

長支間場所打ちPC床版の 温度応力に関する施工確認試験

神原 康樹* 仙田 英俊** 中本 啓介*** 野倉 剛志****

第二東名高速道路で建設中の鋼2主桁橋に設置される場所打ちPC床版は、3車線の広幅員（有効幅員16.5m）を確保するため、床版支間が10m程度となり、床版厚は主桁上で56cm、床版支間中央で37cmと従来の床版に比べ非常に厚い。この長支間場所打ちPC床版（中之沢橋）を移動式型枠で施工を行ったところ、コンクリート打ち込み直後にひび割れを発見した。その原因としては、床版厚が厚く、高強度コンクリートを使用しているため、水和反応による温度応力が大きくなっていることが予想された。そのため、ひび割れ要因分析を行い、それに対する対策、各種施工確認試験を立案・実施した。本文では、初期ひび割れの要因分析および、その対策の有効性を検証する施工確認試験結果と実橋施工時の計測結果について報告する。

キーワード：長支間場所打ちPC床版、2主桁橋、非線形温度応力解析、初期ひび割れ、
実物大試験

まえがき

従来、温度応力が問題視される構造物は、PC橋梁の柱頭部などのようなマスコンクリートとなる部位であった。一般的な温度応力のメカニズムは水和反応により、温度上昇時には内部の温度が表面の温度より高くなり、表面にひび割れが発生しやすくなる。さらに、温度下降時には表面の温度より内部の温度が高くなっているため、温度収縮する際に表面のコンクリート部分が拘束し内部にひび割れが発生し易くなる。

長支間場所打ちPC床版を初めて施工した中之沢橋において、コンクリート打ち込み直後の温度下降時において鋼桁上フランジや隣接する既設床版が構造的にコンクリートの体積収縮を拘束するため温度応力が原因と思われるひび割れ現象を確認した。

そのため、ひび割れの要因分析を行い温度に起因する応力度やそれ以外の要因による応力度の算定を行い、温度応力がひび割れに対してどの程度支配的であるか検証を行った。さらに、ひび

割れに対する対策を立案し、実物大供試体において対策の有効性について検証を行った。本文は、このひび割れの要因分析、対策および実物大施工確認試験を用いての試験結果について報告を行う。

1. ひび割れの発生状況と要因

(1) 発生状況

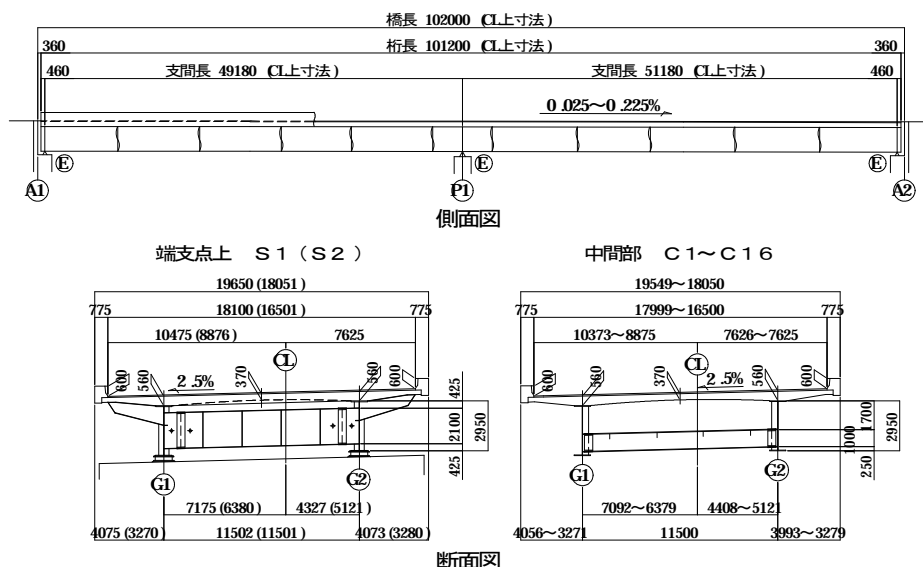
第二東名高速道路鋼2主桁橋（中之沢橋）の一般図および橋梁諸元を図-1に示す。

本橋において、図-2に示すBL8施工準備中（型枠移動後）にBL2の床版下面にひび割れを発見した（打設9日目）。図-3に発見されたひび割れ分類図を、表-1に打ち込まれたコンクリートの配合を示す。

(2) 発生要因

材料、施工、構造特性を個々に検討することにより、本橋で発生した初期ひび割れの主な発生要因としては、以下の3つが考えられた。

- ①コンクリートの水和反応による温度応力
- ②移動式型枠の移動や隣接径間への床版打ち込



形式	2跨間連続非合成版桁(上り線) 3跨間連続非合成版桁(下り線)
設計荷重	B活荷重
橋長	102.00m(上り線) 138.500m(下り線)
支間割	49.1800m+51.1800m(上り線) 45.2000m+46.5000m+45.2000m(下り線)
有効幅員	16.500m~18.100m(上り線) 16.500m(下り線)
斜角	約90°
鋼重	863ton

図-1 中之沢橋(上り線)一般図

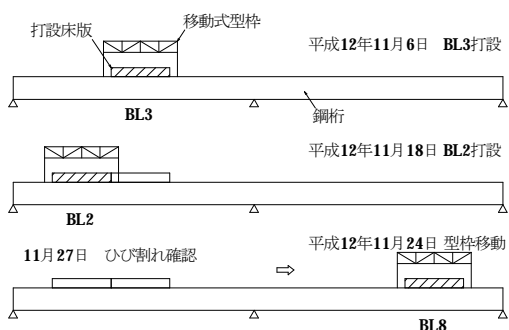


図-2 ひび割れ発見までの施工ステップ

タイプ	タイプ - 1	タイプ - 2
発生位置	打ち継ぎ目近辺	一般部(新ブロックのみ)
発生方向	斜め方向	橋軸直角方向
概要図(床版下面)		
ひび割れ幅	0.10~0.25mm(漏水あり)	0.02~0.15mm
ひび割れ時期の推測	プレストレス緊張前	プレストレス緊張後

図-3 ひび割れの分類

表-1 当初施工時のコンクリート

配合表(早強ポルトランドセメント P4-2:40-12-25)

	粗骨材の最大寸法(mm)	スランブ(cm)	空気量(%)	W/C(%)	s/a(%)	単位重量(kg/m³)				
						セメント	水	細骨材	粗骨材	高性能AE減水剤
早強コンクリート cck=40N/mm²	25	12±2.5	4.5±1.5	42.5	47.1	379	161	834	943	4.169

高性能 AE 減水剤：ポゾリス (レオビルド SP-8S)

みなどによる主桁作用での橋軸方向引張応力

③プレストレスの緊張方法

発生要因の検討は、温度応力についてはマスコンクリートの3次元非線形温度応力解析専用プログラム(ASTEA MACS)、荷重移動およびプレストレス導入時の応力については、立体弾性FEM解析を用いた。

1) 温度応力解析

コンクリートの水和熱に対しては、BL2,3に設置した温度計(熱電対)の計測結果を再現することで温度応力の評価を行った。

図-4に示す温度応力解析結果によれば、新旧ブロックの打ち継ぎ目付近の引張主応力は、発

生したひび割れと一致した方向に生じている。

これは主として、旧ブロックの拘束によるものであり、プレストレス導入前の新コンクリート打ち込み後3日目でコンクリートの引張強度2.0N/mm²を超える2.2N/mm²の応力が発生し、打ち込み後7日目では、2.7N/mm²に達していた(図-5)。これらの結果により図-3タイプ-1のひび割れはプレストレス導入前に温度応力が原因で発生したと推察された。

一方、鋼桁に沿った床版下面では鋼桁の拘束によるものと思われる1.7~1.8N/mm²の引張応力度が発生している。これは、BL2の新ブロックに対してはタイプ-2のひび割れ発生状況と

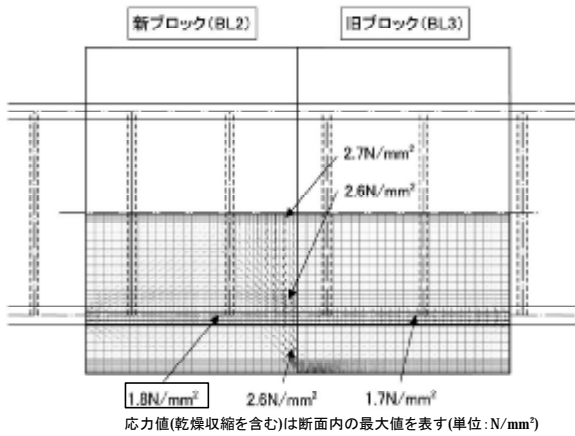


図-4 床版下面主応力図 (BL2 打設後 7 日目)

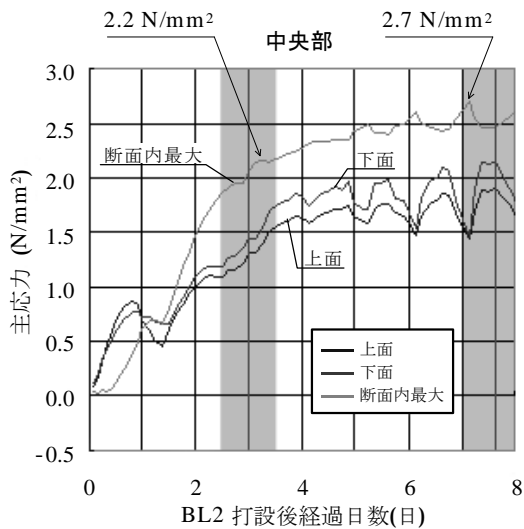


図-5 床版支間中央主応力履歴図

一致するものの、コンクリートの引張強度に対して小さく、また、新旧ブロックで同程度の応力度が発生していることから他にも要因があると思われた。

2) 荷重作用との合成

温度応力と荷重作用に対する弾性 FEM 解析による応力を重ね合わせた結果を図-6 に示す。新ブロック側では荷重作用の影響により引張応力度が加算され、旧ブロック (BL3) に比べ 1.0 N/mm^2 程度引張応力度が大きく、引張強度を超過する。これは、新ブロック (BL2) のコンクリートの打ち込みにより旧ブロックにはプレストレスが作用することにより新旧ブロックに差が生じたものと考えられた。この結果はタイプ-2 のひび割れ状況と一致している。

2. ひび割れの対策

ひび割れの発生要因分析から、材齢初期のひび割れの発生を防止のため以下の対策を行った。

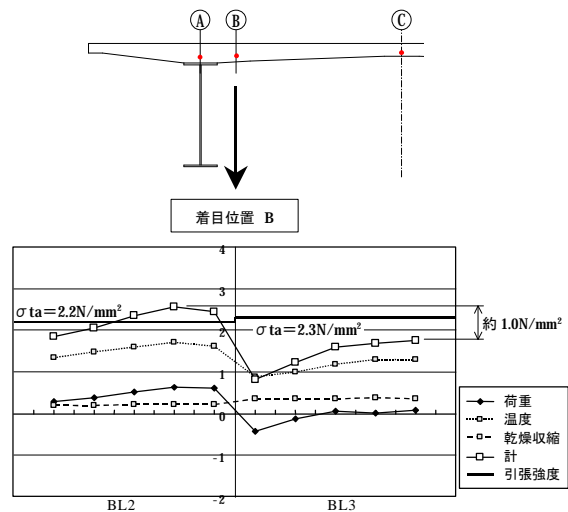


図-6 打ち込み後 7 日目の合成応力 (橋軸方向応力)

(1) 温度応力の低減

1) 配合の変更 (膨張材の添加)

温度応力を小さくするには、発熱量の小さいセメントを使用し、打ち込み後の温度上昇を抑えることが有効である。中之沢橋のその後の施工では、工程上の制約や変動荷重の影響をできるだけ取り除くために固定型枠を使用した。これにより早期の強度発現を期待する必要がなくなったため、セメントを普通セメントに変更し、セメント量も出来るだけ少ない配合に見直すこととした。

また、水和熱による温度降下にとまらぬコンクリートの収縮時の膨張作用を期待して、膨張材を添加することとした。

2) 養生方法の変更

温度応力によるひび割れを防ぐには温度降下をなだらかにし、温度応力よりも強度発現を先行させることも有効である。また、コンクリート内外の温度差が大きいと内部の温度応力が大きくなる。そのため床版上面は保温および風の影響を防ぐために十分湿潤させた養生マットの上から厚手のシートにて覆うこととした。下面については、木製型枠を使用し温度差を抑えた。

(2) PC の 2 回緊張

PC 緊張については、材齢 1, 2 日目で若干のプレストレスを導入する一次緊張を行い、打ち継ぎ目付近に発生する橋軸直角方向の引張応力を抑えた。その後所定のコンクリート強度が発現してから最終 PC 緊張を行う 2 回緊張を行うこととした。一次緊張で導入するプレストレスはコンクリートの

発現強度から主桁上断面で $0.5N/mm^2$ 程度である。

(3) 鉄筋の追加

温度応力および発生したひび割れの分布より、補強鉄筋を追加した。橋軸方向には **1.4%** の鉄筋比 ρ を確保するように主桁上に中段鉄筋を追加し、橋軸直角方向には新コンクリート側打ち継ぎ目付近に補強鉄筋を配置した。これにより、万が一ひび割れが発生しても、有害なものとならないように幅を小さくし、間隔を短くする効果を期待した。

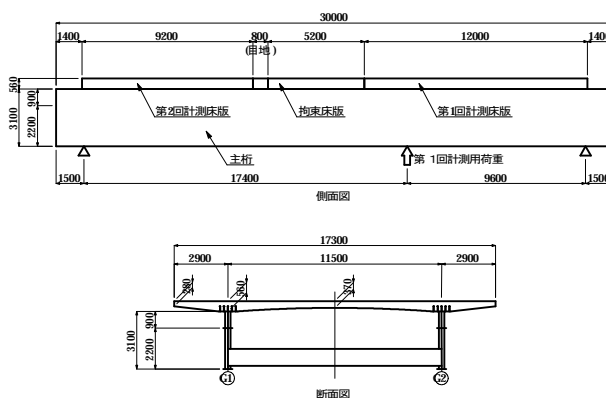


図-7 実物大供試体概要

3. 施工確認試験

2. で示した対策の有効性を確認し、今後の工事においてひび割れの発生を防止できることを確認するため、以下の施工確認試験を行った。

- ①若材齢コンクリートの特性確認試験
- ②1m 供試体による床版再現試験
- ③実物大供試体を用いた床版施工確認試験

(1) 若材齢コンクリートの特性確認試験

1m 供試体による床版再現試験

①および②は解析に用いるパラメータの取得や、膨張材添加量を確認する目的での基礎的実験である。①では若材齢でのコンクリートの物性値、②では熱伝達率や膨張ひずみの計測を行った。これらの試験により、膨張材の添加量は $30kg/m^3$ とし、この添加量において、実際の床版では、膨張ひずみ量が 80μ 程度確保することができることを確認することができた。詳細は文献2)を参照されたい。

(2) 実物大供試体を用いた床版施工確認試験

実橋施工における温度応力、荷重状態を再現し各種施策の有効性を確認するため実物大供試体による確認試験を行った。試験体の概要を図-7、写真-1に、試験目的とした確認項目を表-2に示す。

実物大供試体は、中央に拘束床版部を配置し、その両側に隣接する施工を想定した計測床版部を配置した。隣接径間の床版打ち込みの影響など実橋施工で想定される負曲げモーメントが最も大きいケース、および床版にひび割れが発生する限界については、桁下面からジャッキにより載荷することで再現した。

実物大供試体の温度解析の解析条件については



写真-1 実物大供試体全景

表-2 実物大試験による確認事項

確認事項	内容
主桁および横桁のリバウンド	脱型時の主桁および横桁のリバウンドによる床版の応力状態をジャッキアップにより再現し、床版が健全であることを確認する
温度応力	対策後の引張ひずみ、変形、ひび割れの有無の確認 養生方法による熱伝達率の確認（コンクリート内部温度の分布）
プレストレス	既設および新設ブロックに導入されるプレストレス力の確認
施工性	固定式型枠によるコンクリート打設時の鋼桁（主桁、横桁、型枠支保工）の変形状態および施工性を確認し、実橋施工に反映する

文献3)に詳細を示している。以下に解析値と試験値の比較による結果の一例を示す。

1) 温度分布

図-8, 9にひび割れが発生した実橋施工時のBL2,3と1m 供試体における温度履歴と分布を示す。早強コンクリートを用いたBL2,3は、温度降下量が $40\sim 45^\circ C$ と大きく、材齢3日目までの温度降下勾配も最も急である。これに対し、普通コンクリートを用い、養生方法の改善を行った1m 供試体および実物大供試体は $25\sim 30^\circ C$ 程度の温度降下量であり、温度降下勾配も緩やかになっている。

図-9に示したBL2,3と実物大供試体の床版内部の温度分布の比較より、実物大供試体では床版表面の温度降下量は少なく、シートによる保温養生の効果が現れている。

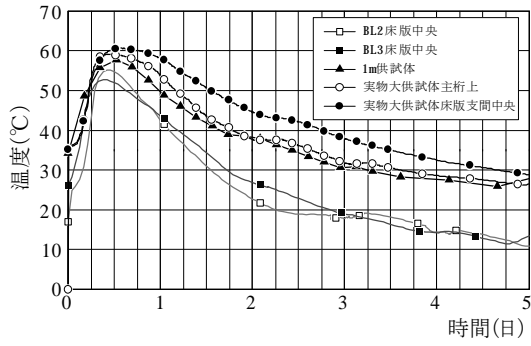


図-8 床版中央の温度履歴

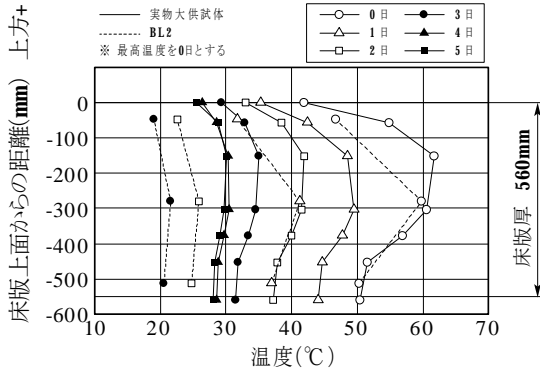


図-9 主筋上床版の温度分布履歴

表-3 ひび割れ発生時の実橋床版内部の応力

項目	対策内容	(N/mm ²)	
		タイプ-1 斜めひび割れ (主応力)	タイプ-2 直角方向 ひび割れ (橋軸方向応力)
温度応力 (乾燥収縮含)	・普通セメントの使用 ・膨張材の使用 ・シート養生, 木製型枠 の使用	2.10 (1.28)	1.96 (1.32)
変動荷重 (リバウンド)	・固定型枠の使用	-	0.20 (0.11)
プレストレス		-	0.60 (0.08)
死荷重		-	-0.26 (-0.02)
合計		2.10 (1.28)	2.50 (1.49)

※1 () 内はひび割れ防止対策を行った実物大供試体の応力を示す。

2) コンクリートの計測ひずみ履歴とコンクリート内の発生応力度の評価

コンクリート実ひずみの履歴を図-10に示す。計測値と解析値は良く整合していることが確認できる。表-3には解析による実橋BL2, 3施工時のひび割れが発生したと考えられるときの床版内部の応力度と実物大供試体試験の応力度表を示しており、ひび割れ防止対策を行った効果を確認することができる。

3) ジャッキアップ载荷試験の結果

床版打ち込み後の施工時の荷重状態を再現するため、ジャッキアップ载荷試験を行った。

载荷試験のひび割れなどを確認するポイントを図-11の「荷重レベル」に示す。载荷試験時

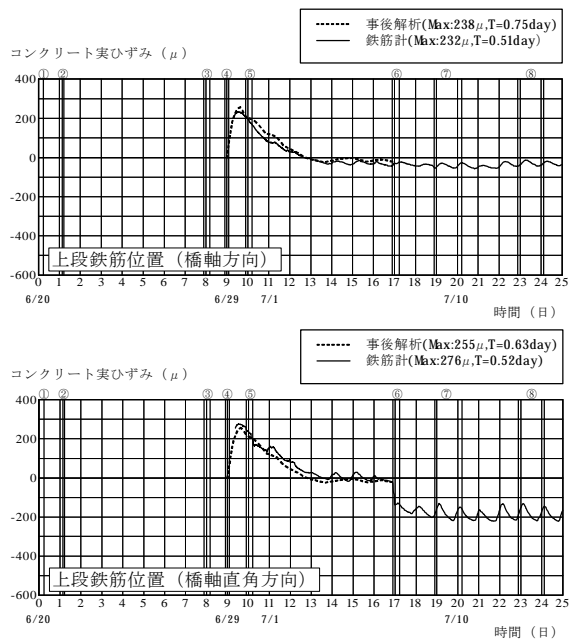
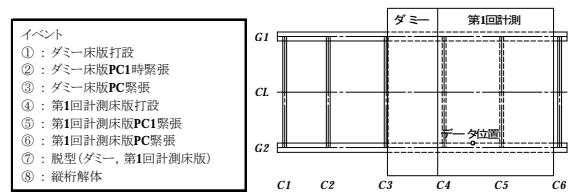


図-10 床版コンクリートひずみの計測結果

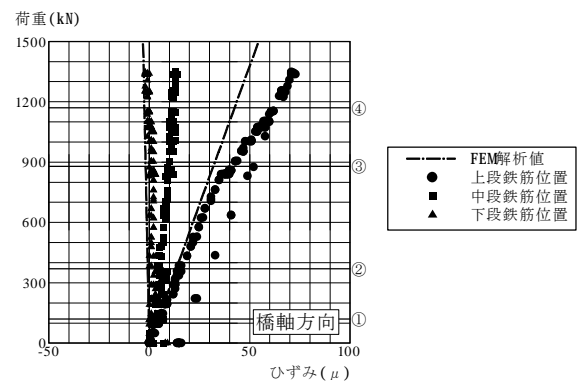
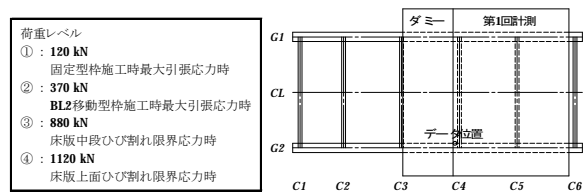


図-11 荷重-コンクリートひずみ関係

には、床版コンクリートのひずみ、鋼桁のひずみ、鋼桁の変形、およびひび割れ観測などを行っている。一例として荷重とコンクリートひずみとの関係を図-11に示す。図よりコンクリート内部にひび割れが発生すると予測した状態(880kN)で若干の非線形性は見られるが、その後もほぼ線形に立ち上がっておりコンクリート内部にひび割れが発生したとは確認できなかった。また、目視によるひび割れ観察からも、コ

表-4 対策後のコンクリート

配合表(普通ポルトランドセメント 40-10-25)

	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位重量(kg/m ³)					
						セメント	水	細骨材	粗骨材	膨張材	高性能 AE 減水剤
普通コンクリート σ _{ck} =40N/mm ²	25	10±2.5	4.5±1.5	44.2	45.3	309	150	821	1006	30	3.560

高性能 AE 減水剤：ポゾリス（レオビルド SP-8S）

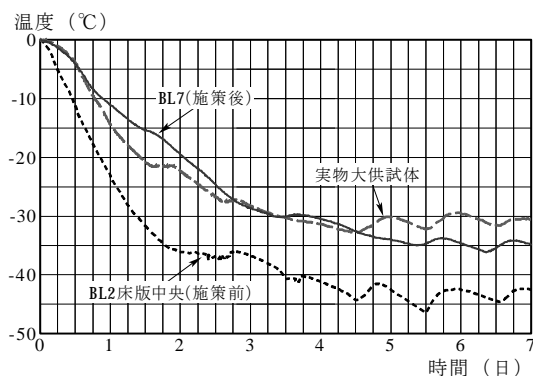


図-12 床版中央の温度降下履歴

ンクリート表面にはひび割れの発生は認められず、対策の有効性が確認できた。

4. 実橋施工時の計測結果

実物大試験において確認された各対策を用いて実橋施工を行った。表-4 に実橋施工時のコンクリートの配合を、図-12 には計測結果の一例として、対策前の実橋施工、実物大供試体、対策後の実橋施工(BL7)とのコンクリート温度下降時の履歴を示す。実物大供試体および対策後の実橋施工ブロックの温度降下は、当初施工時の早強コンクリート使用時よりも明らかに緩やかであり、温度応力対策の効果が確認できる。

実橋施工においては前節までに示した各対策の効果により、ひび割れを発生させることなく良好な床版を打設することができた。

5. 移動型枠施工について

中之沢橋では工程上の制約および変動荷重を少しでも小さくするため固定型枠へ変更したが、ひび割れ発見時の移動型枠による BL2 の床版引張応力は、床版下面では 0.1~0.2N/mm² 程度であり、適切な打設順序等の検討を行えば問題ないものであると考えられる。

しかし、温度応力に対する配慮はいずれの工法

においても重要であり、今回の対策は今後の工事にも十分有効である。普通セメントの使用や PC の 2 回緊張などは、移動型枠ではサイクル施工上採用しにくい。移動型枠の場合は、型枠 2 基の同時使用やカウンターウェイトによる桁作用での床版引張応力度の低減、移動型枠の側面、下面をシートで覆う保温、風雨対策等の、移動型枠の利点を生かした対策が行われ、施工が進められている。

あとがき

床版支間が 10m もの場所打ち PC 床版においては、従来の 6m 支間の床版では顕在化しなかった温度応力が大きくなり、コンクリート材齢初期にひび割れが発生する可能性が大きくなることがわかった。今回はその要因分析および対策の検討を行い、それにより温度応力の把握や膨張材の効果を数値解析で把握し、対策の有効性を確認できた。

これらの解析に用いた熱伝達率などのパラメータについては、今後、PC 床版の応力状態を再現する際に参考となると考えられる。

最後に、本文に示した各検討に際しては、日本道路公団静岡建設局ならびに清水工事事務所、大阪大学松井教授を委員長とした「長支間場所打ち PC 床版の設計施工に関する技術検討委員会」の各委員、(社)日本橋梁建設協会「場所打ち PC 床版技術検討特別委員会」、(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会「場所打ち PC 床版施工対策委員会」の方々の多くのご指導頂いた。さらに、施工に際しての(株)ピー・エス、住友建設(株)の関係者の方々の多大なご協力を頂いた。深く感謝し、誌面をお借りしてお礼を申し上げる次第です。

本稿は橋梁と基礎(2002年10月)掲載²⁾の原稿、第57回土木学会年次学術講演会⁴⁾に発表を行ったものを基に再編集したものである。

参考文献

- 1) 緒方紀夫・木曾 茂・岩立次郎：鋼連続合成桁の中間支点部床版に生じるひび割れに関する実験，第 3 回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，1995.11.
- 2) 寺田典生・福永靖雄・本間淳史・會澤信一・高瀬和男・福田長司郎：長支間場所打ち PC 床版における温度ひび割れに関する考察，橋梁と基礎，Vol.36, No.9, pp.36-45, 2002.9.
- 3) 高瀬和男・寺田典生・福永靖雄・石川敏之：場所打ち PC 床版の材齢初期における膨張材効果の評価方法に関する一提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.1, pp.549-554, 2002.6
- 4) 高瀬和男・福永靖雄・本間淳史・神原康樹：長支間場所打ち PC 床版（中之沢橋）における温度応力に関する考察，第 57 回土木学会年次学術講演会講演概要集，CS4-004, 2002.9.