

集成木材はりの非弾性横座屈実験

TESTS FOR INELASTIC LATERAL BUCKLING OF GLUED LAMINATED TIMBERS

長谷部 薫^{*}, 薄木 征三^{**}

By Kaoru HASEBE and Seizo USUKI

This paper presents an experimental study on the inelastic lateral buckling of glued laminated timber beams with rectangular cross section. Lateral buckling tests are done with simply supported beams under pure bending moment applied at two ends. Wood species of tested glued laminated timber beams is Akita cedar. Through the comparison with the elastic numerical solutions, the decrease of lateral buckling moment is recognized. This is considered due to local strain softening behavior of timber. Experimental values are also compared with the criteria for lateral buckling of glued laminated timbers due to AASHTO.

Key Words : glued laminated timber, lateral buckling, inelasticity

1. まえがき

集成材は接着剤ならびに集成材製作技術の進歩とともに発達し、欧米はもとより近年わが国でも集成材を用いたドーム等の大規模な建築物が建設されるようになってきた。集成材は、主に建築資材として利用されているが、最近橋梁の主構造材料として集成材が使用されており、国内各地において公園内の歩道橋や林道橋が架設されている。しかしながら、集成材の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は横安定性が低く、水平方向の曲げとねじりを伴う横座屈を起こしやすくなる。はりの横座屈について、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規準・同解説¹⁾では、アメリカ(AASHTO²⁾、NDS³⁾)およびカナダ(OHBDC⁴⁾)の規準に採用されている方法を採用し、横座屈による許容曲げ応力度の低減率を導入しているが、わが国でもはりの横座屈に関する資料を蓄積して独自の設計規準を作成することが必要であると思われる。

Hooleyら⁵⁾は、長方形断面の集成材を対象とし、単純ばりと片持ばりの横座屈について、理論的および実験的研究を行い細長比と有効座屈長を提示しており、この研究成果は、アメリカおよびカナダの横座屈に関

* 工博 秋田大学講師 鉾山学部土木環境工学科(〒010 秋田市手形学園町1-1)

** 工博 秋田大学教授 鉾山学部土木環境工学科(同 上)

する設計規準の基本となっている。Fowler⁶⁾はNDSの設計規準に基づいていくつかの設計資料を示しており、また、Zahnら^{7)~9)}は床構造や屋根における木質はりの横安定問題について報告している。山本ら¹⁰⁾は小断面の角材を用いて片持ばりの横座屈試験を行い、鋼構造のはりの設計で用いられている横座屈荷重を求める計算式が木質はりに適用できることを示し、Hooleyらと同様に細長比を定義している。辻野¹¹⁾は有限要素法を用いて木質はりの横座屈解析を行い、山本らの実験結果により解析法の検証を行っている。玉置ら¹²⁾は大断面集成材を用いて片持ばりの横座屈実験を行い、大断面集成材の座屈耐力は、山本らと同様に鋼はりの設計で用いられている弾性座屈理論に基づいて概ね評価できることを示している。また、フランジにLVLを用いウェブに合板を用いたI形はりの横座屈についても報告されている¹³⁾。

集成材を含む木質はりの終局曲げ強さ理論¹⁴⁾によると、等曲げモーメントを受けるはりの場合、鋼はりと異なり引張側で弾性、圧縮側でひずみ軟化挙動を示し、引張側で曲げ破壊が起こるとされており、非弾性状態で横座屈する木質はりの場合、これらのことを考慮した座屈曲線が必要であると思われる。単純ばりの両端に等曲げモーメントおよび不等曲げモーメントを受ける集成材はりの弾性横座屈については既に報告しているが^{15), 16)}、ここでは、非弾性的に横座屈するはりの横安定性に関する基礎資料を得ることを目的として、スギ集成材を用いて模型実験を行い、実験的に検討を試みた。

2. 模型実験

(1) 実験方法

模型実験で用いた試験体は、表-1に示されるような寸法の長方形断面で、2cm厚の秋田杉のひき板をレゾルシノール樹脂接着剤で接着積層した集成材である。図-1に示すように長さ5mの試験体を単純支持し、電動ジャッキを用いてH形鋼を介し、集成材の支点からの張出部 a に2点同時荷重させ等曲げモーメント荷重とした。支間 L は3mと2mとし、6本の試験体を用いて実験を行った。試験体の諸量を表-1に示す。図-1に示すように、載荷部と支点部は半円柱の鋼と鋼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。実験測定量は、支間中央における垂直変位、水平変位、支点部の支点変位および直ひずみであり、ダイヤルゲージと箔ひずみゲージを用いて測定を行った。水平変位の測定位置は、断面の重心軸と上下の縁端部の3箇所とし、水平変位よりねじり角を求めた。

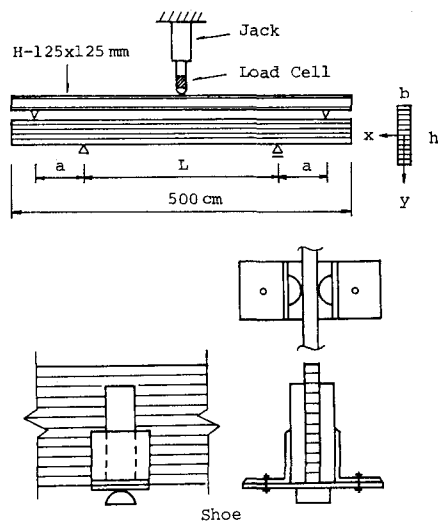


図-1 載荷方法と支点部

(2) ヤング係数の測定

集成材の積層面が荷重方向と直交する場合の繊維方向のヤング係数 E_x は、後述の横座屈実験のデータを用い、単純ばりの両端に等曲げモーメント荷重が作用する場合の、支間中央における垂直変位の式より求めた。等曲げモーメント荷重、故にはりのせん断力は零となり、表-1に示した E_x は真のヤング係数となっている。

集成材の積層面が荷重方向と平行する場合の繊維方向のヤング係数 E_y は、支間を3mと2mとし、支間

表-1 断面諸量と座屈モーメント

CASE	L (cm)	a (cm)	b (cm)	h (cm)	I _x (cm ⁴)	I _y (cm ⁴)	E _x (kgf/cm ²)	E _y (kgf/cm ²)	G (kgf/cm ²)	C _s	M _{exp} (kgf・cm)	M _{cal} (kgf・cm)	M _{exp} M _{cal}
1	300	45	3.011	6.241	61.002	14.200	96414	90573	6659	14.4	6739	8266	0.815
2	300	45	3.004	8.060	131.09	18.208	95544	92198	7118	16.4	9636	10508	0.917
3	300	45	3.002	10.580	296.32	23.853	99973	95103	8269	18.8	14442	14601	0.989
4	200	58	3.000	9.520	215.71	21.420	103924	96925	8288	14.5	17907	20079	0.892
5	200	58	3.016	12.140	449.77	27.759	99024	94136	7512	16.3	22843	24015	0.951
6	200	58	2.999	15.271	890.08	34.326	99963	95214	8309	18.4	30937	31122	0.994
Mean							99140	94025	7693				

中央に集中荷重を作用させて支間中央の変位を測定し、曲げによる変位の式を用いて求めた。ここで、支間と桁高の比 $L/h = 200/3 = 66.7 > 18^{17)}$ で、変位に及ぼすせん断変形の影響は0.3%程度であり、せん断力の影響を考慮せずに E_y を求めた。表-1より E_x/E_y は平均で1.05であり、特級のスギ集成材に対する1.13¹⁾より7%小さな値である。なお、それに関するヤング係数 E_w は、 E_x と E_y の相乗平均と仮定し $E_w = \sqrt{E_x \cdot E_y}$ とした。

(3) せん断弾性係数の測定

木材のせん断弾性係数 G は、アメリカ材料学会 (ASTM)¹⁸⁾ によると、ねじり試験か曲げ試験を行うことにより求めることができ、ここでは曲げ試験を行って G を求めた¹⁵⁾。6本の試験体に対する G を表-1に示しているが、 E_y/G の平均値は12.2でスギ集成材に対する計算規準値¹⁾の15より19%小さな値となっている。

(4) 実験結果および考察

木構造計算規準¹⁾によると、長方形断面の幅 b 、高さ h と支間 L で木質はりの横座屈細長比 C が与えられ、 $C_s = \sqrt{Lh/b^2}$ の値によって横座屈が生じないはり ($C_s \leq 10$)、非弾性的に横座屈するはり ($10 < C_s \leq C_k$) と弾性的に横座屈するはり ($C_k < C_s \leq 50$) に分類される。ここで C_k は弾性横座屈と非弾性横座屈の境界を示す横座屈係数で、 $C_k = 0.8\sqrt{E_y/f_{bx}}$ 、 f_{bx} は図-1に示す x 軸まわりの曲げに関する許容曲げ応力度である。特級のスギ集成材に対する $E_y = 80000 \text{ kgf/cm}^2$ と $f_{bx} = 135 \text{ kgf/cm}^2$ を用いると $C_k = 19$ となる。表-1に試験体の C_s の値を示しているが、ここで用いた試験体の場合、全て非弾性的に横座屈するはりとなっている。

図-2は、支間2mで支点からの張出部 $a = 58 \text{ cm}$ の点に2点集中荷重を作用させ等曲げモーメント荷重としたときの、ケース6桁 ($C_s = 18.4$) の荷重 P と支間中央における重心の水平変位 u および垂直変位 v との関係を示

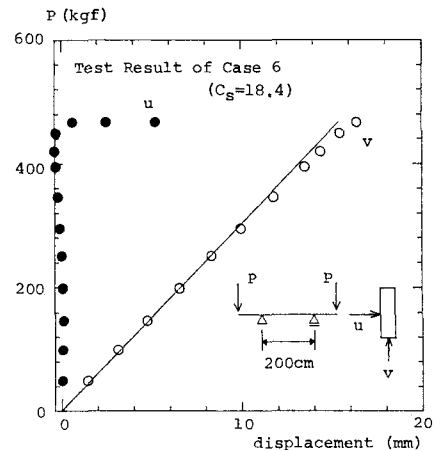


図-2 荷重-変位関係

したものである。図中の実線は垂直変位の弾性解析値である。座屈荷重を求める方法として、荷重 P と水平変位の 2 乗 u^2 の関係曲線を描くと、最大荷重付近で P と u^2 がほぼ直線関係となることから、それを延長して縦軸との交点を座屈荷重とした¹⁰⁾。この方法により求めた横座屈荷重 $P = 463\text{kgf}$ に H 形鋼と載荷器具の重量を加算すると座屈モーメント M_{exp} は $30937\text{kgf}\cdot\text{cm}$ となる。単純ばりの両端に等曲げモーメント荷重が作用する場合、弾性座屈モーメントは

$$M_{cal} = \frac{\pi}{L} \sqrt{\frac{E_y I_y}{1 - \frac{E_y I_y}{E_x I_x}} G J_t \left(1 + \frac{\pi^2 E_w C_w}{G J_t L^2} \right)} \quad (1)$$

で与えられる¹⁵⁾。ここで、 $E_x I_x$ は x 軸まわりの曲げ剛性、 $E_y I_y$ 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。表-1 の値を用いると、式(1)より $M_{cal} = 31122\text{kgf}\cdot\text{cm}$ となり、実験値とほぼ等しい値である。この試験体の C は C_k とほぼ同じ値であることより、式(1)の弾性座屈モーメントで実験値を評価できる結果となっている。

ケース 5 桁 ($C_s = 16.3$) の荷重 P と支間中央における重心の水平変位 u および垂直変位 v との関係を図-3 に示す。図より、垂直変位 v は $P = 250\text{kgf}$ まではほぼ直線的に変位しているが、それ以降は非線形挙動を示しており、圧縮側の一部が塑性化したためと思われる。

ケース 1 桁 ($C_s = 14.4$) は、模型実験で用いた 3 種類の細長比の中で最小の細長比のはりで、図-4 に P と支間中央における重心の u および v との関係を示す。図より垂直変位 v は $P = 50\text{kgf}$ 前後までは弾性的に変位しているが、それ以降は非線形挙動を示しており、終局時は、横座屈とほぼ同時に曲げ破壊に近い形で支間中央付近の引張縁で崩壊した。図中の水平変位 u は、図-2 と 3 で示したような大きな変形を示していないが、これは終局時の正確なデータが得られなかったためである。実際は終局時に大きな横変位を視覚的に確認しており、この時の荷重を横座屈荷重と判定した。

図-5 は ケース 5 桁の荷重 P と支間中央におけるねじり角 θ の関係を示したものであり、図-3 に示した $P-u$ 曲線とほぼ等しい傾向を示している。図より、座屈前は面外変位がほとんど生じないが、ある限界を越えると水平方向の変位が生じ、わずかな荷重の増加に対しても水平方向

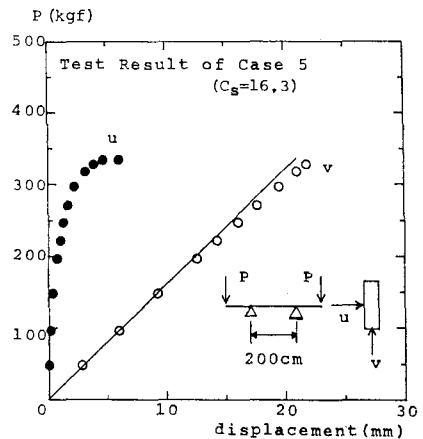


図-3 荷重-変位関係

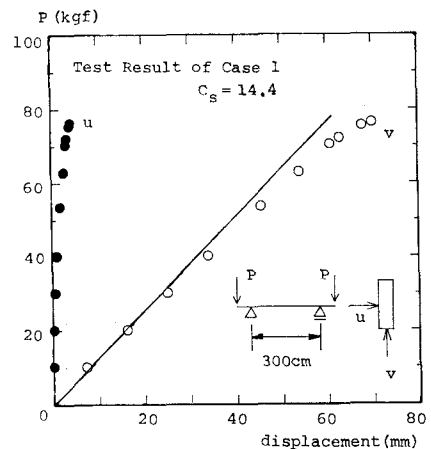


図-4 荷重-変位関係

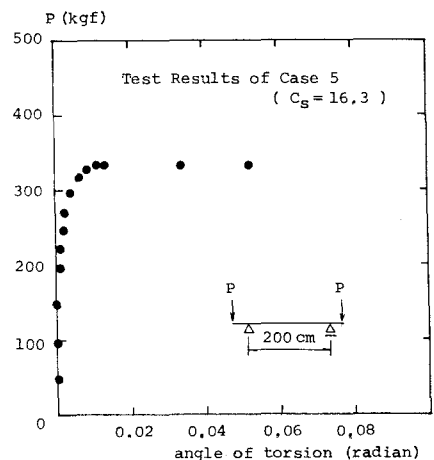


図-5 荷重-ねじり角関係

へ大きく変形しねじり角が大きくなるのがわかる。

ケース1桁の P と支間中央におけるねじり角 θ の関係を図-6に示しているが、図-4に示した $P-u$ 曲線とほぼ等しい傾向を示しており、横座屈と破壊がほぼ同時に生じたために、前述のように終局時の正確なデータが得られず明確なねじり変形を示していない。

図-7は、ケース5桁の荷重 P と支間中央における直ひずみの関係を示したものである。図より、図中の下縁部2の直ひずみは、荷重がある限界に達するまではほぼ直線関係の圧縮ひずみとなっているが、その限界を越えると、水平方向へのねじりを伴う曲げによって引張ひずみが卓越するのがわかる。

図-8は、ケース1桁の荷重と直ひずみの関係を示したものであるが、図-7で示したケース5桁の結果と異なり、横座屈と同時に破壊したために最大荷重まではほぼ直線関係となっている。前述のように、破壊時のデータが得られなかったために横座屈挙動を明示していない。

ケース1桁の断面内のひずみ分布を図-9に示しているが、 $P = 40\text{kgf}$ 時のひずみ分布は断面内でほぼ対称となっている。図-4に示した $P-u$ 曲線より $P > 50\text{kgf}$ で非線形挙動を示すように、 $P = 75\text{kgf}$ 時のひずみ分布は断面内で対称にならず、はりの圧縮側が一部塑性化することにより、引張側への中立軸の移動

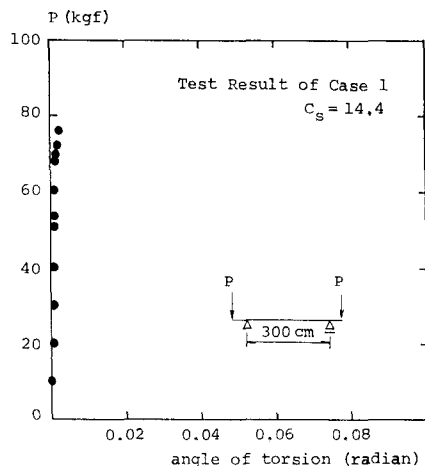


図-6 荷重-ねじり角関係

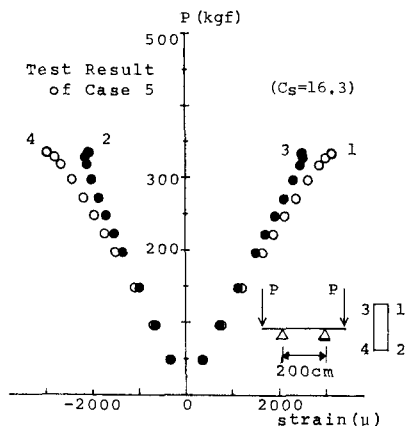


図-7 荷重-直ひずみ関係

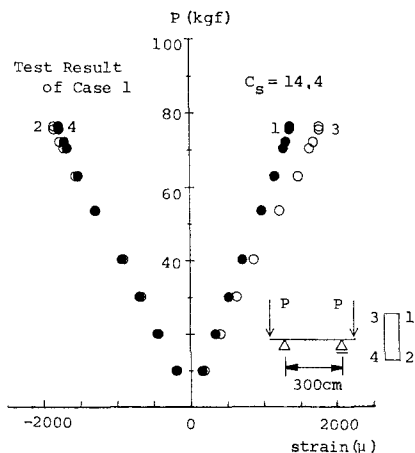


図-8 荷重-直ひずみ関係

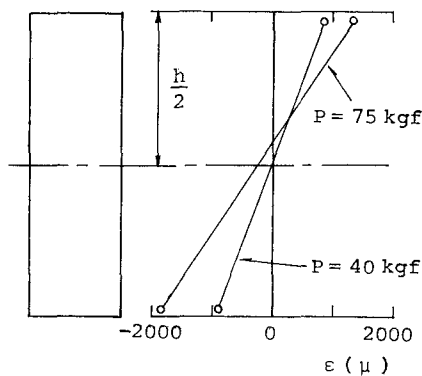


図-9 断面内ひずみ分布

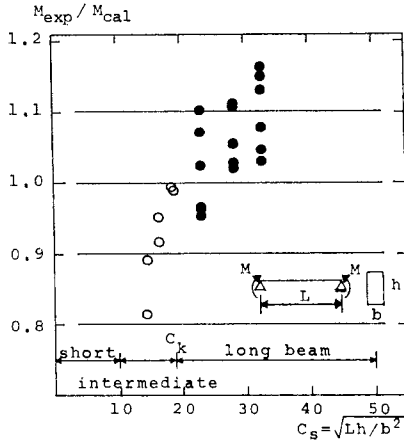


図-10 M_{exp}/M_{cal} と細長比の関係

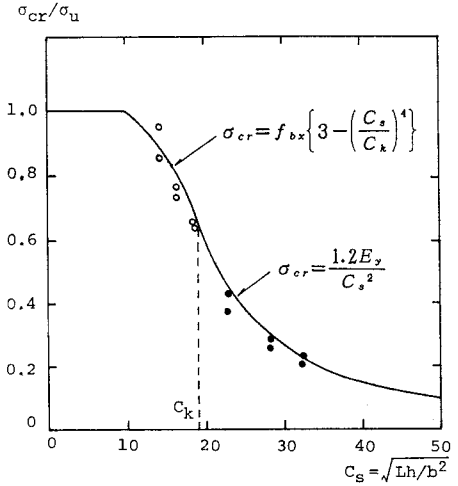


図-11 σ_{cr}/σ_u と細長比の関係

が見られる。

表-1に実験値 M_{exp} と式(1)から得られる弾性座屈モーメント M_{cal} を示しているが、実験値と計算値との比は0.815~0.994の範囲である。6ケースの実験結果について、実験値と計算値の比 M_{exp}/M_{cal} と細長比 C_s の関係を図-10に示す。図中の白丸は今回の6ケースの、黒丸は弾性域での実験結果¹⁵⁾である。図より、 $C_s > 19$ の弾性域では、 M_{exp}/M_{cal} の平均は1.06と実験値は弾性座屈モーメントの計算値よりやや上回るが、非弾性座屈が予想される $10 < C_s \leq C_k$ の範囲における実験値は、 C_s が小さくなるにつれて弾性座屈値より小さくなっており、はりの圧縮側の一部が塑性化することにより横座屈モーメントが低下すると考えられる。

木構造計算規準¹⁾では、はりの横座屈に対してAASHTO²⁾とNDS³⁾の規準を採用しているが、これらの設計規準の基本となる横座屈応力 σ_{cr} は、単純ばりの両端に等曲げモーメント荷重が作用する場合、長方形断面に対して弾性域と非弾性域で

$$\sigma_{cr} = \frac{1.2E_y}{C_s^2} \quad (C_k < C_s \leq 50) \quad (2)$$

$$\sigma_{cr} = f_{bx} \left\{ 3 - \left(\frac{C_s}{C_k} \right)^4 \right\} \quad (10 < C_s \leq C_k) \quad (3)$$

で与えられる。AASHTOと木構造計算規準の弾性横座屈に対する設計式は、式(2)で安全率3を適用し、横座屈を起こさないときの基本許容曲げ応力 f_{bx} の2/3より小さいときだけ適用できると仮定している。これより、弾性横座屈と非弾性横座屈の境界($C_s = C_k$)は次式より得られる。

$$\frac{0.4E_y}{C_k^2} = \frac{2}{3} f_{bx} \quad (4)$$

図-11は、図-10に示した実験値 M_{exp} を弾性限内での断面係数を用いて横座屈応力 σ_{cr} で表し、曲げ強度 σ_u で無次元化した値と細長比との関係を示している。図中の黒丸は、図-10に示した弾性域での実験値の各細長比に対する最大値と最小値を示している。ここで、 $\sigma_u = 3f_{bx}$ と仮定し、特級のスギ集成材に対

する $f_{bx} = 135 \text{ kgf/cm}^2$ を用いている。図中の曲線は、式(2)と(3)から得られる σ_{cr} を $E_y = 80000 \text{ kgf/cm}^2$ として描いたものであるが、実験値よりやや大きな値を示している。図-10と11より、式(2)は式(1)より座屈応力をやや過大評価するが、式(2)と(3)で実験値をほぼ説明できる結果となっている。

3. あとがき

秋田杉集成材を使用し、単純ばりの両端に等曲げモーメント荷重を作用させて横座屈の室内模型実験を行った。6本の試験体を用い、非弾性的に横座屈するように、断面と支間を変化させて3種類の細長比を対象とした。細長比が最小のケース1と4の実験結果は、鉛直変位は大きいが水平方向のそれは小さく、横座屈すると同時に曲げ破壊に近い形で崩壊した。また、断面内のひずみ分布より中立軸の移動が見られ、はりの圧縮側が一部塑性化することにより、座屈モーメントの実験値は弾性座屈モーメントより低下した。このことは、細長比が中間のケース2と5の実験結果にも見られ、圧縮側が一部塑性した後に横座屈した。細長比が最大のケース3と6の場合、弾性横座屈と非弾性横座屈の境界に近い細長比のために、弾性座屈理論値で座屈耐力を評価できる結果が得られた。AASHTOで用いられている木質はりに対する横座屈応力は、今回行った実験の値よりやや大きな値を示すが、実験値を十分説明できると考えられる。

以上のように、非弾性的に横座屈する集成材はりの横安定性について実験的に検討を試みたが、ここで用いた試験体は限られた樹種でかつデータ数も少なくさらに実験データを蓄積していく必要がある。また、圧縮側のひずみ軟化を考慮した非弾性横座屈の解析については今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 日本建築学会：木構造計算規準・同解説，1988.
- 2) American Association of State Highway and Transportation Officials：Standard Specifications for Highway Bridges, 13th edition, 1983.
- 3) National Forest Products Association：National Design Specification for Wood Construction, Washington, D.C., 1986.
- 4) Ontario Ministry of Transportation and Communications：Ontario Highway Bridge Design Code, Downsview, Ontario, Canada, 1983.
- 5) Hooley, R.F. and Madsen, B.：Lateral Stability of Glued Laminated Beams, Jour. of the Struct. Division, ASCE, Vol.90, No.ST3, pp.201-218, 1964.
- 6) Fowler, D.W.：Design of laterally unsupported timber beams, Jour. of the Struct. Division, ASCE, Vol.97, No.ST3, pp.881-889, 1971.
- 7) Zahn, J.J.：Lateral Stability of Deep Beams with Shear-Beam Support, USDA Forest Service Research Paper FPL 43, 1965.
- 8) Jenkinson, P.M. and Zahn, J.J.：Lateral Stability of Beam and Deck Structure, Jour. of the Struct. Division, ASCE, Vol.98, No.ST3, pp.599-609, 1972.
- 9) Zahn, J.J.：Lateral Stability of Wood Beam-and-Deck Systems, Jour. of the Struct. Division, ASCE, Vol.99, No.ST7, pp.1391-1408, 1973.
- 10) 山本宏・松本勝彦：木質梁の横安定性について（第1報），北海道林産試験場研究報告，第62号，pp.1-29, 1974.
- 11) 辻野哲司：木質材料の応力と変形解析，岩手大学教育学部研究年報，第41巻，pp.77-132, 1982.

- 12) 玉置昌孝・小野徹郎・緑川光正・井戸田秀樹：木質大断面集成材の横座屈に関する実験的研究 その2，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.173-174，1990.
- 13) Tokuda, M. and Miyakoshi, M. : Lateral Buckling Strength of I-Beams Made of LVL Flanges, Proc. of the 1990 International Timber Engrg. Conf., Tokyo, Japan, Vol.2, pp.464-469, 1990.
- 14) 長谷部薫・薄木征三：曲げとせん断をうけるひずみ軟化はりの弾塑性変位解析，土木学会論文集，第410号/I-12，pp.351-358，1989.
- 15) 長谷部薫・薄木征三：集成木材はりの横座屈解析と実験，構造工学論文集，Vol.38A，pp.963-970，1992.
- 16) 長谷部薫・薄木征三：不等曲げを受ける集成木材はりの横座屈解析と実験，構造工学論文集，Vol.39A，pp.1113-1120，1993.
- 17) 日本合板検査会：構造用大断面集成材の日本農林規格，1987.
- 18) American Society for Testing and Materials : Standard Methods of Static Tests of Timbers in Structural Sizes, D198, 1984.

(1993年9月16日受付)