

場所打ち PC 床版の温度応力と膨張材の効果

高瀬 和男*

鋼 2 主桁に用いられる場所打ち PC 床版の温度応力に関しては過去に多くの論文が発表されている。この温度応力を算出するには、材齢初期のコンクリートの膨張ひずみや有効ヤング係数など多くの専門的知識を必要としかつ複雑な非線形有限要素解析を行う必要がある。本論文は、過去の発表文献を参考にして建設実績の多い床版支間 6m において、このような複雑な解析能力かつ専門的なコンクリート知識を必要とせず、材料物性および環境温度を変化させた場合の温度応力の大きさと膨張材の応力的効果が解るケーススタディの結果を示す。

キーワード：場所打ち PC 床版，単位粉体量，環境温度，温度応力，膨張材

まえがき

鋼 2 主桁橋に用いられる場所打ち PC 床版の材齢初期に発生する温度応力に関する研究は近年数多く発表されている¹⁻⁸⁾。参考に示した文献のように鋼 2 主桁における早強セメントを用いた場所打ち PC 床版の材齢初期の温度応力解析に用いるコンクリートの材料物性値などの研究は数年前に比べかなり進歩していると考えられる。しかし、この材齢初期のコンクリートの膨張ひずみ、温度依存性のある膨張材の効果や有効ヤング係数などの材料物性値はコンクリートに関する多くの専門知識を持っていないと容易に理解できるものではない。また、温度応力解析に用いる非線形有限要素解析においては解析モデルや条件設定などで高度な解析技術を必要とする。

温度応力は施工条件（養生条件）が一定であれば単位セメント量や膨張材の膨張ひずみなどのコンクリート材料特性、施工時の環境温度に大きな影響を及ぼされることが今までの解析結果でわかってきた。また、床版の厚さによっても影響があると考えられる。よって、床版支間を一定にした検討した場合、床版厚などの構造寸法がほぼ一定であるため、材料特性および環境温度をパラメータとして温度応力や膨張材の応力的効果を定量的に示すことができると考える。

本論文では、いままで温度応力が問題になっていなかった施工実績の多い床版支間 6m の橋梁を対象として、材料特性や施工環境を考慮して温度応力および膨張材の効果がどの程度であるかを定量的に示した。ここでは、実際の床版施工で想定される配合や施工時期についてケースに分け、初期材齢時（材齢 7 日程度まで）に発生する引張応力度（主桁近傍の橋軸方向応力： σ_x 、打継ぎ目近傍の橋軸直角方向応力： σ_y ）を一覧表にまとめる。さらに、それぞれのケースにおいて、膨張材を添加したケースと添加しないケースを解析し、応力解析結果を比較することより、膨張材の使用による引張応力の低減効果を定量的に示した。

この温度応力解析の結果には、膨張ひずみの鉄筋拘束の影響が含まれていない。しかし、この論文では、実際の現象として膨張コンクリートには材齢初期に鉄筋拘束によりケミカルプレストレスが発生していることを考慮すれば、温度応力解析の結果だけで膨張材の効果とするには過小評価であると考え、温度応力解析結果に、参考文献 8) で検討した仕事量一定則による鉄筋拘束の影響を加算することにより膨張材の使用による引張応力の低減効果を評価した。この結果により、施工実績の多い床版支間 6m の鋼 2 主桁橋について、複雑でかつ専門的判断が必要となる温度応力解析を行うことなく、温度応力および膨張材の効果が定量

* 橋梁本部技術部長

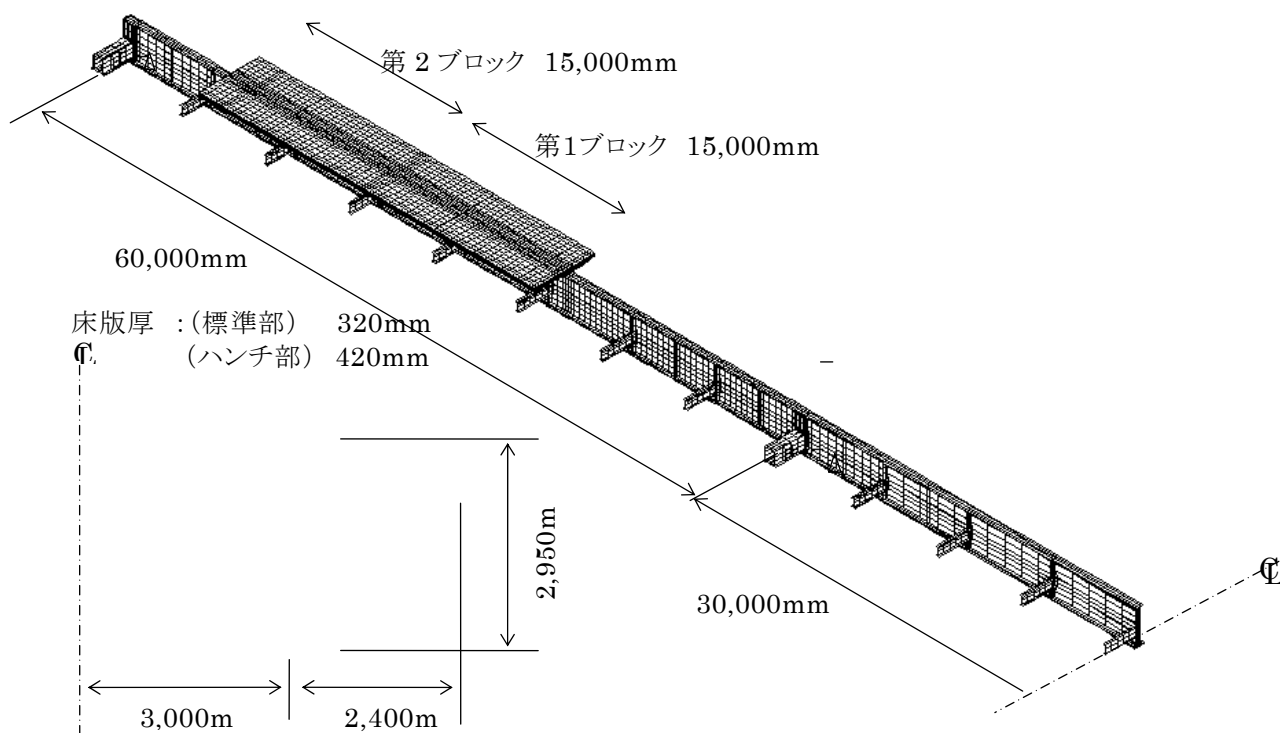


図-1 床版支間6mの温度応力解析モデル

的に「概略応力値」として判断することができる
と考える。

1. 解析モデル

(1) 検討項目

対象としたモデルは、床版支間 6.0m、床版厚

は標準部で 320mm、主桁上で 420mm、3 径間連続合成桁橋（径間長 60m）の 1/2 の範囲に橋軸方向の対称性を考慮した 1/4 モデルを用いた。解析モデル図を図-1 に示す。解析においては標準的な施工（第 1、2 ブロックのコンクリート打込み間隔は 7 日間）を考慮した。解析ケースを表-1 に示す。材料条件の違いとして早強セメントと普

表-1 材料条件・施工時期を考慮した解析ケース

橋梁形式	連続合成2主桁桁橋 PC床版 (3径間連続:径間長 60m)												
床版支間	6.0m												
床版厚さ	標準部:320mm ハンチ部:420mm												
セメント種類	早強ポルトランドセメント						普通ポルトランドセメント						
外気温	25℃	15℃	5℃	25℃	15℃	5℃							
打込み温度	30℃	20℃	10℃	30℃	20℃	10℃							
(施工時期)	(夏期)		(春秋期)		(冬期)		(夏期)		(春秋期)		(冬期)		
膨張材の有無	あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし	
単位粉体量	300	○	—	○	—	○	—	○	—	○	—	○	—
	350	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	400	○	—	○	—	○	—	○	—	○	—	○	—
	450	○	—	○	—	○	—	○	—	○	—	○	—

○：解析を実施したケース

通セメントの2種類を挙げ、さらにそれぞれの配合について、膨張材ありおよび膨張材なしのケースを検討項目とした。単位粉体量は 350 kg/m^3 を基本としているが、それ以外に 300 kg/m^3 、 400 kg/m^3 、 450 kg/m^3 のケースをそれぞれの条件で挙げ、単位粉体量の影響も把握することも検討対象とした。施工条件の違いとしては、外気温を 25°C （夏期）、 15°C （春・秋期）、 5°C （冬期）の3つの条件とし、コンクリートの打込み温度は外気温 $+5^\circ\text{C}$ に設定した。これらの外気温は、理科年表より東京地方の8月、5月、2月の月平均気温から設定した。

(2) 解析条件

材料条件（セメント種類、単位セメント量、膨張ひずみ量）や環境条件（外気温、打込み温度）が異なることによって、温度応力解析で扱ういくつかのコンクリート物性値が変化する。断熱温度上昇特性については参考文献 11,12) で提示された算定式をもとに打ち込み温度とセメント種類を考慮した温度上昇曲線を用いた。またこの図には表されてないが、単位粉体量が変化した場合は、終局断熱温度や発熱速度の係数がそれぞれ変化し断熱温度曲線も変化させている。有効ヤング係数については参考文献 6) で提示された算出法にもとづきコンクリート標準示方書式により床版温度履歴から積算温度による有効材齢を用い、また提案された低減係数を考慮した有効ヤング係数とした。膨張ひずみについては参考文献 7) で提示された実験データより近似した季節ごとの膨張ひずみ曲線を用いた。また、参考文献において有効ヤング係数や膨張ひずみ特性は、早強セメントにより検討されており普通セメントについては十分な検討がされていないが、ここでは普通セメントの場合も早強セメントと同様な有効ヤング係数の特性を示すものとして検討を行った。

他の解析入力物性値については参考文献 5) を参照した。なお、本検討では初期材齢の膨張材の効果を把握することから、乾燥収縮ひずみは考慮しないものとした。

(3) 応力評価の位置

温度応力解析による床版の発生応力の評価位置は、構造的に拘束が大きくひび割れ発生の危険性が高い箇所とし、具体的には図-2に示す鋼桁に

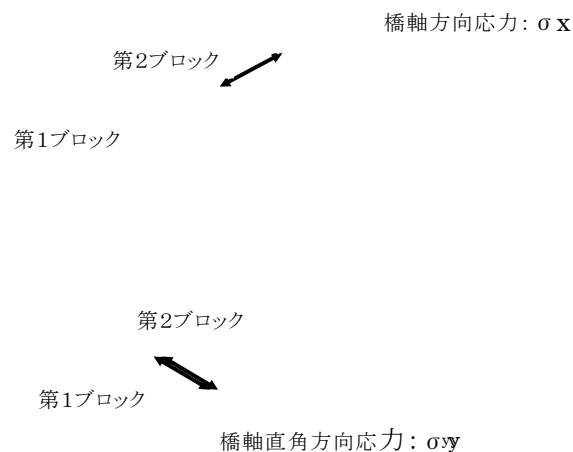


図-2 床版の発生応力の評価位置

よる外部拘束が卓越する主桁近傍の床版厚中央の橋軸方向応力： σ_x と既設の床版ブロックによる外部拘束が卓越する打継目の床版厚中央の橋軸直角方向応力： σ_y の2箇所である。

2. 床版内部の評価応力度

膨張材添加における解析的条件としては、拘束膨張試験 A 法における膨張ひずみは 150×10^{-6} （収縮補償範囲 $150 \sim 250 \times 10^{-6}$ の最小必要値）とした。

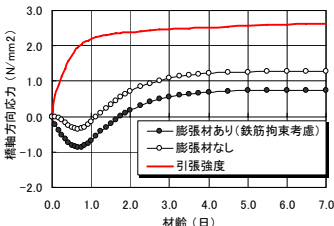
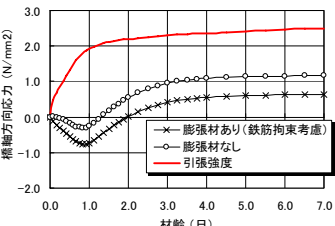
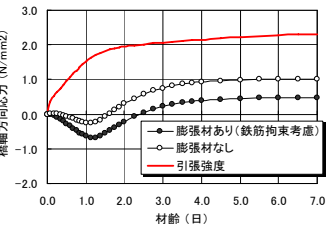
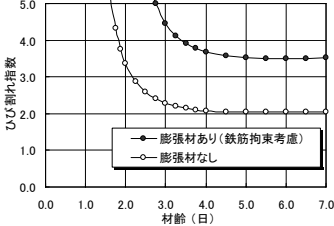
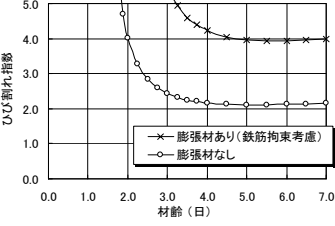
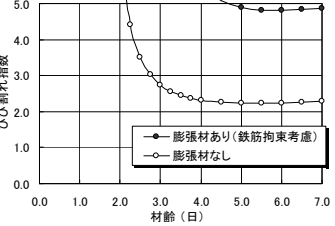
(1) 環境温度の変化

環境温度を変化させた場合の早強セメントの温度応力解析結果およびそこから得られる膨張材の効果の経時変化を表-2, 3に示す。また、普通セメントの結果を表-4, 5に示す。なお、ここでは床版内部の鉄筋はモデル化せず鉄筋拘束下での膨張ひずみ履歴を考慮しているため、内部鉄筋拘束によるケミカルプレストレス（膨張材の効果）は、参考文献 8) に従い別途仕事量一定則を用いて検討した値を示している。また、早強および普通セメントの膨張材有無による温度応力度の最大値およびそのときのひび割れ指数を図-3に示す。

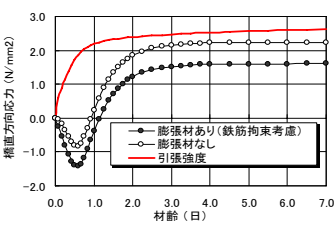
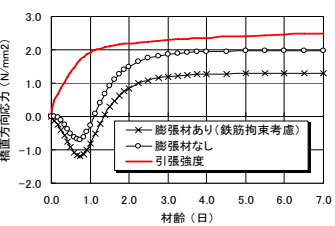
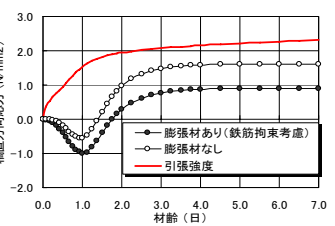
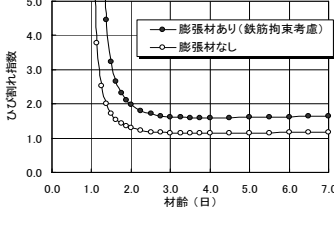
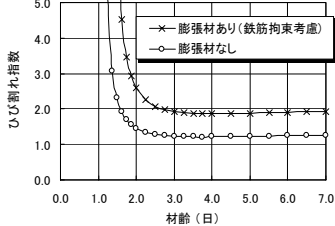
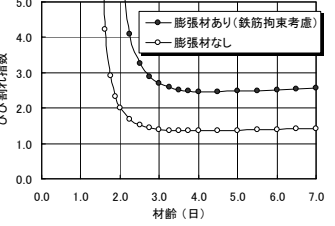
(2) 単位粉体量の変化

(1) の環境温度の計算は単位粉体量が 350 kg/m^3 、膨張材の膨張ひずみは 120μ の条件下での値である。変化単位粉体量を変化させた場合の早強セメント、普通セメントの温度応力解析結果

表一 2 鉄筋拘束を考慮した場合の膨張材の効果（早強 C：橋軸方向応力： σ_x ）

セメント種類	早強ポルトランドセメント (C=350kg/m ³)		
外気温	25℃	15℃	5℃
打込み温度	30℃	20℃	10℃
温度応力解析結果			
膨張材あり①	0.7 N/mm ²	0.7 N/mm ²	0.5 N/mm ²
膨張材なし②	1.3 N/mm ²	1.2 N/mm ²	1.0 N/mm ²
膨張材の効果 ①-②	-0.5 N/mm ²	-0.5 N/mm ²	-0.5 N/mm ²
ひび割れ指数 (引張強度/引張応力)の評価			
膨張材の効果	2.0 → 3.5 (材齢 5.0 日)	2.1 → 3.9 (材齢 5.0 日)	2.2 → 4.8 (材齢 6.0 日)

表一 3 鉄筋拘束を考慮した場合の膨張材の効果（早橋 C：橋軸直角方向応力： σ_y ）

セメント種類	早強ポルトランドセメント (C=350kg/m ³)		
外気温	25℃	15℃	5℃
打込み温度	30℃	20℃	10℃
温度応力解析結果			
膨張材あり①	1.6 N/mm ²	1.3 N/mm ²	0.9 N/mm ²
膨張材なし②	2.2 N/mm ²	2.0 N/mm ²	1.6 N/mm ²
膨張材の効果 ①-②	-0.6 N/mm ²	-0.7 N/mm ²	-0.7 N/mm ²
ひび割れ指数 (引張強度/引張応力)の評価			
膨張材の効果	1.1 → 1.6 (材齢 3.75 日)	1.2 → 1.9 (材齢 3.75 日)	1.4 → 2.5 (材齢 4.5 日)

拘束膨張試験 (A 法) の最大ひずみは 150 μ , 床版鉄筋比は 1.5% (橋軸方向), 0.8% (橋直方向) を想定

表-4 鉄筋拘束を考慮した場合の膨張材の効果 (普通C : 橋軸方向応力: σ_x)

セメント種類	普通ポルトランドセメント (C=350kg/m ³)		
外気温	25℃	15℃	5℃
打込み温度	30℃	20℃	10℃
力解析結果			
膨張材あり①	0.5 N/mm ²	0.4 N/mm ²	0.2 N/mm ²
膨張材なし②	1.0 N/mm ²	0.9 N/mm ²	0.7 N/mm ²
膨張材の効果 ①-②	-0.5 N/mm ²	-0.5 N/mm ²	-0.5 N/mm ²
ひび割れ指数 (引張強度/引張応力)の評価			
膨張材の効果	2.4 → 4.9 (材齢 5.0 日)	2.6 → 6.4 (材齢 6.0 日)	2.9 → 12.3 (材齢 7.0 日)

表-5 鉄筋拘束を考慮した場合の膨張材の効果 (普通C : 橋軸直角方向応力: σ_y)

セメント種類	普通ポルトランドセメント (C=350kg/m ³)		
外気温	25℃	15℃	5℃
打込み温度	30℃	20℃	10℃
力解析結果			
膨張材あり①	1.1 N/mm ²	0.8 N/mm ²	0.3 N/mm ²
膨張材なし②	1.7 N/mm ²	1.4 N/mm ²	1.1 N/mm ²
膨張材の効果 ①-②	-0.6 N/mm ²	-0.6 N/mm ²	-0.8 N/mm ²
ひび割れ指数 (引張強度/引張応力)の評価			
膨張材の効果	1.4 → 2.2 (材齢 4.0 日)	1.6 → 2.9 (材齢 4.5 日)	1.9 → 7.6 (材齢 6.5 日)

*拘束膨張試験 (A 法) の最大ひずみは 150 μ , 床版鉄筋比は 1.5% (橋軸方向), 0.8% (橋直方向) を想定

およびそこから得られる膨張材の効果を図-4に示す。なお、ここでも内部鉄筋拘束によるケミカルプレストレスを考慮した値を用いている。

3. まとめ

施工実績が多く今までに温度応力にあまり注意を払わなかった床版支間 6m 構造においても、床版打継目付近の橋軸直角方向では、膨張材を添加しない早強セメントによる施工であれば打ち込み温度が 20℃以上の標準的な施工に時期であっても 2.0 N/mm² 以上の引張応力度が発生していることが予想された。また、普通セメントでの施工であっても打ち込み温度が 30℃では 1.7 N/mm² と大きな応力度であった。膨張材を添加した場合には、早強セメントで打ち込み温度 20℃において 1.3 N/mm² まで、30℃においては 1.6N/mm² までの応力緩和が図れることが予想された。普通セメントにおいては膨張材を添加することにより各温度共に 1.0 N/mm² 程度以下と予想された。

鋼桁の拘束を大きく受ける主桁近傍の橋軸方向応力度も、橋軸直角方向と同様に膨張材を添加しない早強セメントによる施工であればどのような

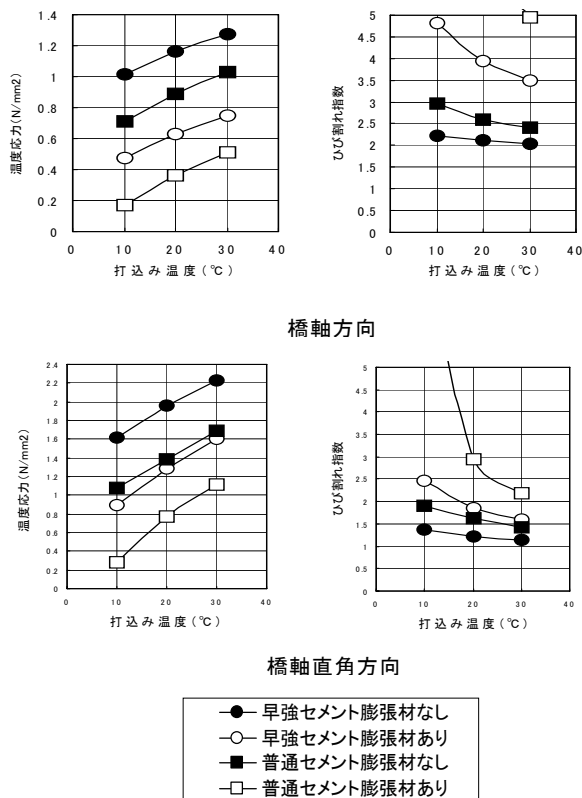


図-3 打ち込み温度別温度応力（最高値）とひび割れ指数

打ち込み時期であっても 1.0 N/mm² 以上の引張応力度が発生していることが予想された。橋軸方向応力度の場合、コンクリートの応力照査におい

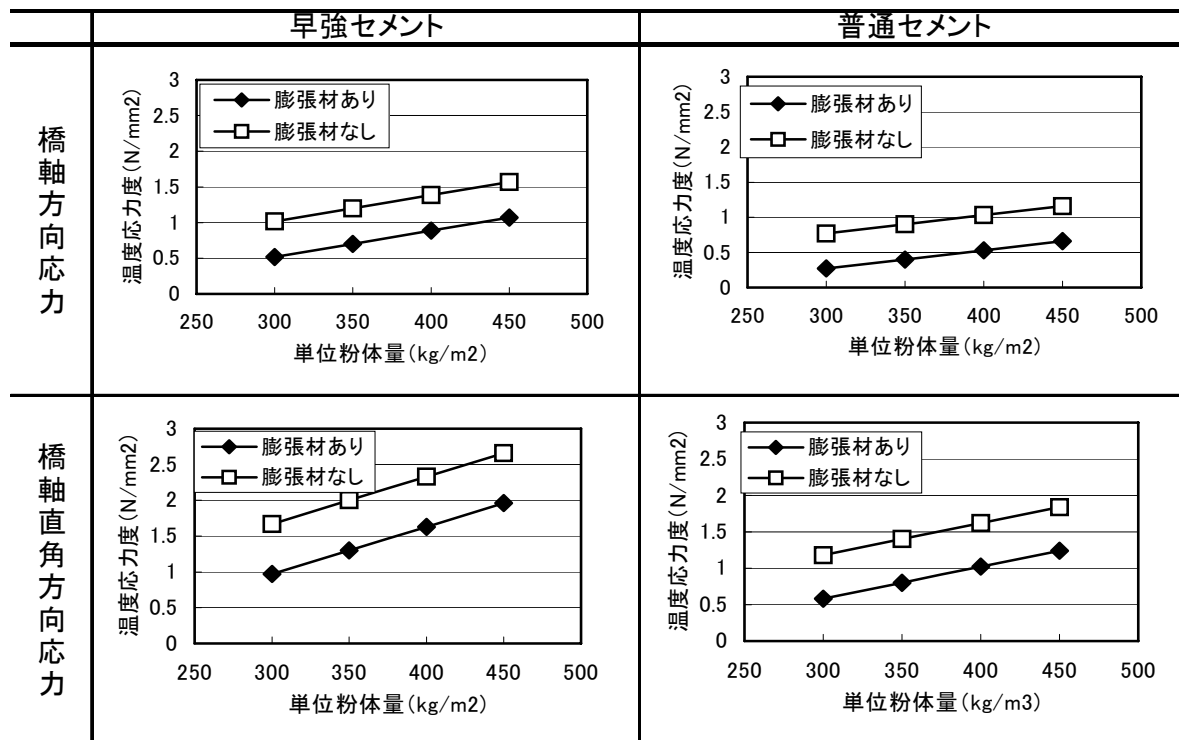


図-4 単位粉体量の変化に伴う温度応力度の変化

て温度応力以外にコンクリート打込み時の施工ステップによる応力照査を行う必要があり、温度応力度を小さく抑えなければ施工が非常に困難を極めることになる。よって、膨張材を入れた場合にはどのような打ち込み時期であっても 1.0 N/mm^2 以下の引張応力度になることが予想され、温度応力の抑制には非常に効果があると考えられる。

解析の結果、膨張材を添加することによって主桁近傍の橋軸方向応力度で約 0.5 N/mm^2 、打継目近傍の橋軸直角方向応力で約 0.7 N/mm^2 の引張応力の低減がはかられていることが示された。同時に、材齢ごとにコンクリート自身の引張強度を求められた引張応力で除した「ひび割れ指数」で表すと、最も応力度が大きく発生した橋軸直角方向の早強セメントの打込み温度 30°C においては、膨張材を添加したことにより橋軸直角方向で 1.1 からひび割れを防止する程度の 1.6 へひび割れ指数が大きくなりひび割れ発生に対して安全側にシフトできることがわかった。よって、収縮補償程度の膨張材の添加では、ひび割れはかならずなくなるとは言いがたいが、ひび割れを有効に制御する方法ではあることがわかる。

また、今までの経験のように打込み温度が高くなればやはり温度応力度が大きく発生する。よって、夏期に施工する場合には早強セメントから普通セメントへ種別を変更し、かつ膨張材の添加を行うことが材料的な温度応力対策として検討される。また、冬期においてはプレストレスの緊張時期の関係から早期の強度を期待するため早強セメントを使用する。そのため、やはり膨張材の添加が対策として検討されると考えられる。しかし、膨張材だけでなく他の施工的な対策も検討することは当然のことである。

本論文は日本橋梁建設協会の「場所打ち PC 床版における膨張材の有効性評価検討報告書」を元に施工環境について追加解析を行い、打込み温度におけるバラツキについて検討したものである。

参考文献

1) 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考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.549-554, 2002.6
 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 床版における温度応力に関する考察, 橋梁と基礎 Vol.36, pp.36-45, 2002.9
 3) 倉田幸広, 河西龍彦, 高瀬和男, 丸山久一: 有限要素法解析による長支間場所打ち PC 床版施工時における応力度評価に関する研究, 土木学会構造工学論文集, vol.49A, pp.825-832, 2003.4
 4) 塩永亮介, 内田大介, 中本啓介, 栖原健太郎, 玉置一清: 膨張コンクリートを用いた場所打ち PC 床版の温度応力解析, 日本コンクリート工学協会, 膨張コンクリートによる構造物の高機能化/高耐久化に関するシンポジウム論文集, pp.143-148, 2003.9
 5) 高瀬和男, 倉田幸宏, 塩永亮介, 内田大介, 坂根秀和, 中本啓介, 丸山久一: 早強セメントを用いた膨張コンクリートの温度応力解析方法の再考, 土木学会第四回道路橋床版シンポジウム, pp.99-104, 2004.11
 6) 高瀬和男, 塩永亮介, 佐久間隆司, 鈴木康範, 丸山久一: 早強セメントを用いた膨張コンクリートの初期材齢における有効ヤング係数に関する考察, 土木学会論文集 (2005.11 掲載予定)
 7) 高瀬和男, 八部順一, 小林潔, 橘吉宏: 場所打ち PC 床版における膨張材の有効性に関する研究, コンクリート工学 Vol.43, pp.26-33, 2005.7
 8) 高瀬和男, 倉田幸宏, 内田大介, 坂根秀和, 中本啓介: 鉄筋拘束を考慮した場所打ち PC 床版に生じる膨張材効果に関する一考察, 土木学会第 60 回年次学術講演会 CS10-007, pp.3133-314, 2005.9
 9) 辻幸和: コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 235 号, No.5, pp.111-124, 1975.3
 10) 玉置一清, 上坂康雄, 余国雄, 和内博樹, 野瀬智也: PC 床版に生じる若材齢時応力算定方法の標準化に関する一提案, 土木学会第 60 回年次学術講演会 CS10-008, pp.315-316, 2005.9
 11) 小田部裕一, 鈴木康範, 高瀬和男, 橘吉宏: 膨張材を用いた早強セメントコンクリートの発熱特性, セメント・コンクリート論文集 No.58, 2004
 12) 鈴木康範: コンクリート中のセメントの水和発熱過程と定量化に関する研究, 東京大学学位論文