

トラス桁形式GFRP製橋梁用検査路の安全性・使用性と10m級スパンへの適用に関する検討

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

¹正会員 東日本高速道路株式会社 東北支社 仙台工事事務所 (〒982-0023 宮城県仙台市太白区鹿野3-4-8)
E-mail: k.koizumi.aa@e-nexco.co.jp

²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)

³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

⁴正会員 東日本高速道路株式会社 東北支社 いわき工事事務所 四倉工事区 (〒970-0101 福島県いわき市平下神谷字仲田100)

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)

床版部を軽量なコア材を用いたサンドイッチパネル床版としたトラス桁形式のGFRP検査路が提案され、支間長6mまでは十分に適用可能であることを確かめられている。一方で、横桁間隔を従来の6mから10mまで広げて横桁数を少なくした合理化橋梁の採用が増えている。本研究では、支間長6m、10m検査路を対象に、その使用性および安全性を検証することを目的として実験的、解析的な検討を行った。その結果、設計荷重に対するたわみ制限 ($L/400$) を満足すること、解析的な検討により、設計荷重に対して十分に安全であることがわかった。また、振動特性試験と衝撃載荷試験より、人の歩行による振動数に抵触しないこと、衝撃荷重に対して部分的な損傷が生じるものの十分な耐衝撃性能を有していることが確かめられた。以上より、対象としたトラス桁形式橋梁用検査路は、十分な安全性と使用性を有していることから、実橋へ適用可能であるといえた。

Key Words : inspection path, GFRP, performance verification test, shear failure

1. はじめに

ガラス繊維強化プラスチック (以下、GFRPとよぶ) の軽量性、耐食性に着目して、橋梁用検査路^{1),2)}が開発され、適用されている。著者らは、GFRPの低弾性の材料特性を補完するために、既往の研究³⁾において、トラス桁形式GFRP検査路を提案している。床版部に軽量な発泡ウレタンのコア材を用いたサンドイッチパネル床版を採用し、トラス構造を採用することで、6mの検査路において合理的な構造となることを確かめている^{4,5)}。

一方、横桁間隔を従来の6mから10mまで広げて横桁数を少なくした合理化橋梁の採用が増えている。そこで本研究では、6m、10m検査路を対象とし、その使用性および安全性を検証することを目的として検討を行った。それらの安全性、使用性の照査にあたっては、最近、FRP

検査路の設計要領と性能照査のための試験方法が示されている⁶⁾。本研究では、それに準拠して設計された橋長6m、10mの検査路を作製し、種々の性能に対する評価項目について、実験的、解析的に検討を行った。

2. トラス桁形式検査路の構造諸元

(1) 設計条件

表-1に、検査路の設計条件を示す。本研究では、東・中・西日本高速道路株式会社より策定されているFRP検査路の設計基準⁹⁾を準用し、設計活荷重を 3.5kN/m^2 として、有効幅員に対して等分布荷重を考慮している。また、有効幅員は0.6m、手摺り高さは1.1m、支柱間隔は1.9m以内である。手摺りへの水平荷重、鉛直荷重は、それぞれ

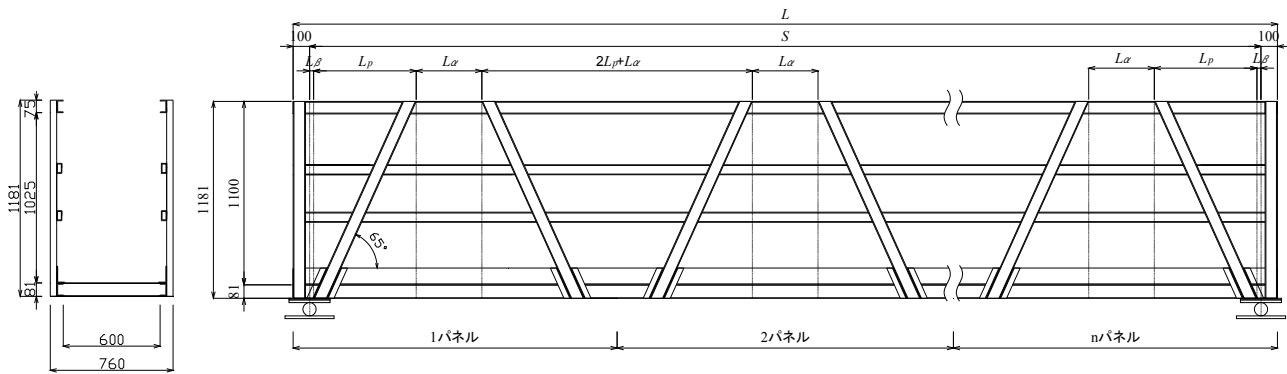


図-1 トラス桁形式検査路の概念図

0.59kN/m, 0.39kN/mである。設計活荷重に対するたわみ制限は、適用した基準では支間長 L に対して $L/100$ であるが、一般の歩道橋⁷⁾におけるたわみ制限（振動使用性に配慮した場合）を採用し、 $L/400$ を基本とした。なお、最大適用支間長は10mとした。これは、前述したように、横桁間隔を広くした合理化橋梁に対応するものである。

(2) 支間長に応じたパネル割と検討対象とする検査路

図-1に、トラス桁形式の検査路の概念図を示す。トラス面材には、GFRP引抜成形の溝形材（C75）を適用している。また、床版部には、サンドイッチパネル床版を採用しており、図-2に、その断面構成を示す。サンドイッチパネル床版の構造は、溝形材を両側に設置し、上下面にGFRP製のスキムプレート（ $t=3\text{mm}$ ）を配置して、内部をコア材である硬質発泡ウレタンで充填したものである。床版上面の両端には、防護板としての役割を担うGFRP製の爪先板を設置している。トラス桁形式の場合、爪先板は、トラス格点部の補強と下弦材の断面剛性に寄与することを設計で考慮している。

トラス形式の特徴は、支間長に関わらず、主構高（手摺り高さ）を1.1m、斜材の角度を 65° の一定とし、格点間に調整長 L_α を導入している点であり、要求される様々な支間長に対応する。全長 L 、支間長 S は次式により定義される⁴⁾。

$$L = (2n-1)L_\alpha + 2L_\beta + nL_p + 200 \quad (1a)$$

$$S = (2n-1)L_\alpha + 2L_\beta + nL_p \quad (1b)$$

$$100 \leq L_\alpha \leq 400 \quad (1c)$$

ここに、 L ：全長（mm），

S ：支間長（mm），

n ：パネル数（mm），

L_α ：格点調整長（mm），

L_β ：支承部調整長（mm），

L_p ：半パネル長（mm）。

図-3に、格点調整長を100～400mmとした場合の支間割を示す。調整長を導入することで、様々な支間長に柔軟に対応でき、設計・施工の合理化を図っている。

表-1 設計条件

使用目的	橋梁点検
設計活荷重	3.5kN/m ²
手摺り鉛直荷重	0.59kN/m
手摺り水平荷重	0.39kN/m
有効幅員	0.6m
手摺りの高さ	1.1m
支柱間隔	1.9m以内
たわみ制限	$L/400$
適用支間長	6m

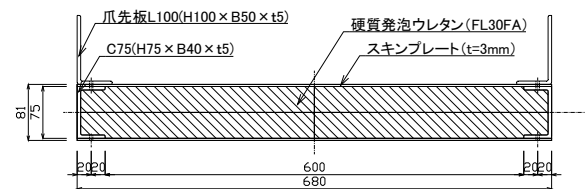


図-2 サンドイッチパネル床版

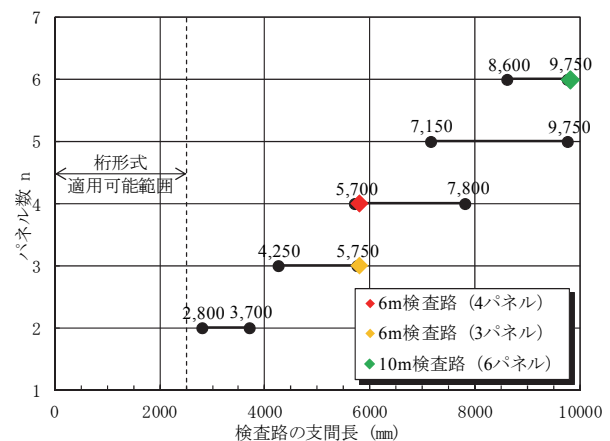


図-3 パネル数と支間長の関係

先行研究⁴⁾では、6m検査路（支間長5.8m）において、3パネルモデル、4パネルモデルを対象に、安全性、使用性が実験的に検討されている。本研究では、これらの曲げ耐荷力を解析的に評価するとともに、10m検査路（支間長9.8m）の曲げ耐荷力の予測を試みる。図-4に、検討対象とする検査路の一般図を示す。図-4 (a)は、支間長5.8mの4パネルモデル（6M4P）であり、標準的なパネル割である。図-4 (b)は、支間長5.8mで、格点調整長を最も長く取り（ $L_\alpha=400\text{mm}$ ）、パネル数を3パネルとしたモデル（6M3P）である。さらに、図-4 (c)に示すように、支

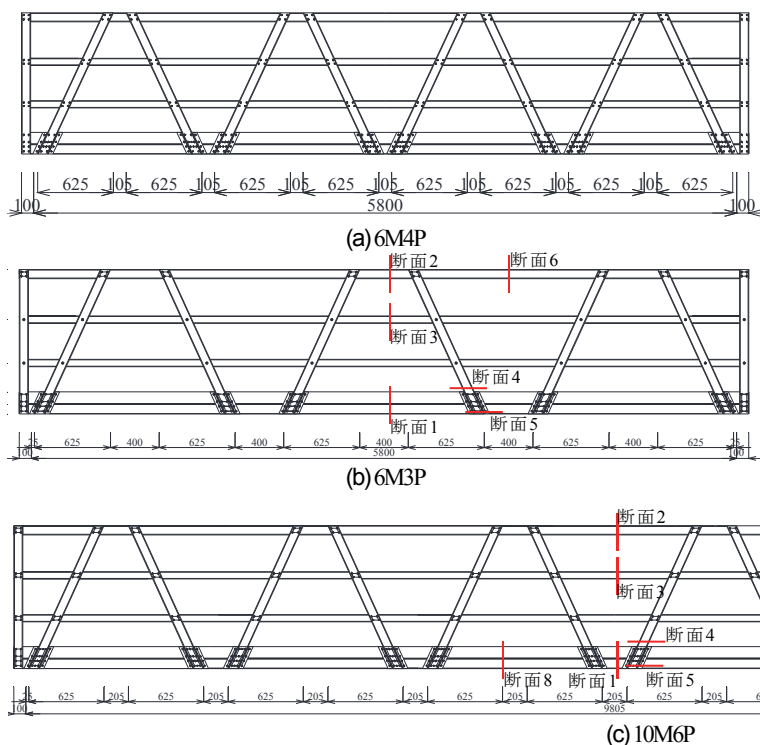


図-4 対象とした検査路の一般図

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)	600.0
	圧縮強度 (MPa)	725.9
溝形材 C100 (爪先板)	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 3mm)	弾性係数 (GPa)	8.8
	引張強度 (MPa)	78.7
	圧縮強度 (MPa)	145.3
硬質発泡ウレタン (FL30FA)	弾性係数 (MPa)	4.5
	圧縮強度 (MPa)	15.8
角パイプ	弾性係数 (GPa)	32.5
	引張強度 (MPa)	521.9
	圧縮強度 (MPa)	458.0

間長9.8mの6パネルモデル (10M6P) を設定し、それらの安全性、使用性を検討することとした。

(3) 適用した部材と材料特性

各部材に適用した材料は、引抜成形により製作された一方向材のGFRPであり、上弦材、斜材、垂直材には、H75×B40×t5.0mm (C75) を、水平材 (非構造部材) には、H60×B32×t4.0mmの角パイプを用いている。表-2に、各部材の材料物性値を示す。

トラス格点部の接合、サンドイッチパネル床版の組立には、片側施工が可能なブラインドリベットによるリベット接合に接着剤を併用した接合とした。リベットには、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) を使用し、接着剤には、構造用接着剤として汎用的に用いられる、変性アクリル系接着剤 (ハードロック G-55-03) を選定した。接着剤の引張せん断接着強さ (JIS6850) は、32.7MPaである。

3. 面内曲げ耐荷力の検討

(1) 解析方法と解析モデル

先行研究で実施された4点曲げ載荷実験による挙動を解析的に検討するために、3次元有限要素解析 (Msc Marc2013) を行った。GFRPは、一般に破壊に至るまで線形的に挙動するため、幾何学的な非線形のみを考慮した弾性有限変位解析によった。

上弦材、下弦材、斜材、垂直材および水平材のGFRP引抜成形材は、直交異方性を考慮して厚肉シェル要素でモデル化した。軸方向の材料特性は、表-2に基づいて設定し、その他の物性値については、一般的なGFRPの材料特性を用いた。また、サンドイッチパネル床版を構成する硬質発泡ウレタン、GFRPスキンプレートは、表-2の物性値を用いて、等方弾性体としてソリッド要素でモデル化した。

支持条件は単純支持であり、荷重条件は先行研究⁴⁾と同じ、4点曲げ載荷とした。支間中央部に対して1,500mm間隔で集中荷重を載荷した。数値解析は、弧長増分法により、解析が発散するまで計算を行った。なお、解析では、FRP部材の破壊は考慮していないが、先行研究⁴⁾では、曲げ耐力は、上弦材のせん断破壊が支配的であることが示されている。そこで、その箇所でのせん断ひずみを比較することでひずみの限界値を評価することとした。

(2) 実験との比較による解析結果の妥当性の評価と限界ひずみの推定

解析結果の一部として、図-5に、6m検査路モデルにおける荷重と支間中央部の鉛直変位の関係を示す。図中には、実験結果も併記している。初期剛性は、3パネル、4パネルの両モデルともに、実験と解析でよい一致を示していること、また、4パネルモデルの方が、鉛直変位に対する剛性が高いことがわかる。さらに、荷重の増加とともに、徐々に実験値と解析値で差異が生じることがわかる。特に、4パネルモデル (6M4P) の実験値では、

約45kN付近で、桁端の上弦材でせん断破壊が先行して生じていることから、その影響で差異が生じた判断された。一方、3パネルモデル（6M3P）では、20kN付近から、実験値と差異が徐々に生じている。局部座屈等が十分に評価されていないことが一つの要因と考えられるが、最大荷重まで概ね評価できているといえる。なお、6M3Pでは、最大荷重時にせん断破壊が生じている⁴⁾。

図-6に、6m検査路モデルにおける荷重とせん断ひずみの関係を示す。着目点は、端部に最も近い上弦材の格点間である。図中には、3パネル（6M3P）モデルで、同じ位置でせん断ひずみが計測されているので、併記している。図より、6M3Pモデルの最大荷重52.7kNで、実験値と解析値がほぼ同じであり、この時の最大せん断ひずみは 8484×10^{-6} であった。一方、4パネル（6M4P）モデルにおいて、この最大せん断ひずみに相当する荷重を図より算定すると、42.0kNとなることがわかる。前述したように、4パネルモデルでは、約45kNで初期せん断破壊が生じていることから、せん断ひずみの限界値は、およそ 8500×10^{-6} であるといえる。

このせん断ひずみの限界値を、10m検査路モデルに適用して、せん断破壊する曲げ耐力力の算定を試みる。

(3) 設計活荷重に対する曲げ耐力の評価

前節では、4点曲げの載荷条件で比較検討を行ったが、

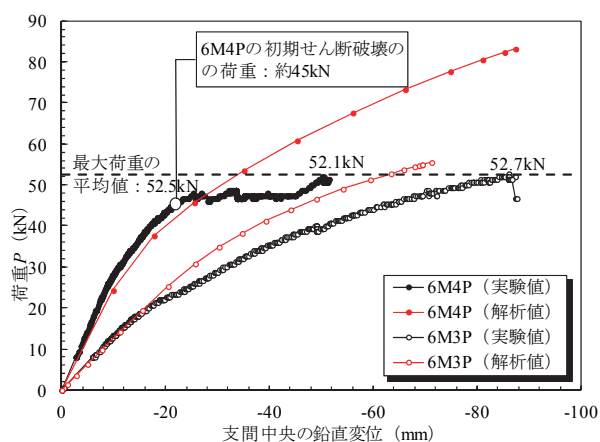


図-5 6m検査路モデルにおける荷重と変位の関係

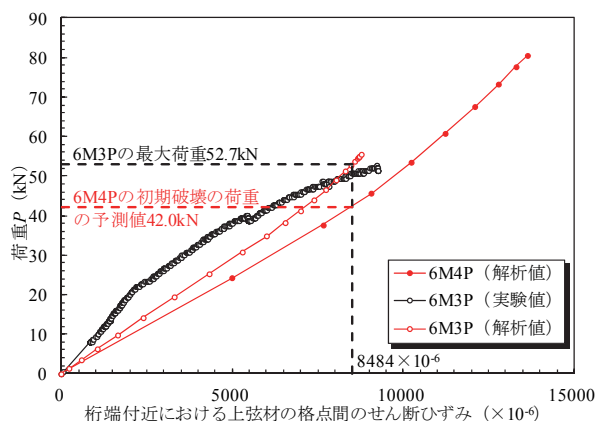


図-6 6m検査路モデルにおける荷重とせん断ひずみの関係

表-1に示したように、設計活荷重は等分布荷重である。そこで、6m（6M3P）、10m（10M6P）の検査路モデルに対して、設計活荷重（ 3.5 kN/m^2 ）を全載する条件で、弧長増分法により弾性有限変位解析を行った。

図-7に、荷重と支間中央部の鉛直変位の関係を示す。図中には、設計活荷重も併記している。6mモデルにおいて、図-5の集中荷重の解析結果と比べると、分布荷重の載荷条件の方が、安定した挙動であり、最大荷重も大きいことがわかる。10mモデルでは、設計活荷重付近の20kN以降では、非線形性が強くなることがわかる。

図-8に、荷重とせん断ひずみの関係を示す。着目点は、端部に最も近い上弦材の格点間である。挙動は、図-6に示した集中荷重の載荷条件と類似している。また、せん断ひずみの限界値（ 8500×10^{-6} ）に対して、6m、10mモデルのせん断破壊荷重を図より算定すると、それぞれ60.47kN、77.15kNであった。設計荷重に対する安全率を表-3に示す。表より、設計荷重に対する安全率は、格点間調整長が最も長い6mモデル（6M3P）で6.33、10mモデル

表-3 設計荷重に対する安全率

解析モデル	支間長 (m)	設計荷重 (kN)	せん断破壊荷重 (kN)	設計荷重に対する安全率
6M3P	5.8	12.18	77.15	6.33
10M6P	9.8	20.58	60.47	2.94

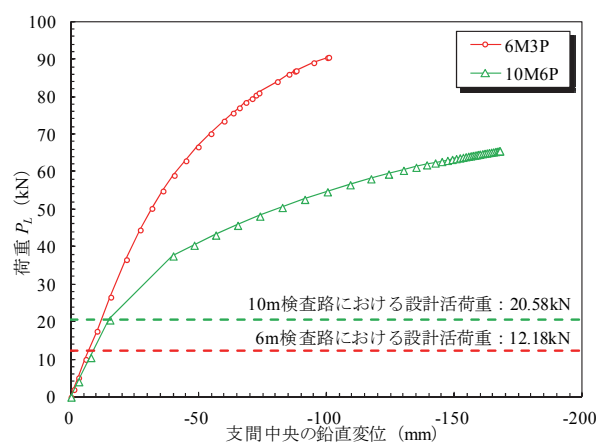


図-7 荷重と変位の関係

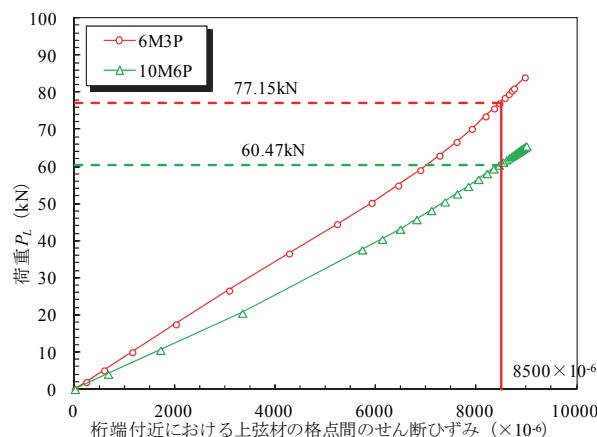


図-8 荷重とせん断ひずみの関係

ルでは2.94であった。10m検査路で、やや低くなったものの、点検員等による実働荷重を想定すれば、設計荷重によるせん断破壊に対して十分に安全であるといえた。

4. 性能照査試験による検証

(1) 性能照査試験の方法と試験体

FRP検査路の性能照査試験は、NEXCO試験方法440⁹⁾に準拠して行った。表-4に、試験項目と試験の概要を示す。具体的な試験方法については、次節の試験結果の中で述べる。

表-5に、対象とした試験体と構造諸元を示す。検査路は、3章までに述べた構造諸元と基本的には同じであり、表-1の設計条件、表-2の材料物性値および図-4 (b), (c)の一般図に基づいて設計・製作されている。ただし、表-5に示した6m検査路の接合部は、現場組み立てにおいて、施工の合理化を図るために、ボルト接合（M6，SUS304）としている。図-9に、6m検査路における下弦材格点部のボルト接合を示す。ボルトの配置は、リベッ

表-4 試験項目と概要

試験項目	試験の概要
検査路本体の静的載荷試験	検査路に設計荷重に相当する荷重（3.5kN/m ² ）を載荷し、検査路のたわみ及びひずみを確認する。
検査路本体の振動特性試験	検査路にダミーウェイトを手摺りの高さから落下させ、床版の鉛直方向の固有振動数を計測し、検査路の固有振動数が人の不快な振動とならないことを確認する。
手摺りの静的載荷試験	上段手摺りに対して鉛直（0.59kN/m）、水平（0.39kN/m）方向の設計荷重を載荷し、手摺りの使用性を確認する。
手摺りの衝撃載荷試験	安全帯のフックを手摺りにかけた状態で、検査路外への転落を想定し、ダミーウェイト（85kg）を落下させることにより、手摺り（上段および中段）の耐衝撃載荷性能を確認する。

表-5 対象とした試験体と構造諸元

モデル名	橋長 (m)	支間長 (m)	パネル数	格点間距離 (mm)	格点部の接合方法
6M3PB	6.0	5.8	3	1025	リベット、ボルト接合
10M6PR	10.0	9.8	6	830	リベット接合



図-9 6m検査路における下弦材格点部のボルト接合

トと同じであり、別途、接合部の要素試験を行って、十分な安全性を有していることを確かめている。

計測項目は、NEXO試験方法440⁹⁾で定められた、鉛直変位、固有振動数、ひずみであり、それぞれ必要な計測機器を用いた。なお、着目点は、各計測項目において最大値あるいは最小値であるが、予めFEM解析を行って、発生部位を特定し、変位計、ひずみゲージを設置した。図-10に、各部位に設置したひずみゲージの位置を示す。断面番号は、図-4に併記している。斜材の断面5、上弦材の断面7は、軸方向ひずみではなく、それぞれ軸直角方向ひずみ、せん断ひずみが支配的であるため、2軸ゲージ、3軸ゲージを設置している。

表-6に、各部材のひずみの限界値とひずみの許容値を示す。軸方向の限界ひずみは、材料試験結果の強度と弾性係数を用いて、線形挙動を仮定して求められるひずみである。また、せん断ひずみの限界値は、3章の結果を踏まえ、 $8,500 \times 10^{-6}$ とした。以下の性能照査試験において、発生ひずみが許容ひずみ以下であることを確認する。

(2) 試験結果と考察

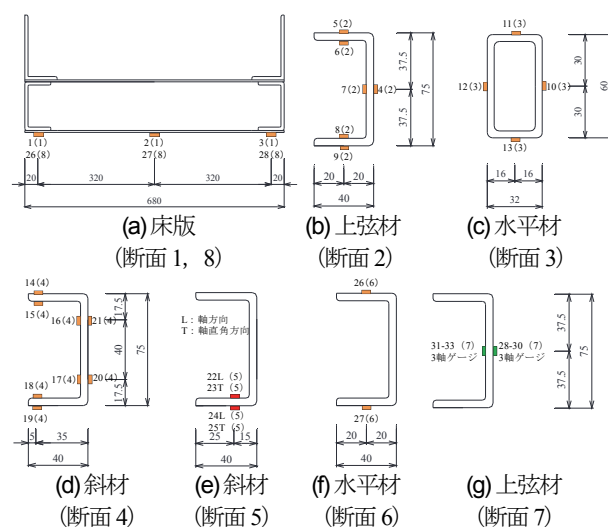
a) 検査路本体の静的載荷試験

検査路本体の静的載荷試験は、設計活荷重に相当する荷重（3.5kN/m²）として、床版上に砂のうを載荷することで、床版下面の鉛直変位を計測した。支持条件は、単純支持とした。図-11に、静的載荷試験の状況を示す。静的載荷は2回行った。

図-11 に、静的載荷試験による床版下面のたわみ分布

表-6 各部材のひずみの限界値とひずみの許容値

形状	対象ひずみ	限界ひずみ $\epsilon_a (\times 10^{-6})$	安全率 γ	許容ひずみ $\epsilon_a (\times 10^{-6})$
溝形材 C75	軸ひずみ	15,000	3	5,000
	せん断ひずみ	8,500	3	2,800
角パイプ SP60	軸ひずみ	12,000	3	4,000



※括弧内の数字：断面番号

図-10 各部位に設置したひずみゲージの位置

を示す。2 回載荷を行って、その平均値を示しているが、1 回目と 2 回目の差異はほとんどなかった。図中には、3 章で述べた FEM 解析モデルによる活荷重たわみの算定値を併記している。実験値は解析値よりやや大きくなるものの、よい一致を示していることがわかる。6m 検査路 (6M3PB) では 7.73 mm、10m 検査路 (10M6PR) では 17.11 mm であり、いずれも $L/400$ のたわみの制限値を満足するが、支間長が長くなると、制限値に対する余裕が小さくなることがわかる。これは、支間長に応じてトラス部材の断面諸元や主構高を変えていないため、支間長が長くなると相対的にたわみが増大するためである。FRP 検査路の基準⁹⁾のたわみの制限値 $L/100$ は十分にクリアしていることから、使用性で問題になることはない。



(a) ピン支点 (b) 砂のうの載荷状態

図-11 静的載荷試験の状況

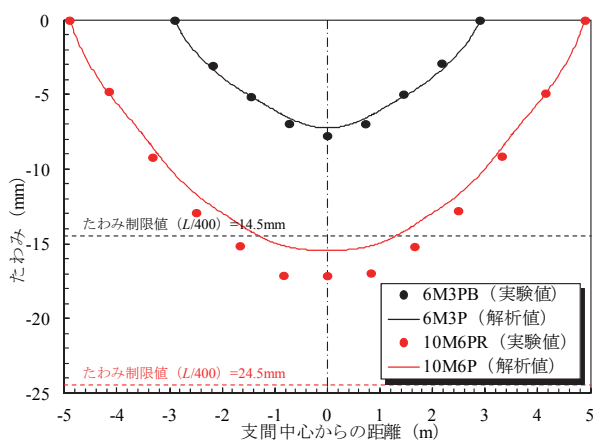


図-12 静的載荷試験による床版下面のたわみ分布

表-7 に、床版下面 (断面 1) および上弦材 (断面 2, 断面 7) の最大ひずみを示す。表中には、FEM 解析結果を併記している。断面 1 はスキンプレートのひずみ、断面 2 は溝形材 C75 のひずみであり、表-6 の許容ひずみに対して十分に小さく、安全性に問題ないことがわかる。断面 7 のせん断ひずみは、表-6 の許容ひずみを若干超えている。限界ひずみに対する余裕度は 2.4 であり、やや小さかったが、一般的な検査路において、設計活荷重が満載となることはほとんどないと思われる。なお、実験値は、解析値とよい一致を示すこともわかる。

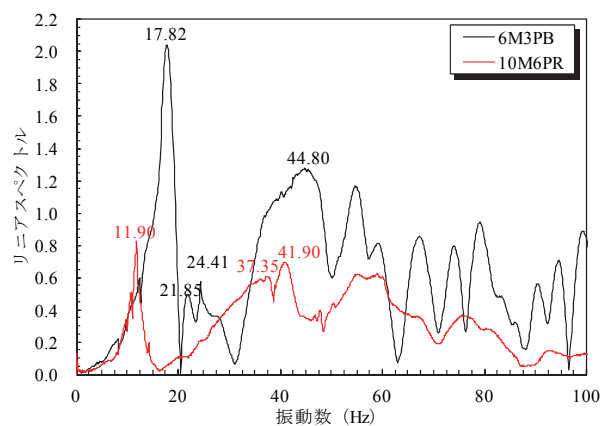


図-13 床版下面の鉛直方向加速度のリニアスペクトル

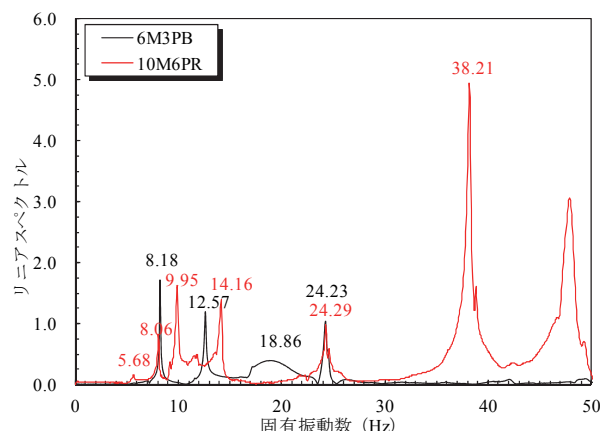


図-14 上弦材の水平方向加速度のリニアスペクトル

表-7 支間中央部の床版下面および上弦材の最大ひずみ

(a) 6m 検査路 (6M3PB モデル) ($\times 10^6$)

部位	断面 1 (支間中央部床版)			断面 2 (支間中央部の上弦材)						
	No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 回		277	268	293	-84	-89	-92	-93	-133	-136
2 回		277	243	305	-87	-92	-94	-94	-132	-135
平均		277	255	299	-86	-90	-93	-93	-133	-136
FEM		249	227	249	-114	-87	-87	-110	-105	-105

(b) 10m 検査路 (10M6PR モデル) ($\times 10^6$)

No.	断面 1 (支間中央部床版)			断面 2 (床版：最大値)			断面 2 (支間中央部の上弦材)						断面 7 上弦材
	1	2	3	26	27	28	4	5	6	7	8	9	
1 回	222	232	233	344	335	325	-324	-432	-397	-318	-213	-187	3600
2 回	226	251	244	344	344	329	-343	-463	-429	-340	-248	-221	3477
平均	224	242	238	344	339	327	-333	-448	-413	-329	-231	-204	3539
FEM	205	212	205	302	281	302	-347	-428	-417	-346	-269	-257	3337

c) 振動特性試験による振動使用性の評価

手摺りの高さ（床版上面から1.1mの高さ）から砂のうを自由落下させることで、検査路の固有振動特性を検討した。本研究では、床版下面の鉛直加速度だけでなく、上弦材の水平加速度も計測することとした。また、モードを分析するため、図を略したが、橋軸方向に9個の加速度計を設置した。なお、砂のうの重さは、20、40、60kgと変化させて、計測を行ったが、ほとんど差異はなかったため、以下では、砂のう20kgの計測結果を示す。

図-13 に、床版下面の鉛直方向加速度のリニアスペクトルを、図-14 に、上弦材の水平方向加速度のリニアスペクトルをそれぞれ示す。また、表-8、表-9 に、固有振動数とモード分析により同定された固有振動モードを床版、上弦材についてそれぞれ示す。

まず、床版の鉛直方向の固有振動数については、1 次モードの固有振動数でも 6M3PB で 17.82Hz、10M6PR で 11.90Hz であり、かなり高いことがわかる。これは面内方向の剛性が高いことによるものである。一方、照査の対象ではないが、上弦材の水平方向の最低次の固有振動数は、それぞれ 8.18Hz、5.68Hz であり、長支間化すると振動数は低下したが、いずれのケースも人の不快な振動（1.5～2.3Hz）とはならないことが確かめられた。なお、上弦材は、複数の振動モードが連成して水平方向に振動することもわかる。

d) 上段手摺りの鉛直方向載荷試験

検査路の上段手摺りにかかる設計荷重を鉛直方向に載荷して、手摺りの鉛直荷重に対する安全性を確かめた。図-15に、上段手摺りの鉛直方向載荷試験の概念図を示す。試験では、トラス桁形式検査路の上段手摺りの最長の格点間に、設計荷重0.59kN/mを載荷する。表-10に、格点間隔から計算される設計鉛直荷重を示す。この設計荷重に相当する砂のうを対象区間に載荷する。図-16に、上段手摺りへの砂のうの載荷状況（10M6PR）を示す。載荷試験は3回行った。最大ひずみが生じる箇所は、上弦材の断面6（6M3PB）、断面2（10M6PR）であるため、表-11に、計測されたひずみの値を示す。表より、実験値は、6M3PBでは解析値とほぼ同じであること、また、10M6PRでは解析値より大きくなったが、いずれも表-6の許容ひずみに対して十分に小さいため、安全であることが確かめられた。

e) 上段手摺りの水平方向載荷試験

検査路の上段手摺りにかかる設計荷重を水平方向に載荷して、手摺りの水平荷重に対する安全性を確かめた。図-17に、上段手摺り水平方向載荷試験の概念図を示す。トラス桁形式検査路の1つの格点部を対象に、設計荷重0.39kN/mから計算される設計水平荷重をジャッキを用い

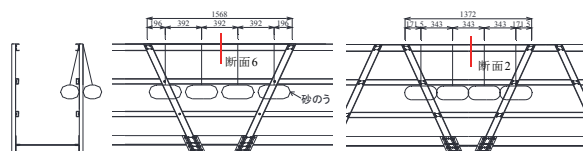
て、両面の手摺りを広げる方法で載荷する。表-12に、上段手摺りに作用させる設計水平荷重の計算結果を示す。図-18に、上段手摺りの水平方向載荷試験のセットアップを示す。載荷載荷は3回行った。着目断面は、図-17に

表-8 床版鉛直方向の固有振動数と振動モード

次数	6m 検査路 (6M3PB)		10m 検査路 (10M6PR)	
	振動数 (Hz)	振動モード	振動数 (Hz)	振動モード
1	17.82	対称 1 次	11.90	対称 1 次
2	21.85	—	37.35	—
3	24.41	—	41.90	—
4	44.80	—	47.79	—

表-9 上弦材水平方向の固有振動数と振動モード

次数	6m 検査路 (6M3PB)		10m 検査路 (10M6PR)	
	振動数 (Hz)	振動モード	振動数 (Hz)	振動モード
1	8.18	対称 1 次	5.68	対称 1 次
2	12.57	対称 2 次	8.06	対称 1 次
3	18.86	対称 3 次	9.95	対称 2 次
4	24.23	対称 3 次	14.16	対称 3 次
5	—	—	24.29	対称 4 次
6	—	—	38.32	対称 5 次



(a) 断面図 (b) 6m 検査路 (6M3PB) (c) 10m 検査路 (10M6PR)

図-15 上段手摺りの鉛直方向載荷試験の概念図

表-10 上段手摺りに作用させる設計鉛直荷重

モデル	鉛直方向設計荷重 (kN/m)	格点間隔 (mm)	設計鉛直荷重 (N)
6M3PB	0.59	1568	925.1
10M6PR		1372	809.5



図-16 上段手摺りへの砂のうの載荷状況（10M6PR）

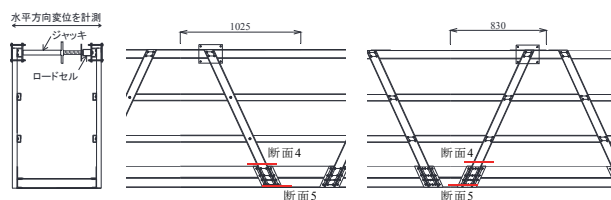
表-11 上段手摺りの鉛直方向載荷時の最大ひずみ (×10⁶)

断面	断面 6 (上弦材)		断面 2 (上弦材)	
No.	26	27	5	9
1 回目	-69	134	-114	111
2 回目	-77	132	-114	103
3 回目	-81	131	-105	100
平均値	-76	132	-111	105
解析値	-53	120	-65	67

併記したように、下弦材側の格点部近傍の斜材の断面4、断面5であり、ひずみに加えて、ジャッキの水平荷重、その位置での上弦材の水平変位を計測した。

図-19に、ジャッキの水平荷重と上弦材の水平変位の関係を示す。図中には、6m検査路（6M3PB）、10m検査路（10M6PR）における計測結果（3回）およびFEM解析による計算結果を示している。図より、実験値は、ばらつきは小さいこと、また、解析値とよい一致を示すことがわかり、荷重作用の範囲では、線形挙動をすることが確かめられた。

図-20に、水平荷重とひずみの関係を示す。ひずみの計測位置は、最大ひずみが生じた断面4の斜材部フランジ端部（図-10 (d)のNo.19）である。図中には、FEM解析による値を併記している。図より、設計水平荷重が載荷された際の最大ひずみは、6m検査路（6M3PB）で約 $1,300 \times 10^6$ 、10m検査路（10M6PR）で約 650×10^6 の圧縮ひずみであった。また、水平荷重とひずみは、いずれも線形関係にあるが、6M3PBでは、1回目の載荷にばらつきが見られること、また、実験値は解析値より小さくなった。これは、6M3PBはボルト接合であり、格点の接合部でのすべり等が考えられた。さらに、実験中には、破壊や割れもなく、計測されたひずみの値は、表-6の許容ひずみに対して十分に小さい値であった。以上より、対象とした検査路は、上段手摺りへの設計水平荷重に対して十分に安全であるといえた。



(a) 断面図 (b) 6m 検査路 (6M3PB) (c) 10m 検査路 (10M6PR)
図-17 上段手摺り水平方向載荷試験の概念図

表-12 上段手摺りに作用させる設計水平荷重

モデル	水平方向設計荷重 (kN/m)	格点間隔 (mm)	設計水平荷重 (N)
6M3PB	0.39	1025	400.0
10M6PR		830	323.7



図-18 上段手摺りの水平方向載荷試験のセットアップ

f) 手摺りの衝撃載荷試験

ダミーウェイト（85kg）が接続された安全帯のフックを手摺りにかけた状態で、ダミーウェイトを検査路外へを落下させることにより、手摺り（上段および中段）の耐衝撃載荷性能を確認した。ダミーウェイトには、85kgに調整した砂のうを用いた。図-21に、手摺り衝撃載荷試験の概念図を示す。上段手摺りの溝形材C75および中段手摺りの角パイプSP60には、直接、安全帯のフックが掛けられないため、ランヤードを手摺り部材に回して、フックを掛けている。また、図-21 (b)に示したように、中段手摺りの試験では、安全帯のランヤードは、手摺りの内側から上段手摺りの上を通して、検査路の外側に出している。着目点は、図-21に併記したように、上段手摺り（上弦材）の断面2、中段手摺り（水平材）の断面3および下弦材格点部近傍の斜材の断面4のひずみであり、動ひずみ測定装置を用いて、1/10,000秒間隔でサンプリングした。

表-13に、衝撃載荷試験により計測された各部位の最大ひずみを示す。

まず、6m検査路（6M3PB）モデルでは、ダミーウェイトによる衝撃荷重が直接作用した部材のひずみは、最

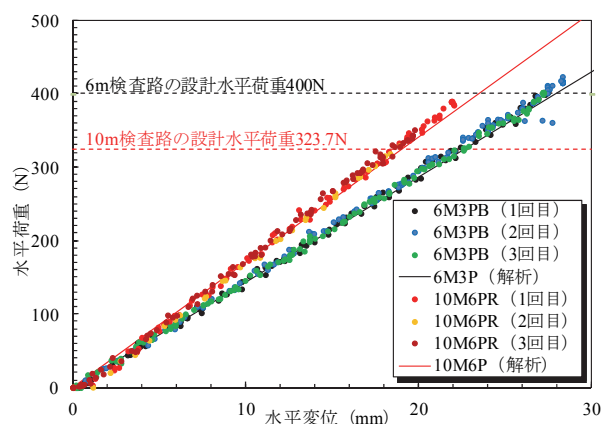


図-19 水平荷重と水平変位の関係

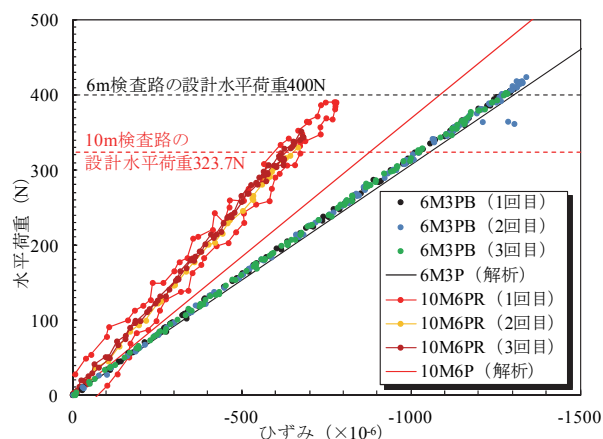


図-20 水平荷重とひずみの関係

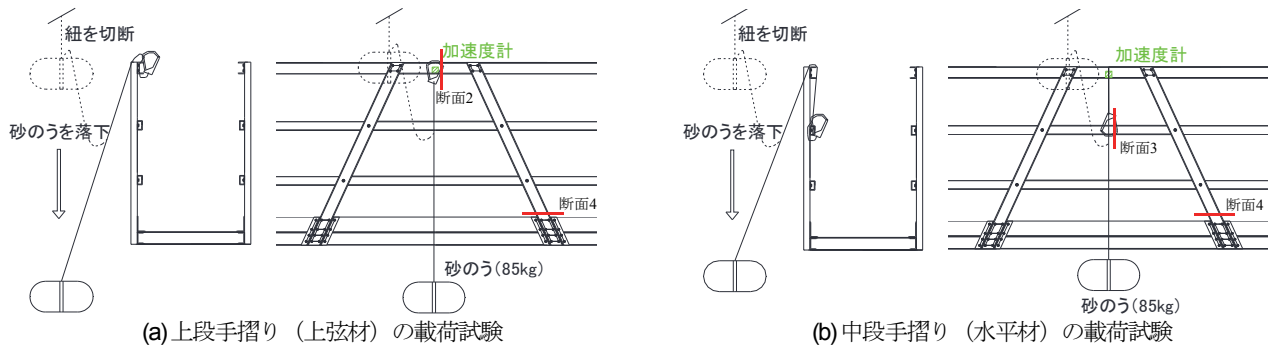


図-21 手摺り衝撃載荷試験の概念図 (6M3PB)

表-13 衝撃載荷試験による各部位の最大ひずみ

(a) 上段手摺り (上弦材) の衝撃載荷試験 ($\times 10^6$)

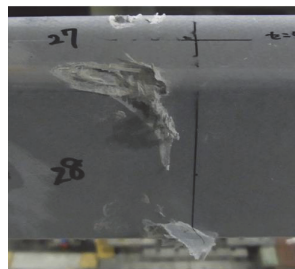
断面	断面 2 (上弦材支間中央部)						断面 4 (下弦材格点部斜材)							
No.	4	5	6	7	8	9	14	15	16	17	18	19	20	21
6M3PB	423	899	-1657	-540	-1291	-1445	-3800	-3209	1013	197	-2894	-3810	870	1789
10M6PR	-3550	1177	-2152	2234	-1233	2139	-1946	-1851	492	386	-2034	-2122	773	967

(b) 中段手摺り (水平材) の衝撃載荷試験 ($\times 10^6$)

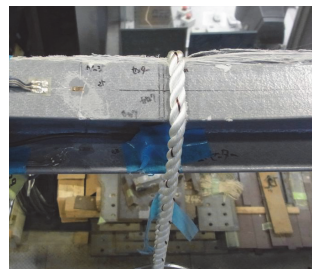
断面	断面 3 (上段水平材支間中央部)				断面 4 (下弦材格点部斜材)									
No.	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21		
6M3PB	762	1112	-404	-1652	-3654	-3105	973	330	-2875	-3698	830	1724		
10M6PR	341	492	-845	-1305	-1885	-1855	481	313	-1990	-2096	685	949		



(a) 上弦材 (6M3PB)



(b) 水平材 (6M3PB)



(c) 上弦材 (10M6PR)



(d) 水平材 (10M6PR)

図-22 手摺り衝撃載荷試験後の各部位の損傷状況

大で $1,500 \times 10^6$ 程度であったのに対し、下弦材格点部の斜材では約 $4,000 \times 10^6$ のひずみが生じた。

一方、10m検査路 (10M6PR) モデルでは、後述するように、上弦材の角部で割れが生じ、損傷が大きかったため、6M3PBと比較して、上弦材のひずみが大きくなる傾向がみられた。これに対して、下弦材格点部の斜材では、6M3PBよりも格点間隔が短いため、ひずみの値は小さく $2,000 \times 10^6$ 程度であったが、これらのひずみの値は表-6の許容ひずみ以下であることがわかる。

図-22に、手摺り衝撃載荷試験後の各部位の損傷状況を示す。

6M3PBでは、図-22 (a)より、上弦材の衝撃試験で、上弦材 (上段手摺り) に安全帯のフックがめり込んだ形跡が見られた。水平材 (中段手摺り) に対する衝撃載荷試験では、図-22 (b)より、水平材の損傷は軽微であった。これは、前述したように、ランヤードを手摺りの内側から上弦材を通して掛けているため、衝撃荷重が上弦材に直接作用するためである。したがって、上弦材への損傷

はさらに拡大した。

10M6PRでは、図-22 (c)より、上弦材の衝撃試験で、上弦材の上フランジとウェブの角部に割れが生じた。また、水平材 (中段手摺り) の衝撃試験では、6M3PBと同様であり、水平材の破損はほとんどなく、上弦材への損傷が拡大した。

これらの結果から、フックやランヤードの接触により、部分的に損傷を受けるものの、上弦材、水平材の脱落は見られないこと、また、格点部のひずみも表-6の許容ひずみ以下であることから、想定される衝撃荷重に対して、十分に安全であることが確かめられた。

5. まとめ

本研究では、橋長6m、10mのトラス桁形式GFRP検査路を対象に、その使用性および安全性を検証することを目的として実験的、解析的な検討を行った。得られた成

果は以下の通りである。

- (1) 6m検査路の4点曲げ載荷実験におけるせん断破壊とその耐荷力をFEM解析により同定し、設計活荷重に対する6m、10m検査路の耐荷力を解析的に推定した。その結果、設計活荷重に対して、6m検査路で6.33、10m検査路で2.94の余裕度があることが確かめられ、十分に安全であるといえた。
- (2) 検査路本体の静的載荷試験より、最大たわみは、6m検査路で7.73mm、10m検査路で17.11mmとなり、10m検査路では解析値よりもやや大きい値となったものの、両方で良い一致を示すこと、また、 $L/400$ のたわみ制限を満足することがわかった。
- (3) 検査路本体の振動特性試験からは、6m、10m検査路の床版、上弦材ともに、そのすべての値が回避すべき振動数の範囲（1.5～2.3Hz）よりも高い値となり、振動使用性を満足することがわかった。
- (4) 上段手摺りの鉛直・水平方向への静的載荷試験より、6m、10m検査路ともに、発生するひずみは解析値とも概ね一致し、十分に小さいことが確かめられた。
- (5) 上段および中段手摺りの衝撃載荷試験より、6m、10m検査路ともに、各部材には部分的に軽微な損傷、割れが生じたものの、部材の落下や接合部の破壊は見られず、発生するひずみの値も小さいことが確かめられ、想定される衝撃荷重に対して十分に安全であるといえた。

以上のことから、トラス桁形式GFRP検査路の適用支間長として10m級までは、設計荷重に対する安全性、使用性を確保できることが確かめられた。

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) 小泉公佑，中村一史，若林 大，古谷嘉康，中井裕司，西田雅之：トラス桁形式 GFRP 製橋梁用検査路の開発，第 5 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム，pp.53-61，2014.11
- 4) 石井佑弥，小泉公佑，中村一史，古谷嘉康，中井裕司，西田雅之：トラス桁形式 GFRP 製橋梁用検査路の使用性と耐荷力に関する研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.72，No.5，p.II_33-II_45，2016.6
- 5) 小泉公佑，中村一史，古谷嘉康，中井裕司，西田雅之：トラス桁形式 GFRP 製橋梁用検査路における面外方向の構造特性と手すり部の耐衝撃性能，第 11 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集，pp.212-220，土木学会，2015.11
- 6) 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，2015.7
- 7) 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.

STUDY ON SAFETY AND SERVICEABILITY OF BRIDGE INSPECTION PATH USING GFRP TRUSSED GIRDER AND APPLICABILITY TO 10-M SPAN LENGTH

Kouzuke KOIZUMI, Yuya ISHII, Hitoshi NAKAMURA,
Yoshiyasu FURUYA, Hiroshi NAKAI and Masayuki NISHIDA

An inspection path for highway bridges has been developed using pultruded GFRP members. The proposed bridge inspection path is a trussed girder type with a sandwiched panel floor made of GFRP and urethane foam. In this study, the inspection path with 10-m long span was developed and fabricated in order to apply to a steel plate girder bridge with a long interval of cross beam. The validity and usability of structural design was investigated by various loading tests using full-scaled models with 6-m and 10-m span length. As a result of static loading test, it was found that the deflection limitation of $L/400$ for the span length L was roughly satisfied, and the result of some vibration test demonstrated that the uncomfortable vibrations did not occur. Therefore, it was confirmed the developed trussed-girder-type inspection paths had the required rigidity and safety, and was feasible for practical use.