支間中央に継手を持つハイブリッド木桁の 性能試験及びFEM解析

千田 知弘¹・佐々木 貴信²・薄木 征三³・後藤 文彦⁴

¹正会員 秋田県立大学流動研究員 木材高度加工研究所 (〒016-0876 秋田県能代市宇海詠坂11-1)

E-mail: chida@iwt.akita-pu.ac.jp

²正会員 秋田県立大学准教授 木材高度加工研究所 (〒016-0876 秋田県能代市宇海詠坂11-1)

E-mail: taka@iwt.akita-pu.ac.jp

³フェロー会員 秋田大学名誉教授 (〒010-0852 秋田県秋田市手形学園町1-1)

E-mail: usuki@beach.ocn.ne.jp

⁴正会員 秋田大学准教授 工学資源学部土木環境工学科 (〒010-0852 秋田県秋田市手形学園町1-1)

E-mail: gotou@gipc.akita-u.ac.jp

近年の環境問題への関心の高まりから、CO₂排出量が少ない木質系材料への関心が高まっており、土木分野においても、景観性に優れた木橋をはじめとして様々な施設への実用化が図られている。木質系材料は破壊性状が脆性的であるために、主要構造部材として用いる場合に、鋼材などの異種材料を用いて適切に補剛、補強したハイブリッド構造が提案されている。これにより集成材主桁と鋼床版を用いたハイブリッド木橋が実用化されているが、部材輸送上の制限から現場継手を要する場合には、施工性や強度など継手の性能が極めて重要となる。

本研究では、集成材主桁と角形鋼管床版を用いたハイブリッド木歩道橋を対象に、実寸モデルの継手試験体を製作し、施工性の確認を行うと共に、載荷試験を行い、実験結果とFEM解析結果を比較検討し強度特性を評価した。

Key Words : steel square tube-timber hybrid beam, joint, FEM, restraint buffer method (RBM)

1. はじめに

秋田県はスギ人工林面積では日本一であり、森林面積も全国で7位と有数の森林県である。温室効果ガスの一つであるCO₂の吸収源としての機能を果たす適切な森林を維持していくためにも間伐の実施や間伐材の用途拡大が期待されており、これまで少なかった建設分野での木材利用が全国的に注目されている。秋田県においても、秋田スギの利用拡大は急務であり、森林土木事業を中心に積極的な木材利用が図られている。その一つとして林道等への木橋の活用があるが、景観性に優れた木橋は市街地の歩道橋としてもニーズが多い。

しかしながら、木材は引張やせん断応力が作用した状態での破壊性状が脆性的であったり、耐久性の面で実績が少ないなど、強度や耐久性の面においても課題が多く、広く普及しているとは言えない状況である。これらの課題を克服し、様々な規模の橋梁に適用可能な木橋を実現していくためには鋼材などで適切に木材を補剛、補強し

たハイブリッド構造を採用することが考えられる。鋼材と木材のハイブリット構造の一つとして、スギ集成材の上下縁に鋼板を垂直に挿入接着した鋼板挿入集成材梁が提案されており、実験と解析に基づく多くの報告が行われ¹⁾⁵⁾、鋼床版と組み合わせて実橋にも採用されている。筆者らは、床版に角形鋼管⁶⁾を用いたハイブリッド木橋⁷⁾⁸⁾を提案しており、2011年に秋田県内において、この工法を採用した木歩道橋の建設が計画されている。この木橋は、単純桁であるが橋長24.7m、支間長23.5m(有効幅員2m)と木橋としては比較的規模が大きく、部材の輸送上の制限などから主桁や床版の現場継手が必要とされる。木橋においては主桁の継手は構造上極めて重要であり、設計曲げモーメントやせん断力に対しての効率的な接合性能が求められる。

本研究では、実寸モデルの継手部分試験体を製作し、角形鋼管を用いたハイブリッド木橋の施工性の確認を行うと共に、載荷試験を行い、継手の強度を含め角形鋼管ハイブリッド木桁の構造特性を評価した。試験に先立っ

てFEM解析による性能評価を試みた⁷⁾が、この時、木材の特性を考慮して解析に反映させる手法を提案しており、実験結果から、この手法の有用性を検証した。

2. 実験供試体

(1) 対象橋梁

想定するハイブリッド木橋の3Dイメージ図を図-1、断面図を図-2、側面図を図-3、平面図を図-4にそれぞれ示す。なお、図-4は、図-3のSectionA部を拡大して示している。本橋は、橋長24.7m、幅員2.8m、支間23.5mあり、図-3に示すように各橋端部から8.1mの位置に継手を有する構造となっている⁹⁾。

主桁には図-2に示すように、集成材桁の上下縁を鋼板で補剛した鋼板挿入集成材桁を用いる。上部挿入鋼板は床版のせん断力を主桁に伝えるジベルとしての役割を担い、下部挿入鋼板は、曲げ破壊時の集成材の脆性的な破壊を緩和する効果を持つ。主桁には $180 \times 200 \times 1553\text{mm}$ の横梁が橋長方向に3m間隔で取り付けられる。

床版は、角形鋼管 $\square 100 \times 200 \times 4.5\text{mm}$ を幅方向に14本並べ、高力ボルトで各角形鋼管を引き寄せ固定した上で、 $\phi 60.5 \times 3.8 \times 800\text{mm}$ の横つなぎ鋼管を貫通させ、その周辺の空間部分にモルタルを充填し角形鋼管どうしを一体

図-1 ハイブリッド木橋の3Dイメージ

図-2 ハイブリッド木橋の断面図(単位:mm)

図-3 ハイブリッド木橋の側面図(単位:mm)

図-4 ハイブリッド木橋のSectionA部の平面図(単位:mm)

化する構造となっている。以後、横つなぎ鋼管挿入部をユニット部と称し、次節で詳細を示す。各ユニット部は、支点部周辺と継手を除き、横つなぎ鋼管が2本挿入され、橋長方向に1m間隔で配置される。支点部周辺の接合部においては、横つなぎ鋼管は1本のみ挿入されるが、その分、橋長方向のユニット部の配置間隔が縮められている。図-4に示すように、床版上面には木製防護柵⁹⁾及び木製床板を取り付けるためのスタッドボルトが予め溶接されており、また、両端から3つ目の角形鋼管には、主桁に挿入接着される上挿入鋼板が予め橋軸方向に沿って溶接されている。

本研究では、対象橋梁の施工性の確認を行うと共に、継手の強度を確認するために、継手箇所を含む長さ5m分を取り出して試験体とし、載荷試験を行う。

(2) 供試体

試験体の3次元パースを図-5、断面図を図-6、継手断面図を図-7、平面図を図-8、側面図を図-9、ユニット部詳細を図-10、継手詳細側面図を図-11にそれぞれ示す。試験体の構造詳細は既に文献に示してあるので^{7,9)}、ここでは簡略化し、補足説明を加える。

a) 主桁

鋼板挿入集成材桁においては、挿入鋼板-集成材界面にせん断応力の卓越が生じ、せん断破壊につながる事が確認されている^{1),2),5)}。この応力の卓越は界面に局所的に生じるので、集成材部の変断面化ではなく応力緩衝層構造が応力の卓越の低減に効果的である^{1),11)}。本試験体では、図-6に示すように、深さ10mmの接着剤層による応力緩衝層を設けた¹¹⁾。挿入鋼板の接着には、二液混合形エポキシ樹脂(サンスター技研(株)製、ペンギンセメント#1031)を使用し、図-7に示す継手のせん断キーの接着には、作業性を考慮し発泡性のウレタン樹脂接着剤(サンスター技研(株)製、ペンギンセメント#930)を用いた。

b) 角形鋼管床版

試験体の角形鋼管床版は、図-6等に示すように角形鋼管□-100×200×4.5mmを幅員方向に5本(桁に接合されている中央の角形鋼管の両脇に2本づつ)並べ $\phi 60.5 \times 3.8 \times 800$ mmの横つなぎ鋼管を貫通させ、横つなぎ鋼管周辺の空間部分にモルタルを充填することで角形鋼管どうしを一体化する構造となっている。ユニット部においては、 $t=4.6$ mmの仕切り板がモルタル挿入口の両側にシール材で固定されており、充填されたモルタルが流れ出さないようになっている(図-10)。

継手においては、橋軸方向の角形鋼管は、角形鋼管底面に設置した鋼板(155×310×9)を介して高力ボルトで接合される(図-8)。さらに他所のユニット部(200×200)の3.5倍の広さを有するユニット部(200×700)を設置し、接合、

図-5 モデル角形鋼管ハイブリッド木桁パース図

図-6 断面図(単位:mm)

図-7 継手断面(単位:mm)

図-8 実験試験体の平面図(単位:mm)

図-9 実験試験体の側面図(単位:mm)

図-10 ユニット部詳細

図-11 継手詳細側面図

補強される。これに伴い、モルタルの充填が広範囲になるため、モルタル挿入の確実性を考慮し、モルタル挿入口もまた他所のユニット部(150×150)の 2.64 倍の大きさ(180×330)となっている。ただし、桁上の角形鋼管のみ、他所と同じ 150×150 のモルタル挿入口を 3 箇所設けることにより、鋼管の有効断面を維持できるようにしている。

なお、各ユニット部の設置間隔、横つなぎ鋼管の挿入本数は図-4 の木歩道橋の設計を参考にした。

試験体には、角形鋼管、横つなぎ鋼管に SS400、その他の鋼部材には SM400、スギ集成材は 26 層から成る異等級スギ集成材 E75-F240 を用いた。

3. 実験方法

本研究では、四点曲げ試験法を用いて継手を含めた角形鋼管ハイブリッド木桁の構造特性を評価する。図-12 に四点曲げ試験時における支点、载荷点位置及び変位計の設置位置を示す(青字は変位計番号を示す)。载荷は、横つなぎ鋼管を 2 本挿入したユニット部にゴム板、鋼板を順に重ねて配置し、それを介して線载荷した。なお、5 章で示す実験結果と FEM 解析との比較において、た

わみに無視できないほどの差が生じたため、図-13 に示す逆対称四点曲げ試験法³⁾を行い、原因を検討している。以後、図-12、図-13 の向きを基準とし、継手を中心として左右と呼ぶ。

集成材桁における、単軸ひずみゲージ貼付位置を図-14、ロゼットゲージ貼付位置を図-15 に示す。(1)等で示す図中の列番号は、各文献⁷⁾⁹⁾と比較するために同じ番号にしてある。本試験体は、26 層の集成材を製作した後、桁高 800mm に成形したが、この際、上下縁のラミナのサイズに 10mm ほどの差が生じた。よって、桁高方向の各ゲージの貼付位置は、上下縁から等間隔ではなく、上縁から 2 層おきに 8 箇所とし、各ラミナの中央に貼付した。この貼付位置を基準とし、単軸ひずみゲージは上下縁 1 層目のラミナにゲージを追加貼付し、ロゼットゲージは中立軸位置のラミナの橋軸方向に 6 箇所ゲージを追加貼付した。単軸ひずみ軸ゲージとロゼットゲージは右の桁の表裏にそれぞれ貼付した。ただし、左右の桁に荷重が均等にかかっているかを確認するため、左側の桁にも右側の(5)に当たる(5')に単軸ひずみゲージを貼付した。

床版上面における単軸ひずみゲージの貼付位置を図-16 に、床版下面と下挿入鋼板底部とフランジ底部における単軸ひずみゲージ貼付位置を図-17 に示す。床版の単軸ひずみゲージは、桁のひずみと比較するため(3)、(5)、(5')の位置に貼付し、加えて(3)の対称位置(3')にも貼付した。継手に補強したフランジの効果を確認するために、フランジ底部と下挿入鋼板底部にも単軸ひずみゲージ

ジを貼付した。本試験体においては、本実験の後、木製防護柵¹⁰⁾の水平荷重追試験等、複数の試験が予定されており、荷重試験は確実に安全側で行われなければならない。よって、次章の FEM 解析の結果を基に、荷重する荷重を決定した。

図-14 集成材桁における単軸ひずみゲージ貼付位置 (単位:mm)

図-15 集成材桁におけるロゼットゲージ貼付位置 (単位:mm)

図-12 四点曲げ試験法(単位:mm)

図-13 逆対称四点曲げ試験法(単位:mm)

図-16 床版上面における単軸ひずみゲージ貼付位置

図-17 床版下面及び下挿入鋼板・フランジ底面における単軸ひずみゲージ貼付位置

4. FEM解析

(1) 解析モデル

本研究では、シエアウェアの汎用有限要素解析ツール ANSYS(バージョン11.0)のアカデミック版を用いて解析を行った。FEM解析モデルを図-18に示す。図中にOで示した位置に原点を取り、幅員方向にx軸、桁高方向にy軸、橋軸方向にz軸を取る。本試験体は弱軸について対称な断面を有するので、yz面で2分割された桁の半分の解析対象とする。载荷点部詳細を図-19に示す。解析では、図-18、図-19に示すように支点板、载荷板及び図-20に示すように接着層をモデル化した。载荷点部においては、载荷板-ゴム板、ゴム板-試験体の界面の節点は共有させず、摩擦係数0.6を用いた接触解析する拘束緩衝法(RBM)を用いた^{7,9)}。支点部においても载荷点部同様に拘束緩衝法を用いた。また、床版の挙動をより忠実にシミュレートするために、ユニット部を除いた隣り合う角形鋼管の節点を独立させ、摩擦係数0.4を用いた接触要素でモデル化した。同様に、接触面が接着されていない角形鋼管床版-集成材桁、継手における集成材-集成材の接触面に関しても接触要素でモデル化し、各々摩擦係数0.4、0.35を用いた^{7,9)}。各部に使用した要素の詳細を表-1、表-2に示す。使用したANSYSアカデミック版には節点数と要素数に制限があるので、継手等の複雑な構造に対しては、要素数節約のため4面体要素を用い、各要素サイズは1辺50mmとした。

境界条件は、原点側の支点板の橋軸方向中央のz方向変位とy方向変位を線拘束、一方の支点板の橋軸方向中央のy方向変位を線拘束し、支点板が回転できるようにした。また、yz対称面上にある全ての節点のx方向変位を拘束する。载荷は载荷板中央に線载荷する。

解析に使用した鋼部材の規格と各材料定数を表-3、集成材の材料定数を表-4¹²⁾、その他の材料定数を表-5に示す。鋼材の値は各規格の公称値であり、集成材の各値は、使用した異等級スギ集成材 E75-F240 の軸方向ヤング率の公称値である 7.5GPa を基に算出した¹²⁾。

(2) 解析結果

$P=200\text{kN}$ 载荷時の、対称面及び側面における軸方向ひずみ ε_z 分布を図-21、図-22に、木桁部のひずみ分布を見易くするために図-22の床版と継手周辺を除いた木桁のみの軸方向ひずみ ε_z 分布を図-23に示す。負のひずみの最大箇所は、床版の载荷点部ではなく、図-21の円内の接着層で生じている。その値は応力換算で2.2MPa程度でエポキシ樹脂の降伏点61.2MPaを下回るので、終局状態に至ってもこの箇所での破壊は生じない。図-23においては、集成材桁の軸方向ひずみ分布は、ディープビーム

図-18 FEM解析モデル

図-19 载荷点部詳細

図-20 接着層

表-1 継手以外の要素詳細

主桁		
部材	要素タイプ	要素形状・自由度
集成材	ソリッド	6面体8節点24自由度
上下挿入鋼板	ソリッド	6面体8節点24自由度
床版		
部材	要素タイプ	要素形状・自由度
角形鋼管	ソリッドシェル	6面体8節点24自由度
角形鋼管(ユニット部)	ソリッド	4面体10節点30自由度
モルタル	ソリッド	4面体10節点30自由度
横つなぎ鋼管	ソリッドシェル	6面体8節点24自由度
支点板・载荷点板		
部材	要素タイプ	要素形状・自由度
ゴム板・鋼板	ソリッドシェル	6面体8節点24自由度

表-2 継手における要素詳細

主桁		
部材	要素タイプ	要素形状・自由度
集成材	ソリッド	4面体10節点30自由度
上下挿入鋼板	ソリッド	4面体10節点30自由度
せん断キー	ソリッド	4面体10節点30自由度
フランジ	ソリッド	4面体10節点30自由度
角形鋼管	ソリッド	4面体10節点30自由度
モルタル	ソリッド	4面体10節点30自由度
横つなぎ鋼管	ソリッド	4面体10節点30自由度
床版		
部材	要素タイプ	要素形状・自由度
角形鋼管	ソリッド	4面体10節点30自由度
モルタル	ソリッド	4面体10節点30自由度
横つなぎ鋼管	ソリッド	4面体10節点30自由度

表-3 主部材に用いた鋼材の規格と各材料定数

	規格	ヤング率 E	せん断弾性係数 G	ポアソン比 ν
角形鋼管	SS400	200GPa	76.9GPa	0.3
横つなぎ鋼管				
挿入鋼板	SM400	200GPa	76.9GPa	0.3
フランジ				
丸鋼(せん断キー)				

表-4 スギ集成材の各材料定数¹⁰⁾

ヤング率	$E_z = 7.5\text{GPa}$ $E_x = E_y = E_z / 25 = 0.3\text{GPa}$
せん断弾性係数	$G_{xy} = G_{yz} = G_{xz} = E_z / 15 = 0.5\text{GPa}$
ポアソン比	$\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yz} = \nu_{yx} = 0.016$ $\nu_{zx} = \nu_{zy} = 0.4$

表-5 その他の材の材料定数

	ヤング率 E	せん断弾性係数 G	ポアソン比 ν
無収縮モルタル	22GPa	9.17GPa	0.2
ゴム	4GPa	1.33GPa	0.499
接着剤	2.43GPa	0.86GPa	0.41

挙動^{7), 13)}となる。本試験体は元々支間桁高比 $l/h=6$ と深い梁ではあるが、継手の存在と、角形鋼管床版の局所的に異なる構造が、ディープビーム挙動をより顕著なものとしている⁷⁾。しかし、ディープビーム挙動自体は結果として引張縁の軸方向ひずみを低減させているだけで、軸方向ひずみに関しては特に問題となる挙動ではない。また、せん断キー挿入部周辺においても、特に大きなひずみは生じておらず、継手の構造にも問題はない。なお、本解析における軸方向ひずみの分布と値は、接着層を考慮しない場合⁷⁾と比べ差は1%に満たず、また、接着層の破壊を考慮する必要がないので、曲げに対する設計、解析時においては、接着層は無視し、集成材として扱って良い。

対称面及び側面におけるせん断ひずみ分布を図-24、

図-21 対称面における軸方向ひずみ ϵ_z 分布

図-22 側面における軸方向ひずみ ϵ_z 分布

図-23 継手を除く木桁側面の軸方向ひずみ ϵ_z 分布

図-25にそれぞれ示す。図-24においては、a部、b部のひずみの卓越が界面に設置した接着層に集中しており、接着層の効果が確認できる。しかし、b部においては、集成材部においても大きなせん断ひずみが分布しており、図-25のc部に見られるように桁側面にまでその影響が現われている。異種材料界面に生じる応力の卓越の影響が桁側面に現れる事はないので^{1), 2)}、b部のひずみの卓越の原因は他にあると推察され、その一つに、均一でない床版の構造が影響していると考えられる。

図-21～図-25の変形形状をみると、桁下部は一樣になだらかな変形を示すのに対し、桁上部はユニット部を基点とし折れ線的に変形する床版と同じ変形をしており、この桁上部と下部の変形の違いがせん断変形を大きくしていると考えられる。特に、応力が卓越している図-24

図-24 対称面におけるせん断ひずみ ϵ_{yz} 分布 図-25 側面におけるせん断ひずみ ϵ_{yz} 分布

におけるb部(図-25においてはc部)位置の床版の左右には短い間隔でユニット部が設けられているため床版の変形量が極めて小さく、また、b部の右側はユニット部と支点到に挟まれ変形が拘束されることもあり、b部周辺の変形が複雑化し、せん断変形が大きくなると考えられる。継手がないモデルにおいても、せん断ひずみ分布の傾向は同じとなるが、せん断区間の最大値は30%ほど低めになる⁷⁾ので、せん断ひずみの値を大きくしている原因は継手に起因するディープビーム挙動であると考えられる。

継手においては、せん断キーの引き抜けによるせん断ひずみは生じるが、その値はせん断区間の最大値の半分の値なので、せん断に関しても継手の構造に問題はない。なお、せん断ひずみの分布と値もまた、接着層を考慮しない場合⁷⁾と比べ差は1%に満たないので⁷⁾、せん断に対する設計時にも曲げ同様接着層を無視し、集成材として扱って良い。

本解析では $P=200\text{kN}$ (鋼板の降伏荷重の1/4) 時の軸方向ひずみ、せん断ひずみの評価を行い、確実に安全側で試験が行えることが確認されたので、実験においては、 $P=200\text{kN}$ まで載荷する。

5. 実験結果及びFEM解析結果との比較

本章では、図-26に示すように四点曲げ試験を行い、

図-26 四点曲げ試験

前節のFEM解析結果と実験結果を比較検討することにより、ハイブリッド木桁の構造特性を評価していく。

(1) たわみ

$P=200\text{kN}$ 載荷時の実験とFEMのたわみ分布を図-27に示す。実験値は、変位計1と5の値を平均し、変位計2~4の各値から差引くことで支点沈下の影響を補正している。FEM解析の値と比較すると、変位計2、4で10%、変位計3で13%ほど解析値が大きいことから、継手のユニット部の剛性が大きいことが分かる。図-10に示したように、モルタルを流し込む際に仕切り板として鋼板を用いたが、設計時において、この仕切り板は構造材として計算していない。しかし、モルタル固化後にモルタルと十分に付着し、角型鋼管のダイヤフラムとして機能するようになったと推察される。さらに、継手のユニット部と、その両脇のユニット部までの距離が短いことから、ダイヤフラムとしての効果がより一層効いていると考察される。このことはFEMで確認することは可能であるが、本研究においては要素数に制限があり、モデル化していない。

そこで、ユニット部の剛性の影響を確認するため、図-13に示す逆対称四点曲げ試験(継手の曲げモーメントが0、せん断力のみ作用)を行った^{1),2)}。逆対称四点曲げ試験におけるたわみの分布を図-28に示す。左支点と左載荷点間においては、横つなぎ鋼管1本挿入ユニット部のみであり、ユニット部の影響が小さく、FEMと実験はよく一致している。一方、左側の横つなぎ鋼管2本挿入ユニット部から継手のユニット部にかけて、実験のたわみがFEMよりも小さくなっている。継手部のユニット部を中心として、左右の剛性の高いユニット部にはさまれた部分が一体となって変形するような挙動が生じ、たわみの減少に影響したと推察される。右載荷点付近においては、ユニット部が短い間隔で配置されていることに加え、桁端が自由端となっているため、床版の変形挙動の差が他所よりも大きく表れたと推察される。これについて

 図-27 たわみ計位置と $P=200\text{kN}$ 時のたわみ分布

 図-29 スケールを合わせた軸方向ひずみ ϵ_{xx} 分布

図-28 逆対称四点曲げ試験におけるたわみ分布

ては、5.(2)b)節において、角形鋼管床版の裏表に貼った単軸ひずみゲージの値を確認することでも考察していく。

(2) 軸方向ひずみ

a) 桁の軸方向ひずみ

$P=200\text{kN}$ 載荷時の、実験とFEM解析の桁高方向の軸方向ひずみ ϵ_{xx} 分布を図-29に示す。桁高 0.6m より下の部分の結果はいずれの箇所においてもよく一致するのに対し、桁高 0.6m より上の部分では、(2)、(5)(5')の結果に差が生じている。桁上部のひずみは床版のひずみと密接にかかわっており、前節で示したように、ユニット部の仕切り

板がダイヤフラムとして機能した分、床版のひずみ挙動に差が生じ、桁上部のひずみに影響したと考えられる。しかし、直接破壊につながる引張縁のひずみはいずれの箇所も良く一致し、圧縮縁のひずみは引張縁のひずみの $1/3$ ほどの値でしかないので、ダイヤフラムの影響は、解析上も構造上も問題にはならない。この挙動に関しては次節で検証する。

実験においてもまた、本試験体が極端な深い梁(ディープビーム)の挙動を示すことが確認された。本試験体は $l/h=6$ であるが、(2)においては $l/h=0.5\sim 1$ 、(3)、(4)、(5)(5')においては $l/h=1\sim 2$ のディープビーム挙動¹²⁾を示す。それぞれの l/h に本試験体の桁高 h を代入すると、 l は各ユニット部の配置間隔と一致する。継手で左右の集成材桁の軸方向ひずみの連続性が分断される上、ユニット部に起因する桁上部の折れ線形的変形が影響していると考えられる。本研究の対象木歩道橋(図-3)は $l/h=30$ を超えるが、支点-継手間は 7750mm であり、 $l/h=9.7$ である。JAS規格に定める構造用集成材の曲げ試験の基準は $l/h=18$ であり¹⁴⁾、 $l/h=9.7$ は集成材桁としては十分に深い梁と言え、継手の存在、ユニット部の配置間隔がこのサイズの木橋にもディープビーム挙動を生じさせる可能性がある。

試験体製作時の作業性に関しては、継手の製作を含め問題はなかった。本試験体の継手に用いられた接合方法は、この種のハイブリッド木桁において、最も効果的かつ効率的な接合方法の一つであると言える。

RBMの効果、精度に関しては、(4)の載荷点を含むいずれの箇所においてもFEM固有の応力の卓越は見られず、実験結果ともよく一致することから、その効果が確認された。

b) 床版の軸方向ひずみ

図-30に床版表面、裏面の軸方向ひずみの実験値とFEM解析値の分布を示す。各図における列番号の右上に記した記号は、 f は表面、 b は裏面であることを示す。FEM解析結果に関しては、隣り合う角形鋼管どうしを剛結として解析したモデル⁷⁾の解析結果も合わせて示している。FEMどうしの結果を比較すると、剛結モデルと接触モデルに無視できないほどの差が生じている。(5)^fでは特に顕著であり、剛結モデルは両端の角形鋼管のひずみが小さくなるせん断遅れの挙動を示すのに対し、接触モデルでは逆に両端のひずみが大きい。ひずみの値そのものはどちらのモデルも実験値と大きくかけ離れており、解析の精度の検討が必要であるが、床版表面では両端の鋼管のひずみが最大となり、裏面では逆にせん断遅れが生じる挙動は、実験と接触モデルで一致している。角形鋼管床版を床版橋として用いた場合、幅方向に床版全体が支持されるため、弾性域では横の角形鋼管どうしにずれは生じない⁶⁾。しかし、合成桁の床版として用いた場合、支持されるのは桁直上に位置する角形鋼管のみであるので、ずれが生じ得る。本試験体は横に並べた角形鋼管の本数は5本と少ないが、歩道橋(図-1)においては角形鋼管の本数は14本となり、角形鋼管どうしのずれがより顕著になると考えられ、床版の挙動のシミュレートには

接触モデルによる解析が必要である。

図-31に(3), (5), (5)'の位置における桁高方向の集成材の軸方向ひずみと、床版の表裏の軸方向ひずみを重ねた分布を示す。FEM解析においては、いずれの箇所においても床版の表面の軸方向ひずみが当然大きくなるが、実験においては、表裏の軸方向ひずみの値はほぼ同じとなり、垂直に分布している。また、各実験値は、各FEM解析の表裏の平均値とほぼ一致する。床版の裏面のひずみと木桁上部のひずみを比較すると、その値はほぼ一致しており、前節で指摘したとおり、床版底面のひずみの差が桁のFEMと実験のひずみの差であったことが確認された。本節においても、床版の局所的な剛性の違いが木桁の曲げ性能に影響を及ぼす事が様々な点から確認された。

c) 下鋼板及びフランジの軸方向ひずみ

図-32に下挿入鋼板と継手におけるフランジ下面の軸方向ひずみ ϵ_z 分布を示す。フランジは継手の補強と、下挿入鋼板の全体の剛性を一様に向上させる目的で取り付けられた。実験とFEM解析はよく一致したが、目的と反し、継手においてのみ剛性が極端に向上し、下部挿入鋼板全体の剛性はそれほど向上しないことが確認された。設計時の挿入鋼板の降伏荷重は800kNであるが、フランジのすぐ横のゲージから降伏荷重を算定すると685kNとなり、さらに図-21におけるフランジ付け根の最大ひずみから

図-30 床版の軸方向応力の分布

図-31 床版の木桁の桁高方向の軸方向ひずみ分布

降伏荷重を算定すると600kNとなる。よって、設計時にはフランジによる補強効果範囲に留意した設計が必要である。下挿入鋼板の全体の剛性を向上させるためには、フランジは少なくとも1m以上は必要になるが、木橋にそのサイズのフランジが数か所に取り付けられれば、景観上の問題が生じる。継手の補強としてのフランジの効果は十分に確認できていることから、あくまでフランジは継手の補強材としてのみ考慮するべきである。

図-32 下挿入鋼板とフランジ下面の軸方向ひずみ分布

(3) せん断ひずみ

a) 桁高方向のせん断ひずみ

200kN載荷時の、実験とFEM解析の桁高方向のせん断ひずみ ϵ_{xz} の分布を図-33に示す。FEM解析値と実験値を比較すると、軸方向ひずみと比べ、値そのものの精度は低い。その原因は、試験体に比較的多く散見していたスギ材の節の影響である。(2)においては、桁高0.55m以下のせん断ひずみは、0.55m付近のひずみが小さいため、ひずみの連続性によって総じて値が小さくなったと考えられる。(4)においても、桁高0.35m近辺に、比較的大きな節があることが確認されている。

軸方向ひずみほどの精度は得られなかったが、(2)においては、せん断ひずみの最大値は桁高0.4m近辺に位置すること、(4)、(6)においては最大値は梁理論における中立軸付近に位置することは一致しており、桁のせん断挙動の傾向そのものは比較検討することが十分に可能である。例えば、(4)の中立軸上のせん断応力よりも、(2)の桁高0.4m付近のせん断ひずみの値の方が大きく、せん断破壊を生じるならば、(2)において、桁の中央より下の部分で生じ易いことが実験からも推察される。4章で示したように、(2)(図-25, c部)のせん断ひずみ分布は、ユニット部の存在、配置間隔の影響を大きく受けており、さらに継手の存在によりディープビーム挙動が顕著になることでせん断ひずみの最大値を大きくしている。5.(2)a)で示したように、対象木橋(図-1)においてもディープビーム挙動を示す可能性があり、本試験体に現れた特徴が対象木橋にも生じる可能性がある。(2)のせん断ひずみの最大値が桁高0.4m付近に位置する事が、中立軸の局所的な移動によるものかどうかは、次節の中立軸上に一列

に貼付したロゼットゲージの値と比較し検討する。

(6)は継手に挿入されたせん断キーの端部に位置するが、実験、解析ともに、問題となる挙動は確認されなかった。

RBMに関しては、支点部に近い(2)において、構造的に木桁下部に大きなせん断ひずみが生じ得ることを予測し実験で実証するなど、その効果が確認された。

b) 梁理論における中立軸上のせん断ひずみ

梁理論において中立軸とされる箇所における、ロゼットゲージの値と、FEM解析値を図-34に示す。なお、使用したロゼットゲージの長さは25mmあり、桁高方向のゲージ長を無視できないので、FEM解析においては、実際のロゼットゲージ貼付位置(中心)に節点を配置せず、上下の節点の間に来るように設定した。

図-34を見ると、ほとんどの箇所で、実験値は上下の節点の値の間に来る。この時、梁理論によるせん断ひずみは 1500μ ほどであるから、実験値、FEM解析値ともに、差は10%前後となり、それほどかけ離れた値ではない。

図-33 スケールを合わせた軸方向ひずみ ϵ_{yz} 分布

図-34 中立軸上のせん断ひずみ ϵ_{yz} 分布

この事は、図-33に見られた挙動は中立軸の移動ではないことを示すとともに、局所的に大きなせん断ひずみが生じて、中立軸のせん断ひずみの値は影響を受けないことを示している。この特徴は、異種材料界面に応力の卓越を生じる鋼板挿入集成材梁においても見ることができ¹⁾²⁾³⁾。よって、中立軸上の値が一致することを理由に、梁理論のみでハイブリッド構造を持つ木質建造物のせん断設計を行うことはせん断応力の過小評価の危険性があるので、FEM解析と併用して性能を照査する必要性がある。

6. まとめ

本研究では、角形鋼管を用いたハイブリッド木橋の実寸モデルの継手部分試験体を製作し、現場継手の施工性を確認すると共に、載荷試験を行い、FEM解析結果と比較検討することで、継手の強度を含めた角形鋼管ハイブリッド木桁の構造特性を評価した。以下に得られた知見を示す。

- ・本試験体製作にあたり、継手の製作を含め、その作業性の確認を行ったが、問題は生じなかった。また、継手を通じて、荷重が左右の桁に十分に伝えられている事が実験、FEM解析の両方において確認された。本試験体の継手は、ハイブリッド木桁の継手として、最も効果的かつ効果的な継手の一つであると言える。

- ・四点曲げ試験において、たわみを計測したところ、実験値とFEM解析値は一致せず、ユニット部の剛性が設計よりも大きいことが示唆された。そこで試験法を逆対称四点曲げ試験法に変更し計測したところ、ユニット部の剛性が大きいことが確認された。その原因は、モルタル挿入時に仕切り板とした鋼板がダイヤフラムとして機能している可能性が示唆された。

- ・異種材料界面に生じる応力の卓越による集成材のせん断破壊を避ける方法として、接着剤による応力緩衝層を提案し、実際の試験体に設けた。FEM解析においては、接着層の有無が、集成材桁の軸方向ひずみ、せん断ひずみの分布に与える影響を調べたが、差は見られなかった。よって、設計時には接着層を無視し、集成材として扱って良い。

- ・軸方向ひずみにおいては、FEM解析と実験はよく一致し、ディープビーム挙動を示すことが確認された。本試験体は元々深い梁であるが、本試験体における顕著なディープビーム挙動は継手が原因であり、床版の形状がディープビームの挙動をより顕著なものにしている事を示した。本研究の対象木橋は桁長が24.7mであるが、継手を2箇所持つことから、ディープビーム挙動を示す可能性が示唆された。ただし曲げに関しては、ディープビー

ムの挙動により、結果として軸方向ひずみが小さくなるだけであり、継手は弱点にならないことが実験、FEM解析から確認された。

・せん断ひずみにおいては、節などの影響により、軸方向ひずみほどの精度は得られなかったが、定性的な評価は十分可能であった。また、ユニット部の存在、配置間隔がせん断ひずみの卓越を生じさせ、継手の存在がその値を大きくすることが確認された。対象橋梁が継手の存在でディープビーム挙動を示すなら、せん断ひずみの卓越に注意を払わなければならない。継手に関しては、弱点となり得る挙動は確認されなかった。

・軸方向の中立軸上のせん断ひずみ分布に関しては、梁理論、実験、FEM解析の値はよく一致した。これにより、中立軸以外に最大せん断ひずみが生じても、中立軸の値に影響しないことが確認された。これについては、異種材料界面に生じる応力の卓越に関しても同様の事が確認されている。よって、中立軸上の値が一致することを理由に、梁理論だけを用いてハイブリッド構造を持つ木質構造物のせん断の設計を行うことは、せん断を過小評価してしまう危険性がある。本研究のように新たに開発したハイブリッド構造を扱う際には、FEM解析が必要不可欠である。

・本研究のFEM解析においては、拘束緩衝法(RBM)⁷⁾を用いたが、支点と載荷点に応力の卓越は生じず、また、結果と実験の結果はおおむね一致するなど、拘束緩衝法の有用性が認められた。これにより、非常に細かいシミュレートが可能となり、性能予測が高い精度で行えることを示した。

謝辞：本研究は、「農林水産省 新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」の補助の下行われた。

参考文献

- 1) 千田知弘, 佐々木貴信, 後藤文彦, 薄木征三, 飯島泰男: 鋼板挿入集成材梁のせん断応力に関する実験と FEM 解析, 構造工学論文集, Vol.55A, (CD-ROM),

2009.

- 2) 千田知弘, 後藤文彦, 薄木征三, 佐々木貴信, 石川和彦: 鋼板挿入集成材梁のせん断強度についての数値的・実験的解析, 構造工学論文集, Vol.54A, (CD-ROM), 2008.
- 3) 千田知弘, 後藤文彦, 薄木征三, 佐々木貴信: 鋼板挿入集成材梁の有限要素弾塑性解析, 構造工学論文集, Vol.53A, (CD-ROM), 2007.
- 4) 薄木征三, 千田知弘, 佐々木貴信, 後藤文彦: 集成材-複数挿入鋼板型ハイブリッド梁の曲げ弾塑性挙動に関する実験と解析, 構造工学論文集, Vol.53A, (CD-ROM), 2007.
- 5) Chida, T., Gotou, H., Usuki, S., Toyoda, A., Sasaki, T.: Elasto-plastic shear behavior of steel-inserted glulam-beams, International Conference on 9th Steel, Space & Composite Structure, 2007.
- 6) 高木優任, 本間宏二, 後藤信弘: 斜角を有する角形鋼管を用いた床版橋の載荷実験, 構造工学論文集, Vol.53A, (CD-ROM), 2007.
- 7) 千田知弘, 佐々木貴信, 薄木征三, 後藤文彦, 篠原義則: 支間中央に継手部を持つ角形鋼管ハイブリッド木桁の FEM 性能予測, 第 8 回木橋技術に関する論文報告集(査読審部門), pp.149-160, 2009.
- 8) 千田知弘, 佐々木貴信, 薄木征三, 石川和彦, 篠原義則, 後藤文彦: 1/4 モデル角形鋼管ハイブリッド木桁のせん断解析, 第 7 回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集(査読審査部門), pp.83-94, 2007.
- 9) Chida, T., Sasaki, T., Gotou, H., Usuki, S., Shinohara, Y., Toyoda, A.: Proposal of a square steel tube-timber hybrid bridge and the technologies used for it, WCTE2010, 2010 (CD-ROM).
- 10) 千田知弘, 佐々木貴信, 薄木征三, 後藤文彦, 篠原義則, 豊田淳: 歩道橋用木製防護柵の基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.56A, (CD-ROM), 2010.
- 11) 千田知弘, 佐々木貴信: 部分フランジ付挿入補強部材及び応力緩衝層構造, 特願 2009-189192.
- 12) (社)日本建築学会: 木質構造設計基準・同解説. 2003.
- 13) (社)土木学会: 構造力学公式集, p.209, 1994.
- 14) 薄木征三, 千田知弘, 佐々木貴信, 後藤文彦: 集成材-複数挿入鋼板型ハイブリッド梁の曲げ弾塑性挙動に関する実験と解析, 構造工学論文集, Vol.53A, p.872, 2007.

(2010.5.14 受付)

PERFORMANCE TEST AND FEM ANALYSIS OF A SQUARE STEEL TUBE-TIMBER HYBRID BEAM WITH A JOINT IN THE CENTER

Tomohiro CHIDA, Takanobu SASAKI, Seizo USUKI and Humihiko GOTOU

It is thought that needs of a client for timber bridge increase from rise or concern to environmental problem in addition to remarkable landscape. Recently, hybrid structure reinforced wood beam with steel plate is proposed, it combines with the steel plate deck and is adopted in any real bridge. In such bridge, a joint is needed from workability, it is very important to know strength property of joint.

In this study, we actually make the exact size specimen of a square steel tube-timber hybrid beam with a joint in the center to confirm its workability. In addition, we carry out load test, assessment its strength property by comparing experiment with FEM analysis.