

鋼ジョイント近傍での木部材の力学性状に関する実験的研究

Experimental Study on behavior of timber member near the steel joint

藤本英稔* 今井富士夫** 中澤隆雄** 間瀬英男***

FUJIMOTO Hidetoshi, IMAI Fujio, NAKAZAWA Takao and MASE Hideo

- * 宮崎大学博士前期課程 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)
** 工博 宮崎大学工学部土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)
*** 宮崎ウッドテクノ (〒883-0105 宮崎県東臼杵郡東郷町)

ABSTRACT The members in the timber bridge are generally connected to steel joint with bolts. It has been clarified in our current research by FEM analysis of the members with steel joint that the stress concentration by bearing force of bolts occur in the section of timber member near the steel joint and the tapered bolt hole in the timber member enough relax the stress concentration. This paper reports on the result of experimentally verifying the stress concentration in the member near the steel joint and the effective of the stress relaxation method clarified by FEM analysis.

Keywords 集成材, ボルト接合, 応力集中, 応力緩和
glued laminated timber, bolt joint, stress concentration, stress relaxation

1. まえがき

2003年4月に完成した大規模なキングポストトラス橋の完成時に実施した静的載荷試験において、鋼ジョイント近傍での木部材に発生するひずみは3次元骨組解析で得られた結果とは異なった分布を示すことが明らかとなった¹⁾。木橋の一般的な設計では木質構造設計規準²⁾などの建築分野でのあまり大きくない部材に適用するものを準用しており、そこでの応力照査は骨組解析での梁要素の断面力を部材断面の断面諸値を利用して応力を算出するものであり、部材の2次元的な拡がりを見逃したものとなっている。このため、実橋での実際の応力分布と設計応力には差異が生じるものとなっていると考えられる。このことから、実橋に発生する応力やひずみを正確に把握し、設計において不利となる場合にはその対応策を検討することは重要である。

これまでの木部材のジョイントに関する研究はジョイントを含む部材全体の耐荷力について検討したものが多く、断面内部に発生する応力分布について詳細を論じた研究はほとんど見受けられないのが現状のように思われる³⁾。

このような観点から、鋼ジョイント近傍の木部材に生じる力学性状を把握するために、著者らは前述のトラス橋の部材を参考にして3次元FEM解析を実施し、鋼ジョイント近傍の応力やひずみが梁理論の結果と異なる大きな理由として、断面の大型化による応力の偏在ならびに接合ボルトの支圧力による応力集中であることが明らかとなり、応力集中の緩和策も考案して、緩和策の効果を解析的に確認している^{3), 4)}。

本論文は解析で得られた鋼ジョイント近傍の木部材の応力集中と著者らが提案した緩和策の有効性を実験的に検討した結果を報告するものである。

2. 実験概要と供試体

実験で使用した供試体を図-1に示す。鋼ジョイントに相当する鋼板は板厚 20mm で、集成木部材（長さ：1800mm）の両端側面に接合ボルト（ $\phi 12\text{mm}$ ）を介して接合されている。木部材は対称異等級集成材でラミナの配分は図-2に示すように、各層のラミナの厚さは 30mm で、上下縁部から中央に向かって L90, L70, L50 となっており、部材幅は 200mm である。

鋼ジョイントの詳細は図-3に示すように、接合ボルトを2列（5本/列）に配したもので、接合ボルトを挿入する木部材のボルト孔はボルト径と同じ $\phi 12\text{mm}$ として、ボルト孔とボルトの間には隙間は生じないようにしている。

実験での測定項目は鋼板近傍の木部材ひずみと鋼板からの木部材の引抜け量で、ひずみは図-3に示すように鋼板から 30mm の位置での測定をひずみゲージにて行い、引抜け量はデジタル変位計にて計測した。

図-4はジョイント部を上部から覗いたもので、図に示すように、鋼板と木部材との接合面にはビニールシートを挟んで摩擦の影響をできるだけ除去できるようにしている。これは外的な荷重のみの作用による応力分布を確認するためである。

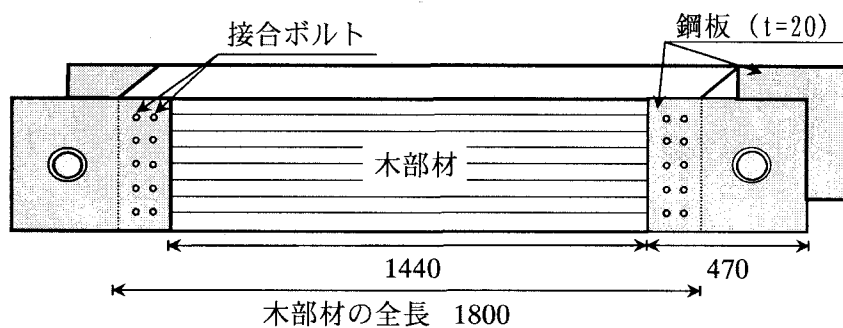


図-1 供試体の全景

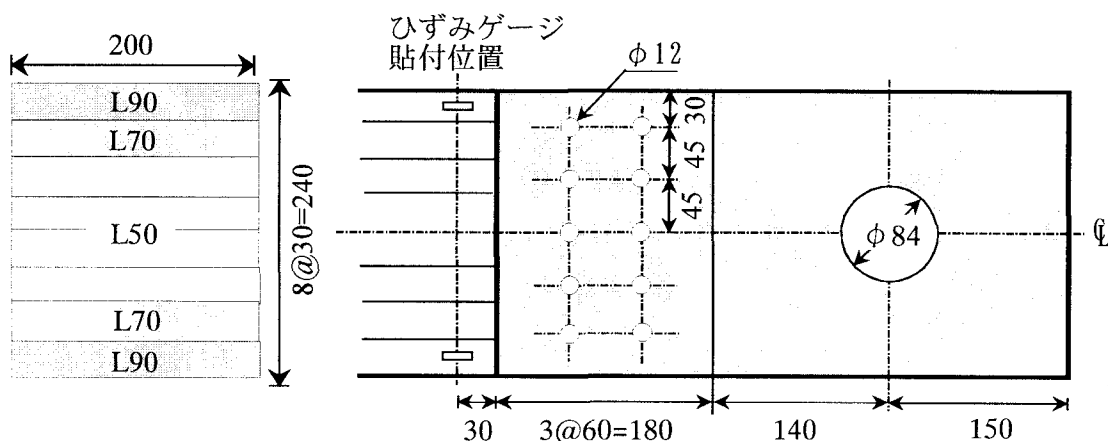


図-2 ラミナの配分

図-3 鋼ジョイントの詳細とひずみ貼付位置

本実験での荷重は単純引張荷重としており、荷重は木部材の両側面に配置した鋼板の開口された $\phi 84\text{mm}$ の孔に $\phi 80\text{mm}$ の大ボルトを挿入して、このボルトに荷重を作用させた。載荷時には載荷側の鋼板が変形しないようにしている。

先の解析で鋼ジョイント近傍には、接

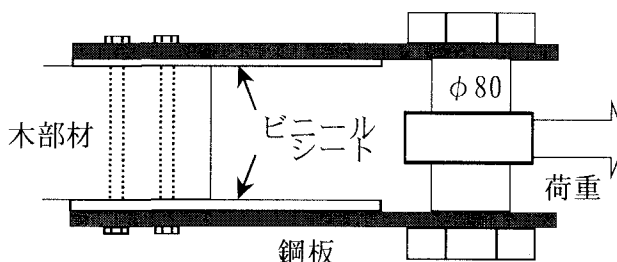


図-4 ジョイント部の平面

合ボルトの支圧力によって木部材には応力集中が発生することが明らかとなり、応力集中の緩和策として、図-5に示すように鋼板との接合面でのボルト孔にボルトとの非接触部を設けることを提案している。テーパ付きの孔（以後、テーパ孔）は非接触部ではボルト径の2倍の直径を有し、奥行はボルト径と同じ長さとするものである。解析でのテーパ付きの孔のサイズは効果を定性的に確認したもので、パラメトリック解析を実施した結果ではないために、サイズが最適なものであるかは今後の課題となる。

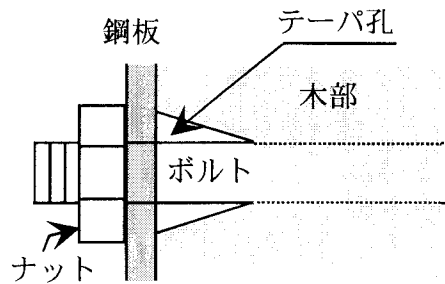


図-5 木部テーパ孔

本実験での使用したテーパ孔もこれに準じたもので、図-6に示すようなものである。ボルト孔はドリルで削り取るため、図に示すようにボルト径のほぼ2倍の径に相当するφ22mmの孔を10mmの深さまで、そこから5mmにテーパがかかったような状態のものとした。

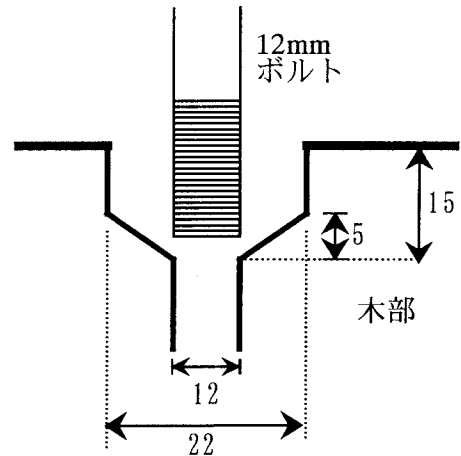


図-6 供試体のテーパ孔

3. FEM解析の概要

本実験の結果を検証するために、3次元FEM解析を実施した。図-7は解析で使用したモデルの要素分割を示したもので、供試体の1/4モデルを採用している。解析要素は木部材とボルトには8節点ソリッド要素を、鋼版には4節点シェル要素を使用した。

要素分割は材軸方向に60分割、高さ方向には16分割、奥行方向は4分割した。ただし、ボルトが設置されている箇所については、図-7の上段に示すような分割とした。

拘束条件は鋼板のみの左端を鉛直方向、水平方向の変位および鉛直軸回りの回転を固定し、さらに木部とボルトの中央面側の材軸直角方向変位を拘束した。

荷重は作用引張力を各層のラミナの弾性係数から換算された等価節点力に変換して、木部材の右端側の断面全域に載荷した。

解析での木部と鋼板との連結には以下のような仮定を行った。

- (1) 鋼板と木部材の間での接触面では、力の伝達はない。
- (2) 鋼板と集成材間の力はボルトのみで伝達する。
- (3) 材料はすべて弾性とする。

解析に使用した材料定数は、鋼材は弾性係数 $E=2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ とし、木部材は異方性材料として、文献6)を参考に表-1のような諸量を使用した。ここでのFEM解析は汎用解析ソフトのMARCによるものである。

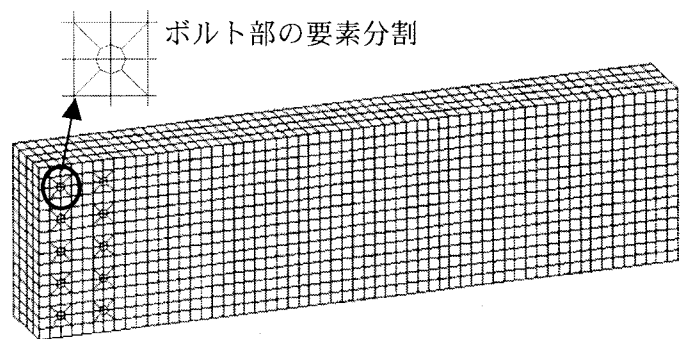


図-7 解析での要素分割

表-1 木部材の材料定数⁶⁾

弾性係数	Ex	各ラミナの規定値 ²⁾
	Ey, Ez	0.04Ex
せん断弾性係数	G	0.067Ex
ポアソン比	ν_x	0.4
	ν_y, ν_z	0.016

注) 添字 x は繊維に平行、y と z は直角方向を示す

4. 解析での断面内の応力分布

鋼ジョイント近傍の木部材のひずみ分布を確認するために、図-7に示す解析モデルの右端に、断面内に一様なひずみ 100μ が発生するような引張荷重を負荷した。図-8は鋼板から 30mm の位置でのひずみ等高線をテーパ孔の有無の両者について図示したものである。いずれの場合も断面内は一様な 100μ とはなっておらず、ひずみの偏在が認められる。テーパ孔を施さない場合（以後、「テーパ無」）には鋼板と接触する両側面に過大なひずみ（最大： 193μ ）が発生し、断面の中央部、特にその上下縁部に 100μ を大きく下回るひずみ（最小： 40μ ）が発生している。

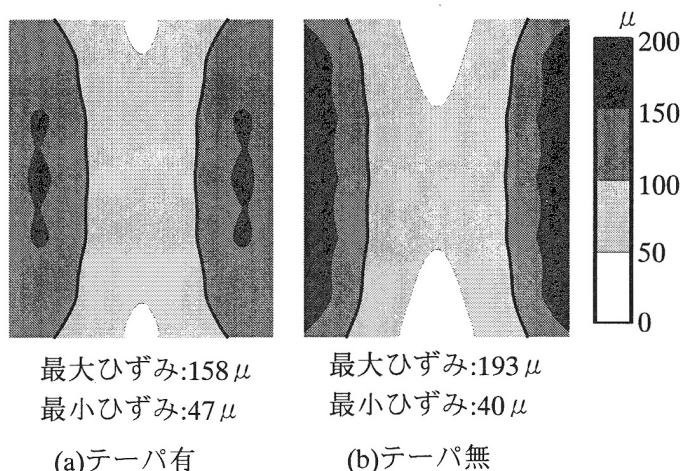


図-8 ジョイント近傍のひずみ分布

テーパ孔を施した場合（以後、「テーパ有」）では、最大ひずみは側面ではなく、テーパ孔の終端近傍に発生しており、その値は 158μ となり、最小ひずみの発生箇所は「テーパ無」と同様に、 47μ と「テーパ無」よりもやや大きくなっている。断面全体の分布と発生値から、テーパ孔は突出したひずみの発生を抑制していることが判る。

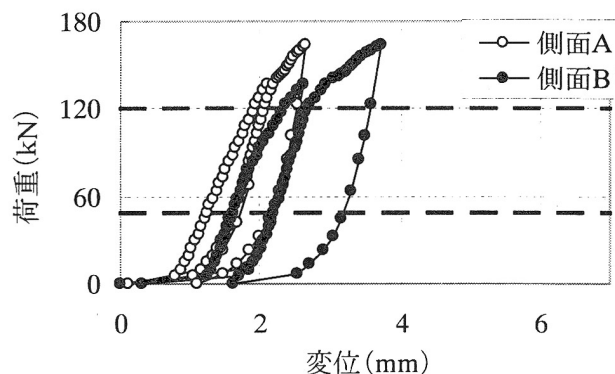
5. 実験による応力（ひずみ）性状

本実験はこれまでの解析で得られた鋼ジョイント近傍の木部材での応力集中の状況と著者らが提案した応力集中緩和策の効果を確認するために実施されたもので、対象荷重は引張荷重である。

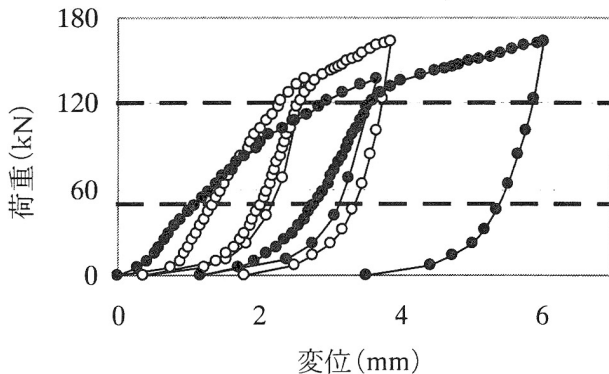
5.1 引張荷重に対する鋼板からの引抜け性状

図-9は引張荷重に対する鋼板からの引抜け量を図示したものである。引抜け量は鋼板から材軸方向に 50mm の位置での木部高さ中央点について変位計にて両側面を測定した。

初期荷重の 10kN 近傍まではテーパ孔の有無に関わらず、大きな引抜けが生じており、その後ほぼ線形的な引抜け量となり、 $120\sim 130\text{kN}$ の荷重に至っては非線形的に増加している。テーパ孔の有無について比較すると、テーパ孔を付した場合が大きくなる傾向にあり、非線形域での引抜けは「テーパ有」は「テーパ無」に比べて 1.5 倍程度となっている。



(a) テーパ無の引き抜け量



(b) テーパ有の引き抜け量

図-9 引張荷重に対する引き抜け量

また、除荷に対する引抜けは除荷初期から 10kN までほぼ線形的に低減している。

ここで、ボルトの許容せん断耐力²⁾はテーパ孔の有無に関わらず、49kN となっており、実験での非線形変形が始まる荷重を限界荷重と定義すると、耐荷力はボルト耐力の 2.5 倍程度となる。

5.2 木部材側面の分布性状

図-8で考察したように、テーパ孔を施さない場合には鋼ジョイント近傍の木部材側面に過大なひずみが生じることが、テーパ孔を設けた場合にはテーパ孔の終端に大きなひずみが生じることが明らかとなった。しかしながら、実験においては内部ひずみの測定は困難であることから、実験では鋼板から 30mm の位置での表面のひずみを測定した。

図-10 はテーパ孔の有無に対するひずみ分布を実験値と解析値の両者について示したもので、引張荷重は線形限界荷重のほぼ半分に相当する 60kN である。集成材を一様断面と仮定し、木質構造設計基準・同解説²⁾にある集成材としての引張荷重に対する弾性係数を利用して算出した理論ひずみは 192 μ となる。

実験と解析を比較した場合、木材には木目などにより一様な材料ではないことを考えると、定性的に十分とは言いがたいが、概ね一致しているものと判断できる。テーパ孔の有無について検討すると、「テーパ無」においては、ひずみ突出や分布の平均的な値についてほぼ一致しているものとする。しかしながら、「テーパ有」では定性的にはほぼ一致していると思われるが、実験値は解析結果よりもかなり大きくなっている。この理由としては、解析では木部材と鋼板の接触面での摩擦はないものと仮定しており、実験でも接合面にはビニールシートを挿入して「縁切り」を行うようにしたが、実際には十分な摩擦の除去には至っていないものと考えられる。

このことは、通常の施工で実施されている樹脂注入法では鋼板と木部材間には樹脂が充填されており、側面応力の増加を招く一因となる可能性を示唆するものである。

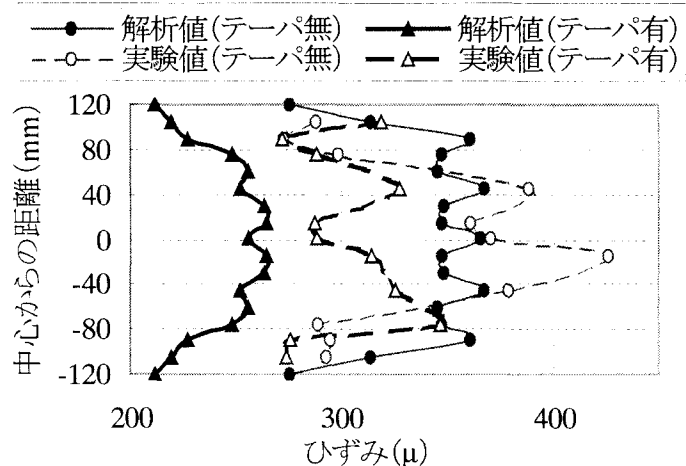


図-10 鋼板から 30mm 側面部のひずみ分布

5.3 木部材上面の分布性状

図-11 は図-10 と同様に引張荷重 60kN 時の鋼板から 30mm 離れた位置での木部材上縁のひずみ分布を示したものである。実験と解析のいずれにおいても、両側面のひずみが大きく、中央線では大きく低減するものとなっており、解析ではテーパ孔の影響はあまり見受けられない。実験値においては、「テーパ無」は「テーパ有」に比べて変動は大きくなるものの、側面のような差異は少ないものと云えよう。また、実験は

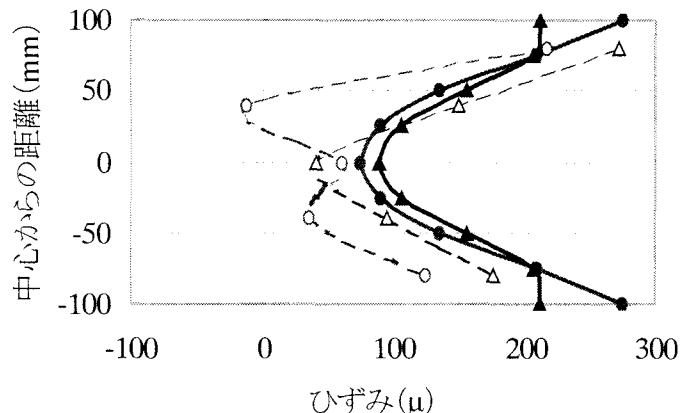


図-11 鋼板から 30mm 上面部のひずみ分布

解析とほぼ一致している。

梁理論から算出されたひずみと比較すると、解析の平均値はほぼ合致するものとなっている。

このようなひずみ変化はボルトによる影響ではなく、部材の2次元的な拡がりによるものと考えられ、断面の幅と高さの比をパラメータとする解析や実験でひずみ変動を詳細に把握する必要があることを示す結果と考えている。

6. あとがき

本論文は鋼ジョイント近傍の集成材の力学性状を確認するために、引張荷重に対する挙動を実験的に明らかにしたもので、実験で得られたひずみからボルト接合による応力集中の傾向ならびにその緩和策の有効性について論じている。得られた結論を要約すると、以下のようになる。

- (1) 鋼ジョイント近傍でのボルトの支圧による応力（ひずみ）集中は実験的にも明らかとなった。
- (2) 応力集中に対する緩和策としては提案したテーパ孔は有効である。
- (3) ジョイントからの木部材の引抜け量はテーパ孔を施すと、大きくなる傾向にある。

これまでの解析で得られた接合ボルトによる木部材への応力集中とその緩和策の有効性は、本実験によりほぼ確認された。しかしながら、多くの実橋でのボルト接合には樹脂充填法が採用されており、樹脂は鋼板と木部材間にも注入されている。これらの影響や断面形状のひずみ分布の偏在などについては今後の課題と思われる。

本研究を遂行するにあたり、宮崎県木材技術利用センターの飯村豊氏には貴重なご意見をいただきましたことに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 今井富士夫, 飯村豊, 入江達雄, 中澤隆雄: かりこぼうず大橋の材料および力学性状, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.865-872, 2004
- 2) 日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説, 2003
- 3) M. Reid and J. Shin; Capacity Predictions for One Two-row Bolted Timber Connections, 8th world conference on timber Eng. pp. 291-296, 2004
- 4) 藤本英稔, 今井富士夫, 中澤隆雄, 間瀬英男: 木部材の鋼ジョイント近傍の応力分布特性, 第3回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp.89-94, 2004
- 5) 今井富士夫, 藤本英稔, 間瀬英男, 飯村豊, 中澤隆雄: 大断面集成材の鋼ジョイント近傍の応力集中とその緩和策, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1203-1210, 2005
- 6) 長谷部薫, 薄木征三, 元沢清佳: バットジョイントを有するプレストレス木床版の曲げ試験と解析, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.847-854, 2004