

報告 非定常電気泳動試験の実施材齢が設計に用いる塩化物イオン拡散係数の推定に及ぼす影響に関する考察

小林 雄一*1・網野 貴彦*2・花岡 大伸*3

要旨：本稿では、普通ポルトランドセメントをベースに高炉スラグ微粉末、フライアッシュを混合したコンクリートの複数材齢で取得した非定常電気泳動試験の結果を用い、塩化物イオン拡散係数の材齢変化の傾向を精度良く推定するための試験材齢について考察した。その結果、材齢 14～182 日の間に 2～3 材齢分の試験値を取得するのが望ましいことがわかった。また、1 材齢の試験値から見掛けの塩化物イオン拡散係数に換算する場合、混和材を混合したコンクリートに対する補正係数は、混和材の種類や置換率の影響の考慮は必要であるが、水結合材比までの考慮は不要にできる可能性があることを示した。

キーワード：非定常電気泳動試験、塩化物イオン拡散係数、材齢依存性、試験材齢、試験回数

1. はじめに

コンクリート標準示方書〔設計編〕では、使用実績の少ない材料や配合のコンクリートや蒸気養生等の特殊な養生を施したコンクリートに対して、セメント種類と水セメント比から求まる見掛けの塩化物イオン拡散係数の算定式を適用できないため、JSCE-G571（電気泳動法）や JSCE-G572（浸せき法）により塩化物イオン拡散係数を取得することとしている¹⁾。しかし、混和材を大量置換した遮塩性の高いコンクリートにこれらの試験を適用したとき、1 年以上の試験期間を要したとする報告もある²⁾。今後開発される様々な新材料や配合のコンクリートの実用化を推進するには、短期間の試験により設計に用いる見掛けの塩化物イオン拡散係数を設定できる方法を確立しておくことが求められている³⁾。

それに対し、筆者らは、文献 4) において、24 時間の通電により塩化物イオン拡散係数を取得できる NT BUILD 492⁵⁾（以下、非定常電気泳動試験）に着目し、この試験方法により取得した 3 材齢分の拡散係数（以下、 D_{nssm} ）と Tang らの方法⁶⁾を組み合わせることで、任意の暴露期間における見掛けの塩化物イオン拡散係数（以下、 D_{ap} ）を推定できる可能性を示している。しかし、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材を用いたコンクリートの D_{nssm} や D_{ap} の材齢変化の傾向は様々であることも報告されている⁷⁾。このようなコンクリートに対し、適切でない材齢かつ少ない回数による試験値を用いて D_{ap} を設定すると、設計において危険側の D_{ap} を与えるリスクが懸念される。その反面、精度確保を重視して、試験を行う材齢を長くしたり試験回数を過度に増加させると、試験に多大な労力を要する。文献 4) では、適切な材齢等の設定について十分に検討できていなかったため、

D_{nssm} から設計で用いる D_{ap} を設定するにあたり、コンクリートの使用材料や配合等の条件に応じて、適切な試験材齢等について検討しておく必要があると考えられた。

そこで本稿では、様々な材料および配合のコンクリートの複数材齢で取得された D_{nssm} を用いて、 D_{nssm} の材齢変化の傾向を適切に推定できる試験材齢や回数の組合せを検討した。さらに、 D_{nssm} の材齢変化の影響を考慮できる Tang らの方法で推定した材齢 50 年時の D_{ap} を用いて、 D_{ap} と材齢 28, 91 日で取得された D_{nssm} の関係を整理し、試験の合理性の観点から、1 材齢の D_{nssm} の試験値から設計に用いる D_{ap} を設定する方法についても考察を加えた。

2. 実験概要

2.1 検討配合

本検討に用いたコンクリート配合を表-1 に示す。筆者らが行った OPC-40, OPC-50, GGBFS45-40, GGBFS45-50, FA15-40 に加え、文献 8) も引用し検討対象とした。なお本稿では、筆者らが実施した実験ケースと比較しやすくするため、文献 8) に記載の配合名の語尾に“-水結合材比の値”を追記して記載している。

2.2 非定常電気泳動試験

非定常電気泳動試験では、 $\phi 100\text{mm} \times \text{H}200\text{mm}$ の円柱供試体を用い、供試体の切出しや飽水処理等の前処理、通電期間中の温度条件、通電条件の設定、塩化物イオンの浸透深さの測定は NT BUILD 492⁵⁾ に準じた。また、1 材齢あたりの供試体数は 3 個とし、3 個の供試体で得られた塩化物イオン浸透深さの平均値を用いて塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} を算出した。試験実施までは標準養生を行い、表-2 に示す材齢で試験を行った。なお、文献 8) の実験も、上記と同様の条件で試験が行われている。

*1 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 修（工）（正会員）

*2 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 リーダー 博（工）（正会員）

*3 金沢工業大学 工学部 環境土木工学科 准教授 博（工）（正会員）

表－1 本検討に用いたコンクリートの配合ケース

配合名	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)										備 考	
		W	B						S1	S2	G1		G2
			C1	C2	GGBFS1	GGBFS2	FA1	FA2					
OPC-40	40	168	420	—	—	—	—	—	737	—	952	—	筆者らの研究
OPC-50	50		336	—	—	—	—	—	766	—	991	—	
GGBFS45-40	40		231	—	189	—	—	—	728	—	945	—	
GGBFS45-50	50		185	—	151	—	—	—	762	—	985	—	
FA15-40	40		357	—	—	—	63	—	728	—	941	—	
OPC-35	35	164.5	—	470	—	—	—	—	—	689	—	978	文献8) の研究
OPC-45	45	166.5	—	370	—	—	—	—	—	773	—	971	
OPC-55	55	176	—	320	—	—	—	—	—	815	—	944	
GGBFS40-35	35	164.5	—	282	—	188	—	—	—	684	—	970	
GGBFS40-45	45	166.5	—	222	—	148	—	—	—	768	—	965	
GGBFS40-55	55	176	—	192	—	128	—	—	—	811	—	939	
GGBFS60-35	35	164.5	—	188	—	282	—	—	—	681	—	966	
GGBFS60-45	45	166.5	—	148	—	222	—	—	—	766	—	962	
GGBFS60-55	55	176	—	128	—	192	—	—	—	809	—	937	
FA20-35	35	164.5	—	376	—	—	—	94	—	676	—	958	
FA20-45	45	166.5	—	296	—	—	—	74	—	762	—	957	
FA20-55	55	176	—	256	—	—	—	64	—	805	—	933	
FA30-35	35	164.5	—	329	—	—	—	141	—	669	—	948	
FA30-45	45	166.5	—	259	—	—	—	111	—	756	—	950	
FA30-55	55	176	—	224	—	—	—	96	—	800	—	927	

W：上水道水，B：結合材，C1：普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³，比表面積 3290cm²/g），C2：普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm³，比表面積 3410cm²/g），GGBFS1：高炉スラグ微粉末（密度 2.91g/cm³，比表面積 3970cm²/g），GGBFS2：高炉スラグ微粉末（密度 2.89g/cm³，比表面積 4893cm²/g），FA1：フライアッシュ II 種（密度 2.30g/cm³，比表面積 4590cm²/g），FA2：フライアッシュ II 種（密度 2.23g/cm³，比表面積 3750cm²/g）S1：細骨材（陸砂，表乾密度 2.58g/cm³），S2：細骨材（川砂，表乾密度 2.58g/cm³），G1：粗骨材（最大寸法 25mm，表乾密度 2.60g/cm³），G2：粗骨材（最大寸法 25mm，表乾密度 2.65g/cm³）

表－2 D_{nssm} の測定結果

配合名	非定常電気泳動試験の試験材齢（日）					
	14	28	91	182	273	365
OPC-35	—	3.67	2.16	1.89	1.66	1.57
OPC-40	5.29	4.68	2.87	2.81	—	—
OPC-45	—	5.45	4.26	3.48	3.21	3.03
OPC-50	5.36	5.09	4.41	4.31	—	—
OPC-55	—	7.73	6.27	5.53	5.40	5.31
GGBFS40-35	—	1.40	0.70	0.69	0.52	0.48
GGBFS45-40	3.22	2.22	1.02	1.19	—	—
GGBFS40-45	—	2.69	1.34	1.16	0.83	0.72
GGBFS45-50	4.02	2.55	2.01	1.97	—	—
GGBFS40-55	—	3.49	1.50	1.27	1.23	1.10
GGBFS60-35	—	1.12	0.63	0.49	0.44	0.32
GGBFS60-45	—	1.83	0.76	0.69	0.60	0.49
GGBFS60-55	—	2.64	0.91	0.78	0.63	0.55
FA20-35	—	2.94	0.73	0.50	0.47	0.44
FA15-40	6.09	4.32	1.80	1.59	—	—
FA20-45	—	5.53	1.90	1.08	0.93	0.85
FA20-55	—	12.07	3.90	3.03	2.53	2.25
FA30-35	—	3.18	0.62	0.48	0.42	0.41
FA30-45	—	6.25	1.55	0.74	0.65	0.51
FA30-55	—	13.26	3.52	1.65	1.50	1.34

※表中の単位は，cm²/年

3. D_{nssm} の材齢変化の推定と D_{ap} への換算の方法

Tang ら⁶⁾ は，任意の材齢における $D_{nssm}(t')$ は，式(1)で表すことができるとしている。

$$D_{nssm}(t') = D_{nssm,t'0} \cdot \left(\frac{t_0}{t'}\right)^n \quad (n < 1) \quad (1)$$

ここに， $D_{nssm}(t')$ ：材齢 t' （年）における非定常電気泳動試験による塩化物イオン拡散係数（cm²/年）， $D_{nssm,t'0}$ ：基準材齢 t_0 （年）における拡散係数（cm²/年）， n ： D_{nssm} の材齢変化を表す係数（以下，材齢係数）を示す。

表－3 式(2)の各パラメータと式(3)による D_{ap} の推定値

配合名	D_0 (cm ² /年)	n	D_{ap} (cm ² /年) ※ $t=50$ 年
OPC-35	1.46	0.35	0.57
OPC-40	2.17	0.28	1.01
OPC-45	3.02	0.23	1.59
OPC-50	3.98	0.09	3.06
OPC-55	5.13	0.16	3.31
GGBFS40-35	0.46	0.43	0.15
GGBFS45-40	0.64	0.49	0.19
GGBFS40-45	0.73	0.51	0.20
GGBFS45-50	1.35	0.31	0.58
GGBFS40-55	0.91	0.51	0.25
GGBFS60-35	0.35	0.45	0.11
GGBFS60-45	0.44	0.54	0.11
GGBFS60-55	0.44	0.69	0.10
FA20-35	0.25	0.95	0.13
FA15-40	0.73	0.65	0.16
FA20-45	0.65	0.83	0.15
FA20-55	1.68	0.76	0.36
FA30-35	0.19	1.15	0.06
FA30-45	0.36	1.13	0.11
FA30-55	0.88	1.09	0.26

式(1)では，2 材齢以上の D_{nssm} を用い，ある基準となる材齢 t_0 における試験値 $D_{nssm,t'0}$ を入力値として n を推定するが，本稿では， t_0 および $D_{nssm,t'0}$ を固定せずに近似できる式(2)に変換し，最小二乗法により D_0 および n を推定した。なお，式(2)における D_0 は $t_0=1$ 年のときの D_{nssm} の推定値を表している。表－2 に示す D_{nssm} の全試験材齢のデータを用いて得られた D_0 および n を表－3 に示す。

$$D_{nssm}(t') = D_0 \cdot \left(\frac{1}{t'}\right)^n \quad (n < 1) \quad (2)$$

また，材齢 t 年時の D_{ap} は，式(2)を材齢 t まで積分し

表-4 近似に用いた試験材齢の組合せパターンと決定係数

組合せパターン名	5	4-1	4-2	4-3	3-1	3-2	3-3	3-4	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6
近似に用いた試験の実施材齢（日）	28, 91, 182, 273, 365	14, 28, 91, 182	28, 91, 182, 273	91, 182, 273, 365	14, 28, 91	14, 28, 182	28, 91, 182	91, 182, 273	14, 28	14, 91	14, 182	28, 91	28, 182	91, 182
OPC-35	0.98	—	0.97	0.77	—	—	0.96	0.77	—	—	—	0.87	0.97	0.68
OPC-40	—	0.96	—	—	0.94	0.96	0.93	—	0.76	0.90	0.94	0.72	0.27	-0.68
OPC-45	1.00	—	1.00	0.98	—	—	1.00	0.96	—	—	—	0.98	0.99	0.91
OPC-50	—	0.97	—	—	0.95	0.97	0.97	—	0.89	0.93	0.97	0.87	0.96	0.12
OPC-55	0.98	—	0.97	0.92	—	—	0.94	0.96	—	—	—	0.95	0.94	0.94
GGBFS40-35	0.96	—	0.96	0.69	—	—	0.96	0.60	—	—	—	0.81	0.92	0.06
GGBFS45-40	—	0.95	—	—	0.92	0.95	0.93	—	0.95	0.91	0.89	0.88	0.87	-0.84
GGBFS40-45	0.99	—	0.99	0.93	—	—	0.99	0.87	—	—	—	0.96	0.96	0.57
GGBFS45-50	—	0.93	—	—	0.90	0.93	0.73	—	0.60	0.91	0.87	0.78	0.73	0.31
GGBFS40-55	0.95	—	0.95	0.38	—	—	0.91	0.34	—	—	—	0.82	0.95	0.45
GGBFS60-35	0.99	—	0.98	0.29	—	—	0.99	0.90	—	—	—	0.98	0.99	0.92
GGBFS60-45	0.96	—	0.99	0.84	—	—	0.95	0.37	—	—	—	0.85	0.95	0.23
GGBFS60-55	0.97	—	0.98	0.50	—	—	0.96	0.42	—	—	—	0.91	0.97	0.29
FA20-35	0.98	—	0.98	0.29	—	—	0.97	0.34	—	—	—	0.96	0.98	0.45
FA15-40	—	0.97	—	—	0.99	0.99	0.97	—	0.97	0.97	0.98	0.89	0.98	-0.23
FA20-45	0.99	—	0.99	0.84	—	—	0.99	0.90	—	—	—	0.99	0.99	0.97
FA20-55	0.98	—	0.98	0.50	—	—	0.97	0.49	—	—	—	0.94	0.98	0.46
FA30-35	0.98	—	0.97	0.12	—	—	0.97	0.15	—	—	—	0.96	0.97	0.16
FA30-45	1.00	—	1.00	0.82	—	—	1.00	0.86	—	—	—	1.00	1.00	0.97
FA30-55	1.00	—	1.00	0.81	—	—	0.99	0.90	—	—	—	0.99	0.99	0.99

た値を材齢 t で除した、式(3)により推定することができ。なお本稿では、表-1 に示した各配合のコンクリートの D_{ap} までを浸せき試験等により取得していないため、表-3 に示すパラメータを用い、 $t=50$ 年として、式(3)に代入した値が、設計に用いられる見掛けの拡散係数 D_{ap} であると仮定して、以降の考察を行った。

$$D_{ap} = \left(\int_0^t D_{nssm}(t') \cdot dt' \right) / t = \frac{D_0}{1-n} \cdot \left(\frac{1}{t} \right)^n \quad (3)$$

4. 試験材齢が D_{nssm} の材齢変化の傾向に関する推定精度に及ぼす影響

本章では、表-4 に示すように、式(2)の近似に用いる試験材齢の組合せパターンを設定し、さらに式(4)に示す決定係数を定義して、各組合せパターンにおける推定精度について考察を行った。また、図-1 には、各配合の D_{nssm} の実測値と組合せパターンごとの近似線を示した。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

ここに、 m ：近似に用いたデータ数、 y_i ：データ数 m のうち i 番目の D_{nssm} の実測値、 $\hat{y}_i$ ：近似により得た D_0 と n を用いて計算される i 番目の D_{nssm} の推定値、 $\bar{y}$ ：近似に用いた全データの D_{nssm} の実測値の平均値を示す。

ここで、表-4 における組合せパターンの見方について、簡単に補足する。今回の検討に用いたコンクリートでは、表-2 に示したように、最大 5 または 4 材齢分の D_{nssm} の試験値が取得されている。このうち、パターン 5 と 4-1 は、取得されている D_{nssm} の全データを用いて式(2)に近似した場合を示している。一方、パターン 3-3 を例にすると、材齢 28, 91, 182 日に取得した 3 材齢分の D_{nssm}

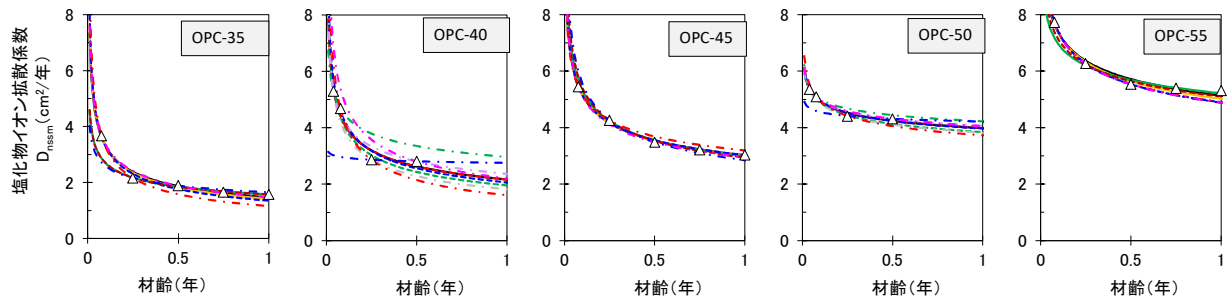
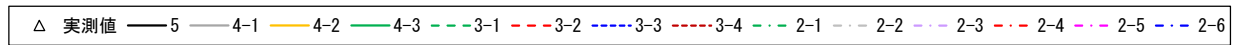
を用いて近似した場合を示しており、材齢 14, 273, 365 日の試験値は存在しないものとして扱っている。

表-4 に示す近似に用いた試験材齢の数が多いパターン 5, 4-1, 4-2 の決定係数に着目すると、当然のことながら、全配合において 1 に近い値となっており、図-1 においても確からしく推定できている様子が伺える。しかし、近似に用いた試験材齢の数がパターン 4-1, 4-2 と同じパターン 4-3 では、決定係数が小さいものが見られる。パターン 4-3 は、材齢 91 日以降に取得した 4 材齢分の試験値で近似したものであるが、試験材齢の数を多くしたとしても、材齢 91 日以降のデータで構成した場合、推定精度は低下する可能性があることがわかる。

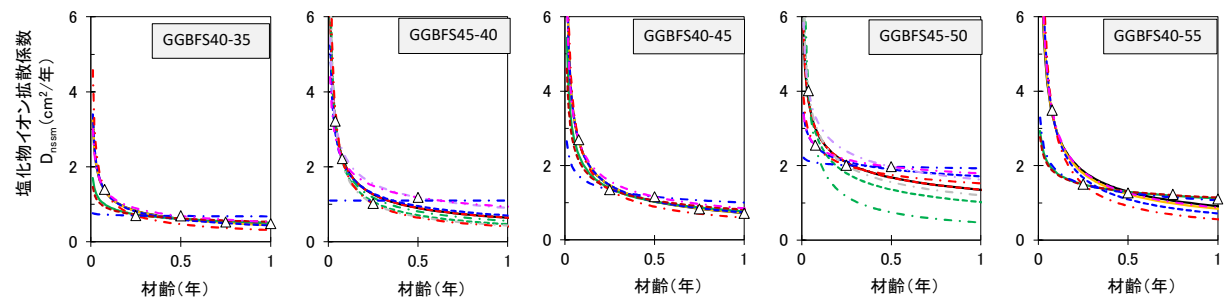
一方、近似に用いる試験材齢の数を 3 つとしたパターン 3-1~3-4 で比較すると、材齢 91 日以降のデータで構成した 3-4 において決定係数が小さくなっている。一方、パターン 3-1~3-3 では、パターン 3-3 の GGBFS45-50 の決定係数が若干小さいものの、パターン 5 や 4-1, 4-2 と同程度の決定係数を維持できている。

さらに、試験の合理化を図るために、近似に用いる試験材齢の数を 2 つとしたパターン 2-1~2-6 を見ると、パターン 3-1~3-3 よりも決定係数は小さくなるものの、材齢 14~182 日の間で 2 材齢の組合せを設定すれば、それなりの精度を確保できそうな様子が伺える（本検討では、材齢 14 日と 182 日の離れた 2 材齢を組み合わせたパターン 2-3 において決定係数が 1 に近い値となった）。

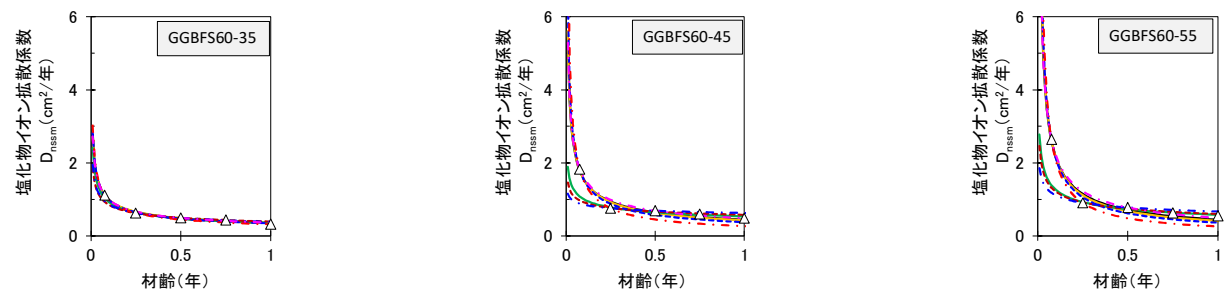
また、図-1 を俯瞰すると、概ね以下のようなイメージで分類できる。なお、今回の検討の範囲では、OPC, GGBFS, FA 等の使用材料、水結合材比や混和材の置換率の違いが、推定精度の優劣に影響している状況は見ら



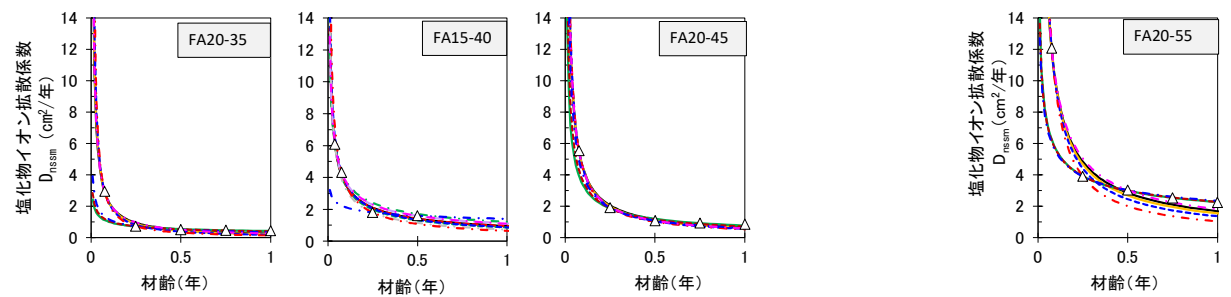
(a) OPC シリーズ



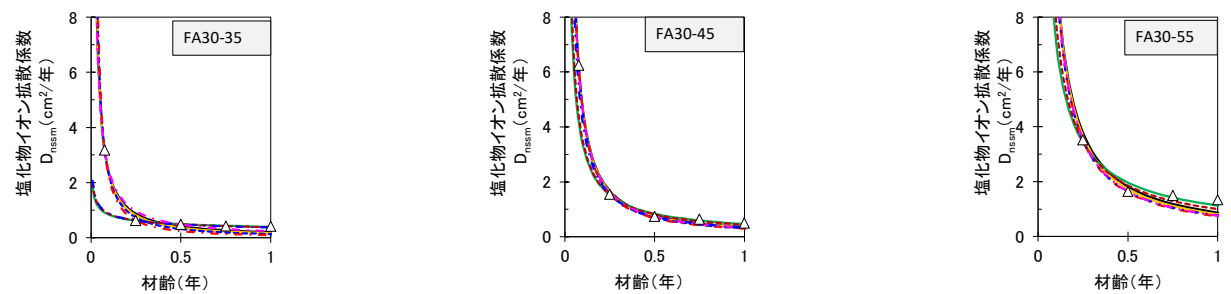
(b) GGBFS シリーズ (高炉セメント B 種相当)



(c) GGBFS シリーズ (高炉セメント C 種相当)



(d) FA シリーズ (フライアッシュセメント B 種相当)



(e) FA シリーズ (フライアッシュセメント C 種相当)

図-1 D_{nssm} の経時変化および式(2)による近似線

れていない。

- (a) いずれの組合せケースでも、式(2)により比較的良好的な推定結果が得られていると思われる配合

該当配合 OPC-45, OPC-55, GGBFS60-35, FA20-45, FA30-45, FA30-55

- (b) 材齢 91 日以前における推定精度が大きく劣っていると思われる配合

該当配合 OPC-35, OPC-40, OPC-50, GGBFS40-35, GGBFS45-40, GGBFS40-45, GGBFS45-50, GGBFS40-55, GGBFS60-45, GGBFS60-55, FA20-35, FA15-40, FA20-55, FA30-35

- (c) 材齢 28 日もしくは 91 日以降における長期的な材齢の推定精度が大きく劣っていると思われる配合

該当配合 OPC-40, GGBFS45-50, GGBFS40-55, FA-20-55

(b)のように、材齢 91 日以前における推定精度が劣るものは、パターン 4-3, 3-4, 2-6 の材齢 91 日以降のデータで構成される組合せで近似したものである。前述のとおり、材齢 91 日以降のデータで構成する場合、特に材齢早期の D_{nssm} の推定の精度が劣ることになる。一方、(c)のように、材齢 28 日もしくは 91 日以降における推定精度が劣るものは、パターン 2-1, 2-2, 2-3, 3-1 の材齢 14 日のデータを含むもので、近似に用いた試験材齢の数も少ないものである。なお、概ね材齢 91 日以降に D_{nssm} の減少が小さかった配合において、(b)および(c)のような推定精度の低下に影響している様子も確認できる。

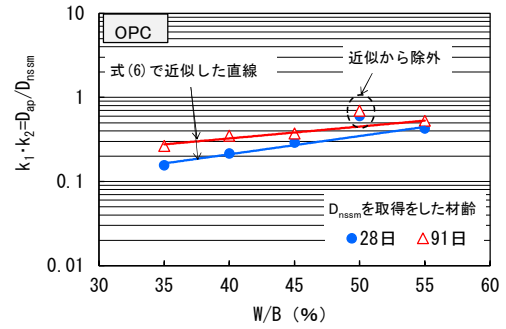
以上のことから、 D_{nssm} の材齢変化の傾向を推定するには、材齢 14～182 日の間で少なくとも 2 材齢、より高い精度を求めたい場合には 3 材齢の D_{nssm} を取得するのがよいと考えられた。また、比較的早期の材齢 14 日～28 日の試験値と、ある程度経過した材齢 91 日～182 日の試験値を組み合わせるのが望ましいと考えられた。

5. D_{nssm} の 1 材齢の試験値から設計に用いる D_{ap} を設定する方法に関する考察

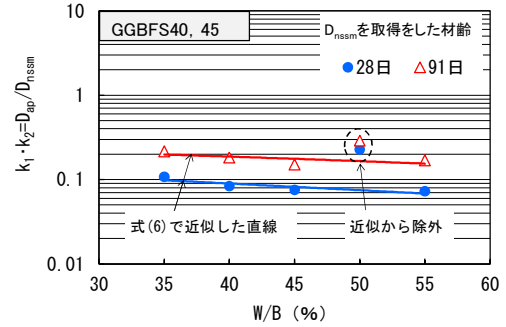
筆者らは、非定常電気泳動試験により取得した 3 材齢分の D_{nssm} と Tang らの方法⁹⁾の組合せにより、任意材齢における D_{ap} を推定する方法を提案してきたが⁴⁾、4 章で述べたように、この方法では 2～3 材齢分の試験値が必要であることがわかった。ただし、2～3 材齢分のデータ取得も労力を要するため、本章では、1 材齢の D_{nssm} から D_{ap} に換算する方法の可能性について考察した。

コンクリート標準示方書〔設計編〕では、JSCE-G571（電気泳動法）により取得した実効拡散係数 D_e から設計に用いる D_{ae} への換算方法として式(5)を示し、式(6)に示す $k_1 \cdot k_2$ と称する補正係数の考慮を推奨している¹⁾。

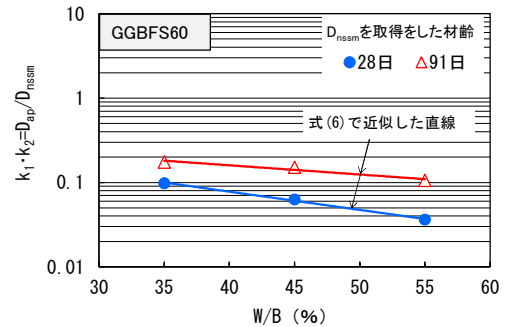
$$D_{ae} = k_1 \cdot k_2 \cdot D_e \quad (5)$$



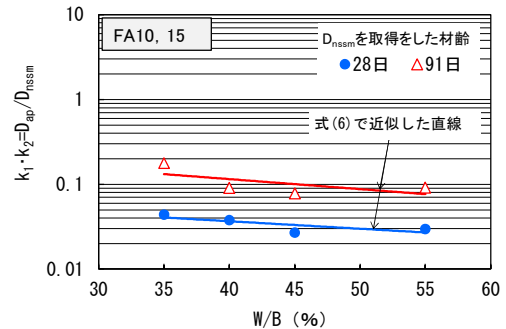
(a) OPC



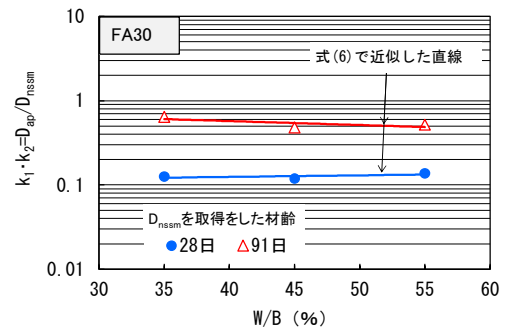
(b) GGBFS（高炉セメント B 種相当）



(c) GGBFS（高炉セメント C 種相当）



(d) FA（フライアッシュセメント B 種相当）



(e) FA（フライアッシュセメント C 種相当）

図-2 補正係数 A と水結合材比の関係

$$k_1 \cdot k_2 = A \cdot \exp\{B(W/C)\} \quad (6)$$

ここに、 W/C ：水セメント比、 A および B ： $k_1 \cdot k_2$ と W/C の関係を表す定数を示す。

なお、コンクリート標準示方書〔設計編〕では、電気泳動法による D_e を取得する材齢について触れられておらず、JSCE-G571 においても「養生期間は 28 日と標準とするが、材料の種類などによって適宜変更する」と記載されているのみである。

そこで、表-3 に示した材齢 50 年時の D_{ap} と表-2 に示した材齢 28 日および 91 日の D_{nssm} で除した値を縦軸に、水結合材比（以下、 W/B ）を横軸として、図-2 に整理した。なお、縦軸に関しては、厳密にはコンクリート標準示方書〔設計編〕における $k_1 \cdot k_2$ の定義と異なるが、本稿では便宜上、 $k_1 \cdot k_2$ と称することとした。また、表-1 に示したコンクリートでは、JIS A 6206 における高炉スラグ微粉末 4000、JIS A 6201 におけるフライアッシュ II 種に適合したものを使用しているが、混和材の置換率は異なっている。そこで、高炉スラグ微粉末を用いた配合は JIS R 5211、フライアッシュを用いた配合は JIS R 5213 の混合材質量（%）を参考にして、グラフを分類した。

図-2 の OPC の結果によると、材齢 28 日、91 日のいずれも、式(6)の式形に従って W/B の増加とともに $k_1 \cdot k_2$ の値は増加した。一方、混和材を用いた GGBFS（高炉セメント B 種および C 種相当）、FA（フライアッシュセメント B 種および C 種相当）では、OPC とは逆に、 W/B の増加とともに $k_1 \cdot k_2$ の値が低下、もしくは、ほぼ一定の値を示した。

混和材を使用したコンクリートは、塩化物イオン拡散係数が小さく、特に置換率が大きい場合には長期的に塩化物イオンの侵入が停滞する現象も確認されている⁹⁾。このようなコンクリートに対して、試験により W/B の増加とともに $k_1 \cdot k_2$ の値が低下する傾向を求めてもよいが、試験に多大な労力を要する。また、使用実績が少なく W/B の大きいコンクリートに対して $k_1 \cdot k_2$ を小さく設定することは、設計に用いる D_{ap} を過小に評価してしまう危険性もある。このため、混和材を使用したコンクリートの $k_1 \cdot k_2$ の設定にあたって、混和材の種類や置換率の影響を考慮する必要はあるが、 W/B の影響までの考慮は必要なく、 $k_1 \cdot k_2$ を一定値と扱っても実用上問題はないと考えられる。ただし、本考察に用いた D_{ap} は、 D_{nssm} の試験値から Tang らの方法により推定したものであり、浸せき法や自然暴露実験、実構造物調査で得られたものではない。今後、新材料や配合のコンクリートにおける D_{ap} に関するデータ蓄積を待って、改めて考察する必要がある。

6. まとめ

本稿では、非定常電気泳動試験により取得した D_{nssm} の

材齢変化の傾向を適切に推定するには、材齢 14～182 日の間で少なくとも 2 材齢、より高い精度を求める場合には 3 材齢の D_{nssm} を取得するのがよいこと、また、早期の材齢（14 日～28 日）の試験値と、ある程度経過した材齢（91 日～182 日）の試験値の組合せにより推定するのが望ましいことを示した。また、コンクリート標準示方書の考え方を参考にして、1 材齢の D_{nssm} から D_{ap} に換算する方法についても検討し、長期的に D_{ap} が小さくなる混和材混合コンクリートに対する補正係数は、混和材の種類や置換率の考慮は必要であるが、 W/B の影響までの考慮は不要にできる可能性があることを示した。

参考文献

- 1) (公社) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕, pp.156-164, 2017
- 2) 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
- 3) (公社) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの品質・性能評価に関する調査研究小委員会報告書, コンクリート技術シリーズ, No.129, pp. II-32～II-58, 2021
- 4) 小林雄一, 網野貴彦：非定常電気泳動試験の結果に基づく鉄筋コンクリート構造物の塩化物イオン浸透予測に関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.508-513, 2022.7
- 5) NT BUILD 492 : Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Nonsteady-state Migration Experiments, Nordtest, Finland, 1999.
- 6) Tang Luping, Joost Gulikers : On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete, Cement and Conc Reserch, Vol. 37, pp.589-595, 2007
- 7) 井口重信, 岸利治：拡散係数経時変化モデルの導入による塩分浸透照査の高度化の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.472-477, 2022.7
- 8) Jae-IM Park et.al : Diffusion Decay Coefficient for Chloride Ions of Concrete Containing Mineral Admixtures, Hindawi Publishing Corporation, Advances in Materials Science and Engineering, Vol.2016, Article ID 2042918, May. 2016
- 9) (公社) 土木学会：コンクリートライブラリー152 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）, p.13, 2018