

論文 高炉スラグ微粉末のコンクリート用混和材としての適用性

横室 隆*¹・依田 彰彦*²・浜田 博文*³

要旨：本研究は、高炉スラグ微粉末の有効利用を図ることを目的としておこなった。実験は高炉スラグ微粉末の置換率を 45 % と一定にし、単に比表面積を変えるだけで JASS 5 による気温の補正値を考慮せず、一年中同一の調合（水結合材比）で所要の強度が得られるものと考え、各月における現場水中養生した材齢 28 日の圧縮・引張・曲げ・付着の各強度をはじめ乾燥収縮および相対動弾性係数などを検討した結果、ほぼ同一の値が得られることを明らかにした。併せて気温による高炉スラグ微粉末の適切な比表面積を明確にした。
キーワード：高炉スラグ微粉末、比表面積、置換率、圧縮強度、乾燥収縮、中性化深さ

1. はじめに

JIS A 6206 に制定されている高炉スラグ微粉末は、比表面積に応じて 4000, 6000 および 8000cm²/g の 3 種類の品質が規格されている。また、最近では粉体技術の発達により比表面積 10,000cm²/g を超え品質が安定している高炉スラグ微粉末の供給体制が整いつつある。

近年、RC 造建物の高性能化に伴い新たな材料・施工・養生の方法等を考慮する必要性が生じている。これらのコンクリートの性能を発揮するには、混和材としての高炉スラグ微粉末などが大きな役割を担ってくる。本研究は、この高炉スラグ微粉末をさらに有効利用する観点から実施したものである。

2. 実験概要

JASS 5⁷⁾によれば、コンクリートの調合強度を定める場合、特に気温が低い場合では、構造体コンクリートの所要の強度を得るには予め水セメント比を小さくし調合強度を高くし、強度発現の遅れによる強度不足を補うために気温による強度の補正値を定めている。

本実験研究は高炉スラグ微粉末の置換率を

45 % と一定にし、単に比表面積を変えるだけで、気温による補正値を考慮せず一年中同一の調合で所要の強度（目標強度を 24N/mm²）が得られる高炉スラグ微粉末コンクリートの各強度をはじめ、乾燥収縮・相対動弾性係数および中性化深さなどについて検討したものである。なお、本論文は、日本建築学会大会¹⁾で発表したものを参考にし、さらに実験を加え再検討し、とりまとめたものである。

2.1 使用材料

セメントは JIS R 5201 の 5、製造方法に規定されている混合材を含んでいない普通ポルトランドセメント（記号 C）を用いた。そのセメントの物理的性質を表-1に示す。

使用した高炉スラグ微粉末（記号 BF）は密度が 2.92g/cm³、ガラス化率 98 %、ブレンによる比表面積 2850cm²/g（平均粒径 10.2 μm）、

表-1 普通ポルトランドセメントの物性

化学成分 (%)			密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	圧縮強さ (N/mm ²)		
ig.loss	MgO	SO ₃			3d	7d	28d
0.7	1.5	2.0	3.16	3410	28.1	45.2	61.2

*1 足利工業大学助教授 工学部 建築学科（正会員）

*2 足利工業大学教授 工学部 建築学科 工博（正会員）

*3 足利工業大学大学院 工学研究科 建築学専攻（正会員）

4450cm²/g (同 9.6 μ m), 7930cm²/g (同 5.2 μ m) および 11240cm²/g (同 4.0 μ m) の4種類である。細骨材は鬼怒川産砂 (絶乾密度 2.65g/cm³, 吸水率 1.7 %, f.m. 2.8), 粗骨材は鬼怒川産砂利 (絶乾密度 2.61g/cm³, 水率 1.8 %, 実積率 62.6 %, Gmax 25mm), 水 (記号 W) は上水道水, 化学混和剤は主成分がリグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体の AE 減水剤標準形を使用した。

2.2 コンクリートの調合

目標としたコンクリートの圧縮強度を 24N/mm² としたため, これまでの研究^{1)~5)}から水結合材比 (W/(C+BF)) は 58 % と定めた。また, コンクリートの打込みは, 各月の中旬を目途に各月に一度行い, 調合は一年間同一とし, スランブは 18 ± 2.5cm, 空気量は 4 ± 1.5 % とした。なお, 高炉スラグ微粉末の置換率は結合材 (C+BF) の質量に対して内割とし, 比表面積を各月で変化させ 45 % と一定にした。その高炉スラグ微粉末コンクリートの調合および置換率を表-2に示す。

2.3 コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜは, 容量 100 ℓ の一軸強制ミキサに細骨材・粗骨材・結合材のセメントと高炉スラグ微粉末の順に投入し 1 分間空練し, そこに AE 減水剤標準形を溶解した水を加えて計 3 分間練混ぜた。

2.4 実験の項目と方法

- ワーカビリティ: スランブ試験におけるコンクリートのくずれ方の状態から目視によって判断した。
- スランブ: JIS A 1101 (コンクリートのスランブ試験方法) によった。
- 空気量: JIS A 1128 (フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法 (空気室圧力方法) によった。
- ブリーディング: JIS A 1123 (コンクリートのブリーディング試験方法) によった。なお, 測定は実験室内でおこなった (表-2参照)。
- 凝結: ASTM C 403 (Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance) によった。なお, 測定は実験室内でおこなった。

表-2 高炉スラグ微粉末コンクリートの調合とフレッシュコンクリートの結果

月 度	水 結 合 材 比 (%)	結合材量 (%)				平均 比 表面 積 (cm ² /g)	単 位 結 合 材 量 (kg/m ³)	細 骨 材 率 (%)	実 験 室 内 の 気 温 (°C)	ス ラ ン ブ (cm)	空 気 量 (%)	練 上 が り 温 度 (°C)	平 材 均 齢 水 28 温 日 ま で の 温 度 (°C)	ワ ー カ ビ リ テ ィ ー	
		高炉スラグ微粉末 プレーンによる比表面積 (cm ² /g)													
		2850	4450	7930	11240										
4	58	55	-	-	45	-	7930	285	47.7	15.8	19.5	4.7	18.0	17.6	良
5	58	55	-	33.75	11.25	-	5320	285	47.7	15.9	20.0	4.6	24.0	19.4	良
6	58	55	-	45	-	-	4450	285	47.7	18.0	20.5	4.2	24.9	22.8	良
7	58	55	11.25	33.75	-	-	4050	285	47.7	28.0	20.0	5.5	29.1	26.2	良
8	58	55	11.25	33.75	-	-	4050	285	47.7	27.3	20.0	5.1	28.3	26.0	良
9	58	55	-	33.75	11.25	-	5320	285	47.7	19.3	20.0	4.7	21.5	19.7	良
10	58	55	-	33.75	11.25	-	5320	285	47.7	12.0	20.0	5.2	18.5	17.1	良
11	58	55	-	22.5	22.5	-	6190	285	47.7	9.0	20.0	4.7	17.5	10.5	良
12	58	55	-	-	33.75	11.25	8760	285	47.7	8.7	19.5	5.2	11.3	6.7	良
1	58	55	-	-	22.5	22.5	9560	285	47.7	3.0	20.5	5.2	10.5	4.7	良
2	58	55	-	-	22.5	22.5	9560	285	47.7	5.0	19.0	5.4	10.8	5.2	良
3	58	55	-	-	33.75	11.25	8760	285	47.7	9.1	20.0	5.2	13.3	9.7	良

[注] 化学混和剤の使用量は AE 減水剤標準形を (C+BF) × 0.25 % である。

f. 圧縮強度：JIS A 1108（コンクリートの圧縮強度試験方法）によった。供試体は $10\phi \times 20\text{cm}$ 円柱供試体を用い、翌日にキャッピングを施し、翌々日に脱型し直ちに水をはったコンテナ中に供試体を浸漬した。これを現場水中養生とし所定の材齢で試験した。なお、水温は毎日3回（9.12.17時）棒状温度計を用いて測定し材齢28日までの平均水温を求めた。

g. 引張強度：JIS A 1113（コンクリートの引張強度試験方法）によった。供試体は直径 10cm の円柱を用い、現場水中養生の材齢28日のみとした。

h. 曲げ強度：JIS A 1106（コンクリートの曲げ強度試験方法）によった。供試体は $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ を用い、現場水中養生の材齢28日のみとした。

i. 付着強度：供試体（ 10ϕ ）の中心部に D16 の鉄筋を埋め込み2.4f.と同様に脱型し ASTM C 234(Standard Method of Test for Comparing Concrete on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel)に準じ、引抜き法によるコンクリートと鉄筋の付着強度を測定した。なお、養生方法は現場水中養生とし、材齢28日のみとした。

j. 乾燥収縮：供試体（ $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ ）は打込み後、材齢1週まで 20°C 水中養生した後、 $20^\circ\text{C} \cdot 60\% \text{RH}$ の恒温恒湿室に放置した。

長さ変化は JIS A 1129（モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法）のコンパレータ一方法により乾燥期間52週まで測定し、材齢1週を基長とした変化率を算出した。

k. 凍結融解作用に対する抵抗性：ASTM C 666 A法（Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing）によって300サイクルまでの相対動弾性係数を求めた。

l. 中性化深さ：材齢1週まで 20°C 水中養生した後、屋外に自然暴露した供試体を材齢1年において試験した。方法はフェノールフタレインアルコール溶液法により中性化深さを測定した。なお、供試体は $10\phi \times 20\text{cm}$ の円柱を用

いた。

3. 実験結果と考察

3.1 フレッシュコンクリートの特性

(1) ブリーディング量

実験室内で測定した月別による最終ブリーディング量を図-1に示す。これによるとブリーディング量は気温の最も高い7月で $0.45\text{cm}^3/\text{cm}^2$ と最大値を示し気温が最も低い1月では $0.15\text{cm}^3/\text{cm}^2$ と最小値を示している。

従って、コンクリートのブリーディング量は、気温による影響を大きく受けることがわかる。

(2) 凝結

実験室内で測定した月別による凝結時間を図-2に示す。これによると凝結時間も同様に気温が最も高い7月では始発は5時間30分、終結は7時間40分と早くなり、気温が最も低い1月では始発は12時間00分、終結は16時間15分と遅くなり、凝結は気温に大きく影響を

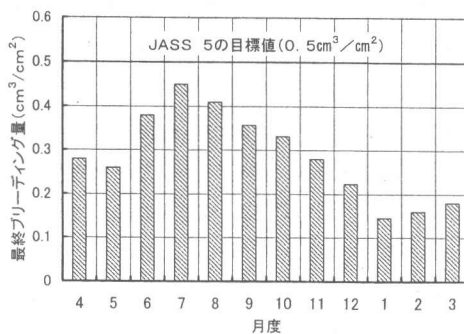


図-1 月別による最終ブリーディング量

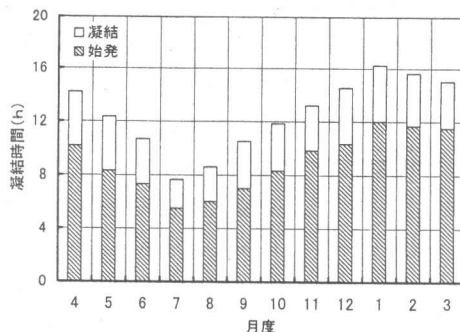


図-2 月別による凝結時間

受けることがわかる。

3.2 硬化コンクリートの特性

(1) 圧縮強度

月別による現場水中養生した場合の圧縮強度を図-3 (a) に示す。これによると、現場水中養生した材齢 28 日までの平均水温が最も高い7月では、初期の材齢7日では 13.0N/mm^2 、材齢14日では 19.6N/mm^2 と圧縮強度が最も大きな値を示している。逆に水温の低い1月の材齢7日では 9.5N/mm^2 、材齢14日では 16.7N/mm^2 と最も小さい値となっている。しかし、材齢28日で見ると水温による影響はあまりみられず目標とした圧縮強度 24N/mm^2 を各月上廻り $24.0 \sim 26.8\text{N/mm}^2$ の範囲にあり、同程度の強度が得られている。なお、各月における標準偏差は 1.0N/mm^2 である。また、材齢1年で見てもその後の強度増進がみられ同様の傾向を示している。

従って、高炉スラグ微粉末の比表面積を変化させるだけで、気温による補正値を考慮なくとも材齢28日の圧縮強度は一年中同一の割合で目標とする圧縮強度が得られる。

(2) 引張強度

現場水中養生した材齢28日の引張強度を図-3 (b) に示す。月別における引張強度は、水温の影響を受けず $2.1 \sim 2.5\text{N/mm}^2$ の範囲にあり同程度の強度が得られる。なお、各月における標準偏差は 0.1N/mm^2 である。

(3) 曲げ強度

現場水中養生した材齢28日の曲げ強度を図-3 (c) に示す。月別における曲げ強度も同様に水温による影響を受けず $4.8 \sim 5.7\text{N/mm}^2$ の範囲にあり同程度の強度が得られる。なお、各月における標準偏差は 0.3N/mm^2 である。

(4) 付着強度

現場水中養生した材齢28日の付着強度を図-3 (d) に示す。月別における付着強度も同様に水温による影響を受けず $7.5 \sim 8.2\text{N/mm}^2$ の範囲にあり同程度の強度が得られる。なお、各月における標準偏差は 0.3N/mm^2 である。

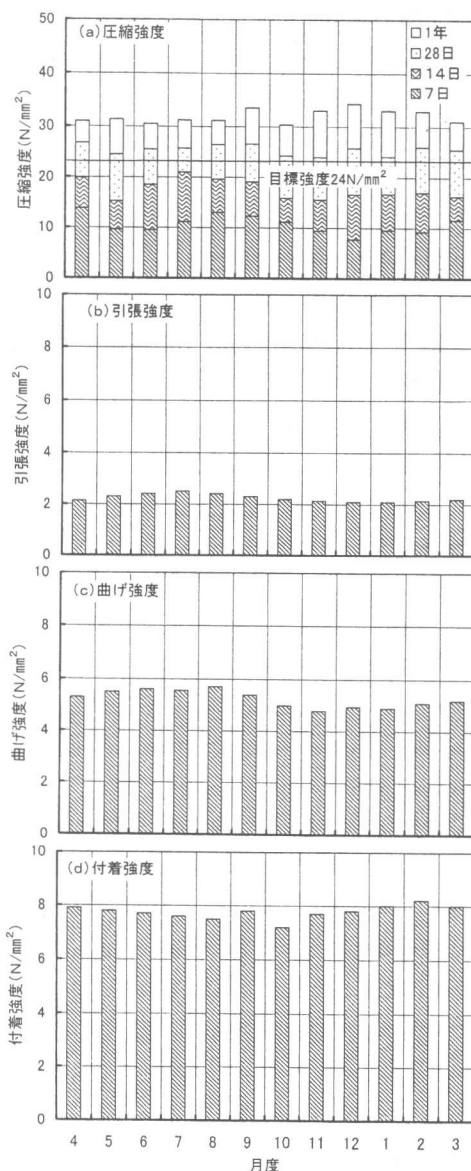


図-3 月別による各強度 (現場水中養生)

(5) 高炉スラグ微粉末の平均比表面積による各強度

各月で用いた高炉スラグ微粉末の平均比表面積を求めたものを表-2に示す。これによれば、6, 7, 8月の比表面積は $4050 \sim 4450\text{cm}^2/\text{g}$ (BF4000), 5, 9, 10, 11月の比表面積は $5320 \sim 6190\text{cm}^2/\text{g}$ (BF6000), 3, 4, 12月の比表面積は $7930 \sim 8760\text{cm}^2/\text{g}$ (BF8000), 1, 2月

の比表面積は 9560cm²/g (BF10000) となる。その、高炉スラグ微粉末の平均比表面積と材齢 28 日における現場水中養生した各強度の関係を図-4に示す。これによると各月における強度の変動はほとんど見られない。

従って、各月における適切な高炉スラグ微粉末の比表面積を選択することにより気温による影響を受けず、ほぼ同一の強度が得られるものとする。

(6) 乾燥収縮

材齢 1 週を基長とした月別による乾燥収縮率を図-5に示す。これは、恒温恒湿室 20℃・60% RH で測定しているため気温によるちがいは見られないが、高炉スラグ微粉末の平均比表面積の影響について検討すると、比表面積が最も小さい高炉スラグ微粉末 (4050cm²/g) を用いた 7 月・8 月では、初期の乾燥期間 1 週の収縮率は 1.8×10^{-4} 程度と小さく、逆に比表面積の最も大きい高炉スラグ微粉末 (9560cm²/g) を用いた 1 月・2 月では 3.3×10^{-4} と大きな値を示している。しかし、乾燥期間 4 週でみると各月の収縮率の平均は 4.9×10^{-4} 程度とほぼ同じ値を示している。また、乾燥期間 52 週で見ても 7.0×10^{-4} 程度とほぼ同じ値を示している。

従って、高炉スラグ微粉末の比表面積が大きいものほど初期における収縮は大きくなるが乾燥期間 4 週以降ではその差は小さくなり長期での乾燥収縮率の影響はほとんどなくなる。

(7) 凍結融解作用に対する抵抗性

300 サイクルまで行った月別による相対動弾性係数を図-6に示す。これによると各月の相対動弾性係数は 92 ~ 96 % の範囲にありほぼ同一の値が得られている。

(8) 中性化深さ

屋外に自然暴露した月別による中性化深さを図-7に示す。これによると中性化深さは平均比表面積が最も小さい高炉スラグ微粉末を用いた 7 月、8 月では 2.5mm 程度、平均比表面積が最も大きい高炉スラグ微粉末を用いた 1 月、2 月では 1.5mm 程度となっている。これは高

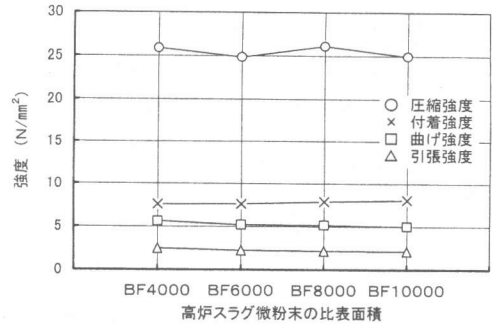


図-4 材齢28日における現場水中養生した各強度

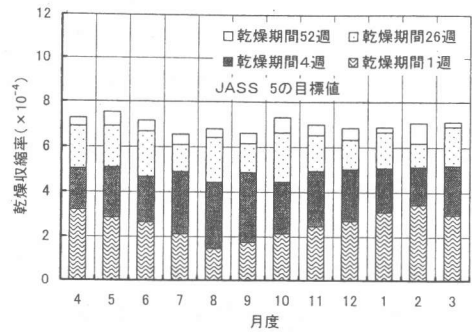


図-5 月別による乾燥収縮率

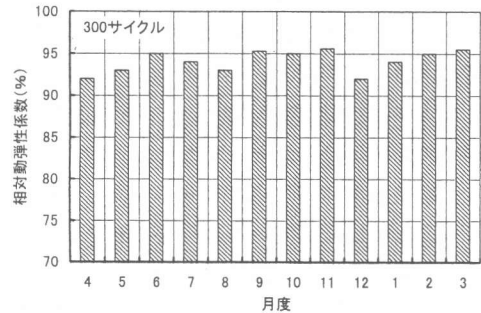


図-6 月別による相対動弾性係数

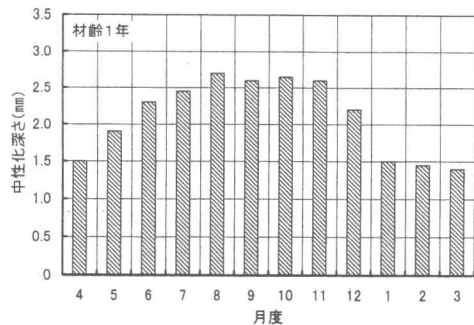


図-7 月別による中性化深さ

炉スラグ微粉末の比表面積が細かいためコンクリートの組織がち密となったためと考える。

高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの中性化深さは比表面積の大きいものほど小さくなるとの報告⁹⁾があり同様の結果となった。

4. まとめ

本実験研究は、高炉スラグ微粉末の置換率を45%と一定にし、気温に応じて比表面積を変えるだけで一年中同一の調合で打込んだコンクリートの性質について次のようなことがいえる。

(1) ブリーディング量は、気温により影響を大きく受ける。

(2) 凝結は、気温により大きく影響を受ける。気温が高い場合は始発・終結時間は早まり、気温の低い場合は遅くなる。

(3) 適切な比表面積を選択することにより、圧縮・引張・曲げおよび付着強度の現場水中養生した材齢28日の各強度は気温による影響をほとんど受けず同程度の強度が得られる。

(4) 乾燥収縮率は、高炉スラグ微粉末の比表面積の大きいものほど、初期において収縮は大きくなるが、乾燥期間4週からは同程度となり、長期での影響はほとんどなくなる。

(5) 凍結融解作用に対する抵抗性は、300サイクルの結果はほぼ同一の値が得られる。

(6) 中性化深さは、高炉スラグ微粉末の細かいものほど組織がち密になり中性化を抑制する効果が大きい。

参考文献

- 1) 横室 隆, 依田彰彦: 高炉スラグ微粉末のコンクリート用混和材としての適用研究(その23 同一の置換率, 水結合材比に基づいたコンクリートの性質) 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.317-318, 1999.9
- 2) 柴田 剛, 依田彰彦, 横室 隆: 高炉スラグ微粉末のコンクリート用混和材としての適用研究(その16 初期養生日数), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.57-58, 1994.9
- 3) 依田彰彦, 横室 隆: 養生(暴露)をかえたコンクリートの基本的性質, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.187-188, 1983.9
- 4) 依田彰彦, 横室 隆: 毎月1日に打込んだコンクリートの性質に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, コンクリート工学協会, Vol.10-2, pp.457-462, 1988.6
- 5) 依田彰彦, 横室 隆, 木村正尚: 微粉末化した高炉スラグを混和材として用いたモルタルコンクリートの強度, セメント技術年報, No.42, pp.92-95, 1988
- 6) 長滝重義, 大賀宏行, 荒井俊晴: 高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの中性化, 土木学会シンポジウム論文集, pp.143-150, 1987
- 7) 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, 1997