

膨張コンクリートの温度依存性を考慮した材料特性モデル

太平洋セメント(株) 正会員 ○三谷 裕二 谷村 充 松本 健一
太平洋マテリアル(株) 正会員 佐竹 紳也

1. はじめに

コンクリート構造物の大型化に伴う温度ひび割れの低減対策として、膨張材の使用を検討するケースが増えており、膨張材の使用効果についてより定量的に評価する手法の確立が求められている。最近では、解析技術の向上に伴い、既存の応力解析プログラム等を利用して、膨張材による引張応力の低減効果や、ひび割れ指数・同発生確率等によってひび割れ抵抗性の向上効果を評価することが行われているが、解析精度の向上が課題である。この種の解析による予測精度は、コンクリートの膨張・収縮ひずみ、ヤング係数・クリープ等の力学特性に関する入力物性値の精度に大きく左右されるものであるが、膨張コンクリートの特に若材齢における材料特性については十分に把握されていない部分もあり、研究の蓄積が望まれる。マスコンクリート構造物では、部材内部の温度の分布に応じて、膨張材による膨張ひずみの発現も温度が高いところと低いところでは自ずと異なることが考えられ、このような膨張材の温度依存性について知見を深めることが必要である。本報告では、筆者らが過去に提示した¹⁾、膨張コンクリートの拘束実験に基づく材料特性モデルの構築方法を取りまとめるとともに、新たにインバー鋼棒を配した拘束実験を行い、これまでの温度上昇時(膨張時)に加え、温度降下時までモデルを拡張した結果を示す。

2. 本研究の特徴

図-1 に、膨張コンクリートの温度依存性を考慮した応力算定法の概要を示す。解析法そのものは既存の手法を用いることを前提とするが、膨張コンクリートの膨張ひずみおよびヤング係数(クリープの影響を含む)を、それらの温度依存性を考慮できるモデルによって推定する点に特徴がある。これにより、構造物各部の温度に依存した膨張ひずみ分布を求めることができ、内部拘束による応力の発生を評価することも可能になると考えられる。コンクリート標準示方書[施工編]には、コンクリートの温度ひずみおよび自己収縮ひずみに起因する応力の算定法が示されているが、これらのひずみと同列に膨張材による膨張ひずみを取り扱うことを基本としている。

過去、温度応力解析における膨張ひずみの取り扱いについては、線膨張係数を操作する方法、想定されるケミカルプレストレスを引張応力から直接減じる方法、膨張ひずみを設定する方法(例えば、膨張ひずみの最大値を $100 \sim 150 \times 10^{-6}$ とした指数関数など)が報告されている。これらの方法は、特定の構造物の事後解析では一定の評価が得られているものの、汎用性に欠ける点が問題であると考えられる。本研究における手法は、膨張ひずみを与える点では上記の範疇に入るが、有効材齢による膨張ひずみ曲線の設定と、温度履歴に応じて膨張ひずみ曲線を重ね合わせる方法を取り入れている。応力算定における重要な力学特性値として、ヤング係数および初期クリープの取り扱いについては、コンクリート標準示方書[施工編]に示されている、有効ヤング係数の考え方を基礎とし、そのクリープによるヤング係数の補正係数(低減係数)およびその補正期間をそのまま用いるか、あるいはそれぞれに設定した値を用いてヤング係数を低減する方法が多く見受けられる。本研究における手法も、強度試験から得られる割線ヤング係数よりも小さなヤング係数を設定している点では同じであるが、これまであまり知見のない、膨張コンクリートを対象にしている点異なる。

3. 材料特性モデルの構築

(1) 拘束実験に基づく方法の考え方 提示する手法では、応力算定に資するために膨張ひずみおよびヤング係数を定めるにあたり、一軸拘束試験に基づく実測データを利用する。一軸拘束試験は、JIS A 6202 附属書 2 に示されている方法を参考にし、その拘束棒の断面積(鋼材比)を変化させて行う。また、コンクリートの養生温度を変化させることにより、温度依存性に係わるデータを取得する。ここでは、拘束を与える方法として、コンクリートに鋼棒を埋込む方法を用いているが、コンクリートに何らかの方法で拘束を与え応力を発生させることが基本となる。鋼材比と鋼材ひずみの関係は、鋼材とコンクリートの力の釣り合いおよびひずみの適合条件より(1)式で与えられる。

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{ca} / (1 + p \cdot E_s / E_{ca}) \quad (1) \quad (\varepsilon_s: \text{鋼材のひずみ}, p: \text{鋼材比}, E_s: \text{鋼材のヤング係数})$$

キーワード：膨張コンクリート、マス養生温度履歴、膨張ひずみ、ヤング係数、材料特性モデル

〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2 太平洋セメント中央研究所 TEL043-498-3894

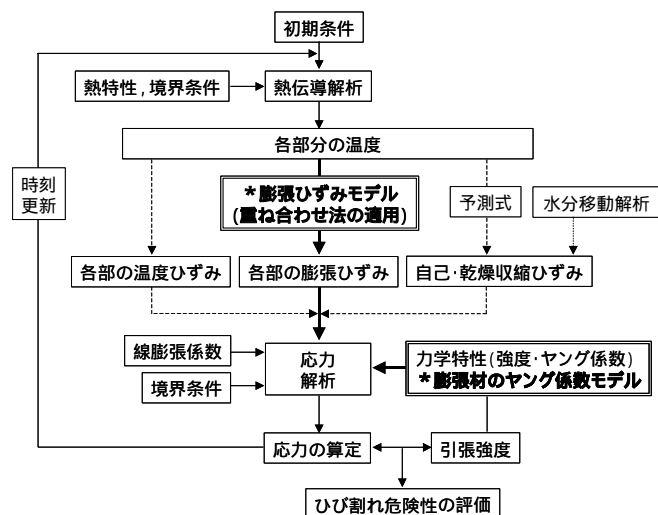


図-1 膨張コンクリートの温度依存性を考慮した応力算定法の概要

ε_{cfa} および E_{ca} は(1)式の未知数であり、その一例を図-2に示すように、拘束膨張ひずみと鋼材比の関係を回帰して求める。 ε_{cfa} は解析に用いるための仮定の膨張ひずみ(≠自由膨張ひずみ)であり、ここではこれを“見かけの膨張ひずみ”と称する。 E_{ca} は、時々刻々と変化する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、ここではこれを“見かけのヤング係数”と称する。提示する手法では、見かけの膨張ひずみと見かけのヤング係数を応力算定に用いる特性として取り扱い、定式化を行う。なお、一般の鋼材を用いる場合は、コンクリートと鋼材の線膨張係数を同一と仮定している。

(2) 膨張ひずみモデル 見かけの膨張ひずみの定式化にあたり、まず、時間ステップごとの鋼材ひずみ変化量より、(1)式を回帰して時間の経過に伴う個々の値を求める。この方法により、見かけの膨張ひずみを求めた例を図-3に示す¹⁾。見かけの膨張ひずみと有効材齢の関係は、例えば、見かけの膨張ひずみの最大値とその進行特性を表す関数の積として、養生温度の影響を考慮した(2)式により表現できる。

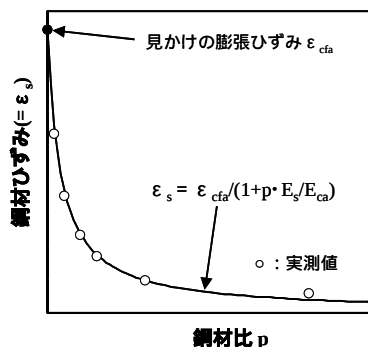


図-2 鋼材ひずみと鋼材比の関係

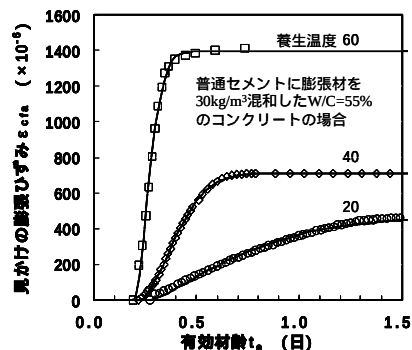


図-3 見かけの膨張ひずみの経時変化

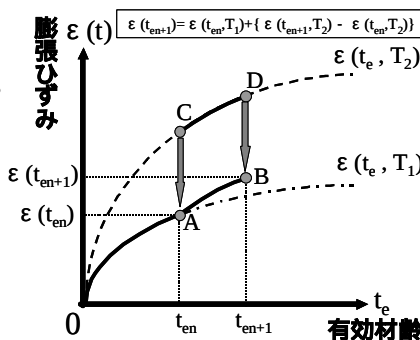


図-4 膨張ひずみ曲線の重ね合わせ法

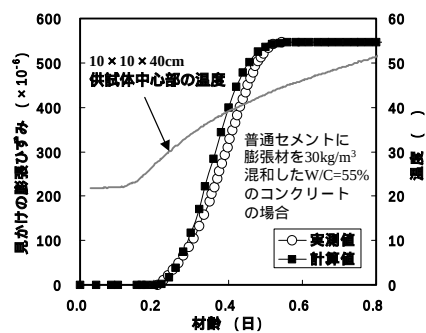


図-5 見かけの膨張ひずみの推定例

$\varepsilon_{cfa}(T, t_e) = \varepsilon_{cfa\infty}(T) [1 - \exp\{-\alpha(T) \cdot (t_e - t_{e0})\}^{\beta(T)}]$ (2)

ε_{cfa} : 見かけの膨張ひずみ(×10⁻⁶), $\varepsilon_{cfa\infty}(T)$: 見かけの膨張ひずみの最大値, $\alpha(T)$, $\beta(T)$: 見かけの膨張ひずみの進行特性を表す係数, t_e : 積算温度方式に基づく有効材齢(日) (= $\sum (T_i + 10) \cdot \Delta t_i / 30$, Δt_i : 温度が T_i である日数), t_{e0} : 凝結始発時の有効材齢, T : ある一定の温度(°C)。(2)式の各係数を回帰より求め、温度との関係を検討した結果¹⁾、それぞれ次の式により表すことができた: $\varepsilon_{cfa\infty}(T) = 262 \exp(0.027T)$, $\alpha(T) = 0.477 \exp(0.083T)$, $\beta(T) = 0.011T + 1.217$, t_{e0} は実測値より 0.2。これより、任意の一定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になる。

次に、図-4に、一定温度下で見かけの膨張ひずみ曲線を重ね合わせ、様々な温度履歴を伴う場合について見かけの膨張ひずみを推定する方法の概要を示す。マスコンクリートと同様の温度履歴を与えた場合の見かけの膨張ひずみについて、実測値に基づく値と重ね合わせ法によって求めた推定値を比較した例を図-5に示すが、両者はよく一致している。

(3) ヤング係数モデル 見かけのヤング係数についても、まず、時間ステップごとの鋼材ひずみ変化量より、(1)式を回帰して時間の経過に伴う個々の値を求める。この方法により、見かけのヤング係数を求めた例を図-6に示す¹⁾。また、これまで検討できていなかった領域であるが、図-7には、線膨張係数が一般の鋼材のおよそ1/20であるインバー鋼材を使用した実験により、膨張時と同様の方法によって温度降下時の見かけのヤング係数を求めた結果を示す。この例では、見かけのヤング係数と有効材齢の関係は、膨張材の作用がほぼ頭打ちとなる2日を境界とした(3)式により表現することができる。

$$\begin{aligned} t_e \leq 2 \quad E_{ca}(t_e) &= 3.23 [1 - \exp\{-3.64(t_e - t_{e0})\}^{0.70}] \\ t_e > 2 \quad E_{ca}(t_e) &= (t_e - 2) / [0.091 + 0.040(t_e - 2)] + 3.22 \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 E_{ca} : 見かけのヤング係数(kN/mm²), t_{e0} : 凝結始発時点の有効材齢(日) (= 0.2 日)

4. まとめ 以上、本報告では、膨張コンクリートの温度依存性を考慮した材料特性モデルを構築するための手法の考え方、それに基づく見かけの膨張ひずみと見かけのヤング係数を定式化した例を示した。このモデルの適用性は別に検討を行っている²⁾。

【参考文献】1) 三谷裕二ほか：マス養生温度履歴を受けた膨張コンクリートの膨張応力算定法，土木学会第60回年次学術講演会集，pp.593-594，2005 2) 谷村 充ほか：マス養生温度履歴を受ける膨張コンクリートの応力算定法とその検証，土木学会第61回年次学術講演会集，2006

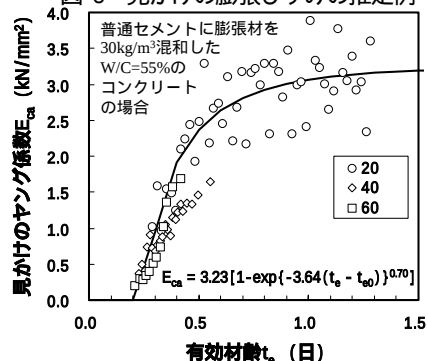


図-6 見かけのヤング係数と有効材齢の関係の例(温度上昇時)

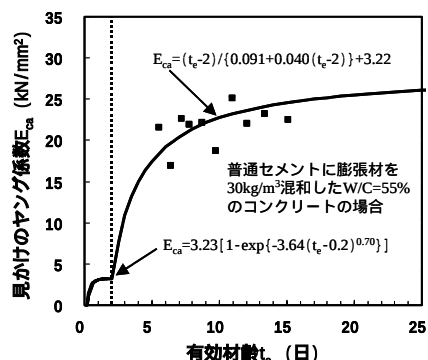


図-7 見かけのヤング係数と有効材齢の関係の例(温度上昇～降下時)