

高炉コンクリートの炭酸化が物質移動抵抗性に与える影響

芝浦工業大学 大学院理工学研究科博士（後期）課程
 芝浦工業大学 理工学研究科建設工学専攻
 芝浦工業大学 工学部土木工学科

○三坂岳広
 末木博
 伊代田岳史

1. はじめに

近年、二酸化炭素排出量削減の方法としてセメントに置換することでセメント使用量を減らすことのできる混和材が注目されており、特に混和材を高置換したコンクリートの研究開発が続けられている。

この混和材料の中でも高炉スラグ微粉末(BFS)は置換率を大きく設定することが可能であり、置換による二酸化炭素排出量削減効果が大きい。BFSで置換した高炉セメントを用いて製造されたコンクリートは、湿潤養生を十分に行うことで長期強度が増進すること、硫酸塩などに対する化学抵抗性が大きいこと、水密性が優れることなどの利点を持つ。しかし、JIS規格の促進中性化試験に準じて試験を行った場合、中性化速度が大きくなる。一方で松田ら¹⁾は実構造物の調査結果より、高炉セメントB種と普通ポルトランドセメント(OPC)を使用したコンクリートにおいて中性化速度係数が同程度としている。また、BFS置換率の高いセメントを用いたセメント硬化体の炭酸化は、OPCとのものと炭酸化進行メカニズムが異なる²⁾との報告もある。高炉セメントの使用を拡大するためには、その炭酸化メカニズムの解明が必要である。

本研究では、BFS置換率を変化させたセメントを用いたコンクリートを促進中性化試験環境下と実際の屋外環境で炭酸化させ、それぞれの環境での中性化速度について比較した。また、促進中性化前後の供試体について透

気試験を実施することで、セメント硬化体の炭酸化による物質移動抵抗性の変化について検討した。これにより、BFS置換率の大きいセメントを用いた際の炭酸化環境によって変化する炭酸化進行メカニズムを明らかにする。

2. 試験概要

表-1にコンクリートの計画配合等を示す。水セメント比は50%とした。高炉スラグ微粉末をセメントに内割で0~80%置換した。図-1に促進中性化試験に使用した供試体の養生条件を示す。養生条件は3水準とした。供試体は、各養生後に恒温恒湿室(温度:20±1℃、湿度60±5%)に静置し、含水状態を調整した。その後、供試体は雨がかりのない屋外に4週間ほど暴露し、各種試験を行った。また、養生条件は、促進中性化試験の炭酸化環境の他に、継続して雨がかりの無い屋外に暴露した実環境も設けた。

試験項目は圧縮強度試験、促進中性化試験、透気試験とした。圧縮強度および促進中性化試験はJIS規格に準拠した。透気試験の試験方法は既往の研究³⁾を参考にした。

3. 試験結果および考察

3.1 促進中性化試験結果

図-2に養生無しの中性化深さを示す。中性化深さはBFS置換率の増加に伴って大きくなり、既往の研究¹⁾と

表-1 計画配合 フレッシュ性状 圧縮強度

| | w/c (%) | 置換率 (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | A E 減水剤 C×% | 助剤 | フレッシュ性状 | | 圧縮強度 (N/mm ²) | |
|-----|---------|---------|---------|--------------------------|-----|-----|-----|-------------|-----|---------|-----------|---------------------------|---------|
| | | | | W | C | | S | | | G | スランプ (cm) | | 空気量 (%) |
| | | | | | OPC | BFS | | | | | | | |
| OPC | 50 | 0 | 46 | 165 | 330 | - | 826 | 1000 | 0.6 | 0.75A | 16.5 | 5.4 | 36.4 |
| B50 | | 50 | | | 165 | 165 | 821 | 993 | | 2.0A | 11.0 | 5.1 | 32.7 |
| B60 | | 60 | | | 132 | 198 | 820 | 992 | | 2.5A | 12.0 | 4.0 | 29.6 |
| B70 | | 70 | | | 99 | 231 | 819 | 990 | | 3.0A | 11.5 | 4.0 | 29.4 |
| B80 | | 80 | | | 66 | 264 | 818 | 989 | | 3.5A | 10.0 | 4.0 | 26.0 |

図-1 養生条件 促進中性化試験

| | | 0日 | 1日 | 1週 | 2週 | 3週 | 4週 | 5週 | 6週 | 7週 | 8週 | 9週 | 10週 |
|------|------|----|----|----|------|----|------|----|------|---------|----|----|-----|
| 促進環境 | 養生無し | 打設 | 型枠 | 脱型 | 恒温室 | | 屋外暴露 | | | 促進中性化試験 | | | |
| | 水4w | | | | 水中養生 | | 恒温室 | | 屋外暴露 | | | | |
| 実環境 | 養生無し | 打設 | 型枠 | 脱型 | 恒温室 | | 屋外暴露 | | | | | | |
| | 水4w | | | | 水中養生 | | 恒温室 | | 屋外暴露 | | | | |

同様の傾向を示した。また、B80 に関しては、促進期間 26 週でフェノールフタレインによる呈色反応域が無くなった。図-3 に養生無しの中性化速度係数と置換率の関係を示す。中性化速度係数は置換率の増加に伴って大きくなり、特に高置換で増加割合が大きくなった。

3. 2 換算中性化速度係数

図-4 に換算中性化速度係数と実環境の中性化速度係数の関係を示す。換算中性化速度係数は、促進中性化試験結果を魚本・高田式を用いて実環境における炭酸ガス濃度の中性化速度係数に合わせたものである。BFS 置換率が小さいものは、図中の点線上に分布しており、良い相関が得られた。しかし、BFS 置換率の高いものほど促進環境と実環境の中性化速度に相違があり、促進環境の中性化速度係数が大きくなった。

3. 3 透気係数と置換率の関係

図-5 に養生無しの透気係数と置換率の関係を示す。促進中性化の前後で比較をすると、OPC では炭酸化により緻密化している。しかし、BFS で置換したものは、炭酸化により透気係数が増加し、コンクリートの物質移動抵抗性が小さくなると評価された。この原因として、BFS で置換したセメントを用いたコンクリートは、置換率の増加に伴ってC/S比の小さいC-S-Hが生成され、これが炭酸化により破壊されることで、細孔構造が粗大化したことが考えられる。

4. まとめ

- 1) 促進中性化試験結果を魚本・高田式を用いて実環境の炭酸ガス濃度の中性化速度係数に換算したものと、実環境の中性化速度係数を比較すると、BFS 置換率の大きなものほど促進環境と実環境の中性化速度に相違があり、促進環境の中性化速度係数が大きくなった。
- 2) 透気係数を促進中性化の前後で比較をすると、OPC を用いたコンクリートでは炭酸化により緻密化しているのに対し、BFS で置換したセメントを用いたコンクリートは、炭酸化により透気係数が増加し、物質移動抵抗性が低下すると評価された。

【参考文献】

- 1) 松田芳範など：実構造物調査に基づく炭酸化に与えるセメントおよび水分の影響、コンクリート工学論文集、Vol.32、No.1、pp.629-634、(2010)
- 2) 三坂岳広など：高炉スラグ微粉末高置換セメントの炭酸化進行メカニズムの検討、土木学会年次学術講演会、第5部、Vol.72、pp.709-710、(2017)
- 3) 林亮太など：透気係数による各種コンクリートの物質移動抵抗性評価手法に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.35、No.1、pp.745-750、(2013)

謝辞) 本研究は、鉄鋼スラグ協会および日本スラグセメントコンクリート研究会からの助成を頂いた。ここに深く御礼申し上げます。

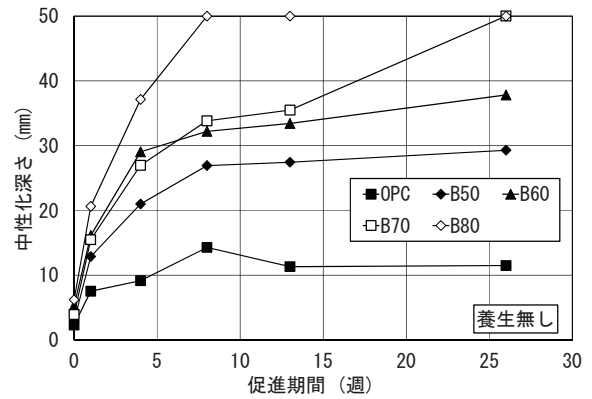


図-2 促進中性化試験結果 養生無し

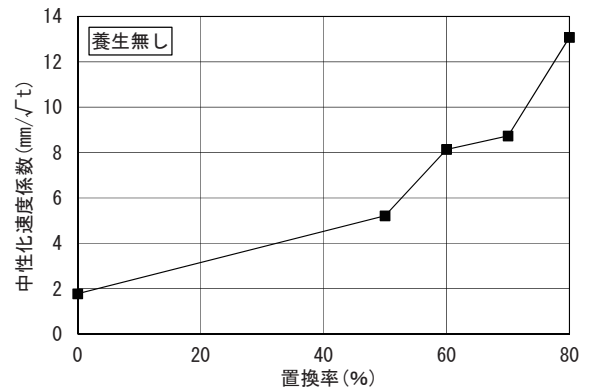


図-3 中性化速度係数と置換率の関係

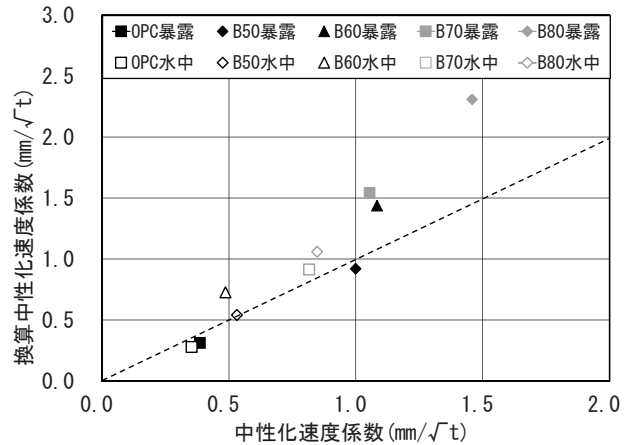


図-4 換算中性化速度係数と中性化速度係数

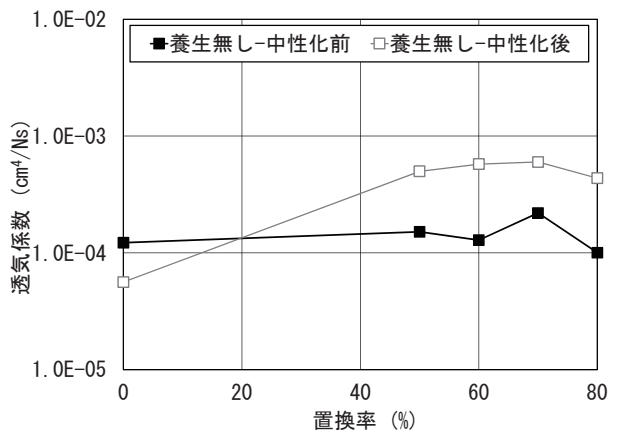


図-5 透気係数と置換率の関係