

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における累積損傷分布の予測精度
Title(English)	PREDICTION ACCURACY OF CUMULATIVE DAMAGE DISTRIBUTION FOR PASSIVE CONTROLLED STRUCTURE WITH HYSTERETIC DAMPERS
著者(和文)	岩森貴寿, 佐藤大樹, 北村春幸, 山口路夫, 脇田直弥, 綿貫雄太
Authors(English)	Takatoshi Iwamori, Daiki Sato, Haruyuki Kitamura, Michio Yamaguchi, Naoya WAKITA, Yuta WATANUKI
出典(和文)	構造工学論文集, Vol. 63B, , pp. 295-301
Citation(English)	Journal of Structural Engineering, Vol. 63B, , pp. 295-301
発行日 / Pub. date	2017, 3
権利情報	日本建築学会

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

PREDICTION ACCURACY OF CUMULATIVE DAMAGE DISTRIBUTION FOR PASSIVE CONTROLLED STRUCTURE WITH HYSTERETIC DAMPERS

岩森貴寿*¹, 佐藤大樹*², 北村春幸*³,
山口路夫*⁴, 脇田直弥*⁵, 綿貫雄太*⁵
Takatoshi IWAMORI, Daiki SATO, Haruyuki KITAMURA,
Michio YAMAGUCHI, Naoya WAKITA and Yuta WATANUKI

Energy-based design method for earthquake-induced response of a building is proposed by Dr. Akiyama, and it is very useful for evaluation of the cumulative damage. In previous studies, the prediction method based on energy balance was extended for case of main structures respond beyond elastic range. However, this method is not considered case of main structures respond mixture elastic story and plastic story.

In this paper, the validity of the method that is considered case of main structures respond in elastic range is examined by nonlinear time-history analysis using passive controlled structure with hysteretic dampers. We establish a qualitative method of prediction accuracy for the cumulative damage distribution.

Keywords : *Passive Controlled Structure, Elasto-plastic Response, Hysteretic Damper, Cumulative Damage Prediction, Energy-based Design Method*

制振構造, 弾塑性応答, 履歴ダンパー, 累積損傷予測, エネルギー法

1. はじめに

耐震構建造物の設計手法の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³⁾(以降, エネルギー法と呼ぶ)が規定されている。エネルギー法は時刻歴応答解析を用いることなく, 超高層建物を除いた履歴ダンパーを有する制振構建造物を設計することができる。そのため, 耐震性能の向上と経済性を両立させることができ, 制振構建造物を設計する場合でも建物の申請において通常の耐震構建造物と同様に大臣認定が不要となり, 申請期間を大幅に短縮することができる⁴⁾。

制振構造では主架構が弾性に留まることを目標に設計されてきたが, 近い将来の襲来が予想される東海・東南海・南海地震などの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。さらに, 履歴ダンパーを有する制振構造を設計するには, 長周期・長時間地震やその余震によって, 多数回の繰返しによるダンパーの累積損傷も評価する必要がある。

主架構弾性時のダンパーの累積損傷分布の応答予測式は秋山によ

り提案されている³⁾。それを北村ら⁵⁾によって主架構が大きく塑性化する場合に対応できる式に拡張された。ただし, 北村らによって拡張された式は, 主架構が塑性する場合には主架構とダンパーを合わせた全体架構での応答予測式としているため, 主架構が弾性の場合と塑性する場合で累積損傷分布の応答予測式を使い分ける必要がある。そして, 北村らによって拡張された応答予測式は主架構が大きく塑性することを想定しているため, 主架構が塑性する層と塑性しない層が混在する場合は考慮されていない。以上のことから, 筆者らは応答予測式を主架構が弾性の場合と塑性する場合を連続的に1つの応答予測式で予測することで, 応答予測式の適用範囲を拡張することができる⁶⁾と考える。

以上を踏まえて, 本論文では研究の初期段階として, 主架構が弾性の場合と塑性する場合の応答を連続的に1つの応答予測式で予測し, ダンパーの累積損傷分布に着目して, 応答予測値と時刻歴応答解析の結果を比較する。また, 累積損傷分布の応答予測精度の定量的な評価法を提案し, 評価法の妥当性について検討を行う。

本論文は文献1), 2)に加筆・修正を加えたものである。

*¹ 東京工業大学大学院総合理工学研究科 大学院生

*² 東京工業大学未来産業技術研究所 准教授・博士(工学)

*³ 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)

*⁴ 新日鉄住金エンジニアリング株式会社 博士(工学)

*⁵ 新日鉄住金エンジニアリング株式会社 修士(工学)

Graduate Student, Faculty of Science and Eng., Tokyo Institute of Technology

Associate Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

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

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

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

2. 諸元の設定と解析概要

2.1 主架構と履歴ダンパーの諸元

本論文では図1に示すように、主架構が弾性である場合と塑性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。本論文では、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。

本論文では文献5), 6)を参考に主架構の弾性1次固有周期 T が1.0sの10層の鋼構造建物の剛性・耐力分布を単純化した10質点系等価せん断型モデルを用いる。図2に本論文における解析モデルの概要を示す。質量分布は等分布(9.8kN・s²/cm)、主架構の剛性分布は台形分布(最上層が最下層の1/2)とする。主架構の初期剛性 k_i は式(1)

で求められる⁷⁾。主架構の剛性分布を台形分布としている妥当性については附録Aを参照されたい。

$${}_f k_i = \frac{{}_s \omega^2 \cdot m_i \cdot {}_s \phi_i + k_2({}_s \phi_2 - {}_s \phi_i)}{{}_s \phi_i} \quad (1a)$$

$${}_f k_i = \frac{{}_s \omega^2 \cdot m_i \cdot {}_s \phi_i + k_{i+1}({}_s \phi_{i+1} - {}_s \phi_i)}{{}_s \phi_i - {}_s \phi_{i-1}} \quad \{i = (N-1) \sim 2\} \quad (1b)$$

$${}_f k_N = \frac{{}_s \omega^2 \cdot m_N \cdot {}_s \phi_N}{{}_s \phi_N - {}_s \phi_{N-1}} \quad (1c)$$

ここで、 ${}_s \omega$: s 次の固有円振動数、 ${}_s \phi_i$: 第 i 層、 s 次の固有モード、 N : 全層数である。このとき、固有モードを算出する際に剛性が必要である。はじめに、剛性分布が台形分布(最上層が最下層の1/2)となる剛性を設定し、1次の固有モード ${}_s \phi_i$ を得る。構造減衰は主架構の1次固有周期 $T=1.0$ sに対して $f_h=2\%$ となる剛性比例型とする。主架構の降伏せん断力分布も台形分布(最上層が最下層の1/2)とする。降伏せん断力 ${}_f Q_{yi}$ は次式で求められる。

$${}_f Q_{yi} = {}_f \alpha_{yi} \cdot \sum_{j=1}^N m_j \cdot g, \quad {}_f Q_{yi} = {}_f \lambda_i \cdot {}_f Q_{y1} \quad (2a, b)$$

ここで、 ${}_f \alpha_{yi}$: 第 i 層の主架構の降伏層せん断力係数、 ${}_f \lambda_i$: 第1層の主架構の降伏せん断力に対する第 i 層の主架構の降伏せん断力の比である(台形分布)。本論文では第1層の主架構の降伏層せん断力係数 ${}_f \alpha_{y1} = 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, \infty$ を設定する。ここで、 ${}_f \alpha_{y1} = \infty$ は主架構が弾性であることを意味する。

ダンパーは、LY225級の低降伏点鋼製の座屈拘束ブレースを階高4.2mのスパン6.4mにハの字(角度54°)で取り付けることを想定する。降伏層せん断力 ${}_d Q_{yi}$ は第1層のダンパーの降伏層せん断力 ${}_d Q_{y1}$ を基準とし、秋山が提案する $\bar{\alpha}_i$ 分布³⁾に基づく最適分布をもとに3つのグループ(1~4層, 5~7層, 8~10層)に分割した3段階分布とする。ダンパーの降伏層せん断力 ${}_d Q_{y1}$ は以下の式で求められる。

$${}_d Q_{y1} = {}_d \alpha_{y1} \cdot \sum_{j=1}^N m_j \cdot g, \quad {}_d \alpha_{y1} = {}_d \bar{\alpha}_1 \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (3a, b)$$

$${}_d Q_{y1} = {}_d \alpha_{y5} \cdot \sum_{j=5}^N m_j \cdot g, \quad {}_d \alpha_{y5} = {}_d \bar{\alpha}_5 \quad (i = 5, 6, 7) \quad (4a, b)$$

$${}_d Q_{y1} = {}_d \alpha_{y8} \cdot \sum_{j=8}^N m_j \cdot g, \quad {}_d \alpha_{y8} = {}_d \bar{\alpha}_8 \quad (i = 8, 9, 10) \quad (5a, b)$$

$\bar{\alpha}_i$ は $x' > 0.2$ の場合、次式で表される³⁾。

$$\bar{\alpha}_i = 1 + 1.5927x' - 11.8519x'^2 + 42.5833x'^3 - 59.4827x'^4 + 30.1586x'^5 \quad (6a)$$

$\bar{\alpha}_i$ は $x' < 0.2$ の場合、次式で表される³⁾。

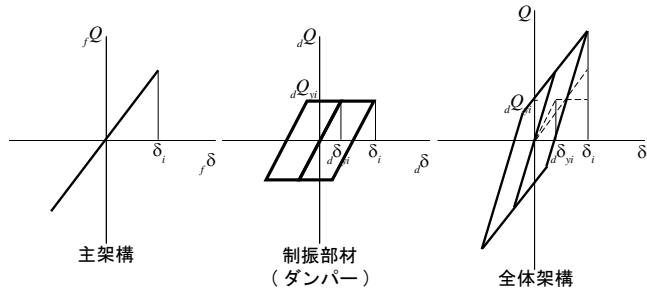
$$\bar{\alpha}_i = 1 + 0.5x' \quad (6b)$$

$$x' = \frac{i-1}{N} \quad (7)$$

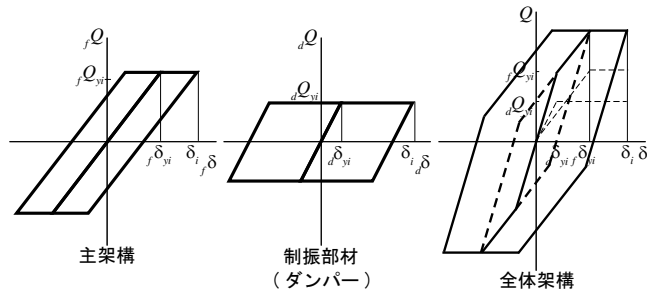
ここに、 ${}_d \alpha_{yi}$: 第 i 層のダンパーの降伏層せん断力係数である。ダンパーの降伏層間変形 ${}_d \delta_{yi}$ は全層で一定値 ${}_d \delta_{yi} = 0.64$ cmとし、ダンパーの初期剛性 ${}_d k_i$ は式(3)より求めた ${}_d Q_{yi}$ を用いて次式より算出する。

$${}_d k_i = {}_d Q_{yi} / {}_d \delta_{yi} \quad (8)$$

本論文では ${}_d \alpha_{y1}$ をダンパー量と呼び、 ${}_d \alpha_{y1} = 0.01, 0.02, 0.04, 0.10, 0.16, 0.20$ と設定する。なお、ダンパーへの変形伝達の障害となる取り付け



(a) 主架構が弾性の場合



(b) 主架構が塑性する場合

図1 復元力特性

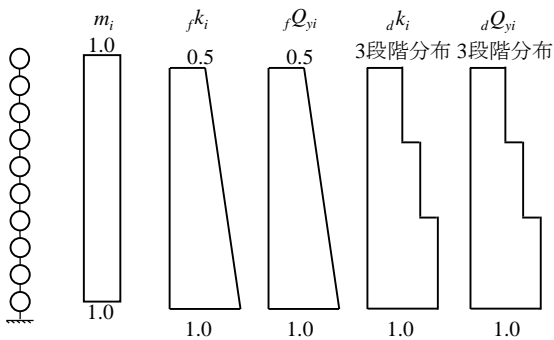


図2 解析モデル概要

表1 解析ケース (除外したケース: ×印)

		${}_d \alpha_{y1}$					
		0.01	0.02	0.04	0.10	0.16	0.20
${}_f \alpha_{y1}$	0.10	○	○	○	×	×	×
	0.15	○	○	○	○	×	×
	0.20	○	○	○	○	○	×
	0.25	○	○	○	○	○	○
	0.30	○	○	○	○	○	○
	∞	○	○	○	○	○	○

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ダンパーの変形に寄与するものとする⁸⁾。

なお、表1に解析ケースを示す。表1中の×印は除外するケースを表す。本論文では主架構の降伏層せん断力係数 $f\alpha_{y1}$ よりダンパー量 $d\alpha_{y1}$ が大きいケースは主架構が先に降伏してしまうため除外する。

2.2 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 $\rho S_V=50, 100, 150$ 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⁸⁾。本論文では $\rho S_V=50, 100, 150$ cm/sの地震動をそれぞれレベル1, レベル2, レベル3と呼ぶ。レベル2の加速度波形(0~300s)を図3に示す。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505s以降を0cm/s²とし、合計で継続時間は550sとする。ART KOBEも同様に270s以降を0cm/s²とし、合計で継続時間は300sとする¹⁾。両地震動ともに解析時間刻み $\Delta t=0.01$ sとする。図4に加速度応答スペクトル S_A 、擬似速度応答スペクトル ρS_V 、変位応答スペクトル S_D およびエネルギースペクトル V_E (固有周期 $T=0\sim 3$ s)を示す。

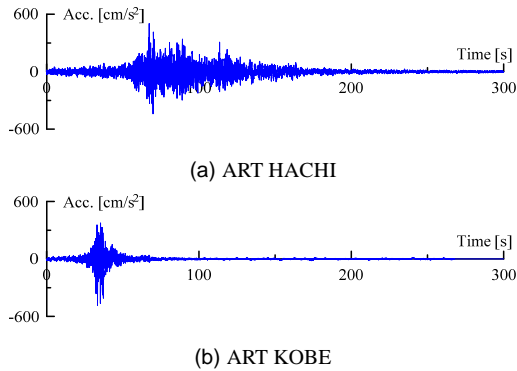
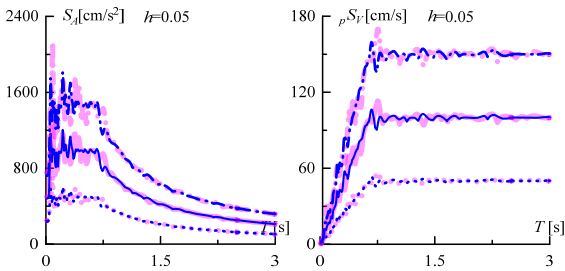
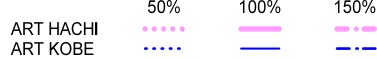
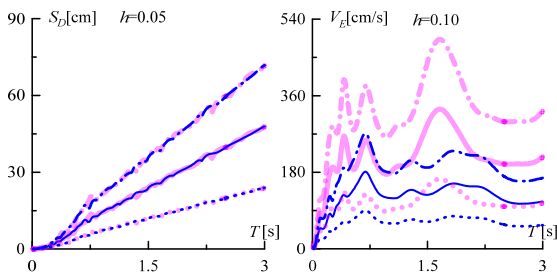


図3 入力地震動の加速度時刻歴波形(レベル2)



(a) 加速度応答スペクトル (b) 擬似速度応答スペクトル



(c) 変位応答スペクトル (d) エネルギースペクトル

図4 応答スペクトルとエネルギースペクトル

3. 累積損傷分布の応答予測式

ダンパーの累積損傷分布 $1/\gamma_{pi}$ はダンパーが吸収する全累積塑性歪エネルギー dW_{pi} に対する第 i 層におけるダンパーが吸収する累積塑性歪エネルギー dW_{pi} の比を用いて以下のように表せる。

$$\frac{1}{d\gamma_{pi}} = \frac{dW_{pi}}{\sum_{j=1}^N dW_{pj}} \quad (9)$$

秋山による累積損傷分布の応答予測式³⁾は主架構とダンパーの剛性比が各層で等しい場合にのみ適用できる式となっており、これを文献8), 9)では主架構とダンパーの剛性比が各層で異なる場合でも適用できる式へと拡張した。文献8), 9)で拡張された式(10)を示す

$$\frac{1}{d\gamma_{pi}} = \frac{dS_i \cdot dP_i^{-dn_i}}{\sum_{j=1}^N (dS_j \cdot dP_j^{-dn_j})} \quad (10)$$

ここで、

$$dP_i = \left(\frac{d\alpha_{yi}}{d\alpha_{y1}} \right) / d\bar{\alpha}_i \quad (11)$$

$$dS_i = \left(\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 \cdot d\bar{\alpha}_i^2 \cdot \left(\frac{d k_i}{d k_1} \right) \quad (12)$$

$$d\bar{\alpha}_i = \bar{\alpha}_i \cdot \frac{d k_i / (f k_i + d k_i)}{d k_1 / (f k_1 + d k_1)} \quad (13)$$

式(10)は主架構とダンパーの初期剛性が各層で等しくなる場合、秋山による累積損傷分布の提案式³⁾と一致する。ダンパーの損傷集中指数 dn_i は、北村らによって負担せん断力比 r_{qi} が大きい範囲を拡張された式(14)を採用する⁵⁾。

$$\left. \begin{aligned} dn_i &= 12 & r_{qi} &\leq 0.33 \\ dn_i &= -2 + 8 \cdot r_{qi}^{-0.5} & 0.33 < r_{qi} \leq 7.0 \\ dn_i &= 1 & r_{qi} &> 7.0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$r_{qi} = \frac{f Q_{i,max}}{d Q_{i,max}} \quad (15)$$

本論文では式(14)の妥当性および、式(10)による予測精度の検証が目的であるため、式(15)を算出する際の $f Q_{i,max}$, $d Q_{i,max}$ は時刻歴応答解析の結果を用いる。文献5)とは異なり、主架構が塑性する場合は $f Q_{i,max}$ ではなく $f Q_{yi}$ を、ダンパーが降伏した場合は $d Q_{i,max}$ ではなく $d Q_{yi}$ を用いる。

筆者らは文献1)にて、秋山による累積損傷分布の応答予測式¹⁾と文献8), 9)によって拡張された応答予測式の比較を行い、予測精度の検討を行った。ただし、文献1)では主架構弾性時のみの検討しか行われていない。本論文では、文献8), 9)で拡張された式(10)が主架構が弾性的の場合と塑性する場合を連続的に予測する際の予測精度について検討を行う。

4. 時刻歴応答解析と応答予測式による応答予測精度の評価

4.1 応答予測精度の評価法

本節では、累積損傷分布 $1/\gamma_{pi}$ の応答予測精度の評価法を提案し、その評価法の妥当性について検討を行う。主架構とダンパーの塑性化の程度を評価する指標として、入力エネルギー E に占める主架構全体の累積塑性歪エネルギー $f W_p$ の割合を主架構のエネルギー分担

率 $f\alpha_p$ として式(16a)で算出する¹⁰⁾。入力エネルギー E に占めるダンパー全体の累積塑性歪エネルギー ${}_dW_p$ の割合をダンパーのエネルギー分担率 ${}_d\alpha_p$ として式(16b)で算出する¹⁰⁾。

$${}_f\alpha_p = {}_fW_p/E, \quad {}_d\alpha_p = {}_dW_p/E \quad (16a,b)$$

ここで、時刻歴応答解析の結果より算出した E , ${}_fW_p$ および、 ${}_dW_p$ は地震終了時の値を用いる。

既往研究^(例えば 7),8)では、 $1/\gamma_{pi}$ の応答予測精度については定性的な評価が行われてきた。それに対して文献 10)では、 $1/\gamma_{pi}$ の総和が 1.0 になることに着目して各層での応答予測値 $[1/{}_d\gamma_{pi}]_p$ (以降、予測値と呼ぶ) と時刻歴応答解析の結果から算出した累積損傷分布 $[1/{}_d\gamma_{pi}]_c$ (以降、解析値と呼ぶ) の差をとり、その絶対値を全層数で平均した値を用いて定量的に評価を行っている。本論文ではこれをダンパーの平均誤差 ${}_dR_a$ と呼び、式(17)で算出する。

$${}_dR_a = \frac{1}{N} \left| \left[\frac{1}{{}_d\gamma_{pi}} \right]_p - \left[\frac{1}{{}_d\gamma_{pi}} \right]_c \right| / N \quad (17)$$

図 5 に ${}_d\alpha_p$ に対するダンパーの平均誤差を ${}_f\alpha_p \leq 0.3$ の範囲を図 5(a)に、 ${}_f\alpha_p > 0.3$ の場合を図 5(b)に示す。なお、図 5(a)には主架構が塑性しない場合も示す(図中×)。図 5(a)に着目すると ${}_d\alpha_p$ が大きくなるにつれて ${}_dR_a$ が小さくなり、解析値に対して予測値が精度良く対応していることがわかる。図 5(b)では ${}_f\alpha_p$ が大きいため ${}_d\alpha_p$ が比較的小さい範囲に分布しており、 ${}_dR_a$ のバラつきが大きい事が確認できる。ここで、さらに詳細に分析を行うため、例として図 5 中に示す 4 ケースについて高さ方向のダンパーの累積損傷分布を図 6 に示す。図 6(a)では損傷が集中する層(以降、弱層と呼ぶ)での予測値と解析値の差が大きく、応答予測式が弱層での損傷集中を予測できていない

ことがわかる。対して、図 6(b)は弱層での予測値と解析値の差が小さく、図 6(a)より予測精度が良いと考えられる。しかし、併記している ${}_dR_a$ に着目すると図 6(a), (b)は同程度の値を示している事がわかる。これは、図 6(a)では弱層での予測値と解析値の差が大きくなっているが弱層以外の層で予測値と解析値の差がほとんどないのに対して、図 6(b)では弱層以外の層で予測値と解析値の差が生じており、弱層での予測値と解析値の差は図 6(a)と比べて小さいにもかかわらず、 ${}_dR_a$ が大きく算出されるためである。つまり、式(17)の平均誤差 ${}_dR_a$ で評価を行うと図 6(a), (b)が同等の予測精度と評価され、弱層での予測値と解析値の差を過少に評価してしまう。図 6(c), (d)においても図 6(a), (b)と同様に、図 6(c)では弱層での予測値と解析値の差が大きく、図 6(d)では全層で小さな差が生じている。そのため、 ${}_dR_a$ に着目すると図 6(c), (d)は同程度の予測精度評価となってしまう。

文献 10)では風応答を対象としており、風応答での $1/{}_d\gamma_{pi}$ は弱層に

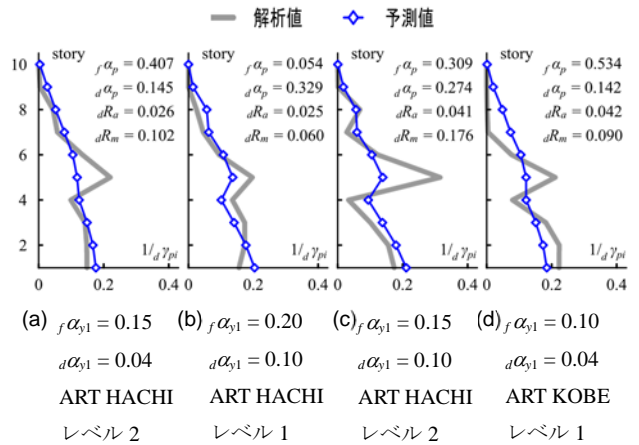
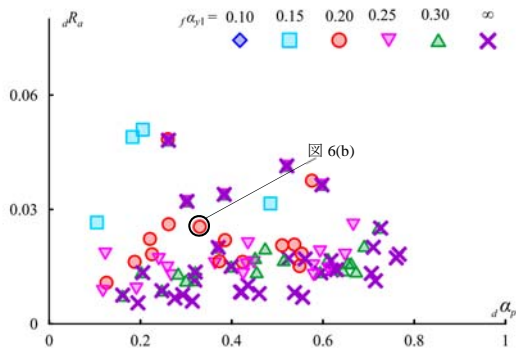
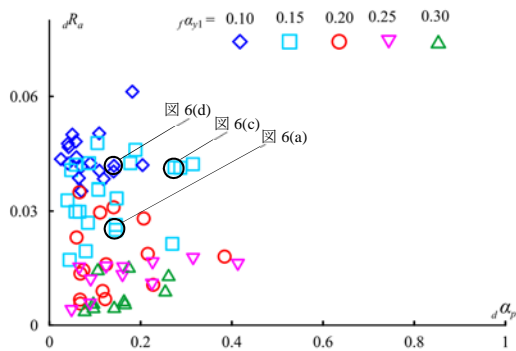


図 6 累積損傷分布の比較

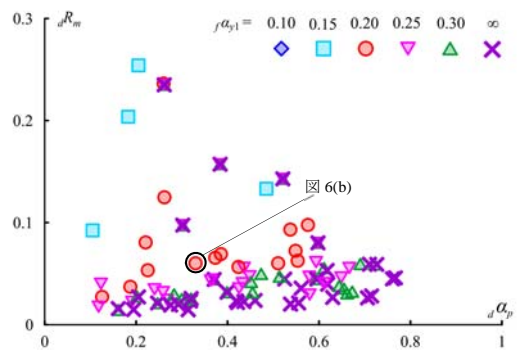


(a) ${}_f\alpha_p \leq 0.3$ の場合

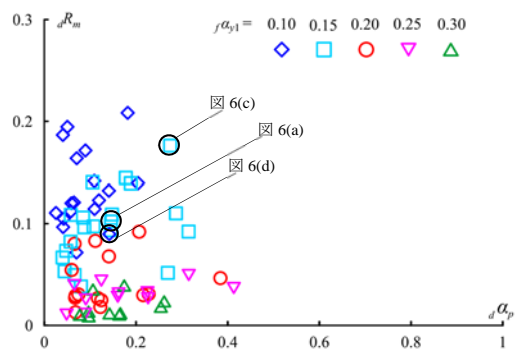


(b) ${}_f\alpha_p > 0.3$ の場合

図 5 ダンパーのエネルギー分担率に対する平均誤差



(a) ${}_f\alpha_p \leq 0.3$ の場合



(b) ${}_f\alpha_p > 0.3$ の場合

図 7 ダンパーのエネルギー分担率に対する最大誤差

極端なエネルギー集中が生じないため、 dR_m での評価が有効であった。しかし、地震応答では、図6に示すように弱層に $1/d\gamma_{pi}$ が集中することを考慮して予測精度を評価する必要がある。そこで本論文では予測値 $[1/d\gamma_{pi}]_p$ と解析値 $[1/d\gamma_{pi}]_c$ の差の絶対値が最大となる層の値をダンパーの最大誤差 dR_m として式(18)で定義する。

$$dR_m = \left| [1/d\gamma_{pi}]_p - [1/d\gamma_{pi}]_c \right|_{\max} \quad (18)$$

図7に $d\alpha_p$ に対するダンパーの最大誤差を図5と同様に $f\alpha_p$ の大きさによってグラフを二つに分けて示す。図中に図6のケースも示す。図6(a), (b)と図6(c), (d)は dR_m がそれぞれ概ね等しいが、 dR_m に着目すると図6(a)の方が図6(b)より大きく、図6(c)の方が図6(d)より大きくなるのがわかる。以上から、地震応答時の $1/d\gamma_{pi}$ を評価する際には dR_m で評価することが有効であることが確認できる。よって、次節からは図7に示すように dR_m で評価を行い、応答予測式(式(10))での予測精度の検討を行う。

4.2 主架構が弾性的場合での応答予測精度の評価

文献8), 9)で拡張された応答予測式は主架構弾性時での検討は行われている。しかし、文献8), 9)では限られた解析条件についてのみ検討を行っており、その評価方法も定性的なものであった。よって、本節では本論文で設定する解析条件での主架構弾性時における応答予測精度を定量的に評価し、後述する主架構が塑性する場合での応答予測精度の評価基準とする。本節では主架構が弾性的場合での計36ケース(= 入力地震動: 2種類, 入力レベル: 3種類, ダンパー量 $d\alpha_{y1}$: 6種類)の結果を用いて予測精度の評価を行う。

図7(a)より、主架構弾性時の場合は多くのケースで dR_m が小さいことが確認できるが、主架構弾性時においても dR_m が0.1以上となるケースがあることが確認できる。傾向として、 $d\alpha_p$ が小さい範囲で dR_m が大きい場合と小さい場合のバラつきが大きく、 $d\alpha_p$ が大きくなるにつれてそのバラつきが小さくなるのがわかる。ただし、 $d\alpha_p$ が比較的大きい0.5以上であっても dR_m が0.1以上となるケースがあり、これは前節で示した図6(a)と同程度の dR_m となる。 dR_m が0.1以上となるケースは図6(a)のように弱層での予測値と解析値の差が大きく、予測精度が低い。

4.3 主架構が塑性する場合での応答予測精度の評価

本節では主架構が塑性する場合での計144ケース(= 入力地震動: 2種類, 入力レベル: 3種類, 主架構の降伏せん断力係数 $f\alpha_{y1}$: 5種類, ダンパー量 $d\alpha_{y1}$: 6種類, 除外したケース: 36ケース)の結果を

用いて応答予測精度の評価を行う。

図7(b)から、主架構の降伏せん断力係数 $f\alpha_{y1}$ が大きい場合には概ね dR_m が小さいことがわかる。それに対して、 $f\alpha_{y1}$ が小さい場合には dR_m が大きくなるケースが多いことが確認できる。これは、図7(b)の中でも特に $f\alpha_p$ が大きくなることが予想され、本論文で用いている応答予測式(式(10))が主架構の塑性化を考慮していないため、予測精度が低くなったと考えられる。図7(a)においても、 $f\alpha_{y1}$ が低い場合で dR_m が大きくなる傾向が確認できる。ただし、前節でも確認したが、主架構弾性時においても dR_m が大きくなるケースがある。また、図7(a)は図7(b)より $f\alpha_p$ が小さいが、 dR_m が大きいケースもあれば小さいケースもあり、予測精度のバラつきが大きい。このことから、 $f\alpha_p$ によって応答予測精度を評価することができないことがわかる。また、風応答を対象とした場合¹⁰⁾、エネルギー分担率 α_p が0.1以上の範囲で予測精度が高くなると示されているが、地震応答を対象とした場合ではそのような傾向は確認できない。

4.4 最大損傷集中に着目した応答予測精度の評価

前節までの結果より、主架構が弾性にもかかわらず最大誤差 dR_m が大きくなるケースがあることがわかった。そこで、本節では dR_m が大きくなる傾向についてさらに詳細な分析を行う。

図8に dR_m が0.2以上となる計7ケースの高さ方向のダンパーの累積損傷分布を示す。図8(a)~(f)の解析値に着目すると $d\alpha_{y1}$ が多い0.10もしくは0.16のケースであり、 $1/d\gamma_{pi}$ が第5層で最も大きく、損傷集中が大きいことがわかる。図8(g)は $d\alpha_{y1}$ が0.04のケースで、第1層で最も損傷集中が大きい。以上のことから、解析値は $d\alpha_{y1}$ によって最も損傷集中する層が変動することがわかる。それに対して、図8(a)~(f)の予測値の場合では、第1, 5, 8層で損傷が集中すると予測しているが、最も損傷が集中する層を第1層と予測しており、解析値で最も損傷集中が大きい第5層を小さく予測してしまっていることがわかる。図8(g)の予測値はほとんど損傷が集中しておらず、最も損傷が集中している最下層から最上層に向け徐々に $1/d\gamma_{pi}$ が小さくなると予測している。また、図8での解析値は第7層より上の層で $1/d\gamma_{pi}$ が小さいのに対し、予測値は第7層より上の層の $1/d\gamma_{pi}$ を多く分配している。以上より、解析値ではほとんどエネルギーを吸収していない層に予測値が $1/d\gamma_{pi}$ を多く分配しているため、解析値で最も損傷が集中する層を予測できていないことがわかる。

続いて、図9に最大誤差が0.1~0.2の範囲の例として16ケースの高さ方向のダンパーの累積損傷分布を示す。図9では解析値をみる

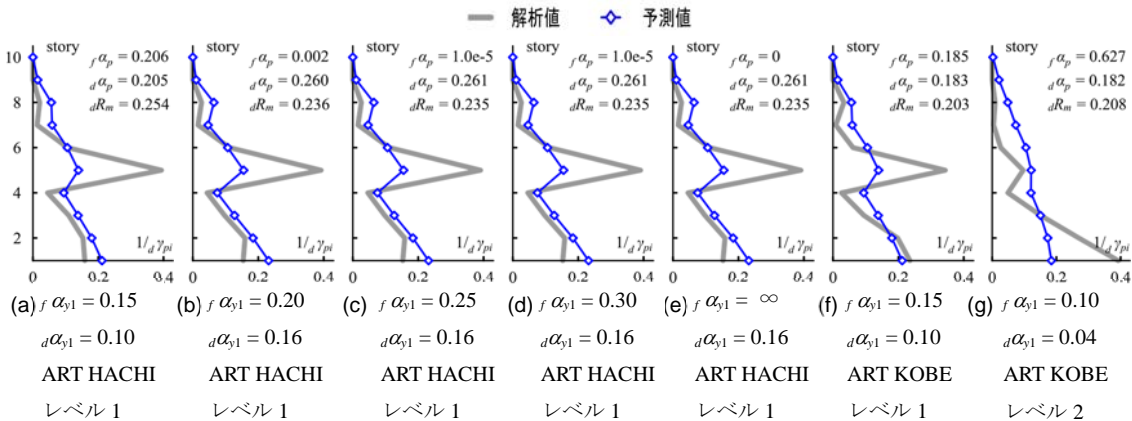


図8 最大誤差 dR_m が0.2以上となる累積損傷分布

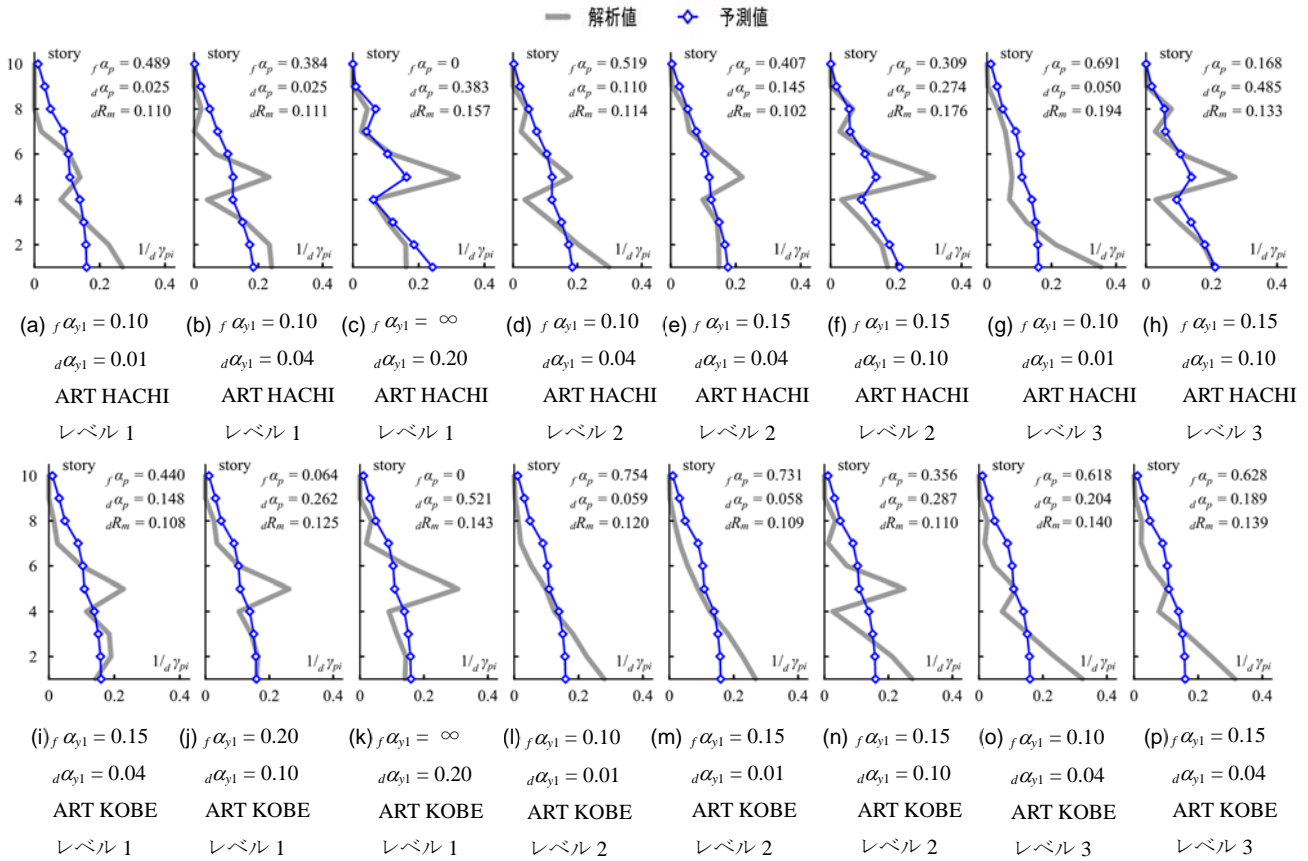


図9 最大誤差 dR_m が 0.1~0.2 の範囲となる累積損傷分布

と $d\alpha_{y1}$ の値にかかわらず最も損傷が集中する層が第 1 層もしくは第 5 層となり、解析値が最も損傷が集中する層に予測値は $1/d\gamma_{pi}$ を少なく分配していることが確認できる。これは、図 8 と同様に予測値が第 7 層より上の層の $1/d\gamma_{pi}$ を多く分配しすぎているためである。また、図 9 に示すように入力地震動、入力レベル、 $f\alpha_{y1}$ 、 $d\alpha_{y1}$ 、 $f\alpha_p$ および、 $d\alpha_p$ にかかわらず、 dR_m が 0.1 以上となるケースが全 180 ケース中 41 ケースあることを確認している。以上から dR_m が大きくなる要因として最も損傷集中が大きい層の解析値(以降、最大損傷集中 $|1/d\gamma_{pi}|_{p,max}$ と呼ぶ)より予測値が小さいため、予測値と解析値の差が大きくなっていることが挙げられる。

そこで本論文では、最大損傷集中 $|1/d\gamma_{pi}|_{p,max}$ に着目し、図 10 に最大損傷集中 $|1/d\gamma_{pi}|_{p,max}$ に対する最大誤差 dR_m を示す。図 10 より、入力地震動、入力レベル、 $f\alpha_{y1}$ 、 $d\alpha_{y1}$ 、 $f\alpha_p$ および、 $d\alpha_p$ にかかわらず最大損

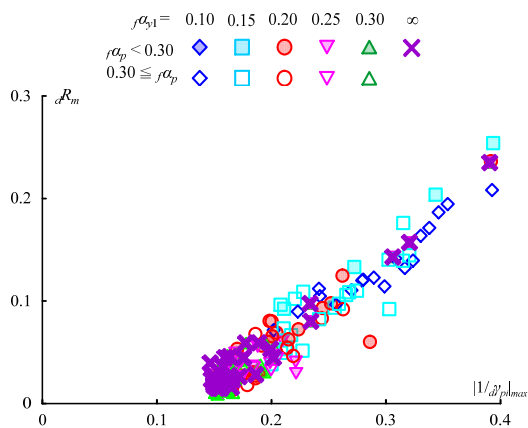


図 10 $|1/d\gamma_{pi}|_{p,max}$ に対する最大誤差

傷集中 $|1/d\gamma_{pi}|_{p,max}$ が大きくなるにつれて最大誤差 dR_m が大きくなることわかる。このことから、主架構の弾性・塑性にかかわらず、応答予測式(式(10))が地震応答時の弱層に生じる極度なエネルギー集中には対応できていないことがわかる。したがって、本論文で設定した剛性分布のように地震応答時に弱層で最大損傷集中 $|1/d\gamma_{pi}|_{p,max}$ が 0.25 以上となる場合で応答予測式(式(10))の予測精度が低くなることわかる。

5. まとめ

本論文では研究の初期段階として、文献(8, 9)にて拡張された応答予測式で、主架構が弾性的場合と塑性する場合を連続的に予測する際の応答予測精度について応答予測値と時刻歴応答解析の結果を比較し、分析を行った。その際、累積損傷分布の応答予測精度を定量的に検討するための評価法を提案し、提案する評価法の妥当性について検討を行った。

累積損傷分布 $1/d\gamma_{pi}$ の応答予測式は主架構の弾性、塑性にかかわらず、予測精度が低くなるケースがあることがわかった。そのため、応答予測値と時刻歴応答解析の結果を比較し、詳細に分析を行った。その結果、最大損傷集中 $|1/d\gamma_{pi}|_{p,max}$ が大きくなるにつれてダンパーの最大誤差 dR_m が大きくなることわかった。このことから、本論文で用いた応答予測式では弱層に過度な損傷集中が生じる場合で予測精度が低いことがわかった。

なお、本論文では 10 質点系等価せん断モデルを用いて限られた解析条件の下で検討を行った。異なる解析条件下においても同様な知見が得られるか確認する必要がある。

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。

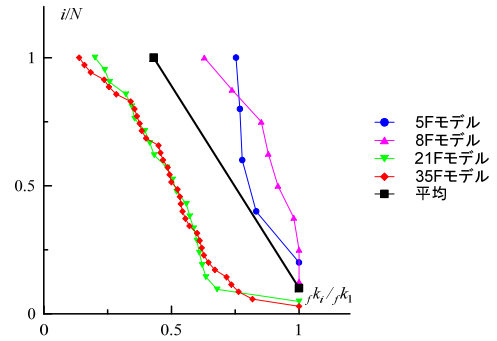
参考文献

- 1) 岩森貴寿, 佐藤大樹, 佐藤利昭, 北村春幸, 山小路夫, 脇田直弥, 綿貫雄太: 主架構弾性時の履歴ダンパーの累積損傷分布における応答予測精度の検証, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.533-536, 2016.3
- 2) 岩森貴寿, 佐藤大樹, 佐藤利昭, 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累積損傷分布による応答予測精度の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.281-282, 2016.8
- 3) 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
- 4) 脇田直弥, 松蔭知明, 樋口公平, 中村秀司: エネルギー法による建物の構造設計～優れた耐震性と経済性を両立した設計手法の確立～, 新日鉄エンジニアリング技報 vol.3, 2012.1
- 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) 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲郎: 粘弾性ダンパーの振動数依存性が風応答に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 635 号, pp.75-82, 2009.1
- 8) 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
- 9) 渋谷政斗, 佐藤大樹, 佐藤利昭, 北村春幸, 山小路夫, 脇田直弥, 綿貫雄太: ダンパーの損傷配分式の主架構とダンパーの剛性分布が異なる場合への拡張, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.773-774, 2015.9

- 10) 佐藤大樹, 池上昌志, 平井宏幸, 吉江慶祐, 佐藤利昭, 北村春幸: 履歴型ダンパーを有する超高層制振建物の風応答時における累積損傷分布予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 81 巻, 第 728 号, pp.1635-1645, 2016.10
- 11) 戸張涼太, 佐藤大樹, 古谷慶, 北村春幸, 石井正人, 吉江慶祐, 宮崎充, 佐々木和彦, 岩崎雄一: 骨組特性値を用いた履歴型ダンパーを有する建物の制振性能評価, 構造工学論文集, Vol.59B, pp.321-327, 2013.3

附録 A 主架構の剛性分布の検討

文献 11) で用いている解析モデルから、本論文で用いている主架構の剛性分布の汎用性について確認を行う。文献 11) で用いている 5F~35F の 4 つのモデルの剛性を最下層で基準化し、高さ方向は最上層で基準化したものを附図 A に示す。5F~35F のモデルの最上層と最下層の剛性でそれぞれ平均値を算出した。最上層の剛性の平均が約 0.5 となることから、本論文で用いている剛性分布が 5F~35F の 4 つのモデルの平均的な剛性分布であることが確認できる。



附図 A 主架構の剛性分布