

## ボルト孔に充填された樹脂の木部材のボルト接合への補強効果

### Effect of Reinforcement on Timber-Steel connection of Resin injected into Bolt hole

○上田亜矢子\* 今井富士夫\*\* 中澤隆雄\*\* 飯村豊\*\*\*

UEDA Ayako, IMAI Fujio, NAKAZAWA Takao and IIMURA Yutaka

- \* 宮崎大学大学院工学研究科修士課程 (〒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)
- \*\*\* 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** Large-scale members of modern timber bridge were connected with steel plates with a lot of bolts and resin was filled into the clearance between bolt and bolt hole to prevent the backlash caused by the clearance. It is considered that the resin contributes to reinforcement of the bolt hole in the member. The tests in this study were carried out to clarify the mechanical properties of such a bolted timber connection under static incremental and cyclic load. Test results show that ultimate load of the connection under cyclic load decreased about 30% than that under the incremental load and the filling of resin into the clearance improved the ultimate load.

**Keywords** : 集成材、鋼ジョイント、樹脂、補強

*glued laminated timber, timber-steel connection, resin, reinforcement*

### 1. まえがき

近年、自然との共生が望まれるなか、「木構造物」が注目されている。木材は人間が生活する環境に対して負荷が少なく、再生産が可能な循環型資源である。また、CO<sub>2</sub>削減などの面でも大きな役割を果たしており、「エコマテリアル」とも呼ばれている<sup>1)</sup>。

森林資源が豊富な日本では、古くから木材を利用した構造物が多く造られ、現在では地球環境問題などの環境面においても、大量消費型社会から低環境負荷社会への転換が望まれており、その中でも循環型資源である木材は、性能や効能に大きな期待が寄せられている。さらに、集成材技術の発展により、品質の信頼性が高い集成材が得られるようになったため、それらを利用することにより、多数の道路橋が建設されるようになってきた<sup>2)</sup>。

集成材は無垢の木材に比べ、割げや節などの狂いが少なく、大断面や長尺、湾曲など任意の形状や寸法のものを作ることができるうえに、大きな強度が期待できることが知られている。木橋の一般的な設計には、建築分野に使用される比較的小さな断面を有する部材を対象とした木質構造規準<sup>3)</sup>などが準用されてきたが、最近、土木学会から「木橋技術の手引き 2005」も刊行され<sup>4)</sup>、木橋の設計・施工・保全に対する仕様も示されるようになってきている。しかしながら、このような基準による応力照査には、大断面化に伴う断面内の2次元的に変化する応力分布性状を考慮できない骨組解析で得られた応力を使用しているのが現状である。さらに、木部材と鋼ジョイントとの連結には、鋼ボルトやドリフトピンを利用する機会が多いが、木材が鋼に比べて柔らかいため、鋼橋では一般的な摩擦接合は適用できず、ボルトのせん断による支圧接合とならざるを得ないが、支圧接合では木材が柔らかいため、ボルト近傍の木部材には極端な応力集中も発生

する。

鋼ジョイントに関する研究は、鋼ジョイント部全体の耐荷力について検討したもの<sup>5)</sup>や破壊形式について行われたもの<sup>6)</sup>に加えて、非弾性解析による挙動解明もなされてきている<sup>7), 8)</sup>。

さらに、接合部の耐荷力を決定付ける要因の1つに、ボルトの木部材への埋め込みがあり、よって木部材のボルト孔を補強する研究も見受けられる<sup>9), 10)</sup>。

木橋のように大型部材を使用する場合、その接合には多数のボルトが必要となる。多数のボルトを使用するとき、ボルトのねじ部の損傷やボルト孔の裂けを防ぐために、木部材のボルト孔はボルトよりも大きく穿ち、その隙間によるガタを防止するために、隙間には樹脂を充填する工法が採用される場合がある。この施工での充填樹脂は木部材のボルト孔を補強する効果が期待される。

図-1 は実橋の施工で使用された樹脂充填方法を示したものである。この工法によれば、鋼ジョイントの鋼板と木部材との接触面にも樹脂が充填されている。著者らは、先に実橋での樹脂充填法を用いた接合部における鋼板と木部材の接触面に注入された樹脂独自の付着性状や鋼ジョイント部近傍の木部材に与える影響について実験的・解析的に検討してきた<sup>11)</sup>。

また、ボルト孔へ充填された樹脂の補強効果を明らかにするために、2列かつ1列あたり3本のボルト接合された供試体による実験を実施して、樹脂のボルト孔に対する補強効果や繰返し荷重の影響について明らかにした<sup>12)</sup>。

本論文では、上記の樹脂効果や繰返し荷重の影響について、2列・1本/列の供試体による実験結果を報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

本実験で使用した供試体を図-2 に示す。木部材は、E75-F240 の宮崎県産オビスギ集成材（気乾比重：0.32）で、どの供試体も一様に、全長 1500mm、断面は高さ 100mm×幅 160mm としている。鋼ジョイントに相当する鋼板は、板厚 16mm、使用したボルト（ $F=240\text{N/mm}^2$ ）のボルト径  $\phi 16\text{mm}$  とし、図-2 の右側のように、2列・1本/列で木部材と接合している。木部材の純区間は 930mm で、木部材と鋼板との接触面の荷重方向の長さは 285mm である。図-3 に、今回使用した集成材のラミナの配分を示している。8層からなる異等級対称モデルで、各層の厚さは全て等しく 20mm で、上下縁部から中央に向かって L90、L70、L50 となっている。

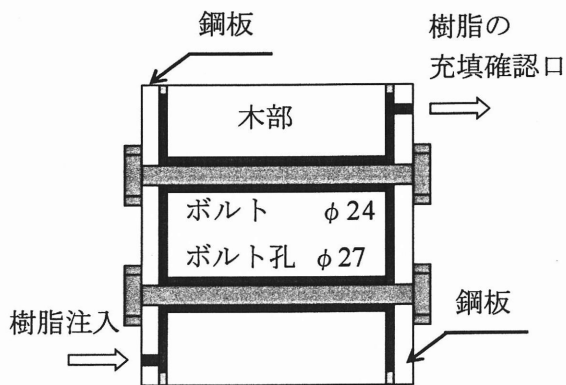


図-1 実橋での樹脂充填状況

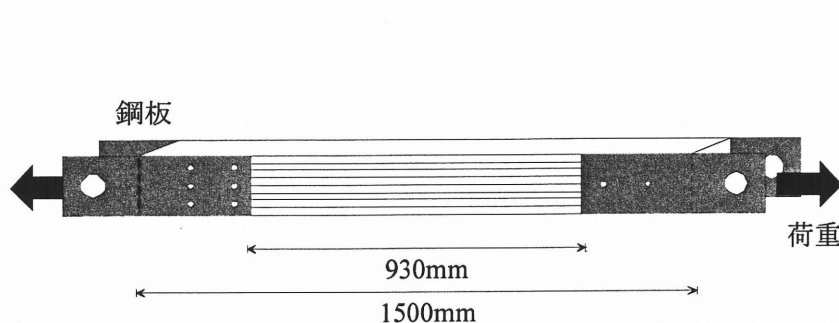


図-2 供試体正面図

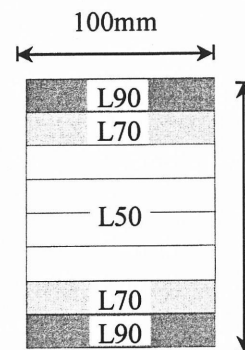


図-3 ラミナの配分

表-1 に、本実験で使用した木部材とボルトの基準強度を示す。 $F_t$  と  $f_t$  は引張りに対する木部材の基準材料強度と基準許容応力度、 $A$  と  $A_n$  は総断面積と純断面積、 $P_a$  と  $P_t$  は、純断面積  $A_n$  で計算した木部材の許容耐力と終局耐力である。また、 $m$  はボルトの本数、 $P_{ba}$  はボルト 1 本あたりの許容せん断耐力、 $F_{ba}$  はボルト 2 本の許容せん断耐力、 $F_y$  はボルトの降伏耐力である。

表-1 木部材とボルトの基準強度

木部材(E75-F240)					
$F_t$	$f_t$	$A$	$A_n$	$P_a$	$P_t$
(N/mm <sup>2</sup> )		(mm <sup>2</sup> )		(kN)	(kN)
15.0	5.0	16000	14400	72	216
ボルト( $\phi 16$ mm, $F=240$ N/mm <sup>2</sup> )					
b/d	m	$P_{ba}$	$F_{ba}$ (kN)		$F_y$
		(kN)	長期	短期	(kN)
6.25	2	9	18	36	54

供試体は全部で 4 体とし、打込み型を 2 体、樹脂型を 2 体作成した。ここでの打込み型とは、接合部のボルトとボルト孔の径が等しく、ボルト挿入の際にボルトを打込んだものである。ボルトの径は  $\phi 16$ mm である。また、樹脂型とは、図-4、5 に示すようにボルト孔をボルト径  $\phi 16$ mm よりも 4mm 大きい  $\phi 20$ mm であけ、隙間によるガタを防ぐため、ボルト孔とボルトとの隙間にエポキシ樹脂を注入したものである。樹脂は、ボルト孔全てに十分に充填され、強度が出ていることを確認してから、実験を行った。写真-1 は、実験での供試体の設置風景を示したものである。

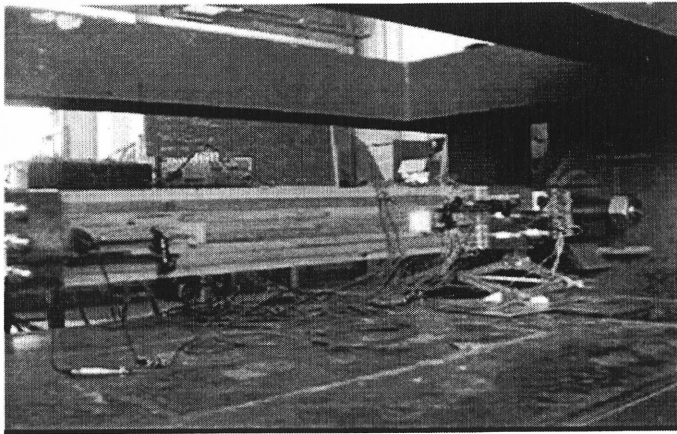


写真-1 実験風景

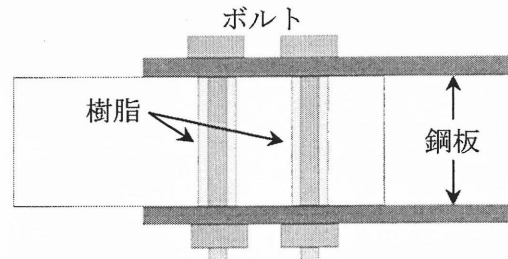


図-4 供試体上面部

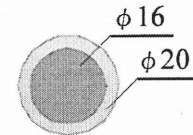


図-5 樹脂充填状況

## 2.2 荷重方法と測定項目

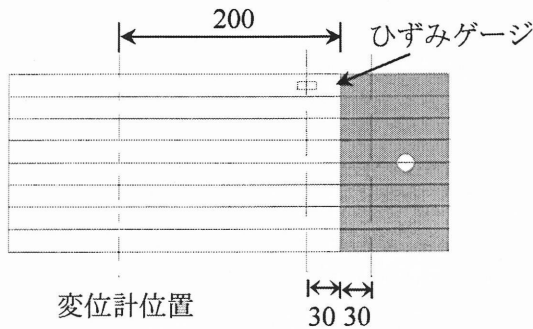
本実験は、荷重方法として漸増と繰返しによる引張荷重を負荷するものとした。繰返し荷重での荷重ステップは、木部材の短期許容ボルト耐力の約 65% の  $P=25$ kN を基準として、 $P_1=25$ kN、 $P_2=1.5P_1$ 、 $P_3=1.5P_2$  と予定し、荷重回数は 3 回繰返すのが基本とされているが<sup>4)</sup>、繰返し荷重による影響を明確に把握するために、5 回を繰返すことにし、5 回繰返し時に 4 回目との引抜け量の差が 0.01mm 以下となった場合に次のステップへと移行するようにした。表-2 に本実験での荷重ステップを示す。荷重は、木部材の両側面に配置した鋼板の開口された  $\phi 64$ mm の孔に  $\phi 60$ mm の大ボルトを挿入し、このボルトの中央点に作用させた。

表-2 荷重ステップ

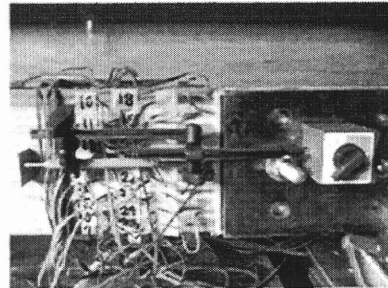
	打込み型	樹脂型
1回目	0-25(1)	0-25(1)
	10-25(4)	10-25(4)
2回目	10-50(5)	10-35(5)
3回目	10-60(5)	10-45(5)
4回目	10-70(7)	10-55(5)
5回目	—	10-65(7)

供試体の測定部は、図-2 のボルトが 1 本/列に配置された右側のみである。また、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より早く起こらないように、配列を 2 列 (3 本/列) としている。

測定項目は、木部材の鋼板からの引抜け量と鋼板端部近傍の材軸方向のひずみで、**図-6**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との相対変位をデジタル変位計(500 $\mu$ /mm)にて、ひずみは木材側のボルトから30mmと90mmの箇所、言い換えると鋼板端部から木部材中央側に30mm、ボルト側に30mmの箇所、2箇所の上下面と側面に貼付したひずみゲージにて測定した。**写真-2**は、実際の測定状況を示している。



**図-6** 変位計設置位置とひずみゲージ貼付位置



**写真-2** 測定状況

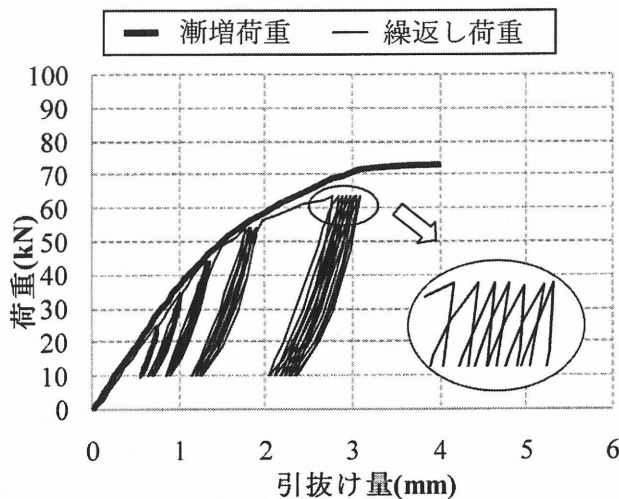
### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 引抜け量

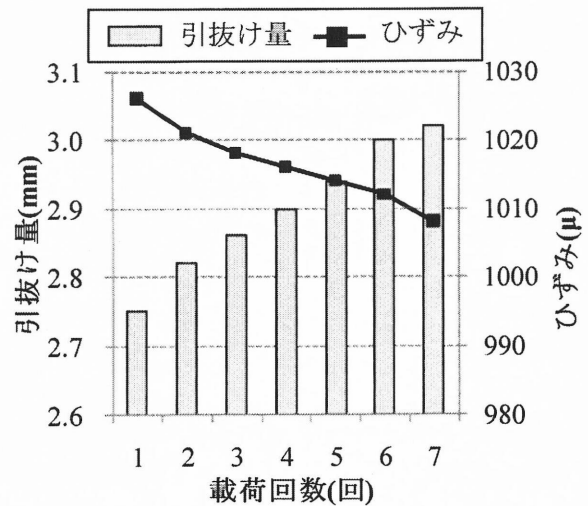
**図-7**と**図-9**は、打込み型と樹脂型のそれぞれの荷重と引抜け量の関係を示したものである。図中の太線は漸増荷重、細線は繰返し荷重による引抜け量を示している。繰返し荷重の引抜け量については、荷重-引抜け曲線の右下側に最終ステップの最大値を拡大しており、載荷回数に対する引抜け量やひずみの詳細については**図-8**と**図-10**に示している。

繰返し荷重による引抜け量は、最終ステップで5回繰返したときも、最大引抜け量の差が0.01mm以下にならず(**図-7**、**9**右下拡大図参照)、最大引抜け量は増加する傾向を示した。載荷は5回行った以降も、さらに2回行い、引き抜け量が增大することから、漸増崩壊(Incremental collapse)に至ったと考えた。また、繰返し荷重については、それぞれのステップにおける載荷回数による引抜け量とひずみを比較すると、第4ステップまでは、載荷回数とともに引抜け量やひずみも増

加したが、最終ステップでは、**図-8**や**図-10**に示すように、引抜け量は増加したが、ひずみは



**図-7** 荷重引抜け曲線(打込み型)



**図-8** 最終ステップにおける引抜け量とひずみの変化

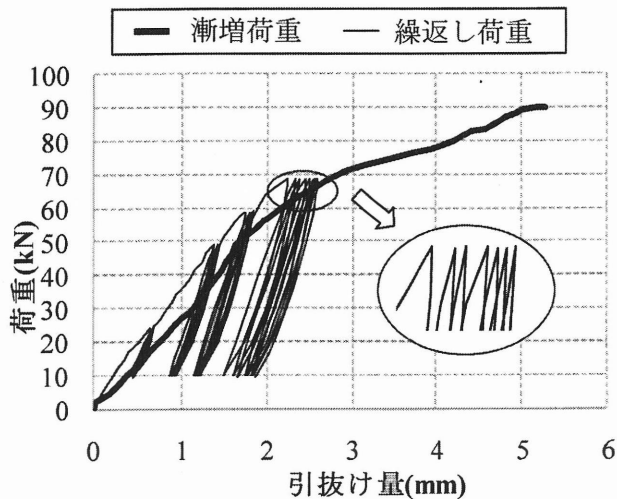


図-9 荷重引抜け曲線  
(樹脂型)

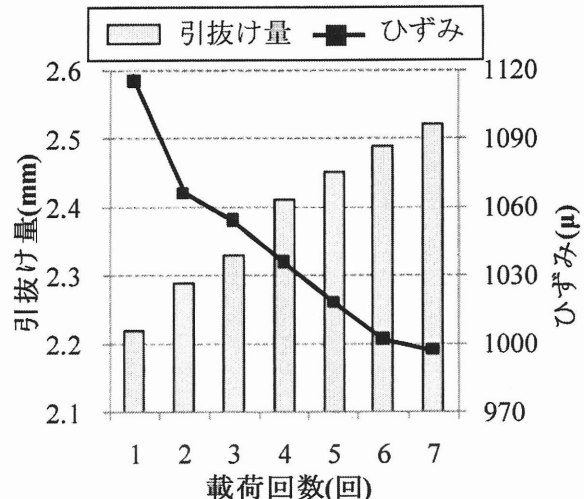


図-10 最終ステップにおける  
引抜け量とひずみの変化

減少している。これは、ボルトがボルト孔に食い込む、いわゆる埋込み崩壊 (Embedded failure) に至ったものと考えられる。そのため、最終ステップの荷重を終局荷重としたが、繰返し荷重での終局引抜け量はその決定法が曖昧なため、以後は特に論じないことにする。

### 3.2 終局荷重と破壊形式

表-3 に各供試体の終局荷重とその破壊形式を示す。ボルト接合の配列が1本/列とする場合、表-1 よりボルトの設計耐荷力は54kNであるから、全ての供試体が設計耐荷力を満足していることがわかる。

供試体の形式で終局荷重を比較すると、終局荷重に対して樹脂が与える影響は、1.1~1.3倍であることがわかる。これは、ボルト孔に樹脂が充填される際に、樹脂がボルト孔周辺の木部材に含浸したため、ボルト孔周辺が補強されたためだと考えられる。また、載荷方法の違いで終局荷重

表-3 終局荷重とその比較(2列・1本/列)

形式	載荷方法	終局荷重(kN)	樹脂/打込み	繰返し/漸増	破壊形式
打込み	漸増	72	-	-	埋込み破壊
	繰返し	64	-	0.89	埋込み破壊
樹脂	漸増	90	1.3	-	埋込み破壊
	繰返し	72	1.1	0.80	埋込み破壊



写真-3 破壊状況(埋込み破壊)

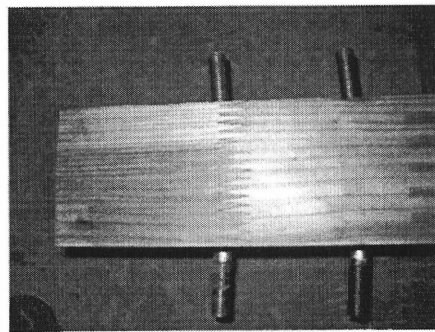


写真-4 ボルト変形状況

を比較すると、繰返し荷重が終局荷重に与える影響は0.8~0.9倍となっており、荷重の繰返しによって、供試体の耐荷力は低下する。

写真-3は破壊状況を示している。また、写真-4はボルトの変形状況で、ボルトが降伏状態を超え、曲げ変形を起こしていることがわかる。

### 3.3 ひずみ分布

図-11と図-12に木側面部で測定された材軸方向の高さ方向についてのひずみ分布を示す。測定位置は鋼板縁端から木部材中央側に30mmの箇所で、ひずみゲージを使用し、木部材表面のひずみを測定した。測定されたひずみは、図-11(a)は25-35kN、(b)は第1ステップ(0-25kN)の初期荷重、図-12(a)は60-70kN、(b)は最終ステップ(打込み型:10-70kN、

表-4 集成材とラミナの規格  
単位(N/mm<sup>2</sup>)

集成材		圧縮	引張	曲げ
		6500	6500	7500
ラミナ	L50	4900		
	L70	6900		
	L90	8800		

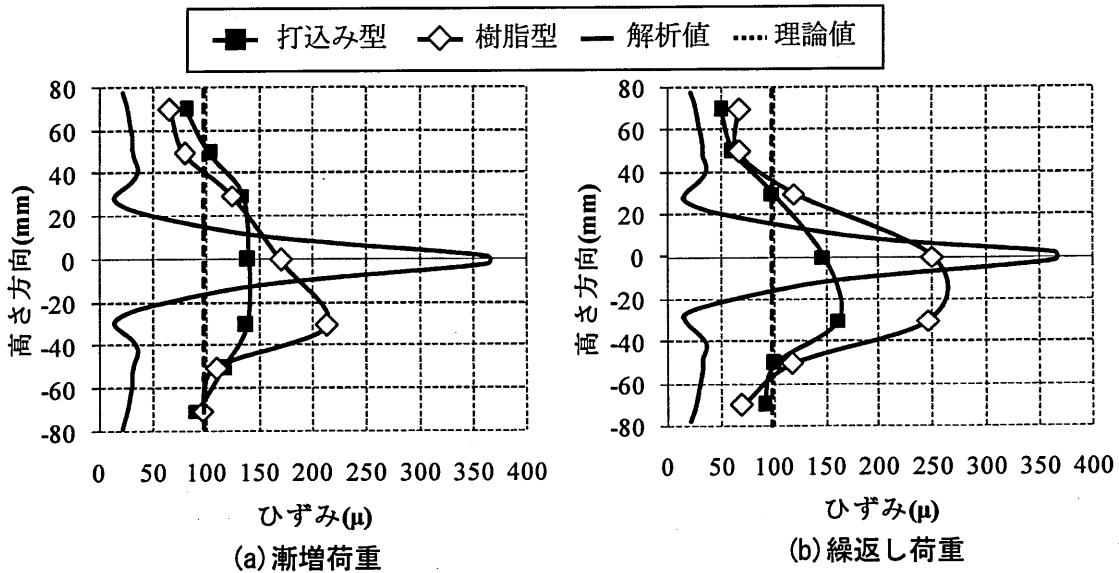


図-11 ひずみ分布(初期荷重近傍)

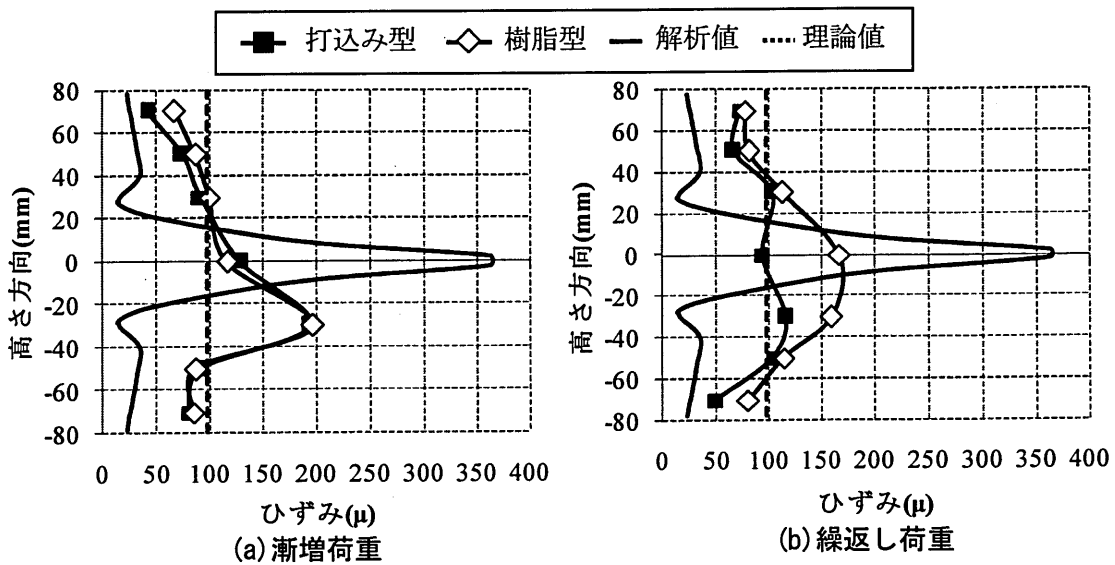


図-12 ひずみ分布(終局荷重近傍)



樹脂型：10-65kN) の初期荷重のひずみを、10kN あたりに換算したものを使用している。図中の解析値とは解析ソフト DIANA を利用した弾性解析で得られた荷重 10kN あたりのひずみで、理論値とは集成材としての弾性係数 6500N/mm<sup>2</sup> (表-4 参照) の引張力 10kN に対する平均ひずみで、96 $\mu$  である。

どの場合も、実験値・解析値共にボルト位置で突出しており、ボルト位置の木部材には過大な応力集中が起こっていることが分かる。打込み型と樹脂型とで比較してみると、樹脂型は特にボルト位置での突出が大きいように思われる。これは、樹脂がボルト孔周辺の木部材に含浸し、ボルト孔周辺の木部材が硬化したためであると考えられる。また、荷重ステップが上がっていくにつれて、ひずみが平均化していき、ほぼ理論値の 96 $\mu$  と等しくなっている。これは、3.1 でも述べたとおり、ボルトがボルト孔に食い込んでいき、埋込み崩壊を起しているためだと考えられる。

### 3.4 多段ボルト配置での終局荷重と崩壊形式<sup>12)</sup>

著者らは先に、2列・3本/列の供試体の実験も実施しており、樹脂の効果を明確にするため、その結果についても提示する。

表-5 に多段ボルト配置での終局荷重とその破壊形式を示した。配列が 3 本/列の場合、ボルトの設計耐荷力は 162kN で、打込み型の供試体に繰返し荷重を載荷した場合を除く、全ての供試体が設計耐荷力を満足していることがわかる。

3.2 の 1 本/列の場合と同様に、供試体の形式で終局荷重を比較すると、終局荷重に対して樹脂が与える影響は、1.3 倍で、載荷方法の違いで終局荷重を比較すると、繰返し荷重が終局荷重に与える影響は、0.8 倍であることがわかる。

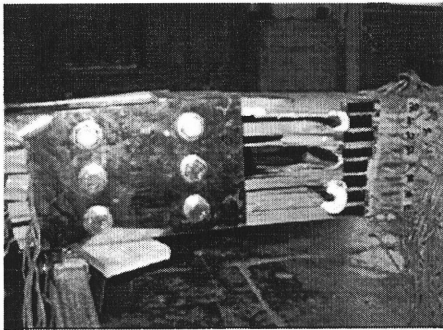


写真-5 プラグ破壊

このことから、終局荷重は、ボルトの本数に関係なく、ボルト孔に樹脂を充填した場合は 1.3 倍、繰返し荷重を載荷した場合は 0.8 倍となることがわかる。しかし、さらに本数を増やした場合の検討も必要だと考える。

また、樹脂型供試体の繰返し載荷では、写真-5 に示すようなプラグ破壊を呈したが、残りの供試体はボルト 1 本配列と同様に埋込み破壊であった。

表-5 終局荷重とその比較(2列・3本/列)

形式	載荷方法	終局荷重(kN)	樹脂/打込み	繰返し/漸増	破壊形式
打込み	漸増	190	-	-	埋込み破壊
	繰返し	151	-	0.79	埋込み破壊
樹脂	漸増	253	1.3	-	埋込み破壊
	繰返し	199	1.3	0.79	プラグ破壊

## 4. まとめ

多数のボルトによる大断面集成材のボルト接合では、ボルトの破損を避けるために、ボルト孔はボルト径よりも大きくされており、ボルトとボルト孔の隙間によるガタを防止するために、その隙間に樹脂が充填される場合がある。また、最近の研究には接合部の強度を向上させるために、ボルト孔への様々な補強方法も提案されている。

本研究ではボルト孔に樹脂を充填するような工法が使用されるとき、樹脂は単にガタ防止だけではなく、樹脂がボルト孔の周囲の木材に含浸して、ボルト孔の補強に寄与するであろうと充分考えられる。そこで、本論文では、鋼ジョイント部についてボルト孔に充填された樹脂の木部材のボルト接合への補強効果について検討を行った。

本研究の結果を整理すると以下ようになる。

- (1) ボルト孔に樹脂を注入すると、樹脂がボルト孔周辺の木部材に含浸し、ジョイント部の耐荷力が30%程度向上する。
- (2) 繰返し荷重下では、漸増荷重に比べて、ボルトが木に食い込み、耐荷力が20%低下する。
- (3) 木部材側面のひずみは、載荷初期にはボルト位置での突出が目立つが、載荷回数が増加とともに、その突出は低減する。

## 5. 参考文献

- 1) 有馬孝禮：エコマテリアルとしての木材、木質材料小特集、Vol.43, No.485, pp.127-136, 1994
- 2) 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
- 3) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説、pp237-245, 317-345, 2003
- 4) 土木学会鋼構造委員会木橋技術小委員会：木橋技術の手引き 2005
- 5) 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検討、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
- 6) Helena JOHANSSON・Lars STEHN：A Linear Fracture Mechanical Evaluation of Plug Shear Failure、8<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering、2004
- 7) 辻野哲司・竹内則雄・平井卓郎：木材のボルト及びドリフトピン接合部のせん断耐力解析（第4報）=剛体-ばねモデルの適用に関する予備的な試み= Vol.50, No.3, pp.176-182, 2004
- 8) Reid M.S・Shin J・Quenneville P：Capacity Prediction for One and Two-row Bolted Timber Connections、8<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering、2004
- 9) Masafumi INOUE・Yuko SIRAOKAWA・Kei TANAKA・Zhongwei Guan：Study on Reinforcement around Bolt Hole at Fastener Joint Timber Structure、9<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering、2006
- 10) Thomaz LODYGOWSKI・Marcin GLAPIAK：THE CHANGE OF TIMBER JOINT RIGIDITY UNDER CYCLIC LOAD、Found of Civil and Environmental Engineering、2006
- 11) 今井富士夫・村上弥生・間瀬英男・飯村豊・中澤隆雄：鋼ジョイント部に注入された樹脂の木部材への影響、第6回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集、pp.73-80, 2007
- 12) Fujio IMAI・Takao NAKAZAWA・Yutaka IIMURA：Influence of Resin injected into Bolt Hole on Mechanical Properties of Timber-Steel Connection、10<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering、2008
- 13) 森林総合研究所：木材ハンドブック改訂4版、2004