**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)	   地震動の違いが2次剛性の異なる制振構造の応答特性に及ぼす影響の分   析
Title(English)	
著者(和文)	
Authors(English)	Takatoshi Iwamori, Daiki Sato
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 529-532
Citation(English)	, , , pp. 529-532
 発行日 / Pub. date	2016, 3

# 地震動の違いが2次剛性の異なる制振構造の応答特性に及ぼす影響の分析

構造一振動

正会員 〇岩森貴寿

正会員 佐藤大樹

制振構造 2 次剛性 履歴ダンパー

応答特性 等価せん断型モデル 告示波

# 1. はじめに

耐震計算法として構造骨組のエネルギー吸収能力により,建物の耐震安全性を確保するエネルギーの釣合に基づ く応答予測法<sup>1</sup>(以降,エネルギー法と呼ぶ)が規定されている。

これまで,制振構造では主架構が弾性に留まることを目 標に設計されてきたが,想定を大きく超える地震動に対し ては,制振構造においても主架構が塑性化することを考慮 して設計を行う必要がある<sup>1)</sup>。文献 2), 3)では主架構の塑 性化を考慮したエネルギーの釣合に基づく制振構造の設 計法について提案している。しかし,文献 2), 3)では主架 構の復元力特性は塑性変形時の剛性を考えない完全弾塑 性型としている。実際の建物では塑性変形時においても剛 性を有している。筆者らは履歴ダンパーを設置した制振構 造において,主架構の塑性変形時の剛性(以降,2次剛性と 呼ぶ)をパラメータとして,10 質点系等価せん断型モデル による時刻歴応答解析を行い,2次剛性の違いが応答に及 ぼす影響について分析を行った。。ただし,その際に検討 用地震動は1種類の告示波を用いた。

そこで、本報では、2種類の告示波を用いて、主架構が 弾性である場合、完全弾塑性である場合と2次剛性を有す る場合の応答特性をそれぞれ比較し、地震動の違いが主架 構の2次剛性の異なる制振構造の応答に及ぼす影響につ いて検討を行うことを目的とする。

# 2. 諸元の設定と解析概要

## 2.1 主架構とダンパーの諸元

本報では図1に示すように,主架構の復元力特性は2次 剛性比 $_{fp}$ を0~1.00の範囲で変動させた2次剛性 $_{fp}$ ・ $_{fk}$ と する。制振部材は履歴ダンパー(以降,ダンパーと呼ぶ)を



対象として,復元力特性は2次剛性を有さない完全弾塑性型とする。本報では,主架構とダンパーを合わせたものを 全体架構と呼ぶ。

図2に解析モデルの概要を示す。本報では文献 3), 5)を 参考に標準層せん断力係数  $C_0=0.2\sim0.3$  で許容応力度設計 された固有周期が 1.0 s の 10 層の鋼構造建物の平均的な剛 性・耐力分布を単純化した 10 質点系等価せん断型モデル を用いる <sup>4)</sup>。質量分布を等分布(9.8kN・s<sup>2</sup>/cm),主架構の剛 性分布を台形分布(最上層が最下層の 1/2)とする。主架構の 剛性  $t_k$ (は(1)式<sup>6</sup>で求められる。

$${}_{f}k_{1} = \frac{{}_{s}\omega^{2} \cdot m_{1} \cdot {}_{s}\phi_{1} + k_{2}({}_{s}\phi_{2} - {}_{s}\phi_{1})}{{}_{s}\phi_{1}}$$
(1a)

$${}_{f}k_{i} = \frac{{}_{s}\omega^{2} \cdot m_{i} \cdot {}_{s}\phi_{i} + k_{i+1}({}_{s}\phi_{i+1} - {}_{s}\phi_{i})}{{}_{s}\phi_{i} - {}_{s}\phi_{i-1}} \{i = (N-1)\sim 2\}$$
(1b)

$$f k_N = \frac{s \, \omega^2 \cdot m_N \cdot s \, \phi_N}{s \, \phi_N - s \, \phi_{N-1}} \tag{1c}$$

ここで、 $s\omega$ : s次の固有円振動数、 $s\phi_i$ : 第i層, s次の固 有モード、g: 重力加速度、N: 全層数、 $f\alpha_{yi}$ : 第i層の主 架構の降伏層せん断力係数である。このとき、固有円振動 数および、固有モードは固有値解析を行い算出されるが、 固有値解析を行うには剛性が必要となる。そのため、剛性 分布が台形分布(最上層が最下層の 1/2)となる剛性を用い て、固有値解析を行い、1 次の固有モード  $1\phi_i$ を得る。 $1\phi_i$ と  $1\omega(=2\pi_1f: f=1 \text{ Hz})$ を用いて(1)式から剛性を再度求 める。構造減衰は主架構の 1 次固有周期  $f_1T = 1.0 \text{ s}$ に対し て h = 2%となる剛性比例型とする。降伏層せん断力  $fQ_{yi}$ を台形分布とする。降伏層せん断力  $fQ_{yi}$ は(2)式で求められ る。

$${}_{f}Q_{y1} = {}_{f}\alpha_{y1} \cdot \sum_{j=1}^{N} m_{j} \cdot g , {}_{f}Q_{yi} = {}_{f}Q_{y1} \cdot {}_{f}\lambda_{i}$$
(2a,b)

ここで、 $_f \lambda_i$ :第1層の主架構の降伏せん断力に対する第i層の主架構の降伏せん断力の比である。

ダンパーは、LY225 級の低降伏点鋼製の座屈拘束ブレー スを階高 4.2mのスパン 6.4m にハの字(角度 54°)で取り付 けることを想定し、ダンパーの降伏層間変形  $d\delta_{yi}$ は全層で 一定値  $d\delta_{yi} = 0.64$ cm とし、降伏層せん断力  $dQ_{yi}$ と剛性  $dk_i$ の高さ方向は秋山が提案する  $\overline{\alpha_i}$ 分布 <sup>1</sup>)に基づく最適降伏 層せん断力分布と一致するように設定した<sup>7</sup>)。ダンパーの 降伏層せん断力  $dQ_{yi}$ は以下の式で求められる。

$${}_{d}Q_{yi} = {}_{d}\alpha_{yi} \cdot \sum_{j=i}^{N} m_{j} \cdot g$$
(3)

$${}_{d}\alpha_{yi} = {}_{d}\alpha_{y1} \cdot \overline{\alpha}_{i} \tag{4}$$

$$\overline{\alpha}_i = 1 + 1.5927 \, x' - 11.8519 \, x'^2 + 42.5833 \, x'^3 - 59.4827 \, x'^4$$

$$+ 30.1586 \, x'^5$$
(5)

 $\overline{\alpha}_i = 1 + 0.5x' \tag{6}$ 

$$x' = \frac{1}{N} \tag{7}$$

ここで、 $d\alpha_{yi}$ :第i層のダンパーの降伏層せん断力係数である。ダンパーの1次剛性 $_{dk_i}$ は次式より求められる。  $_{dk_i = dQ_{yi}/d\delta_{yi}}$  (8)



# 2.2 解析パラメータおよび入力地震動概要

本報では表1に示すように,解析パラメータとして主架 構の降伏層せん断力係数 $_f \alpha_{y1}=0.1$ 、0.15、0.2 とする3つの 基本モデルを作成し,文献4)にて得られた結果から3つの 2 次剛性比 $_f p$  (= 0.00~1.00)を設定する。ここで, $_f p$  = 0.00 は2 次剛性を有さない完全弾塑性型の復元力特性を意味 し, $_f p$  = 1.00 は主架構が塑性化しない弾性設定であること を意味する。本報では入力地震動の違いによる傾向を把握 することを目的としているため, $_f \alpha_{y1}$  = 0.10 についてのみ 述べる。

検討用地震動は、コーナー周期  $T_c$ =0.64s 以降の領域で、 擬似速度応答スペクトル<sub>p</sub>S<sub>V</sub> = 100 cm/s (h = 5%)となる模 擬地震動波形 ART HACHI (位相特性: HACHINOHE 1968 EW) と ART KOBE(位相特性: JMA KOBE 1995 NS)を用い る<sup>8)</sup>。それぞれの加速度波形(0~300 s)を図 3 に示す。ART HACHI では加振終了後の残留層間変形を評価できるよう に 505 s 以降を 0 cm/s<sup>2</sup> とし、合計で継続時間は 550 s とす る。ART KOBE も ART HACHI と同様に加振終了後の残留 層間変形を評価できるように 270 s 以降を 0 cm/s<sup>2</sup> とし,合 計で継続時間は 300 s とする。両地震動ともに解析時間刻 み $\Delta t = 0.01$  s とする。図 4 に加速度応答スペクトル  $S_A$ ,擬 似速度応答スペクトル  $_pS_V$ ,変位応答スペクトル  $S_D$ および エネルギースペクトル  $V_E$ (固有周期  $T = 0 \sim 4$  s)を示す。ART HACHI と ART KOBE を比較すると最大加速度は ART HACHI の方が大きく,エネルギースペクトルを見ると ART HACHI の方が約 1.8 倍大きい事がわかる。

表1 解析パラメータ



# 3. 地震動と2次剛性の違いが応答特性に及ぼす影響

本章では、時刻歴応答解析を行った結果として、各層で 算出される応答の最大値から、最も大きい応答が現れる層 の応答値に着目して応答特性の検討を行う<sup>4</sup>。

#### 3.1 絶対加速度,相対速度,相対変位

図5にダンパー量<sub>d</sub>ay1に対する最大絶対加速度、最大相 対速度、最大相対変位を、図6にfp=0.00に対するfp= 0.50, 1.00 の比率βをそれぞれ示す。最大絶対加速度では両 地震動ともに $_f p = 0.00 \ge _f p = 0.50$ の場合での値が概ね一 致しており、地震動の違いと2次剛性による影響が小さい 事が確認できる(図 5)。fp=1.00の場合では ART HACHI は  $d\alpha_{y1} = 0.10$  で最も応答が小さくなるが、ART KOBE は  $d\alpha_{y1}$ = 0.16 で最も応答が小さくなることが確認できる(図 5)。 最大相対速度を見ると、両地震動ともにfpによる差異が 大きい事より、2次剛性による影響が大きい事がわかる(図 5)。地震動の違いに着目すると、両地震動ともに fp=0.00, 0.50, 1.00の順に応答が大きくなる事がわかる(図 6)。最大 相対変位では両地震動ともにダンパー量が大きくなるに つれて応答が小さくなる事が確認できる(図 5)。両地震動 ともに $_d\alpha_{v1} = 0.00 \sim 0.04$ の範囲で $_f p$ による差異が大きく,  $d\alpha_{v1} = 0.10 \sim 0.20$ の範囲ではfpによる差異が小さくなる事 が確認できる(図 6)。



#### 3.2 層間変形,残留層間変形,せん断力係数

図7にダンパー量<sub>d</sub>α<sub>y1</sub>に対する最大層間変形,残留層間 変形,第1層の全体架構の最大せん断力係数を,図8に fp=0.00 に対する fp=0.50, 1.00 の比率βをそれぞれ示す。 最大層間変形では $_{f}p = 0.00$ の場合で最も大きくなる事が わかる(図 7)。 day1=0.00~0.04 の範囲では fp=0.50 で最大 層間変形が最も小さく, dαy1 = 0.10~0.16 の範囲ではfp = 1.00 で最大層間変形が小さくなる事がわかる(図 7)。残留 層間変形を見ると、fp=0.00の場合で層間変形角 R=1/200 より大きくなる事が確認できる(図 7)。 $_f p = 0.50$ の場合で は $_{f}p = 0.00$ に対して残留層間変形が小さくなる事がわか る(図 8)。fp = 0.50の場合では2次剛性比が大きいため、 塑性変形時にも2次剛性fp·fkiを有している事から地震終 了後の層間変形が減少する量が大きい事がわかる。第1層 の全体架構の最大せん断力では、両地震動ともに同様な傾 向を示している事が確認できる(図7)。2次剛性比の違いに 着目すると、fp=0.00, 0.50, 1.00の順に大きくなる事が わかる(図7)。



## 3.3 入力エネルギーと各エネルギー吸収分担率

図9にダンパー量<sub>d</sub>av1に対する地震終了時の入力エネル ギーE,入力エネルギーE に対する主架構の減衰によるエ ネルギー吸収分担率 fWh/E,入力エネルギーE に対する主 架構の累積塑性ひずみエネルギー分担率 f Wp/E,入力エネ ルギーEに対するダンパーの累積塑性ひずみエネルギー分 担率  $dW_p/E$  を示す。図 10 に fp = 0.00 に対する fp = 0.50, 1.00 の比率βをそれぞれ示す。入力エネルギーでは ART HACHI の方が ART KOBE よりも大きくなる事がわかる (図 9)。これは図 4 で示したエネルギースペクトルからも 同様な傾向が確認できる。fWh/Eでは入力エネルギーと同 様に ART HACHI の方が ART KOBE よりも大きくなる事 がわかる(図 9)。両地震動ともに fp=0.00, 0.50 での fWh/E が同様な傾向となることが確認できる(図 9)。fWp/Eでも両 地震動ともに $_{fp} = 0.00, 0.50$  での $_{fW_{p}/E}$ が同様な傾向とな ることが確認できる(図 9)。 $_dW_p/E$ では ART KOBE の方が ダンパーの累積塑性ひずみエネルギー量が大きいことが わかる。両地震動ともにfp=0.00, 0.50, 1.00の順に大き



くなる事がわかる。両地震動ともにダンパー量  $_{d\alpha_{y1}}$ が大き くなるにつれて  $_{dW_{p}}$ が大きくなる事が確認できる(図 9)。

# 4. まとめ

本報では、2種類の告示波を用いて、主架構が弾性で ある場合、完全弾塑性である場合および2次剛性を有す る場合の応答特性をそれぞれ比較し、地震動の違いが主 架構の2次剛性の異なる制振構造の応答に及ぼす影響に ついて検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- 主架構が塑性する範囲(rp = 0.00 ~ 0.50)では最大絶対加速度,入力エネルギーおよび<sub>f</sub>W<sub>p</sub>/Eは2次剛性による影響が小さくなる事が確認できた。
- (2) *fWh/E*では文献 4)で得られた結果とは異なり、ART KOBEを入力した場合、2次剛性による影響が大きい事がわかった。
- (3) 層間変形,残留層間変形および入力エネルギーは地 震動の違いによる影響が大きい事がわかった。

## 参考文献

- 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 1999.11
- 長谷川隆,西村功,向井昭義,石原直,加村久哉:エネル ギーの釣合に基づく履歴型ダンパー付鉄骨造骨組の地震 応答予測,日本建築学会構造系論文集,第582号,pp.147-154,2004.8
- 3) 北村春幸,財津和廉,馬谷原伴恵:主架構の塑性化を考慮した制振構造物のエネルギーの釣合に基づく応答評価, 日本建築学会構造系論文集,第599号,pp.71-78,2006.1
- 4) 岩森貴寿,佐藤大樹:主架構弾塑性変形時の剛性に着目 した履歴ダンパーを有する制振構造の応答特性の分析, 日本地震工学会第11回年次大会梗概集, P2-12, 2015.11
- 5) 佐藤大輔,北村春幸,佐藤大樹,佐藤利昭,山口路夫,脇 田直弥,綿貫雄太:履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用 した制振構造のエネルギーの釣合に基づく応答予測法, 日本建築学会構造系論文集,第699号,pp.631-640,2014.5
- 6) 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲郎: 粘弾性ダンパーの振動 数依存性が風応答に与える影響,日本建築学会構造系論 文集, 第 635 号, pp.75-82, 2009.1
- 7) 松澤祐介,佐藤大樹,北村春幸,山口路夫,脇田直弥,松 蔭知明:主架構の塑性化の程度を考慮したエネルギーの 釣合に基づく第1層の応答評価法,日本建築学会大会学 術講演梗概集,2013.8
- 8) 栗林晃司,佐藤大樹,北村春幸,山口路夫,西本晃治:実 効変形を考慮した履歴減衰型制振部材を有する鋼構造建 物のエネルギーの釣合に基づく応答予測法,日本建築学 会構造系論文集,第 661 号, pp.543-552, 2011.3
  - \*1 東京工業大学 大学院性
  - \*2 東京工業大学 准教授・博士(工学)