

論文 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の検討

東 邦和*1・中村 敏晴*2・増井 仁*3・梅原 秀哲*4

要旨：膨張コンクリートの解析手法として、3次元 FEM 解析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手法の適用性を検討した。基準となる無拘束膨張ひずみの大きさを実験より求めた。壁厚さの異なる壁体モデルの解析に適用し、膨張ひずみの大きさを変えて応力解析値の変動範囲を得た。またボックスカルバート構造物のひずみと応力の計測結果と解析値を比較して、双曲線式の低減パラメータの値と応力解析値の変動範囲と精度を検討した。

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, ひび割れ

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ブ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。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。温度履歴を与えた拘束膨張試験を行い、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⁾。

本論文では解析モデルに上記の方法を適用する場合に、要素に発生する拘束応力に応じて膨張量を低減する手法に適合する膨張ひずみの大きさを膨張試験により検討した。

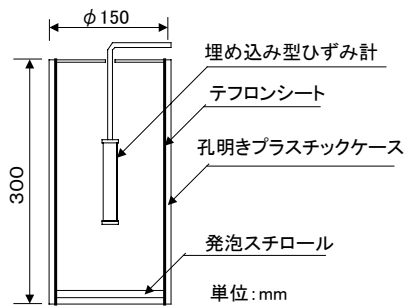


図-1 無拘束試験装置

次に拘束応力と低減率の関係をパラメトリックに解析し、その範囲を検討した。またボックスカルバート構造物に適用して、計測結果と比較してその精度を検討したものである。

2. 膨張ひずみ測定試験方法

膨張ひずみの大きさを検証するために、実験室内での無拘束膨張試験と拘束膨張試験によって膨張性状を調べた。膨張量はコンクリートの温度変化に影響されることから、温度条件を設定した温度制御室における試験を行った。温度条件は、実構造物を想定した温度履歴を FEM 解析により計算して与えた。装置の形状を図-1、図-2に示す²⁾。

コンクリートの使用材料と配合を表-1、表-2に示す。セメントは普通ポルトランド

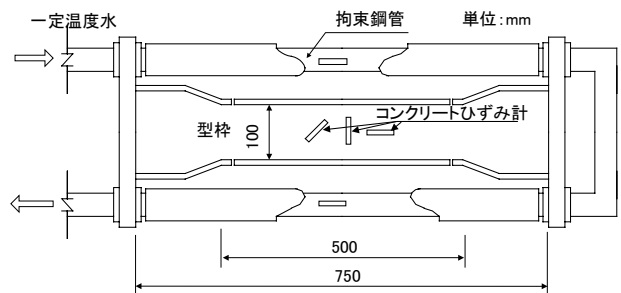


図-2 拘束試験装置

*1 (株)奥村組 技術研究所 材料・LCE グループ 博 (工) (正会員)

*2 (株)奥村組 技術研究所 材料・LCE グループ

*3 (株)奥村組 技術研究所 環境グループ

*4 名古屋工業大学教授 大学院工学研究科都市循環システム工学専攻 Ph.D. (正会員)

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:2.62 g/cm ³ ，吸水率:1.04% |
| 粗骨材 | 岩瀬産碎石，Gmax20mm，表乾密度 2.66 g/cm ³ ，吸水率:0.59% |
| 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

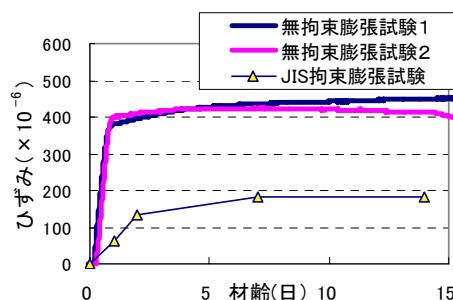
| 配合名 | 水結合材比 (%) | 細骨材率 (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | | AE 減水剤 (kg/m ³) |
|---------|-----------|----------|-------------------------|--------|-------|-------|-------|-----------------------------|
| | | | 水 W | セメント C | 膨張材 E | 細骨材 S | 粗骨材 G | |
| 膨張 (NE) | 55 | 43.8 | 166 | 282 | 20 | 796 | 1036 | 0.981 |

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。ここでは膨張材を添加しないコンクリートを NP，添加したものを NE と呼ぶ²⁾。

3. ひずみ測定結果

3.1 温度一定無拘束試験

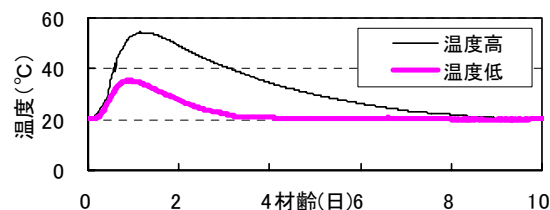
養生温度 20℃一定膨張試験のひずみ計測結果 (2 試験体) を図－3 に示す。NE の無拘束膨張ひずみのピークは材齢 1.07 日で 401×10^{-6} および 380×10^{-6} が得られた，参考に JIS 拘束膨張試験の結果を示す。最大値は 184×10^{-6} である。



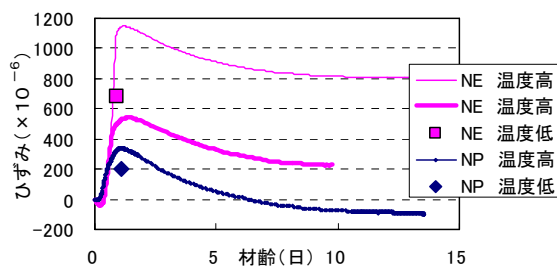
図－3 ひずみ測定結果 (養生温度 20℃一定)

3.2 温度履歴無拘束試験

温度履歴ピーク値 55℃ (高)，35℃ (低) を与えた試験結果を示す。各試験体は設定した温度履歴に追従した。温度履歴の測定値を図－4 に示す。無拘束膨張試験体のひずみ計測結果 (5 試験体) を図－5 に示す。本計測ひずみは温度ひずみを含んでいる。膨張材を添加した NE (高) の膨張ひずみピークは 1147×10^{-6} (材齢 1.21 日) および 542×10^{-6} (材齢 1.42 日) が得られた。膨張ひずみの大きさはばらついている。温度低の膨張ひずみピークは 677×10^{-6} (材齢 0.92 日) である。図中にピークを記号で示す。膨張材のない NP の結果では温度高のひずみピークは 340×10^{-6} (材齢 1.10 日) である。温度低のピーク値は 199×10^{-6} (材齢 1.08 日) であり，図中にピークを記号で示す。膨張ひずみは養生温度が高いほど大きいことと¹⁾，無拘束では方向に



図－4 温度履歴測定結果



図－5 無拘束ひずみ測定結果 (温度履歴)

よる膨張量のばらつきが拡大されているとも考えられる。その結果温度履歴を与えた無拘束ひずみの測定では，ピーク値のばらつきが大きい結果となっていると考えられる。

3.3 温度履歴拘束試験

拘束試験装置による拘束直角方向の膨張ひずみの大きさを測定した。拘束試験装置の諸元を表－3 に示す。拘束度は 2 種類であり，温度履歴

歴（高）を与えている。NE の拘束直角方向のひずみピーク値測定結果（4 試験体）を図-6 に示す。いずれも $800 \sim 950 \times 10^{-6}$ の範囲にある。実験の結果では、拘束直角方向へのポアソン効果の影響は明確な傾向は得られていない。

無拘束膨張ひずみの最大値は無拘束実験結果ではばらつきが大きい最大 1100×10^{-6} 程度の値が得られ、拘束試験体では最大膨張ひずみの値は 900×10^{-6} 付近の値が得られた。これらの値には温度ひずみが含まれており、温度履歴の影響を受けている。ここで検討する解析モデルの壁厚に対して本検討では、温度膨張ひずみを差し引いた膨張材によるひずみを 700×10^{-6} と設定し、解析に用いる無拘束膨張ひずみとした。

4. 膨張ひずみの大きさと発生応力の検討

4.1 解析モデルとケース

実験により得られた膨張ひずみを用いて解析モデルによる検討を行う。解析ケースを表-4 に示す。温度および応力履歴の解析モデルを図-7 に示す。解析条件を表-5 に示す。解析モデル小の壁厚は、標準示方書のマスコンクリートの壁厚 500mm より設定しており³⁾、本解析結果ではピーク温度は前述の温度低より高い。また、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。

4.2 解析定数

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³⁾に準拠した。有効ヤング係数補正係数 ϕ は表-4 に示す値を用いた。解析に用いた膨張ひずみの拘束圧による低減率を図-8 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

表-3 拘束試験装置の諸元

| 拘束 | 拘束鋼管（各4本） | コンクリート断面積 |
|-----|--|-----------------------|
| 大*1 | 外径 42.7mm 内径 26.7mm 合計断面積 3488mm ² | 10,000mm ² |
| 小*2 | 外径 42.7mm 内径 39.4mm 合計断面積 851mm ² | |

*1 拘束度 0.78 (各々ヤング係数比 10 の場合)

*2 拘束度 0.46 JIS 原案準拠

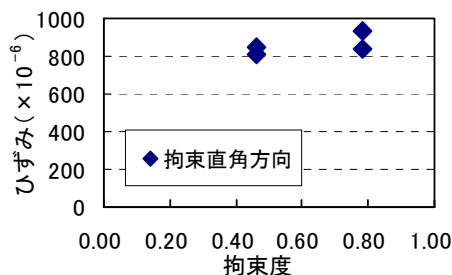


図-6 拘束直角方向ひずみ測定結果（温度履歴）

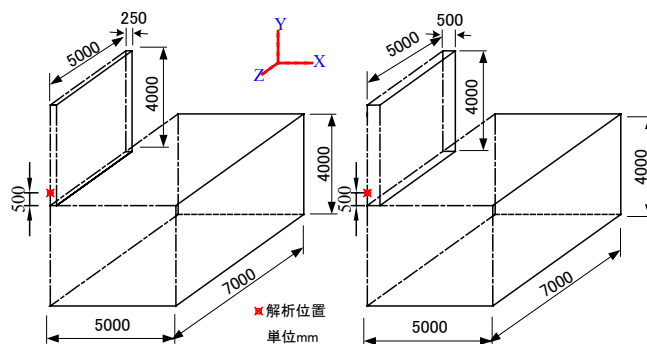


図-7 解析モデル（1/4モデル）小および大

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)

表-4 解析ケース

| 構造 | 拘束圧依存性とヤング係数補正係数 | 膨張ひずみ | |
|--|--|-------|----------------------|
| 0.5 m × 10.0 m × 4.0 m 縦筋 D19@100, 横筋 D13@100 | $\varepsilon_f / \varepsilon_0 = 0.05$ $a = 1, 5$ $\phi = 0.34$ (壁厚 0.5m 材齢 1.26 日まで) | × | 184×10^{-6} |
| 1.0 m × 10.0 m × 4.0 m 縦筋 D25@100, 横筋 D19@100 | $\varepsilon_f / \varepsilon_0 = 0.05$ $a = 1, 5$ $\phi = 0.34$ (壁厚 1.0m 材齢 1.54 日まで) | | 700×10^{-6} |

ここでは双曲線パラメータ $\varepsilon_f/\varepsilon_0=0.05$ で一定とし、 $a=1, 5$ の2ケースを解析した。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無拘束膨張ひずみ $\varepsilon_0=700 \times 10^{-6}$ および比較のために JIS 拘束膨張ひずみ 184×10^{-6} を用いて解析結果を比較した。 ε_f の設定は、 ε_0 が 700×10^{-6} では ε_f は 35×10^{-6} であり、拘束実験結果における拘束圧と軸方向ひずみの大きさの範囲から設定した²⁾。解析に用いた膨張ひずみを図-9に示す。

4.3 解析結果

温度解析結果を図-10に示す。モデル小と大の壁の長さ方向(Z方向)応力の解析結果を図-11, 12に示す。モデル小では温度ピーク 47°C 、圧縮応力ピーク値は膨張ひずみ 184×10^{-6} 、 $a=1$ の場合に、 -0.47N/mm^2 (材齢 1.26 日)、 700×10^{-6} 、 $a=1$ では -1.24N/mm^2 (材齢 1.54 日) の結果となった。モデル大では温度ピーク 56°C であり、同様に -0.86N/mm^2 (材齢 1.54 日)、 -1.61N/mm^2 (材齢 1.54 日) である。

本解析では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いることから、 184×10^{-6} と 700×10^{-6} の膨張ひずみの解析結果では、値は異なるが傾向に極端な違いはないことが分かる。ただし、壁厚方向などの無拘束に近い膨張ひずみの解析には 700×10^{-6} のひずみの大きさが必要である。

5. ボックスカルバートへの適用

5.1 計測結果

適用した構造物は、底版厚さ 1.2m、側壁厚さ

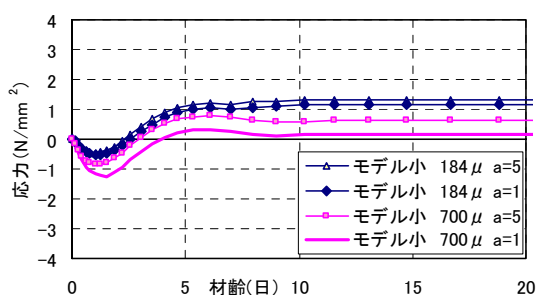


図-11 応力解析結果 (壁長さ方向モデル小)

表-5 解析条件

| 項目 | 使用値 |
|---------------|------------------------------------|
| 初期温度 (°C) | 20 |
| 比熱 (kJ/kg°C) | 1.15 |
| 熱伝導率 (W/m°C) | 2.70 |
| 密度 (kg/m³) | 2300 |
| 熱伝達率 (W/m²°C) | 14 (型枠面) |
| 断熱温度上昇式 | $Q_\infty=46.0 \quad \gamma=1.425$ |

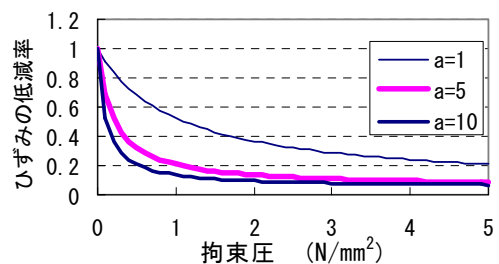


図-8 膨張ひずみの拘束圧による低減率

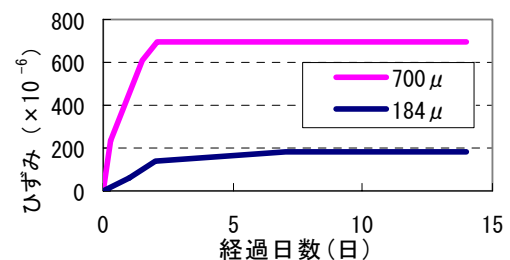


図-9 解析に用いた膨張ひずみ

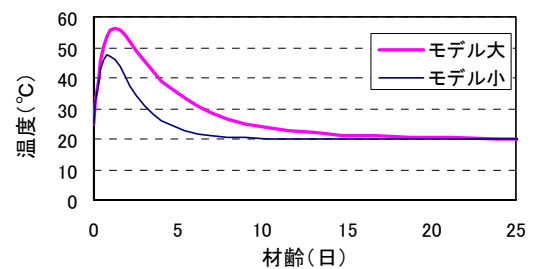


図-10 温度解析結果

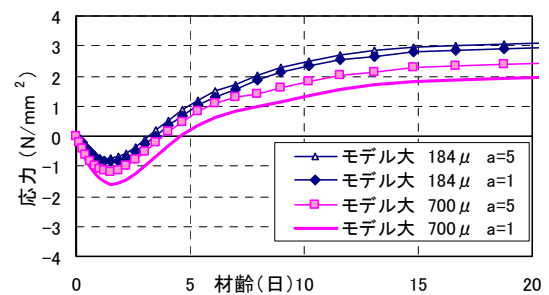


図-12 応力解析結果 (壁長さ方向モデル大)

0.9m, 上床版厚さ 1.0m のボックスカルバートである。膨張コンクリートは、普通ポルトランドセメントを用い水結合材比 56.5%, 単位セメント量 246kg/m^3 , 膨張材量 30kg/m^3 (通常添加型タイプ R) を使用した。ボックスカルバートの施工ブロックの膨張材を用いた NE および膨張材のない NP のそれぞれの打設温度は 20°C , 23°C , ピーク温度は 54°C , 60°C である。

計測断面の計器設置位置を図-13 に示す。ひずみ計により計測したコンクリートひずみを図-14 に示す。NE は 314×10^{-6} , NP は 112×10^{-6} の膨張ひずみを示した。有効応力計により計測した応力を図-15 に示す。NE では、圧縮ピークは -0.82N/mm^2 となり、引張側に移行して 0.86N/mm^2 でひび割れが生じて応力が変動した。NP の応力の圧縮ピークは -0.34N/mm^2 となり、引張側で 0.85N/mm^2 になった時点で同様にひび割れが生じ応力が変動した。最終のひび割れ本数は NP で 3 本が NE では 1 本に減少した。

5.2 解析条件と結果

解析条件を表-6 に示す。解析には無拘束膨張ひずみ (最終 700×10^{-6}) を用いた。低減率はパラメータ $\varepsilon_f / \varepsilon_0 = 0.05$ 一定, $a=1, 5, 10$ の 3 ケースとした。解析モデルを図-16 に示す。

温度の解析結果を図-17 に示す。壁の中心温度のピークは NE で 49.3°C (材齢 1.26 日), NP で 52.3°C (材齢 1.26 日) であり、測定値より $5 \sim 7^\circ\text{C}$ 低い値となった。

壁厚方向ひずみの解析結果を図-18 に示す。ひずみピークは NP で 359×10^{-6} (材齢 1.26 日), NE では解析ケース 700×10^{-6} , $a=1$ で 1055×10^{-6}

表-6 解析条件

| 項目 | 入力値 |
|---------------------------------------|-------------------------------|
| 初期温度 ($^\circ\text{C}$) | 20 (NE), 23 (NP) |
| 比熱 ($\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$) | 1.15 |
| 熱伝導率 ($\text{W/m}^\circ\text{C}$) | 2.70 |
| 密度 (kg/m^3) | 2300 |
| 熱伝達率 ($\text{W/m}^2^\circ\text{C}$) | 6 脱型後 10 |
| 断熱温度上昇式 | $Q_\infty=46.0, \gamma=1.425$ |

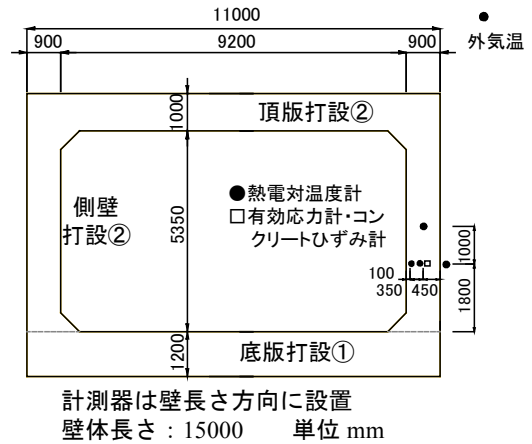


図-13 計測断面の計器設置位置

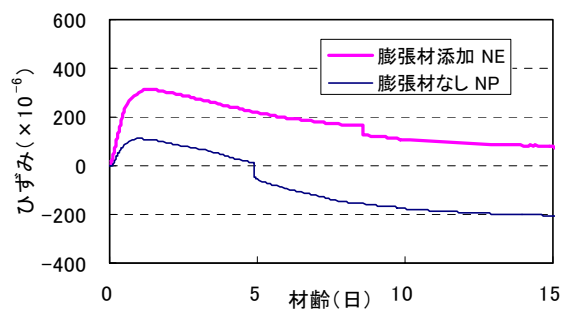


図-14 コンクリートひずみの計測値

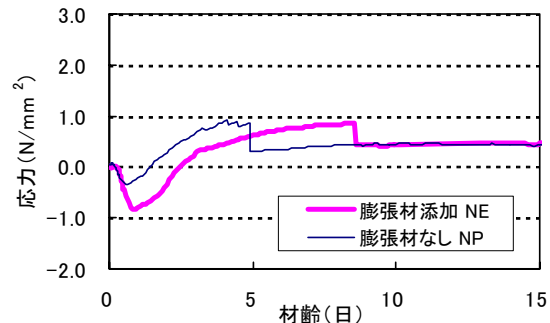


図-15 コンクリート応力の計測値

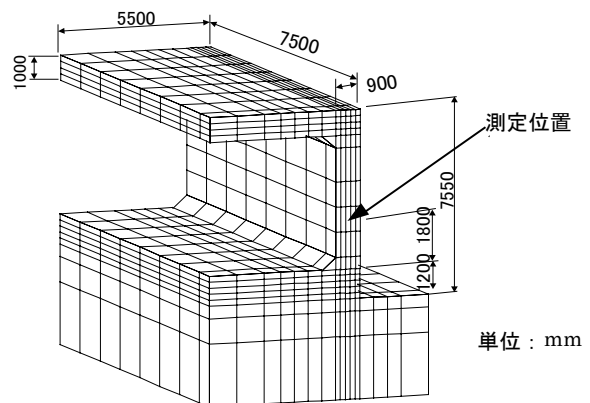


図-16 解析モデル (1/4 モデル)

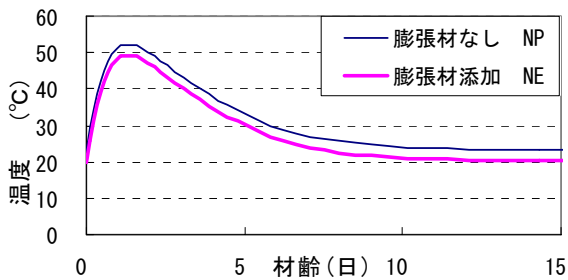


図-17 温度解析結果

(材齢 2.16 日)である。NE では無拘束膨張試験の膨張ひずみに近似した大きさとなった。壁厚方向は応力によるひずみの低減がほとんどないので、低減パラメータの違いによる影響は小さい。

壁長さ方向ひずみの解析結果を図-19 に示す。ひずみピークは NP で 140×10^{-6} (材齢 1.42 日), NE では解析ケース 700×10^{-6} , $a=5$ で 326×10^{-6} (材齢 1.96 日)である。実測値が 314×10^{-6} であるので、 $a=5$ の結果が近い値を示した。

壁長さ方向の応力解析結果を図-20 に示す。圧縮応力ピークは NP で -0.46 N/mm^2 (材齢 1.26 日), NE では解析ケース 700×10^{-6} , $a=1$ で -0.98 N/mm^2 (材齢 1.77 日)である。引張側最終値は NP で 2.01 N/mm^2 (材齢 14.3 日), NE では解析ケース 700×10^{-6} , $a=1$ で 1.40 N/mm^2 (材齢 14.3 日)である。

NP の圧縮ピーク解析値は実測値 -0.34 N/mm^2 より少し大きい値となった。NE では拘束が大きい壁長さ方向での低減パラメータの違いによる影響は大きい。NE の圧縮ピーク解析値は実測値 -0.82 N/mm^2 と比較すると $a=1$ と $a=5$ の中間的な値が実測値と近い結果を示した。

6. まとめ

提案している膨張材の解析手法に用いる設定値を検討した。膨張ひずみの実験結果から無拘束膨張ひずみの大きさとして 700×10^{-6} の値を設定した。解析モデルにより検討した結果、無拘束膨張ひずみとして解析に適用可能な値であるといえる。また低減式の設定値をパラメトリックに解析した結果、設定値のおよその範囲を

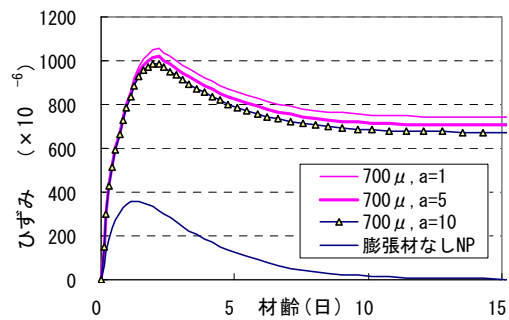


図-18 壁厚方向のひずみ解析結果

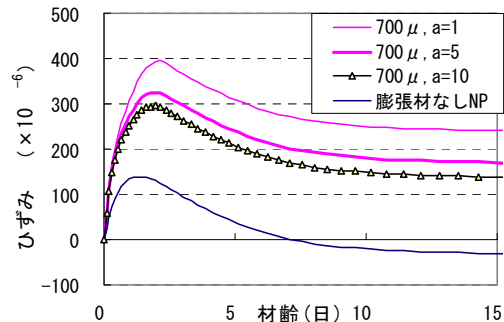


図-19 壁長さ方向のひずみ解析結果

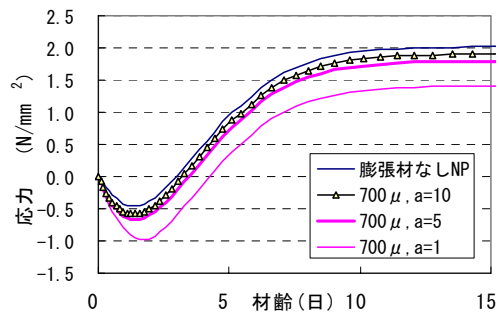


図-20 壁長さ方向の応力解析結果

捉えることができた。これらの結果から本手法により膨張コンクリートを適用した構造物の収縮低減効果を解析できることを確認した。

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：膨張材を用いた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に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1277-1282，2006.7
- 3) コンクリート標準示方書 施工編，2002