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

INFLUENCE OF VERTICAL GROUND MOTIONS ON SEISMIC PERFORMANCE OF STRUCTURES WITH ROTATIONAL FOUNDATION

平石 久廣*, 高橋 加南**, 鈴木 彩香**

Hisahiro HIRAISHI, Kanan TAKAHASHI and Ayaka SUZUKI

The structural system with the rotational foundation due to uplift at pile heads has an excellent seismic performance. However, in this structure, the weight of the structure has great influence on the restoring force characteristic. So, it is conscious that vertical ground motions may affect on the response of the superstructure. Also, the vertical acceleration due to vertical input motion may be important subject to be considered because the horizontal response of this structure causes the vertical acceleration due to uplift.

The purpose of this study is to research the influence of vertical ground motions on the vertical and horizontal response of the superstructure by the dynamic analysis. The effect of the shock absorber at the head of the piles on vertical acceleration is also investigated. The paper concludes that the influence of vertical input motion on horizontal restoring force characteristic is slight and the vertical acceleration of the structure is given by sum of those due to horizontal input motion and vertical input motion, respectively.

Keywords : Rotational foundation, Vertical ground motions, Simultaneous horizontal and vertical earthquake inputs, Vertical acceleration, Restoring force characteristic, Shock absorber

基礎回転系, 地震動上下成分, 水平上下同時入力, 鉛直加速度, 復元力特性, 緩衝材

1. はじめに

著者らは、杭頭浮き上がりによる基礎回転系構造の研究開発を進めている^{1), 2)}。この構造は、上部構造が損傷を生じる以前の荷重で、杭頭部の主筋の伸びによる基礎回転を生じ、その部分で地震エネルギーを吸収することができるような構造である(図1)。結果として、大地震時においても損傷が生じず、上部構造に必要な保有水平耐力が小さくて済むと考えられ、本構造は従来の構造に対して極めて優れた耐震性能を有するだけではなく、コスト面や意匠・計画上の制約などに対しても大きなメリットを有すると考えられる。

しかしながら、一般に浮き上がり型の構造では、建物自重が復元力に大きな影響を与えることから、地震動上下成分が上部構造の応答に影響を及ぼすことが想定される。鉛直方向の加速度については浮き上がりによる回転運動によっても生じるため、特に地震動上下成分の影響が大きくなることが考えられる。また、浮き上がりによって上部構造に生じる加速度は、居住性の観点から重要な問題であろう。

このように浮き上りを許容した構造の鉛直方向の応答に関する研究については古くは原子力建屋に関するもの(例えば^{3), 4)}や、鉄骨架構の柱脚部に上部構造の降伏に先行して、浮き上がり降伏するように工夫したベースプレートを用いる緑川らの研究⁵⁾によるものなどがある。文献³⁾では、基礎の浮き上がりに加えて、地震動上下成分の影響について検討を行っており、地震動水平方向入力のみで浮き上りを考慮した場合の方が、浮き上りを考慮せずに地震動上下成分を入力した場合よりも鉛直方向の応答が小さいことから、浮き

上がりによる鉛直方向の応答に与える影響は小さいことを述べている。文献⁴⁾では地震動を水平上下同時入力した際に鉛直加速度が増加することや、浮き上がり挙動による回転角の増大に伴い、回転運動による鉛直方向の応答が支配的になることなどを述べている。しかしながら、これらの文献^{3), 4)}は極めて短い周期帯における弾性的あるいは降伏以前の非線形領域での検討であり、本論のように崩壊メカニズムを形成し、塑性域での応答を生じるようなものに関するものではない。また、文献⁵⁾では浮き上がり挙動をする際の柱脚着地時の衝撃によって生じる鉛直加速度が、柱軸力に与える影響について検討を行っているが、建物自体の鉛直加速度を論じたものではない。

図1 基礎回転系構造の模式図

図2 基礎回転系構造の上部構造履歴の模式図

* 明治大学理工学部建築学科 教授・工博
(独立行政法人建築研究所 客員研究員)

** 明治大学理工学研究科 博士前期課程

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

そこで本論では、地震動上下成分が杭頭浮き上がり基礎回転系構造の鉛直方向の応答に及ぼす影響について検討を行った。さらに、浮き上がりによって生じる鉛直加速度の低減のため、杭頭部に緩衝材を設けた場合についても検討した。

また、地震動上下成分が水平方向の応答に与える影響に関しては、既往の研究^{6), 7)}でその影響がほとんどないことが報告されている。しかしながら、本構造は建物自重が水平耐力に大きな影響を及ぼし、かつ浮き上がり部で大きなエネルギー吸収をする図2のような復元力特性を持つ構造であるため、既往の研究とは異なることから水平方向の応答に関しても検討を行い、その影響を確認した。

2. 解析内容

2-1 解析対象モデル

解析対象建物は鉄筋コンクリート造の高層集合住宅⁸⁾で、桁行方向が6スパン(39.1m)のラーメン構造、梁間方向が1スパン(12m)の連層耐震壁架構とする(図3)。ただし、解析上では階段室部分は無視した。

解析モデルは梁間方向を解析対象とし、上部構造は1質点系モデル、下部構造はコンクリートばね、鉄筋ばね、水平地盤ばねの3種類のばねを配し、剛な梁要素で結合した(図4)。また、杭頭浮き上がりによる回転中心は圧縮側杭の中心とし、基礎の質量、せいは無視した。

上部構造は、剛体と弾塑性体の場合の2パターンとし5階、10階、20階建てモデルの各3種類、杭芯間距離は6m、9m、12mの各3種類とした。内部粘性減衰定数は、瞬間剛性比例型で1次固有周期に対し3%とした。

図3 基準階伏図

図4 解析モデル

2-2 モデル化方法

1) 上部構造

階高 $h=3.5\text{m}$ 、階数を n としたとき、建物高さ $H(\text{m})$ は(1)式で与えられる。

$$H = h \times n \quad (1)$$

ここで、1質点化による有効高さ $H_u(\text{m})$ は文献⁹⁾にならい、(2)式により各階解析モデルについて求めた。

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

建物固有周期 $T(\text{sec})$ は、建築基準施行令により(3)式によった。

$$T = 0.02H \quad (3)$$

解析対象とする支配面積を $S(\text{m}^2)$ 、上部構造の単位面積当たりの重

量を $\bar{w} = 12\text{kN/m}^2$ とし、層重量 $w(\text{kN})$ 、建物全重量 $W(\text{kN})$ は(4)式、(5)式によった。

$$w = \bar{w} \times S \quad (4) \quad W = w \times n \quad (5)$$

建物全有効質量 $M_u(\text{ton})$ は(6)式により、ここで m_i は i 階の質量(ton)で、全階同一質量とする。 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。鉛直方向の慣性質量については鉛直モードと水平モードの比率がほぼ同じであると見なし、水平方向の慣性質量と同様とした。なお、浮き上がり時のベースシアは建物全重量に対する建物のベースシアと同一である。

建物全有効質量 $M_u(\text{ton})$ と建物周期 $T(\text{sec})$ より、上部構造の初期剛性 $K_1(\text{kN/m})$ は(7)式によった。

$$M_u = \frac{(\sum m_i \cdot \delta_i)^2}{\sum m_i \cdot \delta_i^2} \quad (6)$$

$$K_1 = 4\pi^2 \cdot \frac{M_u}{T^2} \quad (7)$$

以上のように求めた上部構造の諸元を表1に示す。

また、上部構造の鉛直方向の剛性については上下固有周期を水平固有周期の1/10として(7)式より算出した。

表1 上部構造諸元

階数 n	建物高さ(m)	有効高さ(m)	有効重量(kN)	周期(sec)	初期剛性(kN/m)
5	17.50	12.833	23033.455	0.35	757454.690
10	35.00	24.500	44238.857	0.70	363698.474
20	70.00	47.833	86515.902	1.40	177817.103

2) 下部構造 (杭頭)

杭頭部は前述のようにコンクリートと鉄筋を模擬したばねと、水平地盤ばねの3種類を配した。以下にばねの設定方法を示す。

・コンクリートばね

コンクリートばねは、圧縮にのみ抵抗するものとし、図5のような履歴を描くものとした。圧縮剛性は、文献⁸⁾の地盤一杭一建物の一体モデルによる静的荷重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。

・鉄筋ばね

鉄筋ばねは引張、圧縮ともに抵抗するものとし、図6のような履歴を描くものとした。なお、杭頭の鉄筋の付着除去区間を1mとし、その区間の伸縮によって浮き上がりが生じるものとした。

また、設定した目標応変形角を満足するために必要な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_{CBL} として鉄筋の断面積 $A_s(\text{m}^2)$ を用い、鉄筋の引張剛性 $K_s(\text{kN/m})$ を(8)式から求めた。

$$K_s = \frac{E_s \cdot A_s}{l} \quad (8)$$

ここで、 E_s : 鉄筋のヤング係数(kN/m^2)、 l : 鉄筋の付着除去区間(m)とした。

・水平地盤ばね

基礎と地盤の間では、水平方向移動は生じないものとし、水平地盤ばねの剛性は無限大とした。

図5 コンクリートばね履歴

図6 鉄筋ばね履歴

2-3 耐力設定

ここでは一般的な構造として上部構造のみが変形する場合(以下基礎固定と称す)と、基礎回転系の耐力設定の方法について示す。

1) 基礎固定の場合

文献¹⁰⁾から擬応答速度一定領域における等価線形化法による縮約1自由度系のベースシア係数と応答変位の関係は、減衰による加速度低減率 F_h を用いて(9)式のように与えられる。

$$C_B = \frac{0.278}{\delta} \cdot F_h^2 \quad (9)$$

$$F_h = \frac{1.5}{1 + 10h} \quad (10)$$

(9)式に(10)式を代入して整理すると(11)式が得られる。ここで、 δ_H は建物の目標応答値(最大変形角)=1/75のときの水平変位(m)、 H_u は有効高さ(m)、 R_y は降伏変形角=1/120を表す。これより、(11)式を用いてベースシア係数を算出した。

$$C_B = \frac{0.626}{16\delta_H - 20\sqrt{H_u \cdot R_y \cdot \delta_H} + 6.25H_u \cdot R_y} \quad (11)$$

このベースシア係数に対応するせん断力を降伏せん断力 Q_y (kN)とし、降伏後の剛性は(7)式より算出した初期剛性 K_1 の1/1000とし、復元力特性はTakedaモデル¹¹⁾を用いた。

2) 基礎回転系の場合

浮き上がり耐力時のベースシア係数 $C_{B,L}$ は(11)式より算出した基礎固定解析モデルの必要ベースシア係数と等しくした。また、基礎回転系解析モデルにおいて、基礎を固定したときの上部構造のみの変形による耐力 $C_{B,F}$ を、基礎固定解析モデルに対し1.5倍に上げた場合について検討を行った。

上部構造は耐力壁構造を想定したばね剛体の場合と、フレーム構造を想定した弾塑性体の2ケースとした。なお、上部構造が弾塑性体の場合は、上部構造に損傷が生じないよう、建物変形角が1/200に達するとき、浮き上がり耐力時のベースシア係数 $C_{B,L}$ になるよう復元力を設定した。図7に基礎回転系解析モデルで、基礎固定時の上部構造の復元力特性を示す。図中破線は、比較のため行った基礎固定解析モデルの上部構造の復元力特性を表す。

図7 上部構造の復元力特性

鉄筋の降伏による耐力上昇分のベースシア係数 ${}_SC_{B,L}$ は、浮き上がり耐力時のベースシア係数 ${}_0C_{B,L}$ と鉄筋による抵抗がない状態での浮き上がり耐力時のベースシア係数 ${}_0C_{B,L}$ との差分になる。以上のように算出した耐力の一覧を表2に示す。

表2 ベースシア係数一覧

階数n	B (m)	${}_0C_{B,L}$	${}_SC_{B,L}$	$C_{B,L}$
5	6.00	0.234	0.660	0.893
	9.00	0.351	0.543	
	12.00	0.468	0.426	
10	6.00	0.122	0.346	0.468
	9.00	0.184	0.284	
	12.00	0.245	0.223	
20	6.00	0.063	0.177	0.240
	9.00	0.094	0.146	
	12.00	0.125	0.114	

2-4 緩衝材を設けた場合

ここでは、浮き上がりによって生じる鉛直加速度の応答を低減するため杭頭部に緩衝材を設けた場合についても検討を行った。

1) 解析モデル

解析モデルは、2-1で示したような上部構造を1質点化し、杭頭部にコンクリートばね、鉄筋ばね、水平地盤ばねの3種類のばねを配したモデルに、さらに緩衝材を模したばね(以下緩衝ばね)をコンクリートばねに対して直列に、鉄筋ばねに対して並列につないだものとした(図8)。

2) 緩衝ばね設定

緩衝材はゴムを杭頭部に敷くような場合を想定し、緩衝ばねは圧縮にのみ効くようなものとした(コンクリートばねの履歴則を参照)。

緩衝ばねのばね剛性 K (N/cm)は文献¹²⁾より、(12)式を用いて算出した。

$$K = \frac{E_{ap} \cdot AL}{h} \quad (12)$$

ここで、 E_{ap} :見掛けのヤング率(N/cm²)、 h :緩衝材高さ(cm)、荷重を受ける総面積 AL :受圧面積(cm²)を表す。また E_0 を(14)式で与えると、 E_{ap} は(13)式のように与えられる。

$$E_{ap} = E_0(1 + 2\kappa S^2) \quad (13)$$

$$E_0 = 2(1 + \nu)G \quad (14)$$

ここで E_0 はゴムのヤング率であり、形状係数 $\kappa=0.823$ 、ポアソン比 $\nu=0.5$ を(13)式及び(14)式に代入すると E_{ap} はせん断弾性率 G (N/cm²)を用いて(15)式のように表せる。

$$E_{ap} = G(3 + 4.94S^2) \quad (15)$$

S は形状率であり、受圧面積 AL と荷重を受けた場合に変形可能な部分の総面積 AF :自由面積(cm²) (図9)を用いると、(16)式のように表される。

$$S = \frac{AL}{AF} \quad (16)$$

以上の(12)~(16)式において $G=39.2$ N/cm²とし、緩衝材高さ h はコンクリートばねの剛性に対して緩衝ばねの剛性が1/2、1/5となるような値として $h=5, 7$ cmの2種類として緩衝ばねの剛性を求めた。

図 8 解析モデル(緩衝材あり)

図 9 緩衝材形状模式図

2-5 地震動

地震動は、現行建築基準法・限界耐力計算で示されている、簡略 2 種地盤の設計用応答スペクトルを水平動に、同スペクトルに BCI 指針¹³⁾に示されている上下動変換係数を適用したものを上下動の応答スペクトルとする地震動を、El Centro1940 の南北、上下各地震記録のフーリエ位相を用いて作成したものである。さらに、加速度を 2.0 倍に増幅したものを入力し、地震動上下成分の影響を検討した。地震波の加速度をそれぞれ図 10、図 11 に示す。

図 10 水平方向地震波

図 11 上下方向地震波(1.0 倍)

3. 水平方向の地震応答解析結果

以下の地震応答解析では、地震動は水平成分のみを入力した場合(上下なし)、水平成分と上下成分同時の場合(上下 1.0 倍)、上下成分を 2.0 倍にした場合(上下 2.0 倍)を示す。

3-1 解析結果

地震応答解析結果として、図 12、図 13 に上部構造の履歴の一例(20 階、杭芯間距離 12m)を示す。ここで、水平の破線は設定浮き上がり耐力を、垂直の破線は基礎固定とした解析モデルの目標応答変形角($= 1/75$)を表す。上部構造が剛体の場合では、浮き上がり時近傍及び着地時近傍においてせん断力に変動が生じている。上部構造が弾塑性体の場合でも同様にせん断力の変動が生じているが、剛体の場合に比べるとその変動は小さい。その他の階数、杭芯間距離のモデルにおいても同様の結果が得られた。

図 14～図 16 に水平方向変位、加速度、速度の時刻歴波形(剛体、20 階、杭芯間距離 12m)を示す。これらの図から、地震動上下成分の影響と見られる短周期の振動が一部見られる。

図 12 上部構造履歴(剛体)

図 13 上部構造履歴(弾塑性体)

図 14 水平方向変位

図 15 水平方向加速度

図 16 水平方向速度

3-2 水平方向応答の考察

3-1 の結果について考察する。上部構造の履歴において特に剛体の場合でせん断力に変動が生じるが、概ね復元力特性は地震動水平方向のみを入力した場合と同様な性状を示していると言える。また、水平方向変位といった水平方向の応答について、地震動上下成分の加速度を 2.0 倍と地震動水平成分の最大加速度よりも大きくした場合でも、地震動水平方向のみを入力した場合と同様であると言える。以上から地震動上下成分が水平方向の応答に与える影響はほとんどない。

4. 鉛直方向の地震応答解析結果

2 章で示した解析モデルによる、上部構造の鉛直方向の応答に関する地震動上下成分の影響は各階数・杭芯間距離のモデルでほぼ同様の結果を示した。以下では解析結果の一例として 20 階、杭芯間距離 12m の場合を示す。地震動は 3 章と同様とした。

4-1 上部構造が弾塑性体の場合

図 17～図 19 に上部構造の鉛直方向変位、鉛直方向加速度、鉛直方向速度の時刻歴波形を示す。水平方向のみの入力では鉛直方向の応答は浮き上がりによる回転運動のみの応答であるが、それぞれ地震動上下成分が入力されることで、鉛直方向の応答値が大きくなっている。また、図 20～図 22 に 5.0s～10.0s の時刻の鉛直方向の各応答の時刻歴波形を示す。図中囲いの部分は大きな浮き上がり変位を生じている時刻であるが、地震動上下成分の影響が見られる。さらに地震動上下成分の影響と見られる、短周期での振動も生じていることがよくわかる。

図 17 鉛直方向変位(弾塑性体)

図 18 鉛直方向加速度(弾塑性体)

図 19 鉛直方向速度(弾塑性体)

図 20 弾塑性体鉛直方向変位(5~10s)

図 21 弾塑性体鉛直方向加速度(5~10s)

図 22 弾塑性体鉛直方向速度(5~10s)

4-2 上部構造が剛体の場合

図 23～図 25 に上部構造が剛体の場合の鉛直方向変位、鉛直方向加速度、鉛直方向速度の 10.0s～14.0s の時刻の時刻歴波形を示す。

鉛直方向変位、加速度、速度において地震動上下成分の影響と見られる短周期の振動が生じている。

図 23 剛体鉛直方向変位(10～14s)

図 24 剛体鉛直方向加速度(10～14s)

図 25 剛体鉛直方向速度(10～14s)

5. 緩衝材を設けた場合

2-4 で示した解析モデルを用いた地震応答解析結果の一例として、地震動は水平・上下成分同時で上部構造が 20 階、杭芯間距離 12m の場合を示す。

5-1 上部構造応答結果

図 26、図 27 に上部構造の履歴の一例(20 階、杭芯間距離 12m)を示す。基礎回転系構造では、上部構造が剛体の場合において、浮き上がり挙動の初期に一時的に設定浮き上がり耐力(図中水平の破線)を超える現象が見られた。しかしこの現象は、杭頭部に緩衝材を設けることで著しく緩和されている。また、緩衝材高さ h の値を大きくするほど緩和効果が大きくなっている。一方弾塑性体では緩衝材の沈み込みによって浮き上がり耐力が低減されている。

図 26 緩衝材を設けた場合
(剛体)

図 27 緩衝材を設けた場合
(弾塑性体)

5-2 上部構造時刻歴

図 28、図 29 に上部構造が剛体の鉛直方向加速度の時刻歴を示す。これらから杭頭部に緩衝材を設けることで、鉛直方向加速度の応答

を著しく低減する効果があることがわかる。したがって、鉛直方向加速度の応答を低減するためには緩衝材高さ h を大きくするなどして、緩衝ばね剛性を小さくすればよい。

図 28 鉛直方向加速度(緩衝材なし)

図 29 鉛直方向加速度($h=7\text{cm}$)

図 30、図 31 に上部構造が剛体の鉛直方向変位の時刻歴を示している。緩衝材がない場合に比べ、 $h=7\text{cm}$ では浮き上がり変位量が小さくなっている。また 0.41cm の残留変位を生じている。これは緩衝材高さ h の値を大きくすると(12)式より緩衝ばね剛性は小さくなり、下部構造の圧縮剛性が低下する。したがって浮き上がり変位量の減少や残留変位が生じるのは、緩衝材の変形に伴い鉄筋が圧縮降伏し、沈み込みを生じることが原因であると考えられる。ただし、回転変形が増大しても沈下は一定量に留まっている。

図 30 鉛直方向変位(緩衝材なし)

図 31 鉛直方向変位($h=7\text{cm}$)

6. 地震動上下成分による影響の検討

6-1 鉛直方向加速度についての分析

ここでは、地震動水平・上下成分を同時入力した加速度応答値と地震動水平成分のみを入力した加速度応答値の差をとることで、地震動上下成分が上部構造の鉛直方向の加速度応答にどれほどの影響を与えるのかを基礎固定モデルの場合と比較検討した。

上部構造が弾塑性体の場合の、図 32 には基礎固定モデル、図 33 には基礎回転系モデルの 5.5s～7.0s における応答加速度の差分(図 21 の上下 2.0 倍及び上下 1.0 倍の応答から上下なしの応答値を引いたもの)による時刻歴波形を示す。これら 2 つの図を比較すると、6.5s や 6.9s 付近では基礎固定の場合と基礎回転系の場合の応答に若干の違いが見られるが、ほぼ同程度の鉛直方向加速度となっている。

また、図 34 に基礎固定モデルに地震動上下成分のみを入力した場

合の鉛直方向加速度(5.5s～7.0s)を示す。図 32、図 33 と若干異なるもののほぼ一致していると言える。

結果として、基礎回転系モデルの鉛直方向加速度は基礎回転に伴う鉛直加速度に、地震動上下成分のみが作用する場合の鉛直加速度を和して表すことができると言える。

図 32 地震動上下成分の影響度(基礎固定)

図 33 地震動上下成分の影響度(基礎回転系)

図 34 地震動上下成分のみを入力(基礎固定)

6-2 緩衝材の効果についての分析

本項では緩衝材が地震動上下成分による上部構造の鉛直方向加速度の増大の低減に、どの程度寄与しているのかということについて検討する。

図 35 に地震動水平成分のみを入力した場合の鉛直方向加速度の時刻歴波形を示している。緩衝材を設けることで、浮き上がりによる回転運動によって生じる鉛直加速度が大きく低減されている。

図 35 緩衝材の有無による加速度の低減効果

一方で図 36、図 37 は、6-1 と同様に緩衝材を有する基礎回転系モデルの地震動水平・上下成分を同時入力した応答値と地震動水平成分のみを入力した応答値の差をとった、5.5s～7.0s における時刻歴波形である。これらの図と図 33 を比較すると、緩衝材がない場合の応答とほとんど変わらないことから、緩衝材は地震動上下成分による鉛直加速度の低減には効果がないと言える。表 3 に緩衝材の有無による上部構造の鉛直方向剛性の変化量を示す。この表から緩衝材の有無による剛性の変化量は小さいことがわかる。以上の事から今回検討した緩衝材では、上部構造の鉛直方向剛性にさほど大きな影響を与えるほど剛性の小さいものではないため、浮き上がりによる

回転運動によって生じる加速度応答の低減には有効であるが、地震動上下成分による加速度応答を低減する効果はないと言える。

図 36 地震動上下成分の影響(h=5cm)

図 37 地震動上下成分の影響(h=7cm)

表 3 緩衝材の有無による鉛直方向剛性の变化

	上下固有周期	鉛直方向剛性	低下率
緩衝材なし	0.148(sec)	1.59×10^7 (kN/m)	—
h=5cm	0.153(sec)	1.48×10^7 (kN/m)	6.43%
h=7cm	0.155(sec)	1.45×10^7 (kN/m)	8.82%

7. まとめ

本論では、杭頭浮き上がりによる基礎回転系構造の設計法の確立を目的とし、地震動上下成分が基礎回転系構造の鉛直方向の応答に及ぼす影響について、1 質点系モデルを用いた地震応答解析により検討した。また、杭頭部に緩衝材を設けることで浮き上がりに伴い生じる、上部構造の鉛直方向加速度応答の低減効果についても地震応答解析を行った。さらに、地震動上下成分が上部構造の水平方向の応答に与える影響についても検討した。以下に得られた知見を記す。

- ① 浮き上がり部でエネルギー吸収をするような本構造においても、地震動上下成分が上部構造の水平方向変位、水平方向加速度といった水平方向の応答に与える影響はほとんどない。
- ② 地震動上下成分は基礎回転系構造の上部構造の鉛直方向変位、鉛直方向加速度といった鉛直方向の応答に影響を及ぼす。各応答値が地震動上下成分によって増大されるほか、地震動上下成分の影響と見られる短周期の振動が生じる。
- ③ 基礎回転系において、地震動水平成分と地震動上下成分おののによる鉛直加速度のうち地震動上下成分によって生じる鉛直加速度は、基礎固定の場合とほぼ等しく、基礎回転系の鉛直方向加速度は、基礎回転に伴う鉛直加速度に地震動上下成分のみが作用する場合の鉛直加速度を和して表すことができる。
- ④ 杭頭部に緩衝材を設けることで、浮き上がりによって生じる上部構造における鉛直方向の加速度応答を低減することができ、緩衝ばねの剛性を小さくするほどその低減効果が得られる。しかし剛性が小さくなると緩衝材が変形しやすくなり、下部構造の圧縮剛性が低下する。このことから鉄筋が圧縮降伏し、沈み込むことによって浮き上がり変位量の減少や残留変位が生じる。ただし、回転変形が増大しても沈下は一定量に留まっている。また、今回

想定したような緩衝材では、地震動上下成分による影響を低減させるほど上部構造の鉛直方向剛性に影響を与えるものではない。

- ⑤ 上部構造が剛体の場合において、浮き上がり挙動の初期に一時的に設定浮き上がり耐力を超える現象が問題になるが、緩衝材を設けることで著しく緩和することができる。

謝辞

本研究において独立行政法人建築研究所、大川出博士には地震波を提供して頂きました。また、坂場律和氏、梁川幸盛氏をはじめとする株式会社構造計画研究所の皆様には RESP F3T 解析において多大なご協力、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) 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、674、pp.619-626、2012.4

2) 平石久廣、南谷知輝、平岡太一、藤原章弘：杭頭に接合部を設けた降伏機構分離型鉄筋コンクリート造杭の開発、コンクリート工学論文集 vol.22 No.1、pp.23-31、2011.1

3) 外村憲太郎、加瀬博信：水平上下同時入力による基礎浮上りを考慮した非線形地震応答解析、日本建築学会大会学術講演梗概集 構造系、pp.729-730、1982.8

4) 田中稔、福和伸夫、小柳義雄、林康裕、平間敏彦：基礎浮上りと上下動応答について（その 2）既往地震波による上下動応答、日本建築学会大会学術講演梗概集 B 構造 I、pp.969-970、1986.7

5) 草刈崇圭、長谷川達也、緑川光正、麻里哲広、石原直、小豆畑達哉：柱脚浮き上がりを許容した鉄骨架構の 3 次元振動台実験による地震応答エネルギー評価その 2 柱脚浮き上がり架構のエネルギー応答と柱脚着地時の衝撃の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1 構造Ⅲ、pp.1169-1170、2010.9

6) 武藤 清、小林 俊夫：水平上下同時入力に対する原子力発電所の非線形ロッキング地震応答解析、日本建築学会論文報告集 第 276 号、pp.69-77、1979.2

7) 緑川光正、須藤智文、小豆畑達哉、石原直：ベースプレート降伏により柱脚浮き上がりを許容した 10 層鉄骨架構の 3 次元地震応答、日本建築学会構造系論文集、637、pp.495-502、2009.3

8) 斎藤光広、井上芳生、杉本訓祥、舟木秀尊、佐野大作：14 階建て RC 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) 平石久廣、平塚高弘：現行耐震基準による建物の耐震性能の検証、日本建築学会構造系論文集、641、pp.1311-1319、2009.7

10) 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予測と耐震性の評価に関する研究、日本建築学会構造系論文集、613、pp.105-112、2007.3

11) Takeda, Sozen and Nielsen : Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST12, pp.2557-2573, 1970.

12) (社)日本ゴム協会：設計者のための免震用積層ゴムハンドブック、理工図書、2000

13) 日本建築センター、建築研究所：設計用入力地震動作成手法技術指針(案)、(財)日本建築センター、1992.3

(2012年 6 月 9 日原稿受理、2012年11月15日採用決定)