

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	架構の一部に配置された鋼板耐震壁の簡易モデル化手法の構築
Title(English)	Simplified modeling method for steel plate shear walls placed in part of the frame
著者(和文)	高野智樹, 佐藤大樹, 陳引力, 森岡宙光, 佐藤唯
Authors(English)	Tomoki Takano, Daiki Sato, Yinli Chen, Hiromitsu Morioka, Yui Sato
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, I, , pp. 229-232
Citation(English)	, I, , pp. 229-232
発行日 / Pub. date	2026, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

架構の一部に配置された鋼板耐震壁の簡易モデル化手法の構築

構造—鉄骨構造

正会員 ○ 高野智樹^{*1} 正会員 佐藤大樹^{*1}
 〃 陳引力^{*1} 〃 森岡宙光^{*2}
 〃 佐藤唯^{*3}

鋼板耐震壁 スチフナ補剛 連層
FEM 解析 非線形解析 簡易モデル化

1. 序

鋼板耐震壁は、建築物の架構内に設置される耐震要素の一つであり、主に水平剛性および耐力の確保に用いられ、壁面の裏と表で直交するように補剛スチフナが配置される。安永ら¹⁾は、周辺架構を含む試験体を用いて載荷実験による性能検証を行い、その実験を再現できるような、部材すべてをシェル要素でモデル化した FEM モデル(以下、詳細 FEM モデル)の検討がされた。しかし、詳細 FEM モデルは膨大な解析時間を要するため、実務には適していない。そのため、より簡易なモデルとして、架構を線材要素、鋼板耐震壁(以下、壁)を平面応力要素で再現したモデル(以下、簡易 FEM モデル)が用いられることがあるが、このモデルが詳細 FEM モデルをどの程度再現できているかは不明である。そこで、渡邊ら^{2), 3)}は周辺架構を含む壁の詳細 FEM モデルの応力状態を再現できるような簡易 FEM モデルの構築を行ったが、検討に用いられたモデルでは架構に設置された壁幅が限定的(壁のアスペクト比=1.28)であり、壁のアスペクト比を変化させた場合の適用性について十分な検討がなされていない。そこで、本報ではアスペクト比の異なる壁が間柱を介して架構の一部に配置された場合のモデルについて検討を行う。

2. 解析概要

対象建物は鉄骨造地上 20 階建ての事務所ビル⁴⁾とし、設計階層は 10 層目、スパンは 6400 mm、階高は 4000 mm である。また、柱は□-650×650×28、梁は H-800×300×16×32

であり、使用材料は SN490 である。なお、本報では、壁が梁を介して連層で配置されることを想定して、3 層を連層配置したうち、中間層である 2 層目について分析する。

2.1 詳細 FEM モデル概要

Fig.1 に詳細 FEM モデル(Detail-FEM)、Table 1 にモデル諸元を示す。材料特性は 2 次剛性が弾性剛性の 1/60、3 次剛性が弾性剛性の 1/1000 となるようなトリリニア型とし、降伏強度 $\sigma_y=325\text{ N/mm}^2$ 、引張強度 $\sigma_b=490\text{ N/mm}^2$ とした。また、下梁は剛とし、全方向の移動と回転を拘束した。なお、解析ソフトには汎用構造解析プログラム ABAQUS ver.2024⁵⁾を用いる。解析モデル名は、部材すべてをシェル要素(S4)でモデル化したものを Detail-FEM と称し、架構スパンの 1/4 または 3/4 に間柱を、その左側に鋼板耐震壁を配置する。壁のアスペクト比は 1/4 モデルで 3.56、3/4 モデルで 0.78 である。Fig.1 に赤で示す加力面にそれぞれ 6000 kN ずつ載荷し、単調載荷の弾塑性解析を行う。文献 1)と同様、初期不整は固有値解析で得られた 1 次モードを用いて、面外最大変形量が壁高さの 1/1000 になるよう入力した。なお、本報では幾何学的非線形を考慮している。

Table 1 詳細 FEM モデル諸元

解析ケース	壁			
	幅 $D B_w(\text{mm})$	高さ $D H_w(\text{mm})$	板厚 $D t_w(\text{mm})$	せん断降伏強度 $D \tau_y(\text{N/mm}^2)$
1/4 モデル	900	3200	12	187.6
3/4 モデル	4100			

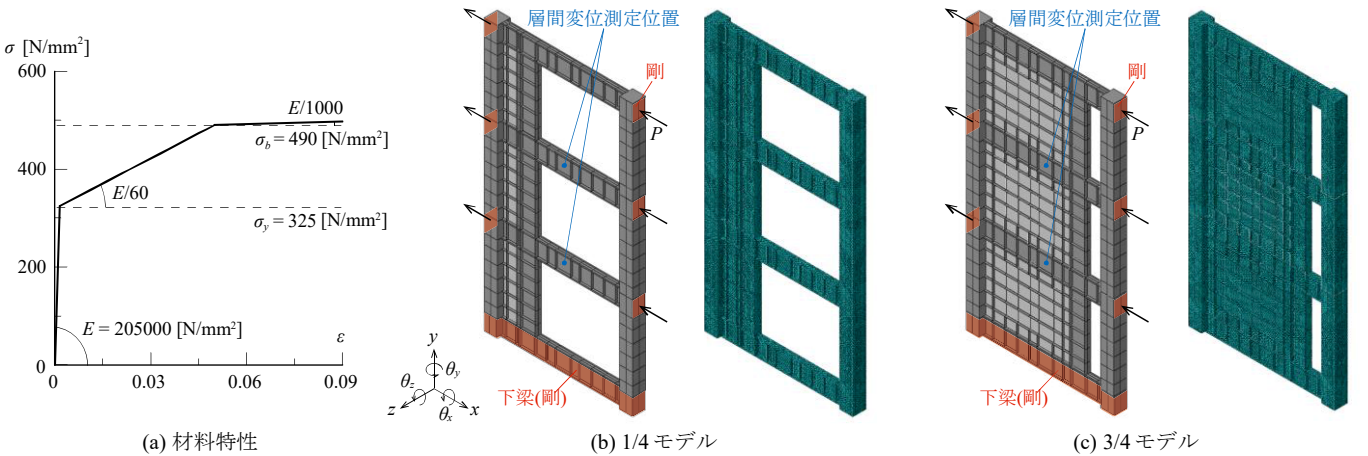


Fig.1 詳細 FEM モデル(Detail-FEM)

Simplified modeling method for steel plate shear walls placed in part of the frame TAKANO Tomoki, SATO Daiki, CHEN Yinli, MORIOKA Hiromitsu, SATO Yui

2.2 簡易 FEM モデル概要

Fig.2 に簡易モデル化概要, Fig.3 に簡易 FEM モデル (Simple-FEM)を示す。簡易 FEM モデルでは、柱をファイバー要素、梁を梁要素、壁を4節点4角形平面応力要素でモデル化し、解析モデル名は Simple-FEM と称す。下梁を剛としてフェイス位置でモデル化し、境界条件・材料特性は詳細 FEM モデルと同様にする。壁のメッシュ分割数は10×10とし、Fig.3に示すように軸力比0の状態では各節点に対し単調載荷の弾塑性解析を行う。なお、解析には汎用構造解析ソフト RESP-F3T ver.3.2.0を用いる。

簡易 FEM モデルにおける壁は、詳細 FEM モデルの壁より架構の断面幅分だけ大きくなるため、壁の剛性とせん断耐力が詳細 FEM モデルと等価となるよう、以下に示す3通りの方法で簡易 FEMモデル諸元を補正し比較を行う。

(i) 詳細 FEM と簡易 FEM のせん断剛性が等価²⁾

詳細 FEM モデルのせん断剛性と簡易 FEM モデルのせん断剛性が等価と仮定すると、簡易 FEM モデルの壁板厚 st_w およびせん断降伏強度 $s\tau_y$ は式(1), (2)のように補正される。

$$st_w = \frac{sH_w}{dH_w} \cdot \frac{dB_w}{sB_w} \cdot dt_w, \quad s\tau_y = \frac{dH_w}{sH_w} \cdot d\tau_y \quad (1), (2)$$

ここで、 sH_w は簡易 FEM モデルの壁高さ、 dH_w は詳細 FEM モデルの壁高さ、 dB_w は詳細 FEM モデルの壁幅、 sB_w は簡易 FEM モデルの壁幅、 dt_w は詳細 FEM モデルの壁板厚、 $d\tau_y$ は詳細 FEM モデルのせん断降伏強度である。

(ii) 詳細 FEM 曲げせん断と簡易 FEM せん断剛性が等価

Fig.4 に要素変形図を示す。本モデルでは板厚が薄く、平面応力要素の剛性が低いため、局所的な変形を示し壁全体として純せん断変形に近い挙動となる。よって、詳細 FEM モデルの曲げせん断剛性と簡易 FEM モデルのせん断剛性が等価と仮定して、簡易 FEM モデルの壁板厚 st_w およびせん断降伏強度 $s\tau_y$ を式(3), (4)のように補正する。

$$st_w = \frac{dK_b}{dK_s + dK_b} \cdot \frac{sH_w}{dH_w} \cdot \frac{dB_w}{sB_w} \cdot dt_w, \quad s\tau_y = \frac{dK_s + dK_b}{dK_b} \cdot \frac{dH_w}{sH_w} \cdot d\tau_y \quad (3), (4)$$

ここで、 dK_b は詳細 FEM モデルの壁の曲げ剛性、 dK_s は詳細 FEM モデルの壁のせん断剛性である。

(iii) 詳細 FEM と簡易 FEM の曲げせん断剛性が等価

詳細 FEM モデルの曲げせん断剛性と簡易 FEM モデルの曲げせん断剛性が等価と仮定すると、簡易 FEM モデルの壁板厚 st_w は式(5)の解となり、せん断降伏強度 $s\tau_y$ は式 (6)のように補正される。

$$E \cdot sB_w \left(\frac{1}{dK_s} + \frac{1}{dK_b} \right) st_w^2 - \frac{E \cdot sH_w}{G} st_w^3 + \left\{ 3E \cdot sB_w^2 (A_{mc} + A_c) \left(\frac{1}{dK_s} + \frac{1}{dK_b} \right) - 5sH_w^3 \right\} st_w - \frac{3E \cdot sB_w \cdot sH_w}{G} (A_{mc} + A_c) = 0 \quad (5)$$

$$s\tau_y = \frac{dt_w}{st_w} \cdot \frac{dB_w}{sB_w} \cdot d\tau_y \quad (6)$$

ここで、 E は弾性係数、 G はせん断弾性係数、 A_{mc} は間柱の断面積、 A_c は柱の断面積である。

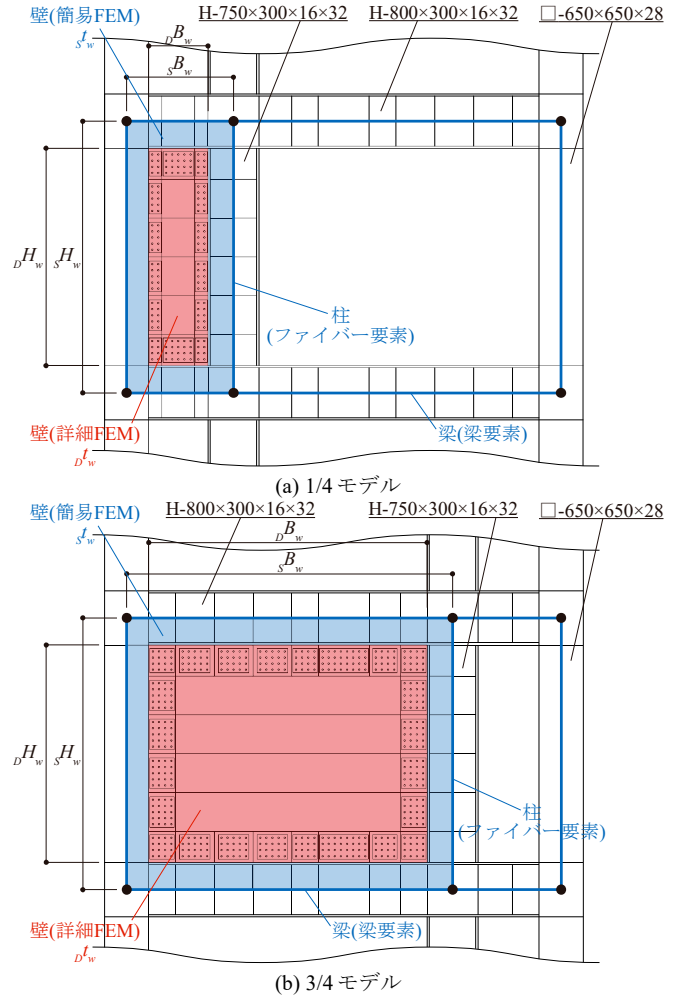


Fig.2 簡易モデル化概要

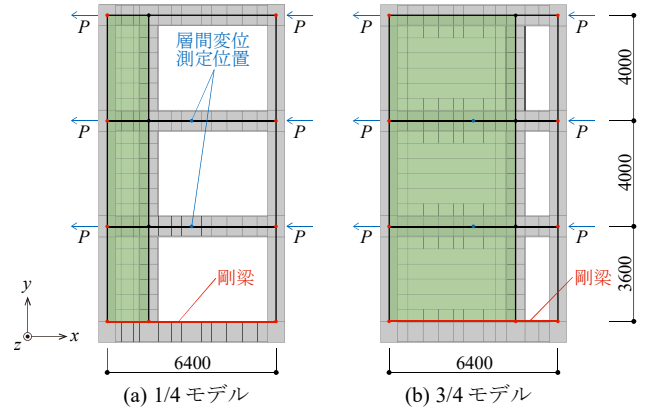


Fig.3 簡易 FEM モデル(Simple-FEM)

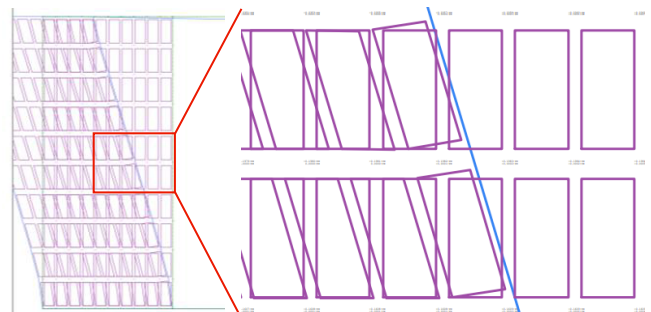


Fig.4 要素変形図

Fig.5 に壁のアスペクト比と補正方法(i)~(iii)による簡易 FEM モデルの補正板厚 s_t^w の関係, Table 2 に 1/4 モデル, Table 3 に 3/4 モデルでの簡易 FEM モデル諸元を示す。Fig.5 より, 補正(i)の詳細 FEM と簡易 FEM のせん断剛性を等価とした場合と比較すると, 補正(ii)の簡易 FEM の曲げ剛性を無視した場合は, 詳細 FEM の曲げせん断変形を表現するために壁の板厚が薄くなるよう補正される。補正(iii)の詳細 FEM と簡易 FEM の曲げせん断剛性を等価とした場合は, 簡易 FEM の曲げ剛性が詳細 FEM よりも小さいため, 壁の板厚が厚くなるよう補正される。

また, 簡易 FEM モデルでは壁諸元の補正を行うため, 応力度評価をするにはせん断応力度の補正を行う必要がある。以下にせん断応力度の評価手順²⁾について示す。

Step 1) 簡易 FEM モデルのせん断応力度 $s\tau$ が詳細 FEM モデルと等価な板厚の場合での応力度になるよう, Step 1 補正後せん断応力度 $s\tau'$ を式(7)により算出する。

$$s\tau' = \frac{s_t^w}{D_t^w} \cdot s\tau \quad (7)$$

Step 2) 壁が塑性化している箇所がある場合, $s\tau'$ が負担する仕事量 sW' と等価な仕事量 sW'' になるよう, Step 2 補正後せん断応力度 $s\tau''$ を式(8)により算出する。

$$s\tau'' = \sqrt{\frac{G}{G_2} \cdot s\tau'^2 + \left(1 - \frac{G}{G_2}\right) \cdot s\tau_y'^2} \quad (sW' \leq \frac{D_t^w}{2G}) \quad (8)$$

$$s\tau'' = \sqrt{s\tau'^2 + \left(1 - \frac{G_2}{G}\right) \cdot (D_t^w)^2 - s\tau_y'^2} \quad (sW' \geq \frac{D_t^w}{2G})$$

ここで, G_2 は 2 次せん断弾性係数であり, せん断降伏強度 $s\tau_y'$ は式(9)で表される。

$$s\tau_y' = \frac{s_t^w}{D_t^w} \cdot s\tau_y \quad (9)$$

3. 弾塑性解析結果

Fig.6 に 2 層目の(a)全体, (b)壁の荷重-変形関係を示す。1/4 モデル, 3/4 モデルともに, 簡易 FEM のせん断剛性と詳細 FEM の曲げせん断剛性を等価とした補正(ii)の諸元を用いた場合に, 壁の弾性剛性が Detail-FEM に最も近い結果となることが確認できる。ただし, 全体の荷重-変形関係においては, 詳細 FEM と簡易 FEM の曲げせん断剛性を等価とした補正(iii)の場合に Detail-FEM に近い結果が得られる。また, 1/4 モデルの全体の荷重-変形関係において Detail-FEM の剛性・耐力が大きい原因は, Simple-FEM では柱を線材に置き換えるため, 壁からのせん断力が軸力として伝達されるが, Detail-FEM では柱が幅を持つため, 壁からのせん断力が伝わる位置と架構中心がずれ, 柱に曲げ戻し力が働くためであると考えられる。

Fig.7 に弾性域での曲げモーメント図を示す。両モデルとも壁のない右側の架構では概ね一致しているが, 壁の取り付く左側の架構では材端に近づくにつれて Simple-FEM のモーメントが Detail-FEM より過大に評価されていることが確認できる。これは, Detail-FEM では壁からのせん断力が, 柱に曲げ戻し力として働くことで架構の変形が抑えられた影響が考えられる。

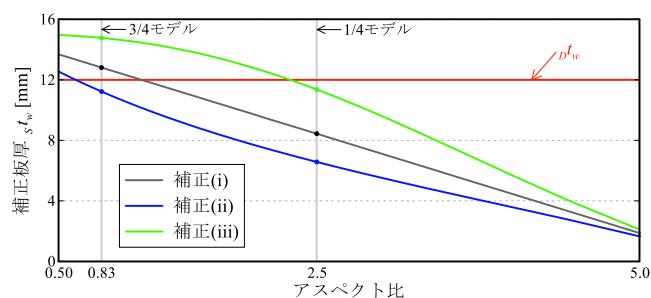


Fig.5 アスペクト比と補正板厚の関係

Table 2 簡易 FEM モデル諸元 (1/4 モデル)

補正方法	層数	壁			
		幅 sB_w (mm)	高さ sH_w (mm)	板厚 s_t^w (mm)	せん断降伏強度 $s\tau_y$ (N/mm ²)
(i) せん断剛性等価	1 層	1600	3600	7.59	166.8
	2, 3 層		4000	8.44	150.1
(ii) 曲げせん断-せん断剛性等価	1 層	1600	3600	5.91	214.2
	2, 3 層		4000	6.57	192.8
(iii) 曲げせん断剛性等価	1 層	1600	3600	8.54	148.3
	2, 3 層		4000	11.37	111.4

Table 3 簡易 FEM モデル諸元 (3/4 モデル)

補正方法	層数	壁			
		幅 sB_w (mm)	高さ sH_w (mm)	板厚 s_t^w (mm)	せん断降伏強度 $s\tau_y$ (N/mm ²)
(i) せん断剛性等価	1 層	4800	3600	11.53	166.8
	2, 3 層		4000	12.81	150.1
(ii) 曲げせん断-せん断剛性等価	1 層	4800	3600	10.10	190.4
	2, 3 層		4000	11.22	171.4
(iii) 曲げせん断剛性等価	1 層	4800	3600	12.25	157.0
	2, 3 層		4000	14.77	130.2

ん断力が, 柱に曲げ戻し力として働くことで架構の変形が抑えられた影響が考えられる。

Fig.8 に壁高さの中央位置でのせん断応力度の水平分布を示す。Detail-FEM のせん断応力度と式(7)~(9)による Simple-FEM の補正せん断応力度は, 弾性域・塑性域ともに概ね一致していることが確認できる。

4. 結

本報では, 周辺架構を含む鋼板耐震壁の詳細 FEM モデルの応力状態を再現できるような簡易 FEM モデル諸元の補正方法を示し, 架構の一部にアスペクト比の異なる壁が配置された場合について検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 壁のアスペクト比が異なるケースにおいても, 簡易 FEM 壁諸元の補正を行うことで簡易 FEM と詳細 FEM の荷重-変形関係は概ね一致する。補正方法(i)~(iii)の適用範囲については今後の検討課題とする。
- 2) 壁が取り付く架構における曲げモーメントは, 材端に近づくにつれて詳細 FEM モデルよりも簡易 FEM モデルの方が過大に評価されることを確認した。

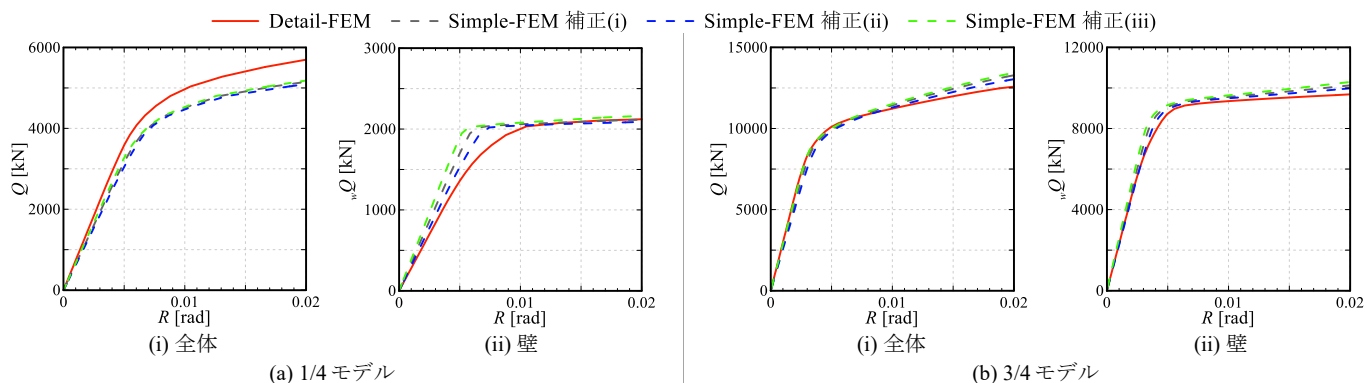


Fig.6 荷重—変形関係

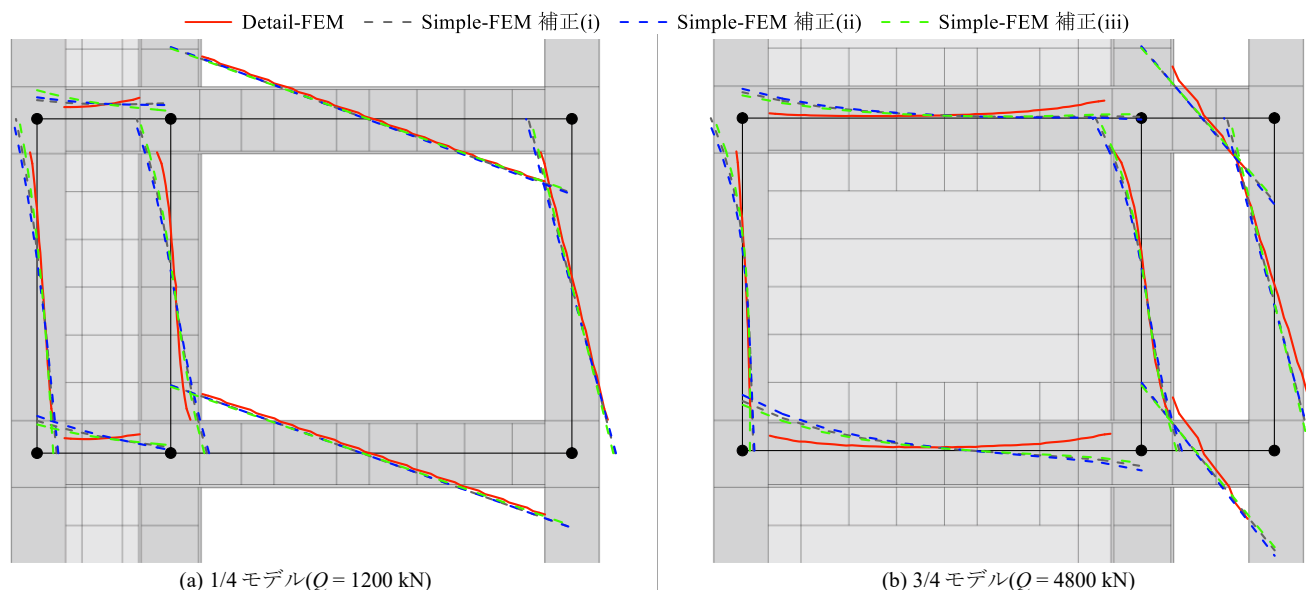


Fig.7 曲げモーメント図

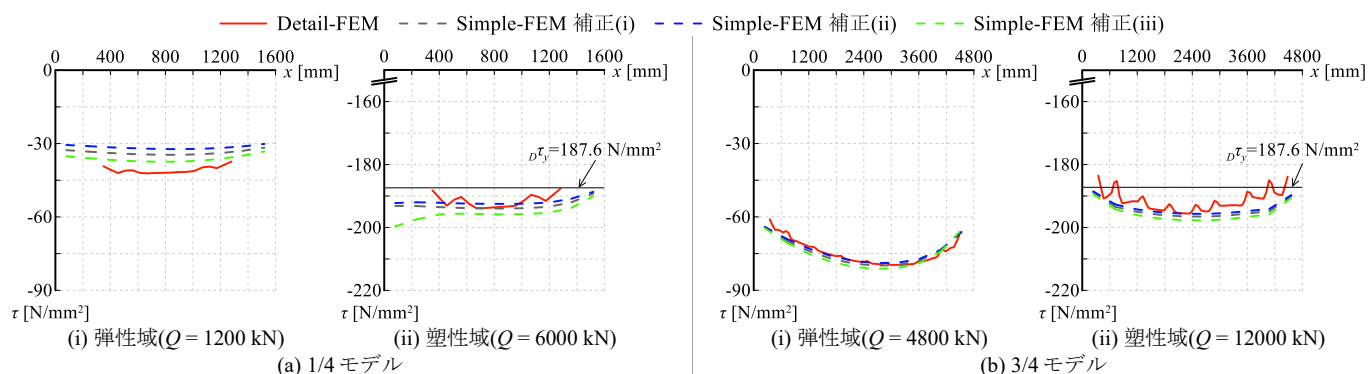


Fig.8 セン断応力度の水平分布

謝辞

本報告は、JFE スチール株式会社、JFE シビル株式会社、株式会社日建設計および東京科学大学佐藤大樹研究室の共同研究の成果の一部をまとめたものです。本研究を進めるにあたり、株式会社日建設計の小野潤一郎氏、木村征也氏、二島冬太氏、佐野航氏には御助言をいただきました。ここに記して感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 安永集平ら：片面スチフナ形式で補剛された鋼板耐震壁の簡易設計手法、日本建築学会構造系論文集、Vol.86, No.786, pp.1213-1223, 2021.8
- 2) 渡邊斐王羅ら：スチフナ補剛された鋼板耐震壁の簡易モデル化手法の構築 その1 間柱を配置しない場合、日本建築学会関東支部研究報告集、2068, pp.493-496, 2025.3
- 3) 渡邊斐王羅ら：スチフナ補剛された鋼板耐震壁の簡易モデル化手法の構築 その2 間柱を配置する場合、日本建築学会関東支部研究報告集、2069, pp.497-500, 2025.3
- 4) 日本建築学会：鋼構造制振設計指針第1版, 2014.11
- 5) ABAQUS/CAE User's Manual, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc;1997

*1 東京科学大学
*2 JFE スチール株式会社
*3 JFE シビル株式会社

Institute of Science Tokyo^{*1}
JFE Steel Corporation^{*2}
JFE Civil Engineering & Construction Corporation^{*3}