

論文 高炉スラグ混和コンクリートの強度発現に及ぼす配合及び温度の影響

岩城一郎^{*1}・澤井洋介^{*2}・三浦尚^{*3}

要旨: 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と普通コンクリートを対象としたモルタル供試体を作製し、寒冷地を想定した様々な温度条件下における各配合の強度発現性を比較検討した。その結果、低温封かん養生下における強度発現性、冬から春への季節の変化に伴う温度上昇による強度回復特性、打込み後所定の期間給熱養生を施すことによる強度発現改善効果は、スラグの混和の有無、スラグの粉末度と置換率の組合せ、さらには水結合材比といった配合上の要因によって異なる傾向を示すことが確認された。

キーワード: 高炉スラグ微粉末、強度発現、封かん養生、給熱養生、高流動コンクリート

1. はじめに

近年、コンクリートの強度、流動性、耐久性といった性能を飛躍的に向上させた高性能コンクリートの実用化が進められている。高炉スラグ微粉末は、コンクリートの高性能化を図る上で重要な混和材であり、これを混和したコンクリートは、水和熱による温度上昇の抑制、高流動コンクリートに対する必要粉体量の確保、塩害やアルカリシリカ反応 (ASR) に対する耐久性の向上、さらには資源の有効利用といった効果が期待できるため、今後、コンクリートの多様化が進むにつれ、高炉スラグ微粉末の用途が一層拡大するものと予想される。

寒冷地においてコンクリートを施工する場合、氷点下あるいはそれに近い厳しい施工環境下における打込み作業となるため、作業効率及び構造物の信頼性の低下が懸念される。従って、このような地域では、振動・締固め作業を行うことなく、型枠の隅々までコンクリートを充てんすることが可能な自己充てん性を有する高流動コンクリート¹⁾の施工が望ましいと考えられる。また、寒冷地におけるコンクリート構造物は、一般環境に比べ厳しい気象環境にさらされる上、融雪剤 (NaCl) が散布される環境においては、

凍害、塩害、ASR が著しく助長することが報告されているため²⁾、このような環境にさらされるコンクリート構造物には、耐久性に優れた高炉スラグ微粉末混和コンクリートの使用が望ましいと判断される。従って、今後、寒冷地においても高炉スラグ微粉末を混和したコンクリート (特に高流動コンクリート) の普及が望まれる。

高炉スラグ微粉末は普通ポルトランドセメントと比較し、反応が遅く、特に低温下においてその傾向が顕著に現れるため、寒冷地において高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートを施工する場合、強度発現に問題が生じる恐れがある。著者らはこれまで、寒冷地における様々な養生条件、環境条件を想定し、低温封かん養生を行った場合や冬から春への季節の変化に伴う外気温の上昇を考慮した高炉スラグ微粉末を混和した高流動コンクリート (水結合材比 35%) 及び普通コンクリート (水結合材比 50%) の強度発現性^{3), 4)}、並びに打込み後給熱養生を施した場合の高炉スラグ微粉末を混和した普通コンクリートの強度発現改善効果⁵⁾について研究を行ってきた。しかしながら、水結合材比やスラグの混和の有無といった配合条件の違いが、寒冷地を想定した温度条件下における強度発現性に

*1 東北大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

*2 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻

*3 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

表-1 セメントの試験成績

密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結			安定性	圧縮強さ(N/mm ²)			MgO (%)	SO ₃ (%)	L.O.I (%)	全アルカリ (%)	Cl ⁻ (%)
		水量(%)	始発(h-m)	終結(h-m)		3日	7日	28日					
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 ³)	比表面積 (cm ² /g)	L.O.I (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	活性度指数		
									材齢7日	材齢28日	材齢91日
2.92	4450	0.0	33.2	14.8	0.4	42.6	6.0	0.1	61	99	113
2.91	7980	0.0	33.4	14.5	0.79	42.8	5.58	0.1	113	129	114

表-3 基本となる配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	自己 充てん性 のランク	目標スランプ フロー (mm)	V漏斗 流下時間 (秒)	水結合 材比 (%)	水粉体 容積比 (%)	単位量(kg/m ³)				
						水	セメント	スラグ	細骨材	粗骨材
						W	C	BS	S	G
20	2	650±50	7～13	35	110.3	175	500	0	824	849
					105.7	175	250	250	816	841
					104.0	175	150	350	811	835

及ぼす影響については未だ十分に明らかにされていない。そこで、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及び普通コンクリートの中から各々、強度発現の遅延が懸念される配合と比較的良好な強度発現性を示す配合を選定し、さらに高炉スラグ微粉末を混和しないプレーンな配合を加えた3種類（合計6種類）の配合に対して、低温封かん養生を行った場合、材齢途中で低温から常温に温度上昇させた場合、打込み後所定の期間給熱養生を施した場合の強度発現性を調査し、水結合材比やスラグの混和の有無といった配合条件が、強度発現性に及ぼす影響を比較検討することとした。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

セメントは普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末は JIS 規格品である高炉スラグ微粉末 4000 と高炉スラグ微粉末 8000 の2種類を使用した。表-1、表-2 にセメント及び高炉スラグ微粉末の試験成績結果をそれぞれ示す。細骨材は山砂（宮城県大和町産、密度 2.60g/cm³、粗粒率 2.82、吸水率 2.05%）を使用した。高性能 AE 減水剤はポリカルボン酸エーテル系のもの

を使用した。

本研究は、モルタル供試体により実験を行っている。その理由は、温度条件の違いがコンクリートの強度発現性に及ぼす影響を調べるのであれば、良質な粗骨材を使用し、材料分離の少ないコンクリートである限り、粗骨材の有無が強度発現性に及ぼす影響は小さいと判断されるためである。高流動コンクリートを対象としたモルタルの配合設計は、高流動コンクリート施工指針¹⁾中の配合設計マニュアルに示されているモルタル配合の設定手順及び標準値を遵守し、高性能 AE 減水剤添加量については、既往の文献⁶⁾に従いモルタルフロー試験を行って、所定の高流動性が得られるように調整した。その結果、表-3 に示す水結合材比 35%、スラグ置換率 0%、50%、70% の3種類の配合から粗骨材を取り除くことによりモルタル配合を設定した。一方、普通コンクリートを対象としたモルタルの配合は、水結合材比 50%、水：結合材：細骨材の比を、0.5：1：2.5 に設定し、スラグ置換率を 0%、50%、70% の3水準で変化させることとした。スラグ置換率を 50% 及び 70% に設定した理由は、既往の文献⁷⁾より、高流動性を付与し、かつ ASR の抑制、耐硫酸塩性及び塩分に対する化学抵抗性の向上を目的としたコンクリートを施工する場合、この程度の置換率が下限及

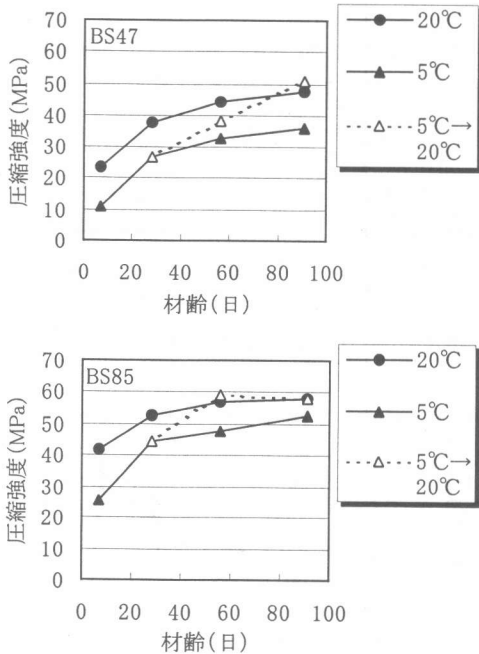


図-1 温度上昇が強度発現に及ぼす影響
(高流動コンクリート)

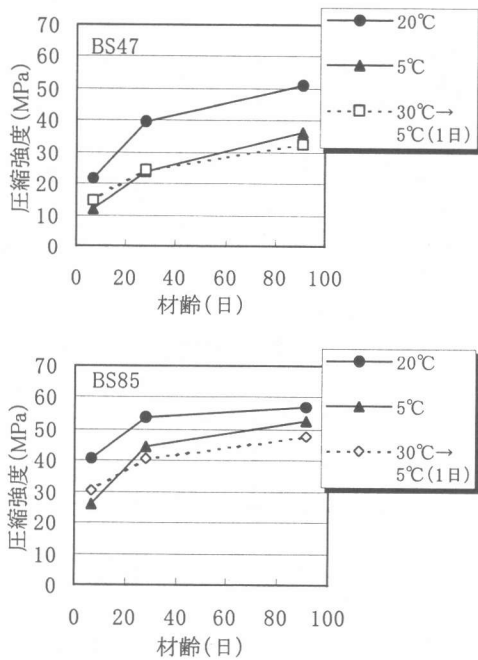


図-2 給熱養生が強度発現に及ぼす影響
(高流動コンクリート)

び上限になると判断されるためである。一般に、スラグを混和したコンクリートは、粉末度が低く置換率が高いほど強度発現が遅延することが知られているため、本研究においては、強度発現の遅延が懸念される配合として高炉スラグ微粉末4000を置換率70%で混和した配合(以下BS47と記す)、比較的良好な強度発現性を示す配合として高炉スラグ微粉末8000を置換率50%で混和した配合(以下BS85)を選定し、各温度条件に対する強度発現性を調べることにした。さらに、高炉スラグ微粉末を混和しないプレーンな配合(置換率0%, 以下Plainと記す)に対しても同様の実験を行い、スラグの混和の有無が強度発現性に及ぼす影響を比較検討した。

2.2 実験方法

モルタルは20°C恒温室内で練り混ぜ、 $\phi 5 \times 10$ cmの円柱型枠に打込み後、標準的な養生温度である20°Cと、寒冷地における日平均気温を想定した温度である5°Cに設定した恒温室内でそれぞれ養生した。また、冬から春への季節の変化に伴う温度上昇がコンクリートの強度回復に

及ぼす影響を調べる実験では、5°C恒温室内で養生を行った供試体を材齢28日で20°C恒温室内に移設し、以降20°C養生を継続した。一方、給熱養生が強度発現性に及ぼす効果を調べる実験では、打込み後30°Cで1日間養生を行った供試体を5°C恒温室内に移設し、以降5°C養生を継続した。養生方法は、寒冷地における現場の状況を想定し、望ましいと判断される封かん養生を採用した。その理由は、寒冷地でコンクリートを施工する場合、気中養生では十分な強度が得られないことがわかっており、また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と考えられるためである。供試体は脱型直後に食品用ラップフィルム及びチャック付きポリエチレン袋で二重に密封し、水分の出入りを遮断した。

3. 実験結果及び考察

図-1に、高流動コンクリートを対象としたBS47、BS85に対して、20°C及び5°C一定養生、並びに材齢28日において5°Cから20°Cに温度上

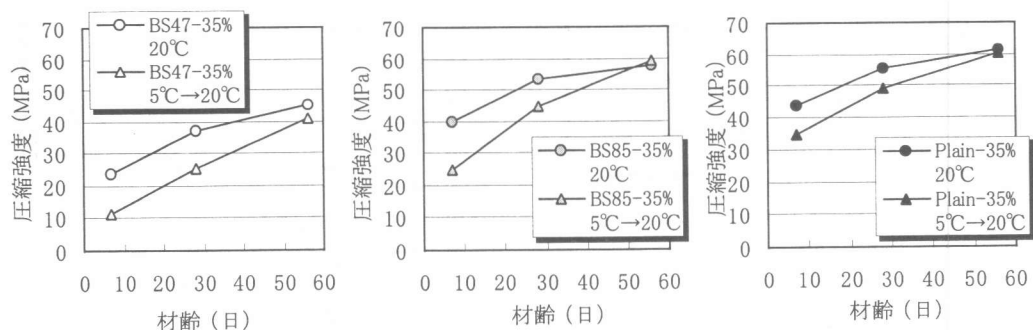


図-3 温度上昇による各配合の強度発現(高流動コンクリート W/B=35%)

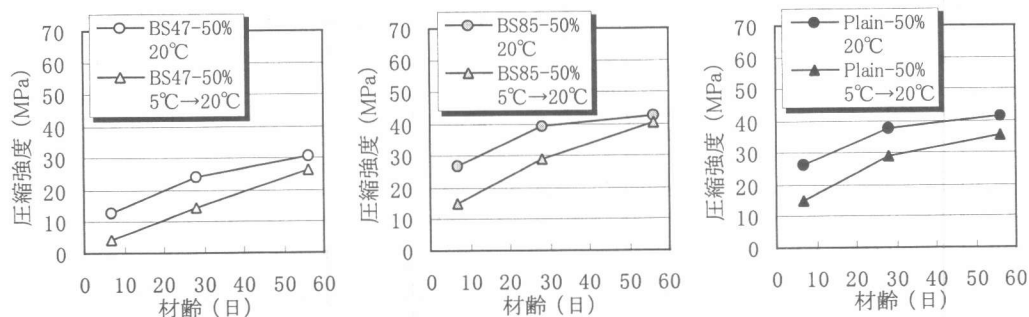


図-4 温度上昇による各配合の強度発現(普通コンクリート W/B=50%)

昇させた場合の強度発現結果を示す。図より、BS47では5℃養生を行った場合、20℃養生と比較して初期の強度発現が著しく遅延し、場合によっては給熱養生を施す必要があると判断される。しかしながら、温度上昇後、強度発現が顕著に増進し、材齢91日において、20℃養生の圧縮強度を上回る結果となった。一方、BS85では、低温養生を行った場合、常温養生と比較して初期の強度発現は多少遅延するものの、温度上昇後、強度発現が急速に増進し、材齢56日で20℃養生の強度を上回ることが確認された。以上の傾向は、既往の研究結果⁴⁾と同様であり、スラグを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、初期の強度発現は遅延するものの、封かん状態が保たれていれば季節の変化に伴う外気温の上昇により、強度発現が顕著に回復することが確認された。

図-2に高流動コンクリートを対象としたBS47、BS85に対して、20℃及び5℃一定養生、並びに打込み後1日間30℃で給熱養生を行い、

その後5℃一定養生を行った場合の強度発現結果を示す。図より、給熱養生を行うことにより、材齢7日の圧縮強度はBS47、BS85ともに改善するものの、BS47では、材齢91日において5℃養生の圧縮強度をやや下回り、BS85では材齢28日時点で5℃養生の強度発現と逆転する結果となった。すなわち、スラグを混和した高流動コンクリートに対して給熱養生を行った場合、初期強度は改善するものの、長期の強度発現性に悪影響を及ぼす可能性のあることが示された。

次に、材齢28日において5℃から20℃に養生温度を上昇させた場合の高炉スラグ微粉末を混和した高流動コンクリートと普通コンクリートの強度発現性を比較検討する。図-3に高流動コンクリートを対象とした配合に対する実験結果を示す。図より、BS47、BS85ともに、低温養生を行った場合、常温養生と比較し、初期の強度発現は遅延するものの、温度上昇後は顕著に強度回復するという図-1と同様の傾向を示している。一方、高炉スラグ微粉末を混和しない配合

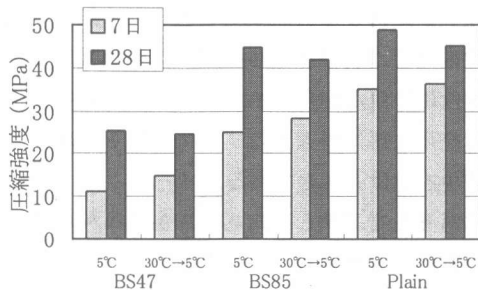


図-5 給熱養生が強度発現に及ぼす影響
(高流動コンクリート:W/B=35%)

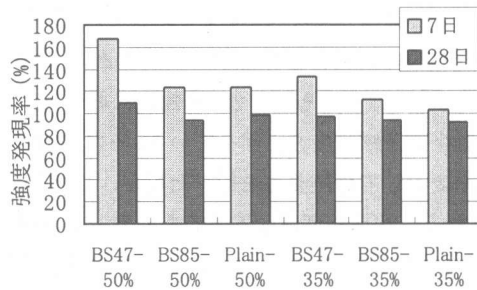


図-7 5°C養生に対する給熱養生の強度発現率

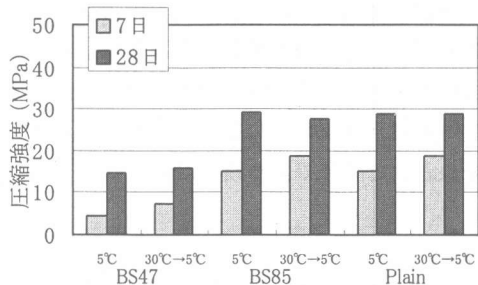


図-6 給熱養生が強度発現に及ぼす影響
(普通コンクリート:W/B=50%)

(Plain) では、スラグを混和した配合と比較して、低温養生下における初期の強度発現性に優れており、温度上昇後も強度発現が増進し、材齢 56 日において 20°C 養生の圧縮強度にかなり近づく傾向を示している。図-4 に普通コンクリートを対象とした配合に対する実験結果を示す。図より、BS47 に対して低温養生を行った場合、材齢 7 日の圧縮強度が 4.5MPa と非常に低く、初期凍害を含む耐凍害性の面から問題が生じる恐れがある。しかしながら、温度上昇後は強度発現が増進し、材齢 56 日において、20°C 養生の強度発現にかなり近づく傾向を示している。また、BS85 については、BS47 に比べ低温養生下における強度発現が良好で、温度上昇後も強度発現が顕著に増進し、材齢 56 日においてほぼ 20°C 養生の強度発現に追いついている。一方、スラグを混和しない Plain では、20°C 養生及び材齢 28 日までの 5°C 養生の強度発現は BS85 と同等であるが、温度上昇に対する強度発現増進傾向は緩慢で、材齢 56 日において 20°C 養生の圧縮強度とはかなりの開きが生じる結果となった。各

配合の材齢 56 日における 20°C 養生の圧縮強度に対する温度上昇させた場合の圧縮強度の値に着目すると、BS47、BS85、Plain とともに高流動コンクリートの方が普通コンクリートに比べ、強度回復傾向が顕著に現われている。

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、材齢途中で温度上昇させた場合、顕著な強度回復を示したが(図-1、図-3 参照)、その理由は、スラグの反応性が温度に依存しやすいこと、すなわち低温では反応性が低下するものの、温度上昇に伴い反応が活性化する性質と、水結合材比の低い配合では、常温養生を行うと比較的に早期に反応に必要な水分が不足し、水和度が 100% に達しないうちに強度発現が頭打ちの傾向を示すことによる相互作用であると考えられる。また、普通コンクリートでは、高流動コンクリートと比較し、水結合材比が高く、材齢が経過しても水和に必要な水分が残存しているため、20°C 養生においても長期にわたり水和が進行したことが温度上昇させても 20°C 養生の強度発現に追いつかなかった一因であると推察される。

次に、打込み後 1 日間 30°C で給熱養生を行った場合の高炉スラグ微粉末を混和した高流動コンクリートと普通コンクリートの強度発現性について比較検討する。図-5 より、高流動コンクリートを対象とした配合では、BS47、BS85、Plain とともに給熱養生を施すことにより、7 日強度は 5°C 養生と比較し改善するものの、28 日強度は、BS47 で 5°C 養生と同等、BS85、Plain に対しては、5°C 養生と比較してむしろ低下してい

る。一方、図-6 より、普通コンクリートを対象とした BS47 に対して給熱養生を施すと、7 日強度が改善するとともに、28 日強度においても 5℃養生の圧縮強度を上回っている。一方、BS85, Plain に対して給熱養生を行った場合、5℃養生と比較し、初期強度は改善するものの、28 日強度は、下回る結果となった。図-7 に給熱養生を行った場合の圧縮強度を同一材齢、同一配合の 5℃養生を行った場合の圧縮強度で除して百分率で表した結果（強度発現率）を示す。つまり、強度発現率は、100%以上で、その値が高いほど給熱養生の効果があったと判断される。図より、給熱養生を施すことにより初期の強度発現に特に効果のあった配合は高流動コンクリート、普通コンクリートともに BS47 であり、低温下において初期の強度発現が遅延する配合ほど、逆に給熱養生による効果が期待できる結果となった。一方、高流動コンクリートを対象とした BS85 及び Plain、並びに普通コンクリートを対象とした BS85 に対しては、材齢 28 日の強度発現率が 100%を下回っており、低温下において比較的良好な強度発現を示すこれらの配合に対してはむしろ給熱養生を行うべきではないと判断される。また、普通コンクリートと高流動コンクリートの強度発現率を比較すると、普通コンクリートに比べ、高流動コンクリートで強度発現率が材齢 7 日、28 日ともに低下しており、水結合材比の低い配合では、給熱養生の効果が薄れることが確認された。このように給熱養生を行なうことにより、各配合条件に対する強度発現傾向に違いが見られた理由は、給熱養生による初期の水と反応の促進とその後の細孔組織の粗雑化が影響していると考えられる。この点については、今後、各温度条件に対するセメント及びスラグの反応性及び細孔構造に着目し、より詳細な検討を行う必要がある。

4. 結論

本研究により得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 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施すと、初期の強度発現は改善するものの、比較的強度発現性に優れた配合（BS85）では、長期の強度発現に悪影響を及ぼすため、むしろ給熱養生を避けるべきである。

- (2) 常温養生を基準とした場合の温度上昇に伴う強度回復傾向は、普通コンクリートに比べ高流動コンクリートを対象とした水結合材比の低い配合でより顕著に現れる。
- (3) 給熱養生による初期の強度発現改善効果は、低温下において初期の強度発現が懸念される配合（BS47）、及び高流動コンクリートに比べ水結合材比の高い普通コンクリートを対象とした配合でより顕著に現れる。

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，土木学会，1998.7
- 2) 融雪材によるコンクリート構造物の劣化研究委員会：報告集・論文集，日本コンクリート工学協会，1999.11
- 3) 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, 1997.6
- 4) 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, 1998.6
- 5) Miura, T. Iwaki, I. : Strength development of concrete incorporating high levels of ground granulated blastfurnace slag at low temperatures, ACI Materials Journal, Vol.97, No.1, pp.66-70, 2000.2
- 6) 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
- 7) 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，土木学会，1996.6