

論文 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酸化抵抗性の評価

中村 英佑*¹・石井 豪*²・渡辺 博志*³

要旨: 高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの混合率の異なるコンクリート供試体を製作して暴露試験と促進中性化試験を行い、試験結果の差について検討した。屋内外での約 20 ヶ月間の暴露試験と促進試験で得られた中性化速度係数は比例関係にあったが、雨掛かりのある屋外に暴露した供試体の中性化深さは促進試験で得られた推定値より小さくなる傾向にあった。また、中性化速度係数は材齢 28 日の圧縮強度と概ね相関関係にあった。ただし、圧縮強度が同程度でも、混和材の混合率が高くセメント使用量の少ない供試体は促進試験で得られる中性化速度係数が大きく、脱型後の湿潤養生期間の影響を受けやすくなった。

キーワード: 中性化, 高炉スラグ微粉末, フライアッシュ, 暴露試験, 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の一環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、この実用化のための一つの課題として中性化抵抗性の確保とその適切な評価方法の確立が挙げられる。国内では、中性化抵抗性を評価する試験として JIS A 1153 に準拠した促進中性化試験が広く採用されている。しかし、最近の研究では、セメント種類の異なる実構造物の中性化深さに大きな差は無いものの促進中性化試験ではセメント種類の影響が明確に現れること¹⁾、二酸化炭素濃度を变化させた促進中性化試験では炭酸カルシウムの生成メカニズムが異なること²⁾などが報告されている。促進中性化試験では試験時の二酸化炭素濃度(5±0.2%)が大気中の濃度(0.03931%)³⁾より大幅に高く、混和材を高含有したコンクリートでも適切な評価が可能か明確ではない。また、実環境下のコンクリートの中性化抵抗性と促進中性化試験の結果の関係は必ずしも解明されておらず、促進中性化試験の結果の解釈や活用の方法も明確ではない。

本研究では、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いたコンクリート供試体の暴露試験と促進中性化試験を行い、試験結果の差とその要因を検討した。また、各混和材の混合率や水結合材比(W/B)、脱型後の湿潤養生期間が異なる供試体の促進中性化試験を行い、各実験パラメータが促進試験の結果に与える影響を考察した。

2. 実験方法

2.1 暴露試験

暴露試験に用いた供試体の形状を図-1 に示す。供試体は、100×100×200mmの角柱である。コンクリート打込み方向に対して片側の側面を暴露面とし、暴露面以外

を塗装材料でシールして中性化の進行を防止した。

暴露環境は、国内3ヶ所(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)の雨掛かりのある屋外の暴露場と独立行政法人土木研究所の事務室の4種類である。つくばの暴露場は内陸部にあり、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2013年10月までの約20ヶ月間である。各暴露場の供試体の暴露状況と最寄りの気象観測地点で測定された暴露期間中の気象データ⁴⁾を図-2、各暴露場で測定した気温と気象データ⁴⁾の関係を図-3に示す。

コンクリート配合を表-1に示す。配合は26種類である。W/B=40%の13配合はプレストレストコンクリートへの適用を想定して早強ポルトランドセメント(HPC)を用い、水中養生あるいは模擬的な蒸気養生を行った。W/B=35%と50%の13配合は普通ポルトランドセメント(OPC)を用い、各混和材の混合率を混合セメントのJISのC種相当以上としたものも含めた。どの供試体も材齢28日まで水中養生を行い、材齢44~69日で暴露を開始した。

中性化深さの測定は、暴露供試体の端部から約40mmの位置を割裂し、JIS A 1152を参考に、割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して行った。中性化深さは、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。

2.2 促進中性化試験

促進中性化試験に用いた供試体は、100×100×400mmの角柱である。暴露試験の結果との比較のため、表-1の26配合の促進試験用供試体を暴露供試体と同時に製作した。材齢28日まで水中養生を行った後、材齢49日以降で供試体の両側の側面(100×400mm)以外をエポキシ樹脂塗料でシールし、材齢56日から促進中性化試験を

*1 (独)土木研究所 つくば中央研究所 材料資源研究グループ 基礎材料チーム 主任研究員 工修 (正会員)

*2 (一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 工修 (正会員)

*3 (独)土木研究所 つくば中央研究所 材料資源研究グループ 基礎材料チーム 上席研究員 工博 (正会員)

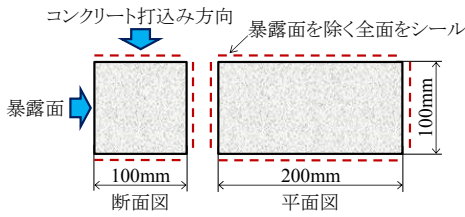


図-1 暴露供試体の形状



図-2 供試体の暴露状況と気象データ⁴⁾
 ※気象データは暴露場の最寄りの気象観測地点(つくば(館野), 高田, 名護)の値を引用⁴⁾

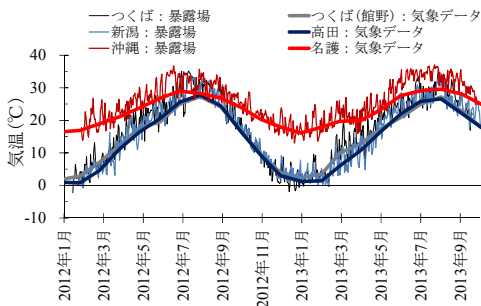


図-3 各暴露場内の気温と気象データ⁴⁾

開始した。JIS A 1153 に準拠し、試験条件を温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ 、二酸化炭素濃度 $5 \pm 0.2\%$ 、促進期間を 1, 4, 8, 13, 26 週間とした。

また、JIS A 1153 では材齢 28 日まで水中養生を行った供試体が用いられるが、脱型後の湿潤養生期間の違いが促進中性化試験の結果に与える影響を検討するため、表-2 の 9 配合の角柱(100×100×400mm)を表-3 の 6 種類の養生方法で別途製作した。高炉スラグ微粉末を 70%、フライアッシュを 30%混合した配合では、ベースセメントの種類と W/B も実験パラメータとした。材齢 49 日以降で供試体の片側の側面(100×400mm)以外をエポキシ樹脂塗料でシールし、材齢 56 日から前記と同条件で促進中性化試験を開始した。さらに、促進試験の中性化速度係数と水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)含有量の関係を考察

表-1 コンクリート配合：暴露試験用と促進試験用の供試体

配合 No.	W/B (%)	B (kg/m ³)	B = OPC+HPC+BS4+BS6+FA 結合材の構成割合(%)					試験値	
			OPC	HPC	BS4	BS6	FA	slump (cm)	air (%)
			H40	100					11.5
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	40	413	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			100				14.5	4.7	
N35B50			50		50		14.5	4.3	
N35B85	35	471	15		85		12.5	5.1	
N35F20			80			20	12.0	3.5	
N35F40			60			40	14.5	4.5	
N50			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	50	330	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/m³)と単位粗骨材量(=968kg/m³)を全配合で統一
- 2) HPC：早強ポルトランドセメント(密度=3.14g/cm³，比表面積=4,490cm²/g)
- 3) OPC：普通ポルトランドセメント(密度=3.16g/cm³，比表面積=3,300cm²/g)
- 4) BS4：高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89g/cm³，比表面積=4,400cm²/g)，BS6：高炉スラグ微粉末 6000(密度=2.91g/cm³，比表面積=5,950cm²/g)，SO₃換算で BS4 は 2.0%，BS6 は 3.0%となるよう無水石膏を添加
- 5) FA：フライアッシュ II 種(密度=2.30g/cm³，比表面積=4,280cm²/g)
- 6) 細骨材：静岡県掛川産陸砂(密度=2.56g/cm³，吸水率=2.23%)
- 7) 粗骨材：茨城県笠間産砕石 6 号(密度=2.67g/cm³，吸水率=0.43%)と 5 号(密度=2.67g/cm³，吸水率=0.46%)を均等に混合，最大寸法=20mm
- 8) 混和剤：スランプ $12 \pm 2.5\text{cm}$ と空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ を目標値とし使用量を調整
- 9) 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
- 10) 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、水と混和剤を投入して 90 秒間練混ぜて排出
- 11) 養生方法：配合 No.の末尾に「S」を付記していない供試体は打込み翌日に脱型して材齢 28 日まで 20℃で水中養生。配合 No.の末尾に「S」を付記した供試体は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

するため、各配合の材齢 28 日まで水中養生を行った供試体(W)で材齢 96~98 日に示差熱天秤分析(TG-DTA)を行った。分析用試料は促進 1 週間後の中性化深さを測定した供試体の内部の未中性化部分から骨材をなるべく取り除いて採取し、Ca(OH)₂含有量は質量減少率から計算した。

2.3 圧縮強度試験

表-1 と表-2 の全種類の供試体において、JIS A 1108 に準拠して材齢 28 日の圧縮強度を測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 暴露供試体の中性化深さと材齢 28 日の圧縮強度

約 20 ヶ月後の暴露供試体の中性化深さと材齢 28 日の圧縮強度を図-4 に示す。つくば、新潟、沖縄の中性化深さの図には図-2 に示した気象データ、室内の中性化

表-2 コンクリート配合：湿潤養生期間の異なる促進試験用の供試体

配合 No.	W/B (%)	B (kg/m ³)	B = OPC+HPC+BS4+FA 結合材の構成割合(%)				試験値	
			OPC	HPC	BS4	FA	slump (cm)	air (%)
N50	50	330	100				11.0	4.8
N50B50			50		50		12.0	4.5
N50B70			30		70		9.5	3.8
H50B70				30		70		11.5
N35B70	35	471	30		70		14.5	4.9
N50F20	50	330	80			20	12.0	5.0
N50F30			70			30	12.0	4.4
H50F30				70		30	12.0	4.8
N35F30			35	471	70			30

- 1) 単位水量(=165kg/m³), 単位粗骨材量(=968kg/m³)
- 2) OPC: 普通ポルトランドセメント(密度=3.16g/cm³, 比表面積=3,200cm²/g)
- 3) HPC: 早強ポルトランドセメント(密度=3.14g/cm³, 比表面積=4,570cm²/g)
- 4) BS4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89g/cm³, 比表面積=4,460cm²/g)
- 5) FA: フライアッシュ II 種(密度=2.30g/cm³, 比表面積=4,280cm²/g)
- 6) 骨材, 混和剤, 温度, 練混ぜ方法: 表-1 と同様
- 7) 養生方法: 表-3 の方法で実施

表-3 脱型後の養生方法と対象供試体の一覧

記号	養生方法		対象供試体 ※○印で実施									
			N50	N50 B50	N50 B70	H50 B70	N35 B70	N50 F20	N50 F30	H50 F30	N35 F30	
W	水中養生	材齢 28 日まで水中養生の後, 気中養生	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3d	気中養生	脱型後から気中養生			○	○	○			○	○	○
5d	湿潤養生	材齢 5 日まで湿潤養生の後, 気中養生	○									
7d		材齢 7 日まで湿潤養生の後, 気中養生		○		○	○	○	○	○	○	○
10d		材齢 10 日まで湿潤養生の後, 気中養生			○	○	○	○	○	○	○	○
14d		材齢 14 日まで湿潤養生の後, 気中養生			○	○	○	○	○	○	○	○

※いずれの養生方法の供試体も, 打込み直後から翌日まで封緘状態に保ち, 材齢 3 日まで十分に湿らせた養生マットで被覆した。その後, 材齢 3 日に脱型して各条件(W, 3d, 5d, 7d, 10d, 14d)で養生を行い, 試験時まで実験室内(20℃, 60%RH)に保管した。

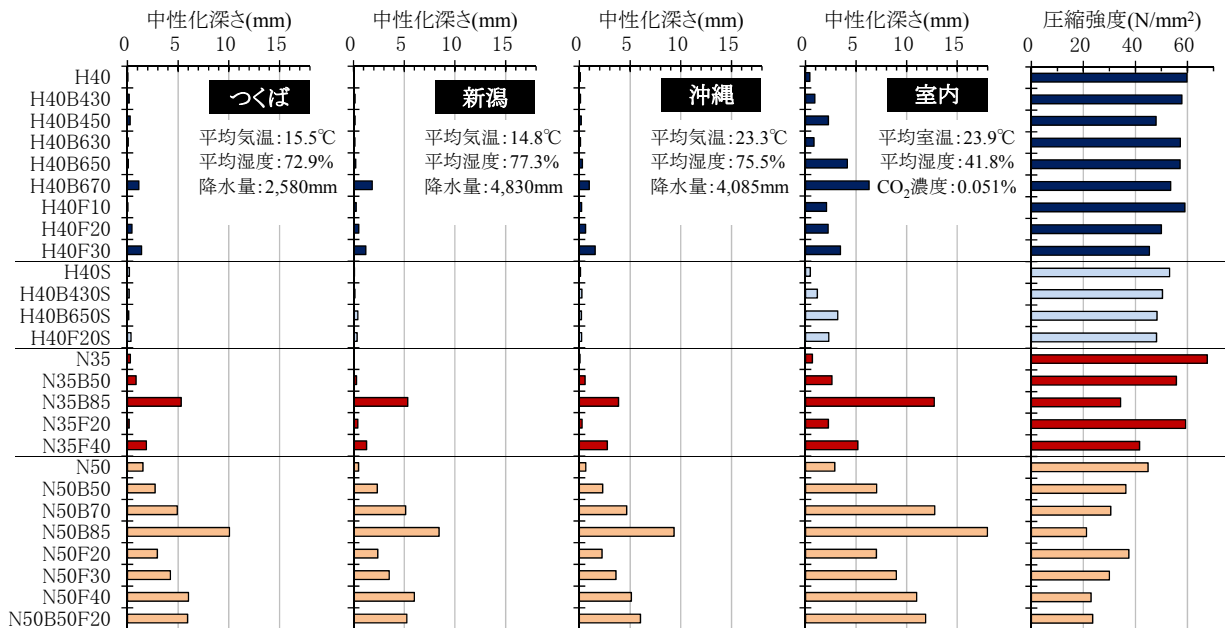


図-4 約 20 ヶ月後の暴露供試体の中性化深さと材齢 28 日の圧縮強度

深さの図には供試体の周囲で測定した室温と湿度, 二酸化炭素濃度の平均値を併記した。どの暴露環境においても, W/B が大きく, 各混和材の混合率の高い供試体で, 中性化深さが大きくなった。屋外 3 ヶ所の暴露供試体の中性化深さは概ね同程度で, 室内の暴露供試体の中性化深さが大幅に大きくなった。屋外の各暴露場では気温や湿度, 降水量, 飛来塩分量などの環境条件が異なるが, この違いが中性化深さの差に与えた影響は屋外と室内の環境条件の違いほど明確ではなかった。室内で中性化深さが大きくなった原因は, 二酸化炭素濃度が屋外より高く, 雨掛かりが無く屋外よりも乾燥しており, 中性化が

進行しやすい環境に供試体が置かれたためと考えられる。

また, 材齢 28 日の圧縮強度は, W/B やベースセメントの種類が同一であれば, 各混和材の混合率が高い供試体で小さくなる傾向にあった。

3.2 中性化速度係数と圧縮強度, 有効水結合材比の関係

材齢 28 日の圧縮強度と暴露試験の結果から計算した中性化速度係数の関係を図-5 に示す。屋外 3 ヶ所の暴露供試体の中性化深さが環境条件の違いにかかわらず概ね同程度であったため, 以降の図では屋外 3 ヶ所の全データを「屋外」と称する。圧縮強度と中性化速度係数は概ね相関関係にあり, 圧縮強度が大きいほど中性化速度

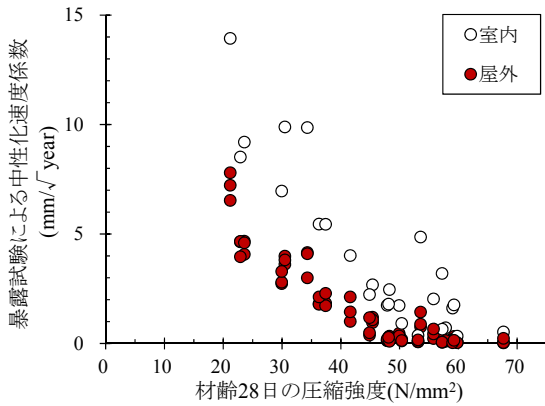


図-5 圧縮強度と暴露試験による中性化速度係数

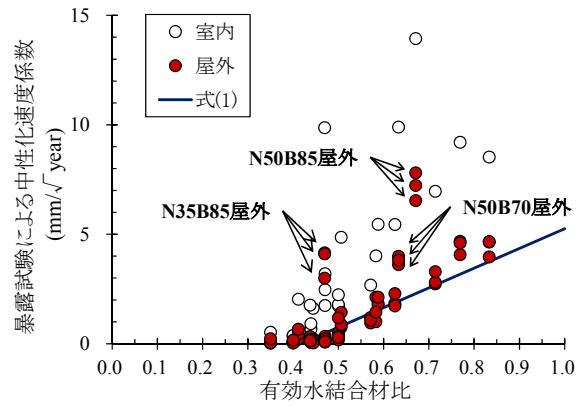


図-6 有効水結合材比と暴露試験による中性化速度係数

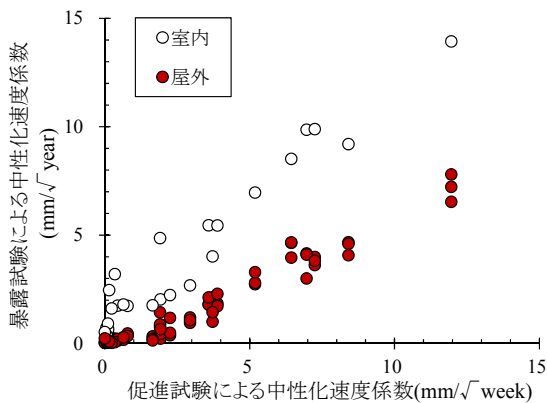


図-7 促進試験と暴露試験による中性化速度係数

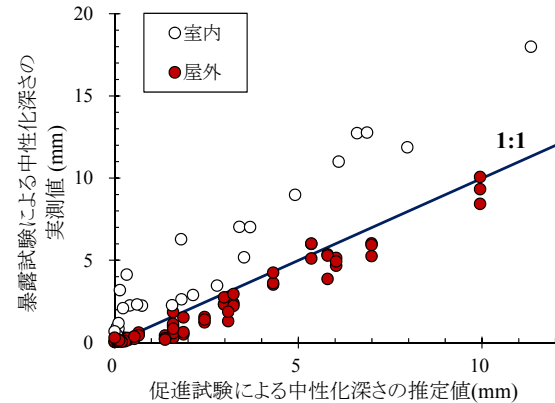


図-8 中性化深さの推定値と実測値

係数が低下する傾向にあった。文献 5), 6)では, 屋外の長期暴露試験の結果から, 材齢 28 日の圧縮強度が同等であれば, 高炉スラグ微粉末やフライアッシュの混合の有無にかかわらず中性化抵抗性が同程度になることが報告されている。今回の屋外の暴露試験の結果もほぼ同様の傾向にある。しかし, 図-5 では, 屋外と室内のように環境条件が極端に異なる場合には, 材齢 28 日の圧縮強度が同等でも中性化速度係数が異なった。中性化抵抗性を吟味する際には, 圧縮強度に加えて, 長期的な環境条件の影響も適切に考慮することが必要と思われる。

同様に, 有効水結合材比との関係を図-6 に示す。同図の有効水結合材比は式(1)⁷⁾の定義に従って求め, 式(1)を用いて計算した中性化速度係数も併記した。

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

ここで, α : 中性化速度係数(mm/√year), W : 単位水量(kg/m³), B : 単位有効結合材量(=C+k·A)(kg/m³), C : 単位セメント量(kg/m³), k : 混和材の種類により定まる定数(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/m³)である。

暴露試験で得られた中性化速度係数は有効水結合材比の高い供試体で大きくなるようにも見えるが, 図-5 の材齢 28 日の圧縮強度との関係よりもばらつきが大きくなった。また, 暴露試験で得られた中性化速度係数を式(1)の計算値と比較すると, 屋外の中性化速度係数は計算

値に近くなったが, 特に高炉スラグ微粉末の混合率を C 種相当以上とした供試体(N35B85, N50B70, N50B85)の中性化速度係数が計算値を大幅に上回った。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から導出されたことや k 値の設定方法に検討の余地があることなどが原因と思われる。一方, 室内の中性化速度係数は計算値より大幅に大きくなった。

3.3 暴露試験と促進試験の比較

暴露試験と促進中性化試験で得られた中性化速度係数の関係を図-7 に示す。暴露試験で得られた中性化速度係数は, 屋外と室内で差が生じたが, いずれも促進中性化試験の結果と概ね比例関係にあることが分かる。

次に, 暴露試験の中性化深さの実測値と促進中性化試験の中性化速度係数から求めた中性化深さの推定値の関係を図-8 に示す。暴露試験と促進中性化試験では様々な試験条件が異なるが, ここでは式(2)⁸⁾を用いて二酸化炭素濃度の差のみを換算して中性化深さを推定した。

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

ここで, C : 暴露 20 ヶ月後の中性化深さの推定値(mm), A_{ACT} : 促進中性化試験の中性化速度係数(mm/√week), CO_2 : 各暴露環境の二酸化炭素濃度(屋外=0.03931%³⁾, 室内=0.051%(図-4 に記した実測値)), $CO_{2,ACT}$: 促進中性化試験の二酸化炭素濃度(=5%), t : 材齢(week)である。

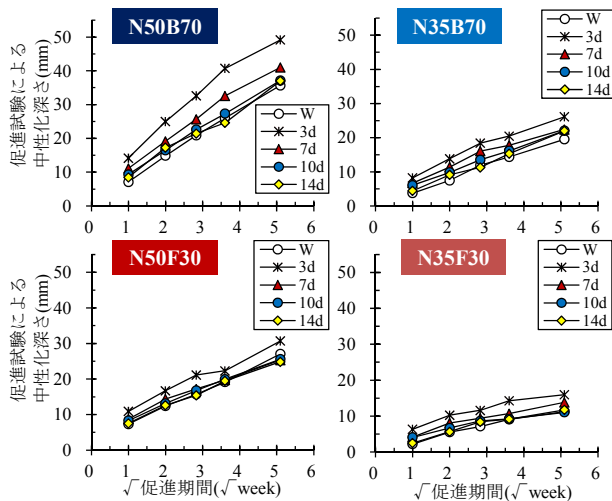


図-9 養生期間の異なる供試体の促進中性化試験による中性化深さの推移

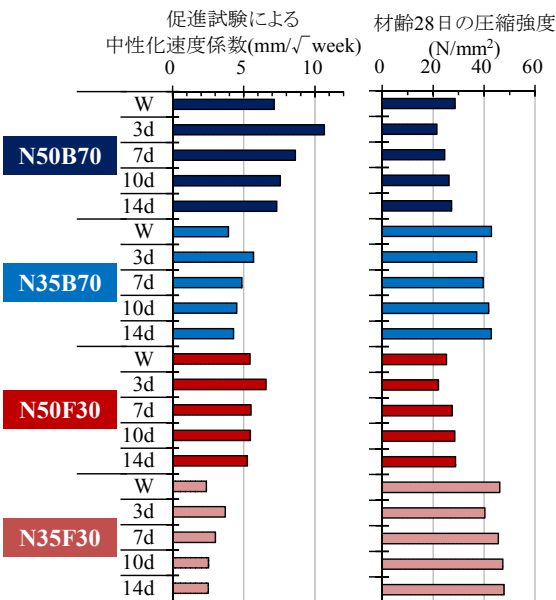


図-10 養生期間の異なる供試体の促進中性化試験による中性化速度係数と材齢28日の圧縮強度

促進中性化試験の結果を用いて計算した中性化深さの推定値を暴露試験で得られた中性化深さの実測値と比較すると、若干のばらつきはあるが、推定値は屋外の供試体の実測値より大きく、室内の供試体の実測値より小さくなる傾向にあった。この原因を環境条件の違いのみに着目して考察すると、屋外の供試体は降雨により水分が供給される環境に暴露されたため、中性化が比較的進行しにくい環境に置かれたこと、室内の供試体は降雨の影響を受けず、促進中性化試験よりも室温が高く湿度が低い環境に暴露されたため、中性化が比較的進行しやすい環境に置かれたことなどが推察される。

なお、本論文では約20ヶ月後の暴露供試体の調査結果を報告したが、長期試験用の供試体も同時に暴露しており、今後も定期的に解体調査を実施する予定である。

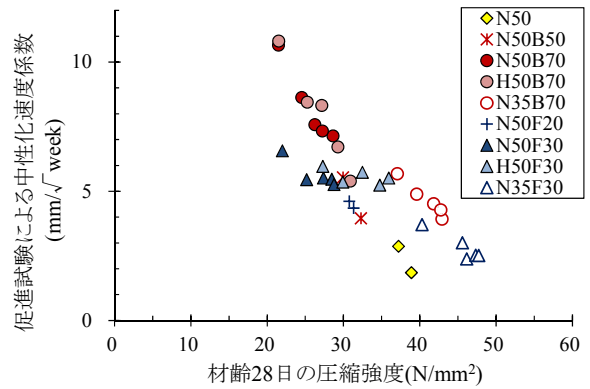


図-11 養生期間の異なる供試体の促進中性化試験による中性化速度係数と材齢28日の圧縮強度の関係

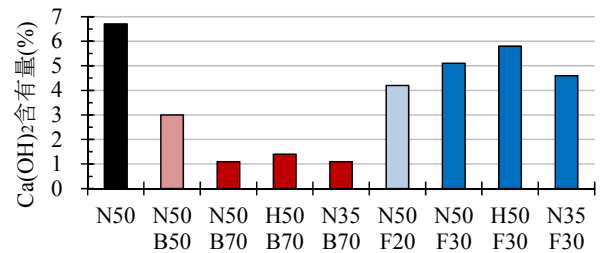


図-12 水中養生を行った供試体のCa(OH)₂含有量

3.4 湿潤養生期間が促進中性化試験の結果に与える影響

湿潤養生期間の異なる供試体の促進中性化試験による中性化深さの推移を図-9、中性化速度係数と材齢28日の圧縮強度を図-10に示す。中性化速度係数は、 \sqrt{t} 則により原点を通る直線で全促進期間のデータを回帰分析して求めた。紙面の制約により、OPCに各混和材をC種相当の混合率で混合してW/Bを変化させた4配合を示す。

図-9によると、若干のばらつきはあるが、中性化深さは湿潤養生期間の短い供試体で大きい。この差は試験開始1週後で確認でき、その後は同程度の勾配で推移した。湿潤養生期間の違いにより供試体表面の中性化抵抗性や試験開始時の含水率が異なり、この影響が試験開始直後の中性化深さに現れたのではないかと推察される。

図-9では湿潤養生期間の違いによる中性化深さの差は高炉スラグ微粉末を70%混合したN50B70とN35B70で大きく、両者の比較ではW/Bが大きいN50B70で差が顕著であった。この傾向は図-10の中性化速度係数でも同様で、湿潤養生期間の短い供試体で中性化速度係数が大きく、その大小の差はN50B70で最も大きくなった。

また、中性化速度係数と材齢28日の圧縮強度の分布形状を比較すると、湿潤養生期間の違いによる差は圧縮強度よりも中性化速度係数で明確に現れた。他の配合でも同様の検証を行うため、全供試体の中性化速度係数と圧縮強度の関係を図-11に示す。高炉スラグ微粉末を70%混合したN50B70とH50B70では、湿潤養生期間の違いによる差が圧縮強度よりも中性化速度係数で明確に現れた。一方、W/B=35%としたN35B70や他の混和材の混合

率の低い供試体では、N50B70 や H50B70 ほど中性化速度係数の差が大きくない。このため、混和材の混合率が高くセメント使用量の少ない供試体では、中性化速度係数が湿潤養生期間の影響を受けやすく、この影響が圧縮強度よりも明確に現れたのではないかと推察される。

なお、図-11 でベースセメントの種類と W/B の違いに着目すると、ベースセメントの HPC への変更よりも W/B の低減の方が、圧縮強度の増加と中性化速度係数の低下の両方に効果的であることが読み取れる。

3.5 中性化速度係数と圧縮強度、Ca(OH)₂含有量の関係

図-11 では圧縮強度と中性化速度係数は概ね相関関係にあるが、配合間の差を厳密に比較すると、圧縮強度が同程度でも、混和材の混合率が高い供試体で中性化速度係数が大きくなった。この要因を Ca(OH)₂ 含有量の点から検証するため、各配合で水中養生を行った供試体の Ca(OH)₂ 含有量を図-12 に示す。厳密には Ca(OH)₂ 含有量は養生方法によって異なると考えられるが、養生の影響を最も受けやすい供試体表層での測定を行うことが困難であったため、各配合の代表として最も理想的な養生方法である水中養生を行った供試体を対象とした。

Ca(OH)₂ 含有量は、OPC 単味の N50 と比べて混和材を混合した供試体で少なく、特に高炉スラグ微粉末を 70% 混合した N50B70, H50B70, N35B70 で少なくなった。

図-11 によると、例えば、N35B70 の圧縮強度は N50 と同程度か大きいものが多いが、N35B70 の中性化速度係数は N50 より大幅に大きい。同様に、若干のばらつきはあるが、N50B70 と H50B70 は他の圧縮強度が同程度の配合と比べて中性化速度係数が大きい供試体が多い。このように混和材の混合率の高い供試体では他の圧縮強度が同程度の供試体よりも中性化速度係数が大きく、湿潤養生期間の影響を受けやすくなる傾向にあったが、その要因の一つは混和材の混合率の高い供試体で Ca(OH)₂ 含有量が少なく中性化抵抗性が相対的に低かったためではないかと推察される。

なお、上記は促進中性化試験の結果であり、図-1, 2 と同様の暴露試験も同時に実施しているため、今後は実環境でのデータを収集して検証を行う予定である。

4. 結論

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 暴露供試体の中性化深さは、環境条件にかかわらず、各混和材の混合率の高い供試体で大きくなった。
- 2) つくば、新潟、沖縄の屋外の暴露供試体の中性化深さは概ね同程度であったが、室内の暴露供試体の中性化深さは屋外の値を大幅に上回った。
- 3) 暴露試験と促進中性化試験で得られた中性化速度係数は比例関係にあったが、雨掛かりのある屋外に暴

露した供試体の中性化深さの実測値は促進中性化試験の結果から求めた推定値より小さくなった。

- 4) 中性化速度係数は材齢 28 日の圧縮強度と概ね相関関係にあった。一方、高炉スラグ微粉末の混合率を C 種相当以上とした屋外の暴露供試体の中性化速度係数は、有効水結合材比を用いた推定式による計算値を上回る傾向にあった。
- 5) 圧縮強度が同程度でも、混和材の混合率の高い供試体は促進試験による中性化速度係数が大きく、湿潤養生期間の影響を受けやすくなる傾向にあった。

本論文は、独立行政法人土木研究所と 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。暴露試験では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の協力を得た。高炉スラグ微粉末は鉄鋼スラグ協会、フライアッシュは電源開発(株)から提供を得た。促進中性化試験では(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。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。

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
- 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.769-774, 2013
- 3) 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
- 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) 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
- 6) 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第 64 号, 1988
- 7) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2013
- 8) 日本建築学会: 高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説, 1991