

高炉セメントを用いた膨張コンクリートのマス養生温度履歴を考慮した材料特性モデルと応力算定法

日本ヒューム(株) 正会員 ○三谷 裕二
 太平洋セメント(株) 正会員 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

近年、膨張材の温度ひび割れ低減効果を解析的に評価する手法の研究が増えている。しかし現状では、様々な手法が提案されている段階であり、評価方法の一般化を図る上では解析精度の向上や適用範囲の拡張が課題となっている。このような中、筆者らは、膨張コンクリートの膨張ひずみおよびヤング係数の温度依存性を考慮した材料特性モデルを構築し、それらを用いた応力算定法によりマス養生温度履歴を受けた膨張コンクリートの拘束応力挙動を概ね良く推定できることを示した^{1), 2)}。しかしながら、提示したモデルは普通セメントを用いた膨張コンクリートに限られており、同手法の適用範囲を拡張する上ではセメント種類が異なる場合の適用性を検証することが必要である。そこで本報では、高炉セメントと膨張材を組み合わせたコンクリートを対象に、過去に提示した手法により応力解析用の材料特性モデル（見かけの膨張ひずみ・ヤング係数）を構築し、さらに、そのモデルを用いた応力算定法の適用性について検討を加えた。

2. 材料特性モデルの構築

応力解析に用いるための膨張ひずみ（見かけの膨張ひずみ ε_{cfa} ）およびヤング係数（見かけのヤング係数 E_{ca} ）は、筆者らが過去に提示した方法¹⁾、すなわち、種々の温度下における一軸拘束試験より得られる膨張ひずみと拘束鋼材比の関係性を力の釣合いとひずみの適合条件に基づく（1）式で回帰することにより算出する。図-1 に両物性値の算出方法の概要図を示す。ここで、 ε_{cfa} は拘束膨張ひずみより推定した拘束鋼材比ゼロにおける膨張ひずみであり、 E_{ca} は時々刻々と変化する弾性応力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。

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

ここに、 $\varepsilon_s(t_i)$ ：時間ステップ t_i における鋼材ひずみの変化量、 $\Delta \varepsilon_{cfa}(t_i)$ ：時間ステップ t_i における見かけの膨張ひずみの変化量、 $E_{ca}(t_i)$ ：時間ステップ t_i における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

上記の見かけの物性値を算定するにあたり、水/（普通セメント＋高炉スラグ微粉末＋膨張材）比 55%，高炉スラグ微粉末の置換率 42%（高炉セメント B 種相当）、単位膨張材（石灰系・低添加型）量 20kg/m³ の膨張コンクリートを用い、PC 鋼材（拘束鋼材比 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 4.0%）およびインバー鋼材（拘束鋼材比 0.7, 1.7, 5.7%）を配した一軸拘束試験を行った³⁾。インバー鋼材は線膨張係数が一般的な鋼材の約 1/20（ $0.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）であるため、膨張ひずみと温度ひずみの双方の影響を含んだ拘束膨張・収縮ひずみを測定できる。なお、養生条件は、PC 鋼材供試体が一定温度 20, 40, 60℃ の 3 水準、インバー鋼材供試体がマスコンクリート部材内部を想定した温度履歴下（温度上昇～温度降下）とした。

見かけの膨張ひずみ：図-2 に養生温度 20, 40, 60℃（PC 鋼材拘束試験）における見かけの膨張ひずみと積算温度方式による有効材齢との関係を示す。

図中には、両者の関係の回帰曲線を併記する。また、図-3 には回帰係数と温度の関係、および両者の関係式を示す。ただし、回帰係数 β については、温度との明確な関係が認められなかったため、温度に拘らず一定値とした。これにより、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できる。

見かけのヤング係数：図-4 に PC 鋼材の拘束試験結果に基づく見かけのヤング係数と有効材齢の関係を示

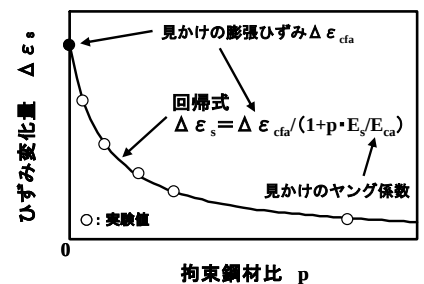


図-1 膨張ひずみと拘束鋼材比の関係

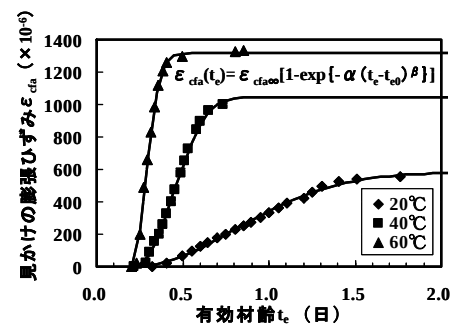


図-2 見かけの膨張ひずみと有効材齢の関係（PC 鋼材拘束試験）

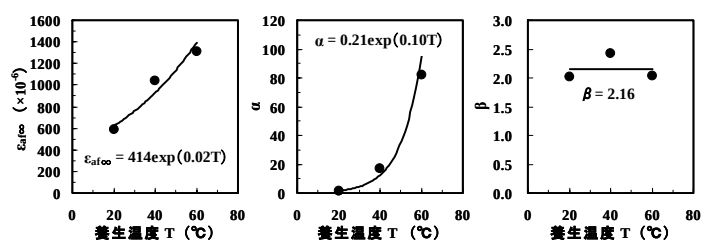


図-3 回帰係数と養生温度の関係

キーワード：高炉セメント B 種、膨張コンクリート、マス養生温度、拘束応力、算定法

〒360-0161 埼玉県熊谷市万吉 3300 日本ヒューム技術研究所 TEL048-536-5431

す。両者には温度に拘らず一義的な関係が認められる。図中には養生温度 20℃における両者の関係の回帰式を併記しており、これより、膨張材の反応が活発に生じる期間（膨張過程）における見かけのヤング係数の温度依存性を評価した。

次に、膨張過程以降の見かけのヤング係数については、インバー鋼材の拘束試験における拘束膨張・収縮ひずみと拘束鋼材比の関係に、(1) 式の見かけの膨張ひずみに温度ひずみ成分を加味した回帰式を適用することにより算出した。図-5に見かけのヤング係数と有効材齢の関係を示す。図中には PC 鋼材の拘束試験による見かけのヤング係数の回帰式、および別に測定した円柱供試体（φ 100×200mm）のヤング係数と有効材齢の関係式を併記する。有効材齢 1.5 日程度までの見かけのヤング係数は約 1000～2500N/mm²であり、PC 鋼材の拘束試験より算出したものと概ね同等であった。また、膨張材の反応がほぼ終了してから最高温度に達するまでの有効材齢 1.5～4.0 日程度の期間では約 6000～9000 N/mm²となり、有効材齢 5.0 日付近において円柱供試体のヤング係数とほぼ同等であった。また、見かけのヤング係数と円柱供試体のヤング係数を比較すると、後者に対する前者の比は、膨張過程では概ね 0.1～0.2、それ以降については 0.6～1.0 程度であった。これをコンクリート標準示方書⁴⁾（材齢 3 日まで 0.73、材齢 5 日以降 1.0）やひびわれ制御指針⁵⁾（温度上昇時：0.36～0.5、温度降下時：0.63～0.67）に提示されているクリープの影響を考慮したヤング係数の補正係数と比較すると、膨張過程における補正係数をより小さくする必要があると考えられる。

以上の検討結果より、見かけのヤング係数については、有効材齢 1.5 日までの膨張過程とそれ以降の 2 区間に分け、膨張過程では PC 鋼材の拘束試験より求めた回帰式、膨張過程以降ではインバー鋼材の拘束試験より求めた回帰式（図-5 中に併記）をそれぞれ用いることによりモデル化した。

4. 材料特性モデルを用いた応力算定法

以下では、上記の材料特性モデルを用いたマス養生温度履歴下における応力算定法の適用性について検討する。

応力算定法の概要：温度履歴下における膨張コンクリートの拘束応力は (2) 式より算出し、見かけの膨張ひずみについては、筆者らが既に提示している一定温度下の膨張ひずみを重ね合わせる方法⁶⁾により、また、見かけのヤング係数は上記の有効材齢 1.5 日を境界とした 2 つの関係式を用いて推定する。ここで、見かけのヤング係数については、拘束試験より算出した見かけのヤング係数と円柱供試体のヤング係数を比較した結果より、ヤング係数の補正係数を、有効材齢 1.5 日までは 0.2、有効材齢 5.0 日以降では 1.0（有効材齢 1.5～5.0 日は直線補間）とした場合についても検討した。なお、補正係数を加味する前のヤング係数は円柱供試体による実測値と有効材齢の関係式とした。

$$\sigma_c = -p \cdot E_s \cdot \Sigma \left[\frac{\Delta \varepsilon_{cf}(t_i) + \Delta \varepsilon_{ct}(t_i) + \Delta \varepsilon_{st}(t_i)}{1 + p \cdot E_s / E_{ca}(t_i)} \right] \quad (2)$$
ここに、 σ_c ：コンクリートに生じる拘束応力（N/mm²）， $\Delta \varepsilon_{ct}(t_i)$ ：時間ステップ t_i におけるコンクリートの温度ひずみの変化量， $\Delta \varepsilon_{st}(t_i)$ ：時間ステップ t_i における鋼材の温度ひずみの変化量

拘束応力の推定結果および考察：図-6 に、マス養生温度履歴下における拘束応力について実測値と上記の方法による計算値を比較して示す。本評価法による計算値（計算値①）は、拘束鋼材比 5.7%の温度上昇過程で生じる圧縮応力を若干小さく評価しているものの、温度上昇～降下過程における圧縮～引張の応力挙動を概ね良く推定できている。また、ヤング係数に独自の補正係数を考慮した場合（計算値②）も、ほぼ同等の精度で実測値を評価できている。

今後は、実構造物の解析に本手法を適用し、材料特性モデルや応力算定法の妥当性を検証する予定である。

参考文献 1) 三谷裕二ほか：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，土木学会第 61 回年次学術講演概要集，pp.497-498，2006 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 回年次学術講演概要集，pp.493-494，2006 3) 三谷裕二ほか：高炉セメントを用いた膨張コンクリートのマス養生温度履歴下における拘束膨張・収縮特性，土木学会第 62 回年次学術講演概要集，2007（投稿中） 4) 土木学会，コンクリート標準示方書[施工編]，pp.52-53，2002 5) 日本コンクリート工学協会，マスコンクリートのひび割れ制御指針，pp.67-70，1986 6) 三谷裕二ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1141-1146，2005

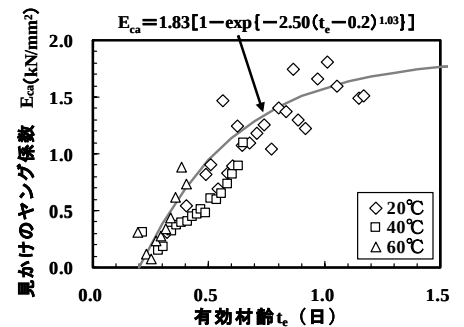


図-4 見かけのヤング係数と有効材齢の関係（PC 鋼材拘束試験）

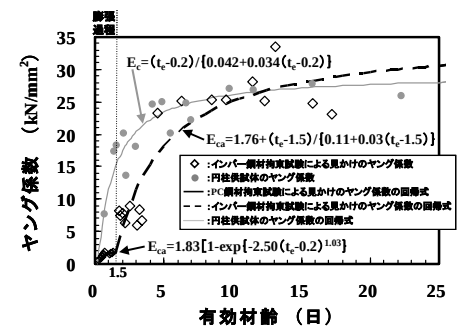


図-5 見かけのヤング係数と有効材齢の関係（インバー鋼材拘束試験）

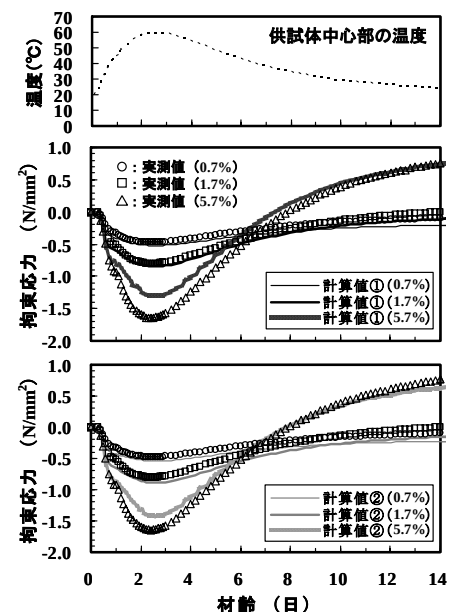


図-6 拘束応力の推定結果