

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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
Title(English)	ENERGY BALANCE-BASED SEISMIC RESPONSE PREDICTION METHOD FOR RESPONSE CONTROL STRUCTURES WITH HYSTERETIC DAMPERS AND VISCOUS DAMPERS
著者(和文)	佐藤大輔, 北村春幸, 佐藤大樹, 佐藤利昭, 山口路夫, 脇田直弥, 綿貫雄太
Authors(English)	Haruyuki Kitamura, daiki sato, Toshiaki Sato, Michio Yamaguchi, Naoya WAKITA
出典(和文)	日本建築学会構造系論文集, Vol. 79, No. 699, pp. 631-640
Citation(English)	Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 79, No. 699, pp. 631-640
発行日 / Pub. date	2014, 5
Rights	日本建築学会
Relation	is version of: https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijs/79/699/79_631/_article/-char/ja/
Note	本文データは学協会の許諾に基づきJ-STAGEから複製したものである

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

ENERGY BALANCE-BASED SEISMIC RESPONSE PREDICTION METHOD FOR RESPONSE CONTROL STRUCTURES WITH HYSTERETIC DAMPERS AND VISCOUS DAMPERS

佐藤大輔*¹, 北村春幸*², 佐藤大樹*³, 佐藤利昭*⁴
山口路夫*⁵, 脇田直弥*⁶, 綿貫雄太*⁶

*Daisuke SATO, Haruyuki KITAMURA, Daiki SATO, Toshiaki SATO,
Michio YAMAGUCHI, Naoya WAKITA and Yuta WATANUKI*

Structural control devices are widely implemented in order to reduce the seismic response of buildings. These devices are typically categorized as hysteretic dampers and viscous dampers. Generally, a structure employs only one of these two dampers; however, in recent years, a case has been made for using both dampers simultaneously in order to improve seismic performance. For the quantitative evaluation of seismic performance, a prediction method based on energy balance has been proposed in the past studies. However, the existing method cannot be adapted to response control structures composed of two types of dampers. This study proposes a solution to this problem by establishing the theory relating to vertical distribution. Furthermore, a wide range of ground motion characteristics are investigated by using f -value for an energy evaluation of ground motion. The proposed prediction method is validated by comparing its results with those of time-history analyses. In addition, the effectiveness and applicability of using both dampers are verified using the proposed method.

Keywords : Response control structure, Hysteretic damper, Viscous damper, Energy balance, Response prediction method, f -value

制振構造, 履歴ダンパー, 粘性ダンパー, エネルギーの釣合, 応答予測法, f 値

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⁾。ここでいう制振構造は、構造骨組の層間変形を利用し、上下階を結ぶ制振部材によって構造骨組のエネルギーを吸収する構造形式で、建物重量を支える柱・梁の損傷を低減することにより、大地震後の建物の継続使用を目標とするものである。制振部材には、座屈拘束ブレースや間柱型制振パネルなどの履歴ダンパー、オイルダンパーや粘性制震壁などの粘性ダンパーが広く用いられている²⁾。履歴ダンパーは、鋼材の塑性歪エネルギー吸収能力を利用するもので、塑性変形に伴う振動エネルギーの吸収により、応答変位の低減に大きな効果を発揮する。粘性ダンパーは、流体がオリフィスを通過する際の抵抗力やそれ自体の粘性抵抗力を利用するもので、ダンパーに作用する相対速度に応じて振動エネルギーを吸収し、応答加速度の低減に大きな効果を発揮する。

制振構造の応答性状を定量的に評価する手法の1つとして、秋山らにより、エネルギーの釣合に基づく応答評価法（以降、エネルギー法と呼ぶ）が提示されている^{3)~7)}など。履歴ダンパーを用いた制振構造は、弾性挙動をする主架構を柔要素、完全弾塑性型の復元力特性にモデル化される履歴ダンパーを剛要素とする柔剛混合構造と位置付けられ、履歴ダンパーの降伏層せん断力分布に依存した各層へのエネルギー配分が定められている。柔剛混合構造は、柔要素によ

ってエネルギー分散が図られることから、層を弾塑性型の復元力特性にモデル化される耐震構造に比して、エネルギー集中が軽減されたとしている^{4),8)}。粘性ダンパーを用いた制振構造のエネルギー法は、原田・秋山によって提示され、粘性ダンパーの各層へのエネルギー配分が、弾性挙動をする主架構の最大層間変形分布に依存し、履歴ダンパーを付与した架構に見られる高さ方向のエネルギー集中が現れないことを示している⁷⁾。免震構造においては、履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用したエネルギー法が、東野・北村によって提示されている。1質点系振動モデルを対象に、全体の応答層せん断力が、変位に依存する積層ゴムの負担層せん断力および速度に依存する粘性ダンパーの負担層せん断力の二乗和平方根（SRSS）に、履歴ダンパーの降伏層せん断力を加えて求められることを示している⁹⁾。

2011年の東北地方太平洋沖地震は、従来の想定レベルを上回るM_w9.0の巨大地震として評価されている。近年では、海溝型地震や直下型地震などの特性が異なる巨大地震の切迫もあって^{10),11)}、建物への十分な耐震性および冗長性の確保を要望する声も多く、ここ数年、履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用した制振構造が増えている例^{12),13)}。しかし、その応答評価を目的とした研究は僅か^{14~18)}、現在のところ、設計に資する知見が十分にあるとは言い難い。エネルギー法においても、両ダンパーを併用した多層から成る制振構造への適用方法は確立されておらず、海溝型地震や直下型地震などに

*1 東京理科大学大学院理工学研究科 大学院生

*2 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)

*3 独立行政法人防災科学技術研究所兵庫耐震工学センター
研究員・博士(工学)

*4 東京理科大学理工学部建築学科 助教・博士(工学)

*5 新日鉄住金エンジニアリング(株) 博士(工学)

*6 新日鉄住金エンジニアリング(株) 修士(工学)

Graduate Student, Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science

Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

Researcher, EERC, NIED, Dr. Eng.

Assist. Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

Nippon Steel & Sumikin Engineering Co., Ltd., Dr. Eng.

Nippon Steel & Sumikin Engineering Co., Ltd., M. Eng.

対応する手法の定量的検証はなされていない。

本論文では、多質点系振動モデルを基に、履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用した制振構造におけるエネルギー法の構築を第一義的な目的とし、それを達成するにあたり、以下の項目を導入・提案した。該当内容は、①制振部材のエネルギー評価における f 値¹⁹⁾ の導入、②単独使用を前提に提案された履歴ダンパー⁴⁾ 及び粘性ダンパー⁷⁾ のエネルギー配分式の導入、③履歴ダンパーのみの最大層間変形分布から粘性ダンパーのエネルギー分散係数 h_i を定める方法の提案、④免震構造で提案された変位および速度に依存するダンパーの負担層せん断力による応答層せん断力の評価方法の導入⁹⁾ の以上4項目である。これらの検証に当たっては、検討用モデルとして、両ダンパーを併用した10質点系等価せん断型モデル、検討用地震動として、 f 値の評価から単位地震動と位置付けられる標準波の他、直下型地震と長周期・長時間地震動の位相特性を採用した模擬波を用いる。また、これらによる応答解析との対比より、履歴ダンパーと粘性ダンパーの各層へのエネルギー配分式と、応答予測式および応答評価手順の妥当性を検証し、導出した応答予測式を基に、両ダンパーを併用した制振構造の応答性状を明らかにする。

2. 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式

2.1. 制振構造のエネルギーの釣合式

本論文では、建物の各層に、履歴ダンパーと粘性ダンパーが併用されたモデルを検討の対象とする。以下に、両ダンパーを併用した制振構造における最大応答発生時刻 t_m 、地震終了時刻 t_0 のエネルギーの釣合式(1),(2)を示す⁶⁾。

$${}_fW_e(t_m) + {}_sW_p(t_m) + {}_hW_d(t_m) = E(t_0) \quad (1)$$

$${}_sW_p(t_0) + {}_hW_d(t_0) = E(t_0) \quad (2)$$

ここに、 $E(t)$ ：時刻 t での制振構造への入力エネルギー

${}_fW_e(t)$ ：時刻 t での主架構の弾性振動エネルギー

${}_sW_p(t)$ ：時刻 t での履歴ダンパーの塑性歪エネルギー

${}_hW_d(t)$ ：時刻 t での粘性ダンパーの減衰エネルギー

制振部材を付加した建物の場合、一般に $E(t_m) \leq E(t_0)$ となることから、式(1)では $E(t_m)$ を $E(t_0)$ に置き換えている^{4),6)}。

図1に、第 i 層における各構成要素の復元力特性の概要を示す。

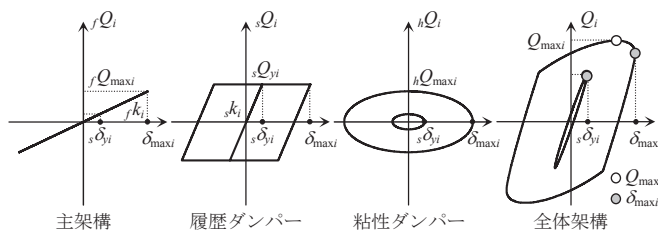


図1 各構成要素の復元力特性

主架構は弾性とし、第 i 層の剛性を ${}_f k_i$ 、最大層せん断力を ${}_f Q_{\max i}$ 、最大層間変形を $\delta_{\max i}$ とする。履歴ダンパーは、完全弾塑性型の復元力特性を有し、第 i 層の剛性を ${}_s k_i$ 、降伏層せん断力を ${}_s Q_{yi}$ 、降伏変形を ${}_s \delta_{yi}$ とする。粘性ダンパーは、速度一減衰関係において線形

特性を有する速度依存型とし、第 i 層の粘性減衰係数を C_i 、最大層せん断力を ${}_h Q_{\max i}$ とする。全体架構の最大層せん断力を $Q_{\max i}$ とする。層間変形の全てが制振部材の変形に寄与し、制振部材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別途考慮するものとし、ここでは対象としない²⁰⁾。

第 i 層における主架構の最大層せん断力係数 ${}_f \alpha_i$ 、履歴ダンパーの降伏層せん断力係数 ${}_s \alpha_{yi}$ 、粘性ダンパーの最大層せん断力係数 ${}_h \alpha_i$ 、全体架構の最大層せん断力係数 α_i を、次式のように定義する。左下の添え字 f は主架構、 s は履歴ダンパー、 h は粘性ダンパーを表す。

$${}_f \alpha_i = \frac{{}_f Q_{\max i}}{\sum_{j=1}^N m_j g}, {}_s \alpha_{yi} = \frac{{}_s Q_{yi}}{\sum_{j=1}^N m_j g}, {}_h \alpha_i = \frac{{}_h Q_{\max i}}{\sum_{j=1}^N m_j g}, \alpha_i = \frac{Q_{\max i}}{\sum_{j=1}^N m_j g} \quad (3a-d)$$

ここに、 m_i ：第 i 層の質量、 g ：重力加速度、 N ：全層数である。主架構の1次固有周期 ${}_f T_1$ を等価周期とする1質点振動系に置換された場合の等価ばね定数 k_{eq} を、各層の質量 m_i の総和である総質量 M と ${}_f T_1$ を用いて下式のように設定する。

$$k_{eq} = 4\pi^2 M / {}_f T_1^2 \quad (4)$$

κ_i, κ_{si} を ${}_f k_i, {}_s k_i$ と k_{eq} を用いて、下式のように定義する。

$$\kappa_i = \frac{{}_f k_i}{k_{eq}}, \quad \kappa_{si} = \frac{{}_s k_i}{k_{eq}} \quad (5a,b)$$

非定常振動において最大層間変形 $\delta_{\max i}$ が発生した1ループにおける粘性ダンパーの最大減衰力が、 $\delta_{\max i}$ を最大振幅とした定常振動 $y_i = \delta_{\max i} \sin \omega t$ (ω ：固有円振動数 $= 2\pi / {}_f T_1$) における最大減衰力と等しいと仮定すると、粘性減衰係数 C_i の粘性ダンパーによる第 i 層の最大層せん断力 ${}_h Q_{\max i}$ は下式で表せる。

$${}_h Q_{\max i} = C_i \cdot \omega_0 \cdot \delta_{\max i} \quad (6)$$

このとき、粘性ダンパーの1ループ分で吸収するエネルギー ${}_h W_{di}$ は下式で表される。

$${}_h W_{di} = \int_0^{2\pi} C_i \cdot \frac{dy}{dt} \cdot dt = \pi \cdot {}_h Q_{\max i} \cdot \delta_{\max i} = \pi \cdot C_i \cdot \omega_0 \cdot \delta_{\max i}^2 \quad (7)$$

粘性減衰係数 C_i は、総質量 M と主架構の1次固有周期 ${}_f T_1$ を用いて、以下のような無次元化したパラメータ h_i で表すものとする。

$$h_i = \frac{C_i}{2\sqrt{M \cdot k_{eq}}} = \frac{C_i \cdot {}_f T_1}{4\pi M} \quad (8)$$

基準となる応答量として、主架構のみの場合における最大層せん断力係数 ${}_f \alpha_0$ と最大層間変形 ${}_f \delta_0$ を、下式のように定義する^{4),6)}。

$${}_f \alpha_0 = \frac{2\pi \cdot V_E}{{}_f T_1 \cdot g}, \quad {}_f \delta_0 = \frac{{}_f T_1 \cdot V_E}{2\pi} \quad (9a,b)$$

E の速度換算値 V_E は運動エネルギー式を用いて、下式で定義される。

$$V_E = \sqrt{\frac{2E}{M}} \quad (10)$$

2.2. f 値による制振部材のエネルギー評価

本研究では、広範な地震動特性への対応を目的として、制振部材のエネルギー評価に f 値を導入する。秋山らは、継続時間の長い地震動を、ある単位地震動が繰返し発生すると仮定し、その単位地震動の反復数を f 値として次式で定義した^{19),21)}。

$$f = \left(\frac{{}_0F(h)}{F(h)} \right)^2 = \left(\frac{{}_0\bar{S}_{V,h} / \sqrt{{}_0\bar{V}_{E,h=0.1}}}{\bar{S}_{V,h} / \sqrt{\bar{V}_{E,h=0.1}}} \right)^2 = \left(\frac{\bar{V}_{E,h=0.1} / \bar{S}_{V,h}}{\sqrt{{}_0\bar{V}_{E,h=0.1}} / \sqrt{{}_0\bar{S}_{V,h}}} \right)^2 \quad (11)$$

ここで、 $F(h)$ ：対象とする地震動に対する構造物の減衰関数

$\bar{S}_{V,h}, \bar{V}_{E,h}$ ：減衰定数 h のときの周期 0~10(s) における平均速度応答スペクトル，平均エネルギースペクトル

${}_0F(h)$ ：単位地震動に対する構造物の減衰関数

${}_0\bar{S}_{V,h}, {}_0\bar{V}_{E,h}$ ：単位地震動における \bar{S}_V, \bar{V}_E

図2に概要を示したように、 f 値は長周期・長時間地震動による応答値の最大値が単位地震動と等しく、入力エネルギー E を単位地震動の入力エネルギー ${}_0E$ の f 倍と考えるものである。すなわち、長周期・長時間地震動の速度応答スペクトル $S_{V,h}$ は、単位地震動の速度応答スペクトル ${}_0S_{V,h}$ と等しく、エネルギースペクトル $V_{E,h=0.1}$ は単位地震動のエネルギースペクトル ${}_0V_{E,h=0.1}$ の \sqrt{f} 倍になる。なお、単位地震動には、標準波 (El Centro NS, TAFT EW, 八戸 NS, EW) が選ばれる。

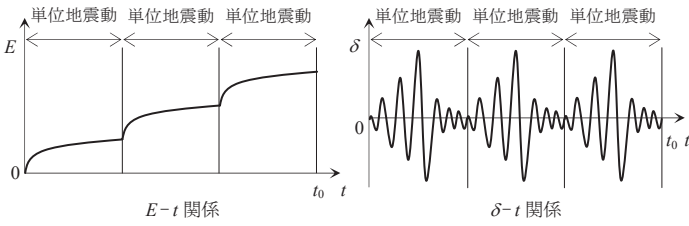


図2 応答の時刻歴 ($f=3$ の場合)

履歴ダンパーの累積塑性変形倍率 ${}_0s\eta_{mi}, {}_0s\eta_{oi}, {}_s\eta_{mi}, {}_s\eta_{oi}$ は、正負の累積塑性変形との和である ${}_0s\delta_{mpi}, {}_0s\delta_{opi}, {}_s\delta_{mpi}, {}_s\delta_{opi}$ を、平均塑性変形倍率 ${}_0s\bar{\mu}_i, {}_s\bar{\mu}_i$ は、正負の最大塑性変形の平均値 $(\bar{\delta}_{maxi} - \bar{\delta}_{yi})$ を降伏変形 ${}_s\delta_{yi}$ で除した数値を指す。左下添え字の 0 は単位地震動と対象とする地震動の差異を表し、右下添え字 m, o は $t=t_m, t_0$ と対応する。

単位地震動の等価繰返し数 ${}_0s n_1, {}_0h n_1$ は、単位地震動による第 i 層の履歴ダンパーと粘性ダンパーが消費するエネルギー ${}_0s W_{pi}, {}_0h W_{di}$ を、最大層間変形 δ_{maxi} を定振幅とする 1 ループで消費するエネルギー ${}_0s W_{pli}, {}_0h W_{dli}$ で除した数値として、次式で定義されている^{4),6),9)}。

$${}_0s n_1 = {}_0s W_{pi} / {}_0s W_{pli}, {}_0h n_1 = {}_0h W_{di} / {}_0h W_{dli} \quad (12a,b)$$

単位地震動による履歴ダンパーの累積塑性変形倍率 ${}_0s\eta_{mi}$ と平均塑性変形倍率 ${}_0s\bar{\mu}_i$ は、 ${}_0s n_1$ を用いて、次式で対応する。

$${}_0s\eta_{mi} = 4 {}_0s n_1 \cdot {}_0s\bar{\mu}_i \quad (13)$$

さらに f 値を用いれば、長周期・長時間地震動による第 i 層の制振部材のエネルギー吸収量 ${}_s W_{pi,h} W_{di}$ は、単位地震動の等価繰返し数 ${}_0s n_1, {}_0h n_1$ と単位地震動の反復数 f 値の関係から次式で評価される^{19),22)}。

$${}_s W_{pi} = f \cdot {}_0s n_1 \cdot {}_s W_{pli}, {}_h W_{di} = f \cdot {}_0h n_1 \cdot {}_h W_{dli} \quad (14a,b)$$

同様に、長周期・長時間地震動による履歴ダンパーの累積塑性変形倍率 ${}_s\eta_{mi}$ と平均塑性変形倍率 ${}_s\bar{\mu}_i$ は、 ${}_0s n_1$ と f 値を用い、次式で関係付けられる。

$${}_s\eta_{mi} = 4 f \cdot {}_0s n_1 \cdot {}_s\bar{\mu}_i \quad (15)$$

なお、これらは直下型地震 ($f < 1.0$) にも対応する。

2.3. 構成要素のエネルギー評価式

以下に、式(1),(2)における各構成要素のエネルギー評価式を示す。

主架構の弾性振動エネルギー ${}_j W_e$ は、以下のように表せる²⁰⁾。

$${}_j W_e(t_m) = \sum_{i=1}^N {}_j W_{ei} = \sum_{i=1}^N \frac{{}_j Q_{maxi} \cdot \delta_{maxi}}{2} = \frac{M \cdot V_E^2}{2} \sum_{i=1}^N \left\{ \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 \cdot \frac{1}{\kappa_i} \cdot \left(\frac{{}_j \alpha_i}{f \alpha_0} \right)^2 \right\} \left(\frac{{}_j \alpha_i}{f \alpha_0} \right)^2 = \frac{M \cdot V_E^2}{2} \left(\frac{{}_j \alpha_i / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} \right)^2 \quad (16)$$

ここに、 $\bar{\alpha}_i$ ：最適降伏層せん断力係数分布である⁴⁾。

履歴ダンパーの消費する全塑性歪エネルギー ${}_s W_p$ は、第 i 層の履歴ダンパーの塑性歪エネルギー ${}_s W_{pi}$ と文献4の履歴ダンパーの損傷分散係数 ${}_s \gamma_i$ を用いて表す。 $t=t_m$ のときの ${}_s W_p(t_m)$ は単位地震動による履歴ダンパーの等価繰返し数 ${}_0s n_1$ 及び単位地震動の反復数 f 値を用い、 $t=t_0$ のときの ${}_s W_{pi}(t_0)$ は累積塑性変形 δ_{opi} を用いて次のように表す⁶⁾。

$${}_s W_p(t_m) = {}_s \gamma_i \cdot {}_s W_{pi} = {}_s \gamma_i \cdot f \cdot {}_0s n_1 \cdot {}_s W_{pli} = 4 {}_s \gamma_i \cdot f \cdot {}_0s n_1 \cdot {}_s Q_{yi} \cdot \delta_{maxi} = \frac{M \cdot V_E^2}{2} \cdot {}_s \gamma_i \cdot f \cdot {}_0s n_1 \cdot c_i \cdot \bar{\alpha}_i^2 \left(\frac{{}_s \alpha_{yi} / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} \right) \cdot \left(\frac{{}_j \alpha_i / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} \right) \quad (17)$$

$${}_s W_p(t_0) = {}_s \gamma_i \cdot {}_s W_{pi} = {}_s \gamma_i \cdot {}_s Q_{yi} \cdot \delta_{opi} = {}_s \gamma_i \cdot {}_s Q_{yi} \cdot \delta_{yi} \cdot n_{oi} \quad (18)$$

$$\text{ここで、} \frac{1}{{}_s \gamma_i} = \frac{{}_s W_{pk}}{\sum_{i=1}^N {}_s W_{pi}} = \frac{{}_s k_i \cdot P_k^{-n_i}}{\sum_{i=1}^N {}_s s_i \cdot P_i^{-n_i}} \quad (19)$$

$$s_i = \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 \cdot \bar{\alpha}_i^2 \cdot \left(\frac{{}_j k_i}{f k_i} \right) \quad (20)$$

$${}_s P_i = \frac{{}_s \alpha_{yi} / {}_s \alpha_{y1}}{\bar{\alpha}_i} \quad (21)$$

履歴ダンパーの損傷集中指数 n_i は、主架構と履歴ダンパーの負担せん断力比 ${}_s r_{qi}$ を用いて範囲分けした下式を採用する⁶⁾。

$$\left. \begin{aligned} n_i &= 12 & {}_s r_{qi} &\leq 0.33 \\ n_i &= -2 + 8 \cdot {}_s r_{qi}^{-0.5} & 0.33 &< {}_s r_{qi} \leq 7.0 \\ n_i &= 1 & 7.0 &< {}_s r_{qi} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

$${}_s r_{qi} = \frac{{}_j Q_{maxi}}{{}_s Q_{yi}} \quad (23)$$

$$c_i = \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 \cdot \frac{1}{\kappa_i} \quad (24)$$

粘性ダンパーの全減衰エネルギー ${}_h W_d$ は、第 i 層の粘性ダンパーの減衰エネルギー ${}_h W_{di}$ と文献7の粘性ダンパーのエネルギー分散係数 ${}_h \gamma_i$ 、単位地震動による粘性ダンパーの等価繰返し数 ${}_0h n_1$ 及び単位地震動の反復数 f 値を用いて表す。

$${}_h W_d(t_m) = {}_h \gamma_i \cdot {}_h W_{di} = {}_h \gamma_i \cdot f \cdot {}_0h n_1 \cdot {}_h W_{dli} = \pi \cdot {}_h \gamma_i \cdot f \cdot {}_0h n_1 \cdot Q_{maxi} \cdot \delta_{maxi} = \frac{M \cdot V_E^2}{2} \cdot 2 \pi \cdot {}_h \gamma_i \cdot f \cdot {}_0h n_1 \cdot c_i \cdot \bar{\alpha}_i^2 \left(\frac{{}_h \alpha_i / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} \right) \cdot \left(\frac{{}_j \alpha_i / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} \right) \quad (25)$$

$${}_h W_d(t_0) = {}_h \gamma_i \cdot f \cdot {}_0h n_1 \cdot \pi \cdot Q_{maxi} \cdot \delta_{maxi} \quad (26)$$

式(7)より、粘性ダンパーの減衰エネルギーが主架構の最大層間変形

によって表されることから、粘性ダンパーのエネルギー分散係数 $h\gamma_i$ の高さ方向分布は最大層間変形分布に依存するとされている⁷⁾。

$$\frac{1}{h\gamma_k} = \frac{hW_{dk}}{\sum_{i=1}^N hW_{di}} = \frac{s'_k \cdot h_k}{\sum_{i=1}^N s'_i \cdot h_i} \quad (27)$$

$$s'_k = \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 \cdot r \bar{\alpha}_i^2 \cdot \left(\frac{f k_i}{f k_i} \right)^2 = \frac{f Q_{\max i}^2}{f k_i^2} \cdot \frac{f k_i^2}{r \alpha_i^2 \cdot M^2 \cdot g^2} = \frac{\delta_{\max i}^2}{\delta_{\max 1}^2} \quad (28)$$

ここで、 $r \bar{\alpha}_i$: 最大応答せん断力係数分布 (= $\bar{\alpha}_i$ とする) である⁷⁾。

2.4. 制振構造の応答予測式の導出

履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用した制振構造におけるエネルギーの釣合に基づく応答予測式を導出する。 $t=t_m$ の釣合式(1)に、式(16),(17),(25)を代入すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{f \alpha_i / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} \right)^2 + 8_s \gamma_i \cdot f \cdot \alpha_0 \cdot n_i \cdot c_i \cdot \bar{\alpha}_i^2 \left(\frac{s \alpha_{yi} / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} \right) \cdot \left(\frac{f \alpha_i / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} \right) \\ & + 2\pi h \gamma_i \cdot f \cdot \alpha_0 \cdot n_i \cdot c_i \cdot \bar{\alpha}_i^2 \left(\frac{h \alpha_i / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} \right) \cdot \left(\frac{f \alpha_i / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} \right) = 1 \end{aligned} \quad (29)$$

式(29)を第 i 層の主架構の層せん断力係数 $f \alpha_i / f \alpha_0$ について解くと、次式の解を得る。

$$\begin{aligned} \frac{f \alpha_i / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} = & \left\{ f \cdot s A_i \left(\frac{s \alpha_{yi} / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} \right) + f \cdot h A_i \left(\frac{h \alpha_i / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} \right) \right\} \\ & + \sqrt{\left\{ f \cdot s A_i \left(\frac{s \alpha_{yi} / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} \right) + f \cdot h A_i \left(\frac{h \alpha_i / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} \right) \right\}^2 + 1} \end{aligned} \quad (30)$$

$$s A_i = 4c_i \cdot \bar{\alpha}_i^2 \cdot s \gamma_i \cdot \alpha_0 \cdot n_i, \quad h A_i = \pi c_i \cdot \bar{\alpha}_i^2 \cdot h \gamma_i \cdot \alpha_0 \cdot n_i \quad (31a,b)$$

履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用した場合、主架構及び履歴ダンパーに対し、粘性ダンパーの応答層せん断力に位相差が生じる。そのため、第 i 層の全体架構の最大層せん断力 $Q_{\max i}$ は、それぞれの最大層せん断力の単純和とはならず、任意の時刻におけるせん断力の和の最大値として考える必要がある。ここでは、文献9を参考に、線形特性を有する主架構と粘性ダンパーの最大層せん断力 $f Q_{\max i}$ 、 $h Q_{\max i}$ の二乗和平方根 (SRSS) に、弾塑性型の復元力特性を有する履歴ダンパーの降伏層せん断力 $s Q_{yi}$ を加えることで $Q_{\max i}$ を評価する。

$$Q_{\max i} = \sqrt{f Q_{\max i}^2 + h Q_{\max i}^2 + s Q_{yi}^2} \quad (32)$$

式(32)より、第 i 層の全体架構のせん断力係数 $\alpha_i / f \alpha_0$ は次式で表せる。

$$\frac{\alpha_i / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} = \sqrt{\left(\frac{f \alpha_i / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} \right)^2 + \left(\frac{h \alpha_i / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} \right)^2 + \left(\frac{s \alpha_{yi} / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} \right)^2} \quad (33)$$

第 i 層の最大層間変形 $\delta_{\max i}$ は、次式で表せる。

$$\frac{\kappa_i \cdot \delta_{\max i}}{f \delta_0} = \frac{\kappa_i}{f \delta_0} \cdot \left(\frac{f Q_{\max i}}{f k_i} \right) = \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{M} \right) \cdot \bar{\alpha}_i \cdot \left(\frac{f \alpha_i / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} \right) \quad (34)$$

式(33)に式(29)の展開より得られる $s \alpha_{yi}$ 、 $h \alpha_i$ をそれぞれ代入すると、以下のような α_i と $\delta_{\max i}$ の関係を得ることができる。

$$\frac{\alpha_i / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} = \sqrt{B_i^2 + \left(\frac{h \alpha_i / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} \right)^2} + \frac{1}{2f \cdot s A_i} \left(\frac{1}{B_i} - B_i \right) - \frac{h A_i}{s A_i} \left(\frac{h \alpha_i / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} \right) \quad (35)$$

$$\frac{\alpha_i / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} = \sqrt{B_i^2 + \left\{ \frac{1}{2f \cdot h A_i} \left(\frac{1}{B_i} - B_i \right) - \frac{s A_i}{h A_i} \left(\frac{s \alpha_{yi} / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} \right) \right\}^2} + \left(\frac{s \alpha_{yi} / \bar{\alpha}_i}{f \alpha_0} \right) \quad (36)$$

$$\text{ここに、} B_i = \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{M} \right) \cdot \left(\frac{1}{\bar{\alpha}_i} \right) \cdot \left(\frac{\kappa_i \cdot \delta_{\max i}}{f \delta_0} \right) \quad (37)$$

以上に述べた予測式による最大応答値の評価は、次の手順による。

- ① 第一近似として、式(34)の $h \alpha_i = 0$ 、すなわち履歴ダンパーを単独で付与した場合の $\delta_{\max i} / \delta_{\max 1}$ を求める。
- ② ①で求めた $\delta_{\max i} / \delta_{\max 1}$ を用い、式(27)で表される粘性ダンパーのエネルギー分散係数 $h\gamma_i$ を算定する。
- ③ 第二近似として、②で求めた $h\gamma_i$ を式(34)に用い、併用時での $\delta_{\max i} / \delta_{\max 1}$ を求める。①と③で求めた $\delta_{\max i} / \delta_{\max 1}$ に大きな誤差がないことを確認した上で、式(30),(33),(34)の計算結果を併用時の最大応答値として採用する。

$t=t_0$ の釣合式(2)に式(18),(26)を代入すると、下式が得られる。

$$s \gamma_i \cdot Q_{yi} \cdot s \delta_{yi} \cdot \eta_{0i} + h \gamma_i \cdot f \cdot \alpha_0 \cdot n_i \cdot \pi \cdot h Q_{\max i} \cdot \delta_{\max i} = E \quad (38)$$

式(38)より、履歴ダンパーの累積塑性変形倍率 $s \eta_{0i}$ が求まる。

$$s \eta_{0i} = \frac{E - h \gamma_i \cdot f \cdot \alpha_0 \cdot n_i \cdot \pi \cdot h Q_{\max i} \cdot \delta_{\max i}}{s \gamma_i \cdot Q_{yi} \cdot s \delta_{yi}} \quad (39)$$

なお、以上の数式表現は、式(30),(33),(34),(35),(39)で $h \alpha_i = 0$ あるいは $h Q_{\max i} = 0$ の場合、履歴ダンパーのみの制振構造における応答予測式^{4),6)}に、式(30),(33),(34),(36)で $s \alpha_{yi} = 0$ の場合、粘性ダンパーのみの制振構造における応答予測式に、式(30),(33),(34),(35),(36)で全層数 $N=1$ の場合、履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用した免震構造における応答予測式⁹⁾に対応する。

3. エネルギー配分基本式の数値解析による検証

3.1. 解析モデル、入力地震動概要及び解析パラメータ

2章に述べた f 値による等価繰返し数の評価と、両ダンパーを併用した制振構造の応答予測式および応答評価手順の妥当性を検証するための解析モデルを設定する。図3に、解析モデルの概要を示す。

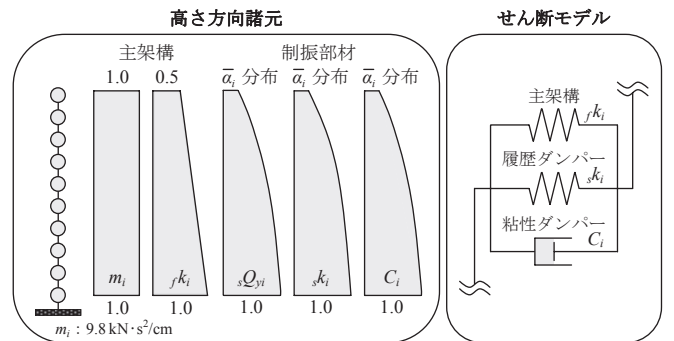


図3 解析モデル概要

各層の質量 m_i が $9.8 \text{ kN} \cdot \text{s}^2 / \text{cm}$ の等分布となる10質点系等価せん断型とし、主架構の剛性分布は、最上層が最下層の1/2となる台形分布とした。履歴ダンパーは、LY225級の低降伏点鋼製の屈座拘束ブレースを階高4.2mの6.4mスパンに八の字(角度54°)で取り付けることを想定し、降伏変形 $s \delta_{yi}$ は全層で一定値 $s \delta_{yi} = 0.64 \text{ cm}$ 、剛性 $s k_i$

と降伏層せん断力 sQ_{yi} は $\bar{\alpha}_i$ 分布とした。粘性ダンパーも同様に、粘性減衰係数 C_i は、式(8)に $i=1$ を代入し得られる第1層の粘性減衰係数 C_1 に、 $\bar{\alpha}_i$ 分布に基づく設計用層せん断力比 Q_i/Q_1 を乗じることによって設定した。表1に、本研究で用いる解析パラメータを示す。

表1 解析パラメータ

主架構	周期 fT_1 (s)	1.0, 2.0
履歴ダンパー	降伏層せん断力係数 $s\alpha_{y1}$	0, 0.01 < $s\alpha_{y1}$ < 0.40
	最弱層 k	1層, 3層, 5層
	sPd	0.5, 1.0
粘性ダンパー	h_1	0, 0.05 < h_1 < 1.00
	最弱層 k	1層, 3層, 5層
	hPd	0.5, 1.0

表1中の sPd, hPd は、最弱層 k の履歴ダンパーの降伏層せん断力 sQ_{yk} を sPd 倍、粘性ダンパーの粘性減衰係数 C_k を hPd 倍したものを表す。

入力地震動は、標準波として最大速度 V_{max} を 50 cm/s に基準化した1968年の十勝沖地震における HACHINOHE EW 成分の観測波の他、コーナー周期 $T_c=0.64$ s 以降で擬似速度応答スペクトル $\rho S_V=100$ cm/s となる模擬波2波を作成し、計3波を検討に用いる。模擬波の位相特性は、直下型地震として1995年の兵庫県南部地震における JMA KOBE NS 成分、長周期・長時間地震動として2011年の東北地方太平洋沖地震における TKY007 K-NET 新宿 NS 成分の観測波を採用した。以降では、これらを入力波を単に HACHINOHE, ART KOBE, ART SHIN と呼ぶ。図4に、各入力波の加速度時刻歴波形を示し、図5に、各入力波の擬似速度応答スペクトル ρS_V 及びエネルギースペクトル V_E を示す。図5中には、各入力波の最大加速度 A_{ccmax} (cm/s²) と共に、単位地震動の反復数 f 値と実効地震継続時間 t_0 (s)¹⁹⁾ も併せて示してある。

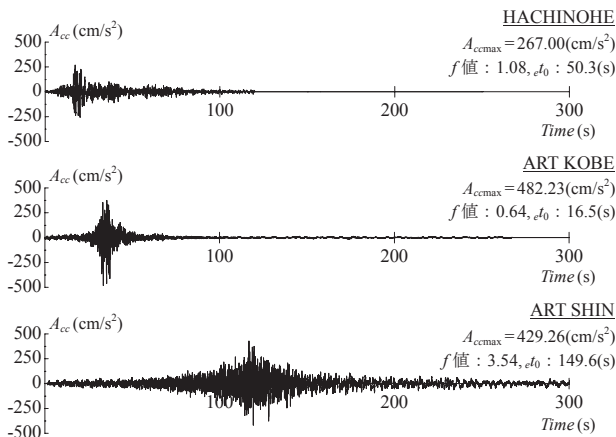


図4 地震動の加速度波形

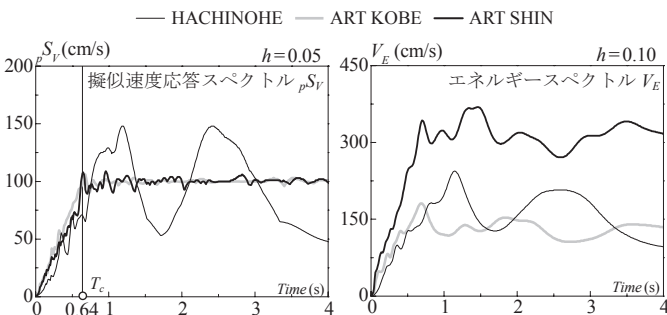


図5 地震動のスペクトル

3.2. 制振部材のエネルギー配分式の検証

履歴ダンパーの損傷集中は、 $\bar{\alpha}_i$ 分布に対する降伏層せん断力の比率 p_i (式(21)) によって評価される^{4),6)}。一方、粘性ダンパーには高さ方向の損傷集中は現れず、各層へのエネルギー配分は主架構の最大層間変形分布に依存することを2.3節で示した⁷⁾。2.4節で述べた応答評価の手順も、これらの知見に基づくことから、両ダンパーを併用した場合においても、この関係が成り立つことを確認する。

単独付与を前提に提案されたエネルギー配分式の適用性を検証するに当たり、まず、両ダンパーを併用した架構における高さ方向の変形分布を確認する。ここでは、理想的にダンパーが配置された場合の他、ダンパー量に乏しい弱層を設け、最弱層のダンパー諸元が最適分布から外れた場合についても検討する。図6に、最弱層 k の履歴ダンパーの降伏層せん断力 sQ_{yk} を0.5倍、すなわち $sPd=0.5$ とした場合、図7に、最弱層 k の粘性ダンパーの粘性減衰係数 C_k を0.5倍、すなわち $hPd=0.5$ とした場合の応答解析と予測式の比較を示す。

応答解析 ○ $h_1=0$ ● $h_1=0.60$ 予測式 — $\bar{\alpha}_i$ 分布 — 第一近似 — 第二近似

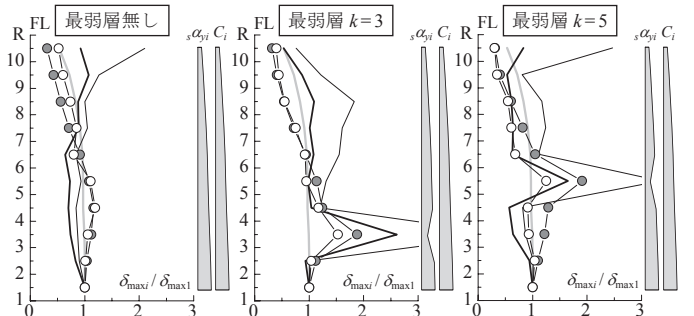


図6 第 i 層と第1層の最大層間変形の比 $\delta_{maxi} / \delta_{max1}$ の高さ方向分布 (HACHINOHE, $sPd=0.5, fT_1=2.0, s\alpha_{y1}=0.12$)

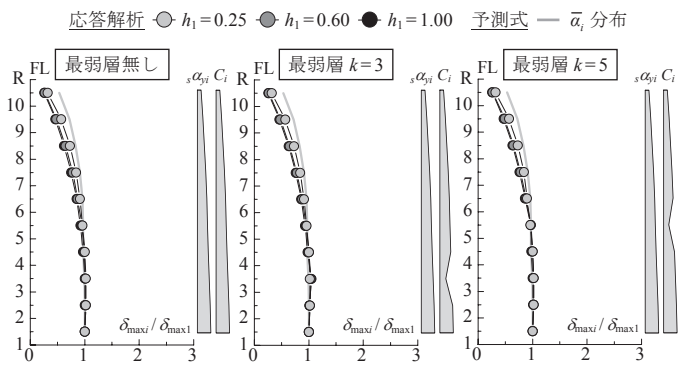


図7 第 i 層と第1層の最大層間変形の比 $\delta_{maxi} / \delta_{max1}$ の高さ方向分布 (HACHINOHE, $hPd=0.5, fT_1=1.0, s\alpha_{y1}=0.04$)

各図は、第1層の最大層間変形 δ_{max1} で第 i 層の最大層間変形 δ_{maxi} を基準化して示してある。応答解析は、標準波である HACHINOHE を対象とし、予測式(34)中の制振部材の等価繰返し数 $f \cdot \omega_{s1} n_1, f \cdot \omega_{h1} n_1$ には下式を用い、 $sW_{pi}, \delta_{maxi}, hW_{di}, hQ_{maxi}$ は解析結果を基に評価した。

$$s n_i = \frac{s W_{pi}}{4 s Q_{yi} (\delta_{maxi} - s \delta_{yi})}, h n_i = \frac{h W_{di}}{\pi h Q_{maxi} \cdot \delta_{maxi}} \quad (40a, b)$$

図6の予測式は、 $\bar{\alpha}_i$ による $\delta_{maxi} / \delta_{max1}$ と、式(34)に $h\alpha_i / f\alpha_0 = 0$ を代入し求めた $\delta_{maxi} / \delta_{max1}$ (第一近似) 及び第一近似より得られる $h\gamma_i$ を式(34)に代入し求めた $\delta_{maxi} / \delta_{max1}$ (第二近似) の場合、図7の予測式は、 $\bar{\alpha}_i$ による $\delta_{maxi} / \delta_{max1}$ の場合である。図6,7で損傷集中に着目す

ると、最弱層 k の履歴ダンパーを $s_{pd} = 0.5$ とした場合には損傷集中を生じるのに対し、最弱層 k の粘性ダンパーを $s_{pd} = 0.5$ としても殆ど変化がない。この要因は、履歴ダンパーが主架構と同位相で応答するのに対し、粘性ダンパーが主架構と逆位相で応答するためと推察される。したがって、両ダンパーを併用した場合でも、履歴ダンパーの耐力分布と最適分布に偏差がなければ、 $\bar{\alpha}_i$ による $\delta_{\max i} / \delta_{\max i}^{(7)}$ は、解析結果に概ね対応する。次に、履歴ダンパーを単独で用いた場合（応答解析では HD と称す）、両ダンパーを併用した場合（応答解析では HVD と称す）における応答解析と予測式の対応関係に着目する。予測式の第一近似と第二近似の $\delta_{\max i} / \delta_{\max i}^{(7)}$ は同様な傾向を示し、第二近似による予測式は HVD の解析結果に概ね収斂している。また、 $\bar{\alpha}_i$ による $\delta_{\max i} / \delta_{\max i}^{(7)}$ は、損傷集中を評価できていないが、第一近似・第二近似による $\delta_{\max i} / \delta_{\max i}^{(7)}$ は共に損傷集中の傾向と調和的である。解析結果においても、予測式同様、HD と HVD の傾向は概ね対応している。以上より、予測式と解析結果には対応関係が認められ、両ダンパーを併用した制振構造の最大層間変形分布は、履歴ダンパー諸元によって予測可能であることが示唆された。

以上の結果を踏まえ、履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用した場合のエネルギー配分式を検証する。図 8, 9 に、最弱層 k を $s_{pd} = 0.5$ とした応答解析 (HACHINOHE) と予測式における $1/s_{\gamma i}$ (式(19)), $1/h_{\gamma i}$ (式(27)) の高さ方向分布をそれぞれ示す。

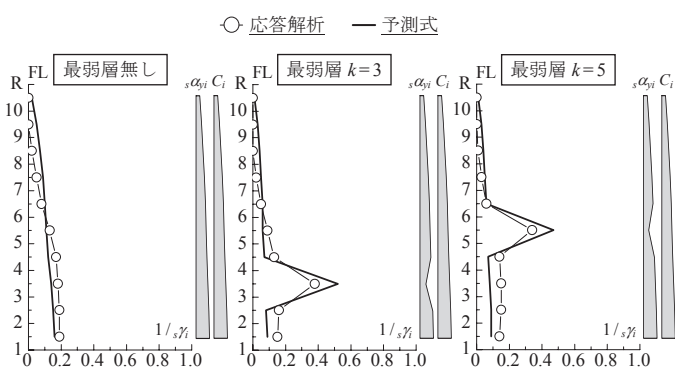


図 8 履歴ダンパーの損傷分散係数の逆数 $1/s_{\gamma i}$ の高さ方向分布 (HACHINOHE, $s_{pd}=0.5, f T_1=2.0, s_{\alpha_{\gamma 1}}=0.12, h_1=0.60$)

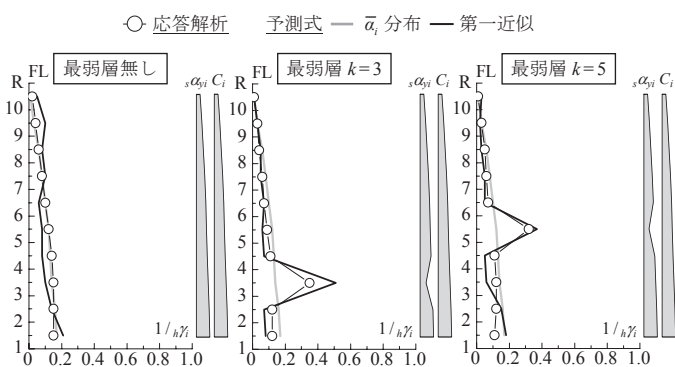


図 9 粘性ダンパーのエネルギー分散係数の逆数 $1/h_{\gamma i}$ の高さ方向分布 (HACHINOHE, $s_{pd}=0.5, f T_1=2.0, s_{\alpha_{\gamma 1}}=0.12, h_1=0.60$)

先と同様、 $s_{\gamma i}, h_{\gamma i}$ 算出時に必要となる $f \cdot \alpha_{\gamma i} n_1, f \cdot \alpha_{\gamma i} n_1$ 及び損傷集中指数 n_i (式(22)) は、解析結果より定めた。図 9 の予測式は、 $\bar{\alpha}_i$ による変形分布を用いて求めた $h_{\gamma i}$ 及び第一近似による変形分布を用いて求めた $h_{\gamma i}$ の場合を示す。図 8 に示す履歴ダンパーの損傷分散係数 $s_{\gamma i}$

に着目すると、予測式は解析結果の傾向を精度良く捉えられており、文献 4 の履歴ダンパーのエネルギー配分式(19)は両ダンパーを併用した場合でも適用できることが示唆される。図 9 に示す粘性ダンパーのエネルギー分散係数 $h_{\gamma i}$ に着目すると、 $\bar{\alpha}_i$ より算出した $h_{\gamma i}$ は応答解析の傾向と大きく相違するのに対し、第一近似による変形分布より定めた $h_{\gamma i}$ は、損傷集中する応答解析の傾向を精度良く捉えられている。以上より、両ダンパーを併用する場合、履歴ダンパーのみの最大層間変形分布を用いることで、文献 7 の粘性ダンパーのエネルギー配分式(27)が適用できると言える。これらの対応から、多層から成る両ダンパーを併用した建物を設計する場合には、履歴ダンパーの設計を先行させ、ある程度の変形分布を想定した後に、粘性ダンパーの設計を行うことが合理的な設計手順であると考えられる。

履歴ダンパーの累積塑性変形倍率 $s_{\eta_{0i}}$ の高さ方向分布を検討する。図 10 に、最弱層 k の $s_{pd}=0.5$ とした場合の応答解析 (HACHINOHE) と予測式における $s_{\eta_{0i}}$ (式(39)) の高さ方向分布を示す。図 10 より、予測式は損傷集中する応答解析の傾向を精度良く捉えられている。

○ 応答解析 — 予測式

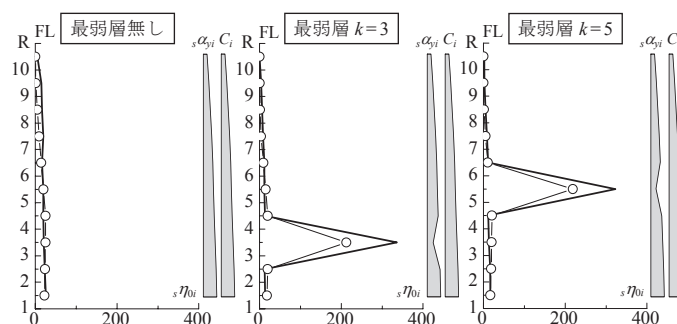


図 10 履歴ダンパーの累積塑性変形倍率 $s_{\eta_{0i}}$ の高さ方向分布 (HACHINOHE, $s_{pd}=0.5, f T_1=2.0, s_{\alpha_{\gamma 1}}=0.12, h_1=0.60$)

3.3. f 値による履歴ダンパーと粘性ダンパーの等価繰返し数の評価

2.2 節で示した対象とする地震動の等価繰返し数 s_{n_1}, h_{n_1} を、単位地震動の等価繰返し数 $o_s n_1, o_h n_1$ 及び単位地震動の反復数 f 値を用いて評価することの妥当性を検証する。単位地震動における履歴ダンパーの等価繰返し数 $o_s n_1$ (式(12a)) は、主架構と履歴ダンパーの負担せん断力比 $s_{r_{qi}}$ (式(23)) を用い、次式で提示されている⁴⁾。

$$\begin{cases} s_{r_{qi}} < 1.0 & o_s n_1 = 1.0 + s_{r_{qi}} \\ s_{r_{qi}} \geq 1.0 & o_s n_1 = 2.0 \end{cases} \quad (41)$$

図 11 に、HACHONOHE, ART KOBE, ART SHIN における式(40a)より得た履歴ダンパーの等価繰返し数 s_{n_1} を f 値で除した値 s_{n_1}/f と $s_{r_{qi}}$ の関係を示す。なお、エネルギー吸収量の比較的小さい上層 3 層、すなわち 8~10 層 (条件 A) と最大層間変形角 $R_{\max i} < 1/200$ (条件 B) の解析結果はプロットしない。図 11 より、本研究では、 s_{n_1}/f の下限値は 2.0 とみなし、履歴ダンパーの等価繰返し数 s_{n_1} の評価には、広範な地震動特性への対応も含め、 f 値を導入した次式を用いる。

$$\begin{cases} (f < 0.5) & s_{n_1} = 1.0 \\ (0.5 \leq f) & \begin{cases} s_{r_{qi}} < 1.0 & s_{n_1} = 1.0 + s_{r_{qi}}(2f-1) \\ s_{r_{qi}} \geq 1.0 & s_{n_1} = 2.0f \end{cases} \end{cases} \quad (42)$$

なお、標準波 ($f=1.0$) の場合、式(41)と式(42)は同値である。

HACHINOHE ⇒ × ○ □ : $f \cdot h \alpha_1 / f \alpha_0 = 0, 0.1, 0.2$
 ART KOBE ⇒ - ○ □ : $f \cdot h \alpha_1 / f \alpha_0 = 0, 0.1, 0.2$
 ART SHIN ⇒ + ● ■ ▲ : $f \cdot h \alpha_1 / f \alpha_0 = 0, 0.1, 0.2, 0.3$

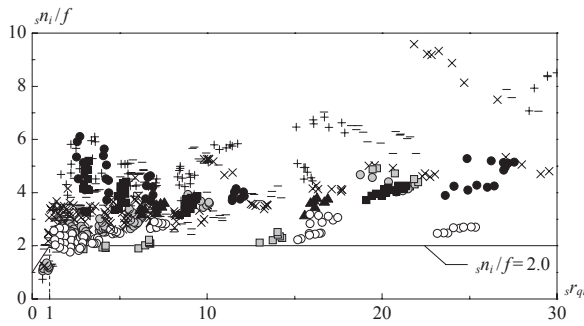


図 11 n_i/f と $s r_{qi}$ の関係

図 12 に、HACHINOHE, ART KOBE, ART SHIN における式(40b)より得た粘性ダンパーの等価繰返し数 $h n_i$ を f 値で除した値 $h n_i / f$ と主架構と粘性ダンパーの負担層せん断力比 $h r_{qi}$ の関係を示す。なお、条件 A, B はプロットしない。

$$h r_{qi} = \frac{f Q_{\max i}}{h Q_{\max i}} \quad (43)$$

HACHINOHE ⇒ × ○ □ △ : $f \cdot s \alpha_{y1} / f \alpha_0 = 0, 0.1, 0.2, 0.3$
 ART KOBE ⇒ - ○ □ : $f \cdot s \alpha_{y1} / f \alpha_0 = 0, 0.1, 0.2$
 ART SHIN ⇒ + ● ■ : $f \cdot s \alpha_{y1} / f \alpha_0 = 0, 0.1, 0.2$

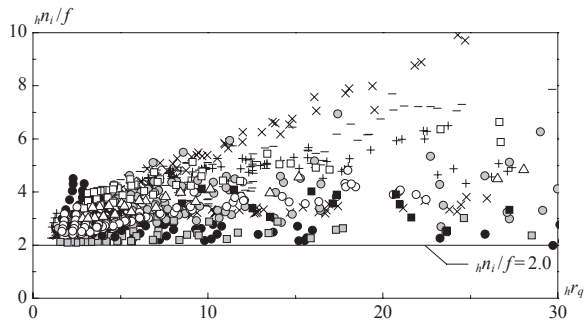


図 12 $h n_i / f$ と $h r_{qi}$ の関係

図 12 より、式(42)同様、本研究では、粘性ダンパーの等価繰返し数 $h n_i$ の評価に、 f 値を導入した次式を用いる。

$$\begin{cases} (f < 0.5) & | & h n_i = 1.0 \\ (0.5 \leq f) & | & h n_i = 2.0 f \end{cases} \quad (44)$$

4. 第 1 層の応答予測式による制振構造の応答性状

本章では、前章で述べた応答予測式を用い、履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用した制振構造の応答性状を明らかにする。応答予測式の評価は、第 1 層の層せん断力係数 $\alpha_1 / f \alpha_0$ と層間変形 $\delta_{\max 1} / f \delta_0$ に代表させる。式(30)に $i=1$ を代入すると、第 1 層の主架構の層せん断力係数 $f \alpha_1 / f \alpha_0$ は次式で表される。

$$\frac{f \alpha_1}{f \alpha_0} = \left\{ s A_1 \left(\frac{f \cdot s \alpha_{y1}}{f \alpha_0} \right) + h A_1 \left(\frac{f \cdot h \alpha_1}{f \alpha_0} \right) \right\} + \sqrt{\left\{ s A_1 \left(\frac{f \cdot s \alpha_{y1}}{f \alpha_0} \right) + h A_1 \left(\frac{f \cdot h \alpha_1}{f \alpha_0} \right) \right\}^2 + 1} \quad (45)$$

同様に、式(33)に $i=1$ を代入すると、第 1 層の全体架構の層せん断力係数 $\alpha_1 / f \alpha_0$ は次式で表される。

$$\frac{\alpha_1}{f \alpha_0} = \sqrt{\left\{ s A_1 \left(\frac{f \cdot s \alpha_{y1}}{f \alpha_0} \right) + h A_1 \left(\frac{f \cdot h \alpha_1}{f \alpha_0} \right) \right\}^2 + 1} + \frac{1}{f^2} \left(\frac{f \cdot h \alpha_1}{f \alpha_0} \right)^2 + \frac{1}{f} \left(\frac{f \cdot s \alpha_{y1}}{f \alpha_0} \right) \quad (46)$$

ここで、第 1 層の最大層間変形 $\delta_{\max 1}$ は、次式で表される。

$$\frac{\kappa_1 \cdot \delta_{\max 1}}{f \delta_0} = \frac{f \alpha_1}{f \alpha_0} \quad (47)$$

また式(35),(36)に $i=1$ を代入すると、 α_1 と $\delta_{\max 1}$ の関係は次式で評価される。

$$\frac{\alpha_1}{f \alpha_0} = \sqrt{\left(\frac{\kappa_1 \cdot \delta_{\max 1}}{f \delta_0} \right)^2 + \left(\frac{h \alpha_1}{f \alpha_0} \right)^2} + \frac{1}{2 f \cdot s A_1} \left\{ \left(\frac{f \delta_0}{\kappa_1 \cdot \delta_{\max 1}} \right) - \frac{h A_1}{s A_1} \left(\frac{h \alpha_1}{f \alpha_0} \right) \right\} \quad (48)$$

$$\frac{\alpha_1}{f \alpha_0} = \sqrt{\left(\frac{\kappa_1 \cdot \delta_{\max 1}}{f \delta_0} \right)^2 + \left[\frac{1}{2 f \cdot h A_1} \left\{ \left(\frac{f \delta_0}{\kappa_1 \cdot \delta_{\max 1}} \right) - \frac{s A_1}{h A_1} \left(\frac{s \alpha_{y1}}{f \alpha_0} \right) \right\} \right]^2} + \left(\frac{s \alpha_{y1}}{f \alpha_0} \right) \quad (49)$$

応答解析との比較より、応答予測式(46),(48),(49)を検証する。履歴ダンパーの損傷集中を表す式(19)に $p_i = 1.0$ 、 $s \alpha_{yi}$ の $\bar{\alpha}_i$ 分布と $f k_i$ の台形分布を代入することで $s \gamma_1 = 6.40$ が求まる。粘性ダンパーのエネルギー集中を表す式(27)に h_i の $\bar{\alpha}_i$ 分布と $h \alpha_i = 0$ とし式(34)により求めた変形分布 $\delta_{\max i} / \delta_{\max 1}$ を代入することで $h \gamma_1 = 6.05$ が求まる。 k_{eq} と $f k_i$ の比を表す式(5a)に $f k_i$ を代入することで $\kappa_1 = 5.38$ が求まる。制振部材の等価繰返し数 $s n_1$ 、 $h n_1$ は、式(42),(44)から求める。以下、特記がない限り、応答予測式には上記の諸元を用いる。

図 13 に、式(46)で表される $\alpha_1 / f \alpha_0$ と $s \alpha_{y1} / f \alpha_0$ 、 $h \alpha_1 / f \alpha_0$ の関係式と解析結果を、図 14 に、式(48),(49)で表される $\alpha_1 / f \alpha_0$ と $\kappa_1 \cdot \delta_{\max 1} / f \delta_0$ の関係式と解析結果を併せて示す。ここでも、入力地震動は標準波である HACHINOHE とし、予測式には $f = 1.08$ を用いた。解析結果において、条件 B はプロットしていない。各図で(a)が $h \alpha_1 / f \alpha_0 = 0, 0.1, 0.2, 0.3$ として $s \alpha_{y1} / f \alpha_0$ を変動させた場合、(b)が $s \alpha_{y1} / f \alpha_0 = 0, 0.1, 0.2, 0.3$ として $h \alpha_1 / f \alpha_0$ を変動させた場合である。太実線は $\alpha_1 / f \alpha_0$ 、右上に単調増加している細実線は $s \alpha_{y1} / f \alpha_0$ (図 13(a))、 $h \alpha_1 / f \alpha_0$ (図 13(b))、 $\kappa_1 \cdot \delta_{\max 1} / f \delta_0$ (図 14)、右下に単調減少している細実線は $f \alpha_1 / f \alpha_0$ (図 13)、 $s \alpha_{y1} / f \alpha_0$ (図 14(a))、 $h \alpha_1 / f \alpha_0$ (図 14(b)) を示し、それぞれ $s \alpha_{y1} / f \alpha_0 > 0$ 、 $h \alpha_1 / f \alpha_0 > 0$ の範囲を示す。図 13, 14 より、予測式は応答解析の傾向を精度良く捉えている。 $\alpha_1 / f \alpha_0$ と $s \alpha_{y1} / f \alpha_0$ 、 $h \alpha_1 / f \alpha_0$ の関係に着目する。図 13(a)に示す $h \alpha_1 / f \alpha_0$ を固定し $s \alpha_{y1} / f \alpha_0$ を変動させた場合より、 $h \alpha_1 / f \alpha_0 < 0.2$ の範囲で固定された $h \alpha_1 / f \alpha_0$ が大きいほど最大層

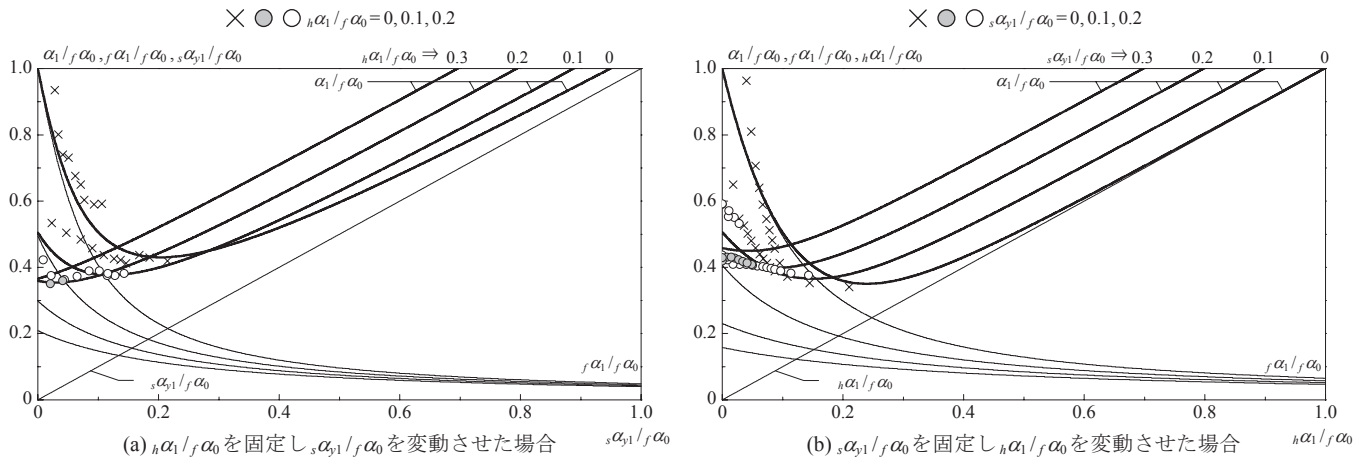


図 13 $\alpha_1/f\alpha_0$ と $s\alpha_{y1}/f\alpha_0, h\alpha_1/f\alpha_0$ の関係 (HACHINOHE, $f=1.08$)

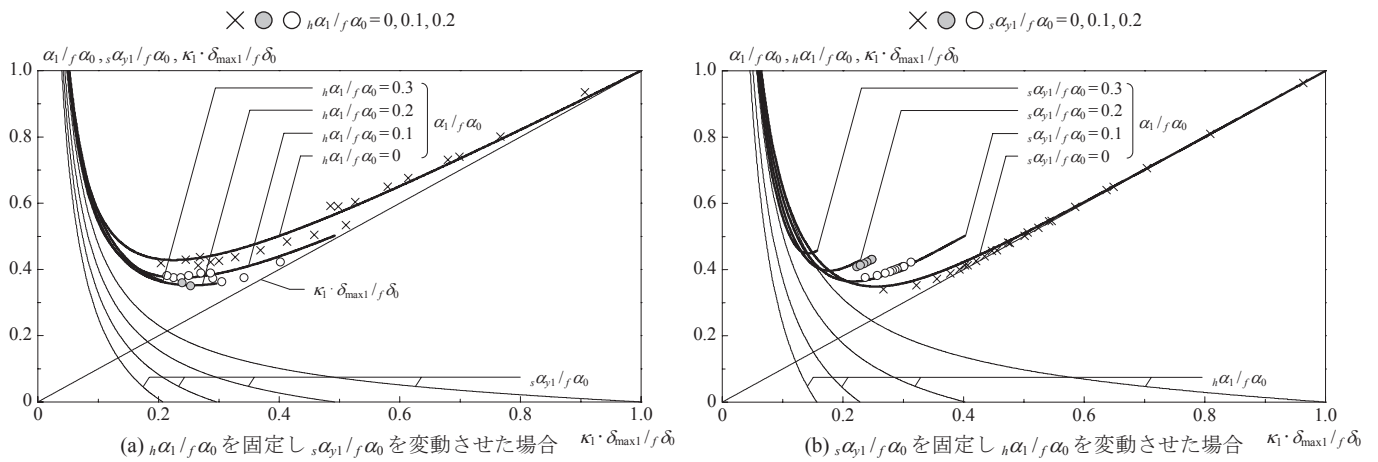


図 14 $\alpha_1/f\alpha_0$ と $\kappa_1 \cdot \delta_{\max 1}/f\delta_0$ の関係 (HACHINOHE, $f=1.08$)

せん断力 $\alpha_1/f\alpha_0$ の極小値は小さくなり、粘性ダンパーによる最大層せん断力の低減効果に加え、両ダンパーを併用した相乗効果が確認できる。 $h\alpha_1/f\alpha_0 > 0.3$ において $\alpha_1/f\alpha_0$ は単調増加するため、この範囲では併用の効果が期待できないことも併せて分かる。一方、図 13(b) に示す $s\alpha_{y1}/f\alpha_0$ を固定し $h\alpha_1/f\alpha_0$ を変動させた場合より、 $s\alpha_{y1}/f\alpha_0 = 0$ で最大層せん断力 $\alpha_1/f\alpha_0$ は最小値となり、固定された $s\alpha_{y1}/f\alpha_0$ を大きくするほど $\alpha_1/f\alpha_0$ の極小値は大きくなるため、履歴ダンパーによる応答層せん断力の低減は期待できないことが分かる。

$\alpha_1/f\alpha_0$ と $\kappa_1 \cdot \delta_{\max 1}/f\delta_0$ の関係に着目する。図 14(a) に示す $h\alpha_1/f\alpha_0$ を固定し $s\alpha_{y1}/f\alpha_0$ を変動させた場合より、固定された $h\alpha_1/f\alpha_0$ を大きくしても最大層せん断力 $\alpha_1/f\alpha_0$ の極小値となる層間変形 $\kappa_1 \cdot \delta_{\max 1}/f\delta_0$ の変化は小さく、粘性ダンパーによる応答変位の低減は期待できないことが分かる。一方、図 14(b) に示す $s\alpha_{y1}/f\alpha_0$ を固定し $h\alpha_1/f\alpha_0$ を変動させた場合より、固定された $s\alpha_{y1}/f\alpha_0$ が大きいほど最大層せん断力 $\alpha_1/f\alpha_0$ の極小値となる層間変形 $\kappa_1 \cdot \delta_{\max 1}/f\delta_0$ は小さくなっており、履歴ダンパーによる応答変位の低減効果に加え、両ダンパーを併用した相乗効果が確認できる。

入力地震動に標準波 (HACHINOHE, $f=1.08$) の他、直下型地震 (ART KOBE, $f=0.64$)、長周期・長時間地震動 (ART SHIN, $f=3.54$) を用いた場合を検討する。図 15 に、式(46)で表される $\alpha_1/f\alpha_0$ と $f \cdot s\alpha_{y1}/f\alpha_0, f \cdot h\alpha_1/f\alpha_0$ の関係式と解析結果を併せて示す。なお、図 13, 14

同様、条件 B はプロットしていない。図 15(a) は、 $f \cdot h\alpha_1/f\alpha_0 = 0.1$ として $f \cdot s\alpha_{y1}/f\alpha_0$ を変動させた場合、図 15(b) は $f \cdot s\alpha_{y1}/f\alpha_0 = 0.1$ として $f \cdot h\alpha_1/f\alpha_0$ を変動させた場合である。太実線は $\alpha_1/f\alpha_0$ 、右上に単調増加している細実線は $f \cdot s\alpha_{y1}/f\alpha_0$ (図 15(a))、 $f \cdot h\alpha_1/f\alpha_0$ (図 15(b))、右下に単調減少している細実線は $f\alpha_1/f\alpha_0$ を示し、それぞれ $f \cdot s\alpha_{y1}/f\alpha_0 > 0, f \cdot h\alpha_1/f\alpha_0 > 0$ の範囲を示す。図 15 より、 f 値が大きいほど最大層せん断力 $\alpha_1/f\alpha_0$ が小さくなる解析結果の傾向と予測式は調和的で、3.3 節の結果も踏まえ、 f 値を用いることで、標準波の他、直下型地震や長周期・長時間地震動の応答も評価できることが示唆される。また上記の傾向を換言すると、直下型地震、標準波、長周期・長時間地震動の順に、制振部材による応答抑制効果が大きくなる。この原因としては、地震動の継続時間が長いほど、制振部材がより多くの振動エネルギーを吸収し、共振の繰返しによる応答増大を抑制するためと考えられる。

第 1 層を弱層とした場合を検討する。図 16 に、第 1 層の履歴ダンパーの降伏層せん断力 sQ_{y1} を 0.5, 1.0 倍、すなわち $p_d = 0.5, 1.0$ とした式(46)で表される $\alpha_1/f\alpha_0$ と $h\alpha_1/f\alpha_0$ の関係式と解析結果を併せて示す。入力地震動は、標準波である HACHINOHE を対象とし、予測式には $f=1.08$ を用いた。なお、条件 B はプロットしていない。図 16 は、 $s\alpha_{y1}/f\alpha_0 = 0.1, 0.3$ として $h\alpha_1/f\alpha_0$ を変動させた場合であり、太波線、太実線は $p_d = 1.0, 0.5$ における $\alpha_1/f\alpha_0$ 、右上に単調増加している

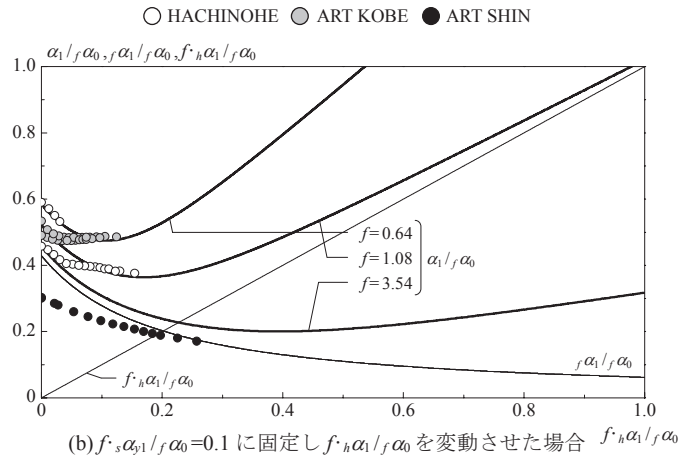
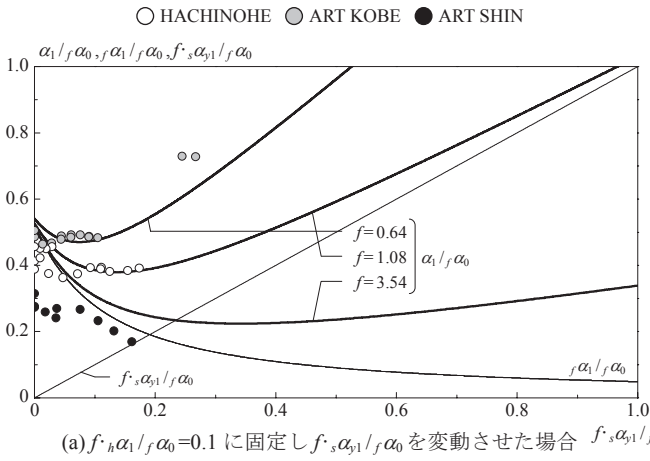


図 15 $\alpha_1/f\alpha_0$ と $f \cdot s\alpha_1/f\alpha_0, f \cdot h\alpha_1/f\alpha_0$ の関係

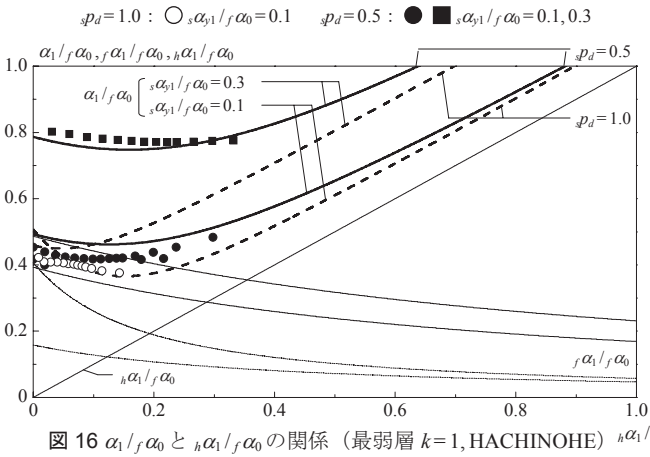


図 16 $\alpha_1/f\alpha_0$ と $h\alpha_1/f\alpha_0$ の関係 (最弱層 $k=1$, HACHINOHE) $h\alpha_1/f\alpha_0$

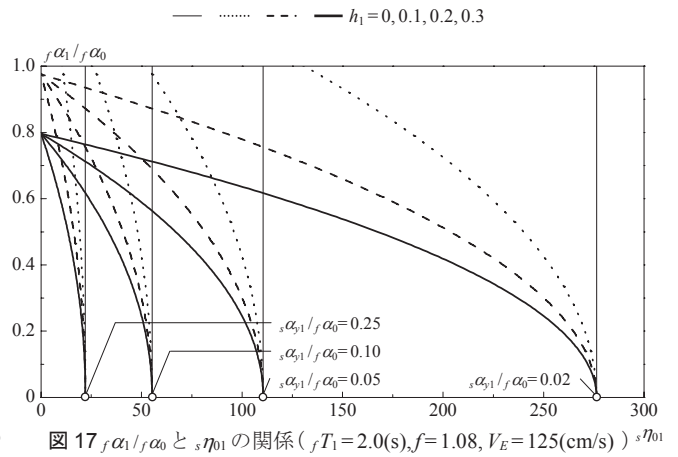


図 17 $f\alpha_1/f\alpha_0$ と $s\eta_{01}$ の関係 ($fT_1=2.0(s), f=1.08, V_E=125(\text{cm/s})$) $s\eta_{01}$

細実線は $h\alpha_1/f\alpha_0$, 右下に単調減少している細点線, 細実線は $s\eta_{01}=1.0, 0.5$ における $f\alpha_1/f\alpha_0$ を示し, $h\alpha_1/f\alpha_0 > 0$ の範囲を示す。表 2 に, 応答予測式に用いた諸元を示す。

表 2 第 1 層を最弱層とした場合の応答予測式に用いる諸元

$s\eta_{01}$	$s\alpha_{y1}/f\alpha_0$	fT_1 (s)	n_i	κ_1	$s\gamma_1$	$h\gamma_1$	f	$0s\eta_{11}$	$0h\eta_{11}$
0.5	0.1	2.0	3.0	5.38	1.67	1.43	1.08	8.0	2.0
	0.3		6.0		1.08	1.00		3.0	2.0
1.0	0.1		6.40		6.05	2.0		2.0	
	0.3		2.0		2.0				

※ $s\eta_{01}=0.5$ における第 1 層以外の $0s\eta_{11}, 0h\eta_{11}$ は 2.0 を採用

図 16 より, 予測式は応答解析の傾向を良く捉えている。第 1 層の履歴ダンパーの降伏層せん断力 sQ_{y1} を $s\eta_{01} = 0.5$ とすることで応答が増大し, その傾向は $s\alpha_{y1}/f\alpha_0$ が大きいほど顕著となる。加えて, 弱層を設けると, 両ダンパーを併用することの相乗効果が薄れることも併せて確認できる。

最後に, 第 1 層の主架構と制振部材の層せん断力係数から第 1 層の履歴ダンパーの累積塑性変形倍率 $s\eta_{01}$ を評価する。式(39)に $i=1$ を代入すると, $s\eta_{01}$ は式(50)より表せる。また, その際, 第 1 層の粘性ダンパーの最大層せん断力 $hQ_{\max i}$ は, 式(51)のように表す。

$$s\eta_{01} = \frac{\kappa_{s1}}{2s\gamma_1} \left(\frac{f\alpha_0}{s\alpha_{y1}} \right)^2 \cdot \left[1 - \frac{4h_1 \cdot h \cdot A_1}{\kappa_1} \left\{ \sqrt{f} \cdot \left(\frac{f\alpha_1}{f\alpha_0} \right) \right\}^2 \right] \quad (50)$$

$$hQ_{\max i} = C_i \cdot \omega_0 \cdot \delta_{\max i} = 2h_i \cdot k_{eq} \cdot \delta_{\max i} = \frac{2h_i}{\kappa_i} \cdot fQ_{\max i} \quad (51)$$

予測式(50)に基づき, $f\alpha_1/f\alpha_0$ と $s\eta_{01}$ の関係を図 17 に示す。なお, エネルギースペクトル V_E は, 単位地震動のエネルギースペクトル $0V_E$ ($=120(\text{cm/s})$) に \sqrt{f} を乗じることで求めた。図 17 を例として, 入力地震動のエネルギースペクトル V_E , 主架構の 1 次固有周期 fT_1 を定め, 履歴ダンパーのせん断力係数 $s\alpha_{y1}$ と粘性ダンパーの h_1 を式(50)に代入することで, 両ダンパー併用時における履歴ダンパーの累積塑性変形倍率 $s\eta_{01}$ を求めることができる。図 17 より, 粘性ダンパーによる履歴ダンパーの疲労低減が期待できるが, $s\alpha_{y1}/f\alpha_0$ が増大するほど, その効果は小さくなるのがわかる。

5. まとめ

本論文では, 弾性挙動をする主架構, 完全弾塑性型の復元力特性を有する履歴ダンパー, 速度-減衰関係において線形特性を有する粘性ダンパーを対象に, 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法を構築し, その妥当性を応答解析との対比によって検証した。また, 導出した応答予測式を基に, 両ダンパーを併用した制振構造の応答性状を明らかにした。以下に, 得られた知見をまとめる。

- (1) 履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用した制振構造における高さ方向の変形分布が, 履歴ダンパーのみの影響を評価すること

で決定し得ることを、履歴ダンパーのみの変形分布とその変形分布より定めた粘性ダンパーのエネルギー分散係数 h_{η} を用い求めた併用時の変形分布の傾向が一致することから確認し、応答予測法の適用性を示した。

- (2) 履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用する場合においても、履歴ダンパーの各層へのエネルギー配分は、単独使用を前提に提案された配分式⁴⁾より評価できることを検証した。また、粘性ダンパーの各層へのエネルギー配分が、主架構の最大層間変形分布に依存することを基に⁷⁾、上記(1)より、履歴ダンパーのみの変形分布を用いることで、単独使用を前提に提案された配分式⁷⁾より評価できることを検証した。
- (3) 制振部材のエネルギー評価において、単位地震動の反復数である f 値を導入することで、地震動が特徴付けられ、広範な地震動特性にも対応した応答評価ができることを応答解析結果より検証した。
- (4) 導出した応答予測式より、履歴ダンパーが応答変位の低減に、粘性ダンパーが応答層せん断力の低減に大きな効果を発揮することを確認し、両ダンパーを併用した相乗効果が期待され得るダンパー量の定性的傾向を示した。また、地震動の継続時間が長いほど、制振部材による応答抑制効果は向上し、さらに両ダンパーを併用することで、履歴ダンパーの疲労低減が期待できることを示唆した。

謝辞

本研究は、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による共同研究の成果の一部を用いたものです。本論文を作成するに当たり、防災科学研究所 K-NET 観測記録を使用させて頂きました。ここに記して、感謝の意を表します。

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) 日本建築構造技術者協会: 応答制御構造設計法-付. 免震・制振(震)建築の設計例/装置・部材データ集-, 彰国社, 2000.11
- 3) 秋山宏: 耐震性能の多様化に対応した耐震設計, 日本建築学会構造系論文集, 第 472 号, pp.85-90, 1995.6
- 4) 秋山宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技術堂出版, 1999.11

- 5) 北村春幸: 性能設計のための建築振動解析入門(第 2 版), 彰国社, 2009.4
- 6) 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法, 日本建築学会構造系論文集, 第 599 号, pp.71-78, 2006.1
- 7) 原田幸博, 秋山宏: エネルギー集中型柔剛混合構造骨組の耐震設計, 日本建築学会構造系論文集, 第 472 号, pp.57-66, 1995.6
- 8) 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
- 9) 東野さやか, 北村春幸: 粘性ダンパーを付与した免震構造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 588 号, pp.79-86, 2005.2
- 10) 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, 日本建築学会, 2013.10
- 11) 大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動及び設計法に関する研究会: 大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および耐震設計指針(その 1 上町断層帯地震に対する大阪府域編), pp. II 1-II 68, 2011.7
- 12) 日本建築センター性能評価シート 2012 BCJ-HR0697-01: 新・新ダイビル(仮称), ビルディングレター, pp.53-55, 2012.11
- 13) 日本建築センター性能評価シート 2013 BCJ-HR0632-06: 環状第二号線新橋・虎ノ門地区第二種市街地再開発事業Ⅲ地区, ビルディングレター, pp.55-57, 2013.5
- 14) 斉藤賢二, 長江建治, 豊田耕造, 余湖兼右, 杉村義文, 中野時衛: 履歴ダンパーと粘性ダンパーを使ったハイブリッド制振システムの高層建物への適用, 日本建築学会技術報告集, 第 19 号, pp.95-100, 2004.6
- 15) 渥美孝敏, 北村春幸, 石井正人, 浦本弥樹: 鋼構造超高層建物における履歴減衰型・粘性減衰型制振部材の高さ方向併用配置の提案-その 2 履歴減衰型・粘性減衰型制振部材の併用配置による制振効果-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.765-766, 2006.9
- 16) 添田幸平, 佐藤大樹, 北村春幸, 石井正人, 吉江慶祐, 宮崎克, 佐々木和彦, 岩崎雄一: 連層配置した履歴型ダンパーと粘性型ダンパーが超高層建物の制振効果に与える影響, 日本建築学会技術報告集, 第 18 巻, 第 39 号, pp.477-482, 2012.6
- 17) 石丸辰治, 江原英次, 石垣秀典, 森川和彦: パッシブ型制震構造物の等価線形化による応答解析法, 日本建築学会構造系論文集, 第 542 号, pp.91-98, 2001.4
- 18) 笠井和彦, 川鍋佳史: 粘性減衰・履歴減衰を併用する構造における動的特性と地震最大応答の等価線形予測法, 日本建築学会構造系論文集, 第 591 号, pp.43-51, 2005.5
- 19) 秋山宏, 北村春幸: エネルギースペクトルと速度応答スペクトルの対応, 日本建築学会構造系論文集, 第 608 号, pp.37-43, 2006.10
- 20) 栗林晃司, 佐藤大樹, 北村春幸, 山口路夫, 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
- 21) 小穴温子, 北村春幸, 吉江慶祐, 佐藤俊明: 設計用地震動のための長周期地震動の f 値の定性的評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 674 号, pp.575-584, 2012.4
- 22) 北村春幸, 馬谷原伴恵, 川崎恵: 時刻歴応答解析結果をもとにエネルギーの釣合に基づく耐震設計法を適用した建築物の耐震性評価法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 73 号, 第 632 号, pp.1755-1763, 2008.10

(2013年11月10日原稿受理, 2014年1月23日採用決定)