

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	建築物のさらなる超高層化に向けた曲げせん断モデル化手法の提案 その1 等価質点系モデル化の既往手法と提案手法の概要
Title(English)	New Bending-shear Modeling Method for Super Tall Buildings of Increasing Height (Part.1) Overview of Past and Proposed Methods for Equivalent Mass-spring System
著者(和文)	笠井和彦, 渡井一樹, 佐藤大樹, 前田周作, 鈴木庸介, 岡日出夫
Authors(English)	Kazuhiko Kasai, Kazuki Watai, Daiki Sato, Shusaku Maeda, Yousuke Suzuki, Hideo Oka
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, , , pp. 955-956
Citation(English)	Summaries of technical papers of annual meeting, , , pp. 955-956
発行日 / Pub. date	2019, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

建築物のさらなる超高層化に向けた曲げせん断モデル化手法の提案

その1 等価質点系モデル化の既往手法と提案手法の概要

正会員	○笠井和彦*1	同	渡井一樹*1
同	佐藤大樹*1	同	前田周作*2
同	鈴木庸介*2	同	岡日出夫*2

超高層建築物	等価質点系	曲げせん断モデル
固有周期	モード変位	高次モード

1. はじめに

建築物のさらなる超高層化とともに、簡易モデルを用いた振動解析手法の高度化が求められている。何千・何万という梁・柱・壁などを個々に模擬する部材構成モデルによる解析は不可欠だがデータが膨大となり、設計初期で様々な案を検討するには時間がかかり過ぎる。初期段階では層のせん断力、変形角、加速度、塑性率など、層単位の情報が十分であるため、要素数が少なく解析時間が短い等価質点系が有用となる。層損傷の程度や制振装置使用時の効率などの評価のために曲げ・せん断変形を分離し、かつ超高層建築物に多いコア構造やアウトリガー構造¹⁾などの架構も模擬する簡易モデルが望まれる。

本研究では等価質点系への新たなモデル化手法の概念と、それに基づくせん断モデル、曲げせん断モデルを提示する。本報その1では等価質点系の既往モデルと新たなモデルの概念、その2で既往モデルの精度と課題を述べる。その3で超高層建築物に対応できる新たな曲げせん断モデルの作成手法を提案し、その4で提案手法によるモデル化精度を検証する。なお、架構が塑性化した場合や制振装置を使用した場合は今後検討していく。

2. 各部材の近似によるモデル化

高畠ら²⁾は建築物を曲げ・せん断剛性をもつ棒材（連続体）に置換した。曲げ剛性は各階の垂直部材の断面積などから平面保持を仮定して算出する。せん断剛性は水平力の方向に沿う柱、梁の曲げ剛性などから求める。ただし、接合部の変形などを考慮した詳細なモデル化や部材数が多い場合の算定は煩雑になり、また、各部材の反曲点位置や内力分布の近似により、精度は定かではない。一方、近年の実務では、詳細で高精度な部材構成モデルが構造ソフトなどを用いて必ず構築されるため、本報ではそれを活用した簡易モデルの作成に言及する。

3. 部材構成モデルの水平載荷解析によるモデル化

等価質点系の既往モデル化手法として、部材構成モデルの静的な水平載荷解析に基づく方法を述べる。Ai 分布

荷重などに従う i 層せん断力 Q_i から水平荷重 F_i を定め、それを部材構成モデルに入力して得た水平変位 u_i を正確に再現するような、せん断モデル (S モデル)、曲げせん断モデル (B モデル) を説明する。

3.1 既往せん断モデル

S モデルは、建築物にせん断変形のみ生じると仮定する。従って曲げ剛性を無限大とする。部材構成モデルの層間変形 Δu_i を用い、S モデルのせん断剛性 K_{si} を次式から得る。

$$K_{si} = Q_i / \Delta u_i, \quad \Delta u_i = u_i - u_{i-1} \quad (1a, b)$$

曲げ変形が少ない中低層建築物に対しては S モデルの精度は良好である。

3.2 既往曲げせん断モデル

B モデルは、曲げ・せん断変形を考慮する。その作成にあたり、部材構成モデルの層間変形 Δu_i から曲げ・せん断成分を抽出する必要がある。まず曲げ成分を評価し、それを Δu_i から引いてせん断成分を求めるのが典型である。

この重要な曲げ成分の評価によく用いられる武藤ら^{3,4)}の方法を述べる。 Δu_i を求めた部材構成モデルの解析結果から各柱の軸変形エネルギーを算出し、柱軸変形が平面を保持すると仮定して式(2a)から i 層の等価増分回転角 $\Delta \theta_{ei}$ を求め、対応する等価曲げ剛性 EL_i を式(2b)から得る。

$$\Delta \theta_{ei} = \sum_{j=1}^{s_i} (N_{ij} \Delta v_{ij}) / \sum_{j=1}^{s_i} (N_{ij} l_{ij}) \quad (2a)$$

$$EL_i = h_i (M_{i+1} + M_i) / 2 \Delta \theta_{ei} \quad (2b)$$

ここに、 $s_i = i$ 層内の柱数、 $l_{ij} =$ 中立軸から部材 j までの水平距離、 $h_i =$ 階高、 $M_i =$ 転倒モーメントである。

EL_i を用い、梁理論から得た次式により、層間変形 Δu_i の曲げ成分 Δu_{bi} を求める (図1, 付録1 参照)。

$$\Delta u_{bi} = \frac{h_i^2}{6EL_i} (M_{i+1} + 2M_i) + h_i \sum_{k=1}^{i-1} \Delta \theta_k \quad (3)$$

せん断成分は $\Delta u_i - \Delta u_{bi}$ であるため、せん断剛性 K_{si} は、

$$K_{si} = Q_i / (\Delta u_i - \Delta u_{bi}) \quad (4)$$

となり、各 i 層で EL_i と K_{si} をもつ B モデルが完成する。

なお、武藤らは B モデルを構面ごとに作成し、それらを連結して疑似立体モデルを構築した。日本免震構造協会

のパッシブ制振構造設計・施工マニュアル⁵⁾では上記の方法で建物を1つのBモデルに置換しており、以後その手法に言及する。

Bモデルでは、純ラーメン構造の中低層建築物に対し1～3次モードの固有周期・刺激関数が合うことを確認した。しかし超高層建築物に対し精度が落ちる他、式(2a)などのブレース構造、コア構造、アウトリガー構造への適用性が不明であることから、適用範囲は限られる。

なお、式(2a)の等価増分回転角の適用は、Bモデルの曲げ変形成分と部材構成モデルのそれとの一致(4章)を保証するものではない。また、その算出に全ての柱軸力と変形を用いるため、超高層建築物ほど計算が煩雑になる。

4. 骨組の固有値解析と純曲げ载荷解析によるモデル化

筆者らは、超高層建築物の簡易モデル化には、少なくとも1～3次モードの固有周期・刺激関数の再現精度が重要であることを確認した(続報その2～4)。提案する等価質点系は、部材構成モデルの1次モード円振動数 ω_1 と選ばれたモード変位 ϕ_1 を再現する(付録2)。3章に因み、これらを1次モード適合せん断モデル($S^{(1)}$ モデル)、1次モード適合曲げせん断モデル($B^{(1)}$ モデル)と呼ぶ。

部材構成モデルから得た*i*層の1次モード水平変位 ϕ_{i1} のみでモード変位 ϕ_1 を表し、水平方向質量 m_i のみを対角項として質量マトリクス $\mathbf{M}$ を表す。求める等価質点系の剛性マトリクス $\mathbf{K}$ は、次式を満たす必要がある。

$$\mathbf{K}\phi_1 = \omega_1^2 \mathbf{M}\phi_1 \quad (5)$$

これ以後、式(5)右辺を1次モード外力 $\mathbf{F}^{(1)}$ とみなし、各層の値 $F_i^{(1)}$ から層せん断力 $Q_i^{(1)}$ を次式で求めておく。

$$Q_i^{(1)} = \sum_{k=1}^N F_k^{(1)} = \omega_1^2 \sum_{k=1}^N (m_k \phi_{k1}) \quad (6)$$

これに基づき、式(5)の剛性マトリクス $\mathbf{K}$ の導出に代わる簡便な等価質点系の作成法を以下に提案する。

4.1 新たなせん断モデル

$S^{(1)}$ モデルのせん断剛性 K_{si} は次式から得る。

$$K_{si} = Q_i^{(1)} / \Delta\phi_{i1}, \quad \Delta\phi_{i1} = \phi_{i1} - \phi_{i-1,1} \quad (7a,b)$$

式(7)から得た K_{si} をもつせん断モデルを構築すれば、その ω_1 と ϕ_1 は部材構成モデルのものと一致する。

4.2 新たな曲げせん断モデル

$B^{(1)}$ モデルの簡易な作成のため、部材構成モデルの曲げ剛性の評価方法をまず提案する。3.2節の既往手法と対比して、部材構成モデルにせん断力を与えず、頂部に純粋な曲げモーメント M_0 を与える純曲げ载荷解析(図2)から水平変位 u_i を求め、層間変形 Δu_i 、回転角 θ_i 、増分回転角 $\Delta\theta_i$ 、曲げ剛性 EI_i を直接得る。すなわち、

$$\Delta\theta_i = 2(\Delta u_i - h_i \theta_{i-1}) / h_i, \quad \theta_i = \theta_{i-1} + \Delta\theta_{i-1}$$

$$EI_i = h_i M_0 / \Delta\theta_i \quad (8a-c)$$

なお、ここで得た EI_i は、水平载荷で生じるせん断力の影響は模擬できない。せん断力の影響を加味すると曲げ剛性が1～2割程度低下することを確認しており、補正係数 α_{EI} をかけたものを曲げ剛性 EI_i と呼び変える(続報その3)。また、1次モード外力による転倒モーメント $M_i^{(1)}$ を用い、式(3)、(4)と同様にせん断剛性 K_{si} を次式から得る。

$$\Delta\phi_{bi} = \frac{h_i^2}{6EI_i} (M_{i+1}^{(1)} + 2M_i^{(1)}) + h_i \sum_{k=1}^{i-1} \Delta\theta_k \quad (9a)$$

$$K_{si} = Q_i^{(1)} / (\Delta\phi_i - \Delta\phi_{bi}) \quad (9b)$$

つまり、式(8c)、(9b)から得た EI_i と K_{si} により曲げせん断モデルを構築すれば、その ω_1 と ϕ_1 は部材構成モデルと一致する。

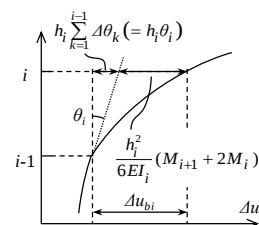


図1 曲げ変形成分の分離

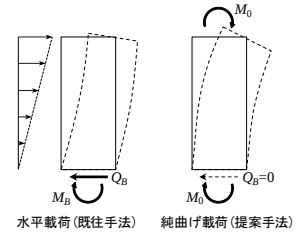


図2 モデル化手法の概念図

5. まとめ

等価質点系への既往モデル化手法の現状と課題を整理し、新たなモデル化手法の概要を述べた。

謝辞

本研究は東京工業大学と竹中工務店との共同研究であり、一部はJST産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラムによるものです。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) M.Nicoreac, J.C.D.Hoenderkamp: Periods of vibration of braced frames with outriggers, Steel Structures and Bridges 2012, Procedia Engineering, Vol.40, pp.298-303, 2012
- 2) 高島秀雄, 北田幸彦, 竹脇出: 超高層ビルの簡易動的設計法, 鹿島出版社, pp.51-84, 2016.3
- 3) 大澤胖, 南忠夫, 松島豊, 長田正至: 新建築学大系 38 構造の動的解析, 彰国文庫, pp.222-224, 1981.10
- 4) 武藤清, 長田正至, 金山弘雄, 上野弘道, 花島実: 高層ビルの耐震解析一貫システム”FAPP-FASP”, 第1回電子計算機利用シンポジウム, pp.205-210, 1979.3
- 5) 日本免震構造協会: パッシブ制振構造設計・施工マニュアル 第3版, pp.131-152, 2013.1
- 6) 笠井和彦, 元結正次郎, 大木洋司: 水平地震動を受ける空間構造への粘弾性ダンパーの適用と応答性状に関する一考察, 日本建築学会構造系論文集, 第561号, pp.125-135, 2002.11

付録1: 文献5)のように、式(3)では曲げ変形成分を転倒モーメントによる変形として扱うが、その一部は水平変形も含んだものである。武藤らは、この水平変形を等価質点系のせん断変形の一部として定義したため、式(3)の右辺第1項が $h_i^2 (M_{i+1} + M_i) / 4EI_i$ となる。

付録2: これは厳密な縮約モデルではなく、部材構成モデルから抽出した1次モード変位・周期、水平方向質量で定義される新たな小自由度システムと、動的特性が一致するモデルである。部材構成モデルの鉛直方向質量、回転質量などのモデル動的特性への影響は少ないことも確認した。

*1 東京工業大学未来産業技術研究所

*2 竹中工務店 エンジニアリング本部

*1 FIRST, Tokyo Institute of Technology

*2 Engineering Dept., Takenaka Corporation