

報告 混和材を高含有したコンクリートの熱特性に関する検討

溝渕 麻子^{*1}・小林 利充^{*2}・神代 泰道^{*2}・新村 亮^{*3}

要旨: 本研究は、混和材を高含有したコンクリートの熱特性を把握することを目的に、単位結合材量（水結合材比）および打込み温度をパラメータとした実験を行い、単位結合材量（水結合材比）および打込み温度が熱特性に与える影響を検討した。一部、高炉セメント B 種との比較も行った。その結果、単位結合材量（水結合材比）と温度上昇量には高い相関が見られた。また、温度応力解析を実施し、打込み温度および単位結合材量にかかわらず、混和材を高含有したコンクリートは、高炉セメント B 種を用いたコンクリートに比べ、マスコンクリートに適用した際に温度ひび割れの低減効果が期待できることがわかった。

キーワード: 熱特性, 混和材, 単位結合材量, 水結合材比, 打込み温度

1. はじめに

昨今、異常気象による自然災害が増加の傾向にある。温室効果ガスによる地球温暖化現象の影響も少なからず考えられる。低炭素社会の構築を進めるにあたり、筆者らはこれまで建設業の立場から、建設材料の二酸化炭素排出量（以降、CO₂排出量と称す）の削減に資するべく、コンクリートの低炭素化に取り組んでいる¹⁾。コンクリートを低炭素化するためには、CO₂排出量原単位が少ない産業副産物である高炉スラグ微粉末、フライアッシュ等の混和材を利用することが有効であるとし、混和材を高含有したコンクリートについて各種検討を行ってきた。

混和材を高含有したコンクリートの特長に「低炭素化」および「低発熱性」がある。本研究では、混和材を高含有したコンクリートの「低発熱性」について、熱特性を把握するために、単位結合材量と打込み温度をパラメータとした実験を行い、単位結合材量および打込み温度がコンクリートの温度上昇量に与える影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験範囲

結合材は、普通ポルトランドセメントおよび高炉スラグ微粉末を使用した 2 成分構成とした。また結合材の混合割合は、質量比でセメント：高炉スラグ微粉末=25：75 とし（以降、CC と称す）、比較検討用として、一部、高炉セメント B 種（以降、BB と称す）を用いたケースも適用した。

2.2 使用材料

使用材料を表-1 に示す。結合材に使用する高炉スラグ微粉末は 4000 ブレーンで石膏を内添したタイプとし、JIS 適合品（JIS A 6206）とした。細骨材は山砂と石灰砕砂を質量比で 7:3 の割合で混合した。粗骨材は石灰砕石を使用した。化学混和剤は、高性能 AE 減水剤または AE 減水剤を調合により選定して使用した。

2.3 調合条件

調合条件を表-2 に示す。空気量は何れも 4.5% とした。調合は、結合材を 2 成分構成とした混和材を高含有した

表-1 使用材料

項目		産地・銘柄
結合材(B)	セメント(C)	普通ポルトランドセメント(OPC)：密度 3.16g/cm ³ ，比表面積 3200cm ² /g 高炉セメント B 種(BB)：密度 3.04g/cm ³ ，比表面積 3810cm ² /g
	高炉スラグ微粉末(BS)	4000 ブレーン JIS 適合品：密度 2.87g/cm ³ ，比表面積 4390cm ² /g [注] 石膏を内添したタイプとする。
水(W)		上水道水
細骨材(S)		山砂（千葉県富津産）：密度 2.60g/cm ³ ，吸水率 1.60%，粗粒率 3.00，混合比率 70% 石灰砕砂（青森県八戸産）：密度 2.69g/cm ³ ，吸水率 1.40%，粗粒率 2.90，混合比率 30%
粗骨材(G)		石灰砕石（青森県八戸産）：密度 2.69g/cm ³ ，吸水率 0.70%，粗粒率 6.60，実積率 60%
化学混和剤(Ad)		高性能 AE 減水剤(SP)：ポリカルボン酸系 高機能 AE 減水剤(AE)：リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸系 助剤：ロジンのカリウム塩

*1 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 副主任研究員 (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*3 (株)大林組 土木本部生産技術本部技術第一部 上級主席技師 修士(工学) (正会員)

コンクリート (CC) の単位結合材量 (水結合材比) をパラメータとした 4 水準および BB を用いた 1 水準の計 5 調合とした。なお、調合名称 CC44.4 については、打込み温度を 10℃、20℃および 30℃の 3 水準とした試験を実施した。CC44.4 および BB は同じ強度レベルと設定した。

2.4 試験項目

試験項目を表-3 に、試験ケースを表-4 に、試験体概要を表-5 にそれぞれ示す。線膨張係数については、強度レベルを同等とした BB と低炭素型のコンクリートの CC44.4 を対象に、中央部に埋込型ひずみ計を埋設した試験体を用いて試験は次のように実施した。①水温 20℃に設定した恒温水槽に試験体を静置し、恒温水槽の水温を 20℃から 60℃まで 1 時間あたり 1℃上昇させる。②水温が 60℃から 20℃まで 1 時間あたり 1℃降下させ、内部ひずみの測定を行う。③測定したコンクリート温度上昇量と内部ひずみの関係を、最小二乗法により近似式を求め、式の傾きを線膨張係数とする。

3. 実験結果

以下に、実験結果を示す。

3.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状はいずれも良好で、スランブ・スランブフローおよび空気量は調合条件を満たしている。打込み温度をパラメータとした CC44.4 のケースについての打込み温度はそれぞれ CC44.4-10 が 11.1℃、CC44.4-20 が 20.0℃、CC44.4-30 が 29.5℃であった。

凝結時間を図-1 に示す。打込み温度をパラメータとした CC44.4 のケースについては、セメント 100%のコンクリートと同様に、打込み温度が高くなるに従い、凝結時間 (始発時間および終結時間ともに) が早くなる傾向がみられる。一方、CC36.2、CC44.4-20 および CC60.0 のケースを比較すると、始発時には単位結合材量 (水結合材比) による明確な差異は表れていないが、終結時間については、水結合材比が大きいほど若干遅くなる傾向が見られた。また、強度レベルが同等となった BB と CC44.4-20 を比較すると始発時間は BB の方が遅いが、

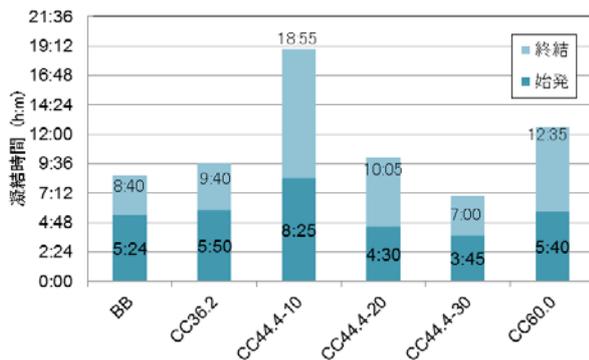


図-1 凝結時間

表-2 調合条件

ケース名称	SL or SF (cm)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
				B		W	
				OPC	BS		
BB	15	55.0	48.5	300	150	150	165
CC30.0	60	30.0	40.2	567	142	425	170
CC36.2	60	36.2	43.4	470	117	352	170
CC44.4	15	44.4	49.2	372	93	279	165
CC60.0	15	60.0	51.6	275	69	206	165

表-3 試験項目

項目		試験方法
フレッシュ性状	分離性状	目視
	スランブ	JIS A 1101
	スランブフロー	JIS A 1150
	空気量	JIS A 1128
	コンクリート温度	JIS A 1156
	単位容積質量	JIS A 1116
	凝結時間	JIS A 1147
硬化性状	圧縮強度 (標準養生)	JIS A 1108
	静弾性係数	JIS A 1149
	割裂引張	JIS A 1113
	断熱温度上昇	JCI SQA3
	線膨張係数	-

表-4 試験ケース

ケース名称	CT (°C)	SL SF Air	凝結時間	圧縮静弾性	割裂	断熱	線膨張
BB	20	○	○	○	-	-	○
CC30.0	20	○	-	○	○	○	-
CC36.2	20	○	○	○	○	○	-
CC44.4-10	10	○	○	○	○	○	-
CC44.4-20	20	○	○	○	○	○	○
CC44.4-30	30	○	○	○	○	○	-
CC60.0	20	○	○	○	○	○	-

[注] CT : コンクリートの打込み温度, SL : スランブ, SF : スランブフロー, Air : 空気量

表-5 試験体概要

項目	寸法(cm)	材齢	養生
圧縮強度	φ10×20	1,3,7,14,	標準養生
静弾性係数		28,56,91 日	
割裂引張	φ10×20	28 日	標準養生
断熱温度	専用缶	14 日間	断熱温度上昇装置
線膨張	10×10×40	56 日	標準養生

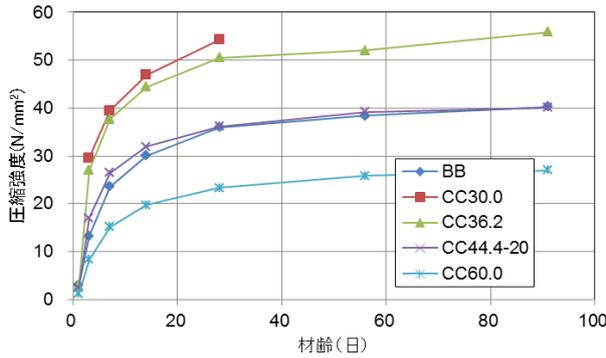


図-2 調合の違いによる圧縮強度の発現

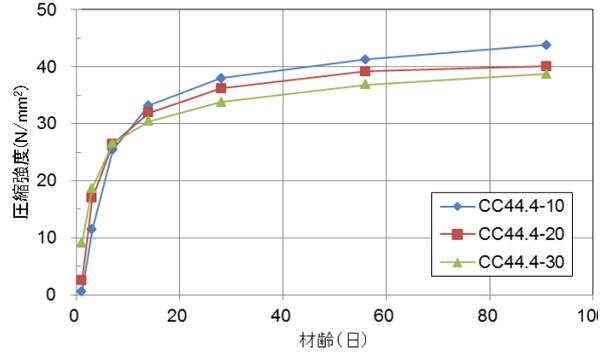


図-3 打込み温度の違いによる強度発現

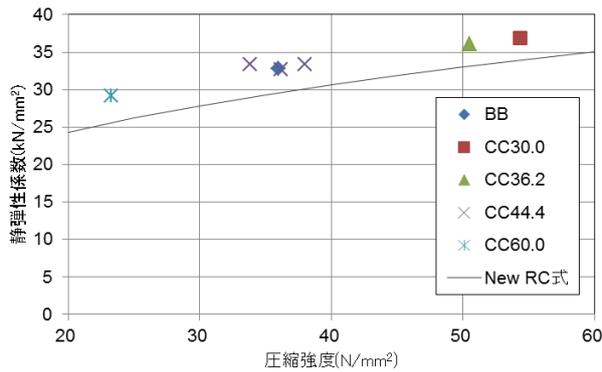


図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係

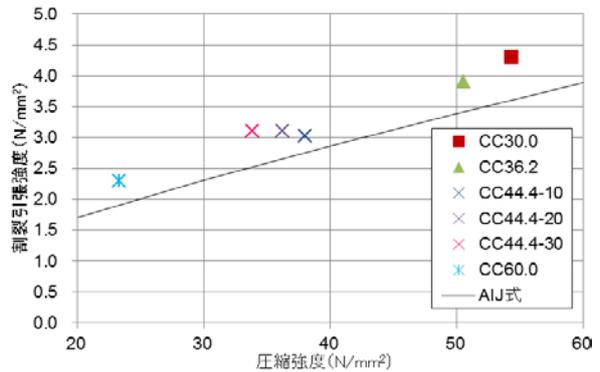


図-5 圧縮強度と割裂引張強度の関係

終結時間は早い結果となった。

3.2 強度試験

(1) 圧縮強度

圧縮強度について、打込み温度を 20℃とした場合の、調合の違いによる圧縮強度の発現を図-2 に示す。セメント 100%のコンクリート同様、水結合材比の減少に伴い圧縮強度が増加する傾向にある。なお、BB と CC44.4-20 は材齢 28 日以降同等の強度となった。

次に打込み温度の違いによる強度発現を図-3 に示す。材齢 7 日までは打込み温度が高いほど圧縮強度も高いが、それ以降は打込み温度が高いほど圧縮強度は低くなる傾向が見られた。筆者らの既往の研究²⁾と同様に打込み温度が高いと初期の強度発現は良いが、長期の強度発現は小さい結果となった。

(2) 静弾性係数

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-4 に示す。また式(1)に示す RC 規準式³⁾ (New RC 式) によって算定した結果も併せて掲載する。

$$E = k_1 \times k_2 \times 3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{2.4}\right)^2 \times \left(\frac{\sigma_B}{60}\right)^{1/3} \quad (1)$$

この時、粗骨材の種類により定まる修正係数 k_1 は石灰砕石を使用しているため 1.2、混和材の種類により定まる修正係数 k_2 は高炉スラグを使用しているため 0.95 とそ

れぞれ設定した。 γ はそれぞれの材齢 28 日の強度試験時の単位容積質量の平均値である 2.3 を用いた。実験結果はいずれも、New RC 式を用いた算定値以上となっており、New RC 式で計算される値の 80%以上の範囲内にあり、一般的な性状を有していることを確認した。

(3) 割裂引張強度

各調合における材齢 28 日標準養生強度と割裂引張強度の関係を図-5 に示す。割裂引張強度は、一般に圧縮強度の 1/10~1/13 と言われており、本実験結果も同様となっている。また表-8 に後述する AIJ 式より若干大きくなった。

3.3 断熱温度上昇試験

断熱温度上昇結果を表-6 に示す。

打込み温度 20℃における断熱温度上昇量を水結合材比別に図-6 に示す。断熱温度上昇量は、水結合材比が小さくなるに従い(単位結合材量が大きくなるに従い)、高くなる傾向にある。CC44.4 について、打込み温度ごとの断熱温度上昇量を図-7 に示す。断熱温度上昇量は、打込み温度に関わらずほぼ同等になるという傾向がみられる。

次に、単位結合材量と終局断熱温度上昇量(以降、K 値と称す) および温度上昇速度に関する定数(以降、 α と称す)の関係を図-8 に、打込み温度と K 値および α 値の関係を図-9 にそれぞれ示す。打込み温度 20℃では単位結

表-6 断熱温度上昇結果

ケース名称	初期温度 (°C)	最高温度 (°C)	温度上昇量 (°C)	T=K(1-e(-αt))		T=K(1-e(-αt ^β))		
				K (°C)	α	K (°C)	α	β
CC30.0	20.8	62.3	41.5	41.2	0.84	41.2	0.80	1.54
CC36.2	20.9	59.9	39.0	38.5	0.85	38.5	0.79	1.59
CC44.4-10	11.5	47.0	35.5	35.6	0.46	35.5	0.29	1.54
CC44.4-20	20.4	58.1	37.7	36.6	0.72	36.7	0.70	1.06
CC44.4-30	29.5	64.6	35.1	35.0	0.94	35.0	0.99	0.63
CC60.0	20.1	49.2	29.1	28.5	0.63	28.5	0.58	1.16

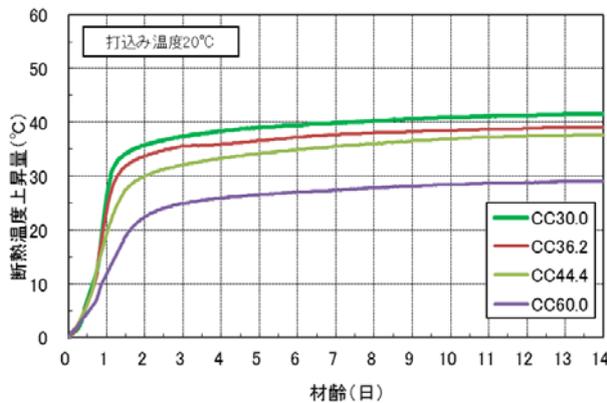


図-6 W/Bによる温度上昇量

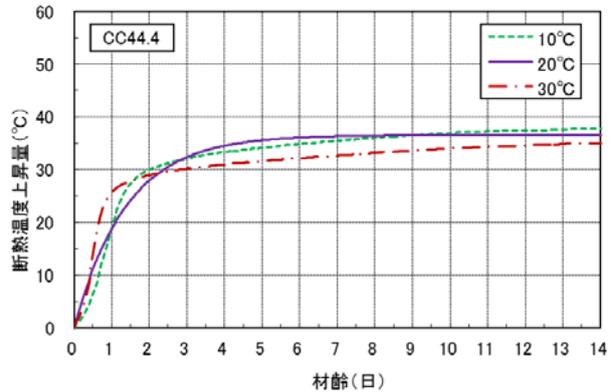


図-7 打込み温度による温度上昇量

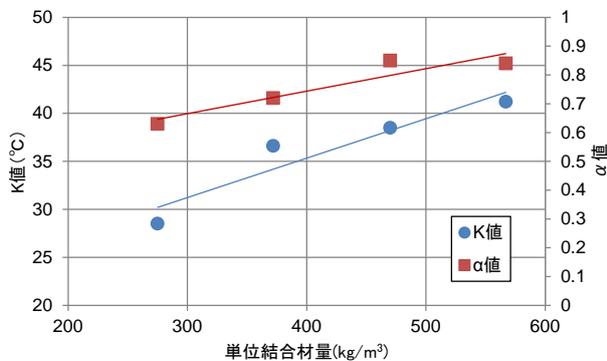


図-8 単位結合材量とK値・α値の関係(20°C)

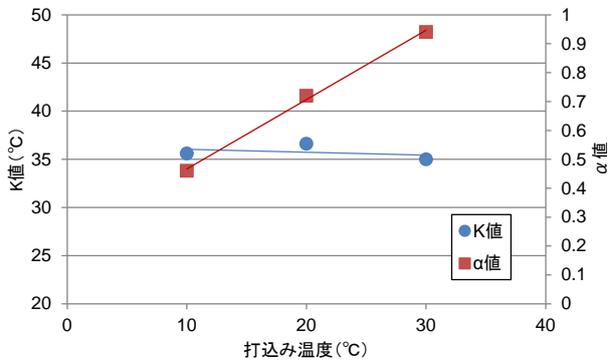


図-9 打込み温度とK値・α値の関係(CC44.4)

合材量とK値およびα値の間には相関が見られ、単位結合材量の増加に伴い、K値およびα値も増加する傾向にある。一方、打込み温度を変えた検討では、打込み温度が高くなるとα値も高くなる傾向が見られるが、K値と打込み温度の間には相関は見られず、打込み温度によらず、ほぼ同等と言う結果となった。

3.4 線膨張係数

BBおよびBBと同じ強度レベルのCC44.4-20の線膨張係数結果を表-7に示す。「JCI ひび割れ制御指針⁴⁾」ではOPCが $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、BBが $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と示されている。CCの線膨張係数はBBと同程度であると評価で

きると考える。なお、本実験では粗骨材に石灰石を使用したため、線膨張係数が指針で示されている数値より小さくなったと考えられる。

表-7 線膨張係数

ケース名称	線膨張係数($\times 10^{-6}$)	
	各値	平均値
BB	5.953	5.862
	5.770	
CC44.4-20	6.124	6.192
	6.259	

4. 温度応力解析

4.1 解析条件

断熱温度上昇試験結果を用いて市販の解析ソフト (ASTEAMACS) を用いた温度応力解析を実施した。対象としたケースは CC30.0, CC36.2, CC44.4, CC60.0 および BB である。解析モデルは、図-10 に示すように 1m の基礎スラブ上に打設される高さ 4m, 幅 2m の壁状構造物とし、打込み長さを 25m とした。対称性を考慮して 1/4 モデルとした。

解析条件を表-8 に示す。打込み温度および外気温は 20°C 一定と仮定した。圧縮強度発現性状は実験結果に基づき、図-11 に示すように設定した。コンクリートの線膨張係数は表-7 に示した実験結果を用いた。なお、自己収縮ひずみは考慮していない。また、地盤は普通地盤と仮定し、ヤング係数は 500N/mm² とした。

4.2 解析結果

温度解析結果を図-12 に示す。壁部材の最高温度は BB が一番高く、CC 調合では CC30.0 > CC36.2 > CC44.4 > CC60.0 の順に低くなっている。つまり水結合材比が小さいほど (単位結合材量が多いほど)、最高温度は高くなる傾向にある。BB と CC 調合のうち水結合材比が最も小さい CC30.0 を比較すると、最高温度で 4°C 程度 CC30.0 の方が低くなっており、CC 調合では CC30.0 と CC60.0 では 8.5°C 程度 CC60.0 が低くなっている。単位結合材量では、約 300kg/m³ 程度異なる。

温度応力解析結果を図-13 に、引張強度を図-14 に、ひび割れ指数を図-15 にそれぞれ示す。壁の長手方向の温度応力 σ_y (引張側) は、CC30.0 が最も大きくなっており、BB のひび割れ指数が最も小さくなった。CC 調合では、水結合材比が大きいほど温度応力 σ_y (引張側) は小さくなる傾向にあるが、ひび割れ指数はほぼ同等となった。よって、CC 調合では単位結合材量 (水結合材比) がひび割れ指数に与える影響は小さいと考えられる。このことより、マスコンクリートに適用する場合は、BB を使用したコンクリートより結合材中のセメントの混合割合を 25% とした CC 調合のコンクリートの方が温度ひび割れを低減させることが期待できると考える。同一強度である BB と CC44.4 を比較しても、CC44.4 の方がひび割れ指数が大きく、ひび割れを低減させる可能性が高いと考えられる。

5. まとめ

単位結合材量 (水結合材比) を 4 水準、打込み温度を 3 水準とした混和材を高含有した CC 調合および BB の熱特性に関する各種実験により、以下のことが分かった。

- (1) 凝結時間は、打込み温度が高くなるほど早くなり、単位結合材量が少なくなるにしたがい、凝結の終結

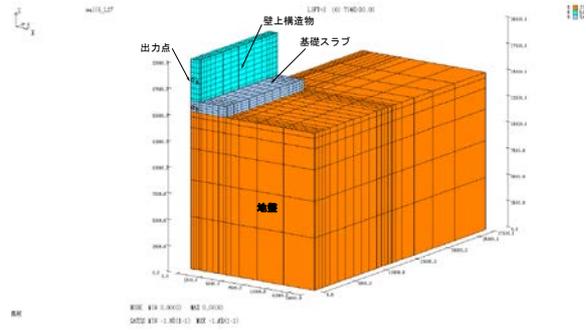


図-10 解析モデル

表-8 解析条件

項目	設定
断熱温度上昇	$Q(t) = K(1 - e^{-\alpha t})$ 実験結果：表-6 参照
圧縮強度	$f_c(t_e) = \exp\left\{s \left[1 - \left(\frac{28}{(t_e - s_f)/T_0}\right)^{1/2}\right]\right\} f_{c28}$ CC30.0 : S=0.23, S _f =0.85 CC36.2 : S=0.24, S _f =0.82 CC44.4 : S=0.29, S _f =0.75 CC60.0 : S=0.38, S _f =0.65 BB : S=0.54, S _f =0
ヤング係数	日本建築学会：マスコン指針 ⁵⁾ , P64, 2008 $E(t_e) = 3.35 \times 10^4 \times k_1 \times k_2 \times \left(\frac{Y}{2.4}\right)^2 \times \left(\frac{f_c(t_e)}{60}\right)^{1/3}$
引張強度	日本建築学会：マスコン指針 ⁵⁾ , P69, 2008 $f_t(t_e) = 0.18f_c(t_e)^{0.75}$
クリープ	日本建築学会：マスコン指針 ⁵⁾ , P65, 2008 $\phi(t_e, t_0) = \phi_0 \times \left[\frac{(t_e - t_0)/t_1}{\beta_H + (t_e - t_0)/t_1}\right]$
線膨張係数	実験結果：表-7 参照
その他	日本建築学会：マスコン指針 ⁵⁾ , P64, 2008 ポアソン比 0.2,

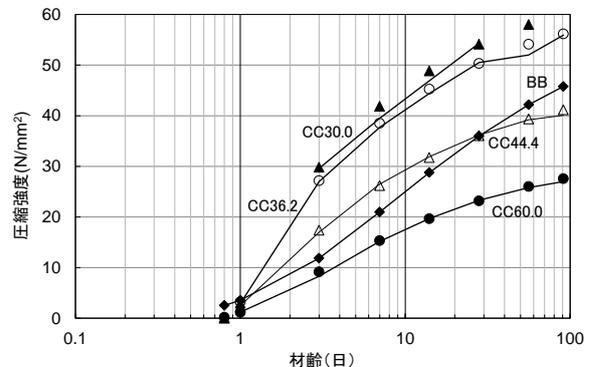


図-11 圧縮強度発現の設定

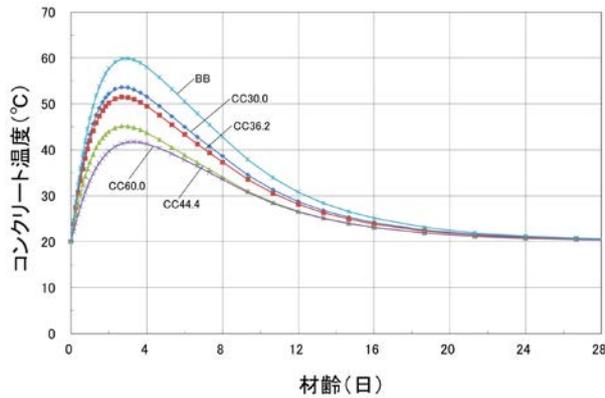


図-12 温度解析結果

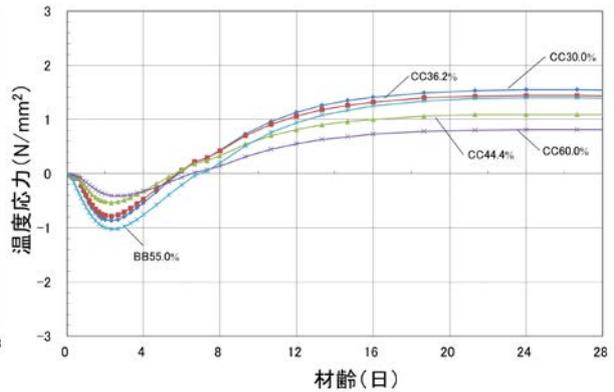


図-13 温度応力解析結果

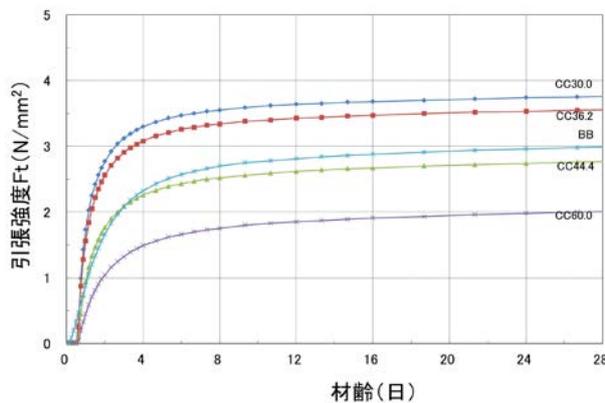


図-14 引張強度

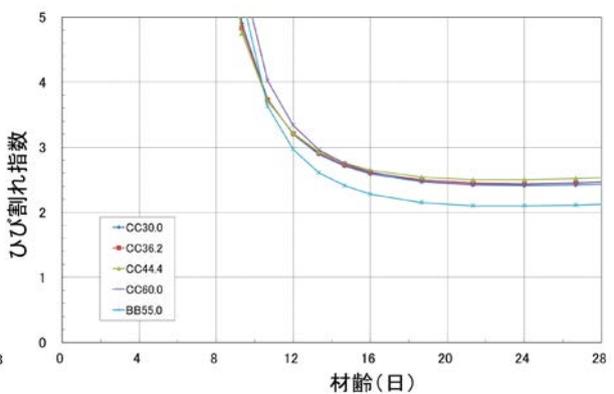


図-15 ひび割れ指数の算定結果

時間が遅くなる傾向が見られた。強度レベルが同等である BB と CC44.4 では、始発は BB の方が遅いが終結は BB の方が早い。

- (2) 圧縮強度発現は、単位結合材量の多いものほど（水結合材比の小さいものほど）大きくなること分かる。また、材齢 7 日までは打込み温度の高いものほど圧縮強度は大きい、材齢 14 日を境とし打込み温度の低いものほど圧縮強度が大きくなり、初期に高温だったものの強度発現は小さい。
- (3) 圧縮強度と静弾性係数の関係は、結合材にセメントを 100% 用いたコンクリートと同様の傾向にある。
- (4) 断熱温度上昇試験では、単位結合材量と K 値の間には相関関係があり、単位結合材量の増加に伴い K 値も大きくなる。また、打込み温度の違いによる影響は小さく、温度上昇量はほぼ同等である。一方、 α 値は単位結合材量、打込み温度の増加に伴い、大きくなる傾向が見られた。
- (5) 線膨張係数は、同じ強度レベルの BB と CC 調査では、ほぼ同程度である。
- (6) 温度応力解析の結果、マスコンクリートに適用する場合、CC 調査は温度ひび割れの低減が期待できる。また、CC 調査では単位結合材量（水結合材比）に

関わらず、ひび割れ指数は一定となった。しかし、水結合材比が小さい場合、自己収縮の影響も大きくなる。このため、ひび割れの検討においては、水結合材比が小さい場合には、自己収縮の影響も考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 溝渕麻子ほか：混和材を高含有したコンクリートの基礎的性状（その 1 からその 12）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.185-190、pp.865-874、pp.214-220、pp.325-328、2011-2014
- 2) 溝渕麻子ほか：低炭素型のコンクリートの強度発現性に及ぼす養生条件の影響、セメント・コンクリート論文集、No.66、pp.332-337、2013.3
- 3) 社団法人 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2009、p.186、2009.2
- 4) 社団法人 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 2008、p.49、2008.11
- 5) 社団法人 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（案）・同解説、P64,65,69、2008.