

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	主架構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
Title(English)	
著者(和文)	岩森貴寿, 佐藤大樹
Authors(English)	Takatoshi Iwamori, Daiki Sato
出典(和文)	日本地震工学会第11回年次大会梗概集, , , P2-12
Citation(English)	Proceedings of the 11th Annual Meeting of Japan Association for Earthquake Engineering, , , P2-12
発行日 / Pub. date	2015, 11



## 主架構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

岩森貴寿<sup>1)</sup>、佐藤大樹<sup>2)</sup>

1) 学生会員 東京工業大学大学院、大学院生  
e-mail : iwamori.t.aa@m.titech.ac.jp

2) 正会員 東京工業大学建築物理研究センター、准教授、博士(工学)  
e-mail : daiki-s@serc.titech.ac.jp

### 要 約

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、制振構造においても主架構が塑性化することを考慮した設計を行う必要がある。しかし、主架構の塑性変形時の剛性に着目した制振構造の応答特性に関する研究は少ない。本報では、10質点系等価せん断型モデルを作成し、主架構の降伏耐力、2次剛性比、制振部材の降伏耐力をパラメーターとして、時刻歴応答解析を行った。解析結果より、応答特性を把握し、2次剛性比が応答にどのような影響を与えるかを検討した。

キーワード： 2次剛性比、制振構造、履歴ダンパー、応答特性

### 1. はじめに

耐震構造は、構造骨組の塑性化によるエネルギー吸収能力を高める方法で、大地震時に建物が倒壊しないように設計されてきた。このような大地震に対する構造骨組の耐震設計法として、降伏層せん断力分布に依存して、構造骨組が吸収すべきエネルギーを配分し、降伏耐力が小さい層への損傷集中を評価したエネルギーの釣合に基づく耐震設計法（以降、エネルギー法と呼ぶ）が提示されている<sup>1)</sup>。

現在、高耐震性能の確保や既存建物の耐震補強の手段として、制振構造が多くの建物に採用されている。構造骨組の各階に履歴減衰型制振部材を取り付けた制振構造は、剛性が低く降伏強度の高い主架構（柔要素）に、剛性が高く降伏強度の低いエネルギー吸収能力に優れた制振部材（剛要素）を取り付けた柔剛混合構造の一つである<sup>1)</sup>。入力エネルギーは、柔要素である主架構の弾性歪エネルギーとして蓄えられ、主架構の固有周期で交番振動を繰り返す間に、エネルギー消費して、主架構の変形を抑制すると説明される<sup>2)</sup>。これまで制振構造に対しては、主に、主架構が弾性挙動する場合について、最大応答発生時刻におけるエネルギーの釣合式に基づく応答予測式が導出されている<sup>1)3)</sup>。一方、主架構が塑性化する場合には、制振部材の降伏耐力を加えた主架構に対して耐震構造のエネルギー配分式が適用されている<sup>4)6)</sup>。

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、近い将来の来襲が予想される東海・東南海・南海地震や首都直下地震など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た設計を行う必要がある。文献 4)-6) では主架構の塑性変形時の剛性としては2次剛性を有さない完全弾塑性型にモデル化している。しかし、実際の建物の塑性

変形時の剛性は2次剛性を有しているので、2次剛性の違いが応答に影響を及ぼしている可能性がある。そこで、本報では履歴ダンパーを有する制振構造における、主架構の2次剛性比が応答に与える影響を分析することを目的とする。本報では主架構の降伏層せん断力係数、2次剛性比、制振部材の降伏層せん断力係数をパラメーターとした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、応答特性を把握する。

## 2. 主架構と履歴ダンパーの諸元および入力地震動

### 2.1 主架構と履歴ダンパーの諸元

文献5)では主架構が弾性の場合と、主架構と制振部材がともに塑性化する場合に分け、塑性化する場合の復元力特性はともに2次剛性を有さない完全弾塑性型にモデル化している。そこで、本報では図1に示すように、主架構の塑性変形時の剛性を2次剛性 ${}_f p \cdot {}_f k_i$ とし、制振部材(履歴ダンパー)の復元力特性は2次剛性を有しない完全弾塑性型とする。本報では、主架構と制振部材を合わせたものを全体架構と呼ぶ。

図2に本報における解析モデルの概要を示す。本報では文献5)、9)を参考に標準層せん断力係数 $C_0=0.2 \sim 0.3$ で許容応力度設計された固有周期が1.0s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。質量分布が等分布(9.8kN・s<sup>2</sup>/cm)、主架構の剛性分布が台形分布(最上層が最下層の1/2)とする。主架構の剛性 ${}_f k_i$ は(1)式<sup>6)</sup>で求められる。

$${}_f k_1 = \frac{{}_s \omega^2 \cdot m_1 \cdot {}_s \phi_1 + k_2({}_s \phi_2 - {}_s \phi_1)}{{}_s \phi_1} \quad (1a)$$

$${}_f k_i = \frac{{}_s \omega^2 \cdot m_i \cdot {}_s \phi_i + k_{i+1}({}_s \phi_{i+1} - {}_s \phi_i)}{{}_s \phi_i - {}_s \phi_{i-1}} \quad [i = (N-1) \sim 2] \quad (1b)$$

$${}_f k_N = \frac{{}_s \omega^2 \cdot m_N \cdot {}_s \phi_N}{{}_s \phi_N - {}_s \phi_{N-1}} \quad (1c)$$

ここに、 ${}_s \omega$  :  $s$  次の円振動数、 ${}_s \phi_i$  :  $i$  層、 $s$  次の固有モード、 $g$  : 重力加速度、 $N$  : 全層数、 ${}_f \alpha_{yi}$  :  $i$  層の主架構の降伏層せん断力係数、 $j$  : 解析ステップである。このとき、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)となる任意の剛性を用いて、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 ${}_1 \omega (=2\pi \cdot {}_1 f : {}_1 f = 1 \text{ Hz})$ を用いて(1)式から剛性を再度求める。主架構のみの固有値解析を行った結果として、図3に1次～3次までの刺激関数を示す。構造減衰は主架構の1次固有周期 ${}_1 T = 1.0 \text{ s}$ に対して2%となる剛性比例型とする。

降伏層せん断力 ${}_f Q_{yi}$ を台形分布(最上層が最下層の1/2)とする。降伏層せん断力 ${}_f Q_{yi}$ は(2)式で求められる。

$${}_f Q_{y1} = {}_f \alpha_{y1} \cdot \sum_{j=1}^N m_j \cdot g, \quad {}_f Q_{yi} = {}_f Q_{y1} \cdot {}_f \lambda_i \quad (2a, b)$$

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

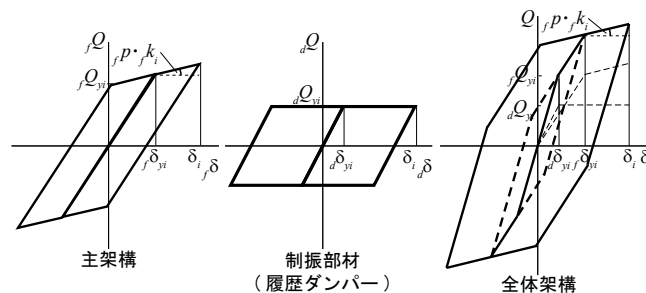


図1 復元力特性

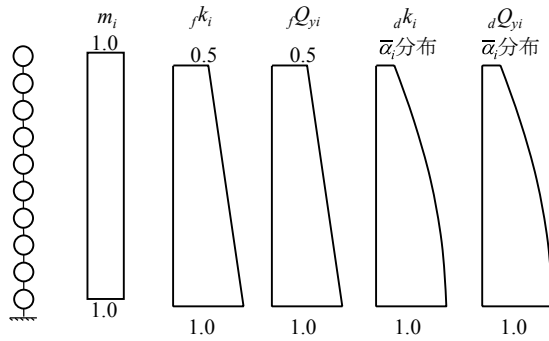


図2 解析モデル概要

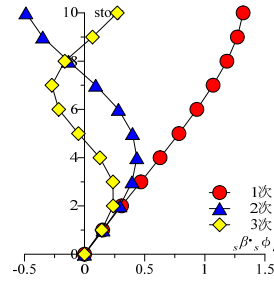


図3 刺激関数

履歴ダンパーは、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に八の字(角度 $54^\circ$ )で取り付けを想定し、履歴ダンパーの降伏層間変形 $d\delta_{yi}$ は全層で一定値 $d\delta_{yi}=0.64\text{cm}$ 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 $\bar{\alpha}_i$ 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>8)</sup>。履歴ダンパーの剛性 $dk_i$ と降伏層せん断力 $dQ_{yi}$ は以下の式で求められる。

$$dQ_{yi} = d\alpha_{yi} \cdot \sum_{j=i}^N m_j \cdot g, \quad d\alpha_{yi} = d\alpha_{y1} \cdot \bar{\alpha}_i, \quad dk_i = dQ_{yi} / d\delta_{yi} \quad (3), (4), (5)$$

$$\bar{\alpha}_i = 1 + 1.5927x' - 11.8519x'^2 + 42.5833x'^3 - 59.4827x'^4 + 30.1586x'^5, \quad x' = \frac{i-1}{N} \quad (6), (7)$$

ここに、 $d\alpha_{yi}$ :  $i$ 層の履歴ダンパーの降伏層せん断力係数である。表1に主架構と履歴ダンパーを合わせた剛性と、その剛性を用いて固有値解析を行い、算出された1~3次の固有周期 $T$ を示す。なお、履歴ダンパーへの変形伝達の障害となる取り付け部材や建物全体の曲げ変形の影響はないと仮定し、各層の層間変形は全て履歴ダンパーの変形に寄与するものとする<sup>7)</sup>。

表1 解析モデルの剛性と固有周期

層	$f_1 T=1.0(\text{s})$				
	$d\alpha_{y1}=0.00$	$d\alpha_{y1}=0.02$	$d\alpha_{y1}=0.04$	$d\alpha_{y1}=0.10$	$d\alpha_{y1}=0.16$
	$f k$ (kN/cm)	$f k + d k$ (kN/cm)	$f k + d k$ (kN/cm)	$f k + d k$ (kN/cm)	$f k + d k$ (kN/cm)
10	10404	11202	12000	14394	16788
9	11560	12767	13974	17593	21213
8	12716	14248	15779	20373	24967
7	13872	15701	17530	23016	28502
6	15028	17101	19174	25392	31610
5	16184	18439	20694	27459	34224
4	17341	19762	22183	29446	36709
3	18497	21137	23777	31698	39618
2	19653	22564	25475	34207	42940
1	20809	23810	26811	35815	44819
$_1 T(\text{s})$	1.00	0.94	0.88	0.77	0.69
$_2 T(\text{s})$	0.36	0.34	0.32	0.28	0.26
$_3 T(\text{s})$	0.22	0.21	0.20	0.17	0.16

## 2.2 解析パラメーターおよび入力地震動概要

本報では表2に示すように、解析パラメーター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、5つの2次剛性比 $f p (=0.00 \sim 1.00)$ を設定する。ここで、 $f p = 0.00$ は2次剛性を有し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。また、5つの履歴ダンパーの降伏層せん断力係数 $d\alpha_{y1} (=0.00 \sim 0.16)$ を設定する。ここで、 $d\alpha_{y1}=0.00$ は履歴ダンパーがない主架構のみであることを意味する。本報では表2に示す解

析パラメーターのなかで、 $f\alpha_{y1}$ の違いによる傾向を把握しやすいように、 $f\alpha_{y1}=0.10, 0.20$ についてのみ述べる。

検用地震動は、コーナー周期  $T_c=0.64$  s 以降の領域で、速度応答スペクトル  $S_V=100$  cm/s ( $h=5\%$ ) となる模擬地震動波形 ART HACHI (位相特性：HACHINOHE 1968 EW) を用いる<sup>7)</sup>。ART HACHI の加速度波形を図 4 に示す。入力波の継続時間は 100 s で、解析時間刻み  $\Delta t=0.01$  s とする。加振終了後の残留層間変形を評価するために 82 s 以降を  $0$  cm/s<sup>2</sup> としている。図 5 に加速度スペクトル  $S_A$ 、速度スペクトル  $S_V$ 、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。なお、図 5 (d) のエネルギースペクトルにプロットした  $V_E$  (図中  $\times$ ) については 3 章にて後述する。

表 2 解析パラメーター

主架構	$f\alpha_{y1}$	0.10, 0.15, 0.20
	$f\beta$	0.00, 0.02, 0.10, 0.50, 1.00
ダンパー	$d\alpha_{y1}$	0.00, 0.02, 0.04, 0.10, 0.16

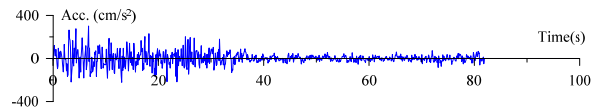


図 4 入力加速度波形

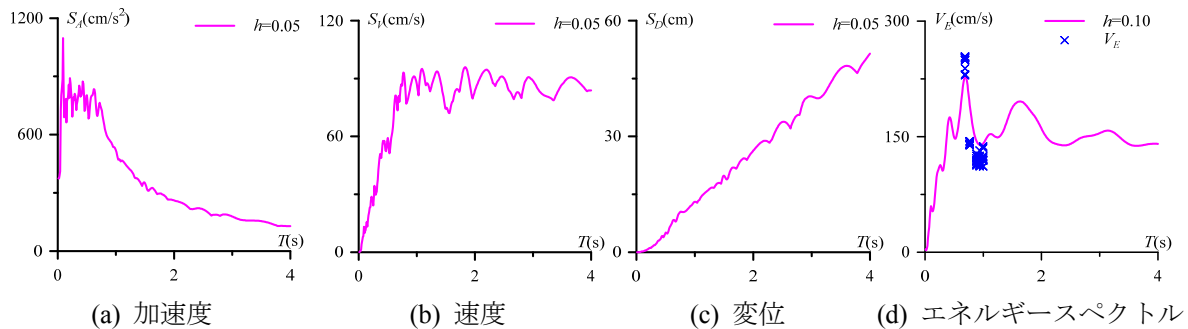


図 5 応答スペクトルとエネルギースペクトル (ART HACHI)

### 3. 時刻歴応答解析結果

#### 3.1 最上層の最大絶対加速度、最大相対速度、最大相対変位

図 6 に最上層の最大絶対加速度を示す。図 6(a) から、 $f\beta=0.00, 0.02$  では  $d\alpha_{y1}$  が増加するにつれて、最大絶対加速度が大きくなることを確認できる。 $f\beta=0.10, 0.50$  では、 $d\alpha_{y1}=0.02$  の時、最大絶対加速度が  $d\alpha_{y1}=0.00$  の時よりわずかに下がるが、それ以降では  $d\alpha_{y1}$  が増加するにつれて最大絶対加速度が大きくなるのがわかる。 $f\beta=1.00$  の時、 $d\alpha_{y1}=0.00\sim 0.04$  までは最大絶対加速度が減少する傾向にあるが、 $d\alpha_{y1}=0.10, 0.16$  では  $d\alpha_{y1}=0.04$  よりも最大絶対加速度が増加していく傾向があるのがわかる。主架構の降伏耐力を高めた場合 (図 6(b))、 $f\beta=0.00\sim 0.50$  では  $d\alpha_{y1}=0.02$  の時に最大絶対加速度が  $d\alpha_{y1}=0.00$  の時より下がるが、 $d\alpha_{y1}=0.04\sim 0.16$ の間では  $d\alpha_{y1}$  が増加するにつれて、最大絶対加速度が大きくなるのがわかる。

最上層の最大相対速度の結果を図 7 に示す。図 7(a) を見ると、 $f\beta=0.00\sim 0.10$  での最大相対速度は  $d\alpha_{y1}$  が大きくなるにつれて増加することが確認できる。 $f\beta=0.50$  では、最大相対速度は  $d\alpha_{y1}=0.00\sim 0.04$  で大きくなっていき、 $d\alpha_{y1}=0.04\sim 0.16$  間では小さくなっていくことがわかる。 $f\beta=1.00$  の時、最大相対速度は  $d\alpha_{y1}$  が大きくなるにつれて小さくなることを確認できる。図 7(a) と図 7(b) を比較すると、全体の傾向としては概ね同様であるが、図 7(b) の方が最大相対速度の値が大きくなるのがわかる。

図 8 に最上層の最大相対変位の結果を示す。図 8(a) に着目すると、 $f\beta=0.00\sim 0.10$  での最大相対変位は 7~15 cm の間で値が増減していることが確認できる。 $f\beta=0.50, 1.00$  の時、 $d\alpha_{y1}$  が大きくなるにつれて最大相対変位は小さくなる。図 8(b) より、 $f\beta=0.00$  の時  $d\alpha_{y1}=0.02$  で最大相対変位が  $d\alpha_{y1}=0.00$  の時より大きくなり、 $d\alpha_{y1}=0.04\sim 0.10$  で下がり、 $d\alpha_{y1}=0.16$  で大きくなることを確認できる。 $f\beta=0.02, 0.10$  では  $d\alpha_{y1}=0.02$  の時に  $d\alpha_{y1}=0.00$  の時より最大相対変位が大きくなり、 $d\alpha_{y1}=0.04\sim 0.16$  では最大相対変位が小さくなるのがわかる。 $f\beta=0.50$  の時、 $d\alpha_{y1}$  が大きくなるにつれて最大相対変位は小さくなっていく。

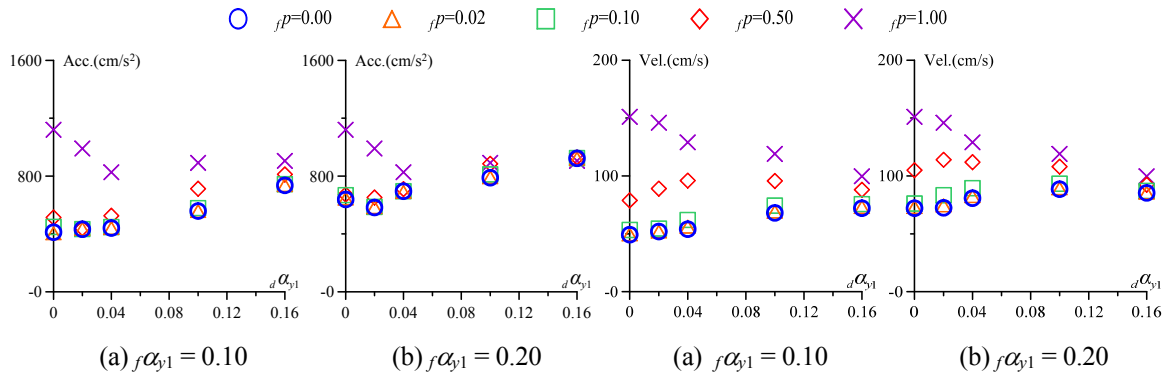


図 6 最上層の最大絶対加速度

図 7 最上層の最大相対速度

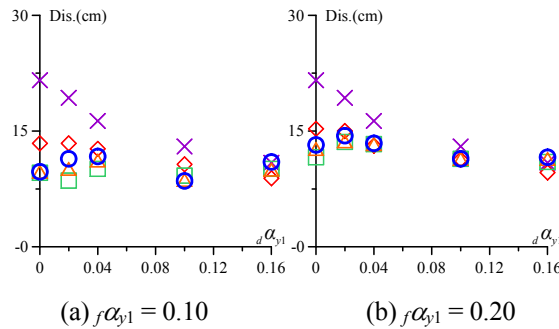


図 8 最上層の最大相対変位

### 3.2 最大層間変形、残留層間変形、1層の全体架構の最大せん断力係数

図 9 に最大層間変形を示す。図 9(a)より、 $fp = 0.00, 0.10$  では  $d\alpha_{y1} = 0.00 \sim 0.04$  の時、最大層間変形が右上がりに大きくなり、 $d\alpha_{y1} = 0.10$  の時に小さくなり、 $d\alpha_{y1} = 0.16$  で大きくなるのがわかる。 $fp = 0.02, 0.50$  では  $d\alpha_{y1} = 0.02$  では  $d\alpha_{y1} = 0.00$  の時より最大層間変形が大きくなり、 $d\alpha_{y1} = 0.04 \sim 0.16$  で小さくなるのが確認できる。 $fp = 1.00$  では  $d\alpha_{y1}$  が大きくなるにつれて最大層間変形は小さくなるのがわかる。図 9(b)では、図 9(a)と同様な傾向を示すが、最大層間変形の値が図 9(a)よりも大きくなるのがわかる。

図 10 に残留層間変形を示す。ここで、層間変形角  $R = 1/200$  となる層間変形  $\delta$  を点線で、層間変形角  $R = 1/100$  となる層間変形を実線で示す。図 10 (a)より、 $fp = 0.00$  かつ  $d\alpha_{y1} = 0.02, 0.04$  の時に  $R = 1/200$  となる層間変形より大きいことがわかる。図 10 (b)から、 $fp = 0.00$  かつ  $d\alpha_{y1} = 0.00$  の時に  $R = 1/200$  となる層間変形より大きいことが確認できる。

図 11 に 1 層の全体架構の最大せん断力係数を示す。図 11(a)より、 $fp = 0.00$  では  $d\alpha_{y1}$  によらず、1 層の全体架構の最大せん断力係数は主架構と履歴ダンパーの 1 層の降伏層せん断力係数の和となっている。これは主架構と履歴ダンパーが塑性化しているためである。 $fp = 0.02, 0.10$  においては  $d\alpha_{y1}$  によらず、1 層の全体架構の最大せん断力係数は全体架構の 1 層の降伏層せん断力係数の値からあまり大きくならないことがわかる。 $fp = 0.50$  では全体架構の 1 層の最大せん断力係数は全体架構の 1 層の降伏層せん断力係数の値よりも大きくなるのがわかる。主架構の降伏耐力を高めた場合 (図 11(b)) では、図 11(a)と同様な傾向は変わらないが、全体架構の最大せん断力係数の値は図 11(a)よりも全体的に大きくなるのがわかる。

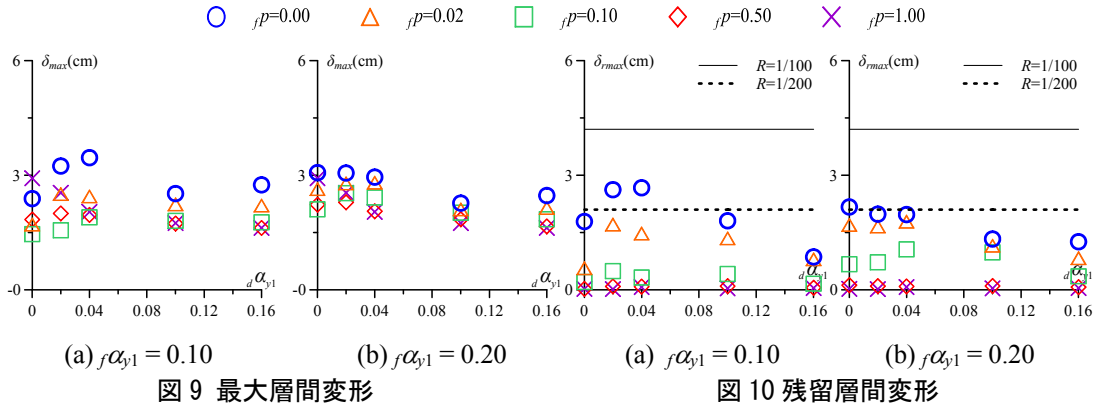


図9 最大層間変形

図10 残留層間変形

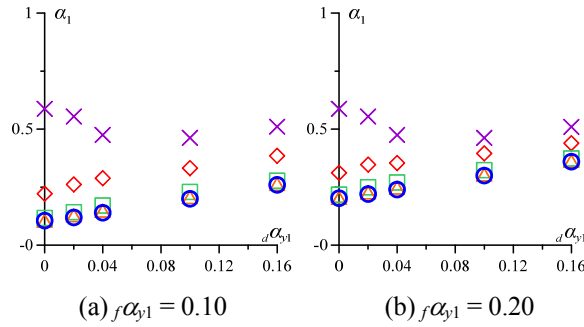


図11 1層の全体架構の最大せん断力係数

### 3.3 主架構と制振部材のエネルギー配分

地震終了時におけるエネルギーの釣合式は次式で表される<sup>1)</sup>。

$${}_f W_h + {}_f W_p + {}_d W_p = E \quad (6)$$

ここで、 $E$ ：入力エネルギー、 ${}_f W_h$ ：主架構の減衰によるエネルギー吸収量、 ${}_f W_p$ ：主架構の累積塑性ひずみエネルギー、 ${}_d W_p$ ：履歴ダンパーの累積塑性ひずみエネルギーである。 $E$ 、 ${}_f W_h$ 、 ${}_f W_p$ 、 ${}_d W_p$ は次式でそれぞれ求められる。

$$E_i = -\frac{1}{2} \cdot m_i \cdot \sum_{i=1}^{N_0} \left\{ (\ddot{z}^{(j+1)} \cdot \dot{y}_i^{(j+1)} + \ddot{z}^{(j)} \cdot \dot{y}_i^{(j)}) \cdot \Delta t \right\}, \quad E = \sum_{i=1}^N E_i \quad (7a, b)$$

$${}_f W_{hi} = \frac{1}{2} \cdot \sum_{j=1}^{N_0} ({}_f Q_{hi}^{(j+1)} + {}_f Q_{hi}^{(j)}) ({}_f \delta_i^{(j+1)} - {}_f \delta_i^{(j)}), \quad {}_f W_h = \sum_{i=1}^N {}_f W_{hi} \quad (8a, b)$$

$${}_f W_{pi} = \frac{1}{2} \cdot \sum_{j=1}^{N_0} ({}_f Q_i^{(j+1)} + {}_f Q_i^{(j)}) ({}_f \delta_i^{(j+1)} - {}_f \delta_i^{(j)}), \quad {}_f W_p = \sum_{i=1}^N {}_f W_{pi} \quad (9a, b)$$

$${}_d W_{pi} = \frac{1}{2} \cdot \sum_{j=1}^{N_0} ({}_d Q_i^{(j+1)} + {}_d Q_i^{(j)}) ({}_d \delta_i^{(j+1)} - {}_d \delta_i^{(j)}), \quad {}_d W_p = \sum_{i=1}^N {}_d W_{pi} \quad (10a, b)$$

ここで、 $\ddot{z}$ ：入力加速度、 $\dot{y}_i$ ： $i$ 層の相対速度応答、 ${}_f Q_{hi}$ ： $i$ 層の減衰力、 ${}_f \delta_i$ ： $i$ 層の主架構の層間変形、 ${}_f Q_i$ ： $i$ 層の主架構の減衰なしのせん断力、 ${}_d Q_i$ ： $i$ 層の制振部材のせん断力、 $N_0$ ：データ数である。

入力エネルギー $E$ の速度換算値 $V_E$ は次式で表される<sup>1)</sup>。

$$V_E = \sqrt{\frac{2E}{M}} \quad (11)$$

ここで、 $M$ ：全体質量である。図 5(d)に示す  $V_E$ (図中×)は解析により算出された入力エネルギー $E$ (式(7b))を用いて、(11)式により求められた  $V_E$ を、全体架構の1次固有周期でプロットしたものである。図 5(d)により、全体架構の固有周期に対してモデルに入力されているエネルギー量がわかる。

図 12 に入力エネルギー $E$ を示す。図 12(a)から、 $f_p = 0.00 \sim 0.10$  では  $d\alpha_{y1} = 0.00 \sim 0.02$  の間では入力エネルギーは減少し  $d\alpha_{y1} = 0.04 \sim 0.16$  では入力エネルギーが増加する傾向となることがわかる。 $f_p = 0.50$  では  $d\alpha_{y1} = 0.00 \sim 0.04$  の間では入力エネルギーは減少し、 $d\alpha_{y1} = 0.10, 0.16$  では入力エネルギーが増加する傾向となることがわかる。 $f_p = 1.00$  では  $d\alpha_{y1} = 0.16$  のとき入力エネルギーが、 $f_p = 0.50$  での入力エネルギーに対して 13%程度大きくなることを確認できる。この理由は  $f_p = 1.00$  以外の時、主架構が塑性したことにより主架構の剛性が低下し、図 6(d)のエネルギースペクトルで見られるピーク時の弾性状態での固有周期より長くなったためだと考えられる。図 12(b)では、図 12(a)と同じ傾向が見られるが、入力エネルギーの値が図 12(a)より大きくなることわかる。

図 13 に入力エネルギー $E$ に対する主架構の減衰によるエネルギー吸収分担率  $fW_h/E$ を示す。図 13(a)より、 $f_p = 0.00 \sim 0.50$  での  $fW_h/E$  は  $d\alpha_{y1} = 0.00 \sim 0.16$  では分担率の 30%付近で増減していることが確認できる。 $f_p = 1.00$  での  $fW_h/E$  は  $d\alpha_{y1}$  が大きくなるにつれて小さくなることを確認できる。図 13(b)でも同様な傾向であるが、 $fW_h/E$  の値は図 13(a)よりも大きいことがわかる。

図 14 に入力エネルギー $E$ に対する主架構の累積塑性ひずみエネルギー分担率  $fW_p/E$ を示す。図 14(a)から、 $d\alpha_{y1} = 0.16$  を除き  $f_p$  によらず  $d\alpha_{y1}$  が大きくなるにつれて  $fW_p/E$  は小さくなることわかる。これは入力エネルギーがエネルギースペクトル上のピーク時に近いいため主架構が  $d\alpha_{y1} = 0.10$  の時より塑性の度合いが大きくなってしまい、 $fW_p$  が増加したことが原因とされる。また、主架構の降伏層せん断力係数が履歴ダンパーの降伏層せん断力係数より小さいためだとも考えられる。図 14(b)より、 $f_p$  によらず  $d\alpha_{y1}$  が大きくなるにつれて  $fW_p/E$  は小さくなることわかる。

図 15 に入力エネルギー $E$ に対する履歴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 15(a)から、傾向として  $dW_p/E$  は  $f_p$  によらず  $d\alpha_{y1}$  が大きくなるにつれて大きくなっていることがわかる。 $f_p$  が大きくなるにつれて  $dW_p/E$  の値は大きくなることを確認できる。図 15(b)でも同様な傾向が見られるが、図 15(a)より  $dW_p/E$  の値は大きくなることわかる。

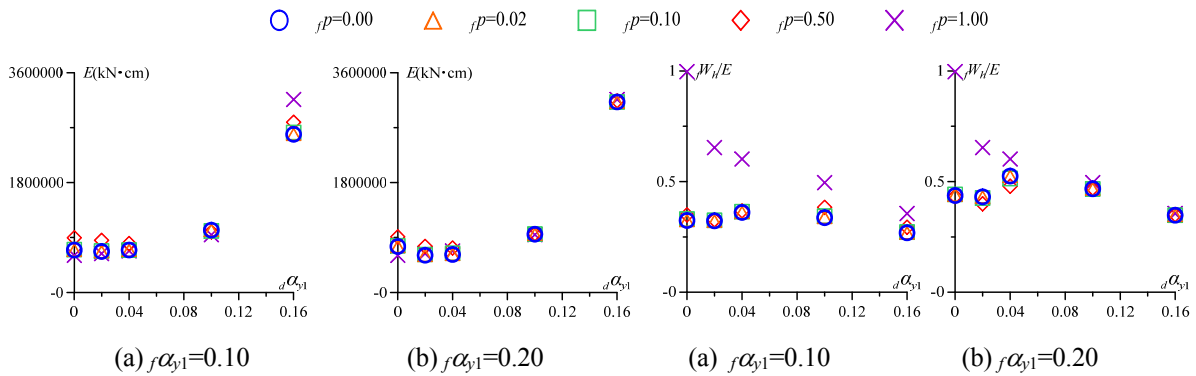


図 12 入力エネルギー

図 13  $fW_h/E$

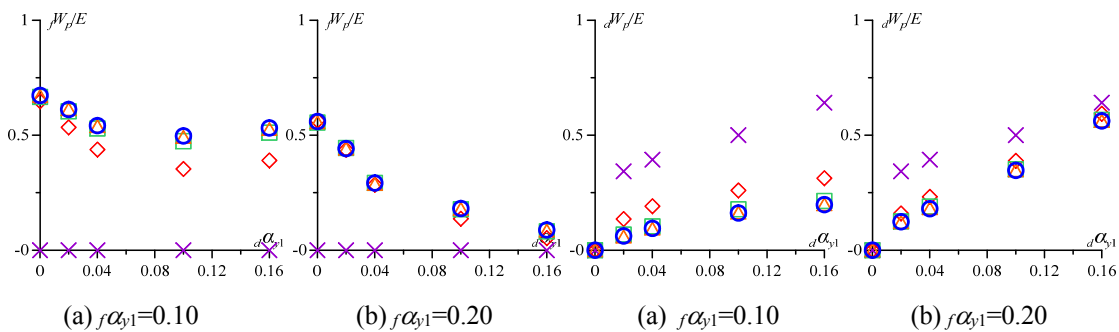


図 14  $fW_p/E$

図 15  $dW_p/E$

#### 4. $f_p$ が応答値に及ぼす影響

図 16 に  $f\alpha_{y1}=0.10$  の時の  $f_p = 0.00$  に対する比率  $\beta$  として (a) は最大絶対加速度、最大相対速度、最大相対変位、(b) は層間変形、1 層の全体架構の最大せん断力係数、残留層間変形、(c) は入力エネルギー、 $fW_h/E$ 、 $fW_p/E$ 、 $dW_p/E$  の結果をそれぞれ示す。図 16(a) では、 $f_p=0.02$ 、 $0.10$  の最大絶対加速度は、 $f_p=0.00$  と概ね等しい値となり、 $f_p=0.50$  かつ  $d\alpha_{y1}=0.00$ 、 $0.10$  の場合では  $f_p=0.00$  の時より 20% 程度大きくなることを確認できる。それに対して  $f_p=0.02$ 、 $0.10$  の最大相対速度は、 $f_p=0.00$  と概ね等しい値となるが、 $f_p=0.50$  の場合では  $f_p=0.00$  の時より 20~70% 程度大きくなることを確認できる。最大相対変位は  $f_p$  と  $d\alpha_{y1}$  によって  $f_p=0.00$  の時より大きくなることもあれば、小さくなることもあることがわかった。以上より絶対加速度、相対速度は  $f_p=0.00$  での値が小さくなることがわかった。

図 16(b) から層間変形、残留層間変形は  $f_p$  による影響が大きく、 $f_p=0.02\sim 1.00$  では  $f_p=0.00$  の時より小さくなることを確認される。1 層の全体架構の最大せん断力係数を見ると  $f_p=0.02\sim 1.00$  では  $f_p=0.00$  の時よりも大きくなることがわかる。

図 16(c) より、 $f_p=0.02$ 、 $0.10$  の入力エネルギー、 $fW_h/E$ 、 $fW_p/E$ 、 $dW_p/E$  は  $f_p=0.00$  の場合と概ね同等であることがわかる。 $f_p=0.50$  の場合での入力エネルギーは  $d\alpha_{y1}=0.00$ 、 $0.02$  の時に  $f_p=0.00$  の時より 20% 以上大きくなることを確認できる。 $fW_p/E$  では、 $f_p=0.50$  の場合で  $f_p=0.00$  より 20% 程度小さくなることを確認できる。 $dW_p/E$  は  $f_p=0.50$  での値が  $f_p=0.00$  の時より 50% 以上大きくなることがわかる。

図 17 に  $f\alpha_{y1}=0.20$  の時  $f_p = 0.00$  に対する比率  $\beta$  として (a) は最大絶対加速度、最大相対速度、最大相対変位、(b) は層間変形、1 層の全体架構の最大せん断力係数、残留層間変形、(c) は入力エネルギー、 $fW_h/E$ 、 $fW_p/E$ 、 $dW_p/E$  の結果をそれぞれ示す。図 17 では、図 16 と概ね同じ傾向を示しているが、 $f\alpha_{y1}=0.10$  の時と比べ比率  $\beta$  の値は小さくなっていることが確認できる。図 17(a) を見ると  $f_p=0.50$  の場合、最大相対変位は  $d\alpha_{y1}=0.00\sim 0.10$  の間で  $f_p=0.00$  のときより 20% 以上大きくなることを確認される。図 17(b) から、 $f\alpha_{y1}$  によらず層間変形、残留層間変形の大きさは  $f_p$  による影響が大きいことがわかる。図 17(c) より、 $fW_p/E$  では、 $f_p=0.50$  の場合  $d\alpha_{y1}=0.10$ 、 $0.16$  で  $f_p=0.00$  より 20% 以上小さくなることがわかる。 $dW_p/E$  は  $f_p=0.50$  で  $d\alpha_{y1}=0.02$ 、 $0.04$  での値が  $f_p=0.00$  の時より 20% 程度大きくなることがわかる。

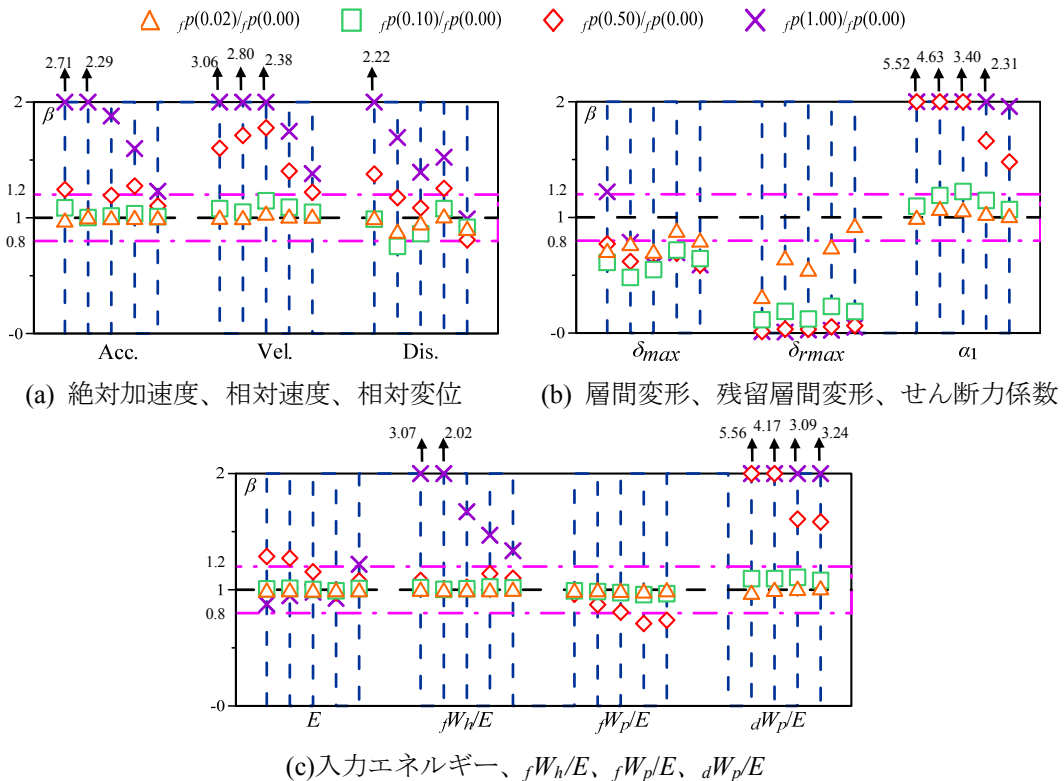


図 16  $f_p$ が及ぼす影響 ( $f\alpha_{y1} = 0.10$ )  
 (左から  $d\alpha_{y1} = 0.00, 0.02, 0.04, 0.10, 0.16$ )

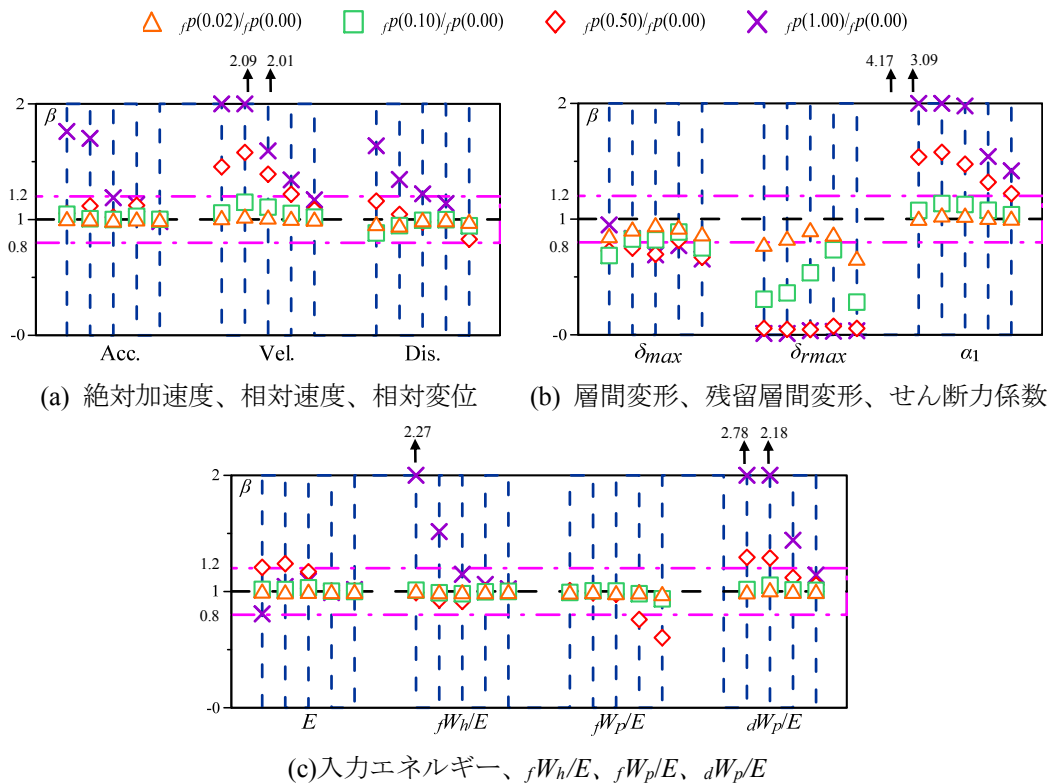


図 17  $f_p$  が及ぼす影響 ( $f\alpha_{y1} = 0.20$ )  
 (左から  $d\alpha_{y1} = 0.00, 0.02, 0.04, 0.10, 0.16$ )

## 5. まとめ

履歴ダンパーを有する制振構造における、主架構の 2 次剛性比が応答に与える影響を分析することを目的とし、主架構の降伏層せん断力係数、2 次剛性比、制振部材の降伏層せん断力係数をパラメータとした 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った。限られたケースであるが、得られた知見を以下に示す。

- (1) 主架構が塑性する範囲 ( $f_p = 0.00 \sim 0.50$ ) で、最大絶対加速度と入力エネルギー、 $fW_h/E$ 、 $fW_p/E$  は 2 次剛性比の差異による影響が小さいことがわかった。
- (2) 主架構の塑性変形時の剛性を 2 次剛性比  $f_p = 0.00$  とした場合では最大相対速度、最大相対変位および  $dW_p/E$  の値が小さくなることが確認できた。

## 参考文献

- 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、1999 年、11 月
- 2) 北村春幸：性能設計のための建築振動解析入門、彰学社、2002 年、9 月
- 3) 原田幸博、秋山宏：エネルギー集中型柔剛混合骨組の耐震設計、日本建築学会構造系論文集、第 472 号、1995 年・6 月、pp. 57-66
- 4) 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、2004 年・8 月、pp. 147-154
- 5) 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、2006 年・1 月、pp. 71-78
- 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、2009 年・1 月、pp. 75-82
- 7) 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、2011 年・3 月、pp. 543-552

- 8) 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年・8月
- 9) 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、2014年、5月、pp. 631-640