

論文 膨張材を用いた打重ね実験による膨張収縮挙動と解析手法の適用

東 邦和^{*1}・中村 敏晴^{*2}・梅原 秀哲^{*3}

要旨: 膨張コンクリートの効果を壁体を模擬した打重ね試験体により検討した。打重ね試験体として無筋試験体と配筋量を変えた鉄筋を3次的に配置したRC試験体を作成し、コンクリートひずみと鉄筋ひずみを測定した。膨張材を添加したコンクリートと通常コンクリートの打重ね部は互いの影響でなだらかにひずみが増加した。次に試験体の3次元FEMモデルに膨張ひずみを与えて要素応力に応じて低減する解析手法を適用した。双曲線式と膨張ひずみの値を設定した解析を行い、試験体の測定ひずみと解析ひずみの比較から配筋による拘束効果を検討し、膨張材の収縮低減効果を精度よく解析できることを示した。

キーワード: マスコンクリート, 温度応力, 膨張材, 膨張ひずみ, 鉄筋コンクリート

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物のひび割れ低減対策として、膨張コンクリートをマッシュな構造物に適用する場合には、効果の大きさを適切に評価することが必要である。膨張材の効果の評価方法が研究されているが^{1,2)}、定量的な評価方法で大型の構造物に適用できる手法は確立されていない。また、RC構造物に適用して膨張効果を評価する研究が行われているが十分ではない^{3,4)}。本研究は膨張コンクリートの応力履歴を解析して収縮低減効果を検討することを目的としている。FEM解析に初期の有効ヤング係数補正係数と膨張ひずみを与え、要素応力により低減する方法を提案している²⁾。

本研究では、無筋コンクリートと鉄筋を配筋したRC試験体を作成した。膨張コンクリートの上に膨張材を添加しない通常コンクリートを連続して打設し、3次的なコンクリートひずみと鉄筋ひずみの分布を測定した。本試験体は、膨張と拘束を同一試験体で測定でき、かつ膨張コンクリートを部分的に使用して通常コンクリートを打ち重ねる場合を想定している。次に各試験体の解析モデルを作成し、提案している解析手法を適用して、配筋の有無を比較することによって、鉄筋拘束の大きさと膨張ひずみの分布を検討し、解析手法の精度を検討したものである。

2. 膨張ひずみの測定

2.1 試験方法

膨張ひずみの大きさに及ぼす配筋の影響を測定するために、無筋試験体とRC試験体の2種類の試験体を作成した。いずれも膨張コンクリートの上に膨張材を添加しない通常コンクリートを連続して打設している。コンクリートの使用材料を表-1に、配合を表-2に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを、膨張材はカルシウムサルフォアルミネートを主成分とするものを使用した。

無筋試験体を図-1に示す。試験体は、全高100cm、水平長さ90cm、厚さ20cmであり、周囲全てに10cm厚の発泡スチロールを設置している。下部50cm高さに膨張コンクリートを打設し、引き続き60分後に上部50cm高さに通常コンクリートを打設した。打継ぎ面は、パイブレータを掛けて一体化した。水平長手方向のひずみ測定のためのコンクリートひずみ計を高さ方向に4点設置している。

RC試験体を図-2に示す。RC試験体は、全高100cm、水平長さ90cm、厚さ40cmであり、同様に全周囲に10cm厚の発泡スチロールを設置している。X方向(水平長手方向)にD22鉄筋を150mmピッチ、Y方向(鉛直方向)にD16鉄筋を150mmピッチ、Z方向(壁厚さ方向)に

表-1 使用材料

使用材料	
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度:3.16g/cm ³
細骨材	富津産山砂, 表乾密度:2.60 g/cm ³ , 吸水率:1.27%
粗骨材	岩瀬産碎石, Gmax20mm, 表乾密度 2.65 g/cm ³ , 吸水率:0.62%
AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物標準形
膨張材	主成分 カルシウムサルフォアルミネート 低添加型

*1 (株)奥村組 技術研究所 土木研究課 博(工)(正会員)

*2 (株)奥村組 技術研究所 土木研究課

*3 名古屋工業大学教授 大学院工学研究科創成シミュレーション工学専攻 Ph.D.(正会員)

表-2 コンクリートの配合

配合名	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					AE 減水剤 (kg/m ³)
			水 W	セメント C	膨張材 E	細骨材 S	粗骨材 G	
膨張 (NE)	55	43.8	166	282	20	789	1032	0.981

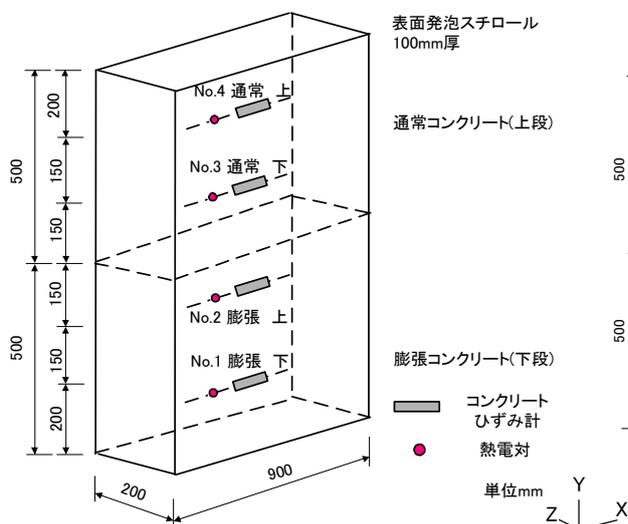


図-1 打重ね試験体 (無筋試験体)

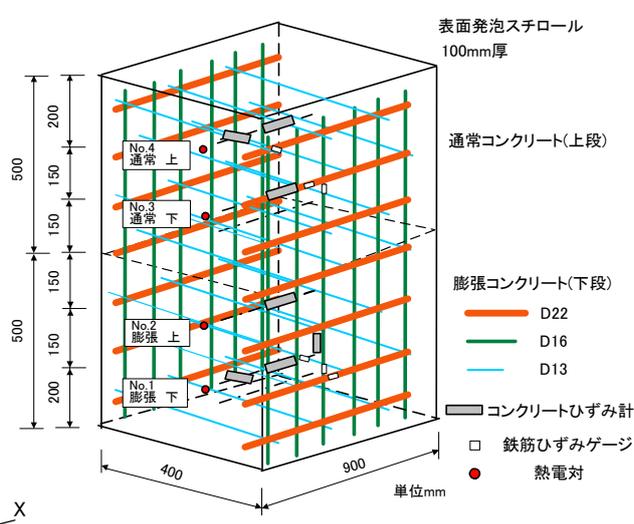


図-2 打重ね試験体 (RC 試験体)

中間帯鉄筋として D13 鉄筋を D22 鉄筋の高さ各段に 3 本ずつ配置している。断面に対する鉄筋比はそれぞれ D22 が 1.39%, D16 が 0.66%, D13 が 0.30% である。鉄筋のかぶり厚は、D22 が 30mm, D16 が 52mm, D13 が 39mm である。鉄筋端部は D22, D16 は直角フック, D13 は半円フックをつけている。鉄筋には No.1, No.4 高さ位置でひずみゲージを鉄筋左右面に貼付した。鉄筋は互いに曲げ力が発生しないように緊結をしていない。周辺の発泡スチロールは、断熱によりマスコンクリートを模擬すると同時に、型枠による拘束を緩和している。

2.2 無筋試験体測定結果

(1) 温度およびコンクリートひずみ測定結果

無筋試験体の温度測定結果を図-3に示す。打設温度 20°C, ピーク温度は材齢 1.30 日, 49.1°C, 外気温は 10°C 付近であった。試験体内部の温度は一様であり膨張コンクリート部と通常コンクリート部に温度履歴の違いはない。

無筋試験体のコンクリートひずみ計によるひずみ測定結果を図-4に示す。膨張コンクリート部に設置したひずみ計の値は試験体の下側 No.1 から材齢 1.43 日で 687×10^{-6} , No.2 は材齢 1.39 日で 599×10^{-6} の膨張ひずみが得られた。通常コンクリート部は下側 No.3 から材齢 1.30 日で 342×10^{-6} , No.4 は材齢 1.25 日で 288×10^{-6} のひずみを得られた。最大ひずみの発生は温度履歴のピーク時とほぼ一致している。本試験体では、膨張の上部 No.2 と通常コンクリートの下部 No.3 のひずみは打重ねの影響を

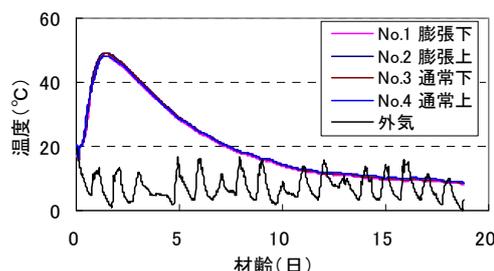


図-3 温度測定結果 (無筋試験体)

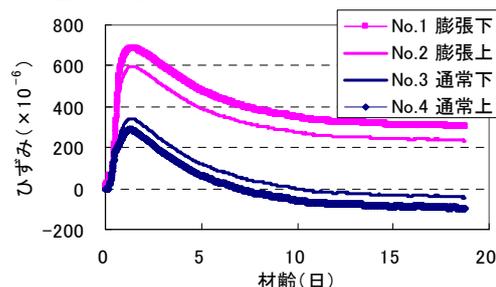


図-4 ひずみ測定結果 (コンクリートひずみ計 X 方向)

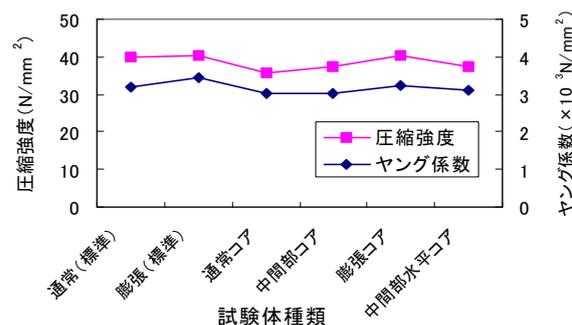


図-5 圧縮強度およびヤング係数測定結果

受けているが、打重ね面から 30cm 離れた通常コンクリート部 No.4 ひずみ計の値は、約 30℃の温度上昇による 300×10^{-6} 程度のひずみピークとなっており、膨張コンクリートによるひずみ増大の影響は見られない。

(2) 強度測定結果

標準養生供試体と無筋試験体からの採取コア供試体により、圧縮強度とヤング係数を測定した。コア採取位置は通常コンクリート部と膨張コンクリート部および中間部（打重ね位置）である。各 3 本を平均した圧縮強度およびヤング係数測定結果を図-5 に示す。材齢 28 日の標準養生試験体の圧縮強度は約 40N/mm^2 であり、ヤング係数は約 $3 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ である。通常コンクリート部のコアの圧縮強度が多少低い、膨張コンクリート部のコアおよび中間部のコアに圧縮強度、ヤング係数に大きな違いはない。

2.3 RC 試験体測定結果

(1) 温度およびコンクリートひずみ測定結果

RC 試験体温度測定結果を図-6 に示す。打設温度 25℃、ピーク温度は材齢 1.56 日、57.5℃、外気温は 25℃ 付近であった。膨張コンクリート部と通常コンクリート部に温度履歴の違いはない。

RC 試験体のコンクリートひずみ計によるひずみ測定結果を図-7 に示す。拘束鉄筋の諸元を表-3 に示す。膨張コンクリート部に設置したひずみ計の値は下側 No.1 は材齢 1.52 日で 505×10^{-6} 、No.2 は材齢 1.51 日で 504×10^{-6} の膨張ひずみが得られた。通常コンクリート部は No.3 は材齢 1.32 日で 326×10^{-6} 、No.4 は材齢 1.23 日で 287×10^{-6} のひずみが得られた。最大ひずみの発生は温度履歴のピーク時とほぼ一致している。膨張ひずみの値は、配筋の影響を受けて無筋試験体より小さい。本試験体でも打重ね面から 30cm 離れた通常コンクリート部上部ひずみ計の値は、約 30℃の温度上昇による 300×10^{-6} 程度のピークひずみとなっており、膨張コンクリートの影響は見られない。

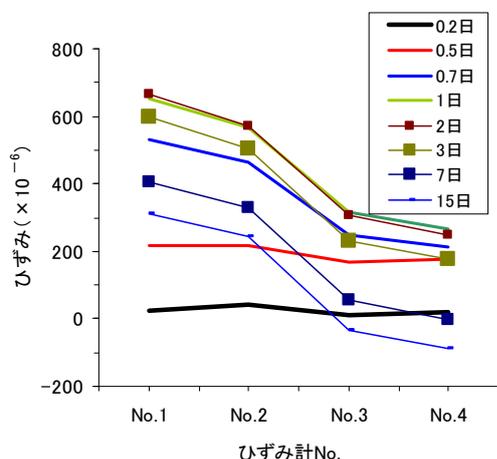


図-8 ひずみ測定結果 X 方向（無筋試験体）

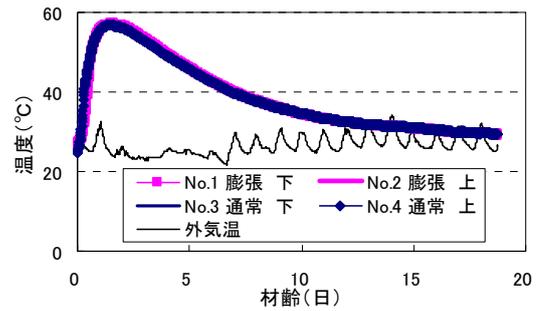


図-6 温度測定結果 (RC 試験体)

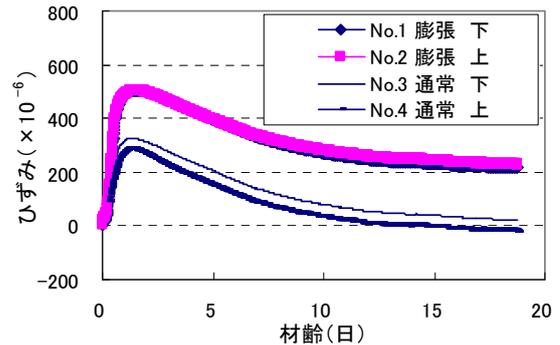


図-7 ひずみ測定結果(コンクリートひずみ計 X 方向)

表-3 拘束鉄筋の諸元

拘束方向	拘束鉄筋	鉄筋比
X 方向 水平長手方向	D22 1 4 本 (7 段) 合計断面積 555.2mm ²	1.39%
Y 方向 鉛直方向	D16 1 2 本 (6 本表裏) 合計断面積 238.3mm ²	0.66%
Z 方向 水平厚さ方向	D13 2 1 本 (7 段) 合計断面積 266.1mm ²	0.30%

ひずみ分布の材齢による変化の無筋試験体の結果を図-8 に RC 試験体の結果を図-9 に示す。ひずみのピーク値は前出の無筋試験体で 687×10^{-6} (材齢 1.43 日)、RC 試験体では 505×10^{-6} (材齢 1.52 日) である。材齢 2 日

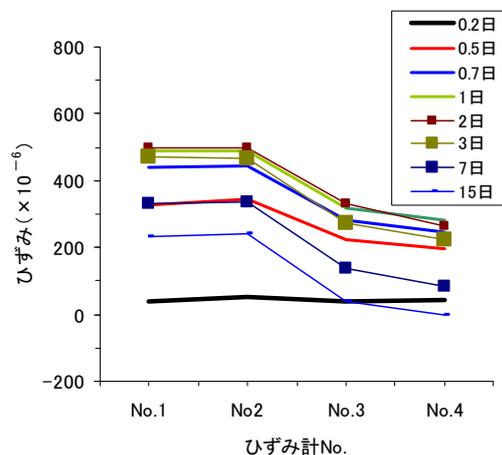


図-9 ひずみ測定結果 X 方向 (RC 試験体)

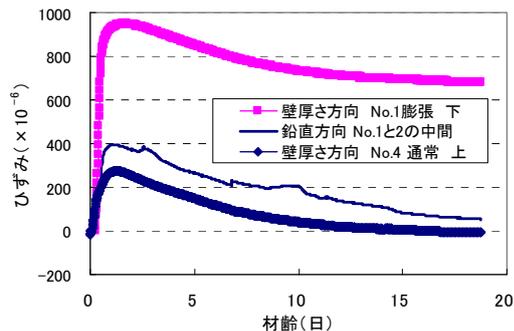


図-10 ひずみ (コンクリートひずみ計) Y 方向 (鉛直) 及び Z 方向 (壁厚さ)

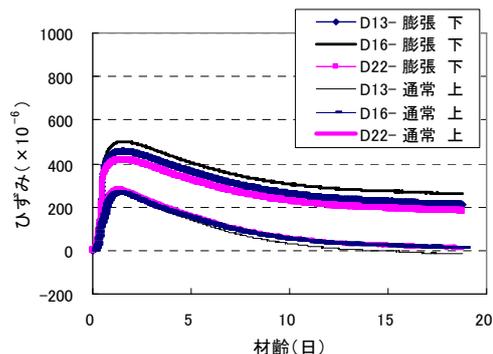


図-11 鉄筋計ひずみ D22 (X 方向), D16 (Y 方向), D13 (Z 方向)

から温度低下により収縮を始め、材齢 15 日程度で外気温に一致するまで収縮する。通常コンクリート部のひずみは、打重ね部分近傍では膨張コンクリートの膨張ひずみの影響を受けて連続的に変化している。RC 試験体の膨張コンクリート部は鉄筋拘束により、ピークひずみは実験結果では 0.74 倍に抑えられている。通常コンクリート部は膨張要因が温度変化だけなので、ひずみの変化は無筋試験体と変わらない。また、無筋試験体および RC 試験体の、膨張コンクリート部(No.1)と通常コンクリート部(No.4)のひずみの差はピークひずみからの温度降下による収縮があっても、変わらないことが判る。

RC 試験体の鉛直方向 (Y 方向) と厚さ方向 (Z 方向) 設置したコンクリートひずみ計の計測結果を図-10 に示す。厚さ方向は膨張コンクリート部で材齢 1.65 日で 948×10^{-6} 、通常コンクリート部では材齢 1.31 日で 275×10^{-6} のピークひずみが得られた。鉛直方向では材齢 1.05 日で 396×10^{-6} の膨張ひずみを得られた。試験体厚さ方向の最大ひずみは大きく、自由膨張ひずみとほぼ等しい値である²⁾。これは壁厚方向の長さが短く拘束鉄筋量が少ないため、膨張ひずみの拘束が得られていないことによる。鉛直方向は縦筋の拘束により中間的な値を示した。

(2) 鉄筋ひずみ測定結果

鉄筋に貼付したひずみゲージによる鉄筋計実ひずみの測定結果 D22, D16, D13 を図-11 に示す。通常コンクリート部分は温度変化に応じた伸びと収縮であり、ピークひずみは D22 で材齢 1.31 日、 287×10^{-6} の伸びひずみを得られた。D16, D13 とともに同様である。膨張コンクリート部分のピークひずみは D22 は材齢 1.48 日で 418×10^{-6} 、D16 は材齢 1.59 日で 502×10^{-6} 、D13 では材齢 1.41 日で 458×10^{-6} の計測結果が得られた。D22, D16 のピーク値はコンクリートひずみ計測値とおよそ一致しているが、壁厚さ方向 D13 のピーク値はコンクリートひずみ計測値 948×10^{-6} と比較して 0.48 倍と小さい値を示した。これは鉄筋長さが 30cm と短く膨張ひずみを十分拘束できないことによる。

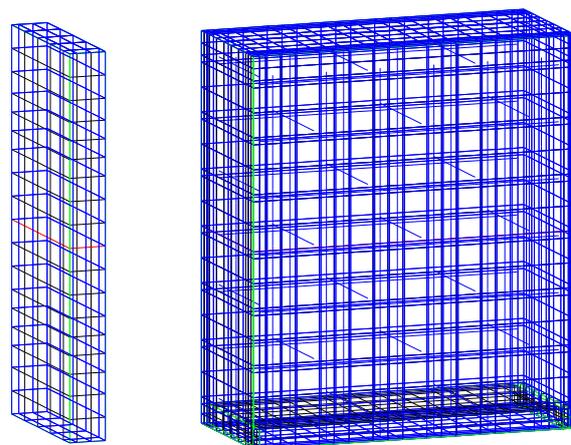


図-12 解析モデル (左: 無筋 1/4 モデル, 右: RC 1/1 モデル)

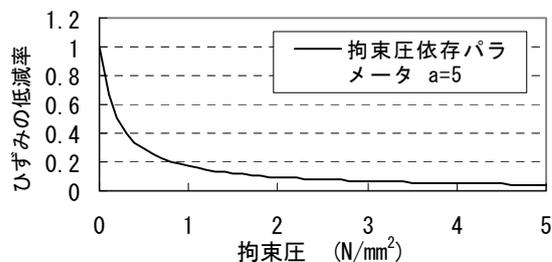


図-13 膨張ひずみの拘束圧による低減率

3. 膨張ひずみの解析

3.1 解析モデルと解析方法

試験体ひずみの解析モデルによる検討を行う。無筋試験体 (1/4 モデル) と RC 試験体 (1/1 モデル) の解析モデルを図-12 に示す。膨張ひずみの低減に用いた拘束圧による低減率を図-13 に示す。解析に用いた自社プログラムは、JCI マスコン委員会の検定解析への適合を確認している。

解析におけるコンクリートの圧縮強度と材齢の関係および有効ヤング係数 E_c は標準示方書⁵⁾ に準拠した。有効ヤング係数補正係数 (ϕ) は材齢 1.2 日まで 0.34、材齢 5 日以降 1.0 とし、その間を線形補間した。解析条件

を表-4に示す。

双曲線式を用いて、時間軸における膨張ひずみの増分をそれぞれの方向の要素圧縮応力 (σ_i) に従って低減して計算する²⁾。双曲線式を式(1)に示す。

$$\varepsilon_{ci} = (\varepsilon_0 - \varepsilon_f) / (1 + a\sigma_i) + \varepsilon_f \quad (1)$$

ここに、 ε_{ci} : i 方向の膨張ひずみ

ε_0 : 無拘束膨張試験の膨張ひずみ

ε_f : 拘束無限大の膨張ひずみ

a : 拘束圧依存パラメータ

σ_i : i 方向の拘束圧 (N/mm²)

本解析で用いた双曲線パラメータは $\varepsilon_f / \varepsilon_0 = 0.05$, $a = 5$ である。膨張ひずみを拘束しないと考えられる引張応力側に移行した時のひずみ増分は低減していない。膨張試験から得られたピークひずみの大きさを $\varepsilon_0 = 700 \times 10^{-6}$ としたものをを用いて解析した。解析に用いた膨張ひずみを図-14に示す。

3.2 解析結果

(1) コンクリートひずみ解析結果

コンクリートひずみ解析結果(無筋試験体 X 方向)を図-15に示す。本試験体の温度解析結果の温度ピークは材齢 1.26 日 47.2°C であり、ピーク温度で計測値より 1.9°C 低いが、ほぼ一致している。膨張コンクリート部のひずみの解析値は No.1 では材齢 1.96 日で 688×10^{-6} , No.2 は材齢 1.96 日で 592×10^{-6} の膨張ひずみが得られた。通常コンクリート部は No.3 では材齢 1.59 日で 329×10^{-6} , No.4 は材齢 1.26 日で 259×10^{-6} のひずみが得られた。膨張部の最大ひずみ発生材齢は試験体計測値より 0.5 日ほど遅れているが、ひずみピークの値は計測値 (687×10^{-6} 図-4) と一致している。最大ひずみ発生材齢の遅れは、解析に用いた膨張ひずみの膨張発現材齢のずれが原因と考えられる。

コンクリートひずみ解析結果(RC 試験体 X 方向)を図-16に示す。本試験体の温度解析結果のピーク温度は材齢 1.42 日 56.0°C であり、計測より 1.5°C 低いがほぼ一致している。膨張コンクリート部のひずみの解析値は下側 No.1 は材齢 1.96 日で 544×10^{-6} , No.2 は材齢 1.96 日で 491×10^{-6} の膨張ひずみが得られた。通常コンクリート部は No.3 は材齢 1.77 日で 348×10^{-6} , No.4 は材齢 1.59 日で 301×10^{-6} のひずみが得られた。

コンクリートひずみ解析結果(RC 試験体 Y, Z 方向)を図-17に示す。鉛直方向(Y 方向)では、膨張コンクリート部 No.1 のひずみの解析値は材齢 2.16 日で 576×10^{-6} , 通常コンクリート部 No.4 は材齢 1.59 日で 307×10^{-6} のひずみが得られた。壁厚さ方向(Z 方向)では、膨張コンクリート部のひずみの解析値 No.1 は材齢 2.16 日で 696×10^{-6} , 通常コンクリート部 No.4 は材齢 1.42 日で 293

表-4 解析条件

項目	設定定数
コンクリート	普通ポルトランドセメント 断熱温度上昇特性: 無筋試験体: $Q_{\infty} 46.2$, $\gamma 1.300$, 打設温度 20°C RC 試験体: $Q_{\infty} 45.7$, $\gamma 1.328$, 打設温度 25°C 圧縮強度 f'_c (28) 34N/mm ²
	熱伝導率 2.7 W/m°C, 比熱 1.15 kJ/kg°C, 単位体積質量 2300 kg/m ³ , 線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/\text{°C}$ 熱伝達率: 発泡スチロール, 無筋試験体 0.75 W/m ² °C, RC 試験体 1.0 W/m ² °C
鉄筋	ヤング係数 2.06×10^5 N/mm ² 線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/\text{°C}$

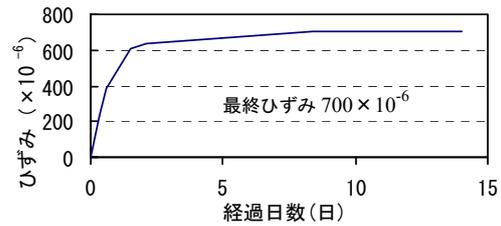


図-14 解析に用いた膨張ひずみ

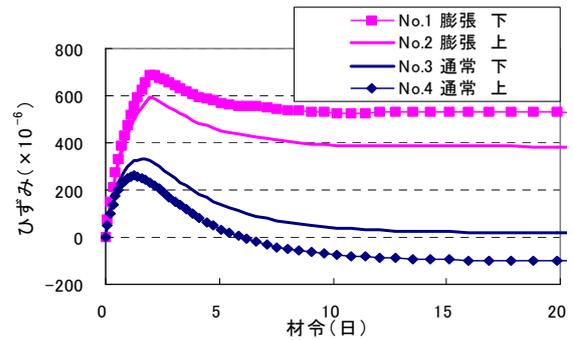


図-15 コンクリートひずみ解析結果(無筋試験体 X 方向)

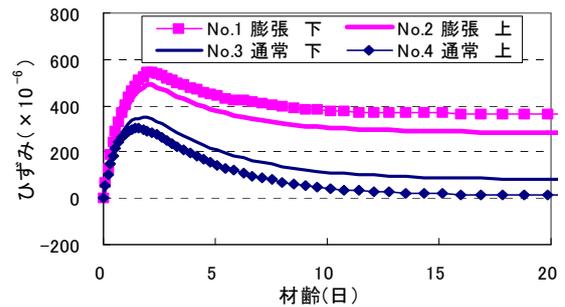


図-16 コンクリートひずみ解析結果(RC 試験体 X 方向)

$\times 10^{-6}$ のひずみが得られた。壁厚さ方向(Z 方向)の解析値は解析モデルでは節点位置で鉄筋要素がコンクリート要素と繋がれていることから鉄筋拘束が利いて、コンクリートひずみ計測値 (948×10^{-6} 図-10) との比較では 0.73 倍と小さい値となった。

本解析では膨張コンクリート部分は、無拘束膨張ひずみの値²⁾を 700×10^{-6} とし、各軸方向の要素圧縮力によって解析ステップにおける膨張ひずみを低減して解析し

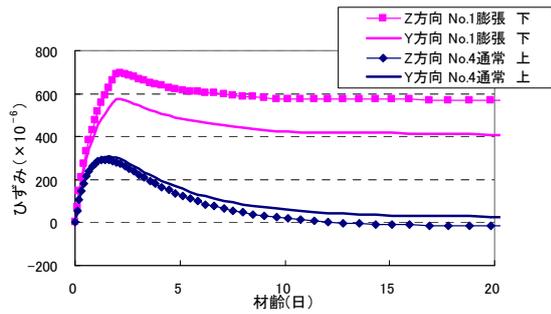


図-17 コンクリートひずみ解析結果
(RC 試験体 Y 方向, Z 方向)

ている。解析結果では、配筋量の違いが考慮され鉄筋拘束によりコンクリートひずみが低減される状況が良好に解析された。解析結果の比較は無筋試験体モデルと比べて RC 試験体モデルでは No.1 位置 (X 方向) で 0.79 倍となり、測定値の変化の 0.74 倍を良好に解析できた。

(2) 鉄筋ひずみ解析結果

鉄筋ひずみ解析結果 (D22 X 方向) を図-18 に示す。膨張コンクリート部 (D22 下) の解析値は材齢 1.96 日で 506×10^{-6} 、通常コンクリート部 (D22 上) は材齢 1.42 日で 299×10^{-6} のひずみが解析された。

鉄筋ひずみ解析結果 (D16 Y 方向, D13 Z 方向) を図-19 に示す。D16 の膨張コンクリート部の解析値は材齢 1.96 日で 578×10^{-6} 、通常コンクリート部は材齢 1.42 日で 298×10^{-6} 、D13 の膨張コンクリート部の解析値は材齢 2.16 日で 645×10^{-6} 、通常コンクリート部は材齢 1.42 日で 295×10^{-6} のひずみが解析された。鉄筋ひずみは解析モデルにおける鉄筋拘束の状況を表しており、膨張コンクリート部のピーク値は計測値に対して D22 の場合に 506×10^{-6} (図-18 解析値) は 418×10^{-6} (図-11 計測値) に対して 1.21 倍、D16 は 1.15 倍 (図-11, 19 参照) となったが、D13 は 1.41 倍 (図-11, 19 参照) となり壁厚さ方向の解析モデルでの拘束は過大になっている。

4. まとめ

本研究の範囲内で次の結果が得られた。

- (1) 無筋試験体, RC 試験体共に、打重ね断面近傍では膨張の影響をなだらかに受けるが、打重ね面から 30cm 離れた通常コンクリート部は、温度上昇のみによる伸びひずみのピークとなり、膨張コンクリートによるひずみ増大の影響は見られないことが判った。
- (2) RC 試験体の膨張コンクリート部ピークひずみは鉄筋拘束により無筋試験体の 0.74 倍に抑えられること、両試験体の膨張部と通常部のひずみの差は温度降下による収縮によっても変わらないことが明らかとなった。
- (3) 標準養生供試体とコア採取供試体の測定結果から、

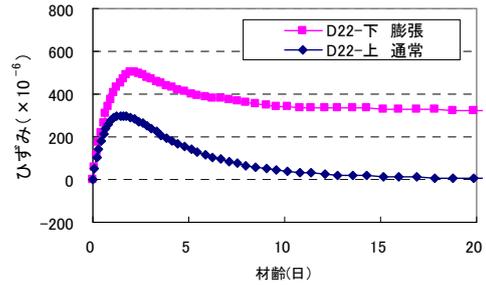


図-18 鉄筋ひずみ解析結果 (RC 試験体 D22 X 方向)

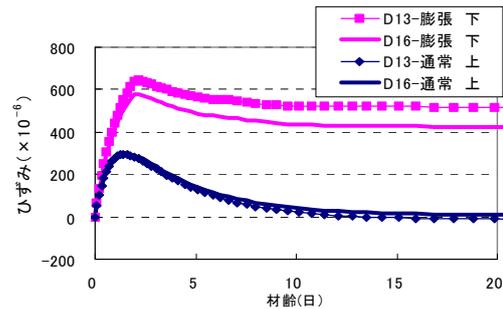


図-19 鉄筋ひずみ解析結果 (RC 試験体 D16 Y 方向, D13 Z 方向)

膨張コンクリート部、打重ね部および通常コンクリート部の圧縮強度、ヤング係数に大きな違いはないことが確認された。

- (4) 配筋量の異なる鉄筋拘束により膨張ひずみが低減される状況が解析され、水平長手方向 (X 方向) の膨張量の低下は 0.79 倍となり、本解析手法で RC 構造物の収縮低減効果を解析できることを示した。

参考文献

- 1) 三谷裕二ほか：マス養生温度履歴下における膨張コンクリートの応力評価手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1295-1300, 2006.7
- 2) 東 邦和, 中村敏晴, 増井 仁, 梅原秀哲：膨張材によるマスコンクリートの収縮低減効果の解析手法と構造物適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.145-150, 2008.7
- 3) 高瀬和男ほか：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, 2002.7
- 4) 東 邦和, 中村敏晴, 増井 仁, 梅原秀哲：膨張材によるスラブ状マスコンクリート構造物の収縮低減効果の解析検討, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, V, pp.879-880, 2008.9
- 5) コンクリート標準示方書 2007 年制定