

論文 新型高炉セメントを用いたコンクリートの強度発現について

宮澤 祐介*1・横室 隆*2

要旨: コンクリートの強度発現は、養生条件や打込み時期に大きく影響され、コンクリートが受ける温度履歴が異なることから強度発現傾向も異なる。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粗くし、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て、暑中期、標準期、寒冷期に打ち込んだコンクリートの性状について、高炉セメント B 種と比較検討した。その結果、新型高炉セメントは打込み時期に関係なく、スラグの分量が多いものほど断熱温度上昇量を低減できる。また、初期の圧縮強度はスラグの分量が多いものほど低い値を示すが、長期では同等の強度となることを明らかにした。
キーワード: 高炉セメント, 高炉スラグ微粉末, 断熱温度上昇, 圧縮強度, 積算温度

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⁾。地球温暖化抑制の観点から、セメント産業における CO₂ 排出量削減を図ることが重要な課題となっており、その削減方策のひとつとして、混合セメントの利用拡大が有効であるといわれている。

我が国で使用されている高炉セメントの使用実績は 20% 程度であり、そのほとんどが高炉セメント B 種である。高炉セメント B 種は、化学的抵抗性や塩分遮蔽性の向上、アルカリシリカ反応抑制効果等の観点から有効であり、土木分野では様々な構造物に使用されているが、建築分野では基礎や地中梁等の一部の用途を除くとほとんど使用されていない。

そこで、高炉セメントの利用拡大を図るため、建築物を含む一般の構造物にも幅広く利用できる高炉セメントを開発することが期待されている。

一般にコンクリートの強度発現は、打込み温度や養生

条件などの環境条件の影響を受ける。また、構造体のコンクリートが受ける温度履歴も異なることから、強度発現の傾向も異なる。

本研究では、新型高炉セメントを試作し、打込み時期毎に実機で練混ぜたコンクリートの性状について、市販の高炉セメント 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²⁾で発表したものに、新たな結果が得られたので再検討し、とりまとめたものである。

2. 新型高炉セメント

既往の研究結果から、一般に高炉セメントに含まれる高炉スラグの比表面積は細かいもの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⁾。さらに、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り、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)}が期待されている。

このことから、今回使用する新型高炉セメントは、高炉セメントの JIS 規定の範囲内で、高炉スラグ微粉末の

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	高炉セメント B 種 (BB)	密度 3.04g/cm ³ , 比表面積 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 , Gmax 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・社会基盤分野 建築学コース 教授 博士 (工学) (正会員)

表-2 各種セメントの化学成分 (%)

セメント種類 (記号)	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
高炉セメント B種 (BB)	1.02	24.68	8.62	2.36	56.83	3.52	1.67	0.33	0.31
高炉セメント (BB40)	0.60	25.68	8.89	1.94	55.11	3.86	3.96	0.21	0.35
高炉セメント (BB60)	0.47	27.68	10.64	1.37	50.33	4.67	3.54	0.21	0.36

比表面積 3,000cm²/g 程度と粗くし、スラグの分量および SO₃ 量を調整したものを用いた。

3. 実験概要

3.1 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、各種セメントの化学成分を表-2 に示す。

なお、新型高炉セメントは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 (高炉スラグの分量 40%) および BB60 (同 60%) の 2 種類を作製した。

3.2 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 (F₉₁) 27N/mm² を超えるものとし、試し練りによって調合を定めた。コンクリートの水セメント比 (W/C) は、BB で 53.0%、BB40 で 50.0%、BB60 で 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。

3.3 コンクリートの打込み時期

コンクリートの打込み時期は暑中期 (9 月)、標準期 (11 月) および寒冷期 (2 月) の 3 時期とした。

3.4 コンクリートの練混ぜ

生コン工場の練混ぜは 2 軸強制ミキサーを用い、1.5 m³分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

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)
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。

ランブ、空気量およびコンクリートの練上り温度を測定した。

4. 実験項目および試験方法

4.1 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。

(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) コンクリートの練上り温度

コンクリートの練上り温度は、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。

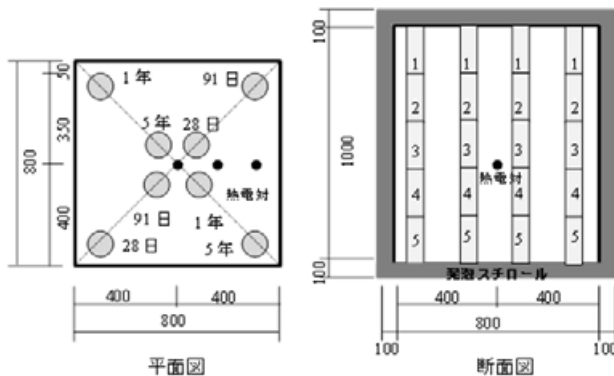


図-1 模擬試験体の概要



写真-1 模擬試験体の養生状況

(6) 凝結

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

(7) 温度上昇量

コンクリートの温度上昇量は、鋼製型枠 (100×100×100cm) を用い、厚さ 10cm の発泡スチロールで上下面および側面を覆い断熱した。温度測定およびコア採取位置を図-1 に示す。鋼製型枠の中心に銅-コンスタンタンの熱電対を埋め込み、9 日間の内部温度を測定した。型枠は内部温度測定後に脱型し、その後材齢 28 日まで散水し、写真-1 に示す通り屋外暴露した。

4.2 硬化コンクリートの試験方法

(1) 圧縮強度

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) によって、φ10×20cm の供試体を作製した。打込み後 24 時間は 20°C・60%R.H. の恒温恒湿室にて養生し、翌日脱型した。その後、試験材齢まで 20°C 水中養生、現場水中養生および現場封緘養生を行った。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、圧縮強度試験を行った。

(2) コア強度

屋外暴露したコア強度試験は、上記 4.1 (7) の供試体からコア採取機を用いて φ10cm 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行った。

なお、4.2(1)および(2)の試験材齢と養生条件および環境条件を表-4 に示す。

5. 実験結果と考察

5.1 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-5 に示し、以下の項目について検討する。

(1) ワークビリティ

ワークビリティは、荷卸し時の際に目視で観察した。いずれのコンクリートともスランプおよび空気量は目標とした値が得られ、ワークビリティは良好であった。なお、打込み時期による違いは見られなかった。

(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図-2 に示す。この図から BB に比して高炉スラグの分量が多いものほど、ブリーディング量は少なくなっているがその差は小さい。また、打込み時期による違いについてはコンクリートの練上り温度の影響のためか、温度が高いほど若干ではあるが少なくなった。なお、いずれのコンクリートとも JASS 5 の目標値 0.50cm³/cm²

表-4 試験材齢と養生条件および環境条件

試験材齢	平均温度 (°C)								
	現場水中養生 ¹⁾			現場封緘養生 ²⁾			屋外暴露 (コア) ²⁾		
	暑中期	標準期	寒冷期	暑中期	標準期	寒冷期	暑中期	標準期	寒冷期
7日	25.8	15.9	6.5	24.7	13.6	2.9	-	-	-
28日	24.3	13.5	6.9	23.6	11.1	4.3	23.6	11.1	4.3
91日	18.8	9.1	10.6	17.4	6.7	8.4	17.4	6.7	8.4
1年	-	-	-	-	-	-	15.3 (-5.4~37.1)		
5年	-	-	-	-	-	-	15.1 (-4.6~38.6)		

[注] 1)現場水中養生は平均水中温度

2)現場封緘養生および屋外暴露 (コア) は平均外気温

表-5 各種コンクリートのフレッシュ性状

打込み時期	セメント種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリートの練上り温度 (°C)	ワーカビリティ
暑中期	BB	10.0	4.3	29.0	良
	BB40	11.5	4.1	28.5	良
	BB60	11.5	4.5	29.0	良
標準期	BB	12.5	4.4	17.0	良
	BB40	10.5	4.7	17.0	良
	BB60	12.5	4.6	17.0	良
寒冷期	BB	11.5	3.5	9.0	良
	BB40	14.5	5.2	11.0	良
	BB60	10.0	4.4	11.0	良

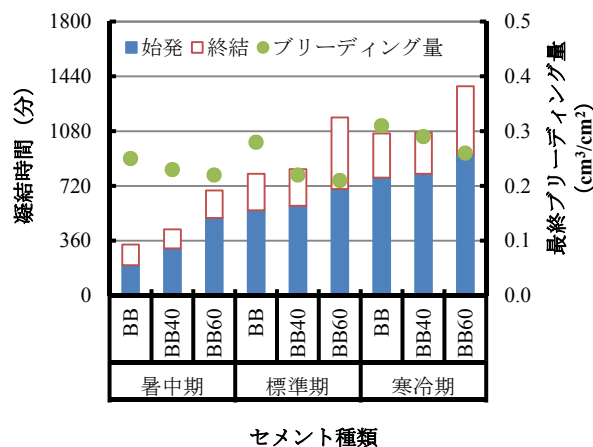


図-2 各種コンクリートの凝結とブリーディング量

以下となっている。

(3) 凝結

各種コンクリートの凝結時間を図-2 に示す。この図から高炉スラグの分量が多いものほど始発・終結とも長くなっている。また、打込み時期による違いは標準期に比して暑中期では始発・終結とも短くなり、寒冷期では長くなる結果となった。これは打込み時期によるコンクリートの練上り温度による影響と思われる。

(4) 温度上昇量

各種コンクリートの温度上昇量を図-3に示す。この図から、暑中期ではBBの最高温度（到達時間 hr）は73.7℃（30hr）、BB40は71.0℃（43hr）、BB60は64.6℃（50hr）となっており、BBに比して最高温度はBB60では約9℃低減できる。同様に、標準期ではBBは62.9℃（65hr）、BB40は60.3℃（50hr）、BB60は57.0℃（52hr）となっており、BBに比して最高温度はBB60では約6℃低減できる。同様に、寒冷期ではBBは42.6℃（97hr）、BB40は41.7℃（80hr）、BB60は38.8℃（80hr）となっており、BBに比して最高温度はBB60では約4℃低減できる結果となった。

これらのことから、コンクリートの温度上昇量は打込み温度が高いほど、また、外気温が高いほど大きくなる傾向となった。温度上昇量が増加した原因については、打込み温度が高い暑中期で最高温度に到達する時間が30～50時間に対し、打込み温度の低い寒冷期では80～97時間となり、外気温による放熱の影響も見込まれるが、打込み温度が高いほど温度上昇速度が増加したものと考える。

5.2 硬化コンクリートの性状

(1) 圧縮強度

20℃水中養生した各種コンクリートの圧縮強度を図-4に示す。材齢7日では、打込み時期に関係なくBBに比して高炉スラグの分量が多いものほど初期強度が低くなっている。また、打込み時期による違いをみると暑中期では、標準期に比していずれのコンクリートとも強度が高い結果となっている。標準期を基準とした打込み時期毎の圧縮強度比で表すと、暑中期のBBは1.27倍、BB40は1.37倍、BB60は1.43倍、寒冷期ではBBは0.97倍、BB40は0.91倍、BB60は0.93倍となっている。

同様に、材齢28日では、暑中期のものは材齢7日と同様な傾向を示しているのに対し、標準期および寒冷期では、BB60が最も高い値となっており、強度の増進割合が大きい結果となった。また、いずれのコンクリートとも材齢91日で目標強度を超えており、スラグの分量が多いものほど高い値となっている。打込み時期による違いをみると、暑中期のものが最も高い値となっており、標準期および寒冷期では同程度の強度となった。さらに材齢5年では、打込み時期により強度差はあるものの、高炉スラグの分量が多いものほど高い値となっている。

また、材齢91日に対する材齢5年までの圧縮強度の増進割合をみると、暑中期ではBBは1.26倍、BB40は1.28倍、BB60は1.31倍、標準期ではBBは1.44倍、BB40は1.45倍、BB60は1.47倍、寒冷期のBBは1.47

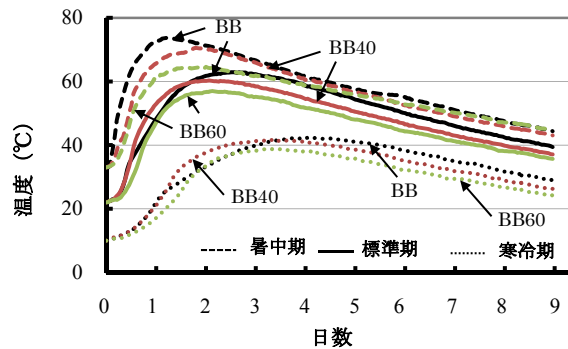


図-3 各種コンクリートの温度上昇量

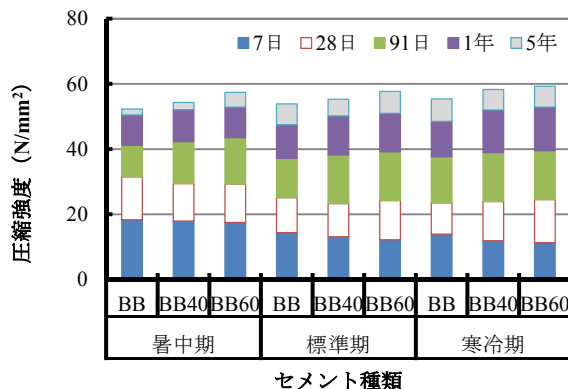


図-4 各種コンクリートの圧縮強度 (20℃水中養生)

倍、BB40は1.49倍、BB60は1.50倍となっており、材齢の経過に伴ない高炉スラグの分量が多いBB60のものが最も高い強度²⁾となっている。また、打込み時期の違いでは寒冷期の増進割合が最も大きい値となっており、各材齢毎の強度発現についても若干の違いがあるが、長期材齢では同様な傾向となっている。

これらの理由については、硬化体の組織、例えば、高炉スラグの反応率やポロシチーとの関連性など、詳細なメカニズムについては、今後検討したい。

次に、各種コンクリートの20℃水中養生と各養生の圧縮強度の関係を図-5に示す。20℃水中養生と現場水中養生、現場封緘養生およびコア強度との間に高い相関が認められた。

図-5(a)から、20℃水中養生と現場水中養生に対する同一材齢における圧縮強度比で表すと、材齢7日の暑中期でBBは1.14倍、BB40は1.14倍、BB60は1.14倍、標準期のBBは0.96倍、BB40は0.96倍、BB60は0.93倍、寒冷期のBBは0.71倍、BB40は0.69倍、BB60は0.62倍となっており、暑中期では20℃水中養生したものより高い強度となった。また、日本建築学会の「高炉スラグ微粉末を使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説」⁷⁾では、15℃以下の水中で養生した場合、養生温度の低下に伴う強度の低下が大きいと記述されていることに合致する結果となった。

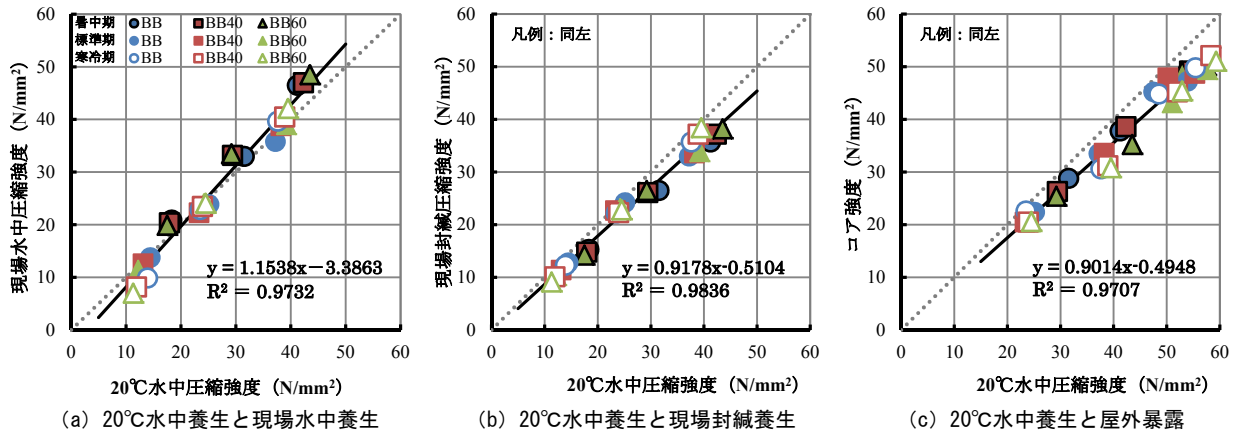


図-5 各種コンクリートの20℃水中養生と各養生の圧縮強度の関係

同様に、材齢28日でも同様な傾向を示しており、打込み時期による違いでは暑中期のものが20℃水中養生したものを上回る結果となった。また、他の打込み時期のものは同程度の値となっており、材齢の経過に伴い、高炉スラグの分量が多いものほど、打込み時期では、暑中期>寒冷期>標準期の順の強度となっている。この理由については、各材齢までの養生温度と湿潤条件による影響と思われる。

次に、図-5 (b) から20℃水中養生と現場封緘養生に対する同一材齢における圧縮強度比で表すと、材齢7日の暑中期でBBは0.84倍、BB40は0.83倍、BB60は0.81倍、標準期のBBは0.89倍、BB40は0.87倍、BB60は0.84倍、寒冷期のBBは0.88倍、BB40は0.85倍、BB60は0.81倍となっており、全ての打込み時期において20℃水中養生したものより小さい強度となった。さらに、材齢28日から91日でも同様な傾向を示しており、圧縮強度比の範囲はBBで0.84~0.96倍、BB40は0.88~0.97倍、BB60は0.86~0.97倍となり、20℃水中養生したものより小さい強度となった。この理由については、養生温度による影響や水分の供給が無かったものと思われる。

次に、図-5 (c) から20℃水中養生と屋外暴露に対する同一材齢における圧縮強度比で表すと、材齢28日の暑中期のBBは0.91倍、BB40は0.89倍、BB60は0.87倍、標準期のBBは0.89倍、BB40は0.88倍、BB60は0.85倍、寒冷期のBBは0.89倍、BB40は0.86倍、BB60は0.84倍となっており、全ての打込み時期において20℃水中養生したものより小さい強度となった。

同様に、材齢91日から5年でも同様な傾向を示しており、圧縮強度比の範囲はBBで0.81~0.92倍、BB40は0.80~0.95倍、BB60は0.78~0.93倍となっており、長期になるほど強度差は大きくなり、全てのコンクリートで20℃水中養生した強度を下回る値となった。この理由については、屋外暴露のため養生温度や降雨による水分の供給などの環境条件が異なることや供試体中からの水分飛散による影響と思われる。

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思われる。

(2) 積算温度と圧縮強度

各種コンクリートの積算温度と材齢91日20℃水中養生に対する各養生の圧縮強度比の関係を図-6に示

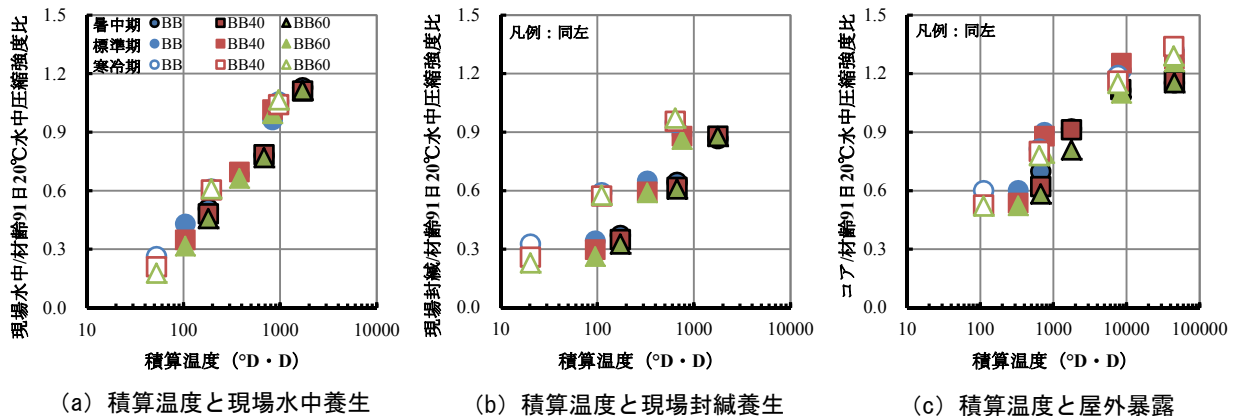


図-6 各種コンクリートの積算温度と材齢91日20℃水中養生に対する圧縮強度比の関係

す。積算温度は次式(1)に示す積算温度方式⁶⁾を用いて検討を行なった。

$$M = \sum (\theta z + 10) \quad (1)$$

M：積算温度(°C・D・D)
 θz ：材齢z日における日平均気温または平均養生温度(°C)

一般に積算温度と圧縮強度の関係はS字状に増加するロジスティック曲線で表されることがよく知られている。この図では、打込み時期毎の各種コンクリートにおいて一定の直線関係が見られ、強度の増進が伺える。また、積算温度が大きくなるほど圧縮強度は高い傾向を示す。さらに打込み時期による違いをみると、初期では、暑中期>標準期>寒冷期の順に圧縮強度が高くなっているが、長期になるほど、寒冷期>標準期>暑中期の順となった。さらに、同一の積算温度であっても同様の傾向になり、養生温度を一定にした場合の圧縮強度を推定できるものと思われる。

また、図-6 から打込み時期毎の積算温度と材齢91日20°C水中養生に対する各養生の圧縮強度比の関係を次式(2)で近似し、その係数 α の結果を表-6に示す。

$$F/F_{91} = \alpha \log_{10} M + b \quad (2)$$

この結果から、現場水中養生に比して現場封緘養生および屋外暴露の圧縮強度比の関係式(2)の係数 α が小さくなった。これは、打込み時期が初期の温度により影響を受けるため、長期強度も初期の温度だけでなく影響を受けることになる。

従って、今後はこれらのことについて、圧縮強度のばらつきや積算温度方式の基準温度などを検討したいと考えている。

6. まとめ

新型高炉セメントを用い、打込み時期毎に実機で練混ぜたコンクリートの性状について、市販の高炉セメントB種(BB)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、BBに比して高炉スラグの分量が多いものほどブリーディング量は少なくなるがその差は小さい。また、打込み時期による違いはみられなかった。

(2) 凝結時間は、高炉スラグの分量が多いものほど、始発・終結とも長くなった。打込み時期による違いは、標準期に比して暑中期では始発・終結とも短くなり、寒冷期では長くなる。

表-6 式(2)の係数 α の結果

養生	打込み時期								
	暑中期			標準期			寒冷期		
	BB	BB 40	BB 60	BB	BB 40	BB 60	BB	BB 40	BB 60
現場 水中	0.27	0.28	0.29	0.28	0.31	0.32	0.27	0.29	0.30
現場 封緘	0.21	0.23	0.24	0.26	0.28	0.29	0.18	0.20	0.22
屋外 暴露	0.11	0.12	0.14	0.12	0.13	0.14	0.12	0.13	0.14

(3) 圧縮強度は、高炉スラグの分量が多いものほど、初期では若干低い値を示すが、長期強度は高くなる。また、現場水中養生および現場封緘養生した強度は材齢の経過に伴ない増加するが、その増進率は標準期に比して暑中期より寒冷期のほうが大きい。さらに、屋外暴露したコア強度は材齢の経過に伴ない増加するが、その増進率は小さい。

〈謝辞〉

本研究を進めるにあたり、試料の提供および実験にご協力頂いた(株)デイ・シイの二戸信和氏をはじめ関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 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
- 宮澤祐介，横室 隆，二戸信和：新型高炉セメントコンクリートの長期性状について，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.43-48，2015
- 宮澤伸吾，大澤友宏，廣島明男，鯉淵 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
- 二戸信和，羽原俊祐，鯉淵 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
- 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SO₃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
- 日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説，1998.2
- 日本建築学会：高炉スラグ微粉末を使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説，2001.7