

III-91

基礎回転系構造の地震時応答に及ぼすP- Δ 効果の評価に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 明治大学理工学部 公開日: 2017-05-31 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 大塚, 悠里, 石田, 光, 朱, 盈, 大井, 希良里, 平石, 久廣 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/18728

Ⅲ-91 基礎回転系構造の地震時応答に及ぼす P- Δ 効果の評価に関する研究

大塚 悠里, 石田 光, 朱 盈, 大井 希良里, 平石 久廣

STUDY ON EVALUATION OF P- Δ EFFECT ON THE SEISMIC RESPONSE OF STRUCTURES WITH ROTATIONAL FOUNDATION

Yuri OTSUKA, Hikaru ISHIDA, Ying ZHU, Kirari OI and Hisahiro HIRAISHI

1. はじめに

近年、建築物には大地震時の地震動に対し、一定の機能維持及び損傷の抑制が要求されるようになり、層間変形角を設計のクライテリアとする設計が普及している。このため、上部構造の変形による層間変形角が抑制される構造が求められ、制振構造や免震構造が普及してきたが、コストや想定を超えるような外乱に対する安全性等、配慮されるべき課題は多い。

本論文における基礎回転系構造(図1)は、杭頭部で基礎回転を生じることにより、上部構造に一定以上の外力が作用しない。このため、浮き上がり時のベースシア係数を上部構造の損傷耐力以下に設定することで、上部構造の損傷を制御することが可能である。

浮き上がりを対象とした研究に二方向入力浮き上がりに及ぼす影響を検討した高橋等の研究¹⁾、上下動による基礎浮き上がりの影響を検討した豊巻等の研究²⁾及び

浮き上がり後の落下による衝突が建物に与える影響を考慮した溜等の研究³⁾が挙げられるが、実施設計された建物の事例は極めて少ない。

これより、著者らは主として梁間方向の連層耐震壁架構を対象に下部構造を基礎回転系とすることで、これらの課題の解決を図る研究を行ってきた^{4),5)}。

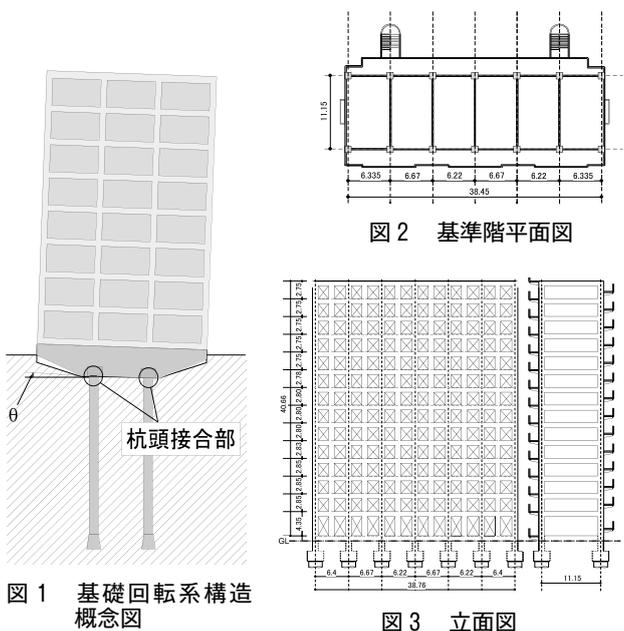
しかしながら、浮き上がり時のベースシア係数を上部構造の損傷耐力以下となるように小さく設定した場合、相対的にP- Δ 効果が耐震性状に与える影響が大きくなることが考えられる。基礎回転系のP- Δ 効果に関する研究としては、基礎と構造物の動的相互作用を考慮した3自由度モデル、つまり、上部構造の回転運動、基礎の並進運動及び回転運動をモデル化し、P- Δ 効果が基礎の応答に与える影響について検討を行った山下らの研究⁶⁾等いくつか存在するが、これらのほとんどは事例的な研究に留まっており、その影響の定量的な把握には至っていない。

以上のような背景より、本論文ではP- Δ 効果が基礎回転系構造の基本的な耐震性状へ与える影響の解明を目的とし、告示波を用いた時刻歴応答解析を行い、解析結果より検討を行った。また、等価減衰定数に及ぼすP- Δ 効果の影響を検討するため、解析対象モデルが最大応答時の周期で定常ループを描くような入力波(以下:定常ループを与えるスイープ波)を用いた時刻歴応答解析を行った。さらに、P- Δ 効果を考慮した際の基礎回転系構造の簡便な応答評価式を提案し、その妥当性を示した。

2. 地震応答解析の概要

2.1. 解析対象建物

対象とする建物は、文献⁷⁾に用いられている鉄筋コンクリート造の14階建高層集合住宅で建物高さ H (40.66m)、桁行方向が6スパンのラーメン構造、梁間方向が1スパンの連層耐震壁架構とした(図2, 図3)。各



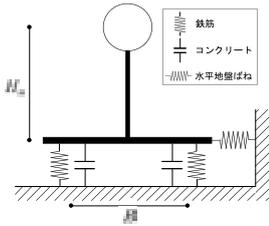


図4 解析モデル

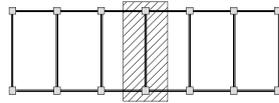


図5 解析対象構面

層の階高を表1に示す。ただし、建物高さには基礎の高さも含むものとした。なお、解析上では階段室部分は無視した。

2.2. 解析対象モデル

解析モデルは基本的なP-Δ効果の影響を検討する為、文献⁴⁾で用いられた一質点系(図4)を参考とした。解析対象は梁間方向とし(図5)、上部構造は一質点系モデル、下部構造は杭の引抜き及び沈下を表すばね(以下:コ

ンクリートばね)、杭頭の伸びを表す鉄筋ばね、水平地盤ばねの3種類のばねを梁要素で結合した。また、内部粘性減衰定数は瞬間剛性比例型とし、1次固有周期に対し3%とした。杭頭浮き上がりによる回転中心は、圧縮側の杭の中心とし、下部構造の杭芯間距離Bは、4m, 6m, 9mの3種類とした。

上部構造の一質点化による有効建物高さH_u(m)は(1)式にて求めた。

$$H_u = \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3n} \right) \times H \quad (1)$$

n: 階数

また、全有効質量M_u(ton)は、(2)式によった。

$$M_u = \frac{(\sum m_i \cdot \delta_i)^2}{\sum m_i \cdot \delta_i^2} \quad (2)$$

ここで、m_iはi階の質量 (ton)、δ_iはi階の水平変位 (m)で、高さ方向に逆三角形分布とした。各階の重量W (kN)を文献⁷⁾より表2に示す。また、全有効質量から有効重量W_u(kN)(W_u=M_u・g、g:重力加速度)を算出した。なお、本論文では、有効高さの位置の質点に重量に相当する外力を加えた。また、一定の重量に相当する外力を作用させ、時刻歴応答解析を行った。

上部構造の復元力特性は、フレームモデルの静的解析から求めた上部構造のみの荷重変形関係(図6破線)と歪エネルギーが等価となるようなトリリニアの骨格曲線とした(図6実線)。文献8より、静的解析で用いたフレームモデルは柱をファイバーモデル、梁をM-θ材端剛塑性ばね、耐震壁を壁谷澤モデルとした。また、鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニアモデル、コンクリートはNew RCモデル⁹⁾とした。表3、表4にフレームモデルの柱、梁及び壁断面詳細と使用材料を示す。

表1 階高一覧

階	階高(m)
14	2.75
13	2.75
12	2.75
11	2.75
10	2.75
9	2.78
8	2.80
7	2.80
6	2.80
5	2.83
4	2.85
3	2.85
2	2.85
1	4.35

表2 各階重量一覧

階	W(kN)	Σ W(kN)
14	1248	1248
13	1100	2348
12	1115	3463
11	1122	4585
10	1147	5733
9	1161	6894
8	1189	8082
7	1204	9286
6	1222	10508
5	1234	11742
4	1265	13007
3	1285	14292
2	1298	15590
1	1305	16895
基礎梁	2294	19189

表3 柱・梁及び壁断面詳細

階	梁断面				階	柱断面			壁断面		
	B×D	上端筋	下端筋	補強筋		B×D	主筋	補強筋	壁厚	縦筋	横筋
R	150×700	2-D19	2-D19	-	14	1150×650	8-D32+6-D16	□D13@100	150mm	1-D10@150	1-D10@150
14	150×700	1-D19	1-D19	-	13	1150×650	16-D32+6-D16	□D13@100	150mm	1-D10@150	1-D10@150
13	150×700	1-D19	1-D19	-	12	1150×650	16-D35+6-D16	□D13@100	150mm	1-D10@150	1-D10@150
12	150×700	1-D19	1-D19	-	11	1150×750	14-D35+6-D16	□D13@100	150mm	1-D10@150	1-D10D13@150
11	180×700	2-D19	2-D19	-	10	1150×750	14-D35+6-D16	□D13@100	180mm	2-D10@250	2-D10@150
10	180×700	2-D19	2-D19	-	9	1150×850	8-D35+6-D16	□D13@100	180mm	2-D10@250	2-D10@125
9	180×700	2-D19	2-D19	-	8	1150×850	8-D35+6-D16	□D13@100	180mm	2-D10@250	2-D13@200
8	180×700	2-D19	2-D19	-	7	1150×900	8-D35+6-D16	□D13@90	200mm	2-D10@250	2-D13@175
7	200×700	2-D19	2-D19	-	6	1150×900	8-D35+6-D16	□D13@90	200mm	2-D10@250	2-D13@150
6	200×700	2-D19	2-D19	-	5	1150×950	14-D35+6-D16	□D13@100	220mm	2-D10@200	2-D13@150
5	220×700	2-D19	2-D19	-	4	1150×950	14-D35+6-D16	□D13@100	220mm	2-D10@200	2-D13@150
4	220×700	2-D19	2-D19	-	3	1150×1000	20-D35+6-D16	□D13@100	250mm	2-D10@200	2-D13@125
3	220×700	2-D19	2-D19	-	2	1150×1050	24-D35+6-D16	□D13@100	250mm	2-D10@200	2-D13@125
2	220×700	2-D19	2-D19	-	1	1150×1050	16-D35+6-D16	□D13@100	250mm	2-D10@200	2-D13@125
基礎梁	650×3800	13-D35	13-D35	□D13@150							

表 4 使用材料

コンクリート種別	設計基準強度(N/mm ²)	使用箇所
Fc27	27	杭、12階柱からR階床まで
Fc36	36	基礎梁・1階床から5階床まで
Fc33	33	5階柱から9階床まで
Fc30	30	9階柱から12階床まで
鉄筋種別	基準強度(N/mm ²)	使用箇所
SD295A	295	壁筋、せん断補強筋 他
SD345	345	杭主筋
SD390	390	柱、梁主筋

表 5 上部構造諸元

階高	建物高さH(m)	有効高さHu(m)	有効重量Wu(kN)	初期剛性K(kN/m)
14	40.66	28.07	15388.33	125741.54

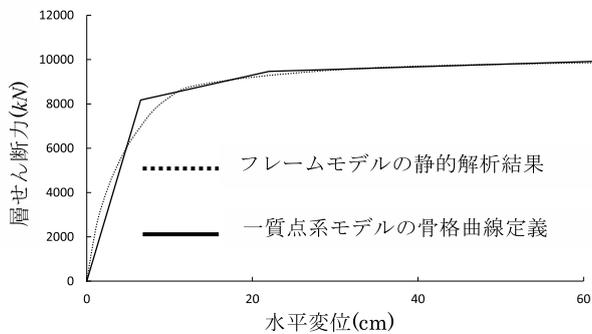


図 6 一質点系モデルの上部構造の骨格曲線定義

図 6 破線より、フレームモデルの初期ひび割れは降伏耐力の1/2以下で生じている。これを一質点系の第一折れ点とした場合、微小ではあるが正負の応答に偏りが生じた。このため、本論文では基礎回転系構造へ与える P-Δ 効果の影響の簡明な評価を行うため、上部構造がひび割れの生じる以前の荷重で浮き上がりが生じるよう、上部構造のひび割れ耐力を設定した(図 6 実線)。また、降伏後の剛性は初期剛性の0.001倍とし、復元力特性は Takeda モデルを用いた。上部構造の諸元を表 5 に示す。

下部構造のばねの設定方法を以下に示す。

1) コンクリートばね

コンクリートばねは圧縮のみに抵抗するものとし、図 7 のような履歴を描くものとした。なお、コンクリートの圧縮剛性 K_c は文献⁸⁾の地盤-杭-建物の一体モデルによる静的増分解析により得られた杭の圧縮変位と圧縮軸力により求めた。

2) 鉄筋ばね

杭頭部の主筋である鉄筋ばねは、引張、圧縮ともに抵抗するものとし、図 8 のような履歴を描くものとした。

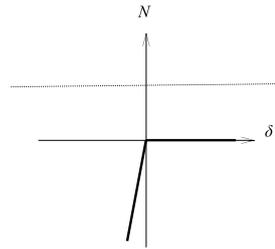


図 7 コンクリートばねの復元力特性

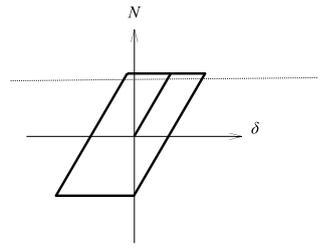


図 8 鉄筋の復元力特性

また、設定した耐力時に基礎回転機構を成立するような鉄筋の断面積 A_s (m²) は、鉄筋による浮き上がり耐力上昇分のベースシア係数を $s_{C.B.L}$ とすると、浮き上がりによる回転中心まわりのモーメントの釣り合いより、(3) 式で与えられる。復元力特性は完全弾塑性型とし、杭頭近傍における鉄筋の付着除去区間 l は 1.0 (m)、鉄筋のヤング係数 E_s は 2.05×10^8 (kN/m²) とした。鉄筋の引張剛性 K_s (kN/m) は (4) 式で与えた。

$$A_s = \frac{s_{C.B.L} \cdot H_u \cdot W_u}{\sigma_y \cdot B} \quad (3)$$

$$K_s = \frac{E_s \cdot A_s}{l} \quad (4)$$

σ_y : 鉄筋の降伏強度 B : 杭芯間距離

E_s : 鉄筋のヤング係数 ($=2.05 \times 10^8$ kN/m²)

l : 鉄筋の付着除去区間 ($=1$ m)

表 6 に、モデルに配した各種ばねのパラメータの一覧を示す。

3) 水平地盤ばね

本論文では、基本的な応答性状の把握のため、基礎と地盤間での水平方向への移動は生じないものとし、水平地盤ばねの剛性が無限大となるように 1.0×10^{20} (kN/m) とした。

表 6 各ばね値一覧

ベースシア係数 $C_{B.L}$	杭芯間距離 B (m)	鉄筋の断面積 A_s (m ²)	鉄筋の引張剛性 K_s ($\times 10^6$ kN/m)	コンクリートの圧縮剛性 K_c ($\times 10^6$ kN/m)
0.1	4	0.008	1.633	24.783
	6	0.022	4.471	
0.15	4	0.008	1.633	
	6	0.036	7.310	
	9	0.017	3.525	
0.2	4	0.005	1.002	
	6	0.063	12.987	
	9	0.017	3.525	
0.3	4	0.036	7.310	
	6	0.017	3.525	
	9	0.091	18.665	
0.4	4	0.054	11.095	
	6	0.030	6.048	
	9	0.119	24.342	
0.5	4	0.073	14.880	
	6	0.042	8.572	
	9			

2.3. 耐力の設定

鉄筋がない状態での浮き上がり耐力時のベースシア係数 ${}_0C_{B.L}$ は、浮き上がりによる回転中心まわりのモーメントの釣り合いより、(5) 式で表される。杭頭部の鉄筋の降伏により基礎回転が生じる耐力を浮き上がり耐力時のベースシア係数 $C_{B.L}$ とすると、(6) 式のように鉄筋がない状態での浮き上がり耐力時のベースシア係数 ${}_0C_{B.L}$ と鉄筋による浮き上がり耐力上昇分のベースシア係数 ${}_sC_{B.L}$ の和で表すことができる。

$${}_0C_{B.L} = \frac{B}{2H_u} \quad (5)$$

$$C_{B.L} = {}_0C_{B.L} + {}_sC_{B.L} \quad (6)$$

浮き上がり耐力時のベースシア係数 $C_{B.L}$ は、基礎回転系構造に対する P-Δ 効果の影響を検討する為、0.10, 0.15, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50の6種類とした。(5) 式、(6) 式より、算出した鉄筋がない状態での浮き上がり耐力時のベースシア係数 ${}_0C_{B.L}$ 、鉄筋による浮き上がり耐力上昇分のベースシア係数 ${}_sC_{B.L}$ 及び鉄筋の降伏による浮き上がり時の上部構造の降伏変形角 R_y を表7に示す。また、基礎回転系構造の上部構造の荷重変形関係を図9に示す。

2.4. 入力地震動

2.4.1. 告示波

告示波は、表層地盤の影響を考慮した第2種地盤の加速度応答スペクトルを基に作成した。告示波の加速度応

答スペクトルを図10(a)、時刻歴波形を図10(b)に示す。なお、告示波は長周期成分を含んでいるが、本論文の解析対象モデルの建物周期の範囲では図10(a)の加速度応答スペクトルのように十分な精度の応答を与える地震波形である。

2.4.2. 定常ループを与えるスイープ波

定常ループを与えるスイープ波は、解析対象モデルが最大応答時の周期で定常応答を描くように作成した。文献¹⁰⁾より、定常ループを与えるスイープ波の入力加速度 \ddot{z} は(7)式で与えられ、減衰定数 $h'_0 = 5\%$ の時の最大応答速度が告示波の速度一定領域と同様に周期に係らず v_0 となるように作成した。(7) 式の最大応答速度 v_0 は、(8) 式で与えられる告示における第2種地盤の速度一定領域の速度応答スペクトルの値とした。

$$\ddot{z} = 2h'_0 \frac{2\pi}{T} v_0 \sin \frac{2\pi}{T} t \quad (7)$$

$$v_0 = 0.815 \times 2.025 (m/sec) \quad (8)$$

h'_0 : 減衰定数 (= 5%) T : 周期

v_0 : 最大応答速度

ここで、定常ループを与えるスイープ波は解析対象モデルに定常ループを与えるため、(7) 式の同一円振動数 $2\pi/T$ で3サイクルとし、周期 T の増分は0.01秒とした。なお、2サイクルでも十分な定常ループを描く結果が得られている。定常ループを与えるスイープ波の加速度応

表7 各耐力及び浮き上がり時の回転角一覧

ベースシア係数 $C_{B.L}$	杭芯間距離B(m)	無鉄筋ベースシア係数 ${}_0C_{B.L}$	引張鉄筋によるベースシア係数 ${}_sC_{B.L}$	降伏変形角 R_y
0.1	4	0.071	0.029	1/575
0.15	4	0.071	0.079	1/560
0.15	6	0.107	0.043	1/580
0.2	4	0.071	0.079	1/502
0.2	6	0.107	0.093	1/572
0.2	9	0.160	0.040	1/574
0.3	4	0.071	0.229	1/418
0.3	6	0.107	0.193	1/416
0.3	9	0.160	0.140	1/481
0.4	4	0.071	0.329	1/353
0.4	6	0.107	0.293	1/459
0.4	9	0.160	0.240	1/406
0.5	4	0.071	0.429	1/304
0.5	6	0.107	0.393	1/331
0.5	9	0.160	0.340	1/350

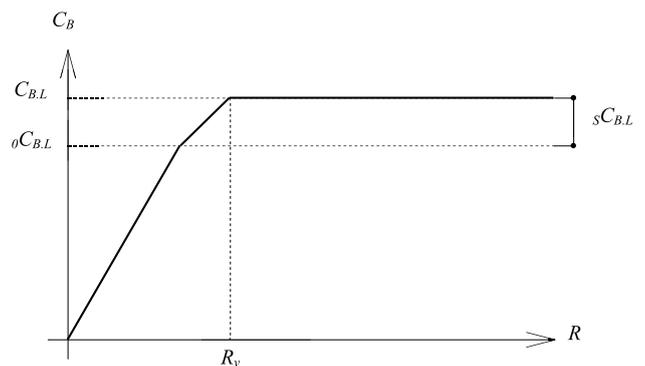
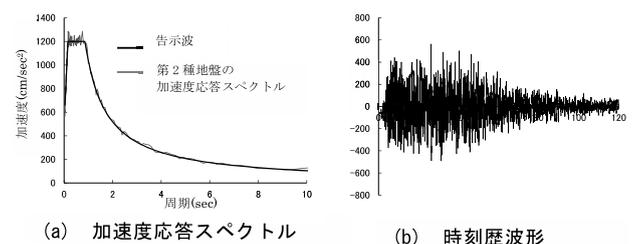


図9 基礎回転系構造の上部構造の荷重変形概念図



(a) 加速度応答スペクトル (b) 時刻歴波形

図10 告示波

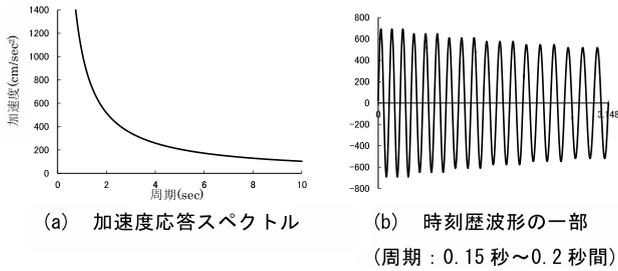


図11 定常ループを与えるスイープ波

答スペクトルを図11(a)に、一部を拡大した時刻歴波形を図11(b)に示す。

2.5. P-Δ効果考慮方法

一質点系の時刻歴応答解析において、幾何剛性により P-Δ 効果を考慮する。幾何剛性 K_g は (9) 式で与えられる。

$$K_g = \frac{mg}{H} = \frac{W}{H} \quad (9)$$

m : 質量 g : 重力加速度 H : 建物高さ

本論文では、質量 m を全有効質量 M_u 、重量 W を有効重量 W_u 、建物高さ H を有効建物高さ H_u として幾何剛性を設定した。また、本論文における基礎回転系構造では、文献¹¹⁾より上下方向の加速度が、水平方向の応答にほとんど影響を及ぼさないことが示されている。

3. 解析結果

3.1. 告示波の応答解析結果

告示波を用いた応答解析結果の例として、P-Δ 効果を考慮しない場合（以下：通常モデル）の上部構造と P-Δ 効果を考慮した場合（以下：P-Δ 効果考慮モデル）の上部構造の履歴を、図12に示す。本論文における基礎回転系構造の履歴形状は、上部構造の線形の応答から下部構

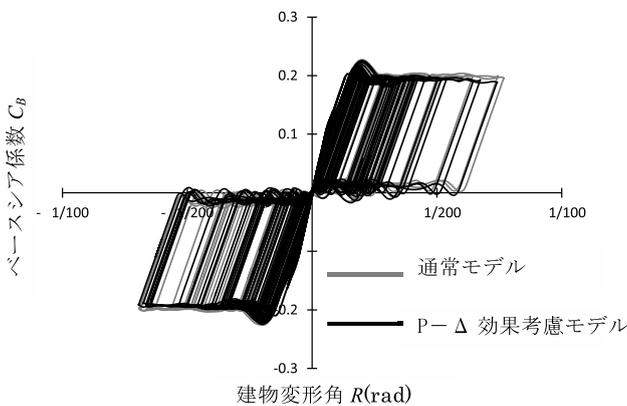


図12 上部構造履歴(告示波, $C_{B,L}=0.2$, $B=6m$)

表8 解析結果(告示波)

ベースシア係数 $C_{B,L}$	杭芯間距離 $B(m)$	解析値 δ (m)		応答増大率
		通常	P-Δ 効果考慮	
0.1	4	0.652	0.573	0.879
	6	0.291	0.299	1.028
0.15	4	0.502	0.504	1.004
	6	0.210	0.203	0.965
	9	0.216	0.208	0.965
0.2	4	0.391	0.291	0.744
	6	0.146	0.150	1.030
	9	0.134	0.135	1.007
0.3	4	0.145	0.142	0.980
	6	0.127	0.125	0.986
	9	0.131	0.133	1.012
0.4	4	0.143	0.145	1.010
	6	0.159	0.155	0.981
	9	0.145	0.146	1.006
0.5	4	0.136	0.136	1.002
	6			

造の鉄筋の引張降伏及び圧縮降伏による応答へ移行することによる旗型の履歴を描いている。また、P-Δ 効果を考慮した場合での基礎回転系構造の上部構造履歴は耐力の低下が生じているものの最大応答変位は増大せず、むしろ微小ではあるが低減される結果となった。

表8に、通常モデルの最大応答変位と P-Δ 効果考慮モデルの最大応答変位、P-Δ 効果による最大応答変位の増大倍率 (P-Δ 効果考慮モデルの応答 ÷ 通常モデルの応答) を併せて示す。浮き上がり耐力に係わらず、基礎回転系構造へ P-Δ 効果を考慮しても最大応答変位はあまり増大せず、耐力が低いモデルでは微小ではあるが最大応答変位が低減される傾向がある。

しかしながら、告示波を用いた応答解析は、図13に示すように負側の最大応答変位に比べ、その直前の正側の応答変位が小さく、これら応答変位の差が大きいの（以下：応答変位の偏り）。そこで、履歴による等価減衰定数への影響を定量的に評価するため、解析対象モデルが最大応答時の周期で左右対称の応答（定常応答）を描く、定

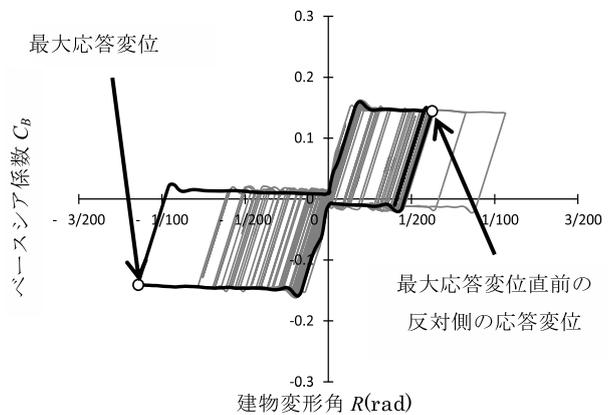


図13 上部構造履歴(告示波, P-Δ効果考慮モデル, $C_{B,L}=0.15$, $B=4m$)

常ループを与えるスイーブ波を用いて応答解析を行った。

3.2. 定常ループを与えるスイーブ波の応答解析結果

定常ループを与えるスイーブ波を用いた応答解析結果の例として、通常モデルの上部構造とP-Δ効果考慮モデルの上部構造の最大応答時における1サイクル分の履歴を、図14に示す。3.1の応答解析結果と同様に、上部構造の線形の応答から下部構造の鉄筋の引張降伏及び圧縮降伏による応答へ移行することによる、旗型の履歴を描いている。また、その履歴は正負が等しく、応答変位の偏りを生じていない。これは、他の耐力を持つモデルでも同様である。さらに、P-Δ効果考慮モデルの上部構造履歴は耐力の低下が生じているが、最大応答変形は増大せず、微小ではあるがむしろ低減される結果となった。

表9に、通常モデルの最大応答変位とP-Δ効果考慮モデルの最大応答変位、P-Δ効果による最大応答変位の増大倍率を併せて示す。P-Δ効果により最大応答変位

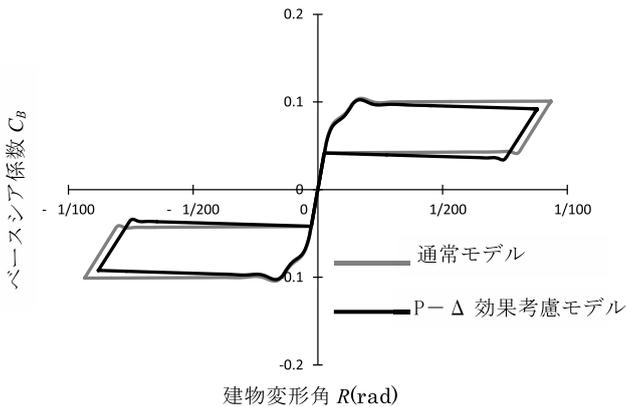


図14 上部構造履歴 (定常ループを与えるスイーブ波, C_{B.L}=0.1, B=4m)

表9 解析結果(定常ループを与えるスイーブ波)

ベースシア係数 C _{B.L}	杭芯間距離B(m)	解析値δ (m)		応答増大倍率
		通常	P-Δ効果考慮	
0.1	4	0.263	0.247	0.941
	6	0.105	0.104	0.991
0.15	4	0.184	0.179	0.974
	6	0.089	0.089	0.997
	9	0.098	0.097	0.994
0.2	4	0.224	0.218	0.977
	6	0.088	0.088	0.999
	9	0.082	0.082	0.998
0.3	4	0.087	0.086	0.996
	6	0.095	0.095	0.999
	9	0.075	0.075	1.001
0.4	4	0.081	0.081	0.999
	6	0.104	0.104	1.000
	9	0.095	0.095	1.000
0.5	4	0.088	0.088	1.000
	6	0.095	0.095	1.000
	9	0.088	0.088	1.000

は低減しており、浮き上がり耐力時のベースシア係数 C_{B.L} が、小さいほど最大応答変位の減少が顕著である。また、浮き上がり耐力時のベースシア係数 C_{B.L}=0.10、杭芯間距離 B=4m のモデルでは最大応答変位が約6%低減されている。

4. 基礎回転系構造へ与えるP-Δ効果の影響

本章では、P-Δ効果による耐力低下及び応答低減係数の低下の関係が、定常応答時の応答変位へ与える影響について検討を行う。また、P-Δ効果を考慮した応答評価式の主たる因子である等価減衰定数の算定及び本応答評価式の妥当性についての検討を行う。

4.1. P-Δ効果を考慮した応答変位

文献¹²⁾より、通常モデルの応答変位 δ が疑似速度一定領域の場合のベースシア係数 C_B との関係から (10) 式で与えられる。

$$\delta = \left(\frac{A \cdot T_2}{2\pi} \cdot F_h \right)^2 \cdot \frac{1}{C_{B \cdot g}} \tag{10}$$

(10)式における A (m/s²) は応答加速度一定領域における応答加速度の値、T₂(s) は加速度一定領域と疑似応答速度一定領域の境界の周期、F_h は応答低減係数を表している。

ここで、第2種地盤、地域係数 Z=1 において、A=12 (m/s²)、T₂=0.864(s) となり、(11) 式が得られる。

$$\delta = \frac{0.278}{C_{B.L}} \cdot F_h^2 \tag{11}$$

また、P-Δ効果を考慮した場合の応答は、後述の4.6に示すように最大耐力時のベースシア係数とその時の応答低減係数で表されることから、応答評価式は (12) 式となる。

$$P_{\Delta} \delta = \frac{0.278}{C_{B.L} - \frac{P_{\Delta} \delta}{H}} \cdot P_{\Delta} F_h^2 \tag{12}$$

なお、P-Δ効果を考慮した時の応答変位を P_Δδ、応答低減係数を P_ΔF_h とした。ただし、応答低減係数の主たる因子である等価減衰定数は後述のように、P-Δ効果による耐力の低下により、P-Δ効果を無視した場合より大きくなる。

(12) 式より、P-Δ効果を考慮した応答変位 P_Δδ は、P-Δ効果による耐力の低下の影響と応答低減係数の影響によって変化する事が示されており、耐力の低下の影響が大きいと応答変位は増大するが、それに伴う応答低

減係数の減少の影響が大きいと応答変位は減少するといえる。以下では、この2つの影響について検討を行う。

$$h_{eq} = \frac{\alpha}{\mu} + \frac{2(\mu-1)}{\pi\mu} \cdot \frac{sC_{B.L}}{C_{B.L}} + h_0 \quad (14)$$

4.2. 等価減衰定数の算定式 (通常モデル)

通常モデルの等価減衰定数の算定方法は、文献⁴⁾に倣った。基礎回転系の上部構造が弾塑性体の場合、履歴特性は図15で表される。なお、図15は定常応答における面積算定用の模式的な履歴図であり、簡便に面積を算出するため下部構造の鉄筋が降伏するまでの剛性を上部構造の初期剛性としている。図15における履歴面積は、簡略化前の履歴面積に比べ、ほとんど変わらないものとなっている。また、本論文では上部構造の応答が線形であるが、等価減衰定数の一般的な算定式を導出ため、図15の上部構造の履歴が面積を有している。

等価減衰定数 h_{eq} を上部構造の変形による等価減衰定数と下部構造の鉄筋ばねによる等価減衰定数に分けて算出する。浮き上がりが生じない時の上部構造の履歴面積を ΔW_1 、浮き上がり時の上部構造の履歴面積を ΔW_2 とすると等価減衰定 h_{eq} が (13) 式で示される。

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta W_1 + \Delta W_2}{W} + h_0 \quad (13)$$

W : 等価線形による最大ポテンシャルエネルギー

h_0 : 内部粘性減衰定数 (= 3%)

また、浮き上がりが生じない時の上部構造の履歴面積 ΔW_1 、浮き上がり時の上部構造の履歴面積 ΔW_2 及び等価線形による最大ポテンシャルエネルギー W を算出し、これらを (13) 式に代入すると、通常モデルの等価減衰定数 h_{eq} が (14) 式で与えられる。なお、 μ は塑性率 ($= R_{max}/R_y$) を表し、上部構造の履歴面積 ΔW_1 は上部構造の変形のみ (図16参照) の等価減衰定数を $\alpha\%$ とし表す。

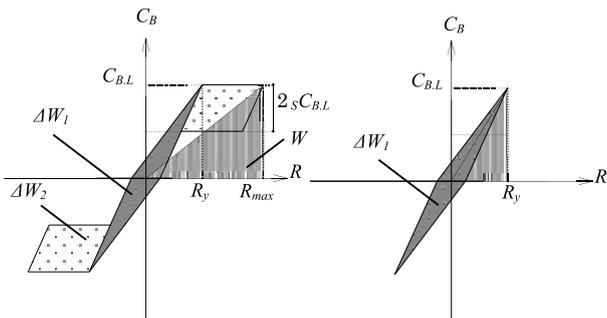


図15 上部構造履歴 (浮き上がり発生後)

図16 上部構造履歴 (浮き上がり発生前)

4.3. 等価減衰定数の算定式 (P-Δ効果考慮モデル)

P-Δ効果を考慮した場合の等価減衰定数の算定式の誘導は(13)式を基にし、図17で示されるようなP-Δ効果の耐力低下による等価の最大ポテンシャルエネルギー W の減少を考慮するものとする。またP-Δ効果を考慮しない場合での浮き上がり耐力時のベースシア係数を $C_{B.L}$ 、P-Δ効果を考慮した場合での最大応答時におけるベースシア係数を $p_{\Delta}C_{B.L}$ 、浮き上がり耐力時のベースシア係数を $p_{\Delta}C'_{B.L}$ とする。図17、(9)式より、P-Δ効果を考慮した場合での最大応答時におけるベースシア係数 $p_{\Delta}C_{B.L}$ は (15) 式、浮き上がり耐力時のベースシア係数 $p_{\Delta}C'_{B.L}$ は (16) 式で表せる。

$$p_{\Delta}C_{B.L} = C_{B.L} - \frac{p_{\Delta}\delta}{H} \quad (15)$$

$$p_{\Delta}C'_{B.L} = C_{B.L} - \frac{\delta_y}{H} \quad (16)$$

なお、(16)式の δ_y は降伏変位とし、基礎回転系の降伏変位である。

(13)式、(15)式及び(16)式より、P-Δ効果を考慮した場合での等価減衰定数 $p_{\Delta}h_{eq}$ の算定式は (17) 式となる。

$$p_{\Delta}h_{eq} = \left\{ \frac{\alpha}{\mu} + \frac{2(\mu-1)}{\pi\mu} \cdot \frac{sC_{B.L}}{p_{\Delta}C'_{B.L}} \right\} \cdot \frac{p_{\Delta}C'_{B.L}}{p_{\Delta}C_{B.L}} + h_0 \quad (17)$$

(17)式より、等価減衰定数はP-Δ効果を無視した場合に比べ一般的に増加する。P-Δ効果を考慮すると等価減衰定数が増大するのは、P-Δ効果による耐力の低下の

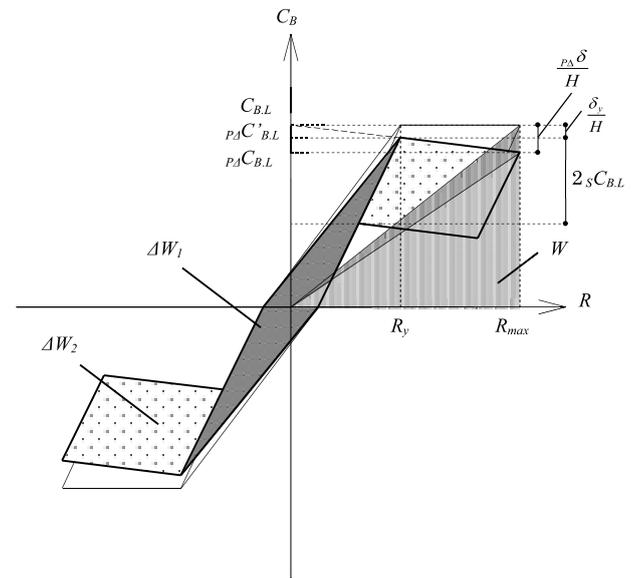


図17 上部構造履歴(浮き上がり発生後、P-Δ効果考慮)

影響により、最大応答時のポテンシャルエネルギー W は減少するものの、基礎回転系構造の杭頭部の鉄筋による履歴吸収エネルギーが変化しないためである。

4.4. 等価減衰定数の算定

3.2の定常ループを与えるスイープ波を用いた応答解析結果より、通常モデルの等価減衰定数 h_{eq} を(14)式、P-Δ効果考慮モデルの等価減衰定数 ${}_{P\Delta}h_{eq}$ を(17)式より算出した。P-Δ効果による等価減衰定数の増大は、浮き上がり耐力時のベースシア係数 $C_{B.L}=0.10$ 、杭芯間距離 $B=4\text{m}$ のモデルで最大となっており、その値は6.3%であった。また、等価減衰定数の増大する比率 (${}_{P\Delta}h_{eq}/h_{eq}$) は、耐力低下の比率 (${}_{P\Delta}C_{B.L}/C_{B.L}$) と概して同値であった。

4.5. 補正係数の誘導

通常モデルの応答変位とP-Δ効果考慮モデルの応答変位の関係を(18)式で表す。ここで、 β はP-Δ効果の補正係数である。

$${}_{P\Delta}\delta = \beta \cdot \delta \quad (18)$$

(18)式より、3.2の定常ループを与えるスイープ波を用いた応答解析結果から得られた補正係数 β を浮き上がり時のベースシア係数 $C_{B.L}$ の関係で図18に示す。P-Δ効果が基礎回転系構造へ与える定常応答時の基本的な影響として、ベースシア係数が小さいほど最大応答変位の減少がみられる。

(18)式に(11)式、(12)式を代入すると、補正係数 β が(19)式で与えられる。

$$\beta = \frac{C_{B.L}}{C_{B.L} - \frac{{}_{P\Delta}\delta}{H}} \cdot \frac{{}_{P\Delta}F_h^2}{F_h^2} \quad (19)$$

(19)式、図18より、P-Δ効果を考慮した応答変位はP-Δ効果による耐力の低下の影響より、P-Δ効果による応答低減係数の減少の影響が大きく、最大応答変位は減少する傾向があるといえよう。

また、文献¹⁰⁾より定常応答時における応答低減係数 F_h の理論式が(20)式で与えられる。なお、(20)式の h は通常モデルの場合は等価減衰定数 h_{eq} ((14)式)、P-Δ効果考慮モデルの場合は等価減衰定数 ${}_{P\Delta}h_{eq}$ ((17)式)とする。

$$F_h = \frac{h_0}{h} \quad (20)$$

h : 任意の値の減衰定数 h_0 : 減衰定数 (= 5%)

(19)式の収束計算より、定常応答時における補正係数

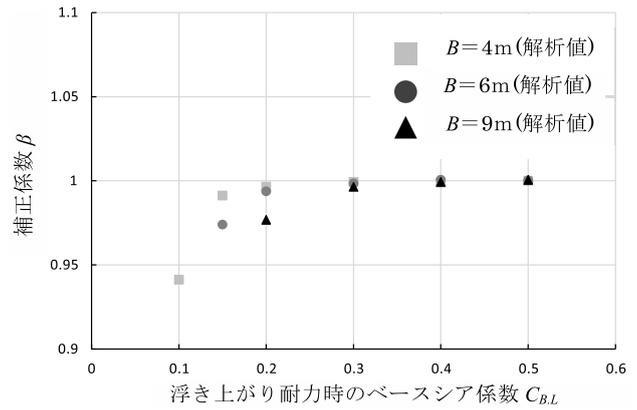


図18 補正係数(解析値)

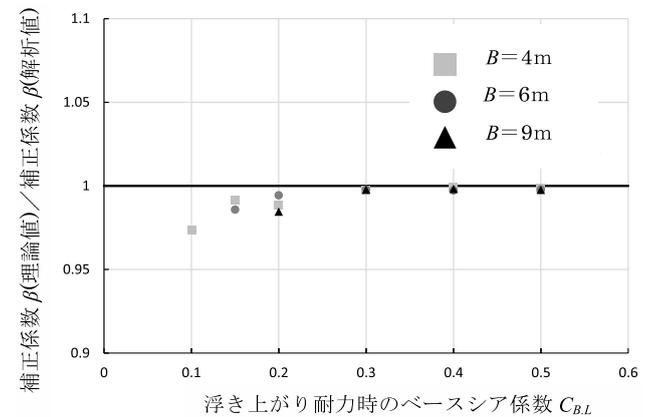


図19 補正係数の理論値と解析値の比較

β の理論値を算定した。補正係数の理論値と、定常ループを与えるスイープ波を用いた応答解析結果による補正係数の解析値(図18)の比を図19に示す。補正係数の理論値と解析値の誤差は約3%未満に収まっており、概ね一致している。したがって、P-Δ効果を考慮した基礎回転系構造の定常応答時の最大応答変位は、(12)式の応答評価式によって評価することができるといえる。

4.6. P-Δ効果による応答変位低減の評価

本節は、P-Δ効果を考慮した場合の最大応答変位の低減を、P-Δ効果による耐力の低下と等価減衰定数によって評価しうるかの検証を行った。検証に用いる本解析モデル(以下:検証モデル)は2章と同様の解析モデルであり(図4参照)、P-Δ効果を考慮した場合での最大応答時におけるベースシア係数 ${}_{P\Delta}C_{B.L}$ に合わせ浮き上がり耐力を設定した(図20参照)。また、下部構造の鉄筋の降伏後、勾配がフラットとなるようにP-Δ効果を考慮しないものとした。以下に、検証モデルの詳細を示す。

- 1) 検証モデルの浮き上がり耐力は3.2のP-Δ効果考慮モデルの最大応答時の耐力に等しい。
- 2) 検証モデルの最大応答時の上部構造及び鉄筋による

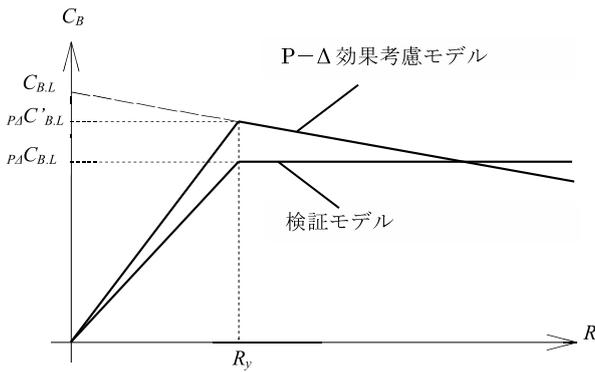


図20 検証モデルの復元力特性

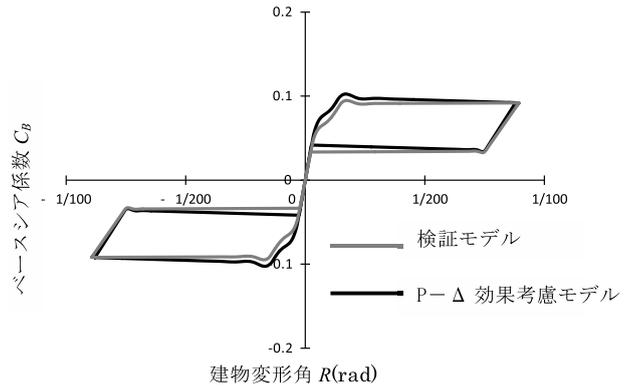


図21 P-Δ効果考慮モデルと検証モデルの比較

表10 検証モデルの各耐力一覧

検証するモデル	ベースシア係数 $C_{B,L}$	杭芯間距離 $D(m)$	無鉄筋ベースシア係数 ${}_0C_{B,L}$	引張鉄筋によるベースシア係数 ${}_sC_{B,L}$	鉄筋の断面積 $A_s(m^2)$	鉄筋の引張剛性 $K_s(kN/m)$	
$C_{B,L}=0.1$	$B=4m$	0.091	3.205	0.057	0.034	0.012	2417472
$C_{B,L}=0.15$	$B=4m$	0.146	3.047	0.054	0.092	0.033	6859273
$C_{B,L}=0.15$	$B=6m$	0.144	5.123	0.091	0.052	0.011	2321339

表11 P-Δ効果考慮モデルと検証モデルの比較

検証するモデル	解析値 δ (P-Δ考慮)	応答増大率 (P-Δ考慮)	ベースシア係数 $C_{B,L}$ (検証モデル)	解析値 δ (検証モデル)	$P_{\Delta} \delta / \delta$	
$C_{B,L}=0.1$	$B=4m$	0.247	0.941	0.091	0.251	0.984
$C_{B,L}=0.15$	$B=4m$	0.104	0.991	0.146	0.106	0.986
$C_{B,L}=0.15$	$B=6m$	0.179	0.974	0.144	0.181	0.991

履歴エネルギー吸収は P-Δ 効果考慮モデルと等しい。

- 検証モデルの浮き上がり時の上部構造の変形角 R_y は、P-Δ 効果考慮モデルと等しい。
- 検証モデルの P-Δ 効果を見捨てた場合の最大応答変位が P-Δ 効果考慮モデルの最大応答変位と同じ場合、最大応答時の等価減衰定数は P-Δ 効果考慮モデルと検証モデルで等しくなる。

以上の4点より設定した検証モデルの骨格曲線の概念図を図20に示す。検証対象としたモデルの浮き上がり耐力時のベースシア係数 $C_{B,L}$ は0.10, 0.15とした場合の3種類とした。各モデルの耐力一覧を表10に示す。なお、入力波には定常ループを与えるスイープ波を用いた。

P-Δ 効果考慮モデルと検証モデル ($C_{B,L}=0.1$, $B=4m$) の上部構造の履歴の比較を図21に示す。検証モデルの履歴特性は3.2の解析結果と同様に、正負の最大応答変位が等しく、下部構造の杭頭部の鉄筋の降伏による旗型の履歴となった。また、P-Δ 効果を考慮した場合の最大応答及び最大応答時のベースシア係数、検証モデルの最大応答及び最大応答時のベースシア係数はほぼ同じ値を示した。

各検証モデルの解析結果を表11に示す。P-Δ 効果考慮モデルと検証モデルの最大応答変位はほぼ等しい値となり、応答変位の誤差は約2%以下に収まっている。以上より、定常応答時の最大応答変位の低減について、P-Δ 効果による耐力の低下と等価減衰定数によって評

価しうるといえる。

5. まとめ

本論文では、P-Δ 効果が基礎回転系構造の耐震性状へ与える影響の解明することを目的とし、告示波及び定常ループを与えるスイープ波を用いた時刻歴応答解析を行うことにより検討を行った。

以下に得られた知見についてまとめる。

- P-Δ 効果を考慮した基礎回転系構造の等価減衰定数の算定式を示した。基礎回転系構造の等価減衰定数は、P-Δ 効果を見捨てた場合に比べ一般的に増大する。
- P-Δ 効果を考慮した基礎回転系構造の応答評価式の提案を行った。応答変位は耐力の低下及び、それに伴う応答低減係数の減少の影響を受ける。
- 定常状態における検討から、定常応答時の最大応答変位は P-Δ 効果を見捨てた場合に比べて、耐力が低下するにも係らず小さくなった。これは、上記の耐力の低下による応答の増大よりも、耐力の低下に伴う等価減衰定数の増大による応答の低減効果の方が大きいことによる。
- 告示波を用いた非定常状態に関する検討では、P-Δ 効果により応答が増大するものも見られたが、概して応答は減少した。
- 提案した応答評価式は、定常状態での P-Δ 効果を考慮した応答を適切に評価しうる。

謝辞

本論文は、平成26年度日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(B)：損傷軽減機構を有する部材を活用した鉄筋コンクリート造高耐震建築物の開発研究（研究代表者：平石久廣 明治大学教授）により行った。

また、株式会社構造計画研究所、梁川幸盛氏には、解析構造プログラム RESP F3T での解析を行うにあたり多大なご協力、ご助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋郁夫, 市川隆之, 林康裕: 基礎浮き上がり地震応答に関する研究 (滑動及び水平二方向入力の影響), 日本建築学会学術梗概集, 構造系 59, pp.2287-2288, 1984.9
- 2) 豊巻真悟, 麻里哲広, 緑川光正, 石山祐二: 構造物の浮き上がりと応答に及ぼす地震動上下成分の影響, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.79, pp73-76, 2006.7
- 3) 溜正俊, 加藤大介, 加藤勉: 基礎部の衝突を考慮した浮き上がりモデルの地震応答, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B, pp.587-588, 1986.7
- 4) 鈴木彩香, 平石久廣, 高橋加南: 杭頭浮き上がり及び沈み込みによる基礎回転系構造の応答評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第683号, pp.165-172, 2013.1
- 5) 平石久廣, 鈴木彩香: 杭頭浮き上がりによる基礎回転系構造の応答評価法に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第77巻, 第674号, pp.619-626, 2012.4
- 6) 山下典彦, 原田隆典, 長野雄大: P- Δ 効果を考慮した3自由度モデルに関する研究, 地盤工学研究発表会 発表講演集, 第38号, pp.1589-1590, 2003.7
- 7) 杉田裕行, 平石久廣, 大出大輔: 杭の浮き・沈みが上部構造の外力分布に与える影響に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻, 第698号, pp.517-524, 2014.4
- 8) 斎藤光広, 井上芳生, 秋田知芳, 金子治, 梁川幸盛: 14階建て RC 造集合住宅における降伏機構分離型鉄筋コンクリート造杭の適用検討事例, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2, pp.781-782, 2010.7
- 9) 崎野健治, 孫玉平: 直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第461号, pp.95-104, 1994.7
- 10) 平石久廣, 大塚悠里, 朱盈, 大井希良里, 大出大輔,

小林正人: 建築物の共振時における応答評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第81巻, 第719号, pp.19-27, 2016.1

- 11) 平石久廣, 高橋加南, 鈴木彩香: 鉛直地震動が基礎回転系構造の耐震性能に及ぼす影響に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第684号, pp.369-375, 2013.2
- 12) 平石久廣, 稲井栄一, 和田寿一, 福島徹: 鉄筋コンクリート造建築物の地震応答と耐震性能評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第613号, pp.105-112, 2007.3
- 13) Takeda, Sozen and Nielsen: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST12, pp2557-2573, 1970