

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研究

東 邦和*1・中村敏晴*2・増井 仁*2・梅原秀哲*3

要旨：ひび割れ防止対策として膨張コンクリートの適用に際しては、効果の大きさを適切に評価することが重要な課題である。本研究では、はじめに温度履歴を与えた拘束試験装置を用いて、拘束に応じた膨張量と応力を精度良く測定した。次に解析モデルを用いて、初期の有効ヤング係数の補正係数と線膨張係数の大きさを検討した。その結果から膨張材の添加による応力履歴の変化を、初期有効ヤング係数の補正係数により評価して、拘束を考慮した膨張量を与えることにより表すことができる可能性があることを確認した。また、ボックスカルバート構造物に適用して精度を検討した。

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の低減は、設計施工時の重要項目である。対策として膨張コンクリートは、ひび割れ低減に有効であるとされており、高強度・高流動コンクリートに添加することも行われ、今後も有用な混和材として使用されて行くと考えられる。膨張材の効果については、評価方法が研究されているが^{1,2,3,4)}、定量的な評価方法は確立されていないと考えられる。本研究の対象にしている膨張コンクリートは膨張力の大きさの分類では、収縮補償用コンクリートの範囲である。膨張コンクリートの収縮補償効果は、その膨張率によって支配されるので、適用には現場に打ち込まれたコンクリートの構造物としての膨張収縮に対する拘束条件の考慮が必要である。既往の研究では膨張材の効果は、主に下降時の線膨張係数の違いおよび見かけのヤング係数の設定によって評価できると示唆されている。ここではそれらの方法の適用性を考慮しながら、膨張材の収縮低減効果を解析的に検証するために、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を考慮した膨張ひずみを用いた解析手法を検討するものである。

2. 拘束膨張試験

膨張材の効果を解析的に検証するために、はじめに実験室内での拘束膨張試験によって、膨張コンクリートの膨張性状を調べた。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拘束試験装置による試験を行った。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⁵⁾。

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ることにより、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。コンクリートの配合と使用材料を表-1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。拘束装置の諸元を表-2

*1 (株)奥村組 技術研究所 (正会員)

*2 (株)奥村組 技術研究所

*3 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 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	
NP	55	43.8	166	302	—	790	1053	0.982
NE	55	43.8	166	272	30	790	1053	0.982

セメント：普通ポルトランドセメント密度 3.16g/cm³，細骨材：鬼怒川産川砂 密度 2.58g/cm³
粗骨材：笠間産砕石 密度 2.66g/cm³ Gmax20mm，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/cm³，水和熱抑制型

に，形状を図-1 に示す。コンクリート試験体に与えた温度履歴のピーク値は 55℃，35℃である。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。また，無拘束のコンクリートの線膨張係数を同時に測定した。線膨張係数測定装置を図-2 に示す。試験ケースを表-3 に示す。試験体数は各 1~2 体である。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。

3. 実験結果

3.1 拘束装置試験結果

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 1~4 間に差はなかった。試験体の温度履歴の測定値を図-3 に示す。

試験ケース 1, 2 の NP の場合に拘束鋼管に生じたひずみを図-4 a に示す。拘束大の最大膨張ひずみは 20×10^{-6} ，拘束小の最大膨張ひずみは 40×10^{-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-4 b に示す。拘束大の圧縮応力ピークは -1.03N/mm^2 ，拘束小では -0.78N/mm^2 が得られた。

試験ケース 3,4 の NE のひずみと応力度を図-5 a, b に示す。NE のひずみピーク値は，NP

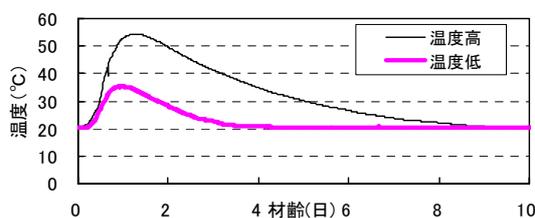


図-3 温度履歴測定値

表-2 拘束装置の諸元

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 32.9mm 合計断面積 2328mm ²	10000mm ²
小 ^{※2}	外径 42.7mm 内径 39.4mm 合計断面積 851mm ²	

※1 拘束度 0.70 (各々ヤング係数比 10 の場合)

※2 拘束度 0.46 JIS 原案準拠

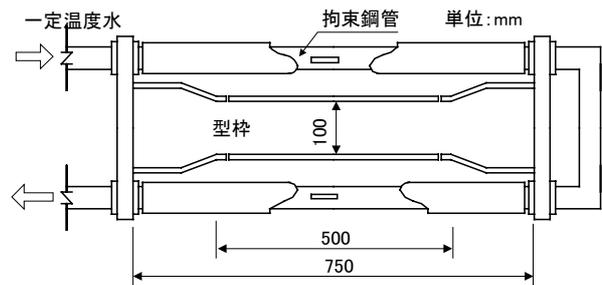


図-1 拘束試験装置

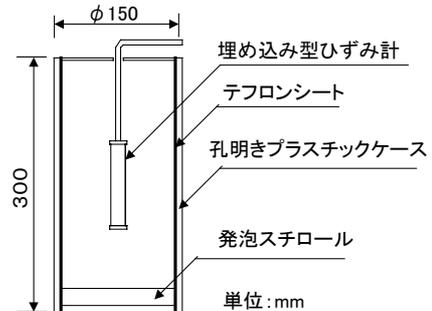


図-2 線膨張係数測定装置

表-3 試験ケース

試験ケース	温度履歴	拘束	配合名
1	高	大	NP
2		小	
3		大	NE
4		小	
5	低	大	NE

打設温度 20℃，温度ピーク値 高：55℃ 低：35℃

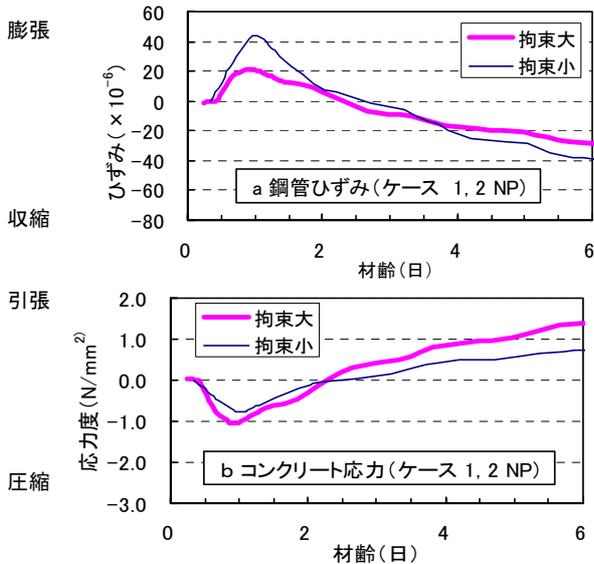


図-4 拘束試験結果 (NP)

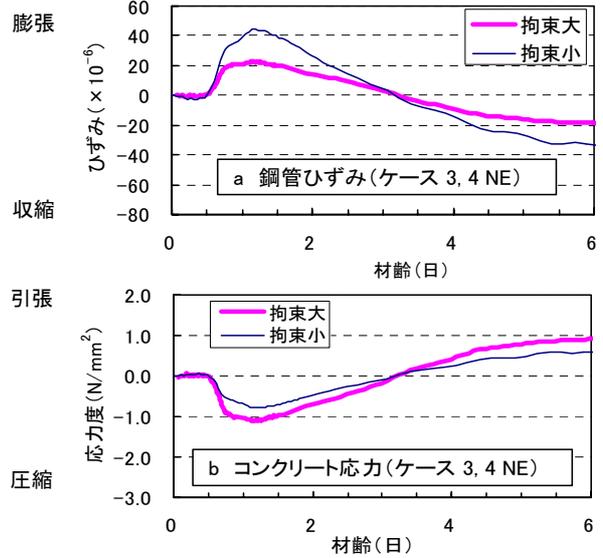


図-5 拘束試験結果 (NE)

の場合と大きくは変わらないが、NP 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 の場合は圧縮部の形状が大きく引張側への移行が遅い傾向が明確に認められる。NE の本ケースの 2 試験体間の応力に大きな差はなかった。

試験ケース 3,5 の NE の温度履歴の違いによる応力比較を図-6 に示す。応力のピーク温度 55℃と 35℃との比較から、膨張および収縮応力最大値はほぼ温度履歴に比例した値が得られた。

3.2 線膨張係数測定結果

無拘束試験体により測定した線膨張係数を図-7 a, b に示す。いずれも温度ピーク後の温度下降部の測定値を取り出して示している。温度上昇部のひずみ量は、NE では試験体ごとの膨張によるひずみ増大のばらつきが大きく、一定した値は得られない。温度下降部の線膨張係数は、温度高では NP の $12.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ に対して NE では平均 $10.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、温度低では NP の $10.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ に対して NE では $7.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の値となった。ピーク部の温度変化の小さい部分を含んで計算しているため、温度低の値は小さく示されている。NE では膨張ひずみにより、温度下降部の見かけの線膨張係数は NP と比較して 0.7 ~ 0.8 倍の値となる結果が得られた。

4. 温度応力解析

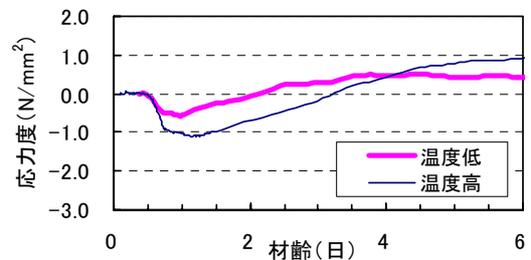


図-6 温度履歴の違いによる応力比較

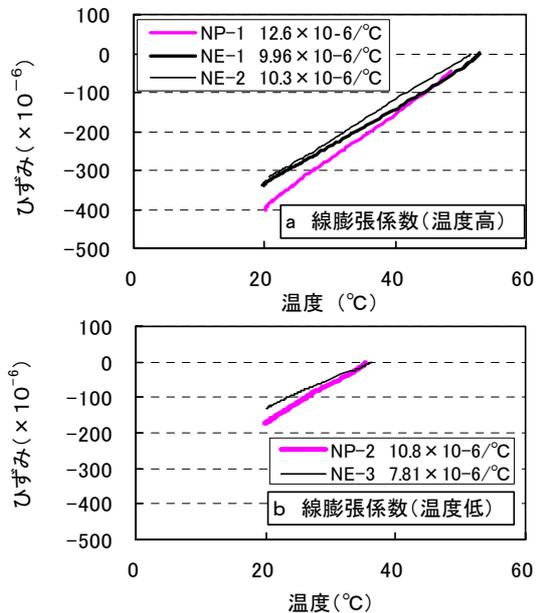


図-7 線膨張係数測定結果

4.1 解析方法

実験により得られた膨張ひずみおよび応力を対比し解析モデルによる検討を行う。解析ケース一覧を表-4 に示す。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-8 に示す。モデルのコンクリートに温度履歴(図-3 高)を

与えて応力を解析した。膨張材の効果を表すために、膨張材を添加しない NP を基本として膨張コンクリートの応力履歴を検討する。解析方法は土木学会コンクリート標準示方書に準拠して行う。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。始めに NP に従来の解析を行い（解析ケース 1）、次に NP と NE に対してヤング係数補正係数の設定を行う（解析ケース 2）。さらに温度下降部の線膨張係数低減の適用検討を行う（解析ケース 3）。それらを検討の上で NP のヤング係数補正係数を用い、膨張ひずみを付加して NE の応力挙動を表す（解析ケース 4）。

4.2 解析定数

解析に於けるコンクリートの圧縮強度と材齢の関係は、標準示方書式(1)⁶⁾を用いた。定数 a, b, d と $f'_{ck}(28)$ の値を表-5 に示す。

$$f'_c(t) = \{t/(a+bt)\} \times d \times f'_{ck}(28) \quad (1)$$

ここに、

$f'_{ck}(t)$: コンクリートの設計基準強度 (N/mm²)

t: 材齢(日) a, b, d: 定数

また、有効ヤング係数 E_c は、標準示方書の式(2)を基本として用いた。

$$E_c(t) = \phi(t) \cdot 4.7 \times 10^3 \sqrt{f'_c(t)} \quad (2)$$

ここに ϕ : 材齢 3 日まで 0.73

材齢 5 日以降 1.0

4.3 解析結果

(1) 逆解析によるヤング係数補正係数の算出

NP の解析結果を図-9 a, b に示す。ケース 1 の式(2)の解析結果は、拘束度大では圧縮部実測値の -1.0N/mm² に対して、解析値は -1.5N/mm² と大きい値を示した。引張部においても実測値より圧縮側の値を示した。拘束小も同様である。

ケース 1 では本実験の計測値を十分に表わせないことから、ケース 2 では解析モデルに応力測定結果を用いて逆解析手法⁷⁾を適用した。温度ピーク 1.2 日までの初期の有効ヤング係数補正係数を同定した結果、 $\phi=0.34$ を得た。1.2 日以降は材齢 5 日で $\phi=1.0$ 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

表-4 解析ケース一覧

解析ケース	解析パラメータ
1	従来の解析 $\phi 0.73$, 線膨張係数 $\alpha 10.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
2	逆解析による有効ヤング係数の補正係数 ϕ の変化, NP $\phi 0.34$, NE $\phi 0.49$
3	線膨張係数の変化 $\phi 0.73$ $\alpha 7.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
4	膨張ひずみの付加 $\phi 0.34$

表-5 解析に用いた定数

設定定数	a	b	d	$f'_{ck}(28)$ (N/mm ²)
	4.5	0.95	1.11	24

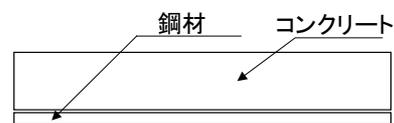


図-8 解析モデル

図中に逆解析として示す。示方書に示される 0.73 より、本実験ではクリープのより大きい若材齢の補正係数を小さく設定することにより、発生応力の近似が改善できることを示している。

NE の解析結果を図-10a, b に示す。NE の初期の補正係数を同様に逆解析を用いて同定した結果、 $\phi=0.49$ を得た。 $\phi=0.49$ を用いた解析結果を図中に示す。初期の有効ヤング係数補正係数の同定値は 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。これにより引張応力低減効果を評価することができると思われる。

(2) 線膨張係数の低減による解析

温度下降部の見掛けの線膨張係数を低減して、膨張材の効果を取り入れる手法により解析した結果を図-11a, b に示す。線膨張係数を上昇部 $10.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、下降部 $7.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とした解析結果は、膨張効果を表すことができるが、無拘束試験体から測定した係数を適用したこのケースは実測値に比べて引張応力の低減を大きめに見積る結果となった。

(3) 膨張量の付加による解析

本コンクリートの JIS 拘束試験⁶⁾による膨張量の測定結果は、 184×10^{-6} の膨張量を示した。

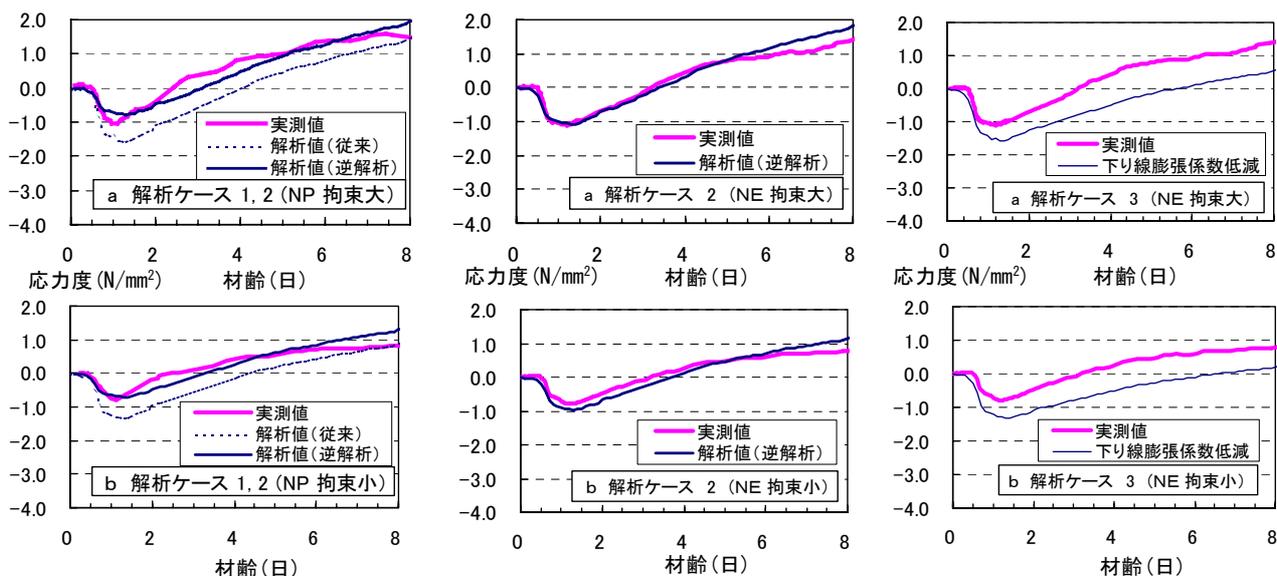


図-9 解析結果 (NP 従来, 逆解析) 図-10 解析結果 (NE 逆解析) 図-11 解析結果 (NE 線膨張係数)

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ることが多い⁸⁾。実験の応力履歴から与える膨張ひずみを逆解析により算定した結果、 $40\sim 80 \times 10^{-6}$ のひずみの値が得られた。これから、近似の膨張ひずみ量として最大膨張ひずみを 70×10^{-6} として設定した。解析に用いた膨張ひずみを図-12 に示す。このひずみ値は、JIS 拘束膨張量と比較して、約 40% の値である。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。 $\phi 0.34$ とし膨張ひずみを与えた解析結果を図-13a, b に示す。解析結果は実測値を比較的良く近似しており、膨張材を添加したコンクリートの膨張収縮挙動は、適切な膨張ひずみを設定すれば解析が可能であることがわかる。解析に与える膨張ひずみの大きさは、JIS 拘束膨張試験を基準にして、解析モデルにおける要素応力度の変化に応じてプログラム中で計算することが考えられ、この値の設定を今後の課題としている。

5. 膨張材の効果の適用

膨張コンクリートを打設した構造物に解析モデルを適用して精度を検討した。対象は、底板厚さ 1.2m, 側壁厚さ 0.9m, 上床版厚さ 1.0m のボックスカルバート構造物である。FEM 解析モデルを図-14 に示す。図中に有効応力計の測定

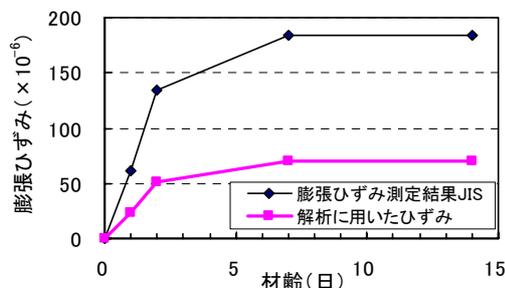


図-12 解析に用いた膨張ひずみ

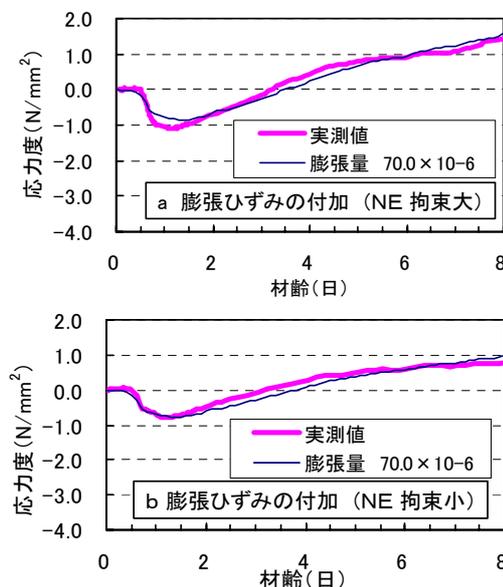


図-13 膨張ひずみの付加

位置を示す。測定結果を図-15a に示す。温度応力の解析条件を表-6 に、有効ヤング係数補正係数 $\phi 0.34$, 膨張ひずみ 70×10^{-6} を用いた解析結果を図-15 b に示す。本構造物の応力履歴は、膨張ひずみを考慮した解析により比較的良

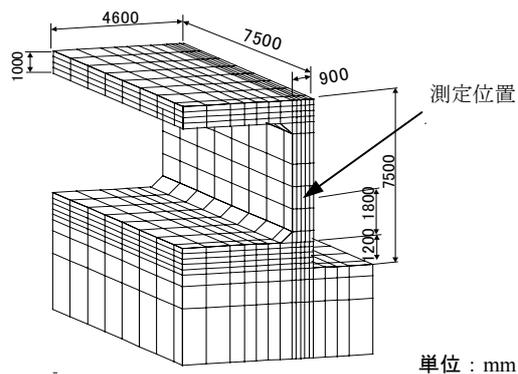


図-14 解析モデル (1/4 モデル)

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	$Q_{\infty}46.0, \gamma 1.425$

好に示すことができる。詳細には解析値は実測値より圧縮ピークが小さく、引張側にシフトしており、改善するためには拘束の検討から膨張ひずみを大きくする、または補正係数を大きくする等の設定が考えられる。また、応力ピークのずれもあり測定値と解析条件を詳細に検討して行く。同時に、実構造物に合わせた拘束と膨張量の関係をさらに範囲を広げて求めることが解析の精度を上げるために必要と考えられる。

6. まとめ

膨張材の効果について、定量的な解析データを得るために温度履歴を与えた拘束試験体を用いた実験を行った。本実験条件のもとで、膨張材を用いたときの応力履歴の大きさは、膨張材を使用しないコンクリートと比べて初期の有効ヤング係数の補正係数が大きくなることにより評価できること、および膨張材を使用しないコンクリートの有効ヤング係数を基準にして、拘束に応じた膨張量を与えることにより膨張応力を解析できる可能性があることを確認した。解析プログラムによる拘束に応じた膨張量の算出を課題としてさらに検討を行っていきたい。

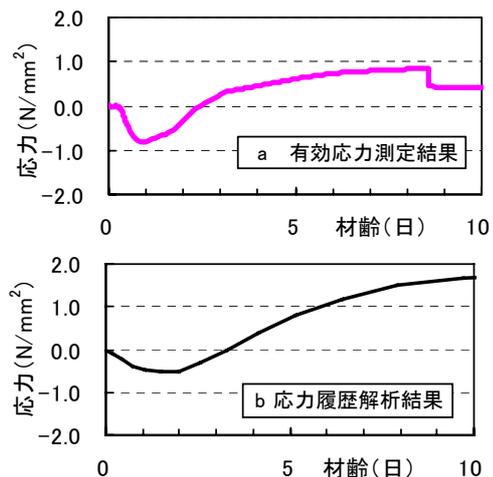


図-15 応力測定結果と解析結果の比較

参考文献

- 1) 辻幸和ほか：膨張材を使用したマスコンクリートの温度応力とケミカルプレストレス，セメント技術年報，36，pp. 159-162，1982
- 2) 竹田宣典，松永篤，近松竜一，十河茂幸：低熱ポルトランドセメントと膨張材を用いた低収縮コンクリートに関する研究，コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 20, No. 2, pp. 997-1002, 1998
- 3) 溝渕利明，横関康祐，信田佳延：一軸拘束試験装置を用いた膨張材の温度応力抑制効果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. 20, No. 2, pp. 1051-1056, 1998
- 4) 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
- 5) 仕入豊和ほか：コンクリートのひび割れ試験方法(案)，コンクリート工学，Vol. 23, No. 3, pp. 40-49, 1985. 3
- 6) 土木学会コンクリート標準示方書施工編，基準編，2002
- 7) 東邦和，廣中哲也，実倉隆幸，梅原秀哲：逆解析手法を用いた温度応力解析の適用性の研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 22, No. 2, pp. 1057-1062, 2000
- 8) 東邦和ら：タンク基礎リングコンクリートへの膨張材適用効果の検討，土木学会第54回年次学術講演会，V-661, pp. 1321-1322, 2002