

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	架構応答に弾性,弾塑性が混在する場合の制振構造建物のエネルギー配分に関する研究：その2：エネルギー法告示に基づく検討
Title	
著者(和文)	佐藤 大輔, 松澤 祐介, 佐藤 大樹, 北村春幸, 山口 路夫, 脇田 直弥, 松蔭 知明
Authors	daiki sato, Haruyuki Kitamura
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Vol. 82, , 2002
Citation(English)	, Vol. 82, , 2002
発行日 / Pub. date	2012, 3
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/110009571488

架構応答に弾性、弾塑性が混在する場合の制振構造物のエネルギー配分に関する研究 (その2: エネルギー法告示に基づく検討)

構造一振動

準会員 ○ 佐藤大輔^{*1} 正会員 松澤祐介^{*1} 〃 佐藤大樹^{*1}

鋼構建造物 履歴型ダンパー エネルギーの釣合

〃 北村春幸^{*1} 〃 山口路夫^{*2} 〃 脇田直弥^{*2}

エネルギー配分 エネルギー法告示 応答予測法

〃 松蔭知明^{*2}

1. はじめに

その1では、架構応答に弾性、弾塑性が混在する場合での全体架構が吸収する塑性歪エネルギーの、時刻歴解析に基づく配分手法を提案し、妥当性を示した。本報その2では、その1で提案したエネルギー配分とエネルギー法告示（以下、告示と呼ぶ）でのエネルギー配分を比較する。

2 エネルギー法告示の概要¹⁾

告示では、損傷限界時（主架構の最弱層のいずれかの部材が、弾性限界に達した時）と安全限界時（主架構の最弱層が、降伏変形 $f\delta_{yi}$ に達した時）の2パターンの検討を必要とするが、本報では架構応答に弾性、弾塑性が混在する安全限界時について検証する。検証箇所としては、図1に示す安全限界時での耐震設計フロー、①安全限界必要エネルギー E_s の算定(式(1))、②各層の必要エネルギー E_{si} の算定(式(7))、③ E_{si} の主架構へのエネルギー配分量 fE_{si} の算定(式(9))、④ $\sigma\eta_{si}$ 算出時に使用する、各層のダンパーの必要エネルギー吸収量 σE_{si} (式(11))の4項目を対象とする。以下に、それぞれの算出方法を示す。

①安全限界必要エネルギー E_s の算定方法

E_{si} の全層の和 E_s は、次式のように表される。

$$E_s = \frac{M \cdot V_s^2}{2} - W_e \quad (1)$$

ここに、 M :建築物の全質量、 V_s :安全限界時に作用するエネルギーの速度換算値である。 W_e は、損傷限界吸収エネルギーであり、図2に示す関係より次式のように求められる。

$$W_e = \sum_{i=1}^N ({}_fW_{ei} + {}_aW_{ei} + {}_aW_{pi}) \quad (2)$$

$${}_fW_{ei} = \frac{{}_fQ_{di} \cdot \delta_{di}}{2} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} {}_aW_{ei} &= \frac{{}_aQ_{yi} \cdot {}_a\delta_{yi}}{2} \\ {}_aW_{pi} &= 2 \cdot {}_aQ_{yi} (\delta_{di} - {}_a\delta_{yi}) n_i \end{aligned} \right\} \text{(ダンパー降伏時)} \quad (4a,b)$$

$${}_aW_{ei} = \frac{{}_aQ_{di} \cdot \delta_{di}}{2} \quad \text{(ダンパー非降伏時)} \quad (5)$$

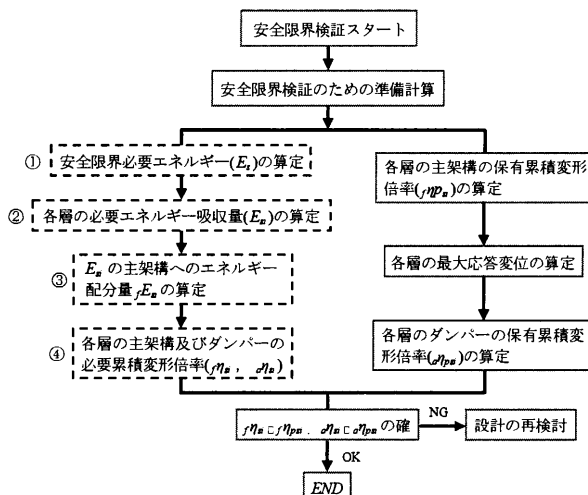


図1 安全限界時の設計フロー

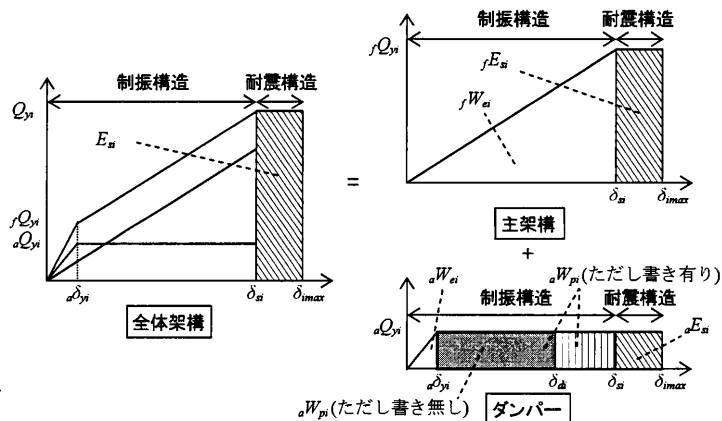


図2 制振構造の復元力特性（最弱層の場合）

ここに、 ${}_fQ_{di}$:損傷限界時における i 層の主架構の層せん断力、 δ_{di} :損傷限界時における i 層の層間変形、 ${}_aQ_{yi}$: i 層のダンパーの降伏層せん断力、 ${}_a\delta_{yi}$: i 層のダンパーの降伏層間変形、 ${}_aQ_{di}$:損傷限界時における i 層のダンパーの層せん断力である。また、これらの値は、部材モデルにおける全体架構（主架構+ダンパー）を静的解析し、本報その1で示した、主架構を完全弾塑性型としたせん断モデルにより得られる。 ${}_fW_{ei}$:主架構の弾性振動エネルギー、 ${}_aW_{ei}$:ダンパーの弾性振動エネルギー、 ${}_aW_{pi}$:ダンパーの塑性歪エネルギー、 n_i :ダンパーの累積塑性変形の程度を表す値（下限値5～上限値20）であり、安全限界時は $n_i = 5$ として検討を行う。

告示には、ただし書き（図2.ダンパー）を適用することによ

り、 fW_{ei} (式(3))と aW_{pi} (式(4b))を、式(6)及び(7)でそれぞれ置き換えて計算することができる。これにより、式(2)の W_e をただし書き無し比べて、大きく見積もることができ、より精度の高い評価をすることができる。

$$fW_{ei} = \frac{fQ_{si} \cdot \delta_{si}}{2} \quad (6)$$

$$aW_{pi} = 2 \cdot aQ_{yi}(\delta_{si} - a\delta_{yi}) \cdot n_i \quad (7)$$

ここに、 fQ_{si} : 安全限界時における主架構の i 層の層せん断力、 δ_{si} : 安全限界時における i 層の層間変形である。

②各層の必要エネルギー吸収量 E_{si} の算定手法

E_{si} は、式(1)より求めた E_s を用いて、次式により算定できる。

$$E_{si} = \frac{s_i \cdot p_i^{-n}}{\sum_{j=1}^N (s_j \cdot p_j^{-n})} E_s \quad (7)$$

ここで、

$$s_i = \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 A_i^2 \frac{k_i}{k_1} \quad (8a)$$

$$p_i = \frac{\alpha_i}{\alpha_1 A_i}, \quad \alpha_i = \frac{Q_{yi}}{\sum_{j=1}^N m_j \cdot g} \quad (8b,c)$$

ここに、 s_i :各層の必要エネルギー吸収量の比を表す基準値、 p_i :各層の保有水平層せん断力係数の A_i 分布とのずれの程度を表す数値、 m_i : i 層の質量、 n :損傷集中指数(梁降伏型の場合は4、それ以外の場合は8)、 k_i :全体架構の i 層の水平剛性、 α_i :各層の保有水平せん断力係数、 Q_{yi} :各層の保有水平耐力($fQ_{yi} + aQ_{yi}$)、 g :重力加速度である。

③ E_{si} の主架構へのエネルギー配分の算定手法

fE_{si} は、式(7)より算出した E_{si} を用いて、次式より求めることができる。

$$fE_{si} = E_{si} \frac{fQ_{yi}}{Q_{yi}} \quad (9)$$

④各層のダンパーの必要エネルギー吸収量 aE_{si} の算出方法

aE_{si} は、次式で求められる。

$$aE_{si} = E_{si} \frac{aQ_{yi}}{Q_{yi}} + aE_{spi} + \beta \cdot aE_{dpi} \quad (10)$$

ここで、ただし書き無しでの aE_{spi} は次式より算出できる。

$$aE_{spi} = 2 \cdot aQ_{yi}(\delta_{di} - a\delta_{yi})n_{si}, \quad n_{si} = 20 \quad (11)$$

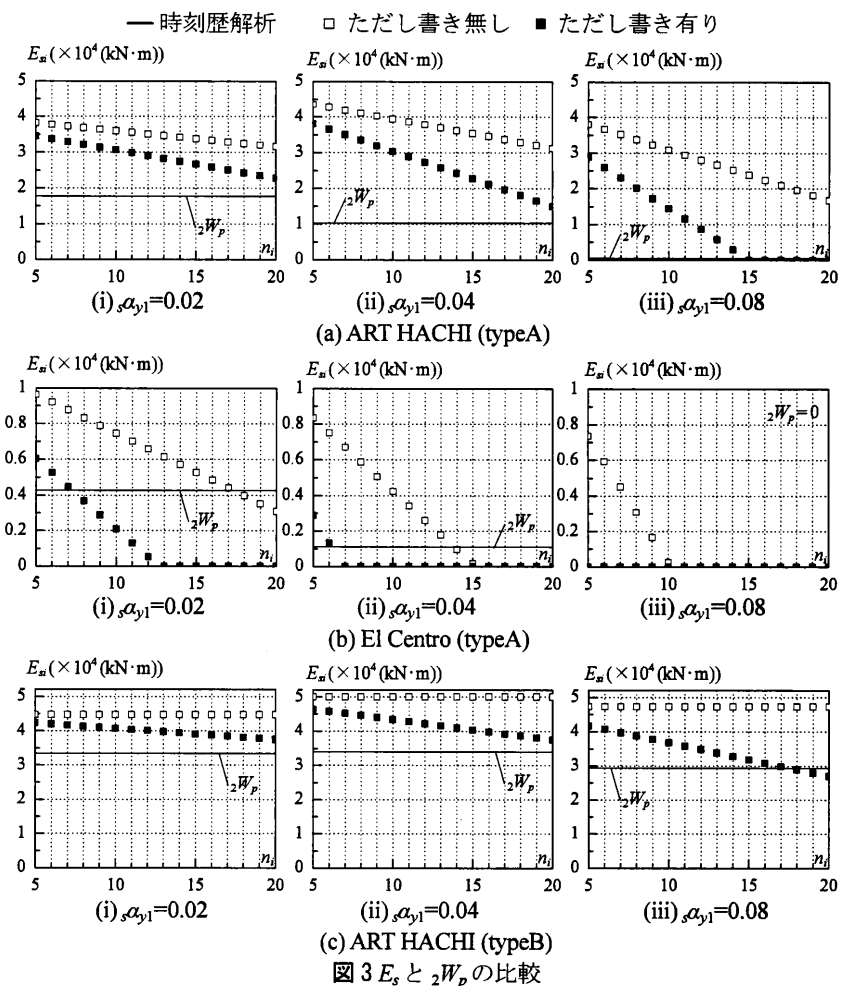


図3 E_s と $2W_p$ の比較

ただし書きを用いると、 aE_{spi} 、 aE_{dpi} は次式より算出できる。

$$aE_{spi} = 2 \cdot aQ_{yi}(\delta_{si} - a\delta_{yi})n_{si}, \quad n_{si} = 20 \quad (12)$$

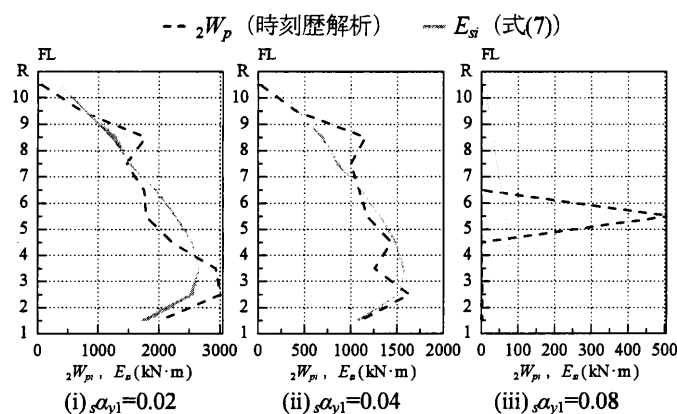
$$aE_{dpi} = 2 \cdot aQ_{yi}(\delta_{di} - a\delta_{yi})n_{di}, \quad n_{di} = 10 \quad (13)$$

ここに、 aE_{spi} :主架構の弾性範囲内の変形内でダンパー部分が吸収するエネルギー、 aE_{dpi} :極めて稀に発生する地震を受ける以前に、すでに数回程度の稀に発生する地震により塑性損傷を被っているものとして算出したエネルギー量、 β :以前に経験した損傷限界レベルの地震の回数等を評価するエネルギー量の割増し係数($\beta=5$)、 δ_{di} :全体架構の塑性歪エネルギーの総和が損傷限界必要エネルギー E_d を越える時の変形である。

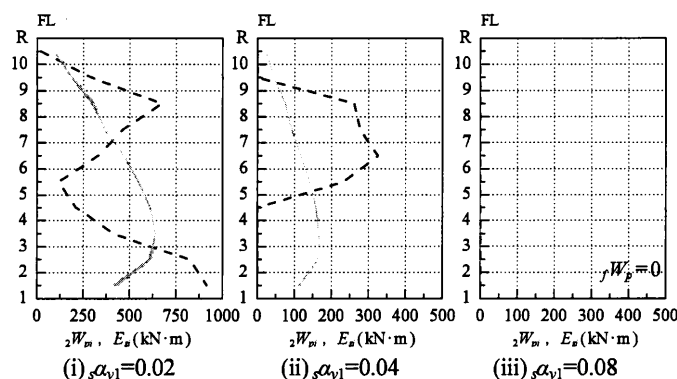
3 エネルギー法告示に基づく検証

3.1 E_s の検証

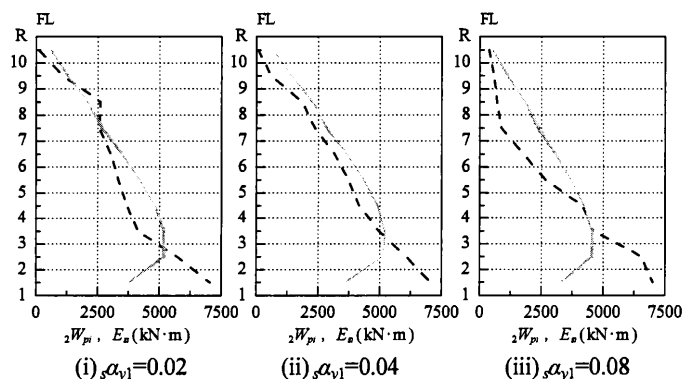
本節において、 E_s を評価するために、式(1)の V_s は、時刻歴解析により得られた V_s を用いる。図3に、式(1)により得られた E_s とせん断モデルの時刻歴解析により得られた $2W_p$ の比較を示す。本報では、 $n_i=5 \sim 20$ の範囲で、式(1)より E_s を求めた。図3より、(a) ART HACHI (typeA)における $\alpha_{y1}=0.02$ 、 $\alpha_{y1}=0.04$ の場合、上限値 $n_i=20$ を用いても、告示の E_s が時刻歴解析の $2W_p$



(a) ART HACHI (typeA)



(b) El Centro (typeA)

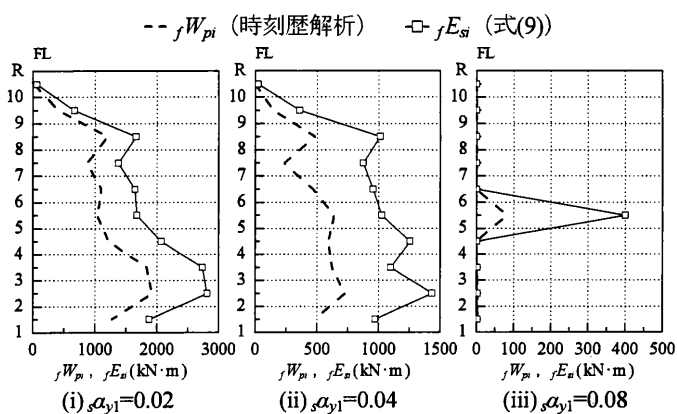


(c) ART HACHI (typeB)

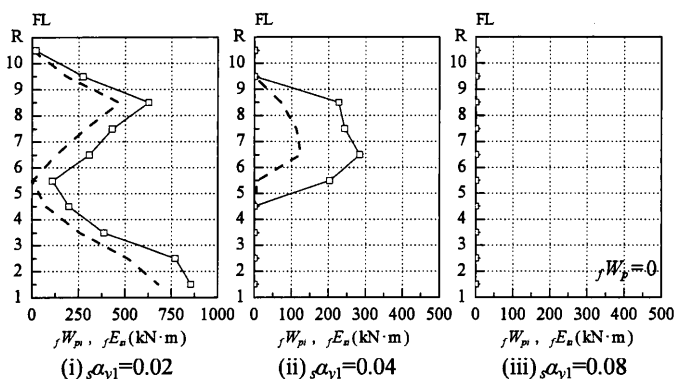
図4 E_s (kJ·m)と ${}_2W_p$ (kJ·m)の比較

よりも大幅に安全側の評価となっていることが分かる。 $s\alpha_{y1} = 0.08$ で、ただし書き無しの場合、告示では主架構が塑性化しているが、時刻歴解析では主架構が塑性化していない。また、ただし書き有りの $n_i=15$ では、 ${}_2W_p$ が E_s と概ね等しい値となることからわかる。(b)El Centro (typeA)では、 $n_i=5\sim 20$ の範囲の値で、 E_s と ${}_2W_p$ の値が概ね等しくなっている。また、地震波の違いから、(1)ART HACHI (typeA)よりも、比較的小さい n_i で E_s と ${}_2W_p$ が同等な値となっている。(c)ART HACHI (typeB)においては、 $s\alpha_{y1} = 0.02$ と $s\alpha_{y1} = 0.04$ の場合に、 $n_i=20$ を用いても、 ${}_2W_p$ より E_s の値が過大となっていた。

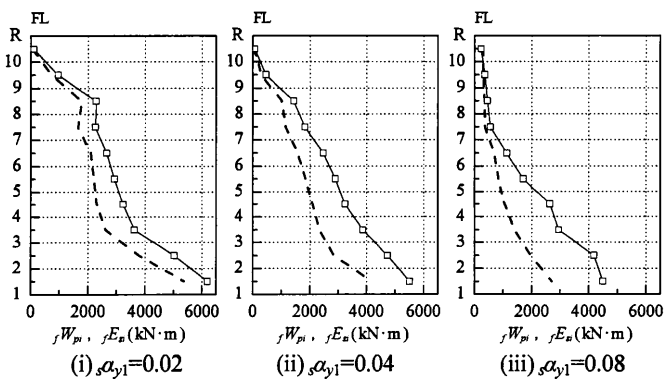
全体的に、ただし書き有りによる影響は大きいこと、入力にも左右されるが、告示で採用されている、 $n_i=5$ は、主架構の損



(a) ART HACHI (typeA)



(b) El Centro (typeA)



(c) ART HACHI (typeB)

図5 fE_s (kJ·m)と fW_{pi} (kJ·m)の比較

傷を評価する上では、相当安全側であることが確認できる。

3.2 E_s の検証

本節において E_s を検証するために、式(7)の E_s は時刻歴解析により得られた ${}_2W_p$ を用いた。図4に、式(7)により $n=3\sim 9$ の範囲で得られる E_s と時刻歴解析により得られた ${}_2W_p$ の比較を示す。なお、(b)El Centro (typeA)の $s\alpha_{y1} = 0.08$ は、 $fW_p = 0$ であったため表記していない。共通して言えることは、本報で用いている解析モデルの p_i の値が、ほぼ全層で1に近いこと、損傷集中指数 n の違いによる E_s への影響は少ない結果となっている。

(a)ART HACHI (typeA)の場合、 $s\alpha_{y1} = 0.02$ と $s\alpha_{y1} = 0.04$ においては、時刻歴解析と告示では同様の傾向を示している。しかし、ダンパー量が増えた、 $s\alpha_{y1} = 0.08$ の場合、時刻歴解析では、5層

だけしかエネルギーを吸収していないのに対して、告示では全層でエネルギーを吸収しており、告示では5層の損傷集中を評価できていない。(c)ART HACHI (typeB)の場合、 E_{si} と ${}_2W_{pi}$ を比較すると、下層で E_{si} と ${}_2W_{pi}$ の値に違いが出るものの、全てのダンパー量で、概ね一致していると言える。一方、(b)El Centro (typeA)では、 $\alpha_{y1}=0.02$ と $\alpha_{y1}=0.04$ においても、 E_{si} と ${}_2W_{pi}$ では、同様な傾向を示さなかった。

3.3 fE_{si} の検証

fE_{si} を検証するために、 E_{si} は時刻歴解析により得られた ${}_2W_{pi}$ を用いた。図5に式(9)より得られた fE_{si} と時刻歴解析の fW_{pi} の比較を示す。図5より、いずれのケースにおいても、 E_{si} の方が、 ${}_2W_{pi}$ より大きく、主架構の損傷を過大に評価していることを確認できる。(a)のtypeAと(c)のtypeBを比較すると、(c)のtypeBの方が、 E_{si} と fW_{pi} との差が小さいことがわかる。 E_{si} と fW_{pi} を比較した際に差がでる要因として、式(9)は、図2に示すような主架構とダンパーの塑性変形の度合いが等しいと仮定しているが、実際は、本報その1(図5)に示すように、主架構とダンパーの塑性変形が異なるためである。

図6に、式(9)の $fE_{si}/{}_2W_{pi}$ と主架構の塑性率 μ_i の関係を示す。なお、図中の γ は、全体架構の降伏耐力 Q_{yi} と主架構の降伏耐力 fQ_{yi} の比である(式15)。

$$\gamma = \frac{fQ_{yi}}{Q_{yi}} \quad (14)$$

図6より、主架構の塑性率が大きくなるに伴い、式(9)による fE_{si} の精度が高くなることが確認できる。また、全体架構と主架構の γ が大きいほど、精度が高くなることが分かる。

3.4 ${}_aE_{si}$ の検証

本節では、 ${}_aE_{si}$ を検証するために、式(11)での V_s は、時刻歴解析により得られた V_s を用いる。図7(a),(b)に、式(11)により得られたtypeA及びtypeBの ${}_aE_{si}$ と時刻歴解析により得られた ${}_aW_{pi}$ の比較をそれぞれ示す。図7(a)より、El Centro (typeA)では、全てのダンパー量で、安全側の評価となっていた。しかし、ART HACHIにおいて、typeA、typeBの各ダンパー量では、告示がダンパーに危険側の評価をする場合があり、ダンパー量や入力地震動によっては、危険側の評価となることが分かった。

4 まとめ

本報での告示に基づく検証により得られた知見を以下に示す。

- (1) 全体的に、告示は時刻歴解析よりも、主架構の損傷を評価する上では、安全側であり、精度は、地震波により異なるこ

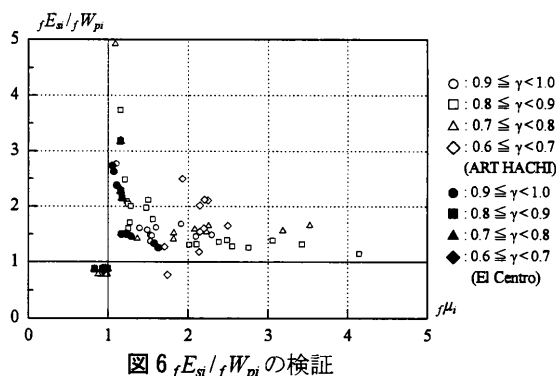


図6 $fE_{si}/{}_2W_{pi}$ の検証

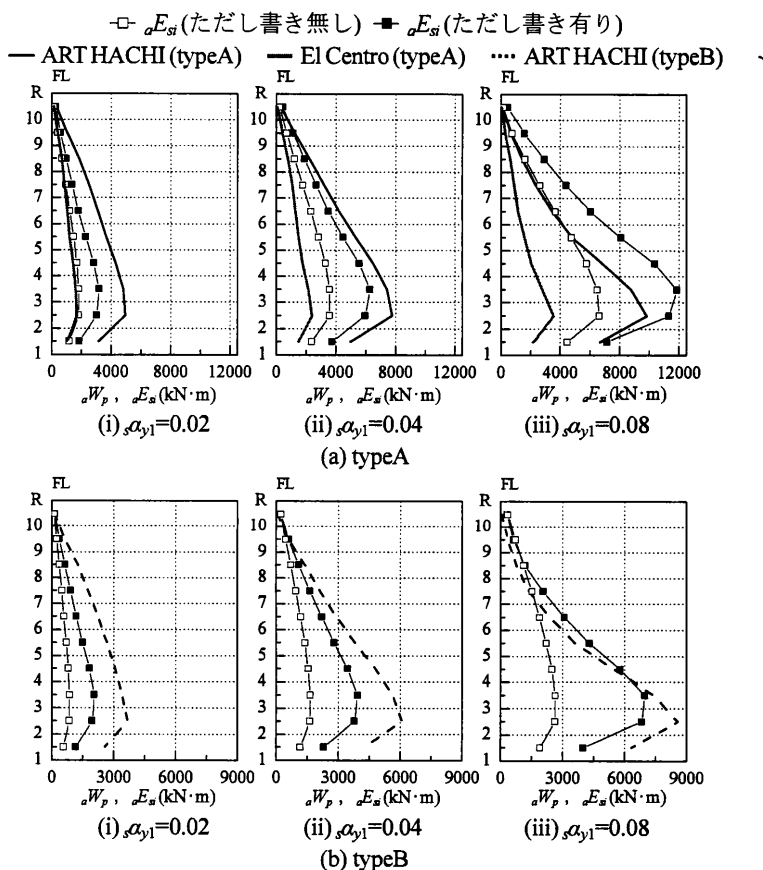


図7 ${}_aE_{si}$ と ${}_aW_{pi}$ の比較

とを確認した。

- (2) 告示の耐震設計フローに設けられている、ダンパー単体の検証においては、ダンパー量や入力地震動によって、危険側の評価となることが分かった。

謝辞

本研究は、新日鉄エンジニアリング株式会社、東京理科大学によるエネルギー法研究会の成果の一部である。

参考文献

- 1) 独立行政法人 建築研究所：鋼構造建築物へのエネルギー法活用マニュアル 平成17年国土交通省告示代631号「エネルギーの釣合に基づく耐震計算法」に準拠して、技術堂出版、2008.9

*1 東京理科大学

*2 新日鉄エンジニアリング株式会社