

集成材格子桁橋鵜養林道橋の現場実験と解析

FIELD TESTS AND ANALYSIS OF UYASHINAI FOREST ROAD BRIDGE USING GLUED LAMINATED TIMBERS

長谷部 薫*, 薄木 征三**

By Kaoru HASEBE and Seizou USUKI

Uyashinai bridge is located at the Uyashinai forest road in Akita District Forest Office, Akita Regional Forest Office. This bridge is glued laminated grillage girder bridge with laminated deck panels and steel cross beam. The present paper is concerned with the behavior of glued laminated grillage bridge with laminated deck panels and steel cross beam. The usual stiffness matrix method is used to investigate this problem. A method of analyzing the rigidity of cross beam is presented. Full scale experiments of Uyashinai forest road bridge are studied experimentally and are compared with the numerical solutions. Through the comparison with field test results, the accuracy and the efficiency of this method may be verified.

1. まえがき

厚さ5 cm以下のひき板を互いに繊維の方向が部材長さ方向へほぼ平行になるように接着剤をもって一体的に接着積層した部材を集成材と言う。集成材の層を構成するひき板は、丸太材などにくらべて板厚が薄いため接着以前に板内部まで均一に乾燥させることが可能であり、狂いや伸縮、割れなどは起こしにくいとされている。また節などの構造上の欠点を分散して再結合することになるので、部材としての弾性係数と破壊強度が上昇するという層効果が得られる。これまでは主に建築資材として屋内で利用されてきたが、集成材製作技術の向上と接着技術の進歩ならびに防腐処理技術の進歩により、集成材を橋梁材料の主要部材として利用する試みが最近いくつか行われている。

わが国において、集成材に関する設計規準には、日本建築学会で定めた木構造設計規準・同解説¹⁾があり、のこひき角材と比べると許容応力度は樹種によらず50%増となっている。ヤング係数も10%増となっており、層効果が認められている。一方、木橋に関する規準としては昭和15年内務省制定の「木道路橋設計示方書案」があり²⁾、形式上は現在も生きているが、この示方書案において集成材については全くふれられていない。

一方国外においては、アメリカ北部及びカナダにおいて木橋の開発研究が盛んに行われていることが報告されている。従来ののこひき角材の代わりに集成材を用い、釘打ち積層床版の代わりに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。この集成材床版パネルに関する研究成果³⁾⁻¹⁰⁾は、アメリカ道路橋設計規準¹¹⁾ (AASHTO)の基本となっている。集成材を使用した各種の木橋の現況報告¹²⁾⁻²⁰⁾によ

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

** 正会員 工博 秋田大学教授 鉦山学部土木工学科 (同 上)

ると、林道のみならずハイウェイ、鉄道そして市町村道に架設されており、集成材に関する規程がAASHTOに取り入れられた経緯も示されている。アメリカ木構造建設協会(AITC)^{21) 22)}発行の木構造建設マニュアルには、設計に必要な許容応力度、荷重および集成桁の形状寸法が成果表として与えられており、AASHTOの設計規程による集成桁橋の設計例がいくつか示されている。

秋田営林局土木課において計画、建設した大断面集成材を使用した鶴養林道橋が、昭和63年8月25日架設完了した。この集成材橋は、秋田杉集成材を主桁とし、ラグボルトで集成材床版パネルを主桁に取り付け、鋼トラス横桁を3本配置した構造となっている。幅員 4.0 m、支間 13.6 m の格子桁橋で、設計荷重は道路橋示方書²³⁾のT-14を用いている。昭和62年に同課で架設した坊川林道橋^{24) 25)}と比べると、幅員は同じであるが支間は2.4倍長く、横桁を2本多く取り付け端対傾構を設けた構造となっている。

本報告では、集成材主桁に床版パネルをラグボルトで結合し、鋼トラス横桁を有する格子桁橋の変形挙動を明らかにするために、剛性法を用いて格子構造の解析を行った。横桁取付部における集成材主桁とボルトの剛性評価は、モデル化を行うことにより可能とし²⁴⁾、床版設置後の横桁の曲げ剛性は、鋼トラス横桁と床版の合成断面として評価した²⁵⁾。さらに、本解析方法を確認するため鶴養林道橋の現場実験を行い、実験との比較により検証を行った。

2. 横桁の力学モデル

これ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。

2.1 横桁取付部における横桁の曲げ剛性

鋼横桁と集成材主桁取付点において曲げモーメント M が作用した場合の、変形後の横断面と応力分布をFig. 1に示す。ここで、主桁に接している垂直材(山形鋼、Fig. 6 参照)は曲げモーメントによって剛体的に回転すると仮定している。また、垂直材と主桁接触面における反力分布は垂直材の変位に比例し、この反力分布は主桁内部に45°の角度で直線分布を保持しながら伝達し、かつ一軸応力状態であると仮定する。以上の仮定より、横桁垂直材下部のボルト孔から応力度が零となる点までの長さ a_c を求める。

木材とボルトの合成断面としてのひずみエネルギーは、主桁のひずみエネルギーとボルトのひずみエネルギーの和に等しいので、これより鋼換算合成断面二次モーメント I_s' が次式で与えられる。

$$I_s' = \frac{3A_m \frac{1}{n'} b(z-t)(a_c + \frac{2}{3}z)^2}{4A_m \cdot l_n \frac{z(t+b)}{t(z+b)} + \frac{3}{n'}(z-t)b} \quad \text{--- (1)}$$

ここで、 $n' = E_s / E_L$ 、 E_L は木材の繊維直角方向のヤング係数、 E_s と A_m はボルトのヤング係数と断面積である。

Fig. 6 に示す鋼トラスの横桁としての断面二次モー

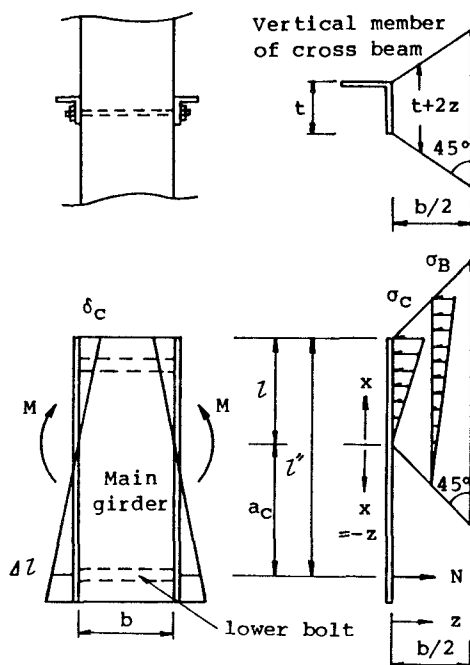


Fig.1 Stress distribution in main girder

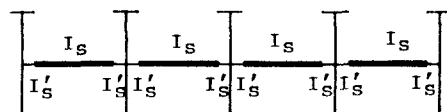


Fig.2 Idealized model of cross beam

ント I_s は⁽²⁾

$$I_s = \frac{A_1 h'^2/2}{1.0 + \frac{3A_1 h'^2/2}{A_2 a'^2 \sin \theta}} \quad (2)$$

Fig. 2に横桁の解析モデルを示す。

2.2 合成横桁の曲げ剛性

集成材主桁に集成材床版パネルをラグボルトによって結合し、鋼横桁を配置した場合を考える。

Fig. 6に示すように、床版パネルは橋軸直角方向には連続版となっている。それゆえ床版の橋軸直角方向の曲げ剛性を考慮すると、Fig. 3に示すように床版の一部は合成断面として作用し、床版の有効幅 B は鉄筋コンクリートT桁橋に準じて横桁間隔に等しい幅を採用できると仮定する。

合成断面の重心を v とすると、合成横桁の鋼換算合成断面二次モーメント I_v は合成桁橋に準じて

$$I_v = I_s + \frac{1}{n} I_w + A_s d_s^2 + \frac{1}{n} A_w d_w^2 \quad (3)$$

ここで A_s = 鋼トラス横桁の上下弦材の断面積の和、 A_w = 共働する床版の断面積、 n = 鋼と繊維平行方向の木材のヤング係数比 ($n = E_s/E_w$)、 I_w = 床版断面の重心 w に関する断面二次モーメントである。 d_s と d_w は

$$d_s = \frac{A_w d/n}{A_s + A_w/n}, \quad d_w = d - d_s \quad (4)$$

合成横桁と主桁取付部における合成横桁の鋼換算合成断面二次モーメント I_v' は、合成横桁の曲げモーメントが正の場合、Fig. 4に示すように式(3)と(4)の A_s を $A_s' = 2A_m$ とし、式(2)の I_s の代わりに式(1)の I_s' を用いればよい。

合成横桁の曲げモーメントが負の場合、Fig. 6に示すように本構造上ボルトの効果はなくなり、Fig. 4に示すように主桁の一部がこれに変わる。Fig. 5に示すように圧縮力 N が作用したときの、横桁垂直材と主桁接触

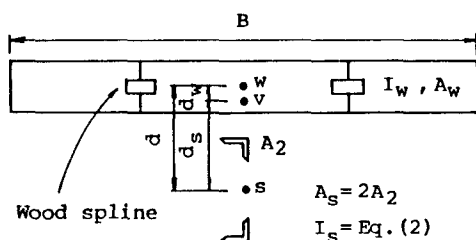


Fig. 3 Cross section of composite cross beam

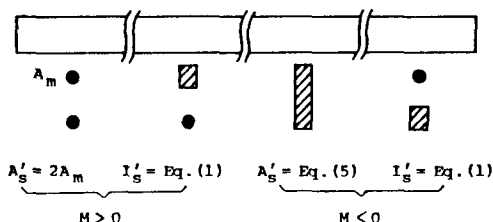


Fig. 4 Cross section of composite cross beam

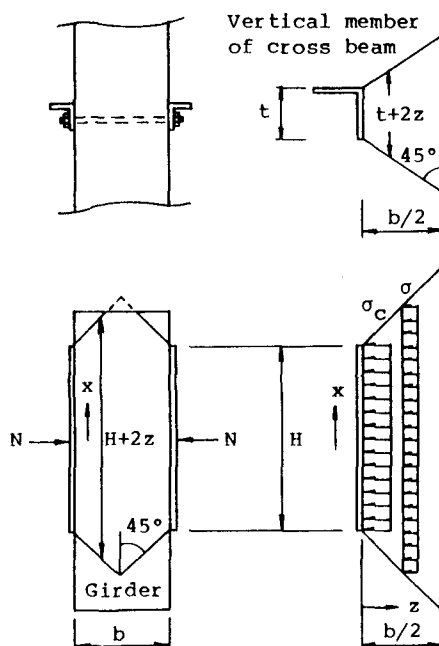


Fig. 5 Stress distribution in main girder

面における応力分布は、主桁内部に45°の角度で一様分布を保持しながら伝達すると仮定する。

側面に圧縮軸力が作用するときの木材のひずみエネルギーと、Fig. 5の四角柱部分の主桁のひずみエネルギーが等しいことより鋼換算断面積 A_s' は

$$A_s' = \frac{b(H-t)}{n' \cdot l_n} \frac{H(t+b)}{t(H+b)} \quad \text{----- (5)}$$

以上より横桁の曲げモーメントが負の場合、Fig. 4に示すように式(3)と(4)の A_s を式(5)の A_s' に置き換え、正負のモーメントに共通に成り立つ式(1)の I_s' を I_s の代わりに用いて式(3)から I_v を求める。

3. 大断面集成材を使用した鶴養林道橋の現場実験

本橋は、秋田営林署管内鶴養林道の起点に位置し、秋田営林局土木課において計画、建設されたものである。設計条件は橋長 = 14.0 m、支間 $L = 13.6$ m、幅員 = 4.0 m、荷重は T-14 を用い7 cm 厚のアスファルト舗装を行っている。

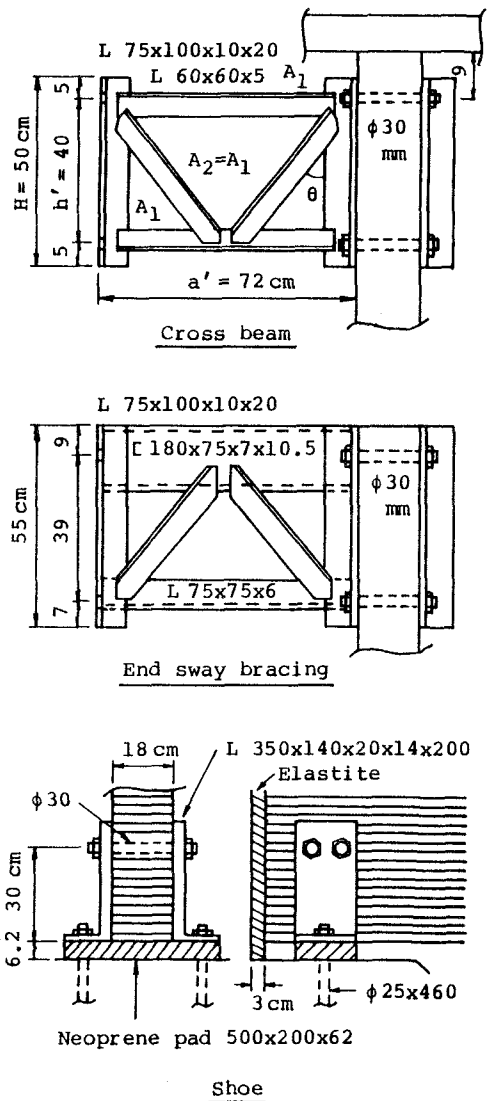
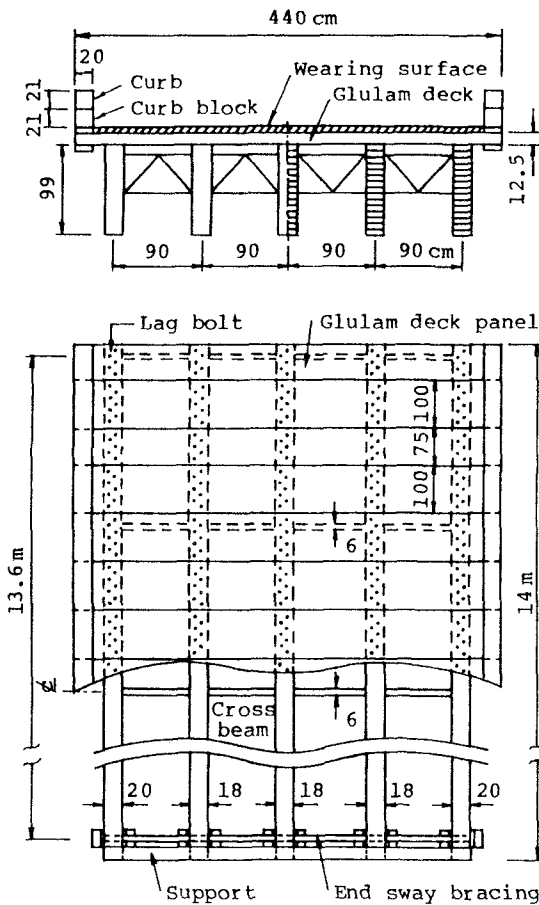


Fig.6 Cross section and plan of Uyasina Bridge

主桁および床版の材質は樹齢70年の秋田杉で、3 cm 厚のひき板を接着積層した集成材を用いている。床版厚 12.5 cm で 75x440 cm と 100x440 cm の床版パネルを 7.5x3x440 cm の米松製やとい実でほぼ組みし、床版パネル15枚を $\phi 11 \times 280$ mm のラグボルトによって 20x99x1400 cm および 18x99x1400 cm の5本の主桁に取り付けている。主桁間隔 $a = 90$ cm で鋼トラス横桁を3本配置し、主桁を貫通する上下2本の $\phi 30$ ボルトで主桁に取り付けた構造となっており、曲げとせん断に対してボルトの設計を行っている。桁の端部には鋼トラスの端対傾構を配置し、横桁と同様に主桁を貫通する上下2本の $\phi 30$ ボルトで主桁に取り付けている。さらに、12x12 cm 断面の支持木を用い、Fig. 6 に示すように 350x140x20x14x200 mm のアングルを支点部に用いて変位とねじりを拘束している。また、20x21x1400 cm の集成材笠木が水縁木、地覆木および床版を貫通する $\phi 16$ ボルトで片持版部に取り付けられている。支点部は、20x50x6.2 cm のネオプレーンパッドを用いゴム支承となっている。本橋の一般図は Fig. 6 に示すとおりである。

(1) 解析方法

床版パネルと主桁をラグボルトによって合成した場合、ボルト孔周辺木部の弾性変形が避けられないことから一種の不完全合成桁と考えることができるが、垂直変位に及ぼす床版と主桁の橋軸方向の合成効果は小さいので²⁵⁾、ラグボルトによる合成効果は考慮せずに床版と主桁の重ねばりとして解析を行った。ただし片持版部における床版の剛性については、笠木、地覆木および床版を合成断面とし、2節で示した方法で断面二次モーメントを求めた。

式(1)~(3)で必要な数値と結果を Table 1 に示す。曲げ格子剛度 Z およびねじり格子剛度 Z_T は Table 1 のデータを次式に代入すると

$$Z = \left(\frac{L}{2a} \right)^3 \cdot \frac{E_s I_v}{E_s I} = 161$$

$$Z_T = \frac{L}{8a} \cdot \frac{E_s I_v}{G_w J} = 93$$

ここで、 G_w = 木材のせん断弾性係数および J = 主桁のねじり定数である。これらの Z と Z_T より、主桁のねじり剛性は無視できるとして計算を行った²⁶⁾。

横桁取付部における曲げ格子剛度 Z' は、2節で示した方法で求めると横桁の曲げモーメントが正の場合 $Z' = 163$ で鋼トラスに対する Z とほぼ等しい値である。横桁の曲げモーメントが負の場合 $Z' = 36$ と減少するが、 $Z = 10$ 以上あれば荷重分配効果が十分発揮されるので²⁶⁾、Table 1 に示すように横桁の曲げモーメントが負の場合の横桁取付部における断面二次モーメント I_v (表中の I_v') を用い解析を行った。

(2) ヤング係数 E_s の測定

Table 1 Dimensions and properties

t	10 cm	a'	72 cm
$n' = E_s/E_1$	700	I_s	2903 cm ⁴
$n = E_s/E_s'$	30	I_s'	504 cm ⁴
A_m	7.07 cm ²	I_w	55339 cm ⁴
($\phi 30$)		A_s	11.60 cm ²
b	18 cm	A_s'	1.50 cm ²
I''	45 cm	A_w	4250 cm ²
a_c	34.81 cm	d_s	32.64 cm
l	10.19 cm	d_w	2.6 cm
A_1	5.80 cm ²	I_v	18064 cm ⁴
(L-60x60x5)		I_v'	4096 cm ⁴
A_2	5.80 cm ²	G_w	392 MPa
(L-60x60x5)		J	192456 cm ⁴
h'	40 cm	E_s	206 GPa
$\sin \theta$	0.773		

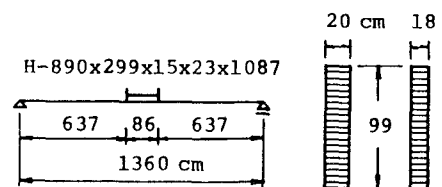


Fig.7 Span and loading condition for bending test

Table 2 Young's modulus E_s

Girder No.	E_s kg/cm ² (MPa)
a	90095 (8829)
b	83812 (8214)
c	83736 (8206)
d	81766 (8013)
e	78788 (7721)
Mean	83639 (8197)
Standard deviation	3708 (363)
Coefficient of variation	0.044

実物桁の曲げ試験を行い E_{θ} を求めた。試験方法は、支間を実橋と同じ 13.6 mとし、Fig. 7に示すようにH形鋼を用いて2点集中荷重を作用させ、荷重と支間中央における変位を測定した。支間と桁高の比 $L/h = 1360/99 = 13.7 \leq 14$ (JAS規定) でせん断力の影響を考慮せずに E_{θ} を求めた。

各主桁に対するヤング係数 E_{θ} をTable 2に示す。木構造設計規準によれば、変形計算には $E_{\theta} = 80000 \text{ kg/cm}^2$ (7840 MPa) を用いることになっており、Table 2の平均値はこれを4.5%上まわっている。

(3) 荷重載荷方法と変位置の測定

アスファルト舗装後、車両総重量 13.7 ton (134.3 kN) のトラックを用いて現場実験を行った。Table 3に使用したトラックの重量等を示している。Photo 1に示すように、支間中央に後輪を静止させ、幅員方向に2点載荷とした。本橋の場合支間 13.6 mであるので、Table 3に示したトラックの車軸距離から、支間中央に後輪を静止させると前後輪荷重の4点載荷となる。実験測定量は、支間中央における各主桁の垂直変位と支点部における支点変位であり、ダイヤルゲージを用いて測定を行った。

(4) 実験結果

笠木と水縁木を床版と連結する前の実験結果をFig. 8～11に示す。Fig. 8は、後輪

Table 3 Dimensions of truck

Spacing of truck axles	4.00 m
Load lane width of front axles	1.56 m
Load lane width of rear axles	1.75 m
Total weight	13.70 ton (134.3 kN)
Weight on front axles	2.74 ton (26.9 kN)
Weight on rear axles	10.96 ton (107.4 kN)

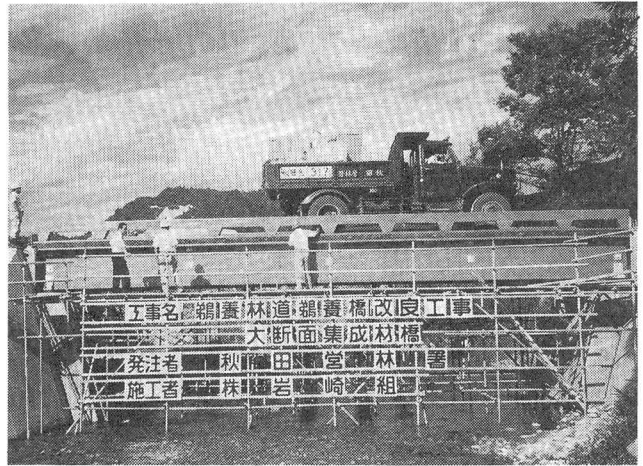


Photo 1 Loading condition

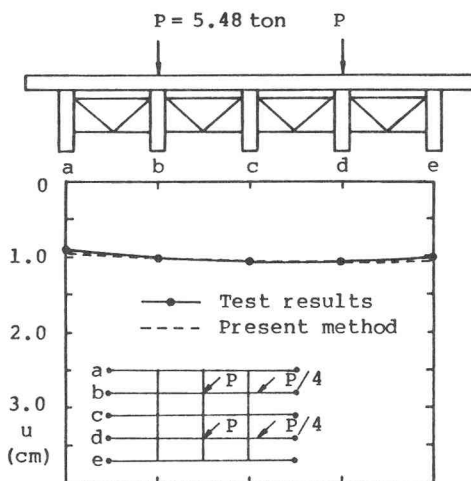


Fig. 8 Deflections of cross section at midspan

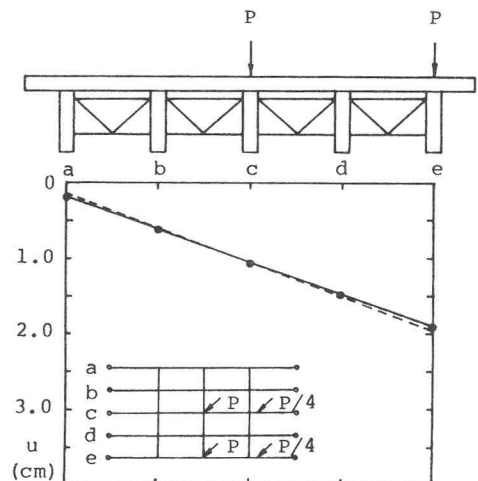


Fig. 9 Deflections of cross section at midspan

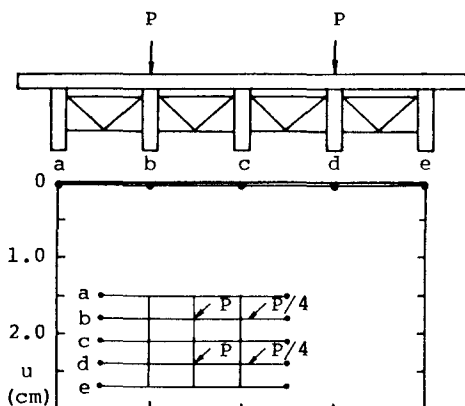


Fig.10 Deflections of cross section at support

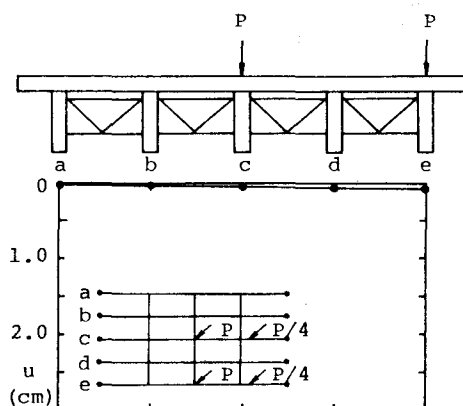


Fig.11 Deflections of cross section at support

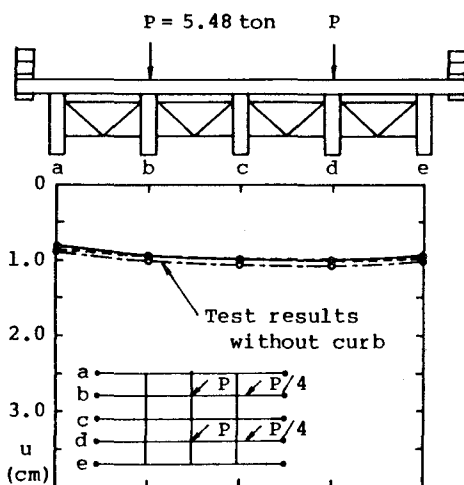


Fig.12 Deflections of cross section at midspan

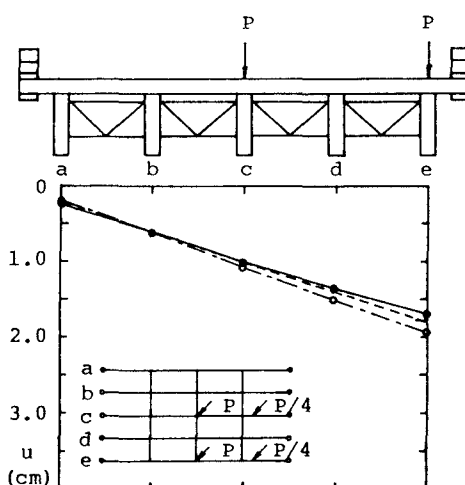


Fig.13 Deflections of cross section at midspan

荷重を支間中央かつ幅員方向の中央に載荷したときの、支間中央における各主桁の変位を示したものである。図中の実線は実験値であり、破線は計算値を示している。Fig. 9 は、支間中央において片側の後輪中心を車道部分の端部から 35 cm として載荷した場合の、支間中央における各主桁の変位を示したものである。Fig. 8、9 の実験値は、Fig. 10、11 に示すように支点部に用いたゴム製ネオプレンパッドによる支点変位を補正した値である。Fig. 10、11 の支点変位は、ローラー支点部とヒンジ支点部の平均値を示しており、両者の差は約 1 % である。図より、支点変位量は支間中央における変位の約 3 % である。

笠木を設置した後の実験結果を Fig. 12 と 13 に示す。Fig. 12 は、Fig. 8 と同じ荷重載荷のときの支間中央における各主桁の変位を示している。実線は支点変位を補正した実験値であり、破線は計算値を示している。また一点鎖線は、笠木を設置する前の実験値である。Fig. 13 は、Fig. 9 と同じ載荷状態における支間中央の各主桁の変位を示したものである。Fig. 12 と 13 より、垂直変位に及ぼす笠木の影響は載荷点付近で約 7 % と 16 % となっている。

以上より、本解析結果は実験値とよく一致しており、解析のモデル化が妥当であることが確認された。

4. あとがき

集成材主桁に集成材床版パネルをラグボルトによって結合し、鋼トラス横桁を3本配置した格子桁橋の解析において、横桁の曲げ剛性を鋼トラスと床版の合成断面とすることにより評価し計算を行った。さらに、実橋の現場実験を行い理論解との比較対照を試みた。

得られた結果をまとめると以下ようになる。

(1) 実橋の現場実験において、垂直変位の実験値と理論値は良く一致していた。これより、鋼トラス横桁と床版の一部は合成断面として作用し、合成横桁として解析できることが確認された。垂直変位に及ぼす笠木と地覆木の影響は、幅員中央載荷の場合載荷点付近で約7%程度であり、地覆側載荷の場合外桁において約16%であった。また、支点部の変位は支間中央における変位の3%程度であった。

(2) 横桁取付部における曲げ格子剛度は、横桁の曲げモーメントが負の場合鋼横桁の値の1/4.5に減少するが、横桁取付ボルト断面積を横桁のトラス弦材断面積と等しくすると、曲げモーメントが正で鋼横桁とほぼ等しい格子剛度が得られる。横桁の曲げモーメントが負の場合でも、横桁と床版を合成断面とみなせるので、合成する前に仮定する格子剛度を十分確保することができる。

以上のように、現場実験の結果、実験の範囲内において本解析法の妥当性が認められた。

最後に、鶴養林道橋の現場実験に当たって御世話を戴いた秋田営林局土木課長塚田邦彦氏ならびに同課関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本建築学会：木構造設計規準・同解説，1973
- 2) 福田武雄，土木学会監修：木構造学，壮文社，1949
- 3) McCutcheon, W.J. and Tuomi, R.L. : Procedure for Design of Glued-Laminated Orthotropic Bridge Decks, USDA Forest Service Research Paper FPL210, 1973
- 4) Tuomi, R.L. and McCutcheon, W.J. : Design Procedure for Glued-Laminated Bridge Decks, USDA, Forest Products Jour., Vol.23, No.6, 1973
- 5) McCutcheon, W.J. and Tuomi, R.L. : Simplified Design Procedure for Glued-Laminated Bridge Decks, USDA Forest Service Research Paper FPL233, 1974
- 6) Tuomi, R.L. : Erection Procedure for Glued-Laminated Timber Bridge Decks with Dowel Connectors, USDA Forest Service Research Paper FPL263, 1976
- 7) Gutkowski, R.M., Goodman, J.R. and Pault, J.D. : Tests and Analysis for Composite Action in Glulam Bridges, Transportation Research Record 676, National Academy of Sciences, 1978
- 8) Gutkowski, R.M. : Glulam Bridge Dowel Systems, Jour. of the Struct. Division, ASCE, Vol.105, No.ST8, pp.1712~1716, 1979
- 9) Sanders, W.W. : Load Distribution in Glulam Timber Highway Bridges, Final Report to American Institute of Timber Construction, Engineering Research Institute, Iowa State University, 1980
- 10) Weyerhaeuser Co. : Weyerhaeuser Glulam Wood Bridge Systems, Tacoma, Wash., 1980
- 11) American Association of State Highway and Transportation Officials : Standard Specifications for Highway Bridges, 13th edition, 1983
- 12) American Society of Civil Engineers, Committee on Wood of the Structural Division :

- Bibliography on Timber Highway Bridge Design, Jour. of the Struct. Division, ASCE, Vol.101, No.ST1, pp.1~10, 1975
- 13) Scarisbrick, R. : Laminated Timber Logging Bridges in British Columbia, Jour. of the Struct. Division, ASCE, Vol.102, No.ST1, pp.19~34, 1976
 - 14) American Society of Civil Engineers, Subcommittee on Wood Research : Important Research Needs in Wood- As a Structural Material, Jour. of the Struct. Division, ASCE, Vol.105, No.ST10, pp.2069~2089, 1979
 - 15) American Institute of Timber Construction : Modern Timber Highway Bridges - A State of the Art Report, Englewood, Colo., 1973
 - 16) Gutkowski, R.M. and Williamson, T.G. : Timber Bridges: A state-of-the-Art Report, ASCE Convention and Exposition, 1980
 - 17) Gutkowski, R.M. and Williamson, T.G. : Timber Bridges - Developments and Trends in North America, 11th World Congress of the International Association of Bridge and Structural Engineers, 1980
 - 18) Gutkowski, R.M. and Williamson, T.G. : Heavy Timber Structures and Bridges, Struct. Wood Research-State of the Art and Research Needs, ASCE, pp.111-130, 1983
 - 19) Gutkowski, R. and Williamson, T. : Timber Bridges: State-of-the-Art, Jour. of the Struct. Engrg., ASCE, Vol.109, No.9, pp.2175~2191, 1983
 - 20) Verna, J., Graham, J., Shannon, J. and Sanders, P. : Timber Bridges: Benefits and Costs, Jour. of the Struct. Engrg., ASCE, Vol.110, No.7, pp.1563~1571, 1984
 - 21) American Institute of Timber Construction : Glulam Bridge Systems - Plans and Details, Englewood, Colo., 1974
 - 22) American Institute of Timber Construction : Timber Construction Manual, 3rd edition, Englewood, Colo., 1985
 - 23) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説, 1980
 - 24) 長谷部薫・薄木征三 : 集成材を主桁とした格子桁の解析と実験的研究, 土木学会論文集, 第397号/VI-9, PP.85~94, 1988年9月
 - 25) 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, 投稿中
 - 26) 高島春生 : 道路橋の横分配実用計算法, 前編, 現代理工学出版

(1988年10月12日受付)