

報告 セメント種類, 水セメント比, 養生条件, 暴露環境がコンクリートの長期的な圧縮強度および物質の透過に対する抵抗性に及ぼす影響

網野 貴彦*1・岩波 光保*2・小林 雄一*3・ZHOU XINGJIAN*4

要旨: セメント種類, 水セメント比, 湿潤養生日数を変えたコンクリート供試体を室内および屋外大気中, 3%NaCl 水溶液中に 8 年間暴露し, 長期的な圧縮強度および塩化物イオン実効拡散係数に及ぼす影響を調査した。その結果, 湿潤養生日数を十分に設けた場合や, 95%RH の室内大気中または屋外や 3%NaCl 水溶液中に暴露した場合の材齢 8 年の圧縮強度は標準養生供試体の材齢 28 日圧縮強度を上回ったが, 60%RH の室内大気中暴露の圧縮強度は下回った。また, 塩化物イオン実効拡散係数は材齢の増加とともに減少傾向を示したが, 60%RH の室内大気中に暴露した混合セメントコンクリートでは逆に大きくなることを確認した。

キーワード: 圧縮強度, 塩化物イオン実効拡散係数, セメント種類, 水セメント比, 湿潤養生日数

1. はじめに

コンクリート標準示方書 [施工編]¹⁾では, コンクリートに要求される品質として, ワークビリティ, 強度発現性, 強度, ヤング係数, 劣化に対する抵抗性, 物質の透過に対する抵抗性, 水密性, 温度ひび割れに対する抵抗性, 施工や収縮等に関わる品質を挙げている。このうち, ワークビリティ, 強度発現性, 施工や収縮等に関わる品質は主に施工時に要求され, 水密性や温度ひび割れに対する抵抗性は適切な配合設計および施工によって確保できるとされている。すなわち, 長期的に要求される品質は, 強度, 劣化に対する抵抗性, 物質の透過に対する抵抗性と考えられる。また, 品質の変化に影響する要因には, 使用材料や配合, 養生条件等に加えて, 暴露環境が考えられる。特に, コンクリート標準示方書 [維持管理編]²⁾では, 水の作用の重要性が述べられている。

上記の背景から, 著者らは, セメント種類および水セメント比, 湿潤養生日数を変えたコンクリート供試体を種々の環境に暴露し, コンクリートの強度および物質の透過に対する抵抗性 (電気泳動試験に基づく塩化物イオンの実効拡散係数) を調査し, 既報 3)にて材齢 22 ヶ月 (約 2 年) までのデータを報告している。ここに, 材齢 8 年のデータを取得できたので, 本稿にて報告する。

2. 実験概要

2.1 検討シリーズ

本研究では, 次の 4 シリーズを設定した。

- ・シリーズ 1: セメント種類の影響
- ・シリーズ 2: 水セメント比の影響
- ・シリーズ 3: 湿潤養生期間の影響

- ・シリーズ 4: 暴露環境 (室内大気中湿度, 3%NaCl 水溶液浸せき, 屋外) の影響

本研究の検討ケースを表-1 に, コンクリートの配合 (使用材料を含む) を表-2 に示す。以下に各シリーズの概要を説明する。

(1) シリーズ 1: セメント種類の影響

シリーズ 1 では, 水セメント比 (以下, W/C) を 0.5 一定として, セメント種類を変化させた。セメントには普通ポルトランドセメント (以下, N), 高炉セメント B 種 (以下, BB), 低熱高炉セメント B 種 (以下, LBB) を使用した。コンクリートの打込みは温度 20°C, 相対湿度 60% の室内で行い, そのまま材齢 2 日まで封緘養生を行った。その後型枠を取り外し, N に対しては 3 日間, BB と LBB は 5 日間の標準養生を行い, 所定の試験材齢 (6 ヶ月, 22 ヶ月, 8 年) まで恒温恒湿室内 (20±1°C, 60±3%RH) に暴露した。また, 本シリーズでは, 上記と同じ手順で製作した供試体を用い, 標準養生終了後に 20°C 一定の 3%NaCl 水溶液中に浸せきさせたものも検討した。

(2) シリーズ 2: 水セメント比の影響

シリーズ 2 では, セメント種類 N に対して W/C=0.4, 0.5, 0.6 の 3 配合を検討した。コンクリートの打込み, 養生, 暴露環境等の条件はシリーズ 1 と同じである。

(3) シリーズ 3: 湿潤養生日数の影響

シリーズ 3 では, 表-1 に示すように, W/C=0.5 のセメント種類 N および BB の供試体に対して, 湿潤養生日数を変化させた。湿潤養生日数は, 文献 1) を参考に, N については, 5 日間 (型枠存置 2 日+標準養生 3 日) を中心に, 2 日間 (型枠存置 2 日+標準養生 0 日), 9 日間 (型枠存置 2 日+標準養生 7 日) を設定した。BB につ

*1 東亜建設工業 (株) 技術研究開発センター プロジェクトマネージャー 博士(工学) (正会員)

*2 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 教授 博士(工学) (正会員)

*3 東亜建設工業 (株) 技術研究開発センター 新材料・リニューアル技術グループ 主任研究員(正会員)

*4 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 土木工学コース

表-1 検討ケース

ケース名	配合名称 ※表-2 参照	検討条件			暴露条件				
		セメント 種類	W/C	湿潤養生 日数※1	室内大気中暴露		浸せき	屋外暴露	
					温度	相対 湿度			
N-01	N40	N	0.4	5	20℃	60%	—	—	
N-02						—	20℃-3%NaCl 水溶液	—	
N-03	60%		—			—			
N-04	95%		—			—			
N-05	—		20℃-3%NaCl 水溶液			—			
N-06	N50		0.5	9	—	—	—	※2	
N-07					—	—	—	—	
N-08			2	20℃	60%	—	—	—	
N-09	N60		0.6			5	—	—	—
N-10				—	20℃-3%NaCl 水溶液		—		
BB-03	BB50	BB	0.5	7	20℃	60%	—	—	
BB-05						—	20℃-3%NaCl 水溶液	—	
BB-07				11		60%	—	—	
BB-08				2			—	—	
LBB-03	LBB50		LBB	0.5	7	20℃	60%	—	—
LBB-05						20℃	—	20℃-3%NaCl 水溶液	—

※1 型枠存置日数2日間（封緘養生）と標準養生日数を合わせて、湿潤養生日数と定義している。

※2 東京都目黒区緑が丘の建物屋上に暴露（年平均気温16℃，年平均相対湿度70%）

表-2 コンクリート配合

配合 名称	配合条件					単体量 (kg/m ³)						圧縮強度 σ_{28} 標準養生供試体 材齢28日
	セメン ト種類	W/C	s/a (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W	C	S	G	Ad1	Ad2	
N40	N	0.4	41	8.0 (±2.5)	4.5 (±1.5)	169	423	698	1,039	2.54	2.54	53.1
N50		0.5	43			157	314	784	1,075	1.88	1.88	49.5
N60		0.6	45			155	258	844	1,067	1.55	1.55	38.2
BB50	BB	0.5	42	153	306	769	1,098	1.84	2.45	41.4		
LBB50	LBB	0.5	42	153	306	769	1,098	1.84	2.45	29.3		

※N：普通ポルトランドセメント（比重3.16），BB：高炉セメントB種（比重3.04），LBB：低熱高炉セメントB種（比重2.98），
W：上水道水，C：セメント，S：君津産山砂（表乾比重2.61），G：北海道上磯郡峯朗町産砕石2005（表乾比重2.70），
Ad1：AE減水剤標準形（I種），Ad2：AE剤（I種）

いては、7日間（型枠存置2日+標準養生5日）を中心に、2日間（型枠存置2日+標準養生0日）、11日間（型枠存置2日+標準養生9日）を設定した。なお、コンクリートの打込み、湿潤養生終了後の暴露環境は、シリーズ1と同様に20±1℃，60±3%RHとした。

(4) シリーズ4：暴露環境の影響

シリーズ4では、W/C=0.5のセメント種類Nの供試体に対し、室内大気中暴露環境の違い（温度20℃，相対湿度95%），屋外暴露のケースを追加し、シリーズ1の室内大気中暴露（60%RH）や3%NaCl水溶液浸せきの結果と比較した。屋外暴露は風雨や気温変化を受ける建物（東京都目黒区緑が丘）の屋上で行った。なお、コンクリートの打込み、養生等の条件はシリーズ1と同じである。

2.2 試験体および試験項目

(1) 圧縮強度

圧縮強度用供試体は直径100mm×高さ200mmの円柱とし、各ケース、各材齢に対して3体作製した。圧縮試

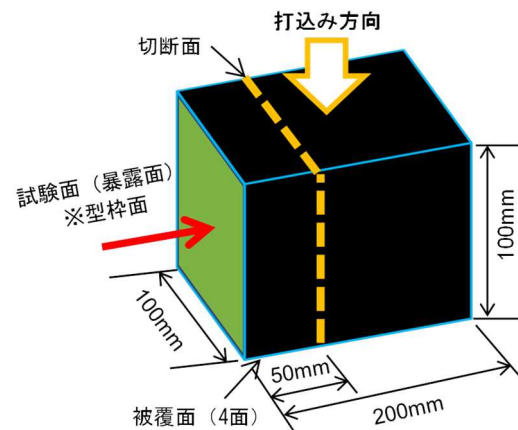


図-1 塩化物イオン浸透抵抗性用供試体

験は、JISA1108に準じて、材齢6ヶ月，22ヶ月，8年が経過した時点で行った。なお，3体の供試体の圧縮強度の変動係数は8%程度のものもあったが（圧縮強度の平均値50N/mm²に対し標準偏差4N/mm²程度），以降に示す圧縮強度は3体の試験値の平均値で示している。

(2) 塩化物イオンの実効拡散係数

塩化物イオン浸透抵抗性用供試体を図-1に示す。全てのシリーズで寸法を100mm×100mm×200mmと統一し、コンクリート打込み方向に対して側面の型枠面2面を試験面(暴露面)とした。なお供試体は、表-1に示す各ケースに対して2体ずつ作製し、型枠取外し後に試験面以外の4面をエポキシ樹脂にて被覆した。圧縮試験と同様、材齢6ヶ月、22ヶ月、8年で供試体を回収し、図-1に示すように暴露面から50mmの位置で切断した厚さ50mmの試験片を用いて電気泳動試験(JSCE-G 571)を行った。なお、以降に示す塩化物イオン実効拡散係数(以下、実効拡散係数)は2つの供試体の試験片で得られた試験値の平均値で示している。

(3) 中性化深さ

W/C=0.5 かつ室内大気中暴露(20±1℃, 60±3%RH)を行った材齢8年のN-03, N-07, N-08, BB-03, BB-07, BB-08, LBB-03においては、電気泳動試験に供した試験片の側面を利用し、JIS A 1152に準じて暴露面からの中性化深さを測定した。

3. 実験結果

3.1 シリーズ1: セメント種類の影響

図-2に、シリーズ1における室内大気中暴露供試体(20℃, 60%RH)の圧縮強度および実効拡散係数の経時変化を示す。BB-03とLBBの圧縮強度は材齢によらず標準養生供試体(材齢28日)の圧縮強度とほぼ同じ値で推移したが、N-03は標準養生供試体よりも小さい値で推移した。一方、N-03の実効拡散係数は、材齢22ヶ月まではBB-03およびLBB-03よりも大きかったが、材齢8年においてBB-03とLBB-03よりも小さくなった。それに対し、LBBは材齢とともに実効拡散係数は増加し、BBはほとんど変化しない様子が伺えた。図-3に、材齢8年の中性化深さを示すが、いずれのセメント種類においても室内大気中暴露(20℃, 60%RH)により中性化が進行しており、特にBBやLBBの中性化深さが大きかった。文献4)では、20℃, 60%RH, CO₂濃度5%の促進中性化

環境下に暴露したコンクリート供試体を用いて NT BUILD 492⁵⁾に基づく塩化物イオン拡散係数を測定し、中性化した範囲では塩化物イオンの遮塩性はほとんど期

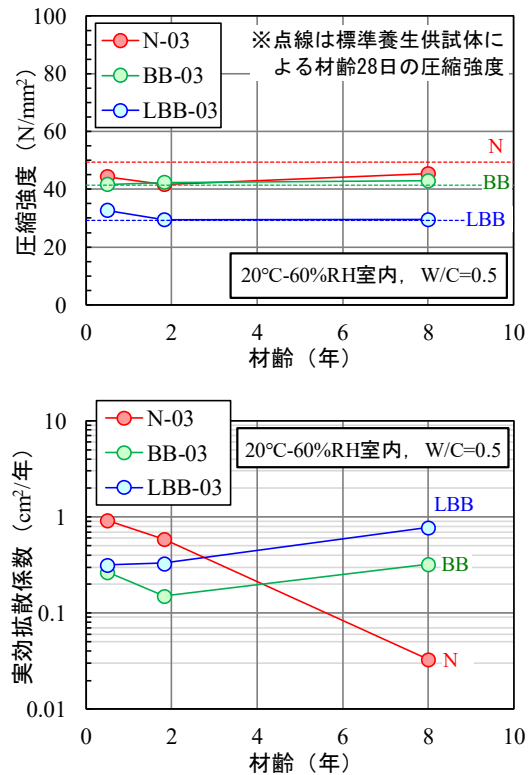


図-2 シリーズ1: 室内大気中暴露

(上: 圧縮強度, 下: 実効拡散係数の経時変化)

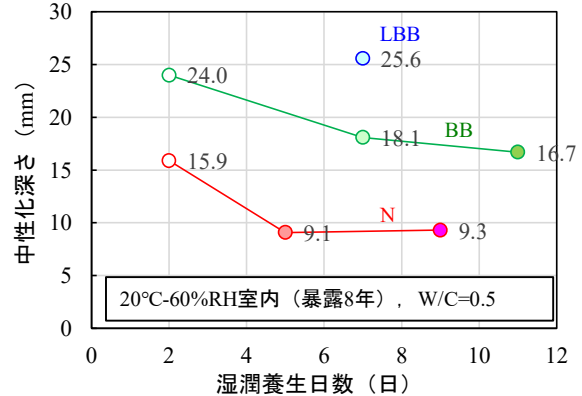


図-3 中性化深さと湿潤養生日数の関係(暴露8年)

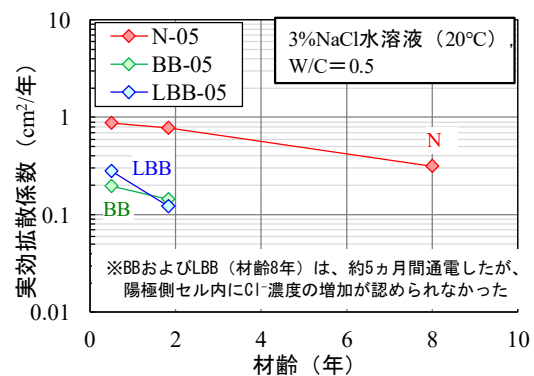
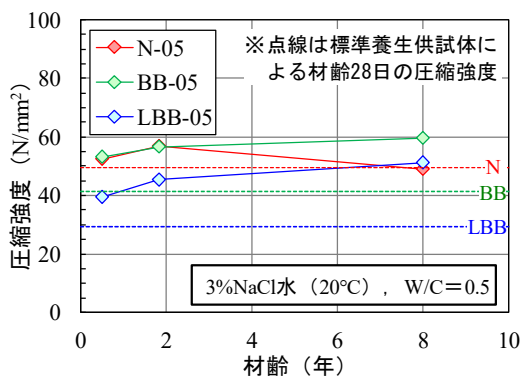


図-4 シリーズ1: 3%NaCl水溶液浸せき(左: 圧縮強度, 右: 実効拡散係数の経時変化)

待できないことを述べている。BB-03 と LBB-03 の材齢 8 年の実効拡散係数は中性化の影響を受けていると考えられる。

図-4 に、3%NaCl 水溶液浸せき供試体の圧縮強度および実効拡散係数の経時変化を示す。BB-05 と LBB-05 の圧縮強度は材齢とともに増加したが、N-05 は材齢 22 ヶ月から 8 年にかけて低下した。文献 6) では、海洋環境下にコンクリート供試体を約 20 年間暴露し、材齢 2 年頃から圧縮強度が低下したことを報告している。また、文献 7) では、X 線回折の結果に基づき、海水作用による長期的な強度低下の原因はエトリングイトの生成や水酸化カルシウムの溶出等によるものと考察している。そこで、材齢 8 年の圧縮試験後の供試体割裂面に 0.1N 硝酸銀水溶液を噴霧したところ、N-05 では割裂面全面に塩化物イオンが浸透していたが、BB-05 と LBB-05 では表層に留まっていることを確認した。これより、N-05 の圧縮強度の低下は塩化物イオンを含む水の内部への浸透が影響したものと推察された。一方、N-05 の実効拡散係数は材齢とともに低下しているが、その値は室内大気中暴露の場合よりも大きかった。それに対し、BB-05 および LBB-05 は、材齢 8 年の電気泳動試験において通電開始 5 カ月が経過しても陽極側セル内の塩化物イオン濃度の増加が確認されなかった。文献 8) では、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材を大量に用いたコンクリート等、遮塩性の高いコンクリートに対して電気泳動試験

等を適用した結果、試験期間に 1 年以上を要したことが報告されている。このことから、材齢 8 年の BB-05 および LBB-05 のコンクリートは長期間の塩水浸せきにより相当に緻密化している可能性が考えられた。以上の結果より、塩化物イオンを含む水が長期間作用する場合は、強度および遮塩性確保の観点から、高炉スラグ微粉末混合セメントの使用が有効であると考えられた。

3.2 シリーズ 2：水セメント比の影響

図-5 に、シリーズ 2 における室内大気中暴露供試体 (20°C, 60%RH) の圧縮強度および実効拡散係数の経時変化を示す。圧縮強度は W/C が小さいほど大きい、材齢とともに W/C の違いが見られなくなる様子も伺える。また、N-01 (W/C=0.4) および N-03 (W/C=0.5) の材齢 8 年の圧縮強度は、標準養生供試体による材齢 28 日の圧縮強度に達していない。このことは、低水セメント比であるほど、湿潤養生 5 日では設計強度を満足できない可能性があることを示唆している。一方、実効拡散係数は、N-09 (W/C=0.6) の材齢 22 ヶ月の結果を除いて、いずれの W/C においても材齢とともに減少する傾向を示した。

図-6 に、3%NaCl 水溶液浸せき供試体の圧縮強度および実効拡散係数の経時変化を示す。圧縮強度は、W/C が小さいほど大きい、室内大気中暴露の場合とは異なり、材齢が経過しても W/C の違いによる強度の差が小さくなる傾向は見られていない。ただし、N-05 (W/C=0.5) と N-09 (W/C=0.6) の圧縮強度は、材齢 22 ヶ月から 8 年

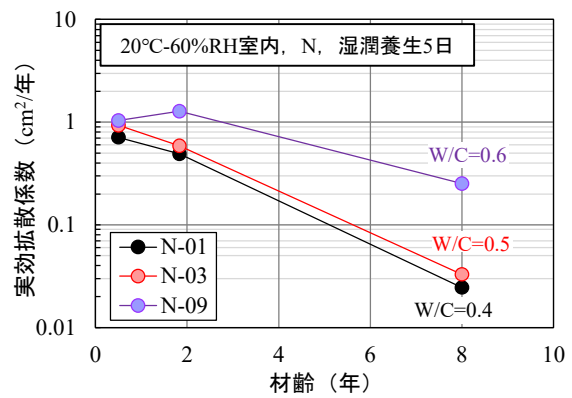
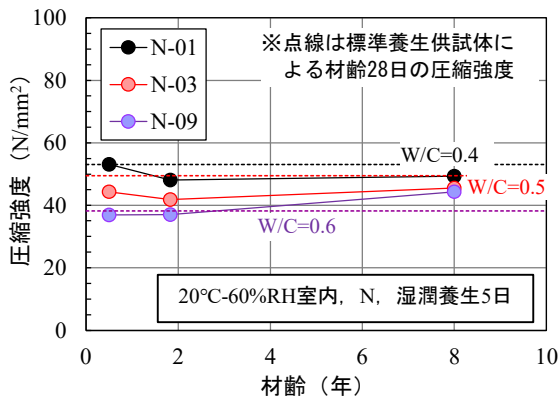


図-5 シリーズ 2：室内大気中暴露 (左：圧縮強度, 右：実効拡散係数の経時変化)

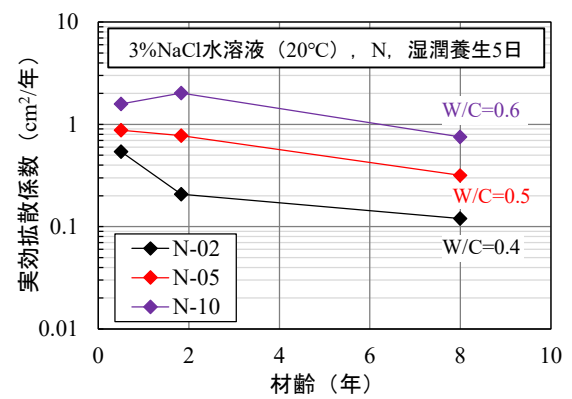
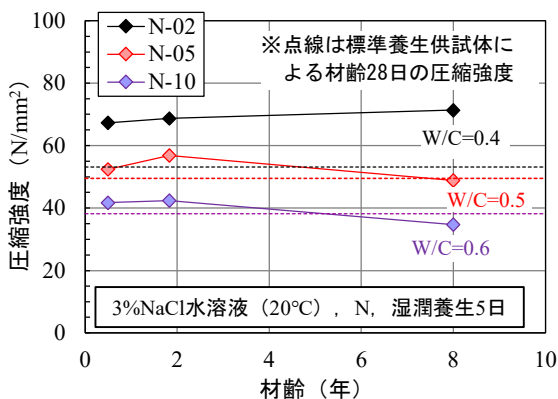


図-6 シリーズ 2：3%NaCl 水溶液浸せき (左：圧縮強度, 右：実効拡散係数の経時変化)

にかけて低下した。一方、実効拡散係数については、室内大気中暴露の場合と同様、材齢とともに小さくなるが、いずれの W/C においても、材齢 8 年の実効拡散係数は、室内大気中暴露の場合より大きかった。このことから、セメント種類 N の場合、W/C を 0.4 と小さく設定しても、長期間の塩水浸せきにより塩化物イオンの内部への拡散が進行し、細孔構造の多孔化を引き起こしている可能性が考えられた。

3.3 シリーズ 3：湿潤養生日数の影響

図-7 に、シリーズ 3 におけるセメント種類 N を用いた供試体の圧縮強度および実効拡散係数の経時変化を示す。圧縮強度は湿潤養生日数が長いほど大きく、その効果は材齢 8 年まで持続している。また、湿潤養生日数の長い N-07 (湿潤養生 9 日) のみ、標準養生供試体による

材齢 28 日の圧縮強度を上回った。この結果からも、20℃、60%RH の暴露環境では、湿潤養生日数を 5 日より長くするのが望ましいと思われる。一方、実効拡散係数は給水せずに封緘養生のみを行った N-08 (湿潤養生 2 日) が最も大きく、遮塩性確保の観点からも湿潤養生期間中の給水が重要であることを示す結果となっている。ただし、給水を行った N-07 (湿潤養生 9 日) と N-03 (湿潤養生 5 日) で比較すると、給水日数を長くした効果は明瞭には見られなかった。

図-8 に、セメント種類 BB を用いた供試体の圧縮強度および実効拡散係数の経時変化を示す。圧縮強度については、セメント種類 N と同様、湿潤養生日数が長いほど大きくなり、その効果は材齢 8 年まで持続している。また、湿潤養生期間中に給水を行った BB-03 (湿潤養生

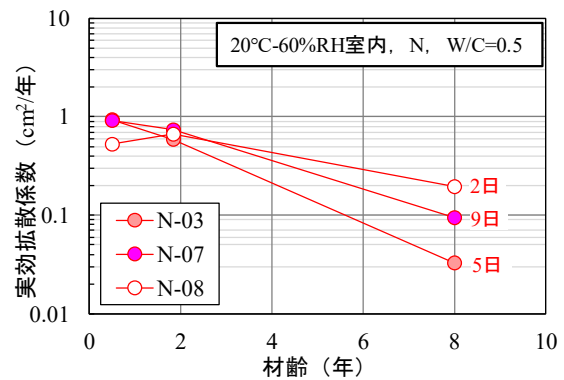
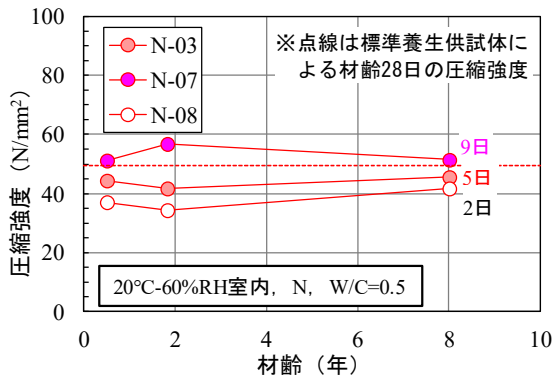


図-7 シリーズ 3：普通ポルトランドセメント (左：圧縮強度，右：実効拡散係数の経時変化)

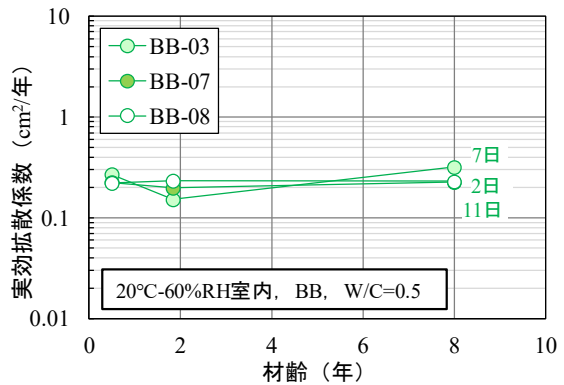
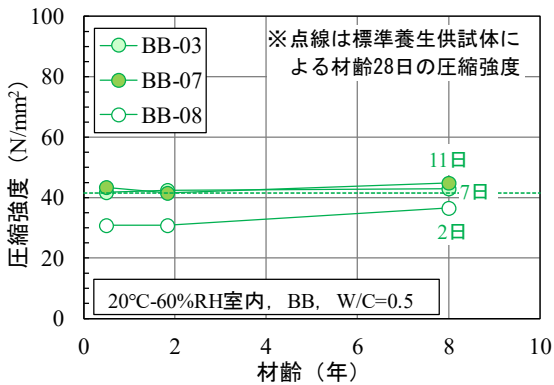


図-8 シリーズ 3：高炉セメント B 種 (左：圧縮強度，右：実効拡散係数の経時変化)

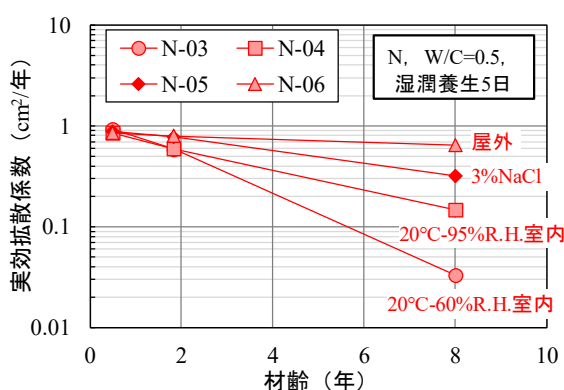
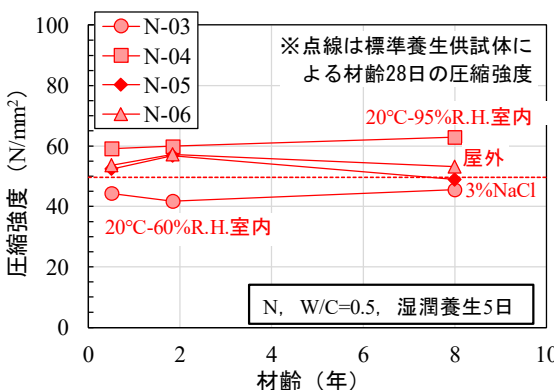


図-9 シリーズ 4 (左：圧縮強度，右：実効拡散係数の経時変化)

7日)とBB-07(湿潤養生11日)では違いがほとんど見られなかった。一方、実効拡散係数については、いずれのケースもほぼ同じ値で推移しており、湿潤養生日数や湿潤養生期間中の給水の有無等の影響は確認されなかった。しかし、前掲の図-3によれば、湿潤養生日数が長いほど中性化深さは小さくなっており、湿潤養生日数の延長による中性化抑制効果は見られている。このことから、湿潤養生日数が物質の透過に対する抵抗性に与える効果は、二酸化炭素等の気体と水を介在して拡散するイオンとは異なる可能性が考えられた。

3.4 シリーズ4：暴露環境の影響

図-9に、シリーズ4における各種環境に暴露した供試体(セメント種類NかつW/C=0.5)の圧縮強度および実効拡散係数の経時変化を示す。圧縮強度は、N-04(95%RH)が最も大きく材齢とともに増加したのに対し、N-06(屋外)はN-05(3%NaCl水溶液浸せき)とほぼ同じ値で推移し、材齢22ヶ月から8年にかけて低下した。一方、材齢8年における実効拡散係数は、N-03(60%RH)、N-04、N-05、N-06の順で大きくなった。N-06は、降雨によるセメント水和物の若干の溶脱に加え、中性化や乾燥収縮ひび割れ等の表層劣化の影響も複雑に加わった可能性が考えられる。

4. まとめ

本稿では、セメント種類、水セメント比、湿潤養生日数を変えたコンクリート供試体を種々の環境に8年間暴露し、圧縮強度と実効拡散係数の長期的な変化の傾向を調査した。本調査で得られた結論を、材齢8年のデータに基づく圧縮強度比(標準養生供試体による材齢28日の圧縮強度で除したもの)と実効拡散係数比(各ケースにおける材齢6カ月の実効拡散係数で除したもの)の関係を整理した図-10を用いて、以下にまとめる。

- (1) 室内大気中暴露(20°C-60%RH)の圧縮強度比は、湿潤養生日数が短い(セメント種類Nでは5日以下、BBとLBBでは7日未満)と1.0を下回った。一方、20°C-95%RHの室内大気中や降雨のある屋外環境では、湿潤養生5日であっても1.0を上回った。
- (2) 3%NaCl水溶液浸せきの圧縮強度比は、セメント種類NかつW/Cが0.5以上の場合に1.0を下回る傾向が見られた。
- (3) セメント種類Nの実効拡散係数比は全てのケースで1.0を下回ったが、室内大気中暴露(20°C-60%RH)におけるBBとLBBの実効拡散係数比は中性化等の影響を受け1.0を上回った。
- (4) 3%NaCl水溶液浸せきにおけるセメント種類Nの実効拡散係数比は、室内大気中暴露(20°C-60%RH)の場合よりも大きくなった。

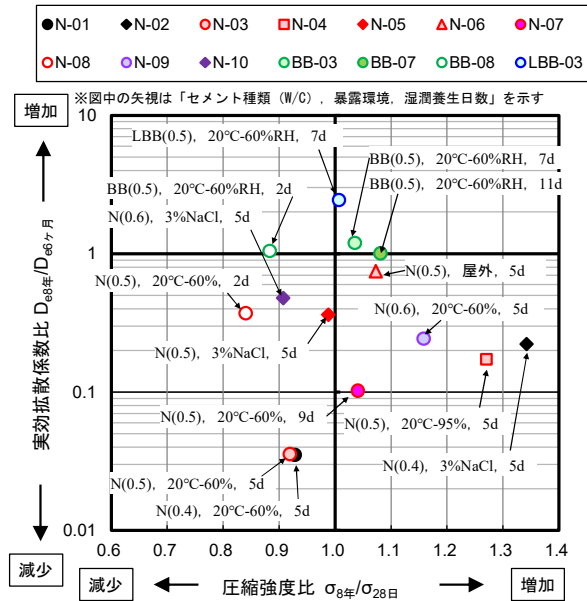


図-10 圧縮強度比と実効拡散係数比の関係

参考文献

- 1) 土木学会：2023年制定コンクリート標準示方書[施工編]，2023.9
- 2) 土木学会：2022年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]，2022.3
- 3) 忽那惇，大塚邦朗，岩波光保，網野貴彦：水の作用がコンクリートの圧縮強度および塩分浸透抵抗性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.559-564，2017.7
- 4) 富田彩花，小林雄一，福手勤：非定常電気泳動試験に基づく中性化したモルタルの遮塩性評価，第47回土木学会関東支部技術研究発表会，V-54，2020.3
- 5) NT BUILD 492：Concrete, Mortar And Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient From Non-Steady-State Migration Experiments, Nordest, Finland, 1999
- 6) 鈴木将充，早川健司，伊藤正憲，与那嶺一秀，山路徹，福手勤：約20年間の暴露試験による海洋・港湾構造物への再生骨材コンクリートの適用性評価，「自然環境下のコンクリート劣化」にシンポジウム，日本コンクリート工学会，pp.255-260，2018.9
- 7) 早川健司，伊藤正憲，大橋潤一：海洋環境下に暴露した再生コンクリートの強度特性—暴露3年までの試験結果—，東急建設技術研究所報 No.27，pp.55-60，2001
- 8) 荻野正貴，大脇英司，白瀬光泰，中山雅：非定常電気泳動とEPMAによるコンクリート中の塩化物イオン拡散係数の迅速測定，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.703-708，2017.7