

論文 低添加型膨張材の場所打ちP C床版への適用に関する研究

河西 龍彦^{*1}・保利 彰宏^{*2}・坂根 秀和^{*3}・上原 正^{*4}

要旨：鋼橋の場所打ちP C床版において、温度応力ならびに収縮に起因する床版コンクリートのひび割れを予防するために膨張材を収縮補償として添加する事例が増えている。本研究では従来の膨張材に比べて経済性に優る低添加型膨張材に着目し、1m サイズの供試体による温度上昇特性やひずみ特性の確認，ならびに実橋をモデルとした温度応力解析を実施して、低添加型膨張材が鋼橋の場所打ちP C床版へ適用可能であることを明らかにした。

キーワード：低添加型膨張材，場所打ちP C床版，温度応力，ひび割れ

1. はじめに

近年，鋼橋において，鉄筋コンクリート床版より耐久性の高いプレストレストコンクリート床版（以下，P C床版という）に鋼少数主桁や鋼開断面箱桁を組み合わせた橋梁形式が注目され，様々な技術開発が積極的に行われている。P C床版の支間長も現在では 10m 級のもの¹⁾が出現するに至っており，P C床版の長支間化に伴ってP C床版は厚くなる傾向にある。

このような長支間場所打ちP C床版を移動型枠によりサイクル施工で建設する際には，現場工期短縮を目的に材齢 3 日程度でプレストレッシング可能な設計基準強度 40 N/mm²程度の早強ポルトランドセメントを用いることが多い。

一方，場所打ちP C床版の施工初期に床版に貫通ひび割れが発生した事例があり，その原因として温度応力が着目されるようになった²⁾。施工初期の床版に貫通ひび割れを発生させることは床版の高い耐久性を前提に成立しているこのような橋梁形式において重大な問題であり，ひび割れを予防する対策について様々な検討が行われ，その有効な方法のひとつとして膨張コンクリートが注目されるようになった³⁾。

鋼橋の床版に膨張コンクリートを用いる試み

は 1980 年代より始まっており，膨張材を収縮補償として 30kg/m³程度添加した膨張コンクリートを使用することにより，床版コンクリートの乾燥収縮を鋼桁が拘束することに起因するひび割れを抑制できることが知られている⁴⁾。このようなことに加え，材齢初期の温度応力に対しても有効ということから，鋼橋の場所打ちP C床版に膨張コンクリートを使用する機運が高まっている。

このような流れの中，マスコンクリートなどの土木建築構造物向けとして開発された「低添加型膨張材⁵⁾」は，単価は割高となるものの標準使用量が従来の膨張材（30kg/m³）に比べて少量（20kg/m³）で従来と同等の膨張性能が得られるため，経済性に優れている。そこで筆者らはこの低添加型膨張材に着目し，これを鋼橋の場所打ちP C床版に適用することを目的に，その性能を確認する基礎的実験と，実橋をモデル化した解析的検証を行ったので報告する。

2. 1m サイズの供試体を用いた基礎的実験

2.1 実験の目的と概要

低添加型膨張材の基本性能を確認するために 1m サイズの供試体⁶⁾を製作し，コンクリート

*1 榊宮地鐵工所 設計部設計一課長（正会員）

*2 電気化学工業(株) 特殊混和材事業部 工修（正会員）

*3 榊宮地鐵工所 設計部設計一課 工修

*4 榊宮地鐵工所 工事部工事計画担当課長

の温度履歴やひずみの計測を行った。供試体の寸法は幅 1m×長さ 1m, 厚さは支間長が 10m 級の長支間床版における鋼桁上の床版厚さに合わせた 53cm とした。また, 実橋と同じく橋軸方向には D19ctc100mm, 橋軸直角方向には D16ctc125mm の 3 段配筋を行った。

供試体は表－1 に示す計 3 体を製作した。供試体のコンクリート配合を表－2 に示す。目標スランプは 14cm, 空気量は 4.5% (何れも荷卸時) である。セメントは何れも早強ポルトランドセメントで, 設計基準強度は 40 N/mm² である。膨張材の添加量は, 供試体Ⅱは従来の膨張材の標準添加量である 30 kg/m³, 供試体Ⅲは低添加型膨張材の標準添加量である 20 kg/m³ とし, セメント+膨張材の結合材量が供試体Ⅰ～Ⅲで同一となるようにした。

供試体には図－1 に示すように熱電対, 埋込型ひずみ計などを配置し, 材齢 1 日までは 30 分ピッチ, 以降は 1 時間ピッチで計測を行った。

表－1 供試体の種類

供試体タイプ	セメント種類	膨張材種類	鉄筋	備考
I	早強	なし	あり	
Ⅱ	早強+膨張材	従来の膨張材	あり	標準型
Ⅲ	早強+膨張材	低添加型膨張材	あり	標準型

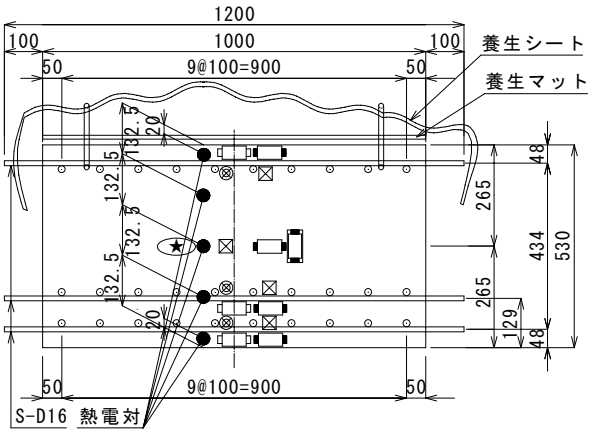
表－2 供試体のコンクリート配合 (早強)

	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単用量 (kg/m ³)					
			水 W	セメント C	膨張材 F	結合材 P=C+F	細骨材 S 1	粗骨材 G
I	43.8	44.0	160	365	—	365	774	999
Ⅱ				335	30			
Ⅲ				345	20			

2.2 供試体の製作

供試体の製作要領を図－2 に示す。

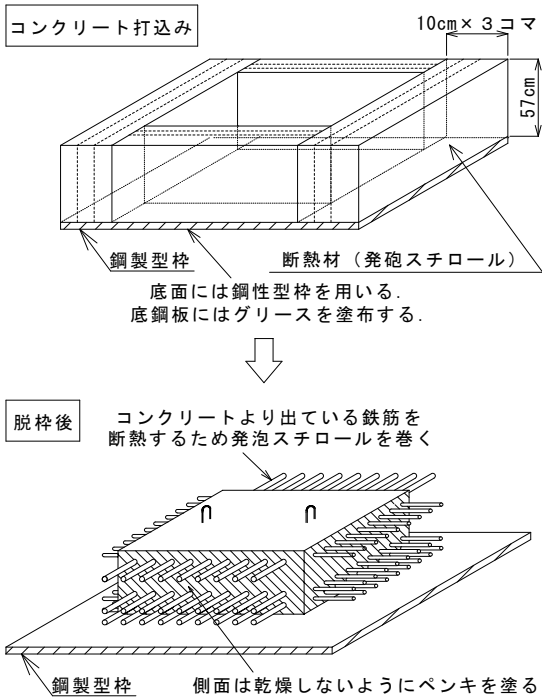
供試体の製作は現場工事ヤード (屋外) で行った。コンクリートの打込みは平成 14 年 3 月 19 日の午後で, 打込み時の天候は晴れ, 外気温は 12.9℃であった。実橋における床版コンクリートの施工と同じく材齢 3 日まで養生した後, 脱型した。脱型後は側面の乾燥を予防する意味でペンキを塗布して放置した。



センサー類 (供試体 1 体当たり)			
□(◎)	鉄筋のひずみ	鉄筋計	3
□(●◎)	鉄筋のひずみ, 温度	熱電対付鉄筋計	3
■(□)	コンクリートのひずみ	埋込型ひずみ計	4
■(●□)	コンクリートのひずみ, 温度	熱電対付埋込型ひずみ計	4
■(□)	コンクリートのひずみ	埋込型ひずみ計 (無応力容器付)	1
●	コンクリートの温度	熱電対	5
○★(★)	コンクリートの内部応力	有効応力計	1

注) () は直角方向視を示す

図－1 計測機器の配置 (橋軸直角方向断面) (mm)



図－2 供試体の製作要領

供試体に用いたコンクリートのスランプ, 空気量等の実測値を表－3 に, 圧縮強度, 引張強度, 弾性係数の各試験結果を表－4 に, 長さ変化の試験 (拘束膨張試験) 結果を表－5 に示す。コンクリートの圧縮強度等, 供試体Ⅲは供試体Ⅰ, Ⅱと同等の値が得られている。

表-3 スランプ等の実測値

	外気温	コンクリート温度	荷卸時	
			スランプ	空気量
単位	℃	℃	cm	%
供試体Ⅰ	16.5	19.0	14.5	4.4
供試体Ⅱ	17.0	19.0	13.5	3.8
供試体Ⅲ	19.0	19.5	13.5	4.1

表-4 供試体コンクリートの試験結果

圧縮強度 (JISA1108)						
材齢	標準養生 (N/mm ²)			現場養生 (N/mm ²)		
	I	II	III	I	II	III
1日	9.9	8.1	12.0	9.9	8.1	12.0
3日	37.1	37.5	38.7	34.3	36.5	36.8
7日	46.5	46.8	45.2	39.5	43.6	39.4
28日	52.0	49.1	49.1	51.6	54.5	51.5

引張強度 (JISA1113, 割裂)						
材齢	標準養生 (N/mm ²)			現場養生 (N/mm ²)		
	I	II	III	I	II	III
1日	1.51	1.62	1.73	1.51	1.62	1.73
3日	—	—	—	2.82	2.59	2.40
7日	3.31	3.22	2.63	3.09	3.05	2.76
28日	3.70	3.99	3.38	3.35	3.23	3.14

弾性係数 (JISA1149)						
材齢	標準養生 ($\times 10^4$ N/mm ²)			現場養生 ($\times 10^4$ N/mm ²)		
	I	II	III	I	II	III
3日	2.80	2.96	3.03	2.59	2.90	2.85
28日	3.50	3.35	3.21	3.23	3.24	3.31

表-5 長さ変化試験結果 (JISA6202, B法)

材齢	I	II	III
3日	-8	191	187
7日	-14	208	220
28日	-19	210	223

($\times 10^{-6}$, +: 膨張)

2.3 実験結果

(1) コンクリートの温度履歴

供試体中央の熱電対により計測したコンクリートの温度履歴を図-3に示す。

横軸は経過時間を対数で表示しており、計測を終了した平成14年10月17日(材齢212日)までのデータを示している。

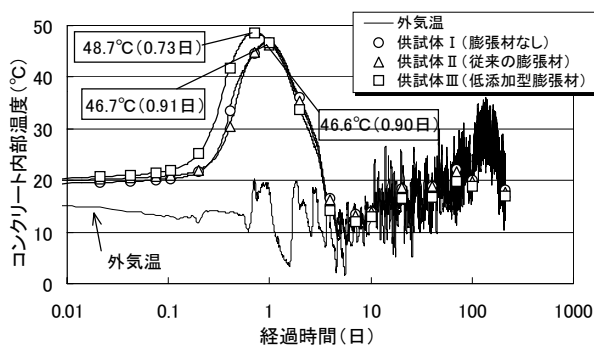


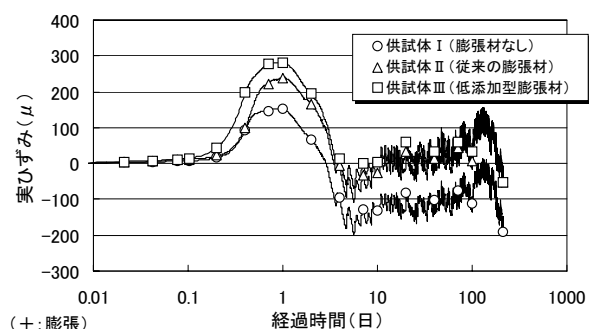
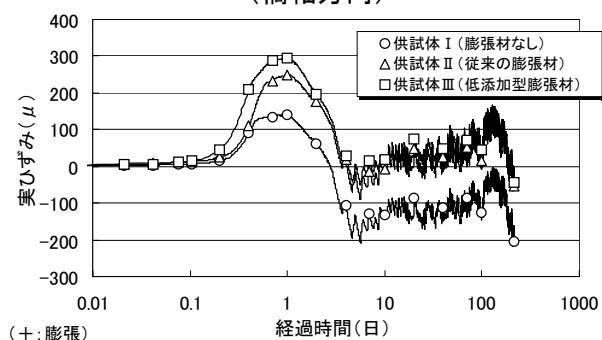
図-3 供試体の温度履歴

供試体Ⅰ(膨張材なし)と供試体Ⅱ(従来の膨張材)はよく似た温度履歴を示したが、これらに比べ供試体Ⅲ(低添加型膨張材)は最高到達温度が若干高く、また最高温度に到達するまでの時間も若干早かった。

膨張材は水和活性の高い遊離石灰が含まれているが、その含有率は一般のセメントに比較して高い。すなわち、膨張材はセメントに比較して一般的に水和反応が速く水和発熱量も多い傾向にある。この点が影響していると考えられる。

(2) 膨張材の効果

供試体中央の埋込型ひずみ計で計測したコンクリートひずみより、ゲージ読み値に対してゲージ自身の温度変化による伸縮量の補正、ならびに凝結終結までの計測不可能部分の加算を行った「初期値補正を行った実ひずみ⁶⁾」(自己収縮や乾燥収縮を含む)を図-4, 図-5に示す。

図-4 初期値補正を行った実ひずみ
(橋軸方向)図-5 初期値補正を行った実ひずみ
(橋軸直角方向)

この「初期値補正を行った実ひずみ」からコンクリートの水和熱による自由ひずみ分を差し引いた「膨張ひずみ」を計算し、膨張材ありの

「膨張ひずみ」より膨張材なしの「膨張ひずみ」を差し引くことで「膨張材の添加による膨張量」を計算した。計算結果を図-6、図-7に示す。

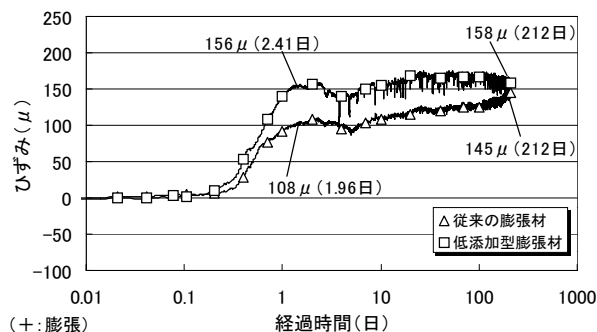


図-6 膨張材の添加による膨張量
(橋軸方向)

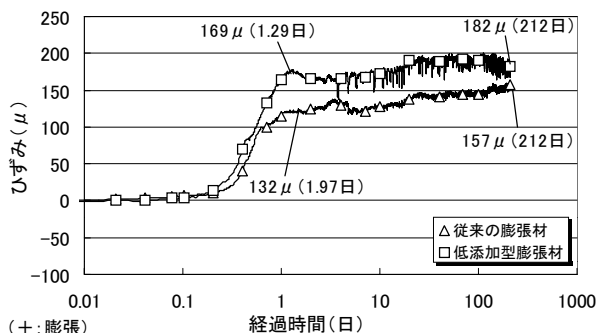


図-7 膨張材の添加による膨張量
(橋軸直角方向)

「膨張材の添加による膨張量」の計算値は、供試体Ⅱ（従来の膨張材）で約 120μ だったのに対し、供試体Ⅲ（低添加型膨張材）は約 160μ であり、供試体Ⅲ（低添加型膨張材）の方が約 40μ 大きかった。

また、計測を終了した材齢 212 日の時点まで「膨張材の添加による膨張量」は持続していた。

3. 実橋を想定した温度応力解析

3.1 解析の目的

1m サイズの供試体を用いた実験結果より、低添加型膨張材の優れた膨張効果が確認できたが、その反面、コンクリートの最高到達温度が若干高く、かつ最高温度に到達する時間も若干早いことが懸念された。

そこで、実橋を対象としたモデルに 1m サイズ

ズの供試体を用いた実験結果より得られた温度履歴や膨張材の添加による膨張量等を入力して、実橋における温度応力のシミュレーション解析を行うこととした。

3.2 解析の概要

解析の対象とした橋梁は第二東名高速道路藁科川橋¹⁾である。本橋梁の断面図を図-8に示す。床版厚は 36cm～53cm である。

温度応力解析に用いた解析モデルを図-9に示す。床版コンクリート、鋼桁とも Solid 要素で、解析に使用したソフトは「コンクリートの非線形温度応力解析プログラム、ASTEA-MACS Ver.2, (株) 計算力学研究センター」である。解析モデルは、実橋と同じ 2 ブロック分の床版を再現し、先に施工する BL1 ブロック（旧ブロック）と次に施工する BL2 ブロック（新ブロック）の材齢差も実橋と同じ 22 日とした。

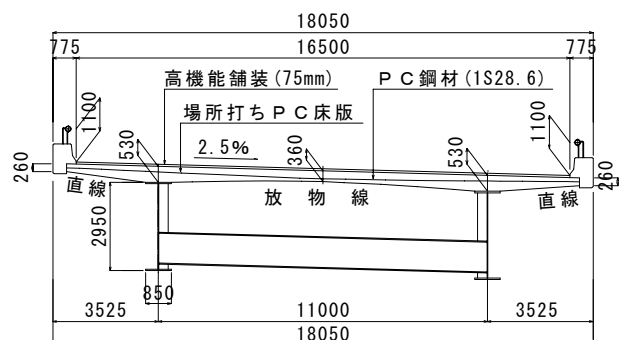


図-8 解析の対象とした橋梁の断面図 (mm)

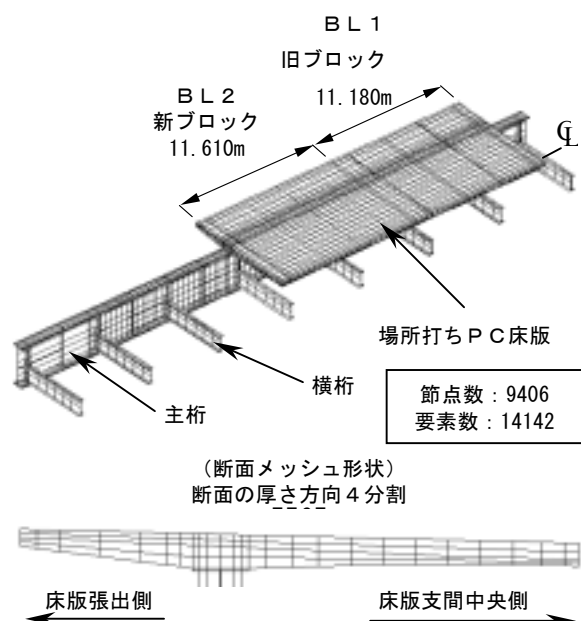


図-9 解析モデル

解析に入力した熱物性値等を表－６～表－８に、コンクリートの断熱温度上昇特性、膨張材の添加による膨張量として入力したひずみ履歴を図－１０、図－１１に示す。ここで、表－７に示す熱伝達率は実橋計測の再現解析に使用した値であり、表－８に示すコンクリートの線膨張係数は 1m サイズの供試体中央の、埋込型ひずみ計の実測値から求めたものである。

表－６ 熱物性値

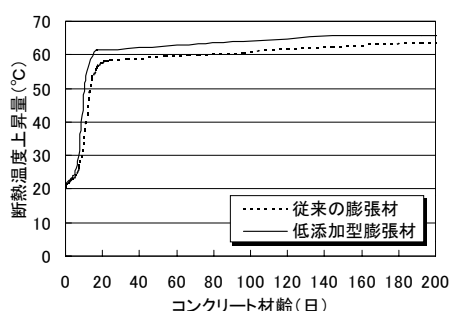
部材	項目	単位	物性値	備考
コンクリート	熱伝導率	W/m°C	2.7	コンクリート標準示方書[施工編]より
	密度	kg/m³	2300	コンクリート標準示方書[構造性能照査編]より
	比熱	kJ/kg°C	1.31	コンクリート標準示方書[施工編]より
	断熱温度上昇量	°C	パラメータ	図－１０参照
鋼桁	初期温度	°C	16.8	BL1, BL2打込み時の打込み温度とする
	熱伝導率	W/m°C	25	理科年表より
	密度	kg/m³	7850	コンクリート標準示方書[構造性能照査編]より
	比熱	kJ/kg°C	0.473	理科年表を参考に設定した
	初期温度	°C	15	経過時間 0 時間の外気温と同じとする
	外気温	°C	パラメータ	BL1, BL2打込み時の外気温とする

表－７ 境界の熱伝達率

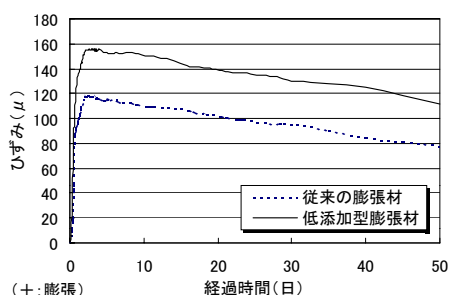
場 所	コンクリート材齢 (時間)	養生方法	熱伝達率 (W/m²°C)
床版上面	0～4.5	養生無し	12
	4.5～13	養生マット+散水+ジェットヒーター	8
	13～67.5	養生マット+散水	9
	67.5～	養生無し	12
床版下面	0～72.5	メタルフォーム	6
および側面	72.5～	養生無し	12
鋼桁表面	0～	養生無し	12

表－８ コンクリートの線膨張係数

経過時間 (hr)	線膨張係数 (1/°C)	備 考
0～16	6.7×10^{-6}	温度上昇時
16～72	8.8×10^{-6}	温度下降時
72～	10.0×10^{-6}	



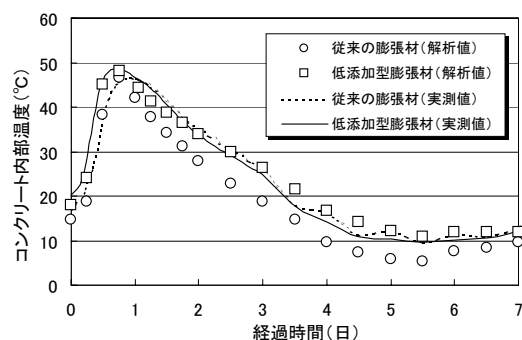
図－１０ コンクリートの断熱温度上昇特性



図－１１ ひずみ履歴

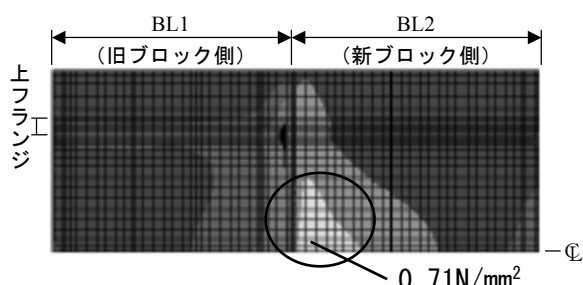
3.3 解析結果

解析結果よりコンクリートの温度履歴を図－１２に示す。従来の膨張材の温度下降時の再現性が若干悪いが、温度応力に対して支配的となる最高到達温度と、最高温度に到達する時間等、概ね良好に再現できている。

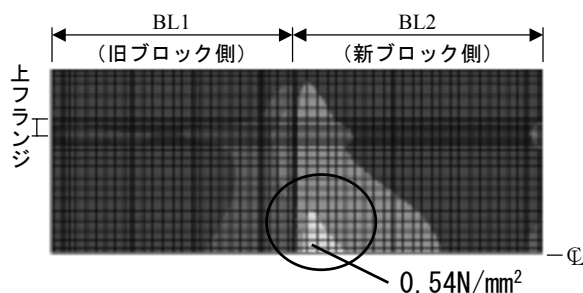


図－１２ コンクリートの温度履歴

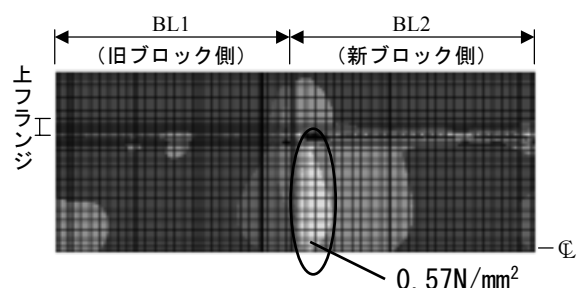
次に温度応力解析結果を示す。後から施工する BL2 ブロック (新ブロック) の材齢 3 日時点における床版コンクリートの橋軸直角方向応力を図－１３～図－１６に示す。(+: 引張)



図－１３ 床版上面 (従来の膨張材)



図－１４ 床版上面 (低添加型膨張材)



図－１５ 床版下面 (従来の膨張材)

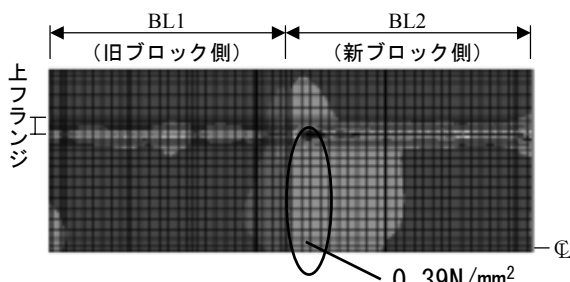


図-16 床版下面（低添加型膨張材）

本解析の結果，コンクリートの最高到達温度が若干高く，かつ最高温度に到達する時間も若干早い低添加型膨張材を使用した膨張コンクリートであっても，従来の膨張材を上回る膨張効果によって，床版コンクリートに作用する温度応力に起因する引張応力はむしろ小さくなっていることがわかった。

4. 結 論

本研究では，低添加型膨張材を鋼橋の場所打ちP C床版に適用することを目的に，その基本的な性能を確認する基礎的実験と，実橋を想定した解析的検証を行い以下の結論を得た。

- (1) 1m サイズの供試体を用いた計測結果によれば，低添加型膨張材を用いたコンクリートの「膨張材の添加による膨張量」は約 160 μ で，従来の膨張材を用いた場合に比べて約 40 μ ほど大きい。
- (2) 1m サイズの供試体中央のコンクリート温度履歴より，低添加型膨張材を用いたコンクリートは従来の膨張材を用いた場合に比べて最高到達温度が若干高く，かつその到達時間も若干早くなる。
- (3) 低添加型膨張材を用いたコンクリートは従来の膨張材を用いた場合と同等の強度を有していた。
- (4) 1m サイズの供試体を用いた計測結果を反映し，実橋を想定したモデルを用いてシミュレーション解析を行った結果，従来の膨張材に比べ低添加型膨張材を使用した場合の方が床版コンクリートに作用する温度応力による引張応力を低減できることが確認

できた。

以上より，鋼橋の場所打ちP C床版における温度応力対策として用いる膨張コンクリートにおいて，従来の膨張材に比べ低添加型膨張材を使用することの優位性が確認された。

なお，本研究に用いた低添加型膨張材の添加量 (20kg/m^3) はもう少し減らせる可能性もあると考えられ，鋼橋の場所打ちP C床版に使用する低添加型膨張材の適当な添加量については今後の検討課題と考える。

本研究の実施にあたっては日本道路公団静岡建設局静岡工事事務所のご協力をいただいた。誌面を借りて厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 本間淳史，長谷俊彦，榊原和成，中村和己，上原正，河西龍彦：長支間場所打ちP C床版の設計と施工－第二東名高速道路藁科川橋一，橋梁と基礎，pp.2-10，2002.10
- 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P C床版における温度応力に関する考察，橋梁と基礎，pp.36-45，2002.9
- 3) 河西龍彦，本間淳史，上原正，松井繁之：鋼2主桁橋長支間場所打ちP C床版の合理的施工法に関する研究，鋼構造年次論文報告集，第10巻，pp.173-180，2002.11
- 4) 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
- 5) 保利彰宏，高橋光男，辻幸和，原田真剛：低添加型膨張材を用いたコンクリートの基礎物性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.261-266，2002.6
- 6) 高瀬和男，寺田典生，福永靖雄，石川敏之：場所打ちP C床版の材齢初期における膨張材高価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