

論文 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

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の膨張コンクリートについて、種々の拘束鋼材比・一定養生温度下における拘束膨張ひずみの実験値より、応力算定に用いるための見かけの膨張ひずみと見かけのヤング係数を定める方法を提案した。さらに、これら見かけの物性値の温度依存性を考慮した膨張応力の算定法を提示し、マスコンクリート様の温度履歴を受ける場合の適用性を検証し、概ね推定可能であることを示した。

キーワード：膨張コンクリート、マスコンクリート、温度依存性、膨張応力、算定法

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の大型化・大断面化に伴う温度ひび割れ対策として、膨張材の適用を検討するケースが増える中、その使用効果を実際に即して定量的に評価する手法の確立が望まれている。すなわち、マスコンクリート部材内部は温度の分布を生じ、その結果、膨張ひずみの発現速度やその最大値は断面内の位置によって異なるものと考えられる。しかしながら、過去この点を考慮した膨張応力の評価法に関する検討はほとんど行われておらず、膨張材の使用効果を明確化する上で研究が必要である。

この観点より、筆者らはこれまでに、種々の養生温度下における拘束鋼材比 0.5~1.5%の拘束膨張ひずみを実験的に把握した上で、応力算定に資するための膨張ひずみとヤング係数の定め方を検討し、さらに、マス養生温度履歴を受ける場合の膨張応力の算定法について基礎的に検討した^{1), 2)}。本研究では、既往の研究に対して、より広い範囲の拘束鋼材比の基で拘束膨張特性を把握し、既往の考え方の適用範囲を拡張するとともに、実マスコンクリート体を想定した温度履歴を与えた際の膨張応力の推定精度について検証を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

- *1 太平洋セメント(株) 中央研究所研究開発部 工修 (正会員)
- *2 太平洋セメント(株) 中央研究所研究開発部主任研究員 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)

表-1に使用材料、表-2に配合を示す。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を用いた。設計基準強度は 30N/mm²、スランプおよび空気量はそれぞれ 15±2.5cm, 4.5±1.5%とした。

2.2 養生方法

養生温度は 20, 40, 60℃の 3 水準、およびマスコンクリート様の温度履歴 3 水準とした。練混ぜは 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 20~25℃の室内に静置した後、仕上げ面にポリエステルフィルムを被せ、さらにその上を湿布で覆った状態で、所定温度の恒温槽内に投入した。

2.3 作製供試体および測定方法

図-1に拘束供試体および無拘束供試体の形状、寸法を示す。拘束鋼材比は 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 3.0, 8.0%の 6 水準とし、0.2~1.5%の場合は拘束棒が 1 本のタイプ I を、3.0, 8.0%の場合は拘束棒が 4 本のタイプ II を用いた。拘束棒には、0.2%ではφ5mmの丸鋼を、0.5~1.5%ではそれぞれ呼び名 9.2mm, 13mm, 17mmのPC鋼棒を、3.0, 8.0%では呼び名 11mm および呼び名 17mmのPC鋼材 4 本を用い、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。鋼材のひずみは鋼材中央部に貼付した自己温度補償型ひずみゲージ（拘束鋼材比 0.2~1.5%：対称面に 2 枚，3.0，8.0%：各鋼材に 1 枚ずつの計 4 枚）を用いて測定した（以下，拘束膨張ひずみ）。無拘束供試体のひずみは，供試体中央部に設置した低弾性型の埋込み型ひずみ計（見かけのヤング係数 40N/mm²）を用いて測定し，コンクリートの線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定して温度ひずみを補正した（以下，自由膨張ひずみ）。

3. 実験結果および考察

3.1 拘束鋼材比と膨張ひずみ

図-2に 20，40，および 60℃で養生した場合の膨張ひずみと拘束鋼材比の関係の経時変化を示す。材齢の起点は注水時点とし，最終値は各温度下で膨張ひずみがほぼ最大となった時点である。また，表-3には膨張ひずみの最大値を示す。自由膨張ひずみは，養生温度の上昇に伴って急激に大きくなり，20℃と比較して40℃で約2倍，60℃で約4倍であった。一方，拘束膨張ひずみは，0.2%の場合に60℃で20℃の約2倍であったものの，拘束鋼材比が大きくなるに従って，養生温度による差は小さくなり，自由膨張ひずみと比較して，相対的に温度依存性が小さくなっている。

筆者らは，拘束鋼材比 0.5~1.5%の範囲において，拘束膨張ひずみと拘束鋼材比が下に緩やかな凸となる曲線的な関係にあることを報告しているが²⁾，本実験結果より，拘束鋼材比 0.2

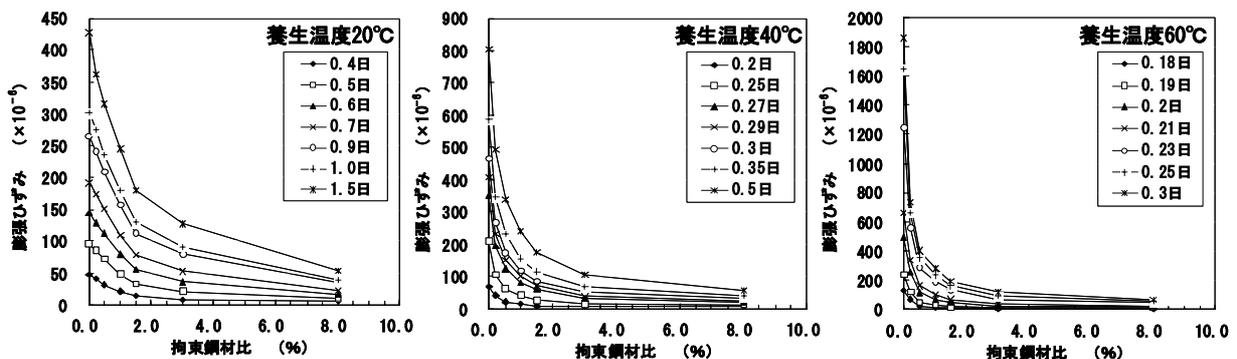


図-2 拘束膨張ひずみおよび自由膨張ひずみと拘束鋼材比の関係

~8.0%のより広い範囲においても同様の関係が確認できた。

次に，上記実験結果を基に，膨張応力算定に

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：1.09g/cm ³
細骨材	S	小笠産陸砂/表乾密度：2.59g/cm ³ ，吸水率：1.63%
粗骨材	G	岩瀬産砕石/最大寸法 20mm，表乾密度：2.64g/cm ³ ，吸水率：0.84%

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

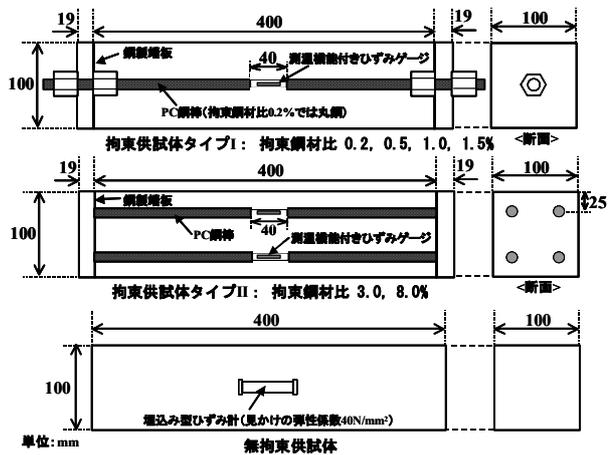


図-1 拘束供試体および無拘束供試体

表-3 膨張ひずみの最大値

養生温度	拘束鋼材比 (%)						
	0	0.2	0.5	1.0	1.5	3.0	8.0
20℃	437	367	320	252	182	130	55
40℃	802	493	339	240	173	106	57
60℃	1858	733	407	283	198	118	68

単位：×10⁻⁶

用いる膨張ひずみ，およびヤング係数を定め，各々の温度依存性について検討する。

両者の算定には，既に筆者らが提示した²⁾，拘束膨張ひずみと拘束鋼材比の関係に力の釣合いとひずみの適合条件に基づく式(1)を適用した。図-3にその概略図を示す。

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

ここに， $\Delta \varepsilon_s(t_i)$ ：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(N/mm²)， E_s ：鋼材のヤング係数(N/mm²)， p ：拘束鋼材比

式中の2つの未知数 ε_{cfa} および E_{ca} は実測値の回帰より算出することができ， ε_{cfa} は拘束膨張ひずみを基に定められた拘束鋼材比0%における膨張ひずみを示しており， 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影響を含んだヤング係数と見なすことができるものである。以下， ε_{cfa} ， E_{ca} を見かけの膨張ひずみ，および見かけのヤング係数と称し，各々の温度依存性について検討する。

3.2 見かけの膨張ひずみ

図-4に養生温度20，40，60℃における見かけの膨張ひずみと有効材齢の関係を示す。有効材齢は特に若材齢における評価に有効とされる積算温度方式による式(2)を用いた。図中には，終局膨張ひずみとひずみの進行速度の積で表される式(3)による回帰曲線を併記する。

$$t_e = \sum_{i=1}^n (T_i + 10) \cdot \Delta t_i / 30 \quad (2)$$

$$\varepsilon_{cfa}(t_e) = \varepsilon_{cfa\infty} [1 - \exp\{-\alpha(t_e - t_{e0})^\beta\}] \quad (3)$$

ここに， t_e ：有効材齢，
 Δt_i ：温度が T_i である期間，
 ε_{cfa} ：見かけの膨張ひずみ，
 $\varepsilon_{cfa\infty}$ ：見かけの膨張ひずみの終局値，
 α, β ：見かけの膨張ひずみの進行特性を表す係数，
 t_{e0} ：凝結始発時点の有効材齢

また，図-5は回帰係数と養生

温度の関係，および両者の関係式を示しており，これより，任意の一定養生温度下における見かけの膨張ひずみ曲線を定めることが可能である。

3.3 見かけのヤング係数

図-6に膨張ひずみがほぼ最大に達する時点までの見かけのヤング係数と有効材齢の関係を示す。

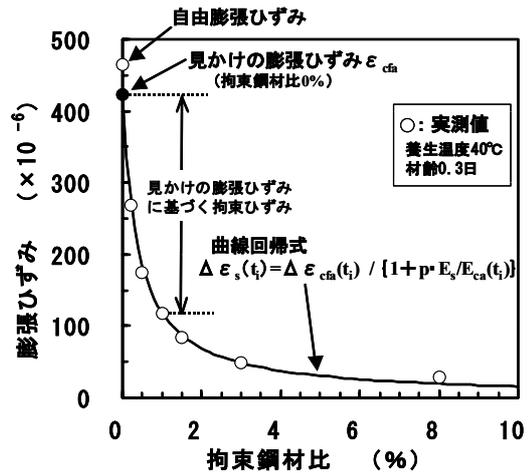


図-3 拘束膨張ひずみと拘束鋼材比の関係

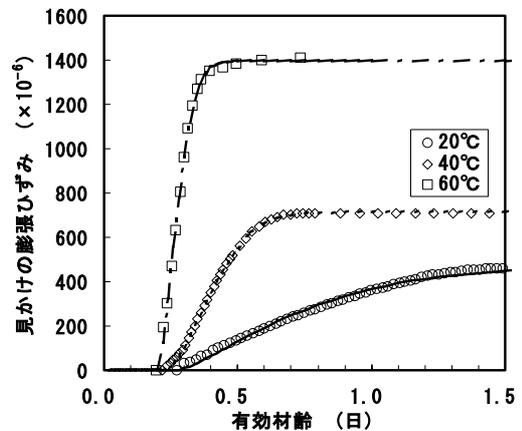


図-4 見かけの膨張ひずみの経時変化

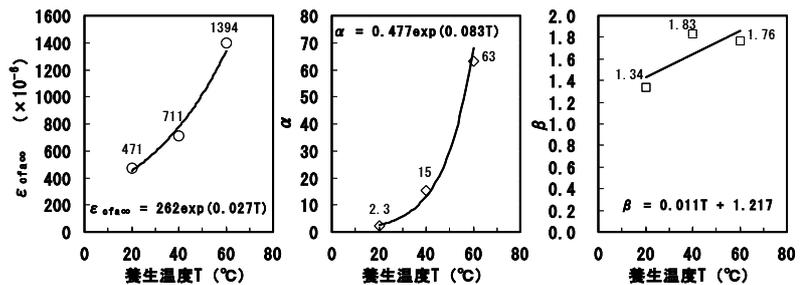


図-5 回帰係数と養生温度の関係

示す。図中には、養生温度 20℃における、(3) 式と同様な見かけのヤング係数の終局値と進行速度の積による回帰式を併記する。

4. 温度履歴下における材料特性の推定

4.1 温度履歴の設定

見かけの膨張ひずみおよび見かけのヤング係数の発現性状に及ぼすマス養生温度履歴の影響を検討するに際し、3 パターンの温度履歴を設定した。すなわち、JCI マスコンクリート委員会報告書³⁾に示されている壁状構造体(高さ 2000mm, 幅 1800mm)について、断面中央の上層(高さ 1800mm), 中層(高さ 1000mm), および下層(高さ 200mm)位置における温度履歴を 2 次元 FEM 温度解析より求め、これに基づいて制御した恒温槽内で供試体を養生した。図-7 に供試体中心部の温度計測結果を示す。

4.2 見かけの膨張ひずみの発現性状

任意の温度履歴下における見かけの膨張ひずみは、図-5 より温度に対応して決まる回帰係数を式(3)に代入して求めた一定温度下における見かけの膨張ひずみ曲線を、図-8 に示す方法で重ね合わせて算出することを検討した。図中では、有効材齢 t_{en} までは温度 T_1 , 有効材齢 $t_{en} \sim t_{en+1}$ は温度 T_2 の場合における重ね合わせの方法を例示している。まず、有効材齢 t_{en} までは、温度 T_1 の膨張ひずみ曲線 $\epsilon(t_e, T_1)$ 上をひずみが増大し、A 点に達する。次に、有効材齢 t_{en} で温度が T_2 となった後は、温度 T_2 の膨張ひずみ曲線 $\epsilon(t_e, T_2)$ 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、その時点の温度と有効材齢に依存するとした。従って、有効材齢 t_{en+1} には、温度 T_2 の膨張ひずみ曲線 $\epsilon(t_e, T_2)$ 上の曲線 CD を A 点に平行移動して B 点に達する。

図-9 は実測値に基づく見かけの膨張ひずみと膨張ひずみ曲線を重ね合わせる手法による計算値を比較した結果である。実測値に基づくひずみの発現速度およびその最大値の大小関係は

概ね上層<中層≒下層となっている。計算値について、上層の温度履歴を与えた際には実測値を若干過大に評価しているものの、中層や下層では良く表現できている。すなわち、温度履歴下における見かけの膨張ひずみの発現性状は、

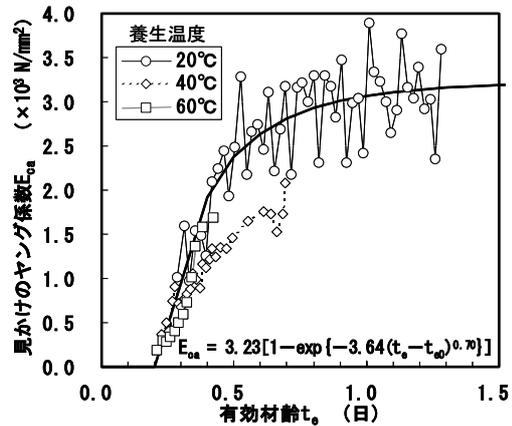


図-6 見かけのヤング係数と有効材齢の関係

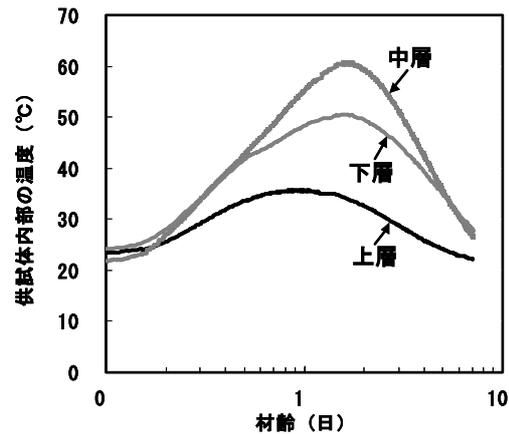


図-7 供試体内部の温度履歴

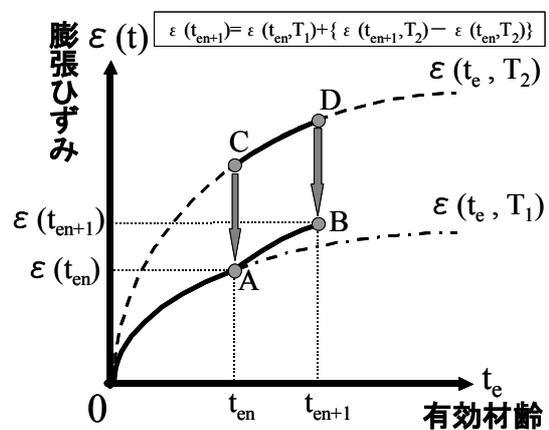


図-8 膨張ひずみの重ね合わせの概要

膨張ひずみ曲線の重ね合わせにより概ね評価できると考えられる。

4.3 見かけのヤング係数の発現性状

図-10 は、見かけのヤング係数の計算値と温度履歴下の拘束膨張ひずみの実測値に基づく見かけのヤング係数を比較したものである。図中の計算値1は図-6に示した有効材齢との関係式で算定した結果であり、実測値に基づく見かけのヤング係数を過大評価している。

図-11 は養生温度 20, 40, 60℃における見かけのヤング係数の平均値（注水時から膨張ひずみが最大に至るまでの範囲）と養生温度の関係を示しており、図中には各養生温度における見かけのヤング係数の 20℃に対する比とその回帰式を併記した。これより、養生温度の上昇に伴って、見かけのヤング係数が小さくなる傾向が認められる。この点を考慮し、図-10における計算値2は、有効材齢に基づく見かけのヤング係数（計算値1）を、図-11に示した回帰式によりその時点の温度に依存させて低減した場合であり、実測値と良く対応している。すなわち、温度履歴下における見かけのヤング係数は有効材齢との関係に温度による低減を加味することにより、概ね良く評価できていると考えられる。

見かけのヤング係数は有効材齢との関係のみを用いる場合とそれに温度による低減を加味する場合の兩者について検討した。見かけの膨張ひずみおよびヤング係数を用い、膨張応力は式(4)より求める。

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

ここに、 σ_c ：膨張応力 (N/mm²)、 $\sigma_c(t_i)$ ：ステップ t_i での膨張応力

ここで、応力算定における始発時点の有効材齢 t_{e0} には、本実験結果より養生温度による始発時点の有効材齢の差が小さいことから、その平均値 0.227 日を用いた。

図-13 は拘束鋼材比 0.2, 1.5, 8.0%の膨張応力の実測値と計算値を比較して示したものである。まず、実測値に及ぼす温度履歴の影響について、膨張応力の発現速度は明らかに異なるが、その最大値は大差ない結果となっている。この傾向を、見かけのヤング係数の温度による

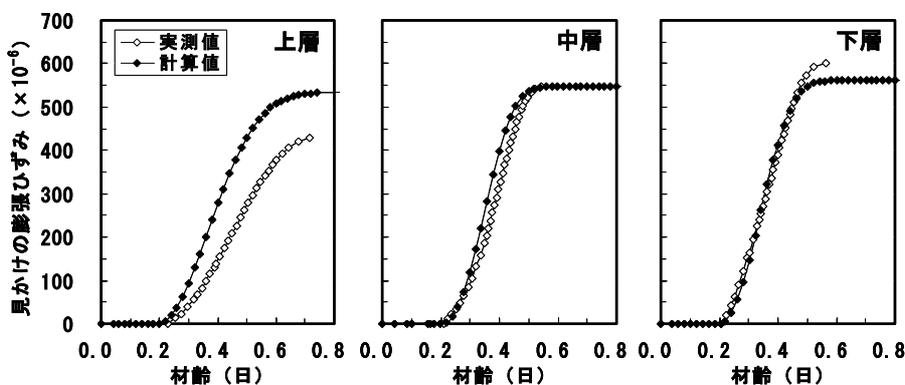


図-9 見かけの膨張ひずみの推定結果

5. 膨張応力の算定

本研究で提示する、マス養生温度履歴下における膨張応力の算定方法は図-12に示すようである。すなわち、見かけの膨張ひずみは、一定温度下の膨張ひずみ曲線を重ね合わせる方法より算出し、

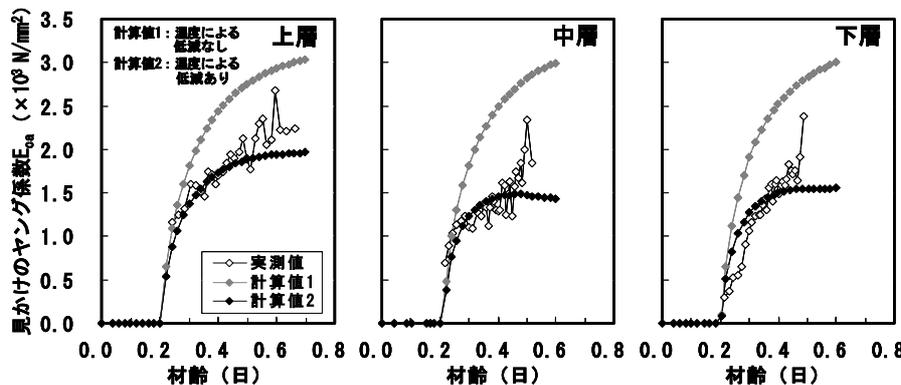


図-10 見かけのヤング係数の推定結果

低減比を加味した計算値2はほぼ良く評価できている。一方、見かけのヤング係数に温度による低減比を加味しない計算値1の場合は、膨張応力をかなり過大に評価している。

6. まとめ

以下、本研究から得られた知見を示す。

- (1) 種々の養生温度下における拘束鋼材比 0.2～8.0%の拘束膨張特性を実験的に把握した。その結果、拘束膨張ひずみと拘束鋼材比には曲線的な関係が認められた。
- (2) 拘束膨張ひずみと拘束鋼材比の関係に力の釣合いとひずみの適合条件に基づく曲線式を適用して算出した、見かけの膨張ひずみと見かけのヤング係数を用いた膨張応力算定法を提示した。
- (3) 一定温度下における見かけの膨張ひずみの重ね合わせと温度による低減を加味した見かけのヤング係数を用いた膨張応力算定法により、種々のマス養生温度履歴下における膨張応力を概ね評価できた。

今後は、膨張コンクリートを用いた実構造物の応力評価に本算定法を取り入れ、検証を進める予定である。

参考文献

- 1) 三谷裕二, 谷村充, 佐久間隆司, 佐竹紳也: 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.156-160, 2003

- 2) 三谷裕二, 谷村充, 佐久間隆司, 佐竹紳也: 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
- 3) 日本コンクリート工学協会, マスコンクリートソフト作成委員会報告書, pp.124-126, 2003

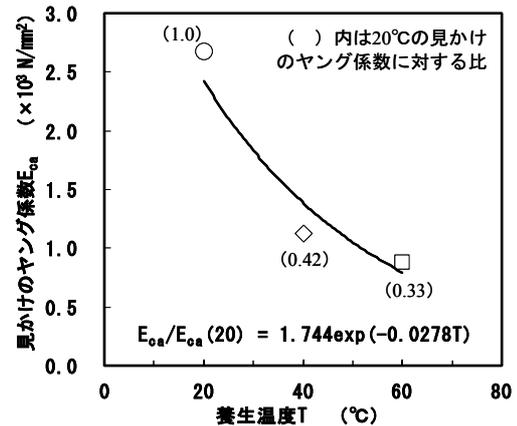


図-11 見かけのヤング係数と養生温度の関係

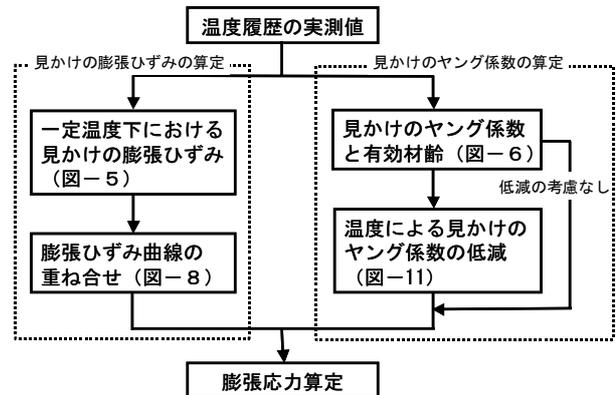


図-12 膨張応力算定のフロー

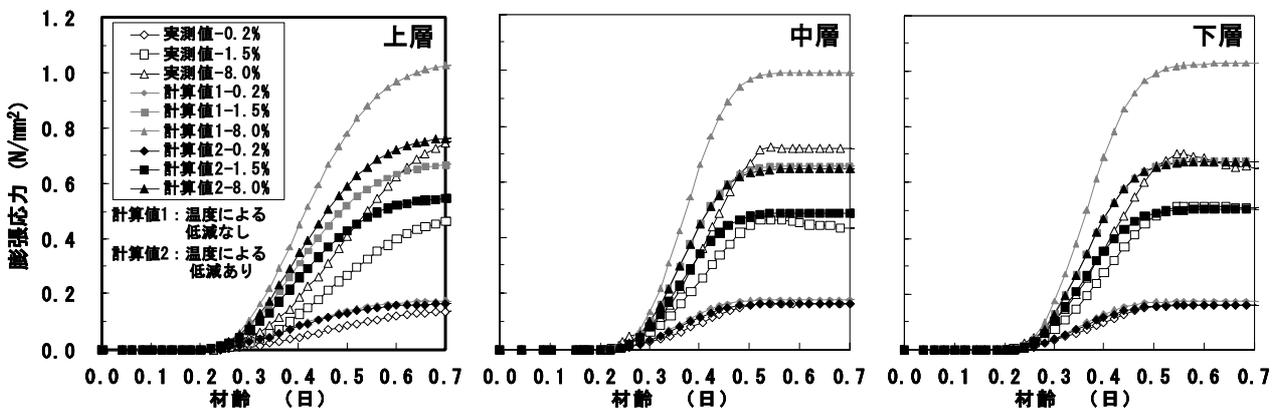


図-13 膨張応力の推定結果