

## 論文 物質移動特性によるコンクリートの耐久性評価

大賀宏行<sup>\*1</sup>・青山武史<sup>\*2</sup>・上野 敦<sup>\*3</sup>・國府勝郎<sup>\*4</sup>

要旨：コンクリートの中性化と塩化物透過性を評価する目的で、促進中性化試験と急速塩化物透過性試験を行い、試験結果と圧縮強度および透水性を表す指標である透水係数との関係について配合条件および初期養生期間と関連させ検討を加えた。高炉スラグ微粉末の置換により中性化の進行は促進されるが塩化物の透過性は著しく低減されることが明らかとなり、これらの傾向は圧縮強度では評価できず、塩化物透過性に関しては透水係数により評価できることを明らかにした。しかし、中性化進行性状に関しては、高炉スラグ微粉末の置換および反応により水酸化カルシウムの消費が大きく透水性に加え化学的検討が必要である。

キーワード：中性化、塩化物透過性、透水性、高炉スラグ微粉末、養生条件

### 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の劣化現象は社会的問題となっており、特に社会基盤施設のように公共性の高い構造物の場合、その耐久性評価方法の確立および耐久性向上技術の開発が必要となっている。鉄筋コンクリート構造物の劣化現象に関しては、塩害、中性化、アルカリ骨材反応など個々の劣化ごとに検討が加えられているが、実構造物の劣化現象は環境条件に大きく影響を受けること、さらにはいくつかの劣化が同時に進行する複合劣化が生じる場合があることなどから、この劣化現象を的確に評価することは困難な場合が多い。既往の研究結果から、鉄筋コンクリート構造物の劣化現象は液体、気体およびイオンなどの物質のコンクリートにおける移動現象と、それと同時にしくはそれに引き続き起こる各物質と水和生成物との反応によって生じることが明らかとなっている<sup>1)</sup>。特に、コンクリート中における水分の役割は重要であり、各物質の移動現象に影響を及ぼすだけでなく、水和反応や各物質と水和生成物との反応にも影響を及ぼすものと考えられている。そこで、コン

クリート中の水分の移動現象を柱として劣化現象を評価する手法が考えられる。

本研究は、コンクリートにおける水の移動現象である透水性と中性化進行性状および塩化物透過性に代表される劣化現象を関連させて検討を加えることにより、コンクリートにおける水分の移動現象が耐久性に及ぼす影響を明確にし、コンクリート構造物の劣化現象の機構解明と耐久性評価方法の開発を目的として、実験的に検討を加えた基礎的研究である。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料

普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm<sup>3</sup>）と高炉スラグ微粉末（密度：2.89g/cm<sup>3</sup>，比表面積：4220cm<sup>2</sup>/g）を用いた。細骨材は砕砂と陸砂を混合したもの（密度：2.57g/cm<sup>3</sup>）を、粗骨材は砕石（密度：2.67g/cm<sup>3</sup>）を用いた。混和剤としてAE減水剤を用い、空気量の補正にAE補助剤を用いた。

#### 2.2 配合条件および養生条件

単位結合材量 (C+SG) および水結合材比 (W/

\* 1 東京都立大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 工博（正会員）

\* 2 東京都立大学学生 工学部土木工学科

\* 3 東京都立大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻（正会員）

\* 4 東京都立大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 工博（正会員）

表-1 コンクリートの配合

SG/C+SG (%)	W/C+SG (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		s/a	W	C	SG	S	G
0	50	43.5	153	306	0	788	1064
30	50	43.5	153	214	92	785	1060
50	50	43.5	153	153	153	783	1057
70	50	43.5	153	92	214	751	1015

C+SG, 50% wt) を一定とし, 高炉スラグ微粉末 (SG) の置換率 (SG/C+SG) を 0, 30, 50, 70% と変化させ, スランプが  $8 \pm 2$  cm, 空気量が  $4.5 \pm 1\%$  となるように AE 減水剤量および AE 助剤量を調整した. コンクリートの配合を表-1 に示す. 打設後約 24 時間で脱型し, 初期養生として材齢 7 日および 28 日まで 20℃ の水中養生を行った.

### 2.3 試験方法

#### (1) 中性化試験

所定の初期水中養生直後に, 温度 40℃, 相対湿度 50%, 二酸化炭素濃度 7% に調整した促進中性化試験装置に供試体 (100 × 100 × 400mm) を搬入し促進中性化試験を行った. 促進環境下に暴露後, 所定の期間ごとに供試体を軸方向に直角に割製し, 1% フェノールフタレインアルコール溶液を噴霧して赤変しない部分の深さを一断面あたり 24 箇所測定し, その平均値を中性化深さとした. コンクリートの中性化深さと促進試験における暴露期間との関係において, 中性化深さが暴露期間の平方根にほぼ比例することから両者の関係において最小二乗法により求めた直線の傾きを中性化係数と定義し, 中性化の進行の指標とした.

#### (2) 塩化物透過性試験

所定の初期水中養生直後に, ASTM に準拠した急速塩化物透過性試験を行った<sup>2)</sup>. 供試体 ( $\phi$  100 × 50mm) の両端に設置したセルに 0.3N NaOH 溶液および 3% NaCl 溶液を満し, 60V の直流電圧を印荷して供試体に流れる電流を測定し, 6 時間に流れる電流量により塩化物の透過性を評価する試験である<sup>3)</sup>.

#### (3) 透水試験

所定の初期水中養生直後に, 水中において真空脱気させた供試体 ( $\phi$  100 × 40mm) を用いて, 圧力勾配下における透水試験を行い, 透水量および水圧から透水係数を算出した. 水圧は供試体の種類により 1 から 3 N/mm<sup>2</sup> 程度とした. なお, 透水係数は水圧の大きさによる影響がほとんどないことが確認された.

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 コンクリートの耐久性

図-1 に高炉スラグ微粉末の置換率とコンクリートの圧縮強度との関係を示す. 既往の研究とは異なり<sup>4)</sup>, 比表面積が 4000cm<sup>2</sup>/g 程度の高炉スラグ微粉末を用いた場合, 材齢 28 日程度までは高炉スラグ微粉末を混和することにより圧縮強

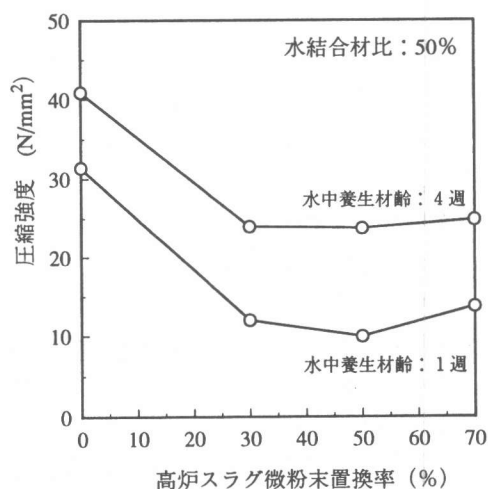


図-1 コンクリートの圧縮強度と高炉スラグ微粉末の置換率との関係

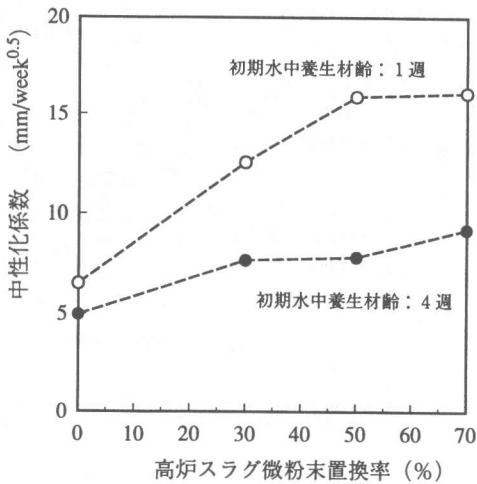


図-2 コンクリートの中性化に及ぼす高炉スラグ微粉末の置換率の影響

度は低下するが、高炉スラグ微粉末の置換率が30%以上では置換率が増加しても圧縮強度はほぼ同じであった。

コンクリートの中性化係数と高炉スラグ微粉末の置換率との関係を図-2に示す。高炉スラグ微粉末の置換率の増加とともに中性化係数は増大している。また、高炉スラグ微粉末を混和した場合には、初期の水中養生期間を1週から4週に増加させることにより中性化の進行を遅らすことが可能となっている。すなわち、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートは初期の十分な養生が中性化の進行抑制に有効である<sup>4)</sup>。

図-3に電気量に及ぼす高炉スラグ微粉末の置換率の影響を示す。電気量は急速塩化物透過性試験において6時間に流れた電気量を示し、この電気量の値により塩化物の透過性を評価できることになっており、電気量が少ない程遮塩性が優れていることになる<sup>2)</sup>。高炉スラグ微粉末の置換率の増加とともに電気量は低減しており、高炉スラグ微粉末の混和により塩化物の透過性が抑制されている。特に、初期の水中養生期間が4週の場合には置換率の増大とともにほぼ直線的に著しく低減しており、中性化と同様に初期の十分な養生が遮塩性に有効である<sup>5)</sup>。

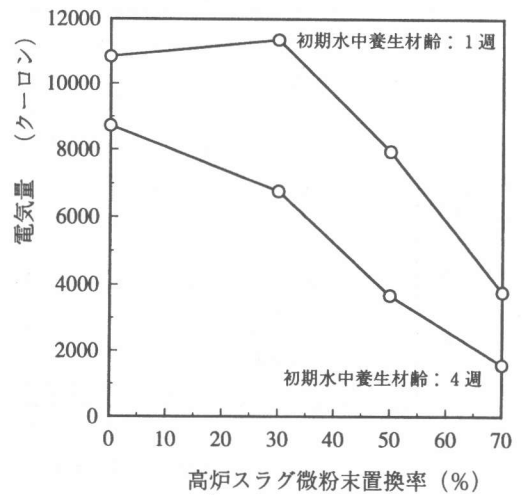


図-3 コンクリートの塩化物透過性に及ぼす高炉スラグ微粉末の置換率の影響

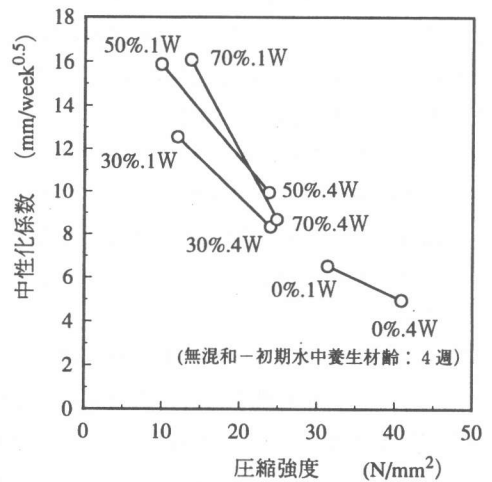
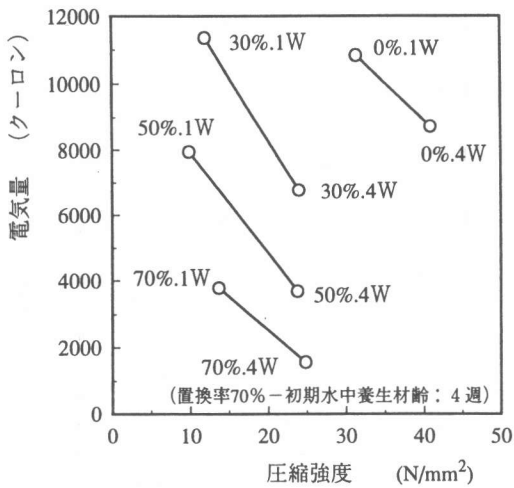
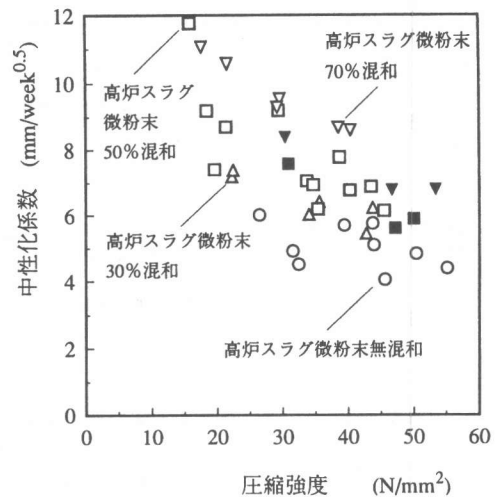


図-4 コンクリートの中性化現象の圧縮強度による評価

コンクリートの耐久性の評価方法を検討する目的でコンクリートの中性化係数と圧縮強度との関係を示したのが図-4である。ここで示した圧縮強度は初期の水中養生直後における圧縮強度であり、それぞれ同一初期養生条件のコンクリートの中性化係数との関係を示している。



図一五 コンクリートの塩化物透過性の圧縮強度による評価

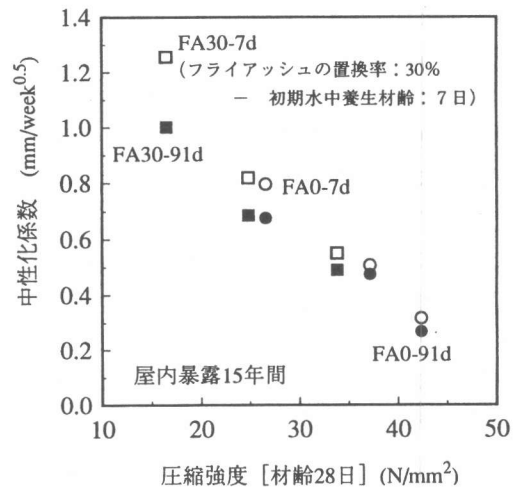


図一六 高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの圧縮強度による中性化現象の評価<sup>4)</sup>

圧縮強度と中性化係数との関係は、圧縮強度の増加とともに中性化係数は低減している。しかし、両者の関係は高炉スラグ微粉末の置換率により異なっており、同一圧縮強度において高炉スラグ微粉末の置換率の増加とともに中性化係数は増大する傾向が認められる。このことは、高炉スラグ微粉末でセメントの30%以上を置き換えた場合には、圧縮強度のような物理的な指標のみでは中性化現象を評価することができないことを示している<sup>4)</sup>。

図一五にコンクリートの圧縮強度と電気量との関係を示す。中性化係数の場合と同様に圧縮強度の増加とともに電気量は低減するが、両者の関係は高炉スラグ微粉末の置換率によって異なり、中性化係数の場合とは逆に同一圧縮強度において高炉スラグ微粉末の置換率の増加とともに電気量は低減している。特に、高炉スラグ微粉末を70%混和した場合には著しい遮塩性を示している。このように、コンクリートの中性化進行性状および塩化物透過性はコンクリートの圧縮強度のみによって評価することができないことが示された。

図一六は比表面積を4000cm<sup>2</sup>/g程度から8000cm<sup>2</sup>/g程度まで変化させた高炉スラグ微粉末を用



図一七 フライアッシュを混和したコンクリートの圧縮強度による中性化現象の評価<sup>6)</sup>

いたコンクリートの促進中性化環境下における中性化係数と圧縮強度(水中養生)との関係を示す<sup>4)</sup>。この場合にも中性化に関する同様な関係が認められ、特に比表面積の大きな高炉スラグ微粉末を比較的多量に用いた場合(図中■印および▼印は比表面積8000cm<sup>2</sup>/g程度の高炉スラグ微粉末を

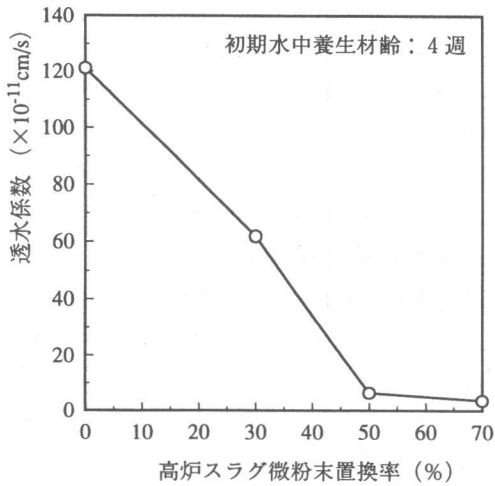


図-8 コンクリートの透水係数に及ぼす高炉スラグ微粉末の置換率の影響

50%および70%置換したコンクリート)に大きな中性化係数を示している。また、フライアッシュを用いた自然暴露試験の結果を図-7に示す<sup>6)</sup>が、同一圧縮強度でも初期の水中養生材齢が小さい程中性化係数は大きくなり、特に圧縮強度が小さい場合にその傾向は顕著となっており、高炉スラグ微粉末を用いた場合と同様に圧縮強度のみでは中性化現象を評価することができないことが示された。

### 3.2 透水性による耐久性の評価

図-8にコンクリートの透水係数と高炉スラグ微粉末の置換率との関係を示す。ここで示した透水係数は初期水中養生材齢28日のコンクリートの透水係数を示す。高炉スラグ微粉末の置換率が50%までは置換率の増加とともに透水係数は著しく低減している。しかし、置換率が50%以上では置換率が增大しても透水係数は若干しか低減しない結果となった。

中性化係数と水中養生材齢28日のコンクリートの透水係数の関係を図-9に示す。透水係数が低減しても中性化係数は増大する結果となっている。すなわち、透水係数で表されるコンクリートの緻密度では高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの中性化性状は評価できないこ

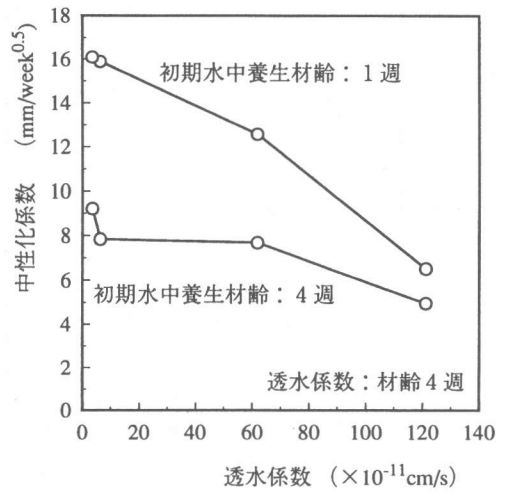


図-9 コンクリートの中性化現象の透水係数による評価

とを示している。図-8に示したように高炉スラグ微粉末の置換率の増加とともに透水係数は著しく低減するが、高炉スラグ微粉末の置換率が増加することにより水酸化カルシウムを供給するセメントの量が減少するだけでなく、高炉スラグ微粉末とセメントの反応により水酸化カルシウムが消費されるために図-9に示すような関係になったものと考えられる。このように、物理的にコンクリートの組織が緻密になったとしても上述の水酸化カルシウムの生成および消費に関連する化学的な影響により中性化の進行が速くなることを示している。高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの中性化を評価する場合には、コンクリートの緻密度のみならず高炉スラグ微粉末の置換によるセメント量の減少と高炉スラグ微粉末とセメントとの反応性についても検討を加えらるとともに、コンクリートにおける気体の移動現象を表す指標、たとえば、透気性についても検討する必要がある。

図-10に急速塩化物透過性試験におけるコンクリートの電気量と透水係数との関係を示す。初期水中養生材齢が4週のコンクリートの透水係数と初期水中養生材齢が1週および4週のコンクリートの電気量との関係において、透水係数の低

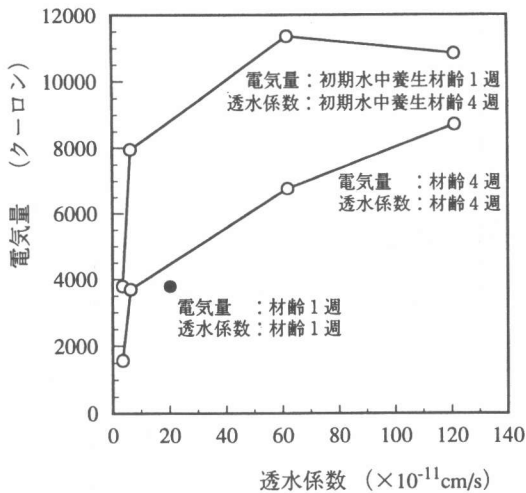


図-10 コンクリートの塩化物透過性の透水係数による評価

減とともに電気量は低減しており、透水係数で表されるコンクリートの緻密度は塩化物透過性と密接に関連していることが示されている。図中●印は初期水中養生材齢1週におけるコンクリートの透水係数と電気量との関係を示している。初期水中養生材齢4週におけるコンクリートの透水係数と電気量との関係を表す線上に初期水中養生材齢が1週の場合の結果があることから、初期の養生条件にかかわらず急速塩化物透過性試験によって得られた電気量は同一初期水中養生材齢のコンクリートの透水係数により評価可能であることが明らかとなった。

#### 4. 結論

コンクリートの耐久性を評価する方法を確立するための基礎的研究として、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの中性化進行性状および塩化物透過性とコンクリートの緻密度の指標としての透水係数との関係について、配合条件および養生条件と関連させ検討を加えた。本研究により得られた結論は以下の通りである。

1) 高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの中性化進行性状および塩化物透過性をコンクリートの圧縮強度のみにより評価することはで

きない。

2) 高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの中性化現象を評価するにはコンクリート組織の緻密度に加えセメント量の減少と高炉スラグ微粉末とセメントとの反応などの化学的な要因についても検討を加える必要がある。

3) 高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの塩化物透過性は初期養生条件にかかわらずコンクリートの透水性により評価できる可能性がある。

なお、本研究の一部は平成9年度科学研究費補助金基盤研究(C)(2)(課題番号:09650512)により実施したものである。

#### 参考文献

- 1) 物質移動ワーキンググループ:コンクリート中の物質移動, 反応モデル解析研究委員会報告書(I), 日本コンクリート工学協会, pp.241-296, 1996.5
- 2) ASTM C 1202: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, American Society for Testing and Materials, 1991
- 3) 大賀宏行, Robert Douglas Hooton: 急速塩化物透過性試験によるセメント系硬化体中の塩化物移動現象の評価, 生産研究, 第46巻, 第7号, pp.29-32, 1994.7
- 4) 長滝重義, 大賀宏行, 荒井俊晴: 高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの中性化, 高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集, pp.143-150, 1987
- 5) 大賀宏行, 平間貴司, 國府勝郎: 高炉スラグ微粉末を混和したモルタルにおける物質移動に及ぼす初期養生条件の影響, コンクリート工学年次論文報告集, 第17巻, 第1号, pp.349-352, 1995.6
- 6) 大賀宏行, 上野 敦, 國府勝郎: 圧縮強度によるコンクリートの耐久性評価に関する基礎的研究, セメント技術大会講演要旨, 第51回, pp.326-327, 1997.5