

論文 高炉スラグ微粉末の混入が炭酸化に及ぼす影響

佐野 禎^{*1} 森 弥広^{*2}

要旨: 本研究は、モルタル及びコンクリート供試体を用いて、高炉スラグ微粉末を混入したセメントの水和特性を考慮した条件で、促進炭酸化を行い、炭酸化が中性化深さと酸素拡散係数に及ぼす影響を検討したものである。その結果、高炉スラグ微粉末の置換率の増加に伴い、中性化深さは増大するが、高炉スラグ微粉末の置換率が45%の場合の酸素拡散係数は、高炉スラグ微粉末を用いない場合に比べて著しく小さいことが確認された。これらの結果を通じて、高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの鉄筋腐食の傾向を、中性化深さのみによって論じることは適切ではないことが明らかになった。

キーワード: 高炉スラグ微粉末, 炭酸化, 中性化深さ, 酸素拡散係数, 回収水

1. はじめに

高炉セメントを用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、中性化速度が大きいことが指摘されており、^{1), 2)} その原因として水酸化カルシウムの生成量が少ない事が挙げられる。ここで鉄筋の腐食のメカニズムを考えてみると、コンクリートの中性化が鉄筋の近傍にまで進行すると、鉄筋の不動態皮膜は破壊される。鉄筋は、腐食に対して無防備の状態になり、酸素の供給下で腐食が進行する。即ち、鉄筋の腐食は、中性化と酸素の供給という2つの条件が整った場合に進行する。また、高炉セメントはセメント硬化体組織が、普通ポルトランドセメントに比べて緻密であり、外部からの腐食因子の透過性が小さいことが知られている。このことは、高炉セメントの場合、中性化速度が大きいことが、必ずしも鉄筋の腐食の傾向と結びつかないことを示している。本研究は、このような観点に立って、高炉セメントの炭酸化を適切に評価しようとしたものである。

そこで本研究では、高炉スラグ微粉末を混入したモルタル及びコンクリート供試体の促進炭酸化を行い、高炉スラグ微粉末の混入が中性化深さ

と酸素拡散係数に及ぼす影響を明らかにした。なお、高炉セメントの水和反応は、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性に依存するために、水和反応速度は普通ポルトランドセメントに比べて緩慢である。このような水和特性の違いを考慮して、高炉セメントを用いたコンクリートの中性化速度を、普通ポルトランドセメントのみを用いた場合と比較検討するためには、両者が共に十分に水和した状態の供試体を、促進炭酸化試験に供する必要がある。そこで本研究では、コンクリートの養生条件と強度の面で、以上のような条件を整えることとした。

また、本研究では、生コン工場でコンクリートの練混ぜ水として使用されている、高アルカリ性で、主としてセメント水和物からなるスラッジを含む回収水が、炭酸化に及ぼす影響についても検討した。

2. 使用材料

結合材は、普通ポルトランドセメント（比重：3.15 粉末度：3,150cm²/g）及び高炉スラグ微粉末（比重：2.89, 粉末度：4,250cm²/g）である。粗骨材は碎石（最大寸法：20mm, 表乾比重：2.65）細骨材は川砂（表乾比重：2.63, F.M：2.07）を

^{*1} 千葉工業大学大学院修士課程 土木工学専攻（正会員）

^{*2} 千葉工業大学助教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

表-1 モルタルの配合

練混ぜ水の種類	配合基準	高炉スラグ微粉末置換率 (%)	水結合材比 (%)	単位量 (kg/m ³)			
				練混ぜ水	セメント	高炉スラグ微粉末	細骨材
水道水	配合 A	0	60	283	472	0	1491
		45	60	283	260	212	1476
		70	60	283	142	330	1466
	配合 B	20	59	280	380	95	1490
		45	53	277	288	235	1447
		70	47	275	175	409	1388
回収水	配合 A	0	60	283	472	0	1491
		45	60	283	260	212	1476
	配合 B	45	53	277	288	235	1447

表-2 コンクリートの配合

配合基準	高炉スラグ微粉末置換率 (%)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水	セメント	高炉スラグ微粉末	細骨材	粗骨材
配合 A	0	60	46	190	317	0	876	996
	45	60	46	190	174	143	853	1007
配合 B	45	57	45	190	183	150	828	1020

使用した。また、モルタルの配合では練混ぜ水に、水道水 (pH 7.52) と回収水 (pH 12.46) の2種類を使用した。

3. 配合 および 供試体の作製

表-1 にモルタルの配合を、表-2 にコンクリートの配合を示す。配合 A は高炉スラグ微粉末の置換率に関わらず、水結合材比を一定 (60%) とし高炉スラグ微粉末を置換した配合である。配合 B は材齢 4 週における圧縮強度がほぼ一定となるよう、高炉スラグ微粉末の置換率の値に応じて、水結合材比を変化させた配合である。

なお、高炉スラグ微粉末の置換率 0% の場合は配合 A と配合 B で同一配合とし、回収水が炭酸化に及ぼす影響を調べる実験は、モルタル供試体を用いて行った。モルタルはフロー値 200 ± 10 を、コンクリートはスランプ 10 ± 1 cm を目標とした。

モルタル供試体は $4 \times 4 \times 16$ cm の角柱体を、コンクリート供試体は $\phi 10 \times 20$ cm の円柱体を使用した。これらの供試体は成形後、温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の水中養生を行った。水中養生期間は、配合 A の場合は 4 週及び 12 週の 2 種類、配合 B の場合には 4 週とした。供試体は水中養生終了後、直ちに促進炭酸化試験に供した。

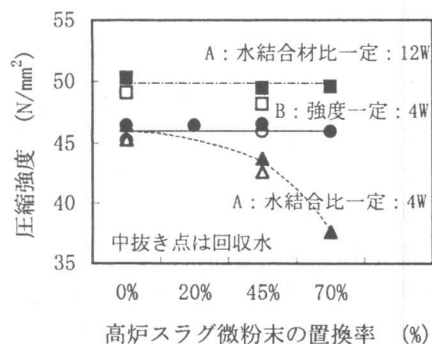


図-1 促進炭酸化前の圧縮強度と高炉スラグ微粉末の置換率の関係 (モルタル)

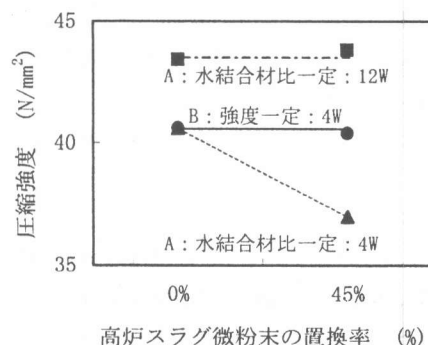


図-2 促進炭酸化前の圧縮強度と高炉スラグ微粉末の置換率の関係 (コンクリート)

図-1は、モルタル供試体における促進炭酸化開始時の圧縮強度と配合及び材齢との関係を示したものである。この図において、黒点は練混ぜ水に水道水を使用した場合を、中抜き点は回収水を使用した場合を示している。配合Aの水中養生4週の場合、高炉スラグ微粉末の置換率の増加に伴い、圧縮強度は低下している。また、回収水を使用すると水道水と比較し、配合条件、高炉スラグ微粉末の置換率に関わらず、圧縮強度は減少する傾向が認められた。

図-2はコンクリート供試体における促進炭酸化開始時の圧縮強度と配合及び材齢との関係を示したものである。

4. 促進炭酸化試験と測定方法

4.1 促進炭酸化試験

相対湿度 $60 \pm 1\%$ 、温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の促進炭酸化試験槽を用い、 CO_2 濃度を 1% と 7% に設定し、12 週間促進炭酸化を行った。 CO_2 濃度を 1% と 7% の 2 種類の濃度レベルで実施した理由は、人工的な促進炭酸化試験の性格を考慮して、炭酸化が諸物性に及ぼす影響の再現性をチェックするためである。また、この濃度レベルは、既往の研究³⁾を参考にして選定した。

4.2 測定方法

中性化深さは、モルタル及びコンクリート供試体の割裂試験を行った破断面にフェノールフタレイン 1% アルコール溶液を噴霧し、紫赤色に変わらない部分を炭酸化したものとして、割裂面の 1 方向に対して 4 点の計 16 点を測定し、その平均値とした。

酸素拡散係数試験は、絶乾の状態のコンクリート試料 ($\phi 10 \times 4\text{cm}$) を作製し、窒素ガスをキャリアガスとして用いる拡散セル法 (JCI-DD5) によって行った。

熱分析試験は、モルタル供試体より試料を作製し、水酸化カルシウムの定量を行った。

5. 実験結果と考察

5.1 中性化深さに関する実験結果と考察

図-3~6 はそれぞれモルタル供試体による高炉

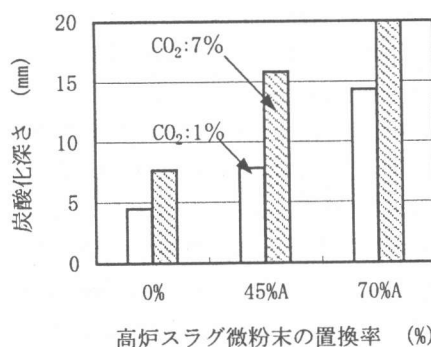


図-3 中性化深さと高炉スラグ微粉末の置換率の関係
(モルタル, 配合A, 水中養生4週)

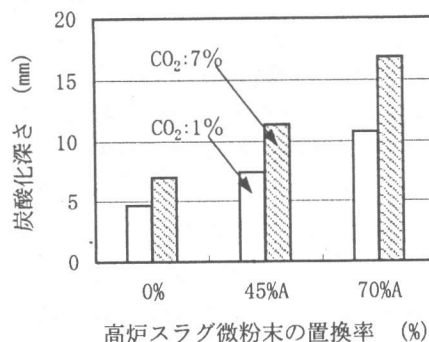


図-4 中性化深さと高炉スラグ微粉末の置換率の関係
(モルタル, 配合A, 水中養生12週)

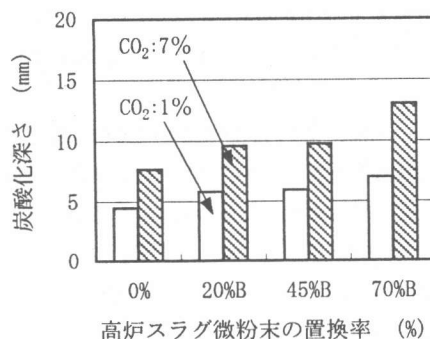


図-5 中性化深さと高炉スラグ微粉末の置換率の関係
(モルタル, 配合B, 水中養生4週)

スラグ微粉末の置換率と中性化深さとの関係を示したものであり、図-7~8 はそれぞれコンクリート供試体による高炉スラグ微粉末の置換率と中性化深さとの関係を示したものである。

図-3~4 の配合 A のモルタル供試体による試験から、高炉スラグ微粉末の置換率の増加に伴い、炭酸化深さが増加する傾向が認められる。また、水中養生を 12 週行った場合、置換率 0% ではほとんど変わらないが、高炉スラグ微粉末を混入した場合、水中養生 4 週と比較し、中性化深さが減少する傾向が認められる。この理由として水中養生 12 週の場合、水中養生を十分行ったことで、組織が緻密になり、炭酸化の主要因である CO_2 の進入が抑制されていることが考えられる。これと同様の傾向は、配合 A のコンクリート供試体の場合（図-7~8）にも認められる。

図-5 の高炉スラグ微粉末の置換率に応じて、水結合材比を変化させた配合 B の場合、置換率 70% の場合を除き、置換率 45% までは、高炉スラグ微粉末を混入することで、中性化深さがやや大きくなる。以上の傾向は、配合 B のコンクリート供試体の場合（図-7）にも同様に認められた。

図-6 は CO_2 濃度 7% で炭酸化させた場合において、練混ぜ水に水道水、回収水を使用したモルタル供試体を比較した結果である。置換率 0% では、回収水を使用することで、中性化深さの差は大きいですが、置換率 45% では配合条件に関わらず、中性化深さの差は小さい。以上の回収水を使用した場合の置換率 0% の傾向は、普通ポルトランドセメントをアルカリ強化した場合⁴⁾と同様の傾向を示している。

また、中性化深さの試験において、 CO_2 濃度の影響を比較した場合、 CO_2 7% の方がいずれの配合条件においても中性化深さは大きくなるが、これは既往の研究結果³⁾と一致している。

一般に、高炉セメントを用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートに比べ、中性化速度が大きいことが指摘されており、その主な原因として水酸化カルシウムの生成量が少ない事が挙げられる。図-9 は促進炭

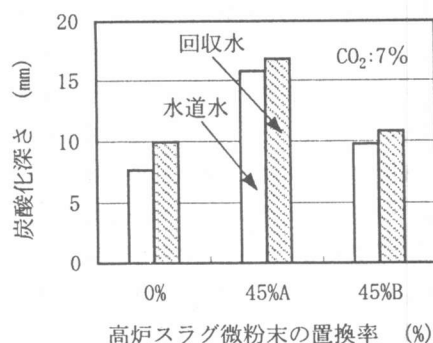


図-6 中性化深さと高炉スラグ微粉末の置換率の関係
(モルタル、水中養生4週)

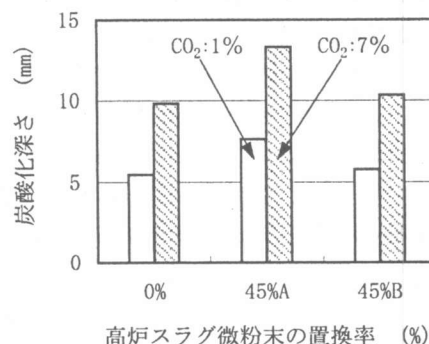


図-7 中性化深さと高炉スラグ微粉末の置換率の関係
(コンクリート、水中養生4週)

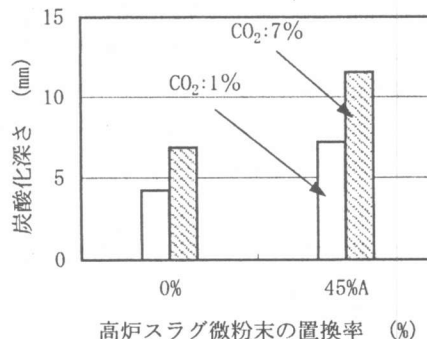


図-8 中性化深さと高炉スラグ微粉末の置換率の関係
(コンクリート、水中養生12週)

酸化開始時のモルタル供試体による、高炉スラグ微粉末の置換率と水酸化カルシウム量の生成量の関係を示したものである。高炉スラグ微粉末の置換率の増加に伴い、生成される水酸化カルシウム量は減少していくことが明らかである。

以上の、中性化深さ試験及び熱分析試験の結果から、普通ポルトランドセメントのみを使用した場合と異なり、配合条件や、水中養生期間によって、その程度は異なるが、高炉スラグ微粉末を混入することで、元々生成される水酸化カルシウム量が少なくなるため、中性化深さが大きくなることが確認された。

5.2 酸素拡散係数の実験結果と考察

図-10～11 は高炉スラグ微粉末の置換率と酸素拡散係数との関係を示したものである。ここで、酸素拡散係数は、試験体内に拡散する酸素量から、組織の緻密度を表わし、酸素拡散係数が小さいということは、組織が緻密であることを意味する。また、鉄筋の腐食の進行は、酸素の供給に依存することから、酸素拡散係数が少ないということは、結果として、鉄筋の腐食速度が遅くなることを意味する。

図-10 の水中養生4週の場合、促進炭酸化の如何を問わず、高炉スラグ微粉末を45%混入したコンクリートの酸素拡散係数が普通ポルトランドセメントのみを用いた場合よりも小さくなっている。この傾向は 図-11 の配合A、水中養生12週の場合に、より顕著であって、炭酸化前の状態で比較すると、高炉スラグ微粉末を45%混入した場合の酸素拡散係数の値は、普通ポルトランドセメントのみを用いた場合の約1/2以下となり、既往の研究結果⁵⁾と一致している。これは、養生を十分行うことで、十分に高炉スラグ微粉末が潜在水硬性を発揮し、組織が緻密となった為と考えられる。

なお、炭酸化させた場合の酸素拡散係数の減少率は、高炉スラグ微粉末を45%混入したコンクリートも、普通ポルトランドセメントのみを用いた場合も、同程度である。また、図-10～11 から明

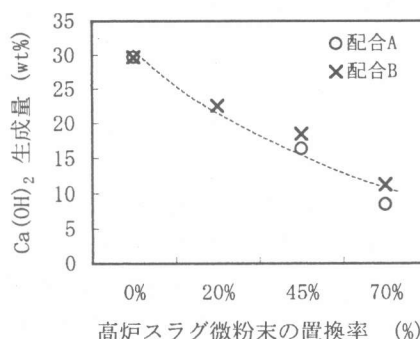


図-9 高炉スラグ微粉末の置換率と水酸化カルシウムの生成量の関係
(モルタル、水中養生4週)

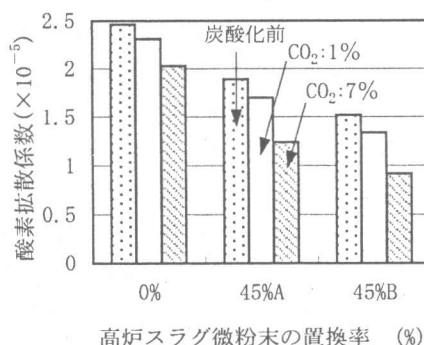


図-10 酸素拡散係数と高炉スラグ微粉末の置換率の関係 (水中養生4週)

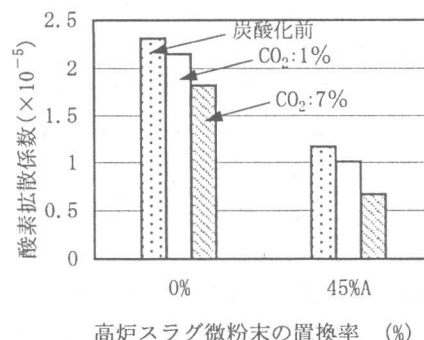


図-11 酸素拡散係数と高炉スラグ微粉末の置換率の関係 (配合A、水中養生12週)

らかなように、CO₂濃度1%と7%で比較すると、7%の方が酸素拡散係数は大きく減少する。

6. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 水結合材比を一定として、高炉スラグ微粉末を混入し水中養生を4週間行った時点の酸素拡散係数は置換率0%と比べ、置換率45%では2割程度しか減少していない。その後12週間促進炭酸化を行った場合、置換率0%と比べ、高炉スラグ微粉末の混入率の増加に伴い、中性化深さも大きくなる傾向が見られた。以上の原因として、高炉スラグ微粉末の混入率に伴い、生成される水酸化カルシウム量が減少すること、組織が十分に水和していないことが考えられる。
- (2) 水結合材比を一定として、水中養生を12週間行い、置換率0%の強度と同等の強度となった時点での酸素拡散係数は置換率0%と比べ、置換率45%では5割減少している。その後12週間促進炭酸化を行った場合、高炉スラグ微粉末の混入率の増加に伴い、中性化深さはやや大きくなる。この原因は、高炉スラグ微粉末の混入量の増加に伴い、生成される水酸化カルシウム量が減少することに起因している。しかし、普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートとは異なり、高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートは組織が非常に緻密となる。高炉スラグ微粉末を混入することで鉄筋の腐食に不可欠な酸素の供給が抑制されることから、高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの鉄筋腐食の傾向を、単純に中性化深さのみによって判定することは適切でないと考えられる。以上より、高炉スラグ微粉末を混入しても、水和特性を考慮し十分養生することにより、炭酸化に対して必ずしも不利にはならないと考えられる。
- (3) 高炉スラグ微粉末を置換しても、材令4週強度が一定となるよう水結合材比を変化させた場合、材令4週の酸素拡散係数は、置換率0%と比べ、置換率45%では4割程度減少している。その後12週間促進炭酸化を行った場合、中性化深さは、高

炉スラグ微粉末の置換率45%までは置換率0%と比べ、僅かに大きい程度である。これは置換率0%と比べ、生成される水酸化カルシウム量は多少減少するが、高炉スラグ微粉末による組織の緻密化が炭酸化を軽減したためと考えられる。

- (4) 高アルカリ性で、主としてセメント水和物からなるスラッジを含む回収水を、練混ぜ水に使用すると、高炉スラグ微粉末の混入の有無に関わらず、水道水と比較して、圧縮強度が低下する傾向が認められた。また、炭酸化させた場合、置換率0%では、回収水を使用することで、水道水を用いた場合と比較し、中性化深さの差は大きい、置換率45%では、中性化深さの差は小さい。
- (5) 今後の課題として、実際に高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートに鉄筋を入れて、十分湿潤養生を行った後、炭酸化させ、鉄筋腐食に関して、中性化深さと高炉スラグ微粉末の混入によるセメント水和組織の緻密度の、どちらがより支配的な要因であるかを検討する必要がある。

謝辞

本研究にあたり、小林一輔本学教授に終始多大なご指導を賜りました。深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岸田孝一：鉄筋コンクリートの耐久性，鹿島建設技術研究所出版部，pp. 165～167，1986
- 2) 和泉意登志：コンクリートの中性化に及ぼすセメントの種類，調査および養生条件の影響について，第7回，コンクリート工学年次講演会論文集，pp. 117～120，1985
- 3) 魚本健人・高田良章：コンクリートの中性化速度に及ぼす要因，土木学会論文集，No. 451，V-17，pp. 119～128，1992. 8
- 4) 小林一輔・宇野祐一：コンクリートの炭酸化のメカニズム，コンクリート工学論文集，第1巻，第1号，pp. 37～48，1990. 1
- 5) 小林一輔・出頭圭三：各種セメント系材料の酸素の拡散形状に関する研究，コンクリート工学，Vol. 24，No. 12，pp. 91～108，1986. 12