T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	履歴型ダンパーを有する超高層制振建物の塑性化および累積損傷分布予測 その2 予測の妥当性
Title(English)	Prediction method of damper yield and cumulative damage distribution of high-rise building with hysteretic damper Part.2 Validity of prediction
著者(和文)	平塚紘基, 佐藤大樹, 田中英之
Authors(English)	Koki Hiratsuka, Daiki Sato, Hideyuki Tanaka
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Ⅰ, , pp. 505-508
Citation(English)	, Ⅰ, , pp. 505-508
発行日 / Pub. date	2020, 3

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

2019年度日本建築学会
関東支部研究報告集 I
2020年3月

履歴型ダンパーを有する超高層制振建物の塑性化および累積損傷分布予測

その 2　予測の妥当性

構造ー振動

正会員 ○ 平塚紘基[*1]　正会員　佐藤大樹[*2]
正会員　田中英之[*3]

超高層制振建物　履歴型ダンパー　風応答解析
累積損傷分布

1. はじめに

本報その 1 では，ダンパーを設置していない非制振モデルおよびダンパーを設置した制振モデルを対象とし，時刻歴応答解析の効率を高めることを目的に，質点数を低下させた縮約モデルの精度について検討した。その結果，わずかな誤差があるものの応答値が概ね一致しており，それぞれの縮約モデルの妥当性を示すことができた。

本報その 2 では，縮約後の制振モデルにおけるダンパーの塑性化の簡易予測手法の提案, 佐藤ら [7]が提案した累積分布予測の本検討モデルへの適合性について検討する。

2. 応答値比較

本章では，縮約後の制振モデルと非制振モデルの時刻歴応答解析の応答値の比較を行う。

Fig. 1(a)～(c)に制振モデル（ダンパー量α_{dy1}＝0.01，0.02，0.04）および非制振モデルの層間変形角 R，速度 V，加速度 A を示す。なお，応答値は 12 波の解析結果をアンサンブル平均している。Fig. 1(a)の層間変形角より，風方向，風直交方向ともに，ダンパー量が増えるにつれて応答値が低下していることがわかる。代表例としてα_{dy1}＝0.02 における風方向と風直交方向の最大応答値の低減を比較すると，応答値が風方向においては 0.6 倍，風直交方向においては 0.35 倍となっており，風直交方向における応答値の方が大きく低減していることが確認できる。Fig. 1(b)の速度より，層間変形角と同様に，ダンパー量が増えるにつれて，応答値が低下していることわかる。代表例としてα_{dy1}＝0.02 における風方向と風直交方向の最大応答値の低減を比較すると，応答値が風方向においては 0.7 倍，風直交方向においては 0.4 倍となっており，層間変形角と同様に風直交方向における応答値の方が大きく低減していることが確認できる。Fig. 1(c)の加速度より，風方向および風直交方向ともに，どのダンパー量においても，応答値が同程度の低減となっていることがわかる。代表例としてα_{dy1}＝0.02 における風方向と風直交方向の最大応答値の低減を比較すると，応答値が風方向においては 0.97 倍，風直交方向においては 0.6 倍となっており，層間変形角，速度と同様に風直交方向における応答値の方が大きく低減していることが確認できる。

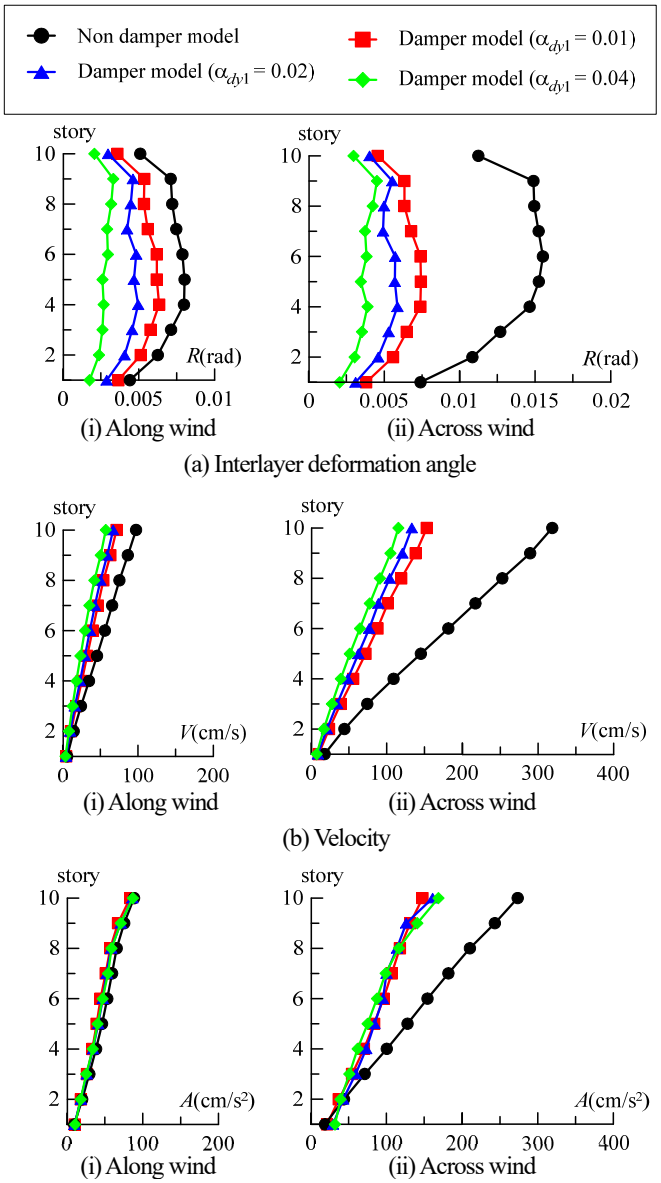


Fig. 1 Comparison of response

Prediction method of damper yield and cumulative damage distribution of high-rise building with hysteretic damper
Part.2　Validity of prediction

Koki HIRATSUKA , Daiki SATO , Hideyuki TANAKA

3. ダンパーの塑性化予測

3. 1. 制振モデル弾性時における層せん断力

制振モデル弾性時における風荷重算出条件は，地表面粗度区分III，建物地点が東京(U_0 = 36 m/s，U_{500} = 40 m/s)であり，小地形の影響，季節係数及び風向係数は考慮しない。また，モード，減衰定数，固有振動数は制振モデルの値とする。制振モデルの減衰定数ξ'は次式より得られる。

$$\xi' = \frac{{}_1\omega'_f}{{}_1\omega'} \cdot \xi_f \tag{1}$$

ここで，ξ'_f：非制振モデルの減衰係数，${}_1\omega'_f$：非制振モデルの 1 次固有円振動数，${}_1\omega'$：制振モデルの 1 次固有円振動数を表す。また，制振モデル弾性時の風方向層せん断力 ${}_{WD}Q'_i$ および風直交方向層せん断力 ${}_{WL}Q'_i$ は，式(2)，(3)で表される。

$${}_{WD}Q'_i = \sum_{j=i}^{10} W'_{Dj} \tag{2}$$

$${}_{WL}Q'_i = \sum_{j=i}^{10} W'_{Lj} \tag{3}$$

ここで，W'_{Dj}：風方向における j 層の風荷重，W'_{Lj}：風直交方向における j 層の風荷重を表す。なお，W'_{Dj} および W'_{Lj} の算出には，建築物荷重・同解説に基づき，AIJ-Wind(ver.1)[10]用いた。

3. 2. 制振モデル降伏層せん断力

制振モデルの降伏層せん断力 Q'_{yi} は以下の算定式を用いて算出する。

$$Q'_{yi} = Q'_{fi} + Q'_{ayi} \tag{4}$$

ここで，Q'_{fi}：付加系降伏変位時の非制振モデルの層せん断力を表し，式(5)で表される。

$$Q'_{fi} = k'_{fi} \cdot \delta'_{ayi} \tag{5}$$

3. 3. ダンパーの塑性化予測の妥当性

Fig. 2(a) ~ (c)にα_{dy1} = 0.01 ~ 0.04 における制振モデルのせん断力 Q'および累積塑性変形δ'_pを示す。Fig. 2(i)は，制振モデル降伏時の層せん断力 Q'_{yi} が制振モデル弾性時の層せん断力 ${}_{WD}Q'_i$，${}_{WL}Q'_i$を下回るとダンパーが塑性化することを表している。また Fig. 2(i)の青丸は，ダンパーが風方向に対して塑性化することを，赤丸はダンパーが風直交方向に対して塑性化することを示している。

ダンパーの塑性化予測において，はじめに Fig. 2(a)(i)より，風方向に対して 6 層目から 1 層目，風直交方向に対して 9 層目から 1 層目の範囲で塑性化する予測となった。次に Fig. 2 (b)(i)より，風方向に対して 5 層目から 1 層目，風直交方向に対して 8 層目から 1 層目の範囲で塑性化する予測となった。最後に Fig. 2 (c)(i)より，風方向に対して全層が塑性化せず，風直交方向に対して 6 層目から 1 層目の範囲で塑性化する予測となった。

以上のダンパーの塑性化予測を踏まえて，解析結果によるダンパーの塑性化範囲を比較する。Fig. 2(ii)において，δ'_p が 0 以上である場合，ダンパーが塑性化したことを表している。また矢印の範囲は，ダンパーの塑性化予測範囲を表している。なお，解析結果は 12 波の結果と 12 波のアンサンブル平均をそれぞれ示している。

はじめに風方向について比較を行う。全てのα_{dy1}において，塑性化予測範囲が解析結果の塑性化範囲よりも小さく評価されていることが確認できる。これは，AIJ-Wind[10]で算出した層せん断力が時刻歴応答解析における応答層せん断力に比べ低く評価されており（付録 A），その影響から予測範囲が小さく評価されたと考えられる。しかし，予測範囲以上の塑性化は，累積塑性変形が小さく（付録 B），ダンパーが弾性状態に近いことから，予測は妥当であると判断できる。

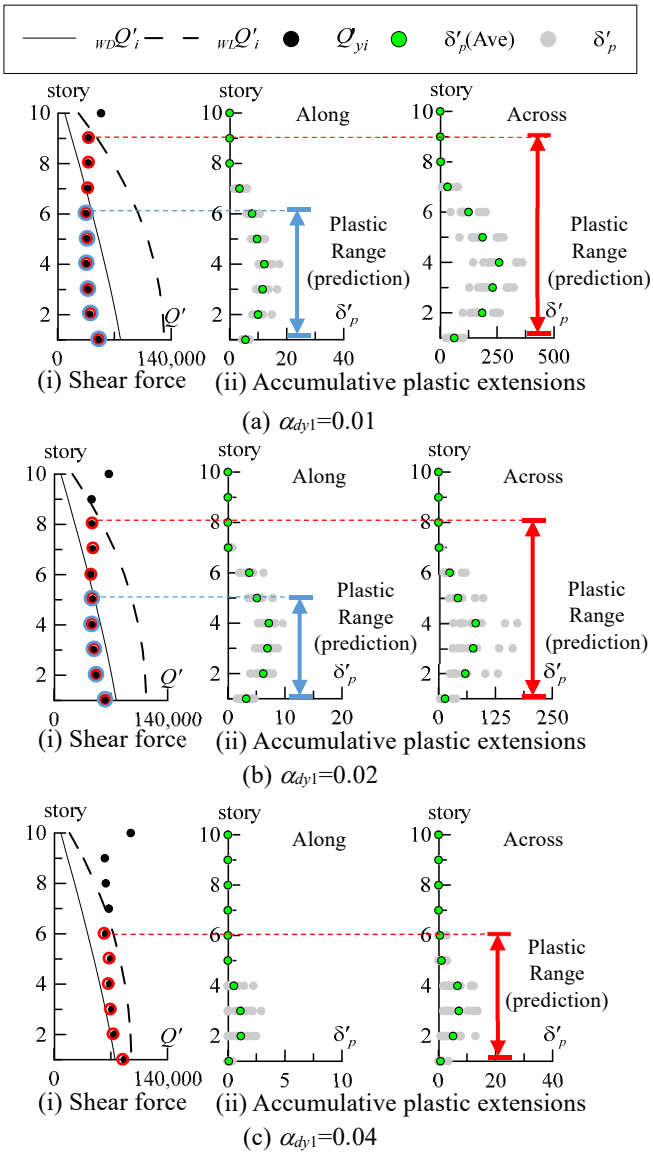


Fig. 2 Shear force and Accumulative plastic extensions

次に風直交方向について比較を行う。風直交方向は，全てのα_{dy1}で，ダンパーの塑性化予測範囲が解析結果に比べ，わずかに大きく評価されているものの，概ね一致していることが確認でき，予測が妥当であると判断できる。

4. 累積損傷分布の予測

4. 1. ダンパー吸収エネルギー

Fig. 3(a) ~ (c)に各ダンパー量の弾塑性解析より得られたダンパー吸収エネルギーW'_dの高さ方向分布を示す。なお，Fig. 3 は，12 波の解析結果と，12 波のアンサンブル平均をそれぞれ示している。

Fig. 3 より，ダンパー量に関係なく風直交方向の方が風方向よりもダンパーの吸収エネルギーが大きくなっていることが確認できる。これは，制振モデル降伏時における層せん断力 Q'_{yi} と制振モデル弾性時における風直交方向層せん断力 $_{WL}Q'_i$ の差が大きいこと （Fig. 2）が影響していると考えられる。また，ダンパー量が増えるにつれて，風方向，風直交方向ともにダンパー吸収エネルギーが小さくなっていることが確認できる。これは，ダンパー量が増えるにつれて降伏層せん断力が大きくなり，小さな荷重レベルでダンパーが塑性化していないことが影響していると考えられる。

4. 2. 累積損傷分布予測結果

Fig. 4(a) ~ (c)にダンパー量 1% ~ 4%の累積損傷分布 $1/\gamma'_{di}$ の予測結果および解析結果を示す。なお，$1/\gamma'_{di}$ は式(6)で表される。

$$\frac{1}{\gamma'_{di}} = \frac{W'_{di}}{\sum_{j=1}^{10} W'_{dj}} \tag{6}$$

また，$1/\gamma'_{di}$ の予測式の詳細については，参考文献 7)を参照されたい。本報では予測式の精度確認のために，時刻歴応答解析の結果を用い，12 波の解析結果をアンサンブル平均している。

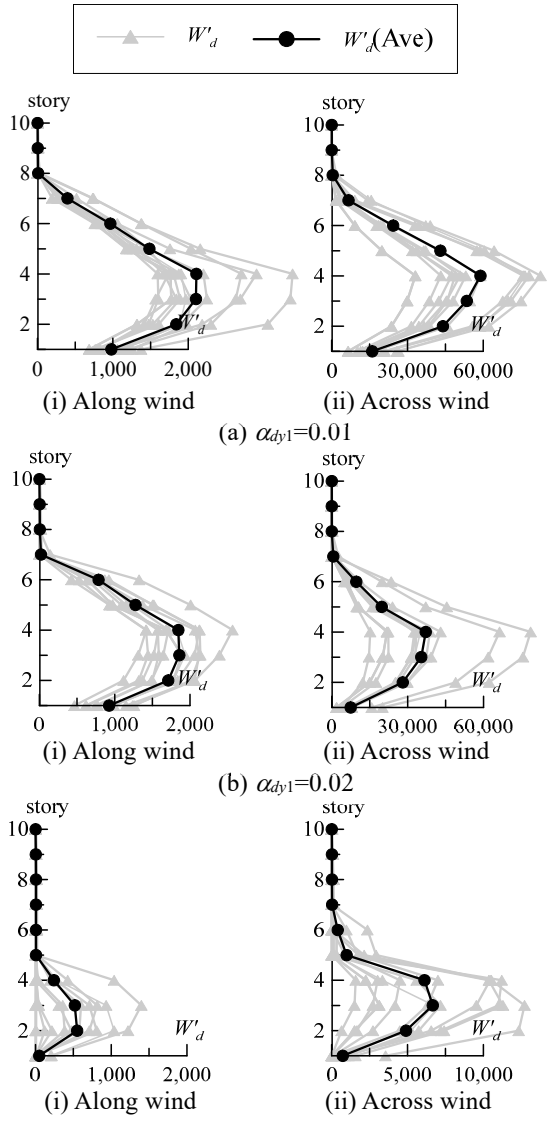


Fig. 3 absorption energy of damper

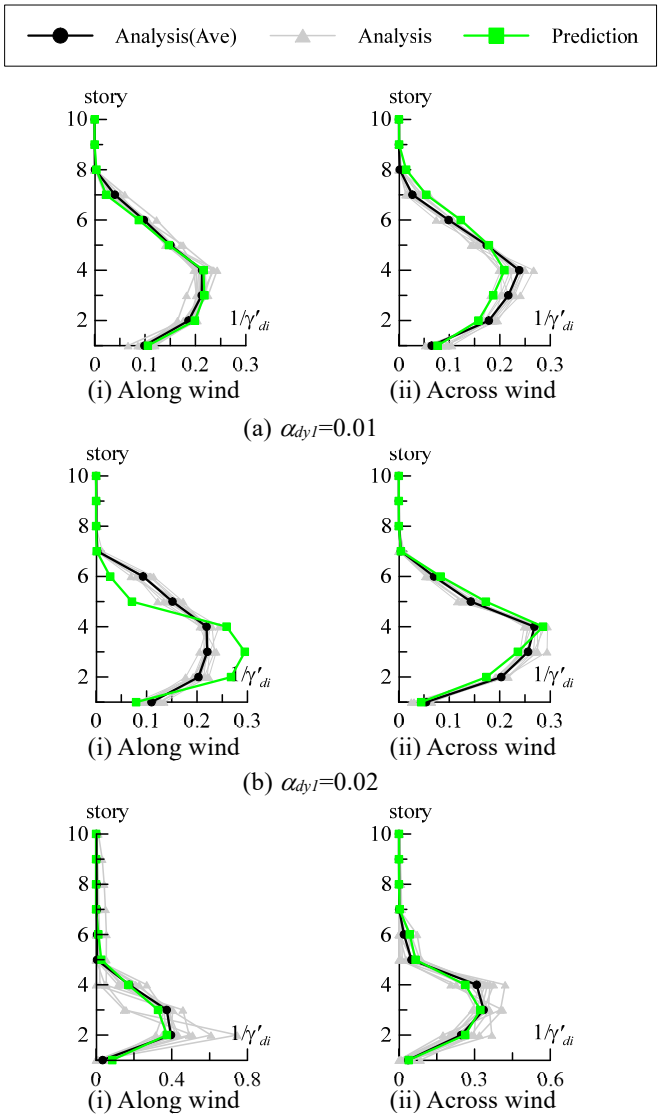


Fig. 4 Accumulative damage distribution

はじめに，Fig. 4 の弾塑性時刻歴応答解析結果に着目すると，上層に比べ，中間層・下層のダンパー累積損傷分布が大きいことが確認できる。これは，最適分布に比べ，中間層・下層における付加系の降伏せん断力分布が小さくなっていることが影響していると考えられる（付録 C）。

次に，予測値と時刻歴応答解析結果の比較を行う。Fig. 4(b)(i)より，累積損傷が大きくなる層のみ正確に予測できているが，全体的な予測は他の結果と比べ精度が低下していることが確認された。一方，Fig. 4(b)(i)を除いて，予測値と時刻歴応答解析結果が精度よく一致していることが確認された。

5. まとめ

本報その 2 では，その 1 で縮約した制振モデルにおける，ダンパーの塑性化の簡易予測手法の提案および佐藤ら [7]が提案した累積損傷分布予測式の本検討モデルにおける適合性について検討を行った。以下に得られた知見を示す。

1) ダンパーの塑性化予測において，予測と解析結果を比較すると，わずかな誤差はあるものの，概ね一致することが確認された。このことより，本報で提案したダンパーの塑性化予測手法は妥当であると考える。
2) ダンパーの累積損傷分布予測において，一部予測と解析結果で誤差が大きくなる場合もあるが，その他は予測値を解析結果が精度よく一致することが確認された。このことにより，佐藤ら [7]が提案したダンパーの累積損傷分布予測式は，全層でダンパーが塑性化しないモデルにおいても概ね解析結果と一致することがわかった。

謝辞

本研究の一部は, JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラムによるものです。ここに記して感謝の意を示します。

参考文献

1) 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，2013.10
2) 佐藤大樹、長江拓也，大内隼人，島田侑，北村春幸，福山國夫，梶原浩一，井上貴仁，中島正愛，斉藤大樹，福和伸夫 ：長周期地震動を受ける超高層建物の鋼製ダンパーによる制振改修に関する E-ディフェンス振動台実験，日本建築学会構造系論文集，第 76 巻，第 667 号，pp.1639-1648，2011.9
3) 木原碩美，浅野美次，國津博昭，吉江慶祐: 風と構造フォルム超高層・タワー，建築技術，pp.164-181，2000.7
4) 大熊武司，神田順，田村幸雄 ：建築物の耐風設計，鹿島出版会，2004.6
5) 吉江慶祐，北村春幸，大熊武司，和田章 ：時刻歴応答解析結果におけるアンサンブル平均のばらつき，日本建築学会学術講演梗概集，pp.233-234，2005.7
6) 秋山宏 ：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計，技報道出版，1997
7) 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，Vol.81，No.728，pp.1635-1645，2016.10
8) 佐藤大樹，笠井和彦，田村哲郎 ：粘弾性ダンパーの振幅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，No.635，pp.75-82，2001.1
9) 岡日出夫，笠井和彦，渡井一樹，佐藤大樹，前田周作、鈴木庸介 ：建築物のさらなる高層化に向けた曲げせん断モデル化手法の提案　その 2　既往手法の適用限界とその要因，日本建築学会学術講演梗概集，2019.9
10) 日本建築学会荷重運営委員会 http://news-sv.aij.or.jp/kouzou/s10/AIJ_Wind.html(2019.6.7 参照)

付録 A　10 質点制振モデルの層せん断力比較

Fig. A に α_{dy1} = 0.04 における 10 質点制振モデルの AIJ-Wind[10]にて算出した弾性時の層せん断力 ${}_{WD}Q'_i$，${}_{WL}Q'_i$ と弾性解析の応答層せん断力 ${}_{WD}Q'_i$ (Analysis)，${}_{WL}Q'_i$ (Analysis)の結果を示す。Fig. A より，風直交方向の層せん断力は概ね一致しているものの，風方向においては，AIJ-Wind[10]にて算出した層せん断力の方が解析結果よりも低く評価されていることが確認できる。

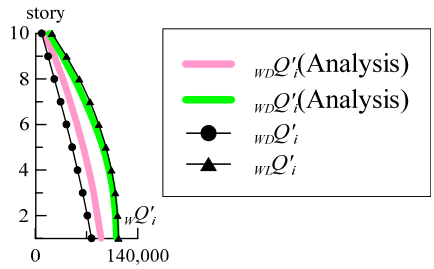
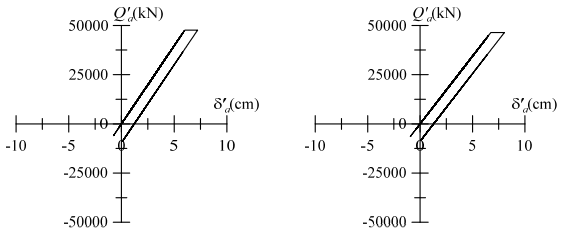


Fig. A　Comparison of shear force (α_{dy1} = 0.04)

付録 B　付加系のせん断力 Q'_a – 変形 δ'_a 履歴曲線（α_{dy1} = 0.04）

Fig. B に 10 分間風外力下における 2 層目と 3 層目の付加系のせん断力 Q'_a – 変形 δ'_a 履歴 曲線（α_{dy1} = 0.04）を示す。Fig. B より，累積塑性変形が小さく，わずかしかエネルギー吸収を行わないことから，概ね弾性状態と判断することができる。



(a) 2th story　　(b) 3th story

Fig. B　Q'_a - δ'_a curve（α_{dy1} = 0.04）

付録 C　付加系の降伏せん断力比

Fig. C に付加系の降伏せん断力比分布 Q'_{ayi}/Q'_{ay1} を示す。Fig. C より，上層においては付加系のせん断力分布が最適分布 Q'_i/Q'_1 より大きいものの，中間層・下層におけるせん断力比分布が最適分布に比べ小さくなっていることが確認できる。このことにより，中間層・下層にエネルギーが集中したことが考えられる。

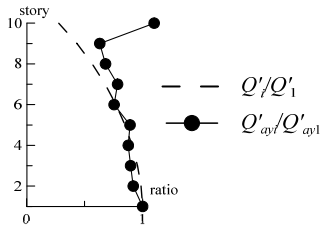


Fig. C　Yield strength ratio of

*1 東京工業大学環境・社会理工学院　大学院生　Graduate Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology
*2 東京工業大学未来産業技術研究所　准教授・博士（工学）　Associate Prof. , FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
*3 株式会社　竹中工務店　Takenaka Corporation