

論文 暴露試験と促進試験に基づく混和材を用いたコンクリートの中性化抵抗性に関する実験的研究

中村 英佑*1・石井 豪*2・渡辺 博志*3

要旨: 混和材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、屋外における長期的な中性化抵抗性の変化と初期材齢の養生条件や配合の違いが中性化抵抗性に与える影響を検討した。屋外に暴露した供試体の中性化抵抗性は長期的に向上したが、同一水結合材比の供試体同士の比較では依然として混和材の混合率の高い供試体で中性化抵抗性が低くなる傾向にあった。また、屋内外いずれの暴露環境においても脱型後の湿潤養生期間の短い供試体ほど中性化深さが大きく、初期材齢の養生条件や配合の異なるコンクリートの中性化抵抗性の差は圧縮強度よりも促進試験から得られた中性化速度係数との適合性が高くなった。

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

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おり、この実用化に向けて中性化抵抗性の確保とその適切な評価方法の確立が求められている。筆者らは、混和材の種類や混合率を様々に変化させた供試体を製作し、暴露試験と促進中性化試験によって混和材を用いたコンクリートの中性化抵抗性を検討している¹⁾。一方、高炉セメントを用いたコンクリートを対象とした最近の研究では、促進中性化試験ではセメント種類の違いによる中性化抵抗性の差を過大に評価する可能性があること^{2), 3)}、普通ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して初期材齢の養生条件の影響を受けやすいこと^{4)~6)}などが報告されている。しかしながら、混和材の種類や混合率などが大幅に異なるコンクリートにおいて、実環境と促進環境での中性化抵抗性の試験結果の差や、これに初期材齢の養生条件の違いが与える影響は必ずしも明確にされていない。中性化抵抗性の適切な評価方法を確立するためには更なる実験データの蓄積と検討が不可欠である。

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、屋外における長期的な中性化抵抗性の変化とその要因を検討した。また、脱型後の湿潤養生期間の異なる供試体を製作して暴露試験を行い、初期材齢の養生条件の違いが中性化抵抗性に与える影響を考察した。

2. 実験方法

2.1 シリーズ I: 屋外での長期的な中性化抵抗性の変化

シリーズ I では、混和材を用いたコンクリートの屋外での長期的な中性化抵抗性の変化とその要因を検討する

ため、試験前の養生条件と試験開始材齢の異なる供試体を用いて促進中性化試験を行った。

シリーズ I の供試体のコンクリート配合とフレッシュ性状を表-1 に示す。配合は 13 種類である。水結合材比 (W/B) を 35% と 50% の 2 種類とし、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの混合率を混合セメントの JIS の C 種相当以上とした供試体も製作した。

供試体の試験前の養生条件と試験開始材齢を表-2 に示す。暴露試験用供試体は、材齢 28 日まで水中養生を行い、材齢 44~58 日から茨城県つくば市南原の雨掛かりのある屋外に約 20 ヶ月間暴露した後で回収し、材齢 22 ヶ月で促進中性化試験を開始した。その後、促進 4, 13 週間後に中性化深さを測定した。暴露試験用供試体の形状を図-1 に示す。供試体は 100×100×200mm の角柱であり、片側の側面(100×200mm)以外を塗装材料でシールした。一方、促進試験用供試体は、JIS A 1153 に準拠して、材齢 28 日まで水中養生を行った後、28 日間の乾燥期間を設け、材齢 56 日で促進中性化試験を開始した。その後、促進 1, 4, 8, 13, 26 週間後に中性化深さを測定した。供試体は 100×100×400mm の角柱であり、両側の側面(100×400mm)以外を材齢 49 日以降にエポキシ樹脂塗料でシールした。促進中性化試験の試験条件は、JIS A 1153 に準拠し、温度 20±2℃、湿度 60±5%、二酸化炭素濃度 5±0.2% とした。中性化深さは、JIS A 1152 を参考に、供試体の割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、試験面から赤紫色を呈した部分までの距離を等間隔に 5 点(促進試験用供試体、両側の側面)あるいは 9 点(暴露試験用供試体、片側の側面)で測定して得られた平均値とした。

なお、暴露試験用供試体の暴露約 20 ヶ月後の中性化深さと促進試験用供試体の中性化速度係数の関係について

*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 (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 交流研究員 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)

表-1 コンクリート配合とフレッシュ性状：シリーズI

配合 No.	W/B (%)	B (kg/m ³)	B = OPC + BS4 + FA 結合材の割合(%)			試験値	
			OPC	BS4	FA	slump (cm)	air (%)
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/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=3,300cm²/g)，BS4：高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89g/cm³，比表面積=4,400cm²/g，SO₃換算で2.0%となるよう無水石膏を添加)，FA：フライアッシュ II 種(密度=2.30g/cm³，比表面積=4,280cm²/g)
- 3) 細骨材：静岡県掛川産陸砂(密度=2.56g/cm³，吸水率=2.23%)，粗骨材：茨城県笠間産砕石(密度=2.67g/cm³，吸水率=0.43%と0.46%を均等に混合，最大寸法=20mm)
- 4) 温度：20℃の実験室内で練混ぜ及び供試体製作を実施
- 5) 練混ぜ方法：水平二軸強制練ミキサーで，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
- 6) 化学混和剤：スランプ 12±2.5cm と空気量 4.5±1.5% を目標値として使用量を調整

表-2 促進中性化試験前の養生条件と試験開始材齢：シリーズI

供試体	試験前の養生条件	試験開始材齢
促進試験用供試体	材齢 28 日まで水中養生	材齢 56 日
暴露試験用供試体	材齢 28 日まで水中養生の後，材齢 44～58 日から雨掛りのある屋外に約 20 ヶ月間暴露	材齢 22 ヶ月

※いずれの供試体も，打込み直後から封緘状態に保ち，翌日に脱型して20℃の養生槽内で水中養生を開始した。また，水中養生及び屋外暴露の終了時から促進中性化試験開始時までの4週間は実験室内で気中保管とした。

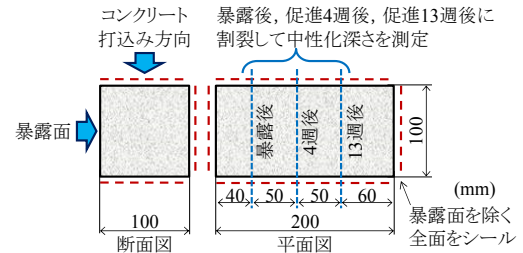


図-1 暴露試験用供試体の形状

は既に報告済み¹⁾であり，本研究では回収後の暴露試験用供試体を対象として促進中性化試験を行い，混和材を用いたコンクリートの長期的な中性化抵抗性の変化とその要因を明らかにすることを試みた。

また，同時に製作した円柱供試体(φ100×200mm)を用いて，JIS A 1108 に準拠し，材齢 28 日，91 日，1 年で圧縮強度を測定した。円柱供試体は，材齢 28 日まで水中養生を行い，暴露試験用供試体と同時に屋外に移設した。

2.2 シリーズ II：養生条件が中性化抵抗性に与える影響

シリーズ II では，初期材齢の養生条件の違いが実環境と促進環境での中性化抵抗性に与える影響を検討するため，脱型後の湿潤養生期間の異なる供試体を製作して暴露試験と促進中性化試験を行った。

シリーズ II の供試体のコンクリート配合とフレッシュ性状を表-3，脱型後の養生条件を表-4 に示す。シリーズ II では，高炉スラグ微粉末を70%，フライアッシュを30%混合した配合においてベースセメントの種類やW/Bを実験パラメータとした供試体も製作した。

暴露試験用供試体は，図-1のシリーズ I と同形状の100×100×200mmの角柱である。暴露環境は茨城県つくば市南原の雨掛りのある屋外と独立行政法人土木研究所の実験室内(温度約20℃，湿度約60%)の2種類，暴露期間は2012年2月から2014年10月までの約20ヶ月間とし，表-4の6種類の条件で養生を行った後に材齢103～115日で暴露を開始した。屋外の暴露状況を写真-1，室内及び屋外の暴露環境条件を表-5に示す。一方，促進中性化試験用供試体も，シリーズ I と同形状の100×100×400mmの角柱である。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日から促進中性化試験を開始した。その後，促進1，4，8，13，26週間後に中性化深さを測定した。試験条件は，JIS A 1153 に準拠し，温度20±2℃，湿度60±5%，二酸化炭素濃度5±0.2%とした。中性化深さは，いずれの供試体においても片側の側面で等間隔に9点で測定して得られた平均値とした。

なお，促進試験用供試体の中性化速度係数については既に報告済み¹⁾であり，本研究では室内及び屋外での暴露試験の結果との比較により，初期材齢の養生条件や配合の違いが実環境と促進環境での中性化抵抗性に与える影響とその差の有無を検証することを試みた。

シリーズ II でも同時に製作した円柱供試体(φ100×200mm)を用い，JIS A 1108 に準拠し，養生終了時(Wは材齢28日の水中養生終了時，3dは材齢3日の脱型時，5d～14dは材齢5～14日の湿潤養生終了時)，材齢28日，材齢1年で圧縮強度を測定した。円柱供試体は暴露試験用供試体と同時に屋外に移設した。

3. 実験結果と考察

3.1 シリーズ I：屋外での長期的な中性化抵抗性の変化

シリーズ I 供試体の中性化深さと圧縮強度を図-2に示す。同図では，暴露試験用供試体と促進試験用供試体の促進4，13週後の中性化深さとその差に加えて，暴露試験用供試体の促進試験前(暴露試験終了時)の中性化深さ¹⁾も参考値として示した。促進試験後の中性化深さは，いずれの配合においても促進試験用供試体より暴露試験用供試体で小さくなった。この差はポルトランドセメン

表-3 コンクリート配合とフレッシュ性状：シリーズII

配合 No.	W/B (%)	B (kg/m ³)	B = OPC + HPC + BS4 + FA 結合材の割合(%)				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	4.9
N35B70	35	471	30		70		14.5	4.9
N50F20			80			20	12.0	5.0
N50F30	50	330	70			30	12.0	4.4
H50F30				70		30	12.0	4.8
N35F30	35	471	70			30	14.5	5.4

- 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)，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)，
- 3) BS4：高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89g/cm³，比表面積=4,460cm²/g，SO₃換算で2.0%となるよう無水石膏を添加)，FA：フライアッシュII種(密度=2.30g/cm³，比表面積=4,280cm²/g)
- 4) 細骨材，粗骨材，温度，練混ぜ方法，化学混和剤：表-1と同様
- 5) 養生方法：表-4の方法で実施

表-4 脱型後の養生条件と対象供試体：シリーズII

記号	養生条件		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鎖状態に保ち，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(温度20℃，湿度60%)に保管した。



写真-1 屋外の暴露状況：シリーズII

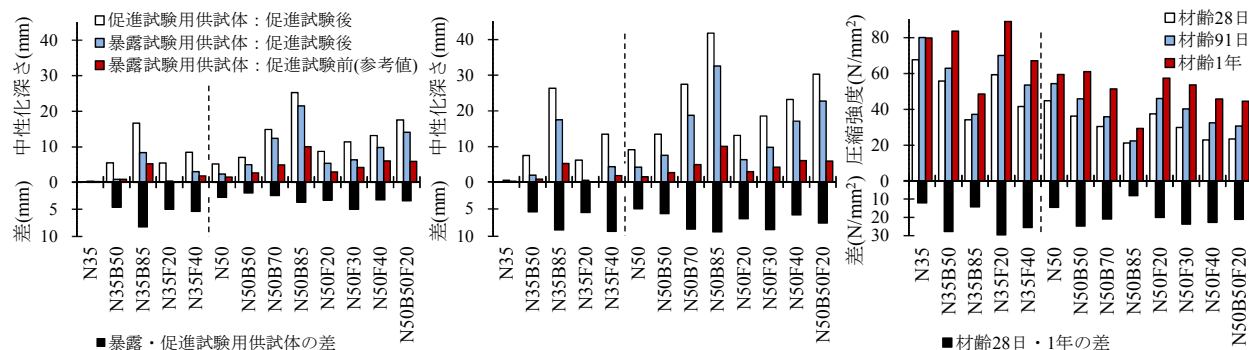
表-5 室内及び屋外の暴露環境条件：シリーズII

供試体	室内	屋外
平均気温(℃)	20.2 ※1)	15.5 ※2)
平均湿度(%)	61.9 ※1)	72.1 ※2)
降水量(mm)	-	2,451 ※2)
二酸化炭素濃度(%)	0.0439 ※1)	0.0396 ※3)

※1) データロガーによる実測値を記載

※2) 最寄りの気象観測地点(つくば(館野))での実測値⁷⁾を引用

※3) 気象庁による平均値⁸⁾を引用



(A)促進4週後の中性化深さとその差 (B)促進13週後の中性化深さとその差 (C)圧縮強度の推移とその差

図-2 シリーズI 供試体の中性化深さと圧縮強度

ト単味の供試体よりも混和材を用いた供試体で大きくなったが，中性化抵抗性は混和材の使用有無にかかわらず向上したと考えられる。暴露試験用供試体では既に中性化が進行した状態で促進中性化試験を開始したが，長期的に中性化抵抗性が向上して促進試験による中性化深さが促進試験用供試体よりも小さくなったためではないかと推察される。また，圧縮強度は，混和材を用いた供試体で材齢28日から1年までの増加量が大きくなる傾向にあった。降雨などにより水分が供給される屋外では高炉スラグ微粉末やフライアッシュの反応が暴露後も継続したことが原因として考えられる。

一方，暴露試験用供試体の中性化深さに着目すると，W/Bが同一の場合には，各混和材の混合率の高い供試体ほど促進試験の実施前と実施後の両方で中性化深さが大きくなったことが読み取れる。雨掛かりのある屋外では中性化抵抗性が長期的に向上する傾向にあったが，W/Bが同一の場合には，依然として混和材の混合率の高い供試体ほど中性化抵抗性が低くなった。ただし，混和材を用いた供試体では，W/Bの低減により促進試験後の中性化深さが大幅に減少しており，W/Bを調整することにより適切な中性化抵抗性を確保することができると考えられる。

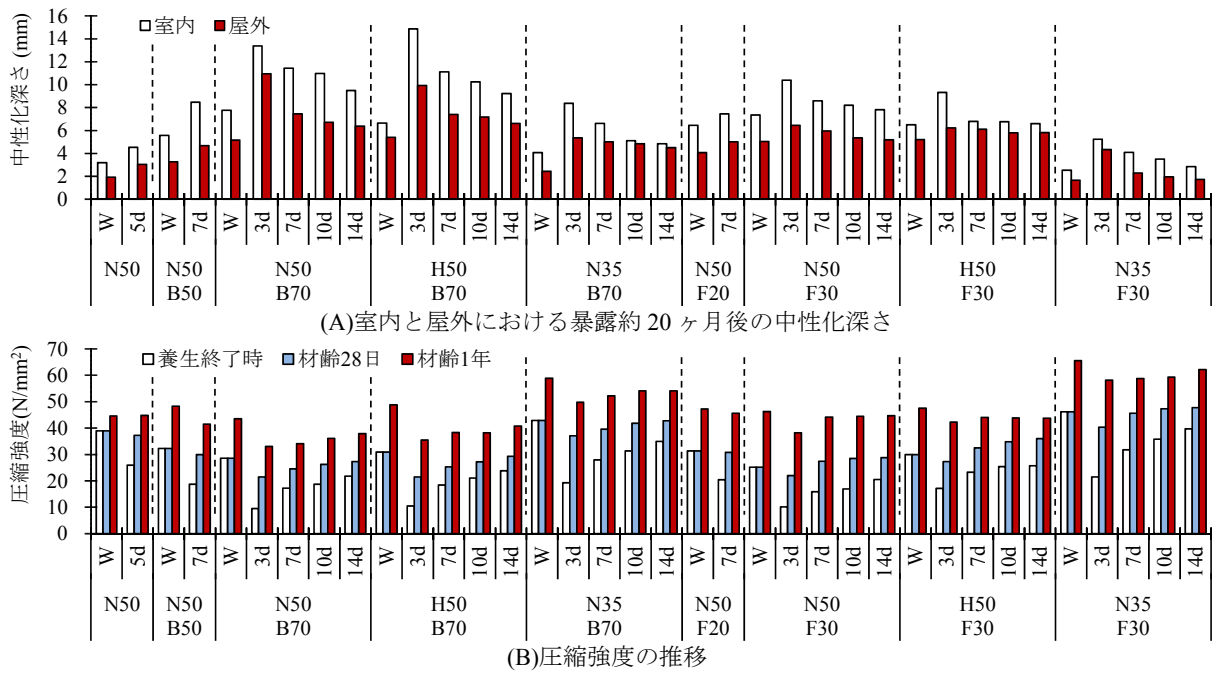


図-3 シリーズII 供試体の中性化深さと圧縮強度

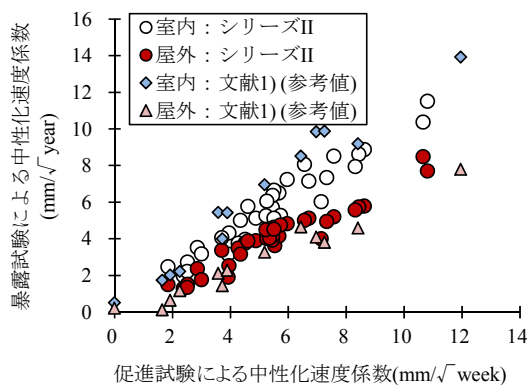


図-4 暴露試験と促進試験による中性化速度係数

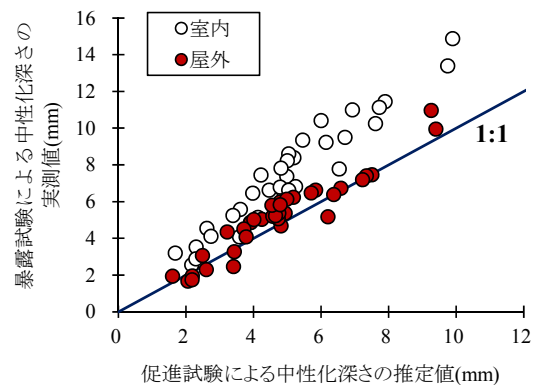


図-5 中性化深さの実測値と推定値

3.2 シリーズII：養生条件が中性化抵抗性に与える影響

(1) 暴露試験による中性化深さと圧縮強度

シリーズII 供試体の中性化深さと圧縮強度を図-3に示す。中性化深さは、いずれの暴露環境あるいは配合においても、脱型後の湿潤養生期間の短い供試体で大きくなった。暴露環境の違いに着目すると、屋外に暴露した供試体に比べて、室内に暴露した供試体で中性化深さは大きくなり、養生条件の違いによる中性化深さの差も相対的に大きくなった。室内に暴露した供試体には降雨などによる水分供給が無く、屋外に暴露した供試体よりも初期材齢の養生条件の影響が長期的に保持されたためと考えられる。この傾向は特に高炉スラグ微粉末の混合率を70%とした供試体で明確に現れており、促進試験の結果¹⁾と同様に、ポルトランドセメント使用量の少ない供試体では水酸化カルシウム含有量も少なく、初期材齢の養生条件の影響を受けやすくなったためではないかと推察される。また、中性化深さは、若干のばらつきが認められるが、特に養生条件3dの値が突出して大きく、他の

養生条件の中性化深さの差は比較的小さくなった。中性化抵抗性は脱型後の湿潤養生期間を延長することで向上する傾向にあったが、この効果がある時点から逡減したことを示唆していると考えられる。

養生条件の影響は材齢1年の圧縮強度にも現れており、脱型後の湿潤養生期間の短い供試体ほど圧縮強度が小さくなる傾向にあった。ただし、図-3の中性化深さと圧縮強度の分布を比較すると、養生条件の違いによる差は圧縮強度よりも中性化深さで大きくなる傾向にあった。中性化抵抗性は供試体表層のコンクリートの品質の影響を強く受けるが、圧縮強度は円柱供試体の断面全体の平均的な強度特性を示すため、養生の良否による影響が中性化深さで明確に現れたためと考えられる。

また、高炉スラグ微粉末を70%あるいはフライアッシュを30%混合した供試体に着目すると、早強セメントの使用は初期材齢の強度発現の改善に寄与したことが分かるが、材齢1年の圧縮強度の増加や暴露試験用供試体の中性化深さの抑制に与えた影響は必ずしも明確ではない。

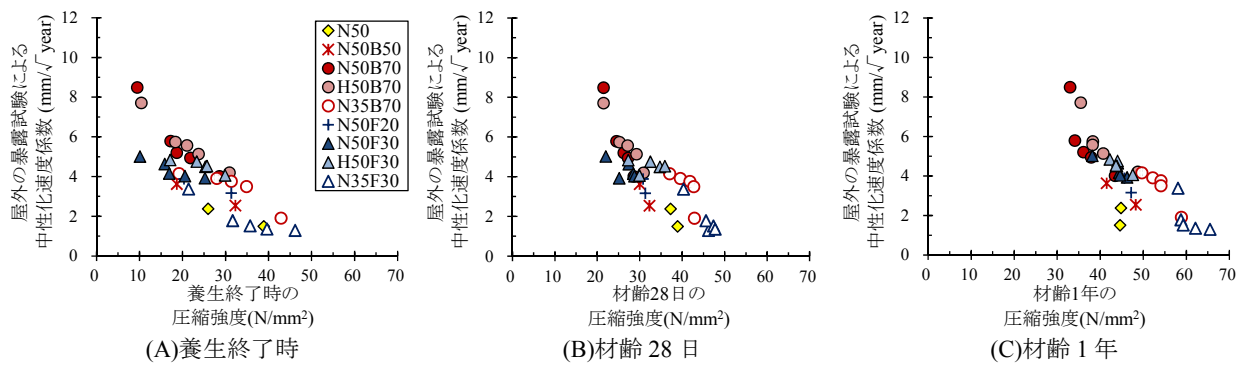


図-6 屋外の暴露試験による中性化速度係数と圧縮強度の関係

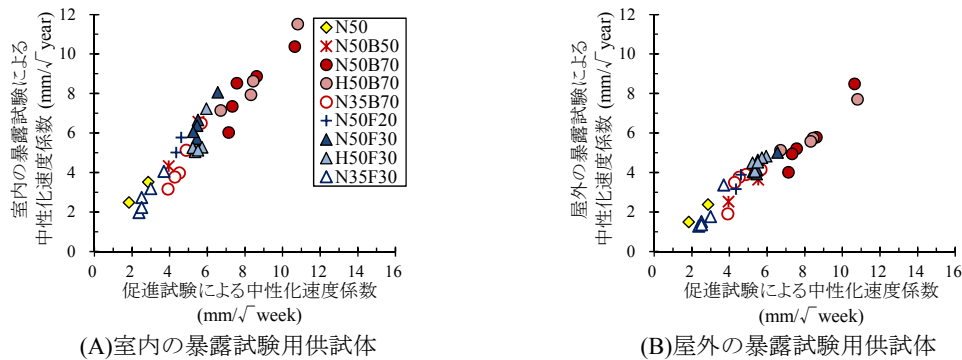


図-7 室内及び屋外の暴露試験と促進試験による中性化速度係数の関係

これらの改善には早強セメントの使用よりも W/B の低減が効果的であったことが読み取れる。

(2) 暴露試験と促進試験による中性化速度係数

暴露試験と促進試験で得られた中性化速度係数を図-4に示す。同図には、シリーズII 供試体の結果に加えて、表-1の13種類の供試体で得られた結果¹⁾も参考値として示した。養生条件の違いにかかわらず、室内に暴露した供試体の中性化速度係数は屋外に暴露した供試体よりも大きくなったが、いずれの暴露環境においても暴露試験と促進試験で得られた中性化速度係数は概ね比例関係にあったことが分かる。

また、シリーズIIと文献1)の結果を厳密に比較すると、両実験は同一の暴露期間で行われたが、室内に暴露した供試体の中性化速度係数は、シリーズIIよりも文献1)の結果で大きくなった。この原因は文献1)で使用した事務室(平均室温 23.9℃、平均湿度 41.8%、二酸化炭素濃度 0.0510%)¹⁾がシリーズIIで使用した実験室(表-5)と比較して、温度が高く、湿度が低く、二酸化炭素濃度が高く、中性化が進行しやすい環境条件であったためと思われる。

(3) 中性化深さの実測値と推定値

暴露試験で得られた中性化深さの実測値と促進試験¹⁾で得られた中性化速度係数から求めた中性化深さの推定値を図-5に示す。暴露試験と促進試験では様々な試験条件が異なるが、ここでは式(1)⁹⁾により二酸化炭素濃度の差のみを換算して中性化深さの推定値を計算した。

$$C = A_{ACT} \cdot \sqrt{CO2/CO2_{ACT}} \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

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)、 $CO2$ ：暴露試験の二酸化炭素濃度(屋外=0.0396%⁸⁾、室内=0.04388%(表-5に記した実測値))、 $CO2_{ACT}$ ：促進中性化試験の二酸化炭素濃度(=5%)、 t ：材齢(week)である。

中性化深さの推定値は、屋外に暴露した供試体では実測値と概ね同程度となったが、室内に暴露した供試体では実測値よりも小さくなる傾向にあった。室内の暴露試験は温度約20℃及び湿度約60%に管理された実験室で行われたため、促進試験の試験条件とは二酸化炭素濃度のみが大幅に異なる。既往の研究¹⁰⁾では、二酸化炭素濃度が異なる環境での中性化の進行は式(1)と同様に二酸化炭素濃度の平方根に比例するが、二酸化炭素濃度が特に高い環境ではコンクリートの品質が変化して二酸化炭素の拡散性が低下するため、中性化深さが上記の関係をj用いて得られる値よりも小さくなることが報告されている。これらを踏まえると、室内に暴露した供試体の中性化深さの推定値が実測値よりも小さくなった原因は、今回の促進試験では暴露試験よりも大幅に高い二酸化炭素濃度を採用しており、式(1)をj用いただけでは適切に中性化深さを推定できなかったためではないかと推察される。一方、屋外に暴露した供試体では降雨などによる水分供給の影響を受けて中性化の進行速度が低下したため、結果的に推定値と実測値が同程度になったのではないかと推察される。ただし、混和材を用いたコンクリートを対象として促進試験の結果から実環境の中性化深さを推定

する方法は必ずしも明確ではなく、今後の暴露試験で長期的な実験データを蓄積して検討を行う予定である。

(4) 配合間の中性化抵抗性と圧縮強度の差

屋外の暴露試験で得られた中性化速度係数と圧縮強度の関係を配合ごとに図-6に示す。中性化速度係数と圧縮強度は概ね線形関係にあり、圧縮強度が大きいほど中性化速度係数が小さくなった。いずれの配合においても、脱型後の湿潤養生期間を長くするほど中性化抵抗性の向上と圧縮強度の増加が得られたためと考えられる。ただし、圧縮強度が同程度で配合の異なる供試体同士の中性化速度係数を比較すると、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った。また、圧縮強度試験の実施材齢が遅くなると、ポルトランドセメント単味の供試体と混和材を用いた供試体の実験値が乖離した。混和材を用いた供試体では長期的な強度発現が著しく、ポルトランドセメント単味の供試体よりも圧縮強度が大きくなった供試体が多く存在したが、混和材を用いた供試体の中性化速度係数がポルトランドセメント単味の供試体よりも大きくなる傾向にあったためと考えられる。従って、圧縮強度を指標とすることで初期材齢の養生条件の異なる供試体の中性化抵抗性の差を定性的に評価できるが、混和材の混合率が大幅に異なる供試体同士では圧縮強度と中性化速度係数の関係が必ずしも一致しない可能性がある点には注意が必要と考えられる。

室内及び屋外の暴露試験と促進試験¹⁾で得られた中性化速度係数の関係を図-7に示す。両試験で得られた中性化速度係数は概ね比例関係にあり、配合間の中性化抵抗性の大小関係もほぼ一致した。このため、促進試験により中性化抵抗性を直接的に評価することで、混和材を用いたコンクリートの中性化抵抗性を的確に評価できると考えられる。ただし、促進試験の結果を用いて実環境の中性化深さを推定する際には、前述したように、暴露環境や促進環境の条件の違いによって推定精度に差が生じる可能性がある点に十分に留意する必要がある。

4. 結論

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 雨掛かりのある屋外では、混和材の使用有無にかかわらず、中性化抵抗性が長期的に向上したが、同一水結合材比の供試体同士では、混和材の混合率の高い供試体で中性化抵抗性が低くなる傾向にあった。
- 2) 室内及び屋外の暴露環境の違いにかかわらず、脱型後の湿潤養生期間の短い供試体ほど暴露約20ヶ月後の中性化深さが大きくなった。また、初期材齢の養生条件の違いによる中性化抵抗性の差は、屋外よりも室内に暴露した供試体で顕著に表れた。
- 3) 初期材齢の養生条件や配合の異なる供試体の中性化

抵抗性の差は、圧縮強度よりも促進中性化試験で得られた中性化速度係数との適合性が高かった。

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。高炉スラグ微粉末は鐵鋼スラグ協会、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。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。

参考文献

- 1) 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
- 2) 鶴田孝司, 佐藤隆恒, 上原元樹, 松田芳範: 高炉セメントコンクリートの中性化速度に及ぼす促進中性化条件の影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.13, pp.447-452, 2013
- 3) 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
- 4) 林瑞紀, 兼松学, 百瀬晴基, 白石聖: 高炉セメントコンクリートの中性化評価に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.856-861, 2014
- 5) 豊村恵理, 伊代田岳史: 養生条件が中性化速度式に及ぼす影響と評価方法の検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.11, pp.401-406, 2011
- 6) 檀康弘, 伊代田岳史, 大塚勇介, 佐川康貴, 濱田秀則: 高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの養生条件と耐久性の関係, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.4, pp.431-441, 2009
- 7) 気象庁ホームページ: 気象統計情報, <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 魚本健人: コンクリート構造物のマテリアルデザイン, オーム社, pp.118-137, 2007