

論文 高炉セメントとフライアッシュを混合使用した低炭素コンクリートに関する基礎的研究

黒田 泰弘^{*1}・依田 侑也^{*1}・片山 行雄^{*1}

要旨:高炉セメント B 種にフライアッシュを 20%混合使用した低炭素コンクリートの性能について検討した。その結果, ①同じ水結合材比の中庸熟ポルトランドセメントを用いた調合に対し, 単位水量を 15kg/m^3 程度削減できること, ②材齢 28 日の圧縮強度を 33N/mm^2 程度以上とすれば, 促進中性化試験 26 週の中性化深さを 25mm 以下とできること, ③呼び強度が同じ中庸熟ポルトランドセメントを用いた調合に対し, CO_2 排出量を 51.6~55.3%に削減できること, ④呼び強度 36 の同一条件での解析結果では, 中庸熟ポルトランドセメントを用いた調合と温度ひび割れへの抵抗性は概ね同等であること, などを明らかとした。

キーワード: 高炉セメント, フライアッシュ, 中庸熟ポルトランドセメント, CO_2 排出量, 温度ひび割れ

1. はじめに

コンクリートの CO_2 排出量に占めるセメント由来の CO_2 排出量は凡そ 95%に相当することから, 低炭素コンクリートを得るには, セメントの低炭素化が課題と考えられる。セメントの低炭素化の手法として一般的なのは, 産業副産物である高炉スラグ微粉末 (BFS) やフライアッシュ (FA) などを混和材として有効利用し, セメント使用量を削減する方法等であり, この手法でハーフカーボン以上を目指すなら潜在水硬性を有する BFS の利用が近道と考えられる。BFS を多量に使用したセメントやコンクリートの研究開発事例が報告されている^{1), 2)}。

ところで, 新規セメントでの対応は, 十分な需要が継続的になればコストアップになることが想像される。このため, 既存の材料を組み合わせ, 生コン工場で混合する方が現実的ではないかと考えられる。現状の生コン工場の設備を考えた場合, 使える結合材の組合せは少ない方がよく, 我が国で比較的入手しやすい結合材を 2 種類まで使用するとした場合, 次のような組合せとなる。

- ①普通ポルトランドセメント+BFS
- ②普通ポルトランドセメント+FA
- ③高炉セメント B 種+BFS
- ④高炉セメント B 種+FA

本研究では, ④の方法で低炭素化を図った 3 成分系の結合材を用いたコンクリートの基礎的性質について検討することにした。狙いは, 低炭素化と基本性能の確保 (呼び強度, 乾燥収縮量 800μ 以下, 促進中性化深さ 25mm 以下, 温度ひび割れ抵抗性) である。

なお, 混和材を多く含む 3 成分系の結合材の使用が適した用途として考えられるのは, マスコンクリートである。このため, 実験では, 普通ポルトランドセメント (N)

を用いた調合ではなく, 中庸熟ポルトランドセメント (M) を用いた調合と比較検討することにした。また, 高炉セメント B 種 (BB) に含まれる混合成分の種類や量については開示されていないため, 成分が既知である N と BFS と FA を混合したものを結合材として用いたコンクリートについても検討を行った。さらに, BB と FA を混合して用いた調合と M を用いた調合について, マスコンクリートを対象とした簡単なひび割れ解析を行って, 温度ひび割れの抵抗性を把握することにした。

2. 実験の概要

2.1 使用材料および調合

使用材料の一覧を表-1 に示す。成分が既知である N として研究用セメント (セメント協会) を, BFS は二水石膏が既添加されているものを用いた。

コンクリートの調合条件を表-2 に示す。結合材は, M100%(M), BB80%+FA20% (BBF), N30%+BFS50%+FA20% (NBF) の 3 種類とし, 水結合材比を 55%, 38%, 30%の 3 水準とした。なお, 施工性に配慮して, 水結合材比 55%の時の目標スランプを 18 cm, 単位粗骨材かさ容積を $0.60\text{m}^3/\text{m}^3$ とし, 水結合材比 38%の時の目標スランプを 21cm, 単位粗骨材かさ容積を $0.58\text{m}^3/\text{m}^3$ とし, 水結合材比 30%の時の目標スランプを 23cm, 単位粗骨材かさ容積を $0.56\text{m}^3/\text{m}^3$ とした。

事前の試験練りの結果をもとに, M を用いた調合の単位水量を 165kg/m^3 , BBF および NBF を用いた調合の単位水量を 150kg/m^3 とし, 高性能 AE 減水剤の添加率により, 目標スランプとなるように調整した。また, 目標空気量は, 結合材の種類, 水結合材比にかかわらず, 4.5% とし, AE 剤の添加率により調整した。

^{*1} 清水建設(株) 技術研究所 (正会員)

表－1 使用材料の一覧

略号	品名	品質
N	研究用セメント (セメント協会)	密度 3.16 g/cm ³ , 比表面積 3330cm ² /g 始 2h-18m, 終 3h-28m
M	中庸熟ポルトランドセメント	密度 3.21 g/cm ³ , 比表面積 3320cm ² /g 始 2h-33m, 終 3h-55m
BB	高炉セメント B 種	密度 3.04 g/cm ³ , 比表面積 3950cm ² /g 始 2h-45m, 終 4h-30m 強熱減量 1.39, SO ₃ 量 2.14%
BFS	高炉スラグ微粉末 (石膏入り)	密度 2.90g/cm ³ 比表面積 3950cm ² /g 強熱減量 0.82%, SO ₃ 量 1.98%
FA	フライアッシュ II 種	密度 2.40g/cm ³ 比表面積 3910cm ² /g 強熱減量 1.4%, MB 量 0.48mg/g
S	山砂	表乾密度 2.63 g/cm ³ , 吸水率 1.68% 微粒分量 1.4%, FM2.60
G	碎石 (2005)	表乾密度 2.65g/cm ³ , 吸水率 0.63% FM6.56, 実積率 62.0%
W	練混ぜ水	上水道水
SP	高性能 AE 減水剤	標準系 I 種
AE	AE 剤	

表－2 調合条件

結合材	単位水量	水結合材比	スランプ	空気量
M	165 kg/m ³	55%	18±2.5cm	4.5±1.5 %
BBF	150 kg/m ³	38%	21±2.0cm	
NBF		30%	23±2.0cm	

表－3 試験項目および方法

No.	項目	方法
1	スランプ	JIS A 1101
2	空気量	JIS A 1128
3	コンクリート温度	JIS A 1156
4	圧縮強度	JIS A 1108 (標準養生後, 材齢 3, 7, 28, 56, 91 日に強度試験)
5	静弾性係数	JIS A 1149
6	長さ変化	材齢 1 週まで標準養生後, 乾燥 長さ変化率の測定は JIS A 1129-2
7	促進中性化	JIS A 1153

2.2 試験方法

練混ぜにはパン型の強制練りミキサを使用した。水結合材比 38%と 50%の調合では、空練りを 10 秒行い、注水後、60 秒練り混ぜた後、かき落としを行い、さらに 60 秒練り混ぜた。一方、水結合材比 30%の調合では、空練りを 10 秒行い、注水後、60 秒練り混ぜた後、かき落としを行い、さらに 90 秒練り混ぜた。なお、コンクリート

表－4 調合

調合	スランプ (cm)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	N	M	BB	BFS	FA
M50	18	50	45.9	165	0	330	0	0	0
M38	21	38	45.1	165	0	434	0	0	0
M30	23	30	43.9	165	0	550	0	0	0
BBF50	18	50	46.7	150	0	0	240	0	60
BBF38	21	38	45.9	150	0	0	316	0	79
BBF30	23	30	44.6	150	0	0	400	0	100
NBF50	18	50	47.0	150	90	0	0	150	60
NBF38	21	38	46.2	150	118	0	0	198	79
NBF30	23	30	45.1	150	150	0	0	250	100

表－5 化学混和剤の添加率とフレッシュ性状

調合	SP (%)	AE (%)	フレッシュ試験結果			
			スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質 量 (kg/L)	温度 (°C)
M50	0.6	0.0020	19.5	4.5	2320	19
M38	0.8	0.0025	21.0	5.2	2325	19
M30	1.0	0.0030	22.0	5.3	2347	20
BBF50	0.7	0.0095	19.5	4.8	2304	19
BBF38	0.9	0.0090	22.5	5.2	2301	19
BBF30	0.9	0.0100	25.5	5.0	2318	20
NBF50	0.7	0.0070	20.0	5.1	2295	19
NBF38	0.9	0.0080	22.0	4.3	2321	20
NBF30	1.1	0.0090	22.0	4.4	2338	20

は練上がりより 5 分後にミキサより排出し、各種試験を実施した。試験項目および試験方法を表－3 に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 実験結果

(1) 調合およびフレッシュ性状

調合を表－4 に、化学混和剤の単位結合材量に対する添加率とフレッシュ性状を表－5 に示す。

BBF30 でスランプが目標をわずかに上回ったものの、その他の調合では目標のスランプと空気量を確保できた。同一水結合材比の M 調合に対し、3 成分系セメントでは単位水量を 15kg/m³ 程度削減できたことになる。

なお、FA を利用した場合、空気量を確保しにくい傾向にあり、AE 剤は結合材として M を用いた調合の 3～5 倍程度の添加率が必要となった。

(2) 圧縮強度特性

圧縮強度試験結果を図－1 に示す。同一の水結合材比で比較すると、M を用いた調合に比べ、BBF や NBF を

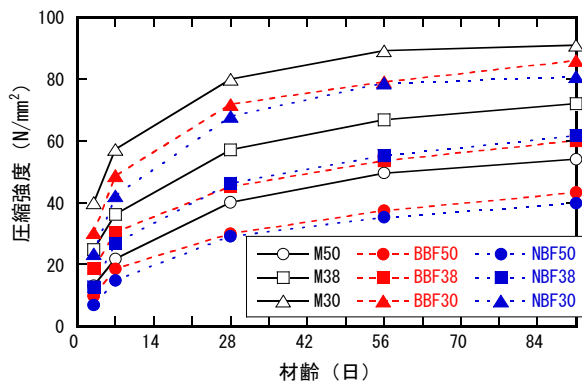


図-1 圧縮強度試験結果

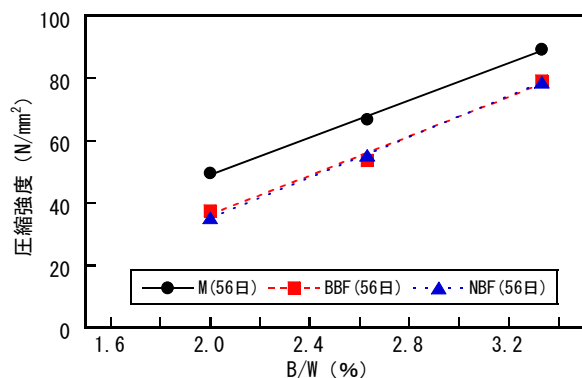


図-2 結合材水比と圧縮強度との関係の例

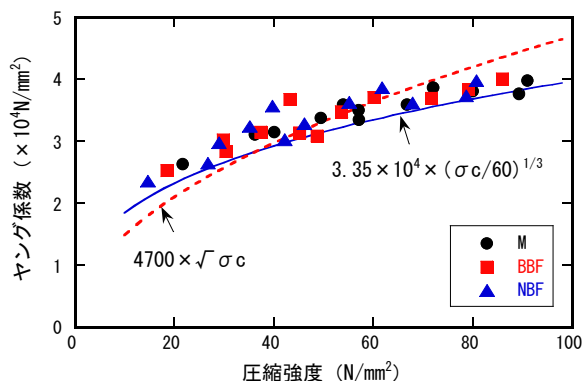


図-3 圧縮強度とヤング係数との関係

用いた調合の強度は低く、長期的にも差を生じた。また、BBF と NBF を用いた調合を比較した場合、材齢 7 日までは、前者と比べて後者の強度が低かったものの、材齢 28 日以降の強度発現にはほとんど差はなかった。

図-2 に結合材水比と圧縮強度との関係の例として材齢 56 日の結果を示す。結合材水比と圧縮強度との関係は、結合材の種類にかかわらず、直線的であった。また、この図からも、BBF を用いた調合の強度が、セメント含有量が 30% しかない NBF を用いた調合と大差ない結果となっていることがわかる。

図-3 に圧縮強度とヤング係数との関係を示す。圧縮強度とヤング係数との関係には、結合材の違いによる差は特に認められなかった。

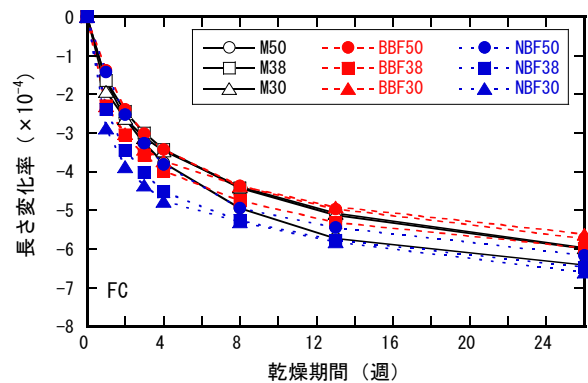


図-4 長さ変化率の推移

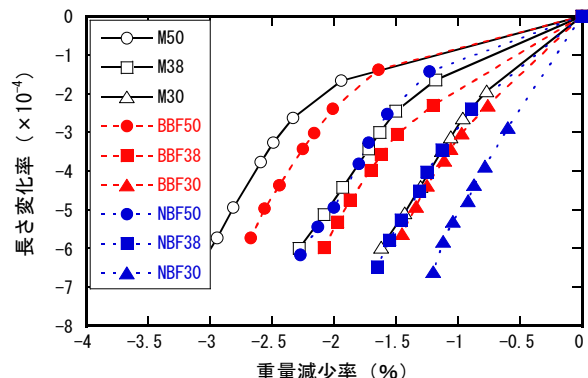


図-5 重量減少率と長さ変化率との関係

(3) 長さ変化

長さ変化率の試験結果を図-4 に、重量変化率と長さ変化率との関係を図-5 に示す。

結合材の種類で比較した場合、長さ変化率は初期には NBF > BBF > M の順であったが、乾燥 26 週では大差ない結果となり、いずれも 8.0×10^{-4} を大きく下回った。重量減少率は M > BBF > NBF の順であり、図-5 で明らかにように BFS の混入量が多い NBF を用いた調合では、重量減少量が小さい割に長さ変化率が大きい結果となった。

(4) 促進中性化

促進中性化試験結果を図-6 に、材齢 28 日の圧縮強度の逆数と中性化速度係数との関係を図-7 に示す。

M50 の促進中性化深さは 6 ヶ月時点でも 8.8mm と小さかったが、BBF50 と NBF50 では 25 mm を上回った。また、材齢 28 日の圧縮強度の逆数と中性化速度係数との関係は直線的であり、BBF を用いた調合と NBF を用いた調合においては、ほぼ一致した。

なお、日本建築学会の「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針 (案)・同解説」では促進中性化 26 週で中性化深さが 25mm 以下となっており、その際の中性化速度係数は 4.9 mm/週 となるため、図-7 より、BBF と NBF の調合では、材齢 28 日の圧縮強度が 33 N/mm^2 程度以上あれば、高耐久コンクリートに必要な中性化抵抗性を確保できることがわかる。

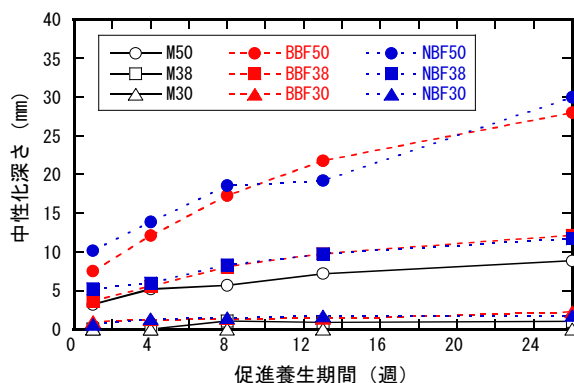


図-6 促進中性化試験結果

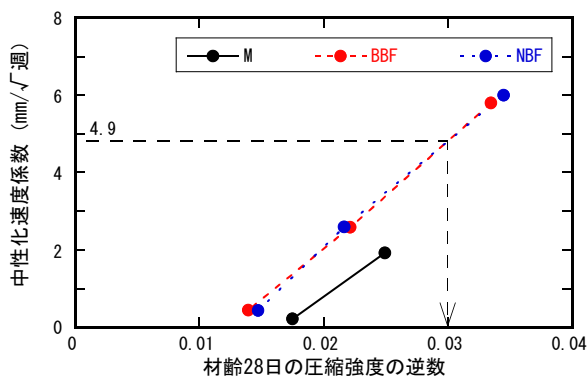


図-7 材齢 28 日の圧縮強度の逆数と
中性化速度係数との関係

3.2 考察

(1) 呼び強度別の水結合材比の設定

標準偏差を呼び強度の 0.1 倍とし、調合強度を(1)式および(2)式を満足するように定めることとし、材齢 56 日の強度式より呼び強度に対する水結合材比を結合材の種類毎に求めた。呼び強度、調合強度と結合材水比との関係を表-6 に示す。

$$F = SL + 2\sigma \quad \dots\dots\dots(1)式$$

$$F = 0.85 \times SL + 3\sigma \quad \dots\dots\dots(2)式$$

F : 調合強度 (N/mm²)

SL : 呼び強度 (N/mm²)

σ : 標準偏差 (N/mm²)

なお、M を用いた呼び強度 40 以下の調合では、外挿によって水セメント比を求めている。

(2) CO₂ 排出量の評価

低炭素化を図ることが目的の一つであるコンクリートにおいて、CO₂ 排出量を試算し、議論することは重要である。表-7 の原単位を用いて調合別に使用材料に起因する CO₂ 排出量を試算した結果を図-8 に示す。なお、M を用いた呼び強度 40 以下の調合では、試験練りを別途行い、AE 減水剤コンクリートとして調合を設定した。

表-6 呼び強度、調合強度と水結合材比との関係

呼び強度 SL	調合強度 F	水結合材比 (%)		
		M	BBF	NBF
30	36.0	63.8	50.0	49.1
33	39.6	59.3	47.2	46.6
36	43.2	55.3	44.8	44.3
40	48.0	50.8	41.9	41.6
42	50.4	48.8	40.6	40.4
45	54.0	46.1	38.8	38.6
50	60.0	42.2	36.1	36.1
55	66.0	38.9	33.8	33.8
60	72.0	36.1	31.7	31.8

表-7 CO₂ 排出量の原単位³⁾

材料	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /t)	備考
N	798.1	セメント協会 (2009), セメントの LCI データの概要
BB	480.7	
BFS	40.4	土木学会 (2005), ライブラリー125
FA	29.0	文献 3) における提案
SP	200.0	ホリカルト®酸系 (100~350) より設定
AE 減水剤	100.0	リガニン系 (100~150) マグネシウム系 (50~150) より設定
W	0.2	東京都環境局 (2010)
S	5.7	土木学会 LCA 小委員会の推奨値
G	2.9	土木学会 (2004), 技術シリーズ No. 62

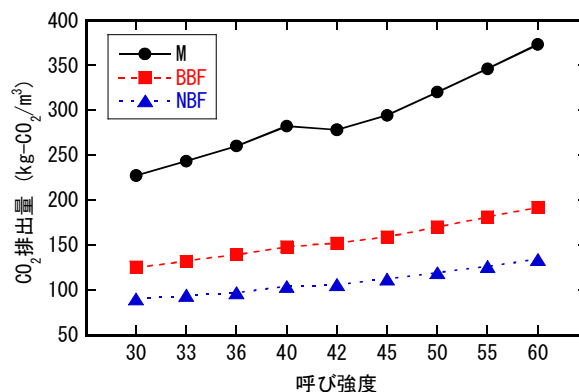


図-8 調合別の CO₂ 排出量

結合材の種類に関わらず、呼び強度が高くなるほど、CO₂ 排出量は増加している。結合材の種類で比較した場合、CO₂ 排出量は M>BBF>NBF の順であり、BBF を用いた調合で M を用いた調合の 51.6~55.3%, NBF を用いた調合で M を用いた調合の 35.8~39.5%と CO₂ 排出量は小さくなった。なお、CO₂ 排出量の削減量は高強度となるほど高くなる傾向にあった。

4. マスコンクリートのひび割れ解析

4.1 解析条件

図-9に示す部材厚1.5mのマットスラブのマスコンクリートを対象に、呼び強度36のBBF調合(36-18-20BBF)とM調合(36-18-20M)について、簡単な2次元のFEM解析を、実施することにした。

36-18-20M および 36-18-20BBF の調合とスランプおよび空気量の試験結果を表-8に示す。なお、36-18-20MはAE減水剤コンクリート、36-18-20BBFは高性能AE減水剤コンクリートであり、セメントと化学混和剤は表-1と製造ロットの異なるものを用いた。

断熱温度上昇量試験結果を図-10に、自己収縮試験結果を図-11に、圧縮強度試験結果を図-12に示す。終局断熱温度上昇量は36-18-20Mで幾分大きく、自己収縮量は36-18-20BBFで幾分大きいものの、大きな差はなか

った。なお、強度発現は、全体的に36-18-20Mで幾分小さかった。

マットスラブは厚さ0.5mで3層に分け、7日毎に打ち込む計画とした。解析上のコンクリートの条件を表-9に、温度予測に関する条件を表-10に示す。

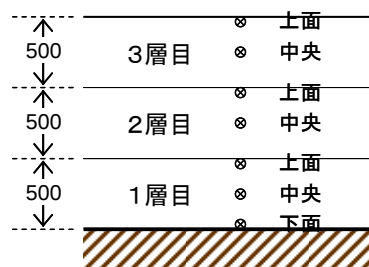


図-9 解析モデル

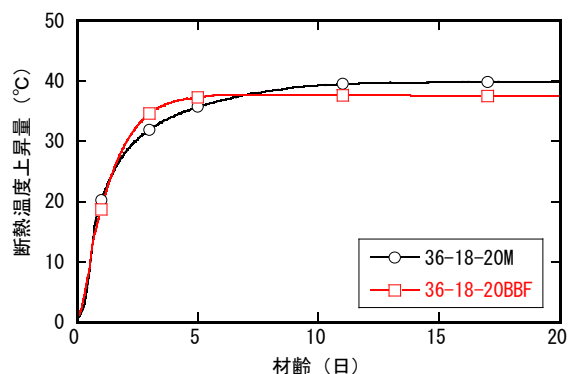


図-10 断熱温度上昇量試験結果

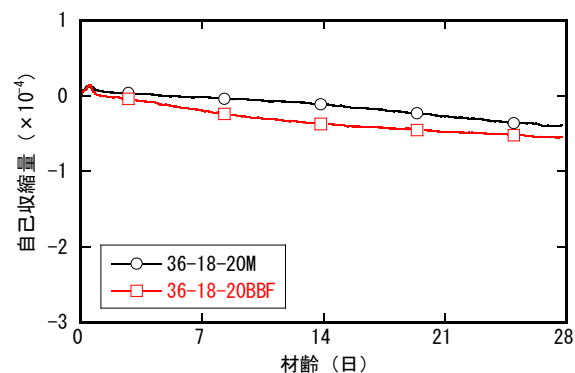


図-11 自己収縮試験結果

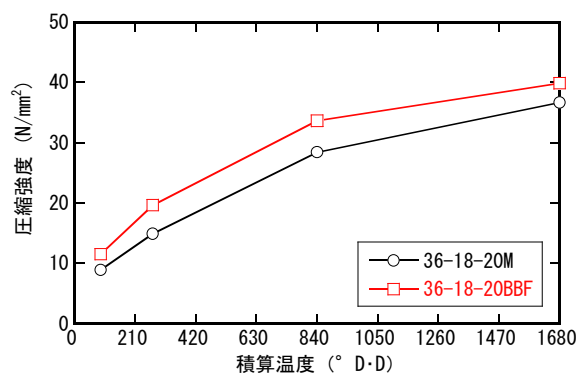


図-12 圧縮強度試験結果

表-8 調合およびフレッシュ性状

調合	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)				スラ ンプ (cm)	空気 量 (%)
			W	M	BB	FA		
36-18-20M*	55.3	46.3	175	316	0	0	20.5	4.7
36-18-20BBF	44.3	46.1	150	0	268	67	19.0	3.8

*高性能AE減水剤ではなく、AE減水剤を用いた

表-9 コンクリートの条件

	36-18-20M	36-18-20BBF
発熱曲線	39.1(1-Exp(-0.599t)) (図-10より近似)	37.9(1-Exp(-0.729t)) (図-10より近似)
自己収縮	図-11	
圧縮強度	図-12(840°D・Dまでを入力)	
ヤング係数	$E = 4700\sqrt{\sigma_c}$	
引張強度	$\sigma_t = 0.35\sigma_c^{1/2}$	
熱膨張係数	$10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	
ポアソン比	0.167	

表-10 温度予測に関する設定

	項目	設定値
温度	打込時の温度	30°C
	雰囲気温度	25°C一定
	地盤の固定温度	16.6°C
熱定数 データ	コンクリートの熱伝導率	2.7W/m°C
	コンクリートの比熱	1.15kJ/kg°C
	地盤の熱伝導率	1.94W/m°C
	地盤の比熱	0.79kJ/kg°C
	マット養生時の表面熱伝達率	5.0W/m°C(7日間)
	湿潤養生終了後の表面熱伝達率	14.0W/m°C(7日以降)

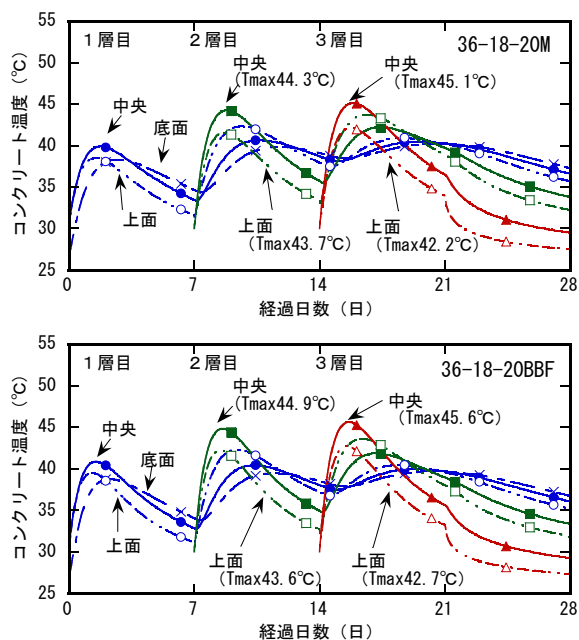


図-13 温度解析結果

表-11 ひび割れ指数の計算結果

		36-18-20M		36-18-20BBF	
		最小値	経過日	最小値	経過日
3層目	上面	1.55	17.1	1.44	16.9
	中央	20.0	14.0	20.0	14.0
2層目	上面	1.37	14.5	1.38	9.1
	中央	1.68	14.6	1.45	14.5
1層目	上面	5.40	0.8	4.35	0.8
	中央	1.40	7.5	1.30	7.5
	底面	2.16	8.7	2.07	8.7

4.2 解析結果

温度解析結果を図-13に、温度ひび割れ指数の計算結果を表-11に示す。

最高温度は3層目の中央において、36-18-20BBFの方が36-18-20Mより幾分高くなったものの、差はわずかであった。また、ひび割れ指数の計算結果も36-18-20BBFの方が最小値は小さくなったが、大差ない結果であり、いずれも1.0を上回った。したがって、36-18-20BBFと36-18-20Mの温度ひび割れへの抵抗性は概ね同等と考えられる。

5. まとめ

高炉セメントB種にフライアッシュを20%混合使用した低炭素コンクリートの品質やCO₂排出量、温度ひび割れへの抵抗性について検討した。主な結果を整理すると、以下の通りである。

- (1) 同じ水結合材比において、中庸熟ポルトランドセメントを用いた調査に対し、高炉セメントB種にフライアッシュを20%混合使用した低炭素コンクリートでは、単位水量を15kg/m³程度削減することができた。
- (2) 同じ水結合材比において、高炉セメントB種にフライアッシュを20%混合使用した低炭素コンクリートの圧縮強度は、中庸熟ポルトランドセメントを用いた調査に対して低く、長期的にも差を生じた。
- (3) 同じ水結合材比において、高炉セメントB種にフライアッシュを20%混合使用した低炭素コンクリートの初期強度は、セメント含有量を30%とした3成分系の結合材を用いた調査より大きかったものの、材齢28日以降は同等となった。
- (4) 高炉セメントB種にフライアッシュを20%混合使用した低炭素コンクリートでも、材齢28日の圧縮強度を33N/mm²程度以上とすれば、促進中性化26週の中性化深さを25mm以下とできることがわかった。
- (5) 呼び強度が同じ場合、中庸熟ポルトランドセメントを用いた調査に対し、高炉セメントB種にフライアッシュを20%混合使用した低炭素コンクリートのCO₂排出量は51.6~55.3%、セメント含有量が30%の3成分系の結合材を用いた調査のCO₂排出量は35.8~39.5%となった。
- (6) 呼び強度36の中庸熟ポルトランドセメントを用いた調査と高炉セメントB種にフライアッシュを20%混合使用した低炭素コンクリートに関し、マスコンクリートのひび割れ解析を実施した結果、温度ひび割れへの抵抗性は概ね同等であることがわかった。

謝辞

本研究の実験の実施にあたり、ご協力頂いた株式会社フローリックの檜垣氏、守屋氏、熊本氏に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 和地正浩ほか：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの物性に及ぼすSO₃量の影響，コンクリート工学年次論文集，vol.33,No.1，pp203-208，2011
- 2) 溝渕麻子ほか：環境配慮型コンクリートの基礎的性質に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，vol.33,No.1，pp215-220，2011
- 3) コンクリートセクターに関わるインベントリ，コンクリートセクターにおける地球温暖化物質・廃棄物の最小化に関する研究委員会報告書，コンクリート工学協会，pp.102-207，2010.7