20140

日本建築学会大会学術講演梗概集
(関東) 2011 年 8 月

セットバック建物の地震応答解析のための層方向縮約モデル

正会員 ○足立 冬樹* 同 吉富 信太*
同 辻 聖晃* 同 竹脇 出*

セットバック建物　ねじれ振動　地震応答解析
縮約モデル　縮約地震時慣性力　逆問題型定式化

1. 序

建物の平面的な偏心が建物の耐震性にとって重要な要因であることは広く認識されており，これまでにも多くの研究によりその重要性が指摘されている．平面的な偏心を有する建物の中でも，全層において平面形が同一である建物の他に，低層部と高層部で平面規模の異なるセットバック建物が多数存在する．このセットバック建物の地震応答解析においては，偏心率が小さい場合には偏心がないものとして扱われる場合が多いが，偏心率がある程度大きい場合にはねじれを考慮する必要がある．

建物の地震応答を評価するには，一般に時刻歴応答解析による検討が必要となるが，ねじれを考慮することで自由度が大きくなり，計算機に大きな負荷が要求される．そこで，計算機の容量や時間的制約などの困難点を克服した精度の高い数値解析法が求められている．

本論文の目的は，セットバック建物が動的な地震外力を受ける場合について，建物を層方向に関して少自由度モデルに縮約し，簡易的かつ高精度な時刻歴応答解析が可能な方法を提案することにある．

2. 主体構造の縮約法

図 1(a)のように，重心位置と剛心位置がそれぞれ同一鉛直線上にある下層と上層の 2 つの部分によって構成されているセットバック建物を対象とする．縮約前のモデルを原モデル，縮約後のモデルを縮約モデルと呼ぶ．また，一般層の表記を，原モデルでは第 i 層，縮約モデルでは第 j 層とする．$\bar{(\ )}$ は縮約モデルに関する量を表す．図 1(b)のように，原モデルの Y 方向の長さは全層で等しく L_Y とし，下層の X 方向の長さを L_{Xb}，上層の X 方向の長さを L_{Xt} とする．このモデルは Y 方向入力に対してのみねじれ振動を生じるため，本論文では地震動の入力は Y 方向とし，Y 方向の並進運動と回転運動のみを考慮する．重心位置のずれを l とする．下層と上層それぞれについて偏心率は等しいとして，下層の偏心率を R_{Yb}，上層の偏心率を R_{Yt} とする．この時，下層と上層それぞれについて偏心距離は一定の値になるので，下層の偏心距離を e_b，上層の偏心距離を e_t と表すこととする．Y 方向の剛性に対する X 方向の剛性の比を α とする．

縮約モデルの層の位置は，原モデルの特定の層の位置(縮約代表位置と呼ぶ)に対応させ，ここでは下層と上層の境界層と最上層を縮約代表位置とする．従って，縮約モデルは 2 層モデルとなる．縮約モデルの質量と回転慣性

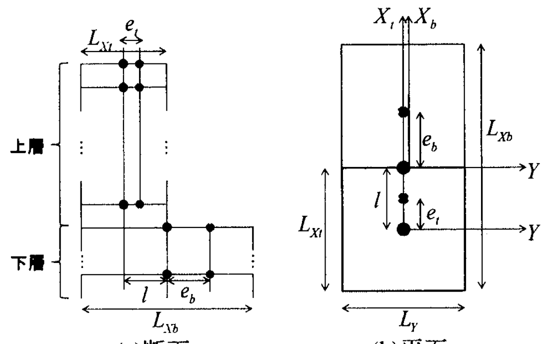

図 1　セットバック建物

は，原モデルの縮約代表位置間の質量と回転慣性を上側の縮約代表位置へ単純和したものとし，縮約モデルの偏心距離，重心のずれは原モデルと等しいとする．縮約モデルの並進剛性およびねじれ剛性は，原モデルと縮約モデルの 1 次固有円振動が等しく，縮約代表位置における両モデルの 1 次固有振動モード成分比が等しいという等価性条件を逆問題的に解くことにより決定する．

ただし，1 次の刺激関数が両モデルでは異なるため，単純に地震動を入力するだけでは両者に無視できない程度の差が生じる．この誤差を近似的に解消するために次節で地震動入力効果の縮約を行う．

3. 地震時慣性力の縮約法

構造物に地震動 $\ddot{u}_g(t)$ が入力された時の原モデルの運動方程式は次式で表される．

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}}(t)+\mathbf{C}\dot{\mathbf{y}}(t)+\mathbf{K}\mathbf{y}(t)=-\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g(t) \tag{1}$$

ここで，$\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{K}$ は原モデルの質量行列，減衰行列，剛性行列を表し，$\mathbf{y}(t)$ は重心の水平変位ベクトルと回転角ベクトルを縦に並べたベクトルを表す．また，$\mathbf{r}$ は成分の数が原モデルの層数の 2 倍の影響係数ベクトルを表す．その成分の上半分は全て 1，他は 0 である．

(1)式の右辺の第 i 成分 $-m_i\ddot{u}_g(t)$ を原モデルの第 i 層に作用する地震時慣性力(実際の慣性力の一部)と定義する．本論文で扱う時刻歴応答解析では，この地震時慣性力が原モデルの各層に作用する外力となる．

地震時慣性力の縮約においては，主体構造の復元力のみで抵抗するようなモデル(復元力抵抗モデルと呼ぶ)を考える．縮約された地震時慣性力を縮約地震時慣性力と呼ぶ [1]．原モデルと縮約モデルにそれぞれ地震時慣性力と縮約地震時慣性力を静的に作用させ，その時の縮約代表位置における重心の変位と回転角が両モデルで等しいとい

Advanced model reduction method for earthquake response analysis of buildings with setback

ADACHI Fuyuki, YOSHITOMI Shinta, TSUJI Masaaki and TAKEWAKI Izuru

う等価性条件を用いることにより，縮約地震時慣性力 $\bar{\mathbf{f}}(t)$ は縮約変換行列 $\mathbf{T}$ を用いて次式で表される．

$$\bar{\mathbf{f}}(t) = -\bar{\mathbf{K}}\mathbf{T}\mathbf{K}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

原モデルには地震時慣性力は並進方向にのみ作用するが，縮約モデルには並進方向に加えて回転方向の縮約地震時慣性力も作用する．ただし，原モデルに作用する地震時慣性力を縮約する層ごとに単純に加えたもの(単純和地震時慣性力と呼ぶ)を縮約モデルに作用させた場合には，縮約モデルには並進方向の地震時慣性力しか作用せず，これは縮約モデルに地震動を入力した場合に相当する．

4．数値例題

2,3 節の縮約法の精度検証のため，図 2 のように，第 1 層の重心，剛心位置が，他層と比べてずれている 10 層モデルを縮約する例を示す．ここでは，$L_{Xt} = L_Y = 40(m)$，$L_{Xb} = 80(m)$，$l = 20(m)$，$\alpha = 0.5$，$R_{Yb} = R_{Yt} = 0.2$ とする．原モデルの質量 m_i は $1\mathrm{m}^2$ あたり 1t とし，並進剛性 k_i はねじれを考慮しない場合の 1 次固有振動モードが逆三角形分布となるように決定する．固有周期は 1s とする．

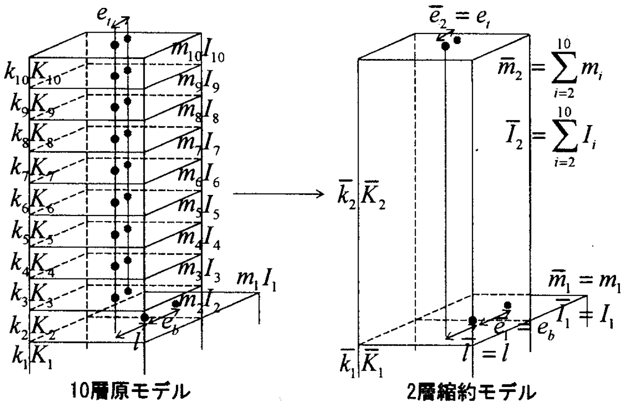

図 2　原モデルと縮約モデル

入力地震動には El Centro NS 1940 記録地震波を用い，0.002 秒刻みで Newmark-β 法による時刻歴応答解析を行う．原モデル，縮約モデルの構造減衰は 2%とし，剛性比例型減衰とする．原モデルに地震動を入力した時の頂部の重心の変位，回転角，隅柱位置の変位と，縮約モデルに縮約地震時慣性力および単純和地震時慣性力を作用させた時の頂部の重心の変位，回転角，隅柱位置の変位を比較する．表 1 に頂部の最大応答値を示す．

表 1　最上層の最大応答値の比較

	原モデル	縮約モデル(縮約地震時慣性力)	誤差(%)	縮約モデル(単純和地震時慣性力)	誤差(%)
重心の変位(mm)	202	197	-2.46	151	-25.5
回転角($\times 10^{-3}$rad)	8.77	8.12	-7.39	6.23	-29.0
変位(mm)正側隅柱位置	208	196	-5.40	151	-27.1
変位(mm)負側隅柱位置	303	260	-14.1	199	-34.5

縮約モデルに縮約地震時慣性力を作用させた場合には，原モデルの応答を縮約モデルで表現することができるが，縮約モデルに単純和地震時慣性力を作用させた場合には誤差が大きくなる．また，偏心率が下層と上層で種々変化した場合にも同様の結果を得た．

5．非比例減衰の例題

ここでは，本提案手法が非比例減衰モデルにも適用可能であることを示す．前節と同じモデルで，上 9 層の重心を通る構面に同じ減衰係数の粘性ダンパーを配置する．ダンパーの減衰係数は，非連成近似下での付加減衰定数が 10%となるように設定する．縮約モデルについても，上層の重心位置に粘性ダンパーを配置し，原モデルと同様に減衰係数を設定する．表 2 に結果を示す．

表 2　最上層の最大応答値の比較

	原モデル	縮約モデル(縮約地震時慣性力)	誤差(%)	縮約モデル(単純和地震時慣性力)	誤差(%)
重心の変位(mm)	90.6	92.0	+1.53	70.4	-22.3
回転角($\times 10^{-3}$rad)	5.49	4.73	-13.7	3.62	-34.0
変位(mm)正側隅柱位置	138	127	-7.72	97.9	-28.9
変位(mm)負側隅柱位置	170	147	-13.5	112	-34.3

6．結論

1) セットバック建物の地震動入力に対する時刻歴応答解析用縮約モデルを提案した．具体的には，セットバックの境界層と最上層を縮約モデル構築のための代表位置として選定し，1 次固有周期と 1 次固有振動モードに関する等価性を用いた逆問題型定式化により，多自由度モデルから少自由度モデルへの層方向に関する主体構造の縮約法を提案した．
2) 復元力抵抗モデルを用いた原モデルと縮約モデルの静的な意味での重心の変位と回転角の等価性条件から地震動入力効果を縮約する方法を提案した．この地震動入力効果の縮約の導入により，主体構造の縮約だけでは十分でない格段の精度向上が可能となる．
3) 数値例題として，下層が 1 層で上層が 9 層の 10 層構造物を扱い，提案縮約モデルは，原モデルの最上層の重心の変位，回転角，および隅柱位置の変位を表現することが可能であることを明らかにした．
4) 提案手法は粘性ダンパーが付加された非比例減衰モデルに対しても同様に適用できることを示した．ただし，回転角については誤差が大きくなる．

参考文献

1) 辻　聖晃他，非線形復元力特性を有する制振ダンパーの構造縮約モデルを用いた最適配置法，構造系論文集，2010 年 12 月．

*京都大学工学研究科建築学専攻

*Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ.