

# 論文 膨張材による RC 部材の膨張収縮挙動とひび割れ抑制効果の研究

東 邦和<sup>\*1</sup>・三澤 孝史<sup>\*2</sup>・白石 祐彰<sup>\*2</sup>・梅原 秀哲<sup>\*3</sup>

**要旨:** コンクリートの硬化時に、先行して打設されたコンクリートによって収縮が妨げられるとひび割れが生じる。このような拘束ひび割れの抑制を目的に、3H 工法で施工する高橋脚の下部に膨張コンクリートを適用した。構造物中の膨張ひずみの大きさは拘束度によって異なり、RC 構造の場合は、配筋量による拘束の考慮が必要である。本研究では、はじめに鉄筋比を変化させた RC 試験体を作製し、その計測結果と膨張ひずみを与えた解析の結果を比較し、解析パラメータの適用性を検討した。また、鋼材量の多い 3H 工法橋脚への膨張コンクリート適用時の計測結果から、導入された圧縮応力によるひび割れ抑制効果を確認し、鋼材量の多い構造物における効果を解析により予測できることを明らかにした。

**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抑制対策として、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。このため膨張材の効果の評価方法が研究されているが<sup>1)~3)</sup>、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。筆者らは、膨張コンクリートの応力履歴を解析してひび割れ抑制効果を検討することを目的として、FEM 解析モデルに初期の有効ヤング係数補正係数と膨張ひずみを与え、要素応力によりひずみの大きさを低減する方法を提案してきた<sup>2)</sup>。さらに、鋼材量の多い RC 構造物においては、膨張効果に対する鉄筋拘束の影響が課題となっている<sup>4,5)</sup>。本研究では、はじめに鉄筋比を変えた RC 試験体による計測結果と鉄筋を配置した解析モデルによる解析結果を比較し、解析パラメータの適用性と解析精度を検討した。次に、鋼材量の多い高橋脚の下部リフトに膨張コンクリートを適用し、鋼材のモデル化の有無による解析結果を比較して、解析精度とひび割れ抑制効果の検討を行った。

## 2. RC 試験体実験

### 2.1 概要

鉄筋の配筋量を変化させた RC 試験体を作製し、膨張コンクリートを打設して 3 次元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。

次に、各試験体の解析モデルを作製し、提案している

解析手法を適用して、配筋の違い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。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。

### 2.2 試験ケース

試験体一覧を表-3 に、RC 試験体と計測器位置を図-1 に示す。No.1, No.2 試験体は、高さ幅共に 200mm、長さ 1200mm の形状であり、周囲全てに 100mm 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。主鉄筋は、No.1 は D22, No.2 は D16, フープ筋は D10 を使用した。No.3~No.6 試験体は、高さ幅共に 150mm、

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 <sup>3</sup>
細骨材	富津産山砂, 表乾密度:2.60 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:1.27%
粗骨材	岩瀬産碎石, Gmax20mm, 表乾密度 2.65 g/cm <sup>3</sup> , 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

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 <sup>3</sup> )					AE 減水剤 (kg/m <sup>3</sup> )
			水 W	セメント C	膨張材 E	細骨材 S	粗骨材 G	
膨張	55	43.8	166	282	20	789	1032	0.981

\*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)

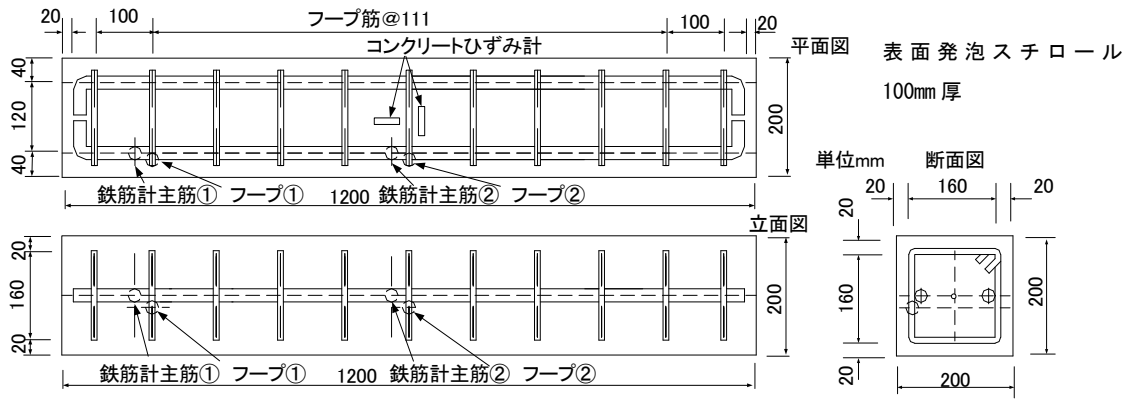


図-1 RC試験体と計測器位置 No. 1, No. 2 試験体

表-3 試験体一覧

試験体 No.	形状	主鉄筋と鉄筋比	フープ筋とフープ筋比
1	200mm×200mm	D22 1.98%	D10, 11本
2	長さ1200mm	D16 0.99%	0.65%
3	150mm×150mm	D16 1.77%	D6, 17本
4	長さ900mm	D10 0.63%	0.80%
5	150mm×150mm	D16 1.77%	D6, 9本
6	長さ900mm	D10 0.63%	0.42%
7	150mm×150mm	D10 0.63%	D6, 5本
8	長さ530mm	D6 0.28%	0.40%

長さ 900mm の形状である。No.7, No.8 試験体は、高さ幅共に 150mm、長さ 530mm の形状である。それぞれ主鉄筋比およびフープ筋比を変えている。No.5~8 は発泡スチロール厚を 20mm として温度ピークの高さを変えている。

### 2.3 測定結果

#### (1) 温度およびコンクリートひずみ測定結果

各試験体の温度測定結果を表-4に示す。No.1, No.2 試験体は、打設温度 20℃、ピーク温度は材齢 1.25 日で 38.7℃である。各試験体の内部に温度差はない。コンクリートひずみ計 (標点距離 31mm) は断面中央に 2 方向に取り付けた。ひずみは温度ひずみを含んだ実ひずみである。コンクリートひずみ測定結果を図-2に示す。主鉄筋方向のコンクリートひずみのピーク値は No.1 (D22) で  $220 \times 10^{-6}$ 、No.2 (D16) で  $275 \times 10^{-6}$  である。主鉄筋直角方向のコンクリートひずみのピーク値は No.1 (D22) で  $629 \times 10^{-6}$ 、No.2 (D16) で  $535 \times 10^{-6}$  である。No.1~No.4 試験体のコンクリートひずみのピーク値を図-3に示す。No.1, No.3 試験体は、主鉄筋方向の鉄筋拘束が大きいいため、それぞれ No.2, No.4 試験体と比較して主鉄筋方向のひずみは小さいが、直角方向のひずみは大きい値が得られた。

#### (2) 鉄筋ひずみ測定結果

鉄筋ひずみは、鉄筋の内外面に貼付したひずみゲージの平均値に温度ひずみを加えた実ひずみである。No.1 試

発泡スチロール厚 No.1~4: 100mm, No.5~8: 20mm  
材齢 28 日: 圧縮強度 34.4 N/mm<sup>2</sup>, ヤング係数 33.2 kN/mm<sup>2</sup>

表-4 試験体温度測定結果

試験体 No.	打設温度	ピーク温度とピーク材齢
1, 2	20℃	38.7℃ 1.25 日
3, 4	20℃	33.0℃ 1.25 日
5, 6	22℃	26.1℃ 1.05 日
7, 8	25℃	39.1℃ 0.75 日

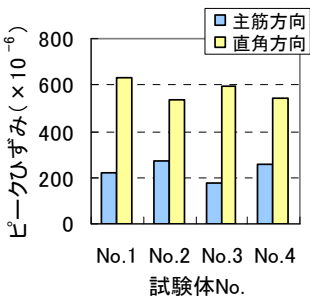


図-3 コンクリートひずみのピーク値の比較

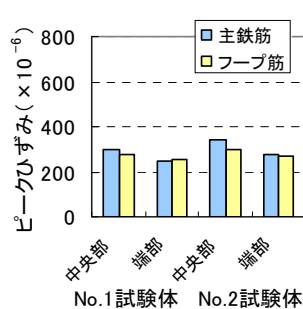


図-5 鉄筋ひずみのピーク値の比較

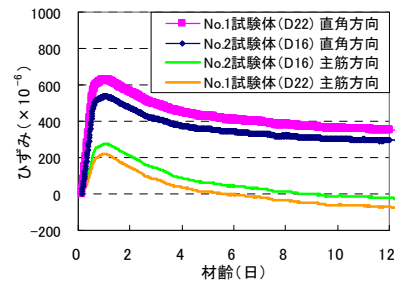


図-2 コンクリートひずみ測定結果

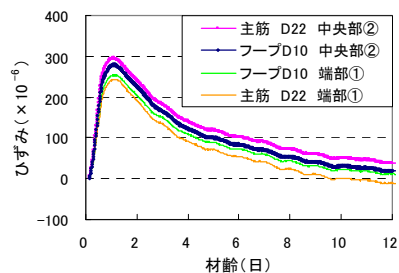


図-4 鉄筋ひずみ測定結果 (No. 1 試験体)

験体の鉄筋ひずみ測定結果を図-4に示す。No.1, No.2試験体の鉄筋ひずみのピーク値を図-5に示す。主鉄筋ひずみのピーク値は、No.1のD22中央部で $295 \times 10^{-6}$ 、No.2のD16中央部で $344 \times 10^{-6}$ である。端部の主鉄筋ひずみは、中央部に比べてそれぞれ $50 \sim 70 \times 10^{-6}$ 小さいが、その差は小さい。また、フープ筋ひずみのピーク値は中央部で $280 \sim 300 \times 10^{-6}$ であり、端部も同様である。これによりNo.1, No.2試験体の中央部および端部の鉄筋は、膨張ひずみを大きな差がなく、均等に受けていると考えられる。

### (3) 鉄筋比との比較

各試験体の主鉄筋方向コンクリートひずみのピーク値を図-6aに示す。鉄筋比に応じてのひずみの変化は、鉄筋比の0.6%以下の範囲では鉄筋比の増加によるコンクリートひずみの減少は $300 \times 10^{-6}$ 程度であり、鉄筋比0.6~2.0%の範囲では $100 \times 10^{-6}$ 程度の減少の結果が得られた。拘束が大きくなるに従いコンクリートひずみの大きさは減少することがわかる。

各試験体の主鉄筋ひずみのピーク値(中央部)を図-6bに示す。主鉄筋ひずみ測定値の大きさはコンクリートひずみより $100 \times 10^{-6}$ 程度大きく、鉄筋比に応じて変化している。フープ筋ひずみのピーク値(中央部)を図-6cに示す。試験体の各組のフープ筋比は同一であり、各組の中ではフープ筋ひずみに差はない。また、フープ筋比によるフープひずみの差は小さく、前述のようにフープ筋は膨張ひずみを均等に受けていると考えられる。

また、前出の図-3, 図-5から主鉄筋方向のコンクリートひずみは、主鉄筋のひずみとほぼ同等の大きさとなっているが、フープ方向(主鉄筋直角方向)は鉄筋比が小さく、試験体の断面の高さと幅が短いことから、コンクリートのフープ方向ひずみ(主鉄筋直角方向)はフープ筋ひずみの約2倍の大きさとなり、コンクリートに及ぼす拘束力が小さいことがわかる。

## 2.4 解析モデルと解析結果

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従って低減して計算した<sup>2)</sup>。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、 $\varepsilon_{ci}$  : i方向の膨張ひずみ

$\varepsilon_0$  : 無拘束の膨張ひずみ

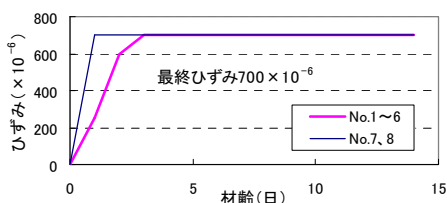
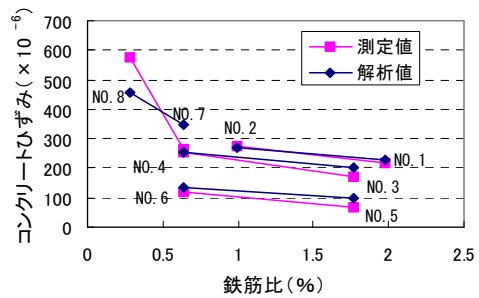
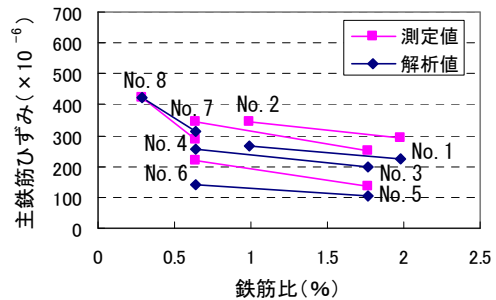


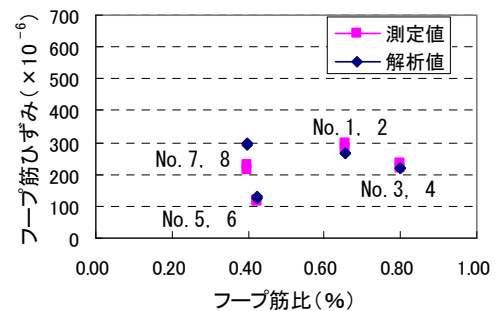
図-7 解析に用いた膨張ひずみ



a. コンクリートひずみのピーク値(主鉄筋方向)



b. 主鉄筋ひずみのピーク値(中央部)



c. フープ筋ひずみのピーク値(中央部)

図-6 測定値と解析値の比較

表-5 解析条件

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 $Q_{ca}45.7$ , $\gamma 1.328$ 打設温度 $20^\circ\text{C}$ , 圧縮強度 $f'(28) 34\text{N/mm}^2$ 有効ヤング係数補正係数 $\phi$ : 材齢 1.2 日まで 0.34, 材齢 5 日以降 1.0, その間を線形補間 ヤング係数 $E(28) 27\text{kN/mm}^2$
	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 $2300 \text{kg/m}^3$ 線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 熱伝達率: 発泡スチロール, $0.9\text{W/m}^2^\circ\text{C}$
	鉄筋
	ヤング係数 $206\text{kN/mm}^2$ 線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

注) 打設温度, 熱伝達率は試験体により変更。

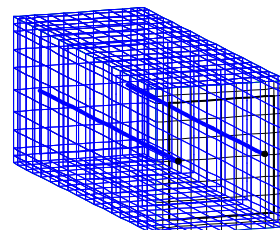


図-8 RC解析モデル(No.1, No.2試験体, 1/2モデル)

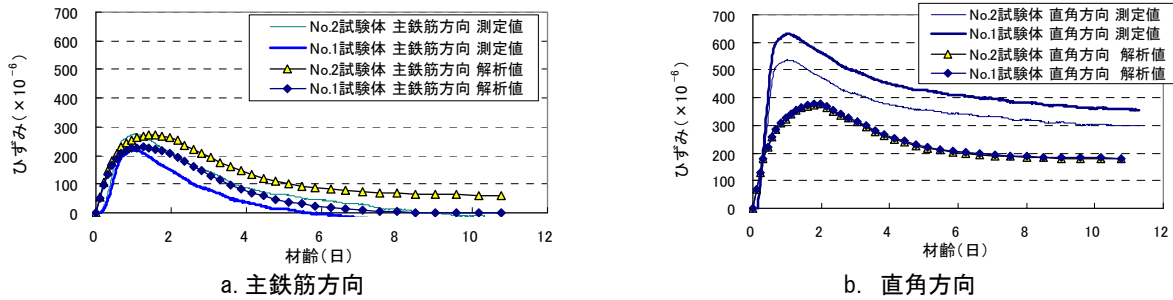


図-9 コンクリートひずみ解析および測定結果 (No. 1, No. 2 試験体)

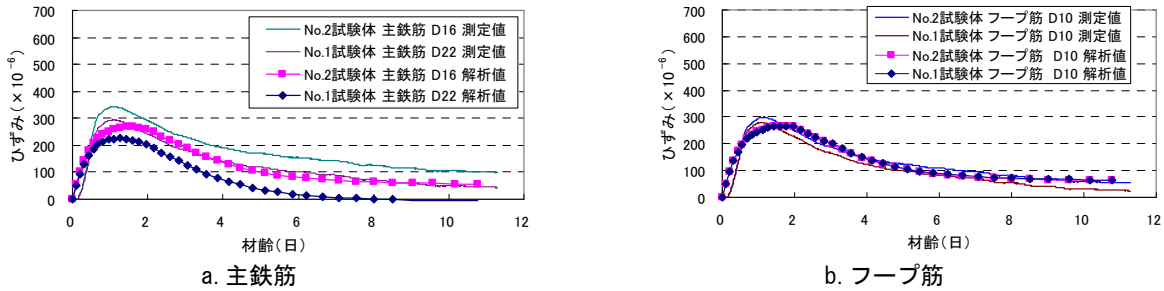


図-10 鉄筋ひずみ解析および測定結果 (No. 1, No. 2 試験体)

- $\epsilon_f$  : 拘束無限大の膨張ひずみ
- $a$  : 拘束圧依存パラメータ
- $\sigma_i$  :  $i$  方向の拘束圧 ( $N/mm^2$ )

表-6 対象橋脚

工事名	尾道・松江自動車道竹地川橋下部工事
橋脚高さ	P1 : 38.0m P2 : 46.0m (計測対象)

表-7 使用材料と配合

セメント	高炉セメント B 種, 密度 $3.04g/cm^3$
細骨材	三次産砕砂, 表乾密度 $2.58g/cm^3$
粗骨材	三次産砕石, 表乾密度 $2.62g/cm^3$ , Gmax20mm
混和剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物
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
配合	水結合材比 50%, 単位水量 $170kg/m^3$ 単位セメント量 $320kg/m^3$ 単位膨張材 $20kg/m^3$

表-8 配置鋼材の種類と鉄筋比

鋼材	水平方向鉄筋	鉛直方向鉄筋・H形鋼
種類	D29 ctc150	スパイラルカラム (D32, H-428 $\times 407$ , H-414 $\times 405$ )
鉄筋比	1.29%	4.08%

膨張ひずみ低減に用いた双曲線式のパラメータは  $\epsilon_f / \epsilon_0 = 0.05$  とし、鉄筋拘束が大きいことから、拘束圧依存パラメータ  $a=10$  とした。解析条件を表-5に示す。圧縮強度、ヤング係数と材齢の関係はコンクリート標準示方書<sup>6)</sup>に準拠した。

解析に用いた膨張ひずみ  $\epsilon_0 = 700 \times 10^{-6}$  を図-7に示す。No.7, No.8 では、打設温度が高く膨張ひずみのピークを早く設定している。鉄筋をモデル化した RC 解析モデル (No.1, No.2 試験体) を図-8に示す。コンクリートひずみ解析および測定結果を図-9に示す。鉄筋ひずみ解析および測定結果を図-10に示す。測定値および解析値のひずみは、温度上昇による温度ひずみを含んでいるが、No.1, No.2 試験体は同時打設であり温度に差はない。

主鉄筋方向のコンクリートひずみの解析によるピーク値は、No.2 試験体(D16)で  $270 \times 10^{-6}$ 、No.1 試験体 (D22) で  $228 \times 10^{-6}$  である。No.1, No.2 試験体の主鉄筋直角方向のひずみピーク値はフープ筋比が同じであるため、どちらも  $388 \times 10^{-6}$  である。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有効に働いた結果となり、鉄筋ひずみ (鉄筋要素位置) は、コンクリートひずみ (試験体中心位置) の値とほぼ等しい結果となっている。

また、主鉄筋およびフープ筋の解析値と測定値の比較 (図-10) から、鉄筋ひずみの解析結果と測定結果の傾向は一致していることがわかる。

主鉄筋比の異なる梁試験体の測定結果では、No.2 試験

体 (D16) の主鉄筋方向コンクリートひずみおよび主鉄筋ひずみは、No.1 試験体 (D22) の 1.3 倍および 1.2 倍の値を得た。一方、本手法による FEM 解析結果では 1.2 倍の値を得ており、コンクリートひずみおよび主鉄筋ひずみの鉄筋比によるピーク値の違いは、各試験体において精度よく解析できたといえ、RC 解析モデルを用いて膨張材による膨張収縮挙動を解析できることを示した。

### 3. 高橋脚への適用

#### 3.1 概要

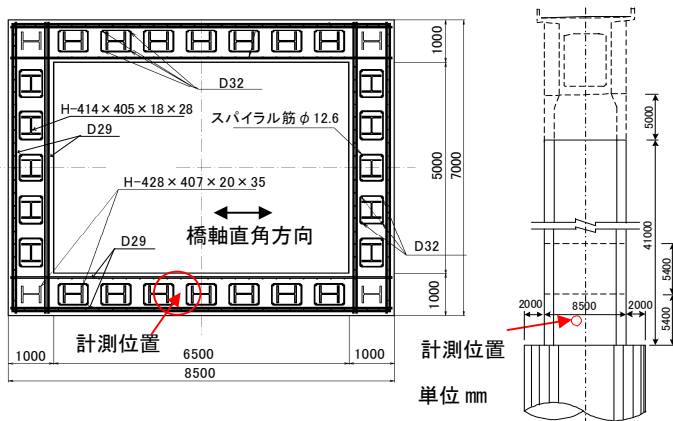


図-11 3H橋脚躯体と計測位置

3H工法橋脚は、従来のRC橋脚で用いられてきた軸方向鉄筋をH形鋼に置き換え、さらにH形鋼を軸方向鉄筋とスパイラル筋で囲った構造（スパイラルカラム）である。対象橋脚を表-6に示す。ひび割れ抑制のために、膨張コンクリートを最下段リフト（第1リフト、高さ5.4m）に使用した。使用材料と配合を表-7に示す。膨張材の効果を確認するために計測を実施した。また、配置鋼材のモデル化の有無による解析結果を測定結果と比較して、ひび割れ抑制効果の解析精度を検討した。

### 3.2 橋脚躯体と計測位置

配置鋼材の種類と鉄筋比を表-8に示す。また、3H橋脚躯体と計測位置を図-11に、計測器の配置を図-12に示す。中空断面橋脚の橋軸直角方向幅は8.5m、高さ7.0m、壁厚さ1mである。計測器設置位置は、リフト高さ5.4mの中間2.7m位置であり、スパイラルカラムの間である。水平方向には帯鉄筋に拘束され、鉛直方向には軸方向鉄筋とH形鋼に拘束されている。

### 3.3 解析モデルと解析方法

解析では、RCモデルと鉄筋要素のない無筋モデルの解析を行った。拘束圧依存性を表す双曲線式のパラメータは $\epsilon_f / \epsilon_0 = 0.05$ とし、拘束圧依存パラメータは標準的と考えられる $a=5$ とした。解析条件を表-9に示す。圧縮強度、ヤング係数と材齢の関係はコンクリート標準示方書<sup>6)</sup>に準拠した。第1リフト解析モデルを図-13に、解析に用いた膨張ひずみの特性を図-14に示す。解析モデルでは橋軸直角方向と鉛直方向の鋼材をモデル化しているが、スパイラル筋はモデル化していない。膨張ひずみは、壁厚がマッシュで膨張ピークが材齢2日以降に遅れることを考慮して設定している。

### 3.4 計測結果と解析結果

温度測定結果を図-15に示す。打設温度は16°C、ピーク温度は材齢2.5日で42.2°Cであった。コンクリートひずみ測定結果と解析結果を図-16に示す。測定した橋軸直角方向のピークひずみは $238 \times 10^{-6}$ 、橋軸方向のピークひずみ（壁厚方向）は $457 \times 10^{-6}$ である。鉛直方向のピ

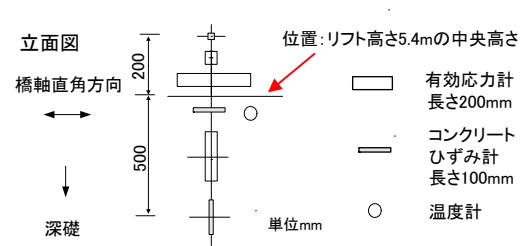


図-12 計測器の配置（壁厚さの中心）

表-9 解析条件

設定定数	
コンクリート	断熱温度上昇特性 $Q_{\infty} 56.7$ , $\gamma 0.646$ 打設温度 16°C, 圧縮強度 $f'_c(28) 24\text{N/mm}^2$ 有効ヤング係数補正係数 $\phi$ : 材齢 2.0 日まで 0.34, 材齢 5 日以降 1.0, その間を線形補間 ヤング係数 $E(28) 23\text{kN/mm}^2$
	熱伝導率 2.7 W/m°C, 比熱 1.1kJ/kg°C 単位体積質量 2400 kg/m³ 線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/\text{°C}$ 熱伝達率: 14W/m²°C
	ヤング係数 206kN/mm² 線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/\text{°C}$
鋼材	ヤング係数 206kN/mm² 線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/\text{°C}$
深礎	ヤング係数 20kN/mm² 線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/\text{°C}$

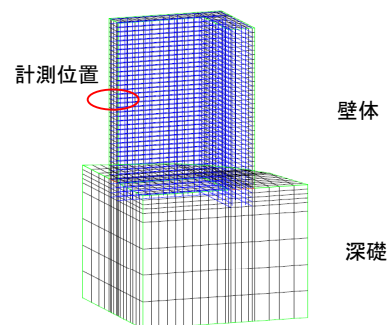


図-13 解析モデル（第1リフト、1/4モデル）

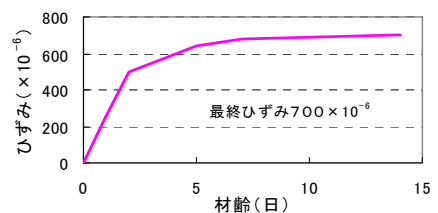


図-14 解析に用いた膨張ひずみ

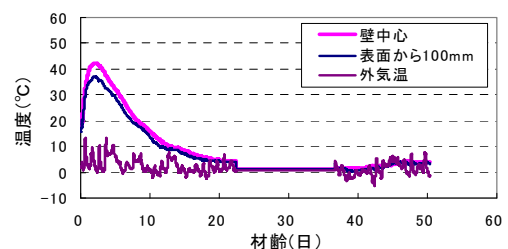


図-15 温度測定結果

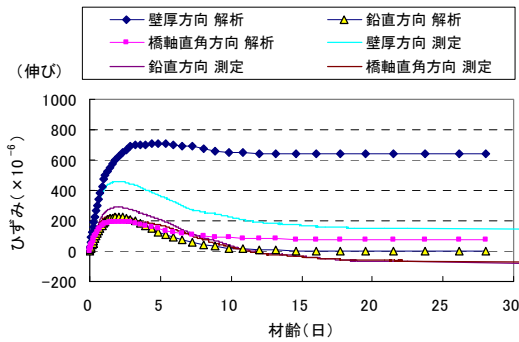


図-16 コンクリートひずみ測定結果と解析結果

ークひずみは  $291 \times 10^{-6}$  である。壁厚方向に比べて拘束の大きい橋軸直角方向、鉛直方向のひずみは小さい。3H橋脚構造は、中間帯鉄筋の役割をスパイラルカラムが受け持っており、壁厚方向の膨張ひずみもこの拘束を受けて測定値は解析結果より小さい値である。

有効応力計による応力の測定結果と解析結果を図-17に示す。橋軸直角方向応力の測定結果では、 $-0.69 \text{ N/mm}^2$ の圧縮応力が導入された。

解析されたコンクリートひずみのピーク値(図-16)は、橋軸直角方向で  $195 \times 10^{-6}$ 、橋軸方向(壁厚方向)で  $709 \times 10^{-6}$ 、鉛直方向で  $224 \times 10^{-6}$  である。図示していないが、無筋モデルでの橋軸直角方向のコンクリートひずみ解析値のピーク値は  $334 \times 10^{-6}$  であり、RCモデルはこの0.58倍の大きさになった。コンクリート応力解析結果を図-18に示す。橋軸直角方向応力の、RCモデルの解析値は、 $-0.49 \text{ N/mm}^2$  となり無筋モデルの  $-0.23 \text{ N/mm}^2$  より測定値  $-0.69 \text{ N/mm}^2$  (図-17) に近く、RCモデルの圧縮応力ピーク値の大きさは無筋モデルの2.1倍である。以上のことから、本構造物のような鋼材量の多い構造物の解析では、膨張ひずみを与える場合には鋼材を考慮した解析モデルを用いるなど、鋼材による拘束に配慮した検討が必要である。

鉄筋比の大きい中空橋脚において、膨張材を用いたリフトでのひずみの状況と圧縮力導入を3次元的に計測し、実際にもひび割れ発生を抑制することができた。また、鋼材を考慮した解析モデルを用いて膨張材の効果を精度よく表せ、ひび割れ抑制効果を検討できることを示した。

#### 4. まとめ

本実験および計測により、次の結果が得られた。

- (1) 鉄筋比を変化させたRC試験体を用いた実験において、鉄筋拘束の膨張ひずみに及ぼす影響を、RC解析モデルを用いて精度よく表すことができた
- (2) 鋼材量の多い高橋脚に膨張コンクリートを適用し、測定結果を良好に解析できたことで、RC解析モデルを用いた場合の本解析手法の有効性が示された

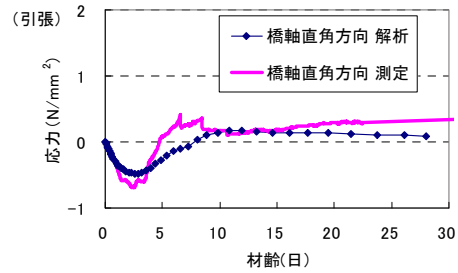


図-17 有効応力測定結果と解析結果

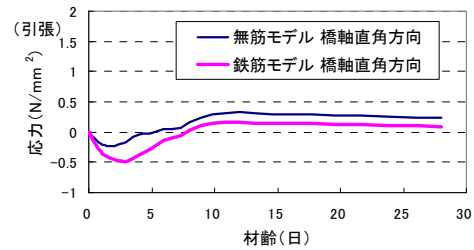


図-18 コンクリート応力解析結果

- (3) 膨張コンクリートを打設した鋼材量の多い構造物の挙動を精度良く予測することにより、効果的なひび割れ抑制対策をとることができる

謝辞 本検討を行うに当たり、国土交通省中国地方整備局三次河川国道事務所のご指導を賜ったことに深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 三谷裕二, 谷村 充, 松本健一, 佐竹紳也: 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, 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RC梁の膨張収縮挙動と解析手法の適用, 土木学会第64回年次学術講演会講演概要集, V, pp.851-852, 2009.9
- 5) 東 邦和, 川口昇平, 桑原昭浩, 石川庄嗣: 膨張材を適用した3H工法高橋脚の膨張収縮挙動とひび割れ抑制効果, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, V, pp.1327-1328, 2010.9
- 6) コンクリート標準示方書設計編, 土木学会, pp.341-342, 2007年制定