

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

高橋一男^{*1}・木村正尚^{*2}・依田彰彦^{*3}・横室 隆^{*4}

要旨：本研究は省資源・省エネルギーが社会的に要請される今日，高炉スラグ微粉末の有効活用を図ることを目的として実施した。実験は材齢28日の圧縮強度を 36, 48, 80N/mm²を目標として，高炉スラグ微粉末の置換率を45%と一定に保ち，JASS 5 の気温による補正は，比表面積を変えるだけで一年中同一の調合で現場水中養生による目標の圧縮強度が得られることを確認した。併せて，ブリッキング量，乾燥収縮率，相対動弾性係数などについても試験し，年間を通じて同程度の品質が得られることが判かり，混和材として高炉スラグ微粉末の気温変化に対応できる比表面積を明確にした。

キ - ワ - ド：高炉スラグ微粉末，比表面積，圧縮強度，乾燥収縮率，相対動弾性係数

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 4,000, 6,000および 8,000cm²/gの3種類の品質が規定されている。

また、近年では比表面積 10,000cm²/gを越える品質の安定している比表面積の大きい高炉スラグ微粉末も供給されている。¹⁾²⁾³⁾

これらの高炉スラグ微粉末を混和材としての活用を図るため，高炉スラグ微粉末の比表面積とセメントとの水和反応が密接な関係にある性質を利用して，多種類の比表面積の組み合わせによる，同一調合によるコンクリート物性の温度変化に対する挙動を明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

コンクリートの強度発現に及ぼす養生温度の影響は非常に大きく，養生温度が低いと強度は小さくなる。JASS 5⁴⁾⁵⁾では，打ち込みから所要材齢までの気温が低い場合には，構造体コンクリートの所要強度を確保するために調合

強度を大きく，水セメント比を小さくして，強度発現の遅れによる強度不足を保証するために気温による補正値を規定している。本実験研究は高炉スラグ微粉末の置換率を45%と一定にして比表面積を変えるだけで，一年間同一の調合で所要の強度(目標強度 36, 48, 80N/mm²)が得られる高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの圧縮強度，ブリッキング量，乾燥収縮率および相対動弾性係数などについて検討した。

2.1 使用材料

セメントはJIS R 5210の5.製造方法に規定されている混合材を含まない普通ポルトランドセメント(記号 C)を用いた。このセメントの品質を表 - 1 に示す。

使用した高炉スラグ微粉末(記号 BF)は密度が 2.90g/cm³，ガラス化率 98%，ブレンによる比表面積 2,900cm²/g(平均粒径 10.2 μm)，4,410cm²/g(同 9.6 μm)，8,470cm²/g(同 5.2 μm)，11,060cm²/g(同 4.0 μm)の4種類である。この高炉スラグ微粉末はビニ-

*1 日立セメント(株) 研究開発部技術サ - ビス課長 (正会員)

*2 日立セメント(株) 取締役研究開発部長 (正会員)

*3 足利工業大学 工学部 建築学科教授 工博 (正会員)

*4 足利工業大学 工学部 建築学科助教授 工博 (正会員)

ル袋に密封し20 恒温室に保存した。細骨材は福島県いわき市の山砂（絶乾密度 2.56g/cm³，吸水率 1.30%，粘土塊量 0.34%，粗粒率 2.71），粗骨材は茨城県笠間市の硬砂岩質碎石（絶乾密度 2.67g/cm³，吸水率 0.42%，最大寸法 20mm，粒径判定実積率 62.2%），練混ぜ水（記号 W）は上水道水，化学混和剤は目標強度が 36，48N/mm²のコンクリ - トは，主成分がリグニンスルホン酸化合物とポリオ - ル複合体の AE減水剤標準形 1種（塩化物イオン量 0.02%），80N/mm²のコンクリ - トはポリカルボン酸エ - テル系と架橋ポリマ - 複合体の高性能AE減水剤 1種（塩化物イオン量 0.00%）を使用した。

2.2 コンクリ - トの調合

目標とした圧縮強度は 36，48，80N/mm²で既往の研究³⁾を参考に，高炉スラグ微粉末の置換率は結合材(C+BF)の質量に対し45%と一定にし，コンクリ - ト練上がり温度を10，20，25 に設定して，高炉スラグ微粉末の比表面積を変化させた。その比表面積は36，48，80 N/mm²の調合すべて同一として予備試験を行い，調合および水結合材比 (W/(C+BF)) を各々 60，45，27%

表-1 普通ポルトランドセメントの品質

化学成分 (%)			密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	圧縮強度 (N/mm ²)		
ig.loss	MgO	SO ₃			3日	7日	28日
0.6	1.5	2.0	3.15	3,350	26.7	48.4	62.6

に定めた。また，本試験はコンクリ - トの練混ぜ・打設は各月の中旬に行い，調合は一年間同一とした。目標強度が 36，48 N/mm²のコンクリ - トの目標スランプは 18±2.5cm，目標強度が80N/mm²のコンクリ - トは高性能AE減水剤を使用し，目標スランプフロ - は 65±5cmとし，また，空気量はともに 4.5±1.5%である。

なお，高炉スラグ微粉末の置換率は結合材の質量に対して45%と一定にし，比表面積のみを各月または 2ヶ月ごとに变化させた。その比表面積は，36，48，80N/mm²すべて表 - 2 および表 - 3 に示した値を用いた。

コンクリ - トの調合とフレッシュコンクリ - トの測定結果の例として，目標強度36 N/mm²の調合を表 - 2，80N/mm²の調合を表 - 3 に示す。なお，目標強度48N/mm²の単位結合材量は389kg

表 - 2 目標強度 36 N/mm²のコンクリートの調合と諸測定結果

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 プ (cm)	空 気 量 (%)	練 上 げ り 温 度 (°C)	の 材 齢 2 8 日 まで の 平 均 水 温 (°C)	ワ ー カ ビ リ テ ィ ー
		高炉スラグ微粉末				ブレーション法による比表面積 (cm ² /g)										
		2900	4410	8470	11060											
1	60	55.00	-	-	22.50	22.50	9765	283	44.9	5.5	19.5	4.6	7.5	3.0	良	
2	60	55.00	-	-	22.50	22.50	9765	283	44.9	5.5	19.5	4.2	7.5	5.6	良	
3	60	55.00	-	-	33.75	11.25	9120	283	44.9	16.0	17.0	4.5	14.5	9.9	良	
4	60	55.00	-	-	45.00	-	8470	283	44.9	19.5	16.5	5.0	18.0	14.4	良	
5	60	55.00	-	33.75	11.25	-	5425	283	44.9	22.0	16.0	4.3	21.0	19.1	良	
6	60	55.00	-	45.00	-	-	4410	283	44.9	26.5	15.5	4.2	24.0	25.3	良	
7	60	55.00	11.25	33.75	-	-	4030	283	44.9	29.0	13.0	4.4	27.0	24.7	良	
8	60	55.00	11.25	33.75	-	-	4030	283	44.9	25.0	14.0	4.9	24.0	23.0	良	
9	60	55.00	-	33.75	11.25	-	5425	283	44.9	25.0	14.0	4.4	24.5	18.0	良	
10	60	55.00	-	33.75	11.25	-	5425	283	44.9	17.0	19.0	4.7	18.5	14.5	良	
11	60	55.00	-	22.50	22.50	-	6440	283	44.9	12.5	18.0	4.9	16.5	10.1	良	
12	60	55.00	-	-	33.75	11.25	9120	283	44.9	11.0	17.0	4.0	12.0	7.5	良	

表 - 3 目標強度 80 N/mm²のコンクリートの調合と諸測定結果

月 度	水 結 合 材 比 (%)	結合材料 (%)					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 ()	ス ラ ン プ フ ロ ー (cm)	空 気 量 (%)	練 上 が り 温 度 ()	材 齢 の 平 均 日 ま だ 水 温 ()	ワ ー カ ビ リ テ ィ ー	高 性 能 A E 減 水 剤 添 加 量 (%)
		高炉スラグ微粉末														
		ブレーション法による比表面積 (cm ² /g)														
2900	4410	8470	11060													
1	27	55.00	-	-	22.50	22.50	9765	630	34.1	5.5	63.0	4.8	8.0	3.0	良	1.4
2	27	55.00	-	-	22.50	22.50	9765	630	34.1	5.5	65.0	5.0	8.0	5.6	良	1.4
3	27	55.00	-	-	33.75	11.25	9120	630	34.1	16.0	66.0	4.9	15.0	9.9	良	1.4
4	27	55.00	-	-	45.00	-	8470	630	34.1	19.5	64.5	4.2	18.0	14.4	良	1.4
5	27	55.00	-	33.75	11.25	-	5425	630	34.1	22.0	65.0	4.4	22.0	19.1	良	1.4
6	27	55.00	-	45.00	-	-	4410	630	34.1	26.5	63.5	5.0	25.0	25.3	良	1.4
7	27	55.00	11.25	33.75	-	-	4030	630	34.1	29.0	62.5	4.5	28.0	24.7	良	1.4
8	27	55.00	11.25	33.75	-	-	4030	630	34.1	25.0	63.5	4.8	25.0	23.0	良	1.4
9	27	55.00	-	33.75	11.25	-	5425	630	34.1	25.0	61.5	4.4	25.0	26.0	良	1.4
10	27	55.00	-	33.75	11.25	-	5425	630	34.1	17.0	63.0	5.0	19.0	14.5	良	1.4
11	27	55.00	-	22.50	22.50	-	6440	630	34.1	12.5	63.5	4.5	17.0	10.1	良	1.4
12	27	55.00	-	-	33.75	11.25	9120	630	34.1	11.0	64.5	4.4	12.0	7.5	良	1.4

/m³・細骨材率は41.6%である。

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 55リットル（練混ぜ量は50リットル）の強制練りミキサを用い、目標強度 36, 48のN/mm²のコンクリートは粗骨材・細骨材・セメント・高炉スラグ微粉末を投入し、15秒間空練りし、AE減水剤を溶解した練混ぜ水を加えて60秒間練混ぜた。また、目標強度 80N/mm²のコンクリートは細骨材・セメント・高炉スラグ微粉末を投入し、15秒間空練りを行い、高性能AE減水剤を溶解した練り混ぜ水を投入し、60秒間練り混ぜた。その後、粗骨材を加えて 60秒間混練した。

2.4 実験項目と方法

(1) ワ・カビリティ

スランプ試験およびスランプフロ - 試験におけるフレッシュコンクリートの状態から目視により観察・判断した。

(2) スランプ

JIS A 1101 (コンクリートのスランプ試験方法) によった。

(3) スランプフロ -

JASS 5 T- 503 (コンクリートのスランプフロ - 試験方法) によった。

(4) 空気量

JIS A 1128 (フレッシュコンクリートの空気の圧力による試験方法 (空気室圧力方法)) によった。なお、目標空気量を得るため空気調整助剤により空気量の調整を行った。

(5) プリ - ディング量

JIS A 1123 (コンクリートのプリ - ディング試験方法) によった。

(6) 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 × 20cmの円柱供試体を用い、24時間後に脱型し、屋外に設置した水を入れたコンテナに供試体を浸漬させ、これを現場水中養生として、所定の材齢で試験を行った。なお、水温は 60分に一回自動記録計で測定し、材齢28日までの平均水温を求めた。

(7) 乾燥収縮率

JIS A 1129 (モルタルおよびコンクリート長さ変化試験方法) のダイヤルゲ - ジ方法によった。供試体は 10 × 10 × 40cmの角柱供試体を用い、材齢 7日まで 20 の水中養生を行ってから、20 ・ 60%RHの恒温恒湿室に放置した。

(8) 凍結融解に対する抵抗性

JIS A 6204 (コンクリート用化学混和剤) 附

属書 2 (コンクリ - トの凍結融解試験方法) に
よって相対動弾性係数を求めた。

3. 実験結果と考察

3.1 フレッシュコンクリ - トの特性

(1) スランプ, スランプフロ - および空 気量

実験室内で測定したスランプは練上がり温度
の高い夏季を除き目標値を確保できた。また,
スランプフロ - および空気量は目標値を確保す
ることができた。

(2) プリ - ディング量

目標強度別調合の最終プリ - ディング量
を 図 - 1 に示す。これによると目標とした
強度 36, 48N/mm²のコンクリ - トでは, 若干
であるが気温の高い夏季に大きく, 気温の低い
冬季に小さくなる傾向を示している。しかし,
いずれも 0.5cm³/cm²以下である。

3.2 硬化コンクリ - トの特性

(1) 圧縮強度

月別による現場水中養生の圧縮強度を 図 -
2 に示す。目標強度 36 N/mm²のコンクリ -
トでは, 現場水中養生温度の高い夏季の初期材
齢 7日は高く, 逆に平均水温の低い冬季では小
さくなっている。しかし, 材齢28日の強度は少
しばらつきがあるものの目標とした圧縮強度が
確保されている。また, 材齢91日でもさらに強
度の増進が見られる傾向を示している。

また, 目標強度 48, 80N/mm²の調合でも目標
強度が確保され, 同様の傾向が見られる。

従って, 気温による補正値を高炉スラグ微粉
末の比表面積を変化させることにより, 材齢28
日の現場水中養生の圧縮強度は一年中同一の調
合により目標とする圧縮強度が得られる。

(2) 高炉スラグ微粉末の平均比表面積に よる圧縮強度

目標強度 36, 48, 80N/mm²の調合ともに使用
した高炉スラグ微粉末の平均比表面積は同一で
表 - 2 および表 - 3 に示す混合割合となっ

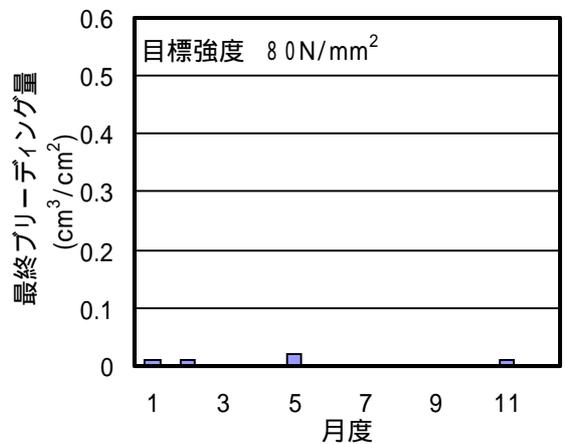
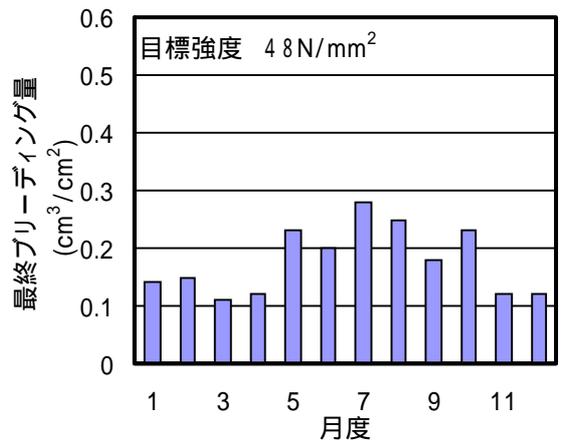
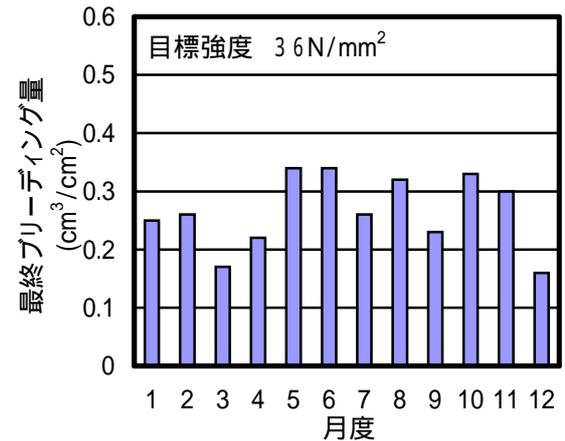


図 - 1 月別による最終プリ - ディング量

ている。これにより 6・7・8月の比表面積は
4,030 ~ 4,410cm²/g, 5・9・10・11月の比表面
積は 5,425 ~ 6,440cm²/g, 3・4・12月の比表面
積は 8,470 ~ 9,120cm²/g, 1・2月の比表面積は
9,765cm²/gとなる。その高炉スラグ微粉末の
平均比表面積と目標とした強度別の材齢28日の
圧縮強度を 図 - 3 に示す。これによると各月
における圧縮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、ほぼ同一の圧縮強度が得られると考えられる。

(3) 乾燥収縮率

材齢 7日を基長とした月別乾燥収縮率を図 - 4 に示す。材齢 7日の標準養生後に恒温恒湿室 20・60% RHで養生しているため気温による影響はみられない。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、目標強度 36N/mm²の調合では、比表面積が小さい高炉スラグ微粉末 (4,030cm²/g) を使用した7・8月度では、初期の乾燥期間 7日の乾燥収縮率は約 2×10^{-4} と小さく、逆に比表面積の大きい高炉スラグ微粉末 (9,765cm²/g) を使用した2月度では約 3×10^{-4} と大きくなっている。しかし、乾燥期間28日で見ると各月の乾燥収縮率は約 $3.5 \sim 4.7 \times 10^{-4}$ となり、さらに乾燥期間91日では $5 \sim 6 \times 10^{-4}$ 程度の値となっている。

また、目標強度 48, 80N/mm²のコンクリートでも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が大きいものほど初期における乾燥収縮率は大きい。

(4) 凍結融解に対する抵抗性

300サイクルまで行った目標強度別の調合による月別の相対動弾性係数を図 - 5 に示す。これによると、目標強度別調合の各月の相対動弾性係数は 100~110%の範囲にあり、ほぼ同じ値が得られている。

4. まとめ

本研究は、材齢28日圧縮強度を 36, 48, 80N/mm²を目標とした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練り混ぜ・打設したコンクリートについて実験した。まとめとして以下のことが言える。

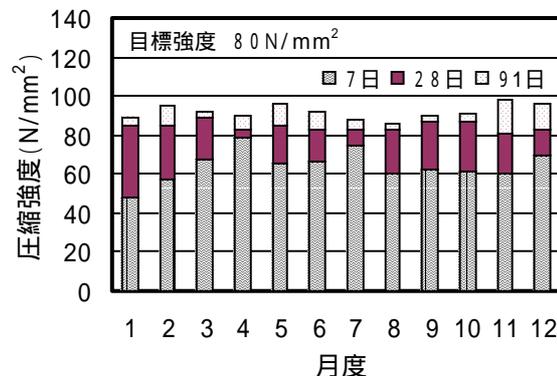
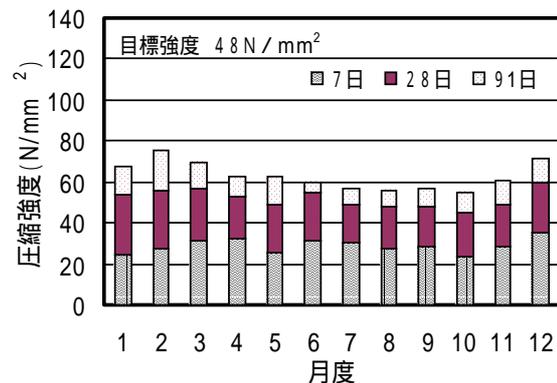
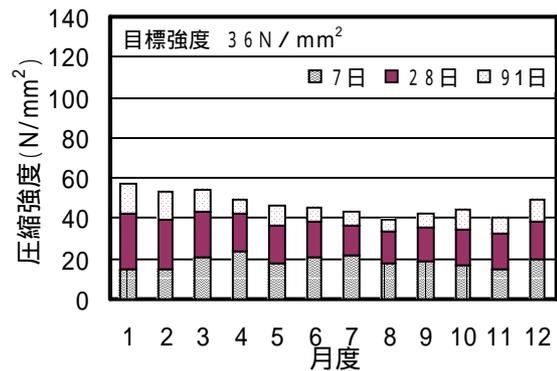


図 - 2 月別による圧縮強度 (現場水中養生)

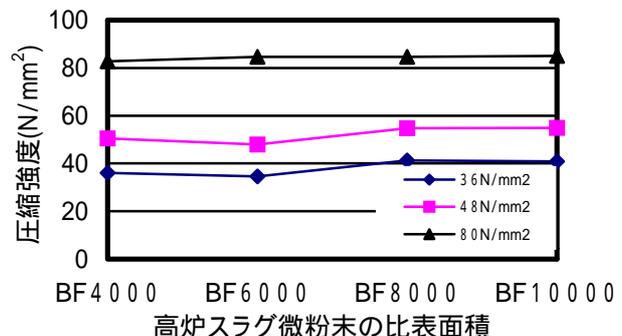


図 - 3 材齢 28 日における圧縮強度 (現場水中養生)

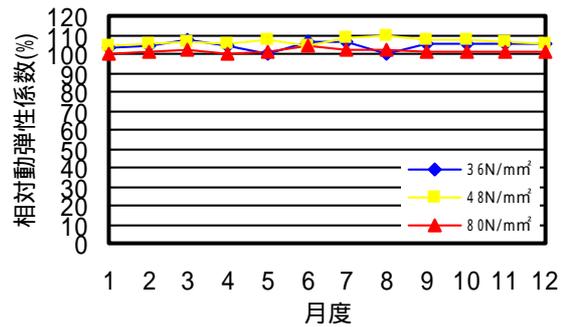
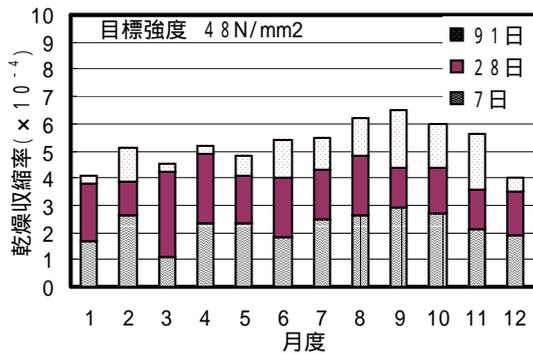
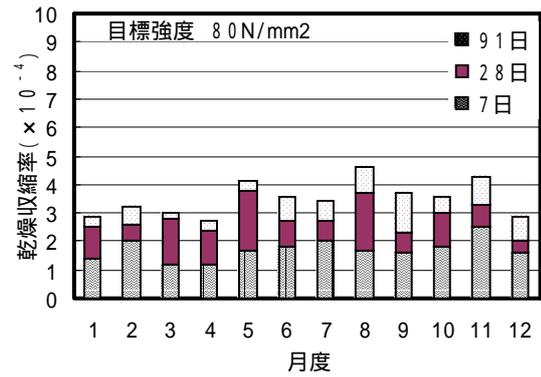
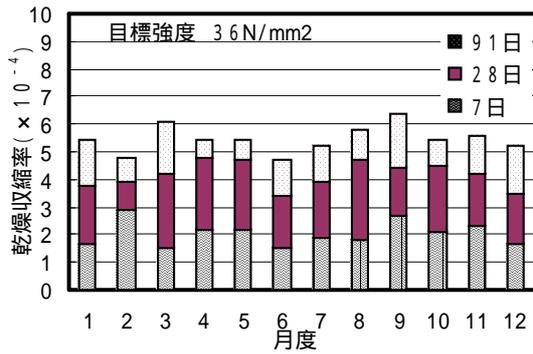


図 - 4 月別による乾燥収縮率

図 - 5 月別による相対動弾性係数

(1) 「ワ-カピリティ」は、適切な比表面積を選択することにより、気温による影響を考慮せず一年中同程度のものが得られる。

また、空気量は空気量調整助剤の適切な使用によって調整が出来る。

(2) プリ-ディング量は、気温による影響を若干受けるが、問題になるほどの差ではない。

(3) 現場水中養生した材齢28日の圧縮強度は、ほぼ同じ値が得られる。

(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、初期では大きくなる。

(5) 凍結融解に対する抵抗性は、ほぼ同じである。

本研究は、住金鹿島鉱化(株)との共同で実施していることを付記して深甚の謝意を表す。

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-ト用混和材としての適用研究(その23, 同一置換率、水結合材比に基づいたコンクリ-トの性質), 日本建築学会大会学術講演概要集(中国), pp.317-318, 1999.9
- 2) 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-トの強度, セメント技術年報, No.42, pp.92-95, 1988
- 3) 横室 隆, 依田彰彦, 浜田博文: 高炉スラグ微粉末のコンクリ-ト用混和材としての適用性, コンクリ-ト工学年次論文集, Vol. 23, pp.145-150, 2001.7
- 4) 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-ト工事, 1997
- 5) 日本建築学会: 高炉スラグ微粉末を使用するコンクリ-トの調合設計・施工指針・同解説, 2001