

# 論文 杭頭曲げを考慮した RC 造建築物の保有水平耐力計算に関する考察

棒田 悠太\*1・坂本 雅敏\*1・秋田 知芳\*2・和泉 信之\*3

**要旨:** 一般的な杭基礎を有する RC 造建築物の保有水平耐力計算では、基礎下をピン支持とした上部構造モデルを多く使用しているため、計算時に考慮していない杭頭曲げの作用により想定した上部構造の崩壊形を実現できない場合がある。本研究では、まず杭下部分離モデルの静的弾塑性解析により、上部構造の崩壊形形成時における杭頭の曲げ降伏の可能性について考察する。次に、杭頭の曲げ降伏も考慮して、上部構造と杭基礎を一体化した一体モデルと分離モデルを用いた静的弾塑性解析を行う。表層地盤の剛性低下も含め、杭頭曲げの作用が上部構造の崩壊形形成や基礎梁の必要耐力などに及ぼす影響について考察する。

**キーワード:** 鉄筋コンクリート構造, 杭基礎, 保有水平耐力計算, 分離モデル, 一体モデル, 崩壊形

## 1. はじめに

現在、鉄筋コンクリート造（以下、RC 造と略記）建築物に対する耐震設計ルート3における保有水平耐力計算では、静的弾塑性解析を行い、対象建築物の保有水平耐力が必要保有水平耐力以上であることを確認している。一般的な杭基礎を有する建築物では、上部構造と杭基礎を分けて構築した分離モデルを用いて静的弾塑性解析を行うことが多い。これは、上部構造については中小地震時及び大地震時の安全性の検討が求められているのに対して、下部構造には中小地震時の安全性の検討のみが求められており、大地震時の安全性の検討が不要なためである。しかし、基礎下をピン支持とした上部構造の分離モデルでは、計算時に考慮していない杭頭曲げの作用により想定した上部構造の崩壊形を実現できず、異なる崩壊形を形成する可能性が危惧される。

そのため、著者らは杭基礎を有する RC 造建築物を対象として、一体モデルと分離モデルの両者を用いた静的弾塑性解析を行い、杭応力を考慮した建築物の保有水平耐力計算法について研究している<sup>例え<sup>1</sup></sup>。

既往の研究<sup>2)</sup>では、低層から高層の RC 造フレーム構造の保有水平耐力計算において、杭頭曲げが作用した場合に、想定した上部構造の崩壊形を実現できる基礎梁の耐力を評価し、1階柱・基礎梁・杭など基礎まわりの部材の耐力指標を考察した。この耐力指標は、保有水平耐力計算における上部構造の分離モデルの適用条件を表すが、杭の曲げ降伏が生じない場合に限られていた。

そこで本研究では、杭頭曲げ降伏を含めるなど文献<sup>2)</sup>より検討対象を広げて基礎まわりの部材の耐力指標などを考察する。まず、杭下部分離モデルの静的弾塑性解析により杭の保有水平耐力を算定して、上部構造の崩壊形形成時における杭頭の曲げ降伏の可能性について考察する。次に、杭頭の曲げ降伏も考慮して、一体モデル

と分離モデルを用いた静的弾塑性解析を行う。杭頭が曲げ降伏する場合も含めて杭頭曲げが上部構造の塑性化の進展や崩壊形形成などに及ぼす影響を評価する。さらに、表層地盤の剛性を低減したケースに対しても検討を行い、上部構造の解析に対する分離モデルの適用条件に用いる基礎まわりの部材の耐力指標などを考察する。

## 2. 解析計画

### 2.1 解析対象骨組

RC 造フレーム構造建築物の中柱を想定した部分架構モデル（図-1）を、本研究の解析対象とする。部分架構モデルの階高は 3.7m、スパンは 7.0m（柱の支配面積は 7.0m×5.5m）として、柱中心から大梁スパン中央点までの長さは 3.5m とする。

地盤は第二種地盤（表-1）とし、杭は場所打ちコンクリート杭（杭先端 GL-20m）とする。杭径は、一体モデルと下部分離モデルに対して、軸径が一律の直杭と先端のみ径を拡大させる拡底杭を想定し、拡底杭の軸径を先端径の 2/3 倍程度となるよう設定する。

### 2.2 解析方法

本解析は、部材の非線形特性に立脚した荷重増分法による静的弾塑性解析である。柱及び梁部材は、建築構造設計で一般的に採用される材端ばねモデルとして、線材に置換したモデルとする。曲げに対するスケルトンカーブは曲げひび割れ、曲げ降伏を考慮するトリリニア型とする（図-2）。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。杭体 1m に対し 10 個の分割点を設け、各分割点における M-φ 関係から、各分割点での曲げ剛性を評価することによってモデル化を行う。部材としての曲げ剛性は各分割点での曲げ剛性の積分から求める。杭体は 1m 毎の要素に分割してモデル化し、杭

\*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 (学生会員)

\*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)

周面地盤との境界に地盤ばね（水平地盤ばね、杭周面摩擦ばね、杭先端地盤ばねの3種類の地盤ばね<sup>3~5)</sup>を設定して、杭周面の局部的な地盤の非線形性を考慮する（図-3、図-4、図-5）。

一体モデルは上部構造と杭基礎を一体に構築した解析モデルとする。上部分離モデルは、基礎梁下をピン支持としたモデルとする。下部分離モデルは、基礎梁上をローラー支持とし、基礎梁を剛としたモデルとする。いずれのモデルも大梁スパン中央部はローラー支持とし、鉛直方向の変位を拘束する。上部構造の水平力分布はAi分布<sup>6)</sup>に基づく値とする。下部構造は上部構造と基礎の慣性力を考慮する。柱と杭の負担せん断力比の差を考慮し、基礎部分の水平震度がベースシア係数の0.64倍となるように設定する。なお、本解析では地盤の強制変位による杭応力は考慮しないとする。

### 2.3 解析ステップ

はじめに第3章において、下部分離モデルを用いた静的弾塑性解析を行い杭の保有水平耐力を算定し、上部構造の崩壊形形成時における杭頭曲げ降伏の可能性について考察する。なお、杭のせん断破壊は生じないとする。

次に第4章において、杭頭の曲げ降伏も考慮して一体

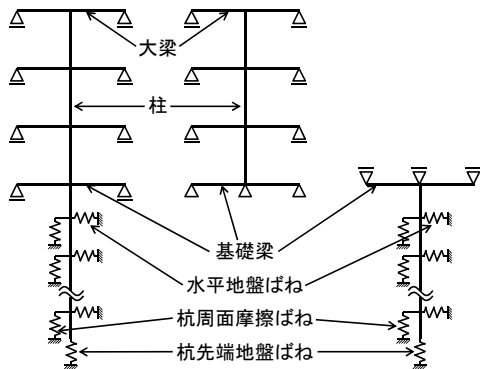


図-1 解析モデル概念図（3階建）  
（左から一体モデル，上部分離モデル，下部分離モデル）

表-1 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

注：Vs、Vpは地盤のS波速度、P波速度をそれぞれ示す。

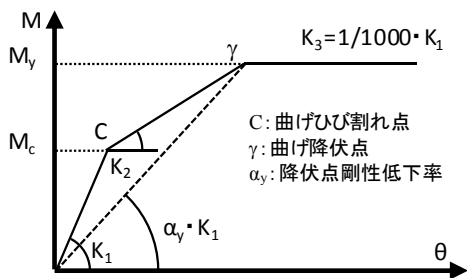


図-2 部材の曲げに対するスケルトンカーブ

モデルと上部分離モデルの静的弾塑性解析を行い、杭頭が曲げ降伏する場合も含めて杭頭曲げが上部構造の塑性化の進展や崩壊形形成などに及ぼす影響を評価する。

最後に第5章において、表層地盤の水平剛性を低減させたケースについて10階建一体モデルの静的弾塑性解析を行い、地盤の水平剛性の低減が上部構造の塑性化の進展や崩壊形形成などに及ぼす影響を評価する。

### 3. 下部分離モデルの静的弾塑性解析

#### 3.1 解析ケース

本章では、4階、6階、8階、10階、12階、14階建の計6種類の階高を支える杭基礎を想定した下部分離モデルを、直杭・拡底杭の2通り、コンクリート断面積に対する杭の鉄筋量の比( $p_g$ )を0.6%、0.9%、1.2%の3通りに変えた、全36ケースの解析を行う。下部分離モデルの主要な部材断面の例を表-2に示す。基礎梁や杭の断面は、RC造建築物の基礎構造として標準的な断面の大きさとなるように設定する。基礎梁は剛と仮定して、基礎梁のせいは1.4m(4階建)~3.2m(14階建)としている。また、各ケースの材料特性値は、鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説<sup>7)</sup>に準拠して算定する。

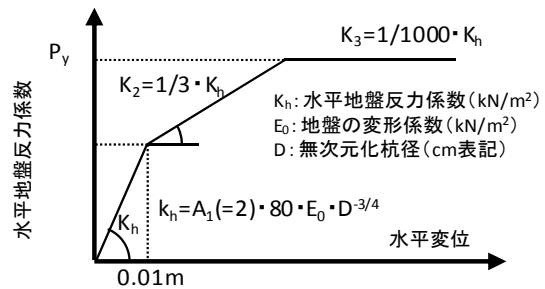


図-3 水平地盤ばねのモデル化

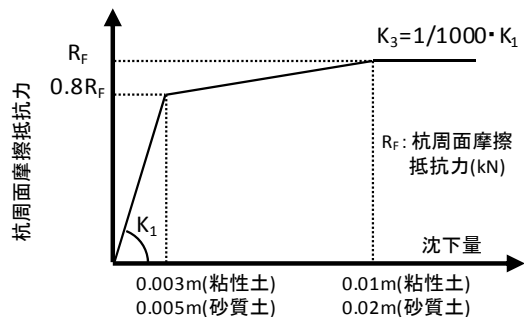


図-4 杭周面摩擦ばねのモデル化

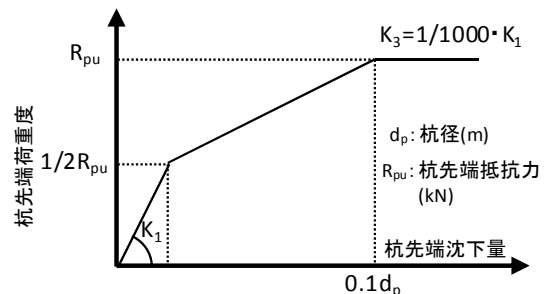


図-5 杭先端地盤ばねのモデル化

### 3.2 解析結果および考察

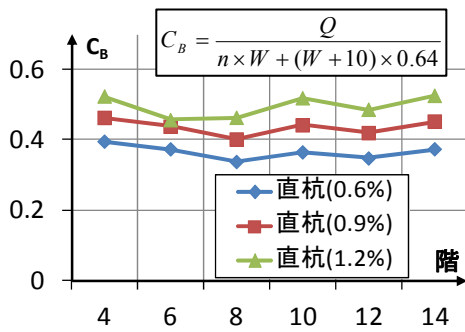
杭基礎の杭頭曲げ降伏時における水平せん断力係数と上部階数の関係を図-6に示す。ここで、水平せん断力係数は、杭頭に作用するせん断力を基礎梁の重量を考慮して算出した上部構造重量で除した値とする。

直杭モデルでは、杭頭主筋量 ( $p_g$ ) が 0.6% の場合、水平せん断力係数が 0.36 ~ 0.45 程度以上であると杭頭曲げ降伏が生じる。一方、拡底杭モデルでは、杭頭主筋量 ( $p_g$ ) が 0.6% の場合、水平せん断力係数が 0.25 ~ 0.35 程度以上であると杭頭曲げ降伏が生じる。上部構造の耐力が高いほど、杭軸径を小さくするほど、杭頭降伏が生じる可能性が大きく、中高層 RC 造の拡底杭では保有水平耐力計算に杭頭曲げを考慮することが望ましい。

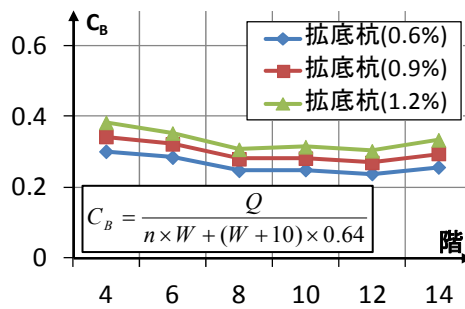
表-2 下部分離モデルの使用材料と部材断面の例

		4階	6階	8階
軸部径 (mm)	直杭	1200	1400	1600
	拡底杭	900	1000	1100
Fc		21	24	
主筋		SD295		SD345
基礎梁せい(mm)		1400	1800	2100
軸力(kN)		2680	3604	4528
地反力(kN/m <sup>2</sup> )		2370	2342	2253
		10階	12階	14階
軸部径 (mm)	直杭	1800	1900	2100
	拡底杭	1200	1300	1500
Fc		27		
主筋		SD390		
基礎梁せい(mm)		2400	2800	3200
軸力(kN)		5452	6376	7300
地反力(kN/m <sup>2</sup> )		2143	2250	2109

注: Fcは、コンクリートの設計基準強度を示す。  
 なお、表中の「軸力」は杭頭部の軸力を示す。



(a) 直杭モデル



(b) 拡底杭モデル

図-6 水平せん断力係数-上部階数関係

### 4. 一体モデルと上部分離モデルの静的弾塑性解析

#### 4.1 基礎梁の変動ケースと耐力指標

##### (1) 基礎梁の曲げ耐力指標と変動ケース

本研究では、基礎梁の曲げ耐力の大きさを表す曲げ耐力指標 ( $\alpha$ ) を定義する<sup>2)</sup>。変動ケースは、 $\alpha$  の値を変えて設定する。

$$\alpha = F_G M_u / (F_G M_{E1} + p M_{E1} / 2) \quad (1)$$

ここで  $F_G M_u$  は基礎梁の降伏曲げモーメントを、 $F_G M_{E1}$  は上部分離モデルによる一次設計レベルでの基礎梁の曲げモーメント、 $p M_{E1}$  は一体モデルによる一次設計レベルでの杭頭曲げモーメントを示す。すなわち、 $\alpha$  は杭頭曲げの影響を考慮した基礎梁の一次設計用曲げモーメントに対する曲げ耐力の倍率を示す値である。

##### (2) 1階柱, 杭, 基礎梁の耐力指標

1階柱, 杭, 基礎梁の耐力バランスに着目し、杭からの入力の影響を検討する。その指標として、以下に示す指標値  $a$  と  $b$  を定義する。

$$a = \Sigma F_G M_u / c M_u \quad (2)$$

$$b = \Sigma F_G M_u / (c M_u + p M) \quad (3)$$

ここで  $F_G M_u$ ,  $c M_u$  は上部分離モデルによる基礎梁と一階柱脚の降伏曲げモーメント、 $p M$  は上部構造メカニズム時の一体モデルの杭頭曲げモーメントである。

指標値  $a$  は杭頭曲げモーメントを考慮しない上部構造のみの耐力バランスを示すのに対して、指標値  $b$  では杭頭曲げの影響を考慮した耐力バランスを示す。

また、横軸に指標値  $a$ 、縦軸に指標値  $b$  をとって対象骨組の耐力バランスを模式的に図-7に示す。 $a > 1$  では  $\Sigma F_G M_u$  が  $c M_u$  より大きくなるので上部分離モデルで柱脚降伏になることを示し、 $b > 1$  では、 $\Sigma F_G M_u$  が  $c M_u$  と  $p M$  の和より大きくなるので杭頭曲げモーメントを考慮した一体モデルで柱脚降伏になることを示す。逆に、 $a \leq 1$ ,  $b \leq 1$  では基礎梁降伏になることを示す。これより、指標値  $a, b$  を用いることで、杭頭曲げの考慮の有無で崩壊形が変わるか否かを明示することができる。

##### (3) 上部構造の耐力指標

上部構造の耐力指標として以下に示す相当  $D_s$  値を用いることとする。本報では、既報告<sup>2)</sup>の相当  $D_s 0.35, 0.40$  に加えて、相当  $D_s 0.45$  の3ケースを設定する。

$$\text{相当 } D_s = (R_T / 67 \text{ 時 } C_B) / (\text{一次設計時 } C_B \times 5) \quad (4)$$

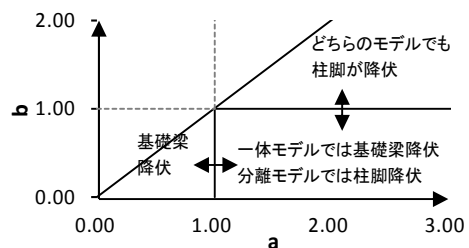


図-7 a-b 関係の概念図

ここで、 $R_T$ は全体変形角であり、上部構造に作用する水平力の重心に相当する床の1階床からの相対的な水平変形を、1階床からその床までの高さで除した変形角である。また、 $C_B$ はベースシア係数を表す。

#### 4.2 解析ケース

本章では、杭頭の曲げ降伏も考慮して、一体モデルと上部分離モデルの静的弾塑性解析を行う。既往の研究<sup>2)</sup>では、解析ケースとして3階、6階、10階、12階、14階建の5棟の基本モデルと、5棟の基本モデルを基に上部構造耐力(相当 $D_s$ 値)を0.35、0.40の2通りに変えたモデル(10棟)の合計15棟に対して、それぞれ基礎梁の曲げ耐力( $\alpha$ )を1.2~1.7まで適宜変えたケースを設定した。

ここでは、6階、10階、14階建の3棟の基本モデルの主要断面は変えずに杭径のみを小さくした拡底杭モデル3棟を新たに作成する。3棟の基本モデルおよび3棟の拡底杭モデル(合わせて6棟)と、これらを基に相当 $D_s$ 値を0.35、0.40、0.45の3通りに変えたモデル(18棟)の合計24棟に対して、それぞれ $\alpha$ を1.5~2.2まで適宜変えた変動ケースを設定する。上部構造モデルの主要な部材断面の例を表-3に示す。一次設計(短期許容応力度設計)用の地震時応力は、建物全体モデルを用いて $A_i$ 分布<sup>3)</sup>に基づき算定する。基礎梁の一次設計用応力には一体解析による杭頭の曲げモーメントを考慮する。基礎梁や杭の断

表-3 上部構造モデルの使用材料と部材断面の例(10階建拡底杭モデル)

柱				大梁			
階	Fc	主筋強度	SD390	階	Fc	主筋強度	SD390
10	27	断面 650 主筋 12-D29		RF	27	断面 500×750 主筋 4-D29	
9	27	断面 650 主筋 12-D29		10	27	断面 500×750 主筋 4-D32	
8	30	断面 650 主筋 12-D32		9	30	断面 500×750 主筋 4-D32	
7	30	断面 650 主筋 12-D32		8	30	断面 550×750 主筋 4-D32	
6	30	断面 700 主筋 12-D35		7	30	断面 550×750 主筋 4(+1)-D32	
5	36	断面 700 主筋 12-D35		6	36	断面 550×750 主筋 4(+1)-D35	
4	36	断面 700 主筋 12-D35		5	36	断面 550×800 主筋 4(+1)-D35	
3	36	断面 700 主筋 12-D35		4	36	断面 550×800 主筋 4(+2)-D35	
2	36	断面 700 主筋 12-D35		3	36	断面 600×800 主筋 4(+1)-D38	
1	36	断面 700 主筋 12-D35		2	36	断面 600×800 主筋 4(+1)-D38	

杭				基礎梁			
位置	Fc	主筋強度	SD390	階	Fc	主筋強度	SD390
全断面	30	断面 1800φ 主筋 16-D35		基礎	36	断面 750×1700 主筋 6-D29	

注:大梁および基礎梁の断面は幅(mm)×せい(mm)を示す。  
また、Fcはコンクリートの設計基準強度を示す。

表-4 基礎梁の設定と基礎梁曲げ耐力指標 $\alpha$

階数	6	10	14
幅(mm)	650	750	850
せい(mm)	1400	1700	2200
配筋	4-D29	6-D29	5-D35
一次設計の余裕度	1.37	1.37	1.26
基礎梁曲げ耐力指標 $\alpha$	1.44	1.48	1.50

面は、RC造建築物の基礎構造として標準的な断面の大きさとなるように設定するとともに、一次設計を満足する配筋量とする。基礎梁の断面は、せいを1.4m(6階建)~2.2m(14階建)とし、幅は適宜設定している。基礎梁の一次設計の曲げ余裕度は、1.26~1.37である(表-4)。杭の主筋量は、杭のコンクリート断面積に対する主筋比( $p_g$ )が0.6%以上となるように適宜設定する(表-5)。材料特性値は、鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説<sup>7)</sup>に準拠して算定する。

#### 4.3 解析結果

10階建拡底杭モデルの層せん断力(Q)と層間変位( $\delta$ )の関係(分離モデルの結果)と $R_T=1/67$ 時の塑性ヒンジ形成状況(一体モデルおよび分離モデルの結果)を図-8に示す。また、上部構造基本モデル(分離モデル)のベースシア係数( $C_B$ )と全体変形角( $R_T$ )の関係を図-9に示す。基本モデルの $R_T=1/67$ 時の $C_B$ は、6階建で0.350、10階建で0.347、14階建で0.311である。

#### 4.4 考察

##### (1) 基礎梁耐力と塑性ヒンジ形成状況

10階建の拡底杭モデルの基礎梁耐力を $\alpha=1.5$ から1.7まで変動させたときの基礎周りの部材の塑性ヒンジ形成状況を図-10に示す。分離モデルではどのケースも1階柱脚にヒンジが発生しているが、一体モデルでは

表-5 拡底杭モデルの杭の設定

階数	6	10	14
軸部径(mm)	1000	1200	1500
底部径(mm)	1400	1800	2100
軸部 $p_g$ (%)	0.60	0.60	0.60

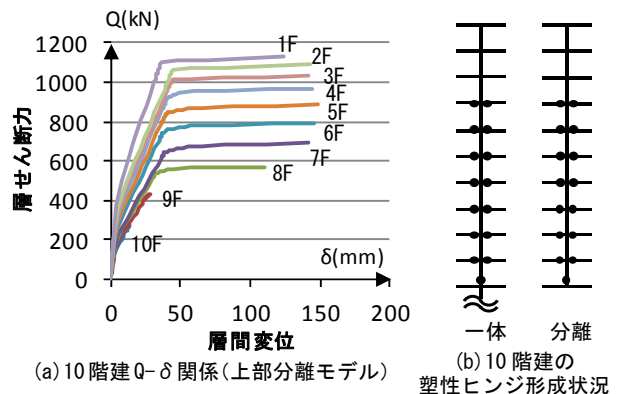


図-8 10階建の層せん断力-層間変位関係と $R_T=1/67$ 時の塑性ヒンジ形成状況

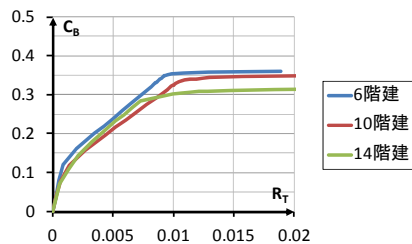


図-9 基本モデル(上部分離モデル)の $C_B-R_T$ 関係

$\alpha=1.6$  以下のケースは基礎梁にもヒンジが発生している。

また、基礎梁ヒンジ形成時の全体変形角は、 $\alpha=1.5$  では  $R_T=0.0102$  であるのに対し、 $\alpha=1.6$  では  $R_T=0.0219$  であり、ヒンジ形成時の変形角が大きく異なっている。

### (2) 基礎梁耐力と a-b 関係図

10 階建の基礎梁耐力を  $\alpha=1.4$  から 1.8 まで変動させたケースの a-b 関係図を図-11 に示す。 $\alpha=1.7$  以下のケースからは  $b=1.0$  のラインを下回っており、一体モデルで基礎梁降伏を示すゾーンに入っている。これは図-10 に示したヒンジ形成状況と一致している。また、指標値  $b$  が 1.0 以上の場合には、 $\alpha$  を低下させると  $b$  の値も線形的に低下するが、 $b$  が 1.0 を下回る領域では  $b$  の値が 1.0 に近いところを推移している。これは、基礎梁が降伏するケースでは基礎梁耐力を低下させると上部構造保有耐力が低下し、上部構造保有耐力時の杭頭曲げモーメント  ${}_pM$  が低下するため、 $b$  が 1 を下回る領域では  $\alpha$  の値を低下させても  $b$  の値はそれに伴っては低下せず 1.0 付近を推移していると考えられる。

### (3) 上部構造の耐力の影響

上部構造耐力を 3 種類に変えたモデルについて、相当  $D_s$  が 0.40 の 10 階建ケースの基礎梁耐力を  $\alpha=1.4$  から 2.0 まで変動させたときの基礎周りの部材の塑性ヒンジ形成状況を図-12 に、a-b 関係図を図-13 に示す。また、同様に相当  $D_s$  が 0.45 の 10 階建ケースの基礎梁耐力

を  $\alpha=1.6$  から 2.2 まで変動させたときの基礎周りの部材の塑性ヒンジ形成状況を図-12 に、a-b 関係図を図-13 に示す。

相当  $D_s$  が 0.35 のケースでは  $\alpha$  が 1.6 以下で  $b$  が 1.0 未満となっているが、上部耐力のやや大きいケース（相当  $D_s$  が 0.40 のケース）では  $\alpha$  が 1.7 以下で  $b$  が 1.0 を下回り、上部耐力の大きいケース（相当  $D_s$  が 0.45 のケース）では  $\alpha$  が 1.9 以下で  $b$  が 1.0 を下回り、基礎梁降伏となっている。また、相当  $D_s$  が 0.40 と 0.45 のケースでは、 $\alpha$  が 1.8 以上となると杭頭降伏が生じている。これより、相当  $D_s$  が大きくなるにつれて、基礎梁が降伏しない基礎梁の耐力指標  $\alpha$  は大きくなる傾向にある。これは、上部耐力が大きくなると  $cMu$  が増加し、同じ  $\alpha$  に対して  $a$ 、 $b$  がともに小さくなるからと考えられる。

### (4) 基礎梁の耐力指標 $\alpha$

図-14 はそれぞれ相当  $D_s$  が 0.35, 0.40, 0.45 の各階数の建物について、横軸に階数、縦軸に指標値  $b$  をとった図である。同じ  $\alpha$  の値のケースを線で結んで表示している。相当  $D_s$  が 0.35 の場合には、 $\alpha$  が 1.6 以下のケースでは基礎梁にヒンジが生じて上部構造の崩壊形に変化が生じる。 $\alpha$  が 1.7 以上のケースでは、指標値  $b$  が 1.0 を上回り、基礎梁にヒンジが生じることがなく、上部構造の崩壊形に変化が見られない。

相当  $D_s$  が 0.40 の場合には、 $\alpha$  が 1.7 以下のケースで

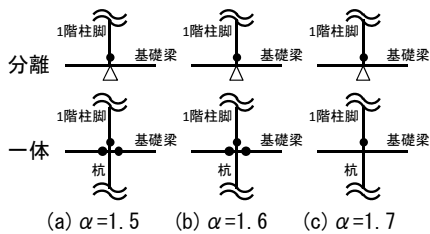


図-10 10階建基礎周り

塑性ヒンジ形成状況 ( $R_T=1/67$  時)

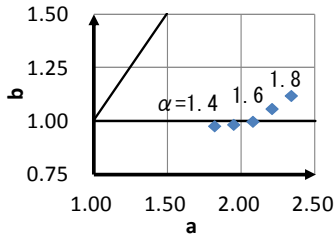
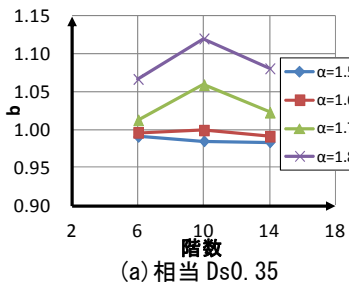


図-11 10階建  $\alpha$  変動ケースの a-b 関係 (相当  $D_s$  0.35)



(a) 相当  $D_s$  0.35

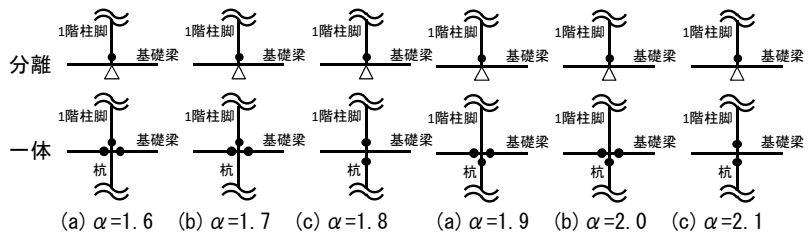
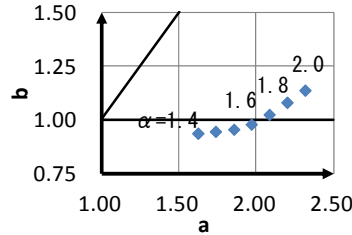


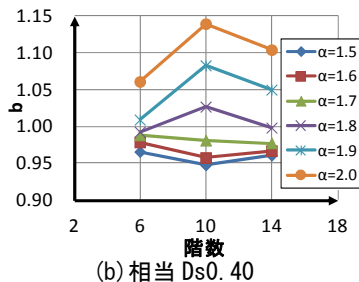
図-12 相当  $D_s$  を変えた 10階建基礎周り

塑性ヒンジ形成状況 ( $R_T=1/67$  時)

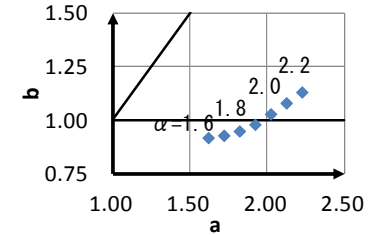


(1) 相当  $D_s$  0.40

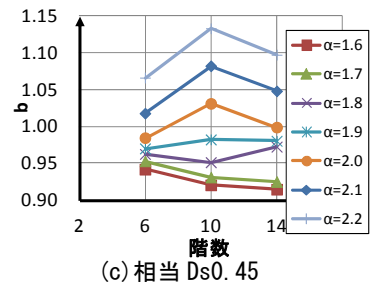
図-13 相当  $D_s$  を変えた 10階建  $\alpha$  変動ケースの a-b 関係



(b) 相当  $D_s$  0.40



(2) 相当  $D_s$  0.45



(c) 相当  $D_s$  0.45

図-14 拡底杭モデルの  $\alpha$  と指標値 a, b の関係

は、すべての階数で基礎梁にヒンジが生じる。 $\alpha = 1.9$ 以上のケースでは、階数によって指標値  $b$  のばらつきが見られるが、基礎梁にヒンジが生じることがない。

また、相当  $D_s$  が 0.45 の場合には、 $\alpha$  が 1.9 以下のケースですべての階数で基礎梁にヒンジが生じる。 $\alpha = 2.1$ 以上のケースでは、基礎梁にヒンジが生じることがない。このように相当  $D_s$  が大きくなるに伴い、基礎梁にヒンジが生じる  $\alpha$  が大きくなる。

## 5. 表層地盤の水平剛性の影響

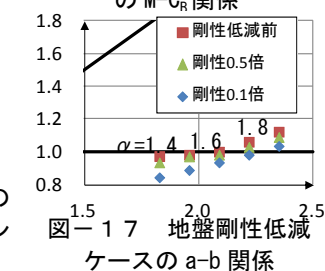
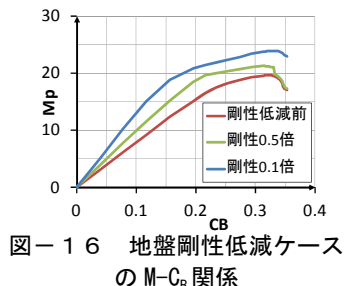
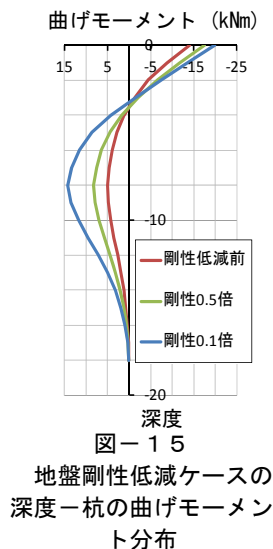
### 5.1 解析ケース

本章では、液状化等で表層地盤の剛性が低下する場合を想定して 10 階建の一体モデルの表層地盤（表-1 に示す地盤の地表から深度-4m までの粘土層）の水平剛性を 0.1 倍、0.5 倍として、その影響を検討する。これは、建築基礎構造設計指針<sup>4)</sup>に示されている地盤の N 値に地盤中の土粒子などに応じて補正した N 値（以下、補正 N 値と略記）と液状化地盤における低減率との関係を参考にしており、低減率が 0.1 倍、0.5 倍程度となる時の補正 N 値はそれぞれ 10、20 程度に相当する。

### 5.2 解析結果および考察

10 階建一体モデルによる杭の曲げモーメント分布（一次設計時）を図-15 に、水平剛性を低減したそれぞれのケースでの杭頭モーメント ( $M_p$ ) とベースシア係数 ( $C_B$ ) 関係を図-16 に示す。これらより、表層地盤の水平剛性が低下すると、杭頭曲げモーメントが増大するため、上部構造の崩壊形形成に対する杭頭曲げの影響が大きくなることがわかる。

また、表層地盤の水平剛性低減ケースについて基礎梁耐力を  $\alpha = 1.4$  から 1.8 まで変動させた  $a-b$  関係図を図-17 に示す。水平剛性が低下すると指標値  $b$  がそれに伴って低下しており、上部構造の崩壊形形成に対する杭頭曲げの影響が大きくなることが推測できる。



## 6. まとめ

本研究の解析範囲内であるが、以下の知見を得た。

- (1) 一般的な杭頭曲げ降伏時の水平せん断力係数は、杭頭筋量が 0.6% の場合、直杭では 0.36~0.45、拡底杭（軸径/先端径=約 2/3）では 0.25~0.35 程度である。
- (2) 上部構造の耐力が高いほど、杭の軸径を小さくするほど、崩壊形形成時に杭頭降伏が生じる可能性が大きくなり、中高層 RC 造の拡底杭では保有水平耐力計算に杭頭曲げを考慮することが望ましい。
- (3) 杭頭が曲げ降伏する場合でも、基礎まわりの部材耐力指標値  $a$ 、 $b$  を用いることにより、杭頭曲げが上部構造の崩壊形形成に及ぼす影響を明示できる。
- (4) 杭頭曲げを考慮しても基礎梁が降伏しない基礎梁の耐力指標  $\alpha$  は、上部構造の相当  $D_s$  によって異なり、相当  $D_s$  が 0.35 では 1.7 以上、相当  $D_s$  が 0.40 では 1.9 以上、相当  $D_s$  が 0.45 では 2.1 以上である。
- (5) 表層地盤の水平剛性が低下すると、杭頭曲げが増大するため、上部構造の崩壊形形成に対する杭頭曲げの影響が大きい傾向がある。

今後、検討対象をさらに広げて基礎まわりの部材耐力指標値と基礎梁耐力指標について定量的な評価を進めていきたい。

## 謝辞

千葉大学和泉研究室卒論生の竹田遼平さんの多大なる協力に深甚なる謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 木谷圭一、江田拓也、秋田知芳、和泉信之：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、コンクリート工学年次論文集、Vol.33、No.2、pp.931-936、2011.7
- 2) 坂本雅敏、木谷圭一、秋田知芳、和泉信之：RC 造杭基礎建築物の保有水平耐力計算に用いる上部モデル、コンクリート工学年次論文集、Vol.34、No.2、pp.13-18、2012.7
- 3) 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
- 4) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、2001.10
- 5) 渡辺一弘、勅使川原正臣、飯場正紀他：一体解析による耐震性能評価手法の検討（その 6 解析概要）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.485-486、2005.9
- 6) 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、pp.260-271、2007
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、pp.6-7、2010.2