

論文 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

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 FEM 解析モデルに有効ヤング係数補正係数と要素応力に応じて低減した膨張ひずみを用いる方法の適用性を検討した。拘束膨張試験から膨張ひずみは拘束の方向と大きさにより異なり，解析モデルの要素主応力方向と膨張ひずみ低減の大きさの比較から，壁厚の薄いものでは要素主応力方向と解析方向は一致し応力履歴を精度良く表せるが，壁厚の大きい場合は低減に用いる主応力方向と解析方向の違いに配慮が必要であることを示した。また，鉄筋要素モデル化の有無による壁体長さ方向の応力への影響は小さいこと，マッシュな構造物への適用から良好な解析精度が得られることを示した。

キーワード：マスコンクリート，膨張コンクリート，膨張材，ひび割れ，温度応力解析

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。膨張コンクリートの収縮補償効果は，現場に打ち込まれたコンクリート構造物の膨張収縮に対する拘束条件によって膨張量が変化することを考慮して検討することが必要である。

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，これまでに温度履歴を与えた拘束膨張試験を行い，初期の有効ヤング係数の補正係数と拘束に応じた膨張ひずみを求めて，FEM 解析にヤング係数補正係数と膨張ひずみを与える方法を提案している³⁾。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を壁体構造物を対象にして検討し，さらにケーソン底版構造物に適用して，膨張材の収縮低減効果を検討した。

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，拘束度と温度条件を設定した試験を行った。拘束試験装置は，拘束鋼管内に一定温度の水を循環させ，拘束鋼管には温度変化に起因するひずみは発生せず，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。また，試験体中にひずみ計を埋設し，拘束方向および拘束直角方向のコンクリートひずみを測定した。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，膨張材は石灰系を使用した。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に示し，拘束試験装置を図-1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に与えた温度履歴のピーク値は 55℃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 23.1×10^{-6} , 72.5×10^{-6} が得られた。ひずみに拘束鋼管の合

*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

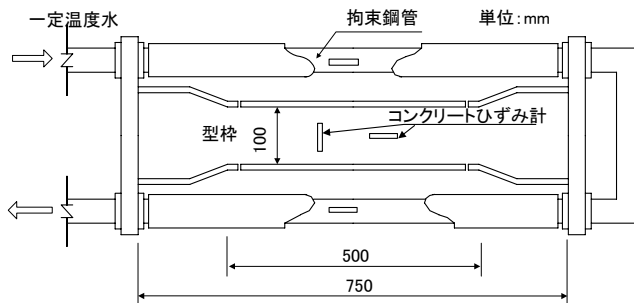
*4 名古屋工業大学教授 大学院工学研究科都市循環システム工学専攻 Ph.D. (正会員)

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，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	55	43.8	166	282	20	796	1036	0.981



図－1 拘束試験装置

表－3 拘束試験装置の諸元

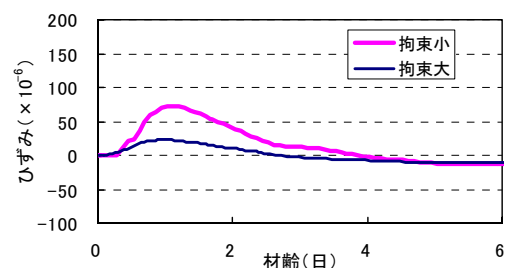
拘束	拘束鋼管（各 4 本）	コンクリート断面
大*1	外径 42.7mm 内径 26.7mm 合計断面積 3488mm ²	10,000mm ²
小*2	外径 42.7mm 内径 39.4mm 合計断面積 851mm ²	

*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℃	大	膨張
2		小	



図－2 軸方向ひずみ測定結果（拘束大，小）

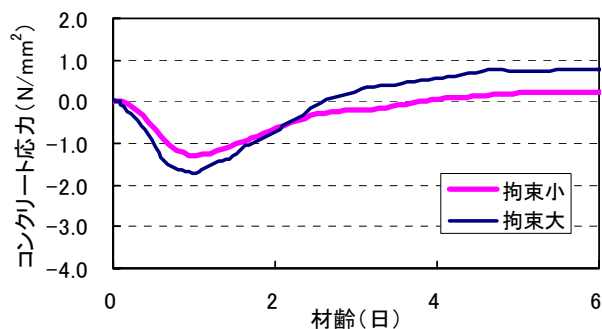
張ひずみの大きさが異なることが確認された。

3. 壁体構造物の規模による解析精度の検討

3.1 解析モデル

拘束方向と膨張ひずみの大きさを考慮して、解析において要素主応力により JIS 拘束膨張

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-1.71N/mm²，-1.29N/mm²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46.3×10⁻⁶，113.6×10⁻⁶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2.0倍，1.6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800×10⁻⁶程度の値が得られた。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),3)}。したがって，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，拘束の大きさによって膨



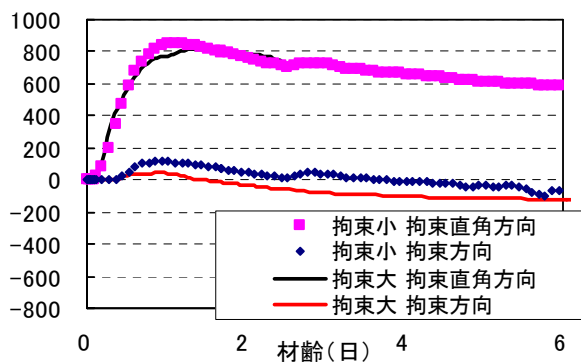
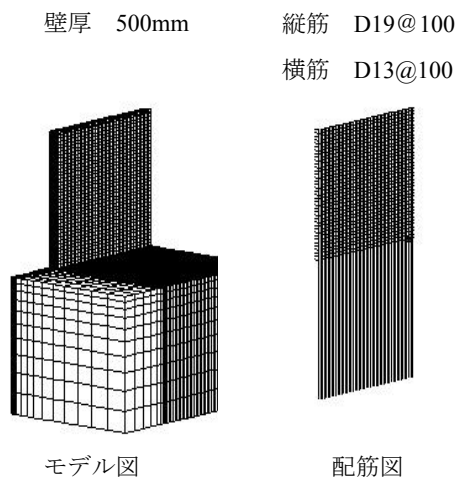
図－３ 軸方向応力測定結果（拘束大，小）

試験による基本膨張ひずみを低減する手法の検討を行なう。解析モデルを図－５に示す。モデル小（壁厚 0.5m）とモデル大（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。解析ケースを表－５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，土木学会コンクリート標準示方書式⁴⁾を基本とした。有効ヤング係数の補正係数は表－５の値を用いた。

3.2 解析方法

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。双曲線式を用いて，JIS 拘束膨張試験による時間軸における膨張ひずみの増分を拘束圧（要素最小主応力）に従って低減して計算する。双曲線式を式(1)に示す。

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_0 - \varepsilon_f) / (1 + a\sigma) + \varepsilon_f \quad (1)$$



図－４ コンクリートひずみ測定結果

表－５ 解析ケース

ケース	構造寸法	解析条件
1	0.5m× 10.0m×4.0m	φ 0.34(材齢 1.26 日まで) *
2	2.0m× 10.0m×4.0m	φ 0.34(材齢 1.85 日まで)*

*温度ピーク材齢まで，材齢 5 日 φ 1.0 とし直線補間

ここに，

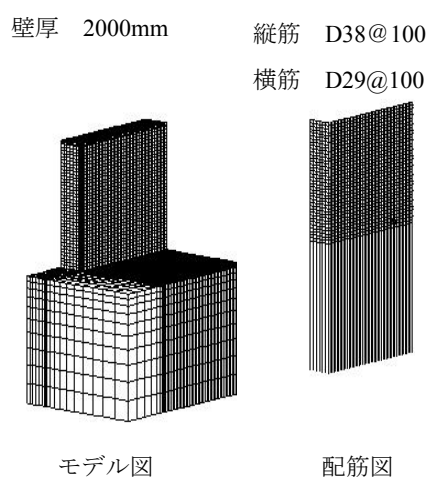
ε_0 : JIS 拘束膨張試験の膨張ひずみ

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 (要素最小主応力) (N/mm²)

ここでは拘束を変化させた拘束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

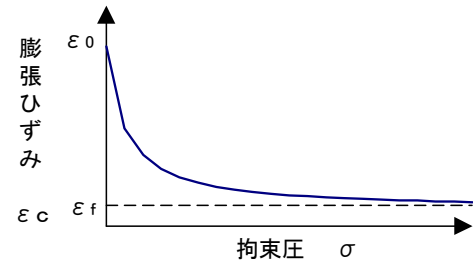


図－５ 解析モデル（1/4 モデル 小，大）

行した時のひずみ増分は低減していない。

3.3 壁体構造物の解析結果

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。解析より得たコンクリート応力の最大主応力と最小主応力（モデル小，モデル大）を図－7に示す。ここでの最小主応力とは，解析上マイナスの絶対値が大きい要素応力を示している。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，要素応力度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ことから，直交する応力が最小側になってもその絶対値が小さい場合は，ひずみの低減量は小さく，ほぼ初期の設定が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－8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主応力に相当することから，解析の状況が，実験



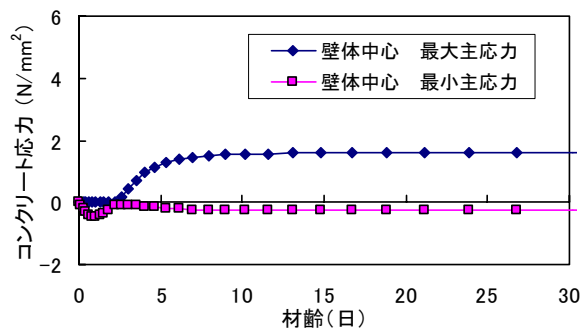
図－6 膨張ひずみの拘束圧依存性

表－6 解析条件

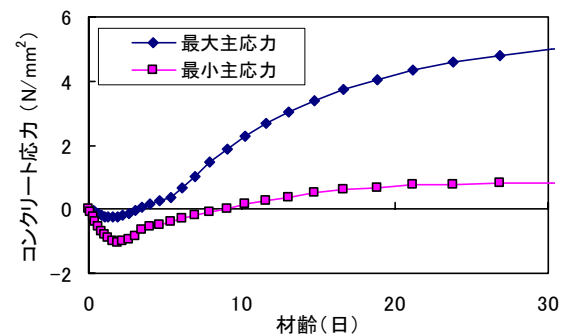
項目	入力値
初期温度 (°C)	20
比熱 (kJ/kg°C)	1.15
熱伝導率 (W/m°C)	2.70
密度 (kg/m³)	2300
熱伝達率 (W/m²°C)	14 (型枠面)
断熱温度上昇式	$Q_{\infty}=46.0, \gamma=1.425$

で行った一軸方向の拘束膨張試験³⁾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－8に示すように，Z 方向

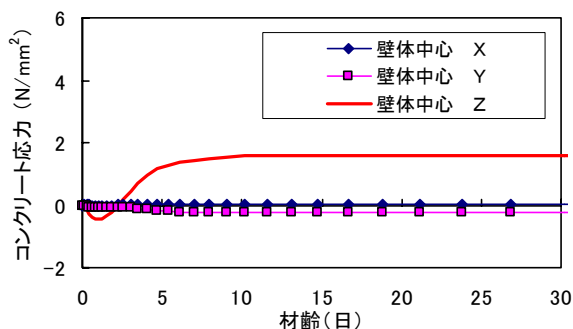


(a) モデル小

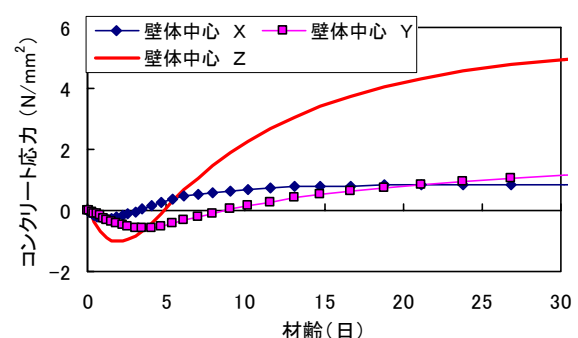


(b) モデル大

図－7 最大主応力と最小主応力（モデル小，モデル大）鉄筋有り

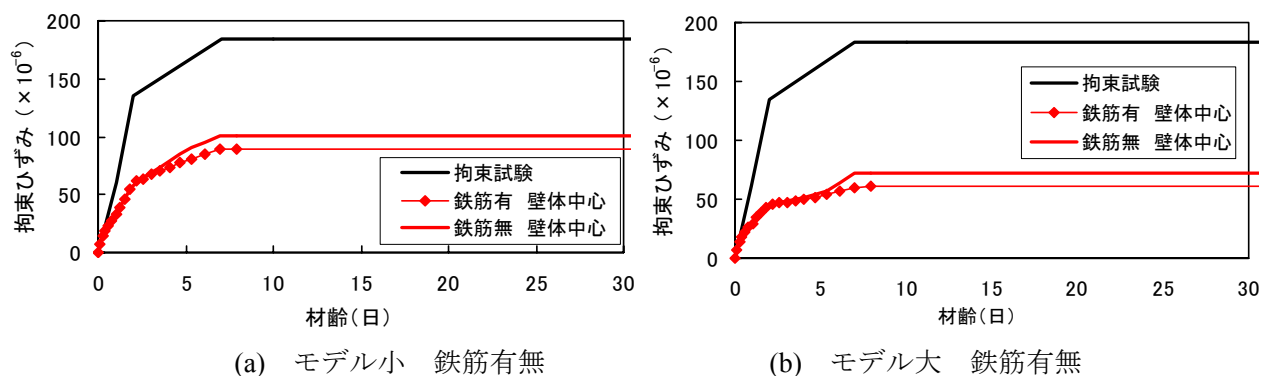


(a) モデル小



(b) モデル大

図－8 X 方向（壁厚さ） Y 方向（壁高さ） Z 方向（壁長さ）応力，鉄筋有り



図－9 基本膨張ひずみと要素応力により低減された膨張ひずみ

(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になる。JIS 拘束膨張試験の基本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－9 に示す。また、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. ケーソン構造物への適用と解析精度の検討

4.1 概要

大規模な立坑構造物の底版 (厚さ 3m) に膨張コンクリートを適用した。使用材料を以下に示す。

セメント：高炉セメント B 種 密度 3.05g/cm^3

細骨材：千葉県大栄町産山砂，栃木市鍋山町産砕砂，尻内町産砕砂の混合砂，密度 2.64g/cm^3

粗骨材：栃木県安蘇郡田沼町産，碎石，密度 2.71g/cm^3 ，Gmax 20mm

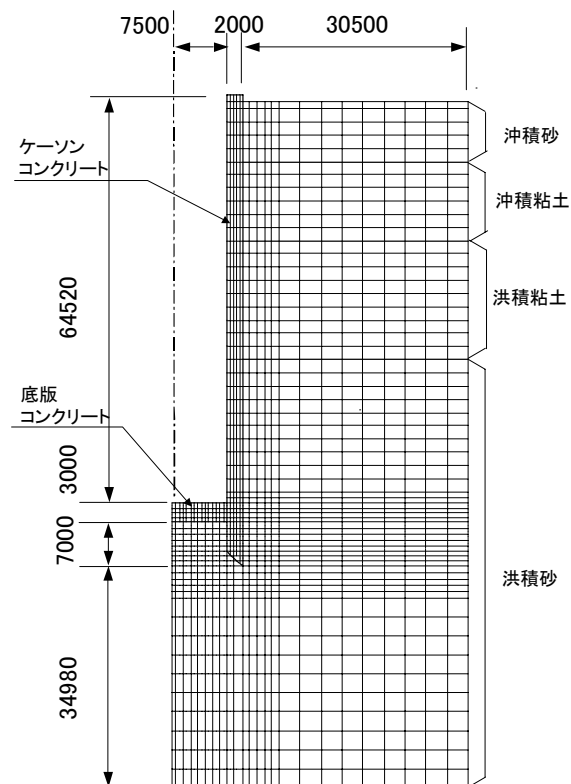
混和剤：AE 減水剤標準形，変性リグニンスルホン酸化合物

混和材：石灰系膨張材 (構造用) 20kg/m^3

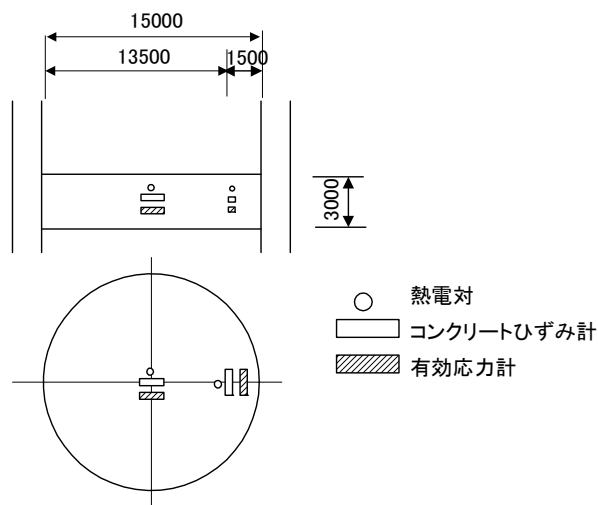
配合は水結合材比 52%，単位水量 160kg/m^3 ，単位セメント量 288kg/m^3 である。

4.2 解析モデル

解析モデルを図－10 に示す。計測器設置位置を図－11 に示す。解析における補正係数 (ϕ) は材齢 3 日まで 0.34，材齢 5 日以降 1.0 とし、



図－10 解析モデル (軸対称モデル)



図－11 計測器設置位置

その間を線形補間した。解析におけるコンクリートの圧縮強度、ヤング係数、引張強度と材齢の関係は示方書に準拠した⁴⁾。膨張ひずみは JIS 拘束膨張試験結果より 220×10^{-6} を与え、低減の有無を比較した。低減に用いた双曲線パラメータの設定定数は、マッシブな構造物であることを考慮し、壁モデルの場合より初期の低減率の大きい $\varepsilon_f/\varepsilon_0=0.1$ 、 $a=10$ とした。

4.3 解析結果と計測結果の比較

中心部および端部の低減したひずみ解析値と計測値の比較を図-12 に示す。ひずみ解析値のピークは低減ありで最大 144×10^{-6} となり、低減なしの場合の最大値 191×10^{-6} と比べて 47×10^{-6} の低減が得られた。解析値は低減ありの場合でも、計測値約 110×10^{-6} よりピーク部では大きい。要素応力に応じた低減が必要なことを示している。中心部および端部円周方向の応力の解析値と計測値の比較を図-13 に示す。中心部と端部の解析値は圧縮側ピークで約 -2.4 N/mm^2 および -1.4 N/mm^2 である。有効応力計による計測値は、中心部および端部で約 -1.6 N/mm^2 であり、要素応力により低減された解析結果は中心部では大きい。比較的良い精度を示している。また、躯体の応力は材齢に伴って、温度低下により引張側に移行して約 1.0 N/mm^2 となったがひび割れは発生せず、抑制効果が認められた。

5. まとめ

本研究の範囲内で次の結果が得られた。

- (1) 拘束膨張試験によるひずみ計の膨張量は拘束方向に比べて、拘束直角方向では大きくなり、無拘束膨張量に近い値を示した。
- (2) 膨張材なしの有効ヤング係数補正係数を用いて、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、構造物の応力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

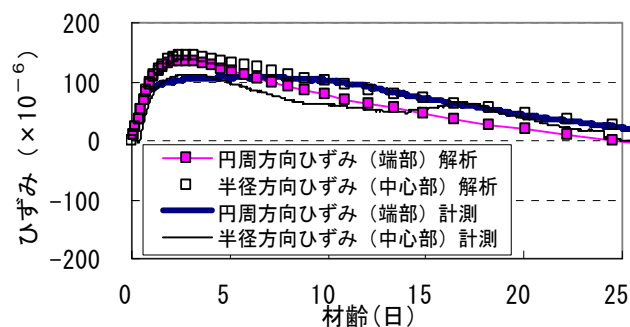


図-12 ひずみの解析値と計測値の比較

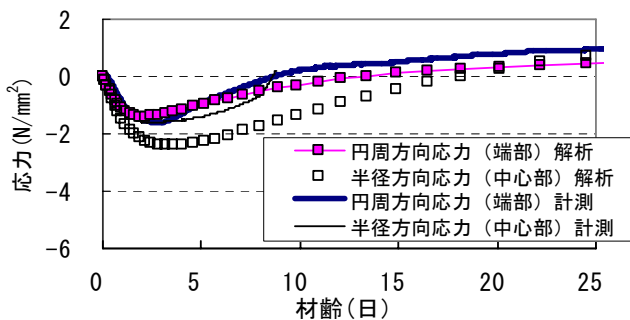


図-13 応力の解析値と計測値の比較

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) 壁体構造物モデルにおいて、壁体長さ方向の応力は鉄筋のモデル化の有無によって、大きくは変わらない。

マッシブな構造物に適用して、解析の精度を確かめることができた。今後さらに検討を進めていきたい。

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：マス養生温度下における膨張コンクリートの膨張応力評価法について，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.225-230，2004.6
- 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解析手法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1329-1334，2004.6
- 4) 土木学会コンクリート標準示方書 施工編，2002