

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

齊藤 雅充* 杉本 一朗*
小林 裕介* 市川 篤司**

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

Masamichi SAITO Ichiro SUGIMOTO
Yusuke KOBAYASHI Atsushi ICHIKAWA

More than a half of existing railway steel bridges in Japan have been in service for more than sixty years. Some of the aged bridges have various severe problems including corrosion, fatigue and noise. In this study, we proposed a method of structural improvement of the existing railway steel bridges by composing with concrete slabs. Using this method, we can improve the load-carrying capacity of the bridges, extend the service life, and reduce the noise. We carried out a series of fundamental studies to verify the adaptability of the proposed method.

Finally, we proposed a method of composition, which applicable in a tight time schedule, and found by loading tests that the girder-slab connection has adequate strength for composition of existing girders.

キーワード：鋼鉄道橋，既設構造物のリニューアル，合成構造化，長寿命化，維持管理

1. はじめに

鋼鉄道橋は明治時代から数多く架設され、半数以上が60年の供用を超えるなど、老朽化した鋼鉄道橋が増加している。多数の既設鋼鉄道橋は今でも十分に役目を果たしているが、腐食による耐荷力の低下¹⁾や疲労によるき裂の発生²⁾が課題となっている。また、一部では列車通過時の騒音の発生なども指摘されている。しかし、これらの橋の架け替えには多大なコストや施工用地，列車運行への支障などの困難が伴うため、できるだけ短時間の簡易な施工で橋を長寿命化し、今後も供用し続けることが求められている。

既設の鋼鉄道橋の多くは、図1 (a) のような橋まくらぎ方式で軌道が敷設されている。これは、まくらぎが鋼桁の上に直接設置されているもので、まくらぎ直下の上フランジにおける局部腐食や列車通過時の騒音が課題となっている。そこで本研究では、既設鋼橋の橋まくらぎの部分、図1 (b) のようにコンクリート床版に置き換え、鋼桁を合成桁のような形に合成構造化して橋梁を再生する手法を検討した。本手法により、腐食や疲労を抑制することによる維持管理の軽減，耐荷力・耐久性の向上，列車通過時の騒音の低減などが期待できる。

これまで、新設の構造物を対象とした合成構造の研究

* 構造物技術研究部（鋼・複合構造）

** 研究開発推進室

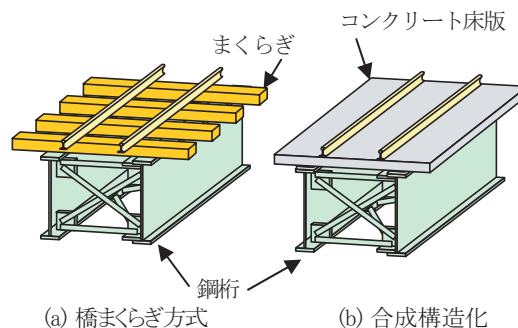


図1 既設鋼橋の合成構造化

は種々行われているが、既設の開床式鋼桁を合成構造化する試みは行われていない。ここでは、本手法の適用性について検討するために、合成構造化の方式，床版の種類，合成効果，死荷重増加の影響，および鋼桁と床版との接合について各種検討を実施した。

2. 合成構造化に関する基礎的な検討

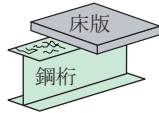
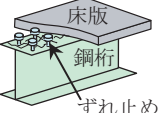
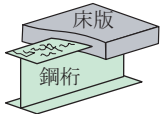
2.1 合成構造化の施工方式の提案と比較検討

合成構造化の施工方法として、表1に示すような合成構造化の方式が考えられる。

プレキャスト床版法は、床版にプレキャスト床版を用いるもので、最も急速な施工が可能である。ただし、鋼桁との接合方法について別途検討が必要である。

特集：構造物技術

表1 合成構造化の施工方式の比較

施工法	プレキャスト床版法	ボルト置き換え法	上フランジ巻き立て法
施工概略図			
施工時間	急速施工可	数日～数週間	数日～数週間
合成効果	接合方法の検討が必要	合成効果あり	合成効果が大きい
重量増	抑制できる	抑制できる	重量増が大きい
施工方法の選択例	短時間で施工する場合	簡易な施工と合成効果を期待する場合	合成効果を高める場合

ボルト置き換え法は、鋼桁上フランジの既存のリベットを取り外し、代わりにずれ止めを兼ねたボルトを設置し、その上にコンクリート床版を打設する方法であり、比較的簡易な施工と合成構造化の効果を両立することができる。

上フランジ巻き立て法は、鋼桁の上フランジ全体をコンクリートで巻き立てる方法であり、最も高い合成効果が期待できる。

しかし、実際の施工に当たっては、なるべく列車の運行に影響を与えない施工方法を用いなければならない。線区によっては長時間列車を運休するリフレッシュ工事が可能な場合もあるが、幹線等においては、列車運行への支障はなるべく避け、夜間の線路閉鎖間合いの中で数時間のうちに作業を完了させることが求められる。

施工時には、上記の時間的制約の中で、既設軌道の撤去、床版の設置または打設、新たな軌道の設置などの一連の作業が必要となる。特に、ボルト置き換え法および上フランジ巻き立て法は、鉄筋の配置、コンクリートの打設および打設後のコンクリート硬化に数日から数週間を要するため、あまり現実的な方法ではない。

これに対してプレキャスト床版法は、プレキャストコンクリート製の床版を用いることによって、コンクリートの硬化時間などを省くことができる。さらに、床版数パネル分ずつに作業を分割し、数回の夜間作業で施工を完成させるなど、列車運行への支障を避けた施工方法が採用できる。以下では、プレキャスト床版法について検討した事柄について述べる。

2.2 コンクリート床版の検討

合成構造化に際して、当該橋梁の前後の構造物や軌道、電車線など他の設備に影響を与えないためには、もとの軌道の位置や高さ（レールレベル）を施工前後で変化させないことが求められる。既存の橋まくらぎの標準

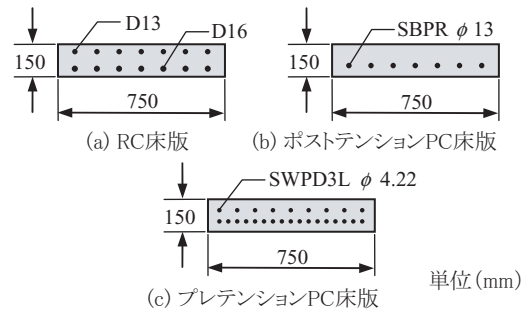


図2 検討に用いた床版断面

表2 床版断面の照査結果

床版種類	安全性の照査		使用性の照査 (上下縁応力) (N/mm ²)
	曲げモーメント $\gamma \cdot M/M_{ud}$	せん断力 $\gamma \cdot V/V_{sd}$	
RC床版	1.103 > 1.0 NG	—	—
ポストテンションPC床版	0.75 ≤ 1.0 OK	0.86 ≤ 1.0 OK	上縁(圧縮応力) $\sigma_c = 14.6 \leq 20.0$ OK 下縁(引張応力) $\sigma_t = 2.0 \leq 2.0$ OK
プレテンションPC床版	0.86 ≤ 1.0 OK	0.75 ≤ 1.0 OK	上縁(圧縮応力) $\sigma_c = 20.3 > 20.0$ NG 下縁(引張応力) $\sigma_t = 1.6 \leq 2.0$ OK

的な高さは200mmであるが、鋼桁上フランジ面の凹凸の存在や接着層を設けることなどを考慮すると、床版厚さは150mm程度であることが望ましい。ここではこの床版厚さで列車荷重を支持することを検討する。コンクリート床版に列車荷重が働いたときの安全性および使用性の照査を行った。コンクリート床版の断面を図2に示す。鋼桁の主桁間で床版が単純支持されているとし、床版の大きさは、上路桁の標準的な主桁中心間隔および列車荷重1軸分（[列車荷重 90kN+衝撃荷重 34kN=124kN] × 2）が働く範囲を考慮して、支間 1700mm、幅 750mm とした。

表2に、曲げモーメントおよびせん断力に対する安全性の照査および上下縁応力に対する使用性の照査を行った結果を示す。照査の結果、ポストテンションPC床版において、安全性および使用性を満たすことが分かった。なお、床版をより厚くした場合や、主桁中心間隔が狭い場合などにはRC床版やプレテンションPC床版も使用できるため、状況に応じて床版の種類を選択することも可能である。

2.3 合成効果に関する検討

過去に、腐食が原因で架け替えられた鋼鉄道橋の中で、図3のようなまくらぎ直下の上フランジの腐食が33%を占めていた³⁾。これは、列車通過時の衝撃や振動

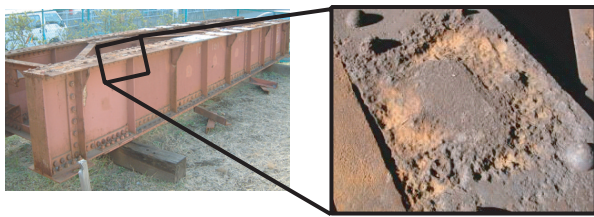


図3 既設鋼桁におけるまくらぎ接触面の腐食

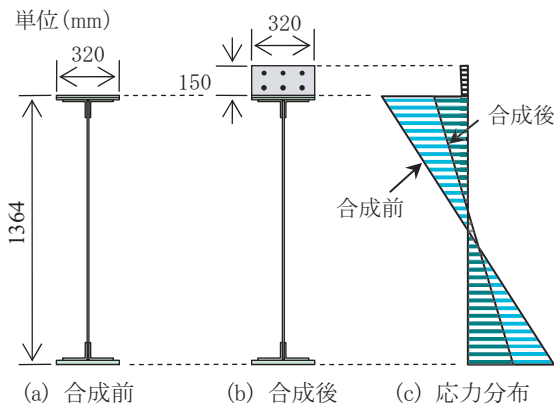


図4 試算に用いた桁と応力分布

表3 合成構造化による応力の変化

	合成構造化前の 応力 (N/mm ²)	合成構造化後の 応力 (N/mm ²)
床版上面 σ_c	—	-6.51
鋼桁上面 σ_s	-105.6	-41.1
鋼桁下面 σ	105.6	58.4

がまくらぎ直下の塗膜を早期に劣化させるため、他の部位に比べて腐食の進行が早いと考えられている。上フランジが腐食して断面が減少すると、断面減少箇所の座屈により桁の曲げ耐力を低下させる¹⁾。

まくらぎ接触面の腐食により断面減少した上フランジは、一般に、部材補強が困難であることから、塗装の塗り替えのみで対応することが多い。ここで提案している鋼桁と床版の合成構造化を行えば、桁全体の耐力が向上し、合成構造化した桁全体に発生する応力が低減されるため、腐食により耐力低下が問題となっている鋼桁の対策に効果的である。特に、局部腐食が問題となりやすい上フランジの応力低減効果が大きい。

合成構造化による応力低減効果の例として、支間12.9mの標準的な既設上路桁における合成構造化前後の応力の変化を試算した。図4 (a) および (b) に、主桁の断面形状を示す。床版は厚さ150mmとし、支間中央における最大曲げモーメントによる応力を算出した。鋼桁に発生する応力を大きめに見積もるため、床版の有効幅をフランジ幅と同じ320mmとした。図4 (c) および表3に試算結果を示す。合成構造化により、鋼桁の上下面ともに応力が低減されていることがわかる。また、合成後の床版にも過度な応力が発生しないことが明らかとなった。

2.4 コンクリート床版による死荷重増加の影響⁴⁾

既設鋼橋を合成構造化したとき、床版設置により増加した死荷重が支承部に直接加わる。そこで、死荷重の増加に対する支承部の耐荷性を、上路桁と下路桁の両者について検討する。

図5に、支間の異なる単線・単純桁の標準的な既設鋼橋に厚さ200mmのコンクリート床版を設置した場合の、列車通過時に支承部コンクリートに発生する支圧応力を示す。上、下路桁ともに、支間40mを超えたところで床版ありの場合の応力が許容応力を超えている。これより、支間が約40m以下の既設鋼橋ならば、合成構造化が適用可能であることが明らかとなった。これ以上の支間の桁を合成構造化する場合は、支承部に何らかの対策が必要となる。

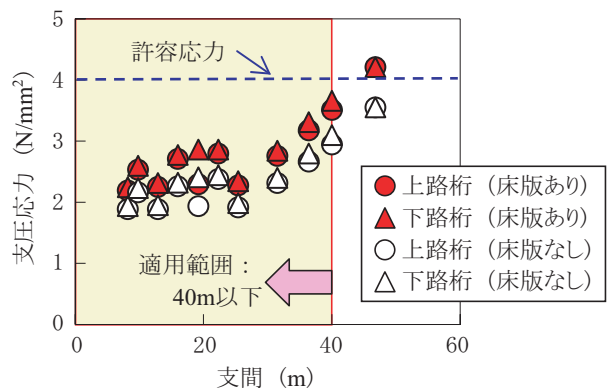
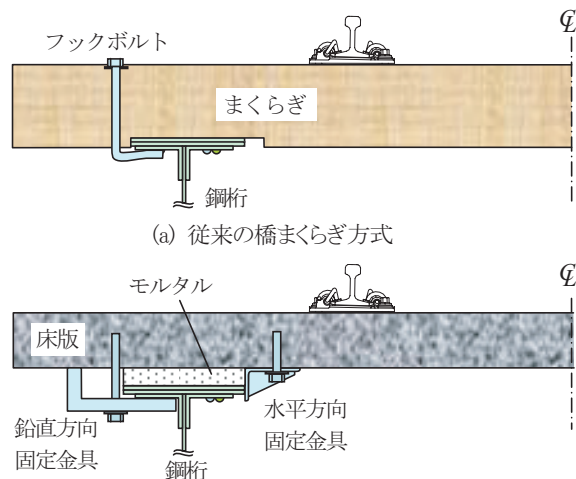


図5 支承部コンクリートの支圧応力

3. 床版と鋼桁の接合方法に関する検討

3.1 鋼桁と床版の接合方法

プレキャスト床版法による急速施工を行う場合、鋼桁と床版の接合方法が課題となる。特に、既設鋼橋ではリベット構造が多く、上フランジ面にはリベット頭が無数に並んでいる。また、局部腐食などにより、上フランジ面には凹凸の激しい部分がある。さらに、上フランジ面



(b) 合成構造化における接合方法の例

図6 鋼桁と床版の接合方法

特集：構造物技術

にカバープレートが取り付けられている場合、カバープレート端部には段差が生じる。

本章では、上記のような上フランジ面の特徴に対する、床版と鋼桁の接合方法に関する検討を行う。ここでは、鋼桁上フランジ面の凹凸や段差による不陸を調整しながら鋼桁と床版を接合する方法として、図6 (b) に示すような、モルタルおよび固定金具を用いた方法により、床版と鋼桁を接合する方法を考案した。この方法により、モルタルを用いて鋼桁上の凹凸による不陸を調整しながら床版を設置し、モルタルと固定金具の双方で列車による荷重を桁に伝達することができる。以下に、この検討内容を示す。

3.2 モルタルを用いた鋼桁と床版の接合⁵⁾

3.2.1 モルタルの充填性確認試験

鋼桁上フランジ面における凹凸や段差による不陸を、図7のようにモルタルによって調整しながら接合することを考え、モルタルの基本的な性能確認試験として、モルタルの充填性確認試験を行った。図8に試験の状況を示す。鋼桁上フランジ面と床版を模擬した試験体を用いて、注入厚(25cm, 50cm)および上フランジ面の形状(リベット頭の有無)をパラメータとして試験を実施した。鋼桁上フランジ面を模擬した鋼板には、平滑な鋼板とリベット頭を取り付けた鋼板を用いた。平面寸法は400mm×1200mmとした。

各条件における充填時間と充填率の試験結果を表4に示す。いずれの条件においても、充填時間および充填率に大きな差異は見られなかった。また、現場施工におい

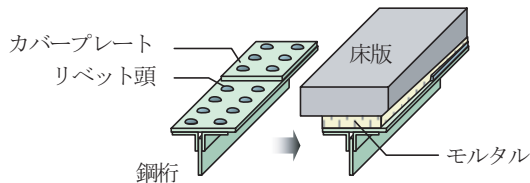


図7 モルタルによる不陸調整のイメージ

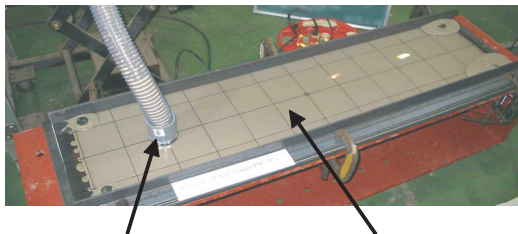


図8 モルタル充填性確認試験

表4 モルタル充填性確認試験の結果

リベット	なし	あり	なし
注入厚さ (mm)	25	25	50
充填完了時間 (秒)	15.2	21.5	28.4
充填率 (%)	99.3	99.6	98.8

て十分な充填完了時間であることも同時に確認した。

3.2.2 鋼桁-モルタル層の押し抜きせん断試験

鋼桁と床版の合成構造化を図るには、鋼桁とモルタル接合面でのせん断抵抗を把握する必要がある。ここでは、リベット頭を有する既設鋼桁上フランジ面とモルタルの間におけるせん断抵抗を確認することを目的として、鋼桁-モルタル層の押し抜きせん断試験を行った。

図9に、試験に用いた試験体の概要を示す。接合面は360mm×300mm、モルタル厚は50mmとした。リベット頭を模擬するために、試験体の上フランジ側にはM22トルシアボルト頭部をそれぞれ6本取り付けられている。

それぞれの試験体における条件および結果をまとめて表5に示す。また、タイプAおよびタイプBについて、載荷試験における荷重と変位の関係を図10に示す。

初期の剛性(ここでは図10の原点と変位0.02mmの点を結んだ直線の傾きとする)は、接合面の供試鋼材表面の処理の有無によって差異がみられ、鋼材面をショット

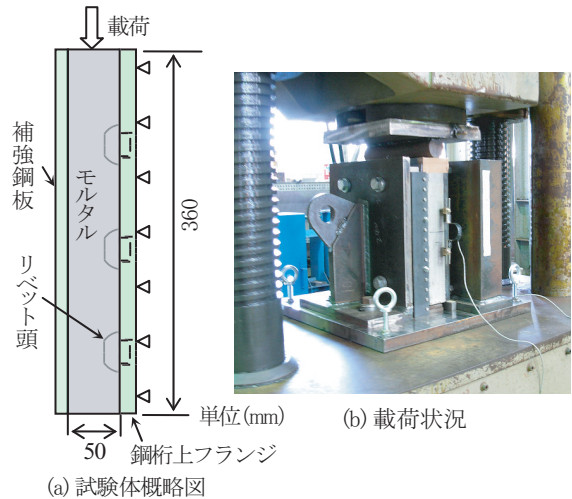


図9 鋼桁-モルタル層の押し抜きせん断試験体概要

表5 押し抜きせん断試験の条件と結果

タイプ	リベット	鋼材面処理	初期の傾き (kN/mm)	せん断抵抗 (kN)	リベット1本分 (kN/本)
A	あり	未処理	1740	109.1	18.18
B	あり	ブラスト	3441	141.0	23.50
C	なし	未処理	—	0.567	—

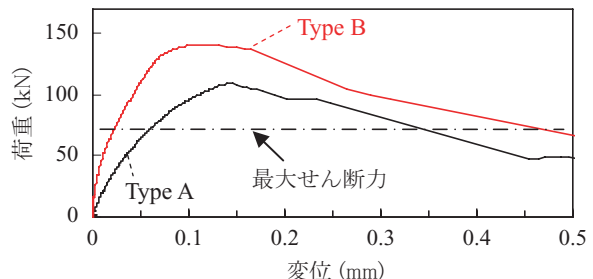


図10 押し抜きせん断試験結果

ブラスト処理した方が未処理（黒皮まま）のものより大きい値となった。最大せん断抵抗は、ブラスト処理した方（タイプB）が未処理（タイプA）のものより大きな値となった。また、いずれの条件においても、リベット1本当たり少なくとも18kNのせん断抵抗を得られる。なお、リベット頭なしの試験体（Type C）ではきわめて低いせん断抵抗であったため、リベット頭ありの試験体のせん断抵抗は、ほとんどがリベット頭の支圧による抵抗であると考えられる。

以上より、モルタルによるコンクリート床版と鋼桁の接合は、床版を鋼桁上に設置するための不陸調整だけでなく、鋼桁上フランジ上面のリベット頭などの凹凸を利用したせん断抵抗も期待できることが明らかになった。この特性は、既設鋼橋には非常に有利である。また、鋼材表面をショットブラスト処理した方が表面未処理のものよりも、初期の剛性および強度において優れているが、未処理のものでも十分な強度を持つことから、施工時の表面処理作業を軽減できると考えられる。

3.3 固定金具を用いた床版と鋼桁の接合⁶⁾

3.3.1 接合方法の検討

前項における検討の結果、モルタルを用いて既設鋼桁とコンクリート床版を接合すれば、必要なせん断抵抗を得られることを示した。しかし、モルタルのせん断抵抗のみに頼って鋼桁と床版の接合を行った場合、経年時のせん断抵抗の低下が万一生じた場合に補修などの手間などがかかる。また、列車通過に伴い接合部端部に上揚力が生じることも懸念される。このため、施工時に機械的な固定金具などを用いて鋼桁と床版の間にかかる力の伝達をより確実にしておけば、さらなる維持管理の軽減を図ることができる。

合成構造化後の構造において、軌道を通じて床版に働く荷重を円滑に鋼桁に伝えるためには、線路直角方向や線路方向の支持、および鉛直方向の上揚力に対する支持が必要である。

そこで、それぞれの支持する方向に応じた固定金具を考案した。図11に、固定金具の例を示す。

水平方向固定金具は、鋼桁の内側に接することによって鋼桁外側方向への荷重を受ける。この金具を左右両側の主桁の内側に設置することによって、線路直角方向のどちらの方向の荷重に対しても抵抗することができる。また、特殊な座金を持つ治具を用いることによって、横方向の設置誤差を微調整するとともに、荷重が加わるとさらに締まる機構となり、より確実に抵抗力を確保することができる。

鉛直方向固定金具は、鋼桁の外側だけに設置することによって、列車荷重作用時に鋼桁外側端部に発生する上揚力に対して抵抗することができる。

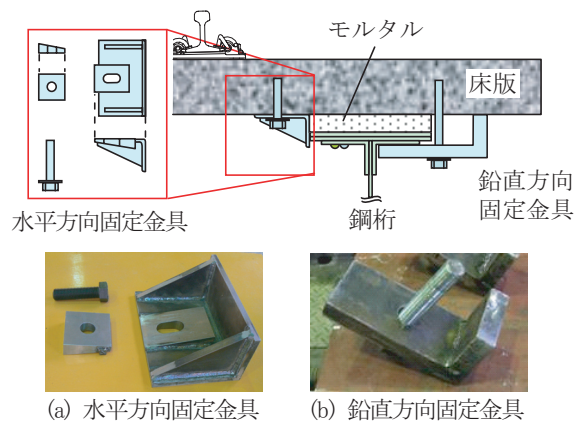


図11 鋼桁と床版の固定金具

3.3.2 静的荷重試験

固定金具を用いた接合部の強度を確認するために、静的荷重試験を行った。試験体にはコンクリート床版と鋼桁の接合部を模擬した実物大のものを用い、1軸分の軸重が荷重される範囲を考慮して1m幅とした。固定金具による接合の強度のみを確かめるために、鋼桁と床版の間にはモルタルなどは使用せず、鋼板とゴム板を敷いて、接触面に余分な横方向の抵抗力が生じないようにした。

図12に試験体の概要を示す。試験体は、水平荷重試験体および鉛直荷重試験体の2体を製作した。水平荷重試験体には列車横荷重、遠心荷重および風荷重を考慮した、設計時に想定しうる最大の横荷重90kNまで繰返し荷重し、最後に最大荷重まで荷重した。鉛直荷重試験体には、列車荷重と衝撃荷重を考慮した荷重による床版端部での上揚力による荷重を模擬して、下から上方向に50kNまで繰返し荷重し、最後に最大荷重まで荷重した。

図13に水平荷重試験結果として、荷重方向（横方向）の床版と鋼桁の相対変位と荷重の関係を示す。想定される荷重までの繰返し荷重において、直線的な挙動と

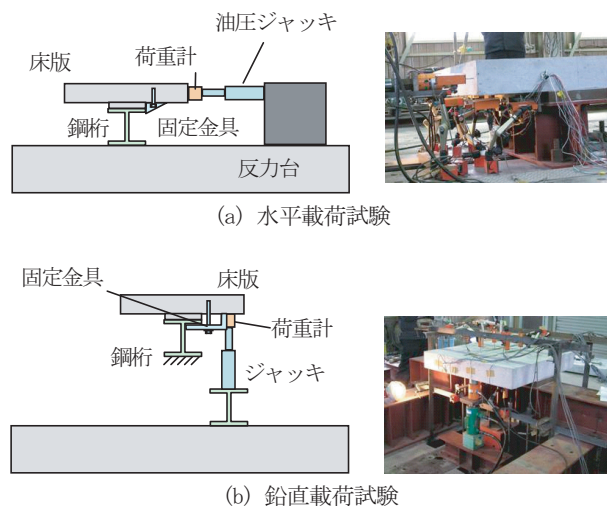


図12 静的荷重試験体と試験状況

特集：構造物技術

なっていないが、これは鋼桁の据え付けの問題であり、接合部には問題ないと考えられる。繰返し载荷において、それぞれ同様の変位を示すことから、接合部自体は弾性挙動を示していると推測される。また、最大荷重は230kNであり、接合部が十分な強度を持っていることが確認できた。

図14に鉛直载荷試験結果を示す。水平载荷試験と同じく、想定される荷重までの繰返し载荷において、それぞれ同様の変位を示すことから、接合部は弾性挙動を示していることがわかる。また、最大荷重は95kNであり、接合部が十分な強度を持っていることが確認できた。

以上より、水平方向固定治具を用いた接合部および鉛直方向固定治具を用いた接合部において、十分な性能を有していることが明らかとなった。この接合方法とモルタルを用いた鋼桁と床版の接合方法を併用すれば、さらに優れた接合部とすることが可能である。

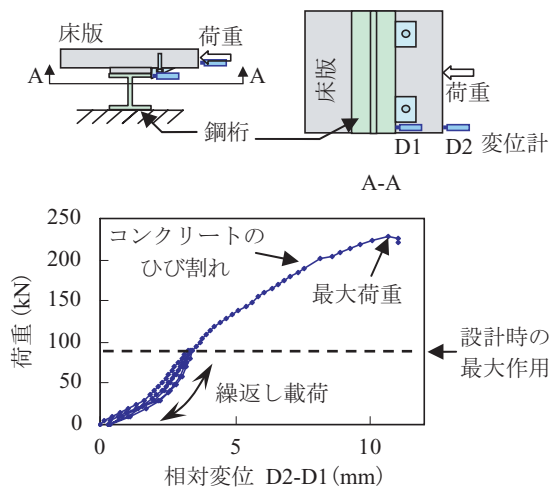


図13 水平载荷試験結果
(床版と鋼桁の相対変位と荷重の関係)

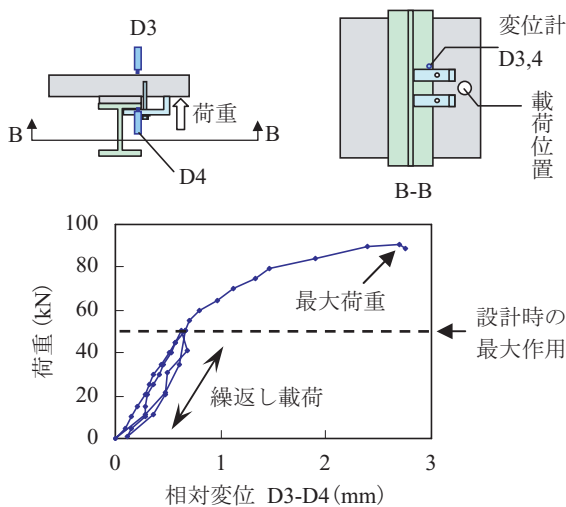


図14 鉛直载荷試験結果
(床版と鋼桁の相対変位と荷重の関係)

4. まとめ

本研究では、既設鋼鉄道橋を対象として、コンクリート床版と合成構造化させるリニューアル工法を提案し、主にプレキャスト床版法について、その適用性を検討した。以下に、検討結果をまとめる。

- ・合成構造化の施工に際しての条件を明らかにし、施工法を提案した。また、プレキャスト床版法による施工により、時間的制約の大きな線区においても本手法が適用可能であることを示した。
- ・コンクリート床版の検討を実施し、150mm程度と薄い床版厚でも、ポストテンションPC床版などの活用によって、合成構造化が可能であることを示した。
- ・鋼桁と床版の合成効果に関する検討を実施し、合成構造化により鋼桁に発生する応力の低減効果があることを示した。
- ・コンクリート床版による死荷重増加の影響について検討し、支間40mを超える桁を合成構造化する場合には、支承部に対策が必要であることを示した。
- ・プレキャスト床版法による合成構造化を施工する際の、鋼桁と床版の接合方法について検討し、モルタルを用いた接合および固定金具を用いた接合を用いることによって、接合部が十分な強度を持つことを確認し、合成構造化が可能であることを示した。

以上の種々の検討より、提案した工法が十分適用可能であることを示した。今後は、実用化に向けて合成効果や騒音低減効果、耐久性などについて実証を進める予定である。

文献

- 1) 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屈座挙動に着目した耐力評価, 鉄道総研報告, Vol.19, No.12, 2005.12
- 2) 杉本一朗, 小林裕介, 市川篤司 : 溶接付加物が鋼リベット桁の疲労に及ぼす影響と延命化手法, 鉄道総研報告, Vol.20, No.5, 2006.5
- 3) 日本鋼構造協会 耐用性調査小委員会: 鋼構造物の耐用性調査報告, JSSC, Vol.5, No.39, 1969
- 4) 杉本一朗, 山口慎, 小林裕介, 金尾光志, 星川正明, 久保武明: 既設鋼橋における合成構造化の設計検討, 土木学会第61回年次学術講演会, 1-607, 2006
- 5) 杉本一朗, 齊藤雅充, 小林裕介, 金子忠男, 大垣賀津雄, 大久保藤和: 既設鋼橋の合成構造化における床版と鋼桁の接合方法の検討—その1—, 土木学会第63回年次学術講演会, VI-109, 2007
- 6) 齊藤雅充, 杉本一朗, 横川勝則, 三宅淳一朗: 既設鋼橋の合成構造化における床版と鋼桁の接合方法の検討—その2—, 土木学会第63回年次学術講演会, VI-110, 2007