

鋼桁・橋台・盛土一体化による旧式橋梁の耐震補強

神田 政幸* 須賀 基晃* 横山 知昭*

舘山 勝** 杉本 一朗***

Reinforcement of Old-type Bridges against Earthquake by Integrating Railway Steel Girder, Abutments and Embankment

Masayuki KODA Motoaki SUGA Tomoaki YOKOYAMA

Masaru TATEYAMA Ichiro SUGIMOTO

The abutments are a kind of the structures to resist an earth pressure from an embankment. The abutments are located at the boundary between the embankment and the bridge, and are important structures compared with other structures such as a pier and a viaduct. The conventional abutments can be weak points, so they are apt to suffer from damages such as settlements during train passage and earthquake, receiving always the earth pressure from embankments. In this study, we have proposed a method to reinforce such conventional old-type bridges by integrating them with an embankment, and carried out a construction test using a real scale model, focusing on integration of girders with abutments and integration of abutments with embankments using nails. In addition, we carried out a series of vertical loading tests and long-term field observations using the real scale model and investigated the performance of the proposed integrated structures “Integral Bridge with Nail - Reinforced Soil” on small load levels.

キーワード：老朽化，耐震補強，橋台，鋼桁，盛土，一体化構造，工法開発

1. はじめに

鋼鉄道橋梁は明治より架設され、供用後50年以上経過した橋梁数が現存橋梁数の半数を超える状況にあり、補修・補強、さらに取替等の措置を必要とする橋梁数も今後増加することが想定される。老朽鋼鉄道橋梁の取替では、仮線方式において仮線の構築や仮設桁・仮橋台の構築を要し、横取り方式において仮設架台等を要するなどどれも工期が長く費用が膨大となる。そこで架替え無しでの老朽鋼鉄道橋梁の延命化・耐震化を目的として、鋼桁・橋台・盛土の一体化による合理的な改築工法を提案した。本提案を「既設盛土一体化補強」、完成した橋梁を「既設盛土一体化橋梁」と呼ぶ(図1)¹⁾。

図1、表1に従来の鋼桁・橋台形式橋梁の課題と提案する既設盛土一体化橋梁により期待される効果をまとめた。従来形式の橋梁では施工順から生じる課題がまず存在する。つまり、背面盛土構築前に両橋台が構築されるため、盛土構築に伴う橋台の沈下や側方移動が生じる。一方、施工後の供用時においては、支承部の腐食および背面盛土の沈下などメンテナンスに関わる課題の他、地震時で

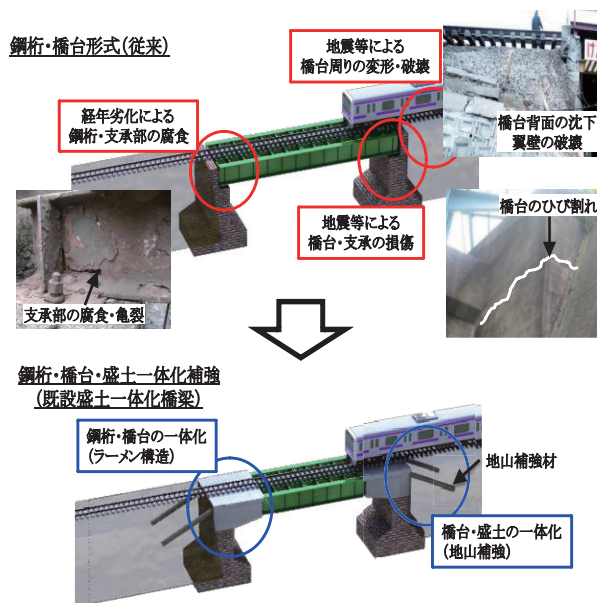


図1 鋼桁・橋台・盛土一体化補強(既設盛土一体化橋梁)の概要

は橋台・背面盛土の耐震性に関わる課題や支承部の損傷が挙げられる。場合によっては、鋼桁の落橋に繋がるような橋台・鋼桁間に大きな相対変位が生じる場合もある。

本研究では鋼桁を架替えることなく、鋼桁・橋台形式

* 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室
 ** 構造物技術研究部
 *** 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

特集：構造物技術

表1 従来形式橋梁の課題と既設盛土一体化橋梁の特徴

	対象	従来形式橋梁の課題 (鋼桁・橋台・盛土分離構造)	既設盛土一体化橋梁の特徴 (鋼桁・橋台・盛土一体化構造)	
			期待される効果	確認事項
施工時		・橋台構築後、背面盛土施工、その後桁架設となるため、 <u>背面盛土構築に伴う橋台の沈下、側方移動が生じる場合がある。</u>	・仮線方式による桁・橋台の取替と比較して、架け替えなし、仮線・仮桁・仮橋台なし、線路切替なしのため、施工しやすい。 ・横取り方式による鋼桁のみの取替と比較して、仮受台なしのため施工が容易で、橋台の機能がアップする。	・既設盛土一体化橋梁の施工性の確認(本論文で対象)。
常時	鋼桁・橋台間	・支承が常に機能するよう <u>支承部の維持管理が発生する。</u> ・雨水等により <u>支承部から錆等の腐食が発生し老朽化が進行する。</u>	・支承が無くなるため、支承部の維持管理が省略できる。 ・列車荷重による桁中央の曲げモーメントが減少するため、疲労寿命を延伸できる。	・温度変化や列車荷重等による桁と橋台の発生断面力の確認(本論文で対象)。
	盛土・橋台間	・橋台には常に土圧が作用し、特に安定性の低い橋台では、 <u>背面盛土の沈下や橋台が前面に倒れ込み</u> 、場合によっては支承が機能不全となる。 ・盛土と橋台の支持特性の違いから <u>相対変位が生じ</u> 、常時の走行性に支障を来す場合がある。このため背面盛土の維持管理が生じる。	・地山補強材により背面盛土の自立性が向上するため、沈下が抑制できる。 ・盛土と橋台での相対変位の発生が防止できるため、背面盛土の維持管理の省力化が可能である。	・温度変化による盛土と橋台の挙動の確認(本論文で対象)。
地震時、地震後	鋼桁・橋台間	・地震時には <u>支承部や橋台の損傷が発生する</u> 場合があり、復旧に時間を要する。 ・斜角桁や桁座の狭い場合、 <u>落橋の可能性もある。</u>	・ラーメン構造化により反対側橋台背面盛土の受働抵抗により、水平抵抗が増加するため、橋梁全体の耐震性が向上する。 ・地震時の桁と橋台が剛結されているため、落橋しない。	・地震時、地震後の桁と橋台の発生断面力、変位の確認。
	盛土・橋台間	・橋台には地震時土圧が作用し、特に安定性の低い橋台では、 <u>橋台の倒れ込みや背面盛土の沈下が生じ</u> 、復旧に時間を要する。 ・盛土と橋台の支持特性の違いから <u>相対変位が生じ</u> 、地震時の走行性に支障を来す場合がある。	・地山補強材により橋台と背面盛土が一体化するため、橋台および背面盛土の耐震性が向上する。 ・橋台と背面盛土が一体化するため、地震時に相対変位が生じにくく、走行性を確保可能である。	・地震時、地震後の盛土と橋台の発生断面力、変位の確認。

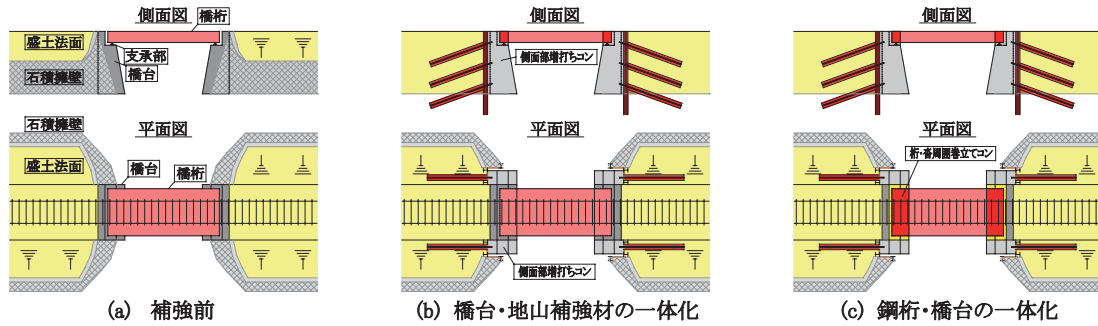


図2 実施工での一体化補強の施工手順

の老朽橋梁の延命化・耐震化を目的として、鋼桁と橋台を鉄筋コンクリートで一体化し、橋台と背面盛土では地山補強材を橋台側面の翼壁部から背面盛土に打設し、剛なRC壁面と橋台を一体化することで、鋼桁・橋台・盛土部からなる橋梁・橋台部の常時・地震時の機能向上を図るものである。鋼桁と橋台を一体化することにより、支承部のメンテナンスが省略できることに加えて、単純支持されていた鋼桁が両端固定となることで、活荷重作用時の発生モーメントが半減されることにより老朽鋼桁の延命化が図れるといった利点が得られる。さらに地震時に対しては、鋼桁・橋台のラーメン構造化により反対側の橋台背面盛土の受働抵抗を期待できることや、構造的弱点である支承部をなくすことで耐震性が格段に向上する利点がある。さらに支承部の損傷から発生する鋼桁の落橋に対しても回避出来る他、構造境界が無くなることで、地震時および地震後の列車の走行安全性に関しても格段の向上が期待できる。一方、支承部を無くしラーメン構造化することにより、温度変化等による鋼桁の伸縮による橋台の水平変位の発生により橋台背面盛土の沈下や、経年的な挙動の累積による橋台背面土圧の増加から生じる

橋台のひび割れ等の損傷が懸念される。しかしながら、本構造では橋台と背面盛土を地山補強材により一体化することで、温度変化等による橋台天端の水平変位が拘束されることに加え、橋台背面の盛土の自立性が増し、背面盛土の沈下や土圧増加の抑制といった利点が期待できる。

これまで既設盛土一体化橋梁の模型実験^{2) 3)}や鋼桁・橋台の隅角部補強に関する部材実験^{4) 5)}、橋台・背面盛土の一体化補強に関する部材実験^{6) 7)}において、模型実験や部材要素実験レベルでの常時および地震時の既設盛土一体化橋梁の全体挙動や部材挙動など基本的な特性を把握してきた。

本研究では、鋼桁・橋台からなる従来形式の実大試験橋梁を構築し、実施工をイメージした鋼桁・橋台の一体化、地山補強材による橋台・背面盛土の一体化による補強実験を実施した。構築した実大試験橋梁の補強前後の動態計測、載荷試験、起振器を用いた振動試験により比較的荷重レベルが小さい領域での一体化の効果を確認した。本論文では、表1の確認事項に示すように、鋼桁・橋台・盛土一体化による補強施工について述べるとともに、常時の一体化効果について論ずる。

2. 試験橋梁の施工

2.1 試験橋梁の概要

本工法の実施工では、図2に示すように橋台側面の翼壁部から仮土留めを施工しつつ地山補強材を橋台背面盛土に施工し、場所打ちRC壁で地山補強材の頭部を結合した後に、これと橋台側面を結合することで橋台と背面盛土の地山補強材による一体化を完成させる(図2(b))。一方、鋼桁と橋台の一体化については事前に鋼桁のケレン作業、橋台増し打ち部のチッピング作業、鋼桁ウェブの削孔作業、鋼桁まわりへの鉄筋の配筋作業や型枠の設置を済ませた後に、夜間の列車間合いでのコンクリート打設によって完成させることを想定している(図2(c))。

試験橋梁は、図3に示すように桁長13.3m、橋台高6.05mであり、橋台幅は単線橋梁を想定し2.95mとした。鋼桁は、山陰本線余部橋梁で使用されていた上路桁形式の1スパン18mの桁を加工し、橋長を調整して用いた。支持地盤の K_{30} 値は、 74MN/m^3 と 79MN/m^3 でありN値7程度と想定される。橋台背面盛土は稲城砂を使用し、既設橋台の背面盛土を再現するために「鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物」⁸⁾に示される性能ランクⅢ(締固め密度比90%以上、かつ K_{30} 値 70MN/m^3 以上)とした。性能ランクⅢを再現するために、近傍で締固め試験、RI試験およびFWD試験を実施し、その結果をもって撤出し厚および転圧回数を決定した。構築した旧式橋梁の実大試験橋梁を図4(a)に、一体化補強後の試験橋梁を図4(b)に示す。

旧式橋台は、重力式の無筋コンクリート橋台が多く、必要に応じて橋台壁体をRC巻立てによる補強を行う場合がある。さらに、本研究では試験橋梁に対して水平載荷試験を計画しているため、橋台に発生する断面力推定をひずみ計測により行う必要があることから、一体化補強と同時に無筋コンクリート橋台に対してRC巻立ての実施も想定し、橋台構築時に所定の配筋を行った。

2.2 橋台・盛土の一体化

前述のように橋台・盛土の一体化施工は、橋台翼壁部、もしくは橋台側面から背面盛土に複数本の地山補強材を打設し、橋台と地山補強材を場所打ちRC壁により一体化することを想定しているが、本試験橋梁の補強施工実験では、予め橋台に設けた開口部から地山補強材を打設後、橋台と一体化を図る計画とした。地山補強材の施工状況を図5に示す。地山補強材は、改良径400mm、改良長5.0m、芯材D35(SD390)とし、1橋台に6本の地山補強材を斜め10度で打設した。なお、芯材端部には定着プレートを設け、橋台・背面盛土の一体化補強に関する部材実験^{6)・7)}から得られた知見をもとに橋台開口部に無収縮モルタルを打設することで橋台と地山補強材の一体化を図った。

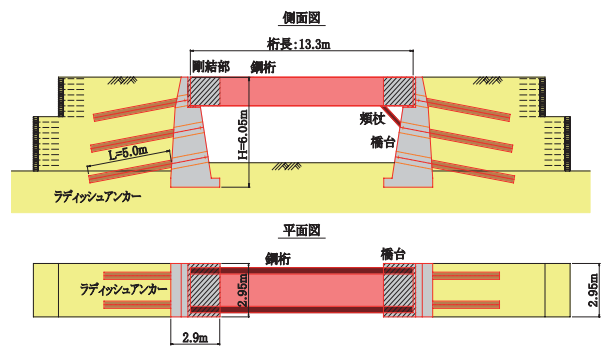


図3 実大試験橋梁の概要



(a) 旧式橋梁(一体化前)



(b) 一体化補強後

図4 実大試験橋梁の外観



図5 地山補強材の施工状況

2.3 鋼桁・橋台の一体化

鋼桁・橋台の一体化は、支承部を鉄筋組立およびコンクリート打設等により剛結し、固定・可動の単純支持構造からラーメン構造に変更する。一体化により鋼桁中央に発生する断面力およびたわみは減少するが、隅角部に上側引張りの断面力が生じることとなる。鋼桁・橋台の一体化施工として、図6(a)(b)に示す「斜杖有り」、「斜杖無し」の2種類の一体化方法を試験橋梁の両端に適用した。

「斜杖有り」は、斜杖、桁座に設置した鉛直アンカー、隅角部の配筋とコンクリート打設により鋼桁から直接橋台に力を伝達させ、バラベットには力を作用させない構造となっている。一方、「斜杖無し」は交差道路等で建築

特集：構造物技術

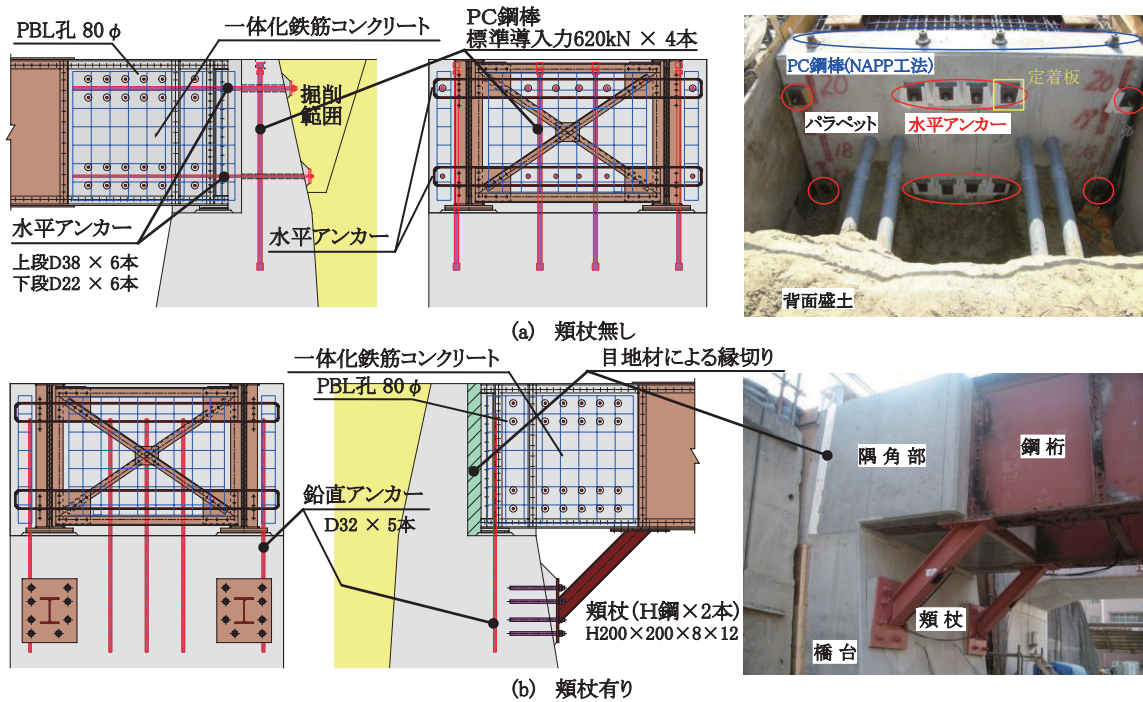


図6 鋼桁・橋台の一体化方法

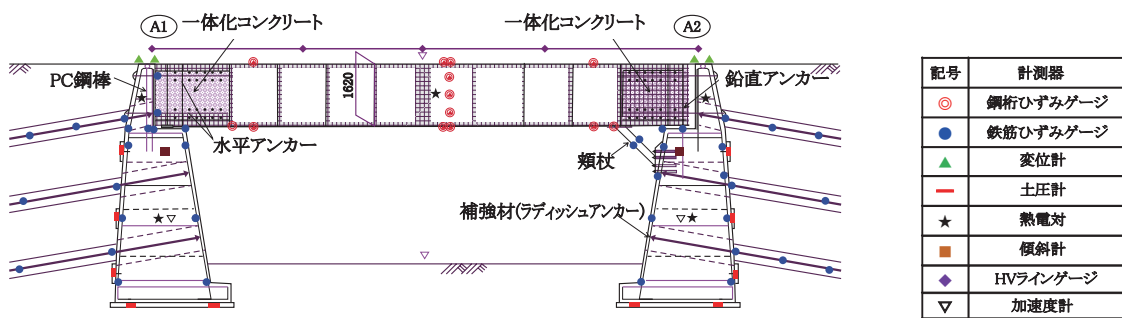


図7 計測器の種類と取付位置

限界の制限があり、頬杖を設置できない場合等を想定したもので、水平アンカーによりパラペットを介して橋台に力を伝達させる構造となっており、水平アンカーとパラペットの結合時に橋台背面を掘削しなければならない他、パラペットを補強する必要がある。

「頬杖有り」の場合は鋼桁下の建築制限の課題、「頬杖無し」の場合は橋台背面の軌道下の掘削等の施工上の課題が考えられるが、各現場に応じた適切な施工方法を選定すればよい。また、実施工ではコンクリート打設作業はコンクリートの養生時間を勘案すると夜間の列車間合いでの当夜施工とならざるを得ない。したがって、列車振動によるひび割れの影響が少ない短繊維混入コンクリート⁹⁾や収縮性の少ない、早期強度発現が期待できるコンクリートを用いるのが効果的である。

本試験橋梁においては、橋台構築時に予め鉛直アンカーやPC鋼棒を設置し、コア削孔は実施していない。また、水平アンカー用のコア削孔も橋台構築時に予めシース管を設置することで、実施を省略した。

3. 実大試験橋梁の動態計測および荷重実験

3.1 動態計測および荷重実験の方法

図7に示すように計測器を試験橋梁に取付け、自動計測（計測インターバルタイム0.5時間）により従来形式橋梁の施工時（一体化前）から一体化後の温度変化による鋼桁の伸縮が橋台天端、背面盛土に及ぼす影響を把握することを目的として、動態計測を実施した。

列車荷重レベルの荷重試験として、起振機（重量53kN、最大起振力±60kN、最大振動数30Hz）を静的に桁中央に設置し、一体化前後の鋼桁のひずみを計測した。

さらに活荷重作用時を想定した荷重試験として、起振機による振動試験を実施し、一体化前後の鋼桁のひずみを計測した。

3.2 動態計測結果

従来形式橋梁の施工開始から、完成時（一体化前）、その後の一体化補強後までの橋台底面に設置した土圧計の

計測結果を図8に示す。施工段階では、橋台コンクリートの打込みや背面盛土の構築による荷重の増加に応じて土圧が増加する他、日変動振幅は一体化後の方が敏感に反応し、その日変動振幅が大きいことがわかる。これは温度変化による鋼桁の伸縮が支承で吸収されていた一体化前に対し、鋼桁・橋台隅角部を一体化したことで橋台に直接伝達していることを示すものである。

次に冬季の日変動計測結果として、図9に鋼桁の鉛直変位を示す。鋼桁・橋台隅角部を一体化したことで鋼桁は、橋台間を結ぶストラットの役割となり温度上昇に伴い、橋台は背面側に変位し、橋面は上フランジの温度上昇に伴い隆起する挙動が見受けられた。なお、1日当たり約10℃の温度変化に対し、鋼桁の鉛直変位は約0.9mm生じ、ここでは示さなかったが橋台天端の水平変位は左右隅角部構造の違いにより差があるものの、0.4~0.9mmと非常に小さいことが明らかになった。

3.3 静的载荷試験結果

図10に従来形式橋梁の一体化補強前後の静的载荷時の鋼桁下フランジのひずみを示す。一体化前では下フランジのひずみ分布が、単純梁のそれと同様に全ての箇所引張りとなっている。一方、一体化後では下フランジのひずみ分布は、両端固定梁の分布形状を呈しており、支間中央におけるひずみ（両主桁の平均）は4.54μであり、一体化前の8.45μと比べほぼ半分となっている。また、一体化によってひずみ分布が変化し、鋼桁端部の下フランジでは圧縮ひずみが発生した。なお、頬杖有り側の橋台の圧縮ひずみが大きいのは、頬杖無し側よりも頬杖有りの方が隅角部補強効果が大きいものと想定されることによる。

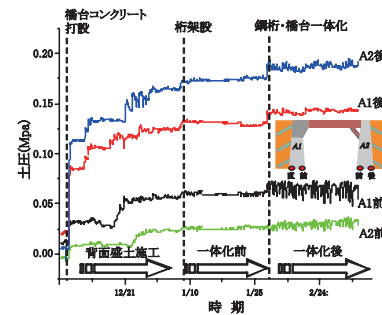


図8 橋台底面の土圧と時間関係（動態計測）

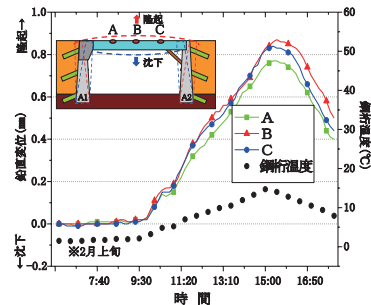


図9 鋼桁鉛直変位、鋼桁温度と時間関係（動態計測）

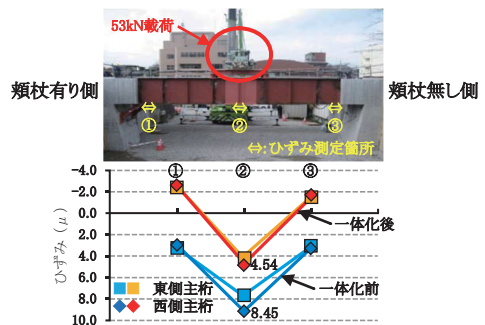


図10 鋼桁下フランジのひずみと位置関係（静的载荷試験）

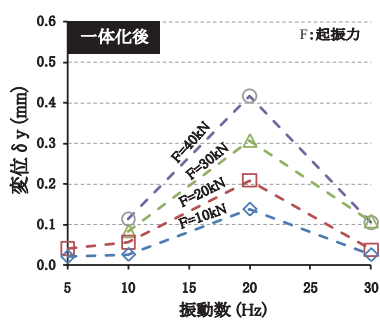
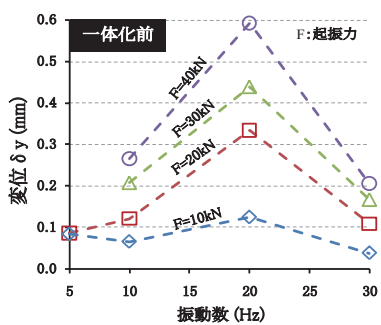


図11 鋼桁中央部の鉛直変位と加振振動数の関係（振動試験）

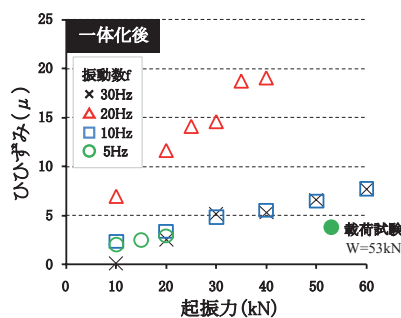
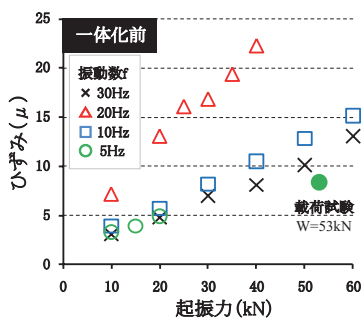


図12 鋼桁中央部下フランジのひずみと加振力（設定値）の関係（振動試験）

特集：構造物技術

3.4 振動試験結果

鋼桁中央部の鉛直変位と加振振動数の関係を図11に示す。一体化前後で共振振動数は20Hz近傍にあり、その変化は明確でないものの、振動変位は約半分に低下した。鋼桁中央部の下フランジひずみと起振力(設定値)の関係を図12に示す。これより一体化前後で下フランジひずみは、振動変位と同様に一体化前よりほぼ半分に低下した。同図には静的載荷試験より得られた荷重とひずみの関係も示した。

4. 結論

架替え無しでの老朽鋼鉄道橋梁の延命化・耐震化を目的として、鋼桁・橋台・盛土の一体化による合理的な改築工法を提案した。鋼桁・橋台からなるスパン13mの従来形式の試験橋梁を構築し、実施工をイメージした鋼桁・橋台の一体化、地山補強材による橋台・背面盛土の一体化による鋼桁・橋台・盛土一体化による補強実験を実施した。構築した実大試験橋梁の補強前後の動態計測の他、列車荷重レベルを想定した静的載荷試験および起振器を用いた振動試験を実施し、以下の結論を得た。

- (1) 営業線施工を想定すると詳細な施工計画が必要となるが、施工実験より本研究における鋼桁・橋台・盛土一体化補強は施工可能であることを確認した。
- (2) 一体化補強前後の動態計測により、一体化後には鋼桁の伸縮の影響が直接、橋台・背面盛土に伝達するものの、その変位は非常に小さいことを確認した。
- (3) 比較的荷重レベルの小さな静的載荷試験、振動試験より鋼桁支間中央に発生する鉛直変位や鋼桁下フランジのひずみは、一体化前と比較して一体化後は約半分程度に低減することを確認した。

5. おわりに

今後、動態計測を継続し橋台と背面盛土の長期的な挙動を把握する他、既設盛土一体化橋梁のL2地震時の挙動把握を目的として、実大試験橋梁に対して水平載荷試験を実施し、提案工法の設計法構築を行う予定である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、ご指導頂いた東京理科大学龍岡教授、ならびに山陰本線余部橋梁の鋼桁を御提供いただいた西日本旅客鉄道(株)にはここに記して感謝の意を表します。なお、本研究は国土交通省の補助金を受けて実施した。

文献

- 1) 白仁田和久, 館山勝, 神田政幸, 小島謙一, 渡辺健治: 鋼桁・橋台・盛土一体化(ラーメン構造化)による延命化工法の提案と影響解析, 地盤工学会, 第45回地盤工学研究発表会, pp.1393-1394, 2010
- 2) 錦織大樹, 相馬亮一, 田村知宏, 有田貴司, 坂井優, 龍岡文夫, 清田隆, 渡辺健治, 館山勝: 構造の一体化と背面土へのネイリング補強による既存橋梁の高耐震化, 第44回地盤工学研究発表講演集, pp.1349-1350, 2009
- 3) 相馬亮一, Munoz Henry, 太田準一郎, 黒田哲也, 龍岡文夫, 清田隆: 橋桁・橋台・盛土を一体構造化した従来形式橋梁の常時安定性, 地盤工学会, 第45回地盤工学研究発表会, pp.1367-1368, 2010
- 4) 三川武紀, 松尾仁, 平陽兵, 山野辺慎一, 小林裕介, 杉本一朗: 既設鋼桁と橋台の一体化方法の検討-その1隅角部試設計-, 土木学会第65回年次学術講演会, 第V部門, pp.67-68, 2010
- 5) 平陽兵, 山野辺慎一, 松尾仁, 三川武紀, 小林裕介, 杉本一朗: 既設鋼桁と橋台の一体化方法の検討-その2隅角部載荷実験-, 土木学会第65回年次学術講演会, 第V部門, pp.69-70, 2010
- 6) 白仁田和久, 館山勝, 神田政幸, 奥村幹也, 野中隆博, 黒岩俊之: 縁端距離および載荷角度を考慮した定着構造に関する水平載荷試験, 土木学会第65回年次学術講演会, 第V部門, pp.1165-1166, 2010
- 7) 黒岩俊之, 野中隆博, 奥村幹也, 館山勝, 神田政幸, 白仁田和久: 棒状補強材頭部の定着長に関する引抜き載荷試験, 土木学会第65回年次学術講演会, 第V部門, pp.1167-1168, 2010
- 8) 国土交通省鉄道局監修, (財)鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(土構造物), 2007
- 9) 白神亮, 細田暁, 金子達哉, 工藤伸司: 工事桁本設利用のための鋼・コンクリート一体化構造の開発に関する載荷試験, 土木学会第58回年次学術講演会, pp.1067-1068, 2003
- 10) 須賀基晃, 栗山亮介, 小林裕介, 杉本一朗, 神田政幸, 館山勝: 老朽橋梁の延命化のための鋼桁・橋台・盛土の一体化補強, 地盤工学会, 第46回地盤工学研究発表会, pp.1499-1500, 2011
- 11) 野中隆博, 小林裕介, 杉本一朗, 神田政幸, 館山勝: 鋼桁・橋台・盛土の一体化補強工法における鋼桁・橋台の施工方法, 土木学会第66回年次学術講演会, 第VI部門, pp.285-286, 2011
- 12) 横山知昭, 小林裕介, 杉本一朗, 獅子目修一, 神田政幸, 館山勝: 鋼桁・橋台・盛土の一体化橋梁(実大試験橋梁)の動的計測, 土木学会第66回年次学術講演会, 第VI部門, pp.287-288, 2011