

鋼桁橋における場所打ちPC床版の設計と施工

—PC床版2主桁橋床版の設計施工—

高橋 昭一*

1. 鋼桁橋床版の課題

平成9年3月末現在における高速道路の橋梁資産は総数約7000橋で、その延長は866kmとなっている。内訳は鋼桁橋40%、PC橋32%、RC橋28%であり、鋼桁橋はJH日本道路公団の高速道路橋で、最も多くを占める橋種である¹⁾。

橋梁形式は鈑桁橋、箱桁橋、トラス橋が基本となっており、道路路面を構成する床版は、海洋架橋、特殊条件下の橋梁を除き、昭和30年代末の名神高速道路以来、RC場所打ち床版が基本となっている。

鋼桁橋床版の構造面での課題として、予想を上回る高速道路交通の伸びと、現在から比較すると床版厚、配力筋の少なさなどに起因した床版の疲労損傷や、近年ではNaClなどからなる凍結防止材散布による塩害損傷がある。これらに対しては、床版厚さの確保、鉄筋の追加配置、そして、道路使用状況に応じた防水工の設置により、改善を行っている。

鋼桁橋床版の施工面での課題としては、型枠支保工、鉄筋工、コンクリート工における熟練労働者不足、作業量の平準化が図れないことによる工費増加、高所作業による墜落事故などがある。JH日本道路公団は平成4年度より、札幌自動車道新琴似高架橋、近畿自動車道末広高架橋、上信越自動車道栃木川橋の3橋梁で、プレキャスト床版を前提とした鋼桁設計を導入して、プレキャスト床版とプレキャスト壁高欄の試験施工を行っているが、主として経済性の面から、標準採用するには至らなかった。その後、磐越自動車道差塩橋でのプレキャスト床版のRC化、橋軸方向継ぎ手のRC化などを検討しているが、工費縮減もあり、従来からの場所打ち床版に比し割高となるプレキャスト床版を、在来多主桁橋で採用する用途はまだまだ立っていない。

2. PC床版2主桁橋

PC床版2主桁橋は、前記札幌自動車道新琴似高架橋ほか2橋で、プレキャスト床版等床版工の合理化と同時に行われた。鋼桁の単純化合理化設計の成果をさらに押し進めるべ

く、従来、幅員10m程度の2車線橋梁が4-5主桁で設計されていたものを2本主桁とするもので、主桁との取合いが少なくなることから、床版工の合理化施工が、経済性を伴って実現できる橋梁形式として、計画されたものである。

道路橋では「床版が工事目的物」であり、何にもましてその耐久性耐荷力が課題となる。PC床版2主桁橋では、床版支間が従来の3m程度から6m程度になるため、ハンドリングのために導入されていたプレストレス力が構造上必要となること、高強度コンクリートとなるためコンクリート構造物としての耐久性も確保されること、30cm程度の床版厚が必要となり道路路面としての耐荷力耐久性も増すことになる。

一方、施工面では、当初、プレキャスト床版を採用しようとして試みたが、筆者が担当していた地方路線では、橋梁延長は平均200m前後であり、しかも片車線しか当分の間施工しない暫定2車線施工区間であったため、プレキャスト床版の経済性に目途が立たなかった。

ドイツ、フランスなどの施工事例を調査しても、場所打ち床版の施工例がほとんどであったことなどから、ホロナイ川橋など場所打ち床版による試験施工橋梁を実際に施工し、改善を加えていったところ、移動型枠工、鉄筋のプレファブ化、また、ほぼ同時期に開発されたプレグラウト鋼材を用いることにより、従来からのRC床版に比べ、格段の省力化が実現できた。

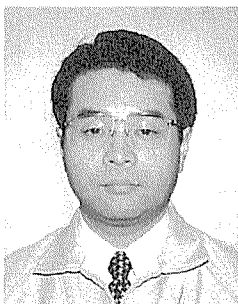
2主桁化による鋼構造のシンプル化に伴い、鋼構造部分でさらなる経済性を実現させ、試験施工を踏まえた床版工費を算出したところ、中規模支間では、コンクリート橋を含む他のあらゆる橋梁形式と比しても、十分な競争性(経済性)を有していることも確認できた²⁾。

3. 場所打ちPC床版の設計

JHでは、工費縮減の流れとも相まって、PC床版2主桁橋の設計施工に関し最適化を検討しており、本章では場所打ちPC床版に関する設計について、その検討の一端を示したい³⁾。

3.1 床版設計の基本方針

ヨーロッパ等において、鋼2主桁はさほど珍しい形式ではなく、合理的な構造形式であると認識されている。このような2主桁橋に対する我が国とヨーロッパでの認識の相違は、床版に対する認識の相違によるところが大きい。すなわち我が国では、これまで鋼構造に重点がおかれ、床版は格子桁に載せる単なる板部材として捉え、「鋼桁ありき」の意識で鋼橋は設計されてきた。これに対しヨーロッパでは古くから、床版に対する防水工の設置が図られてきたり、ある程度以上の床版厚を確保してきており、2主桁橋は、



* Syoichi TAKAHASHI
日本道路公団 静岡建設局
富士工事事務所 構造工事長

「最も単純な合成構造橋梁」として取り扱われてきた。

ホロナイ川橋で用いられた鋼2主桁橋(PC床版2主桁橋)では、「床版ありき」の構造であることから、床版の耐久性に十分に配慮し、半永久的な部材として取り扱えるよう、床版橋軸直角方向にプレストレス力を導入している。従来のPC床版は、活荷重載荷時の制限としてコンクリートに引張応力を発生させないこと(フルプレストレス)を規定している。これに対しPC床版2主桁橋では、フルプレストレスで設計するよりも若干の引張応力度の発生を許容し、適切に鉄筋で補強した方が、終局耐力の向上や構造物の耐久性上好ましいことから、フルプレストレスにこだわらずに設計することとし、従来の道示に規定される許容応力度に加え、各荷重状態において適切な制限値を設けることとしている。

一般に鋼桁の設計では、非合成桁で設計される鋼橋床版は、床版作用のみに対する設計を行い、主桁断面の一部としての作用は無視している。しかしながら、非合成桁として設計された鋼桁橋でも、実橋では床版と鋼桁が合成された挙動をすることが知られている。したがって、床版の耐久性を担保するという観点から、床版橋軸方向の設計では、主桁の断面の一部としての作用を考慮して照査することを義務づけている。

PC床版2主桁橋は、「鋼橋床版の耐久性確保および施工の合理化を念頭において提案された橋梁形式」である。打換えを前提とした在来多主桁橋RC床版とは異なり、床版の長寿命化に期待した、言い換えると床版の寿命が橋梁の寿命となりうる橋梁形式であることから、設計、特に施工にあたっては、床版の長寿命化に資するものを積極的に取り入れるよう配慮しなければならないとした。

具体的な諸策としては、設計では床版厚の確保、プレストレスの導入であり、材料としては高強度コンクリート、膨張コンクリート、プレグラウトタイプ鋼材、防水工であり、施工法としては、床版に施工中に引張力を入れない打設順序の検討、コンクリート打設前後の支点移動(ジャッキアップダウン)による軸方向プレストレスの導入や床版工の省力化である。

PC床版2主桁橋はいまだ過渡的な、施工例の少ない橋梁形式であるが、たとえば、支点移動によるプレストレス導入などは、昭和40年代に東名高速道路でも実施され、その有効性は十分に確認されたものである。このような古くからある技術に、プレグラウトタイプ鋼材、移動型枠、プレファブ鉄筋などによる省力化等新しい技術を組み合わせ、設計・施工計画の中で、床版の耐久性を確保するためには、いかにすべきかを常に考えることが、計画者、設計者、施工者に望まれる。

施工の省力化は今後の高齢化社会への移行を考えると、ぜひ行わなければならないことであり、省力化を第一とした鉄筋、PC鋼材の定尺定形化や省力化のための材料の使用を前提とした施工計画の立案を行わなければならない。場所打ち床版の経済性は、このように行った省力化施工、すなわち床版施工のサイクル化とそのサイクルの短縮によって実現される。

3.2 床版支間と床版厚

床版支間は主桁の中心距離とした。PC床版は基本的に主筋方向が主桁直角方向になることにより、支間は主桁間隔とした。道路橋示方書によれば、単純版の床版支間は、主桁間隔あるいは純支間+床版厚としてよいとの規定もあるが、厚くなる方が耐久性の観点から好ましいと判断して、前者を床版支間とした。

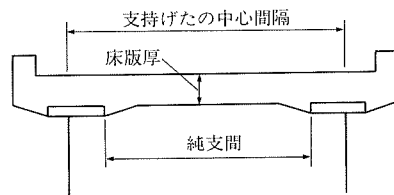


図-1 床版支間

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る。また、床版厚が小さいとPC鋼材の量が多くなり、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好ましくない。

床版支間6m程度までの床版厚の決定には、道路橋示方書における一方PC版の最小床版厚の規定を満足することにした。なお、鋼桁を非合成で設計しても、合成桁で設計しても、式-1の最小床版厚で設計可能であるが、合成桁で設計する場合の最小床版厚は、安全しるを考慮して、式-1の5%増しの床版厚とした。

床版厚については、十分に議論されていないのが現状である。ドイツにおける基準で最小床版厚が28cmに規定されていることも踏まえ、道示の規定を準用し道示の範囲内で安全側の床版厚となるよう定めている。

$$d = (4L + 11) \times 0.9 \dots \dots \dots \text{式-1}$$

ここに、L：床版支間(m)

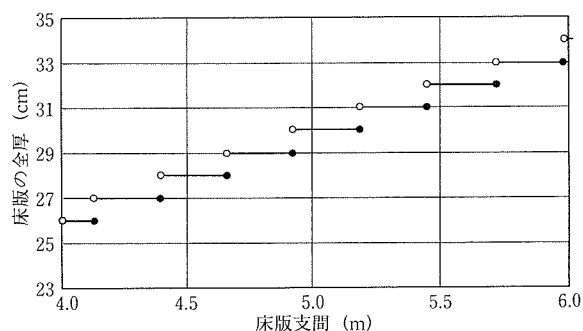


図-2 床版支間と最小床版厚

3.3 制限値の設定

橋軸方向の床版の設計にあたり、床版としての作用と主桁断面の一部としての作用を考慮する必要がある、この2つの作用に対して、それぞれ制限値を設けた。

床版としての作用に対して下記の値を制限値として、必要鉄筋量の照査を行うものとした。

コンクリートの圧縮応力度 $\sigma_{ck}/3$

鉄筋の引張応力度 1400kgf/cm²

コンクリートの許容応力度および鉄筋の許容引張応力度については道示Ⅲに従った。道示ではRC床版に対して、損傷の原因となる有害なひび割れの発生を防ぐ意図に加え耐久性の観点から、鉄筋の許容応力度1400kgf/cm²に対し200kgf/cm²程度の余裕を持たせることとしているが、PC床版2主桁橋は一方PC版であり、許容応力度1400kgf/cm²を制限値とした。

ここで、床版支間が大きくなると、せん断よりも曲げが床版耐力および耐久性に及ぼす影響が大きくなり、鉄筋の疲労強度から許容応力度を規定することも考えられるが、設計で想定する鉄筋の疲労寿命が明確ではないことから、道路橋示方書に従った。

主桁断面の一部としての作用に対して、完成時に床版にひび割れが生じた場合を想定し、中間支点部および支間部でそれぞれ以下のようにひび割れ幅の制限を行うものとした。なお許容ひび割れ幅は、0.0035C (C:純かぶり)である。

中間支点部：完全ひび割れ状態におけるひび割れ幅の照査を行う。荷重の組み合わせは「後死荷重+活荷重」とする。

支間部：床版に初期ひび割れが生じた状態を想定し、ひび割れ位置の鉄筋応力度が降伏応力度を超えることなく、かつ、ひび割れ幅が制限値以下となるよう最小鉄筋量を配置するものとする。

床版と鋼桁とが合成挙動をすれば、完成時の中間支点部の床版は、後死荷重と活荷重によりひび割れが発生し、完全ひび割れ状態となる。完全ひび割れ状態とは、モーメントの増加により新しいひび割れが発生することなくひび割れ幅が増加する状態であり、この状態においてひび割れ照査を行うものとする。

また、支間部の床版については、不慮の原因によりひび割れが生じた場合でも、ひび割れ幅が大きくなるよう初期ひび割れ幅を制限することにした。ここで、合成断面の床版ひび割れの照査方法については、「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)」⁴⁾の第10章の方法を用いて計算してもよいとした。

橋軸直角方向の制限値の設定については、「鋼少数主桁橋梁の設計施工指針(案) プレキャストPC床版編」⁵⁾によったので、これを参照されたい。

3.4 構造細目

構造細目の規定として、ハンチ高さ、配筋、継手があるが、ここではハンチ高さ、施工性を考慮した鋼主桁の設計を紹介する。

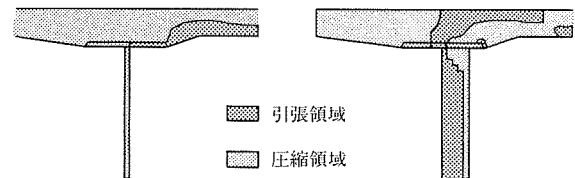
(1) ハンチ高さ

床版にはハンチを設けるものとし、勾配は1:5以上の緩やかな勾配とし、フランジ上面から立ち上げることを原則とした。

ハンチの高さを種々変化させたFEM解析により、フランジ端部近傍の床版コンクリートに発生する局部応力を調べた結果、350kgf/cm²の設計基準強度を有するコンクリートで床版を施工する場合、安全率3を確保するためには、ハンチ高さは8cm程度以上有することが望ましいことが分かった。

設計上必要とされる床版ハンチ高さは、張出し部の設計モーメントから決定されるべきものであるが、張出しが短い場合で必要性が明確でない場合もあり、ハンチなしの場合は、明らかに応力集中度が大きいため、省略する場合はその構造に応じた検討を行う必要がある。

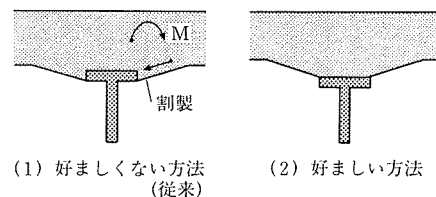
鋼桁の上フランジ近傍は、活荷重の載り方によって応力が交番したり、桁の首振り現象により応力の乱れが発生したりする箇所である。床版支間が大きくなると、この傾向が顕著になる可能性があり、この部分の応力の流れをスムーズにするために、ハンチ勾配は道路橋示方書では1:3以上となっているが、ハンチは1:5以上の緩やかな勾配とした。



(1) スティフナーが無い位置 (2) スティフナーが有る位置

図-3 主桁近傍の応力

従来から、鋼桁橋のハンチは、上フランジ下面から立ち上げるのが一般的である。2主桁橋で同様な構造にすると、上フランジの板厚が厚くなることに伴い、ハンチ部に無筋部分が生じ、横桁取付け位置のように応力が集中する箇所では、かぶりコンクリートが割裂応力により滑落する危険性が高まる。したがって、図-4のようなハンチの立上げ方法とした。



(1) 好ましくない方法 (従来) (2) 好ましい方法

図-4 ハンチの立上げ方法

(2) 鋼主桁側での配慮

鋼橋の設計では、主に工場内での加工工数低減の観点から、最近では、鋼桁の単純化・合理化設計へ移行している。すなわち、従来は、鋼重ミニマムを大前提に、工場内での突合わせ溶接を多用して、作用断面力なりの主桁断面変化を行う設計を基本としていたが、加工工数の増加が製作単価の上昇原因であるとして、フランジ断面変化を厚さ方向にしか行わない「フランジ幅一定」原則など加工工数ミニマムを旨とした鋼桁設計となっている。

PC床版2主桁橋も、この単純化・合理化設計を踏襲しており、上フランジ幅一定であるため、移動型枠工など型枠支保工の合理化が可能となっている。

従来、一般に鋼桁橋は、支承相互を直線で結ぶ折れ桁骨組みを基本として設計を行ってきた。これは、鋼構造物の工場製作を簡便にするためである。PC床版2主桁橋では、主

桁骨組みの決定に際しては、床版の施工性を第一義にして決定することとした。このため、型枠加工性や鉄筋およびPC鋼材の配置の面から、主桁骨組みを道路線形なりの曲線桁配置としている。ホロナイ川橋では $R=1\,000\text{m}$ 、キウス第一橋では $R=5\,200\text{m}$ の曲線桁であった。これにより、従来、ハンチ高さを変化させて、規定の路面高さを確保していた施工法から脱却し、路面の高さ調整は鋼桁製作架設時になされることとなった。

鋼桁側では若干の工数増があったが、移動型枠の調整作業、鉄筋組、特に省力化の一助となるプレファブ鉄筋化、そして横締めPC鋼材の曲上げ曲下げなど偏心配置の精度管理など、場所打ち床版の施工性を考えて、横締めを有するコンクリート橋では常識となっている、主桁の曲線桁配置を設計の基本とした。

3.5 施工時の検討

従来の鋼桁橋では床版の打設により鋼桁がたわみやすいので、一連続桁分について、すべての型枠支保工を設置した後、支間部の床版を先行して打設し、キャンバーを下げた後、同一日以内に中間支点部の床版を打設することにより、打設時に中間支点部床版に引張力が作用しないようにしていた。移動型枠工を用いた場所打ち分割施工では、一打設区間が逐次強度発現した後に、次ブロックの施工となるので、次ブロック以降の打設ブロック重量で桁がたわむことにより、事前に打設し終わっているブロックに引張力が作用し、有害なひび割れが発生することも考えられる。

移動型枠による床版施工では、床版施工時に床版にひび割れが発生しないよう、打設順序や支点移動を検討することとした。ここで、支点移動の操作については、施工時にひび割れが生じないことと、床版ひび割れ幅の制御の観点から中間支点部に作用する負の曲げモーメントを小さくす

ることを目的とするものであり、東名高速道路の連続合成桁橋において実施されたジャッキアップダウン工法とは目的が異なるため、当時の1m近い昇降量に対して、上記の目的による昇降量は小さく、ゴム支承の取替え用受け台を効果的に利用することより容易に施工ができる程度のものである。なお、この支点移動については、打設順序を工夫することにより、施工上必要ない場合でも、中間支点上床版に多少でも軸方向プレストレスを導入しておく方が、耐久性の観点から有効であるため、10cm程度の支点移動を推奨することとした。

4. ホロナイ川橋におけるPC床版の施工

ホロナイ川橋の床版作業目標として次の3点をあげた。

- 在来施工とほぼ同程度の工費
- 施工のサイクル化による省力化
- 現場グラウト作業の省略

上記目標を達成すべく、

- 移動型枠工による床版施工のサイクル化
- 全天候屋根の採用によるサイクル化の担保
- プレファブ鉄筋化による高所作業の軽減
- 1/2ラップ継手化による接続作業の軽減
- プレグラウト鋼材使用によるグラウト作業の廃止
- シングルストランド化による緊張作業の時間短縮等により、具体的な成果を上げた。

移動型枠工には、型枠を上方からつり上げるハンガータイプと下方から支えるサポートタイプがある。ホロナイ川橋では写真-1、図-5にあるようにサポートタイプを使用した。橋長107mを標準部10.6mとして11分割し、A1橋台からA2橋台に向け片押しで分割施工している。当初、1サイクル1週間程度と考え、週休2日制など今後に向けた施工のあり

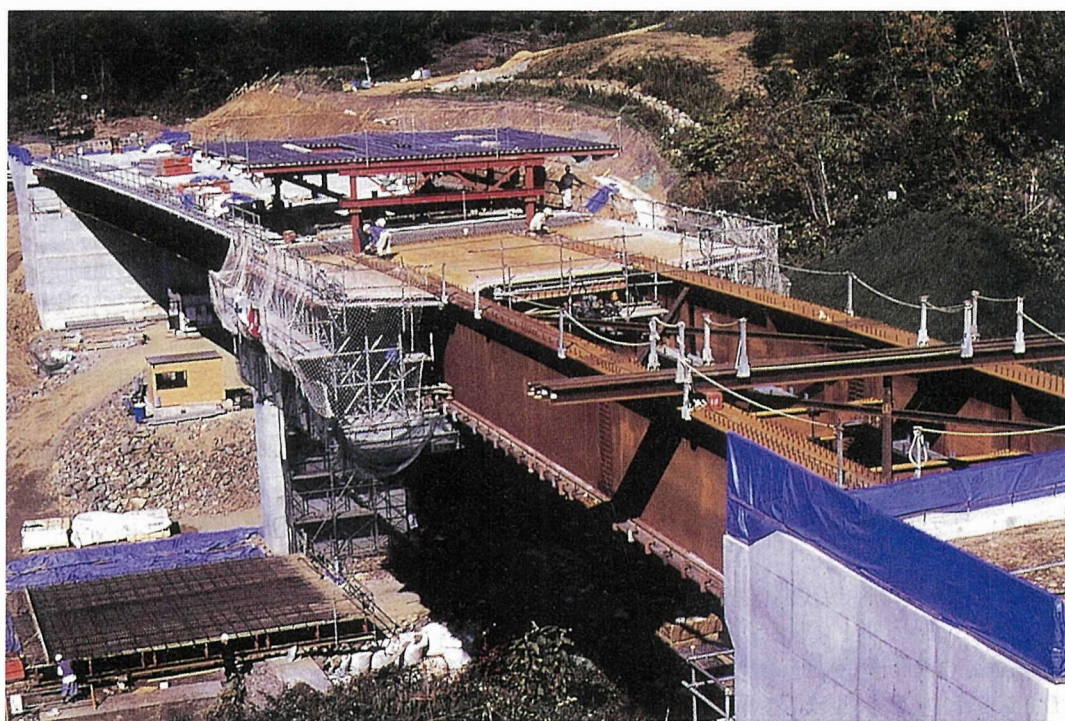


写真-1 ホロナイ川橋の移動型枠工

方を指向したが、全天候屋根や施工の習熟化と工期の制約により、1サイクルを標準で5日間、最短で4日間で施工した。橋梁端部の打下ろし部があるため、標準部は9ブロックであり、経済性を考え型枠は木製型枠とした。また、移動型枠工としての転用を考えなかったため、H鋼、四角支柱など汎用資機材を使用したことにより、移動型枠鋼重は約60トン（全天候屋根含めて70トン）であった⁶⁾。

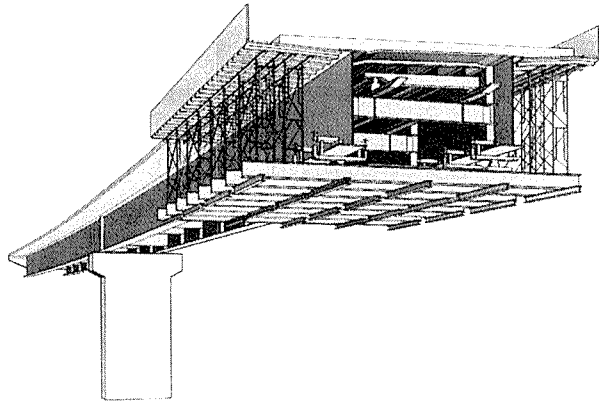


図-5 ホロナイ川橋の移動型枠

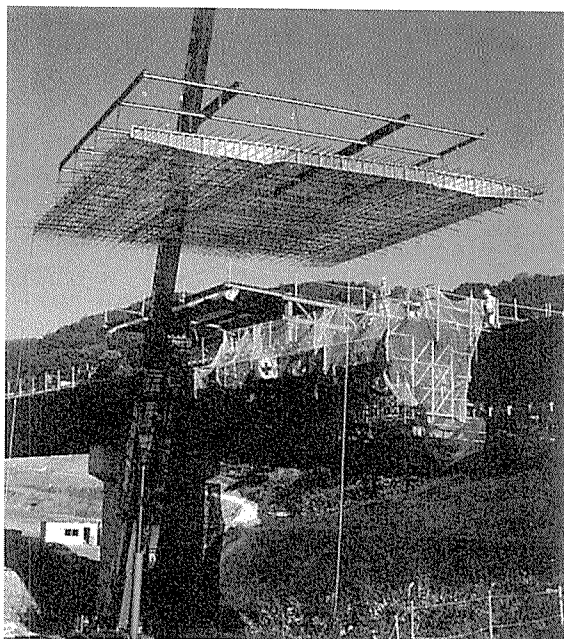


写真-2 プレファブ鉄筋のつり込み

5. キウス第一橋におけるPC床版の施工

ホロナイ川橋において、従来、RC場所打ち床版に比し格段の省力化を実現できたが、床版単独の経済性については、ホロナイ川橋の橋長が107mしかなかったこともあり、実現できなかった。

キウス第一橋では、ホロナイ川橋から得た様々な改良点に関する知見をもとに

- 支保工鋼重の軽減
- サイクル日数の短縮
- プレファブ鉄筋の合理化

を目標にして、床版工のさらなる合理化と経済性の追求を行った。具体的には、

- 移動型枠専用機材の開発
- ハンガータイプ型枠工による移動のスピード化
- メタルフォームの完全採用
- ループ継手化による接続作業の軽減

さらに、床版耐久性を確保することから、

- 膨張コンクリートの採用
- 軸方向引張り力を極力抑えた打設順序の採用
- 打ち継目での防水処理
- プレグラウト鋼材の腐食対策

などを行っている。

キウス第一橋では移動型枠工を写真-3、図-6に示すハンガータイプとした。これにより、ホロナイ川橋で採用したサポートタイプでは時間を要した中間支点の乗越しが容易になり、型枠工の移動スピードも10m/分程度にできたため、図-7に示すような床版に引張力を入れない複雑な打設順序の設定を行っても、これが施工サイクルを大きく狂わすことはなかった。型枠工鋼重は50トンまで減少し、施工サイクルも、プレファブ鉄筋を先置きするなどの工夫と、作業員の習熟により、標準4日、最短3日となった。

ハンガータイプとすることで懸念されたのは、型枠をつり上げる鋼棒が床版と干渉することで、プレストレストコンクリート橋でも、ハンガータイプ大型移動支保工や片持ち張出し工法移動作業車施工には同様の問題があり、金属シースなどで床版に穴を開けているため、跡埋め作業や健

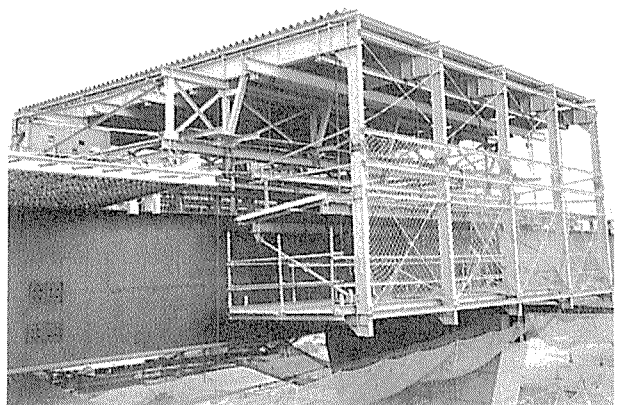


写真-3 キウス第一橋の移動型枠工
移動型枠断面図

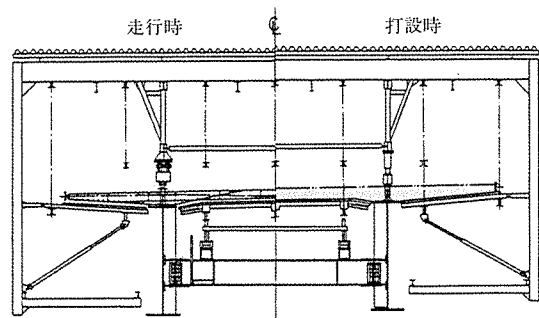


図-6 キウス第一橋の移動型枠工断面

全性の担保に課題を残している。キウス第一橋ではつり上げ鋼棒を埋殺しとし、床版上面で鋼棒を切断するよう工夫して、鋼材貫通孔の跡埋め作業をなくしている。

キウス第一橋は橋長86m上下線施工であり、合計18ブロックに分けて分割施工した。鋼橋床版は従来、木製型枠で施工されてきたが、本橋では鋼橋床版に我が国で初めてメタルフォームを用いた事例となった⁷⁾。

床版打設長と打設順序

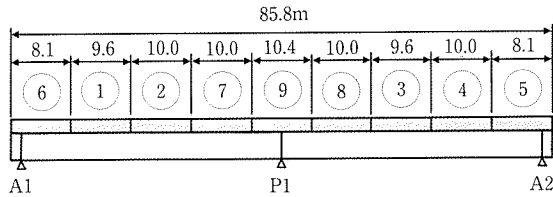
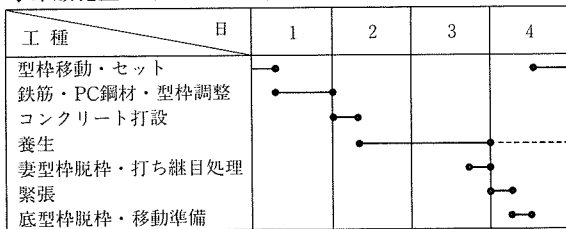


図-7 キウス第一橋の打設順序

◆床版施工サイクル工程◆



●稼働率含まず。強度発現を確認後緊張。養生は5日間継続して実施。

図-8 キウス第一橋の施工サイクル

6. おわりに

ホロナイ川橋，キウス第一橋とともにJH北海道支社設計施工の橋梁である。同支社では現在，利別川第一橋（橋長＝916m、最大支間＝86.5m），千鳥の沢川橋（橋長＝194.0m、最大支間＝53.0m）等4橋のPC床版2主桁橋を施工中であり，ホロナイ川橋，キウス第一橋の施工を踏まえた移動型枠工の改善に取り組んでいる。

また，筆者は現在，JH富士工事事務所において，第二東名高速道路の建設に従事している。第二東名の橋梁幅員は総幅員17.5mであるが，JH富士工事事務所における鋼橋の標準橋梁形式は，床版支間10m程度のPC床版2主桁橋である。支間60m程度以下の橋梁はほぼすべて，経済性と施工の合理

性によりPC床版2主桁橋で計画がされており，その施工方法も場所打ち施工を前提としている。

PC床版2主桁橋は，移動型枠工，鉄筋のプレファブ化，プレグラウト鋼材などプレストレストコンクリート橋の技術陣が営々築き上げてきた場所打ちコンクリート橋の技術を鋼桁橋床版に取り入れたものであり，施工現場に立ち会った人間として，現場施工面ではプレストレストコンクリート橋の範疇にくられる橋梁形式であると考えている。

筆者は，プレストレストコンクリート橋が構造的施工的に内在している様々な矛盾，課題を解決しうる，究極のプレストレストコンクリート橋として，このPC床版2主桁橋を提案したいと考えており，「鋼桁は床版を施工するための特殊支保工」と思っていたのであれば，PC屋として，このPC床版2主桁橋を見る思いも違ってくるのではないかと思う。

施工面では緒についたばかりであり，多くのPC技術者により，より合理的な設計施工法が体系づけられるよう切に願ひ，また，コンクリート屋でもメタル屋でもない真の意味での橋梁技術者が誕生することを祈って，本稿を締めくくるとする。

補) 広幅員床版に対する設計荷重や一方PC版の異方性度の問題など，床版の設計法については課題が多いことを付言しておく。

参 考 文 献

- 1) 小川篤生：鋼橋の経済性と長寿命化を目指して，土木学会平成9年度全国大会研究討論会8資料，土木学会鋼構造委員会，1997.9
- 2) 高橋昭一：PC床版2主桁橋の適用性に関する調査研究，高速道路と自動車，(財)高速道路調査会，1996.10
- 3) JH北海道支社：PC床版2主桁橋の設計マニュアル，PC床版2主桁橋の最適化に関する技術検討報告書，(財)高速道路技術センター，1997.3
- 4) (財)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），第二東名高速道路鋼少数主桁橋梁の設計施工に関する調査研究，(財)高速道路技術センター，1997.3
- 5) JH名古屋建設局：鋼少数主桁橋梁の設計施工指針（案）プレキャストPC床版編
- 6) 高橋他：PC床版2主桁橋「ホロナイ川橋」の現場施工，橋梁と基礎，(株)建設図書，1996.3
- 7) 高橋昭一：鋼橋の経済性と長寿命化を目指して，土木学会平成9年度全国大会研究討論会8資料，土木学会鋼構造委員会，1997.9

【1997年12月9日受付】