

# 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

## — 膨張履歴の解析と構造物への適用 —

東 邦和\* 中村敏晴\* 増井 仁\*

### 1. はじめに

ひび割れ防止対策として膨張コンクリートを適用する場合に、効果の大きさを適切に評価することが必要である。本研究で対象としている膨張コンクリートは、膨張量の大きさの分類では、収縮補償の範囲である。いままでに膨張材の効果については、評価方法が研究されているが、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と考えられる。本研究ではFEM解析モデルを用いて膨張コンクリートの応力履歴を解析し、適用効果を検討することを目的としている。膨張コンクリートの収縮補償効果は、その膨張量によって支配されるので、膨張コンクリートの効果の検討には現場に打ち込まれたコンクリート構造物としての膨張収縮に対する拘束あるいは、温度の条件が必要である。収縮低減効果を解析的に検証するため、はじめに温度履歴を与えた拘束膨張試験を行い、測定値の比較から初期の有効ヤング係数の補正係数と拘束の大きさによる膨張ひずみの違いを検討した。その結果を用いて、拘束膨張試験のFEM解析手法としてヤング係数補正係数と膨張ひずみを与える方法を検討した。次に解析モデルに上記の方法に加えて、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適用し、これを測定値と比較した。また、ボックスカルバート構造物に解析手法を適用して、実測値と比較し膨張材のひび割れ防止効果を検討した<sup>1)</sup>。

### 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、

JIS 原案「コンクリートの水和熱による温度ひび割れ試験方法(案)」に準拠した。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。拘束試験装置は、拘束鋼管内に一定温度の水を循環させ、拘束鋼管に温度変化によるひずみを生じないようにして、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。コンクリートの応力は拘束鋼管のひずみから算出し、クリープ等を考慮したコンクリートに実際に働く応力を測定することができる。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。拘束試験装置の諸元を表-3に、拘束試験装置を図-1に示す。拘束度を式(1)に示す。

$$\text{拘束度} = \frac{EsAs}{EsAs + Ec'Ac} \quad (1)$$

ここに、Es：鋼材のヤング係数

As：鋼材の断面積

Ec'：コンクリートの見かけのヤング係数

Ac：コンクリートの断面積

拘束度はヤング係数の発現に伴い変化する。鋼材とコンクリートのヤング係数比を10とした場合の拘束度は、拘束大で0.70、拘束小で0.46である。試験ケースと試験体数を表-4に示す。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。

#### 2.2 拘束膨張試験結果

温度可変室内に置いた試験体を与えた温度履歴のピーク値は55℃である。試験体中央部の大きさは10cm角であり、表面と中心部の温度差は1℃程度で本検討では均一とみなせる。各試験体の温度履歴は、設定した温度履歴に追従し、試験体ケースI～IV間に差はなかった。試験体の温度履歴の測定値を図-2に示す。試験ケースI、IIのNPの場合に拘束鋼管に生じ

\*技術研究所

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	鬼怒川産川砂, 表乾密度:2.58 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:2.19%
粗骨材	笠間産碎石, Gmax20mm, 密度 2.66 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:0.59%
AE 減水剤	リグニンスルホン酸化合物標準型
膨張材	主成分 カルシウムサルフォアルミネート 密度:2.71g/cm <sup>3</sup> , 水和熱抑制型

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	
NP	55	43.8	166	302	—	790	1053	0.982
NE	55	43.8	166	272	30	790	1053	0.982

表-3 拘束試験装置の諸元

拘束度	拘束鋼管 (各 4 本)	コンクリート 断面積
大	外径 42.7mm 内径 32.9mm 合計断面積 2328mm <sup>2</sup>	10,000mm <sup>2</sup>
小*1	外径 42.7mm 内径 39.4mm 合計断面積 851mm <sup>2</sup>	

\*1 JIS 原案準拠

たひずみを図-3a に示す。拘束大の最大膨張ひずみは  $21 \times 10^{-6}$ 、拘束小の最大膨張ひずみは  $44 \times 10^{-6}$  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-3b に示す。拘束大の圧縮応力ピークは  $-1.03\text{N/mm}^2$ 、拘束小では  $-0.78\text{N/mm}^2$  が得られた。

試験ケース III、IV の NE のひずみと応力度を図-4 a, b に示す。NE のひずみピーク値は NP の場合と大きくは変わらない。しかし NP (図-3a, b) の場合は、ピーク後のひずみおよび圧縮応力の減少が急であるが、NE の場合は圧縮応力の急な減少がなく、引張側への移行が遅いことが明確に認められる。

### 3. 温度応力解析手法の検討

#### 3.1 解析方法

解析によるひずみと応力を実験結果と対比する。拘束試験装置のコンクリートと拘束鋼管の解析モデルを図-5 に示す。解析ケース一覧を表-5 に示す。

表-4 試験ケース

ケース	温度履歴	拘束	配合名	試験体数
I	打設温度 20°C	大	NP	2
II		小		1
III	ピーク温度 55°C	大	NE	2
IV		小		1

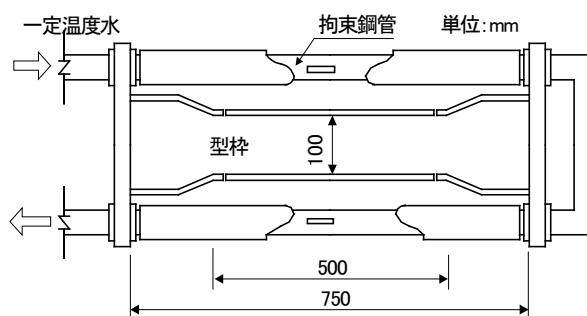


図-1 拘束試験装置

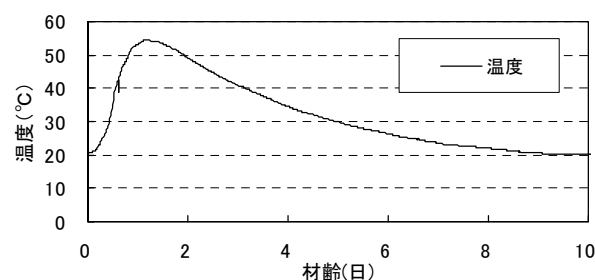
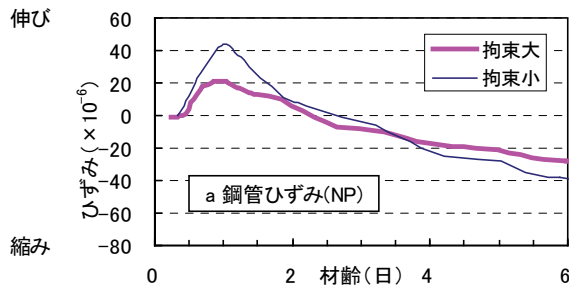
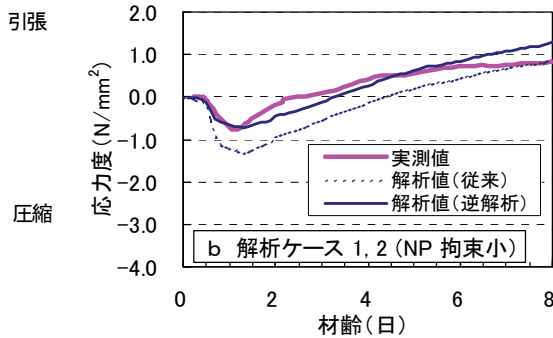


図-2 試験体温度

温度履歴を FEM 解析モデルに与えて、線膨張係数と有効ヤング係数から応力を算出する。これと測定応力履歴との間に逆解析を適用し初期の有効ヤング係数補正係数の大きさと膨張量の大きさを同定解析した。解析におけるコンクリートの圧縮強度と材齢の関係は、



a. ひずみ測定結果



b. コンクリート応力測定結果

図-3 拘束試験結果 (Case I, II NP)

土木学会コンクリート標準示方書 式(2)を用いた。有効ヤング係数  $E_e$  は、式(3)を基本として用いた。本解析では、すべてのケースで鋼管およびコンクリートの線膨張係数は  $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  としている。

$$f'_c(t) = \{t/(a+bt)\} \times d \times f'_{ck}(28) \quad (2)$$

ここに

$$f'_{ck}(t) : \text{設計基準強度 } f'_{ck}(28) = 24 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

t : 材齢(日)

定数 a: 4.5, b: 0.95, d: 1.11

$$E_e(t) = \phi(t) \cdot 4.7 \times 10^3 \sqrt{f'_c(t)} \quad (3)$$

ここに

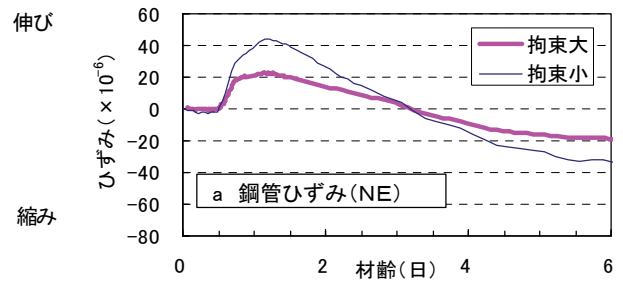
$\phi(t)$  : 有効ヤング係数補正係数

材齢3日まで0.73、材齢5日以降1.0

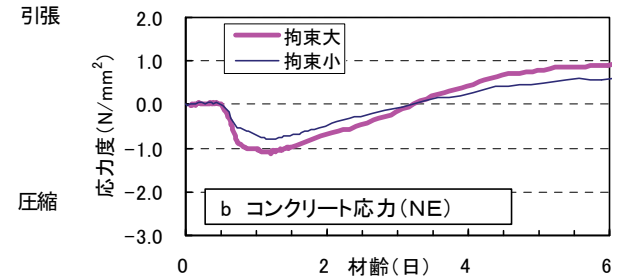
$f'_c(t)$  : 材齢 t 日の圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

### 3.2 解析結果

解析ケース1は、膨張材なしの NP の場合であり、モデルのコンクリート要素に温度履歴 (図-2) を与え、線膨張係数、有効ヤング係数の補正係数  $\phi=0.73$  により応力を解析した。測定結果と解析結果の比較を図-6に示す。aに示す拘束大の結果では、圧縮部



a. ひずみ測定結果



b. コンクリート応力測定結果

図-4 拘束試験結果 (Case III, IV NE)

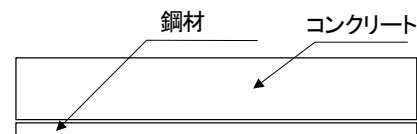


図-5 解析モデル

表-5 解析ケース

ケース	解析パラメータ
1	従来の解析 NP $\phi 0.73$
2	有効ヤング係数補正係数(逆解析より), NP $\phi 0.34$ , NE $\phi 0.49$
3	膨張量の付加 $\phi 0.34$ , $70 \times 10^{-6}$
4	拘束による膨張量の低減の有無 $\phi 0.34$ , $184 \times 10^{-6}$

測定値の  $-1.0 \text{ N/mm}^2$  に対して、解析値は  $-1.5 \text{ N/mm}^2$  と圧縮側に大きい値を示した。引張部においても測定値より圧縮側に大きい値を示した。bの拘束小の場合も同様に整合せず、本実験の測定値を十分に表せないことがわかった。

解析ケース2では解析モデルに温度履歴を与え、線膨張係数、測定応力履歴を用いて逆解析手法を適用し、有効ヤング係数補正係数を求めた。有効ヤング係数の補正係数は算定により、ここではコンクリートの温度ピーク材齢1.2日までの値として  $\phi=0.34$  を得た。材齢5日以降は  $\phi=1.0$  とし、その間を直線補間している。 $\phi=0.34$  を用いて解析した結果を図-6中に逆解

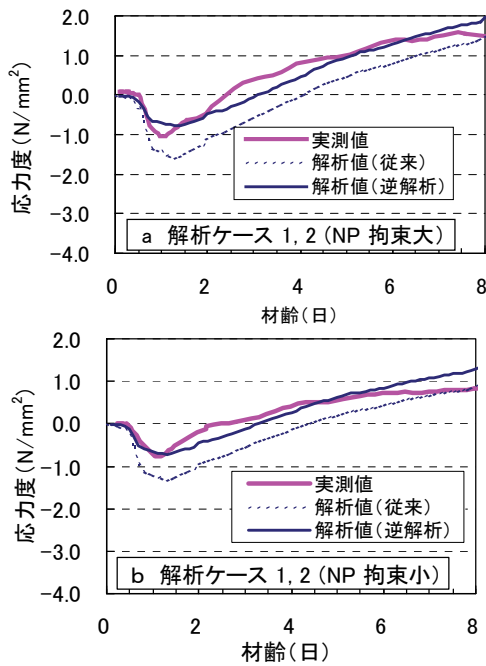


図-6 解析結果 (NP 従来の解析と 逆解析結果)

析として示す。本実験ではクリープの大きい若材齢の補正係数を、示方書の $\phi=0.73$ より小さく設定することによって、発生応力の近似が改善できることを示している。

NE の測定結果と解析結果の比較を図-7に示す。NE の初期の補正係数を同様に逆解析を用いて算定した結果、 $\phi=0.49$ を得た。 $\phi=0.49$ を用いた解析結果を図中に示す。有効ヤング係数補正係数の算定値はNPに比べてNEの方が大きく、応力履歴が膨張側に大きくなることを示している。NEにおける膨張効果による応力履歴を、NPの場合より大きい補正係数を用いることにより、膨張ひずみを用いずに表すことができると考えられる。

解析ケース3では、膨張ひずみの付加による解析を行った。コンクリートのJIS A 6202 拘束膨張試験A法による $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ における拘束膨張量の測定値は、 $184\times 10^{-6}$ の膨張を示した。この膨張量を与えた解析では、圧縮部の応力を過大に見積もることが多い。解析モデルに温度履歴を与え、線膨張係数、測定応力履歴とNPの補正係数 $\phi=0.34$ を用いて、NEの場合に与える膨張ひずみを逆解析により算定し、 $70\times 10^{-6}$ を得た。この値はJIS 拘束膨張試験結果と比較して約40%の値である。本実験はJIS 拘束膨張試験より拘束が大きく、高い温度履歴を与えていることから、温度

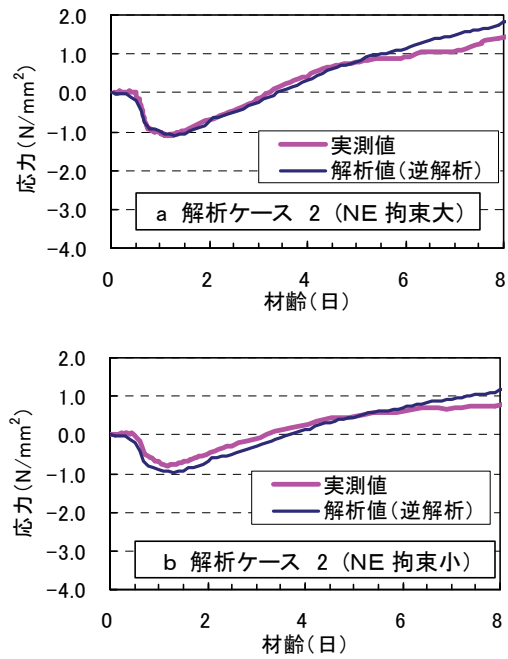


図-7 解析結果 (NE 逆解析)

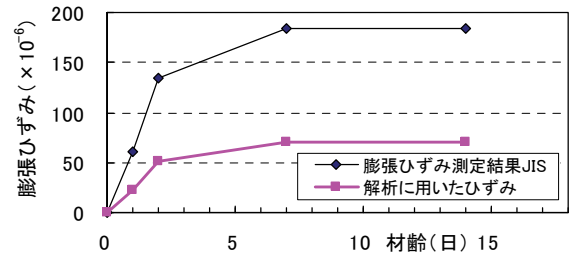


図-8 膨張ひずみの付加解析 ケース3

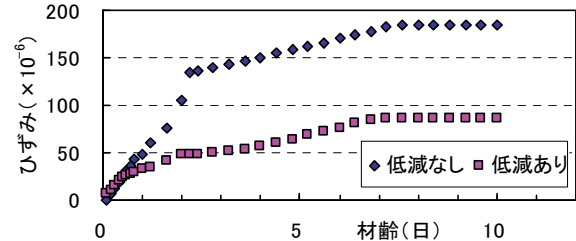


図-9 ひずみの解析結果 ケース4 (低減なし低減)

ひずみ以外の有効な膨張ひずみとして本解析値を位置付けられる可能性がある。解析に用いた膨張ひずみを図-8に示す。解析では計算ステップごとのひずみ増分が初期膨張ひずみとして与えられる。 $\phi=0.34$ とし膨張ひずみ $70\times 10^{-6}$ を与えた解析結果と実測値を図-10、図-11の図中にケース3として示す。

解析ケース4では、膨張材の膨張量の拘束による変化を検討するため、膨張ひずみ $\epsilon_t$ の大きさは要素圧縮応力に依存するとして、双曲線式を用いた数値モデルにより膨張量を低減した。双曲線式を式(4)に示す。

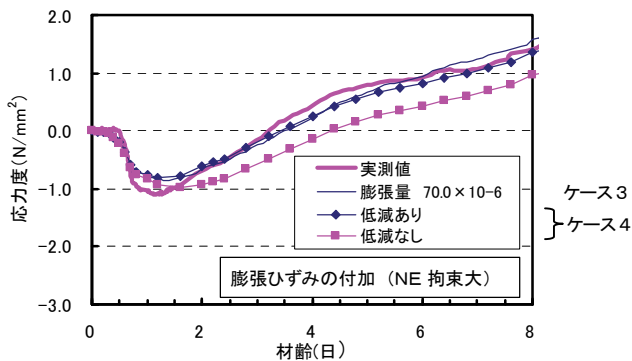


図-10 解析値と測定値の比較 (ケース 3、4 拘束大)

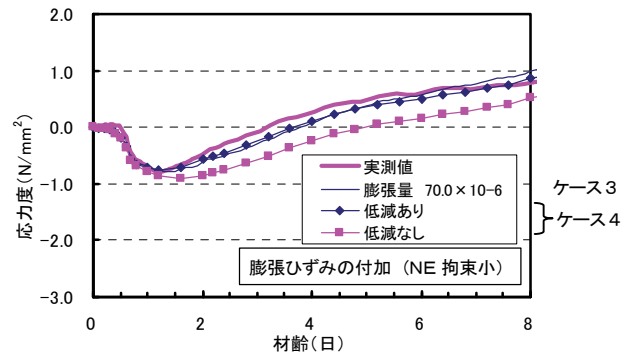


図-11 解析値と測定値の比較 (ケース 3、4 拘束小)

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_0 - \varepsilon_f) / (1 + a\sigma) + \varepsilon_f \quad (4)$$

ここに、

$\varepsilon_0$  : JIS 拘束膨張試験の膨張ひずみ

$\varepsilon_f$  : 拘束無限大の膨張ひずみ

$a$  : 拘束圧依存パラメータ

$\sigma$  : 拘束圧 (N/mm<sup>2</sup>)

解析ステップにおいて膨張ひずみの増分を、拘束圧に従って低減し逐次計算する。ここでは、ケース3に近似するように双曲線パラメータを  $\varepsilon_f / \varepsilon_0 = 0.1$ 、 $a = 10$  とした。また、拘束の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。JIS 拘束膨張試験の膨張ひずみを基にして低減した膨張ひずみ解析結果を図-9に示す。積算膨張ひずみ量が約40%に低減されている。低減ありと低減なしの応力解析結果を図-10、図-11の図中にケース4として示す。双曲線パラメータを用いて、要素応力に応じて膨張ひずみ低減したものは、実測値を良好に近似できているといえる。

#### 4. 実構造物への適用

##### 4.1 ボックスカルバートへの適用

適用した構造物は、側壁厚さ 0.9m のマッシュな道路用地下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<sup>3</sup>、膨張材量 30kg/m<sup>3</sup> であり、カルシウムサルフォアルミネートを主成分とした膨張材を使用した。打設ブロックの 1/4 モデルを図-12に示す。計測器は打設ブロックの中心の断面

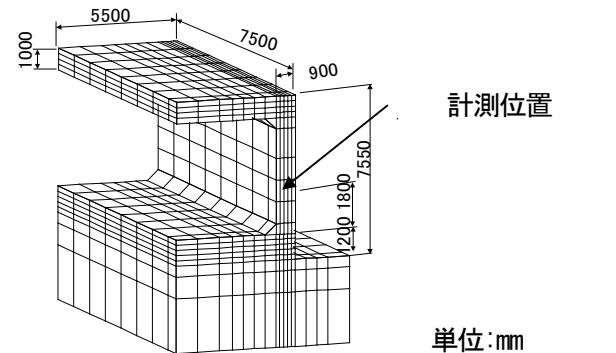


図-12 解析モデル (1/4 モデル)

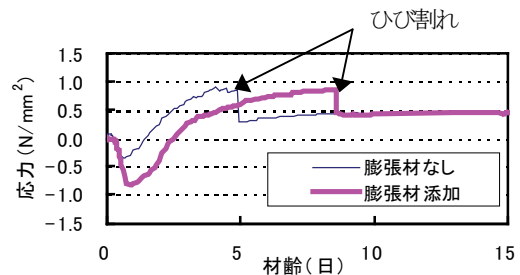


図-13 応力測定結果 (NP : 膨張材なし、NE : 添加)

表-7 解析条件

項目	入力値
$\lambda_c$ 熱伝導率 (コンクリート W/m°C)	2.7
$C_c$ 比熱 (コンクリート kJ/kg°C)	1.15
$\rho_c$ 密度 (コンクリート kg/m <sup>3</sup> )	2300
$Q_\infty$ 断熱温度上昇式	49.9
$r$	1.554
$\eta$ 熱伝達係数 (W/m <sup>2</sup> °C) コンクリート型枠面	14.0 8.0
$\lambda_g$ 熱伝導率 (地盤 W/m°C)	3.5
$C_g$ 比熱 (地盤 kJ/kg°C)	0.80
$\rho_g$ 密度 (地盤 kg/m <sup>3</sup> )	2600
$E_g$ 弾性係数 (地盤 N/mm <sup>2</sup> )	1000

に設置した。計測したブロックは膨張材なしブロックおよび膨張材添加ブロックである。有効応力計により測定したコンクリートの応力を図-13に示す。膨張材を用いない場合は応力の圧縮ピークは-0.34N/mm<sup>2</sup>と

なり、引張側で  $0.85\text{N/mm}^2$  になった時点でひび割れが生じた。膨張材を用いた場合の、圧縮側でのピークは  $-0.82\text{N/mm}^2$  となり、引張側で  $0.86\text{N/mm}^2$  でひび割れが生じた。膨張材により初期の圧縮力が導入されており、ひび割れ発生時期を材齢 8 日まで遅らすことができ、膨張材の効果が示されている。

## 4.2 解析方法と解析結果

解析に用いた物性値を表-7に示す。膨張材なし(NP)の解析において  $\phi=0.34$  および  $\phi=0.73$  とした場合の応力解析値を図-14に示す。 $\phi=0.34$  では、圧縮ピークは  $-0.5\text{N/mm}^2$  であり、材齢約 5 日で引張応力  $1.0\text{N/mm}^2$  になり、図-13 NP に示す実測値と整合した結果を示している。

膨張材を用いた NE の解析においては、JIS 拘束膨張試験の結果を準用して基本膨張量を  $184 \times 10^{-6}$  に設定した。双曲線パラメータの設定定数は、前述と同じである。基本膨張量と低減した膨張量の解析結果を図-15に示す。低減されたひずみ量は圧縮応力ピーク時において約 0.4 倍の値であり、最終ひずみは  $87 \times 10^{-6}$  となった。応力解析結果の比較を図-16に示す。基本膨張量と有効ヤング係数の補正係数  $\phi=0.73$  を用いた解析結果は、全体に圧縮側に大きく、図-13 NE に示す実測値と整合していない。 $\phi=0.34$  として基本膨張量を与えた結果は応力値が改善されている。膨張量を低減した結果は、全体に引張側に移動し、圧縮ピークの大きさは実測値より小さいが、ピーク位置が改善されており、より良く近似している。圧縮ピーク以降の解析において膨張量を過大に見積もらないためにも、拘束度に応じて低減の必要なことを示している。

## 5. まとめ

本研究の範囲内で得られた結果を次に示す。

- (1) 拘束膨張試験の結果から、解析モデルに適切な有効ヤング係数の補正係数を与えることにより、膨張収縮時の応力履歴の大きさを近似できると考えられる
- (2) 逆解析により得られた膨張材を用いた場合の初期の有効ヤング係数補正係数の算定値は、膨張材を用いない場合と比べて大きくなる
- (3) 膨張材を用いない場合の有効ヤング係数補正係

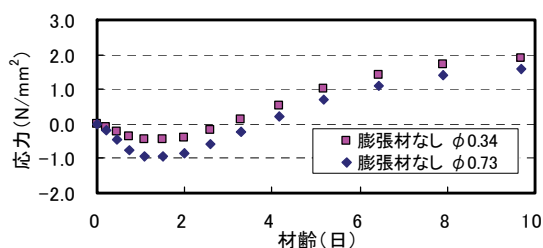


図-14 応力解析結果 (NP)

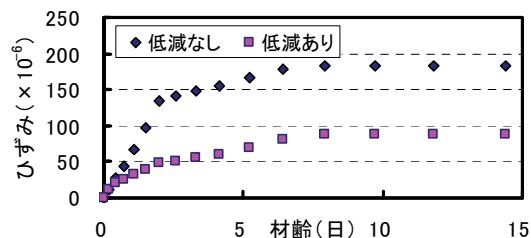


図-15 膨張ひずみ解析結果 (NE 低減の有無)

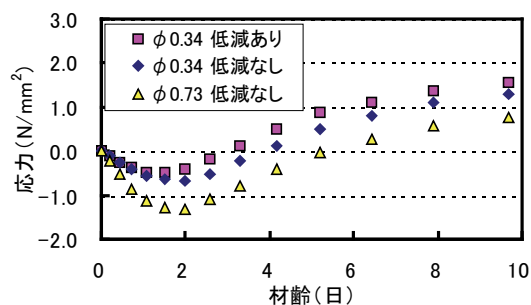


図-16 解析結果の比較 (NE)

数を基準にして、拘束に応じた適切な膨張量を与えることにより、膨張材を用いた場合の応力履歴の近似解析ができる

- (4) 解析プログラムにより要素応力に応じて低減した膨張量を算出して解析することにより、膨張材を用いた場合の応力履歴を表すことができる  
拘束度と温度履歴による膨張量の大きさは、拘束膨張試験の範囲を広げて、さらに多くのデータを得て検討して行くことが必要と考えられる。

### 【参考文献】

- 1) 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構造物ひび割れ対策としての効果の検討」、セメント・コンクリート論文集、No57、pp.193-200、2003