

ボルト継手を用いた木トラス橋の 架設時に生じる変位の検討

下妻 達也¹・渡辺 浩²・松田 敏輝³・大隣 昭作⁴

¹正会員 福岡大学助教 工学部社会デザイン工学科 (〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1)
E-mail: shimozuma@fukuoka-u.ac.jp

²正会員 福岡大学教授 工学部社会デザイン工学科 (〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1)
E-mail: mag@fukuoka-u.ac.jp

³非会員 株式会社名村造船所 鉄構事業部 (〒848-0121 佐賀県伊万里市黒川町塩屋 5 番地 1)
E-mail: Toshiki_Matsuda@namura.co.jp

⁴正会員 福岡大学助手 工学部社会デザイン工学科 (〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1)
E-mail: ohtonari@fukuoka-u.ac.jp

木橋は完成時に過度な変位が生じていると使用性において大きな問題となるため、設計段階で変位の計算が行われる。継手部にボルトを用いる木橋において変位に影響を及ぼす要因は、自重による部材変形に加えて継手部の構造により生じるものが挙げられるが、ボルト継手部の構造により生じる変位は現状手探りの状態で設計が行われている。既設の木橋の場合経験的に変位の計算が行われているが、完成時に設計で想定した変位とずれが生じた木橋も存在するため、継手部の構造により生じる変位の計算手法の確立は急務の課題である。本研究ではボルト継手を用いた木トラス橋を対象とし、架設時に変位を生じる要因を自重による部材変形、ボルト孔の遊び、母材へのボルトのめりこみに分け、各要因に対する変位計算方法を検討する。

Key Words: timber truss bridge, bolted joint, displacement, bolt embedding, calculation formula

1. はじめに

我が国では古来、木材を使った橋梁が数多く架設されてきたが、戦後の急激なモータリゼーションの結果、耐久性や経済性に優れる鋼橋やコンクリート橋が増加し現在でも主流となっている。しかし、近年集成材の製造技術や防腐処理技術の向上、金属製継手の開発、景観や自然との調和が求められていること等を背景として木橋をはじめとする木構造物の建設が以前より増加している¹⁾。

木橋は完成時に過度な変位が生じていると使用性において大きな問題となるため、架設時のベントを外した時に所定の形状となるよう、設計段階で変位の計算が行われる。継手部にボルトを用いる木橋架設時において変位に影響を及ぼす要因は自重による部材変形と継手部の構造により生じるものが挙げられる。この内、設計において自重による部材変形により生じる変位は考慮されているが、ボルト継手部の構造により生じる変位は手探りの状態で計算が行われている。また、木構造のボルト継手部の変位に関する研究について、実験、解析的にいくつ

か検討を行った事例は存在する^{2,3)}。しかし、一つの木構造物について継手部に変位を生じる要因を整理し、各要因について系統的に検討を行った事例は無く、多くは一つの要因に着目した供試体による実験やボルト孔やボルトの局所的な解析を行った事例である。既設の木橋の場合架設時の変位は経験的に考慮されているものの、完成時に設計で想定した変位とずれが生じた木橋も存在する。故に、架設時に生じる変位が分かれば設計時に想定すべき変位を逆算することも可能となり、完成時に生じるずれの抑制を期待できる。

そこで本研究では継手部にボルトを用いた木トラス橋を対象とし、架設時に生じる変位の影響を検討することを目的とする。具体的には継手部の構造による変位についてその発生要因を整理し、各要因に対する変位の計算方法を検討する。また、検討した計算方法を用いて木トラス橋3橋を例に架設時に生じる変位を算出し、各要因の変位への影響の大きさを調べる。さらに、1つの木トラス橋について解析により変位を算出し、検討した計算方法の妥当性を検証する。

2. 木橋ボルト継手部に起因する変位

ボルト継手を用いた木橋の場合、木部材へボルト径よりも1~2(mm)大きな孔をあけ⁴⁾、鋼板を介してボルトで固定する方法がよく用いられる(図-1(a)). 鋼橋の高力ボルト摩擦接合と異なりボルトに強い張力を生じないため木部材へのナットのめりこみを防止でき、また、クリープ変形によるゆるみの影響を受けない利点がある。一方でボルト孔とボルトの間に遊びがあるため継手部を完全に固定できず動きを生じる。また、架設時のベントを外し、ボルトに木部材の軸力による荷重が作用することでボルト孔側面へのボルトのめりこみが発生し、これも変位を生じる原因となる(図-1(b)).

以上のように木橋継手部をボルトで固定する場合、自重による部材変形に加えてボルト孔の遊び、母材へのボルトのめりこみが最終的な変位を決定する要因になると考えられ、変位の計算にはこれら複数の要因について系統的な検討が必要となる。なお、木質構造設計規準・同解説⁵⁾によるとボルトを用いる場合の木部材の継手方法にはいくつか種類があるが、本研究では木部材を両側から鋼板で挟み込む二面せん断鋼板側材形式を対象とする。

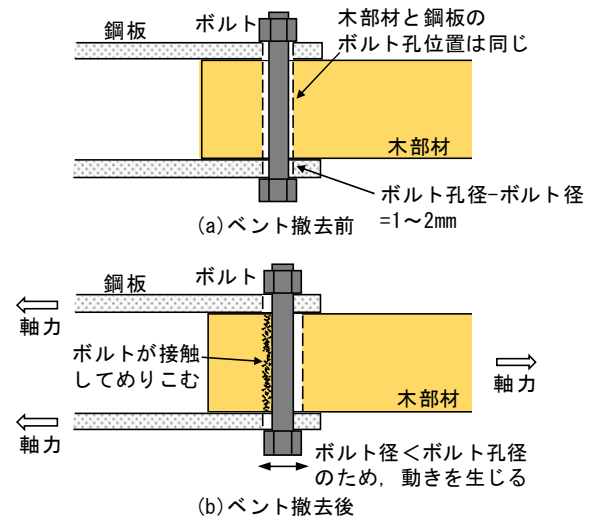


図-1 ボルト継手部の動き

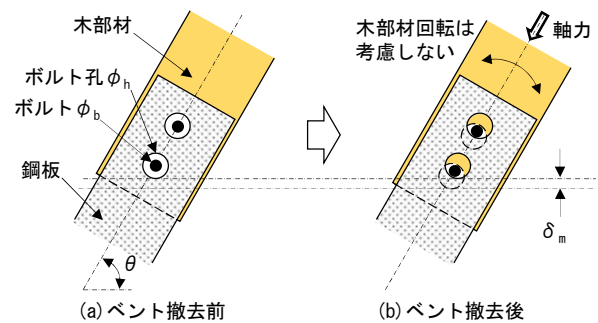


図-2 ボルトが部材軸方向に動いたときの変位

3. 変位計算方法の検討

本章では前章で挙げた架設時に変位を生じる各要因について変位の計算方法を検討する。木トラス橋架設時に生じる変位 δ は次式より計算できると考えられる。

$$\delta = \delta_d + \delta_m + \delta_b \quad (1)$$

ここで、 δ_d は部材変形による変位、 δ_m はボルト孔の遊びによる変位、 δ_b はボルト孔側面へのめりこみによる変位であり、これらの総和が架設時に生じる変位となる。

自重による部材変形を要因とする変位 δ_d はトラス部材、格点部鋼板、床版重量等の死荷重を考慮して算出する。めりこみによる変位算出のため、同時に各部材に生じる軸力も算出しておく。

ボルト孔の遊びによる変位 δ_m は、部材に生じる軸力によりボルトが部材軸方向に動いたときの变位 δ_{m1} と、格点部鋼板の回転による変位 δ_{m2} の合計として算出する。ボルトが部材軸方向に動いたときの变位は、図-2に示すようにボルト孔径 ϕ_h とボルト径 ϕ_b の差だけ部材軸方向へ変位を生じるため、これに部材の傾斜角度 θ を考慮した値として算出される。

$$\delta_{m1} = (\phi_h - \phi_b) \times \sin \theta \quad (2)$$

(2)式は1継手当りの変位であり、全体の変位を算出する際には変位に影響を及ぼす継手数を乗じる必要がある。詳細は次章にて説明する。また、実際には ϕ_h と ϕ_b の差

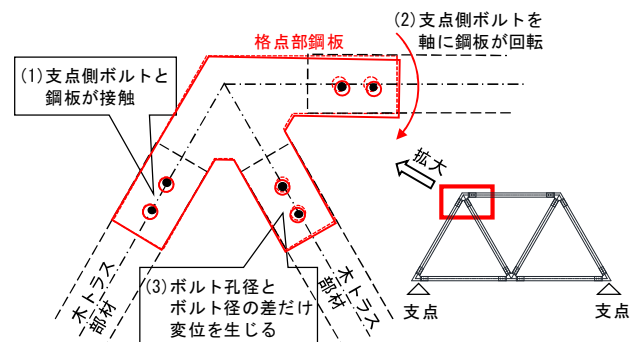


図-3 格点部鋼板の回転による変位

の影響から木部材に回転を生じる可能性があるが、一般的な木トラス橋の場合、継手部の長さよりも部材長が十分に長いため、部材の回転の影響は微小と考え無視した。格点部鋼板の回転による変位は、支点部以外の格点部鋼板は図-3に示すように支点側のボルトを軸として、ボルト孔径とボルト径の差だけ回転を生じると考えられる。従って、格点部鋼板1箇所当りに生じる変位はボルト孔径とボルト径の差で表される。

$$\delta_{m2} = \phi_h - \phi_b \quad (3)$$

ボルト孔側面へのめりこみによる変位 δ_b は面圧定数より(4)式を用いて算出する。めりこみの方向は軸力の作

用方向, すなわち部材軸方向を想定しているため, トラス部材の角度を考慮している. ここで, P : 軸力(N), K_c : 面圧定数(N/mm³), A : ボルトの接触面積(mm²), n : 1 継手当りのボルト本数である.

$$\delta_b = P / (K_c \times A \times n) \times \sin \theta \quad (4)$$

(4)式は1 継手当りの変位であるため, 全体の変位を算出する際には δ_{m1} 同様に継手数を乗じる必要がある.

4. 木トラス橋架設時の変位計算

本章では2 連ワーレントラスの歩道橋を例に, 前章で検討した計算方法により架設時に生じる変位を算出する. また, 解析により結果の妥当性を検証する.

(1) 架設時の変位計算

図-4 に示す2 連ワーレントラスの木歩道橋を例に変位の算出過程を説明する. 木部材断面寸法(110×110 (mm)) およびボルト継手部構造(ボルト径 16(mm), ボルト本数 2 本, ボルト孔径 18(mm))は, 国土交通省⁹⁾の最小ボルト径の規定および木質構造設計規準・同解説⁹⁾に規定されるボルトの縁端距離の規定から決定した. いずれも死荷重(木部材, 格点部鋼板, 床版)と道路橋示方書の群衆荷重⁷⁾より行った概略設計を満足することを確認している. 使用材料は木部材をスギ集成材(E65-F255), ボルトと格点部鋼板をSS400 とした. また, 変位の算出はトラス下弦材で最大変位を生じる下側中央鋼板位置とした.

自重による部材変形を要因とする変位は平面トラスとして算出した. スギ集成材の単位重量は3.24(kN/m³)とし⁸⁾, トラス格点部において部材同士の結合は剛結として計算した. 計算の結果, 下側中央鋼板位置における鉛直変位は $\delta_d = 0.04$ (mm)であった. また, 部材に生じる軸力は外側斜材 555(N), 内側斜材 361(N)であった.

次に, ボルト孔の遊びによる変位を算出する. ボルトが部材軸方向に動いたときの変位 δ_{m1} は, ボルト孔径が 18(mm), ボルト径が 16(mm)より, 1 継手当りの変位は(2)式より $(18-16) \times \sin 60^\circ = 1.73$ (mm)となる. ここで, 変位に影響を及ぼす継手について考える. 現在着目している下側中央鋼板には下弦材と内側斜材が接続されている. 内側斜材は下側中央鋼板が下方へ落下するのを防いでおり, 外側斜材には上側鋼板を介して内側斜材からの力が伝達される. 従って, 変位に影響を及ぼす継手は内側斜材および外側斜材上下端の計 4 か所であり, これに 1 継手当りの変位を乗じればボルト孔の遊びによる変位を算出できると考えた. 上下弦材については水平材であり, 部材やボルトの鉛直方向への移動には大きく影響しないと考えられるため, 変位に影響を及ぼす継手から除外した.

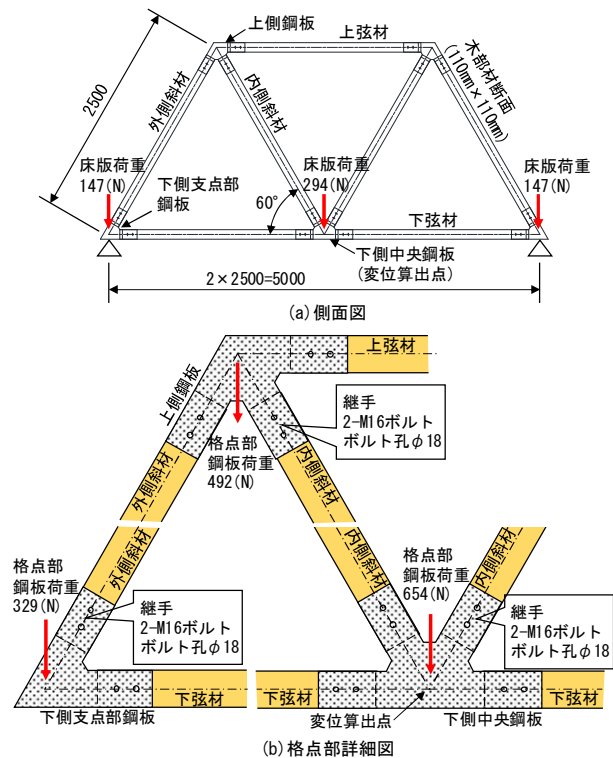


図-4 2 連ワーレントラスの木歩道橋

故に, ボルトが部材軸方向に動いたときの変位は $\delta_{m1} = 1.73 \times 4 = 6.92$ (mm)となる. 格点部鋼板の回転による変位 δ_{m2} は, 回転を生じるのは上側鋼板のみであるため, $\delta_{m2} = 18-16 = 2.00$ (mm)となる.

ボルト孔側面へのめりこみによる変位は(4)式より算出する. 面圧定数は木質構造接合部設計マニュアル⁹⁾を参考に木材の繊維方向のヤング係数から計算を行った値 31.6(N/mm³)を用いた. 変位計算に使用する軸力は部材変形による変位計算時に算出した軸力を用いた. ボルトの接触面積はボルト全幅が接触すると仮定した. 結果, 1 継手当りのめりこみによる変位は,

$$\text{外側斜材: } 555 / (31.6 \times 110 \times 16 \times 2) \times \sin 60^\circ = 0.004 \text{ (mm)}$$

$$\text{内側斜材: } 361 / (31.6 \times 110 \times 16 \times 2) \times \sin 60^\circ = 0.003 \text{ (mm)}$$

となる. 故に $\delta_b = 2 \times 0.004 + 2 \times 0.003 = 0.01$ (mm)がめりこみによる変位の合計となる.

以上の結果より, 図-4 のトラス橋架設時の下側中央鋼板に生じる変位は $\delta = 0.04 + 6.92 + 0.01 = 8.97$ (mm)となる.

(2) 解析による変位の算出

前節で算出した変位の妥当性を検証するため, 図-4 の 2 連ワーレントラス橋を忠実に再現した解析モデルを作成し, 変位を算出する.

a) 解析条件

図-5 に解析モデル, 表-1 に入力した材料定数^{4), 8)}を示す. 部材は木部材, 格点部鋼板, ボルトを全てソリッド要素でモデル化し, 木部材をスギ集成材(E65-F255), ボルトと格点部鋼板を SS400 とした. なお, 本橋の部材, 荷

重、拘束条件は完全に左右対称であり、変位も左右対称に生じると考えられること、また、計算負荷軽減のため橋の片側のみモデル化を行った。拘束条件は支点位置の鋼板下面位置を単純支持とし、上弦材右端および下側中央鋼板の右側は水平方向のみ拘束とした。加えて全部材のZ軸方向の変位も拘束している。荷重は重力加速度を鉛直下向きに作用し、全ての部材を自由落下させ、停止したときの各部材の変位を求めた。解析モデルの初期状態として、木部材と格点部鋼板のボルト孔は完全に一致した状態とし、ボルトはボルト孔の中心にあるものとした。木部材と格点部鋼板は1(mm)の隙間をあけている。木部材と格点部鋼板、ボルト同士の摩擦は考慮していない。なお、本解析は木部材、格点部鋼板、ボルトの要素が接続されておらず、各部材の落下を扱うことから極めて非線形性の強い解析となる。そこで、落下や衝突といった非線形性の強い問題を扱える、汎用有限要素法ソフトウェア ANSYS の陽解法動解析システムを用いた。

b) 部材の移動方向

はじめに、部材の移動方向が3章で検討した通りになっているか確認する。各部材を自由落下させ停止した時

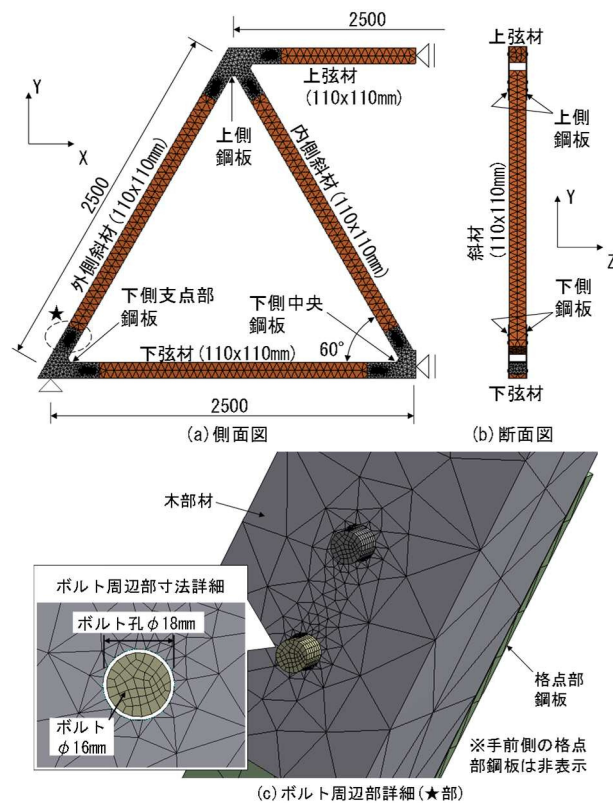


図-5 解析モデル

表-1 材料定数

	スギ集成材 (繊維方向)	鋼材 (SS400)
密度	kN/m^3	
ヤング係数	N/mm^2	
ポアソン比		

密度	3.24	77.0
ヤング係数	6500	200000
ポアソン比	0.4	0.3

の各継手のボルトの移動方向詳細を図-6に示す。図より、A、D部の継手はトラス部材の軸方向とボルトの移動方向がほぼ一致している。上側鋼板の動きを見ると、3章図-3で想定した通り時計回りの回転を生じていた。B、C、E部の上側鋼板との継手はトラス部材の軸方向とボルトの移動方向にずれが見られるが、上側鋼板の回転の影響と考えられる。F部の継手はボルトが真下に落下しているが、上側鋼板と異なり下側中央鋼板には回転を生じないためと考えられる。以上の結果より、概ね3章にて想定した通りに部材は移動しているが、上側鋼板の回転の影響については注意が必要である。

c) 各継手部に生じた変位の解析結果

各継手部に生じた変位について考察する。変位解析結果を図-7に示す。図中のコンターは鉛直下方向の変位を示しており、暖色の箇所ほど生じた変位が大きい。また、木部材と格点部鋼板の継手部には生じた変位の値を示しており、(赤字)で記載されている数値は4章(1)の変位計算結果から部位ごとの変位を示したものである(以下、検討式による変位と呼ぶ)。下側支点部鋼板と外側斜材の継

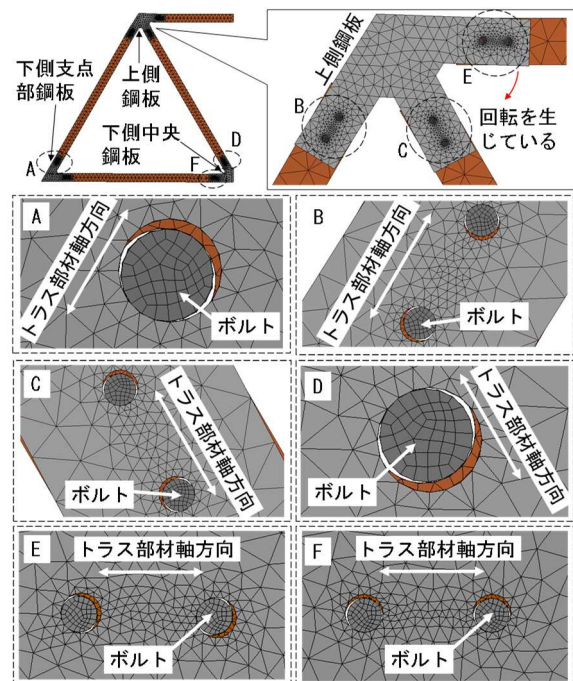


図-6 各継手部のボルトの移動方向

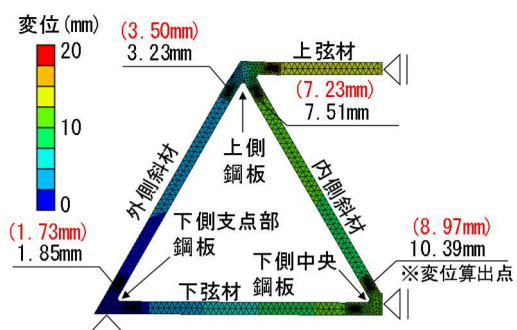


図-7 変位解析結果

手には解析では1.85(mm)の変位を生じた。検討式による変位の計算結果ではトラス部材軸方向への部材の移動とめりこみによって1.73(mm)の変位を生じると計算したが、概ね近い値が得られている。上側鋼板と外側斜材の継手には解析では3.23(mm)の変位を生じているが、検討式による変位の計算結果は3.50(mm)と若干小さい値となっている。これは上側鋼板に図-6に示すような時計回りの回転を生じたことで、外側斜材に下側支点部鋼板の継手部を軸とする反時計回りの回転が生じ、外側斜材の上端側継手部が上方に移動したことが原因と考えられる。一方、上側鋼板と内側斜材の継手には解析では7.51(mm)の変位を生じているが、検討式による変位の計算結果は7.23(mm)と若干大きくなった。内側斜材も外側斜材同様に上側鋼板の回転に合わせて若干の回転を生じたと考えられるが、外側斜材の継手部が上方に移動した分、上側鋼板が時計回りに回転し、内側斜材との継手部に生じる変位がその分大きくなったと考えられる。変位算出点である下側中央鋼板の変位は、解析が10.39(mm)に対し検討式による変位の計算結果は8.97(mm)であり、両者の差は1(mm)程度であった。要因として上側鋼板および斜材の回転の影響が挙げられるが、概ね近い結果が得られた。

d) ボルト孔側面に生じためりこみ変位の解析結果

ボルトの木部材ボルト孔側面へのめりこみ変位について考察する。めりこみ変位の算出箇所は下側鋼板の継手部(図-6, A, D部)の2か所とし、解析の初期状態と部材落下後のボルト孔の節点座標値の差から算出した。検討式により計算しためりこみ変位はA部で0.004(mm)、D部で0.003(mm)であったが、解析結果はA部で0.010(mm)、D部で0.002(mm)と若干の差があった。原因として、解析において斜材の回転によりめりこみ方向が部材軸方向から若干ずれたこと、ボルト孔のメッシュ分割がやや粗く、計算された変位の精度が十分でないことが挙げられるが、図-7の変位算出点に生じた変位と比較して十分小さい値であるため最終的に生じる変位への影響は極めて小さいと言える。

5. 変位計算式の他トラス橋への適用と考察

本研究で検討した変位計算式を他のトラス橋へ適用する場合を想定し、図-8に示す木トラス橋2橋について変位の計算を行う。これらの木トラス橋は前章の2連ワーレントラス同様に木部材とボルト寸法の規定および死荷重、活荷重に対する概略設計を満足するものを用いており、いずれの木トラス橋も部材断面寸法は110×110(mm)、ボルト径16(mm)、1継手当りのボルト本数2本である。変位計算位置は下弦材中央の鋼板位置(☆部)とした。変位計算結果を表-2に示し、前章にて計算した2連ワーレ

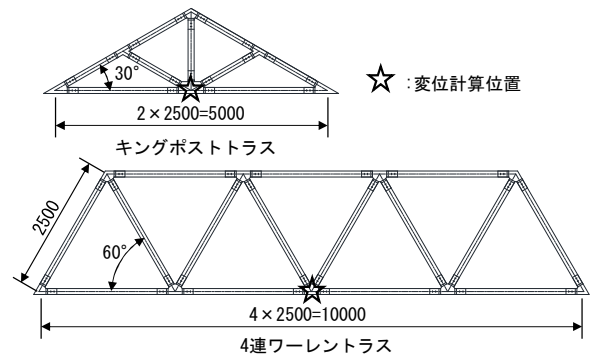


図-8 計算対象の木トラス橋

表-2 変位計算結果

	変位(mm, ())は総変位に対する割合%を示す)						
	ボルト孔遊び		めりこみ		自重		合計
2連ワーレン	8.92	(99.4)	0.01	(0.1)	0.04	(0.4)	8.97
キングポスト	10.00	(98.6)	0.03	(0.3)	0.11	(1.1)	10.14
4連ワーレン	17.86	(98.5)	0.04	(0.2)	0.23	(1.3)	18.13

ントラスの結果も併せて示している。各要因に対する変位と変位の合計に対する割合を示しているが、いずれの結果もボルト孔の遊びによる変位が99%程度と高い値となった。変位に影響を及ぼす継手数は着目点が格点部鋼板位置の場合、「支点～着目点までの斜材・鉛直材の数×2」で算出できるが、径間数が多いほど、また、継手数が多いほど生じる変位は大きくなる。一方で、ボルト孔径とボルト径の差を施工上許される範囲で極力小さくしておくことで、変位の発生を大きく抑えられると考えられる。

めりこみによる変位はいずれも小さく、変位の合計に対する割合はいずれの木トラス橋においても1%に満たない結果となった。めりこみによる変位は、部材に生じる軸力、ボルトの接触面積、面圧定数が結果に影響すると思われる。部材に生じる軸力は橋梁規模や形式によって変化するが、軸力が大きい場合はその分ボルト本数が増加するため、軸力の大小はめりこみ量に大きく影響しないと考えられる。また、ボルトの接触面積は今回ボルトの全幅が接触する場合を想定したが、仮に接触幅を小さくしても変位の合計に及ぼす影響は極めて小さい。一方、面圧定数はスギ集成材のヤング係数から算出したが、使用する値により結果が変わる可能性がある。

自重による変位は2連ワーレントラスよりもトラス高の小さいキングポストトラス、橋長の長い4連ワーレントラスの方が若干大きな値となった。しかし、変位の合計に対する割合は1%程度と小さい結果であった。

6. まとめと今後の課題

本研究ではボルト継手を用いた木トラス橋について、継手部に起因する変位としてボルト孔の遊び、めりこみ、

自重による部材変形の3つについて変位計算方法を検討した。また、検討した計算方法を用いて木トラス橋3橋の変位計算を行い、内1橋について解析により妥当性の検証を行った。解析結果との比較では上側鋼板および斜材の回転により変位に若干の違いが見られたが、着目点での変位の合計の差は1(mm)程度であった。各要因に対する変位と変位の合計に対する割合を計算すると、ボルト孔の遊びを要因とする変位が全体の変位の98%程度となり、継手の構造やボルト孔径とボルト径の差が架設時に生じる変位に大きく影響することが分かった。なお、本研究で検討した変位計算方法は木部材と鋼板のボルト孔が完全に一致し、ボルトは難なく挿入できる施工上極めて理想的な状態を想定している。加えて、部材同士の摩擦の影響を無視していることから、計算される変位は当該橋梁にて生じうる最大の変位になると予想される。

今後の課題として、部材回転の影響の評価、めり込み変位の(4)式の改良、部材同士の摩擦の考慮、活荷重による変位検討、ボルト孔のずれを考慮した計算が挙げられる。今回検討した変位計算方法ではボルト孔の遊びによる変位について部材の回転の影響を無視したが、ボルト孔径とボルト径の差が大きいほど全体の変位への影響は大きくなると考えられる。解析においても上側鋼板の回転により木トラス部材に若干の回転が確認され、下側中央鋼板の変位に影響を及ぼしたと予想される。部材の回転が全体の変位にどの程度影響するか調査を行う必要がある。また、ボルト孔側面へのめりこみによる変位について、今回はボルト全幅が接触すると仮定した。本来、ボルトに荷重がかかっていない状態ではボルト孔とボルトは1点で接触した状態であり、荷重が増加するにつれ徐々に両者の接触面積が増えるような挙動をとる。表-2に示した結果より全体の変位への影響は小さいと予想されるが、軸力相当の荷重をかけた時のボルトとボルト孔

周辺部についてボルト孔径やボルト径、木部材の材料定数、メッシュサイズを変えた場合の解析を行い、ボルトの木部材へのめりこみの挙動を明らかにした上で(4)式の改良を行いたい。また、今回は木部材と格点部鋼板、木部材とボルト、格点部鋼板とボルトの摩擦の影響を考慮していない。これを考慮することで最終的に生じる変位は小さくなると予想されるため、摩擦の影響についても計算方法に取り入れたい。加えて、活荷重による変位の検討やボルト孔やボルトの初期位置がずれた状態での変位計算も行っていきたい。

参考文献

- 1) 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, pp.1, 2005.
- 2) 例えば、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.
- 3) 例えば、Ali Awaludin, Takuro Hirai, Toshiro Hayashikawa, Yoshihisa Sasaki : Loading Resistance of Bolted Timber Joints beyond their Yield-Loads, Proceedings of the 2nd ASEAN Civil Engineering Conference, 2010.
- 4) 財団法人林業土木コンサルタンツ：実務者のための木橋の設計と施工, pp.47,101-103, 2005.
- 5) 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.222-247, 2002.
- 6) 国土交通省北陸地方整備局：設計要領(共通編), p.38 2011.
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編, p.96, 2017.
- 8) 森林総合研究所：改定4版 木材工業ハンドブック, p.135, 2004.
- 9) 日本建築学会：木質構造接合部設計マニュアル, pp.265-266, 2009.

(Received October 16, 2020)

(Accepted January 31, 2021)

CONSIDERATION OF DISPLACEMENT DURING THE CONSTRUCTION FOR TIMBER TRUSS BRIDGE USING BOLTED JOINT

Tatsuya SHIMOZUMA, Hiroshi WATANABE, Toshiki MATSUDA
and Shosaku OHTONARI

Bridge displacement is calculated at the design phase because it is large problem in usability if the bridge has a large displacement. Factors that affect the displacement of timber bridge using bolted joint are deformation of the members due to dead load and the structure of the joint. In the case of existing timber bridge, displacement is calculated empirically, however, there are timber bridges that is distorted at the completion due to incorrect prediction of displacement calculation. Therefore, establishing the calculation method of displacement due to structure of joint has been required. In this study, we focus the timber truss bridge using bolted joint. The factor of displacement during construction are divided into member deformation due to dead load, bolt hole clearance and bolt embedding, and propose the displacement calculation formula.