

トラス桁形式GFRP製橋梁用検査路の開発

小泉 公佑¹・中村 一史²・若林 大³・古谷 嘉康⁴・中井 裕司⁵・西田 雅之⁶

¹学生会員 首都大学東京 大学院 博士前期課程 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

²正会員 首都大学東京 大学院 准教授 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

³正会員 中日本高速道路株式会社 名古屋支社 豊田保全・サービスセンター
(〒470-1202 愛知県豊田市渡刈町大屋敷57)

⁴正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

⁵正会員 前田工織株式会社 東京営業第2部 (〒103-0005 東京都中央区日本橋久松町9-9)

⁶正会員 日本エフ・アール・ピー株式会社 (〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町2-2-13)

軽量で耐食性に優れたトラス桁形式GFRP製橋梁用検査路の開発を目的として、実験的な検討を行った。まず、リベット・接着の併用接合を採用し、トラス格点部の面内・面外に対する接合強度を実験的に検討して、設計断面力に対する安全性を検討した。次に、提案検査路の終局強度を検証するために、サンドイッチパネル床版を有する実大模型による曲げ載荷実験を行った。破壊形式は床版部のせん断破壊であること、設計せん断力に対して十分安全であることが確かめられた。さらに、実大模型を製作して、使用性を検証した。設計荷重に相当する載荷実験からは、たわみ制限を満足すること、また、振動実験からは、有害な振動が生じないことがわかった。これらから、トラス形式とすることで、全体の剛性が高く、安全性・使用性を満足することが確かめられた。

Key Words : inspection path, GFRP, trussed girder, bond strength, serviceability

1. はじめに

高度経済成長期に大量に建設された橋梁の補修・補強、維持管理などの重要性が指摘される中で、橋梁長寿化計画が策定され、計画的に点検・調査が実施されるようになってきた。点検・調査は、近接目視が基本であることから、円滑に実施するためには橋梁用検査路が不可欠である。一般に、検査路は鋼製であるが、海岸部など、環境が厳しい条件では、腐食等が問題となる場合がある。また、計画的な点検・調査を実施するために、後から検査路を設置するケースも増えてきている。

これらのことから、軽量で施工性に優れ、耐食性を有する繊維強化プラスチック (FRP) 製の検査路が適用されつつある¹⁾²⁾³⁾。これらのFRP製の検査路は、一般の鋼製の検査路と同様に、溝形材を桁に用いた、桁構造を基本としている。検査路の設計では、歩道橋と同様に、設計活荷重によるたわみ制限 (使用性) で必要剛度が決定される。桁構造は、鋼に比べて弾性係数が小さいFRPに

とっては、必ずしも合理的な形式とはいえない。

そこで本研究では、FRP製の検査路の剛性を高めるために、トラス桁形式を採用するとともに、床版には、軽量なコア材を用いたサンドイッチパネル床版の適用を提案する。これらを組み合わせることで、構造特性に優れた、低コストなFRP製の検査路を開発する。検討にあたっては、断面寸法の小さいGFRP引抜成形材を適用することから、実大の部分模型を対象に、トラス格点部の耐力、トラス桁構造の曲げ耐力を検討するとともに、実大模型を試作して、設計荷重に対するたわみ特性や、歩行による振動特性など、使用性について検証を行った。

2. 検査路の設計条件とトラス桁形式の提案

表-1に、検査路の設計条件⁴⁾を示す。設計活荷重、有効幅員は、それぞれ3.5kN/m²、0.6mであり、有効幅員に等分布荷重を載荷する。手すりの高さは1.1mとし、支柱間隔は1.9m以内である。本研究では、標準的な検査路と

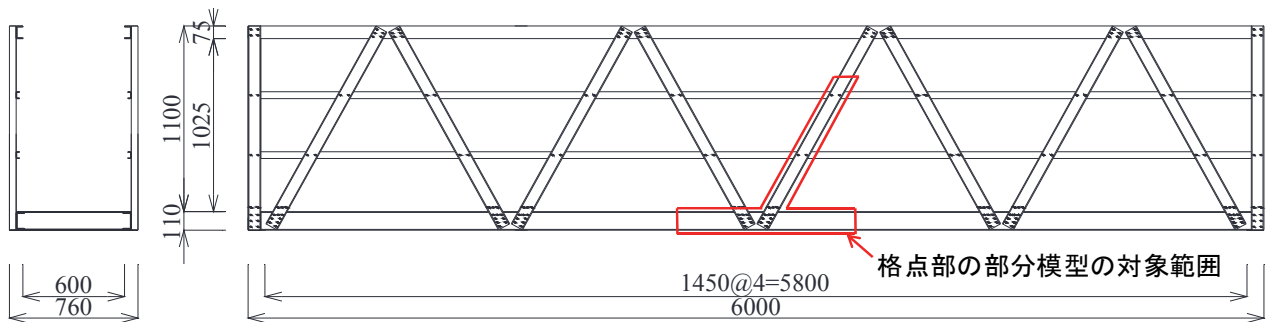


図-1 トラス桁形式FRP検査路の一般図

表-1 検査路の設計条件

設計活荷重 (kN/m ²)	3.5
手すり鉛直荷重 (kN/m)	0.59
手すり水平荷重 (kN/m)	0.39
有効幅員 (m)	0.6
手すり高さ (m)	1.1



図-2 サンドイッチパネル床版の拡大図

して、支間長6mタイプを対象とした。これは、一般的な多主桁橋の対傾構間隔で設置される検査路に相当するものである。また、設計活荷重に対するたわみ制限は、一般の歩道橋⁹⁾を参考に、支間長 L に対して $L/600$ とした。

図-1に、提案するトラス桁形式FRP検査路の一般図を示す。トラスを構成する弦材、斜材、垂直材および非構造部材である高欄の水平材のすべてに、GFRP引抜成形の溝形材を用いている。また、ポニートラス桁形式とすることで、高欄を兼ねたトラス面材となり、たわみを効果的に抑えることができる。トラスの組み方は、軽量化を図るために、ワーレントラスとして、使用部材の数量を減らしている。

さらに、床版にはサンドイッチパネル床版を提案している。図-2に、サンドイッチパネル床版の拡大図を示す。サンドイッチパネル床版は、両端の溝形材の上下面にGFRP製のスキンプレーートを配置した中空の箱断面に、コア材として硬質発泡ウレタンを充填したものである。歩行の路面となる床版部と下弦材を一体化することで部材数を少なくすることができる。また、硬質発泡ウレタンは、軽量盛土工法の充填材としても適用されている⁹⁾。極めて軽量であり、充填性に優れるなど、コア材として利点が多いため、本研究では、硬質発泡ウレタンを適用することとした。

3. 適用材料の選定と材料特性

(1) 構造部材の選定

構造全体系のFEM解析に基づいた概略的な検討結果⁹⁾を参考に、トラスを構成する構造部材を選定した。以下に、その概要を述べる。

a) GFRP溝形材

トラスを構成する部材の断面形状は溝形であり、引抜成形材の汎用品から選定した。ここでは、概略検討によって、たわみ制限を満たす溝形材を選定するものとし、下弦材を兼ねたサンドイッチパネル床版には、 $100 \times 50 \times 5\text{mm}$ (C100)を、上弦材、斜材、垂直材には、 $75 \times 40 \times 5$ (C75)を用いるものとした。さらに、水平材には $40 \times 20 \times 3$ (C40)をそれぞれ選定した。

b) スキンプレータ

サンドイッチパネル床版の上下面に配置するスキンプレータには、ガラス繊維チョップドストランドマットを連続成形した板材を用いることを想定しているが、本研究では、試作段階であることから、チョップドストランドマットをハンドレイアップ成形によって作製した板材を用いることとした。

c) 硬質発泡ウレタン

サンドイッチパネル床版に充填するコア材には、硬質発泡ウレタンを使用した。硬質発泡ウレタンには、ウレタンの密度に応じて種々タイプがある。本研究では、サンドイッチパネル床版の内部が充填されていればよいため、強度が比較的低く、軽量のタイプを選定した。

(2) 接合方法と接合材料の選定

対象とする検査路は、支間長が6mであり、桁の連結は不要であるが、トラスを構成する部材を格点で接合する必要がある。本研究では、断面寸法の小さい、C100、C75の溝形材同士の接合であるため、一般的なガセット接合ではなく、直接、部材同士を接合するものとした。また、接合方法としては、接合面が小さいこと、添接板が不要であること、片側施工が可能であることを考慮し、効率よく接合できるブラインドドリベットと接着剤の併用接合とした。機械接合と接着接合を併用した理由は、リ

ベット接合のみでは、小さい荷重で塑性化すること、また、接着接合の併用により、それが防止でき、継手強度も向上するためである⁸⁾。

リベットには、既往の検討結果⁸⁾と耐食性を考慮して、ステンレス鋼製(SUS305)のブラインドリベット(直径4.8mm, 引張耐力6.35kN, せん断耐力5.45kN)を用いることとした。リベットの適正かしめ板厚は、接合する部材の厚さに応じて選定した。

接着剤は、接合作業の温度、可使時間、施工性、剛性などを考慮して、構造用接着剤として汎用的に用いられている、変性アクリル系接着剤を選定した。接着剤の引張せん断接着強さ(JISK 6850)は32.7MPaである。

(3) 各部材の材料特性

選定された材料(C75, C100, スキンプレート, 硬質発泡ウレタン)について、JISに基づいた材料試験を行い、各部材の材料特性を求めた。表-2に、各部材の材料物性値を示す。表より、トラス部材に用いる溝形材は、引張、圧縮強度ともに450N/mm²以上の高い強度を有していること、また、その弾性係数は引張、圧縮ともにほぼ同じであり、約39kN/mm²であることがわかった。一方、サンドイッチパネル床版を構成するスキンプレートと硬質発泡ウレタンは、溝形材に比べて、強度、弾性係数が小さい。これらは、下弦材を兼ねている溝形材(C100)とともに、群集荷重を担うため、それらが組合わされたサンドイッチパネル床版として、性能の評価を行う必要がある。

4. 骨組構造へのモデル化と概略検討

(1) サンドイッチパネル床版の曲げ変形特性の評価

サンドイッチパネル床版は、溝形材、スキンプレート、コア材(硬質発泡ウレタン)の3つの材料で構成され、それぞれの弾性係数が異なるため、それらの合成版として評価する。ここでは、トラス形式の全体構造を骨組構造部材としてモデル化するために必要な断面剛性を算定する。算定にあたっては、サンドイッチパネル床版のせん断剛性が小さいため、せん断変形による付加たわみを考慮する。ただし、複数の部材からなる合成断面のせん断剛性を求めることは容易ではない。ここでは、サンドイッチパネル床版を、3次元FEM解析(汎用有限要素解析プログラムMSC. Marc 2013)によりソリッド要素を用いてモデル化する。FEM解析により算定された変位を、Timoshenkoは理論に基づいて、有効なせん断剛性を同定した。表-3に、サンドイッチパネル床版の算定された曲げ剛性およびFEM解析により同定されたせん断剛性を示す。さらに、図-3には、支間長5.8mのサンドイッチパネル床版の3点曲げ載荷実験による鉛直たわみと3次元FEM解析によって算定された変位を比較して示す。図よ

り、実験値と解析値はほぼ同じであり、妥当な評価であるといえる。

(2) 解析条件と骨組構造モデル

トラス桁形式のFRP製検査路の概略的な検討を行うために、骨組構造解析によりモデル化を行った。上弦材、斜材、垂直材は、軸力部材としてモデル化した。また、下弦材を兼ねるサンドイッチパネル床版については、前述したように、Timoshenkoは部材としてモデル化した。解析には、せん断変形による付加たわみを考慮できる骨組構造解析プログラム⁹⁾を用いることとし、解析は平面解析とした。表-4に、溝形部材(C75)の断面諸元と弾性係数を、また、図-4に、骨組構造モデルを示す。サンドイッチパネル床版は、支間全長にわたって50分割している。なお、水平材については非構造部材であるため、ここではモデル化していない。荷重条件としては、設計活荷重に相当する等分布荷重(2.1kN/m)を下弦材に載荷した。

表-2 各部材の材料物性値

溝形材 C75	弾性係数 (GPa)	39.5
	引張強度 (MPa)	482.0
	圧縮強度 (MPa)	499.0
溝形材 C100	弾性係数 (GPa)	39.2
	引張強度 (MPa)	512.0
	圧縮強度 (MPa)	509.0
スキンプレート (板厚 5mm)	弾性係数 (GPa)	9.1
	圧縮強度 (MPa)	64.0
	圧縮強度 (MPa)	147.0
硬質発泡ウレタン	弾性係数 (MPa)	9.5
	圧縮強度 (MPa)	0.329

表-3 サンドイッチパネル床版の断面性能

面内曲げ剛性 (kNm ²)	2.84×10^2
引張剛性 (kN)	7.44×10^3
せん断剛性 (kN)	2.86×10^3

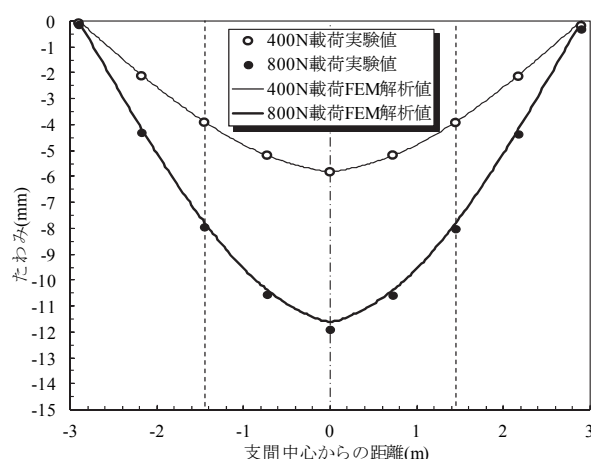


図-3 サンドイッチパネル床版の3点曲げ載荷実験結果

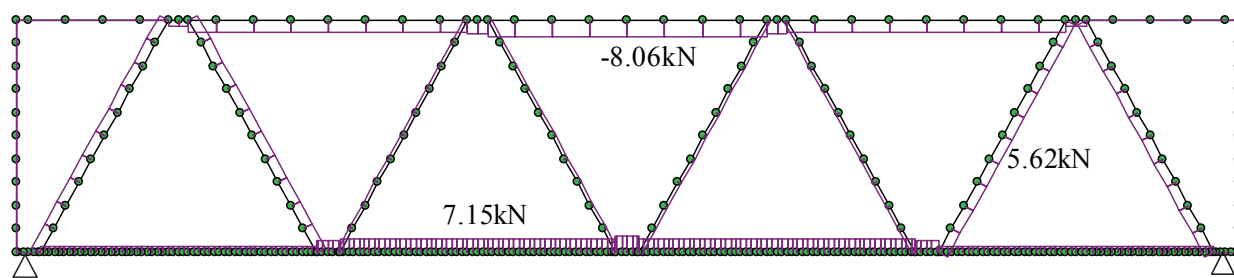


図4 骨組構造解析モデルと各部材の軸力分布図

(3) 解析結果と考察

解析結果の一部として、図-5に、下弦材（サンドイッチパネル床版）の鉛直たわみを示す。参考として、せん断変形を無視して下弦材をモデル化した場合について、また、後述する載荷実験による実験値も併記している。図より、各点部で変位が抑制されるものの、格点間では鉛直たわみが大きくなり、せん断変形による付加たわみが生じていることがわかる。また、たわみの制限値（9.7mm）に対して、最大変位は十分に小さいことから、トラス桁形式は十分に剛性が高いことが確かめられた。

さらに、図-4に、各部材の軸力図を併記している。上下弦材で軸力が大きく、斜材の軸力は比較的小さい。なお、図表を略しているが、軸力を断面積で除して算出される発生応力は、表-2に示した、軸方向の材料強度に対して十分に小さいことを確認している。

表4 溝形材 C75 の断面諸元と弾性係数

断面積 (m ²)	7.3×10^{-4}
面外断面2次モーメント (m ⁴)	6.05×10^{-7}
面内断面2次モーメント (m ⁴)	1.09×10^{-7}
弾性係数 (kN/m ²)	3.95×10^7

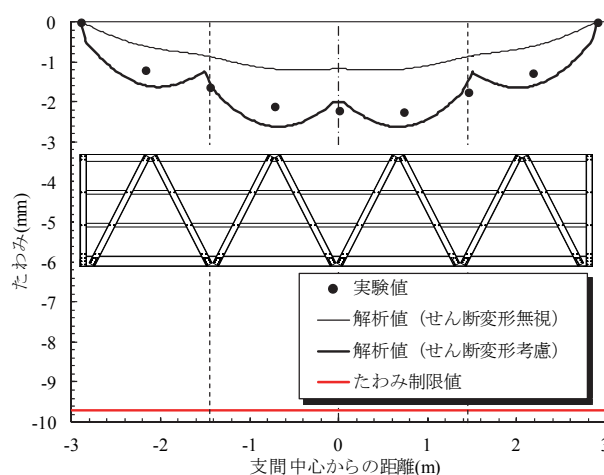


図5 下弦材（サンドイッチパネル床版）の鉛直たわみ

5. トラス格点部の接合方法と耐力の検討

(1) 格点部の接合方法とモデル化

トラス格点部の接合方法は、第3章で述べたように、リベットと接着剤による併用接合としている。ここでは、トラス格点部の部分模型を作製し、載荷実験を行うことで格点部の耐力を実験的に検討した。図-1で、枠で囲まれた範囲を、格点部の部分模型の検討対象とし、図-6に部分模型による試験体の概念図を示す。試験体は、下弦材（C100）と斜材（C75）で構成され、格点部の耐力は、斜材の面外方向および軸方向について検討を行った。表-5に、部分模型による試験体の実験パラメータを示す。パラメータは、リベット列数、リベット数、補強板の有無（有：R、無：N）である。補強板は、C100から切出したアングル材であり、寸法は $L170 \times H50 \times t5$ とした。さらに、面外方向の検討では、下弦材の上面に近い側のリベット列数（2列または3列）もパラメータとした。なお、リベットの配置は、リベット間距離、縁端距離の推奨値¹⁰⁾をもとに決定している。

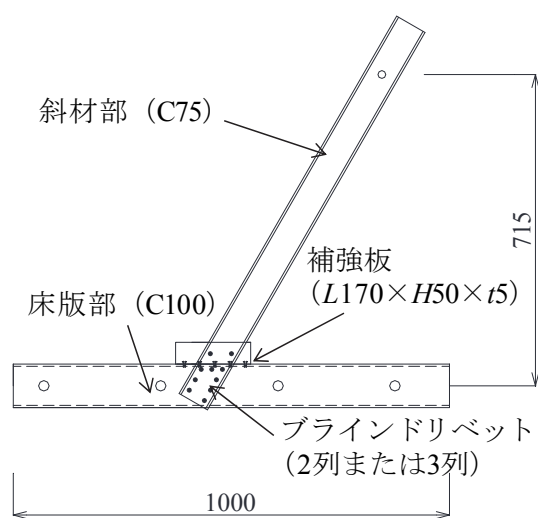


図6 部分模型による試験体の概念図

表-5 部分模型による試験体の実験パラメータ

試験体名	リベット列数	リベット数 (本)	補強板
R2N	2	7	無
R3N	3	8	無
R3R	3	16	有

(2) 面外方向の格点部耐力の検討

図-7に、面外方向載荷実験における試験体のセットアップを示す。下弦材（C100）をアンカープレートにボ

ルトと添接板で固定し、斜材の先端部を油圧ジャッキを用いて引き上げ、集中荷重を面外方向に载荷した。荷重の载荷は変位制御とし、载荷速度は0.5mm/secとし、破壊まで载荷を行った。

実験結果の一部として、図-8に、面外荷重と载荷点における面外変位の関係を示す。図より、補強板の設置により面外剛性が向上することがわかる。また、補強板なしで、リベット列数が異なる場合、最大荷重や面外剛性は、ほとんど同じであった。面外耐力は、補強板を付けた場合で最大となり、634Nと比較的小さい値であった。

表-6に、面外耐力と格点部の設計水平力を比較して示す。手すりの面外方向への設計水平荷重⁴⁾は0.39kN/mであり、設計対象である支間長5.8mにおいて、斜材・垂直材と下弦材の格点部が均等に水平荷重を分担すると考えた場合、1つの格点あたりの設計水平力は226Nとなる。また、面外耐力は、面外载荷実験による最大荷重であるが、面外荷重の载荷位置が異なるため、手すり頂部に対する水平耐力に換算したものを、換算設計水耐力としている。表より、設計水平力に対して、全てのケースで上回るものの、補強板あり（R3R）でも設計水平力に対して、1.85倍であり、やや余裕がないことがわかる。格点部の面外方向の耐力については、今後、補強等を検討する必要があるといえた。

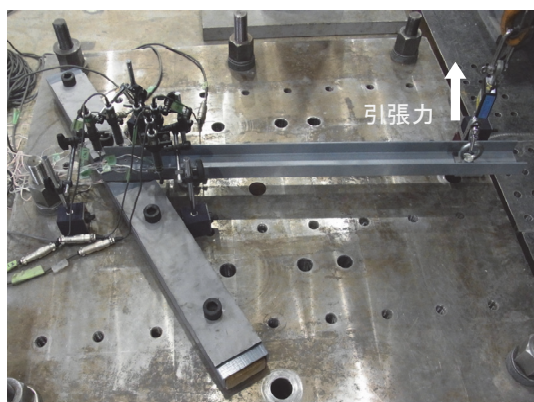


図-7 面外方向载荷実験における試験体のセットアップ

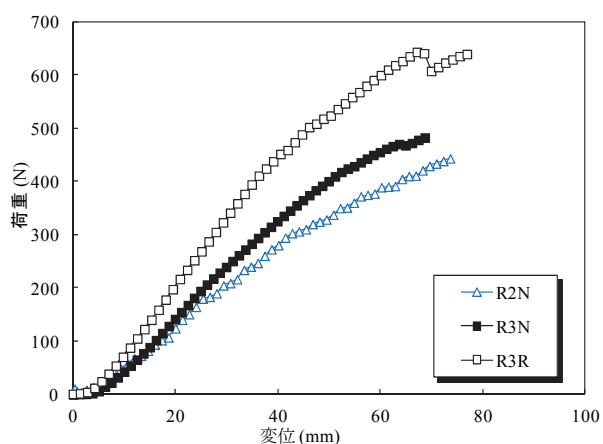


図-8 面外荷重と载荷点における面外変位の関係

図-9に、破壊の状況を示す。破壊モードは、R2ANでは、母材が破壊する前に下弦材の上面側のリベットで引抜けを生じた。また、R3AN、R3ARでは、リベット頭部の打抜き破壊であったが、斜材端部のフランジ部でも破壊が見られた。

(3) 面内方向の格点部の引張耐力の検討

図-10に、面内方向载荷実験における試験体のセットアップ図を示す。実験では、R3N（補強板なし）、R3R（補強板あり）の2ケースについて、各2体実施した。図-10に示すように、センターホールジャッキを用いて、試験体の斜材に高力ボルトで接合したPC鋼棒を緊張し、引張力を作用させて、破壊まで载荷を行った。

実験結果として、図-11に、引張荷重とジャッキのストロークの関係を、表-7に、最大引張荷重と格点部の設計断面力を比較して示す。初期はくり荷重とは、接着剤が部分的にはく離しはじめた時の荷重である。これらの結果より、補強材の有無による差異は小さいこと、最大荷重はリベットのせん断耐力を下回ることがわかった。これは、図-12に示すように、破壊形式がFRPの引裂破壊であり、母材の強度が小さいことによるものである。しかしながら設計断面力と比較すれば、十分に余裕があることが確かめられた。

表-6 面外耐力と格点部の設計水平力の比較

試験体名	設計水平力 (kN)	面外耐力 (kN)	換算設計水平耐力 (kN)
R2N	226	438	285
R3N		482	313
R3R		643	418

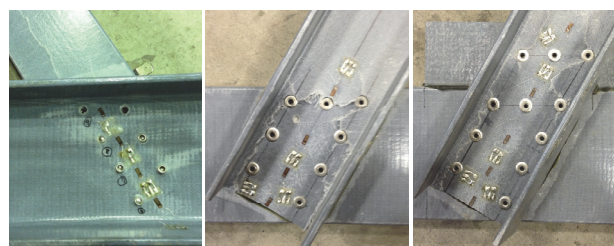


図-9 面外方向载荷試験における試験体の破壊の状況

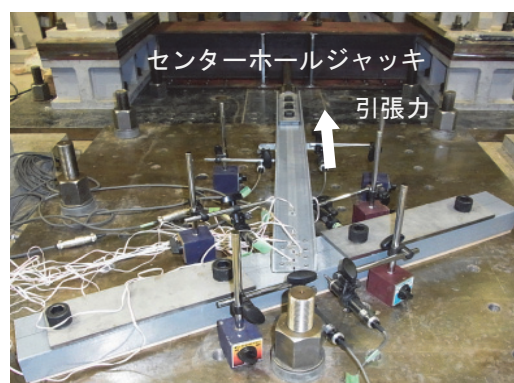


図-10 面内方向载荷実験における試験体のセットアップ

6. 部分模型による曲げ耐荷力の検討

(1) 試験体の概要と実験方法

トラス桁形式検査路の曲げ耐力と破壊形態を検討するために、トラス1パネル分（全支間の約1/4）の実大部分模型を製作し、曲げ載荷実験を行った。

図-13に、実大部分模型の試験体とセットアップ図を示す。パネル数は1パネルであり、支間長1,500mm、全長1,700mm、高さ1,210mmである。下弦材と斜材の格点部の接合方法は、第5章で決定したリベット配置とした。

図-13に、着目断面および変位の測定箇所を併記している。着目断面を、床版部、垂直材、上弦材にそれぞれ定め、7つの断面内の軸方向ひずみと変位を測定した。試験体の支持条件は、単純支持とし、載荷点と支点部にはゴム板と鋼板を設置した。載荷装置には、容量2000kN、ストローク200mmの油圧ジャッキが取り付けられた汎用曲げ載荷システムを用いて載荷した。

(2) 試験結果と考察

実験結果の一部として、図-14に、荷重と変位関係を

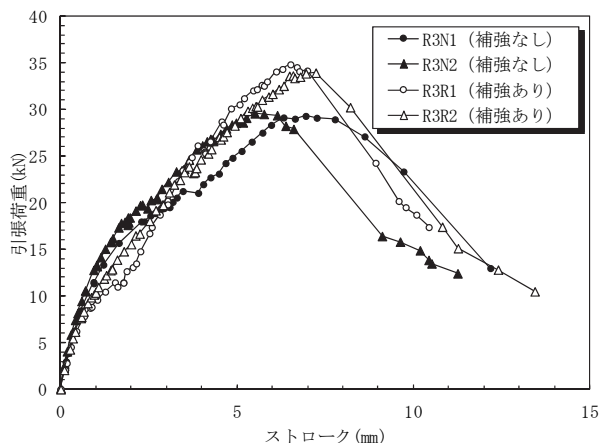


図-11 引張荷重とジャッキのストロークの関係

表-7 最大引張荷重と格点部の設計断面力の比較

補強の有無	設計軸力 (kN)	リベットせん断耐力 (kN)	初期はくり荷重 (kN)	最大引張荷重 (kN)
なし	2.78	43.6	9.6	29.5
あり		60.0	10.0	34.4

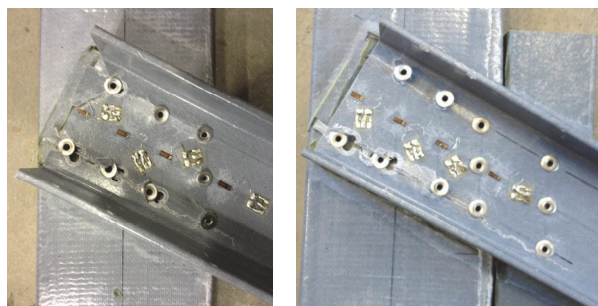


図-12 面内方向載荷実験における試験体の破壊状況

示す。荷重は40kNに達したあたりで、サンドイッチパネル床版の溝形材で、初期のせん断破壊が発生した。その後も荷重は増加し、最大荷重70.6kNで終局となった。

図-15に、破壊状況を示す。荷重と変位の関係は、解析結果の値とほぼ合致した。上弦材の水平変位は、最大でも2.5mmであり、十分に小さく、面外変形に対して剛性が高いことが確かめられた。また、床版のみの鉛直たわみとの比較から、トラスによって構造全体の剛性が向上していることもわかる。

図-16に、各部材の軸力と荷重の関係を示す。実験値の軸力は、各断面の軸方向ひずみの計測値より求めた。解析結果との整合性と、床版部に大きな引張軸力が発生

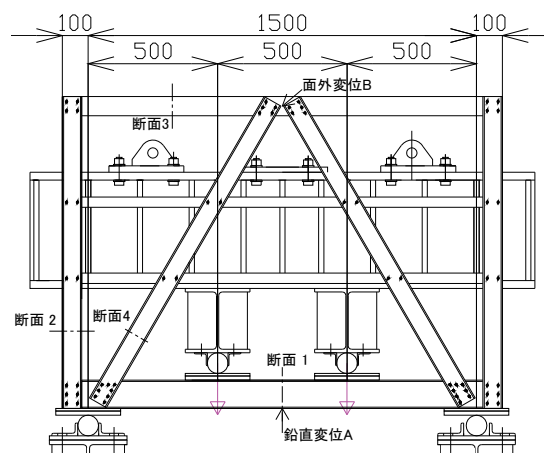


図-13 実大部分模型の試験体とセットアップ図

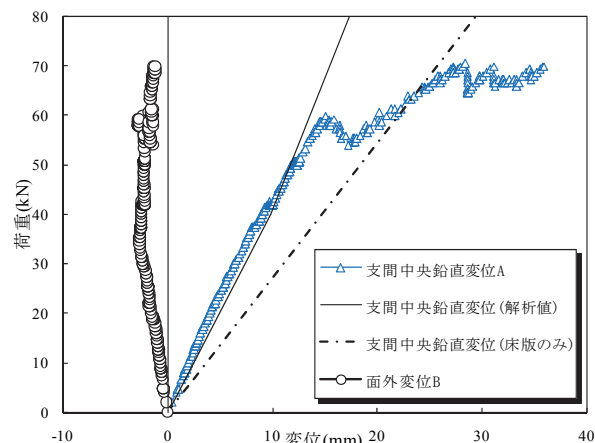


図-14 荷重と変位の関係

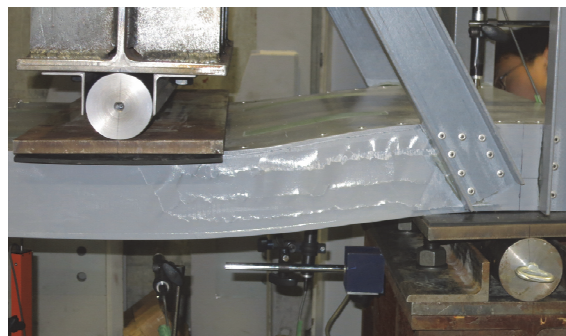


図-15 床版部のせん断破壊の様子

していることがわかる。最大耐力は実構造物の支点反力（設計活荷重より求められる最大せん断力）は12.18kNであり、せん断破壊した最大荷重（70.6kN）を終局状態と考えると、実構造物に対して1/4の実大部分模型ではあるが、設計せん断力に対して、十分な安全性があることが確かめられた。さらに、上弦材の水平変位は小さく、剛性が高いこと、また、トラスによる補剛効果が認められ、桁形式に比べて合理的であることから、本形式は弾性係数の小さいFRPに適した構造であるといえた。

7. 実大模型による使用性の検討

(1) 実大模型の製作

トラス桁形式検査路の使用性を検証するため、実大模型を製作した。実大模型の試験体図は、図-1に示した通りである。試験体の各寸法は、支間長5,800mm、全長6,000mm、高さ1,210mm、有効幅員600mm、総幅員760mmである。試験体の断面形状、製作方法は、第6章で検討した実大部分模型と同一のものである。予め組上げた、サンドイッチパネル床版（下弦材）に斜材、垂直材、上弦材等のトラス部材をリベット接合により、組み立てている。

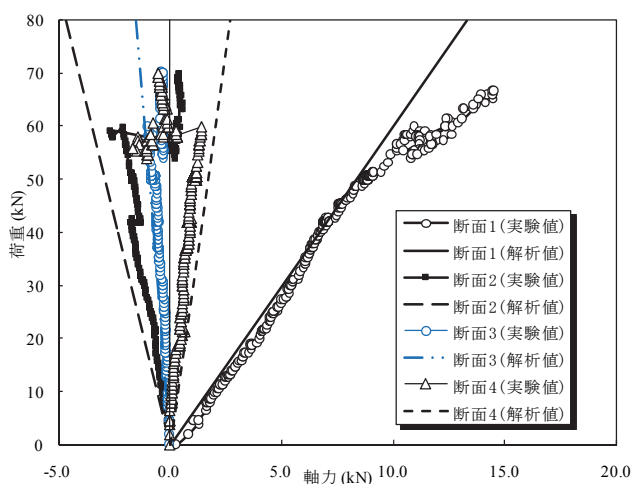


図-16 各部材の軸力と荷重の関係

(2) 設計荷重に対するたわみ特性の検討

設計の妥当性と構造特性を検証するために、設計荷重相当の載荷実験を行った。載荷実験では、図-17に示すように、設計活荷重に相当する重量の砂のう（合計12.6kN）を床版上部に静的に載荷し、サンドイッチパネル床版の下面に設置した変位計によって、鉛直たわみを計測した。

図-5に、計測した床版下面の鉛直たわみの分布と、第4章で検討した、骨組構造解析結果を併記して示す。最大たわみは、支間中央部で2.2mmであり、たわみの制限値（ $L/600 = 9.7\text{mm}$ ）を十分にクリアしていることが確かめられた。併記した解析結果と比較すると、良好な一致を示しているが、格点間において、実験値が若干小さいこともわかる。せん断変形を無視した場合の解析結果も併記しているが、無視した場合、変位が小さく評価されており、実験からもせん断変形の影響が大きいことが確かめられた。

(3) 歩行実験による振動使用性の検討

振動使用性を検証するために、歩行実験による振動計測を行った。計測対象は、床版下面の鉛直加速度および上弦材の水平加速度である。図-18に、ひずみゲージ式加速度計の設置位置を示す。加振方法は、実験員1名



図-17 製作された実大模型への砂のうの設置状況

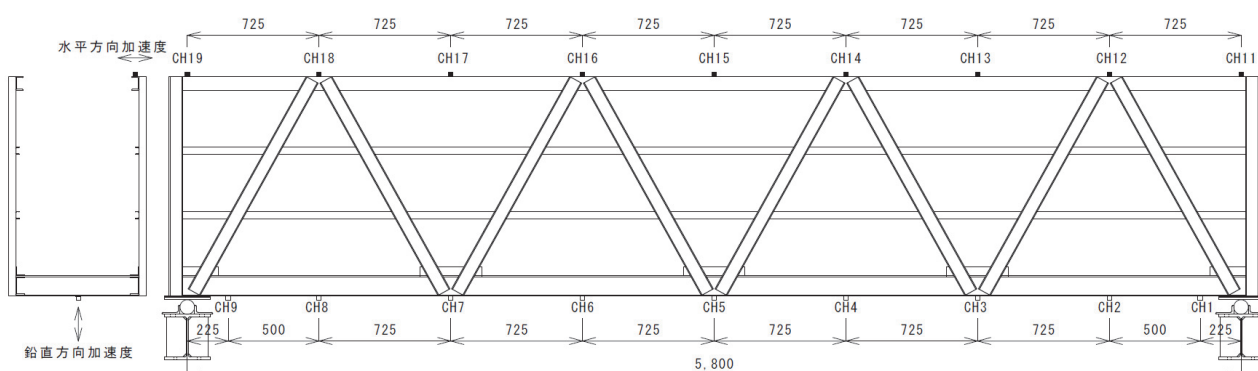


図-18 ひずみゲージ式加速度計の設置位置

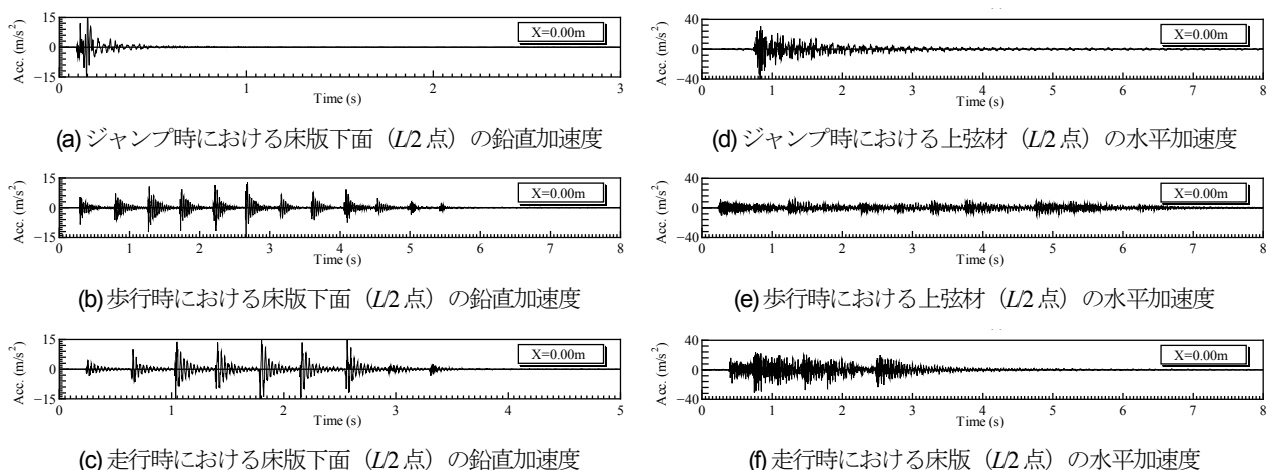


図-19 ジャンプ時，歩行時，走行時による床版下面 (L2 点) の鉛直方向および上弦材 (L2 点) の水平方向の加速度波形

表-8 ジャンプ加振による各部位の振動特性

(a) 上弦材 (水平方向)

振動モード	振動数 (Hz)	減衰定数 (%)
対称 1 次モード	92	0.3
対称 1 次モード*	12.9	1.1
逆対称 2 次モード	16.8	—
対称 2 次モード	25.5	0.4
逆対称 3 次モード	32.4	—

(b) サンドイッチパネル床版 (鉛直方向)

振動モード	振動数 (Hz)	減衰定数 (%)
対称 1 次モード	32.1	3.5

*端部が最大となる水平対称 1 次モード

(体重70kg) による支間中央部でのジャンプ，検査路上での歩行，走行の3ケースである。

図-19に，ジャンプ，歩行，走行による床版下面 (L2 点) の鉛直方向および上弦材 (L2 点) の水平方向の加速度波形を示す。図より，サンドイッチパネル床版の鉛直方向の最大加速度振幅は 15m/sec^2 であるが，剛性が高く，急激に減衰すること，また，上弦材は，大きな振幅で比較的長く揺れることがわかる。

表-8に，3ケースの加振実験において，最も振幅が大きかった，ジャンプ加振による各部位の振動特性として，モード別の固有振動数と減衰定数を示す。歩行時，走行時ケースの図を略したが，全ケースで人の歩調 (1.5～2.3Hz) よりも高い固有振動数となっており，有害な振動が生じないことが確かめられた。

8. まとめ

本研究は，FRP製の検査路の剛性を高めるために，トラス桁形式を採用し，床版には，軽量なコア材を用いたサンドイッチパネル床版の適用を提案して，構造特性に優れた，低コストなFRP製の検査路の開発を目的としたものである。検討の結果，以下のことがいえた。

- (1) 格点部における面外方向の曲げ耐力の検討では，破壊は，GFRP 母材 (斜材) の打抜せん断破壊であり，1 つの格点に対する面外曲げ耐力は，設計水平力を上回ったものの，補強板を設置した場合でも設計水平力に対する余裕は小さかった。
- (2) 格点部における面内方向の引張耐力の検討では，破壊は，GFRP 母材 (斜材) の引裂破壊となり，接合部の引張耐力は，リベットのせん断耐力を下回った。しかしながら，設計軸力に対して十分に余裕があり，設計上，安全であるといえた。
- (3) 実大部分模型による曲げ耐力の検討では，破壊は，サンドイッチパネル床版の溝形材のウェブでせん断破壊であった。その最大荷重は，実構造物における支点部付近の状態を考慮すれば，設計断面力に対して十分に余裕があることが確かめられた。
- (4) 設計荷重に対する実大模型の鉛直たわみは，たわみの制限値を十分に満足することが確かめられた。また，たわみの分布特性は，サンドイッチパネル床版のせん断剛性を適切に考慮すれば，平面骨組構造解析によって十分な精度で予測できることが確かめられた。
- (5) 実大部分模型の振動特性を人力加振により実験的に検討した結果，FRP 検査路の固有振動数は高く，人の歩調 (1.5～2.3Hz) に抵触しないことがわかり，有害な振動が発生しないことが確かめられた。

以上のことから，提案した GFRP 製検査路は，設計条件を満たしていること，また，トラス桁形式とサンドイッチパネル床版を採用することで，FRP の特徴が活かされた合理的な形式となることが確かめられ，実構造物への適用性は十分にあるといえた。

なお，格点部における面外曲げ耐力がやや小さかったが，部分的な補強で十分に対応できるといえた。これらの対策については，今後の課題としたい。

謝辞：前田建設工業株式会社（研究当時、首都大学東京大学院博士前期課程）の盧忠閣 氏および首都大学東京大学院博士前期課程の陶玉亮 氏には、実験の実施、解析データの作成・整理等で協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 大谷康史，荻原勝也，貴志友基：橋梁管理路に対する FRP 適用に関する検討，国土交通省国土技術研究会報告 2008，pp.183-188，2008.
- 2) 栗田繁実，佐藤昌義，久保圭吾：FRP 製橋梁付属物の特徴と今後の展望，宮地技報，No.23，pp.13-18，2008.
- 3) 永見研二，久保圭吾，佐藤昌義：10m 級 FRP 検査路の開発，宮地技報，No.24，pp.28-31，2009.
- 4) 東日本高速道路(株)，中日本高速道路(株)，西日本高速道路(株)：設計要領第二集 橋梁建設編，2014.
- 5) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説（昭和 54 年版），1979.
- 6) (一財)土木研究センター：現場発泡ウレタン超軽量盛土工法 設計・施工マニュアル，2008.
- 7) 本田涼，中村一史，中井裕司：トラス桁形式の GFRP 製橋梁用検査路の提案と構造特性の検討，土木学会第 68 回年次学術講演会，CS3-033，pp.65-66，2013.
- 8) 北山暢彦，前田研一，中村一史，渡邊哲也，瀬戸内秀規：床版橋形式 GFRP 歩道橋のリベット接合と接着接合を併用した連結構造の開発，構造工学論文集，土木学会，Vol.59A，pp.936-948，2013.
- 9) 野中哲也，吉野廣一：パソコンで解くファイバーモデルによる弾塑性有限変位解析，丸善出版，2010.
- 10) 複合構造委員会：FRP 歩道橋設計・施工指針（案），複合構造シリーズ 04，土木学会，2011.

DEVELOPMENT OF BRIDGE INSPECTION PATH USING GFRP TRUSSED GIRDER

Kousuke KOIZUMI, Hitoshi NAKAMURA, Dai WAKABAYASHI,
Yoshiyasu FURUYA Hiroshi NAKAI and Masayuki NISHIDA

In this study, the trussed girder type and the light-weight sandwich panel slab is proposed as the FRP bridge inspection path in order to reduce the construction cost and period. the several experimental studies were conducted using the partial model for the prototype. The ultimate strength of out-of-plane and in plane truss joints, trussed girder were experimentally confirmed for the design condition and requirements. In addition, the real size model was trially fabricated and the serviceability of deflection limitation and vibration were investigated. Therefore, the validity of the development of the bridge inspection path with the trussed girder and the sandwich panel slab is completely verified from experimental results.