

I-94

集成木材を使用したはりの横倒れ座屈について

秋田大学 正員 長谷部 薫

秋田大学 正員 薄木 征三

1. まえがき

近年、集成材を用いたはりやアーチのように、はりの幅に対して高さの大きい部材を用いて大スパン構造物が建てられるようになってきた。しかしながら、このようなはりには横安定性が低く、水平方向の曲げとねじりを伴う横倒れ座屈を起こしやすくなる。はりの横倒れ座屈について、鋼構造に関しては多くの研究が報告されているが、木構造に関するものは少なくわが国ではまだ体系化できる段階に達していない。日本建築学会制定の木構造計算基準・同解説では、アメリカおよびカナダの基準に採用されている方法を採用しているが、わが国でもはりの横倒れ座屈に関する資料を蓄積して独自の設計基準を作製することが必要であると思われる。ここでは、これらの資料の基礎として、曲げを受ける木質はりの横倒れ座屈に関する固有値解析と、スギ集成材を用いて模型実験を行ったので報告する。

2. 解析方法

安定なつり合い状態 Q_n から同じ荷重状態で、 Q_n 状態とわずかに違った安定なつり合い状態 Q_{n+1} がある場合の Q_{n+1} 状態での仮想仕事の原理は

$$\begin{aligned} & \int_0^L \int_F \{ (\sigma_z^0 + \sigma_z) \delta (\varepsilon_z^0 + \varepsilon_z) + (\tau_{xz}^0 + \tau_{xz}) \delta (\gamma_{xz}^0 + \gamma_{xz}) \} dF dz \\ & - \int_0^L \int_F \{ q_x^0 \delta (u^0 + u) + q_y^0 \delta (v^0 + v) + q_z^0 \delta (w^0 + w) \} dF dz \\ & - \int_0^L \int_F \{ \bar{\tau}_{xz}^0 \delta (u^0 + u) + \bar{\tau}_{yz}^0 \delta (v^0 + v) + \bar{\sigma}_z^0 \delta (w^0 + w) \} dF dz = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで上指標 0 は Q_n 状態、指標 $^{\circ}$ を付さない量は Q_n 状態から Q_{n+1} 状態への増分量で、 δ は仮想の項を表している。 q_x^0, q_y^0, q_z^0 は x, y, z 方向への部材中間に作用する分布外力で、 $\bar{\tau}_{xz}^0, \bar{\tau}_{yz}^0, \bar{\sigma}_z^0$ は両端断面に作用する表面力、 L は支間である。座屈前の Q_n 状態で、部材軸線の面外変位(面内: $y-z$ 面)は零とし、 Q_{n+1} 状態での変位増分は十分小さく、増分の2次まで考慮する。図-1の右手系直交座標系に対する Q_{n+1} 状態の変位とひずみを式(1)に代入すると座屈前と座屈後の変位支配方程式が得られる。座屈前の支配方程式より、はりの両端に等曲げモーメント荷重 M だけ作用する場合、座屈前の初期変形は次式で与えられる。

$$v_o^{\circ} = -M / (E_x J_x) \quad (2)$$

ここで v_o は y 方向への原点 o の変位、 $E_x J_x$ は x 軸まわりの曲げ剛性であり、上指標 $^{\circ}$ は z に関する微分を表す。座屈後の変位支配方程式は

$$\{ E_y J_y (u_o^{\circ} + v_o^{\circ} \theta) \}'' + M \theta'' = 0 \quad (3)$$

$$(E_w C_w \theta'')'' + E_y J_y (u_o^{\circ} + v_o^{\circ} \theta) \{ v_o^{\circ} + M / (E_y J_y) \} - G J_T \theta'' = 0 \quad (4)$$

ここで $E_y J_y$ は y 軸まわりの曲げ剛性、 $G J_T$ はねじり剛性、 $E_w C_w$ は曲げねじり剛性である。座屈曲線は

$$u_o = a \sin(\pi z / L), \quad \theta = b \sin(\pi z / L) \quad (5)$$

式(2)と(5)を式(3)と(4)に代入すると、これらの式の固有値から次の座屈モーメントが求まる。

$$M = \frac{\pi}{L} \sqrt{\frac{E_y J_y}{\left(1 - \frac{E_y J_y}{E_x J_x}\right)}} G J_T \left(1 + \frac{\pi^2 E_w C_w}{G J_T L^2}\right) \quad (6)$$

式(6)で式(2)の初期変形を無視すると

$$M = \frac{\pi}{L} \sqrt{E_y J_y G J_T} \left(1 + \frac{\pi^2 E_w C_w}{G J_T L^2}\right) \quad (7)$$

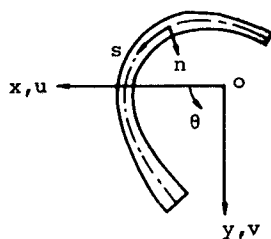


図-1 座標系

また、式(7)で曲げねじり剛性を無視すると

$$M = \frac{\pi}{L} \sqrt{E_y J_y G J_T} \quad (8)$$

3. 模型実験

試験体は3x24cmの長方形断面で、2cm厚の秋田杉のひき板12枚を接着積層した集成材である。図-2に示すように長さ5mの試験体を単純支持し、H形鋼を介して電動ジャッキで集成材の支点からの張出部aに2点同時載荷させ等曲げモーメント荷重とした。支間Lは4m, 3m, 2mとし、6本の試験体を用いて18ケースの実験を行った。図-2に示すように支点部は半円柱の鋼と鉄板を用いてめり込みを防止し、支点上でも半円柱の鋼を用いてねじりを拘束している。試験体の諸量を表-1に示す。表中の E_x は横座屈実験の垂直変位のデータから求め、 E_y は単純ばりの支間中央に集中荷重を作用させた曲げ試験により得られたものである。またせん断弾性係数Gは、支間を1.3m, 1.5m, 2mおよび4mとした単純ばりの支間中央に集中荷重を作用させてたわみを測定し、たわみに及ぼすせん断の影響を含みかけのヤング係数を求め、このヤング係数を用いて得られたものである。

図-3は一例として、支間4mで支点からの張出部35cmの点に2点集中荷重を作用させたときの、ケース6桁の荷重と支間中央における重心の水平変位および垂直変位との関係を示したものである。図より、横倒れ座屈荷重 $P=650\text{kg}$ にH形鋼と載荷器具の重量64kgを加算すると座屈モーメントは $714\text{kg} \times 35\text{cm} = 24990\text{kgcm}$ となり、式(6)から得られる23860kgcmより5%程度大きな値である。18ケースの実験ともに弾性状態で座屈が生じており、表-1に実験値と計算値の比較を示している。表より実験値と式(6)から得られる弾性座屈理論値との比は0.95~1.16の範囲で良い対応を示しており、弾性状態における集成材の座屈耐力は式(6)でほぼ評価できると思われる。表中には式(7)と(8)の値も示しているが、ここで用いた試験体の場合、座屈荷重に及ぼす初期変形の影響は1%、曲げねじりの影響も1%と小さくこれらを無視しても実験値を評価できる結果となっている。

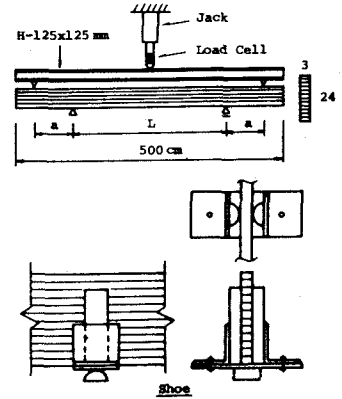


図-2 載荷方法と支点部

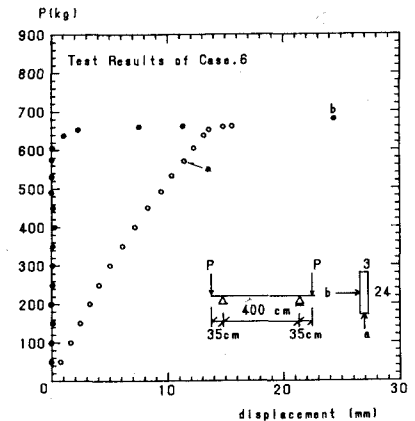


図-3 荷重-変位関係

表-1 断面諸量と座屈モーメント

Case	L (cm)	a (cm)	I_x (cm ⁴)	I_y (cm ⁴)	E_x (kg/cm ²)	E_y (kg/cm ²)	G (kg/cm ²)	M_{ex} (kgcm)	Eq.(6) (kgcm)	Eq.(7) (kgcm)	Eq.(8) (kgcm)	$\frac{M_{ex}}{Eq.(6)}$
1	400	35	3621	56.32	95654	88778	7025	26040	22365	22203	22093	1.164
2	400	35	3579	55.32	96780	90952	7313	25980	22701	22539	22430	1.132
3	400	35	3734	56.40	112255	99540	7452	25185	24425	24261	24129	1.090
4	400	35	3634	56.19	105606	95875	7346	27285	23692	23525	23403	1.151
5	400	35	3727	56.20	113326	99267	6283	24115	22345	22197	22053	1.079
6	400	35	3620	55.90	111517	96372	7475	24960	23860	23700	23576	1.047
7	300	45	3621	56.32	90726	89175	7025	31680	30008	29777	29523	1.056
8	300	45	3579	55.32	94806	89719	7313	30780	30175	29953	29703	1.020
9	300	45	3734	56.40	106249	100741	7452	36630	32908	32678	32365	1.113
10	300	45	3634	56.19	107181	95340	7346	35055	31624	31406	31117	1.108
11	300	45	3727	56.20	113100	96448	6283	31455	29618	29620	29282	1.055
12	300	45	3620	55.90	103184	94930	7475	32580	31703	31477	31196	1.028
13	200	58	3621	56.32	86884	83753	7025	47212	44033	43701	42918	1.072
14	200	58	3579	55.32	95327	87751	7313	43674	45211	44888	44063	0.968
15	200	58	3734	56.40	111909	93318	7452	45762	46012	47709	46725	0.953
16	200	58	3634	56.19	99132	91736	7346	45298	47019	46681	45785	0.963
17	200	58	3727	56.20	113592	99894	6283	50402	45714	45410	44261	1.103
18	200	58	3620	55.90	100138	89445	7475	47734	46815	46292	45427	1.024
Mean			3653	56.06	103463	93617	7149					1.058