

歩道橋用木製防護柵の基礎的研究

Fundamental study of timber railing for pedestrian bridge

千田知弘*, 佐々木貴信**, 薄木征三***, 後藤文彦****, 篠原義則*****, 豊田淳*****
Tomohiro Chida, Takanobu Sasaki, Seizo Usuki, Humihiko Gotou, Yoshinori Shinohara
and Atsushi Toyoda

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

**博(工), 木材高度加工研究所 秋田県立大学准教授 (〒016-0876 能代市宇海詠坂11-1)

***工博, 秋田大学名誉教授 (〒010-8502 秋田市手形学園町1-1)

****博(工), 秋田大学准教授, 工学資源学部土木環境工学科 (〒010-8502 秋田市手形学園町1-1)

*****明治コンサルタント(株) (〒134-0086 東京都江戸川区臨海町3-6-4)

*****三井共同建設コンサルタント(株) (〒169-0075 東京都新宿区高田馬場 1 丁目 4-15)

In recent years, the concern of environmental problem is globally rising. Since amount of carbon dioxide exhaust at construct of timber bridge is much smaller than that of steel or concrete bridge, attention of timber bridge increases. It is more effective to utilize timber for railing in visual effects and decreasing amount of carbon dioxide exhaust. Although the design standard for road bridge cannot be filled with current technology to make timber railing, the standard for pedestrian bridge can be filled with it. In this study, we make prototype of timber railing for the pedestrian bridge, experimentally investigate the performance and compare FEM analysis with experimental results.

Key Words: timber railing, hybrid timber beam, FEM analysis, performance prediction

キーワード: 木製防護柵, ハイブリッド木桁, FEM 解析, 性能予測

1. はじめに

近年, 温室効果ガスによる地球規模での温暖化が叫ばれる中, 家電や自動車を中心に環境問題に強い関心が寄せられている。温室効果ガス全体の排出量の60%をCO₂が占めるが, 建設時のCO₂排出量が鋼やコンクリートを用いた構造物よりも大幅に少ないという事から, 木質構造物の存在意義が更に増してきていると言える¹⁾。現在, 秋田県能代市において, 既存のコンクリート橋に代わって, 図-1に示すハイブリッド木歩道橋²⁾の建設が予定されている。この木橋においては, 主桁はもちろんのこと, 角形鋼管床版の上に木製の床板(ゆかいた)を設置するとともに, 木製防護柵を使用する構造となっている。このように主構造以外の床板や防護柵にも木材を使用することで景観面だけでなく環境面でも効果的である。また, アーチやトラス形式の木橋に比べ, 単純桁形式の木橋では主桁が床版に隠れてしまう分, 木橋と認知されにくい傾向にあるが, 木製防護柵を使用することにより, 木橋としての認知性が高められる効果があることから

発注者のニーズも高い。

既往の木製防護柵においては, 鋼製やコンクリート製の支柱に木材の横梁を取り付けたものや, 従来の鋼製防護柵に化粧板として木材を貼りつけた物が多く, 主部材として木材を使用している橋梁用の防護柵は殆どない。橋梁に使用される防護柵については, 道路橋に関してその設計基準が明確に定められており³⁾, 十分な耐力を持つことはもちろんのこと, 耐力を保持しながら延性が求められる。耐荷力に関しては, 鋼板で補強することにより木製防護柵でも十分に性能規定を満たすことは可能であるが, 破壊性状が脆性的である木材にとって, 耐力を保持しながら延性の性能を満たすことは難しい。著者



図-1 ハイブリッド木歩道橋の3次元パース図

らはこれまで木製防護柵の開発の一環として橋梁用防護柵の設計と実験を行ってきたが、実用化には至っていない。

一方、歩道橋や道路橋の歩道等において転落防止目的として設置される防護柵については歩行者自転車用柵（SP種）としての規定³⁾が示されているが、設計荷重に対して塑性変形しない十分な強度を有することが規定されているのみで終局時の延性の性能については規定されていない。したがって、現状の木質構造の技術を用いて歩道橋用木製防護柵を実現できる可能性がある。

そこで本研究では、道路橋梁用木製防護柵の開発に先立ち、歩道橋用木製防護柵のプロトタイプを作製し、ハイブリッド木桁の試験体²⁾に取り付け水平載荷試験を行い、防護柵の木製支柱の性能評価を行う。また、FEM解析を行い断面内に生じる応力を評価するとともに、実験結果と比較し検討する。

2. 供試体

本研究で作製した木製防護柵の木製支柱の側面図と正面図を図-2に、支柱を受ける鋼材部分(鋼箱)の上面図を図-3に、ハイブリッド木桁²⁾への取り付け位置を図-4にそれぞれ示す。支柱には、異等級のスギ集成材(E75-F240)⁴⁾を用い、鋼材にはSM400材を用いる。

図-2に示すように、断面180×180mm、高さ972mmの集成材の支柱を180×180×238mm、厚さ6mmの鋼箱に挿入し、ボルト4本を挿入して固定する。なお、鋼箱に挿入される支柱の下端部分は、箱の厚さに合わせて四面を6mmずつ削っている。支柱の挿入深さは、鋼箱の深さ238mmに合わせるのではなく、12mm浮かせた226mmとする。これは、供用時に、雨水がボルト孔などから箱内に進入した場合でも、支柱端部が水に接しないように底部に空洞を設け耐久性を考慮したものである。

鋼箱外縁に取り付けられている4本の固定ボルトの位置は、設計上問題が無いとは言え集成材の割裂を考慮すると好ましい位置とは言えないが、これは、別に検討している道路橋用の支柱構造において、支柱内部にH形鋼を埋め込んだハイブリッド構造とするために、上下フランジ位置からボルトを避ける目的で外側にボルトを配置しており、これと共通の構造にしたためである。

ボルト孔は、集成材部においてはボルト径と同じ16mmであるのに対し、鋼箱においては少し大きめの19mmとなっている。この径の違いにより荷重がかかった際にずれが生じるので、支柱の上方の引き抜けがわずかではあるが許容される。横梁を固定するために取り付けられる3箇所の軽量溝形鋼も同様の構造になっている。

鋼箱と支柱の接合に用いられる固定ボルトの方向は橋軸方向に向いているが、耐荷力だけを考慮すれば、集成材の断面欠損が少なくなるように、ボルトの向きは幅員方向に配置する方が効果的であるが、歩行者に接触し

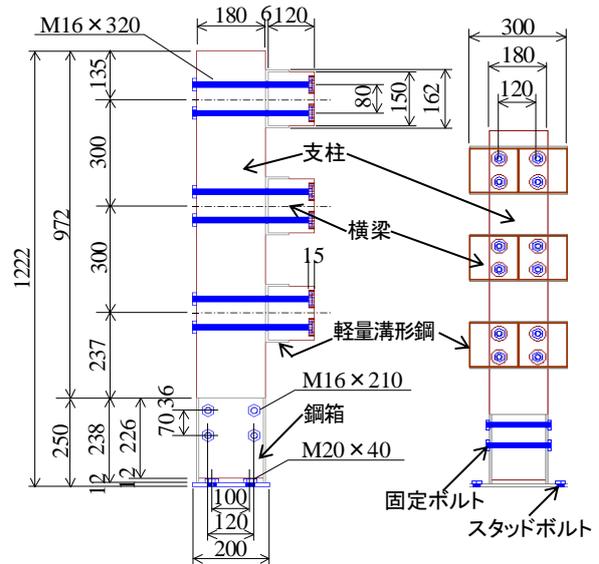


図-2 支柱の側面図と正面図(単位 : mm)

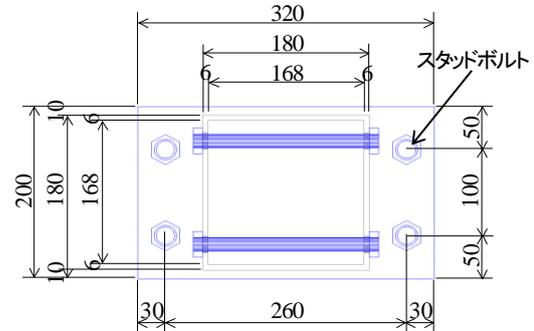


図-3 鋼箱の上面図(単位 : mm)

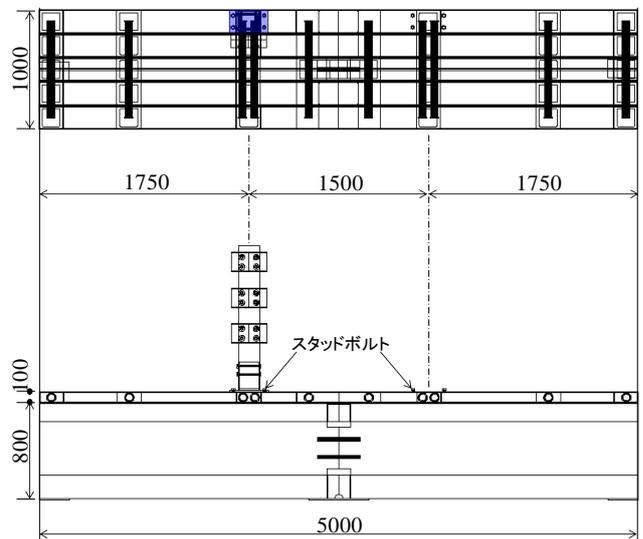


図-4 支柱の取り付け位置(単位 : mm)

ないようにするための配慮から決定している。

横梁と支柱の固定は図-2に示すように、横梁にφ30 mm、深さ15 mmの座掘り加工し、ボルト頭が有効幅員内に突出しないようになっており、同様の配慮がなされている。

本研究においては、図-4に示すように角形鋼管ハイブリッド木桁の試験体³⁾に支柱を取り付けて水平載荷実験

を行う。角形鋼管床版は横つなぎ鋼管挿入部においてのみ、隣り合う角形鋼管どうしが接合されているので、一枚板の床版とは異なり、局所的に鋼管相互にずれが生じる傾向がある。よって、本実験では、木製防護柵の性能評価を行うと同時に、支柱に力がかかった際に、床版にどのような影響があるのかを確認することも目的としている。試験では 図-2 の正面図に示すように、実橋の載荷状態を想定し幅 300mm の溝形鋼を介し 150mm 幅の集成材横梁 2 本を取り付けて載荷した。角形鋼管床版と支柱の取り付けは、図-2、図-3 に示すように床版に 4 か所溶接された $\phi 20\text{mm} \times \text{H}40\text{mm}$ のスタッドボルトに鋼箱の底に溶接された鋼板 ($t=12\text{mm}$) を固定して行う。なお、スタッドボルトを通す底板の孔は $\phi 24\text{mm}$ となっており、支柱が床版からずれることが許容されるので、この部分においても応力集中の軽減が期待できる。

3. 解析モデルと予備解析

本章では、載荷試験を行うに当たり、適切な位置に単軸ゲージを貼付するために、事前に FEM 解析を用いて性能予測を行う。

3.1 FEM 解析モデル

本節では、シエアウェアの汎用有限要素解析ツール ANSYS(ver.11.0)アカデミック版を用いて解析を行う。尚、本節の解析においては、支柱を一枚板の床版の上に固定し解析を行う。以下に理由を示す。

- ゲージ貼付位置を決定することが主目的なので、角形鋼管床版までモデル化する必要が無い。
- 前章でも記した通り、角形鋼管床版の変形、ずれは、実験、解析の結果に大きく影響すると思われる。よって、支柱そのものの定性評価しておく必要がある。

木材の解析においては、ボルトの存在、そのずれの有無が大きく結果に影響することは勿論の事、ボルトと木材の界面のモデル化が大きく結果に影響してくる。そこで本解析においては、使用するボルト全てをボルト頭も含めてモデル化した上で、木材とボルトを含めた全ての鋼材の節点を独立させ、接触解析で行う。接触解析に当たって使用した摩擦係数は、木材-木材においては 0.35、鋼材-鋼材及び鋼材-木材においては 0.52 を使用する²⁾。

図-5 の左図に支柱全体の要素分割図を、右図にボルト周辺のメッシュ分割図を示す。要素サイズは 1 辺 50mm とした。接触解析においては、パソコンのスペックが大きく影響する。使用したパソコンのスペックでは、対象となるジオメトリどうしが複雑であったり、一つのジオメトリに対し複数のジオメトリを接触対象にすると収束せず発散したり、バグを生じて解析そのものを行わなくなるので、図-5 の右図のように、接触解析を用いる箇所を細かく分解して対処する。なお、ボ

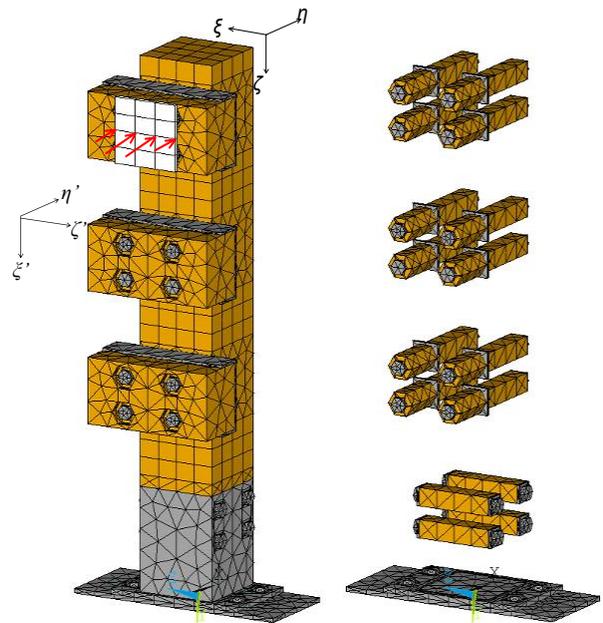


図-5 要素分割詳細

表-1 鋼材の材料定数

	規格	ヤング率	ポアソン比
ボルト	SS400	200GPa	0.3
鋼箱	SM400		

表-2 集成材の材料定数

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	$\nu_{xy}=\nu_{xz}=\nu_{yz}=\nu_{yx}=0.016$
	$\nu_{xy}=\nu_{xz}=0.4$

ルトの形状も収束性能に大きく影響するため、6 角形に簡易モデル化して解析する。

使用した鋼材の各規格と材料定数を表-1 に、集成材の材料定数を表-2 に示す。集成材を各部材として実際に使用する際は、曲げを受ける方向に合わせて繊維方向の向きを変更する。次章では、ハイブリッド木桁に取り付けた支柱の載荷試験の解析を行うので、木桁の幅方向を x 軸、桁高方向を y 軸、梁軸方向を z 軸として全体座標系を定め、図-5 の左図に示すように実際に使用する部材の向きに合わせ局所座標系を各々設定し、表-2 の値を基に支柱と横梁の材料定数を入力する。なお、ここでは、一枚板の床版の底部図心を原点とする。

使用する要素は、ボルトが挿入されていない木材部分及びボルト頭を除くボルト部分のみ 6 面体 8 節点 24 自由度のソリッド要素を使用し、その他の部分は全て 4 面体 4 節点 12 自由度のソリッド要素を使用する。

境界条件は、床版底面の全方向変位を拘束する。載荷は、図-5 左図に示すように、載荷装置の載荷板部分をモデル化し、その中央に線載荷する。載荷板と支柱の節点は共有させず接触問題として解く拘束緩衝法²⁾を用いる。

3.2 FEMによる性能予測

歩道橋用の防護柵として準拠する歩行者自転車用柵（SP種）の設計強度は水平荷重に対して2.5kN/m以上あることが規定されており、設計荷重に対して塑性変形しない十分な強度を有することが要求されている³⁾。秋田県能代市に計画中の木歩道橋においては、支柱間隔が2mの設計であり、支柱一本当たり5kNの設計荷重となり、実験でも5kN時の挙動を確認するが、本節では支柱の定性的評価が目的であるので、1kN 載荷時の挙動を見ていく。

3.1 節でモデル化したモデルに、1kN 載荷時の支柱の変形形状を図-6 に示す。2 章で記したように、鋼箱に開けられたボルト孔の径はボルト径よりも3mm 大きく、支柱が上に引き抜けることを許容している。図-6 を見ると、鋼箱から支柱が引き抜けており、ボルトが斜め上にずれていることから、ボルトとボルト孔の径の違いによるずれが実際に生じ得ることが示唆される。スタッドボルト部においても、ボルト孔はスタッドボルトの径よりも4mm 大きいので、支柱全体が床版からずれると考えられたが、若干床版より浮き上がる挙動しか生じないようである。

次に、径の違いによるこれらのずれを含めた支柱の変形が、支柱全体のひずみ分布にどのような影響があるか見ていく。

図-7 に1kN 載荷時の支柱のひずみ ε_{ζ} (横梁部分は ε_{η}) の分布を示す。図-7 を見ると、横梁と、それを取り付けるためのボルトの存在により局所的に分布は揺らぐが、断面内で直線分布の傾向が認められる。圧縮側においては、支柱の裏側の、鋼箱と接する木材のエッジ部分(以後単にエッジと呼称する)に一番大きな圧縮ひずみの分布が見られるが範囲は広くはない。引張側においては、エッジ周辺に大きなひずみの分布は見られず、エッジより20mm ほど上の部分と、一番下の横梁の取り付け部分の上下エッジ部分周辺に比較的大きなひずみ分布が見られる。横梁周辺に関しては、横梁部分の剛性が極端に大きいので、取り付け部分の変形が他所と比べ拘束される。その変形が拘束される箇所とそうでない箇所の境界で、ひずみが他所よりも大きく出るものと考えられる。

図-8 に鋼箱とスタッドボルト周辺の底板を取り除いたひずみ ε_{ζ} の分布を示す。引張側において支柱の細くなる部分の根元(以後単に根元と記す)に最も大きいひずみの分布が見られる。しかし、根元周辺に大きなひずみの分布が集中するのではなく、根元部分から、太い部分のエッジより20mm ほど上の部分にかけて大きなひずみ分散しているのが分かる。これは、支柱の有効断面にエッジ部が含まれず、変断面部でせん断遅れのような挙動となり、見かけ上20mm ほど上の部分に大きなひずみが出ていると考えられる。

5kN 時の最大ひずみの値にヤング率を乗じて最大引張応力を算出すると11MPa ほどとなるが、強度等級が

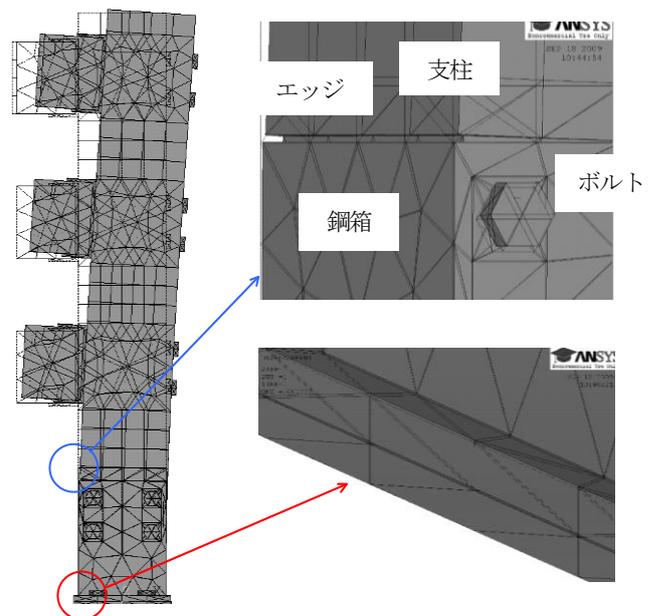


図-6 1kN 載荷時の支柱の変形形状

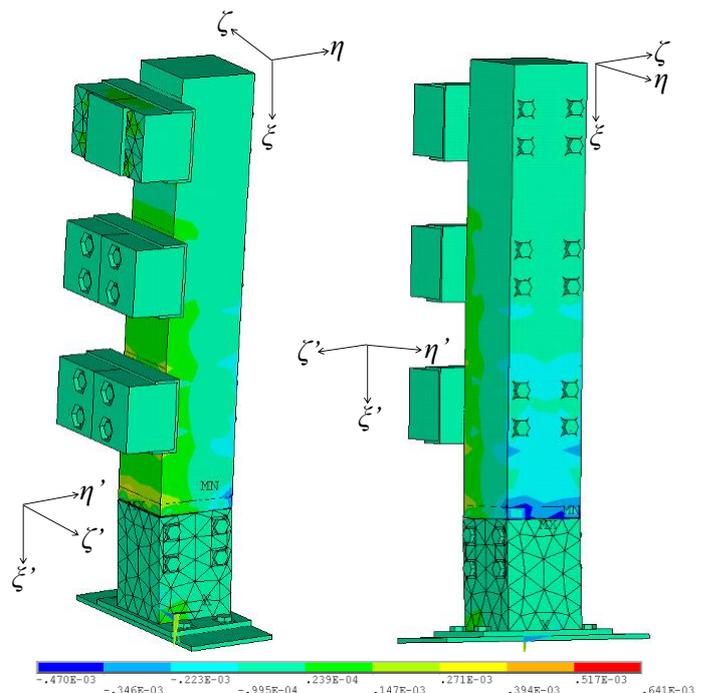


図-7 1kN 載荷時の支柱のひずみ分布 (ε_{ζ})

E75-F240 の集成材の曲げ引張による許容応力度⁴⁾8MPa を上回っているため、断面を大きくするなどの対応が必要となる。一方、圧縮側においては、根元部分に大きなひずみは見られない。支柱が上に引き上げられることで根元部分が鋼箱によってめり込むことが無くなる。同時に、圧縮側のエッジがめり込むように変形するためであろう。エッジ部分のめり込みが支柱全体の強度に影響することはほとんどなく、逆に、繊維方向の単純圧縮は一定値を超えると強度は一定となることから、エッジ部分がめり込むことは悪影響とはならず、効果的に働く

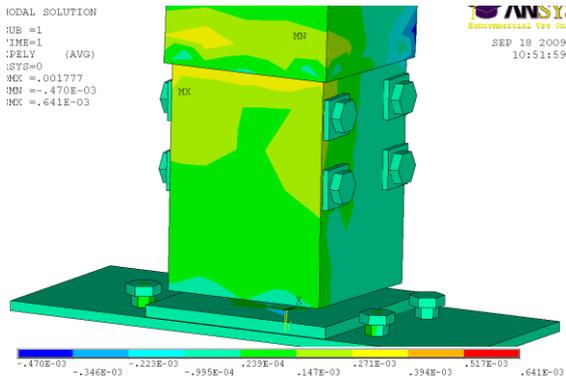


図-8 1kN 載荷時の鋼箱内部の支柱のひずみ分布(ε_z)

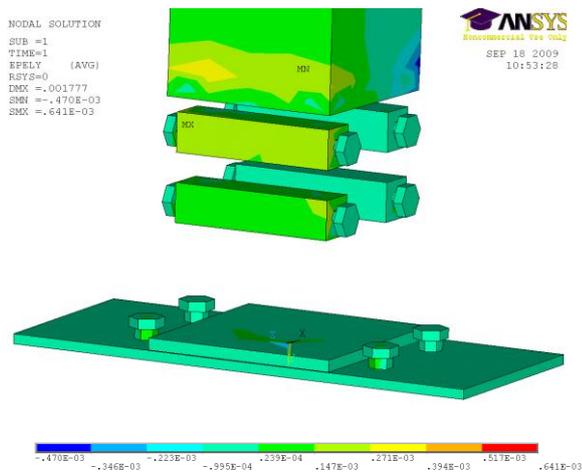


図-9 1kN 載荷時のボルト周辺の木材のひずみ分布(ε_z)

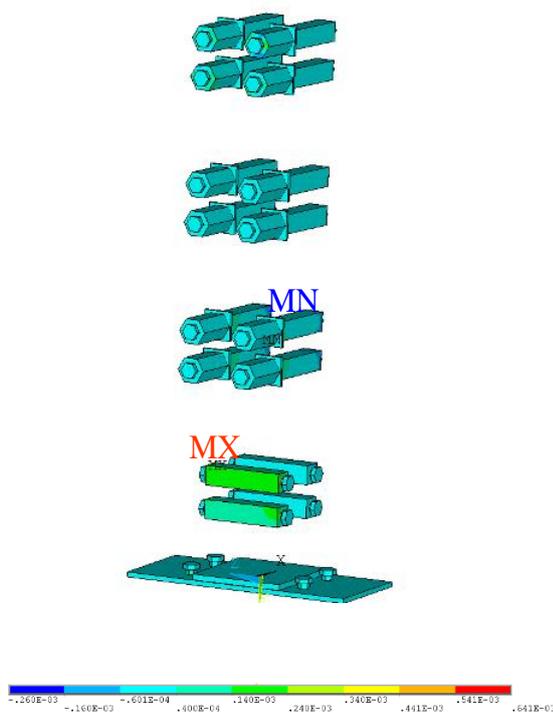


図-10 各ボルト周辺の木材部のひずみ分布(ε_z)

と考えられる。引張側の時と同様に最大圧縮応力を算出すると、17.6MPa ほどとなる。E75-F240 の圧縮による許容応力は 5.8MPa であり、圧縮についても長期許容応力度⁹⁾を上回るが、この値になるのはエッジ部分のみであり、支柱全体に影響を及ぼすということは考えられない。また、木材は圧縮で破壊することはないので、ほとんど影響はないと言える。しかし、このエッジ部のめり込みにより、除荷後に供試体が復元しないことが予測されるので、圧縮部のエッジ部分の検討が必要と考えられる。

スタッドボルトのひずみを見ると、引張ひずみが生じているものの、その値は非常に小さい。底板の孔の径とボルトの径の違いによるずれによる効果とも考えられるが、図-6 で示したように、浮き上がりの変化量そのものも小さいので、単純にスタッドボルトにかかる力は大きくないと考えられる。よって、支柱が力を受けた際に、支柱が床版に与える影響は大きくないと考えられる。

鋼箱と支柱を接合するボルト周辺の木材のひずみ ε_z の分布が見えるようにしたものを図-9 に、全てのボルトの周辺の木材のひずみ ε_z の分布を図-10 に示す。図-9 を見ると、引張側の上のボルト周辺のひずみが最も大きい。根元部分のひずみと比べると、半分ほどの値である。仮に、根元部分のひずみに、ボルトの存在が大きく寄与するのであれば、大きなひずみの分布がボルト周辺から根元まで分布する筈である。よって、ボルト挿入による木材への影響は大きくないと考えられる。ただし、図-9 のひずみの値にヤング率を乗じて応力を算出すると、最大で 2MPa であり、5kN 載荷時には 10MPa 程度であるので、ボルト周辺部での割裂による破壊が生じる可能性がある。図-10 においては、最も大きい圧縮ひずみを生じる上から 3 番目の横梁部のボルト周辺の応力は、5kN 載荷時で 10MPa ほどになり、長期許容応力度を上回る。しかしこの応力は、ボルト挿入によるものではなく、溝形鋼

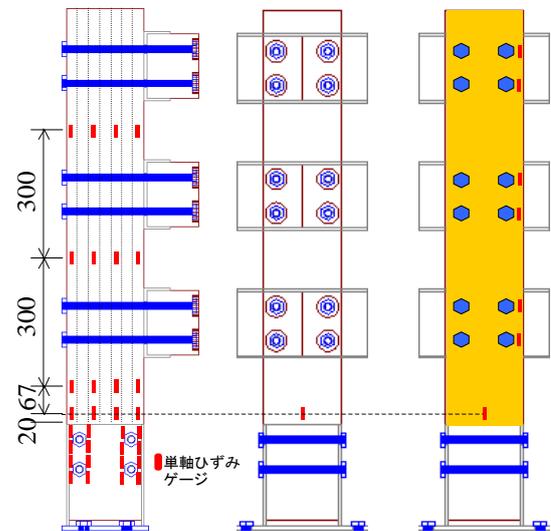


図-11 単軸ゲージ貼付位置

による影響が大きいと考えられる。

以上の事から、本研究の歩道橋用木製防護柵の支柱は、引張においては、根元部及び鋼箱部に挿入された引張側上部のボルト周辺、圧縮においては、木材のエッジ部分及び上から3番目の横梁部周辺において、長期許容応力度を上回る事が予想される。鋼箱部のボルト周辺に関しては、ボルト位置を、上下左右ともに中心に近付けるか、ボルトの向きを横梁設置部と同じ向きにする必要がある。そのほか、支柱断面を大きくするなどの対策の必要性が示唆される。

本章の解析結果より、実験供試体に貼付するひずみゲージ位置は図-11 に示すように定め、次章に水平載荷実験の結果と考察を示す。

4. ハイブリッド木桁に取り付けられた木製支柱の水平載荷試験およびFEM解析

4.1 実験供試体及び実験方法

(1) 実験供試体と水平載荷装置の設置

図-2 に示す実験供試体を、図-4 に示すようにハイブリッド木桁²⁾に取り付け、水平載荷試験を行う。水平載荷に伴う桁全体の横倒れを防ぐために、図-12、図-13 に示すように、円内の4か所に固定した鋼柱を利用し、木材と油圧ジャッキで木桁を固定した。載荷は図-14 に示すように、試験フレームに設置した油圧ジャッキを用いて行った。

(2) 支柱取り付け部の改良

角形鋼管に支柱を取り付けるためのスタッドボルトは角形鋼管に予め溶接されている。このスタッドボルトと角形鋼管の溶接部が盛り上がり、支柱の鋼箱底板に開けられたφ24mmの孔では溶接部が治まらないために、φ35mm孔が開けられた厚さ5mmの鋼板のスペーサーを図-15 に示すように鋼箱底板に溶接しスタッドボルトの溶接部に接触しないようにした。また、角形鋼管の中央部の継ぎ目が盛り上がり、鋼箱を取り付けるとガタが出る。よって、3点でボルトを締めつつ、残り1点の所に2mmほどのスペーサーを挿入しガタが出ないように調整した。

(3) 変位計設置位置

実験においては、角形鋼管床版の変形、スタッドボルト部の引き抜け、支柱の鋼箱からの引き抜けなどが予想される。それらを加味し、図-16 に示すように、6点に変位計を設置した。なお、変位は水平方向は載荷方向を、鉛直方向は下向きの変位をそれぞれ正の値としている。

4.2 FEM解析モデル

図-17 に示すように、3章の解析モデルにスペーサーを加え、文献³⁾のモデルに取り付け解析を行う。ただし、



図-12 正面から見た供試体の固定の様子



図-13 横から見た供試体の固定の様子



図-14 水平載荷試験機の設置



図-15 鋼箱の底板に溶接されたスペーサー

本章の解析にあたっては、使用解析ツールの要素数制限、及びパソコンのスペックによる収束性能を踏まえ、解析モデルに対し、以下の改良を行った。

- ・ 文献のモデルでは、床版における横の角形鋼管どうしの接合は剛結として解析を行ったが、本解析では接触解析とし、角形鋼管の変形をより実際の条件に近付けて解析できるようにした。
- ・ 3章のモデルをそのまま使用した場合、パソコンのスペック上、収束させることが困難であった。3章

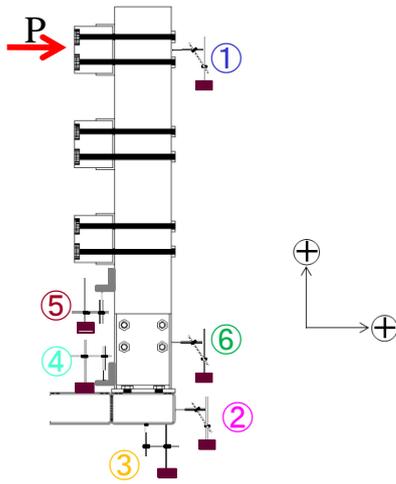


図-16 変位計設置位置

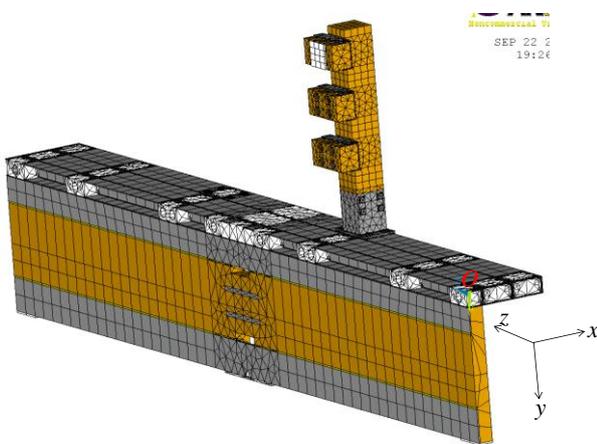


図-17 要素分割図

の結果より、横梁を取り付けるために支柱に挿入されたボルトは、支柱の挙動に大きな影響を及ぼさないことから、横梁、溝形鋼、ボルトの各接合は接触モデルではなく、節点を共有させた剛結モデルとする。鋼箱部分を含め、それより下の部分は3章と同じ接触解析とする。

原点を、図-17 に示すように、対称面上の床版上部に取り桁幅方向を x 軸、桁高方向を y 軸、桁軸方向を z 軸として全体座標系を定める。局所座標系は3章に準ずる。

境界条件は、木桁底部の支点板底面の全方向変位を拘束、 yz 対称面の x 方向を拘束する。尚、実験においては、図-12、図-13 に示すように、横から木桁を押さえつける支持条件であるが、横倒れを生じないという仮定の下、上述のように簡易的に境界条件を与える。

4.3 実験結果及びFEM解析との比較

(1) 荷重-変位関係

図-16 に示した各変位計の荷重-変位曲線を図-18 に、変位量の大きい①の支柱の変位を除いた荷重-変位曲線を図-19 に示す。図-18、図-19 を見ると、すべての変位計でバイリニアもしくはトリリニアの挙動を示している。図

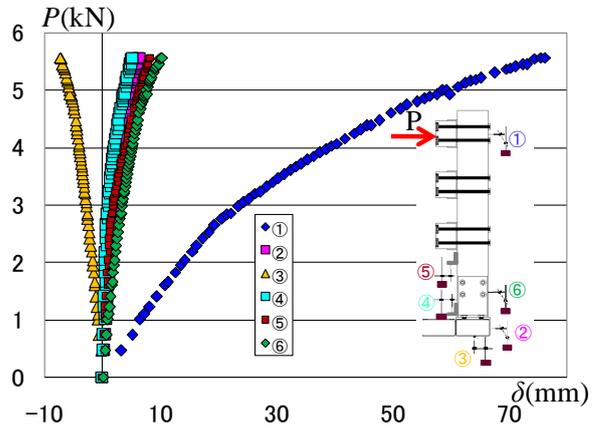


図-18 各変位計の値(①~⑥)

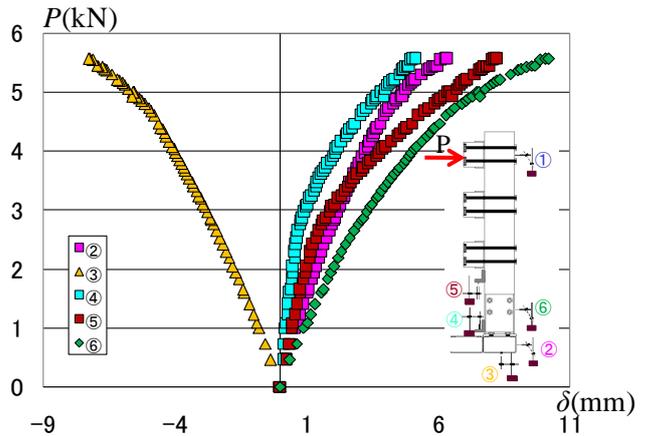


図-19 各変位計の値(②~⑥)

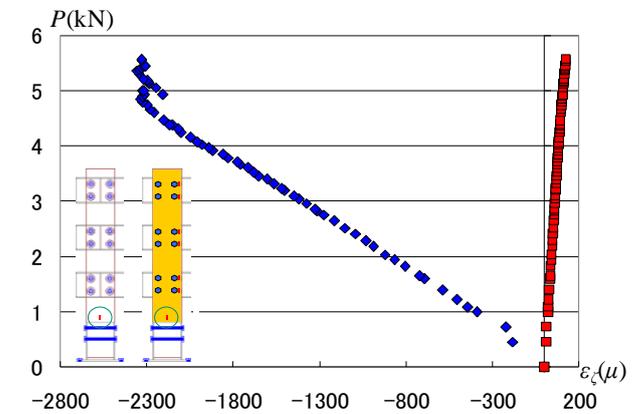


図-20 代表的なひずみの挙動

-16 に示す変位計の位置と両図を比較すると、支柱に取り付けられた①、④、⑤、⑥の変位計は、3kN 辺りで剛性が下がっているが、非線形挙動を示さず、線形挙動を維持しながら 5kN を少し超えるあたりまで推移する。5kN を少し超えたところで再び剛性が下がるが、線形性は維持しており、トリリニアの挙動を示す。一方、床版に取り付けた②、③の変位計は、3kN 付近では剛性は下がらず、5kN を少し超えたあたりで剛性が下がるが、線形性は失わず、バイリニアの挙動を示す。5kN 付近の挙動は、ハイブリッド木桁の横倒れを防ぐジャッキの支持

力が不足し始め、桁全体が横倒れ始めた影響であろう。3kN 付近では支柱の取り付けのガタ等の影響が生じたものと考えられる。

図-20 にひずみ測定結果の一例として図-11 の中央図と右図に示した支柱と鋼箱の界面付近に取り付けたゲージの値を示す。図-20 を見ると、支柱の剛性が大きく失われる 3kN 付近においては、各挙動に変化は特に見られない。この事と床版に取り付けた変位計に変化がないことから、図-18、図-19 における 3kN 付近での剛性の低下は、支柱の圧縮部の比例限による剛性の低下ではなく、支柱部分のみが全体的に大きくずれたことによるものである。また、水平変位量を示す⑥の値に比べ、垂直変位量を示す④、⑤の変化量大きいことから、支柱は水平方向にずれたのではなく、圧縮側のスタッドボルトを中心として、支柱全体が回転したものと考えられる。このことは、①の変化量が⑥を大きく上回ることで確認できる。回転の原因は、鋼箱の底板のゆがみと、スペーサーの強度が挙げられる。底板は鋼箱本体との溶接時にゆがんだものと考えられ、スペーサーの部分溶接時に、底板とスペーサーの間に多くの隙間が見られた。支柱設置時には、2mm ほどの鋼板を挿入しつつガタが出ないようにしたが、載荷後、スペーサーが徐々に変形し、スペーサーと底板の隙間がなくなった分、ガタが生じたものと考えられる。

5kN 付近においては、引張側にこそ挙動に変化は見られないが、圧縮側において、ひずみの値が一旦下がった後、それまでの変化量と同量の割合で再び推移する。3章の解析では、支柱のエッジ部分が引っ掛かるようにめり込んでいく挙動が確認されており、木桁全体がずれた衝撃でエッジ部分が少しずれ、ひずみが減少したものと考えられる。

図-21 に FEM 解析における、桁全体が横倒れを起した 5kN までの各変位を示す。解析はガタなどを生じない理想モデルなので変位量は非常に小さいものとなっているが、図-18、図-19 と比較すると、定性的な挙動に関しては実験値と FEM 解析値は同じ傾向を示す。このことから、FEM 解析で、どの部分がどの様に変形するかといった挙動についての性能予測が可能であると言える。

(2) 特徴的な変形挙動

図-22 に鋼箱から支柱が引き抜ける様子を示した図を、図-23 に鋼箱の底板が変形し、床版から浮き上がる様子を示した図をそれぞれ試験時の写真と並べて示す。3章の解析では、ボルトとボルト孔の径の違いにより、支柱がずれて浮き上がることを示したが、本章における FEM 解析と実験においてもずれて浮き上がる挙動が確認できた。

一方、3章の解析においては、鋼箱の底板が若干ながら床版から浮き上がることを示した。図-23 に示す FEM 解析の変形形状を見ると、本章のモデルにおいては、底

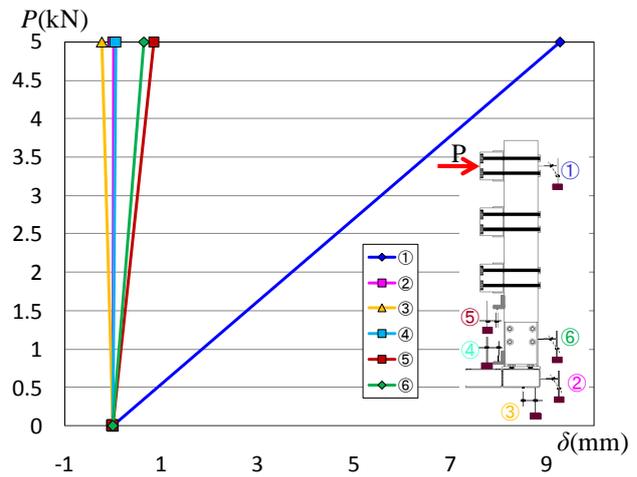


図-21 FEMにおける各変位

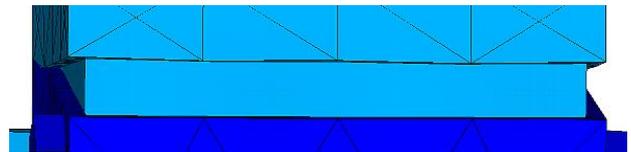


図-22 支柱の鋼箱からの引き抜け(上：FEM, 下:実験)

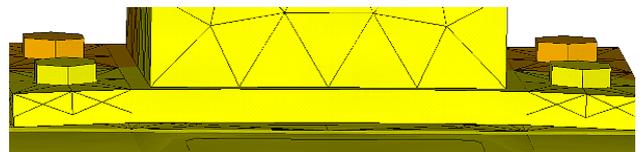


図-23 鋼箱の床版からの浮き上がり(上：FEM, 下:実験)

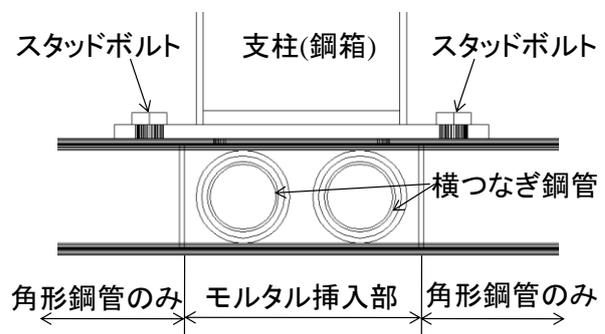


図-24 支柱取り付け部詳細

板が大きく変形し、それにより、底板が床版から大きく浮き上がることが示され、実験においてもその挙動が確認できた。実験での浮き上がりは 5mm を超えるほどなので、本章で再三述べているようにガタの影響も多分に

考えられるが、それ以上に構造上の影響が考えられる。

すなわち、図-24 に示すように、支柱本体は剛性の高いモルタル挿入部の上に来るように設計されているが、スタッドボルトの位置はモルタル挿入部上には無く、角形鋼管のみの箇所には溶接されている。載荷される水平荷重自体は5kNほどではあるが、支柱高が1222mmもあるため、支柱の根元には大きな曲げモーメントが生じる。よって剛性の低い箇所に取り付けられたスタッドボルトが内側に変形し、それに伴い鋼板の底板が変形し、浮き上がるような変形をしたものと考えられる。次節では、この変形に伴うひずみの分布も含め、ひずみゲージとFEM解析値を比較検討し、角形鋼管に取り付けられた支柱の評価を行う。

(3) ひずみの評価

図-25 に5kN 載荷時の、支柱側面に貼付した単軸ひずみゲージの値とFEM解析値の値を示す。なお、その他の箇所の単軸ひずみゲージの値とFEM解析値の値も図-25 に示したものと同等の精度が得られたので、支柱側面の値のみ代表例として示す。また、FEM解析においては、ゲージ貼付位置に節点を設けず、ゲージ位置の上下10mm ずつ離れた箇所に節点を設け解析を行っている。この手法の利点は、単軸ひずみゲージの貼付時のずれを許容できることと、ゲージの値とFEM解析の値がずれた場合、そのずれがゲージ貼付時のずれによる誤差であるかどうか判断できることである。ただし、c 部の下側のゲージに関しては、ゲージ位置の下10mm の箇所が有効断面になっていないエッジ部に当たり、比較できないので解析値は除いている。

図-25 を見ると、すべての箇所で実験データがFEM解析値の結果はよく一致する。引張側のひずみが若干実験結果の方が低いのが、これは横梁を取り付けるための溝形鋼と支柱の接合が、剛結か接触かの違いによる影響によるものと考えられる。3 章ですべての接合を接触で解析した結果を基に、本章ではモデルを簡易し解析を行ったが、十分な精度が得られ、簡易モデルであっても性能予測が可能であることが示唆された。

図-25 で得られた各値に、ヤング率を乗じて応力を算出すると、最も大きい箇所でも長期許容応力度を下回るので、十分に防護柵の性能を満たしていると言える。

一方、局部的にめり込み、ひずみが極度に大きい圧縮側のエッジ部のひずみは2220 μ に達し(図-20)、応力に換算すると16.65MPaに達する。このひずみはエッジ部にしか生じないので、支柱全体の耐力に影響することはないと考えられるが、木材はめり込み変形を生じると、その部分が硬くなり、その影響で除荷後も元の位置に戻らないことが多い。本実験においても、鋼箱のエッジ部分が支柱のエッジ部分にめり込み、除荷後も柱が元の位置に戻らないことが多かった。歩行者用自転車用柵の基準³⁾では、塑性変形を生じないことを規定していることから、

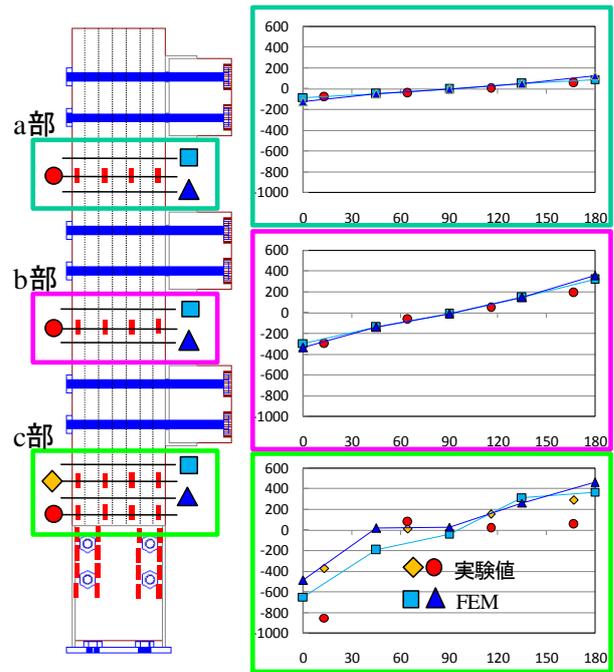


図-25 単軸ゲージの値とFEM解析値との比較
(縦軸：ひずみ(μ)、横軸：幅方向の単軸ゲージ位置と節点位置(mm))

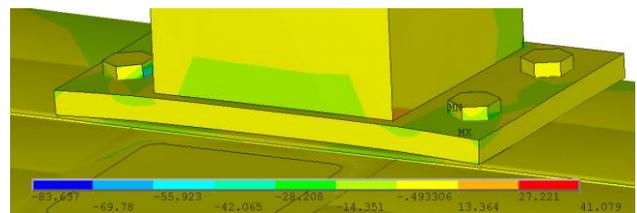


図-26 鋼箱底板部の応力分布

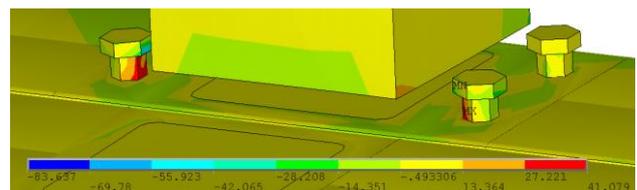


図-27 スタッドボルトの応力分布

圧縮部のエッジ構造だけは改良しなくてはならない。

3 章の解析では、複数箇所において長期許容応力度を上回る箇所が存在したが、本章の実験では、圧縮側の木材エッジ部分のみである。勿論、単軸ひずみゲージが添付できる箇所が限定されるので、3 章で基準を下回った箇所すべてに単軸ひずみゲージは添付できなかったが、実験値とよく一致したFEM解析値を見てみると、エッジ部分以外の箇所の応力はすべて基準値を下回った。図-23 に見られた鋼箱底板の変形が異なることが、その原因として考えられる。

図-26 に1kN 載荷時の鋼箱底板部周辺の応力分布を、図-27 にスタッドボルトの応力分布を示す。図-26 を見る

と、底板が変形し、浮き上がっているが、底板自体には大きな応力は生じていない。そこで、底板を取り除き、スタッドボルトの応力分布を見られるようにした図-27を見ると、手前の引張側のスタッドボルトに41MPaの引張応力が生じており、ナットの部分には、84MPaの圧縮応力が生じている。5kN時の応力に換算すると、それぞれ205MPa、420MPaにもなる。実験においては、供試体の元々のガタもあり、スタッドボルト部の破損、塑性変形は確認できなかったが、スタッドボルトが塑性していた可能性がある。また、ナットが破損し、支柱が床版から外れてしまう可能性があったことが示唆される。4.3.(2)節でも述べたが、鋼箱の底板及びスタッドボルトの変形は、角形鋼管の部分的に異なる剛性によって生じていると考えられる。このような応力集中を避けるためには、スタッドボルト溶接部まで、モルタル挿入区間を拡大し、剛性の差を無くすか、鋼箱の底板の厚さを増やし、底板全体の剛性を向上させ、スタッドボルトにかかる負担を減少させる方法が考えられる。いずれの方法を用いるにしても、非常に簡易に改良できるので、角形鋼管ハイブリッド木桁に、本研究の木製支柱を取り付けることは実現可能と考えられる。

5. まとめ

本研究では、道路橋用木製防護柵の開発に先立ち、歩道橋用木製防護柵のプロトタイプを作成し、ハイブリッド木桁に実際に取り付け水平載荷試験を行うとともに、FEM解析を行い、実験と比較検討した。以下に得られた知見を記す。

- ・実験を行う前にFEMを用い、ボルトを含めたすべての部材を摩擦接合で解く接触解析を行い、木製支柱のみの性能評価を行った。解析の結果、局所的に長期許容応力度を上回る箇所が存在することが明らかになった。

- ・改良手段として、鋼箱に挿入されたボルトの向きを横梁のそれと同じにすることと、断面の拡充が考えられた。しかし、断面を拡充してもエッジ部分のめり込みは生じるので、局所的に許容応力に達してしまい、除荷後に供試体の変形が元に戻らない可能性が示唆された。

- ・ハイブリッド木桁に木製支柱を取り付け、水平載荷試験を行い、FEM解析結果と比較したところ、供試体のガタが原因で変位は著しく合わなかったものの、供試体に貼付した単軸ひずみゲージの値とFEM解析値の値はよく一致した。支柱のみの解析結果と異なり、それらの値は、めり込みが生じるエッジ部を除いて、許容応力の1/4程度であった。

- ・めり込み部に生じる応力は許容応力に近いものであったが、その分布は局所的なものであり、支柱全体の耐力に影響を与えるものではないことが確認された。しかし、めり込みによって除荷後も支柱は元の位置には戻らず、圧縮部の鋼箱と支柱の境界部の改良が必要であることが示された。

- ・変位に関しては、実験値とFEM解析値とは大きなずれが生じたが、鋼箱からの支柱がずれて浮き上がる様子や、鋼箱底板が変形し、床版から浮き上がるといった、本供試体に生じる特徴的な変形はシミュレート可能であった。

- ・鋼箱が変形し、床版から浮き上がる際、引張側のスタッドボルトに応力集中が生じることがFEM解析で示唆された。この原因として、支柱本体が位置する部分と、スタッドボルトが位置する部分とで、床版の構造が異なり、剛性が異なることが挙げられる。改良方法としては、スタッドボルト部までモルタルを挿入し、剛性を均一にするか、鋼箱の底板の厚さを増やし、底板全体の剛性を向上させる方法が考えられ、そのいずれも非常に簡易に行うことが可能である。

以上により、本研究で明らかになった問題点を修正すれば、現状の木質構造の技術を用いた歩道橋用木製防護柵が実現可能であることが示された。

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」の補助の下に行われた。

参考文献

- 1) 三上卓, 堀越一輝, 笹田修司: 木橋建設で生じるCO₂排出量の算定とその評価, 第7回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp.29-36, 2008.
- 2) 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による性能予測, 第8回木橋技術に関する論文報告集, pp.149-160, 2009.
- 3) 社団法人 日本道路協会: 防護柵の設置基準・同解説, 2005.
- 4) (社)日本農林規格: 集成材の日本農林規格, 2007.
- 5) (社)日本建築学会: 木質構造設計基準・同解説—許容応力度・許容耐力設計法一, p.343, 2002.
- 6) 同, pp.157-159, 2002

(2009年9月24日受付)