

論文 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

三谷 裕二^{*1}・谷村 充^{*2}・佐久間 隆司^{*3}・佐竹 紳也^{*4}

要旨：一般的な収縮補償用コンクリートを対象に、拘束膨張ひずみ特性を 20～60℃の養生温度下で実験的に把握し、膨張ひずみ、および膨張過程におけるクリープの影響を含んだヤング係数の温度依存性について検討した。さらに、マスコンクリート様の温度履歴を受ける場合の膨張応力の評価法について検討を加えた。その結果、断熱温度履歴履歴下における膨張ひずみの発現性状は、一定養生温度下で得られたひずみ曲線を重ね合わせる方法で概ね評価できること、また、膨張応力は、見かけの膨張ひずみに重ね合わせ法を適用し、見かけのヤング係数に温度依存性を考慮することで、概ね評価できることを示した。

キーワード：膨張コンクリート、マス養生温度、膨張応力、拘束鋼材比、推定方法

1. はじめに

膨張材によるマスコンクリートの温度ひび割れ低減効果は、定性的にはほぼ把握されている。しかし、昨今の性能照査型設計への移行に伴い、膨張材の使用効果をより定量的に評価する必要が生じている。最近では、膨張材のひび割れ低減効果を解析的に評価することが一般化しているが、その一方で、膨張コンクリートの材料特性に関する知見が不足しており、解析精度を向上させる上で大きな課題となっている。とりわけ、マスコンクリートに膨張材を用いた場合の、諸特性に及ぼす温度の影響については不明な点が多い。

以上の背景から、筆者らは、一般的な収縮補償用コンクリートを対象に、膨張特性を中心とした諸特性に及ぼす温度の影響を実験的に検討した¹⁾。本研究では、20～60℃の養生温度下における拘束膨張ひずみの実験結果に基づき、膨張ひずみ、および膨張過程におけるクリープの影響を含んだヤング係数の温度依存性について検討した。さらに、マスコンクリート様の温度履歴を受ける場合における膨張応力の評価法について検討を加えた。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1、表-2に本実験における使用材料および配合を示す。設計基準強度は 30N/mm²とし、スランブおよび空気量はそれぞれ 15±2.5cm, 4.5±1.5%の範囲とした。用いたコンクリートは水/(セメント+膨張材)比 55%、普通ポルトランドセメントに石灰系膨張材を 30kg/m³ 内割置換した一般的な収縮補償用コンクリートである。

2.2 養生方法

養生温度は 20～60℃の範囲における 10℃間隔の 5 水準、および断熱養生とした。練り混ぜは全て 20℃、R.H.80%の試験室内で行い、打込みからブリーディングがある程度終了するまで 20～30℃の室内に静置した後、表面仕上げを行い、乾燥を防止するために、仕上げ面にポリエステルフィルムを被せた上を湿布で覆った状態で、所定温度の恒温槽内または断熱温度上昇試験装置内に投入した。

2.3 作製供試体および測定方法

図-1に拘束供試体の形状および寸法を示す。拘束鋼材比は 0.5, 1.0, 1.5%の 3 水準とし、それぞれ呼び名 9.2mm, 13mm, 17mm の

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 セメント化学グループ 工修 (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 セメント化学グループ主任研究員 工修 (正会員)

*3 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 (正会員)

*4 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 工修 (正会員)

PC 鋼棒を用い、中央部 40mm が所定の拘束鋼材比になるように円断面に切削加工した。鋼材ひずみを鋼材中央部の対称面に貼付した 2 枚の自己温度補償型ひずみゲージを用いて測定した。以下、この平均値を拘束膨張ひずみと称する。

図-2 に無拘束供試体の形状および寸法を示す。コンクリートの自由な変形が型枠によって拘束されるのを防ぐ方法は、「セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法（改訂版 2002）」²⁾ を参考に、型枠内側の底面にテフロンシート、端面にポリスチレンボードを入れ、その内側および側面にポリエステルフィルムを入れて、コンクリートと型枠が接触しないようにした。ひずみは供試体中心部に設置した低弾性型（見かけの弾性係数：約 40N/mm²）の測温機能付き埋込み型ひずみ計によって測定し、実ひずみから温度ひずみを差し引いたひずみを自由膨張ひずみとした。ここで、温度ひずみはコンクリートの線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として求めた。

尚、以下、拘束膨張ひずみと自由膨張ひずみをまとめて議論する際は、両者を単に膨張ひずみと表現する。

3. 実験結果および考察

3.1 供試体の温度履歴

図-3 は無拘束供試体中心部で測定した温度の経時変化を示す。ここで、材齢の起点は練り混ぜ水を投入した時点としている。全ての供試体は、練り混ぜ水投入時から約 2.5 時間後に所定温度の恒温槽に投入しており、その後 3 時間程度で所定温度に達した。

3.2 膨張特性

図-4 は養生温度別に膨張ひずみと拘束鋼材比の関係の経時変化を示す。図に示す材齢の最終値は、ひずみがほぼ最大となった時点である。また、図-5 は膨張ひずみの最大値を示しており、図中には 20°C における膨張ひずみに対する各温度下の膨張ひずみの比率を併記した。自由膨張ひずみは 40°C を境界に急激な増大を示

表-1 使用材料

材料	記号	物理的性質など
セメント	C	普通ポルトランドセメント/密度：3.16g/cm ³ ，比表面積：3310cm ² /g
膨張材	EX	石灰系膨張材/密度 3.14g/cm ³
高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系/密度：1.06~1.12g/cm ³
細骨材	S	小笠産陸砂/表乾密度：2.59g/cm ³ ，吸水率：1.63%，粗粒率：2.88
粗骨材	G	岩瀬産碎石/最大寸法 20mm，表乾密度：2.64g/cm ³ ，吸水率：0.84%，粗粒率：6.61

表-2 配合

W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	C	EX	S	G	SP
55	47	175	288	30	830	951	0.636

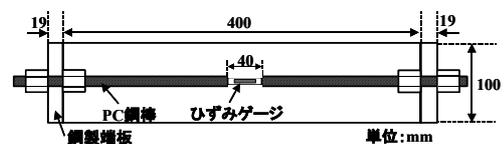


図-1 拘束供試体

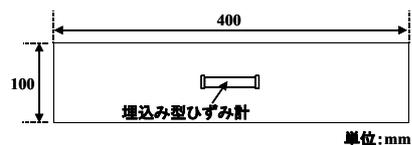


図-2 無拘束供試体

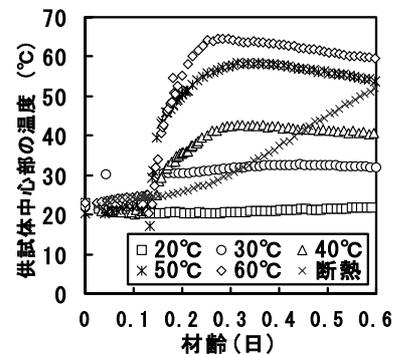


図-3 無拘束供試体の温度履歴

し、20°C に対する比率は 40~60°C で、1.6~2.9 倍であった。一方、拘束膨張ひずみは 0.77~1.2 倍であり、自由膨張ひずみは拘束膨張ひずみと比較して、相対的に温度依存性が大きい。図中の点線は、コンクリート標準示方書³⁾ に規定される収縮補償用コンクリートの目安となる範囲を示している。これと試験条件がほぼ同等である 20°C、1.0%の結果を比較すると、本研究の膨張コンクリートは、その範囲の上限に

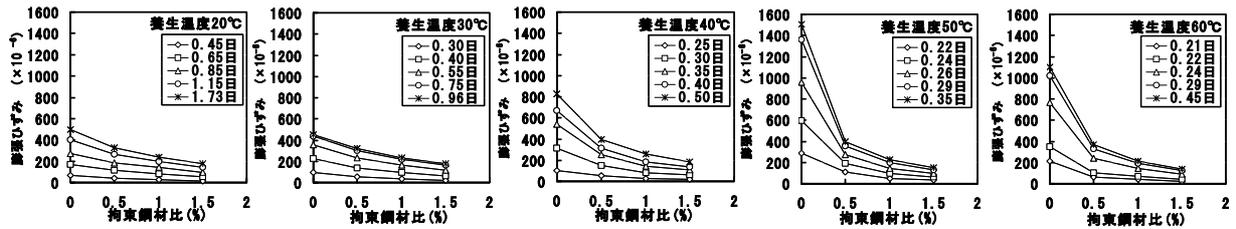


図-4 膨張ひずみと拘束鋼材比の関係

位置しており、温度の上昇に伴い、拘束膨張ひずみの減少傾向が見られるものの、50、60℃および断熱養生下においても、標準値は確保されている。

3.3 膨張ひずみ発現性状の推定方法の検討

図-6に拘束鋼材比1.0%の拘束膨張ひずみの経時変化とその回帰曲線を示す。回帰式は終局の膨張ひずみと進行速度の積で表される式(1)を用いている。表-3に回帰係数を、図-7に回帰係数と養生温度の関係を示す。図中には回帰係数と養生温度の関係式を併記したが、これより任意の養生温度下での膨張ひずみ曲線を求めることが可能となる。

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\infty} \{1 - \exp(-\alpha t^{\beta})\} \quad (1)$$

ここに、 ε ：膨張ひずみ、 ε_{∞} ：膨張ひずみの終局値、 t ：材齢、 α, β ：ひずみの進行速度を表す係数

次に、任意のマス養生温度履歴下における膨張ひずみを、上記の一定温度養生下における膨張ひずみ曲線を重ね合わせることで推定する方法について検討した。図-8は重ね合わせによる方法を模式的に示しており⁴⁾、これは江渡・丸山による潜在膨張量の概念を参考にしたものである⁵⁾。

図中では、時間 t_n までは温度 T_1 、時間 $t_n \sim t_{n+1}$ は温度 T_2 の場合を例示している。まず、時間 t_n までは、温度 T_1 の膨張ひずみ曲線 $\varepsilon(t, T_1)$ 上を A 点までひずみが増大する。次に、時間 t_n で温度が T_2 となった後は、温度 T_2 の膨張ひずみ曲線 $\varepsilon(t, T_2)$ 上をひずみが増大する。その際、温度が変化し直後のひずみの膨張速度は、式(2)に示すように、変化後の温度とそれまでの累積ひずみによって決まるとした。従って、

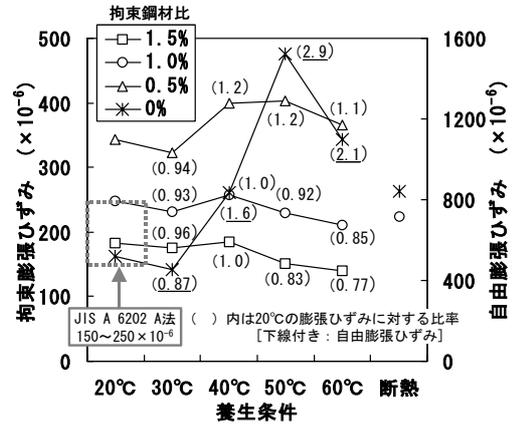


図-5 膨張ひずみの最大値と養生温度

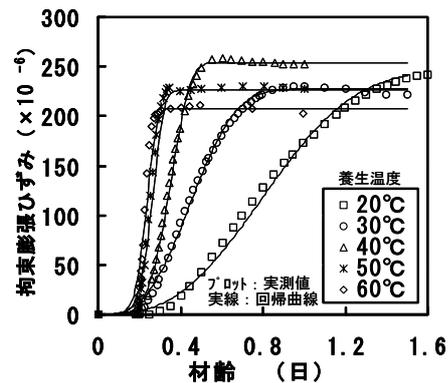


図-6 拘束膨張ひずみの経時変化 (拘束鋼材比1.0%)

表-3 回帰係数(拘束鋼材比1.0%)

温度	ε_{∞}	α	β
20℃	246	1.22	2.57
30℃	228	7.88	3.05
40℃	254	136	4.99
50℃	226	3100	6.27
60℃	207	7922	6.41

* ε_s の単位は $\times 10^{-6}$

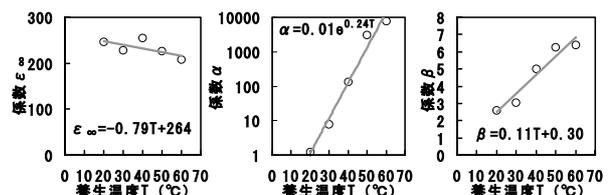


図-7 回帰係数と養生温度 (拘束鋼材比1.0%)

時間 $t_n \sim t_{n+1}$ で生じるひずみは B 点から A 点に平行移動した温度 T_2 の膨張ひずみ曲線 $\varepsilon(t, T_2)$ 上で C 点に達する。

$$\begin{aligned} \varepsilon(t_{n+1}) &= \varepsilon(t_n, T_1) + \Delta \varepsilon \\ &= \varepsilon(t_n, T_1) + \{ \varepsilon(t_n + \Delta t, T_2) - \varepsilon(t_n, T_2) \} \quad (2) \end{aligned}$$

図-9 は断熱養生下における拘束鋼材比 1.0% の膨張ひずみを、20~60℃ 養生下における膨張ひずみの重ね合わせにより推定した結果である。ここで、推定の時間間隔は測定間隔と同一の 15 分とした。推定値は実測値とはほぼ一致しており、本方法により、マス養生温度下における膨張ひずみの発現性状を概ね評価できると考えられる。尚、時間間隔 30~120 分でも検討したが、推定結果に及ぼす影響は小さかった。

4. 膨張応力の評価法の検討

以下では、膨張応力を評価する方法について検討した。図-4 に示したように、拘束膨張ひずみと拘束鋼材比には双曲線のような関係が見られる。そこで、両者の関係を力の釣合いとひずみの適合条件に基づく曲線式 (3) で表すことを考えた。図-10 には、一例として 50℃ 養生における拘束膨張ひずみと拘束鋼材比の関係を示すが、式 (3) による回帰曲線は実測値と概ね良く対応している。この式には、 ε_{cfa} および E_{ca} の 2 つの未知数が含まれているが、これらは、少なくとも 2 つの拘束鋼材比における拘束膨張ひずみが既知であれば定めることができる。拘束鋼材比 0% における膨張ひずみ ε_{cfa} は、いわゆる自由膨張ひずみとは異なるものであり、ここではこれを見かけの膨張ひずみと称する。また、 E_{ca} は時々刻々と変化する膨張応力による弾性ひずみとクリープひずみの両者が考慮されたヤング係数と見なすことができるものであり、これを見かけのヤング係数と称する。これら見かけの膨張ひずみと見かけのヤング係数に基づいて、膨張応力は式 (4) より求めることができる。

$$\Delta \varepsilon_s(t_i) = \Delta \varepsilon_{cfa}(t_i) / \{ 1 + p \cdot E_s / E_{ca}(t_i) \} \quad (3)$$

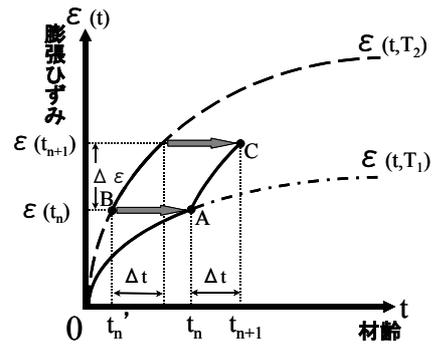


図-8 ひずみの重ね合わせ法の概要

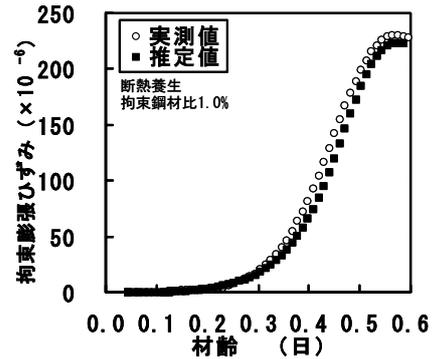


図-9 拘束膨張ひずみの推定結果

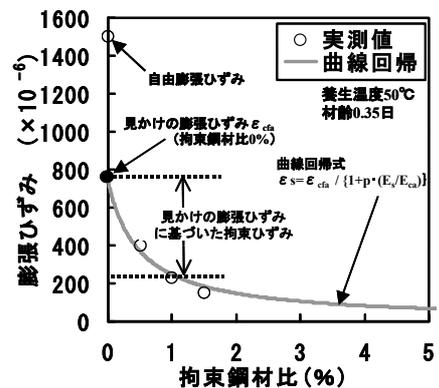


図-10 拘束膨張ひずみと拘束鋼材比の関係 (50℃ 養生の例)

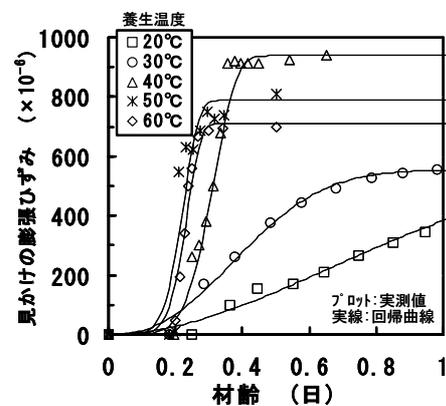


図-11 見かけの膨張ひずみの経時変化

$$\sigma_c = \sum_{i=1}^n \Delta \sigma_c(t_i) = E_s \cdot p \sum_{i=1}^n \Delta \varepsilon_{cfa}(t_i) / \{1 + E_s \cdot p / E_{ca}(t_i)\} \quad (4)$$

ここに、 $\sigma_c(t_i)$ ：ステップ t_i での膨張応力， $\Delta \varepsilon_s(t_i)$ ：ステップ t_i での拘束膨張ひずみの増分量， $\Delta \varepsilon_{cfa}(t_i)$ ：ステップ t_i での見かけの膨張ひずみの増分量， $E_{ca}(t_i)$ ：ステップ t_i での見かけのヤング係数， E_s ：鋼材のヤング係数， p ：拘束鋼材比

以上の考え方により、各養生温度下における拘束膨張ひずみの実測値に基づいて、式 (3) より回帰を行い、見かけの膨張ひずみ、および見かけのヤング係数を求めた。ここで、材齢初期は、膨張ひずみの変化量が小さいために、計算誤差が大きくなることから、膨張ひずみが顕著になる凝結の終結時から、膨張ひずみがほぼ最大となる期間において、養生温度 20、30℃ は約 1 時間、40、50、60℃ は約 30 分間隔の実測値を基に算定している。

図-11 は上記の方法で求めた各養生温度下における見かけの膨張ひずみの経時変化を示す。図中には、式 (1) による回帰曲線を併記した。また、表-4 に回帰係数を、図-12 に養生温度と回帰係数の関係を示す。これより、任意の温度下における見かけの膨張ひずみを求めることが可能である。

図-13 は見かけのヤング係数と有効材齢の関係を示す。有効材齢は式 (5) で表される積算温度方式によるものとした。図中には見かけのヤング係数と有効材齢の関係式を併記している。

$$t_e = \sum_{i=1}^n (\theta_i + 10) / 30 \quad (5)$$

ここに、 t_e ：有効材齢， t ：材齢， θ_t ：材齢 t 日でのコンクリートの平均温度

図-14 に見かけのヤング係数と養生温度の関係を示す。見かけのヤング係数は、養生温度が高いほど小さくなる傾向にある。図中には、各養生温度における見かけのヤング係数の平均値について、20℃に対する比率とその回帰式を

表-4 回帰係数(見かけの膨張ひずみ)

温度	$\varepsilon_{cfa\infty}$	α	β
20℃	592	1.04	1.91
30℃	554	6.14	2.38
40℃	939	664	5.82
50℃	788	6194	5.98
60℃	711	16325	6.82

* $\varepsilon_{cfa\infty}$ の単位は $\times 10^{-6}$

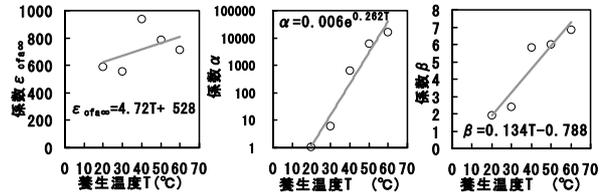


図-12 回帰係数と養生温度 (見かけの膨張ひずみ)

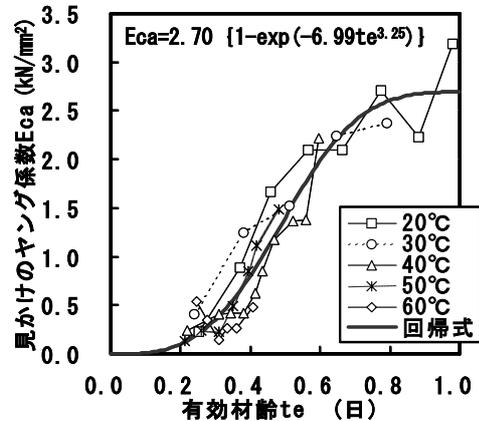


図-13 見かけのヤング係数と有効材齢

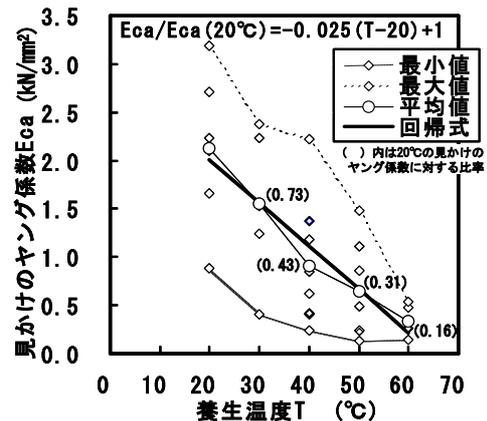


図-14 見かけのヤング係数と養生温度

併記した。

以上の検討に基づいて、マス養生温度履歴を受ける場合の膨張応力の評価法について検討した。図-15 に評価法の概要を示す。見かけの膨張ひずみの発現性状は、3.3 で示した膨張ひ

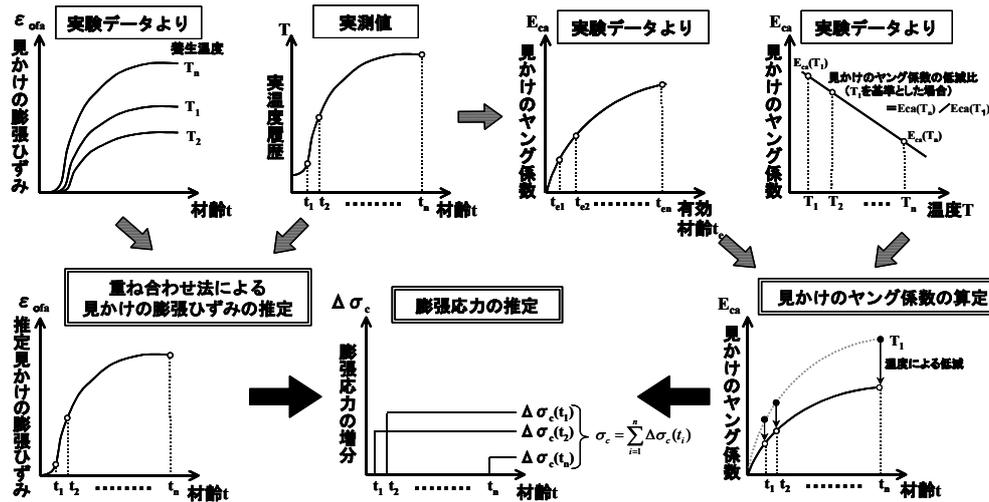


図-15 膨張応力評価法の概要

ずみ曲線の重ね合わせ法により、また、見かけのヤング係数は、図-13 に示した有効材齢との関係式に、図-14 に示した養生温度による見かけヤング係数の低減比を乗じて求める方法にした。

上記の評価法による推定値と実測値を比較した結果を図-16 に示す。図中の計算値①は見かけのヤング係数に、温度履歴の影響のみを考慮した場合、計算値②はそれに温度による低減比を加味した場合の結果である。計算値①では膨張応力を過大に評価しているのに対し、計算値②では実測値を精度良く評価できている。すなわち、膨張ひずみの重ね合わせ法と温度依存性を考慮した見かけのヤング係数によって、膨張応力を概ね評価することが可能である。

本研究は、拘束鋼材比 0.5~1.5%の実験結果に基づいた検討を行ったものである。今後は、より拘束鋼材比の小さい条件および実構造物における高い拘束度を想定した実験、ならびに上記と同様の検討を行って、本評価法の適用性を検証する予定である。

5. まとめ

以下、本研究で得られた知見を記す。

- (1)一定養生温度 20~60℃下で得られた拘束膨張ひずみに、潜在膨張量の概念に基づくひずみ曲線の重ね合わせ法を適用することで、

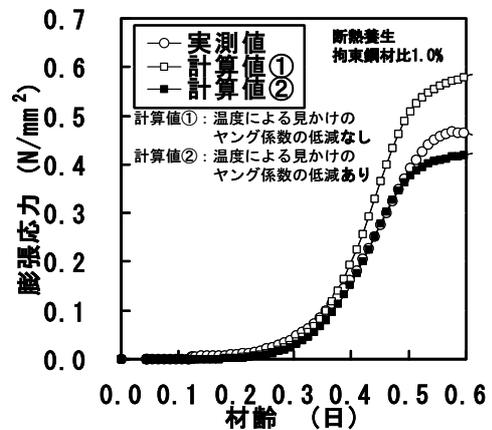


図-16 膨張応力の推定結果

断熱温度上昇履歴下における拘束膨張ひずみの発現性状を概ね推定できた。

- (2)力の釣合いとひずみの適合条件に基づく、膨張応力の一評価法を提示し、見かけの膨張ひずみに重ね合わせ法を適用し、また、見かけのヤング係数に温度依存性を考慮することで、断熱温度上昇履歴下における膨張応力を概ね評価できた。

参考文献

- 1) 三谷裕二ほか：膨張材を混和したコンクリートの拘束膨張特性に及ぼす養生温度の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.155-160，2003
- 2) 日本コンクリート工学協会，コンクリートの自己収縮研究委員会報告書，pp.51-54，2002
- 3) 土木学会，2002年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，pp.289-290，2002
- 4) 谷村充ほか：膨張コンクリートの基本特性に及ぼす養生温度の影響（その2 拘束膨張ひずみの推定），日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.441-442，2003
- 5) 江渡正満，丸山久一：温度履歴が膨張コンクリートに及ぼす影響，土木学会第37回年次学術講演会講演梗概集 V，pp.169-170，1982