

集成木材を主桁と床版に使用した合成桁の
極限強度に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON ULTIMATE STRENGTH OF COMPOSITE GLUED LAMINATED TIMBERS

長谷部 薫^{*}, 上田 有利^{**}, 薄木 征三^{***}

By Kaoru HASEBE, Aritomo UEDA and Seizo USUKI

This paper presents an experimental study on ultimate strength of composite glued laminated timbers. The glulam girder and the longitudinally glued laminated deck panel are connected by using steel plates shear connectors. For Japanese cedar, bi-linear stress-strain relationship is used, and the strain is linearly distributed in the cross section of composite girder as a result of bending up to failure. The deflections due to bending and shear and strains of model girders are measured and compared with the numerical solutions. The distributions of bending and shear stresses in the composite girder are investigated.

1. まえがき

木材橋の床版として古くから使用されているものに、橋軸直角方向に角材を配置し主桁に釘打ちした積層床版、床版剛性を増加させるために釘打ち積層床版上に鉄筋コンクリートを合成させたコンクリート合成床版、木材桁とコンクリート床版を合成させた木-コンクリート合成桁などがある。近年、アメリカ北部およびカナダにおいて、集成材床版パネルを用いることにより、木橋の近代化を計っていることが報告されており¹⁾、集成材を含む木材がカナダ、アメリカ等で道路橋示方書に取り入れられている。また、カナダで研究開発が進められているプレストレス木橋は、ひき板を橋軸方向に配置し接着剤を用いずに横方向からプレストレッシングする床版橋であり、オンタリオ州の道路橋示方書²⁾に取り入れられている。この床版橋は、短支間でクリアランスが問題となる場合に有効な構造形式である。一方わが国においても、木材が構造材料として見直され、小規模な橋梁の主構造材料として集成材が使用されており、国内各地において歩道橋や林道橋が架設されている。

集成材を主桁に用い、床版パネルを橋軸直角方向に配置した桁橋は、最近架設されている木橋の中で最も

* 正会員 工修 秋田大学助手 鉱山学部土木工学科 (〒010 秋田市手形学園町1-1)

** 正会員 工修 働長大 都市計画部 (〒104 東京都中央区湊1-9-8)

*** 正会員 工博 秋田大学教授 鉱山学部土木工学科 (〒010 秋田市手形学園町1-1)

多く用いられている形式である。この桁橋の場合、ラグボルトかブラケットにより床版が桁に固定されるが、木材の繊維に直角方向の弾性係数は平行方向のその1/25³⁾と小さく、桁と床版のずれも大きいために橋軸方向の合成効果は期待できない構造となっている^{4) 5)}。

ここでは、集成材主桁と橋軸方向に配置した床版パネルを鋼ずれ止めで合成した合成桁橋を想定し、T形断面の模型桁を製作して破壊に至るまでの合成桁の変形挙動の測定実験を行った。集成材桁とコンクリート床版を合成したT形桁の弾塑性解析と模型実験については既に報告されている⁶⁾。この報告によると、圧縮試験と引張試験による応力-ひずみ曲線を基に、木桁のひずみ分布の直線性を仮定することにより終局曲げ強さが評価でき、弾塑性状態のはりの変位を求めることにより変位限界を明らかにできるとされている。本報告では、圧縮側の木材の応力-ひずみ関係は完全弾塑性とし、引張側の木部では破断点まで直線関係とするモデルを用い、破壊に至るまでの曲げとせん断によるはりの変位を求め、合成桁の極限強度に及ぼす曲げ応力とせん断応力の影響および主桁と床版とのずれの影響を考察した。

2. 解析方法

一軸対称断面を対象とし、曲げとせん断を受ける集成材床版パネル-鋼-集成材主桁の合成T形桁を考える。ここで、床版パネルは、木材の繊維方向を橋軸方向と平行とする。床版をコンクリートとした場合の合成桁の弾塑性解析については著者らが既に報告済みであるので以下に概要を述べる。

図-1は、スギ材の応力-ひずみ関係を示しており、圧縮試験と引張試験結果⁷⁾より、圧縮側では完全弾塑性、引張側では破断点まで直線関係とする bi-linear 型のモデルを採用する。また、破壊に至るまで曲げによる断面内直ひずみ分布は線形と仮定する。

図-2に弾塑性状態における断面内の応力とひずみ分布を示している。(a)に示すようにはりの上縁の木材の応力度が圧縮強さ $-\sigma_c$ になるまでは弾性であるが、荷重を増加すると(b)に示すように圧縮側塑性域で $\sigma_z = -\sigma_c$ となり、引張縁の木部が引張強さ σ_t に達するとき、あるいは圧縮縁の木部のひずみが図-1の ϵ_{cu} になると崩壊する。断面の床版部が全塑性化するまでは、図の応力分布から弾性部の応力と塑性部の応力 σ_z が次式で示される。

$$\sigma_z = -\sigma_c \quad (-e \leq x \leq -c) \quad (1)$$

$$\sigma_z = \frac{(x - \eta) \sigma_c}{(\eta + c)} \frac{E_i}{E_c} \quad (-c \leq x \leq c_w) \quad (2)$$

ここで、 $c(z)$ =弾塑性境界の位置、 $\eta(z)$ =断面重心から中立軸までの距離、 e 、 c_w =重心から床版上縁と主桁下縁までの距離、 $E_i = E_c$ 、 E_s 、 E_w で床版と鋼と主桁のヤング係数である。

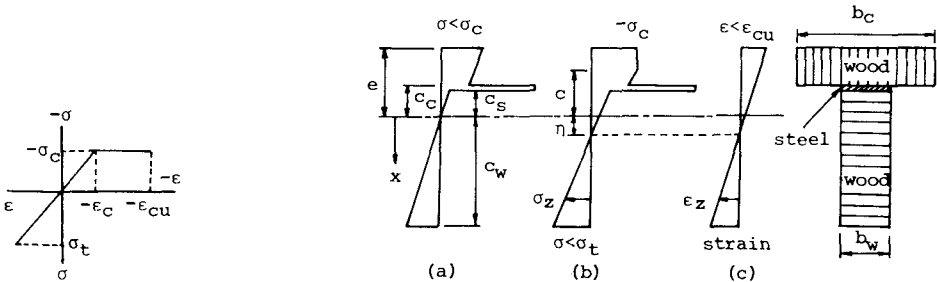


図-1 木材の応力-ひずみ関係

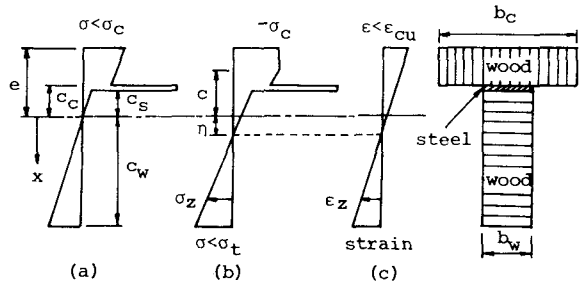


図-2 合成桁の応力とひずみ分布

ひずみは上記の仮定より弾性部と塑性部において

$$\varepsilon_z = \frac{(x - \eta) \sigma_c}{(\eta + c) E_c} \quad (-e \leq x \leq c_w) \quad (3)$$

式(1), (2)の応力と断面力の定義式を用い、軸力=0と曲げモーメント=M(z)とすると、中立軸の移動を示す変数 η と弾塑性境界を示す変数 c が得られる。次に、式(3)のひずみを用いて補仮想仕事の原理を適用すると弾塑性状態における曲げによるはりの変位が求められる。

はり断面部材の微小要素の力のつり合い式より、弾塑性状態にある断面内のせん断応力が与えられる。このせん断応力を用い、曲げによる変位を求める方法と同様にして補仮想仕事の原理を用いてせん断による変位を求める。

3. 実験結果と数値計算

模型実験で用いた2本の合成桁は、集成材主桁と集成材床版パネルを鋼ずれ止めで合成したものである。主桁に用いた集成材は、2.9×15×520cmの秋田杉のひき板14層をレゾルシノール樹脂接着剤で接着積層した15×40cmの長方形断面である。床版パネルに用いた集成材は、3×8cm断面で長さ520cmの秋田杉のひき板17層を接着積層したものである。鋼ずれ止めは、図-3に示すように、0.6×15×520cmの鋼板の上下に0.6cm厚の鉛直鋼板を溶接した板ジベルである。床版パネルの下部溝孔にエポキシ樹脂接着剤を流し込み、板ジベ

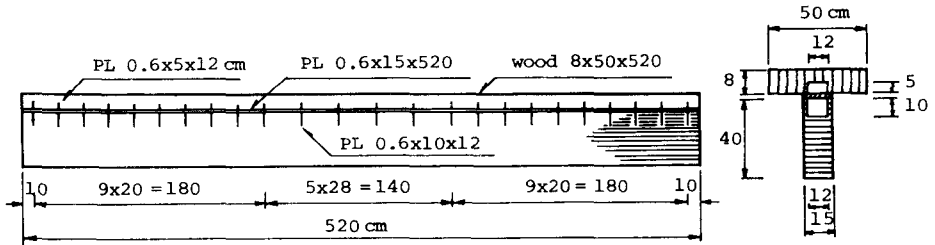


図-3 合成桁の側面図と断面図

ルと一体とし室内で1日間の養生を行った。次に、主桁の上部溝孔にエポキシ樹脂接着剤を充填し、床版パネル-板ジベルの鉛直鋼板を挿入した。この状態で接着剤硬化のため室内で10日間の養生を行った。

(1) ヤング係数Eの測定

主桁の上部溝孔を加工する前に曲げ試験を行い、2本の主桁のEを求めた。試験方法は支間を5mとし、図-4に示すように200kgのH形鋼を用いて集中荷重を作用させ、支間中央における変位を測定した。支間と桁高の比 $L/h = 500/40 = 12.5 < 18^3$ でせん断力の影響を無視できない桁となり、次式の長方形断面に対する曲げとせん断による変位の式を用い E_w と G_w を求めた。

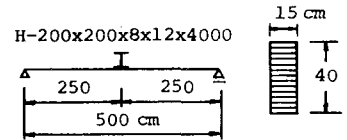


図-4 主桁の曲げ試験

$$u = \frac{P L^3}{48 E_w I} \left\{ 1 + \kappa \frac{h^2}{L^2} \frac{E_w}{G_w} \right\} \quad (4)$$

ここで $\kappa = 1.2$ であり、右辺第 2 項でスギ集成材に対し $E_W / G_W = 80000 / 5000 = 16^{3)}$ と仮定した。得られた E_W と G_W は表-1 に示してある。

図-5 に示すように床版パネルの支間を 5 m とし、6 kg の荷重を作用させて支間中央の変位を測定した。ここで、 $L / h = 500 / 8 = 62.5 > 18$ よりせん断力の影響を考慮せずに E_C を求めた。床版パネルのせん断弾性係数は、 $G_C = E_C / 15^{3)}$ の関係を用い表-1 に示すとおりである。

(2) 実験結果と数値計算

図-6 は 2 本の合成桁の支間中央における荷重と変位の関係を示している。a 桁は支間中央付近の主桁の引張側で曲げにより破壊した。また、b 桁は写真-1 に示すように中立軸付近において木部の水平せん断による破壊と、載荷点付近の引張縁での曲げによる破壊の同時破壊であった。図中の白丸は実験値を示しているが、2 本の合成桁ともに、終局荷重に至るまで荷重と変位は直線関係となっており、圧縮側の床版が塑性化する前に脆性破壊したものと思われる。実線は曲げとせん断による変位の弾性解で、破線はせん断だけによる変位を示している。ここで、主桁からの突出幅と支間の比は a 桁で $17.5 / 500 = 0.035 < 0.05$ および b 桁で $17.5 / 450 = 0.039$ より、床版有効幅は全幅有効とした。図よりせん断による変位の計算値は、a 桁の場合曲げとせん断による変位の 22%、b 桁で 23% となっており、せん断の影響を無視できないことがわかる。

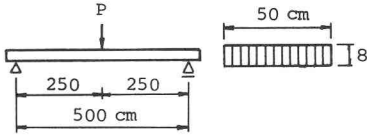


図-5 床版パネルの曲げ試験

表-1 ヤング係数 E とせん断弾性係数 G

		E (kg/cm ²)	G (kg/cm ²)
a 桁	主桁	84270	5267
	床版	65130	4342
b 桁	主桁	88750	5547
	床版	59500	3967

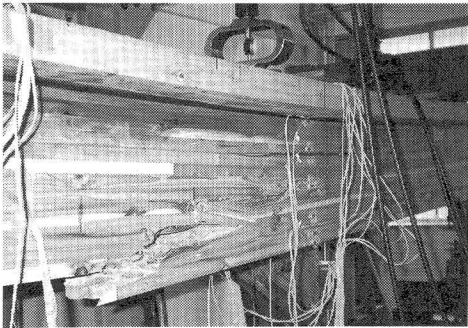
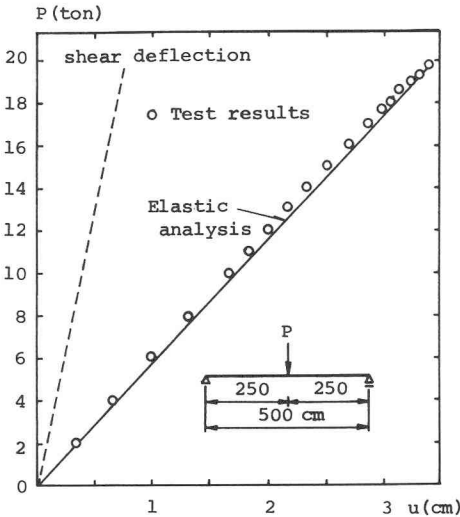
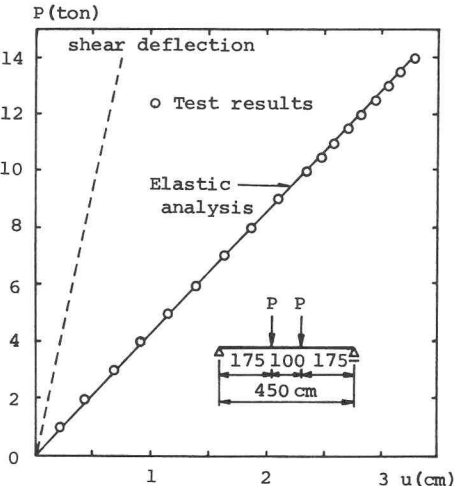


写真-1 b 桁の破壊状態



(a) a 桁



(b) b 桁

図-6 荷重-変位曲線

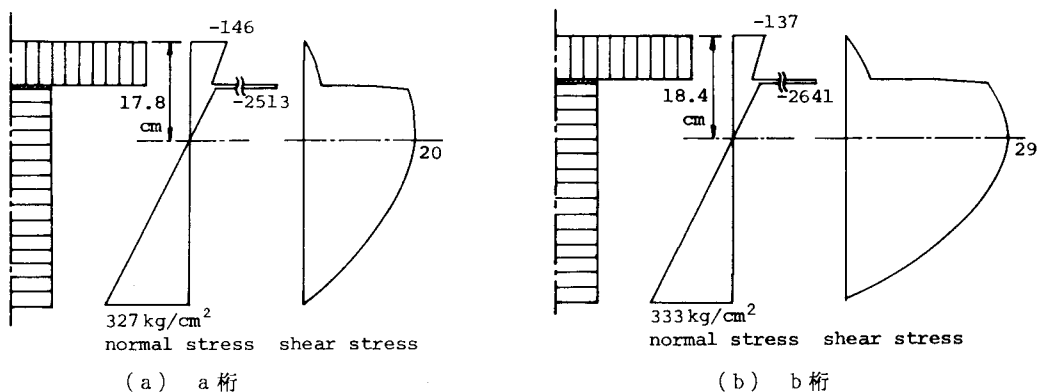


図-7 直応力とせん断応力分布

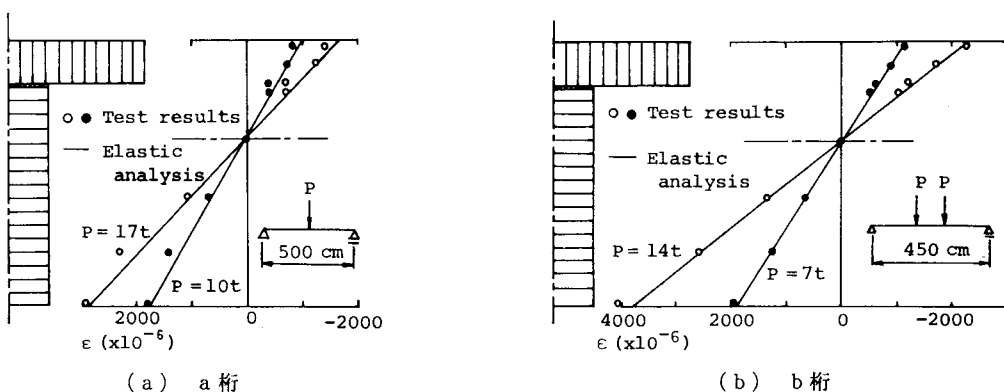


図-8 断面内ひずみ分布

図-7は、2本の合成桁に対し、終局荷重時における荷重点近傍の断面内の直応力とせん断応力分布の弾性解を示している。曲げ破壊したa桁の場合、図の直応力分布より引張強さは $\sigma_t = 327 \text{ kg/cm}^2$ 、床版の圧縮縁の応力は 146 kg/cm^2 となっている。材料試験⁷⁾によると、スギ材の圧縮強さは 200 kg/cm^2 前後から 450 kg/cm^2 位の値であり、これより床版部は塑性化していないと考えられる。曲げとせん断によって同時破壊したb桁の場合、図より引張強さは $\sigma_t = 333 \text{ kg/cm}^2$ 、床版の圧縮縁の応力は 137 kg/cm^2 であり、この桁も床版部が塑性化しないことがわかる。また、せん断応力分布図から中立軸の位置で最大せん断応力が生じ、 $\tau_{xz} = 29 \text{ kg/cm}^2$ であり、許容せん断応力度 9 kg/cm^2 ³⁾の3.2倍となっている。

集成材を用いた合成桁などの曲げを伴う引張材の断面算定式は³⁾

$$\frac{N_w}{A_w} + \frac{f_t}{f_b} \frac{M_w}{Z_w} \leq f_t \quad (5)$$

ここで、 N_w 、 M_w = 主桁に分配された軸方向引張力と曲げモーメント、 A_w 、 Z_w = 主桁の断面積と断面係数、 f_b 、 f_t = 集成材の許容曲げ応力度と許容引張応力度である。模型実験で用いた2本の合成桁に対し、終局荷重時におけるこれらの断面力と断面定数を表-2に示す。

表-2 主桁部の断面力と断面定数

	N_w (kg)	M_w (kgcm)	A_w (cm^2)	Z_w (cm^3)
a 桁	68803	849264	600	4000
b 桁	67256	881565	600	4000

1 級のスギ集成材の許容応力度は、 $f_b=115\text{kg/cm}^2$ 、 $f_t=75\text{kg/cm}^2$ であり、表-2 を用いて式(5)の左辺を求めると、終局荷重時の主桁下縁の値は a 桁で 253kg/cm^2 、b 桁で 256kg/cm^2 となり、a、b 桁ともに許容引張応力度の3.4倍の値となっている。

載荷点近傍における断面内ひずみ分布の実験値と弾性解を図-8 に示しているが、式(3)から得られる計算値は実験値とほぼ等しい値となっている。図より、床版と鋼および鋼と主桁のずれの影響は小さく、断面内のひずみ分布を直線とみなし合成桁として解析してよさそうである。

4. あとがき

集成材床版パネルと集成材主桁の合成効果を期待できる構造形式として、床版パネルの繊維方向を橋軸方向と平行とし、板ジベルとエポキシ樹脂接着剤を用いて合成させた集成材合成桁橋を想定して1/2 縮尺模型を製作した。

秋田杉集成材を使用し、板ジベルで合成した合成T形桁に1点集中荷重および2点集中荷重を作用させて破壊実験を行い、数値計算値と比較検討を行った。ここで用いた2本の合成桁ともに、終局荷重に至るまで荷重と変位の実験値は直線関係となっており、圧縮側の床版が塑性化する前に脆性破壊したものと考えられる。垂直変位の実験値と断面内ひずみ分布の実験値は、完全合成桁に対する弾性解とほぼ一致しており、本T形桁は床版と鋼および鋼と主桁のずれの影響を無視することができ合成桁として解析できることが認められた。数値計算より、変位に及ぼすせん断変形の影響はa桁で22%、b桁で23%と大きくせん断の影響を無視できないことが確認された。2本の合成桁の破壊形態は、主桁の引張側での曲げ破壊、および中立軸付近の木部の水平せん断と引張縁での曲げによる同時破壊であり、終局状態において曲げ破壊のみならず木部の水平せん断破壊に対しても留意すべきであるが、曲げとせん断に対して許容応力度の3倍以上の耐力を有している結果が得られた。

参考文献

- 1) Gutkowski, R.M. and Williamson, T.G. : Timber Bridges : State-of-the-Art, Jour. of the Struct. Engrg., ASCE, Vol.109, No.9, pp.2175-2191, 1983.
- 2) Ontario Ministry of Transportation and Communications : Ontario Highway Bridge Design Code, Downsview, Ontario, Canada, 1983.
- 3) 日本建築学会 : 木構造計算規準・同解説, 1988.
- 4) 長谷部薫, 薄木征三 : 集成材格子桁橋の合成作用に関する解析と実験, 土木学会論文集, 第403号/VI-10, pp.269-272, 1989.
- 5) 長谷部薫, 薄木征三 : 集成材格子桁橋鶴養林道橋の現場実験と解析, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.879-887, 1989.
- 6) 長谷部薫, 薄木征三 : 合成集成材桁の弾塑性解析と実験, 構造工学論文集, Vol.36A, pp.905-914, 1990.
- 7) 薄木征三, 堀江保, 亀井義典 : 集成材高欄支柱の弾塑性状態における変位, 構造工学論文集, vol.35A, pp.861-870, 1989.
- 8) 日本合板検査会 : 構造用大断面集成材の日本農林規格, 1987.

(1990年10月12日受付)