

第4章 実験

4.1 強度実験

(実験担当者) 岡山理科大学工学部建築学科 小林研究室 小林正実

(1). はじめに

CLTモデル建築の構造検討において、下記の5つの項目について、構造実験により解明する必要があるため、次項以降で示す実験方法により実験を実施し、結果を報告する。

① 台形状の壁パネルの面内せん断に対する性状 (実験1)

勾配屋根の支持方法として、台形状の壁パネルで支持する構造形式が候補としてあがっており、矩形でない壁パネルが使用される可能性がある。図1.1に示すように、文献1)第2章2.2第5壁等では、矩形以外は、特別な研究によらなければ、壁パネルとみなすことができないため、構造実験により、面内せん断に対する性状を明らかにする。

台形壁パネルとそれに外接する矩形壁パネルの水平加力試験を実施し、両者の剛性・耐力の対応を調べる。文献3)において、軸組工法における台形耐力壁の水平加力試験が実施されており、これと同様の実験を行う。

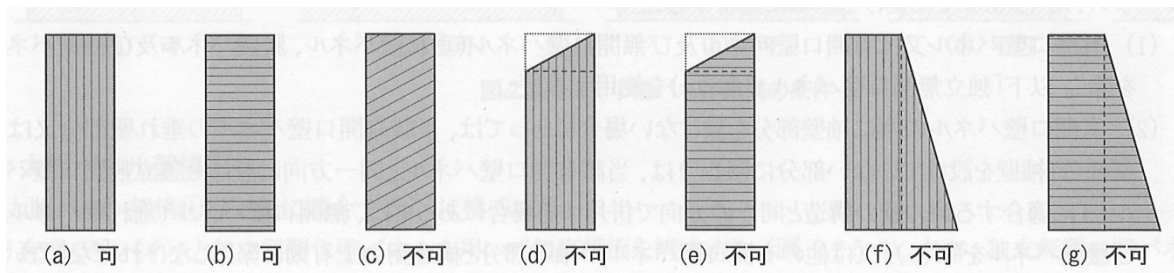


図1.1 壁パネルの形状と外層ラミナ方向の関係 (文献1) 第2章 図2.2.5-3)

② 耐力壁脚の接合部の面内・面外曲げに対する特性 (実験2)

耐力壁が斜めに配置されているため、耐力壁脚の接合部に斜め方向の繰返し水平加力を作用させ、面内・面外複合曲げに対する履歴特性を解明する。

③ 梁と耐力壁の接合部の特性 (実験3)

梁と耐力壁の接合部は、部材どうしが点で接する、通常、使用されない形式の接合部となっており、しかも、 90° 以外の種々の角度で接合される。種々の角度の接合部について、繰返し加力試験を実施し、履歴特性を解明する。

④ 耐力壁間の接合部の面内せん断に対する性状 (実験4)

耐力壁と耐力壁が 90° 以外の種々の角度で接合されており、通常、使用されない形式の接合部であり、種々の角度の耐力壁間の接合部について、面内せん断試験を実施し、性状を把握する。

⑤ 耐力壁間の接合部の引張圧縮に対する性状 (実験5)

耐力壁と耐力壁が 90° 以外の種々の角度で接合されており、通常、使用されない形式の接合部であり、種々の角度の耐力壁間の接合部について、繰返し引張圧縮試験を実施し、性状を把握する。

(2). 試験体、実験方法

(2). 1 実験 1

図 2.1.1 に示すように、試験体は、Mx60A 5-5、厚 150 の CLT を使用する。台形状の壁パネルの大きさは、幅 1m、高さ 3.0m で、3 寸勾配とする（したがって、台形の短辺 2.7m、長辺 3.0m）。台形、外接矩形とも、各 3 体、計 6 体の試験をする。パネル脚部及び中央下部に U 型引張金物（X マーク金物 TB-150）及び U 型せん断金物（X マーク金物 SB-150）を、ビス STSC65 で留めつける。金物の基礎治具への固定は、高力ボルトを使用し、TB-150 は M20、SB-150 は M16 で固定した。また、台形壁については、斜めの辺に沿って加力できるように、頂部に、図 2.1.3 に示す加力治具を、ビス STSC65 で留めつける。

加力方法を図 2.1.2 に示す。岡山理科大学構造実験室の複動式油圧ジャッキ（容量 100kN、ストローク 500mm）により、繰返し水平加力試験を行う。試験方法は、文献 2) の耐力壁試験方法にならひ、同一ステップで 3 回の繰返しとし、見かけのせん断変形角制御で 1/450、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50、1/30rad の正負交番加力を行い、続いて、引き側に加力し、1/15rad に達するか、または、最大耐力の 80% に降下するまで加力する。

計測した変位は、加力梁付近および壁脚の X 方向変位、壁脚部両端の Y 方向変位である。

実験結果から、両者について、初期剛性、降伏耐力、終局耐力を算出し、外接矩形壁パネルにより、安全側に置換できることを検証する。

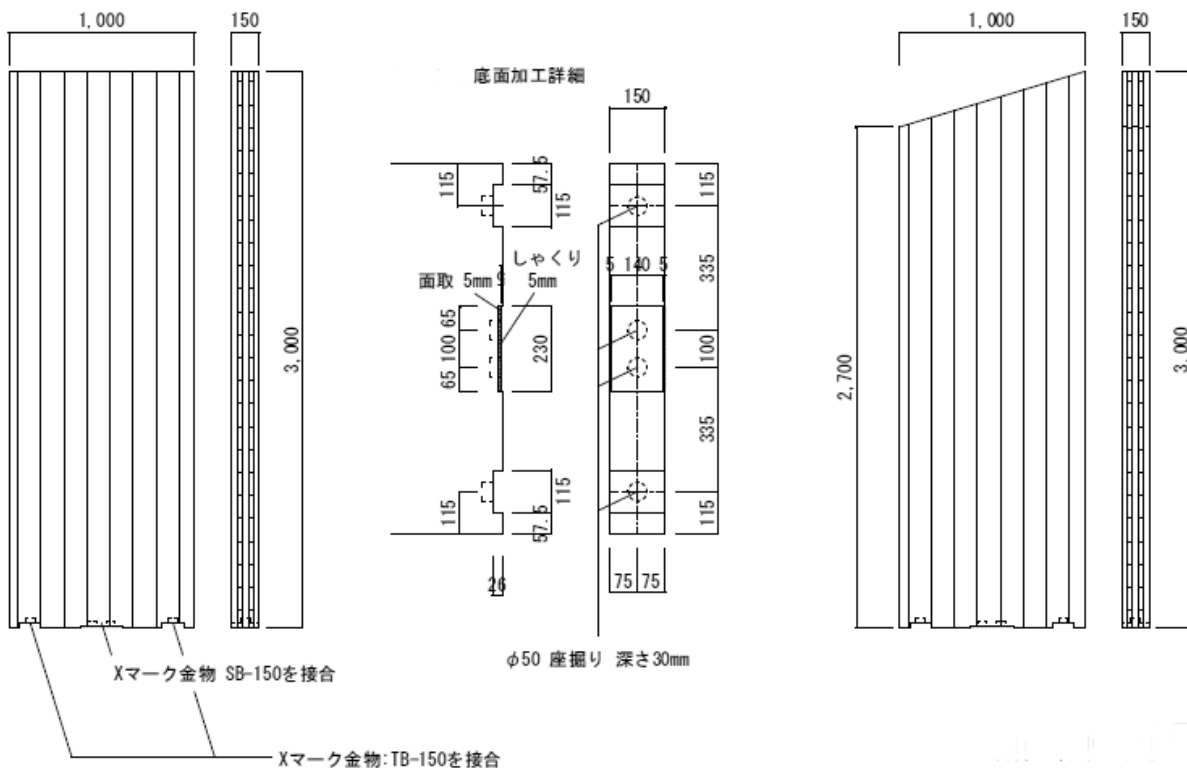


図 2.1.1 実験 1 の試験体の詳細図

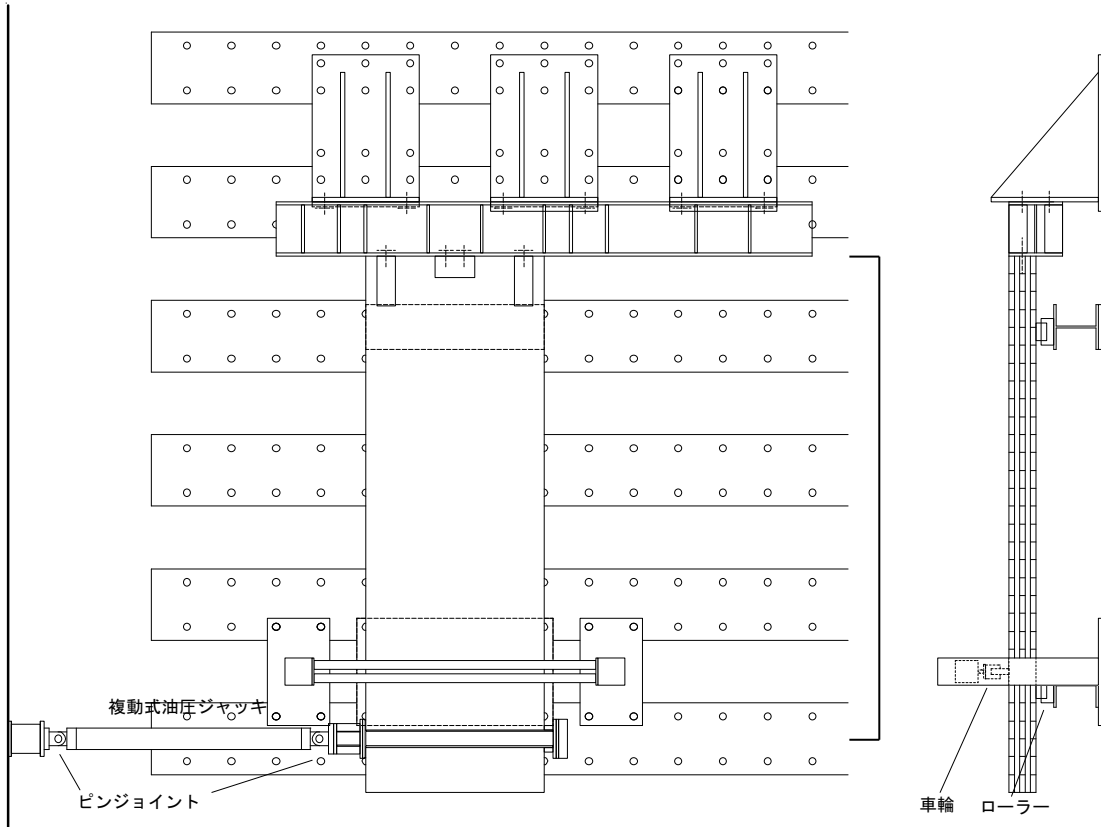


図 2. 1. 2 実験 1 の加力方法
ボルト穴8 (反対側の板にも同じ位置に穴あけ)

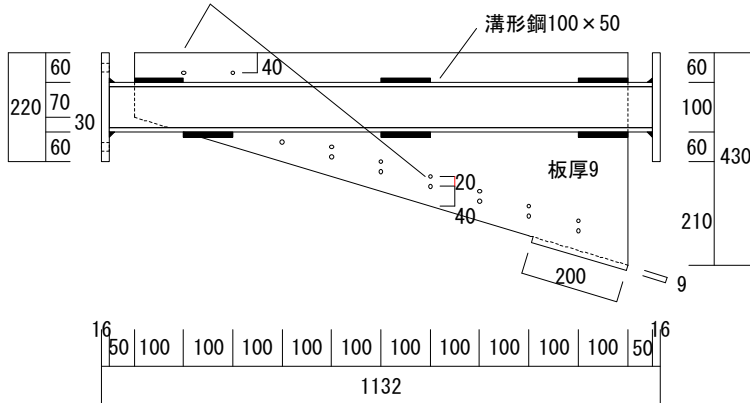


図 2. 1. 3 台形壁頂部の加力治具



写真 2. 1. 1 実験 1 (矩形壁) の装置全景



写真 2. 1. 2 実験 1 (台形壁) の加力治具

(2). 2 実験2

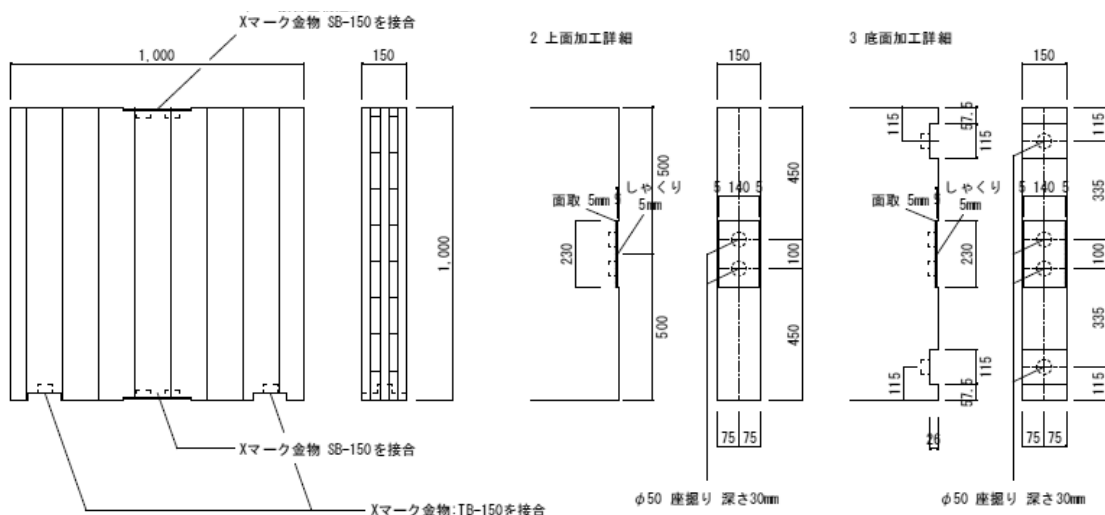
図 2.2.2 に示すように、耐力壁の下部の幅 1m、高さ 1m の部分を、加力方向に対して 45 度の角度で架台に配置し、実験 1 と同一の金物で架台に固定する。耐力壁には、Mx60A 5-5、厚 150 の CLT を使用する。3 体の試験をする。

加力方法を図 2.2.1 に示す。岡山理科大学構造実験室の複動式油圧ジャッキ（容量 100kN、ストローク 500mm）により、繰返し水平加力試験を行う。試験方法は、実験 1 と同様、同一ステップで 3 回の繰り返しとし、見かけのせん断変形角制御で 1/450、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50、1/30rad の正負交番加力を行い、続いて、引き側に加力し、1/15rad に達するか、または、最大耐力の 80% に降下するまで加力する。

計測した変位は、加力梁付近および壁脚の加力方向変位、壁脚部両端の上下方向変位、および、壁頂および壁脚の面内方向水平変位である。

実験結果から、初期剛性、降伏耐力、終局耐力を算出する。実験 1 の矩形壁パネルの実験結果について加力位置の比を (1m/2.7m 倍) 乗じて、これを本実験における加力方向に平行に配置した場合とみなし、比較する。

なお、文献 4) において、枠組壁工法における斜め耐力壁の水平加力試験が実施されており、本実験は、下部の高さ 1m の部分についての同様の検討である。



↑ 図 2.2.1 実験2の試験体の詳細図

↓ 図 2.2.2 実験2の加力方法

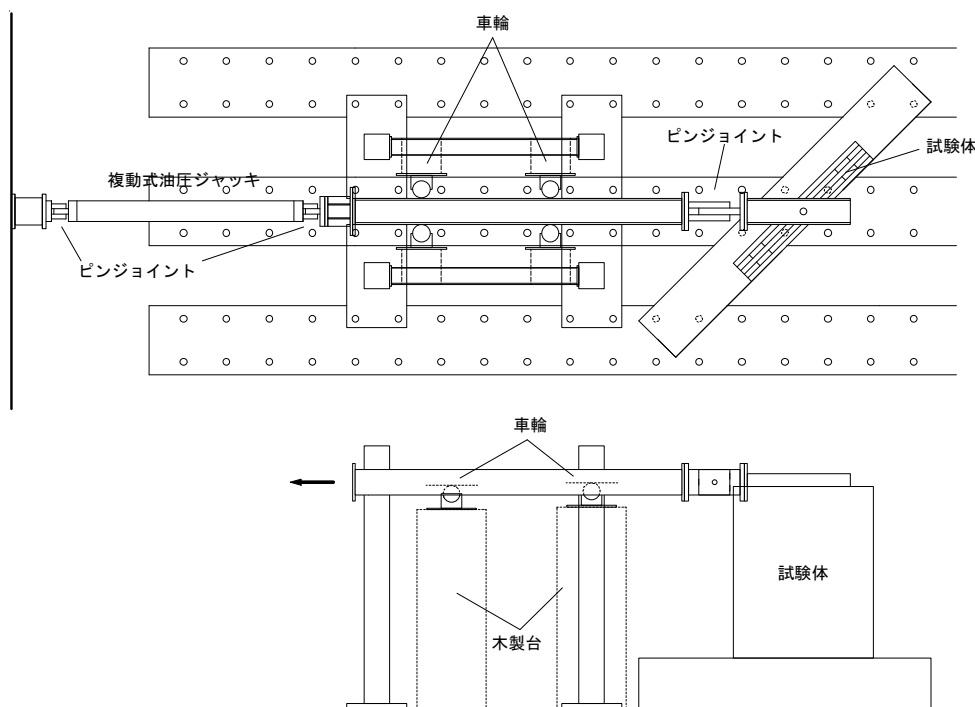




写真 2.2.1 実験 2 の装置全景



写真 2.2.2 実験 2 の装置全景

(2). 3 実験 3

図 2.3.3 に示すように、壁を種々の角度で反力フレームに固定し(図 2.3.3 は 45° の場合) 配置され、図 2.3.2 のような金物を使用した接合部を対象とする。梁は接合せず、金物を、直接、水平加力する。

耐力壁には、Mx60A 5-5、厚 150 の CLT を使用する。角度について、 45° 、 90° の 2 つの角度に対して、試験体を製作し、角度ごとに、各 3 体、計 6 体の試験をする。金物は径 18 のドリフトピンとビス STSC65 で留めつける。

加力方法を図 2.3.3、図 2.3.4 に示す。岡山理科大学構造実験室の複動式油圧ジャッキ (容量 100kN、ストローク 500mm) により、繰り返し水平加力試験を行う。試験方法は、文献 1) の接合部試験方法 (参考 5-10) に従い、1 体目の結果から得た降伏変位の 1/2, 1, 2, 4, 6, 8, 12, 16 倍の順で 1 回ずつの繰り返し加力を行う。なお、1 体目の試験方法は、30mm の 1/10, 1/5, 3/10, 2/5, 1/2, 3/5, 7/10, 1 の順で 1 回ずつの繰り返し加力を行う。最大耐力の 80% に降下するまで加力する。

計測した変位は、金物ガセットプレート頂部、壁中央の加力方向変位である。
実験結果から、初期剛性、降伏耐力、終局耐力を算出し、角度ごとに比較する。

↓ 図 2.3.1 実験 3 の試験体の詳細図 (45°)

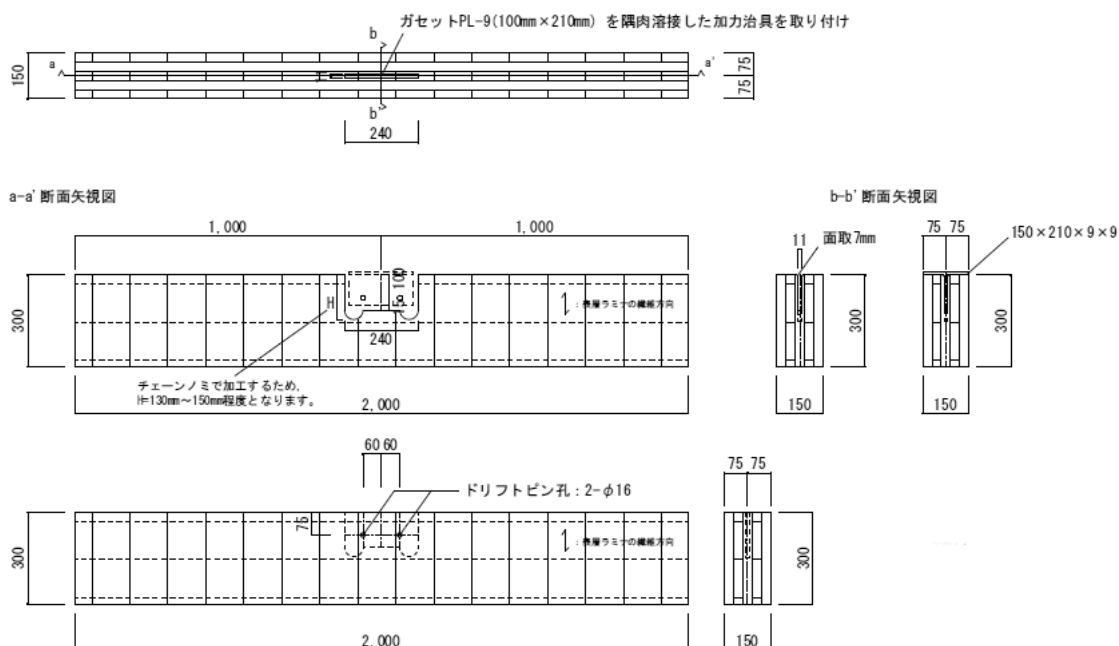
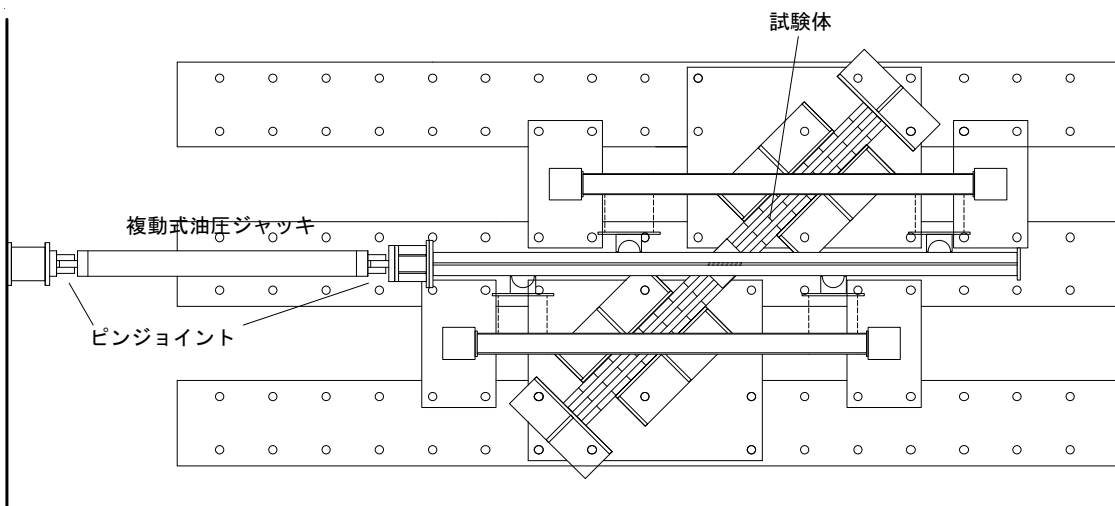
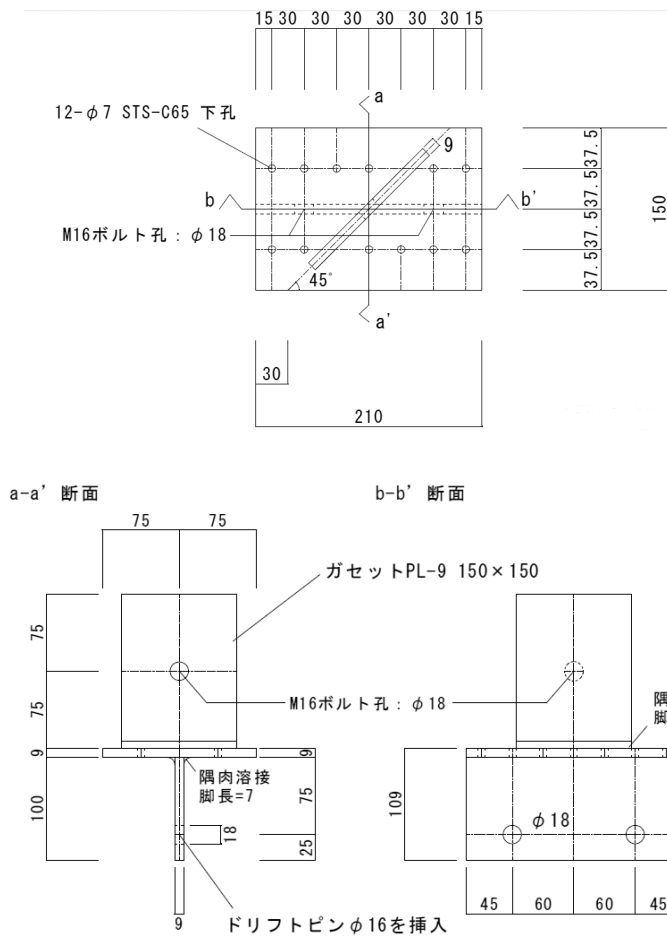


図 2.3.2 実験 3 の金物の詳細図 (45°)



↑ 図 2.3.3 実験 3 の加力方法 (45°) ↓ 図 2.3.4 実験 3 の加力方法 (90°)

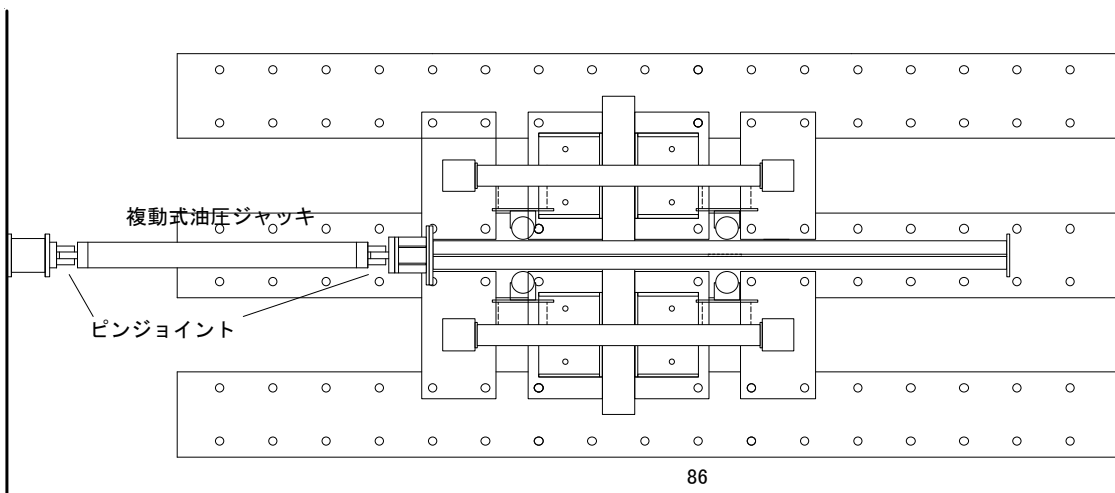




写真 2.3.1 実験 3 の装置全景
(接合角度 45°)



写真 2.3.2 実験 3 の装置全景
(接合角度 90°)

(2). 4 実験 4

耐力壁と耐力壁が 45° の角度で接合された部分を対象とする。直角に接合された部分も試験する。耐力壁には、Mx60A 5-5、厚 150 の CLT を使用する。角度ごとに、各 3 体、計 6 体の試験をする。

接合具は、Rothoblass 社製ビスを使用する。予備試験として、以下の 5 種類のビスで、45° の試験体で、1 体ずつ実験し、結果の良好なもので、2 体追加試験と 90° の実験を実施する。ここで、VGZ は全ネジであり、WT はせん断面にネジを切っていないものである。

- 試験体対象ビス VGZ φ7 L=220mm, 300mm
- VGZ φ9 L=200mm, 280mm
- WT φ8.2 L=220mm

岡山理科大学構造実験室のアムスラー試験機により、図 2.4.3 に示すように、圧縮型せん断試験を実施する。実験結果から、初期剛性、降伏耐力、終局耐力を算定する。

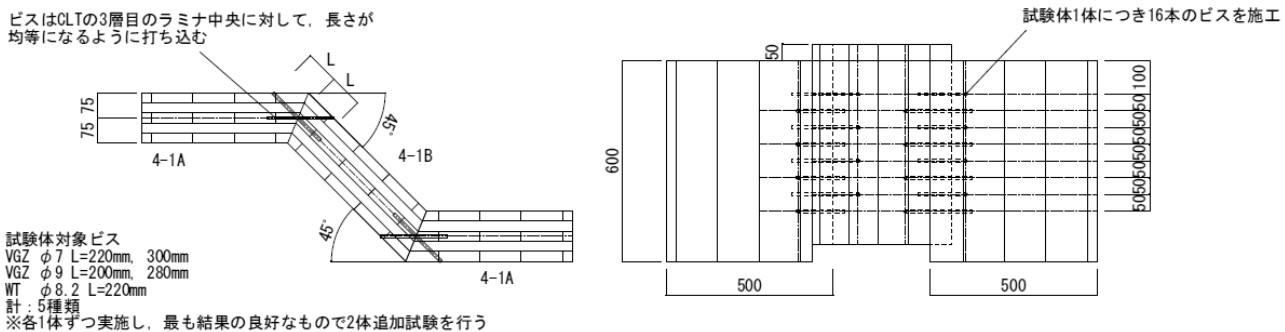


図 2.4.1 実験 4 の試験体の詳細図 (45°)

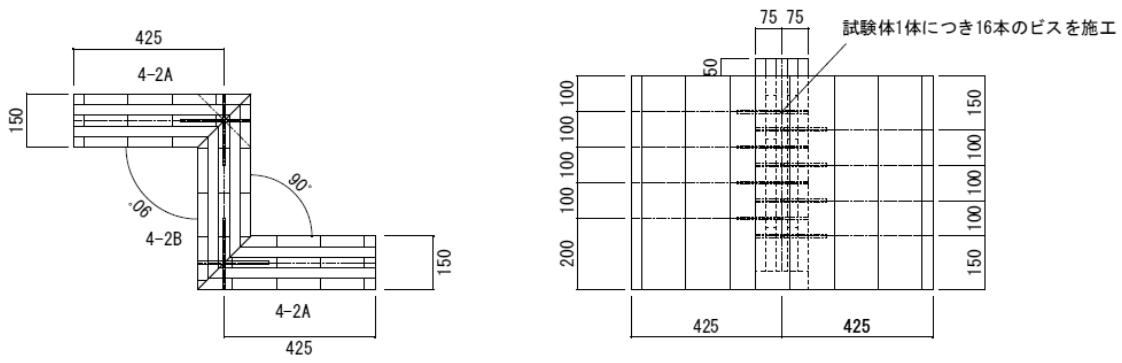


図 2.4.2 実験 4 の試験体の詳細図 (90°)

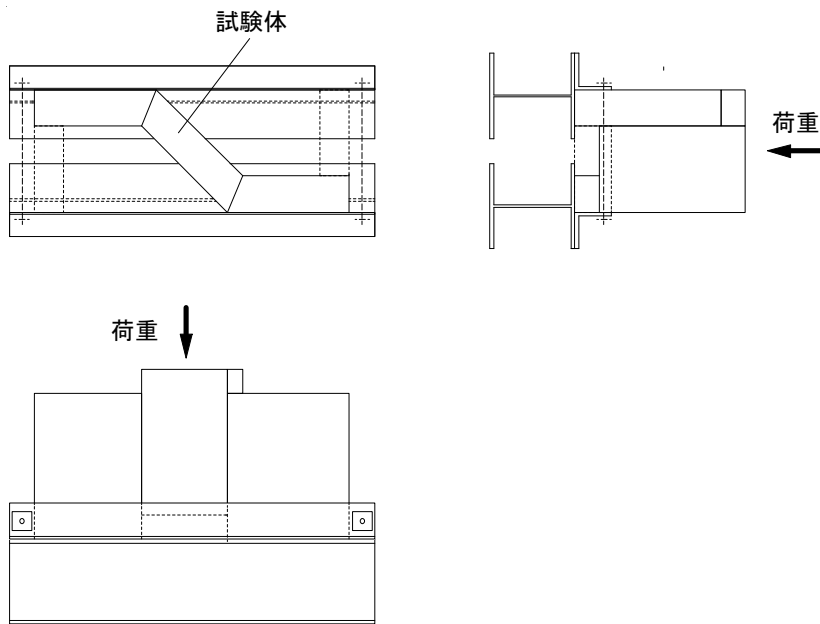


図 2.4.3 実験 4 の加力方法 (45°)

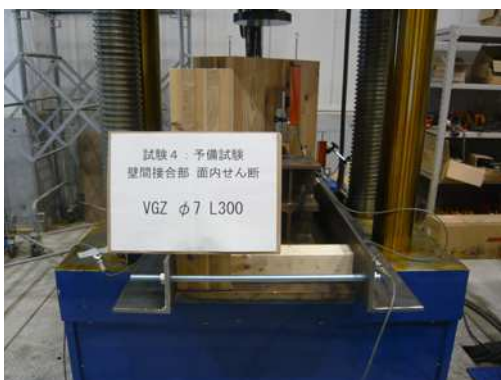


写真 2.4.1 実験 4 の装置全景 (接合角度 45°)



写真 2.4.2 実験 4 の装置全景 (接合角度 45°)



写真 2.4.3 実験 4 の装置全景
(接合角度 90°)

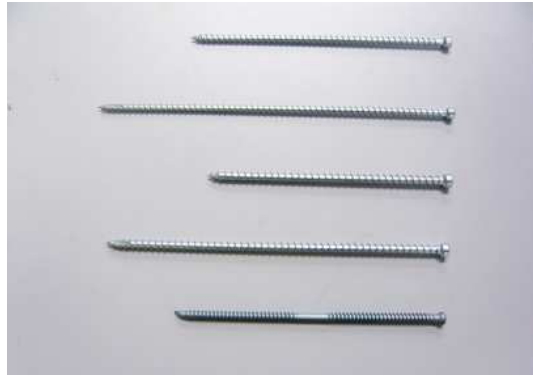


写真 2.4.4 実験 4 の検討対象の 5 種類のビス

(2). 5 実験 5

耐力壁と耐力壁が 45° の角度で接合された部分を対象とする。直角に接合された部分も試験する。耐力壁には、Mx60A 5-5、厚 150 の CLT を使用する。角度ごとに、各 3 体、計 6 体の試験をする。

実験 4 の予備試験で選定した、Rothoblass 社製ビスを使用し、図 2.5.1 に示すビス配置で打ち込む。

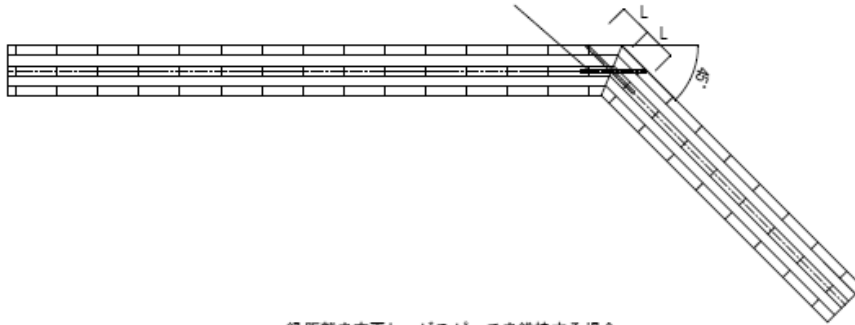
加力方法を図 2.5.2、図 2.5.3 に示す。岡山理科大学構造実験室の複動式油圧ジャッキ（容量 100kN、ストローク 500mm）により、繰返し引張圧縮試験を行う。試験方法は、引張側については、文献 1) の接合部試験方法（参考 5-10）に従い、1 体目の結果から得た降伏変位の 1/2, 1, 2, 4, 6, 8, 12, 16 倍の順で 1 回ずつの加力を行い、圧縮側は、引張側と同じ大きさの圧縮力を載荷する。なお、1 体目の試験方法は、30mm の 1/10, 1/5, 3/10, 2/5, 1/2, 3/5, 7/10, 1 の順で 1 回ずつの繰返し加力を行う。制御に使用する変位は、接合部におけるジャッキ側の加力方向変位とする。最大耐力の 80% に降下するまで加力する。

計測した変位は、接合部における加力方向相対変位である。

実験結果から、初期剛性、降伏耐力、終局耐力を算出し、角度ごとに比較する。

ビスは CLT の 3 層目のラミナ中央に対して、長さが均等になるように打ち込む

ビスは CLT の 3 層目のラミナ中央に対して、長さが均等になるように打ち込む



試験体対象ビス
VGZ φ7 L=220mm

縁距離を変更し、ビスピッチを維持する場合、
ビスは両側3本ずつの施工となる

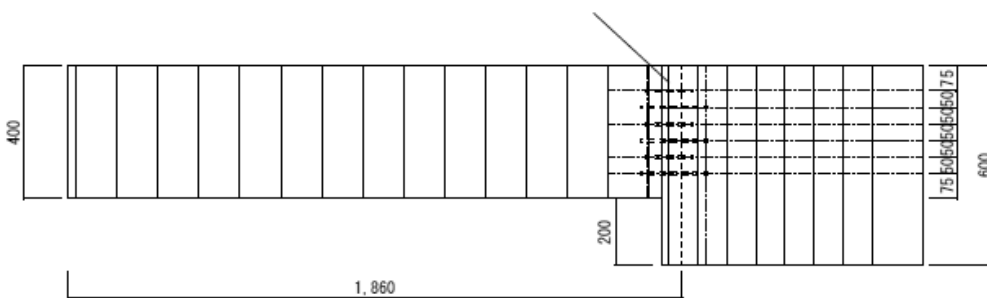


図 2.5.1 実験 5 の試験体の詳細図 (45°)

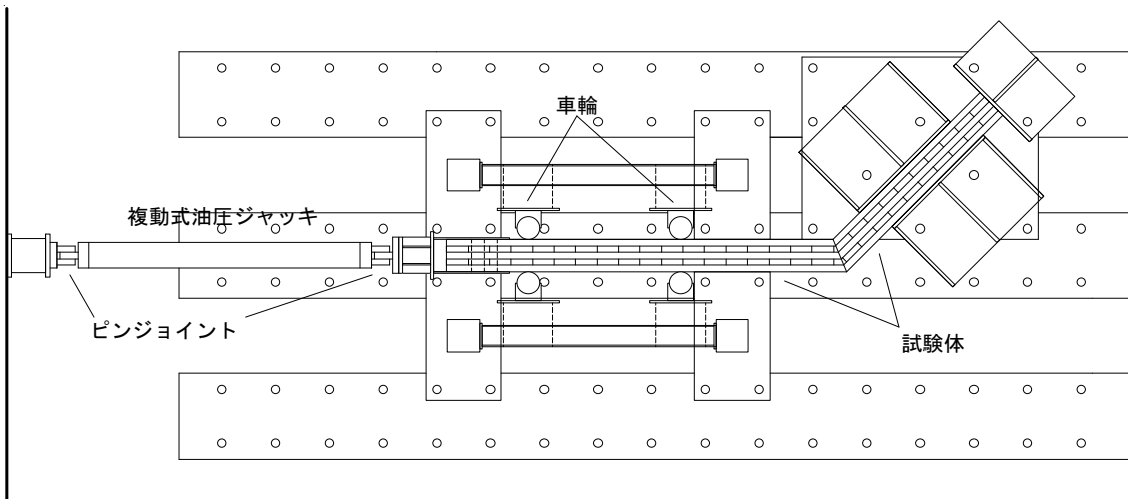


図 2.5.2 実験 5 の加力方法 (45°)

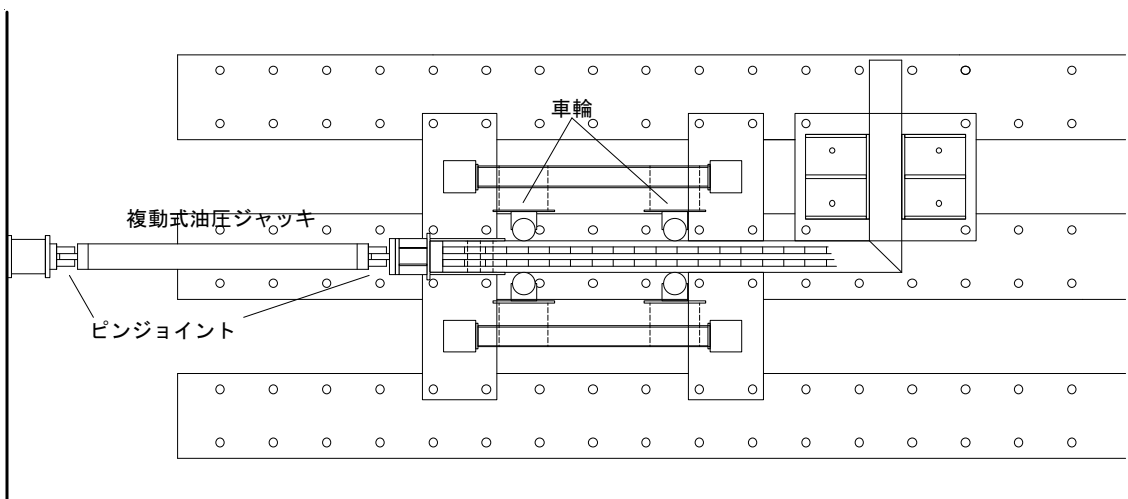


図 2.5.3 実験 5 の加力方法 (90°)



写真 2.5.1 実験 5 の装置全景
(接合角度 45°)

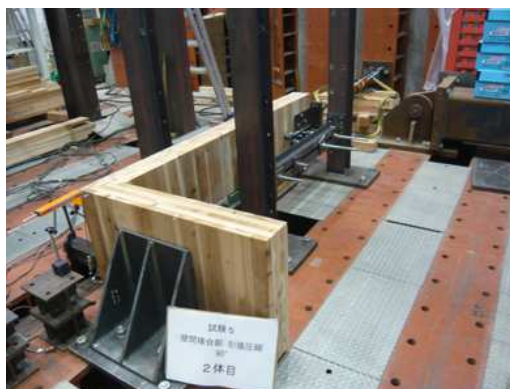


写真 2.5.2 実験 5 の装置全景
(接合角度 90°)

(3). 実験結果

(3). 1 実験 1

図 3.1.1、図 3.1.2 に、荷重－見かけのせん断変形角関係を、矩形パネルと台形パネルのそれぞれ 1 体分について示す。破壊状況は、写真 3.1.1、3.1.2 に示すように、1/15rad までの引き切りの加力の際に、引張金物が大きく変形し、ビスの抜けにより終局状態に至っている。

これらの荷重変形関係の引き切りの加力を行った側(正側)の包絡線から、図 3.1.3、図 3.1.4 に示すように、文献 1) の評価方法に従って、初期剛性、および、各種耐力を求めた。

矩形パネルについて、3 体分の結果から、各特性値の 50% 下限値を求めた結果を、表 3.1.1 に示す。台形パネル 1 体分についての各特性値を表 3.1.2 に示す。

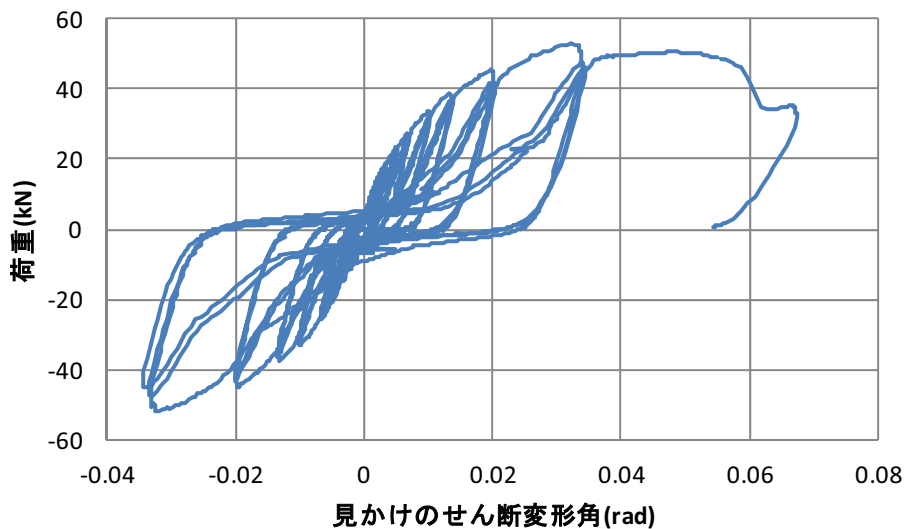


図 3.1.1 実験 1：荷重－見かけのせん断変形角関係（矩形パネル 1 体目）

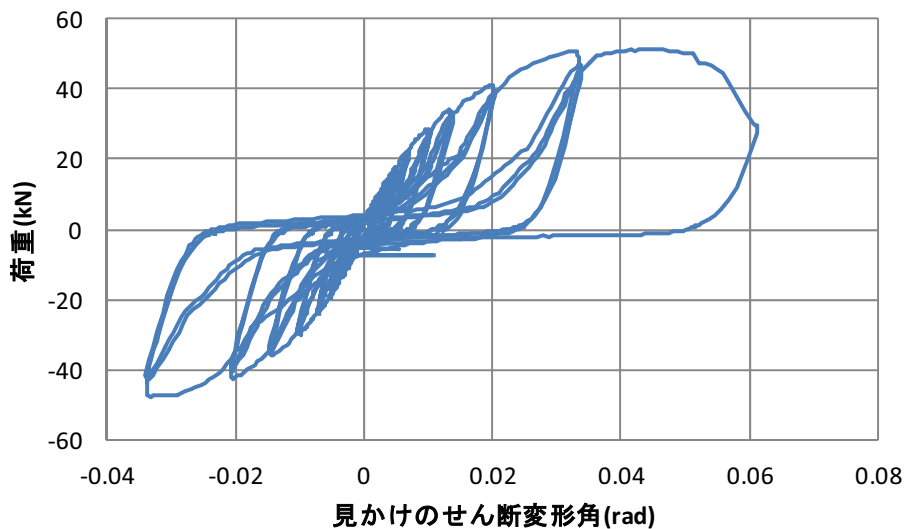


図 3.1.2 実験 1：荷重－見かけのせん断変形角関係（台形パネル）

また、表 3.1.2 では、矩形パネル 3 体分の平均値を、加力点高さが外接矩形に対応するよう修正した値 (2.7m/3m 倍した値) と、台形パネルの結果を、加力点高さが台形パネルの平均高さ (2.85m) に対応するよう修正した値 (2.7m/2.85m 倍した値) を、それぞれ計算し、比較した。この比較からは、外接矩形で安全側に置換できるとは言えず、外接矩形で置換したモデルについて、短期基準耐力は、さらに 11%の低減、初期剛性は、さらに 18%の低減が必要なのことがわかる。

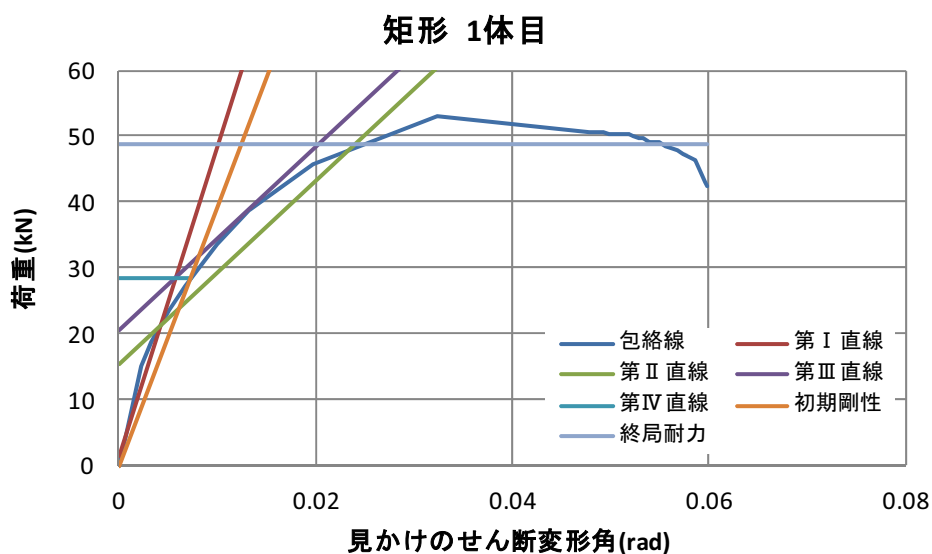


図 3.1.3 実験 1 : 荷重変形関係包絡線と各特性値の算定 (矩形パネル、1 体目)

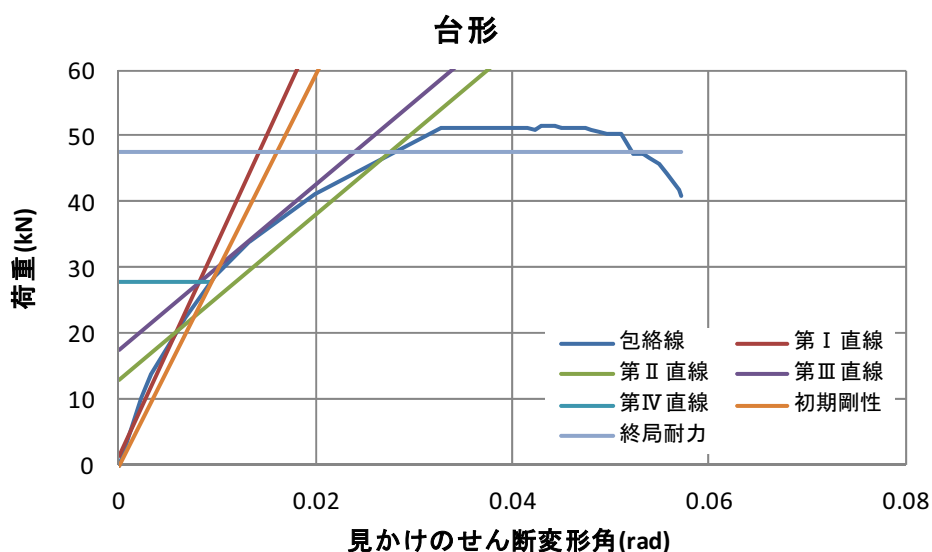


図 3.1.4 実験 1 : 荷重変形関係包絡線と各特性値の算定 (台形パネル)

表 3.1.1 実験 1 : 各特性値及び短期基準耐力 (矩形パネル)

	1体目	2体目	3体目	平均値	標準偏差	変動係数	ばらつき係数	5%下限値
特定変形時耐力 P_{120} (kN)	30.41	30.64	28.04	29.70	1.44	0.048	0.977	29.0
$2/3P_{max}$ (kN)	35.27	35.10	36.63	35.67	0.84	0.024	0.989	35.3
降伏耐力 P_y (kN)	28.54	29.97	26.54	28.35	1.72	0.061	0.971	27.5
降伏変形角 δ_y (rad)	0.0073	0.0077	0.0074	0.0075				
初期剛性 K (kN/rad)	3931.52	3913.28	3566.72	3803.83				
終局耐力 P_u (kN)	48.66	48.67	48.19	48.51				
終局変形角 δ_u (rad)	0.0599	0.0639	0.0510	0.0583				
降伏点変形角 δ_v (rad)	0.0124	0.0124	0.0135	0.0128				
塑性率 $\mu=\delta_u/\delta_v$	4.84	5.14	3.77	4.58				
構造特性係数 D_s	0.34	0.33	0.39	0.35				
$P_u \times 0.2/D_s$ (kN)	28.66	29.65	24.66	27.66	2.64	0.096	0.955	26.4
短期基準耐力 (kN)								26.4

表 3.1.2 実験 1 : 台形パネルの各特性値と矩形パネルとの比較

	台形壁(1体)	矩形壁(3体の平均値)	台形壁の耐力の修正値(加力点高さ2850)	矩形壁の耐力の修正値(加力点高さ3000)
特定変形時耐力 P_{120} (kN)	25.78	29.70	24.42	26.73
$2/3P_{max}$ (kN)	34.17	35.67	32.37	32.10
降伏耐力 P_y (kN)	27.89	28.35	26.42	25.51
降伏変形角 δ_y (rad)	0.0094	0.01		
初期剛性 K (kN/rad)	2968.10	3803.83	2811.89	3423.45
終局耐力 P_u (kN)	47.42	48.51		
終局変形角 δ_u (rad)	0.0571	0.06		
降伏点変形角 δ_v (rad)	0.0160	0.01		
塑性率 $\mu=\delta_u/\delta_v$	3.58	4.58		
構造特性係数 D_s	0.40	0.35		
$P_u \times 0.2/D_s$ (kN)	23.52	27.66	22.29	24.89
短期基準耐力 (kN) [*]	23.5	27.6	22.3	24.8



写真 3.1.1 実験 1 (矩形パネル) の脚部の変形状況



写真 3.1.2 実験 1 (矩形パネル) の引張金物の変形状況

(3). 2 実験 2

図 3.2.1 に加力方向の荷重－見かけのせん断変形角関係を、1 体分について示す。

試験体に対して、横方向の拘束をしていないため、写真 3.2.1 に示すように、面外方向に大きな変形を生じた。

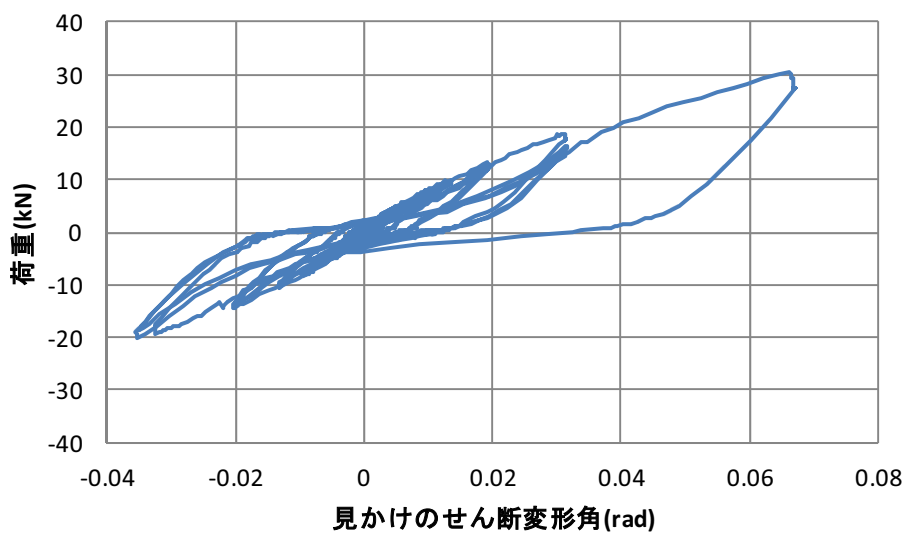


図 3.2.1 実験 2：荷重－見かけのせん断変形角関係（3 体目）



写真 3.2.1 実験 2 の変形状況

変形については、面内方向の成分も計測しており、これを用いて、面内方向の成分について、荷重－見かけのせん断変形角関係を作成したものを、図 3.2.2 に 1 体分について示す。これから引き切りの加力を行った側（正側）の包絡線を求め、これに実験 1 の矩形パネルの加力点高さ 2.7m に対応するよう荷重を修正したもの（1m/2.7m 倍する）と、実験 1 の矩形パネルの包絡線とを比較したものを図 3.2.3 に示す。

実験 2 の方が、相当に耐力が低くなっているが、これは、実験 2 では横拘束を行っておらず、面外方向に大きな変形を生じていることが原因とも考えられる。通常は、床や壁により、このような面外変位は拘束されているため、直ちに、この結果に基づいた大きな低減が必要とは言い切れず、横拘束を行った実験により検討すべきと思われる。

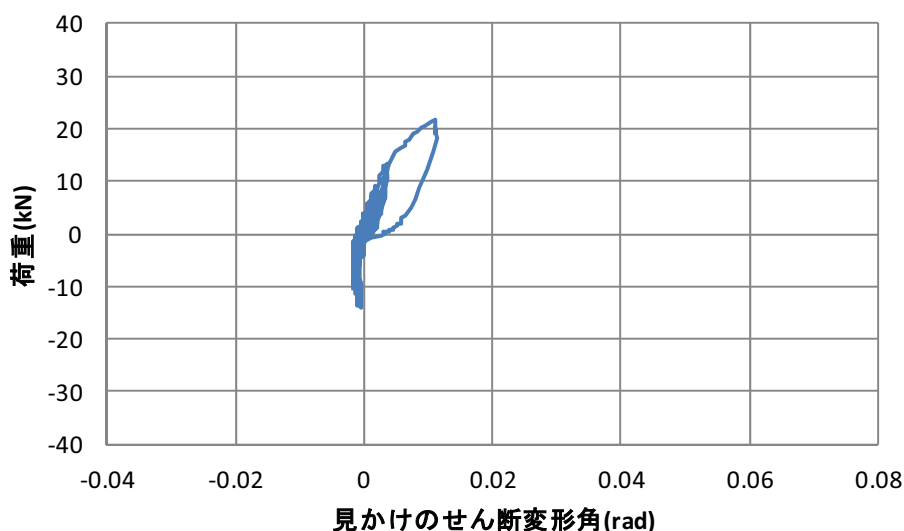


図 3.2.2 実験 2：面内方向の荷重－見かけのせん断変形角関係（3 体目）

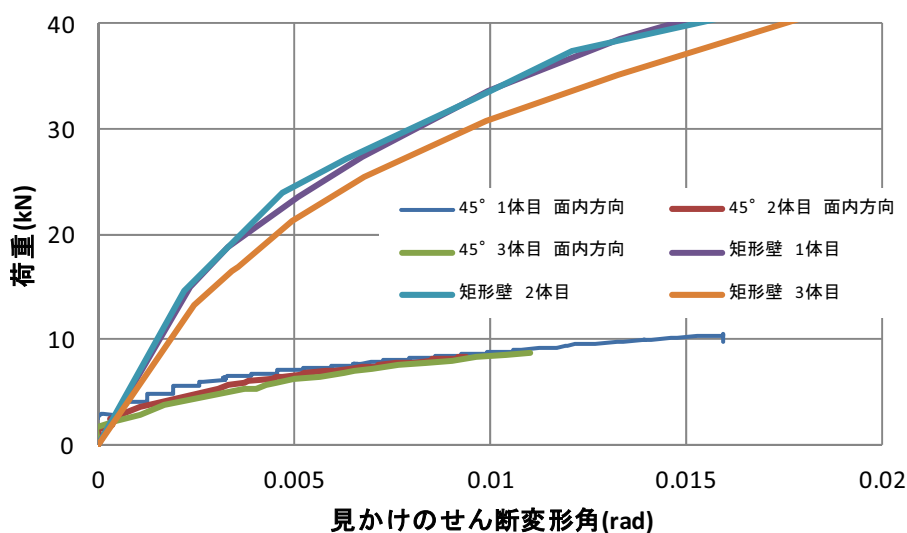


図 3.2.3 実験 2 における面内方向の荷重－見かけのせん断変形角包絡線と実験 1 の結果との比較

また、面外方向の成分について、荷重－見かけのせん断変形角関係を作成したものを、図 3.2.4 に 1 体分について示す。これから引き切りの加力を行った側（正側）の包絡線を求め、図 3.2.5 に示すように、文献 1) の評価方法に従って、初期剛性、各種耐力を算出し、3 体分の結果から 50% 下限値を求めた結果を、表 3.2.1 に示す。また、同表には、実験 1 の矩形パネルの加力点高さ 2.7m に対応するよう修正した値（1m/2.7m 倍する）も示した。

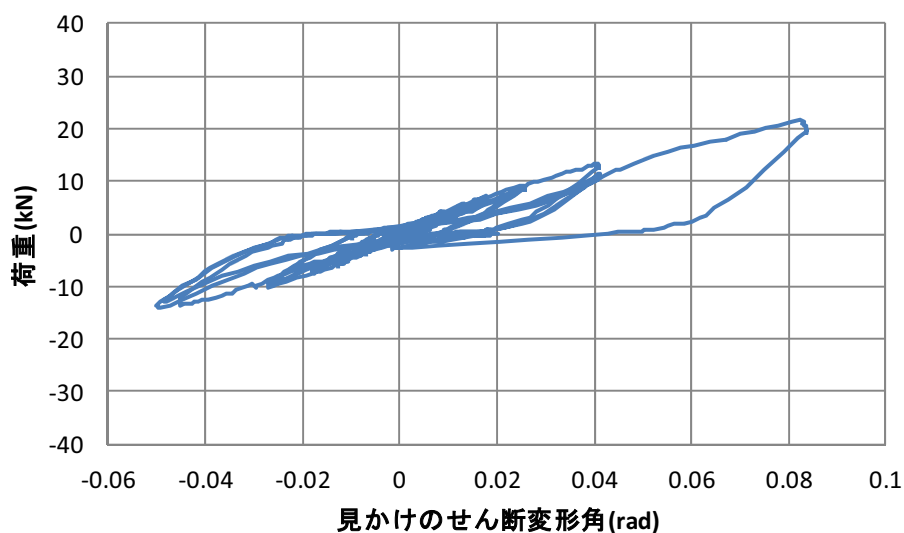


図 3.2.4 実験 2：面外方向の荷重－見かけのせん断変形角関係（3 体目）

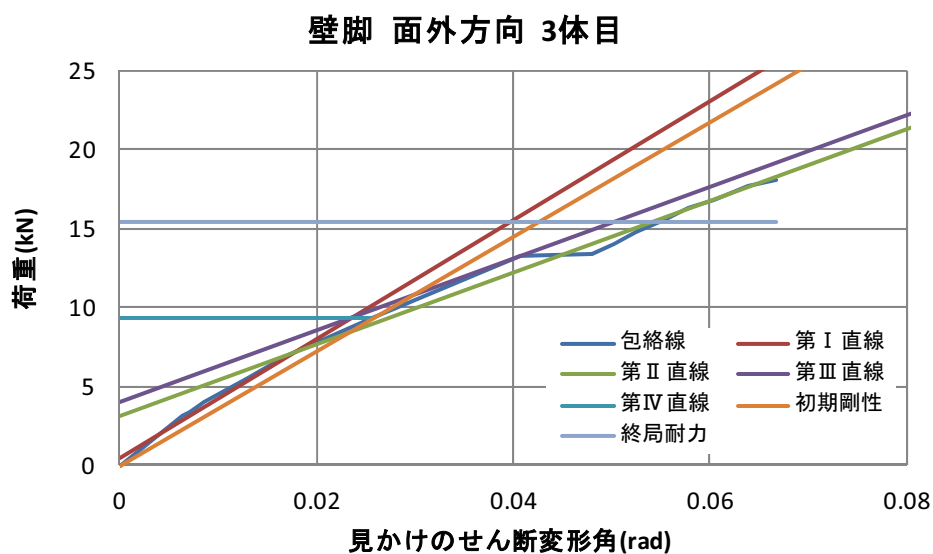


図 3.2.5 実験 2：面外方向の荷重変形関係包絡線と各特性値の算定（3 体目）

表 3.2.1 実験 2 : 各特性値及び短期基準耐力 (面外方向)

	1体目	2体目	3体目	平均値	標準偏差	変動係数	ばらつき係数	5%下限値	実験1の加力点高さ2700に対応させた修正値
特定変形時耐力 P_{120} (kN)	3.85	2.65	3.85	3.45	0.69	0.201	0.906	3.1	
$2/3P_{max}$ (kN)	14.00	11.68	12.00	12.56	1.26	0.100	0.953	12.0	
降伏耐力 P_v (kN)	11.91	10.70	9.33	10.65	1.29	0.122	0.943	10.0	
降伏変形角 δ_y (rad)	0.0257	0.0321	0.0257	0.0278					
初期剛性 K (kN/rad)	463.30	332.98	362.97	386.41					
終局耐力 P_u (kN)	18.98	15.67	15.32	16.66					
終局変形角 δ_u (rad)	0.0667	0.0667	0.0667	0.0667					
降伏点変形角 δ_v (rad)	0.0410	0.0471	0.0422	0.0434					
塑性率 $\mu=\delta_u/\delta_v$	1.63	1.42	1.58	1.54					
構造特性係数 D_s	0.67	0.74	0.68	0.69					
$P_u \times 0.2/D_s$ (kN)	5.71	4.24	4.50	4.82	0.78	0.162	0.924	4.4	
短期基準耐力 (kN)								3.1	1.1
初期剛性 K (kN/rad)								386.4	143.1

(3). 3 実験 3

図 3.3.1、図 3.3.2 に、荷重変形関係を、 45° と 90° のそれぞれ 1 体分について示す。ここで変形は、壁パネルとガセットプレート頂部の相対変位とした。

破壊状況は、写真 3.3.1~3.3.4 に示すように、ラミナの剥がれ、割れにより終局状態に至っている。写真 3.3.5、3.3.6 に示すように、ドリフトピンが大きな曲げ変形を起こしていることがわかる。

これらの荷重変形関係の正側の包絡線から、図 3.3.3、図 3.3.4 に示すように、文献 1) の接合部の評価方法に従って、初期剛性、降伏耐力、終局耐力を求めた。 45° と 90° のそれぞれ 3 体分から、各特性値の 50% 下限値を求めた結果を、表 3.3.1、表 3.3.2 に示す。

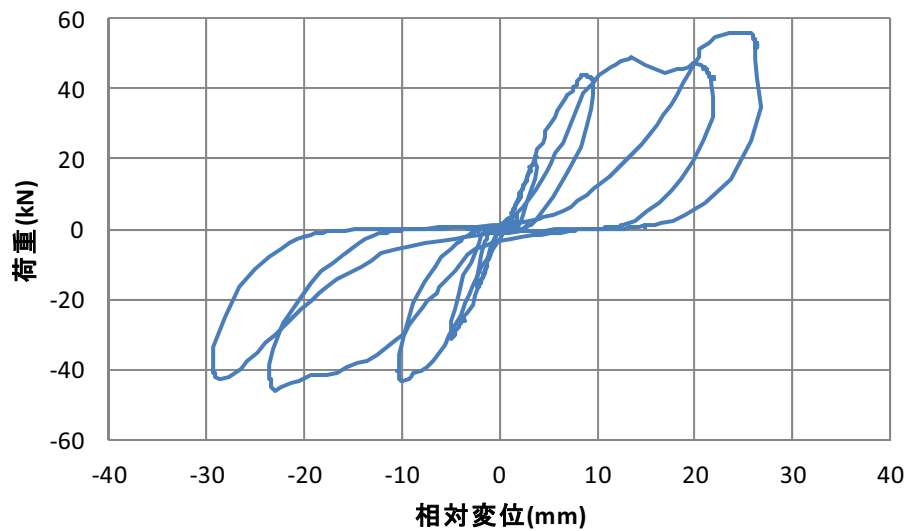


図 3.3.1 実験 3 : 荷重変形関係 (接合角度 45° 、3 体目)

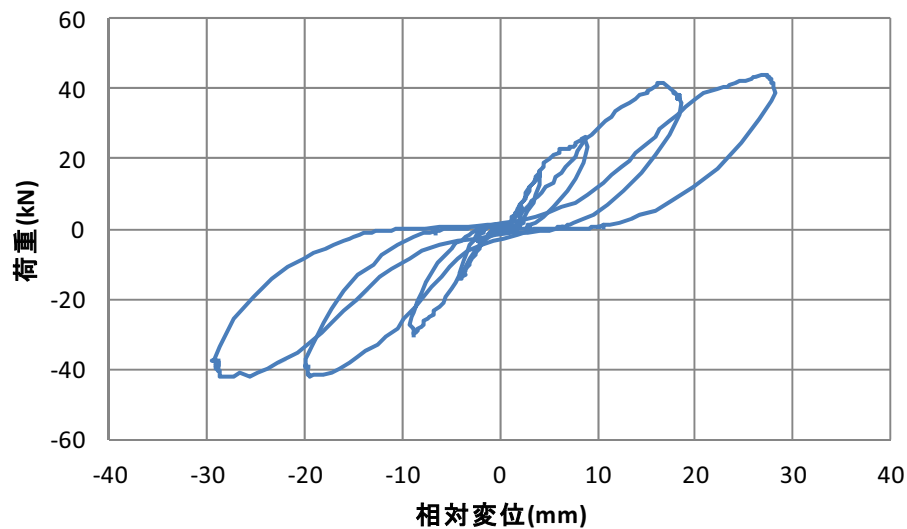


図 3.3.2 実験 3 : 荷重変形関係 (接合角度 90° 、3 体目)

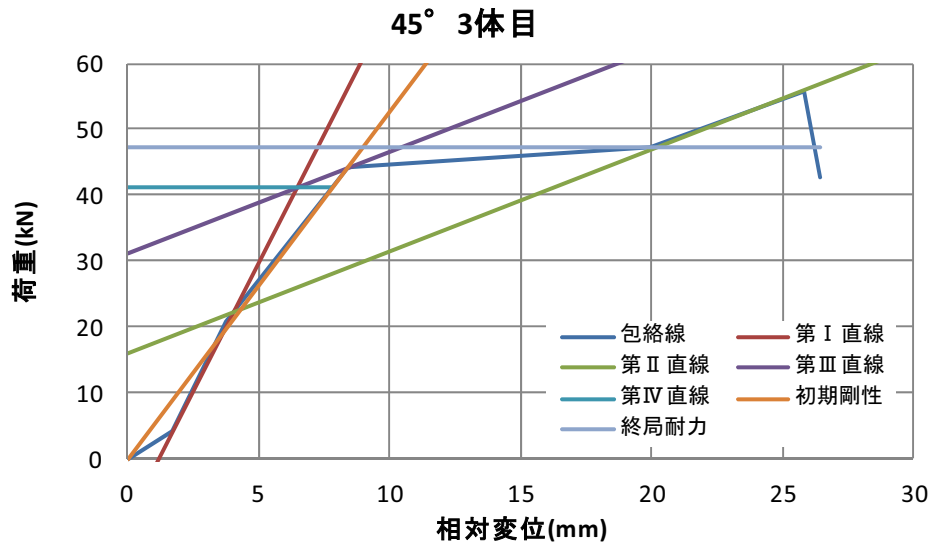


図 3.3.3 実験 3 : 荷重変形関係包絡線と各特性値の算定
(接合角度 45°、3体目)

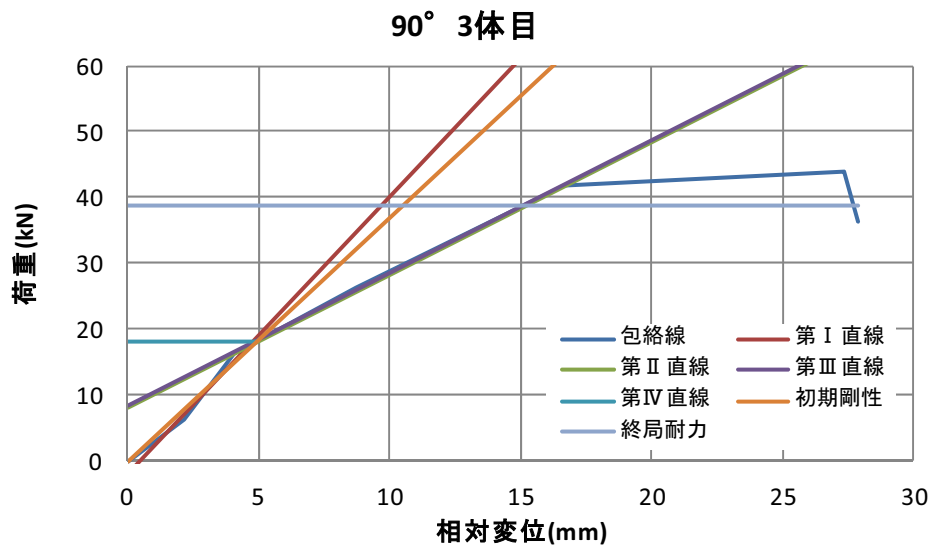


図 3.3.4 実験 3 : 荷重変形関係包絡線と各特性値の算定
(接合角度 90°、3体目)

表 3.3.1 実験 3 : 各特性値及び短期基準耐力 (接合角度 45°)

	1体目	2体目	3体目	平均値	標準偏差	変動係数	ばらつき係数	5%下限値	
2/3Pmax (kN)	33.50	35.27	37.23	35.33	1.87	0.053	0.975	34.5	
降伏耐力Py (kN)	29.98	32.23	41.22	34.47	5.95	0.173	0.919	31.7	
降伏変位Ey (mm)	5.81	7.11	7.80	6.91					
初期剛性K (kN/mm)	5.16	4.54	5.29	4.99					
終局耐力Pu (kN)	43.00	47.98	47.39	46.12					
終局変位Eu (mm)	11.48	21.73	26.45	19.89					
降伏点変位Ev (mm)	8.34	10.58	8.96	9.29					
塑性率 $\mu = 2u/v$	1.38	2.05	2.95	2.13					
構造特性係数Ds	0.76	0.57	0.45	0.59					
Pu × 0.2 / Ds (kN)	11.39	16.92	20.98	16.43	4.82	0.293	0.862	14.2	
短期基準耐力 (kN)									14.2
初期剛性 (kN/mm)									4.99

表 3.3.2 実験 3 : 各特性値及び短期基準耐力 (接合角度 90°)

	1体目	2体目	3体目	平均値	標準偏差	変動係数	ばらつき係数	5%下限値	
2/3Pmax (kN)	26.57	27.03	29.33	27.64	1.48	0.054	0.975	26.9	
降伏耐力Py (kN)	22.94	34.19	18.13	25.09	8.24	0.329	0.845	21.2	
降伏変位δy (mm)	8.61	15.03	4.89	9.51					
初期剛性K (kN/mm)	2.66	2.28	3.71	2.88					
終局耐力Pu (kN)	35.89	37.29	38.75	37.31					
終局変位δu (mm)	29.91	20.56	27.90	26.12					
降伏点変位δv (mm)	13.47	16.39	10.46	13.44					
塑性率 $\mu = \delta u / \delta v$	2.16	1.25	2.67	2.03					
構造特性係数Ds	0.55	0.81	0.48	0.61					
Pu × 0.2 / Ds (kN)	13.08	9.16	16.14	12.79	3.50	0.273	0.871	11.1	
短期基準耐力 (kN)									11.1
初期剛性 (kN/mm)									2.88



写真 3.3.1 実験 3 の破壊状況 (接合角度 45°)



写真 3.3.2 実験 3 の破壊状況 (写真 3.3.1 の側面)



写真 3.3.3 実験 3 の破壊状況
(接合角度 90°)



写真 3.3.4 実験 3 の破壊状況
(写真 3.3.3 の側面)



写真 3.3.5 実験 3 の金物の状況
(接合角度 45°)



写真 3.3.6 実験 3 の金物の状況
(接合角度 90°)

(3). 4 実験 4

(3). 4. 1 予備試験

予備試験として実施した、45° の試験体により、5 種類のビスで、それぞれ 1 体ずつ実験した結果を示す。

各試験体の荷重変形関係を図 3.4.1 に示す。ここで変形は、壁パネルの相対変位とした。

これらの荷重変形関係の包絡線から、図 3.4.2 に示すように、文献 1) の接合部の評価方法に従って、初期剛性、降伏耐力、終局耐力を求めた。各ビスの特性値を、表 3.4.1 に示す。

VGZ φ7 L220 が、各特性値とも高い値を示していることから、以降の実験におけるビスとして採用することにした。

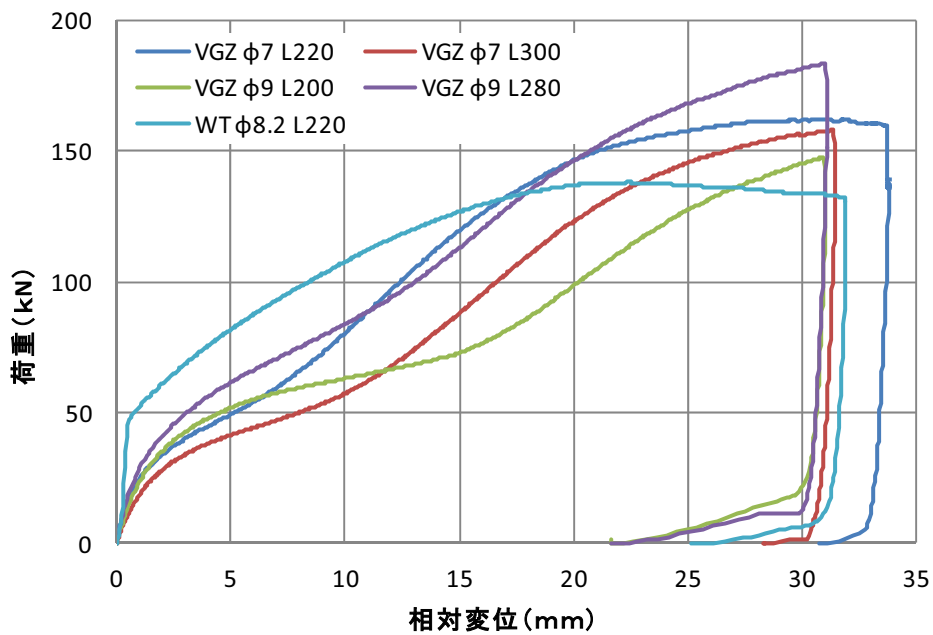


図 3.4.1 実験 4：予備試験における荷重変形関係

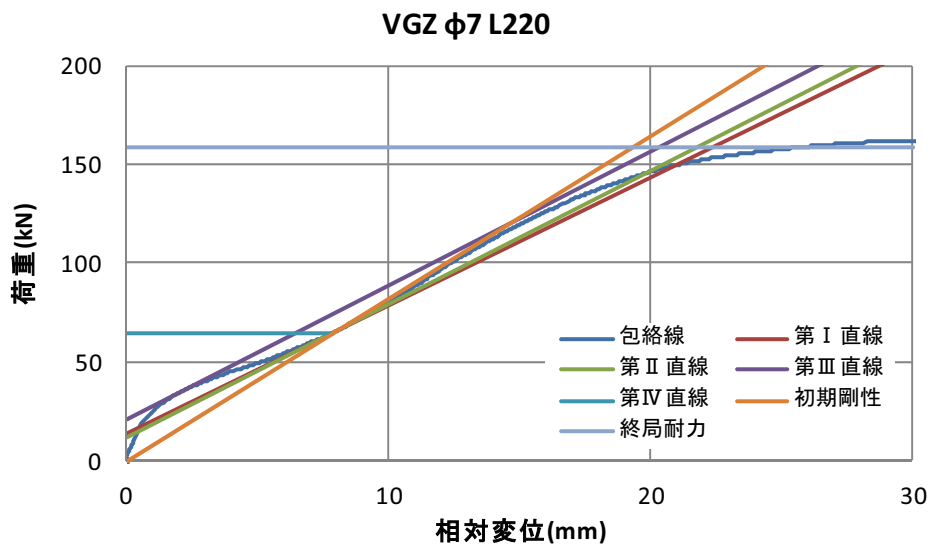


図 3.4.2 実験 4：予備試験における荷重変形関係に基づく各ビスの特性値の算定

表 3.4.1 実験 4：予備試験の結果

	Py (kN)	2/3Pmax (kN)	Pu*0.2/Ds (kN)	短期基準せん断耐力 (kN)	初期剛性 (kN/mm)
VGZ φ7 L220	4.0	6.7	2.8	2.8	0.51
VGZ φ7 L300	3.9	6.5	1.9	1.9	0.35
VGZ φ9 L200	4.0	6.0	2.1	2.1	0.37
VGZ φ9 L280	5.4	7.5	2.9	2.9	0.50
WT φ8.2 L220	3.8	5.5	5.4	3.8	1.74

※1本当たりの値（1体につき16本のため、16本の平均値）

※1体での試験のため、ばらつき係数を乗じていない

(3). 4. 2 本試験

図 3.4.3、図 3.4.4 に、荷重変形関係を、45° と 90° のそれぞれ3体分を重ね描きしたものを示す。ここで変形は、壁パネルの相対変位とした。

これらの荷重変形関係の包絡線から、予備試験と同様に、文献1)の接合部の評価方法に従って、初期剛性、降伏耐力、終局耐力を求めた。45° と 90° のそれぞれ3体分から、各特性値の50%下限値を求めた結果を、表 3.4.2、表 3.4.3 に示す。

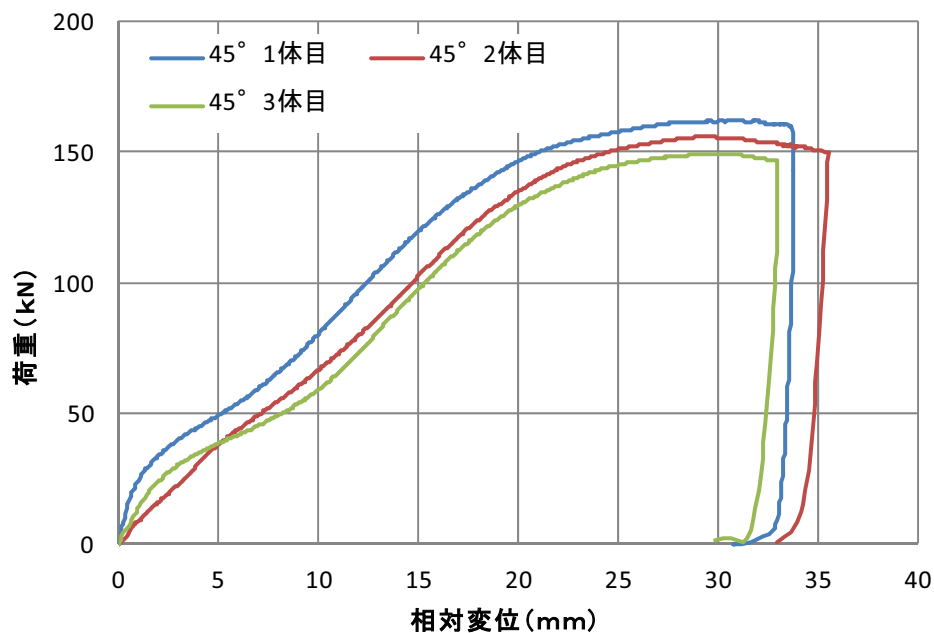


図 3.4.3 実験 4：本試験における荷重変形関係（接合角度 45° ）

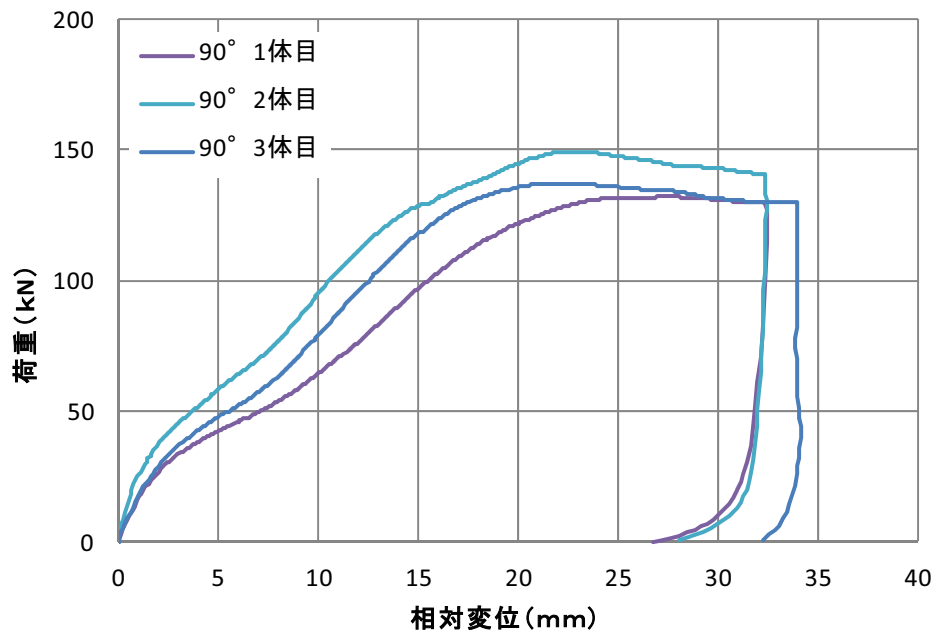


図 3.4.4 実験 4：本試験における荷重変形関係（接合角度 90° ）

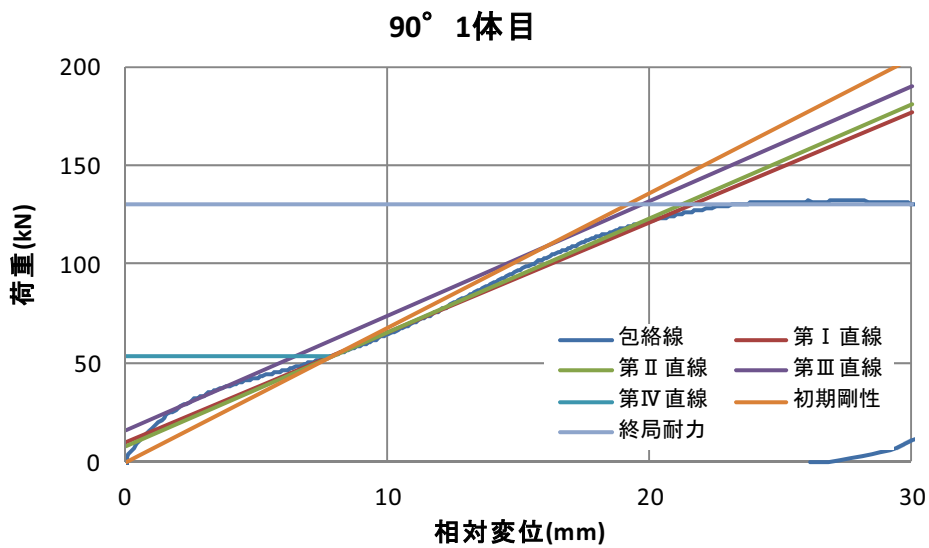


図 3.4.5 実験 4：本試験における荷重変形関係に基づく特性値の算定（接合角度 90° 、1体目）

表 3.4.2 実験 4 : 本試験の結果 (接合角度 45°)

	1体目	2体目	3体目	平均値	標準偏差	変動係数	ばらつき 係数	5%下限値
2/3Pmax (kN)	107.6	103.6	99.3	103.5	4.15	0.040	0.981	101.5
降伏耐力Py (kN)	64.7	62.1	59.3	62.0	2.70	0.044	0.979	60.8
降伏変位 δ_y (mm)	7.85	9.28	10.08	9.07				
初期剛性K (kN/mm)	8.24	6.69	5.88	6.94				
終局耐力Pu (kN)	158.5	156.7	176.6	163.9				
終局変位 δ_u (mm)	30	30	30	30				
降伏点変位 δ_v (mm)	19.23	23.42	30	24.22				
塑性率 $\mu=\delta_u/\delta_v$	1.55	1.28	1	1.28				
構造特性係数Ds	0.69	0.8	1	0.83				
$P_u \times 0.2/D_s$ (kN)	46.1	39.1	35.3	40.2	5.48	0.136	0.936	37.6
短期基準耐力 (kN)								37.6
ビス1本あたりの短期基準耐力 (kN)								2.3
ビス1本あたりの初期剛性 (kN/mm)								0.40

表 3.4.3 実験 4 : 本試験の結果 (接合角度 90°)

	1体目	2体目	3体目	平均値	標準偏差	変動係数	ばらつき 係数	5%下限値
2/3Pmax (kN)	88.0	99.5	91.3	92.9	5.92	0.064	0.970	90.1
降伏耐力Py (kN)	53.0	89.1	54.8	65.6	20.34	0.310	0.854	56.1
降伏変位 δ_y (mm)	7.82	9.39	6.53	7.91				
初期剛性K (kN/mm)	6.78	9.51	8.39	8.23				
終局耐力Pu (kN)	130.1	147.6	134.8	137.5				
終局変位 δ_u (mm)	30	30	30	30				
降伏点変位 δ_v (mm)	19.16	15.5	16.05	16.90				
塑性率 $\mu=\delta_u/\delta_v$	1.56	1.93	1.86	1.78				
構造特性係数Ds	0.68	0.6	0.61	0.63				
$P_u \times 0.2/D_s$ (kN)	37.9	50	44.6	44.2	6.06	0.137	0.935	41.3
短期基準耐力 (kN)								41.3
ビス1本あたりの短期基準耐力 (kN)								2.5
ビス1本あたりの初期剛性 (kN/mm)								0.50

(3). 5 実験 5

図 3.5.1、図 3.5.2 に、荷重変形関係を、 45° と 90° のそれぞれ 1 体分について示す。ここで変形は、壁パネルの相対変位とした。

破壊状況は、写真 3.3.1~3.3.4 に示すように、引張加力の際に、壁パネル接合部が、せん断ずれを伴いながら、破断し、終局状態に至っている。

これらの引張側の荷重変形関係の包絡線から、図 3.5.3、図 3.5.4 に示すように、文献 1) の接合部の評価方法に従って、初期剛性、降伏耐力、終局耐力を求めた。 45° と 90° のそれぞれ 3 体分から、各特性値の 50% 下限値を求めた結果を、表 3.5.1、表 3.5.2 に示す。

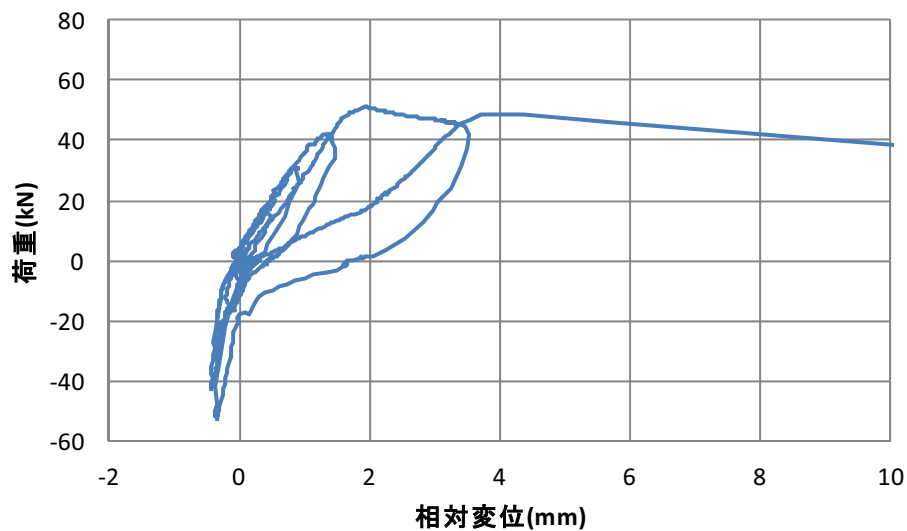


図 3.5.1 実験 5 : 荷重変形関係 (接合角度 45° 、3 体目)

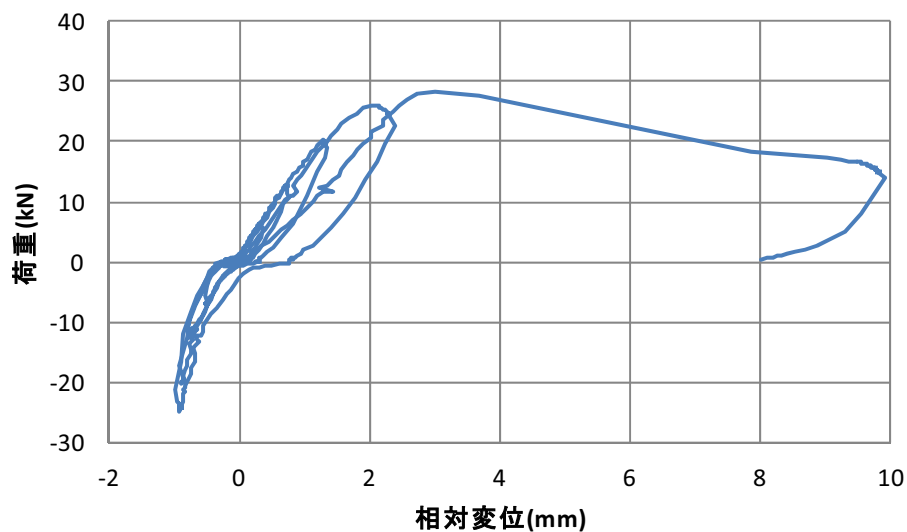


図 3.5.2 実験 5 : 荷重変形関係 (接合角度 90° 、3 体目)

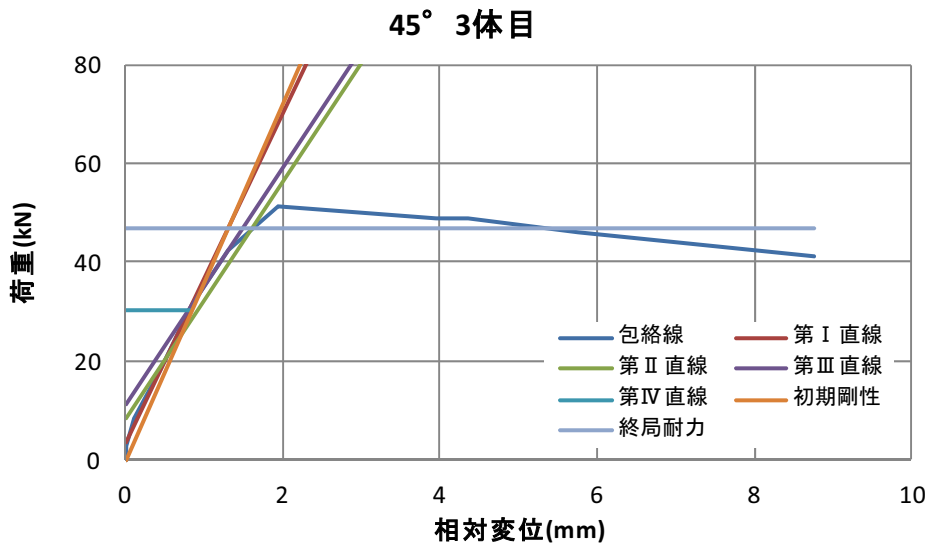


図 3.5.3 実験 5 : 荷重変形関係包絡線と各特性値の算定
(接合角度 45°、3体目)

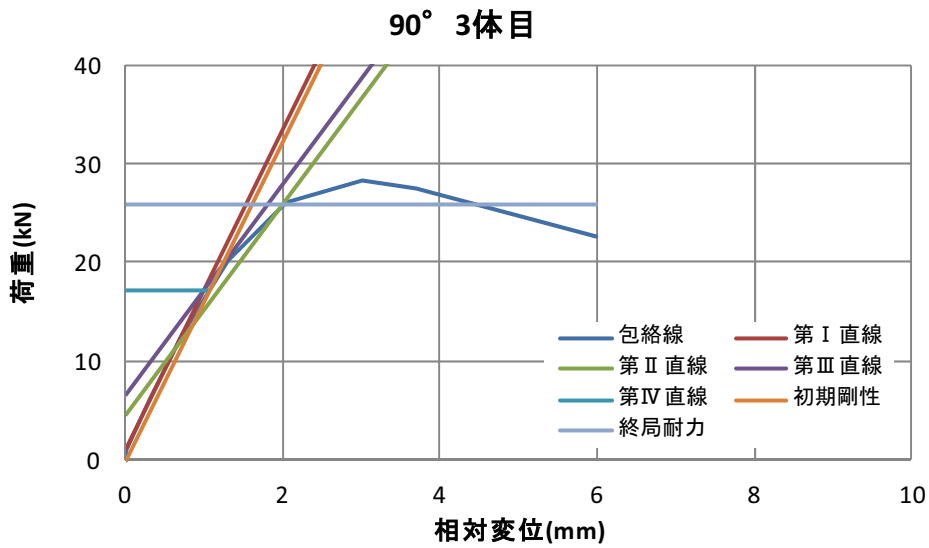


図 3.5.4 実験 5 : 荷重変形関係包絡線と各特性値の算定
(接合角度 90°、3体目)

表 3.5.1 実験 5 : 各特性値及び短期基準耐力 (接合角度 45°)

	1体目	2体目	3体目	平均値	標準偏差	変動係数	ばらつき係数	5%下限値	
2/3Pmax (kN)	36.50	41.23	34.13	37.29	3.62	0.097	0.954	35.6	
降伏耐力Py (kN)	39.81	43.05	30.39	37.75	6.58	0.174	0.918	34.7	
降伏変位δy (mm)	3.15	2.21	0.81	2.06					
初期剛性K (kN/mm)	12.63	19.48	37.33	23.15					
終局耐力Pu (kN)	49.74	55.84	46.61	50.73					
終局変位δu (mm)	11.16	9.63	8.76	9.85					
降伏点変位δv (mm)	3.94	2.87	1.24	2.68					
塑性率μ=δu/δv	2.83	3.36	7.01	4.40					
構造特性係数Ds	0.46	0.42	0.28	0.39					
Pu × 0.2/Ds (kN)	21.49	26.71	33.65	27.28	6.10	0.224	0.895	24.4	
短期基準耐力 (kN)									24.4
ビス1本あたりの短期基準耐力 (kN)									4.0
ビス1本あたりの初期剛性 (kN/mm)									3.80

表 3.5.2 実験 5 : 各特性値及び短期基準耐力 (接合角度 90°)

	1体目	2体目	3体目	平均値	標準偏差	変動係数	ばらつき係数	5%下限値	
2/3Pmax (kN)	20.2	23.5	18.8	20.82	2.42	0.116	0.945	19.7	
降伏耐力Py (kN)	25.07	19.05	17.05	20.39	4.17	0.205	0.904	18.4	
降伏変位δy (mm)	2.23	1.12	1.05	1.47					
初期剛性K (kN/mm)	11.20	16.87	16.17	14.75					
終局耐力Pu (kN)	27.97	32.51	25.92	28.80					
終局変位δu (mm)	7.11	8.54	5.97	7.21					
降伏点変位δv (mm)	2.49	1.92	1.6	2.00					
塑性率μ=δu/δv	2.85	4.43	3.72	3.67					
構造特性係数Ds	0.47	0.36	0.40	0.41					
Pu × 0.2/Ds (kN)	12.13	18.24	13.17	14.51	3.27	0.225	0.894	13.0	
短期基準耐力 (kN)									13.0
ビス1本あたりの短期基準耐力 (kN)									2.1
ビス1本あたりの初期剛性 (kN/mm)									2.40



写真 3.5.1 実験 5 の破壊状況
(接合角度 45°)



写真 3.5.2 実験 5 の破壊状況
(写真 3.5.1 の側面)

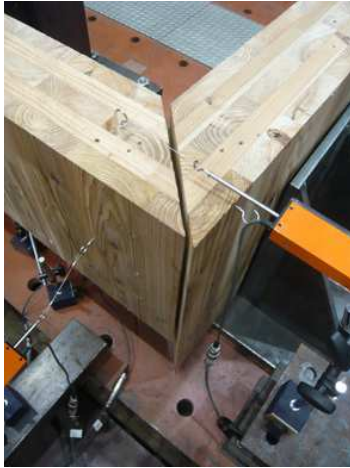


写真 3.5.3 実験 5 の破壊状況
(接合角度 45°)



写真 3.5.4 実験 5 の破壊状況
(写真 3.5.3 の側面)

(4). まとめ

CLT モデル建築の構造検討のために、5種類の実験を実施し、実験の目的、方法を説明し、実験結果を報告した。

実験1については、矩形パネル3体分の結果と台形パネル1体分の結果を比較し、本実験の範囲では、外接矩形で安全側に置換できる結果は得られず、さらに10%~20%の低減が必要という結果になった。

実験2については、横拘束を行っていないため、面外方向に大きな変形を生じ、面内方向の成分については、大きな変形領域までの検討を行うことができなかった。通常は、床や壁により、面外変位は拘束されるため、横拘束を行った実験による検討が必要と考えられる。なお、面外方向の成分については、3体分の実験結果から、各特性値の50%下限値を求めた。

実験3~5については、接合角度が45°と90°のそれぞれについて、3体分の実験結果から、各特性値の50%下限値を求め、配置角度による比較を行った。

参考文献

- 1) 日本住宅・木材技術センター、日本 CLT 協会：2016 年公布・施工 CLT 関連告示等解説書、2016 年
- 2) 日本住宅・木材技術センター：木造軸組工法住宅の許容応力度設計、2008 年
- 3) 守屋嘉晃、高橋仁、川上修、河合直人、槌本敬大：斜め桁を有する木造軸組面材耐力壁のせん断性能に関する実験的研究、日本建築学会大会(東海)学術講演会梗概集、構造Ⅲ、pp. 27-28、2012 年
- 4) 深澤協三、渡辺友規、立花正彦：有開口壁を用いたパノラマ形状による枠組壁工法の力学的挙動、構造工学論文集 B、56B、pp. 317-328、2010 年

4. 2 塗装実験

(実験担当者) 岡山県農林水産総合センター森林研究所木材加工研究室
特別研究員 金田利之 専門研究員 野上英孝
(取りまとめ) 同研究室 河崎弥生

4. 2 塗装実験

1. 実験計画

(1) 実験の目的

C L Tリーディング事業において、C L T外壁部分等の塗装用として、いわゆる「液体ガラス塗料」の採用が発案され、その効果について試験サンプルによる実験的な検証を行う。

(2) 実験の概要

1) 塗料の選択

- ①株式会社N製の液体ガラス塗料を試験対象とする。
- ②同時に、これまで使用されてきている既存の外構塗料（従来型）の一部についても、比較試験を行う。
- ③また、コントロールとして、無塗装条件についても同時に検討を行う。

2) 実験の種類

①C L T塗装材の劣化の進行状態の検証（暴露台試験）

塗装したC L Tブロックを垂直暴露台に配置し、目視によって、経過観察を行う。

(測定項目)

- a. 材色の変化を、色差計で測定する。
- b. 材面の割れ、接着層の剥離等の状況を、経過観察する。
- c. 重量変化を測定する。

②塗膜面における撥水性能の経時変化の検証（撥水試験）

暴露台上に配置した撥水性試験材の塗装面の撥水性能の変化を、経過観察する。塗膜が劣化すれば、撥水性能が低下し、吸水が生じるようになる。

(測定項目)

- a. 表面に水滴を滴下した際の吸水状況を、量的に把握する。
- b. 撥水性能の経時変化を、経過観察する。

③C L Tを基礎にベタ置きした条件下での劣化の進行状態の検証（接地試験）

C L Tが基礎コンクリートにベタ置きされる条件を想定した際の、水の影響等について、経過観察する。

(測定項目)

- a. コンクリートブロック（U字溝）にC L Tブロックを垂直にベタ置きして、主に脚部の劣化状況を観察する。
- b. 接着層の剥離、割れ、変色、腐朽等を、目視によって、経過観察する。
- c. 重量変化を測定する。

(3) 試験材の概要

1) 塗料の種類

液体ガラスと既存の塗料の比較を行うために、以下の塗料を具体的な試験対象とする。また、前述したように、無塗装試験材についても、塗装しなかった場合の変化を観察するために同時に設定した。

- ①液体ガラス「テリオスウッド」
- ②液体ガラス「木あじ」
- ③キシラデコール
- ④VATON
- ⑤IP水性ウッドカラーシステム
- ⑥無塗装

2) 試験材の仕様及び数量等

①樹種

暴露台試験及び接地試験に用いるCLTは、スギ材ラミナによって構成されたものと
する。また、撥水試験に用いるCLTラミナもスギとする。

②形状

- a. 暴露台試験および接地試験は、5層5プライCLTから約30cm角（厚さ150mm）の試験片を採取した。
- b. 撥水試験は、CLTラミナから採材した無節のスギ材（長さ300×幅70×厚さ30mm）とした。

3) 数量

試験条件ごとに、各3枚とした。

2. 試験方法

(1) 試験場所

岡山県農林水産総合センター森林研究所木材加工研究室 敷地内
真庭市勝山1884-2

(2) 試験期間

試験開始は、平成29年2月上旬であり、その後、必要とされる一定期間にわたり測定を行う。本報告書では、約半年を経過した段階までの挙動をについて述べる。今後も継続して測定する予定であるが、終了時期は試験材の状態によって判断することとする。

(3) 暴露台試験及び接地試験

1) 塗布方法

試験体の6材面全てに各種塗料を塗布した。塗料の塗布は、専門業者が各種塗料の仕様書に準拠して行った（図1）。

2) 屋外暴露

各種塗装試験体のうち3体 (No. 1~3) を南面垂直暴露架台に懸架し、残り3体 (No. 4~6) は架台下に配置したU字溝を利用した模擬基礎に直接設置した (図2)。暴露開始は平成29年2月10日とした。

3) 色彩測定

毎回の測定時には、試験体を室内に取り込み、1週間程度養生後 (図3)、南暴露面の測定を行った。色彩測定には分光色差計 (NF-333、日本電色工業) を用い、L*a*b*表色系 (JIS 8781-4:2013) により測定した。なお、1試験体につき9箇所の測定を行った (図4)。

4) 重量測定

上記、色彩測定時に各試験体の重量を測定した。

5) 外観測定

暴露中に、適宜、各種試験体の外観を観察した。



図1 専門業者による塗装



図2 試験材の配置状況



図3 試験体の屋内における養生



図4 使用した分光色差計

(4) 撥水試験

1) 塗布方法

基材の幅広2材面に所定の塗料を塗布し、その他周囲4側面は、エポキシ樹脂でシールした。塗料の塗布及びエポキシ樹脂のシールは、専門の業者が行った。

2) 屋外暴露

屋外暴露は、南面垂直に設置した暴露架台に暴露面を木表側として試験材を設置して、所定の期間暴露を行った。暴露開始は、平成29年2月10日とした。

3) 撥水度試験

所定の期間、屋外暴露を行った試験材を23°C±2°C、50±5%RHの恒温恒湿室で1週間程度調湿を行った後、撥水度試験を行った。

撥水度試験は、森林総研法に準拠して行った。試験は、質量を測定した試験材(質量W1)の中央部に1mlの脱イオン水をマイクロピペットで滴下し、滴下部をシャーレで覆って1分間放置する。1分経過後、試験材上の水分を拭き取り、再び試験材の質量を測定する(質量W2)。測定は、1mg単位で行い、試験材への水の浸透量(W2-W1)を計算し、次式の数値をもって撥水度とした。

$$\text{撥水度 (\%)} = (1 - (W2 - W1) / W) \times 100$$

*ここで、Wは別途測定した水1mlの質量

3. 試験結果

(1) 暴露台試験及び接地試験

1) 色彩測定

図5~8に各種試験体の色差、L*、a*、b*の経時変化を示す。なお、図中の数値は試験体全6体の平均値を示す。

暴露約1ヶ月までは全ての試験体に共通して、明度(L*)は漸増、赤み(a*)は低下、黄色み(b*)は漸増する傾向が認められた。暴露約3ヶ月時点では、無塗装とVATONにおいてb*の明らかな低下が認められた。暴露約6ヶ月時点では、木あじ、キシラデコール以外においてL*およびb*の低下が認められ、無塗装とVATONにおいてはa*の低下も認められた。

結果として暴露6ヶ月時点で、無塗装とVATONにおいては、暴露開始時と比較して $\Delta E^*_{ab} \geq 13$ の色差が生じており、JIS(Z 8102など)に規定されるD級許容差(異なる区別の色系統)となった。

2) 重量測定

図9,10に各種試験体の重量変化を示す。なお、図中の数値は試験体全6体の平均値を示す。またエラーバーは標準偏差を示す。懸架試験体(No.1~3)および接地試験体(No.4~6)ともに重量増や重量減などの傾向は特に認められなかった。

図5 各塗装材における色差(ΔE*ab)の経時変化

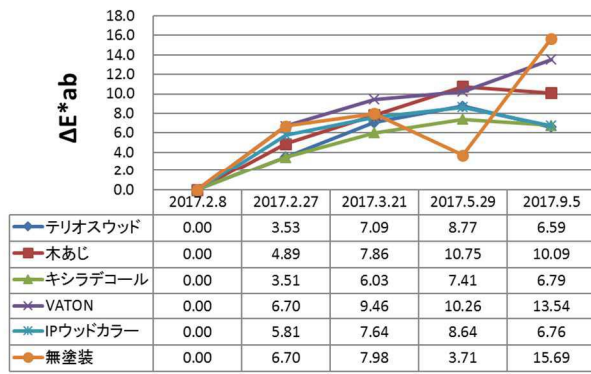


図6 各塗装材におけるL*の経時変化

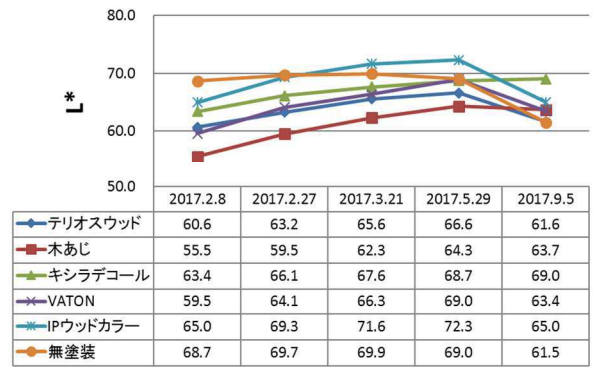


図7 各塗装材におけるa*の経時変化

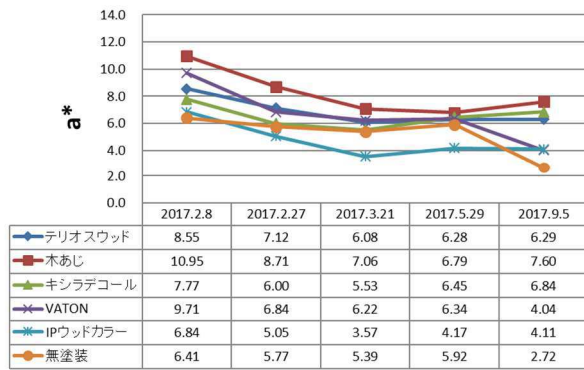


図8 各塗装材におけるb*の経時変化

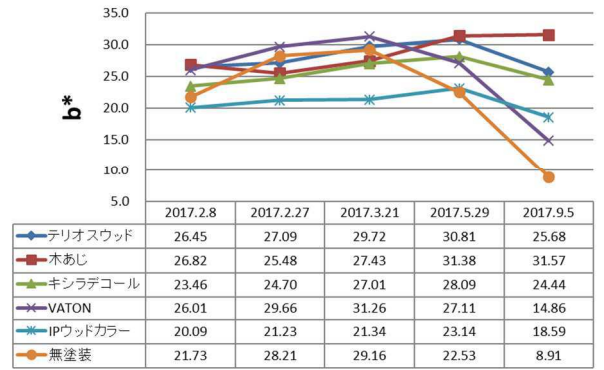


図9 各種懸架試験体の重量変化

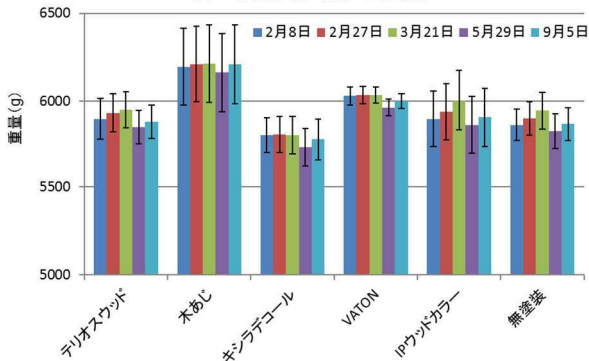
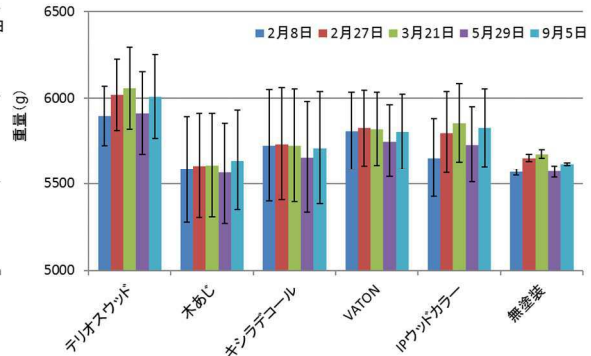


図10 各種接地試験体の重量変化



3) 外観測定

いずれの試験体でも、特に試験体材端面における材割れが多く発生した(図 11~13)。寸法変化に異方性を持つ木材(ラミナ)の直行積層による寸法拘束効果により、吸放湿による材内ストレス(応力)が大きく発生するためである。この傾向は、試験体上端面(図 11)において顕著に発生し、側端面(図 12)では比較的少ない。上端面では側端面に比較して雨などの滞留時間が長く、水分の浸透が多いと考えられ、その結果として吸放湿に伴う寸法変化(応力)がより多く発生していると考えられる。また、一部試験体では材端面の割れが材表面に進展するケースも認められた(図 14)。なお、いずれの試験体においても積層接着層のはく離は認められなかったが、未接着の幅はぎ部には隙間が多く認められた。

塗装材色の変化は木材の紫外線劣化に加え、このような上端面の割れや幅はぎ部の隙間など、塗膜が切れた部分への水浸透によって加速的に進行する(別添、写真 3 や写真 6)と考えられるため、CLT のように構造的に材端面の割れや幅はぎ部の隙間などが生じやすい材料においては、塗装の種類や有無に関係なく風雨に曝されにくい対策(端面の被覆や水平面の雨晒しを防ぐ等)が、基本的に必要である。



図 11 上端面における多数の割れ



図 12 側端面にも見られる幅はぎ部の隙間



図 13 ラミナ桎目部分の材割れ



図 14 材端面から材表面への割れ進展
(別添資料 1 : 各種塗料による塗装試験体(懸架)の外観写真)



写真1 「テリオスウッド」初期



写真2 「テリオスウッド」1ヶ月経過



写真3 「テリオスウッド」半年経過

写真4 「木あじ」初期



写真5 「木あじ」1ヶ月経過



写真6 「木あじ」半年経過



写真7 「キシラデコール」 初期



写真8 「キシラデコール」 1ヶ月経過



写真9 「キシラデコール」 半年経過



写真 10 「VATON」 初期



写真 11 「VATON」 1 ヶ月経過



写真 12 「VATON」 半年経過



写真 13 「水性 IP ウッドカラーシステム」 初期



写真 14 「水性 IP ウッドカラーシステム」 1 ヶ月経過



写真 15 「水性 IP ウッドカラーシステム」 半年経過



写真 16 「無塗装」初期



写真 17 「無塗装」1ヶ月経過



写真 18 「無塗装」半年経過

(2) 撥水試験

屋外暴露期間 185 日までの各種塗料の撥水度（平均値）の推移を、図 15 に示す。無塗装材では、次第に撥水度が低下していくことが観察されたが、塗装材では 185 日経過した時点までには、ほぼ低下は見られなかった。

塗装面の撥水度は、表面の状態変化との関係が強いと推察されるが、さらに長期の経過観察を経なければ、詳細な考察は難しい。今後も、経過観察を継続する予定である。

(注) ①液体ガラス (テリオスウッド)、②液体ガラス (木あじ)、③キシラデコール、
④VATON、⑤IP水性ウッドカラーシステム、⑥無塗装

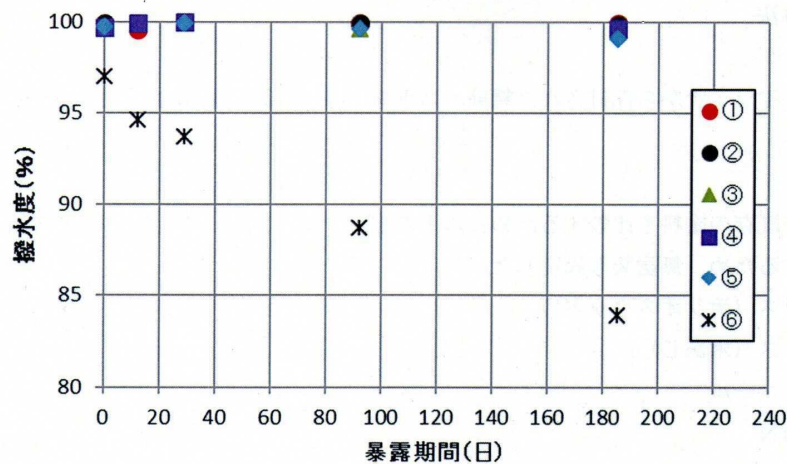


図 15 各種塗料の屋外暴露による撥水度の推移

4. 塗装試験の中間的総括

(1) 今回の塗装実験への思い

CLTを外構面として活かすような設計を行う場合には、適切な塗装が必要になる。このことは、木材、木質材料を利用する際に誰もが前提として考えることであるが、特に新しい建築材料であるCLTについては、具体的な方法などが必ずしも明確ではない部分がある。また、建築物の壁として縦使いする場合と、ベンチなどの平使いをする場合とでも、その対処方法が、おそらく異なったものになることは容易に察しがつくことである。しかし、具体的にはどの様な違いがあり、それぞれの様な対策が必要であるかという点については、現段階においては、十分な知見が得られているとは言い難いように思われる。

今回の実験の場合、「使用環境C」を想定して製造された木質材料を、風雨や紫外線など木材の劣化を促進させる因子が存在する環境下に曝すような設計が、基本的に成り立ち得るのかという検証を行っているという意味合いもある。

加えて、幅はぎ接着をしていないCLTを屋外に晒した場合、雨水が材内部に入り込み、一時的に滞水状態になることも予想され、それが腐朽菌による劣化に繋がるのではないかと懸念についても、塗装を施すことによってどの程度防止できるのかという点を、実証的に検討する意図も含まれている。

今回のガラス塗料は、塗料製造メーカーの説明では、予想されるこれらの懸念を払拭し、これまでよりも長期のメンテナンスフリーを実現できる性能を有するとの説明がなされている。この説明に対して、われわれ検討会の関係者は大いに興味を持ち、保守管理コストの低減に繋がるのではないかと期待を持ったという経緯がある。

今回の実験は、このことを検証してみようという目的で行われたものであるが、結論を得るにはもう少し経過観察が必要である。あくまで現段階における限定した感想ではあるが、メーカーが主張する性能をより良く発揮させるためには、施工方法や木材保護塗料等他の塗料との的確な組み合わせ等についても、さらに検討されるべき余地を残しているようにも思われる。

木材を外構部材として用いる際の塗装については、前述したとおり、木材固有の材質や劣化要因などを慎重に見極め、最良な方法を選択することが重要である。加えて、各種の木質材料においては、その特徴も踏まえた上での判断が必要である。

その際、特殊な高性能塗料を用いて長期間にわたるメンテナンスフリーを獲得するという考え方がある一方で、効率的かつ的確なメンテナンスを、一定期間ごとに継続して実施するということを基本とする設計も、選択肢の一つとしてはあり得るのではないかと考える。

(2) 今後の取り組み

今後、本実験は、森林研究所木材加工研究室が継続していく予定であるが、一定の期間が経過した段階で結果の総括を行い、可能な範囲で、今回のリーディング事業関係者を始め、CLTを取り扱う県内の関係者に結果をお示ししたいと考えている。

また、学術的な価値が高い点が明らかになった場合には、可能な範囲で、学会発表等の公式な場においても公表したいと考えている。