

第6章 大版パネル架構②の構造モデル設定方法

6.1 はじめに

本章では以下の検討を行う。

■複数開口を有する大版パネルのモデル化

大版パネル架構②のような有開口大版パネルによる鉛直構面に水平力が作用するとき、ほとんどの場合、水平変形に伴い開口隅部に鉛直方向の亀裂が発生する。その際には鉛直構面内における応力再分配や水平耐力低下が生じるために静的増分解析では原理的にその過程を追跡することができない。一方で、従来、ルート 1 の許容水平耐力定式化等のためのパラメトリックスタディでは荷重増分解析が採用されているが、上述の理由により大版パネル架構②についてはそれらの解析ツールをそのまま適用することができない。

この点に関して、昨年度までに亀裂発生による応力再分配等を含む鉛直構面の水平力ー水平変形関係の荷重増分解析による再現を可能とする接合部バネの等価性能の評価方法が検討され、単一の開口を有する大版パネルの水平力ー水平変形関係については一定の精度で再現可能となっている。しかし、実建物では一つの大版パネルに複数の開口が設けられることがあり、そのような場合に対する上記等価性能の適用性については未確認である。この状況を踏まえ、第 2 章におけるパラメトリックスタディに関連して、複数開口を有する大版パネルのモデル化方法について検討する。

■無開口とみなし得る小開口の条件

開口部を有する CLT 壁パネルの水平耐力について、開口部の大きさが一定以上であれば上述のような亀裂発生に伴う剛性・耐力低下が生じるが、開口が小さい場合は鉛直構面が終局水平変形に達するまで亀裂が生じず、その壁パネルは無開口壁パネルと同様に挙動することになる。

第 2 章において大版パネル架構②の水平耐力等を検討することに関連して無開口とみなし得る小開口の条件を検討する。具体的には、鉛直構面が保有水平耐力に達するときの壁パネルの負担水平力に対して亀裂を防止し得る開口の大きさ・位置に関して、既往の有開口壁パネル水平加力実験結果および FEM モデルを用いた解析に基づいて検討する。

6.2 複数開口を有する大版パネルのモデル化

6.2.1 概要

R1 年度検討では、H27 年度に実施した振動台実験 6.2-1)の大版パネル架構(C 棟、D 棟)を対象に、下記の 2 点が確認された。

- ① MS 要素を用いた構造モデル(以下、MS モデル)の変位増分解析結果は、単一開口大版パネルの亀裂発生による荷重低下を表現できること
- ② 垂れ壁・腰壁の両端に有効断面を全断面の 8%とした弾塑性バネを設定したフレームモデルの荷重増分解析結果が変位増分解析結果及び実験結果に比較的よく適合すること

本検討では、2 章の大版パネル架構②の許容水平耐力の算定に先立ち、R1 年度検討と同様の方法で設定される MS モデルと等価なフレームモデル(以下、等価フレームモデル)の妥当性を確認する。具体的には、図 6.2.1 に示すような複数開口大版パネル 6.2-2)を対象に、MS モデルの解析結果が実験結果を再現できることを確認(以下、実験的検討)し、図 6.2.2 に示す 14 種類の架構を対象に MS モデルと等価フレームモデルの増分解析結果の比較し、上述の②の設定の妥当性を検討(以下、解析的検討)する。

共通事項

- ・CLT パネル： 壁パネル Mx60-5-5、床パネル Mx60-7-7
- ・引張接合部： 脚部 引きボルト 1-M24(強度区分 10.9)、頭部 GIR 1-D25(SD345)
- ・せん断接合部： 脚部・頭部 鋼板ビス打ち

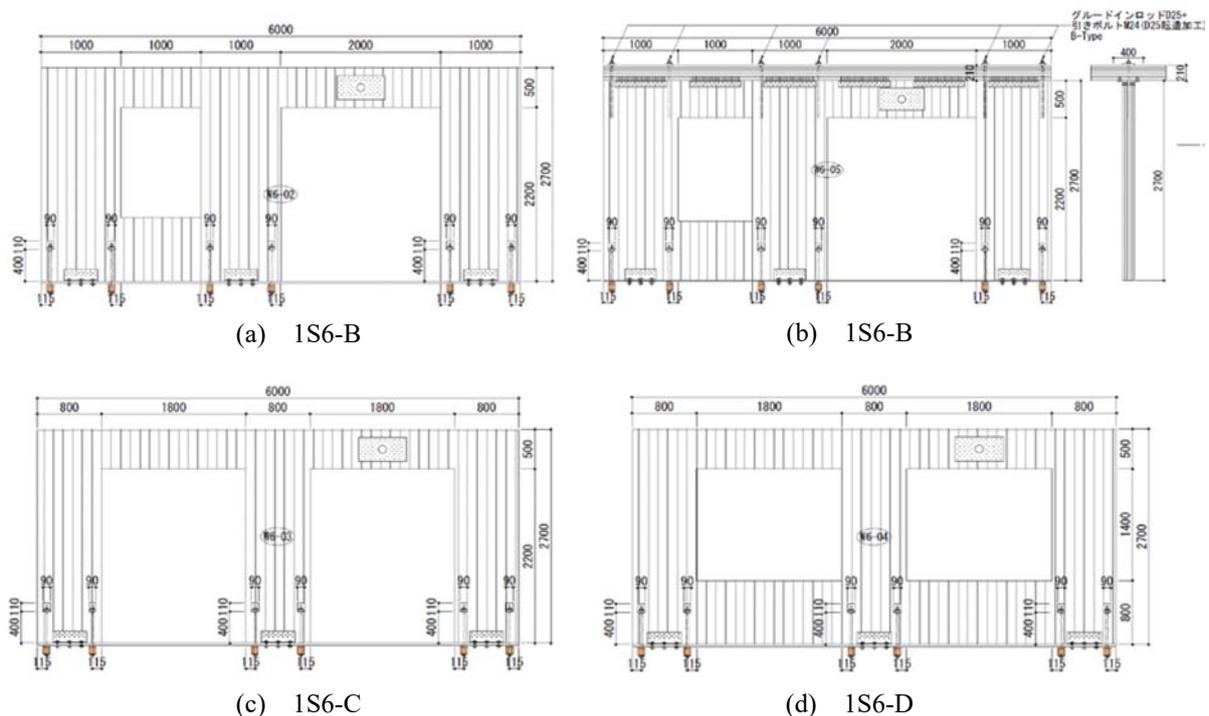


図 6.2.1 実験的検討で対象とする架構一覧

共通事項

- ・CLT パネル: 壁パネル Mx60-5-5(150mm 厚)、床パネル Mx60-7-7(210mm 厚)
- ・引張接合部: 脚部 引きボルト 1-M24(強度区分 10.9)、頭部 GIR 1-D25(SD345)
- ・せん断接合部: 脚部・頭部 鋼板ビス打ち

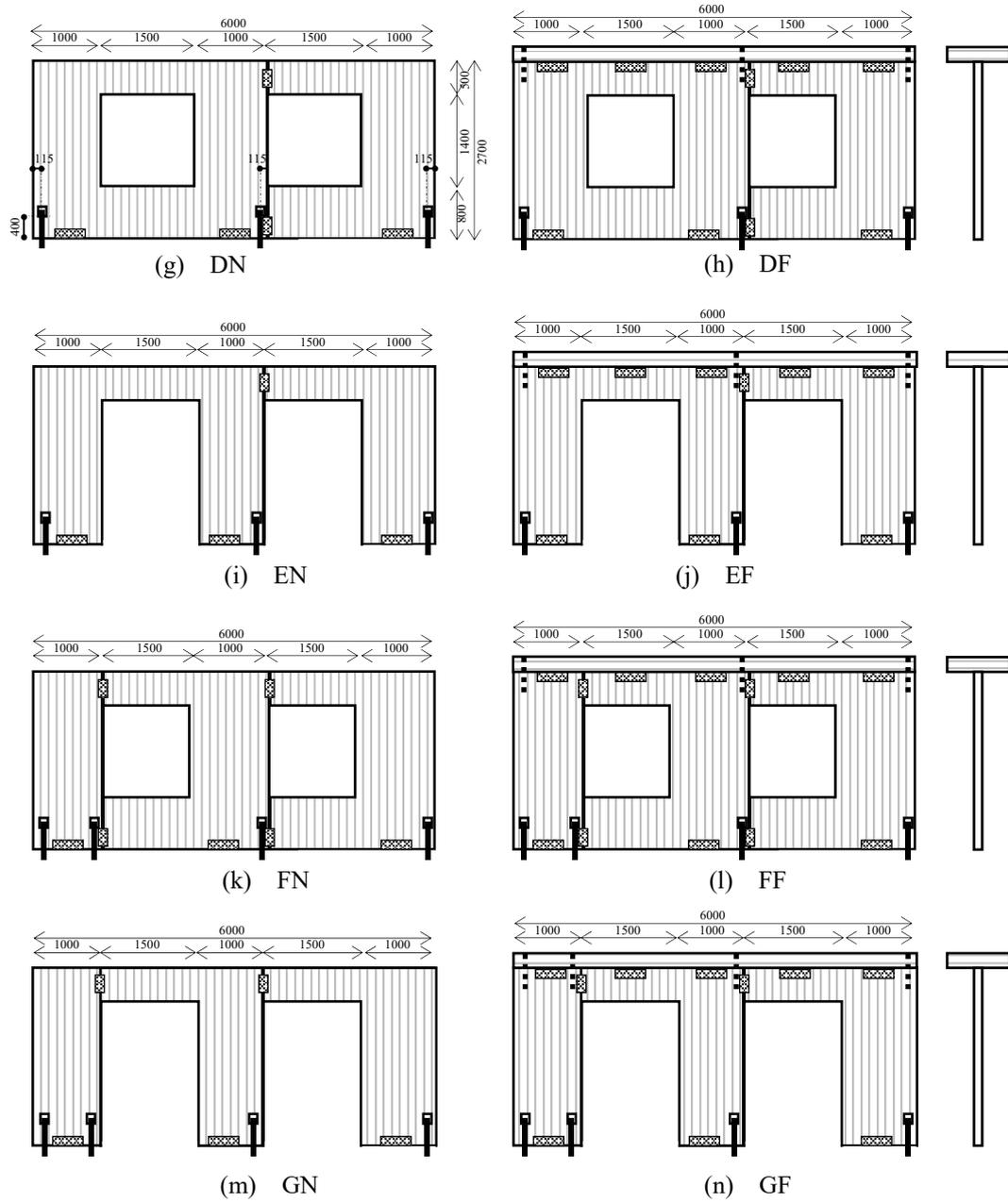
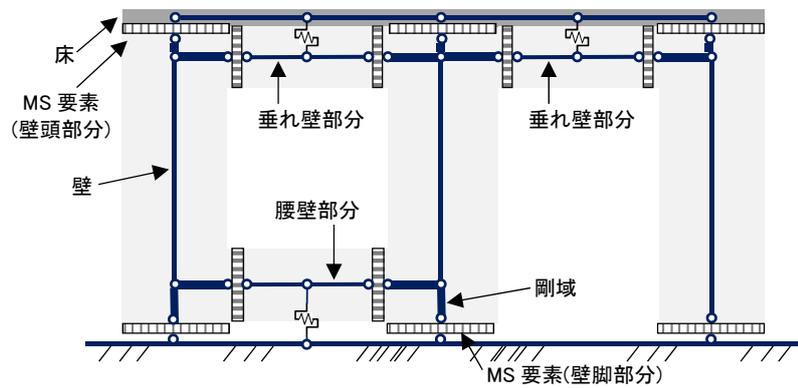


図 6.2.2 続 解析的検討で対象とする架構一覧

6.2.2 解析モデル

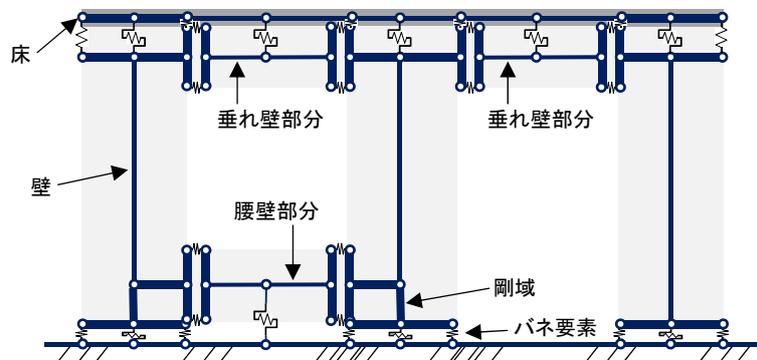
(1) モデル化の概要

解析モデルを図 6.2.3 に示す。「MS モデル」は、図 6.2.3(a)に示すように、袖壁部分・垂れ壁・腰壁部分を含む全ての接合部を MS 要素でモデル化する。各部の復元力特性は後述の通りとする。図 6.2.3(b)は CLT 設計施工マニュアル^{6.2-3)}に示されている現行のフレームモデルである。本検討では、R1 年度検討と同様に、袖壁部分・垂れ壁・腰壁部分の復元力特性を全断面の 8%を有効断面とした弾塑性バネを垂れ壁・腰壁の両端に配置した等価フレームモデルの適合性を検討する。なお、本検討では袖壁部分・垂れ壁・腰壁部分のモデル化の相違による影響を調べるため、図 6.2.3(c)に示すような、柱頭・柱脚部分は MS モデル、袖壁部分・垂れ壁・腰壁部分はフレームモデルとしたモデルで検討を行う。

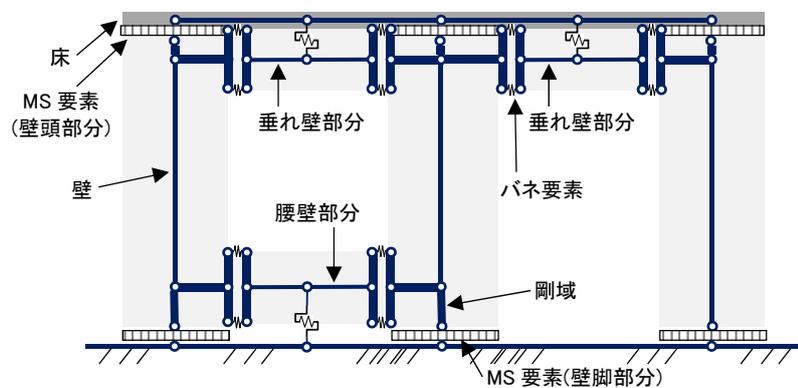


※MS 要素の断面分割数は壁幅の 1/10 とする

(a) MS モデル

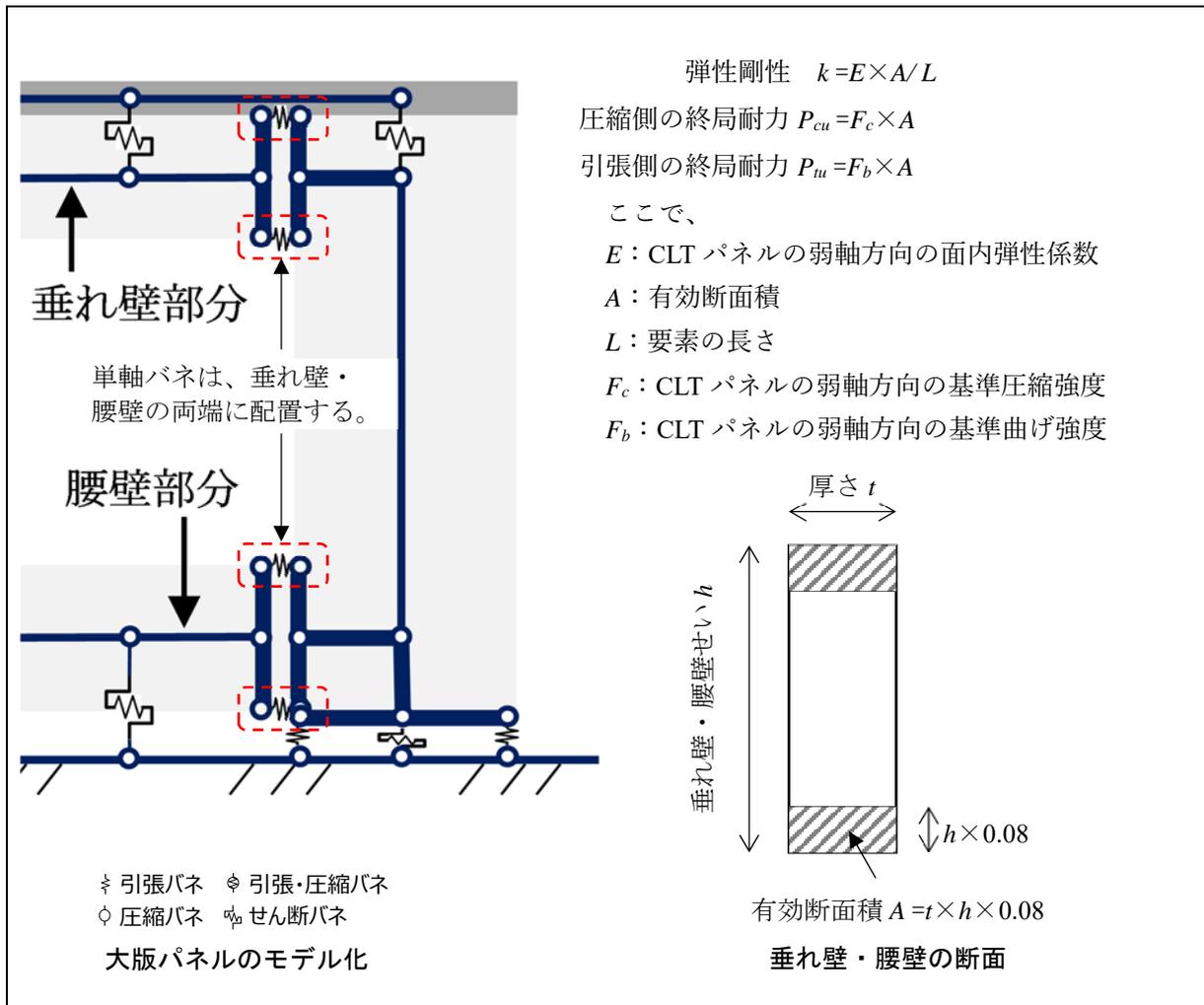


(b) 現行のフレームモデル



(c) 本検討で採用するフレームモデル

図 6.2.3 解析モデル



(d) 大版パネル架構における袖壁—垂れ壁・腰壁部分間のモデル化における有効断面積の設定

図 6.2.3 続 解析モデル

(2) CLT パネル

CLT パネルは線材置換でモデル化し、弾性係数及び基準強度を CLT 設計施工マニュアル 6.2-3) に基づき以下のように設定する。基準強度については、後述する手順より実態性能を推定した値を設定する。

壁：Mx60-5-5(150mm 厚)

床根：Mx60-7-7(210mm 厚)

$$E_{\text{面内,強軸}}=3000\text{N/mm}^2、E_{\text{面内,弱軸}}=1200\text{N/mm}^2$$

$$E_{\text{面外,強軸}}=4040\text{N/mm}^2、G_{\text{面外,強軸}}=29.6\text{N/mm}^2$$

$$G_{\text{面内}}=500\text{N/mm}^2$$

$$F_{ct}=6.00\text{N/mm}^2、$$

$$F_c^{\text{強軸}}=17.00\text{N/mm}^2、F_c^{\text{弱軸}}=10.20\text{N/mm}^2$$

$$F_b^{\text{強軸}}=13.50\text{N/mm}^2、F_b^{\text{弱軸}}=8.10\text{N/mm}^2$$

袖壁部分一垂れ壁・腰壁部分は図 6.2.4 に示すような弾塑性バネとし、当該部分の弾性剛性は弱軸方向の面内曲げで、基準強度について、引張側は曲げ基準強度 F_b 、圧縮側は圧縮基準強度 F_c でそれぞれ表現できると仮定する。各基準強度は同一樹種、同一等級のラミナで構成された既往の実験結果 6.2-4) 6.2-5) に基づき、次頁に示す手順で設定した。

曲げ基準強度

平 13 国交告第 1024 号第三第九号ハに示されている算出方法による。その際、基準強度を平均性能相当と見なせるように、強度分布の 5% 下限値を算出するための調整係数(=0.6)を無視した値としている。ラミナの曲げ強度は同告示の表 1 による値(=27.0N/mm²)とした^{*}。

圧縮基準強度

既往の実験結果 6.2-4) 6.2-5) に適合するように、ラミナの圧縮強度を 34.0N/mm² とし^{*}、平 13 国交告第 1024 号第三第九号イに示されている算出方法により算出する。なお、強度分布の 5% 下限値を算出するための調整係数(=0.75)は無視している。

^{*}S60-5-5、Mx60-5-5、S60-7-7 を対象に、本検討で設定したラミナの基準強度に基づいて算出した F_b と F_c について、既往の実験結果 6.2-4) 6.2-5) より得られた F_b と F_c の比較を以下に示す。S60-5-5、S60-7-7 については、計算値と実験値の相違は 10% 以下であった。Mx60-5-5 については実験値の方が 15% 以上高いが、S60-5-5 の実験結果よりも高くなっていることから、ラミナが M60 相当以上の性能を有していたためと考えられる。

		曲げ基準強度 F_b (N/mm ²)			圧縮基準強度 F_c (N/mm ²)		
		計算値	実験値	計算値/実験値	計算値	実験値	計算値/実験値
S60-5-5	強軸	16.2	14.8	1.09	20.4	19.4	1.05
	弱軸	10.8	9.9	1.09	13.6	14.1	0.96
Mx60-5-5	強軸	13.5	17.2	0.78	17.0	20.2	0.84
	弱軸	8.1	11.1	0.73	10.2	14.2	0.72
S60-7-7	強軸	15.4	13.9	1.11	19.4	18.7	1.04
	弱軸	11.6	11.6	1.00	14.6	13.8	1.06

MSモデルの最大応力度到達後の荷重低下について、引張側は最大応力度到達時の歪+0.0001の点で荷重が0となるように設定した。圧縮側は、図6.2.5に示す既往の圧縮試験結果(高さ200mm)を参考に、 σ - ε 関係より高さを200mmとしたときに F_c 到達時の変位 δ_{max} の20倍の変位で荷重が0となるような σ - ε 関係を設定した。

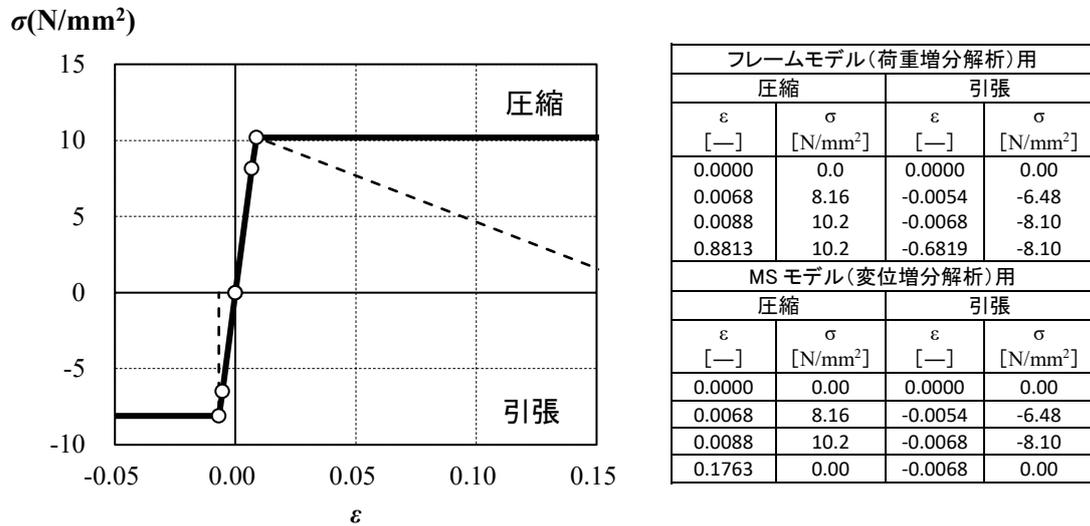


図 6.2.4 袖壁部分—垂れ壁・腰壁部分間の復元力特性

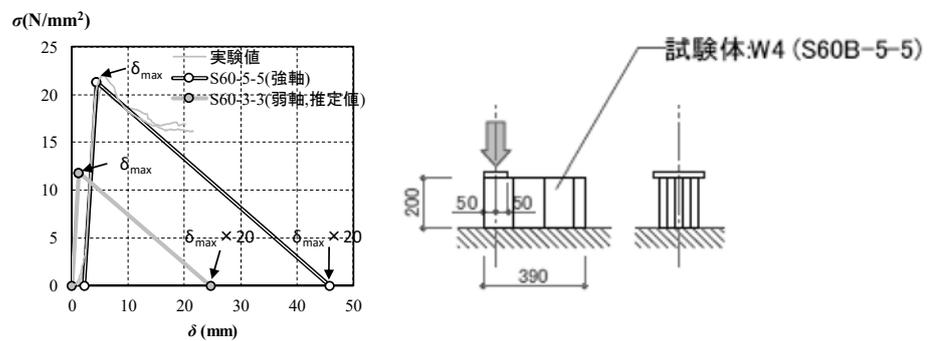
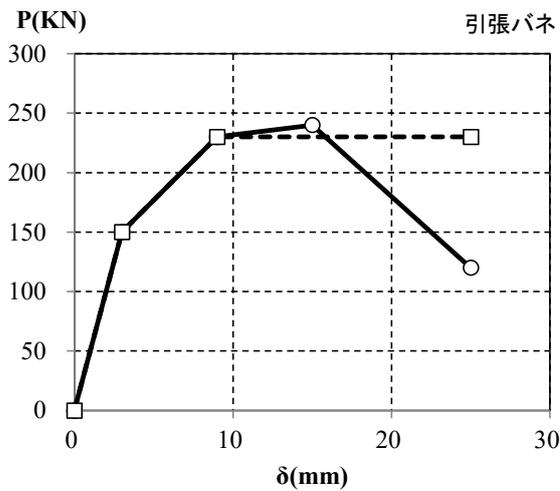


図 6.2.5 CLT パネルの支圧の σ - δ 関係 (高さ 200mm 時)

(3) 接合部バネ

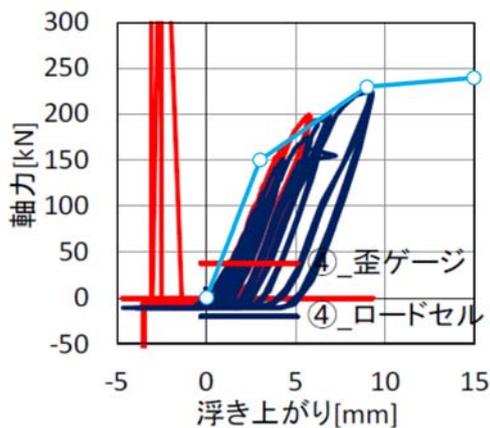
・引張バネ

1 階脚部の引きボルトの引張バネの荷重—変位関係を図 6.2.6 に示す。引張バネの復元力特性は、MS モデルに用いることを想定して荷重低下を考慮したモデルと、フレームモデルに用いることを想定したトリニアモデルの 2 種類を設定した。引張バネのモデル化は、図 6.2.7 に示すような、構面試験結果 6.2-2)より抽出した荷重—変位関係に基づいて設定する。同試験では変位が 9mm 程度に達した時点で亀裂が発生し、以降の変位が抽出できない。従って、9mm 以降の荷重—変位関係については、図 6.2.8 に示すような類似する仕様の引きボルト接合部単体引張試験結果 6.2-3)に基づいて設定する。壁—屋根間の引張接合部(GIR)の荷重—変位関係は、1 階脚部の引きボルトの性能と同じとして設定した。



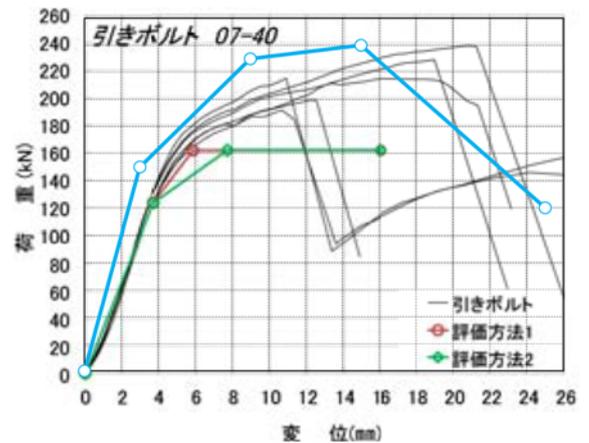
壁—基礎・屋根 荷重低下あり		壁—基礎・屋根 荷重低下なし	
δ [mm]	P [kN]	δ [mm]	P [kN]
0.00	0.00	0.00	0.00
3.00	150.00	3.00	150.00
9.00	230.00	9.00	230.00
15.00	240.00	25.00	230.00
25.00	120.00	—	—

図 6.2.6 引張バネ特性



※青線は設定値

図 6.2.7 構面試験より抽出した接合部の荷重—変位関係と設定値の比較

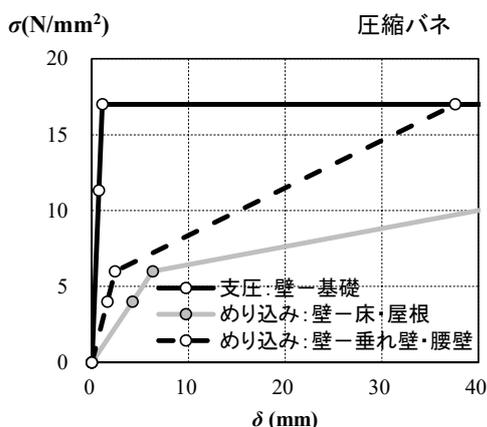


※青線は設定値

図 6.2.8 類似仕様の要素試験結果の荷重—変位関係と設定値の比較

・圧縮バネ

圧縮バネの荷重—変位関係を下図に示す。圧縮バネは MS モデルの場合は断面分割数を 10(等間隔)として、負担面積に応じた圧縮バネを等間隔に配置する。フレームモデルの場合は、CLT 設計施工マニュアル 6.2-3)に従い、有効支圧面積を[壁パネルの厚さ×引張接合部から壁パネル圧縮縁までの距離/4]として設定する。「壁—基礎」間の圧縮バネの弾性剛性は CLT 設計施工マニュアルに従い $k_e = 15.6\text{kN/mm}^3$ とし、圧縮基準強度 F_c は前述の「CLT パネル」で設定した値(=17.00N/mm²)とする。「壁—床・屋根」間、「壁—垂れ壁・腰壁」間の圧縮バネの復元力特性は CLT 設計施工マニュアルに従い設定する。但し、強度については壁パネルの圧縮基準強度 F_c を上限としたトリニアモデルでモデル化する。なお、 E_{90} は 0.2kN/mm³とした。



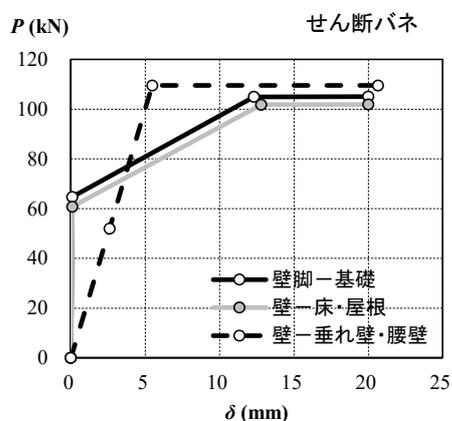
壁—基礎 (支圧)		壁—床・屋根 (めり込み)※		壁—垂れ壁・腰壁 (めり込み)※	
δ [mm]	σ [N/mm ²]	δ [mm]	σ [N/mm ²]	δ [mm]	σ [N/mm ²]
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.73	11.33	4.20	4.00	1.60	4.00
1.09	17.00	6.30	6.00	2.40	6.00
100.00	17.00	98.70	17.00	37.60	17.00
—	—	100.00	17.00	100.00	17.00

※ 降伏後の 2 次剛性は初期剛性の 1/8 とする。

図 6.2.9 圧縮バネ特性

・せん断バネ

せん断金物 1 個あたりの荷重—変位関係を下図に示す。「壁—基礎」間、「壁—床・屋根」間の荷重—変位関係は実験結果 6.2-6) 6.2-7)に準拠し設定する。「壁—垂れ壁・腰壁」間の荷重—変位関係は CLT 設計施工マニュアルに示されている「SP」金物の値を設定する。



壁—基礎		壁—床・屋根		壁—垂れ壁・腰壁	
δ [mm]	P [kN]	δ [mm]	P [kN]	δ [mm]	P [kN]
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	64.72	0.10	60.82	2.60	52.00
12.30	104.97	12.80	101.78	5.48	109.50
20.00	105.05	20.00	101.85	20.65	109.50

図 6.2.10 せん断バネ特性

6.2.3 実験結果と解析結果の比較

実験結果と解析結果の比較を図 6.2.11 に示す。床ありの「1S6-BF」は解析結果と実験結果が比較的良く適合したが、床なしの「1S6-B」、「1S6-C」、「1S6-D」は解析結果の最大耐力が高めに評価される傾向が確認された。そこで、「床なし」の解析結果が実験結果に適合するような CLT パネルの袖壁部分—垂れ壁・腰壁部分の基準強度を試行錯誤して調べ、下記のような値に変更した。基準強度を更新した解析結果と実験結果の比較を図 6.2.12 に示す。

引張側: $F_{b\text{弱軸}}=8.10\text{N/mm}^2 \rightarrow 6.50\text{N/mm}^2$ ($=1/1.25$)

圧縮側: $F_{c\text{弱軸}}=10.20\text{N/mm}^2 \rightarrow 10.20\text{N/mm}^2$ (変更なし)

引張側の基準強度 $F_{b\text{弱軸}}$ を $1/1.25$ とした場合、「床なし」の解析結果は実験結果と適合した。「床あり」についても、亀裂発生時の耐力がやや過小評価となったが、図 6.2.11 の結果と同様に、比較的良く実験結果と適合していることが確認された。CLT 設計施工マニュアル^{6.2-3)}では、図 6.2.13 に示すように、大版パネルの入隅部の応力検定について、1.5 倍程度の応力集中を見込むと良いことが示されている。本検討では、実態強度と推定される値の $1/1.25$ 倍(耐力低減率が 0.8)程度で、同図中の赤枠に示されている耐力低減率の範囲($=0.3\sim 0.9$)であり、既往の検討結果と同様の傾向が確認された。

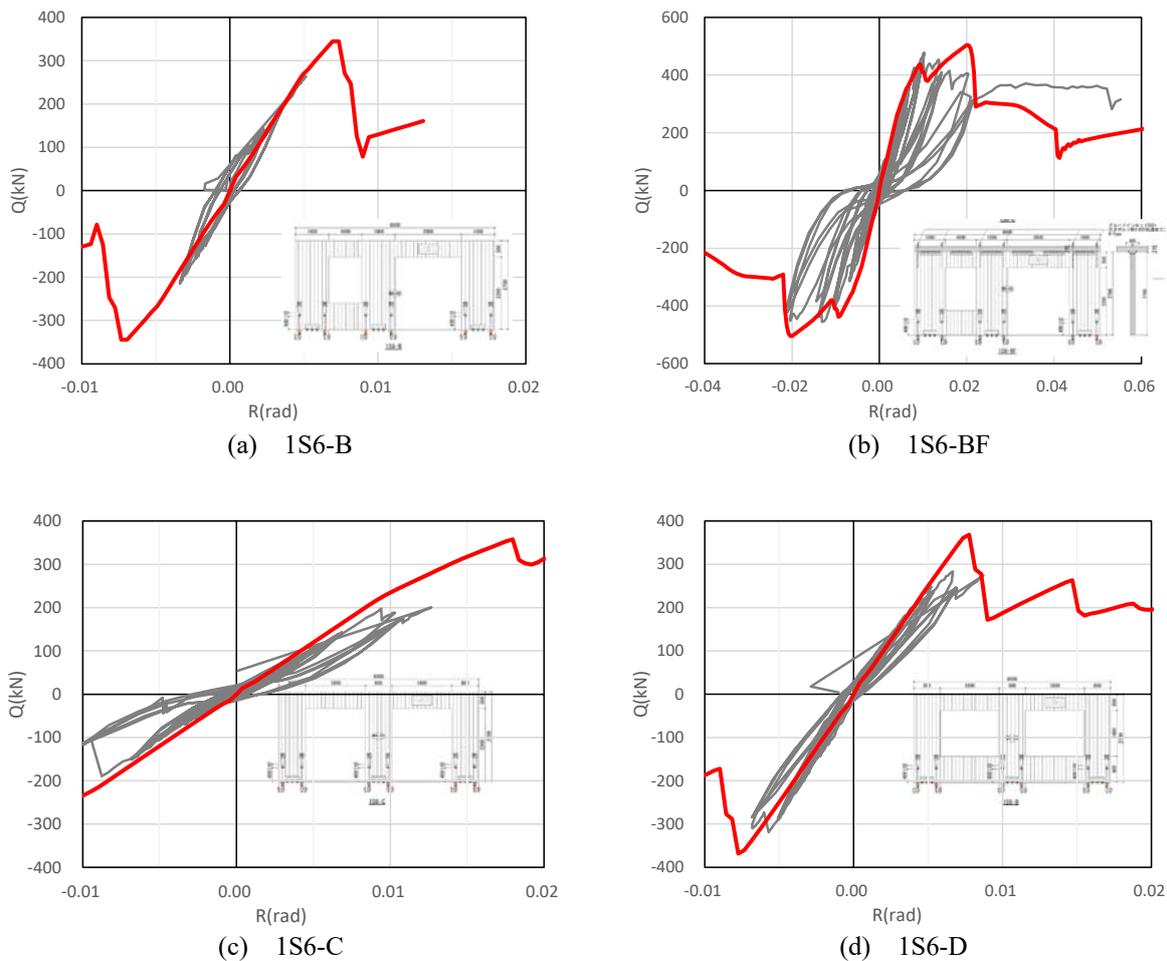
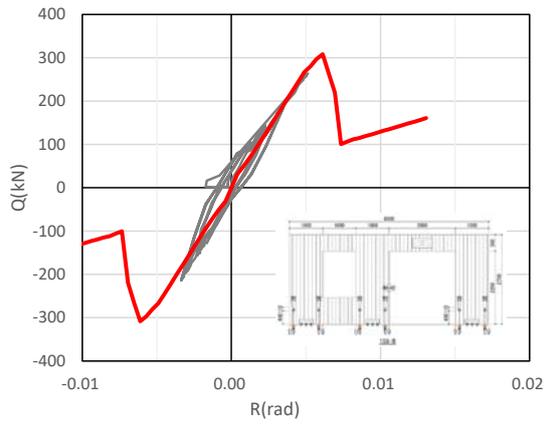
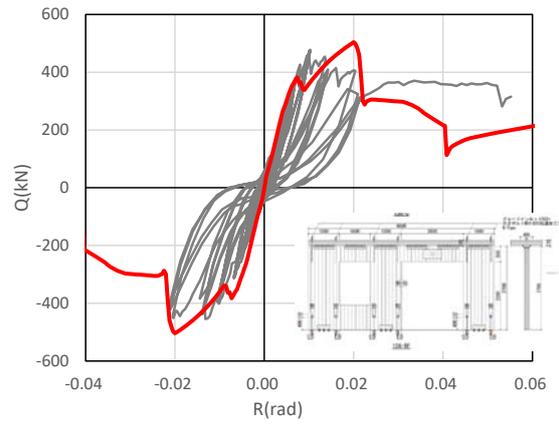


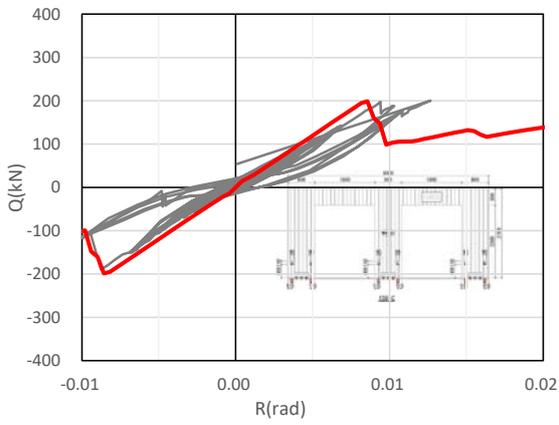
図 6.2.11 実験結果と解析結果の比較



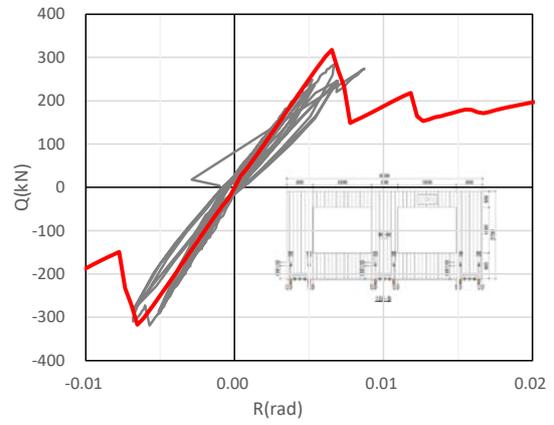
(a) 1S6-B



(b) 1S6-BF



(c) 1S6-C



(d) 1S6-D

図 6.2.12 実験結果と垂れ壁・腰壁部分の曲げ強度を調整した解析結果の比較

3.3.3 有開口壁パネルの開口周辺の剛性・強度⁵⁾

(1) 強度に関する考察

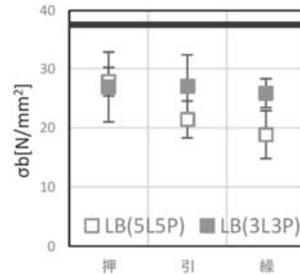
入隅部を有するL形T形試験体では、断面の平面保持を仮定して計算される破壊応力は、スパン比や加力の方向性によって傾向に差が見られるが、おしなべて、3点曲げの条件に対して約0.65倍程度の耐力低減が生じた。すなわち、設計上は1.5倍程度の応力集中を見込むと良い(図3.3.3-1)。

三点曲げ実験

ob[N/mm²] 37.6 ※平均値。せん断スパンによらずほぼ同一の値。FJの無い条件では約50N/mm²を示す。

LT形実験

	スパン比	L型T型強度 / 3点曲げ強度			試験体数
		引	押	繰	
3L3P	LA90 0.3	0.8	0.8	0.8	18
	LB90 0.4	0.7	0.8	0.7	18
	LC90 0.6	0.6	0.7	0.6	18
	TA90 0.2	-	-	0.8	6
	TB90 0.3	-	-	0.7	6
5L5P	TC90 0.4	-	-	0.7	6
	LA150 0.2	0.7	0.9	0.3	3
	LB150 0.4	0.6	0.7	0.5	3
	LC150 0.5	0.5	0.6	0.4	3
	TA150 0.2	0.7	0.6	0.8	3
	TB150 0.3	0.6	0.6	0.6	18
	TC150 0.3	0.6	0.5	0.6	3

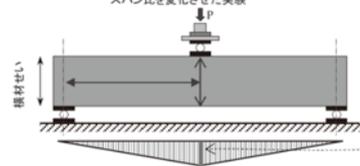


※スパン比によって耐力低下に差がある(3点曲げ試験とは異なる)

※せん断スパンに対するパネルゾーンの大きさ: 横材せい/1200

※梁せい240~480mm, せん断影響の大きいスパン条件、スパン比を変化させた実験

3点曲げ実験



L形T形実験

※最大M/2を比較(LT型は軸力考慮)

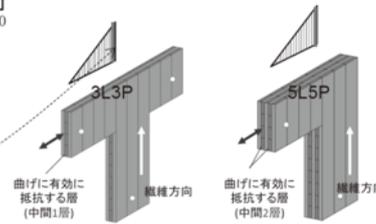


図 3.3.3-1 3点曲げ試験で得られた CLT 有効層曲げ強度に対する L 型 T 型試験体の曲げ応力度の比 (耐力低減率)

図 6.2.13 L 型・T 型入隅部の耐力低減に関する既往の研究結果

6.2.4 MSモデルと等価フレームモデルの解析結果の比較

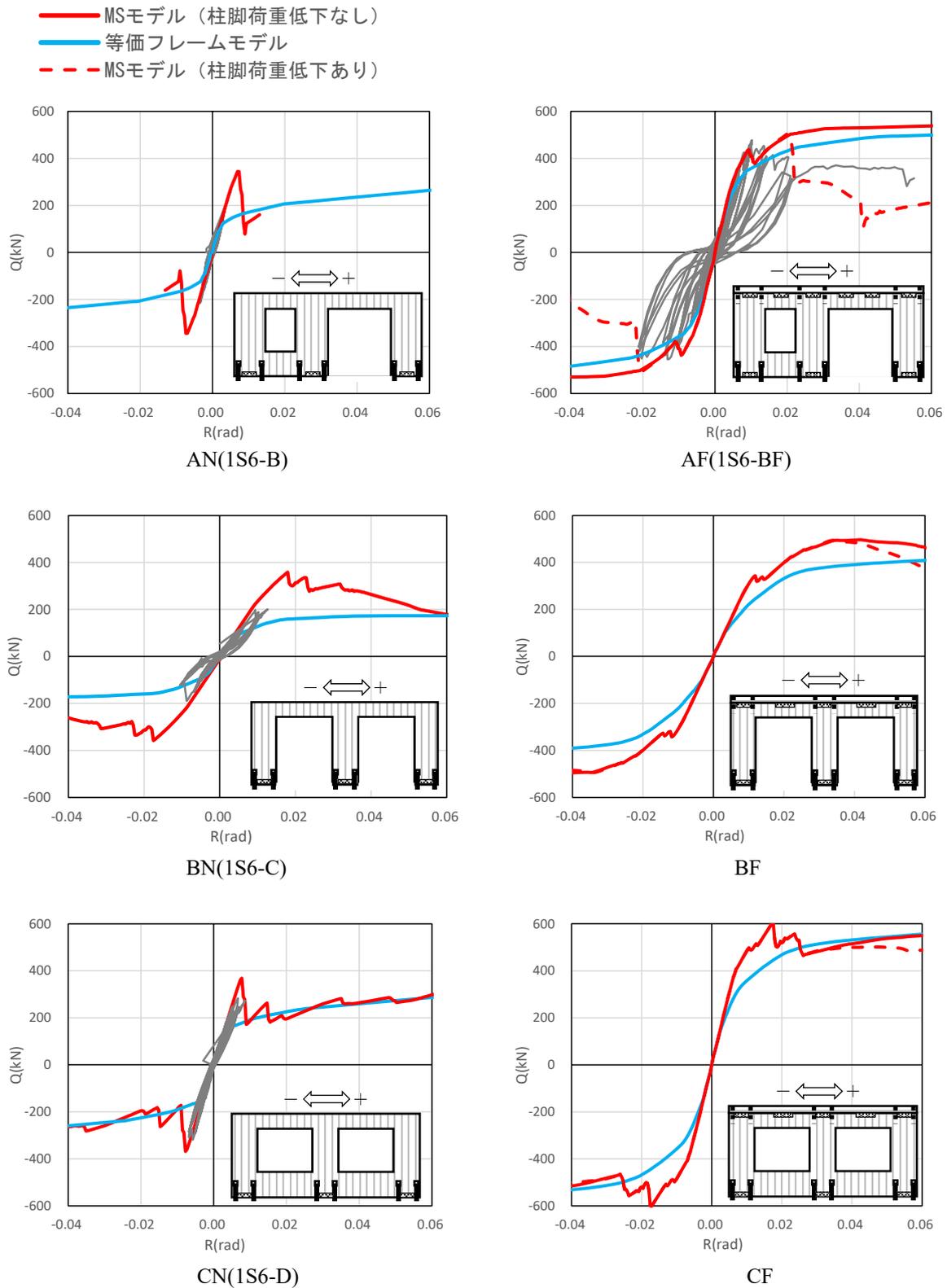
上記(3)の検討より、複数開口大版パネルにおける MS モデルの妥当性が確認された。ここでは、MS モデルの解析結果を正として、図 6.2.2 で示した 14 種類の架構を対象に MS モデルと等価フレームモデルの解析結果の比較を行い、等価フレームモデルの妥当性を確認する。上記(3)の検討では、実験結果と適合性を確認するため、柱脚の引張バネは荷重低下を表現できるモデルを採用したが、ここでは等価フレームモデルの妥当性を調べる、具体的には袖壁部分・垂れ壁・腰壁部分のモデル化の相違による影響を調べるため、MS モデルの柱脚の引張バネは、等価フレームモデルと同様に、荷重低下が生じないモデルを採用する。ただし、参考値として、一部の架構を対象に、引張バネは荷重低下を考慮した MS モデルの解析も行うこととする。CLT パネルの袖壁部分・垂れ壁・腰壁部分の基準強度は図 6.2.11 と同様の検討と同様に、下記の値とする。

引張側: $F_{b弱軸}=8.10\text{N/mm}^2$ 、 圧縮側: $F_{c弱軸}=10.20\text{N/mm}^2$

MS モデルと等価フレームモデルの解析結果の比較を図 6.2.14 に示す。参考値として、「AN(1S6-B)」、「AF(1S6-BF)」、「BN(1S6-C)」、「CN(1S6-D)」については実験結果を灰線で、「AF(1S6-BF)」、「BF」、「CF」については柱脚引張バネの荷重低下を考慮した MS モデルの解析結果を赤破線(「AF(1S6-BF)」については上記(3)の解析結果と同じ)でそれぞれ追加している。

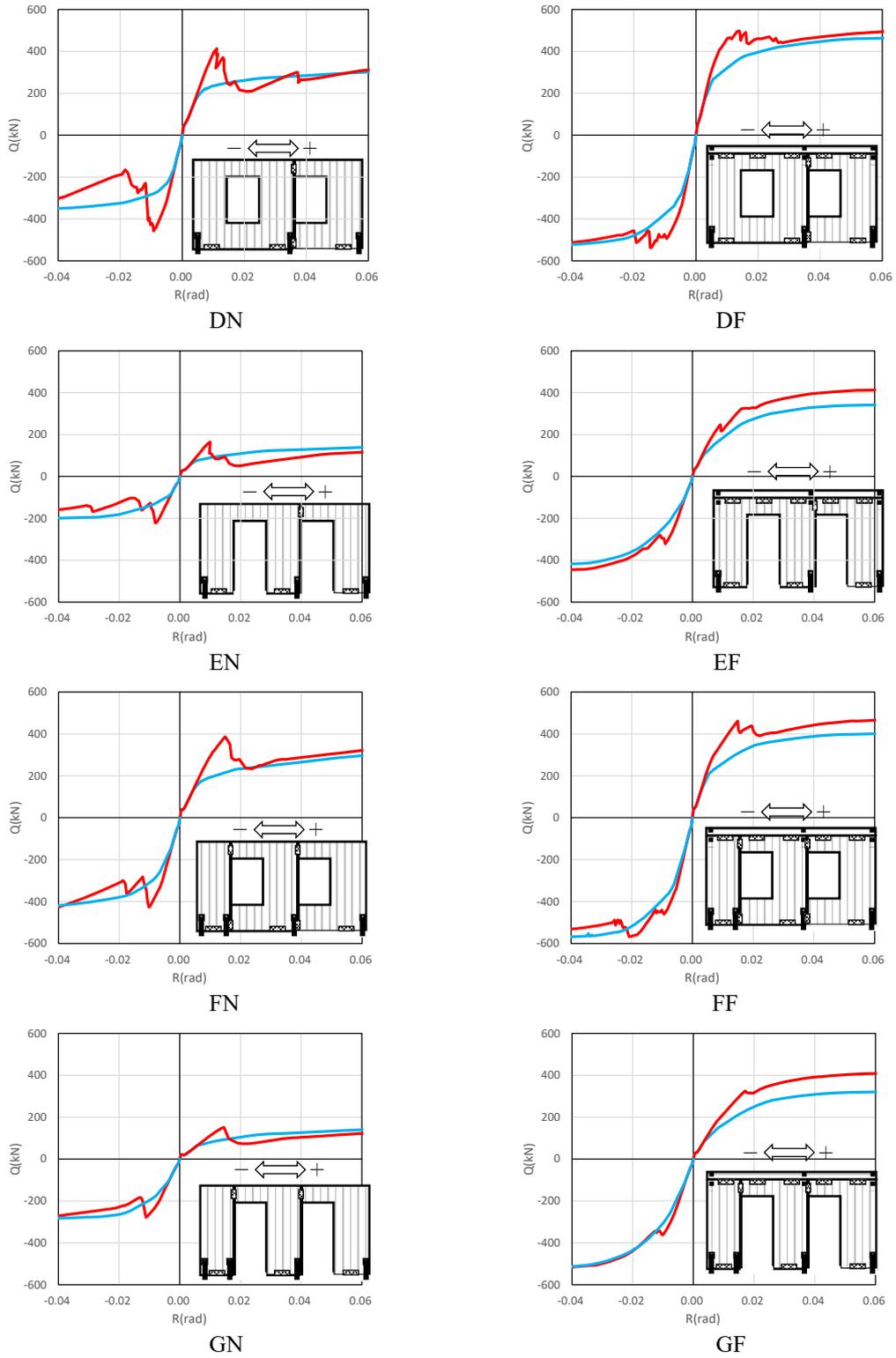
MS モデルと等価フレームモデルの解析結果を比較すると、初期剛性は比較的良く一致している。当然ながら、全ての架構形状において MS モデルの亀裂発生による荷重低下が生じるよりも早くに等価フレームモデルは剛性低下が生じているが、「床あり」の場合、 $0.02(=1/50)\text{rad}$ 程度以降の耐力は MS モデルに対して概ね安全側に適合していることが確認された。一方で、「床なし」の場合、「AN」や「BN」では耐力を過小評価しており、「DN」や「EN」では $0.02(=1/50)\text{rad}$ 程度以降の耐力が過大評価となるなど、MS モデルの解析結果に対して適合性がよくない傾向が確認された。

「AF」について、MS モデル(柱脚荷重低下あり、赤破線)と MS モデル(柱脚荷重低下なし、赤実線)の解析結果の比較により、実験結果(灰線)における $0.02(=1/50)\text{rad}$ 時以降の耐力低下は柱脚接合部の耐力低下により生じていることが分かる。当然ながら、柱脚接合部の耐力低下を考慮していない等価フレームモデルは実験結果及び MS モデル(柱脚荷重低下あり、赤破線)に対して $0.02(=1/50)\text{rad}$ 時以降は適合しないが、ルート 1 に大版パネル架構を採用する場合は、柱脚接合部には塑性変形能力を有することが求められるため、実際には MS モデル(荷重低下なし、赤実線)のような荷重-変形角関係となり、等価フレームモデルは安全側の評価となる。



(a) 床なし (b) 床あり
 図 6.2.14 MSモデルと等価フレームモデルの解析結果の比較

— MSモデル (柱脚荷重低下なし)
 — 等価フレームモデル



(a) 床なし (b) 床あり
 図 6.2.14 続 MSモデルと等価フレームモデルの解析結果の比較

6.2.5 まとめ

複数開口大版パネルを対象に、MSモデルの妥当性とR1年度検討と同様の方法で設定されるMSモデルと等価なフレームモデル(等価フレームモデル)の妥当性の確認を行った。MSモデルの変位増分解析結果は、複数開口大版パネルであっても亀裂発生による荷重低下を表現できることが確認された。MSモデルの解析結果を正として、14種類の架構を対象に、等価フレームモデルの解析結果と比較を行った結果、床パネルを設けた場合、等価フレームモデルの降伏耐力は過小評価される傾向にあったが、大変形時まで比較的安全側に適合する傾向が確認された。一方で、床パネルを設けない場合、大変形時において等価フレームモデルの耐力がMSモデルの耐力を上回る場合があり、適合性がよくない傾向が確認された。

参考文献

- 6.2-1) 日本 CLT 協会,木を活かす建築推進協議会,日本システム設計:平成 27 年度(住宅市場整備促進事業)CLT を用いた木造建築基準の高度化推進事業報告書、2016.3
- 6.2-2) 日本 CLT 協会,木を活かす建築推進協議会,日本システム設計:平成 25 年度(基準整備促進事業)CLT パネル構法の構造性能と設計法に関する調査報告書、2014.3
- 6.2-3) 日本住宅木材技術センター:2016 年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル、2016.10
- 6.2-4) 平松靖、宮武敦、新藤健太、渡部博:スギを用いて製造したクロス・ラミネイテッド・ティンバー(CLT)の強度性能 その 5 面内曲げ性能、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅲ、pp.123-124、2013.8
- 6.2-5) 井道裕史、杉本健一、長尾博文、宮武敦、渡部博:スギを用いて製造したクロス・ラミネイテッド・ティンバー(CLT)の強度性能 その 6 縦圧縮およびめり込みに対する性能、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅲ、pp.125-126、2013.8
- 6.2-6) 木構造振興株式会社:平成 25 年度林野庁委託事業 CLT パネルを用いた接合部のデータ等の収集・分析事業報告書、2015.2
- 6.2-7) 木構造振興株式会社:CLT パネルを用いた中高層建築物の構造計画と接合部性能の検証事業報告書、2012.3

6.3 無開口とみなし得る小開口

6.3.1 目的

無開口とみなすことが可能な小開口の条件の設定を目的として、図 6.3.1 に示す開口を有する大版パネルの水平加力実験 6.3-1(以下、「水平加力実験」)に対応する FEM 解析により開口隅亀裂発生時耐力 Q_{cr} の評価方法を開口係数法等 6.3-2) に準拠して設定する。

その後、前述の M_{Ta} における単位壁長さ当たりの終局水平耐力の最大値 Q_{umax} が Q_{cr} 以下となることを基準として無開口とみなす小開口の条件を設定する。

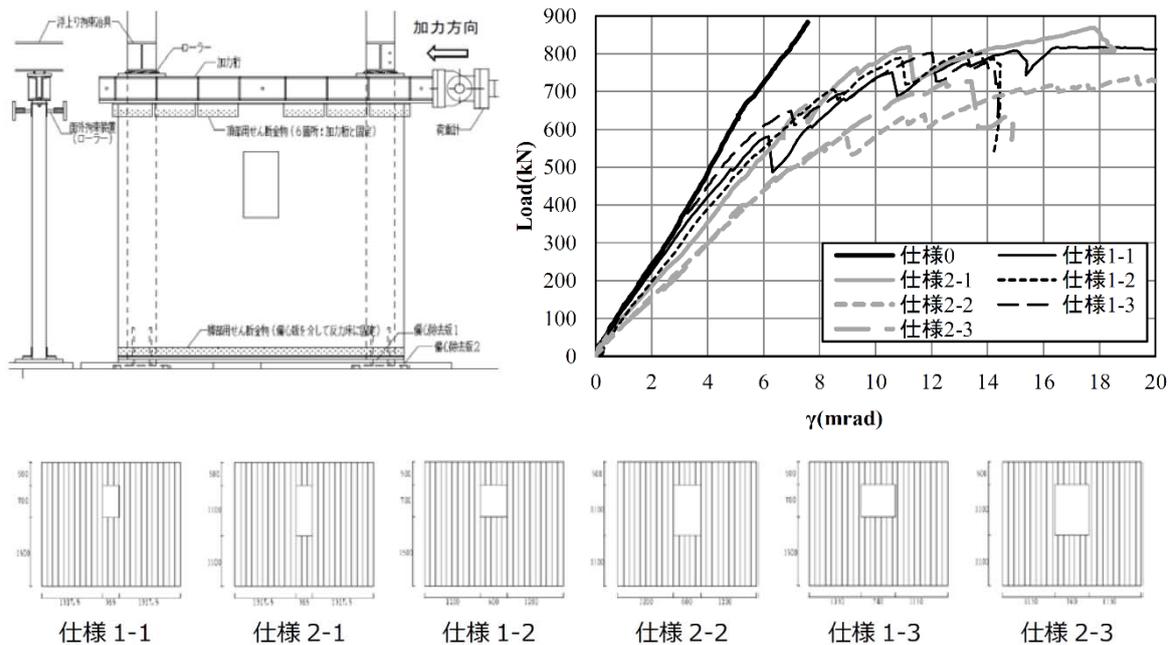


図 6.3.1 複数開口を有する大版パネルの水平加力実験結果

表 6.3.1 水平加力実験の最大荷重と最大せん断応力度

試験体名	壁長(mm)	開口幅(mm)	パネル厚(mm)	Pmax(kN)	$\tau_{max}(N/mm^2)$
仕様 0	3000	0	150	(905)	(2.01)
仕様 1-1	3000	365	150	819	2.07
仕様 1-2	3000	600	150	810	2.25
仕様 1-3	3000	740	150	803	2.37
仕様 2-1	3000	365	150	869	2.20
仕様 2-2	3000	600	150	746	2.07
仕様 2-3	3000	740	150	727	2.14
平均	-	-	-	-	2.18

$$\tau_{max} = P_{max} / (\text{壁長} - \text{開口幅}) \times \text{パネル厚}$$

6.3.2 検討手順

検討手順を以下に示す。

Step1. 【水平加力実験に対応する FEM 解析モデルの作成】

水平加力実験結果の初期剛性を追跡可能な CLT パネルの FEM 解析モデルを作成する。作成した FEM 解析モデルにおいて、開口隅部の弱軸方向引張応力(S11)が告示の弱軸引張基準強度(3.45N/mm²)となるステップの荷重 Q_{crs} を算出する。 Q_{crs} が水平加力実験で実際に破壊が生じた荷重を下回ることを確認することで、FEM 解析モデルにより評価する Q_{crs} が実験結果を安全側に評価可能であることを示す。以降本検討では、 $Q_{crs}=Q_{cr}$ として扱う。

Step2. 【FEM 解析モデルによる開口隅亀裂発生時耐力 Q_{cr} の算出】

作成した FEM 解析モデルにより、CLT 及び開口の高さ、幅、位置を変数としたパラメトリックスタディで開口隅亀裂発生時耐力 Q_{cr} を算出する。

Step3. 【無開口とみなし得る条件の設定】

M_{Ta} における単位壁長さ当たりの終局水平耐力の最大値 Q_{umax} [kN/m]を算出し、 $Q_{umax} \leq Q_{cr}$ となることを基準として、無開口とみなす開口寸法及び開口係数 r_u の条件を設定する。ここで開口係数 r は既報 6.3.2)により、式 6.3.1~6.3.3 のように定義されている。

$$r = \frac{1}{1 + \alpha/\beta} \quad (6.3.1) \quad \alpha = \frac{\sum A_{open}}{A_{wall}} \quad (6.3.2) \quad \beta = \frac{\sum L_{wall} - L_{open}}{L_{wall}} \quad (6.3.3)$$

r : 開口係数 α : 開口面積比 A_{open} : 開口部面積 A_{wall} : 開口部を含む壁面面積
 β : 壁長比 L_{open} : 開口長 L_{wall} : 開口部を含む壁長

Step4. 【無開口とみなす条件の検証】

Step3 で設定した条件の妥当性を、設定した条件を満たすパラメトリックスタディで検証する。

6.3.3 水平加力実験に対応する FEM 解析モデルの作成

(1) FEM 解析モデルの作成

本項は、実験結果の初期剛性を追跡可能な FEM 解析モデルの作成を目的とする。壁パネルはシェル要素でモデル化する。実験の試験体形状にあわせて図 6.3.2 以下に示す 7 ケースの解析を実施した。壁パネルは Mx60-5-5(150mm 厚)とし、材料特性は設計施工マニュアルに従い表 6.3.2 のように設定した。メッシュの分割サイズ、壁脚壁頭の固定方法をパラスタとし、表 6.3.3 に示す各試験体形状毎に 5 ケース、計 30 ケースの解析を実施した。ここで、壁脚壁頭の固定方法で簡易的に壁脚部固定、壁頭部をローラーとしたものを「ローラーモデル」、実験の浮き上がり拘束治具を模して、壁頭壁脚部にバネを配置したモデルを「バネモデル」、パラメトリックスタディを想定し壁頭部を自由としたモデルを「パラスタモデル」と称する。

表 6.3.2 CLT パネル特性

Mx60-5-5	面内方向		
弾性係数	E_x	E_y	G_{xy}
[N/mm ²]	1200	3000	500

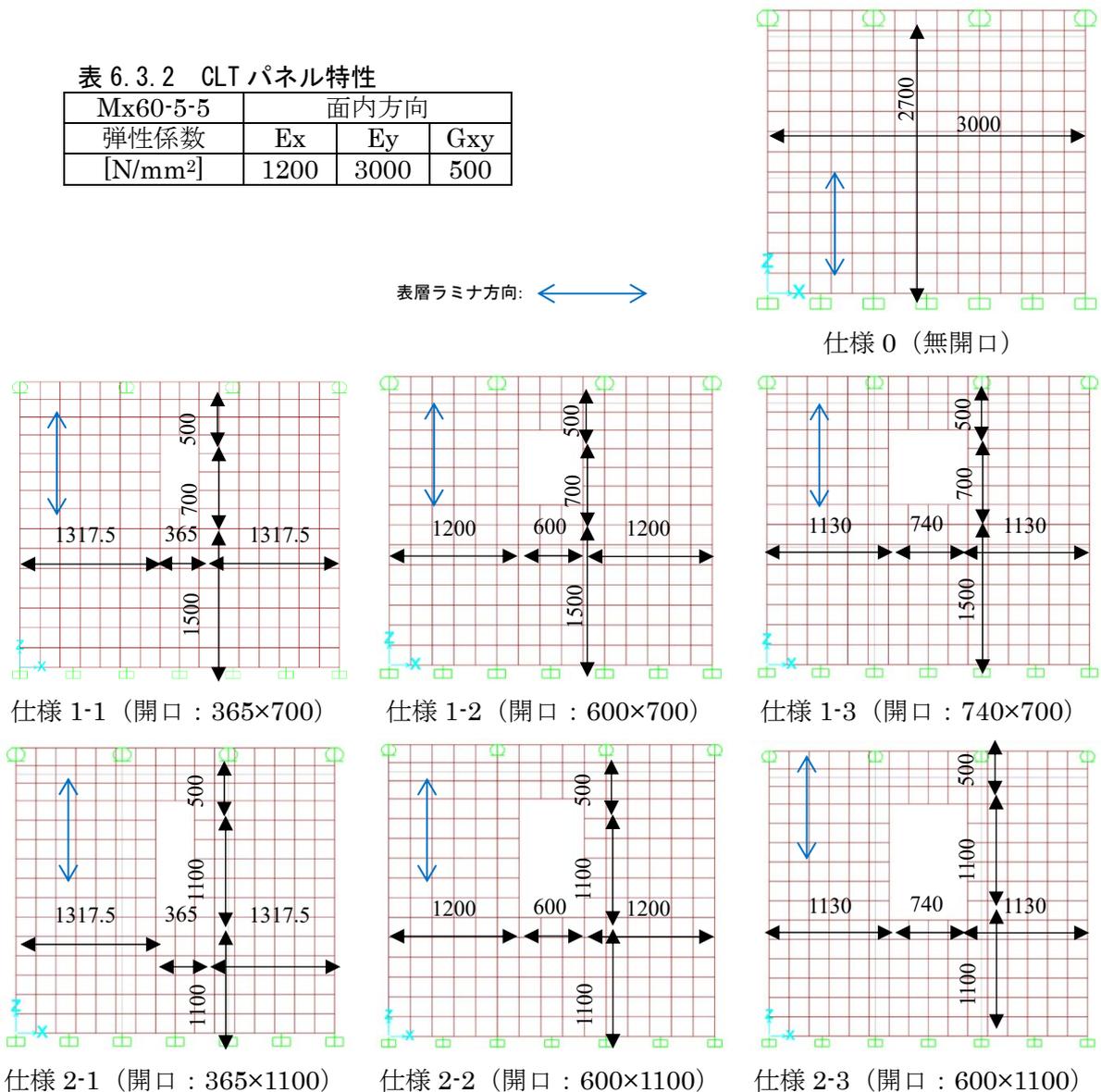


図 6.3.2 解析モデル形状

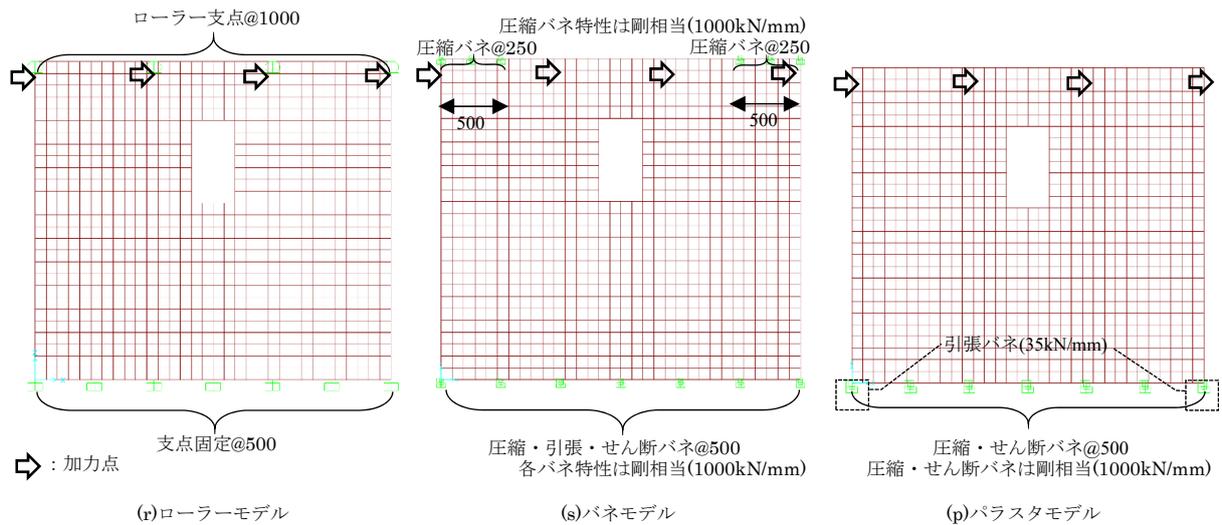


図 6.3.3 解析モデル概要 (仕様 1-1 の 200×200 メッシュで例示)

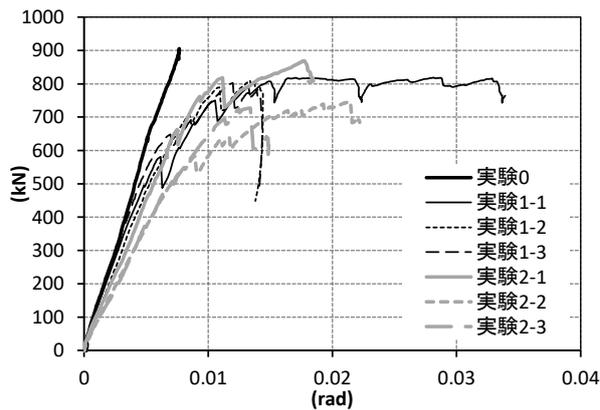
表 6.3.3 解析モデル一覧

対象試験体	解析モデル	開口サイズ [mm]	メッシュ分割 [mm]	壁頭	壁脚
仕様 0	0-0r200	-	200×200	ローラー	固定
	0-0r100		100×100		
	0-0s200		200×200	圧縮バネ	
	0-0s100		100×100		
	0-0p100		100×100		
仕様 1-1	1-1r200	365×700	200×200	ローラー	固定
	1-1r100		100×100		
	1-1s200		200×200	圧縮バネ	
	1-1s100		100×100		
	1-1p100		100×100		
仕様 1-2	1-2r200	600×700	200×200	ローラー	固定
	1-2r100		100×100		
	1-2s200		200×200	圧縮バネ	
	1-2s100		100×100		
	1-2p100		100×100		
仕様 1-3	1-3r200	740×700	200×200	ローラー	固定
	1-3r100		100×100		
	1-3s200		200×200	圧縮バネ	
	1-3s100		100×100		
	1-3p100		100×100		
仕様 2-1	2-1r200	365×1100	200×200	ローラー	固定
	2-1r100		100×100		
	2-1s200		200×200	圧縮バネ	
	2-1s100		100×100		
	2-1p100		100×100		
仕様 2-2	2-2r200	600×1100	200×200	ローラー	固定
	2-2r100		100×100		
	2-2s200		200×200	圧縮バネ	
	2-2s100		100×100		
	2-2p100		100×100		
仕様 2-3	2-3r200	740×1100	200×200	ローラー	固定
	2-3r100		100×100		
	2-3s200		200×200	圧縮バネ	
	2-3s100		100×100		
	2-3p100		100×100		

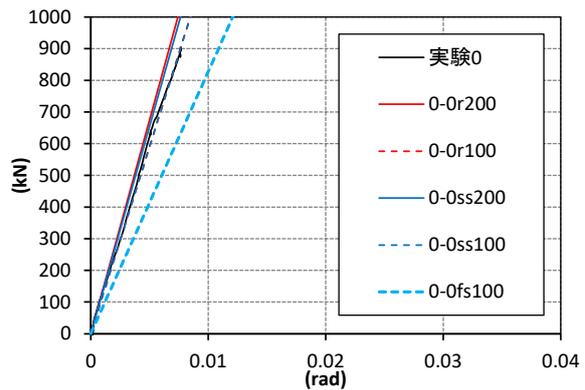
(2) 実験結果と解析結果の比較

(i) 荷重-変形角関係の比較

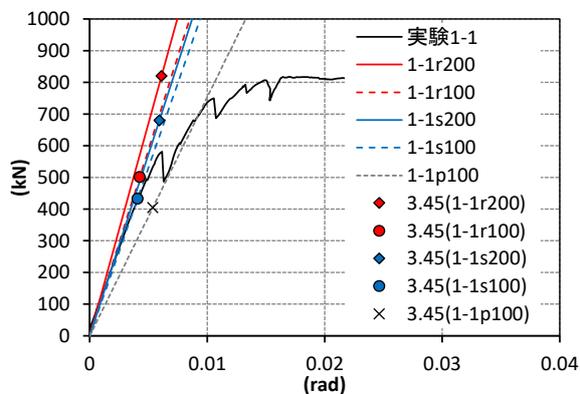
図 6.3.4 に実験と解析の荷重-変形角の比較を示す。変形角は壁頭部と壁脚部の変位差を壁高さで除した値とした。グラフのプロットは FEM 解析による開口隅部の応力度が CLT パネル (Mx60-5-5) の告示における弱軸方向基準強度 $3.45[\text{N}/\text{mm}^2]$ に達したステップを示す。いずれの仕様もバネモデルのメッシュ分割が $100 \times 100 \text{mm}$ で実験結果を良好に追跡できている。また、ローラーモデルと比較してバネモデルの方が、メッシュ分割 200mm と比較して分割 100mm の方がプロット値が小さく Q_{crs} を安全側で評価可能である。また、パラスタモデルの Q_{crs} が最小となる。



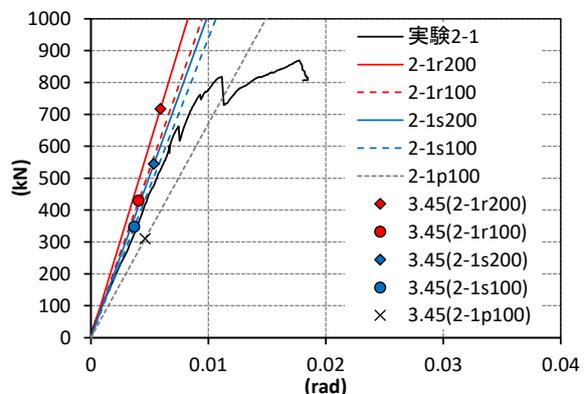
(a) 実験結果



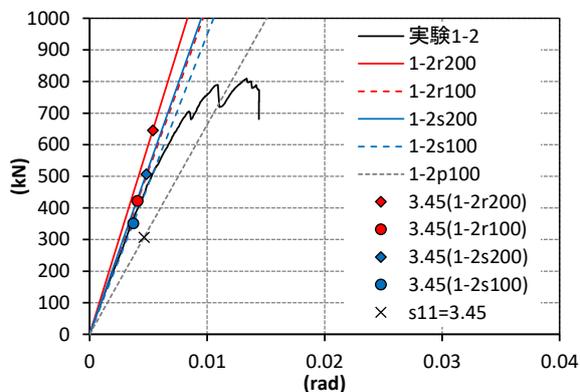
(b) 仕様 0 (無開口)



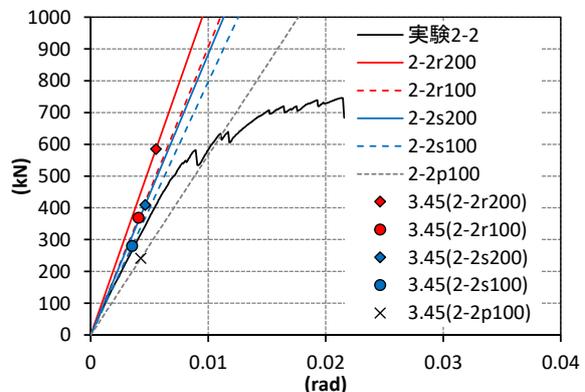
(c) 仕様 1-1 (開口 : 365×700)



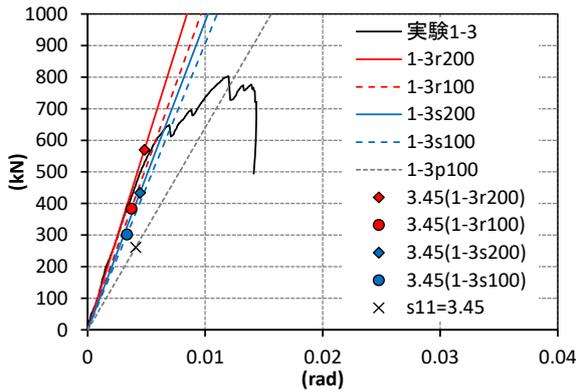
(d) 仕様 2-1(開口 : 365×1100)



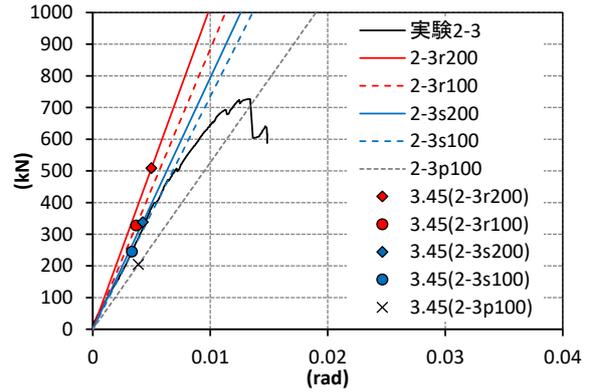
(e) 仕様 1-2 (開口 : 600×700)



(f) 仕様 2-2 (開口 : 600×1100)



(g) 仕様 1-3 (開口 : 740×700)



(h) 仕様 2-3 (開口 : 740×1100)

図 6.3.4 実験と解析の比較 (弱軸方向引張応力 S11)

(ii) ラミナ強度の比較

表 6.3.4 は解析結果より算出した実験におけるラミナ強度である。ラミナ強度は実験最大荷重時の FEM における弱軸方向の引張応力 $S11[N/mm^2] \times 2.5$ (応力割り増し係数) で算出した。バネモデルのメッシュ分割が $100 \times 100 mm$ でラミナ強度が $21.5 N/mm^2$ となり、既報 6.3-3) で示されたラミナ強度 $20 N/mm^2$ 程度と概ね整合する。

表 6.3.4 ラミナ強度の試算

解析モデル	●-●r200	●-●r100	●-●s200	●-●s100
仕様 1-1	8.6	14.1	10.4	16.3
仕様 1-2	10.8	16.6	13.8	19.9
仕様 1-3	12.2	18.0	16.0	22.9
仕様 2-1	10.4	17.4	13.8	21.6
仕様 2-2	11.0	17.4	15.7	23.0
仕様 2-3	12.3	19.1	18.5	25.6
平均	10.9	17.1	14.7	21.5

単位:[N/mm²]

(3) 検討に用いる解析モデル特性

以上の結果より、パラメトリックスタディで用いる FEM 解析モデルを以下のように設定する。

- CLT パネル特性 : 材料特性は設計施工マニュアルに従う
- メッシュ分割 : $100 \times 100 mm$
- 壁脚端部引張バネ : 弾性バネ (剛性はクロスマーク金物相当)
- 壁脚部せん断バネ : 弾性バネ (剛相当)
- 壁脚部圧縮バネ : 弾性バネ (剛相当)
- 壁頭部 : 自由

(4) 実験における開口係数と Q_{cr} の関係

実験結果を追跡した FEM モデルを用いて算出した Q_{cr} を図 6.3.5 及び表 6.3.5 に示す。 Q_{cr} はバネモデルのメッシュ分割が $100 \times 100 \text{mm}$ (「●-●s100」) において、開口隅部の応力度が弱軸方向基準強度 $3.45 [\text{N}/\text{mm}^2]$ に達したステップの荷重である。

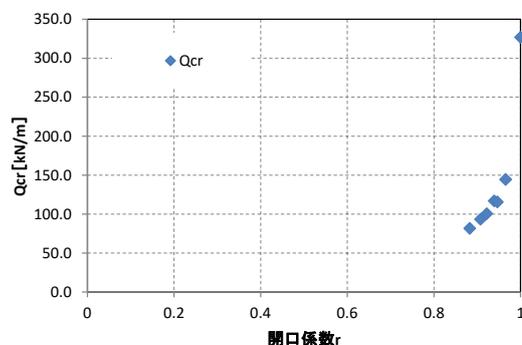


図 6.3.5 開口係数と Q_{cr} の関係

表 6.3.5 開口係数と Q_{cr} の関係

解析モデル	L_{wall}	H_{wall}	L_{open}	H_{open}	A_{open}	α	β	r	Q_{cr}
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]				[kN/m]
1-1s100	3000	2700	365	700	255500	0.032	0.88	0.97	148.89
1-2s100	3000	2700	600	700	420000	0.052	0.80	0.94	113.99
1-3s100	3000	2700	740	700	518000	0.064	0.75	0.92	103.32
2-1s100	3000	2700	365	1100	401500	0.050	0.88	0.95	119.00
2-2s100	3000	2700	600	1100	660000	0.081	0.80	0.91	90.50
2-3s100	3000	2700	740	1100	814000	0.100	0.75	0.88	78.91

ここで、

$$r = \frac{1}{1 + \alpha/\beta} \quad (6.3.1)$$

$$\alpha = \frac{\sum A_{open}}{A_{wall}} \quad (6.3.2)$$

$$\beta = \frac{\sum L_{wall} - L_{open}}{L_{wall}} \quad (6.3.3)$$

r : 開口係数 α : 開口面積比 A_{open} : 開口部面積 A_{wall} : 開口部を含む壁面面積
 β : 壁長比 L_{open} : 開口長 L_{wall} : 開口部を含む壁長

(5) モデル化によるコンターの比較

図 6.3.6 にモデル化による弱軸方向応力のコンター図の比較を仕様 1-1 を例に示す。壁脚壁頭の固定方法で簡易的に壁脚部固定、壁頭部をローラーとした「ローラーモデル」では左右対称分布となっているに対し、実験の浮き上がり拘束治具を模して、壁頭壁脚部にバネを配置した「バネモデル」では浮き上がり拘束によって生じる圧縮ストラットが再現されている。

○ : 応力最大箇所

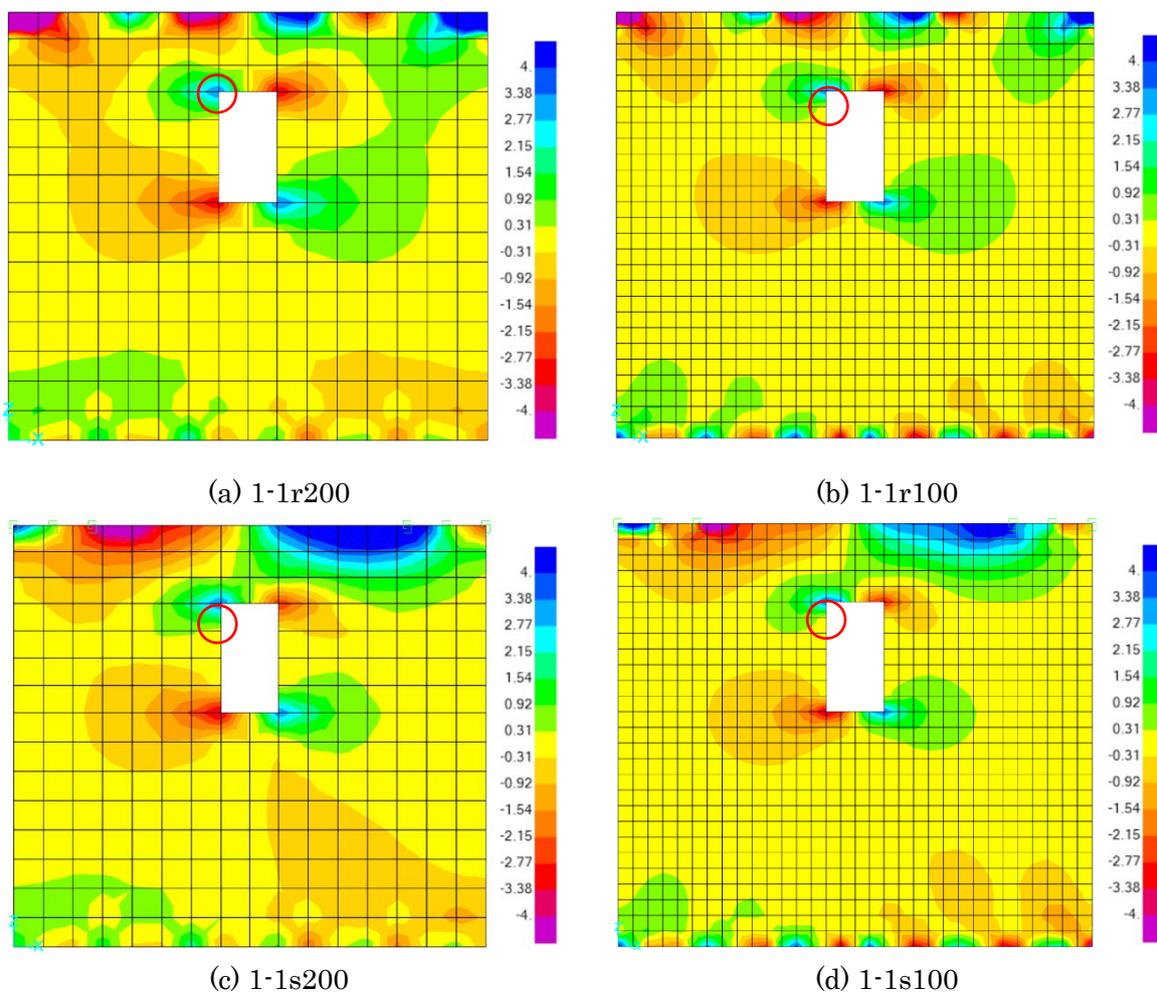


図 6.3.6 コンター図の比較 s11 [N/mm²]

6.3.4 FEM 解析モデルによる開口隅亀裂発生時耐力 Q_{cr} の算出

FEM 解析モデルにより、CLT 及び開口の幅、高さ、位置を変数としたパラメトリックスタディで開口隅亀裂発生時耐力 Q_{cr} を算出した。CLT 高さは 3.0m で統一し、CLT 幅は 1.0、2.5m の 2 ケースとした。開口幅、高さは 0.1、0.25、0.5m を基本に 3×3=9 ケースとし、CLT 幅は 2.5m に関しては 0.75、1.0m を追加した。開口数は 1 箇所とし、開口位置は、図 6.3.7 に示す 9 ケースで実施した。開口端距離は設備開口を想定した実施設計、既報 6.3-4) より 250mm とした。以下に示す仕様で 122 ケースの解析を実施した。

- CLT 高さ(m) : 3.0
- CLT 幅(m) : 1.0、2.5
- 開口幅(m) : 0.1、0.25、0.5、0.75、1.0 ※アンダーラインは CLT 幅 2.5m のみ実施
- 開口高さ(m) : 0.1、0.25、0.5、0.75、1.0 ※アンダーラインは CLT 幅 2.5m のみ実施
- 開口数 : 1
- CLT パネル特性 : Mx60-5-5

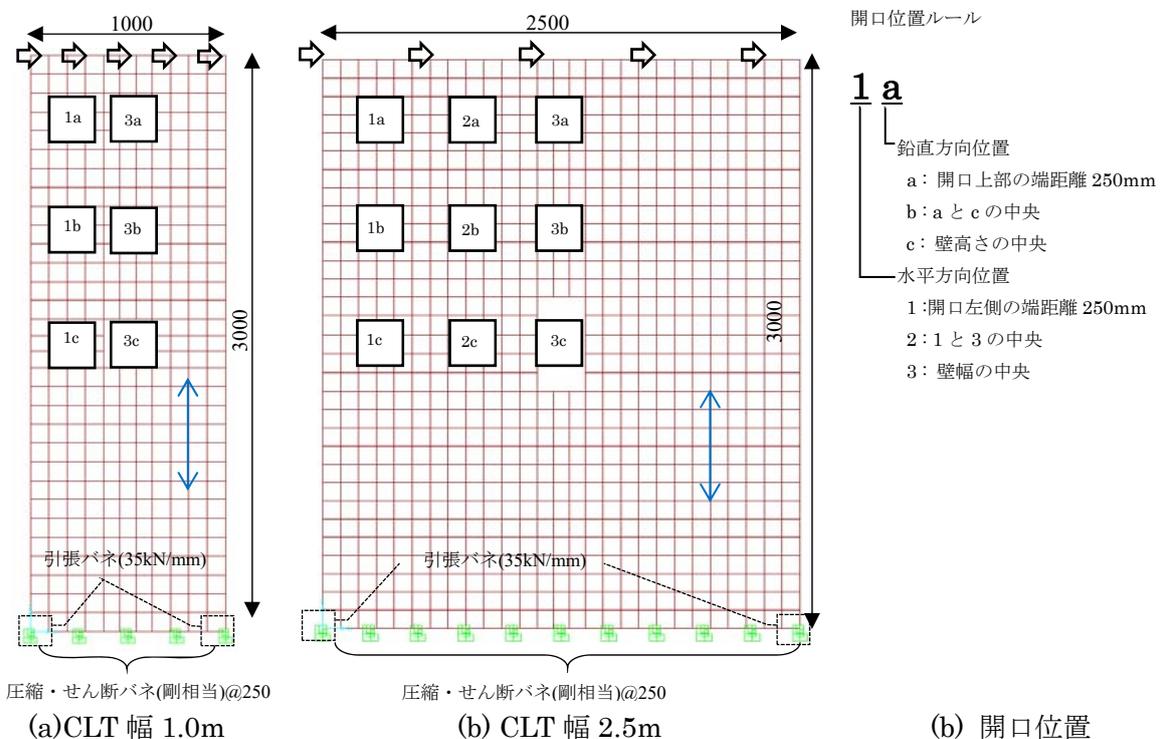


図 6.3.7 解析モデル形状

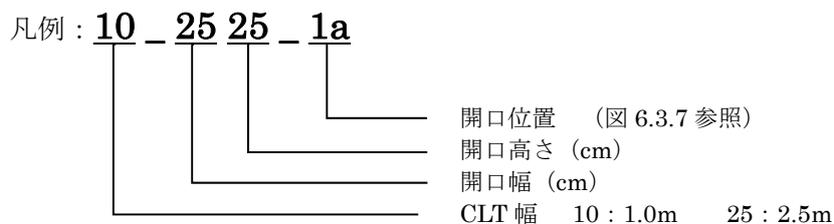


表 6.3.6 及び表 6.3.7 に解析結果の一覧を示す。ここで、 Q_{cr} は FEM において、開口隅部の応力度が弱軸方向基準強度 $3.45[\text{N}/\text{mm}^2]$ に達したステップの荷重である。

表 6.3.6 解析結果一覧 (CLT 幅 1.0m)

No.	解析モデル	Lwall	Hwall	Lopen.	Hopen.	Awall	Aopen	α	β	r	Q_{cr}
		mm	mm	mm	mm	mm ²	mm ²				[kN/m]
1	10_1010_1a	1000	3000	100	100	3000000	10000	0.003	0.9	1.00	746.7
2	10_1010_1b	1000	3000	100	100	3000000	10000	0.003	0.9	1.00	824.1
3	10_1010_1c	1000	3000	100	100	3000000	10000	0.003	0.9	1.00	1326.9
4	10_1010_3a	1000	3000	100	100	3000000	10000	0.003	0.9	1.00	748.5
5	10_1010_3b	1000	3000	100	100	3000000	10000	0.003	0.9	1.00	798.8
6	10_1010_3c	1000	3000	100	100	3000000	10000	0.003	0.9	1.00	826.4
7	10_1025_1a	1000	3000	100	250	3000000	25000	0.008	0.9	0.99	530.0
8	10_1025_1b	1000	3000	100	250	3000000	25000	0.008	0.9	0.99	542.0
9	10_1025_1c	1000	3000	100	250	3000000	25000	0.008	0.9	0.99	507.0
10	10_1025_3a	1000	3000	100	250	3000000	25000	0.008	0.9	0.99	530.7
11	10_1025_3b	1000	3000	100	250	3000000	25000	0.008	0.9	0.99	582.9
12	10_1025_3c	1000	3000	100	250	3000000	25000	0.008	0.9	0.99	629.3
13	10_1050_1a	1000	3000	100	500	3000000	50000	0.017	0.9	0.98	348.7
14	10_1050_1b	1000	3000	100	500	3000000	50000	0.017	0.9	0.98	365.0
15	10_1050_1c	1000	3000	100	500	3000000	50000	0.017	0.9	0.98	353.4
16	10_1050_3a	1000	3000	100	500	3000000	50000	0.017	0.9	0.98	369.8
17	10_1050_3b	1000	3000	100	500	3000000	50000	0.017	0.9	0.98	456.4
18	10_1050_3c	1000	3000	100	500	3000000	50000	0.017	0.9	0.98	484.6
19	10_2510_1a	1000	3000	250	100	3000000	25000	0.008	0.75	0.99	211.3
20	10_2510_1b	1000	3000	250	100	3000000	25000	0.008	0.75	0.99	246.4
21	10_2510_1c	1000	3000	250	100	3000000	25000	0.008	0.75	0.99	243.4
22	10_2510_3a	1000	3000	250	100	3000000	25000	0.008	0.75	0.99	203.0
23	10_2510_3b	1000	3000	250	100	3000000	25000	0.008	0.75	0.99	232.9
24	10_2510_3c	1000	3000	250	100	3000000	25000	0.008	0.75	0.99	255.2
25	10_2525_1a	1000	3000	250	250	3000000	62500	0.021	0.75	0.97	161.4
26	10_2525_1b	1000	3000	250	250	3000000	62500	0.021	0.75	0.97	201.4
27	10_2525_1c	1000	3000	250	250	3000000	62500	0.021	0.75	0.97	202.6
28	10_2525_3a	1000	3000	250	250	3000000	62500	0.021	0.75	0.97	156.4
29	10_2525_3b	1000	3000	250	250	3000000	62500	0.021	0.75	0.97	193.9
30	10_2525_3c	1000	3000	250	250	3000000	62500	0.021	0.75	0.97	220.9
31	10_2550_1a	1000	3000	250	500	3000000	125000	0.042	0.75	0.95	113.8
32	10_2550_1b	1000	3000	250	500	3000000	125000	0.042	0.75	0.95	154.2
33	10_2550_1c	1000	3000	250	500	3000000	125000	0.042	0.75	0.95	161.0
34	10_2550_3a	1000	3000	250	500	3000000	125000	0.042	0.75	0.95	119.7
35	10_2550_3b	1000	3000	250	500	3000000	125000	0.042	0.75	0.95	157.8
36	10_2550_3c	1000	3000	250	500	3000000	125000	0.042	0.75	0.95	175.5
37	10_5010_3a	1000	3000	500	100	3000000	50000	0.017	0.5	0.97	113.9
38	10_5010_3b	1000	3000	500	100	3000000	50000	0.017	0.5	0.97	137.9
39	10_5010_3c	1000	3000	500	100	3000000	50000	0.017	0.5	0.97	153.8
40	10_5025_3a	1000	3000	500	250	3000000	125000	0.042	0.5	0.92	86.9
41	10_5025_3b	1000	3000	500	250	3000000	125000	0.042	0.5	0.92	113.0
42	10_5025_3c	1000	3000	500	250	3000000	125000	0.042	0.5	0.92	134.4
43	10_5050_3a	1000	3000	500	500	3000000	250000	0.083	0.5	0.86	62.7
44	10_5050_3b	1000	3000	500	500	3000000	250000	0.083	0.5	0.86	89.4
45	10_5050_3c	1000	3000	500	500	3000000	250000	0.083	0.5	0.86	106.8

表 6.3.7 解析結果一覧 (CLT 幅 2.5m)

No.	解析モデル	Lwall	Hwall	Lopen.	Hopen.	Awall	Aopen	α	β	r	Q _{cr}
		mm	mm	mm	mm	mm ²	mm ²				[kN/m]
1	25_1010_3c	2500	3000	100	100	7500000	10000	0.0013	0.96	1.00	867.0
2	25_1025_3c	2500	3000	100	250	7500000	25000	0.0033	0.96	1.00	638.3
3	25_1050_3c	2500	3000	100	500	7500000	50000	0.0067	0.96	0.99	511.0
4	25_2510_1a	2500	3000	250	100	7500000	25000	0.0033	0.90	1.00	203.6
5	25_2510_1b	2500	3000	250	100	7500000	25000	0.0033	0.90	1.00	499.7
6	25_2510_1c	2500	3000	250	100	7500000	25000	0.0033	0.90	1.00	394.2
7	25_2510_2a	2500	3000	250	100	7500000	25000	0.0033	0.90	1.00	206.6
8	25_2510_2b	2500	3000	250	100	7500000	25000	0.0033	0.90	1.00	282.4
9	25_2510_2c	2500	3000	250	100	7500000	25000	0.0033	0.90	1.00	331.9
10	25_2510_3a	2500	3000	250	100	7500000	25000	0.0033	0.90	1.00	265.4
11	25_2510_3b	2500	3000	250	100	7500000	25000	0.0033	0.90	1.00	252.6
12	25_2510_3c	2500	3000	250	100	7500000	25000	0.0033	0.90	1.00	290.4
13	25_2525_1a	2500	3000	250	250	7500000	62500	0.0083	0.90	0.99	168.9
14	25_2525_1b	2500	3000	250	250	7500000	62500	0.0083	0.90	0.99	404.7
15	25_2525_1c	2500	3000	250	250	7500000	62500	0.0083	0.90	0.99	337.6
16	25_2525_2a	2500	3000	250	250	7500000	62500	0.0083	0.90	0.99	166.7
17	25_2525_2b	2500	3000	250	250	7500000	62500	0.0083	0.90	0.99	247.7
18	25_2525_2c	2500	3000	250	250	7500000	62500	0.0083	0.90	0.99	296.5
19	25_2525_3a	2500	3000	250	250	7500000	62500	0.0083	0.90	0.99	221.0
20	25_2525_3b	2500	3000	250	250	7500000	62500	0.0083	0.90	0.99	222.4
21	25_2525_3c	2500	3000	250	250	7500000	62500	0.0083	0.90	0.99	240.4
22	25_2550_1a	2500	3000	250	500	7500000	125000	0.0167	0.90	0.98	144.2
23	25_2550_1b	2500	3000	250	500	7500000	125000	0.0167	0.90	0.98	307.7
24	25_2550_1c	2500	3000	250	500	7500000	125000	0.0167	0.90	0.98	299.8
25	25_2550_2a	2500	3000	250	500	7500000	125000	0.0167	0.90	0.98	130.8
26	25_2550_2b	2500	3000	250	500	7500000	125000	0.0167	0.90	0.98	209.0
27	25_2550_2c	2500	3000	250	500	7500000	125000	0.0167	0.90	0.98	248.4
28	25_2550_3a	2500	3000	250	500	7500000	125000	0.0167	0.90	0.98	183.0
29	25_2550_3b	2500	3000	250	500	7500000	125000	0.0167	0.90	0.98	191.2
30	25_2550_3c	2500	3000	250	500	7500000	125000	0.0167	0.90	0.98	204.3
31	25_5010_1a	2500	3000	500	100	7500000	50000	0.0067	0.80	0.99	160.5
32	25_5010_1b	2500	3000	500	100	7500000	50000	0.0067	0.80	0.99	243.7
33	25_5010_1c	2500	3000	500	100	7500000	50000	0.0067	0.80	0.99	247.9
34	25_5010_2a	2500	3000	500	100	7500000	50000	0.0067	0.80	0.99	143.1
35	25_5010_2b	2500	3000	500	100	7500000	50000	0.0067	0.80	0.99	177.4
36	25_5010_2c	2500	3000	500	100	7500000	50000	0.0067	0.80	0.99	209.0
37	25_5010_3a	2500	3000	500	100	7500000	50000	0.0067	0.80	0.99	166.1
38	25_5010_3b	2500	3000	500	100	7500000	50000	0.0067	0.80	0.99	167.5
39	25_5010_3c	2500	3000	500	100	7500000	50000	0.0067	0.80	0.99	185.5
40	25_5025_1a	2500	3000	500	250	7500000	125000	0.0167	0.80	0.98	133.2
41	25_5025_1b	2500	3000	500	250	7500000	125000	0.0167	0.80	0.98	210.8
42	25_5025_1c	2500	3000	500	250	7500000	125000	0.0167	0.80	0.98	219.1
43	25_5025_2a	2500	3000	500	250	7500000	125000	0.0167	0.80	0.98	119.8
44	25_5025_2b	2500	3000	500	250	7500000	125000	0.0167	0.80	0.98	160.0
45	25_5025_2c	2500	3000	500	250	7500000	125000	0.0167	0.80	0.98	190.4
46	25_5025_3a	2500	3000	500	250	7500000	125000	0.0167	0.80	0.98	146.0
47	25_5025_3b	2500	3000	500	250	7500000	125000	0.0167	0.80	0.98	151.7
48	25_5025_3c	2500	3000	500	250	7500000	125000	0.0167	0.80	0.98	169.5
49	25_5050_1a	2500	3000	500	500	7500000	250000	0.0333	0.80	0.96	110.2
50	25_5050_1b	2500	3000	500	500	7500000	250000	0.0333	0.80	0.96	169.3
51	25_5050_1c	2500	3000	500	500	7500000	250000	0.0333	0.80	0.96	181.8
52	25_5050_2a	2500	3000	500	500	7500000	250000	0.0333	0.80	0.96	95.5

53	25_5050_2b	2500	3000	500	500	7500000	250000	0.0333	0.80	0.96	136.7
54	25_5050_2c	2500	3000	500	500	7500000	250000	0.0333	0.80	0.96	162.0
55	25_5050_3a	2500	3000	500	500	7500000	250000	0.0333	0.80	0.96	125.1
56	25_5050_3b	2500	3000	500	500	7500000	250000	0.0333	0.80	0.96	131.1
57	25_5050_3c	2500	3000	500	500	7500000	250000	0.0333	0.80	0.96	147.4
58	25_7510_1a	2500	3000	750	100	7500000	75000	0.010	0.70	0.99	137.0
59	25_7510_1c	2500	3000	750	100	7500000	75000	0.010	0.70	0.99	124.9
60	25_7510_3a	2500	3000	750	100	7500000	75000	0.010	0.70	0.99	119.3
61	25_7510_3c	2500	3000	750	100	7500000	75000	0.010	0.70	0.99	140.0
62	25_7525_1a	2500	3000	750	250	7500000	187500	0.025	0.70	0.97	120.8
63	25_7525_1c	2500	3000	750	250	7500000	187500	0.025	0.70	0.97	112.2
64	25_7525_3a	2500	3000	750	250	7500000	187500	0.025	0.70	0.97	107.7
65	25_7525_3c	2500	3000	750	250	7500000	187500	0.025	0.70	0.97	129.7
66	25_7575_1a	2500	3000	750	750	7500000	562500	0.0750	0.70	0.90	68.4
67	25_7575_1c	2500	3000	750	750	7500000	562500	0.0750	0.70	0.90	98.3
68	25_7575_3a	2500	3000	750	750	7500000	562500	0.0750	0.70	0.90	76.8
69	25_7575_3c	2500	3000	750	750	7500000	562500	0.0750	0.70	0.90	96.5
70	25_10010_1a	2500	3000	1000	100	7500000	100000	0.013	0.6	0.98	103.2
71	25_10010_1c	2500	3000	1000	100	7500000	100000	0.013	0.6	0.98	105.5
72	25_10010_3a	2500	3000	1000	100	7500000	100000	0.013	0.6	0.98	96.7
73	25_10010_3c	2500	3000	1000	100	7500000	100000	0.013	0.6	0.98	115.0
74	25_100100_1a	2500	3000	1000	1000	7500000	1000000	0.1333	0.60	0.82	53.4
75	25_100100_1c	2500	3000	1000	1000	7500000	1000000	0.1333	0.60	0.82	61.7
76	25_100100_3a	2500	3000	1000	1000	7500000	1000000	0.1333	0.60	0.82	53.3
77	25_100100_3c	2500	3000	1000	1000	7500000	1000000	0.1333	0.60	0.82	68.6

ここで、

$$r = \frac{1}{1 + \alpha/\beta} \quad (6.3.4)$$

$$\alpha = \frac{\sum A_{open}}{A_{wall}} \quad (6.3.5)$$

$$\beta = \frac{\sum L_{wall} - L_{open}}{L_{wall}} \quad (6.3.6)$$

r : 開口係数 α : 開口面積比 A_{open} : 開口部面積 A_{wall} : 開口部を含む壁面面積
 β : 壁長比 L_{open} : 開口長 L_{wall} : 開口部を含む壁長

6.3.5 無開口とみなす条件の設定

無開口とみなし得る、開口係数 r_u 及び開口寸法の条件を設定する。 M_{Ta} における単位壁長さ当たりの終局水平耐力の最大値 Q_{umax} [kN/m]とし、 $Q_{umax} \leq Q_{cr}$ となることを無開口とみなすことが可能な条件とした。ここで、 Q_{umax} [kN/m]は解析結果より 132.2[kN/m]とした。

図 6.3.8 に解析した全 122 ケースにおける開口係数 r と Q_{cr} の関係を、図 6.3.9 に開口寸法と Q_{cr} の関係を示す。

図 6.3.8、図 6.3.9 共に開口幅毎にプロット種類を区別しており、図中の赤線よりも上にプロットされるケースが $Q_{umax} \leq Q_{cr}$ となり無開口とみなし得ることを示す。図 6.3.9 は開口高さを横軸に示しており、開口寸法が 250×250mm 以下ではいずれのケースでも $Q_{umax} \leq Q_{cr}$ となり、開口寸法が 250×250mm 以上の場合に $Q_{umax} > Q_{cr}$ となるケースがみられる。また、開口幅が 750mm 以上の時、ほぼすべてのケースで $Q_{umax} > Q_{cr}$ となる。

ここで、 $Q_{umax} \leq Q_{cr}$ となり、無開口とみなし得る条件を以下のように設定する。

- 開口寸法 250×250mm 以下
- 開口係数 $r_u=0.98$ 以上かつ開口幅 500mm 以下 のいずれか

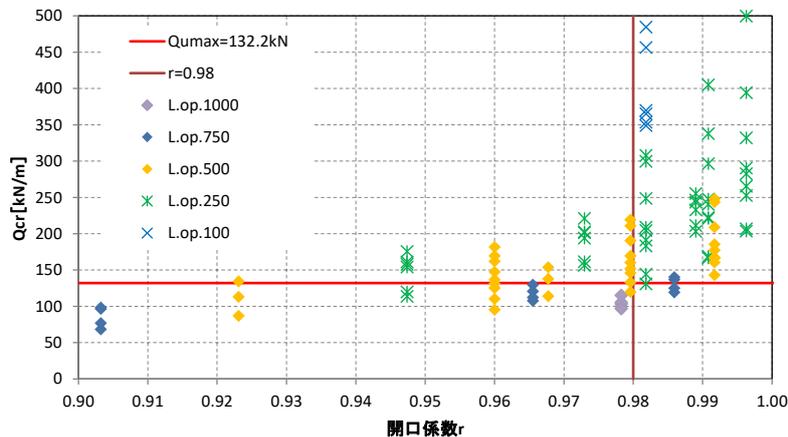


図 6.3.8 開口係数と Q_{cr} の関係

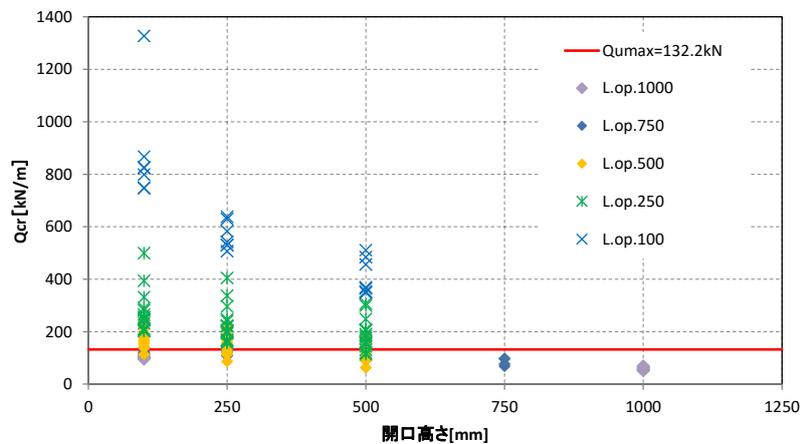


図 6.3.9 開口高さ と Q_{cr} の関係

6.3.6 無開口とみなす条件の検証

前項で設定した下記の条件の妥当性を、設定した条件を満たすパラスタで検証する。パラスタの開口幅は 500、400、300、200、100mm とし、開口係数が設定した条件を満たすように開口高さを決定した。パラスタからは 6.3.4 で解析したケース及び、開口寸法が設定した条件を下回るもの(例、「10_2025_1a」)は除外している。開口位置は 6.3.4 のパラスタで Q_{cr} が最小となる図 6.3.7 の 1a とした。表 6.3.8 及び図 6.3.10 にパラメトリックスタディの結果一覧を示す。いずれのケースにおいても $Q_{umax} \leq Q_{cr}$ となり条件の妥当性が確認された。

- ・ 開口寸法 250×250mm 以下
- ・ 開口係数 $r_u=0.98$ 以上かつ開口幅 500mm 以下 のいずれか

表 6.3.8 解析結果一覧

No.	解析モデル	Lwall	Hwall	Lopen.	Hopen.	Awall	Aopen	α	β	r	Q_{cr}
		mm	mm	mm	mm	mm ²	mm ²				[kN/m]
1	25_4030_1a	2500	3000	400	300	7500000	120000	0.016	0.84	0.981	207.6
2	25_3040_1a	2500	3000	300	400	7500000	120000	0.016	0.88	0.982	276.7
3	25_2060_1a	2500	3000	200	600	7500000	120000	0.016	0.92	0.983	345.9
4	25_10120_1a	2500	3000	100	1200	7500000	120000	0.016	0.96	0.984	339.2
5	10_4010_1a	1000	3000	400	100	3000000	36000	0.012	0.6	0.980	139.4
6	10_3015_1a	1000	3000	300	150	3000000	42000	0.014	0.7	0.980	176.4

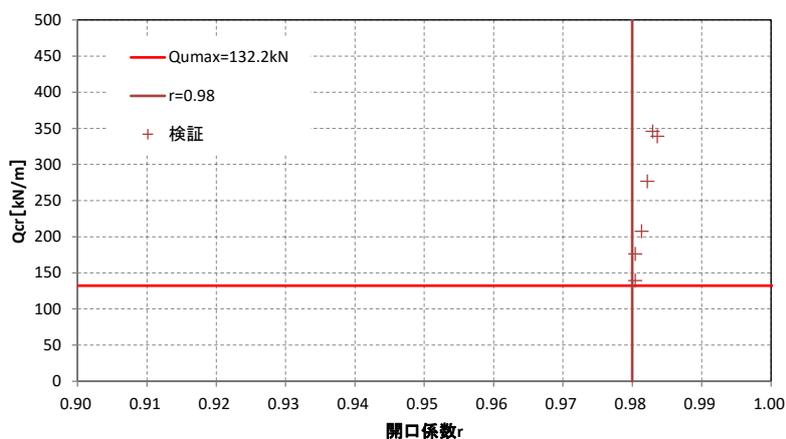


図 6.3.10 開口係数と Q_{cr} の関係

6.3.7 開口を配置可能な範囲

垂れ壁及び腰壁が無い場合の開口を設けられる範囲は、解析パラスタの条件より開口端距離を250mm以上確保した範囲とする。

垂れ壁及び腰壁が取りつく場合は上記の条件に加えて、垂れ壁及び腰壁がパネルゾーンの応力分布に与える影響が不明のためパネルゾーンには開口を設けないものとし、パネルゾーンの上下端から開口端までの距離は（垂れ壁から腰壁間の距離） $\times 0.1$ 以上とする。

ここで、係数の0.1は、断面係数に基づき耐力を低減した^{6.3.5)}とき、壁幅1.0mの壁に開口幅25cm、縁あき25cmの開口を設けた場合の、無開口壁に対する断面係数の低減率=92.2%から安全側となる値として算出した。

ここで、開口を配置可能な範囲を以下のように設定し、開口を配置可能な範囲の条件を図6.3.11に示す。

垂れ壁・腰壁無し

- ・ 開口端距離が250mm以上

垂れ壁・腰壁有

- ・ 開口端距離が250mm以上
- ・ パネルゾーン以外
- ・ パネルゾーン上下端から、開口端までの距離が（垂れ壁から腰壁間の距離） $\times 0.1$ 以上

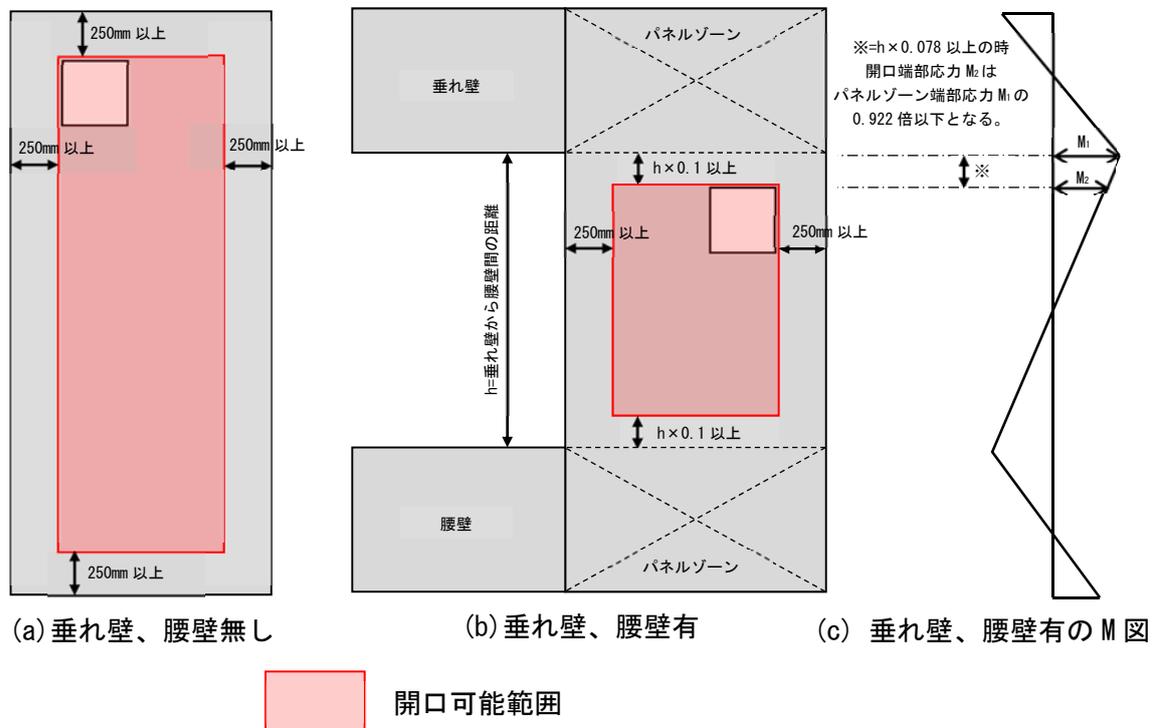


図 6.3.11 開口を設けられる範囲の条件

6.3.8 まとめ

本項では、無開口とみなすことが可能な小開口の条件の設定を目的として、開口を有する大版パネルに対応する FEM 解析により開口隅亀裂発生時耐力 Q_{cr} を算出し、単位壁長さ当たりの終局水平耐力の最大値 Q_{umax} が Q_{cr} 以下となることを基準として無開口とみなす小開口の条件を設定した。

実験結果を追跡可能な FEM 解析モデルにより、CLT 及び開口の幅、高さ、位置を変数としたパラメトリックスタディで開口隅亀裂発生時耐力 Q_{cr} を算出し、無開口とみなし得る、開口の条件を以下のように設定した。

開口数

- ・ 1箇所

開口寸法の条件

- ・ 開口寸法 250×250mm 以下
- ・ 開口係数 $r_t=0.98$ 以上かつ開口幅 500mm 以下 のいずれか

開口を設けられる範囲

垂れ壁・腰壁無しの場合

- ・ 開口端距離が 250mm 以上

垂れ壁・腰壁が取りつく場合

- ・ 開口端距離が 250mm 以上
- ・ パネルゾーン以外
- ・ パネルゾーン上下端から、開口端までの距離が（垂れ壁から腰壁間の距離）×0.1 以上

参考文献

- 6.3-1) 荒木康弘, 中島昌一, 中島史郎, 山口修由: 開口を有する CLT パネルの開口低減係数に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第 24 巻, 第 56 号, pp. 147-152, 2018.2
- 6.3-2) 杉山英男: 壁式木質構造の保有水平耐力略算のための一提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.2265-2266, 1981.9
- 6.3-3) 国土交通省建築基準整備促進事業「CLT を用いた木構造の設計法に関する検討」等
- 6.3-4) H30 林野庁委託事業「CLT 等新たな木質建築部材利用促進・定着委託事業のうち国による開発」
- 6.3-5) 佐藤基志, 田中圭中, 新津靖, 五十田博, 中川貴文, 三宅辰哉: CLT パネルを対象にした設備小開口による耐力の低減に関する検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 85 巻 第 770 巻, pp. 521-527, 2020.4)

