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]・添田　悠介[*3]・小椋　由之[*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実施した。実験は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/mm^2 を対象とし，JASS 5 による気温の補正値を高炉スラグ微粉末の比表面積を変えることにより一年中同一の調合で，現場水中養生した材齢 28 日の所要強度が得られることを確認した。このことから気温と比表面積の関係，さらには高炉スラグ微粉末コンクリートの調合強度と水結合材比の関係などを明らかにしたものである。

キーワード： 高炉スラグ微粉末，比表面積，置換率，圧縮強度，長さ変化

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 8000cm^2/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 10000cm^2/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/mm^2 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。

高炉スラグ微粉末をコンクリート用混和材として活用を図るためには，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ことを利用し，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。このことから高炉スラグ微粉末の比表面積と気温の関係，さらにはコンクリートの調合強度と水結合材比の関係などを明らかにしたものである。

なお，本論文は日本建築学会大会[1)]および日本コンクリート工学協会年次講演会[2), 3)]で発表したものを参考に，さらに実験を加え再検討しとりまとめたものである。

2.　実験概要

JASS 5[4),5)]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値を定めている。

本研究は高炉スラグ微粉末の置換率を 45%と一定にし，気温による補正値を高炉スラグ微粉末の比表面積を変えることにより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/mm^2 の他に，高強度コンクリートを対象とし，同 60N/mm^2 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

*1 足利工業大学　工学部建築学科助教授　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

表－１　普通ポルトランドセメントの物性

化学成分(%)			密度	比表面積	圧縮強さ (N/mm^2)		
Ig.loss	MgO	SO_3	(g/cm^3)	(cm^2/g)	3d	7d	28d
0.7	1.5	2.0	3.16	3410	28.1	45.2	61.2

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/cm^3，ガラス化率 98％，ブレーンによる比表面積 2850cm^2/g（平均粒径（10.2μm)），同 4450cm^2/g（9.6μm），同 7980cm^2/g（5.2μm）および同 11240cm^2/g（4.0μm）の４種類である。細骨材は鬼怒川産砂（絶乾密度 2.65g/cm^3，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/cm^3，Gmax25mm)，水（記号W）は上水道水，化学混和剤は所要強度 24，36N/mm^2 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/mm^2 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

所要強度 24，36 および 60N/mm^2 のコンクリートの調合はこれまでの研究 [2),3)]から水結合材比は 60%，45%および 27%とし，高炉スラグ微粉末の比表面積および置換率を定めた。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た。所要強度 24，36N/mm^2 のコンクリートのスランプは 18±2.5cm，所要強度 60N/mm^2 のコンクリートのスランプフローは 60±５cm 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**に示す。

2.3　コンクリートの練り混ぜ

コンクリートの練り混ぜは容量 100ｌの一軸強制ミキサを用い，所要強度 24N/mm^2 および 36N/mm^2 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分間練り混ぜた。

また，所要強度 60N/mm^2 のコンクリートは同様のミキサを用いて細骨材・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 秒間練り混ぜた。その後，粗骨材を加え 60 秒間練り混ぜた。なお，この方法で練り混ぜると同一のスランプフローを得るのに化学混和剤の使用量が少なくなるため練り混ぜた。

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の通りである。

(1)　フレッシュコンクリートの試験方法

ａ．ワーカビリティー：スランプ試験におけるコンクリートの崩れ方の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量の圧力による試験方法)によった。

ｄ．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）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 10φ×20cm 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）棒状温度計を用い測定し材齢 28 日までの平均水温を求めた。

ｂ．乾燥収縮：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）のコンパレーター方法により乾燥期間 26 週まで測定し，材齢１週を基長とした変化率を算出した。供試体は 10×10×40cm の角柱を用い，打込み後，材齢１週まで 20℃水中養生した後，20℃

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	所要強度	水結合材比	結合材量(%)					平均比表面積 *1	単位結合材量	細骨材率	実験室内の気温	スランプ・スランプフロー	空気量	練り上がり温度	材齢28日までの平均水温	ワーカビリティー
			普通ポルトランドセメント	高炉スラグ微粉末の比表面積 (cm²/g)												
	(N/mm²)	(%)		2850	4450	7930	11240	(cm²/g)	(kg/m³)	(%)	(℃)	(cm)	(%)	(℃)	(℃)	
1	24	60	55	-	-	22.5	22.5	9560	268	41.0	3.0	19.0	3.8	11.9	4.7	良
2				-	-	22.5	22.5	9560			5.0	19.5	4.5	9.5	5.2	良
3				-	-	33.75	11.25	8760			9.1	19.5	4.8	15.0	9.7	良
4				-	-	45.0	-	7930			15.8	20.0	3.7	18.0	17.6	良
5				-	33.75	11.25	-	5320			15.9	20.5	4.6	17.5	19.4	良
6				-	45.0	-	-	4450			18.0	20.5	4.1	24.0	22.8	良
7				11.25	33.75	-	-	4050			28.0	19.0	4.0	27.0	26.2	良
8				11.25	33.75	-	-	4050			27.3	20.0	4.3	26.0	26.0	良
9				-	33.75	11.25	-	5320			19.3	20.0	3.0	26.0	19.7	良
10				-	33.75	11.25	-	5320			12.0	19.5	3.1	21.0	17.1	良
11				-	22.5	22.5	-	6190			9.0	20.5	3.0	17.0	10.5	良
12				-	-	33.75	11.25	8760			8.7	20.5	4.2	13.0	6.7	良
1	36	45		-	-	22.5	22.5	9560	376	37.5	3.0	19.0	3.3	12.1	4.7	良
2				-	-	22.5	22.5	9560			5.0	20.0	4.0	10.5	5.2	良
3				-	-	33.75	11.25	8760			9.1	19.5	3.8	16.0	9.7	良
4				-	-	45.0	-	7930			15.8	19.5	3.5	18.0	17.6	良
5				-	33.75	11.25	-	5320			15.9	20.5	4.3	18.5	19.4	良
6				-	45.0	-	-	4450			18.0	19.5	3.5	24.0	22.8	良
7				11.25	33.75	-	-	4050			28.0	20.0	3.9	27.0	26.2	良
8				11.25	33.75	-	-	4050			27.3	20.5	3.8	27.0	26.0	良
9				-	33.75	11.25	-	5320			19.3	20.0	3.2	27.0	19.7	良
10				-	33.75	11.25	-	5320			12.0	19.5	3.1	20.5	17.1	良
11				-	22.5	22.5	-	6190			9.0	20.5	2.8	17.0	10.5	良
12				-	-	33.75	11.25	8760			8.7	20.5	3.1	13.5	6.7	良
1	60	27		-	-	22.5	22.5	9560	630	28.4	3.0	65.0	3.0	14.0	4.7	良
2				-	-	22.5	22.5	9560			5.0	64.0	3.0	11.0	5.2	良
3				-	-	33.75	11.25	8760			9.1	62.0	3.9	16.0	9.7	良
4				-	-	45.0	-	7930			15.8	60.0	4.6	19.0	17.6	良
5				-	33.75	11.25	-	5320			15.9	60.0	4.0	19.0	19.4	良
6				-	45.0	-	-	4450			18.0	55.0	2.6	26.0	22.8	良
7				11.25	33.75	-	-	4050			28.0	55.0	4.5	29.0	26.2	良
8				11.25	33.75	-	-	4050			27.3	56.0	3.8	29.0	26.0	良
9				-	33.75	11.25	-	5320			19.3	62.0	2.9	27.0	19.7	良
10				-	33.75	11.25	-	5320			12.0	65.0	3.1	20.1	17.1	良
11				-	22.5	22.5	-	6190			9.0	65.0	2.9	18.0	10.5	良
12				-	-	33.75	11.25	8760			8.7	65.0	3.6	14.2	6.7	良

［注］化学混和剤の使用量は AE 減水剤標準形は（C＋BF）×0.25%，高性能 AE 減水剤は（C＋BF）×1.4%である。

*1　高炉スラグ微粉末の比表面積を置換率に応じて平均したもの。

・60%RH の恒温恒湿室に放置した。

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 60N/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いずれも目標値を全て満足している。

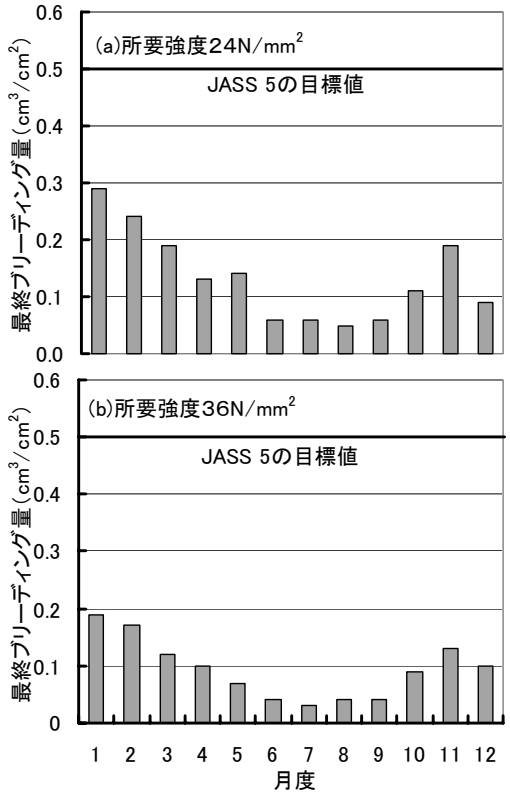
(2) ブリーディング量

実験室内で測定した月別による最終ブリーディング量の一例を**図－1**に示す。これによるとブリーディング量は気温により大きく影響を受ける。しかしいずれのコンクリートとも JASS 5 の目標値 0.5cm^3/cm^2 を下廻っている。なお，所要強度 60N/mm^2 のコンクリートのブリーディング量はいずれも認められなかった。

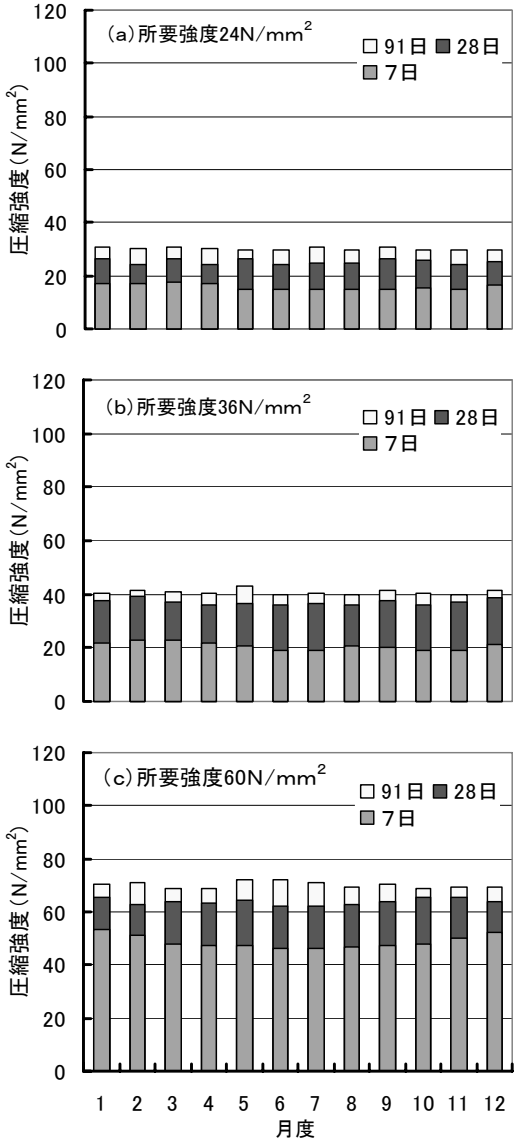
3.2 硬化コンクリートの特性

(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－2**に示す。例えば**図－2**（a）の所要強度 24N/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月の平均比表面積 4050cm^2/g を置換した材齢７日の強度は 14.6N/mm^2 と最も小さくなっている。逆に水温の低い１月の平均比表面積 9560cm^2/g を置換した材齢７日の強度は 16.9N/mm^2 と大きな値を示している。同じように**図－2**（b）および（c）をみても同様の結果となっている。従って，初期材齢においては水温の影響はほとんどみられず比表面積が大きいものほど高い強度が得られている。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



図－1　月別による最終ブリーディング量



図－2　月別による現場水中養生した場合の圧縮強度

ている。また，長期材齢 91 日でみてもその後の強度増進が伺える。従って気温による補正値は高炉スラグ微粉末の比表面積を変えることにより材齢 28 日の現場水中養生した圧縮強度は一年中同一の調合により所要の強度が得られる。

(2)　高炉スラグ微粉末の比表面積による圧縮強度

各月で得られた高炉スラグ微粉末の平均比表面積を**表－２**に示した。これによれば所要強度 24，36 および 60N/mm^2 のコンクリートはいずれも６，７，８月の比表面積は 4050～4450cm^2/g（BF4000），５，９，10，11 月の比表面積は 5320～6190cm^2/g（BF6000），３，４，12 月の比表面積は 7930～8760cm^2/g（BF8000）１，２月の比表面積は 9560cm^2/g（BF10000）となる。その高炉スラグ微粉末の比表面積と材齢 28 日における現場水中養生した圧縮強度の関係を**図－３**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みられない。従って，各月における材齢 28 日の圧縮強度は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ほとんど受けず同一の圧縮強度が得られる。

(3)　気温と高炉スラグ微粉末の比表面積の関係

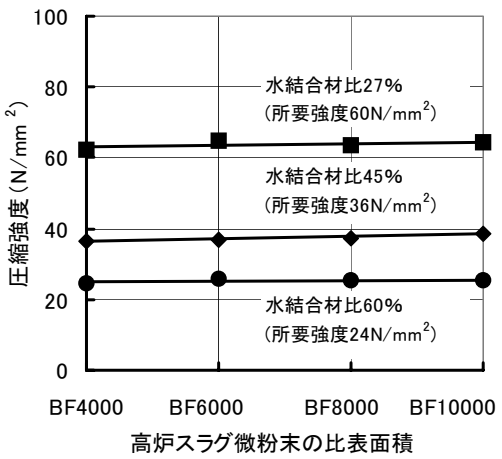
気温と高炉スラグ微粉末の比表面積の関係を**図－４**に示す。これは各月で得られた材齢 28 日までの平均水温から高炉スラグ微粉末の平均比表面積の関係を求めたものである。このことからいずれのコンクリートでも施工する場所が異なっても,打込みから材齢 28 日までの平均気温を算出することにより高炉スラグ微粉末の適切な比表面積を決定することができる。

(4)　調合強度と水結合材比の関係

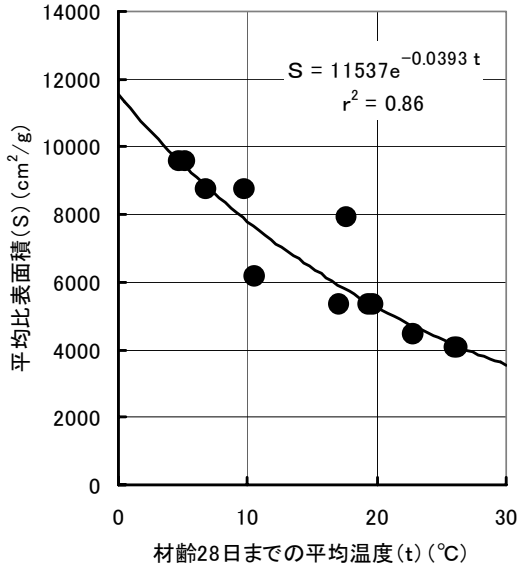
本実験からコンクリートの調合強度と水結合材比の関係を求めると**図－５**のようになり，提案する。相関係数は 0.99 となり調合強度と水結合材比の相関は非常に高い。

(5)　乾燥収縮率

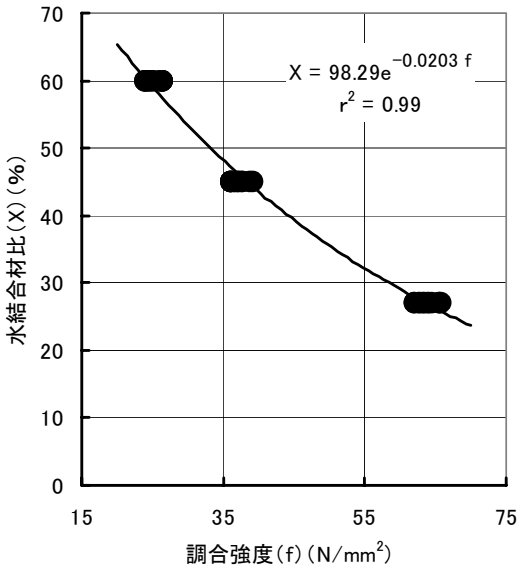
材齢１週を基長として月別による乾燥収縮率を**図－６**に示す。本実験は恒温恒湿室 20℃・



図－３　材齢 28 日における現場水中養生した場合の圧縮強度



図－４　気温と高炉スラグ微粉末の比表面積の関係



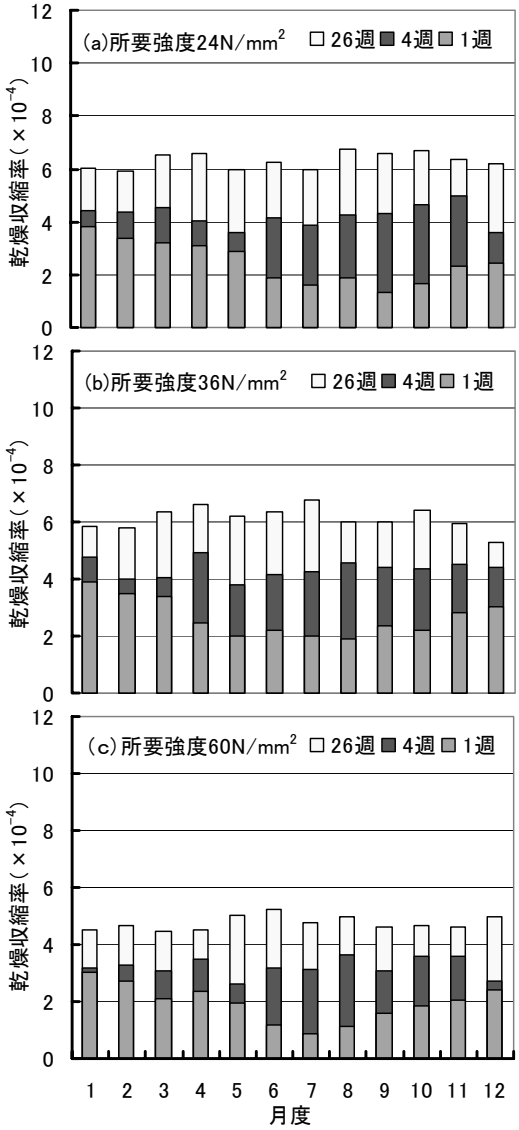
図－５　調合強度と水結合材比の関係

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。例えば**図－６**（ａ）の所要強度 24N/mm^2 について見ると，比表面積が最も小さい高炉スラグ微粉末（4050cm^2/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 1.7×10^{-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（9560cm^2/g）を用いた１月・２月では 3.6×10^{-4} 程度と大きな値を示している。しかし，乾燥期間４週で見ると各月の収縮率の平均は 3.9×10^{-4} 程度となっている。同様に乾燥期間 26 週で見ると各月の収縮率の平均は，6.3×10^{-4} 程度とほぼ同じ値を示している。また，所要強度 36，60N/mm^2 のものも同様の傾向を示し，所要強度の大きいものほど乾燥収縮率は小さくなっている。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いての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。

4.　まとめ

高炉スラグ微粉末の置換率を 45%と一定にし，所要強度 24～60N/mm^2 のコンクリートを対象として実験をおこなった結果，高炉スラグ微粉末コンクリートは気温による温度補正値を高炉スラグ微粉末の適切な比表面積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。

また，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，長期での影響はほとんどなくなる。



図－６　月別による乾燥収縮率

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)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

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･同解説，2001