

「 直交積層材（クロスラミナパネル） 新しい木質構造材料の提案 」
- 木質構造の印象を変える可能性を秘めた構造材料 -

パネラー：島田治男 （島田治男建築設計事務所 所長）
講 師：小松幸平 （京都大学生存圏研究所 生活圏構造機能分野 教授）
日 時：平成 23 年 3 月 20 日 P M 2 時 ~
場 所：リビングデザインセンターOZONE 3F 特設会場

クロスラミナパネルとは、材料性能が明確にされた製材を活用し、集成材を構成するラミナ(挽き板)を直交するように積層接着した重厚なパネルです。厚み・幅・長さの製造自由度が高いため、幅の異なるラミナであっても無駄なく活用できるメリットは大きく、プレキャスト材と同様に施工合理化にも対応できます。床に使用することで、パネルの重厚さによる遮音性能を高めることになり、今後は壁柱としての構造体への活用も望まれます。

欧州では既にクロスラミナパネルが実用化されており、9 階建ての集合住宅(1 階のみ R C 造)にも使われています。工場生産された重厚なクロスラミナパネルを用いて R C 壁式構造のような外観を作り出しています。欧州各国で定められているエネルギー法等により、木質構造の活用によるカーボン排出量削減への関心は近年高まっており、今後クロスラミナパネルを活用した建築への認識も高まると考えられます。

クロスラミナは欧州で開発されたものです。国内でも以前より各研究機関が本材料に関する実大実験等を行っていましたが、まだ一般的な実用化には至っておりません。この度、クロスラミナパネルの日本での活用に向けて、国土交通省 木造住宅・木造建築物等の整備促進に関する普及事業の一環として、京都大学生存圏研究所 小松教授にご協力いただき、強度実験（曲げ強度、せん断強度）を実施し、引き続き寸法変形特性等の実験を行っております。材料特性と合わせて、日本の地勢を考慮した施工方法に付いての検討を進め、木質構造の印象を変える構造材料としての活用に向けて広く成果を発表したいと思います。



(株)プランナーよりの平成 22 年度受託研究成果報告書

研究題目 直交積層材「クロスラミナ」の試験評価

(実験実施・協力者)

小松幸平

中島昌一

二見 亮

京都大学 生存圏研究所 生活圏構造機能分野

田中宏明

孕石剛志

實成康治

二宗要一

銘建工業株式会社

(実験実施場所)

京都市大学生存圏研究所 生活圏構造機能分野 木質材料実験棟

(研究実施期間)

平成 23 年 3 月 7 日 ~ 3 月 10 日

(報告書作成・文責)

小松幸平

平成 23 年 3 月

1. 目的

新しく開発されたスギ直交積層材「クロスラミナ」の建築材料としての性能評価を目的として、曲げ性能、せん断性能、そして乾湿繰り返し環境下での収縮・膨潤性能を評価する。

2. 実験

2.1 試験体

試験体は基本的に2種類の5層構成直交積層材「クロスラミナ」（以下 CLT と記す）で、各性能試験用に表1に示す仕様で試験体が製造された。

表1 供試 CLT の仕様

試験体 No.	試験項目	樹種	構成	サイズ(mm)	試験体数	
(1)～(6)	曲げ試験	杉	同一等級構成	150×700×3000	6 体	
(17)～(22)			異等級構成		6 体	
(9)～(14)	せん断試験		同一等級構成	150×700×2000	6 体	
(25)～(30)			異等級構成		6 体	
(9)～(11)	乾湿繰返し試験		同一等級構成	150×700×900	3 体	
(25)～(27)			異等級構成		3 体	

図1に CLT のラミナ構成断面図とその様子を示す。

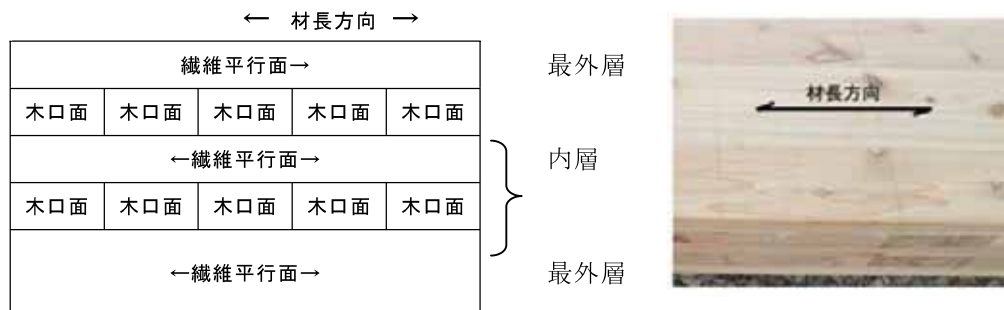


図1 供試 CLT の断面構成図(左)と実際の様子(右)

また、表1における異等級構成 CLT と同等級 CLT におけるラミナの配列ルールを図2に示す。

異等級構成(5 層)	同一等級構成(5 層)
L80	L50
L50	L50
L50	L50
L50	L50
L80	L50

図2 異等級構成 CLT と同等級 CLT におけるラミナの配列ルール

2.2 試験方法

2.2.1 曲げ試験

曲げ試験は、京大生存圏研究所における全国共同利用施設の一つである木質材料実験棟所属の堅型油圧アクチュエータ式試験機（インストロン社製 8050 型）を用いておこなった。

図 3、図 4a)、b) に、CLT の面外曲げ性能を評価するため、通常の 4 点曲げ荷重方式に準拠して、CLT の幅方向にはほぼ一定の線荷重を 2 点で作用させる方式の曲げ試験法のセットアップ図を示す。なお、クロスヘッド速度は、毎分 3mm とした。

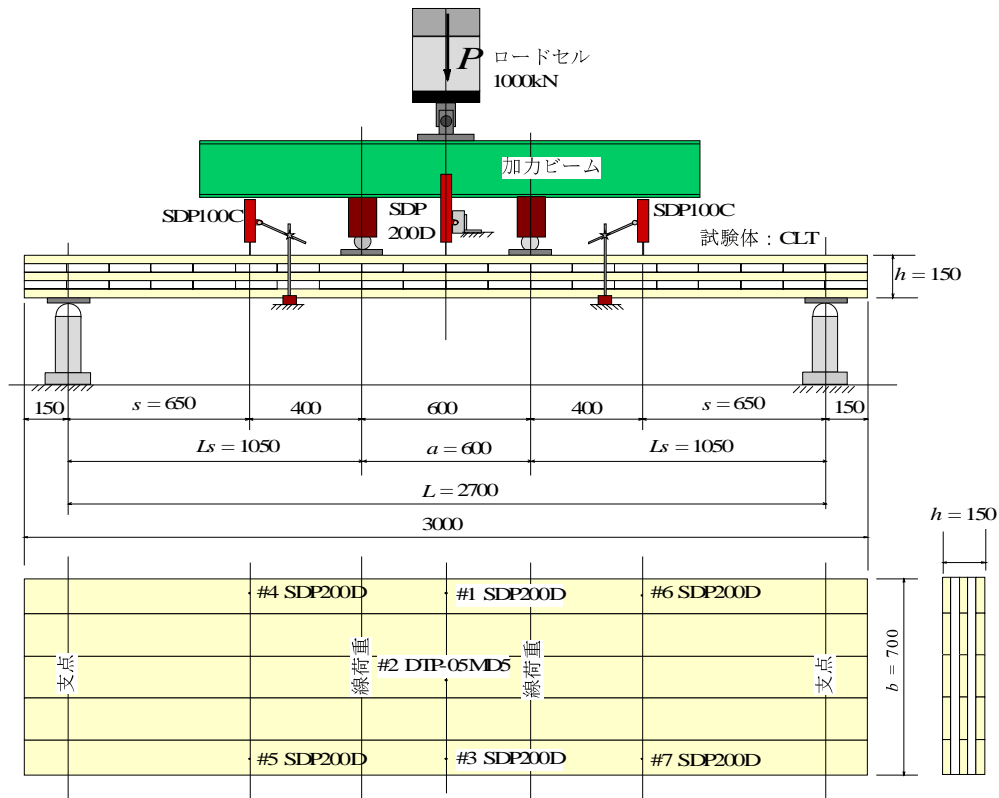


図 3 4 点曲げ試験法に準拠した 2 線載荷式曲げ試験方法のテストセットアップ図



a) 試験法全景



b) 変位計(#1～#3)セッティング詳細

図 4 堅型油圧アクチュエータ式試験機を用いた曲げ試験の状況

2.2.2 曲げ性能の評価式 および 曲げ試験における各種条件

本節では以下に示す算定式(1)を用いて CLT の見かけの曲げヤング係数 E_0 を、算定式(2)を用いて曲げ破壊係数(MOR)を評価した。

$$E_b = \left(\frac{\Delta P}{\Delta \delta_0} \right) \frac{(3L_s L^2 - 4L_s^3)}{48I} = \left(\frac{\Delta P}{\Delta \delta_0} \right) \frac{(3L_s L^2 - 4L_s^3)}{4bh^3} \quad \dots\dots(1)$$

$$\text{MOR} = \frac{M_{\max}}{Z} = \frac{\left(\frac{P_{\max} L_s}{2} \right)}{\left(\frac{bh^2}{6} \right)} = \frac{3L_s P_{\max}}{bh^2} \quad \dots\dots(2)$$

ここで、

$\frac{\Delta P}{\Delta \delta_0}$: 荷重(P)—スパン中央たわみ(δ_0) 関係の直線域の傾き(kN/mm もしくは N/mm)

L_s : 4点曲げ試験におけるせん断スパン(本試験では 1050mm 一定)

L : 試験体曲げスパン(本試験では 2700mm 一定)

b : CLT の材幅(本試験では 700mm 一定)

h : CLT の材せい(本試験では 150mm 一定)

P_{\max} : 最大荷重(kN もしくは N)

荷重、変位の計測に用いた測定器の仕様とその定格出力を表2に示す。

表2 曲げ試験の荷重、変位の計測に用いた測定器の仕様とその定格出力

チャンネル No.	測定項目	仕様	定格出力
#0	荷重	インストロン社製 動的ロードセル	0.5194kN/ μ 、最大計測値:1000kN
#1、#3	スパン中央 両外側のたわみ	東京測器研究所 SDP200D	0.02mm/ μ 、最大計測値:200mm
#2	スパン中央 内部のたわみ	東京測器研究所 DTP-05MD5	0.05011mm/ μ 、最大計測値:500mm
#4、#5、#6、#7	一定せん断スパン 領域のたわみ	東京測器研究所 SDP100C	0.02mm/ μ 、最大計測値:100mm

備考(μ :入力ひずみ値 10^{-6} ストレインの事)

評価結果の算定にあたっては、実測値#1～#3 の平均値をスパン中央たわみと見なした。また見かけの曲げヤング係数の算出は、目視で $\Delta P / \Delta \delta_0$ の直線領域を定め、その範囲に入る荷重とたわみのデータに最小自乗法を適用してその傾きを決定した。

2. 2. 3 せん断試験法

せん断試験も、曲げ試験と同じ堅型油圧アクチュエータ式試験機（インストロン社製 8050 型）を用いて実施した。図5、図6a)、b)に、CLT の面外せん断性能を評価するための逆対称型 4 点载荷方式せん断試験法のセットアップ図を示す。この方法は RC 梁のせん断性能を評価するのに用いられる試験法である。クロスヘッド速度は、この場合も、毎分 3mm とした。

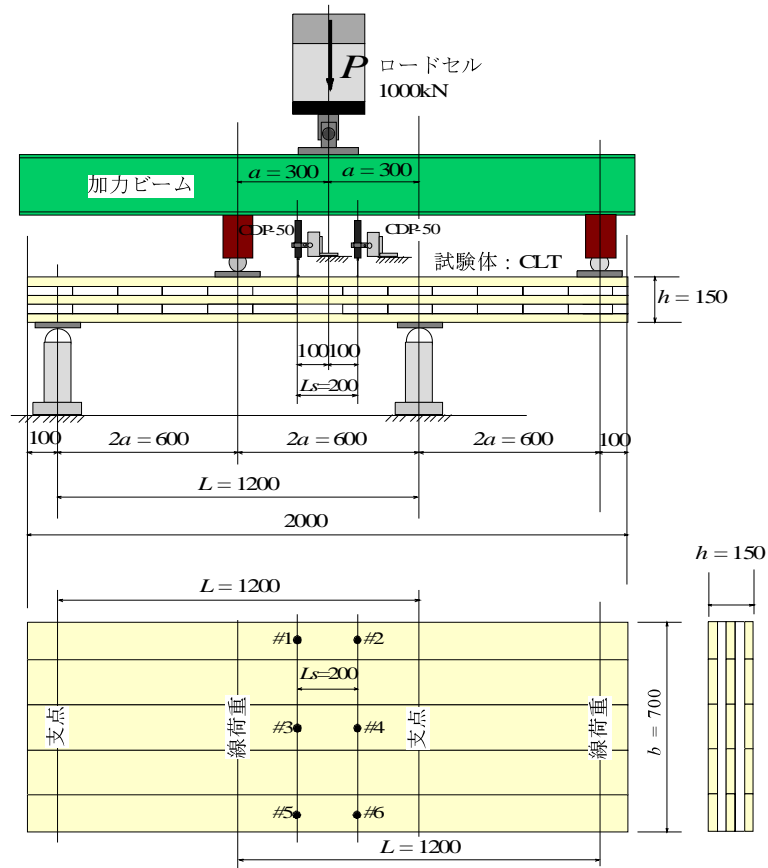


図5 逆対称型 4 点载荷方式せん断試験法のセットアップ図



a) せん断試験法全景



b) 変位計設置状況詳細

図6 堅型油圧アクチュエータ式試験機を用いたせん断試験法の状況

2.2.4 せん断性能の評価方法

図7に今回採用した逆対称型4点载荷方式のせん断試験におけるモーメント分布図(BMD)およびせん断力図(SFD)、そしてそれに基づいて誘導されたせん断剛性率 G とせん断強さ F_s の定義を示す。

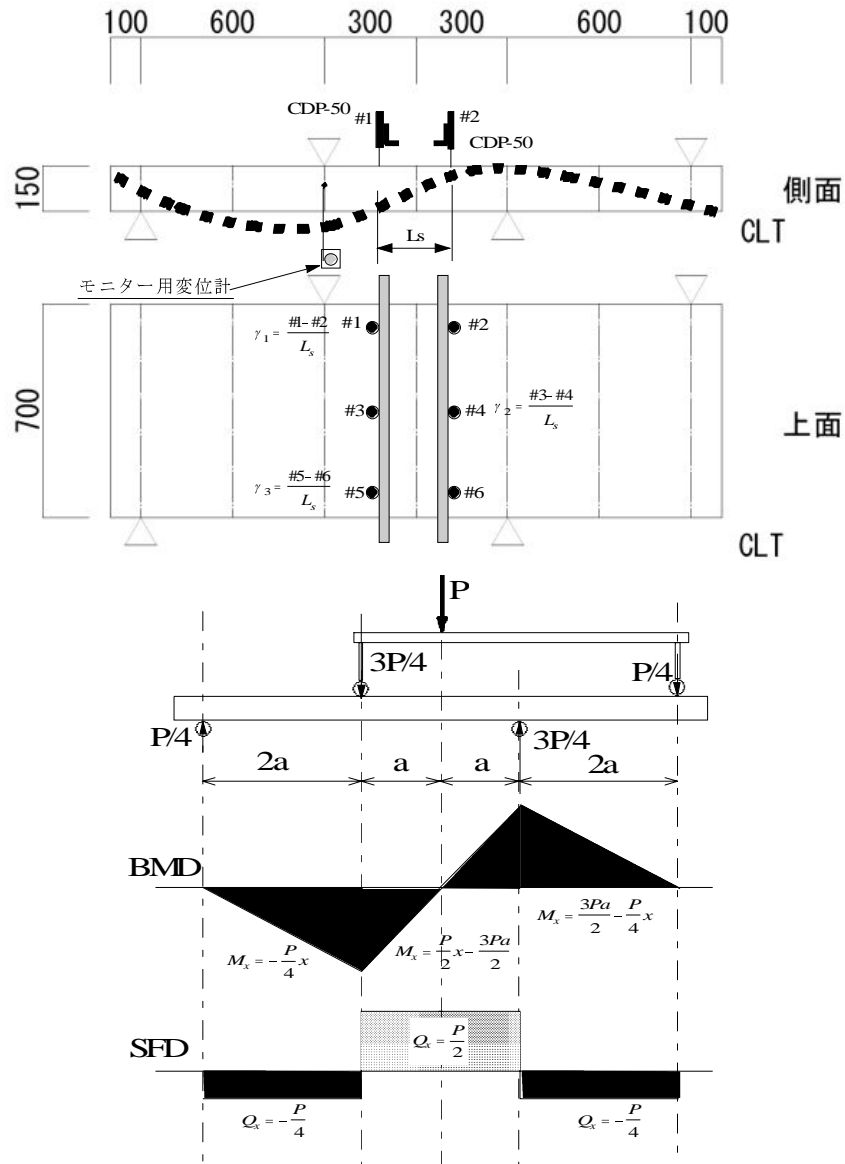


図7逆対称型4点载荷方式におけるモーメント分布図(BMD)およびせん断力図(SFD)

CLT 試験体のせん断ひずみ γ_{CLT} は、曲げモーメントが最小となる試験体中央部の長さ L_s 間に設置した一対の変位計の計測値から、式(3)によって評価した。一方、せん断応力 τ_{CLT} は一定せん断力区間のせん断力 $Q = P/2$ を考慮して式(4)によって評価した。そして、 $\tau_{CLT} - \gamma_{CLT}$ 関係の直線区間より、その傾きを最小自乗法で決定し、せん断弾性係数 G_{CLT} を式(5)によって、評価した。

$$\gamma_1 = \frac{\#1 - \#2}{L_s}, \gamma_2 = \frac{\#3 - \#4}{L_s}, \gamma_3 = \frac{\#5 - \#6}{L_s} \rightarrow \gamma_{CLT} = \frac{(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3)}{3} \quad \dots\dots(3)$$

$$\tau_{CLT} = 1.5 \frac{Q}{A} = \frac{1.5 \times P/2}{bh} = \frac{0.75P}{bh} \Rightarrow F_s = \frac{0.75P_{\max}}{bh} \quad \dots\dots(4)$$

$$G_{CLT} = \frac{\Delta\tau_{CLT}}{\Delta\gamma_{CLT}} \quad \dots\dots(5)$$

ここで、

#1～#6:一定せん断力領域 $Q = P/2$ に配置された変位計で測定された鉛直変位 (mm)

L_s :せん断ひずみ測定用変位計間距離で、本実験では 200mm

$A = bh$:CLT の断面積 (mm²)

P_{\max} :最大荷重 (kN)

$\frac{\Delta\tau_{CLT}}{\Delta\gamma_{CLT}}$:式(4)と式(3)で定義されたせん断応力とせん断ひずみの関係の直線領域 (N/mm²)

せん断試験における荷重、変位の計測に用いた測定器の仕様とその定格出力を表 3 に示す。

表3 せん断試験の荷重、変位の計測に用いた測定器の仕様とその定格出力

チャンネル No.	測定項目	仕様	定格出力
#0	荷重	インストロン社製 動的ロードセル	0.5194kN/ μ 、最大計測値:1000kN
#1～#6	せん断ひずみ 算定用変位	東京測器研究所 CDP-50	0.005mm/ μ 、最大計測値:50mm

備考(μ :入力ひずみ値 10^{-6} ストレインの事)

2. 2. 5 CLT 板の膨潤・収縮性能の測定

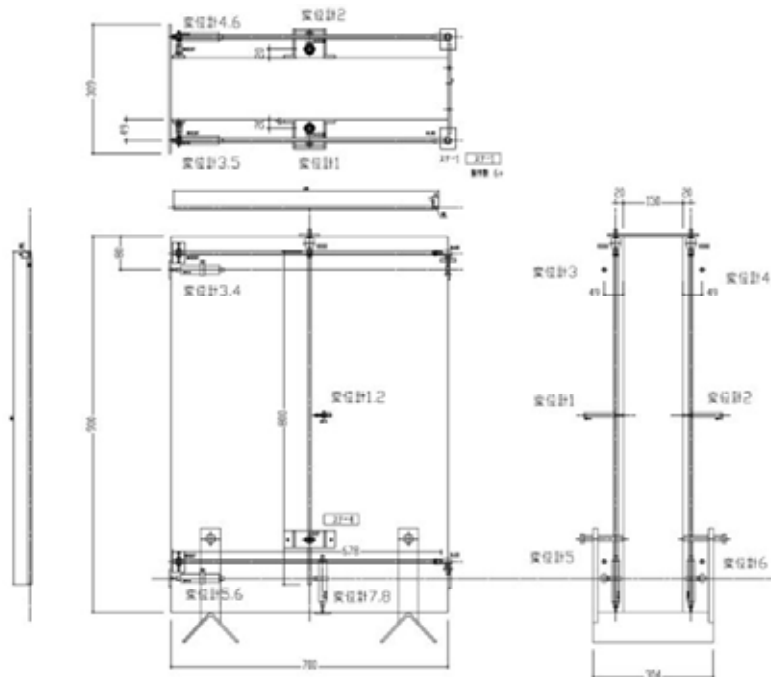


図8 短尺 CLT 板の膨潤・収縮量測定用試験セットアップ図

CLT は日本ではまだ馴染みの少ない材料であるため、その膨潤・収縮性能が殆ど未知である。そこで、**図8**に示すように短尺試験体(幅700mm×せい150mm×長さ900mm)の各部に精密変位計をセットし、3日おきに湿度が85%RHから45%RHに変化する恒温恒湿室(温度20℃)内に静置して、各部の伸び、縮み、矢高量などを測定した。



a)CLT 試験体静置状況全景



b)長手方向伸縮測定用変位計設置状況



c) 短辺方向伸縮測定用変位計設置状況



d)矢高計測用変位計設置状況



e)変位計受け用アクリル板の固定状況(接着)



f)インターバル計測用データロガー

図9 恒温恒湿調整機能を備えたコンテナ内部に静置された3体のCLT試験体の各部詳細

図9a)～f)に恒温恒湿調整機能を備えた 40ft コンテナ内部に静置された 3 体の CLT 試験体における変位測定状況を示す。精密変位計は各試験体の各部の両面に8個ずつ装着され、最初の 3 か月間は、表1に示す試験体番号9～11の試験体(同一等級構成)3 体について毎6時間ごとに合計 24 箇所の変位計をインターバル計測し、全てのデータをデータロガーに自動収録する。また、CLT 短尺板の各部変位の計測に用いた変位計の仕様を表4に示す。

表4 CLT 短尺板の各部変位の計測に用いた変位計の仕様

チャンネル No. /試験体番号			測定項目	仕様	定格出力
9	10	11			
#1、 #2	#9、 #10	#17、 #18	短辺方向伸縮 (上部)	東京測器研究所 CDP10M	0.001mm/ μ 、最大計測値:10mm
#3、 #4	#11、 #12	#19、 #20	短辺方向伸縮 (上部)	東京測器研究所 CDP10M	0.001mm/ μ 、最大計測値:10mm
#5、 #6	#13、 #14	#21、 #22	長辺方向伸縮	東京測器研究所 CDP5M	0.0005mm/ μ 、最大計測値:5mm
#7、 #8	#15、 #16	#23、 #24	短辺方向矢高	東京測器研究所 CDP5M	0.0005mm/ μ 、最大計測値:5mm

備考(μ :入力ひずみ値 10^{-6} ストレインの事)

3. 結果

3.1 曲げ試験の結果

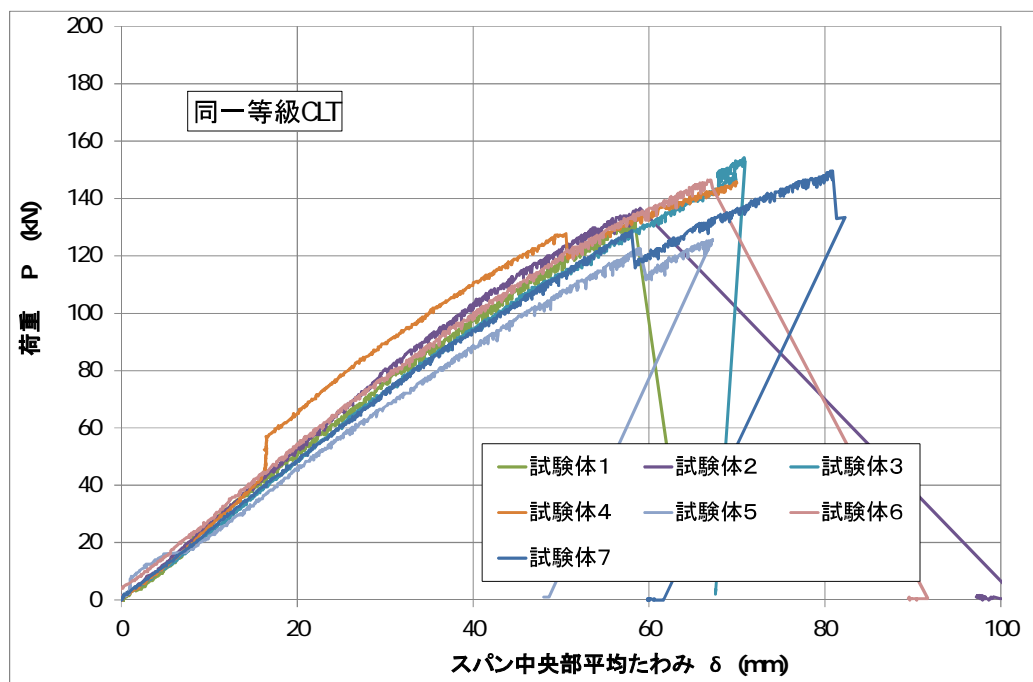


図 10 試験体 01～07 (同一等級試験体) の荷重(P)ースパン中央たわみ (δ) の関係

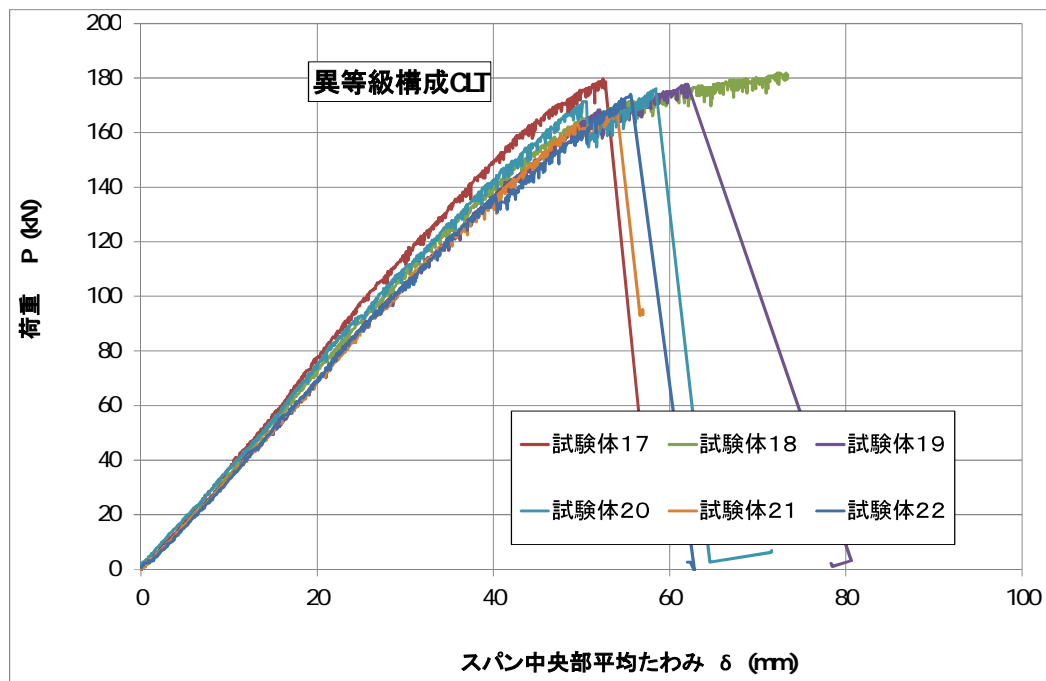


図 11 試験体 17～22（異等級試験体）の荷重(P)－スパン中央たわみ（ δ ）の関係

図 10、図 11 に曲げ試験で得られた荷重－スパン中央たわみの関係を示す。図 10、図 11 を見比べると、異等級構成 CLT の方が明らかに曲げ性能が高いことが分かる。

表 5 に両グループで評価された見かけの曲げヤング係数 E_b と曲げ破壊係数 MOR の評価値を示す。

表 5 供試 CLT 材の曲げ性能評価結果

同一等級CLTの曲げ性能										
試験体	1	2	3	4	5	6	7	平均	標準偏差	下限許容限界
E_b kN/mm ²	4.91	5.10	4.69	4.96	4.39	4.93	4.71	4.81	0.219	4.75 50%
MOR N/mm ²	26.39	27.32	30.85	29.19	25.14	29.29	29.92	28.30	1.910	24.00 95%
										$TL = x - K \cdot s$
異等級CLTの曲げ性能										
試験体	17	18	19	20	21	22	平均	標準偏差	下限許容限界	
E_b kN/mm ²	7.42	6.96	6.71	7.09	6.61	6.88	6.95	0.264	6.87	50%
MOR N/mm ²	35.94	36.46	35.53	35.22	33.86	34.80	35.30	0.830	33.36	95%
										$TL = x - K \cdot s$

同一等級 CLT に比べ、異等級 CLT はそれなりに性能が向上していることが表5から看取される。

図12-a)～d)に曲げ試験における典型的な破壊形態、終局状態の写真を示す。



a) 繊維破断型曲げ破壊形態



b) 層間剥離を伴う曲げ破壊形態



c) 節からの破壊



d) 全体的な曲げ破壊

図12 曲げ試験における典型的な破壊形態、終局状態の写真

3.2 セン断試験の結果

図13、図14にせん断試験体のせん断応力(τ)－せん断ひずみ(γ)の関係を示す。

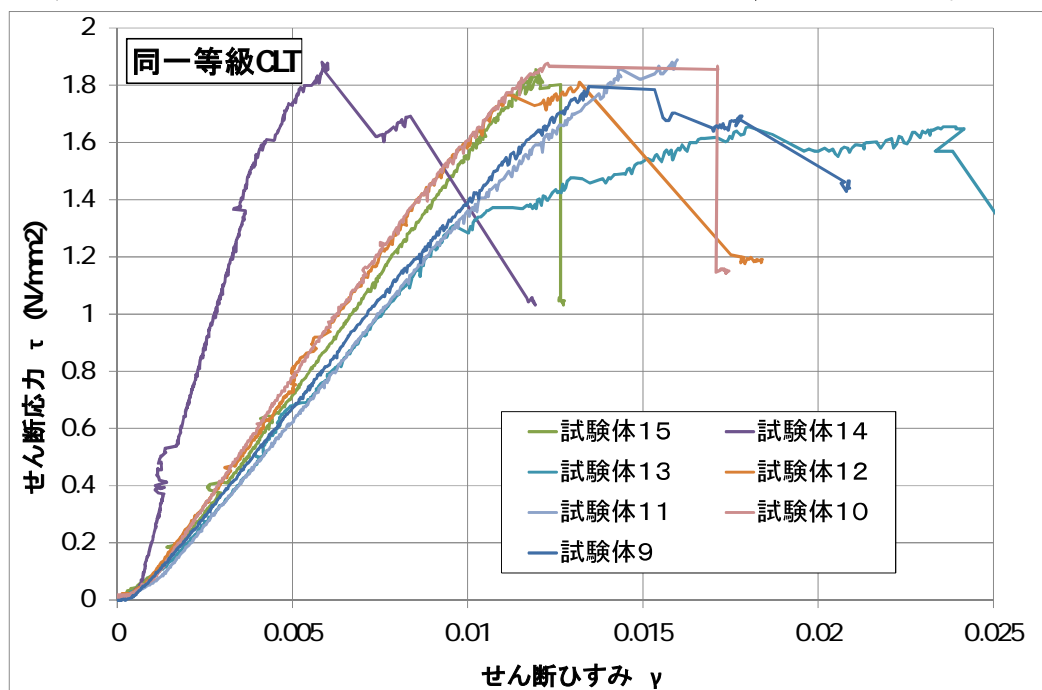


図13 セン断試験体9～15のせん断応力(τ)－せん断ひずみ(γ)の関係

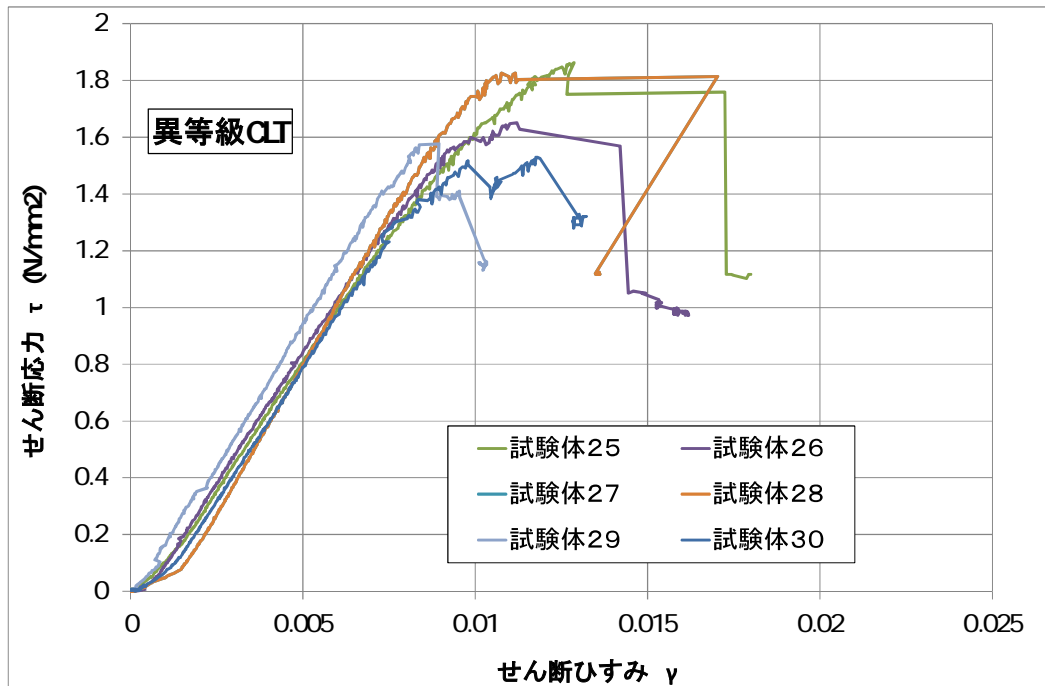


図 14 セン断試験体25～30のせん断応力(τ)－せん断ひずみ(γ)の関係

表 6 に両グループで評価された CLT のせん断弾性係数 G とせん断強度 F_s の評価値を示す。

表 6 供試 CLT 材のせん断性能評価結果

同一等級CLTのせん断性能										
試験体	9	10	11	12	13	14	15	平均	標準偏差	下限許容限界
G kN/mm ²	0.15	0.18	0.14	0.16	0.14	0.47	0.16	0.20	0.111	0.17 50%
F_s N/mm ²	1.80	1.88	1.89	1.81	1.65	1.88	1.86	1.82	0.076	1.65 95%
$TL = x - K \cdot s$										
異等級CLTのせん断性能										
試験体	25	26	27	28	29	30	平均	標準偏差	下限許容限界	
G kN/mm ²	0.18	0.18	0.21	0.21	0.19	0.19	0.19	0.012	0.19	50%
F_s N/mm ²	1.86	1.65	1.83	1.83	1.58	1.53	1.71	0.132	1.40	95%
$TL = x - K \cdot s$										

表6の結果は興味深い。せん断弾性係数の 50%下限値は異等級ラミナ構成の方がやや大きい値となって、ほぼ理にかなっている。一方、せん断強度 F_s の 95%下限値は、異等級構成にして表層が強化された方が同一等級構成に比べて逆に低くなっている。これは、内層と外層で機械的性質に差が大きい程、ローリングシア破壊が起こり易くなることを示唆しているのかもしれない。

図15a～d)にせん断試験で観察されたローリングシアー破壊の写真を示す。



a) 層間剥離とローリングシアー破壊



b) 部材横断型せん断破壊



c) 部材横断型せん断破壊



d) 部材横断型せん断破壊

図 15 せん断試験時の破壊形態

3.3 短尺試験体の膨潤・収縮変形の途中経過

図 16～図 18 に短尺試験体の膨潤・収縮変形の測定結果を示す。データの一部が欠落しているのは停電によるデータロガーの停止による。

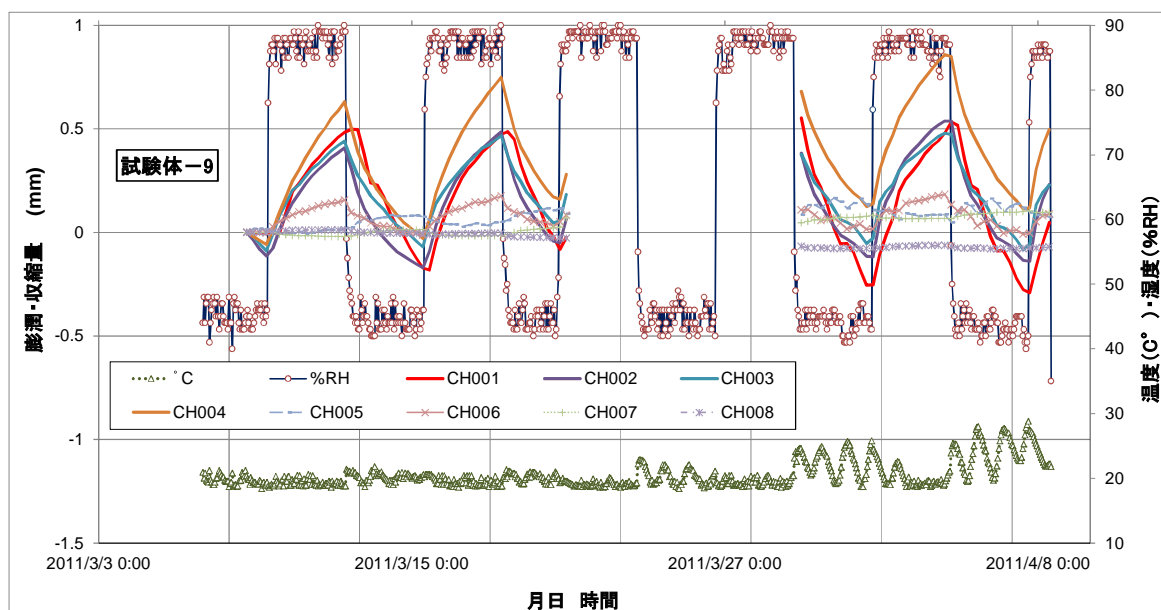


図 16 試験体9における測定経過

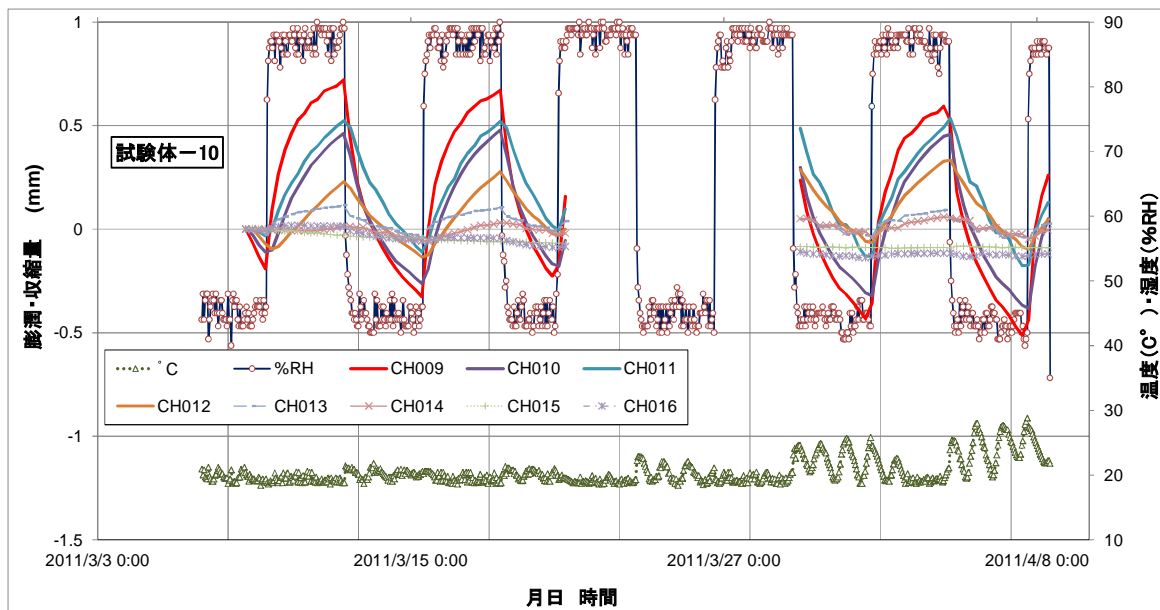


図17 試験体10における測定経過

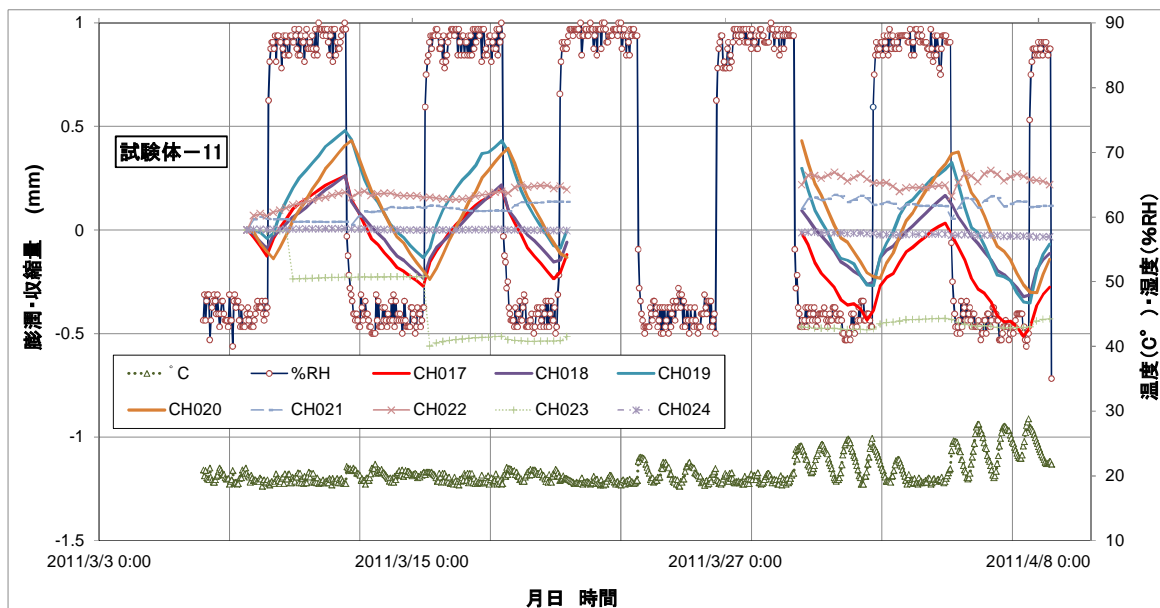


図18 試験体11における測定経過

一ヶ月程度経過した段階で、短辺方向の伸縮が-0.5～+0.8mm 程発生しているが、肉眼では観察できない範囲である。

長手方向の伸縮はほぼゼロと言える。矢高も殆ど発生していない。

本研究で開発した変位測定システムは良好に機能していることが確認できた。測定は継続していく予定である。