

## 7.1 低炭素型セメントの利用技術の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：材料資源研究グループ（基礎材料）

研究担当者：渡辺博志，森濱和正，中村英佑

### 【要旨】

本研究課題では、低炭素型セメントを使用したコンクリートの性能評価方法と設計施工方法、CO<sub>2</sub> 排出削減効果の算定方法などを提案することを目的として、8 機関との共同研究を行っている。平成 23 年度は、低炭素型セメントを使用したコンクリートの強度特性と耐久性を把握するための長期暴露試験をつくば、新潟、沖縄で開始するとともに、塩化物イオンの浸透と中性化に対する抵抗性を迅速に評価する室内促進試験を実施した。また、塩化物イオン浸透抵抗性を評価する新しい室内促進試験を提案することを念頭に、非定常・電気泳動試験の適用方法について検討した。さらに、低炭素型セメントの利用による CO<sub>2</sub> 排出削減効果の試算を行った。

キーワード：低炭素型セメント、混和材、暴露試験、非定常・電気泳動試験、コンクリート構造物

### 1. はじめに

地球温暖化問題に対する世界的な関心の高まりを受けて、社会資本整備に伴って排出される CO<sub>2</sub> を削減するためのひとつの方策として、低炭素型セメントの利用が注目されている。低炭素型セメントは、コンクリートに使用されるセメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材で置換したものであり、混和材の混合率を高めることでセメント使用量を減少させ、セメント製造時に排出される CO<sub>2</sub> を削減できると考えられている。例えば、国内 CO<sub>2</sub> 排出量の約 4% がセメント産業に起因することや<sup>1)</sup>、プレストレストコンクリート橋上部工の建設時に排出される CO<sub>2</sub> の約 40% がコンクリートの材料と製造によるものであることが報告されており<sup>2)</sup>、低炭素型セメントの利用によりコンクリート構造物の建設に伴って排出される CO<sub>2</sub> の相当量を削減できることが期待されている。しかしながら、低炭素型セメントを用いたコンクリートの強度特性や耐久性の評価方法、構造設計に用いる設計用値、現場での施工方法などは必ずしも明確にされていない。また、CO<sub>2</sub> 排出削減効果を適切に算定する方法が整備されていないことも、低炭素型セメントの利用促進を妨げるひとつの要因となっている。

これらのことを背景として、本研究課題では、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなど混和材を多量に混合した低炭素型セメントの利用方法とその CO<sub>2</sub> 排出削減効果の算定方法を規定した「低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの性能評価及び CO<sub>2</sub> 排出削減評価ガイドライン(案)」を作成することを目的として、国内 8 機関

((社)プレストレスト・コンクリート建設業協会、(株)大林組、大成建設(株)、前田建設工業(株)、戸田建設(株)、西松建設(株)、鐵鋼スラグ協会、電源開発(株) との共同研究を実施している。平成 23 年度は、以下の 5 項目に着目して検討を行った。

- ・国内外の主要なセメントの規格を対象として、混和材の混合率の規定内容について調査を行った。
- ・低炭素型セメントを使用したコンクリートの強度特性と耐久性を把握するための長期暴露試験をつくば、新潟、沖縄で開始した。
- ・既存の室内促進試験の適用性を明らかにするため、暴露供試体と同時に製作した供試体を用いて、塩化物イオン浸透抵抗性と中性化抵抗性を評価するための室内促進試験を開始した。
- ・塩化物イオン浸透抵抗性を迅速に評価するための新しい試験方法を提案することを念頭に、非定常・電気泳動試験の低炭素型セメントを使用したコンクリートへの適用性について検討を行った。
- ・低炭素型セメントの利用による CO<sub>2</sub> 排出削減効果の試算を行った。

### 2. 国内外のセメント規格での混和材の混合率の規定

H23 年度は、主に高炉スラグ微粉末とフライアッシュに着目し、国内外のセメントの規格における混和材の混合率に関する規定内容の調査・比較を行った。日米欧の主要なセメントの規格における高炉スラグ微粉末とフライアッシュの混合率の一覧を表-1 に示す。

表-1 日米欧のセメントの規格における混和材の混合率

混和材 国・地域	高炉スラグ微粉末	フライアッシュ
日本 (JIS R 5211) (JIS R 5213)	◆高炉セメント ・高炉セメント A 種 (5% < BS ≤ 30%) ・高炉セメント B 種 (30% < BS ≤ 60%) ・高炉セメント C 種 (60% < BS ≤ 70%)	◆フライアッシュセメント ・フライアッシュセメント A 種 (5% < FA ≤ 10%) ・フライアッシュセメント B 種 (10% < FA ≤ 20%) ・フライアッシュセメント C 種 (20% < FA ≤ 30%)
	◆三成分系セメントについては規定がない。 ◆土木学会コンクリート標準示方書【施工編】では、JIS に適合した混合セメントの使用を標準としているが、C 種相当や三成分系のセメントを使用する場合については十分な規定を行っていない。	
米国 (ASTM C 595)	◆Type IS—Portland blast-fumace slag cement : ポルトランド・高炉スラグセメント ・高炉スラグ微粉末が質量の 95% 以下 ただし、70% 以上の混合は高炉スラグ微粉末に消石灰が含まれている場合に認めている。	◆Type IP—Portland-pozzolan cement : ポルトランド・ポゾランセメント ・ポゾランが質量の 40% 以下 ※フライアッシュ以外にもポゾラン活性を示す混和材をポゾランとして使用することが可能である。
	◆Type IT—Ternary Blended Cement : 三成分系セメント ・ポゾランが質量の 40% 以下かつ高炉スラグ微粉末とポゾランの合計が質量の 70% 以下	
	◆ACI 318 では、凍結融解の作用を受け凍結防止剤の散布がある場合には、高炉スラグ微粉末は重量の 50% 以下、フライアッシュを含むポゾランは重量の 25% 以下に混合率を制限している。	
欧州 (EN 197)	◆CEM II—Portland-slag cement : ポルトランド・スラグセメント ・CEM II/A-S (2% ≤ BS ≤ 20%) ・CEM II/B-S (21% ≤ BS ≤ 35%) ◆CEM III—Blastfurnace cement : 高炉セメント ・CEM III/A (36% ≤ BS ≤ 65%) ・CEM III/B (66% ≤ BS ≤ 80%) ・CEM III/C (81% ≤ BS ≤ 95%)	◆CEM II—Portland-fly ash cement : ポルトランド・フライアッシュセメント ・CEM II/A-V, CEM II/B-V (6% ≤ FA ≤ 20%) ・CEM II/A-W, CEM II/B-W (21% ≤ FA ≤ 35%) ◆CEM IV—Pozzolanic cement : ポゾランセメント ・CEM IV/A (11% ≤ FA ≤ 35%) ・CEM IV/B (36% ≤ FA ≤ 55%) ※フライアッシュ以外にもポゾラン活性を示す混和材をポゾランとして使用することが可能である。
	◆CEM V—Composite cement : 混合セメント ・CEM V/A (18% ≤ BS ≤ 30%、18% ≤ FA ≤ 65%、40% ≤ C ≤ 65%) ・CEM V/B (31% ≤ BS ≤ 50%、32% ≤ FA ≤ 50%、20% ≤ C ≤ 38%) ※フライアッシュ以外にもポゾラン活性を示す混和材をポゾランとして使用することが可能である。	

※BS : 高炉スラグ微粉末、FA : フライアッシュ、C : セメントクリンカー、()内は混和材の混合率を示し、単位は質量%である。

## 2. 1 日本

我が国では、JIS において、コンクリート用の高炉スラグ微粉末 (JIS A 6206)、フライアッシュ (JIS A 6201) など混和材の品質が規定され、これらを用いた混合セメントとして、高炉セメント (JIS R 5211)、フライアッシュセメント (JIS R 5213) などが規定されている<sup>3)</sup>。

JIS によると、高炉スラグ微粉末は、比表面積により高炉スラグ微粉末 4000、6000、8000 の 3 種類に分類されており、比表面積が大きいほど、フロー値比が低く、活性度指数が高い。フライアッシュは、I、II、III、IV 種の 4

種類に分類され、I 種から IV 種にかけて活性度指数が低く規定されている。一方、高炉セメントはセメント中の高炉スラグ微粉末の分量により A 種、B 種、C 種が規定されているが、現在国内で使用されている高炉セメントの大部分が B 種であり、高炉スラグ微粉末の混合率は 40～45% であることが報告されている<sup>4)</sup>。同様に、フライアッシュセメントはセメント中のフライアッシュの分量により A 種、B 種、C 種が規定されている。土木学会コンクリート標準示方書【施工編】<sup>5)</sup>では、JIS に適合したセメントを使用することを標準としているが、例えば、

湿潤養生期間については、混和材の混合率の高いC種相当や三成分系の混合セメントの使用を想定した養生日数は示されていない。すなわち、セメント規格には混和材を高混合したセメントの品質が規定されているが、現状ではこうしたセメントを使用した場合の設計施工方法が明確に示されていない状況にあると考えられる。

## 2.2 米国

米国では、コンクリートに使用する高炉スラグ微粉末の品質についてはASTM C 989<sup>9)</sup>、フライアッシュの品質についてはASTM C 618<sup>7)</sup>に規定されている。これらによると、高炉スラグ微粉末は活性度指数により Grade 80、100、120 の3種類に分類され、フライアッシュは化学成分 (SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の分量) により Class N、F、C の3種類に分類されている。一方、混合セメントの品質についてはASTM C 595<sup>8)</sup>に規定されており、二成分系セメントでは、高炉スラグ微粉末の混合率が95%以下 (高炉スラグ微粉末に消石灰が含まれない場合は70%以下)、フライアッシュを含むポゾランの混合率が40%以下とされている。三成分系セメントでは、ポゾランの混合率が40%以下とされ、さらに高炉スラグ微粉末とポゾランを足し合わせた混合率が70%以下とされている。いずれも我が国の混和材の混合率の規定値よりも高い上限値である。しかし、ACI 318<sup>9)</sup>では、凍結融解の作用を受けて凍結防止剤の散布が行われる場合に、高炉スラグ微粉末の混合率が50%以下、フライアッシュを含むポゾランの混合率が25%以下に制限されている。

## 2.3 欧州

欧州では、EN197<sup>10)</sup>において、各種セメントの品質が規定されている。ここでは、混和材の混合率により27種類にセメントが分類されている。二成分系セメントでは、高炉スラグ微粉末の混合率は最大で95%、フライアッシュの混合率は最大で55%とされている。また、三成分系セメントでは、高炉スラグ微粉末とフライアッシュそれぞれを最大で50%まで混合することが認められているが、セメントクリンカーの混合率が20%以上とされているため、混和材の混合率の実質的な上限は80%である。欧州の規格では、これまでに述べた日米の規格よりも高い混合率の上限値が規定されていることが特徴的である。ところが、文献 11)によると、2003年の欧州で使用されたセメントの割合は、CEM I 約32%、CEM II 約55%、CEM III 約5%、CEM IV 約5%、CEM V 約3%であり、混和材を高混合したセメントの使用割合は必ずしも多くない。ただし、文献 11)では、低強度のセメントの使用割合に着目すると、CEM I 約5%、CEM II 約70%、CEM

III 約6%、CEM IV 約12%、CEM V 約3%となり、約90%が混和材を混合したセメントとなるため、主に低強度領域においては混和材を使用したセメントへの需要が高まっていることを指摘している。

## 2.4 まとめ

本章では、日米欧のセメントの規格に規定されている混和材の混合率について整理した。各規格に規定された混和材の混合率に着目すると、我が国に比べて米国や欧州で高い上限値が規定されていた。ところが、いずれの国や地域においても、混和材の混合率の高いセメントの使用が広く普及しているとは言い難い状況にあった。このひとつの原因として、混和材の混合率の高いセメントの利用方法を規定した設計規準やマニュアル類が整備されていないことが挙げられる。

## 3. 暴露試験と室内促進試験

実環境下で低炭素型セメントを使用したコンクリートの強度特性と耐久性を明らかにするため、H23年度から、つくば、新潟、沖縄の3ヶ所で暴露試験を開始した。また、既存の室内促進試験の適用性を検証するため、暴露試験用の供試体と同時に製作した供試体を用いて、塩化物イオンの浸透と中性化に対する抵抗性を迅速に評価するための室内促進試験を行った。将来的には両試験で得られた結果を比較することにより、室内促進試験の妥当性についても検討を行う予定である。本章では、両試験の概要とH23年度中に得られた結果を報告する。

### 3.1 暴露試験

#### 3.1.1 供試体の形状

暴露試験に用いた供試体の形状を図-1に示す。供試体は、□100mm×200mmの角柱供試体である。実際のコンクリート構造物が置かれる状況を模擬するため、コンクリート打ち込み方向に対して側面を暴露面とし、この暴露面を側面とした状態で供試体を暴露した(図-1の状態を保持)。また、暴露面を除く全面をシールし、暴露面以外での塩化物イオンの浸透と中性化の進行を防止した。

#### 3.1.2 実験パラメータ

暴露試験の主要な実験パラメータを表-2に示す。暴露環境はつくば、新潟、沖縄の3地域とした。つくばの暴露試験場は内陸部に位置するため塩害環境下にはないが、新潟と沖縄の暴露試験場は沿岸部の厳しい塩害環境下にある。暴露期間は、塩化物イオンの浸透と中性化の進展状況を経年的に把握できるように、2、4、10、20年の4時点を予定した。また、コンクリートの水結合材比(以下、W/B)は35、40、50%の3種類とした。セメントは、

普通ポルトランドセメント（以下、OPC）と早強ポルトランドセメント（以下、HPC）を使用した。特に初期強度の発現が重要視されるプレストレストコンクリート構造物を想定した W/B40%の供試体では HPC を使用し、W/B35%と 50%の供試体では OPC を使用して W/B の違いが試験結果に与える影響について検討することとした。混和材は、高炉スラグ微粉末 4000 と 6000（以下、BS4 と BS6）、フライアッシュ II 種（以下、FA）を対象とし、全結合材に占める各混和材の混合割合を質量ベースで計算して使用した。

3.1.3 供試体の製作方法

供試体に使用した結合材の品質を表-3、骨材の品質を表-4 に示す。また、W/B40%のコンクリート配合を表-5、W/B35%と 50%のコンクリート配合を表-6 に示す。配合の種類は計 26 種類である。混和材の種類と混合率を変化させた場合のコンクリートの強度特性と耐久性について検討することを目的としたため、全ての配合で、単位水

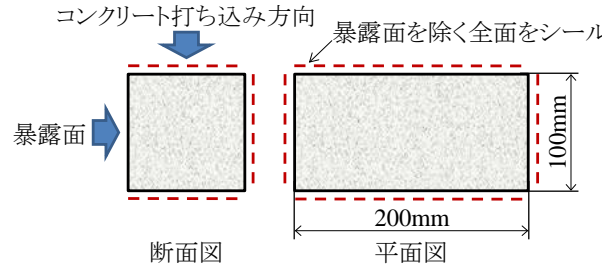


図-1 暴露供試体の形状

量を 165kg/m<sup>3</sup>、単位粗骨材量を 968kg/m<sup>3</sup>に統一した。混和剤の使用量については、コンクリート打設時のスランプの目標値を 12±2.5cm、空気量の目標値を 4.5±1.5%とし、これらの目標値を達成できるように事前の試験練りの結果から決定した。表-5 と表-6 には、打設時のコンクリートのスランプ (SL、JIS A 1101 準拠)、空気量 (AIR、JIS A 1128 準拠)、温度 (TEMP) の試験値も記載した。

先述したように、W/B40%の供試体はプレストレスト

表-2 暴露試験の実験パラメータ

暴露環境	暴露期間 (年)	W/B (%)	セメントの種類	混和材の種類
つくば	2、4、10、20	35	普通ポルトランドセメント 早強ポルトランドセメント	高炉スラグ微粉末 4000 高炉スラグ微粉末 6000 フライアッシュ II 種
新潟	2、4	40		
沖縄	2、4、10、20	50		

※W/B35%と 50%の供試体では普通ポルトランドセメント、W/B40%の供試体では早強ポルトランドセメントを使用

表-3 結合材の品質

記号	結合材の種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	化学成分 (%)						
				ig.loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
OPC	普通ポルトランドセメント	3.16	3300	1.96	—	—	—	—	1.21	2.06
HPC	早強ポルトランドセメント	3.14	4490	0.88	—	—	—	—	1.22	3.06
BS4	高炉スラグ微粉末 4000	2.89	4210	0.17	32.67	13.74	0.29	42.81	5.99	2.19
BS6	高炉スラグ微粉末 6000	2.91	5950	0.02	32.19	13.72	0.40	42.49	5.85	2.85
FA	フライアッシュ II 種	2.30	4280	2.7	56.0	28.9	4.3	2.2	0.9	0.4

表-4 骨材の品質

骨材の種類	種別	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	粒度分布 (通過率%)										粗粒率
				25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
細骨材	掛川産 山砂	2.56	2.23				100	100	81	61	45	26	7	2.80
粗骨材	笠間産 5号 砕石 硬質砂岩	2.67	0.43	100	88	52	0	0	0					7.12
	笠間産 6号 砕石 硬質砂岩	2.67	0.46	100	100	100	78	6	0					6.16

※粗骨材は均等量の 5号と 6号の砕石を混合したものを使用した。粗骨材最大寸法は 25mm である。

表-5 コンクリート配合 (W/B=40%)

配合 No. <sup>※1</sup>	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>※2</sup>						s/a (%)	混和剤 (B×%)		試験値			
		W	B=HPC+BS4+BS6+FA				S		G	AD <sup>※3</sup>	AE <sup>※4</sup>	SL (cm)	AIR (%)	TEMP (°C)
			HPC	BS4	BS6	FA								
H40	40	165	413				758	968	45.0	0.650	0.0035	11.5	4.6	22.9
H40B430			289	124 (30%)			749		44.7	0.450	0.0020	10.5	3.8	23.7
H40B450			206	206 (50%)			744		44.5	0.450	0.0035	13.5	5.1	23.5
H40B630			289		124 (30%)		750		44.7	0.525	0.0035	13.5	4.7	23.4
H40B650			206		206 (50%)		745		44.6	0.525	0.0035	14.5	4.8	23.2
H40B670			124		289 (70%)		740		44.4	0.425	0.0045	13.0	4.9	22.5
H40F10			371			41 (10%)	746		44.6	0.500	0.0150	9.5	4.2	22.1
H40F20			330			83 (20%)	734		44.2	0.450	0.0250	14.0	4.5	21.6
H40F30			289			124 (30%)	721		43.8	0.400	0.0350	12.0	4.3	24.2
H40S			413				758		45.0	0.550	0.0025	12.0	4.6	22.9
H40B430S			289	124 (30%)			749		44.7	0.450	0.0020	10.0	3.9	23.6
H40B650S			206		206 (50%)		745		44.6	0.500	0.0055	12.5	4.7	22.8
H40F20S			330			83 (20%)	734		44.2	0.425	0.0250	10.5	3.1	23.4

※1 配合 No.の末尾に「S」を付した配合は「模擬蒸気養生」を行った配合である。その他は「水中養生」を行った配合である。

※2 BS4、BS6、FA の()内の%値はセメントに対する各混和材の混合率を質量%で示したものである。

※3 AD：「水中養生」を行った配合ではポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤、「模擬蒸気養生」を行った配合ではポリカルボン酸エーテル系の高性能減水剤を使用した。

※4 AE：フライアッシュを使用した配合では高アルキルカルボン酸系、その他は変性ロジン酸化合物系の空気連行剤を使用した。

コンクリート構造物を想定しているため、養生方法を「水中養生」と「模擬蒸気養生」の2種類とした。「水中養生」の供試体は、打設翌日まで室温約20°Cの練混ぜ室に安置した後に脱枠し、材齢28日まで水温約20°Cの水中で養生を行った。「模擬蒸気養生」の供試体は、打設直後に恒温恒湿槽内で湿潤させた養生マットで覆い、模擬的な蒸気養生を行った。この時の恒温恒湿槽内の温度は、20°Cで3時間前養生を行った後、50°Cまで2時間かけて昇温させ、50°Cを6時間維持し、その後、20°Cまで5時間かけて降温させるように設定した。また、湿度について

は、昇温開始から降温終了までは95%、これ以外では60%に設定した。「模擬蒸気養生」を終えた後の供試体は、脱枠し、材齢28日まで水温約20°Cの水中で養生を行った。一方、W/B35%と50%の供試体の養生方法は「水中養生」のみとし、打設翌日まで室温約20°Cの練混ぜ室に安置した後に脱枠し、材齢28日まで水温約20°Cの水中で養生を行った。なお、暴露試験用の供試体と同時に室内促進試験用と圧縮強度試験用の供試体も製作したが、用途にかかわらず配合ごとに同一の養生を施した。

養生終了後、クロロプレンゴムを主材料とする塗装材

表-6 コンクリート配合 (W/B=35%、50%)

配合 No.	W/B (%)	単体量(kg/m <sup>3</sup> ) <sup>※1</sup>					s/a (%)	混和剤 (B×%)		試験値				
		W	B=OPC+BS4+FA			S		G	AD <sup>※2</sup>	AE <sup>※3</sup>	SL (cm)	AIR (%)	TEMP (°C)	
			OPC	BS4	FA									
N35	35	165	471			713	968	43.5	0.650	0.0010	14.5	4.7	23.8	
N35B50			236	236		695		42.8	0.450	0.0015	14.5	4.3	23.4	
N35B85			71	401		682		42.4	0.400	0.0045	12.5	5.1	22.4	
N35F20			377		94	684		42.5	0.500	0.0050	12.0	3.5	22.4	
N35F40			283		189	655		41.4	0.400	0.0250	14.5	4.5	22.2	
N50			50	165	330				827	47.2	0.250	0.0015	14.0	5.2
N50B50	165	165				815	46.8	0.113	0.0045	13.5	4.3	22.2		
N50B70	99	231				810	46.6	0.094	0.0060	12.5	4.5	22.5		
N50B85	50	281				806	46.5	0.088	0.0065	11.5	4.0	22.1		
N50F20	264				66	807	46.6	0.075	0.0200	11.5	4.4	22.8		
N50F30	231				99	797	46.2	0.038	0.0300	11.0	4.6	23.0		
N50F40	198				132	787	45.9	0.038	0.0400	14.5	4.0	22.8		
N50B50F20	99	165			66	795	46.2	0.025	0.0300	12.0	4.6	22.2		
					(50%)	(20%)								

※1 BS4、FAの()内の%値はセメントに対する各混和材の混合率を質量%で示したものである。

※2 AD:「W/B=35%」の配合ではポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤、「W/B=50%」の配合ではリグニンスルホン酸系の AE 減水剤を使用した。

※3 AE:フライアッシュを使用した配合では高アルキルカルボン酸系、その他は変性ロジン酸化合物系の空気連行剤を使用した。

料を用いて暴露面以外の供試体表面をシールした。その後、材齢6週以降で、つくば、新潟、沖縄の暴露試験場に供試体を移設した。

### 3.1.4 供試体の暴露状況

2012年2月から、つくば、新潟、沖縄の暴露試験場において暴露試験を開始した。各暴露試験場における供試体の暴露状況を写真-1に示す。新潟の暴露試験場は、海水が供試体に直接降りかかることはないが、海中の消波ブロックや波打ち際で生成された海水の飛沫によって飛来塩分が供給される環境である。一方、沖縄の暴露試験場は、このような飛来塩分に加えて、天候によっては海

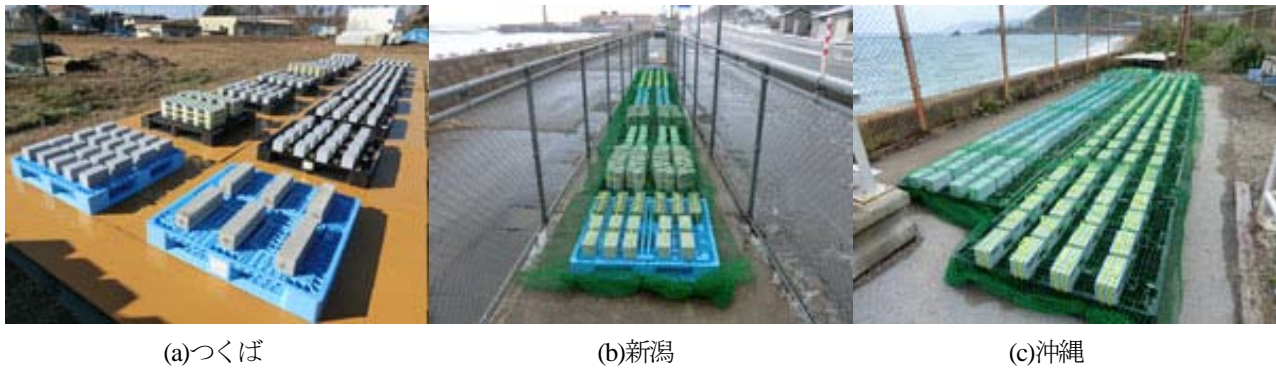
水が供試体に直接降りかかることもある環境である。

また、参考データとして、各暴露試験場の最寄りの気象観測所で得られた2011年の平均気温、平均湿度、合計降水量も付記する<sup>12)</sup>。これらの観測値は必ずしも今回の暴露試験を行う暴露試験場の気象環境と一致するものではないが、気温は沖縄で高く、降水量は新潟で多く、湿度の差はそれほど大きくないようである。

### 3.1.5 供試体の回収と解体調査の予定

供試体の回収と解体調査については、暴露開始から約2年(H25年度)、4年(H27年度)、10年、20年で実施することを予定している。つくばの供試体では、中性化





(a)つくば

(b)新潟

(c)沖縄

写真-1 供試体の暴露状況

※各暴露場の最寄りの気象観測所における 2011 年の平均気温、平均湿度、合計降水量は下記の通りである。

・つくば	気温：14.3℃	湿度：73%	合計降水量：1014.1mm	(観測所：つくば(館野))
・新潟	気温：13.7℃	湿度：76%	合計降水量：3273.5mm	(観測所：高田)
・沖縄	気温：22.4℃	湿度：74%	合計降水量：2115.5mm	(観測所：名護)

深さを測定し、低炭素型セメントを用いたコンクリートの中性化抵抗性について検討を行う予定である。また、新潟と沖縄の供試体では、主に、供試体内部の塩化物イオン濃度の分布を測定し、低炭素型セメントを用いたコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性について検討を行う予定である。

### 3.1.6 材齢 91 日までの強度特性

暴露試験用の供試体と同時に製作した圧縮強度試験用の円柱供試体(φ100mm×200mm)を用いて、低炭素型セメントを使用したコンクリートの強度特性を把握することを試みた。「水中養生」を行った供試体については、材齢 7、28、91 日、「模擬蒸気養生」を行った供試体については、材齢 1、28、91 日で JIS A 1108 に準拠して圧縮強度試験を行った。また、材齢 28、91 日の試験では、コンプレッソメータを用いて静弾性係数の測定を併せて行った。静弾性係数の計算方法は、JIS A 1149 に準拠した。なお、材齢 91 日の試験に用いた供試体は、材齢 28 日まで水中養生を行った後に、温度管理のされていない室内で気中養生を行ったものである。

材齢 91 日までの全供試体の圧縮強度の試験結果を図-2 に示す。使用したセメントの種類や W/B にかかわらず、混和材の混合率が大きい供試体ほど、OPC 単味や HPC 単味の供試体と比べて圧縮強度が小さくなった。この傾向は、HPC を使用した W/B40%の供試体よりも OPC を使用した W/B35%と 50%の供試体で明確に現れた。OPC を使用した供試体と HPC を使用した供試体では混和材の混合率が若干異なるため、必ずしも厳密な比較はできないが、HPC を使用することで混和材使用時の材齢初期での強度発現の遅れを軽減できる可能性があると考え

えられる。

W/B40%の BS4 と BS6 を使用した供試体の圧縮強度を比較すると、材齢 7 日の圧縮強度は BS6 を使用した供試体の方が大きくなった。これは、比表面積が大きく活性度の高い BS6 が初期強度の発現に有効に機能したためと思われる。また、「模擬蒸気養生」を行った供試体の材齢 1 日の圧縮強度は全て  $30\text{N/mm}^2$  を超えており、蒸気養生を行う工場製品でプレストレス導入時に必要とされる圧縮強度を満たすことができると考えられた。

W/B35%と 50%で同一の混和材の混合率の供試体の圧縮強度に着目すると、いずれの場合も W/B35%の供試体の圧縮強度が大きくなった。混和材を使用したコンクリートで材齢初期の圧縮強度の低下を避けるためのひとつの方法は W/B を小さくすることと思われるが、この場合、結果的に単位結合材量が増加して  $\text{CO}_2$  削減効果も低下する可能性があることには注意が必要である。また、BS4 を 85%混合した供試体と FA を 40%混合した供試体はいずれも現行の JIS で規定される混和材の混合率の上限を超えたものであるが、BS4 を 85%混合した供試体は極端に圧縮強度が小さく、材齢 28 日以降の圧縮強度の伸びも小さくなった。

材齢 28 日と 91 日に測定した全供試体の圧縮強度と静弾性係数の関係を図-3 に示す。ここでは、26 種類の配合の供試体で得られた全ての試験結果を掲載している。材齢 28 日の圧縮強度と静弾性係数の関係は、W/B や養生方法、セメント種類、混和材の混合率にかかわらず、土木学会コンクリート標準示方書【設計編】<sup>13)</sup>で規定される圧縮強度と静弾性係数の関係と概ね一致した。しかし、材齢 91 日の試験結果では、いずれの供試体においても圧

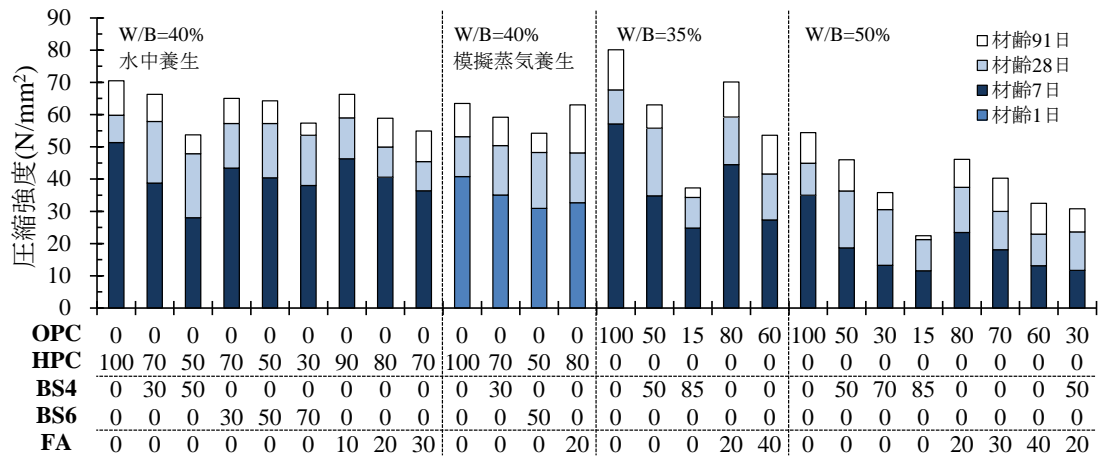


図-2 圧縮強度の試験結果 (材齢91日まで)

※OPC、HPC、BS4、BS6、FAの値は各結合材の使用割合を質量%で示したものである。

縮強度の増加はみられたが静弾性係数は材齢 28 日の結果と同程度であったため、土木学会コンクリート標準示方書【設計編】で規定される圧縮強度と静弾性係数の関係とは一致しなかった。この原因については、現時点では必ずしも明確ではないが、材齢 28 日の試験は水中養生終了直後に実施し、材齢 91 日の試験は水中養生終了後から材齢 91 日まで温度管理のされていない室内に供試体を安置した後で実施したため、コンクリート内部の乾燥状態が大きく異なったためではないかと考えられる。

なお、今後は、つくばに屋外暴露した円柱供試体を用いて、材齢 1 年、3 年でも圧縮強度試験を行い、低炭素型セメントを使用したコンクリートの強度特性について引き続き検討を行っていく予定である。

### 3.2 室内促進試験

コンクリートの耐久性を評価する際、暴露試験を実施することが考えられるが、暴露試験は実環境下での評価ができるという長所を有する反面、試験結果を得るまでに要する時間とコストが膨大になるという短所も併せ持つ。このため、実環境よりも厳しい試験条件でコンクリートの耐久性を評価するための室内促進試験の方法が試験規準として規定されている。低炭素型セメントを使用したコンクリートへの既存の室内促進試験の適用性を検証するため、暴露試験用の供試体と同時に製作した供試体を用いて室内促進試験を行うこととした。

#### 3.2.1 対象とした室内促進試験

H23 年度に製作した室内促進試験用の供試体を用いて実施した室内促進試験の概要を表-7 に示す。ここでは、低炭素型セメント使用時に想定される各室内促進試験の課題についても併記した。

塩害、特に塩化物イオンの浸透に対する抵抗性を評価

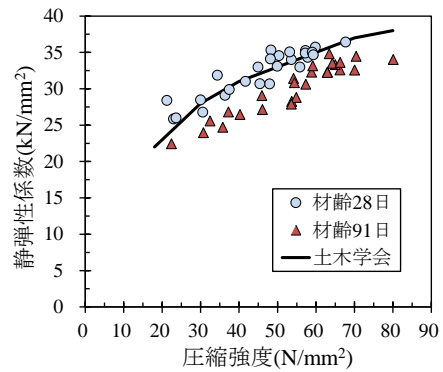


図-3 圧縮強度と弾性係数

するための室内促進試験としては、電気泳動試験 (JSCE-G 571) と浸せき試験 (JSCE-G 572) が土木学会規準として規定されている。電気泳動試験では、塩化物イオンを含む溶液と接している円柱供試体 (φ 100mm×50mm) に 15V の直流電圧を印加して、塩化物イオンを供試体内部へ電気泳動させ、その後、供試体を通過する塩化物イオンの濃度の増加割合が一定に達するまで (定常状態になるまで) 通電と塩化物イオン濃度の測定を継続する必要がある。ここで得られた塩化物イオン濃度の測定結果からその移動流速を求め、実効拡散係数を計算することができるが、混和材 (特に、高炉スラグ微粉末) を高混合した供試体や W/B が低い供試体では、試験に要する期間が極めて長くなることが指摘されている。また、電気泳動試験で得られる実効拡散係数は定常状態での塩化物イオンの移動のし易さを示すものであるため、塩化物イオンが固定化を伴いながら移動するときの拡散速度を示す見掛けの拡散係数とは意味が異なる。実際のコンクリート構造物における塩化物イオンの浸透速度は、見掛けの拡散係数によって予測されると考える



表-7 対象とした室内促進試験

劣化要因	試験方法	試験方法の概要、低炭素型セメント使用時の課題、実施内容
	電気泳動試験 (JSCE-G 571)	(概要) ・直流定電圧 (15V) を用いた電気泳動方法により、コンクリート中で定常状態にある塩化物イオンの実効拡散係数を求めるための試験方法。 (課題) ・混和材を高混合した供試体や低 W/B の供試体の試験を行う際に、試験期間が非常に長くなることがある(場合によっては1年程度)。混和材を高混合した場合に、実効拡散係数を見掛けの拡散係数に適切に換算できるかどうか明確でない。 (実施内容) ・N50、N50B50、N50B85、N50F20、N50F40、N50B50F20の6配合。
塩害	浸せき試験 (JSCE-G 572)	(概要) ・塩化ナトリウム水溶液(濃度10%)に浸せきすることにより、コンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数を求めるための試験方法。 (課題) ・試験開始前の養生期間や浸せき期間をどう設定するか明確でない。浸せき期間が異なる場合、同一配合の供試体でも得られる見掛けの拡散係数が大きく異なることがある。一般的な海水の塩分濃度(約3%)よりも大幅に高い濃度の塩化ナトリウム水溶液を使用する根拠も明確でない。長期間の浸せきを行うため、養生条件の異なる供試体の比較を行うような場合には適していない可能性がある。 (実施内容) ・全26配合。浸せき期間は、6ヶ月、12ヶ月、24ヶ月の3種類。
	非定常・電気泳動試験	(概要) ・直流定電圧を用いた電気泳動方法により、コンクリート中で非定常状態にある塩化物イオンの見掛けの拡散係数を求めるための試験方法。 (課題) ・規準化に向けて土木研究所で検討中。本報告書の第4章でH23年度の検討結果を報告する。 (実施内容) ・全26配合。材齢28日、91日、1年、3年で実施。
中性化	促進中性化試験 (JIS A 1153)	(概要) ・雰囲気中のCO <sub>2</sub> 濃度を高くすることにより(5%)、コンクリートの中性化を促進させた場合の中性化深さを測定するための試験方法。 (課題) ・一般的な大気中のCO <sub>2</sub> 濃度(約0.04%)よりも大幅に高いCO <sub>2</sub> 濃度で試験を行うことの根拠が明確でない。試験の開始材齢の根拠が明確でない。通常は材齢8週から試験を開始するため(湿潤養生4週+乾燥4週)、反応速度の遅い混和材を使用した場合には不利な試験結果が得られることがある。 (実施内容) ・全26配合。W/B35%と55%では、湿潤養生期間を通常の4週間とした供試体に加えて13週間とした供試体でも実施。

※低炭素型セメント使用時の課題については、共同研究内部での討議内容をもとに整理した。

のが妥当である。このため、JSCE-G 571では実効拡散係数を見掛けの拡散係数に換算する方法を記載しているが、現時点ではこれが混和材を高混合したコンクリートにも適用できるかどうか明確ではない。

浸せき試験では、円柱供試体(φ100mm×150mm)を濃度10%の塩化ナトリウム水溶液に一定期間浸せきした後、供試体の深さ方向の塩化物イオン濃度の分布を測定し、コンクリート中への塩化物イオンの浸透がフィックの第2法則に基づいた拡散方程式の解に従うと仮定して見掛けの拡散係数を計算する。しかし、浸せき開始前の供試体の養生期間や浸せき期間の設定方法、一般的な海水の濃度(約3%)よりも大幅に高い濃度の塩水を使用することの根拠など、低炭素型セメントを用いたコンク

リートにそのままの形で適用できるかどうか明確ではない。また、混和材を高混合したコンクリートは、養生条件の受けやすく、養生の出来がその耐久性に多大な影響を与えると考えられる。浸せき試験では、数ヶ月にわたって塩水中に供試体を浸せきすることとなるため、養生条件の違いによる塩化物イオン浸透抵抗性を評価することが困難になる可能性がある。

非定常・電気泳動試験については、試験方法の規準化に向けて土木研究所で検討を行っており、この詳細については第4章で報告する。

一方、中性化抵抗性を評価するための室内促進試験としては、促進中性化試験(JIS A 1153)がある。この試験では、雰囲気中のCO<sub>2</sub>濃度を5%とした促進槽内(温度

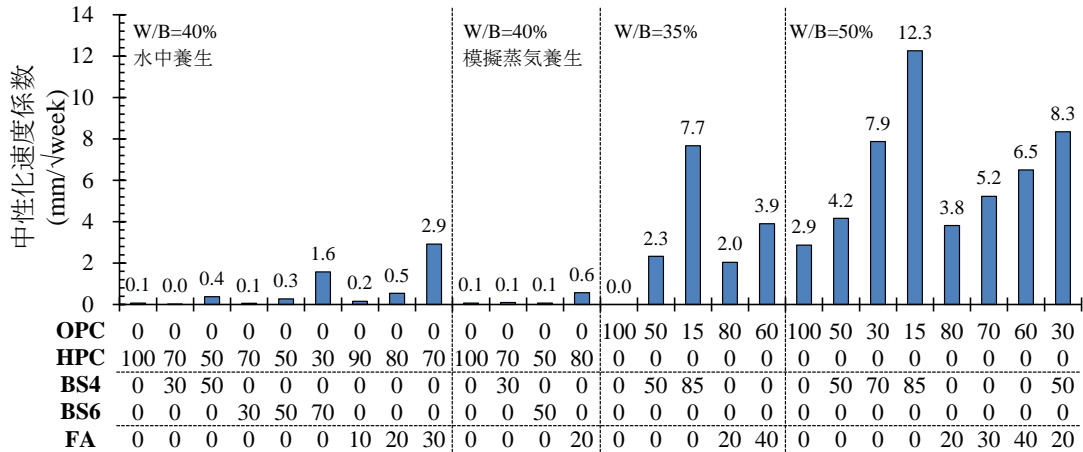


図-4 中性化速度係数 (促進期間 8 週目まで)

※OPC、HPC、BS4、BS6、FA の値は各結合材の使用割合を質量%で示したものである。

20℃、相対湿度 60%) でコンクリートの中性化を促進させるものである。促進期間が 1、4、8、13、26 週の時点で中性化深さを測定し、測定結果から中性化速度係数を計算することができる。通常は、材齢 4 週まで湿潤養生を行い、その後 4 週間の乾燥期間を経た後で試験を開始するが、反応速度の遅い混和材を用いた供試体では極端に不利な結果が得られることが懸念されている。また、試験条件のひとつである CO<sub>2</sub> 濃度の設定値が大気中の CO<sub>2</sub> 濃度 (約 0.04%) よりも大幅に大きいことから、試験条件が過酷すぎるとの懸念もある。

以上のことを踏まえた上で、H23 年度に製作した供試体を用いて、電気泳動試験、浸せき試験、促進中性化試験を実施することとした。電気泳動試験は、多数の供試体での実施が困難なため、6 種類の配合 (N50、N50B50、N50B85、N50F20、N50F40、N50B50F20) に限定して実施することとした。浸せき試験は全 26 配合を対象とし、浸せき期間の違いが試験結果に与える影響について検討するため、6、12、24 ヶ月の 3 種類の浸せき期間を予定した。促進中性化試験も全 26 配合を対象としたが、試験開始前の湿潤養生期間が試験結果に与える影響について検討するため、W/B35%と 50%の供試体については湿潤期間を通常の場合の 4 週間 (28 日間) とした場合と 13 週間 (91 日間) とした場合で試験を行った。いずれの室内促進試験も試験結果を得るまでに長期の試験期間を要することとなるため、上記の試験のうち H23 年度中に結果が得られたのは促進中性化試験の促進期間 8 週目までの結果のみであった。この結果について次に報告する。

### 3.2.2 促進中性化試験の途中経過

促進期間 1、4、8 週の中性化深さの測定結果を用いて計算した中性化速度係数を図-4 に示す。中性化速度係数

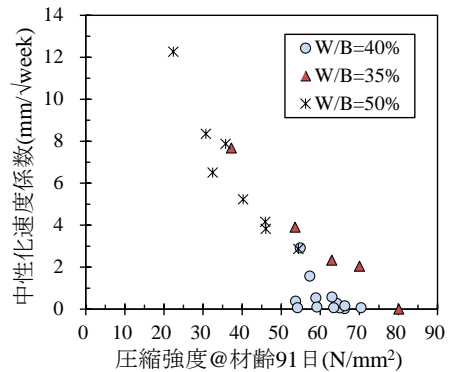


図-5 圧縮強度と中性化速度係数

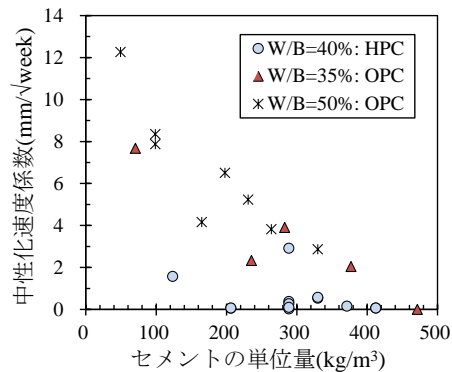


図-6 セメントの単位量と中性化速度係数

$\alpha$  (mm/√week) の計算は、促進期間  $t$  (week) と中性化深さ  $y$  (mm) が式(1)の関係にあると仮定し、促進期間 1、4、8 週の 3 時点での結果を回帰分析して計算した。

$$y = \alpha\sqrt{t} \tag{1}$$

図-4 によると、中性化速度係数は、W/B35%と 50%の供試体に比べて、W/B40%の供試体で小さくなった。W/B40%の供試体で中性化速度係数が比較的大きいのは C 種相当の BS6 と FA を混合した供試体であり、混和材

の混合率が大きいほど中性化速度係数が大きくなったと考えられる。W/B35%と50%の供試体では、同様の傾向をより明確に確認することができる。

中性化速度係数が配合によって大きく異なった原因について考察するため、中性化速度係数と材齢91日の圧縮強度との関係を図-5、セメントの単位量との関係を図-6に示す。これらのグラフによると、圧縮強度が大きいほど、セメントの単位量が多いほど、中性化速度係数が小さくなる傾向にあることが分かる。また、HPCを使用したW/B40%の供試体に着目すると、セメントの単位量が比較的小さい場合においても材齢91日の圧縮強度は50N/m<sup>2</sup>以上となり、同程度のOPCを使用した供試体と比較して、圧縮強度が大きく、中性化速度係数も小さくなったことが読み取れる。すなわち、HPCを使用した供試体では、水和反応の進行がOPCを用いた供試体よりも速く、緻密な組織が形成されたため、圧縮強度が大きくなり中性化の進行も抑制されたのではないかと考えられる。文献14)では、OPCのみを使用した供試体ではあるが、混和材を高混合した場合に圧縮強度が大きいほど中性化速度係数が小さくなったことが報告されている。

ここでは促進期間8週目までの結果を用いて計算した中性化速度係数を示したが、H24年度に、促進期間13、26週の結果を用いて再整理する予定である。また、W/B35%と50%で中性化速度係数が大きくなる結果となったが、これについてはここで使用した供試体と同時に打設して湿潤期間を13週間とした供試体の促進中性化試験を既に開始しており、促進試験前の湿潤期間の影響について検証する予定である。なお、促進中性化試験で得られた結果については、H25年度以降の暴露供試体の解体調査で得られる結果と比較し、促進試験の妥当性についても検証する予定である。

### 3.3 共同研究参加機関による検討

本報告書では、土木研究所で製作した26種類の配合の供試体での試験結果について報告しているが、これに加えて、H23年度に共同研究参加機関で計24種類の配合の供試体を製作した。使用した材料の違いが試験結果に与える影響を排除するため、OPC、HPC、BS4、BS6、FA、細骨材、粗骨材については、全機関で同一のものを使用した。共同研究参加機関の製作した供試体についても、つくば、新潟、沖縄の3ヶ所で土木研究所の製作した供試体と同時に暴露試験を開始した。また、塩化物イオンの浸透と中性化に対する抵抗性を評価するための室内促進試験も併せて実施しているところである。これらの試験結果を精査した上で、「低炭素型セメント結合材を用い

たコンクリートの性能評価及びCO<sub>2</sub>排出削減評価ガイドライン(案)」を作成する予定である。

### 3.4 まとめ

本章では、H23年度に開始した暴露試験と室内促進試験の概要について報告した。いずれの試験も長期の試験期間を要するため、H23年度のみで十分な結果を得るには至らなかったが、低炭素型セメントを使用したコンクリートの材齢91日までの強度特性と中性化抵抗性については基礎的な知見を得ることができた。H24年度以降も引き続き両試験を継続し、結果を整理する予定である。

## 4. 新しい塩化物イオン浸透抵抗性の評価試験方法

先述したように、塩化物イオン浸透抵抗性を評価する試験方法としては、電気泳動試験と浸せき試験が土木学会標準として既に規定されているが、低炭素型セメントを使用したコンクリートにこれらを適用する際には、試験期間が長くなることなど幾つかの課題があると考えられた。このことを受けて、土木研究所では、新しい塩化物イオン浸透抵抗性の評価試験方法として、非定常・電気泳動試験(Non-steady-state Migration Test)を標準化することを目指して、試験方法の検討を行っている。本章では、H23年度に実施した非定常・電気泳動試験の検討結果について報告する。

### 4.1 非定常・電気泳動試験：理論的背景

非定常・電気泳動試験の理論的背景については、次のように説明することができる<sup>15)</sup>。コンクリート中での塩化物イオンの移動は、濃度差、電位差、移動経路での固定化、溶媒の移動の影響を受けながら進展すると考えられる。ここで、コンクリート中の塩化物イオンの移動がNernst-Planck式に従うと仮定すると、単位時間あたりのコンクリート中の単位面積を流れる塩化物イオンのフラックスJは式(2)で与えられる。

$$-J(x) = D \frac{\partial c(x)}{\partial x} + D \frac{zFc}{RT} \frac{\partial \psi(x)}{\partial x} + cv(x) \quad (2)$$

ここに、J：塩化物イオンの単一方向のフラックス

D：塩化物イオンの拡散係数

c：塩化物イオン濃度

x：位置

z：塩化物イオンの電荷

F：ファラデー定数

R：気体定数

T：絶対温度

$\psi$ ：負荷電圧

v：イオン速度(移流速度)

式(2)の右辺の第1項は拡散項、第2項は電気泳動項、第3項は移流項である。飽水状態のコンクリートでは、第3項を無視することができる。また、電位勾配の作用したコンクリートでは、第1項よりも第2項が卓越していると考えられることができるため、第1項も無視することができる。

コンクリート中を移動する塩化物イオンの拡散が非定常状態の場合、任意の時刻 $t$ 、位置 $x$ における塩化物イオン濃度は式(3)のFickの第2法則に支配されると仮定することができる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial j}{\partial x} \quad (3)$$

式(2)の右辺の第1項と第3項を無視して式(3)に代入すると、コンクリート中の塩化物イオン濃度の変化は、式(4)で与えられる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{zF}{RT} \frac{\partial c(x)}{\partial x} \frac{\partial \psi(x)}{\partial x} \quad (4)$$

ここで、ある特定の塩化物イオン濃度の地点がコンクリート内部を移動する速度を、塩化物イオン浸透速度係数 $k$ と定義すると、式(4)より $k$ は式(5)で表される。

$$k = D \frac{zF}{RT} \frac{\partial \psi(x)}{\partial x} \quad (5)$$

式(5)を用いて塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出するためには、 $k$ を何らかの方法で求める必要がある。非定常・電気泳動試験では、塩化ナトリウム水溶液に接した円柱供試体（ $\phi 100\text{mm} \times 50\text{mm}$ ）に直流定電圧で通電し、通電後の供試体内部の塩化物イオンの浸透深さから $k$ を導く方法を採用している。

#### 4.2 非定常・電気泳動試験：試験方法

式(5)を変形すると、非定常・電気泳動試験で得られる塩化物イオンの見掛けの拡散係数は式(6)で定義される。

$$D = k \frac{RT}{zF} \frac{L}{\Delta \phi} \quad (6)$$

- ここに、 $D$ ：見掛けの拡散係数（ $\text{cm}^2/\text{year}$ ）
- $k$ ：塩化物イオン浸透速度係数（ $\text{mm}/\text{hour}$ ）
- $R$ ：気体定数（ $=8.31\text{J}/\text{mol}/\text{K}$ ）
- $T$ ：絶対温度（ $\text{K}$ ）
- $z$ ：塩化物イオンの電荷の絶対値（ $=1$ ）
- $F$ ：ファラデー定数（ $=96485.3\text{C}/\text{mol}$ ）
- $L$ ：円柱供試体の厚さ（ $=50\text{mm}$ ）
- $\Delta \phi$ ：印加電圧（ $\text{V}$ ）

このため、式(6)を用いて見掛けの拡散係数を正確に算出するためには、塩化物イオン浸透速度係数 $k$ 、絶対温度 $T$ 、印加電圧 $\Delta \phi$ の3種類の変数に適切な数値を入力する必

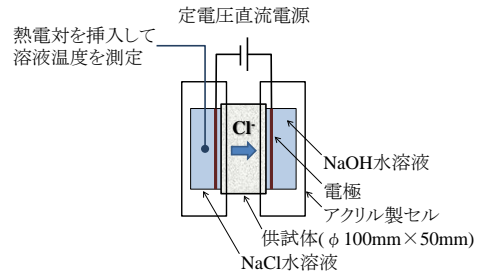


図-7 通電方法のイメージ



写真-2 通電時の状況の例

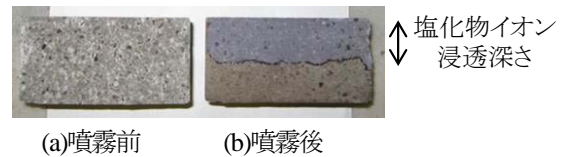


写真-3 硝酸銀噴霧前後の供試体の例

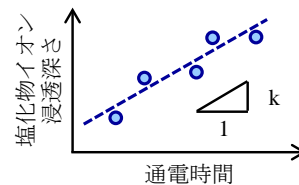


図-8 塩化物イオン浸透速度係数 $k$ の計算方法

要がある。以下に、非定常・電気泳動試験の試験手順と上記の3変数の設定方法を述べる。

- 円柱供試体（ $\phi 100\text{mm} \times 50\text{mm}$ ）を準備する。供試体は、打設時の材料分離の影響を避けるため、円柱供試体（ $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ ）の中央から2個、あるいは円柱供試体（ $\phi 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ ）の中央から1個を切り出して成形する。
- 供試体の側面をエポキシ樹脂で被覆する。
- 供試体をデシケータ内に置き、真空ポンプを用いて3時間の吸引を行う。その後、蒸留水を注入して1時間後に真空ポンプを停止する。デシケータ内に空気を戻して1日程度放置する。
- 2対のアクリル製セルの間に供試体を設置し、陽極側セルにNaOH水溶液（ $0.3\text{mol}/\text{l}$ ）、陰極側セルにNaCl水溶液（ $10\%$ ）を充填する（図-7）。
- 直流定電圧を供試体に印加する（写真-2）。通電の開

始直後と終了前にテスターで両溶液間の電圧を測定し、この平均値を印加電圧  $\Delta\phi$  として式(6)に入力する。通電時間は、電気泳動させる塩化物イオンが供試体を貫通して陽極側セルに到達しない範囲で任意に設定する。通常は、6~30時間の範囲内で設定する。通電は、室温が約20°Cに管理された室内で行う。

- ・通電中の陰極側溶液の温度を測定する。この平均値を  $T$  として式(6)に入力する。
- ・通電後、供試体を取り出して割裂し、割裂面に硝酸銀水溶液 (0.1mol/l) を噴霧する。硝酸銀水溶液が十分に乾燥した後、硝酸銀が白く変色した部分と変色していない部分の境界 (変色境界) の位置をノギスで測定して、塩化物イオンの浸透深さとする (写真-3)。
- ・同様の手順を用いて複数の通電時間で試験を行い、通電時間と塩化物イオンの浸透深さの関係から、塩化物イオン浸透速度係数  $k$  を計算する (図-8)。測定精度を上げるため、少なくとも3種類の通電時間で試験を行う。
- ・式(6)に上記の  $k$ 、 $T$ 、 $\Delta\phi$  を入力して、見掛けの拡散係数を計算する。

上記の試験手順は、過去に土木研究所で実施された実験結果をもとに提案されたものである。本研究課題では、低炭素型セメントを使用したコンクリートへの適用可能性について検討を行い、非定常・電気泳動試験を規準化することを目指す。ここで明らかにしておくべき課題としては以下の点が挙げられる。

- ・混和材を高混合したコンクリートへの適用実績が少ないため、このようなコンクリートに対する非定常・電気泳動試験の適用可能性を検証する必要がある。同時に、印加電圧や通電時間の設定方法など試験手順の詳細についても再確認が必要である。
- ・通電により塩化物イオン以外のイオンの移動が生じることが予測されるが、過去の検討では塩化物イオンを含めた各種イオンの移動形態が明確に示されていない。各種イオンの移動が試験結果に与える影響の有無についても明らかにする必要がある。
- ・塩化物イオン浸透速度係数  $k$  を適切に決定するためには硝酸銀の変色境界の測定精度が極めて重要であるが、硝酸銀の変色時の塩化物イオン濃度は大きくばらつくことが報告されている<sup>16)</sup>。混和材を混合したコンクリートにおいて硝酸銀の変色境界と塩化物イオン濃度の関係を明らかにする必要がある。
- ・電気泳動試験や浸せき試験、暴露試験などその他の試験から得られる見掛けの拡散係数との比較を行い、

試験結果の妥当性について実験結果と理論背景の両面から検証することが必要である。

#### 4.3 非定常・電気泳動試験：欧米の試験方法との違い

通電によりコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性を評価する方法として、国外では既に複数の試験方法が規準化されている。例えば、北米では、ASTM C 1202<sup>17)</sup>と AASHTO T 277<sup>18)</sup>として急速塩分浸透性試験 (Rapid Chloride Permeability Test) が規準化されている。これらでは、円柱供試体 ( $\phi 100\text{mm} \times 50\text{mm}$ ) に、60Vの直流電圧を6時間印加し、供試体を通過した電荷量を用いて塩化物イオン浸透抵抗性を間接的に評価する方法を採用している。ただし、この試験に対しては、コンクリート内部に様々なイオンが存在し、通電時には塩化物イオン以外のイオンの移動も生じて電流が流れることとなるため、試験中に測定した電流を積算して求めた通過電荷量だけでは必ずしもコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性を測定できないとの批判がある<sup>19)</sup>。また、北欧では NT BUILD 492<sup>20)</sup>として、非定常・電気泳動試験が規準化されている。この方法は、土木研究所で検討している非定常・電気泳動試験と概ね同様の試験方法を採用しているが、供試体1体のみの結果から塩化物イオンの浸透速度を計算する点が大きく異なる。この問題点については本章で実験結果をもとに述べるが、土木研究所では、少なくとも3体以上の供試体を使用して3種類以上の通電時間で試験を行うことを提案している。

#### 4.4 モルタル供試体での試行実験

##### 4.4.1 実験の目的

低炭素型セメントを使用したコンクリートへの非定常・電気泳動試験の適用性について検討するため、H23年度は、まずモルタル供試体を用いた試行実験を実施して、以下の5項目について検討を行った。

- ・低炭素型セメントを使用し、養生条件の異なるモルタル供試体において、非定常・電気泳動試験により塩化物イオンの見掛けの拡散係数を適切に算出することができるか確認する。
- ・印加電圧と通電時間を様々に変化させた場合に試験結果に生じる影響を明らかにした上で、適切な印加電圧と通電時間の設定方法について検討する。
- ・配合の種類や通電時間の違いが硝酸銀の変色境界の塩化物イオン濃度に与える影響を明らかにする。また、通電後の供試体内部の塩化物イオン濃度の分布状態を明らかにする。
- ・通電による供試体内部の塩素、カルシウム、ナトリウム、カリウムの移動の有無を確認する。



表-8 モルタル供試体の配合と基本物性

No.	結合材 (混和材の混合率)	W/B (%)	砂結合 材比	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					フロー (mm)	空気量 (%)	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	
				W	C	BS	FA	S			材齢 28 日	材齢 91 日
N40	普通ポルトランド セメント単味	40	1:2.5	237	592	—	—	1480	109×11 0	7.2	76.0	87.2
N40BS50	高炉スラグ微粉末 (50%)			235	293	293	—	1467	112×112	7.7	59.4	81.3
N40FA20	フライアッシュ (20%)			234	468	—	117	1461	119×12 0	6.7	67.0	80.0

表-9 モルタル供試体の実験内容の概要

水中養生期間	非定常・電気泳動試験		電位差滴定法による 塩化物イオン濃度の測定	EPMA 法による 面分析	水銀圧入法による 細孔径分布の測定
	印加電圧	通電時間			
材齢 28 日まで	30V 45V	7 水準	<ul style="list-style-type: none"> <li>硝酸銀の変色境界を中心に、厚さ 10mm にスライスして全塩と可溶性塩の濃度を測定</li> <li>14 供試体/配合で実施</li> </ul>	—	—
材齢 91 日まで	15V 30V 45V	5 水準	<ul style="list-style-type: none"> <li>厚さ 10mm にスライスして深さ方向の全塩と可溶性塩の濃度分布を測定</li> <li>5 供試体 (印加電圧 30V のみ) / 配合で実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>割裂面の塩素、カルシウム、ナトリウム、カリウムの分布を測定</li> <li>1 供試体/配合で実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>通電条件の異なる供試体で細孔分布を測定</li> <li>4 供試体/配合で実施</li> </ul>

- ・特に印加電圧の大小に着目して、通電が供試体の細孔構造に与える影響を明らかにする。

#### 4.4.2 実験の方法

モルタル供試体の配合と基本物性を表-8 に示す。結合材は、普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末 (比表面積 4210cm<sup>2</sup>/g、密度 2.88g/cm<sup>3</sup>)、フライアッシュ (比表面積 4140cm<sup>2</sup>/g、密度 2.35g/cm<sup>3</sup>) の 3 種類とした。N40 は普通ポルトランドセメント単味とし、N40BS50 では普通ポルトランドセメントの 50% を高炉スラグ微粉末で置換し、N40FA20 では 20% をフライアッシュで置換した。W/B は 40%、砂結合材比は 1:2.5 で一定とした。圧縮強度は、材齢 28 日あるいは材齢 91 日まで水中養生を行った直後に測定した。いずれの時点においても N40 の圧縮強度が最も大きくなったが、材齢 91 日まで水中養生を行うと、普通ポルトランドセメント単味の N40 と混和材を使用した N40BS50、N40FA20 の差が小さくなったことが分かる。なお、混和剤は使用しなかった。

実験内容の概要を表-9 に示す。非定常・電気泳動試験は水中養生期間の異なる供試体 (材齢 28 日までと 91 日まで) を対象として行い、養生条件の異なる供試体の塩化物イオン浸透抵抗性の違いを把握できるか検証するこ

ととした。いずれの養生期間の供試体も、水中養生終了後、直ちに試験を行った。また、印加電圧の大小と通電時間の長短が試験結果に与える影響を明らかにするため、水中養生 28 日の供試体では印加電圧 30、45V で各 7 水準の通電時間、水中養生 91 日の供試体では印加電圧 15、30、45V で各 5 水準の通電時間を設定した。通電時間については、電気泳動した陰極側セルの塩化物イオンが供試体を通過して陽極側セルに到達しないように、3~45 時間の範囲で任意に設定した。

通電による塩化物イオンの移動形態を明らかにするため、割裂後の供試体中の塩化物イオン濃度の測定を 2 種類の方法で行った。水中養生 28 日の供試体では、硝酸銀の変色境界の塩化物イオン濃度を明らかにするため、全ての供試体において、硝酸銀の変色境界が中心となるように供試体を厚さ 10mm にスライスし、全塩と可溶性塩の濃度を測定した。一方、水中養生 91 日の供試体では、供試体の深さ方向の塩化物イオンの分布を把握するため、供試体を厚さ 10mm に均等にスライスして、全塩と可溶性塩の濃度を測定した。いずれの測定も JIS A 1154 に準拠し、電位差滴定法により行った。

塩化物イオンに加えて、カルシウム、ナトリウム、カ

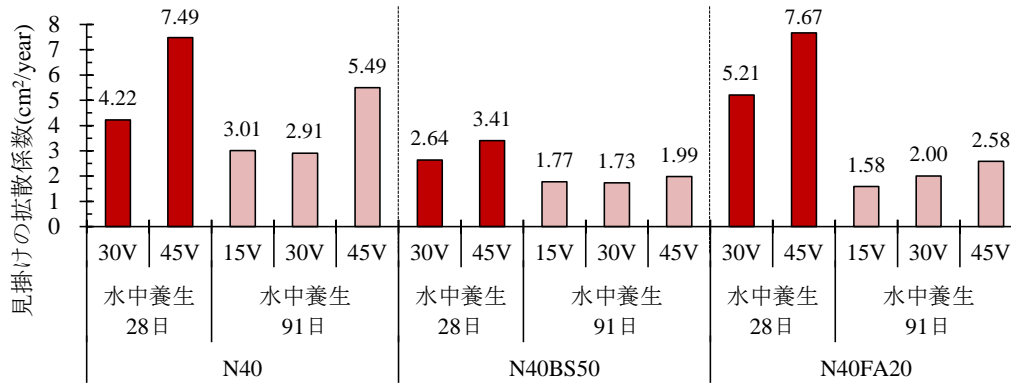


図-9 非定常・電気泳動試験による見掛けの拡散係数

リウムの供試体中での移動の有無を確認するため、供試体の割裂面を対象として、EPMA法による面分析を行った。測定には、水中養生91日後に印加電圧45Vで通電を行った供試体のうち、N40は12時間、N40BS50とN40FA20は21時間の通電を行った供試体を使用した。測定は、JSCE-G 574に準拠して行った。

また、通電の有無と通電時の印加電圧の大小が供試体の細孔構造に与えた影響を明らかにするため、水銀圧入法により細孔径分布の測定を行った。ここでも供試体は水中養生91日後に通電を行ったものを使用し、通電を行っていない供試体と印加電圧15、30、40Vで通電を行った供試体の細孔径分布を測定した。

#### 4.4.3 見掛けの拡散係数の算出結果

非定常・電気泳動試験による見掛けの拡散係数の算出結果を図-9に示す。水中養生28日の見掛けの拡散係数は、N40BS50で最も小さく、N40とN40FA20ではこれよりも大きくなった。一方、水中養生91日の見掛けの拡散係数は、N40BS50とN40FA20が同程度となり、N40よりも小さくなった。また、水中養生28日と91日の結果では、いずれの配合も水中養生91日の見掛けの拡散係数が小さくなった。特にN40FA20では、水中養生91日の見掛けの拡散係数が28日の半分以下となり、養生期間を長くすることで、塩化物イオン浸透抵抗性が大幅に向上したことが分かる。このように、非定常・電気泳動試験から算出される見掛けの拡散係数は、配合や養生条件の異なる供試体の塩化物イオン浸透抵抗性を適切に評価することができると考えられる。

また、印加電圧が大きいほど見掛けの拡散係数も大きくなる傾向にあった。ただし、水中養生91日の結果では、印加電圧15Vと30Vの場合の見掛けの拡散係数は同程度であり、45Vの場合に大きくなった。このため、印加電圧を大きくした場合に見掛けの拡散係数を適切に求める

ことができなくなることが懸念される。この原因については、通電時間と塩化物イオン浸透深さの関係、通電中の電流と陰極側溶液の温度の変化に着目して考察する。

なお、非定常・電気泳動試験を行った供試体と同時に製作した供試体を用いて、濃度の異なる塩化ナトリウム水溶液(3、10、20%)による浸せき試験を実施しており、H24年以降に両試験から得られた見掛けの拡散係数を比較する予定である。

#### 4.4.4 通電時間と塩化物イオン浸透深さ

水中養生91日の供試体で得られた通電時間と塩化物イオン浸透深さの関係を図-10に示す。グラフ中には印加電圧ごとの回帰直線も示しているが、この回帰直線から大幅に乖離するようなデータは得られなかった。すなわち、今回の実験の印加電圧と通電時間の設定範囲内であれば、通電時間と塩化物イオン浸透深さは比例関係にあったと考えられる。ただし、印加電圧45Vの場合、他の印加電圧と比べて塩化物イオンの浸透深さの増加程度が大きくなった点に注意が必要である。例えば、印加電圧15Vと30Vの結果を比較すると、印加電圧15Vの塩化物イオン浸透深さは30Vの約0.5倍であった。ところが、印加電圧30Vと45Vの結果を比較すると、印加電圧45Vの塩化物イオンの浸透深さは30Vの1.5倍以上となることが多かった。同様の傾向は図-11の塩化物イオン浸透速度係数の計算値においても確認することができる。非定常・電気泳動試験の見掛けの拡散係数は式(6)を用いて計算されるが、式(6)では印加電圧の増加程度よりも塩化物イオン浸透深さ、すなわち、塩化物イオン浸透速度係数の増加程度の方が大きくなるような場合には、見掛けの拡散係数の計算値が大きくなる。このため、印加電圧45Vの場合に見掛けの拡散係数が大きく計算された原因のひとつとしては、他の印加電圧の場合と比べて塩化物イオン浸透深さが大幅に大きくなったことが挙

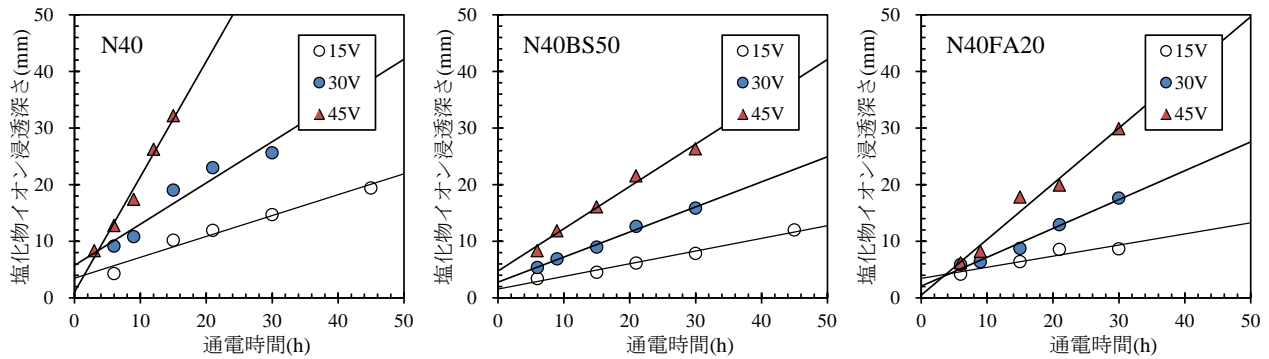


図-10 通电時間と塩化物イオン浸透深さ (水中養生 91 日)

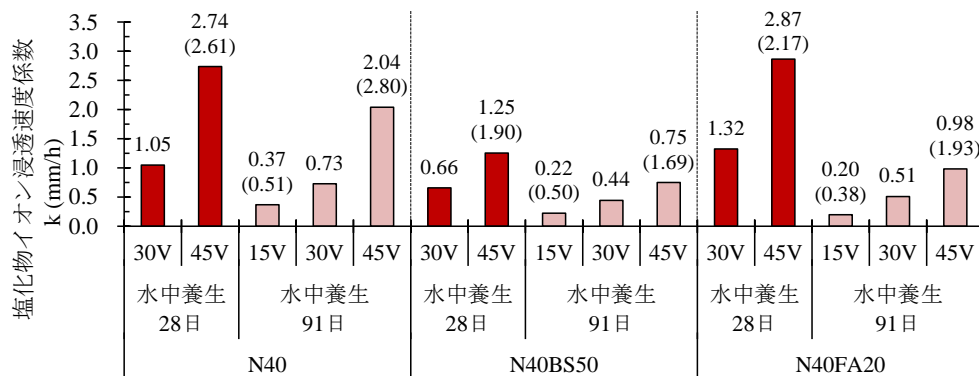


図-11 塩化物イオン浸透速度係数 k

※)内は印加電圧 30V の値に対する比率を示す。

げられる。

また、図-10 では、いずれの配合と印加電圧の場合においても、回帰直線の y 軸切片は正となり、原点を通過することはなかった。先述したように、NT BUILD 492 では供試体 1 体のみの試験結果から塩化物イオンの浸透速度を求める方法を採用しているが、この方法では通电時間と塩化物イオン浸透深さの回帰直線が原点を通らない場合に通电時間の設定によって求まる塩化物イオンの浸透速度が大きく異なることが起こり得る。このことは、NT BUILD 492 で算出される見掛けの拡散係数が通电時間の選択によって変動する可能性があることを意味している。ただし、この回帰直線が原点を通らない原因については現時点では明確でないため、H24 年度以降の実験で引き続き検討していく予定である。

#### 4.4.5 通电中の電流と陰極側溶液の温度の推移

水中養生 91 日の供試体の通电中の電流の推移を図-12、陰極側溶液の温度の推移を図-13 に示す。いずれの配合においても、印加電圧を 45V とした場合に、通电中の電流と陰極側溶液の温度の増加量が大きいことが分かる。印加電圧を 45V とした場合、他の印加電圧と比較して、塩化物イオンの浸透深さの増加程度が大きくなる結果が

得られたが、この原因は、このように通电中の電流が大幅に増加して多くの塩化物イオンが供試体内部に電気泳動したためではないかと考えらえる。また、式(6)には通电中の陰極側溶液の温度の平均値を入力する必要があるため、通电中の陰極側溶液の温度の上昇量が大きい場合にも算出される見掛けの拡散係数が大きくなる。印加電圧 45V の場合に見掛けの拡散係数が大きくなったもうひとつの原因として、このように通电中の陰極側溶液の温度の上昇量が大きくなったことが挙げられる。

以上のことを踏まえると、非定常・電気泳動試験を用いて見掛けの拡散係数を適切に算出するためには、通电中の電流と陰極側溶液の温度が大幅に増加しない程度に印加電圧を設定することが必要と考えられる。今回の実験では、印加電圧 15V の場合ではほとんど電流と陰極側溶液の温度の増加がなく、印加電圧 30V にもこれとほぼ同程度の見掛けの拡散係数が得られた。このため、今回の試験結果の範囲内では、印加電圧は 30V 以下に設定する必要があると考えらえる。

#### 4.4.6 積算通過電荷量と塩化物イオン浸透深さ

今回の実験で得られた積算通過電荷量と塩化物イオン浸透深さの関係を図-14 に示す。積算通過電荷量は、通

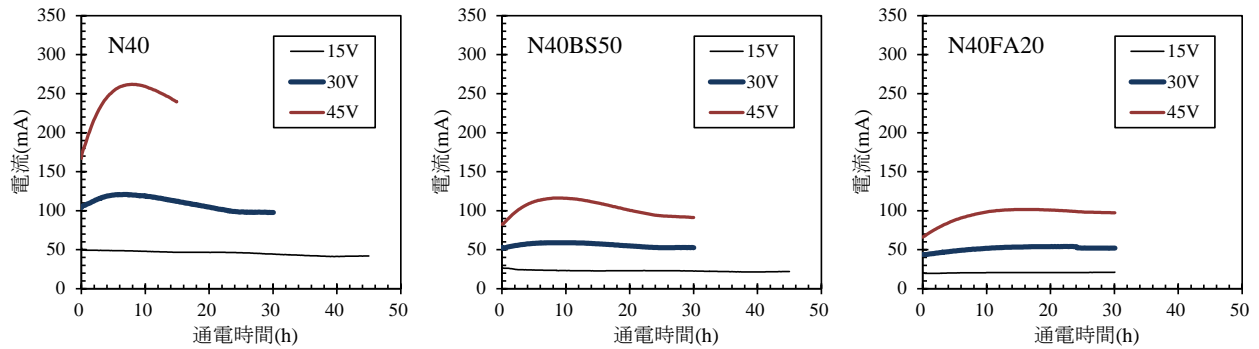


図-12 通電中の電流の推移（水中養生91日）

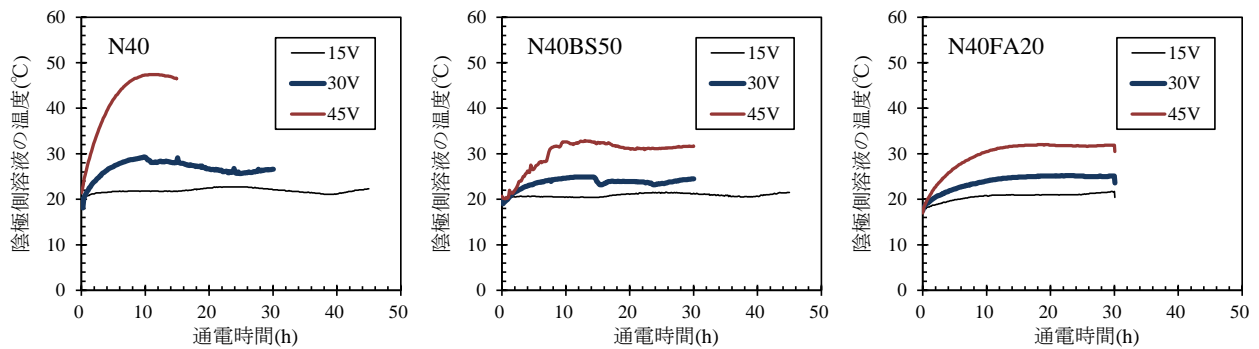


図-13 通電中の陰極側溶液の温度の推移（水中養生91日）

電中の電流の測定値を電荷量に換算して積算して求めた。積算通過電荷量と塩化物イオン浸透深さは概ね線形関係にあるように思われる。しかし、グラフを厳密に精査すると、同一の積算通過電荷量に対して N40 と N40BS50 は概ね同程度の塩化物イオン浸透深さとなったが、N40FA20 はこれらよりも若干大きな塩化物イオン浸透深さとなった。また、この傾向は、塩化物イオン浸透深さが大きくなるほど顕著に現れた。すなわち、供試体の配合によって積算通過電荷量と塩化物イオンの浸透深さの関係が異なる可能性がある。このことを踏まえると、先述した ASTM C 1202 と AASHTO T 277 のように積算通過電荷量のみを用いて供試体の塩化物イオン浸透抵抗性を評価する方法は必ずしも妥当ではないと考えられる。

また、ここでも図-10と同様に、実験データの回帰直線が原点を通過しないと考えられるが、この原因については現時点では明確でない。H24年度に通電時間を極端に短くした供試体の塩化物イオン浸透深さを測定するなどして検討を継続していく予定である。

#### 4.4.7 塩化物イオン濃度の測定結果

硝酸銀の変色境界が中心となるように供試体を厚さ10mmにスライスして行った全塩と可溶性塩の濃度の測定結果を図-15に示す。配合ごとに整理すると、多少のばらつきは認められるが、硝酸銀の変色境界における全

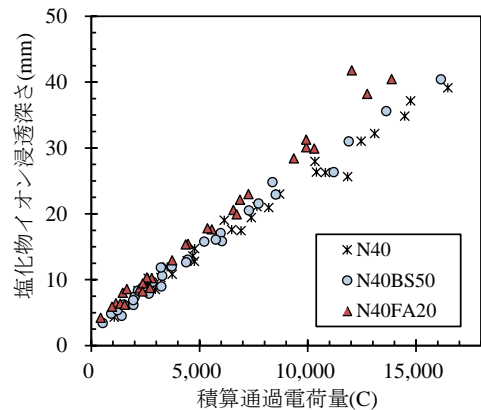


図-14 積算通過電荷量と塩化物イオン浸透深さ

塩と可溶性塩の濃度は概ね線形関係にあると考えられる。すなわち、配合による違いはあるが、供試体内部の塩化物イオンの浸透フロントは、全塩と可溶性塩の比率が概ね一定の割合に保たれた状態で供試体内部を移動したと考えられる。なお、ここで測定結果に大きなばらつきが生じた原因としては、いずれの供試体においても割裂面の硝酸銀の変色境界が曲線となったことから、供試体内部の3次元的な塩化物イオンの浸透が均一ではなく、変色境界近傍のみの試料を採取することが困難であったことが挙げられる。また、後述の EPMA 法による面分析の結果でも分かるように、電気泳動された塩化物イオン



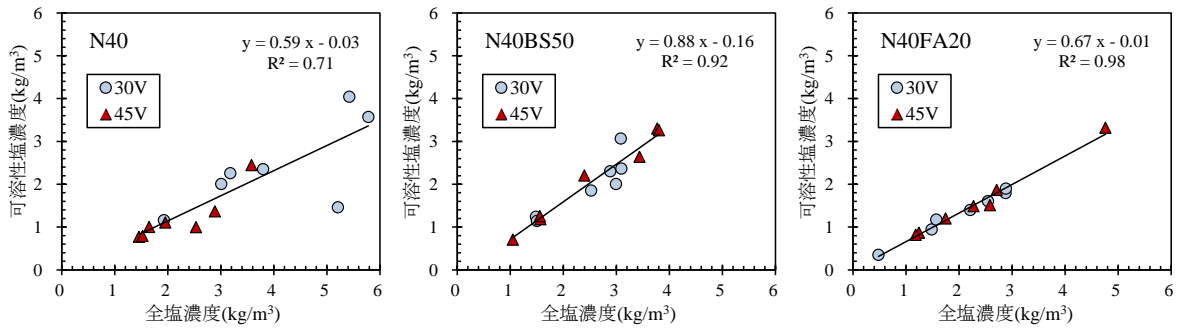


図-15 硝酸銀の変色境界の塩化物イオン濃度

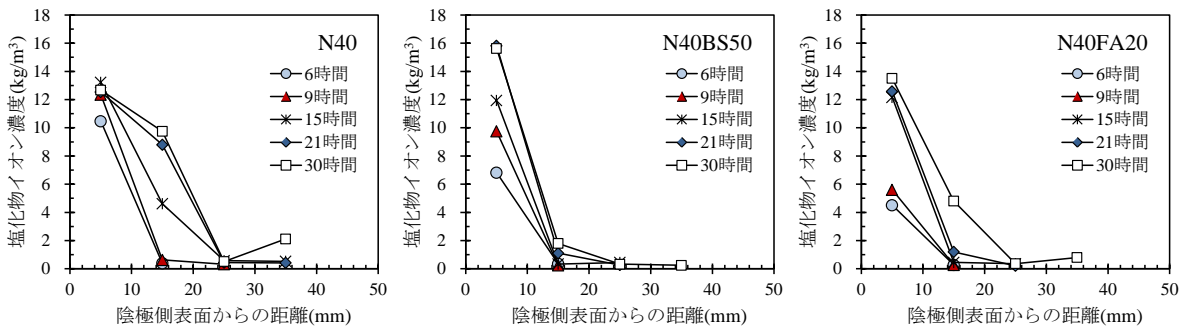


図-16 供試体内部の塩化物イオン濃度の分布

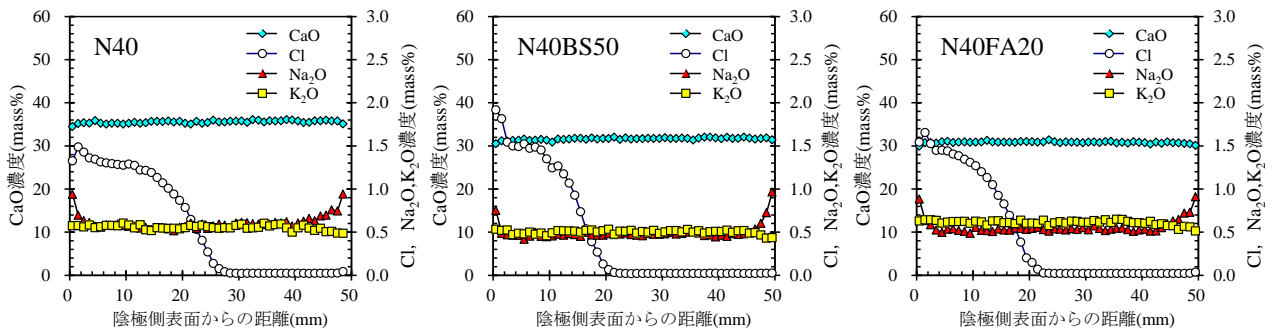


図-17 通電後の塩素、カルシウム、ナトリウム、カリウムの分布

の浸透フロントでの濃度勾配はかなり急であり、僅かな試料採取位置の違いが塩化物イオン濃度の測定結果に大きな影響を与えたことも原因として考えられる。

各配合で通電時間の異なる供試体を均等に厚さ 10mm でスライスして実施した全塩の濃度の測定結果を図-16 に示す。塩化物イオンは通電時間の増加に伴い徐々に供試体内部へと浸透したことが分かる。N40 では、供試体の陰極側の表面付近 (0~10mm) の塩化物イオン濃度が頭打ちとなり、その後、徐々に供試体内部に (10~20mm) 塩化物イオンが浸透した様子を読み取れる。N40BS50 と N40FA20 では深部まで塩化物イオンが浸透する前に通電を終えたが、同様の傾向を確認することができる。また、今回の測定結果では塩化物イオン濃度の上限値は 12~16kg/m<sup>3</sup> の範囲内にあるが、配合間で若干異なる。こ

の原因については現時点では明確ではなく、H24 年度に様々な配合の供試体を用いて検討する予定である。

#### 4.4.8 EPMA 法による面分析の結果

EPMA 法による面分析の結果を図-17 に示す。これらの結果は、CaO 濃度が 20mass% 以上のピクセルを抽出することにより、主としてセメントセメントペーストに相当する部分の面分析の結果を示したものである。いずれの配合においても通電により塩素が供試体内部に浸透したことを明確に確認できる。一方、塩素以外のカルシウム、ナトリウム、カリウムは、通電による移動は起きていなかったと考えられる。ナトリウムの濃度が供試体の両側表面で高いが、これは通電中に供試体を NaOH と NaCl の水溶液と接触させていたためと考えられる。

例えば文献 21) と 22) では、通電中にカルシウムの溶出



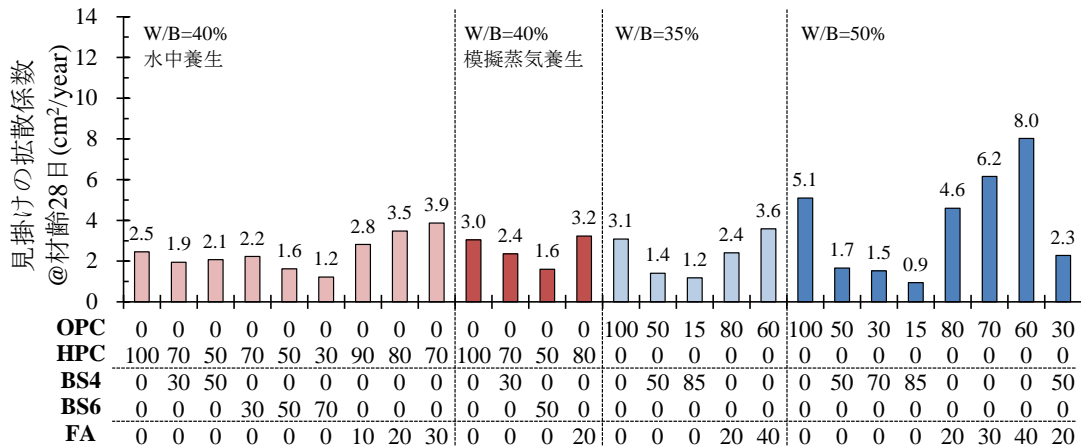


図-18 非定常・電気泳動試験によるコンクリート供試体の見掛けの拡散係数（材齢28日）

※OPC、HPC、BS4、BS6、FAの値は各結合材の使用割合を質量%で示したものである。

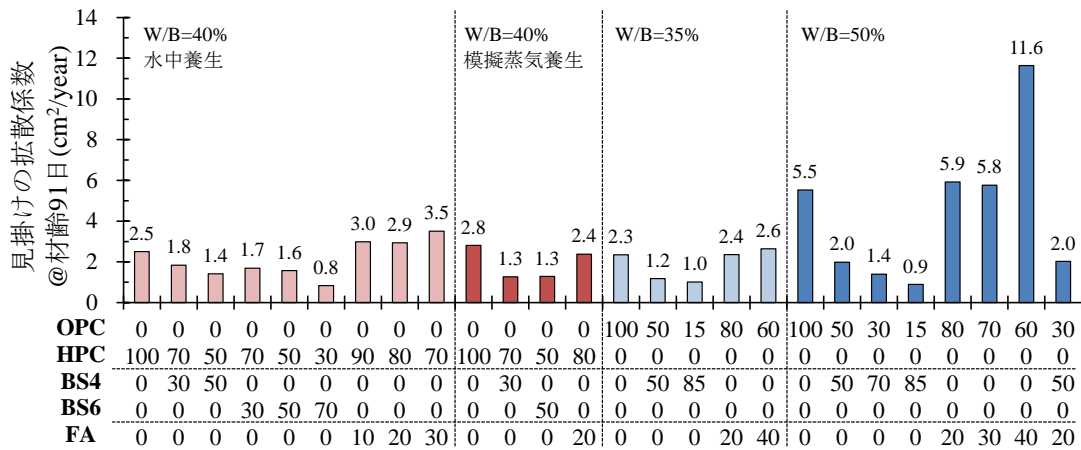


図-19 非定常・電気泳動試験によるコンクリート供試体の見掛けの拡散係数（材齢91日）

※OPC、HPC、BS4、BS6、FAの値は各結合材の使用割合を質量%で示したものである。

やナトリウムの移動などが生じることが報告されていたが、今回のEPMA法による面分析の結果では必ずしもそのような結果は得られなかった。この原因は、非定常・電気泳動試験での通電時間が最長でも30時間程度であり、既往研究の通電時間に比べて短かったためと考えられる。すなわち、非定常・電気泳動試験では、供試体内部でカルシウム、ナトリウム、カリウムの移動が明確に確認される前に通電を終えていると考えられる。ただし、水酸化物イオンの移動については今回の測定では把握できなかったため、H24年度の実験ではこの点を明らかにするための測定を実施することが必要である。

図-17によると、図-16に示した全塩の濃度の結果と同様に、陰極側から浸透する塩化物イオンの濃度は概ね一定値で頭打ちになっていたことが分かる。また、塩化物イオン濃度の単位を  $\text{kg/m}^3$  に換算すると、同程度の濃度の塩化物イオンが浸透していたことを確認できた。

#### 4.4.9 水銀圧入法による細孔径分布の測定結果

水銀圧入法による細孔径分布の測定を実施したが、今回の測定では、印加電圧を15、30、45Vとした場合の細孔径分布の変化を明確に確認するには至らなかった。今回の実験の範囲内では、印加電圧15~45Vの通電が供試体の細孔構造に与えた影響の差はそれほど大きくなかったと推察される。

### 4.5 低炭素型セメントを用いたコンクリートへの適用

#### 4.5.1 実験の方法

前章で述べた暴露試験用の供試体と同時に製作したコンクリート供試体を用いて、非定常・電気泳動試験を用いて塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出した。全26種類の配合の供試体を対象として、材齢28日と91日で試験を行った。供試体は、材料分離を避けるためφ100mm×100mmの円柱供試体から中央の厚さ50mmの部分を切り出したものを使用した。また、圧縮強度試験に

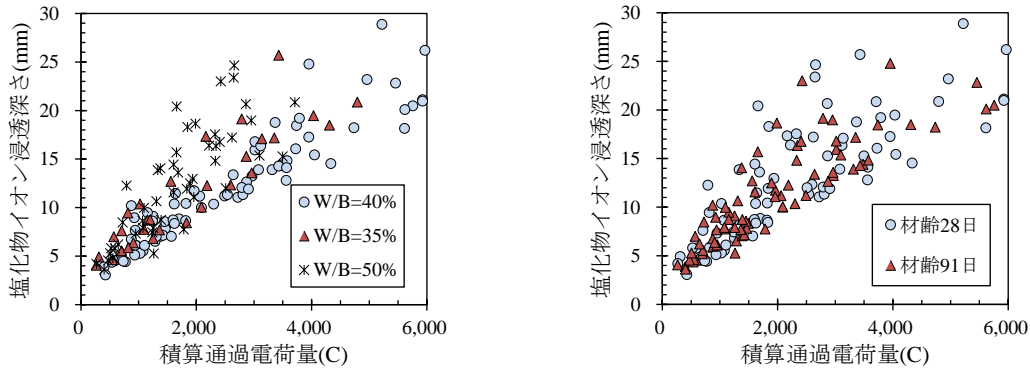


図-20 積算通過電荷量と塩化物イオン浸透深さ (W/B と材齢による比較)

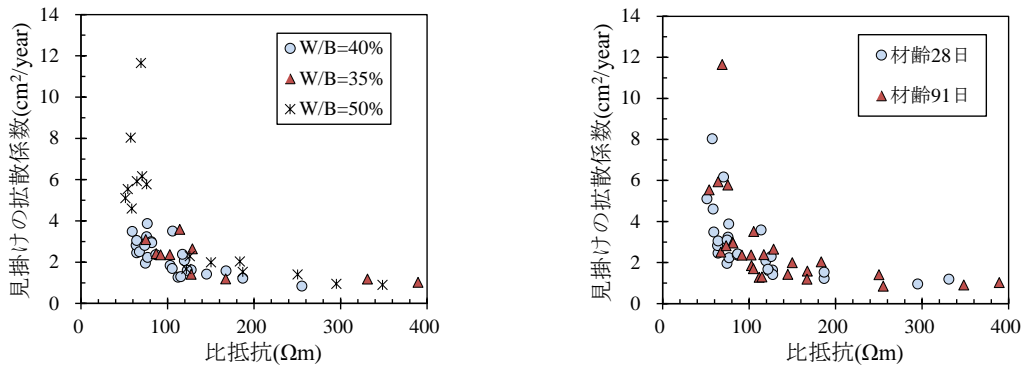


図-21 比抵抗と見掛けの拡散係数 (W/B と材齢による比較)

使用した円柱供試体と同様に、「水中養生」と「模擬蒸気養生」を施したいずれの供試体も材齢 28 日まで水中養生を行い、その後、材齢 91 日まで温度管理のされていない室内に安置した後で試験を行った。なお、ここでは真空飽水処理後の供試体を対象として、LCR メータを用いて比抵抗の測定も同時に行った。

#### 4.5.2 実験の結果

非定常・電気泳動試験を材齢 28 日のコンクリート供試体に適用した結果を図-18、材齢 91 日のコンクリート供試体に適用した結果を図-19 に示す。W/B にかかわらず、OPC 単味あるいは HPC 単味の供試体と比較すると、高炉スラグ微粉末を使用した供試体では見掛けの拡散係数が小さくなったが、フライアッシュを使用した供試体では見掛けの拡散係数が大きくなった。この傾向は、図-9 の材齢 28 日まで水中養生を行ったモルタル供試体と同様である。ところが、コンクリート供試体で材齢 28 日と 91 日の結果を比較すると、見掛けの拡散係数は、若干のばらつきがあるものの、概ね同程度に留まっており、必ずしも材齢が長くなるほど改善していなかったことが読み取れる。この原因は、図-9 のモルタル供試体では材齢 91 日まで水中養生を継続していたが、コンクリート供試体では材齢 28 日で水中養生を終えて室内に安置したため、その後の見掛けの拡散係数の低下が生じなかった

めと考えられる。

積算通過電荷量と塩化物イオン浸透深さの関係を図-20 に示す。図-14 と同様に、積算通過電荷量が多いほど塩化物イオンの浸透深さが大きくなる傾向を確認することができる。ただし、W/B が異なる場合には、積算通過電荷量と塩化物イオン浸透深さの関係も異なるようである。図-14 では 3 種類のモルタル供試体の結果を整理したが、ここでは 26 種類のコンクリート供試体の結果を整理したため、上記の違いを明確に確認することができた。このことから、ASTM C 1202 と AASHTO T 277 が採用しているような積算通過電荷量のみでの評価方法では供試体の塩化物イオン浸透抵抗性を適切に評価することが困難となる可能性が高いと言える。

また、比抵抗と見掛けの拡散係数の関係を図-21 に示す。この結果によれば、W/B や測定時の材齢の違いにかかわらず、比抵抗と見掛けの拡散係数は、概ね反比例の関係にあると考えられる。

なお、ここで示した結果は、いずれも材齢 91 日までの測定結果である。同時に製作した供試体をつくばの屋外に暴露しており、H24 年度以降で、材齢 1 年、3 年の試験を行う予定である。

#### 4.6 まとめ

本章では、低炭素型セメントを使用したコンクリート

表-10 試算に用いた CO<sub>2</sub> 排出原単位

項目	インベントリーデータの算出方法	CO <sub>2</sub> 排出量 (kg-CO <sub>2</sub> )
ポルトランドセメント	・(社)セメント協会から提供された 2003 年度の各種原単位に原料輸送と購入電力使用に伴う環境負荷を加えた。	766.6
天然粗骨材	・加工時に要したエネルギー消費とそれに伴う環境負荷のみを考慮した。	2.9
天然細骨材		3.7
高炉スラグ微粉末	・副産物製造時の環境負荷はゼロとし、加工時に要したエネルギー消費とそれに伴う環境負荷のみを考慮した。	26.5
フライアッシュ		19.6

※各種の統計データを使用して、製造・加工時のエネルギー消費と購入電力を CO<sub>2</sub> 排出量に換算している。

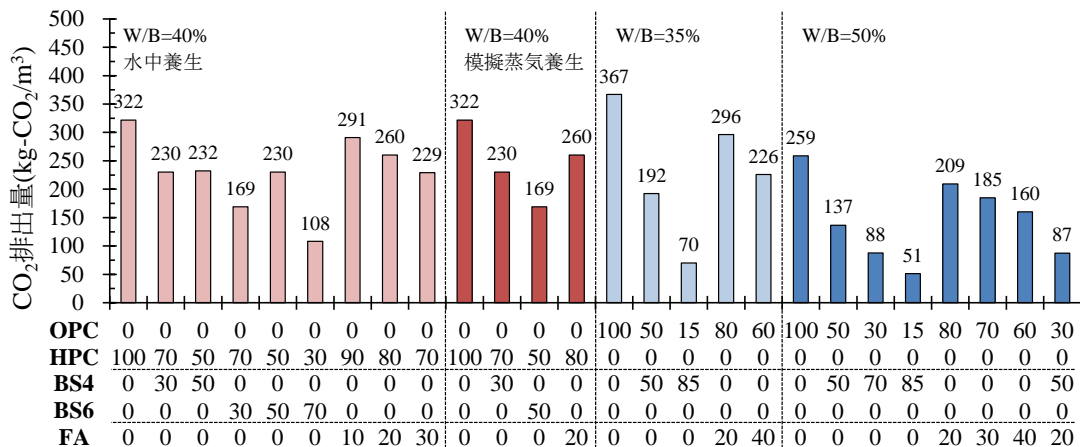


図-22 使用材料からの CO<sub>2</sub> 排出量の試算結果

※OPC、HPC、BS4、BS6、FA の値は各結合材の使用割合を質量%で示したものである。

の塩化物イオン浸透抵抗性を迅速に評価するための試験方法として、非定常・電気泳動試験の適用性について検討を行った。H23 年度の実験的検討により、非定常・電気泳動試験を用いることで、配合や養生条件を反映した見掛けの拡散係数を算出することができる可能性があることを示した。ただし、見掛けの拡散係数を適切に算出するためには、通電中に電流と陰極側溶液の温度の大幅な上昇が生じない範囲内に印加電圧を設定する必要がある。また、通電中の供試体内部の各種イオンの移動形態を明らかにした。H24 年度は、様々な配合のモルタル供試体を用いて検討を継続するとともに、長期材齢のコンクリート供試体でも測定を行う予定である。

### 5. CO<sub>2</sub> 削減効果の試算

近年、社会資本整備に伴って発生する CO<sub>2</sub> 排出量を算定するためのインベントリーデータが様々な機関で作成されている。コンクリート構造物の建設時に発生する CO<sub>2</sub> 排出量を算定するために必要となる CO<sub>2</sub> 排出原単位については、土木学会コンクリート委員会で過去に検討

が行われており、この成果については文献 23)~25) で公表されている。本章では、H23 年度に屋外暴露試験と室内促進試験のために製作した供試体に使用したコンクリート配合 (表-5、表-6) を対象として、コンクリートの構成材料から排出される CO<sub>2</sub> 量の試算結果を報告する。

#### 5.1 CO<sub>2</sub> 削減効果の試算方法

試算に用いた各材料の CO<sub>2</sub> 排出原単位の算出方法と数値を表-10 に示す。今回の試算では文献 24) に記載された CO<sub>2</sub> 排出原単位を用いた。ここでは、H23 年度に製作したコンクリートの配合を対象として、コンクリート 1m<sup>3</sup> の打設に必要なポルトランドセメント、粗骨材、細骨材、高炉スラグ微粉末、フライアッシュの各材料の製造時に排出される CO<sub>2</sub> を積み上げて計算した。H23 年度の供試体では、普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントの 2 種類のセメントを使用し、高炉スラグ微粉末も比表面積の異なる 2 種類のものを使用した。文献 24) で示された CO<sub>2</sub> 排出原単位がどちらに該当するものか明確でなかったため、ここではセメントと高炉スラグ微粉末の種類の違いにかかわらず同一の CO<sub>2</sub> 排出原

単位を用いて試算を行った。また、混和剤についてはCO<sub>2</sub>排出原単位の値自体が示されていないため、今回はこれを除外して試算を行った。

## 5.2 CO<sub>2</sub>削減効果の試算結果

H23年度のコンクリート配合を対象として行ったCO<sub>2</sub>排出量の試算結果を図-22に示す。混和材の混合率が高いほど、CO<sub>2</sub>排出量が少なくなる傾向にある。この原因は、表-10に示したCO<sub>2</sub>排出原単位から分かるように、ポルトランドセメントのCO<sub>2</sub>排出量が高炉スラグ微粉末やフライアッシュの30~40倍であり、セメントの使用量を減らすほど、CO<sub>2</sub>排出削減効果が得られるためである。同様の理由により、特に単位結合材量の多いW/Bの小さい供試体において、混和材の使用によるCO<sub>2</sub>排出削減効果が大きくなったことが分かる。

また、材齢91日の圧縮強度とCO<sub>2</sub>排出量の関係を図-23に示す。この結果によると、材齢91日の圧縮強度が大きいほどCO<sub>2</sub>排出量も多くなることが分かる。材齢91日の圧縮強度を大きくするためには単位セメント量を増やす必要があり、この結果、CO<sub>2</sub>排出量も多くなったと考えられる。ただし、セメント種類の違いに着目すると、OPCを使用したW/B35%と50%の供試体では圧縮強度が大きいほどCO<sub>2</sub>排出量も多くなっているが、HPCを使用したW/B40%の供試体では、いずれの配合においても材齢91日で50N/mm<sup>2</sup>以上の圧縮強度が得られており、この中にはCO<sub>2</sub>排出削減効果の高いものも含まれている。すなわち、混和材を高混合した配合において、圧縮強度の確保とCO<sub>2</sub>排出削減効果の両方を達成するためには、早強ポルトランドセメントと各種混和材の組み合わせが効果的となる可能性があることを示唆している。

一方、図-23は、CO<sub>2</sub>排出削減効果を重視したコンクリート配合を選択する場合、材齢初期の圧縮強度が低下する可能性が高いことを意味している。これに対するひとつの対策としては、第2章に示した欧州の事例のように、高い圧縮強度を要求しない部材での使用を主な用途として混和材を高混合したコンクリートを利用していくことが考えられる。

## 5.3 試算時の問題点

H23年度は、コンクリートの各構成材料の製造時に排出されるCO<sub>2</sub>を対象として、低炭素型セメントの使用によるCO<sub>2</sub>排出削減効果の試算を行った。この計算過程において以下の問題点が明らかとなった。

- H23年度は文献(24)に示されているCO<sub>2</sub>排出原単位を用いて試算を行ったが、実際には、セメント、高炉スラグ微粉末、フライアッシュいずれの結合材にも

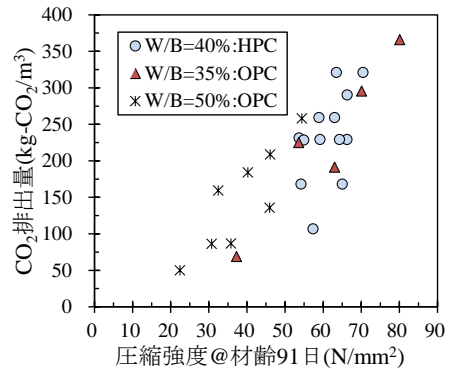


図-23 圧縮強度（材齢91日）とCO<sub>2</sub>排出量

複数の銘柄があり、これらに同一のCO<sub>2</sub>排出原単位を用いて良いか明確でなかった。また、シリカフェームなど上記以外の結合材のCO<sub>2</sub>排出原単位も明らかでなかった。

- H23年度の試算では、混和剤の製造時と輸送時に排出されるCO<sub>2</sub>を含めなかった。文献(25)では数種類の混和剤のCO<sub>2</sub>排出原単位の試算例が示されていたが、銘柄によっては具体的な値が示されておらず、試算に使用することが困難であった。
- 文献(24)に示されたCO<sub>2</sub>排出原単位は、2000年と2002年のものであった。CO<sub>2</sub>排出原単位は産業界の技術革新とともに常に変化する可能性が高いため、最新版のCO<sub>2</sub>排出原単位を継続的に整備しておくことが必要と思われた。

## 5.4 まとめ

H23年度は、コンクリートの各構成材料の製造時に排出されるCO<sub>2</sub>を対象として、低炭素型セメントの使用によるCO<sub>2</sub>排出削減効果を試算した。H24年度以降は、構成材料だけでなく、コンクリート構造物のライフサイクルを通じたCO<sub>2</sub>排出削減効果の算出方法について検討を行う予定である。

## 6. まとめ

本研究課題では、低炭素型セメントを使用したコンクリートの性能評価方法と設計施工方法、CO<sub>2</sub>排出削減効果の算定方法などを提案することを目的として検討を行っている。H23年度の検討結果を以下にまとめる。

- 国内外のセメント規格における混和材の混合率の規定内容を調査したところ、米国と欧州では、日本よりも高い上限値が規定されていた。ただし、これらの国と地域においても、混和材を高混合したコンクリートの普及は十分に進んでいないと考えられた。
- 低炭素型セメントを使用したコンクリートの強度特

性と耐久性を実環境下で明らかにするため、長期暴露試験をつくば、新潟、沖縄で開始した。強度特性については材齢 91 日までの傾向を把握した。

- ・暴露試験用の供試体と同時に製作した供試体を用いて、浸せき試験、電気泳動試験、促進中性化試験など室内促進試験を開始した。促進中性化試験については促進期間 8 週目までの結果を得た。
- ・非定常・電気泳動試験の低炭素型セメントを使用したコンクリートへの適用性について検討を行った結果、配合や養生条件の違いによる見掛けの拡散係数の差を適切に把握できると考えられた。
- ・コンクリート製造時に発生する CO<sub>2</sub> 排出量を試算した結果、混和材の混合率を高くすることで、CO<sub>2</sub> 排出削減効果を高めることができることを確認した。

平成 24 年度は、本報告書で報告した屋外暴露試験と室内促進試験を継続するとともに、低炭素型セメントを使用したコンクリートのクリープ・収縮特性、養生条件が強度特性と耐久性に与える影響、断熱温度上昇特性について検討を行い、「低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの性能評価及び CO<sub>2</sub> 排出削減評価ガイドライン(案)」を作成するための基礎データを得る予定である。

#### 参考文献

- 1) セメント協会ホームページ：  
<http://www.jcassoc.or.jp/index.html>
- 2) 手塚正道、梶原勉、齋藤謙一、河合研至：PC 橋上部工の CO<sub>2</sub> 排出量の見える化、コンクリート工学、Vol.48、No.9、pp.91-94、2011
- 3) 日本規格協会：JIS ハンドブック 10 生コンクリート、2008
- 4) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用（平成 24 年版）、<http://www.slg.jp/index.html>
- 5) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【施工編】、2008
- 6) ASTM C 989-09a: Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars, American Society of Testing and Materials, <http://www.astm.org/>
- 7) ASTM C 618-08a: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, American Society of Testing and Materials, <http://www.astm.org/>
- 8) ASTM C 595-10: Standard Specification for Blended Hydraulic Cements, American Society of Testing and Materials, <http://www.astm.org/>
- 9) ACI 318-08: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary, American Concrete Institute, 2008
- 10) BS EN 197-1:2000: British Standard Cement-Part 1 Composition, specifications and conformity criteria for common cements, British Standards Institution, 2007
- 11) EUROPEAN CONSTRUCTION IN SERVICE OF SOCIETY ECO serve NETWORK: Cluster 2 Production and Application of Blended Cements, Network Activities, Blended cements, The sustainable solution for the cement and concrete industry in Europe, [http://www.eco-serve.net/publish/cat\\_index\\_19.shtml](http://www.eco-serve.net/publish/cat_index_19.shtml)
- 12) 気象庁ホームページ：  
<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 13) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】、2008
- 14) 溝渕麻子、小林利充、近松竜一、一瀬賢一：混和材を高置換した各種コンクリートの基礎的性質および CO<sub>2</sub> 排出量の削減効果、混和材を積極的に使用するコンクリートに関するシンポジウム論文集、日本コンクリート工学協会、JCI-C81、pp.167-172、2011
- 15) 土木学会：コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向、土木学会、コンクリート技術シリーズ No.55、2003
- 16) Baroghel-Bouny, V., Belin, P., Maultzsch, M., Henry, D.: AgNO<sub>3</sub> Spray tests: advantages, weaknesses, and various applications to quantify chloride ingress into concrete. Part1: Non-steady-state diffusion tests and exposure to natural conditions, Materials and Structures, Vol.40, pp.759-781, 2007
- 17) ASTM C 1202-10: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, American Society of Testing and Materials, <http://www.astm.org/>
- 18) AASHTO T 277-07: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, American Association of State Highway and Transportation Officials, <http://www.transportation.org/>
- 19) Shi, C., Stegemann, J. A., Caldwell, R. J.: Effect of Supplementary Cementing Materials on the Specific Conductivity of Pore Solution and its Implications on the Rapid Chloride Permeability Test (AASHTO T 277 and ASTM C 1202) Results, ACI Materials Journal, V.95, No.4, July-August, pp.389-394, 1998
- 20) NORD TEST: NT BUILD 496, Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments, <http://www.nordtest.info/>
- 21) 大畑公嗣、杉山隆文、辻幸和、Supratik Gupta：コンクリート中の電気伝導現象における塩化物イオンの役割、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.2、pp.511-516、日本国



## 7.1 低炭素型セメントの利用技術の開発

リート工学協会、2001

- 22) 久田真、大井才生、尾口本一、長瀧重義：モルタルからのカルシウムの溶出に伴うセメント水和物の組成と硬化体物性の変化、コンクリート工学年次論文集、Vol.22、No.1、pp.223-228、2000
- 23) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価、土木学会、コン

クリート技術シリーズNo.44、2002

- 24) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価（その2）、土木学会、コンクリート技術シリーズNo.62、2004
- 25) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）、土木学会、コンクリートライブラリーNo.125、2005

## DEVELOPMENT OF UTILIZATION TECHNIQUES FOR LOW CARBON CEMENTS

**Budget** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2011-2015

**Research Team** : Materials and Resources Research  
Group (Concrete and Metallic  
Materials Research Team)

**Author** : WATANABE Hiroshi

MORIHAMA Kazumasa

NAKAMURA Eisuke

**Abstract** : The objective of this collaborative research project with eight organizations is to develop utilization techniques for low carbon cements. The project focusses on the effects due to the large usage of the low carbon cements: test methods to evaluate performance of concrete, design and construction techniques, and calculation procedures of carbon dioxide reduction. In this fiscal year, a long-term exposure test was launched in Tsukuba, Niigata, and Okinawa to clarify strength characteristics and durability of concrete fabricated with the low carbon cements. Several accelerated tests, including the non-steady-state migration test, were also applied to concrete specimens to evaluate their resistances to chloride ingress and carbonation. Moreover, the carbon dioxide reduction created by the large usage of the low carbon cements was estimated.

**Keywords** : low carbon cement, supplementary cementing materials, exposure test, non-steady-state migration test, concrete structure