

実環境を考慮した高炉セメント コンクリートの中酸化速度評価

上原 元樹* 鶴田 孝司* 佐藤 隆恒*

Evaluation of Neutralization Rate of Blast-furnace Slag Cement Concrete
with Due Consideration of Actual Environments

Motoki UEHARA Koji TSURUTA Takatsune SATO

Mortar or concrete specimens were prepared using fine powder of blast-furnace slag with various mix proportions. The accelerating neutralization was examined under various curing and testing conditions, considering the environment of an actual structure. The examination showed that the neutralization rate of the blast furnace slag cement concrete under the evaluated conditions was higher than that under the actual conditions. It was also found that the neutralization rate of the blast-furnace slag cement concrete could be evaluated based on the surface structure compressive strength affected by the curing conditions and the amount of calcium hydroxide affected by the amount of blast-furnace slag.

キーワード：高炉スラグ，CO₂濃度，中性化，促進試験，圧縮強度，水分

1. はじめに

鉄鋼製造工程において副産物として発生する高炉スラグ微粉末は、高炉で鉄鉱石を溶解する工程で鉄鉱石に含まれる鉄以外の成分と、副原料の石灰石やコークス中の灰分と一緒に溶融分離回収されたものである。高炉から排出された約 1500℃の溶融したスラグは、加圧水を噴射するなど急激に冷却処理されることにより、ガラス質の水砕スラグとなり、それを粉砕したものがセメント用の混和材として広く用いられている。特に、環境負荷低減の観点から、副産物の利用や、その製造時に CO₂ 排出量が多いポルトランドセメント量を削減する目的で、近年高炉スラグで普通ポルトランドセメントを置換した高炉セメントの利用が推進されている。しかし、高炉セメントは一般的な普通ポルトランドセメントとは異なる特性を有するとして、その使用法には注意が促されている。例えば、高炉セメントは、普通ポルトランドセメントと比較して強度発現が遅くなることから、その養生の際には注意が必要である¹⁾。また、高炉スラグ微粉末で置換したコンクリートを JIS A 1153「コンクリートの促進中性化方法」に準じて試験を行った場合、中性化速度が大きくなることが知られているが、必ずしも実構造物の結果とは一致しないこと等の問題も指摘されている²⁾。すなわち、高炉セメントを使用したコンクリートにおいて、既存の促進中性化試験の結果をそのまま適用すると、実構造物の中酸化の進行を過剰に見積もる可能性

が指摘されている³⁾。

これは、現在の JIS A 1153 において促進中性化試験の試験前養生条件が水中 28 日と規定されており、図 1 に示されるように、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリート（以下、高炉セメントコンクリート）の硬化速度を考慮していないことに起因する可能性が考えられる。

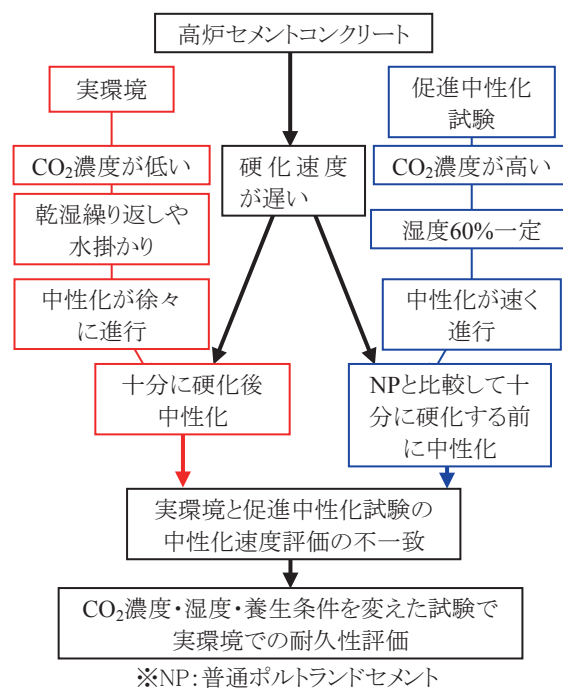


図 1 高炉セメントコンクリートにおける実環境と促進中性化試験の相違

* 材料技術研究部 コンクリート材料研究室

表1 作製供試体の配合および試験条件一覧

コンクリート供試体					モルタル供試体				
W/B	養生方法	CO ₂ 濃度	中性化条件	BS置換率	W/B	養生方法	CO ₂ 濃度	中性化条件	BS置換率
(45%) 55% 65%	・封緘7日	5%	・20℃ 60%R.H.	0%	45%を 基準	・封緘7日 ・水中28日	1%	・20℃ 60%R.H. ・乾湿繰返し (60% 3日 - 95% 4日) ・水中浸漬 (水中1日 - 60% 6日)	0%
	20%			20%					
	40%	40%							
	(50%) 60%	40% 60%							

W/B: 水結合材比率, BS: 高炉スラグ微粉末, コンクリート供試体の () 内は CO₂ 濃度 5% のみで試験を実施
コンクリート供試体の単位水量 148kg/m³, 目標スランブ 8cm, 空気量 4.5 ± 1.5%

すなわち、実環境では、CO₂ 濃度が低いため中性化の進行が遅く、高炉セメントコンクリートの水和硬化が十分に生じた後に、中性化が進行するのに対して、促進中性化試験においては CO₂ 濃度が 5% と実環境と比較して大きいこと、硬化の遅い高炉セメントコンクリートに対して試験前養生期間が水中 28 日では不十分であり、普通ポルトランドセメントコンクリートに対して大きく中性化速度を見積もる可能性が考えられる。また、実環境で生じる乾湿繰返しや水掛かり等の環境要因が、促進中性化試験では考慮されておらず、このことから、実環境における高炉セメントコンクリートの中性化速度を正しく評価できない可能性が考えられる。本研究では、より実構造物に近い環境における高炉セメントを使用したコンクリートの中性化に対する耐久性を評価するため、促進中性化試験における CO₂ 濃度や水分供給条件を変えた試験を行い、高炉セメントコンクリートの物理化学的性状と中性化速度との相関を検討した。

2. 実験概要

促進中性化試験における CO₂ 濃度が中性化速度に与える影響を検討するため、コンクリートおよびモルタル供試体を作製した。本試験で用いた作製供試体の配合および試験条件の一覧を表 1 に示す。ここで、松本ら⁴⁾ は、単位水量と比較して、中性化に与える影響は水結合材比

(W/B) の方が大きいことを示した。そこで、本試験では単位水量を一定とし、W/B が中性化に与える影響を検討した。その際、ブリーディング等による供試体中の W/B のばらつきを抑制するために、一般的なコンクリートの単位水量より小さい 148kg/m³ を選定した。

各コンクリート供試体は打設 2 日後に脱型し、封緘 (20℃) 7 日間、気中 (20℃, 相対湿度 60%) 28 日間、水中 (20℃) 28 日間、水中 (20℃) 91 日間の各養生条件で静置した。養生終了後に 28 日間 20℃ 相対湿度 60% (以下 60%R.H.) の環境に静置し (気中 28 日の試料は養生終了後すぐに試験を実施)、その後圧縮強度および促進中性化の各試験を行った。このため圧縮強度や表面反発度を測定した材齢は養生条件により異なり、促進中性化試験開始直前の圧縮強度および表面反発度となる。なお、CO₂ 濃度 1% に関しては W/B が 55% と 65%、養生条件は封緘 7 日間と水中 28 日間、高炉スラグ置換率は 0%、20%、40%、60% の試験を行った。

各コンクリート供試体の圧縮強度に関しては φ 100 × 200mm の円柱供試体を用い、JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」に基づいて試験を行った。表面反発度試験は、φ 100 × 200mm の供試体の上下をアムスラーで固定して側面を JIS A 1155 「コンクリートの反発度の測定方法」に基づいて測定した。中性化促進試験には 100 × 100 × 400mm の角柱供試体を養生終了後に 100 × 100 × 80mm に切断し、供試体側面 1 面を除い

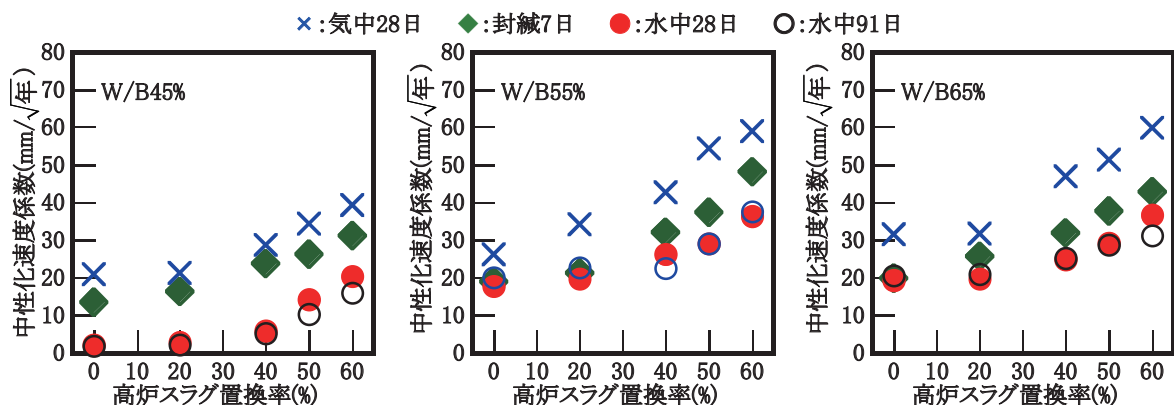


図2 コンクリート供試体の各養生条件における高炉スラグ置換率と中性化速度係数の関係

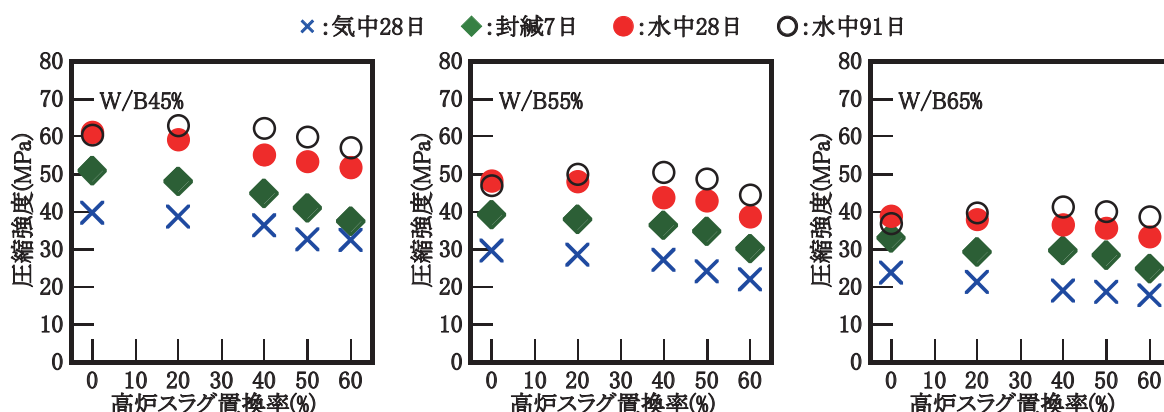


図3 コンクリート供試体の各養生条件における高炉スラグ置換率と圧縮強度との関係

てアルミテープで被覆したものを用いた。中性化深さの測定は JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準じて行った。

各モルタル供試体の配合は、骨材として JIS R 5201 のセメント強さ試験用標準砂を用い、質量比を粉体：砂=1:2 とした。また水分量は、高炉スラグ置換率 0% の W/B45% を基準として、高炉スラグ置換モルタルに関しては、それと同一フロー値となるように調製をした。供試体は打設 2 日後に脱型し、封緘 7 日間、水中 28 日間の各養生条件で静置した。各養生終了後に 28 日間 20℃、60% の相対湿度の環境に静置し、その後圧縮強度および促進中性化の各試験を行った。促進中性化試験は、CO₂ 濃度 1% で 20℃ 相対湿度 60% 一定と、乾湿繰返し (20℃ 相対湿度 60% で 3 日 - 20℃ 相対湿度 95% で 4 日のサイクル)、水中浸漬 (1 日水中浸漬 - 6 日 20℃ 相対湿度 60%) の 3 条件で行った。また、水中浸漬した試料の中性化速度係数に関しては、20℃ 相対湿度 60% の中性化槽に静置している期間のみを試験期間として数えた。

3. 結果および考察

3.1 圧縮強度と中性化速度との関係

図 2 にコンクリート供試体の各 W/B における高炉スラグ置換率と CO₂ 濃度 5% での中性化速度係数 (促進中性化 182 日経過時の中性化深さから算出) との関係を示す。なお中性化速度係数の算出には、中性化の進行が、経過時間の 1/2 乗、つまり \sqrt{t} に比例するとした、いわゆる \sqrt{t} 則を用いた。養生条件の違いで比較すると、いずれの W/B においても中性化速度係数は大きい順に気中 28 日、封緘 7 日、水中 28 日、水中 91 日となった。ここで、水中 28 日と水中 91 日では、高炉スラグ置換率が小さいときはその差がほとんど認められないが、高炉スラグ置換率が 40% 以上では水中 91 日の中性化速度が小さくなる傾向が認められた。

図 3 に各 W/B における高炉スラグ置換率と圧縮強度との関係を示す。同一配合で比較すると、圧縮強度の傾向は、図 2 における中性化速度係数の結果とは逆に、水中 91 日が最も大きくなるのがわかった。また高炉スラグ置換率が 40% 以上で、水中 28 日に比べて水中 91 日の試料の圧縮強度が大きかった。これは、高炉スラグ置換率が大きいコンクリートは硬化速度が遅いため、促進中性化試験に規定された水中養生 28 日では、高炉スラグ微粉末による硬化組織の緻密化が十分ではないためと考えられる。したがって、実環境で緻密化が進んだ後ゆっくり中性化が進行する高炉セメントコンクリートにおいては、十分に養生を行い硬化組織の緻密化が進み、十分圧縮強度が増大したのち、促進中性化試験を行うことが望ましいものと考えられる。また、十分に緻密化が進んでいない現行の 28 日水中養生の条件の促進中性化試験では、高炉セメントコンクリートの中性化速度を普通コンクリートに比べて大きく見積もる可能性が示唆される。

図 4 に各高炉スラグ置換率における中性化試験開始時の圧縮強度と中性化速度係数との関係を示す。養生条件および W/B に関わらず、圧縮強度と中性化速度係数には負の相関が成り立つことがわかった。ただし、同一強

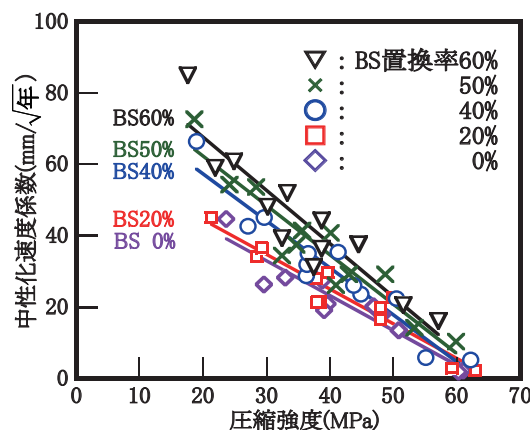


図4 コンクリート供試体の圧縮強度と中性化速度係数の関係

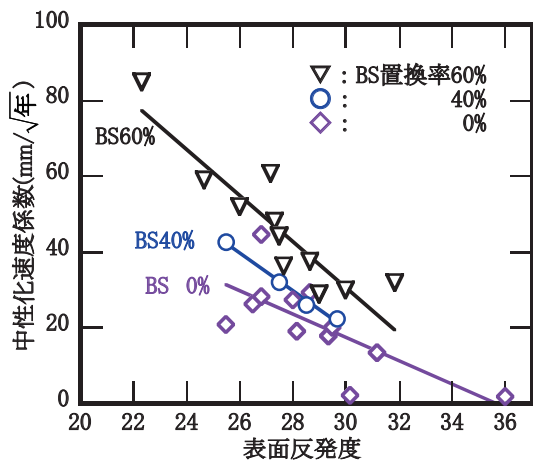


図5 コンクリート供試体の表面反発度と中性化速度係数の関係

度でも高炉スラグ微粉末の置換率に応じて中性化速度係数が大きくなり、高炉スラグ置換率40%以上で特に圧縮強度の低い領域ではそれが顕著になることもわかった。

図5に各高炉スラグ置換率における表面反発度と中性化速度係数との関係を示す。図4に示した圧縮強度と中性化速度係数と同様に、表面反発度と中性化速度係数には高炉スラグ置換率毎に負の相関があること、高炉スラグ置換率40%以上で特に表面反発度の低い領域ではそれが顕著になることがわかった。以上のことから、高炉セメントコンクリートの中性化に対する抵抗性を中性化試験開始時の圧縮強度あるいは表面反発度でおよそ評価できること、同一強度においても高炉スラグ置換率に応じて中性化速度が異なることがわかった。これらの結果は、既往の研究結果と一致する⁵⁾。

上記の結果と、高炉スラグ置換率の高いコンクリートはCa(OH)₂量が少なくなることに着目し、ペースト中のCa(OH)₂量、圧縮強度と中性化速度との重相関を検討した結果を図6に示す。本促進中性化条件の場合、中性化速度係数 $y = -1.30 \times \text{圧縮強度 (MPa)} + (-1.44 \times \text{Ca(OH)}_2 \text{量 (\%)} + 93.3)$ で重相関Rが0.94、重決定R²が0.87と良く近似できることがわかった。したがって、養生条件やW/Bの違いによる細孔組織の相違が、CO₂の浸透抵抗性に影響し、それは圧縮強度や表面反発度として評価できること、一方、完全に中性化するのに必要なCO₂量はCa(OH)₂量で評価できることから、これら二つの要因を考慮することで高炉セメントコンクリートの中性化に対する抵抗性を評価できることがわかった。

なお、本試験において圧縮強度の評価はφ10cmの供試体で行っている。すなわち、供試体の表面から中心までの厚さは5cmであるため、養生の影響を実構造物に換算すると表層5cm程度における養生効果と同等と考えられる。したがって、実構造物において、表面から深い領域では養生の影響を受けにくい表層より圧縮強

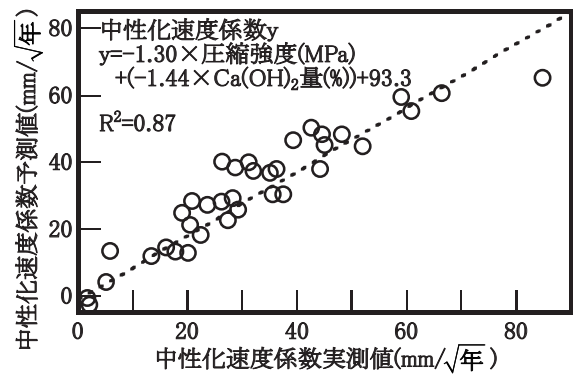


図6 CO₂ 5%, 相対湿度 60% の促進中性化試験における圧縮強度、Ca(OH)₂量と中性化速度との関係

度が大きくなり中性化速度を小さく見積もる可能性がある。このことから、実構造物においては表層5cm程度の圧縮強度を評価し、高炉セメントコンクリート中のポルトランドセメント量でおよそ近似できるCa(OH)₂量の相対量と併せて中性化に対する抵抗性を評価できるものと考えられる。

3.2 CO₂濃度が中性化速度に与える影響

図7はコンクリート供試体における中性化試験開始時の圧縮強度と、CO₂濃度1%での促進中性化試験による中性化速度係数の関係を示したものである。CO₂濃度5%による試験と同様に、圧縮強度と中性化速度係数に負の相関が認められた。また同一強度では、高炉スラグ置換率に応じて中性化速度係数が大きくなる点もCO₂濃度5%による試験と同様であった。

図8は高炉スラグ置換率0%のコンクリートに対する中性化速度係数の比と高炉スラグ置換率の関係を、CO₂濃度1%および5%の場合に関して示したものである。W/B55%, W/B65%共に、高炉スラグ置換率40%以上で、中性化速度係数比はCO₂濃度1%の方がCO₂濃度5%と比較して小さくなった。このことから、高炉スラグ置

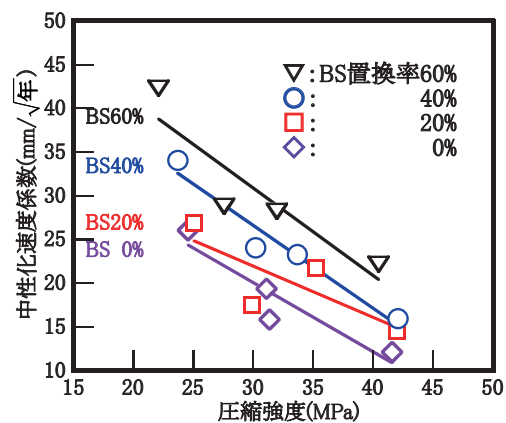


図7 コンクリート供試体のCO₂濃度1%における中性化速度係数と圧縮強度

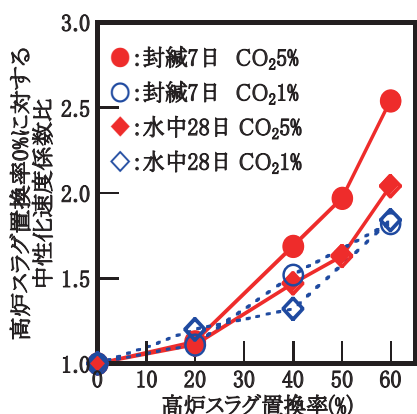


図8 コンクリート供試体の中性化速度係数の比と高炉スラグ置換率 (W/B65%)

換率が高いコンクリートでは、CO₂ 濃度が高い試験では例えば実環境のような CO₂ 濃度が低い場合と比較して中性化速度が過剰に見積もられるものと推察される。つまり、CO₂ 濃度 5% による現行の促進中性化試験は、実環境の中性化速度を推定する際に、前項で明らかにした養生期間の不足に加えて CO₂ 濃度の観点からも、高炉セメントコンクリートの中性化速度係数を過剰に見積もる可能性が示唆された。

3.3 水分供給条件が中性化速度に与える影響

図9は、モルタル供試体による異なる水分供給条件における高炉スラグ置換率と中性化速度係数の関係を示したものである。

同一高炉スラグ置換率で比較すると、水中浸漬試料、乾湿繰り返し試料、温湿度一定の試料の順に中性化速度係数が小さい。この結果は既往の研究結果と一致する⁶⁾。また、乾湿繰り返し条件における試料に対して、中性化が進行しにくい 20℃ 相対湿度 95% に置いた期間 144 日を除外し、20℃ 相対湿度 60% に置いた期間 108 日のみで中性化速度係数を求めた場合(図中、乾湿繰り返し(3日換算)として記述)でも、温湿度一定の試料と比較して中性化

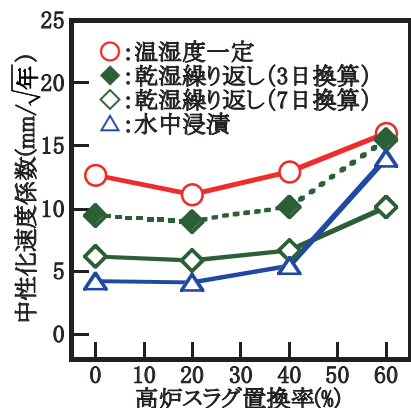


図9 種々の水分供給条件における中性化速度係数と高炉スラグ置換率 (モルタル供試体封緘 7 日)

速度係数が小さくなっている。このことから、20℃ 相対湿度 95% の高湿度状態の期間において中性化が進行しないだけでなく、高湿度状態で水分が供給されることで、乾燥期間中の中性化が抑制されることがわかった。

図10はモルタル供試体による、封緘7日養生で水中浸漬1日-中性化槽6日による中性化試験のサイクルを20回行った試料と、水中28日養生で湿度一定の試験を行った試料の中性化速度係数を比較した図である。封緘7日試料は、水中浸漬期間が合計で20日となるため、封緘7日+水中養生20日の試料と考えることもできる。高炉スラグ置換率40%以下の試料では、水中浸漬の中性化速度係数は、水中養生28日で湿度一定条件における試験結果と比較して小さい値となった。これは、比較的緻密化の進んだ高炉スラグ置換量の少ない領域では、水分が試料表面に供給されることでCO₂の浸透が大きく抑制されるためと考えられる。一方、高炉スラグ置換率が大きく、空隙が多い試料では水分が供給されても逸散が早く、本試験条件ではCO₂の浸透抑制効果が小さかったものと推察される。

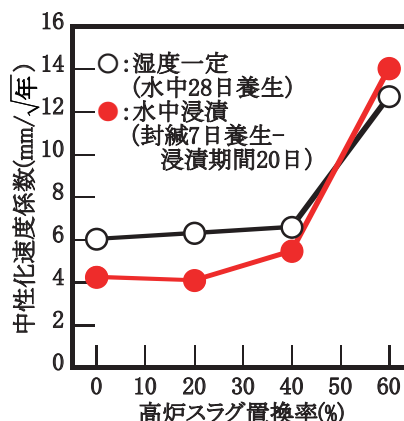


図10 モルタル供試体における水中養生換算した中性化速度係数

4. 実環境における中性化速度係数推定

前章で述べた、CO₂ 濃度や水分供給条件が中性化速度に与える影響の結果から、実環境における中性化速度係数を推定する手法について検討した。

CO₂ 濃度の影響について、魚本ら⁷⁾の研究によると、基本的に中性化速度係数はCO₂濃度の平方根に比例するが、CO₂濃度が高くなるとCO₂がコンクリート中に拡散しにくくなるために中性化速度が式(1)のようなCO₂濃度の関数で示されている。

$$X = (0.742 - 0.224 \log C) \cdot A \cdot \sqrt{(C/0.07) \cdot t} = (2.804 - 0.847 \log C) \cdot A \cdot \sqrt{C \cdot t} = k \cdot A \cdot \sqrt{C \cdot t} \quad (1)$$

ここで、X: 中性化深さ (mm), C: CO₂ 濃度 (%),

A: C=0.07%, すなわち CO₂ 濃度 0.07% 時の中性化速度係数, t: 経過時間 (年), k= (2.804-0.847logC)

特集：材料技術

この式を用い、本試験で得られた結果から実環境における中性化速度係数を推定する手法について検討した。

図 11 は、本試験における CO₂ 濃度 5% および 1% における圧縮強度と中性化速度係数との関係 (図 7 および図 8) を用いて、例えば圧縮強度 30MPa の場合、実環境 (CO₂ 濃度 0.039%) における中性化速度係数を推定する手法を示したものである。具体的には、各 CO₂ 濃度で測定した中性化速度係数から、CO₂ 濃度の関数である比例係数 k を除した値が CO₂ 濃度の平方根と比例することを用い、実環境における中性化速度係数を推定するものである。この結果、実環境における中性化速度係数は促進中性化試験における値に比べて絶対値が低くなり、また高炉スラグ置換率による差も小さくなっている。このことから、実環境下において高炉スラグの置換が中性化に与える影響は、高濃度 CO₂ 環境下と比較して小さくなると推定できる。なお、本試験では CO₂ 濃度 1% と 5% の 2 点のみで直線回帰を行っているため、近似直線にばらつきが生じている。このため、この手法にて詳細な判定を行う際には、さらに CO₂ 濃度が低い領域における長期試験が必要であると考えられる。

水分の影響については、検討手法の 1 つとして、図 9 および図 10 で測定した様に、相対湿度一定条件における中性化速度に対する、乾湿繰り返しおよび水中浸漬試料の中性化速度係数の比を求め、中性化速度係数に掛ける方法が考えられる。高炉スラグ置換率 60% 以外の試料では、図 9 における温湿度一定の試料と乾湿繰り返し (3日換算) の試料との中性化速度係数比は 0.74 ~ 0.80、また図 10 における温湿度一定の試料と水中浸漬の試料との中性化速度係数比が 0.65 ~ 0.83 であり、高炉スラグ置換率による差はほとんどないことがわかった。また、上記の比の値が高炉スラグ置換率 60% 以外では 1 より小さいことから、実環境において水分がある程度供給される場合には、CO₂ 濃度の影響に加えてさらに中性化速度係数が小さくなることがわかった。

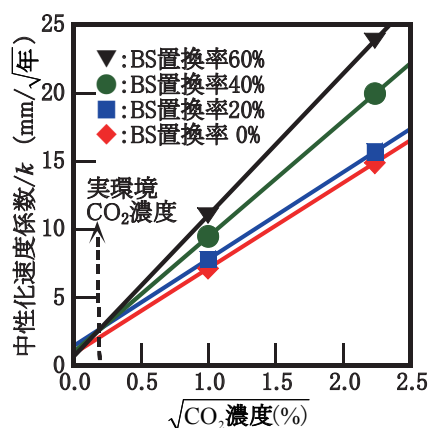


図 11 実環境における中性化速度の算出図 (圧縮強度 30MPa)

以上の結果から、実環境における CO₂ 濃度や水分の影響を考慮すると、高炉スラグの置換が中性化に与える影響は、従来の促進中性化試験条件下に比べて小さく、普通ポルトランドセメントのそれと比べて大きな差はないことがわかった。

5. まとめ

高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートに関して、種々の配合でモルタルおよびコンクリートを作製し、実構造物の環境を考慮した種々の養生条件、試験条件で中性化促進試験を行った。その結果は以下の通りである。

- (1) 養生条件や水結合材比の配合に関わらず、中性化試験開始時の圧縮強度と中性化速度におよそ負の直線関係が成り立つこと、圧縮強度と Ca(OH)₂ 量を考慮することにより促進中性化試験における高炉セメントコンクリートの中性化に対する抵抗性を評価できることがわかった。
- (2) 実構造物では、養生条件の影響を強く受ける表層部分の圧縮強度あるいは反発度と Ca(OH)₂ 量を考慮して中性化に対する抵抗性を評価できるものと推察された。
- (3) 実環境における高炉スラグの置換が中性化に与える影響は、促進試験における高濃度 CO₂ 環境下と比較して小さく、普通ポルトランドセメントのそれと比較して大きな差はないことがわかった。

文 献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編]，pp.122-123，2012
- 2) 土木学会：混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会報告書，pp.204-205，2007
- 3) 松田芳範ほか：実構造物調査に基づく中性化に与えるセメントおよび水分の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.629-634，2010
- 4) 松本幸太郎ほか：降雨の影響を受ける構造体コンクリートの中性化速度に関する研究，日本建築学会中国支部研究発表会，No.109，2012
- 5) 梅木真理ほか：圧縮強度を指標とした高炉スラグ微粉末使用コンクリートの耐久性評価に関する一考察，土木学会第 63 会年次学術講演会，pp.599-600，2008
- 6) 佐伯竜彦ほか：中性化によるモルタルの強度変化，土木学会論文集 No.451，V-17，pp.69-78，1992
- 7) 魚本健人，高田良章：コンクリートの中性化速度に及ぼす炭酸ガス濃度の影響，生産研究，Vol.43，No.6，pp.289-292，1991