

論文 マスコンクリートの外部拘束型ひび割れ危険度の簡易評価

菊地 俊文^{*1}・小澤 貴史^{*1}・橋田 浩^{*2}

要旨：本研究では，簡易断熱養生試験で得られるコンクリートの温度ひずみと自己収縮ひずみの連成ひずみに基づいて，主に建築部材相当の中規模マスコンクリートの外部拘束型ひび割れの危険度を評価した。対象は，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呼び強度 30 および 40 相当のマスコンクリートである。これらのマスコンクリートの発生応力の評価には，セメント種類による自己収縮ひずみの差異，特に水和熱による温度履歴を受けた場合の自己収縮ひずみの把握が重要であることが明らかになった。

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

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は，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ことが従来から指摘されている。

既報¹⁾では，簡易断熱養生試験によって，マスコンクリートの本来の体積変化データである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)を測定し，ある条件で拘束されることを想定したマスコンクリートの応力を算定する手法を提案し，外部拘束型のひび割れ危険度の簡易評価手法としての有効性を示した。

本報では，この評価手法によって，建築工事で汎用的に使用される各種マスコンクリートの外部拘束型ひび割れの危険度を評価するとともに，ひび割れ対策の基礎資料となる応力発生要因について考察した。対象としたセメントは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であり，強度は建築工事で代表的な呼び強度 30 および 40 である。なお，呼び強度 30 の実験結果については，既報¹⁾でも一部報告している。

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。なお，既報¹⁾にて中央部と両端部の温度変化の差については検討しており，ほぼ同じ断熱条件にあるとみなせる。

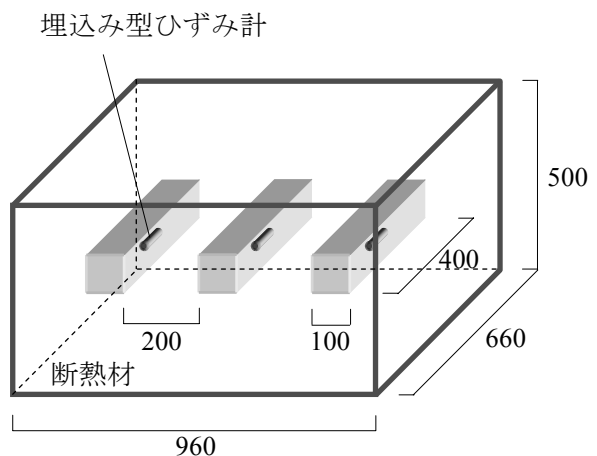


図-1 簡易断熱養生試験概要

*1 清水建設（株） 技術研究所 研究員 工修（正会員）

*2 清水建設（株） 技術研究所 上席研究員 工博（正会員）

表－１ コンクリートの調合

呼び強度 -セメント種類	セメント 種類	W/C [%]	W [kg/m ³]	C [kg/m ³]	S [kg/m ³]	G [kg/m ³]	28日圧縮強度 [N/mm ²]	56日圧縮強度 [N/mm ²]	28日ヤング係数 [kN/mm ²]
30-N	N	49.0	180	367	756	982	45.8	50.6	34.0
30-NSP	N	49.0	168	343	808	982	49.3	55.4	31.2
40-N	N	40.5	189	467	627	1006	57.2	61.6	34.7
30-BB	BB	52.0	175	337	800	965	35.6	42.0	27.2
40-BB	BB	42.0	184	438	665	990	47.1	56.8	30.2
30-M	M	52.0	175	337	815	965	37.8	48.4	29.1
40-M	M	42.0	184	438	685	990	55.3	66.6	32.1

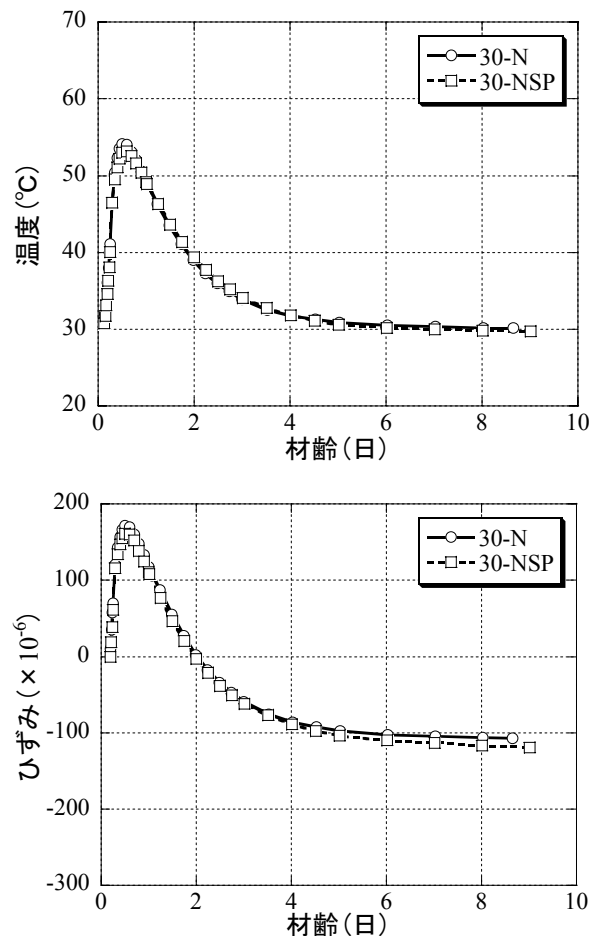
2.2 使用材料および調合

使用材料は、セメント(C)，上水道水(W)，細骨材(S)，粗骨材(G)および混和剤を用いた。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)を用いた。なお、セメントは全て同一メーカーのものとした。また、混和剤には、AE減水剤を用いており、30-NSPのみ単位水量の影響を検討するために、高性能AE減水剤を用いた。

調合を表－１に示す。呼び強度30(N/mm²)および40(N/mm²)，スランプ15cmの建築用マスコンクリートを対象とした。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及びMは強度管理材齢56日を想定する水セメント比とした。

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。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℃一定条件下での供試体のひずみ(自己収縮ひずみ)も併せて測定した。温度・ひずみ測定は，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。なお，温度・自己収縮ひずみおよび自己収縮ひずみは，膨張ひずみを正符号とし，収縮ひずみを負符号とした。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，56日の圧縮強度及びヤング係数を測定した。



図－２ 簡易断熱養生試験の温度と温度・自己収縮ひずみ(30-N, 30-NSP)

3. 測定結果および考察

3.1 単位水量の影響

呼び強度30シリーズにおいて，普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート供試体(30-N, 30-NSP)の断熱養生での温度および温度・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た。

図－2より最大温度上昇量は 24°C 前後であり、ほぼ同一であった。また、温度・自己収縮ひずみも、材齢 8 日時点で -110×10^{-6} 前後であり、ほぼ同一であった。

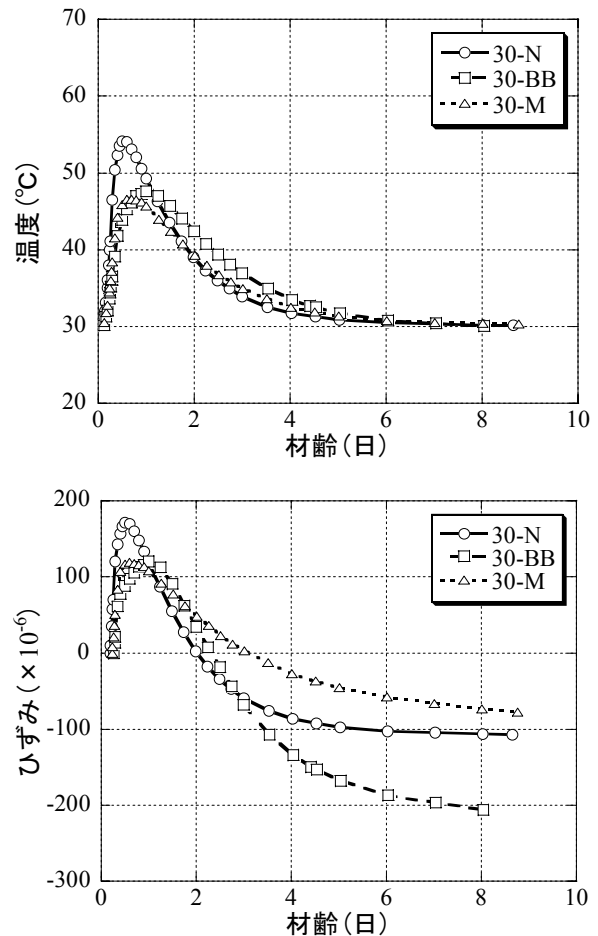
今回の単位水量の範囲においては、単位水量の低減は、上昇温度およびひずみ低減に対して、ほとんど効果が認められなかった。

3.2 呼び強度 30 シリーズにおける比較

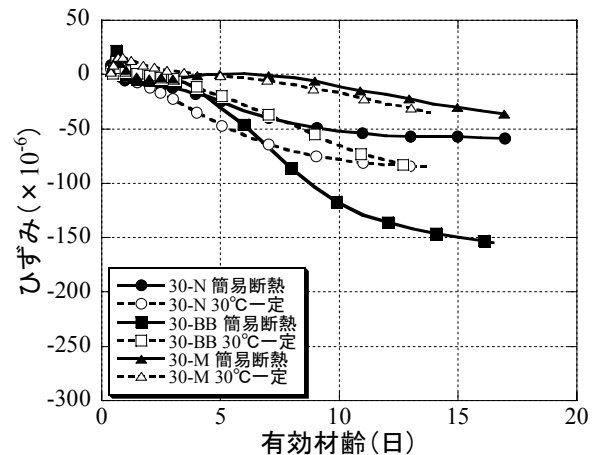
呼び強度 30 シリーズのコンクリート供試体 (30-N, 30-BB, 30-M) の断熱養生での温度および温度・自己収縮ひずみの測定結果を図－3に示す。また、簡易断熱供試体および 30°C の一定環境下で養生した供試体に対する自己収縮ひずみの測定結果を図－4に示す。ここで有効材齢とは、CEB-FIP の MC90²⁾、標準示方書のクリープ材齢などで採用されているアレニウス則を基本にした 20°C 換算材齢とした^{3), 4)}。

図－3より、呼び強度 30 シリーズについては、最大温度上昇量が 30-N で約 24°C と大きく、30-BB および 30-M で 17°C 前後とほぼ同一であった。しかしながら、温度・自己収縮ひずみでは、30-BB が材齢 8 日時点で 30-N よりも 100×10^{-6} 収縮が大きかった。その結果、30-BB は 30-N より温度上昇量が小さくても、温度・自己収縮ひずみの膨張・収縮量の差が大きいため、ひび割れ危険度が低いとはいえない。

図－4より、30-N の場合、自己収縮ひずみは、簡易断熱条件下でも温度一定下でも有効材齢 10 日で、収束傾向が見られた。また 30-M の場合、自己収縮ひずみは、簡易断熱条件下でも温度一定下でも 30-N および 30-BB と比較して顕著に小さかった。その結果として、温度・自己収縮ひずみも小さくなる。一方 30-BB の場合、自己収縮ひずみは、温度一定下では有効材齢 13 日で 30-N と同程度であったが、簡易断熱条件下では、さらにひずみが顕著に増大し、有効材齢 15 日で -150×10^{-6} に達し、その後も収縮が続いた。簡易断熱条件下で自己収縮ひずみが増大するのは、30-N および 30-M では見られない現象であった。高炉スラグを混和したコンクリー



図－3 簡易断熱養生試験の温度と温度・自己収縮ひずみ (呼び強度 30 シリーズ)



図－4 自己収縮ひずみの比較 (呼び強度 30 シリーズ)

トが高温履歴を受けると、自己収縮ひずみが増大することは知られており⁴⁾、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ている。

3.3 呼び強度 40 シリーズにおける比較

呼び強度 40 シリーズのコンクリート供試体 (40-N, 40-BB, 40-M) の断熱養生での温度および温度・自己収縮ひずみの測定結果を図-5に示す。また、簡易断熱供試体および 30℃ の一定環境下で養生した供試体に対する自己収縮ひずみの測定結果を図-6に示す。

図-5 より、呼び強度 40 シリーズでは、呼び強度 30 シリーズよりも、最大温度上昇量、温度・自己収縮ひずみともに、明らかに大きくなった。

図-6 より、40-N および 40-BB では、呼び強度 30 シリーズよりも、自己収縮ひずみは、簡易断熱条件下でも温度一定下でも明らかに大きくなった。しかしながら 40-M では、自己収縮ひずみの収束値は、簡易断熱養生下で 30-M とほぼ同程度であった。

4. 簡易応力算定例

4.1 応力算定法

既報¹⁾で提案した応力算定方法を示す。圧縮強度予測式およびヤング係数予測式はそれぞれ式(1)および式(2)で示される^{3), 5)}。

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

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

ここで、 t は有効材齢、 t_{fs} は凝結の終結時間(日)、 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である。

図-7 に呼び強度 40 シリーズの圧縮強度およびヤング係数発現を示す。(呼び強度 30 シリーズは既報参照のこと)。また、 s_f と s_E には式(3)の関係がある。

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

なお、 s_f はメーカーの技術資料を参考にして算出した。

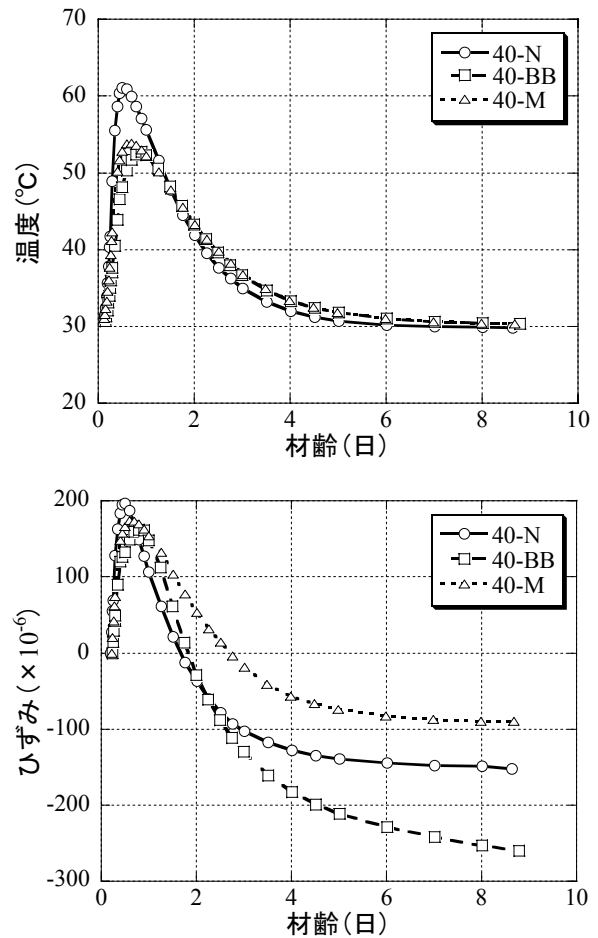


図-5 簡易断熱養生試験の温度と温度・自己収縮ひずみ(呼び強度 40 シリーズ)

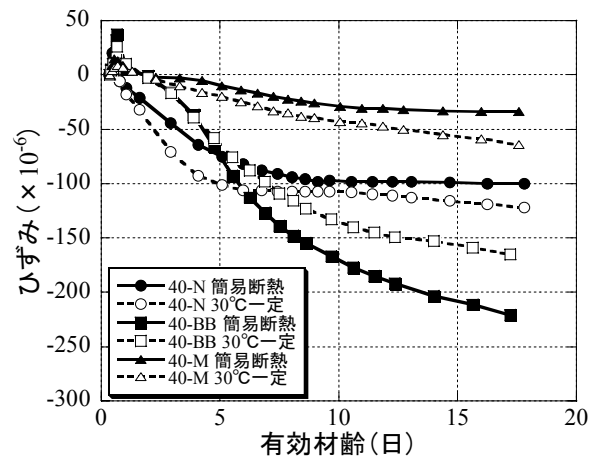
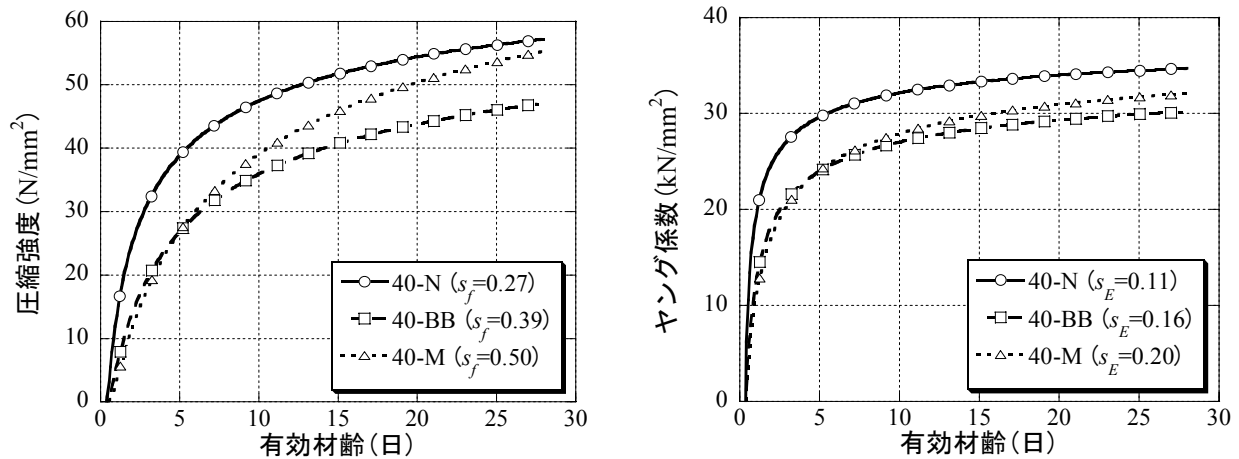


図-6 自己収縮ひずみの比較(呼び強度 40 シリーズ)

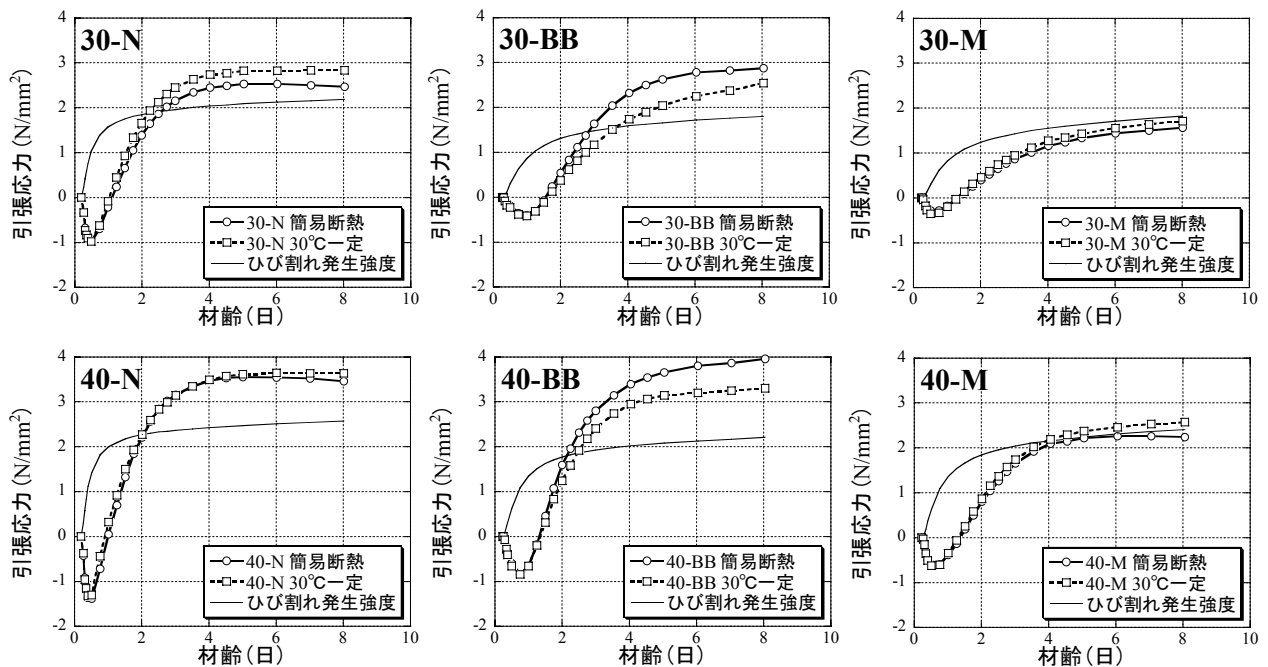
引張クリープ係数式を式(4)に示す。

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

ここで、 $\phi(t, t_0)$ 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



図－７ 応力算定用の圧縮強度とヤング係数



図－８ 応力算定結果 (JIS A 1151 の拘束鋼材を対象としたクリープ計算)

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り、 β と ϕ_0 については式(5)および式(6)の関係⁶⁾がある。

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

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

ここで、 $E(t_0)/E_c$ は標準養生材齢 28 日のヤング係数に対する載荷時材齢 t_0 でのヤング係数の比である。式(1)、式(2)および式(4)から step-by-step 法⁵⁾を利用して、クリープを適切に考慮し、応力を算定した。

4.2 応力算定例

ここでは、一例として JIS A 1151 のような鋼材(断面積 14.6cm²)によってコンクリートが一軸拘束される場合の応力を算定した。なお、鋼材の温度変化は無視した。

拘束度としては、膨張ピーク時で 0.83 から 0.92 程度、材齢 8 日時で 0.64 から 0.72 程度であった。なお、材齢 8 日の拘束度は、膨張のピーク時のひずみを基準として算出した。セメント種類および呼び強度に係わらず、ヤング係数が大きいほど、拘束度は小さい傾向にある。

簡易断熱養生から得られた自己収縮ひずみを

使用した場合と 30℃一定環境下で得られた自己収縮ひずみを使用し、同一の温度履歴を与えた場合の算定結果を図－8に示す。なお、図中のひび割れ発生強度は、まず割裂引張強度 f_T を式(7)に示す圧縮強度との関係式⁷⁾から求め、さらに、一般に引張クリープ限に近いことから、既往の提案式⁸⁾より割裂引張強度の 0.7 倍とした。

$$f_T(t) = 0.291f(t)^{0.637} \quad (7)$$

図－8より、簡易断熱から得られた自己収縮ひずみを用いた場合、ひび割れの危険度は、呼び強度に係わらず、 $BB > N > M$ となった。

M は、N および BB と比較して、ひび割れ危険度は顕著に低く、簡易断熱から得られた自己収縮ひずみを用いた場合および 30℃一定環境下で得られた自己収縮ひずみを用いた場合でも、呼び強度に係わらず、同程度だった。一方、N と BB を比較すると、30℃一定環境下で得られた自己収縮ひずみを用いた場合は、呼び強度に係わらず、N の方がわずかにひび割れ危険度が高かった。しかしながら、簡易断熱から得られた自己収縮ひずみ、つまり実状の温度履歴を受けた自己収縮ひずみを用いた場合には、明らかに BB のひび割れ危険度が高いと判断できる。

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を用いて、汎用セメントを用いたコンクリートのひび割れ危険度を検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) N-30 においては、単位水量の低減が、温度上昇や自己収縮ひずみに与える影響はほとんど認められなかった。
- 2) 本実験範囲において、ひび割れの危険度は $BB > N > M$ となった。M は呼び強度に係わらず、ひび割れの危険度が顕著に低い。
- 3) 高温履歴を受けるマスコンクリートについては、本簡易断熱養生試験のように、実状の自己収縮ひずみが得られる試験方法が有効である。

参考文献

- 1) 橋田浩，小澤貴史：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1301-1306，2006.6
- 2) 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
- 3) 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.9-14，1998.11
- 4) 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.25-31，2002.1
- 5) 自己収縮研究委員会報告書：日本コンクリート工学協会，pp.93-132，1996
- 6) 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.7-12，2000.11
- 7) 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，No.472，pp.11-16，1995
- 8) 牧角龍憲，徳光善治：コンクリートの乾燥収縮ひび割れ発生条件に関する研究，コンクリート工学年次講演論文集，Vol.5，pp.185-188，1983