

高炉スラグ微粉末を大量使用したコンクリート

伊代田 岳 史*

1. はじめに

コンクリート用の混和材として日本でもっとも利用されているのが高炉スラグ微粉末である。高炉スラグ微粉末は、粉末度により 3000, 4000, 6000, 8000 の 4 種類が JIS 規格化されており、その用途はさまざまである。また、置換率によりそれを用いたコンクリートは大きく変化することも知られている。そこで、ここではまず高炉スラグ微粉末の特徴と粉末度の相違による用途などを整理したうえで、置換率を変化させたコンクリートの性質について、整理する。その上で、大量使用した場合の利用についての注意点や着眼点についてまとめる。なお、この報告はこれまでに各学協会にて報告されている内容を取りまとめ、そのトレース実験として筆者が新日鐵高炉セメント（現日鉄住金高炉セメント）に勤務していた時に取得したデータを主として取りまとめたものである。

2. 高炉スラグ微粉末の特徴と比表面積の相違による使用用途

高炉スラグ微粉末は、潜在水硬性を有していることが知られており、アルカリ刺激により化学反応して硬化する。この反応は一般的なポゾラン物質とは異なり、アルカリをあまり消費しないといわれる。そのため、少量のアルカリ刺激剤を用いることで、高炉スラグ微粉末単味で硬化する特徴を有する。

結合材として使用する際には、ポルトランドセメントの代替として利用されることが多いため、使用するポルトランドセメント量が低減し、クリンカ焼成時に生成する CO₂ 発生量を低減することができる。加えて、一般的に高炉スラグ微粉末を使用することで単位水量を低減でき、使用セメント量を減らす効果が期待できるため環境負荷低減となる。また、使用するセメントを減少させることで、セメントからのアルカリ供給量が低減し、中性化抵抗性は低下するがアルカリシリカ反応への抵抗性は向上する。またスラグ中に存在する Al₂O₃ により、塩分遮蔽性や耐硫酸塩性や海水作用に対する抵抗性も向上する。一方でセメント置換によりクリンカ量が減少し初期の反応が遅延するが、セメント中の C₃S の反応が抑制されることで、養生を行えば長期強度の伸びを期待する

* いよだ・たけし／芝浦工業大学 工学部土木工学科 准教授（正会員）

表-1 高炉スラグ微粉末の JIS 規格 (JIS A 6206 : 2013)

品 質		高炉スラグ 微粉末 3000	高炉スラグ 微粉末 4000	高炉スラグ 微粉末 6000	高炉スラグ 微粉末 8000
密 度	g/cm ³	2.80 以上	2.80 以上	2.80 以上	2.80 以上
比表面積	cm ² /g	2750 以上	3500 以上	5000 以上	7000 以上
		3500 未満	5000 未満	7000 未満	10000 未満
活性度指数 %	材齢 7日	—	55 以上	75 以上	95 以上
	材齢 28日	60 以上	75 以上	95 以上	105 以上
	材齢 91日	80 以上	95 以上	—	—
フロー値比	%	95 以上	95 以上	90 以上	85 以上
酸化マグネシウム	%	10.0 以下	10.0 以下	10.0 以下	10.0 以下
三酸化硫黄	%	4.0 以下	4.0 以下	4.0 以下	4.0 以下
強熱減量	%	3.0 以下	3.0 以下	3.0 以下	3.0 以下
塩化物イオン	%	0.02 以下	0.02 以下	0.02 以下	0.02 以下

こともできる。このように結合材として考えた場合には、材料そのものが水と反応するという特徴から幅広いメリットが得られる反面、デメリットも存在する。そのため要求性能を明確にすることが、高炉スラグ微粉末を利用するかどうか、判断するために必要になる。

また前述したように、高炉スラグ微粉末は表-1 のように JIS では比表面積により 4 種類に分類されており、それぞれ使用用途が異なる。比表面積を大きくすれば、反応性が改善され初期強度の確保に役立つ。そのため、コンクリート製品工場などで利用されることが多い。また、微粉末とすると流動性が高くなることが知られており、ひび割れ補修材などの流動性が高く粘性が高い特徴を必要とする場面で用いられる。一方で、比表面積を小さく設定すると、反応が遅延することから水和熱抑制効果が認められる。この性質を利用して、2012 年に比表面積の小さい規格である高炉スラグ微粉末 3000 が新設され、またこれを混和することにより一般高炉セメントと同等の規格値内で低発熱型高炉セメントの開発に至っている。しかしながら、比表面積が小さいものまた大きいものが大量に製造されているわけではなく、一般的には高炉スラグ微粉末 4000 相当品がもっとも多く販売されているのが現状である。

3. 高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの 特徴

3.1 配(調)合と熱特性に与える影響

(1) 単位水量・空気量

高炉スラグ微粉末が無混入のコンクリートと同程度の

表-2 高炉スラグ微粉末添加による単位水量増減表⁷⁾

比表面積 (cm ² /g)	置換率 (%)	単位水量	細骨材率
4000 6000	30	3～4%減	補正なし
	50	4～5%減	
	70	5～6%減	
8000	30	2～3%減	
	50	3～4%減	
	70	4～5%減	

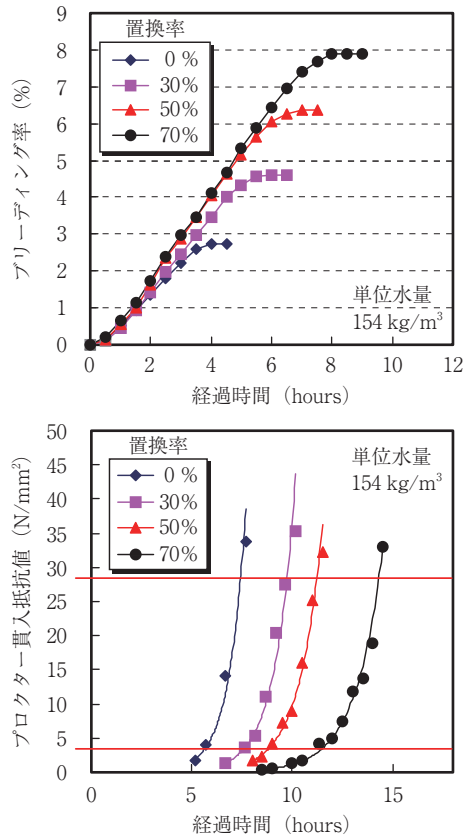


図-1 置換率の相違によるブリーディング率と凝結

ワーカビリティや流動性を得るための高炉コンクリートの単位水量は表-2⁷⁾のように補正するとよいとされる。一方で同程度の空気量を得るためには、空気補助剤の添加量を高炉スラグ微粉末の置換率が大きくなるほど若干多めに添加する必要がある。

(2) ブリーディング・凝結

図-1は水セメント比45%のコンクリートで同一単位水量 154 kg/m³で高炉スラグ微粉末の置換率を0, 30, 50, 70%と変化させたときのブリーディング率と凝結（プロクター貫入抵抗値）の測定結果の一例である。図から、置換率が大きくなるほど反応が遅くなることからブリーディング量が多くなり、凝結時間も遅くなることがわかる。

(3) 断熱温度上昇

一般環境である20℃での水和熱は置換率にほぼ比例して低減する傾向がある。しかしながら、断熱状態における発熱環境では、図-2に示すように一概に置換率で整理できない。大量に使用した場合には、上昇速度ならびに到達温度は著しく低減され、マスコンクリート等の

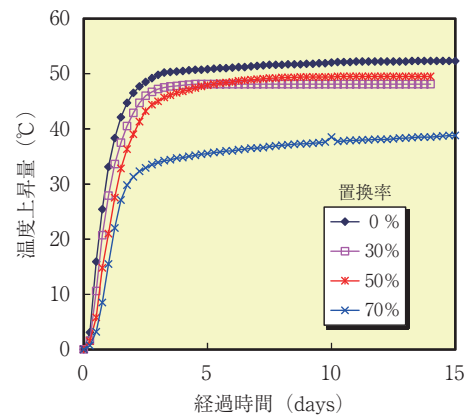


図-2 置換率の相違による断熱温度上昇試験結果

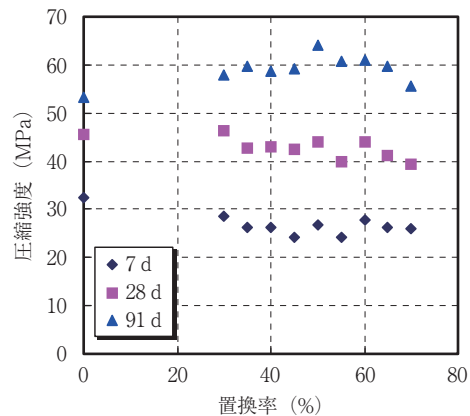


図-3 置換率の相違による圧縮強度の相違

発熱に注意が必要な構造物への適用が可能となる。一方で置換率が小さい場合には、温度上昇速度は低減されるものの、最高到達温度は無混入の場合に比べて大きくなることもある。これは、高温環境になると高炉スラグ微粉末の反応が活性化すること起因しており、反応の温度依存性が高いことを意味している。セメントから生成する水酸化カルシウムと高炉スラグ微粉末の量に関係しているものであり、置換率が50%程度では、反応活性に伴い、発熱量が増加する。しかし、置換率が60%を超えるとセメントから生成する水酸化カルシウムが少ないため、高炉スラグ微粉末の活性化を促す量に到達できず、スラグ自身の反応量も減少することが推測される。

3.2 力学的性状

(1) 圧縮強度

高炉スラグ微粉末混入率の増加に伴い、図-3のように初期強度発現が低下していくことがわかる。これは、高炉スラグ微粉末が混入したことによるクリンカ量の減少に加え、クリンカの水和反応ならびに高炉スラグ微粉末の水和反応によるものと考えられる。

一般的に高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは長期強度増進が大きいことが知られている。図-3は水中養生を行った試験体の91日圧縮強度を表したものであるが、高炉スラグが混和されることで長期に向けて強度増進していることが見て分かる。

一方、実環境に曝されたコンクリート試験体では、一概に長期強度増進が著しいとはいえない。長期間実環境に曝されていたコンクリートからは水酸化カルシウムの溶脱などの影響からか、強度低下も認められている。

(2) ヤング係数

ヤング係数は、一般的には圧縮強度と一定の関係があることが知られている。高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートにおいても標準養生の場合であれば、圧縮強度の増加に伴い、大きな値をとる傾向が認められる。置換率が高くなってもその傾向は同程度であり、高炉スラグ微粉末が無混入のコンクリートとの差もほとんど認められない。しかしながら、温度履歴を伴う場合や乾燥を伴う場合には、その関係が維持できるとは限らないとの報告もあり、未解明な部分が多い。

3.3 各種物理的性状

(1) 空隙構造

高炉スラグ微粉末の置換率を変化させたモルタルの空隙構造を水銀圧入式ポロシメータで測定した数多くの結果を分析すると、基本的に総空隙量は高炉スラグ微粉末の有無で変化しないのに対し、構成されている空隙径が小さな径にシフトしていることが見られる。高炉スラグ微粉末の使用により、10 nm 以下の空隙が大量に存在している結果となっている。そのため、高炉スラグ微粉末を使用することで緻密な構造をとると考える説もある。一方でこの結果はインクボトル効果によるものであり、構成する空隙の入り口部が緻密になっているとの説も存在し、まだ完全に解明できていない部分もあり、今後の研究に期待される。

(2) 自己収縮

高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの自己収縮については、各種報告がなされている。図-4は高炉スラグ微粉末の有無の相違による自己収縮量の違いをセメントペーストで比較した結果である。高炉スラグ微粉末を使用したことにより、同一水セメント比において著しい収縮量の増加が認められる。さらに置換率が大きくなるとその影響はさらに大きくなる結果も示されている。ただし、置換率70%を超えると自己収縮量は低下することも確認されている。一方、図-5はコンクリートを

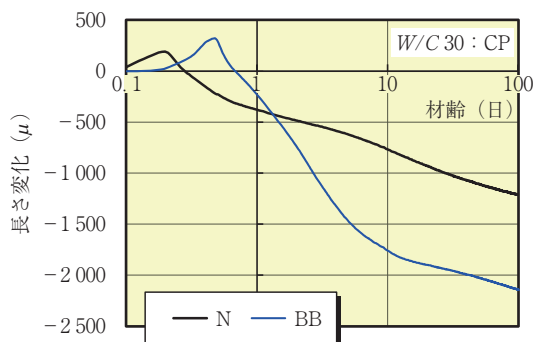


図-4 セメントペーストを用いた自己収縮測定結果

用いた自己収縮測定結果の一例である。この結果を見ると、決して高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの方が、自己収縮が大きいとは言えない。つまり、高炉スラグ微粉末を使用することで、セメントペーストマトリックスは自己収縮が大きくなるが、骨材が混和されることで、その差が小さくなることを意味しており、ペーストの収縮を骨材が拘束しているとも考えられる。その影響については更なる議論が必要である。

(3) 乾燥収縮

図-6は高炉スラグ微粉末の置換率を変化させたコンクリートの乾燥収縮の経時変化である。これより、置換率が大きくなっても乾燥収縮量には大きな影響が認められず、乾燥による収縮特性は高炉スラグ微粉末の混入の有無にかかわらず同程度であるといえる。

(4) クリープ等

高炉スラグ微粉末が混入されたコンクリートのクリープ測定結果は試験データが多くない。クリープ係数については、スラグの置換率が大きくなるほど、減少するとされているが、まだ完全に解明できていない部分もあり、今後の研究に期待される。

(5) 水密性

高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、使用していないコンクリートと比較して一般的に水密性が高いことが知られている。また図-7で示すように拡散係数を比較すると、高炉スラグ微粉末が少量使用されても水

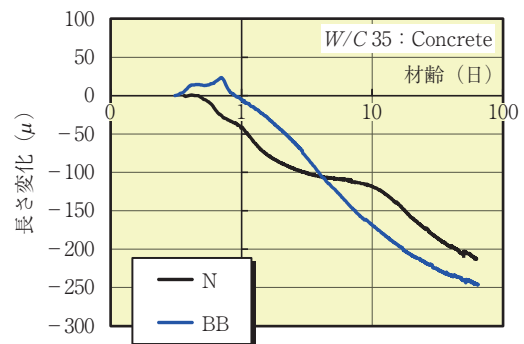


図-5 コンクリートを用いた自己収縮測定結果

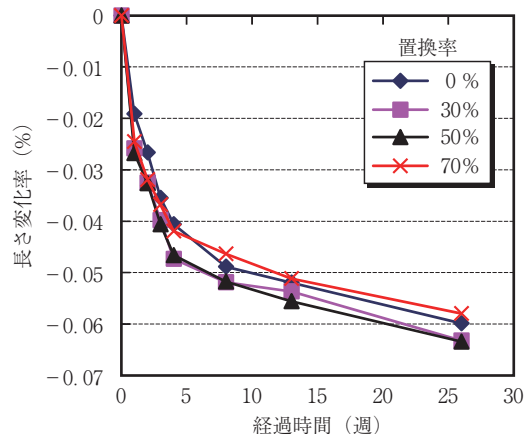


図-6 置換率の相違による乾燥収縮比較

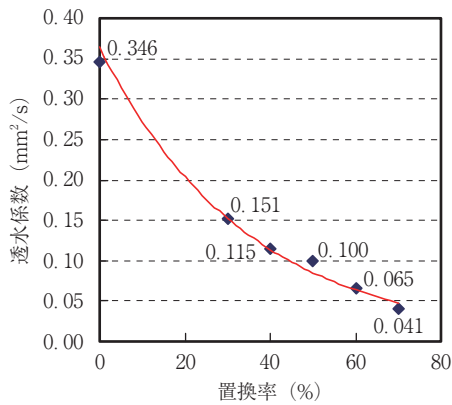


図-7 置換率の相違による透水係数比較

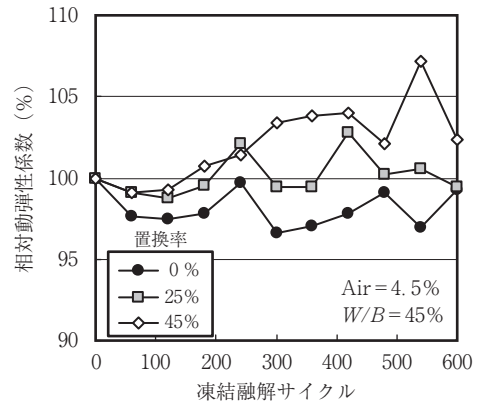


図-8 置換率の相違による耐久性指数比較⁹⁾

密性が著しく改善しており、高置換になればさらに拡散係数は小さくなる。これは、前述したように空隙構造が緻密になることで水の拡散が抑制されているものと考えられる。一方で、養生を怠った場合には、高炉スラグ微粉末を添加した効果が得られにくく、水密性の向上は期待できない。

3.4 耐久性

(1) 中性化

一般環境に曝された、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、同一水セメント比の場合、無混和と比べて中性化速度は若干大きくなる傾向が見られる。しかしながら、その差は議論に値するほどでもなく、むしろ外部からの水の供給などによる、コンクリートの湿潤程度が中性化速度に与える影響のほうが著しいとの報告もある。また、従来から指摘されている通り、同一強度レベルのコンクリートで比較すると、高炉スラグ微粉末の有無の差はさほど認められなくなる。しかし、置換率が増加した場合、中性化速度係数の増加は無視できないレベルとなり、特に置換率が60%を超えた場合には影響が顕著に認められる。一方、促進環境で比較試験を実施すると、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの中性化速度係数は著しく大きく評価される。このメカニズムについては、元来のアルカリが少ないことに加え、炭酸生成物の相違や空隙構造の相違による拡散現象の相違、内部の水分状態による相違などさまざまな指摘がなされており、今後解明されていくことが期待される。

(2) 塩分遮蔽性

高炉スラグ微粉末の混入により塩化物イオンの浸透が抑制されることが報告されている。高炉スラグ微粉末に含まれる Al_2O_3 は水和反応に伴い C-A-H 系水和物等を生じ、コンクリート中に存在する塩化物イオンと固溶置換することでクゼル氏塩やフリーデル氏塩を生成する。これにより、コンクリート中の塩化物イオンが固定化され自由塩分が少なくなることに加え、高炉スラグの水和による緻密な空隙構造を形成することから拡散しづらくなる傾向にあることより、塩分遮蔽性が高くなるといわれている。ただし、置換率による効果は顕著ではなく、

置換率とともに比例的に抵抗性が高くなるわけではない。

(3) 凍害

図-8 は高炉スラグ微粉末の置換率が異なるコンクリートの300サイクル凍結融解試験における耐久性指数を示したものである。コンクリートは空気量を保った状態で作製した試験体であるため、置換率によらず高い耐久性指数を保っている。このことから、空気量を適切に含有できれば、高炉スラグの有無にかかわらず、凍害抵抗性を保持できるといえる。

(4) アルカリシリカ反応

旧建設省の通達ではアルカリシリカ反応の抑制策として、高炉スラグ微粉末が40%以上置換されている高炉セメントの使用をあげている。これに関しては近年、多数の報告がなされており、高置換率においても抑制効果が小さい場合や、骨材種類によっては低置換率でも抑制効果が認められることがあることも報告されている。一方、フライアッシュのようなポゾラン物質では置換率が低い状態においても抵抗性が高いことも報告されていることから、高炉スラグ微粉末におけるアルカリシリカ反応抑制効果と置換率の関係については整理が必要である。加えて、高炉スラグ微粉末の混入とともにアルカリ量が低下することだけで抑制されているのではないことも考慮すると、そのメカニズムについても整理していく必要があると思われる。

(5) 化学的抵抗性

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの化学的抵抗性は一般的に高いといわれる。特に酸に対する抵抗性は高く、また置換率の増加に伴い、抵抗性が向上することが認められる。耐酸性のセメントの開発も積極的に行われており、置換率と SO_3 の調整により優れた性能を發揮する。ただし、石こうの添加がない場合やベースポルトランドセメントの相違などにより期待する性能が得られないこともあるため、十分な注意が必要となる。

4. 近年把握されてきた特徴

4.1 反応性状

高炉スラグ微粉末の反応は、まだ十分な解明に至って

いないが、置換率によって異なることが分かってきている。図-9は高炉スラグ微粉末の置換率を変化させたときの常温でのスラグ反応度を、サリチル酸アセトンメタノール溶解法で計測した結果である。図から、置換率が低い場合には、すべてのスラグ微粉末が反応するのに対し、置換率が50%程度であれば50%程度の反応度となり、70%の置換率では30%程度しか反応していないことが分かる。これは、反応過程において高炉スラグ微粉末の表面に緻密な生成物が生成することで、水がスラグ内部へ浸透する速度が遅くなり、スラグの核となる部分が反応できなくなるためと推測され、SEMを用いて観察すると、反応層と未反応層を判別することが可能である。

また、セメントクリンカへの影響についても十分に整理できていない。たとえばC₃Sの促進やC₂Sの反応抑制が、置換率に応じてどの程度であるかも明確になっていない。さらに、水銀圧入法による測定では水和により形成される空隙構造が、緻密となっていることを示す結果が得られるが、アルキメデス法による水置換法での測定による総空隙量は、普通ポルトランドセメントを用いた場合とほぼ同程度との報告もある。加えて、炭酸化した部分での空隙構造は粗大化することなども報告されており、空隙構造はまだ未解明であるといえる。

さらに図-10のように、生成するC-S-HのCa/Si比が普通ポルトランドセメントと比較して小さいとの報告もあるが、このC-S-Hの空間的な配置などの把握を進めて耐久性等の性能を説明する必要がある。今後、

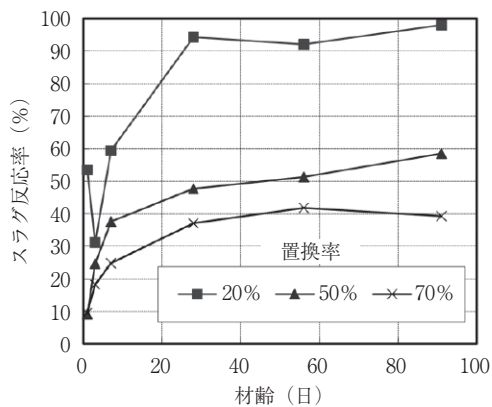


図-9 置換率の相違によるスラグ反応率比較

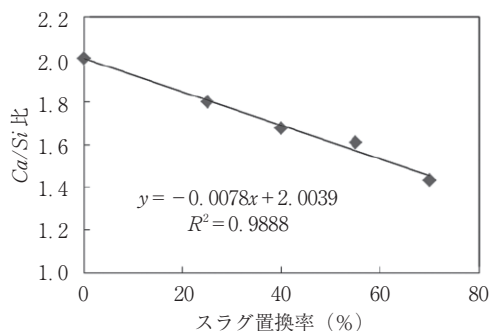


図-10 置換率の相違によるC-S-HのCa/Si比¹⁰⁾

本質的な水和反応を解明する必要があると感じる。

4.2 養生と耐久性能の関係

高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、養生の影響を大きく受けるとされる。たとえば図-11は高炉セメントB種において養生方法が圧縮強度発現に与える影響を示している。養生が不足することで、強度低下が著しいことがわかる。また、図-12は気中養生における置換率の影響を示している。置換率が高くなると養生の影響を大きく受けるため、強度低下が著しい。また、図-13は養生別の促進中性化速度を表しており、養生が極端に不足すると中性化速度も著しく速くなる。このことは高炉スラグ微粉末の反応が普通セメントと比較して遅延するこ

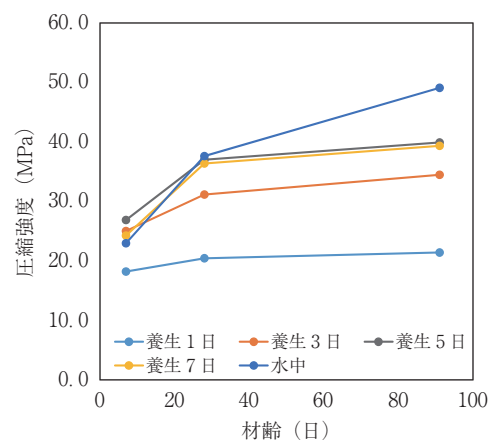


図-11 養生の相違による圧縮強度の発現

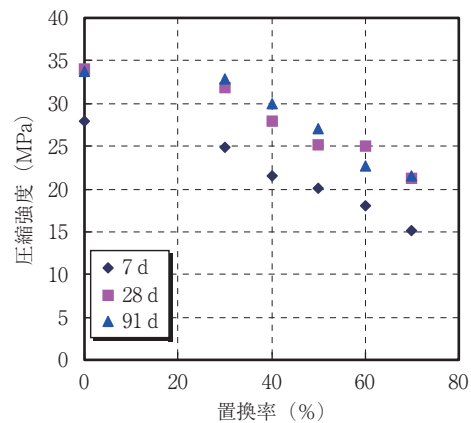


図-12 置換率の相違による圧縮強度 (気中養生)

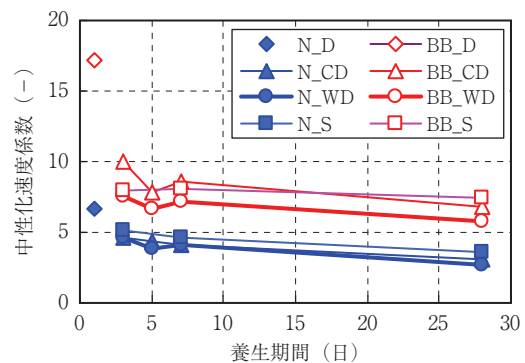


図-13 養生の違いによる中性化速度係数の相違¹¹⁾

と、さらに生成物が異なることに起因すると推測される。

また高炉スラグ微粉末が添加されたコンクリートでは、養生が不足した場合に表層から乾燥する領域が大きくなることも指摘されている。このことはかぶりコンクリートの品質を低下させ、物質の浸透に大きな影響を与えることとなり、注意が必要であるといえる。

4.3 温度依存に関すること

3.1でも述べたが、高炉スラグ微粉末を使用することで、その水和反応は温度履歴に著しく影響を受けることも指摘されている。高温養生を続けることで水和反応やその生成物が一般温度と比較して異なったものとなるため、長期強度や弾性係数が変化することも指摘されている。また、熱膨張係数も影響するとも言われている。

また、高温養生を行うことで、ひび割れが発生する可能性も指摘されている。ヒートショックや水和促進による影響が大きくなるものと考えられるが、まだまだ解明すべき点が多いと感じる。

5. 大量使用する場合に注意すること

高炉スラグ微粉末を大量に使用することで、高炉スラ

表-3 高炉スラグ微粉末添加による性能評価一覧表

フレッシュ	流動性	○	同程度 (若干よい)
	ブリーディング	○	同程度
	凝結	-	遅延する
	断熱温度上昇	△	条件による (置換率)
強度特性	初期強度	×	低い
	長期強度	◎	高い
	高強度	○	同程度
耐久性	乾燥収縮	○	同程度
	中性化	-	条件による (置換率)
	耐凍害性	○	同程度
	水密性	◎	優れている
	塩分遮蔽性	◎	優れている
	耐海水性	◎	優れている
	化学抵抗性	◎	優れている
	ASR抵抗性	◎	優れている

表-4 実験により得られた置換率とコンクリート特性

	無混入		高置換		
	低粉体比↔高粉体比	低粉体比↔高粉体比	低粉体比↔高粉体比	低粉体比↔高粉体比	
フレッシュ性	ブリーディング率	少ない	やや多い	やや少	かなり多
	ブリーディング終了時間	同等		遅い	早い
	凝結時間	同等		遅い	早い
	断熱温度上昇	-		多い	少ない
硬化特性	かなり高置換することで上昇量を抑制				
	圧縮強度	低い	高い	低い	高い
	置換率によりピークが存在する				
	透水係数	同等		低い	やや高い
	長さ変化	小さい	大きい	小さい	大きい
置換率で大きな差はないが50%程度がやや大きい					

グ微粉末の特徴的な性能を十分に発揮することが可能となる。前章で解説した置換率を大きくすることで得られる効果を表-3、表-4にまとめた。

- ①発熱速度が低減されコンクリートの温度上昇を抑制
- ②長期強度が無混入コンクリートよりも大きい
- ③耐海水性、耐酸性、耐硫酸塩性に対して効果大
- ④緻密なコンクリートが得られるため、水密性、塩分遮蔽性が向上
- ⑤適切な置換率を設定することでアルカリシリカ反応抑制効果が向上

その一方で、初期強度発現や中性化抵抗性、養生の影響など、置換率が大きくなることで変化が大きくなる性能があるため、使用には細心の注意が必要となる。そのため、適用範囲や使用環境などを事前に把握しておく必要があると考える。

さらに高炉スラグ微粉末の使用による性能には、未解明なことが多数存在していることから、今後化学的なアプローチなども踏まえて、解明していく必要があると考える。

地球環境保全を考慮し、セメント製造時の二酸化炭素排出量を抑制するためには、高炉セメントの利用促進が期待される。しかし、その一方で高炉セメントは万能であるわけでないことを理解し、適材適所への利用を促進していくべきであると考え。特に高置換高炉スラグセメントは、その特徴をよく理解した上で、利用範囲を考える必要がある。そのためにも、高炉スラグ微粉末の反応やその特徴を説明するメカニズム解明の研究がさらに進むことを期待する。

参考文献

- 1) 土木学会：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, 1996
- 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査設計・施工指針 (案)・同解説, 1996
- 3) 日本コンクリート工学会：混和材積極利用によるコンクリート性能への影響評価と施工に関する研究委員会報告書, 2013
- 4) 日本コンクリート工学協会：混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善研究委員会報告書, 2010
- 5) 土木学会：混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会 (333 委員会) 報告書, コンクリート技術シリーズ 74, 2007
- 6) 土木学会：混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会 (333 委員会) No.2, コンクリート技術シリーズ 89, 2010
- 7) 依田彰彦：技術フォーラム 資源の有効利用とコンクリート 第5回高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート, コンクリート工学, Vol.34, No.4, pp.72~82, 1996
- 8) 田澤栄一・宮澤伸吾：セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材及び配合の影響, 土木学会論文集 No.502/V-25, pp.43~52, 1994
- 9) 檀 康弘・伊代田岳史・兼安真司・植木康知：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの凍害および凍結防止剤に対する劣化抵抗性, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.4, pp.431~441, 2009
- 10) 名和豊春：特集 コンクリート技術者の挑戦—不易流行の観点から—, 2.1.3 混和材, コンクリート工学, 2013年1月号
- 11) 檀 康弘・伊代田岳史・大塚勇介・佐川康貴・濱田秀則：高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの養生条件と耐久性の関係, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.3, pp.291~299, 2009