

第2章 壁端せん断接合部の回轉變位下水平せん断実験

2.1 実験目的

壁体頂部に水平力が作用した状態の壁脚部せん断接合部のせん断性能に関する性能を確認することを目的とする。なお本実験では、CLT 床パネルもしくは集成材梁上に設置した CLT 壁パネルのせん断性能と、基礎フレーム上に設置した CLT 壁パネルのせん断性能の 2 仕様の実験を実施している。

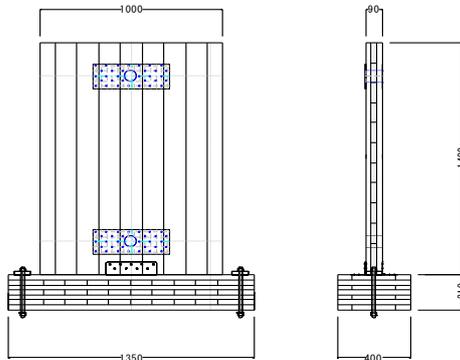
2.2 CLT 床パネル又は集成材梁上に設置した CLT 壁パネルのせん断性能確認実験

2.2.1 試験体

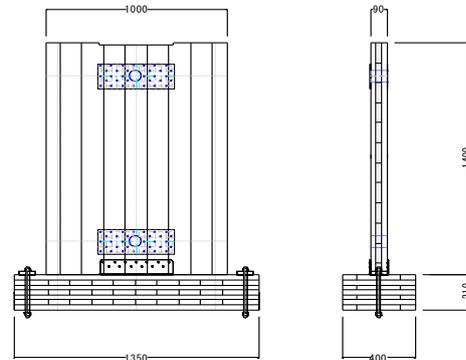
(1) 試験体概要

試験体は、CLT パネル工法における CLT 床パネル又は集成材梁と壁パネルのせん断接合部を模した形状からなる 4 仕様の試験体 (各 3 体、試験体記号:F1~F4) で試験を行った。試験体概要を図 2.2.1.1 に示す。(試験体仕様および形状詳細は 2.2.2 項以降に示す。)

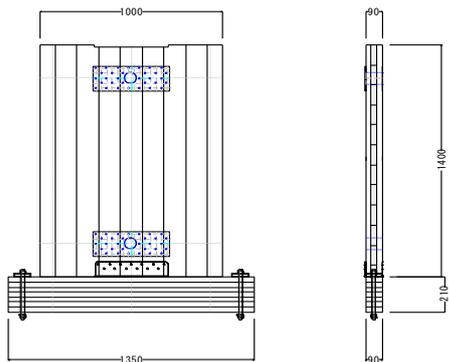
試験体 F1
壁-床接合部 LST×2 壁幅1.0m×3体



試験体 F2
壁-床接合部 新規金物 壁幅1.0m×3体



試験体 F3
壁-梁接合部 新規金物 壁幅1.0m×3体



試験体 F4
壁-床合板・梁接合部 新規金物 壁幅1.0m×3体

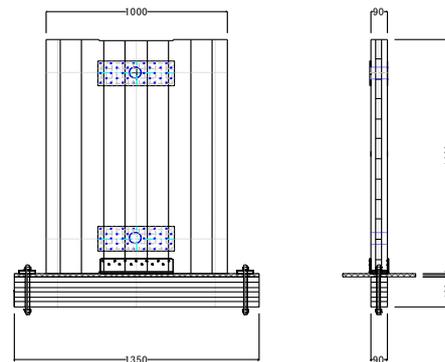


図 2.2.1.1 試験体概要

(2)試験体仕様及び形状

試験体を構成する CLT 壁パネル、せん断金物及他、せん断金物緊結接合具、CLT 床パネルおよび構造用集成材等の仕様を表 2.2.1.1 に示す。また接合金物等詳細図を図 2.2.1.2～2.2.1.4 に、試験体図を図 2.2.1.5～2.2.1.6 に示す。

表 2.2.1.1 試験体仕様

部材名	仕様
CLT 壁パネル	日本農林規格 JAS 3079：2019 直交集成板 強度等級：S60-3-3 同一等級構成直交集成板 厚さ(mm)：90 樹種：スギ ラミナ厚(mm)：30 ラミナ幅(mm)：122 (CLT 切断時に端部ラミナ幅は 122mm 以下) 層構成：3層3プライ 積層接着剤：水性高分子ーイソシアネート系接着剤 (使用環境 C) 幅はぎ接着：なし ラミナ区分：機械等級区分機による A 種ラミナ 製造：銘建工業株式会社 (JAS 認定番号：JPIC-CL6)
CLT 床パネル (試験体 LW4 は、床パネルを幅 90mm 高さ 210mm の梁として利用)	日本農林規格 JAS 3079：2019 直交集成板 強度等級：Mx60-7-7 異等級構成直交集成板 厚さ(mm)：210 樹種：スギ ラミナ厚(mm)：30 ラミナ幅(mm)：122 (CLT 切断時に端部ラミナ幅は 122mm 以下) 層構成：7層7プライ 積層接着剤：水性高分子ーイソシアネート系接着剤 (使用環境 C) 幅はぎ接着：なし ラミナ区分：機械等級区分機による A 種ラミナ 製造：銘建工業株式会社 (JAS 認定番号：JPIC-CL6)
構造用集成材 および 構造用合板	【構造用集成材】 日本農林規格 JAS 1152：2023 集成材で規定する構造用集成材 強度等級：E65-F225 対称異等級構成集成材 寸法(mm)：H210×W90 及び H180×W90 (構造用合板仕様) 樹種：スギ 【構造用合板】 合板の日本農林規格で規定する構造用合板 区分：特類 2 級 厚さ(mm)：24 構造用集成材に木ねじ L70mm 山径 5.5mm 頭部径 10.5mm (ネダノット ND5-70 (シネジック製)) 100mm 間隔で緊結

(次頁に続く)

表 2.2.1.1 試験体仕様 (続き)

<p>せん断金物等 緊結接合具</p>	<p>四角穴付きタッピンねじ STS・C65 (図 2.2.1.2 参照) χマーク金物 ((公財)日本住宅・木材技術センターχマーク承認) 長さ 65mm ねじ部山径 6.5mm 頭部径 10.5mm</p>
<p>壁-CLT 床パネル接合部 L 形金物</p>	<p>L 形金物 LST (図 2.2.1.3 参照) χマーク金物 ((公財)日本住宅・木材技術センターχマーク承認) 長さ 200mm×高さ 70mm 板厚 3.2mm 床パネルおよび壁パネルに四角穴付きタッピンねじ (STC・C65) 各 9 本 計 18 本</p>
<p>壁-CLT 床パネル接合部 及び 壁-構造用集成材接合部 コの字金物 (製作金物)</p>	<p>コの字金物(製作金物)(図 2.2.1.4 参照) 高さ 90mm×長さ 400mm 板厚 4.5mm 壁パネルに四角穴付きタッピンねじ (STC・C65) 両側に各 13 本 計 26 本 構造用集成材に四角穴付きタッピンねじ (STC・C65) 19 本</p>

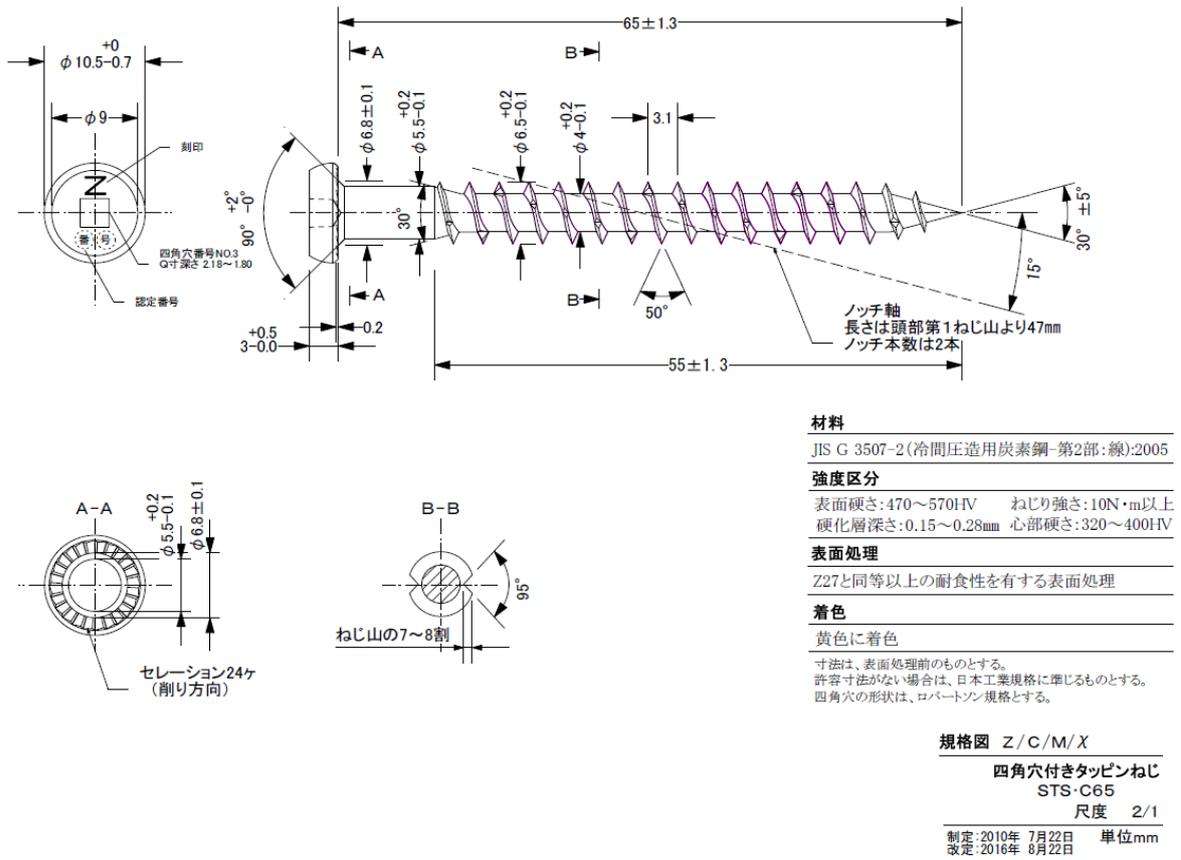


図 2.2.1.2 せん断金物緊結接合具 四角穴付きタッピンねじ (STS・C65 χ マーク金物)

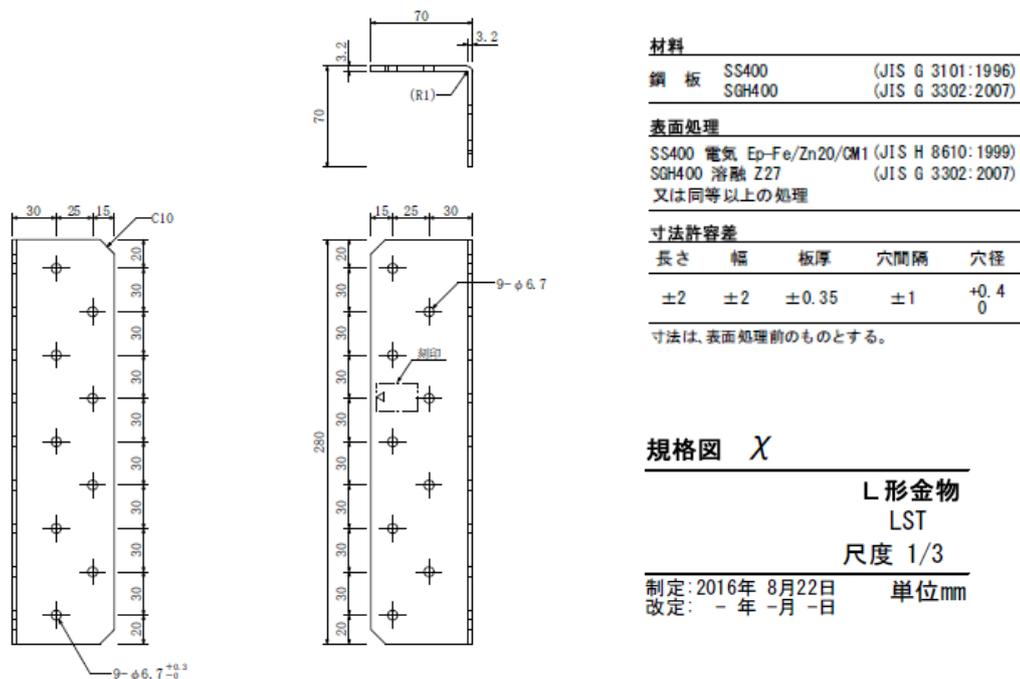
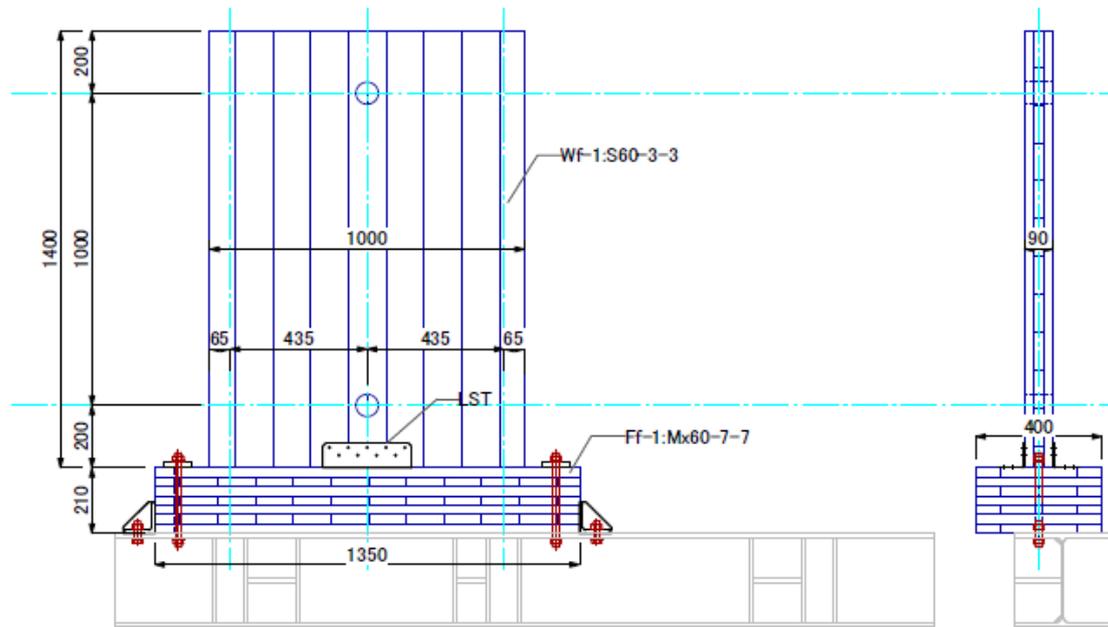
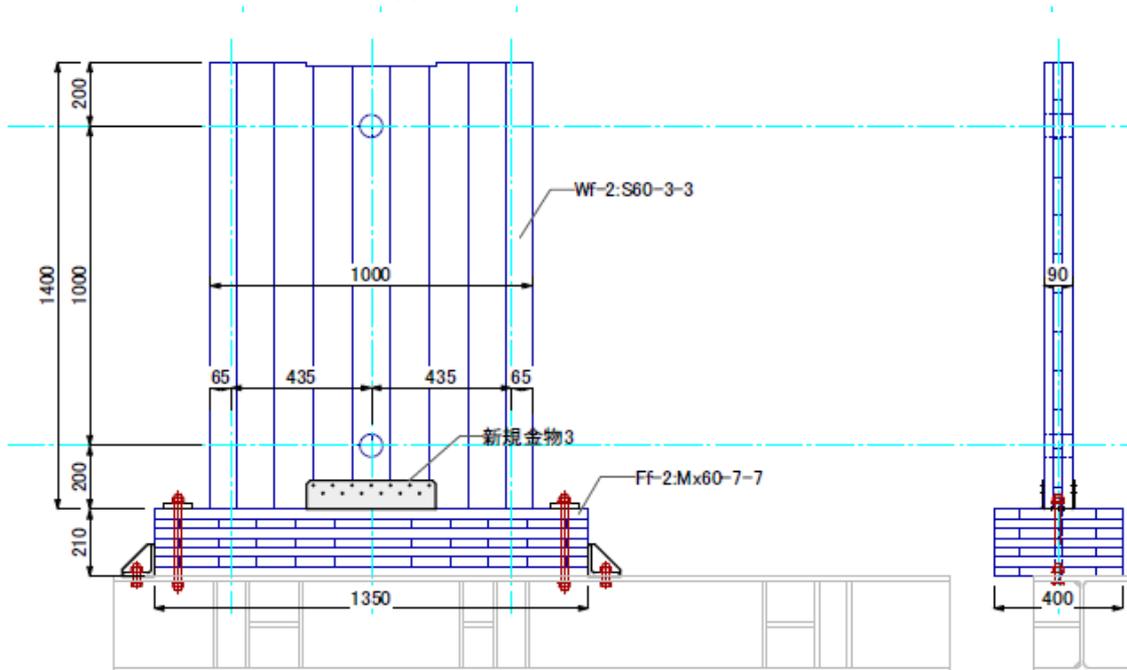


図 2.2.1.3 壁-CLT床パネル接合部 L形金物 (LST χ マーク金物)



F1

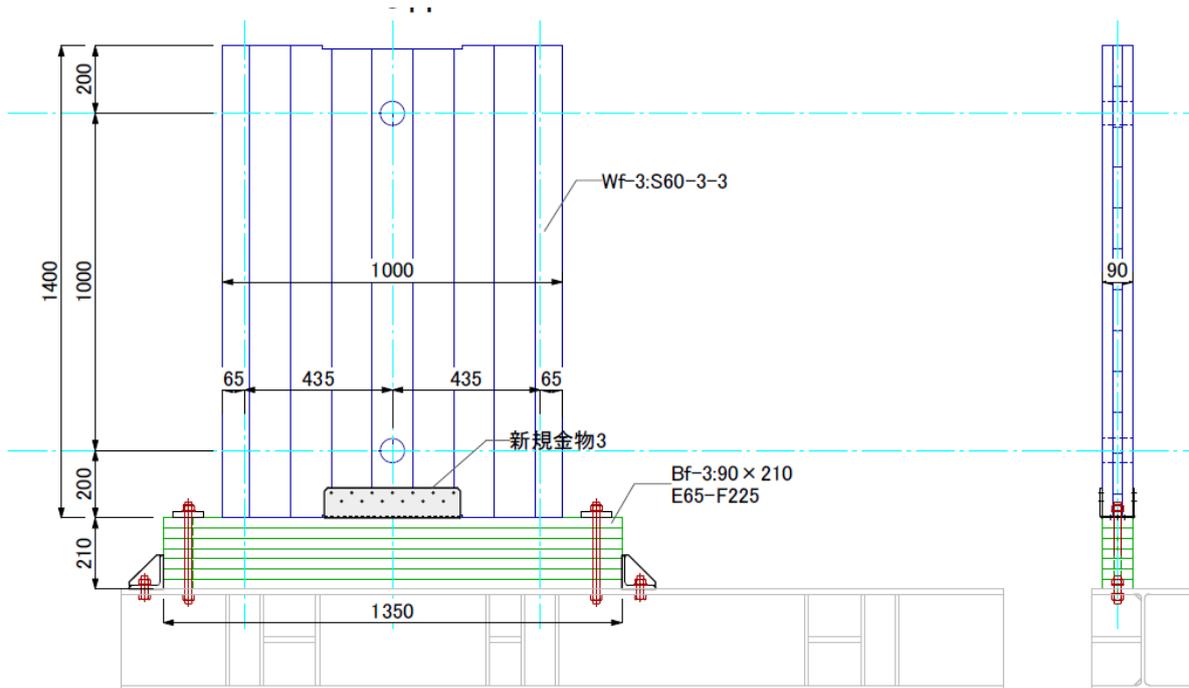
壁-床接合部 LST×2 壁幅1.0m
×3体



F2

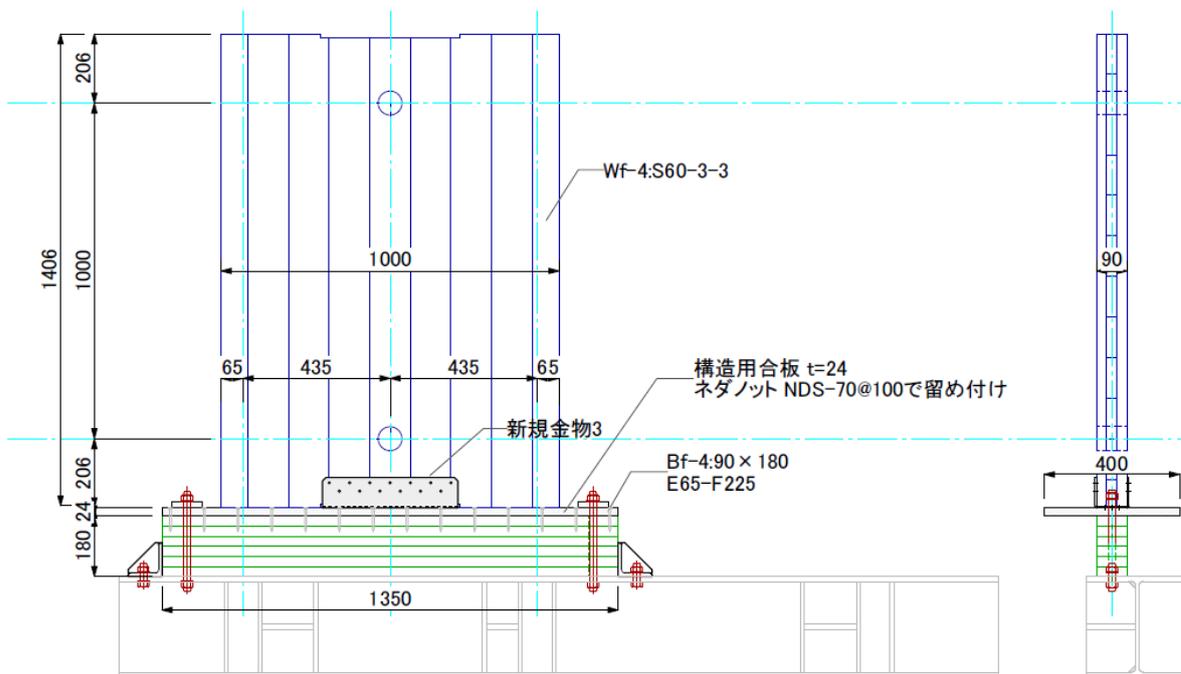
壁-床接合部 新規金物 壁幅1.0m

図 2.2.1.5 試験体図 F1、F2



F3

壁-梁接合部 新規金物 壁幅1.0m



F4

壁-床合板・梁接合部 新規金物 壁幅1.0m

図 2.2.1.6 試験体図 F3、F4

(3)CLT パネル等の密度・含水率

試験体を構成する CLT パネル等の密度・含水率測定結果を表 2.2.1.2 に示す。なお水平加力は、加力なし、1/30rad、1/15rad、1/12rad、1/10rad を基本としているが、壁パネルや床パネルを上下反転させて 2 条件の試験を計画しているため、CLT 壁パネルのロッキングにより CLT 床パネルや構造用集成材が割裂破壊したものについては、1/12rad を省略している。

表 2.2.1.2 CLT パネル等の密度・含水率測定結果

形状	水平加力条件	密度(kg/m ³)		含水率(%)	
		壁パネル	床パネル または 構造用集成材	壁パネル	床パネル または 構造用集成材
F1	水平加力なし	417	410	12.7	13.3
	1/30rad	417	432	12.7	13.7
	1/15rad	413	419	12.3	16.8
	1/12rad	417	410	13.7	13.5
	1/10rad	413	432	15.0	13.3
F2	水平加力なし	429	414	12.7	15.0
	1/30rad	413	419	14.0	13.5
	1/15rad	429	428	12.7	15.2
	1/10rad	425	414	14.0	13.8
F3	水平加力なし	425	412	15.2	14.0
	1/30rad	421	431	12.7	13.5
	1/15rad (補強)	417	412	13.5	16.5
	1/10rad	413	412	13.7	14.2
	1/15rad (SP プレート)	417	431	14.2	14.5
F4	水平加力なし	427	457	15.5	18.3
	1/30rad	431	480	13.3	19.3
	1/15rad	431	457	13.8	16.8
	1/12rad	427	480	12.7	18.3
	1/10rad (補強)	427	480	15.5	18.3

備考：・密度は実測質量(kg)を公称寸法から計算した体積 (m³)で除して算出した。

- ・含水率は電気式木材水分計(株式会社ケツト科学研究所 HM-520) 3 ヲ所測定の平均値とした。
- ・形状 F1 と F2 は CLT 床パネル仕様、F3、F4 は構造用集成材仕様(F3 は梁せい 210mm、F4 は梁せい 180mm+構造用合板(24mm))を示す。

F1～F4 の試験体設置状況例を
写真 2.2.1.1 に示す。



F1 水平加力なし



F2 水平加力なし



F3 水平加力なし



F4 水平加力なし

写真 2.2.1.1 2階 CLT 床パネル及び集成材梁上に設置した CLT 壁パネルのせん断性能確認実験
試験体設置状況例

2.2.2 試験方法

(1)加力方法

CLT 床パネルもしくは構造用集成材と CLT 壁パネルからなる試験体の CLT 床パネルまたは構造用集成材を、反力床上に設置した基礎フレームに固定した。水平加力は、CLT 壁パネルの上側加力点位置(直径 60mm の丸鋼を用いたピン支持、加力点は PL 4.5mm 厚と四角穴付きタッピンねじ(STS・C65)を用いて補強)を、油圧ジャッキを用いて正負繰り返しを行う装置を用いた。また壁パネル頂部両側には、水平加力による壁パネルの面外変形を拘束するためパンタグラフを設置した。

CLT 壁パネル上部加力点での水平加力は、ジャッキ押側を正、引側を負として、壁パネル脚部から加力点までの高さ $h=1200\text{mm}$ とした変形角 $1/240\text{rad}$ 、 $1/120\text{rad}$ 、 $1/60\text{rad}$ 、 $1/30\text{rad}$ 、 $1/15\text{rad}$ 、 $1/12\text{rad}$ 、 $1/10\text{rad}$ での正負 1 回繰り返しを原則とした。(注：正負繰り返し加力は、負側(ジャッキ引側)から加力する。)なお F1~F4 の試験体は各 5 体準備し、CLT 壁パネル上部の水平なし、 $+1/30\text{rad}$ まで、 $+1/15\text{rad}$ まで、 $+1/12\text{rad}$ まで、 $+1/10\text{rad}$ までの 5 条件の変形角まで繰り返し加力を行った後、CLT 壁パネル上部ジャッキを押側特定変形角で保持した状態で、CLT 壁パネル下部の加力点にジャッキを接続し、下部ジャッキを引っ張ることで CLT 壁パネル下部に設置したせん断金物の性能を確認する実験を行った。

CLT 壁パネルの上部及び下部の油圧ジャッキ(引 250kN、押 500kN ストローク $\pm 250\text{mm}$ (D5-500 理研精機(株))を用い、ジャッキ先端に荷重計($\pm 500\text{kN}$ (TCLM-500KNB (株)東京測器研究所)を取り付けた両端ピンとした。CLT 壁パネル上部の水平加力は、加力点高さに設置した変位計出力による自動制御静的加力装置(理研機器(株))を用いた変位制御とした。CLT 壁パネル下部の加力は、油圧ポンプを用いた手動加力とした。

加力装置への試験体設置図及び正負極性の設定を図 2.2.2.1 に、計測機器設置図を図 2.2.2.2 に示す。また計測機器リストを表 2.2.2.1 に示す。

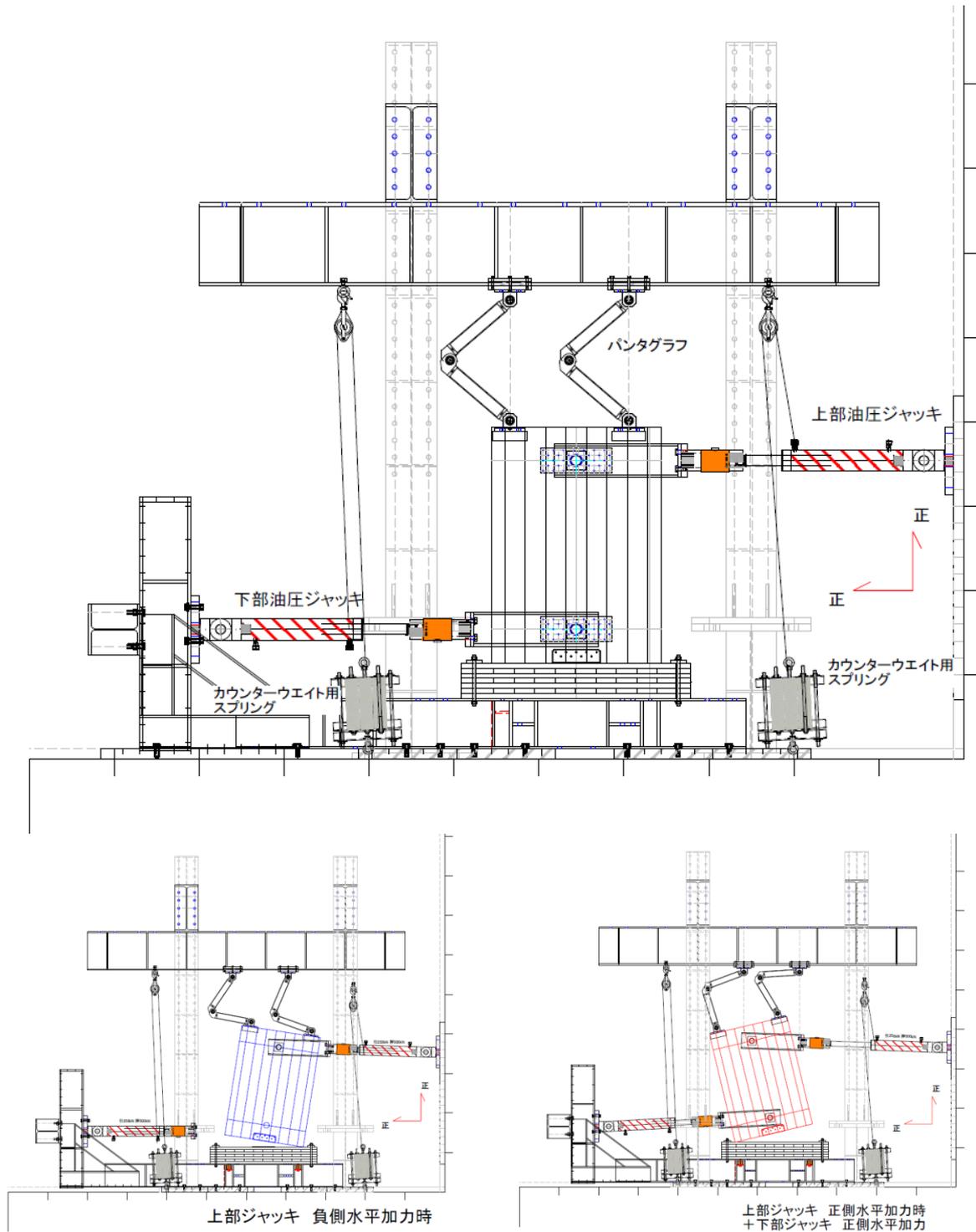


図 2.2.2.1 加力装置への試験体設置図 及び 正負極性の設定

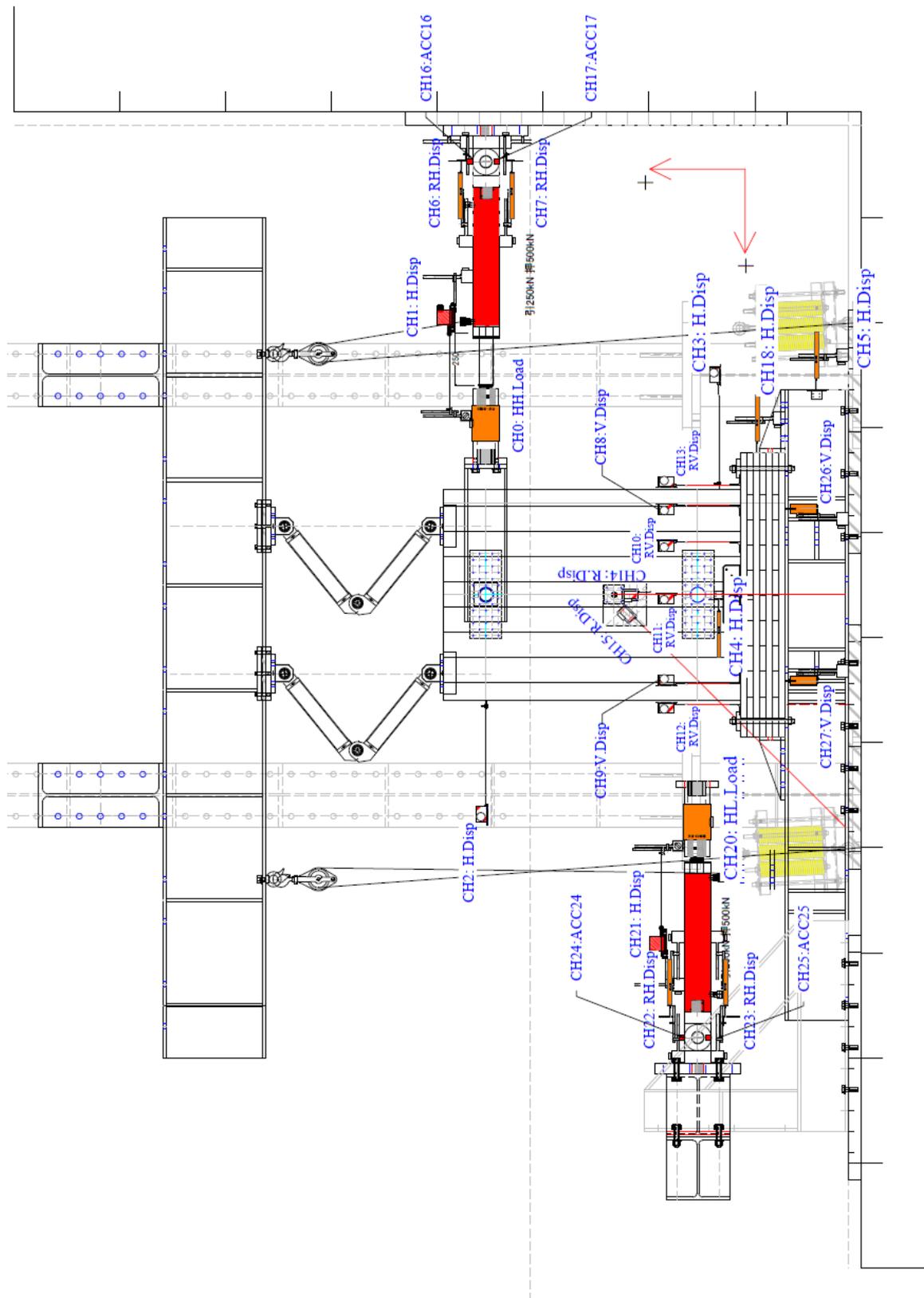


図 2.2.2.2 計測機器設置図 (極性：押を正、上を正)

表 2.2.2.1 計測機器リスト

CH 番号	ラベル	方向	絶対 相対	設置	ターゲット	極性	容量	単位	出力	単位	係数	備考
0	HLLD00	水平	絶対			-1	500	kN	5	V	-100	±500kN ±2000μ 動ひずみアンブ
1	H.DP01	水平	絶対			1	1000	mm	5	V	200	変位制御 1,000mm 10,000μ 動ひずみアンブ
2	H.DP02	水平	絶対			-1	1000	mm	10,000	×10 ⁶	-0.1	注：ワイヤー式変位計
3	H.DP03	水平	絶対			1	1000	mm	5,000	×10 ⁶	0.2	注：ワイヤー式変位計
4	H.DP04	水平	絶対			-1	500	mm	5,000	×10 ⁶	-0.1	注：ワイヤー式変位計
5	H.DP05	水平	絶対			1	100	mm	5,000	×10 ⁶	0.02	
6	RH.DP06	水平	相対	ジャッキ	クレビス	1	100	mm	5,000	×10 ⁶	0.02	
7	RH.DP07	水平	相対	ジャッキ	クレビス	1	100	mm	5,000	×10 ⁶	0.02	
8	V.DP08	鉛直	絶対			1	500	mm	5,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
9	V.DP09	鉛直	絶対			1	500	mm	5,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
10	RV.DP10	鉛直	相対	CLT	基礎フレーム	1	500	mm	5,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
11	RV.DP11	鉛直	相対	CLT	基礎フレーム	1	500	mm	5,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
12	RV.DP12	鉛直	相対	CLT	基礎フレーム	1	500	mm	10,000	×10 ⁶	0.05	注：ワイヤー式変位計
13	R.DP13	鉛直	相対	CLT	基礎フレーム	1	1000	mm	10,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
14	R.DP14	鉛直	相対	CLT	反力床	1	1000	mm	10,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
15	R.DP15	45度	相対	CLT	反力床	1	1000	mm	10,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
16	ACC up 16		絶対			1	9,802	m/s ²	1	V	9,802	
17	ACC down 17		絶対			1	9,802	m/s ²	1	V	9,802	
18	H.DP18	水平	絶対			1	100	mm	5000	×10 ⁶	0.02	
19	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
20	HL.LD20	水平	絶対			1	500	kN	2000	×10 ⁶	0.25	
21	H.DP21	水平	絶対			-1	1000	mm	10,000	×10 ⁶	-0.1	
22	RH.DP22	水平	相対	ジャッキ	クレビス	1	100	mm	5,000	×10 ⁶	0.02	
23	RH.DP23	水平	相対	ジャッキ	クレビス	1	100	mm	5,000	×10 ⁶	0.02	
24	ACC up 24		絶対			1	9,802	m/s ²	1	V	9,802	注：ワイヤー式変位計
25	ACC down 25		絶対			1	9,802	m/s ²	1	V	9,802	
26	V Disp CLT 26	鉛直	絶対			1	50	mm	5000	×10 ⁶	0.01	
27	V Disp CLT 27	鉛直	絶対			1	50	mm	5000	×10 ⁶	0.01	

備考： 上部水平荷重は、押しが正、引きが負出力、下部水平荷重は引きが正とした。絶対変位はジャッキ押しおよび上が正となるよう極性で調整した。

(2)加カスケジュール

水平加力は、CH1 の水平変位 δ_{CH1} (mm)で制御し、壁高さ h を壁パネルの上部丸鋼ピンと壁端間距離 $h=1200\text{mm}$ とし、(2-1)式で算出した変形角 θ (rad)が 1/240 (5.0mm)、1/120 (10.0mm)、1/60 (20.0mm)、1/30 (40.0mm)、1/15 (80.0mm)、1/7.5(160.0mm)、1/3.75(320mm)を特定変形角とした。

$$\theta = \frac{\delta_{CH1}}{h} \quad (2-1)$$

水平加力は負側（油圧ジャッキ引き側）から開始し、設定した特定変形角で正負1回繰り返し加力を行い、設定した特定変形角で変位保持した状態で、CLT 壁パネル下部のジャッキを試験体と接続し、CLT 壁パネル脚部に設置したせん断金物の性能を確認した。

+1/10rad 変形時の状況、-1/10rad 変形時の状況及び-1/10rad 変形時の下部ジャッキ接続状況を写真 2.2.2.1 に示す。

また水平加力による正負繰り返し加力における特定変形角と特定変形角で保持した状態のせん断金物性能試験の関係を表 2.2.2.2 に示す。

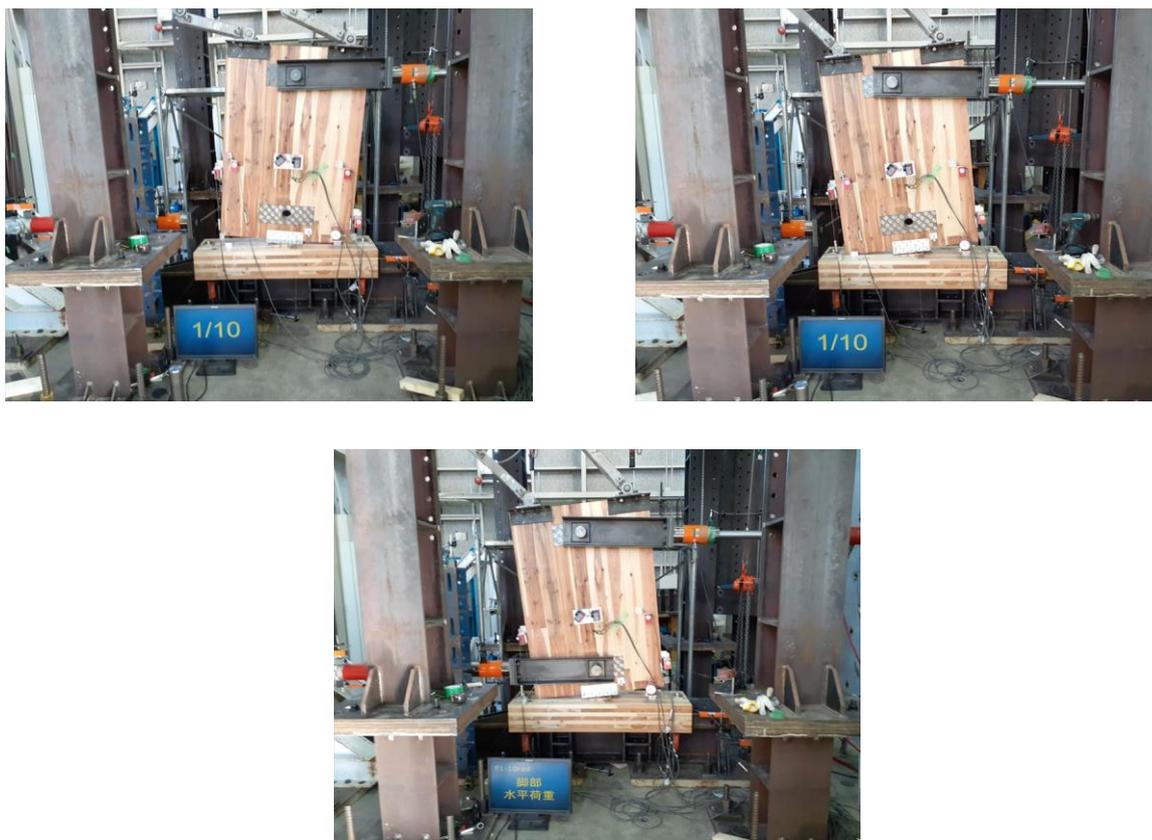


写真 2.2.2.1 +1/10rad 時(左上)、-1/10rad 時 (右上) 及び下部ジャッキ接続状況

表 2.2.2.2 水平加力による繰り返しスケジュールと鉛直荷重載荷変形角の関係

No.	繰り返し変形角	試験体			
		F1 (LST 金物・CLT 床)	F2 ※1 (コの字金物・CLT 床)	F3 ※2 ※3 (コの字金物・集成材梁)	F4 ※2 (コの字金物・集成材梁+合板)
1	水平加力なし	<u>A</u> , B, C, D, E	<u>A</u> , B, C, D	<u>A</u> , B, C, D, (E)	<u>A</u> , B, C, D, E
2	±1/240 rad	B, C, D, E	B, C, D	B, C, D, (E)	B, C, D, E
3	±1/120 rad	B, C, D, E	B, C, D	B, C, D, (E)	B, C, D, E
4	±1/60 rad	B, C, D, E	B, C, D	B, C, D, (E)	B, C, D, E
5	±1/30 rad	<u>B</u> , C, D, E	<u>B</u> , C, D	<u>B</u> , C, D, (E)	<u>B</u> , C, D, E
6	±1/15 rad	<u>C</u> , D, E	<u>C</u> , D	<u>C</u> , D, (E)	<u>C</u> , D, E
7	±1/12 rad	<u>D</u> , E	D	D	<u>D</u> , E
8	±1/10 rad	<u>E</u>	<u>D</u>	<u>D</u>	<u>E</u>

備考：※1：F2 試験体は正負繰り返し加力による床パネルの損傷が大きく、上下反転させて試験を行うことができなかつたため、A～D の 4 段間の繰り返し加力となつた。

※2：F3 C 試験体及び F4 E 試験体は集成材梁をタルキック II (TK5-150II シネジック製) 6 本で割裂補強を施した。

※3：(E) はコの字金物を用いず、SP 金物 (χマーク金物) で試験を実施した。

変形角は水平変位を標点高さ $h=1200\text{mm}$ で除して求めた。

表中の太字下線は、特定変形角で保持した状態で下部せん断金物の性能を確認したことを示す。

2.2.3 試験結果

試験結果として、壁パネル頂部の繰り返し荷重における荷重－変位曲線及び特定変形角保持状態での壁パネル脚部の荷重－変位曲線を以降に示す。

(1)試験体 F1 (CLT 床－LST 金物仕様)

試験体 F1 (CLT 床－LST 金物仕様) の頂部水平加力における荷重－変位曲線と、設定した特定変位で保持した状態での CLT 壁パネル下部を加力した時の荷重－変位曲線を図 2.2.3.1 に示す。また試験実施状況及び破壊状況を写真 2.2.3.1 に示す。

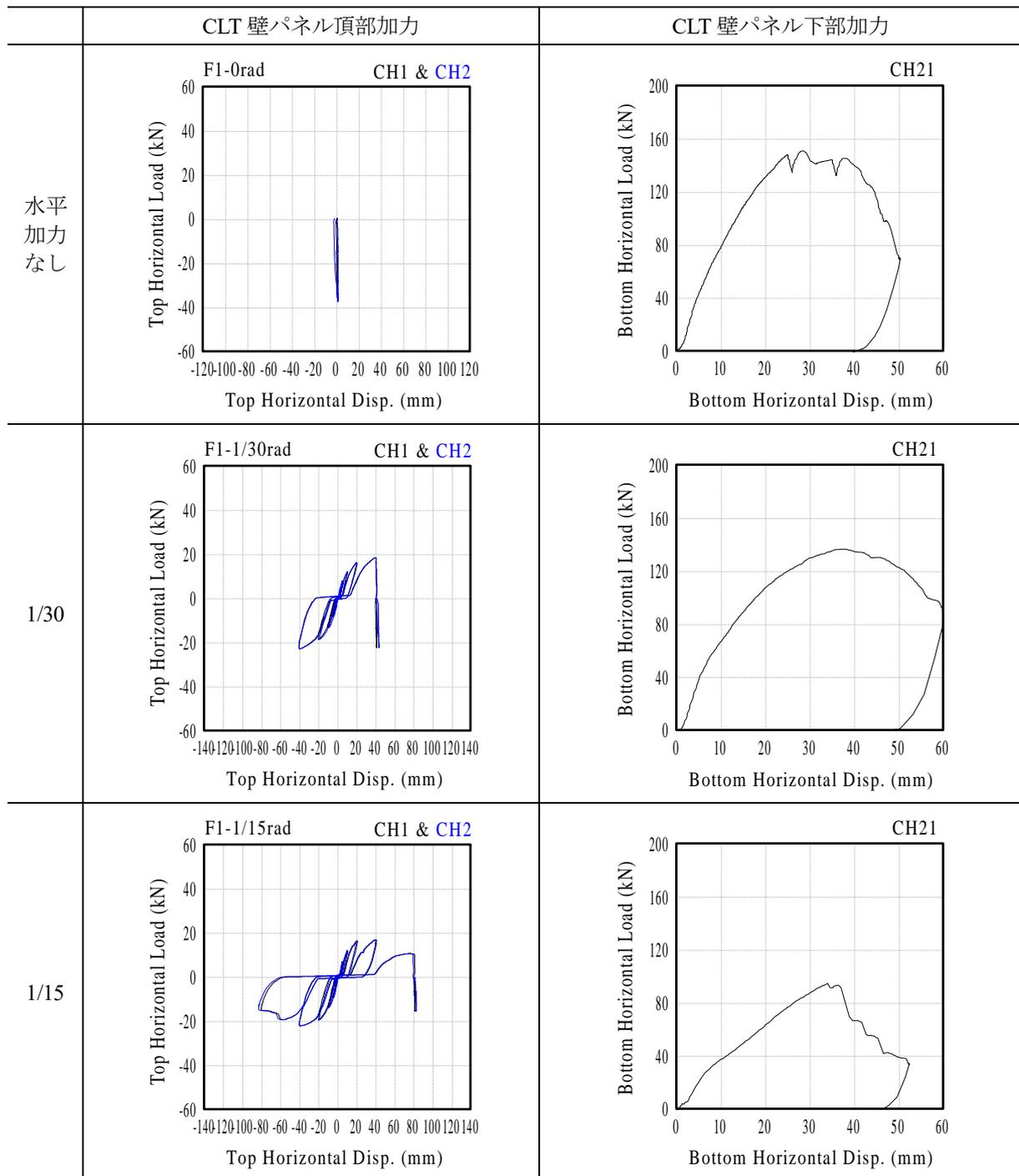


図 2.2.3.1 F1 試験体 荷重－変位曲線 (左：頂部水平加力 右：下部水平加力)

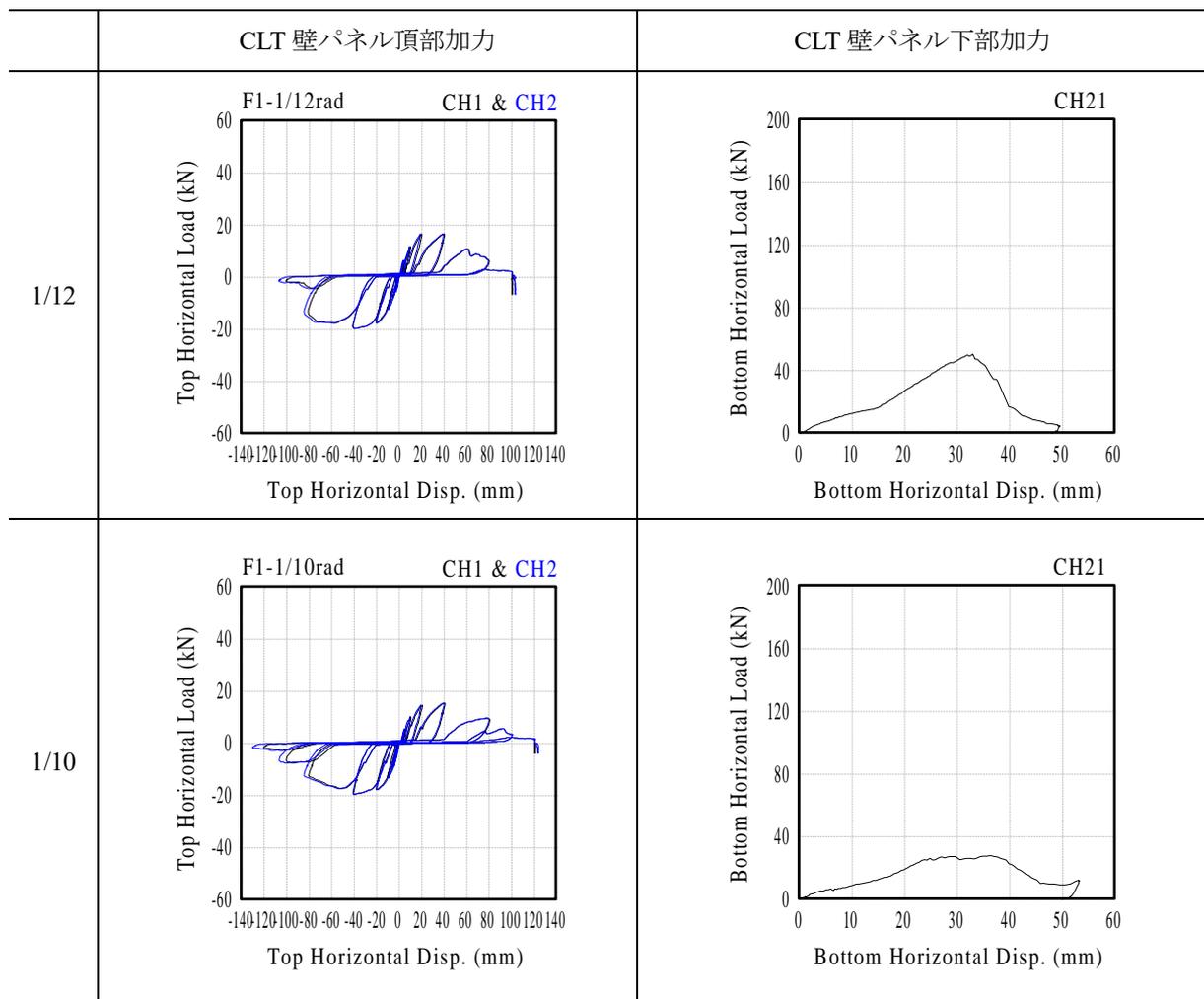
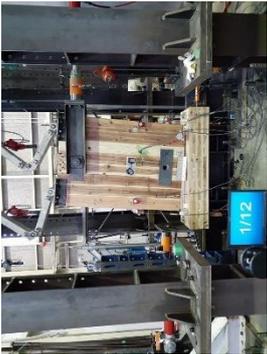


図 2.2.3.1 F1 試験体 荷重-変位曲線 (左: 頂部水平加力 右: 下部水平加力) (続き)

F1 水平加力なし		F1 1/30 rad まで加力	
			
試験前	試験前	試験前	-1/30 rad 時
			
LST 金物 状況 (表側)	壁パネル脚部状況	+1/30 rad 時 (頂部変位保持)	脚部水平加力 終局時
			
LST 金物 状況 (裏側)	LST 金物 状況 (裏側)	LST 金物 状況 (表側)	LST 金物 状況 (裏側)

(次頁に続く)

写真 2.2.3.1 試験実施状況及び破壊状況 F1

F1 1/15 rad まで加力		F1 1/12 rad まで加力	
			
試験前	試験前	試験前	試験前
+	-	+	-
1/15 rad 時 (頂部変位保持)	1/15 rad 時 結局時	1/12 rad 時 (頂部変位保持)	1/12 rad 時 結局時
			
LST 金物 状況 (表側)	LST 金物 状況 (裏側)	LST 金物 状況 (表側)	LST 金物 状況 (裏側)

(次頁に続く)

写真 2.2.3.1 試験実施状況及び破壊状況 F1 (続き)

F1 1/10 rad まで加力



試験前



- 1/10 rad 時



+1/10 rad 時 (頂部変位保持)



脚部水平加力 終局時



LST 金物 状況 (表側)



LST 金物 状況 (裏側)

写真 2.2.3.1 試験実施状況及び破壊状況 F1 (続き)

(2)試験体 F2 (CLT 床-コの字金物仕様)

試験体 F2 (CLT 床-コの字金物仕様) の頂部水平加力における荷重-変位曲線と、設定した特定変位で保持した状態での CLT 壁パネル下部を加力した時の荷重-変位曲線を図 2.2.3.2 に示す。また試験実施状況及び破壊状況を写真 2.2.3.2 に示す。

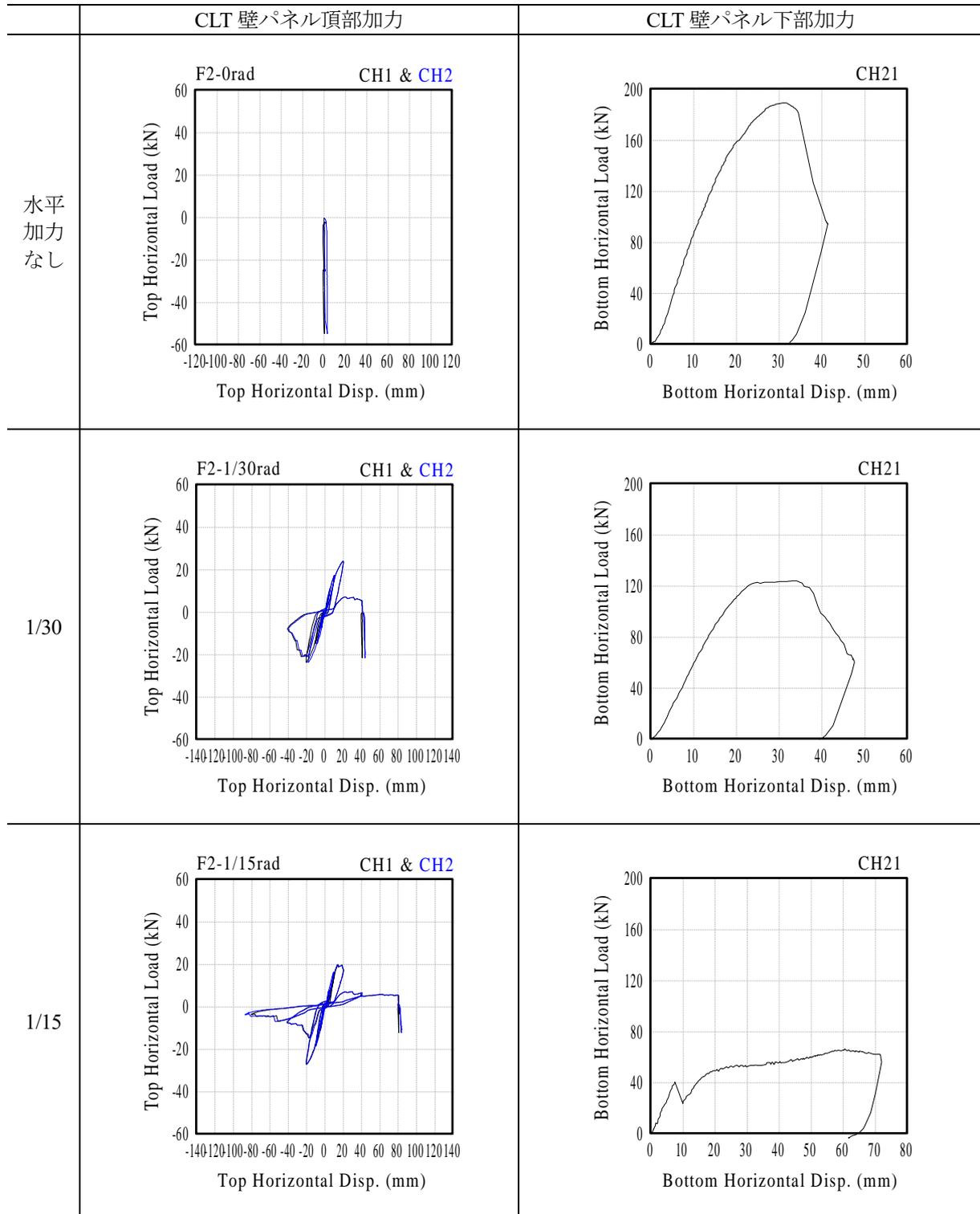


図 2.2.3.2 F2 試験体 荷重-変位曲線 (左: 頂部水平加力 右: 下部水平加力)

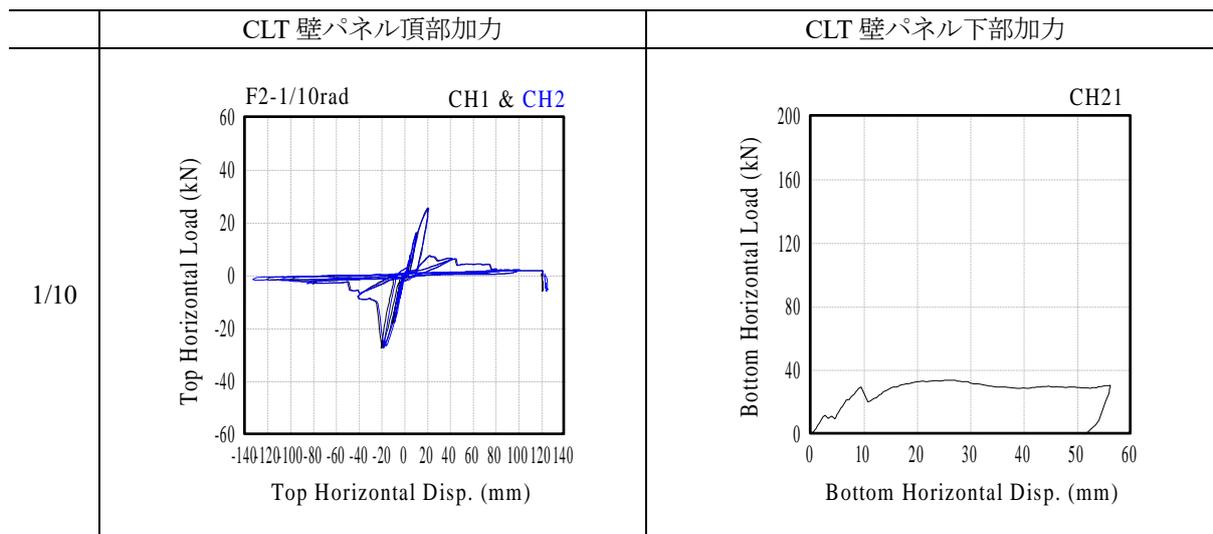


図 2.2.3.2 F2 試験体 荷重-変位曲線 (左: 頂部水平加力 右: 下部水平加力) (続き)

F2 水平加力なし		F2 1/30 rad まで加力	
			
試験前	試験前 コの字金物 設置状況	試験前(1/10rad 予定→1/30rad に変更)	- 1/30 rad 時
			
脚部水平加力 終局時	コの字金物 状況 (表側)	+ 1/30 rad 時 (頂部変位保持)	脚部水平加力 終局時
			
コの字金物 状況 (裏側)	コの字金物 状況 (裏側)	コの字金物 状況 (表側)	解体時 STS・C65 状況 (次頁に続く)

写真 2.2.3.2 試験実施状況及び破壊状況 F2

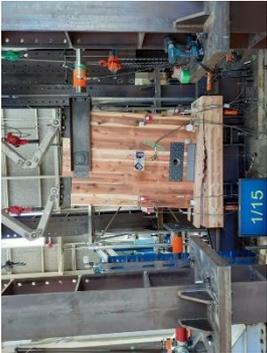
F2 1/15 rad まで加力		F2 1/10 rad まで加力	
			
試験前	試験前	試験前	試験前
			
+1/15 rad 時 (頂部変位保持)	脚部水平加力 終局時	+1/10 rad 時 (頂部変位保持)	脚部水平加力 終局時
			
CLT床パネル+コの字金物 状況 (表側)	CLT床パネル+コの字金物 状況 (裏側)	CLT床パネル 状況 (表側)	コの字金物 状況 (終了時)

写真 2.2.3.2 試験実施状況及び破壊状況 F2 (続き)

(3)試験体 F3 (構造用集成材梁-コの字金物仕様)

試験体 F3 (構造用集成材梁-コの字金物仕様) の頂部水平加力における荷重-変位曲線と、設定した特定変位で保持した状態での CLT 壁パネル下部を加力した時の荷重-変位曲線を図 2.2.3.3 に示す。また試験実施状況及び破壊状況を写真 2.2.3.3 に示す。

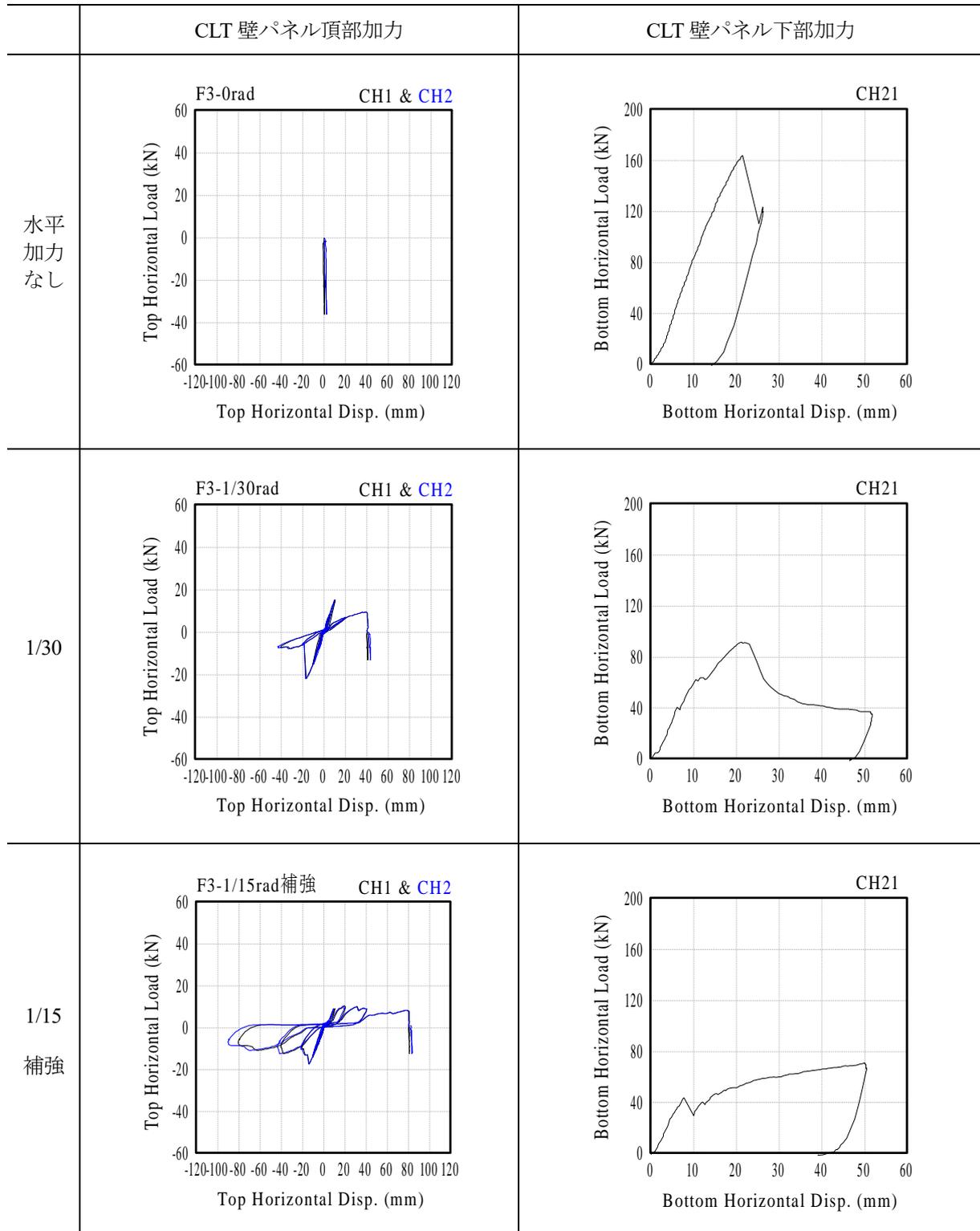


図 2.2.3.3 F3 試験体 荷重-変位曲線 (左: 頂部水平加力 右: 下部水平加力)

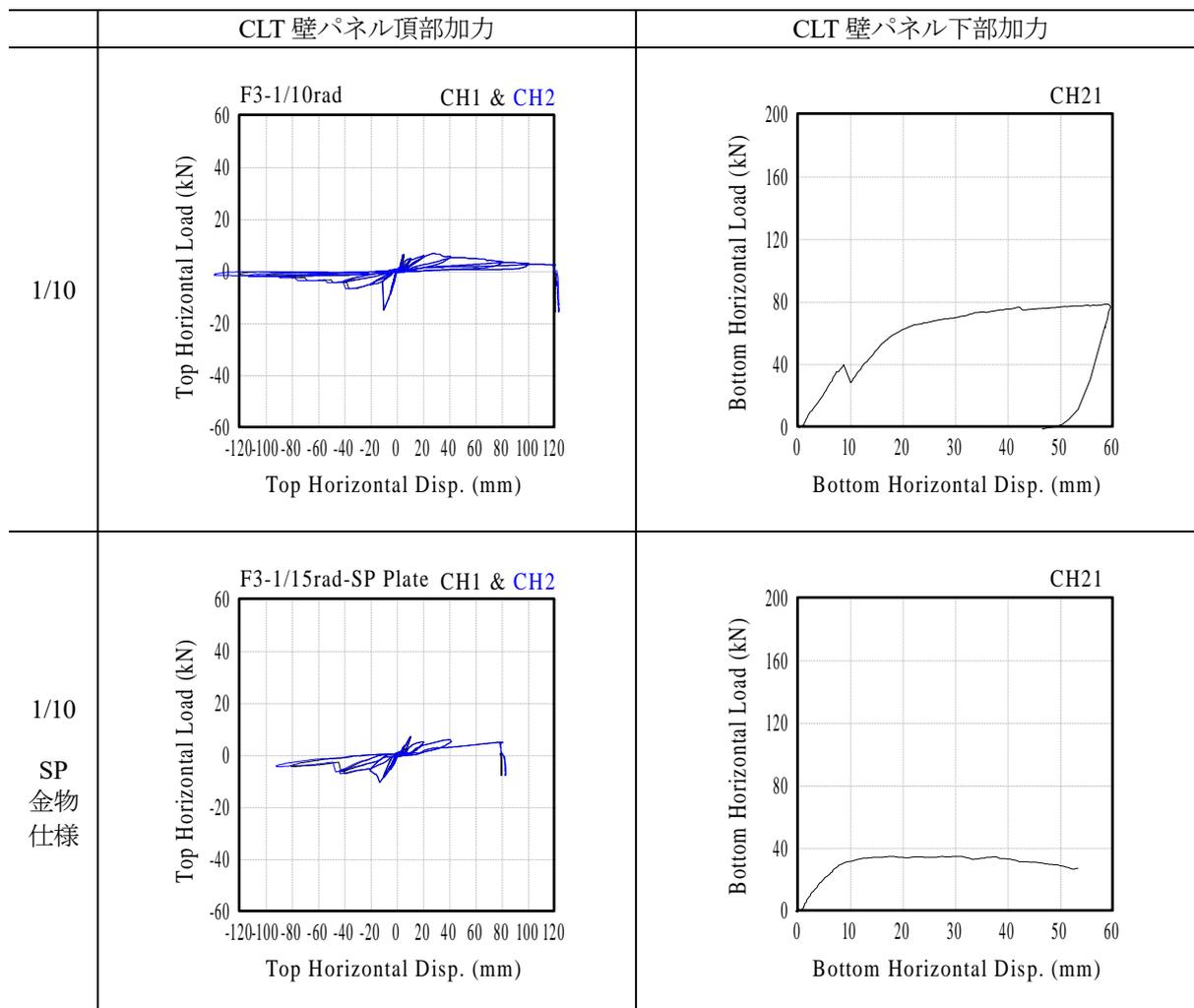


図 2.2.3.3 F3 試験体 荷重-変位曲線 (左: 頂部水平加力 右: 下部水平加力) (続き)

F3 水平加力なし		F3 1/30 rad まで加力	
			
試験前	コの字金物と集成材設置状況	試験前	- 1/30 rad 時
			
脚部水平加力 終局時	構造用集成材 割れ発生 (表側)	+ 1/30 rad 時 (頂部変位保持)	脚部水平加力 終局時
	コの字金物と CLT 壁パネルの変形		
構造用集成材 割れ発生 (裏側)		構造用集成材とコの字金物の状況 (表側)	構造用集成材端部状況

写真 2.2.3.3 試験実施状況及び破壊状況 F3

F3 (補強) 1/15 rad まで加力		F3 1/10 rad まで加力	
			
試験前	試験前	試験前	試験前
			
+1/15 rad 時 (頂部変位保持)	脚部水平加力 終局時	+1/10 rad 時 (頂部変位保持)	構造用集成材とコの字金物の状況 (表側)
			
構造用集成材とコの字金物の状況 (表側)	構造用集成材とコの字金物の状況 (裏側)	構造用集成材とコの字金物の状況 (裏側)	構造用集成材端部状況

写真 2.2.3.3 試験実施状況及び破壊状況 F3 (続き)

F3 1/15 rad まで加力 (SP 金物仕様)



試験前



- 1/15 rad 時



+ 1/15 rad 時 (頂部変位保持)



脚部水平加力 終局時



構造用集成材と SP 金物の状況 (表側)



構造用集成材と CLT 壁パネル 破壊状況

写真 2.2.3.3 試験実施状況及び破壊状況 F3 (続き)

(4)試験体 F4 (構造用集成材梁 (構造用合板木ねじ固定) -コの字金物仕様)

試験体 F4 (構造用集成材梁 (構造用合板木ねじ固定) -コの字金物仕様) の頂部水平加力における荷重-変位曲線と、設定した特定変位で保持した状態での CLT 壁パネル下部を加力した時の荷重-変位曲線を図 2.2.3.4 に示す。また試験実施状況及び破壊状況を写真 2.2.3.4 に示す。

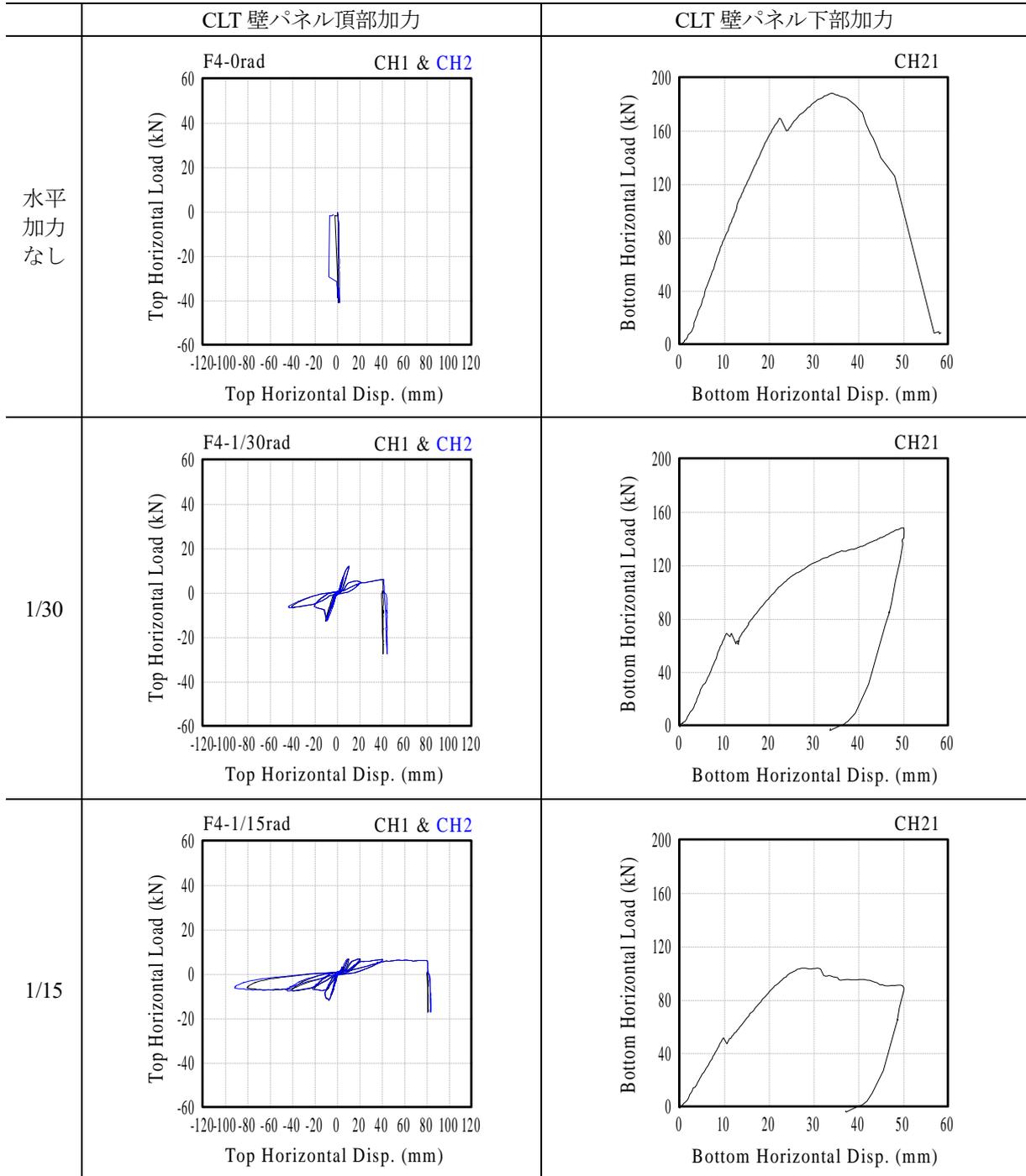


図 2.2.3.4 F4 試験体 荷重-変位曲線 (左: 頂部水平加力 右: 下部水平加力)

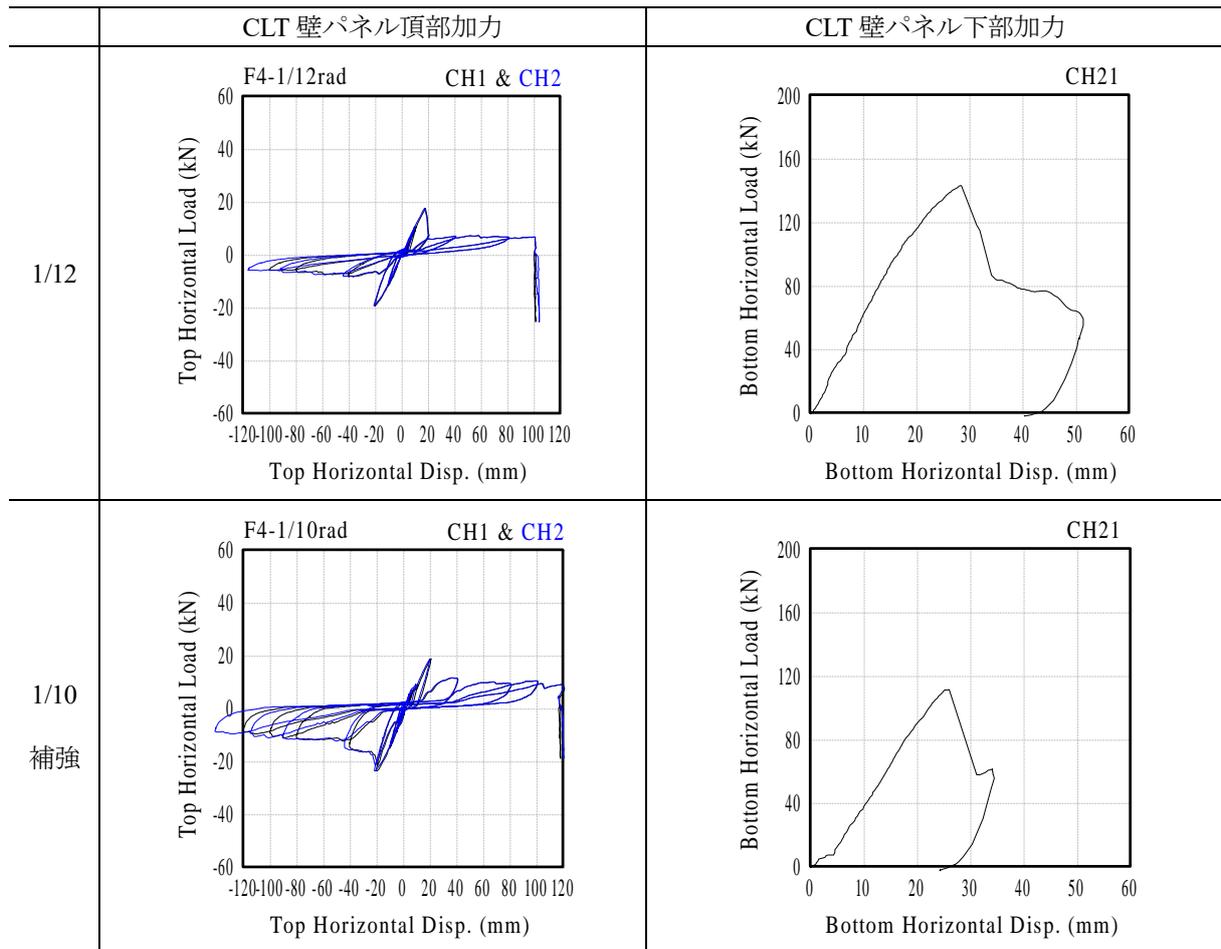


図 2.2.3.4 F4 試験体 荷重—変位曲線 (左：頂部水平加力 右：下部水平加力) (続き)

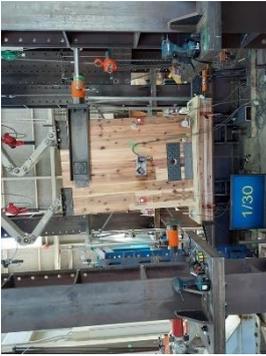
F4 水平加力なし		F4 1/30 rad まで加力	
			
試験前	脚部水平加力 終局時	試験前	-1/30 rad 時
			
構造用合板とコの字金物の状況 (表側)	CLT 壁パネル端部 浮き上がり	+1/30 rad 時 (頂部変位保持)	脚部水平加力 終局時
			
構造用合板とコの字金物の状況 (表側)	構造用集成材の亀裂	構造用集成材の亀裂	構造用集成材+合板端部 状況

写真 2.2.3.4 試験実施状況及び破壊状況 F4

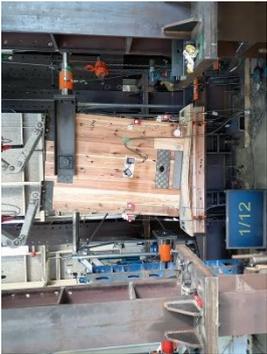
F4 1/15 rad まで加力		F4 1/12 rad まで加力	
			
試験前	試験前	試験前	試験前
+1/15 rad 時 (頂部変位保持)	脚部水平加力 終局時	+1/12 rad 時 (頂部変位保持)	脚部水平加力 終局時
			
構造用集成材の亀裂	構造用合板とコの字金物の状況 (表側)	構造用合板の引張破壊	構造用集成材の亀裂

写真 2.2.3.4 試験実施状況及び破壊状況 F4 (続き)

F4 (補強) 1/10 rad まで加力



試験前



-1/10 rad 時



+1/10 rad 時 (頂部変位保持)



脚部水平加力 終局時



構造用合板の引張破壊



構造用集成材の亀裂

写真 2.2.3.4 試験実施状況及び破壊状況 F4 (続き)

2.2.4. 試験結果比較

図 2.2.4.1 に接合部の柱頭の回転角と最大水平耐力との関係を示す。壁一床接合部を想定した F1、F2 では柱頭の回転角と最大水平せん断力の関係は概ね線形である。壁一梁接合部を想定した F3、F4 では 1/12rad 以上の変形角線形関係で無くなっているのは写真 2.2.4.1 及び写真 2.2.4.2 に示すように梁に割裂及び上下の分断が生じた影響であると考えられる。梁の割裂が発生しないように、せん断断金物の形状変更等の改良を行うことが望ましいと考えられる。

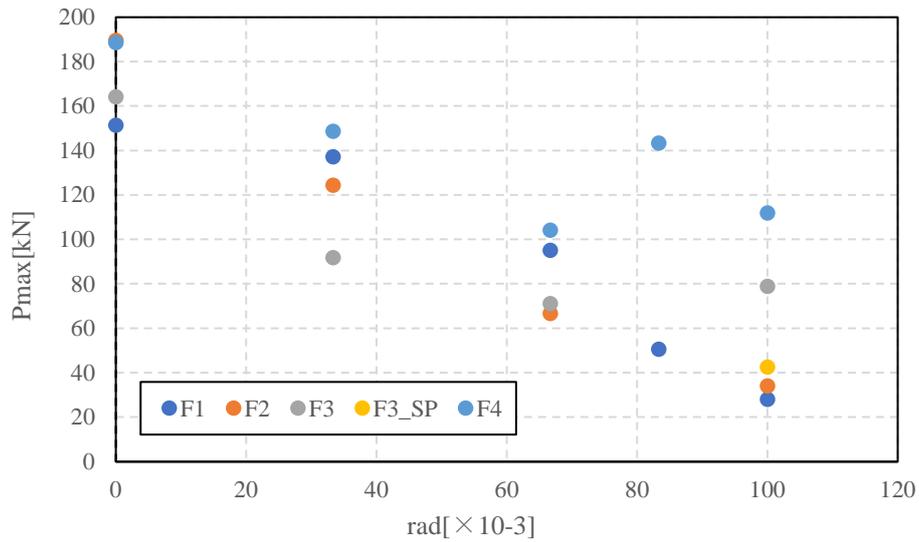


図 2.2.4.1 接合部変形角と最大水平せん断耐力の関係



写真 2.2.4.1 集成材梁の割裂 1



写真 2.2.4.2 集成材梁の割裂 2

2.3 基礎フレーム上に設置した CLT 壁パネルのせん断性能確認実験

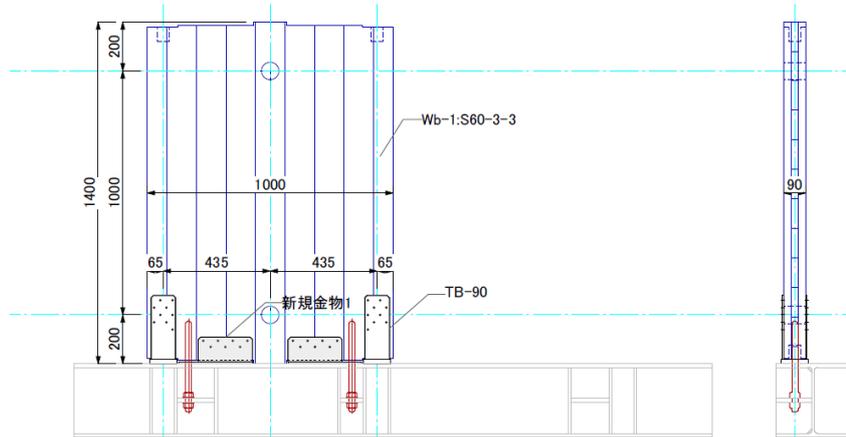
2.3.1.1 試験体

(1) 試験体概要

試験体は CLT パネル工法における基礎フレーム上に設置された CLT 壁パネルで、壁長さ 1m 仕様と 2m 仕様の 2 種類とした。

(各 3 体、試験体記号：壁長さ 1m 仕様は B1-1～B1-3、壁長さ 2m 仕様は B2-1～B2-3)

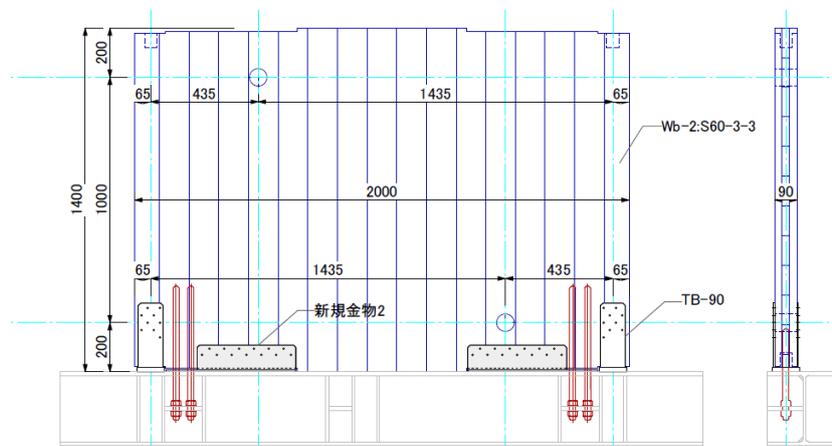
試験体概要を図 2.3.1.1 に示す。(試験体仕様および形状詳細は 2.3.2 項以降に示す。)



B1

壁-基礎接合部 壁幅1.0m

× 3体



B2

壁-基礎接合部 壁幅2.0m

× 3体

図 2.3.1.1 基礎フレーム上に設置した CLT 壁パネルのせん断性能確認実験 試験体概要

(2)試験体仕様及び形状

試験体を構成する CLT 壁パネル、引張金物、せん断金物、せん断金物緊結接合具の仕様を表 2.3.1.1 に示す。また接合金物等詳細図を図 2.3.1.2～図 2.3.1.6 に、試験体図を図 2.3.1.7 に示す。

表 2.3.1.1 CLT 壁パネル、せん断金物、せん断金物緊結接合具の仕様

部材名	仕様
CLT 壁パネル	日本農林規格 JAS 3079 : 2019 直交集成板 強度等級 : S60-3-3 同一等級構成直交集成板 厚さ(mm) : 90 樹種 : スギ ラミナ厚(mm) : 30 ラミナ幅(mm) : 122 (CLT 切断時に端部ラミナ幅は 122mm 以下) 層構成 : 3 層 3 プライ 積層接着剤 : 水性高分子-イソシアネート系接着剤 (使用環境 C) 幅はぎ接着 : なし ラミナ区分 : 機械等級区分機による A 種ラミナ 製造 : 銘建工業株式会社 (JAS 認定番号 : JPIC-CL6)
せん断金物 緊結接合具	四角穴付きタッピンねじ STS・C65 (図 2.3.1.2 参照) χ マーク金物 ((公財)日本住宅・木材技術センター χ マーク承認) 長さ 65mm ねじ部山径 6.5mm 頭部径 10.5mm
引張金物	引張金物 TB-90 (図 2.3.1.3 参照) χ マーク金物 ((公財)日本住宅・木材技術センター χ マーク承認) 底部 110×110mm プレート厚さ 19mm 側面 幅 100mm×高さ 280mm (底部含む) 板厚 4.5mm 四角穴付きタッピンねじ STS・C65 を用いて CLT 壁パネルに片面 9 本 (両面で 18 本) 緊結 注 : 引張金物は、CLT 壁パネル端部の圧縮に作用させるため、基礎フレームとは緊結しない。ただし B1 の 2 体目、3 体目はせん断力に抵抗させる目的で加力側引張金物に M16 全ねじボルトを設置した。

(次頁に続く)

表 2.3.1.1 CLT 壁パネル、せん断金物、せん断金物緊結接合具の仕様 (続き)

<p>B1 用コの字型 せん断金物 (新規金物)</p>	<p>B1 用コの字金物 (新規金物) (図 2.3.1.4 参照) 高さ 100mm×長さ 220mm 板厚 4.5mm のコの字型金物底部に 厚さ 9mm 長さ 300mm 幅 110mm のプレートを溶接 (隅肉溶接脚長 6mm) 壁パネルに四角穴付きタッピンねじ (STC・C65) 片側に各 7 本 計 14 本 底部プレートに φ25mm 穴 1 個</p>
<p>B2 用コの字型 せん断金物 (新規金物)</p>	<p>B2 用コの字金物 (新規金物) (図 2.3.1.5 参照) 高さ 100mm×長さ 400mm 板厚 4.5mm のコの字型金物底部に 厚さ 9mm 長さ 525mm 幅 110mm のプレートを溶接 (隅肉溶接脚長 6mm) 壁パネルに四角穴付きタッピンねじ (STC・C65) 片側に各 13 本 計 26 本 底部プレートに φ25mm 穴 2 個</p>
<p>コの字型せん断金物 鉛直方向ガイドピン 丸鋼</p>	<p>コの字型せん断金物鉛直方向ガイドピン 丸鋼 (図 2.3.1.6 参照) B1 用 : 直径 24mm 長さ 370mm ねじ部 M24 長さ 100mm B2 用 : 直径 24mm 長さ 545mm ねじ部 M24 長さ 100mm</p>

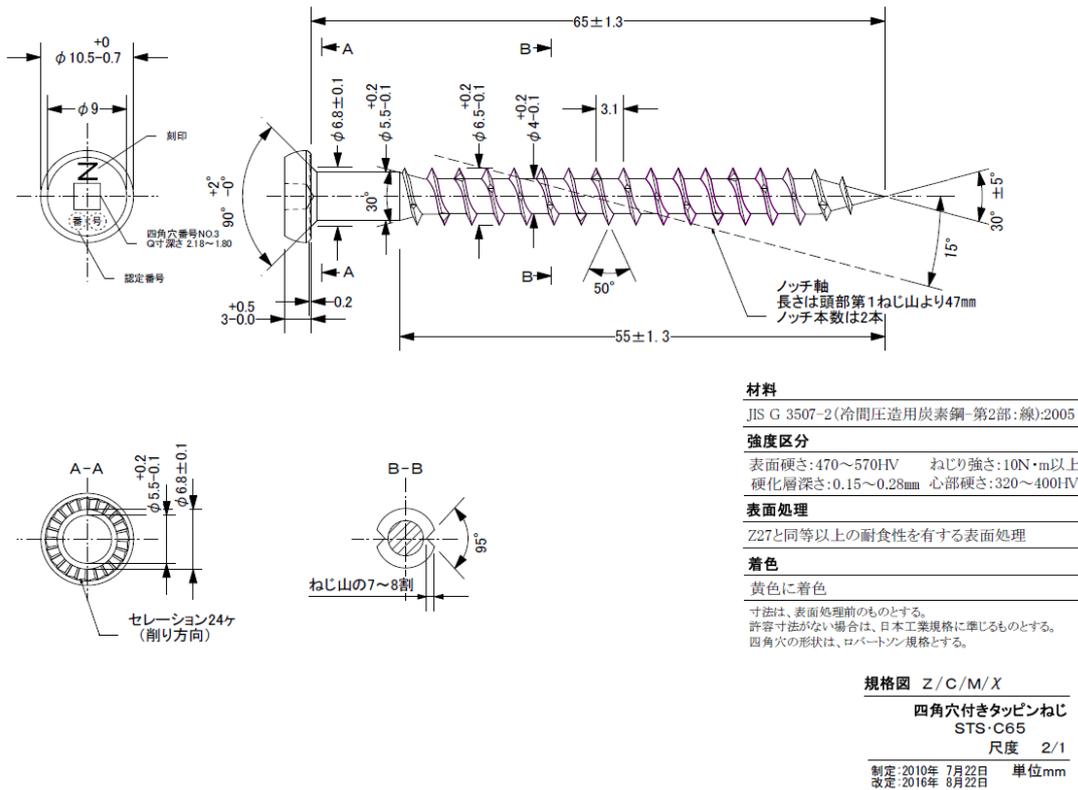


図 2.3.1.2 せん断金物緊結接合具 四角穴付きタッピンねじ (STS・C65 χ マーク金物)

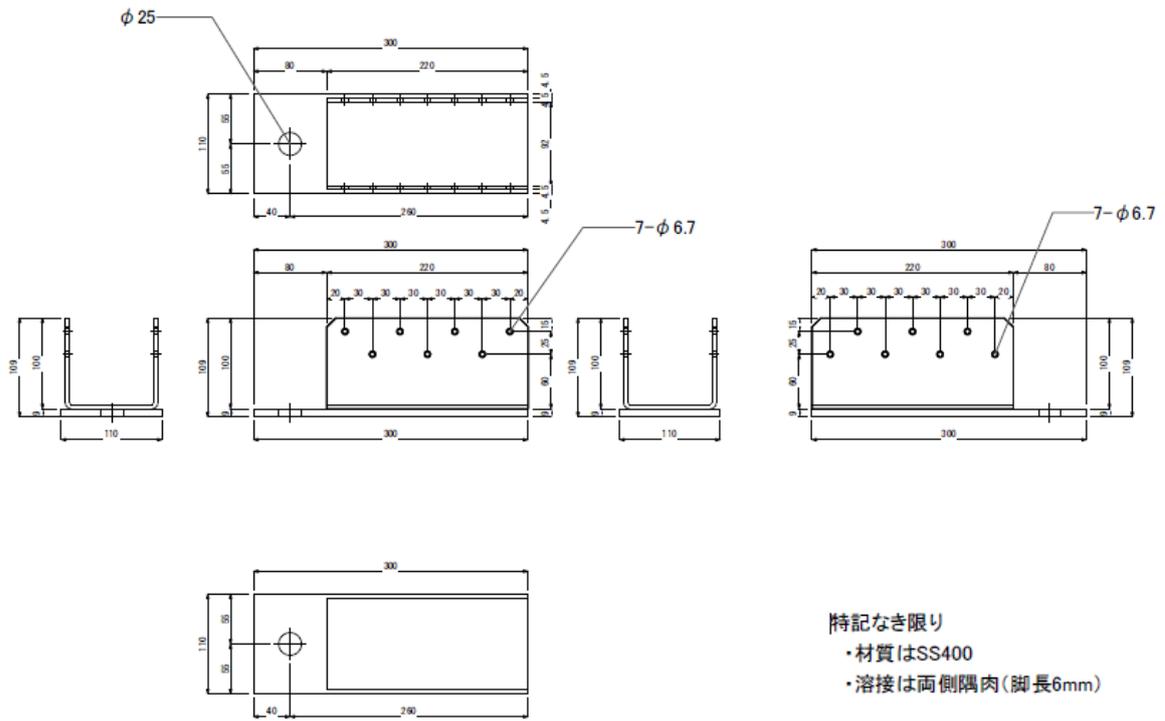


図 2.3.1.4 B1 用コの字型せん断金物 (新規金物)

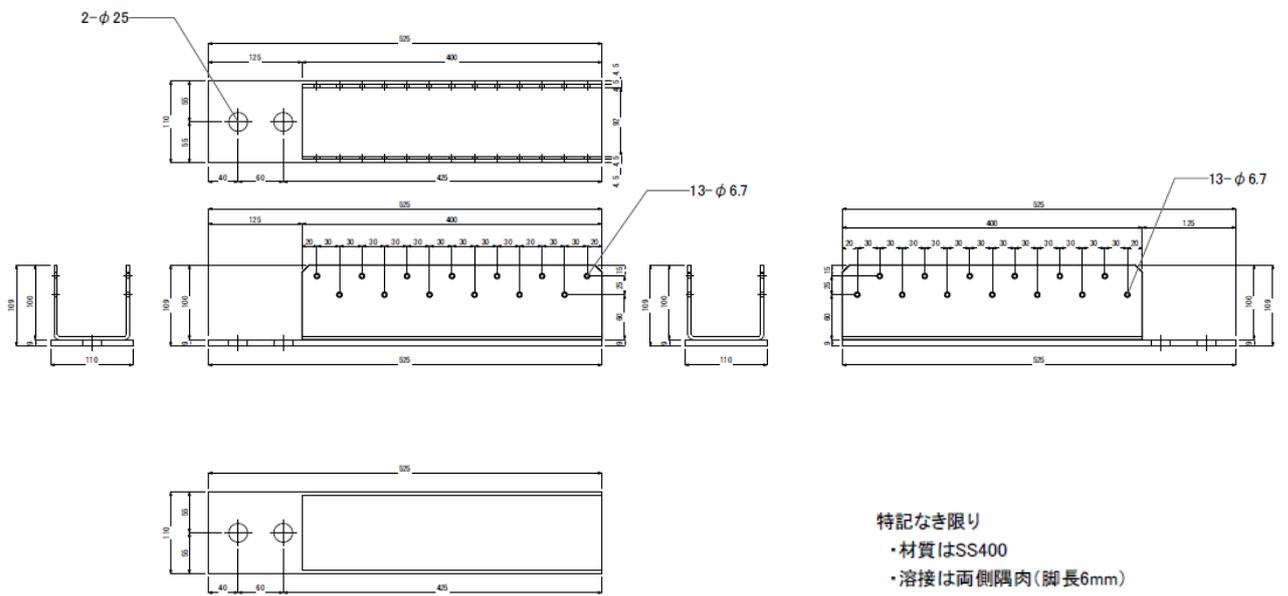
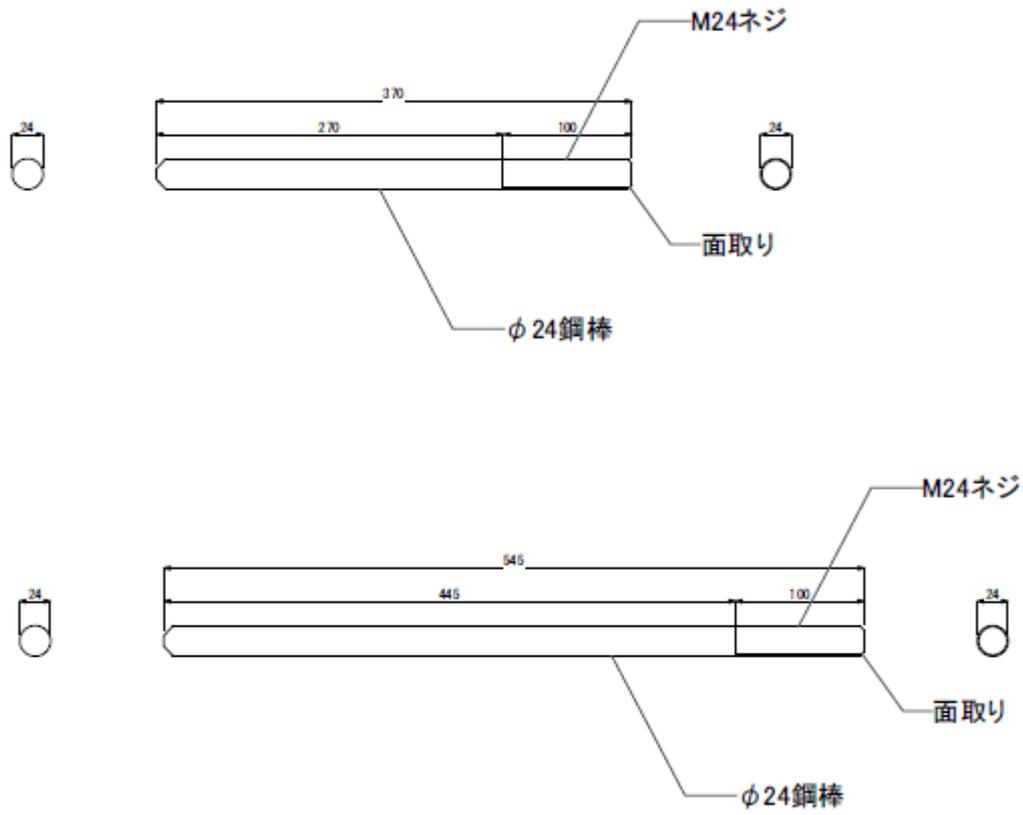
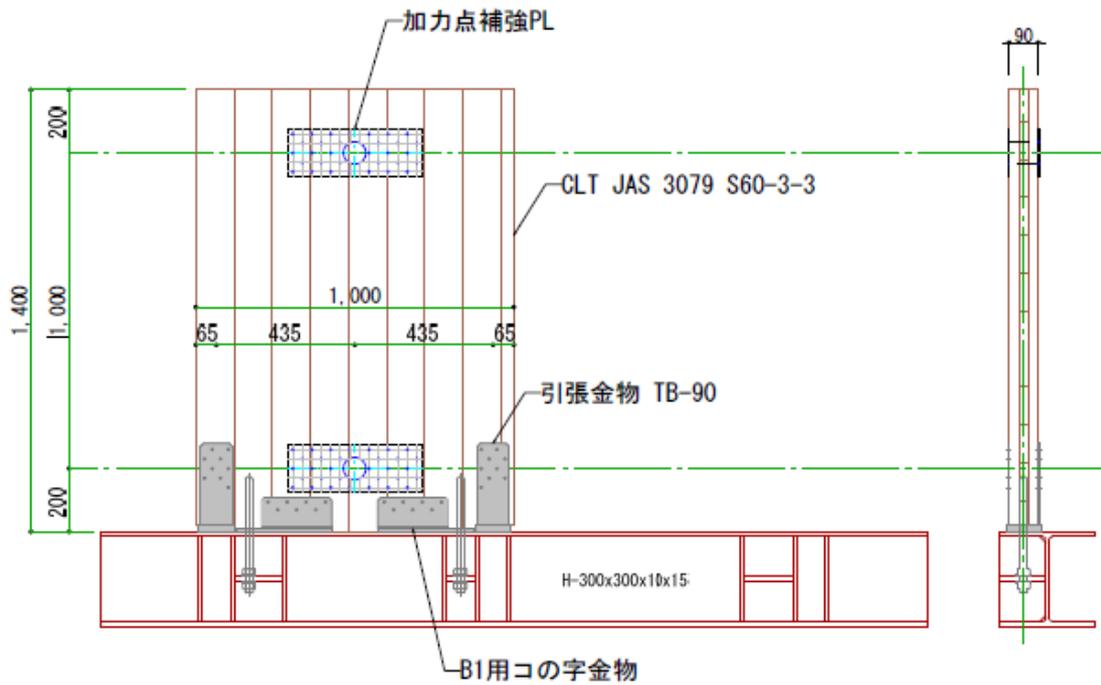


図 2.3.1.5 B2 用コの字型せん断金物 (新規金物)

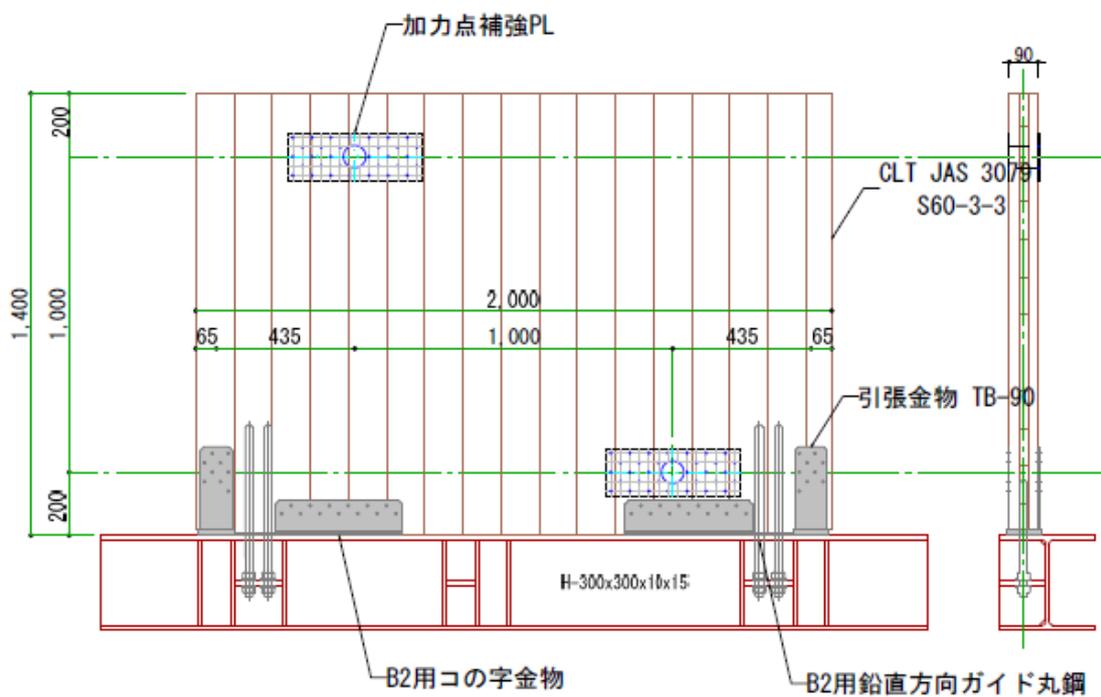


特記なき限り
 ・材質はSS400

図 2.3.1.6 コの字型せん断金物鉛直方向ガイド丸鋼（上：B1用 下：B2用）



試験体 B1 壁—基礎接合部(壁幅 1m)



試験体 B2 壁—基礎接合部(壁幅 2m)

図 2.3.1.7 試験体図

(3)CLT パネルの密度・含水率

試験体を構成する CLT パネルの密度・含水率測定結果を表 2.3.1.2 に示す。なお 3 体の試験のうち 2 体は同一 CLT 壁パネルを上下反転させて試験を実施した。CLT 壁パネルの質量測定状況を写真 2.3.1.1 に示す。

表 2.3.1.2 CLT パネルの密度・含水率測定結果

形状		密度(kg/m ³)	含水率(%)
B1	1 体目	409	13.0
	2 体目	413	16.0
	3 体目	409	13.2
B2	1 体目	389	12.3
	2 体目	393	12.7
	3 体目	389	11.5

備考：・密度は実測質量(kg)を公称寸法から計算した体積 (m³)で除して算出した。

・含水率は電気式木材水分計(株式会社ケツト科学研究所 HM-520)3 ヲ所測定の平均値とした。

・3 体目は 1 体目の試験体を反転させて実験を行った。含水率測定は実験の直前に測定した値としている。



写真 2.3.1.1 CLT 壁パネル 質量測定状況

2.3.2 試験方法

(1)加力装置

壁長さ 1m (試験体記号 : B1) 及び 2m (試験体記号 : B2) の CLT 壁パネルを、反力床上に設置した基礎フレームにコの字型せん断金物を介して固定した。

壁パネル頂部の水平加力は、CLT 壁パネルの上側加力点位置 (直径 60mm の丸鋼を用いたピン支持、加力点は PL4.5mm 厚と四角穴付きタッピンねじ (STS・C65) を用いて補強) を、油圧ジャッキを用いて正負繰り返しとした。また壁パネル頂部両側には、水平加力による壁パネルの面外変形を拘束するためパンタグラフを設置した。

CLT 壁パネル上部加力点での水平加力は、押側を正、引側を負として、壁パネル脚部から加力点までの高さ $h=1200\text{mm}$ とした変形角 $1/240\text{ rad}$ 、 $1/120\text{ rad}$ 、 $1/60\text{ rad}$ 、 $1/30\text{ rad}$ 、 $1/15\text{ rad}$ 、 $1/7.5\text{ rad}$ で正負 1 回繰り返しを行った後、 $1/4\text{ rad}$ (頂部水平変位 $300\text{mm}=1/4\text{rad}$) まで加力することを原則としている。ただし CLT のロックングが先行することで、繰り返し加力により回転中心が移動するため、単調加力で $1/4.4\text{rad}$ (頂部水平変位 275mm) まで加力する試験に変更した実験もある。

壁長さ 1m (試験体記号 : B1) は、CLT 壁パネルの上部及び下部の油圧ジャッキ (引 250kN、押 500kN ストローク $\pm 250\text{mm}$ (D5-500 理研精機(株)) を用い、ジャッキ先端に荷重計 ($\pm 500\text{kN}$ (TCLM-500KNB (株) 東京測器研究所) を取り付けた両端ピンとした。CLT 壁パネル上部の水平加力は、加力点高さに設置した変位計出力による自動制御静的加力装置 (理研機器(株)) を用いた変位制御とした。CLT 壁パネル下部の加力は、油圧ポンプを用いた手動加力とした。

壁長さ 2m (試験体記号 : B2) は、CLT 壁パネルの上部は引 1000kN 容量の油圧ジャッキ (引 1000kN 押 2000kN ストローク $\pm 300\text{mm}$ ((株) 巴技研)) を用い、下部は引 1000kN 容量の油圧ジャッキ (引 1000kN 押 400kN ストローク $\pm 500\text{mm}$ ((株) オックスジャッキ)) を用いた。

B1 試験体の加力装置設置図及び正負極性設定を図 2.3.2.1 に、B2 試験体の加力装置設置図及び極性設定を図 2.3.2.2 に示す。また計測機器設置位置を図 2.3.2.3~2.3.2.4 に、計測機器設置リストを表 2.3.2.1 及び表 2.3.2.2 に示す。

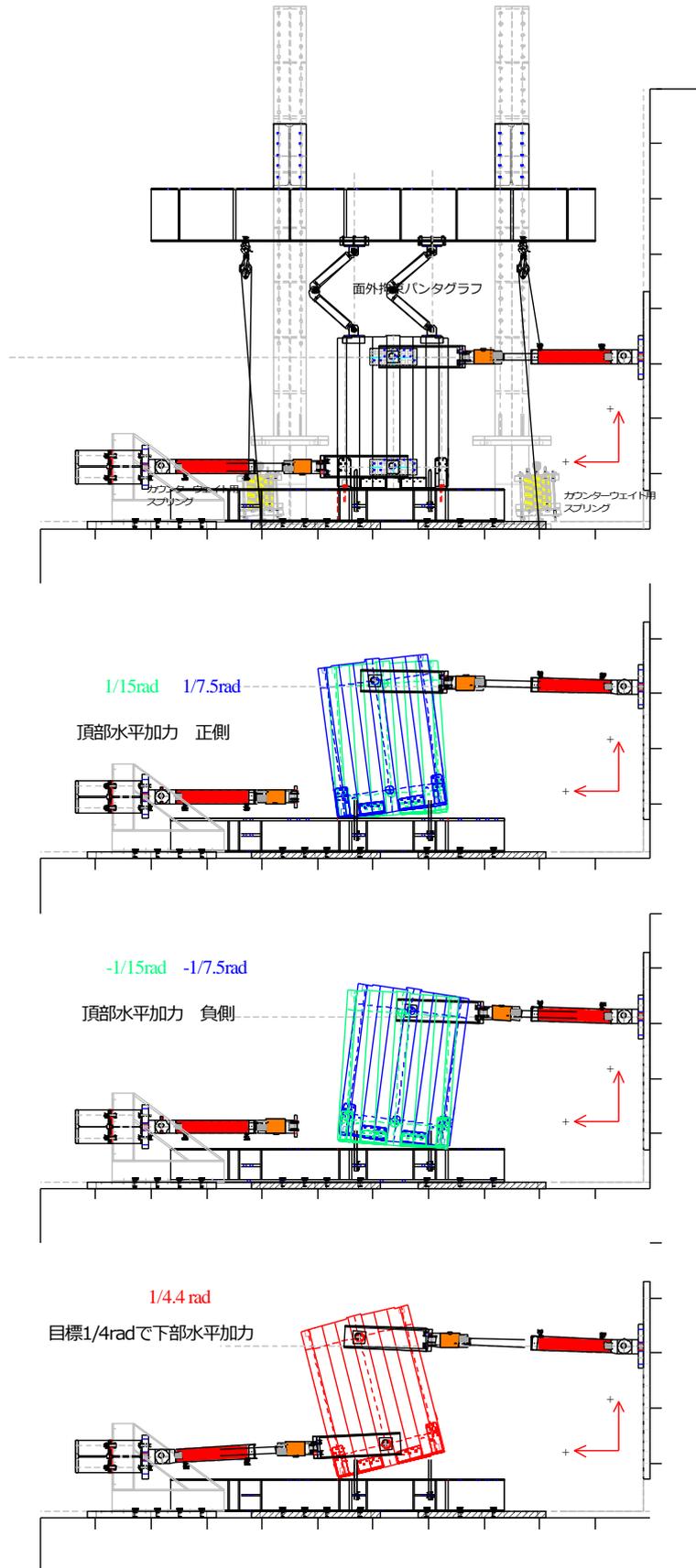


図 2.3.2.1 B1 試験体 加力装置設置図及び正負極性設定

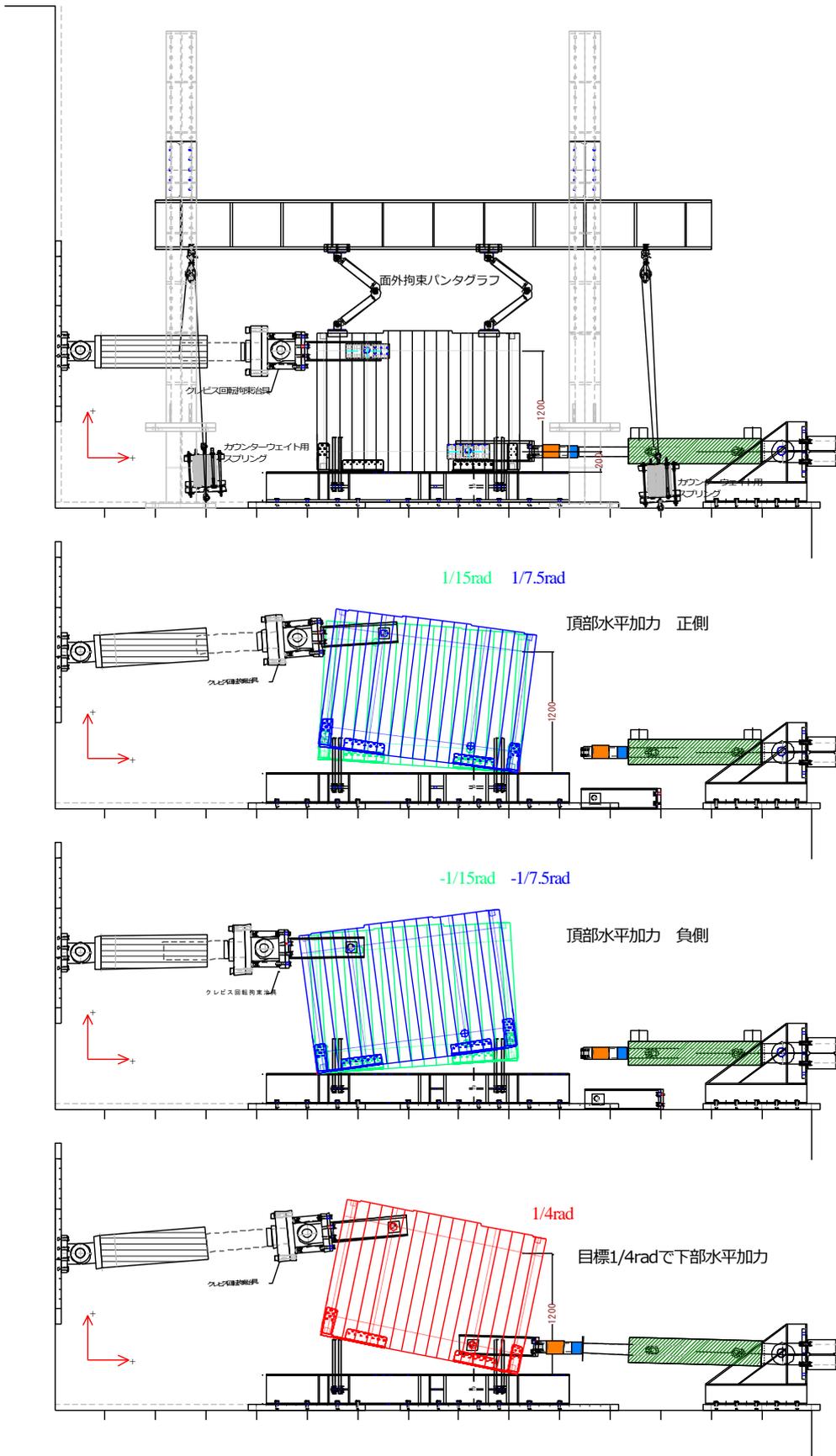


図 2.3.2.2 B2 試験体 加力装置設置図及び正負極性設定

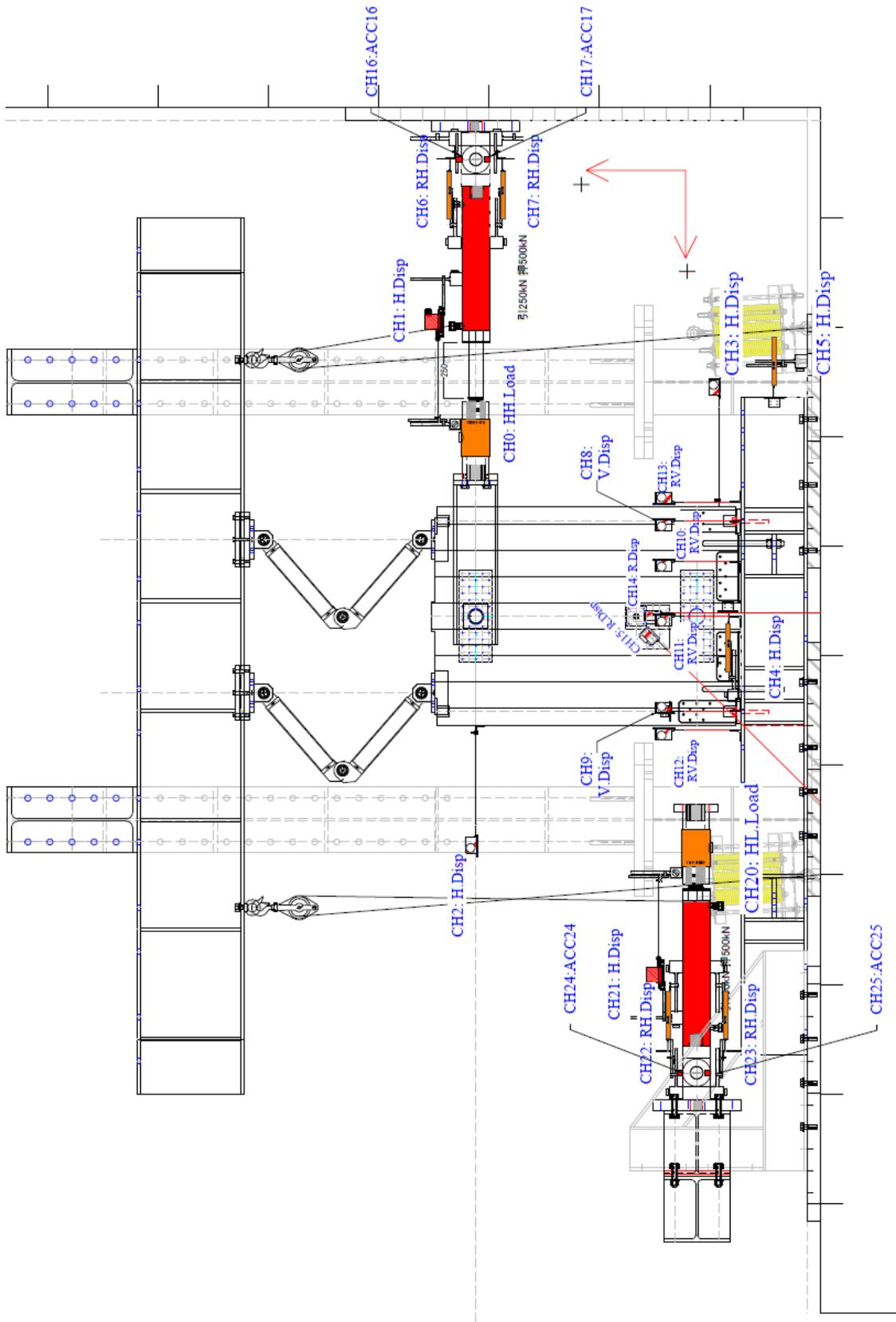
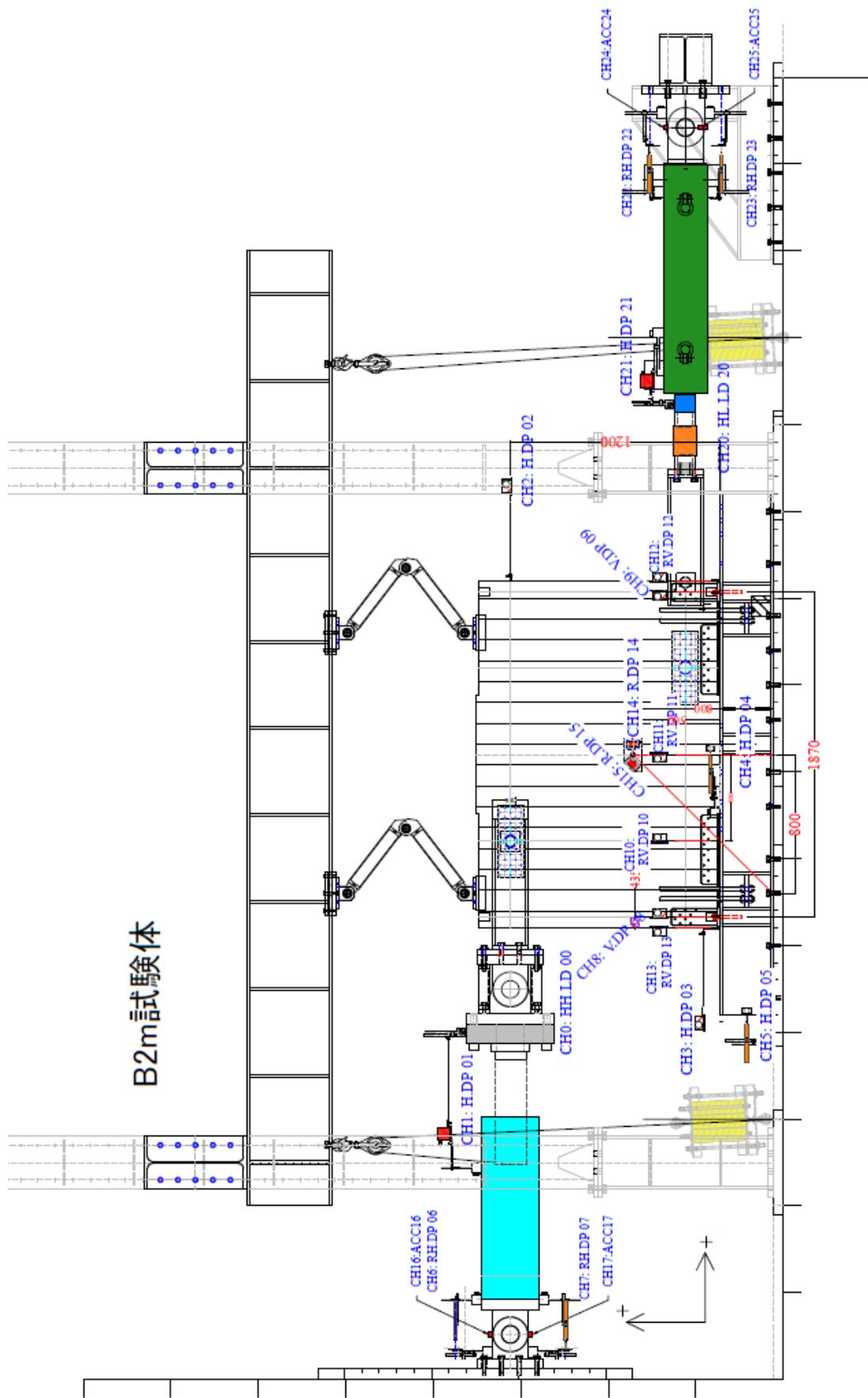


図 2.3.2.3 B1 試験体 計測機器設置位置



B2m試験体

図 2.3.2.4 B2 試験体 計測機器設置位置

表 2.3.2.1 B1 試験体 計測機器設置リスト

CH 番号	ラベル	方向	絶対・相対	設置	ターゲット	極性	容量	単位	出力	単位	係数	備考
0	HLLD 00	水平	絶対			-1	500	kN	5	V	-100	±500kN±2000μ 動ひずみアンブ
1	H.DP 01	水平	絶対	頂部ジャッキ	水平変位	1	1000	mm	5	V	200	変位制御 1,000mm 10,000μ 動ひずみアンブ
2	H.DP 02	水平	絶対	頂部試験体	水平変位	-1	1000	mm	10,000	×10 ⁶	-0.1	注：ワイヤー式変位計
3	H.DP 03	水平	絶対	下部試験体	水平変位	1	500	mm	5,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
4	H.DP 04	水平	絶対	下部中央 試験体	水平変位	-1	100	mm	5,000	×10 ⁶	-0.02	
5	H.DP 05	水平	絶対	基礎フレーム	水平変位	1	100	mm	5,000	×10 ⁶	0.02	
6	RH.DP 06	水平	相対	頂部ジャッキ端部上	水平変位	1	100	mm	5,000	×10 ⁶	0.02	
7	RH.DP 07	水平	相対	頂部ジャッキ端部下	水平変位	1	100	mm	5,000	×10 ⁶	0.02	
8	V.DP 08	鉛直	絶対	加力側 HD	鉛直変位	1	500	mm	5,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
9	V.DP 09	鉛直	絶対	非加力側 HD	鉛直変位	1	500	mm	5,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
10	RV.DP 10	鉛直	相対	CLT 下端 加力側から	鉛直変位	1	500	mm	5,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
11	RV.DP 11	鉛直	相対	CLT 下端 加力側から	鉛直変位	1	500	mm	5,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
12	RV.DP 12	鉛直	相対	CLT 下端 加力側から	鉛直変位	1	500	mm	10,000	×10 ⁶	0.05	注：ワイヤー式変位計
13	R.DP 13	鉛直	相対	CLT 下端 加力側から	鉛直変位	1	1000	mm	10,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
14	R.DP 14	鉛直	相対	CLT 中央→反力床	鉛直方向	1	1000	mm	10,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
15	R.DP 15	45 度	相対	CLT 中央→反力床	45 度方向	1	1000	mm	10,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
16	ACC up 16		絶対	頂部ジャッキ	9.802m/s ² = 1V	1	9,802	m/s ²	1	V	9,802	注：ワイヤー式変位計
17	ACC down 17		絶対	頂部ジャッキ	9.802m/s ² = 1V	1	9,802	m/s ²	1	V	9,802	
18	---											
19	---											
20	HL.LD 20	水平	絶対	下部水平荷重		1	500	kN	2000	×10 ⁶	0.25	
21	H.DP 21	水平	絶対	下部ジャッキ	水平変位	-1	1000	mm	10,000	×10 ⁶	-0.1	注：ワイヤー式変位計
22	RH.DP 22	水平	相対	下部ジャッキ端部上	水平変位	1	100	mm	5,000	×10 ⁶	0.02	
23	RH.DP 23	水平	相対	下部ジャッキ端部下	水平変位	1	100	mm	5,000	×10 ⁶	0.02	
24	ACC up 24		絶対	下部ジャッキ	9.802m/s ² = 1V	1	9,802	m/s ²	1	V	9,802	
25	ACC down 25		絶対	下部ジャッキ	9.802m/s ² = 1V	1	9,802	m/s ²	1	V	9,802	

表 2.3.2.2 B2 試験体 計測機器設置リスト

CH 番号	ラベル	方向	絶対・相対	設置	ターゲット	極性	容量	単位	出力	単位	係数	備考
0	HLLD 00	水平	絶対			-1	1000	kN	5	V	-200	±2000kN ±4000μ 動ひずみアンプ
1	H.DP 01	水平	絶対			1	1000	mm	5	V	200	変位制御 1,000mm 10,000μ 動ひずみアンプ
2	H.DP 02	水平	絶対			-1	1000	mm	10,000	×10 ⁶	-0.1	注：ワイヤー式変位計
3	H.DP 03	水平	絶対			1	500	mm	5,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
4	H.DP 04	水平	絶対			-1	100	mm	5,000	×10 ⁶	-0.02	
5	H.DP 05	水平	絶対			1	100	mm	5,000	×10 ⁶	0.02	
6	RH.DP 06	水平	相対	ジャッキ	クレビス	1	100	mm	5,000	×10 ⁶	0.02	
7	RH.DP 07	水平	相対	ジャッキ	クレビス	1	100	mm	5,000	×10 ⁶	0.02	
8	V.DP 08	鉛直	絶対			1	500	mm	5,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
9	V.DP 09	鉛直	絶対			1	500	mm	5,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
10	RV.DP 10	鉛直	相対	CLT	基礎フレイム	1	500	mm	5,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
11	RV.DP 11	鉛直	相対	CLT	基礎フレイム	1	500	mm	5,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
12	RV.DP 12	鉛直	相対	CLT	基礎フレイム	1	500	mm	10,000	×10 ⁶	0.05	注：ワイヤー式変位計
13	RV.DP 13	鉛直	相対	CLT	基礎フレイム	1	1000	mm	10,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
14	R.DP 14	鉛直	相対	CLT	反力床	1	1000	mm	10,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
15	R.DP 15	45度	相対	CLT	反力床	1	1000	mm	10,000	×10 ⁶	0.1	注：ワイヤー式変位計
16	ACCI 16	頂部水平ジャッキ端部上		加速度		1	10	m/s ²	1	V	10	20m/s ² 加速度計 10m/s ² 1V 動ひずみアンプ
17	ACCI 17	頂部水平ジャッキ端部下		加速度		1	10	m/s ²	1	V	10	20m/s ² 加速度計 10m/s ² 1V 動ひずみアンプ
18	---											
19	---											
20	HL.DD 20	水平	絶対			1	500	kN	2000	×10 ⁶	0.25	
21	H.DP 21	水平	絶対			-1	1000	mm	10,000	×10 ⁶	-0.1	注：ワイヤー式変位計の出力 要確認
22	RH.DP 22	水平	相対	ジャッキ	クレビス	1	100	mm	5,000	×10 ⁶	0.02	
23	RH.DP 23	水平	相対	ジャッキ	クレビス	1	100	mm	5,000	×10 ⁶	0.02	
24	ACC 24	脚部水平ジャッキ端部上		加速度		1	10	m/s ²	1	V	10	20m/s ² 加速度計 10m/s ² 1V 動ひずみアンプ
25	ACC 25	脚部水平ジャッキ端部下		加速度		1	10	m/s ²	1	V	10	20m/s ² 加速度計 10m/s ² 1V 動ひずみアンプ

(2)加カスケジュール

水平加力は、CH1 の水平変位 δ_{CH1} (mm)で制御し、壁高さ h を壁パネルの上部丸鋼ピンと壁端間距離 $h=1200$ mm とし、(2-1)式で算出した変形角 θ (rad)が 1/240 (5.0mm)、1/120 (10.0mm)、1/60 (20.0mm)、1/30 (40.0mm)、1/15 (80.0mm)、1/7.5(160.0mm)を繰り返し加力の特定変形角とした。

$$\theta = \frac{\delta_{CH1}}{h} \quad (2-1)$$

水平加力は負側（油圧ジャッキ引き側）から開始し、1/7.5rad までの特定変形角で正負 1 回繰り返し加力を行った後、変形角 1/4 rad (300mm) (B1 試験体は 1/4.4 rad (275mm)) まで加力し、変位保持した状態で CLT 壁パネル下部のジャッキを試験体と接続し、CLT 壁パネル脚部に設置したせん断金物の性能を確認した。ただし B1 の 2 体目、3 体目は単調加力で 1/4.4rad に到達させた。

−1/7.5 rad 変形時、+1/7.5 rad 変形時及び 1/4 rad 変形時 (B1 は 1/4.4 rad) の試験状況例を写真 2.3.2.1 に示す。

変形角	B1 試験体	B2 試験体
1/7.5 rad		
-1/7.5 rad		
1/4 rad B1 は 1/4.4rad		

写真 2.3.2.1 試験状況の一例

注：B1 は頂部を右側から加力、B2 は頂部を左側から加力している。

2.3.3 試験結果

試験結果として、壁パネル頂部の繰り返し荷重における荷重－変位曲線及び特定変形角保持状態での壁パネル脚部の荷重－変位曲線を以降に示す。

(1)B1 試験体（壁長さ 1m 仕様）

B1 試験体（壁長さ 1m 仕様）の頂部水平加力における荷重－変位曲線と、設定した特定変位で保持した状態での CLT 壁パネル下部を加力した時の荷重－変位曲線を図 2.3.3.1 に示す。また試験実施状況及び破壊状況を写真 2.3.3.1 に示す。

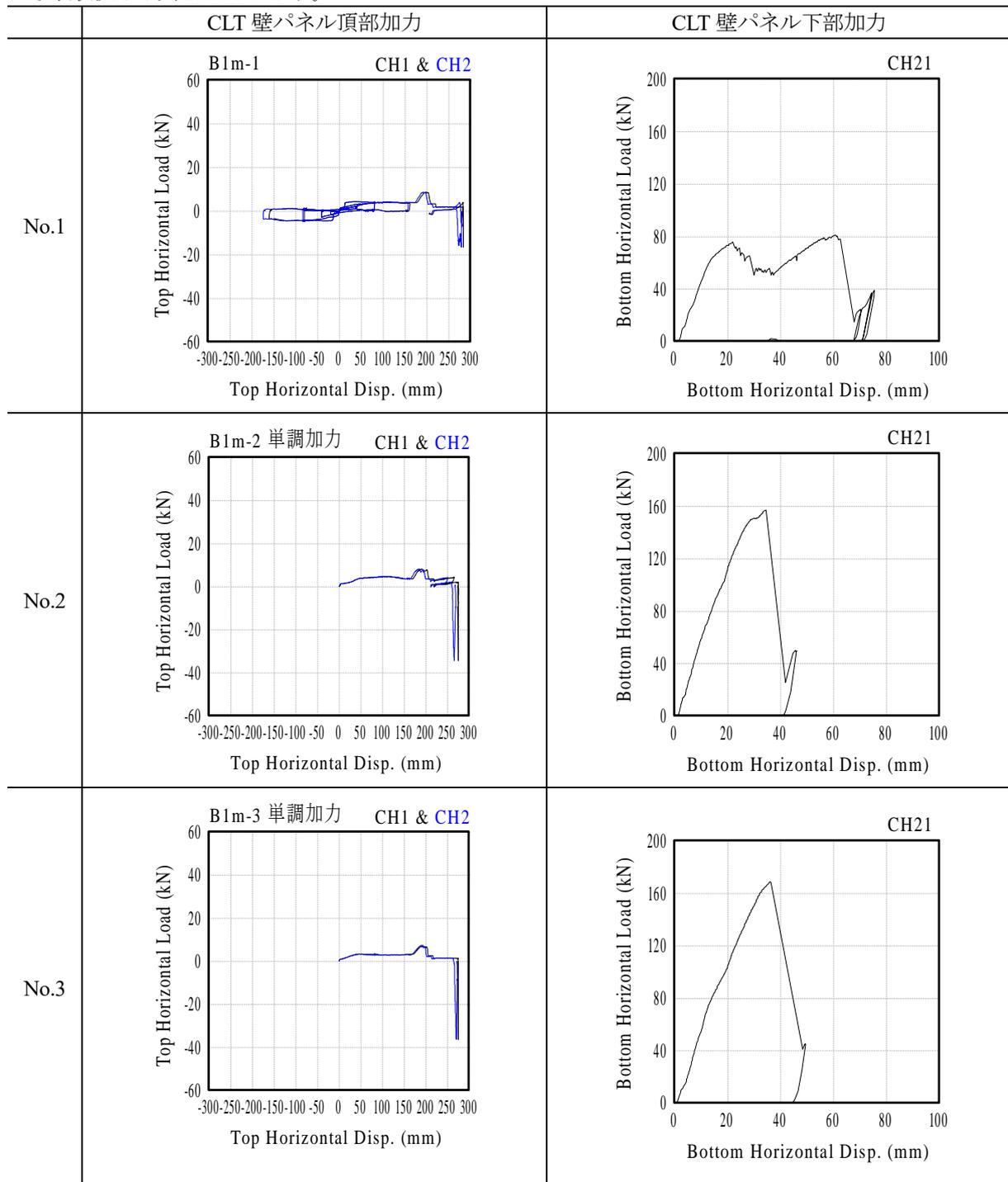


図 2.3.3.1 B1 試験体 荷重－変位曲線（左：頂部水平加力 右：下部水平加力）

B1-1		B1-2	
			
試験前	+ 1/7.5 rad 時	試験前	+ 1/15 rad 時 (単調加力)
			
- 1/7.5 rad 時	+ 1/4 rad 時 (変位保持)	+ 1/7.5 rad 時 (単調加力)	+ 1/4.4 rad 時 (単調加力・変位保持)
			
加力側ガイドピンの曲がり	非加力側ガイドピンの抜け	加力側ガイドピンの曲がり, M16 ボルト破断	ガイドピン、M16 ボルト破壊状況

写真 2.3.3.1 B1 試験体 試験実施状況及び破壊状況

BI-3

	
<p>試験前</p> 	<p>+ 1/15 rad 時 (単調加力)</p> 
<p>+ 1/7.5 rad 時 (単調加力)</p> 	<p>+ 1/4.4 rad 時 (単調加力・変位保持)</p> 
<p>非加力側ガイドピン 側面摩耗</p>	<p>ガイドピン、M16 ボルト破壊状況</p>

写真 2.3.3.1 BI 試験体 試験実施状況及び破壊状況 (続き)

(2)B2 試験体 (壁長さ 2m 仕様)

B2 試験体 (壁長さ 2m 仕様) の頂部水平加力における荷重-変位曲線と、設定した特定変位で保持した状態での CLT 壁パネル下部を加力した時の荷重-変位曲線を図 2.3.3.2 に示す。また試験実施状況及び破壊状況を写真 2.3.3.2 に示す。

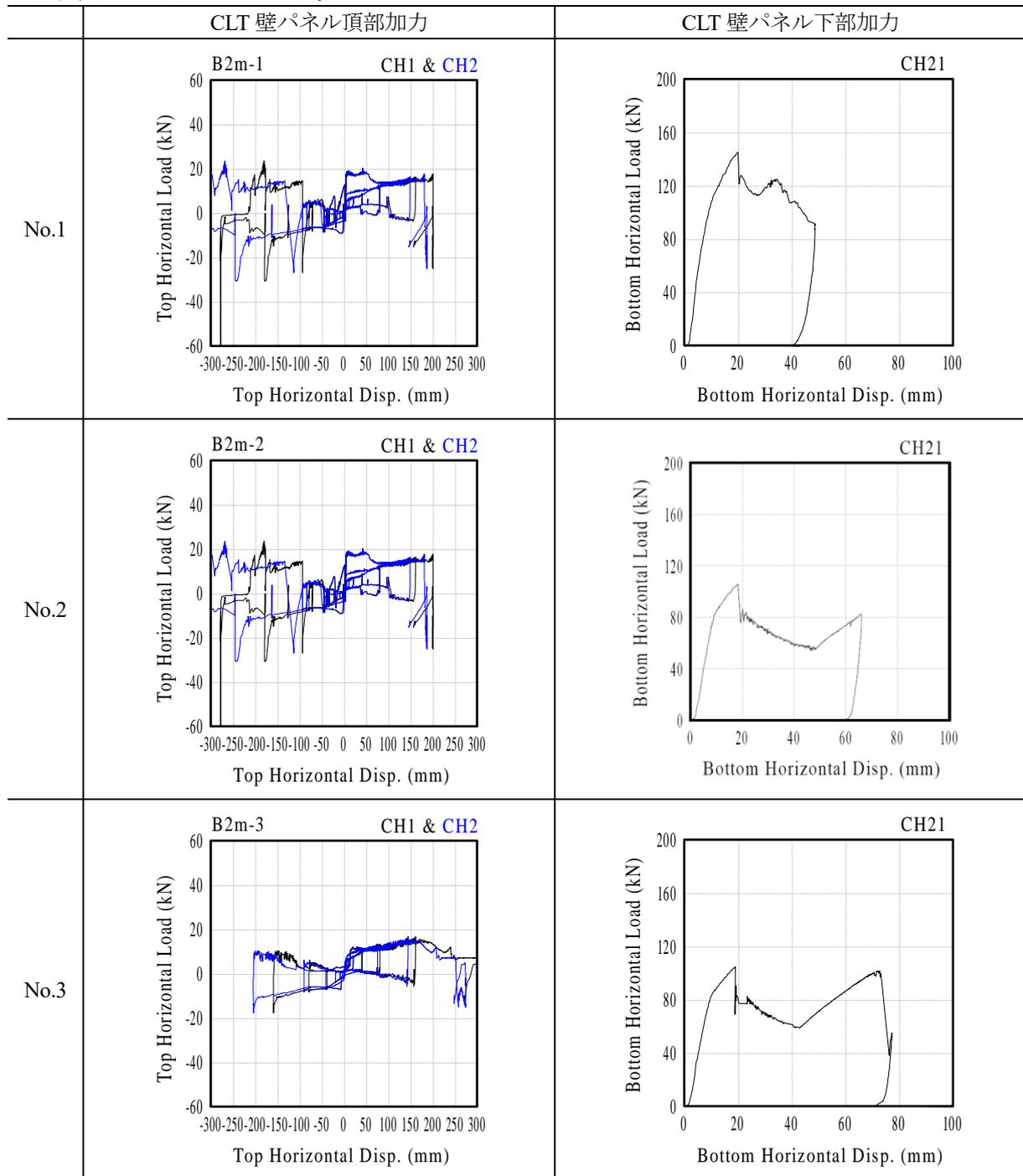


図 2.3.3.2 B2 試験体 荷重-変位曲線 (左:頂部水平加力 右:下部水平加力)

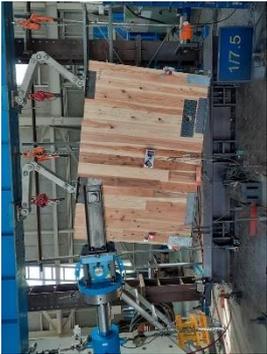
B2-1		B2-2	
			
試験前	+1/7.5 rad 時	試験前	+1/7.5 rad 時
			
-1/7.5 rad 時	+1/6 rad 時 (変位保持)	-1/7.5 rad 時	+1/6 rad 時 (変位保持)
			
加力側ガイドピン 状況	非加力側ガイドピン 状況	加力側ガイドピン 状況	非加力側ガイドピン 状況

写真 2.3.3.2 B2 試験体 試験実施状況及び破壊状況

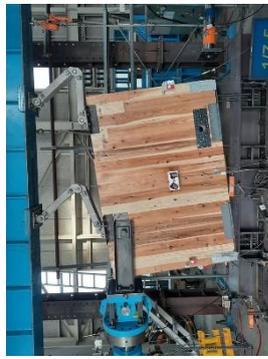
B2-3



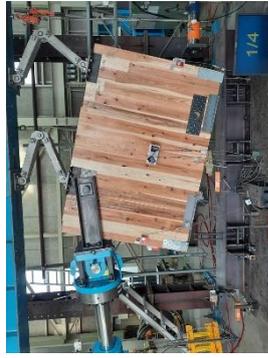
試験前



+17.5 rad 時



-17.5 rad 時



+1/4 rad 時 (変位保持)



加力側ガイドピン 状況



終了時 コの字型金物とガイドピン状況

写真 2.3.3.2 B2 試験体 試験実施状況及び破壊状況 (続き)

2.3.4 試験結果考察

本試験においては壁パネル頂部に変形角を与えた状態で壁パネル脚部に水平力を与えることで特定変形角時のせん断耐力の確認を目的としていたが、壁パネル脚部に水平力を与える段階で写真 2.3.4.1 に示すように壁パネルに浮き上がりが生じ、せん断抵抗用の鋼棒が抜けてしまう挙動が見られた。このような挙動は実建物では上階の鉛直荷重による押さえ込みにより生じないと考えられる。後半に実施した試験体では引張金物を M16 ボルトで架台に緊結することで壁パネルの浮き上がりが生じないようにして試験を実施し、最終的には写真 2.3.4.2 に示すように M16 ボルトの破断で試験を終了した。本試験の目的を達成するためには試験方法の見直しが必要であると考えられる。



写真 2.3.4.1 壁脚部浮き上がり



写真 2.3.4.2 M16 ボルト破断