

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	履歴ダンパーを有する鉄骨構造建物におけるシステム1次適合せん断モデルの提案と検証
Title(English)	Shear model based on first natural frequency of steel structure building with hysteretic dampers
著者(和文)	澤侑弥, 佐藤大樹, 戸張涼太, 太木本仁志, 吉永光寿, 安永隼平, 金城陽介
Authors(English)	Yuya Sawa, Daiki Sato, Ryota Tobari, Hitoshi Takimoto, Mitsutoshi Yoshinaga, Jumpei Yasunaga, Yosuke Kaneshiro
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 497-500
Citation(English)	, , , pp. 497-500
発行日 / Pub. date	2020, 3

履歴ダンパーを有する鉄骨構造建物におけるシステム1次適合せん断モデルの提案と検証

構造—振動

制振構造 履歴ダンパー 静的解析

実効変形比 鉄骨構造建物 1次固有周期

正会員 ○ 澤 侑弥 *1 正会員 佐藤 大樹*2
 // 戸張 涼太*3 // 太木本仁志*1
 // 吉永 光寿*3 // 安永 隼平*4
 // 金城 陽介*5

1. はじめに

制振構造は制振ダンパーの粘性減衰エネルギー、塑性履歴エネルギーの消散することで、建物の振動エネルギーを軽減させることにより、建物の振動および主架構の損傷を低減させるものである。

石井・笠井の手法¹⁾より算出された骨組特性値および擬似ブレース剛性を用いた制振性能評価手法は、静的解析のみから得られる実効変形比（フレームの層間変形に対するダンパーの水平変形成分）の上限値と下限値の予測値を制振性能評価指標としている。古谷らは、文献 1) の評価指標を用い、30 層鉄骨構造建物を対象として、時刻歴応答解析することなく、有効な制振部材の配置形式および投入量の判断を行える評価指標の検討を行った²⁾。また、戸張らは、中層から超高層の建物モデルを対象として、時刻歴応答解析により、アスペクト比の異なる建物の応答低減効果の違いについて検討した。また、骨組特性値を用いた制振性能評価手法を複数の建物にも適用し、その有効性を確認した³⁾。骨組特性値を用いた実効変形比を考慮するせん断モデル化、および評価指標は複数の建物に適用が可能であり、簡易的に制振性能評価できることが確認されている。

本報では、既往のせん断モデル¹⁻³⁾よりも、より直感的にモデル作成を行うことが可能な実効変形比を考慮したシステム1次適合せん断モデルの提案を行う。本手法は主架構のみおよびダンパーを含む部材構成モデル、それぞれの固有値解析結果から擬似ブレース（曲げ変形成分のみを考慮したバネ）剛性を計算し、作成する。部材構成モデル、骨組特性値より作成を行うせん断モデルおよび本手法によるせん断モデルの実効変形比、各応答値の比較検討を行い、本手法の妥当性を確認する。

2. 解析モデル概要

2.1 検討対象建物

以下に、部材構成モデル（以下、Mモデル）概要を記す。検討対象建物は、21階建ての鉄骨構造建物とする³⁾。Fig.1 に軸組図および基準階伏図を示す。階高は1層4.5m、2~21層3.8mとした。Table1 に建物諸元を示す。主

架構のみの1次固有周期は2.56s、総重量128416kNであった。本報では主架構は弾性とする。また、構造減衰は1次固有周期に対して減衰定数 $h = 2\%$ となる初期剛性比例型とする。本報ではX方向のみ検討を行う。

2.2 ダンパー概要

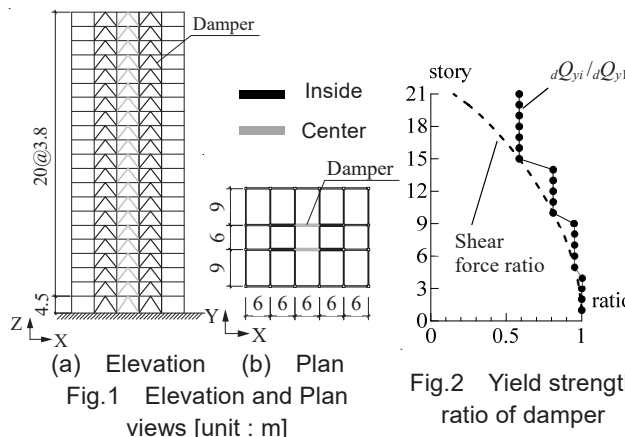
建物高さ方向のダンパー配置は Fig.1 に示すように連層配置とし、平面配置位置には、Inside, Center 配置の2種を用いる。ダンパーは履歴型ダンパーとして座屈拘束ブレースを用い、塑性化部と弾性部で構成される。部材長さ L_d に対して塑性化部長さ $L_d/3$ 、塑性化部断面積 A_d に対して弾性部断面積 $2A_d$ とする。塑性化部には LY225 材を用い、完全弾塑性とする。文献3)に基づき、 aQ_{y1} を基準とし、地震層せん断力係数の高さ方向分布 (A_i 分布) に基づく設計用層せん断力分布をもとに4段階とした (Fig.2)。 aQ_{y1} と第1層のダンパーの降伏層せん断力係数 $a\alpha_{y1}$ の関係は次式で表される。

$$aQ_{y1} = a\alpha_{y1} \sum_{i=1}^N m_i \cdot g \tag{1}$$

ここで、 N は層数、 m_i は第 i 層の質量、 g は重力加速度を表す。

Table1 Model specifications

Column	□-450×450×16×16 ~ □-600×600×40×40
Girder	BH-600×300×12×32 ~ BH-800×200×14×19
Natural period	2.56 [s]
Weight	128416 [kN]



2.3 S^(NR)モデル概要

骨組特性値より作成するせん断モデル（以下、S^(NR)モデル）の概要を以下に記す。Fig.4にMモデルとS^(NR)モデルの対応関係を示す。S^(NR)モデルのバネ系は、擬似フレーム、擬似ダンパー、擬似ブレースより構成される（Fig.3(b)）。

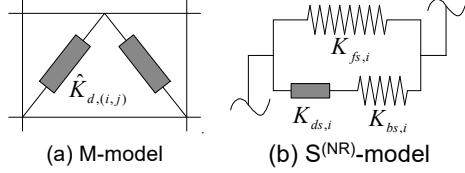


Fig.3 Outline of M and S^(NR)-model

擬似フレーム層剛性 $K_{fs,i}$ は主架構のみの M モデルにおける i 層の質量 m_{fi} が与えられている場合、1次固有振動数及び、1次モード変位がそれぞれ ${}_1\omega_f$, ${}_1\phi_f$ となるような n 質点系モデルでは次式により順次求められる⁴⁾。

$$K_{fs,i} = \frac{{}_1\omega_f^2 \cdot m_{fi} \cdot {}_1\phi_{f,i} + K_{fs,i+1} ({}_1\phi_{f,i+1} - {}_1\phi_{f,i})}{{}_1\phi_{f,i} - {}_1\phi_{f,i-1}} \quad (2)$$

S^(NR)モデルにおけるダンパーのモデル化手法は文献 1) に従い、骨組特性値¹⁾を用い、以下に設定方法を記す。骨組特性値は、ダンパーを設置しない主架構のみの弾性部材モデル（状態 N）と、主架構の制振部材取付位置に極端に剛性の高い弾性バネを設置した（状態 R）、2つの静的解析結果から得られる（Fig.4）。

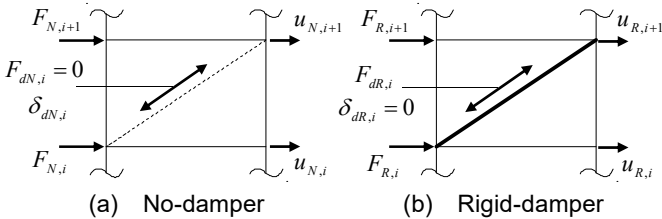


Fig.4 No-damper and Rigid-damper analysis

状態 N 解析は、主架構のみの弾性部材モデルの各層に A_i 分布などの外力を作用させ、 i 層の層剛性 $K_{N,i}$ 、 i 層 j 番目の付加系設置位置についての $\alpha_{N,(i,j)}$ の骨組特性値が算出できる。付加系設置箇所における相対変形の水平成分 $\delta_{dN,(i,j)}$ の層間変形 $\delta_{N,i}$ に対する比 $\alpha_{N,(i,j)}$ は式(3)で求められる。

$$\alpha_{N,(i,j)} = \frac{\delta_{dN,(i,j)}}{\delta_{N,i}} \quad (3)$$

擬似ブレース剛性 $K_{bs,i}$ は状態 R 解析により算出できる。 i 層 j 番目の付加系の負担軸力の水平成分 $F_{dR,(i,j)}$ と i 層の層間変形 $\delta_{N,i}$ で剛性 $K_{dR,(i,j)}$ (式(4)) を各付加系設置箇所について計算し、 i 層のダンパー総数を $N_{d,i}$ とすると、擬似ブレース剛性 $K_{bs,i}$ を得られる (Fig.3(b))。

$$K_{dR,(i,j)} = \frac{F_{dR,(i,j)}}{\delta_{N,i}} \quad (4)$$

$$K_{bs,i} = \sum_{j=1}^{N_{d,i}} \alpha_{N,(i,j)} \cdot K_{dR,(i,j)} \quad (5)$$

S^(NR)モデルではダンパー量に寄らず、各配置形式に対して1つの K_{bs} を得る。Fig.5に α_N の平均値および K_{bs} を示す。 α_N は概ね全層で、Center > Inside となり、 K_{bs} は最上層を除いた全ての層で Inside > Center の関係となった。

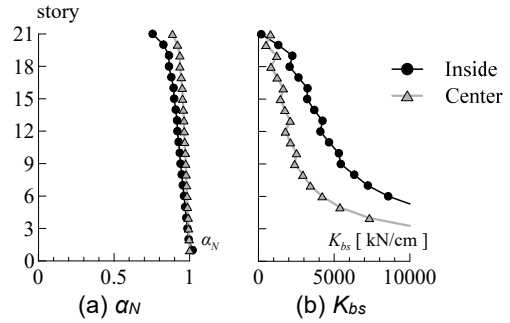


Fig.5 α_N and K_{bs} (S^(NR)-model)

Mモデルの i 層 j 番目の軸方向ダンパー剛性を $\hat{K}_{d,(i,j)}$ 、降伏耐力 $\hat{F}_{dy,(i,j)}$ 、 i 層におけるダンパーの取付角度 θ とすると、 i 層の擬似ダンパーは式(6)で表される (Fig.3(b))。

$$K_{ds,i} = \sum_{j=1}^{N_{d,i}} (\alpha_{N,(i,j)})^2 \cdot \hat{K}_{d,(i,j)} \cdot \cos^2 \theta_i \quad (6a)$$

$$F_{dys,i} = \sum_{j=1}^{N_{d,i}} \alpha_{N,(i,j)} \cdot \hat{F}_{dy,(i,j)} \cdot \cos \theta_i \quad (6b)$$

なお、S^(NR)モデルも主架構および構造減衰は M モデルと同様とし、ダンパーの二次剛性比は0とする。

3. システム1次適合せん断モデル

ダンパーを有する M モデルの1次固有振動数 ${}_1\omega$ と1次モード変位 ${}_1\phi$ に着目した、システム1次適合せん断モデル(以下、S^(sys)モデル)の提案を行う。S^(sys)モデル概要をFig.6に示す。

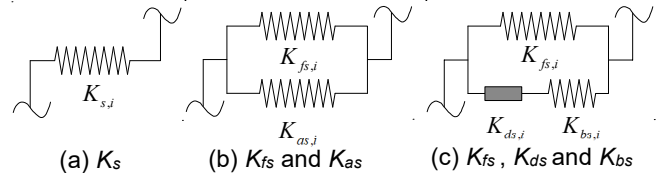


Fig.6 S^(sys)-model

ダンパーを含む M モデルにおいて、 i 層の質量 m_i 、1次固有振動数および、1次モード変位がそれぞれ ${}_1\omega$, ${}_1\phi$ となるような n 質点系モデルのシステム層剛性 $K_{s,i}$ を次式により求める (Fig.6(a))。

$$K_{s,i} = \frac{{}_1\omega^2 \cdot m_i \cdot {}_1\phi_i + K_{s,i+1} ({}_1\phi_{i+1} - {}_1\phi_i)}{{}_1\phi_i - {}_1\phi_{i-1}} \quad (7)$$

擬似フレーム剛性は式(2)と同様であり、擬似フレームと付加系バネは並列の関係であることから式(8)より、付加系の剛性 $K_{as,i}$ を得る (Fig.6(b))。

$$K_{as,i} = K_{s,i} - K_{fs,i} \quad (8)$$

なお、付加系は擬似ダンパーと擬似ブレースより構成されている。Mモデルの i 層 j 番目の軸方向剛性 $\hat{K}_{d,(i,j)}$ 、ダンパ

一本数 $N_{d,j}$, i 層のダンパー取付角度 θ_i , とすると擬似ダンパー $K_{ds,i}$ は式(9a)で求められる。また, M モデルの i 層 j 番目の軸方向降伏耐力 $\hat{F}_{dy,(i,j)}$ とすると擬似ダンパーの降伏耐力は式(9b)で表される。

$$K_{ds,i} = \sum_{j=1}^{N_{d,j}} \hat{K}_{d,(i,j)} \times \cos^2 \theta_i \quad (9a)$$

$$F_{dsy,i} = \sum_{j=1}^{N_{d,j}} \hat{F}_{dy,(i,j)} \times \cos \theta_i \quad (9b)$$

また, 擬似ダンパーと擬似ブレースは直列関係 (Fig.6(c)) であることから, i 層の擬似ダンパー剛性 $K_{bs,i}$ は式(10)より求められる。

$$K_{bs,i} = \left(\frac{1}{K_{as,i}} - \frac{1}{K_{ds,i}} \right)^{-1} \quad (10)$$

ただし, 下層部で, $K_{bs,i} < 0$ となるモデルにおいては, $K_{bs,i} = \infty$ とする。また, 上層部において, $K_{fs,i} > K_{s,i}$ となる場合については, $K_{as,i} = 0$ とし $K_{fs,i} = K_{s,i}$ とする。S^(NR)モデルの K_{bs} は配置形式に対して1つであるが, 本手法における K_{bs} はダンパー量毎に算出される。Fig.7にS^(sys)モデルの K_{bs} の高さ方向分布を示す。Inside 配置形式においてダンパー量の増加に伴い, $K_{bs,i}$ は大きくなる傾向が見られた。Center 配置においても同様の傾向が見られたが, Inside 配置に比べてわずかであった。また, 全てのダンパー量で K_{bs} は Inside > Center の関係になり, ダンパー量の増加に伴い, S^(NR)モデルの K_{bs} に近づいていく傾向を示した。

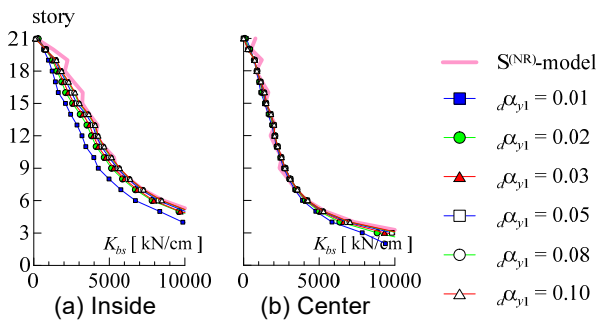


Fig.7 $K_{bs}(S^{(sys)}\text{-model})$

4. 入力地震動概要

HACHINOHE1968EW の位相特性 (以下, ART HACHI) を使用する。Fig.8 に入力地震動波形を示す。また, Fig.9(a) に速度応答スペクトル, (b) にエネルギースペクトルを示す。

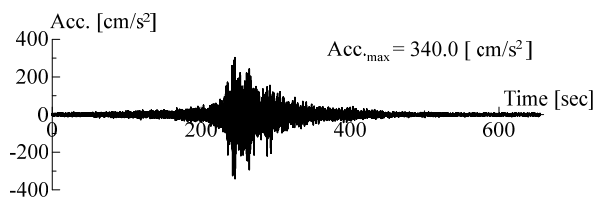


Fig.8 Acceleration time history

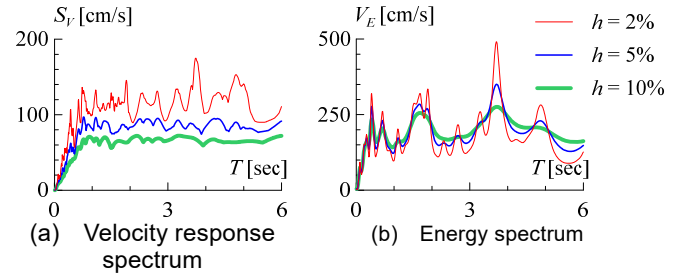


Fig.9 Earthquake motion spectrum

5. 解析結果

5.1 固有周期評価

Table2 に各配置形式の 1~3 次固有周期 ($T_1 \sim T_3$) を示す。M モデルにおいて, ダンパー量の増加に伴い各次固有周期は短くなる傾向を示し, S^(NR), S^(sys)モデルにおいても同様の傾向を示した。全モデルにおいて, T_1 は M モデルと一致することが確認できる。 T_2 における Inside 配置では, M モデルに対して 1.07~1.18, Center 配置では, 1.07~1.16, T_3 における Inside 配置では, M モデルに対して 1.14~1.35, Center 配置では, 1.14~1.33 とダンパー量が増加するにつれ, また, 高次モードになるにつれ M モデルよりも長く評価される傾向が見られた。

Table2 Natural period

$d\alpha_{y1}$	T_n	Natural period [s]					
		Inside			Center		
		① M	② S ^(NR)	③ S ^(sys)	④ M	⑤ S ^(NR)	⑥ S ^(sys)
0.01	T_1	2.32	2.32	2.32	2.35	2.35	2.35
	T_2	0.82	0.88	0.88	0.83	0.89	0.89
	T_3	0.48	0.54	0.54	0.48	0.55	0.55
0.02	T_1	2.19	2.19	2.19	2.26	2.26	2.26
	T_2	0.77	0.84	0.84	0.79	0.86	0.87
	T_3	0.44	0.52	0.52	0.45	0.53	0.54
0.03	T_1	2.11	2.11	2.11	2.21	2.21	2.21
	T_2	0.74	0.81	0.81	0.77	0.84	0.85
	T_3	0.42	0.50	0.50	0.43	0.52	0.53
0.05	T_1	2.01	2.01	2.01	2.15	2.15	2.15
	T_2	0.69	0.78	0.78	0.73	0.82	0.83
	T_3	0.39	0.48	0.49	0.41	0.51	0.52
0.08	T_1	1.94	1.94	1.94	2.11	2.11	2.11
	T_2	0.65	0.75	0.76	0.71	0.81	0.82
	T_3	0.36	0.47	0.47	0.39	0.50	0.51
0.10	T_1	1.90	1.91	1.90	2.09	2.09	2.09
	T_2	0.63	0.74	0.75	0.70	0.80	0.81
	T_3	0.35	0.46	0.47	0.38	0.50	0.51

5.2 実効変形比による検討

M, S^(NR), S^(sys)モデルの実効変形比 (以下, α_e) の比較を行い, モデルの精度を検討する。S^(NR), S^(sys)モデルにおける α_e の定義を以下に記す。 i 層の擬似フレームの最大水平変位 $u_{fs,i,max}$, 擬似ダンパーの最大水平変位 $u_{ds,i,max}$ とすると α_e は式(11)で求められる。

$$\alpha_{e,i} = \frac{u_{ds,i,max}}{u_{fs,i,max}} \quad (11)$$

Fig.10 に各モデルの α_e をそれぞれ示す。Inside, Center 配置共に, $d\alpha_{y1} = 0.01 \sim 0.03$ で最下層から全体の 2/3 層までは M モデルと概ね一致する。ダンパー量が増加すると M モデルに近づいていく傾向がある。S^(sys)モデルも S^(NR)モデルと同等の評価をすることが可能である。

5.3 最大応答値評価

Fig.11 に最大応答値を示す。図中に示す R_{bs} モデルは擬似ブレースを剛としたせん断モデルであり、加速度応答以外 M モデルと大きな誤差を示した。しかし、高さ方向における加速度応答では、大きな誤差を生じた。実効変形比を考慮してモデル化する重要性がわかる。全ての最大応答値で $S^{(NR)}$ 、 $S^{(sys)}$ モデルは一致する。 α_e と同様に、 $S^{(sys)}$ モデルでも $S^{(NR)}$ モデルと同等の結果になることが確認できる。

6. まとめ

本報では、フレームのみ、およびダンパーを含む部材構成モデルの固有値解析からモデル作成を行う、システム 1 次適合せん断モデルの提案を行った。M モデル、 $S^{(NR)}$ モデルおよび、本手法による $S^{(sys)}$ モデルの各次固有周期、実効変形比、および各最大応答値の比較を行い、本手法の妥当性を確認した。以下に知見を記す。

- 1) 固有周期において、1 次固有周期 T_1 は M、 $S^{(NR)}$ モデルと一致した。また、実効変形比、最大応答値においては $S^{(NR)}$ モデルと同等の結果となり、 $S^{(sys)}$ モデルのモデル化における妥当性を確認した。

- 2) $S^{(NR)}$ モデルは、状態 N、R 解析の二つの解析のみで済むが、 $S^{(sys)}$ モデルは、各ダンパー量に応じて、M モデルを作成する必要があり、 $S^{(NR)}$ モデルに比べ、作成モデルが増えてしまう欠点がある。しかし、 $S^{(NR)}$ モデルよりも直感的にモデル化を行うことが可能である。

本知見は 21 層モデルにおける 2 種の配置形式のみの検討であるため、今後は他の配置形式、アスペクト比での検証を行う必要がある。

謝辞

本報は JFE シビル株式会社、JFE スチール株式会社、東京工業大学佐藤研究室の共同研究の成果の一部まとめたものです。JFE スチール株式会社の植木卓也氏には本報を執筆する上で貴重なご意見を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。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。

【参考文献】

- 1) 石井正人、笠井和彦：多層制振構造の時刻歴応答解析に用いるせん断棒モデルの提案，日本建築学会構造系論文集，Vol.75，No.647，pp.103-112，2010.1
- 2) 古谷慶，添田幸平，佐藤大樹，北村春幸，石井正人，吉江慶祐，宮崎充，佐々木和彦，岩崎雄一：履歴ダンパーを有する超高層弾性架構の実効変形比に着目した制振性能評価，構造工学論文集，Vol.58B，pp.197-207，2012.3
- 3) 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
- 4) 佐藤大樹，笠井和彦，田村哲郎：粘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，No.635，pp.75-82，2001.1

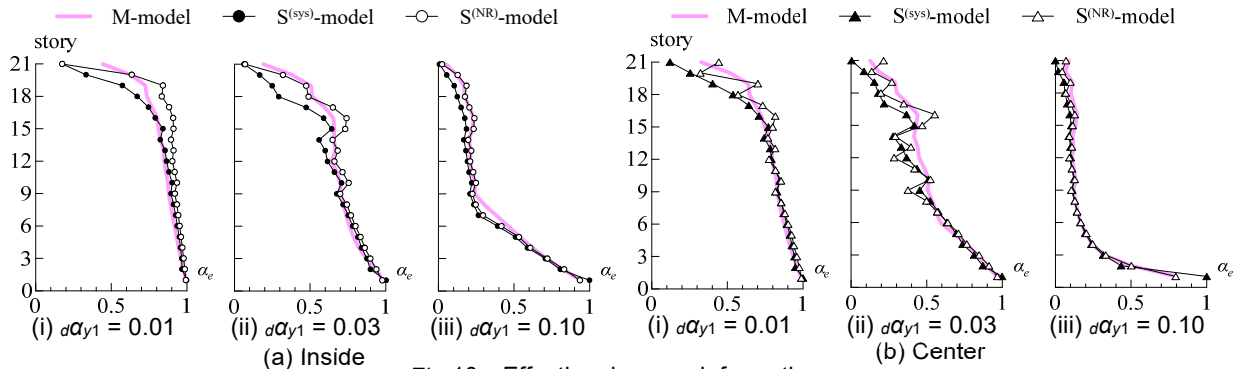


Fig.10 Effective damper deformation

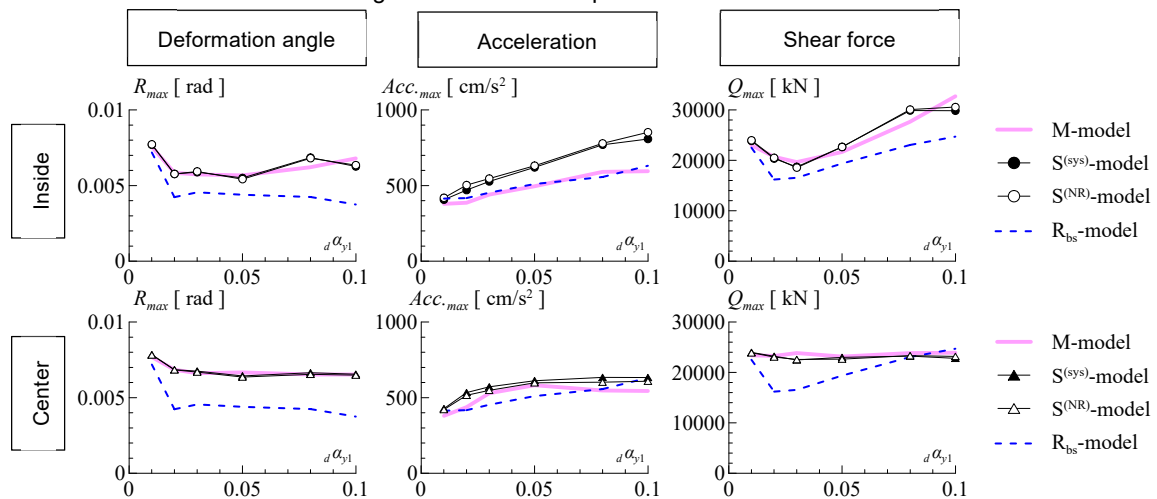


Fig.11 Maximum response

*1 学生会員 東京工業大学 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 JFE シビル株式会社
 *4 JFE スチール株式会社 博士(工学)
 *5 JFE スチール株式会社

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology *1
 Associate Professor, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng. *2
 JFE Civil Engineering & Construction Corporation *3
 JFE Steel Corporation, Dr.Eng. *4
 JFE Steel Corporation *5