

(108) 実応力測定を踏まえた活荷重合成桁の床版打換え における構造検討

富士技研センター株式会社 正会員 ○村坂宗信
同 上 非会員 古屋美伸
同 上 非会員 西山文男

1. はじめに

既設道路橋の中には鉄筋コンクリート床版に損傷を受けた状態で供用されているものも少なくない。また各種の補強部材の増設等による死荷重の増加や設計活荷重のB活荷重への変更に伴い、既設橋梁の耐荷力を確保する必要が生じている現状である。このため、これらの床版の効率的な補修補強工法或いは打換え工法の開発が急がれている。

当該橋梁は一級河川を横過する橋梁（5径間単純活荷重合成桁橋：橋長130m、支間5X26m）で、1962年（昭和37年）に竣工した2等橋（TL-14）である。現況調査及び当社で開発した『橋梁健全度診断システム』による評価の結果、床版の打換えが必要と判断された。また格子解析による当初設計（TL-14）とB活荷重対応時の応力照査の結果、主桁下フランジが30%程度の応力超過傾向が得られたため実応力測定による主桁の余裕耐力評価を実施した。その結果、主桁自体の余裕耐力はB活荷重（TL-25）を考慮した場合ほとんどない状態が確認されたため、床版打換え時に現状の活荷重合成桁から死活荷重合成桁への構造変換対応により桁に余裕耐力を持たせる対応を提案した。対処法としては桁下空間にベントを設置し、支間中央部のジャッキアップ管理により床版打換え時に桁が撓まないように設定（床版死荷重を主桁と床版が合成された断面により抵抗させる）して、完全に合成された状況でジャッキダウンにより床版を含めた合成断面にプレストレスが導入される構造とした。これによりB活荷重でも対応できる構造とした。

本稿では①橋梁健全度診断による床版打換えの提案②実応力測定による活荷重合成桁の耐荷力評価③活荷重合成桁の死活荷重合成桁への構造変換対応について報告するものとする。

2. 対象橋梁の概要

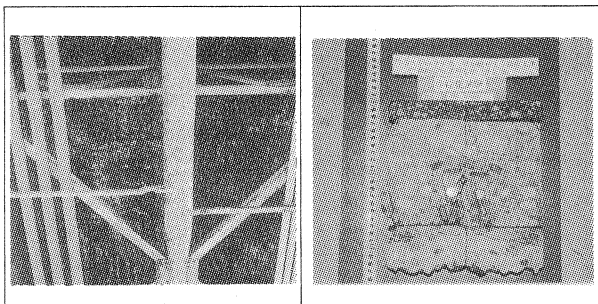
2-1. 対象橋梁の概要

対象となった橋梁は秋田県仙北郡神岡町神宮寺～南外村間の一級河川雄物川に架かる橋梁で昭和37年に完成した。設計基準は昭和31年道路橋示方書が用いられており設計荷重：TL-14（tf）により設計されている。当該橋梁の外観を写真-1に示す。

竣工以来年月が経過し、特に中性化によるコンクリート劣化（写真-2）は顕著である。また打換え計画に先立って行われた現況調査によると最大ひび割れ幅15mm以上であった。またコンクリートコア採取による化学的分析を行った結果、床版かぶり厚さ：3cmに対して①中性化深さ：3cm②圧縮強度：19.2kN/mm²（設計時基準強度：21kN/mm²）③塩化物イオン濃度：87.5g/m³（許容塩化物イオン濃度：600g/m³）の結果が得られた。



写真-1



(a) 床版下面

(b) 中性化状況

写真-2 床版劣化状況

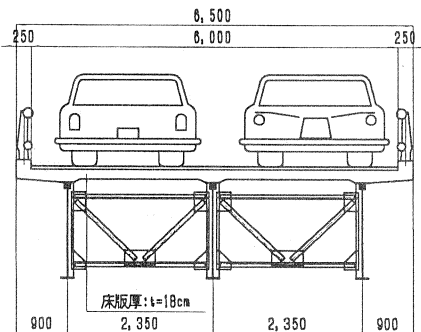


図-1 対象橋梁断面図

2-2. 床版の劣化度診断(余寿命予測)

コンクリート構造においては従来より高い耐久性を有しメンテナンスフリーとする考え方が支配的であったが、塩害や中性化、凍害、アルカリ骨材反応、化学腐食等を原因とする耐久・耐荷性の低下が確認されており、また近年の交通量増加及び車両の大型化に伴い当初設計よりも過酷な供用条件の基で使用されているため、早急な維持管理対策を要する橋梁が年々増加している状況にある¹⁾。この様な背景により、当社では『橋梁健全度診断システム:The Sound Estimation of Bridge System(SEBS)』²⁾を開発し 図-2の“総合システム診断フロー”に示す2段階の健全度評価を基に橋梁全体系の総合システム診断を実施している。

図-3は第1段階のコンクリートの化学的分析調査により得られた基本データから各指標の変数間の相互作用を分析した上で関数式を設定し、『余寿命モデル』に組み入れて①現状把握②既設構造物耐荷力による余寿命予測について解析を行った結果である。横軸に経過年数、縦軸には(a)鉄筋断面欠損率%、(b)床版基本耐荷力 t_f を示し、現状維持の状態と将来供用年数に対する補強レベル(レベル1:現状維持補修、レベル2:防水層処理、レベル3:床版打換え)により得られた結果を示している。この解析結果より必要基本耐荷力を $25t_f$ とした場合、現状維持の状態で9年後に基本耐荷力を下回り、補強レベル1では12年後、レベル2では35年後に基本耐荷力が下回る結果が得られ、レベル3において50年以上の余寿命が得られた。この解析結果は補強レベル2及び3を行うことにより近年の重交通にも対応できる橋梁となることを示している。ここで将来供用年数を50年と設定した場合の「(c)補強レベル別維持管理指数」は、設計当時の維持管理指数を1.0とすると、補強レベル1では4回の補強が必要となりその指数は3.6となる。レベル2では2回の補強が必要となりその指数は3.9、レベル3では1回の補強で済み、その指数は3.3である。このように現状における補強の段階ではレベル3の床版打換え対策が高価な対策(初期コスト大)であるが、将来供用年数を考慮した場合、橋梁を維持するトータルコスト(ライフサイクルコスト)を抑えることができる対策と考えられる。従って床版補強対策として打換え案を提案した。

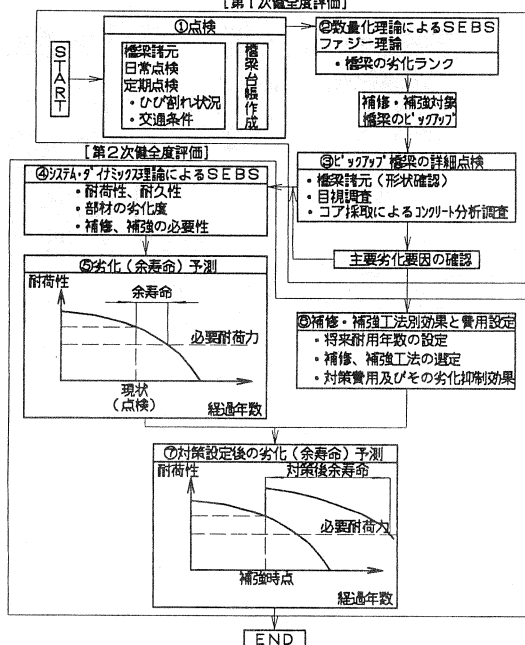


図-2 総合システム診断フロー

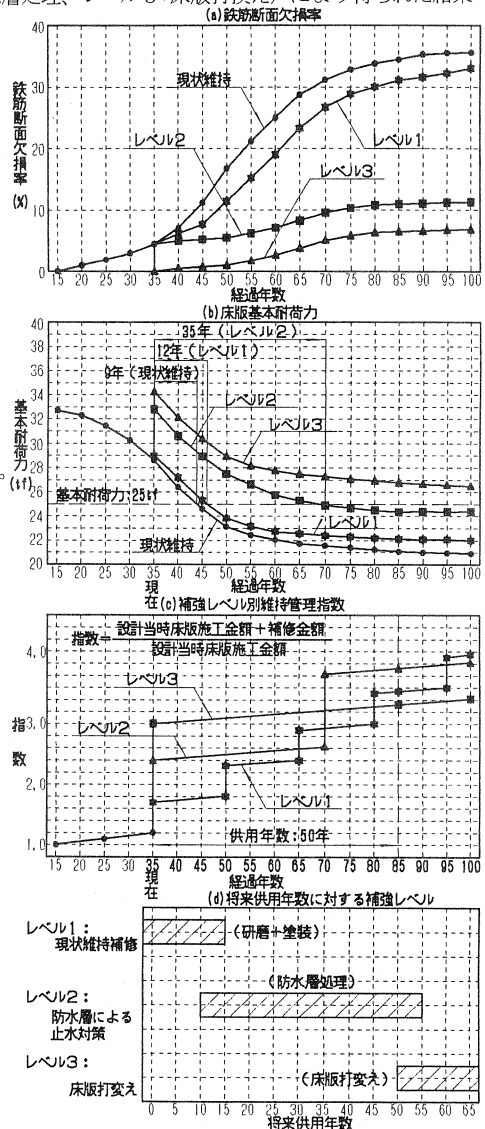


図-3 余寿命モデルによる解析結果

2-3. 実応力測定による鋼桁応力レベルの把握

当初、データ分析として耐荷力とそれに影響を与える要因（主桁本数、主桁間隔、竣工年度、交通量等）との相関性を分析したが、データのバラツキが大きく、判定基準となる傾向を得ることはできなかった。ただしTL-25フル載荷による設計上の耐荷力評価と、応力頻度測定結果を考慮した耐荷力評価との相関性にはある一定の関連性が認められた。

図-4はこれまでの当社における実応力測定より得られたデータを用いて、縦軸に実応力度を考慮した余裕度を、横軸に設計上の余裕度をとりデータをプロットしたものである。このプロット点の中央線及び80%包絡線を最小二乗法より求め、下限80%包絡線が縦軸の1.0水平軸と交わる点の横軸値を判定値として定め、その値より設計上の余裕度が大きい値となる場合は実際の耐荷力は有していると判断することとした。実際の耐荷力とは、現時点での応力頻度測定による実測最大応力度を考慮して求めているため、将来、橋梁構造や交通状況が変化する場合には見直す必要がある。

上述の基本的な考え方に従って作成した図-4の概要は次の通りである。鋼非合成桁橋の場合、(1)データのバラツキは大きく直線的な相関性は認められないが全体的な傾向としてみた場合、余裕度 α は余裕度 p に比べてかなり大きいことがわかる。例えば中央線で見ると余裕度 $p=1.0$ に対して余裕度 α は3.1となっている。すなわち設計上の余裕度に比べて実測応力度を考慮した余裕度の方が常に大きくなるのがわかる。(2)下限80%包絡線と縦軸（実応力度を考慮した余裕度）の $\alpha=1.0$ との交点から、横軸（設計上の余裕度）の値を読み取ると $p \approx 0.6$ となっている。

以上の結果を安全側にまとめて、設計上の余裕度 p が0.6以上あれば、実測応力度を考慮した余裕度 α は1.0以上を確保できることとなる。

次に鋼合成桁橋の場合、(1)データのバラツキは大きく直線的な相関性は認められないが、全体的な傾向としてみた場合、余裕度 α は余裕度 p に比べて少し大きいことがわかる。例えば中央線で見ると余裕度 $p=1.0$ に対して余裕度 α は1.4となっている。すなわち設計上の余裕度に比べて実測応力度を考慮した余裕度の方が約40%大きくなるのがわかる。(2)下限80%包絡線と縦軸（実応力度を考慮した余裕度）の $\alpha=1.0$ との交点から、横軸（設計上の余裕度）の値を読み取ると $p \approx 1.6$ となっている。

以上の結果をみると、全体の傾向としては理論値より実際の耐荷力の方が大きい値となるが、データのバラツキを安全側に考慮した80%包絡線からみると、むしろ実際の耐荷力の方が小さい値となる。つまり鋼単純合成桁橋は余剰部材が少なく、理論値と実耐力とがよく一致していると言える。このことから合成桁橋については全ての橋梁について応力頻度測定を行い判定することとした。図中の△印が当該橋のデータであるが、理論値と実耐力の比率はほぼ1:1であり合成桁自体の余剰耐力が無い結果が得られた。

3. 耐荷性能の向上を目的とした合成桁の床版打換え工法

3-1. 活荷重合合成桁から死活荷重合合成桁への構造系の変更

1) 合成桁の種類

合成桁には架設工法の違いにより『死活荷重合合成桁』と『活荷重合合成桁』の2種類がある。

『死活荷重合合成桁』とは鋼桁の適切な位置に支保工により仮支点を設け、支持した状態で床版コンクリートを打設し、コンクリートが硬化した後に支保工を撤去することにより全死荷重と活荷重に対して合成桁として抵抗する桁である。鋼桁の断面を小さくすることができ、合成断面を有効に利用する点では死活荷重合合成桁は優れているが、支保工の設置・撤去の費用を考えると必ずしも経済的であるとはいえない。また施工中の応力の検討（ジャッキアップによる桁応力の照査）や施工管理（キャンパー調整）もかなり複雑であるので、十分な検討が必要である。

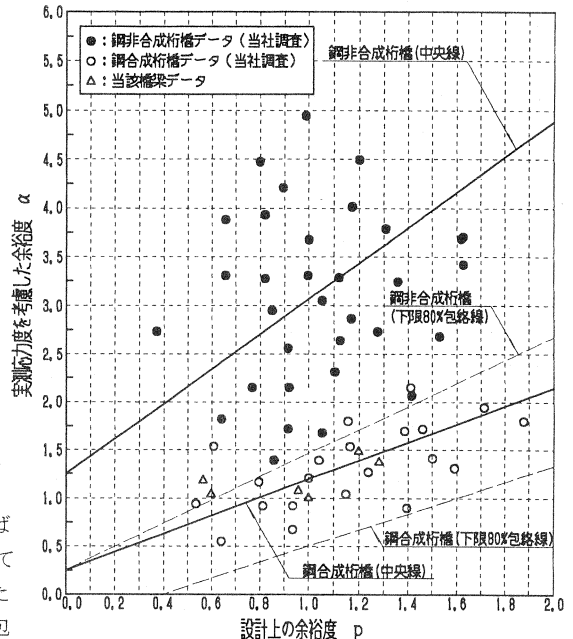


図-4 許容応力度に対する設計上の余裕度と実測値考慮の余裕度との相関性

『活荷重合成桁』とは仮支点は設けず、架設された鋼桁を支保工として用いこれに型枠を支持させて床版コンクリートを打設するもので、鋼桁・床版等の死荷重の大半（前死荷重）は鋼桁断面で抵抗させ、コンクリート硬化後に載荷するわずかな後死荷重（高欄・舗装等）と活荷重に対しては、床版と桁が合成した断面で曲げ抵抗させる桁である。

2) TL-14→B活荷重に対応する工夫

当該橋梁は設計当初においてTL-14活荷重の活荷重合成桁で対応されている。従ってB活荷重による支間中央部の曲げモーメント応力に対して許容することは計算上、不可能である。このような場合、一般的に主桁補強を考えるが主桁補強は既設構造物を痛める可能性があり、また工事費の増加につながるため図-5に示すように活荷重合成桁を死活荷重合成桁へ構造変換させることにより、B活荷重対応時の支間中央曲げモーメントの断面抵抗の増加を図り主桁補強は行わないものとした。

3-2. 仮設ベントを利用したジャッキアップ工法の概要

対象橋梁は活荷重の [TL-14→B活荷重(TL-25)] ランクアップに伴い、床版打換え時に現状の活荷重合成桁を死活荷重合成桁に構造変更する計画である。また既設床版は床版厚 18cmの鉄筋コンクリート床版（単重 2.50tf/m³）であり、打換えは床版厚 17cmのプレキャスト床版（単重 2.65tf/m³）にて行うため、[現状：2.50(tf/m³)X0.18(m)=0.450(tf/m²)] → [打換え後：2.65(tf/m³)X0.17(m)=0.451(tf/m²)] と若干ではあるが死荷重が増加する傾向にあり、現状の主桁下フランジ位置（高さ）は床版打換え後は変動し、現在位置よりも下がる可能性がある。現況の桁下高は河川構造令で規定されている計画堤防高及び現況堤防高よりも高い位置にあり問題はないがその余裕量は僅かであり、現状の主桁下フランジ位置が下がることは極力避けなければならない。従って①現状の桁下からH.W.Lまでの空間の確保（維持）②キャンパー調整により桁及び床版にプレストレスを入れ、活荷重アップによる断面抵抗の増加の2点を目的としてキャンパー管理を行うものとする。当該橋梁のキャンパー量の変動は図-6のように考えられる。

図-6における [A. ②] → [B. ③] への施工段階（床版撤去）におけるキャンパーの戻り量は、現状床版のクリープ等の影響が明確でないためδA-2を限定することは難しい。また死活荷重合成桁による既設主桁の断面抵抗モーメントは現状の主桁が塑性していない条件で算出しており、既設床版撤去時には [A. ①] の状態になることを前提としている。

当該橋梁はバス路線上にあり国道 13 号と 105 号のバイパス的な役割の主要地方道に架設されているため、床版打換え工事では全線交通規制による床版打換えは不可能であり片側を供用しながらの施工形態となる。片側を供用しながらプレキャスト床版を打換える方法として、2パネルを1日の打換え量とした夜間施工とし昼間は全面交通開放する方法（日々打換えタイプ）が採用された。従って今回の床版打換え時のキャンパー管理として① [A. ②] → [B. ③] への施工段階（床版撤去）におけるキャンパーの変化量はない『δA-2=δB-1』ものとする。②これより現状の状態においてベントを設置し [A. ①] のキャンパー量：δA-1=Δδになるようにジャッキアップによりキャンパー調整を行うものとし、③図-6に示すよ

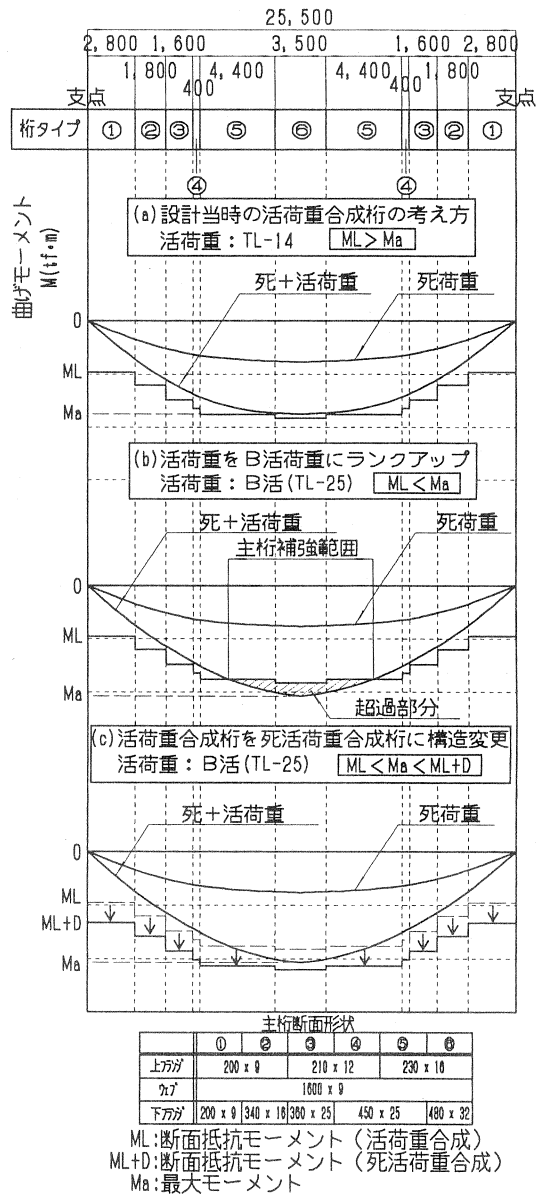
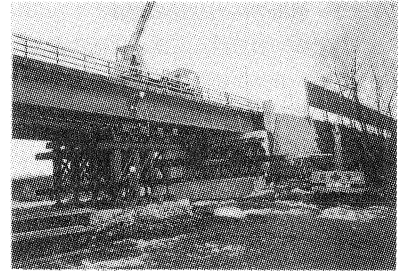
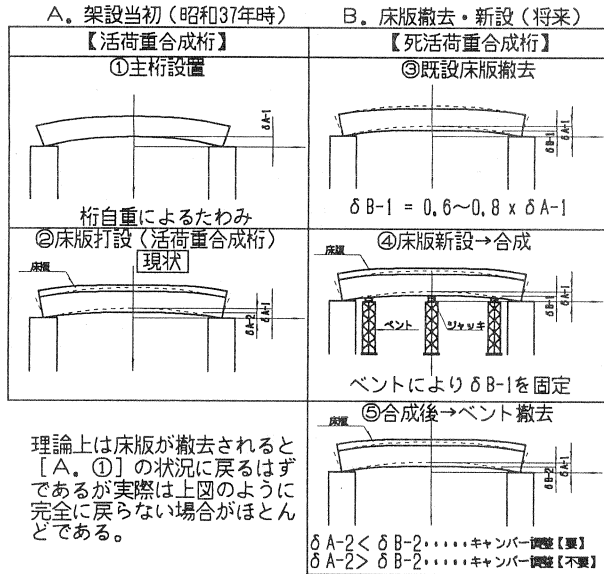


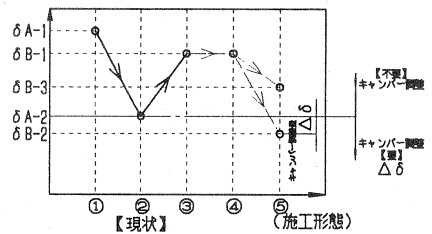
図-5 B活荷重に対応する工夫

うに計算上、 $[\Delta\delta 2 < 0$ の場合 $\rightarrow \Delta\delta = \Delta\delta 1]$ 、 $[\Delta\delta 2 > 0$ の場合 $\rightarrow \Delta\delta = \Delta\delta 1 + \Delta\delta 2]$ のキャンパー量をジャッキアップにより計画した。



写真—3 ベント架設状況

写真 ベント架設状況



図—6 各施工段階におけるキャンパー量の変動図

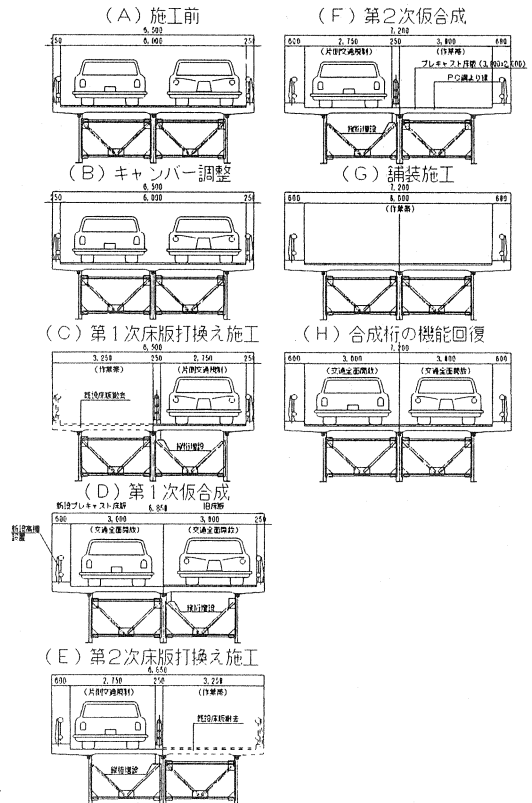
4. 施工中のキャンパー管理及び鋼桁の応力状態の推移

4-1. 打換え施工の手順

この工事では迂回路がなかったため、常に1車線を確保する必要があり、床版の打換え作業は片側車線ずつ2段階に分けて行われた。なお当該橋梁は一級河川雄物川を横過する橋梁であり昼間はバス路線上に位置するため、昼間は全線交通を解放し原則として夜間施工とする。施工の手順は図-7に示す。

まず施工を始めるにあたって桁下空間にベントを設置 (桁端部及び支間中央部位置) し、G1-G2 桁及び G2-G3 桁間に新たに床版を支持するための縦桁を増設した。次に中間ベント上に油圧ジャッキを固定し、必要キャンパー量を調整した (B)。

キャンパー調整が終わった時点で1次施工に入った。まず2次施工側 (G2-G3) の車線の交通を止め、床版の端部から順にコンクリートカッターでブロック状に切断・撤去し、プレキャスト床版 (2Mx3m、厚さ18cm、3.5tf/ブロック) を2ブロック/1夜間ずつ架設した。床版パネルの架設はラフタークレーン (25tf) を用いて橋面下 (河川敷) より行った (C)。架設した床版パネルは箱抜き部分から鋼桁上フランジの上面にスタッドジベルを溶植し、超速硬コンクリートを打設して鋼桁と床版を一体化 (仮合成) した (D)。1次施工側の床版と鋼桁の一体化が完了した段階で交通を1次施工側 (G1-G2) の車線に切り換え、2次施工側の車線を交通止めし2次施工に移った。2次施工は始めに床版を撤去した後に (E) 床版パネルの架設を行い、鋼桁と一体化 (仮合成) した (F)。その後、舗装を施工し (G)、ジャッキ及びベントを撤去し床版軸方向に圧縮力が導入されること



図—7 床版打換えの施工手順

により合成桁としての機能が回復された(H)。なお増設した縦桁はそのまま残した。

4-2. 鋼桁の応力状態の推移

当該橋梁の床版打換え工法は死活荷重合成桁を採用することであったが、表-1に示すように若干の応力度の超過が確認できる。この超過部分は床版コンクリートのクリープ及び乾燥収縮を考慮した場合であり、一般にプレキャスト床版の場合、工場製作品であることからこの影響は小さくなると考えられる。

また昭和47年の鋼道路橋施工便覧に明記されているように補強工事における引張材に対して30%、圧縮材に対して20%程度の許容応力度の超過を許している。このことを考慮するとB活荷重に対応した死活荷重合成桁として打換えた場合、

圧縮材(上フランジ) : $\text{MAX}(\sigma_{su}/\sigma_a) = 0.672 < 1.200$

引張材(下フランジ) : $\text{MAX}(\sigma_{sl}/\sigma_a) = 1.090 < 1.300$

となり十分な主桁耐力があると考えられる。

4-3. キャンパー量の決定

キャンパー調整を行う時に既設床版がある状態でジャッキアップを行うため、ジャッキの軸力導入量が非常に大きくなり、支点(支承)部分のアップリフトが懸念される(図-8)。図-6に示したように[A. ②] → [B. ③]の状態にするにはキャンパー量 : $\Delta \delta = 38.834(\text{mm})$ が必要となり、その際に必要となるジャッキ導入力は $P=87.5(\text{tf})$ である。今、上部工全体死荷重は $192.370(\text{tf})$ あり1支承当たりの反力は $R_d=192.370(\text{tf})/6$ 支承=32.1(tf)となる。仮に支点部のジャッキによる不均衡力を $1.5\alpha P/2$ と想定した場合、最大ジャッキ導入力は $42.8(\text{tf})$ と考えられる。この時の最大キャンパー量は $\delta_{\text{max}}=20(\text{mm})$ 程度であるため、設計上、完全な死活荷重合成桁への対応が困難となる。

しかしながら実際には床版の劣化による剛性低下等の影響が考えられるため、設計照査の段階では支点上のアップリフトを起こさないことに重点を置き、①絶対条件として『ジャッキの最大導入軸力 : $P_{\text{max}}=42.8(\text{tf})$ とし、この $42.8(\text{tf})$ の軸力を導入するまでに設計上の最大キャンパー量 : $\delta_{\text{max}}=20(\text{mm})$ を超えた場合は、②必要条件として『 $\delta=38.834(\text{mm})$ までジャッキアップを行う』ものとした。

5. まとめ

図-9は支間中央主桁下フランジのキャンパー量の実測値と解析値を示したものである。内桁(G2)は実測値と解析値が非常に一致した反面、外桁(G1, G3)は若干ではあるが解析値に対して6(mm)ほど実測値が大きいダウン量を示した。これは①設計段階における断面剛性より実際は劣化等による床版剛性の低下があったこと②鋼桁自体の腐食も若干確認されていたこと等の影響が考えられる。今後はこのような劣化要因を考慮した断面剛性評価を実施するとともに、完成後の実応力度計測を実施することにより死活荷重合成桁への構造変換の効果確認を行うものとする。

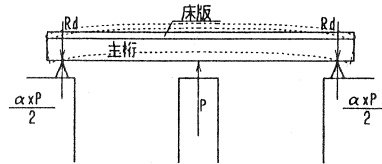
参考文献 1) 西川 : ライフサイクルコストを最小にするミニメンテナンス橋の提案、橋梁と基礎、pp64-72、1997.8

2) 村坂・西山 : 複数の劣化因子から構成されるコンクリート構造物の経時変化予測手法の提案、第9回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp875-880、1999.10

表-1 応力度照査結果

【プレキャスト床版打換 死活荷重合成桁-活荷重-日活荷重】									
	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5	NO.6	NO.7	NO.8	NO.9	
床版	σ_c (kN/mm ²)	-7.5	-8.5	-8.5	-9.0	-9.0	-10.2	-10.4	-10.2
	σ_a (kN/mm ²)	-12.0	-12.0	-12.0	-12.0	-12.0	-12.0	-12.0	-12.0
	σ_c/σ_a	0.628	0.708	0.708	0.753	0.753	0.853	0.863	0.848
上フランジ	σ_{su} (kN/mm ²)	-87.1	-102.2	-102.4	-109.2	-111.1	-120.1	-121.7	-122.3
	σ_a (kN/mm ²)	-182.0	-182.0	-182.0	-182.0	-182.0	-182.0	-182.0	-182.0
	σ_{su}/σ_a	0.479	0.562	0.563	0.600	0.610	0.660	0.669	0.672
下フランジ	σ_{sl} (kN/mm ²)	151.7	146.2	120.3	134.5	120.6	149.8	152.6	130.5
	σ_a (kN/mm ²)	140.0	140.0	140.0	140.0	140.0	140.0	140.0	140.0
	σ_{sl}/σ_a	1.084	1.044	0.859	0.961	0.861	1.070	1.090	0.932

【現状 活荷重合成桁-活荷重-TL-1】									
	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5	NO.6	NO.7	NO.8	NO.9	
床版	σ_c (kN/mm ²)	-5.4	-5.7	-5.7	-5.9	-5.9	-6.4	-6.5	-5.4
	σ_a (kN/mm ²)	-9.6	-9.6	-9.6	-9.6	-9.6	-9.6	-9.6	-9.6
	σ_c/σ_a	0.558	0.596	0.597	0.618	0.618	0.668	0.672	0.665
上フランジ	σ_{su} (kN/mm ²)	-132.1	-158.8	-148.8	-161.4	-163.1	-171.8	-174.5	-173.5
	σ_a (kN/mm ²)	-182.0	-182.0	-182.0	-182.0	-182.0	-182.0	-182.0	-182.0
	σ_{su}/σ_a	0.726	0.862	0.818	0.887	0.896	0.944	0.959	0.953
下フランジ	σ_{sl} (kN/mm ²)	136.0	126.3	100.7	112.7	100.6	121.9	124.3	106.1
	σ_a (kN/mm ²)	140.0	140.0	140.0	140.0	140.0	140.0	140.0	140.0
	σ_{sl}/σ_a	0.971	0.902	0.719	0.805	0.719	0.871	0.888	0.758



R_d : 支点反力(床版重量含)
 P : ジャッキ導入力
 α : ジャッキによる不均衡力の影響係数 ($\alpha=1.5$)

支点上において

$R=R_d-\alpha x P/2 \geq 0 \rightarrow$ 支承は安全

$R=R_d-\alpha x P/2 < 0 \rightarrow$ 支承部分のアップリフト(負の反力)が考えられ、これを防止する対策が必要となる。

図-8 支点上のアップリフト

しかしながら実際には床版の劣化による剛性低下等の影響が考えられるため、設計照査の段階では支点上のアップリフトを起こさないことに重点を置き、①絶対条件として『ジャッキの最大導入軸力 : $P_{\text{max}}=42.8(\text{tf})$ とし、この $42.8(\text{tf})$ の軸力を導入するまでに設計上の最大キャンパー量 : $\delta_{\text{max}}=20(\text{mm})$ を超えた場合は、②必要条件として『 $\delta=38.834(\text{mm})$ までジャッキアップを行う』ものとした。

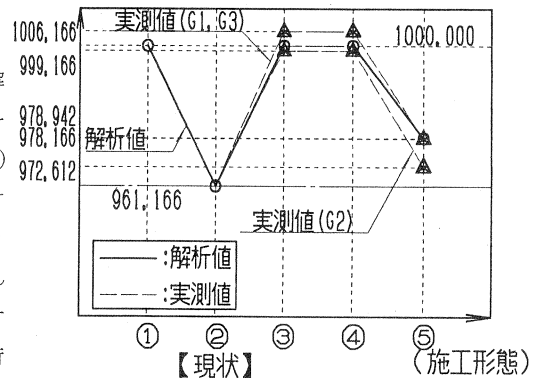


図-9 支間中央部のキャンパー調整