

論文 高炉スラグ微粉末の高強度・高耐久性コンクリートの利用に関する研究

依田彰彦*1・横室 隆*2・木村正尚*3・島崎信明*4

要旨: 高炉スラグ微粉末の比表面積 4,000、8,000、11,000、18,000、30,000cm²/g を用いたコンクリートの高強度・高耐久性化を図ることを目的として水結合材比 25 %、スランプ 17 ~ 23cm、空気量 3 % 以下について材齢 5 年までの圧縮強度をはじめ、ヤング係数、ポアソン比、中性化深さを測定した。併せて比表面積 200,000cm²/g のシリカフュームについても行い、比較検討に供した。

その結果、高炉スラグ微粉末は、シリカフュームを用いたコンクリートと同様、混和材として高強度・高耐久性コンクリートに使用できる見通しが得られた。

キーワード: 高炉スラグ微粉末、比表面積、置換率、水結合材比、コンクリートの性質

1. はじめに

本実験研究は、省資源・省エネルギーや地球環境保全等、社会的な要請に資するために我が国で大量に発生する高炉水砕スラグを比表面積 4,000cm²/g ~ 30,000cm²/g まで微粉末化し、それを混和材として高強度・高耐久性コンクリートへの利用を図ることを目的として既往の文献^{1) ~ 5)}を参考にして実施した。併せて比較検討のために比表面積 200,000cm²/g (平均粒径 0.1 μm) のシリカフュームについても行った。

2. 使用材料

(1) セメント

ビュアな普通ポルトランドセメント (M 社製品、MgO 1.9 %、SO₃ 2.1 %、ig.loss 0.5 %、R₂O 0.73 %、密度 3.15g/cm³、比表面積 3260cm²/g、K₂₈ 59.5N/mm²)

(2) 高炉スラグ微粉末 (すべて S 社製品、密度 2.92g/cm³、ガラス化率 98 %、せっこう無、記号 BF)

① 4,000 (ブレーン法による比表面積 4,830cm²/g、

平均粒径 9.6 μm)

② 8,000 (同 8,180cm²/g、4.8 μm)

③ 11,000 (同 10,800cm²/g、3.5 μm)

④ 18,000 (同 18,050cm²/g、2.0 μm)

⑤ 30,000 (同 29,620cm²/g、1.0 μm)

(3) シリカフューム (E 社製品、SiO₂ 97.5 %、密度 2.20g/cm³、ブレーン法による比表面積 200,000cm²/g、平均粒径 0.15 μm、記号 SF)

(4) 骨材

① 鬼怒川産の砂 (粗粒率 2.8、絶乾密度 2.61g/cm³、吸水率 1.7 %)

② 鬼怒川産の砂利 (最大寸法 25mm、絶乾密度 2.56g/cm³、実積率 65.6 %、破碎値 15.4 %、すりへり減量 15.9 %、単位容積質量 1,690kg/m³)

(5) 化学混和剤

主成分がポリカルボン酸エーテル系の複合体の高性能 AE 減水剤標準形 (Poz 社製品、密度 1.05g/cm³、Rm 0.1 %)

(6) 水

足利工業大学自家用水 (飲料水、色度 5 度以下、濁度 2 度以下、水素イオン濃度 6.7、蒸発

*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 日立セメント(株) 研究開発部長 (正会員)

*4 住金鹿島鉱(株) 技術営業担当部長 (正会員)

表-1 置換率(%)と調合No

高炉スラグ微粉末(BF)	—	4,000				8,000		11,000		18,000		30,000		—	—
シリカフューム(SF)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	200,000		
置 換 率(%)	0	30	50	70	30	50	30	50	15	30	7.5	15	7.5	15	
調 合 No	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	

残留物 163ppm、塩素イオン 7.6ppm、過マンガン酸カリウム消費量 0.5ppm)

(7) 使用材料の品質は、すべて関連する JIS 及び JASS 5 の規定値を満たしている。

3. 実験計画

3.1 目標とするコンクリート調合

- (1) 水結合材比：25 %
- (2) スランプ：17～23cm
- (3) 空気量：3 %以下
- (4) 置換率：表-1 に示す。

3.2 実験の項目と方法

(1) フレッシュ

ユコンクリート

のワーカビリティ

：スランプ

試験の際にスラ

ンプしたコンク

リートの形状

や、これをタッ

ピングしたとき

のくずれ方など

によって判断し

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) 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。

(4) フレッシュコンクリートのブリーディング

量：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。

(5) 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。なお、供試

体の直径は 10cm、水中養生温度は 20℃・5℃、

圧縮強度は Si 社製の 100 トン電子管式の万能

試験機によった。

(6) ヤング係数・ポアソン比：上記 e、圧縮

強度の試験時に併せてダイヤルゲージを用いて

歪みを測定し、最大荷重の 1/3 の点におけるヤ

表-2 実際に得られた水結合材比25%の調合・ブリーディング量等

No	置換率 (%)	打込み年月	単位水量 (kg/m ³)	空気量 (%)	デワイーカビリ	最終ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	中性化深さ (mm)	
									28 日	1 年 5 年
2	0	'93.9	169	0.8	良	0	39	0.19	0	0
		'94.1	169	2.5	良	0.02	33	0.17	0	0
3	BF ⁽¹⁾ 30	'93.9	166	0.9	良	0	40	0.20	0	0
		'94.1	166	3.0	良	0.02	31	0.17	0	0
4	BF ⁽¹⁾ 50	'93.9	164	1.0	良	0	37	0.19	0	0
		'94.1	164	3.0	良	0.02	30	0.17	0	0
5	BF ⁽¹⁾ 70	'93.9	162	0.7	良	0	34	0.18	0	0
		'94.1	162	2.6	良	0.01	29	0.17	0	0
6	BF ⁽²⁾ 30	'93.9	168	0.8	良	0	41	0.21	0	0
		'94.1	168	2.9	良	0.02	32	0.18	0	0
7	BF ⁽²⁾ 50	'93.9	166	0.9	良	0	38	0.20	0	0
		'94.1	166	2.3	良	0.01	32	0.18	0	0
8	BF ⁽³⁾ 30	'93.9	169	1.0	良	0	42	0.21	0	0
		'94.1	169	2.6	良	0.01	33	0.18	0	0
9	BF ⁽³⁾ 50	'93.9	167	0.8	良	0	41	0.21	0	0
		'94.1	167	2.4	良	0.01	33	0.17	0	0
10	BF ⁽⁴⁾ 15	'93.9	170	0.9	良	0	41	0.21	0	0
		'94.1	170	2.9	良	0.01	33	0.17	0	0
11	BF ⁽⁴⁾ 30	'93.9	169	0.9	良	0	42	0.21	0	0
		'94.1	169	2.5	良	0.01	33	0.18	0	0
12	BF ⁽⁵⁾ 7.5	'93.9	170	1.0	良	0	41	0.21	0	0
		'94.1	170	2.7	良	0	33	0.17	0	0
13	BF ⁽⁵⁾ 15	'93.9	171	1.3	良	0	42	0.21	0	0
		'94.1	171	2.7	良	0	34	0.18	0	0
14	SF ⁽⁶⁾ 7.5	'93.9	171	1.5	良	0	43	0.21	0	0
		'94.1	171	2.9	良	0	32	0.18	0	0
15	SF ⁽⁶⁾ 15	'93.9	176	2.0	良	0	42	0.21	0	0
		'94.1	176	2.8	良	0	31	0.18	0	0

[注] 比表面積は次の通り (1)4,000 (2)8,000 (3)11,000 (4)18,000 (5)30,000

(6)200,000cm²/g。細骨材率は 37.3 %、砂利のかさ容積は 0.567m³/m³ と同一にした。

また高性能 AE 減水剤の使用量は単位結合材量の 1.8～2.0 %とした。スランプは 17～23cm の範囲にあった。

ング係数とポ
アソン比を算
出した。

(7) 中性化
深さ：ごく一
般の屋外（気
温 - 2.1 ~
36.9℃（平均
13.7℃）、湿度
17 ~ 100 %
（平均 71 %）、
年平均降雨量
1,240mm、CO₂
濃度 295 ~
305ppm）にて
自然暴露した
高さ 20 × 幅
20 × 長さ
30cm 供試体の
側面から直径

表 - 3 水結合材比 25% の圧縮強度

No	置換率 (%)	水 中 養 生 温 度 (℃)	圧 縮 強 度 (N/mm ²)								
			材 齢								
			1 日	3 日	7 日	28 日	91 日	182 日	1 年	3 年	5 年
2	0	20	25.9	49.3	61.7	66.6	70.7	74.3	76.4	79.4	80.1
		5	—	37.1	44.1	52.1	55.9	58.2	60.9	62.7	63.4
3	BF ⁽¹⁾	20	13.8	37.8	45.8	68.6	76.5	77.5	80.3	82.1	87.4
	30	5	—	28.2	34.6	44.8	51.2	55.5	64.5	66.0	67.4
4	BF ⁽¹⁾	20	13.4	25.4	38.0	60.5	76.0	76.8	78.3	80.9	83.1
	50	5	—	15.6	26.6	43.0	49.9	50.9	63.8	66.7	68.0
5	BF ⁽¹⁾	20	10.3	19.9	35.5	54.1	68.0	72.5	73.4	73.9	78.7
	70	5	—	6.3	15.7	32.5	41.2	45.0	47.0	47.8	51.4
6	BF ⁽²⁾	20	14.0	39.4	51.0	72.1	80.2	81.6	83.4	86.0	88.4
	30	5	—	28.4	37.9	47.5	53.1	63.6	76.3	78.1	79.3
7	BF ⁽²⁾	20	13.0	34.8	49.5	65.2	77.7	79.4	80.5	90.3	93.4
	50	5	—	17.1	33.2	47.6	50.4	52.8	67.0	77.0	77.2
8	BF ⁽³⁾	20	15.0	41.6	56.5	76.8	81.8	82.9	84.1	89.1	93.3
	30	5	—	28.6	47.2	57.2	66.3	76.4	83.6	88.1	91.8
9	BF ⁽³⁾	20	14.2	36.3	57.5	71.9	79.2	79.7	81.0	90.5	106.7
	50	5	—	18.0	46.6	57.0	59.2	62.2	69.0	88.3	91.3
10	BF ⁽⁴⁾	20	18.7	45.9	58.8	72.1	81.9	82.4	82.8	83.5	86.9
	15	5	—	34.7	64.8	77.5	86.7	93.5	95.1	107.3	109.6
11	BF ⁽⁴⁾	20	16.4	46.5	60.2	78.0	82.2	84.4	86.9	88.2	90.0
	30	5	—	29.0	61.8	82.7	90.7	96.4	97.7	108.5	114.5
12	BF ⁽⁵⁾	20	18.8	47.4	59.2	72.1	77.1	86.9	88.1	89.0	91.6
	7.5	5	—	35.6	55.1	67.5	68.4	70.5	78.3	79.4	87.0
13	BF ⁽⁵⁾	20	34.4	53.7	64.4	79.4	83.9	87.7	88.5	89.2	96.3
	15	5	—	32.2	63.7	71.0	72.1	80.6	83.2	88.1	89.1
14	SF ⁽⁶⁾	20	34.5	59.3	69.3	86.1	90.5	96.8	97.3	99.4	101.5
	7.5	5	—	35.1	48.7	58.6	60.4	65.7	71.9	78.1	83.0
15	SF ⁽⁶⁾	20	29.4	52.8	64.1	84.2	86.5	93.6	95.7	97.7	100.1
	15	5	—	26.0	46.0	52.0	61.3	71.9	76.8	82.8	83.9

〔注〕 プレーン法による比表面積は次の通り (1) 4,000 (2) 8,000 (3) 11,000
(4) 18,000 (5) 30,000 (6) 200,000cm²/g。

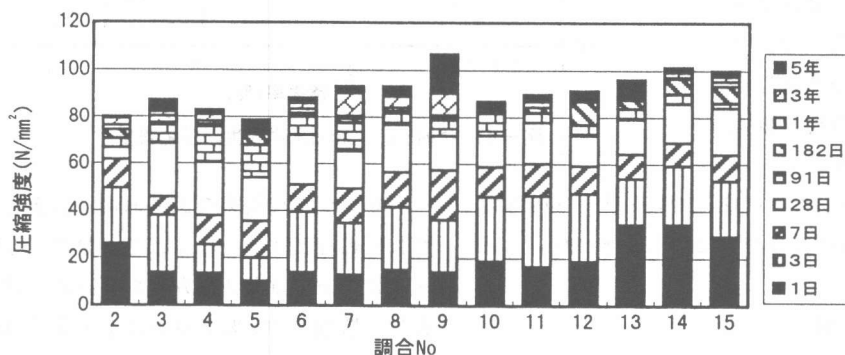


図 - 1 圧縮強度実験結果（水結合材比 25%、20℃水中養生）

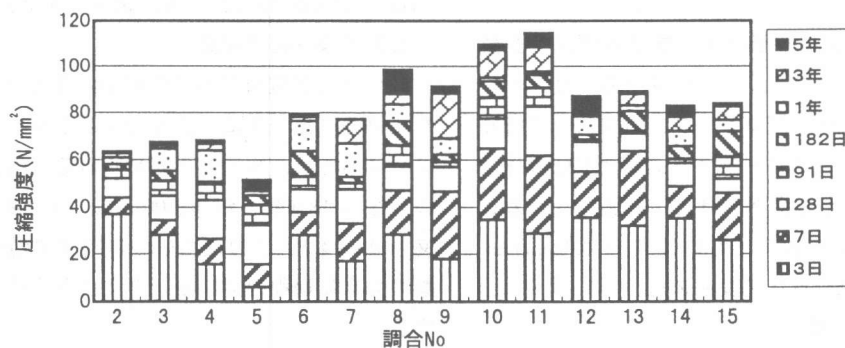


図 - 2 圧縮強度実験結果（水結合材比 25%、5℃水中養生）

10cmのコアを採取し、試験時に割裂・清掃し、その割裂面に1%のフェノールフタレインアルコール溶液を噴霧し、赤紫色にならなかった部分を中性化したものと判断して1cm間隔に両側面18点の中性化深さをノギスで測定することにした。

3.3 コンクリートの練混ぜ及び供試体の作り方

コンクリートは、20℃水中養生が1993年9月20日、5℃水中養生が1994年1月21日に砂・砂利を、ともに表乾状態にして容量100ℓの強制攪拌ミキサーを用い、先ずモルタルとして3分間練混ぜた後に、粗骨材を投入して2分間練混ぜた。

供試体はJIS A 1132（コンクリートの強度試験用供試体の作り方）によって作った。

4. 結果と検討

表-2～3及び図-1～8に示し、以下に検討する。

4.1 ワーカビリティー・ブリーディング量

フレッシュコンクリートのワーカビリティーは、目視によって観測したが、いずれも良好であった。また、ブリーディング量は水結合材比が25%だったためか、9月に打込んだものはゼロ、1月に打込んだものは0～0.02cm³/cm²と極めて少なかった（表-2）。

4.2 圧縮強度

(1) 比表面積との関係

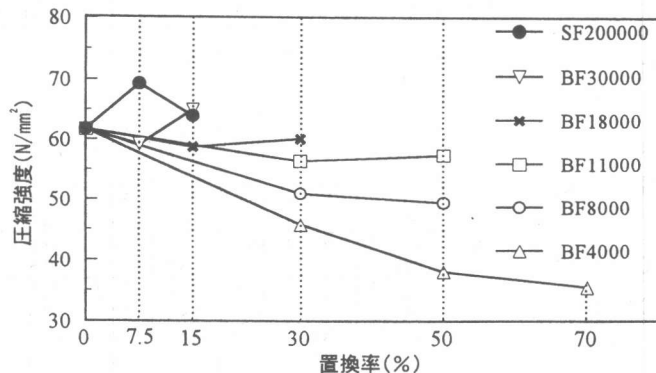


図-3 材齢7日・20℃水中養生の圧縮強度

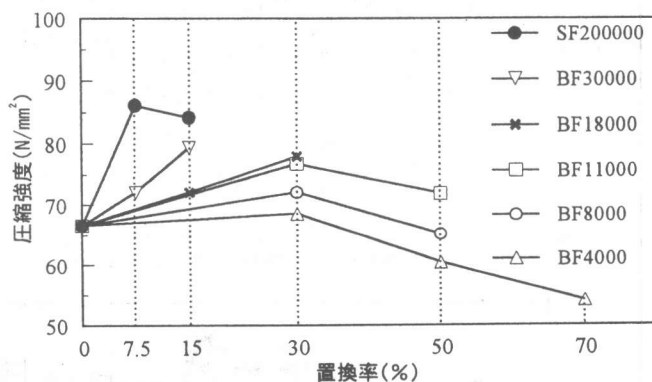


図-4 材齢28日・20℃水中養生の圧縮強度

高炉スラグ微粉末の比表面積が大きくなるにつれ圧縮強度は、一般に大きくなる。しかしケースによっては最大値が変わる（例えば20℃養生・置換率30%で材齢3年・5年の場合及び5℃養生・置換率15%で比表面積18,000と30,000との場合）（表-3、図-1～2）。

(2) 置換率との関係

高炉スラグ微粉末の置換率が大きくなるにつれ圧縮強度は一般に小さくなる。しかし、ケースによっては逆の傾向も認められる（例えば比表面積が18,000とか30,000の場合）（表-3、図-3～4）。この理由は、微粉末の粒が極少なので水和過程の違いかと考えるが今後再検討する。

(3) 材齢との関係

水中 20℃、5℃の養生温度にかかわらず、いずれの調合のコンクリートも材齢の経過にともなって圧縮強度は、当然のことであるが大きくなる（表-3、図-5～6）。

（4）養生温度との関係

20℃と5℃水中養生した結果、前者の圧縮強度が大きい。しかし、高炉スラグ微粉末 18,000 は材齢 7 日以降、後者が大きい。この理由については水和過程の違いかと推察するが今後究明する（表-3）。

（5）シリカフェームとの関係

比表面積 30,000 の高炉スラグ微粉末とシリカフェームとを比較すると 5℃水中養生では前者の圧縮強度が大きく、20℃水中養生では後者が同程度ないし、大きい（表-3）。

4.3 ヤング係数・ポアソン比

材齢 28 日の結果のみ表-

2 に例示したが、ここでは全データより検討する。

（1）ヤング係数

調合の種類にかかわらず、圧縮強度が大きくなるにつれヤング係数は、大きくなる（図-7）。シリカフェーム混入コンクリートが曲線

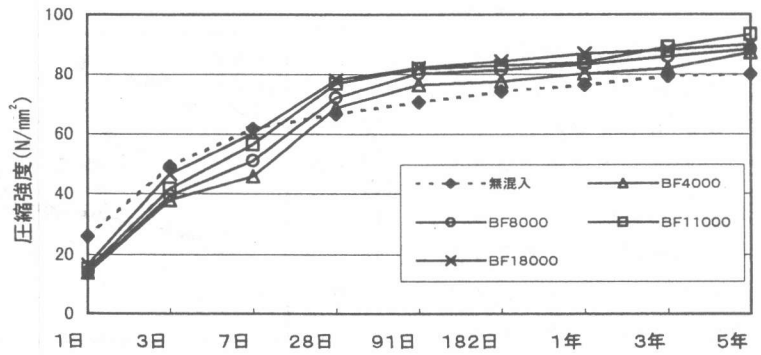


図-5 材齢と圧縮強度との関係（置換率30%・20℃水中養生）

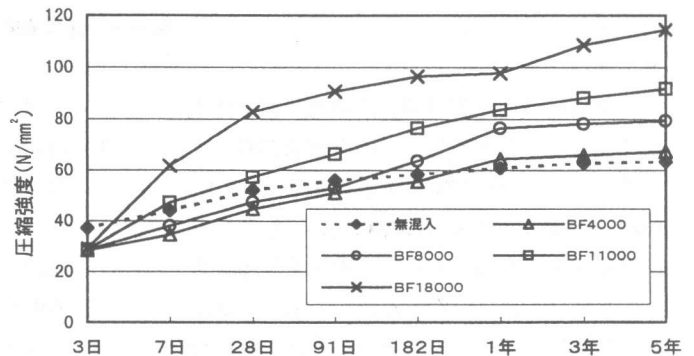


図-6 材齢と圧縮強度との関係（置換率30%・5℃水中養生）

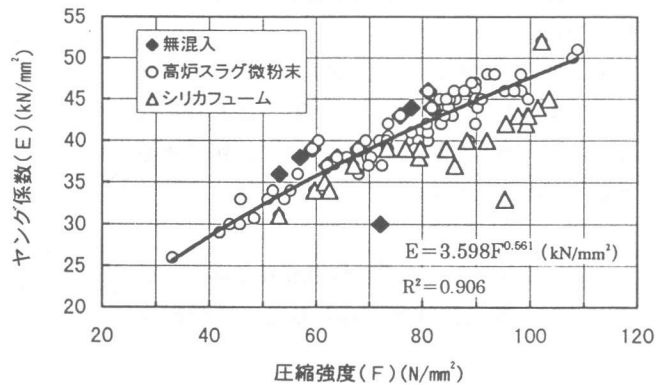


図-7 圧縮強度とヤング係数との関係

より下に分布する理由は水和の違いかと思われる。

（2）ポアソン比

ヤング係数と同様、圧縮強度が大きくなるにつれポアソン比は、大きくなる（図-8）。無混入及びシリカフェーム混入コンクリートのデ

ータのバラツキが大きいのは供試体の締固めに若干、問題があったかと思われる。

4.4 中性化深さ

材齢 7 日まで水中養生した後、供試体をごく一般の屋外に放置して材齢 1 年及び 5 年において中性化深さ測定したが、いずれのコンクリートもゼロであった（表 - 2）。

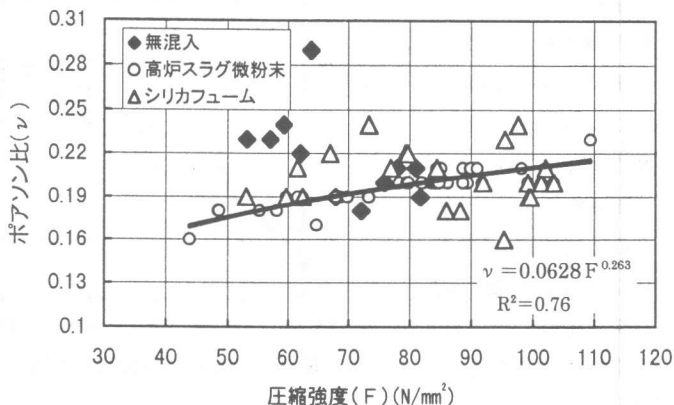


図-8 圧縮強度とポアソン比との関係

5. 結び

本研究は今後、高層 RC 建築物の設計施工が多くなることを予想し、その有用な資料とするため、高炉スラグ微粉末の比表面積 4,000、8,000、11,000、18,000、30,000cm²/g を用いたコンクリートの高強度・高耐久性化を図る実験として水結合材比 25 %、スランプ 17 ~ 23cm、空気量 3 % 以下について材齢 5 年までの圧縮強度をはじめ、ヤング係数、ポアソン比、中性化深さを測定した。併せて比表面積 200,000cm²/g のシリカフュームについても行い、比較検討に供した。

その結果、高炉スラグ微粉末は、シリカフュームを用いたコンクリートと同様、混和材として高強度・高耐久性コンクリートに使用できる見通しが得られた。

本研究は足利工業大学、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，コンクリート工学年次講演会講演論文集，5，pp.33-36，1983.4
- 2) 依田彰彦・横室 隆：超高強度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，11-1，pp.539-544，1989.6

- 3) 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への適用研究，コンクリート工学年次論文報告集，17-1，pp.343-348，1995.6
- 4) 依田彰彦：高炉スラグのセメント・コンクリートへの利用，無機マテリアル Vol6, No 278，pp.62-67，1999.1
- 5) 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(案)・同解説，pp.85-86,1996. 1