

鋼道路橋に適用されるPC床版の現状と課題について

Prestressed Concrete Slabs on Steel Girders for Highway Bridges

橋 吉宏*、街道 浩**、小西哲司***

Yoshihiro TACHIBANA, Hiroshi KAIDO, Tetsushi KONISHI

*博士（工学） 川田工業(株)橋梁事業部東京設計部（〒114-8562 東京都北区滝野川 1-3-11）

**工修 川田工業(株)橋梁事業部東京設計部（〒114-8562 東京都北区滝野川 1-3-11）

*** 川田建設(株)工事本部技術部（〒114-8505 東京都北区滝野川 6-3-1）

In our country, PC (prestressed concrete) slabs began to be used for highway bridge before about 30 years ago. Recently, the application to the steel bridge of the PC slab was rapid attention, because of the need of precast PC slabs for shortening of the construction period, saving labor for site work, rapid construction in the repair of and the deteriorated slabs, and cost reduces by the simplification of the steel structure by using PC slabs. The letter's application for 2 or 3 girders steel bridges which has precondition that slabs have enough durability, has the conversion of consciousness of the steel bridge engineers in our country. This paper presents the history of the application to the steel bridge of the PC slab and its subject.

Key Words :concrete slab, prestressing, durability ,economy,
precaste concrete, traveling formwork,

1. はじめに

わが国の橋梁技術の発展において、プレストレストコンクリート（以下PCと略す）床版の鋼橋への適用は、橋梁形式の自由度を広めるうえで大きな意味を持っている。これまで、PC床版の鋼橋への適用が一般化されなかった背景に、わが国の橋梁技術の発展の歴史があるものと考えられる。鋼構造とコンクリート構造はいずれも外国から輸入された技術であり、明治維新以降、鋼橋は「鉄は国家なり」の号令のもとに発展を続け、また、戦後に技術導入されたPC橋は「メンテナンスフリー」の神話のもとにシェアを急速に伸ばしてきた。お互いの技術者は、「橋を架ける」という共通の目的に対してライバル関係であり、それぞれ別々の分野の技術であるという認識のもとに、互いの技術を尊敬しあいながらも意識的に避けてきたことが、わが国における橋梁技術の自由度を狭めていた原因のひとつであったと考えられる。

たとえば、わが国の鋼橋の形式で最も事例の多いI桁橋をみると、現在は多主桁で非合成桁が一般的になっている。これは、PC床版も適用されている連続合成2主桁橋が一般的になっているヨーロッパとは逆の傾向である。わが国でも、昭和30年代後半から昭和40年代前半にかけて経済性に主眼を置いた少数主桁および合成桁橋が盛んに建設されたが、昭和40年代に過積載を含めた交通量の増大と

RC床版の鉄筋量不足が原因と考えられる床版損傷が顕在化し、床版モーメントの低減や床版補修の容易さなどの理由から、昭和50年前後から多主桁で非合成桁の採用へと向かった。この流れは、床版は損傷してもよいものという技術者の意識のもとに、床版を単なる格子桁の上に載せる板部材として捉えられた結果であり、鋼構造に重点を置くわが国の鋼橋技術者にとっては当然の流れであったと考えられる。これに対して、ヨーロッパの技術者は床版を「壊れない」半永久的な構造部材として捉え、床版には防水層の設置が経験的に常識化され、PC床版の鋼桁への適用も古くからなされてきた。このような社会的な背景の相違が、ヨーロッパとわが国における橋梁構造の差として表れ、わが国における橋梁構造の合理化を遅らせた原因のひとつになっていた。

最近、わが国でもPC床版の鋼桁への適用が再び注目されるようになったのは、補修時の急速施工および熟練技術者の高齢化にともなう現場作業の省力化と工期短縮を目的としたプレキャスト床版に対するニーズと、建設コスト縮減で再び注目を浴びている少数主桁橋への適用に対するニーズである。特に後者の、鋼構造の簡素化によりコスト低減を図る少数主桁橋は、床版支間が大きいながらも床版は壊れないことが大前提であり、わが国の橋梁技術者にとっては意識の転換を求められた構造で、また橋梁形式の自由度が大きい複合構造を進めるうえでの基本となる構

造であると言える。

本文は、今後の採用が増えることが予測されるPC床版について、鋼橋への適用の歴史をふりかえり、現状と課題について報告するものである。

2. 床版の耐久性とPC床版

わが国における床版の疲労耐久性に関する研究は、床版損傷事故が多く報告されて以来積極的に進められ^{1),2)}、輪荷重走行試験機を用いた松井の研究³⁾によりRC床版の疲労損傷機構が明らかにされたと言える。その概要をまとめると、まず最初に乾燥収縮により床版に橋軸方向の引張応力が生じ、それに活荷重による曲げが加わり橋軸直角方向のひび割れが発生する。このひび割れの発生により床版は直交異方性板として働き、主鉄筋方向の荷重分配が大きくなり橋軸方向のひび割れも発生し、床版のひび割れは格子状になる。格子状になったひび割れ面には、輪荷重の走行により曲げとせん断とねじりの変形を受け、ひび割れ面がこすり合わされ徐々に床版の剛性が低下し、さらに疲労損傷が進むと押し抜きせん断強度が低下して陥没に至る。ひび割れ面がこすり合わさる時に雨水の浸入があると、コンクリート中の石灰分が溶出して劣化の進行は加速度的に速まる。

この解明された床版の疲労損傷機構から、床版の耐久性を向上するひとつの対策がプレストレスの導入であることが容易に理解できる。すなわち、橋軸方向あるいは橋軸直角方向のいずれか1方向にプレストレスを導入しておけば、床版劣化の過程で格子状のひび割れに達する状態を阻止できることが期待でき、床版の耐久性は飛躍的に向上することが推測される。PC床版の耐久性については、輪荷重走行試験を用いた試験によっても確かめられており^{4)~6)}最近になりPC床版を用いた少数主桁橋の採用が増えつつあるのは、プレストレス導入技術の発展に加えこのような床版に対する研究成果によるところが大きいものと考えられる。

3. 昭和40年前後の連続合成桁橋とPC床版

上述のように最近の研究により耐久性の高いことが確かめられたPC床版について、鋼橋へのPC床版の適用は昭和30年代~40年代前半にさかのぼることができる。昭和30年代~40年代前半はドイツで開発された合成桁橋の流れを受けて、わが国でも合成桁橋が急速に普及し、床版へのプレストレスを前提とする連続合成桁橋について種々のプレストレス方法が試みられた⁷⁾。その中でPC鋼材を用いて床版にプレストレスを導入する方法も試みられており、代表的な例として昭和37年に建設された錦橋と昭和42年に建設された新石狩川橋があげられる。

(1) 錦橋⁷⁾

錦橋は山口県岩国市の国道2号線上の橋であり、有効幅

員8.0m、橋長151m、主桁間隔4.6m、桁高2.3mの3径間連続合成2主桁橋であり、昭和31年版の道路橋示方書によって設計された橋である(図-1参照)。床版厚は24cmで、2方向にプレストレスが導入されている場所打ちのPC床版が採用されている。橋軸方向には連続合成桁として必要な床版プレストレスが外ケーブル工法によって導入され、橋軸直角方向にも床版内に配置されたケーブルによりプレストレスが導入されている構造である。

(2) 新石狩大橋⁸⁾

新石狩大橋は北海道江別市の国道275号線上の橋であり、有効幅員8.0m、橋長917.8mで、5径間連続合成2主桁橋2連とランガー桁橋と3径間連続合成2主桁橋1連で構成されている(写真-1、図-2参照)。連続合成2主桁橋部の径間長は52.7mの等支間であり、主桁間隔は5.0m、桁高は2.7mであり、昭和39年版の道路橋示方書によって設計された橋である。床版厚は24cmで、橋軸方向にプレストレスが導入されている場所打ちの1方向PC版である。床版は橋軸直角方向はRC床版として設計され、橋軸方向には床版内に配置されたPC鋼材を用いプレストレスが全橋にわたり導入されている構造である。

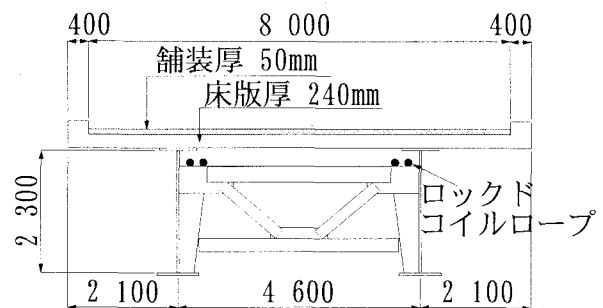


図-1 錦橋(昭和37年)

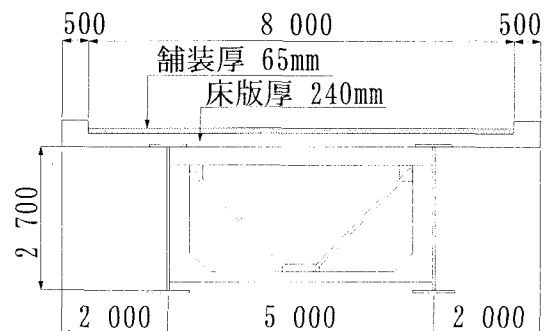


図-2 新石狩大橋(昭和42年)

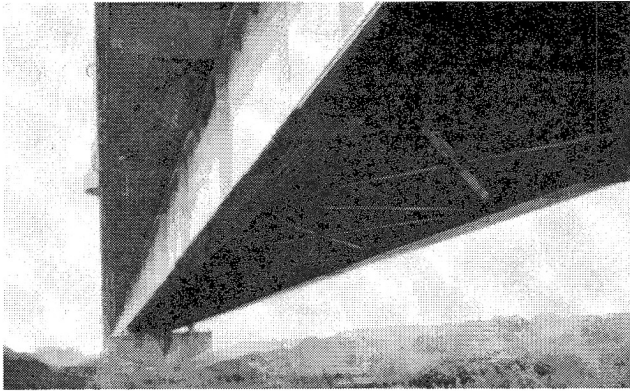


写真-1 新石狩大橋（連続合成2主桁橋）

(3) 当時のPC床版の現状

錦橋および新石狩大橋ともに、大型車両が頻繁に通行する国道の一部として現在でも供用されている橋梁である。床版については、錦橋では張出部床版に鋼板接着による補修がなされているものの支間部は健全な状態であり、新石狩大橋も健全な状態がいまだに保たれている。最近の研究により解明された床版の劣化機構からPC床版の耐久性が高ことが説明できるが、新石狩大橋の例では、橋軸方向への1方向のプレストレスの導入でも床版の耐久性を飛躍的に向上させていることを証明している例であると言える。この時代に建設された連続合成桁を調査してみると、最近注目されているPC床版を有する2主桁橋および連続合成桁橋はわが国では決して新しい構造ではなくて、30年以上も前に実績のある橋梁形式である。上述した昭和50年代の合成桁橋の衰退の波にのまれてこの形式の橋梁は建設されなくなったが、皮肉にも現在になって耐久性が実証された橋梁形式であるといえる。その当時から、PC床版の鋼桁への適用が普及していたなら、わが国の橋梁技術の歴史は現在とは別の経緯をたどっていたかもしれない。

4. プレキャストPC床版の鋼橋への適用

(1) プレキャストPC床版による床版打替え工法

昭和40年代からRC床版の床版損傷が多く報告されるようになり、昭和48年版の道路橋示方書では床版に対する規定が改訂され、それに対応して標準設計の床版支間は3.85mから3.00mに、床版厚は18cmから23cmに変更された。変更前の標準設計では床版支間3.85mに対し床版厚18cmはかなり薄く、加えて配力鉄筋不足もあり、過積載を含めた交通量の増大に耐える構造ではなかった。この頃を境にわが国では、床版の設計モーメントの低減や維持補修の観点から、多主桁で床版と鋼桁とが非合成構造の橋梁へと向かったのは上述したとおりである。この高度経済成長期に建設された橋梁のRC床版の補修技術として、鋼接着工法、炭素繊維接着工法、縦桁増設工法などの開発が進められ、昭和50年代後半にRC床版の打替技術として急速

施工が可能なプレキャストPC床版の開発も進められた⁹⁾。

補修のために用いられるプレキャストPC床版として、橋軸直角方向と橋軸方向の2方向にプレストレスが導入される2方向PC版として開発された形式が、現在一般的に用いられている。これは、補修用の打替え床版として、上記の昭和48年道路橋示方書以前のかかなり薄い床版にも対応する必要があり、道路橋示方書コンクリート橋編では2方向PC床版の最小床版厚は床版支間に関係なく16cmであり、床版死荷重の増加なしに打替えることができる工法として、必然的に2方向にプレストレスを導入するプレキャストPC床版が選択されたものと考えられる。

(2) 新設橋に対するプレキャストPC床版の適用

新設橋に対しても、現場作業の省力化と工期短縮を目的としてプレキャスト床版の採用が試みられた。新設橋に対するプレキャスト床版の適用は古く、RCのプレキャスト床版は昭和45年に首都高速5号線516工区で、橋軸方向にプレストレスを導入するプレキャスト床版は昭和49年に日本道路公団の滑川橋に採用されて以来、RC構造とPC構造を含めて種々のプレキャスト床版が開発された⁹⁾。

プレキャスト床版の長所としては上述のように、①型枠支保工、配筋、コンクリート打設の現場作業が大幅に省力化でき床版工の現場工期短縮を図ることができる。②工場製品としてのプレキャスト床版は品質が安定している。③RC床版と比較して乾燥収縮を含めた耐ひび割れ性が向上する。④プレキャストPC床版では床版厚を薄く設定できることにより死荷重の低減を図ることができる。などがあげられる。一方、短所として、①パネルの種類が多くなるとコスト高になる。②輸送費および据え付け費が、条件によってかなり割高になる場合がある。③継手構造に検討を要する。などがあげられる。プレキャスト床版の現状については文献9)~11)などが参考にできる。

(3) プレキャストPC床版による省力化とコスト低減

写真-2は、札幌自動車道の新琴似高架橋で採用されたプレキャストPC床版であり、主桁間隔2.0mで床版厚18cmの2方向PC版で、継手構造は図-3のPC鋼材により接合する工法である¹²⁾。日本道路公団では平成4年度よりプレキャストPC床版の試験施工として、上記の札幌



写真-2 新琴似高架橋のプレキャストPC床版架設状況

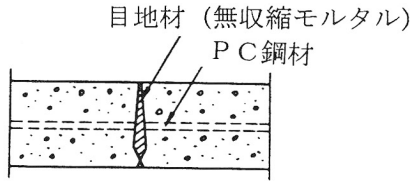


図-3 P C 鋼材による床版継手構造

自動車道の新琴似高架橋の他に、上信越自動車道の栃木川橋、名神高速道路の日向町迂回路橋、関西国際空港線の末広高架橋で種々のプレキャストP C床版に対する省力化の効果について検討を行っている¹³⁾。文献13)によると、プレキャストP C床版と場所打ちR C床版との実施比較では、プレキャストP C床版の採用により床版施工工程と現場労務数の大幅な低減が可能であるが、鋼橋全体のコスト低減の観点からは、プレキャストP C床版を従来の多主桁橋に使用するだけでは、プレキャストP C床版のコスト上昇分だけ鋼橋全体のコストが上昇してしまう結果であることを報告している。この検討結果は、新設橋に対してプレキャストP C床版を用いるのであれば、P C床版のメリットを十分に生かすためにも、主桁の本数を減らして床版支間を大きくして鋼構造の方でコスト低減を図る必要があることを示唆するものであった。このような検討結果からも、P C床版2主桁橋の可能性とコスト低減への模索が行われた¹⁴⁾。

5. 少数主桁橋に対するP C床版の適用

少数主桁橋とP C床版の組み合わせによるコスト低減は、主桁本数を少なくすることにより、鋼重の減少に加えて、部材数や溶接延長の減少による製作工数の低減、現場作業の効率化が図れることにより、P C床版採用によるコスト上昇分を考慮しても、全体として経済的となるからである¹⁵⁾。少数主桁橋に対するP C床版の適用例として、移動型枠を用いた場所打ちP C床版で施工された2主桁橋の北海道縦貫自動車道・ホロナイ川橋、プレキャストP C床版で施工された3主桁橋の第2東海自動車道・東海大府高架橋があり以下に紹介する。これらの床版は、いずれもフルプレストレスに比べP C鋼材量が少ないP R C床版として設計されている。

(1) ホロナイ川橋

ホロナイ川橋の断面図を図-4に、移動型枠を写真-3、図-5に示す。ここに示したホロナイ川橋の移動型枠は、型枠を下方から支えるサポートタイプであり、型枠を上から吊り上げるハンガータイプのもも使用されている。ホロナイ川橋では、全天候屋根の採用、現場グラウト作業が不要のシングルストランドのプレグラウトP C鋼材の採用、プレファブ鉄筋の採用、鉄筋継手の区間長を短くする

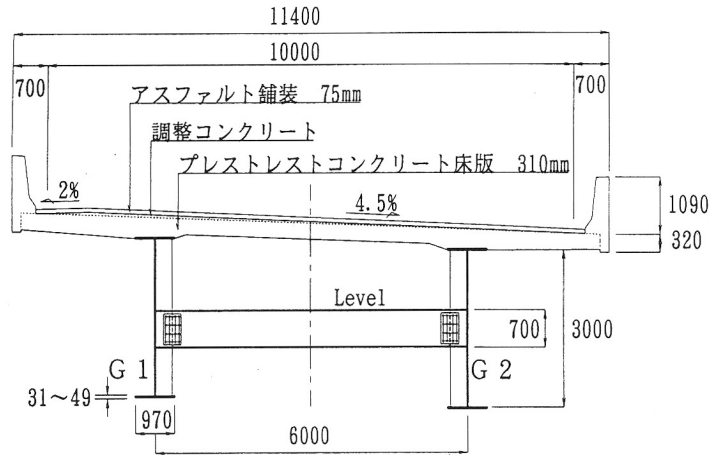


図-4 ホロナイ川橋 (平成7年)

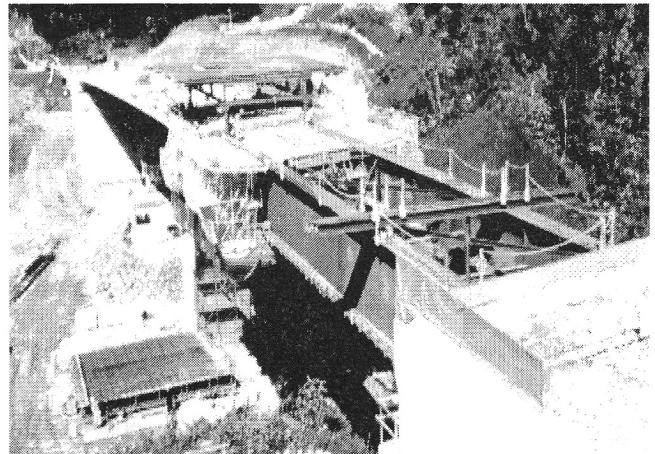


写真-3 移動型枠による床版施工

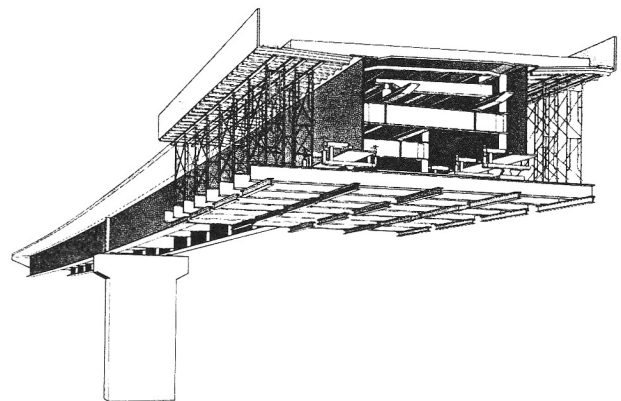


図-5 ホロナイ川橋の移動型枠

などの工夫を行い、より省力化を図っている。ホロナイ川橋の床版施工については文献16)が参照できる。

(2) 東海大府高架橋

写真-4,5はプレキャストP C床版で施工された東海大府高架橋である。東海大府高架橋では、図-6に示すループ状重ね継手による継手構造である。ループ状重ね継手に

よる継手工法が採用されたのは、P C鋼材による継手工法に比べループ状重ね継手を用いた方が工期および現場労務数において有利であること¹²⁾に加え、少数主桁橋に対してP C鋼材による継手工法を採用した場合、橋軸方向に必要なプレストレスを導入するためのP C鋼材量が多くなり物理的に鋼材配置が困難になることによる。東海大府高架橋のプレキャストP C床版については文献 17)が参照できる。

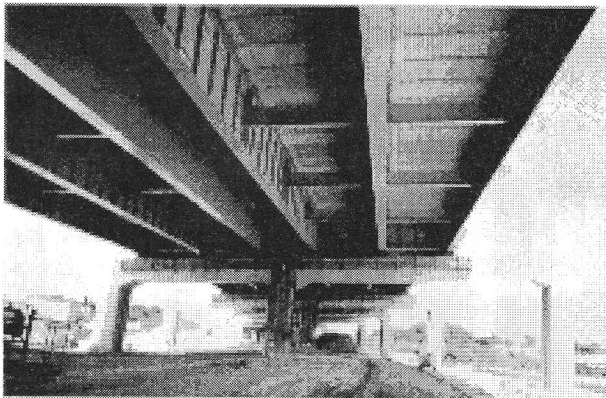


写真-4 東海大府高架橋

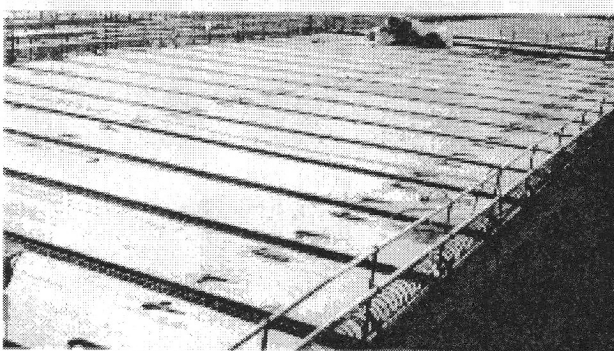


写真-5 プレキャストP C床版敷設状況

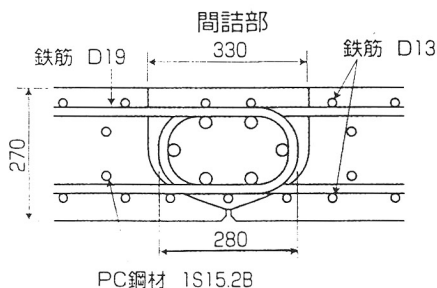


図-6 ループ状重ね継手による継手構造

6. P C床版の今後の課題

以上のように鋼橋に対するP C床版の歴史を述べたが、P C床版を適用するにあたり解決すべき課題が多いのが現状である。以下に、P C床版に対する現状の課題を述べる。

(1) 最小床版厚

床版厚を小さくすると、活荷重による床版たわみが大きくなり、主桁損傷の原因となる主桁上フランジの首振り現象を助長する傾向にあり、また床版厚が小さいとP C鋼材の量が多くなるので、床版の経済性の観点からもむやみに床版厚を小さくすることは望ましくない。また、1方向P C床版を広幅員床版に使用することを想定すると、R C構造として必要な床版厚を確保する必要がある。これらのことを考慮して最適な床版厚を決定すべきであるが、後述するプレストレスの導入量をはじめとしたP C床版の設計法自体に課題が多く最小床版厚についても同様である。道路橋示方書コンクリート橋編で、床版支間6mまでのP C床版に対して最小床版厚の規定があるが、上記の検討事項を考慮したうえで運用する必要があるものと考えられる。

(2) プレストレスの導入レベル

道路橋示方書コンクリート橋編では、P C床版に対するプレストレスの導入レベルとして引張応力を許さないフルプレストレスを規定している。一方、今年7月に改訂された日本道路公団の設計要領第二集では、死荷重作用時にはフルプレストレスで、活荷重作用時には曲げひび割れを生じさせない許容引張応力度以内とし、大型の遮音壁が設置された場合の設計モーメントの増大への対応として風荷重作用時にはひび割れを許容しひび割れ幅により制御する規定としている。後者の方がプレストレスの導入量は小さいが、導入プレストレス量とP C床版の疲労耐久性の関係については、文献6)でさらに小さいプレストレス導入量でも従来のR C床版に比べて飛躍的に耐久性が向上することが報告されている。したがって、床版の耐久性を満足するために最低限必要なプレストレスの導入量については、まだ研究段階と言える。このような道路橋床版の疲労耐久性に関する研究は、輪荷重走行試験機の導入に伴い研究事例は増えているものの十分なデータが得られているとは言い難く、P C床版として必要なプレストレスの導入量やそれに対応した鉄筋の設計方法についても今後の課題である。

(3) 床版の設計モーメント

P C床版では、実際に生じている曲げモーメントを評価しないと危険側の設計になる場合もあるので、設計モーメントの評価は重要である。設計モーメントの算定にあたっての課題として、解析におけるP C床版のモデル化の問題と、活荷重に対する載荷方法の問題があげられる¹⁸⁾。

解析におけるP C床版のモデル化として、直交異方性板としての挙動を示す1方向P C版の取り扱いがあり、直交異方性度によりモーメント分布は変化する。また、場所打ちP C床版の場合は、横桁やダイヤフラム位置で鋼桁の拘束による影響を受けるため、適当なモデル化により設計モーメントを算出する必要がある。

活荷重に対する設計モーメントの課題として、長支間床版に対する活荷重の載荷状態の妥当性があげられる。床版に作用する実際の活荷重は、1車線あたり1台の車両があ

る確立分布にしたがい車線内を通行する。床版支間が大きくなると、道路橋示方書で規定されている活荷重は実際の荷重状態と比較して過大に評価されることになり、過大な設計となってしまうことが指摘されている。

(4) プレキャスト床版における継手構造

プレキャスト床版については、床版相互の継手構造と床版と鋼桁との連結構造が課題である。これらの継手構造や連結構造は、構造と工法により現場作業が大きく異なり、床版のコストに影響するため、理的でかつ耐久性のある構造が求められる。現在は、橋軸方向の継手構造として、RCループ継手とPC鋼材によりプレストレスを導入する継手が一般に用いられている。これらの継手に要求される性能として、継手部の曲げとせん断を伝達することを条件に、ループ継手では鉄筋の形状と継手長が、またPC鋼材による継手ではプレストレスの導入量が決められおり、継手としての耐久性が確認されている。逆に、継手に要求される性能として床版としての耐久性を満足できればよいとすれば、継手部の曲げとせん断をフルに伝達する必要性に必ずしもこだわる必要がなく、さらに単純化した継手構造も期待できる。これらも、上述したプレストレスの導入レベルの課題と同様に、今後の輪荷重走行試験機による研究で明かにされるものと期待される。

(5) 場所打ち床版における施工時の課題

場所打ちのPC床版では、一般に移動型枠により施工される。移動型枠による施工では、床版は適当なブロックに分割して施工され、床版打設計画では先行部の硬化したコンクリートにひび割れが発生しないように、床版打設順序を検討する必要がある。床版打設順序の基本は、支間部を先行して打設して支点部をその後で打設する順序であるが、施工条件によっては必ずしも基本どおりの順序を選択できない場合もある。このような床版打設順序の検討にあたり、ひび割れを発生させないために中間支点部へのプレストレス力の導入が必要な場合もあり、支点のジャッキアップダウン工法を併用するなどの対応が必要である。連続合成桁橋では、床版打設順序により鋼桁の応力度およびキャンパーが変化し、特にジャッキアップダウンを行う場合は、それに伴う鋼桁の必要断面が大きくなるのである。これらに留意して設計を進める必要がある。

7. おわりに

PC床版の鋼橋への適用は、橋梁形式の自由度を広めるうえで大きな意味を持っていることを冒頭で述べたが、適用の歴史をふりかえり課題を整理してみると、PC床版の設計および施工法において必ずしも最適な方法が整備されているとは言えないのが現状である。今後、鋼橋の経済性がライフサイクルコストを含めて論じられることもあり¹⁹⁾、耐荷力や耐久性の高いPC床版に対し合理的でより経済的な設計および施工法を確立するためにも、より一層の研究を進める必要があるものと考えられる。

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た。

参考文献

- 1) 飯岡, 檜貝, 村木: 鉄筋コンクリート床版の疲労試験, 日本道路公団昭和51年度試験所報告, 1977.
- 2) 岡村, 園田: ひび割れ床版の力学的特性, 鉄筋コンクリート床版の損傷と疲労設計へのアプローチ, 土木学会関西支部鉄筋コンクリート床版疲労設計委員会報告, 1997.
- 3) 松井: 道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究, 大阪大学学位論文, 1984.
- 4) 松井: プレストレッシングによる道路橋床版の耐久性向上について, 第6回プレ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, 1996.
- 5) 森山, 松井, 梶川, 橋, 牛島, 大沢: ループ状重ね継手を有するプレキャスト床版の疲労耐久性試験, 土木学会第50回年次学術講演会概要集, 1995.
- 6) 八部, 川畑, 佐々木, 西川, 内田, 宮崎: パーシャルプレストレスを導入したPC床版の輪荷重走行実験, 土木学会第53回年次学術講演会概要集, 1998.
- 7) 橋: 連続合成桁橋, 理工図書, 1976.
- 8) 小西, 高橋, 新山: 5径間連続合成桁橋の架設—新石狩大橋—, 橋梁と基礎, 69-11, 1969.
- 9) 日本橋梁建設協会: 既存床版工法調査書, 1992.
- 10) 松井: プレキャスト床版の開発現状と研究の動向, プレストレストコンクリート, Vol. 40, No. 2, 1998.
- 11) 鳥海, 倉本: プレキャスト床版による施工の合理化, 橋梁と基礎, 92-8, 1992.
- 12) 高速道路技術センター: 橋梁の省力化工法に関する調査検討(その4) 報告書, 1995.
- 13) 清沢, 松永, 茂手木, 小西, 町田, 橋: 合理化手法によって実施された新琴似高架橋の設計/製作/架設, 川田技報, Vol. 12, 1993.
- 14) 酒井, 橋, 小西, 志村: 水平荷重を受けるPC床版2主桁橋について, 土木学会第48回年次学術講演会概要集, 1993.
- 15) 高橋, 志村, 橋, 水野: PC床版2主I桁橋による合理化検討, 土木学会第49回年次学術講演会概要集, 1994.
- 16) 高橋, 小西, 志村, 橋: PC床版2主桁橋の設計・施工(ホロナイ川橋)の床版施工, プレストレストコンクリート, Vol. 38, No. 1, 1996.
- 17) 水口, 村山, 北山, 山下: 東海大府高架橋におけるプレキャストPC床版の設計と施工, プレストレストコンクリート, Vol. 40, No. 2, 1998.
- 18) 松井: 床版の技術開発, 橋梁と基礎, 97-8, 1997.
- 19) 西川: ライフサイクルコストを最小にするミニマムメンテナンス橋の提案, 橋梁と基礎, 97-8, 1997.