論文　高炉スラグ高含有セメントを用いた土木用コンクリートの基礎物性に関する実験的検討

室野井　敏之[*1]・坂井　吾郎[*2]・井上　和政[*3]・齊藤　和秀[*4]

要旨：高炉スラグ微粉末の含有率を 60~65%とした高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの土木構造物への適用を図ることを目的として，その基礎物性を取得した。高炉スラグ微粉末の含有率を高めることで課題となる中性化抵抗性について，AE 減水剤を試製して単位水量を減じ，水セメント比を低減させることで市販の高炉セメント B 種を用いたコンクリートと同等となるように配合の選定を行い，各種の試験を実施した。その結果，強度発現性および自己収縮等が高炉セメント B 種を用いたコンクリートと同等であるとともに，断熱温度上昇量が低減することを確認した。

キーワード：高炉スラグ，高炉スラグ高含有セメント，中性化，断熱温度上昇量，圧縮強度，自己収縮

1. はじめに

地球温暖化の問題に対応するため，国ごとに目標を定めて CO_2 の削減を図る国際的な動きが加速しつつある。我が国においても様々な取組みがなされているが，建設分野に関連するものでは，セメント製造時のエネルギーと材料由来の CO_2 が国内 CO_2 排出量の約 4%とされており，これらを削減することが喫緊の課題と考えられる。

セメント由来の CO_2 を削減する手段の一つとして高炉スラグ微粉末の利用が挙げられる。高炉スラグ微粉末は製造プロセスで原料からの CO_2 排出がないため，ポルトランドセメントに混合した高炉スラグ微粉末のほぼ全量が CO_2 削減に寄与することになる。

現在の建設工事では，高炉スラグ微粉末の含有率 40%程度の市販の高炉セメント B 種（以下，BB と表記）が広く使用されているが，CO_2 の削減の観点から BB よりもさらに高炉スラグ微粉末の含有率を高めたセメントの使用が望まれる。しかし，高炉スラグ微粉末を多量に含有するセメントとして知られる高炉セメント C 種，高硫酸塩スラグセメント等 [1] は，ブリーディングが多い，初期強度が低い，収縮（自己収縮・乾燥収縮）が大きい，中性化が速く耐久性の確保が難しいなどの課題を有しており，現状ではほとんど使用されていない。

このような高炉スラグ高含有セメント特有の課題に対して，最近ではセメント中の SO_3 量を通常のセメントよりも高めることや水セメント比を調整することにより改善する研究がなされている [2),3),4)]。

著者らは，それら既往の研究を踏まえ，高炉スラグ高含有セメント（以下，ECM と表記）[5] の更なる展開を図ることを目的に，土木構造物への適用を行うための検討を進めている。本論文では，土木構造物への適用にあたり，最も重要な課題の一つであると考えられる中性化の抑制を考慮したコンクリート配合の選定と，各種の室内実験によって得られたコンクリートの基礎物性について述べる。

2. 土木構造物への適用に向けての要求性能と対策

ここでは，道路トンネル用のボックスカルバートや橋梁下部工（橋脚）等の比較的マッシブな部材を有する一般的な RC 土木構造物を対象とした。また，これに適用するコンクリート配合として，セメントに BB を使用し，スランプ 8cm，水セメント比 55%，単位セメント量 300kg/m^3 のものを適用対象とし，ECM を用いたコンクリートが，これと同等以上の諸性能を有することを目標とした。ECM 配合の具体的な目標は，以下のとおりである。

(1)スランプ：8cm
(2)呼び強度：24（材齢 28 日）
(3)中性化抵抗性：中性化速度係数が BB 配合と同等以下
(4)断熱温度上昇量：BB 配合と同等以下
(5)強度発現性：BB 配合と同等程度
(6)自己収縮：BB 配合と同等程度

また，CO_2 削減の趣旨と上記(4) 断熱温度上昇量（マス部材への適用）を鑑み，単位セメント量は増加させず，BB 配合と同一（300 kg/m^3）とすることを前提とした。

上記の目標を満たすための方策としては，(5) 強度発現性および(6) 自己収縮については，高炉スラグ微粉末を 60～65%含有し普通ポルトランドセメントと無水石膏の混合によりセメント中の SO_3 量を 3.59%まで高めた高炉スラグ高含有セメントである ECM[5] を使用することで満足できるものと考えた。

*1 鹿島建設（株）　技術研究所　土木材料グループ　研究員　修士（工学）（正会員）
*2 鹿島建設（株）　技術研究所　土木材料グループ　グループ長　博士（工学）（正会員）
*3（株）竹中工務店技術研究所　先端技術研究部建設材料部門グループリーダー　博士（工学）（正会員）
*4 竹本油脂（株）　第三事業部　研究開発部　コンクリートグループ　グループリーダー　（正会員）

(3)の中性化抵抗性を確保する手段としては，水セメント比の低減が考えられる。しかし，単位セメント量を増加させない前提では，水セメント比の低減によって単位水量が少なくなり，スランプの確保ができなくなる。そこで，ECM 用に試製した AE 減水剤を用いて単位水量を低減することで(3)と(1)の両者を満たせる方法により配合を選定した。なお，この AE 減水剤は通常使用するポリマーと比較して，高炉スラグ微粉末を含む粉体の分散性を高める成分と，スランプの保持性を高める成分を多く含んだポリマーを使用した，変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸系化合物の複合体からなるものである.

3. 実験概要

２章で述べた対策に従って， ECM および BB それぞれを用いたコンクリートについて，水セメント比と中性化速度係数の関係を把握するための実験を行った。次に，その実験結果から BB 配合（W/C＝55%）と同等の中性化速度係数が得られる ECM 配合の水セメント比を見い出し，その水セメント比とスランプ 8cm，単位セメント量 300 kg/m^3 の条件を満たす配合を選定し，その ECM 配合の物性を BB 配合と比較した。

3.1 使用材料

本検討で使用するセメントの物性値と化学成分を**表－１**に示す。また，使用材料の一覧を**表－２**に示す。ここで，本検討で使用する化学混和剤 AD-N とは，市販品である AD-1 および AD-2 と比較してスランプ保持性を高め，高炉スラグ微粉末を分散させる機能を有する ECM 用の混和剤である。

3.2 水セメント比と中性化速度係数に関する実験

BB 配合（W/C＝55%）と同等の中性化速度係数となる ECM 配合の水セメント比を決定するため，促進中性化試験を実施した。試験は JIS A 1153 のコンクリートの促進中性化試験方法に準拠して行い，コンクリートの配合は単位セメント量を一定として単位水量により水セメント比を変えた。また，スランプの目標は設けず，供試体が成形可能な範囲内で試験練りを行った。促進中性化試験に供したコンクリートの配合を**表－３**に示す。

3.3 基礎物性の取得

水セメント比と中性化速度係数の関係に基づいて決定した ECM 配合の基礎物性の確認を行った。実施した基礎物性試験の試験項目および試験方法を**表－４**に示す。また，自己収縮試験および線膨張係数については下記に記す。

表－２　使用材料一覧

項目	記号	種　別
水	W	上水道水
セメント	BB	高炉セメント B 種　市販品 密度；3.04g/cm^3
	ECM	高炉スラグ高含有セメント　試作セメント スラグ含有率；60～65%　密度；2.98g/cm^3 SO_3 量；3.60%
細骨材	S1	東京都八王子産　砕砂 表乾密度；2.64g/cm^3，粗粒率；3.04 吸水率；0.98%
	S2	千葉県富津産市鶴岡産　山砂 表乾密度；2.61g/cm^3，粗粒率；1.44 吸水率；1.35%
粗骨材	G	東京都奥多摩産　砕石 表乾密度；2.65g/cm^3，実積率；61.1% 吸水率；0.60%
混和剤	AE	AE 剤 樹脂酸塩系陰イオン界面活性剤
	AD-1	AE 減水剤(標準形) 変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸系化合物の複合体
	AD-2	AE 減水剤(標準形) 有機酸系誘導体と芳香族高分子化合物
	AD-N	AE 減水剤(ECM 用多機能タイプ，標準形) 変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸系化合物の複合体

表－１　セメントの物性値と化学成分

セメント	密度 (g/cm^3)	比表面積 (cm^2/g)	セメントの化学成分(%)										
			SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO
ECM	2.98	4000	28.13	10.90	1.22	49.12	4.62	3.59	0.27	0.30	0.48	0.08	0.23
BB	3.04	3850	26.05	9.17	1.87	54.06	3.57	2.26	0.29	0.31	0.4	0.08	0.32

表－３　中性化試験配合

セメント種類	粗骨材最大寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	目標空気量 (%)	単位量（kg/m^3）					AE減水剤※1 C×%	AE剤※2 (A)
					W	C	S1	S2	G		
ECM	20	45	43.6	4.5	135	300	662	166	1075	2.0	1.5
ECM	20	55	43.6	4.5	165	300	635	159	1030	0.2	4.0
BB	20	45	43.6	4.5	135	300	664	166	1078	2.0	1.5
BB	20	50	43.6	4.5	150	300	650	163	1056	1.2	1.5
BB	20	55	43.6	4.5	165	300	637	159	1033	0.3	4.0

※1 BB配合ではAD-1，ECM配合ではAD-Nを使用した。　※2 1A＝C×0.001%

(1) 自己収縮試験

自己収縮試験の試験概要を**図－１**に示す。自己収縮試験は以下の手順に従って測定した。

① 供試体と型枠との摩擦や乾燥の影響をなくすため，100×100×400mm の鋼製型枠に予めテフロンシートを敷き，埋込みひずみ計と熱電対を設置する。

② 鋼製型枠にコンクリートを打ち込み，締固めを行う。

③ 同じコンクリート試料を用いて実施したプロクター貫入試験によりコンクリートの始発時間を確認し，始発からひずみの計測を開始する。

④ ひずみと温度変化量を 30 分間隔で測定し，これを材齢 28 日まで継続する。

(2) 線膨張試験

線膨張試験の試験概要を**図－２**に示す。試験は以下の手順に従って実施した。

① 容量 20ℓ のポリエチレン製容器に無応力容器および埋込みひずみ計を設置する。

② ポリエチレン製容器および無応力容器内にコンクリートを打ち込み，締固めを行う。

③ 20℃の環境下で 28 日間封かん養生を行う。

④ 28 日間の養生後，ポリエチレン製容器を温度追従養生槽に入れ，供試体に温度履歴を与える。温度履歴は，供試体の温度が 60℃となるまで上昇させ，その後 20℃になるまで下降させる。温度変化は温度追従養生槽内の温度を上昇・下降ともに 2℃/h に制御する。なお，本実験装置により，無応力容器内の温度が均一に追従することを事前に確認している。

⑤ 埋込みひずみ計からひずみと温度変化量を 30 分間隔で測定し，**式**（1）により線膨張係数を求める。

$$\gamma = \varepsilon/\Delta_t \qquad (1)$$

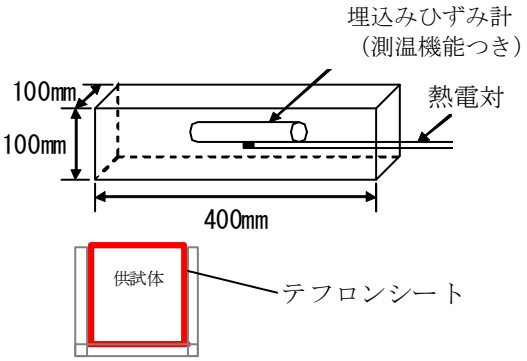
ここで，γ：コンクリートの線膨張係数($\times 10^{-6}$/℃)

ε：実ひずみ

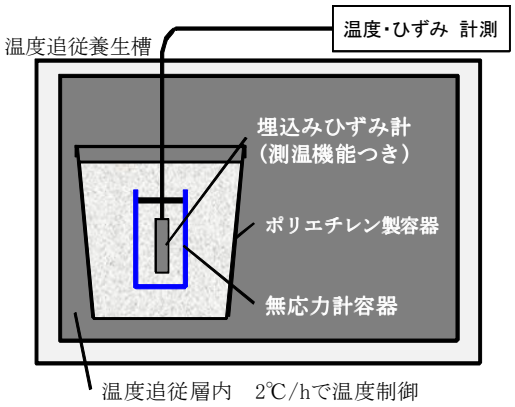
Δt：温度差(℃)

表－４　基礎物性試験項目

試験項目	試験方法
促進中性化試験	JIS A 1153
凝結時間試験	JIS A 1147
ブリーディング試験	JIS A 1123
圧縮強度試験	JIS A 1108 試験材齢 1，3，7，28，56，91 日
静弾性係数試験	JIS A 1149 試験材齢 1，3，7，28，56，91 日
自己収縮試験	3.3 (1)に記載
線膨張試験	3.3 (2)に記載
断熱温度上昇量試験	JCI-SQA3



図－１　自己収縮試験概要



図－２　線膨張試験概要

4. 実験結果

4.1 促進中性化試験

促進中性化試験の試験結果を**表－５**に示す。前述のと

表－５　促進中性化試験の試験結果

セメント種類	W/C (%)	試験結果			測定材齢（週）				
		スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m^3)	1	4	8	13	26
					中性化深さ（mm）				
ECM	45	4.0	4.6	2335	1.8	3.8	6.6	8.6	10.3
ECM	55	7.0	4.0	2304	5.3	8.3	12.2	15.5	24.3
BB	45	3.0	4.3	2359	0.6	2.4	3.5	3.9	3.5
BB	50	6.5	4.7	2316	1.8	3.7	6.6	8.6	10.1
BB	55	9.0	4.7	2293	3.4	7.3	10.6	14.0	18.4

おり，単位セメント量を一定として単位水量により水セメント比を変えたため，フレッシュコンクリートのスランプは水セメント比 45%において ECM で 4.0cm，BB で 3.0cm となったが，いずれも供試体の成形には支障のないものであった。

水セメント比と中性化速度係数の関係を**図－３**に示す。中性化速度係数(A)は，中性化深さ(C)が養生期間(t)の平方根に比例する√t 則を基に C＝A√t として導いた。

図に示すように，BB の中性化速度係数が 0.69（W/C=45%）～3.60（W/C=55%）の範囲にあったのに対して，ECM の中性化速度係数は 2.01（W/C=45%），4.76（W/C=55%）であり，同一の水セメント比では ECM の方が 1.0 (mm/√週)程度速くなる傾向であった。

また，今回の実験で得られた BB の中性化速度係数は，既往の研究[6]やセメントメーカの技術資料[7]に示される値と同程度であり，一般的な土木用コンクリートの中性化速度係数として妥当な値と考えられる，したがって BB の中性化速度係数を基準とし，これと同程度の値が得られるように水セメント比を定めることで ECM の中性化抵抗性を確保できるものと考えられる。同図から，BB の W/C=55%と同等の中性化速度係数が得られる ECM の水セメント比は W/C=51%程度であることから，以降に実施した物性試験にて用いた ECM 配合では水セメント比を 50%とした。

4.2 各種物性の試験結果

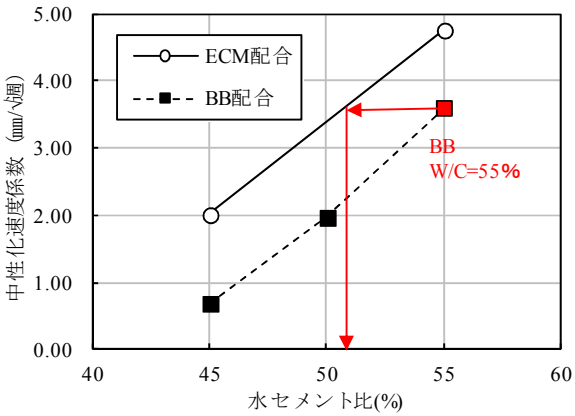
(1) フレッシュコンクリートの性状

基礎物性試験用の選定配合とフレッシュコンクリートの試験の結果を**表－６**に示す。前述のとおり，試製した AE 減水剤を用いることで，ECM 配合についても所定のスランプおよび空気量を得ることができた。

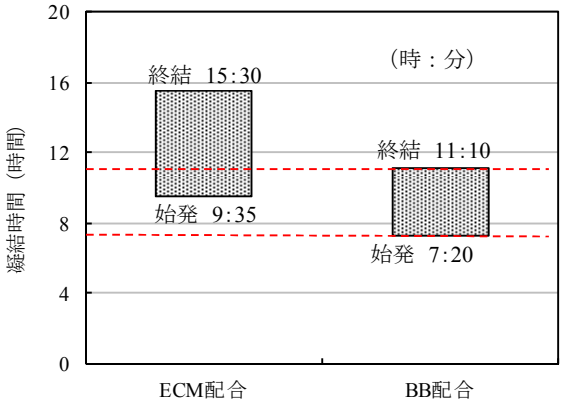
(2) 凝結時間

ECM 配合および BB 配合の凝結時間を**図－４**に示す。

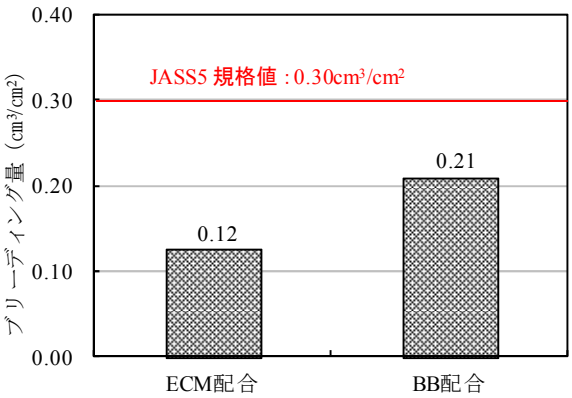
ECM 配合の始発時間は 9 時間 35 分，終結は 15 時間 30 分であり，BB 配合に比較して始発時間で 2 時間，終結時間で 4 時間程度遅延する結果であった。これは，ECM 配合はスラグ微粉末の含有率が高く，初期の水和反応が遅くなることに加え，単位水量低減のためにポリカルボン酸系化合物を含む AD-N を比較的多く使用したことに



図－３　水セメント比と中性化速度係数の関係



図－４　凝結時間



図－５　ブリーディング量

表-６　選定配合およびフレッシュコンクリートの試験結果

セメント種類	粗骨材最大寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	目標空気量 (%)	単位量（kg/m³）					AE減水剤※1 C×%	AE剤※2 (A)	試験結果			
					W	C	S1	S2	G			スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m³)	温度 (℃)
ECM	20	50	43.1	4.5	150	300	641	160	1062	1.0	3.0	8.0	4.0	2324	19.5
BB	20	55	44.1	4.5	165	300	642	161	1021	0.1	4.0	9.0	4.1	2307	19.8

※1 BB配合ではAD-2，ECM配合ではAD-Nを使用した。　※2 1A＝C×0.001%

よると考えられる。
この点については，凝結時間を BB 配合と同等程度として実用性を向上させるために，化学混和剤の改良や ECM の比表面積を大きくするなど，今後さらなる検討が必要であると考えられる。

(3) ブリーディング

ECM 配合および BB 配合のブリーディング量を**図－５**に示す。ECM 配合のブリーディング量は 0.12cm^3/cm^2 であり，BB 配合（0.21cm^3/cm^2）よりも少なかった。また，JASS5 で一つの目標とされている 0.30cm^3/cm^2 よりも少ない結果であった。一般的に，ブリーディング量は高炉スラグ微粉末の置換率が多い方が多くなる傾向にあり，同一配合であれば，ECM 配合の方が BB 配合よりもブリーディング量が多くなる。しかし，今回の試験では ECM 配合の方が BB 配合に比べて，単位水量を 15 kg/m^3 減じていることから，この影響が卓越し ECM 配合の方が，ブリーディング量が小さくなったものと考えられる。

(4) 圧縮強度および静弾性係数

材齢と圧縮強度の関係を**図－６**に示す。

材齢 28 日における ECM 配合の圧縮強度は 40.6N/mm^2 であり，レディーミクストコンクリート工場における製造時の変動係数を 10%程度と想定しても目標である呼び強度 24 を満足する結果であった。また，**図－６**に示すように，ECM 配合と BB 配合の強度発現は，ほぼ同等であった。この理由として，ECM の高炉スラグ微粉末の含有率が高いことによる影響と，ECM 配合の水セメント比が BB 配合よりも小さいことによる影響が相殺されたことが考えられる。

圧縮強度と静弾性係数の関係を**図－７**に示す。

図－７に示すように，圧縮強度と静弾性係数の関係は，ECM 配合，BB 配合ともに土木学会式に準ずることを確認した。

(5) 自己収縮

材齢と自己収縮ひずみの関係を**図－８**に示す。

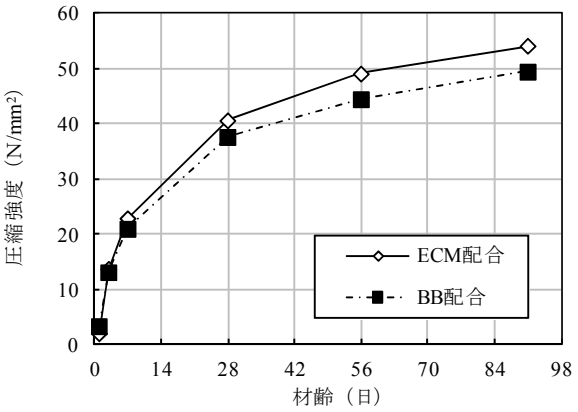
材齢 28 日おける ECM 配合の自己収縮ひずみは 88.3μ であり，BB 配合（92.0μ）と同等であることを確認できた。

また，ECM 配合では材齢 7 日前後において，若干ではあるが膨張傾向にあることが確認できた。これは，ECM に含まれる SO_3 量が多いために硬化過程においてエトリンガイトが生成され，材齢 7 日の時点で BB 配合に比較して 20μ 程度膨張したものと考えられる。

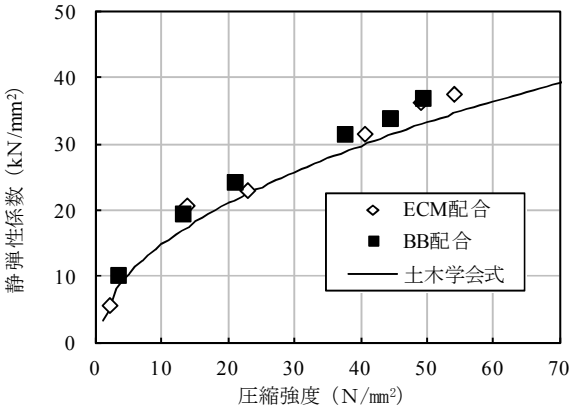
(6) 線膨張係数

温度変化量とひずみの関係を**図－９**に示す。

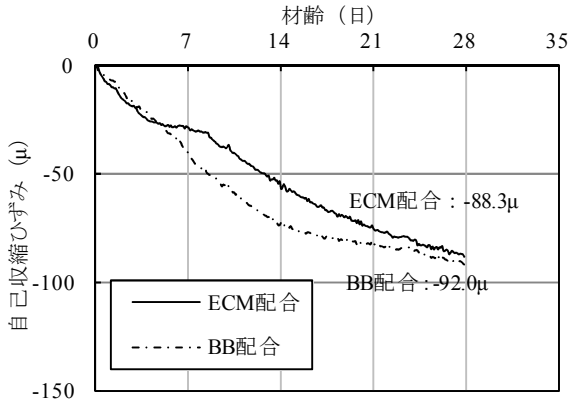
ECM 配合の線膨張係数は，温度上昇時と降下時の平均値で 9.80μ/℃であり，BB 配合（9.70μ/℃）とともに一般にコンクリートの線膨張係数とされる 10μ/℃と同等の結



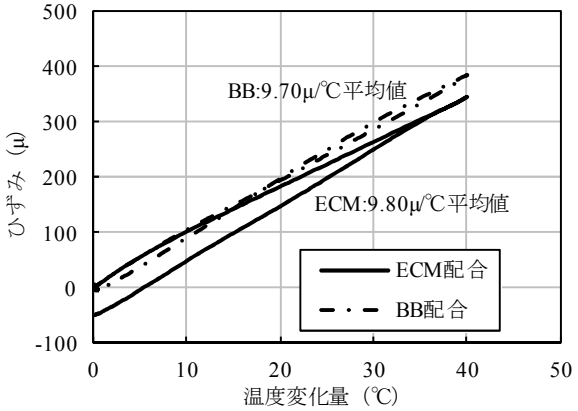
図－６　材齢と圧縮強度の関係



図－７　圧縮強度と静弾性係数の関係



図－８　材齢と自己収縮ひずみの関係



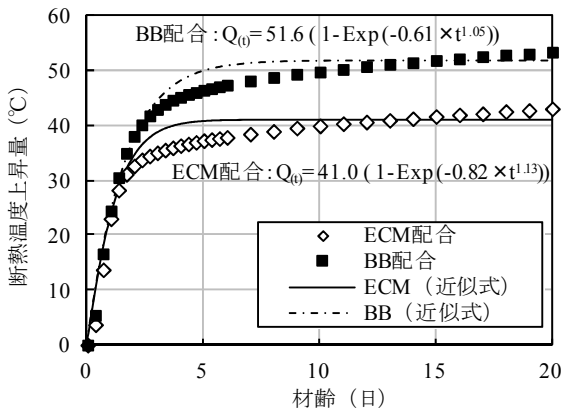
図－９　温度変化量とひずみの関係

果であった。

(7) 断熱温度上昇量

材齢と断熱温度上昇量の関係を**図－10** に示す。

ECM 配合と BB 配合で材齢 2 日程度までの断熱温度上昇の履歴はほぼ同じであるが，ECM 配合の終局温度は 41.0℃であり，BB 配合（51.6℃）よりも 10℃程度低い結果であった。これは，ECM 配合と BB 配合の単位セメント量を同一にしたため，クリンカー量の少ない ECM 配合の方が発熱量が小さくなったことによると考えられる。



図－10　材齢と断熱温度上昇量の関係

5. まとめ

本検討より得られた知見を以下に示す。

(1) ECM を用いたコンクリートの水セメント比を 50%とすることにより，土木構造物で一般に使用される水セメント比 55%の高炉セメント B 種を用いたコンクリートと同等の中性化抵抗性を得ることができる。

(2) 今回選定した ECM 配合は既存の BB 配合と同等のスランプを得ることができる。

(3) 今回選定した ECM 配合は，目標とした呼び強度 24 を満足することができる。また，強度発現は BB 配合と同等である。

(4) 圧縮強度と弾性係数の関係は ECM 配合，BB 配合ともに，土木学会式に準ずる。

(5) 今回選定した ECM 配合の自己収縮ひずみは，既存の BB 配合と同等である。

(6) 同一の単位セメント量 300kg/m^3 で実施した断熱温度上昇量試験では，ECM 配合の方が BB 配合よりも断熱温度上昇量が 10℃程度小さい。

謝辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成による「省エネルギー革新技術開発事業/実用化開発/エネルギー・CO_2 ミニマム（ECM）セメント・コンクリートシステムの研究開発」の一環として実施した。共同研究者である東京工業大学 坂井悦郎教授をはじめ，（株）竹中工務店，鹿島建設（株），（株）デイ・シイ，日鉄住金高炉セメント(株)，太平洋セメント（株），日鉄住金セメント（株）および竹本油脂(株)の関係各位に紙面を借りてお礼申し上げます。

参考文献

1）近藤連一：セメント化学のシーズとニーズ，コンクリート工学，Vol.17，No.2，pp1～11，1979

2）二戸信和，大澤友宏，鯉渕清，宮澤伸吾：高炉セメントの発熱と収縮に及ぼすスラグ粉末度と SO_3 の影響，コンクリート工学年次論文集，30 巻，2 号，pp.121-126，2008

3）金井亮：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの基礎物性（その 2）SO_3 量と水セメント比がフレッシュ性状と圧縮強度に及ぼす影響，日本建築学会学術講演梗概集，pp.207～208，2011.8

4）和地正浩：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの基礎物性（その 3）SO_3 量と水セメント比が自己収縮，乾燥収縮，中性化に及ぼす影響，日本建築学会学術講演梗概集，pp.207～208，2011.8

5）米澤敏男，坂井悦郎，鯉渕清，木之下光男，釜野博臣：エネルギー・CO_2 ミニマム（ECM）セメント・コンクリートシステム，コンクリート工学，48 巻，9 号，pp.69-73，2010.9

6）和地正浩，米澤敏男，三井健郎，井上和政：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 SO_3 量の影響，コンクリート工学年次論文集，33 巻，NO.1，pp.203-208，2011

7）太平洋セメント(株)：セメント総合技術資料，p. 40