

## 鋼ジョイント部に注入された樹脂の木部材への影響

Influence of resin injected into steel joint on timber member

今井富士夫\*、○村上弥生\*\*、飯村 豊\*\*\*、中澤隆雄\*

IMAI Fujio, MURAKAMI Yayoi, IIMURA Yutaka, NAKAZAWA Takao

- \* 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)
- \*\* 宮崎大学工学研究科博士前期課程 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)
- \*\*\* 農博 宮崎県木材利用技術センター (〒885-0037 宮崎県都城市花繰町 21-2)

**ABSTRACT** A resin is injected into not only the gap between the bolt and the bolt hole in the timber member but also the space between the steel connection plate and the timber member at the joint of timber members with the bolt. Therefore, the resin contributes to the resistance of the pulling out from the steel joint of the timber member as well as the joint bolt. In this paper, the bond properties of the resin used to connect the steel plate and the timber member are examined at first, and, next, the strain distribution in the section of the timber member near the steel joint connected with resin is clarified by comparing the results by FEM analysis with the experimental ones.

**KeyWords** : 集成材、樹脂、付着、接合、ひずみ分布

*glued laminated timber, resin, bond, connection, strain distribution*

### 1. まえがき

集成材を利用した近代木道路橋では支間の増大により、木部材の断面は大型化する傾向にあり、部材も支間に対して単一ではなく、複数の部材を連結する必要がある。その連結には、鋼板で製作された鋼ジョイントが使用され、鋼板と木部材の接合には鋼ボルトによる支圧接合が採用される場合が多い。ボルト接合では、木部材のボルト孔の径はボルト径よりも大きく空けられるため、ボルトと木部材のボルト孔との隙間による木部材の2次的な応力の発生を抑制するために、その隙間には一般に樹脂が充填されるようである。樹脂の充填法によっては、鋼ジョイントの鋼板と木部材との間にも樹脂が注入されることになる。この場合、樹脂も鋼板と木部材の接合材として機能することになる。

ボルト接合に関する研究としては、部材全体の耐荷力や木部材のプラグ破壊などの破壊形式について論じた研究<sup>1), 2)</sup>や、ボルトの木部材に対する支圧影響を2次元解析により検討したもの<sup>3)</sup>などがあげられるが、鋼板と木部材間に厚く充填される樹脂に関する研究は少ないようである。

薄木らはドリフトピンおよび樹脂による鋼板との集成材の接合に関して実験的・理論的に検討を行い、そこで得られた非弾性理論を基に設計法も提示している<sup>4)</sup>。

これらのボルトや樹脂接合に関する研究は接合部全体の挙動や耐荷力について検討したもので、接合部での木部材の3次元変形について詳細な検討は行っていない。

著者らは先に、実橋の静的試験<sup>5)</sup>において、鋼ジョイント部近傍の木部材のひずみ分布が設計に使用される梁理論では説明できない特異な分布となることを明らかにし、実橋レベルの大型断面や実験に使用した供試体の3次元有限要素解析<sup>6), 7)</sup>により、前述した特異なひずみ分布はボルトの支圧力による応力集中のみならず、柔らかい木材であるがゆえに生じる過大な木部材の変形に起因することを明らかにしてきた。

すなわち、接合部の安全な設計を行うためには、接合部全体の耐荷力や部材厚さを考慮していない2次元解析のみによる接合部の検討では不十分で、鋼ジョイント近傍の木部材の変形性状を正確に解析できる手法を明確にし、その解析手法を基に断面幅や断面アスペクト比などをパラメータとする解析が必要であると考えられる。

そのためには、実橋における接合部の状況を忠実に取り入れた実験を実施するとともに、3次元解析を行い、解析の精度を確認していく必要がある。

このような考え方から、接合の過程で鋼板と木部材の間に充填される樹脂の影響を検討するために、先の報告<sup>8)</sup>では樹脂のみで接合された供試体実験を実施し、樹脂の付着性状や木部材の表面ひずみなどを実験的に明らかにしてきた。

本論文では、まず前報から追加した実験と3次元解析の両面から樹脂の付着性状について検討し、次いで、そこで得られた樹脂の付着性状を基に解析した結果と実験から、樹脂接合による鋼ジョイント部近傍の木部材断面の変形の状態などを明らかにした。また、ボルトのみの接合による供試体の実験も実施し、そこでは先に著者らが提案したボルト接合時の応力緩和法を取り入れた実験も実施している。

## 2. 実験概要

本実験での供試体を図-1～図-4に示す。

鋼ジョイントに相当する鋼板は板厚 20mm、集成木部材の長さは 1500mm、木部材の純区間は 1140mm、木部材と鋼板との接触面の載荷方向の長さは 180mm である。供試体の断面は図-2に示すような8層の異等級対称モデルとなっており、ラミナの層厚はすべて 20mm で、断面寸法は幅 100mm×高さ 160mm である。ここでの集成材<sup>9)</sup>は宮崎県産のオビシギ（気乾比重：0.32）で作成されている。

供試体では図-1の右側のみを測定部とし、鋼板と木部材の接触部に樹脂を充填した。ただし、載荷時での付着切れによる接合部の破壊を避けるために、ボルト（φ10mm）を2列（1本/列）に差し込んでいるが、載荷時にボルトによる影響が生じないように、木部材のボルト孔径は 12mm とし、ボルトとボルト孔の隙間には樹脂が充填されないようにしている。

また、供試体の左側は非測定部として、左端のジョイント部での破壊が右端測定部の破壊以前に生じないようにボルト接合したもので、その配列は2列（3本/列）とし、縁端距離およびボルト間距離は 60mm とした。供試体のボルトはあくまで樹脂の剥がれによる供試体の剥落防止用であるので、木質構造設計基準によるボルト間距離などは無視している。ここではボルトと木部材のボルト孔の径は同一とし、ボルトを打ち込んでいる。

本供試体での樹脂充填法は、図-4に示すように鋼板と木部材間に厚さ 3mm～9mm、幅 7mm のアクリル角材を接触面の底部と側面の縁端に配置し、上部が開くように隙間を作り、その隙間に樹脂を上部から流し込んだ。ここでの樹脂はエポキシ樹脂系のポリアミドアミンである。

先に報告した実験<sup>8)</sup>では鋼板の表面が無処理の黒皮の付いたもので行っていたが、今回は新たに鋼板の黒皮を除去したものを追加している。

実験での測定項目は木部材の鋼材からの引抜け量と鋼板近傍の材軸方向のひずみで、図-3と図-4に示すように、引抜け量は鋼板から 200mm 離れた箇所の木部材と鋼板の相対変位をディ

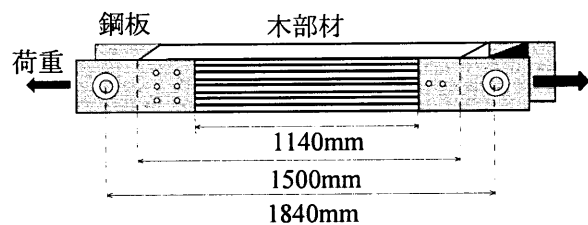


図-1 供試体

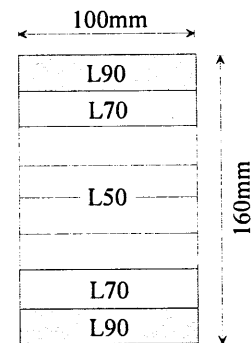


図-2 ラミナの配分

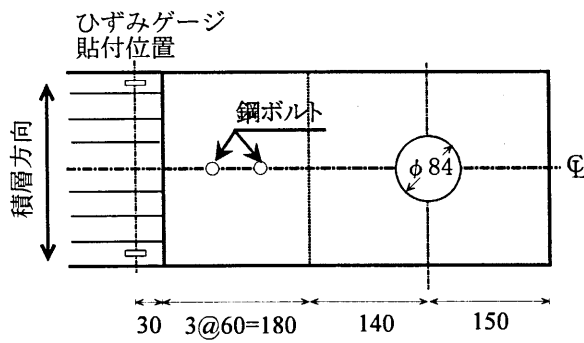


図-3 鋼ジョイント部の詳細とひずみゲージ貼付位置

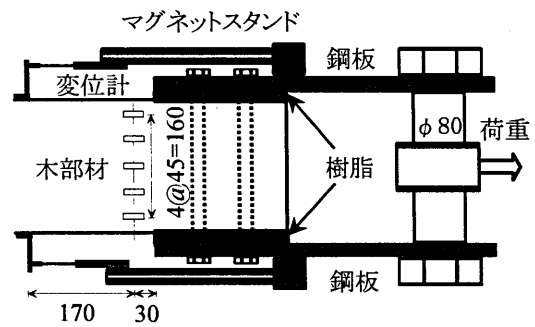


図-4 鋼ジョイント部の平面

デジタル変位計 (500  $\mu$ /mm) にて、ひずみは鋼板から 30mm 離れた箇所の木部材上下面と側面に貼付したひずみゲージにて測定した。

本実験での荷重は単純引張荷重としており、図-3や図-4に示すように、木部材の両側面に配置した鋼板に開口された  $\phi 84$ mm の孔に  $\phi 80$ mm の大ボルトを挿入して、このボルトの中央点に荷重を作用させた。

### 3. 樹脂接合面のせん断特性

#### 3.1 荷重-引抜け量の関係

本章では鋼板からの木部材の引抜けに対する樹脂の抵抗や樹脂の付着強度などについて検討する。

図-5は樹脂厚を変化させたときの鋼板と木部材の接触面に生じるせん断応力と木部材の鋼板からの引抜け量の関係を示したものである。図中の「○mm」は充填した樹脂厚を示し、「○mm (黒皮)」とは黒皮付き鋼板を、「○mm (除去)」は鋼板の黒皮を除去した供試体を示している。

縦軸のせん断応力は鋼板が木部材の両面に配置されていることから、2面せん断として、次式により求めたものである。

$$\tau = P/2A \quad (1)$$

ここに、 $\tau$ はせん断応力 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )、 $P$ は引張荷重 (N)、 $A$ は1面あたり接触面積 ( $\text{mm}^2$ ) である。

図から明らかなように、いずれの樹脂厚においても、せん断応力の増加に対する引抜け量の変化はほぼ線形であり、荷重の増加に対して、突然に荷重が大きく低減した。

また、線形域でのせん断応力に対する引抜け量は樹脂厚や鋼板の黒皮の有無に関わらず、ほぼ一様であると考えられる。

そこで、すべての供試体のデータから、その関係を直線回帰したところ、式(2)のようになった。

$$\tau = k \Delta = 4.35 \Delta \quad (2)$$

ここに、 $k$ はせん断方向ばね係数 ( $\text{N}/\text{mm}^3$ ) (以下、ばね係数)、 $\Delta$ は引抜け量 (mm) である。

各供試体の最大せん断応力 (最大引張荷重) についてみると、黒皮付きの鋼板に比べて、黒皮を除去した鋼板を使用した場合が最大せん断応力は大きくなっていることが判る。

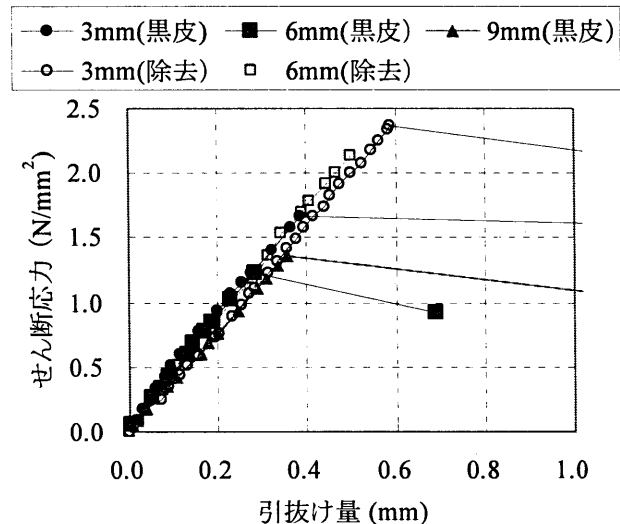


図-5 実験結果

### 3.2 付着強度と剥離状況

図-5で得られた最大せん断応力を樹脂の付着強度と定義する。

表-1は各樹脂厚に対する最大引張荷重および式(1)から求めた最大せん断強度（ここでは、付着強度と称す）を整理したものである。

黒皮の有無に関する付着強度を比較すると、前述したが、黒皮を除去した鋼板を使用した場合が、黒皮の付いた鋼板のものよりも付着強度は増加していることが判る。この結果は既往の研究結果<sup>1)</sup>とは異なるものである。

また、黒皮付きの鋼板では樹脂厚6mmで最小の付着強度となっているが、全体的に考えると、樹脂厚が厚くなると、付着強度は低減する傾向にある。これは、樹脂が厚くなれば、樹脂自体のせん断変形が大きくなるためと考えられるが、データ数が少ないため、十分には考察し難い。

試験終了後の付着切れの状況を観察するため、供試体に安全面から挿入していた2本のボルトを外したところ、簡単に鋼板が離れた。このとき、木部と樹脂間は健全な状態にあった。また、ボルトによる孔の変形も認められなかった。

また、黒皮付き鋼板では樹脂に黒皮が付着した状態で剥がれていることから、黒皮付き鋼板では鋼板と樹脂の純粋な剥離ではなく、黒皮の鋼板からの剥離で終局に至ったと考えるべきであろう。このことから、樹脂を使用する際には、鋼板の黒皮は除去すべきであり、樹脂と鋼板の付着強度を向上させるためには、鋼板の表面に溝を切るなどの細工をすれば、付着強度の増加は期待できるものと思われる。

なお、今回の鋼板からの黒皮除去では、単にサンダーで黒皮を削りとっただけで、サンドブラストなどの処理は行っていない。

表-1 最大引張荷重と付着強度

樹脂厚	3mm	6mm	9mm
黒皮付き			
最大引張荷重 (kN)	95.6	71.1	78.5
付着強度 $\tau_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	1.66	1.23	1.36
黒皮除去			
最大引張荷重 (kN)	136.5	123.1	—
付着強度 $\tau_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	2.37	2.14	—

注) 黒皮除去9mmは実施していない

### 3.3 付着性状

#### (1) 解析概要

実験で得られたばね係数  $k$  および付着強度  $\tau_u$  は、引張荷重を単に接触面積で除した値で、接触面での平均値であり、概算値といえる。

そこで、有限要素法による解析を行い、解析結果と実験値との比較により、実験で得られた樹脂の付着強度およびばね係数の妥当性について検討する。

有限要素法による解析では、鋼板と木部材には8節点ソリッド要素を、木部材と鋼板間には8節点接触要素を採用した。接触要素は3方向のばねモデルである。

解析で使用した各要素の材料定数を表-2と表-3に示す。表-2は木部材の材料定数を示しており、表-3には鋼材の材料定数と接触要素のばね係数を示す。ここで、接線方向のばね係数

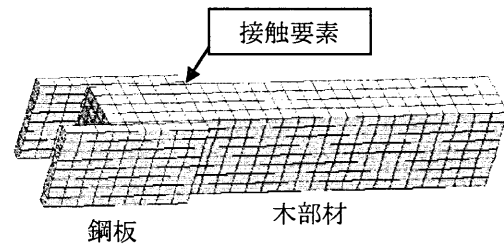


図-6 解析モデル

表-2 木部材の材料定数<sup>12)</sup>

弾性係数	Ex	各ラミナの既定値 <sup>10), 11)</sup>
	Ey, Ez	0.04Ex
せん断弾性係数	G	0.067Ex
ポアソン比	$\nu_x$	0.4
	$\nu_y, \nu_z$	0.016

注) 添字  $x$  は繊維に平行,  $y$  と  $z$  は直角方向

表-3 鋼板と接触要素の材料

鋼板	弾性係数	N/mm <sup>2</sup>	$2.0 \times 10^5$
	ポアソン比		0.03
接触要素	法線方向	N/mm <sup>3</sup>	$1.0 \times 10^5$
	接線方向		

は実験との比較を行いながら変化させ、法線方向については、樹脂は変形しないと仮定して、剛となるような大きな値を入力した。

すべての供試体において、実験では付着切れが生じる終局時まで木部材と鋼板は弾性域にあることが確認できたことから、非弾性解析の要素は接触要素のせん断方向についてのみ考慮した。

## (2) 解析で得られた樹脂のばね係数と付着強度

まず、樹脂のばね係数について検討する。

図-7は荷重と引抜き量の関係について、解析と実験を比較したものである。実験は黒皮を除去した樹脂厚 3mm のもので、図中の「 $k=○$ 」は解析結果であり、例えば、「 $k=4.3$ 」はばね係数  $k=4.3\text{N/mm}^3$  を解析に使用した場合のものである。

解析においても、最大せん断応力に達した直後に解は収束しなくなったので、解析結果はばね係数の検討を行い易くするため、線形時の傾きを延長して図示している。

図から明らかなように、実験で得られた「 $k=4.3$ 」での解析は実験と大きな違いが生じている。

そこで、ばね係数を変化させて解析した結果、「 $k=20$ 」で解析はほぼ実験と一致するものとなった。このことから、ここでの樹脂の真のばね係数は、ほぼ  $k=20\text{N/mm}^3$  と考えられる。

次に、付着強度について検討する。

図-8は、前述の実験との比較で得られたばね係数  $k=20\text{N/mm}^3$  を使用して解析した結果と実験を比較したものである。図中の「3mm (除去)」は実験結果であり、○と△は解析で得られた最大せん断応力である。

実験で得られた付着強度  $\tau_u=2.37\text{N/mm}^2$  として解析した場合 (図中の△) では、最大せん断力は実験の 60%程度しかない。このことから、樹脂の付着強度は最大せん断力とは一致しないことが判かる。

そこで、付着強度を変化させて解析したところ、図に示すように、 $\tau_u=3.0\text{N/mm}^2$  のとき (図中の○)、解析での最大せん断力は実験とほぼ一致する。

よって、樹脂の付着強度は  $\tau_u=3.0\text{N/mm}^2$  となる。

このように、ばね係数  $k$  および付着強度  $\tau_u$  が実験と異なる理由は、樹脂内の引張荷重に対するせん断応力が一様でないためである。

図-9は解析で得られた荷重 10kN あたりの樹脂に相当する接触要素のせん断応力分布を示した

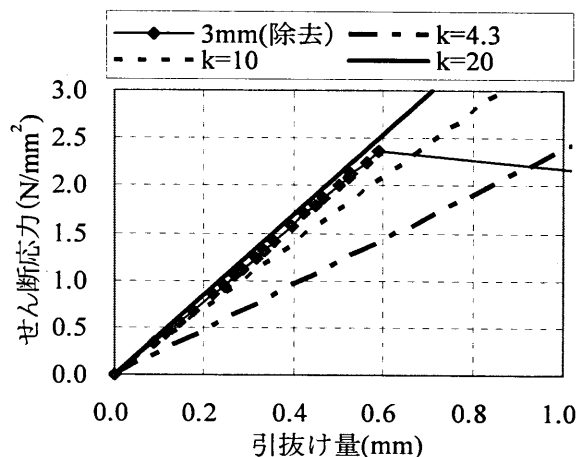


図-7 実験と解析の比較

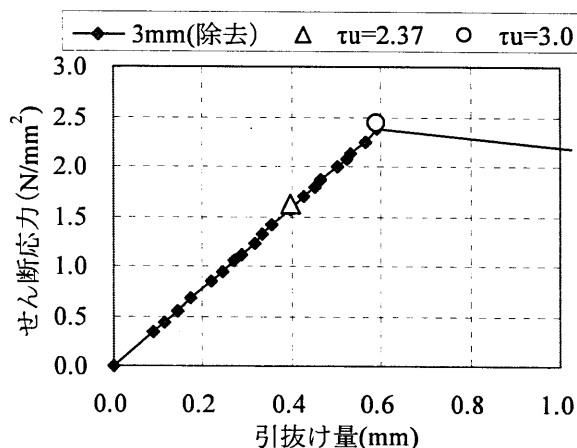


図-8 付着強度の検討

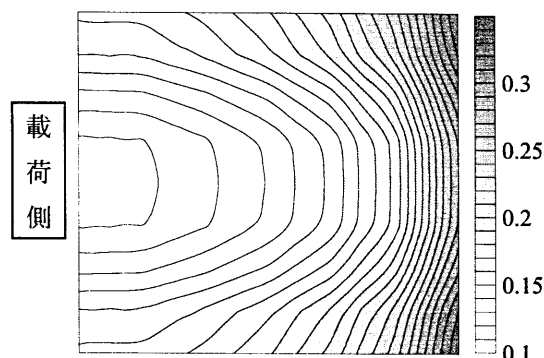


図-9 接触要素のせん断応力 ( $\text{N/mm}^2$ )

もので、せん断応力は載荷部から非載荷部に向かって、 $0.11\sim 0.33\text{N/mm}^2$ と大きく変化しており、樹脂のせん断応力を一様とみなしたときのせん断応力  $0.17\text{N/mm}^2$  に対して、非載荷部では2倍もの応力が発生している。

このように樹脂内部でせん断応力に差異があるにも関わらず、解析において瞬時に終局に至ったのは、非載荷側で付着切れは最初に発生するが、付着切れによる応力の再配分が行われ、非常に小さい荷重間隔で付着切れが全域に亘ったものと考えられる。

以上の結果から、今回使用した樹脂の本来のばね係数は  $20\text{N/mm}^3$ 、付着強度は  $3.0\text{N/mm}^2$  と、実験で得られた結果よりも大きくなることが明らかとなった。

#### 4. 樹脂による鋼ジョイント部近傍の木部材のひずみ性状

鋼ジョイント近傍の木部材に発生するひずみについて検討する。以下では、鋼板から  $30\text{mm}$  離れた位置でのもので、実験は黒皮を除去し、樹脂厚を  $3\text{mm}$  とした供試体について考察する。

図-10 は木部材の上下縁のラミナ (L90) と高さ中央のラミナ (L50) の荷重に対する木部材側面の荷重に対するひずみを図示したものである。いずれの場合にも、最大荷重まで、ひずみは直線的に変化しており、木部材は弾性域にあることが判る。また、3者进行比较すると、上下縁のラミナに比べて、中央のラミナのひずみが大きくなっていることが判る。

次に、断面側面のひずみ分布について観る。

図-11 は荷重  $10\text{kN}$  時の木部材側面のひずみ分布を示したもので、実験でのひずみは樹脂厚  $3\text{mm}$  と  $6\text{mm}$  の2つの平均値である。また、図中の縦軸方向の破線は、荷重  $10\text{kN}$  に対し、木質構造設計規準<sup>13)</sup>を用いて理論的に算出されたひずみである。

解析では、ばね係数  $k$  の値は引抜け量には大きく影響するものの、ひずみに対する影響はほとんどみられない。

解析での  $k=20\text{N/mm}^3$  の結果と実験を比較すると、本解析は実験とよく一致しており、本解析は木部材のひずみを十分に表現できているものと考えられる。

この解析で得られた木部材断面内のひずみ分布を示すと、図-12 のようになる。

図から明らかなように、木部材側面では樹脂の結合により、鋼板に作用する引張力を直接受けるために、大きなひずみを呈しており、側面のひずみは高さ中央で約  $150\mu$ 、上下縁でも約  $130\mu$  となっている。ひずみは断面内部に移るにつれて低下しており、断面の上下面中央で、最小の  $50\mu$  程度まで低減している。

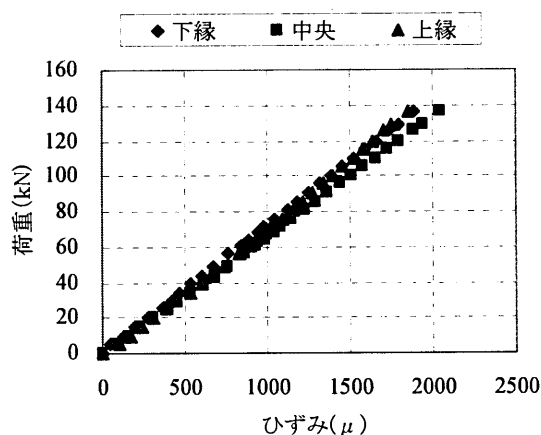


図-10 荷重とひずみの関係

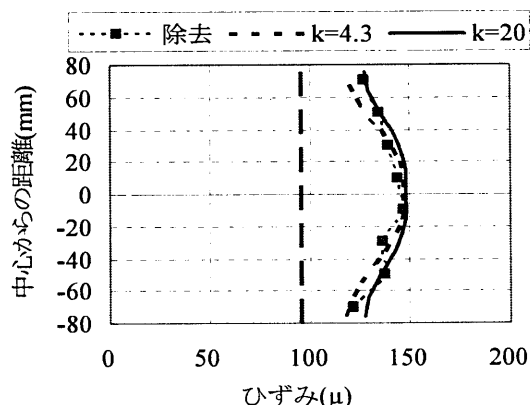


図-11 側面ひずみ分布

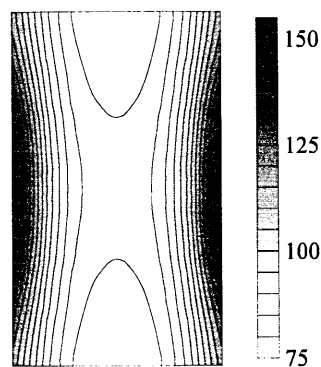


図-12 断面内のひずみ分布 ( $\mu$ )

このように、一定の軸力に対して算出されるひずみに比べて、側面に発生するひずみは50%程度の超過となっている。ただし、この超過率は断面の形状によって変化するものであり、断面形状をパラメータとする解析により、詳細は検討する必要がある。

図-13 は実験で得られた樹脂接合とボルト接合による木部材のひずみ分布を示したものである。

ボルト接合では、図-4 に示す供試体の樹脂の代わりに、ビニールシートを挟んで、木部材と鋼板の摩擦をできるだけ除くようにし、ボルトと木部材のボルト孔は同じ径にした。

ただし、木部材の許容応力に対応するボルト本数は設計では最低9本必要であるため、今回の供試体は設計条件を満足するものとはなっていない。

著者らは先に、ボルト接合においても木部材のひずみ分布は樹脂接合の場合と同様な傾向にあることは既に明らかにしており、このひずみの過大な偏在を緩和する方法も既に提案している<sup>6)</sup>。

その緩和法は図-14 に示すように、木部材の両端にボルトとの非接触部を設けたものである。この非接触部を「テーパ」と称することにする。

図から明らかなように、樹脂接合では滑らかなひずみ変化となるが、ボルト接合ではボルトの支圧力によって、ボルト位置では過大なひずみが生じている。また、テーパを施した場合には、過大なひずみの発生を抑制していることが判る。

今回のボルトは多段に配置したものではないため、樹脂接合とボルト接合の十分な比較とはなっていないことに注意すべきである。文献7) に述べてきたように、多段配置された場合にはボルト1本あたりの分担力が低減されるために、局所的なひずみの発生は小さくなる。

## 5. あとがき

ボルト接合された木部材の鋼ジョイント部では、ボルトと木部材のボルト孔の隙間に充填される樹脂が鋼板と木部材の間にも注入される。よって、樹脂も接合に寄与しているとの観点から、本論文では樹脂接合に対する検討を実験と解析を併用して行ってきた。

ここでは、まず樹脂の付着性状を確認し、次いで樹脂接合された鋼ジョイント部近傍の木部材のひずみ性状を明らかにした。ここで得られて結果を要約すると、以下ようになる。

- (1) 樹脂の付着性状を検討する場合には、実験での鋼板と木部材の接触部の荷重に対する平均的な値では十分ではなく、解析的にも検討する必要がある。
- (2) 樹脂接合においては、鋼ジョイント近傍の木部材には梁理論以上のひずみが発生する。
- (3) 今回使用した解析法は樹脂接合の木部材の挙動を十分に表現できている。
- (4) 今回の主たる課題ではないが、著者らが提案した木部材の両端に設けたテーパ孔は、ボルト接合において、ボルトの支圧力によるひずみの増大化を抑制する有効な方法であることが再確認された。

(ボルト+樹脂)接合では、薄木ら<sup>1)</sup> や著者ら<sup>7)</sup> の研究で明らかなように、載荷当初は樹脂で荷重に抵抗し、樹脂の付着切れが生じた後、突然ボルト接合に移行する。この移行時に接合抵抗

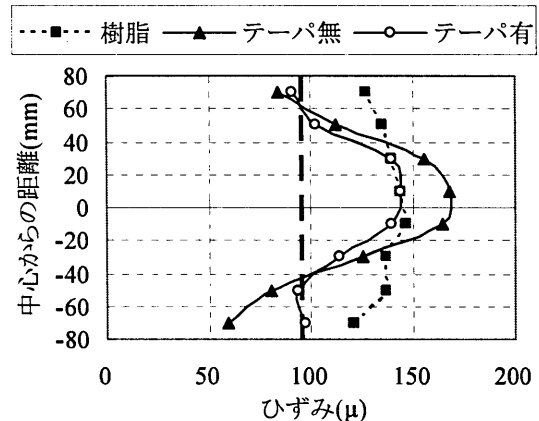


図-13 ボルト接合との比較

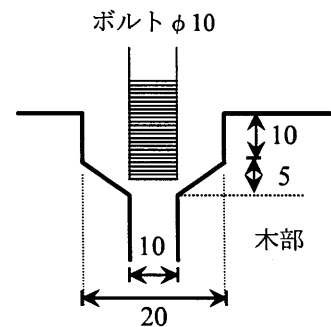


図-14 テーパ

力に差異がないような設計を検討すべきである。また、鋼ジョイント近傍の木部材の過大なひずみの発生も、断面の幅厚やアスペクト比などにより大きく変化するはずである。

今後は、断面の形状などをパラメータとする解析を実施して、このような問題を明らかにしていく必要があるものと考えている。

#### 参考文献

- 1) H. Johnsson and L. Stehn : A Linear Fracture Mechanics Evaluation of Plug Shear Failure, 8<sup>th</sup> World Conference on Timber Eng., pp.253-258, 2004
- 2) 渡辺浩、飯村豊、樋口友三、山田朗央：木橋における集成材ボルト接合部の繰返し挙動に関する実験的研究、第4回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集、pp.95-100、2005
- 3) M. Reid, J. Shin and P. Quenneville : Capacity Predictions for One and Two-row Bolted Timber Connection, 8<sup>th</sup> World Conference on Timber Eng., pp.275-280, 2004
- 4) 薄木征三、佐々木貴信、長谷部薫、大原真也：鋼板、樹脂およびピンによる集成材主桁の接合、構造工学論文集、Vol.44A、pp.1241-1250、1998
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 今井富士夫、村上弥生、間瀬英男、飯村豊、中澤隆雄：接合法の違いによる鋼ジョイント近傍の木部材の力学性状、構造工学論文集、Vol.52A、pp.829-836、2006
- 8) 村上弥生、今井富士夫、中澤隆雄、間瀬英男、飯村豊：樹脂接合による鋼ジョイント近傍の木部材の応力性状に関する研究、第5回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集、pp.95-100、2006
- 9) 飯村豊：オビスギの利用技術、第7回木の建築フォーラム／都城・スギシンポジウム 2004、pp.16-39、2004
- 10) JAS：構造用集成材の日本農林規格、(社)日本合成検査会、pp.12-47、1996
- 11) (社)土木学会鋼構造委員会木橋技術委員会、木橋の手引き 2005、pp.84-97、2005
- 12) 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ト木床版の曲げ試験と解析、構造工学論文集、Vol.50A、pp.847-854、2004
- 13) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説、2003