

ボルト孔に充填された樹脂がボルト接合部の耐荷力に与える影響

Effect of resin injected into bolt hole on strength of bolt joint

○上田亜矢子* 今井富士夫** 中澤隆雄** 尾上幸造** 飯村 豊***

UEDA Ayako, IMAI Fujio, NAKAZAWA Takao, ONOUE Kozou 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 The members of a timber truss bridge were sometimes 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. The effect is not reflected in the standard though it is known that the resin contributes to the improvement of the loading capacity of the joint. The tests in this study were carried out to clarify the effect of resin under static incremental and cyclic load. Test results show that the filling of resin into the clearance improved the loading capacity of the joint and the loading capacity approximately agreed with the one of only the bolt with same diameter as the hole for filling the resin.

Keywords : 集成材、ボルト接合部、樹脂、耐荷力

glued laminated timber, bolt joint, resin, ultimate tensile strength

1. まえがき

近年、環境問題が大きく取り上げられているなかで、木材はCO₂削減による温暖化防止に寄与できる「エコマテリアル」として見直されている。木橋も木構造物を代表するものであるが、公共投資の低下とともに木橋架設が減少しているのも事実である。木橋の活用を広げるためには、環境面に加えて、耐久性や設計の合理性を高めることが必要となる。

木道路橋のように大型部材を使用する場合、その接合に鋼板を添接材として使用することも多く、連結には多数のボルトが使用される。ボルトを使用するときには、ボルトのねじ部の損傷や木部材のボルト孔の裂けを防ぐために、ボルト孔はボルトよりも大きく穿ち、その隙間にはガタを防止するために、樹脂を充填する工法が採用される場合がある。図-1は実際の木トラス橋の施工で使用された樹脂充填法を示したものである¹⁾。この工法はボルト径d24に対して径27mmのボルト孔を穿ち、その隙間に樹脂を充填するもので、下側の樹脂注入口から樹脂を注入し、上の充填確認口から樹脂が出てきたら全体に充填されたとするものである。このため、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。

このような充填樹脂が木部材の接合部の耐荷力を向上させることは手塚らの研究によって、既に明らかになっている。手塚らは1986年から木部材の中央に鋼板を挿入したモデルを対象に樹脂充填接合について研究しており^{2)~3)}、樹脂充填が耐荷力や剛性の向上に寄与していることやL/dの影響、温度が樹脂に与える影響などを検討してきたが、その効果は設計仕様には反映

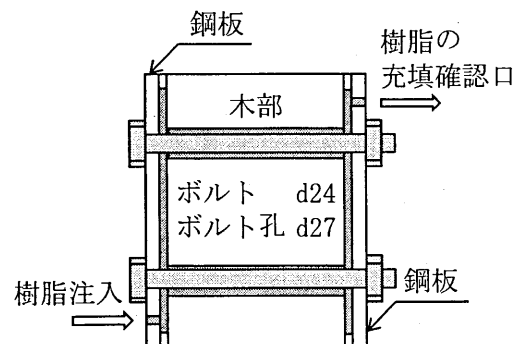


図-1 実橋の充填状況

されていないのが現状のようである。

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と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⁴⁾。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3列2本や1列2本のボルト接合された供試体による実験を実施して、樹脂はボルト孔に対する補強に効果があることを明らかにしてきた^{1), 5)}。鋼ボルト（ドリフトピン）の接合に関して、木部材のボルト孔補強を樹脂以外の材料を使用した研究も見受けられる⁶⁾。

本論文は充填樹脂の効果を設計に反映することを目的に、図-2 に示すように、樹脂を充填したボルトの耐荷力とボルト孔（樹脂充填用）と同等な直径を有するボルトの耐荷力の比較を試みる実験を実施し、両者の耐荷力が等しくなるとの仮定が成立するか否かをも含めて、検討した結果を報告するものである。

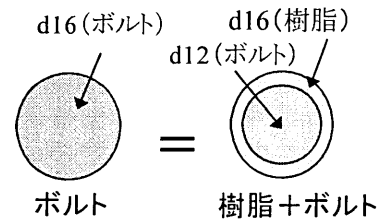


図-2 今回の実験

2. 実験概要

2.1 供試体

本実験で使用した供試体を図-3 に示す。木部材は同一等級（E60）の南九州産スギ集成材（気乾比重 0.32）で、どの供試体も一様に全長 1500mm、断面は高さ 160mm×幅 100mm、木部材の純区間は 900mm、木部材と鋼板との接触面の載荷方向の長さは 300mm である。今回使用した集成材は6層のラミナからなっており、各層は等厚さである（図-4）。また、鋼ジョイントに相当する鋼板は、板厚が 12mm、使用したボルト（ $F_y=235\text{N/mm}^2$ ）の径は d12、d16 の2種類とし、図-3 のように3列2本で木部材と接合している。ボルトの配置は木質構造設計規準・同解説⁷⁾より設計しており、その詳細は図-5、表-1 に示す。

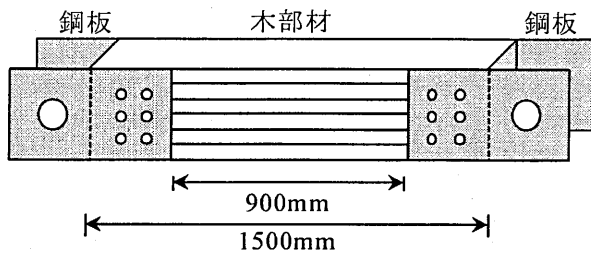


図-3 供試体正面図

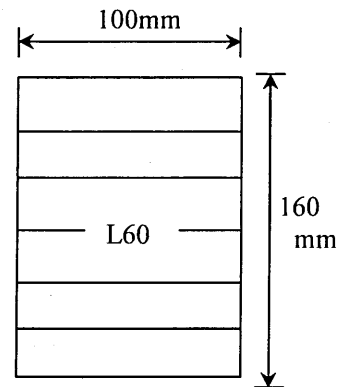


図-4 ラミナの配分

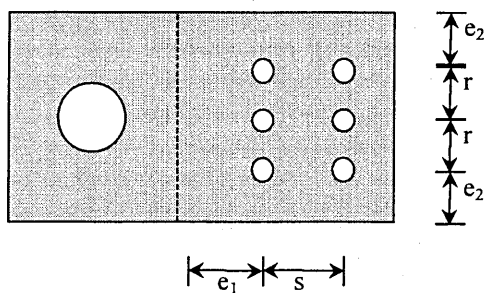


図-5 ボルト配置

表-1 ボルト配置

規準			d16	設計
材端距離	e_1	7d		
ボルト間隔	s	7d	112	120
縁端距離	e_2	1.5d	24	30
ボルト列間隔	r	3d	48	50

以上

mm

本研究の目的は、充填された樹脂の効果を設計に反映できるように、具体的に検討することである。そこで、本実験で作成した供試体は表-2 に示すような3種類を用意した。すなわち、(1) 打込み型 (d12) : d12mm の木部材のボルト孔に同じ径のボルトを打込んだもの、(2)打込み型 (d16) : d16mm の木部材のボルト孔に同じ径のボルトを打込んだもの、(3)樹脂型 (d12) : 16mm のボルト孔に d12mm のボルトを挿入し、その隙間には樹脂を充填したものの3種類である。なお、樹脂充填には鋼板と木部材の間には樹脂が入り込まないようにしており、さらに木部材と鋼板との間の摩擦を切るために、その間には薄いビニールシートも挿入している。また、ボルトはレンチで軽く締め付けた程度である。今後は締め付け力の管理も必要と考えている。

表-2 供試体の種類

供試体の呼称	ボルト径	ボルト孔径	樹脂充填	供試体本数
	(mm)	(mm)		
打込み型(d12)	12	12	無	2
打込み型(d16)	16	16	無	2
樹脂型(d12)	12	12	有	2

表-3 設計耐力(kN)

	ボルト	木部材		鋼板
	降伏せん断	せん断破壊	引張耐力	引張強度
	P_{uj}	P_{uw}	P_{ut}	F_{st}
d12	114	131	213	2914
d16	202	117	192	2632

表-3 は木質構造設計基準⁷⁾に基づいて計算された供試体の設計耐力である。基準では、(1) 木材が破壊しないと仮定した場合のボルト接合部の基準終局耐力 (P_{uj})、(2) 集合型せん断破壊による終局耐力 (P_{uw})、(3) 木材の引張りに対する終局耐力 (P_{ut})、(4) 鋼板の引張強度 (F_{st}) の4つの耐力のうち、最小の値が設計耐力となる。ここで、(1)はボルトによる耐力で、(2)は木材のプラグ破壊などに相当する耐力、(3)と(4)はそれぞれ木部材と鋼板の純断面から計算される引張耐力である。

供試体の設計では d12 と d16 の使用ボルトについて、いずれもボルト耐力が最小となるように考えていたが、d16 のボルトでは計算ミスもあり、木部材のせん断破壊が支配的な耐力となっている。

2.2 荷重方法と測定項目

本実験での荷重は静的引張荷重で、漸増と繰返し荷重を載荷した。荷重は木部材の両側面に配置した鋼板に開口されたφ64の孔にφ60の大ボルトを挿入し、このボルトを負荷するものである(図-3と後述の図-6)。写真-1は実験の全景を示したものである。

繰返し載荷法は木質構造設計基準・同解説 2007⁷⁾に記載されているが、繰返しの規定は変位となっている。本実験の載荷は手押しの油圧ジャッキを使用しているため、変位制御は難しい。そこで、本実験の載荷は荷重制御とし、繰返し実験の前に実施した漸増試験と設計規

表-4 荷重ステップ(単位:kN)

	打込み		樹脂
	d12	d16	d12
1	0-5 (1)	0-5 (1)	0-10 (1)
2	5-10 (1)	2.5-15 (1)	5-15 (1)
3	5-20 (1)	2.5-20 (1)	5-25 (1)
4	5-30 (1)	5-25 (1)	5-40 (1)
5	5-40 (1)	5-50 (3)	5-50 (1)
6	5-70 (3)	5-100 (3)	5-100 (3)
7	5-110 (3)	5-150 (3)	5-140 (3)
8	5-160 (3)	5-200 (3)	5-180 (3)

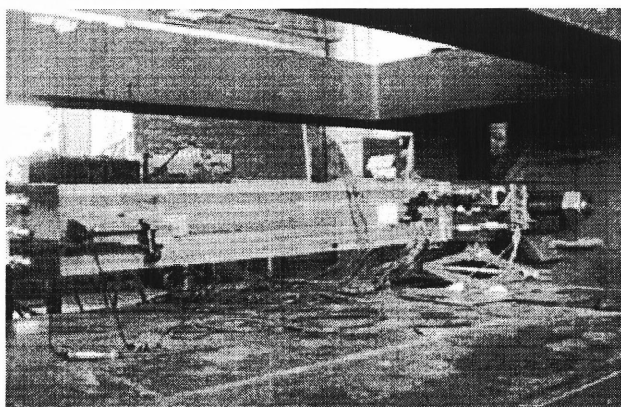


写真-1 実験風景

準を参考に、表-4に示すような荷重ステップとした。

実験での測定部は図-3の供試体の固定側（左側）のみとし、測定項目は木部材の鋼板からの引抜け量（以後、変位と称す）とボルト間の木部材のひずみである。

変位は図-6に示すように、木部材縁端から500mm離れた箇所に設置されたデジタル変位計（ $500\mu\text{m}/\text{mm}$ ）にて木部材と鋼板との相対変位で、ひずみは鋼板から180mm離れた位置の木部材の上下面と側面に、ひずみゲージにて測定した（図-7参照）。

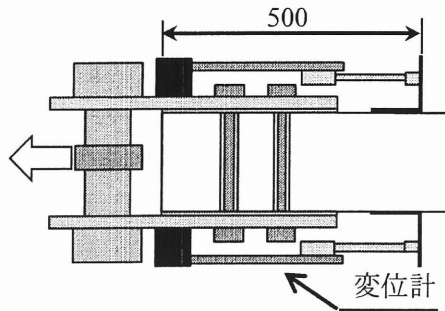


図-6 変位計設置位置

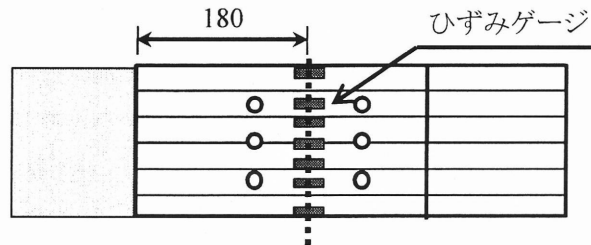


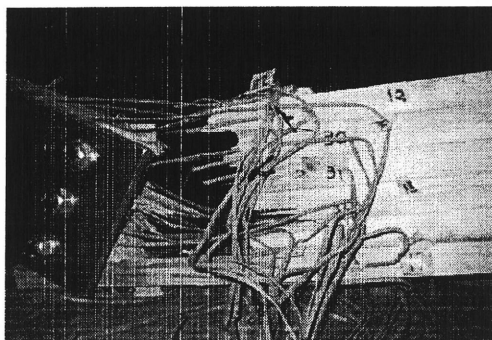
図-7 ひずみゲージ貼付位置

3. 実験結果と考察

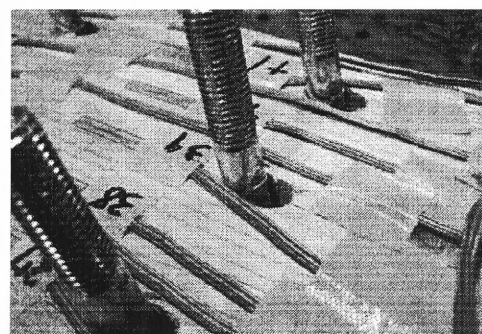
3.1 破壊形式と耐荷力

今回の実験では写真-2に示すように2種類の破壊形式が表れた。1つは写真-2(a)のような木部のせん断破壊形式、もう1つは写真-2(b)のように、ボルトが木部に食い込み、ボルトが曲げ降伏する破壊形式である。

写真-3は実験終了後に木部材からボルトを取り出して、ボルトの最終状況を確認したも



(a)木部材の破断



(b)ボルトの食い込み

写真-2 木部材の破壊状況

ので、写真右端のボルトは使用していないボルトである。未使用ボルトとの比較から明らかなように、木部材中央点に大きな曲がりが生じていることが判る。また、充填樹脂とボルトあるいは木部材との接着（付着）状況は、樹脂とボルトとの間はほとんど付着していなかった。樹脂と木部材とは十分な接着が認められた。このことは星井らの検討と一致する¹⁰⁾。

表-5は今回の実験で得られた終局荷重と破壊形式についてまとめたものである。表中の「設計値と

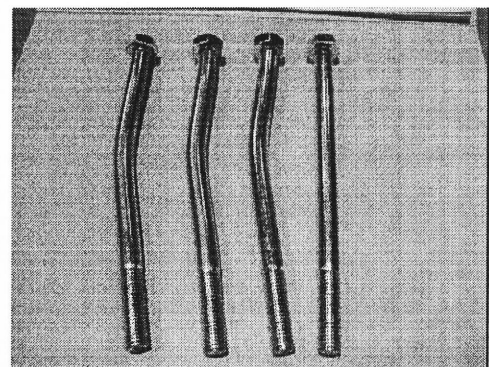


写真-3 ボルトの終局状況

表-5 実験で得られた終局荷重と破壊形式

形式	ボルト径	载荷方法	供試体	終局荷重	破壊形式	設計値との比較 ^{*1)}	d16の設計値との比較 ^{*2)}
				(kN)			
打込み	d12	漸増	①	146	ボルト破壊	1.28	0.72
			②	140	ボルト破壊	1.23	0.69
		繰返し	①	127	ボルト破壊	1.11	0.62
			②	147	ボルト破壊	1.29	0.73
	d16	漸増	①	205	ボルト破壊	1.01	1.01
			②	165	木部せん断破壊	1.41	—
		繰返し	①	204	木部せん断破壊	1.74	—
			②	173	ボルト破壊	0.85	0.85
樹脂	d12	漸増	①	203	ボルト破壊	1.78	1.01
			②	204	ボルト破壊	1.79	1.01
		繰返し	①	185	木部せん断破壊	1.41	—
			②	190	ボルト破壊	1.67	0.94

*1) 使用ボルト径と破壊形式の設計耐力に対する実験値の比

*2) d16ボルトの設計ボルト耐力との比

の比較」の欄は実験と同じ破壊形式を有する同じボルト径との比を表したものであり、「d16の設計値との比較」は d16 ボルトのボルト破壊の設計値に対する実験値の比を示したものである。ここで、設計値は表-3 に示した値である。

「打込み型 (d12)」ではすべてボルト破壊となっており、実験値は設計値のおよそ 1.2 倍となっている。一方、「打込み型 (d16)」では実験では「木部せん断破壊」も生じているが、せん断破壊の設計値との比較では 1.4~1.7 倍と、実験値は大きくなっている。しかしながら、「ボルト破壊」では 0.85~1.01 と実験値は設計値とほぼ同等か、あるいは小さくなっている。さらに、「樹脂型 (d12)」では、ボルト径 d12 に設計値と比較すると、「ボルト破壊」および「木部せん断破壊」ともに、「打込み型 d16」とほぼ同等な値となっていることが判る。

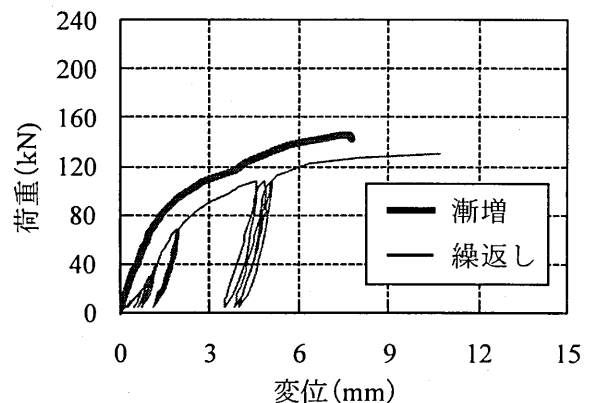
このことは、ボルトとボルト孔との間に樹脂を充填した場合には、設計ボルト径をボルト径として設計できることを示唆している。

前回の論文⁴⁾では、繰返し荷重下では漸増荷重よりも 10%程度低くなっており、今回のボルト破壊でも、その傾向は見受けられる。

3.2 荷重-変位関係

図-8 は各供試体の荷重-変位曲線を示したものである (供試体の詳細については表-2を参照)。図-8(c)の×印は、木部材がせん断破壊したことを示すものである。各供試体ともに 2 体の実験を行っているが、同じシリーズの荷重-変位関係に大きな差異が見受けられなかったため、ここでは代表的なものを掲示した。

いずれの供試体も漸増荷重に対して、繰返し荷重を受ける場合には剛性が小さくな



(a) 打込み型(d12)

図-8 荷重-変位関係 (続く)

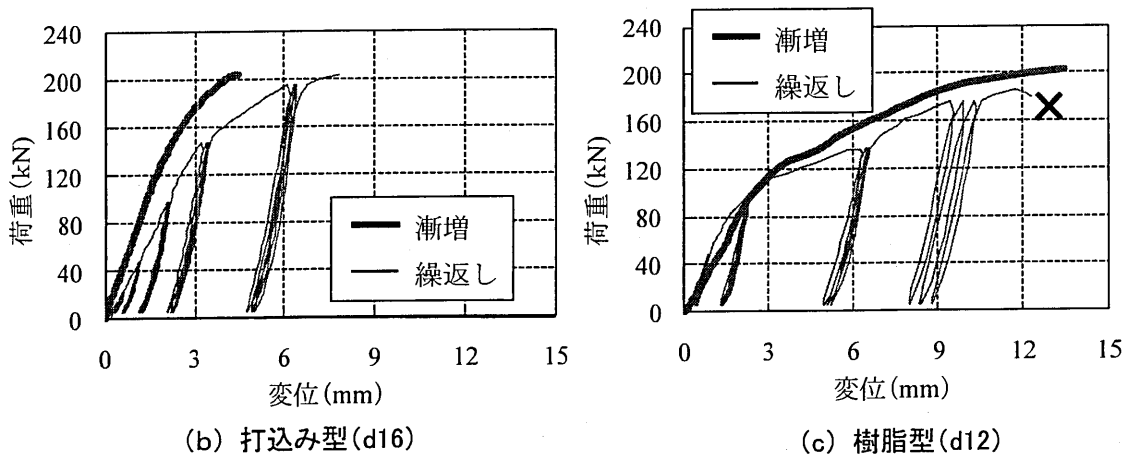


図-8 荷重変位関係

っていることが判る。また、「打込み型 (d16)」の一方の供試体での漸増荷重下で、このモデルでは非線形挙動が明確でない荷重 165kN で木部のせん断破壊を生じたが、他の供試体では(c)の「樹脂型(d12)」の繰返し荷重に示すように、ボルト耐力を思われる変位挙動の後に発生した。

図-9 は漸増荷重を受けた各供試体の荷重-変位曲線を比較したものである。樹脂型での初期の変位を除くと、3者ともに線形変位域での剛性に差異は見受けられないが、非線形性が顕著になる領域では「打込み型(d12)」の変位が大きく増大している。

同じボルト径 d12 を使用した樹脂型は「打込み型 (d12)」に比べて、終局荷重と同様に非線形域での剛性も向上している。今回使用したエポキシ樹脂の引張に対する弾性係数は 3300N/mm^2 で、木部材のそれよりも低いものである。

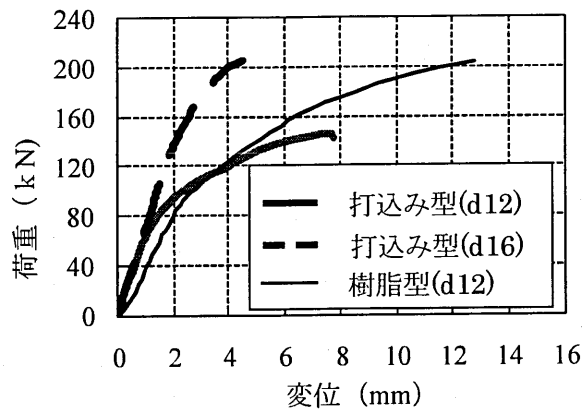
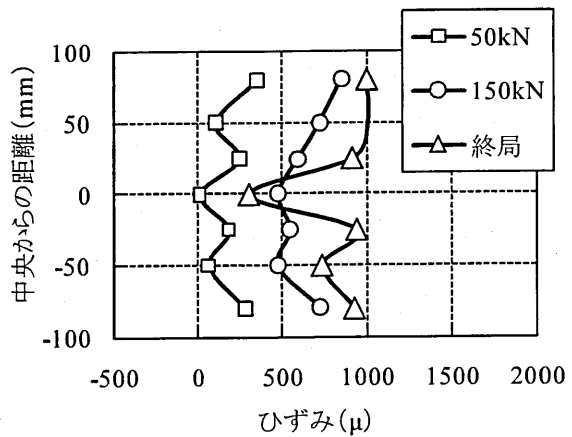


図-9 荷重-変位関係(各供試体の比較)

3.3 ひずみ分布の変化

図-10 は各供試体の断面の高さ方向のひずみ分布の変化を示したものである。ボルトは中央点 0mm と $\pm 50\text{mm}$ の位置に設置されている。(a)打込み型 (d12) をみると、荷重 50kN のときにボルト点のひずみがほぼ 0 となっている。これはひずみゲージの貼付位置が材軸方向の 2つのボルトの中央にあるため、両ボルトからの木部材への影響(引張あるいは圧縮)が相殺されたものと思われる。その後、荷重 150kN ではほぼ平均化されるが、終局時には中央点のひずみは他の箇所と比べて、極端に小さくなっている。このことから、木部材で周囲のひ



(a) 打込み型(d12)

図-10 各供試体のひずみ分布(続く)

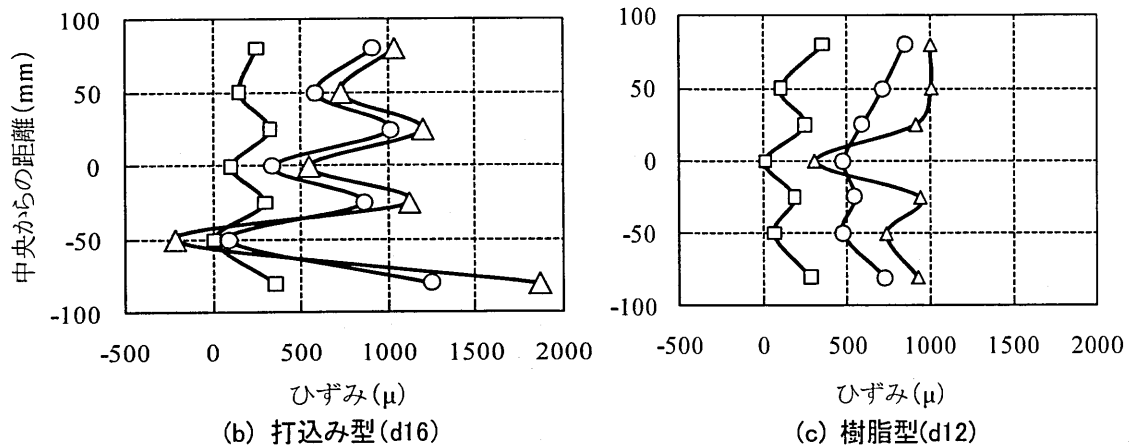


図-10 各供試体のひずみ分布

ずみに比べて、ボルト位置のひずみが極端に小さくなるときには、ボルトが大きく変形しているものと考えられる。

このような傾向は他の種類の供試体にも見受けられる。ただし、「打入型 (d16)」では3箇所のボルト位置でひずみは小さくなっているが、他の種類では中央点が顕著に小さくなっている。これは木質構造設計基準・同解説⁷⁾にもあるように、多列にボルトが配置される場合には中央部分が端部に比べて、ボルト応力分布が異なることに起因するものと思われる。

4. まとめ

木橋の部材接合でボルト接合する場合、ボルトねじ部の破損や木部材のボルト孔の裂けを防止するためにボルト孔をボルトよりも大きくし、その隙間によるガタを防ぐために隙間に樹脂を充填する工法が採用されることも多い。充填樹脂はボルト接合部の耐力や剛性を向上することは知られているが、樹脂の効果は設計規準に未だ反映されていないように思われる。

本論文では、その効果を具体的に考察するために、供試体による静的実験結果を報告したものである。本論文で得られた結果を要約すると、以下のようになる。

- (1) 充填樹脂はボルト接合耐力を向上させるとともに、非線形領域での剛性を増加させる。
- (2) 樹脂を充填することにより、その耐力は樹脂を充填するために穿った孔の径と同じ径を有するボルトと同等となる。

本論文で得られた結果は、樹脂充填するボルト接合を用いる場合には、使用するボルト径により算定された本数を軽減できることを示唆するものである。しかしながら、ここでの結果はボルト径 12mm に対してボルト孔を 16mm とした供試体のみの結果である。樹脂の効果を実設計規準に反映させるには、樹脂の厚さや L/d の影響をさらに検討する必要がある。さらに、接合部の応力性状を明確にするためには、数値解析による詳細な検討も必要であろう。

さらに、道路橋を対象とする場合には疲労性状も把握することも重要な課題となる。

現在、接触要素を考慮した非線形要素による有限要素法を検討しているが、未だ十分な結果を得るには至っていない。今後は疲労試験も計画している。

謝辞

本実験を遂行するに当たり、山佐木材株式会社（鹿児島県）の原田浩司様、村田忠様には供試体製作するに際してご助言と精度の良い供試体を製作して戴きましたことに感謝の意を表します。なお、本研究は科学研究費・基盤研究 (C) の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 上田亜矢子、今井富士夫、中澤隆雄、飯村豊：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、第7回木橋技術に関するシンポジウム、pp.63-70、2008
- 2) 山田伸典、手塚升、松井源吾：エポキシ充填鋼板挿入式ボルト接合に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、第448号、pp.69-78、1993
- 3) 山田伸典、手塚升：エポキシ充填ボルト接合に関する研究・その19 多数本打ちボルトのピッチが耐力に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.65-66、1997
- 4) 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
- 5) Fujio IMAI・Takao NAKAZAWA・Yutaka IIMURA：Influence of Resin injected into Bolt Hole on Mechanical Properties of Timber-Steel Connection、10th World Conference on Timber Engineering、2008
- 6) Masafumi INOUE・Yuko SIRAKAWA・Kei TANAKA・Zhongwei Guan：Study on Reinforcement around Bolt Hole at Fastener Joint Timber Structure、9th World Conference on Timber Engineering、2006
- 7) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説－許容応力度・許容耐力設計法－、pp.41-42、2007
- 8) 星井睦、手塚升、山田伸典、松井源吾：エポキシ充填ボルト接合に関する研究・その4 ボルト近傍の応力分布と剛性－数値解析による実験結果の検討－、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.95-96、1989