

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	エネルギー法の主架構とダンパーの剛性分布が異なる場合への拡張に向けた検討, その2, ダンパーの強度低下率の評価とダンパーの損傷集中指数の検討
Title	
著者(和文)	渋谷政斗, 佐藤大樹, 北村春幸, 佐藤利昭, 山口路夫, 脇田直弥, 綿貫雄太
Authors	Daiki Sato, Haruyuki Kitamura, Toshiaki Sato, Michio Yamaguchi, Naoya WAKITA
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2015, 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: <a href="http://ci.nii.ac.jp/naid/110009947864">http://ci.nii.ac.jp/naid/110009947864</a>

エネルギー法の主架構とダンパーの剛性分布が異なる場合への拡張に向けた検討

その2：ダンパーの強度低下率の評価とダンパーの損傷集中指数の検討

構造一振動 正会員 ○ 渋谷政斗<sup>\*1</sup> // 佐藤大樹<sup>\*2</sup> // 佐藤利昭<sup>\*1</sup>  
 鋼構造建物 制振構造 履歴減衰型ダンパー // 北村春幸<sup>\*1</sup> // 山口路夫<sup>\*3</sup> // 脇田直弥<sup>\*3</sup>  
 エネルギー法 時刻歴解析 損傷集中指数 // 綿貫雄太<sup>\*3</sup>

1. はじめに

本報その1では、高さ方向の剛性が極端に不均一な主架構に、提案最適分布 $\overline{\alpha}_i$ に基づくダンパーを付与した制振構造を対象に、エネルギー法において最大応答の予測に用いる等価繰返し数 $n_{eqi}$ について検討した。

秋山によるエネルギー法は、ダンパーの降伏せん断力係数分布が最適分布 $\overline{\alpha}_i$ から外れた場合、強度低下率 $p_i$ と損傷集中指数 $n_i$ を用いて、下式より相対的な弱層へのダンパーの損傷配分を評価している<sup>2)</sup>。

$$\frac{{}_sW_{pk}}{{}_sW_p} = \frac{S_k \cdot P_k^{-n_k}}{\sum_{i=1}^N S_i \cdot P_i^{-n_i}} \quad (1)$$

$$s_i = \left( \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 \cdot \overline{\alpha}_i^2 \cdot \left( \frac{f_j k_j}{f_i k_i} \right), \quad p_i = \frac{s \alpha_{yi} / s \alpha_{y1}}{\overline{\alpha}_i} \quad (2a, b)$$

ここに、 ${}_sW_{pi}$ ：ダンパーの塑性歪エネルギー、 ${}_sW_p$ ：ダンパー全層の塑性歪エネルギー、 $N$ ：層数、 $m_i$ ：質量、 $M$ ：総質量、 $f_i k_i$ ：主架構の初期剛性、 $s \alpha_{yi}$ ：ダンパーのせん断力係数である。その2では、その1で設定した提案最適分布 $\overline{\alpha}_i$ に基づく制振構造のダンパー諸元を変化させた場合におけるダンパーの強度低下率と損傷集中指数を検討する。

2. ダンパーの強度低下率の評価

本章では、応答解析からダンパー諸元の変化と損傷配分の関係を把握した上で、応答解析の傾向を表現するダンパーの強度低下率 ${}_s p_i$ の提案を試みる。損傷集中の程度は、次章で扱うダンパーの損傷集中指数 ${}_s n_i$ が強く影響するため、 ${}_s p_i$ は、その層に損傷集中が生じるか否かを適切に表現することが重要となる。

2.1 解析パラメータ

本節では検討モデルの設定を示す。提案最適分布 $\overline{\alpha}_i$ に基づく制振構造を基準とし base と呼ぶ。base のある $j$ 層におけるダンパーの降伏耐力 ${}_s Q_{yj}$ とダンパーの初期剛性 ${}_s k_j$ に関して、図1のように ${}_s Q_{yj}$ のみを $\beta_j$ 倍、 ${}_s k_j$ のみを $\beta_j$ 倍、 ${}_s Q_{yj}$ と ${}_s k_j$ の双方を $\beta_j$ 倍したモデルを作成し、それぞれ Q, K, QK と呼ぶ。本検討では、 $\beta_j=0.8, j=1\sim 3$ とする。表1に解析パラメータを示す。

2.2 応答解析結果における損傷集中の分析

はじめに、入力地震動および建物モデルの違いについて検討する。図2に、ダンパー量 $\alpha_{y2}=0.20, j=2$ に

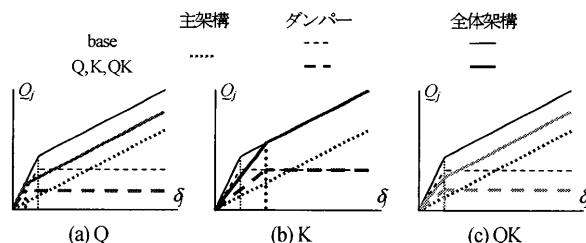


図1 j層の復元力の変化 ( $\beta < 1.0$ )

表1 解析パラメータ (2章)

建物モデル	L1, L3, L13, L35
${}_s \alpha_{y2}$	0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.15, 0.20
ダンパー設定	base, Q, K, QK
$j$	1, 2, 3
$\beta_j$	0.8
入力地震動	ART HACHI, ART KOBE

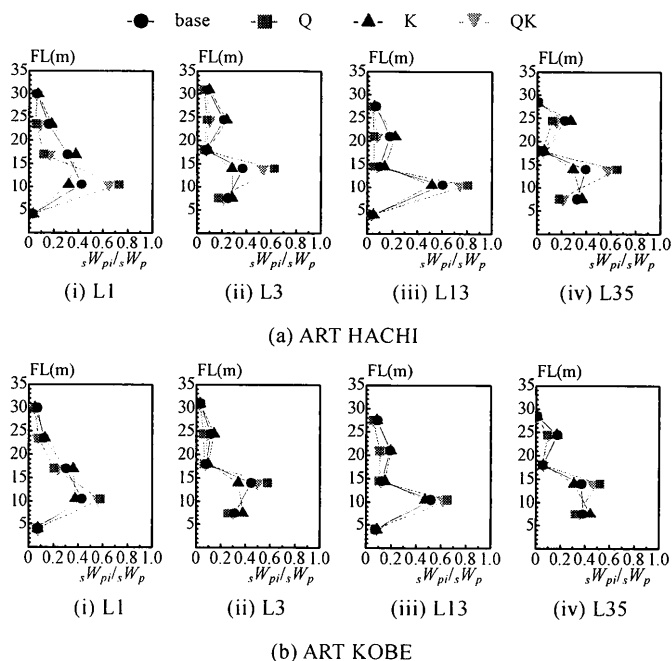


図2 ダンパーの損傷配分  ${}_s W_{pi} / {}_s W_p$  ( $\alpha_{y2}=0.20, j=2$ )

おけるダンパーの損傷配分 ${}_s W_{pi} / {}_s W_p$ を示す。図2より、ダンパー諸元を変化させた第2層のダンパーの損傷配分 ${}_s W_{p2} / {}_s W_p$ は、K, base, QK, Qの順で大きくなることから、 ${}_s Q_{y2}$ のみを小さくすると、その層に損傷集中が生じること、 ${}_s k_2$ のみを小さくすると、その層の損傷が緩和されること、 ${}_s Q_{y2}$ と ${}_s k_2$ の双方を小さくすると、その層に損傷集中は生じるが、 ${}_s Q_{y2}$ のみと比べやや小

い値となること、いずれの入力地震動、建物モデルにおいても確認できる。これらの傾向について、図3に示す図2(a), (i)における第2層のダンパーの履歴曲線を用いて考察する。図3より、QKはQとおおむね同様の履歴曲線を描き、Kの履歴曲線はbaseからほとんど変化していないことから、ダンパーの初期剛性 $s_k$ と比べ、ダンパーの降伏耐力 $sQ_{yi}$ の変化の方が応答性に大きな影響を及ぼすことが確認できる。QおよびQKは、最大層間変形の増大に加え、baseと比べ、小さいせん断力でダンパーが塑性化に至ることで(図1(a), (c)), ダンパーが塑性化する時間が増加し、損傷集中が生じたと推察される。一方、Kはダンパーの弾性域が長くなることで(図1(b)), ダンパーの塑性化が遅れ、他の層のダンパーへ損傷が分散したことによって、 $sW_{p2}/sW_p$ が減少したと考えられる。

続いて、 $j$ 層の違いによるダンパーの損傷配分の傾向を把握する。図4に、ART HACHI, L1モデル、 $s\alpha_2 = 0.20$ におけるダンパーの損傷配分 $sW_{pi}/sW_p$ を示す。図4より、baseにおける第1層の $sW_{p1}/sW_p$ が極僅かであるため、(a)における変化も小さいものの、 $sW_{pi}/sW_p$ の変化は、いずれの層を $j$ 層としても図2と同様の傾向を示すことが確認できる。最後に、ダンパー量 $s\alpha_2$ の変化によるダンパーの損傷配分の傾向を把握する。図5に、ART HACHI, L1モデル、 $j=2$ におけるダンパーの損傷配分 $sW_{pi}/sW_p$ を示す。図5より、 $s\alpha_2$ が小さいほど、 $sW_{pi}/sW_p$ の変化が生じにくくなるものの、図2とおおむね同様の傾向を示すことがわかる。

以上より、入力地震動、建物モデル、ダンパー諸元を変化させる層に大きく依存せず、 $sQ_{yi}$ のみを小さくすると、その層に損傷集中が生じること、 $s_k$ のみを小さくするとその層の損傷が緩和されること、 $sQ_{yi}$ と $s_k$ の双方を小さくするとその層に損傷集中は生じるが、 $sQ_{yi}$ のみと比べやや小さい値となることを確認した。

### 2.3 評価式の提案および性状分析

本節では、前節で得られた応答解析結果の傾向を表現するダンパーの強度低下率の評価式を提案する。主架構とダンパーの剛性分布が等しいことを前提としている秋山による強度低下率 $p_i$ <sup>2)</sup>(2b)式は、エネルギー法の基準状態を与える最適分布 $\bar{\alpha}_i$ からのダンパーのせん断力係数分布 $s\alpha_{yi}/s\alpha_{y1}$ の隔たり度合を表し、(1)式には、 $p_i/p_1 = 1.0$ 以下となるとその層に損傷集中が生じ、1.0以上となると損傷が他の層に分散されるように組み込まれている。主架構とダンパーの剛性分布が異なる場合、基準状態は $\bar{\alpha}_i$ ではなく(3)式に示す $s\alpha_i$ により与えられることから<sup>1)</sup>、この場合のダンパーの強度低下率として、(2b)式の $\bar{\alpha}_i$ を $s\alpha_i$ とした(4)式に示す $s p_i$ を提案する。 $s\alpha_i$ は $s_k$ を含む式であるため、 $s p_i$ は、前節における $s_k$ の変化に伴うダンパーの損傷

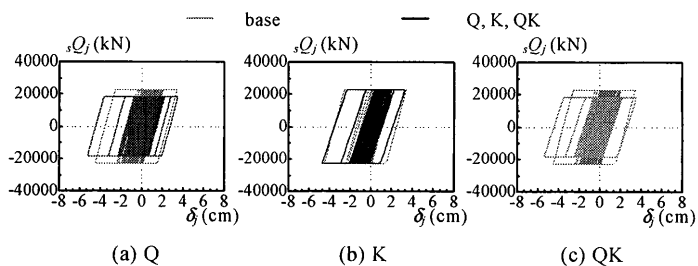


図3  $j$ 層のダンパーの履歴曲線 (ART HACHI, L1,  $j=2, s\alpha_2 = 0.20$ )

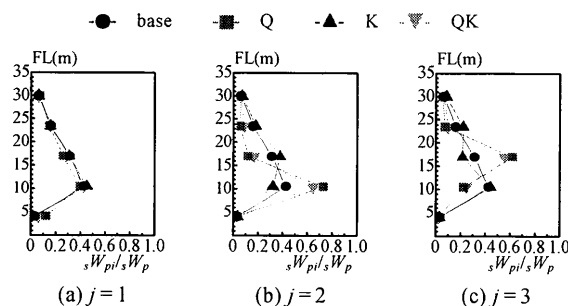


図4 ダンパーの損傷配分 $sW_{pi}/sW_p$  (ART HACHI, L1,  $s\alpha_2 = 0.20$ )

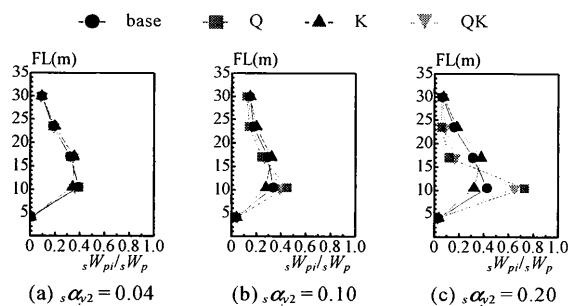


図5 ダンパーの損傷配分 $sW_{pi}/sW_p$  (ART HACHI, L1,  $j=2$ )

配分の変化を表現できるものと考えられる。

$$s\alpha_i = \alpha_i \cdot \frac{s k_i / (r k_i + s k_i)}{s k_1 / (r k_1 + s k_1)} \quad (3)$$

$$s p_i = \frac{s\alpha_{yi} / s\alpha_{y1}}{s\alpha_i} \quad (4)$$

主架構とダンパーの剛性分布が等しいとき、(3)式は $\bar{\alpha}_i$ となるため、(4)式は(2b)式に帰着する。(2b), (4)式中の $s\alpha_{yi}$ は下式で表される。

$$s\alpha_{yi} = sQ_{yi} / \sum_{j=1}^N m_j \cdot g \quad (5)$$

ここに、 $sQ_{yi}$ : ダンパーの降伏耐力、 $g$ : 重力加速度である。以降は、(4)式の性状について確認する。(3), (5)式を用いると(4)式は下式で表される。

$$s p_i = \frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{M}{\sum_{j=1}^N m_j} \cdot \frac{(r k_i + s k_i) \cdot s \delta_{yi}}{(r k_1 + s k_1) \cdot s \delta_{y1}} \quad (6)$$

ここに、 $s\delta_{yi}$ : ダンパーの降伏変位である。base ( $s p_i = 1.0$ )

の状態から、Q, K, QK のようにある  $j$  層のダンパーの諸元を  $\beta_j$  倍することを考える。変化後の  ${}_s p_j, {}_s k_j, {}_s \delta_{yj}$  をそれぞれ  ${}_s p_j', {}_s k_j', {}_s \delta_{yj}'$  と置くと、 ${}_s p_j'$  は(7)式で表される。

$${}_s p_j' = \frac{({}_f k_j + {}_s k_j') \cdot {}_s \delta_{yj}'}{({}_f k_j + {}_s k_j) \cdot {}_s \delta_{yj}} \quad (7)$$

${}_s k_j'$  および  ${}_s \delta_{yj}'$  は、Q の場合 ( ${}_s Q_{yj}$  のみを  $\beta_j$  倍)、 ${}_s k_j, \beta_j \cdot {}_s \delta_{yj}$ 、K の場合 ( ${}_s k_j$  のみを  $\beta_j$  倍)、 $\beta_j \cdot {}_s k_j, {}_s \delta_{yj} / \beta_j$ 、QK の場合 ( ${}_s Q_{yj}$  と  ${}_s k_j$  の双方を  $\beta_j$  倍)、 $\beta_j \cdot {}_s k_j, {}_s \delta_{yj}$  となることから、(7)式はそれぞれ(8)~(10)式で表される。

$${}_s p_j' = \frac{({}_f k_j + {}_s k_j) \cdot \beta_j \cdot {}_s \delta_{yj}}{({}_f k_j + {}_s k_j) \cdot {}_s \delta_{yj}} = \beta_j \quad (Q) \quad (8)$$

$${}_s p_j' = \frac{({}_f k_j + \beta_j \cdot {}_s k_j) \cdot {}_s \delta_{yj} / \beta_j}{({}_f k_j + {}_s k_j) \cdot {}_s \delta_{yj}} = \frac{r_{kj} + \beta_j}{\beta_j \cdot (r_{kj} + 1)} \quad (K) \quad (9)$$

$${}_s p_j' = \frac{({}_f k_j + \beta_j \cdot {}_s k_j) \cdot {}_s \delta_{yj}}{({}_f k_j + {}_s k_j) \cdot {}_s \delta_{yj}} = \frac{r_{kj} + \beta_j}{r_{kj} + 1} \quad (QK) \quad (10)$$

(9), (10)式中の  $r_{kj}$  は、主架構とダンパーの初期剛性比<sup>2)</sup>であり下式で表される。

$$r_{kj} = \frac{{}_f k_j}{{}_s k_j} \quad (11)$$

(8)~(10)式より、(8)式 × (9)式 = (10)式となることから、 ${}_s Q_{yj}$  と  ${}_s k_j$  の双方が変化する場合における損傷集中の性状は、 ${}_s k_j$  と  ${}_s Q_{yj}$  が単独で変化する場合の両者の性状の掛け合わせで表現されていることがわかる。(9)式は、 $r_{kj} \rightarrow 0$  で 1.0、 $r_{kj} \rightarrow \infty$  で  $1 / \beta_j$  に漸近することから、 $r_{kj}$  が十分に小さければ、ダンパーの損傷配分には  ${}_s Q_{yj}$  の変化が支配的に影響すると言える。(10)式は、 $r_{kj} \rightarrow 0$  で  $\beta_j$ 、 $r_{kj} \rightarrow \infty$  で 1.0 に漸近することから、 ${}_s Q_{yj}$  と  ${}_s k_j$  の双方を変化させ、ダンパーの損傷配分の制御を図る場合、 $r_{kj}$  が小さい層を対象とすると効率が良いことが示唆される。図6に、(3)式の性状の一例として、 $r_{kj} = 0.2, 1.0$  としたときの  ${}_s p_j'$  と  $\beta_j$  の関係を示す。 $\beta_j$  は 0.5 ~ 2.0 とする。

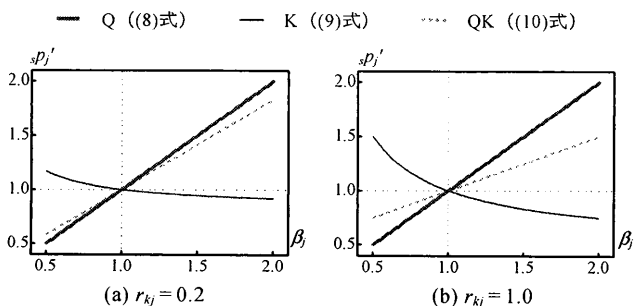


図6  ${}_s p_j'$  と  $\beta_j$  の関係

図6より、 $\beta_j < 1.0$  の範囲において、 ${}_s p_j'$  は K, QK, Q の順で小さくなり、K において 1.0 以上、QK, Q において 1.0 以下となることが確認できる。これは、K ではその層の損傷が緩和されること、QK, Q ではその層に損傷集中が生じることを意味し、前節において  $\beta_j = 0.8$  としたときの応答解析結果の傾向と対応する。このことから、(4)式は、ダンパー諸元の変化によって生じるダンパーの損傷配分の変化を適切に評価できるものと考えられる。

### 3. ダンパーの損傷集中指数の検討

本章では、相対的な弱層への損傷集中の程度を表すダンパーの損傷集中指数  ${}_s n_i$  の応答解析結果と既往の評価式の対応について検討する。

#### 3.1 既往評価式および解析パラメータ

${}_s n_i$  は主架構とダンパーの負担せん断力比  $r_{qi}$  との関係式として下式で与えられている<sup>3)</sup>。

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

$r_{qi}$  は下式で定義される<sup>2)</sup>。

$$r_{qi} = \frac{{}_f Q_{maxi}}{{}_s Q_{yi}} \quad (13)$$

ここに  ${}_f Q_{maxi}$  : 主架構の最大層せん断力である。応答解析結果の  ${}_s n_i$  は下式で求められる。

$${}_s n_i = -\ln \left\{ \frac{b(1-a)}{a(1-b)} \right\} / \ln p_d \quad (14)$$

ここで、 $a = {}_s W_{pj} / {}_s W_p$ 、 $b = {}_s W_{pj} / {}_s W_p$ 、 $a$  は任意の降伏せん断力係数分布の下における  $j$  層の損傷配分、 $b$  は  $j$  層のダンパーの降伏耐力を  $p_d$  倍した損傷配分を表す。(14)式は、任意の降伏せん断力係数分布からのダンパーのせん断力係数分布  ${}_s \alpha_j / {}_s \alpha_1$  の隔たりに対して、ダンパーの損傷配分がどの程度増加したかを求めるものである。本節では、応答解析結果を(14)式に代入し算定した  ${}_s n_i$  を用いて、(12)式を検証する。任意の降伏せん断力係数分布を  ${}_s \alpha_j$  とすると、 $a$  は base の応答解析結果となる。base からある  $j$  層におけるダンパーの  ${}_s Q_{yj}$  のみを 0.8 倍、 ${}_s k_j$  のみを 1.25 倍、 ${}_s Q_{yj}$  と  ${}_s k_j$  の双方を 0.8 倍したモデルを作成し、それぞれ Q, K, QK と呼ぶ。本検討では  $j = 1 \sim 3$  とする。表2に解析パラメータをまとめる。(14)式中の  $p_d$  は、前章における  ${}_s p_j'$  を意味するため、Q については(8)式、K については(9)式、QK については(10)式を用いることで  $p_d$  が求められる。Q における  $p_d$  は、全てのケースで 0.8 となるが、K および QK における  $p_d$  は、主架構とダンパーの初期

剛性比  $r_{kj}$  に応じて、それぞれ 0.846 ~ 0.976, 0.824 ~ 0.954 の範囲となり、任意の降伏せん断力係数分布からの隔たりは、Q よりも小さく評価される。

### 3.2 検討結果

図 7 に、ダンパーの損傷集中指数  $s_{n_i}$  と主架構とダンパーの負担せん断力比  $r_{qi}$  の関係を示す。図 7 より、 $s_{n_i}$  と  $r_{qi}$  の関係に建物モデルの違いによる明瞭な傾向は認められないことがわかる。ART KOBE に比べて ART HACHI における  $s_{n_i}$  の方が大きい傾向にある。これは、ART HACHI の方が継続時間が長く、相対的な弱層となった  $j$  層のダンパーが長時間にわたり損傷したためと考えられる。K による  $s_{n_i}$  が比較的大きい要因は、前述したように  $p_d$  が大きいため、ダンパーの損傷配分の僅かな増減が、 $s_{n_i}$  に大きく反映されやすいためと考えられる。(12)式は、ART HACHI における中央値、ART KOBE における上限値におおむね対応し、本報のような剛性が極端に不均一な主架構を用いた制振構造においても十分適用可能と考えられる。

### 4. まとめ

本報その 2 では、提案最適分布  $\overline{\alpha_i^{(1)}}$  に基づく制振構造のダンパー諸元を変化させた場合におけるダンパーの強度低下率  $s_{p_i}$  と損傷集中指数  $s_{n_i}$  を検討した。以下に得られた知見を示す。

(1) ある層のダンパーの降伏耐力  $s_{Q_{yi}}$  やダンパーの初期剛性  $s_{k_i}$  を低減させた応答解析におけるダンパーの損傷配分  $s_{W_{pi}} / s_{W_p}$  から、 $s_{Q_{yi}}$  のみの低減では、その層に損傷集中が生じること、 $s_{k_i}$  のみの低減では、損傷が緩和されること、 $s_{Q_{yi}}$  と  $s_{k_i}$  の双方の低減では、その層に損傷集中が生じ、 $s_{Q_{yi}}$  のみの低減よりも  $s_{W_{pi}} / s_{W_p}$  が小さい値となることを確認し、これらの傾向を表現するダンパーの強度低下率  $s_{p_i}$  として(4)式を提案した。

(2)  $s_{n_i}$  と主架構とダンパーの負担せん断力比  $r_{qi}$  の関係式である(12)式<sup>3)</sup>は、ART HACHI (海溝型位相の模擬波)、ART KOBE (直下型位相の模擬波) の応答解析結果における中央値、上限値にそれぞれおおむね対応し、本報において対象とした剛性が極端に不均一な主架構を用いた制振構造においても十分適用可能と考えられる。

### 謝辞

本論文は、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。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

1) 渋谷政斗, 佐藤大輔, 佐藤利昭, 北村春幸, 山口路夫, 脇田

表 2 解析パラメータ (3章)

建物モデル	L1, L3, L13, L35
$s_{\alpha_{y2}}$	0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.15, 0.20
ダンパー設定	Q, K, QK
$j$	1, 2, 3
$\beta_j$	0.8 (Q, QK), 1.25 (K)
入力地震動	ART HACHI, ART KOBE

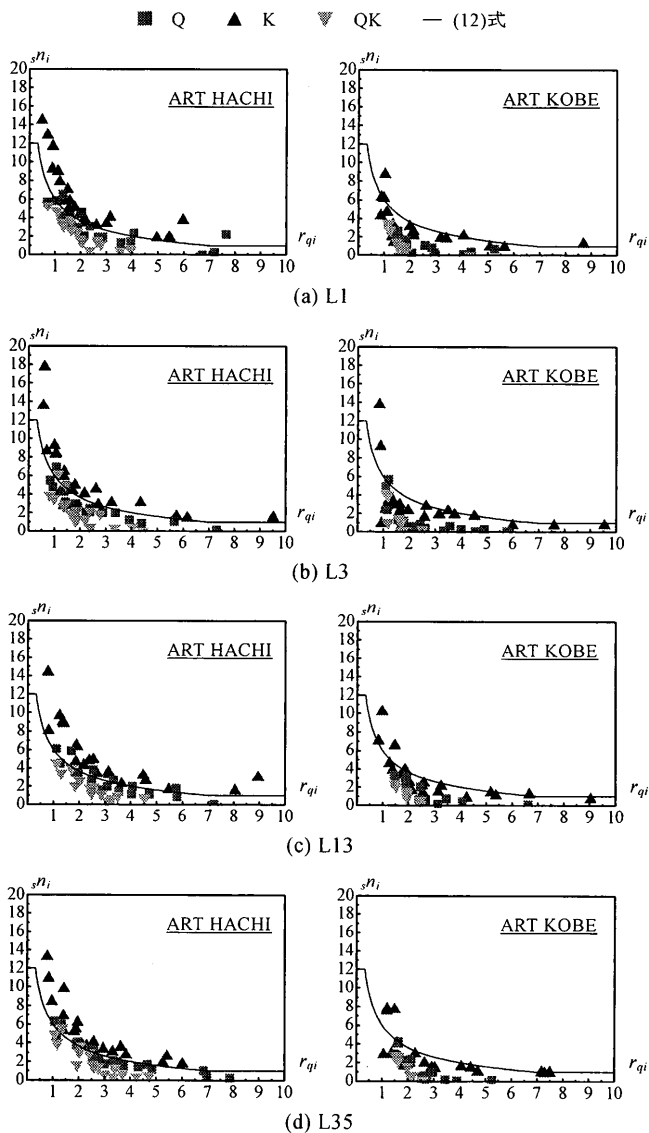


図 7 損傷集中指数  $s_{n_i}$  と負担せん断力比  $r_{qi}$  の関係

直弥, 綿貫雄太: 主架構との剛性比が各層で異なる履歴ダンパーの最適強度分布に関する検討 その 1: 最適強度分布の導出と検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集 2014 (構造 II), pp.677-678, 2014.9  
 2) 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  
 3) 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

\*1 東京理科大学 \*2 東京工業大学  
 \*3 新日鉄住金エンジニアリング株式会社