

鋼橋RC床版の全面打替えによる改良効果

EFFECTS OF DECK REPLACEMENT WORKS FOR HIGHWAY STEEL BRIDGES

石井孝男^{*}, 井口忠司^{**}, 竹之内博行^{***}, 谷倉 泉^{****}

by Takao ISHII, Tadashi IGUCHI, Hiroyuki TAKENOCHI, Izumi TANIKURA

Bridge deck replacement works were conducted at several steel bridges with damaged concrete slab decks on the Tomei Expressway.

Three kinds of bridge deck replacement systems were selected and their applicability for the highway bridges were investigated by the trial execution. They are, concrete filled i-beam grid deck, orthotropic steel plate deck, and precast composite slab deck system.

Effects of those replacements on the bridge structure were investigated by stress and deflection measurements, which were conducted before, after and during the replacement works including the loading test on the actual bridges.

1. まえがき

東名高速道路は昭和44年の全線供用開始以来、既に23年が経過している。この間、交通量の増大と車の大型化による繰返し荷重の増大に伴い、鋼橋のRC床版では疲労によると思われる2方向のひびわれや貫通ひびわれ等の各種の損傷が見られるようになり、損傷の範囲も次第に広がっている。¹⁾²⁾ 今後もこのようなRC床版の損傷は増加していくものと予想され、高速道路の基幹路線として安全かつ快適に供用を続けるためには、これらの損傷に対して早期に安全かつ確実な対策を行うことが重要である。

日本道路公団ではこれまで各種の工法により損傷部の補修・補強工事を行うとともに、これらの工法に関する研究を進めてきた。しかし、これまで実施してきたような損傷部に対する部分的な補修工法では対処しきれない状況も出始めているため、抜本的な補修・補強工法を確立するとともに、これを実橋に適用していくことが必要な時期にきている。

一方、東名高速道路の大井松田～御殿場I.C間では、平成3年3月末の新線の開通に伴い、その後9ヶ月間に渡って旧線の反転化及びリフレッシュ工事を行った。長期間の全面通行止が可能になるこの機会を利用して、RC床版の損傷が著しいいくつかの橋梁に対して床版の全面打替え工事を行うこととなった。打替え工法としては今後の急速、かつ確実な施工を目指して、現場での施工期間の短縮が図れる① I形鋼格子床版、② プレキャストコンクリート床版、③ 鋼床版の3工法を採用した³⁾。工事に際しては、床版の全面打替えが橋体全体に及ぼす影響(改良効果)や施工中に生じる変化等をとらえるため、工事の前後及び施工中に載荷試験を含む詳細な実橋測定を行った。

本論文は、これらの実橋測定の結果を整理し、各種打替え工法による改良効果及び施工に伴う各部の挙動について報告するものである。⁴⁾⁵⁾

* 工修 日本道路公団 東京第一管理局(〒213 神奈川県川崎市宮前区南平台1-1)

** 日本道路公団 東京第一管理局(〒213 神奈川県川崎市宮前区南平台1-1)

*** (社)日本建設機械化協会 建設機械化研究所(〒417 静岡県富士市大淵3154)

**** 工修 (社)日本建設機械化協会 建設機械化研究所(〒417 静岡県富士市大淵3154)

2. 全面打替え工事の概要

2.1 橋梁及び工事の概要

RC床版の全面打替え工事を行った橋梁及び適用した工法の概要を表-2.1に示し、以下、各橋梁ごとに工事の内容を説明する。なお、A橋、B橋で行った半幅施工とは、全幅員を一期施工側と二期施工側に分割し、工事用車両を通しながら施工を行ったもので、一般車両の供用下での工事を想定した試験施工と位置付けたものである。

2.2 鋼床版による打替え工事の概要

A橋で用いた鋼床版及びそれを支持する床組を図-2.1に示す。鋼床版は、1パネル当たり、重さ約5.5t、寸法約2.5m×8m、デッキプレート厚16mmで、約42cmピッチの縦リブを有し、3～4mピッチで横桁に支持されるプレハブ鋼床版である。

施工は、まず増設縦桁(床版補強のため供用開始後に設置されたもの)をジャッキを用いて床版から剥離させて取除いた後、横桁及び張出しブラケットを新設した。その後、反復施工によりRC床版を切断撤去し、鋼床版をボルト接合で主桁に取付けた。この打替え工事により、橋梁の死荷重は鋼桁と床版を合わせて約30%減少した。

2.3 RCプレキャスト床版による打替え工事の概要

B橋で用いたプレキャスト床版の構造を図-2.2に示す。この床版は、1パネル当たり、寸法2m×6.4m、厚さ18cm、重量約5tの工場製作プレキャスト版である。本床版はコンクリートと鋼版の合成版であり、底版に4.5mmの鋼板を用い、これにパイプジベルを溶植してコンクリートとの一体化を図っている。版同士の結合はスキンプレーートの溶接や目地コンクリートの打設等による。また、主桁とは50cmピッチのスタッドジベルを介して結合されている⁶⁾。

施工は半幅施工形式で、RC床版を切断撤去した後、主桁にスタッドジベルを溶植し、その後、プレキャスト床版の敷設、スキンプレーートの溶接、間詰め部の早強コンクリート打設の順で行った。この工事では床版の打替え以外にはほとんど構造変更がなく、死荷重の変化も僅か4%の増加が生じた程度であった。

2.4 I形鋼格子床版による打替え工事の概要

C橋では、主鉄筋の代わりに小型のI形鋼を使用した床版で打替えた⁷⁾。その構造概要を図-2.3に示す。施工は、全面一括施工形式で、RC床版を切断撤去した後、張出し部の一部にブラケットを取付けて補強した。さらに主桁上にスタッドジベルを溶植した後、底板、I形鋼、配力筋で構成されるパネルを敷設し、早強コンクリートを現場で打設する手順で行った。この施工により、死荷重は約14%増加した。

3. 全面打替えによる改良効果

3.1 測定内容と測定方法

今回採用した3種類の全面打替え工法が、今後の高速道路の補修・補強において安全で確実な改良工法であることを確認するためには以下の課題を明らかにする必要がある^{8) 9)}。

表-2.1 橋梁諸元および打替え工事の概要

橋名	型式	A 橋	B 橋	C 橋
		単純活荷重合成桁	4径間連続鉄筋桁	単純活荷重合成桁
橋梁諸元	橋長	40.0m	104.8m	80.0m
	支間	39.2m	25.95m	39.2m
	有効幅	12.3m	10.95m	10.95m
	主桁本数	4主桁	4主桁	3主桁
	主桁間隔	3@3.4	3@3.4	2@4.0
	平面線形	直線	R=300m	R=400m
	縦断勾配	i=2.3%	i=1.12%	i=2.3%
	横断勾配	i=5.8%	i=9%	i=7%
打替え工事	床版厚	18cm	18cm	19cm
	工法	鋼床版	RCプレキャスト床版	I形鋼格子床版
	施工法	半幅施工	半幅施工	全幅一括施工
	工期	100日	110日	110日

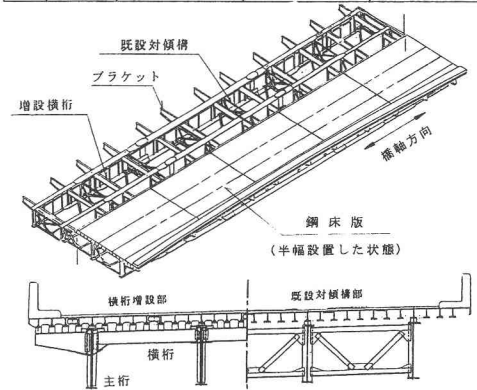


図-2.1 鋼床版の構造概要

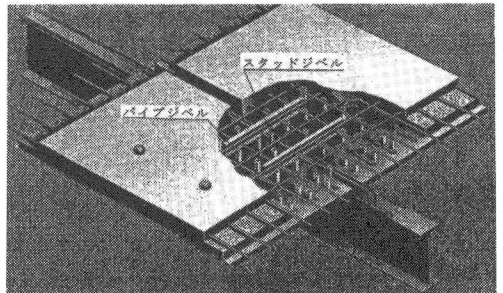


図-2.2 RCプレキャスト床版の構造概要

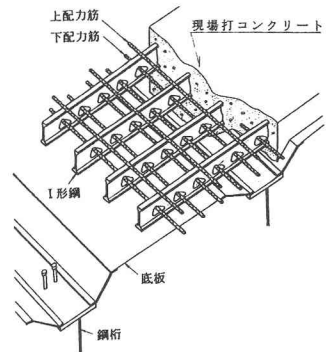


図-2.3 I形鋼格子床版の構造概要

- ① 鋼桁部に悪影響を及ぼさない施工であること。 →施工中の挙動測定
 ② 床版を全面打替えた改良効果が鋼桁部で認められること。 →改良効果の測定
 ③ 新設された床版の応力変位挙動に問題がないこと。 →新設床版の挙動測定

これらの課題を明らかにす

表-3.1 全面打替え施工に関する測定内容と測定方法

測定内容	測定項目	測定方法	測定機器・材料
① 施工中の挙動	㊦ 主桁の応力	インターバル測定(3時間間隔)	1軸・3軸ひずみゲージ 電気式変位計 埋込式ひずみゲージ
② 改良効果	㊧ 主桁、縦桁のたわみ	頻度測定(1日単位)	
	㊨ 対傾構取付け部の応力	施工前後における荷重車の載荷試験	
③ 新設床版の挙動	㊩ 主桁との合成作用	施工後の荷重車の載荷試験	
	㊪ 各部位の応力		

るため表-3.1に示す内容の現場測定を行った。¹⁰⁾ 着目した主な内容は、死活荷重の影響を受けやすい主桁の応力とたわみ、及び局所的な二次応力によって疲労きれつも見られる対傾構取付け部の応力とした。新設床版については、主桁との合成作用、床版パネルの接合部等、現場で接合された部位の挙動が不明であったため、それぞれの挙動を各橋梁で調査した。3工法をそれぞれ適用した3橋について、既設の一般構造及び測定位置を図-3.1~3.3に示す。

3.2 鋼床版による打替えを行ったA橋の改良効果

(1) 施工中の挙動

約100日間に及ぶ施工期間中の橋梁死荷重の変化、工事車両の通過と重機の乗載等が鋼桁部の挙動に及ぼす影響について、3時間間隔のインターバル測定と最大値をとらえるための頻度測定で追跡した。施工期間中のインターバル測定結果を図-3.4に示す。長期測定から、次のような傾向が明らかとなった。

- ① 主桁の応力とたわみは、施工中の死荷重変化の影響を受けて大きく変動する。一期施工で高欄やRC床版を半幅だけ撤去した場合、撤去した側の外桁の変動量大きい、撤去しない側の外桁ではほとんど変化が見られない。また、二期施工では変動量は小さいが一期施工と逆の挙動を生じる。

施工後の死荷重が約3割減少した影響が主桁の挙動に表れた。すなわち主桁のたわみは上方へ2~5cm浮上り、これに伴って主桁上フランジの圧縮応力は5~8kgf/mm²引張側へ軽減され、下フランジの引張応力も4~6kgf/mm²圧縮側へ軽減された。

- ② 1日の気温は約5~10℃の範囲で変動した。通常、このような気温変化に伴って橋梁の床版と主桁の間で温度差が生じ、主桁のキャンパーや応力が微小な範囲で変化する。この変化量は同じ温度変化に対して、RC床版に比べて鋼床版に打替えた後の方が若干大きく表れている。

- ③ 対傾構取付け部の垂直補剛材上端の応力は、㊩重機がその直上付近に乗載した時、㊧床版の撤去・架設に伴って死荷重が変化した時、㊨主桁の上フランジを跨いで横桁上フランジ間を接合するパスプレートボルト締めした時の変化量大きい。

施工で撤去されるRC床版と高欄コンクリートの

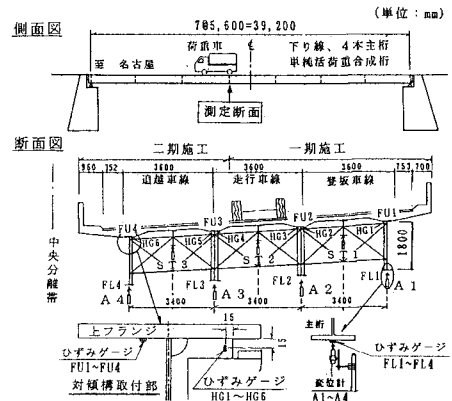


図-3.1 A橋の既設構造と測定位置

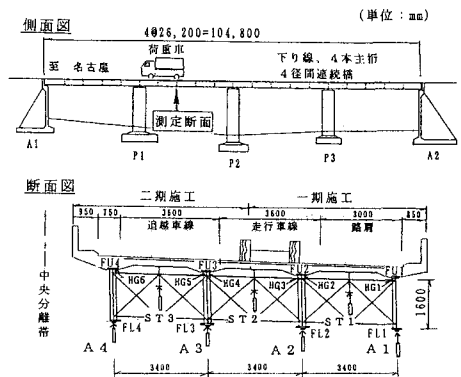


図-3.2 B橋の既設構造と測定位置

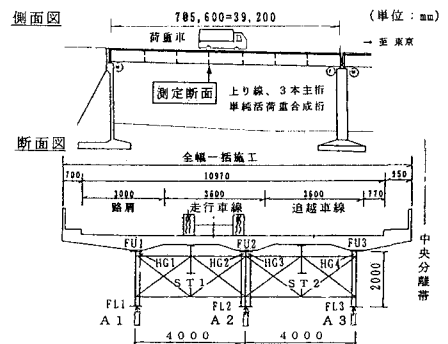


図-3.3 C橋の既設構造と測定位置

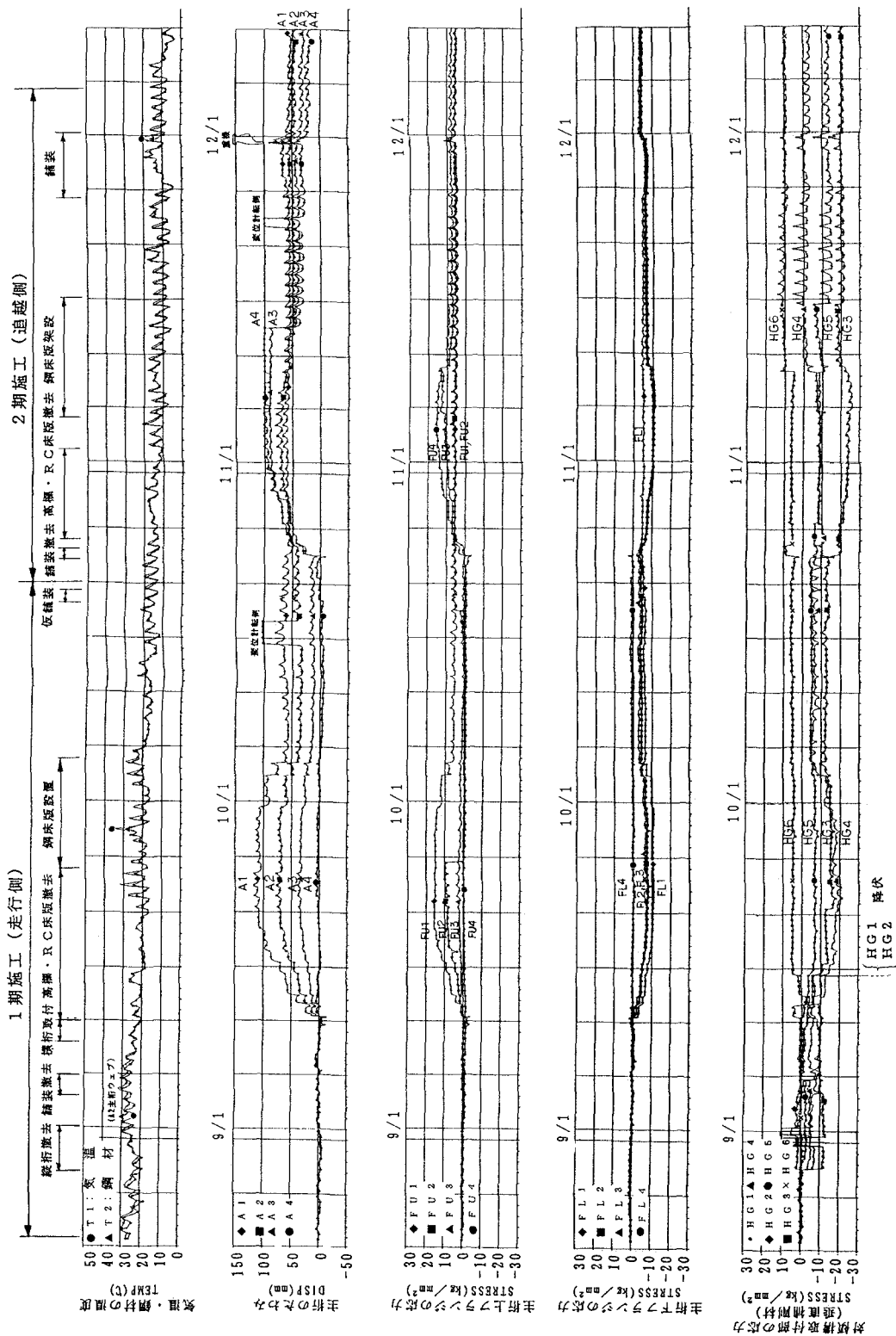


図-3.4 A橋 インターバル測定結果(3時間毎のデータプロット)

死荷重は、半幅当り約230トンにも及ぶため、上記㉔に比べて㉕の影響はかなり小さく、特に重機や工事車両乗載の影響は無視できる程度のものである。しかし㉕のうち、既設の対傾構が横桁に近接しているようなケースでは、一部の垂直補剛材で降伏点を越えるようなひずみを生じることがわかった。また、施工に伴って各部位の応力が大きく変動し、応力が再配分されることもわかった。

(2) 改良効果

床版の支持構造及び床版形式の変更が主桁構造の応答値に及ぼす影響をとらえるため、施工の前後で20トン荷重車を用いた走行試験を実施した。

荷重車は走行車線中央を約70km/hの速度で走行させ、この時に生じる橋梁各部位の最大値を施工の前後で比較した。施工前後の主桁の応力及びたわみ測定結果を表-3.2と図-3.5に、対傾構取付け部の応力の測定結果を表-3.3に示す。なお、主桁のたわみについては、微振動の影響を去除するため、スムージング処理を行い、その最大値で評価した。

これらの図表から次のような改良効果が認められる。

- ① 主桁の応力が平均約1.5割減少するとともに、主桁のたわみも2割前後減少した。また、それに伴って相隣りあう主桁間のたわみ差も大幅に減少し、床版の打替えと横桁の増設により、橋桁全体の剛性が高まった。
- ② 主桁間中央部の床版の相対たわみが約3割増加したことから、鋼床版はRC床版に比して多少たわみ易い傾向が見られる。
- ③ 一般に対傾構取付け部の垂直補剛材上端部では、主桁の不等沈下(たわみ差)と床版変形等の影響を受けて応力集中を生じる傾向がある。¹¹⁾ 全面打替え後の実測の結果、床版変形は増加したものの主桁間のたわみ差が減少したこともあり、各取付け部での応力は1/2以下にまで低減した。このことより、対傾構取付け部の疲労寿命は大幅に改善されたものと思われる。
- ④ 施工の前後で中桁の中立軸の移動量を実測した結果、図-3.6に示すように主桁の中立軸が約20cm上昇し、鋼床版と主桁を合成させることによって、主桁としての剛性が高まったことを確認できた。

(3) 新設鋼床版の挙動

新しく架設された鋼床版は、縦リブと主桁の上フランジがライナープレートを通して1.2m間隔でボルト結合されている。その中間部は無収縮モルタルで充填されているが、この区間の主桁との合成作用が不明であった。また、各鋼床版パネルは添接板を介してボルト接合されている。この接合部は主桁間のほぼ中央部に位置していることもあって、縦リブや横桁とともに比較的大きな応力を生じる可能性があった。このようなことから、着目する部位の直上に20トン荷重車を乗荷して発生応力を調査し、設計値との比較も行った。その結果、新設鋼床版の挙動について次の点が明らかになった。

- ① 単純活荷重合成桁としての機能を確認するため、図-3.7に示すようにボルト締め断面とボルトの中

表-3.2 A橋における主桁の応答値比較

測定項目	応力(kgf/cm ²)			たわみ(mm)					
	主桁下フランジ			主桁のたわみ			床版の相対たわみ		
	施工前	施工後	変化率(%)	施工前	施工後	変化率(%)	施工前	施工後	変化率(%)
A1主桁	0.77	0.54	70	2.24	1.82	81	—	—	—
ST1縦桁	—	—	—	2.65	2.09	79	0.83	0.46	55
A2主桁	0.96	0.81	84	3.07	2.28	74	—	—	—
ST2縦桁	—	—	—	3.29	2.61	79	0.03	0.05	—
A3主桁	0.97	0.84	87	3.04	2.33	77	—	—	—
ST3縦桁	—	—	—	2.68	2.21	82	—	—	—
A4主桁	0.77	0.77	100	2.30	1.98	86	0.74	0.35	47
							0.01	0.06	—

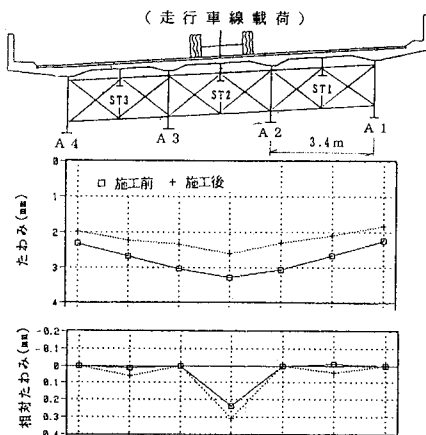


図-3.5 A橋におけるたわみ分布の変化

表-3.3 A橋における垂直補剛材応力の変化

主桁	応力単位(kgf/cm ²)					
	A1主桁	A2主桁	A3主桁	A4主桁	ST1	ST2
施工前	-1.1	2.0	-4.9	-5.2	1.6	-1.3
施工後	-0.6	0.9	0.8	1.0	0.8	0.4
変化率(%)	50	48	17	-19	53	-31

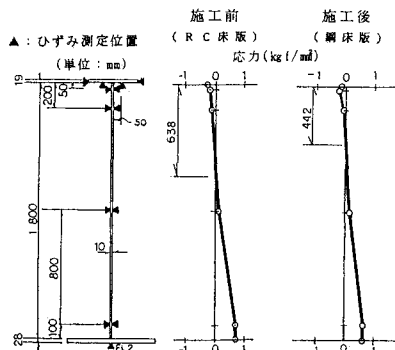


図-3.6 A橋における中立軸の移動

間断面において鋼床版縦リブ及び主桁のウェブの両面で水平方向ひずみを測定し、断面のひずみ分布を求めた。その結果、同図に示すようにボルト締め位置に関係なく全断面で主桁と鋼床版が一体化した挙動を示すことを確認できた。

② 荷重の載荷条件等が設計とはかなり異なるが、鋼床版及び横桁各部の応力を20トン荷重車の載荷試験によって実測し、参考として設計値と比較した。その結果、表-3.4に示すように20トン荷重車が単独で載荷された場合に生じる各部位の応力は、設計応力の1割程度であることがわかった。

(4) その他の挙動変化

本橋で行った荷重車の走行試験の結果、橋梁の固有振動数は施工前の2.7Hzから鋼床版打替え後は4.0Hzにまで増加した。また、スムージング処理で得られた最大値と走行試験時の実測最大値を比較して得た動的増幅率は、多少のバラつきがあるが、各主桁のたわみについては施工前は1.2～1.4、施工後は1.4～1.5程度となった。

騒音の変化については、今回の工事が山間部で行われたこともあり、測定は行わなかった。

3.3 プレキャスト床版による打替えを行ったB橋の改良効果

(1) 施工中の挙動

B橋は4主桁の4径間連続橋であり、打替えには鋼・コンクリート合成床版の1種であるRCプレキャスト床版が採用され、施工は半幅施工形式で行われた。なお、一期側の施工期間においては一部に自動計測ができなかった部分があるため、二期施工時の測定結果を中心に説明する。

約110日間に渡る施工期間中のインターバル測定結果を図-3.8に示す。主な結果は次のとおりである。

① 二期施工中の主桁の挙動を見ると、床版の撤去・架設時に大きな変化を生じている。RC床版撤去後の主桁の浮上りは、施工される側の外桁で大きく(11月1日前後)、これは半幅施工を行ったA橋と全く同様の傾向である。また、RC床版を撤去する段階においては、A4外桁で重機乗載(約30トン)により2cm近いたわみが生じており、これは20トン車載荷時の約8倍に相当する。また、測定断面の直上スパンでの床版撤去が終了し、隣接スパンでの作業中は逆に4cm近く浮上った。これに比べて、プレキャスト床版が敷設されていく過程でのたわみ変化はかなり小さくなっている。

以上のようなことから、B橋のような連続橋の場合には、A橋のような単純桁に比べてRC床版が撤去されたままの状態では重機乗載の影響が大きく表れやすいと言える。

② 主桁上下フランジの応力は、各主桁のたわみ変化に相応して変動する。施工中の主桁のたわみ変化は±2cm、主桁の応力はおよそ±10kgf/㎠の範囲で変動した。

③ 全面打替えにより橋梁の死荷重が約4%増加した。その影響により、施工後は各主桁のたわみが5cm程度下り、上フランジの応力は5～8kgf/㎠圧縮側へ増加し、下フランジの応力は1～5kgf/㎠引張側へ増加する等の変化が見られた。これは死荷重が低減されたA橋と逆の傾向である。

④ 対傾構取付け部の垂直補剛材においても、主桁と同様に死荷重の変化に対応して応力が変化した。しかし、主桁のように全体的なものではなく、重機が直上付近に乘載した時にのみ大きな応力を生じる傾向があり、最大で20トン車載荷時の7倍(14kgf/㎠)もの変化が見られた。

⑤ 日中の温度変化に伴って主桁のキャンパーが僅かに変化した。その変動量は施工の前後でほぼ等しく、

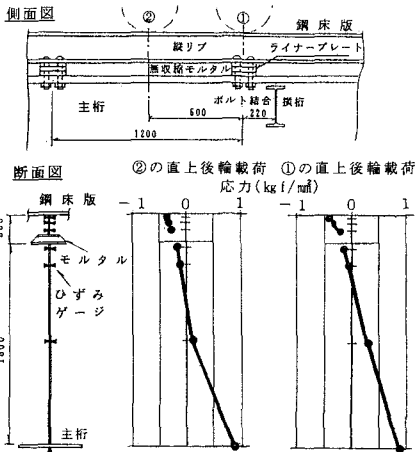


図-3.7 鋼床版と主桁の合成作用

表-3.4 鋼床版各部の応力比較

測定項目	測定方向	実測最大値 (kgf/㎠, mm)
縦リブ下フランジ応力	横 軸	+1.3
添 接 板 応 力	横軸直角	+0.4
デッキプレート下面応力	横軸直角	+1.0
バスプレート側面応力	横軸直角	+0.9
横桁下フランジ応力	横軸直角	+1.6
横 桁 の た わ み (mm)	鉛 直	+0.29

設計値

(1) 床版作用

部 材	計 算 方 法	設 計 荷 重	設 計 値 (kgf/㎠, mm)
縦リブ下フランジ応力	無限連続鉄梁	死荷重+T-20	12.6
上フランジ応力	無限連続鉄梁	死荷重+T-20	-8.5
添接板たわみ	無限連続鉄梁	T-20	2.6
横桁応力	単純鉄梁	死荷重+T+T43	18.7
横桁たわみ	単純鉄梁	T+T43	2.8

(2) 主桁格子作用

部 材	計 算 方 法	設 計 荷 重	設 計 値 (kgf/㎠)
縦リブ上フランジ応力	格子計算	死荷重+L-20	-5.3
横 桁 応 力	格子計算	死荷重+L-20	5.3
バスプレート応力	格子計算	死荷重+L-20	7.6

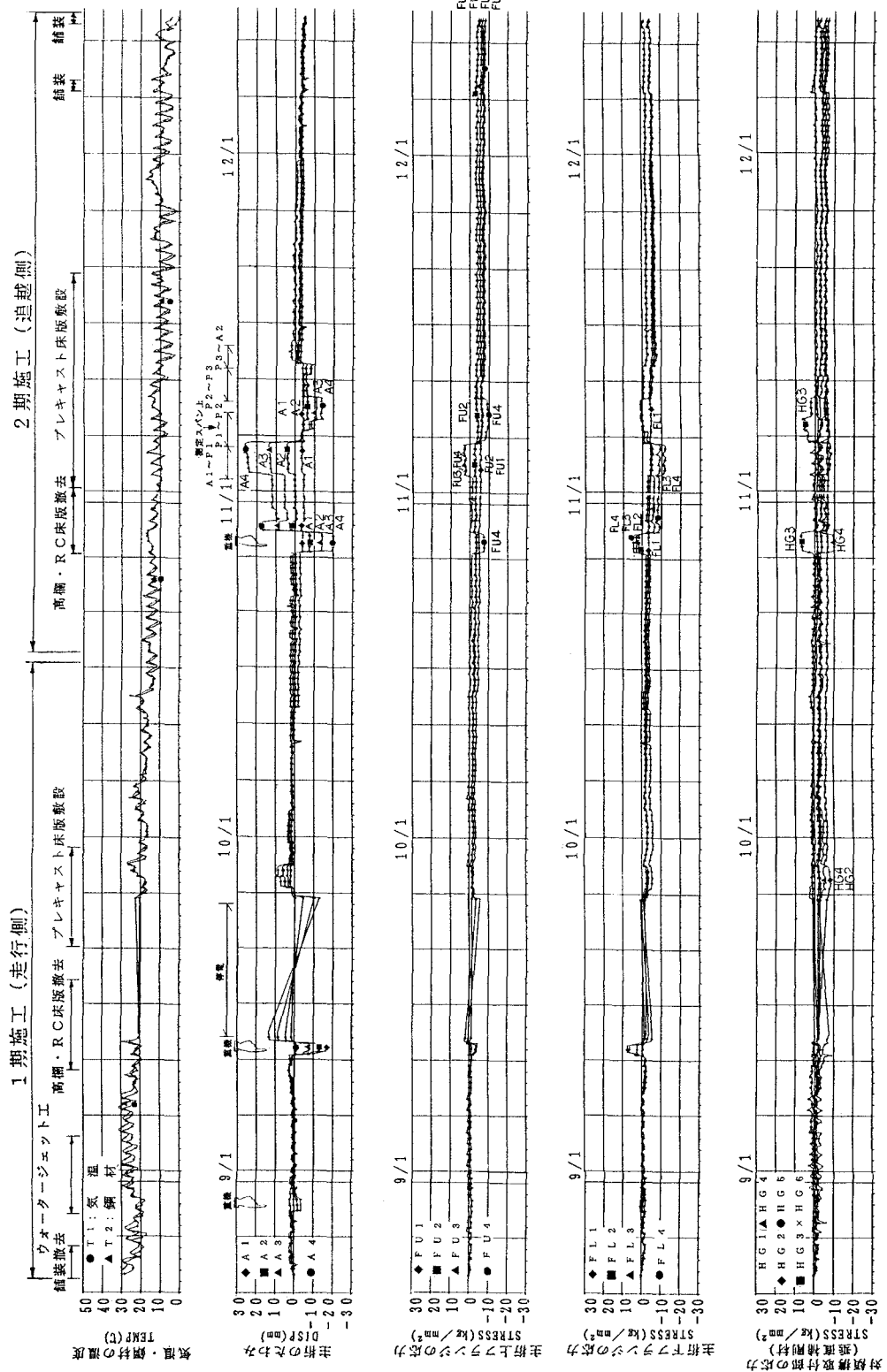


図-3.8 B橋 インターバル測定結果(3時間毎のデータプロット)

プレキャスト床版とRC床版は温度変化に対して同様の挙動を示す。

- ⑥ 施工期間中の頻度測定の結果、二期施工でRC床版が撤去された状態において、工事車両が通過した時、主桁に20トン荷重車載荷時の約4倍(6.5 kg f/mm²)の応力振幅が記録された。80トンの工事車両の通行は考えられないことから、床版が撤去され半幅供用の状態では偏載荷の影響が顕著に表れることが推定できる。

(2) 改良効果

全面打替えによる改良効果は、施工の前後においてスパン中央部の測定断面直上において、20トン荷重車の後輪を走行車線中央に載荷した時の測定データを比較し、その変化率で評価した。施工前後における主桁の応力とたわみの変化を表-3.5に、断面のたわみ分布の変化を図-3.9に、対傾構取付け部の応力変化を表-3.6に示す。これらの図表に見られる主な改良効果は次のとおりである。

- ① RC床版とプレキャスト床版の厚さは共に18cmであるが、プレキャスト床版の断面剛性をRC床版厚に換算した場合には、全断面有効とした場合21cm厚相当になる。この断面剛性の向上により、全面打替え後は主桁の応力が0.5割前後、主桁のたわみは全体的に1～2割減少し、床版の相対たわみも3～4割減少した。

- ② 対傾構取付け部の応力は施工の前後とも発生値が小さく、改良効果を評価するほどのものではなかった。

- ③ 主桁の上下フランジとウェブの両面に貼付したひずみゲージの出力から中立軸位置を求めた結果、図-3.10のようにプレキャスト床版への打替えによって中立軸は上方へ約7.5cm上昇した。本橋は合成桁ではないが、道示の床版の有効幅の規定に従って合成桁としての中立軸位置を概略計算で求めたところ、同図内に示すように計算値と実測値は比較的良く一致した。¹²⁾

(3) 新設プレキャスト床版の挙動

新設されたプレキャスト床版については、④床版下面のスキンプレート溶接部近傍の応力、⑤床版の内部応力の分布、⑥主桁とプレキャスト床版の合成作用を、20トン荷重車の静的載荷試験によって確認した。その結果を以下に説明する。

- ① B橋は曲率半径300cmの曲線橋である上、横断勾配も9%と大きいため、プレキャスト床版も予め工場内で所定の形状に調整されて製作されている。また、円筒形ジベルを溶植した床版下面のスキンプレートについては、室内疲労試験により十分な疲労強度を有することが確認されている。しかし床版パネルを接合するため現場溶接されたスキンプレートにはどのような応力が発生するのか不明であった。スキンプレート溶接部の下面にひずみゲージを貼付し、橋軸及び橋軸直角方向の応力を測定した結果、図-3.11に示すように後輪荷重8tを直上に載荷した場合でも発生応力は1 kg f/

表-3.5 B橋における主桁の応答値比較

測定項目	応力(kg f/mm ²)			たわみ(mm)					
	主桁下フランジ			主桁のたわみ			主桁のたわみ差		
	施工前	施工後	変化率(%)	施工前	施工後	変化率(%)	施工前	施工後	変化率(%)
A1主桁	0.80	0.78	98	1.28	1.14	89	0.63	0.60	95
ST1縦桁	—	—	—	1.67	1.53	92			
A2主桁	1.45	1.43	99	1.91	1.74	91	0.42	0.42	100
ST2縦桁	—	—	—	1.85	1.63	88			
A3主桁	1.11	1.07	96	1.43	1.32	93	0.71	0.70	99
ST3縦桁	—	—	—	1.08	0.94	87			
A4主桁	0.44	0.36	82	0.78	0.62	79	—	—	—

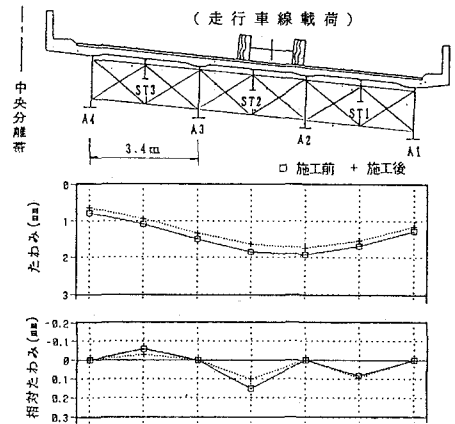


図-3.9 B橋におけるたわみ分布の変化

表-3.6 B橋における垂直補剛材応力の変化
応力単位(kg f/mm²)

主桁 縦剛材位置	A 1 主桁	A 2 主桁		A 3 主桁		A 4 主桁
	G 1	G 2	G 3	G 4	G 5	G 6
施 工 前	-1.3	0.7	0.5	-0.3	0.3	-0.5
施 工 後	-0.6	0.9	1.0	-0.0	0.1	-0.3
変 化 率 (%)	41	133	200	-6	45	74

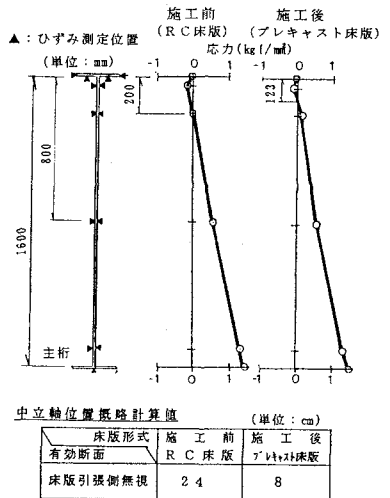


図-3.10 B橋における中立軸の移動

mm以下で、疲労寿命が問題となるような応力は測定されなかった。

- ② プレキャスト床版の内部コンクリートの応力分布を知るため、床版製作時に埋込式ひずみ計を予め内部に埋込み、断面内の応力を測定した。測定断面は設計スパン中央に当たる主桁と縦桁の中間位置とし、荷重車の後輪(8 t)を直上に静載荷した。その結果、図-3.11に示すように床版コンクリートとスキンプレートが一体化した挙動を示し、断面全体で

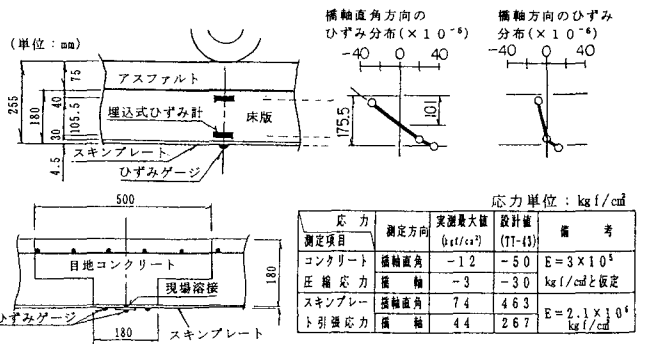


図-3.11 プレキャスト床版に生じる応力(8トンの輪荷重載荷時)

純曲げに近い応力分布になることが確認できた。また、8トンの輪荷重載荷によってコンクリート圧縮縁に生じる応力は、設計応力をかなり下回るものであった。

- ③ B橋は非合成連続橋であるが、非合成であっても連続橋の場合には供用開始直後は合成桁に近い挙動を示すことが一般に知られている。その状況を確認する目的で供用前に荷重車の載荷試験を行い、主桁と床版のひずみ分布から、断面の応力分布を求めたところ、図-3.12に示すようにプレキャスト床版と主桁は比較的一体化した挙動を示すことが確認できた。¹³⁾

3.4 I形鋼格子床版による打替えを行ったC橋の改良効果

(1) 施工中の挙動

I形鋼格子床版は通常グレーチング床版とも呼ばれ、打替えに用いられる床版の形式としては非常に採用実績の多い床版である。このためI形鋼格子床版を採用したC橋においては、床版そのものの挙動測定は省略し、主桁構造を中心にして施工中の挙動測定と改良効果の確認を行った。

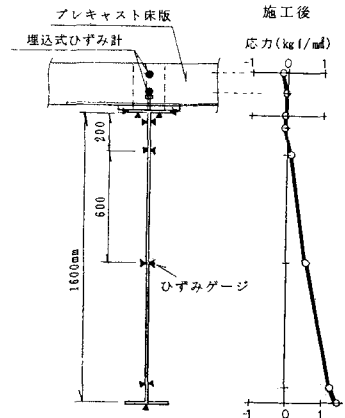


図-3.12 プレキャスト床版と主桁の合成作用

C橋はスパン約40mの単純活荷重合成桁で、施工はA橋、B橋とは異なり、全面通行止のもと全幅一括施工形式で行われた。主桁構造については、端部にブラケットを付ける等の補強が行われた他、大きな構造変更はなかった。施工中のインターバル測定結果を図-3.13に示し、主な測定結果を以下に説明する。

- ① 施工中の橋梁死荷重の増減に伴い、主桁のたわみは大きく変化した。RC床版を全て撤去した時の主桁の浮上がり量は最大10～12cmで、これは等スパンのA橋(半幅施工)の外桁の浮上がり量と等しい。また、たわみの変化量は死荷重の変化量にほぼ比例し、格子計算によるカンバー変化の計算値とも良く一致した。施工後は橋梁死荷重が打替え前に比べて14%増加し、測定の結果、施工後の主桁のたわみは施工前より2cm下方に沈下した。
- ② 主桁のたわみの増減に伴い、各主桁の応力もほぼ同じ傾向で増減した。RC床版を全て撤去した時、主桁上フランジの圧縮応力は約20 kgf/mm²、下フランジの引張応力は約10 kgf/mm²低減された。施工完了後は、主桁フランジの引張応力は施工前に比べて4～9 kgf/mm²増加した。
- ③ 対傾構取付け部の応力は、床版撤去に伴って圧縮側へ変化し、その後死荷重が増加するに従って徐々に引張側へ変化した。応力の変化量は対傾構取付け部によってバラついており、最大変化量は20 kgf/mm²足らずであった。
- ④ 施工の前後は、日中の温度変化が主桁のカンバー変化に及ぼす影響はあまりないが、RC床版が撤去された状態においてはこれより若干日変化量が大きくなった。
- ⑤ 施工中の重機の乗載が各部位の挙動に及ぼす影響は、死荷重変化の影響に比べて非常に小さなものであった。

(2) 改良効果

B橋と同様に施工の前後において20トン荷重車の静的載荷試験を行い、改良効果を求めた。スパン中央

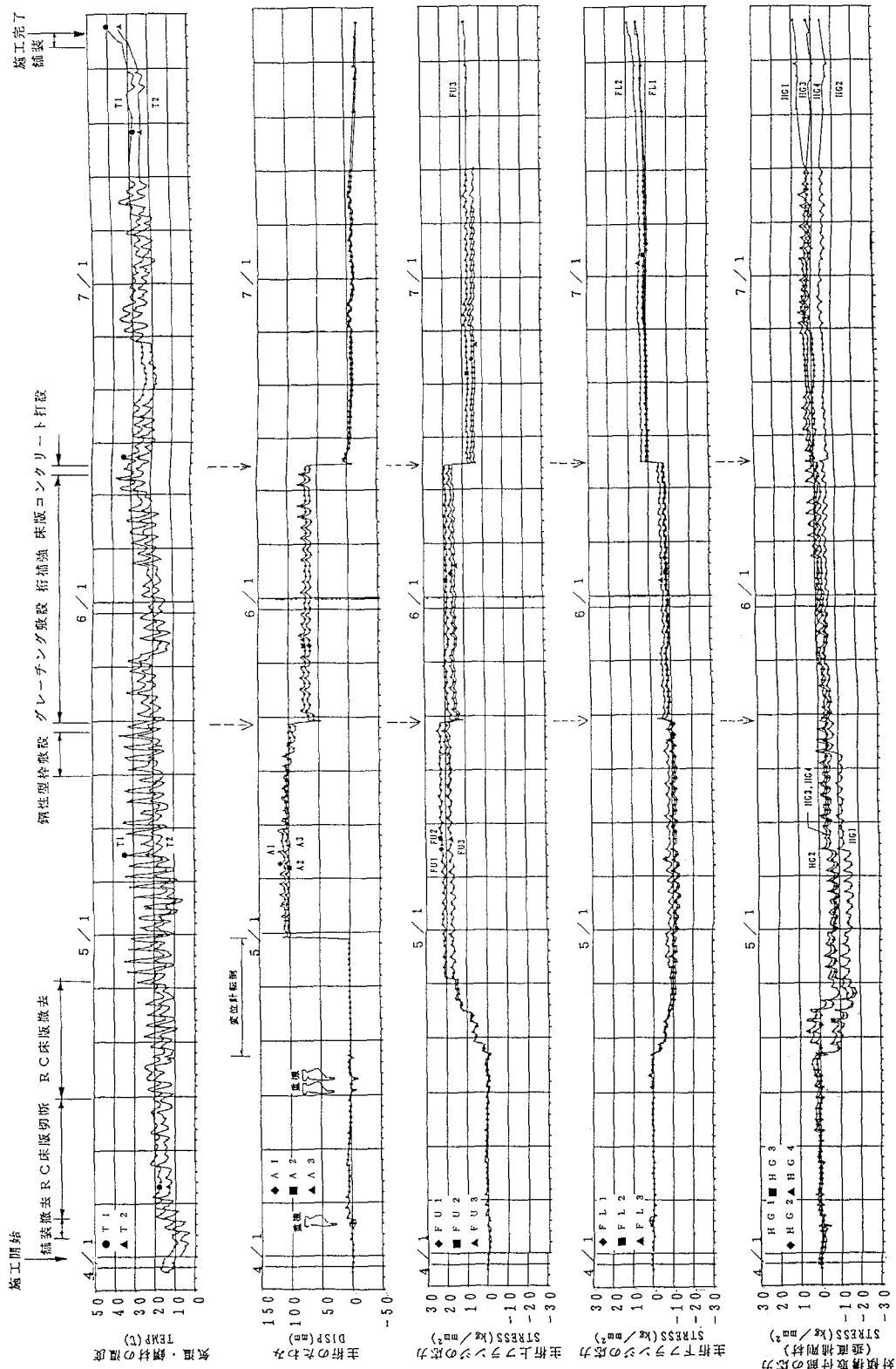


図-3.1.3 C橋 インターバル測定結果(3時間毎のデータープロット)

部の測定断面直上に後輪を載荷した時に生じる各部位の最大値を用いて整理し、その結果を表－3.7、図－3.14及び表－3.8に示す。主な改良効果は次のとおりである。

- ① R C床版とI形鋼格子床版の厚さはともに19cmであるが、I形鋼格子床版の断面剛性をR C床版厚に換算した場合は約21cm厚相当になる。損傷したR C床版がI形鋼格子床版によってリフレッシュされた結果、主桁のたわみは全体的に1～2割減少し、主桁のたわみ差も2～3割減少した。また、縦桁位置の床版の相対たわみも載荷点下で3割減少する等、活荷重に対する応答が著しく改善された。
- ② 対傾構取付け部の応力は、施工前の状態で最大約3 kgf/mm²程度であったが、施工後は各部位の応力がそれぞれ約半減し、著しい改良効果が見られた。
- ③ 全面打替え後は、図－3.15のように主桁の中立軸が大幅に上昇する測定結果が得られた。しかし、施工後はウェブ上方の中立軸位置近傍での応力が多少乱れた傾向が見られ、合成桁としての中立軸位置の概略計算とは大きく異なった。

4. FEM計算による挙動解析結果

4.1 概要

床版の劣化や全面打替えによる床版剛性の変化が、橋梁の全体挙動及び疲労損傷を生じている対傾構取付け部の応力に及ぼす影響等について、実測により検討した内容を前章で述べた。これらの実測結果をさらに一般的なものとし、鋼・コンクリート合成構造としての鋼橋の設計や、今後の同種の補修補強工事の計画に資するため、実測を行った各橋梁に対してFEM解析を行った。

ここでは、半幅施工でプレキャスト床版に打替えた4径間連続のB橋の解析結果を説明する。

4.2 解析方法

(1) 全体構造のモデル化

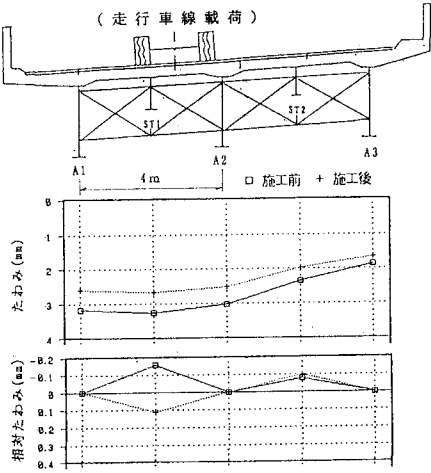
ここで用いた解析方法は、床版を板、主桁及び対傾構を偏心を有する補剛材とみなし、橋梁全体を補剛版として2次元的にモデル化して解析するものである。すなわち、対象橋梁全体を床版は薄板要素、主桁は偏心骨組要素、対傾構は対傾構要素により表す。モデル化に当たって、偏心骨組要素及び対傾構要素の節点は偏心を考慮せず直接床版を表す薄板要素の節点位置に配置し、偏心は要素剛性評価の段階で算入する。このように橋梁をモデル化し、与えられた荷重条件及び拘束条件のもとに解析を行い対傾構の部材力を求めるものである。この方法についての詳細な解析手順は参考文献を参照されたい。¹⁴⁾

(2) 要素分割及び載荷位置

C橋の要素分割と載荷位置を図－4.1に示す。R C床版とプレキャスト床版ともに要素分割は同じである。また、載荷位置と載荷荷重はB橋の載荷試験に用いた荷重車と同様とした。

表－3.7 C橋における主桁の応答値比較

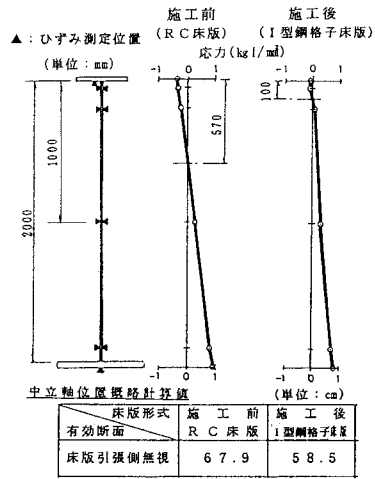
測定項目 主桁	応力(kgf/mm ²)		たわみ(mm)							
	主桁下フランジ		主桁のたわみ		主桁のたわみ差		床版の相対たわみ			
	施工前	施工後	施工前	施工後	施工前	施工後	施工前	施工後	施工前	施工後
A 1 主桁	0.95	0.80	84	3.17	2.61	82	0.14	0.09	81	0.16
ST 1 縦桁	—	—	—	3.26	2.67	82	—	—	—	—
A 2 主桁	0.92	0.84	91	3.03	2.52	83	—	—	—	—
ST 2 縦桁	—	—	—	2.37	1.98	84	—	—	—	—
A 3 主桁	0.44	0.44	100	1.86	1.64	88	1.17	0.88	70	-0.08
									-0.10	—



図－3.14 C橋におけるたわみ分布の変化

表－3.8 C橋における垂直補剛材応力の変化

主桁 対傾構取付け部	応力単位(kgf/mm ²)			
	A 1 主桁 G 1	A 2 主桁 G 2	G 3	A 3 主桁 G 4
施工前	-3.0	-2.2	2.2	-1.1
施工後	-1.2	-1.2	0.9	-0.5
変化率(%)	41	54	41	44



図－3.15 C橋における中立軸の移動

(3) 解析ケース

解析を行った施工状態及び荷重条件は、表-4.1に示す4ケースとした。この内、解析ケースB2は荷重を載荷せず、RC床版を半幅撤去した時の死荷重の減少分を除荷荷重として上方へ負載させ、床版撤去の影響を見たものである。解析ケースB3は走行車線側のRC床版が半幅撤去された状態に対し、追越車線側に荷重を載荷して工事車両が通過したケースを想定したものである。解析に当たっては、版の弾性係数を $2.0 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比を0.16とした。

4.3 解析結果

各解析ケースに対する解析結果として、断面のたわみ分布と対傾構部材の軸力を、B橋での静的荷重試験の実測結果と合わせて図-4.2に示す。

表-4.1 解析ケース

解析条件	構造条件		載荷条件
ケース名	鋼桁部	床版	
B1	既設構造	全幅RC床版	追越車線載荷
B2	"	半幅RC床版	半幅RC床版撤去
B3	"	"	追越車線載荷
B4	"	全幅プレキャスト床版	"

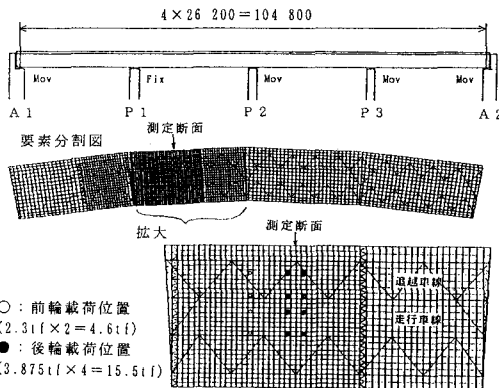


図-4.1 C橋の要素分割と載荷位置

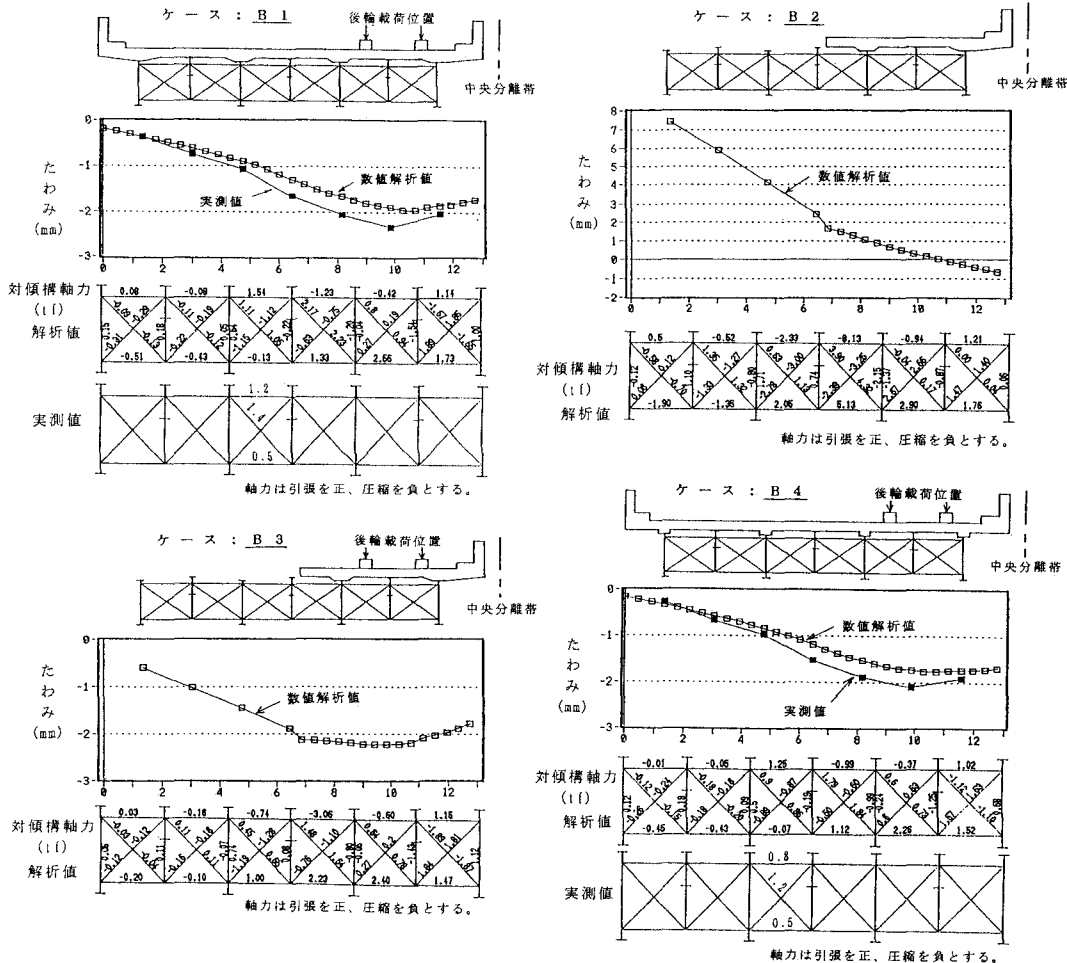


図-4.2 C橋に対するFEM解析結果

主な解析結果は次のとおりである。

- ① 施工前後の解析ケース B 1, B 4 を比較すると、主桁のたわみはプレキャスト床版へ打替えた後の方が減少しており、これは実測値の傾向と同じである。また、解析値は実測値より若干小さいが、両者は比較的良く一致している。対傾構の部材軸力についても微小な軸力を除き、1 トン前後の部材軸力については解析値と実測値は良く一致している。
- ② R C床版を半幅撤去した解析ケース B 2 については、主桁の最大浮上り量は 7.5 mm となっている。実測では停電によりこのケースに相当する一期施工時のデータが得られていないが、二期施工時の追越側床版撤去時の主桁の浮上り実測値が 12 mm 程度であることを考慮すると、解析値は実測値に比べて多少小さい値ではないかと推定される。断面のたわみ分布から、床版切断位置を境界にして床版を撤去した側の主桁が比較的急な勾配で浮上る傾向が見られる。対傾構部材の軸力については、床版切断位置の直下付近の上・下支材及び斜材で 4～8 トンに及ぶ大きな軸力変化を生じている。
- ③ 床版が半幅だけ撤去された状態に対し、追越車線側の R C床版上に載荷したケース B 3 においては、主桁の最大たわみ量 2.2 mm が得られている。この値は施工前に行った静的載荷試験で得られた実測最大値 1.9 mm と比較すると、床版が半幅になっても生じるたわみは若干大きい程度である。対傾構の軸力については、②で述べた上支材の最大軸力 8 トンに対し、載荷による軸力 3 トンが加わり、施工前に比べて合計 11 トン近く圧縮力が増加する傾向が見られる。

5. まとめ

これまでに述べてきた全面打替え工事に関する実橋測定結果及び F E M 解析結果をとりまとめ、以下に示す。さらに今後検討すべき課題についても若干触れておく。

(1) 全面打替えによる改良効果の測定結果

- ① 劣化損傷の進んだ R C床版を各種新設床版(鋼床版, R Cプレキャスト床版, I 形鋼格子床版)で打替えたことにより、主桁との合成作用で橋桁全体の剛性を高めることができた。その結果、活荷重に対する主桁等の負担が低減された。また、耐久性においても橋梁によっては疲労き裂の発生が見られる対傾構取付け部の応力を 1/2 以下に低減する等、著しい改良効果が期待できる。
- ② 橋梁死荷重の増減が主桁の挙動に及ぼす影響を、施工期間中の長期計測によって明らかにすることができた。鋼床版による全面打替えでは死荷重が減少するため主桁の応力が軽減されることが確認され、これは付帯構造物の増設で応力的に余裕が少なくなっている鋼橋の現状に対して有効な工法であると考えられる。これに対し、プレキャスト床版や I 形鋼格子床版では死荷重が増加し、その程度に応じて主桁の死荷重応力も増加した。
- ③ R C床版撤去等の施工中の死荷重変化に伴う主桁のキャンバー変化は、単純桁で大きく連続桁ではこれに比してかなり小さい。しかし、R C床版の撤去作業時において、施工用の重機等が乗載した影響の表れ方は連続桁の方が著しい。すなわち、単純桁では重機の乗載が主桁のたわみ量に及ぼす影響は死荷重変化による影響に比べて非常に小さいが、連続桁では重機乗載の影響が大きく表れる。
- ④ 鋼床版及び R Cプレキャスト床版については、施工後に荷重車の載荷試験を行い、主桁との合成作用及び床版各部の応力・変形状態を明らかにし設計値と比較した。合成桁に採用された鋼床版は、主桁と非常に良く一体化した合成作用を示し、非合成桁に採用されたプレキャスト床版においても、新設の状態では合成桁に近い挙動を示すことが確認できた。

(2) F E M 解析結果について

- ① 施工前の R C床版及び施工後のプレキャスト床版それぞれの床版を有す構造について解析を行った結果、実測値と良く一致した解析結果が得られた。
- ② 半幅施工時の安全性を推定する目的で、R C床版が半幅だけ撤去された構造に対して、他の半幅に車両が乗載した時の状態を想定して解析を行った。その結果、床版が半幅であっても床版上に荷重が載荷される限り、床版が撤去されていない状態と大差がないことがわかった。

(3) 今後の課題について

- ① 今回調査対象とした打替え工法・施工形式・橋梁形式に対しては多くの成果が得られたと考えるが、今後の経済的で合理的な対策検討に当たっては他の全面打替え工法、あるいは交通規制の必要がない床版下

面からの補修・補強方法等についても検討が必要と思われる。

- ② 鋼床版は床版下面から目視等による床版全体の点検が可能であるが、プレキャスト床版と I 形鋼格子床版は下面が薄鋼板で覆われているため、薄鋼板の点検はできても内部コンクリートの点検が困難である。このため、プレキャスト床版と I 形鋼格子床版については、雨水の侵入・滞水に対する非破壊検査等の維持管理手法について検討が必要と思われる。また、耐久性を確認する意味で、追跡調査の継続が重要であろう。
- ③ 工事が比較的山間部の橋梁で実施されたこともあって、供用後の振動や騒音に関する改良効果については検討から除外した。架設地点によっては、このような課題を含めた検討も必要と思われる。また、今回の工事では、施工後に対傾構取付け部の応力レベルが著しく改善されたため、その部位の疲労寿命に関する検討を省略した。しかし、工事条件によっては頻度測定等による寿命評価も必要と思われる。

6. あとがき

東名高速道路において初めて大規模に実施された全面打替え工事は、順調に進捗し無事完了した。今回現場で実施した施工期間中の各種調査・測定結果から、各種全面打替え工法の確実性と安全性が確認でき、今後の同種橋梁への適用の見通しが得られたと考える。しかし、今後も増加する一方の交通量とそれを支える基幹路線としての機能を維持するためには、それぞれの全面打替え工法だけでなく、多方面からの総合的な技術的検討がますます必要になって来るとと思われる。ここでは調査結果の一部しか紹介することができなかったが、このような調査・検討が今後の鋼橋の維持管理の合理化に向けて寄与できればと願う次第である。

本論文は、「鋼橋改良検討委員会」（委員長：横浜国立大学 池田尚治教授）の御指導のもとに実施した検討成果の一部をとりまとめたものであり、FEM解析では武蔵工大 増田陳紀助教授のご協力を賜った。本論文作成に当り、御指導・御協力をいただいた関係者の皆様には紙面を借り深堪なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 西川：プレートガーター橋の疲労損傷例，道路，1985-7
- 2) 日本道路公団試験所：道路橋鉄筋コンクリート床版の損傷機構に基づく健全度判定と補修工法の選択，試験所技術資料第413号，1985-3
- 3) 建設経済局：機会施工合理化推進調査報告書，橋梁の急速施工床版，S60-3
- 4) 日本道路公団 東京第一管理局：鋼橋の維持補修に関する検討報告書，1991-3
- 5) 日本道路公団 東京第一管理局：鋼橋の維持補修に関する検討報告書，1992-3
- 6) 日本橋梁建設協会：既存床版工法調査書，1989-10
- 7) 中井：プレキャスト床版合成桁橋の設計・施工
- 8) 石井・井口・谷倉・竹之内：鋼床版を用いた鋼橋RC床版の全面打替えによる改良効果，土木学会第47回年次学術講演会，1992-9
- 9) 石井・井口・竹之内・谷倉：鋼・コンクリート合成床版を用いた鋼橋RC床版の全面打替えによる改良効果，土木学会第47回年次学術講演会，1992-9
- 10) 竹之内・谷倉・古川・三木：実交通荷重による橋梁の応力及び変形の測定方法，構造工学論文集，vol.32A，1986-3
- 11) 竹之内・谷倉・高倉・三木：実交通荷重による鋼板桁橋の応力変形挙動，構造工学論文集，vol.33A，1983-3
- 12) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説
- 13) 土木学会：鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン
- 14) 増田・三木他：合成鋼桁橋の対傾構部材力に及ぼす床版損傷補修対策の影響，構造工学論文集，vol.34A，1988-3

(1992年9月21日受付)