

(9) 既設鋼橋の局所的な複合構造化による 補修補強方法の開発実験

谷口 望¹・大久保 藤和²・佐竹 紳也³・杉野 雄亮⁴

¹正会員 前橋工科大学 社会環境工学科 准教授 (〒371-0816群馬県前橋市上佐鳥町460-1)
E-mail:n-tani@maebashi-it.ac.jp

²正会員 太平洋マテリアル 営業本部 機能性材料営業部 (〒135-0064東京都江東区青海2-4-24)
E-mail:fujikazu-okubo@taiheiyo-m.co.jp

³正会員 太平洋マテリアル 開発研究所 混和材料グループ (〒285-0802千葉県佐倉市大作2-4-2)
E-mail:Shinya-Satake@taiheiyo-m.co.jp

⁴正会員 太平洋マテリアル 開発研究所 混和材料グループ (〒285-0802千葉県佐倉市大作2-4-2)
E-mail:yusuke-sugino@taiheiyo-m.co.jp

既設橋梁のうち鋼橋は、従来より数多く建設されてきた橋梁形式であるが、現在その維持管理方法はまだ明確となっておらず、また、設計、製作、施工に関して維持管理性への配慮が不十分なものがある。そのため、数十年が経過した現在、既設鋼橋に腐食や床組部材（縦桁・横桁・主桁の各連結部）に疲労き裂などの損傷による耐荷力低下が発生している。

そこで、既設鋼鉄道橋にゴムラテックスモルタルによる被覆を用いて速硬軽量コンクリートを付加することにより、施工性に配慮した上で、耐荷力向上、耐久性（耐疲労性および耐腐食性）向上を図る手法を考案し載荷試験を実施した。

Key Words : Partial Hybrid structure, Maintenance, Extension of life

1. はじめに

既設の土木構造物の維持管理や長寿命化に対する検討は急務になっている。特に鋼鉄道橋は、古くからはリベットを用いた構造を経て、溶接・高力ボルトを用いた構造に移行し、現在でも使用されている。近年、維持管理が課題となる中で、維持管理上の問題点を、設計計画にフィードバックされている項目が多くなってきているが、高度経済成長期までに製作された鋼鉄道橋では設計、製作、施工に関して維持管理への配慮が不十分なものが見受けられる。そのため、製作後数十年が経過した現在、既設鋼橋の特定の部位に腐食や疲労き裂などの損傷が発生し、重大な耐荷力低下が発生するケースもある。

鋼鉄道橋の中でも、下路プレートガーダー（図-1）は、今日でも一般的な構造である。この下路プレートガーダーに発生する損傷の多くは、支点部と床組（縦桁－横桁連結部）に生じることが知られている¹⁾。近年製作される本形式の橋梁では、過去の損傷の事例に対応し、設計の時点でこれらの損傷を防止するように配慮がされて

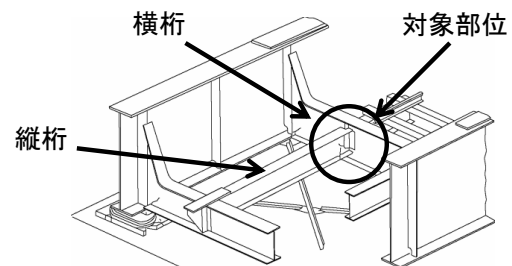


図-1 下路プレートガーダーと疲労き裂の例¹⁾

いる。しかしながら、これらの配慮が行われる前に製作された橋梁では、損傷が発生する可能性が非常に高く、何らかの対応が必要な橋梁数は膨大であると考えられる。

下路プレートガーダーを含めた鋼橋の損傷に対する補修補強策としては、一般に鋼材による当て板補強が一般的である。この当て板を行う場合、溶接により取り付けることは推奨されていない。この理由としては、この溶接は現場で行う必要があるが、この品質管理が非常に困難であることと、リベットを用いている時代の鋼材は溶接には適さない材質となっていることが挙げられる。ま

た、高力ボルトを用いる補修補強策では、必要な高力ボルトを通すための削孔が必要となり、狭隘な箇所の場合は施工だけでなく孔を設置すること自体が困難な事例も見受けられる。

そこで、著者らは、これらの対策として、鋼橋にコンクリート部材を合成させて、補修補強を行うことを提案し検討を行っている²⁾。このコンクリート部材を用いた補修補強方法は複合構造化と呼ばれているが、問題となるのは鋼部材との合成（付着）である。鋼部材とコンクリートとの界面に剥離が生じると、形状によっては水が鋼部材表面に回り込み、腐食が生じて、補修が困難な断面欠損を生じてしまう恐れがある³⁾。さらに、鋼部材との付着が切れた場合には、コンクリートの剛性の寄与がなくなり耐疲労性の向上は期待できないと考えられる。また、従来の複合構造化においては、剥離対策として機械式ずれ止めを用いることが提案されている事例もあるが、この記載式ずれ止めの設置には溶接や削孔が必要となり、鋼材による当て板補強と同様な課題が生じる。

そこで、著者らは、既設鋼鉄道橋にゴムラテックスモルタルによる被覆を用いて速硬軽量コンクリートを付加することにより、施工性に配慮した上で、耐荷力向上、耐久性（耐疲労性および耐腐食性）向上を図る手法²⁾を開発しているが、本報告ではこれを応用し、既設鋼橋の部分的な補修補強方法を提案する。

本報告では、下路プレートガーダー橋の床組部の縦桁－横桁連結部のうち、損傷が多く報告されている、縦桁のフランジが横桁に連結されていない構造ディテールの橋梁（写真-1）を想定し、この橋梁の複合構造化に関して研究を行うこととした。なお、もう一方で多くの損傷が報告されている支点部に対しての検討は、すでに一部報告されているため、本報告では省略するものとする⁴⁾。

2. 複合構造化手法

今回考案した下路プレートガーダー橋の床組部の縦桁－横桁連結部の複合構造化の手順を図-2に示す。手順としては、補強を行う当該箇所に対して、塗装、さび、汚れを除去し、その部分にゴムラテックスモルタル被覆を吹付により取り付ける（図-2(a)）。次に、この周囲に、埋設型枠、および、ひび割れ防止用の鉄筋を設置する（図-2(b)）。最後に速硬軽量コンクリートを打設する（図-2(c)）。なお、コンクリートの形状については、縦桁の下フランジの応力を、コンクリートを介して横桁下フランジに伝えることができるように配慮して形状を決定している。本来は上フランジ側も同様に、横桁上フランジ部へのコンクリート打設を行うのが望ましいが、

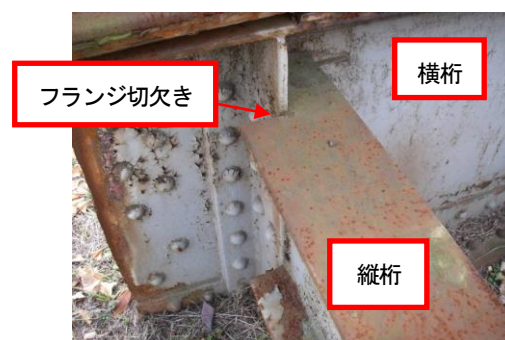
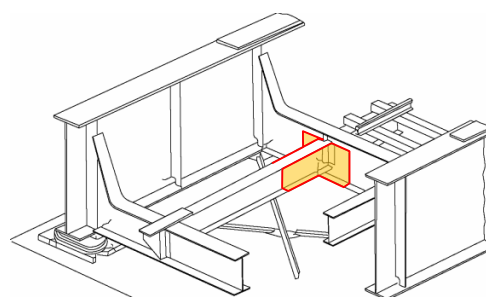
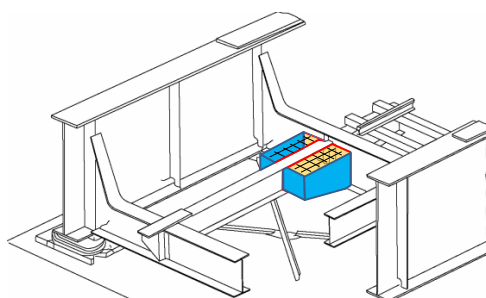


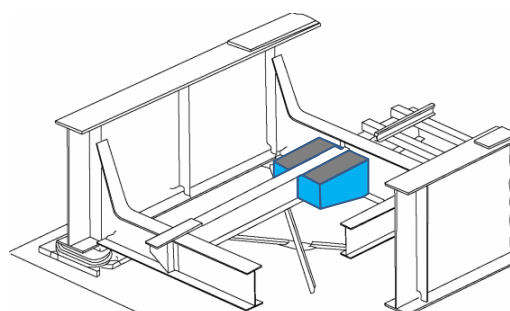
写真-1 縦桁と横桁の連結部の例



(a) ゴムラテックス被覆（5mm厚）の設置（朱部分）



(b) 埋設型枠・鉄筋の設置（青・黒部分）

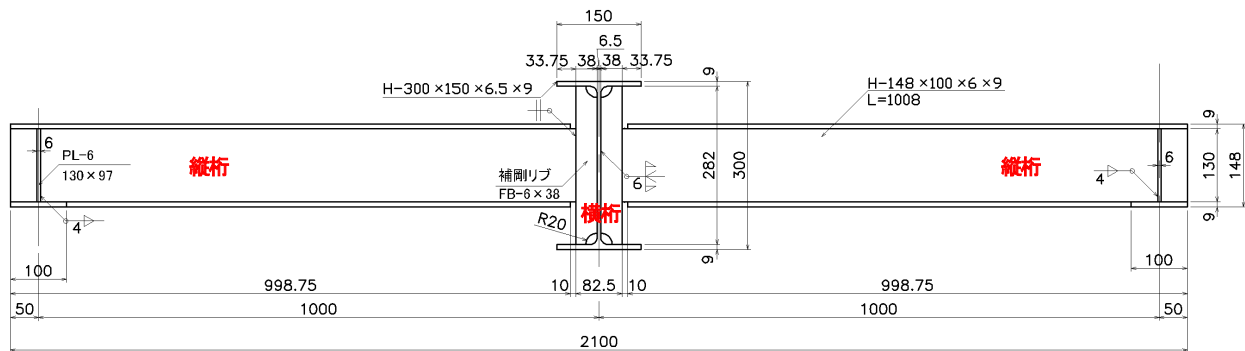


(c) 速硬軽量コンクリートの設置（灰部分）

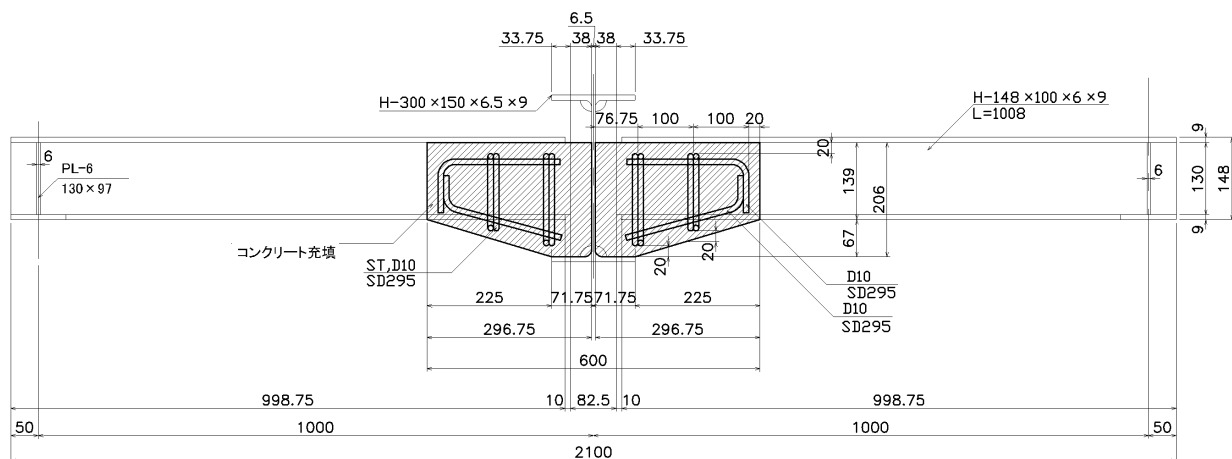
図-2 提案する部分的な複合構造化手法の概要

上フランジ上は軌道構造があり、コンクリートの設置が困難であるケースが多いと考え、図-2(c)のような形状とした。

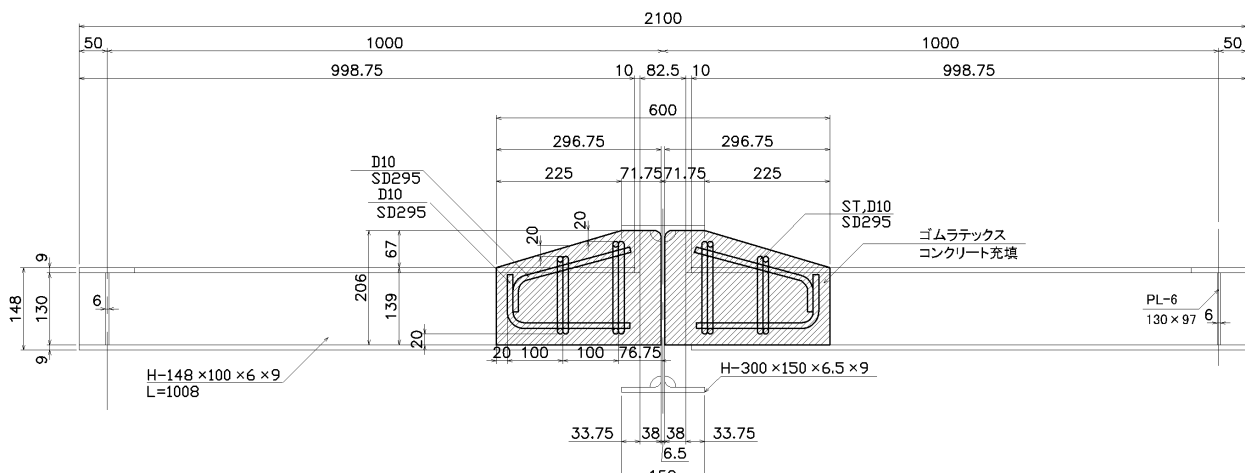
それぞれの複合構造化の構成材には次のような目的がある。



(a) 複合構造化前供試体形状図（正曲げ・負曲げ共通，H-300(横桁)の奥行きは300mm)



(b) 複合構造化前供試体形状図（正曲げ用，コンクリートの奥行きは250mm）



(c) 複合構造化前供試体形状図（負曲げ用，コンクリートの奥行きは250mm）

図-3 供試体概要図（単位 mm）

① ゴムラテックスモルタル（被覆材）⁵⁾

- ・コンクリートとの一体化促進
- ・鋼・コンクリート境界部の防食

② 埋設型枠（FRPの活用を想定）

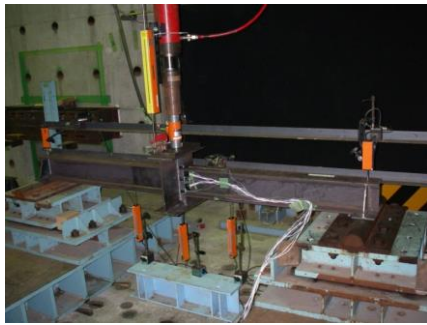
- ・施工性の向上
- ・コンクリートの剥落防止

③ 速硬軽量コンクリート⁶⁾

- ・鋼橋への剛性の寄与（耐荷力，耐久性の向上）
- ・死荷重増分量の低減（軽量）

・鉄道工事の夜間急速施工に対応可能（速硬）

ゴムラテックスモルタルは、モルタルにゴムラテックス混和剤を混入させたものであり、鋼材・コンクリート双方への付着性能が高く（一般に材令7日付着せん断強度で5.0N/mm²程度）、耐水性能、耐衝撃性能にも優れていることが知られている。既存の適用事例としては、道路橋の鋼床版の疲労対策として、鋼床版の上に打設する構造などが提案されている。本複合構造化においては、この高い付着性能から、鋼・コンクリートの境界部の防



(a) 供試体全景（事前载荷試験状況）



(b) 供試体連結部拡大

写真-2 複合構造化前の鋼桁供試体

食だけでなく、コンクリートとのずれ止め効果を期待している。なお、ゴムラテックスのヤング係数は、一般に $2.00 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 程度である。

速硬軽量コンクリートは、鉄道橋における夜間施工を想定して、比較的早期に強度を発現させることに着目した新しい材料である。また、付加される死荷重を低減させるために、軽量骨材を使用し、単位容積質量を 2.03 kg/l 程度、ヤング係数を $2.30 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 程度（通常の軽量コンクリートとほぼ同等）とすることとした。なお、コンクリート中の鉄筋は、速硬軽量コンクリートのひび割れ防止のために配置しており、鋼桁を貫通することは現時点で想定していない。

3. 供試体の概要

本構造を模擬するために、模型供試体を作成した。模型供試体は、縦桁－横桁連結部を想定した単純はりとし、連結部に作用する力を想定して、正曲げ载荷用、負曲げ载荷用の2体を作成することとした。また、連結部は、写真-1のような摩擦面を持つ連結構造では、偏心が生じて载荷試験の安全性に問題が生じることが懸念されたため、突合せ溶接により作成している。複合構造化前の鋼桁供試体の概要を図-3(a)、写真-2に示す。鋼桁供試体は上下方向対称な構造であるため、正曲げ・負曲げともに共通である。なお、本実験では、载荷試験時にコンク



(a) ゴムラテックスモルタル施工状況



(b) 速硬軽量コンクリート打設状況



(c) 速硬軽量コンクリート打設後（保温材取付）



(d) 複合構造化後の供試体（正曲げ载荷試験状況）

写真-3 複合構造化作業および複合構造化後の供試体

リートの破壊状況を確認するために、埋設型枠は使用せずに、取り外し式の型枠を使用することとし、コンクリート硬化後に型枠を取り外した。

複合構造化後の供試体の概要、および施工状況を図-3(c)、(d)、写真-3に示す。今回使用したゴムラテックスモルタル、速硬軽量コンクリートの諸元を表-1～表-4に示す。また、コンクリート打設後は、反応温度の急激な

表-1 ゴムラテックスモルタルの配合

水セメント比	ポリマーセメント比	砂セメント比	単位量 (kg/m ³)	
(%)	(%)	(%)	パウダー	混和液
26.9	18.8	1.86	1911	305

表-2 ゴムラテックスモルタルの諸元

フロー	単位容積質量	圧縮強度 (N/mm ²)		
(mm)	(g)	3d	11d	28d
165	2.15	26.8	33.1	36.2

表-3 速硬軽量コンクリートの配合

水セメント比	細骨材率	単位量 (kg/m ³)		
(%)	(%)	水	パウダー	軽量粗骨材
32.5	60	183	1529	412

表-4 速硬軽量コンクリートの諸元

試験項目	測定値
スランプ (cm)	19.5
空気量 (%)	4.5
練上り温度 (°C)	21
硬化時間 (分)	110
圧縮強度 (N/mm ²)	3hr 19
	1d 34.4
	5d 46.1
	28d 52.3

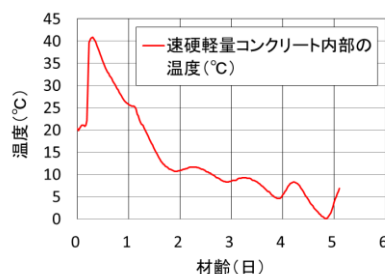


図-4 速硬軽量コンクリートの温度変化

変化によりひび割れを生じる可能性があることが報告されているため、打設後は4日目まで保温材を型枠周辺に取り付けることとした（写真-3(c)）。打設直後からのコンクリートの温度変化の状況を図-4に示す。型枠取り外し後にコンクリートの状況を確認したが、表面上にはひび割れが生じていないことを確認している。

4. 載荷試験

載荷試験は、複合構造化前後（以降、事前、事後とする）で3点曲げにより行っている。載荷点は横桁フラン

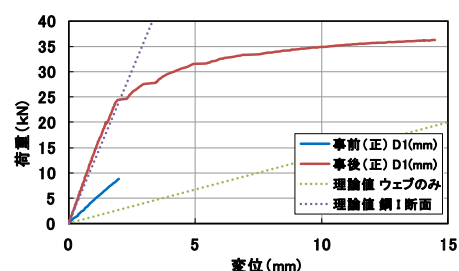


図-5 スパン中央の荷重-変位関係（正曲げ載荷）

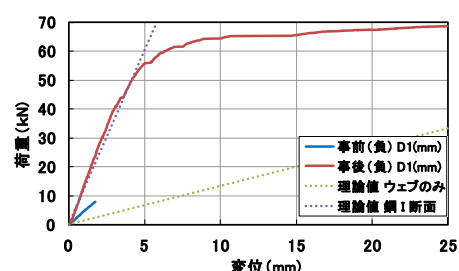


図-6 スパン中央の荷重-変位関係（負曲げ載荷）

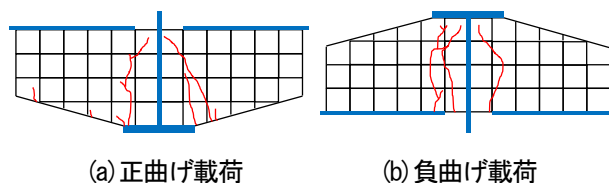


図-7 載荷終了時のひび割れ状況

ジ部とし、連結部に曲げモーメントが作用するように設定している。事前の載荷は、鋼桁の降伏が生じる前の弾性域のみで行うものとし、いずれかのひずみ計測結果が800μになるまでとした。事後の載荷は、鋼桁が降伏し、荷重-変位曲線の勾配が十分に低下するまで実施した。載荷試験の状況を写真-2(a)、写真-3(d)に示す。

(1) 荷重-変位関係

スパン中央における荷重-変位関係の事前事後の比較を図-5、図-6に示す。本図においては、理論値として、桁全体にわたって鋼I断面の剛性として計算したもの（鋼I断面）と連結部のフランジが切れたところに着目してI断面のウェブのみの剛性で算出したもの（ウェブのみ）を示している。事前の載荷試験結果は、この2つの理論値の中間的な挙動となっており、本供試体としては、連結部がヒンジのような挙動をしていることが推測される。一方で事後の載荷試験結果は、理論値・鋼I断面の結果とよく一致しており、本結果よりコンクリートの効果により、事前ではヒンジのように挙動していた部分が剛結化した結果となっている。また、荷重-変位曲線の低下は、コンクリートのひび割れにより生じていると考えられる。最大耐力は、負曲げ試験の方が大きな

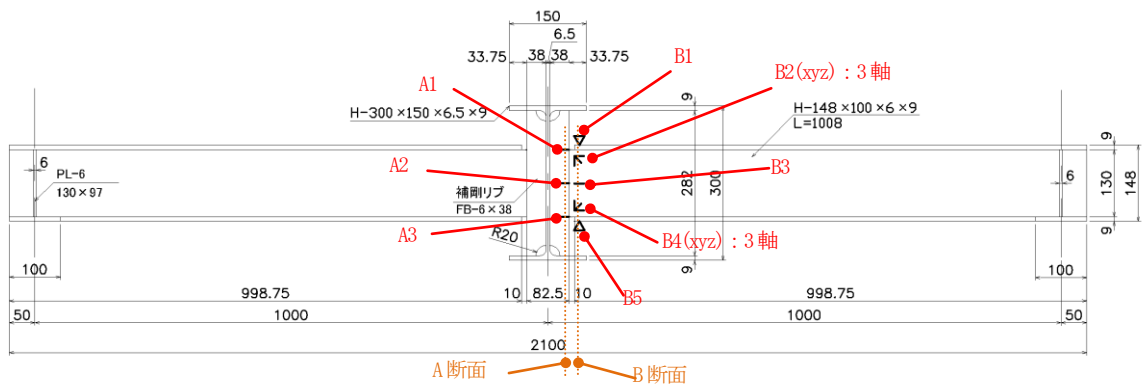


図-8 ひずみゲージ取付位置と測定点名称（事前事後，正曲げ・負曲げ共通，単位 mm）

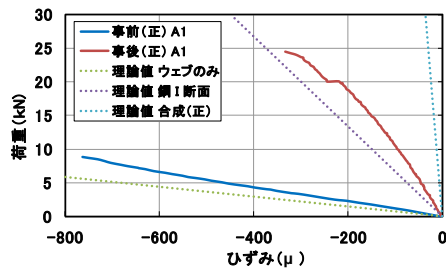


図-9 A1の荷重-ひずみ関係（正曲げ載荷）

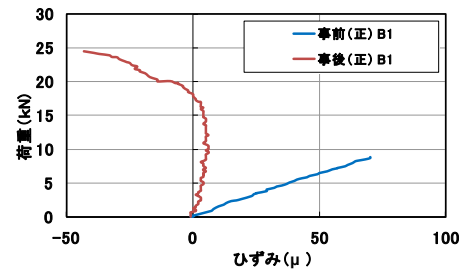


図-11 B1の荷重-ひずみ関係（正曲げ載荷）

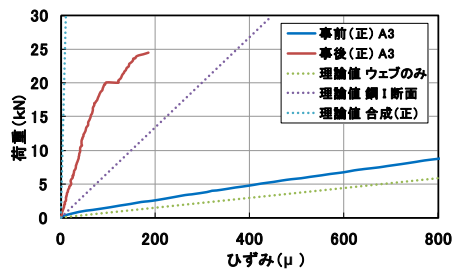


図-10 A3の荷重-ひずみ関係（正曲げ載荷）

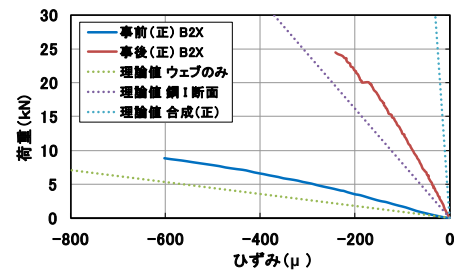


図-12 B2xの荷重-ひずみ関係（正曲げ載荷）

値となっているが，これは負曲げ用供試体では圧縮域のコンクリートが，正曲げ用の供試体よりも体積が大きくなっていることから生じていると考えられる。

(2) ひび割れ状況

各供試体の載荷終了時のひび割れ発生状況を図-7に示す。ひび割れ発生荷重は，正曲げ：23.1kN，負曲げ：44.0kN，となっている。ひび割れは，正曲げ載荷では横桁下フランジ端から，負曲げ載荷では縦桁下フランジ端より生じている様子がわかる。なお，コンクリートにひび割れは生じたものの，載荷終了時までコンクリート部分が落下することはなかった。

(3) 荷重-ひずみ関係

供試体に取り付けたひずみゲージの位置と測定点名称を，図-8に示す。ひずみゲージは，連結部の応力が集中する場所に取り付けることとし，横桁補剛材側をA断面，

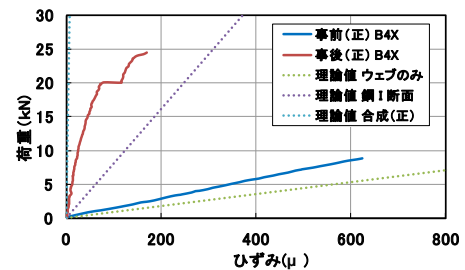


図-13 B4xの荷重-ひずみ関係（正曲げ載荷）

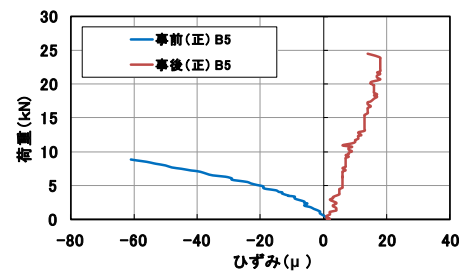


図-14 B5の荷重-ひずみ関係（正曲げ載荷）

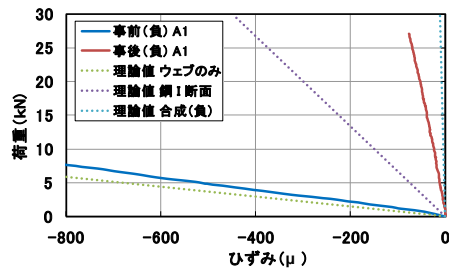


図-15 A1の荷重-ひずみ関係（負曲げ載荷）

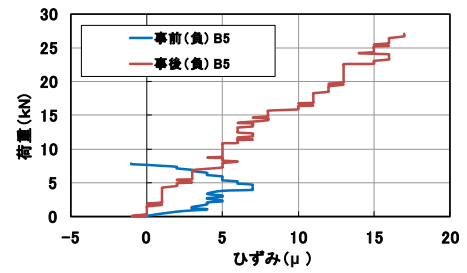


図-20 B5の荷重-ひずみ関係（負曲げ載荷）

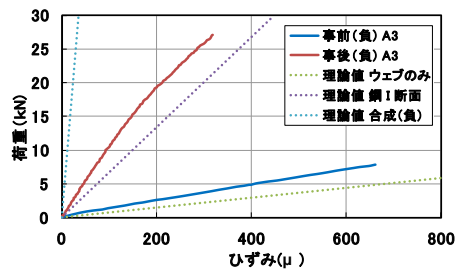


図-16 A5の荷重-ひずみ関係（負曲げ載荷）

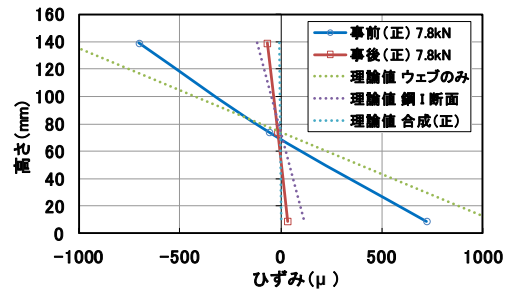


図-21 弾性時のA断面内ひずみ分布（正曲げ載荷）

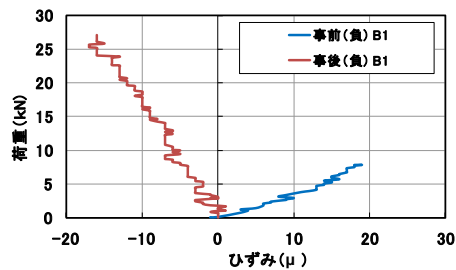


図-17 B1の荷重-ひずみ関係（負曲げ載荷）

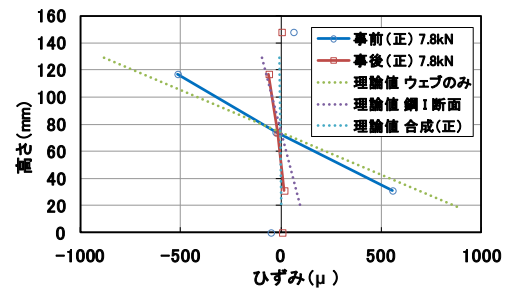


図-22 弾性時のB断面内ひずみ分布（正曲げ載荷）

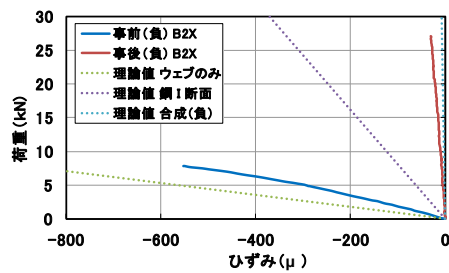


図-18 B2xの荷重-ひずみ関係（負曲げ載荷）

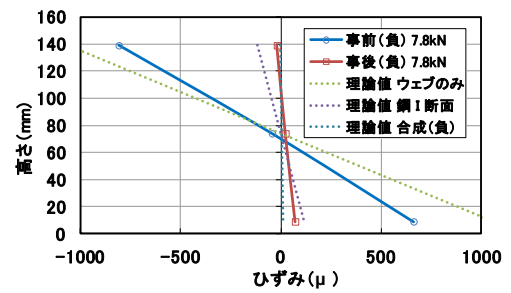


図-23 弾性時のA断面内ひずみ分布（負曲げ載荷）

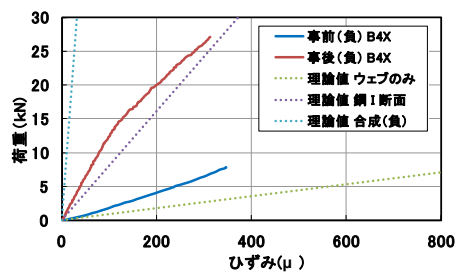


図-19 B4xの荷重-ひずみ関係（負曲げ載荷）

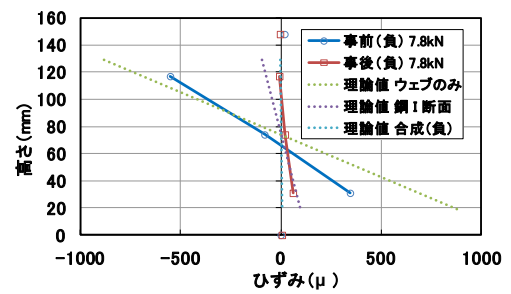


図-24 弾性時のB断面内ひずみ分布（負曲げ載荷）

縦桁ウェブ側をB断面としてそれぞれひずみゲージを取り付けた。また、試験結果のうち、代表的な荷重-ひずみ関係を図-9～図-20に示す。フランジ部 (B1, B5) を除いた各図において、理論値は、コンクリートの剛性を考慮した断面 (合成) も加えて表示している。なお、本図では、正曲げ・負曲げともにスパン中央の変位が2mmまでの範囲での結果を示している。フランジ部 (B1, B5) を除いた各図の結果から、事前ではI断面ウェブのみの剛性と近い結果となっているものの、事後では鋼I断面と合成断面の中間的な挙動となっていることが把握でき、複合構造化により鋼部材に発生する応力が大きく低下していることがわかる。なお、フランジ部 (B1, B5) に発生するひずみは、各結果ともに非常に小さな値であるが、傾向は事前事後で大きく変化していることがわかる。この部分のひずみは、事前では桁の曲げ挙動とは圧縮・引張で逆の方向を示していたが、事後では、値は小さいものの、桁の曲げ挙動の圧縮・引張の方向と一致するように変化していることから、完全ではないもののコンクリート部材を介して、桁の曲げを受け持つように改善されたと考えられる。

(4) 弾性時の断面内ひずみ分布

事前事後ともに弾性的な挙動を示している7.8kN載荷時の、A・B断面の断面内ひずみ分布を図-21～図-24に示す。各図ともに、フランジのひずみ以外は平面保持が成立している様子がわかる。また、本結果からも、事前では鋼I断面のウェブのみの理論分布とほぼ一致し、事後では鋼I断面と合成断面の中間的な挙動となっていることがわかる。

5. まとめ

本研究より以下の結論を得た。

- (1) 今回提案した部分複合構造化手法は、急速施工も可能であり、大規模な溶接や削孔を必要としないため、供用中の既設鋼橋に対しても十分に施工可能である。
- (2) 部分複合構造化した連結部の応力は、大きく減少できることを確認した。この効果は、荷重-変位関係から考察すると、切断されている縦桁のフランジを橋軸方向に一体化させる程度の効果があると考えら

れる。

- (3) (2) の結果、損傷が多く発生する縦桁-横桁連結部の構造に対する補強対策として十分有効であり、累積疲労損傷度の理論から考えると、構造物の長寿命化につながると言える。
- (4) 今回の実験結果より、ひび割れが生じて鋼材が降伏した以降も、複合構造化により使用したコンクリート部材は剥落することはなかった。

なお、本研究結果から、下路プレートガーダーの縦桁-横桁連結部の予防保全策としてはそのまま活用できると考えられる。また、応力低減効果としては、かなりの効果が期待できるため、き裂等が生じた後の補修や、耐震補強部材としての活用も期待できると考えている。

また、下路プレートガーダーの縦桁-横桁連結部の損傷は、マクラギの設置方法の不整により、ねじれが生じて起ることも知られているため、このような挙動に対しては、今後3次元の有限要素解析を行い、補強効果を検証する予定である。

謝辞：本実験の実施にあたっては、日鉄住金環境 (株) の井上氏、宮本氏に多大な協力を得ました。また、本研究は科学研究費助成事業 (若手B) を受けて実施しました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説、鋼・合成構造物，2007.1.
- 2) 谷口望，半坂征則，小出宜央，大垣賀津雄，大久保藤和，佐伯俊之：施工性を考慮した鋼鉄道橋の複合構造化に関する研究，構造工学論文集，Vol.57A，pp.1052-1059，2011.
- 3) 土木学会：複合構造物を対象とした防水・排水技術の現状，土木学会，複合構造レポート 07，2013.7.
- 4) 谷口望，吉田直人，杉野雄亮，佐竹紳也，大久保藤和，小出宜央，大垣賀津雄：鋼橋の複合構造化に使用する速硬軽量コンクリートの硬化時におけるひび割れ挙動に関する検討，構造工学論文集，Vol.58A，pp.917-924，2012.
- 5) 上月隆史，棚橋明朗，谷口望，碓山晴久，依田照彦：ゴムラテックスモルタルを被覆した負曲げを受ける合成桁のずれ止めに関する実験的研究，構造工学論文集，土木学会，Vol.56A，pp.969-978，2010.4.
- 6) 浜中昭徳，長塩靖祐，中島裕：速硬性混和材および軽量骨材を用いたコンクリートの基礎性状，土木学会平成 22 年度全国大会，土木学会，V-710，pp.1419-1420，2010.9.

A Study on Partial Hybrid Structures Renovated from the Old Railway Steel Bridges

Nozomu TANIGUCHI, Fujikazu OHKUBO, Shinya SATAKE, and Yusuke SUGINO

The maintenance of the railway steel bridges is considered to be problems. Therefore, in this study, to be easy to come to do maintenance, the partial members of steel bridges are composed with concrete members. The stiffness increases from the bridges of only steel members. The remainder life of the structure is extended by this effect. These effects are confirmed by the experiments.