T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

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 5 制振ダンパーをもつ超高層建築のモデル化手法
Title(English)	New Bending-shear Modeling Method for Super Tall Buildings of Increasing Height (Part. 5) Modeling Method for Super Tall Buildings with Dampers
著者(和文)	笠井和彦, 牟雨, 佐藤大樹, 渡井一樹, 飯野夏輝
Authors(English)	Kazuhiko Kasai, Yu Mu, Daiki Sato, Kazuki Watai, Natsuki Iino
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, II, , pp. 887-888
Citation(English)	, II, , pp. 887-888
発行日 / Pub. date	2022, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

日本建築学会大会学術講演梗概集
（北海道） 2022 年 9 月

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 5　制振ダンパーをもつ超高層建築のモデル化手法

正会員　○笠井和彦*1　同　牟　雨*1
同　佐藤大樹*1　同　渡井一樹*2
同　飯野夏輝*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　状態 N/R 解析

1.　はじめに

筆者らは、超高層建物の何千・何万という自由度をその数%にまで縮小した既往のせん断、曲げせん断モデル化手法の検証や、新たな曲げせん断モデル化手法の開発を行ってきた。その１～４では、ダンパーなどの減衰機構がない非制振建物に限定し、実務で静的解析や固有値解析に用いる部材構成モデル（以下、M モデル：*member-to-member model*）の固有周期とモードを高精度で再現し、よって正確で効率的な動的解析を可能にする曲げせん断モデルの作成法を提案した [1)-3)]。作成法をまず要約する。

M モデル頂部に曲げモーメントを与え、せん断力ゼロの純曲げによる変形を求めた後、各 i 層の曲率、ひいては曲げせん断モデルに用いる曲げ剛性 EI_i を求める。その後、M モデルの固有値解析から得る 1 次モード層モーメントと EI_i により M モデルの曲げ変形量を評価し、1 次モードの水平変形から引いてせん断変形を求め、これと 1 次モード層せん断力から、曲げせん断モデルに用いるせん断剛性 Ks_i を得る。つまり曲げせん断モデルの 1 次モード変形・周期が、M モデルと一致する。さらに、曲げせん断モデル全層の EI_i を一律やや低く、Ks_i をその分高める調整により、2 次周期も M モデルと一致させることができ、これを $B^{(1)}$モデル（*1st mode bending-shear model*）と定義した。

本報その 5~6 は、これを制振建物の場合へと拡張する。

2.　曲げせん断モデル化への状態 N/R 解析の導入

制振ダンパーをもつ一層 M モデルを状態 N/R 解析によりせん断モデルに厳密に縮約する方法を笠井・岩崎が提案し [4)]、多層のせん断モデルへの拡張を石井・笠井が行った [5)]。塔状比にもよるが、30~40 層までの建物には、せん断モデルで精度十分と考えられる。それ以上の高さを包含する曲げせん断モデル、名付けて NR-$B^{(1)}$モデルの基本理論を本節で述べ、次節でせん断剛性の修正法を述べる。

図 1a の M モデルのように、ダンパーが必ずしも各階にない一般的な場合を想定する。筋交い型ダンパーを示すが、間柱型など任意形式のダンパーにも適用できる [4), 5)]。

図 1b の状態 N (No-damper) は、ダンパーの履歴挙動のうちダンパー力がゼロ、状態 R (Rigid-damper) は、ダンパー変形がゼロとなり、動的な交番載荷時に M モデルで必ずおきる状態を示す。これら 2 状態の力学特性を模擬する。

まず、状態 N の M モデルを模擬する方法は、非制振建物の $B^{(1)}$モデル化 (1 節) と同じである。M モデル頂部に静的曲げモーメント M_{top} を与え、i 層の曲げ剛性 EI_{Ni} を得る。

$$EI_{Ni} = \alpha M_{top} \big/ p_{Ni} \tag{1}$$

ここに、p_{Ni}＝得られた M モデル水平変位の 2 階微分式 [2)] から求まる i 層の曲率であり、α＝2 次周期調整係数（初期値 1）である [2)]。また、せん断剛性 K_{Nsi} は次式から得る。

$$K_{Nsi} = Q_{Ni}^{(1)} \big/ (\Delta u_{Ni} - \Delta u_{Nbi}) \tag{2}$$

ここに、図 1b に示すように、$Q_{Ni}^{(1)}$＝M モデルの 1 次モード変位に基づく層せん断力 [2)]、Δu_{Ni}＝M モデル 1 次モード層間変形、もしくは $Q_{Ni}^{(1)}$を与えたときの静的な M モデル層間変形。Δu_{Nbi}＝上記の EI_{Ni} と 1 次モード層モーメント $M_{Ni}^{(1)}$から算出される曲げ層間変形である。

以上の EI_{Ni}、K_{Nsi} からなる NR-$B^{(1)}$モデルは、1 次周期・モードが M モデルと一致するが、2 次周期も合わせるために、式(1)の α を徐々に下げて(1)と(2)を数回繰り返すことで、EI_{Ni}、K_{Nsi} を調節する。典型的には $0.8<\alpha<1$ である。

次に、状態 R の M モデルの模擬について述べる。M モデル頂部に曲げモーメントを与えて得る曲げ剛性 EI_{Ri} は、高層建物の場合ほど上記の EI_{Ni} に概ね等しいことが分かった。さらに低層の場合は EI_{Ri} 、EI_{Ni} ともに高いため曲げ変形が非常に小さく、その精度は全体の精度に殆ど影響しない。よって任意の建物高さに対し、

$$EI_{Ni} = EI_{Ri} \tag{3}$$

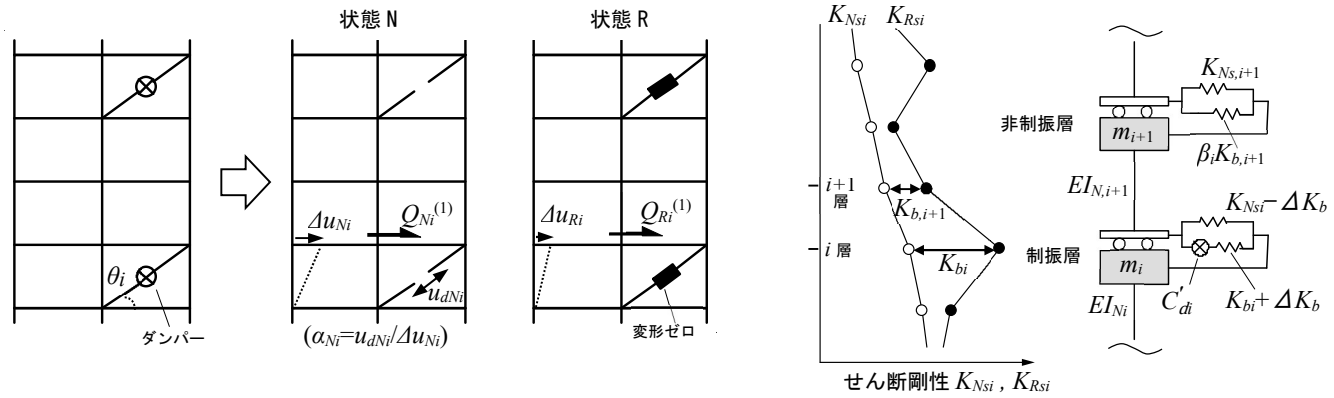
また、せん断剛性 K_{Rsi} は、次式から求める。

$$K_{Rsi} = Q_{Ri}^{(1)} \big/ (\Delta u_{Ri} - \Delta u_{Rbi}) \tag{4}$$

図 1c のように、制振・非制振層に関わらず $K_{Rsi} > K_{Nsi}$ となり、その程度は制振層の上の非制振層を重ねるごとに低下する。つまり、図 1b の状態 R で M モデル変形モード

New Bending-shear Modeling Method for Super Tall Buildings of Increasing Height
(Part. 5) Modeling Method for Super Tall Buildings with Dampers

Kazuhiko Kasai, Yu Mu, Daiki Sato, Kazuki Watai, Natsuki Iino



(a) M モデル　(b) 状態 N と R　(c) M モデルせん断剛性　(d) NR-B(1) モデル

図 1 ダンパーを考慮した新たな曲げせん断モデルの提案

が、剛なダンパーの層だけでなく、非制振層でも状態 N と異なり、その影響は制振層から離れるほど鈍化する。

以上は、制振層のみ影響されるせん断モデル [5] と対比し、曲げ剛性により他層との干渉が、状態 R の剛なダンパーとつながる等価支持材の剛性に左右されて生じると言える。これを反映させる NR-B(1)モデルの修正法を次節で述べる。

3. 曲げせん断モデルのせん断剛性修正法

図 1a のダンパーを粘性要素（軸方向粘性係数 C_{di}）と考える。NR-B(1)モデルは図 1d で表され、ダンパーに直列結合するバネは、ダンパー直近のブレースだけでなく、M モデルの全部材の変形寄与を再現することに注意されたい。このバネの弾性剛性 K_{bi} は次式で表される（図 1c）。

$$K_{bi} = K_{Ri} - K_{Ni} \tag{5}$$

また、非制振 i+1, i+2 層でも式(5)と同様に $K_{b,i+1}$, $K_{b,i+2}$ などが生じ、その影響度は、i 層ダンパー・等価支持材の直列結合体（Maxwell 体）の等価剛性 K_{ai} で把握できる。

$$K_{ai} = K_{bi} / \left\{1+(1/\lambda_i)^2\right\},\ \ \lambda_i = C_{di}(\cos\theta_i)^2\,\omega / K_{bi} \tag{6}$$

ここに、λ_i= 等価支持材変形比、ω=正弦波入力の円振動数（状態 N の 1 次円振動数とみなす）。式 6 から λ_i が高いほど K_{ai} が上がり、究極で K_{bi} と等しくなり状態 R と一致する。詳細は省くが多くの数値実験により、以上を反映させたせん断剛性調節係数 β_i=0.9 λ_i (≤1) を提案する。

まず非制振層で、図 1c の傾向を反映させ、状態 N のせん断剛性を $\beta_i K_{b,i+1}$ だけ増加させる。つまり、

$$K'_{s,i+1} = K_{Ns,i+1} + \beta_i K_{b,i+1},\ \ EI_{i+1} = EI_{N,i+1} \tag{7a,b}$$

また、その上の非制振 i+2, i+3 層なども同様に調節する。

次に制振 i 層では、上の非制振層で増えたせん断剛性による状態 N の 1 次周期のズレを極力抑えるため、増加分の ΔK_b を制振層せん断剛性 K_{Nsi} から引く。また、一方で図 1c の制振層の状態 R せん断剛性をずらさないように、ΔK_b を等価支持材剛性に加算する。すなわち、

$$\Delta K_b = \beta_i (K_{b,i+1} + K_{b,i+2} + K_{b,i+3} + \cdots) \tag{8}$$

$$K'_{si} = K_{Nsi} - \Delta K_b,\quad K'_{bi} = K_{bi} + \Delta K_b \tag{9a,b}$$

また、M モデルのダンパーとの変換則に用いるダンパー変形分担比 [5] α_{Ni} も求める（図 1b）。

$$\alpha_{Ni} = u_{dNi} / \Delta u_{Ni} \tag{10}$$

NR-B(1)モデルの粘性係数 $C'_{di}=C_{di}(\alpha_{Ni})^2$ とし(図 1d)、解析から得るダンパー力 F_{dsi} と変形 u_{dsi} は、次式で M モデルのダンパー軸力 F_{di} と変形 u_{di} に変換できる。

$$F_{di} = F_{dsi} / \alpha_{Ni},\ \ u_{di} = u_{dsi}\alpha_{Ni} \tag{11a, b}$$

4. まとめ

超高層制振建物の状態N/R解析による曲げせん断モデル化を定式化した。その 6 で精度を示す。

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) 笠井和彦, 渡井一樹ほか 4 名: 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, その 2 既往手法の適用限界とその原因, その 3 提案手法によるモデル化の手順, その 4 提案手法の精度検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）, pp.955-962, 2019.9
2) 笠井和彦, 渡井一樹, 前田周作, 佐藤大樹, 鈴木庸介: 建築物のさらなる超高層化に向けた等価質点モデル化手法（その 1）曲げせん断モデル作成に関する既往手法の考察と新たな手法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 85 巻, 第 772 号, pp. 791-801, 2020. 6
3) 渡井一樹, 前田周作, 笠井和彦, 佐藤大樹, 鈴木庸介: 建築物のさらなる超高層化に向けた等価質点モデル化手法（その 2）新たな曲げせん断モデルを用いた建物応答の曲げ・せん断分離手法, 日本建築学会構造系論文集, 第 86 巻, 第 779 号, pp. 21-31, 2021. 1
4) 笠井和彦, 岩崎啓介: 様々な形式の制振構造における自由度縮約法と水平バネ系への変換法, 日本建築学会構造系論文集, 第 605 号, 37-46, 2006.7
5) 石井正人, 笠井和彦: 多層制振構造の時刻歴解析に用いるせん断棒モデルの提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 647 号, pp. 103-112, 2010. 1

*1 東京工業大学未来産業技術研究所
*2 竹中工務店
*1 FIRST, Tokyo Institute of Technology
*2 Takenaka Corporation