

論文 高炉スラグ微粉末を用いたセメントペーストの細孔量と強度

李 長江*³・依田彰彦*¹・横室 隆*²

要旨：ブレーン方法によって測定した比表面積が30000cm²/gと4000cm²/g程度の高炉スラグ微粉末を混和材として用いたセメントペーストの細孔量と強度について実験研究した。比表面積30000cm²/g程度の高炉スラグ微粉末を用いたセメントペーストは、高炉スラグ微粉末を用いないセメントペースト（以下、ブレーンと呼ぶ）に比べて、材齢7日までは水和反応が速く、細孔量が大幅に減少することなどによって、強度が著しく増加する。長期材齢では、いずれの高炉スラグ微粉末を用いたセメントペーストも、その組織が密実であることが観察された。

キーワード：高炉スラグ微粉末、比表面積、セメントペースト、細孔量、強度

1. はじめに

筆者らは従来から、比表面積が4000～8000cm²/g程度の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に関する研究を数多く行い、ワーカビリティの改善、ブリーディング量の低減、長期強度の増進、水密性、耐海水性や耐酸性・耐硫酸塩性の向上等の特性があることを明らかにしている[1], [2], [3], [4], [5], [6]。さらに、昨年は11000～30000cm²/g程度に微細化したものを用いて、初期強度が著しく大きくなり、中性化速度が遅くなることなどを報告した[7]。

本研究は、高炉スラグ微粉末の比表面積とセメントペースト硬化体の細孔量及び強度発現性との関係を解明することを目的としたものであり、一昨年から研究しはじめた比表面積30000cm²/g程度のものと通常使用されている比表面積4000cm²/g程度の高炉スラグ微粉末を用いたセメントペーストの細孔量、強度発現性及びそれらの関係について検討した。

2. 実験計画

2.1 使用材料

本実験には、ピュアな普通ポルトランドセメント（比重3.15、比表面積3200cm²/g、記号N）及び混和材として比表面積29620cm²/gと4830cm²/gの高炉スラグ微粉末（比重2.92、ガラス化率98%、記号BF30000、BF4000）を使用した。表-1に普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末の化学分析を示す。また、レーザー回折粒度分布測定装置を用いてBF30000及びBF4000の粒度分布を測定した結果を図-1に示す。BF30000及びBF4000の平均粒径は約1μmと10μmである。なお、水は飲料水を用いた。

2.2 供試体の作製

セメントペースト供試体は、NとBF30000とBF4000及び水を用い（記号：N-BF30000及びN-BF4000）、置換率0%、30%、50%及び70%、水結合材比を35%、40%、45%及び50%とし、これを作製するために容量12ℓのモルタルミキサを用いた。まず、普通ポルト

*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 足利工業大学大学院博士（後期）課程 工修（正会員）

表-1 使用した結合材の化学分析結果(%)

種類	ig. loss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	S	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻
普通ポセ	0.7	0.2	21.4	5.2	3.2	64.7	1.5	—	1.9	0.28	0.56	0.005
BF30000 BF 4000	—	—	33.0	13.9	FeO 0.29	42.5	6.0	0.7	—	0.23	0.31	0.004

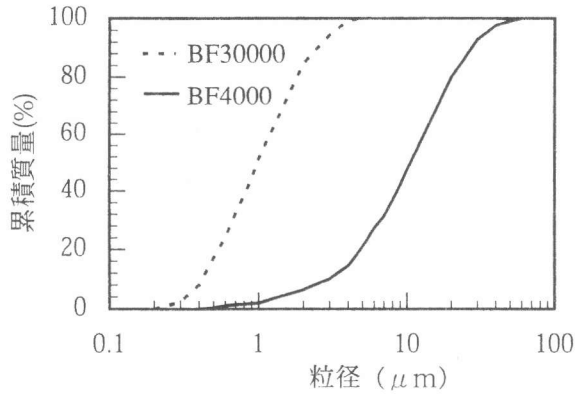


図-1 高炉スラグ微粉末の粒径分布

ランドセメントと高炉スラグ微粉末を1分間空練りしてから所定量の水を入れ、さらに2分間練り混ぜた。その後、4×4×16 cmの型わくに詰め供試体を作製した。作製した供試体は20℃・80%の恒温恒湿室におき、翌日脱型して、20℃の水中で材齢1日、3日、7日、28日、91日、182日、365日まで養生を行った。

2.3 実験方法

各材齢に到達したセメントペースト硬化体よりコア供試体(10φ×40mm)を採取し、アセトンに浸漬して水和を停止させてから、相対湿度11%の雰囲気中にて乾燥させた。この供試体を用いて水銀圧入式ポロシメーターで0.00375~75 μmの細孔量を測定し、強熱減量法による結合水量を測定した。また、走査型電子顕微鏡を用いてセメントペースト硬化体の微細組織の観察を行い、4×4×16 cmの供試体によりJIS R 5201に準じて圧縮強度の測定を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 セメントペーストの結合水量

水結合材比50%、置換率50%とした場合、プレーン、N-BF4000及びN-BF30000の材齢と結合水量との関係を図-2に示す。材齢1日では高炉スラグ微粉末の水和反応に必要なCa(OH)₂の

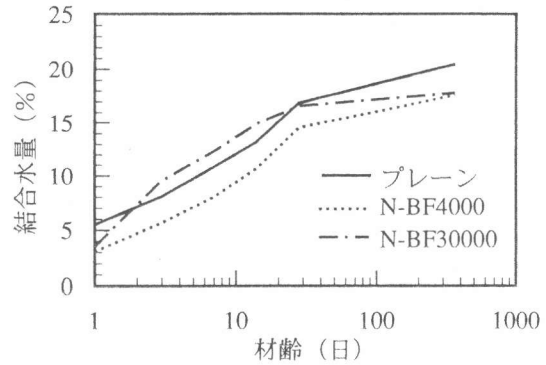


図-2 材齢と結合水量との関係
(置換率=50%、水結合材比=50%)

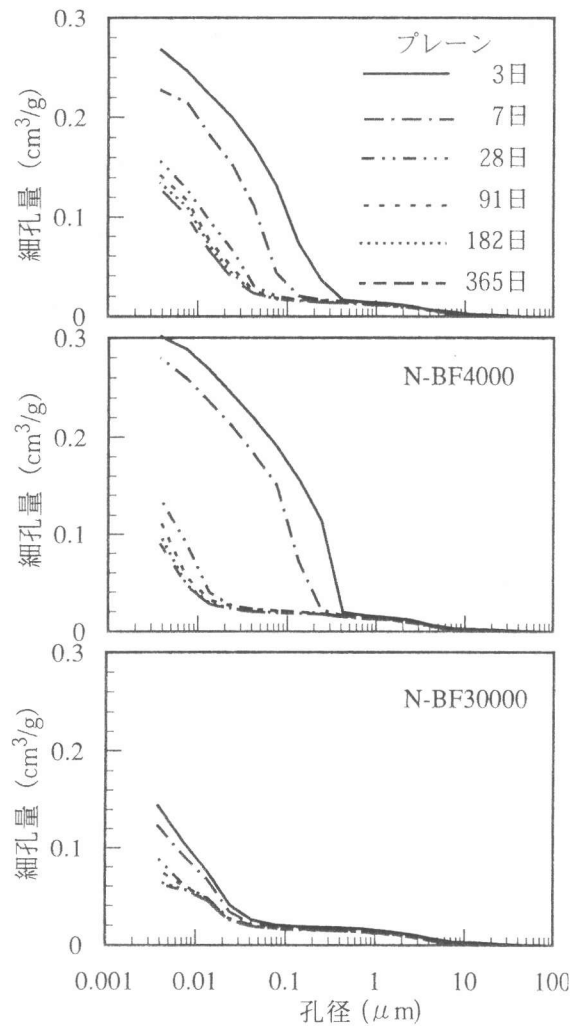


図-3 材齢と細孔分布
(水結合材比=50% 置換率=50%)

生成が十分でないことから、N-BF4000及びN-BF30000の結合水量は、ともに小さく、ほぼ同じであった。材齢3～28日では、高比表面積の高炉スラグ微粉末を用いたN-BF30000の結合水量が著しく増加し、プレーンより大きい。材齢28日以降では、高炉スラグ微粉末の比表面積のちがひによる大きな差は認められなかった。

3.2 細孔分布

(1) 材齢と細孔分布

図-3にプレーン、N-BF4000及びN-BF30000の材齢と細孔量との関係を示す。材齢3日及び7日ではN-BF4000の結合水量は小さいため、細孔量及び細孔径は大きい。28日以降では逆の傾向となった。N-BF30000では、高炉スラグ微粉末の粒径が小さく、充てん性が高く、比表面積が大きいため結合水量が大きく、初期材齢でも大量の水和物の生成によって細孔は充てんされ、細孔量及び細孔径は小さい。

(2) 置換率と細孔分布

図-4に置換率0%、30%、

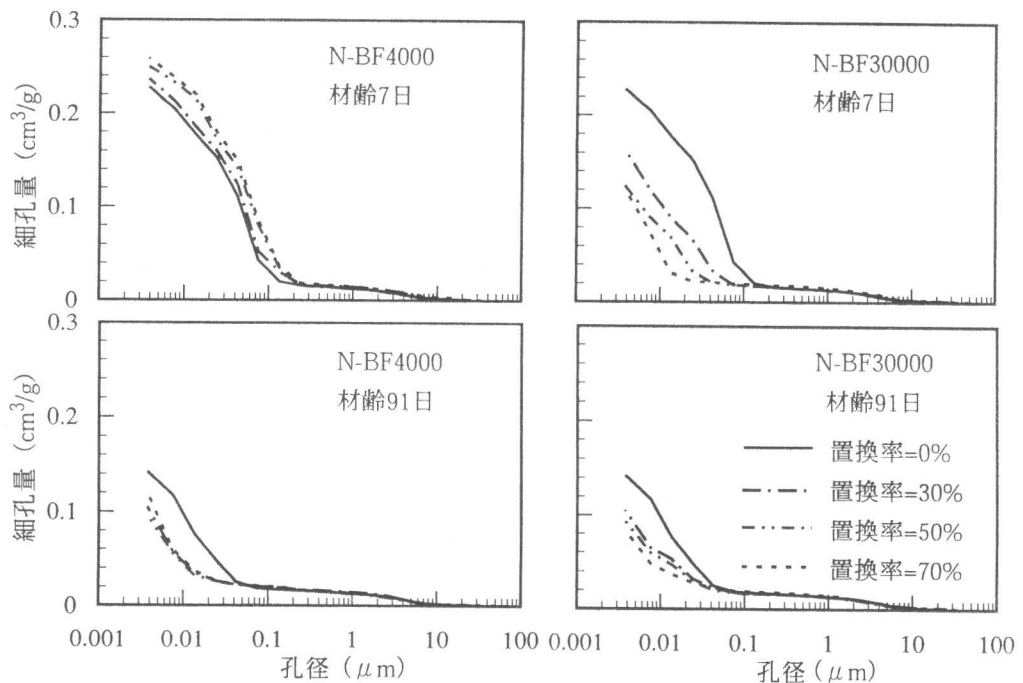


図-4 高炉スラグ微粉末の置換率とセメントペーストの細孔量 (水結合材比=50%)

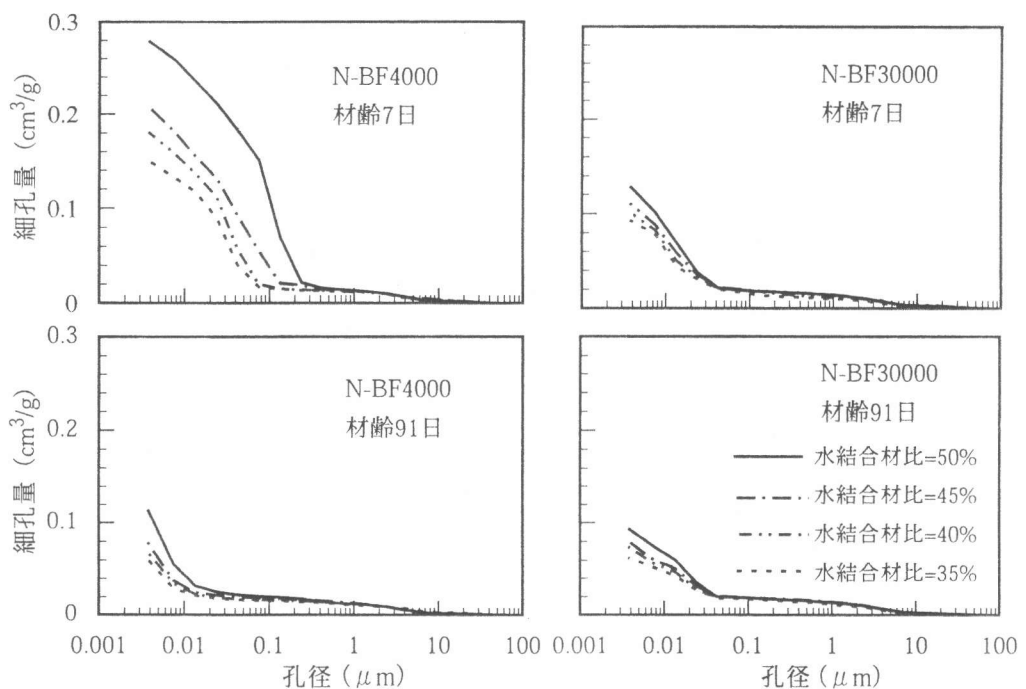


図-5 水結合材比と細孔分布 (置換率=50%)

50%及び70%とした場合のN-BF4000及びN-BF30000の細孔分布を示す。BF-4000の粒径は普通ポルトランドセメントとほぼ同じであり、置換率の増大による細孔量への影響は小さい。材齢7日では、N-BF4000の結合水量は小さいため細孔量はプレーンより大きく、材齢91日では、逆の傾向になった。

BF-30000の平均粒径は前述している通り約1 μm であり、置換率の増加による充てん性が高いため、細孔量は小さくなり、細孔径は大きい孔径から小さな孔径へ移行し、いずれの置換率のN-BF30000の細孔量は、プレーンより小さい。

(3) 水結合材比と細孔分布

図-5に置換率50%、材齢7日及び91日のN-BF4000及びN-BF30000の水結合材比と細孔分布との関係を示す。N-BF30000及びN-BF4000の細孔量は、水結合材比が小さいほど、小さくなった。材齢7日では、水結合材比の低下に伴うN-BF4000の細孔量の減少はN-BF30000より大きく、材齢91日では、N-BF30000の細孔量はN-BF4000の細孔量とほぼ同じとなった。また、水結合材比が小さいほど、N-BF30000の練り混ぜ時に若干粘性が増すためか、N-BF30000の細孔径はN-BF4000より大きくなる傾向が見られた。

3.3 セメントペーストの組織

走査型電子顕微鏡で観察した水結合材比50%、材齢7日、28日のプレーン、N-BF4000及びN-



写-1 プレーン、置換率0%
水結合材比50%、材齢7日



写-2 N-BF4000、置換率50%
水結合材比50%、材齢7日



写-3 N-BF30000、置換率50%
水結合材比50%、材齢7日



写-4 プレーン、置換率0%
水結合材比50%、材齢28日



写-5 N-BF4000、置換率50%
水結合材比50%、材齢28日



写-6 N-BF30000、置換率50%
水結合材比50%、材齢28日

BF30000の微細組織(2000倍)の結果を写-1~6に示す。材齢7日では、N-BF4000の微細組織は、プレーンより粗であるが、材齢28日では密になる。N-BF30000の場合は、いずれの材齢でも、最も密実であることが観察された。また、N-BF4000に大量の未反応の高炉スラグ微粉末の粒子が観察された。

3.4 圧縮強度の発現性

(1) 置換率と圧縮強度

高炉スラグ微粉末を用いた水結合材比50%のセメントペーストの強度発現性に及ぼす置換率の影響を図-6に示す。

材齢7日では、N-BF4000の水和反応が遅いため、置換率が大きいほど圧縮強度は小さく材齢28日でもプレーンより小さいが、置換率50%の場合は圧縮強度が最も大きい。一方、N-BF30000の場合、材齢7日、28日では結合水量は大きく細孔量は小さいため、圧縮強度は大きくなる。材齢91日以降ではプレーンに比べて、置換率30%、50%のN-BF4000の圧縮強度は大きく、N-BF30000は、置換率が大きくなるとわずかながら強度が低下する。これはN-BF30000の初期材齢の水和反応が速いため、長期材齢の水和反応が抑制されがちになるので、N-BF30000の長期材齢強度はN-BF4000に比べて若干小さい。

(2) 水結合材比と圧縮強度

置換率50%のN-BF4000及びN-BF30000の水結合材比と圧縮強度との関係を図-7に示す。N-BF4000及びN-BF30000の圧縮強度は、初期・長期の材齢にかかわらず水結合材比が小さいほど大きい。一方、水結合材比が小さいほど、長期材齢ではN-BF30000の圧縮強度の増加はN-BF4000より小さい。この強度増進を図るためには例えば良質な高性能減水剤を併用することによって、高炉スラグ微粉末の分布の均一性を高めることによって、N-BF30000の長期材齢強度の増加が期待できると考える。

3.5 細孔量と圧縮強度との関係

図-8に細孔量と圧縮強度との関係を示す。いずれの場合も圧縮強度は、細孔量の減少とともに増加し、細孔量 $0.06\text{cm}^3/\text{g}$ 程度を境にして細孔量が同じである場合、プレーンの圧縮強度は

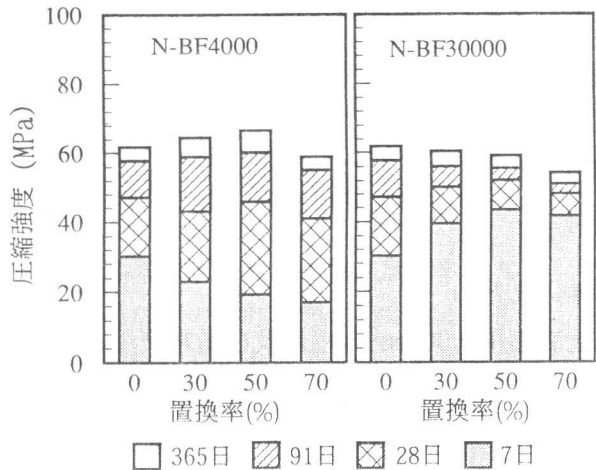


図-6 高炉スラグ微粉末の置換率とセメントペーストの強度 (水結合材比=50%)

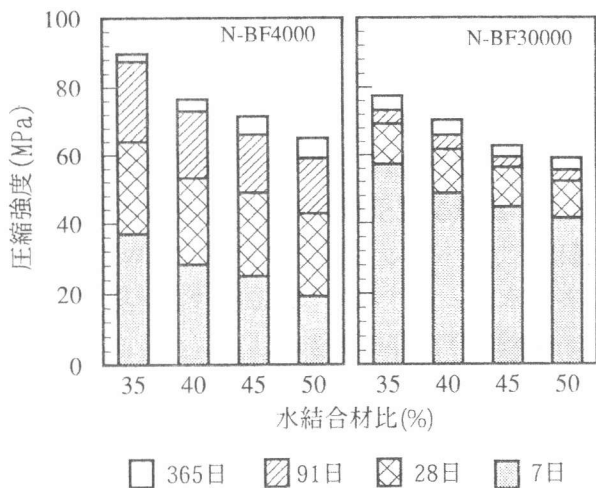


図-7 セメントペーストの水結合材比と強度 (置換率=50%)

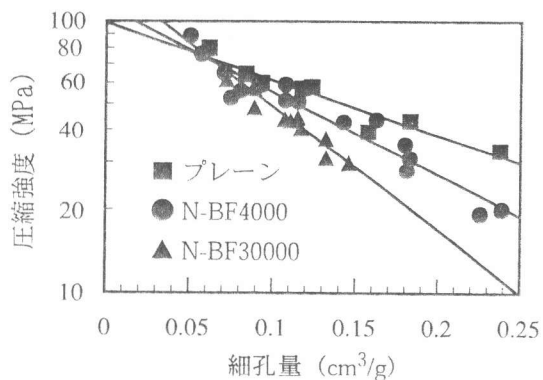


図-8 セメントペーストの細孔量と圧縮強度

最も大きく、次はN-BF4000、N-BF30000の順であった。これは、水和生成物の組織及び細孔分布が異なることによるものであると考えられる。一方、圧縮強度が同じ場合、高炉スラグ微粉末、特に比表面積 $30000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度の高炉スラグ微粉末を用いたセメントペーストの細孔量は、プレーンより小さいことから、高炉スラグ微粉末の比表面積を大きくすることなどにより、セメントペーストの組織は密実となり、耐久性の向上が期待できるものと考えられる。

4. まとめ

比表面積 $30000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度及び通常使用されている $4000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度の高炉スラグ微粉末を用いたセメントペーストの細孔量、強度発現性及びそれらの関係について実験を繰り返し、以下の結論を得た。

- (1) 高炉スラグ微粉末の比表面積が大きいと初期材齢の結合水量は大きくなり、長期材齢だけでなく初期材齢においても細孔量が小さく、置換率の増加や水結合材比を小さくすることにより細孔量はさらに小さく、セメントペーストの組織は密実となる。
- (2) 高炉スラグ微粉末の比表面積が $30000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度だと初期材齢強度は大きく、長期材齢強度はプレーンと同程度である。しかし比表面積が $4000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度だと傾向はこの逆になる。

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。また、走査型電子顕微鏡は、三菱マテリアル(株)セメント研究所にお世話になった。心より感謝する。

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 4 1、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 4 2、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 4 3、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 4 3、No 4 9 1、pp. 943-948、1994. 8
- [7] 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、pp. 343-348、1995