

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	2066 履歴減衰型制振構造物の取付架構剛性を考慮したエネルギーの釣合に基づく応答予測法(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 I, , No. 79,
Citation(English)	, , No. 79,
発行日 / Pub. date	2009, 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: http://ci.nii.ac.jp/naid/110007453919

履歴減衰型制振構造物の取付架構剛性を考慮したエネルギーの釣合に基づく応答予測法

準会員 ○ 栗林晃司^{*1} 正会員 佐藤大樹^{*1} 同 北村春幸^{*1}
同 山口路夫^{*2} 同 西本晃治^{*2}

構造—振動

履歴減衰型制振部材 部材レベルモデル セン断型モデル

実効変形比 時刻歴応答解析 エネルギー法

1. はじめに

建築物の耐震安全性は、終局耐力と塑性変形能力（塑性エネルギー吸収量）の積により判定している。現在、このことを重点においた耐震計算法である、エネルギーの釣合に基づく応答予測法¹⁾（以後、エネルギー法と呼ぶ）が確立されている。

現在提案されているエネルギー法では、簡便なせん断型モデルを基本としている。しかし、制振構造を考えた場合、せん断型モデルではダンパーが取付く架構の曲げ変形や周辺部の剛性を考慮していないため、ダンパーによる制振効果を過大に評価することとなる。つまり、実際の応答では、ダンパーの実効変形比（層間変形に対するダンパー変形の水平方向成分の比）が小さくなるため、エネルギー法においても影響を加味する必要があると思われる。よって、本報ではダンパーに新たに直列バネを取付けることにより、ダンパーの取付架構剛性を考慮したせん断型モデルを作成し、エネルギー法に適用することを目的とする。

2 部材レベルモデルの建物諸元

2.1 検討対象建物概要

検討対象建物は、地上8階、高さ32.7mの鋼構造建物とする。対象建物の基準階伏図と軸組図を図1に示す。基準とする純ラーメン構造をA1モデルとし、1次固有周期 T_1 は1.36(sec)である。このA1モデルに、ダンパーを図1に示す位置に付与したモデルをB1モデルとする。本報では、ダンパーとしてLYP225材の座屈拘束ブレースを用いる。また、柱と梁の代表部材断面を表1に示す。

2.2 ダンパーの断面積算定

ダンパーの降伏層せん断力係数 α_{y1} をパラメータとし、第1層のダンパーの層せん断力 Q_{y1} を以下の式で求める。

$$Q_{y1} = \alpha_{y1} \cdot \sum_{i=1}^N m_i g \quad (1)$$

ここで、 m_i : i 層の質量、 g : 重力加速度である。また、各層のダンパー量は第1層のダンパー量により A_i 分布に基づいた降伏層せん断力分布 Q_i に従うものとする。

$$Q_{yi} = (Q_i / Q_1) \cdot Q_{y1} \quad (2)$$

このとき、ダンパー取付け角度を θ とし、各層1方向に4本のダン

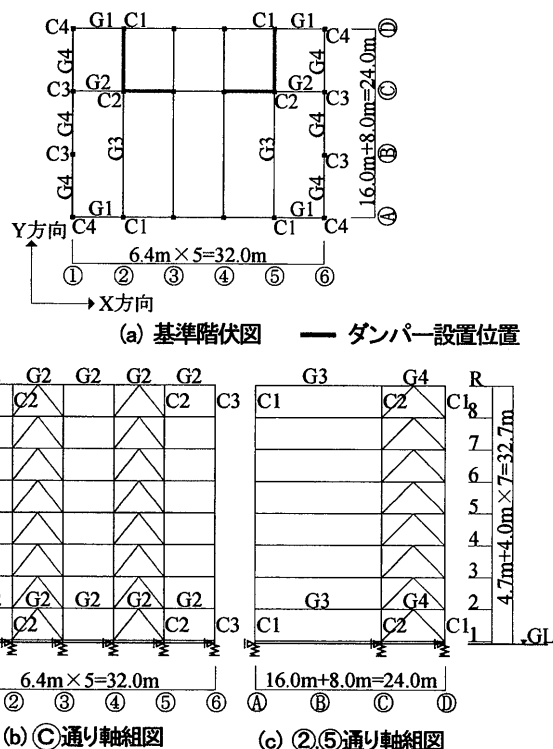


図1 対象建物の基準階伏図と軸組図

表1 対象建物の代表部材断面

	符号		鋼材種類	A1,B1モデル
柱	C2	上層	SN490級	□-400×400×28
		下層	SN490級	□-400×400×45
梁	G2	上層	SN490級	H-600×200×12×14
		下層	SN490級	H-600×200×12×25
	G3	上層	SN490級	H-800×250×14×16
		下層	SN490級	H-800×250×14×25

パーが設置されているので（図1）、降伏軸力 N_{yi} は次式で求める。

$$N_{yi} = Q_{yi} / 4 \cos \theta \quad (3)$$

ダンパーの降伏応力度 σ_y を用いて、1本分の断面積 A_i を算出する。

$$A_i = N_{yi} / \sigma_y \quad (4)$$

上記の方法でダンパーの断面積 A_i が求まる。このようにして、決定したダンパー量をtype1と呼ぶこととする。なお、本報では事前の α_{y1} を変えたパラメータスタディによって、応答値の最も低減した $\alpha_{y1}=0.07$ のダンパー量を使用する。

2.3 等価剛性、等価断面積の算定

図2で示すようなダンパーの等価剛性及び等価断面積を下記の方法で示す。

等価剛性 K は、次式で求める。

$$K = \frac{EA_c}{L} \cdot \frac{1}{\alpha + 2\beta \frac{A_c}{A_1} + (1 - \alpha - 2\beta) \frac{A_c}{A_2}} \quad (5)$$

ここで、 L ：柱・梁芯間長さ、 E ：鋼管の弾性係数、 A_c ：塑性化部断面積、 A_1 ：弾性部断面積、 A_2 ：パネルゾーン断面積、 α ：塑性化部長さの柱・梁芯間の長さに対する比、 β ：弾性部長さの柱・梁芯間の長さに対する比である。次に等価断面積 A' は以下の式となる。

$$A' = A_c \cdot \frac{1}{\alpha + 2\beta \frac{A_c}{A_1} + (1 - \alpha - 2\beta) \frac{A_c}{A_2}} \quad (6)$$

本報では、 $\alpha=0.25$ 、 $\beta=0.325$ 、 $L_2=0.05L$ 、 $A_1=2A_c$ 、 $A_1=A_2$ とし、等価剛性及び等価断面積を算出する。

2.4 ダンパーの耐力分布

前節までの各層のダンパー量は第1層のダンパー量により A_i 分布に基づいた降伏層せん断力分布に従って決めていた(type1)。ダンパー量の耐力分布を図3に示すように3つのグループに分割(1~3層、4~6層、7~8層)したのを type2 とし、type2 から 7~8 層のグループを除いたのを type3 とする。

3. ダンパーの取付架構剛性を考慮したせん断型モデルの作成・解析

3.1 本手法の概念

図4に、ダンパーの取付架構剛性を考慮した本手法の概念図を示す。架構が $\delta_{\max}$ 変形した際のダンパーの水平方向変形 $s\delta$ を実効変形と呼び、 $\delta_{\max}$ との比を実効変形比と定義する。図4(a)より、架構の曲げ変形に伴い、 $\delta_{\max}$ と $s\delta$ の差 $b\delta$ が生じる。本報では、せん断型モデルにおいても、図4(b)に示すようなダンパー剛性 $s k_i$ に直列にしたバネ $b k$ (以後、直列バネと呼ぶ) を設けることで、実効変形の減少つまり $b\delta$ を表現する。 $b k$ の決定法については、次節で詳しく述べる。

3.2 作成手法

ダンパーを設置した部材レベルモデルの剛性マトリクス(水平方向の自由度に縮約した物)から、フレームのみの剛性マトリクスを引くと剛性マトリクス $[aK]$ はフルマトリクスとなる。せん断型モデルでのダンパーの剛性マトリクス $[a_k]$ の場合 3 重対角のマトリクスとなるのに対し、フルマトリクスの $[aK]$ はダンパーの剛性以外にダンパーの取付架構剛性による影響が含まれている。本手法では、せん断型モデルを作成する際、この影響をダンパーに直列バネを設けることで表す。

せん断型モデルの i 層のダンパーの剛性 $s k_i$ に対し、直列バネの剛性 $b k_i$ を付与し、ダンパー+直列バネの剛性(以後、直列系剛性と呼ぶ) $a k_i$ は次式で表される。

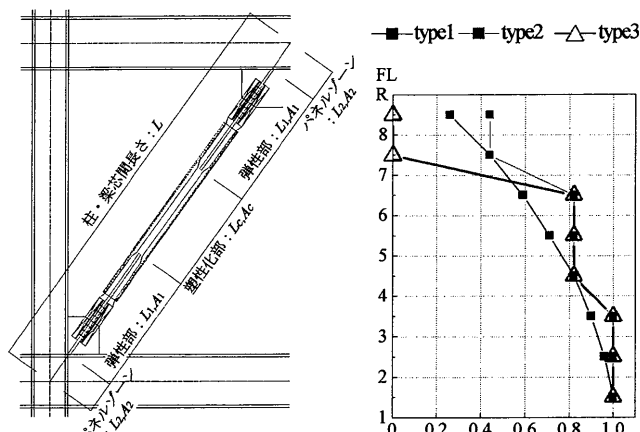


図2 ダンパー配置図

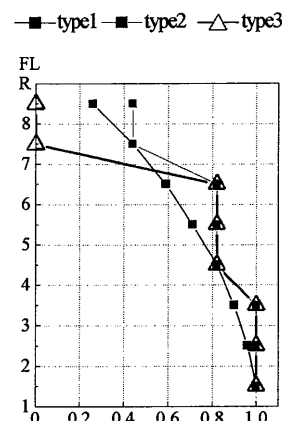


図3 ダンパーの耐力分布

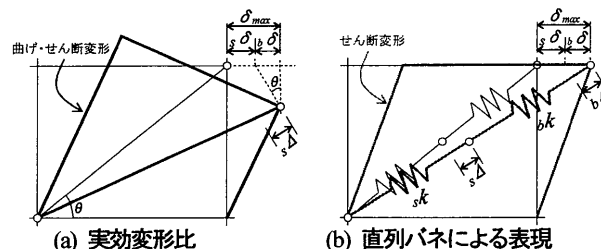


図4 ダンパーの取付架構剛性を考慮した本手法の概念図

$$a k_i = \frac{s k_i \cdot b k_i}{s k_i + b k_i} \quad (7)$$

また、せん断型モデルを考えた場合、 $[aK]$ と $[a_k]$ について任意の変形 $\{x\}$ に対し、水平力が等しくなるとすると、せん断型モデルの n 層の直列系剛性 $a k_n$ は $[aK]$ マトリクスの要素 $a k_{ij}$ を用いて、次式のごとく表される。

$$a k_n = \frac{1}{x_n - x_{n-1}} \sum_{i=n}^N \sum_{j=1}^N a K_{ij} \cdot x_j \quad (8)$$

ここで、 N ：層数、 $x_0 = 0$ である。よって、直列バネの剛性 $b k_i$ は次式より求めることができる。

$$b k_n = \frac{a k_n \cdot s k_n}{s k_n - a k_n} \quad (9)$$

また、各層の層間変形 δ_n が等しい ($\delta_n = \delta$) と仮定し $x_n = n \cdot \delta$ とすると、直列系剛性 $a k_n$ は次式で表すことができる。

$$a k_n = \sum_{i=n}^N \sum_{j=1}^N a K_{ij} \cdot j \quad (10)$$

3.3 部材レベルモデルとの応答比較

対象建物の減衰定数は $h=2\%$ とする剛性比例型とする。解析に用いる地震動は、レベル2地震に相当する長周期領域で、 $S_r=100\text{cm/sec}$ ($h=5\%$) となる模擬地震動の ART HACHI, ART KOBE, ART TOMA を用いる。図5に速度応答スペクトルとエネルギースペクトルを示す。なお、主架構は弾性とし、 $a_{y1}=0.07$ のときの1次固有周期 T_1 は $1.05(\text{sec})$ である。

時刻歴解析より得られた全ての地震動について、層間変形角 R_i 、ダンパーの累積塑性変形倍率 $s \eta_i$ 、ダンパーの塑性変形倍率 $s \mu_i$ 、ダ

ンパーの $s a_{di}$ 値、ダンパーの等価繰返し数 n_{li} を図6に示す。4章で述べるエネルギー法の結果も併記している。このとき、ダンパーの累積塑性変形倍率 $s \eta_i$ 、ダンパーの塑性変形倍率 $s \mu_i$ 、ダンパーの $s a_{di}$ 値、ダンパーの等価繰返し数 n_{li} は、次式より算出する。

$$s \eta_i = s W_{pi} / (s Q_{eqi} \cdot s \delta_{eqi}) \quad (11)$$

$$s \mu_i = (\delta_{i \max} - s \delta_{eqi}) / s \delta_{eqi} \quad (12)$$

$$s a_{di} = s \eta_i / s \mu_i \quad (13)$$

$$n_{li} = s W_{pi} / (4 s Q_{eqi} (\delta_{i \max} - s \delta_{eqi})) \quad (14)$$

ここで、 $s W_{pi}$: i 層のダンパーの塑性履歴エネルギー、 $s Q_{eqi}$: i 層のダンパーの等価降伏層せん断力、 $s \delta_{eqi}$: i 層のダンパーの等価降伏層間変形、 $\delta_{i \max}$: i 層の最大層間変形である。なお、本報で使用するダンパーは、完全 Bi-Linear 型復元力特性のダンパーなので $s Q_{eqi} = s Q_{yi}$ 、 $s \delta_{eqi} = s \delta_{yi}$ となる。ここで、 $s Q_{yi}$: i 層のダンパーの降伏層せん断力、 $s \delta_{yi}$: i 層のダンパーの降伏層間変形である。

図6より、従来のせん断型モデル（時刻歴解析（直列バネ無し））より、前節で作成したせん断型モデル（時刻歴解析（直列バネ有り））の方が、部材レベルモデル（時刻歴解析（部材レベル））の応答値に近い値になっていることがわかる。

4. エネルギーの釣合に基づく応答評価法

4.1 エネルギー法の応答予測式²⁾

制振構造におけるエネルギー法の応答予測式について述べる。なお、本報では、主架構を弾性としている(3.2節)。

ダンパーの累積塑性変形倍率 $s \eta_i$ は次式で表すことができる²⁾。

$$s \eta_i = \frac{E_D}{\gamma_{si} \cdot s Q_{yi} \cdot s \delta_{yi}} = \frac{1}{2 \gamma_{si} \cdot c_i} \left(\frac{s k_i}{f k_i} \right) \left(\frac{f \alpha_0}{s \alpha_{yi}} \right)^2 \quad (15)$$

ここで、 E_D : 損傷に寄与するエネルギー、 γ_{si} : ダンパーの損傷分散係数、 $f k_i$: フレームの初期せん断ばね定数、 $s k_i$: ダンパーの弾性せん断ばね定数、 $s \alpha_{yi}$: ダンパーの降伏せん断力係数、 $f \alpha_0$: フレームの無減衰時のせん断力係数である。なお、 c_i については文献3を参照されたい。

時刻歴解析の結果から等価繰返し数 n_{li} を求め、塑性変形倍率 $s \mu_i$ を算出する。

$$s \mu_i = s \eta_i / 4 n_{li} \quad (16)$$

以上より、 i 層の最大層間変形 $\delta_{i \max}$ 及び層間変形角 R_i は、それぞれ次式で求まる。

$$\delta_{i \max} = (s \mu_i + 1) s \delta_{yi} \quad , \quad R_i = \delta_{i \max} / h_i \quad (17a, b)$$

ここで、 h_i : i 層の階高である。また、ダンパー量の耐力分布の type3 は、7,8 層にダンパーが付与されていないため、7,8 層の最大層間変形 $\delta_{i \max}$ が(17a)式からは算出できない。そこで本報では、6層を基準とした A_i 分布に基づく降伏せん断力分布に比例して算出した。

4.2 ダンパーの取付架構剛性を考慮したモデルのエネルギー法

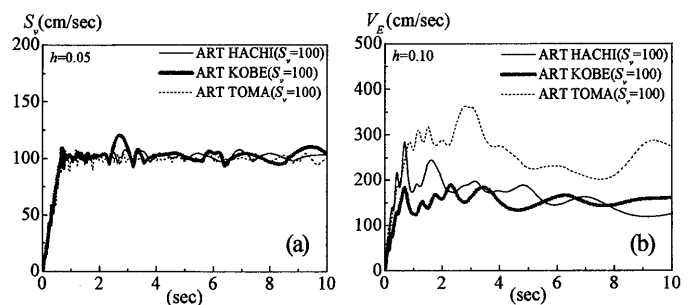


図5 (a) 速度応答スペクトル, (b) エネルギースペクトル

3 章で作成したダンパーの取付架構剛性を考慮したせん断型モデルに、前節のエネルギー法を適用させる。(15)式のダンパーの弾性せん断ばね定数 $s k_i$ を、(7)式の直列系剛性 $a k_i$ に置き換えて評価する。

4.3 時刻歴応答解析による結果との比較

解析に用いる地震動は、ART HACHI, ART KOBE, ART TOMA とし、ダンパー量は $s \alpha_{yi}=0.07$ とする。

エネルギー法の結果について、層間変形角 R_i 、ダンパーの累積塑性変形倍率 $s \eta_i$ 、ダンパーの塑性変形倍率 $s \mu_i$ を図6に合せて示す。

図6より、エネルギー法での直列バネの有無を比較すると、層間変形角 R は、直列バネ有りの方の値が大きく出ていて、ダンパーの累積塑性変形倍率 $s \eta_i$ 、ダンパーの塑性変形倍率 $s \mu_i$ は、直列バネ有りの方の値が小さくなっていることがわかる。これは、従来のエネルギー法やせん断型モデルが、部材レベルモデルより危険側で評価していることを意味する。次に、エネルギー法と時刻歴解析を比較すると、上層部でズレが出ていることがわかる。これは、エネルギー法では、ダンパーが塑性化しない場合を考慮していないからだと考えられる。また、type2,3のエネルギー法では、応答値がダンパー量を変えた層で、急に変化していることがわかる。

5. まとめ

本報では、ダンパーの取付架構剛性を考慮したせん断型モデルの作成を行い、エネルギー法においても適用できることを示した。これにより、実際の建築物の応答値により近づけることができた。このことは、構造設計を行っていくにあたり、大きな利点になると考えられる。

今後の課題としては、主架構が塑性化する場合においても検討を行うことと、エネルギー法と時刻歴解析の比較で上層部にズレが出ることの修正と検討を行っていくことである。

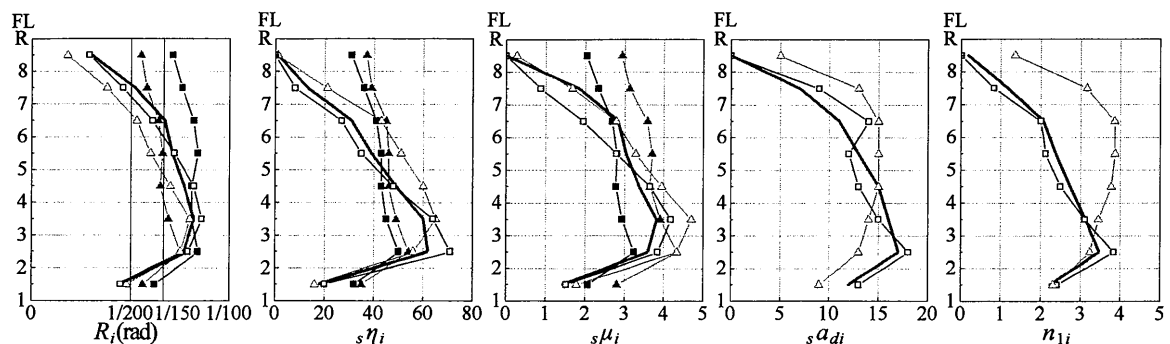
参考文献

- 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) 北村春幸，財津和康，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法，日本建築学会構造系論文集，第599号，pp71-78，2006.1

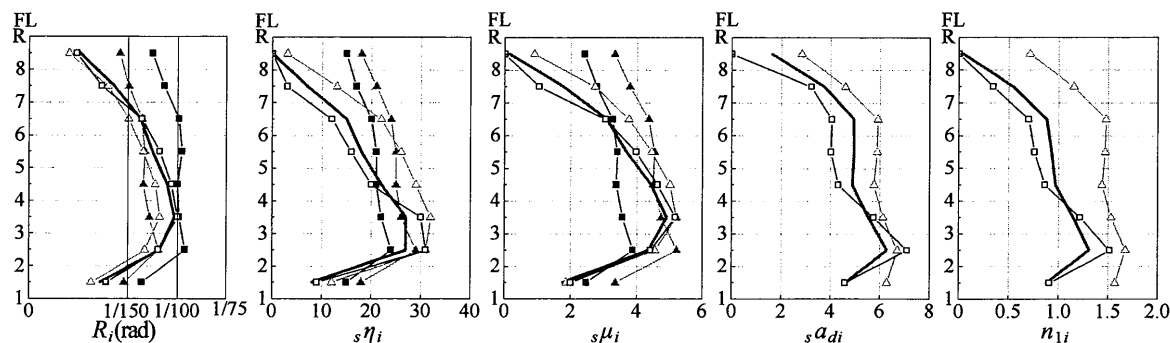
*1 東京理科大学 *2 新日鉄エンジニアリング株式会社

— 時刻歴解析(部材レベル) —□— 時刻歴解析(直列バネ有り) —△— 時刻歴解析(直列バネ無し) —■— エネルギー法(直列バネ有り) —▲— エネルギー法(直列バネ無し)

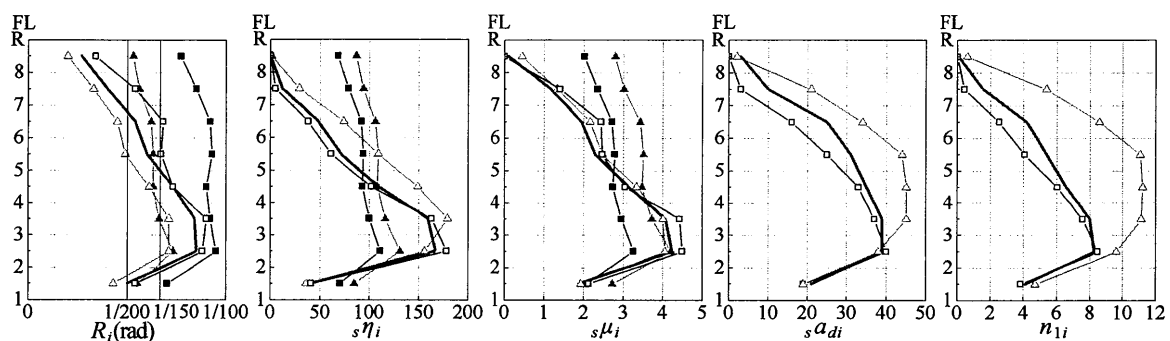
(a)
・入力地震動
ART HACHI
・ダンパー分布
type1



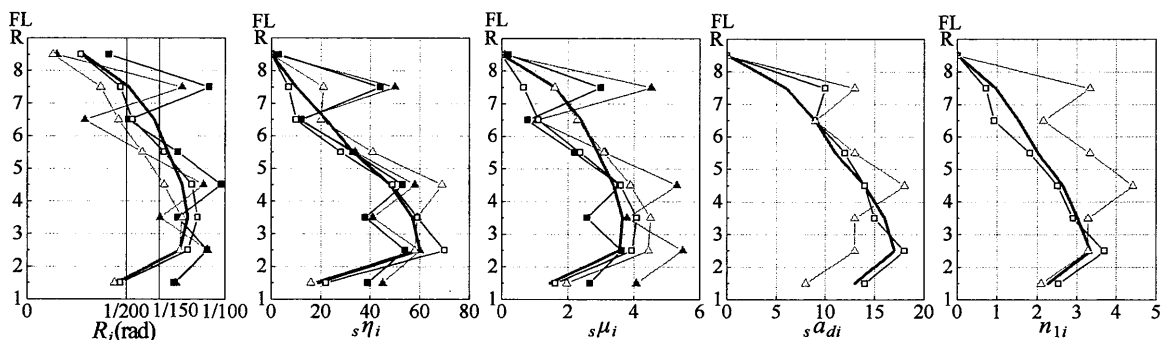
(b)
・入力地震動
ART KOBE
・ダンパー分布
type1



(c)
・入力地震動
ART TOMA
・ダンパー分布
type1



(d)
・入力地震動
ART HACHI
・ダンパー分布
type2



(e)
・入力地震動
ART HACHI
・ダンパー分布
type3

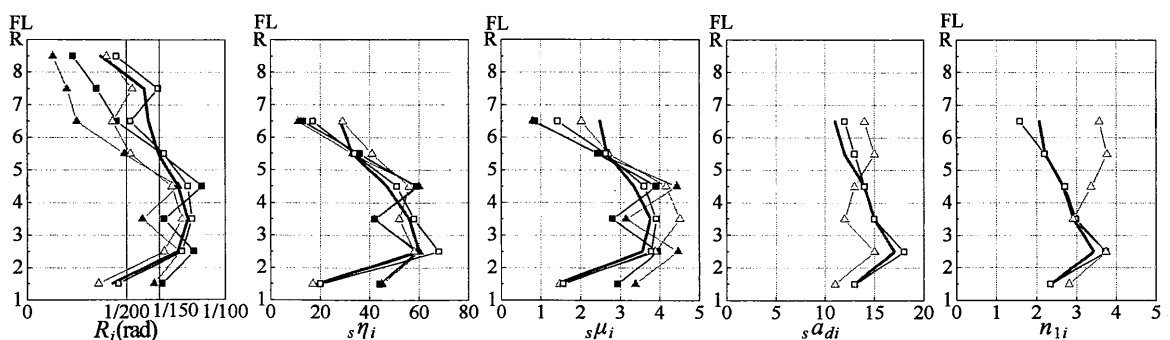


図6 直列バネの有無による時刻歴応答解析及びエネルギー法の結果