

論文 新型高炉セメントコンクリートの長期性状について

宮澤 祐介*1・横室 隆*2・二戸 信和*3

要旨：本研究は、高炉セメントの JIS 規定の範囲内で、高炉スラグ微粉末の比表面積を 3000cm²/g 程度に粗くして、スラグの分量および SO₃ 量を調整した新型高炉セメントを用いたコンクリートの性状について、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種と比較検討した。その結果、新型高炉セメントの圧縮強度はスラグの分量が多いほど、初期では低い値を示すが、長期強度は高くなる。また、長さ変化は小さくなる。さらに中性化深さは、従来いわれているように若干大きな値を示すが、長期材齢になるとその増進割合は小さくなる。また、塩分浸透深さは小さくなることが明らかとなった。

キーワード：高炉セメント、高炉スラグ微粉末、圧縮強度、長さ変化、中性化深さ、塩分浸透深さ、凍害性

1. はじめに

我が国の CO₂ 排出量は、年間 12 億 t 程度であり年々増加傾向にある。現在、日本のセメント産業から排出される CO₂ 総排出量は約 4% を占めており、セメント 1t 製造するに当たり、約 0.8t の CO₂ を排出しているといわれている¹⁾。

セメント産業における CO₂ 排出量削減の対策として、セメントの中間製品であるクリンカ製造時および混合セメントを使用することにより CO₂ を削減できるなどが考えられる。

混合セメントに用いられる高炉スラグ微粉末は、塩害抑制、アルカリシリカ反応抑制および水密性の改善などが図られる混和材料である。しかし、初期強度が小さいため、早期脱型などに問題がある。また、十分な養生がおこなわれない場合には、強度発現や耐久性が低下することなどが知られている²⁾。

一般に、高炉スラグの比表面積は細かいほど初期強度は増進するが、収縮の観点からみると粗いものほど低減される³⁾。

また、SO₃ 量が過大であると強度低下などの悪影響を生じることがある。しかし、SO₃ 量を適切な範囲で大きくすることにより、収縮および水和熱の低減^{4),5)}が期待されることが指摘されている。

本研究は、これらのことから高炉セメントの JIS 規定の範囲内で、高炉スラグ微粉末の比表面積を 3,000cm²/g 程度、スラグの分量および SO₃ 量を調整した新型高炉セメントを用い、実機で練混ぜたコンクリートの性状について、普通ポルトランドセメント (N) および高炉セメント B 種 (BB) と比較検討した。

なお、本報告は、コンクリート工学年次論文集⁶⁾で発表したものに、長期材齢の結果が得られたので再検討し、とりまとめたものである。

表-1 使用材料および物性

使用材料	種類 (記号)	物性
比較用 セメント	普通ポルトランドセメント (N)	密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3320cm ² /g
	高炉セメント B 種 (BB)	同 3.04g/cm ³ , 同 3920cm ² /g
新 型 セメント	高炉セメント (BB40)	同 3.04g/cm ³ , 同 3220cm ² /g
	高炉セメント (BB60)	同 2.98g/cm ³ , 同 3130cm ² /g
混和材	高炉スラグ微粉末 (BF)	同 2.94g/cm ³ , 同 3030cm ² /g
	天然無水石膏 (Gy)	同 2.90g/cm ³ , 同 4800cm ² /g
細骨材	葛生産砕砂 (70%) と陸砂 (30%) の混合砂 (S)	表乾密度 2.61g/cm ³ , f.m. 2.73
粗骨材	葛生産砕石 2005 (G)	同 2.64g/cm ³ , G _{max} 20mm, 実積率 59.2%
化学混和剤	AE 減水剤 (リグニンスルホン酸化合物とオキシカルボン酸の複合体)	密度 1.09g/cm ³
練り混ぜ水	地下水 (W)	

*1 足利工業大学 総合研究センター 客員研究員 (正会員)

*2 足利工業大学 工学部 創生工学科 建築・社会基盤学系 教授 博士 (工学) (正会員)

*3 (株) デイ・シイ 技術部 主査 博士 (工学) (正会員)

表-2 比較用のセメントと高炉スラグ微粉末の化学成分 (%)

セメント種類	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
普通ポルトランドセメント	1.29	21.00	5.41	3.06	63.82	2.27	2.11	0.35	0.31
高炉セメント B 種	1.02	24.68	8.62	2.36	56.83	3.52	1.67	0.33	0.31
高炉スラグ微粉末	0.02	33.43	15.20	0.93	41.41	6.15	(S) 0.85	0.24	0.10

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験で使用した材料および品質を表-1 に示す。また、比較用のセメントと高炉スラグ微粉末の化学成分を表-2 に示す。

なお、新型高炉セメントは比較用の普通ポルトランドセメントにせつこうが含まれていない高炉スラグ微粉末と天然無水せつこう量を調整し SO₃ 量が 4% となるように混合したもので BB40 (スラグの分量 40%) および BB60 (同 60%) の 2 種類を作製した。

2.2 コンクリートの調合

コンクリートの目標強度は、材齢 91 日で圧縮強度 27N/mm² を超えるものとし、試し練りによって調合を定めた。そのコンクリートの水セメント比 (W/C), N は 53.9%, BB は 53.0%, BB40 は 50.0%, BB60 は 48.0% とした。また、スランブは 12±2.5cm, 空気量は 4.5±1.0% を目標とした。なお、これらの各種コンクリートの調合を表-3 に示す。

2.3 コンクリートの練混ぜ

生コン工場の練混ぜは 2 軸強制ミキサを用い、1.5m³ に相当する化学混和剤を含む水、細骨材および粗骨材の順に投入し、その後、セメントを入れ合計 2 分間練り混ぜた。このコンクリートをアジテータトラックで、20 分かけて現場に輸送し、荷卸し時におけるスランブ、空気量およびコンクリートの練り上り温度を測定した。

2.4 模擬柱を想定したコンクリート

模擬柱を想定したコンクリート供試体の寸法は、80×80×80cm の供試体を作製し、コア強度試験用とした。なお、屋外でコンクリートを打設した後、材齢 28 日まで散水養生をおこない、その後、試験材齢まで屋外暴露をおこなった。

なお、屋外暴露した環境条件は、平均外気温 15.3℃ (-5.4~37.1℃), 平均湿度 64.7%, 年間降水量 1358mm である。

3. 実験項目とおよび試験方法

3.1 フレッシュコンクリートの試験方法

(1) スランブ

スランブ試験は JIS A 1101 (コンクリートのスランブ試験) によった。

表-3 各種コンクリートの調合

セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)			
			水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)
N	53.9	44.8	168	312	803	1003
BB	53.0	45.0	168	317	802	992
BB40	50.0	44.5	166	332	790	996
BB60	48.0	44.0	165	344	774	996

[注] 使用した化学混和剤量はセメント×1.0%添加した。

(2) 空気量

空気量試験は JIS A 1128 (フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法) によった。

(3) コンクリートの練り上り温度

コンクリートの練り上り温度は、棒状温度計を用いて測定した。

(4) ワーカビリティ

ワーカビリティについては、スランブ試験の際、スランブしたコンクリートの形状や、くずれ方などから目視によって判断した。

(5) ブリーディング量

ブリーディング量試験は、JIS A 1123 (コンクリートのブリーディング試験方法) によった。

(6) 凝結

凝結試験は、ASTM C 403 (Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance) によった。

3.2 硬化コンクリートの試験方法

(1) 圧縮強度・ヤング係数およびポアソン比

圧縮強度の供試体は、JIS A 1132 (コンクリートの強度試験用供試体の作り方) によった。10φ×20cm の供試体を作製した。なお、圧縮強度試験は JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) により、20℃水中養生した強度試験をおこなった。

なお、材齢 7 日、28 日、91 日、1 年および 5 年で試験した。

また、圧縮強度時にコンプレッソメータを用いて、ひずみを測定し、最大荷重の 1/3 のヤング係数およびポアソン比を求めた。

(2) コア強度

模擬柱を想定したコンクリート供試体から、コア採

取機を用いて 10φ のコアを抜き取り、JIS A 1107 (コンクリートからの採取方法及び圧縮強度試験方法) により圧縮強度試験をおこなった。

なお、材齢 28 日, 91 日, 1 年および 5 年で試験した。

(3) 曲げおよび引張強度

曲げ強度試験は、10×10×40cm の供試体を用いて JIS A 1106 (コンクリートの曲げ強度試験方法) により強度試験をおこなった。また、引張強度試験は、10φ ×20cm の供試体を用いて JIS A 1113 (コンクリートの割裂引張強度試験方法) により強度試験をおこなった。

なお、現場封緘養生した、材齢 91 日で試験した。

(4) 長さ変化

長さ変化試験は、10×10×40cm の供試体を用い屋外暴露したものを JIS A 1129 に定められているコンパレーター法により測定した。なお、基長は材齢 28 日とし、5 年までの長さ変化を測定した。

また、参考のため JIS A 1129-1 (モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法) により、20℃・60% R.H. の恒温恒湿室に放置した長さ変化についても測定した。

なお、基長は材齢 7 日とし、乾燥期間 5 年までの長さ変化を測定した。

(5) 中性化深さおよび鉄筋の発錆

中性化深さおよび鉄筋の発錆試験は、図-1 (a) に示す通りの供試体を用い、かぶり厚さ (2, 3, 4cm) の位置に磨き鉄筋 (10φ) を配筋した。また、供試体の前養生は、コンクリート打設後、材齢 28 日まで散水養生をおこなった。その後、屋外に暴露し、材齢 1 年および 5 年の中性化深さと鉄筋の発錆について試験した。

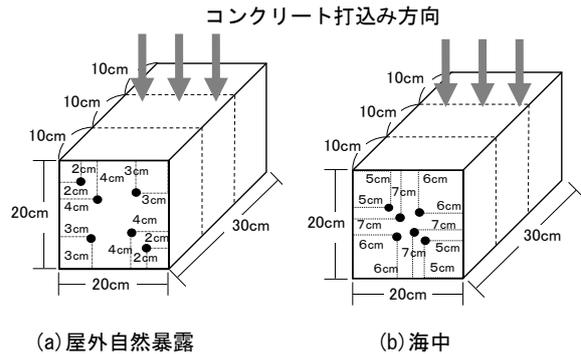
なお、中性化深さの測定は、長手方向に 10cm 厚に切断・清掃し、その断面にフェノールフタレインアルコール溶液 (1%) を噴霧し、両側面計 40 か所をノギスを用いて測定し、平均中性化深さを求めた。

また、鉄筋の発錆については、この供試体からコンクリートを研り、鉄筋を取り出し錆を肉眼で確認した。

(6) 塩分浸透深さおよび鉄筋の発錆

塩分浸透深さおよび鉄筋の発錆試験は、図-1 (b) に示す通りの供試体を用い、かぶり厚さ (5, 6, 7cm) の位置に磨き鉄筋 (10φ) を配筋した。また、供試体の前養生は上記 3.2 (5) と同様とし、材齢 28 日から神奈川県川崎区の中に浸漬した。供試体の浸漬状態は、満潮時には海中に浸漬されており、干潮時には露出されている。この供試体の材齢 1 年間および 5 年間の塩分浸透深さと鉄筋の発錆について試験した。

なお、塩分浸透深さの測定は、長手方向にドライ用コンクリートカッターを用い、10cm 厚に切断し、その断面にフルオレセインナトリウム溶液と硝酸銀溶液を噴霧し、白色に変色した部分の深さの両側面 40 ケ所を



(a) 屋外自然暴露

(b) 海中

図-1 中性化深さ・塩分浸透深さおよび鉄筋の発錆試験用供試体

表-4 各種コンクリートのフレッシュ性状

セメント種類	フレッシュ性状				
	スランプレンプ (cm)	空気量 (%)	コンクリートの練上り温度 (°C)	ワーカビリティ	最終ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)
N	10.0	5.0	10.0	良	0.21
BB	11.5	3.5	9.0	良	0.31
BB40	14.5	5.2	11.0	良	0.29
BB60	10.0	4.4	11.0	良	0.26

ノギスを用いて測定し、その平均浸透深さを求めた。

また、鉄筋の発錆については、上記 3.2 (5) と同様の方法で確認した。

(7) 凍結融解作用に対する抵抗性

凍結融解作用に対する抵抗性試験は、ASTM C 666 A 法 (Resistance of concrete rapid Freezing and thawing) により 300 サイクルまでの相対動弾性係数を測定した。

4. 実験結果と考察

4.1 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの実験結果を表-4 に示し、以下に検討する。

(1) ワーカビリティ

ワーカビリティは、荷卸しの際に目視で観察したが、いずれのコンクリートともスランブおよび空気量は目標とした値が得られ、ワーカビリティは良好であった。

(2) ブリーディング量

各種コンクリートの最終ブリーディング量を表-4 に示す。この結果から N に比して、他のコンクリートのブリーディング量は若干多くなっている。

また、BB に比して高炉スラグの分量が多いほどブリーディング量は少なくなった。なお、いずれのコン

クリートとも JASS 5 の目標値 $0.50\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下となっている。

(3) 凝結

各種コンクリートの凝結を図-2 に示す。この図から N に比して、他のコンクリートの凝結は長くなっている。また、BB に比して、BB40 は始発で 25 分、終結で 5 分、BB60 は始発で 150 分、終結で 310 分といずれも長くなっている。これは高炉スラグの分量が多いほど、さらには、比表面積が粗くなっているため始発・終結とも長くなったものと考えらる。

4.2 硬化コンクリートの性状

(1) 圧縮強度

各種コンクリートの圧縮強度を図-3 に示す。圧縮強度は材齢の経過に伴ない、いずれのコンクリートとも強度が増進している。材齢 7 日をみると N に比して高炉スラグの分量が多いほど初期強度が低くなっている。

同様に材齢 28 日では、N を除く他のコンクリートは同程度の強度となっている。

また、目標とした圧縮強度は、いずれのコンクリートとも、材齢 91 日で $27\text{N}/\text{mm}^2$ を超えている。

ここで、材齢 28 日に対する圧縮強度の増進をみると、材齢 5 年の N は 1.73 倍、BB は 2.31 倍、BB40 は 2.35 倍、BB60 は 2.37 倍となっており、材齢の経過に伴なって高炉スラグの分量が多い BB60 が最も高い強度⁶⁾となっている。これらの理由については、硬化体の組織、例えば、ポロシチーとの関連性など、長期材齢の詳細なメカニズムについては、今後の検討課題としたい。

次に、 20°C 水中養生とコアによる圧縮強度の関係を図-4 に示す。この図から 20°C 水中養生に対して同一材齢における圧縮強度で除した値の圧縮強度比を求めると、材齢の経過に伴ない、N は $0.80\sim 0.96$ 倍、BB は $0.88\sim 0.92$ 倍、BB40 は $0.86\sim 0.95$ 倍、BB60 は $0.82\sim 0.96$ 倍となっており、いずれのコンクリートとも 20°C 水中養生に比して小さい値となっている。これは、屋外暴露のため気温の変化や降雨による湿度などの環境条件が異なることが影響しているものと思われる。

また、コンクリートの内部温度の影響もあり長期で水和があまり進行しなかったものと考えらる。

(2) ヤング係数およびポアソン比

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-5 に示す。この図からいずれのコンクリートとも、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」に示されている式を上回っている。

一般にコンクリートの静弾性係数は、圧縮強度および使用する粗骨材ならびに混和材の種類に影響され、強度が高いほど静弾性係数は大きな値を示すと考えら

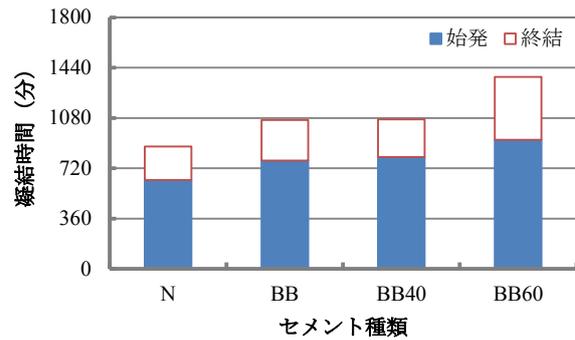


図-2 各種コンクリートの凝結

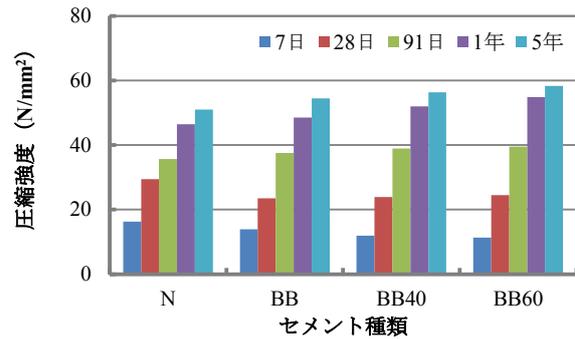


図-3 各種コンクリートの圧縮強度 (20°C水中養生)

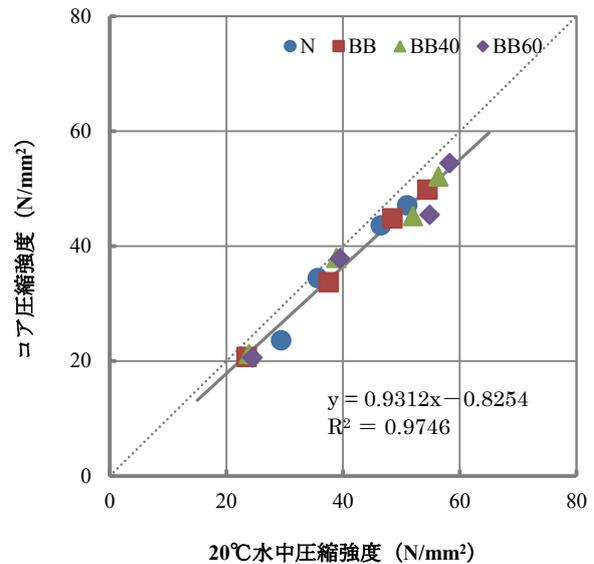


図-4 20°C 水中養生とコアによる圧縮強度関係

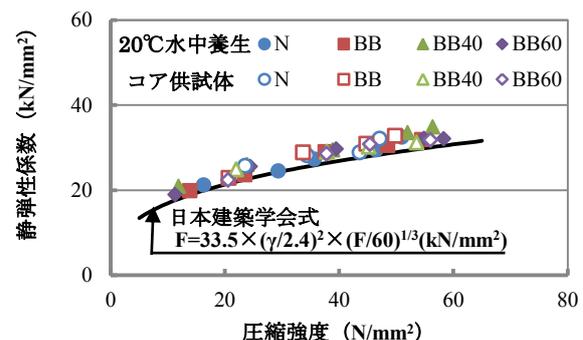


図-5 圧縮強度とヤング係数の関係

れている。本実験での静弾性係数は $19.0 \sim 34.9 \text{ kN/mm}^2$ の範囲にあり、従来からいわれている通り、圧縮強度が高いほど静弾性係数は大きな値となっている。

次にポアソン比の値は $0.16 \sim 0.22$ の範囲(図-6 参照)にあり、材齢の経過に伴ない圧縮強度と同様、強度が高いものほどポアソン比も大きな値となっている。

(3) 曲げおよび引張強度

各種コンクリートの圧縮強度と曲げおよび引張強度の関係を図-7 に示す。曲げ強度および引張強度は、いずれのコンクリートとも同程度の値となっており、その差はみられない。また、圧縮強度に対する曲げ強度比は、 $1/7$ 倍程度、同様に引張強度比は、 $1/15$ 倍程度である。

(4) 長さ変化

各種コンクリートの長さ変化を図-8 に示す。この図から JIS 法による、初期の1週の N は 2.1×10^{-4} 、BB は 2.0×10^{-4} 、BB40 は 1.8×10^{-4} 、BB60 は 1.7×10^{-4} となっており、市販の BB よりも BB40 および BB60 のものは、乾燥収縮率が小さくなっている。同様に、長期材齢5年でみると、N は 9.9×10^{-4} 、BB は 10.1×10^{-4} 、BB40 は 9.8×10^{-4} 、BB60 は 9.3×10^{-4} となっており BB40 および BB60 のものは、高炉スラグの比表面積を粗くしたため、収縮率が小さくなったものと思われる。

また、材齢5年の屋外暴露をみると、N は 4.5×10^{-4} 、BB は 4.7×10^{-4} 、BB40 は 4.1×10^{-4} 、BB60 は 3.9×10^{-4} となっており、BB40 および BB60 のものは収縮率が低減⁹⁾されている。

また、屋外暴露したものは、雨などにより水分の供給を受けるため、JIS 法に比して小さい値となったものと考えられる。

(5) 中性化深さおよび鉄筋の発錆

各種コンクリートの中性化深さを図-9 に示す。屋外暴露した材齢5年の N は 5.9 mm 、BB は 6.1 mm 、BB40 は 7.3 mm 、BB60 は 9.8 mm となっており、スラグの分量が多いものほど中性化深さは大きな値⁹⁾を示している。また、材齢1年に対する中性化深さの増進をみると、材齢5年で N は 5.3 倍、BB は 3.4 倍、BB40 は 4.1 倍、BB60 は 2.7 倍となっており、材齢の経年に伴ない高炉スラグの分量が多いものほどその割合は小さくなっている。この理由としては、屋外暴露で水分供給がおこなわれ水和が進行し、コンクリート組織が緻密になることから、 CO_2 の拡散が阻害されたためと考える。

従って、高炉スラグの分量が多いほど、中性化深さは大きくなるが、長期的にはその差は小さいくると考える。

なお、材齢5年までの鉄筋の発錆は、現在のところ認められていない。

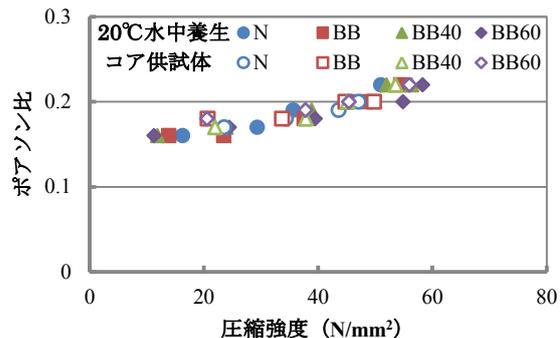


図-6 圧縮強度とポアソン比の関係

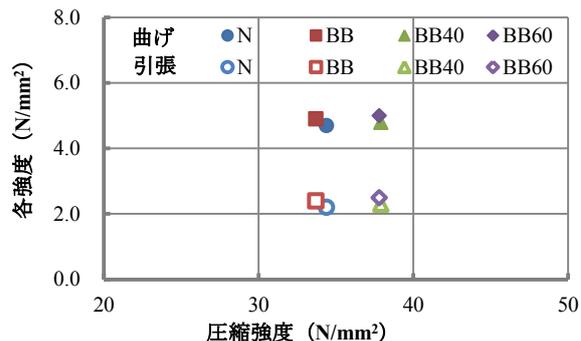


図-7 圧縮強度と曲げおよび引張強度の関係

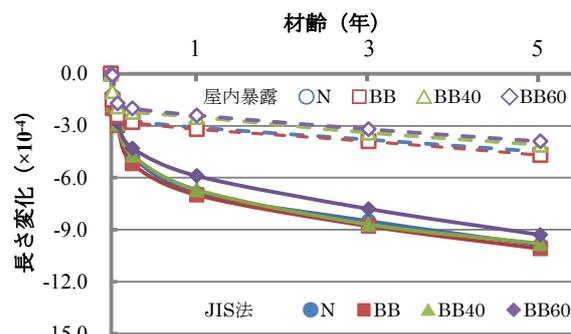


図-8 各種コンクリートの長さ変化

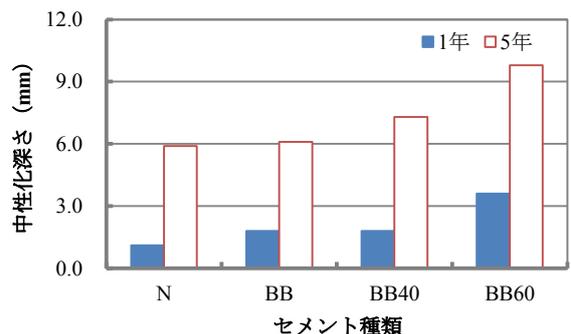


図-9 各種コンクリートの中性化深さ

(6) 塩分浸透深さおよび鉄筋の発錆

海中に浸せきした、各種コンクリートの塩分浸透深さを図-10 に示す。海中に浸せきした材齢1年の N は 7.2 mm 、BB は 5.7 mm 、BB40 は 5.4 mm 、BB60 は 5.0 mm となっており、N に比していずれのコンクリートとも同程度の値となっている。しかし、材齢5年の N は 32.5 mm 、BB は 17.2 mm 、BB40 は 14.6 mm 、BB60 は

12.9mm となっており、高炉スラグの分量が増すほど塩分浸透深さは小さくなっている。この理由としては、高炉スラグを混合したものは、通常のコンクリートの約 2 倍の Al_2O_3 を含有しているため、内部に塩分の拡散を抑制するフリーデル氏塩の生成量が多いこと、さらには、コンクリートの透水係数が通常のコンクリートよりも小さいため、塩分浸透抑制効果があるものと考えられる。

なお、材齢 5 年までの鉄筋の発錆は、現在のところ認められていない。

(7) 凍結融解作用に対する抵抗性

各種コンクリートの凍結融解作用に対する抵抗性の結果を図-11 に示す。300 サイクルにおける相対動弾性係数は、凍結融解サイクル数が増加しても 92~95% の範囲にあり、大きな低下は認められていない。

従って、いずれのコンクリートとも、JASS 5 で目標としている相対動弾性係数の 85% を大きく上回っている。

5. まとめ

高炉セメントの JIS 規定の範囲内で比表面積を粗くし、 SO_3 量を調整し、さらに高炉スラグの分量を変化させた新型高炉セメントを用い、実機によって練混ぜたコンクリートについて、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種と比較検討した結果、次のことが明らかとなった。

- (1) ブリーディング量は、N に比していずれのコンクリートとも多くなるが、高炉スラグの分量が多いほどブリーディング量は少なくなる。
- (2) 凝結は、高炉スラグの分量が多いものほど始発・終結とも長くなる。
- (3) 圧縮強度は、高炉スラグの分量が多いほど、初期では若干低い値を示すが、長期強度は高くなる。また、コア強度は材齢の経過に伴ない増加するが、その値は小さい。
- (4) 長さ変化は、JIS 法および屋外暴露ともに高炉スラグの分量が多いほど、初期および長期材齢では低減される。
- (5) 中性化深さは、高炉スラグの分量が多いほど大きくなるが、長期材齢になるとその増進割合は小さくなる。
- (6) 塩分浸透深さは、高炉スラグの分量が多いほど、その浸透深さは小さくなる。
- (7) 鉄筋の発錆は現在のところ、いずれのコンクリートとも認められない。
- (8) 凍結融解作用に対する抵抗性は、いずれのコンクリートとも同程度である。

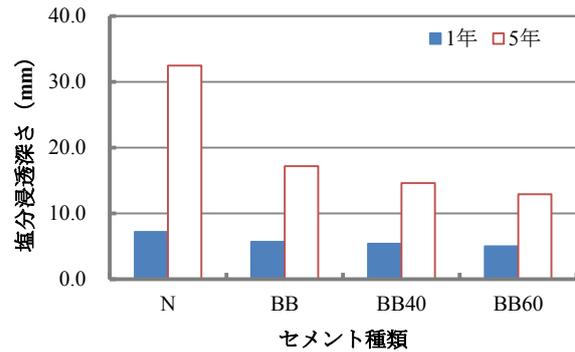


図-10 各種コンクリートの塩分浸透深さ

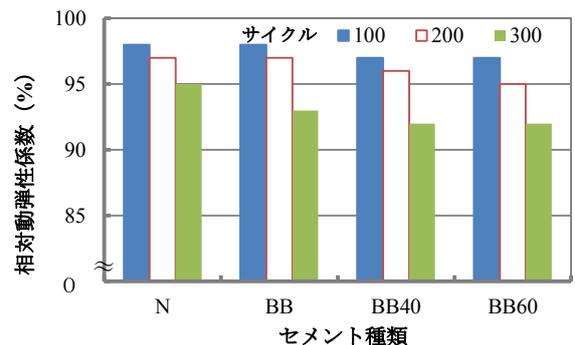


図-11 各種コンクリートの凍結融解作用に対する抵抗性

参考文献

- 1) 樋口雅也, 落合研至: コンクリートの環境負荷評価における環境要因に関する基礎的検討: コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1531-1536, 2002
- 2) 伊代田岳史, 檀 康弘, 川端雄一郎, 濱田秀則: 高炉コンクリートの耐久性における養生敏感性: コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.111-116, 2008
- 3) 宮澤伸吾, 大澤友宏, 廣島明男, 鯉渕 清: 低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートの特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.487-492, 2005
- 4) 二戸信和, 羽原俊祐, 鯉渕 清, 坂井悦郎: 断熱温度上昇に及ぼす高炉セメントの水和反応の温度依存性の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.59-64, 2010
- 5) 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, Vol.33, No.1, pp.203-208, 2011
- 6) 横室 隆, 依田彰彦, 二戸信和, 神崎隆男: 試作した高炉セメントを用いたコンクリートの耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.57-62, 2008