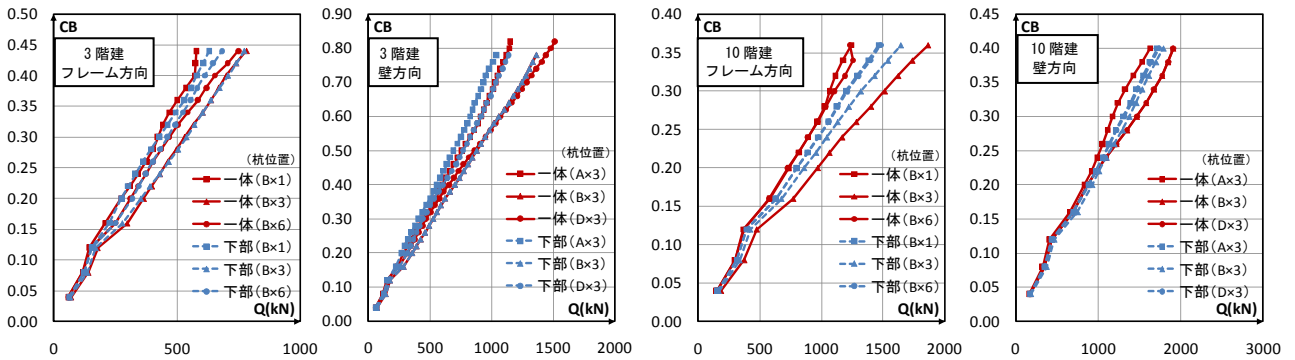


図-15 ベースシア係数-杭頭せん断力関係

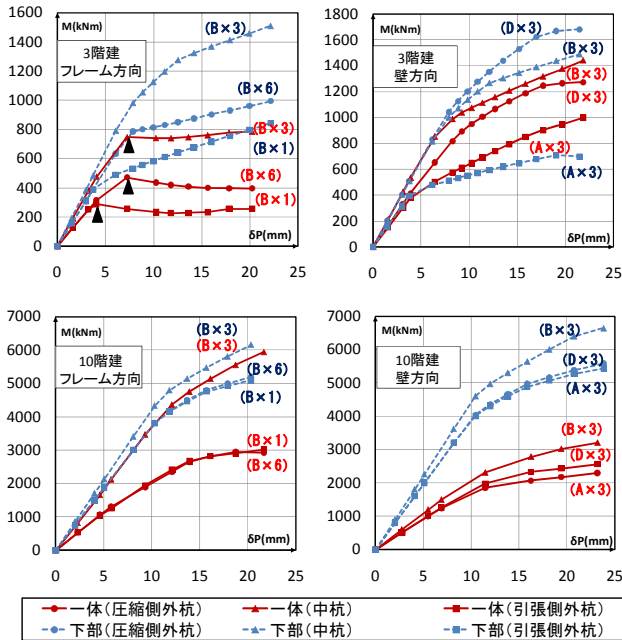


図-16 杭頭曲げモーメント-杭頭水平変位関係

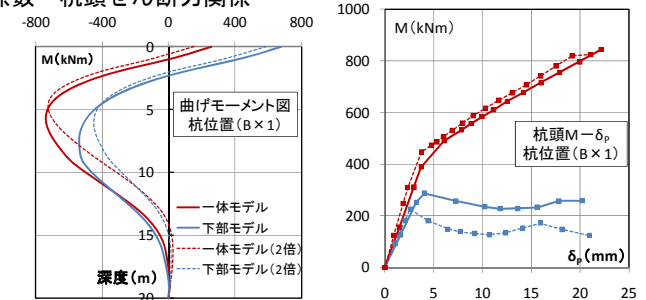


図-17 地盤ばねを変えた3階建杭の応力比較

5. まとめ

杭基礎を有する RC 造建築物に対し、分離モデルと一体モデルによる静的非線形解析を行った。その結果、本解析の範囲内であるが、以下の知見を得た。

- (1) 分離モデルによる上部構造の水平剛性は、一体モデルと比べて大きく評価することがある。これは、中高層壁フレーム構造で顕著に見られ、杭の鉛直変位による基礎回転の影響が大きい。
- (2) 分離モデルによる上部構造の崩壊形は、一体モデルとはやや異なり、その水平耐力を大きく評価することがある。これは、下部構造の水平耐力が上部構造より小さい低層壁フレーム構造で顕著で見られる。
- (3) 分離モデルによる柱せん断力は、一体モデルと比べて外柱と中柱の違いを小さく評価する傾向がある。これには、基礎回転変形及び杭頭曲げの影響が大きい。
- (4) 分離モデルによる耐力壁せん断力は、一体モデルと比べて大きく評価する傾向がある。これには、耐力壁の回転変形の影響が大きい。
- (5) 分離モデルによる杭頭せん断力は、一体モデルと

比べて外杭と中杭の違いを小さく評価する傾向がある。これには、基礎回転変形の影響が大きい。

(6) 分離モデルによる杭頭曲げモーメントは、一体モデルと比べて大きく評価する傾向がある。これには、基礎梁剛性低下による杭頭固定度の影響が大きい。

今後、本研究により明らかになった一体モデルと分離モデルの違いによる結果の差異に対して、地盤や杭などが異なる様々な条件下の RC 造建築物を対象に耐震性能評価を行い、分離モデルの適用範囲を検討していきたい。

謝辞

千葉大学卒論生の坂本雅敏さん、田中晃祐さんに多大なる協力を頂きました。深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 秋田知芳, 木谷圭一, 和泉信之: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.907-912, 2010.7
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, pp6-7, 2010.2
- 3) 相羽均修ほか: 静的非線形解析を用いた RC フレーム構造の崩壊メカニズムと応力推定, 日本地震工学シンポジウム論文集, pp3117-3122, 2010.11
- 4) 国土交通省住宅局建築指導課ほか: 建築物の構造関係技術基準解説書, pp502-505, 632-639, 2007.8
- 5) 梅村美孝他: 建物-基礎-地盤一体解析, 日本建築学会大会鉄筋 RC 構造 PD 資料, pp.15-27, 2006.9