

大洲高架橋の設計・施工

小川 路加¹⁾ 神原 康樹²⁾ 小沼 定博³⁾ 高橋 秀樹⁴⁾

大洲高架橋は中央径間を鋼4主鈹桁とし、側径間をPRC中空床版で構成した鋼・PRC3径間連続混合橋である。一般に、混合橋は材料と剛性の異なる鋼桁とコンクリート桁を結合するため、その複合部は応力集中の発生など構造上の弱点となりやすい。したがって、その設計・施工には特別な配慮が必要である。本橋においても、複合部を設計する際に、鋼桁応力集中の照査や複合部マスコンクリートの温度・温度応力解析などを実施して、その安全性を確認し、複合部の施工方法を検討した。

本文は、本橋の設計・施工時に実施した検討内容について報告するものである。

キーワード：混合橋，FEM解析，温度解析，温度応力解析

まえがき

日本道路公団四国支社では、四国縦貫自動車道と四国横断自動車道による8の字ルートの663kmが予定路線として計画されている。四国縦貫自動車道は、平成12年7月に全開通となり、現在は、終点大洲から一般国道56号大洲道路に連結させる高架橋工事が実施されている。松山自動車道大洲高架橋（鋼上部工）西工事は、そのバイパスのうち、一般国道56号（以下、国道56号）とJR予讃線（以下、JR）を跨ぐ区間の2橋である（図-1）。

近年、より合理的な橋梁の建設を目指して、鋼とコンクリートを組み合わせて橋梁全体を構成する混合橋の建設が増えてきている。本橋は、国道56号を跨ぐため、側径間に比べて中央径間が長い支間割りとなった。一般に、このような径間比の悪い橋梁は、断面力のバランスが悪いため、不経済となる場合が多い。そこで、本橋では中央径間を重量の軽い鋼桁とし、側径間を重量の重いPRC桁で構成することで、断面力バランスの改善を図った鋼・PRC3径間連続混合橋を採用した。

1. 工事概要

本工事は、国道56号を跨ぐ鋼・PRC3径間連続混合橋と、JRを跨ぐ2径間連続鈹桁橋が含まれる。その概要を以下に示す。

工事名称：大洲高架橋（鋼上部工）西工事
 路線名：高速自動車国道 四国縦貫自動車道
 工事箇所：自）愛媛県大洲市東大洲
 至）愛媛県大洲市新谷
 道路規格：第1種第3級B規格（V=80km/h）
 設計荷重：B活荷重



図-1 位置図

1) 橋梁設計部大阪設計二課 2) 橋梁設計部大阪設計二課課長 3) 橋梁工事部東京工事課 4) 橋梁工事部東京工事課

平面線形：R=800 ～クラッド (A=300) ～ R=400m
 縦断勾配：- 0.441 ～ +2.480%
 横断勾配：5.000 ～ 8.000% (片勾配)

1) 大洲高架橋 (P27A ～ P30A)
 形式：鋼・PRC 3径間連続混合橋
 橋長：114.0m
 支間長：27.5+58.0+27.5m
 有効幅員：9.370 ～ 9.732m
 PC鋼材：1S28.6 (SWPR19L)

2) 大洲高架橋 (P34A ～ P36A)
 形式：2径間連続鋼桁橋
 橋長：72.0m
 支間長：35.5+35.5m
 有効幅員：9.550m

なお、本文では、大洲高架橋 (P27A ～ P30A) 鋼・PRC3 径間連続混合橋について述べる。

2. 大洲高架橋の設計

(1) 橋梁形式の選定

本橋は国道 56 号を跨ぐために、中央径間長が側径間長に比べて長い立地条件を有している。一般に、このような径間比の悪い橋梁では、桁の断面力や支点反力のバランスが悪いため、その建設には、通常よりもコスト高になることが多い。

近年、力学特性や経済性の向上を目的として鋼とコンクリートを組み合わせて橋梁全体を構成する混合橋の建設が増えてきている。混合橋としては、複合斜張橋、ラーメン橋およびアーチ橋¹⁾、最近では木曾川橋²⁾のような複合エクストラードズド橋など、種々の構造形式が採用されている。一方、河川条件、地盤条件、自然環境および隣接構造物などとの関係で、スパン割が制限されるような場合には、桁橋においても混合橋を採用すると有利な場合が多い³⁾。

そこで、本橋では力学特性と経済性の改善を目的に、中央径間を重量の軽い鋼桁とし、側径間を重量の重い PRC 桁で構成する鋼・PRC3 径間連続混合橋を採用した。本橋の一般図を図-2に示す。

(2) 架設ステップ

本橋の架設ステップを図-3に示す。鋼桁部をト

ラッククレーンベント工法により架設した後、側径間の PRC 桁部を施工する前に、鋼桁床版中央部を先に打設する。この施工ステップを採用することで、架設系 (鋼桁単純桁状態) から完成系 (3径間連続桁状態) における中間支点上の負曲げが減少し、鋼桁床版部を一括打設する場合と比べると、PC 鋼材本数を 1/3 程度減らすことができる。

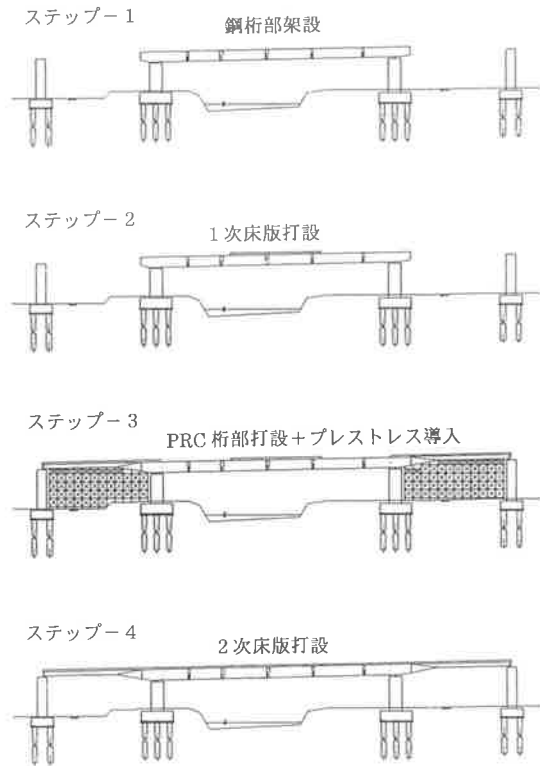


図-3 架設ステップ

(3) 上部工の設計概要

上部工の設計概要を以下に示す。

- ① 鋼桁部は主桁本数の経済比較の結果から 4 主鋼桁とした。
- ② PRC 桁部は景観の連続性を考慮して、隣接橋梁と同じ中空床版形式とした。
- ③ PC 鋼材は当初設計において、グラウトタイプ 12S15.2B (SWPR7B) であった。最近、PC 鋼材のグラウト充填不良による PC 橋の損傷が問題になっている。そこで、本橋ではプレグラウトタイプの PC 鋼材を使用することとした。さらに、従来のプレグラウト PC 鋼材は硬化速度におよぼす温度の影響が大きく、マスコンクリートのように水と発熱により高温になる部材への適用は困難であった。本橋の複合部は、最大断面が高さ 2.83m × 幅 7.50m

と大きくマスコンクリート部材となることから、樹脂中に含まれる微量の水分により樹脂が硬化する湿気硬化型のプレグラウト鋼材を採用した。

④周辺地域との景観性が重要視されたため、上部工検査路用の昇降梯子や下部工検査路は設けずに、高所作業車を用いて接続する構造とした。また、排水管はVP角管とし、PRC桁に設けたスリット内に配置して排水管が目立たないようにした(写真-1)。

⑤支承は地震時水平分散構造を採用した。



写真-1 排水管の設置

3. 複合部の設計

(1) 構造概要

混合橋は複合部において材料および剛性の異なる鋼桁とコンクリート桁（PRC 桁）の力学的不連続点を有するため、応力集中の発生など構造上の弱点となりやすいことから、相互の力の伝達が円滑に行われるように配慮することが重要である。

多々羅大橋に代表される複合斜張橋では、接合方法として「后面板を用いた部分接合中詰めコンクリート形式」⁹⁾の採用が多い。これは主桁に取り付けられた鋼殻セル内に充填したコンクリートを経て応力伝達を行う方式である。この方式は桁橋である新川橋⁵⁾などでも採用されており、ずれ止めとしてスタッドの代わりに孔明き鋼板ジベル（PBL）を用いている。

鋼桁と RC 桁の上部工同士を結合した事例である松山高架橋⁶⁾では、RC 床版橋断面に鋼主桁を挿入した構造としている。鋼桁と RC 桁との応力の伝達はスタッドジベルを用いて、曲げモーメン

トはフランジを介して、またせん断力はウェブを介して行うシンプルな方式を採用している。

上記の2橋ともにそれぞれ特徴があり、実験や解析により接合部としての性能、耐荷力は確認されている。本橋では、①橋梁の構造形式が類似している。②新川橋の場合、鋼殻セル内へのコンクリート打設に高流動コンクリートの採用などの配慮が必要である、などの理由から松山高架橋の方式を採用した。

(2) 複合部の設計

複合部に力が作用すると、それに対して鋼桁と PRC 桁との合成断面で抵抗する。しかし、鋼桁部および PRC 桁部と比較し複合部が弱点とならないように安全を考慮して、作用断面力に対してそれぞれ単独で抵抗できるよう設計した。

ずれ止めは頭付きスタッドを採用し、曲げモーメントに対して上下フランジに設けたスタッドで、せん断力に対してウェブに設けたスタッドで応力伝達を行うものとする。なお、スタッドは道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編⁷⁾（以下、道示）で設計した。

また、複合部の底面は鋼桁とコンクリートを確実に一体化させるため、主桁下フランジ間を鋼板でつなぎ、コンクリートを囲む構造とした。その継手は、景観を考慮して、現場溶接にて接合した。コンクリート打設前の複合部の状況を写真-2に示す。

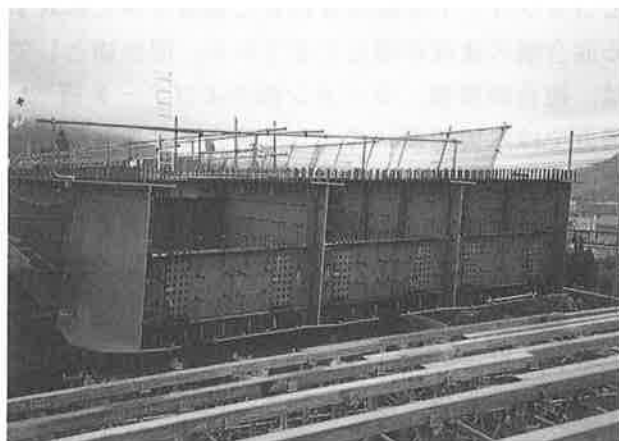


写真-2 複合部の構造（鋼桁架設時）

4. 複合部のFEM解析

(1) 解析目的

本橋の複合部は松山高架橋で実績のある方式を採用している。しかし、松山高架橋が鋼桁とRC桁との結合であったのに対し、本橋は鋼桁とPRC桁との混合橋である。そのため、プレストレスが複合部の鋼桁やスタッドに及ぼす影響は不明である。そこで、複合部の応力性状やスタッドに作用する力を照査するため、立体FEMで解析した。

(2) 解析モデル

解析モデルは複合部付近を再現した橋軸直角方向1/2モデルとした(図-4)。鋼部材は4節点シェル要素、コンクリート部材は8節点ソリッド要素とした。スタッドは線形ばね要素とし、そのばね値は文献8)を参考にして267kN/mm²とした。

解析は、死荷重時と活荷重(MIN, MAX)時の3ケース行った。

(3) 解析結果

図-5に活荷重(MIN)時の主桁G1ウェブと下フランジの主応力図を示す。鋼桁部から複合部に変化する断面急変個所においても、発生応力の最大値は許容応力度210kN/mm²(SM490Y)の半分以下であり、応力の流れも鋼桁からPRC桁部に円滑に流れていることが確認できた。他のケースも定性的に同様であった。

複合部では作用する荷重に対して、スタッドを介して鋼桁部からPRC桁部に応力伝達が行われる。複合部設計の際、スタッドの必要本数は道示のスタッド耐力算定式から算出している(耐力=27,298kN/本)。しかし、本橋の複合部は、プレストレスが作用しているため、その影響を受けて局所的にスタッドに大きな力が作用する可能性がある。

表-1は、スタッド反力の最大値を解析ケースごとにまとめたものである。スタッドに作用する力は最大で62,673kNであり、設計上の許容せん断力を上まわっている。しかし、道示にあるように、上記の許容せん断力で設計されたスタッドは、一般に降伏に対して3以上の安全率がある。したがって、いずれのケースについても、複合部のスタッドは、局所的な集中を受けた場合を考慮しても

降伏にいたることはなく、複合部として十分な耐力を有している。

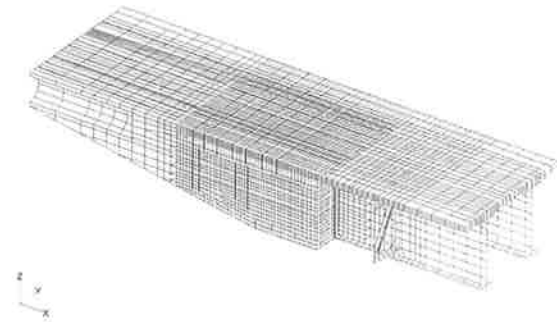
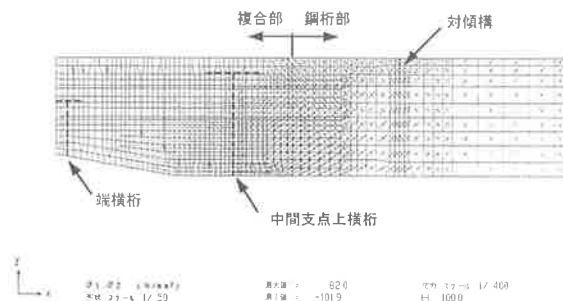
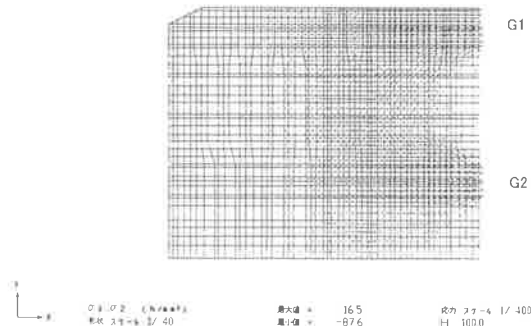


図-4 解析モデル



(a) G1ウェブ主応力図(活荷重MIN時)



(b) 複合部下フランジ主応力図(活荷重MIN時)

図-5 主応力図

表-1 スタッド反力の最大値(単位: kN)

ケース	荷重	位置	スタッド反力最大値	スタッド反力/許容せん断力
1	死荷重	ウェブ	31,041	1.1
		下フランジ	22,112	0.8
2	死+活(MIN)	ウェブ	62,673	2.3
		下フランジ	48,417	1.8
3	死+活(MAX)	ウェブ	59,408	2.2
		下フランジ	42,101	1.5

図-6は、複合部コンクリートの PC 鋼材位置における主応力図である。複合部端部から導入されたプレストレス力は、中間支点上横桁があっても、横桁背面の PRC 桁部に作用している様相がわかる。ただし、緊張端直下については、橋軸方向応力が小さくなっており、プレストレス力が期待できない。そこで、中間支点上横桁付近の断面に対しては、RC 断面としての照査を行い、断面の安全性を確認した。

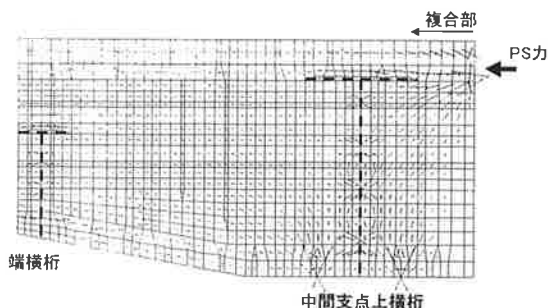


図-6 複合部コンクリート主応力図 (PC鋼材位置)

5. 複合部の温度・温度応力解析

(1) 解析目的

本橋の複合部は橋軸直角方向の最大断面が高さ 2.83m × 幅 7.50m であり、コンクリートの断面が大きい。このようなマスコンクリートでは、硬化時の水和発熱による内部温度の上昇、ならびに以後の降下によって、温度収縮応力が発生しひび割れが生じやすい⁹⁾。

そこで、複合部における温度応力の分布性状を把握し、施工方法や温度ひび割れに対する鉄筋補強の必要性の有無を検討する目的で、3次元温度解析および温度応力解析を実施した。

解析は表-2に示すように以下に着目して実施した。

- ①材料面からコンクリート種別の影響を調査する。

表-2 温度・温度応力解析検討ケース

ケース	複合部打設回数	コンクリート種別
1	1	普通コンクリート
2	1	早強コンクリート
3	2	普通コンクリート
4	2	早強コンクリート

- ②施工面から一括施工した場合とコンクリートの温度上昇を低減させるために分割施工した場合について比較する。

(2) 解析モデル

解析モデルは複合部付近を再現した橋軸直角方向に 1/2 断面モデルであり、断面寸法は実部材寸法の平均値を用いた (図-7)。

熱伝達境界条件は、施工状況にあわせて床版上面はシート養生、側面と底面のコンクリート部は合板型枠とした。外気温は 25℃一定と仮定した。表-3に外気温と熱伝達率を示す。コンクリートは外気温より 5℃高くなり 30℃で打設するものと設定した。

分割打設の検討では図中の分割位置にて、複合部を二分割して打設するものとした。

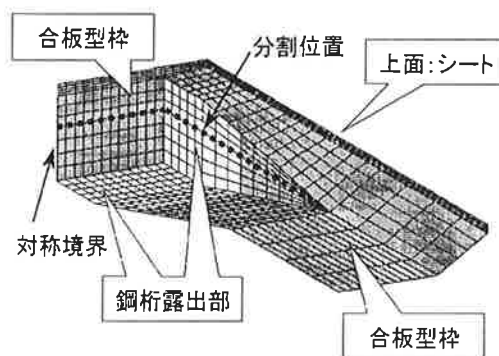


図-7 温度解析モデル

表-3 外気温と熱伝達率

外気温 (℃)	熱伝達率 (kcal/m ² hr℃)			
	シート	合板型枠	鋼桁	空气中
25	5	7	12	12

(3) 解析結果

解析結果の一例として早強コンクリートを使用した場合 (ケース 2, 4) の橋軸直角方向応力についてまとめたものを図-8に示す。複合部を一括施工した場合、温度は打設後 57 時間後にモデル中心で 87℃に達した。応力は材齢 30 日で引張強度を上回り、材齢 60 日で 3.0N/mm² (30.57kgf/cm²) となる。一方、分割施工した場合、温度は打設後 33 時間後にモデル中心で 83℃に達する。応力は第 1 リフト、第 2 リフトとも引張強度を上回ることはない。複合部のコンクリートを分割打設すること

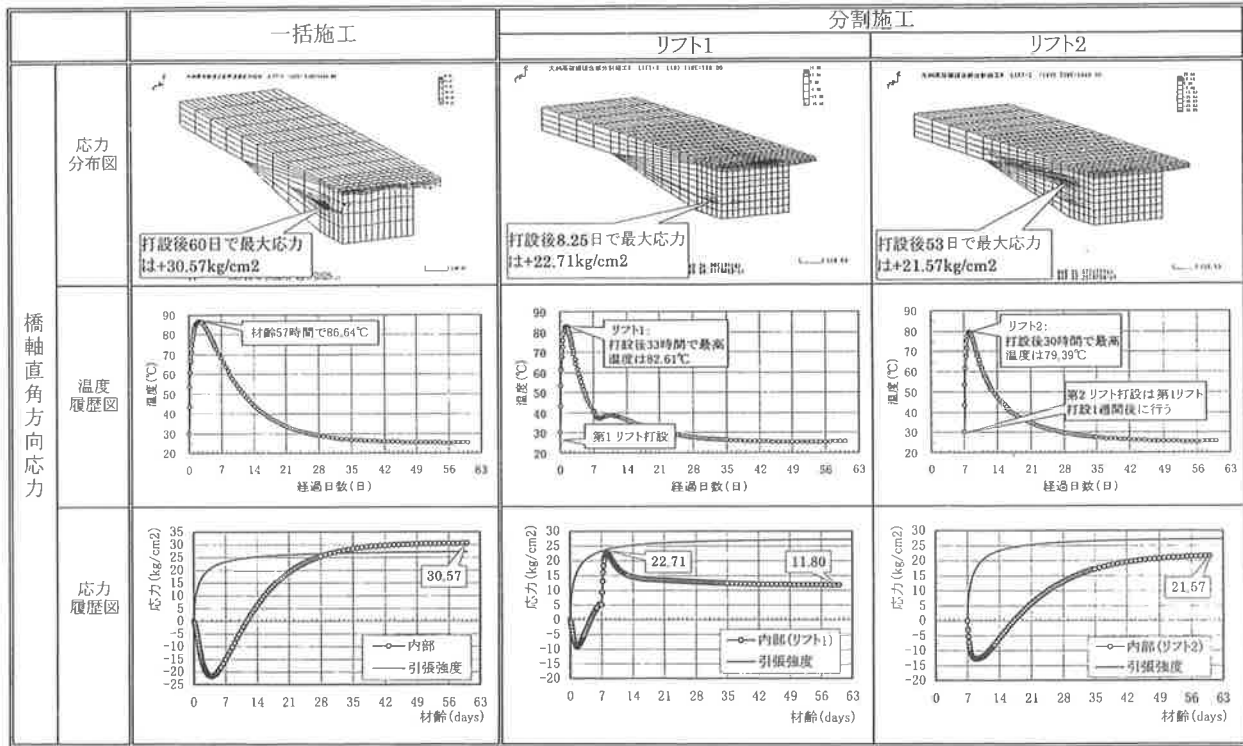


図-8 温度応力解析結果（早強コンクリート、橋直方向応力）

で、最大温度、発生応力および引張応力の発生領域を減らすことができる。橋軸および高さ方向についても、橋軸直角方向とほぼ同様の傾向がみられた。

コンクリートを普通コンクリートとすると、早強コンクリートの場合と比べて、最大発生温度や引張応力の値は若干小さめの値となっているものの、一括打設では早強コンクリートの場合と同様に発生応力が引張強度を上回った。

(4) 解析結果の反映

以上の結果を踏まえ

- ①早強と普通コンクリートでは大きな効果の違いがなく、普通コンクリートを採用しても一括打設を採用できない
- ②早期に強度発現させることで工程短縮を図るなどを考慮して、早強コンクリートを使用して分割施工する方法を採用した。

また、応力解析の結果より複合部内部に発生した引張応力は、コンクリートの硬化とともに進展して応力は残留する。その値は引張強度以下ではあるが、ひび割れの発生を抑制するため補強鉄筋を配置することとした。補強鉄筋は、引張応力発生領域から引張力の合力を算出して必要鉄筋量を算出した。

6. 大洲高架橋（P27A～P30A）の架設

(1) 架設の概要

中央径間の鋼桁部はトラッククレーン・ベント施工した。鋼桁部は国道 56 号線を跨ぐため、交通規制の日数を短縮し一般交通への影響を極力少なくするため、2 ブロックを地組みした後、大型重機（油圧式 360t 吊）を使用して架設した。

PRC 桁部の施工は、P27A 側、P30A 側の順序で行った。複合部は事前に実施した FEM 解析での検討を踏まえて、2 段階に分割してコンクリート打設を行った。打設時期は外気温 30 度を上回る酷暑であった。そこで、コンクリートの練り上がり温度の上昇を防ぐため、氷を用いて練り混ぜ水温を管理した。また、複合部のコンクリートを打設した後、外気温の変化にともなう鋼桁の伸縮により、若材齢のコンクリートに悪影響を与えることが懸念されるため、以下の対策を行った。

- ①外気温による鋼桁の変形を極力少なくするため、PRC 桁部施工期間中は鋼桁全体をビニールシートで覆い、直射日光が鋼桁にあたらないようにした（写真-3）。
- ②鋼桁の伸縮の影響を少なくするため、コンクリートの強度が発現するまで、打設側の支



写真-3 鋼桁部のシート養生

を一時的に固定した。

PRC 桁部にはクリープや乾燥収縮による変形があり、それは鋼桁にも影響を及ぼす。さらに、それらは時間的に変化するため、施工ステップごとにクリープ・乾燥収縮による変形量を算出して形状管理を行った。

(2) 1次床版のひび割れ対策

本橋は PC 鋼材を減らすことができるという経済性の観点から、PRC 桁部の施工前に鋼桁中央部の床版（1次床版）を先行打設する施工方法が採用されている。しかし、プレストレスを導入し PRC 桁が自立すると、中央径間の鋼桁部は側径間 PRC 桁部の自重による負曲げを受ける。ところが、その時には 1次床版は既に硬化しているため、1次床版に主桁作用による引張応力が生じ、ひび割れに対する検討が必要となる。

この負曲げは 2次床版打設により改善される一

時的なものである。そこで、1次床版のひび割れ対策として、1次床版打設後、PRC 桁部施工前に 1次床版中央にカウンターウエイトを載荷して一時的に床版のコンクリート断面に圧縮力を導入する対策を採用した。

カウンターウエイトの載荷量（プレストレス導入量）は、道示Ⅱ 9.3 より床版引張応力度を 1.0N/mm^2 以下とすること、載荷時の鋼桁応力度などを考慮して約 165kN とした。カウンターウエイト載荷時の状況を写真-4に示す。



写真-4 カウンターウエイト

(3) 複合部の温度計測

1) 概要

複合部はマスコンクリートであり温度応力が大きくなると予想されたため、施工前に温度および温度応力解析を実施し、その検討結果を踏まえて補強鉄筋の配置およびコンクリートの 2 段階分割打設を採用した。

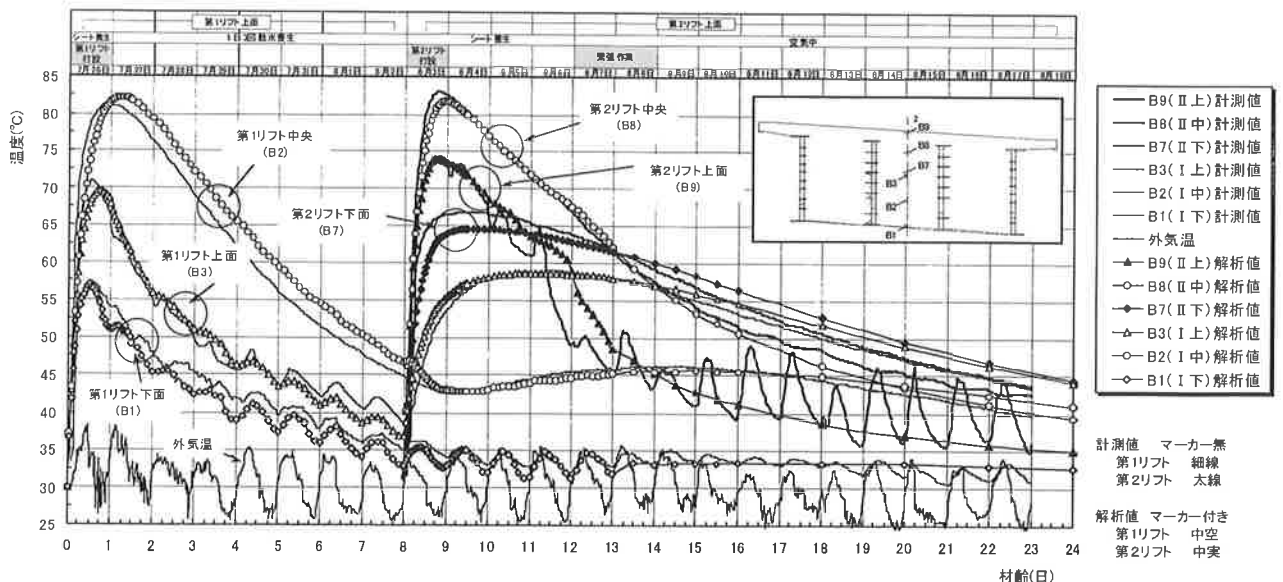


図-4 温度計測結果と温度解析結果の比較（複合部中央断面）

そして、解析およびそれを踏まえた施工対策の妥当性を検証するために、複合部マスコンクリートの温度を計測して解析値との差異を調査した。あわせて、実測の外気温、打設温度などの解析入力パラメータを施工時のものに再設定して応力解析を行い、実際に発生したコンクリート応力度および分布性状などの推定を行った。

2) 温度計測方法

温度計測は第1リフト打設前日から第2リフト打設後2週間にわたり実施した。計測は熱電対を用い、温度データを記録間隔30分ごとに記録した。

3) 計測結果

温度計測結果と実際のコンクリート施工状況から入力パラメータを再設定した解析の結果の一例として複合部中央付近における結果を図-4に示す。

最高温度の計測値と解析値の差は0.9～-1.4℃と微小であり、温度履歴の全過程から見るとほぼ一致する。また、温度低下の勾配はほぼ一致した。最高温度の発生材齢は計測値が解析値より5～7時間程度早い。この差の原因は日射の影響が大きいと考えられる。コンクリート施工時の現地平均気温は30℃以上の酷暑であったため、日射の影響によりコンクリートの温度が上昇し、セメントの水和反応が促進されたためと考えられる。以上より、温度解析の結果は、複合部の検討を行うのに十分な精度を有していたと考える。また、発生コンクリート応力の推定値より、最小ひび割れ指数¹⁰⁾を算出すると1.2であり、ひび割れの発生をできるだけ制限したい条件を満足していると考えられる。

あとがき

本橋は力学特性と経済性の改善を目的に、混合橋形式を採用した。その施工にあたり、通常的设计時における検討に加えて、鋼桁とPRC桁が結合する複合部の応力性状の確認や、複合部のマスコンクリートによる温度対策の検討などを実施した。計画段階の十分な事前検討と綿密な施工管理体制のもとに円滑な施工ができた。今後、よりコスト縮減が重要視される社会資本整備が求められ、本橋のような混合橋の採用が増えるものと考えられるが、そのとき、最も重要なことは、鋼橋である

とかコンクリート橋といった分野の違いにとらわれないことであると感じている。

本文では紙面の都合上、詳述しなかったが、本工事には2径間連続鋼桁橋も含まれており、JR上を夜間に一括架設するものであった。本工事が無事事故もなく完成できたのも、日本道路公団四国支社の関係各位の適切なご指導とご支援を頂いた結果である。文末ながら、心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 前田幸雄：複合構造に関する研究の歴史と動向，土木学会論文集，第344号/I-1，pp.13-25，1984.4.
- 2) 池田博之・中須 誠・水口和之・前田晴人・小松秀樹：第二名神高速道路木曾川橋・揖斐川橋上部工の設計，橋梁と基礎，Vol.33，No.11，pp.19-28，1999.11.
- 3) NCB研究会編：新しい合成構造と橋，山海堂，1996.2.
- 4) 藤原 亨・森山 彰・川西直樹：多々羅大橋上部工の実施設計，本四技報，Vol.22，No.88，pp.12-27，1998.10.
- 5) 望月秀次・安藤博文・宮地真一・高田嘉秀：鋼・PC混合橋（新川橋）の設計と施工，プレストレストコンクリート，Vol.43，No.1，pp.82-89，2001.1.
- 6) 松田哲夫・湯川保之・長谷俊彦・西海健二・奥田正裕：スタッドを用いた鋼桁-RC桁結合部の力学特性について，土木学会第50回年次学術講演会講演概要集，I-124，pp.248-249，1995.9.
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，1996.12.
- 8) 平城弘一：頭付きスタッドの静的および疲労強度と設計法に関する研究，大阪大学博士論文，2001.1.
- 9) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点 '01，2001.9.
- 10) 土木学会：コンクリート標準示方書 施工編，1996.3.