

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

太平洋セメント(株) 正会員 谷村 充 三谷 裕二 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。膨張コンクリートにおいては、特に若材齢時の材料特性(膨張ひずみや初期クリープを考慮したヤング係数の取り扱い方)について検討する必要がある。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温度上昇時(膨張時)の材料特性モデルを温度降下時まで拡張したモデル²⁾を用いて、マスコンクリートと同様の温度履歴を受けた膨張コンクリートの膨張・温度応力を算定し、実測値と比較することにより手法の適用性を検証した。

2. 検証に用いる実験の概要³⁾

図-1に、検証に用いた一軸拘束供試体の形状・寸法を示す。温度ひずみを含む変形拘束によって生じる拘束応力を評価するために、埋め込む鋼棒には、その線膨張係数が一般の鋼材のおよそ1/20であるインバー鋼棒を使用し、鋼材比は0.7%、1.7%および5.7%の3水準とした。検証に用いたコンクリートは、普通セメントに膨張材を30kg/m³混和したW/C=55%の一般的な膨張コンクリート(NE)である。また、膨張材を用いない普通コンクリート(NP)についても実験を行った。コンクリートの練混ぜおよび打込みは20の試験室で行い、ブリーディングがほぼ終了する2.5時間程度まで静置した後、ポリエステルフィルムで打込み面を覆い、所定の温度履歴パターンに制御した恒温槽内で養生を行った。供試体に与える温度履歴パターンは、JCI・マスコンクリートソフト作成委員会報告書³⁾に示されている壁状構造体(高さ2000mm、幅1800mm)を参考にして、その2次元FEM温度解析より求めた断面中央の中層(高さ1000mm)位置における温度履歴を設定した。図-2に、設定した温度履歴下で養生した供試体中心部の温度の測定結果を示す。

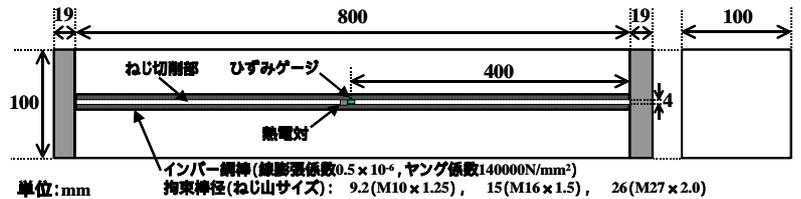


図-1 インバー鋼棒を配した一軸拘束供試体の形状・寸法

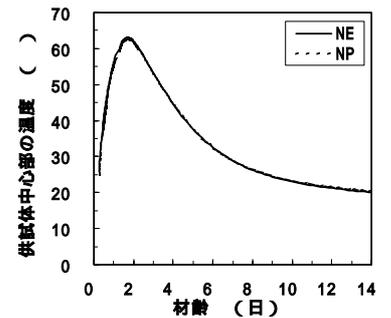


図-2 供試体中心部の温度履歴

3. 数値解析による応力の算定法

図-3に、温度履歴を受ける膨張コンクリートの数値解析による応力算定法の概要を示す。温度履歴を受ける場合の見かけの膨張ひずみの推定は、筆者らが提示した方法²⁾(任意の一定温度下における見かけの膨張ひずみ曲線を重ね合わせて求める方法)により、また、見かけのヤング係数については、図-4に示す有効材齢(= (T_i+10)・t_i/30, t_i: 温度がT_iである日数)2日を境界とした関係式を用いる(以下、方法)。この方法による場合は、コンクリート標準示方書[施工編]に示されている、クリープによるヤング係数の補正係数(低減係数)は考慮せずに、直接これを用いることになる。一方、既存のプログラムを用いて、補正係数を介してヤング係数を低減して解析を行う場合を想定し、強度試験によるヤング係数の実測値との関係から本研究で独自に定めた補正係数の値を表-1に示す。表-1には、コンクリート標準示方書をはじめ、幾つかの過去に提示されている補正係数を併記するが、これらと本研究による場合の値を比較すると、温度上昇時の補正係数がより小さくなっている。これより、表-1に示す本研究の補正係数を用いる場合、さらに、コンクリート標準示方書[施工編]の補正係数をそのまま用いる場合の3つの方法について比較する。

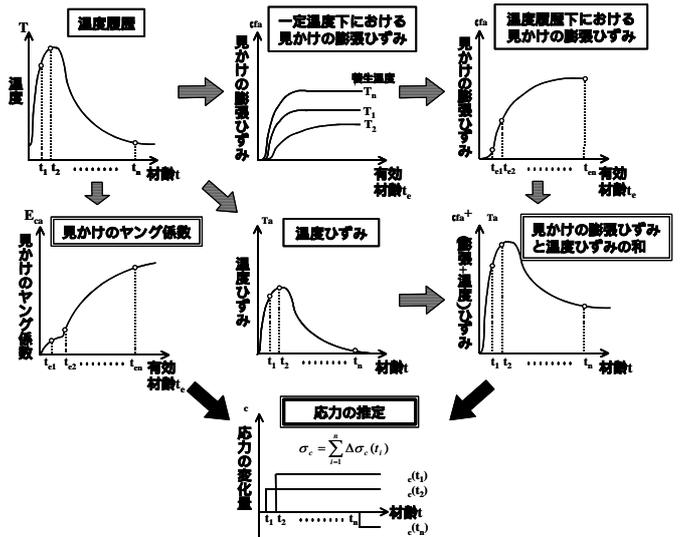


図-3 温度履歴を受ける膨張コンクリートの応力算定法の概要

さらに、コンクリート標準示方書[施工編]の補正係数をそのまま用いる場合の3つの方法について比較する。

キーワード：膨張コンクリート，マス養生温度履歴，拘束応力，算定法，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

また、膨張材を用いない普通コンクリートについても、コンクリート標準示方書〔施工編〕の補正係数を用いる場合、および本研究による補正係数を用いる場合の双方について応力算定を行う。なお、およびの方法による場合について、補正係数を掛ける前のヤング係数は実測値を回帰した式より求める。

数値解析の手法は、温度応力解析によく用いられている有効ヤング係数に基づく増分法を採用する。RC軸モデルにおける応力算定式は(1)式で表される。

$$\sigma_c = -p \cdot E_s \cdot \left\{ \frac{\epsilon_{ca}(t_i) + \epsilon_{CT}(t_i) - \epsilon_{ST}(t_i)}{1 + p \cdot E_s / E_{ca}(t_i)} \right\}$$
 (1) ここに、 σ_c ：コンクリートの応力（引張を正、圧縮を負）、 p ：鋼材比、 $\epsilon_{ca}(t_i)$ ：時間ステップ t_i における見かけの膨張ひずみの増分、 $\epsilon_{CT}(t_i)$ ：時間ステップ t_i のコンクリートの温度ひずみの増分、 $\epsilon_{ST}(t_i)$ ：時間ステップ t_i の鋼材の温度ひずみの増分、 $E_{ca}(t_i)$ ：時間ステップ t_i の見かけのヤング係数、 E_s ：鋼材のヤング係数。なお、見かけの膨張ひずみ、見かけのヤング係数、補正係数を掛ける前のヤング係数は、凝結始発に相当する有効材齢：0.2日を原点とした。

4. 検証結果

図-5に、膨張材を混和したコンクリートの発生応力の実測値と、数値解析による計算値を比較して示す。応力の実測値は、鋼材のひずみを用いて(2)式より求めている。

$$\sigma_c = -P_s / A_c = - (A_s / A_c) \cdot E_s \cdot \epsilon_s$$
 (2)

ここに、 σ_c ：コンクリートの応力、 P_s ：鋼材に生じる軸力（ $=A_s \cdot E_s \cdot \epsilon_s$ ）、 A_c 、 A_s ：コンクリートおよび鋼材の断面積、 E_s ：鋼材のヤング係数（インバ-鋼：140kN/mm²）、 ϵ_s ：鋼材のひずみ

これより、本研究で提示している手法を用いることにより、鋼材比の差（拘束の程度の差）に拘わらず、温度上昇時（圧縮応力増加時）～温度降下時（圧縮応力減少時）の領域における応力の発生状況を良く評価できている。また、補正係数を介したヤング係数による場合も、同様の精度で実測値を評価できることがわかる。一方、コンクリート標準示方書の補正係数を用いた計算値は、特に温度上昇時の圧縮応力を過大に評価している。また、図-6には、膨張材を用いない普通コンクリートの発生応力の実測値と計算値を比較して示す。普通コンクリートの場合も、本研究で提示しているヤング係数の補正係数を用いることにより、応力の発生状況を良く評価できている。補正係数をコンクリート標準示方書の値よりも小さく設定している既往の知見に対応する結果であると考えられる。

5. まとめ 提示した見かけのヤング係数と見かけの膨張ひずみを用いる応力算定法により、マス養生温度履歴を受ける膨張コンクリートの圧縮～引張応力の挙動を良く評価できる可能性を示した。なお、提示した材料特性モデルや応力算定法については今後、より広い範囲の温度履歴パターンによる検証や、実構造物レベルでの検証を積み重ねるとともに、セメント種類やコンクリート強度(W/C)の影響などについて知見を深め、モデルを拡充する予定としている。

【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) 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の構築，土木学会第61回年次学術講演会集，2006 3) JCI：マスコンクリートソフト作成委員会報告書，pp.124-126，2003

表 3-1 ヤング係数の補正(低減)係数

出展 No.	ヤング係数の補正係数	条 件
本研究	・有効材齢 2 日まで(温度上昇時) =-0.3 ・有効材齢 3 日以降(温度降下時) =1.0 ・有効材齢 2 日から 3 日まで 直線補間 ただし、有効材齢は積算温度方式による。	・膨張材あり (30kg/m ³) ・普通セメント ・W/C=55% ただし、膨張ひずみは本研究の方法により求める。
(1)	・材齢 3 日まで =-0.73 ・材齢 5 日以降 =1.0 ・材齢 3 日から 5 日まで 直線補間	
(2)	・温度上昇時 =-0.36 ~ -0.5 ・温度降下時 =-0.63 ~ -0.67	
(3)	・材齢 1.5 日まで =-0.73 × 0.6 (0.44) ・材齢 1.5 日以降 =-0.8	・膨張材なし ・普通セメント (σ ₂₈ =21N/mm ²)
(4)	・温度上昇時(圧縮応力増加時) =0.4 ・温度降下時(圧縮応力減少時) =1.0 温度ピーク材齢の2倍 =-0.7 ・引張応力発生時 =-0.7	・膨張材なし ・早強セメント (σ ₂₈ =40N/mm ²)
(5)	・温度上昇時(圧縮応力増加時) =-0.63 ・温度降下時(圧縮応力減少時) =-1.02 ・引張応力発生時 =-0.61	・膨張材なし ・低熱セメント (呼び強度 30N/mm ²)
(6)	・温度ピークまで(材齢1.2日) =0.34 ・材齢 5 日以降 =1.0 ・材齢 3 日から 5 日まで 直線補間	・膨張材の有無に関係なし ただし、膨張量:70 × 10 ⁻⁶ を設定 ・普通セメント
(7)	・0 < t - t _{max} (最高温度時) =0.5 ・t _{max} < t 3.0 =-0.75 + 0.25(t - t _{max})/(3 - t _{max}) ・t > 3.0 =1.0	・膨張材あり (30kg/m ³) ・早強セメント ・W/C=44% (σ ₂₈ =40N/mm ²)

- 出展(1) 土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕,2002
- 出展(2) JCI：マスコンクリートのひび割れ制御指針,1986
- 出展(3) 名和ら：コンクリート工学年次論文報告集,Vol.10,No.2,1988
- 出展(4) 江渡ら：構造工学論文集,Vol.45A,1999
- 出展(5) 徳永ら：コンクリート工学論文集,Vol.13,No.2,2002
- 出展(6) 東ら：セメント・コンクリート論文集,No.57,2003
- 出展(7) 高瀬ら：コンクリート工学,Vol.43,No.7,2005

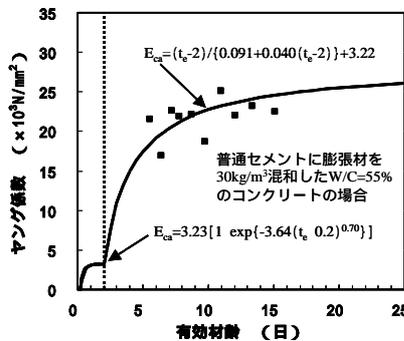


図-4 ヤング係数モデル

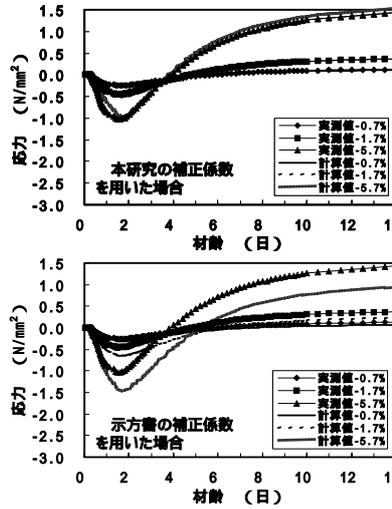


図-6 応力の推定結果 (NP)

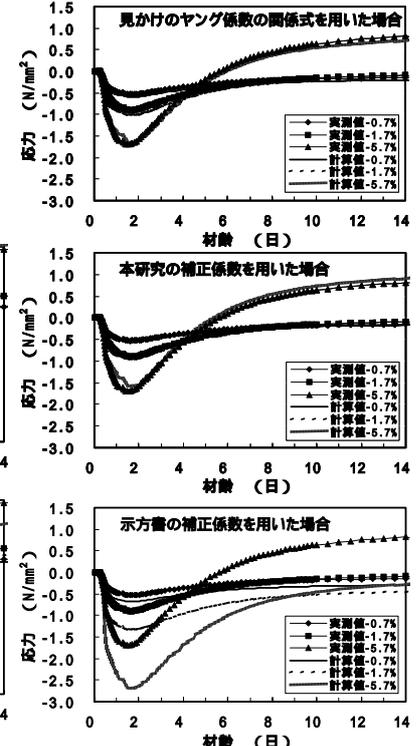


図-5 応力の推定結果 (NE)