

論文 高炉スラグ微粉末のコンクリート用混和材への適用研究

依田彰彦^{*1}・横室 隆^{*2}

要旨：ブレン法による比表面積が4000, 8000, 11000, 18000, 30000cm²/g前後の高炉スラグ微粉末を混和材として用いた水結合材比45, 65%、スランプ17～20cm、空気量3～5%の砂・砂利・A E減水剤コンクリートのブリーディング量、圧縮強度、ヤング係数、ポアソン比、乾燥による収縮率及び質量減少率、凍結融解作用に対する抵抗性、耐薬品性などについて関連するJ I S等の試験方法によって実験研究した。その結果、置換率にもよるが一般により微粉末な高炉水砕スラグを用いるほど水和反応が早まり、コンクリートの組織が密実になる。そのためか良好な諸結果を得た。

キーワード：高炉スラグ微粉末、混和材、粉末度、比表面積、置換率、水結合材比

1. はじめに

筆者らは以前より高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの諸性質を実験研究している[1], [2], [3], [4], [5], [6]。本研究は近い将来のコンクリートの多様化を鑑み、以前に報告している高炉スラグ微粉末の比表面積の範囲より、さらに微粉末化した場合のコンクリートの諸性質について究明することを目的として実施した。

2. 使用材料

a. セメント

① 早強ポルトランドセメント (O社製品、比重3.12、K₂₈500kgf/cm²、記号H)

② ピュアな普通ポルトランドセメント (M社製品、比重3.15、K₂₈433kgf/cm²、記号N)

b. 高炉スラグ微粉末 (すべてS社製品、比重2.92、ガラス化率98%、記号B F)

4000(ブレン法による比表面積4830cm²/g, 平均粒径9.6μm)、8000(同8180cm²/g, 4.8μm)
11000(同10800cm²/g, 3.5μm)、18000(同18050cm²/g, 2.0μm)、30000(同29620cm²/g, 1.0μm)

c. シリカフューム (E社製品、SiO₂ 97.5%、比重2.20、記号S F) 比表面積200000 (平均粒径0.15μm)

d. 骨材

鬼怒川産の砂 (f. m. 2.8、比重2.61) と砂利 (最大寸法 25mm、比重2.56、実積率65.8%)

e. 化学混和剤

主成分がリグニンスルホン酸化合物及びポリオール複合体のA E減水剤標準形 (Poz社製品)

f. 水

足利工業大学自家用水 (飲料水)

g. 使用材料の品質は、すべて関連するJ I S及びJ A S S 5の規定値を満たしている。

3. 実験計画

* 1 足利工業大学教授 工学部建築学科、工博 (正会員)

* 2 足利工業大学助教授 工学部建築学科 (正会員)

3. 1目標とするコンク

リート調査

a. 水結合材比：45%、
65%

b. スランプ：17～20
cm

c. 空気量：3～5%

d. 置換率：表-1に
示す。

表-1 置換率 (%)

H	セメント N					
	無混入	高炉スラグ微粉末				
		4000	8000	11000	18000	30000
		30	30	30	15	7.5
		50	50	50	30	15
		70	—	—	—	—

3. 2実験の項目と方法

- ピカー針による結合材ペーストの凝結試験 (J I S R 5201)
- フレッシュコンクリートのワーカビリティ：スランプ試験の際に判定した。
- フレッシュコンクリートのブリーディング量 (J I S A 1123)
- 20℃水中養生した直径10cm・長さ20cm供試体の圧縮強度 (J I S A 1108)
- ヤング係数・ポアソン比：上記d. 圧縮強度の試験時に併せてダイヤルゲージを用いて歪を測定し、最大荷重の1/3の点におけるヤング係数とポアソン比を算出した。
- 20℃水中養生した10×10cm・長さ40cm供試体の曲げ強度 (J I S A 1106)
- 20℃水中養生した直径10cm・長さ20cm供試体の引張強度 (J I S A 1113)
- 乾燥による収縮率・質量減少率 (長さは、J I S A 1129によるコンパレータ法によって測定した。質量は0.1gまで測定できる直示天秤を用いて測定した。いずれも材齢7日まで20℃水中養生した後、20℃・60%室に放置したもので、基長は材齢7日とした。)
- 凍結融解作用に対する抵抗性 (A S T M C 666 A法)
- 耐薬品性：上記d. と同じ形状寸法の供試体を用い、材齢7日まで20℃水中養生した後、材齢28日まで20℃・80%室に放置した。材齢28日から2%塩酸 (記号HCl)、5%硫酸 (記号H₂SO₄)、10%硫酸ナトリウム (記号Na₂SO₄) の各溶液 (20℃) と20℃・80%湿空中とのくり返しを7日間ごとに延べ1年間実施し、同一期間20℃水中養生した圧縮強度と比較検討した。なお、溶液はいずれも7日間ごとに新しいものと取りかえた。
- ポロシチー：C社製の水銀圧入装置を用いて37.5～750000Åのポアーを測定した。

3. 3コンクリートの練りませ及び供試体の作り方

コンクリートの練りませは容量100ℓの強制攪拌ミキサを、砂・砂利は、ともに表乾状態のものを、これ以外はJ I S A 1138によってコンクリート試料を作った。

4. 結果と検討

表-2～5及び図1～5に示し、以下に検討する。

4. 1結合材ペーストの凝結 (表-2)

- 標準軟度を得る水結合材比はNo. 10、12、13を除き比較のNo. 2より大きい。
- 同一置換率では比表面積が大きいほど凝結時間は若干短くなる。
- 同一比表面積では置換率が大きいほど凝結時間は比表面積18000、30000を除き長くなる。

4. 2ワーカビリティ (表-3～4)

- フレッシュコンクリートのワーカビリティはスランプしたコンクリートの形状等から

観察した結果、いずれも良好だった。なお、要した単位水量は、丸みを帯びた骨材と良質なA E減水剤を用いたためか、いずれも170kg/m³以下であった。同一比表面積の場合、置換率が大きいほど単位水量は若干小さい。同一置換率の場合、比表面積は小さいほど単位水量は若干少ない。

4. 3ブリーディング量 (表-3~4)

高炉スラグ微粉末、シリカフェームを混和材として用いたフレッシュコンクリートのブリーディング量は無混入コンクリートより小さくなるか、同程度である。傾向としては①水結合材比別では小さい方が②比表面積はより微粉末なほど③置換率は大きいほど、いずれも小さい。

4. 4圧縮強度 (図-1~2)

一般に高炉スラグ微粉末は微粉末なもののほど、アルカリ刺激水との反応が早まるために初期材齢における圧縮強度が大きい。これは化学的にも報告されている〔7〕、上にコンクリート組織のポロシチーが小さいことから理由づけられよう(図-3~4)。強度の発現傾向はおよそ次の通り。

- 同一置換率における圧縮強度は微粉末なほど、材齢7日または28日までは大きく、それ以降の長期材齢では比表面積11000~8000の高炉スラグ微粉末が大きくなる。
- 同一比表面積における圧縮強度は11000または18000を境にして異なる。すなわち、それらより微粉末なものは置換率が大きい方が圧縮強度は大きい場合が多く、それらより粗いも

表-3 実験結果 (その1、水結合材比45%、細骨材率40.3%、スランプ17~20cm)

組合せ No	結 合 材			置換率 (%)	空気量 (%)	単位水量 (kg/m ³)	ワーカビ ティ-	ブリーディング量 (cc/cm ²)		引張	曲げ	乾燥収縮率 (×10 ⁻⁴)		質量減少率 (%)
	セメント	BF	SF					(kgf/cm ²)		28日	3ヵ月	1年	1年	
								60分	120分					
1	H	—	—	0	3.2	166	良	0.07	0.12	22	69	4.5	6.8	2.9
2	N	—	—	0	4.5	166	良	0.08	0.17	21	68	4.7	7.1	3.3
3	N	4000	—	30	4.0	163	良	0.05	0.11	22	67	4.9	7.1	3.3
4	N	4000	—	50	3.7	161	良	0.07	0.15	23	63	5.0	7.2	3.4
5	N	4000	—	70	3.6	159	良	0.08	0.18	16	54	5.0	7.4	3.6
6	N	8000	—	30	3.3	165	良	0.03	0.08	22	68	4.6	6.9	3.1
7	N	8000	—	50	3.0	163	良	0.02	0.05	23	72	4.8	7.1	3.3
8	N	11000	—	30	3.2	166	良	0.03	0.07	25	78	4.8	7.1	3.3
9	N	11000	—	50	3.0	164	良	0.02	0.04	26	82	4.7	6.7	2.8
10	N	18000	—	15	3.4	167	良	0.04	0.08	25	81	4.6	7.0	3.0
11	N	18000	—	30	3.1	166	良	0.02	0.04	27	83	4.5	6.8	2.9
12	N	30000	—	75	3.7	167	良	0.03	0.07	25	84	4.7	7.1	3.4
13	N	30000	—	15	3.5	168	良	0.01	0.04	27	84	4.5	6.8	3.1
14	N	—	200000	75	3.4	168	良	0.04	0.06	25	76	4.7	7.1	3.1
15	N	—	200000	15	3.4	170	良	0.00	0.01	25	80	5.1	7.2	3.2

のは置換率が小さい方が圧縮強度は大きい場合が多い。

c. 同一置換率でシリカフェームに匹敵できる高炉スラグ微粉末は比表面積30000または比表面積18000の材齢28日までで、それ以降の材齢ではシリカフェームの圧縮強度が大きい。

d. 今回、用いた高炉スラグ

微粉末の多くは普通セメントを用いた無混入のコンクリートの圧縮強度に匹敵できる。しかし、早強セメントを用いた無混入コンクリートに対しては材齢91日以

降では匹敵できるが、材齢28日までは匹敵できない。

e. ばらつきを示す標準偏差は19.3kgf/cm²以下、変動係数は5.7%以下であった。また、用いた普通ポルトランドセメントとの相性は、今回も良かったことを付記する。

4. 5材齢28日以降のヤング係数 (図-5)

日本建築学会構造計算規準で提唱している式を90%以上のデータが上回る。

4. 6材齢28日以降のポアソン比は紙面の都合上、データを載せていないが、0.15~0.25の範囲にあった。その傾向は圧縮強度が大きいほど、また材齢が経過するほど、ともに大きい。

4. 7材齢28日の曲げ・引張強度 (表-3)

表-4 実験結果 (その2、水結合材比65%、スランプ17~20cm)

組合せ No	結合材			置換率 (%)	空気量 (%)	単位水量 (kg/m ³)	ワーカビリティ	ブリーディング量 (cc/cm ²)	
	セメント	B F	S F					60分	120分
1	H	—	—	0	3.4	164	良	0.15	0.30
2	N	—	—	0	4.0	164	良	0.34	0.47
3	N	4000	—	30	4.5	161	良	0.20	0.33
4	N	4000	—	50	3.0	159	良	0.33	0.42
5	N	4000	—	70	3.5	157	良	0.34	0.47
6	N	8000	—	30	4.2	163	良	0.13	0.24
7	N	8000	—	50	3.4	161	良	0.11	0.19
8	N	11000	—	30	3.1	164	良	0.21	0.27
9	N	11000	—	50	4.0	162	良	0.05	0.09
10	N	18000	—	15	4.5	165	良	0.13	0.23
11	N	18000	—	30	3.9	164	良	0.04	0.09
12	N	30000	—	7.5	4.4	165	良	0.06	0.14
13	N	30000	—	15	4.4	166	良	0.05	0.10
14	N	—	200000	7.5	4.4	166	良	0.06	0.14
15	N	—	200000	15	4.4	170	良	0.05	0.10

〔注〕細骨材率は、すべて44.3%

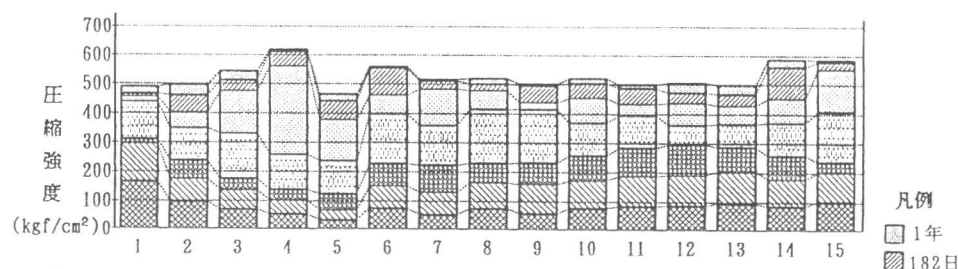
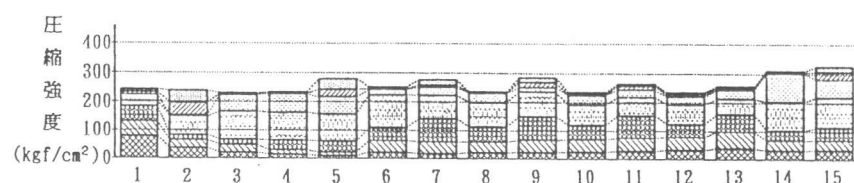


図-1 圧縮強度実験結果 (水結合材比45%、20℃水中養生)



セメント	H	N													
B F	—	—	4000	8000	11000	18000	30000	—	—	200000					
S F	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
率 (%)	0	0	30	50	70	30	50	30	50	15	30	7.5	15	7.5	15

図-2 圧縮強度実験結果 (水結合材比65%、20℃水中養生)

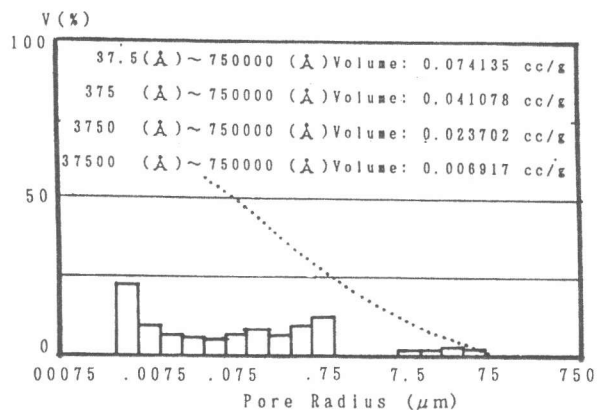


図-3 水結合材比45%のポロシチー
(比表面積4000、置換率50%、材齢3日)

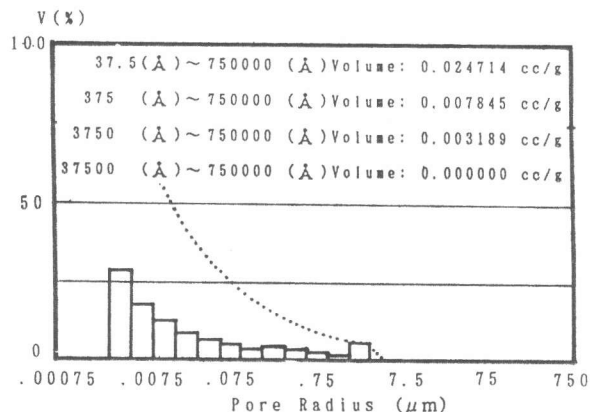


図-4 水結合材比45%のポロシチー
(比表面積18000、置換率50%、材齢3日)

a. 高炉スラグ微粉末コンクリートの曲げ強度は84~54 kgf/cm²で、より微粉末な高炉スラグ微粉末を用いた方が大きく、普通及び早強セメントを用いた無混入コンクリートを上回る場合が多い。また圧縮強度に対する比は0.24~0.17 (平均0.21) である。

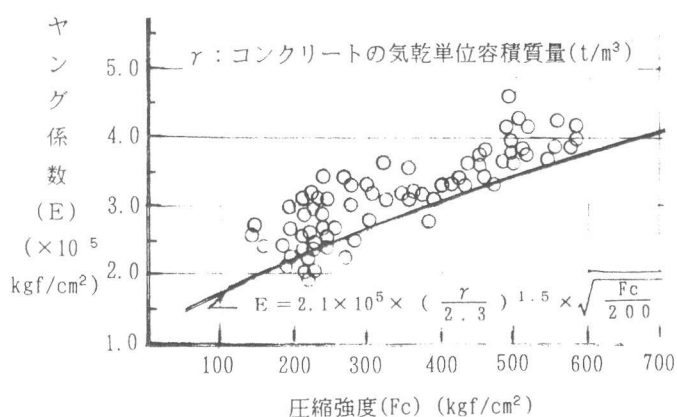


図-5 圧縮強度とヤング係数との関係 (20℃水中養生)

b. 高炉スラグ微粉末コンクリートの引張強度は27~16kgf/cm²で、より微粉末な高炉スラグ微粉末を用いた方が大きく、普通及び早強セメントを用いた無混入コンクリートを上回る場合が多い。また圧縮強度に対する比は0.09~0.06 (平均0.07) である。

表-5 実験結果(その3、水結合材比45%、細骨材率・単位水量は表-3と同じ、スランプ17~20cm)

組合せ No	セメント	結 合 材		置換率 (%)	空気量 (%)	耐久性指数				耐薬品性			
		B F	S F			サイクル数				*3 圧縮強度	圧縮強度比*4		
						78	147	257	300		HCl	H ₂ SO ₄	Na ₂ SO ₄
1	H	—	—	0	4.0	96	95	92	90	474	86	66	91
2	N	—	—	0	4.5	98	95	93	91	480	88	81	87
3	N	4000	—	30	4.8	99	97	95	93	481	90	82	93
4	N	4000	—	50	3.6	98	96	94	92	483	90	83	92
5	N	4000	—	70	3.7	97	95	93	91	495	95	85	94
6	N	8000	—	30	3.3	99	97	96	93	484	97	91	91
7	N	8000	—	50	3.2	97	96	98	94	531	93	89	90
8	N	11000	—	30	3.3	98	96	96	94	503	92	90	90
9	N	11000	—	50	3.0	99	97	95	93	523	90	90	88
10	N	18000	—	15	3.4	99	98	96	94	508	91	91	88
11	N	18000	—	30	3.0	99	97	95	93	522	91	87	86
12	N	30000	—	7.5	3.7	97	95	93	91	513	91	90	87
13	N	30000	—	15	3.0	98	96	95	90	525	91	88	86
14	N	—	200000	7.5	4.0	98	98	96	93	548	84	71	87
15	N	—	200000	15	3.1	99	95	94	92	575	71	66	75

【注】*3 同一期間20℃水中養生した圧縮強度(kgf/cm²)

*4 上記*3に示した値を100とした場合の比(%)

4. 8 乾燥収縮率・質量減少率 (表-3)

- a. コンパレータを用いて測定したコンクリート表面の乾燥収縮率は普通及び早強セメントを用いた無混入コンクリートと比較して高炉スラグ微粉末コンクリートは同程度で、比表面積や置換率のちがいが認められなかった。
- b. 質量減少率は高炉スラグ微粉末が微粉末なものほど、置換率は比表面積11000以上の場合大きいほど、それぞれ若干であるが小さい。

4. 9 凍結融解作用に対する抵抗性 (表-5)

300サイクル繰り返したが、いずれのコンクリートも良好な結果を得た。

4. 10 耐薬品性 (表-5)

- a. 3種類の溶液中と湿空中とを7日間ごとに1年間にわたって繰り返し、ここでは「圧縮強度比」の大小で劣化の程度を判断した。5%硫酸の場合の劣化は多少であるが大きく、以下10%硫酸ナトリウム、2%塩酸の順である。
- b. 5%硫酸と2%塩酸の場合、普通セメントを用いた無混入コンクリートより劣化が大きいのは早強セメント(N01)とシリカフュームを用いたコンクリートで、逆に劣化が小さいのは高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートである。
- c. 10%硫酸ナトリウムの場合、普通セメントを用いた無混入コンクリートと同程度のものが多いが、比表面積4000の高炉スラグ微粉末コンクリートだけは明らかに劣化が小さい。

5. 結論

本研究は多量に発生する貴重な資源の高炉スラグの付加価値をより高めるために従来の比表面積より、さらに微粉末化したコンクリートの諸性質について究明した。得られた結論は次の通り。

- a. より微粉末な高炉スラグを用いるほど水和反応が早まり、硬化体の組織が密実になる。
- b. 高炉スラグ微粉末をより微粉末化したものを用いたフレッシュコンクリートのワーカビリティは良好になる上に、ブリーディング量は小さくなる。
- c. 高炉スラグ微粉末の比表面積と置換率とを組合せた硬化コンクリートの圧縮強度の発現状況をはじめ、耐薬品性が有利など、諸性質を明確にした。

本研究は住友金属工業(株)、住金鹿島鉱化(株)、日立セメント(株)と共同で実施したことを付記する。

参考文献

- 1) 依田彰彦・横室 隆：高炉スラグを混和材として用いたコンクリートの性質、コンクリート工学講演論文集 5、pp. 33-36、1983. 4
- 2) 依田彰彦・横室 隆・木村正尚：高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性質、セメント技術年報 41、pp. 142-145、1987. 12
- 3) 依田彰彦・横室 隆：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 42、pp. 92-95、1988. 12
- 4) 依田彰彦・横室 隆：高炉スラグ微粉末を20、45、65%内割添加したコンクリートの性質、セメント・コンクリート論文集 43、pp. 132-137、1989. 12
- 5) 依田彰彦：高炉スラグ微粉末の高強度・高耐久性コンクリートへの利用、Gypsum & Lime 243、pp. 82-87、1993
- 6) 依田彰彦：高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性質、材料 Vol 43、No 491、pp. 943-948、1994. 8
- 7) 佐藤和義・小西英一郎・深谷一夫：スラグ粉末の粒度と水和反応性、セメント技術年報 39、pp. 49-52、1985. 12