

論文 高炉スラグ微粉末高置換セメントを用いたコンクリートの炭酸化進行に関する検討

水野 博貴*1・末木 博*2・伊代田 岳史*3

要旨： 近年、環境負荷低減のため混和材の使用が進められている。混和材料の一種である高炉スラグ微粉末は他の混和材料と比較して置換率を高く設定することが可能であるため、より環境負荷低減に寄与できる。このように、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは多くのメリットもあるが、中性化への抵抗性が懸念される。中性化は構造物における耐久性設計の一つの項目であり、照査が必要である。そこで本研究では高置換高炉セメントの置換率、養生期間、環境条件を変化させたコンクリートにおける中性化抵抗性について検討した。

キーワード： 中性化、中性化速度係数、高炉スラグ微粉末、高置換高炉セメント、促進中性化試験

1. はじめに

近年、環境負荷低減の観点から排出する二酸化炭素の削減が求められている。特に建設産業においては製造時に二酸化炭素の排出量が多い普通ポルトランドセメント（以下、OPC）の代替材料として高炉スラグ微粉末（以下、BFS）やフライアッシュなどの混和材料を高置換したセメントの利用が着目されている。BFSは他の混和材料と比較して置換率を高く設定することができるため、より二酸化炭素の削減効果が高い。また、高炉セメントを用いた場合、塩分浸透抵抗性、長期強度の増進、ASRの抑制などの利点がある一方で、中性化抵抗性の低下などの問題が懸念されている。

コンクリート標準示方書[施工編]及び[維持管理編]において、新たな材料などを使用する際の中性化の進行予測には促進試験から得た結果から判断することが多い。また、対象となる構造物と同じ、あるいは類似した材料・配合・実環境などから推定式がない場合には土木学会フライアッシュ小委員会が提示した回帰式を用いて良いとされている。この回帰式では、混和材の種類によって定まる定数を乗ずることで適用可能となっている。その混和材料によって定まる定数は高炉スラグ微粉末を置換した場合は0.7となっており、OPCと比較して中性化抵抗性が低く設定されている。ただし、この定数はコンクリートの養生の影響や供用環境の影響が考慮されていないため、実環境下では中性化速度係数が異なることが想定される。

松田ら¹⁾の既往の研究によると促進環境下においてはOPCと高炉セメントを比較すると、高炉セメントを使用したコンクリートの中性化速度係数が大きくなる一方で実環境下においてはOPCを用いたものとそれほど差は

表-1 コンクリートの計画配合表

凡例	W/C	s/a	W	B		S	G
				OPC	BFS		
50-N	50	46	165	330	-	826	1000
50-B50				165	165	821	993
50-B60				132	198	820	992
50-B70				99	231	819	990
50-B80				66	264	818	989

ないという報告がある。また豊村ら²⁾は実環境と促進環境では異なるメカニズムにより炭酸化が進行すると報告している。つまり、促進試験では高炉セメントを用いたコンクリートは中性化の進行が著しく大きくなることを示している。今後、BFSの置換率を高く設定したセメントを使用していくためには、中性化抵抗性を環境条件、及びBFSの置換率等を考慮する必要がある。そこで本研究では、3つのSeriesに分けて試験を行った。Series1ではBFSを高置換したセメントを用いたコンクリートを作製し、養生条件とBFS置換率を変化させたものを、実環境及び、促進環境で中性化試験を実施した。その際、前養生の影響も評価した。Series2では一般的に相関関係があるとされている圧縮強度と中性化の関係について検討を行った。Series3では透気試験を行い、空隙構造と中性化の関係について検討を行った。

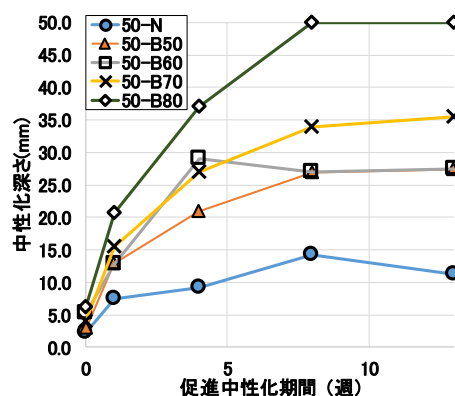
2. BFS置換率及び養生期間が中性化に及ぼす影響 (Series1)

2.1 使用材料及び計画配合

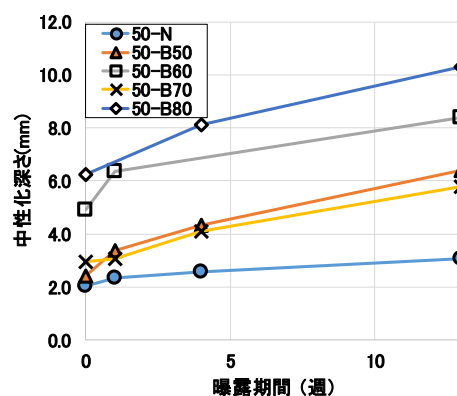
*1 芝浦工業大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (学生会員)

*2 芝浦工業大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (学生会員)

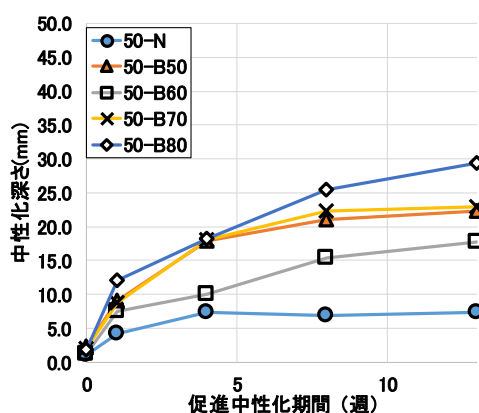
*3 芝浦工業大学 工学部土木工学科 教授 博士 (工学) (正会員)



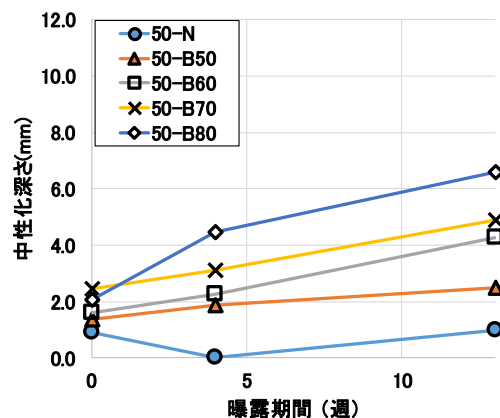
図一1 中性化深さ（促進環境・養生なし）



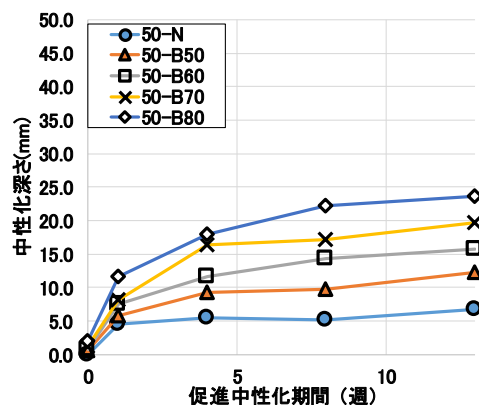
図一4 中性化深さ（実環境・養生なし）



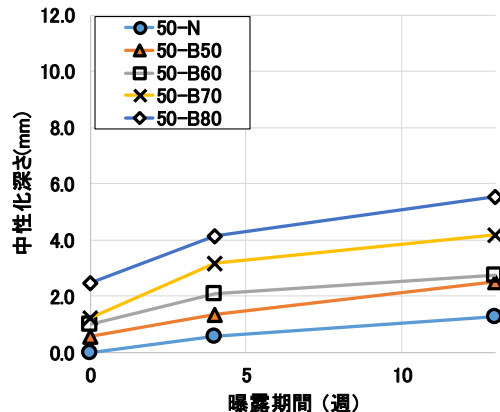
図一2 中性化深さ（促進環境・水中1週間）



図一5 中性化深さ（実環境・水中1週間）



図一3 中性化深さ（促進環境・水中4週間）



図一6 中性化深さ（実環境・水中4週間）

表一1 に Series1 で使用したコンクリートの配合を示す。セメントは普通ポルトランドセメント（記号：OPC，密度 3.16g/cm³，比表面積 3120cm²/g），高炉スラグ微粉末（記号：BFS，密度 2.91g/cm³，比表面積 4290cm²/g，SO₃ 量 2.62%）細骨材は千葉県君津市産山砂（記号：S，表乾密度 2.62g/cm³，吸水率 1.48%，粗粒率 2.57），粗骨材は（記号：G，表乾密度 2.70g/cm³，吸水率 0.32%，粗粒率 6.61）を用いた。高炉スラグ微粉末が高置換されたコン

クリートにおける中性化を計測するために BFS 置換率を 50 (50-B50)，60 (50-B60)，70 (50-B70)，80 (50-B80) % と設定した。

2.2 中性化試験

供試体は 100×100×400mm の角柱試験体とし，打設したコンクリートは翌日に脱型した。養生による中性化抵抗性の評価を行うために，養生なし，水中養生を 1 週間と 4 週間行った。養生終了後，恒温恒湿室（温度 20±2℃，

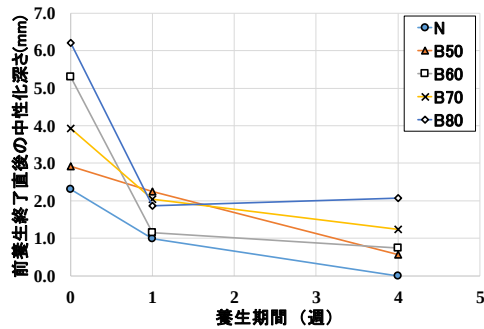


図-7 養生期間と前養生終了直後の中性化深さ

相対湿度 60%) にて 1 週間静置し 4 週間雨がかりがなく直射日光を避けた屋外環境 (平均温度 28.6℃, 平均湿度 63.9%) にて前養生を行った。前養生終了後、コンクリートの割裂を行い、断面に濃度 1% のフェノールフタレイン溶液を噴霧し、前養生終了直後の中性化深さを計測した。その後、打設面を含めた 4 面をシールし、型枠とその反対面を開放面とした。試験体は促進環境 (温度 20℃, 湿度 60%, CO₂ 濃度 5.0%) と屋外環境に静置し、所定の期間において中性化深さを計測した。

2.3 BFS 置換率及び養生期間が中性化深さに与える影響

図-1～図-3 に促進環境における中性化深さの結果を示す。養生期間が長くなるに従い、中性化深さがいずれの配合においても小さくなった。また、BFS の置換率が高くなるに従って、中性化深さが大きくなっていることが分かる。次に実環境における中性化深さを図-4～図-6 に示す。BFS 置換率が高くなるに従い、中性化深さが大きくなっていることが分かる。これらの結果も促進中性化試験の結果と同様に養生期間が長くなるに従い、中性化深さがいずれの配合においても小さくなっているのが分かる。

2.4 養生期間が前養生終了直後の中性化深さに与える影響

前養生終了直後の中性化深さと養生期間の関係を図-7 に示す。養生期間が長くなると、前養生終了直後の中性化深さが小さくなっていることが分かる。特に、OPC は養生期間によって中性化深さが徐々に小さくなっていく一方で、BFS を 60% 以上置換したコンクリートは、養生なしから 1 週間にかけて中性化深さが急激に小さくなっている。しかし養生期間 1 週から 4 週にかけては中性化深さの減少が小さい。つまり、BFS が高置換されているコンクリートは水和の進行が遅いため、若材齢時に養生を止めてしまうことによって表層部分の乾燥領域が大きくなり、水和が阻害されることによってコンクリートの表層部分が粗となり、初期の中性化深さが大きくなることが予想される。また養生を長くすることによって、表層部分が緻密となり、初期の中性化深さを小さくする

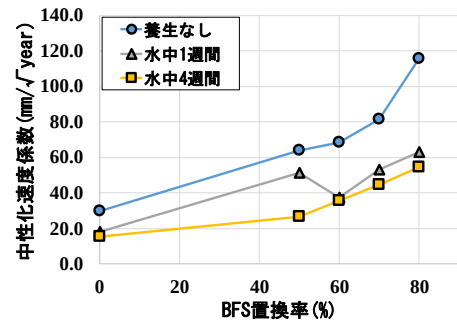


図-8 BFS 置換率と中性化速度係数

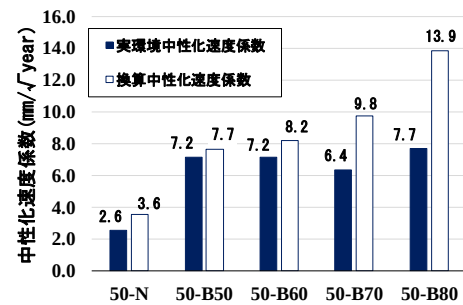


図-9 換算中性化速度係数と実環境中性化速度係数 (養生なし)

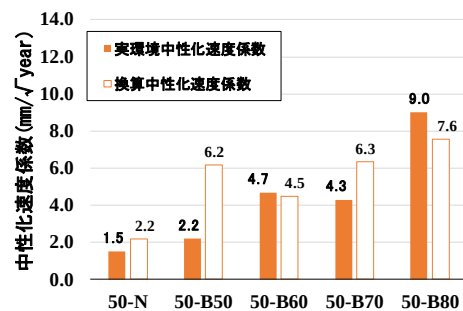


図-10 換算中性化速度係数と実環境中性化速度係数 (水中養生 1 週間)

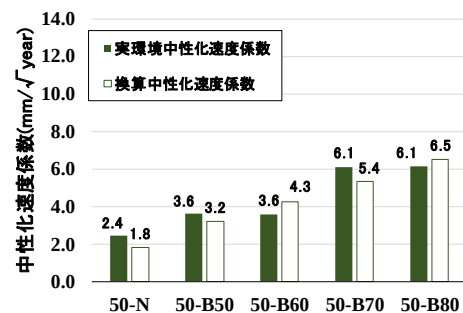


図-11 換算中性化速度係数と実環境中性化速度係数 (水中養生 4 週間)

ことができる。

2.5 置換率が中性化速度係数に及ぼす影響

コンクリートの中性化速度係数を図-1 および図-3 の結果より算出した。

表-2 コンクリートの計画配合表 (Series2)

凡例	W/C	s/a	W	B		S	G
				OPC	BFS		
40-B50	40	44	165	206	206	754	989
40-B60				165	248	752	987
40-B70				124	289	751	985
40-B80				83	330	750	984
60-N	60	47		275	-	866	1006
60-B50				138	138	861	1001

BFS 置換率と促進試験より得た中性化速度係数の関係を図-8 に示す。BFS の置換率の増加に伴い中性化速度係数が大きくなっていることが分かる。また養生をすることにより、いずれの置換率においても中性化速度係数が小さくなる傾向となった。

次に、促進中性化試験から得た中性化速度係数を魚本・高田式³⁾を用いて式(1)のように二酸化炭素濃度の換算を行い、実環境二酸化炭素濃度 (0.04%) における中性化速度係数に変換した。

$$K_C^* = (2.804 - 0.847 \log C) \sqrt{C} \quad (1)$$

$$K_C = K_C^* / K_{0.04}^*$$

ただし、

K_C^* : CO_2 濃度が C のときの係数

C : CO_2 濃度 (%)

K_C : 地上の CO_2 濃度を 1 としたときの CO_2 濃度による係数

実環境による試験結果から算出した中性化速度係数と、促進環境から実環境へと換算した中性化速度係数を図-9 から図-11 に示す。まず、養生なしの結果に着目すると、BFS の置換率が 60% までは実環境中性化速度係数と換算中性化速度係数に大きな差は見られないが、置換率が 70% を超えると換算中性化速度係数が大きな値となり、実環境から得た中性化速度係数と大きく差が生じていることが分かる。また、養生期間が長くなるに従い実環境中性化速度係数と換算中性化速度係数との差は小さくなり、養生期間 4 週間ではその差はほぼなくなった。つまり、中性化速度係数の換算式は、BFS が高置換され養生期間が短い場合に適用が難しく、養生期間を長く行うことによって換算式の適用が可能であることが考えられる。

3. 圧縮強度と中性化速度係数の関係 (Series2)

一般的にコンクリートの中性化と圧縮強度には相関があるとされている。しかし、BFS が高置換された配合における圧縮強度と中性化の関係は不明である。そこで Series2 では圧縮強度を変えるために水セメント比(W/C)を変化させたコンクリートを作製し試験を行った。

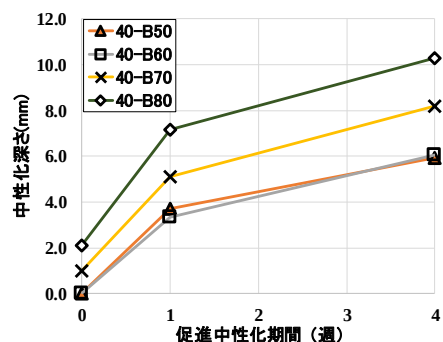


図-12 中性化深さ (促進環境・W/C40%)

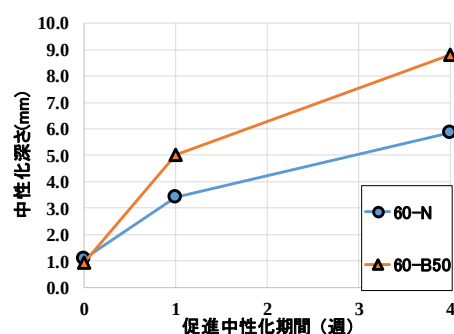


図-13 中性化深さ (促進環境・W/C60%)

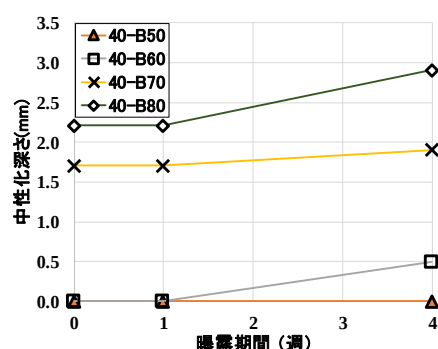


図-14 中性化深さ (実環境・W/C40%)

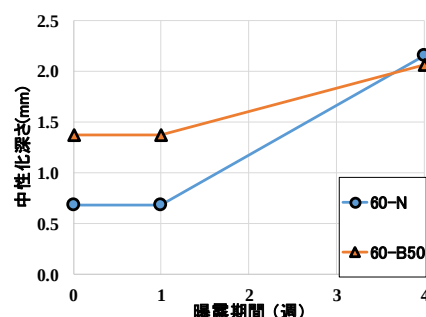


図-15 中性化深さ (実環境・W/C60%)

3.1 水セメント比がコンクリートの中性化深さに与える影響

表-1 に加え W/C を 40, 60% と変化させた表-2 のコンクリートを作製し、水中養生を 4 週間行った後に

Series1 と同様の条件で前養生を行い、所定の期間において中性化深さを計測した。W/C40%のコンクリートにおける中性化深さの結果を図-12 および図-14 に示す。実環境では 40-B50、40-B60 がほとんど中性化しなかった一方で、BFS 置換率が 70%を超えると中性化深さが大きくなる結果となった。W/C60%のコンクリートにおける中性化深さの結果を図-13 および図-15 に示す。促進環境では、OPC のみを使用したコンクリートより BFS を 50%置換したコンクリートが中性化する結果となったが、実環境において測定材齢 4 週時点では同程度の中性化深さとなった。

3.2 圧縮強度と中性化速度係数

3.1 の結果より中性化速度係数を算出した。促進環境から得た中性化速度係数と圧縮強度の関係を図-16 に示す。圧縮強度の増加とともに中性化速度係数が小さくなったが、同一強度レベルにおいては中性化速度係数に多少の差が生じている。次に図-17 に圧縮強度と実環境における中性化速度係数の関係を示す。こちらも圧縮強度の増加とともに中性化速度係数が小さくなる結果となった。また、同一強度レベルのコンクリートであれば中性化速度係数も同程度となる結果となった。圧縮強度は空隙量と相関があることから空隙量と中性化速度係数に相関があることが考えられる。

4. 透気係数と中性化速度係数の関係 (Series3)

Series2 の結果より空隙量と中性化の相関が考えられる。そこで Series3 では透気試験を行い、空隙構造と中性化の関係について検討を行った。

4.1 透気試験

表-1 で示した配合で透気試験を実施した。透気試験は $\Phi 100 \times 50 \text{mm}$ の円柱供試体を使用し、供試体の側面部からの空気の流れを防ぐために打設面と底面部以外をアルミテープでシールした後、シリンダーに供試体を設置した。供試体の設置後はコンプレッサーから圧力を載荷し、水を張った容器とメスシリンダーを用い水上置換法により透気量を算出し、式(2)を用い透気係数を算出した。養生条件は中性化試験を行うものと統一し、養生なし、水中養生 1 週間、水中養生 4 週間行った。

$$K = \frac{2LP_2}{P_1^2 - P_2^2} \times \frac{Q}{A} \quad (2)$$

K : 透気係数 $\text{cm}^4/(\text{Ns})$

L : 供試体厚さ(cm)

P_1 : 載荷圧力(N/cm^2)

P_2 : 流出側圧力(N/cm^2)

※ P_2 では大気圧として $0.1(\text{N}/\text{cm}^2)$ を用いた。

Q : 透気量(cm^3/s)

A : 透気面積(cm^2)

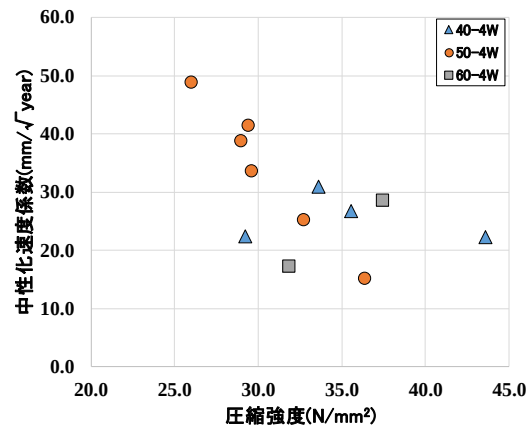


図-16 圧縮強度と中性化速度係数（促進環境）

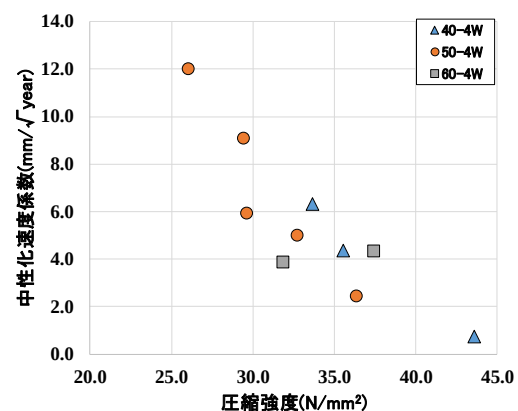


図-17 圧縮強度と実環境中性化速度係数（実環境）

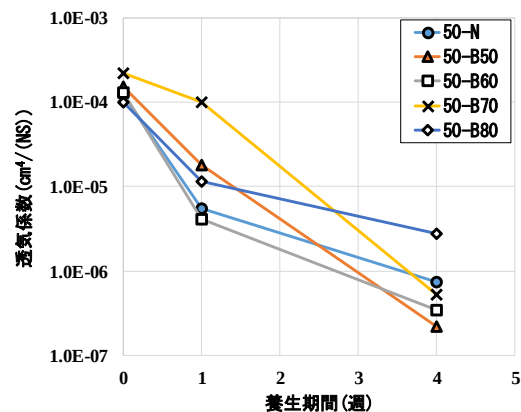


図-18 養生期間と透気係数

透気試験の結果を図-18 に示す。養生を行わない場合、透気係数はいずれの配合においても大きな差は見られなかった。水中養生 4 週間時点において BFS の置換率が 70%までは置換率が高くなるほど透気係数が小さな値となったが、置換率が 80%になると養生による透気係数の改善効果が小さかった。これは BFS が 80%置換されたコンクリートは大きな空隙構造を有していることが考えられる。また、大きな空隙構造になったのは水和反応が

遅いことが原因として考えられる。しかし、BFSの置換率が70%と80%で透気係数に違いがみられたことから、水和の進行度合いを置換率も含め検討する必要がある。

4.2 透気係数と中性化速度係数

透気係数と促進環境中性化速度係数の関係を図-19に示す。いずれのコンクリートにおいても透気係数が小さくなるとともに中性化速度係数も小さくなった。これは透気係数が炭酸ガスの透過性を示していることが考えられる。よって中性化速度係数が小さくなったことは空隙構造が緻密であり、炭酸ガスが透過しにくかったことが原因として考えられる。また、置換率が50から70%の間であれば、透気係数と中性化速度係数は同程度の関係を維持しているが、置換率が80%となると著しい中性化速度係数の増加がみられた。伊藤ら⁴⁾によるとBFSが高置換された $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が少ない配合においてはC-S-Hの炭酸化が卓越することが考えられると報告しており、本研究においてもC-S-Hの炭酸化が考えられる。次に透気係数と実環境中性化速度係数の関係を図-20に示す。透気係数と中性化速度係数の関係を表す傾向は、促進環境とは異なり、50から70%の置換率においても置換率毎に違いがみられた。これは、中性化前のコンクリートのpHの違いや $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の量が異なるためだと考えられる。以上のことより、BFSが高置換された配合においては空隙構造のみならず、pHや水和生成物などの化学組成の整理が必要であると考え、今後さらなる検討が必要である。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 養生期間はコンクリートの表層から乾燥する領域を変化させ、初期の中性化に差が生まれる。とくにBFSが置換されているコンクリートはOPCのみのコンクリートと比較して養生による影響を大きく受けるため養生を行うことが重要であることが分かった。
- 2) 促進環境から換算した中性化速度係数は養生を行わず、BFSの置換率が高い場合、実環境中性化速度係数と換算中性化速度係数は乖離する傾向にある。
- 3) 促進環境より得た中性化速度係数と圧縮強度の関係は多少ばらつきが生じるが、実環境中性化速度係数と圧縮強度の関係においてはばらつきが小さくなる。
- 4) 透気係数と中性化速度係数の結果より、BFSの置換率が高いコンクリートの中性化は空隙構造のみではなく、pHや水和生成物などの化学組成の整理も必要であると考え。

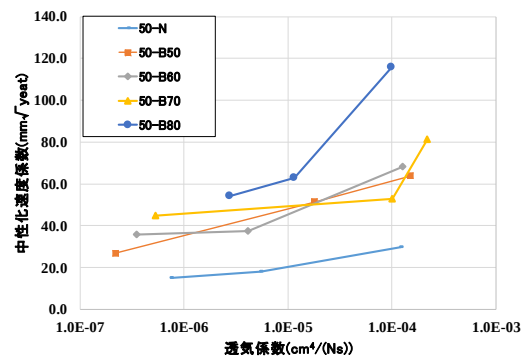


図-19 透気係数と促進環境中性化速度係数

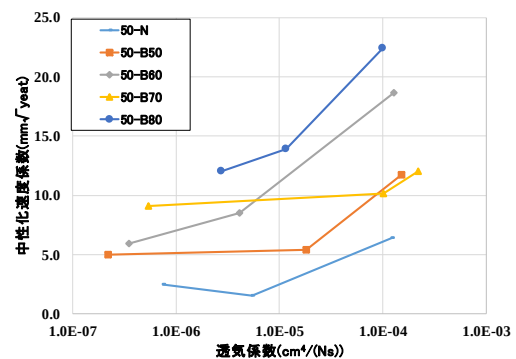


図-20 透気係数と実環境中性化速度係数

謝辞

本研究は、科学研究費 基盤研究(C)15K06169 (研究代表:伊代田岳史)の一部として実施いたしました。また、鉄鋼スラグ協会の助成および日本スラグ・セメントコンクリート研究会からの助成をいただいて実験を行いました。ここに感謝の意を記します。

参考文献

- 1) 松田芳範, 上田洋, 石田哲也, 岸利治: 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, pp629-643, 2010
- 2) 豊村恵理, 伊代田岳史: 異なる二酸化炭素濃度環境下における炭酸化メカニズムに関する一検討, コンクリート工学論文集, Vol.35, No1, 2013
- 3) 魚本健人, 高田良明: 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, pp119-128, 1992
- 4) 伊藤孝文, 伊代田岳史: 混和材料を高置換したセメントにおける中性化メカニズムの検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No1, 2017
- 5) 林亮太, 檀原弘貴, 添田政司, 松本涼: 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方法に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, Vol35, No1, 2013