高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの細孔構造と中性化性状に関する研究

東京都立大学大学院　正会員　佐藤篤　フェロー　國府勝郎、正会員　宇治公隆、正会員　上野敦
日本道路公団試験研究所　紫桃　孝一郎

１．はじめに

高炉セメントを用いたコンクリートの中性化は、結合材中のポルトランドセメント量の低下とスラグの潜在水硬性による水酸化カルシウムの消費の影響を受ける。一方、スラグの水和によって細孔構造が緻密化することが明らかになっており、炭酸ガスの拡散経路となる細孔構造の変化を養生の程度と関係づけて評価する必要がある。本研究は、水結合材比を一定とした配合において、高炉スラグ微粉末の置換率と養生条件がコンクリートの中性化性状に及ぼす影響を物理化学的に検討したものである。

２．実験方法

(1)使用材料および試験体諸元

本研究では、ポルトランドセメント（密度3.16g/cm³, 比表面積3370cm²/g)と高炉スラグ微粉末（密度2.89g/cm³, 比表面積4260cm²/g)を練混ぜ時に混合することとした。細骨材には、砕砂（表乾密度2.65g/cm³,F.M.2.87)および山砂（表乾密度2.63g/cm³,F.M.1.55)を質量比8:2で混合したものを、粗骨材には砕石2005(表乾密度2.66g/cm³,F.M.6.36)を使用した。試験体諸元を表-1に示す。水結合材比は52.4%とし、高炉スラグ微粉末の置換率は0、30、45、60の４種類とした。供試体は□10×10×40cmとし、１側面を残し他を全てエポキシ樹脂で被覆した。

表－１　配合および養生条件

結合材種類	W/(C+B)(%)	B/(C+B)(%)	s/a(%)	前養生
普通セメント(OPC)	52.4	0	42	a)標準養生(28W) b)３日水中以後気中(3W28) c)７日水中以後気中(7W28)
高炉セメント(BB30)	52.4	30	42	
高炉セメント(BB45)	52.4	45	42	
高炉セメント(BB60)	52.4	60	42	

(2)促進中性化試験

前養生の方法を３種類に変え、材齢28日から促進暴露を開始した。気中養生期間中は恒温恒湿室に保存した。養生環境を表-2に示す。供試体の端部付近を軸直角方向に割裂し、フェノールフタレイン1%アルコール溶液の噴霧により中性化深さを測定した。割裂面は再び樹脂を塗布して被覆し、試験を継続した。

表－２　養生環境

	CO_2濃度	温度	湿度
中性化槽	7%	20°C	60%
恒温恒湿室	ー	20°C	60%

(3)示差熱分析試験

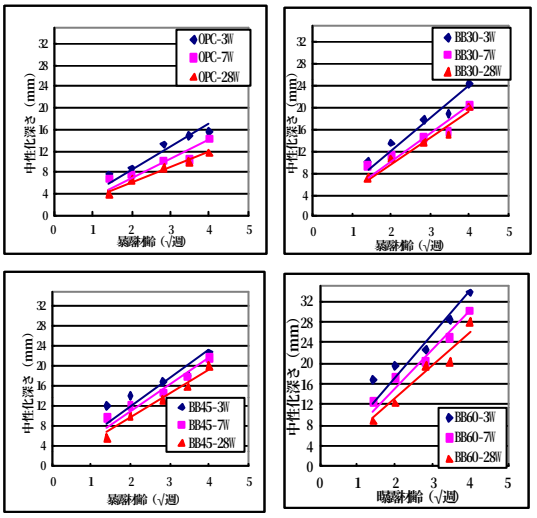
高炉スラグ微粉末の水和、中性化の進行にともなう$Ca(OH)_2$の消費量と$CaCO_3$の生成量を示差熱天秤による重量変化で測定した。

(4)細孔径分布試験

表面から1cmごとにスライスし、細孔径分布を測定した。試験には、水銀圧入式ポロシメーター(測定可能径6nm～500μm)を用いた。

３．実験結果

(1)促進中性化試験



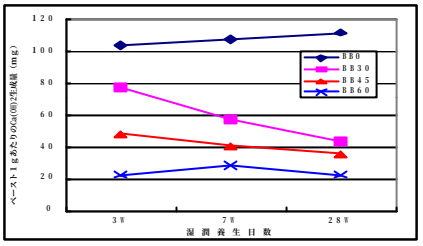
図－１　促進中性化試験

図-1は、曝露材齢と中性化深さの関係を示す。スラグ置換率が小さいほど、また湿潤養生期間が長いほど中性化深さは小さくなる。なお、中性化深さは曝露材齢に比例すると考え、中性化速度式（$X=\alpha\sqrt{t}$）を適用して原点を通る近似直線を図中に示している。高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの中性化深さの実測値は、中性化試験初期段階においては近似値よりも大きくなっていることが分かる。

キーワード：中性化、高炉スラグ微粉末、水酸化カルシウム、炭酸カルシウム、細孔径分布
〒192-0397東京都八王子市南大沢1-1　TEL0426-77-1111　FAX0426-77-2772

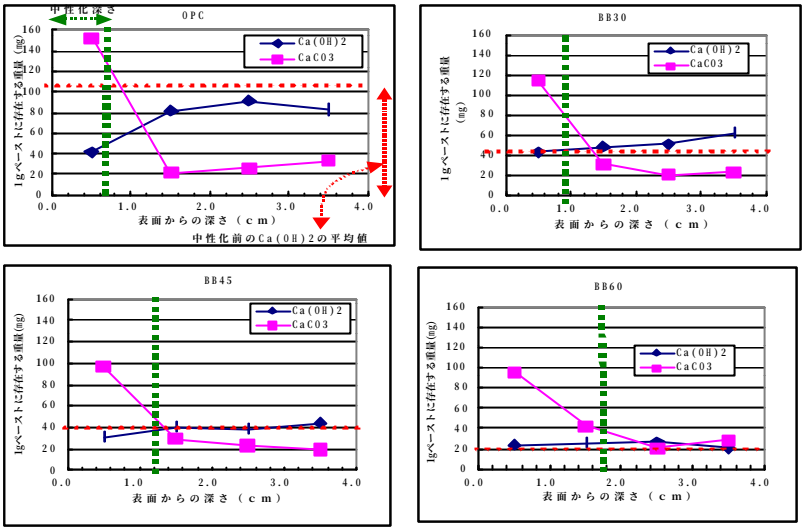
(2)示差熱分析試験

図-2にセメント水和生成物である$Ca(OH)_2$量の測定結果を示す。普通セメントのみの場合、湿潤養生期間の増加にともない$Ca(OH)_2$は増加している。一方、高炉スラグ微粉末で置換した場合は、湿潤養生期間の増加にともなって$Ca(OH)_2$量が減少する傾向にある。この傾向は、置換率30および45%とした場合に顕著である。なお、置換率60%の場合には、湿潤養生期間による$Ca(OH)_2$量の変化はほとんど認められない。この理由として、存在する$Ca(OH)_2$が極めて少ないために、スラグの水和が進行しないことが考えられる。



図－２　水酸化カルシウム生成量

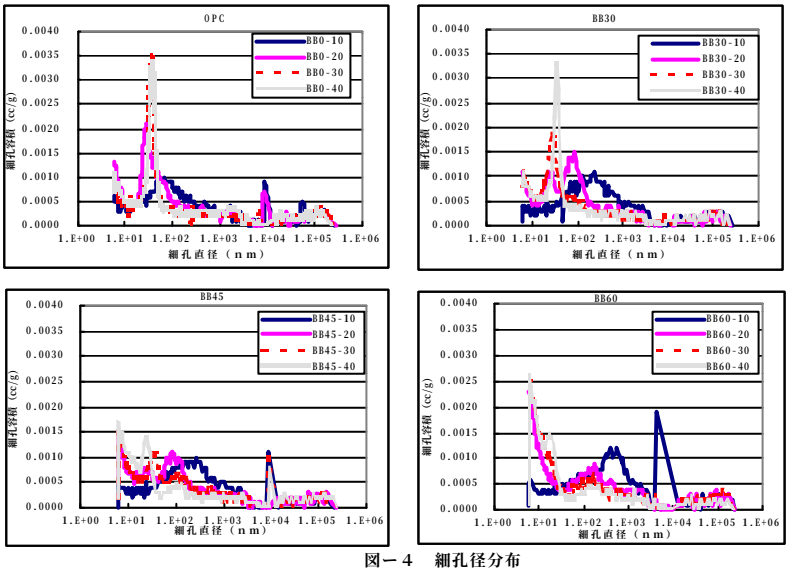
図-3に、7W28で中性化材齢4週の供試体における、表面からの深さごとの$Ca(OH)_2$量および$CaCO_3$量を示す。図には、中性化深さ(縦線)および中性化開始前の$Ca(OH)_2$量(横線)を合わせて示している。熱分析結果により求まる中性化フロントは、フェノールフタレインで判定される中性化位置よりもかなり内部に位置することが分かる。また、高炉スラグ微粉末で置換した場合、表面付近の中性化域において$Ca(OH)_2$の減少量に比べて$CaCO_3$の増加量が非常に大きくなっており、さらに検討が必要である。



図－３　水酸化カルシウム量と炭酸カルシウム量

(3)細孔径分布試験

図-4に中性化材齢4週における細孔径分布を示す。乾燥にともない表面から深さ方向に細孔構造の不均質化が生じている。置換率が大きくなると表面部のピーク細孔径が大きくなる。なお、内部における細孔構造は均質である。このことから、中性化試験初期段階においては中性化速度が速く、内部に進行するにつれ中性化速度は一定値に収束するといえる。ところで、内部の細孔構造は、置換率が増えると潜在水硬性による緻密化によって普通コンクリートと同等もしくはそれ以上に微細化する。したがって、潜在水硬性による$Ca(OH)_2$の消費と細孔構造の緻密化との相互関係をさらに検討する必要がある。



図－４　細孔径分布

４．考察

(1)高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの中性化速度は、乾燥による細孔径の粗大化により初期段階には中性化速度式による推定値よりも大きいが、内部の均質な構造によって一定値に収束する。

(2)高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの中性化は、潜在水硬性による水酸化カルシウムの消費と細孔構造の緻密化の相互作用を検討することが重要である。