

高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの中性化速度の評価

材料技術研究部 コンクリート材料研究室

主任研究員 鶴田 孝司

1. コンクリートの中性化および促進中性化試験

コンクリートは、材料としてセメントを用いているため強いアルカリ性を呈している。このためにコンクリート中の鉄筋は錆びを生じない。しかし、大気中の CO_2 がコンクリートに侵入すると、コンクリート中の水酸化カルシウムと CO_2 が反応し、コンクリートのアルカリ性が弱まる。これが中性化と言われる現象である。中性化がコンクリート表面より進行し、鉄筋などの鋼材位置に達すると、鉄筋の不動体被膜を破壊する。これにより鋼材が腐食すると、腐食生成物である錆の体積膨張によりコンクリートにひび割れやはく離を生じ、耐荷力などコンクリート構造物の性能低下を引き起こす。また、ひび割れが発生したコンクリートはさらに CO_2 の侵入を促すため、中性化によるコンクリート構造物の劣化や雨水などの浸入による鉄筋の腐食が加速する。このため、中性化の進行速度を予測することはコンクリート構造物の耐久性を考える上で重要である。

しかしながら、中性化は数年～数十年にわたりゆっくりと進行するため、自然暴露による試験では相応の期間を要してしまう。このため、中性化の進行速度の予測には、コンクリート供試体による促進中性化試験を取り入れている。この試験は、 CO_2 濃度を高めた試験槽（図1）にコンクリート供試体を入れることにより中性化速度を速め、実験的に中性化深さを求め、長期材齢時の中性化深さを予測するものである。



図1 促進中性化試験槽

2. 高炉スラグ微粉末によるコンクリートの中性化への影響

近年、コンクリートに添加する材料として、鉄鋼業で発生する副産物の再利用や製造時の CO_2 排出量削減のため、製鉄所から排出される高炉スラグ（以下 BS）微粉末の利用頻度が高まっている。BS 微粉末を添加することにより、コンクリートの長期強度の増進が大きくなり、耐海水性や化学抵抗性が向上するとされている。しかし、BS 微粉末をセメントに混和した場合には強度発現が遅くなることから、その養生条件に際して注意が促されている¹⁾。また、BS 微粉末で一部を置換したコンクリート（以下 BS コンクリート）に対して、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²⁾。その一方で、促進中性化試験は実構造物の中性化深さを過剰に見積もることが懸念されるなどの問題も指摘されている³⁾。これは、現在の促進中性化試験が水中に 28 日養生した供試体を CO_2 濃

度 5%で中性化させているため、比較的遅く硬化する BS コンクリートにとって養生が不十分であることが考えられる。また、実環境で生じる乾湿繰り返しなどの環境要因が促進中性化試験では考慮されておらず、実環境における BS コンクリートの中性化を正しく評価できない可能性が考えられる。

そこで、本研究では、実環境における BS コンクリートの中性化に対する耐久性を評価するために、BS 微粉末の置換率、水結合材比 (W/B)、養生条件を変えてコンクリート供試体を作製し、かつ促進中性化条件における CO₂ 濃度、湿度、水中浸漬の有無など、その環境条件を変えて中性化速度を検討し、中性化に対する BS 置換効果をより実環境に即して評価する方法を検討した。

3. 圧縮強度と中性化速度との関係

図 2 は凡例に示す 4 通りにて養生した W/B45% の供試体を、CO₂ 濃度 5%にて促進中性化試験を行ったときの BS 置換率と中性化速度係数の関係である。なお、中性化速度係数とは、中性化の進行を予測する式 $X = A\sqrt{t}$ の係数 A のことを指す (X : 中性化深さ(mm) t : 時間(年))。BS 置換率の高い試料では、水中 28 日の試料と比較して水中 91 日の中性化速度が遅かった。これは、BS 置換率が高いコンクリートでは硬化の進行が遅く、水中養生 28 日では不十分なためと推測される。このことから、BS コンクリートにおける促進中性化試験では普通コンクリートに比べて中性化速度を大きく見積もる可能性が示唆される。

図 3 は BS 置換率、W/B、および養生条件が異なる供試体を、CO₂ 濃度 5%にて促進中性化試験を行ったときの中性化試験開始前の圧縮強度と中性化速度係数の関係である。養生条件および W/B に関わらず、圧縮強度が高い場合には中性化速度係数が小さいこと、同一強度でも BS 微粉末の置換率に応じて中性化速度係数が大きくなり、また各 BS 置換率に関して圧縮強度との負の直線関係が成り立つことがわかった。

これらの結果と、BS 置換率の高いコンクリートは水酸化カルシウム（以下 Ca(OH)₂）量が少

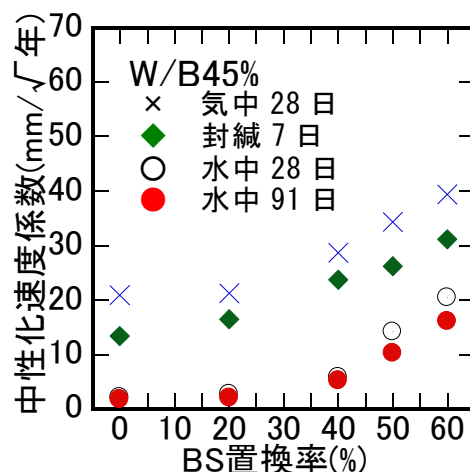


図 2 養生を変化させた供試体の BS 置換率と中性化速度係数との関係

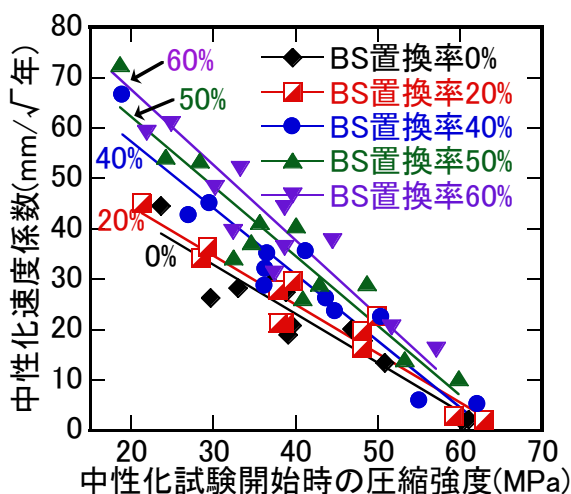


図 3 中性化試験開始時の圧縮強度と中性化速度係数との関係

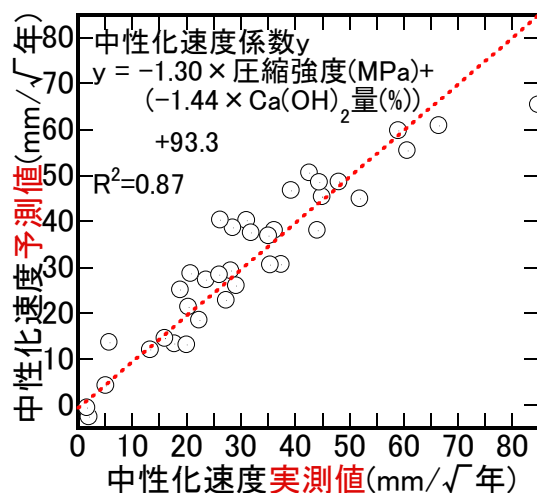


図 4 中性化速度係数の実測値と予測値との関係

なくなることに着目し，促進中性化試験の結果から求めた中性化速度係数を，圧縮強度とセメントペースト部の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量の関数として重相関を求めた。図 4 に結果を示す。中性化速度係数の実測値と予測値との相関係数 R^2 は 0.87 となり，良く予測できることがわかった。したがって，養生条件や W/B 等の配合の違いが CO_2 の浸透抵抗性に影響し，それは圧縮強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 CO_2 量は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量で評価できることから，この二つの要因を考慮することで促進中性化試験における BS 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。

4. CO_2 濃度や水分が中性化速度に与える影響

図 5 は BS 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 BS 置換率の関係を CO_2 濃度 1% および 5% の場合に関して示したものである。封緘 7 日ではいずれの BS 置換率でも BS0% に対する中性化速度係数比は CO_2 濃度 1% に比べて CO_2 濃度 5% の方が高く，水中 28 日でも BS 置換率 40% 以上では同様の傾向が見られた。このことから， CO_2 濃度 5% による試験では，実環境と比較して，中性化速度を大きく見積もる可能性があることがわかった。つまり， CO_2 濃度 5% による試験結果を用いて実環境の中性化速度を推定する際には， CO_2 濃度による中性化速度係数の影響を考慮する必要があることが推察される。

図 6 は凡例に示す各条件下における，BS 置換率と中性化速度係数との関係である。温度 20°C ，相対湿度 60% 一定の試料と比較して，同一 BS 置換率で比較すると，水中浸漬（1 日水中・6 日相対湿度 60% のサイクル），乾湿繰り返し（3 日相対湿度 60%・4 日相対湿度 96% 以上のサイクル：図中 7 日換算），温湿度一定の試料の順に中性化速度係数が小さいことがわかった。また，乾湿繰り返し条件における試料に対して，相対湿度 96% 以上の 4 日分を除外し，相対湿度 60% の 3 日のみで換算した（図中 3 日換算）中性化速度係数を求めた場合でも，温湿度一定の試料と比較して中性化速度係数が小さくなった。このことから，高湿度状態では中性化が進みにくいこと，水分が供給されることで，さらに中性化が抑制されることがわかった。

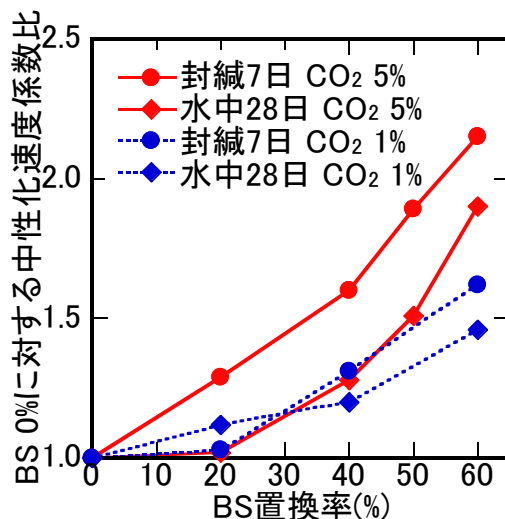


図 5 CO_2 濃度の違いによる BS 置換率と中性化速度係数比との関係

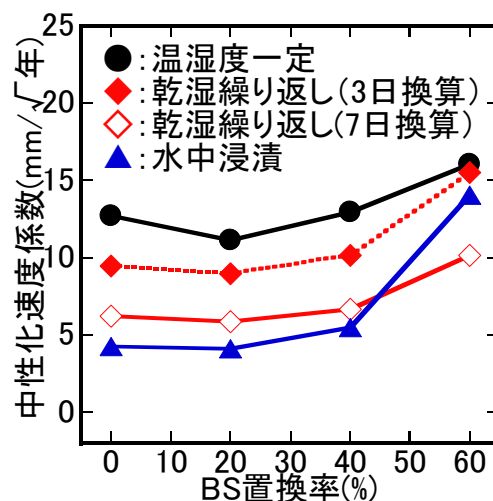


図 6 各養生条件および中性化環境条件における BS 置換率と中性化速度係数との関係

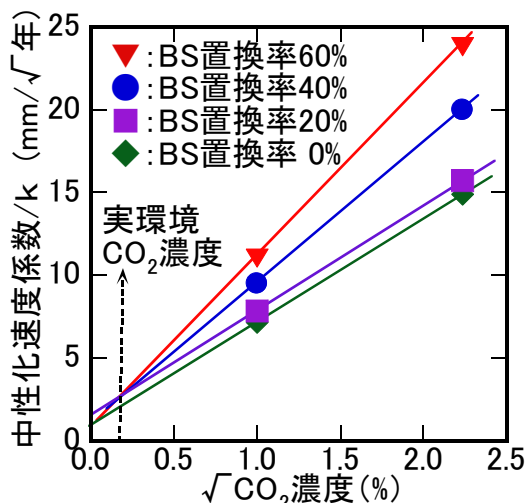


図 7 実環境における中性化速度係数の概念図
 $k = 2.804 + 0.847 \times \log(\text{CO}_2 \text{ 濃度}(\%))^4$

以上の結果を用いて、実環境におけるコンクリートの中性化速度係数を推定する手法について検討した。基本的に中性化速度係数は CO_2 濃度の平方根に比例するが、 CO_2 濃度が高くなると CO_2 がコンクリート中に拡散しにくくなるために比例係数が図 7 の注釈に示す CO_2 濃度の関数で示されることが魚本ら⁴⁾により示されている。この関係を用いて、実環境である大気中の CO_2 濃度 (0.039%) における中性化速度係数の求め方を検討した。図 7 は、圧縮強度 30MPa の場合での CO_2 濃度の平方根と、中性化速度係数を注釈に示した k で除した値との関係である。本研究では CO_2 濃度 1% および 5% の試験のみ実施していることから、その 2 点を用いて直線回帰を行った。このために CO_2 濃度が低い値では外挿値に誤差が生じやすくなる。この点を考慮しても、実環境である CO_2 濃度 0.039% 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 BS 置換率による差も小さくなっている。また水分の影響については、例えば図 6 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 (BS 置換率 60% 以外) との中性化速度係数比は 0.74~0.80 であり、BS 置換率による差はほとんどないこと、上記の比の値が 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、 CO_2 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推察される。以上のことから、実環境における CO_2 濃度や水分の影響を考慮すると、BS 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

実環境における BS コンクリートの中性化に対する耐久性を評価するために、各種条件を変えてコンクリート供試体を作製し、かつ促進中性化条件における環境条件を変えて中性化速度を検討し、中性化に対する BS 置換効果をより実環境に即して評価する方法を検討した。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 養生条件や W/B などの配合に関わらず、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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量を考慮することにより促進中性化試験における BS 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) 実環境における BS の置換が中性化に与える影響は、高濃度 CO_2 環境下と比較して小さくなると推定でき、水分がある程度供給される場合にはさらに小さくなることがわかった。
- (3) 実環境における CO_2 濃度や水分の影響を考慮すると、BS 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。

参考文献

- 1) 土木学会編：コンクリート標準示方書 [施工編]，pp.122-123 2012
- 2) 土木学会編：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) 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