

論文 暑中環境下のマスコンクリートの諸物性および温度ひび割れ危険度の簡易評価

菊地 俊文*1・片山 行雄*1・黒田 泰弘*2・今本 啓一*3

要旨：普通コンクリートでは、適切な対策を講じることで、受入れ時のコンクリート温度の上限値を 35℃から 38℃に変更することが認められているが、マスコンクリートは対象外とされている。本論文では、各種ポルトランドセメントを用いた同じ強度レベルのコンクリートを対象に、練上がり温度を 20℃および 40℃とした室内実験、受入れ時の温度を 35℃超とした実機実験を行い、フレッシュ性状の経時変化、凝結硬化、自己収縮、温度履歴、圧縮強度（簡易断熱・模擬部材含む）を測定した。また、外部拘束型の温度ひび割れ危険度を解析的に評価し、受入れ時 35℃を超えるマスコンクリートの適用可能性について言及した。

キーワード：暑中コンクリート、マスコンクリート、温度ひび割れ、応力強度比

1. はじめに

気候変動に伴う暑中環境の過酷化と長期化が顕著となっている。近年では、受入れ時 35℃を超えるコンクリートの検討が学協会を中心に行われており、上部躯体等の一般的なコンクリートにおいては、受入れ時のコンクリート温度を 38℃まで緩和する動きがある¹⁾。

一方、マスコンクリートは打込み時の温度の上昇が温度応力に影響を及ぼし、温度ひび割れの危険度が高まることから、受入れ時のコンクリート温度は 35℃を上限としており、35℃を超えた場合には現状施工することができない²⁾。一般的なコンクリートに続き、マスコンクリートも受入れ時のコンクリート温度の上限値が緩和されるためには、今後も検討を行い、有用なデータを蓄積していくことが必要となるが、特に水和熱を抑制する中熱および低熱ポルトランドセメント等の低発熱型セメントを用いたコンクリートを対象にした研究は少ない。

既報³⁾では、各種ポルトランドセメントを用いた水セメント比 45%のコンクリートを対象に、目標練上がり温度および環境温度を 20～45℃とし、簡易断熱養生試験による温度・自己収縮ひずみを入力値とした応力算定を行い、練上がり温度が外部拘束型のマスコンクリートの温度ひび割れ危険度に及ぼす影響を明らかにした。

本検討では、設計基準強度 36N/mm²とした各種ポルトランドセメントを用いたコンクリートを対象として、練上がり温度を 20℃および 40℃とした室内実験および暑中期に受入れ時 35℃超とした実機実験を行い、コンクリートの各種物性を取得し、外部拘束型のマスコンクリートの温度ひび割れ危険度について、応力強度比による解析的な評価を行うことで、受入れ時 35℃を超えるマスコンクリートの適用可能性を検討した。

2. 室内実験

2.1 概要

各種ポルトランドセメントを用いた設計基準強度 36N/mm²のコンクリートを対象に、目標練上がり温度および環境温度を 20℃および 40℃の 2 水準とし、スランプや空気量の経時変化、プロクター貫入抵抗値、圧縮強度の諸性状について検討した。

2.2 実験計画

(1) 使用材料および計画調査

使用材料を表-1に、計画調査を表-2にそれぞれ示す。設計基準強度 36N/mm²に一般的な各種ポルトランドセメントの構造体強度補正值²⁾を考慮して、計画調査を

表-1 使用材料

材料	記号	種類・名称
水	W	上水道水(室内実験)、工業用水(実機実験)
セメント	NC	普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm ³
	MC	中熱ポルトランドセメント、密度 3.21g/cm ³
	LC	低熱ポルトランドセメント、密度 3.22g/cm ³
細骨材	S	混合砂、表乾密度 2.62g/cm ³
粗骨材	G	石灰岩碎石2005、表乾密度 2.70g/cm ³
化学混和剤	SP	高性能AE減水剤遅延形 I 種

表-2 計画調査

調査名	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				SP添加率(C×%)		
		W	C	S	G	室内実験		実機 実験
						20℃	40℃	
42N	39.5	175	444	747	959	0.900	1.000	0.975
39M	40.8	175	429	794	929	0.700	0.900	0.975
36L	42.1	175	416	805	929	0.500	0.725	0.800

表-3 試験項目および方法

試験項目	試験方法	
スランプ	JIS A 1101	練上がり、30分、60分、90分、120分
空気量	JIS A 1128	
コンクリート温度	JIS A 1156	
凝結時間	JIS A 1147	20℃または40℃環境室
圧縮強度	JIS A 1108	標準養生7、28日

*1 清水建設（株） 技術研究所（正会員）

*2 清水建設（株） 技術研究所 博士(工学)（正会員）

*3 東京理科大学 工学部建築学科 教授 博士(工学)（正会員）

設定した。また、練上がり時の目標スランプは受入れまでのスランプ低下を 2cm 見込んで $23 \pm 2\text{cm}$ 、目標空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ 、目標練上がり温度は目標値 $\pm 2^\circ\text{C}$ とした。

(2) 試験項目および方法

試験項目および方法を表-3 に示す。スランプ、空気量、コンクリート温度は静置試料を用いて、経時変化（練上がり、30 分、60 分、90 分、120 分）を確認した。凝結試験は各温度環境下で行った。圧縮強度試験用供試体は各温度環境下で採取後、養生室（室温 20°C 、相対湿度 99% 以上）に材齢 1 日まで静置し、脱型後に標準養生とした。

2.3 実験結果および考察

(1) フレッシュ性

スランプの経時変化を図-1 に示す。いずれの調査も 40°C 環境下ではスランプの低下量は大きくなり、42N が 120 分後に、39M が 90 分後に、36L が 60 分後に、それぞれ急激に低下した。一方、 20°C 環境下では、42N および 39M はスランプの低下がほとんど認められず、36L のみ 90 分後に低下した。化学混和剤の使用量の多寡による差が要因と考えられる。なお、暑中コンクリート工事における対策マニュアル⁴⁾では、 20°C 環境下における静置状態で 60 分経過後のスランプ低下量が 6cm 以下であれば、スランプ保持性能を十分に満足できる調合とされている。

空気量の経時変化を図-2 に示す。いずれの調査も、各温度環境下に関わらず、管理範囲内で最大 1.6% の変動であり、経時による顕著な変化は認められなかった。

(2) 凝結時間

凝結試験結果を図-3 に示す。一般の打重ね許容限度とされる貫入抵抗値 0.5N/mm^2 となる時間は、 40°C 環境下では、42N が 139 分、39M が 138 分、36L が 199 分であった。練混ぜから打込み終了までの時間の限度を 90 分、打重ね時間間隔の限度を 120 分とすると、打重ね許容時間は 210 分以上とする必要があるが、 40°C 環境下では、この時間より短かった。

(3) 圧縮強度

圧縮強度試験結果を図-4 に示す。いずれの調査も管理材齢 28 日における必要強度を満たしたが、 40°C 環境下では、 20°C 環境下よりも圧縮強度が 10% 程度低い傾向にあった。過去に行った環境温度および練上がり温度を要因とした試験結果と同じ傾向であった⁵⁾。

3. 実機実験

3.1 概要

室内実験で検討したコンクリートを対象として、受入れ時のコンクリート温度が 35°C を超える実機実験を東京都内の猛暑日に行い、暑中環境下のコンクリートの特性、室内および実機実験における品質の違いについて検討した。

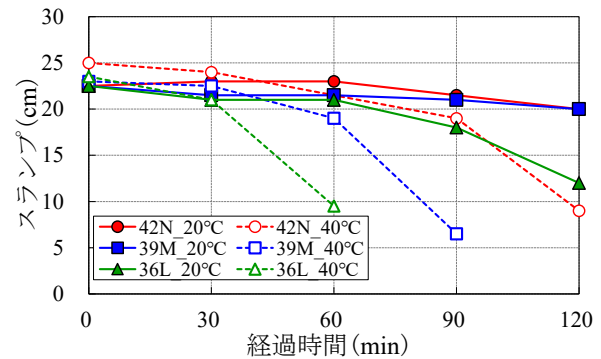


図-1 スランプの経時変化

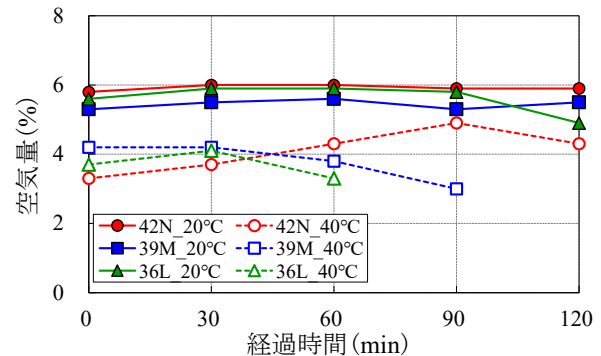


図-2 空気量の経時変化

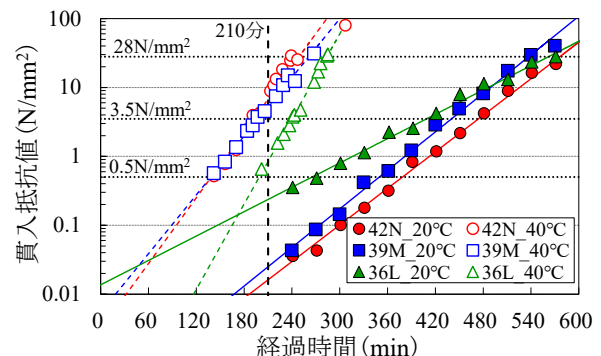


図-3 凝結時間

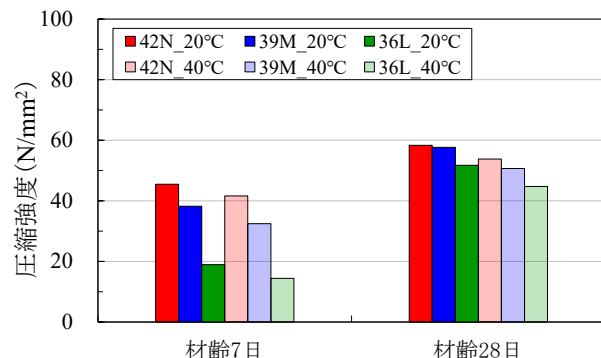


図-4 標準養生圧縮強度

3.2 実験計画

(1) 使用材料および計画調査

使用材料および計画調査は室内実験と同じである。なお、化学混和剤の使用量は前述の表-2 のとおりであり、室内実験と異なった。

(2) コンクリートの練混ぜおよび運搬

コンクリートの練混ぜは、二軸強制練りミキサ（公称容量 2.75m^3 ）を用いて、1 バッチの練混ぜ量を 2.00m^3 と

し、練上がり温度を調整するため、練混ぜ水の一部に60℃程度の温水を使用した。

2 バッチ分をトラックアジテータに積み込み、経時 30 分までレディーミクストコンクリート工場敷地内で試験を行い、その後、模擬部材等を採取する実験場所に運搬して、経時 60 分、90 分、120 分の試験を行った。

(3) 試験項目および方法

試験項目および方法を表-4に示す。スランプ、空気量、コンクリート温度はトラックアジテータから試料を採取して、経時変化（練上がり、30 分、60 分、90 分、120 分）を確認した。凝結試験は 40℃に設定した環境室で行った。

模擬部材概要を図-5に、簡易断熱養生箱概要を図-6にそれぞれ示す。経時 60 分で採取した模擬部材は屋外保管と 40℃環境室に材齢 28 日まで保管した後、屋外保管の 2 種類とした。簡易断熱養生箱は 40℃環境室に材齢 28 日まで保管した後、供試体を取り出し、恒温恒湿室（室温 20±2℃、相対湿度 60±5%）で封かん養生とした。

3.3 実験結果および考察

(1) フレッシュ性状

スランプの経時変化を図-7に示す。練上がりから 90 分間のスランプの低下量は 42N が 1.0cm、39M が 2.5cm、36L が 4.0cm であり、室内実験と同様に化学混和剤の使用量の多寡による差が要因と考えられる。化学混和剤の使用量を増やすことで、スランプの低下量は小さくなるものの、練上がりのスランプが上限値に近いことから、36L では 90 分後まで施工性を確保するために化学混和剤中の保持成分の割合を増やす等の調整が必要になる。

空気量の経時変化を図-8に示す。いずれの調合も管理範囲内で最大 1.5%の変動であり、室内実験と同様に経時による顕著な変化は認められなかった。

(2) 凝結時間

凝結試験結果を図-9に示す。貫入抵抗値 0.5N/mm² となる時間は、40℃環境下の室内実験と比較して遅く、42N が 240 分、39M が 230 分、36L が 212 分であった。スランプの低下量が最も大きい 36L でも、打重ね許容時間 210 分以上を満足しており、打重ねについて概ね問題のない結果が得られることがわかった。

(3) 模擬部材の温度履歴

模擬部材の温度履歴を 40℃環境室に設置した簡易断熱養生の温度履歴とともに図-10に示す。低発熱型のセメントを用いることで、最高温度で 10～20℃程度の温度低減効果があることがわかった。

(4) 圧縮強度およびヤング係数

圧縮強度試験結果を図-11に示す。いずれの調合も管理材齢における必要強度を満たした。また、材齢 91 日では、標準養生よりも簡易断熱養生の圧縮強度が低く、

表-4 試験項目および方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
コンクリート温度	JIS A 1156
凝結時間	JIS A 1147
圧縮強度	JIS A 1108
ヤング係数	JIS A 1149
自己収縮	埋込み型ひずみ計
線膨張係数	埋込み型ひずみ計
構造体強度（コア強度）	JIS A 1107

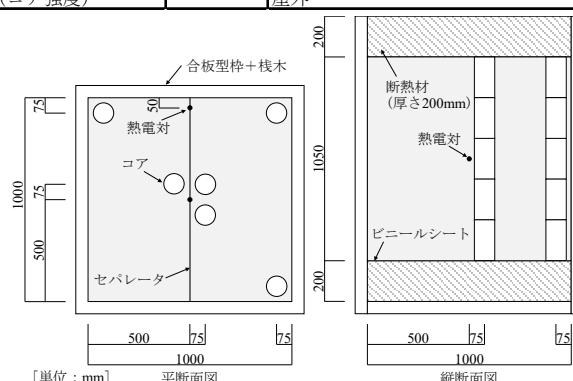


図-5 模擬部材の概要

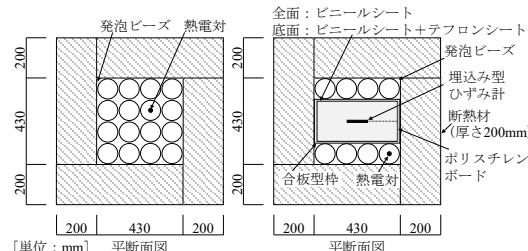


図-6 簡易断熱養生箱の概要

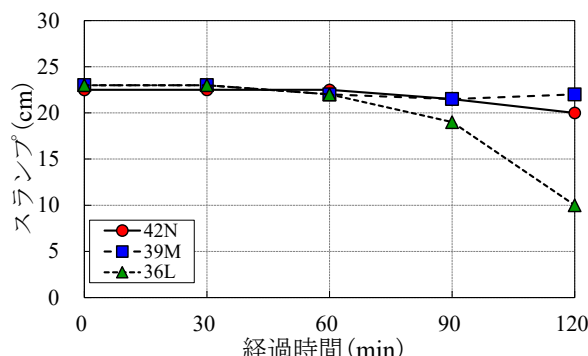


図-7 スランプの経時変化

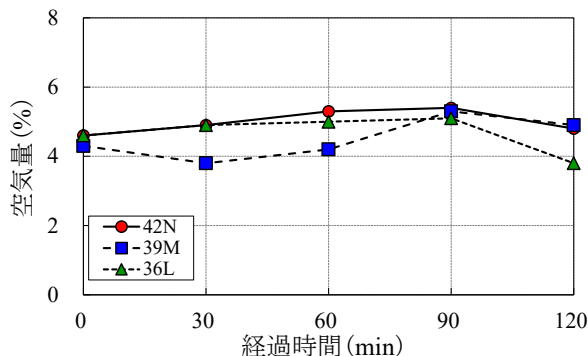


図-8 空気量の経時変化

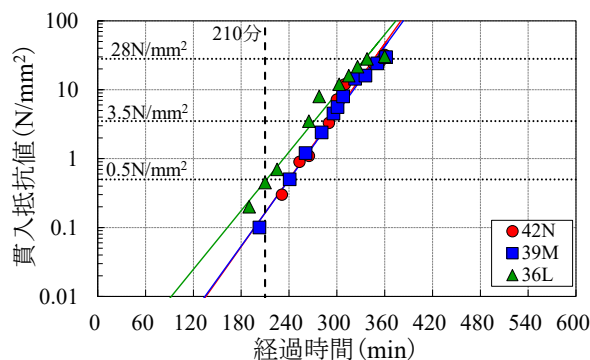


図-9 凝結時間

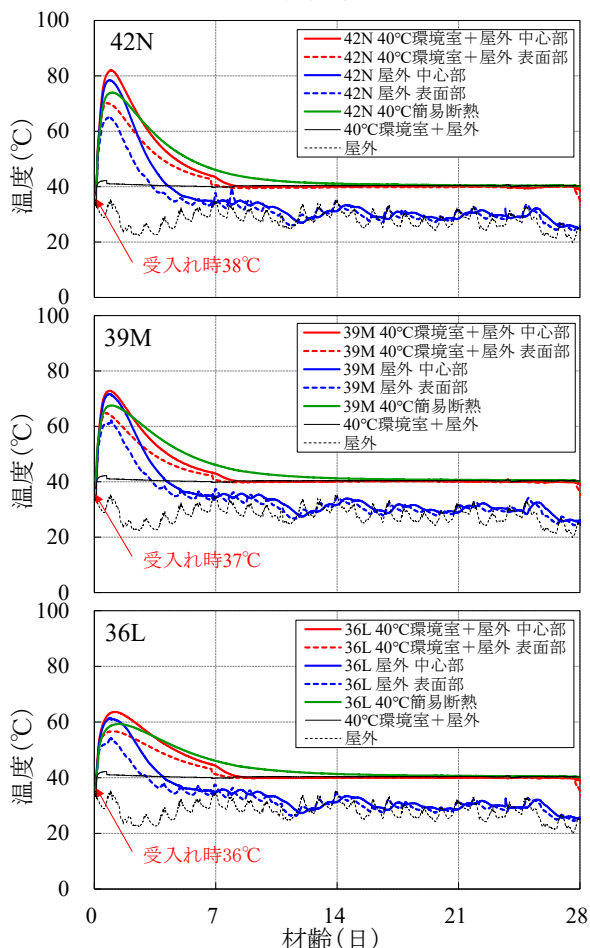


図-10 模擬部材の温度履歴

初期高温履歴によって、長期強度の増進が停滞したことが原因として考えられる。

マスコンクリートの構造体強度補正値を図-12に示す。いずれの調合も材齢91日コア強度は、40℃環境および屋外環境の保管の方が、屋外環境のみの保管よりも小さかった。このため、材齢4週までの平均養生温度が高いほど、構造体強度補正値が大きくなった。初期高温履歴および材齢28日まで40℃環境下にあったことで長期強度の増進が停滞したことが原因と考えられる。また、構造体強度補正値は42Nが最も大きく、39M、36Lの順に小さかった。材齢4週までの平均養生温度が40℃を超える高い場合であっても、いずれの調合の構造体強度補正値も一般的な値²⁾を下回った。

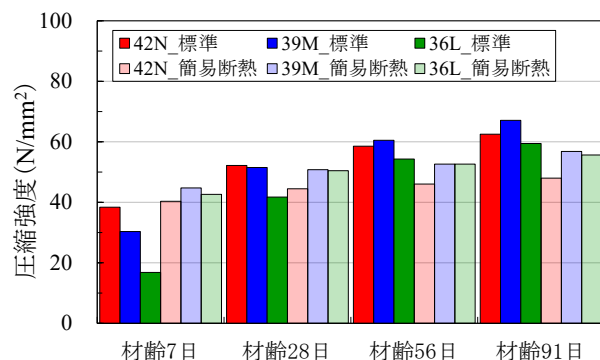


図-11 標準養生および簡易断熱養生圧縮強度

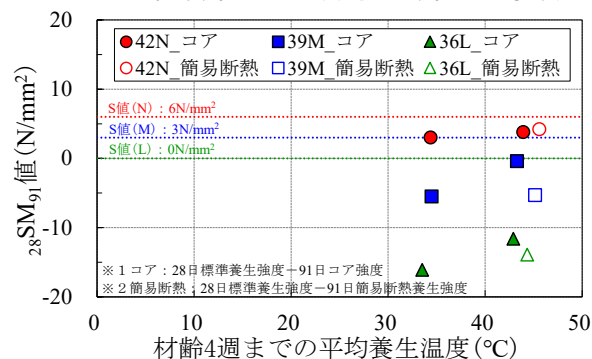


図-12 構造体強度補正値

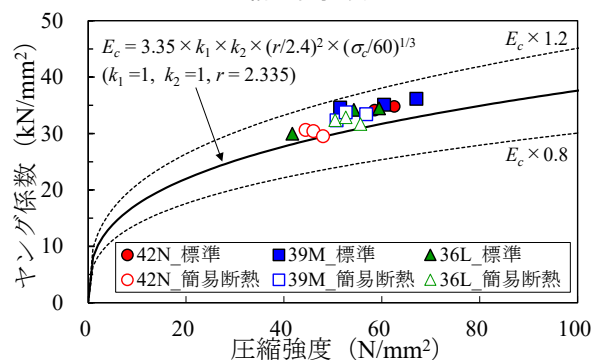


図-13 圧縮強度とヤング係数

圧縮強度とヤング係数の関係を、JASS5に示される圧縮強度とヤング係数の関係式と併せて図-13に示す。いずれの調合も関係式の0%～+20%程度の範囲にあった。

(5) 線膨張係数

線膨張係数の計測結果を図-14に示す。セメント種類による差はほとんどなく、石灰岩骨材を用いているため、線膨張係数は7.8～8.0 μ/℃と比較的小さかった。

(6) 自己収縮

自己収縮ひずみの計測結果を一般的な算定式⁶⁾による自己収縮ひずみとともに図-15に示す。なお、材齢に伴い、線膨張係数は変化することが知られているが、ここでは図-14の値を考慮して一定値とし、応力発生原点とみなせる凝結の終結を基点とした。自己収縮ひずみは42Nが最も大きく、39M、36Lの順に小さかった。また、水和熱に伴う高温履歴が自己収縮ひずみに及ぼす影響も小さく、20℃環境下とほとんど差がなかった。さらに、算定値と大小関係は同じであるが、ひずみの基点による違いがひずみ量の差に影響したと考えられる。

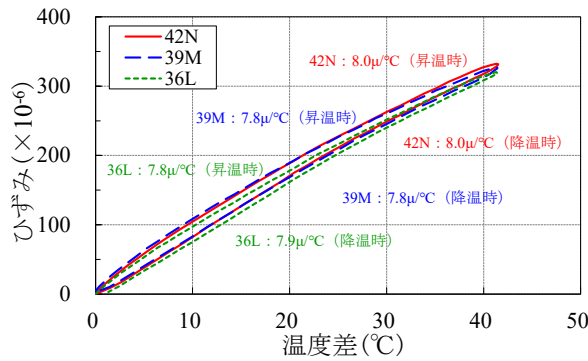


図-1 4 線膨張係数

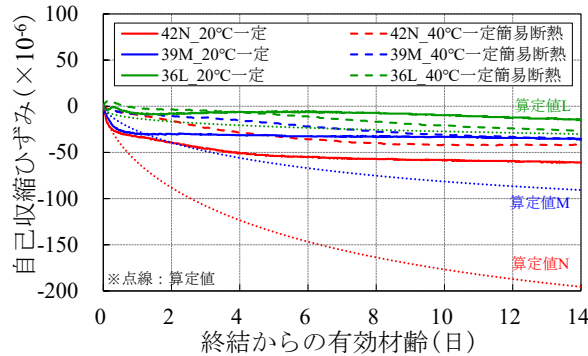


図-1 5 自己収縮ひずみ

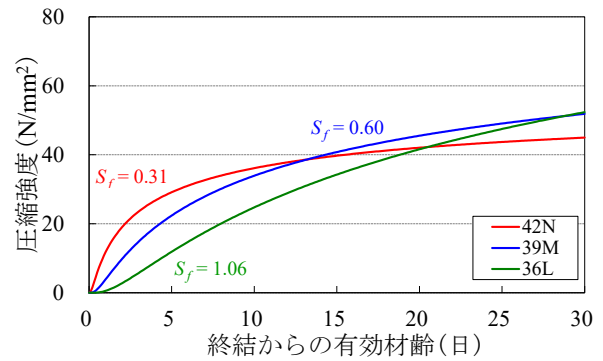


図-1 6 圧縮強度発現

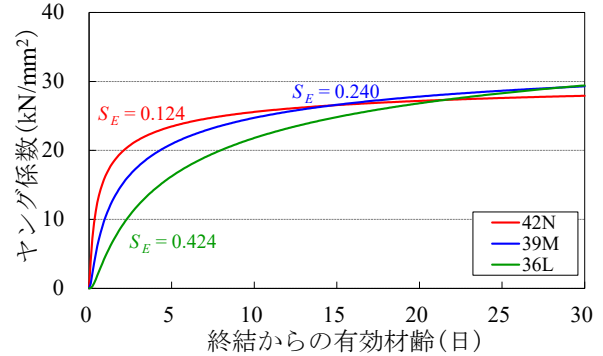


図-1 7 ヤング係数発現

4. 温度応力算定

4.1 概要

既報^{3,7)}で提案した温度応力の算定方法を用いて、実機実験で得られたコンクリートの物性を入力値とし、自己収縮およびクリープを考慮した温度応力を算定した。また、応力強度比に基づく温度ひび割れ危険度を評価した。

4.2 算定方法

(1) 入力値

模擬部材の温度履歴に概ね相当する簡易断熱養生による圧縮強度発現を図-1 6に、ヤング係数発現を図-1 7に、温度・自己収縮ひずみを図-1 8にそれぞれ示す。実機実験で得られたコンクリートの物性のうち、圧縮強度等を定式化し、温度・自己収縮ひずみ(全ひずみ)を入力値とし、step-by-step法を用いて、自己収縮およびクリープを考慮した温度応力を算定した^{3,7)}。

(2) 対象

建築のマスコンクリートの対象となる部材は、マットスラブのような盤状部材や基礎梁のような壁状部材である。部材形状や材齢に伴うコンクリートの物性の変化によって拘束度は異なることから⁸⁾、本検討では拘束度0.3、0.5、0.7の一定拘束を受ける場合を対象とした。

(3) 評価方法

応力強度比を式(1)に、ひび割れ発生強度の予測式は式(2)にそれぞれ示す²⁾。

$$\eta(t_e) = \frac{\sigma_{st}(t_e)}{f_{cr}(t_e)} \quad (1)$$

$$f_{cr}(t_e) = 0.18 \times f_c(t_e)^{0.75} \times \kappa \quad (2)$$

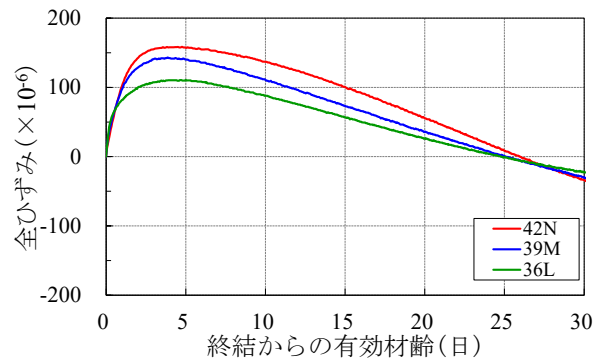


図-1 8 温度・自己収縮ひずみ(全ひずみ)

ここに、 $\eta(t_e)$ は応力強度比、 $\sigma_{st}(t_e)$ はコンクリート温度応力の予測値(N/mm²)、 $f_{cr}(t_e)$ はひび割れ発生強度(N/mm²)、 $f_c(t_e)$ は材齢28日圧縮強度(N/mm²)、 κ はひび割れ発生低減係数(1.0を標準とする)、 t_e は有効材齢(日)である。

自己収縮がほぼ収束した後、材齢28日までの応力強度比の最大値で温度ひび割れ危険度を評価した。さらに、コンクリート打込み後、冬期に向けて気温が低下していくことから、圧縮強度発現が概ね収束した材齢91日以降の線膨張係数計測時のひずみから、10℃まで低下した場合の温度ひび割れ危険度も併せて評価した。

4.3 算定結果および考察

温度応力算定結果の一例を、式(2)で算出したひび割れ発生強度とともに図-1 9に示す。水和に伴う発熱による熱膨張で圧縮力が導入され、放熱に伴う熱収縮および自己収縮で引張力が徐々に加わり、引張力は42Nが最も大きく、39M、36Lの順に小さくなった。この傾向はいずれの拘束度でも同様であった。

応力強度比と拘束度の関係を図-20に示す。図中には、一般的な鉄筋腐食抵抗性の設計値 1.3 および漏水抵抗性の設計値 0.8 も併せて示す²⁾。応力強度比は 42N が最も大きく、39M、36L の順に小さかった。水和に伴う発熱が終わり、コンクリート温度が周辺温度と同程度になった時点では、39M および 36L は応力強度比 0.8 を下回っており、漏水抵抗性は確保できる。しかしながら、気温の低下を考慮し、コンクリート温度が 10℃ となると 39M や 36L であっても、拘束度が大きい領域で鉄筋腐食抵抗性や漏水抵抗性を確保することが困難な場合があった。材料・調合以外に、設計・施工等も含めた総合的な温度ひび割れの対策を行う必要があると考えられる。

5. まとめ

本論文では、各種ポルトランドセメントを用いた同じ強度レベルのコンクリートを対象に、受入れ時 35℃ を超えるマスコンクリートの適用可能性について検討した。主な結果は次のとおりである。

- (1) スランプの経時変化は、40℃ 環境下の室内実験では低下量が多いものの、実機実験では 90 分後の低下量は 1.0～4.0cm であった。スランプの低下量が最も大きい 36L でも、化学混和剤中の保持成分の割合を増やす等の調整により、酷暑期においても 90 分後まで施工性を確保できる可能性があると考えられる。
- (2) 一般の打重ね許容限度とされる貫入抵抗値 0.5N/mm² となる時間は、40℃ 環境下の室内実験では 210 分未満だったものの、実機実験ではいずれの調査も 210 分以上となった。酷暑期においても打重ねに対応できると考えられる。
- (3) マスコンクリートの構造体強度補正値は 42N が最も大きく、39M、36L の順に小さかった。いずれの調査の構造体強度補正値も一般的な値を下回った。
- (4) 応力強度比による温度ひび割れ危険度は、42N が最も大きく、39M、36L の順に小さかった。気温の低下を考慮し、コンクリート温度が 10℃ となると 39M や 36L であっても、拘束度が高い領域で鉄筋腐食抵抗性や漏水抵抗性を確保することが困難な場合があった。

以上の結果より、酷暑期の実機実験で得られた結果に大きな問題は認められないことから、調合に応じて化学混和剤の調整等ができれば、施工性や構造体コンクリート強度は満足する。一方、マスコンクリート特有の温度ひび割れの観点では、拘束度が大きい部材で中庸熱や低熱の低発熱型セメントを用いた場合でも漏水抵抗性を確保するのが困難な場合があり、最大ひび割れ幅を鉄筋量で制御することや地下外壁で二重壁を採用すること等の設計的な対策のほか、施工等も含めた総合的な温度ひび割れ対策を行えば、適用できる可能性があると考えられる。

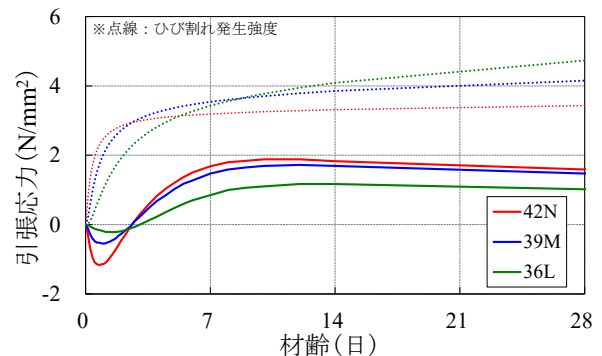


図-19 温度応力算定結果（拘束度 0.5 の場合）

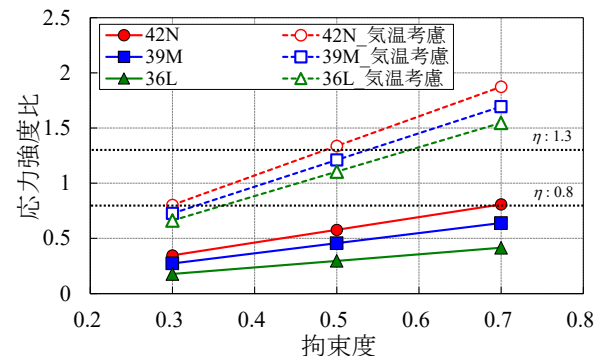


図-20 応力強度比と拘束度

謝辞

化学混和剤の提供および実験にあたり、株式会社フローリックの協力を戴きました。また、実機実験にあたり、東京コンクリート株式会社の協力を戴きました。この場を借りて深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本建築学会：暑中コンクリートの施工指針・同解説，2019
- 2) 日本建築学会：マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針・同解説，2019
- 3) 菊地俊文，片山行雄，黒田泰弘，辻埜真人：暑中環境下のマスコンクリートの温度ひび割れ危険度の簡易評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.976-981，2022
- 4) 日本建築学会近畿支部：暑中コンクリート工事における対策マニュアル 2022
- 5) 片山行雄ほか：脱型までの温度が管理用供試体の圧縮強度に及ぼす影響，日本建築学会学術講演梗概集（近畿），pp.617-618，2014
- 6) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016
- 7) 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
- 8) 木村克彦，小野定：マスコンクリート構造物の温度ひび割れ発生の評価方法に関する研究，土木学会論文集，No.378，V-6，pp.61-70，1987.2