

論文 混和材を大量に使用したコンクリートへの硝酸塩の添加による中性化抑制効果の検討

荻野 正貴*1・大脇 英司*2・岡本 礼子*3・宮原 茂禎*4

要旨： 混和材を大量に使用したコンクリートは CO₂ 排出量の削減に有用であるが、通常のコンクリートと比較して中性化速度係数が大きいという課題がある。複数の硝酸塩を用意し、混和材を大量に使用したコンクリートに添加した際の中性化抑制効果を検討した。促進環境では、硝酸カルシウムの添加により中性化速度係数は無添加時の 35～40%に低減され、通常のコンクリートと同等以下となった。約 3.8 年間の実環境での曝露試験においても同様に中性化抑制効果が得られることを確認した。

キーワード： コンクリート, 低炭素, 混和材, 中性化, 抑制, 硝酸塩

1. はじめに

近年、コンクリートに関わる温暖化ガスの排出抑制を目的に、ポルトランドセメントを混和材で置換したコンクリートが適用されている。一般にはグリーン購入法(国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律：2000年制定)で指定される高炉セメント B 種(置換率：30～60%)を用いたコンクリート(以下、BB コンクリート)が適用されるが、混和材の置換率をさらに高め 70%以上とした“混和材を大量に使用したコンクリート”の検討も進み、設計・施工指針等が公開されている¹⁾²⁾。

混和材を大量に使用したコンクリートは温暖化ガスの主成分である CO₂ の排出削減に加え、塩化物イオンの拡散係数が小さいなどの長所があるが、中性化速度係数が通常のコンクリートより大きいとの留意点もある¹⁾。設計・施工指針(案)¹⁾によれば中性化速度係数： α_p は式(1)で推定できる。ポルトランドセメントを混和材で置換すると中性化速度係数が大きくなる²⁾ことが分かる。

$$\alpha_p = 3.57 + 9.0 \cdot W / (C + k \cdot A_d) \quad (1)$$

ここに、 W ：単位水量、 C ：単位セメント量、 A_d ：単位混和材量、 k ：混和材の種類により定まる定数。既往の混和材を大量に使用したコンクリート²⁾では、 $k=0.3$ ¹⁾。

著者らは混和材を大量に使用したコンクリートとして、高炉スラグ微粉末をカルシウム系の刺激材で硬化させてポルトランドセメントの使用量を“ゼロ”とした環境配慮コンクリートを開発した³⁾。CO₂ 排出量は同程度の強度(呼び強度 24N/mm²)のポルトランドセメントのみを用いたコンクリートの約 1/4 である。CO₂ の排出削減を目的とした同程度の強度の BB コンクリートと比べると、フレッシュ性状や力学性状は同等であるが、中性化速度係数は、促進環境の場合、約 1.5 倍と大きい³⁾。

コンクリートの水セメント比の低減は、中性化抑制する単純な方法のひとつである⁴⁾。ただし、混和材を大量に使用したコンクリートは通常のコンクリートと比して水セメント比が低いことが多く、さらなる低減による施工性の低下等が懸念される。また、水セメント比の低減のため単位結合材量を増加すると CO₂ 排出量の増加が懸念される。このため、水セメント比を低減せずに中性化を抑制する手法の開発が望まれる。

雨がかりのある実環境では、高炉スラグを使用したコンクリートと普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの中性化深さの差は、促進中性化環境で比較した場合より小さいとの報告がある⁵⁾。また、実環境では水酸化カルシウム(以下 CH)が炭酸化した後にケイ酸カルシウム水和物(以下 C-S-H)が炭酸化するが、促進環境では CH と C-S-H が同時期に炭酸化し、未反応の CH を残して炭酸化が進むため、実環境と促進環境では中性化の機構が異なるとの報告もある⁶⁾。混和材を大量に使用したコンクリートにおいても、中性化の進行や機構が実環境と促進環境とで異なる可能性があり、両者にて評価する必要がある。

ここでは、混和材を大量に使用したコンクリートの中性化の抑制のため、硝酸塩の添加効果をペースト試験により検討した。結果を混和材の種類や量を一元的に示す指標 K を定めて整理した。さらに、硝酸塩を添加したコンクリートを約 3.8 年間、曝露して抑制効果を検証した。

2. 試験方法

2.1 ペースト試験

ポルトランドセメントを使用せず、最も混和材の使用割合の高いコンクリート(環境配慮コンクリート³⁾)の

*1 大成建設(株) 技術センター社会基盤技術研究部材工研究室 研究員 工修(正会員)

*2 大成建設(株) 技術センター社会基盤技術研究部材工研究室 主幹研究員 工博(正会員)

*3 大成建設(株) 技術センター社会基盤技術研究部材工研究室 副主任研究員(正会員)

*4 大成建設(株) 技術センター社会基盤技術研究部材工研究室 主任研究員 工博(正会員)

ペーストに5種類の硝酸塩を添加し、中性化抑制効果を評価した(ペースト試験1)。硝酸塩はCa(NO₃)₂・4H₂O、Mg(NO₃)₂・6H₂O、NH₄NO₃、NaNO₃、KNO₃とした。使用材料と配合を表-1に示す。高炉スラグ微粉末と刺激材に、硝酸イオン(NO₃⁻)が外割で2~3mass%となるように硝酸塩を添加した。ペーストの水粉体比は40%とし、Ca(NO₃)₂・4H₂O、Mg(NO₃)₂・6H₂Oの場合は結晶水の量を練混ぜ水から減じた。

粉体に水道水を加えて約3分間、手で練り混ぜ、φ30×50mmの円筒型枠に打ち込んで20°Cで封かん養生した。材齢28日で脱型し、温度20°C、R.H.60%でさらに7日間、保管した。供試体の打込み面ではない底面を曝露面とし、他をアルミニウムテープで被覆した。温度20°C、R.H.60%、CO₂濃度5%で促進中性化試験を行い、試験材齢28日、56日で試験体を割裂し、1%フェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化深さを測定した。6か所の平均値を促進中性化深さとした。

次に、ペースト試験1の結果から硝酸塩をCa(NO₃)₂・4H₂Oとし、添加率をNO₃換算で0.5、1.0、2.0mass%として、5種の混和材を大量に使用したコンクリートを中心に、9配合についてペーストに対する添加効果を評価した(ペースト試験2)。ペーストの配合は既往の研究²⁾を参考にした。使用材料と配合を表-2に示す。これらの促進中性化深さをペースト試験1と同様に求めた。

2.2 コンクリートを用いた屋外曝露試験

ペースト試験の結果を参考に、硝酸カルシウムを主成分とする市販のコンクリート用化学混和剤を中性化抑制剤として環境配慮コンクリートに添加した(表-3)。コン

表-1 ペースト試験1の配合

配合名及び 添加した 硝酸塩	水粉体比 (mass%)	粉体の構成 (mass%)		
		BFS	St	硝酸塩
比較用無添加	40.0	77.2	22.8	—
Ca(NO ₃) ₂ ・4H ₂ O	38.9			3.76
Mg(NO ₃) ₂ ・6H ₂ O	36.4			6.50
NH ₄ NO ₃	40.0			3.76
NaNO ₃	40.0			3.76
KNO ₃	40.0			3.76

BFS: 高炉スラグ微粉末, JIS A 6206, 無水セッコウ 2.1%添加, 密度 2.89 g/cm³, ブレーン値 4460cm²/g

St: 刺激材, 以下の材料で構成³⁾

- ・膨張材: JIS A 6202, 石灰系, 密度 3.14g/cm³, ブレーン値 3500cm²/g
- ・消石灰: JIS R 9001, 密度 2.20g/cm³, 600μm 篩全通, 150μm 篩上 ≤ 5%
- ・石灰石微粉末: JIS A 5008, 密度 2.65g/cm³, 75μm 篩 80%通過, CaCO₃含有量 ≥ 97.5%

硝酸塩: いずれも特級試薬

クリートは容量50Lの水平2軸強制練りミキサーで練り混ぜた。フレッシュ性状の目標値はスランプ 15±2.5cm, 空気量 6.0±1.5% (凍結融解抵抗性向上のため通常よりも高くした³⁾)とし、これを満足するよう Ad-1~2の量を調整した。混練した後、φ100×200mmの円筒または100×100×400mmの直方体の型枠に打ち込んだ。材齢3日まで20°Cで封かん養生して脱型し、表-4に示す2種類の方法で養生を継続した。“水中養生”は材齢28日まで20°Cの水中で養生し、“湿潤7日養生”は20°Cの室内にて湿らせた養生マットで材齢7日まで覆った後、20°C、

表-2 ペースト試験2の配合

配合	種別	水	結合材(Stを用いる場合は粉体)					Ca(NO ₃) ₂ ・4H ₂ O	
			ポルトランドセメント:PC		高炉セメント B種: BB	混和材			
			普通	早強		高炉スラグ微粉末: BFS ^{a,b}	その他		
1	混和材を大量に使用した コンクリート	PC=0 ^{**}	40.0	—	—	—	77.2 ^a	St:22.8	0, 0.94, 1.88, 3.76
2		PC=10	42.5	—	10.0	—	85.0 ^b	SF:5.00	0, 3.76
3		PC=25	42.0	25.0	—	—	65.0 ^b	SF:10.0	0, 3.76
4		PC=25	40.5	25.0	—	—	45.0 ^b	FA:30.0	0, 3.76
5		PC=32.7	46.7	32.7	—	—	60.8 ^b	An:6.50	0, 3.76
6	高炉セメントC種相当	PC=30	55.0	30.0	—	—	70.0 ^a	—	0, 3.76
7	フライアッシュセメントC種相当	PC=70	55.0	70.0	—	—	—	FA:30.0	0, 3.76
8	高炉セメントB種	PC=約60	55.0	—	—	100	—	—	0, 3.76
9	普通ポルトランドセメント	PC=100	55.0	100	—	—	—	—	0, 3.76

※: 結合材(または粉体)中のPCの割合

- ・普通ポルトランドセメント: JIS R 5210, 密度 3.16g/cm³, 比表面積 3300cm²/g
- ・早強ポルトランドセメント: JIS R 5210, 密度 3.14g/cm³, 比表面積 4560cm²/g
- ・BB: 高炉セメント B種, JIS R 5211, 密度 3.04g/cm³, 比表面積 3830cm²/g
- ・BFS^a: 高炉スラグ微粉末: JIS A 6206, 無水セッコウ 2.1%添加, 密度 2.89g/cm³, 比表面積 4460cm²/g
- ・BFS^b: 高炉スラグ微粉末: JIS A 6206, セッコウ無添加, 密度 2.90g/cm³, 比表面積 4500cm²/g
- ・St: 刺激材, 膨張材・消石灰・石灰石微粉末の混合物, 表-1の注を参照
- ・SF: シリカフューム, JIS A 6207, 密度 2.25g/cm³, 比表面積 16.4m²/g
- ・FA: フライアッシュ, JIS A 6201, 密度 2.30g/cm³, 比表面積 4280cm²/g
- ・An: 無水セッコウ, JIS R 9151, 密度 2.90g/cm³, 比表面積 3630cm²/g

表-3 コンクリート試験配合

配合名	スランプ (cm)	空気量 ^{※1} (%)	細骨材率 (%)	水粉体比 (%)	単体量 (kg/m ³)								
					水	粉体 ^{※2} : P			骨材		化学混和剤		
						W	BFS ^a	St	BB	S	G	中性化抑制剤	Ad-1
比較用無添加	15±2.5	6.0±1.5	43.3	35.4	155	333	98.7	—	695	958	—	P×1.0%	—
抑制剤添加	15±2.5	6.0±1.5	43.3	35.4	155	333	98.7	—	695	958	P×8.3%	P×1.25%	—
比較用 BB	15±2.5	4.5±1.5	43.0	55.0	160	—	—	291	770	1060	—	—	P×0.2%

※1：凍害抵抗性向上のため空気量を 6.0±1.5% とした³⁾。 ※2：各記号は表-2 を参照。

S：砕砂，JIS A 5005，表乾密度 2.56g/cm³，吸水率 2.81%，粗粒率 2.57

G：碎石，JIS A 5005，碎石 2005，表乾密度 2.66g/cm³，吸水率 0.79%，粗粒率 6.56

中性化抑制剤：JIS A 6204，硝酸塩を主成分 (NO₃⁻ : 24%) とし，密度 1.41~1.45 g/cm³，塩化物イオン量 0.01%

Ad-1：JIS A 6204，ポリカルボン酸エーテル系化合物と変性リグニンスルホン酸化合物=オキシカルボン酸化合物の複合体の混合物

Ad-2：JIS A 6204，リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体

表-4 中性化試験前の養生方法

養生方法	材齢(日)				
	0~2	3	~7	~28	~56
水中養生	20℃ 封かん	脱型	20℃水中		20℃ R.H.60%
湿潤 7 日 養生			養生 マット	20℃ R.H.60%	



写真-1 曝露試験の状況

R.H.60%で材齢 28 日まで気中養生した。

促進中性化試験は JIS A 1153 に準拠した。水中養生または湿潤 7 日養生した角柱供試体を 20℃，R.H.60%にて材齢 56 日まで静置した後，10×40cm の 2 つの側面を曝露面とし，他の面をエポキシ樹脂で被覆した。20℃，R.H.60%，CO₂ 濃度 5% の環境で促進試験を実施した。試験材齢 7，28，56，91 日に供試体を切断し，1%フェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化深さを JIS A 1152 に準拠して測定した。

曝露試験は神奈川県横浜市のある屋外で行った。促進試験の場合と同様に表面を被覆した角柱供試体を各配合 2 体ずつ，曝露面を鉛直にして約 3.8 年間，曝露した (写真-1)。試験中の年平均降水量は 1777mm/年であった⁷⁾。曝露後，概ね同じ大きさの 2 体に割裂し，促進試験と同様に中性化深さを測定した。また，水中養生した供試体と曝露試験後の供試体の細孔径分布と空隙率 (空隙径 3nm~340μm) を水銀圧入式ポロシメーターで求めた。未中性化部から約 3mm 角のモルタルを分取して約 1 日間，アセトンに浸漬した後，約 10 日間，D-dry 法で乾燥して試料とした。細孔径分布は見掛け体積に対する空隙量で表し，各 2 試料の平均値を示した。

3. 試験結果と考察

3.1 硝酸塩の種類による添加効果

ペースト試験 1 の結果，中性化深さの進行は従来と同様に試験期間の平方根に比例した。比例定数を中性化速度係数とし，無添加の場合に対する添加時の比率 ([化合

物添加時の中性化速度係数] / [無添加時の中性化速度係数]) を図-1 に示す。また，中性化速度係数の比率が最も小さく抑制効果が顕著であった Mg(NO₃)₂・6H₂O と，効果が認められなかった KNO₃ について写真-2 に示す。

Mg(NO₃)₂・6H₂O や Ca(NO₃)₂・4H₂O を添加した配合の中性化速度係数は無添加時の 34~61% であり，高い中性化抑制効果を示した。NH₄NO₃，NaNO₃ の場合には中性化速度係数の比率が 1 を下回り，効果は確認できたが顕著ではなかった。KNO₃ では抑制効果がみられなかった。同程度の硝酸イオンの添加量であっても陽イオンの違い

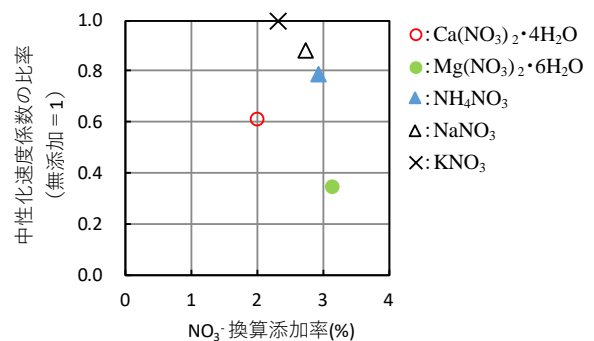
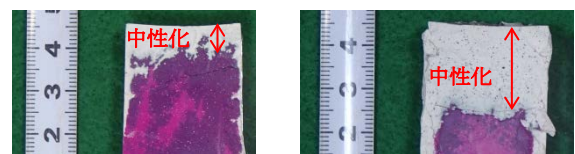


図-1 硝酸イオン添加率と中性化抑制効果の関係



a) 配合名 : Mg(NO₃)₂・6H₂O

b) 配合名 : KNO₃

写真-2 ペースト試験 1 の状況 (上側が曝露面)

により中性化抑制効果の程度が異なった。

3.2 混和材を大量に使用したコンクリートへの添加効果

混和材を大量に使用したコンクリートへの硝酸塩の添加効果を粉体構成に着目して検討した。粉体構成を高炉スラグ微粉末 (BFS) (無水セッコウ (An) が含まれる場合があるため An と合算) と、フライアッシュやシリカフェーム等のシリカ質混和材 (ポルトランドセメント, BFS, An 以外の成分) に分けて整理した。ペースト試験 2 の結果を図-2 に示す。混和材を多く用いた配合 1~7 では中性化の抑制効果がみられ (図-2: ○), 混和材の使用量の少ない配合 8 および配合 9 は抑制効果がみられなかった (図-2: ×)。抑制効果の有無は図-2 中の点線を境界とし区分できた。なお、この点線は式(2)に $K=1$ を当てはめて表現できる。

混和材を大量に使用したコンクリートは混和材の種類や量が異なるため、セメント置換率などの単純な指標で粉体構成を表現できない。図-2 の点線を基準として、この点線からの各配合の距離 K を式(2)のように定め、この K を指標として粉体構成を一元的に示すことを試みた。

$$\frac{[BFS+An]}{\alpha} + \frac{[100-(セメント+BFS+An)]}{\beta} = K \quad (2)$$

ここに、BFS+An: 高炉スラグ微粉末と無水セッコウの割合を合算。セメント:ポルトランドセメントの割合。なお、“割合”とは粉体に占める質量百分率。 α, β : 図-2 の点線から読み取った値 ($\alpha = 67.3, \beta = 30.0$)。

ペースト試験 2 の各配合は図-2 に示すように固有の K を示す。この指標 K を用いて中性化抑制効果を整理した。結果を図-3 に示す。 K が大きいほど中性化抑制効果が大きくなる傾向にあり、粉体構成の特徴と中性化抑制効果への影響を K で整理できると分かった。

各配合の中性化抑制に必要な硝酸イオンの添加率を推定するために、ペースト試験 2 の結果を指標 K と NO_3^- の添加率で整理した結果を図-4 に示す。硝酸塩の添加効果の有無は図中の点線を境界として示すことができた。コンクリートの粉体構成に応じた最低限必要となる添加率を硝酸イオン量で代表して推定できる可能性が示された。低炭素社会の実現に向けて混和材を大量に使用したコンクリートを展開していく際の、重要な課題のひとつを解決する道筋が示されたと考える。

3.3 曝露試験での中性化抑制効果の評価

ペースト試験 1 により $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ や $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ において高い抑制効果が得られることが分かった。コンクリートへの添加を考慮した場合、 $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ は工業製品としての流通が限られるようであったが、 $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ は化学混和剤に主成分として含まれている場合があった。コンクリート用化学混和剤として JIS を満たした製品でもあり、他の性状への影響など、実用

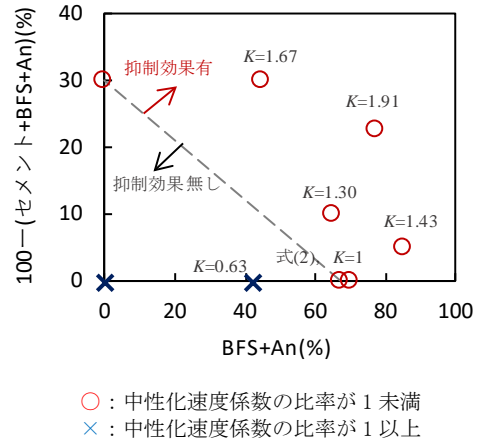


図-2 硫酸塩の中性化抑制効果と混和材の使用量 (NO_3^- 換算添加率 2.0%)

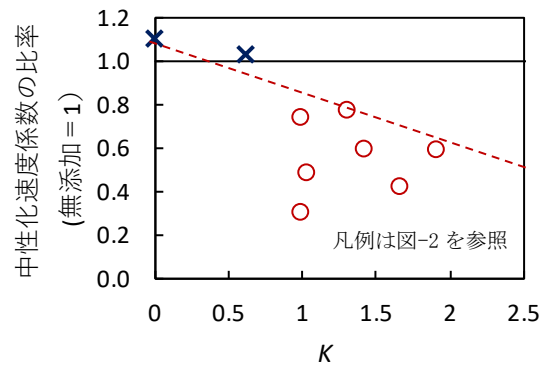


図-3 粉体構成の指標 K と硝酸塩の中性化抑制効果 (NO_3^- 換算添加率 2.0%)

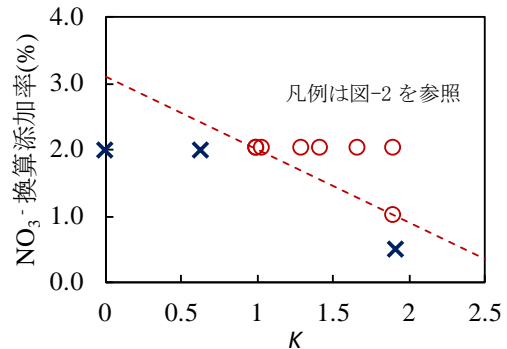


図-4 中性化抑制に必要な硝酸イオン添加率

化に際して検討の労力を省略できることが期待される。ここでは、硝酸カルシウムを NO_3^- として 24% 含む化学混和剤を用い、環境配慮コンクリート ($K=1.91$) へ添加した場合の抑制効果を確認した。ペースト試験 1 の結果を参考に、 NO_3^- の添加率は粉体に対して 2mass% とした。

先に示した使用材料および配合 (表-3) で硝酸カルシウムを含有する化学混和剤を用いたコンクリート (配合名: 抑制剤添加) を作製し、促進中性化試験を行った。混和材を大量に使用したコンクリートは初期の養生条件の影響を受けやすいため²⁾、水中養生と湿潤 7 日養生を行い (表-4)、検討した。結果を図-5 に示す。抑制剤添

加の中性化深さは試験期間の平方根と線形関係にあり、通常のコンクリートと同様に \sqrt{t} 則に従っていた。抑制剤添加はいずれの養生方法においても中性化抑制効果を有し、中性化速度係数の比率は比較用無添加⁸⁾に対して0.35~0.40であり、比較用BBに対して0.60~0.61であった。ペースト試験の結果をコンクリートに応用し、さらに硝酸塩を試薬から化学混和剤に変更した場合においても、中性化抑制効果を得ることができた。

第1章に示したように、混和材を用いたコンクリートでは促進中性化試験の結果と実環境（供用環境）における曝露試験の結果が異なることがあるため、約3.8年間の曝露試験を行い、中性化抑制効果を確認した。なお、回収した供試体の外観には、いずれもひび割れなどの変状は観察されなかった。

混和材を大量に使用したコンクリートの供用環境における中性化速度係数： α_p は、促進試験による中性化速度係数： α_{acc} と式(3)を用いて推定できることが当該コンクリートの設計・施工指針（案）⁹⁾に示されている。

$$\alpha_p = \alpha_{acc} \cdot \sqrt{[\text{CO}_2] / [\text{CO}_2]_{acc}} \quad (3)$$

ここに、 α_p ：供用環境における中性化速度係数の推定値（mm/ $\sqrt{\text{年}}$ ）， α_{acc} ：促進環境における中性化速度係数の測定値（mm/ $\sqrt{\text{年}}$ ）， $[\text{CO}_2]$ ：供用環境の CO_2 濃度（%）， $[\text{CO}_2]_{acc}$ ：促進環境の CO_2 濃度（%）である。

日本国内3か所の観測点における CO_2 濃度が0.0408~0.0411%（2017年）であったことから⁹⁾、曝露地点の CO_2 濃度を0.041%と仮定し、促進試験の結果と式(3)を用いて曝露試験における中性化速度係数を推定して曝露試験における測定値と比較した（図-6）。曝露試験における抑制剤添加の中性化速度係数は2.1~2.3mm/ $\sqrt{\text{年}}$ であり、養生方法によらず促進試験から推定した値と良い一致を示した。抑制剤を添加した場合において、式(3)が適用できることが確認できた。また、既報の比較用無添加の中性化速度係数は、曝露地点の降水量などの気象条件の違いにより3.2~6.4mm/ $\sqrt{\text{年}}$ であったことから⁸⁾、無添加に対する添加効果を中性化速度係数の比率で表すと0.34~0.63となった。促進試験において0.35~0.40であったことと大きく乖離することなく、曝露試験においても中性化の抑制効果が確認された。比較用BBの中性化速度係数は曝露試験の場合より促進試験の場合の方が大きくなり、これは既往の報告と同様であった⁵⁾。抑制剤添加の中性化速度係数は、促進試験においては比較用BBより小さかったが、比較用BBは曝露試験において中性化速度係数が小さくなる傾向にあるため、曝露試験においては抑制剤添加と比較用BBの中性化速度定数は同程度の値となった。中性化の進行の様子を写真-3に示す。すなわち、抑制剤添加は、実環境においてもグリーン購入法の指定品目であるコンクリートと比較して十分な中性化

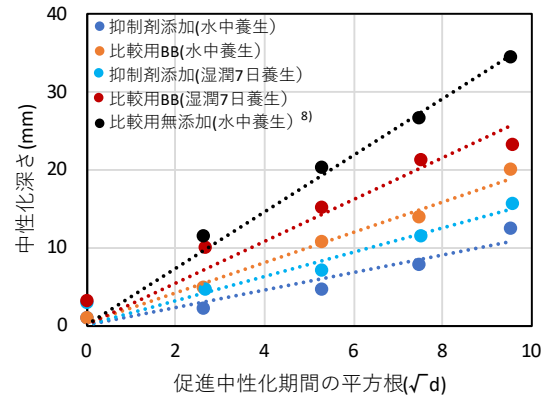


図-5 コンクリートを用いた促進中性化試験結果

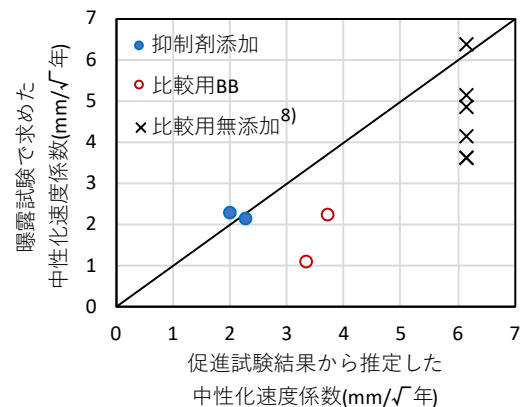


図-6 促進試験と曝露試験の中性化速度の関係（比較用無添加は曝露期間20か月⁸⁾）

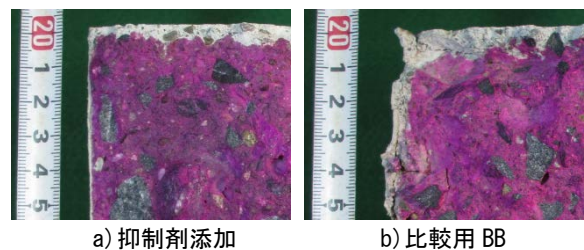


写真-3 曝露3.8年後の中性化深さ（湿潤7日養生，上側が曝露面）

抵抗性を有することが確認できた。

抑制剤添加，比較用BB，比較用無添加の細孔径分布を図-7，図-8に示す。材齢28日，曝露期間約3.8年の試料とも未中性化部の測定結果である。材齢28日の比較用無添加の細孔径分布は，材齢28日の比較用BBと比較して空隙径が0.01~0.05 μm の空隙量が大きくなり，異なる分布を示した。一方，材齢28日の抑制剤添加の細孔径分布は，材齢28日の比較用BBとよく類似していた。比較用無添加と比較用BBの細孔径分布が異なるのに対し，抑制剤を添加することにより細孔径分布が比較用BBに類似した。この空隙構造の変化が中性化に影響した可能性がある。また，曝露3.8年後の抑制剤添加の細孔径分布も比較用BBと類似しており，材齢の進捗とともに空

隙径が $0.01 \sim 0.05 \mu\text{m}$ の空隙が顕著に減少した。

一方、既往の文献では中性化速度係数と空隙径 $0.15 \mu\text{m} \sim 15 \mu\text{m}$ の空隙量に強い相関が認められている¹⁰⁾。比較用無添加と抑制剤添加の空隙径 $0.15 \mu\text{m} \sim 15 \mu\text{m}$ の空隙量には顕著な差がみられないことから、空隙構造のみで中性化の抑制機構を整理することは難しい。中性化の抑制機構としては細孔溶液の pH などの影響も報告されており¹¹⁾、硝酸塩の添加による中性化効果についてはさらに検討する必要がある。

4. まとめ

混和材を大量に使用したコンクリートの中性化抑制手法について検討した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 硝酸塩の添加により混和材を大量に使用したコンクリートの中性化の進行を抑制できた。硝酸マグネシウムや硝酸カルシウムの添加が効果的であった。
- 2) 多様な粉体構成の混和材を大量に使用したコンクリートについて、新たに指標 K を提案し、粉体構成が一元的に整理できる可能性を示した。また、これを用いて配合毎に中性化の抑制に必要な硝酸イオンの量を示すことができた。
- 3) 混和材を大量に使用したコンクリートに硝酸塩を主成分とする化学混和剤を添加して、高炉セメント B 種を用いたコンクリートと同程度まで中性化の進行を抑制できることを、約 3.8 年間の曝露試験で確認した。また、その効果は促進試験で推定できた。

参考文献

- 1) 土木学会：混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー152，土木学会，2018.9
- 2) 土木研究所ほか：低炭素型セメント結合材の利用に関する共同研究報告書（I），2016.1. <https://www.pwri.go.jp/team/imarrc/research/tech-info/co471.pdf>（閲覧日：2020年1月10日）
- 3) 岡本礼子，宮原茂禎，坂本淳，丸屋剛：高炉スラグ微粉末とカルシウム系刺激材を使用した環境配慮型コンクリートの物性について，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1981-1986，2013.7
- 4) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術[基礎編] '19，日本コンクリート工学会，pp.30-36，2019
- 5) 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.629-634，2010.6

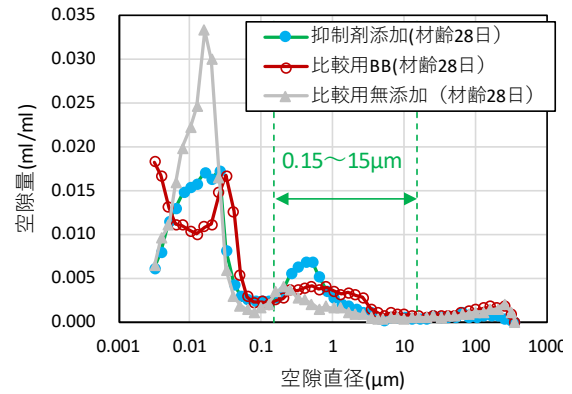


図-7 材齢 28 日の細孔径分布

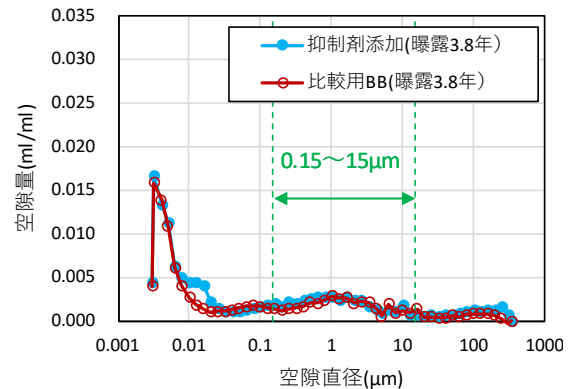


図-8 曝露 3.8 年後の細孔径分布

- 6) 伊代田岳史，中村絢也，後藤誠史：セメント硬化体の炭酸化機構の検討—実環境と促進環境の相違について—，セメント・コンクリート論文集，vol.72，No.1，pp.225-232，2019.3
- 7) 気象庁：過去の気象データ，年毎の値 https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/annually_s.php?prec_no=46&block_no=47670&year=&month=&day=&view=（閲覧日：2020年1月10日）
- 8) 宮原茂禎，荻野正貴，大脇英司，中村英佑：高炉スラグ微粉末を大量使用した環境配慮コンクリートの曝露試験および室内試験における耐久性，セメント・コンクリート論文集，vol.70，pp.443-449，2016
- 9) 気象庁：二酸化炭素濃度の年平均値 https://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/obs/co2_yearave.html（閲覧日：2020年1月10日）
- 10) 鄭載東，平井和喜，三橋博三：中性化速度に及ぼすコンクリートの調合及び細孔構造の影響に関する実験的研究，コンクリート工学論文集，No.1，pp.61-73，1990.1
- 11) 小林一輔：コンクリートの炭酸化に関する研究，土木学会論文集，No.433，V-15，pp.1-14，1991.