

住宅用構造部材（横架材）の軽量化に関する研究（第1報）

— 扁平アーチ材におけるたわみ量の抑制について —

小倉 光 貴 ・ 鈴木 修 治

要旨：ヤング係数が小さいスギ材を桁、梁等の横架材として使用する可能性について、スギラミナを湾曲させて積層接着した扁平アーチ集成材を試作し、垂直荷重に対する曲げ性能や挙動について通直集成材との比較を中心に検討した。その結果、曲げ強さや曲げヤング係数などの曲げ性能に関しては、通直集成材と差が認められなかった。しかし、垂直荷重に伴って発生する水平反力が非常に大きかったため、鋼製のタイロッドにより両端を拘束したタイドアーチとして荷重試験を行った。その結果、タイロッドを付けない場合との比較で曲げヤング係数がほぼ2倍となり、横架材としての性能が十分期待できる見通しを得た。

I はじめに

生活様式の変化に伴い、木造住宅の間取りが大型化し、これに伴い横架材（梁、桁）スパンが長大化し、断面も大きくなり、重量も増大している。

従来から、横架材にはヤング係数の高いマツ（Japanese pine）やベイマツ（Douglas-fir）等が使用され、スギはヤング係数が小さく、荷重に対するたわみが大きくなることから、使用されることは稀であった。

今後、スギ材の生産量が増大するに伴い、これらの用途にも使用する可能性を見出すことが求められている。すでによりヤング係数の大きな樹種との複合化による、異樹種集成材として使用することについて、技術的な目途は得られたが、さらにスギ材のみの使用により低廉化を目指し、同時に横架材の軽量化する事が求められると考える。その対応策として、①湾曲集成材とタイロッドを併用することにより、荷重に対するたわみ量の抑制を図ること。②I型梁や箱型梁など断面形状の合理化により軽量化と高剛性化を図ること。以上のことが考えられる。

本報においては①について、実験検討を行ったので、その結果の報告を行う。

本試験は国庫補助大型プロジェクト研究「地域産材を用いた住宅用高信頼性部材の開発」の一環として実施した。

II 試験概要

現在に至るも小屋梁にはマツのタイコ挽き材が、その曲がりを利用して、言わば天然のアーチ材として利用されている。このような天然アーチ材と、人工の集成アーチ材を比較した場合、人工アーチ材では、予め剛性を計算して設計することが可能である点や、形状も計画的に設計できるため、小屋束の長さが規格化でき、プレカット工法にも導入可能であること等がメリットである。

その反面、スギ材をアーチ材として使用する場合、ヤング係数が小さいことがデメリットとなるが、変形を拘束することによりたわみを抑える事が可能であると考えられる。

本試験の目的は、ヤング係数が小さく横架材として使用した場合にたわみが問題となることが予測されるスギ材を取って横架材に使用する可能性を検討することにある。そこで、本試験では、まず小試験体による予備試験において、通直材とアーチ材の曲げ性能比較を行い、この結果を踏まえて実大アーチ材およびタイロッドの設計、試作、性能試験を行い、その性能について検討を行った。

III 予備試験

1. 目的

予備試験は通直材とアーチ材の間で曲げ強さや曲げヤング係数、変形挙動に差異があるか、また、アーチ材の端部を拘束した場合にどのような変化があるかについて基礎的データを得ることを目的

に、小試験体を用いて、JIS-Z-2101に準じた曲げ試験を実施した。

2. 試験材

本試験は湾曲の有無による曲げ性能の差異について検討することを目的としたので、材料は比較的材質的に均質で欠点が少ないベイヒバ材（＝アラスカシーダー、*Chamaecyparis nootkatensis*） $L=60\text{cm}$ 、 $b=10\text{cm}$ 、 $h=4\text{cm}$ を用い、これから厚さ1.0cm、幅4.0cmのラミナを採取した。

ラミナ全数（ $n=157$ ）に対して E_{dw} を測定し、等級区分した。等級別個体数を表1に示す。

表1 等級別ラミナ本数（予備試験）

Edw	個体数
$17.6\text{GPa} \leq E_{dw}$	3 (1.9%)
$15.7 \leq E_{dw} < 17.6$	3 (1.9)
$13.7 \leq E_{dw} < 15.7$	15 (9.6)
$12.3 \leq E_{dw} < 13.7$	31 (19.7)
$10.8 \leq E_{dw} < 12.3$	35 (22.3)
$9.8 \leq E_{dw} < 10.8$	26 (16.6)
$8.8 \leq E_{dw} < 9.8$	11 (7.0)
$7.8 \leq E_{dw} < 8.8$	8 (5.1)
$E_{dw} < 7.8$	25 (15.9)

このうち、 $E_{dw} < 7.8\text{GPa}$ のものを除いた中から4プライ集成材を28体を作製した。 E_{dw} の高いものを順に外層に用い、残りのものから内層に用いた。積層接着は水性高分子イソシアネート系接着剤（大鹿振興 TP111、以下 API）を使用し、圧縮圧667kPaで2時間圧縮した。なお、12体については1.0cmのライズ（ $f=1/60L$ ）を付け、湾曲集成材とした。型枠はメラミン化粧板（ $t=1.2\text{mm}$ ）裏面にカーブに合わせて厚紙を重ね貼りして作成した。

また、その後に端部拘束した場合の曲げ性能と挙動を測定するための試験体については、同じ材料から厚さ1.0cm、幅10cm、長さ60cmのラミナ4プライ、水平反力を考慮してライズを3.0mm（ $f=1/20$ ）とした湾曲集成材ブロック6体を作製し、養生後に幅方向に3分割して、 $L=56\text{cm}$ 、 $b=3.0\text{cm}$ 、 $h=4.0\text{cm}$ の試験体とした。

3. 試験方法

曲げ試験方法は、万能試験機（島津製作所 UH 20A）を用い JIS-Z-2101の曲げ試験に基づいて、以下の条件によって実施した。

- ・スパン=56cm

- ・荷重方法：中央集中荷重等速荷重制御
- ・荷重速度：980N/min.
- ・測定項目：MOE、MOR

また、端部拘束試験においては、下図1に示す治具を用いて、同様の条件で試験を実施した。

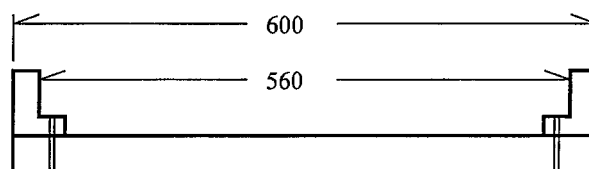


図1 端部拘束試験治具

端部のブロックとベースは高耐力ボルトにより締結した。試験体はブロックと接する材端部の圧壊を防ぐため、材端部下面を材長方向に約2cm水平に削り出した。

4. 試験結果および考察

曲げ試験の結果を表2および図2に示す。

表2 予備試験における曲げ試験結果

	MOE (GPa)			MOR (MPa)		
	straight	arch	arch-bl	straight	arch	arch-bl
avg.	11.2	11.2	14.2	87.0	89.3	101.2
max.	12.5	12.6	16.5	102.3	101.9	118.0
min.	10.0	9.6	11.6	73.8	70.7	80.0
std.	0.7958	0.9636	1.6358	7.4337	9.1870	9.7798

○MOEおよびMORに関して、通直材と湾曲材との間に差異は見られなかった。

○端部の拘束により、MOEは約25%、MORは約15%向上した。端部拘束試験体の構成ラミナから求めた E_{dw} の平均は11.6GPaであったので、端部拘束による曲げヤング係数の改善効果は約20%と考えられる。

○最大荷重時において端部に発生する水平反力Hは次式により求められ、平均で36.2kN、最大で42.6kNである。

$$H = \frac{15 P \cdot \ell}{64 f}$$

ここで、P：垂直荷重

ℓ ：スパン

f：ライズ

○ブロックと接する材端部（木口面、9cm²）はめり込み破壊を発生した。単位面積当たりの圧力は平均40.2MPa、最大47.3MPaとなり、アラスカシーダーの縦圧縮強度は43.5MPa¹⁾であることから、妥当な結果であると考えられる。

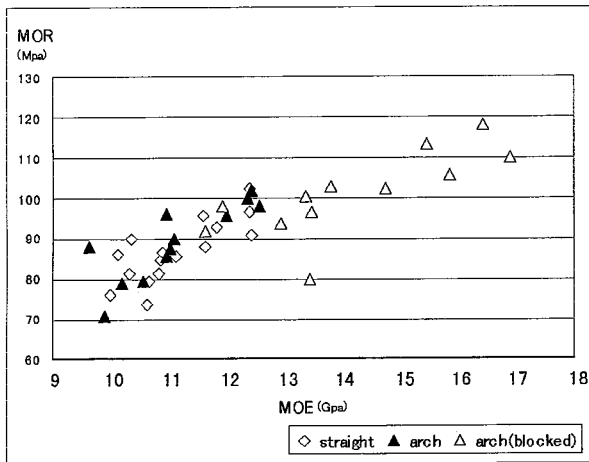


図2 予備試験における曲げ試験結果

IV 実大アーチ荷重試験

1. 目的

前項の予備試験の結果、通直材とアーチ材の曲げ強度性能に差が認められないことを検証した。また、アーチ材の材端を拘束して水平変位を抑えることによりヤング係数の向上が認められたので、実大のアーチ材を試作してこれらの効果を確認し、横架材として要求される性能の有無について検討することを目的とした。

2. 試験材

(1) 集成材ラミナ

集成材に使用したラミナは、鳳至郡穴水町内の原木市場で購入した、同郡門前町産のスギ丸太(2~3番玉、長級4.0m、末口径20~24cm)30本から採材した。断面寸法は10.8×3.2cmで他の用途材も含めた製材歩留まりは59%であった。

ラミナは162本採材され、縦振動法により動的ヤング係数(Efr)を求めた後、人工乾燥により含水率を15~20%に調湿した。このうち、Efr ≥ 9.8GPaであった68本のうち、断面欠損の大きかった10本を除く58本についてプレーナーにより厚さを28.5mmに揃え、死荷重による静的ヤング係数(Edw)を測定して、最終的には49本を使用して7プライ対称異等級集成材(材背20cm、材幅10cm)を7体作製した。

Edw計測時の等級別本数を表3に示す。なお、ラミナには縦継ぎ、幅はぎ等の加工は行っていない。

ラミナの配列は、最外層をL110、L100とし、中立軸に向かって順にL90、L80とし、中立軸上の4層目はL70である。

表3 等級別ラミナ本数

Edw (GPa)	個体数
10.8 ≤ Edw < 12.3	5 (8.6%)
9.8 ≤ Edw < 10.8	11 (19.0)
8.8 ≤ Edw < 9.8	18 (31.0)
7.8 ≤ Edw < 8.8	15 (25.9)
6.9 ≤ Edw < 7.8	9 (15.5)

(2) タイドアーチの条件設定

スギ材をアーチ材として使用する場合、ヤング係数が小さいこと、また、スパンに対してライズの小さい扁平アーチにおいては、垂直荷重に比して大きな水平反力が発生することが問題となるが、予備試験の結果から得られたように、材長方向に拘束することによりたわみを抑える事が可能で、横架材としての性能を満たすことも可能であると考えられる。その拘束方法として、鋼製のタイロッドにより引張する方法を採用した。

計画寸法としては、住宅部材用途として小屋梁に使用することが想定されるが、2階床梁に使用することも考慮すると、1階天井から2階床までのクリアランスに収まる物でなければならない。このため、最大梁背を40cmに収めた。

材長については4.0mとし、想定する荷重については、梁1本当たり間口3.6m、桁行き1.8mを負担すると仮定して、瓦葺き4分勾配仕様を想定して、自重0.6t/6.6m²、積雪荷重2.1t/6.6m²(積雪1.0m、密度300kg/m³)²⁾であることからP=29.42kNとした。

(3) 試験材の作製

7体の試験材のうち3体はコントロールデータの目的で通直材とした。他の4体はL=4m、ライズf=20cmの円形アーチ型に沿って接着した。

アーチの型はバイマツ集成材の板(長さ2m、厚さ5cm)からNCルーターにより半径9.2mの円曲線を彫り込み、削りだして厚さ4cmの型を製作した。これを3枚合わせてボルトで締め、さらに同様のものを中心から対称に置いて双方を金具で連結した。

積層接着はAPIを硬化剤配合率15重量%、塗布量250gr/m²で使用して、18℃の雰囲気内で行い、圧縮圧785kPaで3時間圧縮し、解圧後15~18℃の雰囲気中で3日間養生した。なお、アーチの圧縮の場合、端部に近いほど傾斜が増し、圧縮に支障があるので、写真1に示すようにカーブに合

わせた雌型を挿入して圧力が垂直に架かるように配慮した。

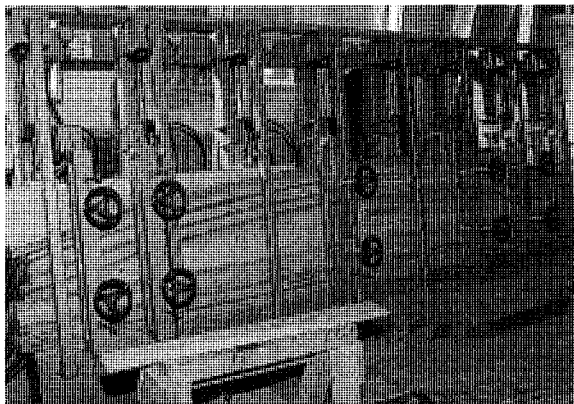


写真1 アーチの圧縮状況

3. 試験条件および方法

(1) タイドアーチにおける応力計算

アーチに対する垂直荷重試験の概念を図3に示す。

垂直荷重29.42kN（2点荷重）に伴い発生する水平反力の算定およびタイロッドの耐力計算は以下のとおりである。

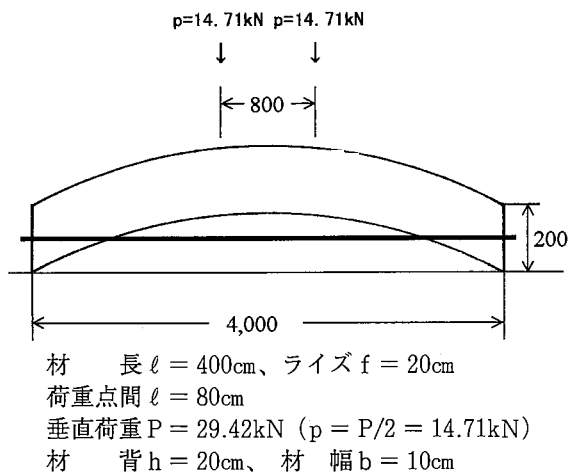


図3 タイドアーチ荷重試験概念

① 水平反力²⁾

2点荷重の場合の水平反力Hは次式より求めた。

$$\begin{aligned}
 H &= \frac{15}{2f} \times pl \times \left(\frac{2}{5}\right)^2 \times \left(1 - \frac{2}{5}\right)^2 \\
 &= \frac{15}{40} \times 14.71 \times 400 \times \frac{4}{25} \times \frac{9}{25} \\
 &= 127.09\text{kN}
 \end{aligned}$$

ここで、 $p = P/2 = 14.71\text{kN}$

l : スパン = 400cm

f : ライズ = 20cm

荷重点 : 両端より $2/5 l$

② タイロッドの所要引張り耐力

$H \approx 130\text{kN}$ として

$$2H = 260\text{kN}$$

JIS-G-3123³⁾の炭素鋼みがき鋼棒（SGD-400 D） $\phi 20\text{mm}$ 2本を並列使用して

鋼棒の単位引張り耐力を $500\text{N}/\text{mm}^2$ と仮定すると断面積 $A = 3.14\text{cm}^2$ であるから

$$50 \times 3.14 \times 2\text{本} = 314\text{kN} > 2H$$

③ タイロッドの取り付け

前述のとおり、29.42kNの垂直荷重に伴い、片側130kNの水平反力が発生する。したがって、タイロッドの取り付けもそれに耐えうる強度が必要である。今回は図4および写真2のとおり溝型鋼を用いて締結した。強度計算は以下のとおり。³⁾⁴⁾

y面を中心とした断面二次モーメントは

$$\begin{aligned}
 I_y &= \frac{bh^3}{3} \\
 &= \frac{10.9 \times 0.6^3}{3} + \frac{(12.5 - 10.9) \times 6.5^3}{3} \\
 &= 147.25\text{cm}^4
 \end{aligned}$$

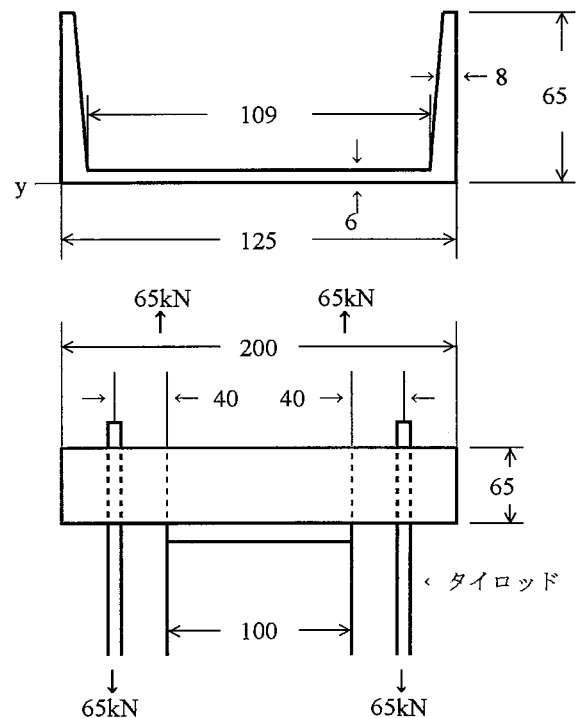


図4 タイロッドの取り付け概略図

断面係数は

$$Z_y = \frac{I_y}{x} = \frac{147.25}{12.5} = 11.8\text{cm}^3$$

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{P(L-l)}{4Z} = \frac{130 \times (18-10)}{4 \times 11.8} \\
 &= 220.3\text{N}/\text{mm}^2
 \end{aligned}$$

鋼材の許容耐力は $245\text{N}/\text{mm}^2 > 220.3\text{N}/\text{mm}^2$ となるので、強度上問題ないと判断した。



写真2 タイロッド取り付け状況

(2) 荷重試験

荷重試験は構造用集成材の日本農林規格（以下[JAS]と略）の曲げA試験に準ずる形で実施した。

試験は実大材強度試験機（鳥津製作所 UH100 A）を使用して以下の条件で行った。

スパン=360cm

ロードスパン=80cm

荷重制御方式：等速荷重制御

荷重速度：9.81kN/min.

予めコントロールの通直材3体について曲げ破壊強度試験を行い、最大荷重および比例限度荷重が設計荷重の29.42kN以上であることを確認し、その結果を受けてアーチ材に対する垂直荷重試験を、先ずタイロッド非装着の状態です39.23kNまで荷重し、一旦除荷した後、タイロッドを装着して29.42kNまで荷重して、中央部のたわみ量および両材端部での水平変位量を測定した。タイロッドの緊張は取り付け板へのボルト締めにより行い、緊張の度合いは任意とした。

4. 試験結果

コントロール材3体の曲げ破壊強度試験の結果を表4に、アーチ材に対する垂直荷重試験の結果を表5、図5に示す。

コントロール材の曲げ強度性能は、構造用集成材のJASに規定される異等級対称集成材 E135-F375に該当する。比例限度荷重は平均58.84kNであり、これが短期許容応力に相当すると考えると、長期許容応力は $58.84/2=29.42\text{kN}$ であり、今回の設計荷重に一致する。

また、表5に示すとおりタイロッドの装着によ

り曲げヤング係数は約2倍に、たわみ量および水平変位量は約1/2になった。このことより、タイロッドによるたわみ抑制の効果は十分に認められた。なお、水平変位量はタイロッド非装着の場合でも7~8mm程度であり、住宅の軸組においてこの程度の水平方向の狂いをどう評価すべきか今後の課題に含めたい。

また、スパン360cmの場合、許容たわみ量は $360/300=1.2\text{cm}^5$ であり、想定した荷重26.5kNに対しては約2mm程度上回るが、建築基準法施行令第84条および第86条に基づいて計算した、平面積6.6 m^2 当たりの設計荷重19.6kNに対しては基準値を満足した。

表4 スギ集成材曲げ破壊強度試験結果

samp.	MOE	MOR	PI	S-pl
	GPa	MPa	MPa	kN
St 01	13.47	70.88	57.55	54.78
St 02	13.30	81.37	64.12	59.86
St 03	14.77	82.75	64.90	61.87
avg.	13.85	78.33	62.19	58.84

表5 アーチ材垂直荷重試験結果

sample No.	arch			tied-arch		
	MOE	strain*	h-disp**	MOE	strain*	h-disp**
	GPa	mm	mm	GPa	mm	mm
Ar 01	13.30	30.57	7.41	26.51	16.21	3.56
Ar 02	12.20	31.15	7.49	25.93	16.31	3.26
Ar 03	13.38	30.08	6.74	26.34	15.53	3.02
Ar 04	14.16	29.79	7.51	24.70	16.41	3.11
avg.	13.26	30.40	7.29	25.87	16.12	3.24
*** effect	-	-	-	195.1%	53.0%	44.4%

* : stressed at 29.42kN

** : horizontal displacement on stressed at 29.42kN

*** : effect on vertical load between the arch and tied arch

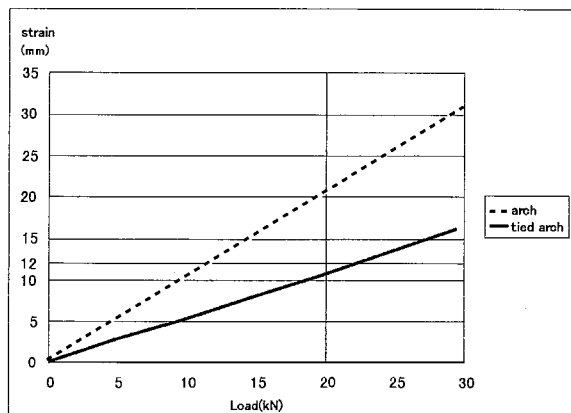


図5 スギアーチ材の応力/たわみ曲線

5. 考察

湾曲材の半径方向の最大応力度は

$$\sigma_R = \frac{3M}{2\rho bh}$$

で表され、湾曲の中心に向かって荷重がかかる場合は σ_R は許容せん断応力度の1/3以下でなければならぬ。⁶⁾

ここで、 σ_R ：半径方向の垂直応力度の最大値
 M ：湾曲材に生ずる曲げモーメント
 ρ ：湾曲材の中心線の曲率半径=9.3m
 b ：材幅=10cm
 h ：材背=20cm

$$M=14.71 \times 220/360 \times 140 + 14.71 \times 140/360 \times 220 = 2517 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

したがって、 $\sigma_R = 0.203 \text{ MPa}$

スギ集成材の許容せん断応力度 0.88 MPa ⁷⁾から、 $0.88/3 = 0.29 \text{ MPa} > \sigma_R = 0.203 \text{ MPa}$

次に、たわみ量や水平変位量が約1/2に抑えられたことは、梁に発生した引っ張り応力の相当部分をタイロッドが負担していると考えられる。

タイロッドにかかる引張力 T は次式により表される。⁸⁾

$$T = \frac{\Delta_0}{\Delta_1 + \frac{L}{Et \cdot At}}$$

ここで、 Δ_0 ：タイロッド非装着での水平変位量
 Δ_1 ：単位引張力 $T=1$ によるアーチの縮み

Et ：タイロッドの弾性係数

At ：タイロッドの断面積

$$At = 3.14 \times 2 = 6.28 \text{ cm}^2$$

L ：梁長=400cm

表5より $\Delta_0 = 7.29 \text{ mm}$ (平均値)、 $Et \approx 200 \text{ GPa}$ ⁹⁾とし、縮み量 Δ_1 については、

$$\Delta = \Delta_0 - T \Delta_1$$

ただし、 Δ ：タイドアーチの荷重による水平変位量(=3.24mm)より、

$$T \Delta_1 = \Delta_0 - \Delta = 4.05 \text{ mm}$$

これより、 Δ_1 は十分に小さな数であるので無視すると

$$T \approx \frac{\Delta_0}{L} \cdot Et \cdot At$$

と置き換えることができる。よって、

$$T \approx \frac{0.729}{400} \cdot 200 \cdot 6.28 \approx 229 \text{ kN}$$

3(1)①で求めたとおり、 $P = 29.42 \text{ kN}$ 荷重時のこの梁に発生する水平反力は約254kNであることから、そのほぼ90%をタイロッドが負担していることになる。このことは、木製のアーチ材に鋼製タイロッドを張った場合、タイドアーチの曲げ剛性はほとんどタイロッドの引っ張り剛性によって決まることを意味し、換言すればアーチ材の曲げ剛性については多少ラフに考えても支障ないと考えられる。したがって、より低質でヤング係数の小さなラミナにより構成した場合でも、タイドアーチにすることにより梁としての剛性は確保できると考える。このことは、次年度において実証試験を試みる予定である。

6. 結論

ベイマツの平均的ヤング係数は約 11.4 GPa ¹⁰⁾であり、差し渡し3.6mに通常使用される、梁背21cm、幅12cmの平角材の場合、29.42kNの荷重に対して想定される梁のたわみ量は12.8mm程度と推定される。このたわみ量を $\text{MOE} = 7 \text{ GPa}$ のスギ平角材で再現するには梁背を25cm以上とする必要がある。したがって、本試験において試みたタイドアーチは梁背を増すことなく高い剛性が得られ、横架材の軽量化や長大化に対応し得る点で有効な方法であると結論づける。

謝 辞

本実験計画の中で、水平反力の算定とタイロッドの所要耐力の算定に関し、株式会社中東よりアドバイスをいただいた。深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 林業試験場編：「木材工業ハンドブック」丸善 1982 p.194
- 2) 杉山英男・谷 資信：「建築構造力学演習2」オーム社 1960
- 3) 日本規格協会：「JISハンドブック・鉄鋼Ⅱ」1999 p.79~81, 474~487
- 4) 志村一男・栗原 博：「絵解き建築構造力学」オーム社 1976 p.130~135
- 5) 日本住宅・木材技術センター：「木造住宅軸組構法のスパン表」1996 p.30~35

- 6) 杉山英男・野口弘行ほか：「木質構造」共立出版 2000 p.145～146
- 7) 日本建築学会：「木質構造設計規準・同解説」1995 p.172
- 8) 塚本正文：「構造力学Ⅲ～門形ラーメン・リング・アーチ～」現代理工学出版 1993 p.140
- ～143
- 9) 堀内良ほか訳：「材料工学入門」内田老鶴圃 1985 p.36～37
- 10) 強度性能研究会：「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集3 1999 p.33