

場所打ち PC 床版のひび割れ抑制 — 「佐分利川橋」 —

Control of Cracking on Cast-in-Place Pre-stressed Concrete Slab “Saburigawa Bridge”

塩 永 亮 介	技術開発本部基盤技術研究所構造研究部
藪 野 真 史	物流・鉄構事業本部橋梁事業部海外プロジェクト部
戸 田 均	物流・鉄構事業本部橋梁事業部建設部 課長
西 東十郎	物流・鉄構事業本部橋梁事業部建設部 部長
久保田 善 明	元 物流・鉄構事業本部橋梁事業部基本計画部

「佐分利川橋」は、近年の合理化橋梁の一つで、場所打ち PC 床版を用いた 8 径間連続合成 2 主 1 桁橋である。本橋では、床版のひび割れ防止や施工の合理化のため、膨張コンクリート、逐次ジャッキアップダウン工法、移動型枠を用いた床版施工などの新材料・新工法を採用した。これらの効果を把握するため、実橋床版の温度・ひずみの連続計測試験を実施し、施工段階の経時挙動を把握した。また FEM 解析で施工時の温度応力や乾燥収縮に伴う発生応力を評価するとともに、膨張材の添加によるひび割れ抑制効果を明らかにした。

“Saburigawa Bridge” is 8 spans continuous composite girder bridge with 2 steel plate girders and cast-in-place pre-stressed concrete slab, which is a rationalized bridge in recent years. In order to defend cracks and reduce the construction time, expansive concrete, jack-up-down construction method and casting slabs with traveling forms were applied to the bridge. To prove these effects, the measuring tests were carried out through the construction, and it clarified the changes of temperature and the behavior of strain in the concrete slab. Also, it was shown the merit of using the expansive admixture against the cracks, by FEM analysis considering thermal stress and drying shrinkage under the construction.

1. 結 言

「佐分利川橋」は、場所打ち PC 床版を用いた 8 径間連続合成 2 主 1 桁橋である。床版のひび割れ防止や施工の合理化の面から、膨張コンクリート、逐次ジャッキアップダウン工法、移動型枠を用いた床版施工などの新材料・新工法が採用された。これらの効果を把握するため、実橋床版における温度・ひずみの連続計測試験を実施し、施工段階の経時挙動を把握した。同時に、FEM 解析で施工時の温度応力や乾燥収縮に伴う発生応力を評価するとともに、膨張材の添加によるひび割れ抑制効果を定量的に示した。本稿では、これらの計測実験や解析評価で得られた知見と、場所打ち PC 床版のひび割れ抑制技術について報告する。

橋梁諸元を次に示す。

道路規格	第 1 種第 3 級 B 規格
活 荷 重	B 活荷重
橋梁形式	8 径間連続合成 2 主 1 桁橋
橋 長	476 m (上り線), 480 m (下り線)
支 間 長	55.7 ~ 61.5 m
有効幅員	9.040 m × 2
平面線形	R = 1 200 ~ A = 500

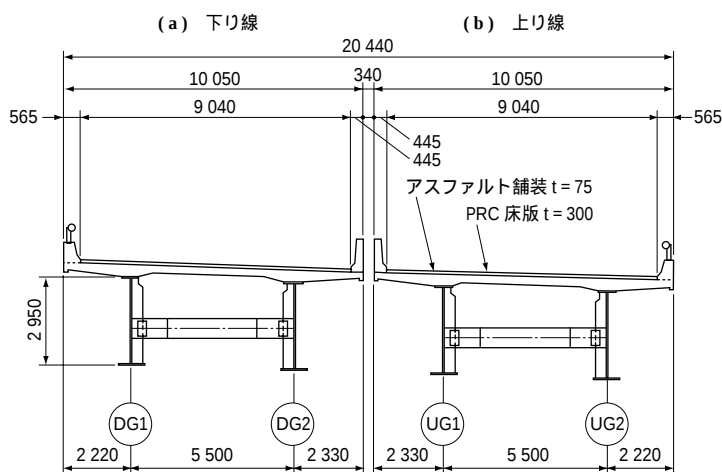
2. 「佐分利川橋」の特徴

2.1 設計概要⁽¹⁾

本橋（第 1 図）は、近畿自動車道敦賀線（現：舞鶴若狭自動車道）の東舞鶴～小浜間に位置する。工事は 1999 年日本道路公団関西支社から石川島播磨重工業株式会社・高田機工株式会社共同企業体が受注し、2002 年 9 月に竣工、2003 年 3 月に開通した。本橋の上部工断面を第 2 図、



第 1 図 「佐分利川橋」施工時全景
Fig. 1 “Saburigawa Bridge”



第 2 図 上部工断面 (単位: mm)
Fig. 2 Cross section of superstructures (unit: mm)

舗 装 アスファルト舗装 ($t = 75 \text{ mm}$)
床 版 PRC 床版 ($t = 300 \text{ mm}$)
コンクリート $\sigma'_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$

本橋の設計・施工において採用した新技術の主なものを以下に示す。

- PC 床版 2 主桁橋 (少数主桁橋) の採用
- 連続合成桁 (橋軸方向プレストレス) の採用
- 腹板の少補剛・薄板化設計法
- 高力ボルト合理化設計法
- 主桁フランジ、ウェブへの LP 鋼板 (テーパプレート) の採用
- 仮組立シミュレーションによる仮組立の省略
- 移動型枠を用いた床版打設工法
- 半壁式鋼製高欄, FRP 製角型排水管の使用
- プレグラウト PC 鋼材の使用

本橋の床版は、橋軸直角方向には PC 鋼材を用いてプレストレスを導入した PC 構造であるが、橋軸方向にはジャッキアップダウンでプレストレスを導入しているものの、構造的には一般的な RC 構造としている。

床版の設計において、橋軸直角方向にはそれぞれの設計荷重に対する曲げ引張制限状態を規定し、ある程度まではひび割れを許容する PRC 床版としての設計を行った。

また、橋軸方向の設計において、本橋は合成桁であるため床版を主桁断面の一部として考慮している。橋軸方向に作用する応力には、合成後死荷重、活荷重、クリープ、乾燥収縮、温度差によるものがある。それらの応力のうちジャ

ッキアップダウンでは、少なくともクリープおよび乾燥収縮による中間支点付近の引張応力度を消去することを目的とし、ジャッキアップダウン量 (最大 180 mm) を決定した。

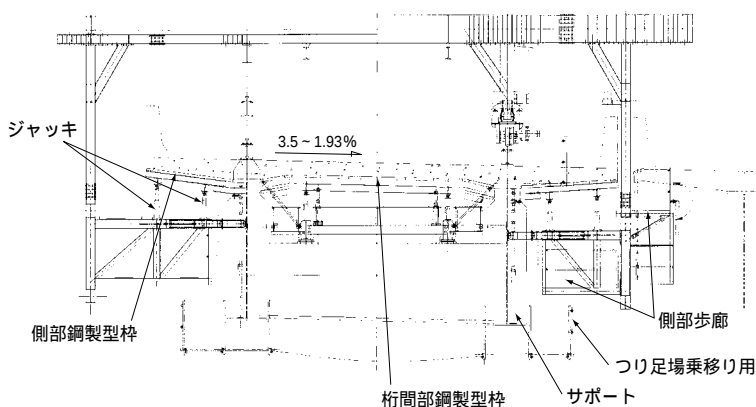
2.2 施工概要

床版の施工は、移動型枠によるステップ打設で行った。この工法は、全面固定型枠および全面作業足場の設置・撤去の必要がなくなり、工事の安全性および経済性の向上を図ることができる。本橋では、上り線と下り線に 1 台ずつの移動型枠を使用した。第 3 図に移動型枠の断面を示す。

移動型枠による床版 1 ブロックの打設長は約 15 m であり、型枠設置から配筋、打設、養生、PC 緊張、脱型・移動までの 1 回の施工サイクルは 8 日間 (ネット) である (第 1 表)。

また打設順序は、打設済みの床版に最も負担の少ない順序を検討し決定した (第 4 図)。最初にたわみの大きい支間中央部から打設し、負曲げを受ける中間支点部はあらかじめジャッキアップした後、コンクリートを打設しジャッキダウンする。このジャッキダウンで床版の橋軸方向にプレストレスが導入され、クリープおよび乾燥収縮による引張応力度分を消去することができる。また橋軸直角方向の PC 緊張については、緊張時の床版内部の応力勾配を軽減するために、一度に目標値まで緊張するのではなく 2 段階で緊張する方法をとった。

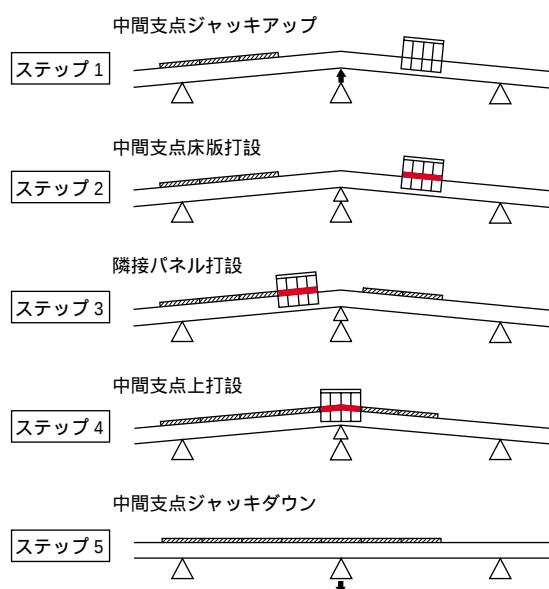
コンクリート配合の面では、水和発熱の抑制や乾燥収縮の低減を考慮し、高性能 AE 減水剤を使用することで単位セメント量および単位水量を減らした。さらに、膨張材を 30 kg/m^3 添加した膨張コンクリートとしてひび割れ抑制対策を図った。第 2 表に床版コンクリートの示方配合を示す。



第 3 図 移動型枠の断面
Fig. 3 Cross section of traveling form

第 1 表 床版施工サイクル工程
Table 1 Slab casting cycle schedule

	1	2	3	4	5	6	7	8
型枠工	■							
鉄筋工		■	■	■				
PC 配置			■					
コンクリート工				■	■			
養生				■	■	■	■	■
レイタンス除去					■			
PC 緊張							■	■
脱型・移動							■	■



第 4 図 床版打設ステップ
Fig. 4 Slab casting procedures

第 2 表 示方配合
Table 2 Specified mix proportion

呼び 強度	最大 骨材径 Gmax (mm)	水セメ ント比 W/B (%)	細骨 材率 s/a (%)	単位量 (kg/m³)					
				水 W	セメント C	膨張材 Ex	細骨材 S	粗骨材 G	混和材 Ad
40	20	44.1	43.0	152	315	30	818	1 147	2.59

打設ブロックは上下線あわせて 60 ブロック以上になるため、施工は通年にわたり実施された。特に冬季は地域的にも氷点下近い外気温となるため、寒中対策として床版打設後にジェットヒータや練炭を用いた給熱や、養生材に気泡シートを使用するなどの養生対策も施した。

3. 実験 / 解析による評価

3.1 実橋計測実験

前述してきたように、本工事ではひび割れ抑制を目的に設計・施工・材料の面からいろいろの対策を講じてきたが、

これらがどの程度の効果があるのか実施工において定量的に計られた例は少ない。そこで実験の目的に以下の 3 点を挙げ、コンクリート床版および鋼桁の温度・ひずみ連続計測を実施した。

クリート打設直後からの初期温度・ひずみ挙動の把握

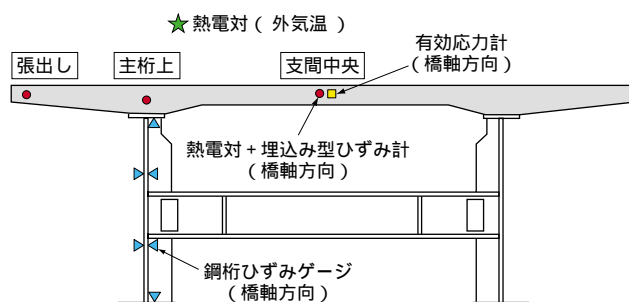
移動型枠の移動や隣接径間の床版打設（リバウンド荷重）に対するひび割れ発生評価

ジャッキアップダウンによる橋軸方向プレストレス導入量の検証

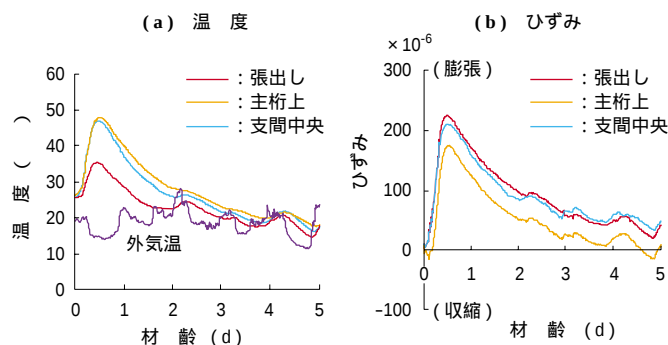
3.1.1 初期材齢時の温度・ひずみ挙動

床版および鋼桁の計測位置を第 5 図に示す。床版内部は支間中央、主桁上、張出しの 3 箇所温度とひずみ、鋼桁については上下フランジ、腹板の表裏で橋軸方向のひずみを計測した。また支点上の床版には直接応力を計る有効応力計も設置した。

第 6 図に、初期材齢（打設～材齢 5 日）の温度およびひずみ計測結果を示す。コンクリート打込み温度 26 に対して最高温度は断面厚の大きい主桁上中心で 48 程度となり、材齢 4 日ごろには外気温に落ち着く。一方、ひずみの挙動は最高温度時に $170 \times 10^{-6} \sim 230 \times 10^{-6}$ の膨張ひずみが生じる。張出し部では主桁の拘束の影響を受けにくい



第 5 図 温度・ひずみの計測箇所
Fig. 5 Measuring points for temperature and strain



第 6 図 床版内部の温度・ひずみ計測結果
Fig. 6 Temperature and strain curves inside the slabs

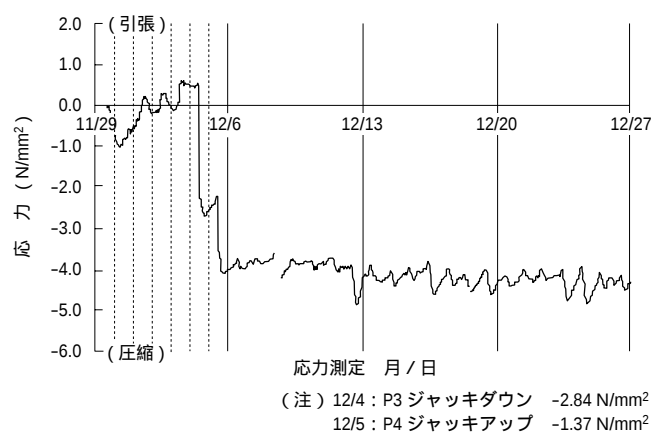
ため、比較的大きな膨張ひずみが発生するが、主桁上では外部拘束で膨張ひずみが抑えられており、この拘束ひずみ分が圧縮応力として床版内部に残存される。

3.1.2 施工時荷重に伴うひずみ変動

第7図に径間中央のブロック（9月29日打設）の打設直後から10週間の床版内部の橋軸方向ひずみ履歴を示す。他ブロックの打設や型枠の移動などによって生じるひずみは、日射などによる一日のひずみ変動差に比べれば小さく、長期的にみても徐々に圧縮側のひずみが導入されており、施工時のリバウンド荷重によってひび割れを起こす可能性は少ない。設計段階でブロックが最も大きな引張応力を受けると予想されたブロック打設時（10月17日）においても、床版の打設時間内に床版に発生した引張側のひずみは 25×10^{-6} であった。応力として換算すると $25 \times 10^{-6} \times 30 \text{ kN/mm}^2 = 0.75 \text{ N/mm}^2$ と、ほぼ設計値（ 0.80 N/mm^2 ）に近い計測結果であり、ひび割れに与える影響はほとんどなかった⁽²⁾。

3.1.3 ジャッキアップダウンによる導入応力

床版の橋軸方向には、支点部を逐次ジャッキアップダウンすることでプレストレス（圧縮力）を導入する。この圧縮力を実橋で確認するために床版内部に有効応力計を埋め込み、経時計測を行った。P3 橋脚上のブロック（11月29日打設）に設置した計器による応力履歴を第8図に示す。材齢5日目（12月4日）にまず支点P3 ジャッキダウンで 2.84 N/mm^2 、翌日（12月5日）の支点P4 ジャッキアップでさらに 1.37 N/mm^2 の圧縮力が導入された。なお、P3、P4 のジャッキアップ量はいずれも 150 mm である。プレストレス導入で、死荷重およびクリープ・乾燥収



第8図 床版内部の応力履歴
Fig. 8 Stress variation inside the slabs

縮が床版内部に発生する引張応力度を消去することでひび割れの制御を図っている。

隣接のブロックも含めた導入プレストレス量の実測値と設計値の比較を第3表に示す。施工誤差や計測誤差で若干設計値との差はあるが、ジャッキアップダウンによる所定の圧縮力が導入されていることが確認できた⁽²⁾。

3.2 床版モデル試験

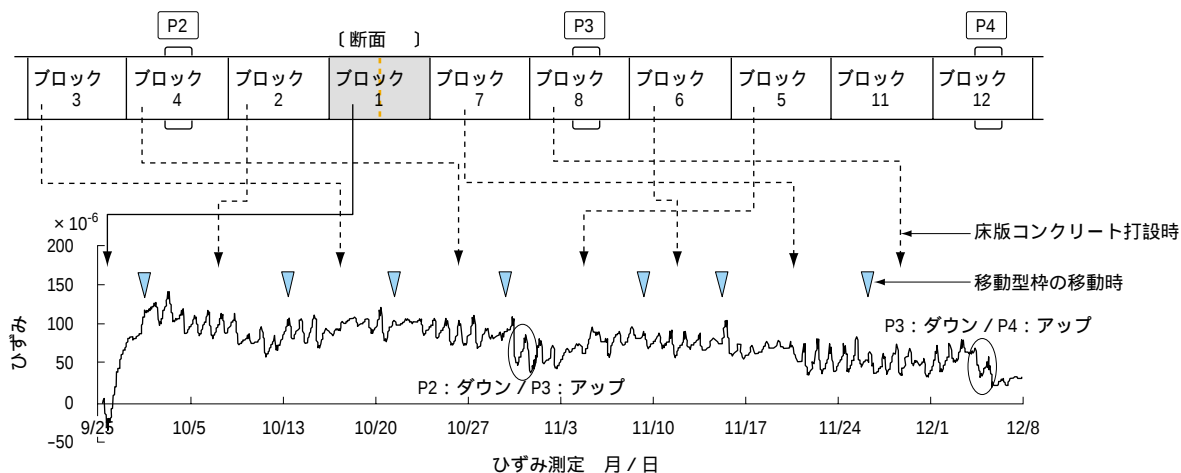
3.2.1 乾燥収縮・クリープ計測試験

前節で示した導入プレストレス量を決定する際に、設計

第3表 導入プレストレス量
Table 3 Prestress magnitude

		P3 プレストレス量 ^{*1} (N/mm^2)	P4 プレストレス量 ^{*2} (N/mm^2)
ブロック	実測値	-1.62	-1.11
	設計値	-1.44	-0.96
ブロック P3上	実測値	-2.84	-1.37
	設計値	-2.59	-1.48

(注) *1: ジャッキダウン (150 mm)
*2: ジャッキアップ (150 mm)



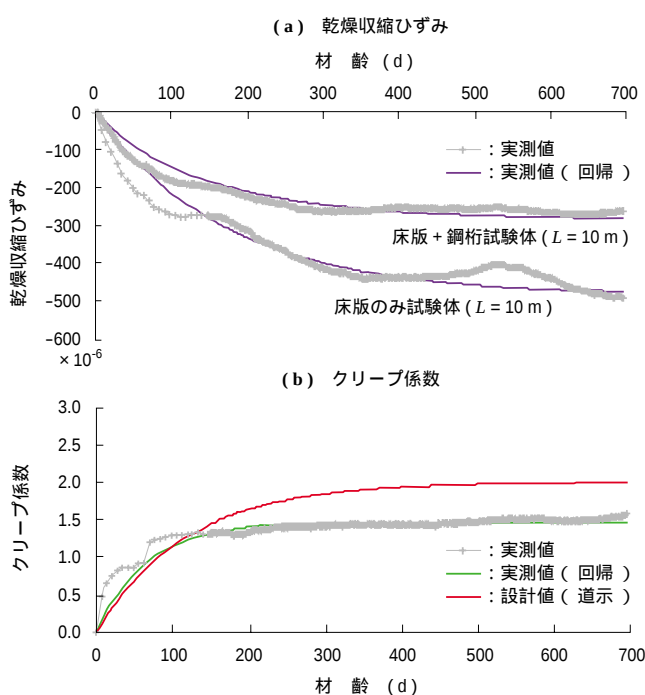
第7図 床版内部のひずみ履歴 (ブロック)
Fig. 7 Strain variations inside the slabs (Block)

で想定する応力度評価法（死荷重，乾燥収縮，クリープ）は正しいということが前提にあるが，本橋のような連続合成桁においてプレストレス導入後の長期変動を実計測した例は少ない．そこで，温度・湿度変化の影響が少ない地下ピット（大阪工業大学八幡工学実験場）で，実橋の 1/5 模型供試体（第 9 図）を製作し，約 2 年間にわたる長期室内計測試験を実施した⁽³⁾．

本実験から乾燥収縮挙動については，床版単体では最終ひずみ約 500×10^{-6} に対し鋼桁と合成されることで 1/2 の 250×10^{-6} に抑えられる．またクリープについては，設計値で扱っているクリープ係数 $\phi = 2.0$ に対して，実際には $\phi = 1.5$ 程度に落ち着くことが示された（第 10 図）．



第 9 図 合成桁 1/5 模型供試体
Fig. 9 Composite girder scale model (1/5) for tests



第 10 図 乾燥収縮ひずみとクリープ係数
Fig. 10 Drying shrinkage strain and creep index

3.2.2 膨張材ひずみ計測試験

2.2 節に記したように，本橋ではひび割れ抑制を目的に膨張材（ 30 kg/m^3 添加）を用いている．この膨張材による導入ひずみ量を把握するため，膨張材有り / 無しの配合で製作した実橋床版の切出しモデル試験体 $1.0 \times 1.0 \times 0.3 \text{ m}$ （第 11 図）を用い，コンクリート打込み直後からのひずみ計測試験を実施した．内部の温度履歴が実橋と同様となるように側面に断熱材を使い，養生方法も実施工と同様な手法で行った．

各試験体の断面中心の実ひずみ履歴を第 12 図に示す．膨張材有り試験体の実ひずみから膨張材無し試験体の実ひずみを差し引くことで，膨張材による導入ひずみが得られ，その値としては 150×10^{-6} 程度であり，ひび割れ抑制に対し十分その効果が期待できることが確認できた⁽⁴⁾．

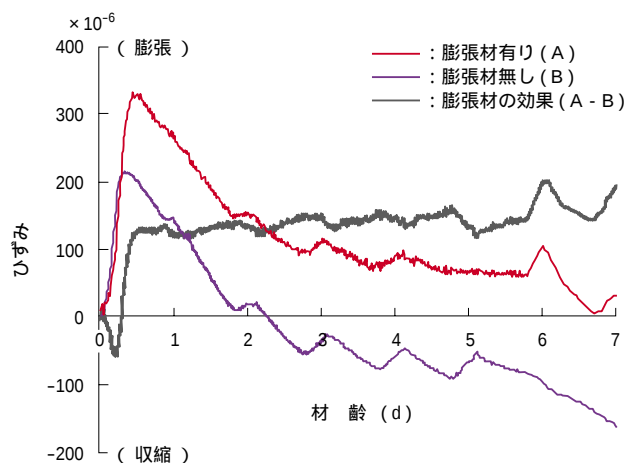
3.3 温度応力解析

3.3.1 床版内部応力分布の推定

実橋実験およびモデル実験などで得られた温度，ひずみ履歴や諸特性値を基に，三次元温度応力解析（解析コー

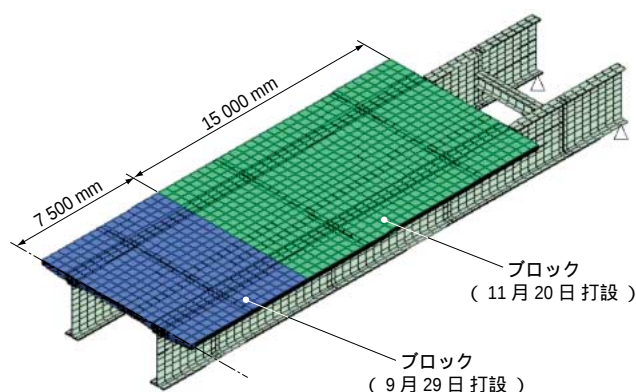


第 11 図 床版切出しモデル試験体
Fig. 11 Slab scale models for tests

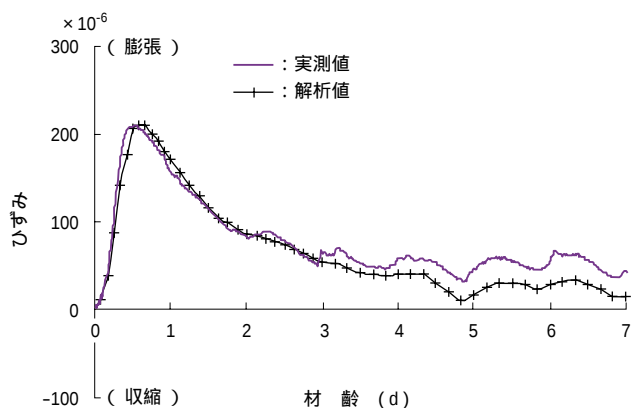


第 12 図 膨張材による導入ひずみ
Fig. 12 Expansive strain

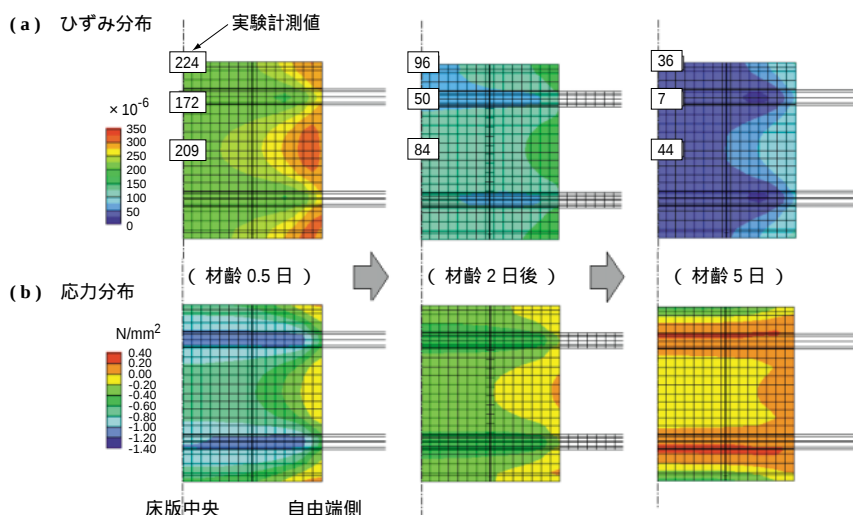
ド：ASTEAMACS）で床版全体の経時挙動の把握を試みた。解析モデルを第13図に示す。P2 - P3 径間の半分を対象とし、先に径間中央の床版ブロックを打設後、隣接のブロックを打設する実際の工程と同様とした。また現地の気温データや強度データを用い、配合条件や施工手順などについても実橋に即した解析を実施した⁽⁵⁾。膨張材添加によるひずみ特性については、3.2.2項で示した床版切出し試験体で得られたひずみデータを使用した。ブロックの床版断面中心（主桁上）のひずみ履歴を第14図に示す。解析値はほぼ実測値と一致しており、ひずみの経時挙動がおおむね再現できたことが分かる。この解析結果による床版内部のひずみおよび応力（いずれも橋軸方向）のコンターを第15図に示した。第15図-（a）はひずみ分布、-（b）は応力分布であり、それぞれ材齢



第13図 FEM解析モデル
Fig. 13 FEM analysis model



第14図 ひずみ履歴
Fig. 14 Strain Variations



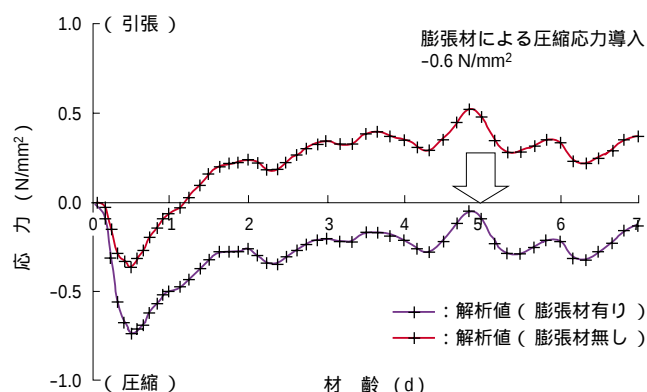
第15図 床版内部のひずみ・応力分布（ブロック）
Fig. 15 Distribution of strains and stresses inside the slab (Block)

0.5, 2, 5 日における床版厚さ方向中心断面のコンターを表している。

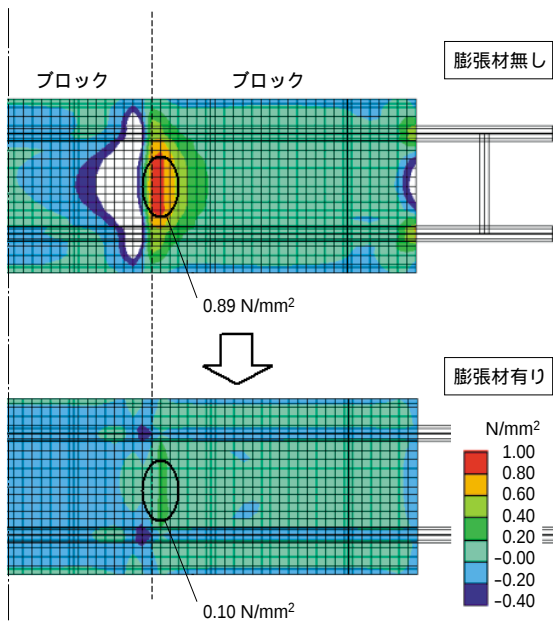
計測データからも推測されるように、打設後 0.5 日の初期において主桁近傍では拘束を受けて膨張ひずみが抑えられているが、この拘束によって応力としては他部位よりも大きな圧縮応力が生じる。材齢が進むにつれて、温度降下および乾燥などで収縮側のひずみが生じるが、そのひずみが主桁による外部拘束を受け比較的大きな引張応力が発生している。これによって、材齢 5 日以降は主桁周辺やブロック端部からひび割れが発生しやすいという実橋床版の傾向が表れている。

3.3.2 膨張材による導入応力度の評価

さらに同解析手法を用いて、膨張材を添加しない場合の解析を実施した。床版内部の応力履歴について、膨張材有りと膨張材無しの解析結果の比較を第16図に示す。ブロックの床版中心の橋軸方向応力履歴を示しているが、膨張材を添加することで 0.6 N/mm^2 の圧縮応力導入が図られて



第16図 応力履歴の比較
Fig. 16 Stress variation comparison



第 17 図 応力分布の比較
Fig. 17 Stress distribution comparison

いることが明らかになった。

また、膨張材による導入応力は外部拘束が大きい箇所ほどその効果は大きいといわれる。第 17 図に後から打設したブロックの床版内部の応力分布を示す。打継ぎ目近傍では既設床版（ブロック）による外部拘束を大きく受けるため、橋軸直角方向に発生する引張応力は比較的大きくなるが、膨張材を添加することで 0.8 N/mm^2 の応力低減につながることも解析的に示された。

4. 結 言

「佐分利川橋」における各種実験検討および解析評価で、床版のひび割れ抑制や施工の合理化を目的に採用した新材料・新工法の効果や優位性を定量的に示すことができた。これらのことから本橋では、問題となるひび割れの発生はなく、客先から高い評価を得ている。

また、本構造形式（少数主桁橋）は今後の鋼橋の標準構造となりつつあるため、本検討で明らかにした実験結果・解析評価技術を整備し、今後の同種工事に活用していくと

ともに、さらなる設計・施工の合理化やコスト縮減を目指し鋭意開発に取り組む予定である。

— 謝 辞 —

本工事における実橋実験および室内実験に際して、日本道路公団関西支社構造技術課の安川課長代理・稲葉技師、日本道路公団舞鶴工事事務所の関係各位、大阪工業大学の栗田教授および片山ストラテック株式会社の大山氏には多大なご助言、ご助力をいただきました。ここに記し、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 田中常夫, 中根 誠: 佐分利川橋 (日本道路公団) の設計 高田機工技報 No.17 大阪 2001 年 pp.25 - 31
- (2) 藪野真史, 塩永亮介, 田中常夫, 稲葉尚文, 三井邦弘: 逐次ジャッキアップダウン工法による場所打ち PC 床版 2 主桁橋の施工時挙動 - 佐分利川橋 - 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集 2002 年 9 月 pp.145 - 146
- (3) 對馬大輔, 栗田章光, 稲葉尚文, 田中常夫: ジャッキアップダウン工法によりプレストレスを導入した連続合成桁の長期応力変動確認実験 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集 2001 年 10 月 pp.424 - 425
- (4) 師山 裕, 塩永亮介, 倉田幸宏, 河野 豊: コンクリート床版における膨張材の効果と鉄筋量に関する解析的検討 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集 2002 年 9 月 pp.147 - 148
- (5) 塩永亮介, 藪野真史, 戸田 均, 安川義行, 稲葉尚文: 場所打ち PC 床版 2 主桁橋の床版コンクリート初期ひずみ特性 - 佐分利川橋 - 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集 2002 年 9 月 pp.143 - 144