

論文 建築工事に用いるマスコンクリートのひび割れ危険度に関する簡易評価手法の検討

橋田 浩^{*1}・小澤 貴史^{*2}

要旨：本研究では、簡易断熱養生試験によって、コンクリートの温度ひずみと自己収縮ひずみによる連成ひずみを測定することで、主に、建築用マスコンクリートとしてのひび割れ危険度を評価する手法について検討した。測定されたひずみを用い、ある条件下で拘束されることを想定したコンクリートの応力を算定することで、簡易的なひび割れ危険度評価が可能であることを示した。また、建築工事での汎用セメントである普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種および中庸熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートのひび割れ危険度を評価した。

キーワード：マスコンクリート、ひび割れ、自己収縮、高炉セメント、中庸熱セメント

1. はじめに

建築工事においては、基礎梁やマットスラブがマスコンクリートとなることが多く、部材のひび割れ対策が要求されている。その解決法として、構造・施工条件、拘束条件を考慮した応力解析によってひび割れ危険度を評価することが望ましいが、基礎梁など建築部材のそれらの外的要因は複雑であるため、通常は、部材としてのコンクリートの温度変化を予測することで、ひび割れの危険度を類推するに留まっている。

一方で、マスコンクリートの体積変化に伴うひび割れの原因として、セメントの水和熱による温度応力の他、自己収縮応力を考慮する必要性が従来から指摘されている。したがって、ひび割れ危険度を評価するためには、部材の温度変化を予測するだけでは不十分であり、少なくとも温度ひずみと自己収縮ひずみの連成によるトータルのひずみ（以下、温度・自己収縮ひずみと称する）変化を把握し、さらには、部材の力学特性を考慮した応力算定を実施し、ひび割れ危険度を評価することが望ましい。

本研究では、簡易断熱養生試験によってコン

クリートの温度・自己収縮ひずみを測定することで、主に、建築用マスコンクリートとしてのひび割れ危険度を評価する手法について検討した。また、建築工事での汎用セメントである普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種および中庸熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートのひび割れ危険度を評価した。

2. 実験概要

2.1 簡易断熱養生試験

簡易断熱養生試験の概要を図-1 に示す。試験に用いた簡易断熱養生箱は、寸法 100×100×400mm の供試体を成形できる型枠兼用の発泡ス

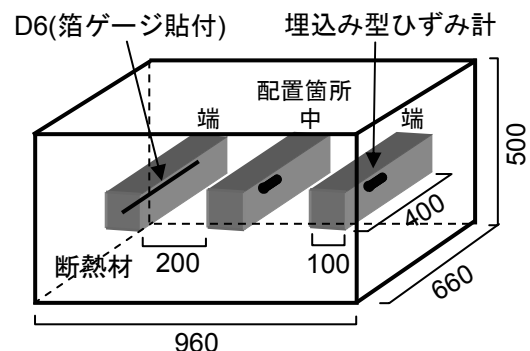


図-1 簡易断熱養生試験の例

*1 清水建設（株） 技術研究所 上席研究員 工博（正会員）

*2 清水建設（株） 技術研究所 研究員（正会員）

チロール箱であり、3本の供試体を1組として無拘束状態で養生できる仕様とした。供試体のひずみは埋込み型ひずみ計(T社 KM-100B)で、温度は熱電対で測定する。図-1は、供試体のひずみを簡易測定する目的で、ひずみゲージ(1ゲージ3線式)を中央部両面に貼付した400mmのD6鉄筋を埋め込んだ供試体を含む場合の例を示している。

2.2 コンクリート種類

対象としたコンクリートの調合は、建築工事で代表的な呼び強度30N/mm²、スランプ15cmに相当する表-1に示すものとした。セメント種類は、普通ポルトランドセメント(N)、高炉セメントB種(BB)および中庸熱ポルトランドセメント(M)とした。NはセメントメーカーA, B, C社のセメントの混合品、BBはA, B, C各社毎のセメント、MはA社のセメントのみを使用した。なお、一般的な建築工事に合わせ、Nは強度管理材齢28日、BBおよびMは強度管理材齢56日を想定した水セメント比としている。

2.3 実験環境・測定条件

実験は、夏期工事を想定し、30℃の環境室で行った。したがって、コンクリートの練上がり温度は約30℃である。簡易断熱養生試験の他、内寸100×100×400mmの鋼製型枠に埋込み型ひずみ計を設置し、30℃一定条件での供試体のひずみ(自己収縮ひずみ)も併せて測定した。ひずみ・温度測定は、コンクリート打込み後から、簡易断熱養生供試体の温度が環境温度まで降下する材齢まで継続した。また、各コンクリート試料は、JISに準じ、凝結時間、標準養生材齢28日の圧縮強度およびヤング係数を測定した。

3. 測定結果および考察

3.1 簡易断熱養生試験から得られるデータ

普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートN、A社製高炉セメントB種を用いたコンクリートBB-Aの簡易断熱養生での温度変化および埋込み型ひずみ計による温度・自己収縮ひずみの測定結果を図-2に示す。ここで、測定ひ

表-1 コンクリートの調合

記号	セメントメーカー	W/C (%)	水量 (kg/m ³)	セメント量 (kg/m ³)
N	3社混合	49	180	367
BB-A	A	52	175	337
BB-B	B			
BB-C	C			
M	A	52	175	337

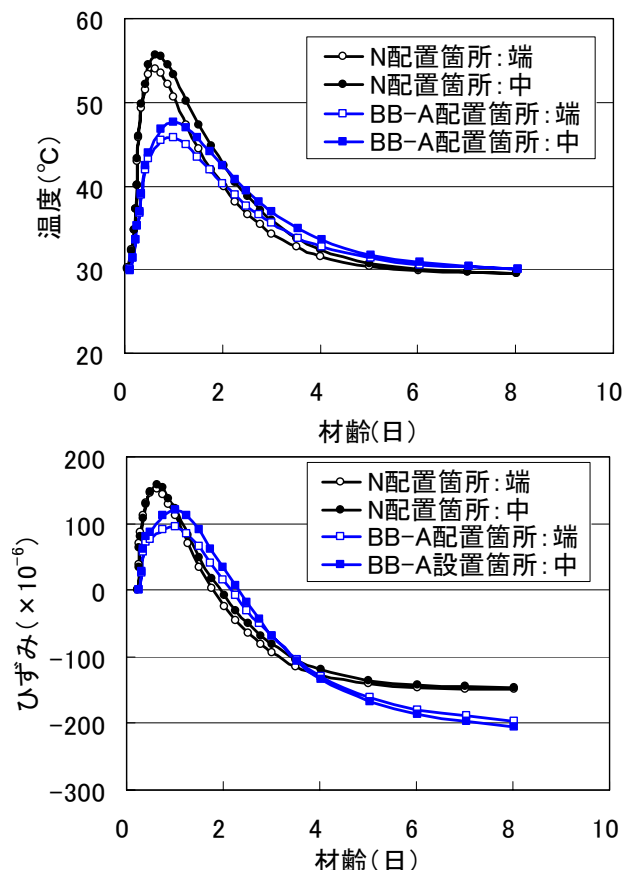


図-2 簡易断熱養生試験の測定温度と温度・自己収縮ひずみ(N, BB-A)

ずみの基点は、応力発生原点とみなせる凝結の終結時としている。

3供試体を1組とした本養生箱では、中央に配置した供試体と両端の供試体での温度差が懸念されたが、最大で1.5℃程度の温度差であり、両者はほぼ同じ断熱条件であると見なせる。温度・自己収縮ひずみ変化についても、配置箇所によらずほぼ同一の結果が得られている。

次に、埋込み型ひずみ計による温度・自己収縮ひずみと、鉄筋ひずみの測定結果(応力ひずみ)に鉄筋の温度ひずみ(線膨張係数: $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)を加えた実ひずみを比較して図-3に示

す。両者はよく合致しており、鉄筋ひずみの測定結果によってコンクリートの温度・自己収縮ひずみを代替することも可能と思われる。ただし、最終的には両者に若干のひずみ差が生じており、鉄筋の定着長不足に起因している可能性もあるので、さらに検討は必要である。

3.2 普通セメントと高炉セメント B 種の比較

図-2 から、最大温度上昇量は、コンクリート N で約 26°C 、BB-A で約 17°C であり、BB-A の温度上昇はかなり小さい。しかしながら、温度・自己収縮ひずみでは、BB-A の膨張ひずみは小さいものの、材齢 8 日時点での収縮ひずみは N よりも 50×10^{-6} 大きくなっている。その結果、膨張ピークからの収縮量は、N と BB-A でほぼ同程度となっており、温度上昇量が小さくてもひび割れ危険度が低いとはいえない。これは、自己収縮ひずみの影響によるものである。

図-4 に簡易断熱養生供試体と 30°C 一定環境供試体での有効材齢に伴う自己収縮ひずみ変化を比較して示す。ここで有効材齢とは、積算温度ではなく、CEB-FIP の MC90¹⁾、標準方書のクリープ材齢などで採用されているアレニウス則を基本にした 20°C 換算材齢である^{2), 3)}。N の場合、自己収縮ひずみは、簡易断熱養生下でも温度一定下でも有効材齢 10 日で 70×10^{-6} 程度となり、収束傾向が見られる。一方、BB-A の場合、温度一定下でも有効材齢 10 日頃から N より自己収縮ひずみが大きくなるが、簡易断熱養生下では、さらに収縮ひずみが顕著に増大し、有効材齢 15 日で 150×10^{-6} に達しており、その後も増大傾向が続いている。このように、高炉スラグを混和したコンクリートが高温履歴を受けると、自己収縮が増大あるいは温度効果以上に加速することは知られており³⁾、高温になるほどポルトランドセメントよりスラグの水和活性が高まるためと推察される。

3.3 高炉セメント B 種と中庸熱セメントの比較

メーカーの異なる高炉セメント B 種を用いたコンクリート BB-A～C および中庸熱セメントを用いたコンクリート M の簡易断熱養生試験結果

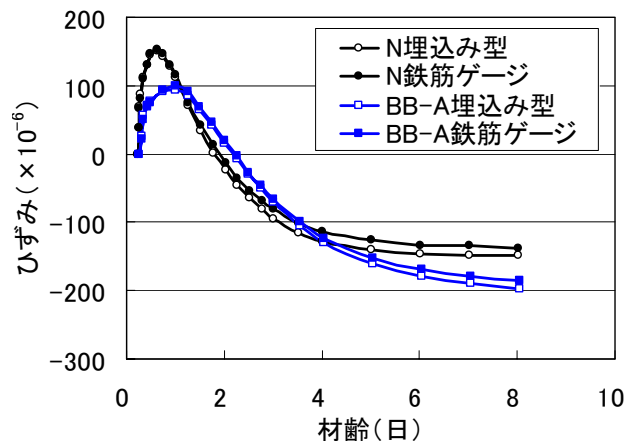


図-3 埋込み型ひずみ計と鉄筋実ひずみの比較

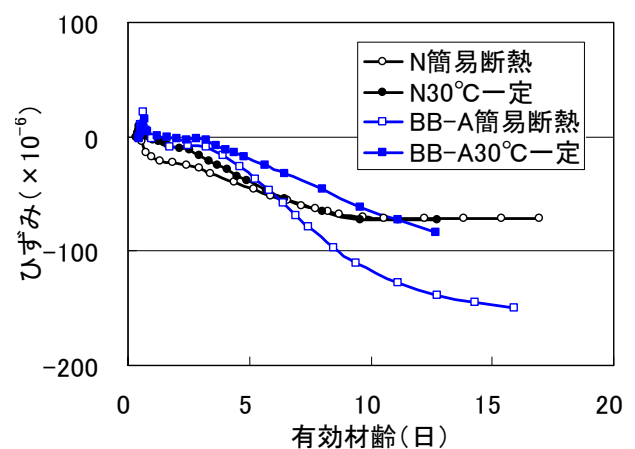


図-4 自己収縮ひずみの比較(N, BB-A)

を図-5 に示す。

3 社の BB を比較すると、今回の試料では BB-A のみ温度上昇が明らかに小さい結果となり、BB-B、BB-C と 4°C 程度の差が生じた。一方で、温度・自己収縮ひずみについては、材齢 8 日時点での膨張ピークからの収縮量は、いずれもおおよそ 300×10^{-6} 前後であり、BB-B > BB-A > BB-C となっている。また、今回の結果では、M の温度上昇量は BB-A と同程度になったが、膨張ピークからの温度・自己収縮ひずみの収縮量は、BB-A より顕著に小さい。このように、温度上昇量と温度・自己収縮ひずみは整合している訳ではなく、その主な原因は、自己収縮ひずみ（正確には、ある線膨張係数を仮定した場合の見かけの自己収縮ひずみ）が異なるためである。

図-6 に簡易断熱養生試験における自己収縮ひずみ（線膨張係 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 一定と仮定）変化を示す。高温履歴を受けた場合でも、M の自己

収縮はBBに比べ顕著に小さいのがわかる。また、BBについては、メーカー各社でかなり異なる性状を示している。これらは、自己収縮ひずみの統一的な予測の難しさを示唆している。

3.4 簡易断熱養生試験の有効性

真の自己収縮ひずみを求めるには、材齢に伴う線膨張係数変化の同定が必要となる。今回示している自己収縮ひずみは、線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 一定と仮定しているの、何らかの温度ひずみ分も含まれた結果を示しているに過ぎない。しかしながら、このような不確定要素はあっても、簡易断熱養生試験から得られる温度・自己収縮ひずみは、マスコンクリートとしての本来の体積変化を示している。したがって、ひび割れ危険度を評価するために、温度上昇量ではなく、自己収縮ひずみを包含した温度・自己収縮ひずみを測定することは非常に有効といえる。

4. 簡易応力算定例

4.1 応力算定法

温度・自己収縮ひずみの測定結果からマスコンクリートとしてのひび割れ危険度を評価するには、最終的に、ひずみ拘束を想定した応力算定をするのがよい。ここでは、文献 2), 5) に基づいた応力算定例を示す。算定用の圧縮強度およびヤング係数予測式としては、標準養生材齢 28 日の力学特性を基準に、若材齢時からの発現予測が可能である式(1)、式(2)を用いる^{2), 4)}。

$$f(t) = f_c \cdot \exp \left\{ s_f \left[1 - \left(\frac{28 - t_{fs}}{t - t_{fs}} \right)^{0.5} \right] \right\} \quad (1)$$

$$E(t) = E_c \cdot \exp \left\{ s_E \left[1 - \left(\frac{28 - t_{fs}}{t - t_{fs}} \right)^{0.5} \right] \right\} \quad (2)$$

ここに、 t は有効材齢、 f_c 、 E_c は標準養生材齢 28 日における圧縮強度またはヤング係数、 s_f 、 s_E は各特性の増進速度を表す係数、 t_{fs} は凝結の終結時間(日)である。図-7 にコンクリート N, BB-A, M の圧縮強度およびヤング係数発現を示す。 f_c 、 E_c 、 t_{fs} は実測値であり、圧縮強度の s_f はメーカ

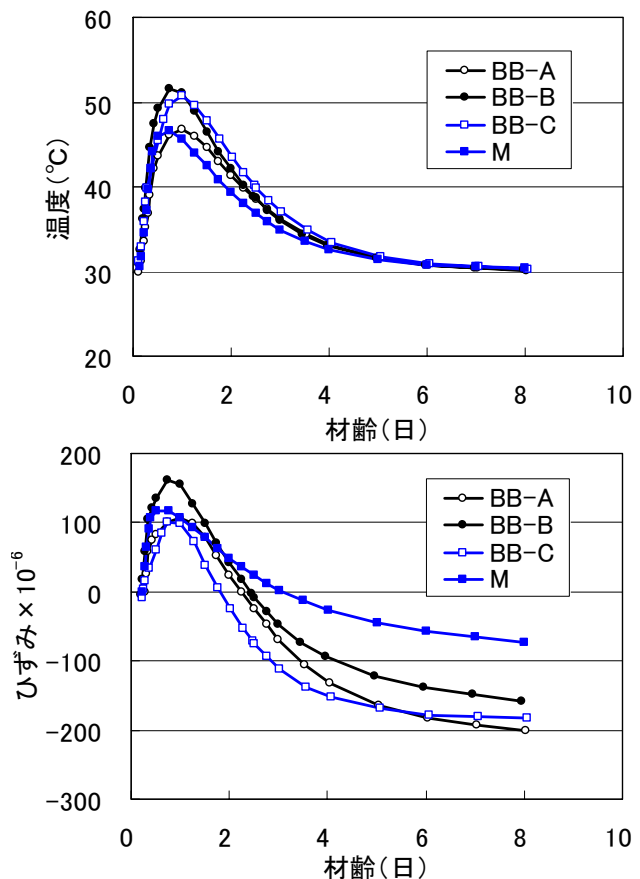


図-5 簡易断熱養生試験の測定温度と温度・自己収縮ひずみ(BB, M)

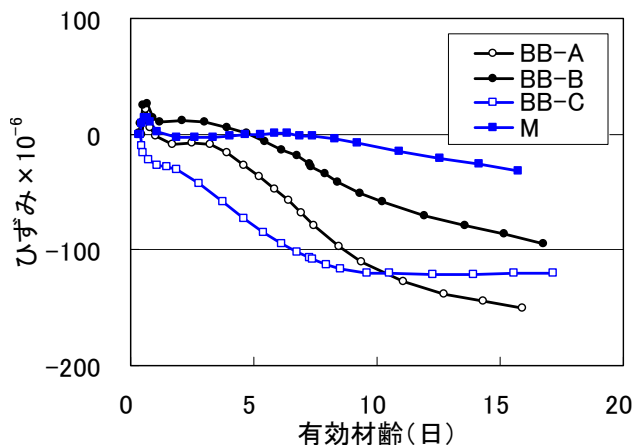


図-6 自己収縮ひずみの比較(BB, M)

一の技術資料を参考にして、また、ヤング係数の s_E は式(3)の関係から定めた。

$$s_E = 0.4s_f \quad (3)$$

次に、引張クリープ進行については、式(4)を用いる。

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \frac{(t - t_0)^{0.6}}{\beta + (t - t_0)^{0.6}} \quad (4)$$

ここに、 $\phi(t, t_0)$ は有効材齢 t_0 で載荷された供試体の有効材齢 t でのクリープ係数、 ϕ_0 は見かけの終

局クリープ係数、 β はクリープの進行速度を表す係数である。 β については、標準養生材齢 28 日のヤング係数に対する載荷時材齢でのヤング係数の比、 $E(t_0)/E_c$ の関数となっている式(5)が、コンクリート種類に係わらず、若材齢クリープ式として有効であることが示されている⁵⁾。

$$\beta = 0.05 \exp \left[5.0 \frac{E(t_0)}{E_c} \right] \quad (5)$$

ϕ_0 についても、 $E(t_0)/E_c$ の一次関数とする有効性が確認されている⁵⁾。ここでは、対象としたコンクリート強度に近い過去の引張クリープ測定値を参考に、式(6)を用いることとする。

$$\phi_0 = 3.2 - 2 \frac{E(t_0)}{E_c} \quad (6)$$

4.2 応力算定例

基礎梁やマットスラブの拘束度は、条件によって大きく異なるが、0.3~0.7 程度ではないかと思われる。ここでは、一例として、測定された温度・自己収縮ひずみが拘束度 0.5 の一定拘束を受ける場合の応力を計算する。この場合の拘束引張ひずみは図-8 のようになる。弾性計算で応力を求める場合、このひずみ増分にヤング係数を乗じることで、逐次応力増分を算定できる。より実状に近いクリープを考慮した応力を求める場合は、逐次計算法⁶⁾⁻⁸⁾ (step-by-step 法⁴⁾) が利用できる。算定結果を図-9 に示す。なお、引張強度 f_t は、式(7)に示す圧縮強度との関係式⁹⁾ から求めている。

$$f_t(t) = 0.291 \cdot f(t)^{0.637} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (7)$$

コンクリート N と BB-A を比較すると、クリープ計算および弾性計算とも、引張応力の最終値は同程度であるが、引張強度増進が相対的に遅いため、BB-A の方がひび割れ危険度は高いと判断できる。また、コンクリート M は、N や BB-A に比べ、ひび割れ危険度は顕著に低いことがわかる。結果として、今回対象としたコンクリートのひび割れ危険度は、BB-A > N > M であると判断される。このように、簡易断熱養生試験による温度・自己収縮ひずみの測定値に基づいて応力算定することで、マスコンクリートのひび

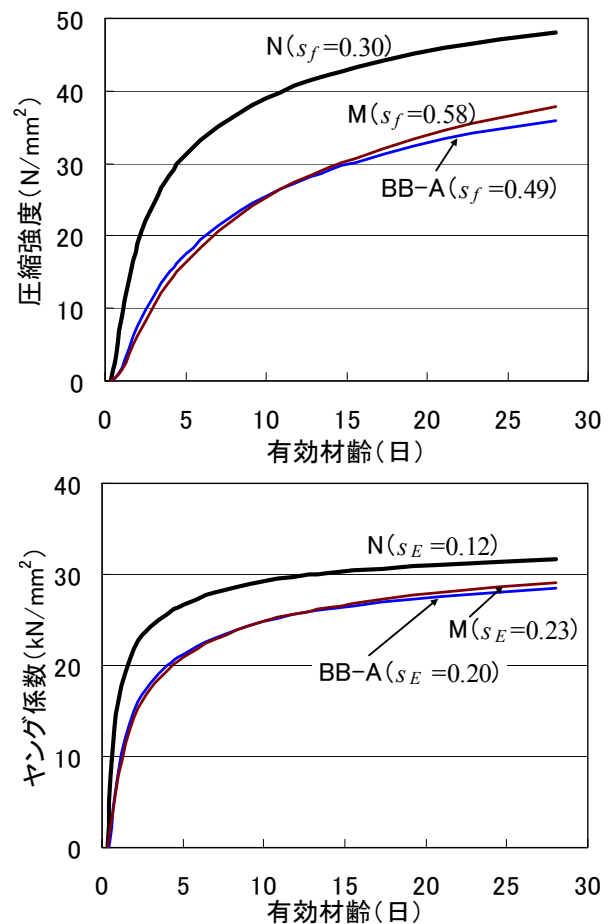


図-7 応力算定用の圧縮強度とヤング係数

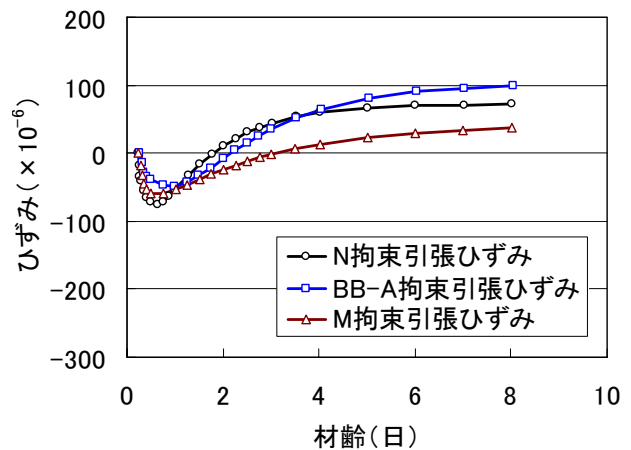


図-8 拘束度 0.5 とした場合の拘束引張ひずみ

割れ危険度を簡易に評価することが可能と考えられる。

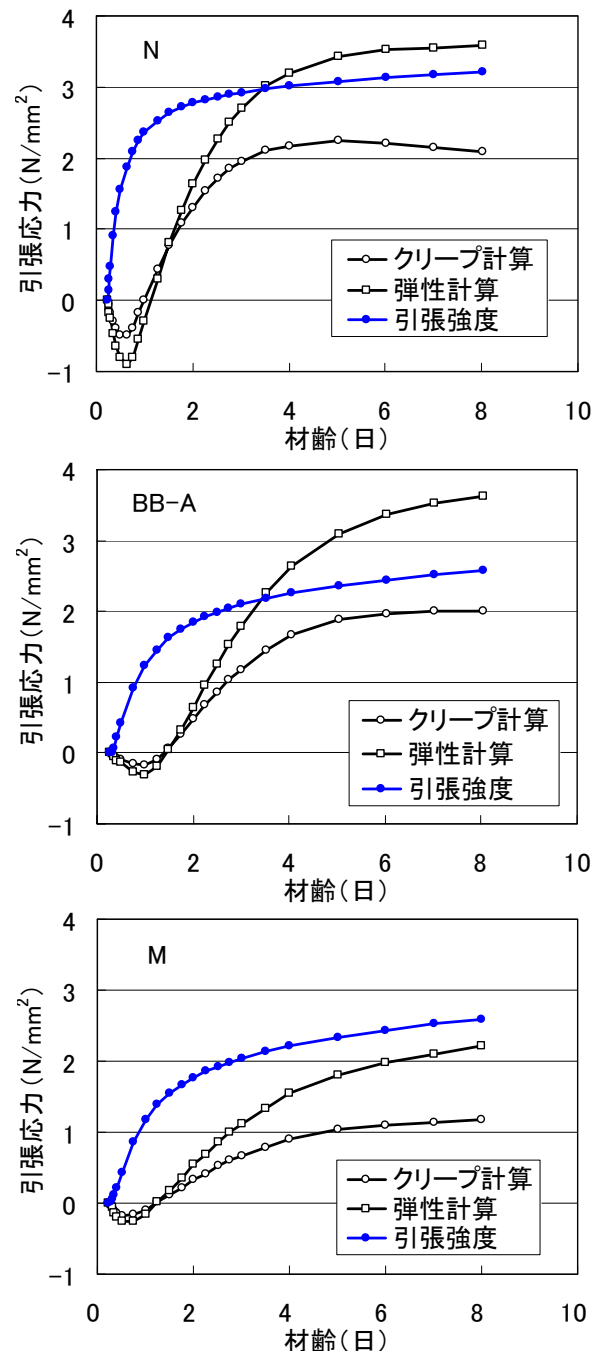
5. まとめ

本研究では、主に、建築工事用マスコンクリートのひび割れ危険度を簡易に評価する手法について検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 簡易断熱養生試験により，マスコンクリート本来の体積変化データである温度・自己収縮ひずみを容易に得ることができる。
- 2) 測定された温度・自己収縮ひずみを用い，ある条件で拘束されることを想定したコンクリートの応力を算定することで，ひび割れ危険度の評価が可能である。
- 3) 本手法により，打込み温度 30℃，呼び強度 30N/mm² 相当の N コンクリート，BB コンクリートおよび M コンクリートを比較すると，ひび割れ危険度は BB>N>M と判断された。N より BB の危険度が高くなるのは，高温履歴を受けた場合の自己収縮が大きく，引張強度増進が相対的に遅いためと考えられた。

参考文献

- 1) Muller, H.S.: New Prediction Models for Creep and Shrinkage of Concrete, Creep and Shrinkage of Concrete: Effect of Materials and Environment, Daye and Fu (eds.), ACI SP-135, pp.1-18, 1992
- 2) 橋田浩, 黒田泰弘, 山崎庸行: CEB-FIP モデルを改良した高強度コンクリート構造部材の力学特性発現モデル, 日本建築学会構造系論文集, No.513, pp.9-14, 1998
- 3) 橋田浩, 山崎庸行: 自己収縮と水和熱膨張による高強度コンクリートの連成ひずみ特性に関する検討, コンクリート工学論文集, Vol.13, No.1, pp.25-31, 2002
- 4) 自己収縮研究委員会報告書: 日本コンクリート工学協会, 1996
- 5) 橋田浩, 山崎庸行: 初期高温履歴を受ける高強度コンクリート構造体の自己収縮応力の算定法に関する検討, 日本建築学会構造系論文集, No.537, pp.7-12, 2000
- 6) Neville, A.M.: Creep of Concrete; Plain, Reinforced and Prestressed, North-Holland, 1970
- 7) 鈴木計夫, 大野義照, 中川隆夫: コンクリートの収縮拘束ひび割れ試験 (その 1; 収縮応力の算定), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, pp.177-178, 1976



図ー9 拘束度 0.5 とした場合の応力算定結果

- 8) Neville, A.M., Dilger, W.H. and Brooks, J.J.: Creep of plain and structural concrete, Construction Press, Longman, pp.246-263, 1983
- 9) 野口貴文, 友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係, 日本建築学会論文報告集, 第 472 号, pp.11-16, 1995