

履歴ダンパーの耐力・剛性偏心が損傷制御構造の耐震性能に与える影響

EFFECT OF STRENGTH AND STIFFNESS ECCENTRICITY OF HYSTERESIS DAMPER ON SEISMIC PERFORMANCE OF DAMAGE TOLERANT STRUCTURE

山田 哲*¹, 藤井賢志*², 和田智子*³, 和田 章*⁴
Satoshi YAMADA, Kenji FUJII, Tomoko WADA
and Akira WADA

This paper discusses the seismic response of damage tolerant structure with plan irregularity based on energy response concept. In this paper, the reduction factor of seismic performance due to plan irregularity is defined as the ratio of energy absorption capacity of structure with plan irregularity and that of structure with regular plan. Based on the energy response concept, a simplified equation of the reduction factor is proposed and its applicability is discussed.

Keywords: Seismic Performance, Strength Eccentricity, Stiffness Eccentricity, Hysteresis Damper, Response Analysis

耐震性能、耐力偏心、剛性偏心、履歴ダンパー、応答解析

1. 序

兵庫県南部地震以降、柱・梁からなる重力を支える主架構と、地震による入力エネルギーを吸収するダンパーを機能上分離し、地震時においても主架構を弾性範囲に留める損傷制御型の耐震構造¹⁾(バッシブ制振構造)が普及するようになってきた。損傷制御型の耐震構造に関してはこれまでも数多くの研究²⁾⁴⁾などが行われているが、それらの多くは構面内挙動を扱ったものであり、ねじれを伴う損傷制御型の耐震構造を対象とした研究³⁾⁵⁾などは比較的少ない。平面計画上の理由等で層内におけるダンパーの配置のバランスが悪いような場合に、ダンパーの性能の偏心が構造全体の耐震性能に与える影響を明らかにすることは残された課題となっている。もちろん、構造要素の偏在が耐震性能に与える影響については、従来型の耐震構造を対象とした研究が数多く行われている⁶⁾¹⁴⁾などが、履歴ダンパーを用いた損傷制御型の耐震構造は、剛性の高いダンパーが塑性化する一方で主架構は基本的に弾性範囲に留まることから、ダンパーが塑性化した後も残る主架構の弾性復元力によりダンパー自体の偏心の影響が抑えられる可能性が考えられる点や、主架構の特性とダンパー系の性能の組み合わせで構造全体の耐震性能が決まる点において従来型の耐震構造とは異なる。

筆者等は前報¹⁵⁾において、加振方向の2構面に剛性と耐力のバランスを変化させた履歴ダンパーを組み込んだ2/3スケールの1層1スパン立体鋼構造骨組の振動台実験を行い、実験でのパラメーターの範囲内ではあるが、ダンパーの塑性化後においては耐力偏心の影響が支配的であることを実験的に示した。ねじれを伴う構造物の耐震性能に与える耐力偏心の影響については、既往の従来型の耐震構

造を対象とした研究⁹⁾¹⁰⁾においても指摘されていることではあるが、定量的な評価が十分になされているとは言い難い。

本研究では、1層のモデルを対象として、履歴ダンパーの耐力偏心・剛性偏心が耐震性能に与える影響を、ダンパーがバランス良く設置された場合に対するエネルギー吸収能力の低下として捉え、その略算的評価方法について検討を行う。なお、ダンパーの平面内における性能バランスが耐震性能に与える影響を調べることを目的としたことから、解析モデルは矩形の平面形状を有し、主架構は耐力・剛性・重量のいずれについても偏心していないものとした。

2. 耐震性能への影響係数 χ

本研究では損傷制御構造の性能限界を図-1に例示するように、骨組を構成する全ての構面において主架構の変形が弾性範囲に留まる限界と定義する。また、損傷制御構造の耐震性能を、性能限界範囲内にぎりぎり留まる入力を受けた時のダンパー系の塑性仕事で表す。そして、同じ主架構に対して、ダンパーが耐力・剛性偏心した場合の塑性仕事 W_p の、平均的な性能のダンパーをバランス良く配置した場合の塑性仕事 W_{p0} に対する比率 $\chi (=W_p/W_{p0})$ を、ダンパーが耐力・剛性偏心したことによる耐震性能への影響係数と定義する。図-2に例示する各構面にダンパーが装着された4x2構面の骨組の場合、左端の骨組のように降伏変形・降伏耐力が揃っていないダンパーが偏心して取り付けられた場合には、1) χ_1 で表される平面内の偏心による影響と、2) χ_2 で表される降伏変形の差異の影響を掛け合わせたものが耐震性能への影響係数 χ となる。本研究ではこの χ について検討を行う。

*¹ 東京工業大学建築物物理研究センター 助教授・博士(工学)

*² 東京理科大学理工学部建築学科 助手・博士(工学)

*³ 元 東京工業大学 大学院生・修士(工学)

*⁴ 東京工業大学建築物物理研究センター 教授・工博

Assoc. Prof., S.E.R.C., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Research Assoc., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Engineering, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

Former Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

Prof., S.E.R.C., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

3. 2x2構面モデルの解析

3.1 解析モデル

解析モデルは一層一軸偏心 2x2 構面モデルであり、偏心の影響を受ける方向に一方向入力した場合を扱う。解析モデルの概略を図-3に示す。主架構は矩形の整形な平面形状を有し、偏心要因はダンパーのみとしたことから重量・剛性・耐力のいずれについても偏心させていない。質量は床板内に一様に分布するものとし、剛床を仮定する。また、階高を 4m、降伏せん断力係数を $\alpha_{yd}=0.2$ 、降伏変形角を $\theta_{yd}=1/150(\text{rad})$ と設定する。ダンパーについては、降伏変形が層間変形角で $\theta_{yd}=1/500(\text{rad})$ となる履歴ダンパーを加振方向の 2 構面にバランス良く配置した場合を基本状態として、主架構とダンパー(加振方向合計)の耐力比を第 1 のパラメーターとして、

1) $\alpha_{yf}/\alpha_{yd}=1.0, 2.0$ (ダンパーの降伏せん断力係数で $\alpha_{yd}=0.2$ と 0.1)

の 2 通りを設定する。これを基に、加振方向 2 構面のダンパーの耐力比及び降伏変形比を主たるパラメーターとして

2) 耐力比 $Q_{yd1}/Q_{yd2}=1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ の 4 通り

3) 降伏変形比 $\delta_{yd1}/\delta_{yd2}=1/4, 1/3, 1/2, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ の 7 通り

を設定する。加振方向 2 構面のダンパーの剛性比は、耐力比及び降伏変形比を用いて $K_{d1}/K_{d2}=(Q_{yd1}/Q_{yd2})/(\delta_{yd1}/\delta_{yd2})$ と表される。また、極端な例として、加振方向の 1 構面のみにダンパーを設置した場合も対象とする。(この場合、耐力比と降伏変形比はいずれも ∞ となる)このほかに、ねじれ応答性状に影響を及ぼすパラメーターとして、以下の 3 つのパラメーターについても検討を行う。

4) 主架構の平面形状の辺長比 $l_x/l_y=0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0$

($\alpha_{yf}/\alpha_{yd}=1.0$ の場合については $l_x/l_y=1.0$ のみ)

5) 加振と直交方向の弾性剛性

① 加振方向の主架構及びダンパーの弾性剛性の合計：

$$K_y = K_{fx} + (K_{d1} + K_{d2})$$

② 加振方向の主架構と同じ： $K_y = K_{fx}$

③ ①と②の平均値： $K_y = K_{fx} + (K_{d1} + K_{d2}) / 2$

($\alpha_{yf}/\alpha_{yd}=1.0$ の場合については①のみ)

6) 1次固有周期 T_1 ：上記のようにして設定した 1 層のモデルでは、1 次固有周期は $T_1=0.2 \sim 0.5(\text{s})$ という比較的短周期での検討に留まる。そこで、略算的に周期が長い場合についての検討を行うため、全要素の剛性を $1/\tau^2$ 倍にすることで、周期を τ 倍に調整する。これらのモデルでは、元のモデル($\tau=1$)に対し、質量、降伏耐力は変化させず、周期のみを調整している。本研究では $\tau=2, 3$ としたモデルも設定する。

ダンパーの復元力特性は、前報¹⁹⁾における応答解析結果が実験結果と良い対応を示したバウシinger効果を考慮した履歴モデル¹⁹⁾を用いる。この履歴モデルは、図-4に示すように骨格曲線、バウシinger部、弾性除荷部より構成されるが、骨格曲線の 2 次剛性は弾性剛性の 1%とする。なお、既往の研究において、偏心建物の応答は偏心の大小のみならずねじれ剛性の影響を著しく受けることが指摘されている^{7), 8)}。本節での議論の対象となるモデルは、全て重心で定義される弾力半径比⁹⁾が 1 より大きい。従って、その応答は 1 次モード成分の影響が顕著になるとと思われる¹⁹⁾。

3.2 弾塑性応答解析

入力には兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録 NS 成分(以後神戸 NS 波)、十勝沖地震八戸記録 EW 成分(以後八戸 EW 波)、インベリアルバレー地震エルセントロ記録 NS 成分(以後エルセントロ NS 波)を用いた。数値積分法は平均加速度法を用い、数値積分における時間刻みは 1/500 秒とし、減衰は初期剛性比例型として弾性 1 次モードに対する減衰定数を 2%とする。解析においては、入力の強さ(加速度の振幅)を変化させることで地震終了時に主架構が弾性範囲に留まる限界の入力を調べ、そのときにダンパーが吸収する塑性仕事等の応答量を求める。

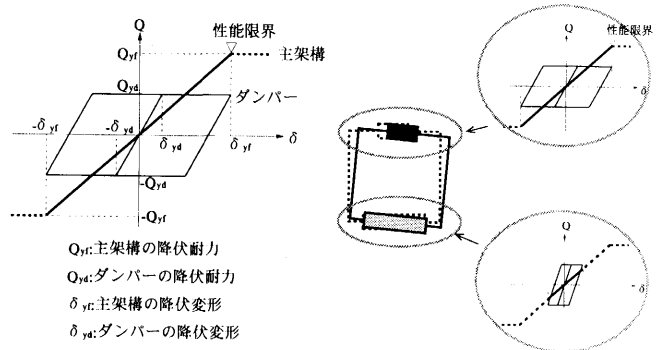


図-1 損傷制御構造の性能限界

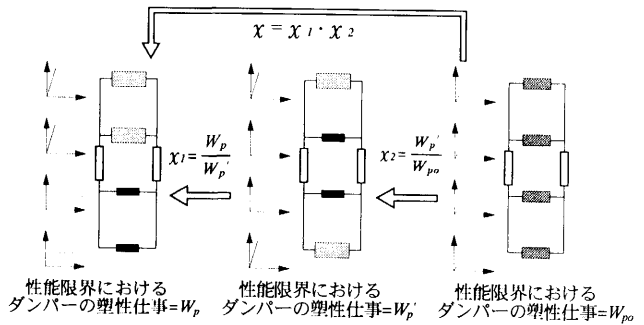


図-2 耐震性能への影響係数 χ

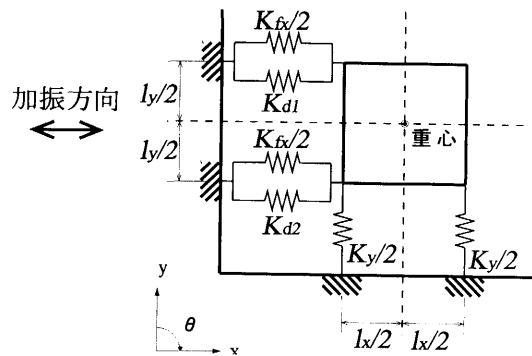


図-3 解析モデルの概要

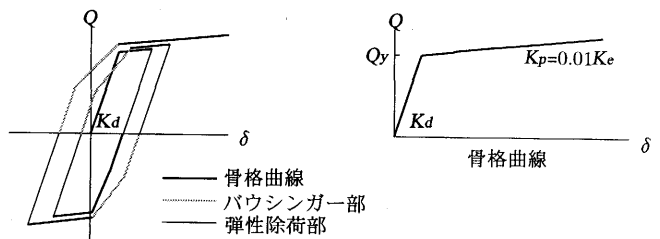


図-4 ダンパーの履歴モデルの概要

3.3 解析結果

図-5に $\alpha_{yp}/\alpha_{yd}=2.0$ 、平面形状の辺長比が $l_x/l_y=1$ 、直交方向の弾性剛性が $K_y=K_R+(K_{d1}+K_{d2})$ であり1次固有周期を3倍に調整したモデルに神戸NS波を入力した場合を例に、各モデルの偏心量と耐震性能への影響係数 χ の関係を示す。両構面のダンパーの耐力比が大きくなる程、また降伏変形の差が大きくなる程、 χ が小さくなり耐震性能が低下する様子が見て取れる。また図-6ならびに図-7に、主架構の平面形状が変化した場合と加振と直交方向の剛性が変化した場合の χ への影響を、図-5同様1次固有周期を3倍に調整したモデルに神戸NS波を入力した場合を例に、1)耐力のみ偏心したモデル($Q_{yd1}/Q_{yd2}=1/4$ かつ $\delta_{yd1}/\delta_{yd2}=1/4$)、2)剛性のみ偏心したモデル($Q_{yd1}/Q_{yd2}=1.0$ で $\delta_{yd1}/\delta_{yd2}=4.0$ すなわち $K_{d1}/K_{d2}=1/4$)、3)耐力・剛性ともに偏心したモデル[① $Q_{yd1}/Q_{yd2}=1/2$ で $\delta_{yd1}/\delta_{yd2}=1.0(K_{d1}/K_{d2}=1/2)$ としたモデルならびに、② $Q_{yd1}/Q_{yd2}=1/4$ で $\delta_{yd1}/\delta_{yd2}=1.0(K_{d1}/K_{d2}=1/4)$ としたモデル]、4)1構面のみダンパーを設置したモデルの解析結果を示す。図-6より、ダンパーが耐力偏心したモデルにおいて辺長比 l_x/l_y の χ に与える影響が顕著に現れ、加振方向の辺が相対的に短いほど χ が小さくなる様子が見られる。また図-7より、加振と直交方向の剛性が小さい程 χ が小さくなる様子が見られる。

4. 2x2構面モデルの耐震性能評価

4.1 評価方法

ここでは1層2x2構面モデルを対象として、履歴ダンパーが耐力偏心・剛性偏心したことによる耐震性能への影響係数 χ を、略算的に評価する方法について検討する。ねじれを伴う1層構造物の構面毎の損傷分布に関する研究としては島崎、秋山¹³⁾の研究があり、各構面の強度が入力波のエネルギースペクトルと弾性モード解析結果に基づき設定された最適強度分布に対してどの程度ずれているかの度合いに基づいて、構面毎の損傷分布が予測できることが明らかにされている。高山、木村¹²⁾の研究においても、各構面の損傷が質量偏心・耐力偏心・剛性偏心といった偏心要因に関わらず、弾性時の固有1次モード形に基づき予測できることが示されている。これらの研究は、主架構が塑性化することでエネルギー吸収を行う従来型の耐震構造を対象としているが、履歴ダンパーを装着した損傷制御型の耐震構造においては剛性の高いダンパーが塑性化する一方で主架構は基本的に弾性範囲に留まることから、ダンパーが塑性化した後も残る主架構の弾性復元力の影響を考慮しなくてはならない。そのためには、ある程度塑性化した状態を考慮して等価剛性を用いてモード解析を行い最適強度分布を求めることも考えられるが、ダンパーの塑性化の程度はねじれの影響を受けるため、適切に等価剛性を決めることは困難である。一方、塑性化の影響を考慮して各ステップ毎のモード形を逐一定めて静的漸増荷重解析を行って応答評価を行う方法も示されているが^{13), 14)}、これは手計算による略算的評価には適していない。

本研究では、ダンパーの降伏耐力の偏りに着目して耐震性能への影響係数 χ を略算的に評価することを試みる。まずダンパーの復元力特性が完全弾塑性型であると仮定したうえで、地震波を入力した際の履歴吸収エネルギーが、図-8に示すように一定の変形モードを保ったまま両構面ともにそれぞれ最大振幅 δ_{1max} ならびに δ_{2max} で n_{eq} 回

繰り返し変形した場合と等価であると仮定する。このとき、両構面のダンパー塑性仕事の和 W_p は、

$$W_p = 4n_{eq} \{ Q_{yd1} \cdot (\delta_{1max} - \delta_{yd1}) + Q_{yd2} \cdot (\delta_{2max} - \delta_{yd2}) \} \quad (1)$$

ただし、 $\delta_{1max} \geq \delta_{yd1}$ かつ $\delta_{2max} \geq \delta_{yd2}$

$$\left[\begin{array}{l} \delta_{1max} \geq \delta_{yd1} \text{ かつ } \delta_{2max} < \delta_{yd2} \text{ の場合は } \\ W_p = 4n_{eq} \cdot Q_{yd1} \cdot (\delta_{1max} - \delta_{yd1}) \end{array} \right]$$

と表せる。一方、降伏耐力が $\bar{Q}_{yd} = (Q_{yd1} + Q_{yd2})/2$ 、降伏変形が $\bar{\delta}_{yd} = (Q_{yd1} + Q_{yd2}) / (K_{d1} + K_{d2})$ という平均的な性能を持つダンパーをバランス良く配置した場合のダンパーの塑性仕事の和 W_{po} は、最大振幅 δ_{omax} で n_{eq} 回繰り返し変形するものと仮定すると、

$$W_{po} = 8n_{eq} \cdot \bar{Q}_{yd} \cdot (\delta_{omax} - \bar{\delta}_{yd}) \quad (2)$$

と表せる。さらにダンパーが偏心したモデルとバランスの良いモデルの繰り返し数 n_{eq} が等しいと仮定する。ここで $\delta_{1max} > \delta_{2max}$ とすると、

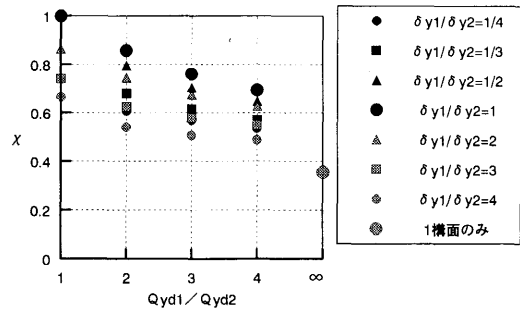


図-5 偏心量と耐震性能への影響係数 χ の関係

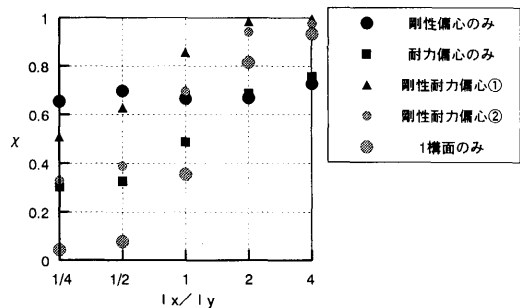


図-6 平面形状と耐震性能への影響係数 χ の関係($K_y=K_R+(K_{d1}+K_{d2})$)

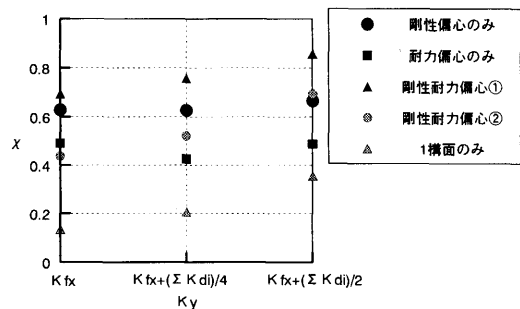


図-7 加振と直交方向の剛性と耐震性能への影響係数 χ の関係 ($l_x/l_y=1$)

主架構が同じであれば性能限界状態においては $\delta_{1max} = \delta_{0max} = \delta_{yf}$ であることから、ダンパーが耐力・剛性偏心したことによる耐震性能への影響係数 $\chi (=W_p/W_{po})$ は

$$\chi = \frac{W_p}{W_{po}} = \frac{Q_{yd1} \cdot \left(1 - \frac{\delta_{yd1}}{\delta_{yf}}\right) + Q_{yd2} \cdot \left(\frac{\delta_{2max}}{\delta_{1max}} - \frac{\delta_{yd2}}{\delta_{yf}}\right)}{2 \cdot \bar{Q}_{yd} \cdot \left(1 - \frac{\bar{\delta}_{yd}}{\delta_{yf}}\right)} \quad (3)$$

ただし、 $\delta_{2max} < \delta_{yd2}$ の場合は

$$\chi = \frac{Q_{yd1} \cdot \left(1 - \frac{\delta_{yd1}}{\delta_{yf}}\right)}{2 \cdot \bar{Q}_{yd} \cdot \left(1 - \frac{\bar{\delta}_{yd}}{\delta_{yf}}\right)} \quad (3)'$$

となる。

式(3)では、ダンパーが偏心したモデルにおける両構面の最大水平変形の比 $\delta_{2max}/\delta_{1max}$ のみが未知量であることから、 $\delta_{2max}/\delta_{1max}$ の導出が次の課題となる。本研究では、ダンパーの降伏耐力の偏りに着目して両構面の最大水平変形の比 $\delta_{2max}/\delta_{1max}$ を求める方法について検討する。

図-3に示すように、主架構における加振方向の弾性剛性の合計を K_x (各構面で $K_x/2$)、直交方向の弾性剛性の合計を K_y (各構面で $K_y/2$)とし、両構面におけるダンパーの降伏耐力の水平成分を Q_{yd1} 、 Q_{yd2} とする。架構床重心での x 方向変位および回転角をそれぞれ x 、 θ とおく。重心の x 方向に水平荷重 P_x のみが作用して両構面のダンパーが降伏している場合の力の釣合は式(4)で表される。

$$\left. \begin{aligned} K_x \cdot x + (Q_{yd1} + Q_{yd2}) &= P_x \\ - \left[K_x \cdot \left(\frac{l_y}{2}\right)^2 + K_y \cdot \left(\frac{l_x}{2}\right)^2 \right] \cdot \theta + (Q_{yd2} - Q_{yd1}) \cdot \frac{l_y}{2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)より明らかなように、重心の x 方向に水平荷重 P_x のみが作用して両構面のダンパーが降伏している場合の床の回転角 θ は、荷重 P_x とは無関係であり式(5)により得られる。

$$\theta = \frac{2 \cdot (Q_{yd2} - Q_{yd1}) \cdot l_y}{K_x \cdot l_y^2 + K_y \cdot l_x^2} \quad (5)$$

式(5)は、 θ が両構面でのダンパーの降伏耐力の差と主架構の剛性分布および床の平面形状により定まり、ダンパーの弾性剛性には依存しないことを示している。一方、動的外力下においては床の回転慣性による影響が入ってくる。これを考慮するためには式(4)の右辺において、水平外力 P_x に加えて適切な大きさのモーメント M_x が作用しているものと考えればよいが、この大きさを適切に定めるのは困難である。そこで、動的外力下での平面の回転角 θ' を便宜上式(5)による θ の係数倍として式(6)で表す

$$\theta' = a \cdot \theta \quad (6)$$

ここで、式(6)中の係数 a は動的効果を表す係数である。文献7)では、偏心系の弾性応答における動的ねじれ応答倍率と x 方向と θ 方向の振動数比 ζ_{θ} (重心に関する弾力半径比の逆数に相当)の関係を検討しており、 ζ_{θ} が1に近くなると動的ねじれ応答倍率が大きくなり偏心比が小さい場合ほど顕著となること、および ζ_{θ} が小さくなるとす

なわち重心に関する弾力半径比が大きくなるほど動的ねじれ応答倍率は偏心比による差異が小さく1に近づくことが示されている。本論文においては、対象とするモデルでは重心に関する弾力半径比が1より大きいものとして a の値として2を仮定した。なお、3章で述べたモデルに関して別途式(6)による θ' と応答解析による最大値 θ_{max} との比較を行い、ばらつきは見られるものの概ね対応することを確認している。以上により、

$$\theta' = a \cdot \theta = \frac{4 \cdot (Q_{yd2} - Q_{yd1}) \cdot l_y}{K_x \cdot l_y^2 + K_y \cdot l_x^2} \quad (7)$$

で得られる θ' を性能限界状態における平面の回転角の予測値とする。式(7)で予測した平面の回転角 θ' を用いて、性能限界状態における両構面の最大水平変形の比 $\delta_{2max}/\delta_{1max}$ は

$$\frac{\delta_{2max}}{\delta_{1max}} = \frac{\delta_{yf} \cdot l_y \cdot \theta'}{\delta_{yf}} = 1 \cdot \frac{4 \cdot (Q_{yd2} - Q_{yd1}) \cdot l_y^2}{(\sum K_{fd} \cdot l_y^2 + \sum K_{yl} \cdot l_x^2) \cdot \delta_{yf}} \quad (8)$$

で予測できる。式(8)を式(3)に代入することにより、ダンパーが偏心したことによる耐震性能への影響係数 χ の予測値が得られる。

4.2 評価方法の検討

前節で示した耐震性能への影響係数 χ の略算の評価方法について、解析結果と比較・検討し、修正を行う。式(8)による $\delta_{2max}/\delta_{1max}$ の予測値を解析で得られた両構面の最大水平変形の比の計算値と比較し図-10に、式(8)による $\delta_{2max}/\delta_{1max}$ の予測値を式(3)に代入して求めた χ の予測値を解析結果と比較し図-11に示す。全体的に見ると式(8)による $\delta_{2max}/\delta_{1max}$ の予測値は、解析結果の傾向を概ね捕らえては

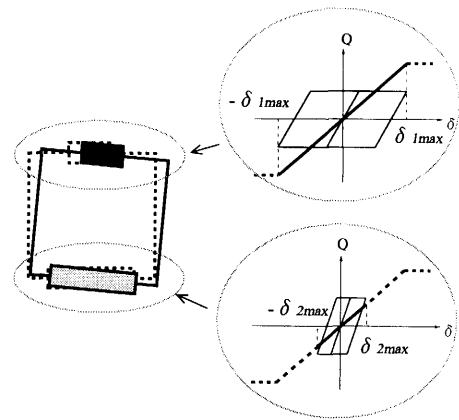


図-8 変形モードの仮定

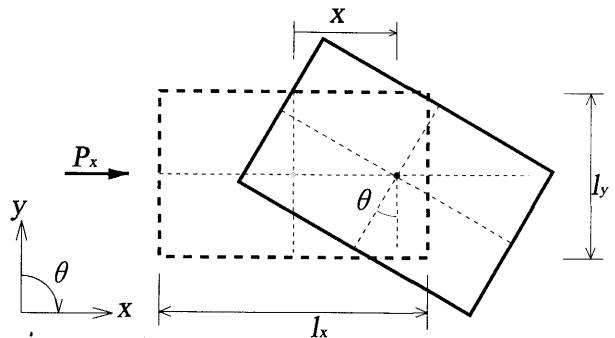


図-9 重心に水平力を作用させた場合の変形状態

いるものの、ばらつきはかなり大きい。これは、動的外力下における床の回転慣性の影響を平面の回転角で2倍としたことと、力の釣り合いにおいてダンパーの弾性剛性の影響が反映されていないことが原因と考えられる。また、耐震性能への影響係数 χ の予測値についてもばらつきが大きいものの、予測値は解析結果の傾向を概ね捕らえてはいる。ばらつきが大きいことに対しては、評価方法を詳細に検討して予測精度を上げるという対応も考えられるが、略算的評価方法としては、簡易な手法で耐震性能の下限値を押さえることができれば十分有効であると考え、以下では危険側のプロットを減らすことに主眼をおく。

式(3)においては、 $\delta_{2max}/\delta_{1max}$ が大きくなると耐震性能への影響係数 χ の予測値も大きくなる。そこでまず、 $\delta_{2max}/\delta_{1max}$ の予測値が解析結果を上回った場合、すなわちねじれを過小評価した場合に耐震性能への影響係数 χ を過大評価しているかを調べる。図-11に示した χ の予測値と解析結果の対応関係を、式(8)による $\delta_{2max}/\delta_{1max}$ の予測値が解析結果を上回った場合と下回った場合に分けて、図-12に示す。 $\delta_{2max}/\delta_{1max}$ の予測値が解析結果を上回った場合に耐震性能への影響係数を過大評価する傾向は見られるが、 $\delta_{2max}/\delta_{1max}$ の予測値が解析結果を下回った場合においても多くのケースで耐震性能への影響係数を過小評価していることから、 $\delta_{2max}/\delta_{1max}$ 以外の原因を検討する。

式(3)を導出するにあたって設定した仮定の中で、耐震性能を過大評価する原因となる可能性がある仮定としては、ダンパーが偏心したモデルとバランス良く配置したモデルにおいて、地震波を入力した際の履歴吸収エネルギーと等しくなる最大振幅での繰り返し回数 n_{eq} が等しいという仮定が挙げられる。応答解析結果における等価な繰り返し回数を、ダンパーが偏心したモデルについて、

$$n_{eq}' = \frac{W_p}{4 \cdot Q_{yd1} \cdot (\delta_{1max} \cdot \delta_{yd1}) + 4 \cdot Q_{yd2} \cdot (\delta_{2max} \cdot \delta_{yd2})} \quad (9)$$

$\delta_{1max}, \delta_{2max}$ は解析結果

ダンパーをバランス良く配置したモデルについて、

$$n_{eqo}' = \frac{W_{po}}{8 \cdot \bar{Q}_{yd} \cdot (\delta_{oamax} \cdot \bar{\delta}_{yd})} \quad (10)$$

δ_{oamax} は解析結果

として求め、両者を比較し図-13に示す。両者の対応関係は、非常にばらつきの大きなものとなっている。式(3)による χ の予測値に等価な繰り返し回数の違いを反映するためには、係数 n_{eq}/n_{eqo}' を掛ける必要がある。一般に n_{eq} は振動系の性質が少し変わるだけで変化するばらつきの大きな値であり、¹⁾係数 n_{eq}/n_{eqo}' を適切に設定することはできないが、耐震性能の下限値を押さえるための措置を検討する。

耐震性能の下限値を押さえる上で問題となるのは、耐震性能への影響係数 χ を過大評価することになる n_{eq}/n_{eqo}' が1より小さくなる場合である。ダンパーの偏心の度合いが大きいモデルほど、バランスを良くダンパーを配置したモデルに対する振動系としての特性の差異が大きいことに着目し、ダンパーの偏心の影響を表す係数とも言える $\delta_{2max}/\delta_{1max}$ の予測値との関係において n_{eq}/n_{eqo}' をプロットし、

図-14に示す。 $\delta_{2max}/\delta_{1max}$ の予測値に対して n_{eq}/n_{eqo}' の値は大きくばらついているが、図中に破線で示す

$$n_{eq}/n_{eqo}' = \delta_{2max}/\delta_{1max} \quad (11)$$

で概ね下限値が押さえられることがわかる。そこで、式(3)ならびに式(3)'の右辺に $n_{eq}/n_{eqo}' = \delta_{2max}/\delta_{1max}$ を掛けた式(12)ならびに式(12)'を用いて、耐震性能への影響係数 χ の下限値を予測することにする。

$$\chi = \frac{W_p}{W_{po}} = \frac{\delta_{2max}}{\delta_{1max}} \cdot \frac{Q_{yd1} \cdot \left(1 - \frac{\delta_{yd1}}{\delta_{yf}}\right) + Q_{yd2} \cdot \left(\frac{\delta_{2max}}{\delta_{1max}} \cdot \frac{\delta_{yd2}}{\delta_{yf}}\right)}{2 \cdot \bar{Q}_{yd} \cdot \left(1 - \frac{\bar{\delta}_{yd}}{\delta_{yf}}\right)} \quad (12)$$

ただし、 $\delta_{2max} < \delta_{yd2}$ の場合は

$$\chi = \frac{\delta_{2max}}{\delta_{1max}} \cdot \frac{Q_{yd1} \cdot \left(1 - \frac{\delta_{yd1}}{\delta_{yf}}\right)}{2 \cdot \bar{Q}_{yd} \cdot \left(1 - \frac{\bar{\delta}_{yd}}{\delta_{yf}}\right)} \quad (12)'$$

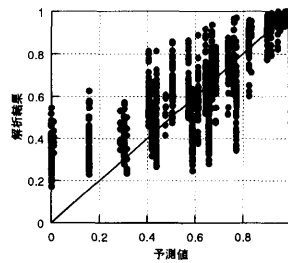


図-10 $\delta_{2max}/\delta_{1max}$ の予測値と解析結果の比較

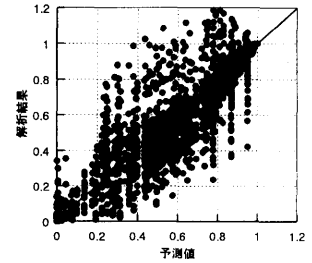
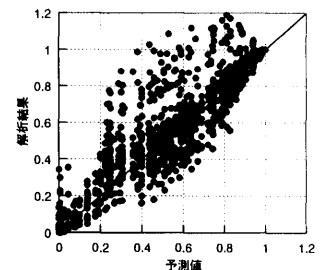
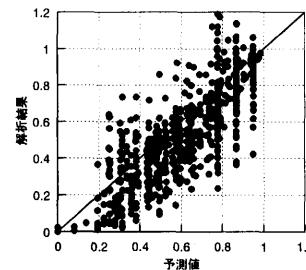


図-11 式(3)と式(8)による χ の予測値と解析結果の比較



(1) $\delta_{2max}/\delta_{1max}$ の予測値が解析結果を上回っていたもの (2) $\delta_{2max}/\delta_{1max}$ の予測値が解析結果を下回っていたもの
図-12 $\delta_{2max}/\delta_{1max}$ が χ の予測値と解析結果の対応に与える影響

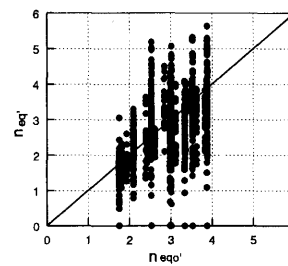


図-13 n_{eq} と n_{eqo}' の対応

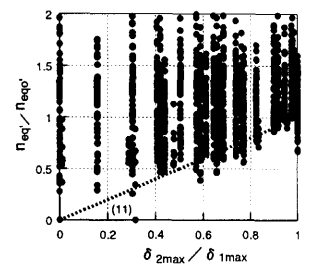


図-14 n_{eq}/n_{eqo}' と $\delta_{2max}/\delta_{1max}$ の関係

式(8)と式(12)ならびに式(12)による χ の予測値と解析結果を比較し、図-15に示す。●でプロットしたダンパーが剛性のみ偏心したモデルを除き、 χ が 0.6 を下回る範囲で多少はずれる場合も見られるが概ね耐震性能への影響係数 χ の下限値が押さえられている。 χ が 0.6 を下回る範囲というのは、ねじれの影響によりエネルギー吸収能力が 40%以上低減するような領域でありダンパーを有効活用できていない領域である。また、ダンパーが剛性のみ偏心したモデルでは、式(8)において $\delta_{2max}/\delta_{1max}=1.0$ となりねじれによる耐震性能の低減がないとみなされてしまうことが予測がはずれる原因であるが、剛性のみ偏心するのは耐力が等しく降伏変形が異なるダンパーを設置する場合であり、実際にはあまり起こりにくいパラメーターであると考えられる。

式(8)と式(12)ならびに式(12)によって、矩形の平面形状を有する 1 層 2x2 構面で耐力・剛性・重量のいずれについても偏心していない主架構にダンパーが耐力・剛性偏心して取り付けられた場合の耐震性能への影響係数 χ の下限値は、ダンパーが剛性のみ偏心して取り付けられる場合を除き概ね評価できることがわかった。

5. 耐震性能評価手法の多構面モデルへの適用

5.1 解析パラメーター

本章では、前章で導いた 2x2 構面モデルにダンパーが耐力・剛性偏心して取り付けられた場合の耐震性能への影響係数 χ の下限値の評価式を、多構面モデルについても適用することができるかどうかについて、図-16に示す一層一軸偏心 4x2 構面モデルによる検討を行う。

主架構については、2x2 構面のモデル同様、矩形の平面形状を有し重量・剛性・耐力のいずれについても偏心していないものとし、降伏せん断力係数は $\alpha_f=0.2$ 、降伏変形角は $\theta_{yf}=1/150(\text{rad})$ とする。ダンパーについては、加振方向にバランス良く配置した場合に降伏変形角が層間変形角で $\theta_{yd}=1/500(\text{rad})$ となるようにし、主架構とダンパー系の耐力比が降伏せん断力係数の比で $\alpha_{yf}/\alpha_{yd}=1.0, 2.0$ (ダンパー系の降伏せん断力係数で $\alpha_{yd}=0.2$ と 0.1) の 2 通りを設定する。

以上のように設定した加振方向にバランス良く配置した場合のダンパー系の耐力及び弾性剛性を、加振方向の 4 構面に図-17に示す 7 通りに配分した場合について検討を行う。1 ~ 7 のモデルには、a と b または c と d の 2 種類のダンパーを配置を変えて設置している。ダンパー a 対ダンパー b、ダンパー c 対ダンパー d の降伏耐力比・降伏変形比を、

- 1)降伏耐力比が 2:1 で降伏変形比が 1:1
- 2)降伏耐力比が 1:1 で降伏変形比が 2:1
- 3)降伏耐力比が 2:1 で降伏変形比も 2:1
- 4)降伏耐力比が 2:1 で降伏変形比が 1:2

の 4 種類設定する。なお、全てのモデルにおいて、主架構の平面形状の辺長比は $l_x/l_y=1/3$ とし、加振と直交方向の弾性剛性は、加振方向の主架構及びダンパーの弾性剛性の合計値 $K_y=K_x+\sum K_{di}$ とする。

応答解析は、神戸 NS 波を周期を 3 倍に調整したモデルに、八戸 EW 波を周期を 2 倍に調整したモデルに、エルセントロ NS 波を周期を調整していないモデルにそれぞれ入力する。なお、数値積分における時間刻みは 1/500 秒とし、平均加速度法により計算する。また減衰は各モデルとも初期剛性比例型とし、減衰定数は弾性 1 次モ

ードに対し 2%と仮定する。ダンパーの復元力特性については、2x2 構面モデルと同様、骨格曲線の 2 次剛性を弾性剛性の 1%としたパウシガー効果を考慮した履歴モデルを用いる。以上の方法で解析を行い、各モデルについてバランス良くダンパーを配置したモデルと性能限界におけるエネルギー吸収能力を比較したダンパーの偏心したことによる耐震性能への影響係数 χ を算出する。

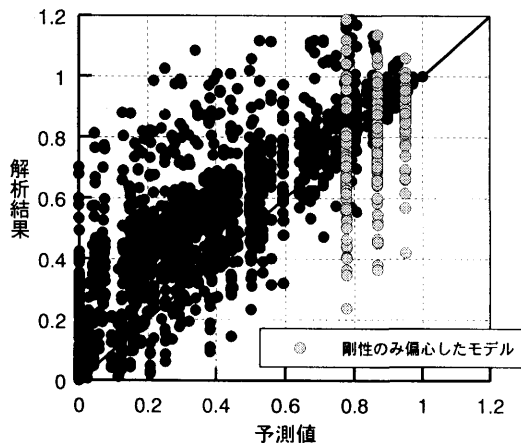


図-15 式(8)と式(12)による χ の予測値と解析結果の比較

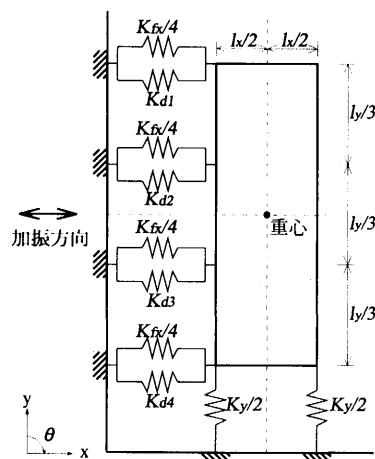


図-16 一層一軸偏心 4x2 構面モデル

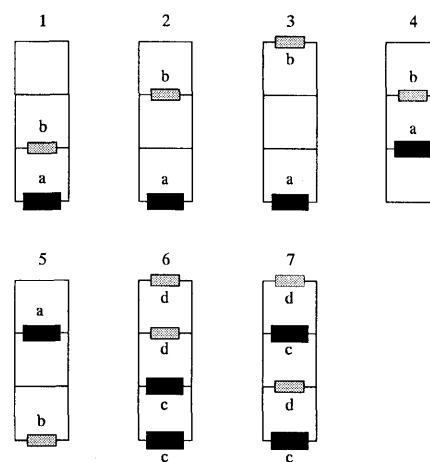


図-17 ダンパー配置

5.2 評価方法の検討

多構面モデルにおいても2x2構面モデル同様、重心に水平力を加えた場合の静的な力の釣り合いに基づき耐震性能への影響係数 χ を略算的に評価することを試みる。2x2構面モデル同様、ダンパーの復元力特性が完全弾塑性型であると仮定したうえで、地震波を入力した際の履歴吸収エネルギーが、図-18に示す一定の変形モードを保ったまま最大振幅で n_{eq} 回繰り返し変形した場合と等価であると仮定する。ここで $\delta_{1max} > \delta_{4max}$ とし、ダンパーが偏心したモデルとバランスの良いモデルの繰り返し数 n_{eq} が等しいと仮定すると、2x2構面モデルにおける式(3)ならびに式(3)に相当するダンパーが耐力・剛性偏心したことによる耐震性能への影響係数 χ は

$$\chi = \frac{Q_{ydi} \cdot \left(1 - \frac{\delta_{ydi}}{\delta_{yf}}\right) + \sum_{i=2}^4 \text{Max} \left\{ 0, Q_{ydi} \cdot \left(\frac{\delta_{imax}}{\delta_{1max}} \cdot \frac{\delta_{ydi}}{\delta_{yf}}\right) \right\}}{4 \cdot \bar{Q}_{yd} \cdot \left(1 - \frac{\bar{\delta}_{yd}}{\delta_{yf}}\right)} \quad (13)$$

ここで、 Q_{ydi} :構面 i に取り付けられたダンパーの降伏耐力
 δ_{ydi} :構面 i に取り付けられたダンパーの降伏変形
 δ_{imax} :構面 i の最大変形

$\bar{Q}_{yd} = \sum_{i=1}^4 Q_{ydi} / 4$:平均的なダンパーの降伏耐力

$\bar{\delta}_{yd} = \sum_{i=1}^4 Q_{ydi} / \sum_{i=1}^4 K_{di}$:平均的なダンパーの降伏変形

K_{di} :構面 i に取り付けられたダンパーの弾性剛性
 $(Q_{ydi}, \delta_{ydi}, \bar{Q}_{yd}, \bar{\delta}_{yd}, K_{di})$ はいずれも水平成分)

と表される。さらに2x2構面モデル同様、ダンパーが偏心したモデルとバランス良く配置したモデルの最大振幅での等価な繰り返し回数の相違の影響を、式(13)の右辺に $\delta_{4max}/\delta_{1max}$ を掛けることで反映し、耐震性能への影響係数 χ の下限值を式(14)で予測することとする。

$$\chi = \frac{\delta_{4max}}{\delta_{1max}} \cdot \frac{Q_{ydi} \cdot \left(1 - \frac{\delta_{ydi}}{\delta_{yf}}\right) + \sum_{i=2}^4 \text{Max} \left\{ 0, Q_{ydi} \cdot \left(\frac{\delta_{imax}}{\delta_{1max}} \cdot \frac{\delta_{ydi}}{\delta_{yf}}\right) \right\}}{4 \cdot \bar{Q}_{yd} \cdot \left(1 - \frac{\bar{\delta}_{yd}}{\delta_{yf}}\right)} \quad (14)$$

各構面の最大変形 δ_{imax} は、最外縁の構面の最大変形 δ_{4max} が決まれば決まることから、式(14)における未知量は $\delta_{4max}/\delta_{1max}$ のみである。

次にダンパーの降伏耐力の偏りに着目して各構面の最大水平変形の比 $\delta_{imax}/\delta_{1max}$ を予測する。4章での議論と同様、性能限界状態における平面の回転角の予測値は、全てのダンパーが降伏しているものとする式(15)で得られる。

$$\theta' = a \cdot \theta = 2 \cdot \frac{-\sum_{i=1}^4 Q_{ydi} \cdot l_{yi}}{\frac{K_{fx}}{4} \cdot \sum_{i=1}^4 l_{yi}^2 + \frac{K_y}{4} \cdot \sum_{i=1}^2 l_{xi}^2} \quad (15)$$

ここで、 l_{yi} 、 l_{xi} はそれぞれ重心を原点とした時の x 、 y 方向各構面の位置であり、 x 、 y 座標軸と同じ符号を取るものとする。 $\theta' > 0$ の場合には $\delta_{1max} > \delta_{2max} > \delta_{3max} > \delta_{4max}$ であり、性能限界状態においては

$\delta_{1max} = \delta_{yf}$ であるから $\delta_{imax}/\delta_{1max}$ は式(16)により定まる。

$$\frac{\delta_{imax}}{\delta_{1max}} = \frac{\delta_{yf} \cdot (l_y/2 - l_{yi}) \cdot \theta'}{\delta_{yf}} = 1 - 2 \cdot \frac{l_y/2 - l_{yi}}{\delta_{yf}} \cdot \frac{-\sum_{i=1}^4 Q_{ydi} \cdot l_{yi}}{\frac{K_{fx}}{4} \cdot \sum_{i=1}^4 l_{yi}^2 + \frac{K_y}{4} \cdot \sum_{i=1}^2 l_{xi}^2} \quad (16)$$

式(16)による $\delta_{4max}/\delta_{1max}$ の予測値を解析で得られた両構面の最大水平変形の比の計算値と比較し図-19に示す。2x2構面モデル同様、解析結果の傾向を概ね捕らえてはいるがばらつきは大きい。

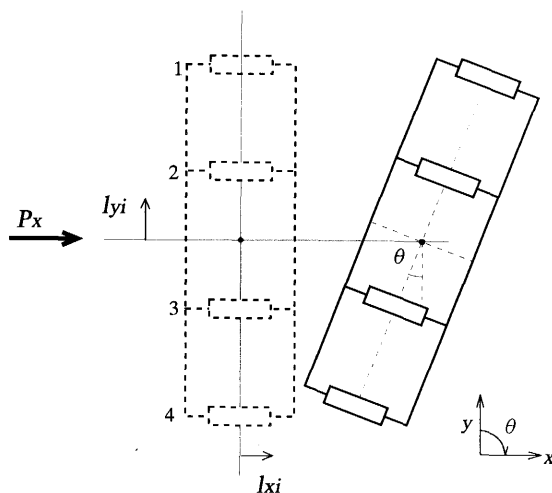


図-18 4x2 構面モデルの重心に水平力を加えたときの変形状態

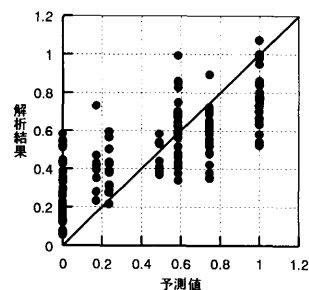


図-19 $\delta_{4max}/\delta_{1max}$ の予測値と解析結果の比較

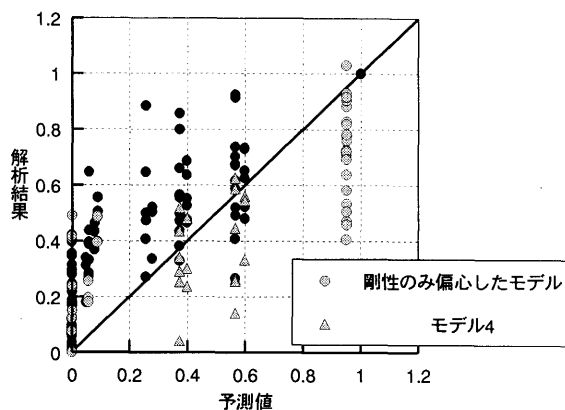


図-20 4x2 構面モデルにおける χ の予測値と解析結果の比較

式(17)による $\delta_{Imax}/\delta_{1max}$ の予測値を式(14)式に代入して求めた χ の予測値を解析結果と比較し、図-20に示す。2x2 構面モデル同様、 \ominus でプロットしたダンパーが剛性のみ偏心したモデルで危険側となるほか、 \blacktriangle でプロットしたモデル 4、即ち内側の構面にのみダンパーを取り付けたモデルでも危険側の評価となったが、全体的に見ると概ね耐震性能への影響係数 χ の下限値が押さえられている。ダンパーを内側に配置したモデル 4 で χ が危険側の評価となった要因としては、ダンパーを内側に配置した場合には偏心が小さい一方で弾性時における弾力半径比も小さくなることから、2次モード応答の影響が顕著となって式(13)の前提条件である一定の変形モードで振動しているという仮定が成立し得ないこと、および動的効果を表す係数 α を2とした場合では回転を過小評価することになっていることなどが挙げられる。この場合にはねじれ応答が顕著となって外側構面の応答が増大するため、現実的に望ましい設置とは考えにくい。従って、内側のみにダンパーを配置する場合は本略算の評価法の適用範囲外としても実用上大きな問題はないと考えられる。

6. 結論

矩形の平面形状を有する1層のモデルを対象に、履歴ダンパーの耐力偏心・剛性偏心が耐震性能に与える影響を、ダンパーがバランス良く設置された場合に対するエネルギー吸収能力の低下として捉え、その略算の評価方法について検討を行った。なお、本研究ではダンパーの平面内における性能バランスが耐震性能に与える影響を調べることを目的としたことから、解析モデルの主架構は耐力・剛性・重量のいずれについても偏心していないものとした。

まず、損傷制御構造の性能限界を骨組を構成する全ての構面において主架構の変形が弾性範囲に留まる限界と定義し、耐震性能を性能限界範囲内にぎりぎり留まる入力を受けた時のダンパー系の塑性仕事で表すこととした。そして、同じ主架構に対して、ダンパーが耐力・剛性偏心した場合の塑性仕事 W_p の、平均的な性能のダンパーをバランス良く配置した場合の塑性仕事 W_{p0} に対する比率 $\chi (=W_p/W_{p0})$ を、ダンパーが耐力・剛性偏心したことによる耐震性能への影響係数と定義した。

次いで、最も基本的な振動系である2x2構面のモデルを対象に、地震波を入力した際の履歴吸収エネルギーが重心に水平力を加えた場合の静的な釣り合い状態から導いた基本的な変形状態で n_{eq} 回繰り返し変形した場合と等価であると仮定し、耐震性能への影響係数 χ の下限値を略算的に評価する方法を提案した。提案した評価法を、主架構の平面形状、ダンパーの耐力比・剛性比を主たるパラメータとした応答解析結果を用いて検討し、ダンパーが剛性のみ偏心し

て取り付けられる場合を除き概ね評価できるように修正した。なお、剛性のみ偏心するのは耐力が等しく降伏変形が異なるダンパーを設置する場合であり、実際にはあまり起こりにくいパラメーターであると考えられることから適用範囲外としても問題は無いと考えた。

さらに、この評価法を多構面モデルについても適用することができるかどうかについて、4x2構面モデルによる検討を行ったところ、ダンパーが剛性のみ偏心した場合と、内側の構面にのみダンパーを取り付けた場合を適用範囲外とすれば概ね適用できることがわかった。

参考文献

- 1)和田 章, 岩田 衛, 清水敬三, 安部重孝, 川合廣樹: 建築物の損傷制御設計, 丸善, 1998
- 2)高橋 誠, 秋山 宏: 地震時における柔剛混合構造せん断型多層骨組の損傷集中特性, 日本建築学会構造系論文集, 第536号, pp.63-70, 2000.10
- 3)小野森司, 青木博文, 松本由香: 損傷制御構造のエネルギー配分に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2分冊, pp.299-300, 2001.9
- 4)山口路夫, 山田 哲, 松本由香, 谷川敬祐, 小野森司, 竹内 徹, 小川信行, 秋山 宏: 座屈拘束ブレースを有する損傷制御構造部分骨組の実大振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 第558号, pp.189-196, 2002.8
- 5)寺田岳彦, 矢部喜堂, 真瀬伸治: 偏心を有する柔剛混合鉄骨架構の弾塑性ねじれ応答, 日本建築学会構造系論文集, 第425号, pp.47-56, 1991.7
- 6)岡田恒男, 村上雅也, 宇田川邦明, 西川孝夫, 大沢 胖, 田中 尚: 1968年十勝沖地震による八戸市立図書館の被害に関する考察, 日本建築学会論文報告集, 第167号, pp.47-58, 1970.1
- 7)山崎 裕: 偏った剛性分布を持つ構造物のねじれ応答, 日本建築学会構造系論文集, 第369号, pp.31-41, 1986.11
- 8)大綱浩一, 村上雅也: 1層1軸偏心線形系におけるねじれ成分の特性, 日本建築学会構造系論文集, 第471号, pp.51-60, 1995.5
- 9)日野泰道, 中埜良昭, 楠 浩一: 鉄骨系架構により補強された鉄筋コンクリート造骨組のねじれ応答性状に関する研究, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, 第2分冊, pp.2631-2634, 1998.11
- 10)長田正至, 前田匡樹, 淵脇常貴: 剛性・耐力偏心を有する建物の弾塑性地震応答性状, その1/その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2分冊, pp.417-420, 1999.9
- 11)島崎 大, 秋山 宏: 振れを伴う1層構造物の最適強度分布と損傷分布, 日本建築学会構造系論文集, 第506号, pp.101-107, 1998.4
- 12)高山正春, 木村雄一: 1層1骨組のねじれ地震応答性状, 日本建築学会構造系論文集, 第526号, pp.53-59, 1999.12
- 13)藤井賢志, 中埜良昭, 真田 靖士: 単層1軸偏心建物の非線形応答評価法に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 48B, 日本建築学会, pp.173-182, 2002.3
- 14)藤井賢志, 中埜良昭, 真田靖士: 1方向地震入力を受ける多層1軸偏心建物の各構面最大応答変位の推定手法, 日本建築学会構造系論文集, 第583号, pp.99-106, 2004.9
- 15)山田 哲, 和田智子, 藤川恵一, 前澤将男, 北村春幸, 和田 章: 履歴ダンパーが耐力・剛性偏心して取り付けられた1層鋼構造骨組の振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 第590号, pp.111-119, 2005.4
- 16)秋山 宏, 高橋 誠: 鋼構造剛接骨組の耐震性に及ぼすバウシンガー効果の影響, 日本建築学会構造系論文集報告集, 第418号, pp.49-57, 1990.12
- 17)秋山 宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技法堂出版, 1999

(2005年4月7日原稿受理, 2005年7月5日採用決定)