

実大木構造物，実大集成梁の強度試験（2）

- 実大集成梁の強度試験 -

木材部 強度科，材質科

1. はじめに

前報において述べたように，本試験はエゾマツ集成梁の補強として，ミズナラを面材に用いた効果および設計製造技術に関する資料をうるための予測計算の適合性を検討した。前報と多少重複する部分もあるが実大集成梁の強度試験の結果を報告する。

2. 供試体

供試体は，断面寸法15cm×30cm，材長5mの15層集成梁である。ラミナはすべてプレーンスカフにより縦継ぎされている。使用したラミナは，厚さ2cmのエゾマツおよびミズナララミナである。

構成は次のような3種類で各1本製造した。

集成梁の記号	ラミナ構成
Q-Q	QQQ.....QQQ Q単一構成
A-A	AAA.....AAA A単一構成
Q-A	QQA.....AQQ QA異種構成
Q	ミズナラ
A	エゾマツ

3. 試験方法

試験は東京衡機製型油圧式材料試験機を使用した。試験機の曲げ最大負荷能力は20tで，10t，5t，2tの4段階に切換え可能で，剛性試験では，それぞれの荷重範囲で切換え使用した。

3.1 剛性試験

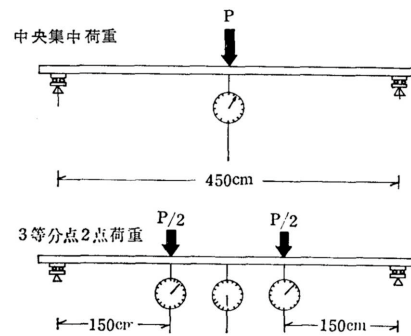
剛性試験は，スパン450cmの一定とし，中央集中荷重方式および3等分点2点荷重方式で，接着層に垂直方向および平行方向に負荷した。中央集中荷重方式ではスパン中央撓みを，3等分点2点荷重方式では，スパン中央撓みと荷重点直下の撓みを，それぞれ精度

1/100mmのダイヤルゲージで測定した。

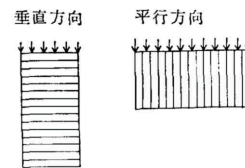
試験の要領を第1～2図および第1表に示した。

3.2 破壊試験

剛性試験終了後，A-A，Q-Aは3等分点2点荷重方式，Q-Qは中央集中荷重方式で，いずれも接着



第1図 荷重方式と撓み測定位置



第2図 荷重方向

第1表 剛性試験の種類

荷重方式	荷重方向	梁の種類	限界荷重 kg	撓み測定 荷重間隔 kg
中央集中荷重	平行	Q-Q	2000	100
		A-A	2000	100
		Q-A	2000	100
	垂直	Q-Q	4000	100
		A-A	4000	100
		Q-A	4000	100
3等分点 2点荷重	平行	Q-Q	2000	100
		A-A	2000	100
		Q-A	2000	100
	垂直	Q-Q	10000	200
		A-A	6000	200
		Q-A	8000	200

層に垂直方向に破壊するまで負荷した。また、破壊においても、剛性試験と同じ方式で撓みを測定し、1 mm目盛の竹スケールでもスパン中央の撓みを破壊まで測定した。

4. 予測計算の方法

4.1 曲げヤング係数

a) 接着層に垂直方向のヤング係数

この方向のヤング係数は次式によって求めた。

$$EI = \sum_{i=1}^n E_i I_i \quad (1)$$

ここで E : 集成梁のヤング係数 (kg/cm)

I : 集成梁の中立軸に関する断面二次モーメント, $BH^3/12$ (cm⁴)

E_i : ラミナのヤング係数 (kg/cm²)

I_i : 梁の中立軸に関するラミナの断面二次モーメント (cm⁴)

また (1) 式は次のように変形することができる。

奇数枚構成の場合 $n = 2m + 1$ 層として

$$EI = 24I_0 \sum_{i=1}^m E_i e_i^2 + 2I_0 \sum_{i=1}^m E_i$$

$$\therefore E = 24 \frac{I_0}{I} \sum_{i=1}^m E_i e_i^2 + 2 \frac{I_0}{I} \sum_{i=1}^m E_i \quad (1)'$$

ここで,

$$I_0 = \frac{Bt^3}{12}$$

(1) 式において、右辺第2項は、集成梁のヤング係数の値にほとんど影響しないので省略して次のような近似式によって計算してもあまりちがわない。

$$E = 24 \frac{I_0}{I} \sum_{i=1}^m E_i e_i^2 \quad (2)$$

すなわち,

$$E = 24 \frac{I_0}{I} \{ E_1 + 4 E_2 + 9 E_3 + \dots + m^2 E_m \}$$

偶数枚構成の場合 $n = 2m$ 層として

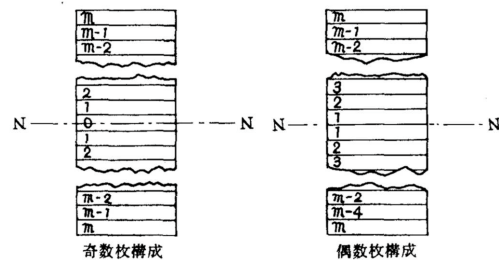
この場合 (2) 式に相当する式は次のようになる

$$E = 6 \frac{I_0}{I} \sum_{i=1}^m E_i e_i^2 \quad (3)$$

すなわち,

$$E = 6 \frac{I_0}{I} \{ E_1 + 9 E_2 + 25 E_3 + \dots + (2m-1)^2 E_m \}$$

ただし、中立軸からの各ラミナの番号は次のようにする。



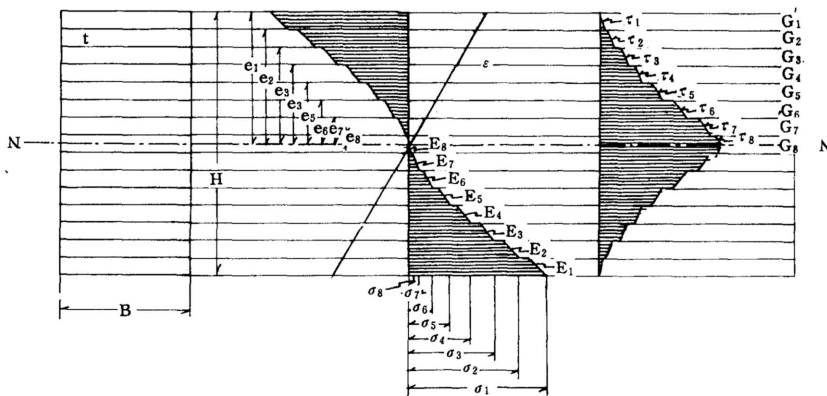
第3図 (2) (3) 式の場合のラミナ番号

b) 接着層に平行方向のヤング係数

この方向のヤング係数は次式によって求めた。

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i$$

$$= \frac{1}{n} [E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n] \quad (4)$$



第4図 対称集成梁の断面内における応力分布

4.2 スパン中央における弾性撓み

対称集成梁の断面内における応力分布を第3図に示した。

N-N: 中立軸, σ : 垂直応力, τ : 垂直歪, γ : 剪断応力, E: ヤング係数, G: せん断弾性係数, e: 中立軸より各部材までの距離, HおよびB: 断面寸法とする。

エネルギー法により求められた弾性撓みの計算式を用い, 第3図の応力関係から各係数を求め, せん断撓みを含めたスパン中央における弾性撓みを求めた。

a) 中央集中荷重の場合

$$\delta_1 = \frac{P\ell^3}{48EI} \left[1 + \frac{3}{5\varphi} \left(\frac{h}{\ell} \right)^2 \beta \right] \quad (5)$$

b) 3等分点2点荷重の場合

$$\delta = \frac{23P\ell^3}{1296EI} \left[1 + \frac{54}{115\varphi} \left(\frac{h}{\ell} \right)^2 \beta \right] \quad (6)$$

ここで,

$$\begin{aligned} e_1 &= u_1 H & E_2 &= K_2 E_1 \\ e_2 &= u_2 H & E_3 &= K_3 E_1 \\ e_3 &= u_3 H & E_4 &= K_4 E_1 \\ \vdots & & \vdots & \\ e_7 &= u_7 H & E_7 &= K_7 E_1 \\ e_8 &= u_8 H & E_8 &= K_8 E_8 \end{aligned} \quad \text{として,}$$

$$\begin{aligned} \varphi &= 2 \left\{ u_1^3 - u_2^3 + K_2 (u_2^3 - u_3^3) + K_3 \right. \\ &\quad \left. (u_3^3 - u_4^3) + K_4 (u_4^3 - u_5^3) \right. \\ &\quad \left. + K_5 (u_5^3 - u_6^3) + K_6 (u_6^3 - u_7^3) \right. \\ &\quad \left. + K_7 (u_7^3 - u_8^3) + K_8 u_8^3 \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta &= \alpha_1 \frac{E_1}{G_1} + \alpha_2 \frac{E_2}{G_2} + \alpha_3 \frac{E_3}{G_3} + \alpha_4 \frac{E_4}{G_4} + \alpha_5 \frac{E_5}{G_5} \\ &\quad + \alpha_6 \frac{E_6}{G_6} + \alpha_7 \frac{E_7}{G_7} + \alpha_8 \frac{E_8}{G_8} \end{aligned}$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{8} (4 - 15u_2 + 40u_2^3 - 48u_2^5)$$

$\alpha_2 \sim \alpha_7$ は $i = 2 \sim 7$ までとして

$$\alpha_i = 2k_i \left\{ 15c_i^2 (u_i - u_{i+1}) - 10c_i \right.$$

$$\left. (u_i^3 - u_{i+1}^3) + 3(u_i^5 - u_{i+1}^5) \right\}$$

$$\alpha_8 = 2k_8 \left\{ 15c_8^2 u_8 - 10c_8 u_8^3 + 3u_8^5 \right\}$$

$$C_2 = \frac{1}{4K_2} \left\{ 1 - 4(1 - K_2)u_2^2 \right\}$$

$$C_3 = \frac{1}{4K_3} \left\{ 1 - 4(1 - K_2)u_2^2 - 4(K_2 - K_3)u_3^2 \right\}$$

$$C_4 = \frac{1}{4K_4} \left\{ 1 - 4(1 - K_2)u_2^2 - 4(K_2 - K_3)u_3^2 - 4(K_3 - K_4)u_4^2 \right\}$$

$$C_5 = \frac{1}{4K_5} \left\{ 1 - 4(1 - K_2)u_2^2 - 4(K_2 - K_3)u_3^2 - 4(K_3 - K_4)u_4^2 - 4(K_4 - K_5)u_5^2 \right\}$$

$$C_6 = \frac{1}{4K_6} \left\{ 1 - 4(1 - K_2)u_2^2 - 4(K_2 - K_3)u_3^2 - 4(K_3 - K_4)u_4^2 - 4(K_4 - K_5)u_5^2 - 4(K_5 - K_6)u_6^2 \right\}$$

$$C_7 = \frac{1}{4K_7} \left\{ 1 - 4(1 - K_2)u_2^2 - 4(K_2 - K_3)u_3^2 - 4(K_3 - K_4)u_4^2 - 4(K_4 - K_5)u_5^2 - 4(K_5 - K_6)u_6^2 - 4(K_6 - K_7)u_7^2 \right\}$$

$$C_8 = \frac{1}{4K_8} \left\{ 1 - 4(1 - K_2)u_2^2 - 4(K_2 - K_3)u_3^2 - 4(K_3 - K_4)u_4^2 - 4(K_4 - K_5)u_5^2 - 4(K_5 - K_6)u_6^2 - 4(K_6 - K_7)u_7^2 - 4(K_7 - K_8)u_8^2 \right\}$$

: 荷重Pkgにおけるスパン中央撓み (cm)

E: (1) で求めたヤング係数 (kg/cm²)

I: 梁の断面二次モーメント

P: 荷重 (kg)

l: スパン (cm)

E/G: ミズナラ 20

エゾマツ 25

4.3 曲げ強さ

次式により梁の曲げ強さを求めた。

$$b_r = x E x \quad (7)$$

ここで,

b_r : 求める曲げ強さ

: 樹種により一定値を示すといわれ, 小型無欠点

試験片による曲げ試験より b/E_0 として求められる。

ここで b は曲げ強さ， Ecl は純曲げ条件でのヤング係数である。本試験ではミズナラ0.008，エゾマツ0.006とし，異種構成のQ-Aでは次式で ϵ を求めた。

$$\epsilon = \frac{1}{I} \{ 0.008 \times If + 0.006 Ic \} = 0.0072 \quad (8)$$

ここで，

If：ミズナララミナの中立軸に関する断面二次モーメント

Ic：エゾマツラミナの中立軸に関する断面二次モーメント

e：節を断面欠損とみた場合の強度低減率，次により求めた。

$$\varphi_e = \frac{Ie}{I} \quad (9)$$

$$Ie = 24 I_0 \sum_{i=1}^n e_i \phi_i^2$$

$$= 2bt^3 \{ \dots + 49 \dots \} \quad (10)$$

$$= (1 - \dots)$$

ここで，I：集成梁の断面二次モーメント

Ie：節を断面欠損とみなした場合の梁の有効断面二次モーメント

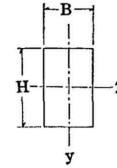
：断面減少率

i_5 ：材長方向15cm区間における集中節径比

r：スカフ効率=0.8

5. 試験結果

供試体の概要を次に示す。



第2表 供試体の概要

	巾 B cm	せい H cm	材長 L cm	重量 W kg	断面係数 Zz cm ³	断面二次モーメント		強度低減率 φ_e	試験時比重 γ_u	試験時含水率 M.C %
						Iz cm ⁴	Iy cm ⁴			
Q-Q	15.04	30.21	500.1	155.3	2288	34556	8565	0.920	0.68	11.1
A-A	15.02	30.10	500.1	100.2	2268	34134	8500	0.727	0.44	11.7
Q-A	15.02	30.15	500.2	114.1	2276	34304	8514	0.813	0.50	11.7

第3表 ヤング係数の比較

	計算値 Evr	実測値			$\frac{Evc}{Evr}$	$\frac{Evt_1}{Evr}$	$\frac{Evt_2}{Evr}$	$\frac{Evt_2}{Evc}$
		Evc	Evt ₁	Evt ₂				
Q-Q	124	124	125	130	1.00	1.01	1.05	1.048
A-A	130	126	129	134	0.97	0.99	1.03	1.063
Q-A	131	125	127	134	0.95	0.97	1.02	1.072

	EHr	EHc	EHt ₁	EHt ₂	$\frac{EHc}{EHr}$	$\frac{EHt_1}{EHr}$	$\frac{EHt_2}{EHr}$	$\frac{EHt_2}{EHc}$
A-A	118	125	127	131	1.06	1.08	1.11	1.048
Q-A	118	120	121	124	1.02	1.03	1.05	1.051

Ev = 接着層に垂直方向のE Eh = 接着層に平行方向のE

Evc, Ehc = 中央集中荷重中央撓みから求めたE

Evt₁, Eht₁ = 3等分点2点荷重中央撓みから求めたE

Evt₂, Eht₂ = 3等分点2点荷重荷重点間撓みから求めたE

5.1 剛性試験

剛性試験の結果より求めたヤング係数と予測計算で

求めたヤング係数の比較を第3表に，スパン中央撓みの実測値と計算値の比較を第4表に示した。

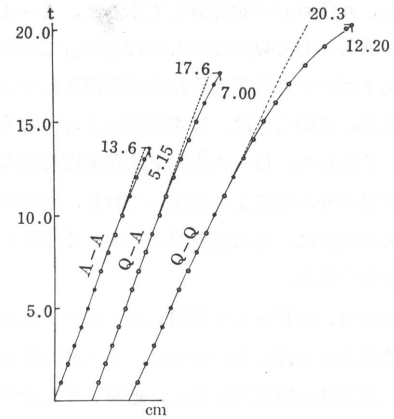
第4表 集成梁の垂直撓み（荷重100kgあたり）

	計算値		実測値		$\frac{\delta_{vc}}{\delta_{vcr}}$	$\frac{\delta_{vt}}{\delta_{vtr}}$
	$\frac{\delta_{vcr}}{10^{-3}cm}$	$\frac{\delta_{vtr}}{10^{-3}cm}$	$\frac{\delta_{vc}}{10^{-3}cm}$	$\frac{\delta_{vt}}{10^{-3}cm}$		
Q-Q	50.1	41.6	44	37	0.88	0.89
A-A	49.7	41.0	44	37	0.89	0.90
Q-A	49.2	40.6	44	37	0.89	0.91

vc = 中央集中荷重中央撓み： vt = 3等分点2点荷重中央撓み

5.2 破壊試験

破壊試験結果を第5表に示す，第5図には，破壊までの荷重 - 撓み曲線を写真1にはQ-Qの11t附近の実験状況，写真2～4は集成梁の破壊状態を載せた。

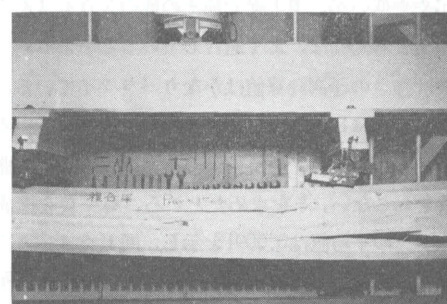
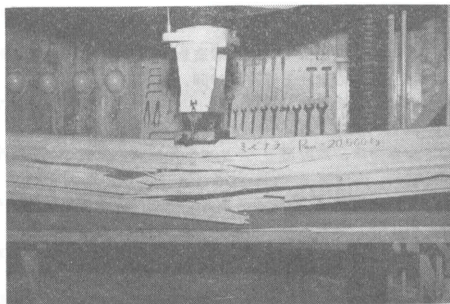
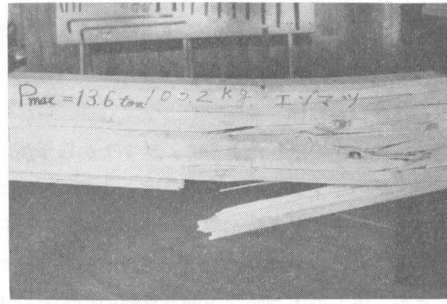
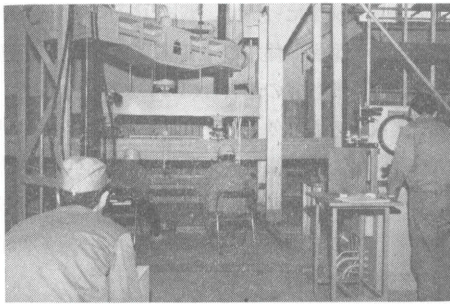


第5図 集成梁の荷重撓み曲線

第5表 梁の破壊試験結果

	比例限度荷重 Pp kg	破壊荷重 Pmax kg	曲げ比例限度 σ_{bp} kg/cm ²	曲げ強さ σ_b kg/cm ²	曲げ強さ計算値 σ_{br} kg/cm ²	$\frac{\sigma_{bp}}{\sigma_b}$	$\frac{\sigma_b}{\sigma_{br}}$	破壊形態
Q-Q	*15,600	*30,500	511	998	730	0.51	1.37	引張破断
A-A	8,500	13,600	281	450	454	0.62	0.99	引張破断
Q-A	10,160	17,600	335	580	613	0.58	0.95	A材せん断

*中央集中荷重を3等分点2点荷重に換算



6. 考察

面材効果について

曲げ強さで3種類の集成梁を比較するとA-Aを

1.00として，Q-Qは2.21，Q-Aは1.29となる。A-AとQ-Aは剛性がほぼ等しく，強度でQ-Aが約3割高くなっており，面材の効果がでたといえる。し

かし， $\sigma_b/Evt_2 =$ を計算してみると，A - A0.0034，Q - A0.0043でQ - Qは0.0077となっており，面材としてミズナラの効果はそれほど発揮されていないと思われる。このことは，破壊形態によって明らかである。すなわち，Q - A集成梁は異種接着層に近いエゾマツ材のせん断により破壊しており，面材の引張破断による場合は，その荷重がより大きくなると判断されるからである。

つまり，面材として使用したミズナラ材がまだその破壊応力まで達しないうちに，コア材であるエゾマツが，限界せん断応力に達し，破壊してしまうわけである。このことは，特に実用上はより低質のエゾマツ材をミズナラ材で補強することになると思われるから，当然せん断強さも低くなり，集成梁の強さが限定されることになる。

しかし，梁の破壊条件は，はりたけ - スパン比によって異なり，面材の配置の如何によっても異なる。したがって，せん断破損をも考慮したうえで，使用条件によるはりたけ - スパン比，面材の配置など適切に処理しなければならない。しかし，この方面での研究は少なく，集成材の合理性を十分に発揮させようとするならば，解決しなければならない問題点である。

予測計算の適合性

剛性試験結果で示したように，ラミナから予測計算した集成梁のヤング係数と実測値はよく適合しており，ラミナのヤング係数が明らかであれば，それらによって構成される集成梁のヤング係数は充分予測できる。また，撓みの実測値は予測計算値の約90%で実測値がやや低いが，実大梁で節その他の欠点も含んでいることを考えれば，よく適合しているといえる。

曲げ強さの予測計算値はかなりバラツキている。特にQ - Qでは1.37と計算値を大中に上まわっている。

集成梁の破壊後，健全部より小型試片を切り取り曲げ試験をおこない， σ_b を求めたところ，Q - Qを構成したラミナの平均値は0.0091を示し，同じくA - Aでは0.0063，Q - Aでは，Qが0.0089，Aが0.0066を示した。これらの値を前述した，(7)，(8)式に代入し，計算すると，第6表のようになる。

このことから，(7)式を用いての予測計算では σ_b の値が大きく支配するので，樹種毎の，同一樹種でも材質の異なるものでの σ_b の範囲を把握することが必要であ

第6表 ラミナから切取った小型試片の σ_b を用いた計算値

	ϵ	曲 げ 強 さ		$\frac{\sigma_b}{J_{br'}}$
		計 算 値 $\sigma_{br'}$	実 測 値 σ_b	
Q-Q	0.0091	830	998	1.20
A-A	0.0063	476	450	0.95
Q-A	0.0080	682	580	0.85

る。それにしても，Q - Qの場合は実測値がやや高めであり，実用的には安全側にあり，A - Aではほぼ一致しており，梁が引張破断によって破壊する場合には(7)式による推定評価はほぼ有効であると思われる。しかし，Q - Aのようにせん断破断を起す場合は(7)式による予測は不充分であると思われる。この場合も面材効果のところ述べてのように，せん断破断の条件を考慮しなければならない。

7. あとがき

以上，エゾマツ集成梁の補強材として，圧縮および引張側各2層にミズナララミナを添えた15層集成梁，および比較材として，エゾマツ単一構成，ミズナラ単一構成15層集成梁について，断面15cm x 30cm，スパン450cmの大型供試体での強度試験をおこない，面材効果および予測計算の適合性について検討したが，異種構成集成梁の面材効果，予測計算の方法を検討するにあたり，せん断破損の条件を考慮する必要があり，異種構成，特に強度性能に差のある広葉樹，針葉樹異種構成集成梁の合理的な製造のためにはせん断問題の解決が大きな問題である。

文 献

- 1) 木材部・試験部：実大木構造物・実大集成梁の強度試験（1），木材の研究と普及，1969・11
- 2) 集成梁研究会北海道研究班：ラミナの強度等級に関する調査試験（3），1968
- 3) 伊藤勝彦，宮野博：カラマツ集成材，木材の研究と普及1968・9
- 4) 矢沢亀吉他：北海道産各種広葉樹による集成材の研究（第1報）北大演習林研究報告23巻第1号，1963
- 5) 矢沢亀吉：同上（第2報）北大演習林研究報告第24巻第2号，1965
- 6) 沢田 稔：木材梁の弾性撓に関する理論計算，北大講義資料
- 7) 沢田 稔，山本 宏：木質複合梁に関する研究（第1報）北大演習林研究報告，26巻第1号，1968

（原稿受理 46.7.16）