

基礎の浮上りに伴う振動方向間の応答連成効果を評価可能な地震応答解析モデルの構築

正会員      ○杉本浩一<sup>\*1</sup>      同 護 雅史<sup>\*2</sup>  
同              福和伸夫<sup>\*3</sup>

地盤ばね              基礎浮上り              非線形地震応答解析  
連成挙動              回帰式              動的相互作用効果

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震では、設計時の想定を上回る地震動を記録したが、中低層 RC 造建物の被害は比較的少なかった。この原因として、設計では考慮しない諸要因により、意図した耐震性能以上の余力を有す可能性や、基礎の滑動や浮上りといった基礎―地盤間の接触非線形の影響の可能性が指摘されている<sup>1,2)</sup>。滑りや浮上りについては、以前から浮上りに伴う水平・上下応答の連成効果に着目した検討が多く行われてきたが<sup>3)</sup>、振れ振動の誘発に関する検討例は少ない。強震時の建物実挙動を詳細に検討するためには、浮上りによる連成現象を考慮できる地盤ばねモデルの構築が不可欠である。

そこで本論では、基礎浮上りに伴うインピーダンスと基礎回転中心の逐次変化を考慮した地盤ばねモデル<sup>4)</sup>を構築すると共に、時刻歴非線形地震応答解析を実施して、連成現象が建物応答性状に与える影響について検討する。

2. 連成現象を評価可能な地震応答解析手法の構築

2.1 連成現象を考慮した地盤ばねモデル

本節では、地盤ばねの具体的なモデル化方法について述べる。浮上りによって、基礎の接地領域が変化する。これにより地盤インピーダンスが変化すると共に、基礎回転中心の移動に伴う偏心が生じ、振れ挙動が励起される。これらが建物応答に影響を与えることとなる。そこで、水平 2 成分と上下成分に加え、各方向の回転成分を合わせて 6 成分を表現する地盤ばねモデルを構築した。図 1 に地盤ばねの概念図を示す。浮上り幅は、基礎の偏心率から算出する<sup>5)</sup>ため、浮上り幅と地盤ばねの初期値に対する変化率(以降、補正係数)の関係式が導出できれば、時刻歴で逐次、各方向の地盤ばねの簡便な評価が可

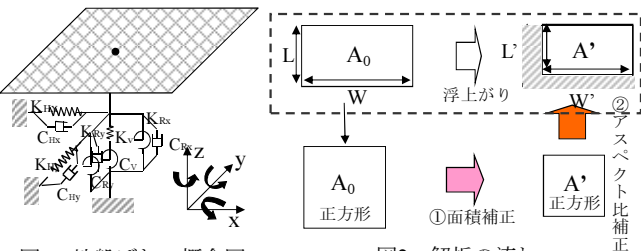


図1 地盤ばねの概念図

図2 解析の流れ

表1 ①の解析ケース(正方形)

基礎幅比	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
基礎形状	30×30	27×27	24×24	21×21	18×18	15×15	12×12	9×9	6×6	3×3

表2 ②の解析ケース(長方形)

アスペクト比	1:1	1:1.44	1:2.25	1:2.78	1:4	1:6.25	1:9
基礎形状	30×30	36×25	45×20	50×18	60×15	75×12	90×10

能となる。具体的な評価方法は次節で示す。また振れ挙動については逐次、基礎剛心の移動に伴う偏心距離をばねの剛域長としてモデル化し評価する。

2.2 浮上り量と地盤ばね補正係数の回帰式の導出

接地基礎幅と地盤ばねの補正係数の回帰式を、パラメトリックスタディによって作成する<sup>7)</sup>。解析の流れを図 2 に示す。図 2 のように、浮上りによる接地領域の変化を、面積による補正とアスペクト比による補正の 2 段階で考慮する。図中①、②を以下に概説する。

- ①基礎の接地領域を面積等価な正方形基礎に置換し、正方形基礎の面積変化としての補正を行う。
- ②面積等価として、基礎の接地領域のアスペクト比による補正を行う。

①、②を実施するにあたり、①では表 1 に示すように、面積を変化させた 10 ケースの正方形基礎のインピーダンスを算定する。②では表 2 に示すように、アスペクト比を変化させた 7 ケースの長方形基礎のインピーダンスを算定する。なお、地盤は半無限一様地盤とし、せん断波速度  $V_s$  を 150m/s、密度  $\rho$  を 1.5 t/m<sup>3</sup>、ポアソン比を 0.45 とした。①、②の解析によって得られた各ケースのインピーダンスを初期形状(①では基礎幅比 1、②では、アスペクト比 1:1)の値で基準化した値を補正係数として、それぞれのパラメータに関する回帰式を作成する。この時、剛性は 0.1Hz の準静的値を用い、減衰係数は概ね振動数に依存しない事を確認した上で 2.0Hz の値を用いた。①の回

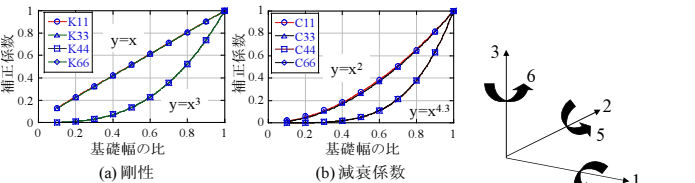


図3 正方形基礎の基礎幅比と地盤ばね剛性の関係

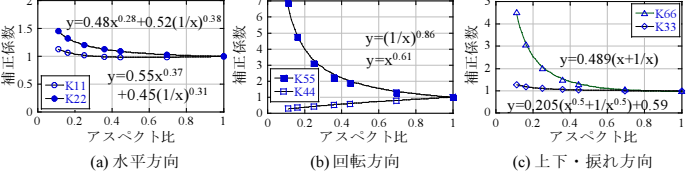


図4 長方形基礎のアスペクト比と地盤ばね剛性の関係

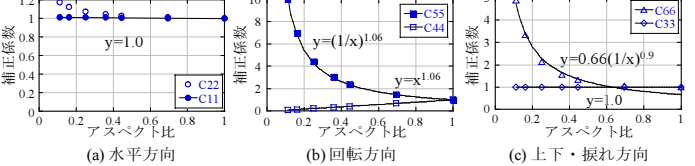


図5 長方形基礎のアスペクト比と地盤ばね減衰係数の関係

帰結果を図3に、②の回帰結果のうち、剛性について図4に、減衰係数について図5にそれぞれ示す。図中、K11等は1の方向に加振した際の1の方向の数値を示している。

図3(a)より、水平、上下方向の剛性は基礎幅に比例し、回転、捩れ方向の剛性は基礎幅の3乗に比例して低減する。また同図(b)より水平、上下の減衰係数は、面積に比例する。これらは理論式<sup>9)</sup>からも明らかである。②の解析結果は、図4(a)より水平剛性は基礎が狭まる効果(x)と広がる効果(1/x)が影響することが分かる。図5より水平、上下方向の減衰係数は、アスペクト比に関わらず一定である。同図(c)より、捩れに関しては十分な回帰ができていない。ただし、アスペクト比が0.6以上では値に変化が見られないため、0.6以下の場合に回帰式を適用し、0.6以上では1とする。①、②の解析により求めた、各方向の回帰式一覧を表3に示す。表中、 $\alpha$ 、 $\beta$ はそれぞれ浮上りによる基礎幅の低減率で、図2で表す $L/L'$ 、 $W/W'$ にそれぞれ対応し、 $\lambda$ は基礎幅のアスペクト比 $L'/W'$ を示す。

これらの結果より、既に理論式が存在する正方形基礎のインピーダンスと、本解析で示したアスペクト比による補正係数の回帰式を用いれば、任意の矩形基礎の地盤インピーダンスの評価が可能となる。

### 3. 連成現象に関する感度解析

#### 3.1 解析概要

2章で作成した地盤ばねを用いた時刻歴非線形地震応答解析を行い、連成現象が建物応答に与える影響を検討する。

ここでは、3階建てと10階建て建物について検討する。基礎形状は10m×10mの直接基礎とし、解析モデルは等価1質点系せん断型モデルとする。各階階高は3.5m、単位

質量は1t/m<sup>2</sup>、1次固有周期は0.07×階数、モード形は逆三角形とする。上部建物は弾性とし、減衰定数は、1次固有周期に対して3%とする。SRモデルと浮上りモデルの2つを用いて検討を行う。入力地震動はレベル2の告示スペクトルをターゲットとして、1995年兵庫県南部地震のJMA神戸における観測記録(EW、NS成分)の位相特性、ランダム位相特性+日本建築センターによる経時特性をそれぞれ与えて作成した入力波を原波で用いる。random位相波は同じ地震波を2方向に入力する。

#### 3.2 解析結果

図6に10階建てにおける両モデルのrandom位相波入力時の頂部の水平加速度波形と浮上りモデルの上下ばね変位を示す。図より、浮上りにより上下変位が生じる瞬間から、浮上りモデルの応答がSRモデルに比べて低減し、さらに上下変位が増大すると応答低減が増大することが分かる。図7に浮上りモデルの、SRモデルに対する最大加速度と最大層間変形角の比を示す。図より、3階建てに比べて10階建てにおいて応答低減が顕著であると分かる。これは塔状比が大きい程、基礎が浮上り易いためと考えられる。図8には、神戸位相波入力時の基礎部における捩れ回転角の応答波形を示す。図より、浮上りが生じた瞬間より捩れ振動が確認できる。

#### 4. まとめ

本論では、基礎の浮上りに伴うインピーダンスと基礎回転中心の逐次変化を考慮した地盤ばねモデルを構築し、連成現象が建物応答に与える影響について検討した。検討に当たり、浮上りによるインピーダンス変化を考慮できる回帰式を作成した。本回帰式は任意の矩形基礎の地盤ばね評価にも有用である。また、この地盤ばねを付与した

解析モデルで時刻歴非線形地震応答解析を行った結果、塔状比が大きい建物で応答低減が認められた。

#### 【参考文献】

- 林 康裕：直接基礎構造物の基礎浮上りによる地震被害低減効果、日本建築学会構造系論文集、No.485、pp.53-62、1996
- 壁谷澤寿一 他：実大3層鉄筋コンクリート建物の振動実験、日本建築学会構造系論文集、No.632、pp.1833-1840、2008
- 山田正明：正弦波多軸入力による剛体基礎の浮上り性状に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第340号、pp.32-39、1984.6
- 福和伸夫 他：動的地盤ばねの幾何学的非線形性を考慮した基礎浮上り解析、構造工学論文集、Vol.32B、pp.11-18、1986
- 大崎順彦：建築基礎構造、技報堂出版、1991
- 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計、2006
- 文学章、福和伸夫：隣接建物の存在が杭基礎の動的相互作用特性に与える影響に関する解析的検討、日本建築学会構造系論文集、第606号、pp.147-154、2006.8

表3 地盤インピーダンス補正係数の回帰式一覧

剛性	K11	$\xi_{11} = \sqrt{\alpha\beta} \times (0.55\lambda^{0.37} + 0.45\lambda^{-0.31})$	K44	$\xi_{44} = \sqrt{\alpha\beta^3} \times \lambda^{0.61}$
	K22	$\xi_{22} = \sqrt{\alpha\beta} \times (0.48\lambda^{0.28} + 0.52\lambda^{-0.38})$	K55	$\xi_{55} = \sqrt{\alpha\beta^3} \times \lambda^{-0.86}$
	K33	$\xi_{33} = \sqrt{\alpha\beta} \times [0.205(\sqrt{\lambda} + 1/\sqrt{\lambda}) + 0.59]$	K66	$\xi_{66} = \sqrt{\alpha\beta} \times 0.49(\lambda + 1/\lambda)$
減衰係数	C11	$\zeta_{11} = \alpha\beta$	C44	$\zeta_{44} = \sqrt{\alpha\beta^3} \times \lambda^{1.06}$
	C22	$\zeta_{22} = \alpha\beta$	C55	$\zeta_{55} = \sqrt{\alpha\beta^3} \times \lambda^{-1.05}$
	C33	$\zeta_{33} = \alpha\beta$	C66	$\zeta_{66} = \sqrt{\alpha\beta^3} \times 0.66\lambda^{-0.9} (\lambda < 0.6)$ $\zeta_{66} = 1.0 (\lambda \geq 0.6)$

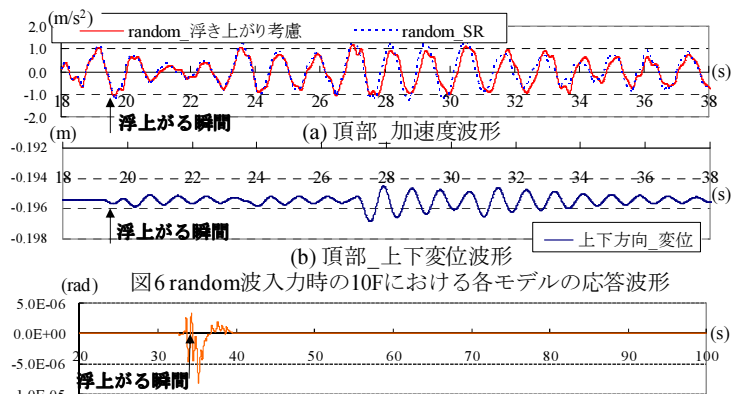


図8 Kobe波入力時の基礎における捩れ回転角応答波形

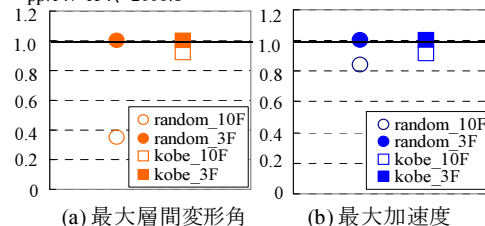


図7 各ケースのSRモデルに対する浮上りモデルの応答値比

\*1 清水建設(株) 技術研究所 修士(工学)  
\*2 名古屋大学大学院環境学研究科准教授・博士(工学)  
\*3 名古屋大学大学院環境学研究科教授・工博

\*1 Institute of Technology, Shimizu Corp., M.Eng..  
\*2 Assoc.Prof., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr.Eng.  
\*3 Prof., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr.Eng.