

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2）

－膨張履歴の解析手法の検討－

東 邦和* 中村敏晴* 増井 仁*

1. はじめに

膨張コンクリートをマッシュなコンクリート構造物にひび割れ防止対策として適用する場合には、その効果の大きさを適切に評価することが必要である。膨張材による収縮低減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する場合に用いることのできる手法は確立されていないのが現状である。

著者らは膨張コンクリートの応力履歴を解析し、収縮低減効果を検討することを目的として、これまでにマスコンクリートを模擬した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材による膨張ひずみ（JIS 拘束膨張試験および無拘束膨張試験による膨張率）を与える方法を提案している³⁾⁴⁾。ここでは構造物中の膨張ひずみは、拘束に応じて3次的に変化し、同一要素でも拘束方向によって自由膨張に近い大きいひずみから拘束による小さいひずみとなることを実験により明らかにする。次に、解析で与える膨張ひずみの大きさを JIS 拘束膨張試験のものと無拘束膨張試験によるものの2種類を用いて壁状構造物モデルと拘

束試験体モデルに適用して、膨張材の膨張履歴の解析手法を検討するものである。

2. 拘束膨張試験

2.1 試験方法

膨張コンクリートの膨張量は拘束度およびコンクリートの温度変化に影響されることから、拘束度と温度履歴を設定した試験を行った。拘束試験装置を図-1に示す。拘束試験装置の拘束鋼管は、一定温度水により温度変化に起因するひずみを発生させず、コンクリートの長さ変化の拘束から生じるひずみを測定できるものである。試験体中にひずみ計を埋設し、拘束方

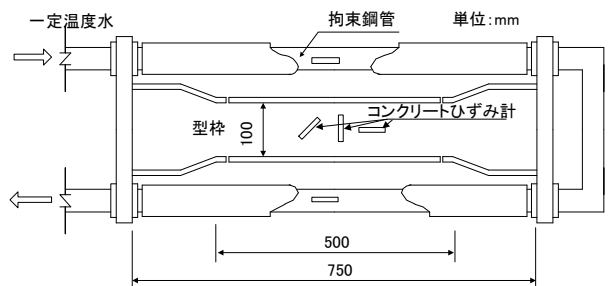


図-1 拘束試験装置

表-1 使用材料

使用材料	種類・諸元
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	岩瀬産砕石、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	石灰系（構造用） 低添加型 密度:3.16g/cm ³ 、粉末度 3450cm ² /g

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

*技術研究所

向および 45° 方向、直角方向のコンクリートひずみを測定した^{3) 4)}。コンクリートの使用材料を表-1に、配合を表-2に示す。拘束試験装置の拘束の大きさは2水準とした。拘束試験装置の諸元を表-3に示す。試験ケースを表-4に示す。

2.2 拘束膨張試験結果

温度可変室内に置いた試験体の温度履歴³⁾のピーク値は 55°Cである。試験ケース1、2の拘束鋼管に生じたひずみを図-2に示す。拘束大、小の最大膨張ひずみはそれぞれ 43.8×10^{-6} 、 100.8×10^{-6} が得られた。ひずみに拘束鋼管の合計断面積とヤング係数を乗じ、コンクリート断面積で除して求めたコンクリート応力を図-3に示す。拘束大、小の圧縮応力ピークはそれぞれ -3.21N/mm^2 、 -1.80N/mm^2 が得られた。埋込んだコンクリートひずみ計による実ひずみを図-4に示す。拘束方向のひずみは、拘束大、小でそれぞれ 84.8×10^{-6} 、 183.6×10^{-6} が得られた。この値はそれぞれ拘束鋼管から得られたものより 1.9 倍、1.8 倍である。拘束鋼管より得られたひずみは全体の平均ひずみであるが、コンクリートひずみ計は長さ 30mm で部分的な値であり、硬化初期のひずみ値の精度が良くないことから違いが生じたものと考えられる。拘束直角方向のひずみは、拘束大、小ともに $800 \sim 950 \times 10^{-6}$ の値が得られた。この値は、無拘束膨張試験のひずみに近い大きさである²⁾。コンクリートのひずみは拘束方向と拘束直角方向に大きな違いがあり、45° 方向は中間の値を示した。拘束の方向によって膨張ひずみの大きさが異なることが確認された。

3. 壁体構造物モデルの規模による解析精度の検討

3.1 解析方法

膨張材無添加のコンクリート (NP) の有効ヤング係数の補正係数 ϕ を一定値で与え、膨張ひずみを要素最小主応力 (圧縮拘束圧) で低減して付加する方法を行った。本解析では、与える膨張ひずみを JIS 拘束膨張試験³⁾ による膨張ひずみとした。膨張ひずみの最大値は 184×10^{-6} である。解析モデルを図-5、図-7に示す。マッシュな RC スラブの上に打設された壁体を模擬している。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、土木学会コンクリート標準示方書式⁵⁾を基本とした。解

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

表-4 試験ケース

試験ケース	温度履歴	拘束	配合名
1	高 55°C	大	膨張 (NE)
2		小	

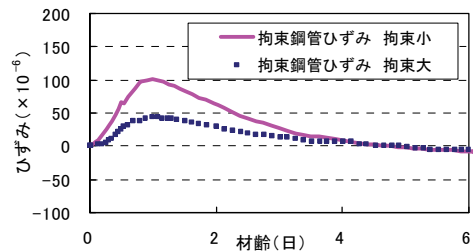


図-2 軸方向鋼管ひずみ測定結果

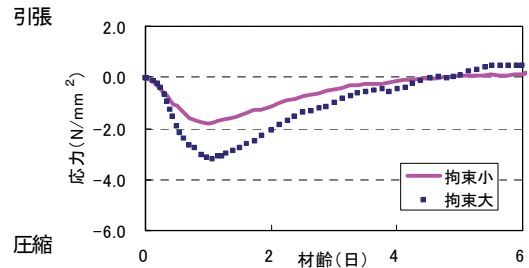
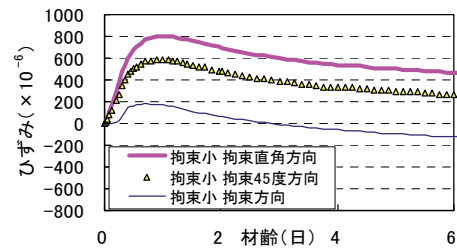
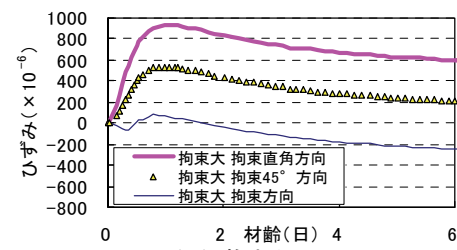


図-3 軸方向応力測定結果 (拘束大、小)



(a) 拘束小



(b) 拘束大

図-4 コンクリートひずみ測定結果

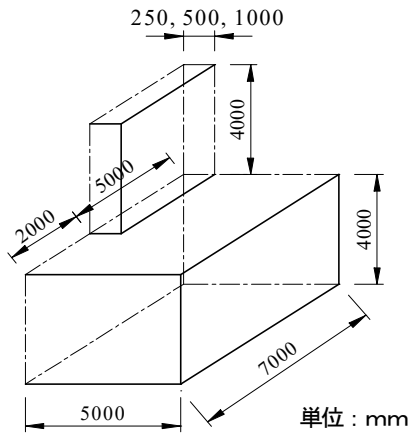


図-5 壁状構造物解析モデル (1/4 モデル)

析ケースとモデルの寸法、配筋量および有効ヤング係数の補正係数を表-5に示す。温度ピーク材齢に合わせて補正係数の低減期間を設定した。解析条件を表-6に示す。

3.2 解析モデル

本項では双曲線式を用いて、JIS 拘束膨張試験による膨張ひずみの増分を拘束圧 (要素最小主応力) に従って低減し、各解析ステップにおいて要素に与えて計算する。解析に用いた膨張ひずみの拘束圧依存性モデルを図-6に示す。双曲線式を式(1)に示す。

$$\epsilon_c = (\epsilon_0 - \epsilon_f) / (1 + a\sigma) + \epsilon_f \quad (1)$$

ここに、

ϵ_0 : JIS 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 : 拘束圧 (N/mm²)

表-5 構造物解析ケース

ケース	構造寸法	配合名	解析条件
1-1	0.5m×10.0m×4.0m	NE	φ0.34(材齢 1.26日まで)
1-2	縦筋 D19@100 横筋 D13@100	NP	
2-1	1.0m×10.0m×4.0m	NE	φ0.34(材齢 1.54日まで)
2-2	縦筋 D25@100 横筋 D19@100	NP	
3-1	2.0m×10.0m×4.0m	NE	φ0.34(材齢 1.85日まで)
3-2	縦筋 D38@100 横筋 D29@100	NP	

*材齢5日 φ1.0 間は直線補完

表-6 解析条件

項目	入力値
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/m ³)	2300
熱伝達率 (W/m ² °C)	14 (型枠面)
断熱温度上昇式	Q _∞ 46.0、γ1.425

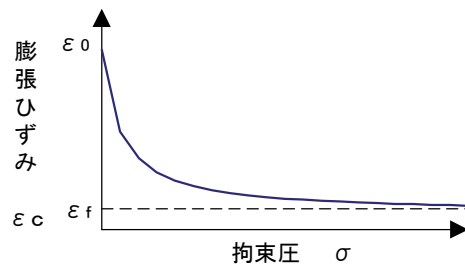


図-6 膨張ひずみの拘束圧依存性

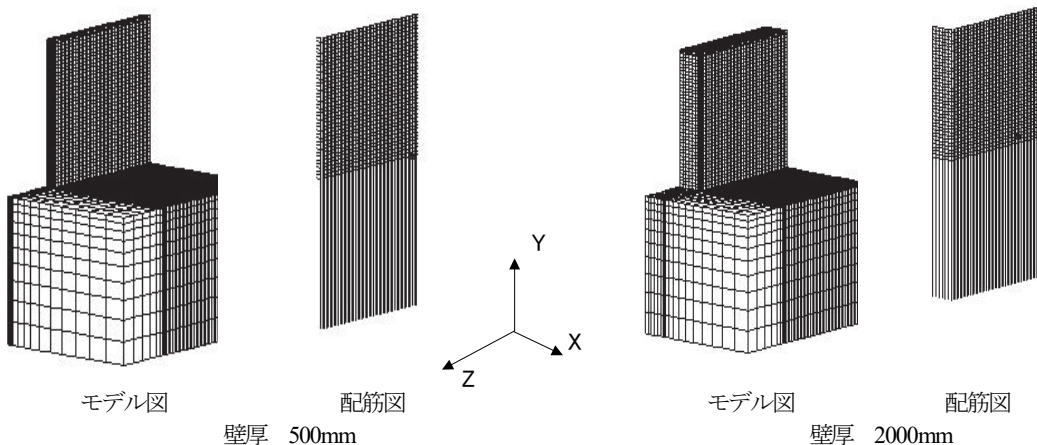


図-7 解析モデル (1/4 モデル 小、大)

ここでは膨張試験から得られた膨張ひずみを近似して双曲線パラメータを $\varepsilon_f/\varepsilon_0 = 0.05$ 、 $a = 5$ とした。また、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。モデル小（壁厚 0.5m）、モデル中（壁厚 1.0m）、モデル大（壁厚 2.0m）では、規模に合わせて配筋の量を変えている。配筋の位置はコンクリート表面から縦筋で 10cm、横筋で 5cm 入った位置にある。

3.3 解析結果

解析結果は断面中央で底版から 500mm の高さの位置で評価した。温度ピークはケース 1~3 でそれぞれ 47℃、56℃、62℃である。ケース 1~3 の応力解析結果を図-8に示す。発生最大応力はケース 1-1 NE の場合に、圧縮で-0.46N/mm²、引張最終値 1.59N/mm² となった。ケース 2-1 NE では、圧縮で-0.75N/mm²、引張で 3.20N/mm²、ケース 3-1 の NE では、圧縮で-1.02N/mm²、引張で 5.43N/mm² となった。図に示すようにケース 1、2 では、NP と比較して NE の引張応力低減が大きい。ケース 3 ではピーク温度が高く圧縮応力が大きいこと、膨張ひずみが発生する材齢に対してピーク材齢が遅いこと、および解析着目方向と膨張ひずみ低減に用いる最小主応力方向が異なってくることが理由に挙げられる。解析で

与えた膨張ひずみ 184×10^{-6} に対して、要素応力度により低減したひずみの最終値は、ケース 1~3 で、それぞれ 89.7×10^{-6} 、 84.7×10^{-6} 、 60.5×10^{-6} となった。解析より得たコンクリートの最大主応力と最小主応力（モデル小、モデル大）を図-9に示す。ここでの最小主応力とは、圧縮側の最小要素応力（解析上マイナスの値の場合は絶対値が大きい応力）をいう。モデル小では圧縮力（マイナス符号）が初期に作用しており、これによって要素の膨張ひずみが低減されている。それに直交する最大主応力は小さい値である。また、最小主応力が引張側に移行した場合は、膨張ひずみは低減しないとしている。解析で着目する応力に直行する応力が圧縮で最小主応力になってもその絶対値が小さい場合は、解析ステップにおいて要素に与える膨張ひ

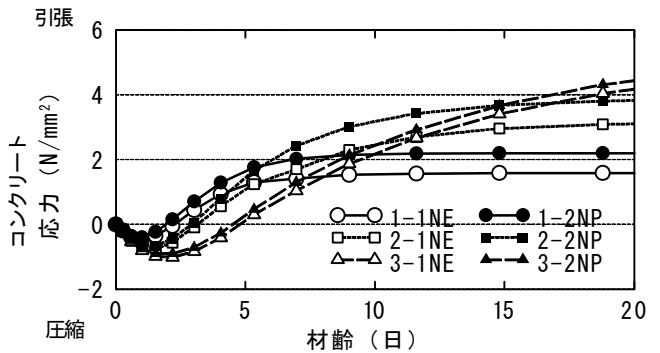
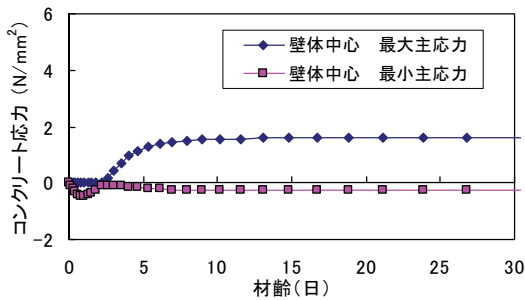
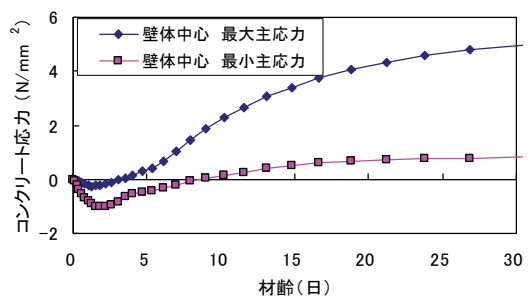


図-8 壁長さ方向応力解析結果（ケース 1、2、3）

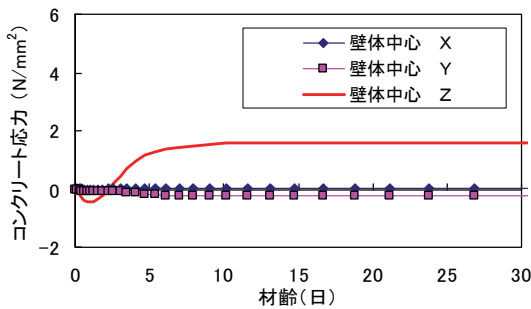


(a) モデル小

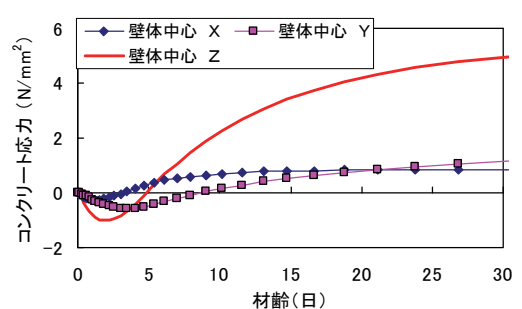


(b) モデル大

図-9 最大主応力と最小主応力（モデル小、モデル大）鉄筋有り

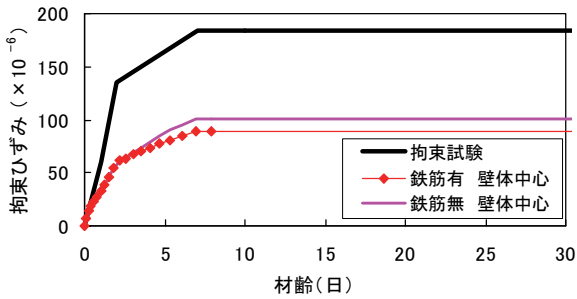


(a) モデル小

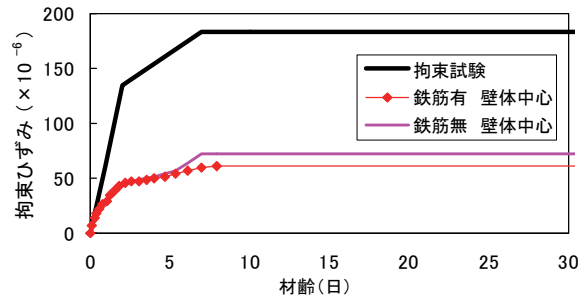


(b) モデル大

図-10 X方向（壁厚さ）Y方向（壁高さ）Z方向（壁長さ）応力、鉄筋有り



(a) モデル小 鉄筋有無



(b) モデル大 鉄筋有無

図-11 解析に与えた膨張ひずみ (拘束膨張試験) と要素応力により低減された膨張ひずみ

ひずみの低減量は小さく、着目する方向の解析応力の精度は満足されていると考えられる。また、壁の直交する X 方向 (壁厚さ) Y 方向 (壁高さ) Z 方向 (壁長さ) の 3 方向の応力度の解析結果を図-10 に示す。モデル小では、壁の長さ方向 (z 方向) の応力が圧縮から引張に移行する最小および最大主応力に相当することから、解析応力は実験で行った一軸方向の拘束膨張試験の履歴と整合していることが示された。

一方、モデル大の場合は、最小主応力が材齢 10 日程度まで圧縮側にあるので、膨張ひずみの低減が行われる。図-10 (b) に示すように、Z 方向 (壁長さ) の応力度が圧縮側から材齢 5 日で引張側に移行するが、Y 方向 (壁高さ) 方向が圧縮側で最小主応力となるために、膨張ひずみはそれによって低減される結果となり、Z 方向の解析に影響している。JIS 拘束膨張試験の膨張ひずみと要素応力により低減された膨張ひずみを図-11 に示す。鉄筋モデル化の影響については、鉄筋の有無によってコンクリートの応力履歴は大きくは変わらない。本モデルでは鉄筋は壁体の Z 方向 (壁長さ) に対しては大きく拘束しないためである。

4. 拘束試験体モデルの解析精度の検討

4.1 解析方法

本項での解析に用いた膨張ひずみの拘束圧依存性モデルは、無拘束膨張試験から得られた無拘束膨張ひずみ $\epsilon_0 = 700 \times 10^{-6}$ を用いた。双曲線パラメータは壁体の解析に用いたものと同じ $\epsilon_f / \epsilon_0 = 0.05$ 、 $a = 5$ とした。双曲線式を用いて、膨張試験による時間軸における膨張ひずみの増分をモデルの各軸方向の拘束圧に従って低減して計算する。双曲線式を式(2)に示す。

$$\epsilon_{ci} = (\epsilon_0 - \epsilon_f) / (1 + a\sigma_i) + \epsilon_f \quad (2)$$

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)

4.2 解析モデル

拘束試験体解析モデルを図-12 に示し、解析ケースと有効ヤング係数の補正係数を表-7 に示す。また、

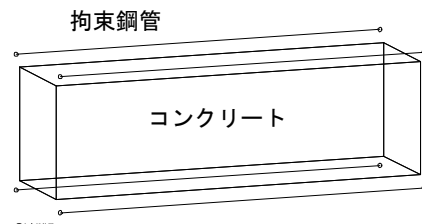


図-12 解析モデル (3 次元)

表-7 解析ケース

ケース	モデル	解析条件
1	拘束大	温度履歴と膨張ひずみを与える。 $\phi 0.73$ (材齢 1.2 日まで)*
2	拘束小	

*材齢 5 日 $\phi 1.0$ とし直線補間

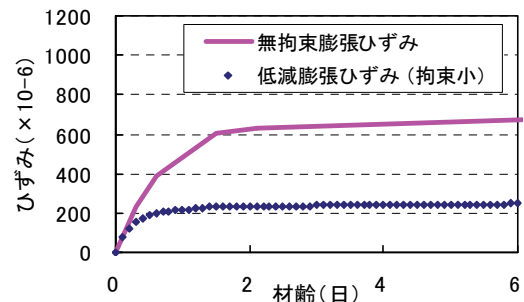


図-13 無拘束膨張ひずみと低減膨張ひずみ

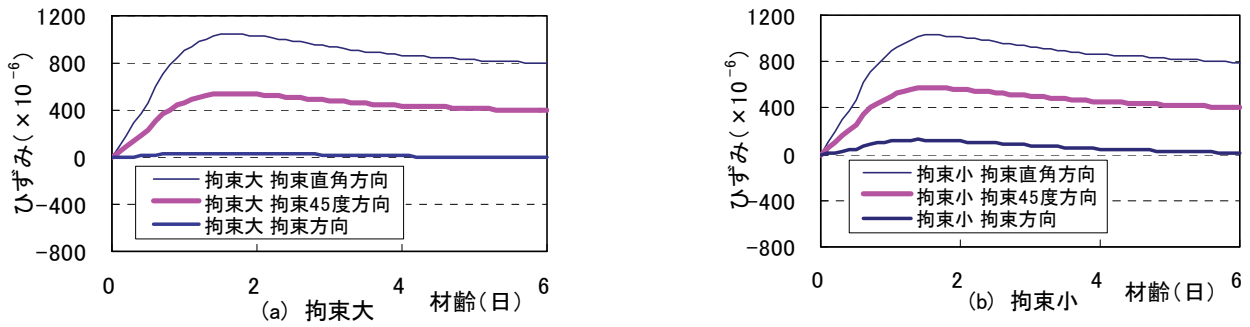


図-14 コンクリートひずみ解析結果 (拘束大、小)

壁体の解析と同様に膨張ひずみを拘束しないと考えられる引張側に移行した時のひずみ増分は低減していない。

4.3 解析結果

膨張ひずみの拘束圧依存性を考慮して与えた無拘束膨張ひずみと要素応力により低減された解析結果の膨張ひずみを図-13 に示す。膨張ひずみ低減量を無拘束 $0.0N/mm^2$ から要素圧縮応力 $3.0N/mm^2$ 程度の範囲で表すことは、温度と材齢の関係を吟味して詳細な検討が必要と考えられる。本解析では ϵ_0 に対して累加で約 270×10^{-6} と約 40% の膨張ひずみに低減された。コンクリートひずみの解析結果を図-14 に示す。拘束大および拘束小のコンクリート拘束方向ひずみ解析結果は 37.3×10^{-6} 、 124×10^{-6} である。本解析モデルでは拘束鋼管とコンクリートは同じひずみであるので、この値は拘束鋼管の測定結果 (図-2) の値に近い。拘束直角方向のひずみは拘束大小でそれぞれ 1050×10^{-6} 、 1030×10^{-6} である。この値は温度変化と膨張ひずみおよびポアソン効果を含んだものである。

有効ヤング係数補正係数 ϕ を一定値で与え、膨張ひずみを解析モデル各軸の要素応力 (圧縮拘束圧) で低減して付加する方法は、拘束が無いと考えられる方向では、無拘束膨張の値を示し現象を良く表しているといえる。一方、膨張ひずみに JIS 拘束膨張試験による膨張ひずみの値を用いた場合は、無拘束に近い状態の膨張ひずみを表現することはできないが、要素最小主応力による低減ができることから、拘束方向に配慮すれば膨張履歴の解析精度は良いと考えられる。

5. まとめ

本研究の範囲内で次の結果が得られた。

- (1) 拘束膨張試験においてひずみ計の膨張量は拘束方向に比べて、拘束直角方向では無拘束膨張量に近い値を示し、 45° 方向では中間の値を示した。
- (2) 有効ヤング係数補正係数を一定値で与え、解析プログラムで膨張ひずみを拘束に応じて低減させて、構造物の膨張履歴を計算することで膨張材の効果を検討できる。
- (3) 壁体構造物で壁厚の小さい場合は、最小主応力 (圧縮力) の方向は壁体長さ方向と一致しており、膨張ひずみ低減に良好な精度が得られるが、壁厚の大きい場合には、低減の適用に主応力の方向と低減の大きさについて検討が必要である。
- (4) 拘束試験体モデルにおいて、無拘束膨張ひずみを用いて、解析プログラムで膨張ひずみを各軸方向の要素応力 (圧縮拘束圧) により低減して、膨張履歴を表現できる。

【参考文献】

- 1) 保利彰宏、玉木俊之、萩原宏俊「膨張材を添加したコンクリートの物理的性状に関する実験的検討」、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21、No.2、pp.571-576、1999.6
- 2) 三谷裕二ほか「膨張コンクリートのマス養生温度履歴を考慮した膨張応力算定法」、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.1、pp.1141-1146、2005.6
- 3) 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研究」、奥村組技術研究年報、Vol.30、pp.51-56、2004
- 4) 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の適用性に関する研究」、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.1、pp.1147-1152、2005.6
- 5) 土木学会コンクリート標準示方書 施工編、2002