

第3章 実大3層試験体の簡易モデルによる解析検討

3.1 概要

本章では2章で示した実大3層試験体の静加力試験を対象として、令和2年度林野庁委託事業報告書²⁾及び令和3年度林野庁補助事業報告書³⁾にて提案した簡易モデルによる解析的検討を行い、実験結果と比較することによりその妥当性及び安全性について確認を行う。なお、設計で用いる各部の性能（以後、設計性能）と実際の性能（以後、実態性能）が異なることや、提案した簡易モデルは従来までの正確なモデル化（以後、詳細モデル）にこだわらず、実務者が他構造で馴染みのあるモデルに重きを置き、基本的にはCLT床パネルは面外方向に期待しないものとするなど、実態性能と簡易モデルの設計性能は差異が生じるものが十分予想されたため、以下のような流れで検討した。なお、加力ケースは加力1を対象とした。

3.2は、簡易モデルと詳細モデルの概要を説明する。

3.3は、実験で与える入力変形比の算出及び計画段階における性能予測のため、既往報告書⁸⁾で示された各部の実態性能を用いた詳細モデルによる事前解析について示す。2.2に示したように、本実験は各層に設置したアクチュエータによる変位制御荷重となるため、本事前解析ではAi分布による荷重増分解析を実施し、目標変形角毎の1層に対する2層及び3層の変形比を算出した。なお、試験体2は試験体1の実験結果を受けて、試験体1に対してCLT床パネルの面外性能を変更する等の補正を行った。

3.4は、事後解析として実験結果の再現を試みた実態性能の詳細モデルによる解析について示す。入力試験により実際に得られた各層の変形量を強制変形増分解析として与える。全体の性能として層せん断力の比較の他、各パネルの負担せん断力、引張接合部の発生軸力など部位の比較も行うことで、詳細モデルの妥当性を確認する。

3.5では、提案した簡易モデルの検証として、本試験体の設計用性能における詳細モデルと簡易モデルの比較検討によりモデルの精度検証を行うとともに、実験値や実態性能の詳細モデルとの比較による設計用モデルの実性能に対する余裕度について確認する。

表3.1-1に本章の構成と扱う解析モデルを整理した。

表 3.1-1 本章の構成と解析モデルの検証目的

本章の構成	3.3		3.4	3.5			
解析フェーズ	事前解析		事後解析				
目的	<ul style="list-style-type: none"> ・実験で与える入力変形比率の算出 ・計画段階における性能予測 		<ul style="list-style-type: none"> ・実験結果の再現を試みた詳細モデルであり、要素試験による各部の実態性能等を採用 	<ul style="list-style-type: none"> ・提案した簡易モデルについて、 →設計用詳細モデルとの比較によるモデル精度検証 →実験値及び実態用詳細モデルとの比較による安全性の確認 			
荷重入力	<ul style="list-style-type: none"> ・Ai分布に基づく“荷重増分解析” 		<ul style="list-style-type: none"> ・加力1の試験で得られた各層変形値による“強制変形増分解析” 				
試験体	試験体1	試験体2	試験体1、試験体2				
解析モデル	詳細モデル (実態_床考慮)		詳細モデル (実態_床考慮)	詳細モデル (設計_床考慮)	簡易モデル (設計_床考慮)	詳細モデル (設計_床無し)	簡易モデル (設計_床無し)
床の面外抵抗	継手部: 曲げせん断ピン	継手部:剛	継手部:剛	継手部:曲げピン		床の壁端部をピン →面外に効かない	基本、床要素はモデル化しない
床の性能	Mx60-5-7 (設計性能_弱軸)	試験体1に対して17.5倍	Mx60-5-7(実態性能_弱軸) →CLT床の面外曲げ要素試験値(2.8)参照	Mx60-5-7(設計性能_弱軸)			
各接合部の性能	既往報告書8)による実態性能		既往報告書8)による実態性能+要素試験による性能補正 ・引きボルトの引張試験値(2.9) ・せん断金物の引張抵抗追加(2.6) 壁基礎せん断性能は、本実験を参考に再設定		「CLT設計施工マニュアル」に準拠した設計性能		



試験体 1



試験体 2

図 3.1-1 対象とする試験体

参考文献

- 1) 「CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル」(公財)日本住宅・木材技術センター,2016
- 2) 令和2年度林野庁補助事業「令和2年度 中高層建築物を中心とした CLT 等の木質建築部材の利用促進事業のうち CLT 等の利用促進及び低コスト化の推進に係る技術開発・検証等 CLT パネル工法ルート2のモデル化、階数制限の緩和検討 事業報告書」
- 3) 令和3年度林野庁補助事業「令和3年度 木材産業・木造建築活性化対策のうち CLT・LVL 等の建築物への利用環境整備事業のうち CLT・LVL 等を活用した建築物低コスト化・検証等 CLT パネル工法の構造計算のモデル化手法、階数制限緩和、プログラム開発に向けた検討 事業報告書」
- 8) 2018年林野庁委託事業「CLT パネル工法の構造計算関係規定の拡充・合理化検討事業」報告書 第2章 ルート1 関係規定の拡充検討 p9」

3.2 簡易モデルと詳細モデルの概要

3.2.1 簡易モデル

(1) 概要と対象

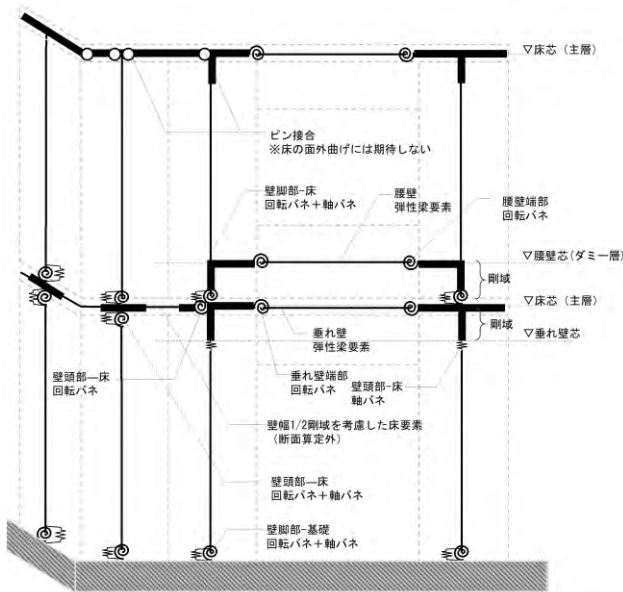
詳細モデルは精度よく CLT パネル工法の耐力発現機構を再現できるが、接合部に圧縮専用バネや引張専用バネなどの非線形バネを用いなければならないこと、節点数および要素数が多くなることなど、モデル化における煩雑さがある。そこで、簡易モデルは令和 2 年度林野庁委託事業報告書²⁾と同様、安全な建物を設計することを大前提に、従来までの正確なモデル化にこだわらず、実務者が他構造で馴染みのあるモデル化手法と同等の解析モデルを構築する方針として、煩雑な CLT 端部接合部を、梁要素の材端回転バネや軸バネに置き換える方法を採用している。

令和 3 年度林野庁補助事業報告書³⁾では、代表架構としての小幅パネル架構の他、大版パネル架構②、その他架構（集成材梁勝ち、鉄骨梁勝ち、通し壁）についても簡易モデル化手法を示したが、本報告書では、試験体の対象とした小幅パネル架構について簡易モデル化手法について改めて説明する。なお、簡易モデルは構造計算ルート 2 を対象として主に検討してきたが、令和 3 年度林野庁補助事業報告書³⁾では、小幅パネル架構を対象に保有水平耐力計算に用いる非線形を考慮した簡易モデル化方法を示しており、本章においても非線形を考慮した簡易モデルを扱う。

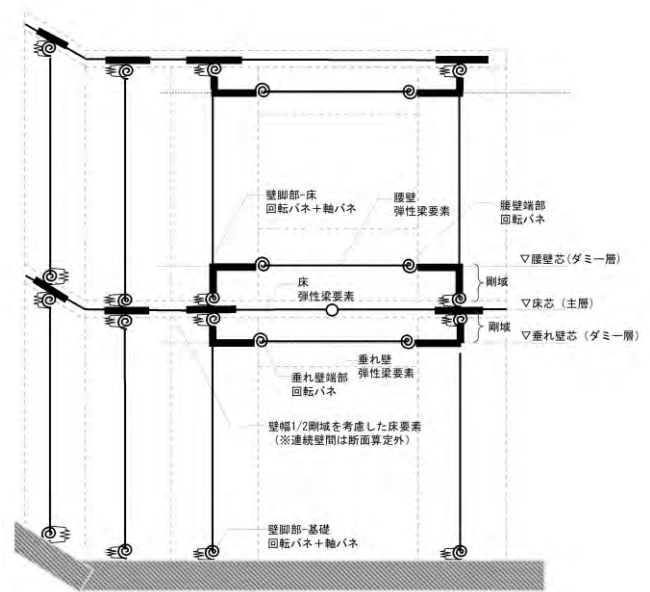
小幅パネルを対象とした簡易モデルの概要を次項に示す。令和 3 年度林野庁補助事業報告書³⁾では、モデル簡易化に重きを置き、原則 CLT 床パネルをモデル化しない方法を示しつつ、更なる精度向上を目指した場合として、垂れ壁とは別に床要素をモデル化する方法についても示した。本試験体は壁厚 90mm に対して床厚 210mm であり、床要素による曲げ戻し効果の寄与率が高い。したがって、床を考慮しない場合と、床を考慮する場合の 2 つの手法を用いて設計性能による事後解析を実施している。なお、令和 3 年度林野庁委託事業報告書³⁾からの変更点として、床を考慮しない場合に関して、垂れ壁が取り付く袖壁パネルに連続して袖壁を配置した場合、壁頭と床の回転バネを床要素の端部に設けることにした。本来は壁頭に回転バネを配置したいが、壁頭に配置すると垂れ壁側にも壁頭-床の回転バネが影響し実態と乖離する。そこで、床要素端部に配置する方針とした。

表 3.2.1-1 各部位の簡易モデル化方法（小幅パネル架構）

No.	部位・部材	モデル化方法
①	袖壁（壁パネル）	エレメント置換（梁要素および上部剛梁要素）
②	壁-基礎接合部	材端バネ（回転バネ+軸バネ）※軸バネは圧縮・引張の平均値
③	壁-床接合部	材端バネ（回転バネ+軸バネ）※軸バネは圧縮・引張の平均値として壁頭壁脚に振り分ける。なお、連続壁間は回転バネを壁頭又は床要素端部に設ける。
④a	垂壁	床考慮しない場合：梁要素（床芯レベルに入力） 床考慮する場合：梁要素（垂壁芯レベルに入力）
④b	腰壁	梁要素（腰壁芯レベルに入力）
⑤	垂壁・腰壁接合部	材端バネ（回転バネ）、垂壁・腰壁せいの 1/2 までを剛域に設定
⑥	壁-直交壁間の接合 連続壁間の接合 （最上層以外）	壁幅 1/2 を剛域設定した床要素（CLT マニュアルに準拠し有効幅 1.0m とする）による接合。ただし、CLT マニュアルに準拠し、床を介して壁壁間の圧縮ストラットが見込めるため断面算定対象外とする。
⑦	壁-直交壁間の接合 連続壁間の接合 （最上層）	床考慮しない場合：両端ピン要素で接合 床考慮する場合：最上層以外の層と同様（ただし、断面算定対象）
その他		<ul style="list-style-type: none"> 各せん断金物接合部のせん断剛性は考慮しない（剛とする） 床を考慮する場合は、最上層以外の連続壁間を除き、床要素も断面算定対象となる。また、床継手は適宜ピン等に設定する。



床を考慮しない場合（簡易モデル_床無視）



床を考慮する場合（簡易モデル_床考慮）

図 3.2.1-1 簡易モデル概要（小幅パネル架構）

(2) 壁 - 基礎接合部のモデル化方法

壁-基礎接合部は詳細モデルにおいて、非線形の軸バネである圧縮専用バネおよび引張専用バネ、せん断接合部を表したせん断バネで構成される。簡易モデルでは以下に示すように、これらのバネを一つの回転バネと軸バネに置き換える。これにより詳細モデルでは節点間バネでしか入力できなかったモデルが、より簡単な材端バネとして設定することが可能となる。なお、簡易モデルは接合部のせん断剛性は考慮しない。

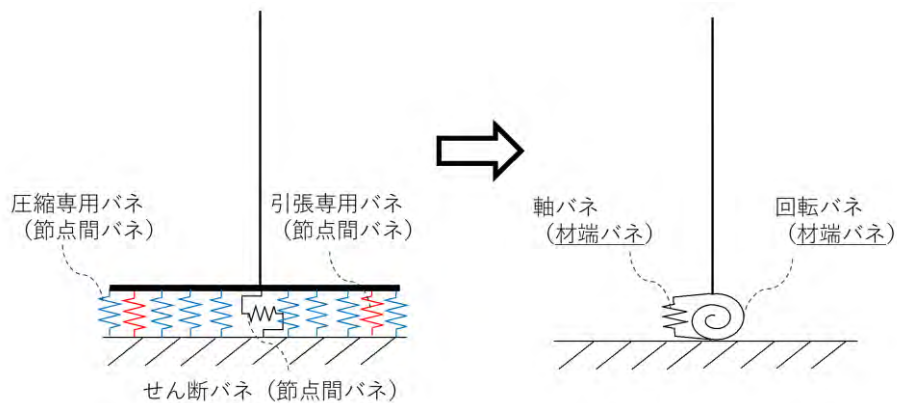


図 3. 2. 1-2 壁基礎接合部の簡易モデル

壁-基礎接合部の回転バネの算出方法⁹⁾を以下に示す。簡単のため、軸力がない状態を考える。CLT 壁脚部は、曲げモーメント M に対し、引張接合部の引張力と CLT 基礎端部の支圧力が抵抗する。下図のように支圧力の合力を $P_c = \Sigma N$ 、CLT 壁の圧縮側最外縁の変形量を δ_c 、引張接合部の引張力を P_t 、変形量を δ_t とし、CLT 壁端部は平面保持の仮定が成り立つとすると、引張接合部の引張力 P_t と支圧力の合力 $P_c = \Sigma N$ は次式で表される。

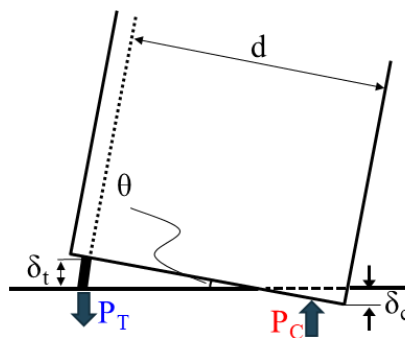


図 3. 2. 1-3 壁基礎接合部の回転剛性算出の概要図

参考文献

- 9) 稲山正弘：引きボルト式木造ラーメン柱脚接合部の設計法に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集 621-622,2013.8
- 10) 秋山信彦他：引きボルト式集成材ラーメン構造の耐震設計法に関する研究 その 6：柱脚接合部に一定軸力を考慮した降伏耐力・終局耐力の推定法の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集 155-156,2020.9

$$P_t = K_{wt} \cdot \delta_t \quad (\text{式 3.2.1-1})$$

$$P_t = P_c = \sum N \quad (\text{式 3.2.1-2})$$

ここで、 K_{wt} ：引張接合部の引張剛性

次に鉄筋コンクリートと同様に力と変形の釣合条件により圧縮側縁から中立軸までの距離 x_{n0} を求める。

$$\sum N = \frac{1}{2} x_{n0}^2 \cdot t \cdot k_e \cdot \theta \quad (\text{式 3.2.1-3})$$

$$\delta_t = P_t \left(\frac{1}{K_{wt}} \right) \quad (\text{式 3.2.1-4})$$

ここで、 k_e ：壁パネルの支圧剛性(= $15.6N/mm^3$) ※CLT 設計施工マニュアルに準拠

t ：壁厚

d ：引張接合部から壁パネル圧縮側縁までの距離

力の釣合より

$$\sum N = P_t \quad (\text{式 3.2.1-5})$$

変形の釣合より

$$(d - x_{n0})\theta = \delta_t \quad (\text{式 3.2.1-6})$$

上記より得られた2次方程式を解く。

$$\frac{1}{2} x_{n0}^2 \cdot t \cdot k_e \cdot \theta = \frac{(d - x_{n0})\theta}{\left(\frac{1}{K_{wt}} \right)} \quad (\text{式 3.2.1-7})$$

$$\frac{1}{2} \cdot t \cdot k_e \cdot x_{n0}^2 + K_{wt} \cdot x_{n0} - K_{wt} \cdot d = 0 \quad (\text{式 3.2.1-8})$$

これより

$$a = \frac{1}{2} \cdot t \cdot k_e \quad (\text{式 3.2.1-9a})$$

$$b = K_{wt} \quad (\text{式 3.2.1-9b})$$

$$c = -K_{wt} \cdot d \quad (\text{式 3.2.1-9c})$$

とおくと、圧縮側縁から中立軸までの距離 x_{n0} が算出できる

$$x_{n0} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (\text{式 3.2.1-10})$$

次に応力中心間距離 j は以下となる

$$j = d - \frac{1}{3} x_{n0} \quad (\text{式 3.2.1-11})$$

壁脚モーメントと回転角 θ の関係は

$$M = \sum N \cdot j = P_t \cdot j = \frac{(d - x_{n0})\theta}{\left(\frac{1}{K_{wt}}\right)} \cdot j \quad (\text{式 3.2.1-12})$$

回転剛性 $K_{w\theta}$ は

$$K_{w\theta} = \frac{M}{\theta} = \frac{(d - x_{n0})}{\left(\frac{1}{K_{wt}}\right)} \cdot j = K_{wt}(d - x_{n0}) \cdot \left(d - \frac{1}{3}x_{n0}\right) \quad (\text{式 3.2.1-13})$$

次に壁-基礎接合部の軸バネ剛性の算出方法を以下に示す。簡単のため、軸剛性 K_{WA} は引張接合部の引張剛性と圧縮接合部の圧縮剛性の平均値を用いる。

全面 K_{wc} : 圧縮接合部の圧縮剛性 ($K_{wc} = k_e \cdot A_c$)

A_c : 支圧面積 (壁パネルの厚さ $t \times B$ とする) ※ B : 壁幅

n : 引張接合本数

$$K_{WA} = \frac{n \cdot K_{wt} + \text{全面}K_{wc}}{2} \quad (\text{式 3.2.1-14})$$

壁-基礎接合部の許容応力度設計で用いる断面算定方法は、文献 10)と同様の方法を用いるものとして、曲げモーメント M と軸力 N (圧縮力が正) および作用した柱脚接合部の各部の設計用応力と許容耐力と検定は以下による。なお、各部号は文献 10)に合わせて記載するが、記号の説明にて補足する。

< 応力状態の判別 >

曲げモーメント M を等価な偏心圧縮力に置換したときの偏心距離 e ($=M/N$) に応じて、次式により応力状態は(i)~(v) (図 3.2.1-4) に判別される。

$$\begin{aligned}
 0 < e \leq g1 & \rightarrow (i) \\
 g1 \leq e \leq g2 & \rightarrow (ii) \\
 g2 \leq e, e \leq g3 & \rightarrow (iii) \\
 g3 \leq e \leq g4 & \rightarrow (iv) \\
 g4 \leq e < 0 & \rightarrow (v)
 \end{aligned}
 \tag{式 3.2.1-15}$$

$$g1 = \frac{ch}{6}$$

$$g2 = \frac{ch}{6} - \frac{d}{3}$$

$$g3 = -\frac{3n_e \cdot ch(d - ch/2)^2 + (d + ch/2)(ch - d)^2}{3n_e \cdot ch(d - ch/2) - 3(ch - d)^2}$$

$$g4 = -\left(d - \frac{ch}{2}\right) / \frac{ch}{2}$$

$$n_e = \frac{Kt}{k_e \cdot cb \cdot ch/4}$$

記号 ch : 壁幅

d : 壁の圧縮縁から引張ボルト芯までの距離 (壁の有効幅)

cb : 壁厚 (=t)

Kt : ボルト接合部の引張剛性 ($=K_{wt}$)

k_e : 壁パネルと基礎接合部の支圧剛性($= 15.6N/mm^3$)

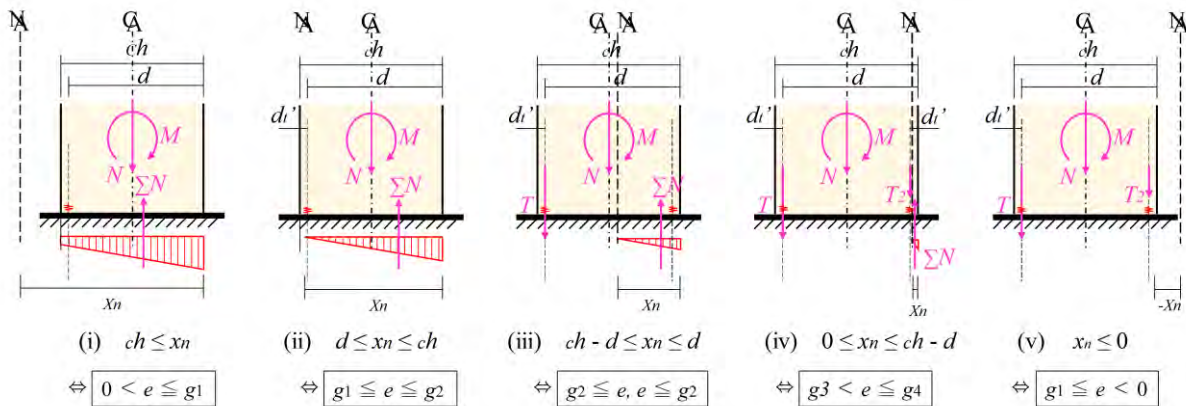


図 3.2.1-4 軸力に応じた応力状態の判別¹⁰⁾

<中立軸と壁木口の圧縮合力>

・中立軸

判別された応力状態に応じて、中立軸 x_n は次式による。

$$\frac{ch}{2} \cdot \left(1 + \frac{ch}{6e}\right) \quad \dots \text{ (i)}$$

$$3 \cdot \left(\frac{ch}{2} - e\right) \quad \dots \text{ (ii)}$$

The solution of

$$x_n = x^3 - 3\left(\frac{ch}{2} - e\right) \cdot x^2 + \frac{3}{2} \cdot n_e \cdot ch \left(d - \frac{ch}{2} + e\right) (x - d) = 0 \quad \dots \text{ (iii)} \quad \text{(式 3.2.1.-17)}$$

The solution of

$$x^3 - 3\left(\frac{ch}{2} - e\right) \cdot x^2 + 3n_e \cdot ch \left\{e \left(x - \frac{ch}{2}\right) - \left(d - \frac{ch}{2}\right)^2\right\} = 0 = 0 \quad \dots \text{ (iv)}$$

$$\frac{ch}{2} + \left(d - \frac{ch}{2}\right) \cdot \frac{1}{e} \quad \dots \text{ (v)}$$

・壁木口の圧縮合力

判別された応力状態に応じて、壁木口の圧縮合力 ΣN は次式による。

$$N \quad \dots \text{ (i)}$$

$$N \quad \dots \text{ (ii)}$$

$$\Sigma N = \frac{e + d - ch/2}{d - x_n/3} \cdot N \quad \dots \text{ (iii)} \quad \text{(式 3.2.1.-18)}$$

$$\frac{e \cdot (ch/2 - x_n) + (d - ch/2)^2}{(ch/2 - x_n/3) \cdot (ch/2 - x_n) + (d - ch/2)^2} \cdot N \quad \dots \text{ (iv)}$$

$$0 \quad \dots \text{ (v)}$$

<ボルトの設計用引張力および壁木口の設計用めり込み応力>

判別された応力状態に応じて、ボルトの設計用引張力 T_d と柱木口の設計用めり込み応力 σ_{ed} は次式による。

・ボルトの設計用引張力

$$\begin{aligned}
 & 0 \quad \dots \text{(i)} \\
 & 0 \quad \dots \text{(ii)} \\
 & \frac{e - {}_c h/2 + x_n/3}{d - x_n/3} \cdot N \quad \dots \text{(iii)} \\
 T_d = & \frac{(e - {}_c h/2 + x_n/3) \cdot (d - x_n)^2}{2 \cdot \{({}_c h/2 - x_n/3) \cdot ({}_c h/2 - x_n) + (d - {}_c h/2)^2\}} \cdot N \quad \dots \text{(iv)} \\
 & - \frac{d - x_n}{{}_c h - 2x_n} \cdot N \quad \dots \text{(v)}
 \end{aligned} \tag{式 3.2.1-18}$$

・壁木口の設計用支圧応力

$$\begin{aligned}
 & \frac{2 \cdot x_n}{{}_c b \cdot {}_c h \cdot (x_n - {}_c h)} \cdot N \quad \dots \text{(i)} \\
 & \frac{2}{{}_c b \cdot x_n} \cdot N \quad \dots \text{(ii)} \\
 \sigma_{ed} = & \frac{2 \cdot (e + d - {}_c h/2)}{{}_c b \cdot x_n \cdot (d - x_n/3)} \cdot N \quad \dots \text{(iii)} \\
 & \frac{2 \cdot \{e \cdot ({}_c h/2 - x_n) + (d - {}_c h/2)^2\}}{{}_c b \cdot x_n \cdot \{({}_c h/2 - x_n/3) \cdot ({}_c h/2 - x_n) + (d - {}_c h/2)^2\}} \cdot N \quad \dots \text{(iv)} \\
 & 0 \quad \dots \text{(v)}
 \end{aligned} \tag{式 3.2.1-19}$$

<検定>

ボルトの設計用引張力と壁木口の設計用支圧応力が許容耐力を下回ることを確認する。

・ ボルトの検定

$$\frac{R_f \cdot T_d}{P_{ba}} \leq 1 \quad (\text{式 3.2.1-20})$$

記号 T_d : ボルトの設計用引張力

R_f : 応力割増係数 (ルート 2 : 1.3 以上の数値、ルート 3 : 1.0 以上の数値)

P_{ba} : ボルトの許容引張耐力

・ 木口支圧の検定

$$\frac{R_f \cdot \sigma_{ed}}{cF_{ea}} \leq 1 \quad (\text{式 3.2.1-21})$$

記号 σ_{ed} : 壁木口の設計用支圧応力

R_f : 応力割増係数 (ルート 2 : 1.0 以上の数値、ルート 3 : 1.0 以上の数値)

cF_{ea} : 壁木口の許容支圧応力度

壁-基礎接合部の保有水平耐力計算で用いる終局耐力の算定方法は、文献 10)と同様の方法を用いる。軸力 N と曲げモーメント M の終局時の応力分布を下図のように仮定した。これは CLT 壁端部で平面保持が成り立つと仮定し、引張接合部を鉄筋と見なした鉄筋コンクリート柱の応力分布と同じである。Case1~3 に対する終局モーメントを下式に示す。下式により終局曲げモーメント M および軸力 N の関係を、 M - N 関係として材端バネの非線形特性として設定する。

Case 1	Case 2	Case 3
$N_{uc} - T_u \leq N \leq N_{uc}$	$-T_u \leq N \leq N_{uc} - T_u$	$-2T_u \leq N \leq -T_u$

図 3.2.1-5 終局時の応力状態の仮定（壁基礎接合部）¹⁰⁾

Case1 $N_{uc} - T_u \leq N \leq N_{uc}$ $M_u = N \left(\frac{D}{2} - d_t \right) \left(\frac{N_{uc}}{N} - 1 \right)$ (式 3.2.1-22)

Case2 $-T_u \leq N \leq N_{uc} - T_u$ $M_u = T_u \left(\frac{D}{2} - d_t \right) + \frac{(N + T_u)D}{2} \left(1 - \frac{N + T_u}{N_{uc}} \right)$ (式 3.2.1-23)

Case3 $-2T_u \leq N \leq -T_u$ $M_u = (N + 2T_u) \left(\frac{D}{2} - d_t \right)$ (式 3.2.1-24)

ここで、

N_{uc} : 最大圧縮耐力

$$N_{uc} = 0.85 \cdot F_c \cdot t \cdot D \text{ (壁-基礎接合部の場合)}$$

T_u : 引張金物の終局耐力

t : 袖壁パネルの厚さ

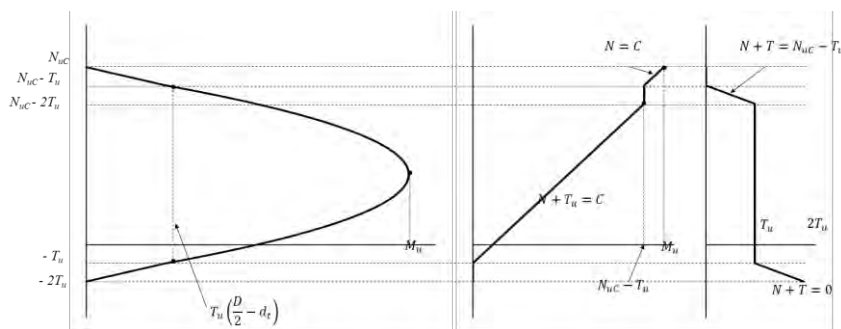


図 3.2.1-6 軸力と曲げを受ける CLT 壁脚の終局状態における応力相関

簡易モデルの軸バネの設定は詳細モデルに設定した各バネの降伏耐力を圧縮側と引張側でそれぞれの耐力として下表の数値を設定した。

表 3.2.1-2 簡易モデルの軸方向バネの終局耐力

	圧縮側	引張側
壁-基礎接合部の軸耐力	P_{yc}	$2P_{yt}$

ここで、

P_{yc} : 壁 - 基礎接合部の支圧終局耐力 ($P_{yc1} = F_c \cdot A_c$)

P_{yt} : 壁 - 基礎接合部の引張金物の終局耐力

F_c : 壁パネルの圧縮の基準強度

A_c : 全支圧面積 (壁パネルの厚さ $\times d$ とする)

(3) 壁 - 床接合部のモデル化方法

壁-床接合部も基本的に壁-基礎接合部と同様に簡易モデル化を図る。壁基礎接合部と異なるパラメータは以下に示すように支圧剛性がめり込み剛性となる。

k_e : 床パネルのめり込み剛性(= $\frac{E_{90}}{Z_0} N/mm^3$ とする) ※CLT 設計施工マニュアルに準拠

E_{90} : 床パネルラミナの繊維直交方向のヤング係数

(繊維並行方向のヤング係数の 1/30 とする) ※CLT 設計施工マニュアルに準拠

Z_0 : 床パネルの厚さ ※CLT 設計施工マニュアルに準拠

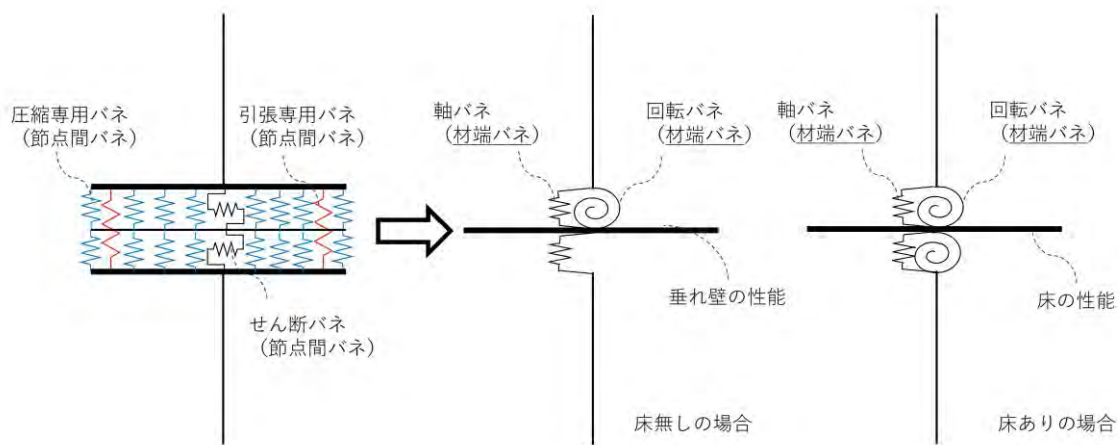


図 3.2.1-7 壁床接合部の簡易モデル

次に壁-床接合部の軸バネ剛性の算出方法を以下に示す。簡単のため、軸剛性 K_{WA} は引張接合部の引張剛性と圧縮接合部の圧縮剛性の平均値を用いる。なお、最上層以外については軸バネは壁頭壁脚にそれぞれ設けるため、剛性を2倍して配置する。

$$K_{WA} = 2 \times \frac{n \cdot K_{wt} + \text{全面}K_{wc}}{2} \quad \dots \text{最上層以外 (式 3.2.1-25a)}$$

$$K_{WA} = \frac{n \cdot K_{wt} + \text{全面}K_{wc}}{2} \quad \dots \text{最上層 (式 3.2.1-25b)}$$

全面 K_{wc} : 圧縮接合部の圧縮剛性 ($K_{wc} = k_e \cdot A_c$)

A_c : 支圧面積 (壁パネルの厚さ $t \times D$ とする) ※ D : 壁幅

n : 引張接合本数

壁-床接合部の許容応力度設計で用いる断面算定方法、保有水平耐力計算で用いる終局耐力の算定方法は支圧性能をめり込み性能に置き換えることで、壁-基礎接合部と同様の方法により算定できる。

(4) 壁 - 垂れ壁 (腰壁) 接合部のモデル化方法

壁・垂れ壁(腰壁)接合部は詳細モデルにおいて、非線形の軸バネである圧縮専用バネおよびせん断接合部を表したせん断バネで構成される。簡易モデルでは以下のように、これらの垂壁・腰壁端部の回転バネに置き換え、回転剛性を設定する。なお、簡易モデルは接合部のせん断剛性は考慮しない。

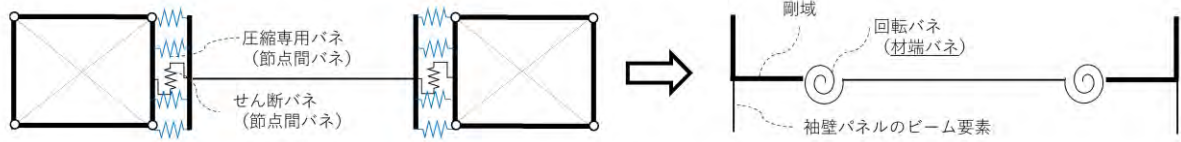


図 3.2.1-8 壁垂れ壁(腰壁)接合部の簡易モデル

垂壁・腰壁接合部の回転バネ剛性の算出方法を以下に示す。垂壁・腰壁端部は曲げモーメント M に対して、垂壁・腰壁間の支圧力 C_L と C_R で抵抗する。ここで、 $C_L = C_R$ とする。下図のように垂壁圧縮端部から回転中心までの距離を x とし、 $x = \frac{Ht}{2}$ と仮定する。圧縮端部のめり込み変位を δ とすると、壁・垂壁間回転角 θ は次式で表される。

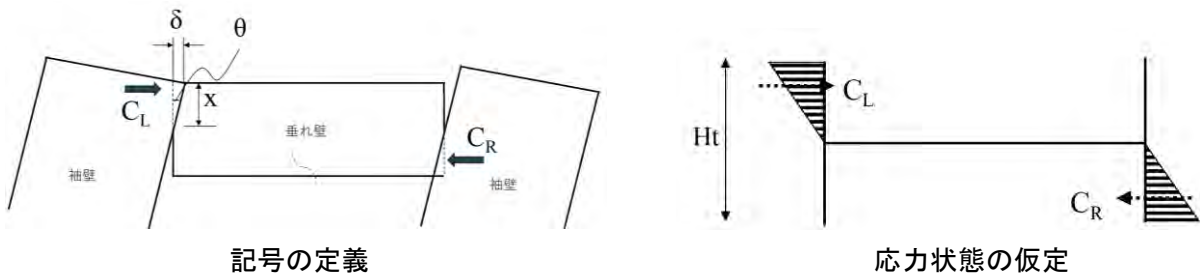


図 3.2.1-9 壁垂れ壁(腰壁)接合部の簡易モデルの考え方

$$C_L = \sum N = \frac{1}{2} \left(\frac{Ht}{2} \right)^2 \cdot t \cdot k_e \cdot \theta \quad (\text{式 3.2.1-26})$$

次に応力中心間距離 j は以下とする

$$j = \frac{2}{3} \left(\frac{Ht}{2} \right) \quad (\text{式 3.2.1-27})$$

壁脚モーメントと回転角 θ の関係は

$$M = \sum N \cdot j = \frac{1}{2} \left(\frac{Ht}{2} \right)^2 \cdot t \cdot k_e \cdot \theta \cdot j \quad (\text{式 3.2.1-28})$$

回転剛性 $K_{w\theta}$ は

$$K_{w\theta} = \frac{M}{\theta} = \frac{1}{2} \left(\frac{Ht}{2} \right)^2 \cdot t \cdot k_e \cdot j = \left(\frac{Ht^3}{24} \right) \cdot t \cdot \frac{1.5E_{90}}{Z_0} \quad (\text{式 3.2.1-29})$$

ここで、 t : 壁厚

k_e : 壁 - 垂れ壁のめり込み剛性(= $\frac{1.5E_{90}}{Z_0} N/mm^3$ とする) ※CLT 設計施工マニュアル¹⁾に準拠

E_{90} : 床パネルラミナの繊維直交方向のヤング係数

(繊維並行方向のヤング係数の $1/30$ とする) ※CLT 設計施工マニュアル¹⁾に準拠

Z_0 : ラミナ幅

※CLT 設計施工マニュアル¹⁾に準拠

壁-垂壁（腰壁）接合部の許容応力度設計で用いる断面算定方法は、図 3.2.1-9 に示した応力状態を考え、垂壁パネル縁のめり込み応力度が許容応力度に達する時の垂壁心周り曲げモーメントとして以下のように計算される。

$$M_a = \left(\frac{H_t}{2} \cdot \frac{2}{3} \right) \frac{\frac{H_t}{2} \cdot t \cdot f_{cv}}{2} \quad (\text{式 3.2.1-30})$$

M_a : 垂壁パネル端部の許容曲げモーメント ($kN \cdot m$)

H_t : 垂壁パネル高さ (mm)

t : 垂壁パネル厚さ (mm)

f_{cv} : 壁-垂壁接合部の許容めり込み応力度 (N/mm^2)

垂壁・腰壁接合部の保有水平耐力計算で用いる終局曲げモーメント M_u の算出方法を以下に示す。

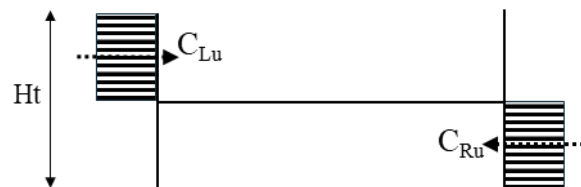


図 3.2.1-10 垂壁・腰壁接合部の終局時の応力状態の仮定

$$M_u = \left(\frac{H_t}{4} \right) \frac{H_t}{2} \cdot t \cdot F_{cv} \quad (\text{式 3.2.1-31})$$

ここで、

F_{cv} : 壁 - 垂壁接合部のめり込み強度 (N/mm^2)

(5) 水平方向に連続した壁間のモデル化方法

水平方向に壁パネルを連続的に配置する場合の簡易モデル化方法を以下に示す。詳細モデルでは壁床接合部の圧縮バネと引張バネが、床要素を介して力が伝達される。簡易モデルでは、床要素の面外方向への応力負担を期待しない場合、最上階については両端ピン要素でつなぐモデルとする。床要素に期待する場合は壁頭部に回転バネと軸バネを設ける（バネ特性の設定は最上階以外の場合と同様となる）。

最上階以外では、床パネルを介しての応力伝達ではあるが床パネル内に圧縮ストラットが形成されるためこの部分の床要素の断面算定は省略してよいものとなっている。簡易モデルでは下図に示すように、壁幅の1/2を剛域として設定した床要素を配置し、前述で算出した壁床接合部の回転バネと軸バネを上下に配置するモデルとする。なお、床要素は断面算定対象外とし、壁と直交壁間も同様の応力負担となることから、同様にモデル化を行う。バネ性能はいずれも壁床接合部と同様となる。

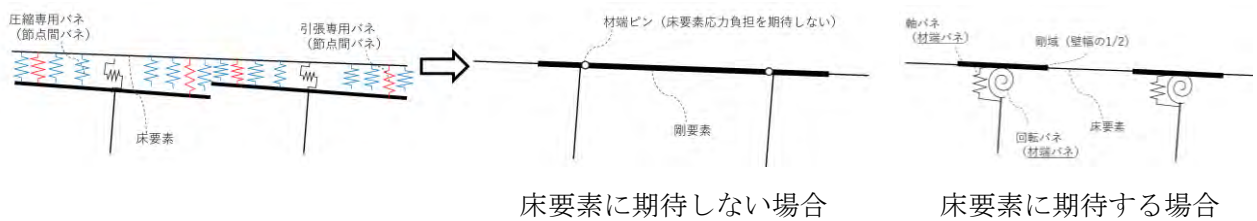


図 3.2.1-11 連続壁間の簡易モデル化概要（最上階）

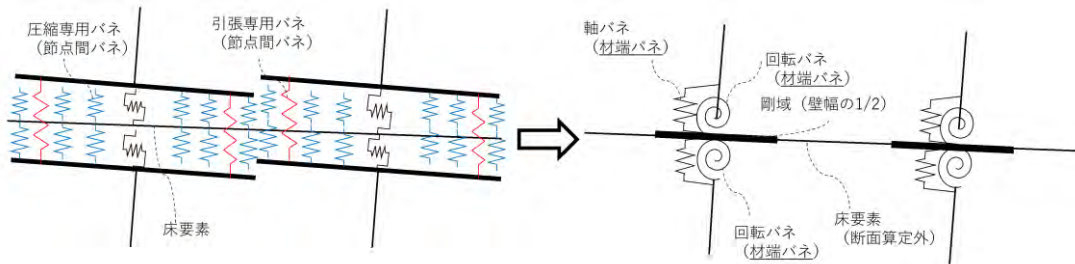


図 3.2.1-12 連続壁間の簡易モデル化概要（最上階以外）



図 3.2.1-13 圧縮ストラット効果（連続壁パネル継ぎ目位置における床パネルの面外変形状態）

3.2.2 詳細モデル

詳細モデルは基本的には「CLT 設計施工マニュアル」に準拠したモデルとし、簡易モデルと条件を合わせるため、圧縮バネは MSS モデルとして分散配置したモデルを本章では扱う。なお、実態性能及び設計性能では若干モデル化方法を変えている部分があり、それは各節にて説明する。

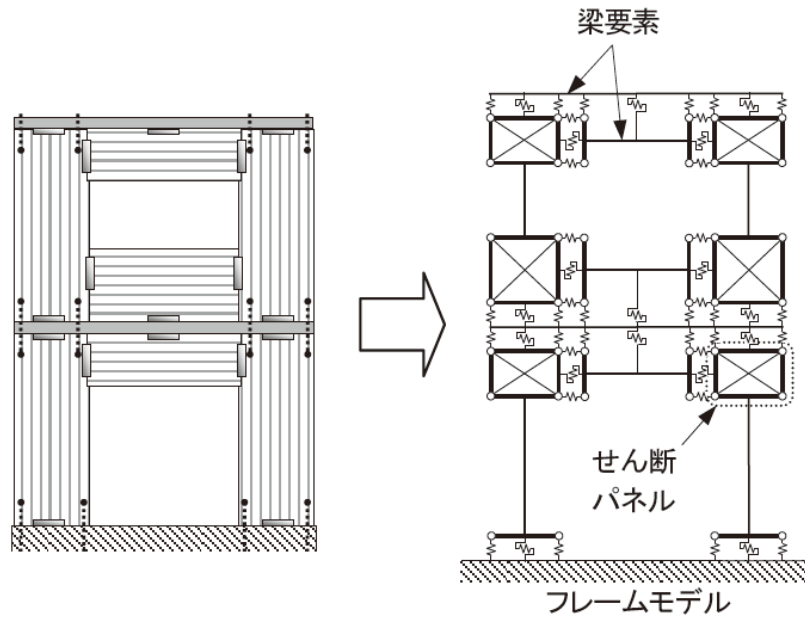


図 3.2.1-14 詳細モデルの概要

3.3 詳細モデルの実態性能による事前解析

3.3.1 目的

本節では、実験で与える入力変形比の算出及び計画段階における性能予測のため、既往報告書⁸⁾で示された各部の実態性能を用いた詳細モデルによる事前解析について示す。2.2 に示したように、本実験は各層に設置したアクチュエータによる変位制御の試験となるため、本事前解析では A_i 分布による荷重増分解析を実施し、目標変形角毎の1層に対する2層及び3層の変形比を算出した。なお、試験体2は試験体1の実験結果を受けて、試験体1に対してCLT床パネルの面外性能等を変更する等の補正を行った。

3.3.2 解析モデル

事前解析モデル図を以下に示す。解析モデルは現行の詳細モデルを元に、接合部を設計で用いる性能ではなく、既往の実験結果に基づいた実態性能とした立体モデルである。次項に試験体1及び試験体2の解析モデルの説明図を示す。

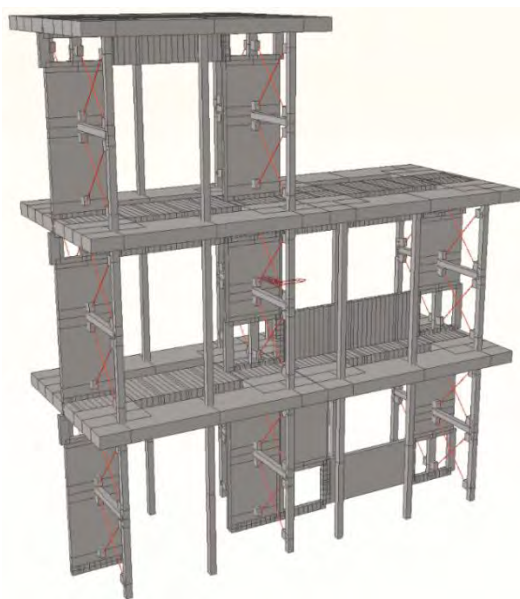


試験体 1

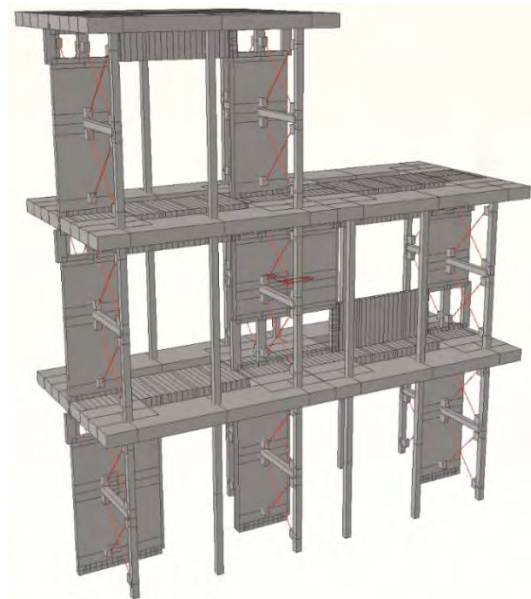


試験体 2

図 3.3.2-1 対象とする試験体



試験体 1



試験体 2

図 3.3.2-2 詳細モデルによる事前解析モデル

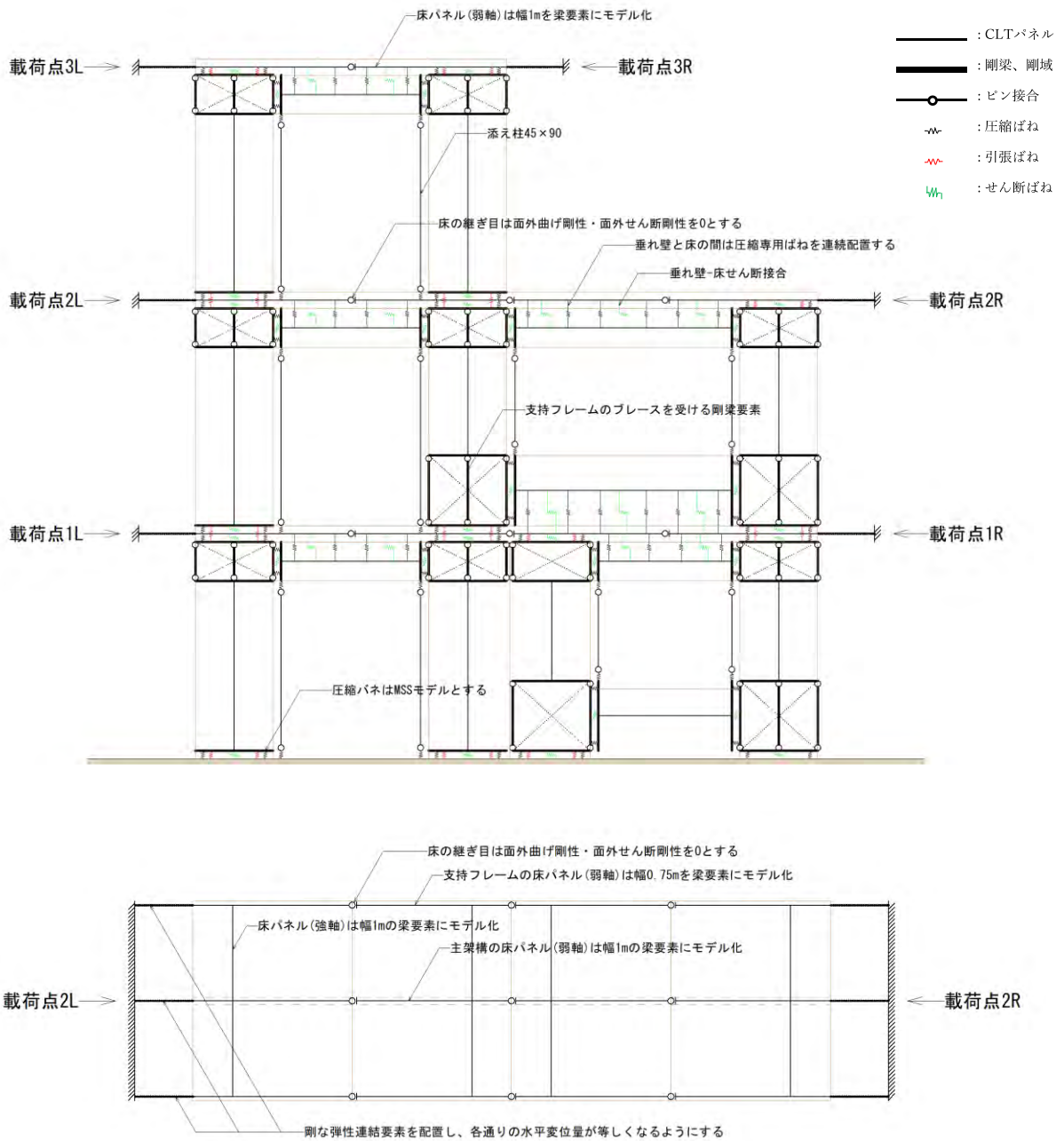


図 3.3.2-3 中央構面及び3階床面の事前解析モデル図(試験体1)

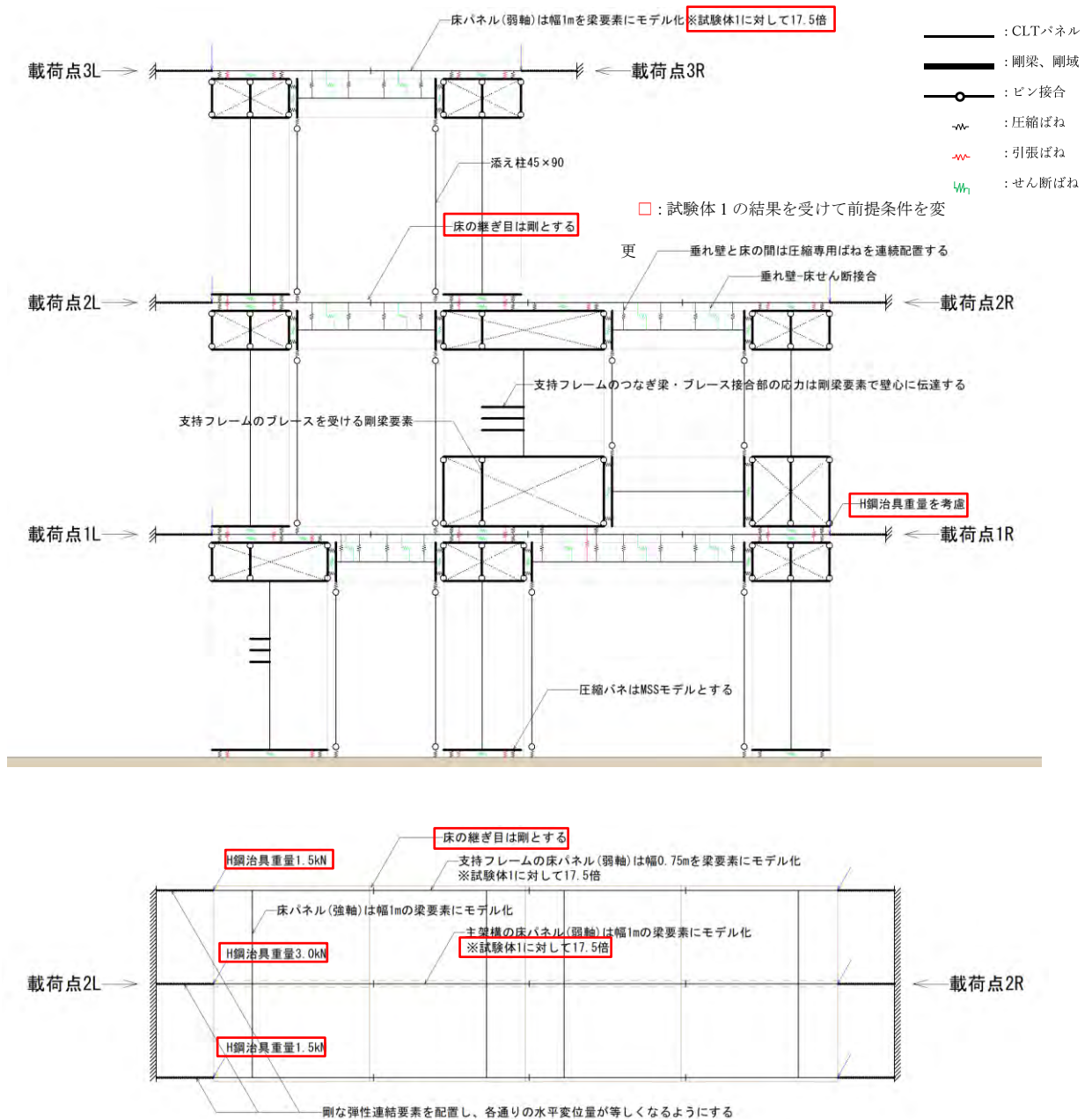


図 3.3.2-4 中央構面及び3階床面の事前解析モデル図(試験体2)

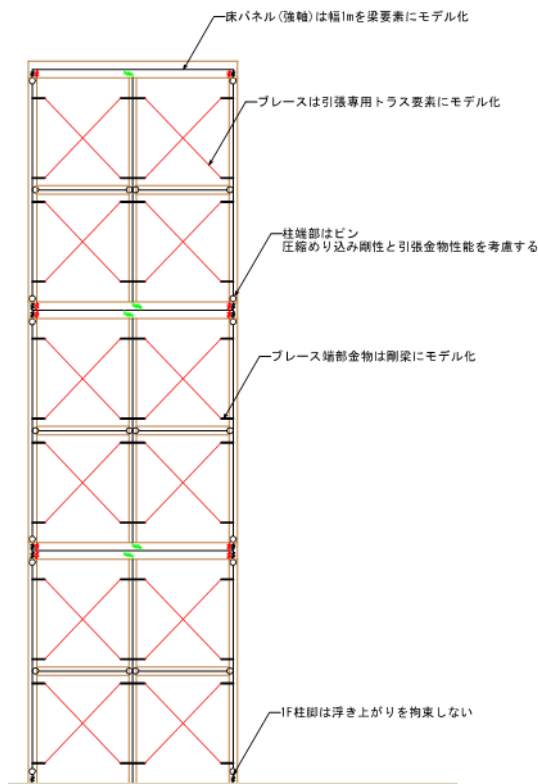


図 3.3.2-5 直交フレームの事前解析モデル図（試験体 1、試験体 2 共通）

試験体 1 は図 3.3.2-3 に示すように、床継手部を面外曲げピン、かつ面外せん断剛性を 0 としていたが、実際の試験を確認したところ、完全にピンで面外方向にせん断ズレが生じるような挙動は確認されなかった。そこで試験体 2 は試験体 1 の実験結果を受けて、継手部を剛として事前解析モデルに修正した。その際、CLT 床要素の性能も過去に得られた知見等を鑑み、大雑把な設定ではあるが試験体 1 に対して 17.5 倍の性能に修正した。さらに、浮き上がり拘束として加力桁とした治具重量を長期荷重として与えた。以上が試験体 1 と試験体 2 の事前解析モデルの違いである。

次に各部に設定した性能を説明する。

(1) 母材性能

母材の性能はいずれも設計用性能を採用し、弾性要素とした。

表 3.3.2-1 弾性要素の母材性能一覧

部材	強度区分	BD[mm]	E[N/mm ²]	G[N/mm ²]	備考
壁(面内)	S60-3-3_強軸(スギ)	90×1000 等	4000	500	
垂れ壁(面内)	S60-3-3_強軸(スギ)	90×500	4000	500	
腰壁(面内)	S60-3-3_強軸(スギ)	90×900	4000	500	
加力方向床(面外)	Mx60-5-7_弱軸(スギ)	1000×210	227	9.7	試験体 2 は 17.5 倍
直交方向床(面外)	Mx60-5-7_強軸(スギ)	1000×210	5536	29.7	
柱、中棧	E70(スギ)	1000×210	7000	-	両端ピン要素
ブレース M16	SS400	A=155mm ²	205000	-	引張専用

(2) 引張接合部、せん断接合部、圧縮接合部

既往報告書⁸⁾で示された各部の実態性能としてトリリニアによる非線形性能を与えた。

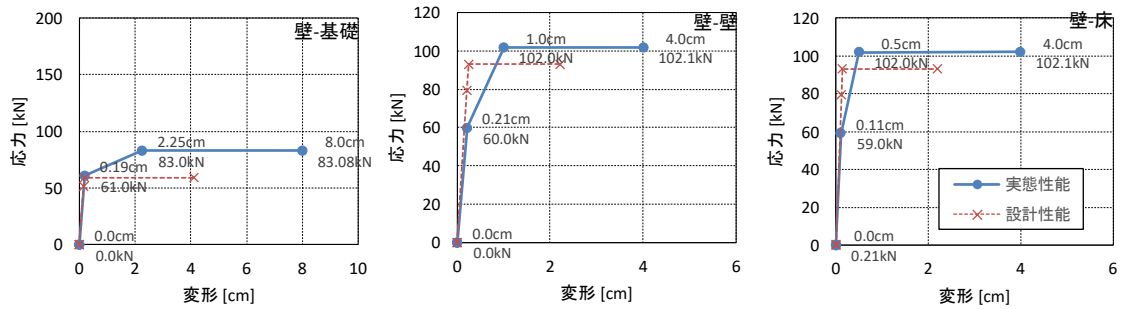


図 3.3.2-6 引張接合部の性能⁸⁾

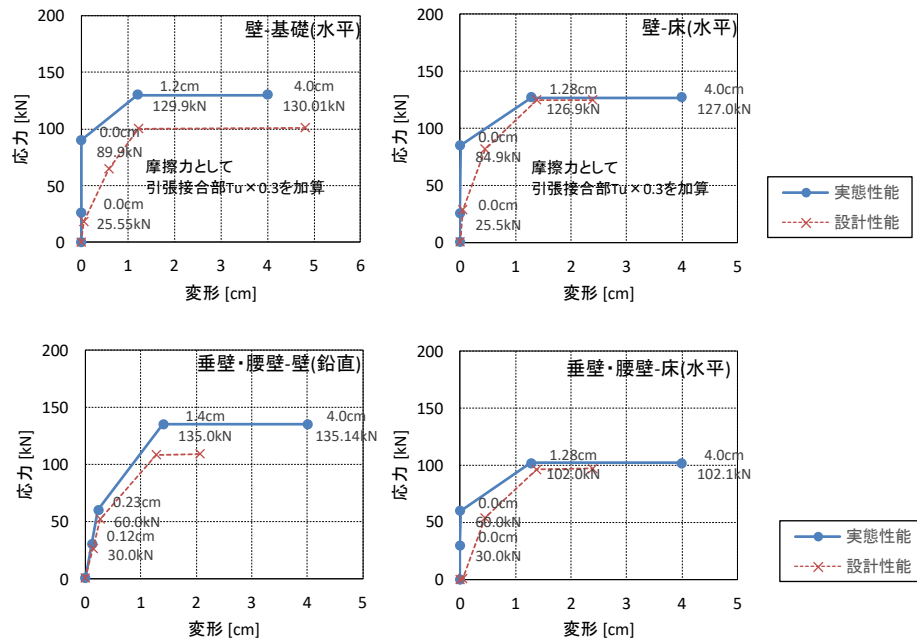


図 3.3.2-7 せん断接合部の性能⁸⁾

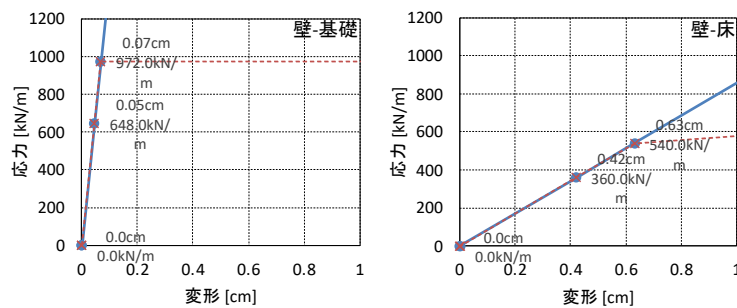


図 3.3.2-8 圧縮接合部の性能⁸⁾

参考文献

8) 2018 年林野庁委託事業「CLT パネル工法の構造計算関係規定の拡充・合理化検討事業」報告書 第 2 章 ルート 1 関係規定の拡充検討 p9」

(3) パネルゾーンのモデル化

「CLT 設計施工マニュアル」に準拠し、せん断剛性が等価なブレース置換とする。せん断弾性係数 G は、設計用性能として 500N/mm^2 を用いて算定した。

$$EA_b = \frac{G \cdot A \cdot L}{2H \cdot \cos^3 \theta} \quad (\text{式 3.3.2-1})$$

$$K = E \cdot A_b / (\sqrt{L^2 + H^2}) \quad \text{※ (式 3.3.2-1) のバネ値表現 (式 3.3.2-2)}$$

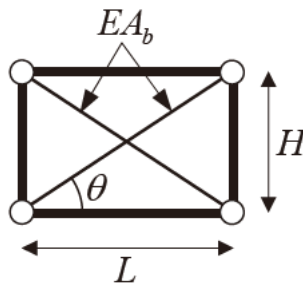


図 3.3.2-9 パネルゾーンの形状

表 3.3.2-2 パネルゾーンの等価ブレース剛性一覧

部材	壁 $G[\text{N/mm}^2]$	壁厚[mm]	壁幅[mm]	垂壁/腰壁せい[mm]	$K[\text{N/mm}]$
垂れ壁	500	90	1000	500	56.25
垂れ壁	500	90	1500	500	75.00
垂れ壁	500	90	2000	500	95.63
腰壁	500	90	1000	900	45.25
腰壁	500	90	2000	900	60.13

(4) 重量

本試験体は積載荷重を載荷しない試験体ではあるが、躯体重量が抑え込みのカウンターウェイトになるため、表 3.3.2-1 に示した木部材については $\gamma = 4.5\text{kN/m}^3$ の自重を見込むものとする。

3.3.3 入力変位を決定するための想定 A_i 分布による荷重増分解析

本実験は各層に設置したアクチュエータによる変位制御荷重となるため、本事前解析では A_i 分布による荷重増分解析を実施し、目標変形角毎の1層に対する2層及び3層の変形比を算出する。加力は試験体1、2ともに2ケース実施する。

加力1は事前解析に基づく A_i 分布を想定した強制変形入力とし、特定変形角毎に正負交番の繰り返し荷重である。加力1では一般的な設計で用いる安全限界変形角の $1/30\text{rad}$ 程度までの変形を与える。加力2は、参考加力として、加力1の終了後の試験体を活用して、これまでの試験で確認できていない破壊状況の確認用として、2層目で破壊させることを目的に、加力1の変形入力に対して、2層目と3層目の入力変形量を3.0倍とした入力変形を単調荷重として与えた。

本節では加力1に対する荷重増分解析について説明する。まず、本試験の想定する重量と外力分布について説明する。加力1は一般的なCLTパネル工法建物の総3階建てを想定し、R階を 3.75kN/m^2 、床階を 5.0kN/m^2 として重量を仮定し、 A_i 分布を算出した。試験体はセットバックした形状となるが、総3階建てを想定した A_i 分布を維持させ、3階については実際の負担面積が半分として負担面積見合いで基準水平力として設定する。試験体1の1層は壁長さが合計 4m となるため、壁倍率換算5倍を基準化水平力と設定(1層目： $5 \times 1.96 \times 4 \div 40\text{kN}$)し、事前解析モデルに外力設定した。

表 3.3.3-1 想定する試験体の A_i 分布の水平荷重

階	屋根/床	H[m]	$A[\text{m}^2]$	$W/A[\text{kN/m}^2]$	$W_i[\text{kN}]$	$\sum w_i[\text{kN}]$	α_i	A_i	C_i	$Q_i[\text{kN}]$	基準化 $Q_i[\text{kN}]$	基準化 $P_i[\text{kN}]$
3F	屋根	3.0	10	3.75	38	38	0.158	1.490	0.298	11.2	9.4	9.4
2F	床	3.0	20	5.00	100	138	0.579	1.184	0.237	32.6	27.4	18.0
1F	床	3.0	20	5.00	100	238	1.000	1.000	0.200	47.5	40.0	12.6

解析モデルへの荷重位置は実際の試験に合わせて、床面に節点荷重として与え、引き (+) は下図の3R~1R位置に加力、押し (-) は3L~1L位置に加力する。初期荷重を与えて $P\delta$ 効果を考慮する。

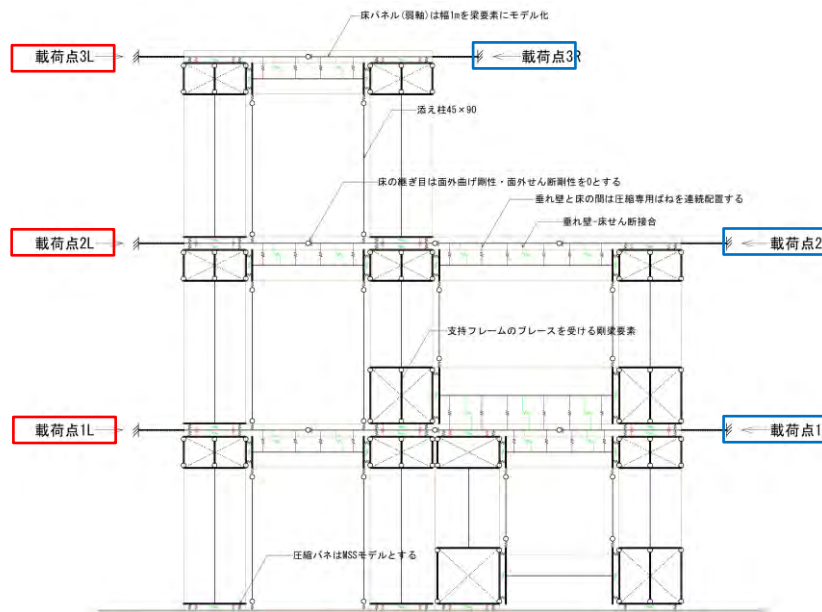
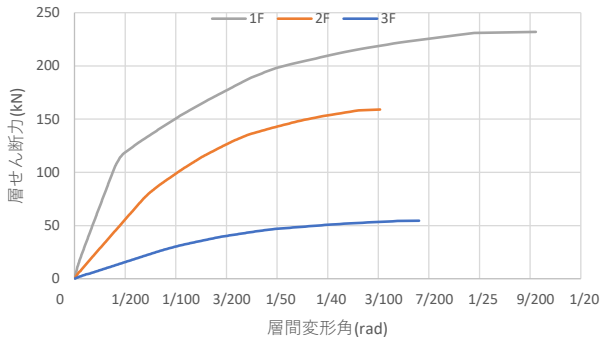


図 3.3.3-1 加力位置

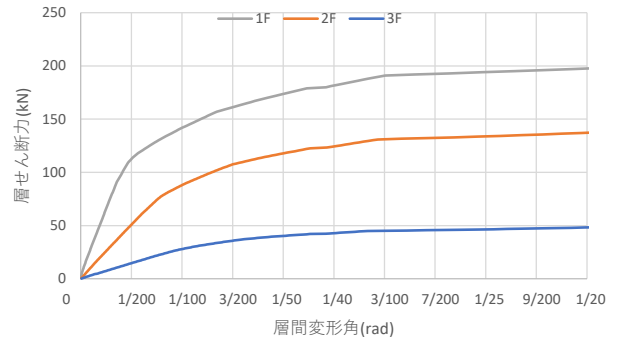
3.3.4 荷重増分解析結果と入力変形比

以上の事前解析モデルの荷重増分解析により得られた荷重変形関係及び、1層の層間変形角が1/450~1/30に達したステップにおける1層に対する2層と3層の変形比を以下に示す。

1層の最大層せん断力は試験体1で250kN程度、一部モデルに修正を加えた試験体2で350kN程度であることが確認できた。また、加力1は引きと押し、また各目標変形角に応じて、以下の表に示す変形割合で強制変形を与えた。

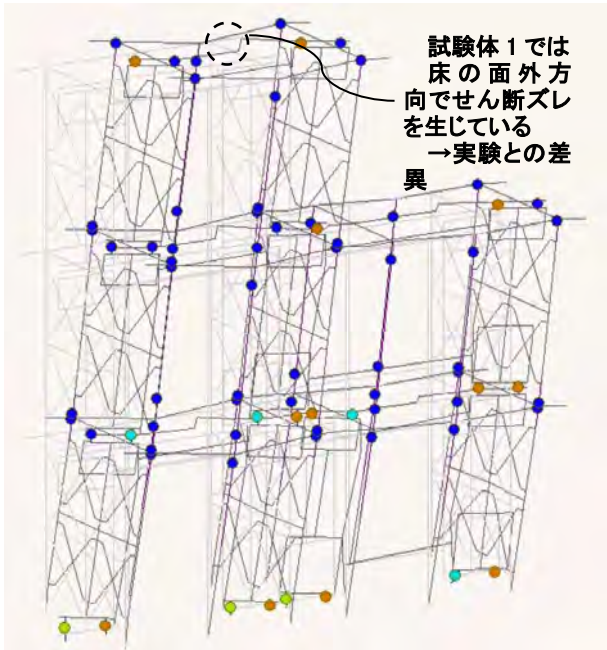


(押し)

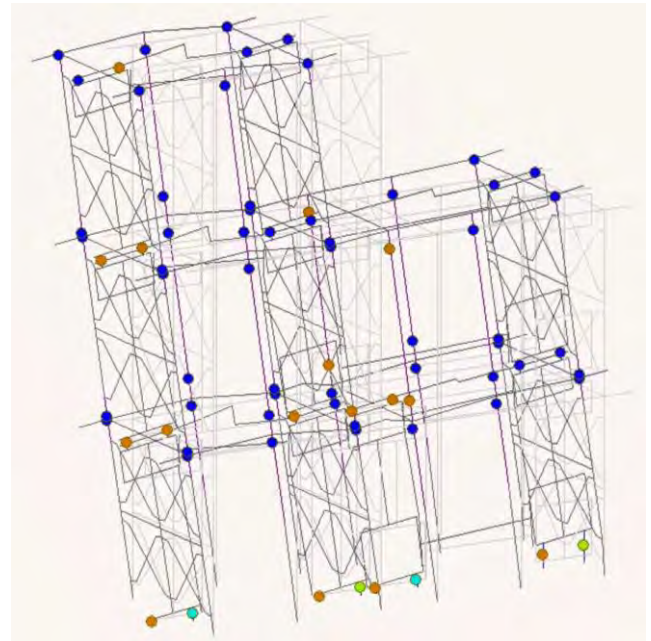


(引き)

図 3.3.4-1 事前解析による荷重変形関係 (試験体1)



(押し)

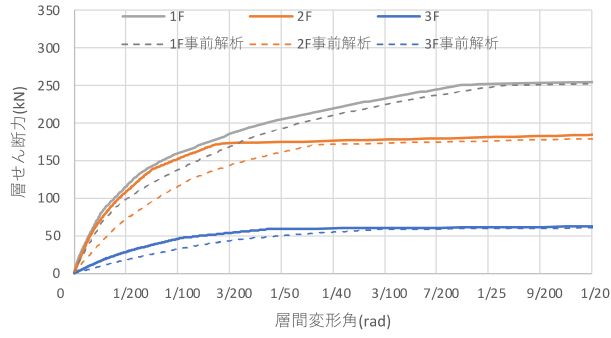


(引き)

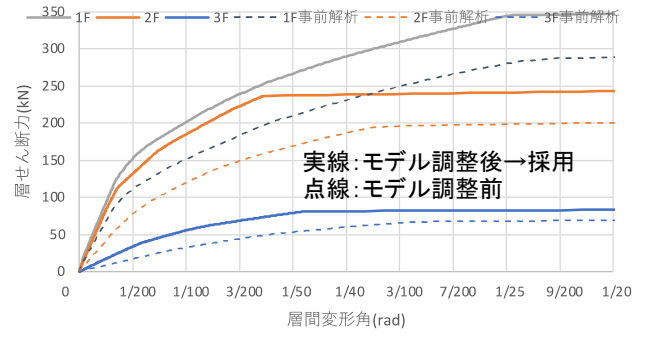
図 3.3.4-2 最大変形角が1/30rad程度の変形図 (試験体1)

表 3.3.4-1 加力1の強制変形比（試験体1）

<試験体1>														
■荷重増分解析 +加力（押し）														
1層 層間変形角 [rad]	アクチュエーター部						層せん断力-層間変形角							
	2階床部		3階床部		R階床部		1層に対する変形比		1F		2F		3F	
	水平力 [kN]	絶対変位 [mm]	水平力 [kN]	絶対変位 [mm]	水平力 [kN]	絶対変位 [mm]	2層	3層	層せん断力 (kN)	層間変形角 (rad)	層せん断力 (kN)	層間変形角 (rad)	層せん断力 (kN)	層間変形角 (rad)
1/450	19.2	6.4	27.5	17.5	14.3	31.2	2.7	4.9	61.0	0.0022	41.8	0.0037	14.3	0.0046
1/300	28.0	9.6	40.1	26.1	20.9	46.2	2.7	4.8	89.0	0.0033	61.0	0.0055	20.9	0.0067
1/200	37.5	14.6	53.6	37.1	28.0	64.4	2.5	4.4	119.0	0.0050	81.5	0.0075	28.0	0.0091
1/150	41.0	19.3	58.5	44.9	30.6	75.2	2.3	3.9	130.0	0.0067	89.1	0.0085	30.6	0.0101
1/100	47.6	29.1	68.0	61.3	35.5	98.6	2.1	3.4	151.0	0.0101	103.4	0.0107	35.5	0.0124
1/75	53.2	38.8	76.1	77.4	39.7	121.3	2.0	3.1	169.0	0.0134	115.8	0.0129	39.7	0.0147
1/50	62.7	58.9	89.6	111.3	46.8	170.7	1.9	2.9	199.0	0.0203	136.3	0.0175	46.8	0.0198
1/40	66.2	73.1	94.5	134.2	49.4	203.6	1.8	2.8	210.0	0.0252	143.9	0.0204	49.4	0.0231
1/30	70.3	95.5	100.4	169.2	52.4	253.0	1.8	2.6	223.1	0.0330	152.8	0.0246	52.4	0.0279
■荷重増分解析 -加力（引き）														
1層 層間変形角 [rad]	アクチュエーター部						層せん断力-層間変形角							
	2階床部		3階床部		R階床部		1層に対する変形比		1F		2F		3F	
	水平力 [kN]	絶対変位 [mm]	水平力 [kN]	絶対変位 [mm]	水平力 [kN]	絶対変位 [mm]	2層	3層	層せん断力 (kN)	層間変形角 (rad)	層せん断力 (kN)	層間変形角 (rad)	層せん断力 (kN)	層間変形角 (rad)
1/450	18.6	6.5	26.6	18.3	13.9	32.5	2.8	5.0	59.0	0.0022	40.4	0.0039	13.9	0.0047
1/300	27.1	9.7	38.7	27.2	20.2	48.0	2.8	5.0	86.0	0.0033	58.9	0.0058	20.2	0.0070
1/200	35.6	14.7	50.9	38.5	26.6	66.5	2.6	4.5	113.0	0.0051	77.4	0.0079	26.6	0.0094
1/150	39.1	19.2	55.8	47.3	29.1	79.3	2.5	4.1	124.0	0.0066	84.9	0.0094	29.1	0.0106
1/100	44.7	29.1	63.9	65.8	33.4	105.6	2.3	3.6	142.0	0.0100	97.3	0.0122	33.4	0.0133
1/75	49.1	38.3	70.2	82.7	36.7	129.8	2.2	3.4	156.0	0.0132	106.9	0.0148	36.7	0.0157
1/50	54.8	58.4	78.3	120.7	40.9	183.4	2.1	3.1	174.0	0.0202	119.2	0.0208	40.9	0.0209
1/40	57.3	73.2	81.9	149.0	42.8	223.5	2.0	3.1	182.0	0.0253	124.7	0.0253	42.8	0.0248
1/30	60.5	95.4	86.4	190.3	45.1	280.6	2.0	2.9	192.0	0.0329	131.5	0.0316	45.1	0.0301

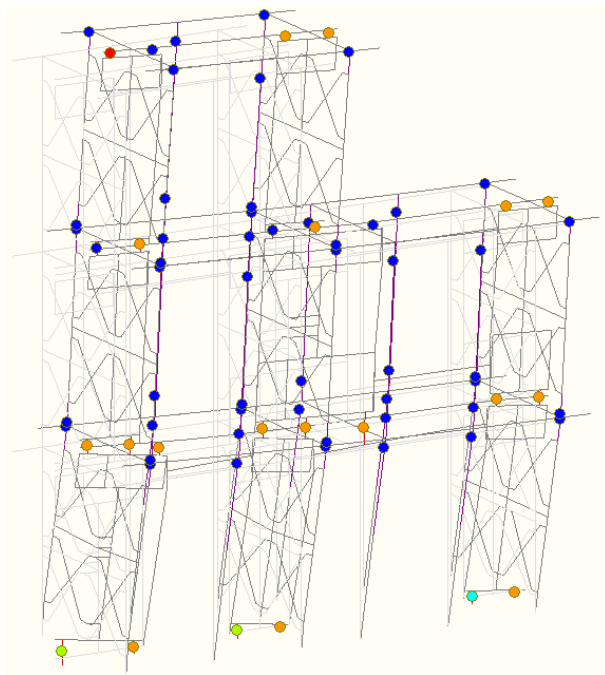


(押し)

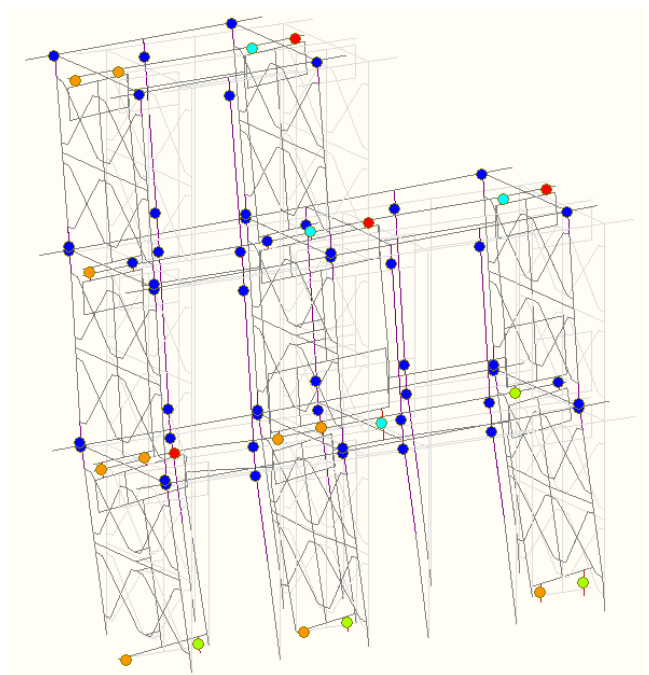


(引き)

図 3.3.4-3 事前解析による荷重変形関係 (試験体 2)



(押し)



(引き)

図 3.3.4-4 最大変形角が 1/30rad 程度の変形図 (試験体 2)

表 3.3.4-2 加力1の強制変形比（試験体2）

<試験体2>

■荷重増分解析 +加力（押し）

1層 層間変形角 [rad]	アクチュエーター部						層せん断力-層間変形角							
	2階床部		3階床部		R階床部		1層に対する変形比		1F		2F		3F	
	水平力 [kN]	絶対変位 [mm]	水平力 [kN]	絶対変位 [mm]	水平力 [kN]	絶対変位 [mm]	2層	3層	層せん断力 (kN)	層間変形角 (rad)	層せん断力 (kN)	層間変形角 (rad)	層せん断力 (kN)	層間変形角 (rad)
1/450	22.1	6.4	31.6	10.8	16.5	18.3	1.7	2.9	70.3	0.0022	48.2	0.0015	16.5	0.0025
1/300	28.9	9.6	41.3	15.8	21.6	26.1	1.7	2.7	91.8	0.0033	62.9	0.0021	21.6	0.0034
1/200	36.3	14.4	51.8	23.3	27.1	37.2	1.6	2.6	115.2	0.0050	78.9	0.0030	27.1	0.0046
1/150	42.6	19.0	60.8	30.5	31.8	47.8	1.6	2.5	135.1	0.0066	92.5	0.0038	31.8	0.0058
1/100	50.2	28.8	71.7	44.0	37.4	66.0	1.5	2.3	159.3	0.0100	109.1	0.0050	37.4	0.0073
1/75	55.6	38.4	79.4	56.4	41.4	82.1	1.5	2.1	176.4	0.0133	120.8	0.0060	41.4	0.0086
1/50	64.3	57.0	91.9	80.3	48.0	112.5	1.4	2.0	204.2	0.0197	139.9	0.0078	48.0	0.0108
1/40	68.8	71.5	98.3	100.0	51.3	139.4	1.4	1.9	218.5	0.0247	149.7	0.0095	51.3	0.0131
1/30	75.7	95.8	108.2	132.8	56.5	183.4	1.4	1.9	240.4	0.0331	164.7	0.0123	56.5	0.0169

■荷重増分解析 -加力（引き）

1層 層間変形角 [rad]	アクチュエーター部						層せん断力-層間変形角							
	2階床部		3階床部		R階床部		1層に対する変形比		1F		2F		3F	
	水平力 [kN]	絶対変位 [mm]	水平力 [kN]	絶対変位 [mm]	水平力 [kN]	絶対変位 [mm]	2層	3層	層せん断力 (kN)	層間変形角 (rad)	層せん断力 (kN)	層間変形角 (rad)	層せん断力 (kN)	層間変形角 (rad)
1/450	26.2	6.4	37.5	11.5	19.6	20.0	1.8	3.1	83.3	0.0022	57.0	0.0017	19.6	0.0028
1/300	37.6	9.5	53.7	16.9	28.0	29.2	1.8	3.1	119.2	0.0033	81.7	0.0024	28.0	0.0041
1/200	47.8	14.3	68.3	24.0	35.7	40.0	1.7	2.8	151.8	0.0050	104.0	0.0032	35.7	0.0053
1/150	54.0	19.2	77.2	31.0	40.3	49.6	1.6	2.6	171.6	0.0066	117.5	0.0039	40.3	0.0062
1/100	63.3	28.8	90.4	45.1	47.2	68.6	1.6	2.4	200.8	0.0099	137.6	0.0054	47.2	0.0079
1/75	71.5	38.4	102.2	58.9	53.4	87.1	1.5	2.3	227.1	0.0133	155.6	0.0068	53.4	0.0094
1/50	83.7	57.4	119.5	86.2	62.4	123.1	1.5	2.1	265.6	0.0198	181.9	0.0096	62.4	0.0123
1/40	91.2	72.3	130.3	107.4	68.0	151.7	1.5	2.1	289.6	0.0250	198.3	0.0117	68.0	0.0148
1/30	101.0	96.1	144.3	139.7	75.4	194.1	1.5	2.0	320.7	0.0332	219.7	0.0145	75.4	0.0181

3.3.5 実験結果と事前解析の比較

各階の層せん断力-層間変形角の関係について、実験結果と荷重増分解析による事前解析結果の比較を以下に示す。試験体 1 は各層ともに事前解析が実験値を大幅に下回っていることが確認できる。これは前述したように、主に床継手部を面外方向に曲げとせん断に期待しない設定としていることが主な原因と考え、試験体 2 ではそれらのモデル修正を行った。試験体 2 を確認すると、初期剛性はいずれの層も概ね良く対応しており、2 層及び 3 層に関しては降伏後の耐力も比較的良く対応している。1 層に関しては塑性化が顕著となる変形角 1/100rad を超えて以降、事前解析が実験値を若干下回る傾向が確認できる。これらの違いについて、3.4 の詳細モデルによる事後解析で分析を行った。

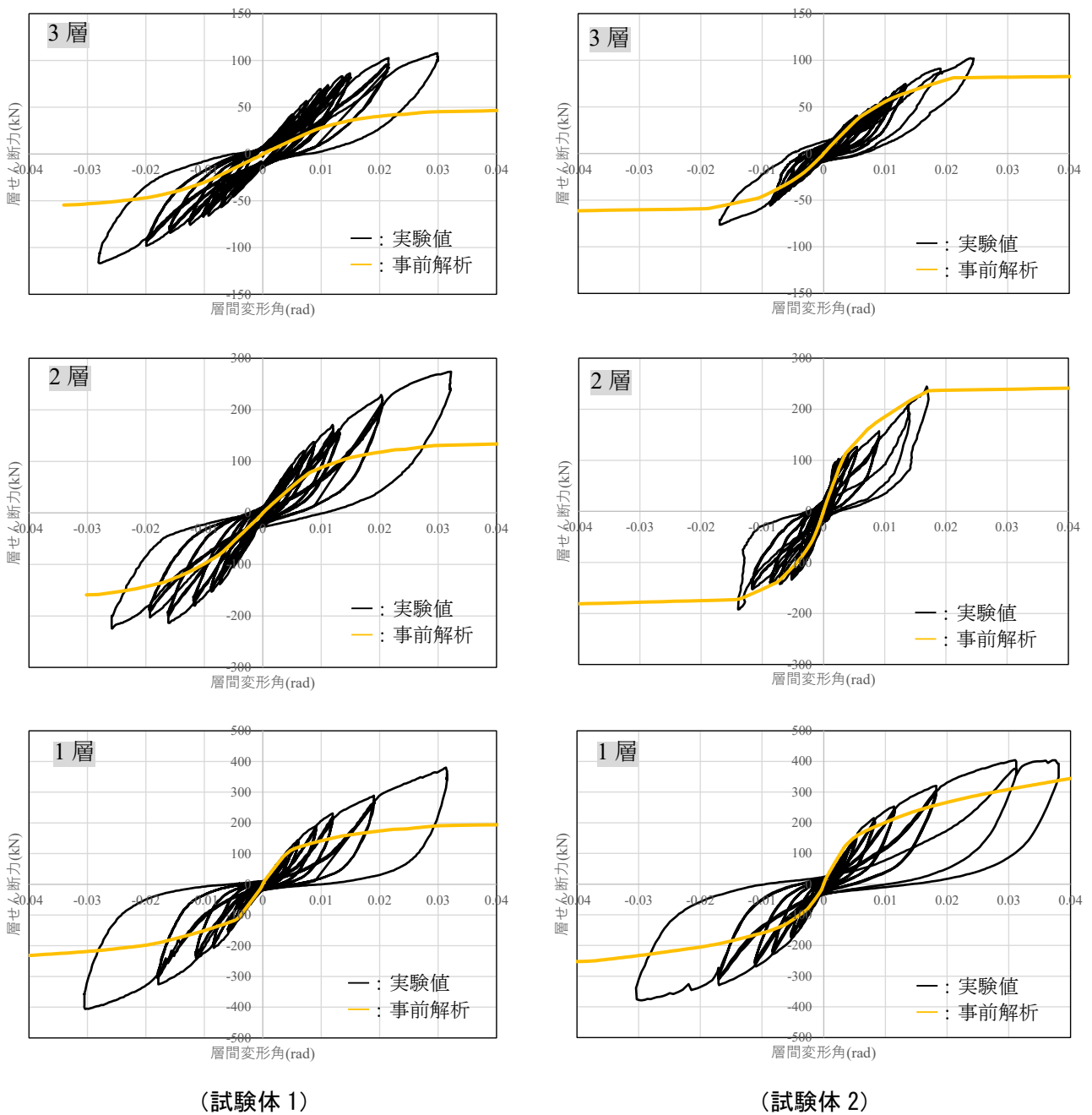


図 3.3.5-1 実験結果と事前解析の比較

3.4 詳細モデルの実態性能による事後解析

3.4.1 目的

事後解析として実験結果の再現を試みた実態性能の詳細モデルによる解析について示す。入力試験により実際に得られた各層の変形量を強制変形増分解析として与える。試験体全体の性能として層せん断力の比較の他、各パネルの負担せん断力、引張接合部の発生軸力など部位の比較も行う。

3.4.2 解析モデル

詳細モデルによる事後解析モデルを次項に示す。事前解析モデルと事後解析モデルの主な違いを以下の表に示す。

表 3.4.2-1 詳細モデルによる事後解析モデルと事前解析の違い

本章の構成	3.3		3.4	3.5			
解析フェーズ	事前解析			事後解析			
目的	・実験で与える入力変形比率の算出 ・計画段階における性能予測		・実験結果の再現を試みた詳細モデルであり、要素試験による各部の実態性能等を採用	・提案した簡易モデルについて、 →設計用詳細モデルとの比較によるモデル精度検証 →実験値及び実態用詳細モデルとの比較による安全性の確認			
荷重入力	・Ai分布に基づく ”荷重増分解析”		・加力1の試験で得られた各層変形値による”強制変形増分解析”				
試験体	試験体1	試験体2		試験体1、試験体2			
解析モデル	詳細モデル (実態_床考慮)		詳細モデル (実態_床考慮)	詳細モデル (設計_床考慮)	簡易モデル (設計_床考慮)	詳細モデル (設計_床無し)	簡易モデル (設計_床無し)
床の面外抵抗	継手部: 曲げせん断ピン	継手部:剛	継手部:剛	継手部:曲げピン		床の壁端部をピン →面外に効かない	基本、床要素はモデル化しない
床の性能	Mx60-5-7 (設計性能_弱軸)	試験体1に 対して17.5 倍	Mx60-5-7(実態性能_弱軸) →CLT床の面外曲げ 要素試験値(2.8)参照	Mx60-5-7(設計性能_弱軸)			
各接合部の性能	既往報告書8)による実態性能		既往報告書8)による実態性能+ 要素試験による性能補正 ・引きボルトの引張試験値(2.9) ・せん断金物の引張抵抗追加(2.6) 壁基礎せん断性能は、本実験を参考に再設定	「CLT設計施工マニュアル」に準拠した設計性能			

試験体1の事後解析モデルは、まず試験体2の事前解析モデルの条件に合わせ、かつ実態に応じたモデルに微調整をした。更に、試験体1、試験体2ともに、2章の要素試験の結果を参考にして各部の性能を補正した。なお、床継手部は実態としては完全な剛ではなく回転バネが正だと考えられるが、継手部をピンとした場合と、剛とした場合に大差がないことを鑑み、本検討では剛とした。

<要素試験を参考に設定した性能>

- ・床の面外曲げせん断性能については、2.8で示した実験結果の平均値を用いた。
- ・引張ボルトの耐力は、2.9で示した実験結果の平均値を用いた。剛性は事前解析と同様にした。
- ・2.6の要素試験にて確認できたように、せん断金物は実際には引張抵抗するため、全てのせん断接合部に引張バネを追加した。なお、せん断金物の引張実験を実施していないため、本検討では「CLT設計施工マニュアル」に記載されたビス一本当たりのせん断性能をビス本数分で整数倍した性能を用いた。
- ・壁基礎せん断金物は、実際には付加軸力に応じた摩擦抵抗と、金物のせん断抵抗が複合した複雑な抵抗となる。ここでは、壁基礎滑り変形と、三分力計で得られた荷重の関係を用いて性能を再定義した。

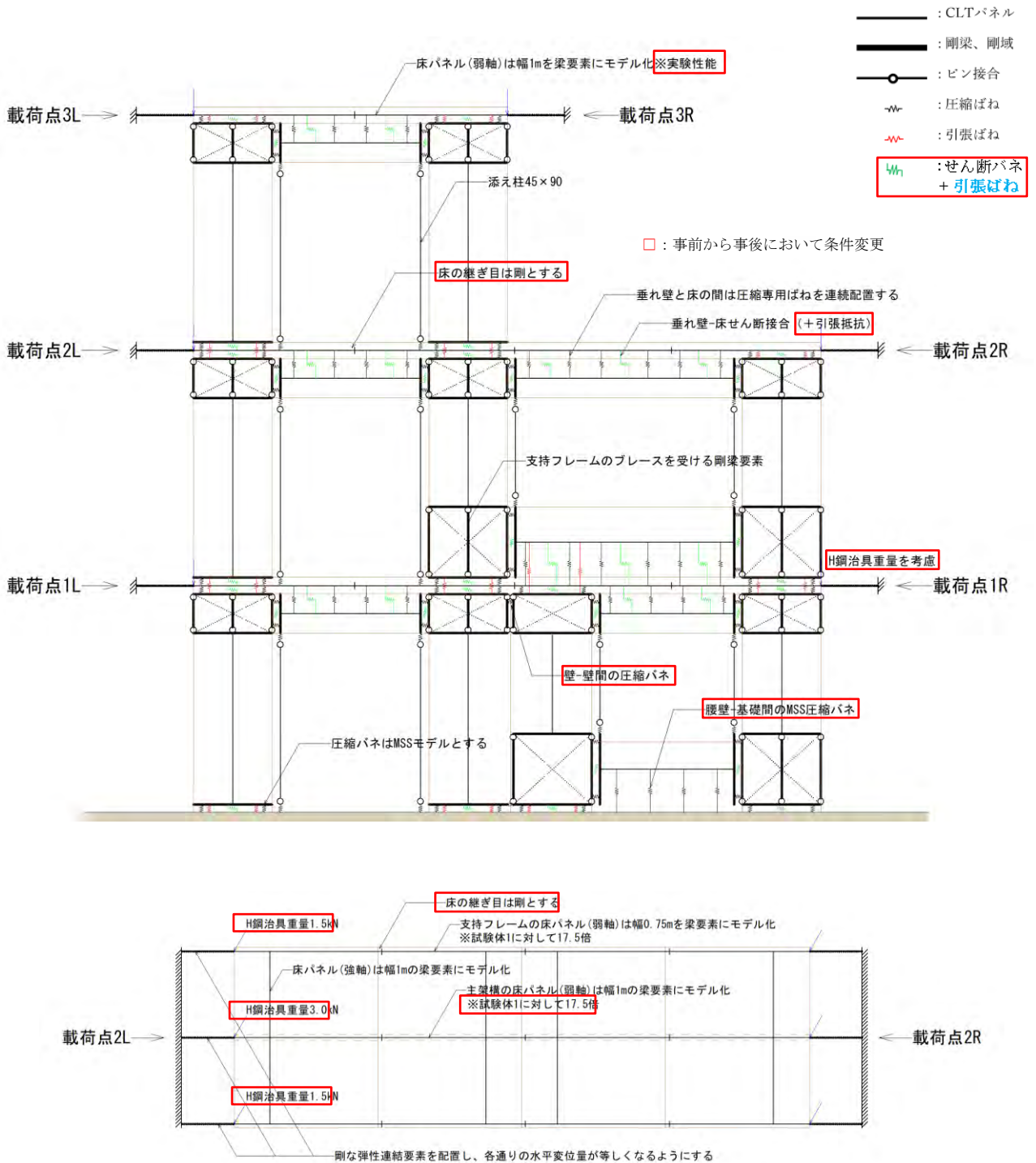


図 3.4.2-1 中央構面及び3階床面の詳細モデルの事後解析モデル(試験体1)

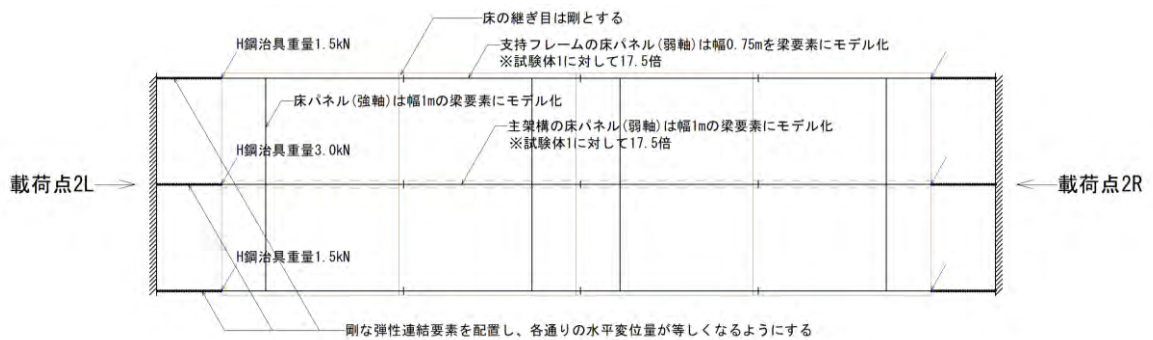
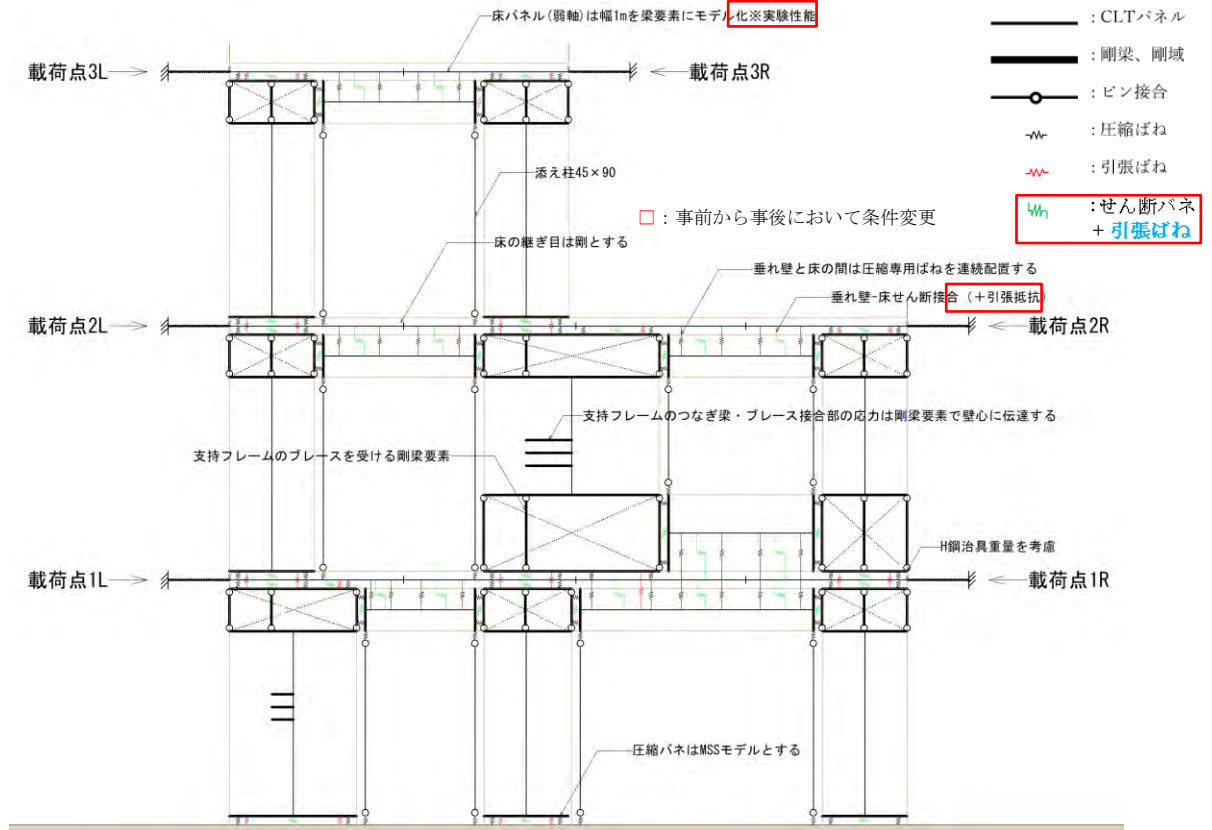


図 3.4.2-2 中央構面及び3階床面の詳細モデルの事後解析モデル(試験体2)

(1) 母材性能

母材の性能は以下に示す性能として、弾性要素とした。床の面外曲げせん断性能については、2.8 で示した実験結果の平均値を用いた。

表 3.4.2-2 弾性要素の母材性能一覧

部材	強度区分	BD[mm]	E[N/mm ²]	G[N/mm ²]	備考
壁(面内)	S60-3-3_強軸(スギ)	90×1000 等	4000	500	
垂れ壁(面内)	S60-3-3_強軸(スギ)	90×500	4000	500	
腰壁(面内)	S60-3-3_強軸(スギ)	90×900	4000	500	
加力方向床(面外)	Mx60-5-7_弱軸(スギ)	1000×210	682 【3.1】	566 【62.9】	実験平均値
直交方向床(面外)	Mx60-5-7_強軸(スギ)	1000×210	7820 【1.4】	348 【12.0】	実験平均値
柱、中棧	E70(スギ)	1000×210	7000	-	両端ピン要素
ブレース M16	SS400	A=155 mm ²	205000	-	引張専用

【】：設計性能に対する倍率

(2) 引張接合部、せん断接合部、圧縮接合部

既往報告書⁸⁾で示された各部の実態性能を基に、以下のように補正した。なお、圧縮バネの縁部はめり込みや支圧変形なども確認されたが、本検討では事前解析モデルと同様に弾性バネとして設定した。

- ・引張ボルトの耐力は、2.9 で示した実験結果の平均値を用いた。剛性は事前解析と同様にした。
- ・2.6 の要素試験にて確認できたように、せん断金物は実際には引張抵抗するため、全てのせん断接合部に引張バネを追加した。なお、せん断金物の引張実験を実施していないため、本検討では「CLT 設計施工マニュアル」に記載されたビス一本当たりのせん断性能をビス本数分で整数倍した性能を用いた。
- ・壁基礎せん断金物は、実際には付加軸力に応じた摩擦抵抗と、金物のせん断抵抗が複合した複雑な抵抗となる。ここでは、壁基礎滑り変形と、三分力計で得られた荷重の関係を用いて性能を再定義した。

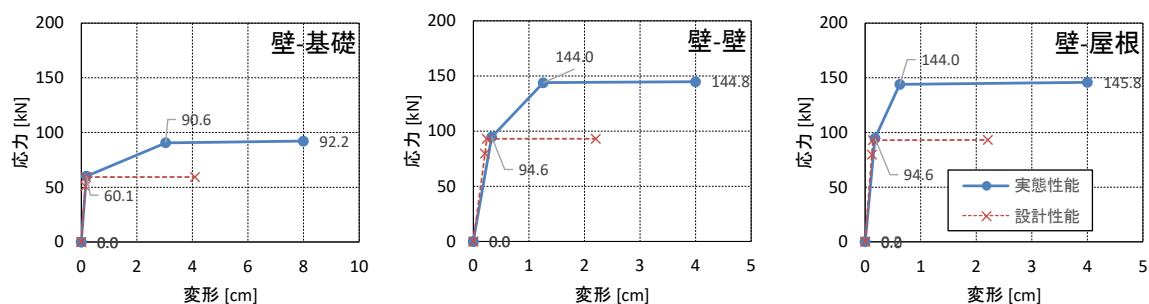
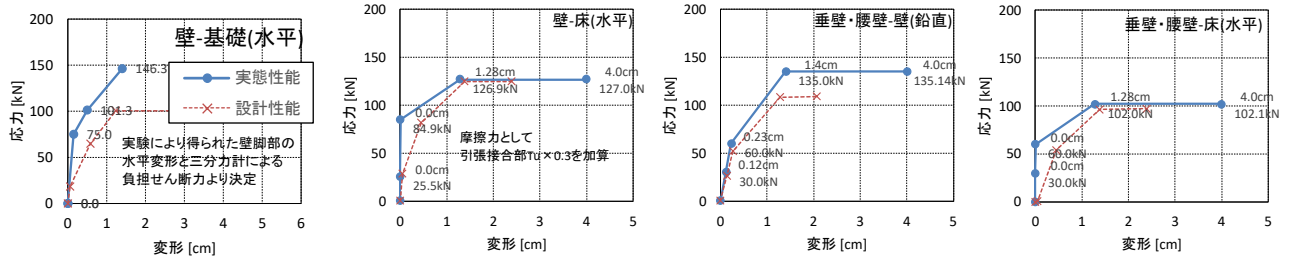
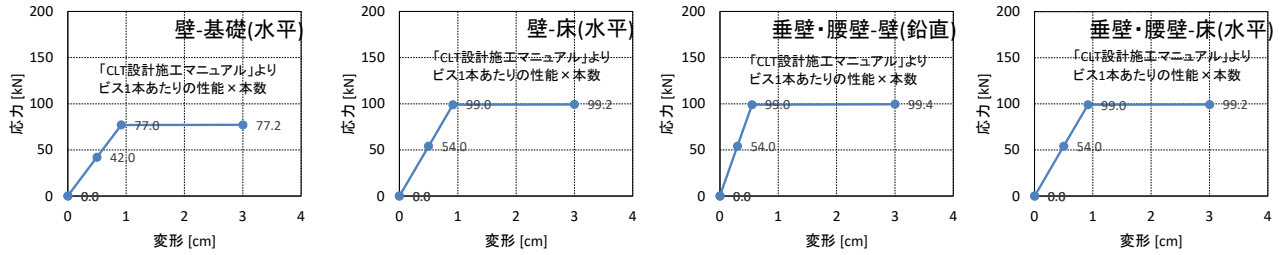


図 3.4.2-3 引張接合部の性能 (2.9 の要素試験より得られた平均値を採用)



せん断性能



引張性能

図 3.4.2-4 せん断接合部性能 (せん断性能+引張性能)

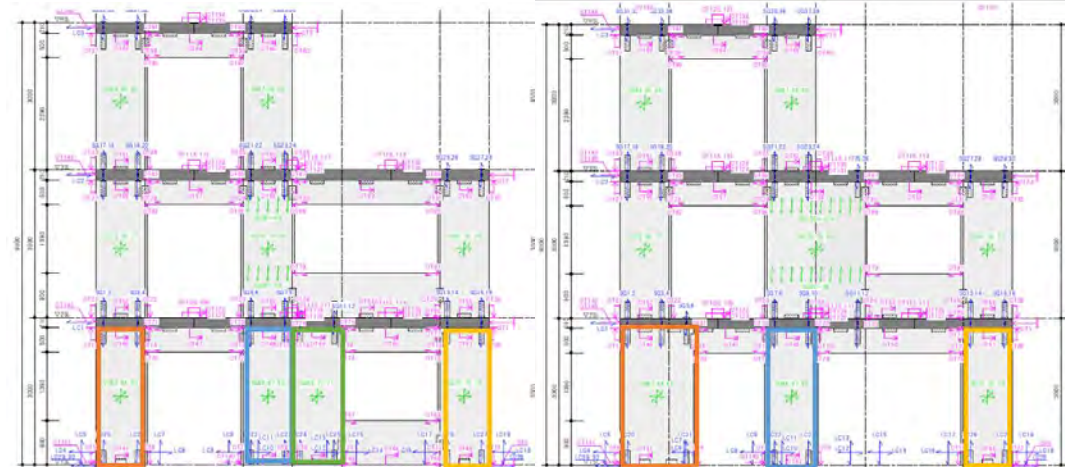
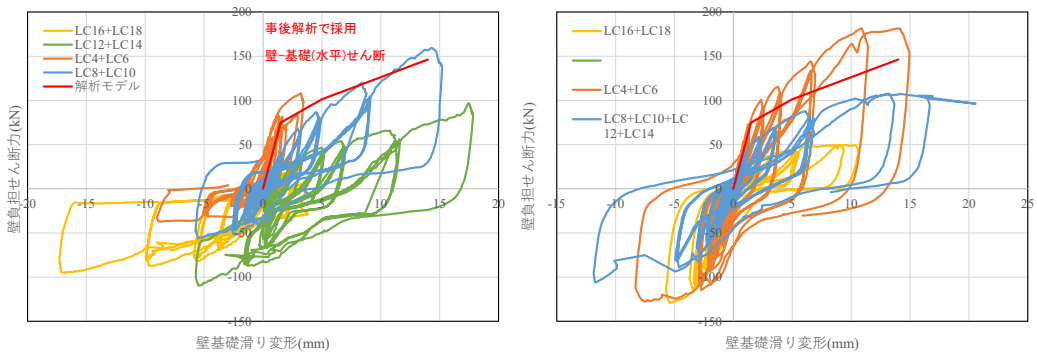


図 3.4.2-5 本試験で得られた壁基礎せん断滑り変形-三分力計による水平荷重関係

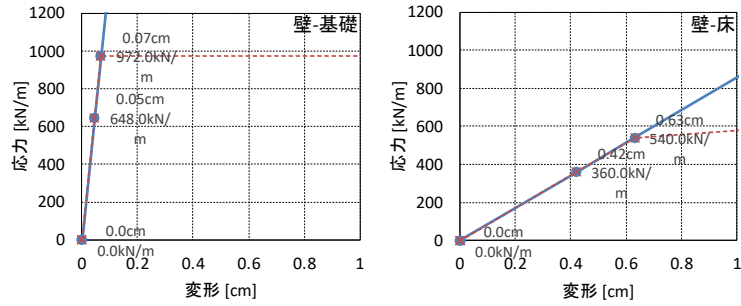


図 3.3.2-6 圧縮接合部の性能⁸⁾

(3) パネルゾーンのモデル化

事前解析と同様に、「CLT 設計施工マニュアル」に準拠し、せん断剛性が等価なブレース置換とする。せん断弾性係数 G は、設計用性能として 500N/mm^2 を用いて算定した。

(4) 重量

事前解析と同様に木部材については $\gamma = 4.5\text{kN/m}^3$ の自重を見込む。

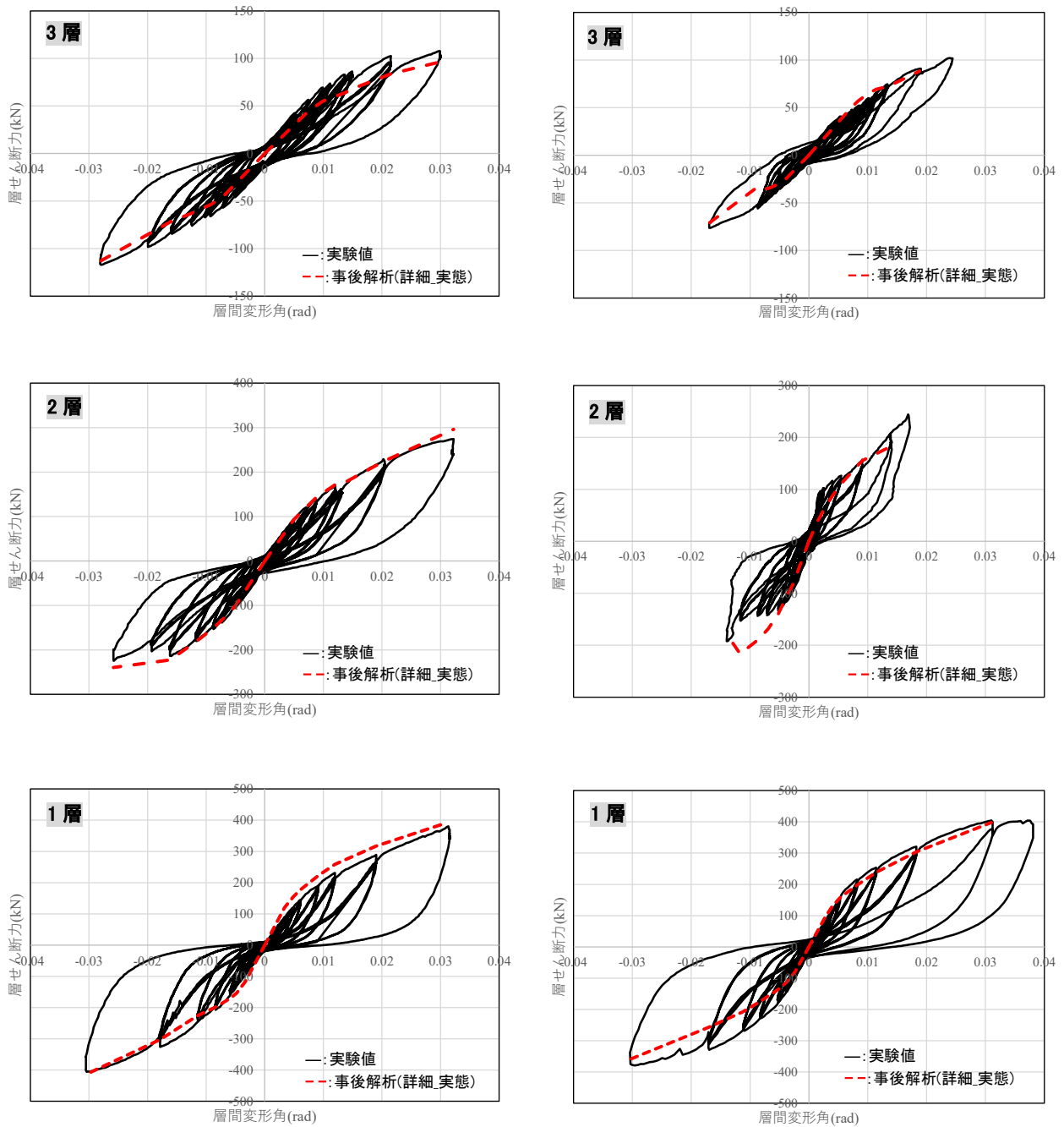
参考文献

8) 2018 年林野庁委託事業「CLT パネル工法の構造計算関係規定の拡充・合理化検討事業」報告書 第 2 章 ルート 1 関係規定の拡充検討 p9」

3.4.3 試験で得られた変位分布による変位増分解析と実験結果の比較

試験体1、2ともに、加力1を対象に、実験で得られた各層の変形量を解析モデルに強制変形増分解析として与える。初期荷重を与えてP δ 効果を考慮する。なお、目標変形角毎に変形比が異なるため、本解析においても、引きと押しの目標変形角毎の変位増分解析ケースを作成し、それぞれの最終ステップ時の各層の層せん断力、1層のパネル負担せん断力、壁基礎引張ボルトの軸力を算出し、実験結果と比較検証する。

(1) 層せん断力-層間変形角関係



(試験体 1)

(試験体 2)

図 3.4.3-1 実験結果と事前解析の比較

(2) 1階 CLT 壁パネルの負担せん断力の比較

実験値は三分力計による水平方向の荷重値を、解析では壁パネルの負担せん断力を抽出した。なお、試験体 1 のパネル②③④は、連続壁また腰壁が取り付く部分であり、三分力計による実験値はそれぞれのパネルせん断力の集計とはなっていないため、参考として灰色で示した。正負が異なるが絶対値の比較が良い。

表 3.4.3-1 1階壁パネルの負担せん断力の比較 (試験体 1)

引き(+)	CLTパネル①		CLTパネル②		CLTパネル③		CLTパネル④	
	実験値 LC4+LC6	詳細 (実態)	実験値 LC8+LC10	詳細 (実態)	実験値 LC12+LC14	詳細 (実態)	実験値 LC16+LC18	詳細 (実態)
1/300	29.4	-29.2	15.8	-29.6	21.1	-42.4	14.5	-29.9
1/200	38.5	-40.6	27.2	-27	29.0	-52.2	15.4	-35.4
1/150	46.3	-48.8	39.2	-30.7	34.6	-58.8	14.6	-38.1
1/100	58.4	-60.6	65.6	-37.8	44.7	-74.7	16.6	-49
1/75	70.4	-69.5	84.3	-43.6	52.0	-85.1	17.3	-60.7
1/50	80.3	-88.4	111.0	-51.6	63.7	-106.7	-0.1	-71
1/30	105.3	-113.2	157.3	-62.6	83.9	-133.5	7.3	-79
押し(-)	CLTパネル①		CLTパネル②		CLTパネル③		CLTパネル④	
	実験値 LC4+LC6	詳細 (実態)	実験値 LC8+LC10	詳細 (実態)	実験値 LC12+LC14	詳細 (実態)	実験値 LC16+LC18	詳細 (実態)
1/300	-11.4	14.2	-7.0	25.1	-25.7	38.7	-34.9	38.4
1/200	-15.3	17.4	-11.2	33.6	-34.8	52.8	-47.3	50.1
1/150	-17.5	17.6	-16.7	36.8	-42.9	60.7	-54.7	55.9
1/100	-19.8	17.7	-31.2	41.8	-57.4	74.2	-69.3	65.4
1/75	-20.0	16.3	-39.2	44.5	-67.0	90.5	-81.7	74.5
1/50	-31.1	27.8	-51.9	61.2	-87.0	117.2	-86.7	96.7
1/30	-37.0	43.4	-56.3	83.6	-109.5	156.7	-94.6	130.3



表 3.4.3-2 1階壁パネルの負担せん断力の比較 (試験体 2)

引き(+)	CLTパネル①		CLTパネル②		CLTパネル③	
	実験値 LC4+LC6	詳細 (実態)	実験値 LC8+LC10+ LC12+LC14	詳細 (実態)	実験値 LC16+LC18	詳細 (実態)
1/300	37.5	-54.6	24.1	-24	20.3	-18.1
1/200	51.5	-71.8	29.9	-32.6	23.2	-25.2
1/150	73.4	-86.4	41.8	-41.3	28.8	-29.9
1/100	98.9	-111.8	58.2	-52.6	32.6	-35.3
1/75	115.5	-135.7	69.2	-63.1	36.7	-40
1/50	109.9	-170.9	69.5	-83.3	32.6	-49.7
1/30	174.0	-223.7	105.5	-113.4	49.0	-60.7
押し(-)	CLTパネル①		CLTパネル②		CLTパネル③	
	実験値 LC4+LC6	詳細 (実態)	実験値 LC8+LC10+ LC12+LC14	詳細 (実態)	実験値 LC16+LC18	詳細 (実態)
1/300	-38.6	34.4	-28.7	19.4	-26.6	25.7
1/200	-54.1	44.8	-39.5	31.7	-42.3	38.6
1/150	-64.2	49.6	-48.5	36.4	-56.7	49.7
1/100	-78.8	61.3	-60.6	47.4	-77.8	64
1/75	-93.1	74.5	-71.2	57.5	-92.7	75.1
1/50	-112.6	88.6	-87.2	75	-112.2	94
1/30	-125.0	117.9	-106.0	110.2	-128.9	131.8



(3) 1階 CLT 壁パネルの壁脚引張ボルトの軸力比較

実験値は壁基礎引張ボルトに設置したロードセルの荷重値を示し、解析値は壁基礎引張バネの荷重値を示した。パネル番号は前述同様である。

表 3.4.3-3 1階壁パネル脚部の引張ボルト軸力の比較 (試験体 1)

引き(+)	CLTパネル①				CLTパネル②				CLTパネル③				CLTパネル④			
	左下		右下		左下		右下		左下		右下		左下		右下	
	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)
1/300	-0.5	0.0	40.3	28.6	0.0	0.0	24.2	36.5	0.0	0.0	29.1	60.1	0.8	0.6	50.6	57.3
1/200	-0.5	0.0	50.9	44.6	0.0	0.0	31.1	55.1	0.0	0.3	41.4	61.3	1.1	5.7	59.8	61.2
1/150	-0.5	0.0	58.5	57.0	0.0	0.0	35.6	60.6	0.0	2.6	50.2	62.3	0.1	11.1	60.2	62.2
1/100	-0.5	0.0	62.6	61.9	0.0	0.7	37.1	62.8	0.0	7.9	61.6	64.7	0.6	24.4	61.2	64.9
1/75	-0.5	0.0	62.0	64.0	0.0	5.3	37.3	64.8	0.0	11.8	60.8	66.7	0.1	34.4	64.7	67.3
1/50	-0.5	2.1	67.2	68.9	-0.1	17.8	38.9	69.7	0.0	26.0	64.9	71.9	5.6	59.9	73.7	73.5
1/30	-0.5	15.3	77.3	76.7	-0.1	45.8	45.6	78.3	0.0	54.9	74.4	80.9	23.9	62.0	83.7	84.4
押し(-)	CLTパネル①				CLTパネル②				CLTパネル③				CLTパネル④			
	左下		右下		左下		右下		左下		右下		左下		右下	
	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)
1/300	49.8	44.5	0.0	0.0	64.7	43.1	0.0	0.0	15.5	49.6	0.0	0.0	31.5	47.5	0.0	0.0
1/200	60.6	80.6	0.0	2.1	85.3	60.4	0.0	0.0	21.7	60.7	0.0	0.0	43.4	60.5	0.0	0.0
1/150	61.3	61.6	0.0	5.4	94.9	61.5	0.0	1.9	28.6	61.6	0.0	0.0	50.1	61.3	0.0	0.0
1/100	62.3	63.9	0.1	15.1	93.1	63.6	0.0	7.7	40.1	63.5	0.0	3.2	62.9	62.7	0.0	0.0
1/75	65.7	66.6	0.1	26.9	94.5	66.2	0.0	17.5	39.2	65.7	0.0	7.5	65.3	64.4	0.0	0.0
1/50	73.5	72.2	0.1	47.1	106.6	71.5	0.0	35.1	42.5	70.7	0.0	19.4	65.7	68.2	0.0	0.0
1/30	82.6	84.1	0.1	61.5	119.4	82.9	0.0	60.8	47.8	80.8	0.0	48.6	73.8	76.1	0.0	13.6

表 3.4.3-4 1階壁パネル脚部の引張ボルト軸力の比較 (試験体 2)

引き(+)	CLTパネル①				CLTパネル②				CLTパネル③			
	左下		右下		左下		右下		左下		右下	
	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)
1/300	0.0	0.0	28.9	49.3	0.0	0.0	22.1	31.6	0.7	0.0	41.2	36.1
1/200	0.0	0.0	38.4	60.7	0.0	0.0	29.2	48.4	1.2	0.0	50.9	53.4
1/150	0.0	0.0	53.7	62.2	0.0	0.0	36.9	60.5	0.5	1.8	62.2	60.9
1/100	-0.1	0.0	64.6	65.5	0.0	3.0	40.4	62.9	0.2	11.7	61.9	63.6
1/75	0.0	0.0	65.1	68.9	0.0	8.2	40.0	65.3	0.0	23.2	64.4	66.5
1/50	0.0	0.0	53.8	77.5	0.0	21.4	33.0	70.6	0.0	48.1	52.6	72.7
1/30	0.0	14.6	82.6	90.7	0.0	56.7	49.2	81.0	0.0	61.6	81.7	84.9
押し(-)	CLTパネル①				CLTパネル②				CLTパネル③			
	左下		右下		左下		右下		左下		右下	
	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)	実験値	詳細 (実態)
1/300	42.9	49.9	0.0	0.0	27.9	30.0	1.2	0.0	15.3	21.4	-0.1	0.0
1/200	59.2	61.5	0.0	0.0	36.9	53.3	0.3	0.0	30.2	38.6	-0.1	0.0
1/150	65.2	63.2	0.0	0.0	42.4	61.0	0.0	1.4	41.9	53.1	-0.1	0.0
1/100	63.1	67.0	0.0	4.3	40.0	63.4	0.0	7.3	59.1	61.6	-0.1	0.0
1/75	71.0	70.9	0.0	9.0	40.0	66.0	0.0	15.1	65.6	63.8	-0.1	0.0
1/50	78.8	79.0	0.0	25.7	44.9	70.8	0.0	29.9	65.0	68.0	-0.1	1.5
1/30	88.9	90.8	0.0	60.5	51.0	81.0	0.0	58.7	77.8	77.1	-0.1	20.3

(4) 目標変形角毎の変形図及び応力図

詳細モデルの事後解析により得られた変形図、応力図を目標変形角毎に示す。

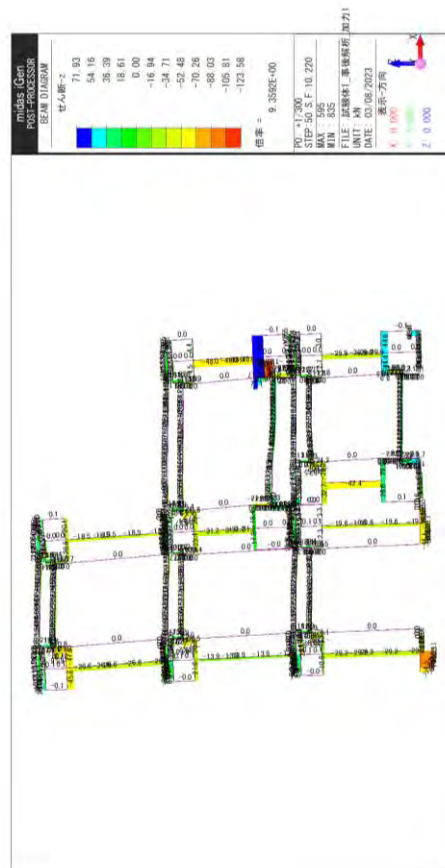
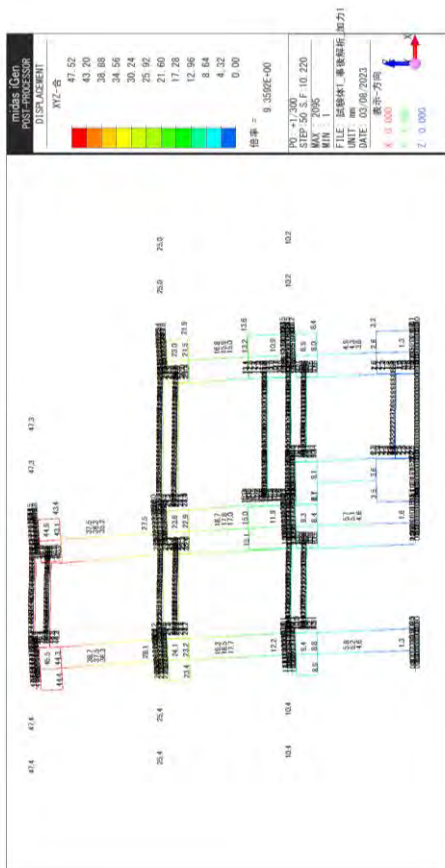
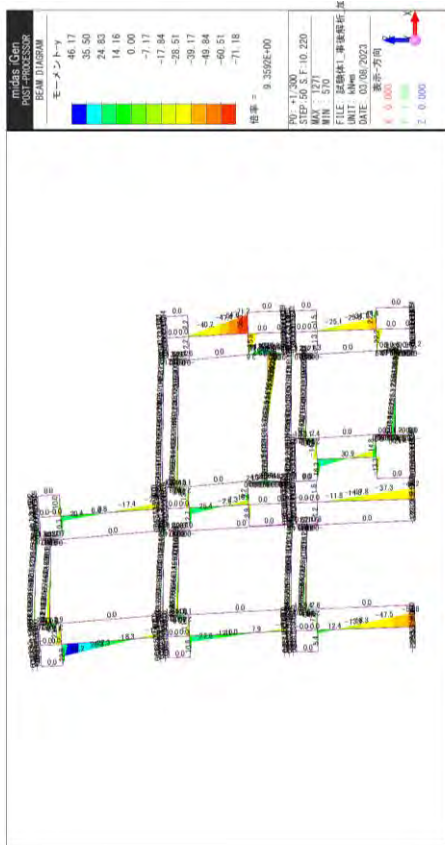
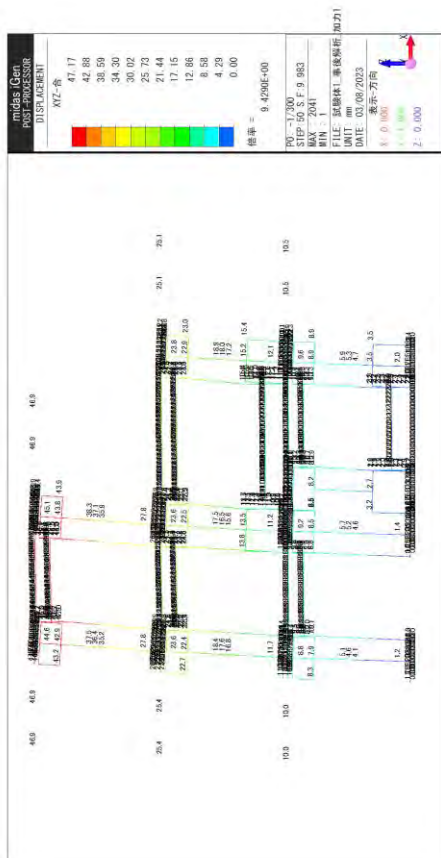
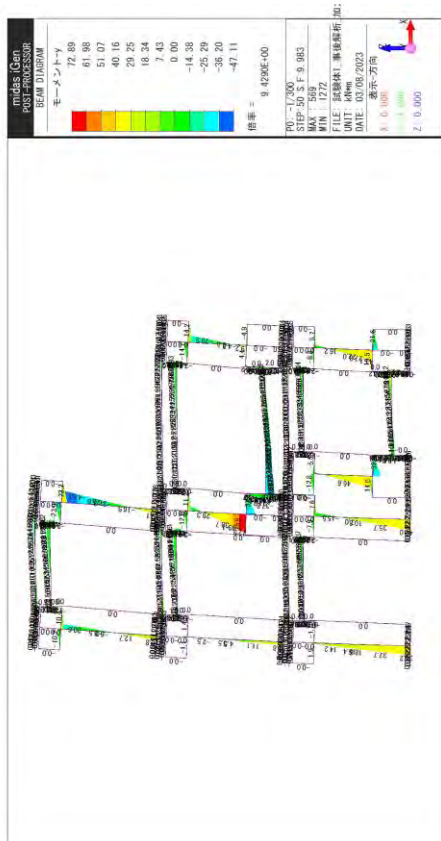


図 3.4.3-2 詳細モデル (事後_実態) による変形、応力図 (試験体 1 1/300 引き)



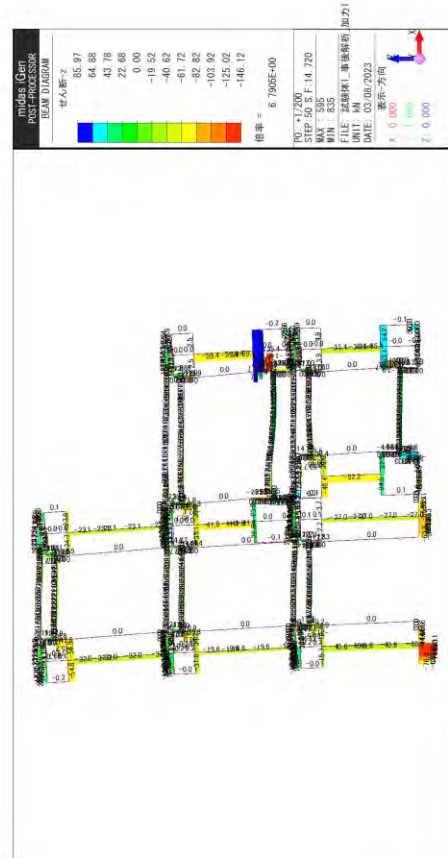
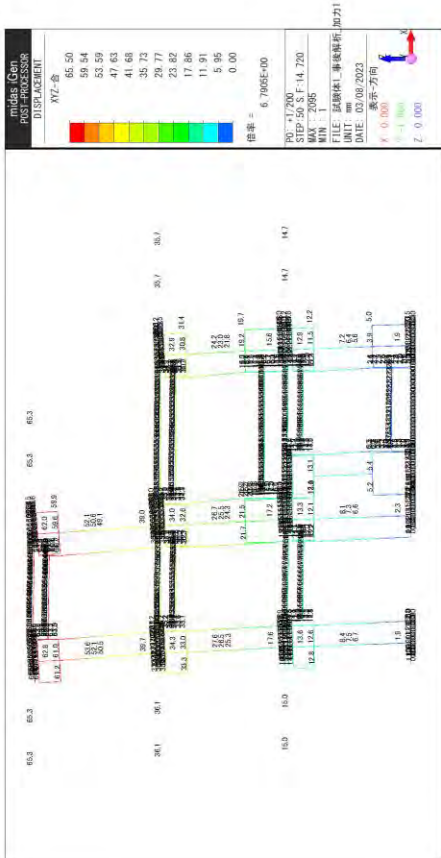
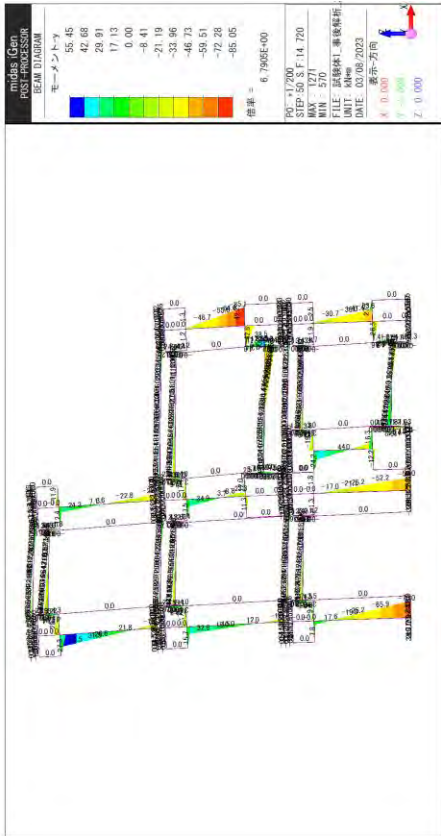


図 3.4.3-4 詳細モデル (事後_実態) による変形、応力図 (試験体 1 1/200 引き)

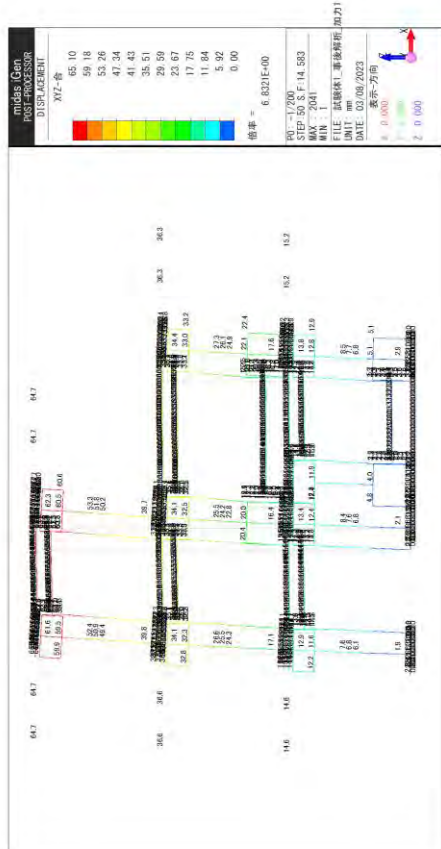
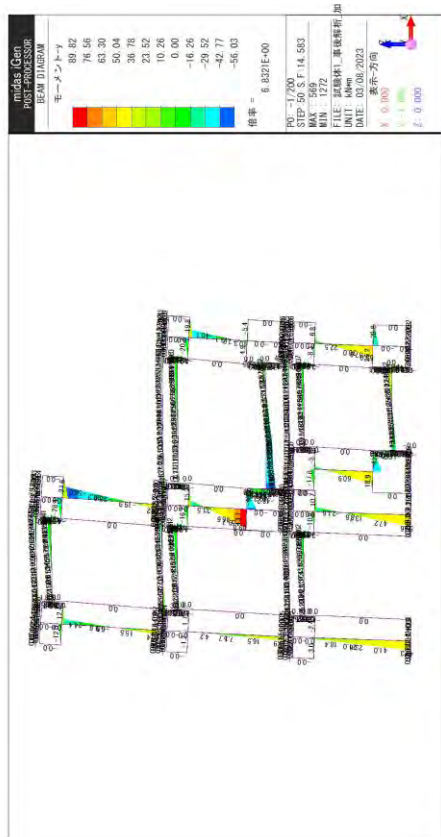


図 3.4.3-5 詳細モデル (事後_実態) による変形、応力図 (試験体 1 1/200 押し)

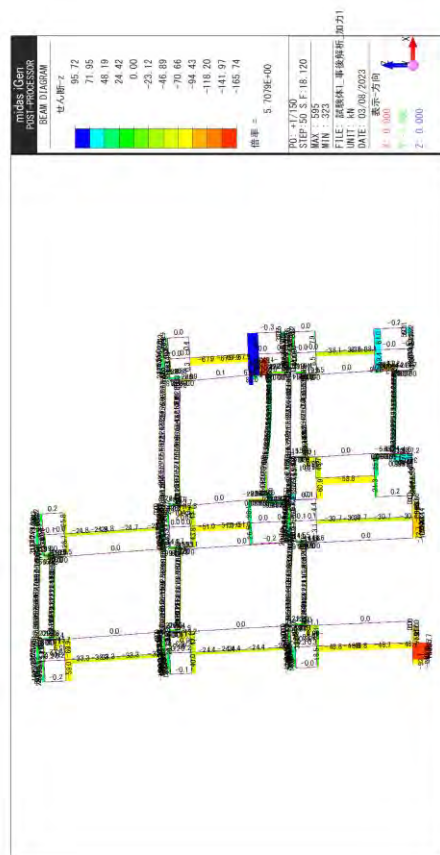
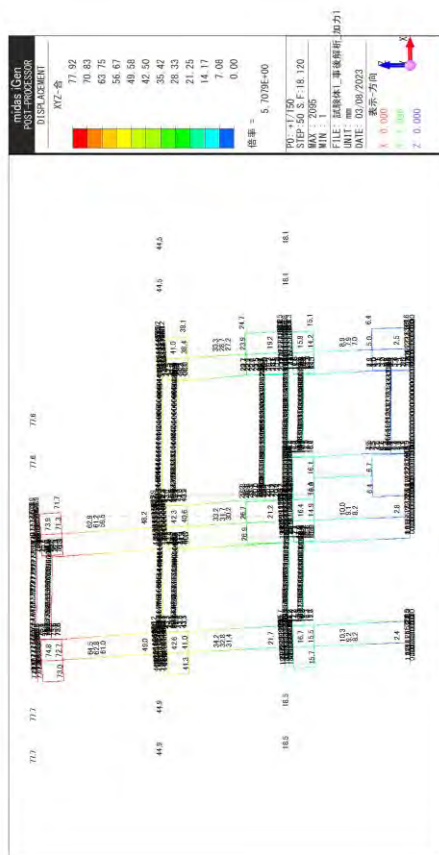
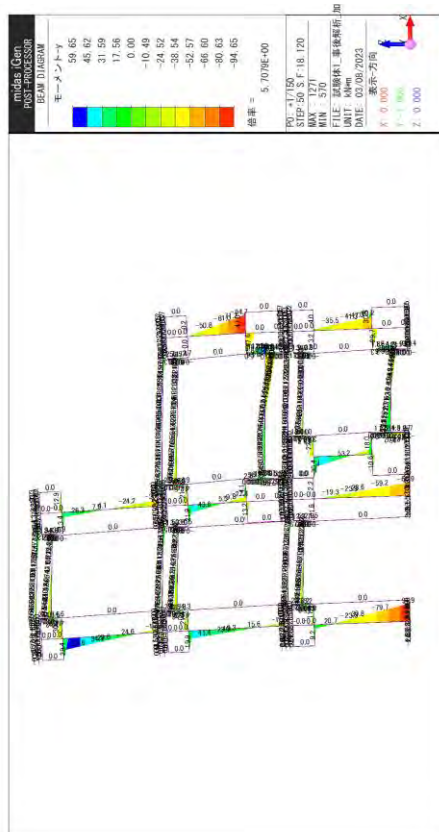


図 3.4.3-6 詳細モデル（事後_実態）による変形、応力図（試験体 1 1/150 引き）

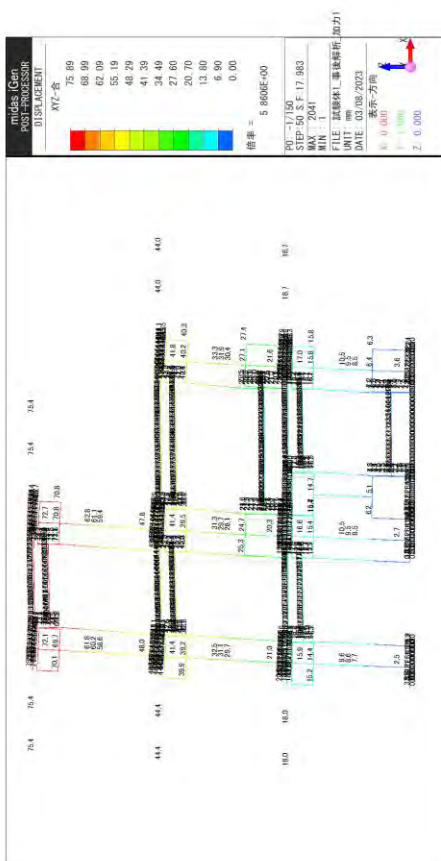
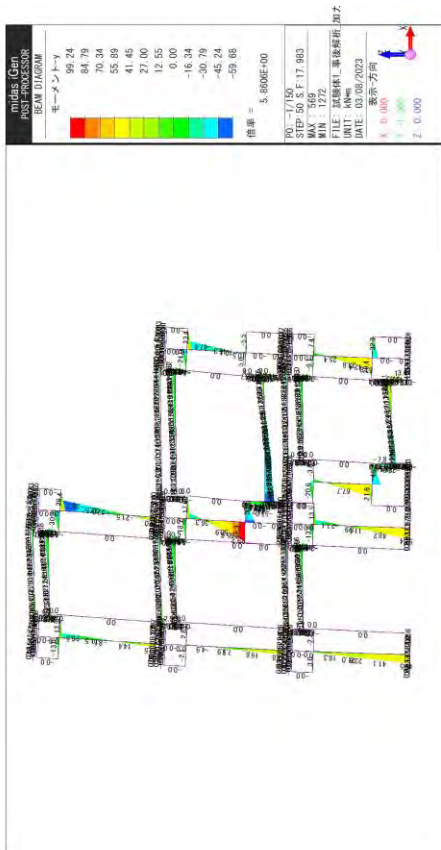


図 3.4.3-7 詳細モデル (事後_実態) による変形、応力図 (試験体 1 1/150 押し)

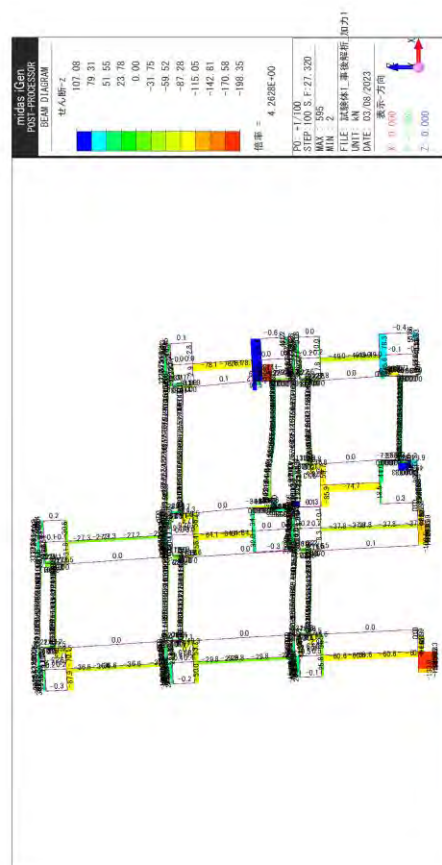
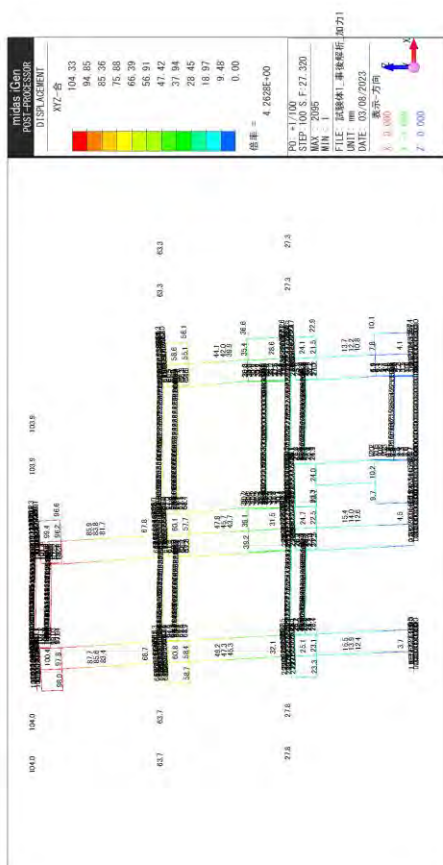
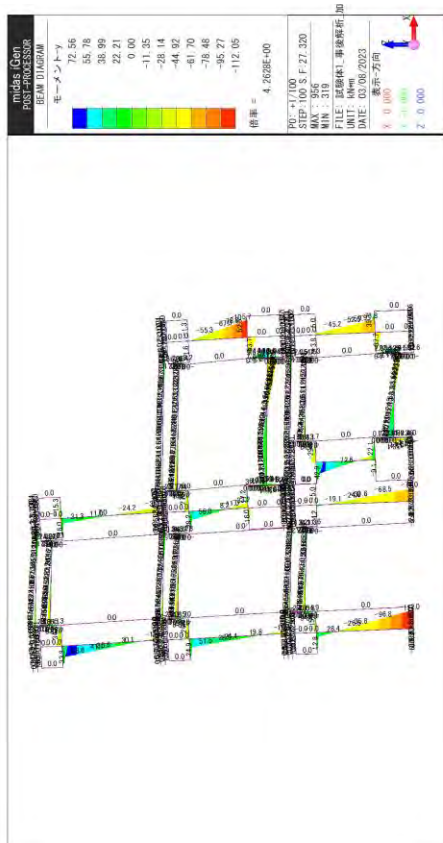


図 3.4.3-8 詳細モデル (事後_実態) による変形、応力図 (試験体 1 1/100 引き)

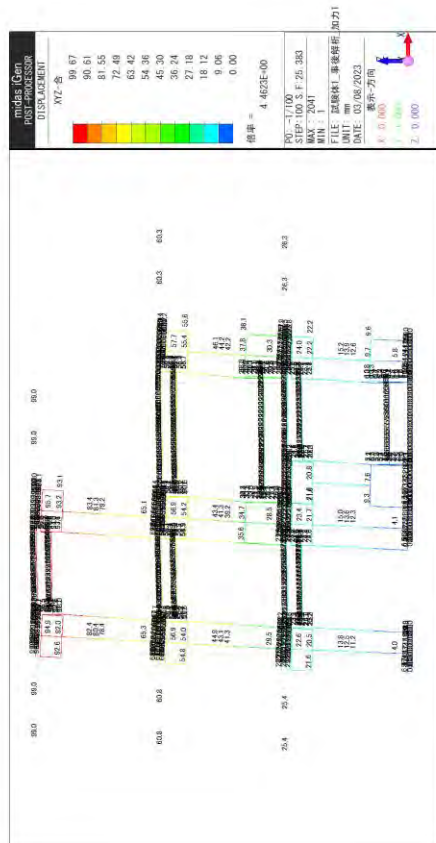
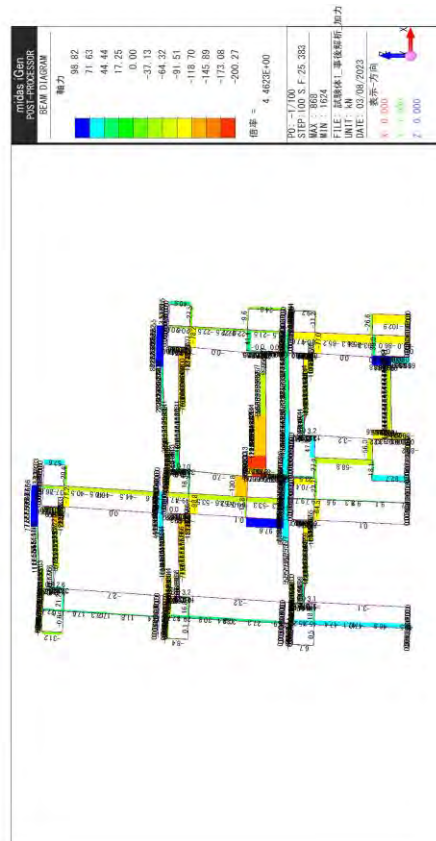
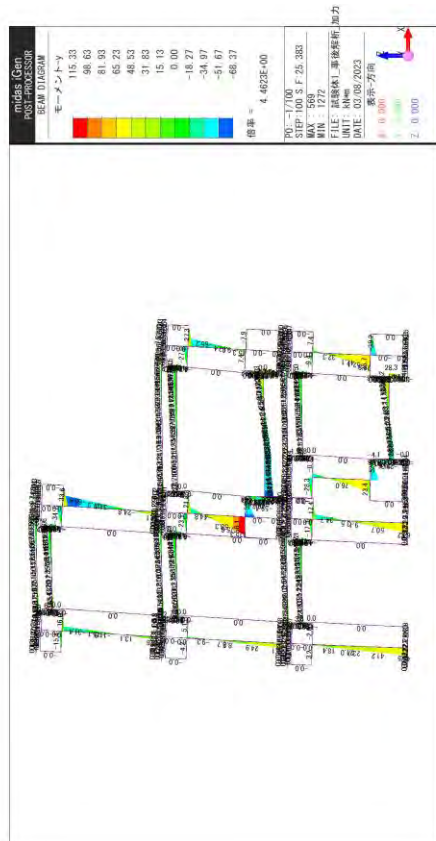


図 3.4.3-9 詳細モデル (事後_実態) による変形、応力図 (試験体 1 1/100 押し)

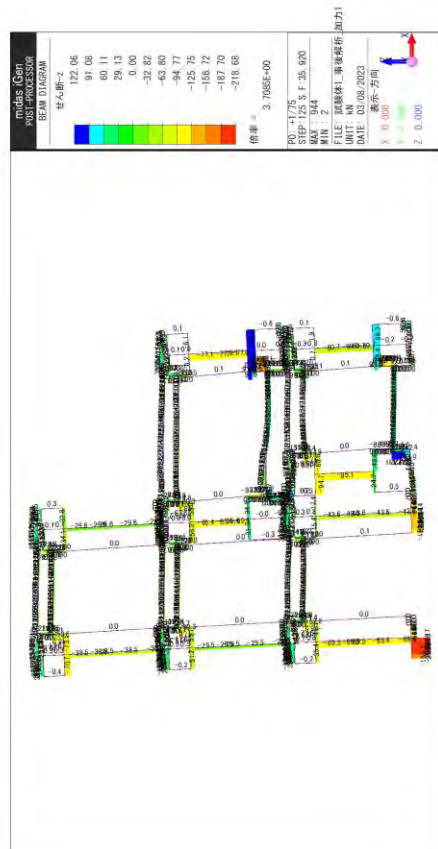
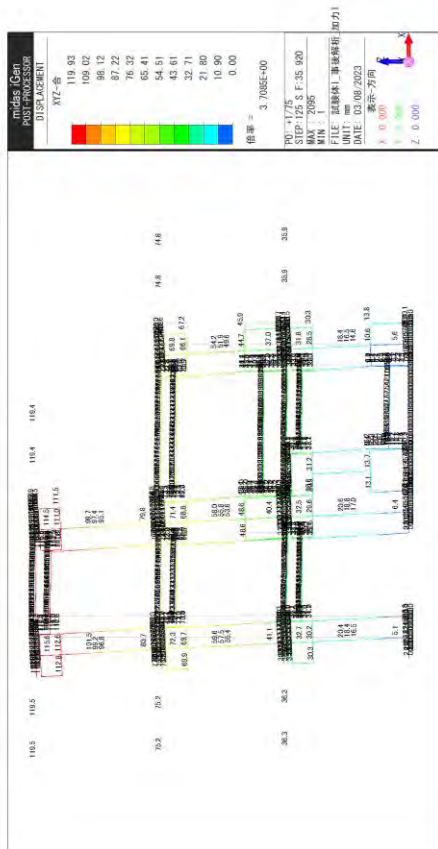
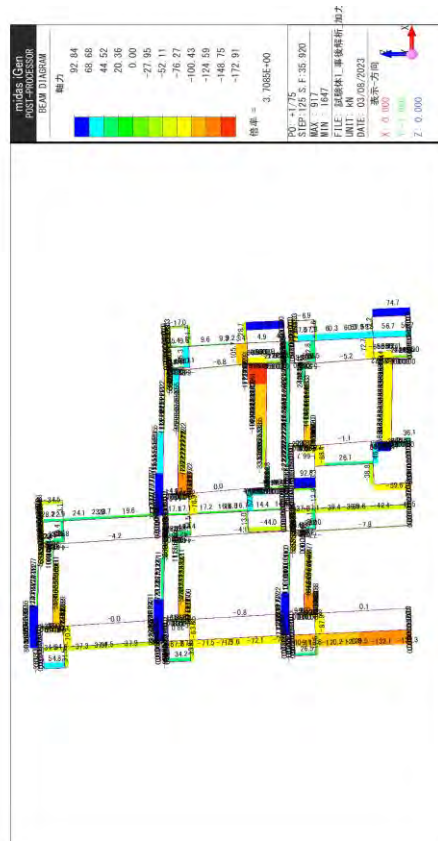
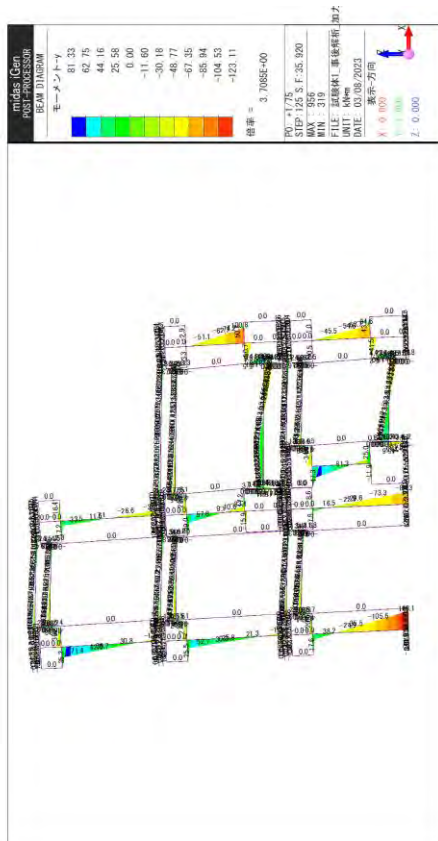


図 3.4.3-10 詳細モデル (事後_実態) による変形、応力図 (試験体 1 1/75 引き)

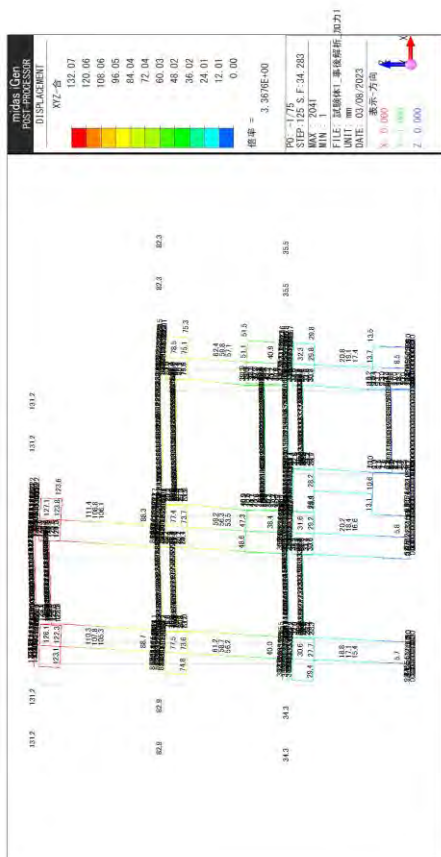
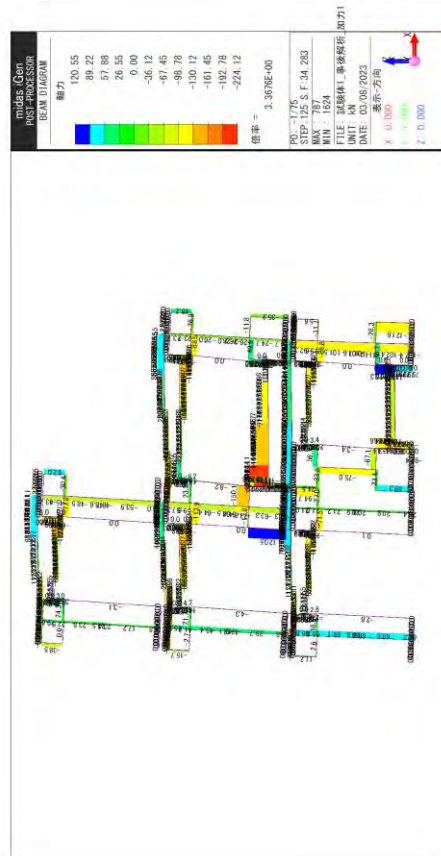
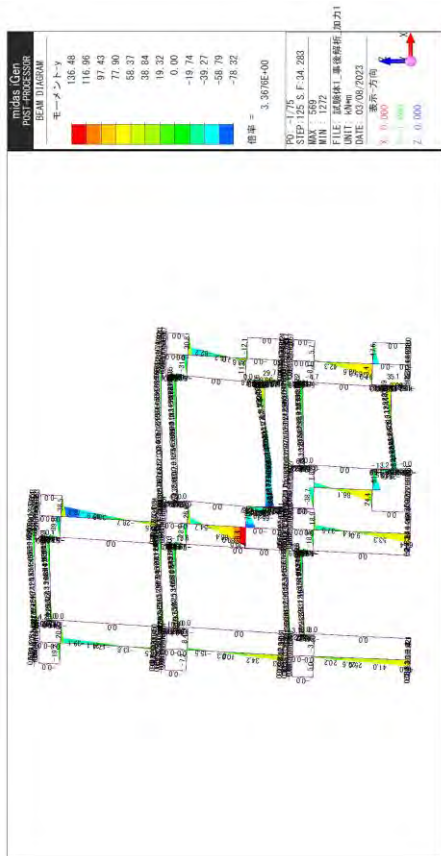


図 3.4.3-11 詳細モデル (事後_実態) による変形、応力図 (試験体 1 1/75 押し)

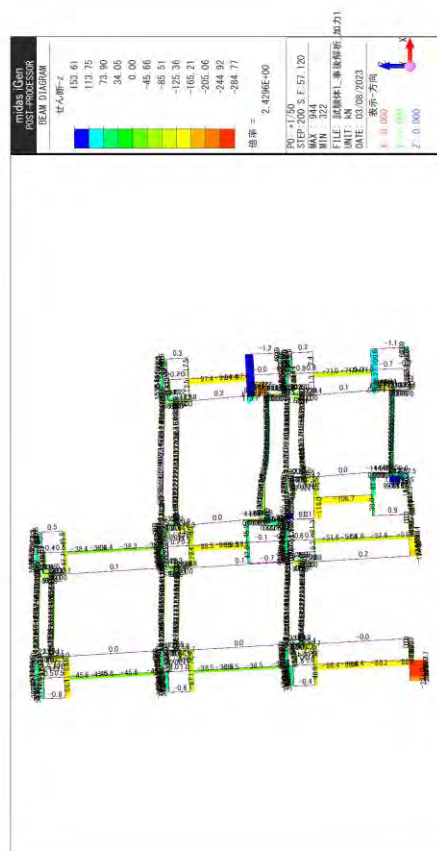
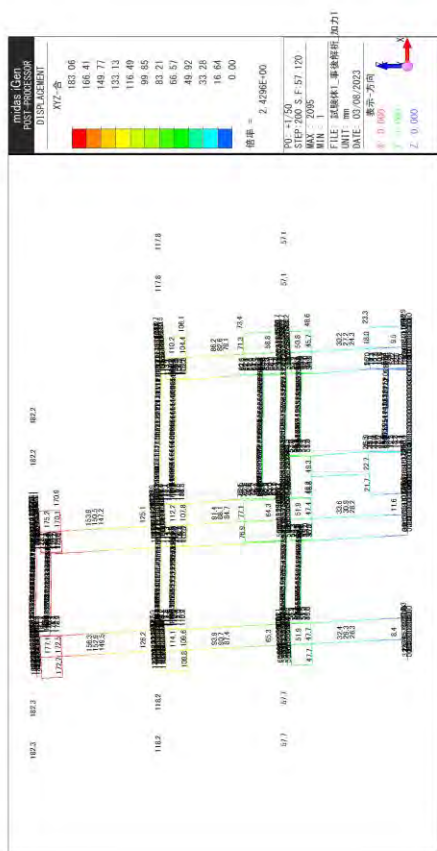
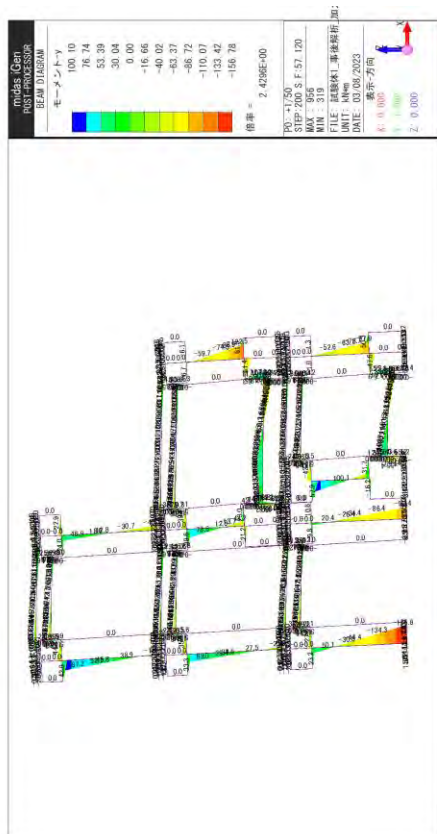


図 3.4.3-12 詳細モデル (事後_実態) による変形、応力図 (試験体 1 1/50 引き)

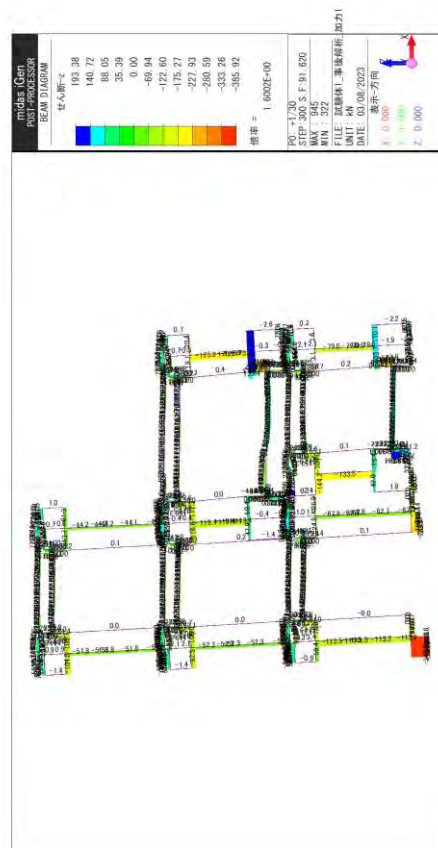
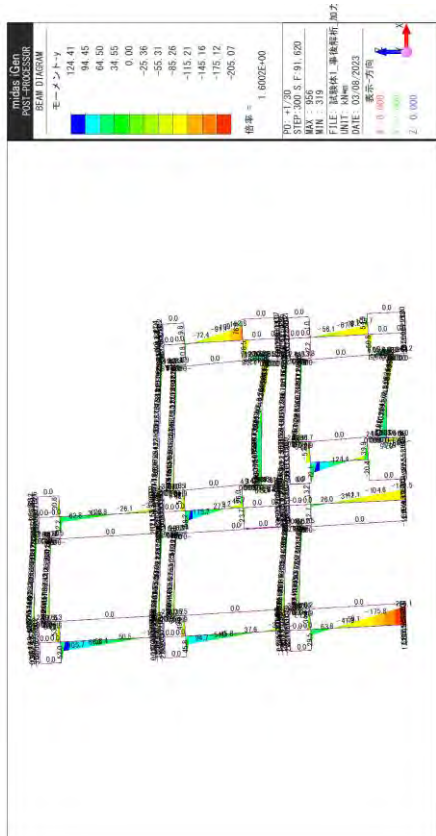


図 3.4.3-14 詳細モデル (事後_実態) による変形、応力図 (試験体 1 1/30 引き)

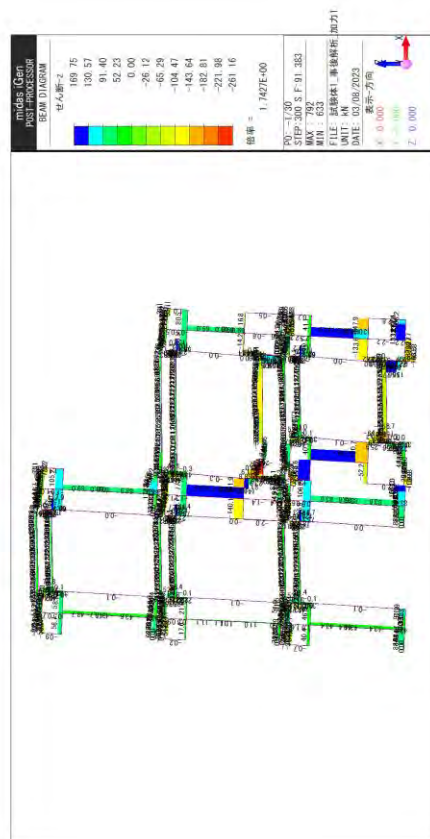
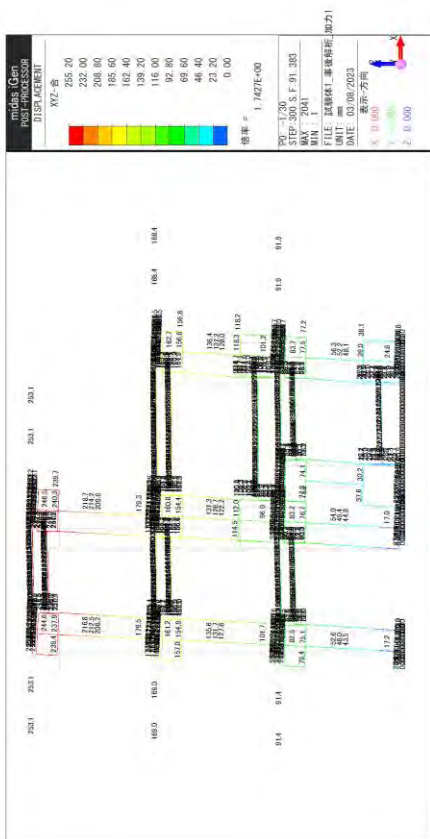
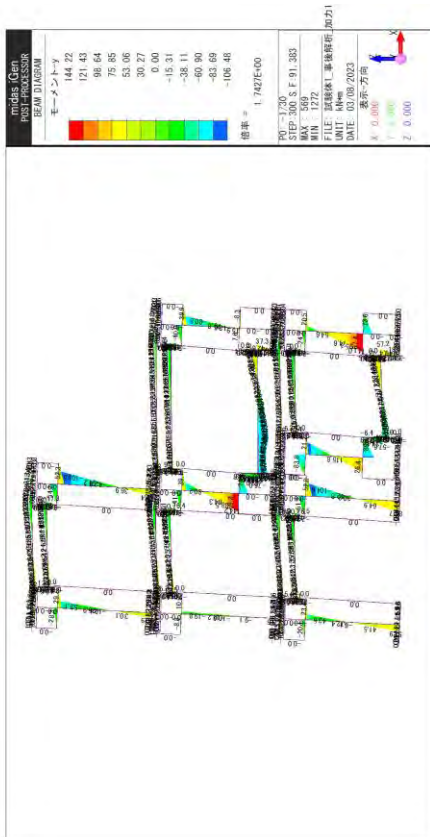


図 3.4.3-15 詳細モデル (事後_実態) による変形、応力図 (試験体 1 1/30 押し)

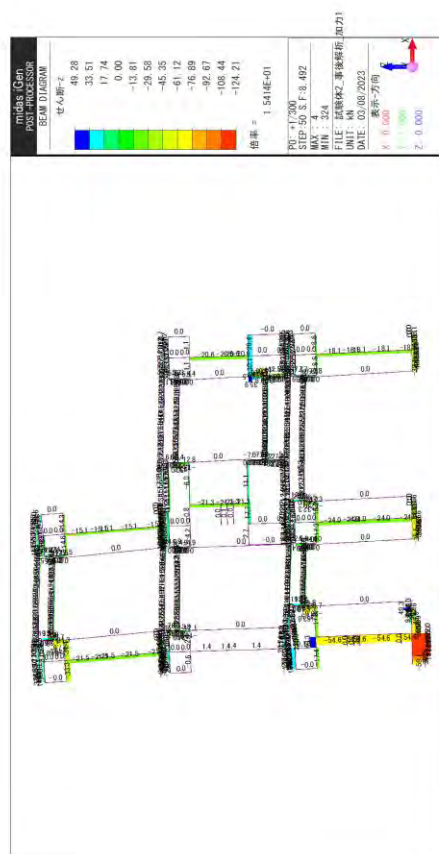
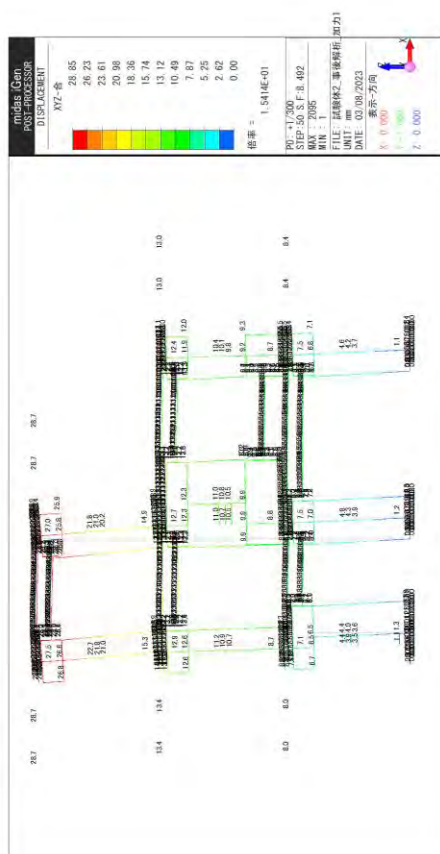
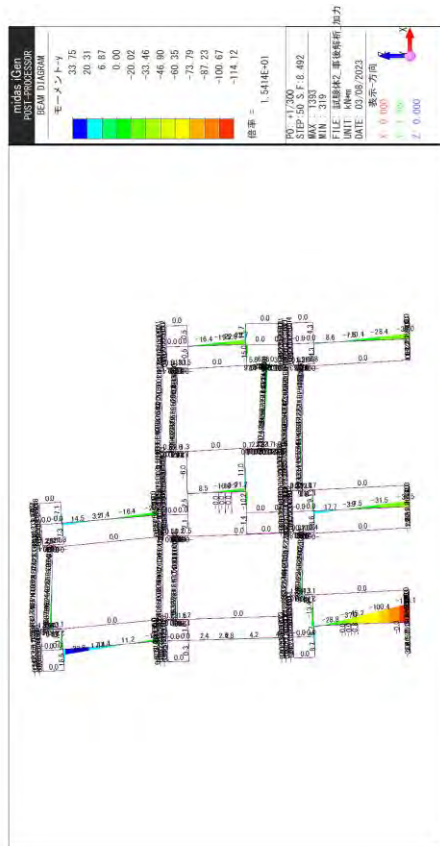


図 3.4.3-16 詳細モデル (事後_実態) による変形、応力図 (試験体 2 1/300 引き)

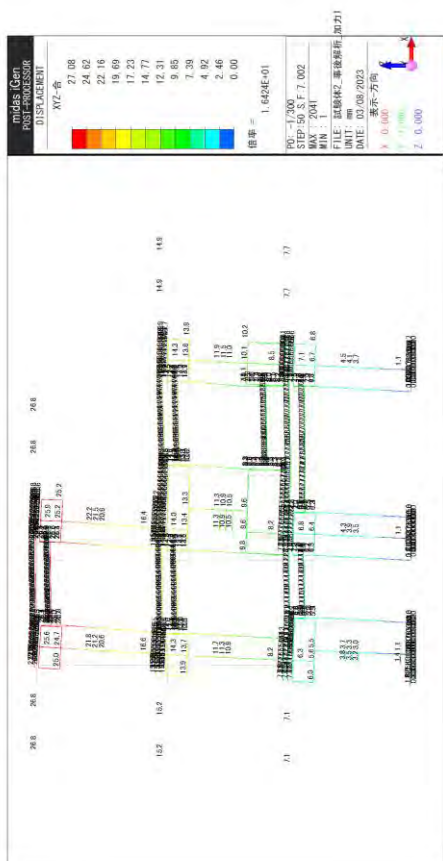
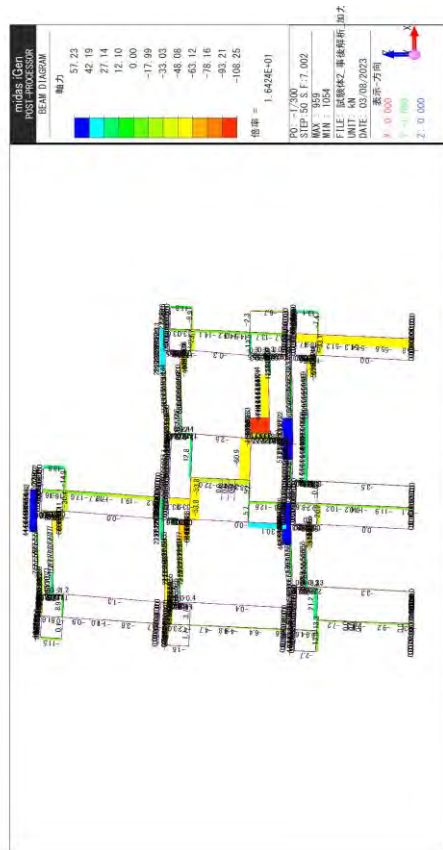
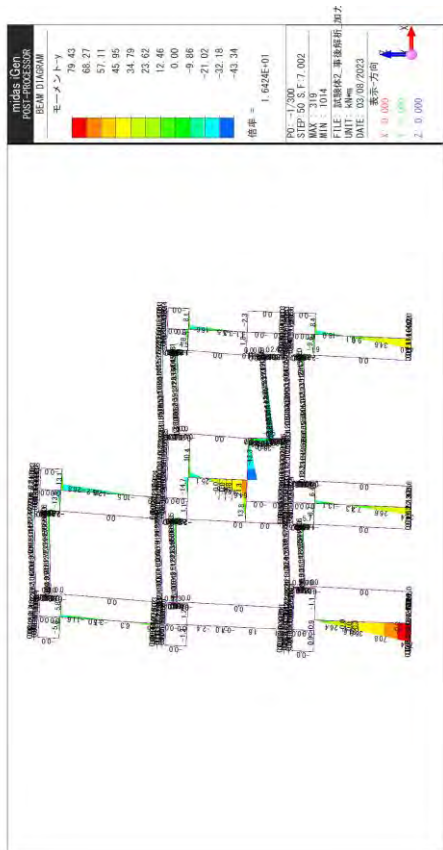


図 3.4.3-17 詳細モデル (事後_実態) による変形、応力図 (試験体 2 1/300 押し)

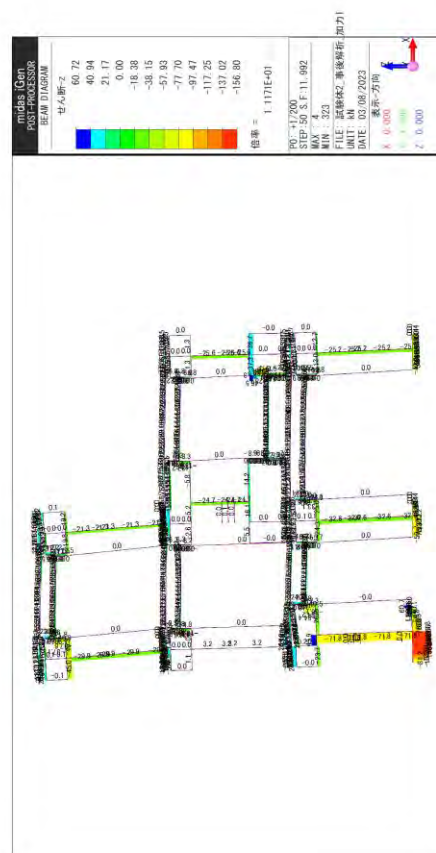
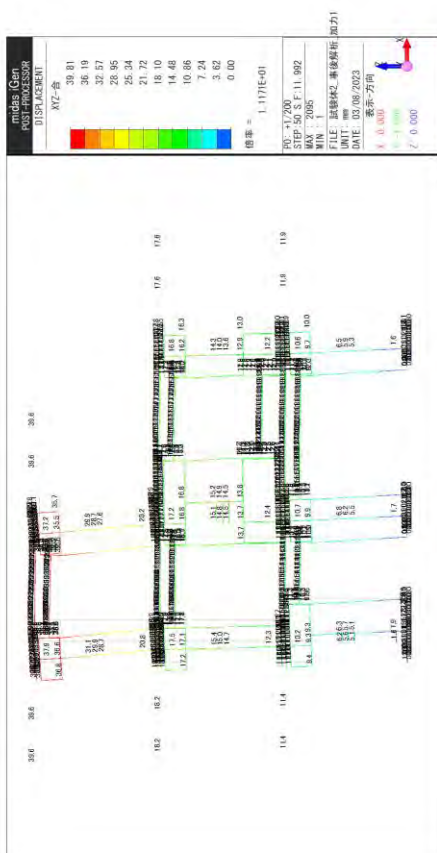
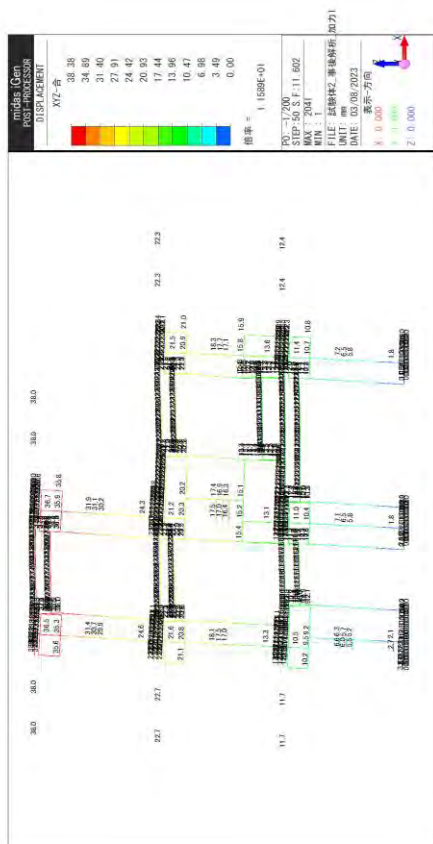
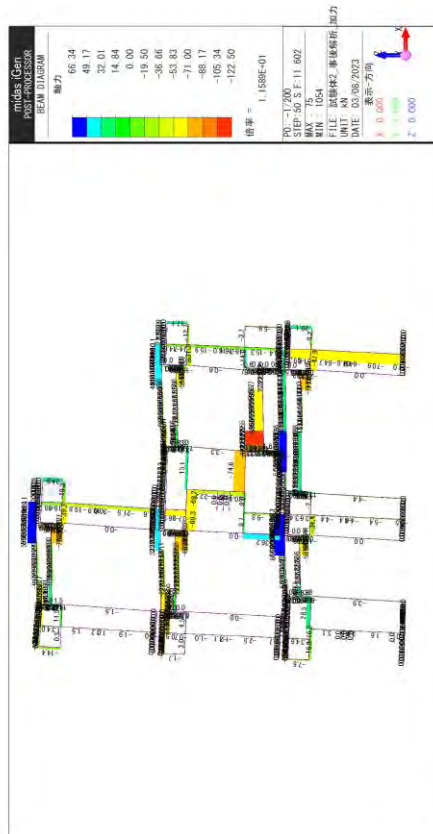
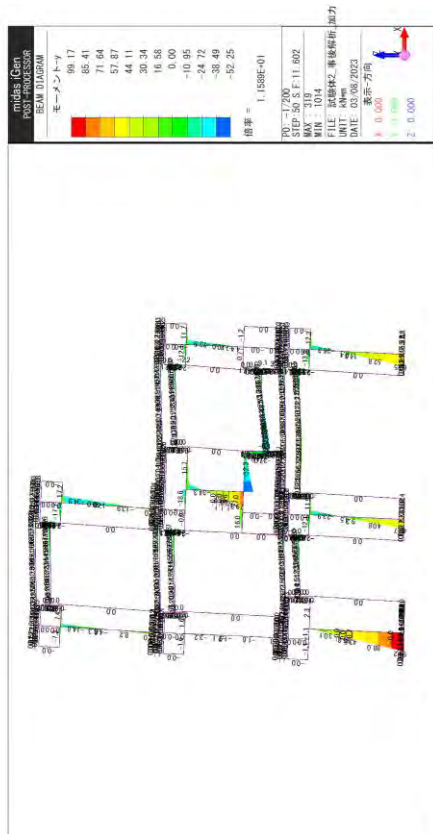


図 3.4.3-18 詳細モデル (事後_実態) による変形、応力図 (試験体 2 1/200 引き)



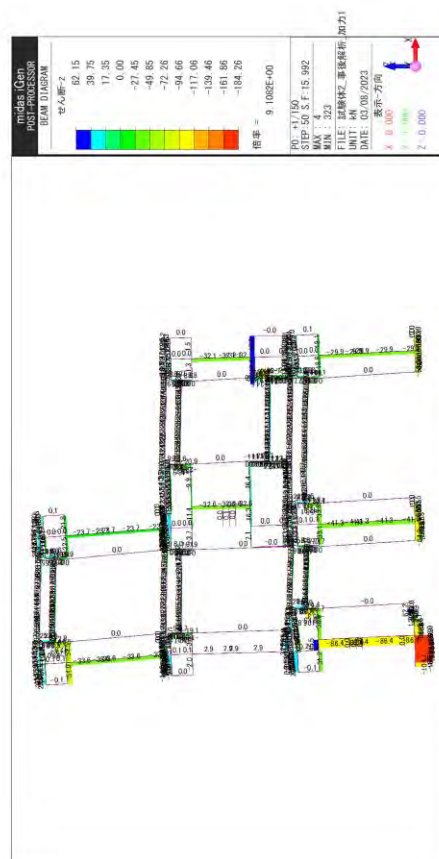
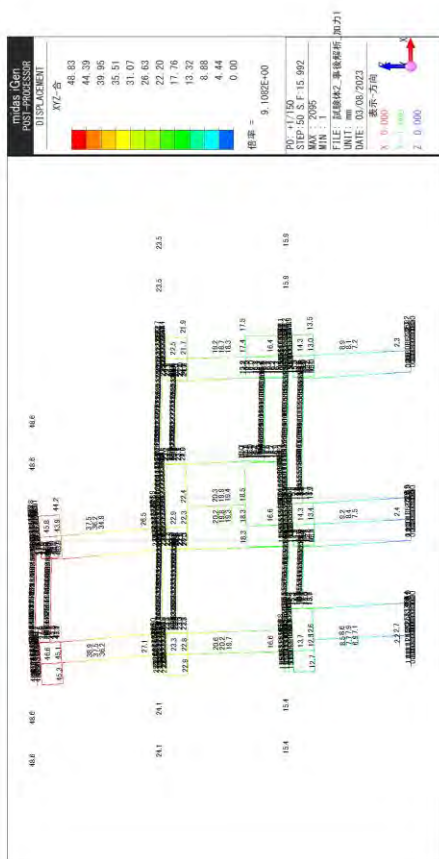
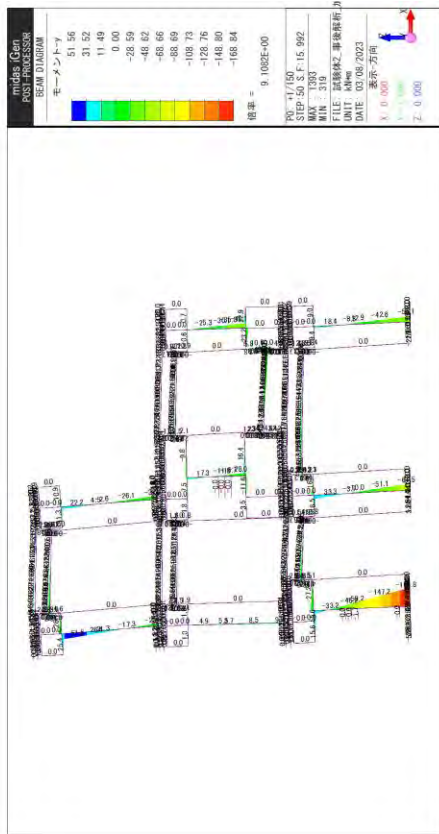


図 3.4.3-20 詳細モデル (事後_実態) による変形、応力図 (試験体 2 1/150 引き)

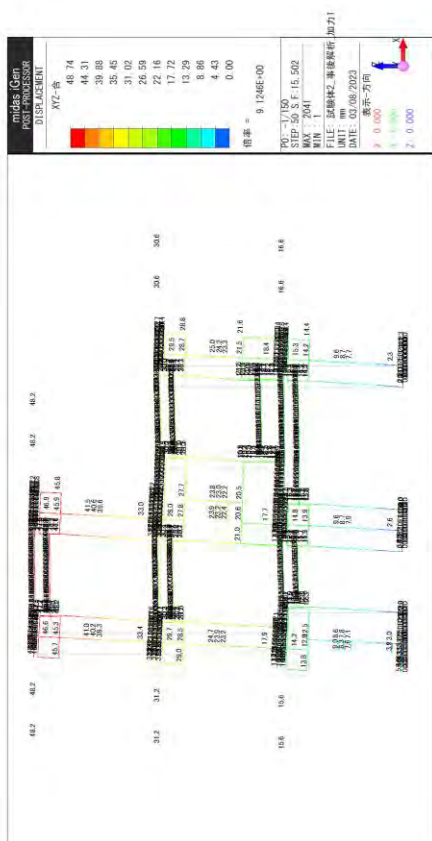
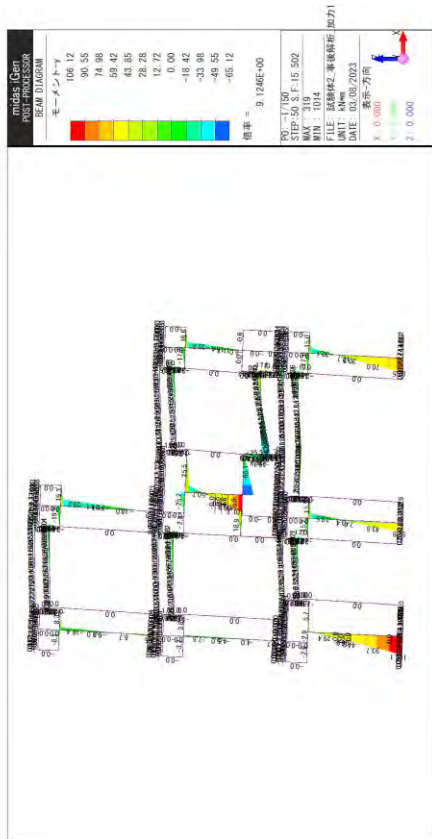


図 3.4.3-21 詳細モデル (事後_実態) による変形、応力図 (試験体 2 1/150 押し)



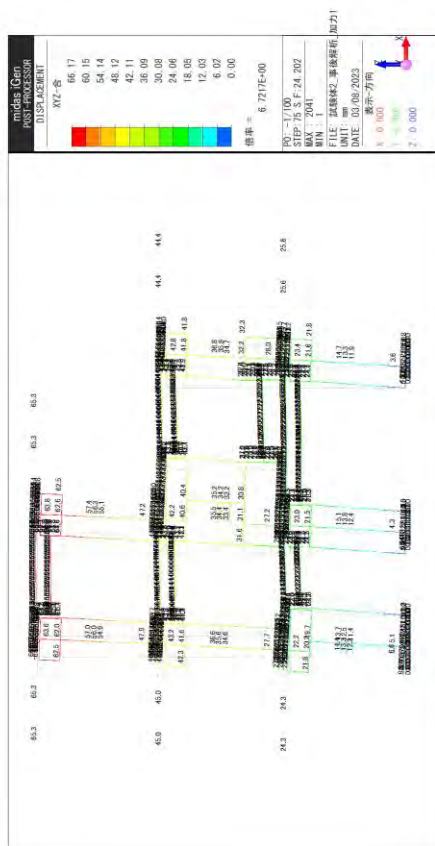
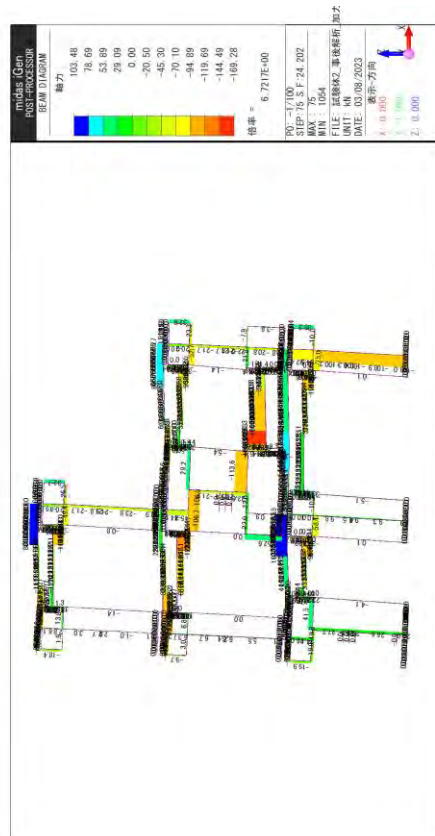
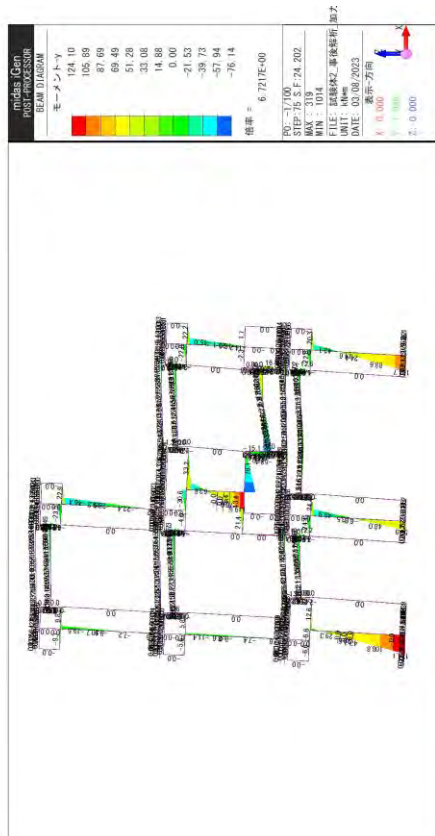


図 3.4.3-23 詳細モデル（事後_実態）による変形、応力図（試験体 2 1/100 押し）

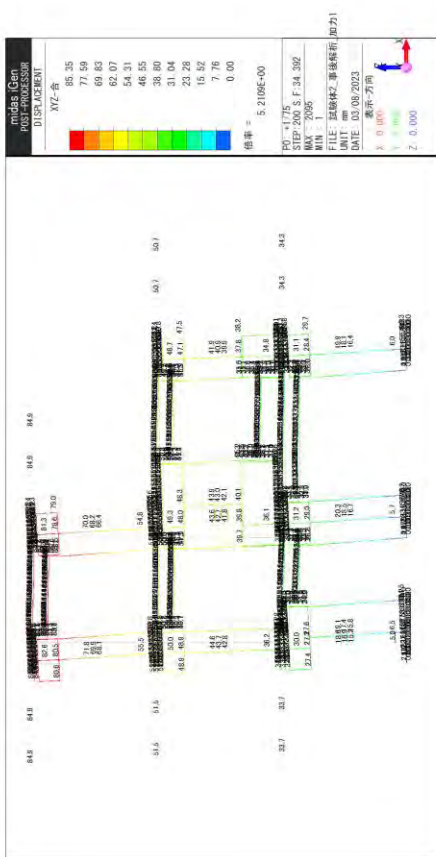
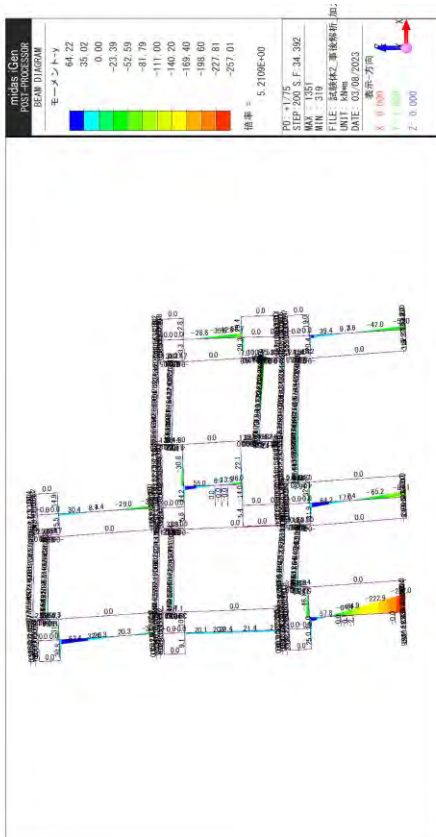


図 3.4.3-24 詳細モデル (事後_実態) による変形、応力図 (試験体 2 1/75 引き)

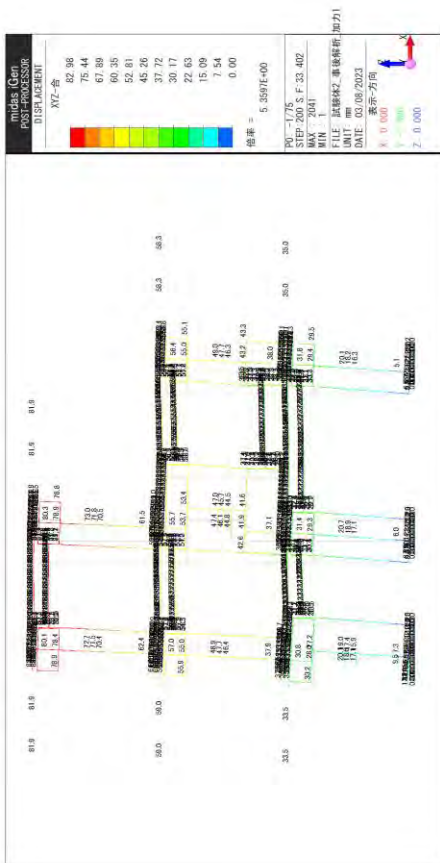
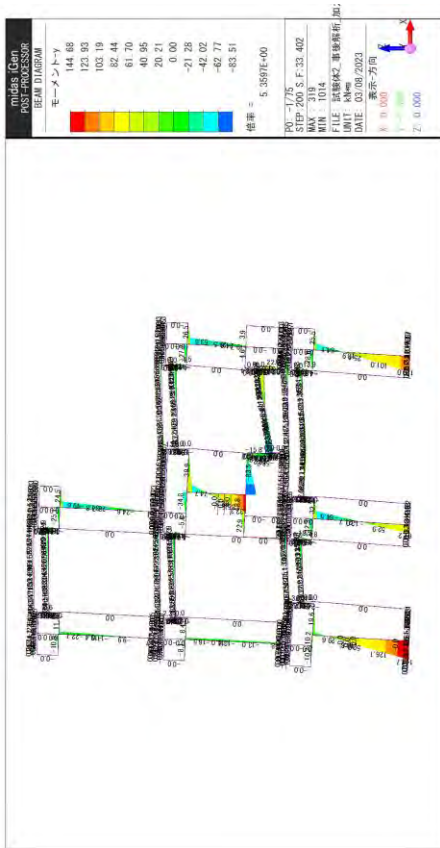


図 3.4.3-25 詳細モデル (事後_実態) による変形、応力図 (試験体 2 1/75 押し)

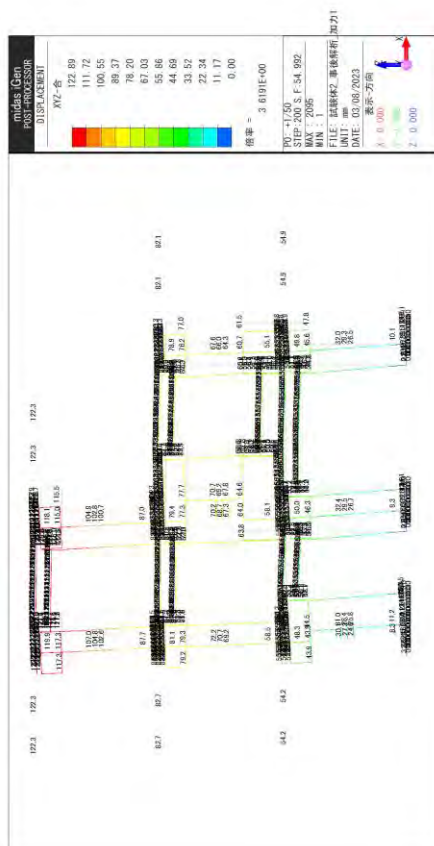
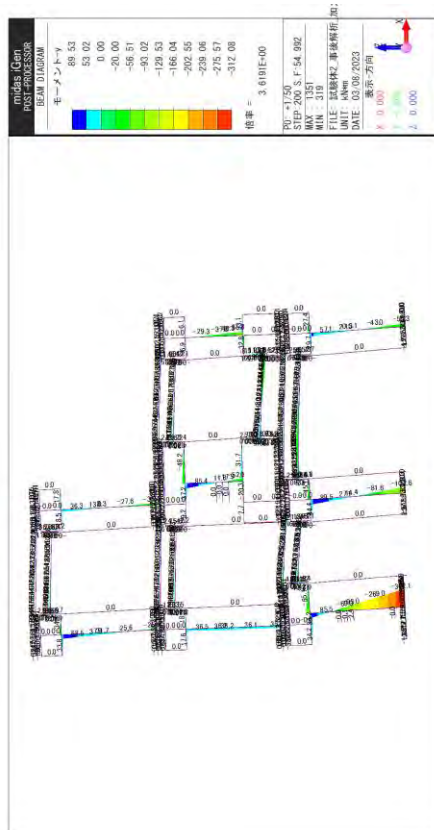


図 3.4.3-26 詳細モデル (事後_実態) による変形、応力図 (試験体 2 1/50 引き)

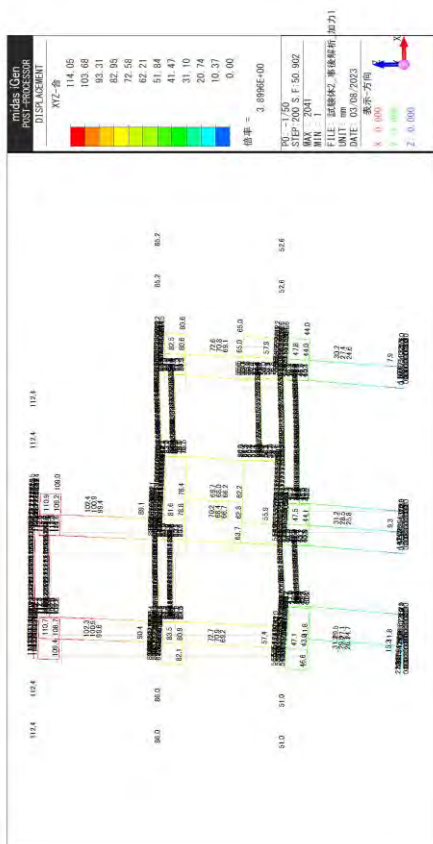
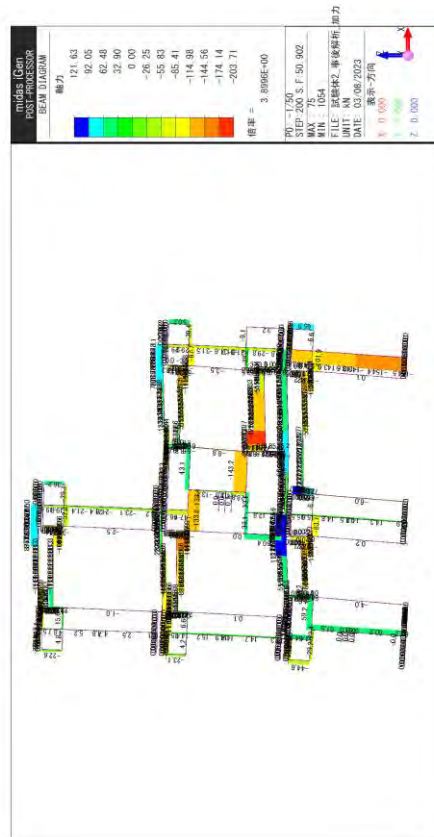
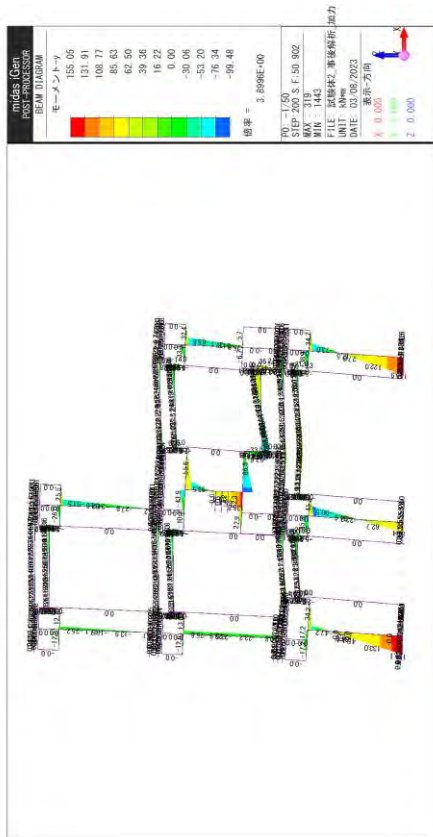


図 3.4.3-27 詳細モデル (事後_実態) による変形、応力図 (試験体 2 1/50 押し)

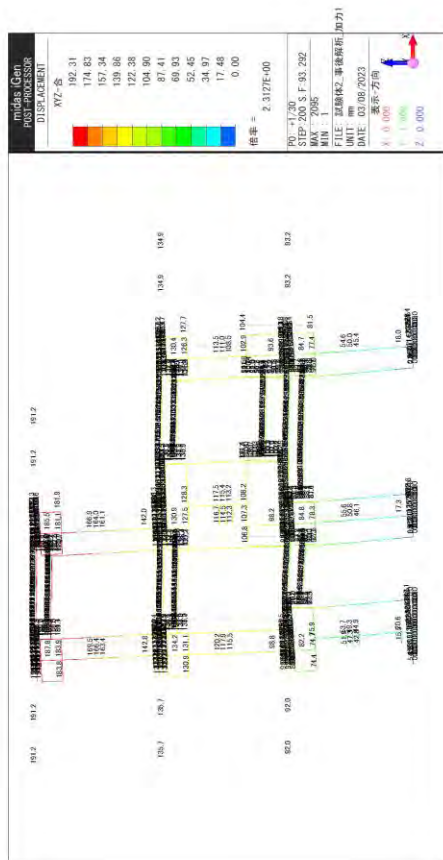
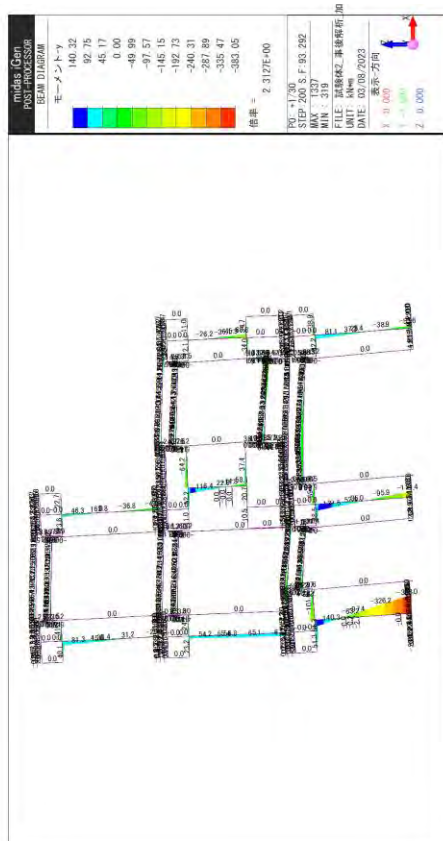


図 3.4.3-28 詳細モデル (事後_実態) による変形、応力図 (試験体 2 1/30 引き)

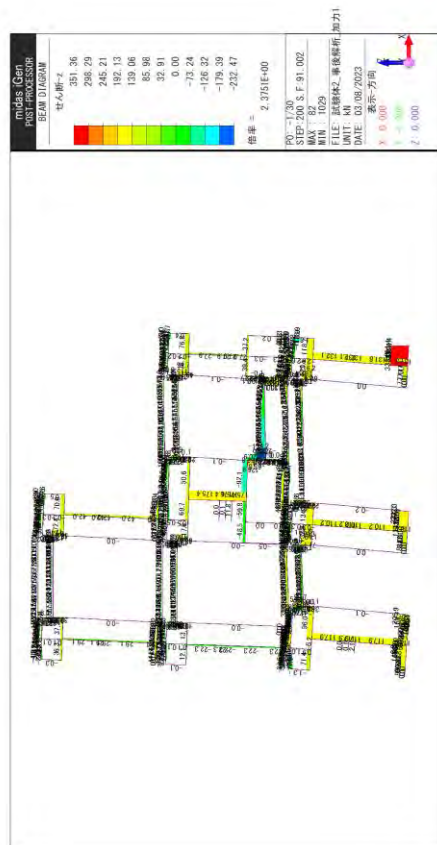
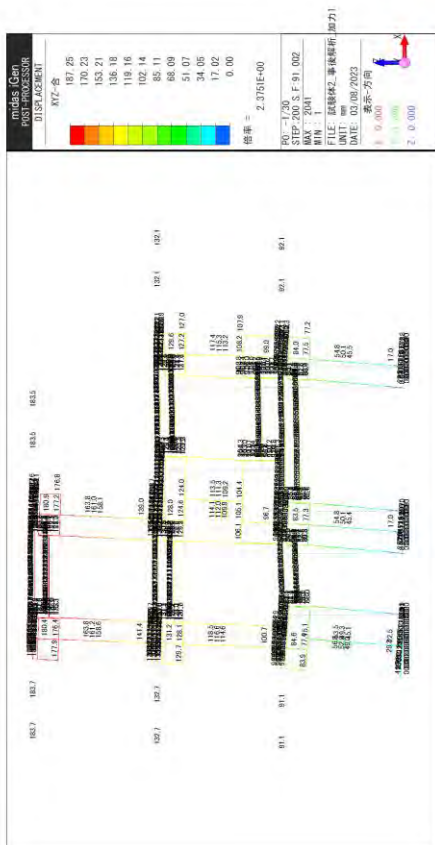
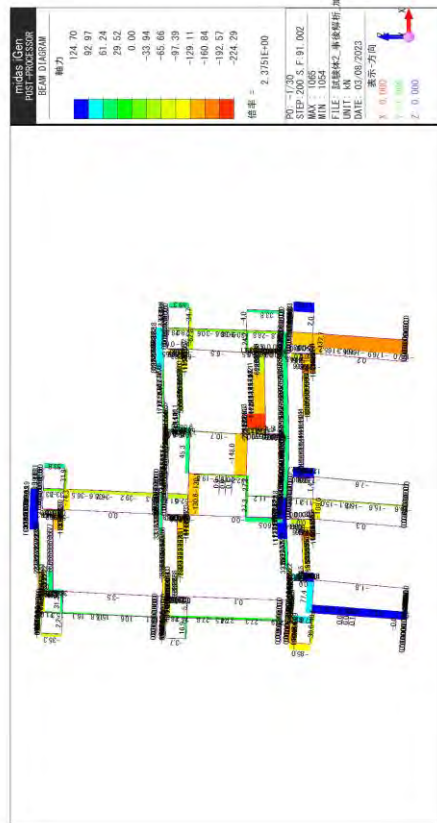
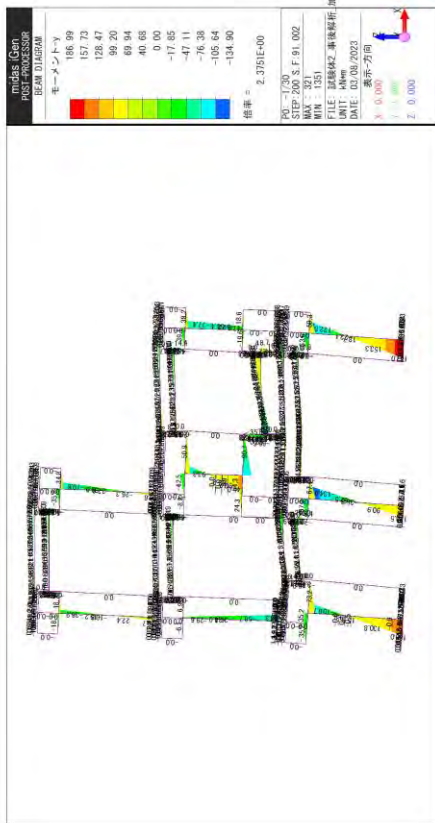


図 3.4.3-29 詳細モデル (事後_実態) による変形、応力図 (試験体 2 1/30 押し)

3.4.4 考察

以上、実験結果の再現を試みて実態性能を用いた詳細モデルによる事後解析を実施した。実験結果との比較により得られた結果を以下に記載する。

(1) 層せん断力-層間変形角関係

試験体1は、各層、各方向ともに事後解析値による骨格曲線は、実験結果と概ね良く一致することが確認できた。試験体2は、押し側において1層と3層の解析値が実験に比べて若干耐力が小さく、2層は逆に大きくなっているが、引き側では各層ともに事後解析値による骨格曲線は、実験結果と概ね良く一致することが確認できた。

事前解析からの変更点として、せん断金物の引張抵抗をビス一本当たりの性能を本数倍した性能として考慮したが、この金物は壁パネルの中央付近に設置されていることが多く、変形角が進むにつれてその寄与率が高くなり、事後解析においても大変形領域までよく一致した主要要因であると考えられる。例えば今後の保有水平耐力計算での合理化を図る上では、ディテールに応じたせん断金物の引張性能を耐力に見込むといったことが、知見の蓄積により十分考えられる。

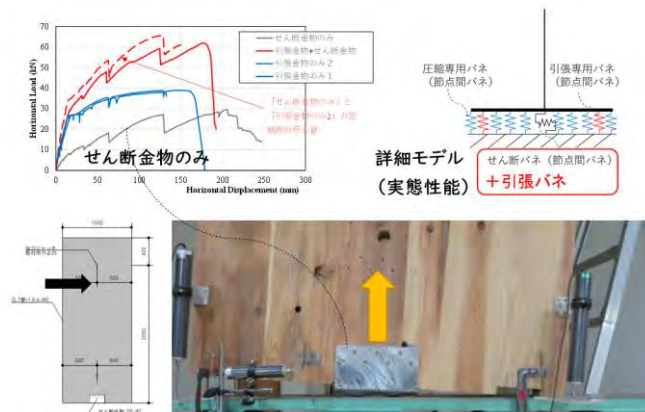


図 3.4.4-1 せん断金物の引張抵抗

(2) 1階 CLT 壁パネルの負担せん断力の比較

試験体1は、連続壁や腰壁が取り付けられないパネル①について確認すると、解析/実験の割合は引き側平均 1.04、押し側平均 1.02 と良く一致することが確認できた。また変動軸力の影響により壁頭壁脚及び、壁-垂れ壁接合部の回転剛性が変動することにより、実験結果では、引き側と押し側で、2.5~3.5 倍ほど負担せん断力が異なることも確認できた。

試験体2は、1階の壁パネルは3枚あり、いずれも腰壁が取り付けられないため全てを実験と解析で比較することができた。解析/実験の割合は引き側で各変形角の平均で、パネル①1.31、パネル②1.02、パネル③1.14 であり、押し側で各変形角の平均で、パネル①0.83、パネル②0.82、パネル③0.89 が確認できた。押し側は層せん断力層間変形角関係においても解析値が若干低い事が確認されており、パネル負担せん断力も若干小さいことと対応している。また、変動軸力の影響による負担せん断力の違いについて引き側と押し側の負担せん断力の違いを実験結果より確認すると、1.5m 幅のパネル①で 0.97~1.40 倍程度、1.0m 幅のパネル③で 1.31~3.44 倍程度と差がみられた。

(3) 1階 CLT 壁パネルの壁脚引張ボルトの軸力比較

試験体1、試験体2 とも傾向として、各壁パネルの引張側のボルト軸力是一部値自体に差異がある箇所も存在するが、全体としては比較的実験と同様の傾向、数値を解析においても確認された。一方で実験では圧縮側となる引張ボルトには、ほぼ軸力が発生していないのに対して、解析値では特に変形角が大きくなるにつれて引張力が発生しており、実験と乖離があった。これは恐らく、解析では壁基礎圧縮バネを線形としたが、実験では端部は支圧破壊が確認されており、中立軸の位置に差がでたものと考えられる。



図 3.4.4-2 壁脚端部の支圧変形

3.5 詳細モデル及び簡易モデルの設計性能による解析

3.5.1 目的

本節では、提案した簡易モデルの検証として、本試験体の設計用性能における詳細モデルと簡易モデルの比較検討によりモデルの精度検証を行うとともに、実験値や実態性能の詳細モデルとの比較による設計用モデルの実性能に対する余裕度について確認を行う。

3.5.2 解析モデル

詳細モデル及び簡易モデルの説明図を次項に示す。本節で扱う設計性能用のモデルは以下に示すように、床考慮、床無しを含めて合計 4 種類となる。各部の性能は事前解析で示した設計性能を採用し、簡易モデルによるバネ性能は 3.2 で説明した式を用いて算定した。

表 3.5.2-1 詳細モデルと簡易モデルの設計性能による事後解析の位置づけ

本章の構成	3.3		3.4	3.5			
解析フェーズ	事前解析			事後解析			
目的	<ul style="list-style-type: none"> ・実験で与える入力変形比率の算出 ・計画段階における性能予測 		<ul style="list-style-type: none"> ・実験結果の再現を試みた詳細モデルであり、要素試験による各部の実態性能等を採用 	<ul style="list-style-type: none"> ・提案した簡易モデルについて、 →設計用詳細モデルとの比較によるモデル精度検証 →実験値及び実態用詳細モデルとの比較による安全性の確認 			
荷重入力	<ul style="list-style-type: none"> ・Ai分布に基づく”荷重増分解析” 			<ul style="list-style-type: none"> ・加力1の試験で得られた各層変形値による”強制変形増分解析” 			
試験体	試験体1	試験体2		試験体1、試験体2			
解析モデル	詳細モデル (実態_床考慮)		詳細モデル (実態_床考慮)	詳細モデル (設計_床考慮)	簡易モデル (設計_床考慮)	詳細モデル (設計_床無し)	簡易モデル (設計_床無し)
床の面外抵抗	継手部: 曲げせん断ピン	継手部:剛	継手部:剛	継手部:曲げピン		床の壁端部をピン →面外に効かない	基本、床要素はモデル化しない
床の性能	Mx60-5-7 (設計性能_弱軸)	試験体1に 対して17.5 倍	Mx60-5-7(実態性能_弱軸) →CLT床の面外曲げ 要素試験値(2.8)参照	Mx60-5-7(設計性能_弱軸)			
各接合部の性能	既往報告書8)による実態性能		既往報告書8)による実態性能+ 要素試験による性能補正 ・引きボルトの引張試験値(2.9) ・せん断金物の引張抵抗追加(2.6) 壁基礎せん断性能は、本実験を参考に再設定	「CLT設計施工マニュアル」に準拠した設計性能			

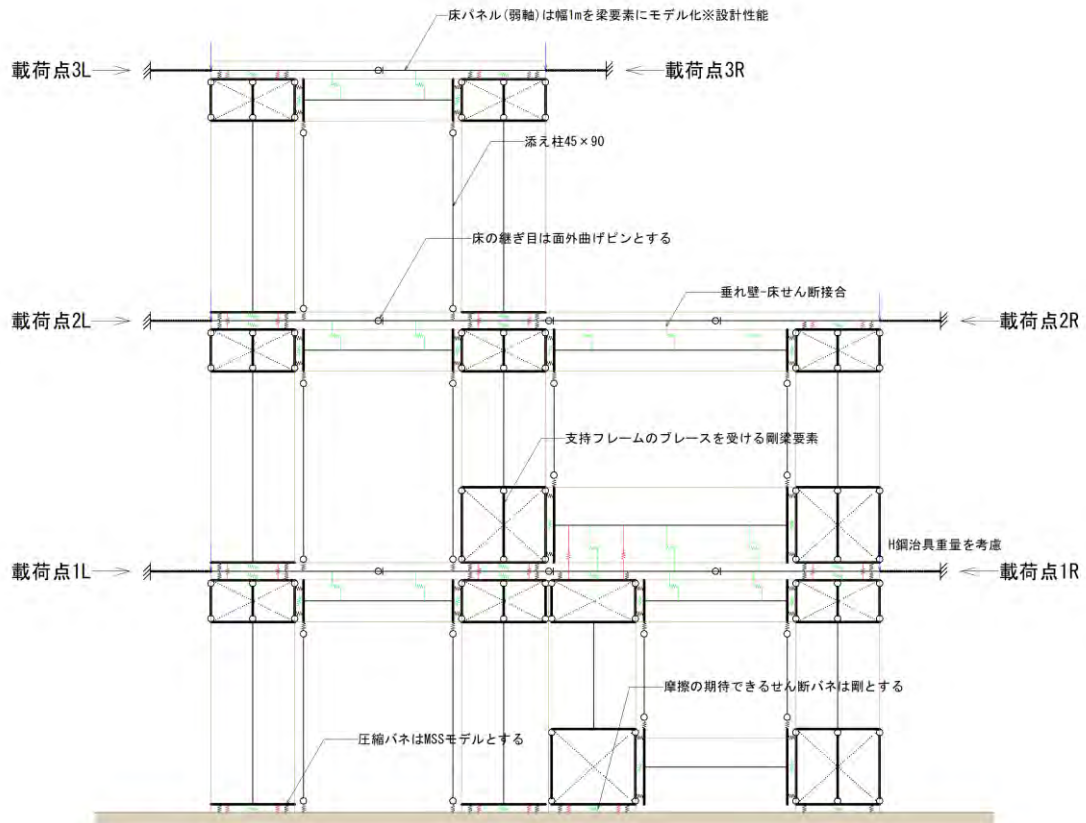


図 3.5.2-1 詳細モデル (設計性能_床考慮) 試験体 1

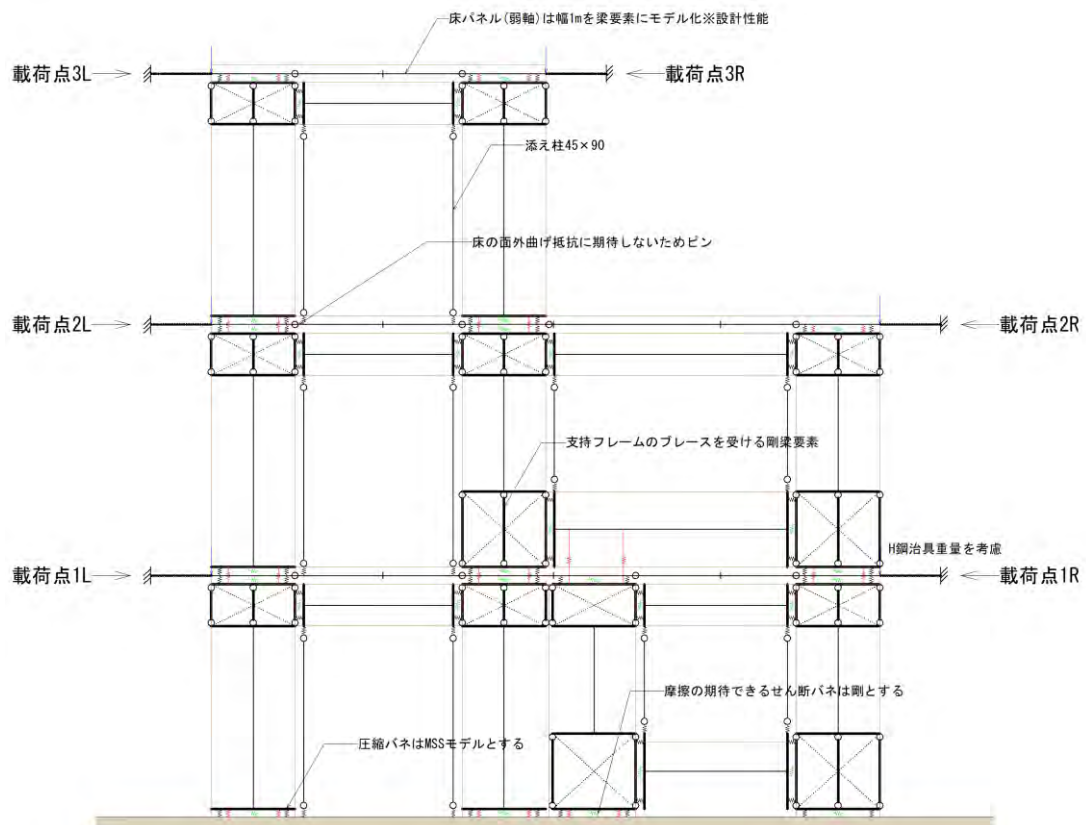


図 3.5.2-2 詳細モデル (設計性能_床無し) 試験体 1

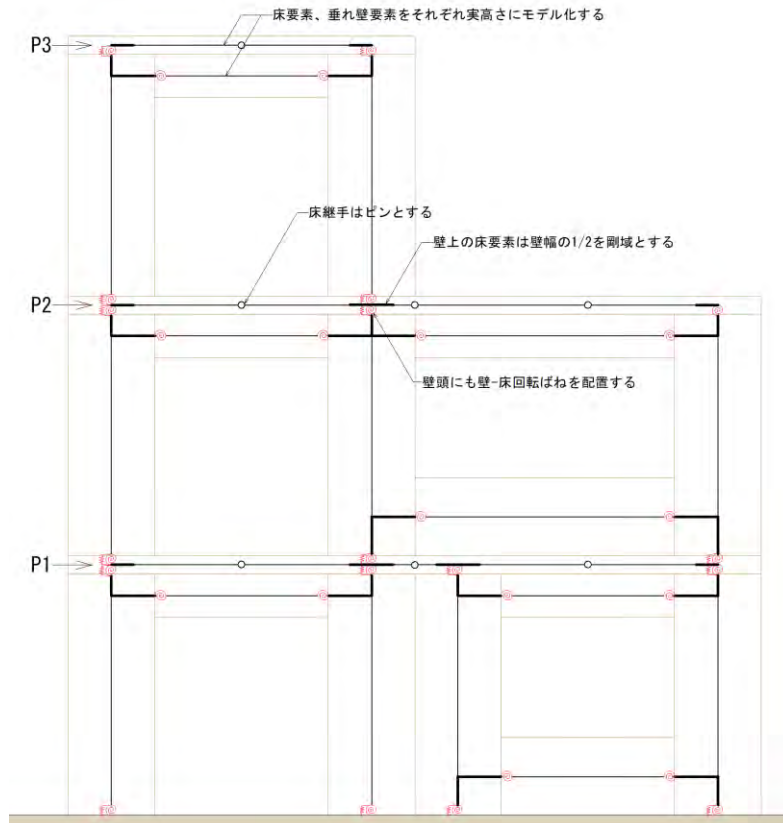


図 3.5.2-3 簡易モデル（設計性能_床考慮） 試験体 1

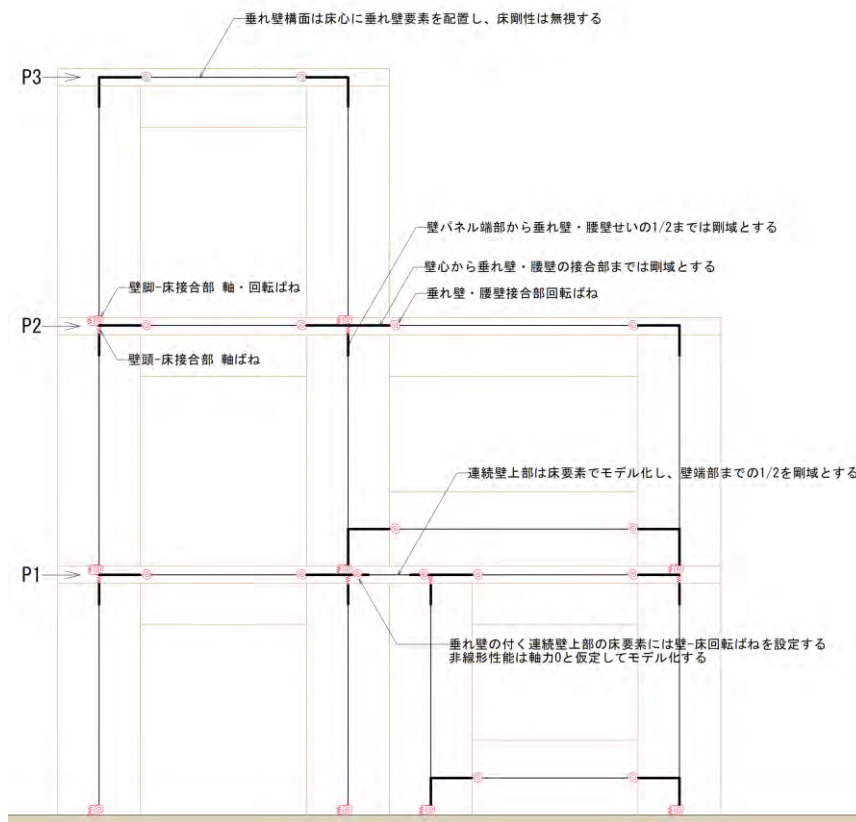


図 3.5.2-4 簡易モデル（設計性能_床無し） 試験体 1

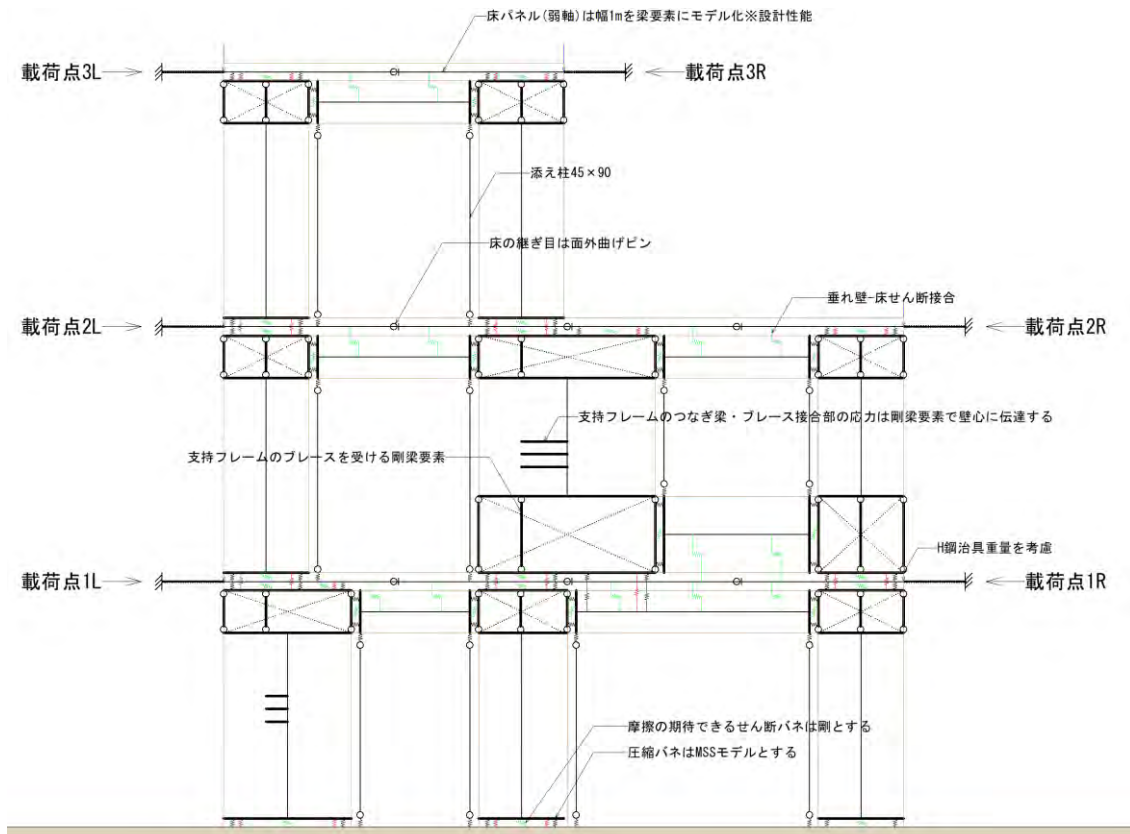


図 3.5.2-5 詳細モデル (設計性能_床考慮) 試験体 2

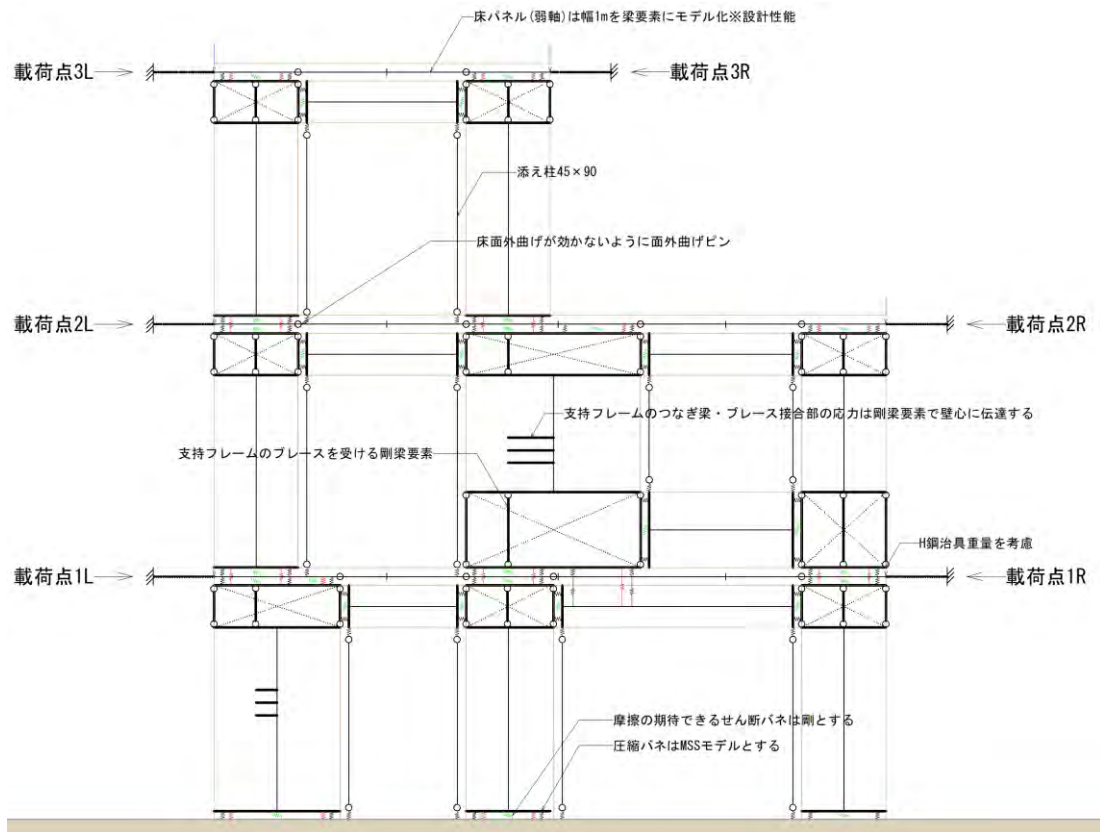


図 3.5.2-6 詳細モデル (設計性能_床無し) 試験体 2

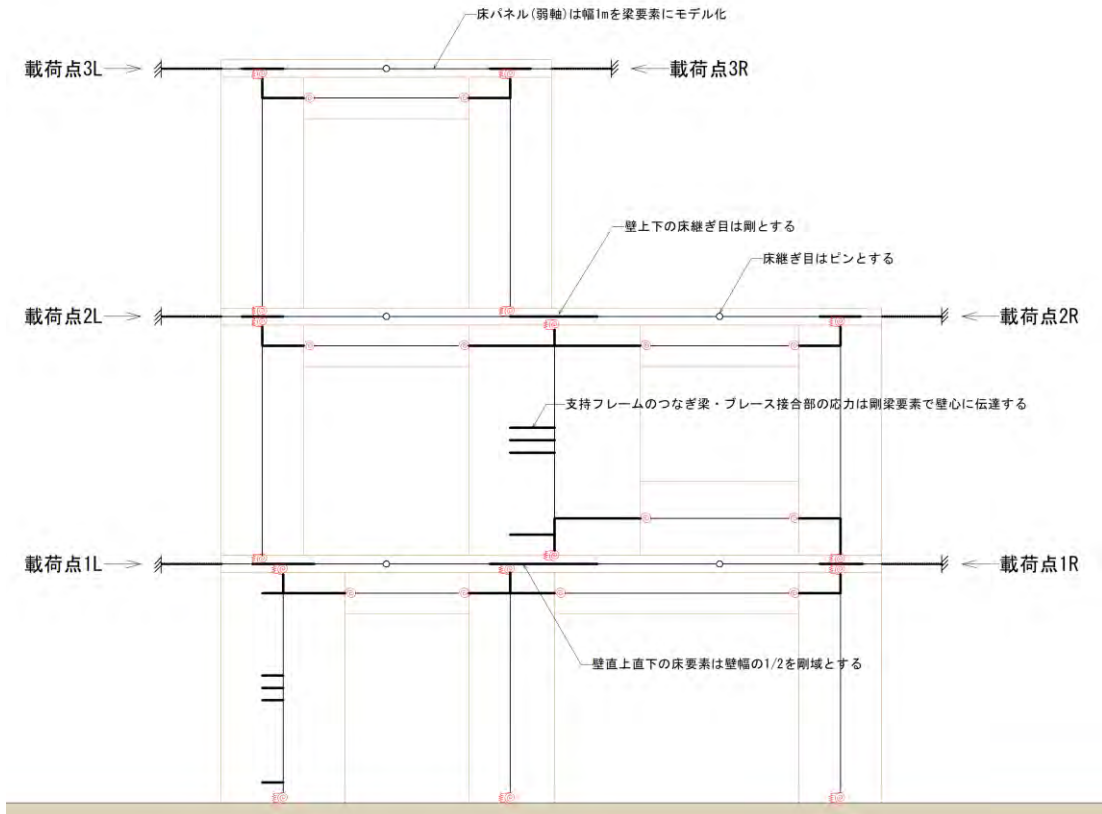


図 3.5.2-7 簡易モデル (設計性能_床考慮) 試験体 2

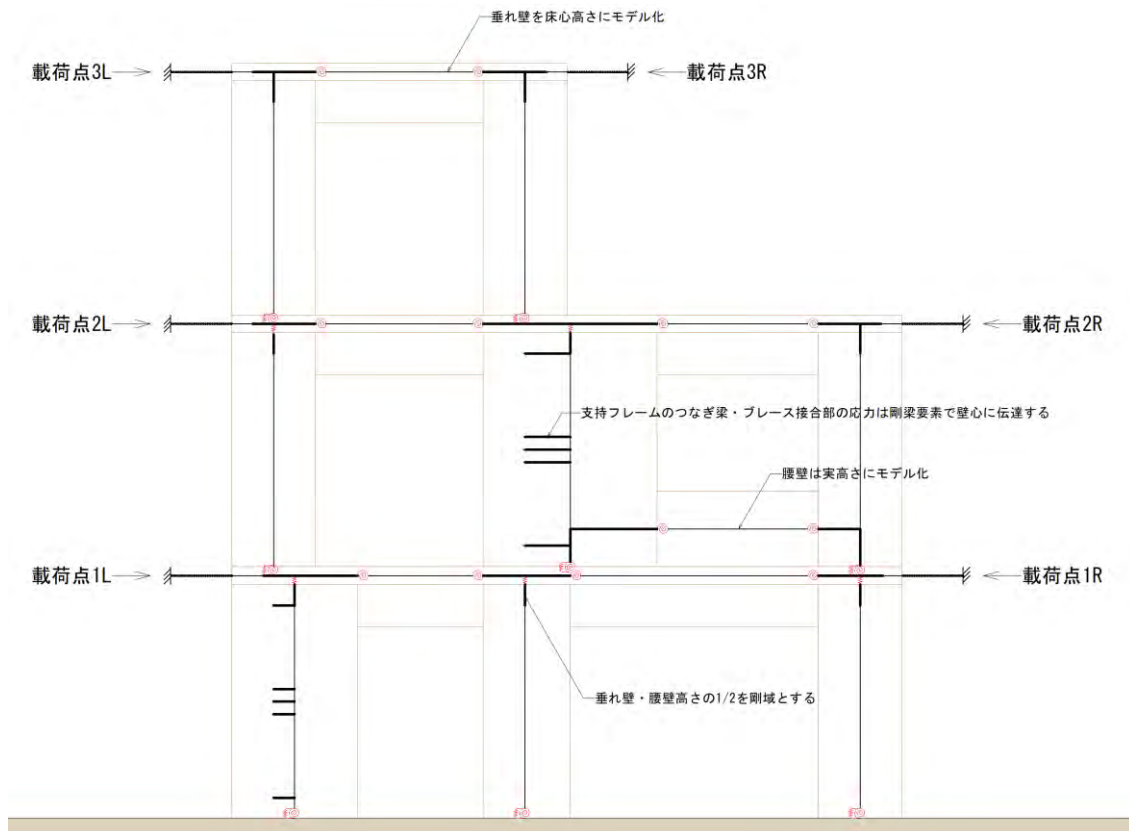
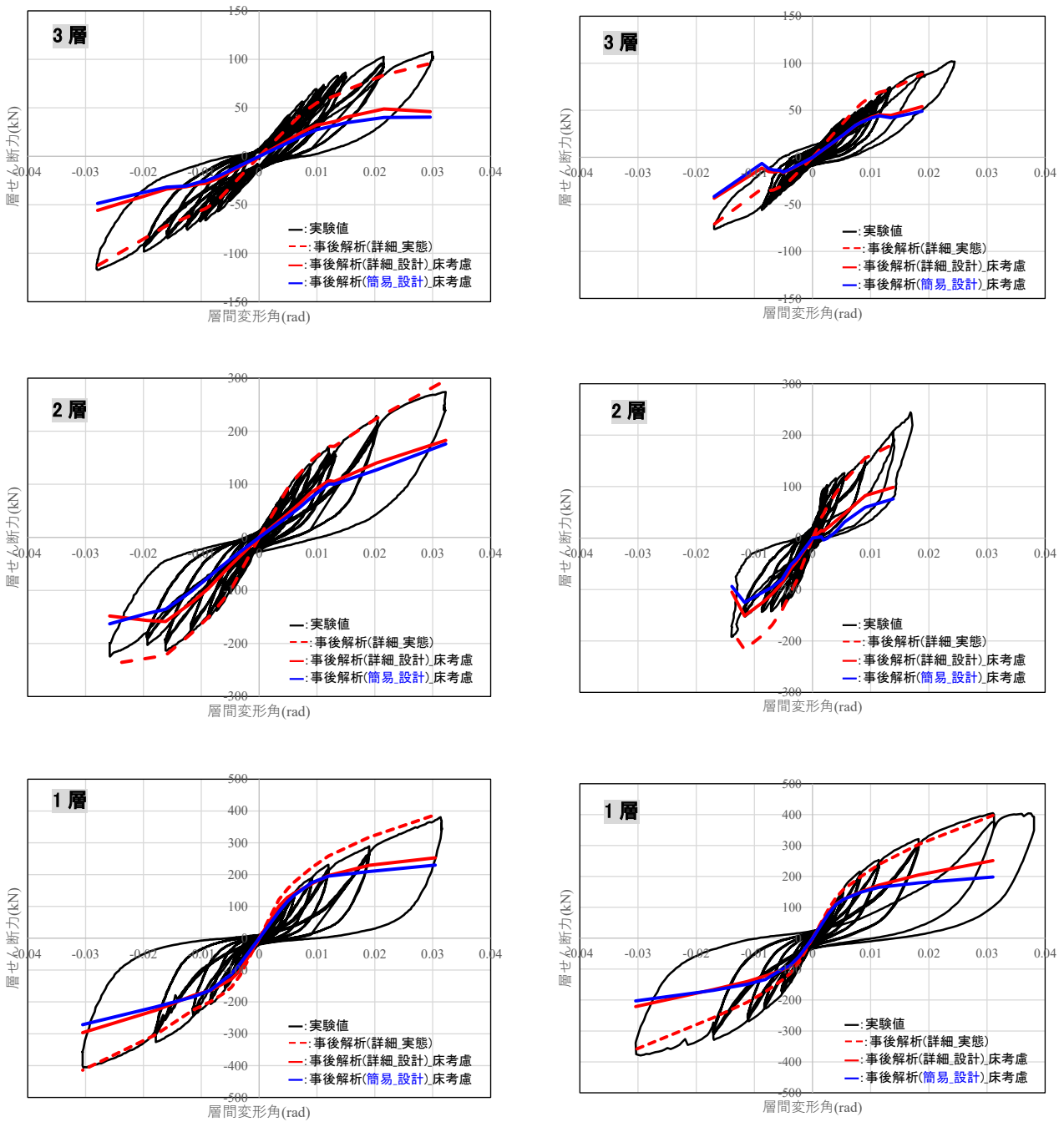


図 3.5.2-8 簡易モデル (設計性能_床無し) 試験体 2

3.5.3 試験で得られた変位分布による変位増分解析と実験結果の比較

試験体1、2ともに、加力1を対象に、実験で得られた各層の変形量を解析モデルに強制変形増分解析として与える。初期荷重を与えてP δ 効果を考慮する。なお、目標変形角毎に変形比が異なるため、本解析においても、引きと押しの目標変形角毎の変位増分解析ケースを作成し、それぞれの最終ステップ時の各層の層せん断力を算出した。

(1) 層せん断力-層間変形角関係



(試験体 1)

(試験体 2)

図 3.5.3-1 実験結果と事後解析(詳細モデルと簡易モデルの設計性能_床考慮)の比較

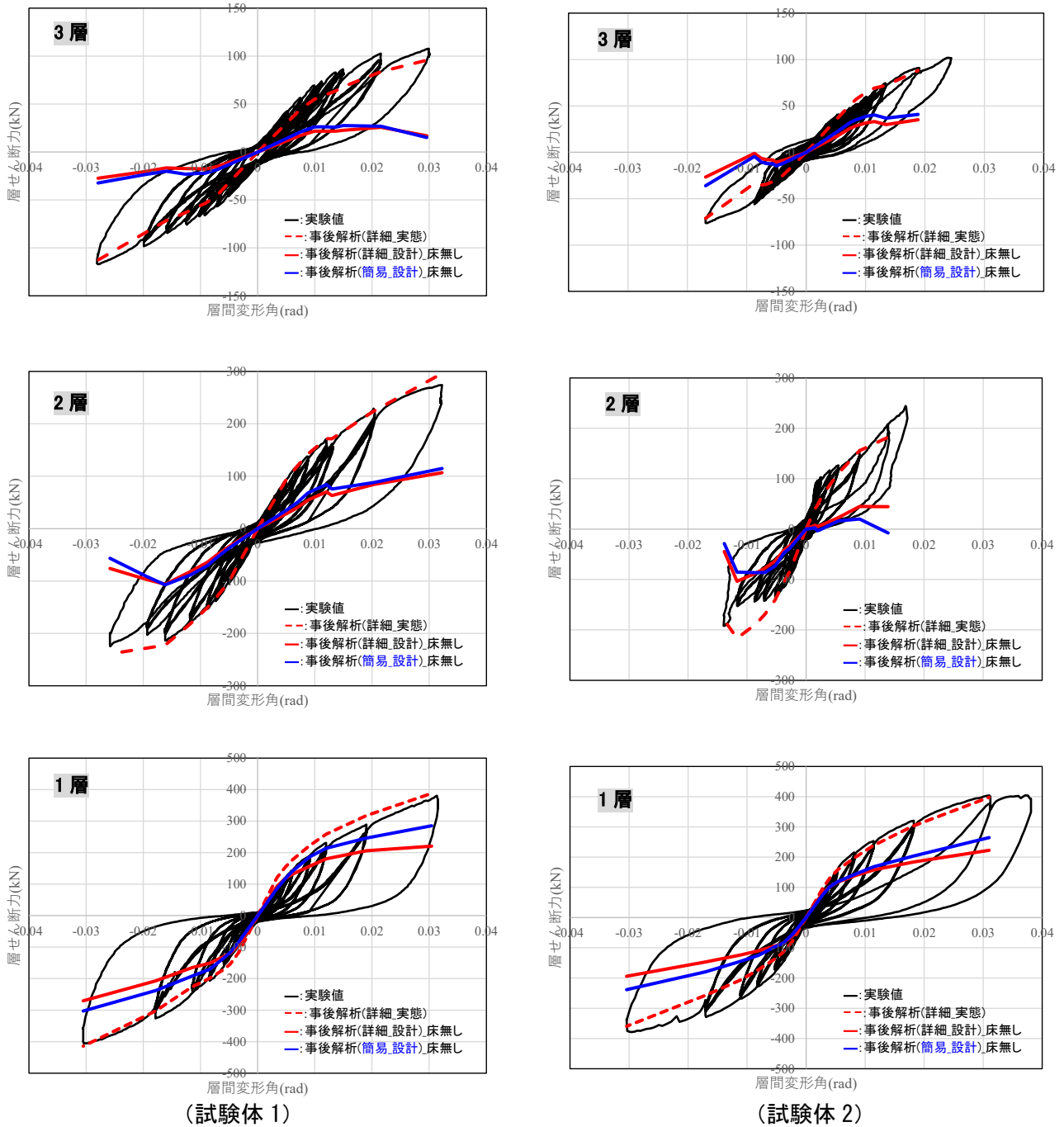


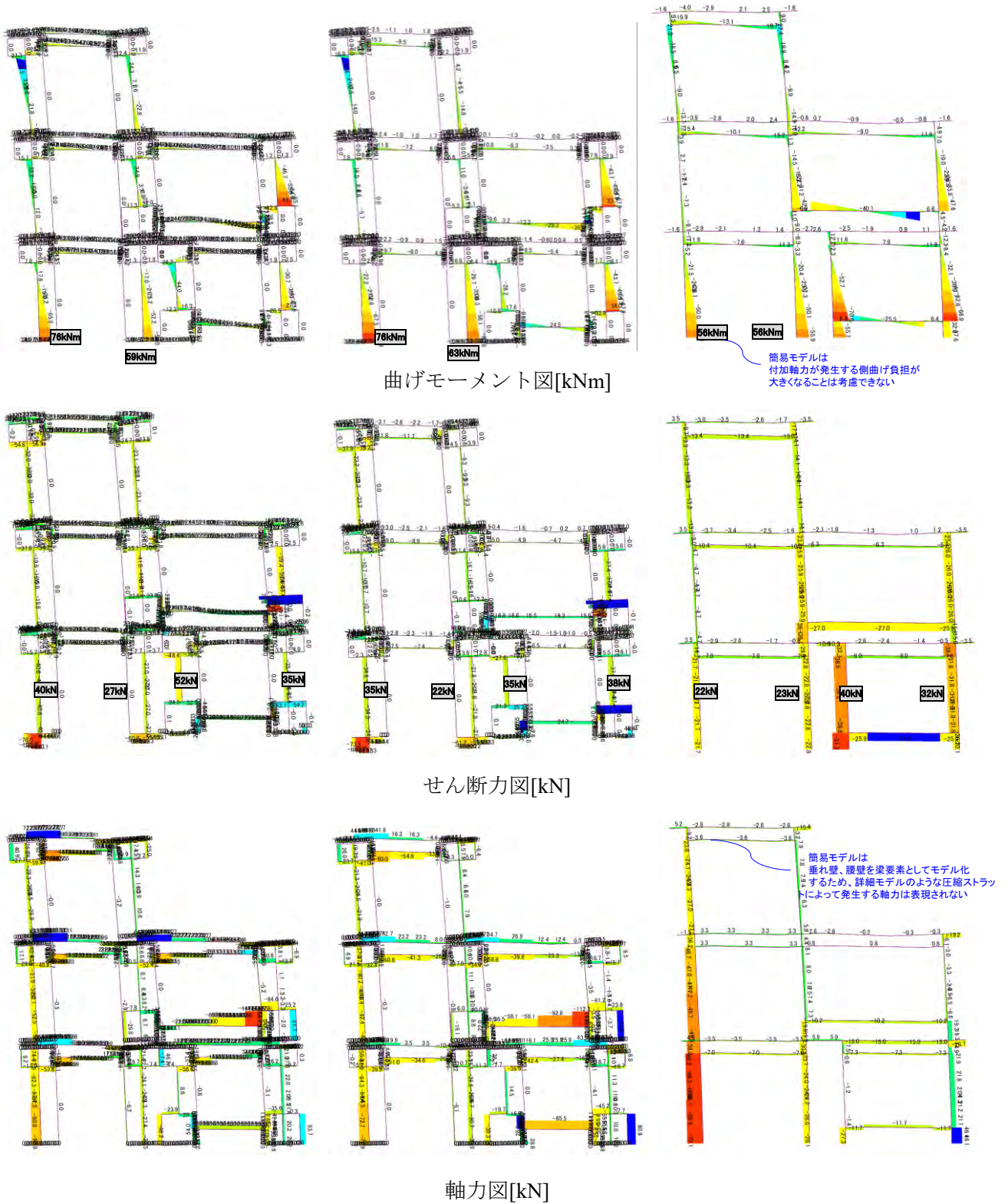
図 3.5.3-2 実験結果と事後解析(詳細モデルと簡易モデルの設計性能_床無し)の比較

・試験体 1、試験体 2 ともに、詳細モデルと簡易モデルの設計性能同士の比較では、床考慮した場合と床を無視した場合いずれもほぼ性能が一致しており、簡易モデルの妥当性が確認できる。また、床を考慮した解析では、若干簡易モデルが詳細モデルに比べて性能が安全側に評価されていることが確認できる。なお、床を無視したモデルでは特に 2 層と 3 層の性能が実験に比べて極端に小さくなり、本試験では床による影響が大きいことも確認できる

・床を考慮した簡易モデルと、実験値を比べると、初期剛性は 1 層が比較的实验値と近い剛性が確認できるが、2 層 3 層では 2/3~1/2 程度低めであることが確認できる。また耐力はいずれも変形角が大きくなるごとに差が大きくなり、1/50rad 付近では 2/3 程度の耐力であることが確認できる。

(2) 詳細モデル(実態性能)、詳細モデル(設計性能)、簡易モデル(設計性能)の比較

代表として 1/200rad、1/50rad 時における各モデルの応力図を比較する。設計性能は床を考慮する。

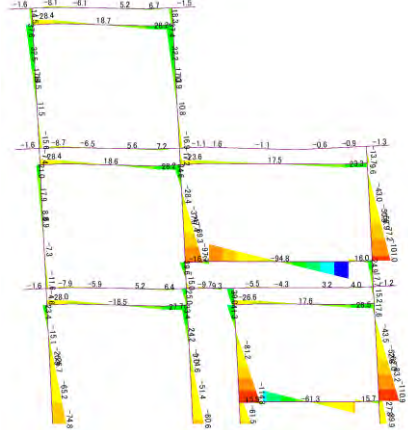
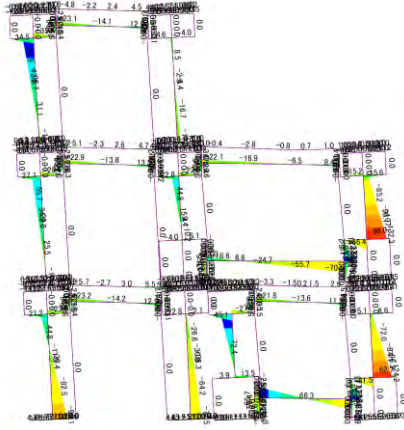
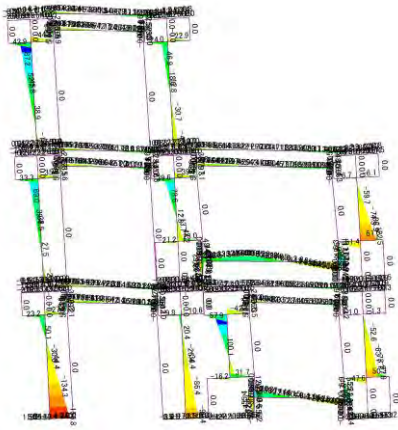


詳細モデル(実態)

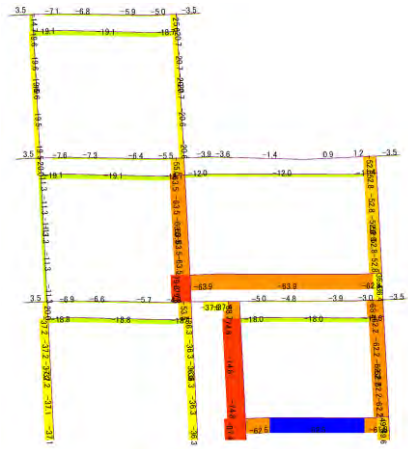
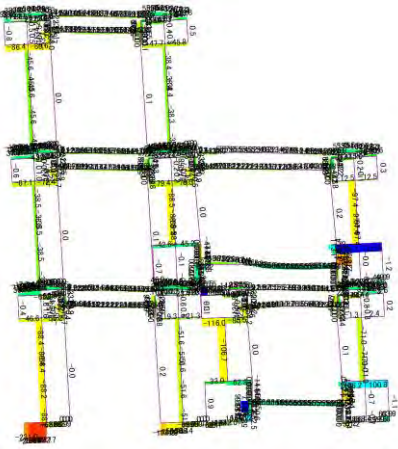
詳細モデル(設計)

簡易モデル(設計)

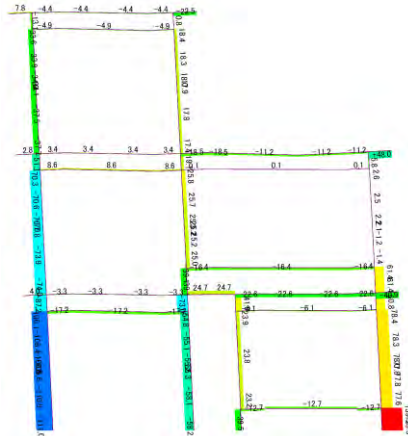
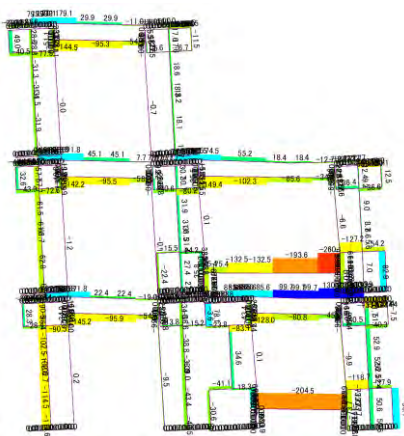
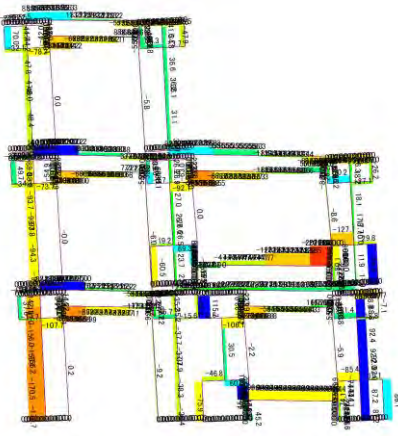
図 3.5.3-3 各モデルの応力 試験体 1 1/200rad 引き



曲げモーメント図[kNm]



せん断力図[kN]



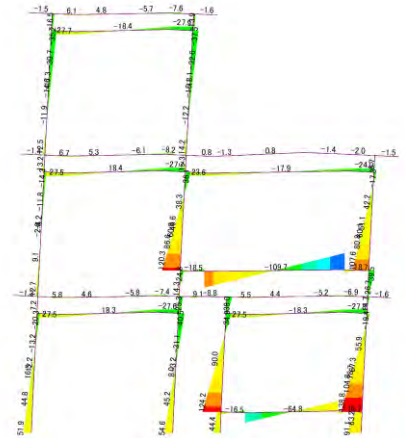
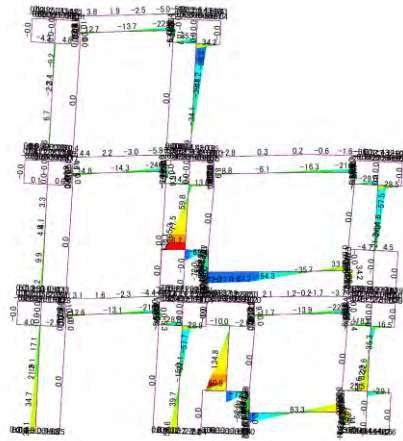
軸力図[kN]

詳細モデル(実態)

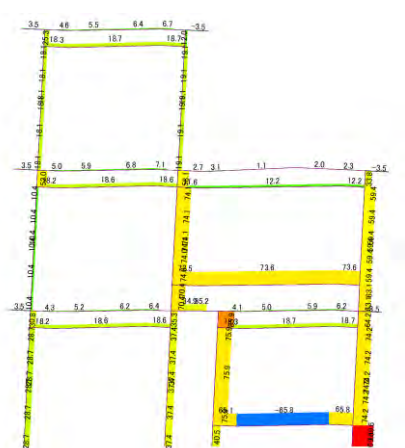
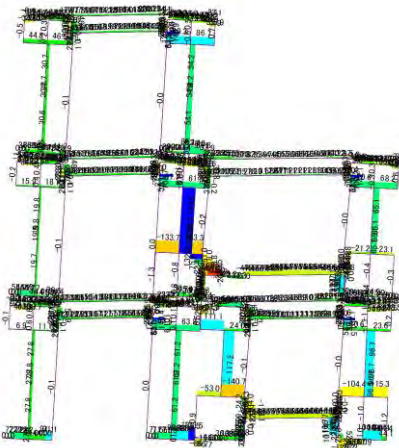
詳細モデル(設計)

簡易モデル(設計)

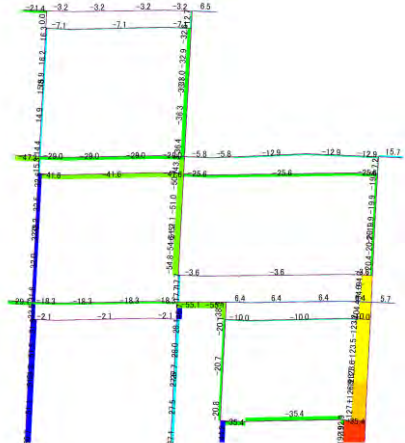
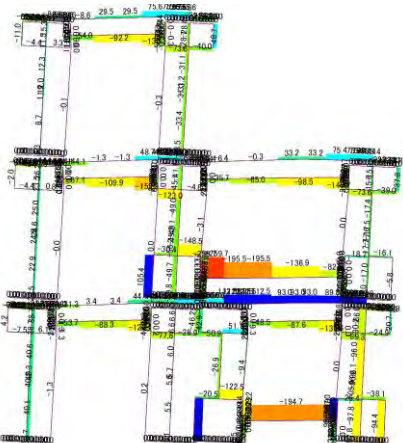
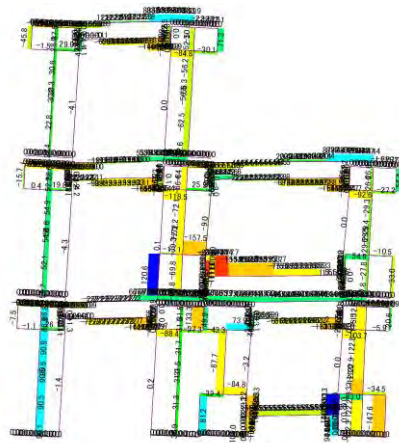
図 3.5.3-5 各モデルの応力 試験体 1 1/50rad 引き



曲げモーメント図[kNm]



せん断力図[kN]



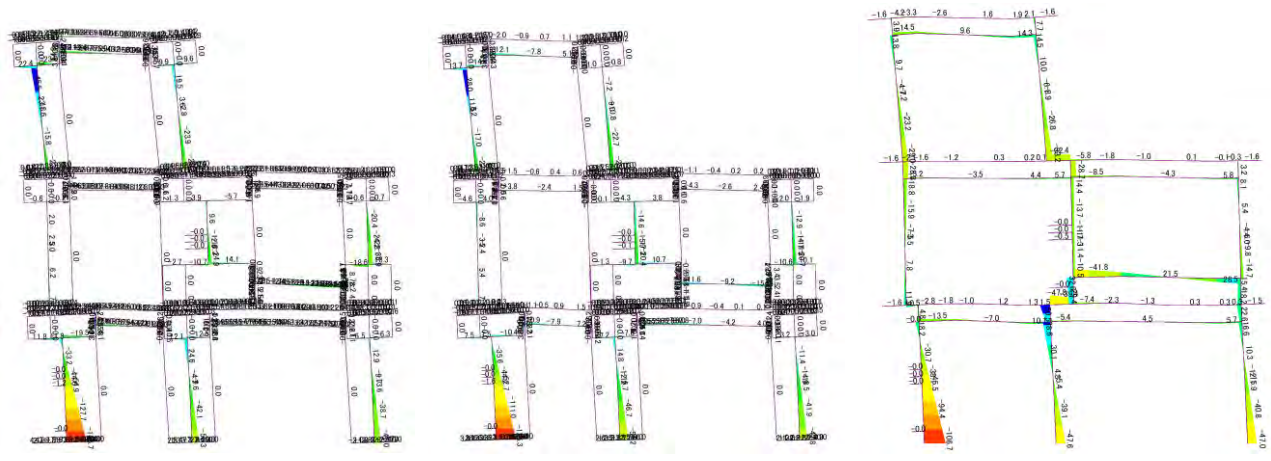
軸力図[kN]

詳細モデル(実態)

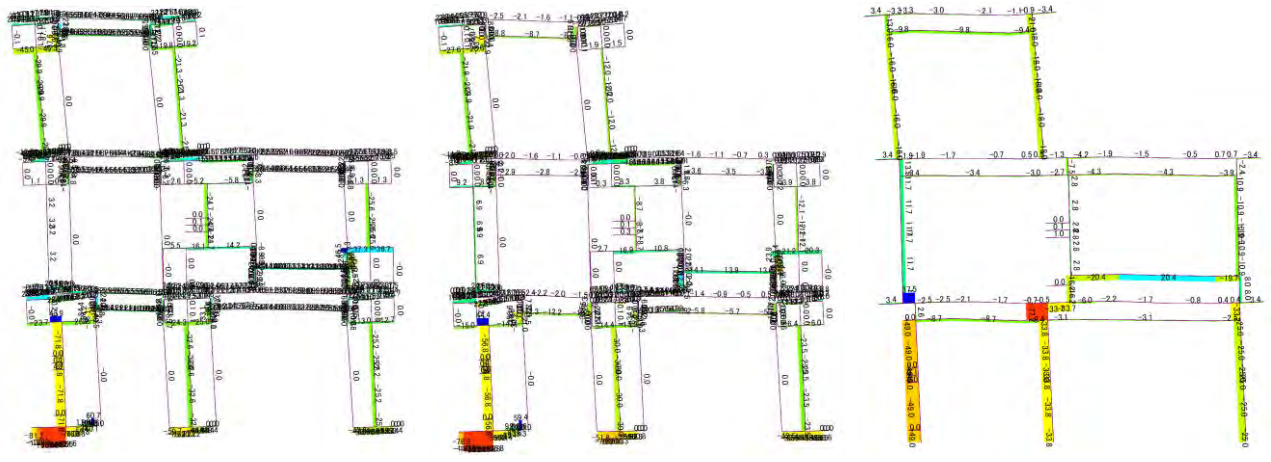
詳細モデル(設計)

簡易モデル(設計)

図 3.5.3-6 各モデルの応力 試験体 1 1/50rad 押し



曲げモーメント図[kNm]



せん断力図[kN]



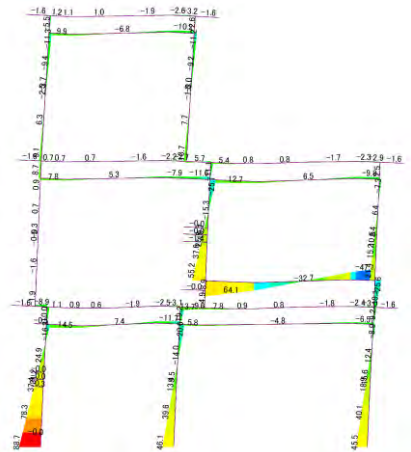
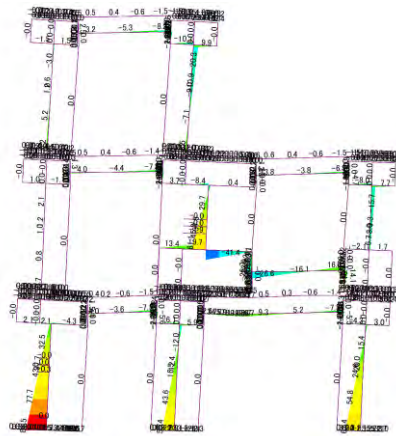
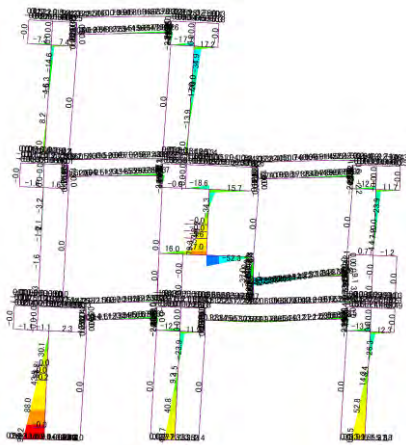
軸力図[kN]

詳細モデル(実態)

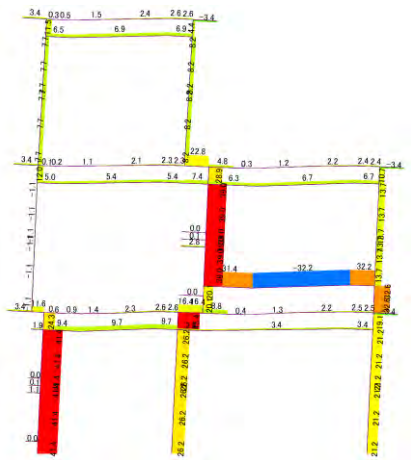
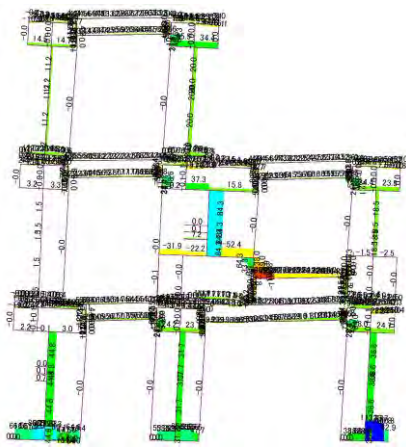
詳細モデル(設計)

簡易モデル(設計)

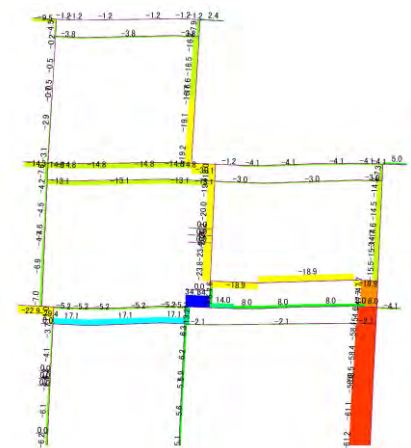
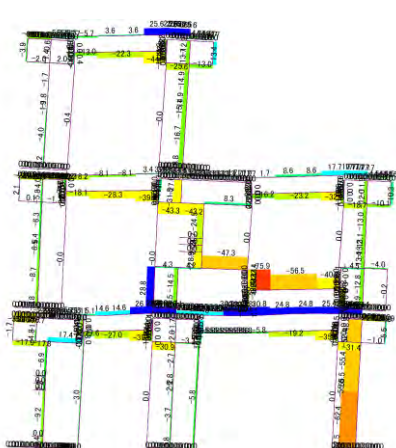
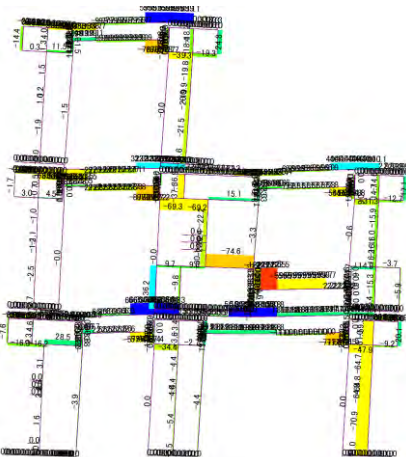
図 3.5.3-7 各モデルの応力 試験体 2 1/200rad 引き



曲げモーメント図[kNm]



せん断力図[kN]



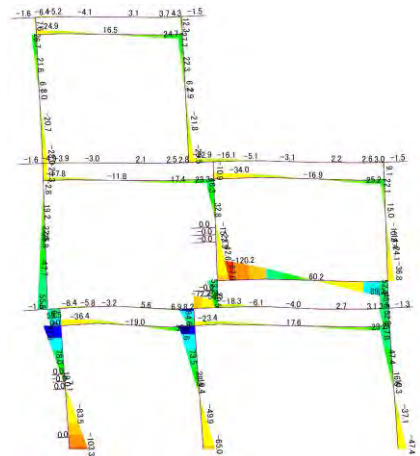
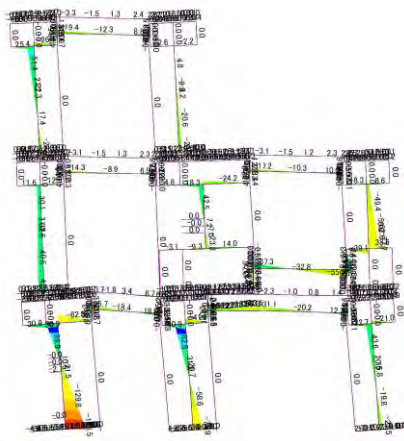
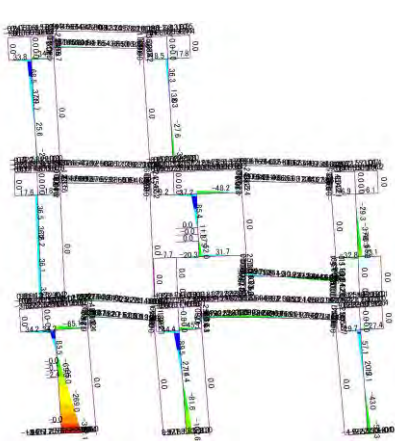
軸力図[kN]

詳細モデル(実態)

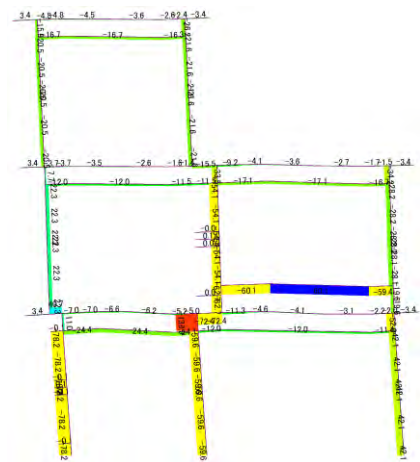
詳細モデル(設計)

簡易モデル(設計)

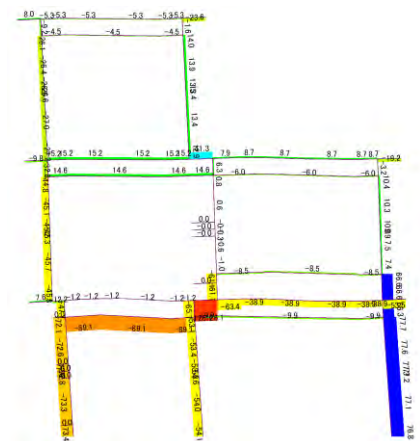
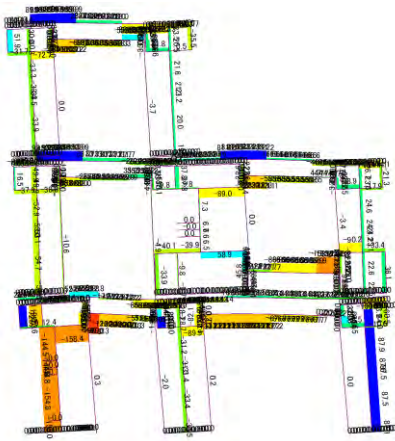
図 3.5.3-8 各モデルの応力 試験体 2 1/200rad 押し



曲げモーメント図[kNm]



せん断力図[kN]



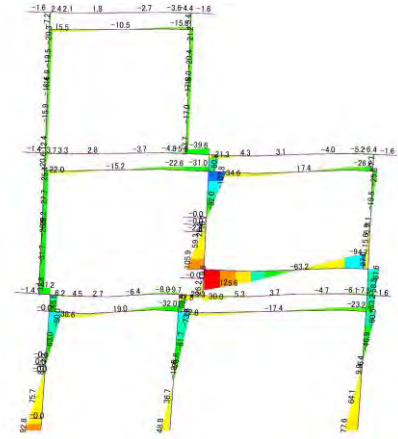
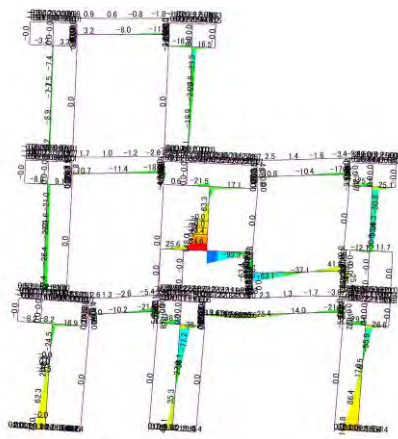
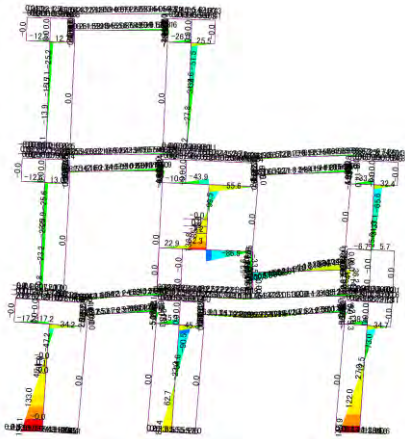
軸力図[kN]

詳細モデル(実態)

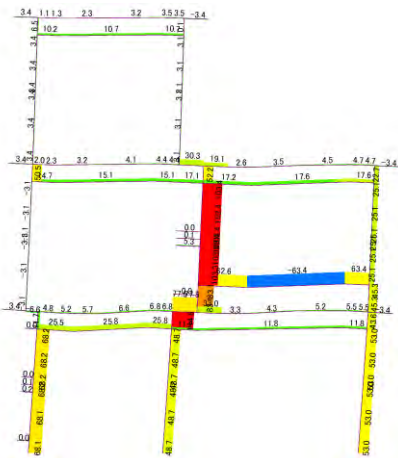
詳細モデル(設計)

簡易モデル(設計)

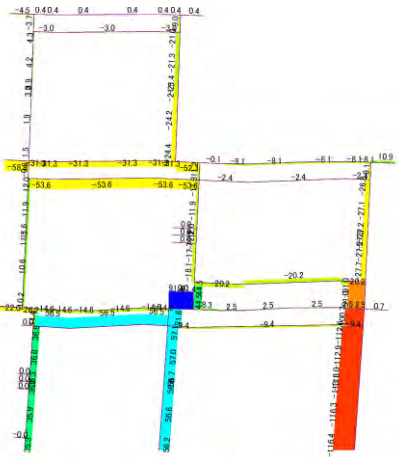
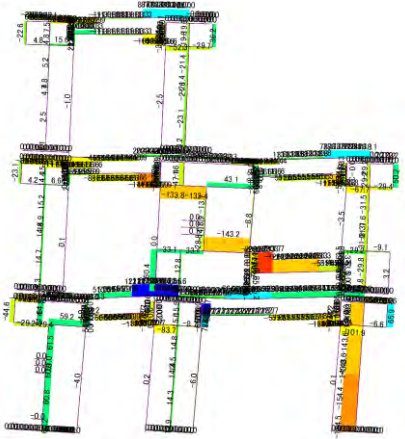
図 3.5.3-9 各モデルの応力 試験体 2 1/50rad 引き



曲げモーメント図[kNm]



せん断力図[kN]



軸力図[kN]

詳細モデル(実態)

詳細モデル(設計)

簡易モデル(設計)

図 3.5.3-10 各モデルの応力 試験体 2 1/50rad 押し

3.5.4 考察

以上、提案した簡易モデルの妥当性及び安全性を確認するため、設計性能を用いた詳細モデルと簡易モデルにより実験結果と比較検証した。得られた結果を以下に記載する。

(1) 層せん断力-層間変形角関係

試験体 1、試験体 2 とともに、詳細モデルと簡易モデルの設計性能同士の比較では、床考慮した場合と床を無視した場合いずれも、弾性から弾塑性にかけて、ほぼ性能が一致しており、簡易モデルの妥当性が確認できた。

床を考慮した解析では、若干簡易モデルが詳細モデルに比べて性能が安全側に評価されていることが確認できた。

床を無視したモデルでは特に 2 層と 3 層の性能が実験に比べて極端に小さくなり、本試験では床による影響が大きいことが確認できた。(壁厚 90mm に対して床厚 210mm のような場合は床を無視すると極端に性能が安全側になり、各部の応力についても実態と乖離が大きくなる)

・床を考慮した簡易モデルと実験値を比較すると、初期剛性は 1 層が比較的实验値と近い剛性が確認できるが、2 層 3 層では 2/3~1/2 程度低めであることが確認できた。また耐力はいずれも変形角が大きくなるごとに差が大きくなり、1/50rad 付近では 2/3 程度の耐力であることが確認できた。前者の影響は特に床の実態の性能が高いことや継ぎ手部分が完全なピンではないことが剛性に初期の剛性に影響を与えているものと考えられる。後者については、各部の実態性能と設計性能との違いが影響していると予想できる。これらより、設計性能の簡易モデルは、実際の性能に対して、安全側の性能で評価されていることが確認できた。

(2) 詳細モデル(実態性能、設計性能)と簡易モデルによる各部の応力比較

簡易モデルは①壁頭壁脚の回転剛性が付加軸力の影響を受けないため、詳細モデルのように付加圧縮力を受ける壁の応力負担が大きくなる(逆に付加引張力を受ける壁の負担応力が小さくなる)ことが表現できないことや、②垂れ壁/腰壁を梁要素としてモデル化しているため、詳細モデルのように変形角が進むにつれて部材自体に軸力が発生(圧縮ストラット効果)することが表現できていないなど、部分的に違いがあるものの、それらを除くと、詳細モデルと簡易モデルは全体的な負担応力の傾向がいずれの試験体でも表現できていることが確認できた。これは、実験結果と概ね良く対応することが確認された詳細モデル(実態性能)のと簡易モデルを比較しても同様に全体的な負担応力の傾向が対応していることが確認できた。

前述の①の差異について、簡易モデルで設計する際の配慮として考えられることは、安全側に考えると隅壁への応力割増を何かしら設定することが考えられるが、従来の鉄骨造の露出柱脚や木質ラーメン構造においても材端バネとして表現されることが一般的に扱われていることや、実性能に対する余裕度を鑑みると不要ということも十分考えられる

前述の②の差異については、簡易モデルで設計する際の配慮としては、垂れ壁/腰壁の梁要素に生じる曲げモーメントから軸力を計算により別途算出して、垂れ壁/腰壁の梁要素に付加軸力を考慮して断面算定を実施するといった配慮が考えられる。ただし、これらの影響は CLT パネル工法に限らず、比較的壁や柱の剛性が高く、せいが大きい梁部材には同様の圧縮ストラットが実際には生じているものとも考えられ、実験性能に対する余裕度等も鑑み、設計用応力として扱うかは今後議論の余地があると考えられる。

3.6 まとめ

本章では2章で示した実大3層試験体の静加力試験を対象として、入力変形を決定するための事前解析、実験結果の再現を試みた実態性能の詳細モデルによる事後解析、提案した設計性能の簡易モデルの妥当性及び安全性を確認するため実験値や詳細モデルと比較検討した。本章より得られた知見を以下にまとめる。

(1) 事前解析

事前解析では仮定した重量想定に対して A_i 分布による水平力を算定し、試験体1、試験体2の詳細モデルの立体モデルに対して荷重増分解析を実施した。試験体1では床継手部を面外方向に対して曲げせん断ともにピンとして設定したが、実験結果との対応は特に2層3層が悪いことが確認された。一方で、試験体2は試験体1の実験結果との乖離を受けて、床継手部を剛としてモデルを補正したが、2層3層は概ねよく実験結果と対応することが確認された。

(2) 実態性能を用いた詳細モデルによる事後解析

要素試験により得られた性能を一部採用した詳細モデルを構築し、実験で得られた各層の変形を解析モデルに強制変形として入力した。試験体1は、各層、各方向ともに事後解析値による骨格曲線は、実験結果と概ね良く一致することが確認できた。試験体2は、押し側において1層と3層の解析値が実験に比べて若干耐力が小さく、2層は逆に大きくなっているが、引き側では各層ともに事後解析値による骨格曲線は、実験結果と概ね良く一致することが確認できた。また、1階のCLT壁パネルの負担せん断力や、壁脚引張ボルトも同様に比較したところ、解析値は実験値と概ね対応することが確認できた。

(3) 簡易モデル（設計性能）の妥当性と安全性

試験体1、試験体2ともに、詳細モデルと簡易モデルの設計性能同士の比較では、床考慮した場合と床を無視した場合いずれも、弾性から弾塑性にかけて、ほぼ性能が一致しており、簡易モデルの妥当性が確認できた。床を考慮した解析では、若干簡易モデルが詳細モデルに比べて性能が安全側に評価されていることが確認でき、床を無視したモデルでは特に2層と3層の性能が実験に比べて極端に小さくなり、本試験では床による影響が大きいことが確認できた。

床を考慮した簡易モデルと実験値を比較すると、初期剛性は1層が比較的实验値と近い剛性が確認できるが、2層3層では2/3～1/2程度低めであることが確認できた。また耐力はいずれも変形角が大きくなるごとに差が大きくなり、1/50rad付近では2/3程度の耐力であることが確認できた。

本試験体は壁厚90mmに対して、床厚210mmと性能が高いため床を考慮した簡易モデルが必要であり、本検討では床を考慮した簡易モデル化方法を示したが、今後より簡易なモデルとするためには、垂れ壁要素及び垂れ壁端部の接合性能に、床による影響を加味した方法（例えば、垂れ壁床せん断接合性能を考慮したT型断面評価など）を用いる等、より簡便化を図ることが期待される。また、床継手部はピンとして評価すると実態性能と乖離が大きいことも確認された。床を考慮する場合、現行告示では強軸/弱軸による設定や継手部をピンにする等が非常に煩雑であることが知られているため、今後は実態挙動を解明しつつ、より単純に簡便な床の評価に繋がることも期待される。

また、実態性能の事後解析では、せん断金物の引張抵抗をビス一本当たりの性能を本数倍した性能として、比較的簡易に考慮したが、実際には金物の変形や、せん断応力と複合的に寄与することなどが考えられ、性能は精査が必要であるが、今後の保有水平耐力計算での合理化を図る上では、ディテールに応じたせん断金物の引張性能を耐力に見込むといったことが、知見の蓄積により十分考えられる。