

膨張材を用いたマスコンクリートの収縮低減効果の研究 (その3)

—膨張ひずみの大きさと鉄筋拘束の検討—

Investigation of the Crack Prevention Effects of Expansive Additive in Massive Concrete Structures (Part 3)

- Examination of Expansive Strain and Restraining Effects of Reinforcements -

東 邦和* 中村敏晴* 増井 仁**

要 旨

マスコンクリートにおける膨張材の効果、壁体を模擬した打重ね試験体により検討した。無筋試験体と配筋量を変えた鉄筋を3次元的に配置したRC試験体を作成し、コンクリートと鉄筋のひずみを測定した。膨張コンクリートと通常コンクリートの打重ね部では、互いの影響でなだらかにひずみが増加した。RC試験体の膨張コンクリート部ピークひずみは、鉄筋拘束により主筋方向で無筋試験体の0.74倍に抑えられた。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結果、鉄筋拘束による膨張ひずみ低減が得られ、主筋方向の膨張ひずみは0.79倍となった。本解析手法で膨張材によるRC構造物の収縮低減効果を予測できることが示された。

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. まえがき

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。これまで、膨張材の効果の評価方法が研究されてきたが^{1)~3)}、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。本研究は膨張コンクリートの応力履歴を考慮して収縮低減効果を評価することを目的とし、FEM解析に初期の有効ヤング係数の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、始めに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方向の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おり、膨張と拘束が同一試験体で測定できる。

次に、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より、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

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。

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

表-1 コンクリート使用材料

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	岩瀬産砕石、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

*技術研究所 **東日本支社土木技術部

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

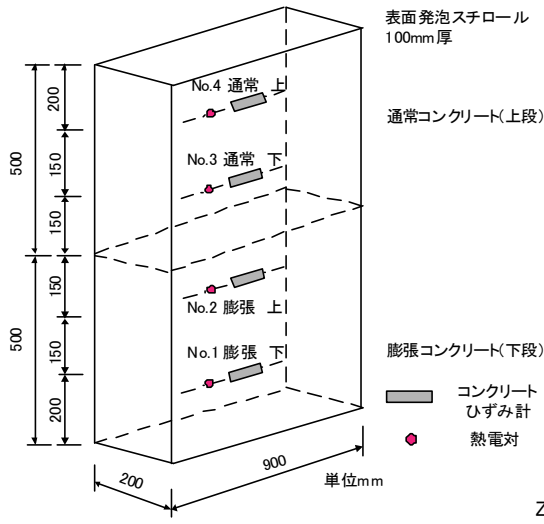


図-1 打重ね試験体 (無筋試験体)

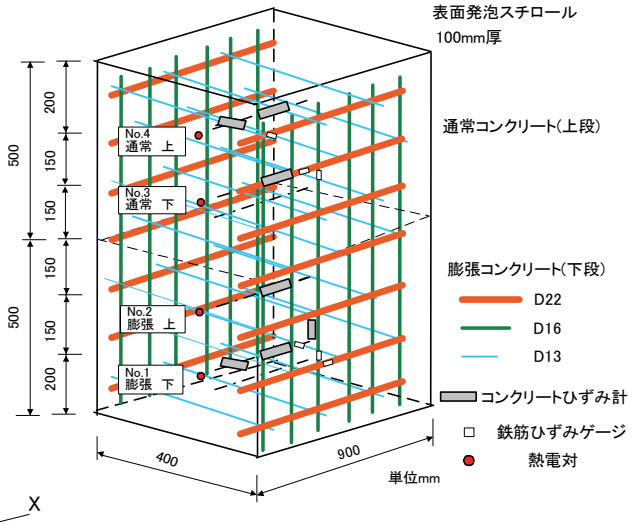


図-2 打重ね試験体 (RC 試験体)

した。無筋試験体を図-1に示す。無筋試験体は、厚さ20cm、高さ100cm、幅90cmである。計測方向の拘束を主にするため厚さは20cmとし、周囲全てに10cm厚の発泡スチロールを設置し、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。

試験体のケースと拘束鉄筋の諸元を表-3に示す。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の高さに通常コンクリートを打設した。打継ぎ面は、パイプレータをかけて一体化した。また、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、厚さ40cm、高さ100cm、幅90cm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)に中間帯鉄筋としてD13鉄筋をD22鉄筋の高さ各段に3

本づつ配置している。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。D22、D16の鉄筋端部は直角フックを、D13は半円フックをつけている。鉄筋には、No.1、No.4の高さ位置でひずみゲージを鉄筋左右面に貼付した。鉄筋は互いに曲げ応力が発生しないように緊結をしていない。

2.2 無筋試験体測定結果

a. コンクリートひずみ測定結果

無筋試験体は、打設温度20℃、ピーク温度は49.1℃(材齢1.30日)、外気温は10℃付近であった。試験体内部の温度は一律であり、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かった。

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-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、試験体の下部No.1から 687×10^{-6} (材齢1.43日)、No.2から 599×10^{-6} (材齢1.39日)のピークひずみが得られた。通常コンクリート部では、下部

表-3 試験体ケース

形状		鉄筋		鉄筋比
無筋試験体	厚さ200mm×高さ1000mm×幅900mm	無筋		—
RC試験体	厚さ400mm×高さ1000mm×幅900mm	X方向 水平長手方向	D22 14本(7段) 合計断面積555.2mm ²	1.39%
		Y方向 鉛直方向	D16 12本(6本表裏) 合計断面積238.3mm ²	0.66%
		Z方向 壁厚さ方向	D13 21本(7段) 合計断面積266.1mm ²	0.30%

No. 3で 342×10^{-6} (材齢 1.30 日)、No. 4では 288×10^{-6} (材齢 1.25 日) のピークひずみが得られた。ピークひずみの発生材齢は、温度履歴のピーク時材齢 (材齢 1.30 日) とほぼ一致している。本試験体では、膨張コンクリートの上部 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受けている。しかし、打重ね面から 30cm 離れた通常コンクリート部 No. 4 のひずみの値は、約 30°C 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、膨張コンクリートによるひずみ増大の影響は見られない。

b. 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-4 に示す。材齢 28 日の標準養生試験体の圧縮強度は約 40 N/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は多少低いが、膨張コンクリート部のコアおよび中間部のコアの圧縮強度、ヤング係数には大きな違いはない。

2.3 RC 試験体測定結果

a. コンクリートひずみ測定結果

RC 試験体は、打設温度 25°C、ピーク温度 57.5°C (材齢 1.56 日)、外気温は 25°C 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かった。

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-5 に示す。膨張コンクリート部に設置したひずみ計は下部 No. 1 から 505×10^{-6} (材齢 1.52 日)、No. 2 から 504×10^{-6} (材齢 1.51 日) のピークひずみが得られた。通常コンクリート部では下部 No. 3 で 326×10^{-6} (材齢 1.32 日)、No. 4 では 287×10^{-6} (材齢 1.23 日) のピークひずみが得られた。ピークひずみの発生は、温度履歴のピーク時 (材齢 1.56 日) とほぼ一致している。膨張コンクリート部のひずみの値は、配筋の影響を受け

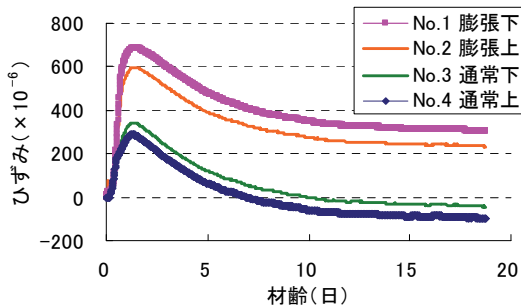


図-3 無筋試験体ひずみ測定結果 (コンクリートひずみ計 X 方向)

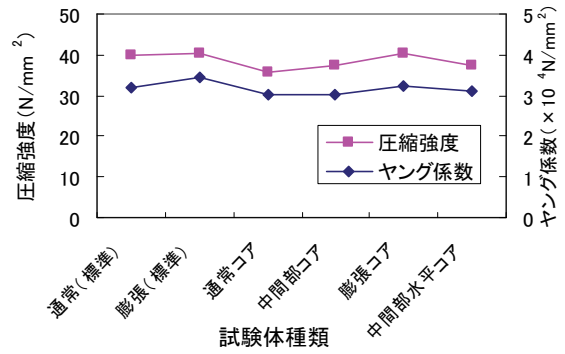


図-4 圧縮強度およびヤング係数測定結果

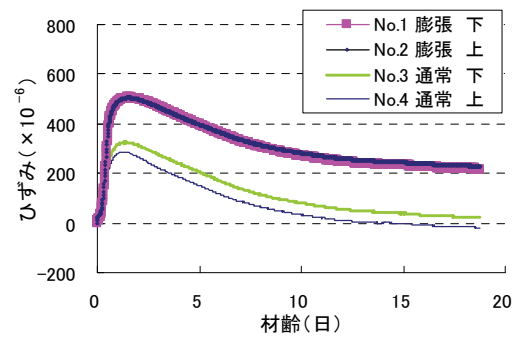


図-5 RC 試験体ひずみ測定結果 (コンクリートひずみ計 X 方向)

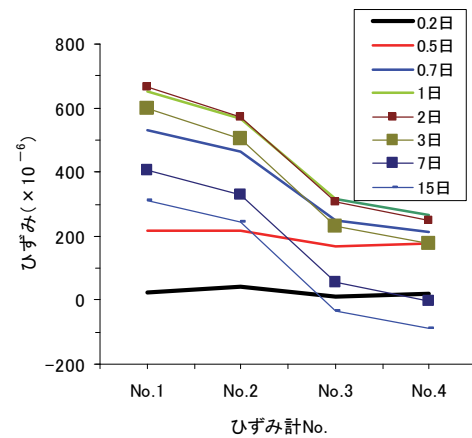


図-6 ひずみ分布の材齢による変化 (無筋試験体)

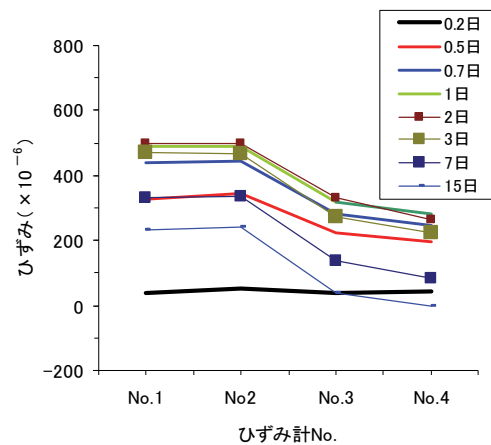


図-7 ひずみ分布の材齢による変化 (RC 試験体)

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のNo.4ひずみ計の値は、約30℃の温度上昇による 300×10^{-6} 程度のピークひずみとなっており、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。

無筋試験体におけるひずみ分布の材齢による変化を図-6に、RC試験体の変化を図-7に示す。ひずみのピーク値は、前述の無筋試験体で 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。いずれの試験体も、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。鉄筋拘束により、RC試験体の膨張コンクリート部のピークひずみは無筋試験体の0.74倍に抑えられている。RC試験体の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、変わらないことが分る。

RC試験体の鉛直方向(Y方向)と壁厚さ方向(Z方向)に設置したコンクリートひずみ計の測定結果を図-8に示す。試験体壁厚さ方向のピークひずみは 948×10^{-6} （材齢1.65日）と大きく、自由膨張ひずみとほぼ等しい値である²⁾。これは、壁厚さ方向の長さが短く、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。通常コンクリート部のひずみは、 275×10^{-6} （材齢1.31日）となり温度上昇による大きさである。鉛直方向は 396×10^{-6} （材齢1.05日）と、縦筋の拘束により中間的な値を示した。

b. 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の実ひずみの測定結果を図-9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 287×10^{-6} （材齢1.31日）の伸びひずみが得られた。

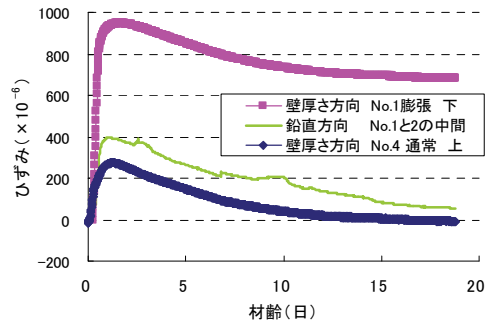


図-8 ひずみ（コンクリートひずみ計）Y方向（鉛直）およびZ方向（壁厚さ）の測定結果

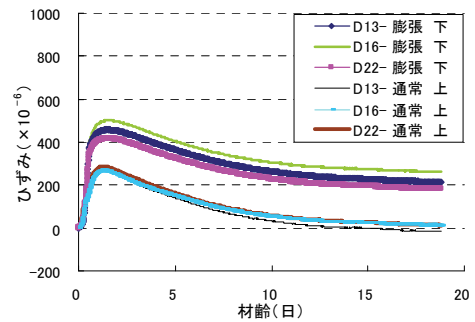


図-9 鉄筋計ひずみD22（X方向）、D16（Y方向）、D13（Z方向）の測定結果

D16、D13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 418×10^{-6} （材齢1.48日）、D16は 502×10^{-6} （材齢1.59日）、D13では 458×10^{-6} （材齢1.41日）の測定結果が得られた。D22、D16のピーク値はコンクリートひずみ測定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測定値（ 948×10^{-6} 図-8参照）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。

3. 膨張ひずみの解析

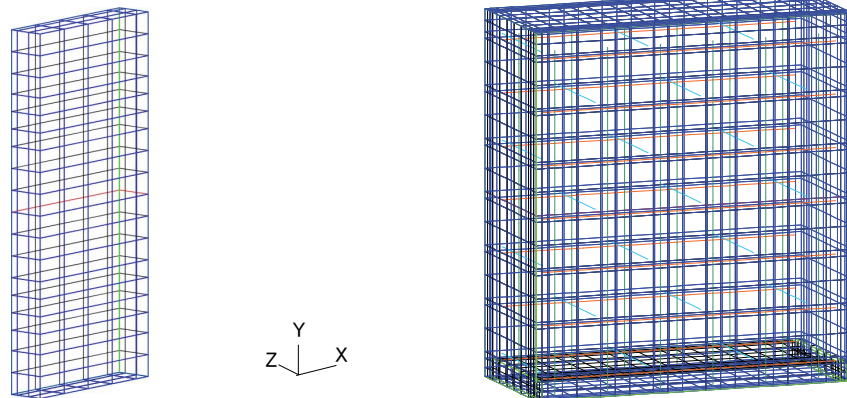


図-10 解析モデル（左：無筋試験体1/4モデル、右：RC試験体1/1モデル）

3.1 解析モデルと解析方法

試験体ひずみの FEM 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-10 に示す。解析条件を表-4 に示す。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_e) は、標準示方書⁴⁾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。解析は拘束圧依存性を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各軸方向の拘束圧に応じて低減して計算した²⁾。双曲線式を下記の式(1)に示す。

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

ここに、

- ε_{ci} : i 方向の膨張ひずみ
- ε_0 : 無拘束の膨張ひずみ
- 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 $\varepsilon_0 = 700 \times 10^{-6}$ として解析した。解析に用いた膨張ひずみを図-11 に示す。

3.2 解析結果

a. コンクリートひずみ

コンクリートひずみ (無筋試験体 X 方向) の解析結果を図-12 に示す。本試験体の温度解析結果のピーク温度は 47.2°C (材齢 1.26 日) であり、ピーク温度測定値より 1.9°C 低い、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、下部 No. 1 は 688×10^{-6} (材齢 1.96 日)、No. 2 は 592×10^{-6} (材齢 1.96 日) のピークひずみが得られた。通常コンクリート部では、No. 3 は 329×10^{-6} (材齢 1.59 日)、No. 4 では 259×10^{-6} (材齢 1.26 日) のピークひずみが得られた。膨張部のピークひずみの材齢は試験体測定値より約 0.5 日遅れているが、ピークひずみの値は測定値 (687×10^{-6} 図-3 参照) と一致している。ピーク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差異が原因と考えられる。

コンクリートひずみ (RC 試験体 X 方向) の解析結果を図-13 に示す。本試験体の温度解析結果のピーク温度は 56.0°C (材齢 1.42 日) であり、測定値より 1.5°C 低い。膨張コンクリート部のひずみの解析値から下部 No. 1 では 544×10^{-6} (材齢 1.96 日)、No. 2 では 491×10^{-6} (材齢 1.96 日) の膨張ひずみが得られた。通常コンクリート部では、No. 3 で 348×10^{-6} (材齢 1.77 日)、No. 4

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： $Q_{\infty} 46.2^{\circ}\text{C}$ 、 $\gamma 1.300$ 、打設温度 20°C RC 試験体： $Q_{\infty} 45.7^{\circ}\text{C}$ 、 $\gamma 1.328$ 、打設温度 25°C 圧縮強度 $f' (28) 34\text{N/mm}^2$
	熱伝導率 $2.7\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ 、比熱 $1.15\text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ 、 単位体積質量 2300 kg/m^3 、線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 熱伝達率：発泡スチロール、 無筋試験体 $0.75\text{ W/m}^2\text{C}$ 、RC 試験体 $1.0\text{ W/m}^2\text{C}$
鉄筋	ヤング係数 $2.06 \times 10^5\text{ N/mm}^2$ 線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

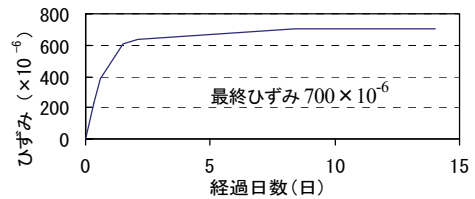


図-11 解析に用いた膨張ひずみ

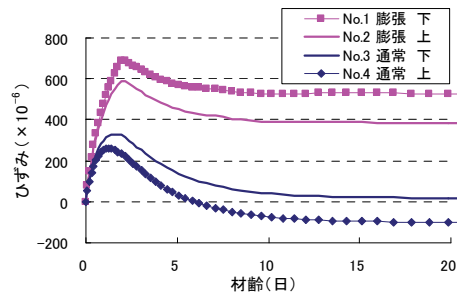


図-12 コンクリートひずみ解析結果 (無筋試験体 X 方向)

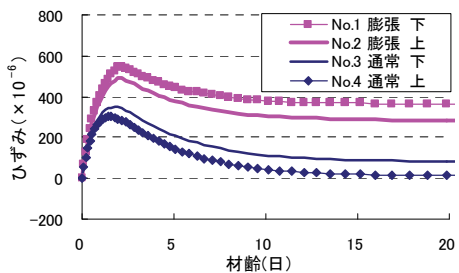


図-13 コンクリートひずみ解析結果 (RC 試験体 X 方向)

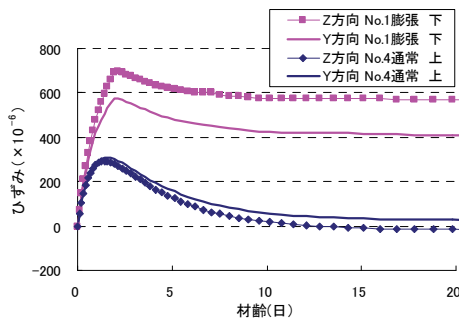


図-14 コンクリートひずみ解析結果 (RC 試験体 Y 方向、Z 方向)

では 301×10^{-6} (材齢 1.59 日) のひずみが得られた。

コンクリートひずみ (RC 試験体 Y、Z 方向) の解析結果を図-14 に示す。膨張コンクリート部の壁厚さ方向 (Z 方向) のピークひずみは、No. 1 では 696×10^{-6} 、通常コンクリート部 No. 4 では 293×10^{-6} であった。壁厚さ方向 (Z 方向) の解析値は、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により、コンクリートひずみ測定値 (948×10^{-6} 図-8 参照) との比較では 0.73 倍と小さい値となった。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 576×10^{-6} 、通常コンクリート部 No. 4 では 307×10^{-6} のひずみが得られた。

本解析では、膨張コンクリート部は、無拘束膨張ひずみの値²⁾を 700×10^{-6} として、各軸方向の要素圧縮力に応じて解析ステップにおける膨張ひずみを低減した解析をしている。解析結果は、配筋量の違いから生じる鉄筋拘束によりコンクリートひずみが低減される状況を良好に表した。解析値の比較は、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 688×10^{-6} に対して 544×10^{-6} と 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。

b. 鉄筋ひずみ解析結果

鉄筋ひずみ解析結果 (D22 X 方向) を図-15 に示す。膨張コンクリート部 (D22 下) の解析値は、それぞれピークひずみで 506×10^{-6} 、通常コンクリート部 (D22 上) では 299×10^{-6} のひずみが得られた。

鉄筋ひずみ (D16 Y 方向、D13 Z 方向) の解析結果を図-16 に示す。D16 の膨張コンクリート部の解析値はそれぞれピークひずみで 578×10^{-6} 、通常コンクリート部は 298×10^{-6} 、D13 の膨張コンクリート部の解析値は 645×10^{-6} 、通常コンクリート部は 295×10^{-6} のひずみとなった。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測定値に対して D22 の場合に 506×10^{-6} (図-15 参照 解析値) は 418×10^{-6} (図-9 参照 測定値) に対して 1.21 倍、D16 は 1.15 倍 (図-9、16 参照) となったが、D13 は 1.41 倍 (図-9、16 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. あとがき

本研究の範囲内で、以下の結果が得られた。

- i. 無筋試験体、RC 試験体ともに、打重ね断面近傍では膨張の影響によりひずみがなだらかに変化するが、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分った
- ii. RC 試験体の膨張コンクリート部のピークひずみ

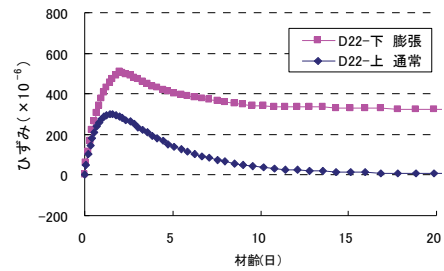


図-15 鉄筋ひずみ解析結果 (RC 試験体 D22 X 方向)

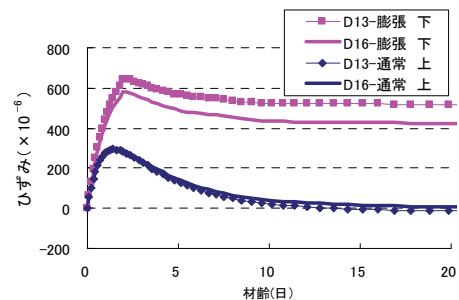


図-16 鉄筋ひずみ解析結果 (RC 試験体 D16 Y 方向、D13 Z 方向)

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

- iii. 標準養生供試体とコア採取供試体の測定結果から、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
- iv. 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) 三谷裕二他、「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) 高瀬和男他、「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) 土木学会「コンクリート標準示方書 2007 年制定」