

# LVL ユニットを用いた疑似曲面構造物の開発

T A C . T の 輪

安田 聡\*<sup>1</sup>・森田 仁彦\*<sup>1</sup>・相馬 智明\*<sup>1</sup>  
野口 裕介\*<sup>2</sup>・岡山 真之介\*<sup>3</sup>・鈴木 あゆみ\*<sup>3</sup>・土井 健史\*<sup>4</sup>

Keywords : Laminated veneer lumber, glued-in-rod joint, scarf joint, unit structure, mockup, finite element method

単板積層材, GIR, スカーフジョイント, ユニット構造, モックアップ, 有限要素法

## 1. はじめに

LVL (Laminated Veneer Lumber) は繊維方向を揃えた単板を積層、接着した木質材料で、建材として建築物に多く使用されている。筆者らは、ユニット化した材長の短い、厚さ 35mm の LVL 平板を角度を付けながら繋ぎ合わせることで疑似曲面を形成する構法を開発し、人が座るベンチやカウンターテーブルの機能を有する構造物として大成建設技術センター本館エントランスの「TAC.T の輪」に適用した。設置状況を写真-1 に示す。「TAC.T の輪」は、DNA 二重らせん構造とメビウスの輪をコンセプトにしたリング状としている。コンピュータシミュレーションを用いた構造最適化手法による形状探索を実施し、設計に反映させている<sup>1)</sup>。使用した LVL を写真-2 に示す。強度・剛性の高いブナ材を幅方向に積層した LVL を用いた。ベンチやカウンターテーブルを構成する LVL ユニットは、図-1, 2 に示すような一般曲げ部とひねり部に大別される。一般曲げ部

の継手にはスカーフジョイントを採用した。ひねり部は、木口に角度を付けた三角形の LVL を GIR 接合 (Glued in Rod) で繋ぎ合わせることで、構面を水平から 90 度ひねり垂直に移行させている。

幅方向に積層した LVL の面材としての曲げ・せん断性能は不明な点が多い。そこで本研究では LVL の面材としての基本性能とスカーフジョイントおよび GIR 接合の継手性能を確認する構造実験を実施するとともに、

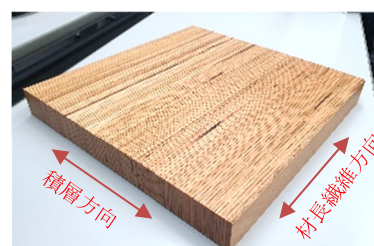


写真-2 使用した LVL (ブナ材)  
Photo.2 LVL (beech wood)

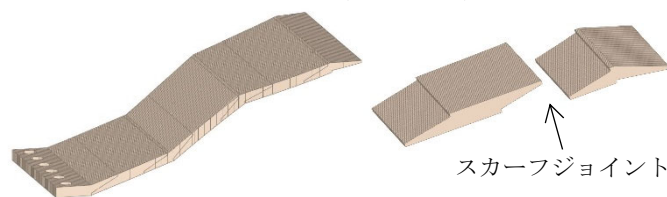


図-1 一般曲げ部および LVL ユニット  
Fig.1 Bent part and LVL unit

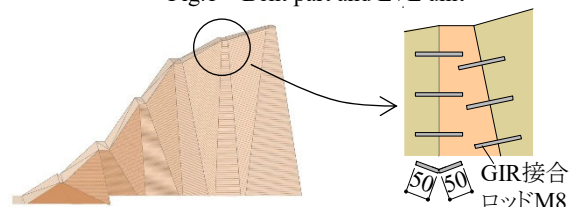


図-2 ひねり部および GIR 接合  
Fig.2 Twist part and GIR joint



写真-1 疑似曲面構造物「TAC.T の輪」  
Photo.1 Pseudo curved structure

\* 1 技術センター 都市基盤技術研究部 構造研究室  
\* 2 設計本部 構造設計第三部  
\* 3 設計本部 構造計画部  
\* 4 設計本部 建築設計第三部

人が座るベンチ部のモックアップ載荷実験および FEM 解析を行い構造安全性を検証した。また、LVL の含水による寸法変化が大きいことから、乾湿の寸法変化試験を行い被膜形成用の塗料を検討した。

## 2. 幅方向積層 LVL の加力実験

### 2.1 試験体

試験体一覧を表-1 に、試験体の継手詳細を図-3 に示す。試験体は厚さ 35mm、幅 200mm の幅方向に積層した LVL 面材である。n と nr は継手のない試験体で、n は繊維方向、nr は積層方向（繊維直交方向）の基本性能を確認する。sc はスカーフジョイントを材長繊維方向に設けている。継手長さを 100mm とし、先端に 7mm の突合せを設けた。sc-gir はスカーフジョイントと GIR 接合を併用した試験体である。板厚中央に M8(4T)の全ねじボルトを 25mm 間隔に配した。gir は GIR 接合した試験体で、継手界面の接着の有無を実験変数とした。曲げ試験体 B-gir は実構造物のひねり部を模擬し、継手部に 140 度の角度を設けた。GIR 接合のロッドには M8(4T)の全ねじボルトを用い、継手部に 2 段 2 列に配した。ボルト孔径は施工性を考慮し 10mm（ボルト径 +2mm）とした。スカーフジョイント接合面および GIR 接合にはエポキシ系接着剤を基本に用い、B-sc の 1

体のみポリウレタン系接着剤を用いた。

### 2.2 載荷方法

載荷方法を図-4 に示す。面外曲げ実験（B シリーズ）は 4 点曲げ載荷を行った。せん断実験（S シリーズ）は大野式の逆対称曲げせん断加力を行った。曲げ破壊を防止するため、図-4(c)に示すように、鋼板を接着し補強している。S-nr は押抜き載荷を行った（図-4(d)）。

### 2.3 曲げ実験結果

曲げ実験結果を表-2 に示す。初期剛性実験値は最大荷重の 10%と 40%の荷重点における割線剛性とした。荷重-たわみ関係を図-5 に示す。図中の破線は下記規格値を用いた弾性剛性  $K_0$  と曲げ強度  $P_b$  の計算値である。B-sc-gir、B-gir の破壊状況を写真-3 に示す。

- ・ヤング係数（繊維方向）：14,900(N/mm<sup>2</sup>)
- ・曲げ強度（繊維方向）：64.9(N/mm<sup>2</sup>)

継手のない B-n の初期剛性は  $K_0$  の 1.1~1.2 倍で、曲げ強度は  $P_b$  の約 1.6 倍であった。スカーフジョイントとした B-sc、B-sc-gir の初期剛性は、継手のない  $K_0$  と同等であった。B-sc と B-sc-gir の接着面が破壊する荷重はほぼ等しく、 $P_b$  の 1/3 程度であった。接着剤の相違による強度差はない。B-sc-gir は接着面が破壊した後、荷重

表-1 試験体一覧  
Table 1 List of specimens (N数2)

曲げ試験体	せん断試験体	継手仕様
B-n	S-n	継手なし
B-nr	S-nr(押抜き載荷)	継手なし、積層方向
B-sc	S-sc	スカーフジョイント
B-sc-gir	S-sc-gir	スカーフジョイント+GIR接合
B-gir1	S-gir1	GIR接合、界面接着なし
B-gir2	S-gir2	GIR接合、界面接着あり

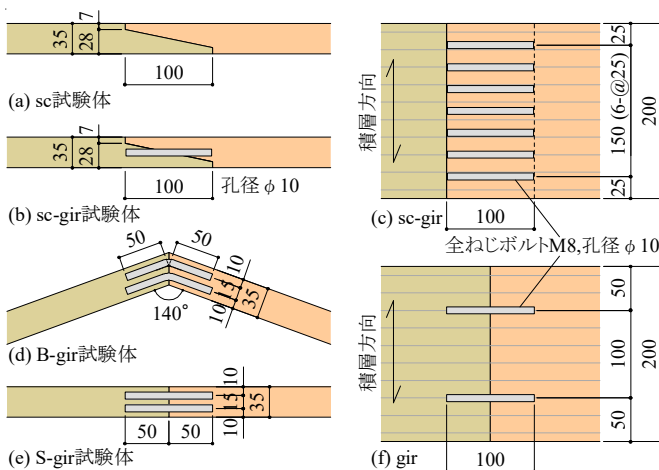


図-3 継手詳細  
Fig.3 Joint details

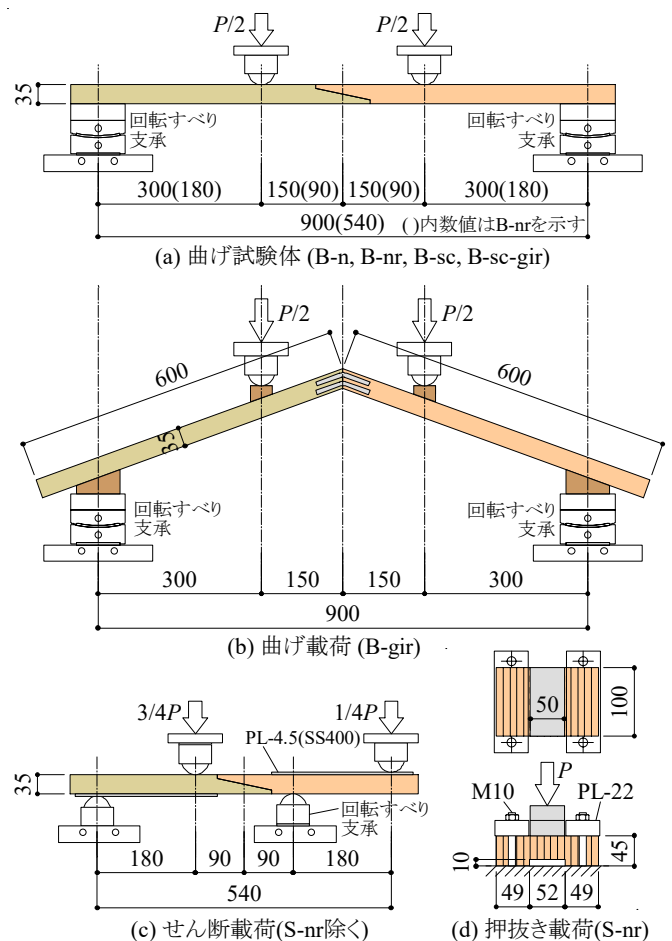


図-4 載荷方法  
Fig.4 Loading method

の低下・上昇を繰り返し、全ねじボルトが抜け出すまで、2kN以上の荷重を維持した。

B-nr (積層方向) の初期剛性は B-n (繊維方向) の約 1/6 であり、B-nr の曲げ強度は B-n の約 1/30 (平均 3.75 N/mm<sup>2</sup>) であった。

界面接着のない B-gir1 の初期剛性は K<sub>0</sub> の約 50% であり、界面接着した B-gir2 は K<sub>0</sub> とほぼ等しい。B-gir2 は

荷重 1kN 程度で接着破壊により荷重が若干低下したが、変位の増大にともない荷重は約 2kN まで上昇した。接着破壊後の荷重変形関係は B-gir1 と同じ挙動を示した。いずれの試験体も最終的に全ねじボルトの抜け出し破壊により荷重が低下した。

式(1)から同定される全ねじボルトの付着強度 τ<sub>b</sub> は平均で 10.6N/mm<sup>2</sup> であった。

$$M_e = 0.9 \cdot n_b \cdot \pi \cdot D \cdot L_b \cdot \tau_b \cdot d_b \quad (1)$$

ここで、M<sub>e</sub> : 曲げ耐力(0.6kNm)、n<sub>b</sub> : 引張側ボルト本数、D : ボルト公称径、L<sub>b</sub> : ボルト定着長(50mm)、d<sub>b</sub> : 圧縮縁から引張側ボルト重心までの距離(25mm)

### 2.4 せん断実験結果

せん断実験結果を表-3 に、せん断力-せん断変形角関係を図-6 に示す。S-gir2 の初期剛性は S-gir1 の約 1.5

表-2 曲げ実験結果

Table 2 Bending experiment results

曲げ試験体	初期剛性 kN/mm	実験値 K <sub>0</sub>	最大荷重 P/2 kN	実験値 P <sub>b</sub>	曲げ強度 <sup>※2</sup> σ <sub>b</sub> N/mm <sup>2</sup>
B-n	0.475	1.19	15.6	1.76	114.5
	0.442	1.10	14.5	1.65	106.8
B-nr	0.068	-	0.805	-	3.55
	0.072	-	0.895	-	3.95
B-sc <sup>※1</sup>	0.416	1.04	3.25	0.37	23.9
	(0.431)	(1.08)	(3.51)	(0.40)	(25.8)
B-sc-gir	0.399	1.00	3.28	0.37	24.1
	0.402	1.00	3.52	0.40	25.9
B-gir1	0.234	0.59	2.04	0.23	15.0
	0.228	0.57	1.98	0.22	14.5
B-gir2	0.402	1.00	1.95	0.22	14.3
	0.376	0.94	2.02	0.23	14.8

※1 ( )はポリウレタン系接着剤を使用した値

※2 σ<sub>b</sub> = M / Z, M: 曲げ耐力, Z: 断面係数

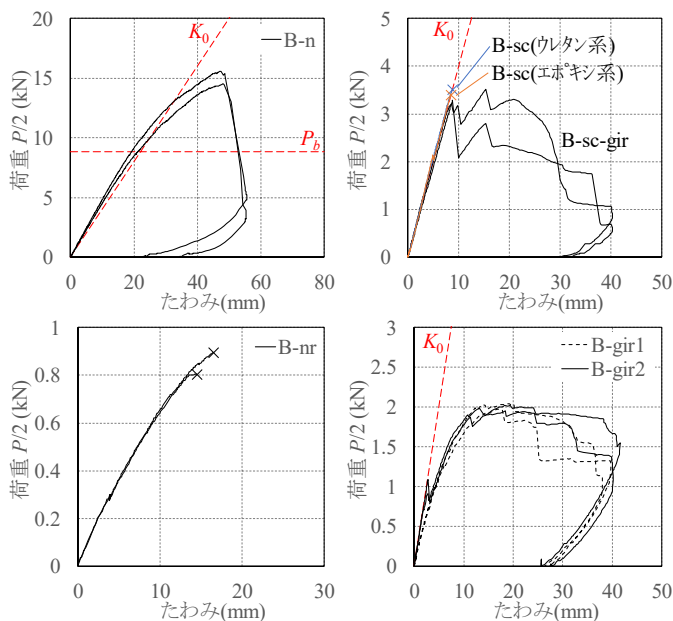


図-5 荷重-たわみ関係

Fig.5 Load-deflection relationship



(a) B-sc-gir

(b) B-gir

写真-3 破壊状況

Photo.3 Destruction situation

表-3 せん断実験結果

Table 3 Shear experiment results

せん断試験体	初期剛性 kN/rad	最大荷重 P/2 kN	せん断強度 <sup>※1</sup> τ N/mm <sup>2</sup>
S-n	1391	45.8	6.54
	1491	47.2	6.74
S-sc	1776	48.2	6.88
	1681	43.5	6.21
S-sc-gir	1715	51.9	7.42
	1788	46.7	6.66
S-nr 押抜載荷	21.7kN/mm	18.1	5.16
	22.9kN/mm	20.2	5.78
S-gir1	1312	10.1	1.45
	1261	9.7	1.39
S-gir2	1983	22.5	3.21
	1830	28.5	4.07

※1 τ = Q / A, Q: せん断耐力, A: せん断面積

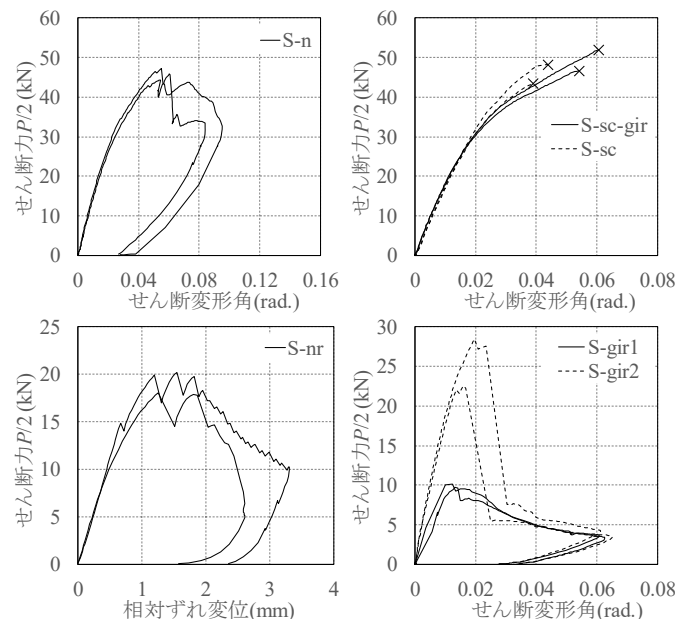


図-6 せん断力-せん断変形角関係

Fig.6 Shear force-shear deformation angle relationship



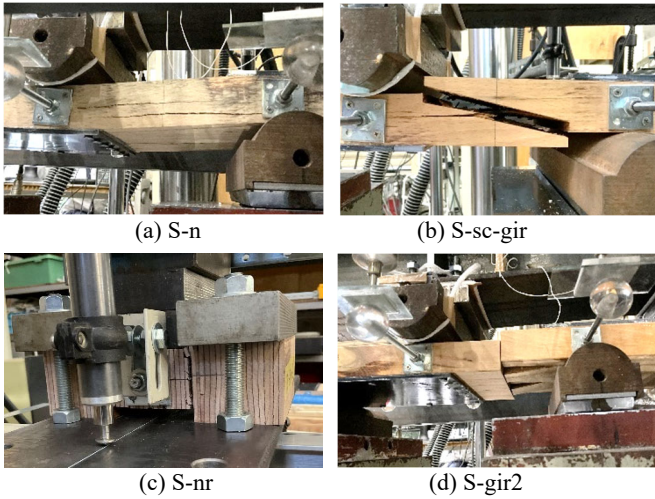


写真-4 破壊状況  
Photo.4 Destruction situation

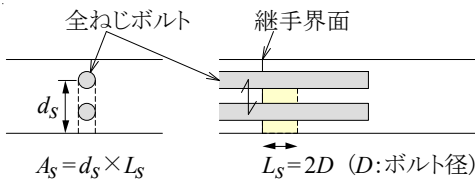


図-7 せん断有効断面積  $A_s$  の定義  
Fig.7 Definition of effective shear area  $A_s$

倍、最大せん断力は 2 倍以上であり、界面接着の効果が表れている。S-gir2 の接着破壊後は S-gir1 と同じ挙動を示した。最終的にいずれの試験体も、写真-4 に示すような全ねじボルトの支圧による LVL のはし抜け破壊が生じてせん断力が低下した。

式(2)から同定される全ねじボルトに対する LVL のはし抜けせん断強度  $\tau_s$  は  $6.19\text{N/mm}^2$  であった。

$$Q_e = 2 \cdot n_s \cdot A_s \cdot \tau_s \quad (2)$$

ここで、 $Q_e$  : せん断耐力 (9.91kN : S-gir1 の平均)、 $n_s$  : ボルト列数、 $A_s$  : せん断有効断面積 ( $=d_s \times L_s$ , 図-7 参照)、 $d_s$  : ボルト間隔と縁端距離の和 ( $=15+10\text{mm}$ )、 $L_s$  : ボルトの支圧に寄与する有効長さで、本報ではボルト公称径の 2 倍と仮定した ( $=16\text{mm}$ )

### 3. ベンチモックアップ載荷実験

これまでに示した材料・接合方法による LVL ユニット構造物の構造安全性を確認するため、ベンチ部分のモックアップを製作し、載荷実験を実施した。

#### 3.1 実験概要

モックアップ試験体を図-8 に、全景を写真-5 に示す。実験は大人 3 人が同時に座ることを想定した荷重・載荷位置を設定し、下記、実験 I と実験 II を実施した。

- ・実験 I (弾性変形) : 大人 1 人の想定荷重<sup>2)</sup>を 75kg と

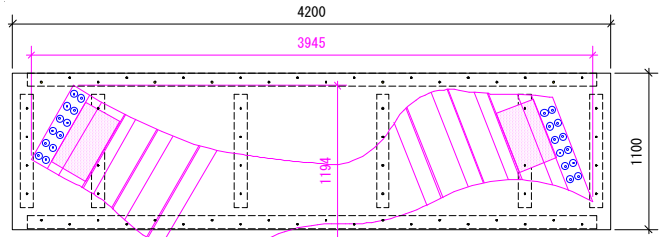


図-8 ベンチモックアップ試験体  
Fig.8 Bench mockup for loading test



写真-5 ベンチモックアップ試験体(全景)  
Photo.5 Bench mockup for loading test (overall view)

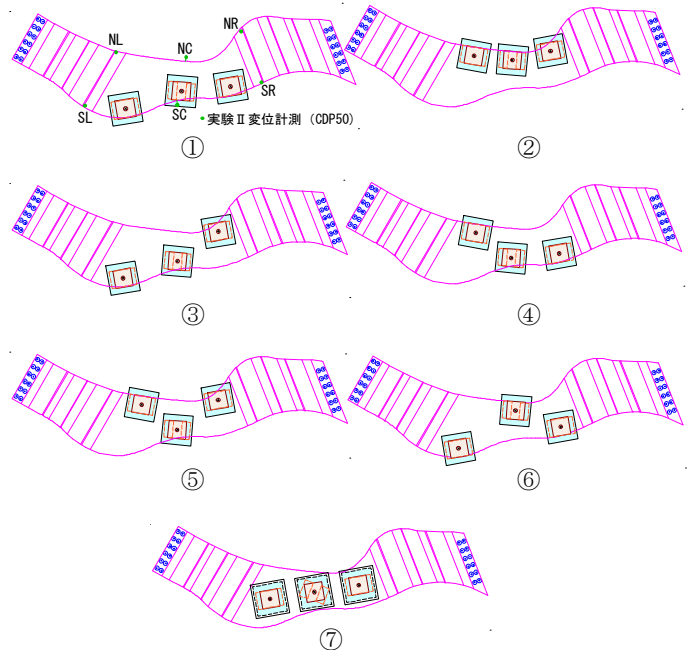


図-9 実験 I の載荷位置  
Fig.9 Loading position of Experiment I

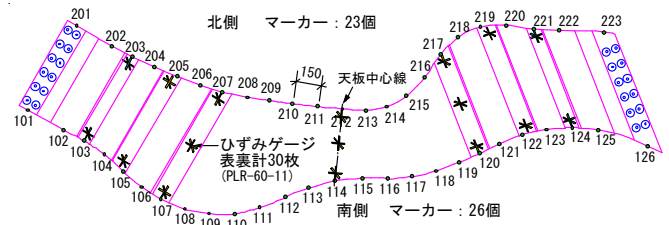


図-10 ひずみゲージとマーカー位置  
Fig.10 Strain gauge and marker position

し、7 ケースの載荷位置にて測定  
・実験 II (破壊想定) : 1 箇所 100→130→150kg と想定荷重の 2 倍まで増加させて測定  
実験 I の載荷位置①～⑦を図-9 に示す。計測は、板

の表裏面のひずみを3軸ひずみゲージで、板幅両端位置での変位を3D モーションキャプチャシステムで行った。ひずみゲージの配置と、3D モーションキャプチャシステムのマーカー位置を図-10 に示す。マーカーは、図に示す天板中心線を起点として、およそ150mmピッチで板厚中央に配置した。実験Ⅱの荷重位置は、荷重偏心の大きい①とした。ひずみ計測は実験Ⅰと同じであるが、変位はベンチ天板6カ所(図-9の①)に設置した高感度変位計(CDP-50)にて計測した。

計測値については各ケースとも荷重直後のデータを採用したが、実験Ⅱでは最終150kg荷重時のデータに加えて、10分間の経過観察後のデータを追加した。

### 3.2 実験結果

#### 3.2.1 実験Ⅰ

ベンチの鉛直方向変位について、実験Ⅰの結果を図-11 に示す。荷重前の各マーカーの変位を0として、荷重時の鉛直変位量をプロットしたものである。ベンチは南側へ湾曲し跳ね出しているため変位は南側が大きく、偏心の大きいマーカーNo.110付近に荷重した①、③、⑥ではその傾向が著しい。各ケースでの除荷時残留変形は、最大0.37mmであった。

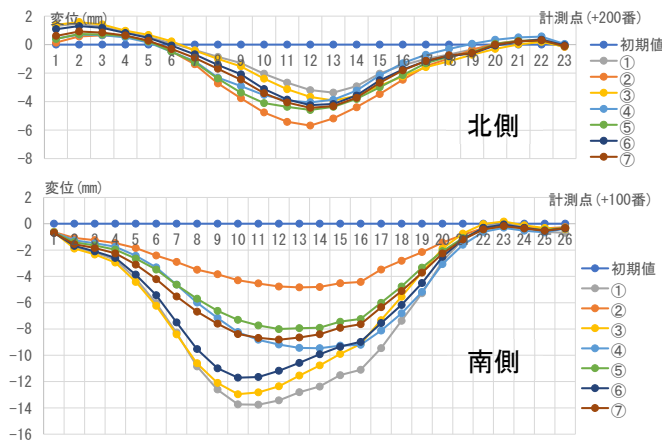


図-11 鉛直方向変位 (実験Ⅰ)  
Fig.11 Vertical displacement (Experiment I)

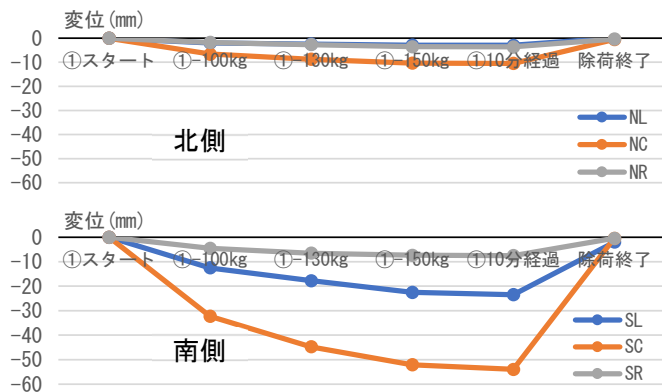


図-12 鉛直方向変位 (実験Ⅱ)  
Fig.12 Vertical displacement (Experiment II)

#### 3.2.2 実験Ⅱ

実験Ⅱの結果を図-12 に示す。①の荷重位置のため南側の変位が大きく、中央部で60mm程度となった。実験Ⅱでは、接合部の曲げ実験結果から、最終ステップに至るまでに部分的には接合部が損傷する可能性も想定したが、3人掛け想定2倍の荷重においても、若干の音鳴りはしたものの損傷は見られず、破壊にも至らなかった。

ベンチの応力については、平面応力状態の直交異方性材料に関する応力-ひずみ関係の剛性マトリクスにおいて面内材料定数  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $G_{xy}$ ,  $\nu_{xy}$ ,  $\nu_{yx}$  に  $\nu_{yx} = \nu_{xy}(E_y/E_x)$  なる関係が成り立つと考え、これを代入・展開して、

$$\sigma_x = \frac{1}{1 - \nu_{xy}^2} \frac{E_y}{E_x} (E_x \cdot \varepsilon_x + \nu_{xy} \cdot E_y \cdot \varepsilon_y) \quad (3)$$

$$\sigma_y = \frac{1}{1 - \nu_{xy}^2} \frac{E_y}{E_x} (\nu_{xy} \cdot E_x \cdot \varepsilon_x + E_y \cdot \varepsilon_y) \quad (4)$$

$$\tau = G_{xy} \cdot \gamma \quad (5)$$

とした。ここで、使用したブナ材 LVL については  $E_x$  (繊維方向)のみが既知であったため、 $E_y$  (積層方向:半径方向)と  $\nu_{xy}$  は式(6)と式(7)より、 $G_{xy}$  は式(8)と式(9)より推定した<sup>3),4)</sup>。

$$E_y = 0.15 E_x \quad (6)$$

$$\nu_{xy} = 0.4 \quad (7)$$

$$\frac{1}{G_{xy}} = \frac{4}{E_{45}} - \left( \frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} - \frac{2\nu_{xy}}{E_x} \right) \quad (8)$$

$$E_{45} = 0.2 E_x \quad (9)$$

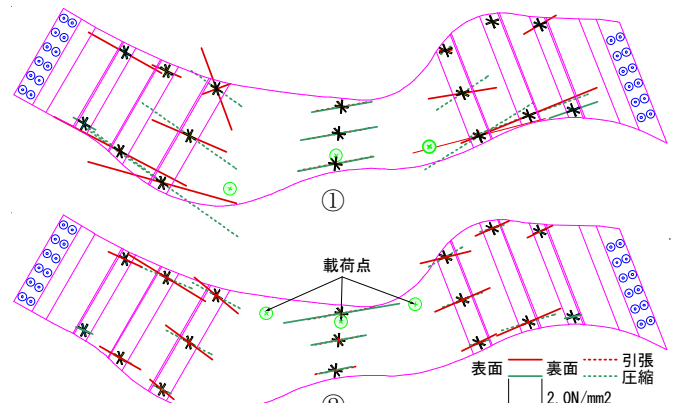


図-13 ベンチ表裏面の主応力度 (実験Ⅰ)  
Fig.13 Principal stress on the front and back of the bench (Experiment I)

実験 I の①（偏心大）と②（偏心小）におけるベンチ板面の主応力度とその方向を図-13に、せん断応力度を図-14に、表裏両面を合わせて示す。偏心の小さい②は左右支点を結ぶ線上の応力が大きく、偏心の大きな①では天板両端南側の応力が大きくなっている。また、

①の主応力方向が天板両端の位置において表裏で異なることから、板に捩れが生じていることがわかる。せん断応力度も②に比べて①の天板両端面内せん断力はかなり大きくなっており、荷重バランスは応力の大小に大きく影響している。

#### 4. FEM 解析

ベンチモックアップの実験 I を対象に FEM 解析を行い、変位やひずみについて比較検証した。解析プログラムは Karamba3D (ver1.3.3-build200511 for RHINO6) を用いた。

##### 4.1 解析モデル概要

解析モデルは Rhino+Gh で定義した面材を Karamba3D でシェル要素に変換し作成した。面材はベンチ製作のために作成した Rhino の立体モデル表面に沿わせて定義した。解析モデルと製作用モデルを重ねて図-15に示す。橙色の節点は鉛直水平並進拘束とし、ボルトで床面に緊結される領域を表す。緑色の節点は鉛直圧縮のみ拘束とし、下部が枕材に支えられる領域を表す。べ

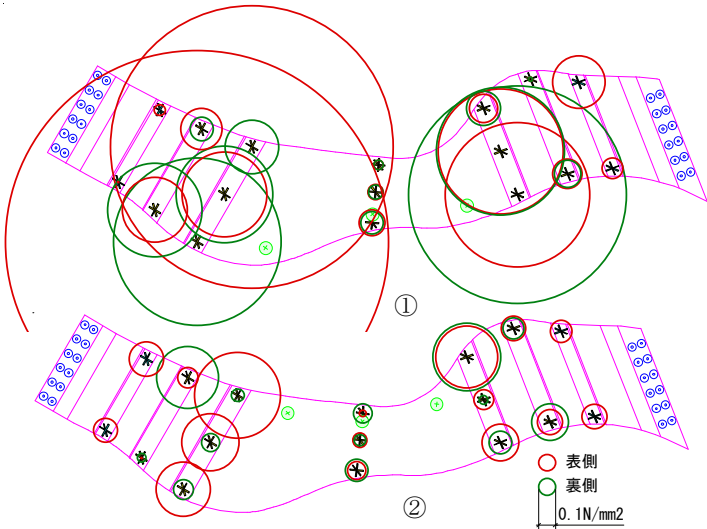


図-14 ベンチ表裏面のせん断応力度（実験 I）

Fig.14 Shear stress degree on the front and back of the bench (Experiment I)

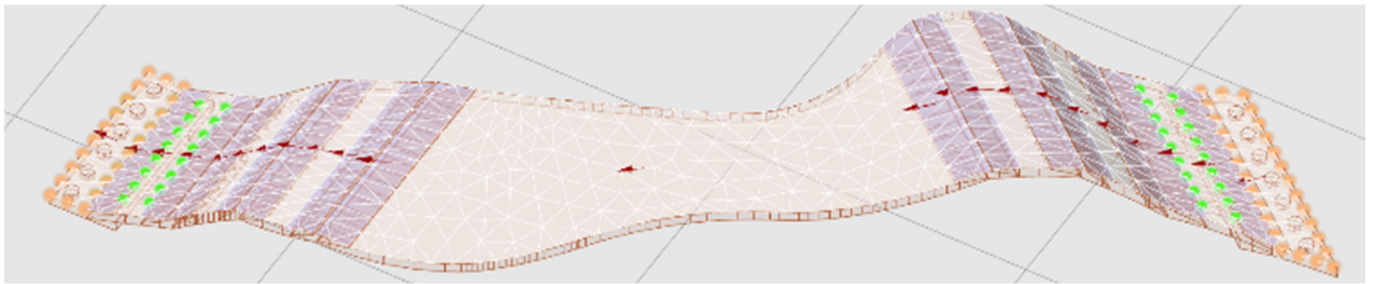


図-15 解析モデルおよび製作用モデル

Fig.15 Analytical model and production model

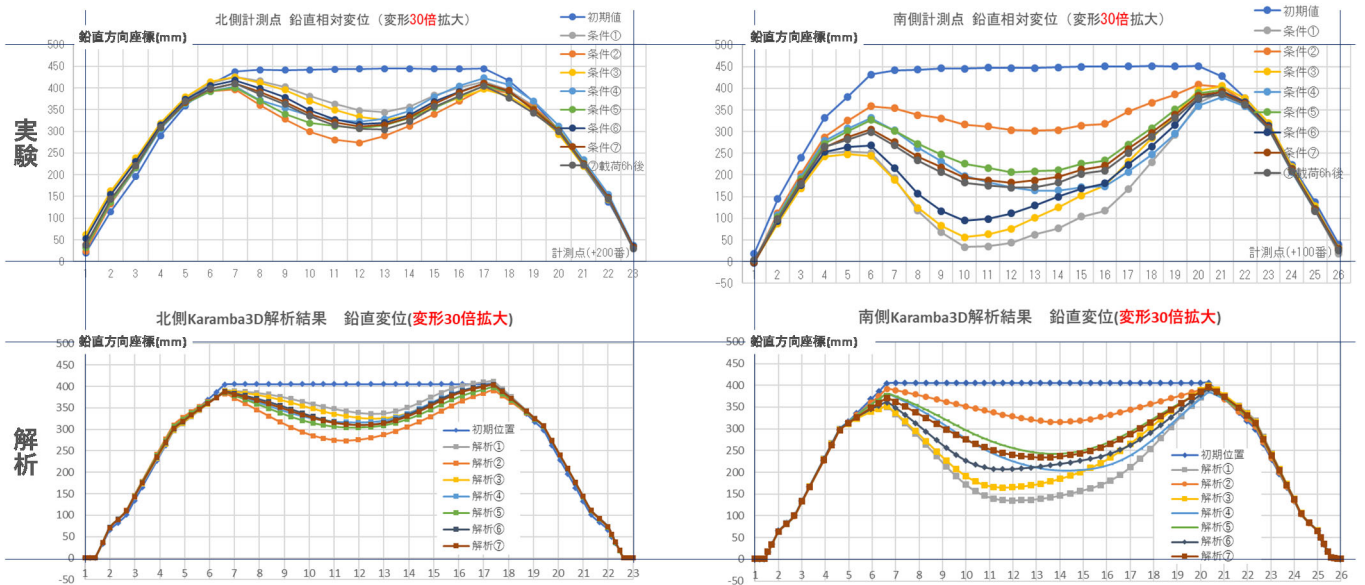


図-16 実験と解析の変形比較（単位：mm，変形30倍に拡大）

Fig.16 Deformation comparison between experiment and analysis (unit: mm, deformation 30 times larger)



ージュ色の領域は母材、紫色の領域はスカーフジョイントを表し、各領域中心から伸びる赤い矢印は LVL の繊維方向を表す。LVL の物性値および荷重はモックアップに合わせた。

### 4.2 変形の比較

初期位置および条件①～⑦の実験と解析の変形図を図-16 に示す。初期位置は試験体およびモデルの Z 座標（鉛直）を表し、変形は 30 倍に拡大している。全体的に実験の方が大きな変形となっており、特に南側での差異が顕著である。特徴的な点として、計測点 1～6 における変形が解析では殆ど無いのに対し、実験では北側で浮き上がり、南側で沈み込みが生じている。このことから実験ではボルト緊結部や下部台座の上下変形

が完全には拘束されていなかった可能性がある。一方、荷重条件による変形の大小（例えば南側の変形が大きい順に①・③・⑥と続き②が最小となる点）や、全体の変形形状（南側の変形が①・③・⑥では計測点 10～12、それ以外は 13～16 付近で最大となる点）は解析と実験で一致している。

次に、条件①の変形図を図-17 に示す。計測点 2 の北側と南側で 2+2=4mm 程度の変位差が生じているが、この延長として支点中心間を結ぶ軸（図-18 の黒一点鎖線）を中心に剛体回転が生じたと仮定し、図-18 に軸の平行線を記入すると北側で最大 1mm、南側で最大 6mm 程度の鉛直変位を目算できる。図-17 では北側の計測点 13 で 1mm、南側の計測点 10 で 6mm 程の差が生じており、

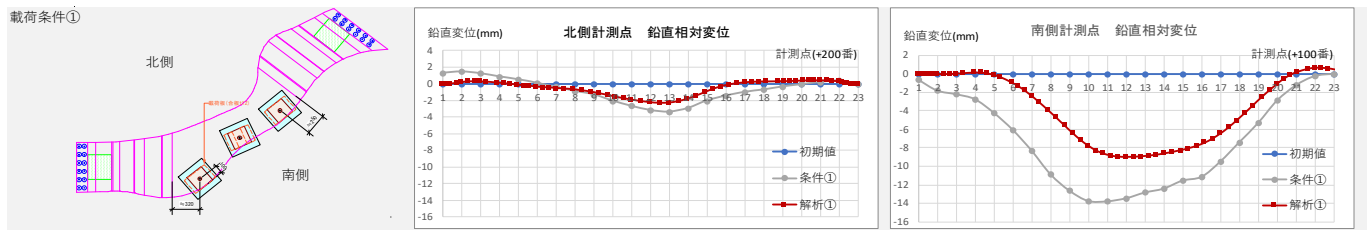


図-17 荷重条件①における実験と解析の変形比較（単位：mm）

Fig.17 Deformation comparison between experiment and analysis under loading condition ① (unit: mm)

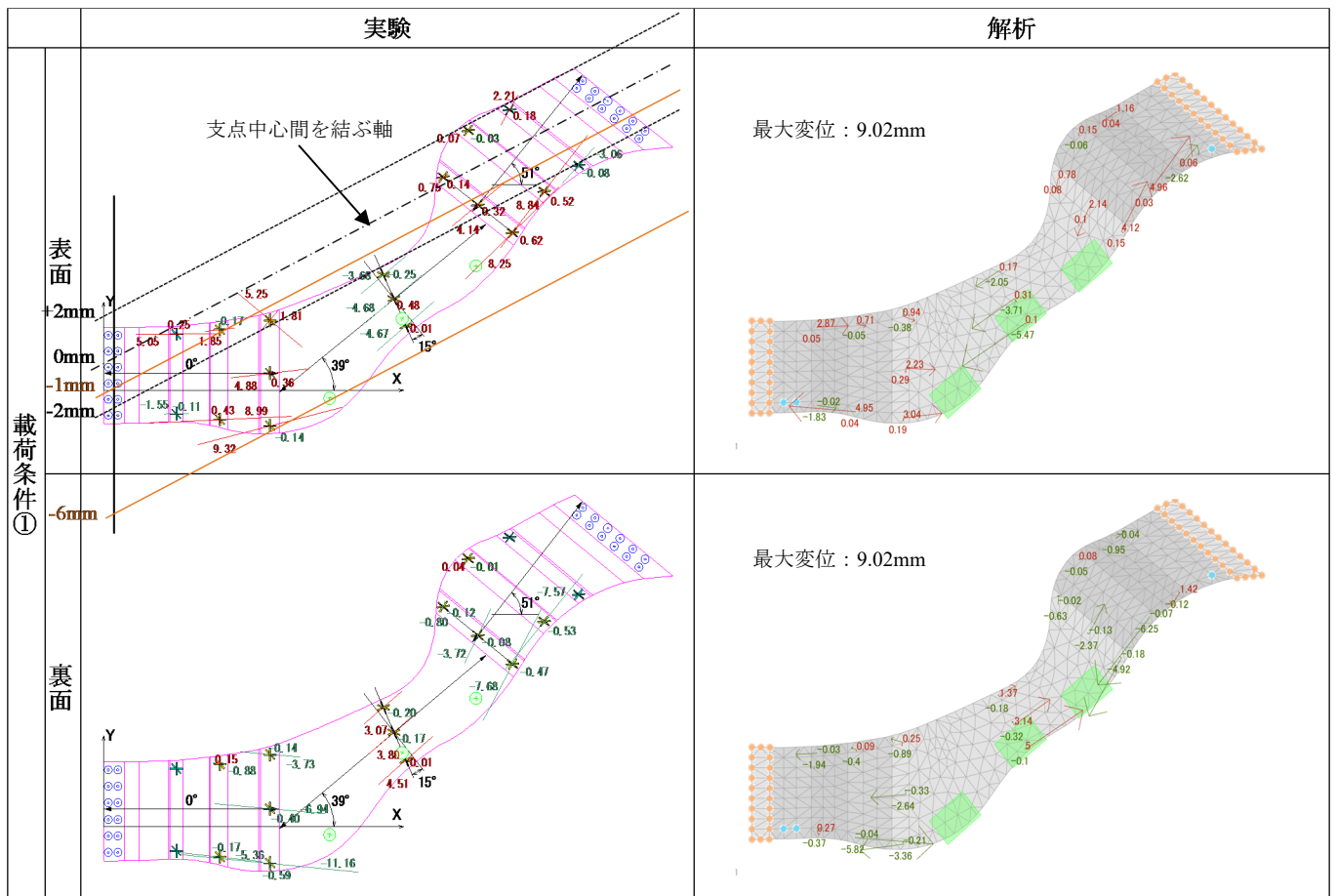


図-18 荷重条件①における実験と解析の主応力比較（単位：N/mm<sup>2</sup>，赤字：引張(正)，緑字：圧縮(負)）

Fig.18 Comparison of principal stress between experiment and analysis under loading condition ①

(Unit : N/mm<sup>2</sup>, red : tension (positive), green : compression (negative))

剛体回転の影響は少なからずあると推察できる。一方、実験で見られる天板両端の主応力方向が表裏で異なる現象は解析では再現できておらず、スカーフジョイントのモデル化に課題が残る。

### 4.3 応力の比較

図-18 に実験と解析の主応力図を示す。圧縮／引張の関係や主応力方向は概ね一致しているが、大きさについては差異があり、例えば天板近傍の接合部では 2 倍近い差となっている。また、天板中央表面の圧縮応力度をみると、解析では南側から 5.47/3.71/2.05、実験では 4.67/4.68/3.68 となっており、実験では応力の偏りが生じていない。このことから、実験では支点における鉛直方向の拘束が完全でなかった可能性が示唆される。なお、図-17 から解析における天板中央部の応力を計算すると、

$$\bullet \text{ 軸力 } N = A \cdot \sigma_n$$

$$N = (500 \cdot 35) \times (3.71 - 3.14) / 2 \times 10^{-3} = \underline{5.0 \text{ kN}}$$

$$\bullet \text{ アーチ曲げ } M_{arch} = N \cdot H$$

$$M_{arch} = 5.0 \times 0.4 = \underline{2.0 \text{ kNm}}$$

$$\bullet \text{ 曲率曲げ } M_b = Z \cdot \sigma_b$$

$$M_b = (500 \cdot 35^2 / 6) \times (3.71 + 3.14) / 2 \times 10^{-6} = \underline{0.35 \text{ kNm}}$$

$$\bullet \text{ 曲げ応力アーチ分担率 : } 2.0 / (2.0 + 0.35) \times 10^2 = \underline{85\%}$$

同様に実験結果から求めると、

$$\bullet \text{ 曲げ応力アーチ分担率 : } 3.1 / (3.1 + 0.44) \times 10^2 = \underline{88\%}$$

即ち解析、実験ともに十分なアーチ効果が発揮されているのがわかる。

## 5. 寸法変化試験

寸法変化試験に用いた試験体は 300mm 角×35mm (N 数 3) で、塗料 3 種と無塗装について実施した。試験は 338 時間まで 40°C/90%Rh、以降は 23°C/50%Rh の湿潤状態を保った。845 時間後の最終状況を写真-6 に示す。含水率の推移を図-19 に示す。含水率は試験時重量と絶乾重量の差を絶乾重量で除した値である。塗装することで水分の吸収が無塗装に比べ抑えられること、塗料の種類により水分吸収抑制効果が大きく異なることがわかる。

積層方向の寸法変化率を図-20 に、材長繊維方向の寸法変化率を図-21 に示す。寸法は 1 体に付き 3 か所測定した N 数 3 の平均を用いた。積層方向の寸法変化率は、無塗装の 4.8% に対し、塗装を行うことで 1.4% まで抑制できている。材長繊維方向の寸法変化率はいずれも 0.1% 以下であった。



写真-6 最終状況(845h)  
Photo.6 Final status(845h)

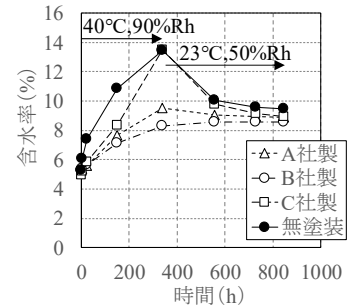


図-19 含水率変化  
Fig.19 Changes in water content

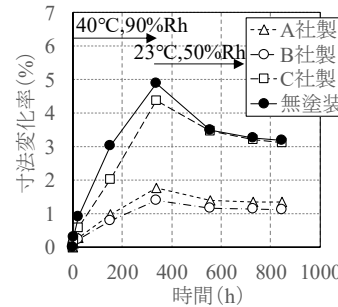


図-20 寸法変化率(積層方向)  
Fig.20 Dimensional change rate (stacking direction)

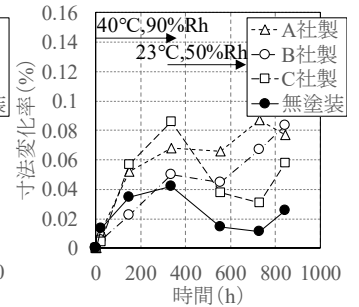


図-21 寸法変化率(繊維方向)  
Fig.21 Dimensional change rate (fiber direction)

## 6. まとめ

幅方向に積層した LVL を用いた疑似曲面構造物を実現するために実施した各種実験の結果を以下に示す。

- 1) スカーフジョイントおよび GIR 接合の初期剛性、曲げ強度、せん断強度および破壊性状を明らかにした。
- 2) ベンチモックアップ載荷実験・FEM 解析により応力・変形の性状を把握し、想定 の 2 倍の荷重で損傷・破壊しないことを確認した。
- 3) 塗料による含水率、寸法変化の抑制効果を確認し、最適な塗料を選定した。

今回、木材を曲げ加工することなく、曲面形状を形成する新たな合理化構法を提案した。幅方向に積層した LVL は意匠性が高く構造物への利用が期待される。今後も、本技術の特徴を生かし、様々な部材・架構への適用を推進していきたい。

### 参考文献

- 1) 鈴木あゆみ、江森健人ほか：3次元曲面構造における形状最適化、その1、その2、日本建築学会大会学術講演梗概集、2022.9
- 2) EN81-1/2
- 3) 沢田稔：木材の強度特性に関する研究 主として、その木材梁への適用、林業試験場研究報告第108号、1958.11
- 4) 林毅：直交異方性材料による光弾性実験法、応用物理第31巻第10号、1962.8