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)	吸収エネルギーに着目した超高層建物の制振性能評価手法の検討 - ダ ンパー配置の違いが制振効果に与える影響 - 形の簡易評価
Title	
著者(和文)	古谷慶, 佐藤大樹, 北村春幸, 石井正人, 吉江慶祐, 宮崎充, 佐々木和彦, 岩崎雄一
Authors	daiki sato, Haruyuki Kitamura, Mitsuru MIYAZAKI, Kazuhiko Sasaki, IWASAKI Yuichi
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 83, , 2041
Citation(English)	, Vol. 83, , 2041
発行日 / Pub. date	2013, 3
rights	
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf:http://ci.nii.ac.jp/naid/110009769787

吸収エネルギーに着目した超高層建物の制振性能評価手法の検討 ーダンパー配置の違いが制振効果に与える影響 –

構造一振動

2041

制振構造 履歴ダンパー エネルギーの釣合 吸収エネルギー 層せん断力係数 ダンパー配置

1. はじめに

超高層建物は、曲げ変形が卓越しやすいため、ダンパーを有効に 稼働させるせん断変形が小さくなり、制振効果が低下する。筆者ら ¹⁾は、層間変形に対するせん断変形の比(以後、実効変形比)に着 目した検討を行い、実効変形比がダンパー配置やダンパー量により 変動し、制振効果の優劣に影響することを確認した。また、実効変 形比の予測式を提案し、部材レベルモデルによる時刻歴応答解析を 用いずに、有効なダンパー配置の判断が出来ることを示した。しか し、実効変形比のみでは層間変形角や層せん断力、ダンパーのエネ ルギー吸収効率にどの程度の差があるのかを捉えることが難しい。

本報では、石井・笠井²により報告された骨組特性値を用いた簡 易モデルに対し、エネルギーの釣合に基づく応答予測法^{3,4)}を適用 した制振効果の評価手法を提案し、ダンパー配置の違いによる応答 値の差異を捉える。また、30 階鋼構造建物¹⁾を用いた検証を行う。

2. 目標層間変形に対する評価指標の概要

本評価手法は、骨組特性値²⁾を用いたせん断モデルに対し、設定 した層間変形(以後,目標層間変形)を与えた際の建物が吸収し得 るエネルギー量および層せん断力を用い、制振効果の傾向を捉える ものである。

2.1 骨組特性値²を用いたせん断モデルの作成

評価指標の算出に用いるせん断モデルは、骨組特性値を用いた手 法³⁾を用い作成する。図1に示すように主架構を表す擬似フレームと 付加系部を表す擬似ダンパーおよび擬似ブレースで構成される。骨 組特性値 α_N および K_{aR} は、主架構のみの弾性部材モデル(状態 N モデル)と制振部材設置位置に剛性が極端に大きい弾性バネを挿入 した(状態 R モデル)2 ケースの静的解析結果を用いた次式から得 られる²。静的解析時の荷重分布は Ai 分布に基づくものとする。

$$\alpha_{N} = \frac{\delta_{dN}}{\delta_{Ni}}, K_{dR} = \frac{F_{dR}}{\delta_{R}}, K_{bs} = \alpha_{N} \cdot K_{dR}$$
(1 a,b,c)

ここで、 δ_d :制振部材設置箇所の相対変形の水平成分、 δ :層間 変形、 F_d :の制振部材設置箇所の弾性バネが負担する軸力の水平成 分である。また、右下の添え字NおよびRは、状態Nモデルおよ

	*1		* 1		* 1
正会員 〇	古谷慶	同	佐藤大樹	同	北村春幸
同	石井正人*2	同	吉江慶祐	同	* ³ 宮崎充
同	*3 佐々木和彦	同	半3 岩崎雄一		

び状態 R モデルによる計算値であることを示す。

図1より、部材レベルモデルとせん断モデルとの対応関係を示す。 式(2)より、 α_N を用いて、部材レベルモデルのダンパーの軸変形の 水平成分 δ_d 、軸力の水平成分 F_d および剛性の水平成分 K_d を、せん 断モデルのダンパーの変位 δ_a 、軸力 F_b および剛性 K_a に変換出来 る。添え字のsはせん断モデルの諸元および応答値を示す。

$$\delta_d = \alpha_N \cdot \delta_{ds}, \quad F_d = \frac{F_{ds}}{\alpha_N}, \quad K_d = \frac{K_{ds}}{{\alpha_N}^2}$$
 (2 a,b,c)

以上より、部材レベルモデルからせん断モデルを作成する。



図1 部材レベルモデルとせん断モデルの対応関係

2.2 評価指標の算出フローの概要

評価指標の算出フローの概要を以下に示す。

与条件:目標最大層間変形およびダンパー量を設定する。

- 主架構モデル(弾性モデル)に対して、外力分布をAi分布 と仮定した層せん断力を作用させ、層間変形の高さ方向分 布を算出する。
- 2) 1)の層間変形の高さ方向分布において、最大値を取る層の 層間変形を設定した目標最大層間変形となるようにし、分 布形状に沿うように他層の目標層間変形を算出する。
- 3) 目標層間変形に対する評価指標(2.3, 2.4節)を算出する。

2.3 建物が吸収し得るエネルギー量

弾性挙動を仮定した際の制振構造に適用されるエネルギーの釣 合式^{3,4}位次式で表される。

$$_{f}W_{es} +_{a}W_{es} +_{a}W_{ps} = E_{s} -_{f}W_{ds} = E_{Ds}$$
 (3)

ここで、 $_{f}W_{s}$: 主架構が蓄える弾性振動エネルギー、 $_{a}W_{s}$: 付加系が蓄える弾性振動エネルギー、 $_{a}W_{s}$: 付加系が消費する累積塑性

歪みエネルギー, E_s :入力された総エネルギー量, $_fW_a$:主架構の 減衰により消費するエネルギー, E_{Ds} :損傷に寄与するエネルギー 入力量である。擬似ダンパーと擬似ブレースを合わせた部分を付加 系と呼び,添え字をaとする。

また、累積値に係わるエネルギーの釣合式は、地震終了時刻に弾 性振動エネルギーが $_{f}W_{g}$ = $_{a}W_{g}$ =0となることから次式で表される。

$$_{a}W_{ps} = E_{Ds} \tag{4}$$

Encは、次式で求められる。

$$E_{Ds} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot V_{Ds}^{2} \tag{5}$$

ここで、 $M: 架構の総質量, V_{Ds}: E_{Ds}$ の速度換算値である。

一方で、建物が吸収し得るエネルギーW_Dは、式(4)より、次式のような形で表すことが出来る。

$$W_{Ds} =_a W_{ps} \tag{6}$$

。Wpsは次式で与えられる。

$${}_{a}W_{ps} = \sum_{i=1}^{N} {}_{a}W_{psi} = \sum_{i=1}^{N} \left\{ 4 \cdot_{a} n_{eq} \cdot_{a} \mathcal{Q}_{ysi} \cdot (\delta_{si} -_{a} \delta_{ysi}) \right\}$$
(7)

$$= = \mathcal{C},$$

$${}_{a}Q_{ysi} = \alpha_{Ni} \cdot {}_{d}Q_{ysi}, \quad {}_{a}\delta_{ysi} = {}_{a}Q_{ysi} / K_{asi}$$
 (8a,b)

$$K_{asi} = \frac{1}{1/(\alpha_{Ni}^{2} \cdot K_{dsi}) + 1/K_{bsi}} = \frac{\alpha_{Ni}^{2} \cdot K_{dsi} \cdot K_{bsi}}{\alpha_{Ni}^{2} \cdot K_{dsi} + K_{bsi}}$$
(8c)

ここに、 $_{a}W_{psi}: i$ 層の付加系の累積塑性歪みエネルギー、 $_{a}n_{eg}: fd$ 加系の等価繰り返し数(地震終了時刻)、 $_{a}Q_{ysi}: i$ 層の付加系の降伏 せん断力、 $\delta_{si}: i$ 層の目標層間変形、 $_{a}\delta_{ysi}: i$ 層の付加系の降伏変形、 $K_{asi}: i$ 層の付加系剛性、 $K_{asi}: i$ 層のダンパーの水平剛性である。

 $_{a}W_{psi}$ は、式(8a,b,c)より α_{N} および K_{aR} を用いると次式となる。

$${}_{a}W_{psi} = 4 \cdot_{a} n_{eq} \cdot \alpha_{Ni} \cdot_{d} Q_{yi} \cdot \left\{ \delta_{si} -_{d} Q_{yi} \cdot \left(\frac{1}{K_{aRi}} + \frac{1}{\alpha_{Ni} \cdot K_{di}} \right) \right\}$$
(9)

また、WDsの速度換算値 VDsを次式のように定義する。

$$V_{Ds} = \sqrt{\frac{2 \cdot W_{Ds}}{M}} \tag{10}$$

目標層間変形および付加系の等価繰り返し数を設定すると、その 建物が吸収し得るエネルギー量の速度換算値 V_{D's}が定まる。例えば、 入力地震動の V_{Ds}に対して、V_{D's}が上回る場合は、そのダンパー配 置およびダンパー量で目標層間変形以下に抑えられることを表す。

2.4 標準せん断力係数相当に基準化した層せん断力係数

層せん断力を表す評価指標としては、次式のように第1層の層せん断力係数 d_{s1}に弾性1次固有周期 T₁を乗じることで標準せん断力 係数相当に基準化したものを用いる。

$$\alpha'_{s1} = \frac{\mathcal{Q}_{s1}}{M \cdot g} T_1 \tag{11}$$

ここで、Q_{s1}:第1層の層せん断力、g:重力加速度である。

3. 検証に用いる検討対象建物概要

検証には、図2に示す30 階鋼構造建物¹⁾を用いる。部材断面は標 準せん断力係数 $C_0=0.2$ の設計用地震力に対して許容応力度設計を 行い決定した。架構の弾性1次固有周期 T_1 は4.47 sec である。解析 は X 方向のみを対象とし、剛床を仮定した部材レベルモデルで行 う。なお、主架構は弾性状態を保つものとし、構造減衰は主架構の T_1 に対して2%となる剛性比例型とする。

ダンパーには、LY225 材(降伏応力度 225 N/mm²)からなる座屈 拘束型ブレースを用いる。ダンパーの履歴性状は完全弾塑性型とす る。検討に用いるダンパー配置には、図2 に示す10 種類を用いる。

各層のダンパーの降伏せん断力は、第1層のダンパー降伏せん断 力 $_{dQ_{11}}$ を基準とし、Ai分布に基づく設計用層せん断力分布をもと に6層毎の5段階とした。 $_{dQ_{11}}$ と第1層のダンパーの降伏せん断力 係数 $_{d\alpha_{11}}$ の関係は次式で表され、検討には $_{d\alpha_{21}}$ =0.015を用いる。

$${}_{d}\mathcal{Q}_{y1} = {}_{d} \alpha_{y1} \cdot \sum_{i=1}^{30} m_{i} \cdot g$$
(12)



検討用入力地震動には、長周期領域で擬似速度応答スペクトル $S_{p\nu}$ (h=5%) が 0.8 m/s で基準化された模擬波を用い、位相特性と して、HACHINOHE 1968 EW、JMA KOBE 1995 NS、TOMAKOMAI EW および東北地方太平洋沖地震で観測された 1 波(以後、ART HACHI, ART KOBE, ART TOMA, ART SHIN)を採用する。なお、 検討には、入力倍率として 0.75、1.0、1.5 倍を用いる。

4. 本評価手法の設定条件に関する検討

本評価手法では、評価手法の簡便性を考慮し、①目標層間変形角の高さ方向分布の統一(2.2節)、②エネルギー集中を無視し、各層

-446-

のダンパーが理想的にエネルギー吸収を行うもの(2.3節)としている。本章では、それらの設定条件について妥当性を確認する。なお、検討用入力地震動は、ART HACHI および ART TOMA とする。

4.1 目標層間変形角と応答値との比較

目標層間変形角の高さ方向分布は、主架構のみにおける分布形状 を仮定しているため、ダンパー配置などが異なる場合でも同一の分 布形状となる。本節では、その分布に対して、ダンパーを設置した 架構における時刻歴応答解析結果から得た分布と比較する。図3に、 図2に示したダンパー配置における応答値の層間変形角Rと目標層 間変形角R。との比較結果を示す。図3より、各入力倍率における 全ダンパー配置の最大層間変形角が概ね1/170 rad, 1/135 rad, 1/100 rad となることから、目標最大層間変形角も 1/170 rad、1/135 rad、 1/100 rad とする。図 3(a)より、ART HACHI では全ダンパー配置の 応答値の平均値(点線)と目標層間変形角(黒実線)が概ね一致し ている。しかし、図3(b)より、ART TOMA では、入力倍率1.5倍で 両者の分布形状に差が見られる。この原因は、ART TOMA におけ る層せん断力の高さ方向の分布形状が本評価手法における Ai 分布 に基づく分布形状と異なっているためである。以上より、層せん断 力の分布形状が Ai 分布に基づく層せん断力の分布形状と大きく異 なわなければ、本評価手法で設定した層間変形角の分布形状で応答 値の層間変形角の分布形状を模擬することが出来ると考える。

4.2 付加系の損傷分布と応答値との比較

本評価方法では、各層のダンパーが理想的にエネルギー吸収を行

うものとして、エネルギー法のように損傷集中を考慮していない。 そこで、部材レベルモデルの時刻歴応答解析から得たダンパーの損 傷分布 _aW_{pi}/_aW_p(以後、損傷分布(時刻歴))と本評価方法による もの _aW_{pi}/_aW_p(以後、損傷分布(本手法))の比較を図4に示す。 各損傷分布は全ダンパー配置の平均値とする。図4より、両者から 上層部よりも下層部で損傷することが分かり、上層部においては両 者の分布形状が似た傾向を示す。しかし、損傷分布(本手法)には、 損傷分布(時刻歴)のように下層部で損傷集中する傾向が見られな い。以上より、本評価手法において、1~10層の下層部のみでエネ ルギー吸収するような場合には大きく精度が落ちることが考えら れる。このような場合を除けば、ある程度の精度を持って評価する ことが出来ると考え、次章以降の検討を進めていく。

5. 本評価手法の精度検証結果

全4波入力時の10種類のダンパー配置において、本評価手法で 算出した指標(以後,評価値)と部材レベルモデルの応答値とを比 較し、本評価手法の精度を確認する。評価値を算出するに当たり、 目標最大層間変形角および*nag*を設定する。目標最大層間変形角は、 4.1節の設定と同様なものとする。*nag*は、まず応答値から各ダンパ 一配置ごとに各層の*nag*を算出し、全層の平均値を算出する。さら に、全ダンパー配置で平均値をとったものとする。

図5に、評価値と応答値との比較結果を示す。図には全120ケー スを示す。また、評価値と応答値が一致する実線とそれに対して



-447-

0.2

0.2

±15%の誤差を点線で示す。図5(a)より、 $V_{D'(s)}$ は、ART TOMA でば らつきが大きく、精度が劣るが、他の3波では概ね誤差±15%以内に 収まる。ART TOMA のばらつく原因は次章に示す。図5(b)より、 $\alpha'_{(s)1}$ は、1.5倍で精度が劣るプロット(1-6)が存在するが、概ね誤差±15% 以内に収まる。以上より、評価値は、概ね誤差±15%以内で応答値を 捉えられることが分かった。ただし、この精度は目標最大層間変形 角および d_{Par} を応答値から定めた場合ある。

6. ダンパー配置の違いによる制振効果の評価

図6には、評価値および応答値を用いた10種類のダンパー配置の 違いによるARTHACHI、ARTTOMA入力時の応答比較結果を示す。 評価値の算出に用いる目標最大層間変形角および dnag は、前章と同 様の設定とする。図 6(a), (b)の VD'いより, 評価値に着目すると, A とB, CとD, EとFがほぼ同等の値をとり、全てを含めると、1-6 <2-5<E と F<3-4<A と B<C と D<chidori の順に大きくなる。 このダンパー配置の違いによる傾向は、応答値でも概ね同様の傾向 を示すことを確認することが出来る。しかし、ART TOMA の0.75 倍, 1.0 倍の応答値では、共振現象により 1-6, 2-5, E, Fの入力エ ネルギーが他の配置よりも大きくなり、ダンパー配置の違いによる $V_{D'}(W_{p(s)})$ の大小関係が評価値と大きく異なる。図 6(a), (b)の $d_{(s)}$ より,評価値に着目すると、1-6<2-5<EとF<34<AとB<CとD <chidoriの順に小さくなっている。ART HACHI では、入力倍率1.5 倍で評価値と応答値のプロットに大きな差があるが,全ての入力倍 率においてダンパー配置の違いによる優劣を概ね捉えることが出 来る。ART TOMA では、評価値と応答値のプロットの傾向が良く 似ている。なお、図示していないが、他の2波においても、評価値 は応答値の傾向を十分に捉えていることを確認した。

以上より、ダンパー配置の違いによる制振効果の優劣は、応答値 に代わり評価値により捉えられると考える。また、応答値では、ダ ンパー配置の違いにより共振現象を起こし、制振効果の優劣の判断 が難しいものがあった。これを踏まえても、静的解析のみを用いる 本評価手法は、応答値の妥当性を確認する一つの判断材料として有 効であると考える。

7. おわりに

本報では、骨組特性値を用いたせん断モデルに対し、エネルギー の釣合に基づく応答予測法を適用した制振効果の評価手法を提案 し、ダンパー配置の違いによる制振効果の優劣を捉えられることを 示した。また、30 階鋼構造建物に本評価手法を適用し、部材レベ ルモデルの応答値との比較することで精度を確認した。

本評価手法では、最大層間変形角および付加系の等価繰り返し数 を設定することで、あるダンパー量で建物が吸収し得るエネルギー



図6 ダンパー配置の違いによる評価($V_D'_{(y)}, \alpha'_{(y)}, d\alpha_{y1}=0.015$) を評価することが出来る。今後、検討を重ね、ある入力地震動に対

する概略設計としての活用方法を目指す。

参考文献

- 古谷慶, 添田幸平, 佐藤大樹, 北村春幸, 石井正人, 吉江慶祐, 宮崎充, 佐々木和彦, 岩崎雄一, 履歴ダンパーを有する超高層弾性架構の実効変 形比に着目した制振性能評価, 構造工学論文集, pp197-208, 2012.3
- 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,Vol.75, No.647, pp103-112, 2010.1
- 秋山宏:エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計,技報堂出版, 1997
- 4) 北村春幸:性能設計のための建築振動解析入門 第二版, 彰国社, 2009.4

謝辞

本研究は、日建設計、オイレス工業、東京理科大学北村研究室による共同 研究の成果の一部を用いたものです。

*1 東京理科大学 *2 (株)日建設計 *3 オイレス工業(株)