約 50 年間供用された床版目地を有する連続非合成鋼 I 桁橋の 損傷状況と現地載荷試験

Damage condition and field loading test of the continuous non-composite I-girder steel bridge with deck joints used for about 50 years

村越潤*, 梁取直樹**, 澤田守*, 前田和裕*, 西弘明***, 三田村浩*** Jun Murakoshi, Naoki Yanadori, Mamoru Sawada, Kazuhiro Maeda, Hiroaki Nishi, Hiroshi Mitamura

*工修,(独) 土木研究所,構造物メンテナンス研究センター(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6) **MS,(独) 土木研究所,構造物メンテナンス研究センター(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6) ***博(工),(独) 土木研究所寒地土木研究所,寒地構造チーム(〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

In order to investigate the structural behavior of an old continuous non-composite steel I-girder bridge with deck joints, which had been in service for five decades in cold region of Hokkaido, Japan, visual inspection and static/dynamic loading tests were conducted. In addition, analytical study using frame analysis and FE analysis were carried out. It is found that composite action between concrete deck and steel girders is clearly shown through comparison between analytical values and measurement values, and that there is a little difference between FEA and measurement values.

Key Words: Existing steel bridge, Loading test, Finite element analysis, Composite action, Deck joint キーワード: 既設橋, 載荷試験, 有限要素解析, 合成挙動, 床版目地

1.はじめに

高度経済成長期に建設された膨大な道路橋ストック の高齢化が進展していく中で、これらの橋梁を健全な状態で適切かつ合理的に維持管理していくための点検、診 断、対策技術が求められている.

しかしながら,道路橋のように多数の部材から構成さ れる複雑な構造物では,劣化損傷・変状の要因が多岐に わたるだけでなく,それらが橋の耐荷性能や耐久性能に 与える影響は,設計・構造条件のみならず橋梁を取り巻 く環境,交通状況等によっても大きく異なるものである. このため,損傷・変状の生じている橋の構造安全性の評 価は極めて難しくなる場合が多い.したがって,出来る 限り実橋での劣化損傷・変状や実挙動に関する計測デー タを蓄積していくことが重要かつ不可欠であり,著者ら が所属する構造物メンテナンス研究センターでは,長期 供用され劣化損傷の生じた実橋の状態を探る取り組み を臨床研究と称して,撤去橋梁等を活用した各種の現地 調査及び撤去部材調査を進めているところである. こうした臨床研究の一環として、約50年間供用され 撤去に至った連続非合成鋼I桁橋を対象として、活荷重 に対する全体挙動の把握及び各種解析手法の適用性の 検討を主な目的として、劣化損傷の目視調査、荷重車載 荷試験による橋梁各部のひずみ、変位、振動特性等の挙 動計測、数値解析との比較、撤去後の材料強度試験等を 行った.

本橋は非合成桁として設計されているが、これまでの 実橋計測によれば非合成桁であっても床版と鋼桁間の 合成挙動の事例が多数確認されている^{1)~3)}.本橋の場 合にも、上フランジにはスラブアンカーが設置されてお り両者の相対変位は生じにくいものと考えられる.一方 では、長期間供用され床版と鋼桁間には劣化損傷が確認 されており、かつ約 8m 間隔に設けられた9箇所の目地 によって床版が不連続の構造となっており、このような 状態での合成挙動の程度は、橋の耐荷性能を評価する上 で検討しておくべき点と考えられる.

以上の点を踏まえ、本文では、各種調査のうち、主に 劣化損傷の目視調査結果と、床版と主桁との合成挙動に 着目した載荷試験結果を報告する.

2. 橋梁概況

2.1 橋梁諸元

対象橋梁は北海道芦別市の一般国道452号において空 知川に架かる橋梁である(図-1,図-2),本橋は、橋長 82.7m (支間割:24.6m+32.8m+24.6m)の3径間連続非合成鋼I 桁橋である.設計活荷重は 14tf (昭和 14 年道示⁴⁾),主 要鋼材は SS41 である. 昭和 28 年に竣工し, 平成 14 年 に別線に新橋が架設され通行止めとなるまでの 49 年に わたり供用された. 平成 11 年道路交通センサス調査にお いて、大型車交通量は160(台/日)、日交通量は2,563 (台/日)である、本橋の構造的特徴としては、部材間 の接合にリベット接合が用いられていること、非合成桁 として設計され、両端部で約8.5m、その他の部分では約 8.2m 間隔に鉄筋コンクリート床版(以下,床版)の不連 続部(以下,目地)が設けられていること,2 主桁構造 であること等が挙げられる. 床版と鋼桁上フランジはス ラブアンカー(設置間隔1.1m)によって定着されている. 床版厚は 150mm であり、建設当初より 50mm のコンク リート舗装が施工されている. さらに, その上に 20mm 前後のアスファルト舗装が舗設されている. なお, 撤去 後の一部の床版切断面の目視調査によれば、床版とコン クリート舗装間には剥離等の特段のひび割れは見られ ず外観上は一体化しているように見えた.



2.2 劣化損傷の状況

図-3に本橋に見られる主な劣化損傷の状況を示す.

(1) 床版・地覆等コンクリート部材

床版張出し部, 地覆, 高欄のコンクリートには, 図-3(a) に示すように寒冷地のため凍害が発生しており, 著しい 剥落・鉄筋の露出が見られた.

主桁間の床版については,床版下面のほぼ全面に微小 なひひ割れが見られるとともに、一部では施工不良によ る粗骨材の露出が見られた.また、原因は特定できない が、目地間の各床版パネルにより損傷の程度に若干の違 いが見られた.パネルによっては疲労と考えられる2方 向のひび割れ(図-3(b))や,エフロレッセンス(図-3(c)) が見られた. 床版目地の周辺については, 図-3(d), (e)の ような水等の浸入による漏水、著しい遊離石灰が見られ た. そのため、図-3(f)に示すように、目地部分を挟んで 下面増厚している部分が2箇所見られたが、うち1箇所 では主桁と縦桁間の床版支間中央に橋軸方向に幅約 0.3mm のひび割れが生じていた. 床版と鋼桁の境界部で は、上フランジ端部との接触部に全長のかなりの部分に わたり漏水、遊離石灰の跡や、それに伴う塗装劣化、腐 食が見られた (図-3(g)). 接触部の状況から付着切れの可 能性が示唆される部位も見受けられたが、目視では隙間 の有無やずれ等は確認できなかった. 床版施工当時の記 録によれば、本橋の主桁間の床版については、主桁上に 目地を設け、屋根、壁を設置した養生環境でまず主桁間 の床版打設が行われ、その後、1.2月の酷寒の中で、張り 出し部の床版、地覆・高欄の施工の一因と考えられると している. また, 床版と鋼桁間の接触面からの漏水, 遊 離石灰についても目地からの貫通ひび割れの発生に起 因するものと推測される. なお、本橋では供用期間中に 凍結防止剤の散布は行われていない.

(2)鋼桁

鋼桁については、主桁上フランジと床版との境界部や 目地直下の横構ガセットプレート周りなどに、図-3(g), (h)のような目地や床版からの遊離石灰を含む漏水の影 響による局部的な腐食が見られた.平成8年に塗装塗替



図-2 橋梁一般図



(a) 凍害による地覆, 高欄, 張出し部の劣化・剥落



(c) 床版下面のエフロレッセンス



(e) 床版目地の漏水・遊離石灰(橋面下, (d)の直下)



(g) 床版と上フランジ境界からの漏水, 遊離石灰, 腐食



(b) 床版下面の2方向ひび割れ



(d) 床版目地 (コンクリート舗装上に薄層のアスファルトを舗設)



(f) 床版目地部の下面増厚部の橋軸方向ひび割れ



(h) 床版からの漏水の跡と腐食((g)の直下)

図-3 本橋における主な劣化損傷の状況

が行われており、その他の部分については桁端部も含め 特段の局部腐食や塗装部分の局部欠損の形跡は見られ ず、外観上比較的健全な状態であった.

2.3 材料試験

(1) 床版コンクリート

床版コンクリートの劣化状態及び材料特性の把握の ため、中性化深さ試験および圧縮強度試験を実施した. 調査箇所は、遊離石灰を伴うひび割れが多く見られた部 位①と遊離石灰を伴うひび割れは見られない部位②を 選定した(後述の図4参照).表-1に測定結果を示す. 平均中性化深さは、部位により異なり調査箇所②の方が 大きかった.コンクリートの圧縮強度は、調査箇所②の 方が若干小さかったものの、その差は小さく2箇所とも に床版コンクリートの強度は40N/mm²前後であり、現 行道示⁵⁾における合成作用を考慮しない設計を行う場合 の設計基準強度(24N/mm²以上)に対して十分高い値 であった.

(2)鋼材

使用鋼材(鋼種 SS41)の材料・強度特性を把握するため,主桁ウェブから各種の試験片を採取した.表-2 に引 試験とシャルピー衝撃試験の結果を示すとともに当時 の規格値を示す.降伏点については、当時、規格値は定 められていなかったが、現在のSS400の規格値(245 N/mm²以上)を満足していた.引張強さは、当時及び現 在の規格値である400N/mm²を若干下回っていた.シャ ルピー吸収エネルギーについては、試験片採取方向で若 干差が見られたものの、両方向とも現在のSM 鋼材 B種 のJIS 規格値である27J以上であった.化学成分につい ては省略するが、当時及び現在の規格値を満足していた.

表-1 床版コンクリート部材の試験結果(平均値)

	2 2 1 HILL 2 1 H		
項目	試験・測定の結果		
	調査位置A	調査位置B	
中性化深さ (中性化速度係数)	5.3mm (0.7mm/√年)	17.8mm (2.4mm/√年)	
圧縮強度	44.8N/mm2	39.4N/mm2	

表-2 鋼材引張試験およびシャルピー衝撃試験結果

鋼材,規格	引張試験		シャルピー衝撃試験	
	降伏応力 (N/mm2)	引張強さ (N/mm2)	伸び (%)	0℃のシャルピー 吸収エネルギー(J)
旭橋 SS41 (JIS 5号試験片)	280	373	21.4	100(主桁ウェブ橋軸方向) 78(主桁ウェブ鉛直方向)
SS41 (日本標準規格 430号 昭和13年)	-	400~490	20以上 (板厚9mm 以上)	-



図-4 載荷ケース,計測位置,計測位置床版下面の損傷状況



(a)中央径間中央部での荷重車2台載荷の状況



(b)中央径間中央部での人力加振の状況

図-5 静的載荷試験および振動試験の状況

3. 載荷試験方法

3.1 静的載荷試験

活荷重に対する全体挙動を把握するため、20トンダン ンプトラックを荷重車として用いて静的載荷試験を行 った(図-5(a)).図-4に載荷ケース(Case1~6),計測位 置,計測位置床版下面の劣化状況の目視記録を示す.図 -6に試験に用いた2台の荷重車の寸法諸元と,軸重諸元 の平均値を示す.載荷は荷重車2台を静的に載荷するケ ース(Case1~5)及び各部の計測値の影響線を把握する 目的で荷重車1台を移動させながら所定位置に静的に載 荷するケース(移動載荷)(Case6)の2方法により行っ た.

中間支点部(断面 A),中央径間中央付近(断面 B), 側径間中央付近(断面 C)を計測対象とし,桁ひずみを 各断面(各桁 12 箇所)において,桁鉛直変位を G2 桁の 中央径間支間中央(1 箇所)において路面の水準測量に より計測した.また,床版と鋼桁上フランジの橋軸方向 の相対変位を各断面(各桁 2 箇所)において, πゲージ を用いて計測した.なお,断面 B,Cについては各支間 中央付近で,床版目地から若干離れた位置で,垂直補剛 材の影響の受けない位置を選定した.

3.2 振動試験

振動試験については、強制加振後の鉛直方向加速度の 自由減衰振動波形から固有振動数、構造減衰等の振動特 性を把握するため、荷重車を用いた段差加振および人力 加振を実施した.段差加振による計測結果については荷 重車のリーフサスペンションのバネ振動の連成や車重 等の影響の詳細分析が必要と考えられたため、本文では 人力加振の結果のみを示す.人力加振(図-5(b))は中央 径間支間中央位置で鉛直たわみ対称一次モードが発生 するように計3回実施した.

3.3 計測結果の比較に用いた数値解析

静的載荷試験および振動試験で得られた鋼桁の変位, ひずみ,振動特性の計測値との比較を行うために数値解



前軸重	後タンデム前軸重	後タンデム後軸重	総重量
5.6	7.6	7.6	20.8

図-6 荷重車の寸法・重量諸元

表-3 解析に使用した材料物性値

使用材料	弹性係数E (N/mm ²)	ポアソン比
鋼材	2.0×10^{5}	0.3
コンクリート	2.8×10^{4}	0.167



析を行った.表-3 に解析に使用した本橋の材料物性値を 示す.床版コンクリートについては,表-1 に示したよう に40N/mm²前後の圧縮強度を有しており,現行床版の設 計基準強度を基に弾性係数を設定した⁶⁾.本研究では, 実務レベルでの数値解析を想定し,以下のモデルにより 解析を行い計測結果との比較を行った.

(1) 骨組モデル

鋼桁の設計計算に一般的に用いられる格子桁解析の モデル(以下,骨組モデル)を用いて,床版と鋼桁との 合成を考慮しない場合と考慮する場合(以下,骨組(非 合成)モデル,骨組(合成)モデル)について解析を行 った.骨組(非合成)モデルでは,床版を構造部材とし て考慮せず,主桁,縦桁,横桁をはり要素でモデル化し ている.骨組(合成)モデルでは,主桁および縦桁と床 版間は完全合成と仮定している.なお,鋼主桁における 床版の有効幅は1500mm(縦桁間の床版支間の1/2と張 出し部全長の和)である.固有値解析においては,橋梁の総重量を主桁はり要素の節点に分配させた.

(2) FEM モデル

図-7 に FEM モデルを示す. FEM モデルでは, 主桁, 縦桁, 横桁をはり要素とし, 床版をシェル要素でモデル



図-9 荷重車2台載荷時(Case1~4)の主桁中立軸位置



図-8 荷重車2台載荷時(Case1~5)の主桁断面応力分布



図-12 荷重車1台移動載荷時(Case6)の主桁下フランジ応力度及び鉛直変位

化している.床版及び鋼桁の図心位置にそれぞれ要素を 配置し,床版と鋼桁間は床版と桁の図心位置の関係を保 つような剛はり要素で結合した.なお,別の鋼桁橋にお いて,載荷試験による実測値,同モデル及び鋼桁をシェ ル要素とした立体 FEM モデルによる解析値との比較を 行っており,同モデルにおいても概ね実挙動を再現でき ることを確認している⁷⁾.なお,解析ソフトは COSMOS 2005 GeoSTAR を用いた.床版目地や主桁床版間のスラ ブアンカーのせん断バネ定数等のモデル化については 5.1 節に述べるが,まず,基本モデルとして,床版は目 地がないと仮定し完全合成となるように十分に大きい せん断バネ定数を設定した.固有値解析においては,鋼 桁及びハンチの重量を主桁はり要素の節点に分配させ, 地覆,床版の重量をそれぞれシェル要素の節点に分配さ せた.

以上の骨組モデルと FEM モデルでは、地覆およびコ ンクリート舗装については断面剛性として考慮してい ない.前述のとおりコンクリート舗装は床版(厚さ 150 mm)と一体化しているように見えたが、全断面の剛性 を考慮するには不確実な部分もあることから考慮しな かった.また、本橋の主桁フランジとウェブ間は、L型 アングル材とリベットにより接合されているが、桁断面 はアングル材を含めた断面剛性としている.荷重車はタ ンデム軸を1軸としてモデル化している.

4. 載荷試験結果

本章では、主に床版と鋼桁の合成挙動や荷重分配等の 全体挙動の傾向について検討するため、幅員中央載荷、 偏心載荷、移動載荷における主桁の中立軸、応力分布、 変位について着目し、実測値および解析値の比較検討を 行った.なお、床版と鋼桁間の相対変位の計測結果は、 5章の解析値との比較検討の中で示す.

4.1 主桁断面応力分布

図-8 に断面 B, C (正曲げ), 断面 A (負曲げ) に着目 した荷重車 2 台載荷時の主桁の断面応力度分布を示す. なお,幅員中央載荷の Casel, 3 の実測値は G1, G2 桁で ほぼ同値であったので,両主桁の平均値で示している. 実測値に対して,骨組(非合成)モデルでは特に上フラ ンジ側で異なる応力分布を示しているが,骨組(合成) モデル,FEM モデルでは比較的近いひずみ分布を示して いる.

図-9 に断面 B, C (正曲げ) における中立軸位置を示 す. 図中の一点鎖線は, 骨組(非合成) モデルの中立軸 位置と骨組(合成) モデルの中立軸位置を示している. 実測値による中立軸位置は, 骨組(合成) モデルの解析 値に近く, 完全ではないものの合成挙動に近い挙動をし ていることがわかる.

図-10 に荷重車2 台を幅員中央載荷および偏心載荷し

た際の主桁下フランジの応力度を示す. 幅員中央載荷の 場合でも,実測値の方が FEM 解析値よりも応力が小さ い傾向が見られ実挙動の剛性が適切にモデル化されて いない可能性が考えられる. また, 偏心載荷の場合につ いてはさらに実測値と FEM 解析値の違いは大きくなる 傾向にあり,床版をシェル要素でモデル化したものの床 版や横桁等の横つなぎ部材による荷重分配作用を適切 に考慮できていないことが考えられる. 以上の実測値と FEM 解析値の違いについては,モデル化では剛性として 見込んでいない約50mmのコンクリート舗装の影響等が 考えられるが,この点については5章で考察する.一方, 骨組(合成)モデルについては、従来より指摘されてい るように荷重載荷側では実測値と比較して,85~65%程 度の値となっており,安全側の評価を与える傾向にある ことがわかる.

図-11 に中央径間支間中央の主桁鉛直変位を示す.図 -10 と同様の傾向にあり,FEM 解析値は実測値に近い.

4.2 応力, 変位の影響線

図-12 に荷重車 1 台を移動載荷した場合の各計測位置 での桁の応力, 鉛直変位の影響線を示す. 横軸の載荷位 置は, 荷重車の後タンデム軸の中心位置を示している. 実測値の中に若干特異値が見られるが, FEM モデル及び 骨組(合成)モデルの解析値の橋軸方向の変化傾向は実 測値の場合と良く一致している. ただし, 4.1 節で述べた ように実測値の方が若干小さく,特に,変位に関して, 実測値は側径間載荷時に相対的に小さい値を示した.

4.3 振動特性

表-4に人力加振及び固有値解析によって得られた固有 振動数を示す.図-13 に鉛直加速度の自由減衰波形の例 (図中横軸の時間は加振途中からの計測開始を意味す る.)を示す.加振時の最大加速度は約 6gal であった. 今回の人力加振では振動方法の制約のため,鉛直たわみ



図-13 人力加振による鉛直加速度の自由減衰波形例

表-4 対称一次モードの固有振動数

固有振動数 (Hz)

測定および解析ケース



(a)B 断面主桁下フランジの応力度

(b)中央径間支間中央の鉛直変位







図-15 荷重車1台移動載荷時(Case6)における床版と主桁間の相対変位

対称一次モードのみ卓越するような載荷のみを行って おり、周波数分析からも同モードのみが計測されている. 実測値は、合成挙動を想定した、骨組(合成)モデルや FEM モデルの解析値に近く、振動特性からも本橋が合成 桁に近い挙動を示していることが確認された. なお, 上 記振動数は, 鋼桁橋の振動数の推定式⁸⁾ により算出され る値 3.05Hz(支間長 32.8m として計算)とほぼ近い値と なっており、他の鋼桁橋と大きく異なる振動特性を有す る橋ではない.

5. 床版と鋼桁間の挙動と解析モデルに関する検討

静的載荷載荷試験による実測値は、合成挙動を想定し た骨組(合成)モデルおよび FEM モデルによる解析値 に近い値を示しており,床版と鋼桁は完全合成ではない ものの合成桁に近い挙動をしていることが確認された. ここでは、床版と鋼桁間の相対変位の計測値に基づき、 FEM モデルによる目地の有無、バネ定数のモデル化の影 響について検討するとともに, FEM 解析結果 (完全合成, 目地なし)と実測値の相違について考察する.

5.1 床版と鋼桁間の合成挙動のモデル化の方法

FEM モデルについて、床版(シェル要素)と鋼桁(は り要素)間の水平方向の挙動を表現するため接合部にせ

ん断バネを配置し、鉛直方向変位及び回転については固 定とした.本橋のスラブアンカー(径 416,設置間隔 1.1m)のせん断バネ定数については、既往のスラブアン カーの水平せん断試験結果9)を参考に、コンクリートの 付着がなく同一径のスラブアンカーで拘束されている 状態(死荷重相当の拘束力を考慮)のせん断バネ定数 (3.75×10⁵kN/m)を基本値として、これをオーダー単位で 変化させた.なお、本橋の場合、床版境界面にはスラブ アンカー以外にリベット頭やフランジ板厚変化部によ る拘束があること、死荷重による拘束力も若干異なるこ とから、この数値はあくまでもバネ定数をパラメータと する際の目安として設定したものである. 床版目地につ いては、隙間が設けられている状態であるため、床版の シェル要素に10mmの不連続部分を設けてモデル化した.

5.2 床版と鋼桁間相対変位の実測値と解析値の比較

図-14 に、せん断バネ定数(以下、図表中では k と記 載)を変化させた場合の、床版目地モデル化の有無の違 いによる、中央径間中央2台載荷(Case1)時におけるB 断面下フランジ応力度および中央径間支間中央の鉛直 変位を示す. 図中には、50mm のコンクリート舗装を考 慮した場合の骨組モデル解析値も参考に示す.本橋の場 合には、床版目地のモデル化の有無に関わらず、k=3.75 ×10⁸ kN/m で概ね収束している (3,4 章の FEM モデルで



図-16 Casel における床版と主桁間の相対変位

表-5 対称一次モードの固有振動数

測定および解析ケース		固有振動数 (Hz)	実測値/ 解析値
実測値(人力加振)		3.26	1.00
	骨組(非合成)モデル ¹⁾	2.31	1.41
解析値	骨組 (合成) モデル ¹⁾	3.21	1.02
	FEM (k=3.75×10 ⁸ ・目地無) モデル ²⁾	3.43	0.95
	FEM (k=3.75×10 ⁸ ・目地有) モデル	3.35	0.97
	FEM (k=3.75×10 ⁶ ・目地無) モデル	3.42	0.95
	FEM (k=3.75×10 ⁶ ・目地有) モデル	3.17	1.03

1) 表-4の再掲 2) 表-4のFEMモデルと同じモデル

はこの値を使用). 合成挙動の条件下では目地の有無に よる差は、応力では約3%、変位では約5%であり、そ れほど大きい値ではない. ただし、実測値は、k=3.75× 10⁸kN/mとした場合の解析値よりも応力、変位ともに小 さい値を示しており、本解析で考慮していないコンクリ ート舗装の剛性が影響している可能性がある.

図-15 に移動載荷時における断面 B, C での πゲージに より計測された床版と鋼桁間の相対変位を示す. 横軸は, 荷重車の後タンデム軸の中心位置を示している. 図中に は比較的相対変位が近いせん断バネ定数(k=3.75×10⁶ kN/m)の解析値(実測値のピーク値近傍のみ)および, k=3.75×10⁵, 10⁷, 10⁸kN/m)の解析値(実測値のピーク値の み)を併せて示す. 実測値は,荷重載荷位置が P-1 支点 から P-2 支点方向に移動するにともない,相対変位は増 加し,計測位置直上付近に荷重載荷された時点でピーク 値を示し,その後,荷重位置が遠ざかるにつれ,再び零 に戻るという弾性的な挙動を示している. 4 ケースのせ ん断バネ定数による解析値との比較より, k=3.75×10⁶ とした解析値が実測値の傾向にほぼ近いことがわかる.

図-16 に中央径間中央の荷重車 2 台載荷(Casel)時に おける床版と鋼桁間の相対変位を示す.図中にはせん断 バネ定数 $k=3.75 \times 10^5$, 10^6 , 10^7 , 10^8 kN/m とした場合の 解析結果を併せて示す.実測値が小さく計測点数が少な いためせん断バネ定数の絶対値の評価は難しいが,目地 の影響を考慮し $k=3.75 \times 10^6$ とした解析値は実測値の傾 向と比較的近い.

以上,図 14~16 より、本橋の場合、鋼桁と床版間は 弾性的なずれ挙動を示しているものの、ずれ剛性はスラ ブアンカーのせん断バネ定数よりも1オーダー程度大き く,完全合成に近い挙動を示しているものと推察される.

5.3 固有振動数の実測値と解析値の比較

表-5 に卓越振動数に関する実測値(表4の再掲)と固 有値解析結果を示す.FEM モデルの場合,床版と鋼桁間 の接合が完全合成とみなせるせん断バネ定数(k=3.75× 10⁸ kN/m)では,目地の有無による固有振動数の比は2% 程度と小さい.また,FEM モデル(目地有)の場合,せ ん断バネ定数の値により実測値と前後するが,±3%程度 でありほぼ近い値を示している.

5.4 実測値と解析値の相違に関する考察

ここまで荷重車載荷試験で得られた本橋の挙動について説明するとともに、応力、変位及び振動数の実測値 と解析値の比較を行い、FEMモデルによる解析値が実測 値に近いものの、ひずみ、変位に関して若干差が見られ ることを示した.以下、実測値とFEMモデル解析値と の比較に関して主要な点を以下にまとめる.

- 1)中立軸位置は、合成桁を想定した解析値(FEM モデル 及び骨組(合成)モデル)と比較して、若干低くなっ ており、実挙動は完全な合成挙動ではないものの合成 桁に近い挙動を示している.
- 2)ただし、応力と変位の実測値は、完全合成を仮定した 解析値と比較してやや小さく、解析モデルよりも若干 剛性が大きいと推測される挙動を示している.また、 幅員中央載荷時よりも、偏心載荷時の方が両者の差が 大きくなり、本文で示した FEM 解析モデルでは荷重 の主桁間の横分配作用を必ずしも適切に評価できて いない可能性がある.
- 3) 床版と鋼桁間には荷重車による影響線載荷時に橋軸 方向の相対変位が発生しており、これをバネ定数でモ デル化した FEM 解析結果によると、1)と同様に完全合 成ではないが合成桁に近い挙動を示している.

これらの点に関して,詳細な FEM 解析による検討は 未実施であるが,ここではモデル化に際して未考慮の点 (コンクリート舗装の剛性の影響,荷重の主桁間の横分 配作用)について,応力,変位の解析値への影響に関し て若干の考察を行う.

図-17 に荷重車 2 台載荷時における計測値と、コンク リート舗装の剛性を考慮した場合の骨組(合成)モデル の解析値の比較結果を示す.図-14に示したFEM(k=3.75 ×10⁶,目地有)の結果も併せて示す.50mmのコンクリ ート舗装の剛性を桁剛性の一部として考慮して解析し た結果,はり要素の断面二次モーメントは約10%増加し, 幅員中央載荷(Casel)時の断面 B における応力(中立 軸位置の変化を考慮)では約5%(考慮/未考慮解析値: 26.1MPa/27.4MPa),中央径間中央の鉛直変位では約10%

(考慮/未考慮解析値:-9.4mm/-10.5mm)小さくなる.また, 偏心載荷 (Case2)時の断面 B における応力(中立



図-17 荷重車2台載荷時(Casel,2)の主桁下フランジ応力度及び中央径間支間中央鉛直変位

軸位置の変化を考慮)では約4%(考慮/未考慮解析値: 42.5MPa/44.4MPa),中央径間中央の鉛直変位では約10%

(考慮/未考慮解析値:-15.2mm/-16.7mm)小さくなる. FEM モデルについても同様の傾向になるものと推察され、実測値に近づくものと考えられる.非構造部材のコンクリート舗装について全断面の剛性を考慮するには 多少不確実な面があるが、FEM 解析モデル自体の信頼性 や計測誤差も踏まえると、実務的にはほぼ実測値に近い 結果が得られるものと考えられる.

以上のモデル化により、一般に非合成桁については、 これまでにも合成挙動が確認されているが、本橋の場合 には、床版と鋼桁間に相対変位が計測されており、鋼桁 上フランジと床版との接触面の劣化状況からして一部 付着が失われていた可能性は否定できない.しかしなが ら、相対変位から推定されるせん断バネ定数はスラブア ンカーによるせん断バネ定数(3.75×10⁵ kN/m)と比較 してはるかに大きい値(3.75×10⁶ kN/m)であることが 確認された.これは、コンクリートとの付着もしくはリ ベット頭やフランジ厚の変化による凹凸の存在により 床版と鋼桁間の接合に実質的に大きなずれ剛性を有し ていたことが推察される.

6. まとめ

約 50 年間供用された床版目地を有するリベット接合 を用いた連続非合成鋼 I 桁橋を対象として,損傷状況の 目視調査,荷重車載荷試験等を行い,床版と鋼桁との合 成挙動に着目し,鋼桁のひずみ,変位計測結果と解析結 果との比較を行った.また,両者の比較を通してモデル 化の影響について考察した.得られた主な結果を以下に まとめる.

(1) 橋全体の劣化損傷の目視調査結果,材料試験より, 床版等の損傷状況及び材料強度特性について確認した.その結果,施工時の打継目部や,床版目地部に 関しては,路面からの水の浸入が見られ床版の損傷 やその下の塗装劣化,腐食の主因になっていること が確認された.また,鋼材及び床版コンクリートの 強度については,現行のJIS 規格値や設計基準強度 に対して,鋼材の引張強さが若干小さかったことを 除き,十分高い値を示した.

- (2) 現地載荷試験による桁断面の応力分布,桁の鉛直変 位,振動数の計測結果と合成・非合成挙動を想定し た解析結果の比較より,床版と鋼桁間に関して,完 全な合成挙動ではないものの合成桁に近い挙動を示 していることが確認された.
- (3) 床版をシェル要素とし鋼桁をはり要素とし、床版目地と床版と鋼桁間の相対変位をせん断バネ定数により考慮した FEM 解析により、相対変位を含めて、実測値と解析値を比較した.その結果、床版と鋼桁間の相対変位は、荷重車の載荷・除荷に対して弾性的な挙動を示すものの、スラブアンカーから想定されるせん断バネ定数と比較してずれ剛性は非常に大きく、(2)と同様に合成挙動に近いこと、実務的には目地無しで完全合成と仮定した FEM モデルで概ね挙動を再現できることが確認された.また、合成桁に近い挙動の場合には、解析上、床版目地が全体挙動に与える影響は小さかった.

今後、こうした劣化損傷の生じた古い橋梁の損傷状況・実挙動の調査事例の蓄積を図り、既設橋の健全性評価の技術支援の参考にするとともに、耐荷性能の診断技術の開発に活かしていく予定である.

謝辞

本橋を撤去前に現地載荷試験のフィールドとして提 供頂いた国土交通省北海道開発局札幌開発建設部滝川 道路事務所の皆様に深謝の意を表します.

参考文献

- 三木、山田、長江、西:既設非合成連続桁橋の活荷重 応答の実態とその評価、土木学会論文集 No.647/I-51, pp.281-294, 2000.4.
- 2) 笹井,佐藤,松本,奥谷:中央自動車道古川度橋における床版取替え-塩害を受けたRC床版からプレキャスト床版へ-,橋梁と基礎,pp.27-33,1994.10.

- 3)藤原,村越,鹿嶋:鋼プレートガーダー橋における応 力測定結果に関する報告,構造工学論文集, Vol.37A, pp.1181-1188, 1991.3.
- 4) 日本道路技術協会:鋼道路橋設計示方書案解説, 1940.6.
- 5) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 Ⅱ鋼橋編, 2002.3
- 6) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 I 共通編, 2002.3.
- 7) 村越,高橋,吉岡,野中,加藤:FEM 解析を用いた 鋼多主桁橋の設計合理化の検討,鋼構造論文集 第11
 巻,第43号, pp.131-145, 2004.9.
- 橋梁振動研究会:橋梁振動の計測と解析,技報堂出版, 1993.10.
- 9) 枡田, 平城, 渡辺, 高田, 宮地, 牛島: スラブアンカ ーの静的ずれ耐荷力特性に関する実験的研究, 構造工 学論文集 Vol.47A, pp.1373-1380, 2001.3. (2009 年 9 月 24 日受付)