第５章　構造設計に用いるCLT・接合部の構造特性に関する検討

第 5 章 構造設計に用いる CLT・接合部の構造特性に関する検討

5.1 概　要

本章では、これまでに実施された CLT パネル、CLT パネル間接合部に関する各種構造試験の結果に基づき、“FPInnovations (Canada): CLT Handbook, Chap. 3 Structure, 2011” (以下「CLT ハンドブック」) 等を参考にして、CLT パネルおよび CLT パネル間接合部の耐力・剛性などの設計用構造性能を提案する。各種構造試験と設定する設計情報の関係を表 5.1.1 に示す。

表 5.1.1　各種構造試験と設計情報の関係

部　位		応力状態	根拠試験
CLT パネル	面外	曲げ	①
		せん断	
		圧縮(座屈)	
CLT 接合部	引きボルト	引張	②
	鋼板ビス	せん断	
		引張	

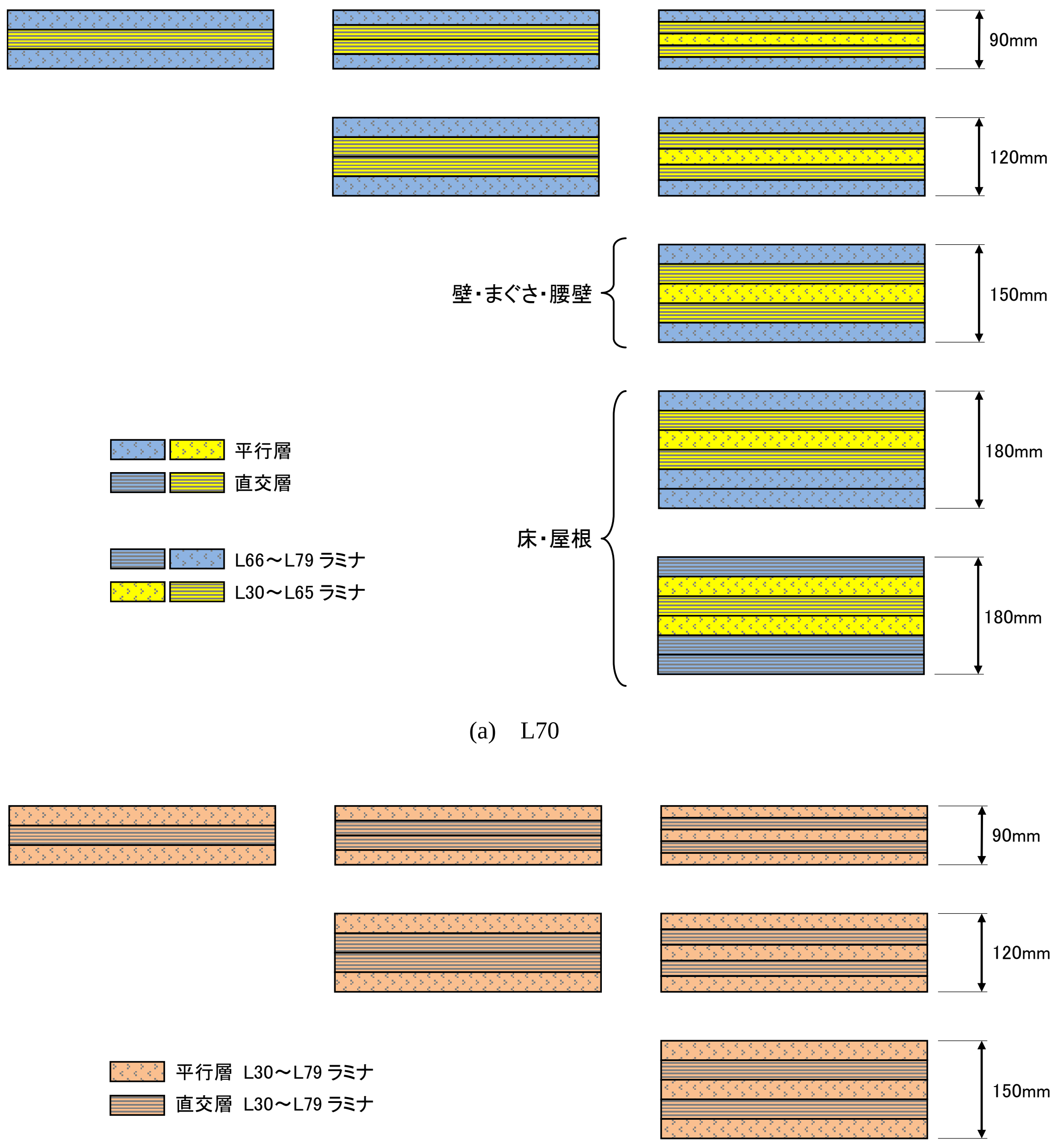
① 銘建工業株式会社：木造住宅・建築物の整備促進に関する技術基盤強化を行う事業, 国産材(杉)直交積層材(クロスラミナ)の製作及び性能実験, 平成 23 年 8 月
② 木構造振興株式会社：CLT パネルを用いた中高層建築物の構造計画と接合部性能の検証事業報告書, 平成 24 年 3 月

5.2 CLT パネルの面外性能

本節では、主として CLT ハンドブックを参考として面外曲げ・面外せん断に対する CLT パネルの剛性・耐力の評価方法を提案する。また、その結果を「銘建工業株式会社：木造住宅・建築物の整備促進に関する技術基盤強化を行う事業, 国産材(杉)直交積層材(クロスラミナ)の製作及び性能実験, 平成 23 年 8 月」(以下「CLT パネル試験」) の結果に基づいて検証する。

5.2.1 検討対象とする CLT のラミナ構成

本章で対象とする CLT のラミナ構成を図 5.2.1 に示す。ラミナ構成は表層を L66～L79 ラミナとし、その他を L30～L65 ラミナとした「L70」と、L30～L79 ラミナを無作為に混合配置した「Mix」



(a) L70

(b) Mix

図 5.2.1 検討対象 CLT パネルのラミナ構成

に大別される。これらのうち、L70, 150mm 厚のものが壁・まぐさ・腰壁に用いられ、L70, 180mm 厚のものが床・屋根スラブに用いられる。なお、CLT パネル試験の対象は 150mm 厚以下のパネルであり、床・屋根スラブ用の CLT パネルは含まれていない。さらに一部の試験では壁・まぐさ・腰壁用パネルも試験対象となっていない。したがって、まず、図 5.2.1 のすべての CLT パネルを対象として共通の剛性・耐力の評価方法を定式化し、その結果を CLT パネル試験の結果に基づいて検証することで、設計対象 CLT パネルの剛性・耐力の評価を可能とする。

5.2.2 CLT パネルの設計用面外性能

5.2.2.1 面外性能の定式化

(1) 面外剛性

CLT ハンドブックに掲載される Shear Analogy Method によれば、CLT パネルの有効曲げ剛性 $(EI)_{eff}$ と有効せん断剛性 $(GA)_{eff}$ は次のように求められる。

$$(EI)_{eff} = (EI)_A + (EI)_B = \sum_{i=1}^{n}\left(E_i \cdot b_i \cdot \frac{h_i^3}{12}\right) + \sum_{i=1}^{n}\left(E_i \cdot A_i \cdot z_i^2\right) \qquad (5.2.1)$$

$$(GA)_{eff} = \frac{a^2}{\dfrac{h_1}{2 \cdot G_1 \cdot b_1} + \sum_{i=2}^{n-1}\dfrac{h_i}{G_i \cdot b_i} + \dfrac{h_n}{2 \cdot G_n \cdot b_n}} \qquad (5.2.2)$$

ここで、n ：ラミナ層数

E_i, G_i ：i 層ラミナのヤング係数、せん断弾性係数

A_i ：i 層ラミナの断面積

b_i, h_i ：i 層ラミナの幅、高さ (図 5.2.2 参照)

z_i ：全層一体時の中立軸と i 層ラミナ重心の距離 (図 5.2.2 参照)

a ：最外層ラミナ重心間の距離 (図 5.2.2 参照)

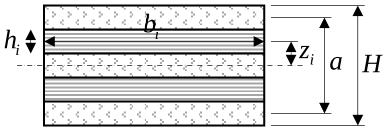


図 5.2.2

E_i, G_i は繊維方向がスパンに平行なラミナについては E_p, G_p、繊維方向がスパンに直交するラミナについては E_c, G_c とする。G_c はローリングシアが生じる場合のせん断弾性係数に相当する。

$$E_c = \frac{E_p}{e_1} \qquad G_p = \frac{E_p}{e_2} \qquad G_c = \frac{G_p}{e_3} \qquad (5.2.3)$$

ここで、E_p ：繊維平行方向のヤング係数

e_1, e_2, e_3 ：係数

係数 e_1, e_2, e_3 の値については CLT ハンドブックではそれぞれ 30, 16, 10 が推奨されている。

(2) 面外曲げ耐力

面外曲げによる CLT パネルの曲げ応力度 σ_b および曲げ強さ M_b は次のように算定する。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z_{eff}} \tag{5.2.4}$$

$$M_b = {}_dF_b \cdot Z_{eff} \tag{5.2.5}$$

ここで、M ：曲げ応力

${}_dF_b$ ：設計用曲げ強度

$$Z_{eff} = \frac{(EI)_{eff}}{E_s \cdot y_s} \quad \text{：有効断面係数} \tag{5.2.6}$$

E_s ：表層ラミナの維平行方向のヤング係数

y_s ：中立軸から CLT 表面までの距離

(3) 面外せん断耐力

均質な任意断面の、中立軸から x だけ離れた位置のせん断応力度は次のように計算できる。

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{b \cdot I} \tag{5.2.7}$$

ここで、Q ：せん断応力

S ：せん断応力度を求める位置より外側の断面の全断面中立軸回りの断面一次モーメント

I ：断面二次モーメント

b ：せん断応力度を求める位置の断面の幅

CLT パネルではせん断応力度を求める位置より外側のラミナを対象として、

$$\tau = \frac{Q}{2 \cdot (EI)_{eff}} \cdot \left\{ E_1 \cdot (x_1^{\,2} - x^2) + \sum_{i=2}^{m-1} E_i \cdot (x_i^{\,2} - x_{i-1}^{\,2}) \right\} \tag{5.2.8}$$

ここで、m ：せん断応力度を求める位置より外側のラミナ層数

E_i, x_i, x ：図 5.2.3 参照

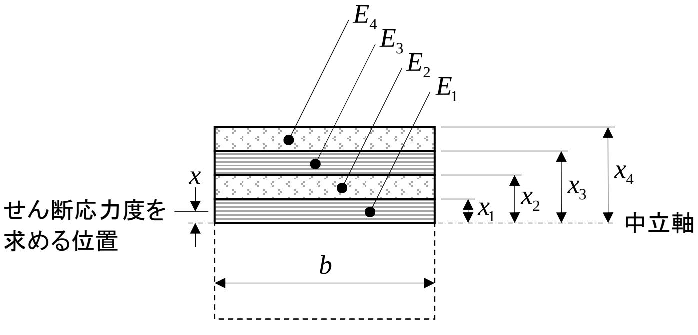


図 5.2.3

せん断応力度分布係数 β は

$$\frac{\beta \cdot Q}{A_{ttl}} = \frac{Q}{2 \cdot (EI)_{eff}} \cdot \left\{ E_1 \cdot (x_1^{\,2} - x^2) + \sum_{i=2}^{m-1} E_i \cdot (x_i^{\,2} - x_{i-1}^{\,2}) \right\} \tag{5.2.9}$$

として、

$$\beta = \frac{A_{ttl}}{2\cdot(EI)_{eff}}\cdot\left\{E_1\cdot({x_1}^2 - x^2) + \sum_{i=2}^{m-1} E_i\cdot({x_i}^2 - {x_{i-1}}^2)\right\} \tag{5.2.10}$$

ここで、 A_{ttl} ：CLT パネルの全断面積

CLT パネルの面外せん断強さ Q_b を次のように算定する。

$$Q_b = {}_dF_s \cdot A_{eff} \tag{5.2.11}$$

ここで、 Q ：せん断応力

${}_dF_s$ ：設計用せん断強度

$$A_{eff} = \frac{A_{ttl}}{\beta} = \frac{2\cdot(EI)_{eff}}{E_1\cdot({x_1}^2 - x^2) + \sum_{i=2}^{m-1} E_i\cdot({x_i}^2 - {x_{i-1}}^2)} \text{ ：有効せん断断面積} \tag{5.2.12}$$

図 5.2.1 に示すラミナ構成について以上の定式化に基づいて求められる断面性能を表 5.2.1, 5.2.2 に示す。ラミナのヤング係数はそれぞれの層を構成するラミナのヤング係数の中央値とした。(5.2.3) 式の係数 e_1 は 30 とし、 e_2, e_3 については後述の CLT パネル試験結果への適合性を考慮して、それぞれ 13, 4 とした。

表 5.2.1　CLT パネルの断面性能 (L70)

				*1	*2	*3	*4	*5	*6	*7	*8	*9	*10	*11	*12	*13	*14
パネル厚さ [mm]	層数	ラミナ厚さ [mm]	No.	位置 xi [mm]	Ei [GPa]	Gi [GPa]	Ei*xi	xn [mm]	(EI)A	(EI)B	(EI)eff	a [mm]	a^2/(GA)eff	(GA)eff [kN]	Zeff [mm^3]	Aeff [mm^2]	β
									[GN*mm^2]								
150	5	30	1	15	7.25	0.558	108.75	75	16.3	783.0	1609	120	26.9	18165	2960	123319	1.216
			2	45	0.00	0.091	0		0.0	0.0			328.4				
			3	75	4.75	0.365	356.25		10.7	0.0			82.1				
			4	105	0.00	0.091	0		0.0	0.0			328.4				
			5	135	7.25	0.558	978.75		16.3	783.0			26.9				
120	5	24	1	12	7.25	0.558	87	60	8.4	400.9	824	96	21.5	14532	1894	98655	1.216
			2	36	0.00	0.091	0		0.0	0.0			262.7				
			3	60	4.75	0.365	285		5.5	0.0			65.7				
			4	84	0.00	0.091	0		0.0	0.0			262.7				
			5	108	7.25	0.558	783		8.4	400.9			21.5				
120	4	30	1	15	7.25	0.558	108.75	60	16.3	440.4	914	90	26.9	11398	2100	93333	1.286
			2	45	0.00	0.091	0		0.0	0.0			328.4				
			3	75	0.00	0.091	0		0.0	0.0			328.4				
			4	105	7.25	0.558	761.25		16.3	440.4			26.9				
90	5	18	1	9	7.25	0.558	65.25	45	3.5	169.1	348	72	16.1	10899	1065	73991	1.216
			2	27	0.00	0.091	0		0.0	0.0			197.1				
			3	45	4.75	0.365	213.75		2.3	0.0			49.3				
			4	63	0.00	0.091	0		0.0	0.0			197.1				
			5	81	7.25	0.558	587.25		3.5	169.1			16.1				
90	4	22.5	1	11.25	7.25	0.558	81.563	45	6.9	185.8	385	67.5	20.2	8549	1181	70000	1.286
			2	33.75	0.00	0.091	0		0.0	0.0			246.3				
			3	56.25	0.00	0.091	0		0.0	0.0			246.3				
			4	78.75	7.25	0.558	570.94		6.9	185.8			20.2				
90	3	30	1	15	7.25	0.558	108.75	45	16.3	195.8	424	60	26.9	9419	1300	65000	1.385
			2	45	0.00	0.091	0		0.0	0.0			328.4				
			3	75	7.25	0.558	543.75		16.3	195.8			26.9				
180	6	30	1	15	7.25	0.5577	108.75	99.623	16.3	1557.5	2905	150	26.897	27451	4023	132580	1.358
			2	45	0	0.0913	0		0.0	0.0			328.42				
			3	75	4.75	0.3654	356.25		10.7	86.4			82.105				
			4	105	0	0.0913	0		0.0	0.0			328.42				
			5	135	7.25	0.5577	978.75		16.3	272.2			26.897				
			6	165	7.25	0.5577	1196.3		16.3	929.6			26.897				
180	6	30	1	0	0.00	0.000	0	45	0.0	0.0	278	60	0	7308	1300	65000	1.385
			2	15	4.75	0.365	71.25		10.7	128.3			82.105				
			3	45	0.00	0.091	0		0.0	0.0			328.42				
			4	75	4.75	0.365	356.25		10.7	128.3			82.105				
			5	0	0.00	0.000	0		0.0	0.0			0				
			6	0	0.00	0.000	0		0.0	0.0			0				

外層 E=7.25[GPa]　　内層 E=4.75[GPa]　　e2=Ep/Gp=13　　e3=Gp/Gc=4

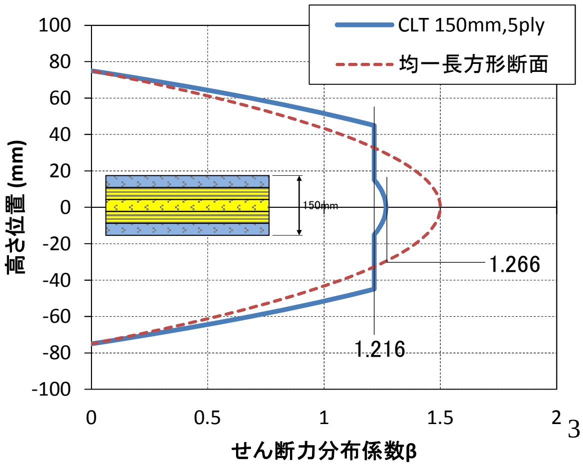
表 5.2.2　CLT パネルの断面性能（Mix）

				*1	*2	*3	*4	*5	*6	*7	*8	*9	*10	*11	*12	*13	*14
パネル厚さ [mm]	層数	ラミナ厚さ [mm]	No.	位置 xi [mm]	Ei [GPa]	Gi [GPa]	Ei× xi	xn [mm]	(EI)A	(EI)B	(EI)eff	a [mm]	a^2/(GA)eff	(GA)eff [kN]	Zeff [mm^3]	Aeff [mm^2]	β
									[GN*mm^2]								
150	5	30	1	15	5.45	0.419	81.75	75	12.3	588.6	1214	120	35.8	20123	2970	123750	1.212
			2	45	0.00	0.105	0		0.0	0.0			286.2				
			3	75	5.45	0.419	408.75		12.3	0.0			71.6				
			4	105	0.00	0.105	0		0.0	0.0			286.2				
			5	135	5.45	0.419	735.75		12.3	588.6			35.8				
120	5	24	1	12	5.45	0.419	65.4	60	6.3	301.4	622	96	28.6	16098	1901	99000	1.212
			2	36	0.00	0.105	0		0.0	0.0			229.0				
			3	60	5.45	0.419	327		6.3	0.0			57.2				
			4	84	0.00	0.105	0		0.0	0.0			229.0				
			5	108	5.45	0.419	588.6		6.3	301.4			28.6				
120	4	30	1	15	5.45	0.419	81.75	60	12.3	331.1	687	90	35.8	12577	2100	93333	1.286
			2	45	0.00	0.105	0		0.0	0.0			286.2				
			3	75	0.00	0.105	0		0.0	0.0			286.2				
			4	105	5.45	0.419	572.25		12.3	331.1			35.8				
90	5	18	1	9	5.45	0.419	49.05	45	2.6	127.1	262	72	21.5	12074	1069	74250	1.212
			2	27	0.00	0.105	0		0.0	0.0			171.7				
			3	45	5.45	0.419	245.25		2.6	0.0			42.9				
			4	63	0.00	0.105	0		0.0	0.0			171.7				
			5	81	5.45	0.419	441.45		2.6	127.1			21.5				
90	4	22.5	1	11.25	5.45	0.419	61.313	45	5.2	139.7	290	67.5	26.8	9433	1181	70000	1.286
			2	33.75	0.00	0.105	0		0.0	0.0			214.7				
			3	56.25	0.00	0.105	0		0.0	0.0			214.7				
			4	78.75	5.45	0.419	429.19		5.2	139.7			26.8				
90	3	30	1	15	5.45	0.419	81.75	45	12.3	147.2	319	60	35.8	10062	1300	65000	1.385
			2	45	0.00	0.105	0		0.0	0.0			286.2				
			3	75	5.45	0.419	408.75		12.3	147.2			35.8				

外層E=5.45[GPa]　内層E=5.45[GPa]　e2=Ep/Gp=13　e3=Gp/Gc=4

*1　パネル上面からラミナ厚さ中央までの距離。
*2,*3　ラミナのヤング係数、せん断弾性係数。直交層のヤング係数は幅はぎがなされていないことを考慮して 0 とする。同様に、180mm 厚弱軸については外側の直交層ラミナのヤング係数は 0 とする。
*5　パネル上面から中立軸までの距離。
*6, *7, *8　(5.2.1)式による$(EI)_A$, $(EI)_B$ および有効曲げ剛性$(EI)_{eff}$ 。
*9　表裏のラミナ厚さ中央の距離 a。
*10　(5.2.2)式中の各層の $a^2/(GA)_{eff}$ 。
*11　(5.2.2)式による有効せん断剛性$(GA)_{eff}$ 。
*12　(5.2.6)式による有効断面係数 Z_{eff} 。
*13　(5.2.12)式による有効せん断断面積 A_{eff} 。
*14　(5.2.10)式によるせん断応力度分布係数 β。

参考として、(5.2.10)式によるせん断応力度分布係数とせん断応力度を算定する高さ位置の関係を図化すると図 5.2.4 のようになる。



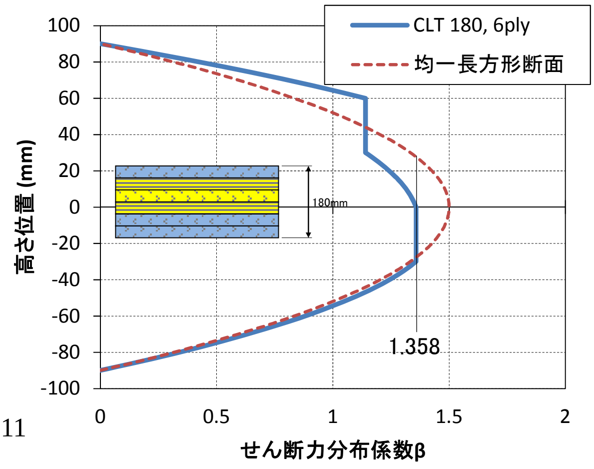


図 5.2.4　CLT パネルのせん断力分布係数の例

5.2.2.2 面外性能算定方法の検証

(1) 面外曲げ剛性･面外曲げ耐力

CLT パネル試験, 2. 曲げ試験では、図 5.2.1 に示すラミナ構成のうち 180mm 以外のものを対象として図 5.2.5 に示す三等分点曲げ試験を行っている。なお、CLT パネルの幅は 1(m)としている。

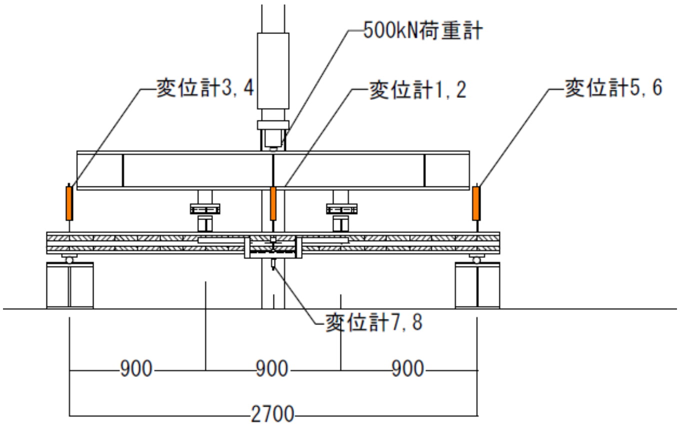


図 5.2.5　試験方法 (曲げ試験)

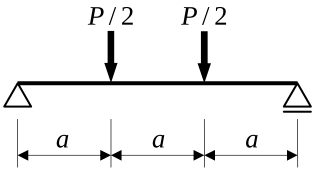


図 5.2.6　曲げ試験に対応する計算モデル

図 5.2.5 の荷重状態を図 5.2.6 のようにモデル化する。このとき、スパン中央のたわみ δ_c と全荷重 P の関係は次のように表される。

$$\delta_c = \frac{23}{48} \cdot \frac{P \cdot a^3}{(EI)_{eff}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{P \cdot a}{(GA)_{eff} / \kappa} \qquad (5.2.13)$$

また、曲げ強さ M_b は(5.2.5)式によって求められ、M_b に対応する荷重 P_b は次のようになる。

$$P_b = M_b \cdot \frac{2}{a} \qquad (5.2.14)$$

試験体のうち｢L70｣の CLT パネルを用いたものを対象として、(5.2.13)式中の有効曲げ剛性 $(EI)_{eff}$ と有効せん断剛性 $(GA)_{eff}$ 、および(5.2.5)式中の有効断面係数 Z_{eff} を表 5.2.1 に示す値とした場合の(5.2.13)式による弾性剛性 P/δ_c と(5.2.14)式による荷重 P_b を試験結果と比較して図 5.2.7 に示す。なお、(5.2.13)式右辺第二項のせん断変形係数 κ は均質長方形断面では 1.2 となるが、図 5.2.4 に示すように、CLT パネルではせん断応力度分布係数 β の最大値が均質長方形断面より小さいことから、κ も均質長方形断面より小さいことを考慮して、図 5.2.7 では κ = 1.0 としている。また、(5.2.5)式中の設計用曲げ強度 ${}_dF_b$ は 表 5.2.3 に示す集成材の日本農林規格に規定される等級 L70 のラミナの曲げ強さの下限値(25.0MPa)としている。図 5.2.7 では P/δ_c は試験結果に良好に一致しており、P_b は試験による最大荷重の下限にほぼ一致している。5.2.2.1 項による面外曲げ性能の定式化は妥当といえる。

表 5.2.3　集成材の日本農林規格　第 5 条，第 2 項, (2)等級区分機によるもの，
イ　ラミナの強度性能の基準（参考）

機械区分による等級	曲げヤング係数（ＧＰａ又は10³Ｎ／㎟）	曲げ強さ（ＭＰａ又はＮ／㎟）		引張り強さ（ＭＰａ又はＮ／㎟）	
		平均値	下限値	平均値	下限値
L 90	9.0	39.0	29.5	23.5	17.5
L 80	8.0	36.0	27.0	21.5	16.0
L 70	7.0	33.0	25.0	20.0	15.0
L 60	6.0	30.0	22.5	18.0	13.5
L 50	5.0	27.0	20.5	16.5	12.0
L 40	4.0	24.0	18.0	14.5	10.5
L 30	3.0	21.0	16.0	12.5	9.5

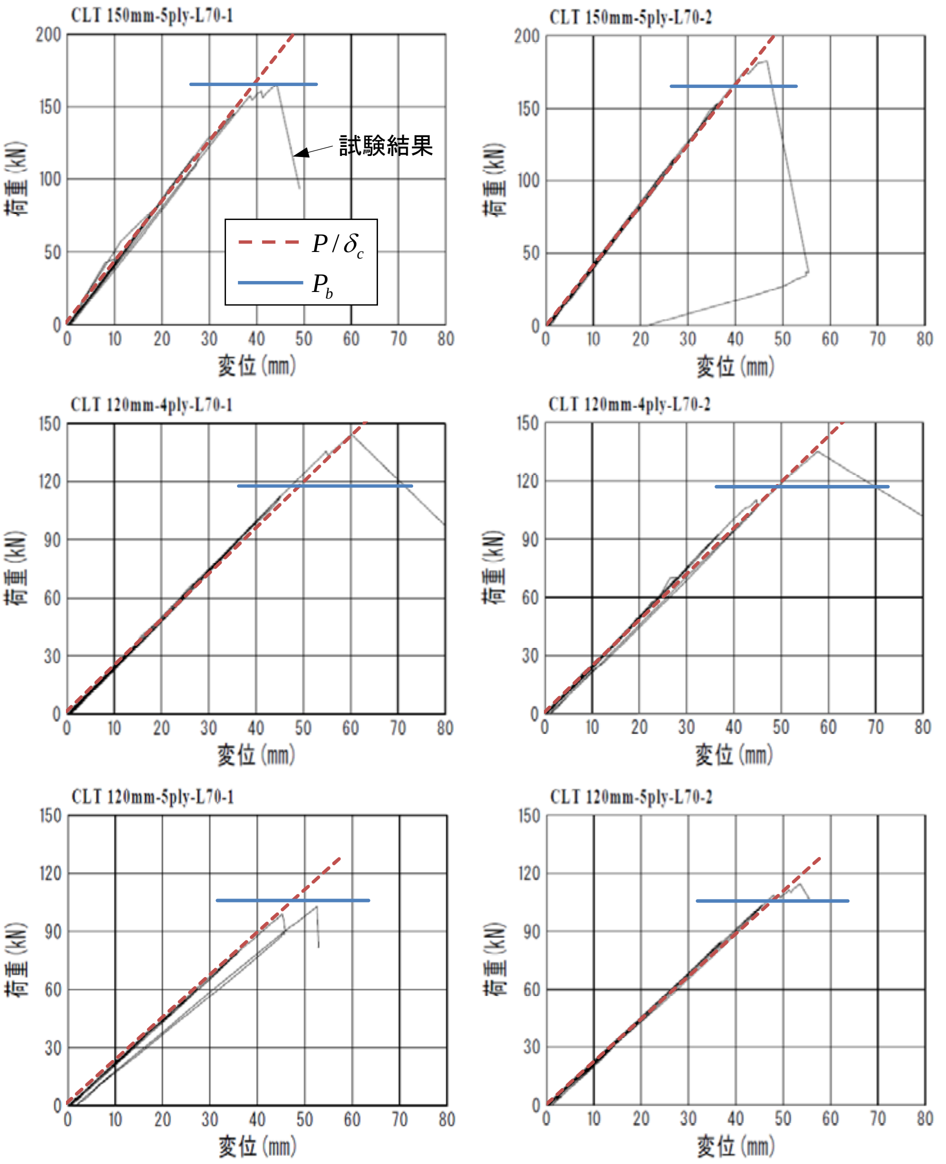


図 5.2.7　設計用曲げ剛性・曲げ強さと試験結果の比較

(2) 面外せん断剛性･面外せん断耐力

CLT パネル試験, 4. 逆対称せん断試験では、図 5.2.1 に示すラミナ構成「Mix」を対象として図 5.2.8 に示すせん断試験を行っている。なお、CLT パネルの幅は 1(m)としている。

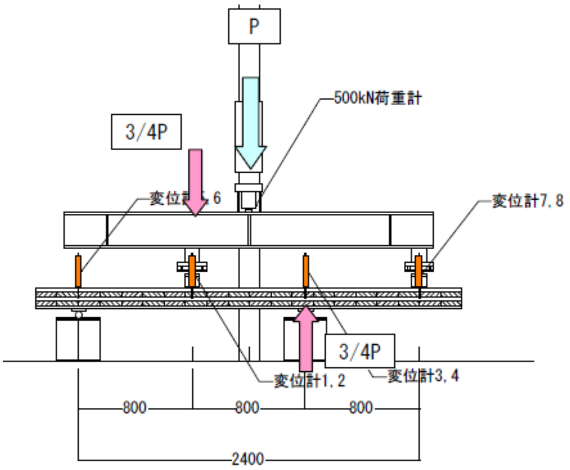


図 5.2.8　試験方法 (せん断試験)

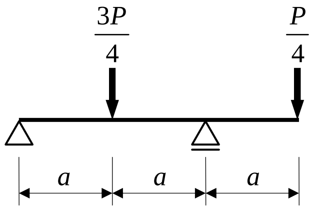


図 5.2.9　せん断試験に対応する計算モデル

図 5.2.8 の荷重状態を図 5.2.9 のようにモデル化する。このとき、左側加力点のたわみδ_cと全荷重Pの関係は次のように表される。

$$\delta_c = \frac{3}{48}\cdot\frac{P\cdot a^3}{(EI)_{eff}} + \frac{3}{8}\cdot\frac{P\cdot a}{(GA)_{eff}/\kappa} \tag{5.2.15}$$

また、せん断強さQ_bは(5.2.11)式によって求められ、Q_bに対応する荷重P_bは次のようになる。

$$P_b = 2\cdot Q_b \tag{5.2.16}$$

(5.2.15)式中の有効曲げ剛性$(EI)_{eff}$と有効せん断剛性$(GA)_{eff}$、および(5.2.11)式中の有効せん断断面積A_{eff}を表 5.2.2 に示す値とした場合の(5.2.15)式による弾性剛性P/δ_cと(5.2.16)式による荷重P_bを試験結果と比較して図 5.2.10 に示す。ただし、試験結果は$P\times3/4$に対してプロットされているので、P/δ_cとP_bについても(5.2.15)式、(5.2.16)式による値の 3/4 倍としている。なお、(5.2.13)式右辺第二項のせん断変形係数κは前項と同様に 1.0 としている。また、(5.2.11)式中の設計用せん断強度${}_dF_s$は、試験では直交層のローリングシアで最大耐力が決まっていることに注意して、日本建築学会：木質構造設計規準に記載される構造用合板の面外力に対する基準許容せん断応力度の 3 倍の値(= 1.2MPa)としている。

図 5.2.10 ではP/δ_cはいずれも試験結果に対してやや過小評価となっているが、その度合いは設計上の問題は無いレベルといえる。P_bは 90mm 厚, 4ply を除いて試験による最大荷重の下限にほぼ一致している。90mm 厚, 4ply については直交層が二つ連続することによりローリングシア耐力が低下したものと推察される。120mm 厚, 4ply もほかの試験体に比べて最大荷重が低いこともその証左と考えられる。よって、各層ラミナの方向が交互に直交している場合は${}_dF_s$=1.2(MPa)として設計できると考えられる。

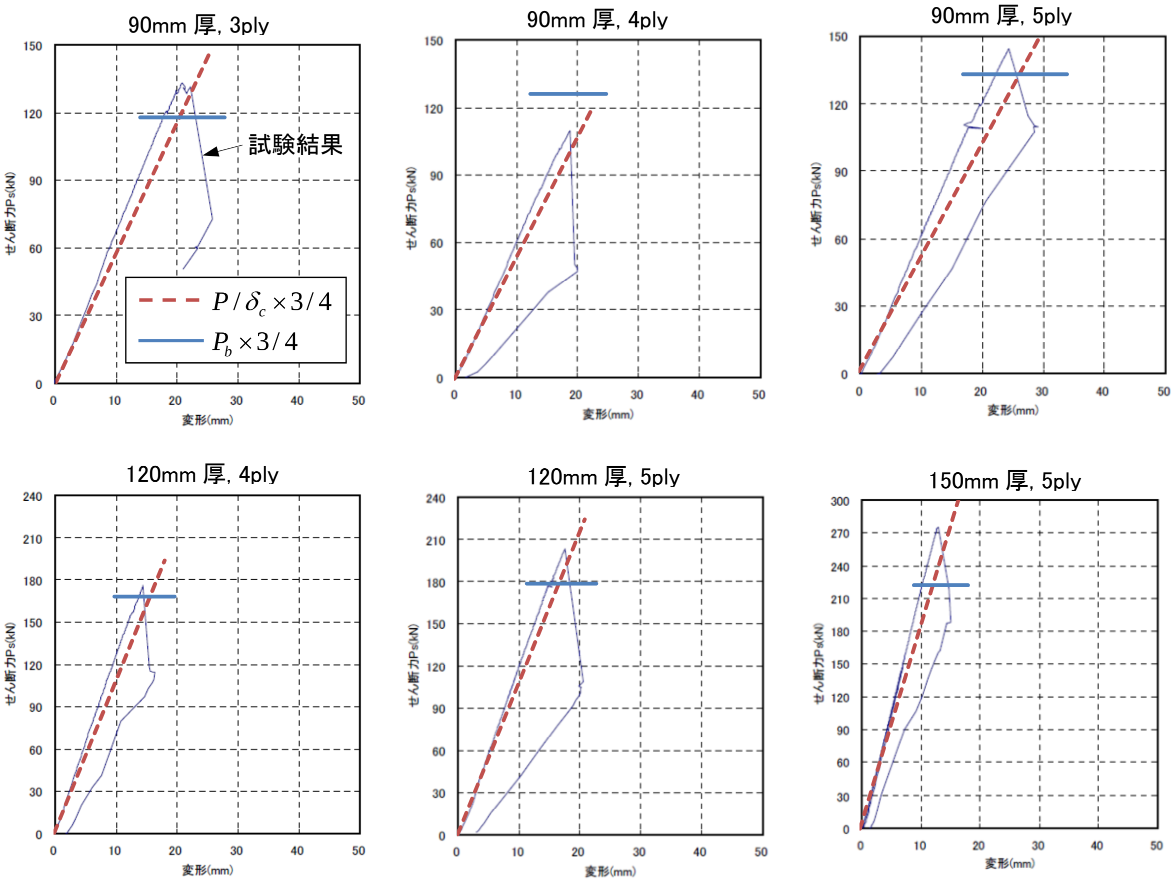


図 5.2.10　設計用せん断剛性・せん断強さと試験結果の比較

5.3 CLT パネルの圧縮座屈性能

本節では、主として CLT ハンドブックを参考として面内圧縮に対する CLT パネルの耐力の評価方法を提案する。また、その結果を CLT パネル試験 の結果に基づいて検証する。

5.3.1 圧縮座屈性能の定式化

CLT ハンドブックに掲載される Mechanically Jointed Columns Theory (Eurocode 5)によれば、面内圧縮に対する CLT パネルの有効細長比 λ_{eff} は次のように求められる。

$$\lambda_{eff} = \frac{l}{i_{eff}} \tag{5.3.1}$$

ここで、

$$i_{eff} = \sqrt{\frac{I_{eff}}{A_{ttl}}} \quad \text{：有効断面二次半径} \tag{5.3.2}$$

A_{ttl} ：繊維方向が圧縮力方向に平行なラミナの合計断面積

$$I_{eff} = \frac{(EI)_{eff}}{E_{mean}} \quad \text{：有効断面二次モーメント} \tag{5.3.3}$$

E_{mean} ：繊維方向が圧縮力方向に平行なラミナの平均ヤング係数の平均値

なお、CLT ハンドブックでは A_{ttl} は直交層を含めた全断面積と読み取れるが、ここでは、安全側の判断として繊維方向が圧縮力方向に平行なラミナの合計断面積とする。設計では、(5.3.1)式による有効細長比 λ_{eff} を用いて、平 13 国交告第 1024 号による座屈基準強度 ${}_dF_k$ を算定して、CLT パネルの圧縮座屈に対する検定を行う。

$\lambda_{eff} \le 30$ のとき　${}_dF_k = {}_dF_c$ (5.3.4a)

$30 < \lambda_{eff} \le 100$ のとき　${}_dF_k = (1.3 - 0.01 \cdot \lambda_{eff}) \cdot {}_dF_c$ (5.3.4b)

$100 < \lambda_{eff}$ のとき　${}_dF_k = \dfrac{3000}{\lambda_{eff}} \cdot {}_dF_c$ (5.3.4c)

ここで、${}_dF_c$ ：CLT パネルの設計用圧縮強度

CLT パネルの圧縮座屈強さは次のように計算する。

$$N_{cr} = {}_dF_k \cdot A_{ttl} \tag{5.3.5}$$

5.3.2 圧縮座屈性能算定方法の検証

CLT パネル試験, 3. 面内圧縮試験(座屈試験)では、図 5.2.1 に示すラミナ構成のうち「L70」については厚さ 90mm、「Mix」については 90mm 厚 3ply、120mm 厚 4～5ply、150mm 厚 5ply を対象として、図 5.3.1 に示す 1/3 偏心圧縮試験を行っている。

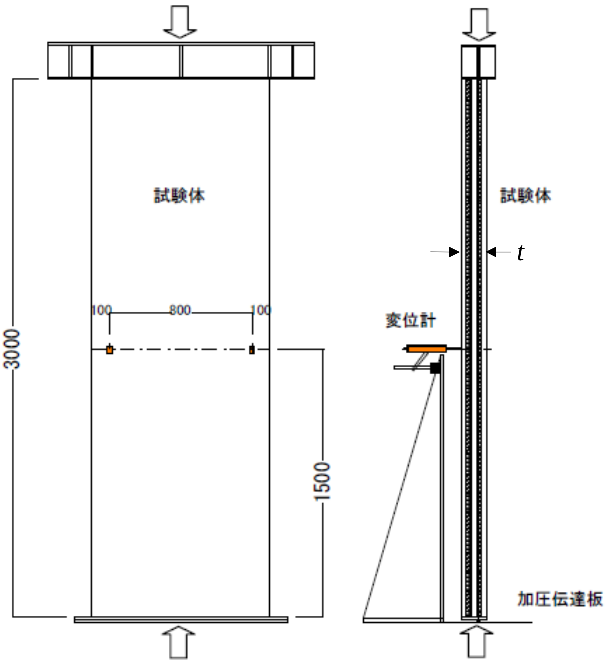


図 5.3.1 試験方法 (圧縮試験)

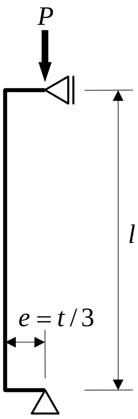


図 5.3.2 圧縮試験に対応する計算モデル

図 5.3.1 の荷重状態を図 5.3.2 のようにモデル化する。このとき、パネルの面外たわみ y と荷重 P の関係は次のように表される[†]。

たわみ $$y = e\cdot\left(\frac{\sin(\alpha l-\alpha x)+\sin\alpha x}{\sin\alpha l}-1\right) \tag{5.3.6}$$

曲げ応力 $$P\cdot(e+y) = Pe\cdot\frac{\sin(\alpha l-\alpha x)+\sin\alpha x}{\sin\alpha l} \tag{5.3.7}$$

最大たわみ $$y_{\max} = e\cdot\left(\sec\frac{\alpha l}{2}-1\right) \tag{5.3.8}$$

最大曲げ応力 $$M_{\max} = Pe\cdot\sec\frac{\alpha l}{2} \tag{5.3.9}$$

ここで、 $$\alpha = \sqrt{P/EI} \tag{5.3.10}$$

EI ：曲げ剛性

ただし、この方法には CLT パネルのせん断変形による面外剛性の低下が考慮されていない。CLT ハンドブックによれば、CLT パネルのせん断変形による面外剛性の低下率は一般的に 0.85～0.99 の範囲にあるとされている。そこで、(5.3.10)式の α を次のように計算することとして、パネル中央の面外たわみ $y_{\max}$ と荷重 P の関係を試験結果と比較する。

[†] 藤本盛久：鉄骨の構造設計, 第 2 版, pp. 97-98, 1982.6.20, 技法堂出版

$$\alpha = \sqrt{\frac{P}{(EI)_{eff} \cdot \phi}} \tag{5.3.11}$$

ここで、ϕ ：せん断変形による面外剛性の低下率

また、次式を満足する荷重 P を本試験に対応する圧縮強さ $P_{\max}$ とする。

$$\frac{P}{A_{ttl} \cdot {}_d F_k} + \frac{M_{\max}}{Z_{eff} \cdot {}_d F_b} = 1.0 \tag{5.3.12}$$

なお、座屈基準強度 ${}_d F_k$ の算定に関して、有効細長比 λ_{eff} を算定する際にも $(EI)_{eff}$ に ϕ を乗じる。

以上の P - $y_{\max}$ 関係と圧縮強さの算定条件を表 5.3.1 に示し、P - $y_{\max}$ 関係と試験結果の比較を図 5.3.3 に示す。設計用曲げ強度 ${}_d F_b$ は表 5.2.3 中の曲げ強さの下限値とし、「L70」については等級 L70 の値、「Mix」については等級 L50 と L60 の平均値とした。設計用圧縮強度 ${}_d F_c$ については同様に表 5.2.3 中の引張強さの下限値とした。

表 5.3.1　P - $y_{\max}$ 関係と圧縮強さの算定条件

区分	厚さ	層数	*1 (EI)eff [GNmm	*2 ϕ	*3 Emean	*4 Ieff [×10^6mm^4]	*5 Attl [mm2]	*6 ieff [mm]	*7 λ eff	*8 Fc (MPa)	*9 Fk (MPa)	*10 Zeff [×10^3mm^3]	*11 Fb (MPa)
L70	90	5	348	0.95	6.42	51.5	54000	30.9	97.2	15	4.92	1065	25
		4	385	0.9	7.25	47.8	45000	32.6	92.0	15	5.70	1181	25
		3	424	1	7.25	58.5	60000	31.2	96.1	15	5.09	1300	25
mix	90	3	319	1	5.45	58.5	60000	31.2	96.1	12.75	4.33	1300	21.5
	120	5	622	1	5.45	114.0	72000	39.8	75.4	12.75	6.96	1901	21.5
	120	4	687	0.8	5.45	100.8	60000	41.0	73.2	12.75	7.24	2100	21.5
	150	5	1214	0.85	5.45	189.3	90000	45.9	65.4	12.75	8.24	2970	21.5

*1　2.2.1 項による有効曲げ剛性。
*2　CLT パネルのせん断変形による面外剛性の低下率。
*3　繊維方向が圧縮力方向に平行なラミナの平均ヤング係数の平均値。
*4　(2.4.3)式による有効断面二次モーメント。
*5　繊維方向が圧縮力方向に平行なラミナの合計断面積。
*6　(2.4.2)式による有効断面二次半径。
*7　(2.4.1)式による有効細長比。
*8　CLT パネルの設計用圧縮強度。
*9　(2.4.4)式による設計用座屈強度。
*10　有効断面係数。
*11　設計用曲げ強度。

図 5.3.3 に見るように、面外剛性の低下率 ϕ は試験体ごとに異なるが、0.80～1.0 の範囲に設定すれば P - $y_{\max}$ 関係は試験結果にほぼ一致し、(5.3.12)式を満足する圧縮強さ $P_{\max}$ は面外変形の増大が始まる荷重に概ね一致している。図 5.3.3 に示す圧縮試験に用いた CLT パネルのうち、120mm 厚, 4ply の ϕ はその他の試験体より小さい。この CLT パネルでは圧縮力方向に直交する方向のラミナが 2 層連続していることがその原因である可能性を指摘でき、各層ラミナの方向が交互に直交している場合は ϕ を 0.85 として有効細長比 λ_{eff} を算定すれば安全側の評価になると考えられる。

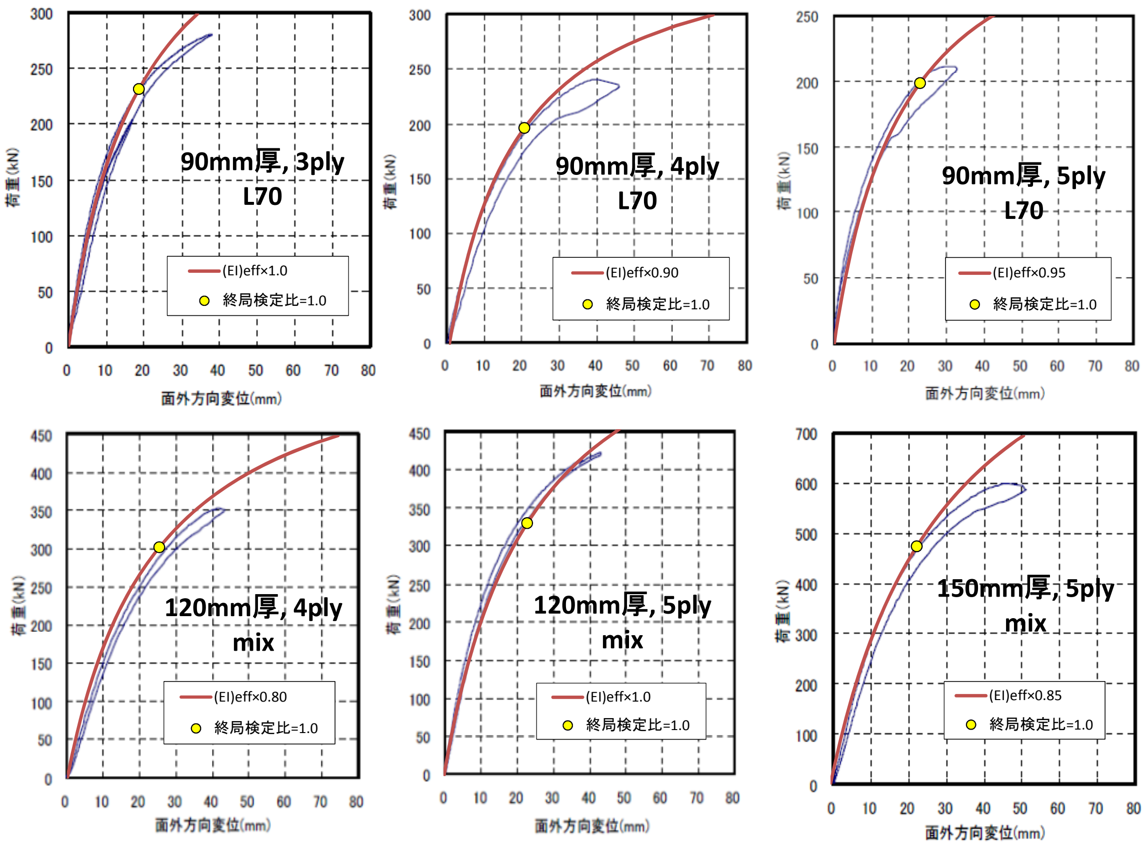


図 5.3.3　圧縮試験結果と設計用特性の比較

5.4 CLT パネル接合部の荷重変形性能

本節では、「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, 平成 24 年 3 月」(以下「CLT 接合部試験」) の結果に基づいて、CLT 接合部の設計用荷重変形性能を提案する。

5.4.1 引きボルト接合部引張性能 [CLT 接合部試験報告書, 3.4 引張接合部の本試験]

5.4.1.1 破壊性状

(a) 2-M16 繊維平行

- 試験の都合で設けた欠き込み入隅に破断が生じたものは参照する必要が無い。
- それ以外に FJ 部で破断しているものもあるが、本接合部は「2-M16 繊維直交」と直列に設置され、それより耐力が高いので問題はない。

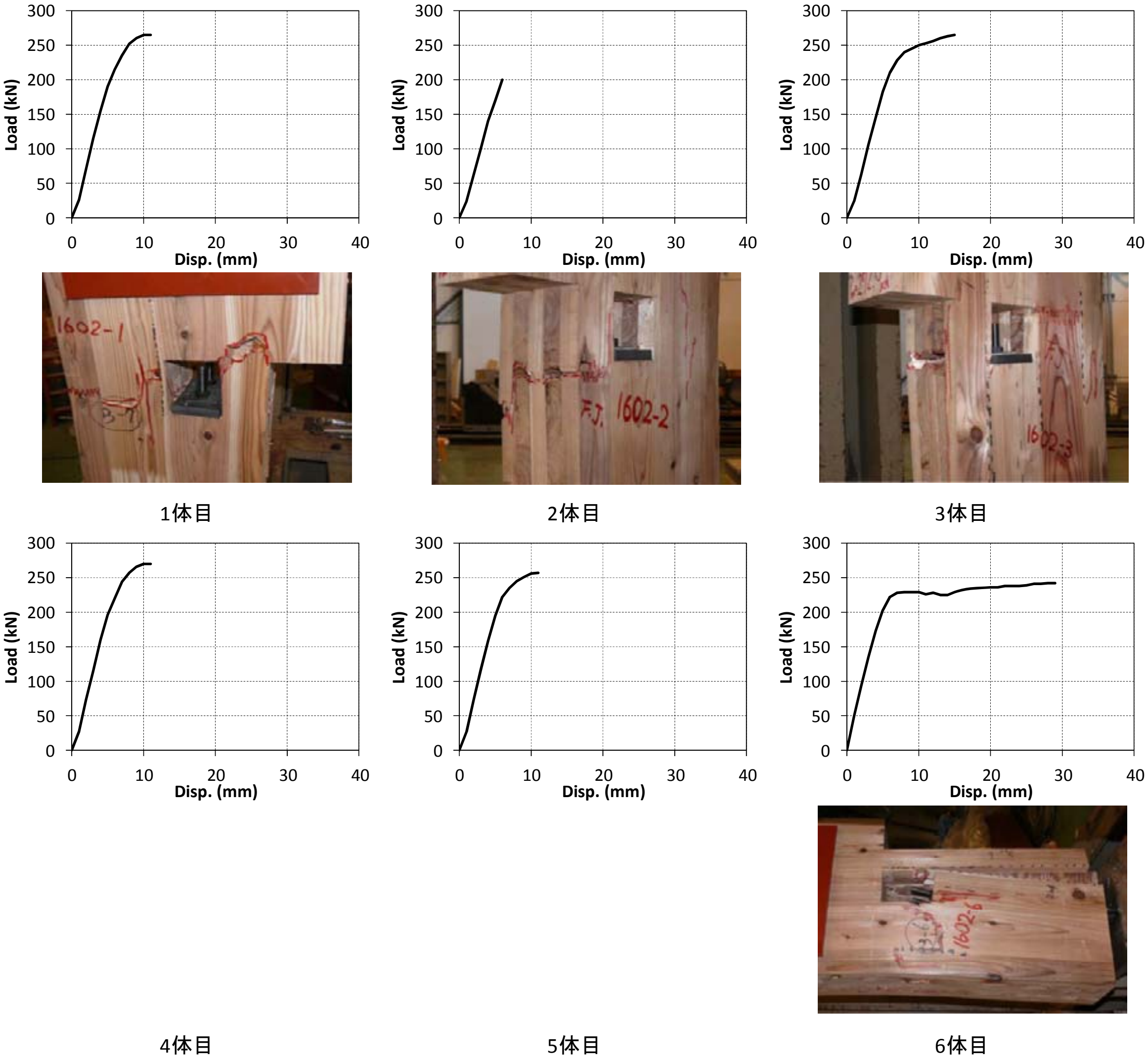
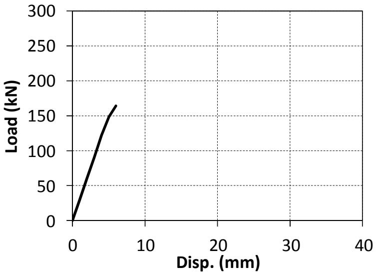


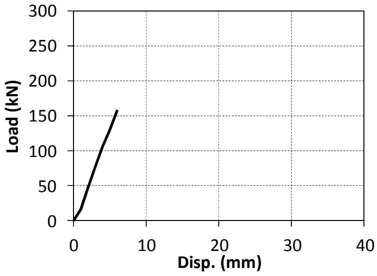
図 5.4.1 引きボルト「2-M16 繊維平行」の荷重変形関係と破壊状況

(b)　2-M16 繊維直交

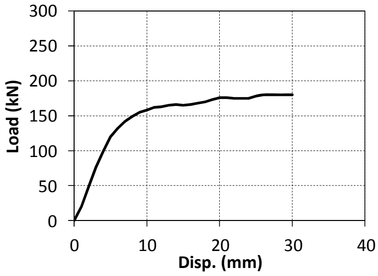
- 試験の都合で設けた欠き込み入隅に破断が生じたものは参照する必要が無い。
- それ以外のものは一定の変形能力がある。



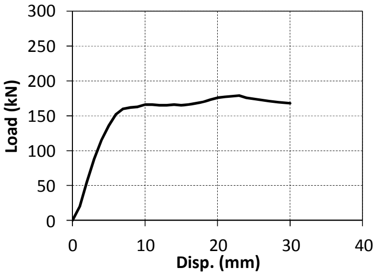
1体目



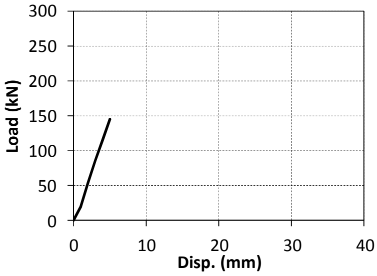
2体目



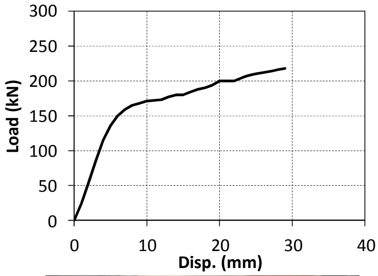
3体目



4体目



5体目



6体目

図 5.4.2　引きボルト「2-M16 繊維直交」の荷重変形関係と破壊状況

(c)　1-M24 繊維平行 座金 19mm

- 欠き込み入隅破断の有無にかかわらず最大変形が 10mm 程度のものがある。終局状態(耐力低下域)まで加力していないことによる。

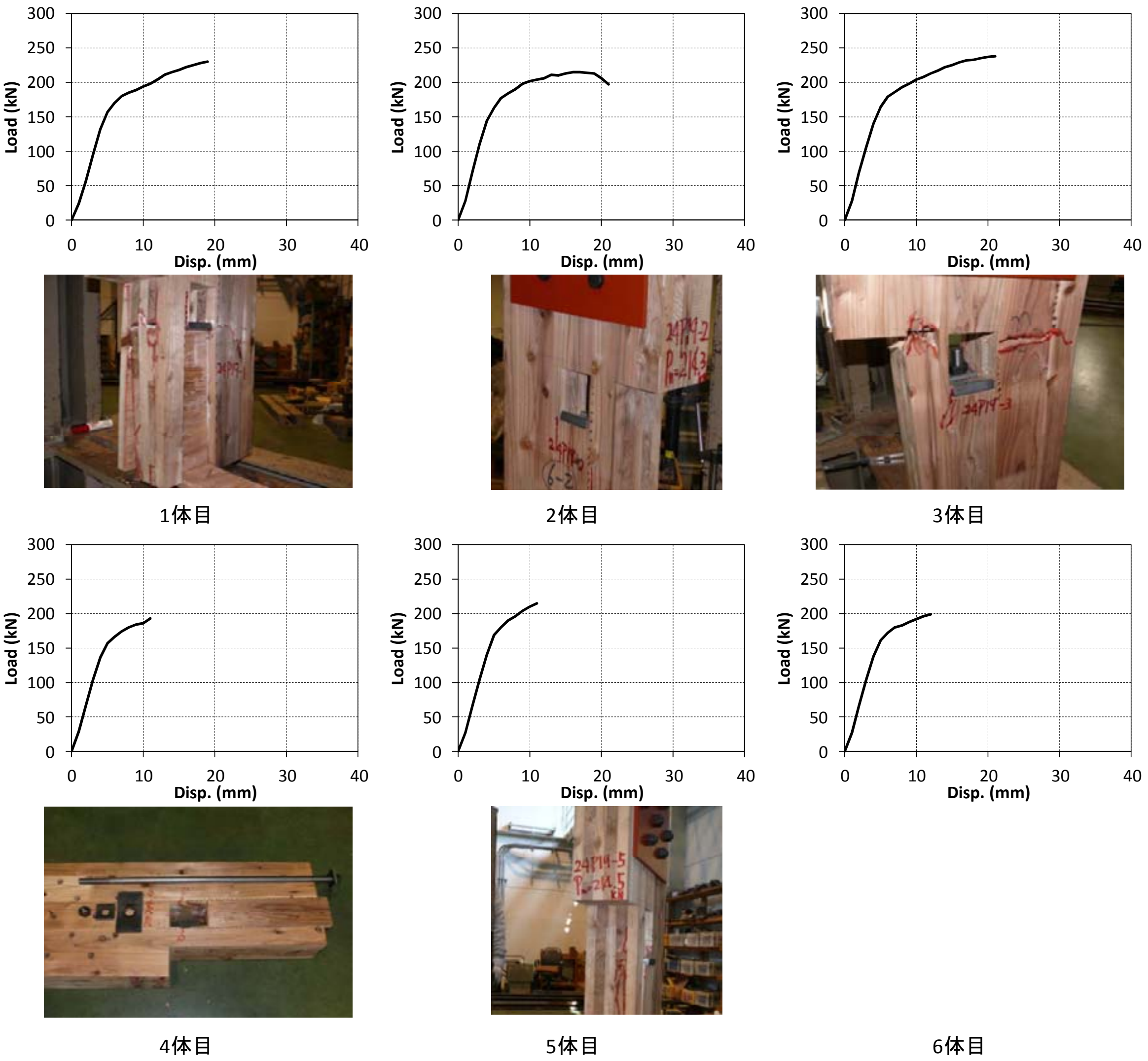
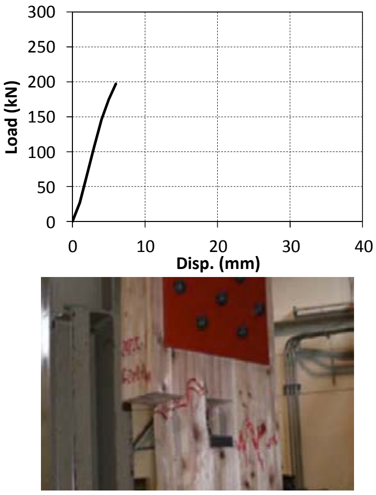


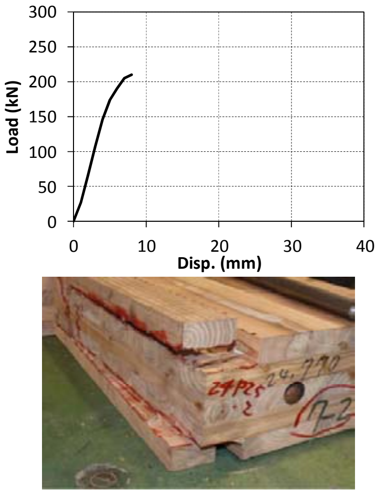
図 5.4.3　引きボルト「1-M24 繊維平行 座金 19mm」の荷重変形関係と破壊状況

(d) 1-M24 繊維平行 座金 25mm

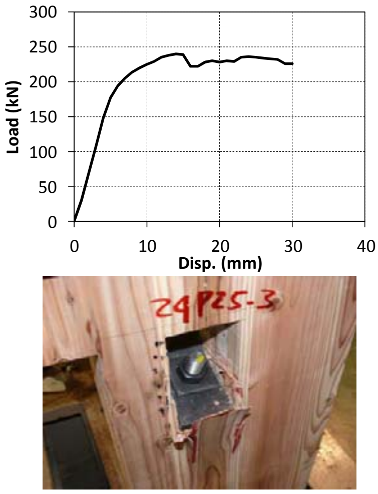
- 試験の都合で設けた欠き込み入隅に破断が生じたものは参照する必要が無い。
- それ以外に FJ 部で破断しているものもあるが、その時点で加力をしているので終局状態(耐力低下域)の性状が未確認。壁構面試験では、このような破断が生じても水平荷重の低下は認められず、層全体の水平耐力の低下は生じない。



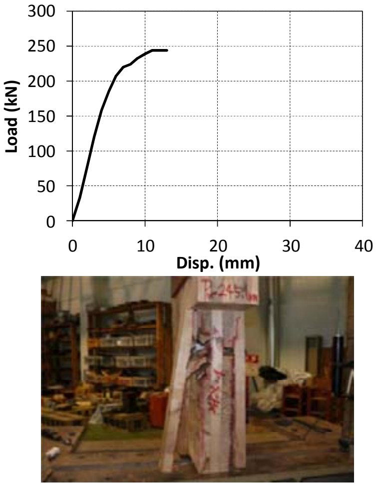
1体目



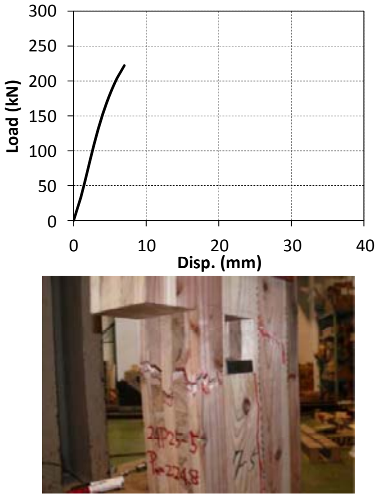
2体目



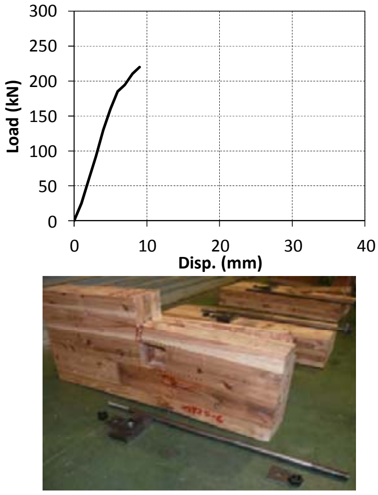
3体目



4体目



5体目



6体目

図 5.4.4 引きボルト「1-M24 繊維平行 座金 25mm」の荷重変形関係と破壊状況

5.4.1.2 設計用特性の設定

- 壁構面せん断実験および振動台実験で接合部の脆性破断が生じなかったので、最も変形能力の高い結果を採用する。

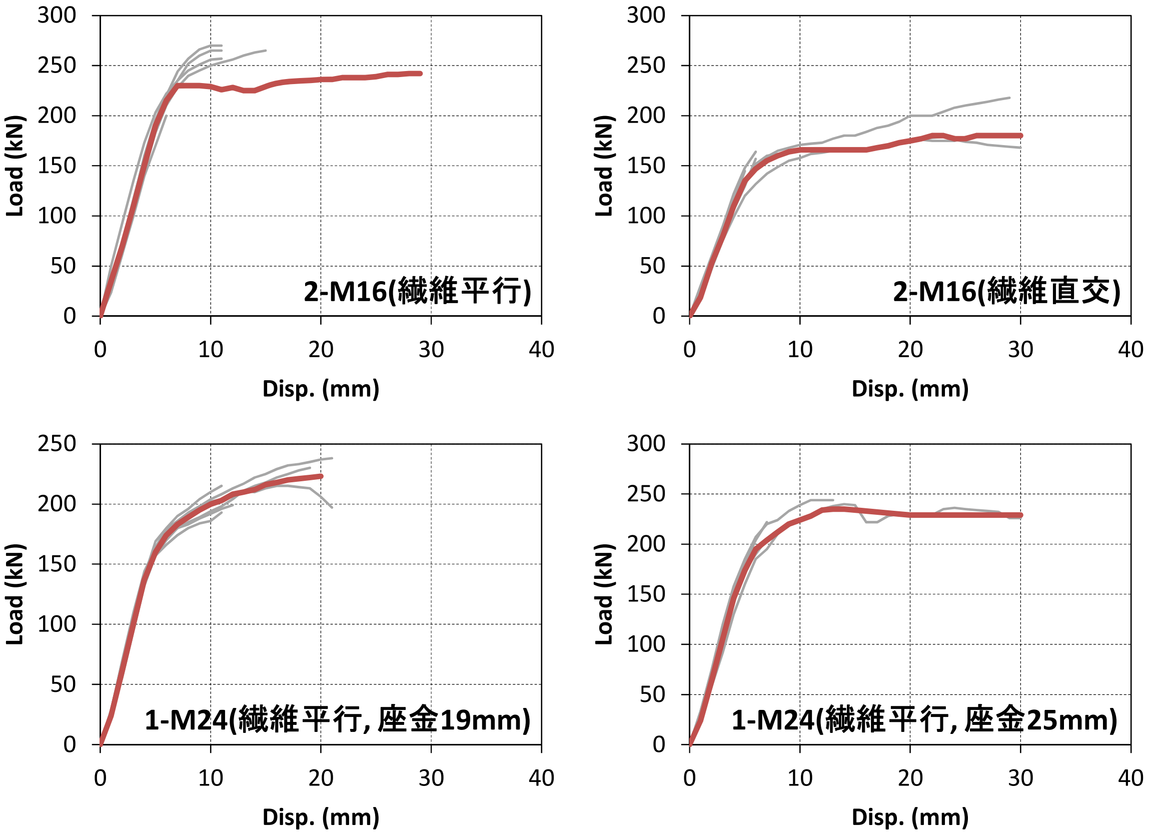
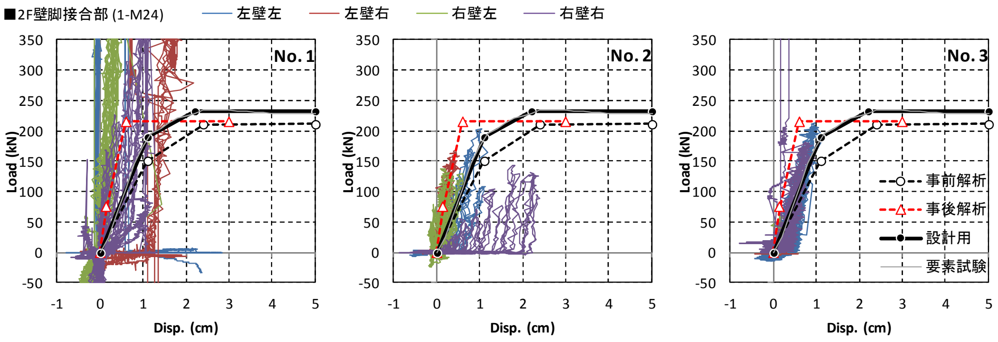
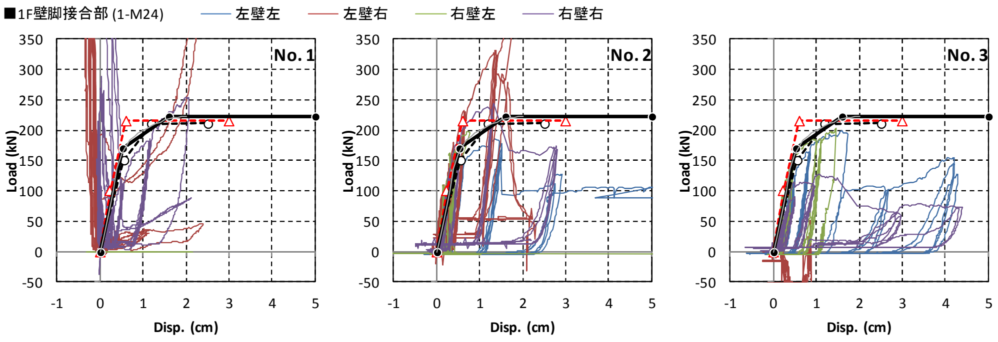


図 5.4.5　引きボルト接合部の設計用特性



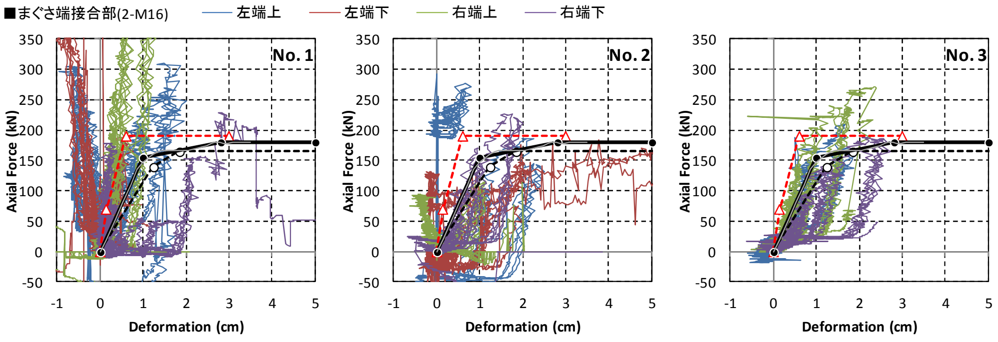
事前解析		事後解析	
変形	荷重	変形	荷重
0	0	0	0
1.1	150	0.15	75
2.4	210	0.6	215
5	211	3	215

設計用	
変形	荷重
0	0
1.1	190
2.2	233
5	233



事前解析		事後解析	
変形	荷重	変形	荷重
0	0	0	0
0.55	150	0.23	100
1.2	210	0.6	215
2.5	211	3	215

設計用	
変形	荷重
0	0
0.53	170
1.6	222
5	222



事前解析		事後解析	
変形	荷重	変形	荷重
0	0	0	0
1.24	140	0.15	70
1.84	165	0.6	190
7	166	3	190

設計用	
変形	荷重
0	0
1	155
2.8	180
5	180

図 5.4.6　引きボルト接合部の設計用特性と振動台実験解析用特性の比較

5.4.2 鋼板ビス打ち接合部せん断性能［CLT 接合部試験報告書, 3.5 せん断接合部の本試験］

● 試験結果のばらつきが少ないので、それらの平均的特性を設定する。

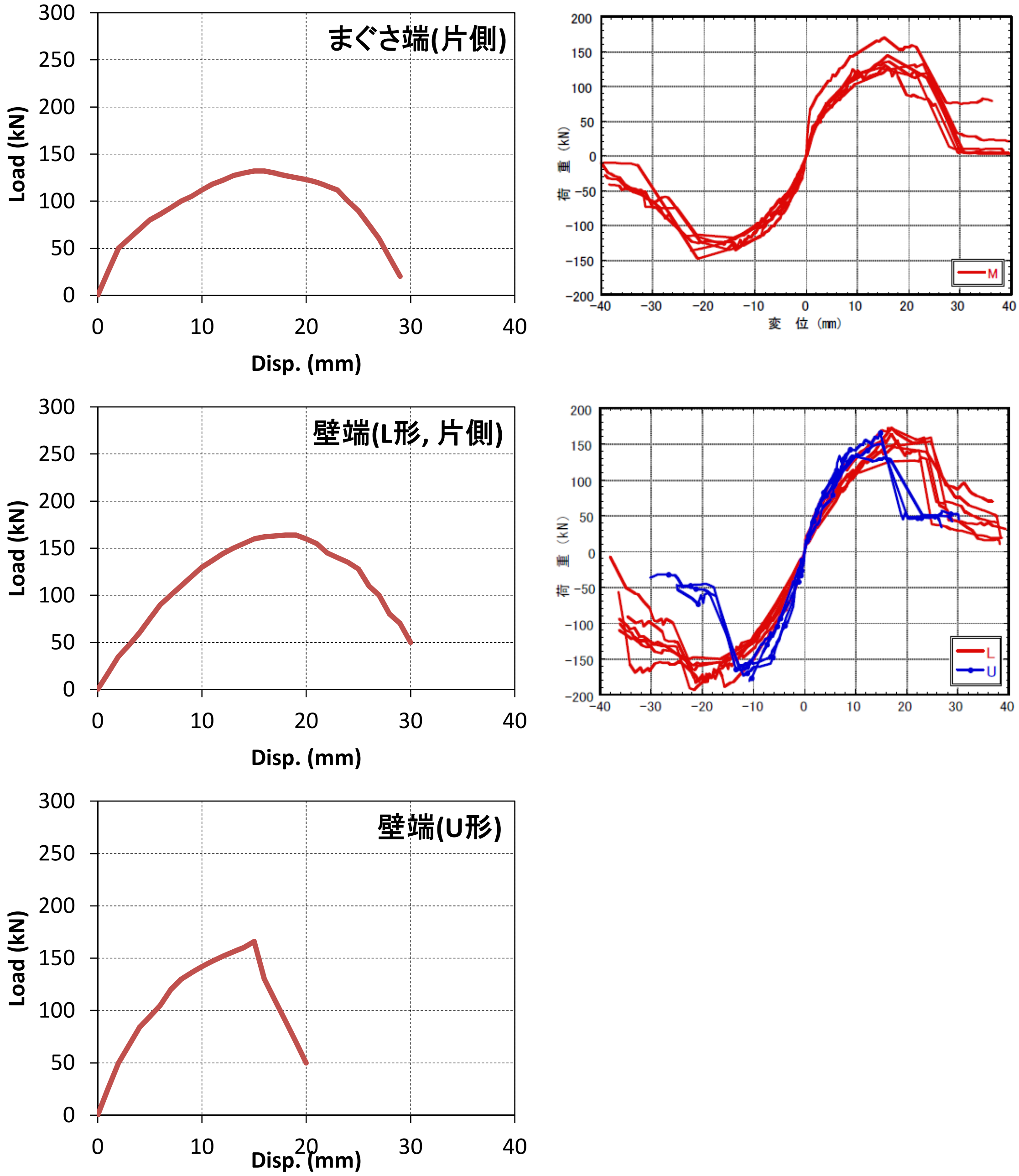
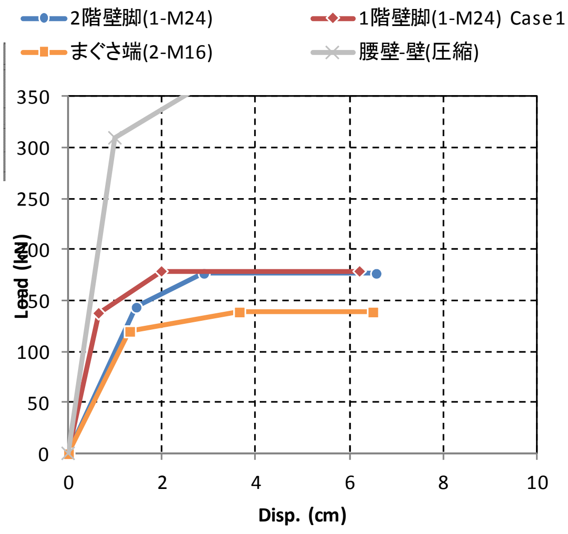


図 5.4.7 鋼板ビス打ち接合部の設計用せん断特性

5.4.3 壁構面せん断実験に対応する荷重増分解析

- 5.4.1, 5.4.2 で仮定した特性を用いても実験結果に良く合う。
- ただし、「壁-基礎(圧縮側)」と「腰壁-壁」接合部のせん断耐力は根拠無く大きくしている。この点については今後検討を要する。



応力中心間距離と材せいの比率による調整率

2階壁脚接合部 (1000-(205+105)/2)/1000*0.9=0.761

1階壁脚接合部 (1000-105)/1000*0.9=0.806

まぐさ端接合部 (800-(105+125)/2)/800*0.9=0.771

耐力に調整率を乗じ、変形を調整率で除す。

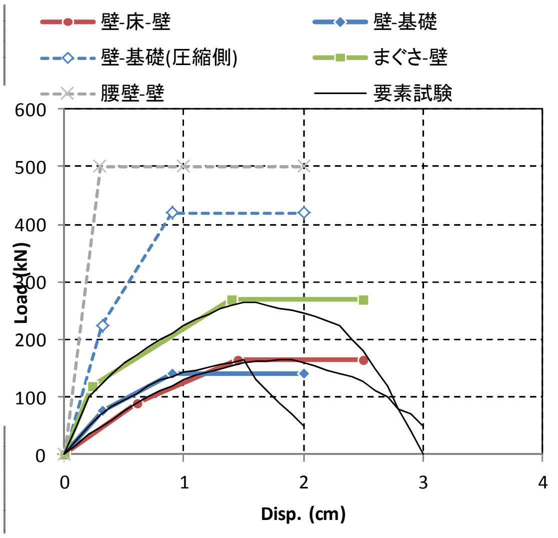
腰壁-壁接合部

引張 K=0.1kN/cm

圧縮 まぐさ-壁引張耐力の2倍

壁-壁		壁-基礎		まぐさ-壁		腰壁-壁接合	
引張		引張		引張		圧縮	
変形	荷重	変形	荷重	変形	荷重	変形	荷重
0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.45	144	0.66	137	1.30	119	1.00	310
2.89	177	1.99	179	3.63	139	2.80	360
6.57	177	6.21	179	6.49	139	5.00	360
Kc=750kN/cm		Kc=1500kN/cm		Kc=500kN/cm		Kt=0.1kN/cm	

図 5.4.8 引きボルト接合部の設計用引張特性

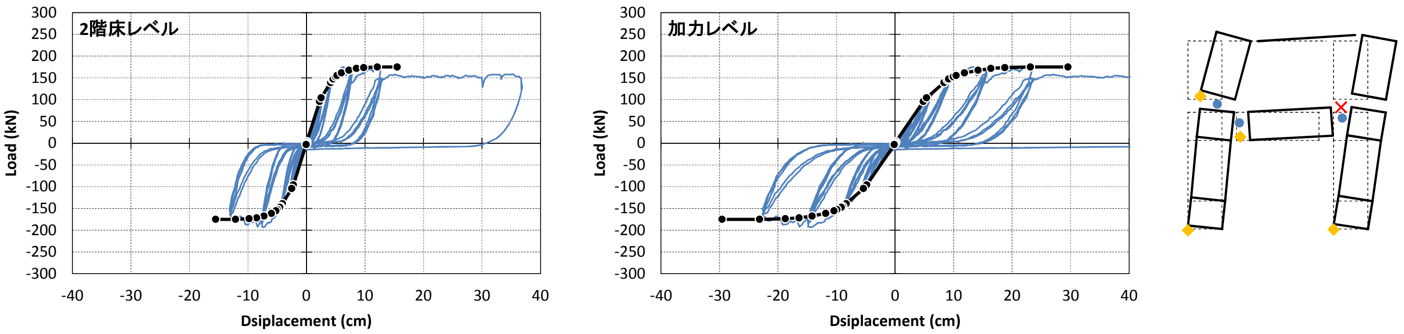


静的解析用

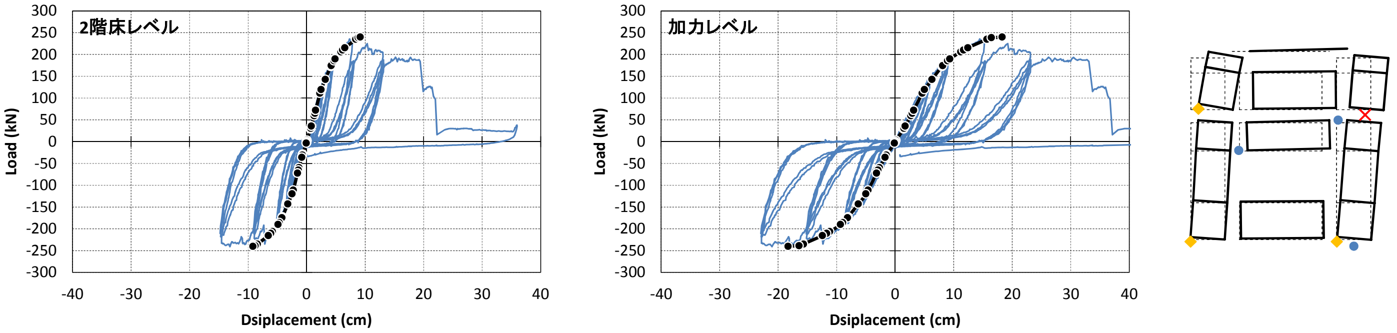
壁-床-壁		壁-基礎				まぐさ-壁		腰壁-壁	
		引張側		圧縮側					
変形	荷重	変形	荷重	変形	荷重	変形	荷重	変形	荷重
0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.60	90	0.32	75	0.32	225	0.23	120	0.30	500
1.45	165	0.90	140	0.90	420	1.40	270	1.00	500
2.50	165	2.00	140	2.00	420	2.50	270	2.00	500

・壁-基礎(圧縮側)の荷重は引張側の3倍とした

図 5.4.9 鋼板ビス打ち接合部の設計用せん断特性



腰壁無し (No. 2)



腰壁有り (No.3)

図 5.4.10　壁構面せん断実験結果と荷重増分解析結果の比較