

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	2062 履歴型ダンパーを有する鋼構造建物におけるダンパー配置と応答性状に関する研究 : その2:ダンパーの実効変形を考慮したせん断型モデルとエネルギー法における検討(構造)
Title	
著者(和文)	栗林 晃司, 佐藤 大樹, 北村春幸, 山口路夫, 西本晃治
Authors	daiki sato, Haruyuki Kitamura, Michio Yamaguchi, Kohji Nishimoto
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 81, No. 0, 2062
Citation(English)	, Vol. 81, No. 0, 2062
発行日 / Pub. date	2011, 2
rights	日本建築学会
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: <a href="http://ci.nii.ac.jp/naid/110008730302">http://ci.nii.ac.jp/naid/110008730302</a>

履歴型ダンパーを有する鋼構造建物におけるダンパー配置と応答性状に関する研究  
(その2: ダンパーの実効変形を考慮したせん断型モデルとエネルギー法における検討)

構造—振動

鋼構造建物 履歴型ダンパー ダンパー配置

実効変形 エネルギーの釣合 応答予測法

正会員 ○ 栗林晃司<sup>\*1</sup> // 佐藤大樹<sup>\*1</sup>  
// 北村春幸<sup>\*1</sup> // 山口路夫<sup>\*2</sup>  
// 西本晃治<sup>\*2</sup>

1. はじめに

その1では、部材レベルモデルの時刻歴応答解析により、ダンパー配置が応答性状に与える影響についての検討を行った。本報その2では、その1で示したダンパー配置において、文献2で提案したダンパーの実効変形を考慮したせん断型モデル（以後、実効せん断型モデルと呼ぶ）及びエネルギー法による検討を行う。

2. ダンパー配置の影響に着目した実効せん断型モデルの検証

2.1 実効せん断型モデルの概要

文献2では、せん断型モデルのダンパーに、新たに直列バネを付与することで、実効せん断型モデルを作成した。同様な手法の実効せん断型モデルは、他にも提案されている<sup>3)~7)</sup>。文献2の作成手法は、直列バネを求めるために静的解析を行わずに、剛性マトリクスを用いる点において、他の手法と異なる。以下に、作成手法の概要を示す。

図1(a)のような部材レベルモデルの*i*層において、最大層間変形 $\delta_{maxi}$ だけ変形した場合、ダンパーの軸方向の最大実効変形 $s\Delta_{maxi}$ の水平方向変形 $s\delta_{maxi}$ は、曲げ変形や周辺架構剛性の影響で $\delta_{maxi}$ より小さくなる。 $\delta_{maxi}$ と $s\delta_{maxi}$ との差分をダンパーのロス変形 $b\delta_{maxi}$ とする。図1(b)のようなせん断型モデル（以後、直接せん断型モデルと呼ぶ）での $s\delta_{maxi}$ は、最大層間変形 $\delta'_{maxi}$ と等しくなるため、ダンパーによる制振効果を過大に評価することとなる。そこで、文献2で提案した実効せん断型モデルは、図1(c)のように、ダンパーの剛性 $s_k$ に直列バネの剛性 $b_k$ を設けることで $b\delta_{maxi}$ を表現した。以下に、ダンパー+直列バネ（以後、付加系と呼ぶ）の剛性 $a_k$ 及び $b_k$ の式をそれぞれ示す<sup>2)</sup>。

$$a_k = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N ({}_a K_{mn} \cdot n) \quad (1)$$

$$b_k = \frac{s k_i^2 \cdot \beta_{ki}}{s k_i (1 - \beta_{ki})}, \quad \beta_{ki} = \frac{a_k}{s k_i} \quad (2a, b)$$

ここに、*N*: 全層数、 ${}_a K_{mn}$ :  $[{}_a K]$ マトリクスの要素、 $[{}_a K]$ : 部材レベルモデルにおける主架構+ダンパーの剛性マトリクスから主架構のみの剛性マトリクスを引いたものである。なお、式(2b)のダン

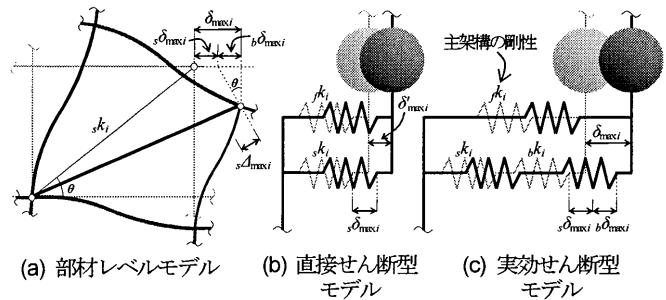


図1 ダンパーの実効変形を考慮した本手法の概念図

パー剛性低下率 $\beta_{ki}$ は、その1においても述べたが、主架構及びダンパーが弾性の時における実効変形比（層間変形に対する実効変形の比）を表すものである。

2.2 1次固有周期 $T_1$ 及びダンパー剛性低下率 $\beta_{ki}$ の比較

本報その2では、その1と同様に、5層の鉄骨構造建物を用いることとする。また、使用するダンパー配置及びダンパー設置型は、K型の5-6,3-8,1-10配置とV型の5-6配置及びZ型の5-6配置とし（その1の2.1節参照）、ダンパー量は、 $s\alpha_{yl}=0.08$ とする。

部材レベルモデルにおいて、ダンパー配置を変更すると剛性マトリクスが変化するため、1次固有周期 $T_1$ が変わるが、直接せん断型モデルは、図1(b)に示すようにダンパー剛性を主架構のバネに並列に付与するため、ダンパー配置に関わらず、全て同じ1次固有周期 $T_1$ となる。実効せん断型モデルが、ダンパー配置の影響を捉えられているか確認するため、各モデルの1次固有周期 $T_1$ の比較を表1に示す。表1から、各ダンパー配置、各ダンパー設置型ともに、直接せん断型モデルと部材レベルモデルとの誤差は、10%程度と大きな値となるが、実効せん断型モデルと部材レベルモデルの誤差は、全てのダンパー配置、ダンパー設置型において、1%以下となっていることがわかる。

図2に、各ダンパー配置、各ダンパー設置型におけるダンパー剛性低下率 $\beta_{ki}$  (式(2b))の値を示す。図2から、全てのダンパー配置、ダンパー設置型において、1層に比べて上層の方が、 $\beta_{ki}$ の値が小さいことがわかる。つまり、ダンパー効率が低下していることがわかる。また、図2(a)より、ダンパー配置別で比較すると、3-8配置、1

表 1 1 固有周期の比較

	1次固有周期 $T_1$ (sec)		
	部材レベルモデル	直接せん断型モデル	実効せん断型モデル
K型 5-6配置	0.739	0.697 (0.943)	0.742 (1.004)
K型 3-8配置	0.770	0.697 (0.905)	0.774 (1.005)
K型 1-10配置	0.765	0.697 (0.911)	0.768 (1.004)
V型 5-6配置	0.773	0.697 (0.902)	0.777 (1.005)
Z型 5-6配置	0.740	0.697 (0.942)	0.742 (1.003)

※ ( ) 内は、部材レベルモデルとの比を表す

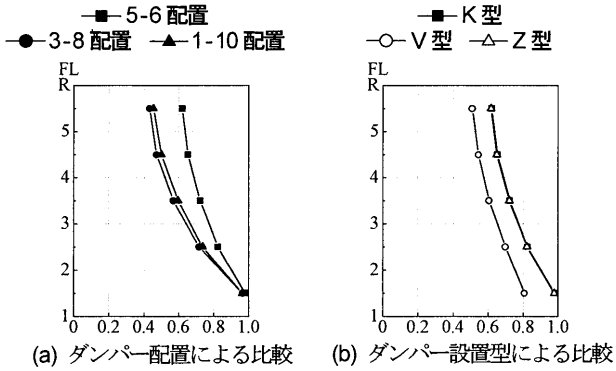


図 2 各ダンパー配置の  $\beta_{ki}$

-10 配置のダンパー効率が悪く、5-6 配置が最も良いことがわかる。図 2(b)より、ダンパー設置型別で比較すると、V 型が最もダンパー効率が悪く、K 型、Z 型が良いことがわかる。

2.3 時刻歴応答解析による比較

各ダンパー配置、各ダンパー設置型における、部材レベルモデルと、直接せん断型モデル、実効せん断型モデルの時刻歴応答解析より得られた高さ方向の応答比較を図 3 に示す。比較する応答値は、ダンパーの累積塑性変形倍率  $s\eta_i$  と、層間変形角  $R_i$  及び実効変形比である。実効変形比の図中に、高さ方向の  $\beta_{ki}$  の値を併せて示す。なお、解析に用いる入力地震動は、ARTHACHI とする (その 1, 2.2 節参照)。

図 3 から、全てのダンパー配置、ダンパー設置型において、直接せん断型モデルは、ダンパーの実効変形を考慮していないため、部材レベルモデルより、危険側に評価してしまっているが、実効せん断型モデルは、部材レベルモデルの値に近いことが確認できる。図 3 の  $s\eta_i$  から、5 層のダンパーが塑性化していないことがわかる。2.1 節で述べたように、 $\beta_{ki}$  は、主架構及びダンパーが弾性の時における実効変形比を表すものであるため、ダンパーが塑性化していない層の実効せん断型モデルの実効変形比が、 $\beta_{ki}$  と一致していることが、確認できる。また、図 3(a)~(c)の実効変形比から、ダンパー配置別の比較をすると、実効せん断型モデルは、3-8 配置、1-10 配置のダンパー効率が悪く、5-6 配置が最も良いことがわかり、図 3(a),(d),(e)の実効変形比から、ダンパー設置型別の比較をすると、V 型が最も

—部材レベルモデル □—直接せん断型モデル ■—実効せん断型モデル

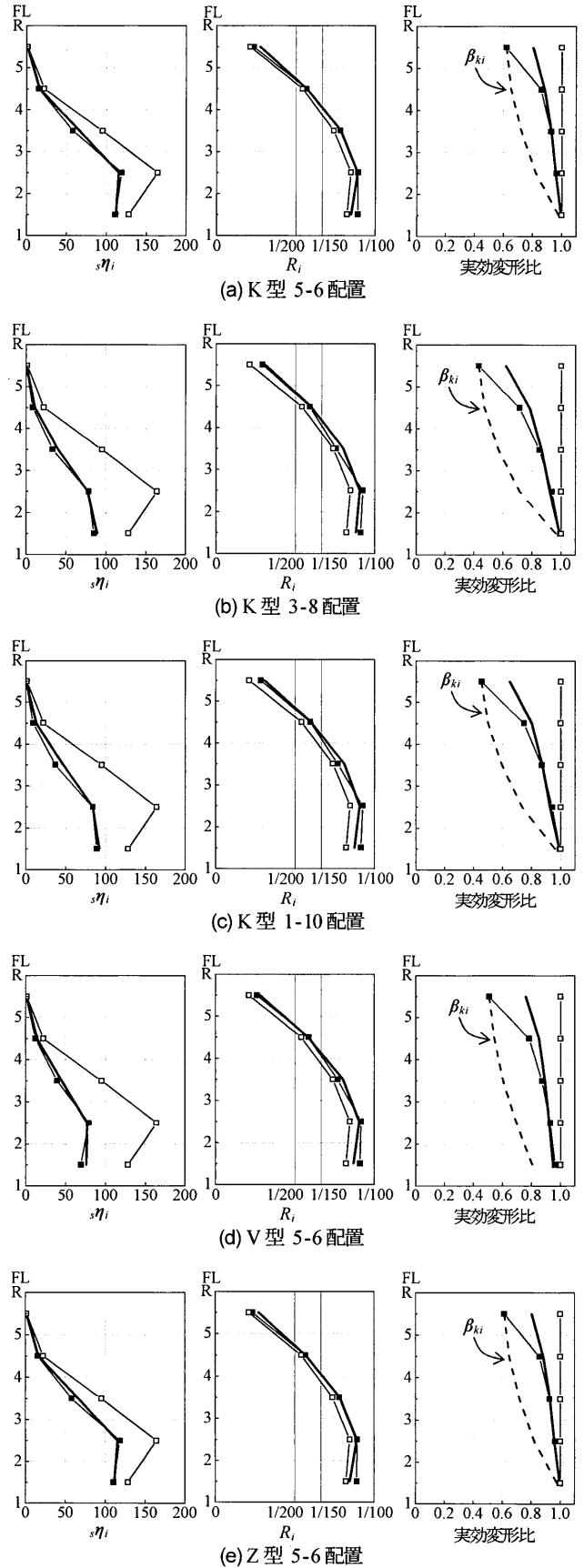


図 3 部材レベルモデルとの高さ方向の応答比較

ダンパー効率が悪く、K型、Z型が良いことがわかる。これは、部材レベルモデルの実効変形比と同じ傾向である。このことより、実効せん断型モデルは、部材レベルモデルの実効変形比の傾向を模擬できていることがわかる。

3. ダンパー配置の影響に着目したエネルギー法の検証

3.1 ダンパーの実効変形を考慮したエネルギーの釣合式

筆者らは、前章の実効せん断型モデルをエネルギー法に適用させた<sup>2)</sup>。以下に、ダンパーの実効変形を考慮したエネルギーの釣合式として、 $s\eta_i$ などの累積値を算出する時に用いる地震終了時刻 $t_0$ における釣合式(式(3))と、 $R_i$ などの最大値を算出する時に用いる最大応答時刻 $t_m$ における釣合式(式(4))を、それぞれ示す<sup>2)</sup>。

$${}_aW_p(t_0) = E_D(t_0) \tag{3}$$

$${}_fW_e(t_m) + {}_aW_e(t_m) + {}_aW_p(t_m) = E_D(t_0) \tag{4}$$

ここで、 $E_D(t_0) = \frac{1}{2} M \cdot V_D^2$  (5)

$${}_aW_p(t_0) = a\gamma_i \cdot {}_aQ_{yi} \cdot a\delta_{yi} \cdot a\eta_i \tag{6}$$

$${}_fW_e(t_m) = \frac{M \cdot V_D^2}{2} \cdot \frac{1}{f\bar{\alpha}_i^2} \left( \frac{f\alpha_i}{f\alpha_0} \right)^2 \tag{7}$$

$${}_aW_e(t_m) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N ({}_aQ_{yi} \cdot a\delta_{yi}) \tag{8}$$

$${}_aW_p(t_m) = \frac{M \cdot V_D^2}{2} (8n_1 \cdot c_i \cdot a\gamma_i) \frac{a\alpha_{yi}}{f\alpha_0} \left( \frac{f\alpha_i}{f\alpha_0} - \frac{f k_i}{a k_i} \cdot \frac{a\alpha_{yi}}{f\alpha_0} \right) \tag{9}$$

ここに、 $E_D$ : 損傷に寄与する入力エネルギー<sup>1)</sup>、 ${}_aW_p$ : 付加系のエネルギー吸収量、 ${}_fW_e$ : 主架構の弾性振動エネルギー、 ${}_aW_e$ : 付加系の弾性振動エネルギー、 $M$ : 総質量、 $V_D$ :  $E_D$ の速度換算値<sup>1)</sup>、 $a\gamma_i$ : 付加系の損傷分散係数<sup>2)</sup>、 ${}_aQ_{yi}$ : 付加系の降伏層せん断力、 $a\delta_{yi}$ : 付加系の降伏層間変形、 $a\eta_i$ : 付加系の累積塑性変形倍率、 $f\bar{\alpha}_i$ : 主架構の最適降伏層せん断力係数分布<sup>2)</sup>、 $f\alpha_i$ : 主架構の層せん断力係数、 $f\alpha_0$ : 主架構の無減衰時の層せん断力係数、 $n_1$ : ダンパーの等価繰返し数、 $a\alpha_{yi}$ : 付加系の降伏層せん断力係数、 $f k_i$ : 主架構の剛性である。 $c_i$ については、文献1を参照されたい。

3.2 累積塑性変形倍率と層間変形角及び実効変形比の検討

ダンパーの累積塑性変形倍率 $s\eta_i$ は、式(3)、(5)、(6)を用いて、次式から算出することができる。

$$a\eta_i = \frac{a k_i \cdot f\alpha_0^2}{2 a\gamma_i \cdot c_i \cdot f k_i \cdot a\alpha_{yi}}, \quad s\eta_i = \frac{a\eta_i}{\beta_{ki}} \tag{10a,b}$$

層間変形角 $R_i$ は、式(4)、(5)、(7)、(8)及び(9)を用いて、 $f\alpha_i/f\alpha_0$ を導出し(式(11))、式(12a)に代入することで求めることができる。

$$\frac{f\alpha_i}{f\alpha_0} = \frac{4n_1 \cdot c_i \cdot a\gamma_i \cdot f\bar{\alpha}_i^2 \cdot a\alpha_{yi}}{f\alpha_0} + f\bar{\alpha}_i \sqrt{\frac{8n_1 \cdot c_i \cdot a\gamma_i \cdot a\alpha_{yi}^2}{f\alpha_0^2} \left( 2n_1 \cdot c_i \cdot a\gamma_i \cdot f\bar{\alpha}_i^2 + \frac{f k_i}{a k_i} \right) + 1 - \frac{\sum_{i=1}^N ({}_aQ_{yi} \cdot a\delta_{yi})}{M \cdot V_D^2}} \tag{11}$$

$$\delta_{\max i} = \frac{f\delta_0 \cdot \sum_{j=1}^N m_j}{\kappa_i \cdot f\alpha_0} \cdot \frac{f\alpha_i}{f\alpha_0}, \quad R_i = \frac{\delta_{\max i}}{H_i} \tag{12a,b}$$

ここに、 $f\delta_0$ : 主架構の無減衰時の層間変形、 $m_i$ : 質量、 $H_i$ : 階高である。 $\kappa_i$ については、文献1を参照されたい。

実効変形比は、式(12a)の $\delta_{\max i}$ を用いて、次式で表される。

$$\text{実効変形比} = \frac{s\delta_{\max i}}{\delta_{\max i}} = \frac{(s\mu_i + 1) \cdot s\delta_{yi}}{\delta_{\max i}} \tag{13}$$

ここで、 $s\mu_i = \frac{a\mu_i}{\beta_{ki}}$ ,  $a\mu_i = \frac{\delta_{\max i}}{a\delta_{yi}} - 1$  (14a,b)

ここに、 $s\delta_{yi}$ : ダンパーの降伏層間変形、 $s\mu_i$ : ダンパーの塑性変形倍率、 $a\mu_i$ : 付加系の塑性変形倍率である。

上記の式から求めた応答値(以後、応答予測(本手法)と呼ぶ)と、直接せん断型モデルを用いて文献8の応答予測式から求めた応答値(以後、応答予測(従来計算)と呼ぶ)及び部材レベルモデルの時刻歴応答解析から求めた応答値(以後、時刻歴解析(部材レベル)と呼ぶ)を、比較することで応答予測(本手法)の有用性を検証する。応答予測(従来計算)は、エネルギーの釣合式において、 ${}_sW_e(t_m) = 0$ とし、式(11)の $f\bar{\alpha}_i$ を主架構+ダンパーの最適降伏層せん断力分布 $\bar{\alpha}_i$ と置き換えて応答予測式を解いている。また、文献2において、文献8のダンパーの損傷分散係数 $s\gamma_i$ を再評価し、ダンパーへのエネルギー配分を改善している点においても、応答予測(本手法)と応答予測(従来計算)の算出式は異なる。応答予測式に用いる、 $E_D$ の速度換算値 $V_D$ とダンパーの等価繰返し数 $n_1$ の値を表2に示す。なお、 $V_D$ は、時刻歴解析(部材レベル)と同じ値を用い、ダンパーの等価繰返し数 $n_1$ は、ダンパーが塑性化していない5層目(図3参照)を除いた、時刻歴解析(部材レベル)の平均値を使用することとする。時刻歴解析(部材レベル)に用いる入力地震動は、前章と同様に、ART HACHI とする。

図4に、応答予測(本手法)、応答予測(従来計算)及び時刻歴解析(部材レベル)のダンパーの累積塑性変形倍率 $s\eta_i$ と、層間変形角 $R_i$ 及び実効変形比の比較を示す。図4の $s\eta_i$ より、応答予測(本手法)は、応答予測(従来計算)と同程度の値であることがわかる。応答予測(従来計算)の $R_i$ は、全てのダンパー配置、ダンパー設置型において、時刻歴解析(部材レベル)より低い値となっているため危険側の評価となっているのに対して、応答予測(本手法)の $R_i$ は、時刻歴解析(部材レベル)と同程度の値となっていることがわか

表2 応答予測式に用いる  $V_D, n_1$  の値

	$V_D$ (cm/sec)	$n_1$
K型 5-6配置	177	4.24
K型 3-8配置	150	2.87
K型 1-10配置	155	3.12
V型 5-6配置	148	2.86
Z型 5-6配置	177	4.22

る。また、ダンパー配置別、ダンパー設置型別で比較すると、前章の実効せん断型モデルの時と同様に、応答予測（本手法）は、時刻歴解析（部材レベル）の実効変形比の傾向を模擬できていることが確認できる。

5. まとめ

本報その1, その2では、5層の制振建物を対象に、ダンパー配置に着目した応答性状の変化について、検討を行った。

本報その2では、その1で示した、部材レベルモデルにおけるダンパー配置が応答に与える影響を、文献2で提案したダンパーの実効変形を考慮したせん断型モデルとエネルギー法においても、考慮することができるか検証を行った。

ダンパーの実効変形を考慮したせん断型モデルは、考慮していないせん断型モデルより、全てのダンパー配置、ダンパー設置型（その1, 2.1節参照）において、部材レベルモデルと近い時刻歴応答解析結果となることを示した。エネルギー法も同様に、実効変形を考慮していないエネルギー法より、部材レベルモデルの解析結果と同等な値となることを確認した。

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，1999.11
- 2) 栗林晃司，佐藤大樹，北村春幸，山小路夫，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，2011.3（掲載予定）
- 3) 石井正人，北村春幸，和田章，笠井和彦：粘弾性型制振部材付き架構のモデル化に関する検討，日本建築学会構造系論文集，第531号，pp.55-62，2000.5
- 4) 石井正人，太田弘俊，多田有輝，北村春幸，和田章：速度依存型制振部材付き架構の簡易モデル化手法，日本建築学会構造系論文集，第592号，pp.43-50，2005.6
- 5) 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，pp.37-46，2006.7
- 6) 市川尚史，竹中裕美，大宮幸，石井正人，寺本隆幸：制振部材の実効変形を考慮した等価せん断型モデルに関する研究—実効せん断型モデルの適用性—，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，B-2，pp.795-796，2006.9
- 7) 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647号，pp.103-112，2010.1
- 8) 北村春幸，財津和康，馬谷原伸恵：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法，日本建築学会構造系論文集，第599号，pp.71-78，2006.1

\*1 東京理科大学

\*2 新日鉄エンジニアリング株式会社

—部材レベルモデル—□—直接せん断型モデル—■—実効せん断型モデル

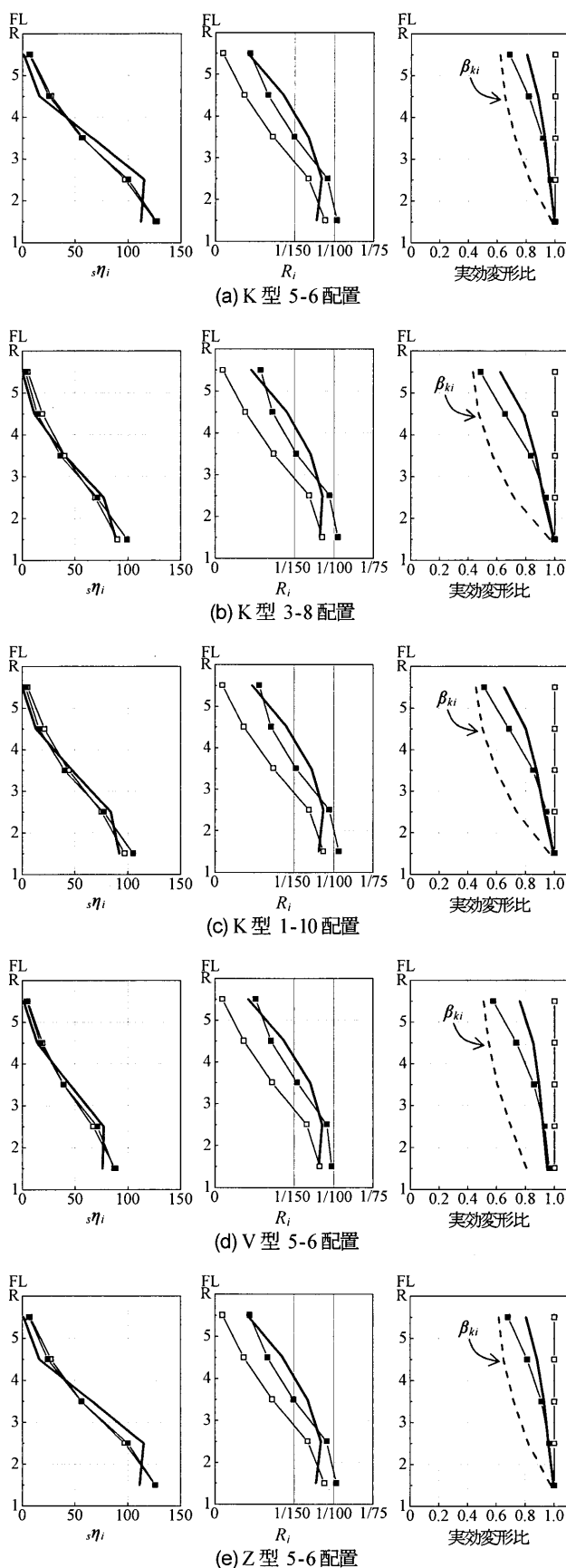


図4 部材レベルモデルとの高さ方向の応答比較