

論文 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

岩城一郎^{*1}, 鈴木一利^{*2}, 三浦尚^{*3}

要旨：一般に高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートはスラグを混和しないコンクリートと比較して養生温度の影響を受けやすく、低温養生を行うと強度発現の遅延を招くことが知られている。しかし、季節の変化に伴う温度の上昇を考慮した本研究結果から、比較的若い材齢で温度が上昇することにより、コンクリートの強度が顕著に回復することが明らかになった。その傾向は、水結合材比 50%の一般のコンクリートを想定した配合と比べ、高流動コンクリートを想定した水結合材比 35%の配合でより顕著に現れた。そして、5℃一定封かん養生、あるいは0℃一定封かん養生を行っても養生途中で温度が20℃に上昇することにより、20℃一定封かん養生を行った場合の圧縮強度を追い越す結果となった。

キーワード：高炉スラグ微粉末、低温養生、強度回復、封かん養生、高流動コンクリート

1. はじめに

コンクリートの性能向上、高流動コンクリートや高強度コンクリートの普及、資源の有効利用といった点から、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの施工例が増えてきた。高炉スラグをコンクリートの混和材として用いることの利点として、単位水量の低減、粉末度の大きいものにおけるブリーディングの抑制、長期材齢における強度増進、セメントに対する置換率の増加による水和熱の抑制、水密性、耐久性の向上、アルカリ骨材反応の抑制効果などが明らかにされている¹⁾。反面、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートは、普通ポルトランドセメントのみを使用したコンクリートと比較して、初期強度が低下したり、低温環境下では強度発現の遅延を招くといった欠点が指摘されている。さらにこの傾向は高炉スラグ微粉末の粉末度が小さく、置換率が大きいほど顕著に現れるため、寒冷地で高炉スラグ微粉末混和コンクリートを施工する際には、高炉スラグ微粉末の粉末度や置換率を慎重に選定した上で養生方法について十分な検討を行う必要がある²⁾。

寒冷地で冬期にコンクリートを打設する場合であっても、冬から春へと季節が変化することによって外気温が上昇する。高炉スラグは水和反応に対する温度依存性が高いため、低温では強度発現が低下するものの、温度が上昇すれば水和が促進し、強度が回復することが予想される。実際に水結合材比 50%、粉末度 4000cm²/g から 8000cm²/g の高炉スラグ微粉末を置換率 50%または 70%で混和したモルタル供試体による既往の研究結果³⁾から、養生途中で温度を 5℃から 20℃に上昇させることにより強度が十分に回復することが確認されている。

そこで本研究では、高流動コンクリートを想定した水結合材比 (W/B) 35%のモルタル供試体を封かん養生し、養生途中で温度を 5℃(あるいは 0℃) から 20℃に上昇させた後の強度回復特性を調べた。さらに、この性質は養生時の構造物の乾燥状態にも大いに依存すると考えられるため、気中養生においても同様の実験を行い、養生方法の違いが温度上昇後の強度回復に及ぼす影響についても検討した。

*1 東北大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻 工修 (正会員)

*2 秋田県庁 工修 (正会員)

*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)

Table-1 Physical properties and chemical analyses of cement

Specific gravity	Blaine (cm^2/g)	Set			Strength			MgO (%)	SO ₃ (%)	ig.loss (%)	Cl ⁻ (%)
		Water (%)	Initial (h-m)	Final (h-m)	3days (MPa)	7days (MPa)	28days (MPa)				
3.15	3290	27.9	2-22	3-34	16.9	27.0	42.0	1.5	1.8	1.7	0.006

Table-2 Physical properties and chemical analyses of GGBS

Blaine (cm^2/g)	Specific gravity	ig.loss (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	TiO ₂ (%)	MnO (%)
4100	2.90	0.1	33.1	13.9	0.2	42.2	6.7	1.1	0.3
7950	2.90	0.1	33.2	14.2	0.2	42.1	6.8	1.2	0.3

Table-3 Examples of mix proportion of self-compacting concrete

W/B (%)	Air (%)	W/C (%)	GGBS/B (%)	s/a (%)	Unit mass (kg/m^3)				
					W	C	GGBS	S	G
35	4.5	35	0	52	175	500	0	824	849
	4.5	70	50	52	175	250	250	816	841
	4.5	117	70	52	175	150	350	811	835

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（以下図表中では **GGBS** と記す）はプレーン比表面積 $4100\text{cm}^2/\text{g}$ と $7950\text{cm}^2/\text{g}$ の2種類を使用した。**Table-1**、**Table-2** に普通ポルトランドセメントと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、比重 2.53、粗粒率 2.71）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。

配合は、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想定し、水結合材比 35%、単位結合材量 $500\text{kg}/\text{m}^3$ 、スラグ置換率を 0%、50%、70% の3水準とした。モルタル供試体の配合は、**Table-3** に示す一般的な高流動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、混和剤は各配合の流動性がほぼ一定となるよう文献 4) のフロー試験に従い、相対フロー面積比が 5.0 ± 0.5 となるように高性能 AE 減水剤を用いて調整した。

2.2 実験方法

本研究の目的は、低温養生を行った高炉ス

ラグ微粉末混和コンクリートの強度回復特性に及ぼす水結合材比、スラグの粉末度及び置換率、養生方法といった影響を明らかにすることである。本研究ではこれらの要因による高炉スラグ微粉末混和コンクリートの強度回復特性に及ぼす影響はモルタルによっても十分評価が可能であると判断し、モルタル供試体により実験を行うこととした。

モルタルは練混ぜ後 $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の円柱型枠に打設し、 20°C 一定及び 5°C 一定恒温室に静置した。一部の配合については 0°C 一定養生についても実験を行った。 5°C あるいは 0°C 一定養生を行った供試体の一部は材齢 28 日、56 日で 20°C 一定恒温室に移設し、以後 20°C 一定養生を継続した。養生温度上昇後の強度回復傾向はモルタル圧縮強度を測定することにより調べた。圧縮強度試験は各養生条件に対して材齢 7 日、28 日、56 日、91 日（一部 182 日）で行った。

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。ただし、一部の配合では、気中養生についても封かん養生と同じ実験方法により養生途中で温度を上昇させて、強度回復傾向を調べた。封かん養生では、供試体を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。気中養生では、平均湿度約 70%の恒温室にそのまま放置した。

3. 実験結果及び考察

Fig.1 に昨年度実施した研究結果の一例として、水結合材比 50%、粉末度 $4100\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を置換率 70%で混和した配合（以下 GGBS4000/70 と記す）の圧縮強度測定結果を示す。図より、 5°C 一定封かん養生を行った場合、 20°C 一定封かん養生と比較して、半分程度の圧縮強度しか得られないが、材齢 28 日で養生温度を 20°C に上昇させることにより材齢 91 日以降で、 20°C 一定養生の約 90%まで強度が回復する結果となった。この傾向は材齢 56 日で養生温度を上昇させた場合も同様で、材齢 182 日で比較すると材齢 56 日で温度を上昇させた場合、材齢 28 日で温度を上昇させた場合と比べむしろ強度が高くなった。以上のような強度回復傾向は水結合材比 50%で高炉スラグ微粉末を混和した全ての配合についてほぼ共通して観察された。

Fig.2 及び Fig.3 に本研究で行った水セメント比 35%のスラグを混和していないプレーンな配合（以下 Plain と記す）と水結合材比 35%、粉末度 $4100\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を置換率 50%で混和した配合（以下 GGBS4000/50 と記す）の 5°C 一定養生から養生温度を上昇させた場合の強度発現結果を示す。Fig.2 より、高炉スラグを混和しない配合については、低温養生下でも材齢 7 日で 30MPa に近い十分な強度が得られており、さらに養生温度の上昇に伴い、強度が増進している。これに対して、GGBS4000/50 では低温養生下における材齢初

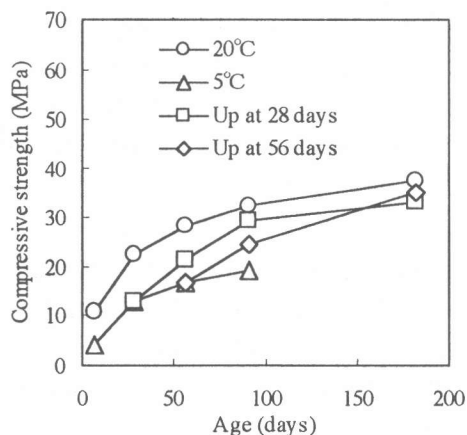


Fig.1 Strength development of GGBS4000/70, W/B=50%

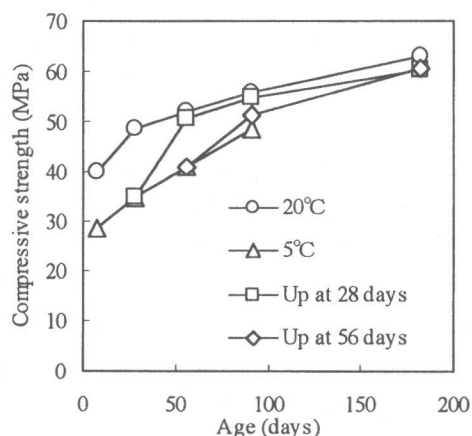


Fig.2 Strength development of Plain, W/C=35%

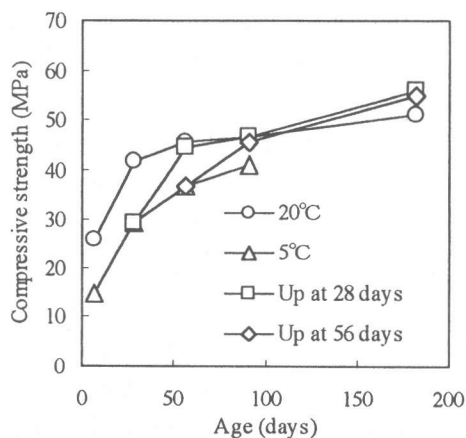


Fig.3 Strength development of GGBS4000/50, W/B=35%

期の強度は非常に低いものの、材齢 28 日、56 日で養生温度を上昇させると温度上昇後 1 ヶ月程度で 20℃一定養生の強度にほぼ追いつき、さらに材齢 182 日においては 20℃一定養生の強度を追い越す結果となった。

このように、高炉スラグ微粉末を混和した水結合材比 35%の配合で温度上昇後の強度回復傾向が顕著に現れた理由を以下に考察する。

一般に高炉スラグ微粉末混和コンクリートの材齢初期における水和はセメント成分の反応によって支配され、材齢が経過するに従い、スラグの潜在水硬性により高炉スラグの水和が進行すると考えられる。さらに、低温養生下ではスラグ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、低温養生中にスラグの水和はほとんど進んでいないと推察される。一方、低温養生を行った場合、セメント粒子表面近くに急速に水和生成物層が形成されることはないため、緻密な水和組織を形成する上で有利に作用する。そこに養生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℃一定養生を行った同じ配合では、材齢初期よりセメントの水和反応が活発に進行するため、セメント粒子のまわりに密度の高い水和物膜が生成し、セメント成分の溶解・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いため、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、強度発現が頭打ちになると考えられる。つまり Fig.3 で見られる強度の逆転現象は、低温養生から養生温度を上昇させたことによる組織の緻密化及び高炉スラグ微粉末の水和促進効果と、20℃一定養生を継続したことによる水和組織の粗雑化

と水分の不足による強度発現の頭打ちが相互に関連した結果であると考察される。

このように、初期の低温養生とその後の温度上昇が、高炉スラグ微粉末の水和反応を促進し、顕著な強度回復を引き起こすのであれば、構造物が凍結しない範囲で低温養生を行えば強度の回復は期待できると予想される。

Fig.4 及び Fig.5 は、本研究の対象範囲で最も強度発現が遅いと思われる配合（スラグ粉末度 4100cm²/g、置換率 70%：GGBS4000/70）と最も強度発現が優れていると判断される配合（スラグ粉末度 7960cm²/g、置換率 50%：GGBS8000/50）について、低温養生時の温度を 0℃に下げて封かん養生を行い、材齢 28 日、56 日で養生温度を 20℃に上昇させた場合の強度回復傾向を測定したものである。これらの図より、GGBS4000/70 では、0℃一定養生の材齢 7 日における強度がわずか 5MPa 足らずであるのに対し、GGBS8000/50 では、同じ条件下で 15MPa 近い強度が得られている。しかしながら、材齢 28 日、56 日でそれぞれ養生温度を 20℃に上昇させることにより、どちらの配合でも著しい強度回復を示しており、温度上昇後わずか 1 ヶ月程度で 20℃一定養生の強度と同等もしくはそれ以上に強度が回復する結果となった。これらの結果は、5℃一定養生から温度を上昇させた GGBS4000/50 の強度回復と同等かむしろ上回る傾向を示した (Fig.3 参照)。以上の結果から、本研究で対象とした一般的なスラグ粉末度及び置換率を適用した高流動コンクリートであれば、初期に低温養生を行っても、その後の温度上昇に伴い、著しく強度が回復すると思われる。さらに、この傾向はスラグ粉末度や置換率、並びに低温養生時の温度 (0℃または 5℃) によらず常温養生を行った供試体と同等かそれ以上の強度発現が期待できる結果となった。

Fig.5 に 20℃一定水中養生を行った場合の強度発現結果 (20℃ in water) を併せて示す。図より、材齢 28 日までは封かん養生と水中養生

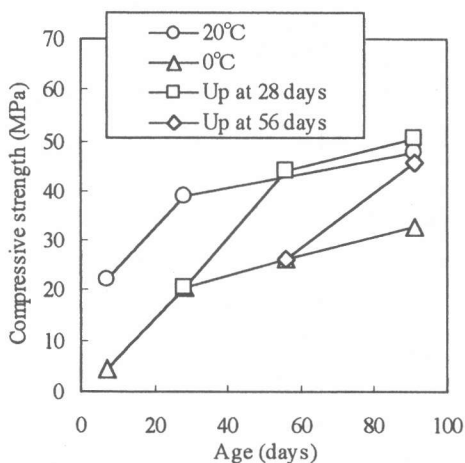


Fig.4 Strength development of GGBS4000/70, W/B=35%

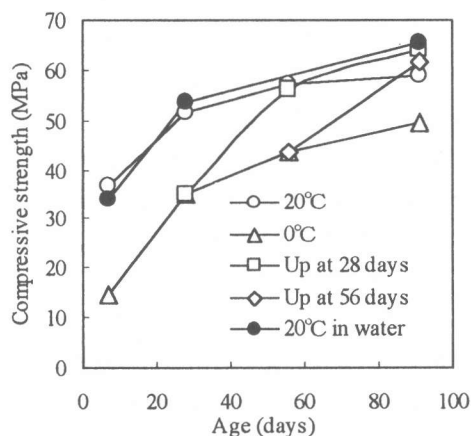


Fig.5 Strength development of GGBS8000/50, W/B=35%

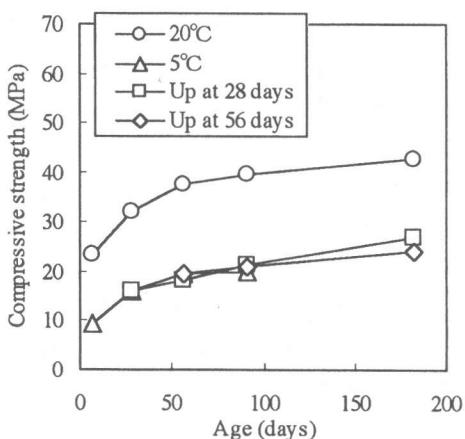


Fig.6 Strength development of GGBS4000/70, W/B=35% (Atmospheric curing)

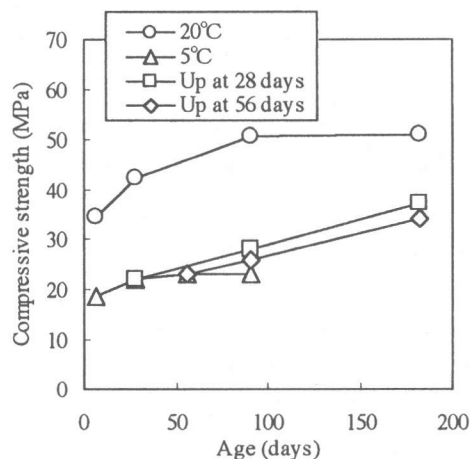


Fig.7 Strength development of GGBS8000/50, W/B=35% (Atmospheric curing)

の強度がほとんど変わらないのに対し、その後徐々に封かん養生を行った供試体の強度発現が低下し、材齢 91 日では、水中養生を行った供試体の圧縮強度の約 90%となった。この強度低下の理由は、封かん養生では外から水分が供給されないため、水和に必要な水分が不足してしまったためであると考えられるが、封かん養生を確実にすることにより、材齢長期においても水中養生を継続したものに近い強度が期待できることが確認された。

このように、封かん養生を行うことにより、養生途中から温度が上昇することに伴う強度回復が十分に期待できるという結果が得られたが、養生中に構造物内部から水分が継続して蒸発する気中養生においては十分な強度回復が得られない恐れがある。そこで、気中養生についても封かん養生と同じ温度条件で実験を行い、養生中の乾燥状態が温度の上昇に伴う強度回復に及ぼす影響について調べることにした。

Fig.6, Fig.7 に水結合材比 35%, GGBS4000/70

及び GGBS8000/50 の配合に対して気中養生を行い、養生温度を 0℃から材齢 28 日、56 日で 20℃に上昇させた場合の強度回復傾向を測定した結果を示す。これらの図より、20℃一定気中養生を行った場合の材齢 7 日での圧縮強度は、封かん養生や水中養生を行った場合の強度と変わらない結果が得られているが、その後徐々に強度発現が低下し材齢 91 日で頭打ちになっている。つまり、気中養生では、材齢 7 日までは水中養生とほとんど変わらない水分状態を保持しているが、その後の水分の蒸発に伴い、強度発現が低下したと考えられる。一方、温度の上昇に伴う強度回復に着目すると、GGBS8000/50 でわずかな強度回復が確認されたものの、強度発現性の劣る GGBS4000/70 ではほとんど強度回復が期待できない結果となった。このことは、温度が上昇する材齢 28 日、56 日では供試体中のかなりの水分が蒸発してしまったため、高炉スラグの水和がほとんど起こらなかったことを示している。このように温度の上昇に伴う強度回復は、適用する養生方法により全く異なる傾向を示すため、養生方法の選定に当たっては十分に注意する必要がある。そして温度上昇に伴う強度回復効果も含めて長期にわたる強度発現を期待する場合にはやはり封かん養生を適用することが重要であると判断される。

4. 結論

本研究により得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 低温で封かん養生を行った高炉スラグ微粉末混和コンクリートは、その後の温度上昇に伴い、顕著に強度が回復する。その傾向は、水結合材比 50%の一般のコンクリートを想定した配合と比べ、水結合材比 35%の高流動コンクリートを想定した配合の方がより顕著に現れる。
- (2) 低温で気中養生を行った場合、その後の温度上昇に伴う、強度回復効果はほとんど期待できない。
- (3) 寒冷地で高炉スラグ微粉末混和コンクリー

トを施工する場合、その後、その気候がどの位継続するかを的確に判断し、所定の強度発現が得られるよう、配合、養生方法について慎重に検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 堺 孝司・渡辺 宏・下林清一：高炉スラグ高微粉末を用いた低発熱高強度コンクリート，土木学会論文集，No.544/V-32，pp.187-203，1996.8
- 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，土木学会，1996
- 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) 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
- 5) 内川 浩：混合セメントの水和および構造形成に及ぼす混合材の効果，セメント・コンクリート，No.484，pp.81-93，1987.6
- 6) 大門正機他：わかりやすいセメント科学，セメント協会，1993.3