

プレファブ鋼床版によるRC床版架け替え時の桁橋の全体挙動

STATICAL BEHAVIOR OF PLATE GIRDER BRIDGES UNDER REDECKING

中村聖三*, 山尾敏孝**, 川井 豊***, 崎元達郎****

by Shozo NAKAMURA, Toshitaka YAMAO,

Yutaka KAWAI and Tatsuro SAKIMOTO

Statical behavior of plate girder bridges under redecking is investigated by statical loading tests and finite element analysis. In a series of statical loading tests, some loading and structural conditions which may occur when the bridge is partially open to traffic during redecking are considered. Many useful informations for redecking design are derived from the results of these tests. Also in order to analyze the statical behavior of plate girder bridges under redecking, a finite element model is developed and the results of analysis are compared with the test results. Both of displacement and stress derived from these analyses show good agreement with those of test.

1. まえがき

交通量の増加や走行車両の大型化に起因するRC床版の早期劣化の対策として、近年種々の補修・補強工法が開発されている¹⁾。これらの補修・補強工法の中でも、損傷を受けたRC床版を鋼床版に置き換える工法が死荷重の軽減と耐久性向上の観点から注目され、幾つかの実施例も報告されている^{2)~9)}。

著者らはこれまでに、製造コストや製作精度の確保の点で有利であり、主桁や支持横桁などとの接合部の構造が比較的単純であることなどの理由から、RC床版架け替え用のプレファブ鋼床版として、縦リブ主体のBattledeck Floor Typeの鋼床版¹⁰⁾を選び、その構造詳細および架け替え工法に関して研究を実施してきた^{11), 12)}。

一方、RC床版の劣化が著しいような橋梁は交通量の非常に多い橋梁であり、床版を架け替えるに際しても、できるだけ道路交通を阻害しないことが望まれる。したがって、例えば、2車線以上を有する橋梁の場合、床版架け替え中も最低1車線は確保しなければならない状況も生じ得るものと思われる。このような状況に対して、鋼床版による架け替え工法を適用する場合、RC床版が一部撤去された状態あるいは一部鋼床版で置換された状態に荷重が作用した場合に鋼桁がどのような全体挙動を示すかを明らかにする必要がある。しかし、分割施工で床版を架け替える際の鋼桁の全体挙動を、詳細に検討するための手法が確立されているとは言い難い。

* 工修	川崎製鉄(株)	鋼構造研究所土木建材研究室	(〒281 千葉市長沼町351)
** 工博	熊本大学助教授	工学部土木環境工学科	(〒860 熊本市黒髪2-39-1)
*** 工博	川崎製鉄(株)	土木技術部鉄構海洋技術室	(〒100 千代田区内幸町2-2-3)
**** 工博	熊本大学教授	工学部土木環境工学科	(〒860 熊本市黒髪2-39-1)

本研究は、上記観点から、床版架け替え時の全体挙動や応力状態などの挙動特性を解析する一手法を提案し、並行して実施した模型実験により本手法の妥当性について検討した結果を報告するとともに、床版架け替え時の挙動に関して模型実験より得られた知見を提示するものである。

2. 解析法の概要

筆者らは、鋼桁とRC床版からなる合成I桁橋の全体挙動を、横桁や対傾構の剛性ならびに床版と鋼桁のズレを考慮して解析できる手法の開発を行ってきた¹³⁾。しかし、この手法では対傾構や上下横構の取扱いが複雑となることから、自由度を少なくして効率よく、かつ精度よく解析を行うことを主眼として、ここでは、プレートガーダーをひずみエネルギー等価の手法によりトラスに置換する方法を用いて、架設途中の挙動を解析することとする。なお、主桁以外の部材については、対傾構をトラス要素、支持横桁をはり要素、床版を板要素でモデル化する。

主桁をトラス置換して解析する手法については、文献14)において上下非対称I形断面はりおよび箱形断面薄肉はりを対象として、その妥当性が検証されており、メインガーダーとそれを支えるバックガーダーからなるクレーンガーダーの解析に適用されている。

本手法は、図-1に示すような1パネルを基本として、プレートガーダーの曲げとせん断によるひずみエネルギーがトラスの軸力によるひずみエネルギーに等しくなるように、置換トラス各部材の断面積を求めるものであり、各部材の断面積は次式で表される。

$$\text{上弦材: } A_{cc} = \frac{I}{(h_c + h_t) h_c}$$

$$\text{垂直材: } A_v = \frac{6 A_w G}{\mu E \tan \theta}$$

$$\text{下弦材: } A_{ct} = \frac{I}{(h_c + h_t) h_t}$$

$$\text{斜材: } A_d = \frac{3 A_w G}{2 \mu E \sin \theta \cos^2 \theta}$$

これらの式を求めるにあたり、プレートガーダーの曲げひずみエネルギーを置換トラスの上下弦材の軸ひずみエネルギーと等置し、せん断ひずみエネルギーと垂直材および斜材の軸ひずみエネルギーを等置している。なお、置換トラスにおいて斜材と垂直材の受け持つ軸ひずみエネルギーは等しいものと仮定している。

3. 静的載荷試験

3.1 試験体

RC床版をプレファブ鋼床版に架け替える模擬実験であることから、本来はRC床版を有する模型桁を用いるべきであるが、模型桁にした場合の床版厚が薄く構造体としてのバランスが悪いこと、床版の打設および撤去を載荷装置内で行うことが困難なことなど、諸般の理由により鋼床版をRC床版に見立てて実験を行うこととした。

試験体は、荷重分配対傾構を有する3主桁の桁橋を基本モデルとし、縦リブ主体のバトルデッキ型プレファブ鋼床版を高力ボルトを用いて着脱できるようにした。また、一次施工

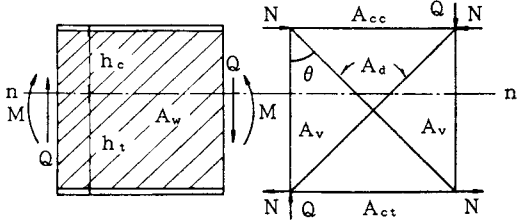


図-1 主桁のトラス置換

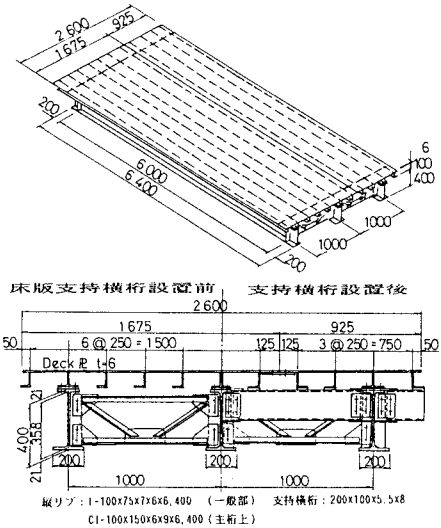


図-2 試験体の形状・寸法

・二次施工の施工段階を構造的に模擬できるように、鋼床版パネルは橋軸方向に2分割とした。さらに、従来用いられている直交異方性版タイプの鋼床版における横リブに相当する支持横桁は、荷重分配対傾構の中間にボルトで着脱できるような構造とし、支持横桁の荷重分配効果も調査できるよう配慮した。試験体の形状・寸法を図-2に示す。

3.2 試験方法

本実験では、施工中における主構造の全体挙動および各部の応力分布を調査することを目的としているため、施工中に現れる最も危険な荷重条件を想定し、支間中央断面の中桁（GB）上および主桁間隔中央に一点もしくは二点の荷重を行った。この際、輪荷重幅を考慮し、デッキプレート上には硬質ゴムを介した載荷板を用い、300×120mmの範囲で載荷した。なお、載荷には±100tonf電気油圧式サーボ型疲労試験機を用いた。

載荷ケースを一覧表にして、表-1に示す。

実験は施工手順を考慮し、表-2に示すようなSTEP①～STEP⑦の7段階について実施し、主桁、鋼床版、および支持横桁各部の応力をひずみゲージにより、主桁の鉛直変位および主桁と鋼床版との水平ズレをそれぞれ電気式変位計およびキャンチレバー式変位計により、測定・記録した。なお、表-2には各実験ステップにおける載荷ケースおよび調査目的も併せて示した。

表-1 載荷ケース一覧表

	最大 荷重 (tf)	載 荷 状 態
CASE I	15	
CASE II	7	
CASE III	10	
CASE IV	15	
CASE V	7	

表-2 実験手順

	調査項目	載荷
STEP①	・主桁の剛性 ・対傾構の 荷重分配	Ⅰ Ⅲ
STEP②	・支持横桁の 荷重分配	Ⅰ Ⅱ Ⅲ
STEP③	・床版の 合成効果 ・荷重分配 の変化	Ⅰ Ⅱ Ⅴ
STEP④	・一次施工時 の挙動	Ⅰ Ⅱ Ⅴ
STEP⑤	・中間状態 での挙動	Ⅰ Ⅱ Ⅴ
STEP⑥	・二次施工時 の挙動	Ⅰ Ⅱ Ⅴ
STEP⑦	・完成時の挙動	Ⅰ Ⅱ Ⅴ

3.3 試験結果および考察

1) 対傾構、支持横桁、および床版の荷重分配作用

STEP ①、STEP ②、およびSTEP ③の実験結果を比較することにより、本試験体における対傾構、支持横桁、および床版の荷重分配作用について考察する。

荷重分配効果が最も比較し易い実験結果として、中桁（GB）支間中央点直上に荷重が作用する載荷ケースⅢ（ $P=10tf$ ）について、支間中央断面における鉛直変位の分布を図-3に、主桁の曲げ応力分布を図-4に示す。

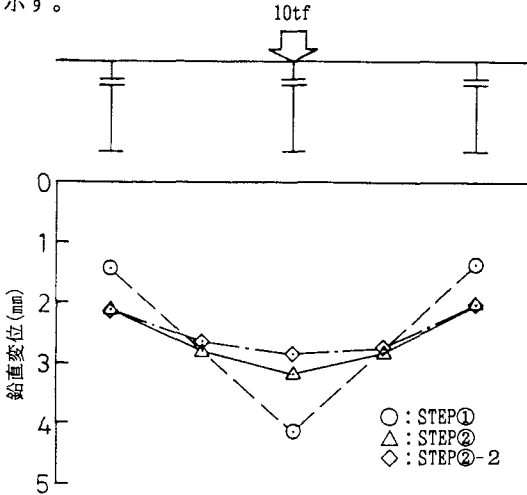


図-3 鉛直変位分布（支間中央断面）

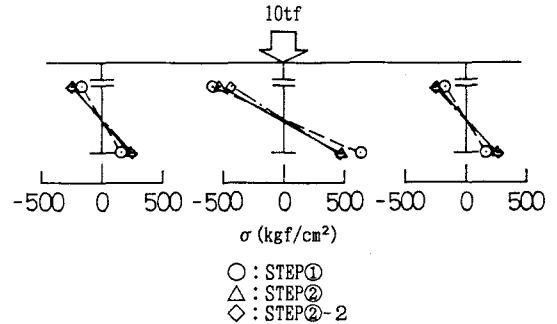


図-4 主桁の応力分布（支間中央断面）

また、表-3は、これらの結果のうち、中桁にのみ注目して鉛直変位および曲げ応力をまとめたものである。同表には、主桁1本のみの状態に同様の荷重が作用したときの支間中央点における鉛直変位および上下フランジの曲げ応力との比も示している。なお、STEP①および②では床版が設置されていないため主桁単体の断面剛性を用いて計算した鉛直変位（ $w=6.90mm$ ）および曲げ応力

（ $\sigma_c=-1,047kgf/cm^2$ 、 $\sigma_t=886kgf/cm^2$ ）に対する比、STEP③では道路橋示方書に従い鋼床版デ

ッキプレートの有効幅を求め、主桁と鋼床版（縦リブについては主桁直上のみを考慮）との合成断面での変位（ $w=2.93mm$ ）および応力（ $\sigma_c=-209kgf/cm^2$ 、 $\sigma_t=611kgf/cm^2$ ）に対する比を示している。

これらの図表から、対傾構、支持横桁、および床版の荷重分配作用が読み取れる。すなわち、対傾構の存在により、中桁直上に作用した荷重の約40%が外桁に分配され、さらに支持横桁を増設することにより外桁に分配される荷重の割合が50~60%まで増加することがわかる。また、本実験で用いた鋼床版パネルが縦リブ主体であることから、橋軸直角方向の曲げ剛性をほとんど持たないため、床版本体は荷重分配に寄与していない。しかし、床版にRC床版が用いられている場合は橋軸直角方向にかなりの曲げ剛性を持つため、床版も荷重分配作用に寄与するものと考えられる。

また、主桁間を横桁で連結して格子桁とする場合、一般に隣接する横桁のフランジをテンションプレートで連続させ、モーメントを伝達するような構造とする（STEP②-2）が、テンションプレートがない場合（STEP②-1）でもかなりの荷重分配効果を発揮することがわかる。これは、横桁のウェブがかなり剛に主桁ウ

表-3 GB桁の鉛直変位および曲げ応力

	鉛 直 変 位 (mm)	上フランジ応力 (kgf/cm ²)	下フランジ応力 (kgf/cm ²)
STEP ①	4.12 (0.60)	-592 (0.56)	629 (0.71)
STEP ②-1	3.18 (0.46)	-543 (0.52)	493 (0.56)
STEP ②-2	2.83 (0.41)	-426 (0.41)	464 (0.52)
STEP ③	1.42 (0.48)	-122 (0.58)	344 (0.56)

エブに連結されていることに起因するものと考えられる。

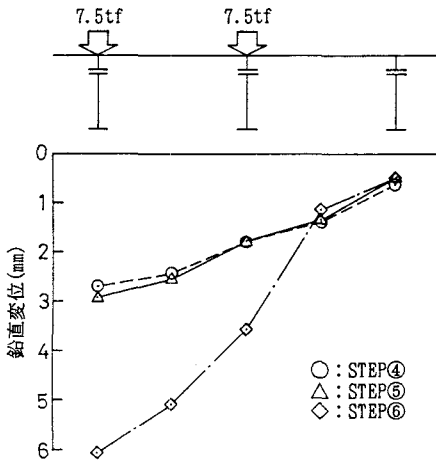
以上述べたように、本工法により損傷したRC床版をプレファブ鋼床版に架け替えることにより、荷重分配効果が改善され、主桁本体にも好ましい。しかし、対象とする橋梁が既に十分な荷重分配作用を有している場合、当然のことながら大きな効果は期待できない。

2) 施工中の挙動

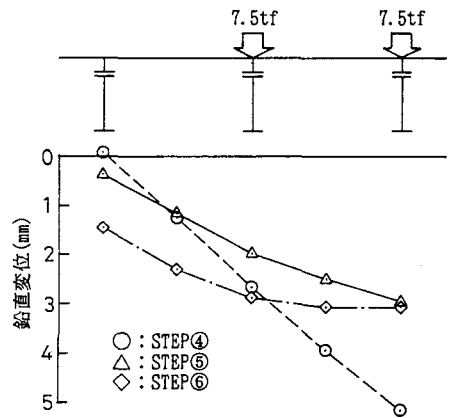
前述したように、本工法では支持横桁を増設するため、荷重分配作用が大きくなる。これは、完成時においては主桁の応力状態が改善されるなど、好ましいことであると考えられるが、施工途中に部分的に交通解放を行う場合、横桁を介して床版のまだ設置されていない主桁に荷重が伝達され、当該主桁が厳しい応力状態になることが懸念される。

ここでは、そのような懸念に対し、今回実施した一連の実験において施工途中の状態を想定したSTEP④～⑥について、支間中央断面の鉛直変位および応力の分布に着目し、検討を加える。

STEP④～⑥における支間中央断面での鉛直変位分布を載荷ケースⅠおよびⅣについて図-5に示す。これらの図において、載荷ケースⅠのSTEP⑥や載荷ケースⅣのSTEP④で、同じ載荷ケースの他のSTEPに比べ鉛直変位が特に大きくなっているが、これは鋼床版パネルが設置されていない主桁の直上に荷重が作用しているためである。このような載荷状態が施工中発生することは通常考えられないため、問題点として取り上げる必要はないものと考えられる。

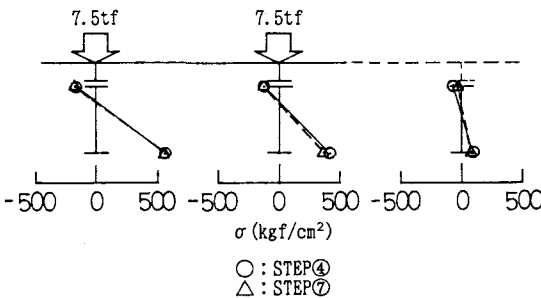


(a) CASE I

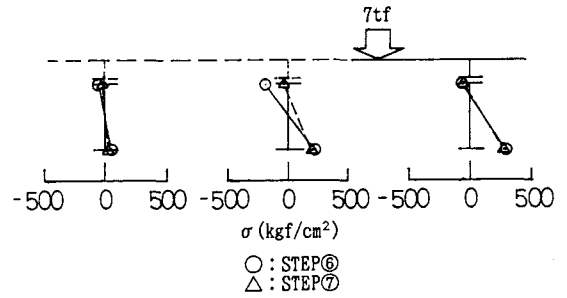


(b) CASE IV

図-5 各載荷ケースの鉛直変位分布 (支間中央断面)



(a) CASE I



(b) CASE IV

図-6 主桁の応力分布 (支間中央断面)

一方、施工中の交通解放により発生すると考えられる荷重状態は、今回の実験の場合、STEP④における載荷ケースⅠ～Ⅲ、STEP⑤の載荷ケースⅠ～Ⅴ、あるいはSTEP⑥の載荷ケースⅤである。これらのうち、床版のない主桁が最も厳しい状態におかれると考えられるSTEP④の載荷ケースⅠおよびSTEP⑥の載荷ケースⅤについて、主桁の応力分布を示したのが図-6である。同図には、完成系であるSTEP⑦に同様の荷重が作用した場合の主桁の応力分布も示している。

主桁GA・GB・GCの下フランジに発生している応力は、STEP④の載荷ケースⅠではそれぞれ570kgf/cm²、416kgf/cm²、89kgf/cm²、STEP⑥の載荷ケースⅤではそれぞれ52kgf/cm²、219kgf/cm²、292kgf/cm²であり、床版のない主桁に発生する応力は他の主桁の応力に比べ、かなり小さくなっている。また、これらの応力状態は、STEP⑦（完成系）に同じ荷重が作用した場合と大差なく、STEP④のGCおよびSTEP⑥のGBにおいて上フランジの圧縮応力が変化しているだけである。

これは、主桁のみの断面二次モーメント（ $I = 31,062\text{cm}^4$ ）に比べ、鋼床版と合成した場合の断面二次モーメント（外桁：68,779cm⁴、中桁：73,187cm⁴）が大きく2.2～2.4倍となっているため、荷重の大部分を合成断面で受け持つためであると考えられる。

一般に、合成桁橋では床版に主桁の圧縮フランジとしての機能を期待し主桁本体の上フランジは小さいため、例えば主桁間に大きな荷重が作用する場合などに、載荷点に隣接する床版のない主桁の上フランジの座屈が問題になることも考えられるが、本実験結果からみる限り、横桁の荷重分配作用に起因する施工途中の挙動は、特に問題ないと考えられる。

4. 解析手法の妥当性の検討

4.1 解析モデル

解析手法およびモデル化の妥当性を検証することを目的とし、静的載荷試験に用いた試験体を解析対象に有限要素解析を行ない、実験値と比較することとした。解析にあたっては、前述の通り、床版を板要素、主桁・対傾構をトラス要素、支持横桁をはり要素とし、対象条件により全体構造の半分をモデル化した。要素分割は実験と同じ分割ができるように、橋軸方向及び橋軸直角方向ともに10等分とした。解析モデルの一例を図-7に示す。また、今回用いた試験体において、床版と主桁とは高力ボルトで連結されているが、そのズレ剛性を考慮できるように、橋軸方向のせん断力のみを伝えるような結合材で両者を連結した。なお、結合材の剛性は実際の床版と主桁とのズレ剛性を考慮して決定した。

以下に、実験の各STEPごとにモデル化の方法を述べる。

STEP①：主桁と対傾構のみの解析となる

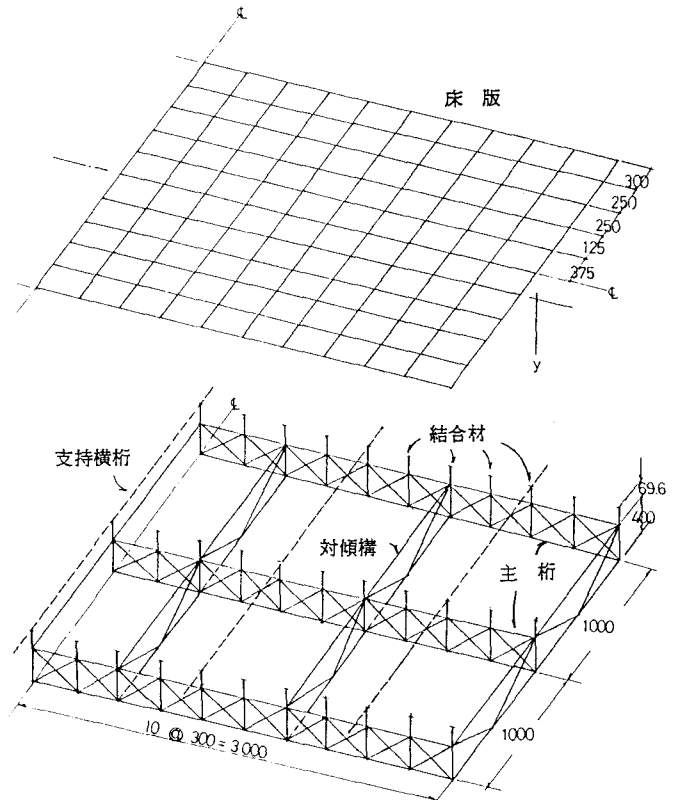


図-7 解析モデルの一例

が、ここでは、床版も一緒につけて解析する。ただし、床版の板厚は主構造に影響がない程度に小さく ($t=0.001\text{cm}$) するとともに、結合材のパネ定数も小さくする。

STEP②：STEP①のモデルに支持横桁を取り付けて解析する。この際、支持横桁は床版と同一平面内に配置する。

STEP③：鋼床版を同じ曲げ剛性を持ち、中立軸の位置が等しくなるような矩形断面に置換し、全体系で解析する。

STEP④：試験体において床版のない部分を、STEP③のモデルで当該部分の板厚を小さく ($t=0.001\text{cm}$) することによりモデル化し、主桁GC上の結合材を除去して解析する。

STEP⑤：床版の不連続部に板厚0の板要素を配置することにより、床版の橋軸直角方向の不連続性をモデル化し解析する。

STEP⑥：STEP④の場合と同様な考え方でモデル化する。板厚を小さくする位置および除去される結合材がSTEP④と異なる。

STEP⑦：STEP③と解析上は同じになる。

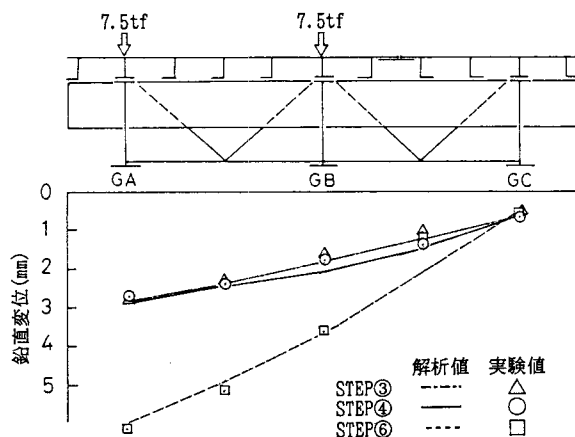
4.2 解析結果と実験値との比較

全ての実験ケースについて解析を行う前に、主桁と鋼床版とを連結する結合材のせん断パネ定数 k を $k=10^4$ (kgf/cm/cm) および 10^5 として、STEP③の荷重ケースⅢを解析した。その結果、表-4に示すように変位・応力ともに実験値は両者の中間的な値となったが、ここでは控えめに見積もって、以降の解析ではせん断パネ定数を $k=10^4$ (kgf/cm/cm) とした。

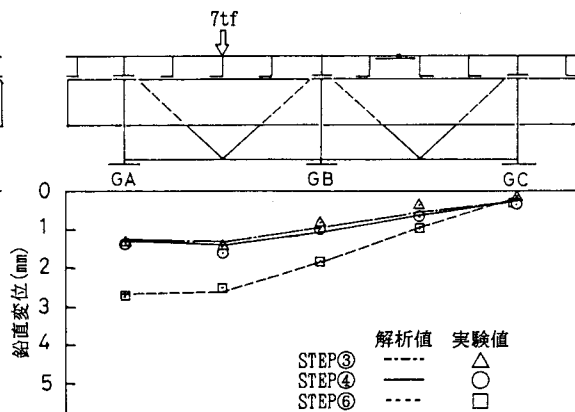
表-4 せん断パネ定数による変位および応力の変化

(a) 変位 単位: mm						
	GA		GB			GC
実験値	0.90	1.32	1.42	1.31		0.94
解析値	$k=10^5$	0.86	1.16	1.31	1.16	0.86
	10^4	1.16	1.31	1.48	1.31	1.16

(b) 応力 単位: kgf/cm^2						
	GA		GB		GC	
	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張
実験値	52	165	122	344	48	158
解析値	$k=10^5$	38	160	92	341	38
	10^4	60	170	166	348	60



(a) CASE I



(b) CASE II

図-8 解析値と実験値との比較 (支間中央断面の変位分布)

図-8には解析結果の一例として、荷重ケースⅠ、Ⅱの場合についてSTEP③、④、および⑥での支間中央断面の変位分布を示す。この例では、荷重ケースⅠのSTEP⑥の場合に主桁GB-GC間の横桁のたわみが実験値と解析値とで多少違っているなど、支持横桁の変位に若干の誤差が目立つが、各STEPとも実験値と解析値とは概ねよい一致を示していると言える。他の荷重ケースについても、ここで示した例と同様にほぼ良好な結果が得られている。

図-9は載荷ケースⅢの場合のSTEP③、④、および⑥での支間中央断面の主桁の応力状態を示したものである。この図からわかるように、主桁の応力についても実験値と解析値とがかなり良く一致している。ただし、表-5に示すように今回の解析値では主桁上フランジの応力が実験値より大きくなっていることが多く、実験ケースによってはかなりの違いがみられる。不完全合成桁においては、主桁上フランジの応力は下フランジの応力に比べせん断バネ定数の大きさに敏感であり、バネ定数が減少するとその応力は増加することから、違いの大きかった実験ケースについては、解析で用いたせん断バネ定数の値が過大評価になっていたと考えられる。また、解析モデルでは支持横桁が主桁と剛結されていることも、実験値と解析値との違いをもたらす原因の一つであると言える。

しかし、全般的にみて変位・応力ともに実験値と解析値とは実用上問題ない精度で一致していると考えられ、本解析法は今回対象としたようなRC床版架け替え時の桁橋の挙動調査にも適用可能であると言える。

5. まとめ

今回実施した一連の研究により得られた知見を以下にまとめる。

- ① BattleDeck Floor Typeの鋼床版により、損傷したRC床版を架け替える場合に増設する支持横桁は、かなり大きな荷重分配作用を有する。今回の実験においては、中桁の直上（支間中央点）に荷重が作用した場合、対傾構によりその約40%が外桁に分配され、支持横桁を増設することにより分配される荷重の割合が50～60%にまで増加した。しかし、荷重分配作用は主桁と横桁との剛比により変化するため、これらの値は不変性を有するものではない。
- ② 主桁間を横桁で連結して格子桁とする場合、主桁をはさんで隣接する横桁のフランジをテンションプレートで連続させ、モーメントを伝達するような構造とするのが一般的であるが、実験結果では、変位・応力ともにテンションプレートの有無による顕著な差は認められなかった。これは、横桁のウェブが剛に主桁ウェブに連結されていることに起因すると考えられ、テンションプレートがない場合でもかなりの荷重分配作用を発揮すると言える。
- ③ 施工中の交通解放により発生すると考えられる荷重状態を模擬した載荷試験でも、応力状態は完成系に同じ荷重が作用した場合と大差なく、床版のない主桁において上フランジの圧縮応力が多少増加しただけであった。増加した圧縮応力も他の主桁に発生する応力に比べると小さく、座屈が問題になるようなことはないと考えられる。
- ④ 床版の架け替え工事中に大きな荷重が作用するのは床版上であり、床版のある合成断面は主桁のみの断

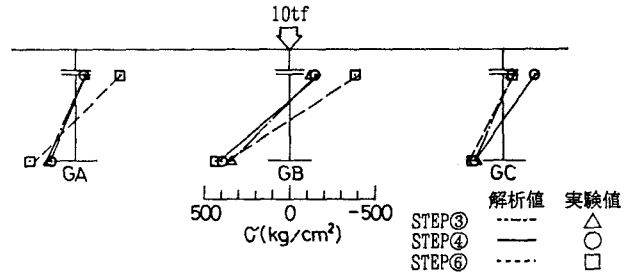


図-9 解析値と実験値との比較（支間中央断面の応力分布）

表-5 解析値と実験値との比較（主桁応力、単位：kgf/cm²）

			GA		GB		GC	
			圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張
CASE①	STEP④	実験値	161	570	119	416	66	89
		解析値	214	563	194	410	90	80
		比	1.33	0.99	1.63	0.99	1.36	0.90
	STEP⑥	実験値	747	822	470	527	26	93
		解析値	815	720	506	448	32	92
		比	1.09	0.88	1.08	0.85	1.23	0.99
CASE②	STEP④	実験値	90	273	60	220	20	21
		解析値	95	251	98	209	27	24
		比	1.06	0.92	1.63	0.95	1.35	1.14
	STEP⑥	実験値	312	343	263	300	2	51
		解析値	365	322	266	236	9	32
		比	1.17	0.94	1.01	0.79	4.50	0.63
CASE④	STEP④	実験値	2	15	140	530	662	693
		解析値	38	23	200	524	691	611
		比	19.00	1.53	1.43	1.01	1.04	0.88
	STEP⑥	実験値	154	171	373	419	168	606
		解析値	154	135	420	373	240	623
		比	1.00	0.79	1.13	0.89	1.43	1.03

面と比較して断面二次モーメントが大きいため、たとえ横桁が十分な荷重分配作用を有しているとしても、剛性の大きい合成断面が作用荷重の大部分を受け持つ。

- ⑤ プレートガーダーをひずみエネルギー等価の手法によりトラスに置換したモデルを用いた有限要素解析結果は、変位・応力ともに実用上問題ない精度で実験値と一致した。したがって、本解析法は今回対象としたようなＲＣ床版架け替え時の桁橋の挙動調査にも適用可能であると言える。

最後に、解析プログラムの開発にあたり、当時の熊本大学大学院生の石井勝敏氏（現 鹿島建設㈱）に協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) (財)首都高速道路技術センター：高架橋床版の打ち替えに関する調査・研究報告書
- 2) Wolchuk, R. : Applications of Orthotropic Decks in Bridge Rehabilitation, Engineering Journal, 3rd Qtr., 1987, pp.113-121
- 3) 渡辺, 城原：兼山橋における既存コンクリート床版の鋼床版による補修、橋梁と基礎、1975. 1.
- 4) 大日方, 森：鋼床版パネルによるコンクリート床版橋の復旧、橋梁と基礎、1985. 4.
- 5) 石川島播磨重工(株)橋梁設計部：建設省中国地方建設局「新観音橋」床版張替工事、石川島播磨技報 第25巻 第5号、1985. 9.
- 6) 切石, 川村, 高橋, 加藤：紅楓橋における鋼床版張替え工法、橋梁と基礎、1989. 6.
- 7) 方波見, 河合, 和田：勝どき橋の補修・補強、橋梁と基礎、1983. 8.
- 8) 石井, 宮崎, 岩井, 大友：若戸大橋の拡幅工事(上)(下)、橋梁と基礎、1989. 12.、1990. 1.
- 9) 福島, 岡, 岩竹, 竹中：名神高速道路蟬丸橋架換え工事－鋼2ヒンジアーチ橋－、橋梁と基礎、1990. 4.
- 10) A. I. S. C : Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridges
- 11) 藤原, 原, 吉田, 川井：ＲＣ床版補修用プレファブ鋼床版に関する基礎実験(その1・その2)、土木学会第43回年次学術講演会概要集、1988. 10.
- 12) 村越, 川井, 吉田, 中村：ＲＣ床版補修用プレファブ鋼床版の実用化実験(その1・その2)、土木学会第44回年次学術講演会概要集、1989. 10.
- 13) 山尾, 崎元, 湯治, 川井：合成Ⅰ桁橋の挙動を求める構造モデルと一解析手法について、構造工学論文集Vol. 35A、1989. 3.
- 14) 山尾, 崎元, 椎原, 河野, 川井：クレーンガーダーのトラス置換による挙動解析、土木構造・材料論文集 第5号、1990. 1.

(1991年9月30日受付)