

# 寒冷地における高炉スラグ微粉末混和高流動コンクリートの強度発現性に関する基礎的研究

岩城一郎<sup>1</sup>・三浦尚<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 東北大学講師 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)  
<sup>2</sup>フェロー 工博 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

本研究は、高炉スラグ微粉末を混和した粉体系高流動コンクリートを寒冷地において施工する場合を想定し、様々な配合条件、養生条件、環境条件に対する強度発現性を明らかにすることを目的としている。はじめに、高炉スラグ微粉末の粉末度及び置換率を変化させたモルタル供試体を作製し、養生方法や養生温度が強度発現性に及ぼす影響を調査した。その結果、低温養生を行った場合、配合によっては強度発現性に問題があることが確認されたため、給熱養生による強度発現改善効果を検討した。一方、我が国の寒冷地で冬期にコンクリートを打ち込む場合、打ち込み後しばらくは低温にさらされても、冬から春への季節の変化に伴い外気温が上昇し、強度発現が回復する可能性があると判断される。そこで、材齢途中で温度が上昇することに伴う強度回復特性についても検討を行った。

*Key Words: low temperature, strength development, self-compacting concrete, ground granulated blast-furnace slag, sealed curing, heat curing, strength recovery*

## 1. はじめに

フレッシュ時の材料分離抵抗性を損なうことなく流動性を高めた高流動コンクリート<sup>1)</sup>の普及に伴い、今後、寒冷地においても、作業環境の大幅な改善や、信頼性の高いコンクリート構造物の実現のために高流動コンクリートの積極的な利用が望まれる。一方、寒冷地においてコンクリート施工を行う場合、一般に養生温度が低温となるため、凝結硬化が遅延するという問題が懸念される。特に、高炉スラグ微粉末を多量に混和した高流動コンクリートを寒冷地において施工する場合、低温下において高炉スラグ微粉末の反応性が著しく低下し<sup>2)</sup>、高性能AE減水剤の多量添加により、コンクリートの凝結硬化が一層遅延するため<sup>3)</sup>、初期の強度発現が遅延したり、材齢が経過しても十分な強度発現が得られないといった問題が発生する恐れがある。このうち、初期の強度発現の遅れは、施工工程上支障をきたすだけでなく、初期凍害や春までに受ける凍結融解作用に対する抵抗性が低下するため、注意が必要である。この点について、著者らは寒冷地において高炉スラグ微粉末を混和した粉体系高流動コンクリートを施工した場合を想定し、コンクリートが誤って初期凍害を受けてしまった場合の品質低下とその対策方法について詳細な検討を行っている<sup>4)</sup>。

一方、ある程度材齢が経過した段階における強度発現の遅延は、各施工段階における工事の遅れにつながるだけでなく、場合によってはコンクリートの長期強度が予想以上に低下し、構造物そのものの耐力や耐久性に影響を及ぼす可能性がある。

高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートは本来、アルカリシリカ反応の抑制、耐硫酸塩性及び海水や融雪剤に対する化学抵抗性の向上に優れた効果を発揮するため、今後コンクリート構造物の高耐久化を図る上でも、寒冷地において是非とも普及させたいコンクリート技術であるといえる。そのためにも、高炉スラグ微粉末を混和した高流動コンクリートの強度発現性を正しく理解し、所定の強度発現性を得るために必要な配合、養生方法を適切に選定することが重要であると考えられる。

以上の背景から、本研究では、高炉スラグ微粉末を混和した粉体系高流動コンクリートを寒冷地において施工する場合を想定し、様々な配合条件、養生条件、環境条件に対する強度発現性を明らかにし、所定の強度発現性を満足するために必要な配合及び施工法の提案を行うことを目的とした。本研究では、これらの要因が強度発現性に及ぼす影響を検討するのであれば、モルタルによりその傾向を十分に把握することが可能であると判断し、モルタル供試体により実験を行

表-1 セメントの試験成績

	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝結			安定性	圧縮強さ(N/mm <sup>2</sup> )			MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	L.O.I (%)	全アルカ (%)	Cl <sup>-</sup> (%)
			水量(%)	始発(h-m)	終結(h-m)		3日	7日	28日					
シリーズ1	3.15	3290	27.9	2-22	3-34	良	16.9	27.0	42.0	1.5	1.8	1.1	0.64	0.006
シリーズ2	3.16	3290	28.1	2-26	3-39	良	26.5	42.4	60.1	1.5	2.0	1.3	0.61	0.005

表-2 高炉スラグ微粉末の試験成績

	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	L.O.I (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)
シリーズ1	2.90	4100	0.1	33.1	13.9	0.2	42.2	6.7
	2.90	7950	0.1	33.1	14.2	0.2	42.1	6.8
シリーズ2	2.92	4450	0.0	33.2	14.8	0.4	42.6	6.0
	2.91	7980	0.0	33.4	14.5	0.79	42.8	5.58

表-3 細骨材の試験成績

	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	粗粒率	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	洗い試験 (%)	有機不純物
シリーズ1	2.55	2.63	2.07	1560	0.40	合格
シリーズ2	2.60	2.82	2.05	1620	0.35	合格

うこととした。はじめに、内的要因として高炉スラグ微粉末の粉末度及び置換率、外的要因として養生方法及び養生温度を変化させて、これらの要因が強度発現性に及ぼす影響を調査した。その結果、低温養生を行った場合、配合によっては初期の強度発現が著しく遅延するとともに、材齢が経過しても所定の強度発現性が得られないことが明らかになったため、初期の強度発現性を改善する目的で打込み後1日程度給熱養生を行い、その改善効果について検討を行った。一方、我が国における寒冷地の気候を考慮すると、冬期にコンクリートを打ち込む場合、コンクリートは打込み後しばらくの間は低温にさらされるものの、冬から春への季節の変化に伴い外気温が上昇し、強度発現が回復する可能性がある。そこで本研究では、温度上昇に伴う高炉スラグ微粉末を混和した高流動コンクリートの強度回復特性について、温度上昇の時期、低温養生時の養生温度、気中養生の影響を調べることにした。

尚、本論文は著者らによって行われた既往の研究成果<sup>5, 6, 7)</sup>に新たな実験データを加え、取りまとめたものである。

## 2. 実験概要

### (1) 使用材料及び配合

本論文は多年にわたり行ってきた研究結果を取りまとめたものであり、使用材料であるセメント、高炉スラグ微粉末、細骨材は、2種類の組み合わせからなる。以下、この組み合わせをシリーズ1、シリーズ2と記し、区別する。セメントは、表-1に示す普通ポル

トランドセメントを使用した。高炉スラグ微粉末は表-2に示す通り、各シリーズごとにJIS規格品である高炉スラグ微粉末4000及び8000の2種類を使用した。砂は宮城県大和町産の山砂を使用した(表-3参照)。高性能AE減水剤は主成分がポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体で、低空気量タイプのものを使用した。

粉体系高流動コンクリートを想定した配合の水結合材比は35%一定とし、単位結合材量500kg/m<sup>3</sup>、高炉スラグ微粉末の置換率(以下、スラグ置換率と記す。)は0%、50%、70%の3水準とした。スラグ置換率を50%あるいは70%とした理由は、既往の文献<sup>8)</sup>より、高流動化を図り、かつアルカリシリカ反応の抑制、耐硫酸塩性及び海水や融雪剤に対する化学抵抗性の向上を目的とした場合、この程度の置換率が下限及び上限になると判断されるためである。高炉スラグ微粉末を混和した配合は、その粉末度と置換率を組み合わせ、4種類の配合からなる。さらに比較用として、高炉スラグ微粉末を混和していないプレーンな配合1種類を加え、合計5種類の配合により検討を行った。以下、これらの配合をBS45、BS47、BS85、BS87、Plainと記して区別する。例えば、BS45は高炉スラグ微粉末4000を置換率50%で混和した配合を意味する。Plainは、スラグ置換率0%の配合である。モルタル供試体の配合は、表-4に示す基本コンクリートの配合から粗骨材を取り除くことにより設定し、高性能AE減水剤の添加量は、各配合の流動性がほぼ一定となるよう文献<sup>9)</sup>に示されているフロー試験に従い、相対フロー面積比が5.0±0.5となるように調整した。

## (2) 実験方法

モルタルは20℃恒温室内において、文献<sup>9)</sup>に示されている方法に従い練混ぜを行い、φ5×10cmの円柱型枠に打ち込んだ後、20℃及び5℃恒温室内に静置した。ここで、20℃は標準的な養生温度であり、5℃は寒冷地における日平均気温を想定した温度である。一部の配合については、0℃においても実験を行った。キャッピングは原則として打込みの翌日に行い、脱型はさらにその翌日に行った。基本となる養生方法は、寒冷地でコンクリート施工を行う場合、気中養生では十分な強度発現が得られないこと<sup>9)</sup>、寒冷地における実際の現場で長期にわたり水中養生を継続することは難しいことを考慮し、封かん養生を採用した。ただし、一部の実験では比較用に水中養生及び気中養生を行った。封かん養生では、モルタル打込み後、直ちに型枠上面を食品用ラップフィルムと輪ゴムで密封し、型枠脱型後は気泡を追い出しながらラップフィルムにより供試体を巻いて、さらにその供試体をチャック付きポリエチレン袋に入れて2重に密封し、養生中の水分の出入りを遮断した。その結果、型枠脱型時から材齢91日にいたる供試体の質量減少率は、多くて0.2%程度と非常に少なく、養生中に水分損失がほとんど生じていないことが確認された。一方、水中養生は、恒温水槽及び恒温室内に設置した水槽により行った。気中養生では、各温度に設定された平均湿度約70%の恒温室内に供試体をそのまま放置した。圧縮強度試験は、JIS A 1108に従い、材齢7日、28日、91日で行うこととし、各実験シリーズごとに必要に応じて、材齢14日、56日、182日においても圧縮強度試験を行った。

給熱養生による強度発現改善効果を調べる実験では、打込み後供試体を封かん状態とした後、所定の期間30℃一定恒温器内で養生を行った。給熱養生後、供試体を5℃一定恒温室内に移して、封かん養生を継続し、20℃一定あるいは5℃一定封かん養生を行った供試体の強度発現と比較した。給熱養生期間は、予備実験を行い、材齢7日の圧縮強度が15MPaを満足するように設定した。その結果、高炉スラグ微粉末4000に対しては1日及び2日給熱養生を行うこととした。一方、高炉スラグ微粉末8000に対しては、給熱養生を行わなくても材齢7日の圧縮強度が15MPaを大きく上回るため、経済性を考慮し、必要最小限の給熱養生期間として、12時間及び1日を選定した。このように材齢7日における圧縮強度の目標値を15MPaに選定した理由は、コンクリート標準示方書施工編<sup>10)</sup>において、構造物の断面が薄く、連続してしばしば水で飽和される部分においても、養生終了時の圧縮強度が15MPa以上あれば、春までに受ける凍結融解作用に対して抵抗できるとの記述による。また、この条件を満足していれば、型

表-4 基本コンクリートの配合表

水結合 材比 (%)	水粉体 容積比 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
		水 W	セメント C	スラグ BS	細骨材 S	粗骨材 G
35	110.3	175	500	0	824	849
	105.7	175	250	250	816	841
	104.0	175	150	350	811	835

枠脱型時期等の工程上支障をきたすこともなく、初期凍害に対する抵抗性も十分に備えていると判断される。

外気温の上昇が強度回復特性に及ぼす影響を調べる実験では、5℃一定封かん養生を行った供試体の一部を材齢28日、56日、91日で20℃一定恒温室に移設し、以降20℃一定封かん養生を行い、所定の材齢における圧縮強度を測定した。さらに、0℃から温度上昇させた場合の強度回復特性や、気中養生を行った場合の温度上昇に伴う強度回復特性についても検討を行った。

## 3. 結果及び考察

### (1) 養生方法や養生温度の違いが強度発現性に及ぼす影響

一般に、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの強度発現性は、粉末度が低く、置換率が高いほど遅延することが知られている。そこで、本実験では選定した配合中最も強度発現が遅延すると予想されるBS47と、最も強度発現性に優れていると判断されるBS85を対象に、養生方法や養生温度が強度発現性に及ぼす影響を調べることにした。図-1に養生方法の違いが強度発現性に及ぼす影響を調べた結果を示す。養生方法として、水中養生、封かん養生、気中養生の3種類、養生温度として20℃と5℃の2種類を適用している。

図より、BS47、BS85ともに材齢7日における圧縮強度は、養生温度が同じであれば養生方法の違いによらずほぼ同じことがわかる。その後材齢が経過するに従い、気中養生を行った供試体の強度発現は停滞し、水中養生、封かん養生を行った場合の強度発現と大きな開きが生じている。特にBS85では、低温養生を行った場合、その傾向がより顕著に現れており、またBS47に対して低温気中養生を行うと材齢91日においても20MPa程度の強度しか得られないことが明らかになった。このことから、低温環境下では気中養生を適用すべきではないと判断される。このように低温下で気中養生を行った場合、強度発現の低下が特に顕著に現れた理由は、低温下では、常温と比較し水和反応速度が低下し、細孔組織の緻密化が遅延するため、細孔中

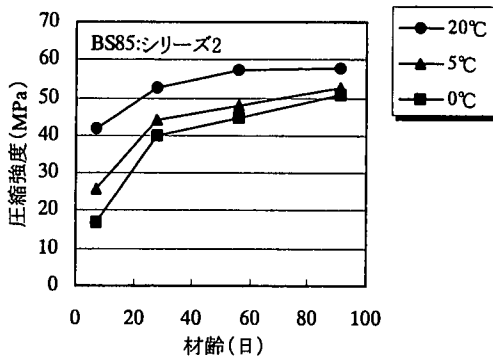
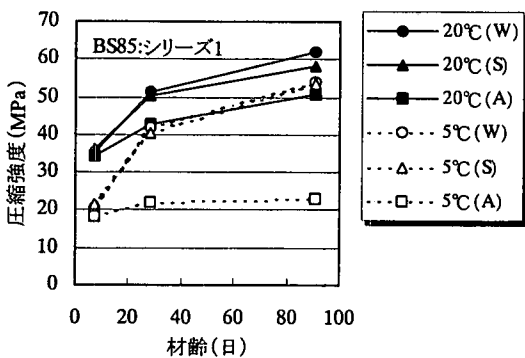
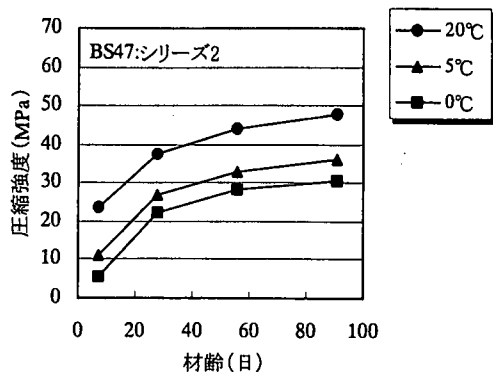
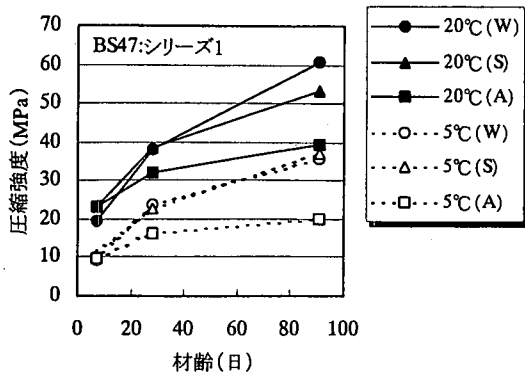


図-1 養生方法の違いが強度発現に及ぼす影響 (高流動)

図-2 養生温度の違いが強度発現に及ぼす影響 (封かん養生, 高流動)

の自由水が蒸発しやすくなり、その結果、水和が十分に進行しないうちにペースト中の自由水が不足してしまったためであると考えられる。

一方、水中養生と封かん養生の強度発現性を比較すると、20°C養生では、水中養生に比べ、封かん養生で材齢91日における圧縮強度が多少低下するものの、5°C養生では、両者の強度発現はほぼ同じであり、封かん養生を適用することにより水中養生と同程度の強度発現性が期待できる結果となった。

図-2に養生温度の違いが強度発現性に及ぼす影響について調べた結果を示す。強度発現の遅いBS47と強度発現性に優れたBS85を対象に、20°C、5°C、0°C一定封かん養生を行い、強度発現性を調べた結果、BS47では5°C及び0°C養生を行った場合、20°C養生と比較して初期の強度発現が著しく遅延している。材齢7日の圧縮強度は5°C養生で11.2MPa、0°C養生で5.5MPaと非常に低く、このままでは施工工程上支障をきたすとともに、初期凍害や春までに受ける凍結融解作用に対する抵抗性に問題が生じる可能性がある。そのため、場合によっては給熱養生等の補助工法を施し、初期強度の改善を図る必要があると思われる。また、BS47ではその後材齢が経過しても、5°C及び0°C養生の強度発現が20°C養生の強度発現に近づくことはなく、ほぼ平行に推移していることから、長期強度

に対しても問題が生じる可能性がある。一方、BS85ではBS47と同様に、5°C及び0°C養生を行った場合、20°C養生と比較して初期の強度発現は遅延するものの、BS47に比べ、材齢7日における圧縮強度は明らかに高い値を示しており、初期強度そのものが問題になることはないと思われる。また、材齢の経過とともに5°C及び0°C養生の強度発現が20°C養生の強度発現に近づいており、長期の強度発現性についても問題ないと判断される。

## (2) 給熱養生が強度発現性に及ぼす影響

前述の実験結果より、高炉スラグ微粉末を混和した粉体系高流動コンクリートでは、配合によって低温下における初期の強度発現が著しく遅延するため、場合によっては給熱養生等の補助工法を用いて初期の強度発現性を改善させる必要があることが明らかになった。そこで、高炉スラグ微粉末の粉末度及び置換率を変化させた4種類の配合 (BS45, BS47, BS85, BS87) に対して所定の期間給熱養生を行い、初期強度の改善効果と長期強度への影響について検討を行った。結果を図-3に示す。まず各配合に対して20°C及び5°C一定封かん養生を行った場合の強度発現性を比較する。高炉スラグ微粉末8000を用いた場合 (BS85, BS87)、同じ置換率で高炉スラグ微粉末4000を混和した配合

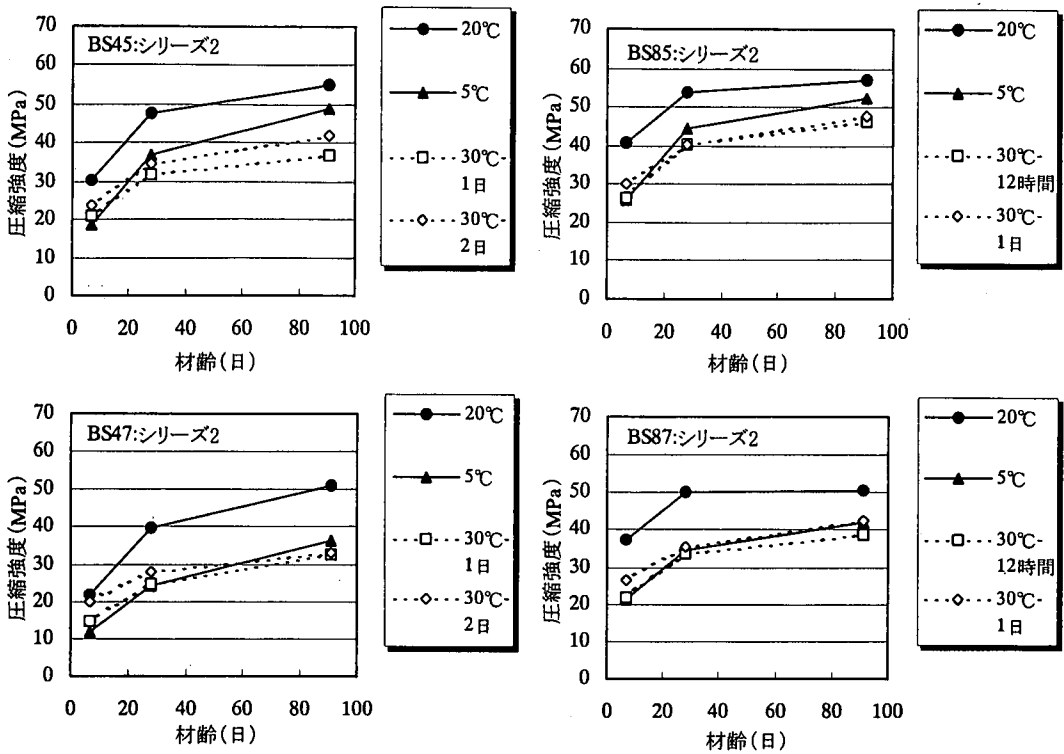


図-3 給熱養生が強度発現に及ぼす影響 (高流動)

(BS45, BS47) と比較して、20°C、5°Cともに初期の強度発現が顕著に増進し、20°C養生では材齢28日以降の強度発現が停滞する傾向を示している。一方、スラグ置換率が50%の配合 (BS45, BS85) では、材齢の経過に伴い5°C養生の強度発現が増進し、材齢91日において20°C養生の強度発現にかなり近づくのに対し、置換率を70%とした場合 (BS47, BS87)、5°C養生の強度発現が遅延し、材齢91日においても20°C養生の強度発現と大きな開きが生じる結果となった。以上の実験結果より、高炉スラグ微粉末の粉末度を高くすると、特に初期の強度発現が促進し、スラグ置換率を上げると、初期の強度発現が遅延するとともに、長期の強度発現も大きく低下することが確認された。高炉スラグ微粉末の粉末度を高くすることにより初期の強度発現が促進した理由は、比表面積の高い高炉スラグ微粉末を混和したことにより、細孔中の水分と高炉スラグ微粉末粒子の接触機会が増えて、高炉スラグ微粉末の反応が促進したためと考えられる。一方、スラグ置換率の増加に伴い特に低温下で長期の強度発現が低下した理由は、単位セメント量の減少に伴い、高炉スラグ微粉末の水和に必要なセメント粒子からのカルシウムイオン溶出量が減少し、さらに低温封かん養生下ではこれらのイオンや水分の拡散速度が著しく低下するため、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性が著しく阻害されたためであると推察される。一般に低温封かん

養生を行ったコンクリートの強度発現性は、初期には多少遅延するものの長期では常温養生を行った強度発現に追いつくか逆転すると考えられており、寒中コンクリートの施工指針<sup>10)</sup>等においてもこの考えに従っている。しかしながら、高炉スラグ微粉末4000を置換率70%で混和した場合、長期においても5°C養生の強度発現が20°C養生の強度発現に近づく傾向を示さないことから、寒冷地においてこのような配合を適用する場合には、最終強度が低下する可能性があることを予め考慮に入れておく必要があると思われる。

次に給熱養生を行った場合の強度発現性について検討を行う。図-3より、高炉スラグ微粉末4000を混和した場合、打込み後1日あるいは2日給熱養生を行うことにより初期の強度発現が顕著に改善し、材齢7日において目標強度 (15MPa) を満足する結果が得られた。しかしながら、その後は材齢の経過とともに強度発現が停滞し、特にBS45では材齢28日以降、給熱養生を行った場合、5°C養生を行った供試体の強度発現に追い越される結果となった。BS47については、材齢91日で給熱養生を行った場合の圧縮強度が5°C養生の圧縮強度を若干下回る程度であった。一方、高炉スラグ微粉末8000を混和した場合、給熱養生を行わなくても材齢7日における目標強度を満足しており、給熱養生を行うと、BS85ではBS45と同様に、材齢28日以降で給熱養生を行った場合、5°C養生を行った供試体の強

度発現に逆転される結果となった。つまり、スラグ置換率50%の配合 (BS45, BS85) では、給熱養生を行うよりも5℃養生を行った方が長期において優れた強度発現性を示すことが明らかになった。各配合の20℃養生を行った場合の強度発現を基準として、給熱養生、5℃養生の強度発現を比較すると、給熱養生を行った場合、20℃養生に対する強度発現の低下傾向は配合によらずほぼ同様であるのに対して、5℃養生を行った場合、スラグ置換率を50%とした配合では長期にわたり強度発現が増進していることが確認された。つまり、BS45, BS85について、5℃養生を行った場合の強度発現が給熱養生を行った供試体の強度発現を逆転した理由は、他の配合と比べ、給熱養生の強度発現が顕著に低下したためではなく、むしろ5℃養生の強度発現が、長期にわたり著しく増進したためであると判断される。

一般に、打込み直後に高温養生を行ったコンクリートの強度発現は、初期に促進するものの、長期においては停滞することが知られており、その理由として、高温養生を行った場合、初期の急速な水和反応によりセメント粒子周りに密度の高い水和物層が形成され、その後の水和生成物の拡散を抑制すること<sup>11)</sup>が原因であると考えられている。また、後方散乱電子画像によりセメント粒子周りの水和物の形態を調べた結果、高温養生を行った場合、密度の高い水和物層がセメント粒子周りに形成され、セメント粒子間が多孔質になっていることが確認されている<sup>12)</sup>。一般に5℃養生を行った場合、水和物が分散して析出するため、長期にわたり安定した水和反応が継続すると考えられているが、本実験のように打込み直後に給熱養生を行った場合には、密度の高い水和物層がセメント粒子 (及び高炉スラグ微粉末粒子) 周りにバリアを形成し、水分やイオンの拡散を阻害するため、この要因によってその後の5℃養生の水和反応速度が支配され、特に5℃一定養生を行った場合優れた強度発現性を示すスラグ置換率50%の配合 (BS45, BS85) に対して、その影響がより顕著に現れたと考えられる。

以上のことから、高炉スラグ微粉末を混和した高流動コンクリートに対して給熱養生を行う場合、反応の遅いBS47に対しては初期強度の改善に効果があるが長期の強度発現はあまり期待できないこと、スラグ置換率50%の配合では、給熱養生により、その後の強度発現に著しいブレーキがかかるため、給熱養生を行うべきではないこと、さらに高炉スラグ微粉末8000を混和した配合では給熱養生を行わなくても十分な初期強度が得られ、給熱養生を行うとむしろ長期の強度発現性に悪影響を及ぼすため、やはり給熱養生を適用すべきではないことが明らかになった。

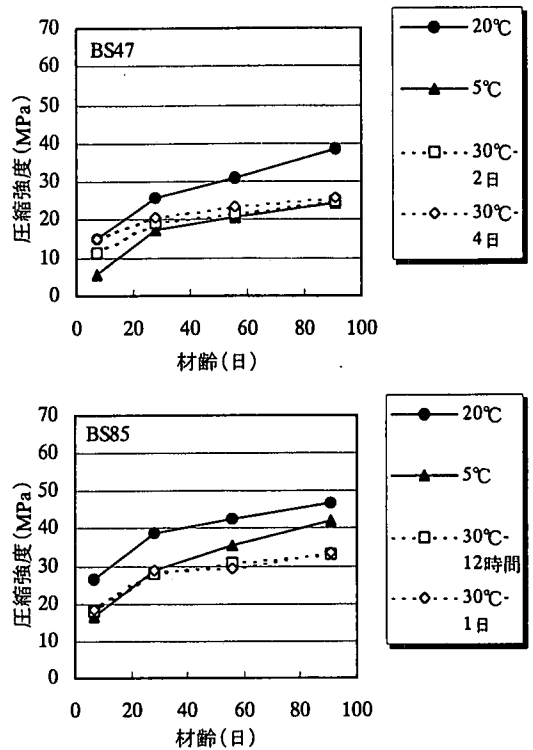


図-4 給熱養生が強度発現に及ぼす影響 (普通)

図-4に普通コンクリートを対象に給熱養生の影響を調べた既往の研究結果<sup>9)</sup>を示す。図より、BS47では、高流動コンクリートの実験結果 (図-3参照) と比べ、初期の強度発現の遅延がさらに深刻化している。普通コンクリートでは高流動コンクリートと比較し水結合材比が高いため、圧縮強度が低くなるのは当然の結果であり、さらに本実験では普通コンクリートを対象としたモルタルには高性能減水剤を添加していないことから結合材粒子の分散性が低下し、このことも強度発現の遅延につながったと考えられる。しかしながら給熱養生を行うことにより、初期強度が顕著に改善されるとともに、長期においても5℃養生と同程度の強度発現性が期待できることから、給熱養生の適用が有効であると判断される。一方、強度発現性に優れたBS85では、給熱養生による長期の強度発現の低下が高流動コンクリートを対象とした本実験結果と比較してやや顕著に現れており、高流動コンクリートと普通コンクリートで給熱養生によるその後の強度発現性に及ぼす影響が多少異なる傾向を示している。

### (3) 温度上昇が強度回復特性に及ぼす影響

図-5は高炉スラグ微粉末4000及び8000、置換率50%及び70%を組み合わせた4種類の配合について、材齢28日、56日、(BS47, BS85に対しては) 91日で5℃から20℃に温度を上昇させて、その後の強度回復特性を

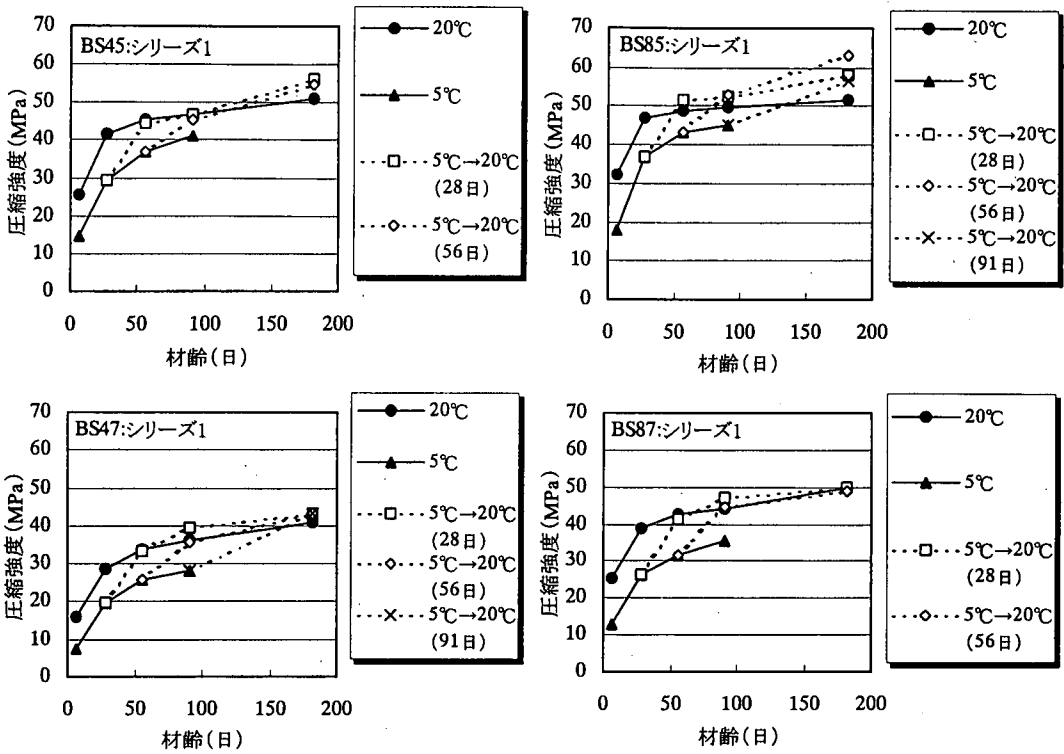


図-5 温度上昇が強度発現に及ぼす影響 (封かん養生, 高流動)

調べた結果である。図より、全ての配合で、温度上昇後、顕著な強度回復を示し、材齢28日及び56日で温度上昇させた場合、その後1ヶ月程度で20℃養生と同程度の圧縮強度が得られる結果となった。さらに置換率50%の配合 (BS45, BS85) では、温度上昇させた場合、材齢182日において20℃養生の圧縮強度を上回ることが確認された。一方、スラグ置換率70%の配合 (BS47, BS87) では、温度上昇後、材齢182日における圧縮強度は20℃養生の圧縮強度とほぼ同じであり、置換率50%の配合と比較して、温度上昇に伴う強度の伸びはやや少ない傾向を示した。このように高炉スラグ微粉末を混和した高流動コンクリートでは、低温養生を継続した場合、常温養生と比較して強度発現が遅延するものの、材齢途中で温度を上昇させることにより顕著に強度が回復し、長期においては常温養生を行った場合と同等かそれ以上の強度発現性を示すことが確認された。図-6に高炉スラグ微粉末を混和しないプレーンな配合 (Plain) の温度上昇に伴う強度回復特性を示す。図より、Plainでは温度上昇後強度発現がある程度回復するものの材齢182日においても20℃養生の圧縮強度に追いついていないことから、高炉スラグ微粉末を混和した配合に比べ、強度の回復が顕著に現れない傾向を示している。

次に、低温下における養生温度が強度回復特性に及ぼす影響について検討を行う。図-7は、打込み後5℃

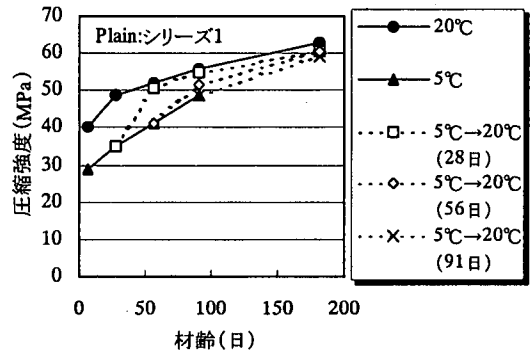


図-6 温度上昇が強度発現に及ぼす影響 (封かん養生, 高流動)

及び0℃一定封かん養生を行った供試体 (BS47, BS85, Plain) を材齢28日において温度上昇させてその後の強度回復特性を調べた結果である。図より、高炉スラグ微粉末を混和した場合 (BS47, BS85), 温度上昇後顕著な強度回復を示し、低温養生を行った際の養生温度に関わらず材齢91日において20℃養生の圧縮強度を上回ることが確認された。すなわち、低温養生時の養生温度は、温度上昇後の強度回復特性の支配的な要因にはならないことが明らかになった。一方、Plainでは、温度上昇後多少強度回復するもののその程度は高炉スラグ微粉末を混和した配合ほど大きくないことが確認された。

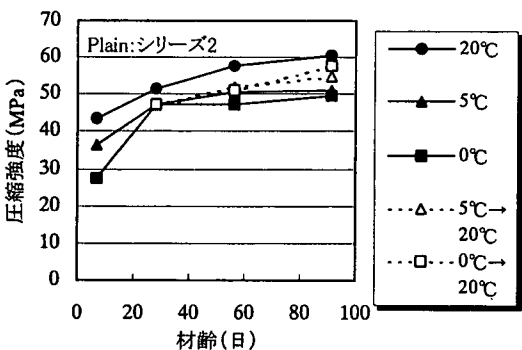
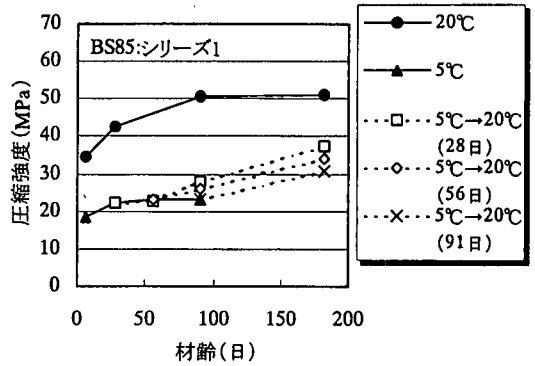
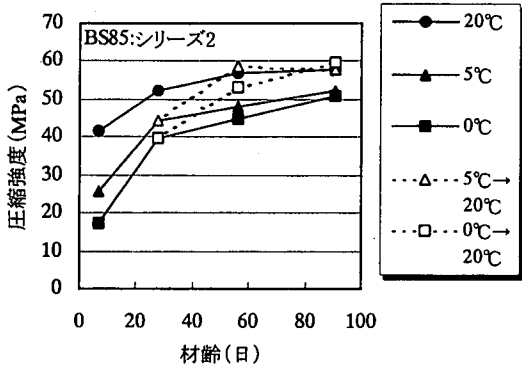
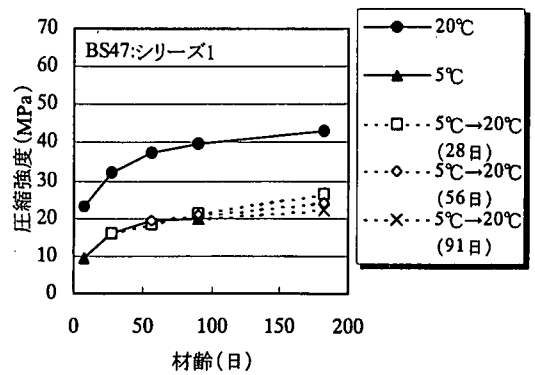
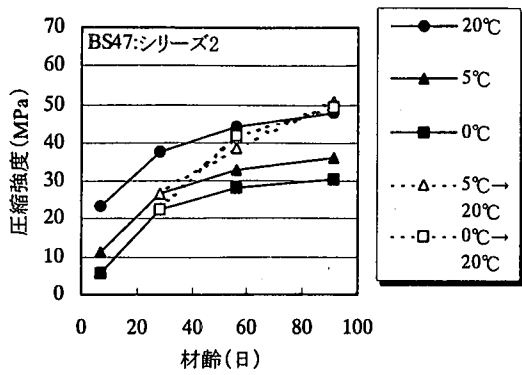


図-8 温度上昇が強度発現に及ぼす影響 (気中養生, 高流動)

図-7 温度上昇前の養生温度が強度発現に及ぼす影響 (封かん養生, 高流動)

うに、寒冷地において気中養生を行った場合、たとえその後温度が上昇したとしても、その時点では水合に必要な水分が不足しており、強度回復が望めないため、やはり寒冷地においては気中養生を避けるべきであると判断される。

図-9に普通コンクリート (BS47, BS85) を対象に材齢途中における温度上昇が強度発現性に及ぼす影響を調べた既往の研究結果を示す。図より、普通コンクリートでは、高流動コンクリートを対象とした供試体ほど温度上昇後の著しい強度回復を示さず、材齢91日において20℃養生の強度発現に近づく程度である。BS47とBS85の強度回復特性を比較すると、反応性に優れたBS85の方が、反応の遅いBS47に比べ、強度回復傾向が早期に現れている。

以上の検討は、封かん養生を行った供試体に対して行ったものであり、材齢の進行に伴いペースト中の水分が蒸発する気中養生においては、温度上昇後の強度回復が十分に期待できない可能性がある。そこで、5℃で気中養生を行った供試体 (BS47, BS85) を材齢28日、56日、91日において20℃に温度上昇させてその後の強度回復特性を調べた。結果を図-8に示す。図より、気中養生を行った場合、温度が上昇しても強度発現はあまり回復せず、特にBS47では温度上昇後の強度増進がほとんど期待できない結果となった。この理由は、反応速度の遅いBS47では供試体中の水分の蒸発が促進し、温度上昇時には水合に必要な水分が供試体中にほとんど残っていないためと推察される。このよ

以上のことから、高炉スラグ微粉末を混和した高流動コンクリートを低温封かん養生した場合、配合によっては長期強度が十分に得られないといった問題が発生するが、冬から春への季節の変化に伴う外気温の上昇を考慮すると、温度上昇後強度発現が顕著に回復し、長期強度はむしろ20℃養生を行った場合の強度を上回ることが明らかになった。このような結果が得られた理由について以下に考察を行う。

一般に高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの材齢初期における強度発現性はセメントの水和反



応によって支配され、材齢が経過するに従い、潜在水硬性により高炉スラグ微粉末の水和が進行すると考えられる。さらに、低温養生下では高炉スラグ微粉末の反応性が著しく低下するため、本研究のように材齢28日あるいは56日まで低温養生を行った場合、低温養生中に高炉スラグ微粉末の水和はあまり進んでいないと推察される。一方、低温養生を行った場合、反応速度は遅いもののセメント粒子周りに急速に水和物層が形成されることはないため、水和物が分散して析出し、緻密な水和組織を形成する上で有利に作用する。そこに温度が上昇することにより、水和反応に対する温度依存性の高い高炉スラグ微粉末の水和が活発に行われたため、極めて優れた強度回復を示したと考えられる。

これに対して、20℃養生を行った場合、打込み直後からセメントの水和反応が活発に進行するため、セメント粒子の周りに密度の高い水和物層が生成し、水和物層を介した水分及びイオンの拡散が次第に抑制される。その結果、初期に低温養生を行った場合と比較すると、材齢長期においては水和組織がポーラスになると考えられる。さらに、封かん養生では供試体外部から水分の供給が行われなため、本研究で対象としている水結合材比の低い配合では、時間の経過とともに水和に必要な水分が不足し、強度発現が停滞すると考えられる。つまり本実験で確認された温度上昇を行った供試体と20℃一定養生を行った供試体の長期における強度発現の逆転現象は、低温養生から養生温度を上昇させたことによる細孔組織の緻密化及び高炉スラグ微粉末の反応促進効果と、20℃一定養生を継続したことによる水和組織の粗雑化及び水分の不足による水和反応速度の停滞が相互に関連した結果であると推察される。

#### 4. 結論

高炉スラグ微粉末を混和した粉体系高流動コンクリートを寒冷地において施工する場合を想定し、様々な配合条件、養生条件、環境条件に対する強度発現性を検討した結果、以下の結論が得られた。

1. 封かん養生を行った高炉スラグ微粉末混和高流動コンクリートは、水中養生と同程度の強度発現性を示すのに対して、気中養生を行った場合、特に低温下で強度発現が大きく低下する結果となった。従って、寒冷地においては気中養生を避けるべきである。
2. 高炉スラグ微粉末4000を置換率70%で混和した配合では、低温下における初期の強度発現が遅延し、場合によっては給熱養生等の補助工法を必要とす

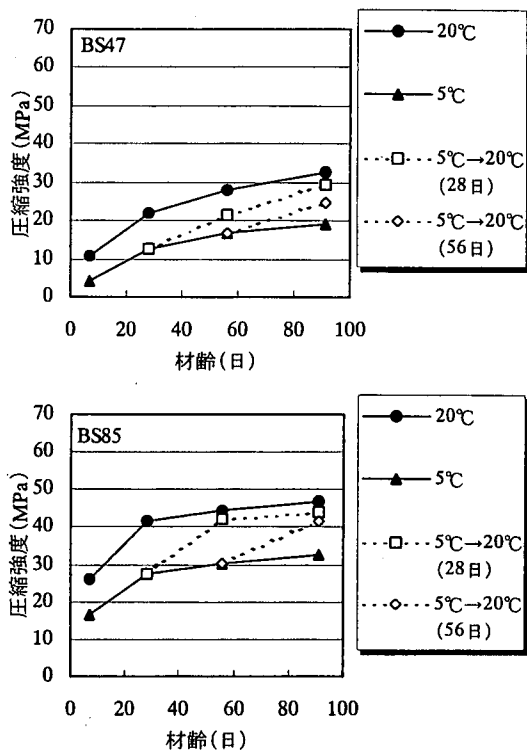


図-9 温度上昇が強度発現に及ぼす影響 (封かん養生, 普通)

ること、また長期においても期待している強度に達しない可能性があることが明らかにされた。一方、高炉スラグ微粉末8000を置換率50%で混和した配合では、低温下においてもある程度の初期強度が期待でき、長期においても良好な強度発現性を示すことが確認された。

3. 高炉スラグ微粉末4000を置換率70%で混和した配合に対して、給熱養生を行った場合、長期の強度発現性には多少問題があるものの、材齢初期の強度発現の改善には有効であることが示された。一方、スラグ置換率を50%とした配合では、給熱養生を行うことにより、5℃養生で期待される強度発現が大幅に低下し、また、高炉スラグ微粉末8000を使用した場合には、給熱養生を行わなくても十分な初期強度が得られ、給熱養生を行った場合には逆に長期の強度発現性に悪影響を及ぼすことから、給熱養生を適用すべきではないと判断される。
4. 材齢途中で5℃から20℃に温度上昇した場合、高炉スラグ微粉末混和高流動コンクリートでは封かん養生を継続している限り顕著に強度発現が回復し、温度上昇後1ヶ月程度で、20℃養生の強度発現を上回ること、また、その傾向は反応性の高い配合でより顕著に現れることが確認された。さらに、温度上昇後の強度回復特性は、低温養生時の養生温

度や温度を上昇させる時期にはあまり依存しないことが明らかになった。ただし、気中養生を行った場合、温度上昇後の強度回復がほとんど期待できないことから、寒冷地においてはやはり気中養生を避けるべきであると判断される。このように、寒冷地においては、コンクリートからの水分の蒸発を極力防ぐ必要がある、現状では、膜養生による対応が考えられる。ただし、長期にわたる保水性が期待できない場合には、養生途中で膜養生剤を再散布する必要が生じるであろう。また、将来的には、これまで以上に優れた施工性、信頼性、耐久性を有する封かん材の開発が望まれる。

以上の検討結果より、高炉スラグ微粉末を混和した高流動コンクリートは、その配合条件、養生条件、環境条件によって強度発現性が大きく異なるため、配合及び施工方法を慎重に検討する必要がある。また、コンクリート打込み後その気候(温度)がどのくらい続くかという点についても考慮に入れておく必要がある。その結果、寒冷地においても要求される強度発現性を十分に満足するとともに、施工性、耐久性に優れたコンクリート構造物が実現すると思われる。

謝辞：本研究に際し、多大な協力を得た当時東北大学大学院博士課程前期2年の関紀宏君（現JR東日本）と同博士課程前期2年の澤井洋介君に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会：高流動コンクリート施工指針，コンクリートライブラリー93，土木学会，1998。
- 2) 土木学会コンクリート委員会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートライブラ

- リー86，土木学会，1996。
- 3) 土木学会コンクリート委員会：高流動コンクリートシンポジウム論文報告集，コンクリート技術シリーズ10，土木学会，1996。
- 4) 高京澤，岩城一郎，三浦尚：初期凍害を受けた高炉スラグ微粉末混和高流動コンクリートの品質低下とその対策，土木学会論文集，No.641/V-641，pp.1-13，2000。
- 5) Miura, T. and Iwaki, I. : Strength development of concrete incorporating high levels of ground granulated blast-furnace slag at low temperatures, *ACI Materials Journal*, Vol.94, No.1, pp.66-70, 2000.
- 6) 鈴木一利，岩城一郎，三浦尚：寒冷地における高炉スラグ微粉末混和コンクリートの強度発現，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19, No.1, pp.247-252, 1997。
- 7) 岩城一郎，鈴木一利，三浦尚：低温養生を行った高炉スラグ混和コンクリートの強度回復特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20, No.2, pp.205-210, 1998。
- 8) 岡村甫，前川宏一，小澤一雅：ハイパフォーマンスコンクリート，技報堂出版，1993。
- 9) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書施工編，土木学会，1996。
- 10) 寒中コンクリート施工指針・同解説，日本建築学会，1998。
- 11) Verbeck, G. J. and Helmuth, R. A. : Structures and physical properties of cement paste, *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Symp. On the Chemistry of Cement*, Vol.3, pp.1-32, 1968.
- 12) Kjellsen, K., O. Detwiller, R. J. and Gorr, O.E. : Development of microstructures in plain cement pastes hydrated at different temperatures, *Cement and Concrete Research*, Vol.21, pp.179-189, 1991.

(1999. 10. 15受付)

## STRENGTH DEVELOPMENT OF SELF-COMPACTING CONCRETE INCORPORATING GROUND GRANULATED BLAST-FURNACE SLAG IN COLD REGIONS

Ichiro IWAKI and Takashi MIURA

The purpose of this study is to reveal the strength development of self-compacting concrete incorporating ground granulated blast-furnace slag (ggbs) constructed in cold weather conditions. First of all, using mortar specimens varying the fineness of ggbs and the replacement level of ggbs, the strength development for various curing methods and curing temperatures is researched. Then the application of heat curing necessary for improving an early strength development at low temperatures is investigated. Finally, considering the change of season at construction site from winter to spring, the properties of strength recovery of self-compacting concrete incorporating ggbs caused by the rise of temperature are discussed.