

高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの乾燥収縮と空隙構造特性

正会員○ 渡邊 詩穂子*¹
同 濱 幸雄*²
同 佐川 孝広*³

1. 材料施工-2. モルタル・コンクリートの物性
乾燥収縮、モルタル、高炉スラグ微粉末、空隙構造特性

1. はじめに

製鉄所の副産物である高炉スラグ微粉末を使用した高炉セメントはグリーン調達品に指定されるなど利用促進が期待され、現在では国内のセメント使用量の25%程度となっている。しかし、高炉セメントを使用したコンクリートは乾燥収縮によるひび割れが早期に発生する場合もあることが指摘されているものの、高炉セメントのキャラクターが乾燥収縮特性に及ぼす影響についての検討は少ない¹⁾。モルタル、コンクリートの乾燥収縮試験は、材齢7日水中養生後を乾燥開始材齢として行われる場合が多いが、水中養生期間がモルタルの乾燥収縮特性に影響を及ぼすことも考えられる²⁾。

また、高炉セメントを用いたコンクリートの硬化特性は、結合材であるポルトランドセメントや高炉スラグ微粉末の水和反応に強く依存する。特にスラグの水和反応はセメント鉱物とは全く異なった反応プロセスを示し、水和物組成や微細構造形成がポルトランドセメント単体の系とは異なった様相を呈すると推測される。これは、佐川らによって高炉セメントの乾燥収縮量は生成するC-S-Hゲル量と関連することが指摘されており³⁾、セメントの水和の進行程度で乾燥収縮量の変動する可能性があることを意味している。

そこで本研究では、各種ポルトランドセメントおよび粉末度の異なるスラグ微粉末を用いて広範な組成をもつ高炉セメントを試製し、モルタルの乾燥収縮特性に及ぼすポルトランドセメント種類、スラグ粉末度および乾燥開始材齢の影響について検討を行った。

2. 実験方法

表1に調合表を示す。本実験では混合材を含まない普通ポルトランドセメント(N)、中庸熱ポルトラ

表1 調合表

試験体記号	W/C(%)	単位水量(kg/m ³)	質量(kg/m ³)		
			セメント	高炉スラグ	細骨材
N	50	256	512	0	1536
N3-45			282	230	
N4-45			282	230	
N8-45			282	230	

上記の表は普通ポルトランドセメント(N)の調合表であるが、中庸熱(M)・低熱(L)も同様に調合した。

[備考:試験体記号について]

- N3-45-28 ①:セメント(N・M・L)および高炉スラグ微粉末(3000・4000・8000)の種類
① ② ③ ②:高炉スラグ微粉末の置換率 45%
③:乾燥開始材齢(7・28日)

ンドセメント(M)、低熱ポルトランドセメント(L)と粉末度3000、4000、8000cm²/gの高炉スラグ微粉末(以下:BFS)とJIS標準砂を用い、4×4×16cmのモルタル試験体を作製した。スラグの置換率は0、45%の2水準とした。材齢7日または28日まで20℃水中養生を行った後、20℃、RH60%環境下での乾燥収縮量を測定した。長さ変化の測定はJIS A 1129-3(ダイヤルゲージ方法)に準じて行った。また、Φ5×10cmの試験体において圧縮強さを測定した。モルタル試験体を5mm角に切断しアルキメデス法により毛管空隙量、ゲル空隙量を測定した。毛管空隙量は表乾状態から40℃乾燥での逸散水のもつ空隙、ゲル空隙は40℃から105℃乾燥での逸散水のもつ空隙と定義した³⁾。

3. 実験結果及び考察

図1に乾燥開始材齢7日における収縮量を示す。図2に乾燥開始材齢28日における収縮量を示す。各図の(a)にはセメント単味の比較を、(b)(c)(d)にはセメントN、M、LにBFSを45%置換した時の収縮量を示す。

Microstructure Characteristics and Drying Shrinkage of Mortar Using Ground Granulated Blast Furnace Slag

Shihoko WATANABE, Yukio HAMA and Takahiro SAGAWA

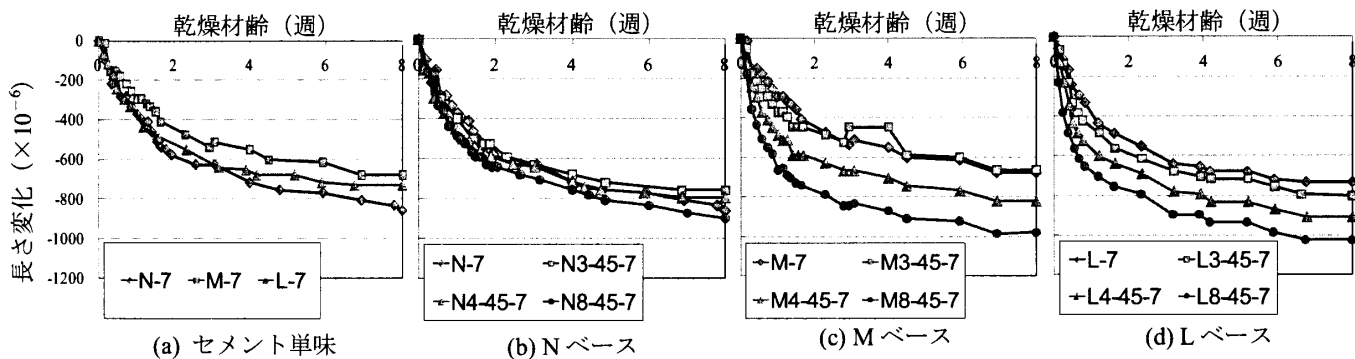


図1 乾燥開始材齢7日での長さ変化

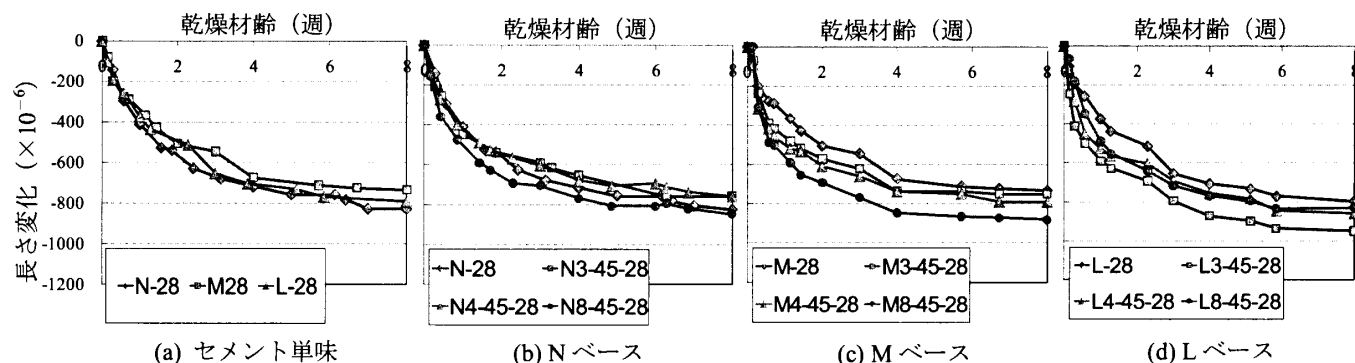


図2 乾燥開始材齢28日での長さ変化

3. 1 ポルトランドセメント単味の収縮挙動

セメント単味の比較では図 1(a)に示すように、Nの収縮量が最も大きく、M、Lの収縮量はやや小さくなった。

しかし、図 2(a)に示すように、乾燥開始材齢 28日ではN、M、Lの違いによる収縮量の差はほとんどなくなっている。本実験の範囲では、Nは乾燥収縮量に及ぼす前養生期間の影響は小さく、M、Lは乾燥開始材齢を7日から28日にすることで乾燥収縮量はやや大きくなる結果となった。

3. 2 BFSを混和したセメントの収縮挙動

図 1(b)及び図 2(b)に示すように、NにBFSを混和した場合、乾燥開始材齢によらず、BFS混和の有無及びBFS粉末度の違いによる収縮量への影響は少ない結果となった。つまり、NにおいてはBFSが収縮量に及ぼす影響、乾燥開始材齢の違いが収縮量に及ぼす影響はほとんどないと言える。

一方、図 1(c)(d)に示すように、M、LにBFSを混和すると収縮量は大きくなり、スラグ粉末度が高いほどその傾向が顕著であり、乾燥収縮量に及ぼすBFS混和の影響はベースセメントの種類により大きく異なると言える。

乾燥開始材齢に着目すると、図 2(c)(d)に示すように、乾燥開始材齢が28日になると乾燥開始材齢7

日(図 1(c)(d))のものに比べてBFS粉末度の違いによる収縮量の差は小さくなる結果となった。つまり、M及びLをベースとする高炉セメントでは、乾燥開始材齢を7日から28日に延長することで、収縮量は小さくなるといえる。

なお、乾燥開始材齢7日の場合、MではBFSの粉末度8000を混入した場合に最も収縮量が大きくなり、28日の場合にもその傾向

は同様である。しかし、Lでは、乾燥開始材齢7日ではBFSの粉末度8000を混入した場合が、乾燥開始材齢28日では粉末度3000を混入した場合がそれ

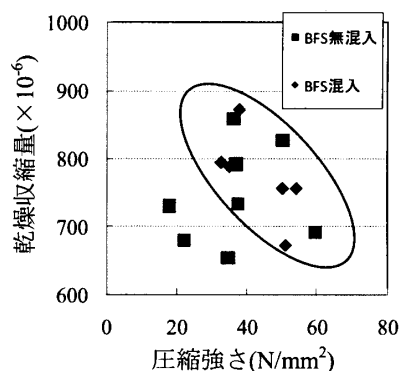


図3 モルタル圧縮強さと乾燥収縮量の関係

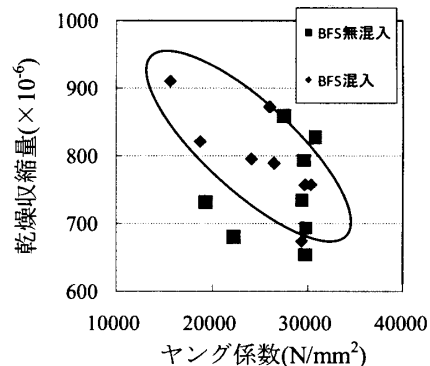


図4 ヤング係数と乾燥収縮量の関係

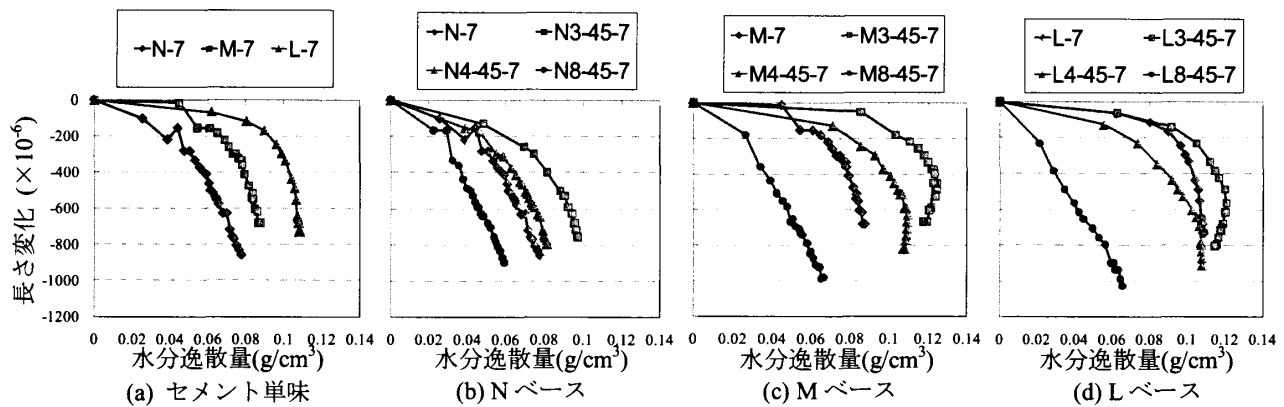


図5 乾燥開始材齢7日における収縮量と水分逸散量の関係

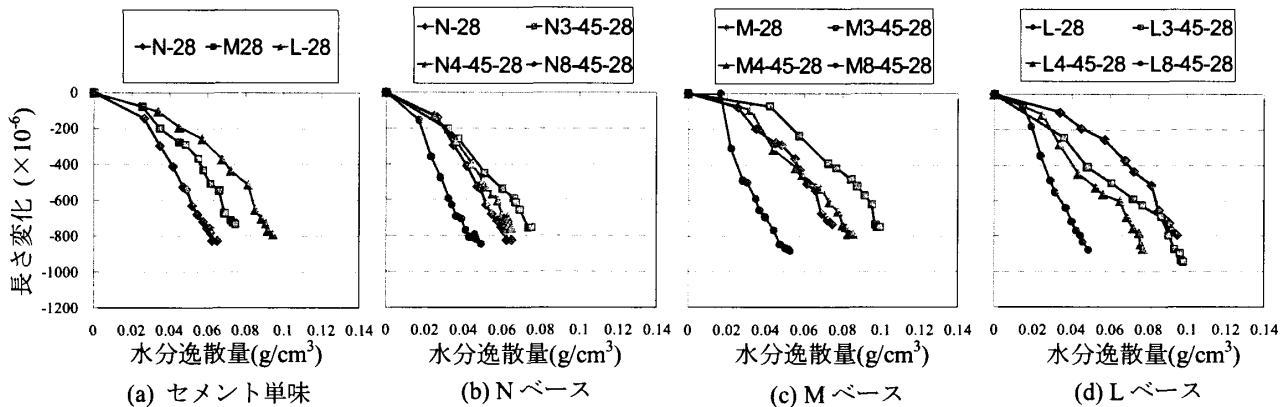


図6 乾燥開始材齢28日における収縮量と水分逸散量の関係

ぞれ収縮量が大きい結果となっている。これについては、他の傾向と異なっているため、今後詳細に検討する必要がある。

3. 3 モルタル圧縮強さと乾燥収縮量の関係

図3にはモルタル圧縮強さと乾燥収縮量の関係を、図4にはヤング係数と乾燥収縮量の関係を示す。BFSを混和した場合は、圧縮強さ、ヤング係数が大きくなる程収縮量が小さくなる傾向がみられた。しかし、BFS無混和の場合では両者に相関は見られず、圧縮強さにて収縮量を評価することは出来ないと考えられる。

3. 4 乾燥収縮量と水分逸散量の関係

図5に乾燥開始材齢7日における収縮量と水分逸散量との関係を示す。図5(a)に示すように、BFS無混和の場合ではNの水分逸散量が最も少なく、次いでM、Lの順に多くなる結果となった。一方、図5(b)(c)(d)に示すように、BFSの粉末度が高いほど水分逸散量は少なくなり、粉末度3000, 4000ではベースセメントに比較して水分逸散量は多いが、8000を混和した場合でベースセメント以下の水分逸散量となった。なお、一部の条件で、材齢の経過により供試体質量が増加し水分逸散量が減少する傾向が認められるが、これは試料の炭酸化の影響と考えられる。

また、図6に乾燥開始材齢28日における収縮量と水分逸散量との関係を示す。乾燥開始材齢7日と比較すると水分逸散量は少なくなっているが、全般的な傾向は図5と同様である。ただし、LについてはBFS混和による水分逸散量の減少程度が大きく、水分逸散量は粉末度3000の混入でベースセメントと同程度、粉末度4000および8000の混入でベースセメント以下の水分逸散量となった。なお、図5での炭酸化による水分逸散量が減少する傾向は、乾燥開始材齢28日では認められず、養生期間を延長することで炭酸化抵抗性が向上したと考えられる。

3. 5 毛管空隙量、ゲル空隙量と乾燥収縮量の関係

図7に、アルキメデス法により求めた毛管空隙量、ゲル空隙量と乾燥収縮量の関係についてBFSの粉末度別に示す。全ての粉末度において毛管空隙量が大きいほど収縮量が大きくなる傾向となった。しかし、ゲル空隙量と収縮量の関係についてはばらつきが多く、相関があまり見られなかった。しかし、粉末度8000においてはゲル空隙量が増加すれば、収縮量が減少する傾向も見てとれる。巨視的には毛管空隙量が大きく、ゲル空隙量が少なければ収縮量は大きくなると見る事も出来る。

セメントの水和が進行し微細な空隙が増えると乾燥時の水分逸散は緩慢になり、ペースト硬化体の

収縮に抵抗するヤング率も増すために収縮量は小さくなる。しかし一方で、毛細管張力による応力は細孔径が小さいほど大きくなることから、セメントの水和が進行し微細な空隙が増すほど、その応力は大きくなる。実際の乾燥収縮量は、この双方の影響のバランスにより決定付けられることとなる。図5で示された BFS 粉末度の増大により水分逸散量が減少しているにもかかわらず、収縮量が增大する結果は、微細な空隙の増加による収縮応力の増大が卓越した影響と考えられる。一方で図7に示したように、同一スラグ粉末度で比較すると、微細な空隙(ゲル空隙)量が多いほど収縮量は小さくなり、一見すると反対の傾向となる。このことは、毛管空隙、ゲル空隙量のみでは収縮量を評価できず、空隙径の分布も収縮量に影響を及ぼすことが考えられる。今回の検討では、毛管空隙、ゲル空隙量を指標として乾燥収縮量を理論的に説明することはできなかった。これは、毛管空隙、ゲル空隙量の測定誤差や、前述のとおり、毛管空隙やゲル空隙径の分布、水和生成物のキャラクターなど水和によって生成される生成物の根本の特性が異なるなど様々な原因が考えられる。そのため、今後水銀圧入法や水蒸気吸着によって検討を行う必要があると考えられる。

4. まとめ

- 1) 普通セメントは、乾燥開始材齢が7日でも28日でも収縮量に大きな差は認められず、乾燥開始材齢による影響はほとんど認められなかった。
- 2) 普通、中庸熱、低熱セメントにおける収縮量は乾燥開始材齢7日では中庸熱、低熱セメントが普通よりも小さくなる結果となったが、乾燥開始材齢28日の場合で同程度となった。
- 3) 普通セメントに高炉スラグ微粉末を混和した場合、乾燥収縮量に及ぼす影響は小さいが、中庸熱、低熱セメントでは、高炉スラグ微粉末の混和により収縮量は増大し、その傾向はスラグ粉末度が高いほど顕著であった。
- 4) 中庸熱、低熱セメントベースの高炉セメントでは、乾燥開始材齢を7日から28日に延長することで収縮量は小さくなる傾向にあった。
- 5) BFSを混入すると、圧縮強さ、ヤング係数が大きくなると収縮量が小さくなる傾向が見られた。しかし、BFS無混入の場合では、ばらつきが多く相関はみられなかった。

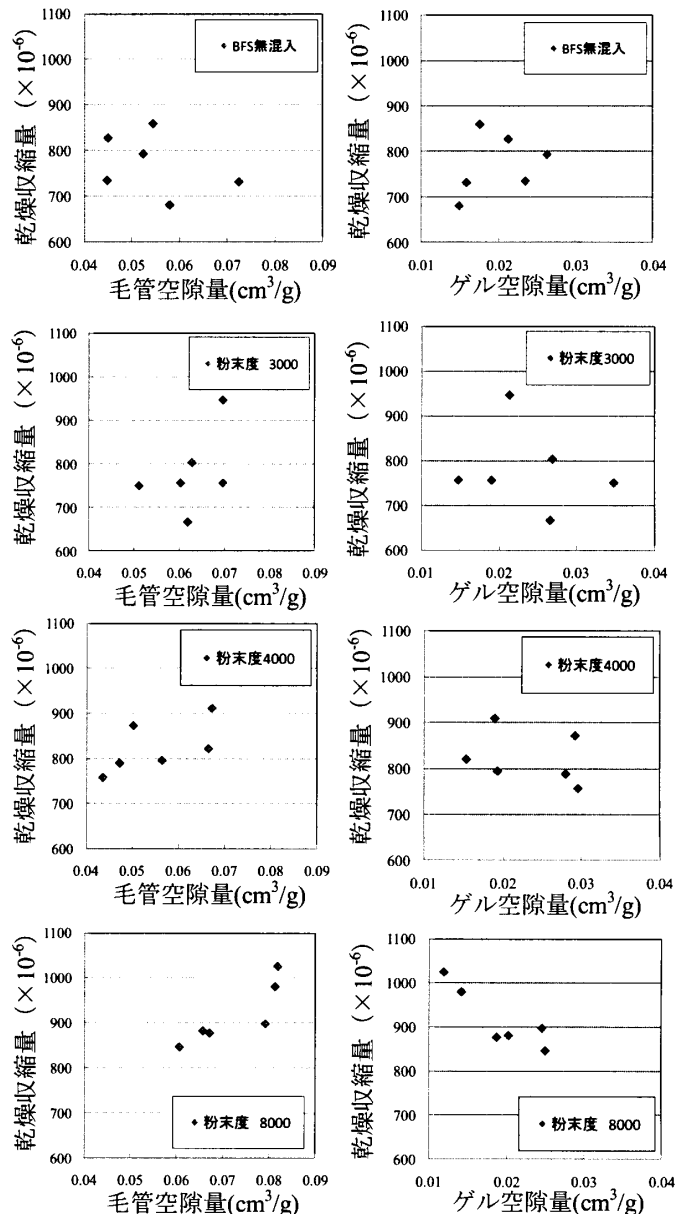


図7 毛管空隙量、ゲル空隙量と乾燥収縮量の関係

- 6) 粉末度 8000 の BFS を混和した場合に、最も水分逸散量が少ない結果となった。乾燥開始材齢7日と28日では、28日のほうが水分逸散量は減少した。

【参考文献】

- 1) 川村祐史ほか：混和材を用いたセメントペーストの強度および収縮ひずみ、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.145-146、2001
- 2) 大津武ほか：水中養生期間がモルタルの乾燥収縮に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.301-302、2004
- 3) 佐川孝広、名和豊春：ポルトランドセメント-高炉スラグ系の水和反応-微細構造形成と乾燥収縮、日本建築学会構造系論文集、Vol.75, No.652, 2010

【謝辞】

この実験を行うにあたり、本学建設システム工学科4年捻金宏太氏には多大なる援助をしていただきました。ここに謝意を表します。

*1 室蘭工業大学大学院 博士前期課程

*2 室蘭工業大学大学院 教授・博士(工学)

*3 日鐵セメント株式会社 技術部 博士(工学)

Graduate Student, Muroran Institute of Technology
Prof., Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.
Nittetsu Cement Co., Ltd., Dr. Eng.