

論文 低熱セメント系膨張コンクリートの膨張性状

狩野 周^{*1}・細田 暁^{*2}・八巻 大介^{*3}

要旨：膨張コンクリートの膨張性状は使用セメントにより大きく異なる。梁型の試験体を用いてセメント種類，鉄筋定着部の形状，スターラップの有無に着目し，膨張性状の検討を行った。鉄筋定着部のフックは試験体端面から 250mm 程度離れた位置の膨張拘束効果に有効であること，低熱セメントの場合でも，スターラップは膨張ひずみ分布のばらつきを緩和するのに有効であることが明らかとなった。また，低熱セメントの場合は，鉄筋のケミカルプレストレインが定常状態になった後も，コンクリート表面の膨張が継続することが分かった。

キーワード：膨張コンクリート，低熱セメント，膨張ひずみ分布，定着，スターラップ

1. はじめに

膨張コンクリートの膨張ひずみの発現は，使用するセメント種類により大きく異なる¹⁾。膨張材が水和反応して膨張エネルギーを発揮するときに，膨張力を受け止めるセメントマトリックスの強度が大きく影響するからである。低熱セメントを用いた場合は，普通セメントに比べて強度発現が遅い。したがって，膨張力を拘束するマトリックスの強度が比較的小さいために，大きな膨張ひずみが発現することになる。

一般に低熱セメントと膨張材は，膨張ひずみの発現の観点からは相性が良い，とされている。低熱セメントを用いることにより，発熱量，収縮量が小さく，また膨張ひずみは大きくなることから，ひび割れ抑制効果の非常に大きい組み合わせとして注目されている。しかし，新しい組み合わせであるために，基礎的性状が十分に検証されていない面もある。筆者らが基礎実験を行ったところ，通常収縮補償に用いられる単位膨張材量の配合における無拘束の膨張コンクリートに，亀甲状のひび割れが発生した。材料の組み合わせによってはこのようなことが生じ得るため，低熱セメント系膨張コンクリートの

膨張性状を詳細に調べることにした。過去に普通セメント系膨張コンクリートについて行われた実験^{2), 3)}を参考にして，セメント種類，梁試験体の鉄筋定着部の形状，スターラップの有無に着目して，試験体各位置における膨張ひずみを計測した。普通セメントの場合は，従来の知見を再確認する結果となったが，低熱セメントの場合は，普通セメントの場合の膨張性状とはかなり異なることが明らかとなった。

2. 実験概要

2.1 予備実験

無拘束状態における，低熱セメント系膨張コンクリートの膨張性状の確認を目的に，角柱供試体（100×100×400mm）で表面膨張ひずみを計測した。配合，使用材料を表-1，表-2に示す。練り混ぜは秋季の実験室で行い，打設は 20℃の恒温室にて行った。脱型は材齢 1 日，計測期間中は湿布による 20℃の恒温湿潤養生を継続した。コンクリート表面の膨張を，脱型直後からコンタクトゲージにより計測した。使用した膨張材は，一般に収縮補償用として単位膨張材量 30kg/m³ で使用するタイプのものである。また，

*1 横浜国立大学大学院 工学府社会空間システム学専攻 (正会員)

*2 横浜国立大学大学院 工学研究院 助教授 博(工) (正会員)

*3 西松建設株式会社 札幌支店 余市出張所 (正会員)

比較のため同条件にて普通セメント系膨張コンクリート供試体を作製した。

試験結果を図-1に示す。低熱セメント系膨張コンクリートの膨張量が、普通セメント系膨張コンクリートより明らかに大きいことが確認された。さらに、L-40では材齢5日、L-30では材齢11日で亀甲状のひび割れが確認された。各種材料の組み合わせの相性があるにせよ低熱セメントを用いた場合、ごく一般的な配合のコンクリートとして不適切な現象が確認された。

表-1 予備実験配合

供試体名	使用セメント	水結合材比		細骨材率	単位量 (kg/m ³)					膨張材置換率 E/(E+C) (%)
		W/(C+E) (%)	空気量 (%)		s/a (%)	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
L-20	低熱	50	6.0	41.7	165	310	734	1058	20	6.06
L-30	低熱	50	6.0	38.9	175	320	637	1082	30	8.57
L-40	低熱	50	6.0	38.9	175	310	636	1082	40	11.43
N-50	普通	50	6.0	41.7	165	280	731	1054	50	15.15

表-2 使用材料一覧

材料名	産地と物性
セメント	普通ポルトランドセメント T社製 (密度:3.16) 低熱ポルトランドセメント T社製 (密度:3.22)
膨張材	CSA系膨張材 (密度:2.95)
粗骨材	硬質砂岩 秩父郡神村大字小森産 (表乾密度:2.70 吸水率:0.75 粗粒率:6.80)
細骨材	山砂 千葉県君津市法木産 (表乾密度:2.62 吸水率:1.59 粗粒率:2.34) L-30、L-40にて使用 山砂 千葉県君津市法木産 (表乾密度:2.64 吸水率:1.50 粗粒率:2.29) L-20、N-50、梁供試体にて使用

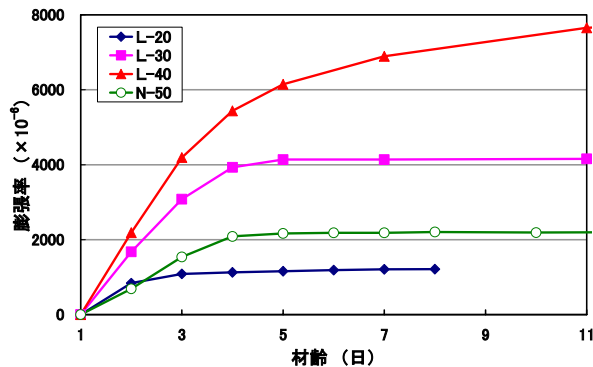


図-1 無拘束供試体の表面膨張率

2.2 本研究に関する既往の研究

膨張コンクリートの膨張性状については、既往の研究より、拘束鉄筋とコンクリートとの付着により膨張力を一軸方向のみ拘束する内的一軸拘束試験、およびスターラップも配置した梁試験体において、特有の性状がいくつか報告さ

れている^{2), 3)}。

鉄筋の膨張ひずみは、鉄筋とコンクリートとの付着の向上にともない、梁型供試体の端面から離れるほど大きくなる。断面の形状寸法、鉄筋の種類や配置方法次第ではあるが、端面から500mm程度離れると、その膨張ひずみはほぼ一定となる。逆に、コンクリート表面の膨張ひずみは、端面から離れるほど鉄筋の拘束力が大きくなるため小さくなっていく。特に端面に近い断面でコンクリートの表面膨張ひずみは、鉄筋位置から離れた場所で大きくなる。これは、鉄筋の付着が不十分でコンクリートの膨張に対する拘束力が小さいためである。さらに、端面から500mm程度離れると、断面内の膨張ひずみもほぼ一樣になることが報告されている。

また、梁試験体にスターラップを用いて主鉄筋に直角方向に配置し、この方向の膨張を拘束することで、断面内における軸方向のコンクリートの膨張ひずみ分布が緩和され、軸方向に膨張エネルギーが有効に作用することも報告されている。

しかし、これらの研究報告は普通セメントを用いた膨張コンクリートを対象としたものである。そこで、低熱セメント系膨張コンクリートの膨張性状を明らかにするため梁型供試体を用いて実験を行った。

2.3 実験方法

(1) 供試体諸元

梁供試体の断面図を図-2に示す。主筋はD16異形鉄筋で拘束鉄筋比は1.77%である。供試体の定着部の形状が膨張性状に及ぼす影響を明らかにするため、供試体右側のみを直角フックの定着端とした。左側はフックを設けない直線状とした。また、多軸拘束の効果を明らかにするためD10異形鉄筋のスターラップを200mm間隔で配置した供試体も作製した。

配合は予備実験の結果から単位膨張材料を決定した。低熱セメント系膨張コンクリートは若材齢における異常なひび割れの発生する危険性

表-3 梁型供試体のパターンと配合

供試体名	使用セメント	スターラップの有無	水結合材比 W/(C+E) (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					膨張材置換率 E/(E+C) (%)
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	膨張材 E	
A	低熱	無し	50	1.5	41.7	173	325	769	1108	21	6.06
B	低熱	有り	50	1.5	41.7	173	325	769	1108	21	6.06
C	普通	有り	50	1.5	41.7	173	293	766	1103	52	15.15

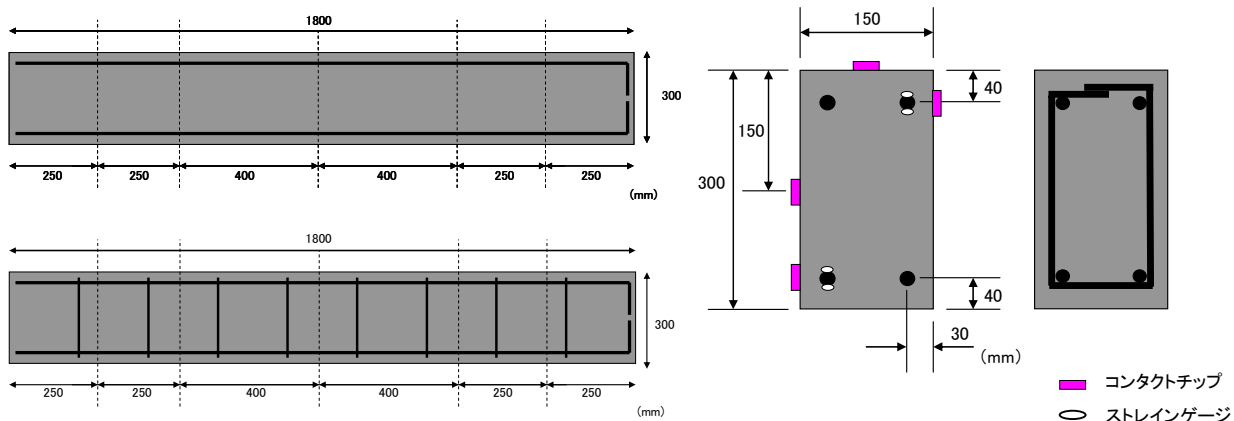


図-2 梁型供試体の配筋図

のない単位膨張材量 21kg/m³とした。比較用に作製した普通セメント系膨張コンクリートについては、単位膨張材量 52kg/m³とした。使用材料を表-2、供試体パターンと配合を表-3に示す。

(2) 膨張ひずみ計測方法

計測位置は、図-2の点線位置で供試体端面から250mm, 500mm, 900mmの合計5断面である。軸方向鉄筋は、各断面の上下主筋、各々1本の膨張ひずみを打設直後から計測した。コンクリート表面は各断面の上面中央、上面から40mm, 150mm, 260mmの位置にて脱型直後からコンタクトゲージにより計測した。供試体端面から500mmと900mmの位置については断面中央にモールドゲージを配置しコンクリート内部の膨張ひずみを打設直後から計測した。

(3) その他の条件

コンクリートの練り混ぜは冬季の実験室にて行い、練り上がり温度は低熱セメント系膨張コンクリートが17.2℃、普通セメント系膨張コンクリートが17.4℃であった。打設は室温20℃の恒温室で行い、24時間後に脱型した。脱型直後にコンクリート表面の膨張ひずみの計測を目的にコンタクトチップを貼りつけた。養生方法は湿布を用いた湿潤養生とし、計測期間中は

20℃の恒温室で養生を継続した。

3. 試験結果と考察

各供試体の断面中央にて計測した温度履歴を図-3に示す。各供試体における温度変化はそれほど大きくないことが確認できる。以下に示す材齢3日および7日の膨張ひずみは温度補正を施していない。

なお、20℃の恒温室で養生を継続したものの、材齢3日以降は各供試体ともに16℃程度で安定している。湿潤養生に用いた水が若干冷たかったこと、あるいは水分の蒸発にともなう気化熱として熱が奪われたことが要因として考えられる。

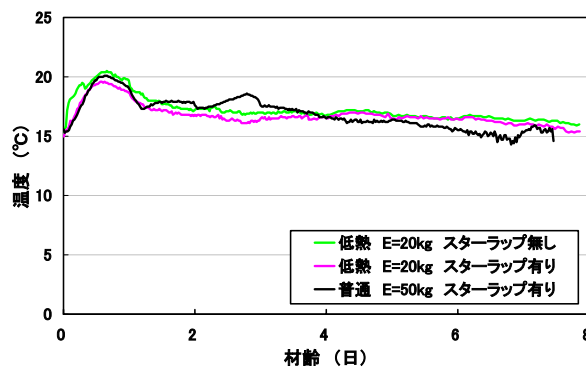


図-3 梁型供試体の温度履歴

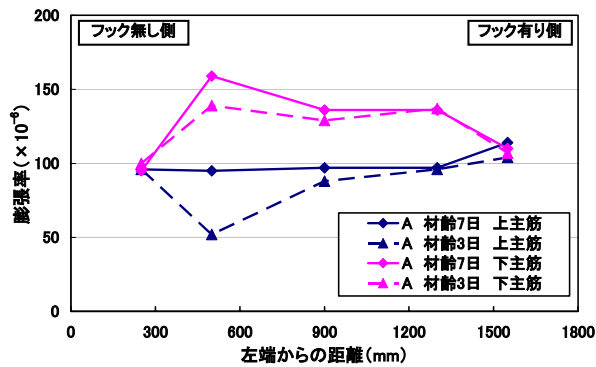


図-4 ケミカルプレストレイン分布 (供試体A)

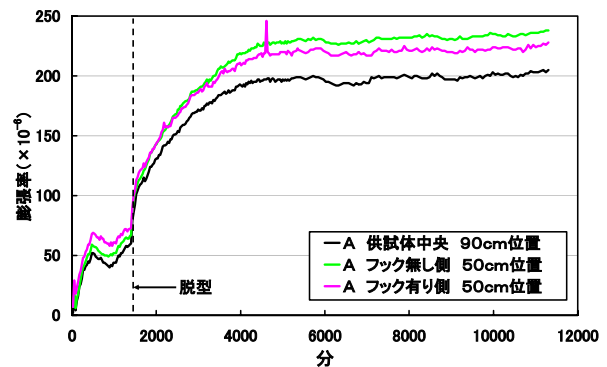


図-7 コンクリート内部膨張率 (供試体A)

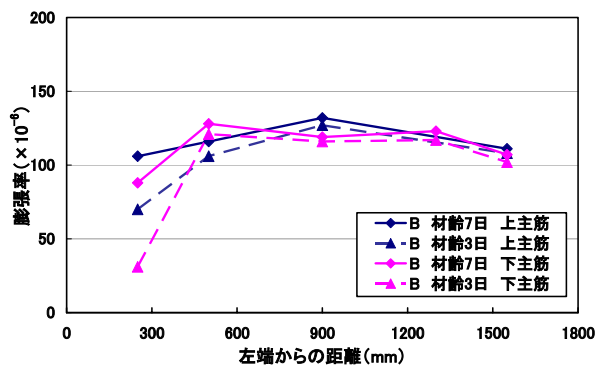


図-5 ケミカルプレストレイン分布 (供試体B)

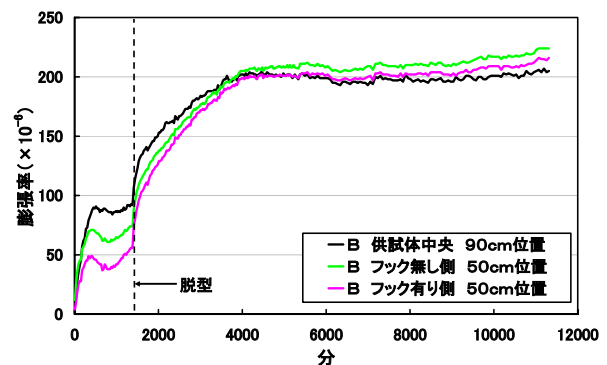


図-8 コンクリート内部膨張率 (供試体B)

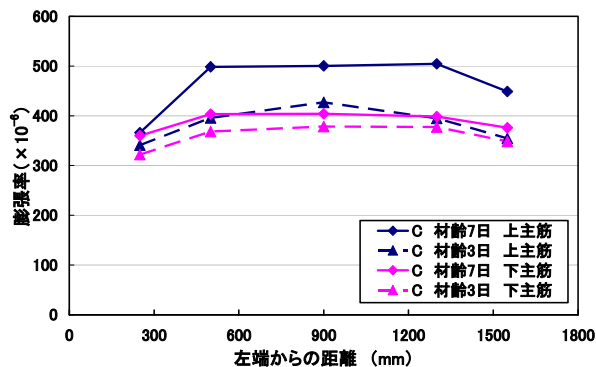


図-6 ケミカルプレストレイン分布 (供試体C)

3.1 ケミカルプレストレイン分布

図-4 から図-6 に各供試体における材齢 3 日, 7 日の打設直後からの軸方向鉄筋ケミカルプレストレイン分布を示す。軸方向鉄筋とコンクリートの一体性が十分でないと思われる両端面から 250mm の位置の値は, 供試体 A の上主筋右側 (フック有り側) を除いて, 端面から 500mm と中央の 900mm の位置の値と比較すると, 相対的に小さい。端面から 250mm の位置の断面にでは, いずれの分布も供試体右側のケミカルプレストレインが, 左側よりも若干大きい結果となった。これは, フックにより主鉄筋の定着が向上し,

膨張に対する拘束効果が向上されたためと考えている。しかし, 端面から 500mm の位置においては, 必ずしもフックによりケミカルプレストレインは大きくなっていない。軸方向鉄筋とコンクリートの一体性に対するフックの影響は, 端面に近い位置に限定される結果となった。

普通セメント系膨張コンクリートでは, 既往の研究通り端面から 500mm と中央の 900mm の位置の膨張ひずみはほぼ同じである。上下主筋の値の差が低熱セメントの場合より若干大きいのは, そもそもの膨張エネルギーの違いが要因として考えられる。低熱セメント系膨張コンクリートの場合も, スターラップを配置しておけば, 端面から 500mm と中央の 900mm の位置の膨張ひずみはほぼ同じになることが確認された。また, スターラップを配置した供試体 B の分布は, 供試体 A よりも計測断面位置におけるばらつきが小さく, 上下主筋のケミカルプレストレインが近い値となった。これらは, 低熱セメントを用いた場合でもスターラップの多軸拘束の効果により断面内の軸方向膨張ひずみ分布が緩和されることを示している。

3.2 コンクリート内部膨張ひずみ

モールドゲージにて計測した供試体端面から500mm と中央の 900mm の位置のコンクリート内部の打設直後からの膨張ひずみを図-7, 図-8に示す。

スターラップを配置した供試体Bは各計測断面における膨張ひずみのばらつきが小さい。主鉄筋から離れたコンクリート内部についても、ケミカルプレストレイン分布と同様に多軸拘束により膨張ひずみのばらつきが緩和された。

3.3 コンクリート表面膨張ひずみとケミカルプレストレイン分布の関係

コンタクトゲージにて測定した材齢 7 日のコンクリート表面の膨張ひずみと上主筋のケミカルプレストレイン分布を図-9 から図-11 に示す。ひずみの値はコンタクトゲージのイニシャル測定時(材齢 1 日)からの膨張ひずみとした。

供試体中央の端面から 900mm の位置では、ケミカルプレストレインとコンクリート表面膨張ひずみの差は小さい。軸方向鉄筋とコンクリートの一体性が高く、膨張に対する拘束効果が高いためである。供試体の端面に近づくにともない、その差は大きくなる。また、定着部にフックを設けなかった供試体左側は、特にその差が大きい傾向がある。配筋が同じ供試体BとCを比較すると、低熱セメント系膨張コンクリートの場合は、端面から 500mm の位置においても、ケミカルプレストレインとコンクリート表面膨張ひずみの差は普通セメント系膨張コンクリートの場合よりもかなり大きい。

なお、図-2 に示すように各断面の上面から 150mm, 260mm の位置においてもコンクリート表面の膨張ひずみを計測した。これらの測定箇所では湿潤養生であるにも関わらず、供試体AとBにおいては、収縮している位置が数箇所存在した。計測ミスはないと信じているが、低熱セメント系膨張コンクリートにのみ生じた特異な現象である。

3.4 断面内での膨張ひずみ分布

断面内における膨張ひずみ分布を検討した。

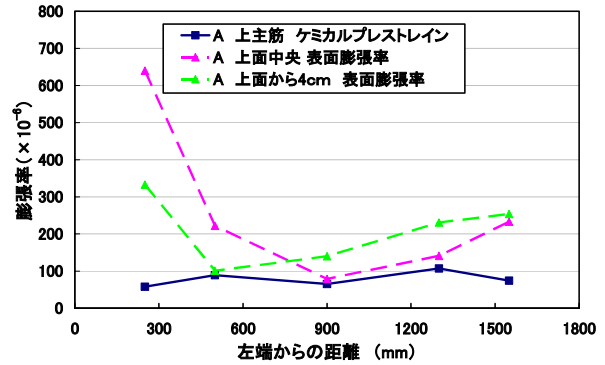


図-9 ケミカルプレストレインとコンクリート表面膨張率①(供試体A)

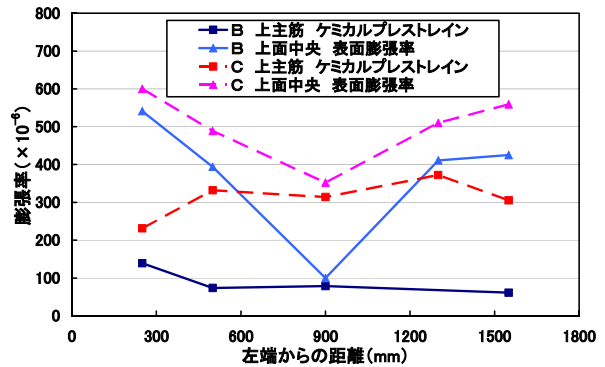


図-10 ケミカルプレストレインとコンクリート表面膨張率②(供試体BとC)

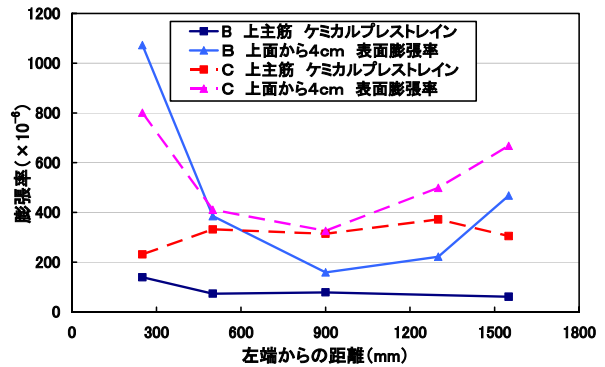


図-11 ケミカルプレストレインとコンクリート表面膨張率③(供試体BとC)

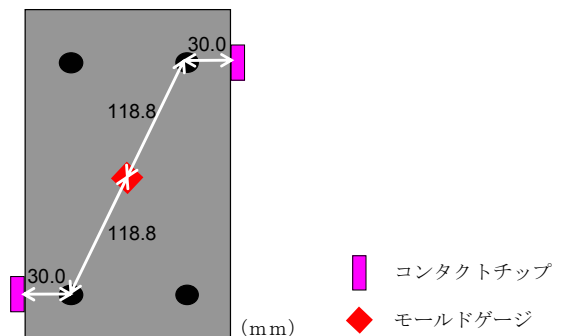


図-12 断面内の膨張ひずみ計測位置

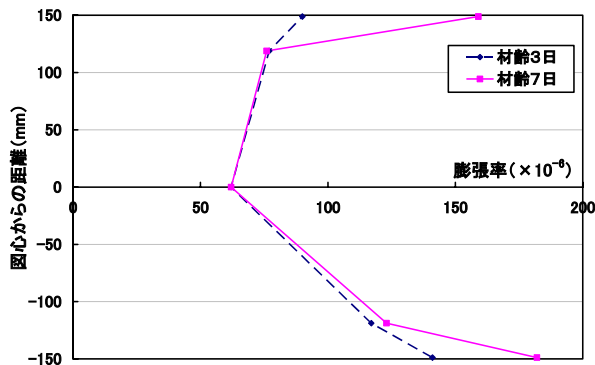


図-13 断面内膨張率分布 (供試体B)

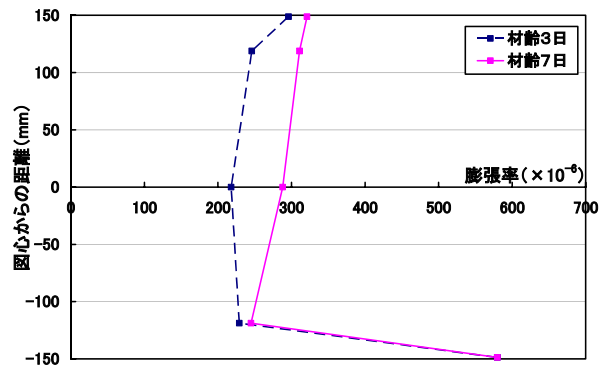


図-14 断面内膨張率分布 (供試体C)

モールドゲージを配置した断面中央を図心とし、図心と計測箇所的位置関係を表したのが図-12である。図心から鉄筋中心までの距離は118.8mm、鉄筋中心からコンクリート表面までの距離は30.0mmである。図-13、図-14は、端面から900mmの供試体中央位置における、材齢3日と7日の断面内膨張ひずみ分布である。この位置では、軸方向鉄筋の膨張拘束効果が最も有効に働いていると考えている。図のコンクリート内部およびケミカルプレストレインの値は、コンタクトゲージのイニシャル測定時(材齢1日)からの膨張ひずみとした。低熱セメント系膨張コンクリートの供試体Bにおいては、コンクリート内部の膨張およびケミカルプレストレインの増加が落ち着いた材齢3日以降も、コンクリート表面は膨張を続けていることが分かる。一方、モールドゲージを配置した断面図心位置は、軸方向拘束鉄筋から118.8mmも離れているが、しっかりと膨張が拘束されている。

さらにデータの蓄積の必要性があるものの、これらの結果を踏まえると、低熱セメントの場合、実構造物においては、鉄筋の定着が不十分な位置や鉄筋から離れた位置のコンクリート表面において過膨張が懸念される。本研究では単位膨張材料を 20kg/m^3 程度と小さく設定したが、もう少し多い配合ではこのような箇所での過膨張による品質低下に注意する必要があるだろう。

5. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである。

(1) 低熱セメントを用いた場合は、普通セメント

の場合より大きな膨張ひずみが発現し、標準添加量で使用しても、亀甲状のひび割れが生じる場合がある。

(2) 軸方向鉄筋の定着部のフックは、試験体端面から250mm程度離れた位置の膨張拘束効果に有効である。

(3) 低熱セメント系膨張コンクリートの場合も、スターラップを配置することで、軸方向鉄筋のケミカルプレストレインおよびコンクリート内部の膨張ひずみ分布のばらつきは緩和される。

(4) 低熱セメント系膨張コンクリートの場合、端面から500mm離れた位置におけるケミカルプレストレインとコンクリート表面膨張ひずみの差は、普通セメント系膨張コンクリートの場合よりも大きい。

(5) 低熱セメント系膨張コンクリートの場合、コンクリート内部の膨張および軸方向鉄筋のケミカルプレストレインの増加が落ち着いた後も、コンクリート表面は膨張が続く。

【謝辞】本研究は、科学研究費補助金(課題番号16360220, 研究代表者; 佐藤良一 広島大学教授)によって実施した。

参考文献

- 1) 膨張コンクリート設計施工指針, 土木学会, コンクリートライブラリー75, 1993
- 2) 辻 幸和: 内的および外的一軸拘束を受ける膨張コンクリートの膨張特性, 土木学会論文集, No. 378/V-6, pp. 279-282, 1987
- 3) 細田 暁・岸 利治: ケミカルプレストレス部材の曲げ性状と多軸拘束の効果, 土木学会論文集, No. 739/V-60, pp. 15-29, 2003