

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と構造物適用に関する研究

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3次元FEM解析モデルに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。拘束の大きさを変えた拘束膨張試験結果から、コンクリート試験体中の膨張ひずみの大きさは拘束度と拘束方向との角度により異なることを明らかにし、無拘束からひび割れが生じる大きい拘束状態までの3次元解析モデルの要素応力方向と膨張ひずみ低減の大きさの関係を設定した。また、マッシュなスラブ状の構造物に適用して、応力とひずみの大きさを3次元的に計測し、解析値と比較して精度を検討した。

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。

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、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る方法を提案している。構造物中の膨張ひずみは、拘束に応じて3次元的に変化するものである。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までを示す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拘束度と膨張ひずみ量の範囲を、無拘束状態からひび割れの生じる拘束状態まで拡張して検討した。さらにスラブ構造物での3次元的な計測結果と比較して、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。拘束試験装置は、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。試験体中にひずみ計を埋設し、拘束方向および45°方向、直角方向のコンクリートひずみを測定した²⁾。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。

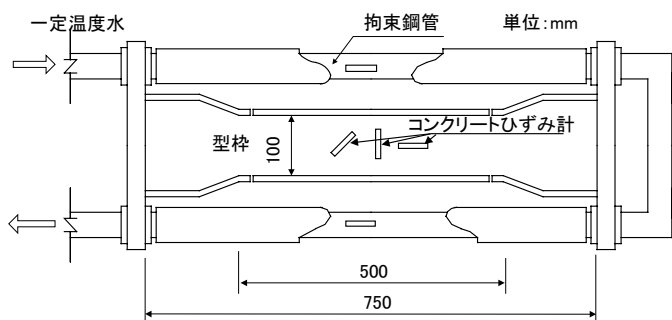


図-1 拘束試験装置

*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	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

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 43.8×10^{-6} , 100.8×10^{-6} が得られた。拘束度と鋼管ひずみの最大値測定結果を図-3 に示す。図中には同配合の既実験の値を付加して示している²⁾。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-4 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-5 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 $800 \sim 950 \times 10^{-6}$ 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^{1),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。

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℃	大	膨張
2		小	

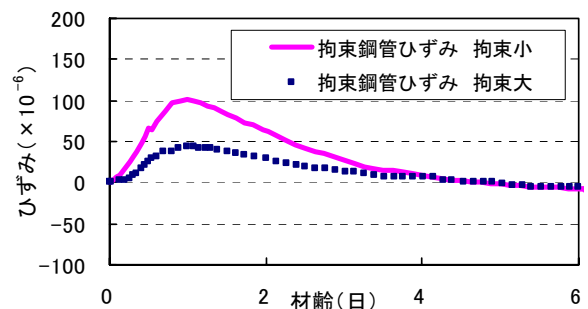


図-2 軸方向鋼管ひずみ測定結果

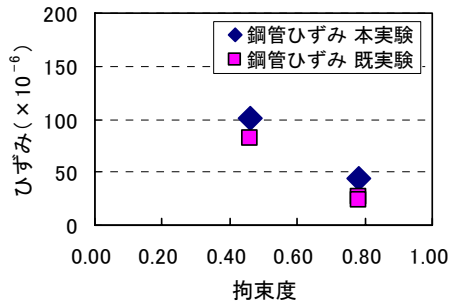


図-3 拘束度と鋼管ひずみ最大値測定結果

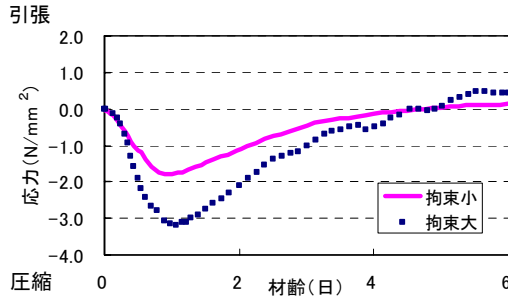
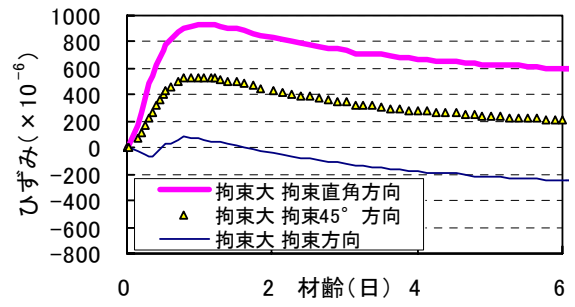
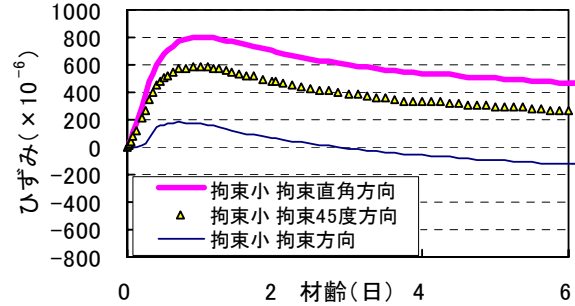


図-4 軸方向応力測定結果 (拘束大, 小)



a. 拘束大



b. 拘束小

図-5 コンクリートひずみ測定結果

拘束度とコンクリートひずみの測定結果を図-6に示す。試験体ごとのひずみのばらつきは小さく、拘束方向がひずみの大きさの違いの主な要因になっている。また、拘束度の違いは拘束軸方向では明確なひずみ差になっているが、45°方向では差は小さく、軸直角方向では拘束度の大きいほうが、膨張ひずみの大きい傾向も見られる。

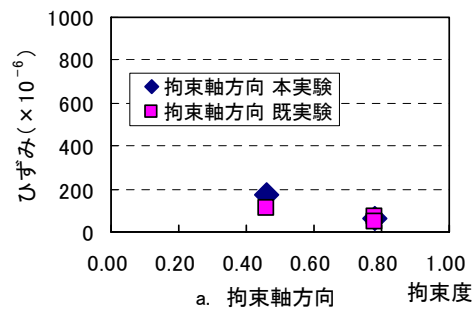
3. 構造物の解析精度の検討

3.1 解析モデル

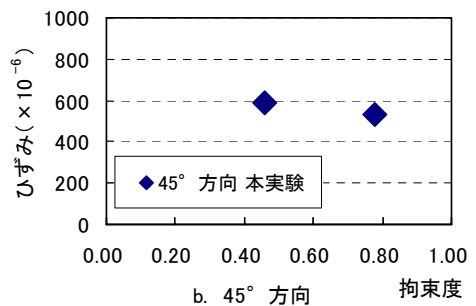
拘束方向と膨張ひずみの大きさを考慮して、解析において要素主応力により無拘束膨張ひずみを低減する手法の検討を行う。解析モデルを図-7に示す。解析ケースを表-5に示す。解析におけるコンクリートの圧縮強度と材齢の関係および有効ヤング係数 E_c は、土木学会コンクリート標準示方書式³⁾を基本とした。有効ヤング係数の補正係数は表-5の値を用いた。

3.2 解析方法

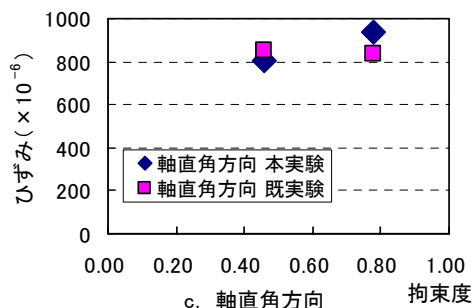
解析に用いた膨張ひずみの拘束圧依存性モデルを図-8に示す。双曲線式を用いて、膨張試験による時間軸における膨張ひずみの増分を各



a. 拘束軸方向



b. 45°方向



c. 軸直角方向

図-6 拘束度とコンクリートひずみの最大値

方向の拘束圧に従って低減して計算する。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)

ここでは膨張試験から得られた無拘束膨張ひずみ ($\varepsilon_0 = 700 \times 10^{-6}$) を近似して双曲線パラメータを既報告²⁾と同じ値の $\varepsilon_f / \varepsilon_0 = 0.05$, $a = 5$ 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。

3.3 拘束試験体モデルの解析結果

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-9に示す。膨張ひずみ低減量を無拘束 0.0N/mm² から要素圧縮応力 3.0N/mm² 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-10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}

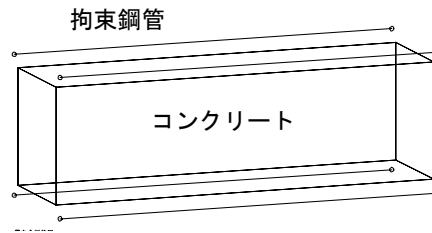


図-7 解析モデル (3次元)

表-5 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。 φ0.73(材齢1.2日まで)*
2	拘束小	

*材齢5日φ1.0とし直線補間

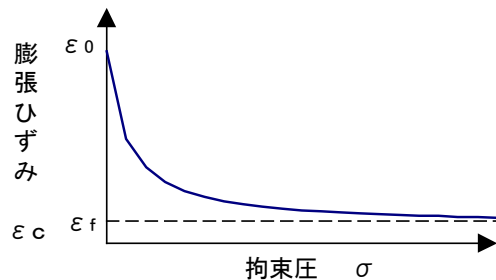


図-8 膨張ひずみの拘束圧依存性

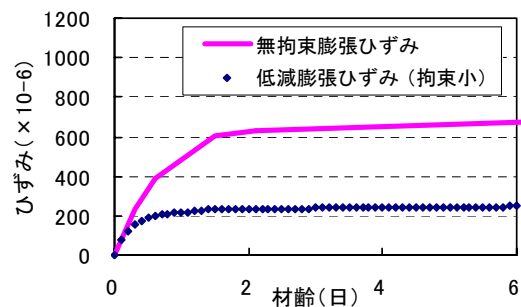
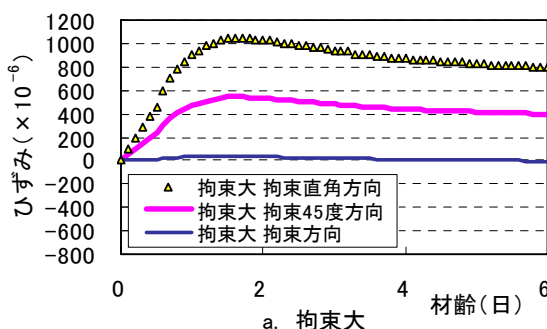
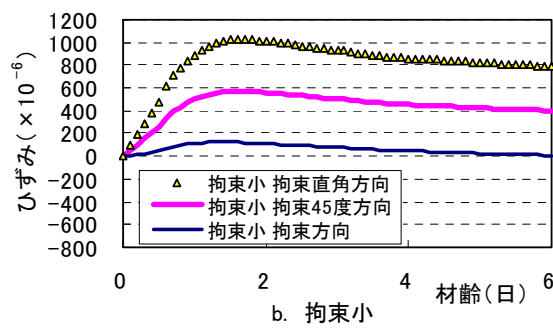


図-9 無拘束膨張ひずみと低減膨張ひずみ



a. 拘束大



b. 拘束小

図-10 コンクリートひずみ解析結果 (拘束大, 小)

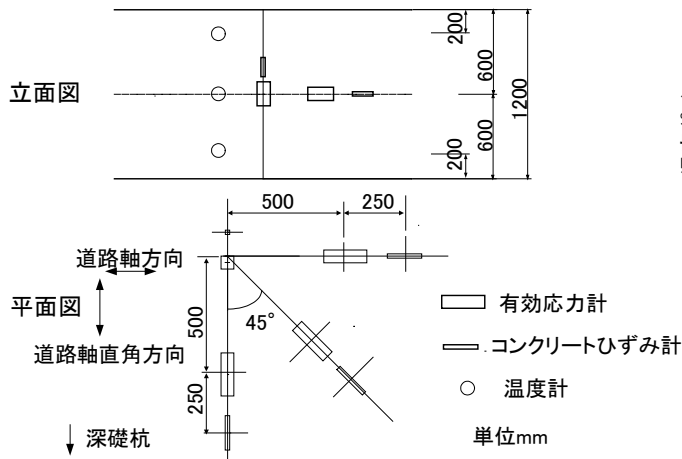


図-11 計測器設置位置

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。

4. スラブ構造物への適用と解析精度の検討

4.1 概要

構造物のスラブ（厚さ 1.2m）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 3.04g/cm^3
 細骨材：千葉県君津市久留里大谷産山砂，表乾密度 2.62g/cm^3 ，粗骨材：大分県津久見，砕石，表乾密度 2.70g/cm^3 ，Gmax 20mm
 混和剤：AE 減水剤標準形，流動化剤
 混和材：CSA 系膨張材（低添加遅延型） 20kg/m^3
 配合は水結合材比 54%，単位水量 161kg/m^3 ，単位セメント量 279kg/m^3 である。

4.2 測定結果

計測器の設置位置を図-11（図-15 参照）に示す。本構造物は両サイドに深礎土留めを持つ逆巻き施工であり，上床スラブは底面に型枠パネルを敷いているので，厚さ方向の拘束はほとんどない。温度の計測値を図-12 に示す。中心部ピーク温度は 68.4°C である。コンクリートひずみの計測値を図-13 に，応力の計測値を図-14 に示す。道路軸直角方向のひずみが一番小さく，これは両側の深礎杭の拘束が大きいことによる。厚さ方向のひずみは無拘束の膨張ひずみの大きさである。応力の最大値は圧縮では道路軸直角方向で -0.95N/mm^2 ，道路軸方向で -0.37

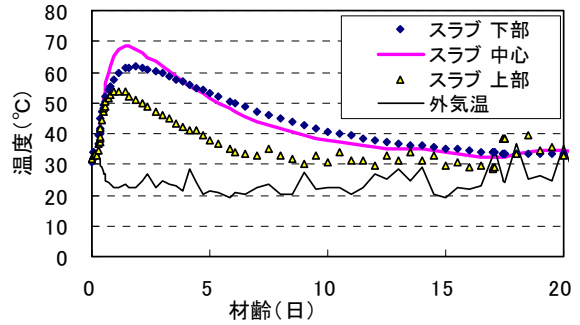


図-12 温度の計測値

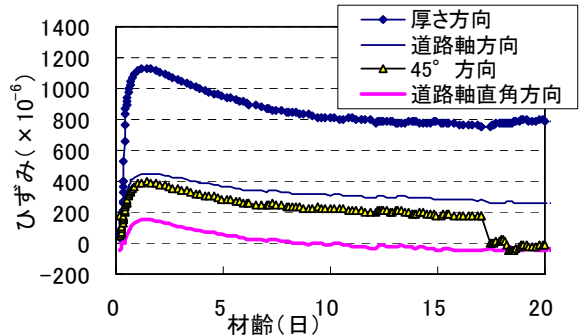


図-13 コンクリートひずみの計測値

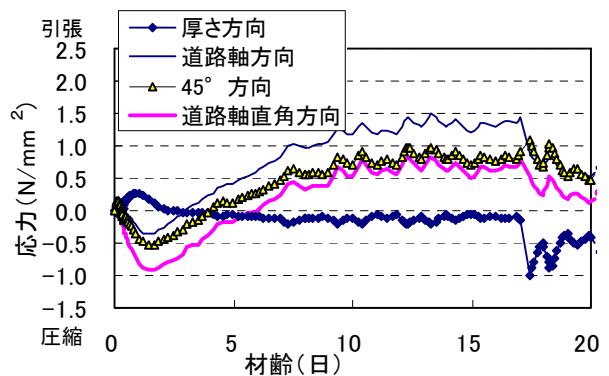


図-14 コンクリート応力の計測値

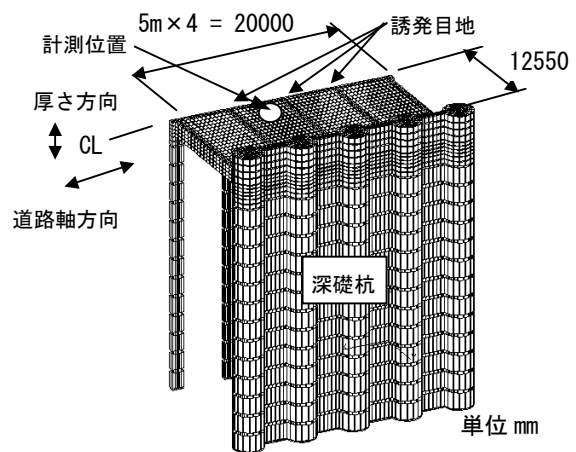


図-15 解析モデル（1/2 モデル）

N/mm²であり、45° 方向は中間値を示した。引張では道路軸直角方向で 0.83N/mm²、道路軸方向で 1.50N/mm²であり、45° 方向は中間値を示した。材齢 17 日で道路軸直角の 3 箇所の誘発目地が働いてひずみと応力が変化している。

4.3 解析モデル

解析モデルを図-15 に示す。解析における補正係数 (ϕ) は材齢 3 日まで 0.73、材齢 5 日以降 1.0 とし、その間を線形補間した。解析条件を表-6 に示す。圧縮強度、ヤング係数と材齢の関係は示方書に準拠した³⁾。膨張ひずみおよび低減に用いた双曲線パラメータの設定定数は、拘束膨張試験体モデルと同じである。

4.4 解析結果と計測結果の比較

温度の解析は中心部ピークで 66.8°C となり測定値より 1.6°C 低い結果であった。ひずみの解析値を図-16 に、応力の解析値図-17 に示す。ひずみ解析値のピークは拘束の大きい道路軸直角方向で 421×10^{-6} 、道路軸方向 626×10^{-6} となり、解析モデルの深礎杭の拘束評価が小さかったことにより、計測値 153×10^{-6} 、 452×10^{-6} と比べて大きいひずみとなった。応力解析値の圧縮最大値は、道路軸直角方向で -0.88 N/mm^2 、道路軸方向 -0.47 N/mm^2 となり、計測値と比べてよい精度を示している。引張側は 8 日以降の膨張ひずみは小さく、解析モデルの方向による拘束の違いが小さい影響から応力差が小さくなった。3次元 FEM 解析モデルによって、各要素応力軸にそれぞれ双曲線パラメータによる膨張ひずみの低減を与えることによって、各要素軸方向のひずみと応力を解析できると考えられる。

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) 解析プログラムで膨張ひずみを各軸方向の応力 (圧縮力) により低減して、応力履歴を

表-6 解析条件

項目	設定定数
頂版部	セメント種類 高炉 B 種 $Q_{\infty} 44.7$, $\gamma 1.372$ 打設温度 30°C
	熱物性値 熱伝導率 2.7 W/m ² °C, 比熱 1.15 kJ/kg°C, 単位体積質量 2300 kg/m ³
	熱伝達率 上面 14 W/m ² °C, 下面 8 W/m ² °C 圧縮強度 $f' (28) 27 \text{ N/mm}^2$, a 6.2, b 0.93, c 1.15
深礎杭	熱物性値 頂版と同じ
	圧縮強度 27 N/mm^2 , ヤング係数 29000 N/mm^2
	深礎杭間の要素: ヤング係数 1450 N/mm^2 深礎杭背面のばね定数: 28000 kN/m^3 (N 値 15 相当)

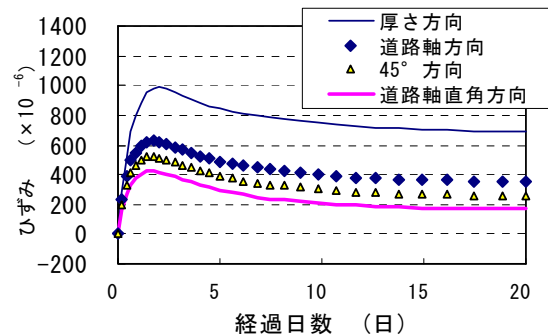


図-16 ひずみの解析値

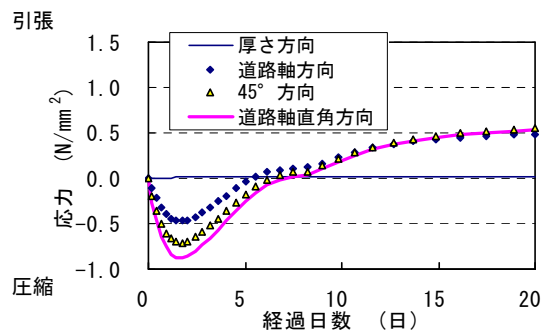


図-17 応力の解析値

計算することで膨張材の効果を検討できる。

- (3) スラブ構造物に適用した結果、測定結果と解析結果の傾向は一致しており、膨張材の効果を解析できることを示した。

参考文献

- 1) 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
- 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
- 3) コンクリート標準示方書 施工編, 2002