

論文 石灰石微粉末-高炉セメント三成分系セメントを用いたコンクリートの基本性能

小倉 東^{*1}・羽原 俊祐^{*2}・小野寺 浩昭^{*3}・西村 信二^{*4}

要旨: 本研究は、高炉セメントを普通ポルトランドセメントの強度特性に近づけるため、高炉セメントに石灰石微粉末を内割りで15%加え、石灰石微粉末-高炉セメントの三成分系セメントを試製し、コンクリートのフレッシュ性状や強度発現性の基本性能について評価を行った。その結果、三成分系セメントを用いたコンクリートのフレッシュ性状は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと比べ、単位水量の低減が可能であり、ブリーディングが大きく減少した。また強度発現性では、標準養生の材齢7日における強度の増進が認められた。

キーワード: 石灰石微粉末, 高炉セメント, フレッシュ性状, 強度発現

1. はじめに

従来、高炉セメントは長期強度の増進が大きく、化学抵抗性に優れたセメントとして普通ポルトランドセメントと区別して使用されている。現在の高炉セメントは、高炉スラグの割合がB種相当で一般に40~45%となっているが、材齢7日までの初期強度は普通ポルトランドセメントと比較すると低く推移する。このため、通年施工を考慮した場合の高炉セメントは、型枠存置期間の延長が必要になること、後養生の必要性や冬期施工時におけるスラグの水和反応の温度依存性による強度発現の遅延が施工工程に影響を及ぼすこと等、特に積雪寒冷地における冬期間の使用が少なくなる状況となっている。

また、高炉セメント等の混合セメントは近年の環境負荷低減に対し、セメント製造時のCO₂排出を低減できることから、季節に左右されることなく通年で使用されることが望まれる。

これらのことから、高炉セメントは、初期の強度発現性を普通ポルトランドセメントの強度発現性に近づけることにより、施工性の観点からも使いやすい環境に変化する可能性がある。この初期の強度発現性について、筆者らはモルタルによる予備実験を実施し、高炉セメン

トに15%程度の石灰石微粉末を混合することで、材齢初期の強度増進を確認した。そこで本研究では、石灰石微粉末-高炉セメントの三成分系セメントとして、石灰石微粉末をセメントの内割りで15%置換し、残りを高炉セメントB種及びC種として、三成分系セメントを調製した。これらのセメントを用い、コンクリートとしてフレッシュ性状及び強度発現性を把握し、三成分系セメントの有効性について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用したセメント及び石灰石微粉末の性状を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(NPC)、高炉セメントB種(BB)、高炉セメントC種(BC)の3種類を使用し、石灰石微粉末(LSP)は、道路用石灰石微粉末を用いた。細骨材は登別産陸砂(密度2.65g/cm³, 吸水率:1.71%, 粗粒率:2.84)及び岩内産細砂(密度:2.58g/cm³, 吸水率:2.9%, 粗粒率:1.35)を9:1の比率で混合したものを使用し、粗骨材は白老敷生川産砕石2515及び1505を6:4の比率で混合したもの(密度:2.68g/cm³, 吸水率:1.96%)を用いた。混和剤は、リグ

表-1 セメント及び石灰石微粉末の性状

材料名	密度 (g/cm ³)	粉末度 (cm ² /g)	化学成分(%)								
			ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
NPC	3.16	3350	0.6	21.4	5.9	2.8	63.9	1.6	2.09	0.31	0.43
BB	3.05	3710	0.7	26.1	9.5	2.0	55.2	3.2	1.90	0.26	0.36
BC	3.00	3880	0.7	28.5	11.2	1.6	50.9	4.0	1.80	0.24	0.34
LSP	2.73	4440	41.0	2.8	0.3	0.3	50.4	1.1	-	-	-

*1 日鐵セメント(株) 技術部研究所副主幹研究員 (正会員)

*2 岩手大学 工学部社会環境工学科准教授 博(工) (正会員)

*3 日鐵セメント(株) 営業部営業技術グループマネージャー

*4 フジコンサルタント(株) 試験研究部課長

表-2 配合条件と示方配合

配合の種類	W/B (%)	s/a (%)	LSP (wt%)	SL (cm)	air (%)	単位量 (kg/m ³)								Ad (vol%)	AE (%)	
						W	NPC	BB	BC	LSP	S1	S2	G1			G2
N55	55	47	0	18 ±2.5	4.5 ±1.5	152	276	-	-	-	801	88	613	406	0.25	0.0001
BB55			-				276	-	-	799	608		403	0.00015		
BBL55			-				235	-	41	797	608		403	0.0004		
BCL55			-				-	235	41	794	608		403	0.0008		
BBL50	50	46	15	18 ±2.5	4.5 ±1.5	152	-	259	-	46	770	85	611	406	0.25	0.0005
BCL50							-	-	258	46	768		611	403		0.001

ニンスルホン酸系 AE 減水剤を用い、空気量調整剤は、1%に希釈したものを用い、目標空気量が得られるように適宜添加量を変化させて使用した。

2.2 配合条件と示方配合

配合条件及び示方配合を表-2に示す。水結合材比は、55%を基本として設定したが、石灰石微粉末を置換したBB及びBCについては、水結合材比が50%の水準も加えた。石灰石微粉末の置換率は、BB及びBCの単位セメント量の質量に対して内割りの15%とした。単位水量は、どの配合も152 (kg/m³)の一定として設定した。フレッシュ性状は、目標のスランブを18cmとし、目標空気量を4.5%とした。今回の実験では、単位水量を一定としたため、配合の種類によってスランブの値が大きく変化する場合も考えられたが、材料分離や極端に作業性が悪くなった配合は無く、スランブの調整は行わなかった。

各配合はそれぞれ記号で表し、N55は普通ポルトランドセメント(N)の水セメント比55%、BB55は高炉セメントB種(BB)の水セメント比55%、BBL55は高炉セメントB種(BB)の石灰石微粉末(L)が15.0%置換の三成分系セメントで水結合材比55%という表記とした。以降は各配合をこの表記にて記す。

2.3 実験方法

(1) フレッシュ性状

フレッシュ性状は、スランブ (JIS A 1101) 及び空気量 (JIS A 1128)による練り上がり直後の測定と、それぞれの経時変化についても測定を行った。経時変化の測定は、N55, BB55, BBL55, BBL50の4配合について行い、練り上がり直後の測定から、15分後、30分後、60分後、90分後についてのスランブおよび空気量をそれぞれ測定した。経時変化の測定方法は、コンクリートの練り上がり直後の測定が終了した後、練り舟に静置し、乾燥による水分の逸散を防ぐために覆いを被せ、所定に時間に練り返しを行って測定する方法とした。また、JIS A 1123に規定されているブリーディング試験を N55, BB55, BBL55, BBL50の4配合について実施した。さらに、水結合材比55%の水準において、JIS A 1147に規定されるコンクリートの凝結時間の測定を水セメント比55%の水準で行った。

(2) 圧縮強度

圧縮強度は、JIS A 1108による方法に従って、試験材齢を3日、7日、28日、56日、91日とした。供試体の養生条件は、標準養生(20℃水中)及び低温養生(5℃水中)の2条件とした。低温養生におけるコンクリートの練り上がり温度は20℃とし、供試体成形後直ちに5℃の養生室へ搬入した。また、標準養生及び低温養生の供試体は初期乾燥を防ぐために打設面をラップで覆った。供試体の脱型は、標準養生の場合において成形後2日目で行うこととした。低温養生の場合では、供試体の強度が型枠取り外しの目安となる強度¹⁾よりも下回る可能性があったため、成形後5日目に行うこととした。ただし、材齢3日の圧縮強度を測定する計画としたため、低温養生の供試体は、使い捨ての簡易型枠を用いて成形し、試験のみ慎重に脱型して圧縮強度試験に供した。

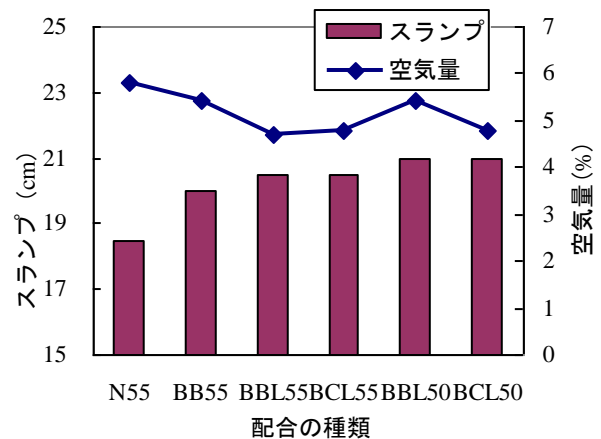


図-1 練り上がり直後のスランブ・空気量

3. 実験結果及び考察

3.1 フレッシュ性状

(1) 練り上がり性状

図-1に練り上がり直後のスランブ値並びに空気量の値を示す。コンクリートのスランブ値は、N55が最も小さくほぼ目標通りの値となったのに対し、高炉系セメントの配合では、N55のスランブ値をすべての配合で上回る結果となった。BB55と三成分系セメントを比較する

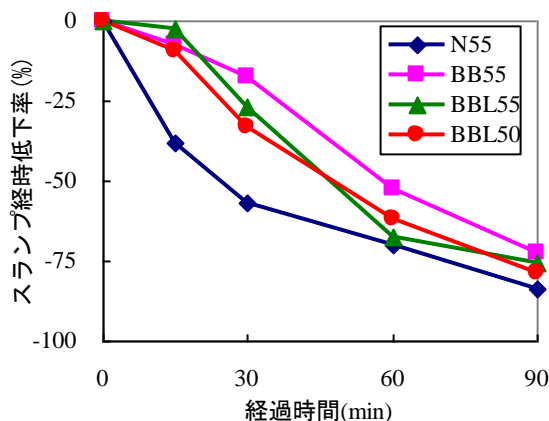


図-2 スランプの経時低下率

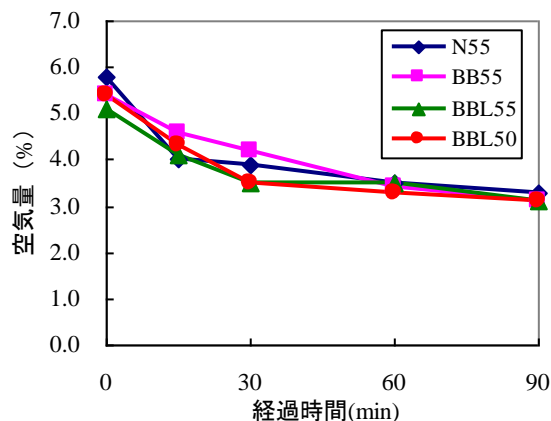


図-3 空気量の経時変化

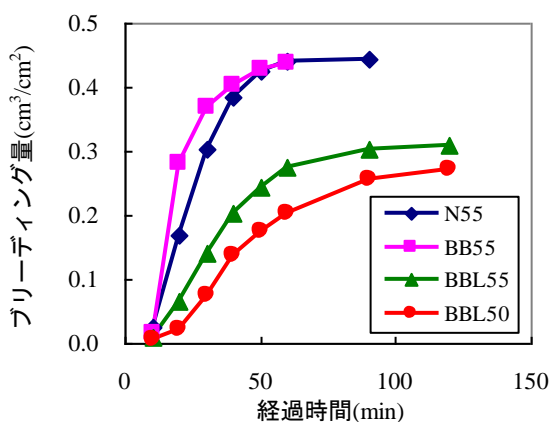


図-4 ブリーディング量

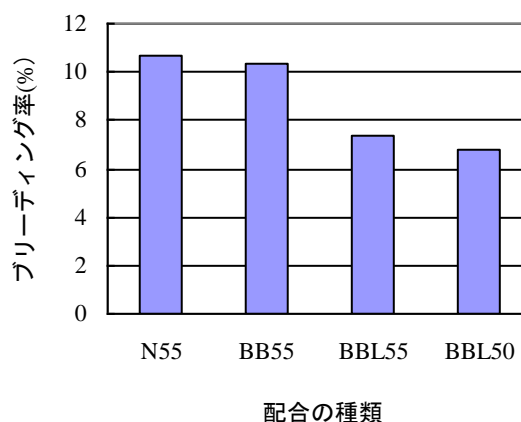


図-5 ブリーディング率

と、三成分系セメントのすべての配合でスランプの値が若干大きくなった。空気量は、表-2の空気量調整剤(AE)の使用量に示すように、目標値に合わせるための使用量が異なった。ここでBB55とBBL55の添加量を見ると、石灰石フィラーを置換したBBL55の添加量が多くなっていることが分かる。これは、石灰石微粉末にもAE剤が吸着するため²⁾、AE剤の使用量が増大したものと考えられる。

(2) スランプと空気量の経時変化

図-2にスランプの経時低下率を、図-3に空気量の経時変化をそれぞれ示す。図-2から、スランプの経時低下率は、BB55が最も小さく、N55で最も大きくなった。一方、BBL55とBBL50は、15分後の測定においてBB55との差が見られないものの、その後の測定からBB55よりも経時低下が若干大きく推移した。特にBBL55では30分及び60分経過時に、BBL50では30分経過時にそれぞれ経時低下率が大きくなった。Nとの比較では、BBL55及びBBL50の経時低下率が共に小さかった。

図-3から空気量の経時変化は、30分後の測定におい

て石灰石微粉末の有無による差が僅かに見られ、BBL55及びBBL50の空気量の低下が大きくなった。それ以外の測定はほぼ同じような値で経過した。

この空気量の経時変化は、スランプの経時変化に良く対応しているように見受けられ、特に三成分系であるBBL55並びにBBL50では、30分後における空気量の低下と同時にスランプの値も低下しており、空気量のロスがスランプの経時低下に影響を及ぼしている可能性がある。

(3) ブリーディング

図-4に積算ブリーディング量と経過時間を、図-5に各配合におけるブリーディング率の結果を示す。ブリーディング量が最も多かった配合はN55で、次にBB55、三成分系セメントであるBBLはブリーディングが少なかった。測定したブリーディング量の値は、N55で0.443 (cm³/cm²)、BB55で0.439 (cm³/cm²)、BBL55で0.310 (cm³/cm²)、BBL50で0.273 (cm³/cm²)となり、BBL55及びBBL50は、N55やBB55と比較し、BBL55で約7割程度、BBL50で約6割程度のブリーディング量に留まった。また、JASS5の水密コンクリートに規定されてい

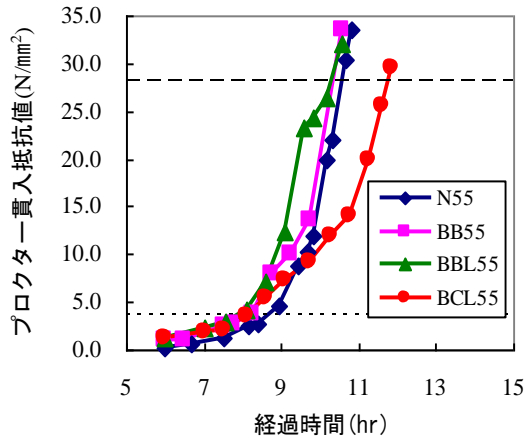


図-6 凝結試験結果

るブリーディング量は、 $0.3 \text{ (cm}^3/\text{cm}^2)$ 以下³⁾が推奨されているが、この基準値と本実験結果を比較すると、N55及びBB55は規格値を超えた値を示したのに対し、BBL55ではほぼ規格値と同等の値となり、BBL50では規格値を下回った。またブリーディングの速度は、石灰石微粉末の置換の有無で異なり、三成分系セメントの方が緩やかに増加する傾向となった。さらに、ブリーディング率においても三成分系セメントの方が小さな値を示し、さらに水結合材比が5%小さくなることでブリーディング率も小さくなる結果となった。

石灰石微粉末を置換したコンクリートのブリーディングは、水の移動速度が抑制されるため減少すると指摘されており²⁾、本実験に用いた三成分系セメントにおいても同様の結果となった。

(4) 凝結試験

図-6に水結合材比55%における各配合の凝結試験結果を示す。始発時間は、N55が最も長く8:36、最も短かった配合はBBL55で7:30であった。BB55とBBL55の比較では、三成分系セメントであるBBL55の方が僅かに短くなった。終結時間は、最も短かった配合がBBL55で10:23、最も長かった配合はBCL55で12:47であった。N55とBBL55の比較では、始発・終結共にBBL55の凝結時間が短く、BB55とBBL55の比較では、BBL55で僅かに短くなっているものの、それほど大きな差は認められなかった。全般的な凝結時間は、BCL55の終結時間が若干長くなっているものの、特異な傾向は見られなかった。

石灰石微粉末を内割り置換した場合、置換率が30%程度までは凝結時間が短くなることが報告されている⁴⁾。また、単位粉体量が一定のもと、石灰石微粉末を内割り置換した場合、置換率がコンクリートの凝結時間に及ぼす影響は小さいとされている⁶⁾。本実験における凝結時間は、始発時間および終結時間共に三成分系セメントで

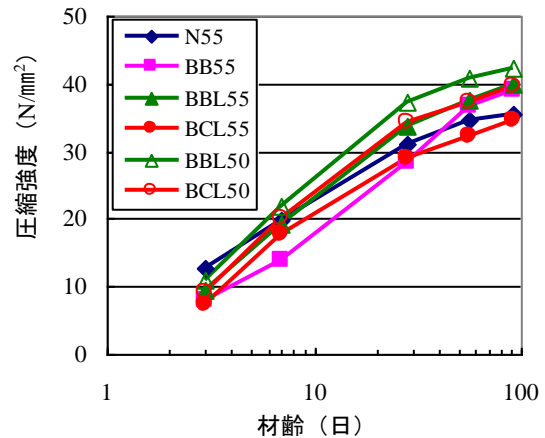


図-7 標準養生の圧縮強度

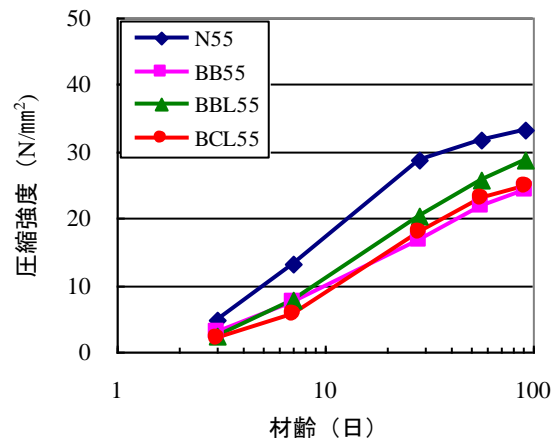


図-8 低温養生(5°C)の圧縮強度

あるBBL55の配合が最も短くなっているが、BB55との比較では大差ない結果となった。

3.2 圧縮強度

(1) 標準養生

図-7に標準養生における圧縮強度試験結果を示す。石灰石微粉末を置換した三成分系セメントの圧縮強度は、材齢3日において強度増進が僅かに見られたもののどの水準もN55の圧縮強度に達しなかった。材齢7日では、BBL55とBCL50がN55とほぼ同等の強度性状を示し、BBL50はN55を約 $2 \text{ (N/mm}^2)$ 程上回った。BCL55は、N55を下回る結果となった。同一水結合材比の材齢28日における圧縮強度は、BBL55が最も高く、次にN55、BCL55、BB55の順に小さくなり、石灰石微粉末を置換することによって、材齢7日以降における圧縮強度の増進が見受けられた。材齢28日以降の強度特性は、BB55の伸びが大きく増進しているのに対し、三成分系セメントでは、いずれの配合も強度の増進が小さかった。ただし、長期的な強度の伸びが大きくなって、BBL55やBBL50及びBCL50の圧縮強度は、材齢7日以降におい

てN55の圧縮強度を下回る値にはならなかった。

(2) 低温養生(5°C)

図-8に低温養生における水結合材比55%の圧縮強度試験結果を示す。一般的な強度発現性は、普通ポルトランドセメントであるN55が各材齢において高く推移した。一方、BB55、BBL55、BCL55の高炉系セメントは、強度発現性が初期から緩やかに推移したため、N55の値に到達しなかった。高炉系セメントでは、養生温度が低い場合に、高炉スラグの水和反応の温度依存性による影響が大きいと言え、強度発現性が緩やかに或いは遅延しながら進行しているものと考えられる。また、三成分系セメントは、標準養生の場合のような強度増進が見られなかったが、材齢の経過とともにBBL55が材齢7日で、BCL55では材齢28日で、それぞれBB55を上回る値を示した。

3.3 フレッシュ性状と強度発現の比較評価

表-3に本研究に関する評価を示す。評価は、各実験項目に対するセメントの優位性を記号で表し、◎は特に優れている・○は良好・△はやや劣るとした。また、評価基準として表-3に示しているが、練り上がり性状はスランブの目標値である18cmを基準とし、ブリーディングは、JASS5の水密コンクリートに規定されているブリーディング量0.3(cm³/cm²)以下³⁾を基準とした。経時変化や凝結及び強度発現についてはN55を基準に評価し、経時変化は30分及び60分経過後の経時低下を基準とし、凝結は始発時間を、強度発現は材齢7日の強度を基準にN55の強度に対し±10%程度を良好として、それぞれ評価した。

(1) フレッシュ性状

目視による練り上がり直後のコンクリートの性状は、いずれの配合も材料分離等が見られなく、良好な状態であった。また、各配合におけるスランブの状態は、崩れや割れが生ずることもなく、プラスチックな状態を保ちながらスランブした。目標スランブによる評価では、Nがほぼ目標通りの値が得られ、BB、BBL、BCLは目標のスランブ設定値を上回った。また、BBL及びBCLは、水結合材比を5%小さくした配合においても同様の結果

となった。したがって、スランブを一定の条件した場合、BBやBBL及びBCLは、目標スランブに対して単位水量を減少させることが可能である。

ブリーディングはN及びBBが基準値を大きく超える値を示し、BBLでは基準値に対し同等以下となった。三成分系セメントのブリーディングは、石灰石微粉末を置換することで大きく低減できることが確認できた。

このことから、三成分系セメントは、既往の研究²⁴⁾で示されている流動性の向上やブリーディング抑制の効果に期待できるセメントであることが考えられる。また三成分系セメントは、練り上がり直後のスランブを同じ値に調整した場合に、単位水量の低減が可能であることから、さらにブリーディング量が減少するものと予測されるため材料分離抵抗性が向上し、均一なコンクリート組織が形成されるものと考えられる。

経時変化は、室内での静置による実験であったため、実際の生コンでの状況と異なるものと推測されるが、三成分系セメントの経時変化は、Nよりも経時による低下が小さく、BBよりも経時低下が若干大きい結果となった。BBLがBBよりも経時低下が大きくなった理由として、空気量の経時低下による影響や石灰石微粉末を置換したことによって、石灰石微粉末による水の拘束が経時的に作用したため、経時低下が若干大きくなったものと考えられる。

凝結は、Nに対して、BBおよびBBLで始発及び終結が共に短く、BCLでは始発が短く終結が長くなった。凝結は、実際の現場において仕上げ工程に影響を及ぼす。この点を考慮すると、BBLは、Nに対して優位性があるように考えられる。

コンクリートのフレッシュ性状は、コンクリートの施工性能に大きく関係する。本実験結果から、石灰石微粉末を置換した三成分系セメントのフレッシュ性状は、NやBBに対しても優位性が認められる結果が多いことから、概ね良好な結果であると考えられる。

(2) 強度発現

標準養生における圧縮強度は、三成分系セメントの材

表-3 今回の実験における評価

セメントの種類		N	BB	BBL	BCL
フレッシュ性状	練り上がり直後の性状	○	◎	◎	◎
	経時変化	—	◎	○	—
	ブリーディング	△	△	◎	—
	凝結	—	○	○	△
強度発現	標準養生	—	△	○	○
	低温養生(5°C)	—	△	△	△
評価基準	練り上がり直後の性状：目標スランブ値の18cmを基準、ブリーディング：推奨値の0.3(cm ³ /cm ²)以下を基準、経時変化(30分後及び60分後)・凝結(始発時間)・強度発現(材齢7日)：Nの実験値を基準				

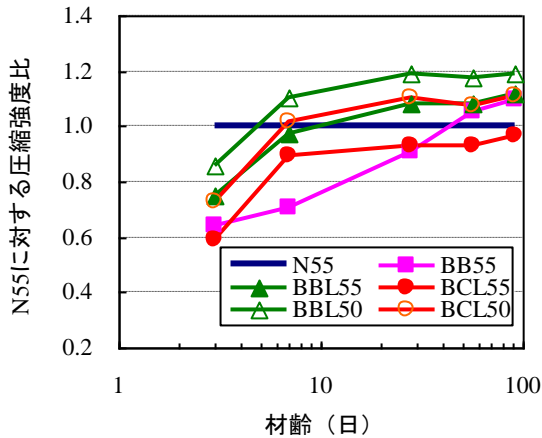


図-9 標準養生の N55 に対する強度比

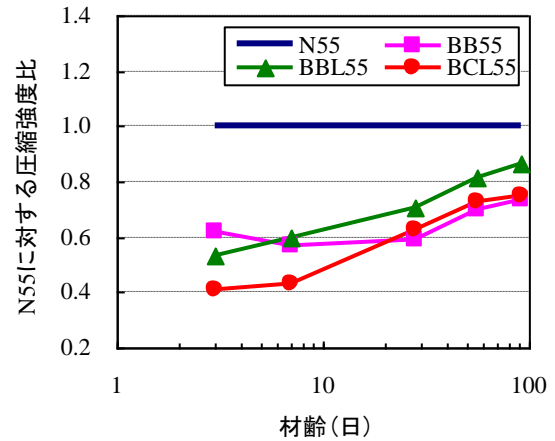


図-10 低温養生の N55 に対する強度比

齢 7 日の強度増進傾向が見受けられ、BBL55 では N55 と同等の強度発現性を示し、BBL50 では N55 を上回る結果となった。また、BCL55 は N55 を下回ったものの、BCL50 については材齢 7 日以降で N55 と同等の強度発現となった。この圧縮強度の結果について、N55 を基準とした強度比で表すと、図-9 のようになる。材齢 3 日の強度は、どの水準も N55 の圧縮強度を下回っているが、材齢 7 日では、BBL 及び BCL の三成分系セメントの強度上昇が N55 に近づく水準を上回る水準も確認でき、BB55 と異なる強度増進傾向が見られた。材齢 7 日以降の三成分系セメントの強度増進は、N55 に対して大きく増進することなく、N55 と各セメントの間にほぼ一定の比率で推移した。BB55 については、N に対する強度増進傾向が初期から緩やかで、材齢 28 日以降で N55 の強度を上回る結果となった。このことから、石灰石微粉末は、高炉セメントに置換することによって、材齢 3 日から材齢 7 日までの強度の伸びが比較的大きく、これ以降の材齢については強度増進が抑制されているように見受けられる。以上の結果を踏まえると、材齢 7 日からの強度発現は、BBL で N と同等以上の強度発現性が得られ、BCL は水結合材比を 5% 低くすることによって、N とほぼ同等の強度発現性が得られた。

この強度発現性の一つの理由として、既往の研究⁵⁾から、石灰石微粉末は高炉セメント中のスラグとの共存下において、スラグの水和反応を促進している可能性があることが挙げられる。

図-10 に N55 を基準とした低温養生における強度比を示す。低温養生の圧縮強度は、スラグの温度依存性が大きく影響しているものと考えられ、石灰石微粉末を置換した三成分系セメントの圧縮強度は、標準養生の時のような強度増進傾向が見られなく、N55 の圧縮強度には到達していない。しかし、三成分系セメントの圧縮強度は、BB55 と比較して、BBL55 は材齢 7 日で、BCL55 は

材齢 28 日で、それぞれ上回る結果となった。このことから、低温の領域においても少なからず石灰石微粉末の強度増進効果が寄与しているものと考えられ、BB55 に対する優位性は僅かであるが認められた。

4. まとめ

高炉セメントに石灰石微粉末を 15% 置換した三成分系セメントについて、コンクリート試験を実施し、その基礎的な性状を把握した。その結果を以下に記す。

- (1) フレッシュ性状は、高炉セメントをベースとした三成分系セメントの場合でも、N と比較して、練り上がり性状の向上やブリーディングの抑制効果が確認でき、概ね良好な結果が得られた。
- (2) 標準養生に強度発現において、材齢 3 日では N の強度に対してどの水準も達しなかったが、材齢 7 日からの強度発現では、BB ベースの三成分系セメントで N と同等以上の強度発現が見られ、BC ベースの三成分系セメントで水結合材比を 5% 小さくした場合に N と同等の強度発現が得られた。

参考文献

- 1) 土木学会，コンクリート標準示方書施工編，2007 年制定
- 2) 日本コンクリート工学協会，石灰石微粉末の特性とコンクリートへの利用に関するシンポジウム委員会報告書・論文集，1998
- 3) 日本建築学会，建築工事標準仕様書・同解説，JASS5 鉄筋コンクリート工事，2009
- 4) セメント協会，石灰石微粉末門委員会報告書，2001
- 5) 佐川孝広，名和豊春：高炉セメントの水和反応に及ぼす石灰石微粉末の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，pp.93～98，2007