論文　暴露 40 ヶ月後の混和材を多量に用いたコンクリートの中性化抵抗性

中村　英佑[*1]・栗原　勇樹[*2]・古賀　裕久[*3]

要旨：高炉スラグ微粉末やフライアッシュの混合率の異なるコンクリートの暴露 40 ヶ月後の中性化深さを測定し，実環境下での中性化抵抗性と評価方法を検討した。混和材の混合率が高いと，環境条件にかかわらず，中性化深さが大きくなったが，雨掛かりのある屋外では中性化速度係数が経時的に減少した。また，高炉スラグ微粉末の混合率が高い場合に既存の有効水結合材比を用いた予測式では中性化速度係数を過小に評価することが多くあったため，有効水結合材比の計算方法の修正案を示した。さらに，試験時の CO_2 濃度の差を補正することによって促進中性化試験から屋外での中性化深さを推定できる可能性があることが分かった。

キーワード：暴露試験，中性化，高炉スラグ微粉末，フライアッシュ，促進中性化試験

1. はじめに

低炭素社会の構築に向けた取り組みとして混和材を多量に用いたコンクリートが再注目されているが，この実用化には実環境下での中性化抵抗性の確保と評価方法の確立が不可欠である。混和材を用いたコンクリートの実環境下での中性化抵抗性を明らかにするため，様々な暴露試験が行われている[例えば 1), 2)]。しかし，過去の暴露試験の多くは，高炉スラグ微粉末の混合率を JIS R 5211 の高炉セメント C 種の上限値(70%)あるいはフライアッシュの混合率を JIS R 5213 のフライアッシュセメント C 種の上限値(30%)までとした供試体を用いたものであり，混和材の混合率を各混合セメントの C 種の上限値よりも高くしたコンクリートを対象としたものではなかった。また，国内では中性化抵抗性の評価方法として JIS A 1153 の促進中性化試験が普及しているが，混和材の混合率の高いコンクリートへの適用性は明確ではなかった。

こうした背景のもと，高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの混合率を各混合セメントの C 種の上限値よりも高くした供試体も含めて，混和材の混合率，セメントの種類，水結合材比(W/B)などの異なる供試体を製作して暴露試験を開始した[3)]。本論文では，暴露 40 ヶ月後の供試体の解体調査を行い，高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを多量に用いたコンクリートの実環境下での中性化抵抗性とその評価方法について検討した。

2. 実験方法

2.1 コンクリート配合

26 種類のコンクリート配合を**表－1** に示す。W/B=40%の 13 配合では，プレストレストコンクリートへの適用を想定して早期の強度発現を得るため，早強ポルトランドセメントを用い，高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの混合率を各混合セメントの C 種の上限値までとした。一方，W/B=35，50%の 13 配合では，普通ポルトランドセメントを用い，高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの混合率を各混合セメントの C 種の上限値よりも高くしたものも含めた。

また，26 種類の配合を各混和材の混合率で整理すると，ポルトランドセメントのみを用いた 4 配合，高炉スラグ微粉末の混合率が 50%以下(高炉セメント B 種相当以下)の 8 配合，70%以上(C 種上限値以上)の 4 配合，フライアッシュの混合率が 20%以下(フライアッシュセメント B 種相当以下)の 5 配合，30%以上(C 種上限値以上)の 4 配合，高炉スラグ微粉末とフライアッシュを同時に用いて三成分とした 1 配合となる(**表－2** 参照)。

2.2 暴露試験

暴露供試体の形状を**図－1** に示す。供試体は 100×100×200mm の角柱である。材齢 28 日まで水中養生を行った後，実験室内に保管して，コンクリート打込み方向に対して片側の側面(暴露面，100×200mm)以外を塗装材料でシールし，材齢 44～69 日で暴露を開始した。

暴露環境は，雨掛かりのある屋外の 3 ヶ所の暴露場(茨城県つくば市南原，新潟県上越市名立区，沖縄県国頭郡大宜味村)と土木研究所の事務室である。各暴露環境における暴露供試体の状況と気象データを**写真－1** に示す。つくばの暴露場は内陸部にあり塩化物イオンの供給はないが，新潟と沖縄の暴露場は沿岸部の塩害環境下にある。

暴露期間は，2011 年 2 月から 2015 年 6 月までの 40 ヶ月間である。暴露 20，40 ヶ月後に供試体を回収し，供試体端部から約 40mm の位置を割裂して，中性化深さを測定した(**図－1** 参照)。中性化深さは，JIS A 1152 を参考と

*1 国立研究開発法人土木研究所　先端材料資源研究センター　材料資源研究グループ　主任研究員　(正会員)
*2 国立研究開発法人土木研究所　先端材料資源研究センター　材料資源研究グループ　交流研究員　(正会員)
*3 国立研究開発法人土木研究所　先端材料資源研究センター　材料資源研究グループ　上席研究員　(正会員)

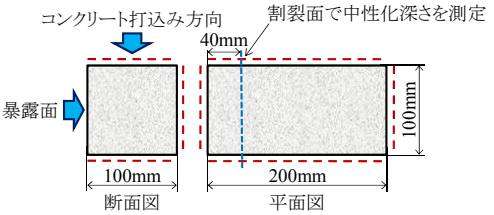
表－1　コンクリート配合

配合 No.	W/B (%)	B (kg/m^3)	結合材の構成割合(%) B = OPC + HPC + BS4 + BS6 + FA					スランプ (cm)	空気量 (%)
			OPC	*HPC*	*BS4*	*BS6*	*FA*		
H40	40	413	-	*100*	-	-	-	11.5	4.6
H40B430			-	*70*	*30*	-	-	10.5	3.8
H40B450			-	*50*	*50*	-	-	13.5	5.1
H40B630			-	*70*	-	*30*	-	13.5	4.7
H40B650			-	*50*	-	*50*	-	14.5	4.8
H40B670			-	*30*	-	*70*	-	13.0	4.9
H40F10			-	*90*	-	-	*10*	9.5	4.2
H40F20			-	*80*	-	-	*20*	14.0	4.5
H40F30			-	*70*	-	-	*30*	12.0	4.3
H40S			-	*100*	-	-	-	12.0	4.6
H40B430S			-	*70*	*30*	-	-	10.0	3.9
H40B650S			-	*50*	-	*50*	-	12.5	4.7
H40F20S			-	*80*	-	-	*20*	10.5	3.1
N35	35	471	*100*	-	-	-	-	14.5	4.7
N35B50			*50*	-	*50*	-	-	14.5	4.3
N35B85			*15*	-	*85*	-	-	12.5	5.1
N35F20			*80*	-	-	-	*20*	12.0	3.5
N35F40			*60*	-	-	-	*40*	14.5	4.5
N50	50	330	*100*	-	-	-	-	14.0	5.2
N50B50			*50*	-	*50*	-	-	13.5	4.3
N50B70			*30*	-	*70*	-	-	12.5	4.5
N50B85			*15*	-	*85*	-	-	11.5	4.0
N50F20			*80*	-	-	-	*20*	11.5	4.4
N50F30			*70*	-	-	-	*30*	11.0	4.6
N50F40			*60*	-	-	-	*40*	14.5	4.0
N50B50F20			*30*	-	*50*	-	*20*	12.0	4.6

1) 単位水量(=165kg/m^3)と単位粗骨材量(=968kg/m^3)を全配合で統一
2) W: 上水道水(茨城県つくば市)
3) HPC: 早強ポルトランドセメント(密度=3.14g/cm^3, 比表面積=4,490cm^2/g)
4) OPC: 普通ポルトランドセメント(密度=3.16g/cm^3, 比表面積=3,300cm^2/g)
5) BS4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89g/cm^3, 比表面積=4,400cm^2/g, SO_3=2.19%(無水せっこう添加))
6) BS6: 高炉スラグ微粉末 6000(密度=2.91g/cm^3, 比表面積=5,950cm^2/g, SO_3=2.85%(無水せっこう添加))
7) FA: フライアッシュ II 種(密度=2.30g/cm^3, 比表面積=4,280cm^2/g)
8) 細骨材: 静岡県掛川産陸砂(密度=2.56g/cm^3, 吸水率=2.23%)
9) 粗骨材: 茨城県笠間産砕石 6 号(密度=2.67g/cm^3, 吸水率=0.43%)と 5 号(密度=2.67g/cm^3, 吸水率=0.46%)を均等に混合, 最大寸法=20mm
10) 化学混和剤: スランプ 12±2.5cm, 空気量 4.5±1.5%を目標値とし使用量を調整
11) 温度：20℃の実験室内でコンクリートの練混ぜと供試体の製作を実施
12) 練混ぜ方法：水平二軸強制練ミキサで，セメント，混和材，細骨材，粗骨材を 30 秒間空練りした後，水と化学混和剤を投入して 90 秒間練混ぜて排出
13) 養生方法(配合 No.の末尾に「S」を付記していない供試体)：コンクリート打込み翌日に脱型して材齢 28 日まで 20℃で水中養生
14) 養生方法(配合 No.の末尾に「S」を付記している供試体)：コンクリート打込み後から恒温恒湿槽を用いて模擬的な蒸気養生(20℃で 3 時間の前養生，50℃まで 2 時間で昇温，50℃を 6 時間維持，20℃まで 5 時間で降温)を行った後，脱型して材齢 28 日まで 20℃で水中養生

表－2　混和材の混合率による配合の分類

1. ポルトランドセメント 混合率 100%
H40, H40S, N35, N50　**4 配合**
2. 高炉スラグ微粉末 混合率 50%以下 (B 種相当以下)
H40B430, H40B450, H40B630, H40B650, H40B430S, H40B650S, N35B50, N50B50　**8 配合**
3. 高炉スラグ微粉末 混合率 70%以上 (C 種上限値以上)
H40B670, N35B85, N50B70, N50B85　**4 配合**
4. フライアッシュ 混合率 20%以下 (B 種相当以下)
H40F10, H40F20, H40F20S, N35F20, N50F20　**5 配合**
5. フライアッシュ 混合率 30%以上 (C 種上限値以上)
H40F30, N35F40, N50F30, N50F40　**4 配合**
6. 三成分　N50B50F20　**1 配合**



図－1　暴露供試体の形状

【つくば】
茨城県つくば市南原内陸部
平均気温: 13.9℃
平均湿度: 71.8%
積算降水量: 4,896mm

【新潟】
新潟県上越市名立区沿岸部(海岸線付近)
平均気温: 13.2℃
平均湿度: 76.0%
積算降水量: 10,378mm

【沖縄】
沖縄県国頭郡大宜味村沿岸部(海岸線付近)
平均気温: 22.4℃
平均湿度: 74.6%
積算降水量: 7,828mm

【室内】
土木研究所
事務室
平均気温: 24.4℃
平均湿度: 37.1%
CO_2 濃度: 0.05138%

写真－1　暴露供試体の状況と気象データ
※気象データ：屋外では暴露場の最寄りの気象観測地点(つくば(舘野)，高田，名護)での測定値[4]，室内ではデータロガーによる測定値

して，割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し，供試体表面から赤紫色を呈した部分までの距離を等間隔に 9 点で測定し，これらの平均値とした。なお，暴露 20 ヶ月後と暴露 40 ヶ月後の中性化深さの測定にはそれぞれ異なる供試体を用いており，暴露 20 ヶ月後の中性化深さの測定結果については既報[3]で報告している。

2.3 促進中性化試験

暴露供試体と同時に 100×100×400mm の角柱を製作して，材齢 28 日まで水中養生を行った後，材齢 49 日以降で両側の側面(100×400mm)以外をシールし，材齢 56 日から促進中性化試験を行った。JIS A 1153 に準拠し，試験条件を温度 20±2℃，湿度 60±5%，二酸化炭素(CO_2)濃度 5±0.2%，促進期間を 1，4，8，13，26 週間とした。

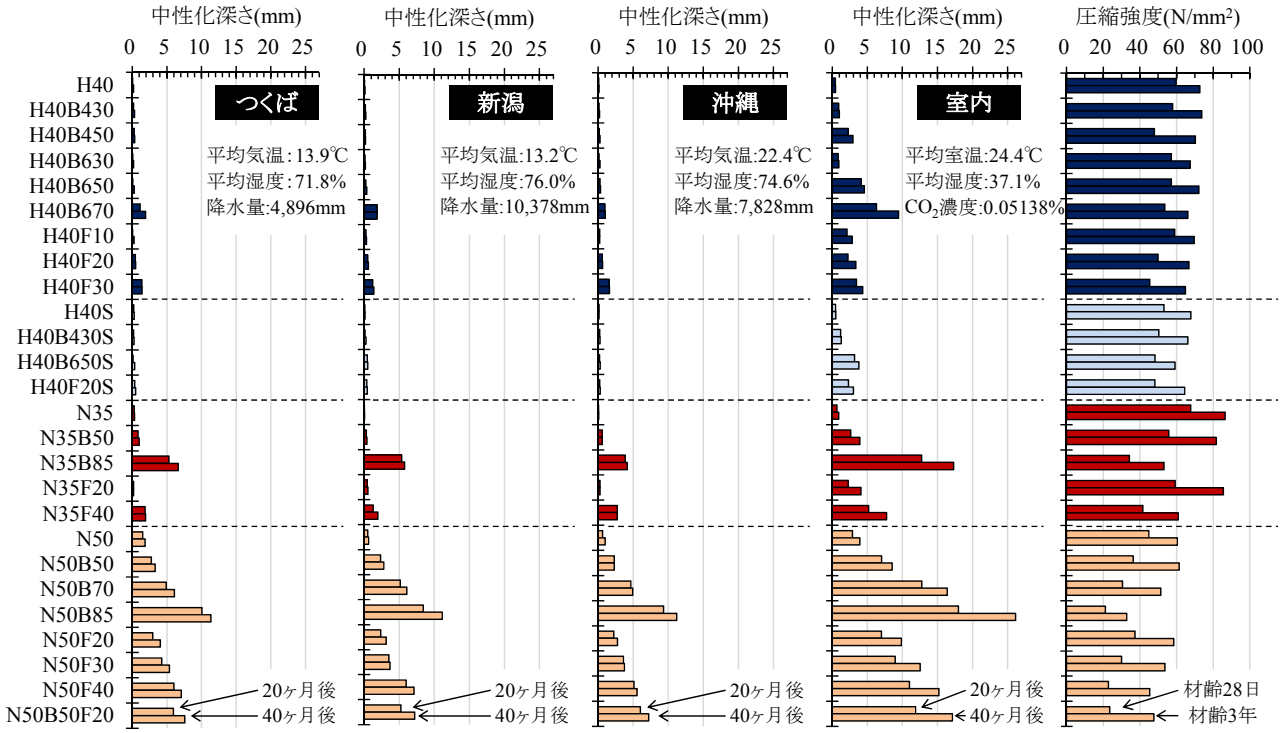
2.4 圧縮強度試験

材齢 28 日と材齢 3 年で円柱供試体(φ100×200mm)を用いて，JIS A 1108 に準拠して圧縮強度を測定した。材齢 28 日では水中養生後の供試体，材齢 3 年では暴露供試体と同時につくばの暴露場に移設した供試体を用いた。

3. 実験結果と考察

3.1 暴露供試体の中性化深さと圧縮強度の測定結果

暴露供試体の中性化深さと圧縮強度の測定結果を**図－2** に示す。中性化深さは暴露 20，40 ヶ月後の測定値，圧縮強度は材齢 28 日，3 年での測定値である。



図－2　暴露供試体の中性化深さと圧縮強度

※中性化深さ：上段は暴露 20 ヶ月後の測定値，下段は暴露 40 ヶ月後の測定値
※圧縮強度：上段は材齢 28 日の測定値，下段は材齢 3 年の測定値(暴露供試体と同時につくばの暴露場に移設した供試体での測定値)

(1) 暴露供試体の中性化深さ

中性化深さは，いずれの暴露環境においても，W/B と混和材の種類が同一の場合，混和材の混合率の高い供試体ほど大きくなった。また，中性化深さは暴露期間を長くするほど大きくなったが，暴露 20 ヶ月後から暴露 40 ヶ月後までの中性化深さの増加量は暴露 20 ヶ月後の中性化深さよりも小さく，中性化深さは暴露期間の長さに比例して増加していなかった。中性化速度係数の経時変化については 3.2 節(1)で述べる。

配合が同一の場合，暴露期間の違いにかかわらず，室内に暴露した供試体の中性化深さは屋外 3 ヶ所に暴露した供試体よりも大幅に大きくなった。室内では CO_2 濃度(=0.05138%，測定値)が大気中の CO_2 濃度(=0.03977%，2014 年の平均値 [5])よりも高く，雨掛かりの影響がなく，湿度が低く，室内に暴露した供試体が屋外 3 ヶ所に暴露した供試体よりも中性化の進行しやすい環境に置かれたためと考えられる。

(2) 圧縮強度

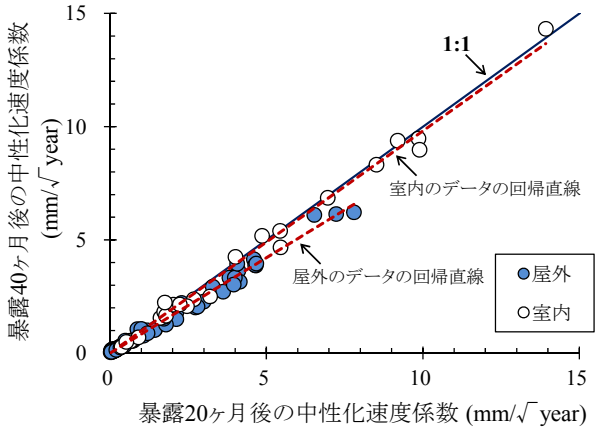
W/B と混和材の種類が同一の場合，材齢 28 日では，圧縮強度は混和材の混合率の高い供試体ほど小さくなった。材齢 3 年では，高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの混合率を各混合セメントの B 種相当以下とした供試体の圧縮強度は，ポルトランドセメントのみを用いた供試体と同程度になった。高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの混合率を各混合セメントの C 種上限値以上とした供試体の圧縮強度は，ポルトランドセメントのみを用いた供試体と同程度まで増加することはなかったが，材齢 3 年までの増加量が大きく，両供試体の圧縮強度の差は減少する傾向にあった。

3.2 中性化速度係数と暴露期間，暴露環境の関係

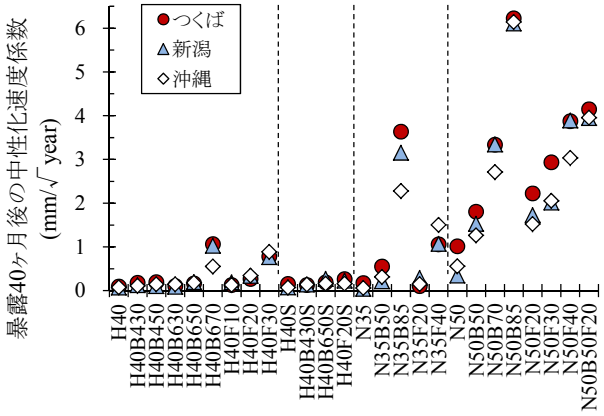
(1) 中性化速度係数の経時変化

暴露 20 ヶ月後と暴露 40 ヶ月後の中性化速度係数を**図－3** に示す。同図では，暴露 20 ヶ月後と暴露 40 ヶ月後の中性化深さの測定値を各暴露期間の平方根で除して中性化速度係数を求めた。また，屋外 3 ヶ所に暴露した供試体の中性化深さが室内に暴露した供試体よりも大幅に小さく，屋外と室内の違いを比較するため，屋外 3 ヶ所に暴露した供試体の全データを「屋外」と表示した。

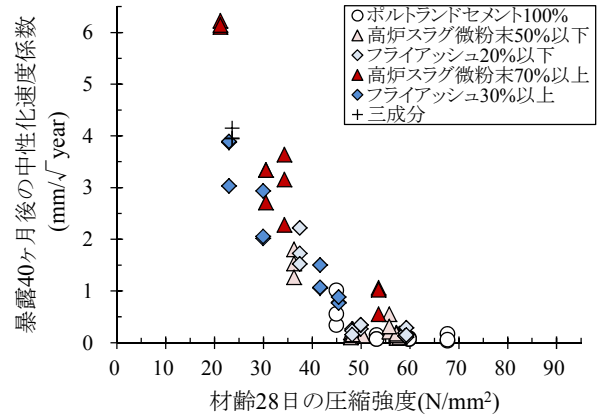
暴露 20 ヶ月後と暴露 40 ヶ月後の中性化速度係数は比例関係にあり，混和材の混合率の高い供試体においても，中性化が暴露期間の平方根に比例して進行する，すなわち，$\sqrt{t}$ 則に従うとみなすことができる。ただし，室内と屋外のデータの分布を精査すると，室内に暴露した供試体の中性化速度係数は，暴露 20 ヶ月後と暴露 40 ヶ月後で同程度であったが，屋外に暴露した供試体の中性化速度係数は，暴露 20 ヶ月後よりも暴露 40 ヶ月後で小さくなる傾向にあったことが分かる。屋外に暴露した供試体では，試験時に降雨等によって水分が供給されるため，結合材の反応が継続して材齢の経過とともに中性化抵抗性が向上したことが原因ではないかと推察される。



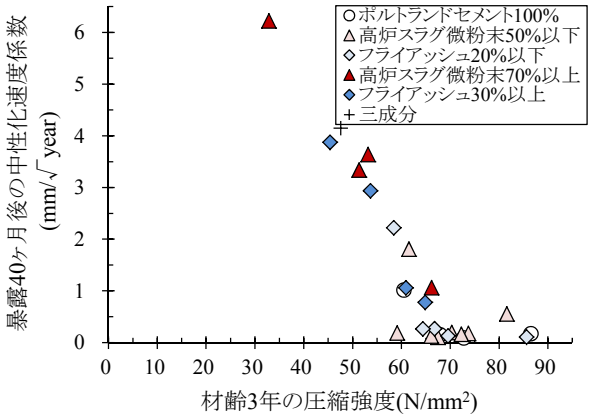
図－3　暴露 20 月後と暴露 40 ヶ月後の中性化速度係数



図－4　屋外に暴露した供試体の中性化速度係数



図－5　材齢 28 日の圧縮強度と中性化速度係数



図－6　材齢 3 年の圧縮強度と中性化速度係数

(2) 中性化速度係数と屋外の暴露環境の関係

屋外 3 ヶ所に暴露した供試体の中性化速度係数を暴露場ごとに区別して**図－4** に示す。中性化速度係数が 1mm/√year 程度以上で中性化が比較的進行した供試体に着目すると，ばらつきは認められるが，つくばに暴露した供試体の中性化速度係数が新潟と沖縄に暴露した供試体よりも若干大きくなる傾向にあったことが分かる。つくばの降水量が新潟と沖縄よりも少なかったこと(**写真－1** の気象データ参照)，つくばの暴露場が内陸部に位置していたことなどから，つくばに暴露した供試体が新潟と沖縄に暴露した供試体よりも乾燥しやすい環境に置かれたことによって中性化の進行速度が僅かに大きくなったためではないかと推察される。

なお，本論文では暴露 40 ヶ月後までの中性化速度係数を示したが，暴露期間や環境条件の違いが中性化速度係数に与える影響については，今後も暴露試験を継続して，長期的な試験データを取得して検討を行う予定である。

3.3 屋外に暴露した供試体の中性化抵抗性の評価

屋外で供用される土木構造物に混和材を多量に用いたコンクリートを適用することを想定して，屋外に暴露した供試体の暴露 40 ヶ月後の中性化深さに基づき，圧縮強度，有効水結合材比を用いた予測式 [6]，促進中性化試験による中性化抵抗性の評価方法の適用性を検証した。

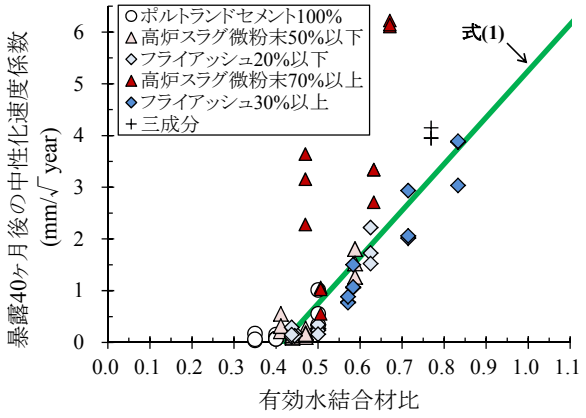
(1) 圧縮強度と中性化速度係数の関係

材齢 28 日の圧縮強度と屋外 3 ヶ所に暴露した供試体の中性化速度係数の関係を**図－5**，つくばに暴露した供試体の材齢 3 年の圧縮強度と中性化速度係数の関係を**図－6** に示す。これ以降のグラフの凡例で結合材の種類を示す場合には，**表－2** に従ってデータを示した。既報 [3]と同様に，暴露 40 ヶ月後の結果でも，全体的な傾向として，圧縮強度が大きいほど中性化速度係数が小さくなった。

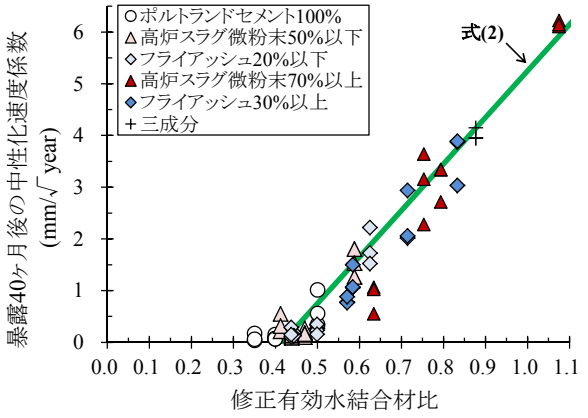
文献 1), 2)では，材齢 28 日の圧縮強度が同等であれば，高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの使用有無にかかわらず，中性化抵抗性が同程度となることが指摘されている。しかし，**図－5** を精査すると，高炉スラグ微粉末の混合率を 70%以上とした供試体では，材齢 28 日の圧縮強度が同等の他の供試体と比較して，中性化速度係数が大きくなったことが分かる。また，**図－6** によると，材齢 3 年の圧縮強度は混和材の使用有無や混合率による差が減少したが，中性化速度係数には差が生じていたことが分かる。混和材の混合率が大幅に異なるコンクリートの中性化抵抗性を比較する場合，圧縮強度による間接的な評価では中性化抵抗性の差を精緻には把握できない可能性があると考えられる。

(2) 有効水結合材比を用いた中性化速度係数の予測式

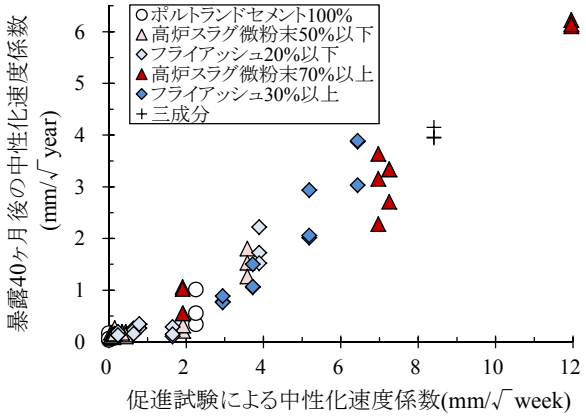
有効水結合材比と中性化速度係数の関係を**図－7** に示



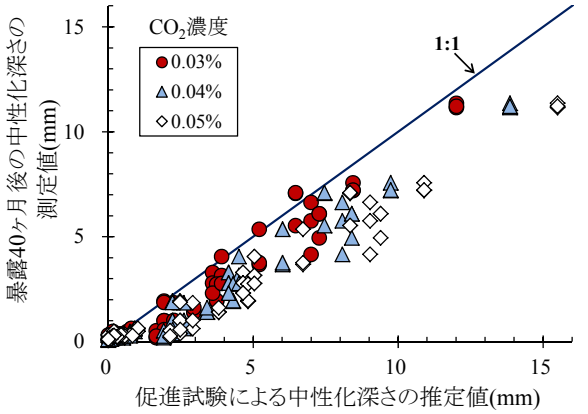
図－7　有効水結合材比と中性化速度係数



図－8　修正有効水結合材比と中性化速度係数



図－9　促進試験と暴露試験の中性化速度係数



図－10　中性化深さの推定値と測定値

す。同図では，文献 6)の式(1)の定義に準拠して設定した k 値を用いて有効水結合材比を求め，式(1)を用いて計算した中性化速度係数を併記した。

$$\alpha = -3.75 + 9.0W / B \qquad (1)$$

ここで，α：中性化速度係数(mm/√year)，W/B：有効水結合材比(=$W/(C+k\cdot A)$)，W：単位水量(kg/m^3)，C：単位セメント量(kg/m^3)，k：混和材の種類によって定まる定数(高炉スラグ微粉末=0.7，フライアッシュ=0)，A：単位混和材量(kg/m^3)である。

既報[3)]と同様に，暴露 40 ヶ月後の結果でも，高炉スラグ微粉末の混合率を 70%以上とした供試体の中性化速度係数には式(1)の計算値よりも大幅に大きくなったものが多く存在したが，他の供試体の中性化速度係数は式(1)の計算値と同程度か小さくなった。式(1)がフライアッシュの混合率を 30%までとした屋外の暴露試験の結果から導出されたこと，高炉スラグ微粉末の混合率を 70%以上とした場合の高炉スラグ微粉末の k 値の設定方法に検討の余地があることなどが原因と考えられる。

次に，**図－7** の結果を踏まえて，高炉スラグ微粉末の混合率を 70%以上とした場合の高炉スラグ微粉末の k 値の設定方法について検討した。**図－7** では，高炉スラグ微粉末の混合率を 50%以下とした供試体の中性化速度係数は式(1)の計算値と同程度か小さくなった。このことを踏まえて，本論文では，高炉スラグ微粉末の混合率を 70%以上とした場合にも式(1)を用いて中性化速度係数を適切に推定できるように，単位セメント量以下の質量の高炉スラグ微粉末に対しては式(1)と同様に k 値を 0.7，単位セメント量を超える質量の高炉スラグ微粉末に対しては k 値を 0.3 として修正有効水結合材比を求め，式(2)を用いて中性化速度係数を計算した。

$$\alpha = -3.75 + 9.0W / B' \qquad (2)$$

ここで，W/B'：修正有効水結合材比(=$W/(C+k'\cdot A)$)，k'：混和材の種類によって定まる定数(高炉スラグ微粉末=単位セメント量以下の質量に対して 0.7，単位セメント量を超える質量に対して 0.3，フライアッシュ=0)である。

修正有効水結合材比と中性化速度係数の関係を**図－8** に示す。同図には，式(2)を用いて計算した中性化速度係数を併記した。**図－8** によると，単位セメント量を超える質量の高炉スラグ微粉末の k 値を低減した結果，高炉スラグ微粉末の混合率を 70%以上とした供試体の中性化速度係数が式(2)の計算値と同程度か小さくなったことが分かる。ただし，本論文で提案した k 値の設定方法の妥当性については，多様な配合のコンクリートの実験データを蓄積して引き続き検討する必要がある。

(3) 促進中性化試験による中性化深さの推定

促進中性化試験による中性化速度係数と暴露 40 ヶ月

後の中性化速度係数を**図－9** に示す。既報 [3]と同様に，暴露 40 ヶ月後の結果でも，両試験による中性化速度係数は概ね比例関係にあり，どちらの試験結果においても混和材の混合率の高い供試体で中性化速度係数が大きくなる傾向にあった。このため，促進中性化試験の結果から中性化抵抗性を直接的に評価することによって，混和材の混合率が大幅に異なるコンクリートの中性化抵抗性の差を把握することができると考えられる。

次に，促進中性化試験から求めた中性化深さの推定値と暴露40ヶ月後の中性化深さの測定値を**図－10**に示す。本論文では，文献 7)～9)に基づき，中性化の進行速度が CO_2 濃度の平方根に比例すると仮定して，式(3)を用いて試験時の CO_2 濃度の差を補正して暴露 40 ヶ月後の中性化深さを推定した。また，補正時の暴露環境の CO_2 濃度を文献 8)の 0.03%，大気中の平均値 [5]と同等の 0.04%，文献 9)の 0.05%の 3 種類として推定結果を比較した。

$$C = A_{ACT} \cdot \sqrt{CO_2 / CO_{2,ACT}} \cdot \sqrt{t} \qquad (3)$$

ここで，C：暴露 40 ヶ月後の中性化深さの推定値(mm)，A_{ACT}:促進中性化試験による中性化速度係数(mm/√week)，CO_2：暴露環境の CO_2 濃度(%)，$CO_{2,ACT}$：促進中性化試験の CO_2 濃度(=5%)，t：材齢(week)である。

暴露 40 ヶ月後の中性化深さの測定値と促進中性化試験から求めた中性化深さの推定値は概ね比例関係にあった。また，暴露環境の CO_2 濃度を高く設定するほど，中性化深さの推定値は暴露 40 ヶ月後の中性化深さの測定値よりも大きくなった。中性化深さの測定値が 1mm 程度以上で中性化が比較的進行した供試体に着目すると，CO_2 濃度を 0.03%とした場合には大部分の供試体で，0.04%あるいは 0.05%とした場合には全ての供試体で推定値が測定値よりも大きくなったことが分かる。過大評価となる傾向にはあるが，試験時の CO_2 濃度を補正することによって促進中性化試験の結果から屋外に置かれるコンクリートの中性化深さを概ね推定できる可能性があると考えられる。ただし，促進中性化試験と暴露試験では CO_2 濃度に加えて，温度や湿度，水分供給の有無なども異なるため，促進中性化試験による中性化深さの推定精度を高めるためには，構造物が供用時に置かれる環境条件の影響も適切に考慮する必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

1) 中性化深さは，室内よりも屋外に暴露した供試体で小さくなり，W/B と混和材の種類が同一の場合，混和材の混合率の高い供試体で大きくなった。
2) 暴露 20 ヶ月後と暴露 40 ヶ月後の中性化速度係数は比例関係にあったが，屋外に暴露した供試体の中性化速度係数は経時的に減少する傾向にあった。
3) 圧縮強度が同等でも，混和材の混合率が大幅に異なる供試体同士の比較では，混和材の混合率の高い供試体で中性化速度係数が大きくなることがあった。
4) 有効水結合材比を用いた予測式は高炉スラグ微粉末の混合率を 70%以上とした供試体の中性化速度係数を過小に評価することが多くあったため，有効水結合材比の計算方法の修正案を示した。
5) 促進中性化試験と暴露試験の中性化速度係数は概ね比例関係にあり，試験時の CO_2 濃度の差を補正して促進中性化試験の結果から屋外のコンクリートの中性化深さを推定できる可能性があることが分かった。

本論文は，国立研究開発法人土木研究所と国内 8 機関の共同研究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」の実験結果の一部に考察を加えたものである。暴露試験において，国土交通省北陸地方整備局高田河川国道事務所直江津国道維持出張所，内閣府沖縄総合事務局北部国道事務所名護維持出張所，促進中性化試験において，(株)大林組の小林利充氏，前田建設工業(株)の白根勇二氏，戸田建設(株)の田中徹氏，西松建設(株)の椎名貴快氏の協力を得た。化学混和剤について，BASF ジャパン(株)の土谷正氏の助言を得た。記して謝意を表する。

参考文献

1) 依田彰彦 : 40 年間自然暴露した高炉セメントコンクリートの中性化と仕上げ材の効果，セメント・コンクリート論文集，Vol.56，pp.449-454，2002
2) 土木学会：フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期研究(最終報告)，コンクリートライブラリー64，1988
3) 中村英佑，石井豪，渡辺博志：暴露試験と促進試験による混和材を用いたコンクリートの中性化抵抗性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.202-207，2014
4) 気象庁ホームページ：気象統計情報，http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html
5) 気象庁ホームページ：二酸化炭素濃度の経年変化，http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html
6) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編]，pp.147-148，2013
7) fib: Model Code for Concrete Structures 2010, First Edition, pp.106-107, 2013
8) 日本建築学会：高耐久性コンクリート造設計施工指針（案）・同解説，pp.87-88，1991
9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（案）・同解説，pp.54-59，pp.92-108，2004