

## 合成桁RC床版の現状と課題

### Present Status and Problems of Reinforced Concrete Decks of Steel Composite Girders

上阪康雄\*  
Yasuo KOSAKA

\*Dipl.-Ing. 新日本技研(株) 技術部 (〒105-0014 東京都港区芝2-1-23)

Steel composite girder bridges with reinforced concrete deck have been constructed since 1950's in Japan. This type of bridge has been yearly increased until 1964. But then, constructions of composite girder bridges have been reduced gradually. After 1980, even single span bridges are built as non-composite steel girders. For the reason of reducing composite girders, concrete deck damages are reported very often. At that time, concrete decks were designed too thin, and reinforcement steel amount was quite insufficient. And also, steel composite girders were designed very slender, so that thin decks were deformed easily under heavy traffic loading.

Recently, composite girder bridges are considered again as the economical and rational solution. Well-designed concrete decks with waterproofing coat are able to carry heavy traffic for a long time. This paper describes the short history of composite girder bridges, problems of the past and recent time of composite girders, and methods of replacement of concrete decks of composite girder bridges.

key words : composite beam, reinforced concrete deck, replacement of deck

#### 1. まえがき

我が国において、RC床版を有する鋼合成桁の建設は、戦後の1950年代から始まった。建設傾向は、1964年(S.39)に急増したが、徐々に減少し、1980年代になってからは、単純合成桁でさえ、稀にしか建設されない状態であった。

その原因の一つは、過度にスレンダーな合成桁を追求したために、主桁の剛性が小さくなり、偏載荷重時の変形によって、RC床版に過大な応力が発生しやすく、床版が損傷をきたすことが多かったため、合成桁自体がきらわれてしまったためと、もう一つは、当時のRC床版自体の床版厚が小さいうえ、鉄筋量が少なかったため、損傷しやすい状態にあったためであると推察される。

しかし最近になって、橋梁建設の合理化と建設費縮減が叫ばれる中、再び合成桁が見直されつつあり、またフランスを中心とした新しい形式の合成桁に関する技術開発が刺激となって、我が国でも合成桁復権の気運が高まっていると言えよう。

本論文は、今後、合成桁の設計・施工を進めていくうえで、これまで問題の多かったRC床版に焦点を当て、注意すべき点、および新しい技術開発を進めるうえでの課題を示すことに重点を置いている。また、既に建設された合成桁の内、特に損傷の著しいRC床版の打換えにあたっては、合成桁特有の問題があるので、その対策方法についても示している。

#### 2. 合成桁建設の経緯

##### 2.1 欧米における発展<sup>1)</sup>

鋼・コンクリート合成桁に関しては、1930年代までに合成効果、ジベルの必要性、負曲げの影響などの基本特性が確認され、1920~1940年に欧米各地で建設されている。豪州のタスマニアで建設された合成桁に関するKnightsの論文では、ジベル設計法、主桁の上昇降下作業によるプレストレッシング(P.S)導入、死活荷重合成法、橋軸直角方向のモーメント分布と有効幅などの合成桁設計法に関する基本的事項が議論されている。このように、欧米では、合成桁は経済性のある構造形式として定着しており、100m以下の橋梁でのシェアが1975年にはわずか2.5%であったものが、1991年には20%になり、今日、スパン60~80mでは、道路橋、鉄道橋を問わず最も競争力のある構造形式となっている。

欧米における合成桁の建設は基準の制定されない状態で行われたが、その後、ドイツではDIN 1078(1953年)に、アメリカではAASHO(1949年)に、イギリスではBS 5400, Part 5(1978年)に合成桁の基準が制定された。またフランスでは1985年に2主桁合成橋梁に関する指針が制定され、Eurocodeでは1983年に合成構造の設計法として限界状態設計法の考えが示されている。

床版コンクリート構造は、1950年代までは場所打ち施工で行われた。1960年代になってプレキャスト床版がヨーロ

ツパ諸国で使用されるようになったが、1970年代以降、ドイツ、オーストリアでは継手部等のひび割れ発生によりプレキャスト床版の使用は減少しており、主として、フランスでのみの使用に限定されている。フランスでは高幅員合成2主桁の施工や、鋼管トラス、波形鋼板ウェブなど、複合化技術開発が目覚ましい。

連続桁中間支点部の負曲げ対策として、英、米では1970年代中頃までは単純桁構造として用いられ、連続桁でもPS導入は稀で、正曲げモーメント領域のみにコンクリート床版を期待する、部分合成法の考え方が一般的であった。一方、ドイツやフランスでは、1970年代までは、床版コンクリートには引張力を発生させない考え方により、中間支点部主桁の上昇降下作業によりPS導入が行われたが、施工が煩雑なため、PC桁に対して競争力が低下していった。今日では、負曲げ対策として、設計上の引張応力を制限する方法よりも、床版施工法によりひび割れ分布、ひび割れ幅をいかにコントロールするかが課題となっている。

## 2. 2 日本における発展<sup>1)2)</sup>

我が国における最初の合成桁橋は、1951年(S. 26)に試験的に建設された鈴橋(大阪)であると言われている。1953年(S. 28)、神崎橋(大阪)では、格子桁理論の展開による荷重分配効果の実測も行われ、翌年には鉄道橋初の合成桁橋、高屋川橋(岐阜)も建設された。1959年(S. 34)には最初の合成桁示方書として、単純合成桁のみを対象とした「鋼道路橋の合成ゲタ設計施工指針」が定められている。初期の橋では、ずれ止めとして、アングルまたはチャンネル形鋼を切断したもの(馬蹄形ジベルなど)あるいは角鋼ブロックに輪形筋を取りつけたもの(ブロックジベル)などが用いられていた。

1957年(S. 32)には、箱桁を用いた連続合成桁、正喜橋(埼玉)が建設され、以後主としてドイツ流のプレストレッシングを前提とする連続合成桁が数多く施工された。この頃から、アメリカで開発された頭付きスタッドによるずれ止めの研究も始まっている。PSの導入に関しては、中間支点部主桁の上昇降下作業、高張力ケーブルの使用などによっていた。

1961年(S. 36)以降、関西道路研究会を中心に連続合成桁の研究が盛んになり、正モーメント域を合成桁、負モーメント域を非合成桁とする部分合成桁や、プレストレスしない合成桁の検討も始まっている。五十畑等<sup>1)</sup>による合成桁建設統計をみると、この頃から合成桁の建設が大きく伸びている。

しかし、1975年頃から鋼道路橋のRC床版に過大なひび割れ損傷が多発するようになり、この原因として、競争設計により鋼重を減らすために主桁間隔をできるだけ大きく、床版厚をできるだけ薄くしたこと、床版の設計法における問題(配筋筋不足、支持桁の不等沈下など)、また交通量が急増したことに加えて過積載大型車の混入が目立つようになったことが指摘されている。このような情勢

から、1980年になると合成桁の採用が幾分控えられるようになり、特に床版補修が困難である連続合成桁については、ほとんど建設されないようになっていった。

## 3. 合成桁RC床版の損傷と原因

### 3. 1 RC床版の損傷メカニズム

基本的に、非合成桁・合成桁とも、RC床版の損傷メカニズムは同一である。すなわち、合成桁の場合にも、近年明らかになりつつあるRC床版の損傷の原因、および大きな損傷に至るまでの各損傷段階のひび割れ進展は変わらない。以下、一般的なケースとして、主筋方向が橋軸に直交する場合の損傷メカニズムを示す(図-1)<sup>3)</sup>。

#### ①主として主筋方向のひび割れの発生(段階I)

RC床版は、ずれ止めもしくはスラブ止めによって鋼桁に固定されているため、床版コンクリートの乾燥収縮などによって、床版には橋軸方向に引張り力が生じる。この状態で輪荷重が載ると、橋軸方向・橋軸直角方向の双方に曲げモーメントが生じるが、ひび割れは主に橋軸直角方向に先に生じる。

#### ②2方向ひび割れへの移行(段階II)

橋軸直角方向にひび割れが入ると、配筋筋方向の曲げ剛性が主筋方向に比べてかなり小さくなり、床版は等方性から異方性に変わる。そして、今度は主筋方向への曲げモーメント負担が増加し、橋軸方向にもひび割れが生じる。

#### ③ひび割れの網細化と角落ち(段階III)

2方向にひび割れた床版は、版全体としてのせん断剛性・ねじり剛性が低下し、輪荷重の繰り返し載荷によってひび割れの数が増す(亀甲状ひび割れ)とともに、貫通するものも生じて、やがてひび割れの開閉、こすり合わせ挙動による摩耗から、ひび割れ交点では、角落ちが生じるようになる。

#### ④床版の陥没(段階IV)

この状態がさらに進行すると、一部に放射状あるいは蜘蛛の巣状のひび割れが現れ、やがてこの部分のコンクリートが陥没、剥落してしまうことになる。通常、この部分には鉄筋だけが残っている。

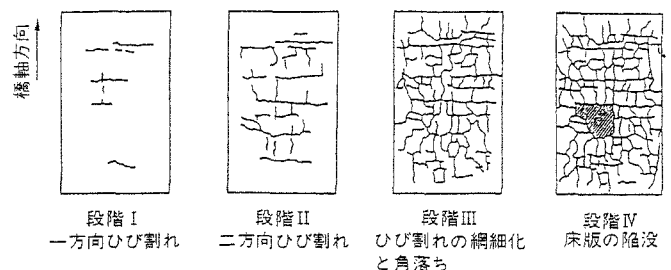


図-1 道路橋RC床版のひび割れ損傷過程<sup>3)</sup>

以上の損傷は、我が国のRC床版によく見られる床版損傷であり、床版コンクリートの疲労として知られている。

我が国の床版損傷では、さらに2方向ひび割れとなった後、橋面から水が浸透するケースが多く、コンクリートのひび割れ箇所を通過する際に、水中にCa<sup>++</sup>を溶け込ませることが多く、ひび割れのこすり合わせによる摩耗をより促進させる原因になっている。このCa<sup>++</sup>は、床版下面において空中の炭酸ガスと結合し、白色の生成物である遊離石灰を発生させる。また、橋面舗装が常時濡れている場合、舗装を剥がしてみると、中の床版コンクリート上層部が泥と化しているケースも見られる（写真-1）。

### 3. 2 合成桁RC床版損傷の原因

上述した床版コンクリートの疲労に関わる原因としては、以下の項目があげられる。

荷重、設計面では、

- ① 過積載荷重
- ② 交通量の増大
- ③ 床版厚さの不足
- ④ 配力筋の不足

また、材料、施工面では、

- ① コンクリートの品質不良（粗骨材の碎石への移行）
- ② コンクリートの施工不良（ポンプ打設への移行）

この他、特に連続合成桁の場合には、中間支点部など負曲げ領域におけるひび割れの問題がある。初期の設計では、温度変化による引張り応力について、過小評価がなされていたことに加え、施工時の養生方法に十分な配慮がなかったことも手伝って、予想以上に乾燥収縮が進むケースが多かったのである。また、負引張り応力に対して導入したプレストレスが抜けてしまったケースも見られる。

また、合成桁の場合には、通常の非合成桁主桁断面より小さくできるメリットがあるが、主桁剛性が小さいと主桁不等沈下が強調され、床版にはより大きい作用力が加わることがある。さらに、関連する問題として、施工時のキャンパー調整に関して、非合成桁より敏感であり、複雑であることから、初期キャンパーが不揃いになりやすい。

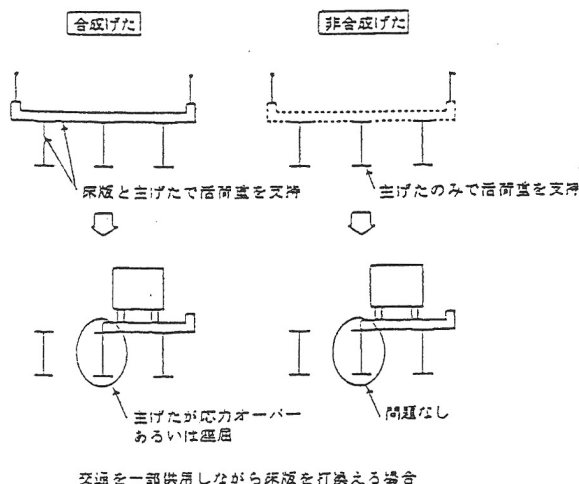


図-2 合成桁橋における床版打ち換えの問題

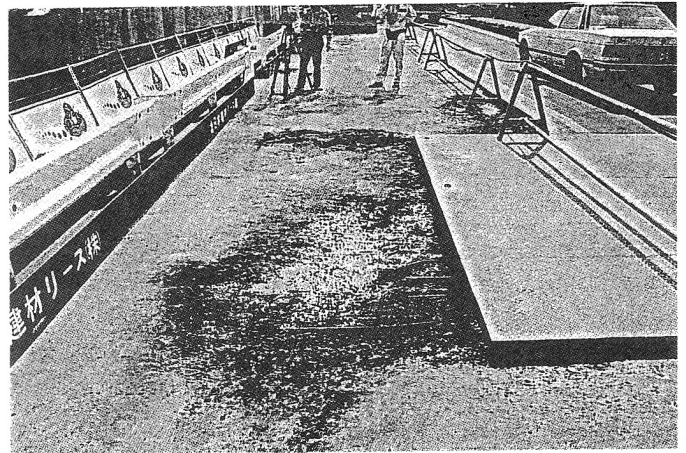


写真-1 舗装湿潤部撤去後の劣化床版

## 4. 合成桁橋の床版打換えにおける問題と対策

### 4. 1 片側交通供用時における床版打換えの問題

合成桁において、床版損傷が進み、下面補強工法や上面増厚工法によっても床版の機能を回復させることができない場合、床版を部分的に打ち換えたり、全面打換えを必要とするが、この場合には交通事情などから全面通行止めを実施できることは非常に稀である。

こうした場合、例えば片側交通を許しながら床版撤去を行うと、打換え境界付近の主桁は、合成されるべき床版が無い状態で活荷重を載荷することになり、応力超過の可能性があるが、非常に不安定となって横倒れ座屈を起こすことがある（図-2）。

また、床版が撤去された主桁は、未撤去部の主桁の影響によって、たわみが完全に戻らないことになる。この状態で床版を打設すると、打ち換えた主桁には付加応力が残留する。

過去には、架設時の詳細な検討をすることなく、一度に大量のコンクリート床版を撤去したため、撤去区間の主桁上フランジが座屈を起こし、落橋寸前まで至ったこともある。

### 4. 2 合成桁の床版打換え工法

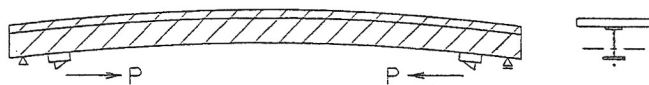
床版撤去時に、下から固定支保工で支えることができればよいが、一般に固定支保工が使用できるケースはあまり無いのが現状である。

こうした場合、対策工法として注目されるのが、以下の工法である。

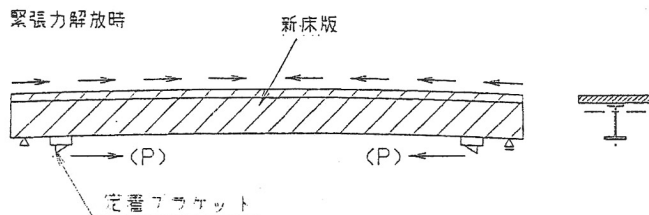
#### ① 外ケーブル工法<sup>4.5)</sup>

合成桁床版の打換えにあたり、主桁の下側に仮設材として外ケーブル（PC鋼棒等）を設置し、これに緊張力を導入し、主桁に偏心軸力を与えることによって、床版打換え時の主桁の安全性を確保する工法である（図-3）。

緊張力導入時



緊張力解放時



P:外ケーブルの緊張力

図-3 外ケーブル工法の概念図

そのため、既設床版の損傷程度に左右されず、新床版の種類も限定されないという利点がある。この工法によれば、特に主桁上フランジの圧縮応力度を低減でき、横倒れ座屈に対する安全性を高めることが可能で、カンバーの調整を行うこともできる。さらに、床版打換え後に、外ケーブルの緊張力を解放することにより、床版に橋軸方向の圧縮力が導入されるため、主桁の応力が低減され、耐荷力が向上する。

② 軸力導入工法<sup>6,7)</sup>

合成桁の新床版と旧床版の目地部に、複数の床版軸力を伝達させる部材(軸力伝達装置)を配置し、主桁と床版の合成効果を確保しながら合成桁床版の打換えを行う工法である(図-4)。

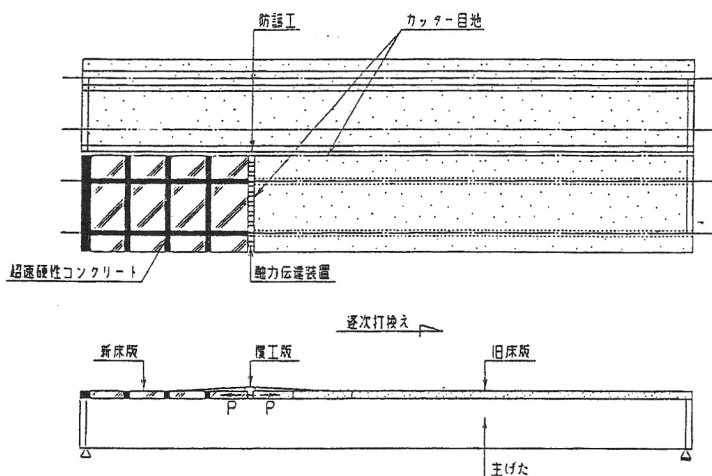


図-4 軸力導入工法の概念図  
(1サイクル施工終了後の交通仮開放の状態)

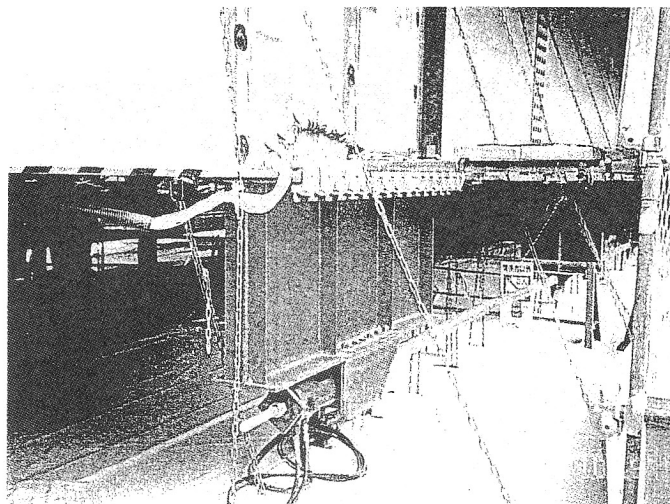


写真-2 桜川橋(山形)における外ケーブル工法の適用

施工途中においても目地部を覆工することにより、交通仮開放が可能である。交通仮開放時には、主桁上フランジの応力低減や活荷重振動による軸力伝達装置のゆるみ止めを目的として、軸力伝達装置に所定の初期突張り力(プレロード)を導入し、新旧床版間に圧縮力を作用させる。

これらの工法適用に関しては、土木研究所資料「合成げたの床版打換え工法に関する調査」<sup>8)</sup>を参照されたい。この中には、表-1の範囲における単純合成桁の適用工法が示されている。

5. 合成桁の構造、設計、施工における今後の課題

5.1 構造、設計及び施工上の一般的な問題

我が国では、1970年以降、合成桁に関する興味が薄れ、発展が停滞していた感がある。しかし、構造合理化や工事費削減の波に乗って、合成桁見直しの機運が高まってきた。その場合、構造、設計、施工の面から、改善すべき点がいくつか残されている。

構造面では、ずれ止めに対する見直しが挙げられる。頭付きスタッドの短所は、付根溶接部における疲労損傷が生じやすいことと、溶接の煩雑さである。この点に関しては、パーフォボンドリブ(穴あき鋼板)やボックスジベルなどが提案されており、今後の発展が期待される。また、プレキャスト床版を使用する場合には、より簡便な結合要素が望まれる。

筆者は、理想的な床版として、高強度コンクリート、高強度鉄筋を使用した、厚さ18~20cm程度のプレキャスト床版を橋軸方向に並べていき、橋軸、橋軸直角両方向に25~40kgf/cm<sup>2</sup>のパーシャルプレストレスを与えたものを考えている。プレキャスト床版継手部には、水を完全に遮断

表-1 合成桁床版打換え工法の適用

		外ケーブル工法	軸力導入工法
橋長（支間長）		50m程度迄	70m程度迄
幅員		16mまでの2車線+歩道	広い幅員でも可
構造	活荷重	鋼単純げた橋	◎
	合成	鋼単純箱げた橋	◎
形式	死活荷重	鋼単純Iげた橋	×
	合成	鋼単純箱げた橋	—
非合成げた橋の合成桁化		◎	×
桁の平面形状	直線主げた	◎	◎
	曲線主げた	○	◎
道路	道路法線が曲線	○	◎
	縦横断勾配	◎	◎
線形	斜角	70°～90°	特に制限なし
床版	プレキャスト床版	◎	◎
形式	場所打ち床版	○	×
耐荷力の向上		○	×
既設床版の損傷状態		劣化の著しい床版でも適用可	強度低下の著しい床版は不可

上記表に示される◎は適用可を、○は適用に際しては可能であるが、慎重な検討が必要であることを示すものとする。×は不適用を示す。

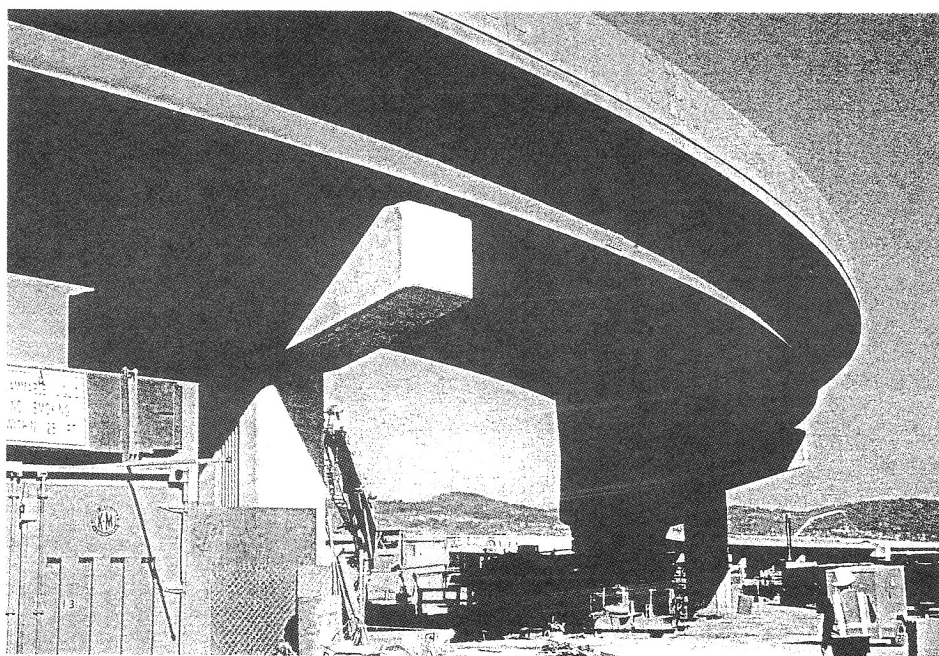


写真-3 最近の合成桁の例 (米国サイプレス高架橋)

できる工夫が必要である。

設計面での最大の問題は、主桁作用で床版に引張軸力が発生する部分、すなわち、中間支点部引張域における床版のひび割れ制御である。先に述べたように、合成桁の場合、乾燥収縮によって橋軸方向に引張応力が発生することから、ひび割れは避けられないが、活荷重載荷前及び載荷後のひび割れ(幅)をいかにして制御するか、応力度だけでなく、配筋間隔をはじめとした性能照査型設計への移行が必要であろう。また、使用状態におけるずれ止め、鉄筋、微細ひび割れを有するコンクリートそれぞれの応力の分担に関する理論的、実験的研究も不可欠である。

床版設計上のもう一つの問題は、合成桁としての主桁作用と、床版作用による応力の組合せが、これまで不明瞭であったことである。この点に関しても、今後、十分な検討が不可欠である。

施工面からは、いかにして初期乾燥収縮を小さく抑えることができるか、検討する必要がある。また、高強度コンクリートやプレキャスト床版を使用した場合、ミニマムメンテナンスの見地から、経済性を見直してみることも必要である。鉄筋配置が適切であれば、主桁のジャッキアップ、ダウン等による中間支点部の対策は、不要になる。ただし、中間支点部については、今日、適切な弾性支承を使用することで、負曲げモーメントを低減することが可能である。

床版は非常に重要な部材であり、伸縮装置のある端部を含めて、水の浸透は許されない。床版防水工に関しては、新設、補修を問わず、より耐久性のある材料の導入が望まれる<sup>9)</sup>。

## 5. 2 施工に関わる非合成、部分合成及び完全合成の問題

これまで、合成桁に関しては、先ず鋼桁をすべて架設したうえで、現場打ちコンクリート床版を一括施工する活荷重合成型が一般的であった。この場合には、設計で仮定した死荷重非合成、活荷重合成の考えが成り立つ。

しかし、合理化施工、急速施工が要求される今日、プレキャスト床版の採用が広がり、この床版を主桁に順次合成しながら施工していく場合には、部分合成された床版と、単に死荷重として作用する床版との、施工段階ごとの厳密なより分けが必要となってくる。さらに、一般には、弾性的に仮固定しておくケースもある。このような場合、実際の固定レベルに対応した主桁の変形計算は、非常に重要である(性能照査型設計)。この問題は、当然、分割施工の場合の現場打ち床版にも当てはまる。特に、施工時に大型トレーラーなどが載荷される場合、非合成部の応力超過に注意しなければならない。

また一方では、これまで非合成とみなされてきた非合成床版が、実際にはレベルの差こそあれ、弾性的合成に近い状態であることがわかってきた。鋼橋のタイプごとに、実橋床版及び主桁の応力頻度測定等によって、現実に近い固定レベル(弾性バネ常数)を求め、これを今後の維持管理に活用していくことは、合成桁研究者の課題の一つである。

ここまで考えてくると、非合成床版は、実際には存在せず、固定レベルの低い合成床版と捉えることができる。その場合、なぜ固定レベルを低くしておく必要があるのか? これまでは、設計・施工の煩雑さから非合成床版が多用されてきたが、合成桁特有の大きな問題であったRC床版の問題が解消もしくは大幅に削減された場合、建設費削減の見地からは、合成床版を前提とした合成桁のほうが、有利であることは明白であるのではなからうか? 筆者は、これは世界的な傾向でもあると感じている。

## 6. まとめ

合成桁は、合理的で、経済的な橋梁形式の一つであるが、我が国において、その普及は遅れている。その大きな原因となっているのが、合成桁に使用されるRC床版の損傷であり、床版打ち換えの難しさであると言われてきた。

しかし、近年、合成桁復権の流れが見え始めており、RC床版の耐久性向上も、設計・施工の改善によって、可能であることがわかってきた。本論文は、床版の改善に向けての課題を示したものである。

本研究は、土木学会鋼構造委員会「鋼橋床版の調査研究小委員会」の活動として行われているもので、本論文で示した課題については、引き続き研究を進めていきたいと考えている。

### [参考文献]

- 1) 五十畑、綿引、榛澤：道路橋鋼合成桁の歴史的調査、土木史研究 第17号(1997.6)
- 2) 川田、野村、梶川：複合構造橋梁 第3章、技報堂出版(1994.9)
- 3) 松井、西川、大田：RC床版とその損傷、橋梁と基礎(1998.5)
- 4) 伊藤、高田、神田、西川、藤原：外ケーブルを用いた合成桁橋の床版打ち替えにおける構造検討、構造工学論文集、Vol.43A(1997.3)
- 5) 西川、神田、上阪、高田、藤原：外ケーブルを用いた合成げた床版の打換え工法、第5回鋼構造物の補修・補強技術報告会論文集(1996.6)
- 6) 竹村、富沢、斎藤、石川：合成桁床版の昼間交通解法可能な打換え工法の基礎実験、橋梁と基礎(1986.7)
- 7) 石田、山本、斉木、新田、細谷：交通開放下での合成桁橋の床版打換え、橋梁と基礎(1994.8)
- 8) 土木研究所：合成げたの床版打換え工法に関する調査、土木研究所資料第3582号(1998.6)
- 9) 上阪：ドイツにおける橋面防水工設計・施工指針の紹介と作成の背景、土木施工(1998.11)