

連続合成2主桁橋「千鳥の沢川橋」のPC床版設計、施工

Design and Construction of PC Slab for A Continuous Composite Two Plate Girders Bridge “Chidorinosawa River Bridge”

山本晃久^{*}、大垣賀津雄^{**}、作川孝一^{***}、伊藤聡哉^{****}、川尻克利^{*****}、福岡一幸^{*****}

Akihisa YAMAMOTO, Kazuo OHGAKI, Kouichi SAKUGAWA, Toshiya ITO,
Katsutoshi KAWASHIRI and Kazuyuki FUKUOKA

^{*}工修 川崎重工業(株) 鉄構事業部 橋梁技術総括部 課長 (〒136-8588 東京都江東区南砂 2-6-5)

^{**}工修 川崎重工業(株) 鉄構事業部 橋梁技術総括部 課長代理 (〒136-8588 東京都江東区南砂 2-6-5)

^{***}工修 川崎重工業(株) 鉄構事業部 橋梁技術総括部 (〒136-8588 東京都江東区南砂 2-6-5)

^{****} 川崎重工業(株) 鉄構事業部 野田工場 工事部 (〒278-8585 千葉県野田市二ツ塚 118 番地)

^{*****} 日本道路公団 北海道支社 建設部 構造技術課 (〒004-8512 北海道札幌市厚別区大谷地西 5-12-30)

^{*****} 日本道路公団 北海道支社 千歳工事事務所 追分工事長 (〒066-0037 北海道千歳市新富 1-2-14)

There is an increasing need for the use of labor-saving methods in bridge construction, and studies have been made of two I-girder bridges in this respect. This particular type of bridge makes use of long-span, transversely prestressed concrete slabs, however there has been relatively little design and construction of such slabs, since in Japan two I-girder bridges have not been realized so far. In the design and construction of Chidorinosawa river bridge, which is a continuous composite two I-girder bridge with prestressed concrete slabs, we carried out investigations of this bridge. This paper presents the design method of prestressed reinforced concrete slab and the slabs at intermediate supports of continuous composite girder bridge, which has longitudinally prestressing by the jack-up-down method, and introduces the construction method of slabs with a new type moving formwork.

Key Word PC slab, composite two plate girder, prestressed reinforced concrete, moving formwork

1. はじめに

近年、鋼橋の経済性、耐久性および維持管理の容易さなどの観点から、PC床版を有する鋼2主桁橋が有力な構造形式として認められ、関係各所で建設が進められている。これらの橋梁形式では、床版支間が大きくなるため、我が国では耐久性のある横締めPC床版を採用しているのが一般的である。このようなPC床版には、プレテンション方式によるプレキャスト床版と、ポストテンション方式による場所打ち床版があり、前者は工期短縮や品質の安定化などが、後者には鋼桁との合成化を図りやすいことや建設費の縮減を目指しやすいなどの長所が挙げられる。いずれのタイプのPC床版を採用するかについては、設計条件、現地の架設条件、工程および工費などを比較検討して、総合的に判断されるべきものである。

一方、近年のPC構造物の設計においては、PC鋼線量を押さえた上で破壊時にねばりのある変形特性を持たせるために、PRCの考え方を採用するケースが多くなってきている。しかしながら、PRC設計の考え方は種々存在

し、その方針は必ずしも確立されているとは言い難い状況にある。

もう一つの動向として、連続合成桁設計の採用が挙げられる。2主桁橋のような構造形式で対傾構、横構を省略する場合、風荷重や地震荷重などの橋軸直角方向力に対しては、床版によってせん断力伝達を行わねばならない。そのため、鋼桁と床版は十分結合させる必要があり、その解決策としてずれ止めを多く配置するほど、従来の非合成桁設計の考え方が疑問視されることとなり、連続合成桁設計が合理的であると判断される場合が増えてきている。しかしながら、中間支点部床版のひび割れ制御、移動型枠による床版施工法およびジャッキアップダウンによるプレストレス導入など、中間支点部床版の設計・施工の考え方が十分確立されていないというのが実状である。

このような状況の中で、千鳥の沢川橋はPRC設計した床版を有する4径間連続合成2主桁橋として¹⁾、実施設計および鋼桁架設を行い、移動型枠を用いた場所打ちのPC床版施工を完了させた²⁾。また本橋では中間支点部床版の施工時におけるひび割れを回避することを主

目的に、移動型枠による支間部先行打設のピアノ工法を行うとともに、各支点をジャッキアップダウンすることにより、橋軸方向にプレストレスを導入するという施工法を採用した。

本文は鋼2主桁上に施工される PRC 床版構造の一つの事例として、また連続合成桁設計された床版の事例として、本橋の実施設計や施工方法を紹介するものである。

2. 対象橋梁

(1) 対象橋梁の概要

日本道路公団北海道横断自動車道千鳥の沢川橋は、平均支間長 48.5m の PC 床版を有する 4 径間連続合成 2 主桁橋である。図-1 に一般図を示す。本橋の床版は総幅員 11.4m、床版支間 5.7m、版厚 320mm の場所打ち横締め PC 構造を採用している。また本橋は平面線形が $R=2,200m$ の曲率を有しており、床版の張出し量を一定とするため曲線桁として鋼桁の設計、製作を行った。

(2) 主要材料

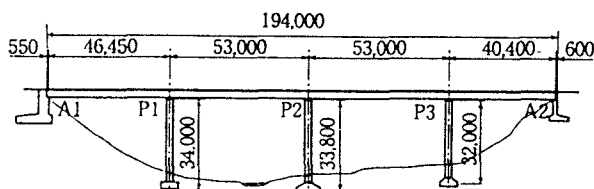
コンクリート強度： $\sigma_{ck}=40N/mm^2$ (膨張剤使用)

鉄筋：D10, D13, D16, D19, D22 (SD345)

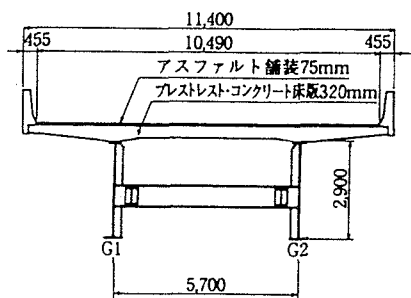
PC 鋼材：鋼より線 SWPR19-1T21.8 ctc500 (標準部)

プレグラウト (アフターボンド) 仕様

鋼板：SMA400W, SMA490W, SMA570W (鋼桁主部材)



a) 側面図



b) 断面図

図-1 千鳥の沢川橋

3. PC 床版の設計

(1) 床版厚

道路橋示方書³⁾ (以下、道示と呼ぶ) II 6.1.3 によると、図-2 に示す通り床版支間 L は純支間から支間中央の

床版厚を加えた長さとなるが、活荷重による上フランジの首振り変形は、垂直補剛材が極力省略されることなどから十分拘束されているとは言い難く、ここでは安全側に支持桁の中心間隔を床版支間 L と考えた。

したがって、床版厚は道示 III 5.4 に従い $0.9 \times (4L + 11) = 30.4cm$ となるが、連続合成桁設計していることを理由に 5% 増しの 32cm を採用した。しかしながら、この種の 2 主桁橋では風や地震に対しても十分な合成度を確保するために比較的多くのずれ止めを配置しており、非合成桁設計された場合でも完成挙動は合成桁になると考えられる。また設計法が非合成であれ合成であれ 2 主桁橋の床版は取替え困難であり、そのためにも PC 床版を採用することにより耐久性を向上させ、取替を前提としていない構造形式であるといえる。床版厚の決定方法は非合成と合成にかかわらず一定とすべきであり、このような観点から再検討を加える必要がある。

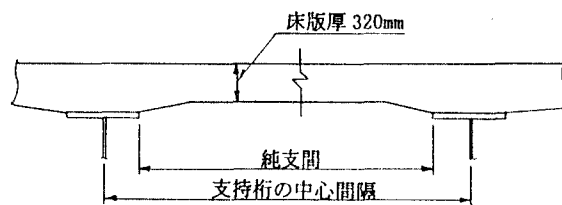


図-2 床版支間

(2) ハンチ形状

床版のハンチ高さは張出し部床版の設計曲げ応力度から決定されるべきものであるが、本橋の床版設計段階で種々ハンチ高さを変化させた FEM 解析を行い、その結果から局所応力を緩和させるためには 8cm 程度以上のハンチ高さを有することが望ましいと判断した (図-3 参照)。また鋼橋の床版ハンチはこれまで上フランジ下面から立ち上げる場合が一般的であったが、2 主桁橋でフランジが厚くなることに伴い、ハンチ部のかぶりが大きくなって無筋部分が広がるため、横桁位置など応力集中を受ける部分のハンチにはひび割れが生じる可能性が高くなる。したがって上フランジ厚を下逃げとして鋼桁を製作し、上フランジ上面からハンチを立ち上げてハンチ筋を一定形状で配置しやすくした (図-4 参照)。ここで、ハンチ勾配は従来の 1:3 から 1:5 に緩和させたが、合成桁設計上に見込んだハンチは 45° 分である。

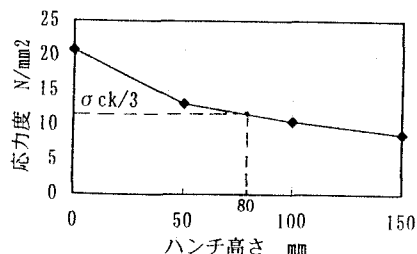


図-3 ハンチ高さ

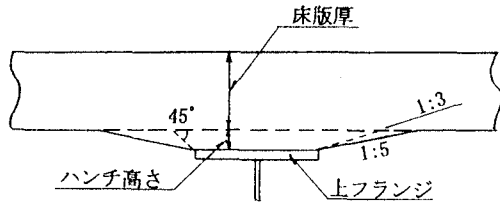


図-4 ハンチ部形状

(3) 橋軸直角方向の設計

a) 死荷重曲げモーメント

死荷重状態の床版設計曲げモーメントの算出においては、道示式や単純梁モデルの計算のみならず、横桁が床版挙動に与える影響を考慮して安全側となるように床版を主桁位置にて固定支持した梁モデルに対しても計算を行った⁴⁾。実際の発生断面力は、横桁位置では固定支持に近く、一般部では単純支持に近い状態であると考えられる⁵⁾。

これらの設計モーメントの比較結果を表-1に示すが、このような実断面力を考えると、道示Ⅲ 5.5.1による床版支間部の死荷重曲げモーメントは、正の安全側すぎる値であることが明らかである。一方、単純梁モデルを採用すると、張出し部の地覆や壁高欄荷重の影響により、床版支間部の死荷重モーメントが負の値を持ち、正の活荷重モーメントを減少させるので、危険側の評価を与える可能性がある⁴⁾。したがって、本橋の床版支間部の死荷重曲げモーメントには、安全側となる固定梁モデルの値を採用することとした。

表-1 床版支間部死荷重曲げモーメント (単位: tfm/m)

項目	道示式	単純梁	固定梁
床版自重	3.25	0.61	0.94
舗装	0.70	0.21	0.20
壁高欄, 地覆	0.00	-2.62	0.00
遮音壁	0.00	-0.41	0.00
全死荷重	3.95	-2.21	1.14

注) 表中, マイナスは負曲げモーメントを示す。

b) 活荷重曲げモーメント

一方、活荷重については、道示Ⅲ 5.5.1の設計曲げモーメント式に従っている。この際の床版支間も主桁間隔を採用している。

c) PRC 設計の考え方

これらの設計断面力に対して、PC 鋼線は経済性を考慮して偏心配置とした。また PC の導入軸力が鉄筋に拘束されることを考慮して、鉄道構造物等設計標準-コンクリート構造物⁶⁾10.4.2 に従い、床版の応力計算やひび割れ幅の照査を実施した。ここで、橋軸直角方向の鉄筋はひび割れ分散性をよくするため、細径鉄筋 D10 を密(100mm ピッチ)に配置している⁷⁾。

床版の設計における PRC の考え方は次の通りである。

- ①死荷重: 引張応力を発生させない。
- ②死+活荷重: 引張応力を許容するが、ひび割れを発生させない許容引張応力度(コンクリート標準示方書⁸⁾7.4.4 [解説]により、曲げひび割れの検討を省略できる制限値)とした。
- ③風荷重: ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅の規定(コンクリート標準示方書⁸⁾7.4.2「許容ひび割れ幅」の特に厳しい腐食性環境による値)を設けて鉄筋により制御する。
- ④衝突荷重: ひび割れ幅の照査は行わず、割り増しを考慮した鉄筋の許容応力度にて照査する。

いま、上述の通り、固定梁モデルによる死荷重曲げモーメントを与えて PC 鋼線を偏心配置としたが、床版は鋼桁により弾性固定されていると考えられるので、単純梁モデルを用いた死荷重モーメントに対しても応力を確認することとした。その結果は表-2に示す通りであり、上記 PRC の考え方①の死荷重時に引張を許さないという規定を満足させることができない。これらを同時に満足させるためには、PC 鋼線を軸力配置に近づけて、より多くの鋼線を配置する必要があるが、それは不経済であると判断し、本橋では単純梁モデルを用いた場合に生じる引張応力がさほど大きくないので、それを許容することとした。今後の課題として、弾性固定される主桁-床版接合部の解析を行い、真値の死荷重曲げモーメント評価方法を検討する必要がある。

表-2 床版支間部の応力計算

項目	単位	単純梁	固定梁
死荷重モーメント M_D	tfm/m	-2.21	1.14
活荷重モーメント M_L	〃	8.97	8.97
鉄筋拘束モーメント	〃	0.33	0.33
設計モーメント M_{D+L}	〃	7.09	10.44
設計下面応力 σ_{D+L}	kgf/cm ²	-2.0	-21.7
死荷重上面応力 σ_D	〃	-12.9	7.1

注) 表中, マイナスの応力は、引張を示す。

(4) 橋軸方向の設計

a) 支間部の考え方

道示Ⅲ 5.5.1により配筋方向の設計活荷重曲げモーメントを算出し、複鉄筋の RC 断面計算を行った。また支間部の正曲げモーメント領域では、主桁作用と床版作用の重ね合わせの照査を行った。その結果、配筋鉄筋は D19-ctc125mm とした。

b) 中間支点部の考え方

移動型枠により床版を順次施工し合成させていく場合、各打設ステップで合成桁部分と鋼桁のみの非合成桁部分が混在する。したがって打設ステップの重ね合わせにより、格子計算点ごとに前死荷重と後死荷重の断面力を区分する必要がある。このようにして得られた後死荷重応力と、ジャッキアップダウンによる床版プレストレス導入応力を計算する。さらにクリープ、乾燥収縮およ

び鋼桁と床版の温度差による不静定モーメント再配分計算を行った。ただし乾燥収縮による断面力算出に際して、床版コンクリートに膨張剤を用いることから、道示Ⅱ 9.2.8による床版乾燥収縮量 200 μ を 150 μ に低減させた⁹⁾。

上記の計算方法に従い、最適な床版打設順序を検討した上で、ジャッキアップダウン量を種々変化させてひび割れの照査検討を実施した。本橋の中間支点部床版は、表-3に示す通り、死荷重(D)、乾燥収縮(SH)、クリープ(CR)および温度差(T)の組合せ荷重状態で引張応力を許容するが、ひび割れを発生させない許容引張強度以下となるようにジャッキアップダウン量を計算した。

表-3 中間支点部床版の応力照査

項 目	単 位	P 1	P 2	P 3
ジャッキアップダウン量	mm	160	120	120
①後荷重	kgf/cm ²	-18	-16	-18
①'ジャッキアップダウン	//	30	22	33
②クリープ	//	-10	-9	-11
③乾燥収縮	//	-14	-12	-15
④温度差	//	-11	-8	-12
①+①'+②+③	//	-12	-15	-11
①+①'+②+③+④	//	-23	-23	-23
許容引張強度	//	-23	-23	-23

注) 表中、マイナスの応力は、引張を表す。

また活荷重載荷時においては、中間支点部床版のひび割れ発生を許容するが、鉄筋量を支間部より多くして(D22-ctc125mm)ひび割れ幅の推定計算を行い¹⁰⁾、コンクリート標準示方書⁸⁾7.4.2「許容ひび割れ幅」特に厳しい腐食環境による値以下となるように、鉄筋にてひび割れ制御を行った¹¹⁾。

移動型枠による分割施工を行う場合、橋軸方向の至る所に一時的な負曲げモーメントが発生する。その外力モーメントにより生じる床版内の応力勾配と、乾燥収縮や温度差などの固有応力による応力勾配とが逆方向になるため、中間支点部のみならず全橋を通じて、橋軸方向の配筋鉄筋は床版の上側と下側に均一配置するものとした。

4. PC床版の施工

(1) PC床版施工の基本方針

2主桁橋の場所打ちPC床版は、施工の機械化、省力化が一つの技術課題となっている。このような課題を解決する施工設備として、欧州諸国では移動型枠が一般的に採用されているように見受けられる。PC床版の場所打ち施工に移動型枠を用いれば、全面固定支保工、全面固定型枠、全面作業足場の設置撤去の必要が無くなり、工事の安全性向上を図ることができる。また設備の標準化による同種工事への転用を図ることにより、施工コスト

を低減することが可能となる。以上のことから、本橋のPC床版施工は移動型枠を用いた場所打ちサイクル施工を基本方針とする。

(2) 移動型枠の構造

本橋のPC床版施工で採用した移動型枠は図-5に示す通りであり、その構造諸元と特長は以下の通りである。

a) 構造諸元

全 長：16.0 m

総 重 量：45tf(メタルフォーム、作業足場除く)

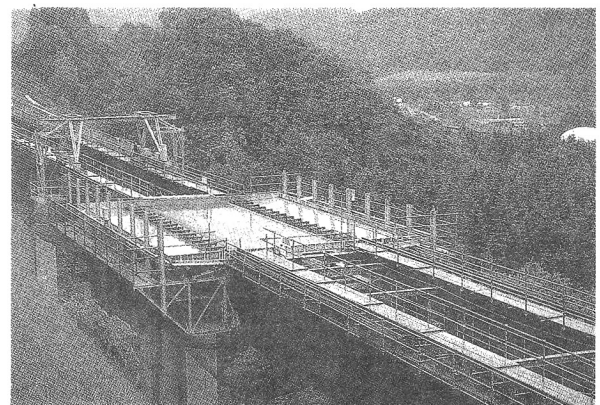
施工長さ：15.0 m以下(施工幅員 11.1 m)

駆動方法：ギヤトモーター(0.4KW 1.5rpm)×10台

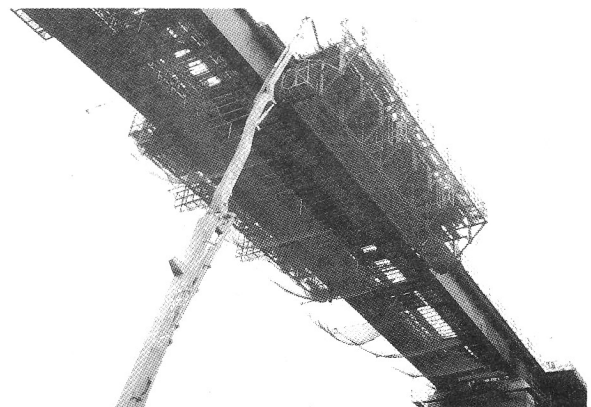
走行速度：1.5 m/min

b) 特長

- ①サポート形式を採用したことにより床版施工面の機材がほとんどなくなり、床版打設作業(打コン、締め固め、表面均し)の省力化が図れる。
- ②内型枠を改造すれば、より広幅員の2主桁橋や3主桁橋にも適用可能である。
- ③1回の床版施工は、橋軸方向に15mまで可能としている。フレーム枠を増やせば、橋軸方向施工長さを30m程度まで自由に選択できる。



a) 移動型枠セット状況



b) 床版打設状況

図-5 移動型枠

④型枠総重量は、15m 施工で 45tf と軽量であり、床版打設時の鋼桁安定性に有利である。

⑤移動型枠は鋼桁下フランジより上部に配置しているため、中間橋脚を無理なく通過できる。この際、中間支点上の垂直補剛材も、移動型枠車輪部の回転機能により機材との干渉を回避できる。

(3) 床版打設順序の検討

このような移動型枠では、橋軸方向に 10~20m 程度の分割打設となるが、その施工性を考えると一方の橋台から他方への片押し施工が望ましいといえる。しかしながら、この場合の床版には大きな引張力が発生し、ひび割れが生じることが懸念される。これを回避するために、図-6 に示すような支間部から打設するピアノ工法を採用した。床版打設は最大 15m のブロックに区分し、15 回の分割打設を行った (最大 55 m³)。分割打設の打継ぎ目地は、図-7 に示すように、連続性の高い止水構造を採用した。

このように支間中央部から床版を施工するために、まだ固まらない床版施工時の鋼桁全体座屈や腹板の局部座屈など鋼桁の安定性が懸念されるが、施工計画段階において全橋モデルの有限変位解析を行い、仮横構をヤストラットを設けるなどの対策を施し、安全性を確保している¹²⁾。

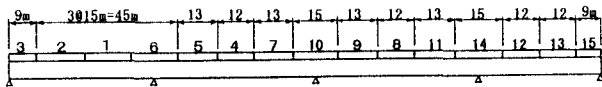


図-6 床版打設順序

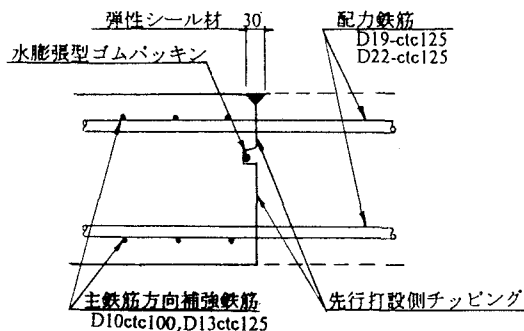


図-7 床版打継ぎ目地

(4) ジャッキアップダウン工法

中間支点付近の床版のひび割れを回避するために、橋軸方向にプレストレスを導入する施工法が考えられる。この代表的な工法の一つにジャッキアップダウンによるプレストレス導入方法がある。昭和 30 年代から 40 年代前半に用いられていたジャッキアップダウン施工法は、図-8 に示すように、中間支点 P1~P3 を床版打設前に上げ越しておき、橋梁全体に弓なりの強制キャンバ

ーを与え、床版打設後一括で降下させる工法であった。しかしながら、移動型枠により施工されるために床版は順次鋼桁と合成されることと、近年計算機が発達したことなどから、このような場合のジャッキアップダウン手順は図-9 に示すように各支点の床版施工のタイミングに合わせ、中間支点部床版打設ごとに逐次橋軸方向プレストレスを与えることとした。

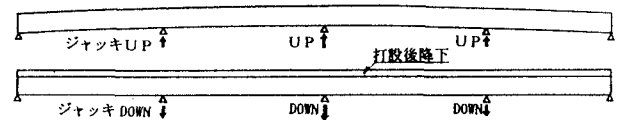


図-8 従来のジャッキアップダウン工法

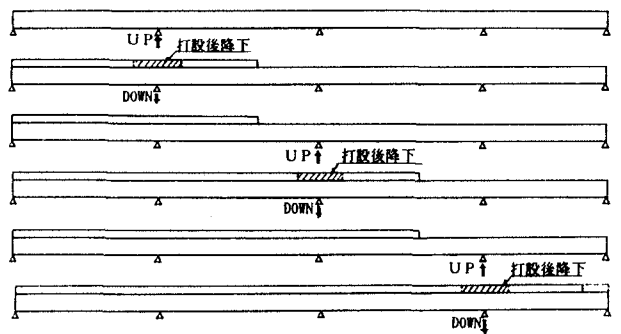


図-9 逐次ジャッキアップダウン工法

本橋で設定したジャッキアップダウンによるプレストレス量は 1 つの事例であることは言うまでもない。このようなプレストレス導入量は PRC 設計と同様に種々考えられ、仮に整理すると表-4 に示す通りである。本橋でも活荷重に対して床版が割れないことを条件 (同表中ランク B) に検討したが、結果として中間支点部の鋼桁断面が床版の施工時に決定され経済的ではないこと、ジャッキアップしていない支点において負反力が発生することなどから、本橋では照査ランク E を採用することとした。

表-4 中間支点部床版の照査方法

ランク	呼び名	荷重	条件 (制限)
A	完全合成桁	フルプレスト	D+PS+CR+SH+T+L 引張を許さない
B			D+PS+CR+SH+T+L ひび割れ制限
C		部分プレスト	D+PS+CR+SH+T 引張を許さない
D			D+PS+CR+SH 引張を許さない
E			D+PS+CR+SH+T ひび割れ制限
F			D+PS+CR+SH ひび割れ制限
G		プレストレスなし	D+ CR+SH+T+L ひび割れ制限

注) D: 後死荷重, PS: プレストレス力, CR: クリーブ, SH: 乾燥収縮, T: 温度差, L: 活荷重

ジャッキアップダウンにより導入した中間支点部床版のプレストレスは、クリープや乾燥収縮により減少することが考えられる。これらについては本橋の床版打設時に鋼桁および床版の応力測定を実施し、上述の考え方

や有効性に関する基礎データを得ることとしている。中間支点部床版に防水層施工を施し橋軸方向の配力鉄筋でひび割れ制御する、欧州諸国で採用されているようなプレストレスしない連続合成桁¹¹⁾の考え方(ランクG)が最も合理的であるならば、煩雑なジャッキアップダウン作業を行わない方向で今後検討すべきであろう。

5. まとめ

本橋は、PC床版を有する鋼2主桁橋という構造形式の中で、我が国で初めて連続合成桁設計された橋梁である。その床版施工においては、移動型枠による機械化施工や逐次ジャッキアップダウンによるプレストレスの導入など、新しい技術や工法を導入しており、この種の橋梁の設計、施工技術の標準化にもつながるパイロット工事である。今後、PC床版連続合成2主桁橋が、次世代の標準化橋梁形式と位置づけられ、発展を遂げるためにも、以下の課題にさらに取り組む必要がある。

- ①床版の死荷重曲げモーメント評価方法
- ②ひび割れ制御を含めた中間支点部床版の設計方法
- ③ジャッキアップダウンによるプレストレス導入効果の確認
- ④床版施工の機械化、省力化の推進
- ⑤床版施工時の鋼桁安定性など留意点の明確化と照査方法のマニュアル化

本橋のPC床版施工は、平成10年6月から開始し、15サイクルを15週間で、同年9月末に完了させることができた。本文が、今後、建設が急増すると考えられるPC床版連続合成2主桁橋の設計、施工の一助になれば幸いである。最後に、本検討に際してご指導、ご協力頂いた関係各位に感謝する次第である。

参考文献

- 1) 田村陽司, 川尻克利, 大垣賀津雄, 作川孝一: PC床版連続合成2主桁橋「千鳥の沢川橋」の設計, 橋梁と基礎, Vol.32, No.9, pp.18~22, 1998.9
- 2) 馬場敦美, 福岡一幸, 森隆行, 伊藤聡哉: PC床版連続合成2主桁橋「千鳥の沢川橋」の施工, 橋梁と基礎, Vol.32, No.10, pp.2~8, 1998.10
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I~V, 平成8年12月
- 4) 作川孝一, 八部順一, 大垣賀津雄, 高橋昭一, 高畑和弘, 川尻克利: 横桁の影響を考慮した2主桁橋床版の死荷重曲げモーメントに関する一考察, 土木学会第52回年次学術講演会, I-A260, 1997.9
- 5) 坂井藤一, 八部順一, 大垣賀津雄, 橋本靖智, 友田富雄: 合成2主桁橋の立体挙動特性に関する研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.41A, pp.945~954, 1995.3
- 6) (財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説-コンクリート構造物, 丸善, 1992
- 7) 横道英雄, 成井信, 上阪康雄, 石原重孝訳: レオンハルトのコンクリート講座③, 鉄筋コンクリートの配筋, 鹿島出版会
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書[平成8年度制定]設計編
- 9) 増田隆, 岡米男, 木曾茂: 鋼橋における膨張コンクリート床版の特性, 日本道路公団試験所報告, Vol.27, pp.45~59, 1990
- 10) G. Hanswille: Zur RiBbreitenbeschränkung biverbundtragern, Januar 1986.
- 11) 日本橋梁建設協会: PC床版を有するプレストレスしない連続合成桁 設計要領(案), 平成8年3月
- 12) 太田哲司, 川尻克利, 長井正嗣, 磯江暁, 大垣賀津雄, 作川孝一: 少補剛設計した2主桁橋の施工時安定性に関する解析的研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.45A, 1999.3 [投稿中]