

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	鋼材ダンパーを有する超高層制振建物の地震応答評価 その2 レインフロー法を用いた鋼材ダンパーの疲労損傷評価
Title(English)	Seismic Response Evaluation of Super High-Rise Building with Steel Dampers (Part2) Fatigue Damage Evaluation of Steel Damper using Rain Flow Method
著者(和文)	宮本滉大, 佐藤大樹, 陳引力, 田中英之, 曾根孝行, 今野大輔, 渡井一樹
Authors(English)	Kodai Miyamoto, Daiki Sato, Yinli Chen, Hideyuki Tanaka, Takayuki Sone, Daisuke Konno, Kazuki Watai
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 401-404
Citation(English)	, , , pp. 401-404
発行日 / Pub. date	2025, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

鋼材ダンパーを有する超高層制振建物の地震応答評価

その2 レインフロー法を用いた鋼材ダンパーの疲労損傷評価

構造—振動

正会員 ○ 宮本滉大 *1

正会員 佐藤大樹 *2

〃 陳引力 *3

〃 田中英之 *4

超高層建物 制振構造 時刻歴応答解析

〃 曾根孝行 *4

〃 今野大輔 *4

レインフロー法 履歴型ダンパー 疲労損傷

〃 渡井一樹 *4

1. はじめに

前報その1では、履歴型ダンパーを有する超高層制振建物モデルを対象として時刻歴応答解析を行い、ダンパー量をパラメータとする各モデルの応答値の違いより、ダンパー量および入力波の種類と応答値の関係について分析し、最適なダンパー量を検討した。

本報その2では、その1で対象とした履歴型ダンパーを有する超高層建物モデルに地震動を入力して得られたダンパーの歪時刻歴データにレインフロー法¹⁾を適用してダンパーの疲労損傷評価を行うことを目的とする。

2. 解析概要

前報その1に引き続き、その1の図1に示す立面および図2に示す平面を有する座屈拘束ブレース無のN-Modelおよびダンパー量 α_{dp1} をパラメータとするD-Modelを対象として検討を行う。なお、本報においてD-Modelのダンパー量は、 $\alpha_{dp1} = 0.010, 0.020, 0.030$ の計3モデルに限定して検討を行う。

入力地震動についても同様に、その1に引き続き、告示波であるART HACHI（位相特性：Hachinohe 1968 NS）および基整促波であるOS1を使用する。

3. ダンパー塑性化部歪高さ方向分布による検討

図1にXおよびY方向入力時におけるダンパー塑性化

部歪の最大値 $|\hat{\epsilon}_{dpi}|_{max}$ の高さ方向分布をそれぞれ示す。ここで、 i 層 j 番目のダンパー塑性化部歪の時刻歴 $\hat{\epsilon}_{dpij}(t)$ は式(1)で示される。

$$\hat{\epsilon}_{dpij}(t) = \left(\hat{u}_{dij}(t) - \frac{2\hat{F}_{dij}(t)}{\hat{K}_{dei}} \right) / L_{dpi} \quad (1)$$

ここで、 $\hat{u}_{dij}(t)$: i 層 j 番目のダンパー軸方向変形、 $\hat{F}_{dij}(t)$: i 層 j 番目のダンパー軸方向力、 \hat{K}_{dei} : i 層のダンパー弾性部軸剛性である。

本節では、X方向入力時には $j=③$ のダンパーを、Y方向入力時には $j=④$ のダンパー（その1の図2）を対象とする。両図より、入力方向によらずOS1入力時のほうがART HACHIに比べて $|\hat{\epsilon}_{dpi}|_{max}$ が大きい傾向がみられる。これは、その1の表2に示すように建物モデルの弾性1次固有周期が4.5~5.5秒程度であり、これに対応する応答スペクトル（その1の図7）に差があるからであると考えられる。

4. 疲労性能曲線の作成方法

本報では、文献2)~4)の座屈拘束ブレースの疲労性能曲線（以降、S-N曲線と呼称）をもとに、本報において定義する平均的な全歪振幅-繰返し回数関係をもつ座屈拘束ブレースのS-N曲線を用いる（式(2)）。式(2)は、同文献に示されたS-N曲線の各繰返し回数に対応する全歪振幅

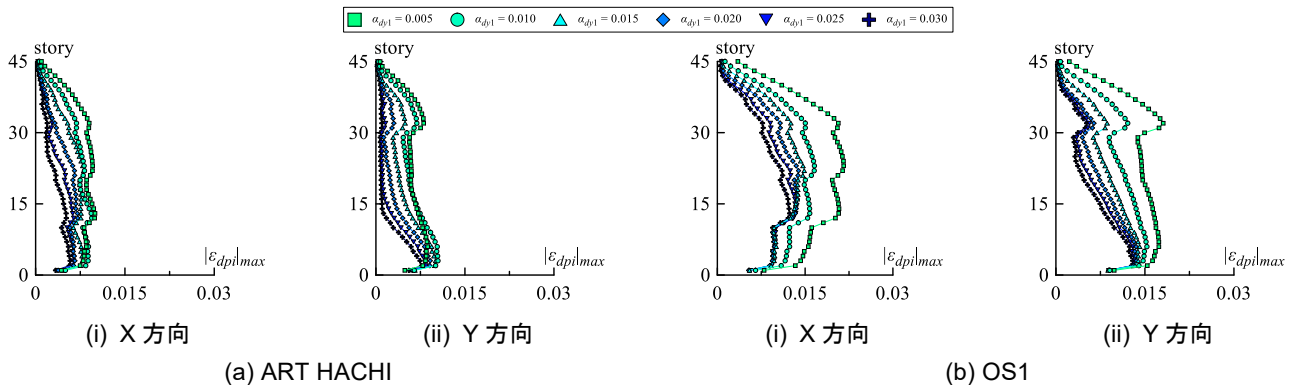


図1 最大塑性化部歪の高さ方向分布

の平均値を算出することで描ける曲線を累乗近似し、さらに値を調整することにより作成した。

$$\Delta\epsilon_{dp} = 18N^{-0.46} \quad (2)$$

図2に縦軸を全歪振幅 $\Delta\epsilon_{dp}$ [%], 横軸を破断までの繰返し回数 N [回]とする曲線を示す。なお本検討では、疲労限度はないものと仮定する。

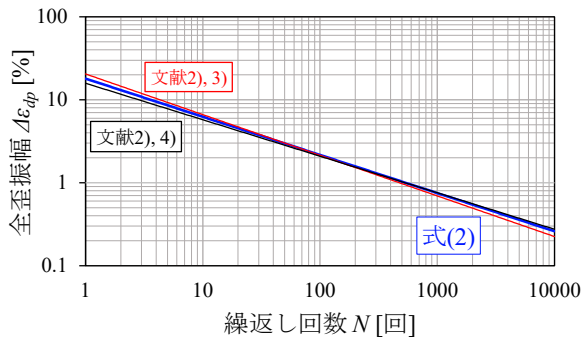


図2 S-N 曲線

5. 疲労損傷評価方法

本章では、時刻歴応答解析によって得られたダンパー塑性化部歪の時刻歴 $\epsilon_{dpj}(t)$ から、レインフロー法を用いて各歪振幅区間における頻度分布を算出する方法について述べる。

はじめに、レインフロー法を用いて S-N 曲線 (図2) により、各歪振幅 k における破断までの繰返し回数 $n^{(k)}$ を算出する。次に、算出した各歪振幅の頻度分布および疲労回数により累積疲労損傷度 (以降、 D 値と呼称) を算出する。本報では、各ダンパーの D 値の算出にあたり、式(3)に示すマイナー則を用いる。

$$D = \sum D^{(k)} = \sum \frac{n^{(k)}}{N_d^{(k)}} \quad (3)$$

ここで、 $D^{(k)}$: k 番目の振幅での損傷度、 $n^{(k)}$: k 番目の振幅での繰返し回数 [回]、 $N_d^{(k)}$: 破断までの繰返し回数 [回] である。

6. 時刻歴応答解析によるダンパー疲労損傷評価

本章では、ART HACHI および OS1 入力時のダンパー塑性化部歪の時刻歴 $\epsilon_{dpj}(t)$ から、歪の振幅とその繰返し回数を算出し、ダンパーの疲労損傷評価を行う。

6.1 累積疲労損傷度高さ方向分布による検討

本節では、 D 値の高さ方向分布より、各層の設置ダンパーの疲労損傷評価を行う。図3に、ART HACHI および OS1 入力時におけるダンパー量 α_{dp1} をパラメータとする D-Model における各層の D 値の高さ方向分布をそれぞれ示す。同図より、入力波およびその入力方向によらず、ダンパー量の増大とともに各層ダンパーの D 値は小さくなる傾向がみられる。また、X 方向入力時にはダンパー③で、Y 方向入力時にはダンパー④ (その1の図2) において各層で D 値が最も大きくなる傾向がみられた。X 方向入力時には入力波の種類によらず低層部～中層部で D 値が大

きくなる傾向がみられる。ただし、ダンパー量が大きくなるにつれて中層部の D 値は急激に小さくなる傾向がみられる。一方で、Y 方向入力時には入力波の種類によらず低層部で D 値が大きくなる傾向がみられる。特に、 $\alpha_{dp1} = 0.020, 0.030$ では中層部よりも上層では D 値は限りなく 0 に近い値をとり、ダンパーの損傷度は低いといえる。また、ダンパー量および入力方向によらず、OS1 入力時のほうが ART HACHI に比べて各層ダンパーの D 値は、X 方向で最大約 13 倍、Y 方向で最大約 21 倍の値をとった。その1の図7に示した通り、D-Model の1次固有周期は 4.5～5.5 秒程度であり、OS1 はこの周期帯において疑似速度応答スペクトルおよびエネルギースペクトルが増大していることから、 D 値に顕著な差が生じたと考える。

6.2 全歪振幅頻度分布および疲労損傷度分布による検討

本節では、図3の D 値高さ方向分布において、ダンパー量にかかわらず D 値が大きくなる傾向がみられた第13層 (X 方向入力時) および第3層 (Y 方向入力時) で、特に D 値が大きくなったダンパー③およびダンパー④ (その1の図2) を対象に、各歪振幅区間 m における全歪振幅頻度分布および D 値分布を示す。なお、歪振幅区間は ART HACHI 入力時に、最小値 0, 最大値 0.02, OS1 入力時に、最小値 0, 最大値 0.04 として、この範囲を 50 分割 ($m = 1 \sim 50$) することにより設定する。

図4および図5に、ART HACHI および OS1 入力時の縦軸を m 番目の歪振幅区間における区間カウント数 $n^{(m)}$ 、横軸を全歪振幅 $\Delta\epsilon_{dp}$ とする全歪振幅頻度分布を示す。同図より、入力波の種類、ダンパー量によらず、歪振幅の増大に伴いその発生頻度は少なくなっていることが確認できる。また、ダンパー量が小さいほど歪振幅の頻度分布は広範囲に分布していることが確認できる。ダンパー量の増大に伴い、微小な歪振幅を伴うサイクル数が増加し、大きな歪振幅を伴うサイクル数は少なくなっていることが確認できる。また、入力波の種類によらず、Y 方向入力時のほうが X 方向入力時に比べて各歪振幅区間におけるサイクル数は概ね大きくなる傾向がみられる。

図6および図7に、ART HACHI および OS1 入力時の縦軸を m 番目の歪振幅区間における区間損傷度 $D^{(m)}$ 、横軸を全歪振幅 $\Delta\epsilon_{dp}$ とする歪振幅区間ごとの D 値分布を示す。図4および図5より、歪振幅の増大に伴いその発生頻度は少なくなっていることを確認したが、図6および図7より、入力波の種類によらず、歪振幅が大きくなるほど、これに対応する区間損傷度 $D^{(m)}$ は大きな値をとる傾向が確認できる。これは式(2)より、 $\Delta\epsilon_{dp}$ に対して N がべき乗で増加するからである。この傾向より、微小な歪振幅を伴う繰返し回数は総繰返し回数の大部分を占めるものの、 D 値の増大にはほとんど寄与しないと考えられる。一方で、大きな歪振幅を伴う繰返し回数は少ないものの、各層のダンパーの疲労損傷度に及ぼす影響は大きいといえる。OS1 入力時には、ART HACHI に比べて各歪振幅区間における $D^{(m)}$ が顕著に大きくなることを確認できる。

7. まとめ

本報その2では、その1で対象としたダンパー量をパラメータとする履歴型ダンパーを有する超高層制振建物モデルに2種類の地震動を入力して時刻歴応答解析を行い、得られたダンパーの歪履歴データにレインフロー法を適用してダンパーの疲労損傷評価を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 累積疲労損傷度の高さ方向分布より、入力波によらず、ダンパー量の増大とともに各層ダンパーの D 値は小さくなる傾向がみられた。また、OS1 入力時のほうが ART HACHI に比べて、各層の D 値は X 方向で最大約 13 倍、Y 方向で最大約 21 倍大きくなっていることが確認できた。
- (2) 全歪振幅頻度分布より、入力波の種類、ダンパー量によらず、歪振幅の増大に伴いその発生頻度は少なくなることが確認できた。また、ダンパー量が小さいほど歪振幅の頻度分布は広範囲に分布するが、ダンパー量の増大に伴い、微小な歪振幅を伴うサイクル数が増加することを確認した。
- (3) 疲労損傷度分布より、入力波の種類によらず、歪振幅が大きくなるほど、これに対応する区間損傷度 $D^{(m)}$ は大きな値をとる傾向を確認した。これより、微小な歪振幅を伴う繰返し回数は総繰返し回数の大部分を占めるものの、ダンパーの疲労損傷にはほとんど影

響しない。一方で、大きな歪振幅の影響はサイクル数が少ないものの大きい。

今後は、風応答時の D 値との比較を行うことにより、地震応答時の D 値との特性の違いについて分析する予定である。

謝辞

本研究は、(株)竹中工務店、東京科学大学佐藤大樹研究室による共同研究の成果の一部を用いたものです。ここに記して感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 遠藤達雄, 松石正典, 光永公一, 小松角一, 高橋清文: 「Rain Flow Method」の提案とその応用, 九州工業大学研究報告(工学), No.28, pp33-62, 1974.3
- 2) 一般社団法人 日本免震構造協会: パッシブ制振構造設計・施工マニュアル 第4版 別冊1, 2024.6
- 3) 日鉄エンジニアリング株式会社: 「アンボンドブレース®」入手先 <https://www.eng.nipponsteel.com/steelstructures/wp/wp-content/uploads/2022/08/UBB_202208.pdf>, (参照 2024-11-6)
- 4) JFE シビル株式会社: ハーフ十字ブレースダンパー入手先 <<https://www.jfe-civil.com/pdf/catalog/half.pdf>>, (参照 2024-11-6)

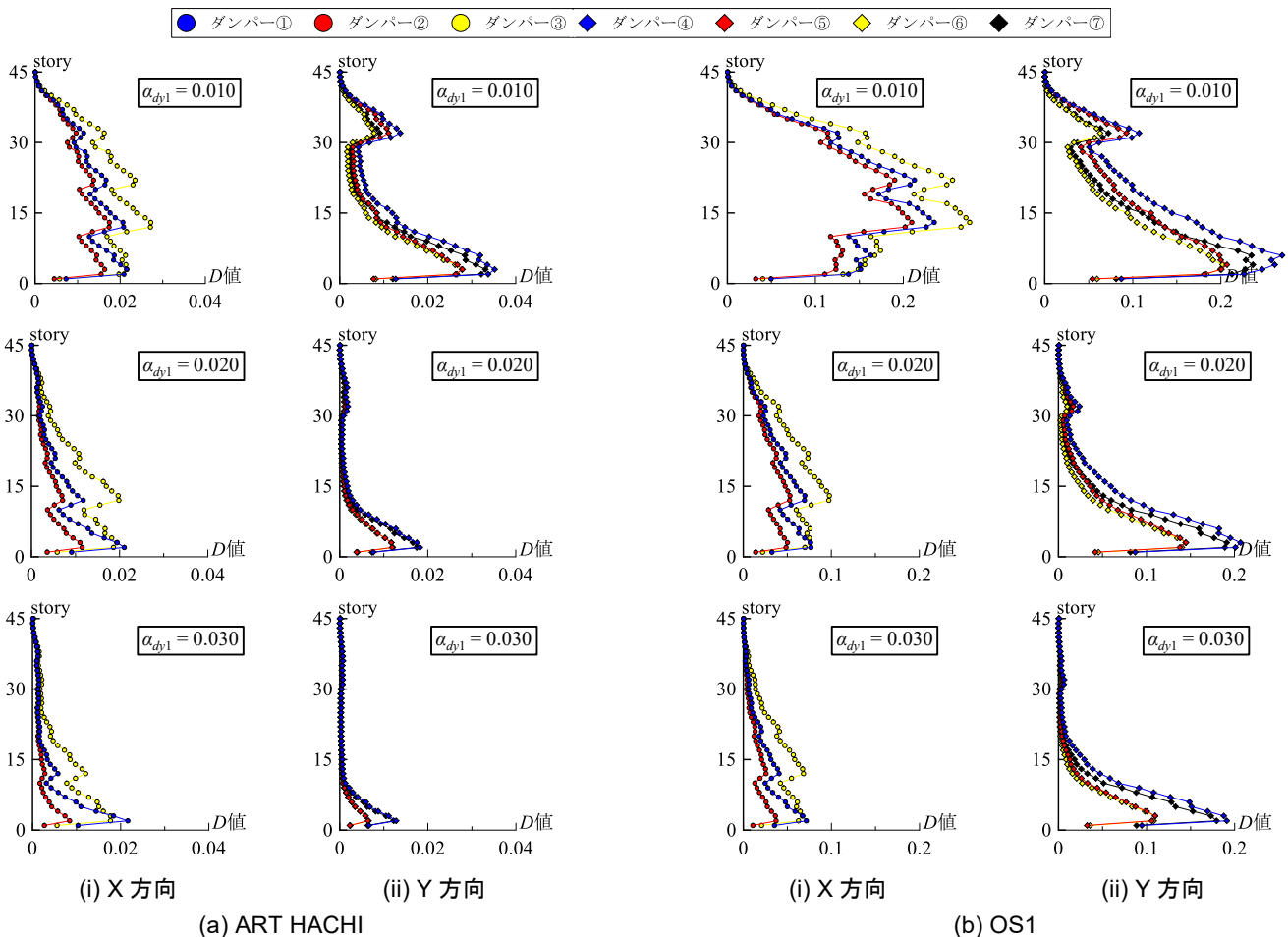


図3 D 値高さ方向分布

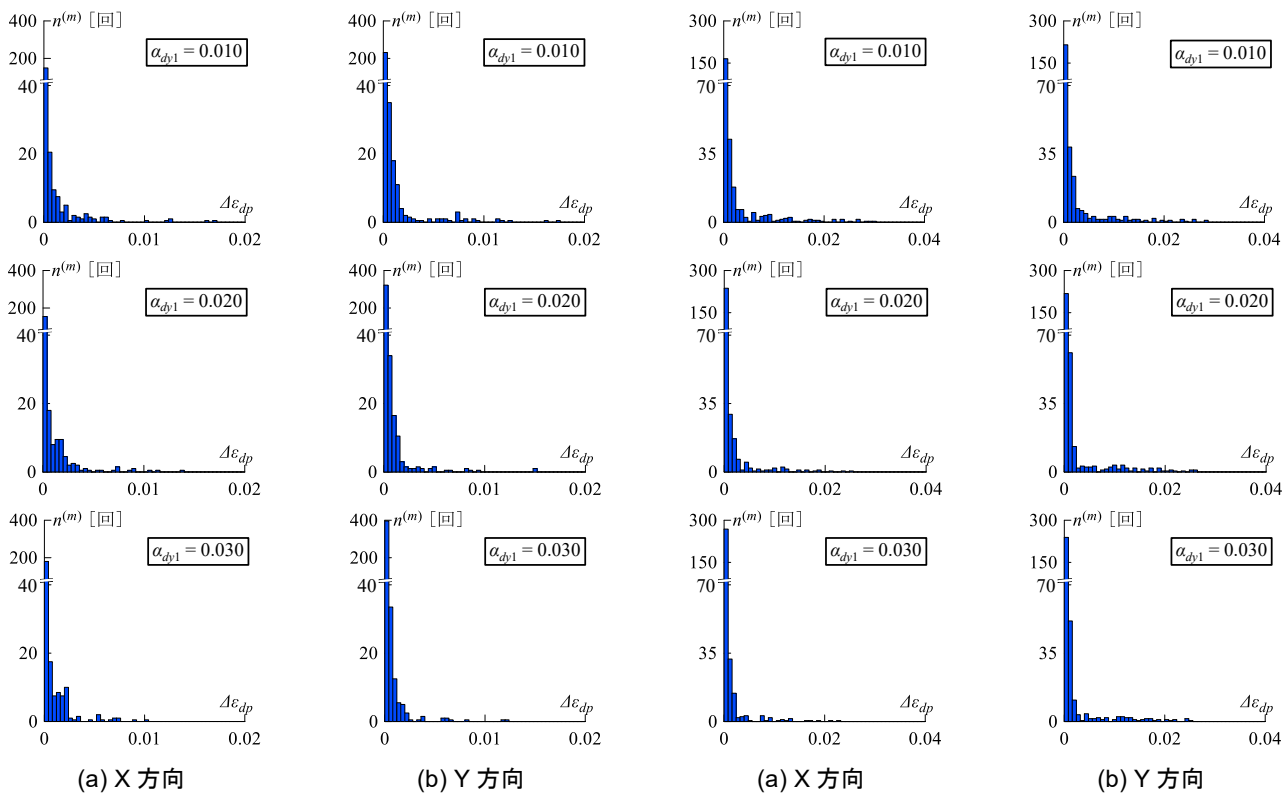


図4 歪振幅頻度分布 (ART HACHI)

図5 歪振幅頻度分布 (OS1)

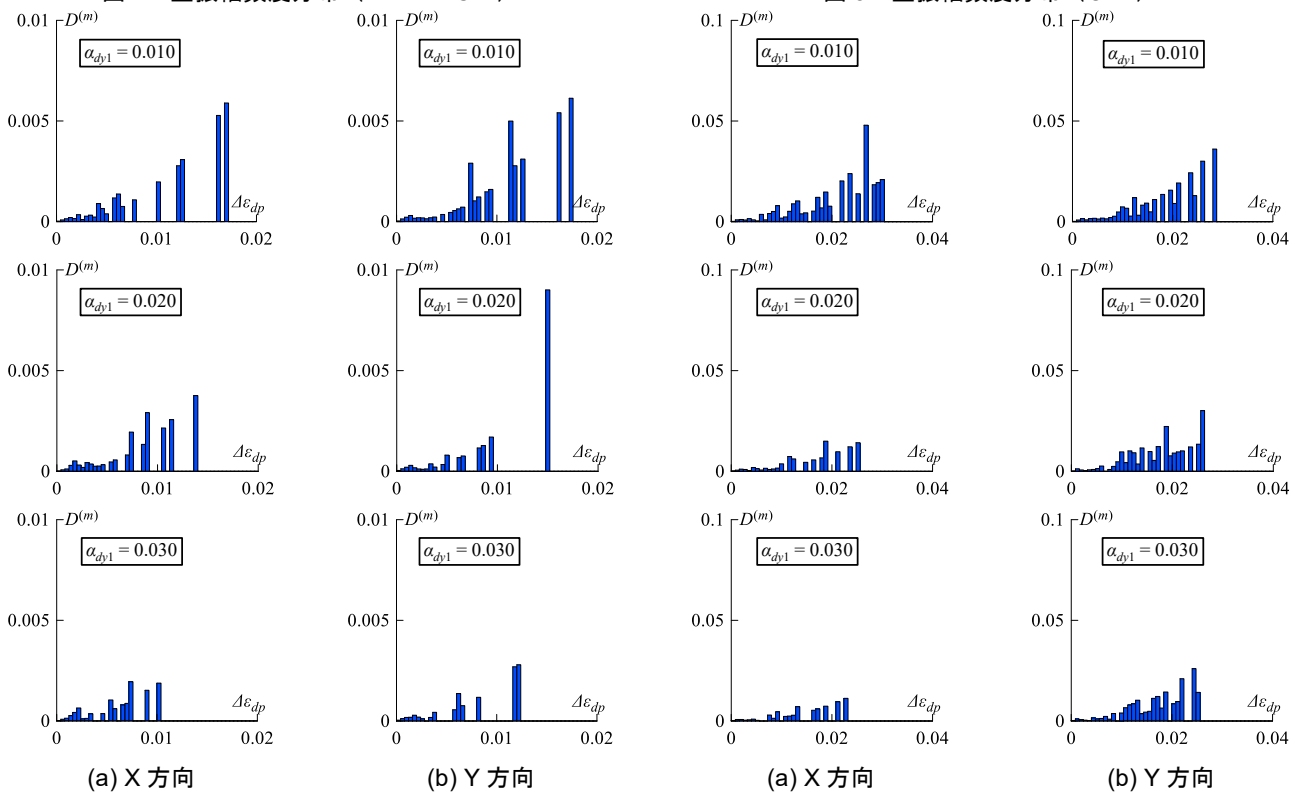


図6 区間損傷度分布 (ART HACHI)

図7 区間損傷度分布 (OS1)

*1 東京科学大学 大学院生

*2 東京科学大学 総合研究院 准教授・博士 (工学)

*3 東京科学大学 総合研究院 助教・博士 (学術)

*4 株式会社竹中工務店 技術研究所

Graduated Student, Institute of Science Tokyo*1

Associate Prof., IIR, Institute of Science Tokyo, Dr.Eng.*2

Assistant Prof., IIR, Institute of Science Tokyo, Ph.D.*3

Research & Development Institute, Takenaka Corporation*4