

既設鋼橋のリニューアルのための合成構造化の開発

吉田 善紀* 谷利 晃** 杉本 一朗*

Development of Structural Improvement Composing with Concrete Slabs for Renewal of Existing Railway Steel Bridges

Yoshinori YOSHIDA Akira TANIKAGA Ichiro SUGIMOTO

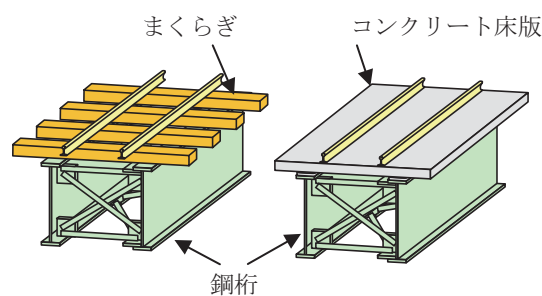
More than a half of existing railway steel bridges in Japan have been in service for more than seventy years. Some of the aged bridges have various severe problems including corrosion of upper flange, fatigue and noise. In this study, we proposed a method of structural improvement for the existing railway steel bridges by composing with concrete slabs. This method enables to improve the load-carrying capacity of the bridges, extend the service life, and reduce the noise. We carried out workability studies on the proposed method of composition and verified the method was applicable in a tight time schedule. Furthermore we found by loading tests that the strength and the stiffness of the girder improved with the method of composition.

キーワード：鋼鉄道橋，維持管理，リニューアル，合成構造化

1. はじめに

鋼鉄道橋は、明治時代から供用されており、既に半数以上が経年70年を超えている¹⁾。当初、鋼鉄道橋は、鋼桁の上にマクラギを直接敷設した開床式が一般的であった。この開床式鋼鉄道橋では、鋼桁上フランジに敷設されている橋まくらぎの下面が腐食しやすく、維持管理に手間を要する事例が見られ、鋼桁の耐荷力にも影響することが想定される^{2) 3)}。大多数の開床式鋼鉄道橋は、現在も供用され十分な役割を果たしているが、今後、架け替えが必要となる鋼鉄道橋も増えていくことが想定される。架け替えには、鋼鉄道橋の設計・製作だけではなく、線路の切り替え作業や架け替え作業に伴う用地の確保なども必要になる。このため、通常の補修・補強とは別に、既設の鋼鉄道橋を今まで以上に長持ちさせることがさらに重要になると考えられる。

古い鋼鉄道橋の補修・補強は既に様々なところで行われてきているが、リニューアルという観点での検討事例は少ない。筆者らは、既設の開床式桁を再生する方法として、橋まくらぎをコンクリート床版に置き換えて合成構造化する方法に着目し検討を進めてきた⁴⁾。この方法は、鋼桁とコンクリート床版をずれ止めを介して合成桁のように一体化させようとするもので、床版に荷重を分担させて、既設の鋼桁に加わる作用を軽減し、耐荷力の向上を図ることが期待できる(図1)。これまで基礎的な



(a) 橋まくらぎ方式 (b) 合成構造化

図1 合成構造化のイメージ

要素試験を実施してきたが、夜間の列車間合いでの施工も想定されることから、本検討を深度化する上では、施工性を考慮した検討も重要と考えられる。

そこで、本研究では、施工性を考慮し実物に近い桁試験体を用いて合成構造化の効果を検討したのでその内容を報告する^{5) 6)}。

2. 既設鋼桁の合成構造化の基本的な概念

既設鋼桁を合成化する際のイメージを図2に示す。

一般に、新設の合成桁では鋼桁と床版を一体化する方法としてスタッドジベル、孔あき鋼板ジベル、および馬蹄形ジベルなどのずれ止めが用いられるが、今回の検討では、リベット桁のような古い鋼桁を想定していることから、ずれ止めの設置は溶接ではなく機械的な結合が望ましい。ここでは、鋼桁上フランジのリベット孔を利用して、ずれ止めボルトを設置する方法を採用することと

* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

** 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

(現 ジェイアール東海コンサルタンツ(株))

特集：構造物技術

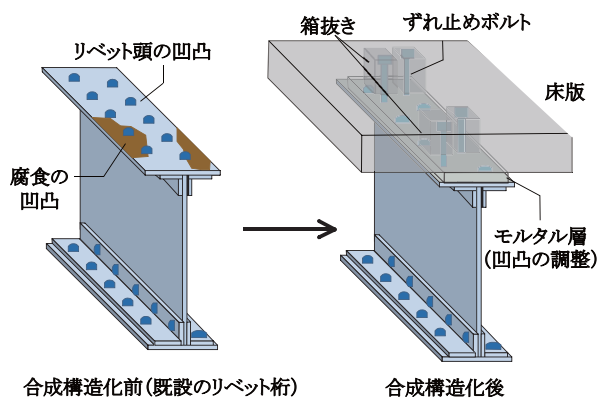


図2 既設鋼桁の合成構造化の概念

した。リベット孔に差し込むことで、高力ボルトをずれ止めとして用いることにした。

ずれ止めボルトと床版の結合は、床版に箱抜きを設けて、床版を設置した後に箱抜きにモルタルを充填することで一体化を図ることとした。この時、既設の鋼桁の上フランジ面にはリベットの頭があることや上フランジ面の腐食等により、床版を鋼桁上に直に設置することが困難なことが予想される。そこで、鋼桁の上フランジ面と床版の間にはモルタルを充填して一体化を図ることとした。

3. 施工手順

既設の鋼鉄道橋を合成構造化する際、供用中の施工が前提となることも考えられる。そこで、夜間の列車の間

合いでの作業を想定した施工手順について一例を図3に示す。STEP1が事前準備作業、STEP2とSTEP3が合成構造化に必要な作業である。

STEP1 [鋼桁単体]

STEP1では、事前作業として、橋まくらぎが敷設されている状態において、主桁上フランジのリベット数本をずれ止めボルトに交換する。そして、ずれ止めボルトの設置と並行して、床版を仮支持するためのブラケットを主桁に取り付ける。

STEP2 [床版仮支持]

STEP2では、レール、橋まくらぎを撤去した後、鋼桁上フランジ上に床版を設置する。床版は、事前に取り付けたブラケットの上に設置した仮支承によって仮支持する。床版の高さおよび水平方向の調整は、ボルトや治具を用いてブラケットの位置で行う。

STEP3 [モルタル充填]

STEP3では、床版の位置を固定した後、床版と鋼桁間にモルタルを充填する。鋼桁と床版の間はモルタル充填用の型枠を先に施工しておく。本研究では、床版と床版の間の目地にモルタルを充填しない場合 (STEP3-1) と、床版と床版の間の目地にモルタルを充填する場合 (STEP3-2) について、モルタルの充填の効果を検討した。

ここで示した方法は一例であるが、事前準備作業を実施しておくことにより、合成構造化の作業性が向上するものと考えられる。

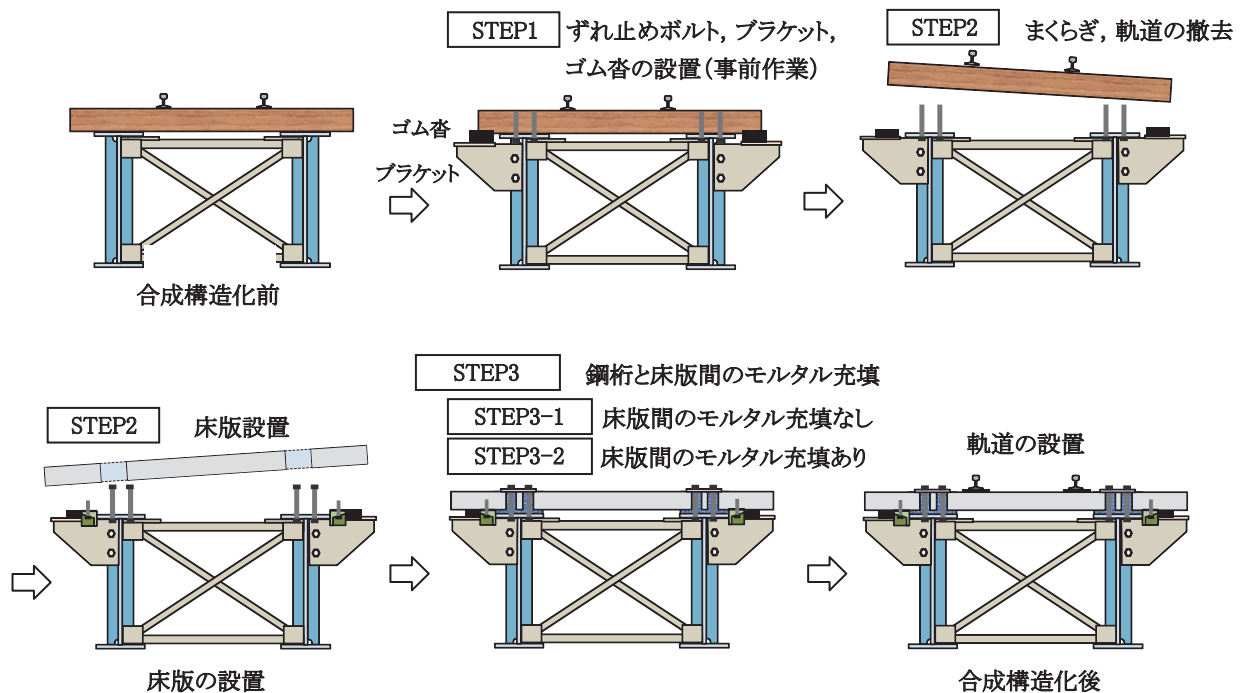


図3 合成構造化の施工手順の例

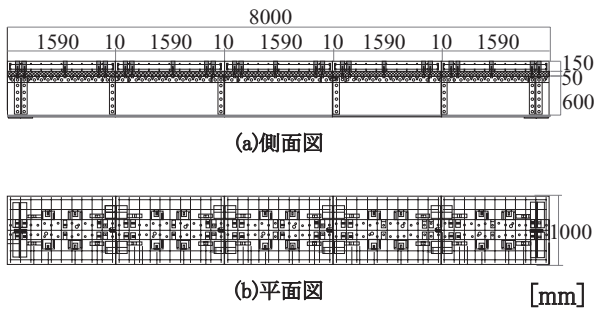


図4 桁試験体の概略寸法



図5 試験体（鋼桁）の上フランジの状況

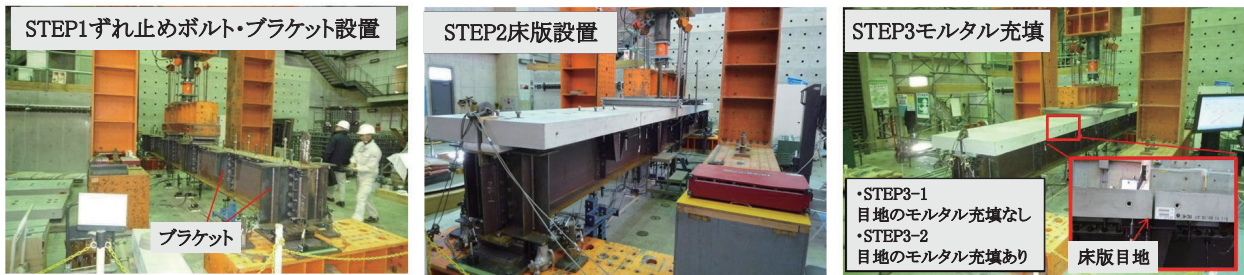


図6 桁試験体の荷重試験状況

4. 荷重試験

4.1 桁試験体

前項で示したような施工手順を想定した上で合成構造化の効果を調べるために、桁試験体を用いて荷重試験を実施した。床版を設置した桁試験体の形状を図4に示す。桁試験体の長さは8000mmとし、鋼桁の上に長さ1590mmの床版を線路方向に5枚設置した。床版と床版の間隙（目地）は10mmとした。床版の厚さは、まくらぎの高さ（200mm）を考慮して150mmとし、残りの50mm分をモルタルの厚さとした。鋼桁の上フランジ上面には、リベット桁を想定して、アングル材とウェブをトルシア形高力ボルトで接合した。鋼桁の上フランジの状況を図5に示す。ずれ止めボルトは、床版1枚あたり10本とし、床版の両端に4本ずつと中央に2本を配置した。

4.2 各施工段階の桁の挙動

合成構造化による効果と各施工段階の桁の挙動を把握するため、静的荷重試験を実施した。荷重は、支間長を7600mm、荷重スパンを2100mmとして4点曲げとした。荷重ケースは、先の施工手順を想定してSTEP1～STEP3とした。このうちSTEP3では、前述の通り床版間の目地にモルタルを充填しない場合と充填した場合に分けて荷重試験を実施した。試験状況を図6に示す。

- STEP1 : 鋼桁単体
- STEP2 : 床版仮支持
- STEP3-1 : モルタル打設（床版の目地あり）

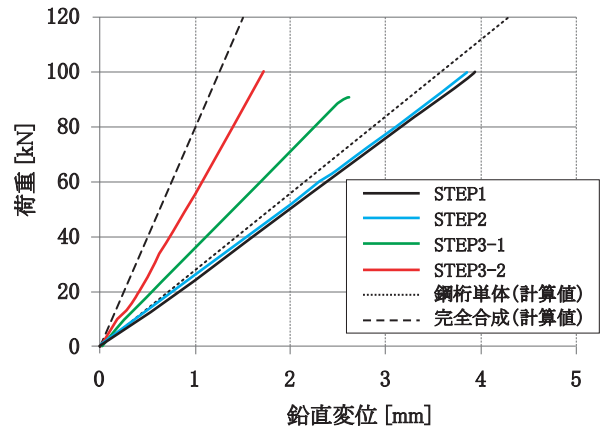


図7 各施工段階の荷重鉛直変位

STEP3-2：モルタル打設（床版の目地無し）

図7に、支間中央における桁の鉛直変位を示す。モルタル充填前のSTEP2は、鋼桁単体のSTEP1と比較して初期剛性に変化は見られない。これに対して、モルタルを充填した後のSTEP3では、初期剛性が高くなっていることが読み取れる。目地にモルタルを充填しない場合のSTEP3-1では、鋼桁単体の約1.4倍、目地にモルタルを充填した場合のSTEP3-2では、約2.0倍、剛性が上がっていることが読み取れる。

図8に、荷重100kN時の支間中央断面における橋軸方向ひずみ分布を示す。モルタル充填前のSTEP2では、下フランジのひずみが、鋼桁単体と比較して3割程度低減しているが、これは床版を介して荷重を行ったことで、荷重が分散したためであると考えられる。モルタル充填後のSTEP3は、目地のモルタル充填の有無と関係なく、

特集：構造物技術

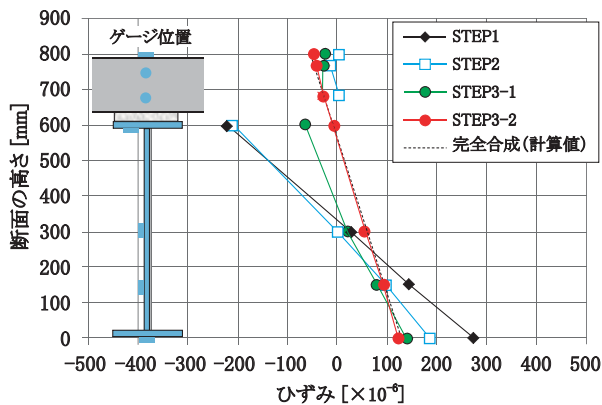


図8 支間中央断面のひずみ分布

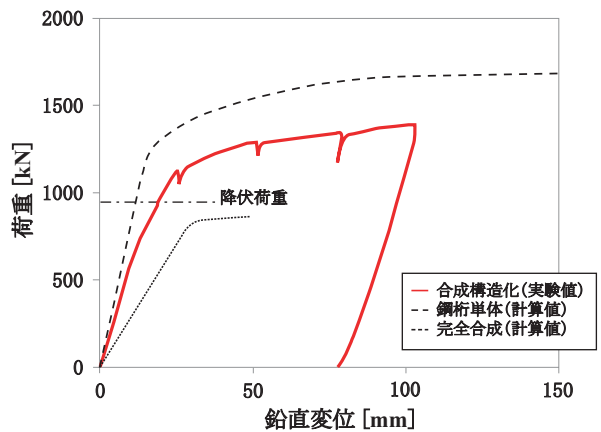


図10 荷重鉛直変位関係

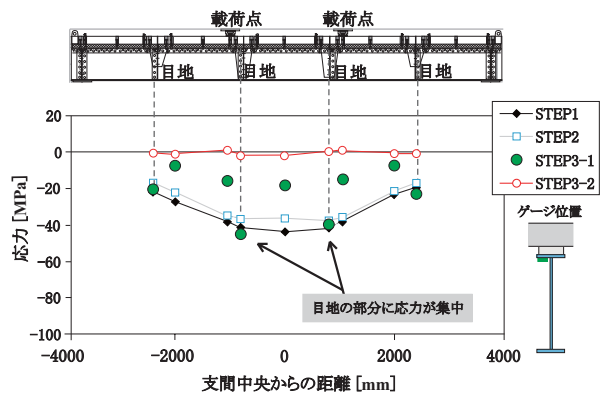


図9 上フランジの橋軸方向の応力

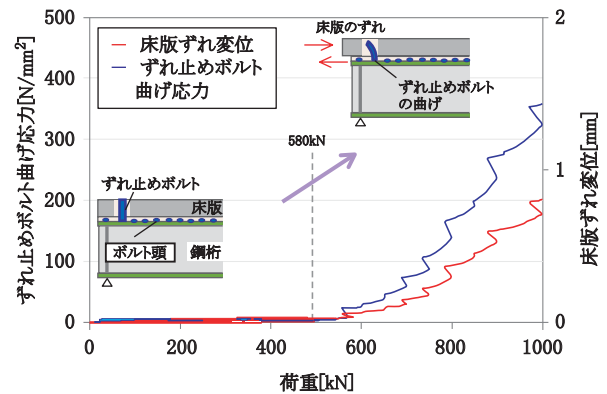


図11 床版のずれ変位とずれ止めボルトの曲げ応力

下フランジのひずみが鋼桁単体STEP 1の半分以下に低減している。目地を充填したSTEP3-2は、完全合成とした計算値とひずみ分布が概ね一致しており、鋼桁と床版が一体で挙動していると考えられる。これに対して、目地が充填されていないSTEP3-1は、STEP3-2と比較して、鋼桁上フランジのひずみが大きく、床版のひずみが小さいことから、床版に力が伝達されていないことが考えられる。

図9に、上フランジの応力の橋軸方向の分布を示す。STEP3-2は、各断面とも上フランジにほとんど応力が生じていない。一方、STEP3-1では、目地位置の断面で鋼桁単体STEP1よりも大きい応力が生じている。このことから、目地にモルタルが充填されていないと、目地位置の鋼桁に応力が集中し、この部分の変形が大きくなると推察され、桁の剛性が小さくなったものと考えられる。

以上のことから、床版と鋼桁および床版間をモルタルを介して一体化することで、完全合成桁に近い挙動をすることが明らかとなった。

4.3 合成構造化後の桁試験体の耐荷力

合成構造化後の桁の耐荷力を調べるため、床版の目地にモルタルを充填した桁試験体の耐荷力試験を行った。

図10に、荷重と載荷点直下における鉛直変位の関係を

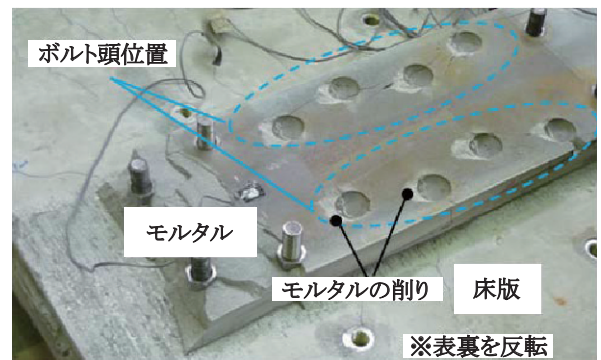


図12 モルタルと鋼桁の界面の状況

を示す。載荷開始直後は、完全合成とした計算値に近い挙動を示している。荷重が約1060kNのときに鋼桁下フランジが降伏し、1396kNのとき試験機の限界で載荷不能となったため、試験を終了した。合成構造化後は、降伏時の荷重が鋼桁単体の場合と比較して約1.2倍向上している。また、降伏に至るまでの桁の剛性は、荷重が600kNまでの範囲では、鋼桁単体の約2倍となっており、その後剛性は低下するものの、約1.3倍の剛性を保っている。

図11に、荷重と端部床版のずれ変位およびずれ止めボルトの曲げ応力の関係を示す。荷重が580kNになるまで、床版にずれは生じておらず、ずれ止めボルトにもひ

表1 押し抜きせん断試験の荷荷条件

	荷荷条件
試験体 No1	材齢 15 日で終局まで荷荷
試験体 No2	材齢 5 時間で終局まで荷荷
試験体 No3	(1) 材齢 5 時間で終局荷重の 1/3 の荷重を 5 回繰り返して荷荷 (2) 材齢 15 日で終局まで荷荷

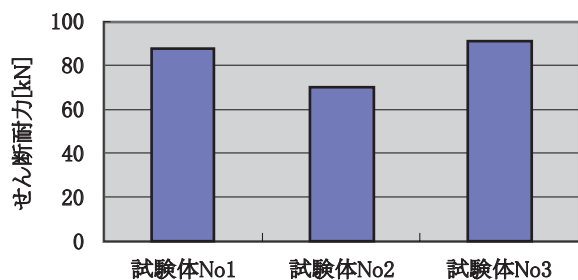


図13 押し抜きせん断試験結果

ずみが生じていない。荷重が580kNを超えると、床版のずれ変位およびずれ止めボルトの応力が荷重の増加とともに大きくなっている。

荷荷試験終了後に試験体を切断し、鋼桁とモルタルの界面の観察を行った。図12にモルタルと鋼桁の界面写真を示す。リベットを模擬したトルシア形高力ボルトの頭（以下、ボルトの頭）の前面のモルタルに、削れたような跡が見られる。これは、ボルト頭が床版のずれに対して抵抗し、前面のモルタルが支圧破壊したことで、モルタルが鋼桁上を滑り、床版にずれが生じたものと推察される。

以上のことから、床版のずれに対して、荷重の小さい範囲ではボルト頭が抵抗し、荷重が大きくなりモルタルが滑り始めてからは、ずれ止めボルトで抵抗したものと考えられる。モルタルが滑り始める前は、床版のずれが生じないため、完全合成桁に近い挙動を示すが、モルタルが滑り始めてからは、ずれ止めボルトが変形し床版にずれが生じるため、桁の剛性が低下したものと考えられる。ただし、降伏に至るまでは、鋼桁単体以上の剛性を有する。

5. 若材齢モルタルのずれ止めの押し抜きせん断試験

前項で、合成構造化により、桁の耐荷力および剛性が向上することを確認したが、ここでは、実際の施工でモルタルが十分に固化する前に床版と鋼桁の接合部に荷重が加わることを想定し、荷荷開始時間をパラメータとしたスタッドの押し抜きせん断試験を実施した。

荷荷条件を表1に示す。若材齢モルタルのずれ止めの

せん断耐力を評価するため、試験体No1、No2は、荷荷開始時間を変えて終局状態まで荷荷を行った。試験体No3は、モルタルの若材齢時の荷重履歴が養生後のずれ止めのせん断耐力に及ぼす影響を把握することを目的として、モルタル充填5時間後に試験体No2の最大耐力の1/3の荷重で5回の繰り返し荷荷を行い、その後材齢15日で終局状態まで荷荷した。

図13に押し抜きせん断試験の結果を示す。養生時間を5時間とした試験体No2のせん断耐力は、試験体No1の8割程度となっている。試験体No3は、試験体No1と同程度のせん断耐力となっており、若材齢時の荷重履歴の影響は見られなかった。以上より、モルタルの養生時間が短く、強度を発現していない場合であっても、ずれ止めのせん断耐力は大幅に低減しないと考えられる。また、若材齢時の荷重履歴がずれ止めのせん断耐力に及ぼす影響も小さいと考えられる。

6. まとめ

本研究では、既設の鋼鉄道橋に合成構造化を適用する場合を想定して、施工手順の一例について提案した。そして、施工性を考慮した桁試験体を製作し、合成構造化の効果を明らかにした。

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- ・ 床版と鋼桁間にモルタルを充填したSTEP3-1とSTEP3-2は、鋼桁単体のSTEP1と比較して、弾性範囲内において、剛性がそれぞれ約1.4倍と約2.0倍に向上することが明らかとなった。
- ・ 桁試験体の断面方向のひずみ分布は、モルタルを充填したSTEP3-1とSTEP3-2は、鋼桁単体STEP1と比較して半分に低減することが明らかとなった。
- ・ 目地の部分を充填していないSTEP3-1は、目地の部分を充填したSTEP3-2と比較して、目地の部分における鋼桁上フランジのひずみが局所的に大きくなる傾向にあった。このことより、合成構造化を行う上で、目地を充填することが重要であると考えられる。
- ・ 荷重と端部床版のずれ変位およびずれ止めボルトの曲げ応力は、荷重が580kNを超えてから増加する傾向が見られた。これは、580kNまでは、リベットを模擬したトルシア形高力ボルトの頭がずれに抵抗し、モルタルが滑り始めてからずれ止めボルトが効いて抵抗したものと考えられる。580kN以降、荷重が大きくなり付着が切れると剛性が若干低下するが、鋼桁単体の剛性を下回ることではない。
- ・ 合成構造化後の耐荷力は、鋼桁単体の耐荷力を降伏時で約1.2倍上回っており、降伏以降の変形性能も十分に有しており、急激な耐力低下も見られなかった。

特集：構造物技術

た。

- ・ モルタル若材齢時のずれ止めの押し抜きせん断試験を実施したところ、ずれ止めのせん断耐力は養生後の8割程度であった。また、モルタル若材齢時に載荷を行っても、その後のせん断耐力にはほとんど差が見られなかった。このことより、仮にモルタルが若材齢時に載荷されるようなケースがあっても、合成構造化は十分可能と考えられる。

今後、施工性を考慮して目地の間隔やずれ止めボルトの適切な配置について検討を進めていく予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、鹿島建設の平様、浅沼様、安部日鋼工業の横川様、岡山様にご協力ならびに貴重な助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

本研究は国交省の補助金を受けて実施しました。

文献

- 1) 市川篤司：鋼鉄道橋の補修・補強の概要，橋梁と基礎，Vol.28, No.8, pp.17-21, 1994.8
- 2) 中山太士，岡本章太，近藤拓也，藤井堅，松井繁之：まくらぎ下の上フランジに局部腐食を有する桁の残存耐荷力，構造工学論文集A, Vol.56, pp.145-156, 2010.3
- 3) 杉本一朗，小林裕介，市川篤司，谷口望，Vo Thanh Hung：腐食上路プレートガーダーの座屈挙動に着目した耐力評価，鉄道総研報告，Vol.19, No.12, pp.27-32, 2005.12
- 4) 斉藤雅充，杉本一朗，小林裕介，市川篤司：既設鋼鉄道橋の合成構造化によるリニューアル工法の提案，鉄道総研報告，Vol.22, No.10, pp.5-10, 2008.10
- 5) 谷利晃，杉本一朗，平陽兵，浅沼大寿：既設鋼橋の合成構造化における施工手順を考慮した実験的検討－その1－，土木学会第66回年次学術講演会，第CS部門，2011.9
- 6) 浅沼大寿，平陽兵，谷利晃，杉本一朗：既設鋼橋の合成構造化における施工手順を考慮した実験的検討－その2－，土木学会第66回年次学術講演会，第CS部門，2011.9