

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	エネルギーの釣合に基づく主架構と履歴ダンパーの累積塑性歪エネルギー分担率の予測法
Title(English)	Proposal of a prediction formula for the share of cumulative plastic strain energy of frame and hysteresis dampers by energy based method.
著者(和文)	中村一哉, 佐藤大樹
Authors(English)	Kazuya Nakamura, Daiki Sato
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 349-352
Citation(English)	, , , pp. 349-352
発行日 / Pub. date	2019, 3

エネルギーの釣合に基づく主架構と履歴ダンパーの 累積塑性歪エネルギー分担率の予測法

構造—振動

正会員 ○ 中村一哉^{*1} // 佐藤大樹^{*1}

制振構造 履歴ダンパー 時刻歴応答解析
エネルギーの釣合 応答予測法 エネルギー分担率

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降、建物に制振構造を採用する事例が増加している¹⁾。特に、履歴ダンパーを有する制振構造に対して、長周期・長時間地震動が作用した場合、多数回の繰り返しによるダンパーの累積損傷も評価する必要がある^{2),3)}。

累積損傷を評価する手法として、建物の地震応答をエネルギーの観点から整理する、エネルギーの釣合に基づく応答評価法⁴⁾（以後、エネルギー法）がある。地震によるエネルギー入力と建物の有するエネルギー吸収能力の対比により構造物の耐震性を評価するため、早期に降伏する制振部材の設計にも適している。

制振構造は、地震エネルギーをダンパーに集中させることで主架構の損傷を低減し、大地震後の建物の継続使用を目標とするものである。そのため、制振構造は主架構が弾性に留まることを目標に設計されるべきである。しかし、近い将来に襲来が予想される、これまでの想定をはるかに超える地震動を考えると、制振構造においても主架構が塑性化することを考慮する必要がある。したがって、設計時には主架構とダンパーの塑性歪エネルギーの分担率（以後、エネルギー分担率 fW_p/aW_p ）が重要となる。

以上より、本報では主架構の塑性化を考慮した制振構造におけるエネルギー分担率を、時刻歴応答解析を行わずに予測できるよう、エネルギー法による予測式の提案を目的とする。はじめに、時刻歴応答解析により、主架構の降伏せん断力係数やダンパー量、入力地震動の違いがエネルギー分担率 fW_p/aW_p に与える影響を検討する。次に、エネルギー法による予測式を提案し、予測式の分析を行う。最後に、予測値と時刻歴応答解析の結果と比較することで、予測式の精度を検証する。

2. 解析モデル概要

本報では文献5)、6)を参考に主架構の弾性1次固有周期を $T=1.0$ s、質点数 N は10と設定し、10層の鋼構造建物

の剛性・耐力分布を単純化した多質点系等価せん断型モデル（以降、せん断モデルと呼ぶ）を用いる。

図1に本報における解析モデルの概要を示す。質量分布は等分布($m_i = 9.8 \text{ kN}\cdot\text{s}^2/\text{cm}$)、主架構の剛性分布 $f k_i$ と主架構の降伏せん断力分布 $f Q_{yi}$ は台形分布（最上層が最下層の1/2）とする。本報ではパラメータとして第1層の主架構の降伏せん断力係数 $f \alpha_{y1} = 0.20, 0.30$ に設定する。構造減衰は T に対して $h = 2\%$ となる初期剛性比例型とする。

ダンパーの降伏せん断力 $a Q_{yi}$ は第1層のダンパーの降伏せん断力 $a Q_{y1}$ を基準とし、秋山が提案する分布⁴⁾に基づく最適分布をもとに3つのグループに分割した段階分布とする。本報ではダンパー量 $a \alpha_{y1} = 0.01, 0.02, 0.04, 0.10, 0.16, 0.20$ に設定する。ダンパーの初期剛性 $a k_i$ は $a Q_{yi}$ からダンパーの降伏層間変形 $a \delta_{yi}$ で除して算出される。 $a \delta_{yi}$ は全層で一定値とし、 $a \delta_{yi} = 0.64 \text{ cm}$ とする。なお、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ものと仮定し、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⁷⁾。

本報では、主架構が塑性化する場合の復元力特性について考える。塑性化を考慮した主架構と履歴ダンパー（以降、ダンパーと呼ぶ）の復元力特性は完全弾塑性型とする。図2に主架構とダンパー、全体架構の復元力特性を示す。なお、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こととする。

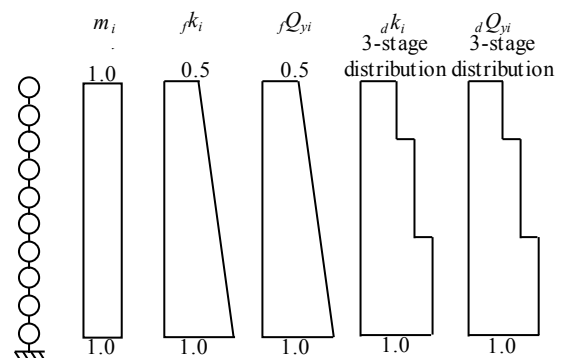


図1 解析モデル概要

Kazuya Nakamura, Daiki Sato

Proposal of a prediction formula for the share of cumulative plastic strain energy of frame and hysteresis dampers by energy based method.

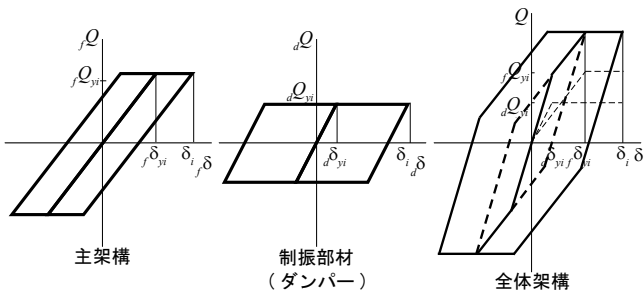


図2 復元力特性

3. 入力地震動概要

検討用地震動は、コーナー周期 $T_c = 0.64$ s 以降の領域で、擬似速度応答スペクトル $pS_V = 50, 100, 150$ 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⁷⁾。本報では $pS_V = 50, 100, 150$ cm/s の地震動をそれぞれレベル 1, レベル 2, レベル 3 と位置付ける。ART HACHI は加振終了後の入力エネルギーを評価できるように 505 s 以降を 0 cm/s² とし、合計で継続時間は 550 s とする。ART KOBE は加振終了後の入力エネルギーを評価できるように 270 s 以降を 0 cm/s² 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 3 に擬似速度応答スペクトル pS_V とエネルギースペクトル V_E (固有周期 $T = 0 \sim 3$ s) を示す。

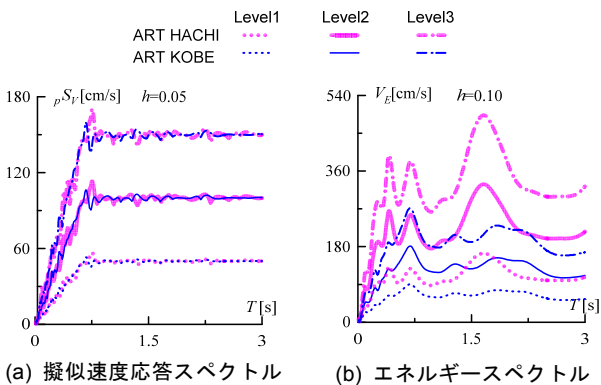


図3 応答スペクトルとエネルギースペクトル

4. 時刻歴応答解析によるエネルギー分担率

本章では、主架構が塑性化することを考慮した制振構造の設計時に重要となる、エネルギー分担率 fW_p/dW_p の時刻歴応答解析結果を示す。エネルギー分担率は、地震終了時刻 t_0 のものとする。

図 4 に主架構とダンパーのエネルギー分担率とダンパー量の関係を示す。(a)には ART HACHI, (b)には ART KOBE の結果を示し、各ダンパー量において左からレベル 1, 2, 3 とする。凡例はシンボルで入力レベルを、色で主架構の降伏せん断力係数 $f\alpha_{y1}$ を表す。それぞれの図にはエネルギー分担率 $fW_p/dW_p = 1.0$ を赤線で示しており、 fW_p/dW_p が 1.0 以上のプロットは、ダンパーよりも主架構の方が累積塑性歪エネルギーを多く負担しており、制振構造としてダンパ

一の性能が発揮できていないため省略する。

(a)より、ダンパー量が小さい箇所では fW_p/dW_p が 1.0 以上となっている箇所が多く、地震エネルギーをダンパーに集中させることができていない。ダンパー量が大きくなるほど fW_p/dW_p は小さくなっているが、 $d\alpha_{y1} = 0.16$ と $d\alpha_{y1} = 0.20$ ではほとんど差がない。入力レベル 1 の場合では fW_p/dW_p が概ね 0 となっている箇所もあり、そこでは主架構がほとんど塑性化していない。入力レベルが大きいほど fW_p/dW_p が大きい傾向にあるが、ダンパー量が大きくなるとその差は小さくなる。また、同じダンパー量において、いずれの入力レベルでも $f\alpha_{y1} = 0.3$ の方が fW_p/dW_p が小さい。これは、主架構の降伏せん断力係数が大きい、つまり主架構とダンパーの降伏せん断力の比 fQ_{y1}/dQ_{y1} が大きいほど、ダンパーが累積塑性歪エネルギーを負担しやすいことを表している。(b)でも同様の傾向がみられる。

(a)と(b)を比較すると、同じダンパー量において、いずれの入力レベルでも(a)の方が fW_p/dW_p が小さい。つまり、(a)の方がダンパーが効率的に性能を発揮できている。これは、それぞれの地震動で、 fW_p/dW_p を決定する重要な指標となるダンパーの等価繰返し数 an_{pi} が異なるためだと考えられる。ART HACHI は長周期地震動、ART KOBE は直下型地震動に分類され、長周期地震動の方が an_{pi} が大きく、直下型地震動では an_{pi} が小さくなる傾向があるため、同じ建物諸元でも ART HACHI の方が fW_p/dW_p が小さく、ダンパーの性能が発揮されている。

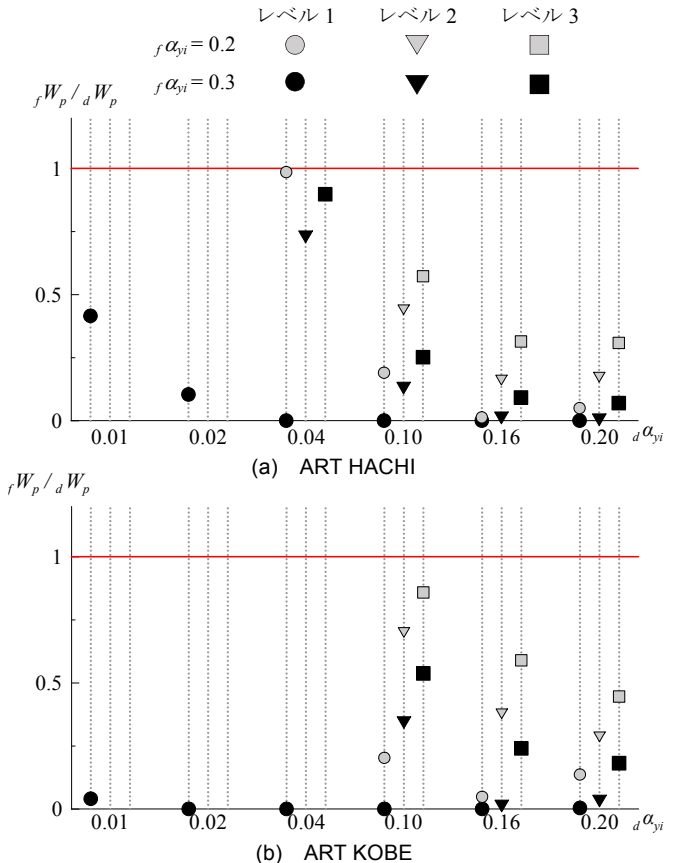


図4 エネルギー分担率とダンパー量の関係

5. エネルギー法による分担率の予測

本章では、主架構とダンパーの塑性歪エネルギーの分担率 fW_p / dW_p の、エネルギー法を用いた予測式を提案する。提案した予測式の各項と、本報における解析範囲とを比較し、各項の概ねの値を示しそれぞれの特徴を検討する。予測式による結果と時刻歴応答解析の結果を比較することで、予測式の精度を確認する。

5.1 エネルギー法による予測式の提案

地震終了時刻 t_0 における全層の主架構の累積塑性歪エネルギー fW_p は、第 i 層の主架構の累積塑性歪エネルギー fW_{pi} と主架構の損傷分散係数 $f\gamma_i$ を用いて表される。 fW_p は、主架構の降伏せん断力 fQ_{yi} と、最大変形 $\delta_{i\max}$ の 1 ループが消費する累積塑性歪エネルギーと主架構の等価繰返し数 $f n_{pi}$ の積で表される。

$$fW_p(t_0) = f\gamma_i \cdot fW_{pi} = 4 \cdot f n_{pi} \cdot f\gamma_i \cdot fQ_{yi} \cdot (\delta_{i\max} - f\delta_{yi}) \quad (1)$$

同様に、全層のダンパーの累積塑性歪エネルギー dW_p は次式で表される。

$$dW_p(t_0) = d\gamma_i \cdot dW_{pi} = 4 \cdot d n_{pi} \cdot d\gamma_i \cdot dQ_{yi} \cdot (\delta_{i\max} - d\delta_{yi}) \quad (2)$$

式(1)を式(2)で除すことで、エネルギー分担率 fW_p / dW_p を求めることができる。

$$\begin{aligned} \frac{fW_p}{dW_p} &= \frac{4 \cdot f n_{pi} \cdot f\gamma_i \cdot fQ_{yi} \cdot (\delta_{i\max} - f\delta_{yi})}{4 \cdot d n_{pi} \cdot d\gamma_i \cdot dQ_{yi} \cdot (\delta_{i\max} - d\delta_{yi})} \\ &= \frac{f n_{pi} \cdot f\gamma_i \cdot fQ_{yi} \cdot f\delta_{pi}}{d n_{pi} \cdot d\gamma_i \cdot dQ_{yi} \cdot d\delta_{pi}} \\ &= \lambda_{ni} \cdot \lambda_{\gamma i} \cdot \lambda_{Qi} \cdot \lambda_{\delta i} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $f\delta_{pi}$: 第 i 層の主架構の塑性変形、 $d\delta_{pi}$: 第 i 層のダンパーの塑性変形

5.2 予測式の各項の分析

本節では、式(3)における各項の分析を行う。図5に主架構とダンパーの(a)等価繰返し数 $f n_{pi} - d n_{pi}$ 関係、(b)損傷分散係数 $f\gamma_{pi} - d\gamma_{pi}$ 関係、(c)降伏せん断力 $fQ_{yi} - dQ_{yi}$ 関係、(d)塑性変形 $f\delta_{pi} - d\delta_{pi}$ 関係の解析値を示し、式(3)の各項がどの程度の値となるのか検討する。

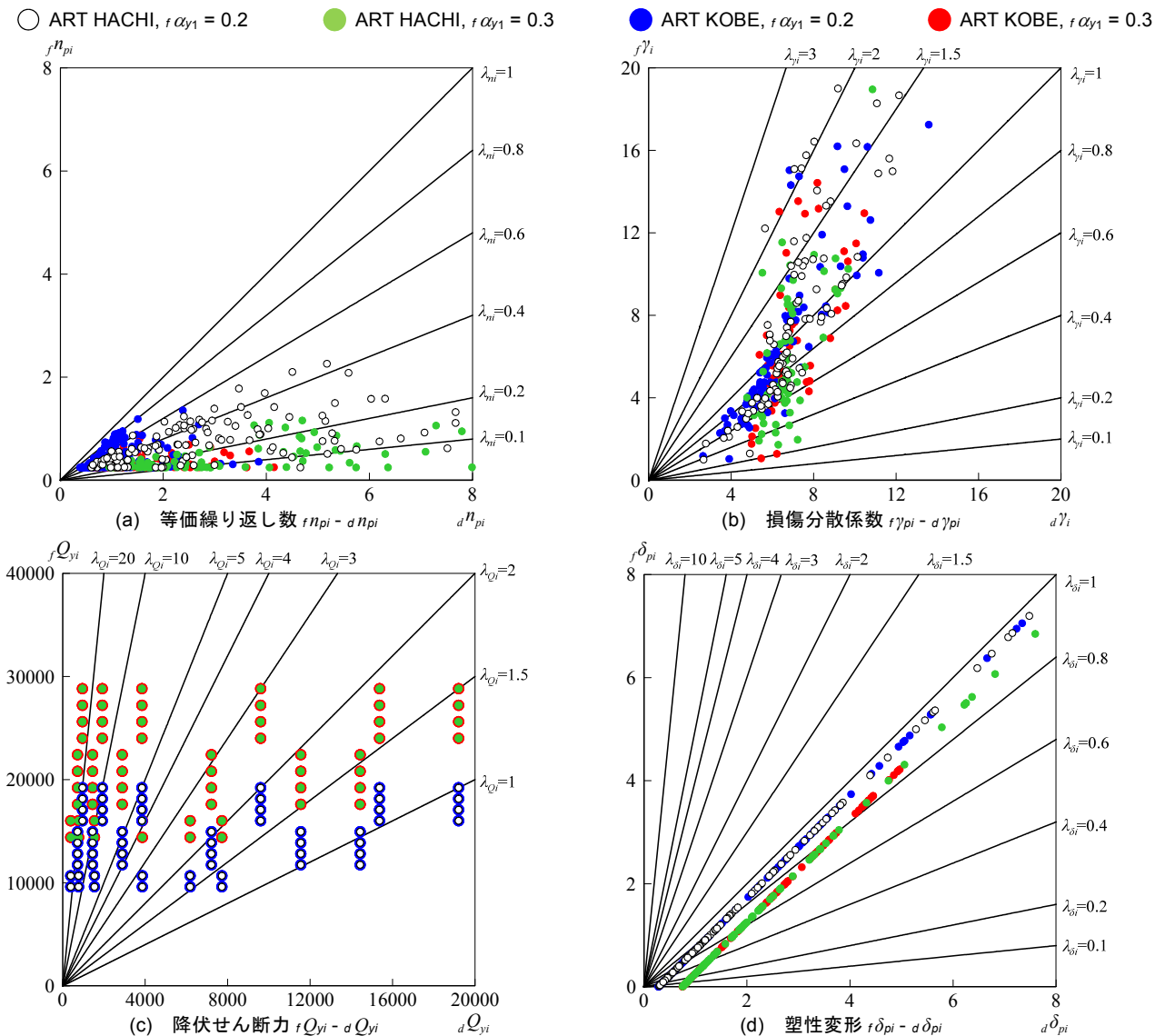


図5 予測式の各項の分析

(a)より、 λ_{ni} は0~0.8程度となり、1.0を超えないことがわかる。ダンパーの等価繰返し数 $d n_{pi}$ は入力地震動の影響を大きく受け、ART HACHIでは $d n_{pi}=0\sim 8$ 、ART KOBEでは $d n_{pi}=0\sim 4$ 程度である。一方、主架構の等価繰返し数 $f n_{pi}$ は入力地震動よりも、主架構の降伏せん断力係数 $f \alpha_{y1}$ の影響を大きく受け、どちらの地震動でも $f \alpha_{y1}=0.3$ よりも $f \alpha_{y1}=0.2$ の方が大きい。

(b)においては主架構、ダンパーともに、損傷が小さい層を無視するため、損傷分散係数 $f \gamma_{pi}$ 、 $d \gamma_{pi}$ が20以下の結果を示す。 λ_{yi} は0.2~2.0程度となる。本報では質点数 $N=10$ と設定しているため、 $\gamma_{pi}=10$ のときが、全層の累積塑性歪エネルギー W_{pi} が等しい理想的な状態である。 $\gamma_{pi}<10$ の層は損傷が集中しており、 $\gamma_{pi}>10$ の層は他の層に比べて損傷が比較的小さく、大きくなればなるほど損傷はさらに小さいことを表している。 $d \gamma_{pi}$ は3.0~8.0程度に集中しているのに対し、 $f \gamma_{pi}$ は10以内にある程度集中はしているものの、比較的広く分散している。それぞれの傾向については、入力地震動や $f \alpha_{y1}$ との関係性は見られない。なお、建物の上層階など、主架構の塑性化が小さい場合に、 $f \gamma_{pi}$ が非常に大きな値となる可能性があるため、質点数 N によって γ_{pi} の上限値を適宜定める必要がある。

(c)より、 λ_{Qi} は1~20程度となる。 λ_{Qi} は、主架構とダンパーの耐力 $f Q_{yi}$ と $d Q_{yi}$ の組み合わせで決定されるため、設計時に与えることができる。そのため、 $f \alpha_{y1}$ が等しいケースで解析値が重なっている。式(3)より、 λ_{Qi} が大きくなるほど $f W_p/d W_p$ も大きくなるように考えられるが、図4の時刻歴応答解析の結果をみると、 λ_{Qi} が大きくなるほど $f W_p/d W_p$ は小さくなる点に注意が必要である。

(d)より、 $\lambda_{\delta i}$ は0~1.0程度となり、1.0を超えないことがわかる。それは、ダンパーの降伏変形 $d \delta_{pi}$ が、主架構の降伏変形 $f \delta_{pi}$ よりも常に小さいためである。最大層間変形 δ_{max} が大きいほど塑性変形 $d \delta_{pi}$ 、 $f \delta_{pi}$ が共に大きくなり、その差が縮まることで $\lambda_{\delta i}$ は1.0に近づく。 δ_{max} が小さいほど $d \delta_{pi}$ 、 $f \delta_{pi}$ の差は大きくなり、 $\lambda_{\delta i}$ は0に近づく。

5.3 時刻歴応答解析との比較

前節の分析を踏まえ、図6に主架構とダンパーの塑性歪エネルギーの分担率 $f W_p/d W_p$ と $\lambda_{\delta i}$ の関係を示す。ダンパーの性能が発揮されている範囲での検討を行うため、 $f W_p/d W_p$ が1.0以下の結果のみを示す。直線で予測式を示し、凡例は $\lambda_{ni} \cdot \lambda_{yi} \cdot \lambda_{Qi} = \lambda_{n\gamma Qi}$ とする。プロットで解析値を示し、各プロットの色は $\lambda_{n\gamma Qi}$ によって決定し、予測式の凡例と同様とする。結果をみると、解析値によるプロットの色は、予測式による直線の色と精度良く対応している。これにより、いずれかの第 i 層の λ_{ni} 、 λ_{yi} 、 λ_{Qi} 、 $\lambda_{\delta i}$ がわかれば、建物全体としてのエネルギー分担率 $f W_p/d W_p$ が決定することがわかった。 λ_{Qi} 、 $\lambda_{\delta i}$ は設計時に与えることができるため、 λ_{ni} 、 λ_{yi} の予測が重要となる。

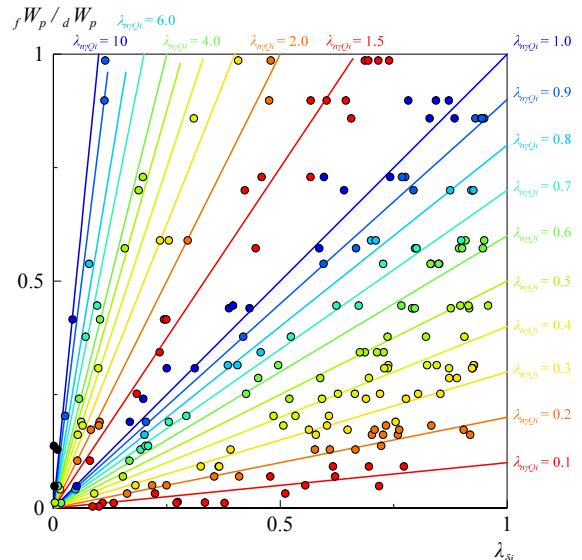


図6 エネルギー法による予測式と解析値の比較

6. まとめ

本報では、時刻歴応答解析により、主架構の降伏せん断力係数 $f \alpha_{y1}$ やダンパー量 $d \alpha_{y1}$ 、入力地震動の違いが主架構とダンパーの塑性歪エネルギーの分担率 $f W_p/d W_p$ に与える影響を検討した。さらに、エネルギー分担率 $f W_p/d W_p$ を時刻歴応答解析を行わずに予測できるように、エネルギー法による予測式の提案を行った。その予測式による結果と時刻歴応答解析結果とを比較することで、予測式の妥当性を検討した。以下に得られた知見を示す。

- (1)いずれの地震動でも、 $f \alpha_{y1}$ が大きくなると $f W_p/d W_p$ は小さくなった。入力レベルが大きいほど $f W_p/d W_p$ が大きい傾向にあるが、 $d \alpha_{y1}$ が大きくなるとその差は小さくなった。
- (2)第 i 層の主架構とダンパーの等価繰返し数 n_{pi} 、損傷分散係数 γ_{pi} 、耐力 Q_{yi} 、塑性変形 δ_{pi} を用いることで、建物全体の $f W_p/d W_p$ を精度良く予測することができた。

なお、本報では n_{pi} と γ_{pi} に解析値を用いたが、今後はそれらも予測することで、さらなる知見の充実を図りたい。

参考文献

- 1)北村春幸, 北村佳久, 伊藤優, 坂本光雄: 適用建物調査に基づく日本の応答制御構造の分析・評価, 日本建築学会技術報告集, 第18号, pp.55-60, 2003.12
- 2)日本建築学会: 長周期・長時間地震動と超高層建物の対応策-専門家として知っておきたいこと, 2013.11
- 3)佐藤大樹, 長江拓也, 大内隼人, 島田侑, 北村春幸, 福山國夫, 梶原浩一, 井上貴仁, 中島正愛, 斉藤大樹, 福和伸夫: 長周期地震動を受ける超高層の鋼製ダンパーによる制振改修に関する E-ディフェンス振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 第76巻, 第667号, pp.1639-1648, 2011.9
- 4)秋山宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 第1版, 技報堂出版, 1999.11
- 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, pp.71-78, 2006.1
- 6)佐藤大輔, 北村春幸, 佐藤大樹, 佐藤利昭, 山小路夫, 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
- 7)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, pp.543-552, 2011.3

*1 東京工業大学