水平地盤ばねの履歴特性と杭頭 接合条件が上部構造の地震時応 答に与える影響に関する研究

STUDY ON INFLUENCE OF HYSTERETIC CHARACTERISTICS OF SPRING MODEL OF SOIL AND TYPES OF CONNECTION CONDITION AT PILE HEADS TO EARTHQUAKE RESPONSE OF SUPERSTRUCTURES

平石久廣 — * 1 須田あゆみ — * 2
掛水政妃 — * 2 積山 悠 — * 2
大出大輔 — * 2

Hisahiro HIRAISHI — * 1 Ayumi SUDA — * 2
Maki KAKEMIZU — * 2 Yu TSUMIYAMA — * 2
Daisuke ODE — * 2

キーワード:

鉄筋コンクリート造, 地震応答解析, 杭頭接合条件,
地盤ばねモデル, スリップモデル

Keywords:

Reinforced concrete buildings, Earthquake response analysis,
Connection condition at pile head, Spring model of soil, Slip model

Recently, a lot of research works on the base structures have been conducted. For example, the research on the influence of the connection conditions at piles heads on the seismic response of superstructures is one of a major theme of these researches. However, ground conditions are limited and the peeling between soil and piles which occur during earthquakes was not considered in these researches. This paper studied the seismic response of superstructures considering the various ground conditions and peeling. As a result, the influence of the peeling on the response was found to be remarkable particularly when superstructures are elastic.

1. はじめに

近年、杭頭部を半剛接やピンとすることにより杭基礎建物の応答性状に与える影響を明らかにする等、建物の下部構造に着目した研究が数多く見られる^{1)~4)}。

例えば、杭頭部の接合条件に着目した研究としては護、長谷川¹⁾の研究があり、軟弱地盤上においてピンと剛接合という異なる杭頭接合条件が建物の応答性状に及ぼす影響について明らかにされている。また、平塚、平石等²⁾は文献¹⁾を踏まえ杭頭接合条件が上部構造の応答性状に与える影響をさらに詳細に検討するため、杭頭部を剛接合、ピンに加え杭頭部の曲げ耐力が異なる接合条件として3種類のヒンジを設定し、建物・杭・地盤連成系モデルによる地震応答解析を行っている。その結果、上部構造が弾性体の場合は上部構造の応答が低減することを、上部構造が弾塑性体の場合は杭頭接合条件が上部構造の応答に与える影響は小さいことを明らかにしている。ただし、文献^{1)~2)}ともに地盤条件が限定されたものとなっており、後述の地盤と杭の剥離の考慮はなされていない。

一方、杭と地盤の相互作用の影響を検討し水平地盤ばねモデルの履歴特性に着目した研究としては阿部、堀井等³⁾の研究があり、流動性の低い地盤において地震時に建物と周囲地盤間に空隙ができることに着目し、建物・杭・地盤連成系モデルによる検討を行っている。その際に、地盤と杭間の変形を考慮するとともに地盤が大きな受働

土圧を受けた場合に地盤は降伏し、変形が逆方向へ進むときには、その降伏変形はそのまま残存し隙間ができることからスリップモデルを用いて振動解析を行い、地盤と杭間の隙間が生じる影響を無視できないことを明らかにしている。また牧、睦好⁴⁾は、地盤・杭間の相互作用を把握するために杭頭水平載荷実験を行い、その復元力特性は地盤・杭界面挙動に大きく影響し、履歴形状はスリップモデルとなる傾向があることを明らかにしている。

以上のような背景から、本報告では構造物系の相互作用の影響を考慮した建物・杭・地盤連成系モデルを用い検討を行っている平塚、平石等²⁾の研究を踏まえ、地盤と杭の剥離の考慮を追加し各種構造成因が上部構造の応答性状に与える影響を体系的に把握するため広範かつ総合的に評価した。なお、検討の範囲においては建物周期および地盤の違いが上部構造の応答性状に与える影響は異なると考えられることから、平塚、平石等²⁾が検討している表1の●部分に加え、表1の○部分に示した範囲の検討を行った。さらに、検討においては上部構造の応答とともに、構造物系の各部位にて消費されるエネルギーを算出することでエネルギーの観点からも併せて建物、杭および地盤の各種構造成因が上部構造の応答性状に与える影響を総合的に評価した。

¹⁾ 明治大学理工学部建築学科 教授・工博(建築研究所 客員研究員)
(〒214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1)

²⁾ 明治大学大学院博士前期課程

¹⁾ Div. Prof., Dept. of Architecture, School of Science & Technology, Meiji Univ., Dr. Eng. (Visiting Research Fellow, Building Research Institute)

²⁾ Graduate School of Science & Technology, Meiji Univ.

表 1 本報告の検討範囲

(左：水平地盤ばね、階数、地盤条件、右：杭頭接合条件)						
地盤条件	水平地盤ばねの履歴則			杭頭接合条件		
	3階	8階	18階	剛接合	ヒンジ3種類	ピン
N2	○	○	○	○	○	○
N5	●	○	○	○	○	○
N10	○	○	○	○	○	○
N20	○	○	○	○	○	○
N30	○	○	○	○	○	○

※図中●は平塚、平石等²⁾の検討範囲

2. 解析概要

2.1 解析対象モデル

図 1 に構造物系と自由地盤系を相互作用ばねとダッシュポットで関連づけた建物・杭・地盤連成系の地震応答解析モデル(修正 Penzien モデル)を示す。対象建物は建物の桁行方向を想定し、場所打ちコンクリート杭に支持され、かつ基礎梁は十分に剛である鉄筋コンクリート造無限均等ラーメン構造物とした。また、各内柱に杭 1 本を有する建物と仮定した。解析対象は建物中央部に位置している柱および杭 1 本当たりの構造物(6m×6m)とし(図 2)、地震時に変動軸力は作用しないと仮定した。上部構造は、周期が異なる建物として 3 階モデル、8 階モデルおよび 18 階モデルを設定した。また、上部構造の復元力特性は線形の上部弾性体モデル(以下、弾性体と呼称)および非線形性能を与えた上部弾塑性体モデル(以下、弾塑性体と呼称)の 2 種類を設定した。解析モデルは上部構造を 1 質点、杭と地盤は各々並列に多質点化した。内部粘性減衰は瞬間剛性比例型とし、上部構造、杭および影響地盤ばねの減衰定数を連成系の 1 次固有周期に対し 3%とした。

2.2 解析パラメータ

本報告では 3 種類の上部構造高さ、上部構造の非線形性の有無、5 種類の杭頭接合条件、N 値により異なる 5 種類の地盤、地盤と杭の剥離の考慮の有無をパラメータとし解析を行った。

2.3 構造諸元

2.3.1 上部構造

1) モデル化

本報告で上部構造の最大応答値に関しては、最大応答時付近の振動は 1 次モードで振動する傾向がある²⁾とされていること、また上部構造の応答の簡明な評価を行うため単純化したモデル化が適していることから上部構造は 1 質点系モデルとした。1 質点系のモデル化の算定式に関しては、文献²⁾を参照されたい。

2) 復元力特性

上部構造の降伏時せん断力 Q_y (kN) は、剛接合杭で水平地盤ばねモデルが normal 型の場合において、あらかじめ地震応答解析を行い、塑性率 μ がおよそ 2 となるような値を求めその値に設定した。また、上部構造の降伏変形角を $R_y=1/120$ とし、ひび割れせん断耐力 Q_{cr} (kN)、降伏変形 δ_y (m)、ひび割れ変形 δ_{cr} (m) は文献²⁾にない設定した。降伏後の剛性は初期剛性の 1/1000 とし、復元力特性は武田モデル⁷⁾を用い、除荷剛性低下率は $\gamma=0.45$ とした。以上より求めた上部構造の諸元を表 2 に、上部構造の耐力一覧を表 3 に、上部構造の $Q-\delta$ 関係を図 3 に示す。

2.3.2 杭

杭体は文献²⁾と同様に、弾性固定支持(以下、剛接合杭と呼称)、杭頭部のみ曲げ塑性性を考慮したピン支持(以下、ピン杭と呼称)および弾塑性固定支持(以下、ヒンジ杭と呼称)を 3 種類、計 5 種類の杭頭接合条件とした。

図 1 修正 Penzien モデル

図 2 解析対象

表 2 上部構造諸元

階数	1 質点系					
	建物高さ(m)	代表高さ(m)	有効重量(kN)	周期(s)	基礎重量(kN)	剛性(kN/m)
3	10.5	8.17	1.11.E+03	0.21	4.32.E+02	1.01.E+05
8	28.0	19.83	2.74.E+03	0.56	8.64.E+02	3.53.E+04
18	63.0	43.17	5.99.E+03	1.21	1.30.E+03	1.22.E+04

表 3 上部構造の耐力一覧

階数		地盤N値				
		2	5	10	20	30
3F	降伏時ベースシア	0.47	0.55	0.50	0.35	0.28
	保有耐力(kN)	5.22E+02	6.11E+02	5.55E+02	3.89E+02	3.33E+02
8F	降伏時ベースシア	0.23	0.12	0.10	0.08	0.09
	保有耐力(kN)	6.31E+02	3.29E+02	2.74E+02	2.20E+02	2.47E+02
18F	降伏時ベースシア	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03
	保有耐力(kN)	2.40E+02	2.40E+02	2.40E+02	1.80E+02	1.80E+02

本報告で設定した杭は、3 階モデルの場合杭長 21m、8 階および 18 階モデルの場合杭長 22m の場所打ちコンクリート杭とした。なお、杭は 1m ごとに質点化した。ただし、杭頭接合条件を設定した付近 1m は、杭長 10cm ごとに 10 分割して質点化し、杭頭部以外の杭体は弾性とした。杭諸元の設定および杭重量は文献²⁾にならない定めた。なお杭径の設定に関しては、N 値の違いによる挙動を簡明に把握するため、同建物階数では同径の杭とし、文献²⁾と同様杭先端支持力のみで定め、杭の軸力比が 0.15 となるように杭の断面積を定めた。曲げに対するひび割れ耐力 M_{cr} (kN・m)、降伏耐力 M_y (kN・m) の算定式に関しては、文献²⁾を参考されたい。

3 種類のヒンジ杭(A,B,C)の杭頭部曲げ耐力は図 4 の杭頭部の $M-\phi$ 関係を示し、表 4 は図 4 で設定した曲げ降伏耐力および曲率を示す。杭の塑性化範囲の復元力特性は武田モデルとし、除荷剛性低下率は $\gamma=0.45$ とした。杭の諸元を表 5 に示す。

2.4 敷地地盤諸元

本報告で対象とする敷地地盤は、全層砂質土とし、単位体積重量を $\rho=18$ (kN/m³) とした。

パラメータとして設定した 5 種類の敷地地盤は文献²⁾で検討された N 値 5 および N 値 10 の地盤(以下、N5 地盤、N10 地盤と呼称)の他に、N 値 2、N 値 20 およびの N 値 30 地盤(以下、各々 N2 地盤、N20 地盤、N30 地盤と呼称)を設定した。なお、杭の支持層への根入れは、3 階モデルの場合は N 値 50 の地盤(以下、N50 地盤と呼称)に対し 1m、8 階および 18 階モデルの場合は N50 地盤に対し 2m とした。3 階モデルでは深度 21m、8 階および 18 階モデルでは深度 22m までを表層地盤とし、それぞれ 21m、22m を解放工学的基盤として設定した。文献⁸⁾で引用されている太田・後藤式よりせん断波速度 V_s (m/s) を定める。なお、地下水位は十分に深く液状化は起こらないものと仮定した。図 5 に異なる地盤の V_s 値を示す。一例として、表 5 に N10 地盤の諸元を示す。

水平地盤ばねの履歴則は文献²⁾で用いられている Masing 型トリリニアモデル(以下、normal 型(図 6(a))と呼称)と文献³⁾で指摘された杭と地盤の剥離を考慮したモデルとしてスリップモデル(以下、slip 型(図 6(b))と呼称)の 2 種類を設定した。

自由地盤の応答および杭先端の地震動は、SHAKE により定めた⁹⁾。ただし、自由地盤の非線形モデルは、Hardin-Drnevich モデルとし、基準せん断歪 $\gamma_{0.5}$ 、最大減衰定数 h_{max} は文献¹⁰⁾より、それぞれ 0.10%、21%とした。

2.5 地震動

深度 21m または 22m に設定した解放工学的基盤における地震動には、平 12 建第 1461 号に示された「極めて稀に発生する地震動」の加速度応答スペクトルに対応させた 3 種類の模擬地震動を用い、

図 4 杭頭部 $M-\phi$ 関係

表 4 杭頭部の耐力

	$M_u(kN \cdot m)$	$\phi(1/m)$
3階		
ヒンジA	6.75E+02	1.17E-02
ヒンジB	4.78E+02	6.35E-03
ヒンジC	2.81E+02	9.64E-04
8階		
ヒンジA	2.15E+03	8.44E-03
ヒンジB	1.54E+03	4.60E-03
ヒンジC	9.36E+02	7.71E-04
18階		
ヒンジA	6.08E+03	6.06E-03
ヒンジB	4.38E+03	3.32E-03
ヒンジC	2.69E+03	5.78E-04

表 5 杭諸元

階数	D(m)	$F_c(N/mm^2)$	A(m^2)	I(m^4)	Z(m^3)	E(kN/m^2)
3	0.9	21	6.36E-01	3.37E-02	8.46E-02	2.36E+07
8	1.5		1.77E+00	2.60E-01	3.92E-01	
18	2		2.88E+00	8.22E-01	9.28E-01	
階数	G(kN/m^3)	EI($kN \cdot m^2$)	Mcr($kN \cdot m$)	$M_u(kN \cdot m)$	$\phi_{cr}(1/m)$	$\phi_y(1/m)$
3	9.84E+06	7.96E+05	4.47E+02	1.14E+03	5.61E-04	8.18E-03
8		6.14E+06	1.96E+03	5.03E+03	3.19E-04	4.78E-03
18		1.94E+07	5.06E+03	1.28E+04	2.61E-04	3.74E-03

D:杭直径、 F_c :コンクリートの設計基準強度、A:設計断面積、I:断面二次モーメント、Z:断面係数、E:ヤング係数、G:せん断剛性係数、Mcr:ひび割れ耐力、 M_u :降伏耐力
 ϕ_{cr} :ひび割れ時の曲率、 ϕ_y :降伏時の曲率

図 5 V_s 値

表 6 敷地地盤諸元 (N10 地盤)

杭深度 (m)	土質名	地質年代	N値	密度 $\rho(kN/m^3)$
0.1-0.9	細砂	完新世	10	18
1-20	細砂	完新世	10	18
21-22	砂礫	更新世	50	20

図 6 水平地盤ばねの履歴則

図 7 地震動の加速度応答スペクトル

図 8 時刻歴波形

(a) 加速度応答スペクトル

(b) 速度応答スペクトル

図 9 自由地盤地表面の応答スペクトル

位相特性は乱数位相とした (図 7 参照)。また、解放工学的基盤に設定した 3 種類の地震動の時刻歴波形を図 8 に示す。SHAKE により算出した自由地盤地表面の加速度応答スペクトルならびに速度応答スペクトルを図 9 に示す。なお、図 9 のスペクトルは、図 8 の 3 波を用いた応答の平均を示している。

3. 地震応答解析結果と考察

本報告では、各モデル・パラメータにおいて 3 種類の告示波を用いてそれぞれ地震応答解析を行った。地震応答解析結果は、3 波の地震波の結果を平均した値として示す。

以下では、上部構造を弾性体とした場合および弾塑性体とした場合において、建物、杭および地盤の各種条件が上部構造の応答に与える影響に関して比較・検討を行った。

本項では累積消費エネルギーに関して、上部構造の履歴吸収エネルギーを上部履歴エネルギー、上部構造の内部粘性減衰による消費エネルギーを上部減衰エネルギーとし、杭頭部の履歴吸収エネルギーを杭履歴エネルギー、杭の減衰による消費エネルギーを杭減衰エネルギーと表記する。また、構造物系と自由地盤系の相互作用を考慮した水平地盤ばねの履歴吸収エネルギーを地盤履歴エネルギーと減衰による消費エネルギーを地盤減衰エネルギーと表記する。なお、詳細なエネルギー算定方法については文献²⁾を参照されたい。

3.1 上部構造を弾性体とした場合

3.1.1 最大応答ベースシア係数 C_B と最大杭頭モーメント M 関係

図 10 は 3 階モデルにおける N10 地盤および N30 地盤の場合の最大応答ベースシア係数 C_B と最大杭頭モーメント M の関係を示す。なお、横軸は剛接合杭の場合の最大杭頭モーメント M_e で除してある。また、本報告における C_B-M 図および後述の $R-M$ 図のプロットは図中の左端 (杭頭モーメント=0kN・m の位置) がピン杭となり、右端が剛接合杭、その中間がヒンジ杭 (左: ヒンジ C 杭、中: ヒンジ B 杭、右: ヒンジ A 杭) を表す。図 10 に示すように、最大応答ベースシア係数は 3 階モデルにおいて水平地盤ばねモデルが slip 型の場合、杭頭接合条件によらず、normal 型とした場合と比べ大きな値となった。また、杭頭接合条件で比較を行うと水平地盤ばねモデルによらず剛接合杭と比べ他の杭頭接合条件とした場合は上部構造の応答が低減した。次に、表 7 に各ヒンジ杭の最大応答ベースシア係数を剛接合杭の場合の最大応答ベースシア係数に対する比 (%) として一覧で示す。表 7 より水平地盤ばねモデルによらず、上部構造の応答はほとんどの条件下で 100% 未満であることから、杭頭接合条件をヒンジにしたことにより剛接合と比べ上部構造の応答が低減できるといえる。なお、3 階モデルにおいて N20 地盤の場合に 100% を超えた理由として、後述する加速度応答スペクトルと建物周期の関係が影響することが挙げられる。

(a) N10 地盤

(b) N30 地盤

図 10 C_B-M 関係 (上部弾性-3 階)

表 7 ヒンジ杭の場合の剛接合杭に対する上部構造の最大応答比(上部構造弾性体)

階数	normal型									slip型								
	3F			8F			18F			3F			8F			18F		
杭頭部	ヒンジA	ヒンジB	ヒンジC	ヒンジA	ヒンジB	ヒンジC	ヒンジA	ヒンジB	ヒンジC	ヒンジA	ヒンジB	ヒンジC	ヒンジA	ヒンジB	ヒンジC	ヒンジA	ヒンジB	ヒンジC
N2	89.93	90.29	91.22	85.52	83.59	81.72	86.54	85.69	84.40	53.57	54.14	62.20	81.08	82.36	83.64	56.24	55.29	56.59
N5	93.51	93.85	95.48	76.48	76.21	76.58	85.08	83.33	82.94	45.23	46.58	52.96	67.45	68.94	72.01	87.33	86.05	94.52
N10	98.75	98.39	97.31	65.19	63.52	61.89	83.73	81.34	80.88	48.10	50.45	51.51	69.61	75.12	74.58	81.43	81.37	87.51
N20	101.20	100.65	103.66	59.16	58.20	57.36	81.37	79.70	78.93	45.37	44.14	42.52	84.28	88.26	96.42	78.76	79.50	91.04
N30	97.09	95.42	96.89	63.72	62.42	59.92	82.08	79.93	80.97	44.69	46.75	42.68	87.68	80.89	99.61	78.87	79.66	88.30

図 11 累積消費エネルギー (上部弾性-3 階-N10 地盤)

図 12 累積上部減衰エネルギー (上部弾性-3 階-N10 地盤)

3.1.2 累積消費エネルギーによる検討

図 11 に、N10 地盤の 3 階モデルにおいて、水平地盤ばねモデルを normal 型とした場合および slip 型とした場合の累積消費エネルギーを示す。図 11 (a) より、水平地盤ばねモデルが normal 型の場合、杭頭部の拘束を弱めることにより剛接合杭と比較して増加する傾向がみられた。水平地盤ばねモデルが slip 型の場合は、図 11 (b) に示すように杭頭部の拘束を弱めることにより剛接合杭と比較して累積消費エネルギーが減少する傾向がみられた。これは、後述 (3.1.3 項) のように加速度応答スペクトルと建物周期の関係に起因するといえる。

次に図 12 は、図 11 の 3 階モデルの場合の上部減衰エネルギーを取り出した図を示す。図 12 (a)、(b) を杭頭接合条件別に比較すると、水平地盤ばねモデルを normal 型から slip 型とすることにより上部減衰エネルギーが増加する傾向がみられた。これは、slip 型とすることにより履歴吸収面積が小さくなり地盤で消費できるエネルギーが減少したことが大きな要因であるといえる。また水平地盤ばねモデルによらず、杭頭部の拘束を弱めることにより剛接合杭とした場合と比較して他の杭頭接合条件の場合の上部構造の応答が低減していることが確認できる。

図 13 加速度応答スペクトルと建物周期
(上部弾性-3 階-N10 地盤)

3.1.3 応答時の建物周期と加速度応答スペクトル

N10 地盤における加速度応答スペクトルと建物周期の関係を図 13 に示す。網掛け部は、3 階モデルにおいて水平地盤ばねモデルを normal 型とした場合および slip 型とした場合の剛接合杭からピン杭へと杭頭部の拘束を弱めることで変化した周期の伸びを示す。図 13 より、normal 型とした場合においては建物周期が加速度応答スペクトル上のピーク付近の複雑な領域に存在している。一方、slip 型とした場合においては、建物周期が加速度応答スペクトル上の減少領域に存在していることが確認できる。これより、normal 型とした場合は、杭頭部の拘束を弱めることによる周期の伸びにより入力加速度への影響は複雑に増減するが、slip 型とした場合は、杭頭部の拘束を弱めることで周期が伸び、入力加速度が減少することを示している。これは、前述した図 10 の杭頭部の拘束を弱めることで最大応答ベースシア係数が減少していることとほぼ対応する。

以上より、前述した上部構造の応答は加速度応答スペクトルと建物周期の関係に大きく影響することが確認できる。また、水平地盤ばねモデルを slip 型とすることにより normal 型とした場合と比べ地盤で消費するエネルギーが減少したことが slip 型とした場合の上部構造の応答が増加した大きな要因であるといえる。

3.2 上部構造を弾塑性体とした場合

3.2.1 最大応答変形角 R と最大杭頭モーメント M 関係

図 14、15 に、3 階および 18 階モデルにおいて N10 地盤、N30 地盤の場合の最大応答変形角 R と最大杭頭モーメント M の関係を示す。なお、横軸は剛接合杭の場合の最大杭頭モーメント M_e で除してある。3 階モデルにおいては、図 14 (a) に示すように、水平地盤ばねモデルを slip 型としたことにより normal 型と比較して最大応答変形角が増加する傾向がみられたが、N 値が大きい地盤 (N30 地盤) においては地盤ばねモデルによる差異が小さい傾向となった。18 階モデルにおいては、N 値が比較的大きな地盤 (N10 地盤、N30 地盤) になると、水平地盤ばねモデルによる差異が生じなかった (図 15 参照)。また、杭頭接合条件別に比較を行うと上部構造が弾性体の場合と比較して剛接合杭と他の杭頭接合条件の最大応答変形角の差異が小さい傾向となった。次に、表 8 に各ヒンジ杭の最大応答変

図 14 $R-M$ 関係 (上部弾塑性性-3 階)

図 15 $R-M$ 関係 (上部弾塑性性-18 階)

図 16 累積消費エネルギー (上部弾塑性性-3 階-N30 地盤)

図 17 累積消費エネルギー (上部弾塑性性-3 階-N10 地盤)

形角を剛接合杭の場合の最大応答変形角に対する比 (%) として一覧で示す。表 8 の斜線部は、上部構造が降伏に至らなかったため省略している。表 8 に示すように、剛接合杭に対する各ヒンジ杭の上部構造の応答比はほとんど 100% 付近にあることが示されている。これらより、杭頭接合条件が上部構造の応答に与える影響が小さいといえる。

3.2.2 累積消費エネルギーによる検討

3 階モデルの場合の N10 地盤および N30 地盤の累積消費エネルギーを図 16、17 に示す。図 16 より、normal 型と slip 型の上部履歴エネルギーに差異がみられなかった。これは、図 14 (b) の normal 型と slip 型の最大応答変形角の大きさの度合いとほぼ対応する。ただし、地盤の N 値が小さくなることおよび杭頭部の拘束が弱まることで、図 17 の normal 型と slip 型の上部履歴エネルギーに差が生じ、それに対応する図 14 (a) の normal 型と slip 型の最大応答変形角にも差が生じた。これは、図 17 より地盤の N 値が小さくなることおよび杭頭部の拘束が弱まることにより地盤履歴エネルギーが増加したためと考えられる。また図 16、17 に示すように、杭頭部の拘束が弱まるにつれ累積消費エネルギーが増加する傾向にある。しかしながら、増加分のエネルギーは主に下部構造で消費されていることが確認でき、上部構造の応答に差異が見られなかった。

3.2.3 応答時の建物周期と加速度応答スペクトル

N30 地盤における加速度応答スペクトルと建物周期の関係を図 18 に示す。網掛け部は、水平地盤ばねモデルを normal 型とした場合の 3 階、8 階および 18 階モデルにおいて、剛接合杭からピン杭へと杭の拘束を弱めることで変化した周期の伸びを示す。上部構造が降伏し、図 18 より N30 地盤において 3 階モデルの場合は、加速度応答の減少領域に 8 階および 18 階モデルの場合は、ほとんど変化のない領域に存在することがわかる。しかしながら、3 階モデルにおいても杭頭部の拘束を弱めることによる周期の伸びが少ないため、剛接合杭の場合と同程度の入力加速度を示している。これは、前述の杭頭部の拘束を弱めることが最大応答変形角に与える影響が小さいこととほぼ対応している。

図 18 加速度応答スペクトルと建物周期
(上部弾塑性性-N30 地盤-normal 型)

表 8 ヒンジ杭の場合の剛接合杭に対する上部構造の最大応答比 (%) (上部構造弾塑性性体)

階数	normal型									slip型								
	3F			8F			18F			3F			8F			18F		
杭頭部	ヒンジA	ヒンジB	ヒンジC	ヒンジA	ヒンジB	ヒンジC	ヒンジA	ヒンジB	ヒンジC	ヒンジA	ヒンジB	ヒンジC	ヒンジA	ヒンジB	ヒンジC	ヒンジA	ヒンジB	ヒンジC
N2				94.29	94.03	94.14	96.66	97.21	99.01	100.97	100.00	112.09	90.66	88.22	93.62	106.44	112.97	127.50
N5	64.63	62.25	84.28	99.98	99.80	97.44	100.49	100.94	100.81	98.43	95.71	100.93	107.57	105.50	119.30	103.59	105.17	99.11
N10	92.31	90.91	85.71	98.20	97.55	96.70	99.73	99.91	100.17	110.45	116.97	127.82	97.74	97.23	102.41	99.69	100.24	100.47
N20	100.43	100.05	98.37	99.15	99.08	99.22	99.65	99.71	99.75	101.92	102.09	104.20	99.51	99.67	100.16	99.76	99.97	100.65
N30	100.37	100.44	99.90	99.36	99.32	99.05	99.70	99.70	99.81	100.80	101.06	100.68	99.61	99.57	99.66	99.80	99.81	99.90

4. まとめ

本報告では、極めて稀に発生する地震動に対して体系的に把握するため文献²⁾では考慮されていない地盤と杭の剥離の考慮が上部構造の地震時応答に与える影響について検討した。また、地盤や建物周期の違いによる差異を検討するため、文献²⁾より広範な条件を設定し、建物・杭・地盤連成系モデル（修正 Penzien モデル）を用い地震応答解析を行った。

以下に得られた知見についてまとめる。

- 1) 上部構造が弾性体の場合、地盤と杭の剥離を考慮したことにより、剥離を考慮していない場合と比較して上部構造の応答の顕著な増加が確認された。
- 2) 平塚、平石等²⁾の考察と同様、地盤条件および地盤と杭の剥離の考慮にかかわらず、上部構造が弾性体の場合、杭頭部の拘束を弱めることにより剛接合杭に比べ上部構造の応答低減が期待できる。
- 3) 上記 2) は、建物周期が加速度応答スペクトル上の減少領域に存在することに起因する。
- 4) 上部構造が降伏した場合、N 値が大きい地盤の場合においては地盤と杭の剥離の考慮の有無が、上部構造の応答に与える影響は小さい。ただし、N 値が小さい地盤の場合においては地盤と杭の剥離を考慮することで考慮していない場合と比較して上部構造の応答が増加する傾向がみられた。
- 5) 平塚、平石等²⁾の考察と同様、杭と地盤の剥離の考慮の有無および地盤条件にかかわらず、上部構造が降伏した場合、杭頭接合条件が上部構造の応答に与える影響は小さい。

謝辞

本報告に際して株式会社構造計画研究所の梁川幸盛氏には RESP-F3T における解析モデルの設定およびエネルギーの算定に関して貴重な御助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 護雅史，長谷川正幸：杭頭接合条件の異なる杭基礎建物の耐震性能に関する解析的研究，日本建築学会構造系論文集，第 554 号，pp.87-94，2002.4
- 2) 平塚高弘，平石久廣，小林正人，大場航，齊藤元嗣：杭頭接合条件が建物の地震応答性状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 649 号，pp.625-633，2010-03
- 3) 阿部宏正，堀井昌博，和田章，木原碩美，北村春幸：杭と周辺地盤の離間を考慮した動的解析による杭の水平力分担率の考察（その 1・その 3），日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）B1，pp.2081-2086，1980-8-10
- 4) 牧剛史，睦好宏史：鉄筋コンクリート杭の水平復元力特性と変形状に關する研究，土木学会論文集，No.683，pp.103-118，2001.8
- 5) 倉本洋：多層建築物における等価 1 自由度系の地震応答特性と高次モード応答の予想，日本建築学会構造系論文集，第 580 号，pp. 61-68，2004.6
- 6) 日本建築学会：建築物の耐震設計資料，1981
- 7) Takeda, Sozen and Nielsen : Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal, Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST12, 1970
- 8) 国土交通省建築研究所編集：改正建築基準法の構造関係規定の技術的背景，2001

9) Per B.Schnabel, John Lysmer, H.Bolton Seed : SHAKE A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No.EERC 72-12, EERC University of California, Berkeley, December 1972

10) 建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会編集：2007 年版 建築物の構造関係技術基準解説書，2007.8

[2014 年 6 月 4 日原稿受理 2014 年 12 月 1 日採用決定]