

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	履歴ダンパーを有する制振構造の主架構の塑性化の程度を考慮した第1層の応答評価
Title(English)	
著者(和文)	岩森貴寿, 佐藤大樹, 北村春幸, 山口路夫, 脇田直弥
Authors(English)	Takatoshi Iwamori, Daiki Sato, Haruyuki Kitamura, Michio Yamaguchi, Naoya WAKITA
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 273-276
Citation(English)	, , , pp. 273-276
発行日 / Pub. date	2018, 3

履歴ダンパーを有する制振構造の主架構の塑性化の程度を考慮した第1層の応答評価

構造—振動

正会員 ○岩森貴寿^{*1}

正会員 佐藤大樹^{*2}

〃 北村春幸^{*3}

〃 山口路夫^{*4}

〃 脇田直弥^{*5}

制振構造 応答評価 履歴ダンパー

主架構の塑性化 等価繰返し数 損傷分散係数

1.はじめに

耐震構造建物の設計手法の1つに構造骨組のエネルギー吸収能力により建物の耐震安全性を確保する、エネルギーの釣合に基づく耐震計算法¹⁾(以降、エネルギー法と呼ぶ)が規定されている。

主架構が弾性に留まることを想定した制振構造のエネルギー法は秋山により提案され、北村ら²⁾によって主架構が大きく塑性化する場合を考慮したエネルギー法に拡張された。北村らはエネルギー配分を決定する重要な指標となる主架構と制振部材(以降、ダンパーと呼ぶ)の等価繰返し数を耐震部材の等価繰返し数と同じ値とすることで、主架構が塑性化した制振構造は耐震構造と同様に計算できると仮定している。しかし、ダンパーのエネルギー吸収効率は主架構の塑性化の程度に応じて徐々に低下することが考えられるため³⁾、主架構の塑性化の程度を考慮したダンパーの等価繰返し数は耐震構造の等価繰返し数と同じ値とは限らない。そこで、文献3)、4)では主架構の塑性化に伴うダンパーの等価繰返し数の低下傾向を分析し、主架構の塑性化の程度を考慮した応答評価法を提案しているが、その有用性は示されていない。

以上より本報では、主架構の塑性化の程度を考慮した応答評価法の構築のため、エネルギー法の重要な指標となる等価繰返し数、損傷分散係数および主架構の降伏せん断力の違いが応答評価に及ぼす影響を分析する。

2.主架構の塑性化の程度を考慮した第1層の応答評価式

文献3)より、主架構が弾性である場合の非制振弾性モデルの層せん断力係数に対する第1層の主架構、ダンパーの層せん断力係数の割合 $f\alpha_1/f\alpha_0$ 、 $d\alpha_{y1}/f\alpha_0$ と非制振弾性モデルの応答変形に対する第1層の最大層間変形の割合 $\kappa_1 \cdot \delta_{\max,1}/f\delta_0$ の関係はそれぞれ式(1)、(2)で表され、全体架構(主架構+ダンパー)の層せん断力係数は式(3)で表される。

$$\left(\kappa_1 \frac{\delta_{\max,1}}{f\delta_0} \right) = \left(\frac{f\alpha_1}{f\alpha_0} \right) \quad (1)$$

$$\left(\kappa_1 \frac{\delta_{\max,1}}{f\delta_0} \right) = -\frac{4_d n_{ei} \cdot d \gamma_1}{\kappa_1} \left(\frac{d\alpha_{y1}}{f\alpha_0} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{4_d n_{ei} \cdot d \gamma_1}{\kappa_1} \right)^2 \left(\frac{d\alpha_{y1}}{f\alpha_0} \right)^2 + 1} \quad (2)$$

$$\left(\frac{\alpha_1}{f\alpha_0} \right) = \left(\frac{d\alpha_{y1}}{f\alpha_0} \right) + \left(\frac{f\alpha_1}{f\alpha_0} \right) \quad (3)$$

ここで、非制振弾性モデルの最大せん断力係数 $f\alpha_0$ と最大変

形 $f\delta_0$ は構造体の損傷に寄与するエネルギーの速度換算値 V_D と主架構の弾性1次固有周期 T を用いて次式で表される²⁾。

$$f\alpha_0 = \frac{2\pi \cdot V_D}{f_1 T \cdot g}, \quad f\delta_0 = \frac{f_1 T \cdot V_D}{2\pi} \quad (4,5)$$

主架構の塑性化の程度を考慮した第1層の応答評価式を算出するには文献3)、4)より、主架構の塑性化に伴うダンパーの等価繰返し数の低下率 β_{ni} を用いる(式(6))。

$$\beta_{ni} = -0.2 \cdot f\mu_i + 1 \quad f\mu_i < 3 \quad (6a)$$

$$\beta_{ni} = 0.4 \quad f\mu_i \geq 3 \quad (6b)$$

ここで、主架構の塑性変形倍率 $f\mu_i$ は次式で表される。

$$f\mu_i = \frac{\delta_{\max,i}}{f\delta_{yi}} - 1 \quad (7)$$

主架構の塑性化の程度を考慮した非制振弾性モデルの変形に対する第1層の最大層間変形の割合 $\kappa_1 \cdot \delta_{\max,1}/f\delta_0$ の関係は次式で表すことができる³⁾。

$$\left(\kappa_1 \frac{\delta_{\max,1}}{f\delta_0} \right)^{(j+1)} = \frac{\kappa_1 \left(\frac{f\alpha_0}{f\alpha_{y1}} \right) - \kappa_1 \left(\frac{f\alpha_{y1}}{f\alpha_0} \right) + 8_f n_{i1} \cdot f \gamma_1 \left(\frac{f\alpha_{y1}}{f\alpha_0} \right)}{8_d n_{ei} \cdot \beta_{ni}^{(j)} \cdot d \gamma_1 \left(\frac{d\alpha_{y1}}{f\alpha_0} \right) \left(\frac{f\alpha_0}{f\alpha_{y1}} \right) + 8_f n_{i1} \cdot f \gamma_1} \quad (8)$$

ここで、括弧書きの添え字は反復操作回数である。右辺の $\beta_{ni}^{(j)}$ は $\delta_{\max,1}^{(j)}$ を含む項であるため、左辺の $\delta_{\max,1}^{(j+1)}$ と値を一致させる必要がある。そこで、はじめは $\beta_{ni}^{(1)} = 1$ と仮定し $\delta_{\max,1}^{(2)}$ を求め、 $\delta_{\max,1}^{(j+1)}$ が概ね一定値となるまで式(8)に代入する。筆者らはこの収斂計算を5回程度行うことで $|\delta_{\max,1}^{(j)} / \delta_{\max,1}^{(j+1)} - 1|$ が0.1以下なることを確認している。

3.制振構造の第1層の応答評価手法の提案

本章では、エネルギー法による第1層のせん断力係数と最大層間変形の関係を用いて、制振構造の主架構弾性の場合と主架構が塑性化する場合の応答評価曲線を示す。

はじめに、各モデルの T とそれに対応する V_D を用いて式(4)より非制振弾性モデルのせん断力係数 $f\alpha_0$ を算出する。本報ではコーナー周期 $T_c = 0.64$ s以降で $V_{D,\max} = 300$ cm/sが一定となる設計用エネルギースペクトルを用いる。

制振構造の第1層のせん断力係数と最大層間変形の関係は、ダンパー量 $d\alpha_{y1}$ を $f\alpha_0$ で除した $d\alpha_{y1}/f\alpha_0$ を用いて式(2)から主架構弾性時、式(8)から主架構の塑性化した場合での、非制振弾性モデルの変形に対する第1層の最大層間変形の割合 $\kappa_1 \cdot \delta_{\max,1}/f\delta_0$ をそれぞれ算出する。なお、主架構の損傷分散係数、ダンパーの損傷分散係数、主架構の等価繰返し数、ダンパー

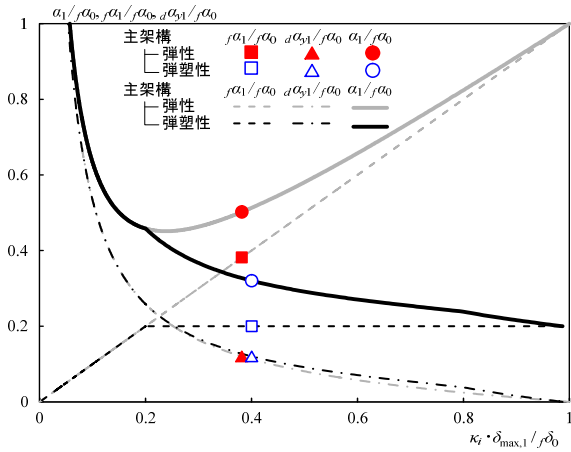


図1 第1層の応答評価
 $f\alpha_{y1}/f\alpha_0=0.2$, $dn_{el}=2.5$, $d\gamma_1=5.0$, $f\mu_1=1.0$, $f\gamma_1=4.1$,

の等価繰返し数および主架構の降伏せん断力係数比の違いが第1層の応答評価に及ぼす影響については次章で後述する。

図1に質点数 $N=10$ 、主架構の弾性1次固有周期 $T=1.0$ sを想定し、縦軸に全体架構の層せん断力係数比 $\alpha_1/f\alpha_0$ 、主架構の層せん断力係数比 $f\alpha_1/f\alpha_0$ 、ダンパーの層せん断力係数比 $d\alpha_{y1}/f\alpha_0$ とし、横軸に最大層間変形比 $\kappa_1 \cdot \delta_{max,1}/f\delta_0$ とした応答評価曲線を示す。主架構が弾性である場合の線を灰色で、主架構が塑性化する場合を黒で示している。このとき、主架構が塑性化する場合 $\kappa_1 \cdot \delta_{max,1}/f\delta_0$ が0.2以下の範囲は式(6)、0.2以上の範囲は式(8)で示している。応答評価曲線を算出する際に主架構とダンパーの損傷分散係数は $f\gamma_1=4.1$ 、 $d\gamma_1=5.0$ を設定し、主架構の等価繰返し数 $f\mu_1=1.0$ 、主架構弾性時のダンパーの等価繰返し数 $dn_{el}=2.5$ とする²⁾。主架構の降伏せん断力係数比 $f\alpha_{y1}/f\alpha_0=0.2$ と設定する。ここで、文献5)に制振構造を設計する際には $f\mu'_i$ が1.0以内であることが望ましいと記載されていることから、主架構弾塑性時で $f\mu'_i$ が1.0となる $f\alpha_1/f\alpha_0$ を□、 $d\alpha_{y1}/f\alpha_0$ を△、 $\alpha_1/f\alpha_0$ を○で示し、このときのダンパー量 $d\alpha_{y1}$ が同じ場合での主架構弾性時の $f\alpha_{y1}/f\alpha_0$ を■、 $d\alpha_{y1}/f\alpha_0$ を▲、 $\alpha_1/f\alpha_0$ を●で示している。図1より、主架構弾性時と主架構弾塑性時の応答評価曲線は主架構が塑性化する範囲となる $\kappa_1 \cdot \delta_{max,1}/f\delta_0$ が0.2以降で異なることがわかる。図1の縦軸に着目すると、主架構が塑性化することで全体架構のせん断力係数比 $\alpha_1/f\alpha_0$ が大幅に低下している(●→○)。次に、図1の横軸に着目すると、同じ $d\alpha_{y1}$ の場合で主架構弾性時と主架構弾塑性時の $\kappa_1 \cdot \delta_{max,1}/f\delta_0$ があまり変わらないことが確認できる。これは、主架構の塑性化によりダンパーの等価繰返し数が2割低下し(式(6), $f\mu'_i=1.0$)、ダンパーによるエネルギー吸収量が低下するが、主架構の塑性化によるエネルギー吸収で、それを補っているためである。ただし、主架構の損傷分散係数は $f\gamma_1$ 、主架構の等価繰返し数 $f\mu_1$ の値によって異なるため注意が必要である(次章後述)。

4. パラメータの違いが第1層の応答評価に及ぼす影響

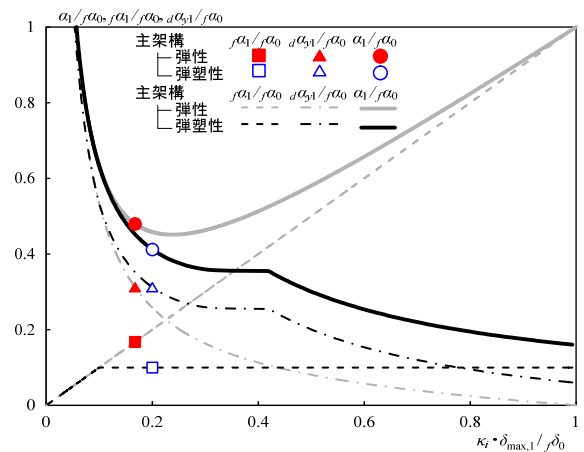
本章では、質点数 $N=10$ 、主架構の弾性1次固有周期 $T=1.0$ sを想定して設定するパラメータ(主架構の降伏せん断力

係数比 $f\alpha_{y1}/f\alpha_0$ 、主架構とダンパーの損傷分散係数 γ_1 、等価繰返し数 m_1)の違いによる第1層の層せん断力係数と最大層間変形の関係を分析する。

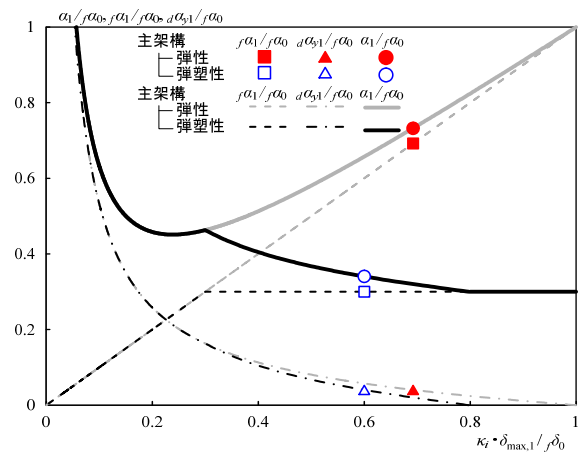
4.1 主架構の降伏せん断力係数比が応答評価に及ぼす影響

本節では、主架構の降伏せん断力係数比 $f\alpha_{y1}/f\alpha_0$ を0.1, 0.3に変動させる。これは、主架構が塑性化しない非制振構造に対して推定される最大せん断力の1割および3割のせん断力で主架構が塑性化することを意味する。

図2に $f\alpha_{y1}/f\alpha_0$ を変動させた第1層の応答評価を示す。図中には図1と同様に主架構弾性時と主架構弾塑性時のプロットを示している。なお、図2(a)の $f\alpha_{y1}/f\alpha_0=0.1$ の時(図中□), $d\alpha_{y1}/f\alpha_0$ が0.3程度(図中△)となっており、ダンパーより先に主架構が塑性化するため制振構造の設計として望ましくない例である。図2(a)の $f\alpha_{y1}/f\alpha_0=0.1$ では、主架構が塑性化すると主架構弾性時より変形が大きくなる。一方、図2(b)の $f\alpha_{y1}/f\alpha_0=0.3$ では、主架構弾性時よりも主架構が塑性化する場合の方が $\kappa_1 \cdot \delta_{max,1}/f\delta_0$ が小さくなることからわかる。 $d\alpha_{y1}/f\alpha_0$ のプロット(△, ▲)に着目すると、図2(a)では $d\alpha_{y1}/f\alpha_0$ が0.3程度であるのに対して、図2(b)では $d\alpha_{y1}/f\alpha_0$ が0.05程度であることが確認できる。従って、 $f\alpha_{y1}/f\alpha_0$ を大きく設定すると主架構のエネルギー吸収効率が良くなり少ないダンパー量



(a) $f\alpha_{y1}/f\alpha_0=0.1$



(b) $f\alpha_{y1}/f\alpha_0=0.3$

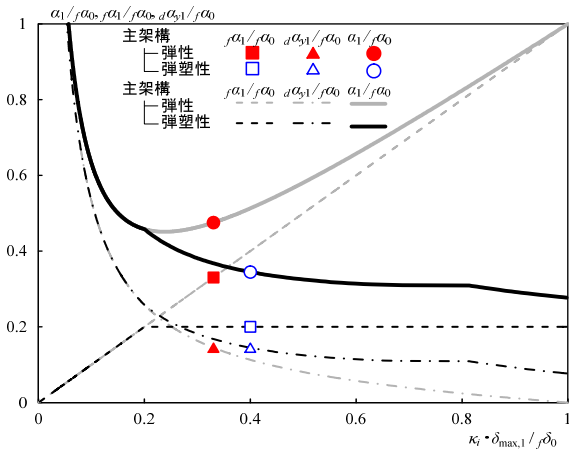
図2 $f\alpha_{y1}/f\alpha_0$ を変動させた第1層の応答評価
 $dn_{el}=2.5$, $f\mu_1=1.0$, $d\gamma_1=5.0$, $f\gamma_1=4.1$

$d\alpha_{y1}$ で変形を抑えられることがわかる。ただし、この結果は主架構の等価繰返し数 $f n_1$ が1.0であることを満足することが前提であるため注意が必要である（次節後述）。

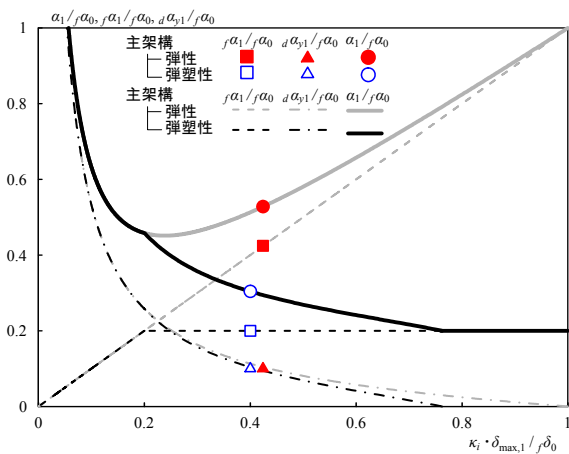
4.2 主架構の等価繰返し数が応答評価に及ぼす影響

本節では主架構の等価繰返し数 $f n_1$ を変動させ、応答評価に及ぼす影響を分析する。北村らは主架構が塑性化する場合の $f n_1$ を1.0にすることを提案している²⁾。本報では $f n_1$ を0.4, 1.4に変動させる。 $f n_1$ は主架構のエネルギー吸収効率を意味し、 $f n_1=0.4$ は主架構のエネルギー吸収効率が高い、 $f n_1=1.4$ は主架構のエネルギー吸収効率が低い場合に相当する。

図3に $f n_1$ を変動させた第1層の応答評価を示す。図3(a)のプロットに着目すると、主架構が塑性化した場合に $\kappa_1 \cdot \delta_{\max,1} / f \delta_0$ が主架構弾性的の場合より大きくなり、図3(b)のプロットに着目すると、主架構が塑性化した場合に $\kappa_1 \cdot \delta_{\max,1} / f \delta_0$ が主架構弾性的の場合より小さくなる。以上から、 $f n_1$ を大きく想定すると、 $\kappa_1 \cdot \delta_{\max,1} / f \delta_0$ と $\alpha_1 / f \alpha_0$ を小さくすることが可能であるが、主架構がダンパーと同様に多数回の繰返しによる損傷を許容していることと同意であり、主架構の損傷が大きくなる。さらに、 $f n_1$ はバラツキが大きい²⁾、主架構のエネルギー吸収を過度に期待した制振構造の設計は危険である。そのため、 $f n_1$ は1.0以下とする設計が望ましい。



(a) $f n_1 = 0.4$



(b) $f n_1 = 1.4$

図3 $f n_1$ を変動させた第1層の応答評価
 $f \alpha_{y1} / f \alpha_0 = 0.2$, $d n_{e1} = 2.5$, $d \gamma_1 = 5.0$, $f \gamma_1 = 4.1$

4.3 ダンパーの等価繰返し数が応答評価に及ぼす影響

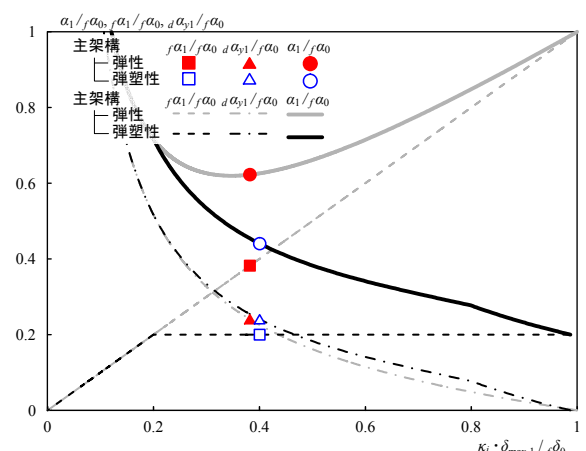
本節ではダンパーの等価繰返し数 $d n_{e1}$ を変動させ、応答評価に及ぼす影響を分析する。北村らは主架構弾性的の $d n_{e1}$ を2.5にすることを提案しており²⁾、本報では $d n_{e1}$ を1.25, 5.0に変動させる。 $d n_{e1}$ は地震動の特性によってバラツキが大きく、 $d n_{e1}=1.25$ は継続時間の短い比較的短周期の地震動、 $d n_{e1}=5.0$ は継続時間の長い長周期の地震動を想定している。

図4に $d n_{e1}$ を変動させた第1層の応答評価を示す。図4(a)の $d n_{e1}=1.25$ に着目すると、主架構が塑性化する場合で $f \mu_i$ が1.0となる $d \alpha_{y1} / f \alpha_0$ が0.2程度であるのに対して図4(b)の $d n_{e1}=5.0$ では、 $d \alpha_{y1} / f \alpha_0$ は小さく0.05程度となる。これは、 $d n_{e1}$ が大きいのでダンパーが効率良くエネルギーを吸収しているためである。しかし、 $d n_{e1}$ を必要以上に大きく設定するとダンパーの制振効果を過大に評価することになるため注意が必要である。

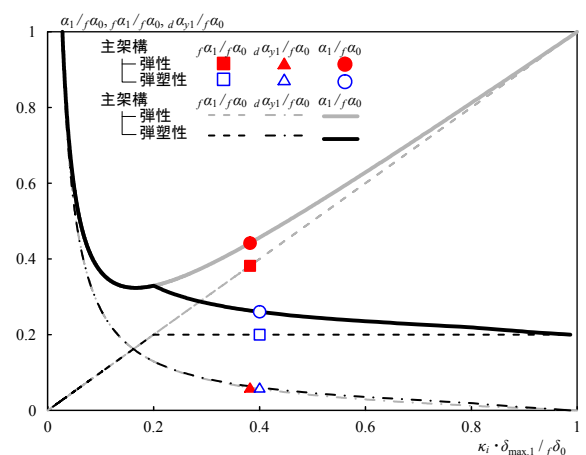
4.4 主架構の損傷分散係数が応答評価に及ぼす影響

本節では主架構の損傷分散係数 $f \gamma_1$ を2.5, 8.0に変動させ、応答評価に及ぼす影響を分析する。 $f \gamma_1=2.5$ は第1層の主架構に過度に損傷が集中する架構であり、 $f \gamma_1=8.0$ は全層に概ね均等に損傷を分散する架構を意味する。

図5に $f \gamma_1$ を変動させた第1層の応答評価を示す（次頁）。図5(a)の $f \gamma_1=2.5$ に着目すると、主架構が塑性化した場合に



(a) $d n_{e1} = 1.25$



(b) $d n_{e1} = 5.0$

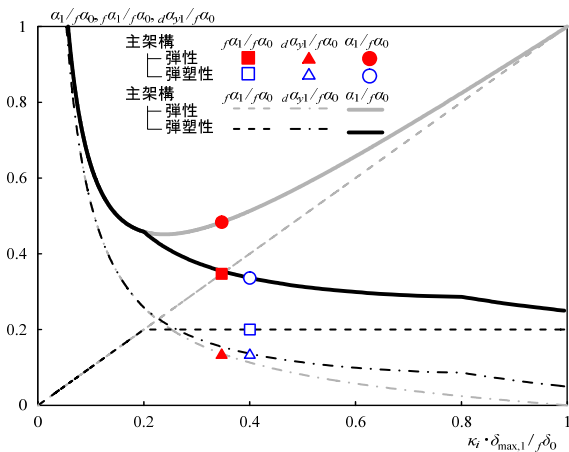
図4 $d n_{e1}$ を変動させた第1層の応答評価
 $f \alpha_{y1} / f \alpha_0 = 0.2$, $f n_1 = 1.0$, $d \gamma_1 = 5.0$, $f \gamma_1 = 4.1$

$\kappa_1 \cdot \delta_{\max,1} / f \delta_0$ が主架構弾性的の場合より大きくなる。一方、図5(b)の $f \gamma_1 = 8.0$ に着目すると、主架構が塑性化した場合の $\kappa_1 \cdot \delta_{\max,1} / f \delta_0$ が主架構弾性的の場合より小さいことがわかる。これは、図5(a), (b)ともに主架構の等価繰返し数を $f n_1 = 1.0$ と等しく設定しているためである。つまり、 $f \gamma_1 = 2.5$ では第1層に集中したエネルギーを1サイクルで吸収しなければいけないため必然的に変形は増大する。逆に、 $f \gamma_1$ を大きく設定すると、変形($\kappa_1 \cdot \delta_{\max,1} / f \delta_0$)とせん断力($\alpha_1 / f \alpha_0$)を小さくすることが可能である。従って、全層に概ね均等に損傷を分散する設計が望ましいといえる。

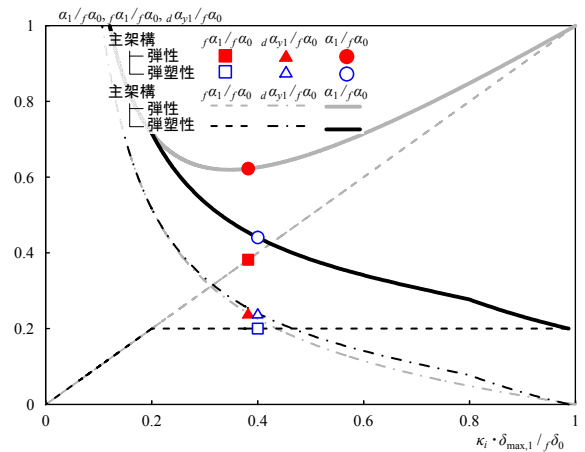
4.5 ダンパーの損傷分散係数が応答評価に及ぼす影響

本節ではダンパーの損傷分散係数 $d \gamma_1$ を2.5, 8.0に変動させ、応答評価に及ぼす影響を分析する。 $d \gamma_1 = 2.5$ は第1層の主架構に過度に損傷が集中するダンパー配置であり、 $d \gamma_1 = 8.0$ は全層に概ね均等に損傷を分散する配置を意味する。

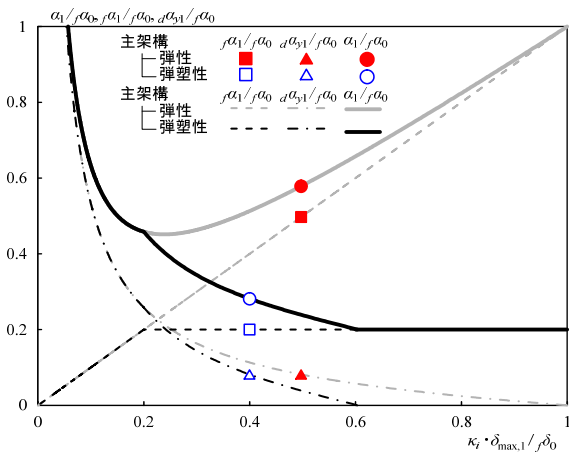
図6に $d \gamma_1$ を変動させた第1層の応答評価を示す。4.4節と同様に、 $d \gamma_1$ を大きく設定することで変形($\kappa_1 \cdot \delta_{\max,1} / f \delta_0$)とせん断力($\alpha_1 / f \alpha_0$)を小さくすることができるが、 $d \gamma_1$ を大きくするにつれて他層に損傷集中が生じる可能性があるため、 $[1/d \gamma_1] \cdot N > 2$ となる値⁶⁾から全層で均一な損傷分布となる値の範囲($N/2 < d \gamma_1 < N$)に設定することが望ましい。



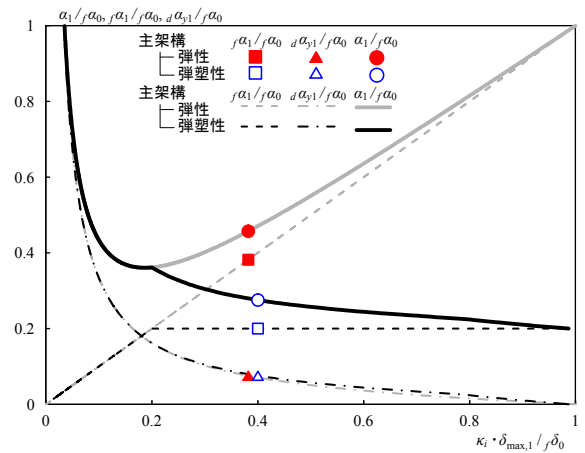
(a) $f \gamma_1 = 2.5$



(a) $d \gamma_1 = 2.5$



(b) $f \gamma_1 = 8.0$



(b) $d \gamma_1 = 8.0$

図5 $f \gamma_1$ を変動させた第1層の応答評価
 $f \alpha_{31} / f \alpha_0 = 0.2, d n_{e1} = 2.5, f n_1 = 1.0, d \gamma_1 = 5.0$

図6 $d \gamma_1$ を変動させた第1層の応答評価
 $f \alpha_{31} / f \alpha_0 = 0.2, d n_{e1} = 2.5, f n_1 = 1.0, f \gamma_1 = 4.1$

5. まとめ

本報では、エネルギー法の重要な指標となる等価繰返し数、損傷分散係数および主架構の降伏せん断力の違いが応答評価に及ぼす影響について分析を行った。

謝辞

本報は、新日鉄住金エンジニアリング株式会社、東京理科大学北村研究室、東京工業大学佐藤研究室によるエネルギー法研究会の成果の一部を用いたものです。東京理科大学 松田頼恒助教、新日鉄住金エンジニアリング株式会社 綿貫雄太氏、山口慎吾氏には本報を執筆する上で貴重なご意見を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

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
- 3) 松澤雄介，佐藤大樹，北村春幸，山小路夫，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，構造II，pp.1041-1042，2013.8
- 4) 岩森貴寿，佐藤大樹，北村春幸，山小路夫，脇田直弥，綿貫雄太：履歴ダンパーを有する制振構造の応答予測精度評価手法の構築 その2 質点数の変動による影響と等価繰返し数の分析，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.585-586，2017.8
- 5) 日本建築学会：鋼構造制振設計指針，第1版，2014.11
- 6) 岩森貴寿，佐藤大樹，北村春幸，山小路夫，脇田直弥，綿貫雄太：履歴ダンパーを有する制振構造における累積損傷分布の予測精度，構造工学論文集，pp.295-301，2017.3