

論文 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの性質について

横室 隆^{*1}・依田 彰彦^{*2}・小椋 由之^{*3}・添田 悠介^{*3}

要旨：高炉スラグ微粉末の置換率を 45%と一定にし、所要強度 24, 36 および 60N/mm²を対象に、気温による補正值を高炉スラグ微粉末の比表面積をかえることにより、同一の調合で材齢 28 日の所要強度が得られることをこれまでに報告した。このことから気温と比表面積の関係について明らかにした。本研究は高炉スラグ微粉末の置換率を 30%および 70%とかけ、明らかにした気温と比表面積の関係から、高炉スラグ微粉末の平均比表面積を求め、圧縮強度試験を行った。その結果、高炉スラグ微粉末の置換率を 30%および 70%とかけても、同一の調合で材齢 28 日の所要強度が得られることが明らかとなった。

キーワード：高炉スラグ微粉末、比表面積、置換率、圧縮強度

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 種類の品質が規定されている。また、最近では比表面積 10000cm²/g を超え、品質の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 造建物は高層化、大規模化などに伴いコンクリートの高性能化を図ることが要求されている。そのため、設計基準強度 36N/mm²を超える高強度コンクリートなどの必要性が生じている。これらの性能を確保するためには、高炉スラグ微粉末が大きな役割を担っている。

高炉スラグ微粉末はコンクリート用混和材として用いられ、比表面積の大小によりセメントとの水和反応に大きく影響を及ぼす。このことから、気温により比表面積を種々変化させ、一年中同一の調合で材齢 28 日の所要強度が得られるコンクリートの性状について、これまでに報告^{1), 2), 3)}してきた。昨年の日本コンクリート工学協会年次講演会⁴⁾では、高炉スラグ微粉末の置換率を 45%と一定にし、JASS 5 による気温の補

正值を高炉スラグ微粉末の比表面積をかえることにより、一年中同一の調合で材齢 28 日の所要強度が得られることを報告した。このことから、高炉スラグ微粉末の比表面積と気温との関係、さらにはコンクリートの調合強度と水結合材比との関係などについて明らかにした。

本研究は高炉スラグ微粉末の置換率を 45%と一定にし、明かとなった気温と比表面積の関係から高炉スラグ微粉末の平均比表面積を求め、置換率 30%および 70%について、圧縮強度試験を行い検討したものである。

2. 実験概要

JASS 5^{5), 6)}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、気温による強度の補正值を定めている。

本研究は高炉スラグ微粉末の置換率を 30%および 70%と一定にし、気温による補正值を高炉スラグ微粉末の比表面積を変えることにより、

*1 足利工業大学 工学部建築学科教授 博士（工学）（正会員）

*2 足利工業大学 工学部建築学科教授 工博（正会員）

*3 足利工業大学大学院 工学研究科修士課程建築学専攻

一年中同一の調合で所要の強度が得られるコンクリートについて実施したものである。なお、実験は所要強度 24 および 36N/mm² の他に、高強度コンクリートを対象とし、同 60N/mm² についても検討した。

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 2.92g/cm³, ガラス化率 98%, ブレーンによる比表面積 4410cm²/g（平均粒径（9.6 μm））、同 8470cm²/g（5.0 μm）および同 11060cm²/g（4.1 μm）の 3 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, Gmax25mm）、水（記号 W）は上水道水、化学混和剤は所要強度 24, 36N/mm² のコンクリート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 減水剤を用い、所要強度 60N/mm² のコンクリートはポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマー複合体の高性能 AE 減水剤を用いた。

2.2 コンクリートの調合

コンクリートの調合は、材齢 28 日で所要の圧縮強度が得られるコンクリートを目標とし、所要強度 24, 36 および 60N/mm² とした。なお、調合はこれまでの研究^{2),3),4)}から水結合材比を決定した。高炉スラグ微粉末の置換率 30% の場合の、それは 61%, 48% および 30% とした。同様に置換率 70% の場合は 54%, 41% および 24% とした。高炉スラグ微粉末の平均比表面積は前報⁴⁾で提案している、気温と高炉スラグ微粉末の平均比表面積（cm²/g）（S）の関係式から算出した。

$$S=11537e^{-0.0393t} \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

なお(t)は、理科年表から求めた材齢 28 日までの予想平均気温（℃）としている。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た。所要強度 24

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

および 36N/mm² のコンクリートのスランプは 18±2.5cm, 所要強度 60N/mm² のコンクリートのスランプフローは 60±5 cm とし、空気量はいずれも 4±1.5% とした。これらの高炉スラグ微粉末コンクリートの調合を表-2 および表-3 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 100l の一軸強制ミキサーを用い、所要強度 24N/mm² および 36N/mm² のコンクリートは細骨材・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 分間空練りし、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。また、所要強度 60N/mm² のコンクリートは同様のミキサーを用いて細骨材・セメント・高炉スラグ微粉末の順に投入し 15 秒間空練りし、高性能 AE 減水剤を溶解した水を加え、60 秒間練混ぜた。その後、粗骨材を加え 60 秒間練混ぜた。なお、低水結合材のため、所要強度 24 N/mm² および 36 N/mm² と同じ方法で練混ぜると、化学混和剤の使用量が多くなるため、この方法で練混ぜた。

2.4 実験の項目と方法

高炉スラグ微粉末コンクリートの実験項目と方法は、以下に示す通りである。

(1) フレッシュコンクリートの試験方法

a. ワーカビリティ

スランプ試験におけるコンクリートの崩れ方状態から目視によって判断した。

b. スランプ・スランプフロー

JIS A 1101（コンクリートのスランプ試験方法）によった。

c. 空気量

JIS A 1128（フレッシュコンクリートの空気

表－２ 高炉スラグ微粉末のコンクリートの調合とフレッシュコンクリートの結果
(高炉スラグ微粉末の置換率 30%の場合)

月 度	所要強度 (N/mm ²)	水 結 合 材 比 (%)	結合材量(%)				平均 ^{*1} 比 表 面 積 (S) (cm ² /g)	材 齢 28 日 ま で の 予 想 平 均 気 温 (θ) (℃)	単 位 結 合 材 量 (kg/m ³)	細 骨 材 率 (%)	ス ラ ン プ ・ ス ラ ン プ フ ロ ー (cm)	空 気 量 (%)	材 齢 28 日 ま で の 平 均 水 温 (℃)	ワ ー カ ビ リ テ ィ ー	
			セ メ ン ト	高炉スラグ微粉末 ^{*2} の比表面積 (cm ² /g)											
				4410	8470	11060									
1	24	61	普通ポルトランド セメント	-	37.1	629	10100	35	264	41.3	200	39	40	良	
2				-	71.8	282	9200	58			210	38	60	良	
3				129	87.1	-	7900	9.7			185	40	94	良	
4				469	53.1	-	6400	15.0			180	41	146	良	
5				696	30.4	-	5400	19.5			195	45	192	良	
6				855	14.5	-	4700	22.9			185	42	235	良	
7				100.0	-	-	4400	25.2			180	43	263	良	
8				87.8	12.2	-	4600	23.9			195	45	231	良	
9				69.6	30.4	-	5400	19.4			190	42	205	良	
10				40.1	59.9	-	6700	14.1			195	42	155	良	
11				9.9	90.1	-	8100	9.0			205	42	109	良	
12				-	52.5	47.5	9700	4.6			195	42	58	良	
1	36	48		70	-	37.1	629	10100	35	352	37.5	195	41	40	良
2					-	71.8	282	9200	58			205	40	60	良
3					129	87.1	-	7900	9.7			180	43	94	良
4					469	53.1	-	6400	15.0			185	42	146	良
5					696	30.4	-	5400	19.5			200	45	192	良
6					855	14.5	-	4700	22.9			200	42	235	良
7					100.0	-	-	4400	25.2			200	43	263	良
8					87.8	12.2	-	4600	23.9			205	42	231	良
9					69.6	30.4	-	5400	19.4			190	42	205	良
10					40.1	59.9	-	6700	14.1			195	43	155	良
11					9.9	90.1	-	8100	9.0			195	43	109	良
12					-	52.5	47.5	9700	4.6			195	40	58	良
1	60	30	70		-	37.1	629	10100	35	567	28.4	580	40	40	良
2					-	71.8	282	9200	58			575	39	60	良
3					129	87.1	-	7900	9.7			580	42	94	良
4					469	53.1	-	6400	15.0			570	40	146	良
5					696	30.4	-	5400	19.5			585	39	192	良
6					855	14.5	-	4700	22.9			580	38	235	良
7					100.0	-	-	4400	25.2			585	39	263	良
8					87.8	12.2	-	4600	23.9			575	36	231	良
9					69.6	30.4	-	5400	19.4			585	34	205	良
10					40.1	59.9	-	6700	14.1			580	36	155	良
11					9.9	90.1	-	8100	9.0			580	36	109	良
12					-	52.5	47.5	9700	4.6			575	38	58	良

[注] 化学混和剤の使用量(主剤)は、AE 減水剤標準形を(C+BF)×0.25%、高性能 AE 減水剤は(C+BF)×1.4%である。
なお、空気量などについては補助剤で調整した。

*1 高炉スラグ微粉末の平均比表面積は、材齢 28 日までの予想平均気温を求め、提案式から算出した値。

*2 高炉スラグ微粉末は平均比表面積に応じて割合を算出したもの。

表ー３ 高炉スラグ微粉末のコンクリートの調合とフレッシュコンクリートの結果
(高炉スラグ微粉末の置換率 70%の場合)

月 度	所要強度 (N/mm ²)	水 結 合 材 比 (%)	結合材量(%)			平均 ^{*1} 比表面積 (S) (cm ² /g)	材 齢 ²⁸ 日 ま で の 予 想 平 均 気 温 (θ) (℃)	単 位 結 合 材 量 (kg/m ³)	細 骨 材 率 (%)	ス ラ ン プ ・ フ ロ ー (cm)	空 気 量 (%)	平 均 水 温 (℃)	ワ ー カ ビ リ テ ィ 材 齢 ²⁸ 日 ま で の	
			セ メ ン ト	高炉スラグ微粉末 ^{*2} の比表面積 (cm ² /g)										
				4410	8470									11060
1	24	54	30	-	37.1	629	10100	298	41.3	200	39	40	良	
2				-	71.8	282	9200			58	210	38	60	良
3				129	87.1	-	7900			9.7	185	41	94	良
4				469	53.1	-	6400			15.0	180	42	146	良
5				696	30.4	-	5400			19.5	195	46	192	良
6				85.5	14.5	-	4700			22.9	185	43	235	良
7				100.0	-	-	4400			25.2	180	41	263	良
8				87.8	12.2	-	4600			23.9	195	45	23.1	良
9				69.6	30.4	-	5400			19.4	190	43	20.5	良
10				40.1	59.9	-	6700			14.1	195	42	15.5	良
11				9.9	90.1	-	8100			9.0	20.5	42	10.9	良
12				-	52.5	47.5	9700			4.6	19.5	42	5.8	良
1	36	41	30	-	37.1	629	10100	412	37.5	190	40	40	良	
2				-	71.8	282	9200			5.8	19.5	44	6.0	良
3				129	87.1	-	7900			9.7	180	43	9.4	良
4				469	53.1	-	6400			15.0	180	43	14.6	良
5				69.6	30.4	-	5400			19.5	180	45	19.2	良
6				85.5	14.5	-	4700			22.9	190	45	23.5	良
7				100.0	-	-	4400			25.2	190	41	26.3	良
8				87.8	12.2	-	4600			23.9	18.5	45	23.1	良
9				69.6	30.4	-	5400			19.4	180	43	20.5	良
10				40.1	59.9	-	6700			14.1	180	42	15.5	良
11				9.9	90.1	-	8100			9.0	180	40	10.9	良
12				-	52.5	47.5	9700			4.6	180	41	5.8	良
1	60	24	30	-	37.1	629	10100	708	28.4	550	39	40	良	
2				-	71.8	282	9200			5.8	560	35	6.0	良
3				129	87.1	-	7900			9.7	550	40	9.4	良
4				469	53.1	-	6400			15.0	58.5	41	14.6	良
5				69.6	30.4	-	5400			19.5	560	36	19.2	良
6				85.5	14.5	-	4700			22.9	58.5	39	23.5	良
7				100.0	-	-	4400			25.2	58.5	40	26.3	良
8				87.8	12.2	-	4600			23.9	56.5	42	23.1	良
9				69.6	30.4	-	5400			19.4	56.5	39	20.5	良
10				40.1	59.9	-	6700			14.1	550	39	15.5	良
11				9.9	90.1	-	8100			9.0	57.5	40	10.9	良
12				-	52.5	47.5	9700			4.6	58.5	42	5.8	良

[注] 化学混和剤の使用量(主剤)は、AE 減水剤標準形を(C+BF)×0.25%, 高性能 AE 減水剤は(C+BF)×1.4%である。
なお、空気量などについては補助剤で調整した。

*1 高炉スラグ微粉末の平均比表面積は、材齢 28 日までの予想平均気温を求め、提案式から算出した値。

*2 高炉スラグ微粉末は平均比表面積に応じて割合を算出したもの。

の圧力による試験方法) によった。

(2) 硬化コンクリートの試験方法

a. 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 $10\phi \times 20\text{cm}$ の円柱を用い、翌日にキャッピングを施し、翌々日に脱型した。なお、脱型までの養生については実験室内にそのまま放置し、その後直ちに水をはったコンテナ中に供試体を浸せきした。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6時間間隔で1日4回自動記録装置を用い測定し、材齢28日までの平均水温を求めた。

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) スランプ・スランプフローおよび空気量
所要強度 24, 36 および 60 N/mm^2 のコンクリートのスランプ・スランプフローおよび空気量は、表-2 および表-3 に示した通りであり、いずれも目標とした値が得られている。

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-1 および図-2 に示す。例えば、図-1 (a) の高炉スラグ微粉末を 30% 置換した場合の所要強度 24 N/mm^2 をみると、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 月の高炉スラグ微粉末の平均比表面積 4400 g/cm^3 を置換した材齢 7 日の圧縮強度は、 14.0 N/mm^2 と最も小さくなっている。逆に水温の低い 1 月の高炉スラグ微粉末の平均比表面積 10100 g/cm^3 を置換した、材齢 7 日の圧縮強度は 17.8 N/mm^2 と大きな値を示している。同じように所要強度 36 N/mm^2 および 60 N/mm^2 の場合でも図-1 (b) および (c) に示したように同様の結果が得られている。また、高炉スラグ微粉末を 70% 置換した場合でも、同様な結果が得られる。このことから初期材齢においては水温の影響はほとんど受けず、高炉スラグ微粉末の平均比表面積が大きいものほど高い圧縮強度が得られている。

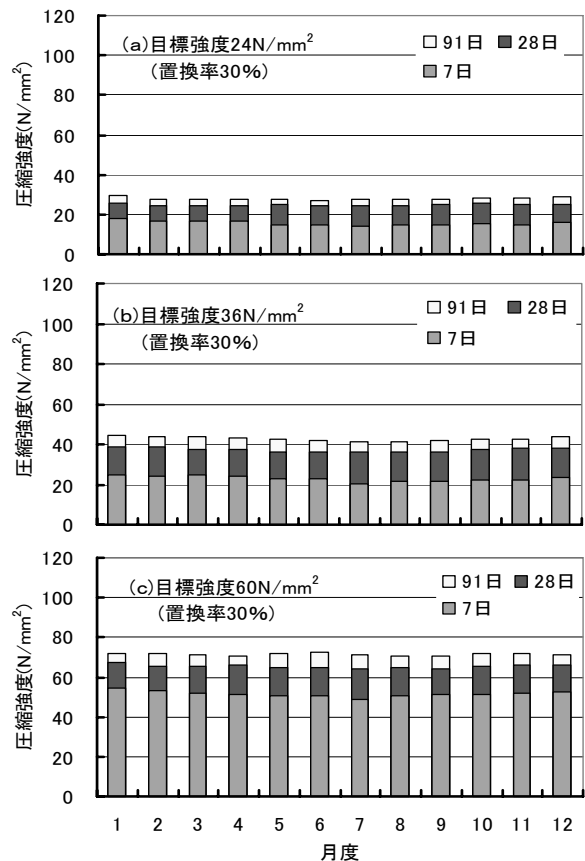


図-1 月別による現場水中養生した場合の圧縮強度 (高炉スラグ微粉末の置換率 30%)

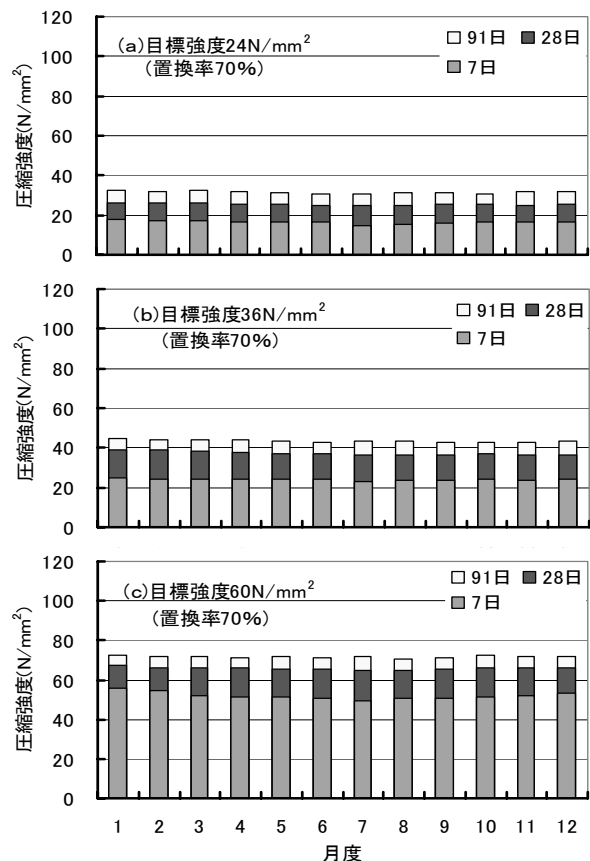


図-2 月別による現場水中養生した場合の圧縮強度 (高炉スラグ微粉末の置換率 70%)

しかし、いずれのコンクリートとも材齢 28 日でみると、ほぼ同一の所要強度が得られている。さらに、長期材齢 91 日をみても、その後の強度増進が伺える。このことは前報⁴⁾で報告した、高炉スラグ微粉末を 45%置換率した場合と同様の結果となっている。従って、気温による補正值は高炉スラグ微粉末の適切な比表面積を定めることにより、高炉スラグ微粉末の置換率を 30%および 70%と変化させても、材齢 28 日の現場水中養生した圧縮強度は一年中同一の調合で所要強度が得られることになる。

(2) 調合強度と水結合材比の関係

図-3 は本実験で得られた、材齢 28 日の圧縮強度をプロットし、調合強度と水結合材比の関係を示したものである。このことから、高炉スラグ微粉末を混和材として 30%および 70%置換した場合の所要強度を得るための水結合材比を求めることができる。

4. まとめ

高炉スラグ微粉末の置換率を 30%および 70%と一定にし、所要強度 24~60 N/mm² のコンクリートを対象として実験をおこなった。その結果、高炉スラグ微粉末コンクリートは、気温による温度補正值を高炉スラグ微粉末の適切な比表面積（例えば、冬季では 10100cm²/g、夏季では 4400 cm²/g）を選択することにより、一年中同一の調合で、所要の圧縮強度が得られることが明らかとなった。

謝辞

本実験は住金鉱化(株)と日立セメント(株)のご協力を得て行ったことを付記して謝意を表する。

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

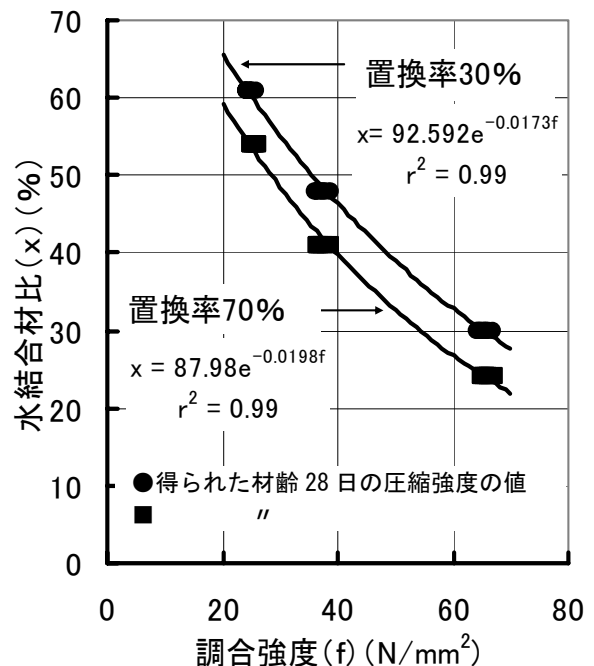


図-3 調合強度と水結合材比の関係

23 同一置換率, 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) 横室 隆, 依田彰彦, 浜田博文: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, pp.145-150, 2001.7
- 3) 高橋一男, 木村正尚, 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性, コンクリート工学年次論文集 Vol.24, pp.99-104, 2002.6
- 4) 横室 隆, 依田彰彦, 添田悠介, 小椋由之: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの性質について, コンクリート工学年次論文集, vol.25, pp113-118, 2003.6
- 5) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5, 鉄筋コンクリート工事, 1997
- 6) 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合設計・施工指針・同解説, 2001