

プレストレストコンクリートの耐久性向上を目指した  
CaO・2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系塩素固定化材の適用性に関する研究

2023年11月

俵 道和

## 目 次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 PC 構造物の耐久性向上	1
1.1.2 PC 構造物の環境負荷低減	2
1.2 研究の目的	2
1.3 本論文の構成	4
参考文献	6
第2章 既往の研究	7
2.1 本章の概要	7
2.2 混和材および高炉スラグ細骨材の使用に関する既往の研究	7
2.2.1 $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ 系塩素固定化材	7
2.2.2 高炉スラグ微粉末	10
2.2.3 高炉スラグ細骨材	12
2.3 コンクリートの耐久性向上に関する既往の研究	13
2.3.1 塩化物イオン浸透抵抗性	14
2.3.2 中性化抵抗性	15
2.3.3 凍結融解抵抗性	15
2.3.4 ASR 抵抗性	16
2.4 現状の課題と本論文の位置づけ	17
参考文献	19
第3章 ペーストの特性に及ぼす塩素固定化材の影響に関する評価	23
3.1 本章の目的	23
3.2 試験概要	23
3.2.1 試験材料および配合	23
3.2.2 試験方法および試験項目	24
3.3 試験結果	30
3.3.1 セメントの水和生成物に及ぼす塩素固定化材の影響	30
(1) 結合材種類の影響	30
(2) 初期養生温度の影響	32
(3) 促進中性化の影響	34
3.3.2 塩化物イオンの固定作用に及ぼす塩素固定化材の影響	37
(1) 結合材種類の影響	37

(2) 初期養生温度の影響	38
(3) 促進中性化の影響	39
3.3.3 ペースト硬化体の細孔構造に及ぼす塩素固定化材の影響	41
(1) 結合材種類の影響	41
(2) 初期養生温度の影響	41
(3) 促進中性化の影響	42
3.3.4 ペースト硬化体の塩化物イオン見掛け拡散係数に及ぼす塩素固定化材の影響	44
(1) 結合材種類の影響	44
(2) 期養生温度の影響	46
(3) 促進中性化の影響	46
3.3.5 ペースト硬化体の圧縮強度に及ぼす塩素固定化材の影響	49
(1) 結合材種類の影響	49
(2) 初期養生温度の影響	49
3.4 本章のまとめ	50
参考文献	51
第4章 モルタルの特性に及ぼす塩素固定化材の影響に関する評価	52
4.1 本章の目的	52
4.2 試験概要	52
4.2.1 試験材料および配合	52
4.2.2 試験方法および試験項目	54
4.3 試験結果	56
4.3.1 モルタルのフレッシュ性状に及ぼす塩素固定化材の影響	56
4.3.2 モルタルの細孔構造に及ぼす塩素固定化材の影響	58
(1) 結合材種類の影響	58
(2) 初期養生温度の影響	58
(3) 骨材種類の影響	59
(4) 促進中性化の影響	59
4.3.3 モルタルの塩化物イオンの見掛け拡散係数に及ぼす塩素固定化材の影響	61
(1) 結合材種類の影響	61
(2) 初期養生温度の影響	62
(3) 骨材種類の影響	63
(4) 促進中性化の影響	64
4.3.4 モルタルの圧縮強度に及ぼす塩素固定化材の影響	67
(1) 結合材種類の影響	67
(2) 初期養生温度の影響	68

(3) 骨材種類の影響	68
4.4 本章のまとめ	69
参考文献	70
第5章 コンクリートの特性に及ぼす塩素固定化材の影響に関する評価	71
5.1 本章の目的	72
5.2 試験概要	72
5.2.1 使用材料および配合	72
5.2.2 試験方法および試験項目	75
(1) フレッシュ性状に関する試験方法	75
(2) 強度特性に関する試験方法	75
(3) 変形特性および体積変化に関する試験方法	75
(4) 耐久性に関する試験方法	75
5.3 試験結果	77
5.3.1 コンクリートのフレッシュ性状に及ぼす塩素固定化材の影響	77
(1) コンクリートのスランプおよび空気量	77
(2) コンクリートのブリーディング	81
(3) コンクリートの凝結時間	82
5.3.2 コンクリートの強度特性に及ぼす塩素固定化材の影響	84
(1) 標準養生を行った試験体の強度特性	84
(2) 蒸気養生の影響	86
(3) 湿潤養生期間の影響	86
5.3.3 コンクリートの変形特性に及ぼす塩素固定化材の影響	92
(1) 自己収縮と乾燥収縮	92
(2) ヤング係数	102
(3) クリーブ係数	103
5.3.4 コンクリートの耐久性に及ぼす塩素固定化材の影響	104
(1) コンクリートの塩分浸透抵抗性	104
a) 塩化物イオンの見掛け拡散係数	104
b) 塩化物イオンの実効拡散係数	111
(2) コンクリートの中性化抵抗性	117
(3) コンクリートの凍結融解抵抗性	119
(4) コンクリートの ASR 抵抗性	125
5.3.5 湿潤養生日数が耐久性に及ぼす影響	132
(1) コンクリートの塩分浸透抵抗性	132
(2) コンクリートの中性化抵抗性	133

5.4 本章のまとめ	134
参考文献	136

第6章 大型試験体によるプレストレストコンクリートへの 塩素固定化材の適用性に関する検証	137
6.1 本章の目的	137
6.2 試験概要	137
6.2.1 試験材料および配合	137
6.2.2 大型試験体の概要	138
6.2.3 試験方法および試験項目	140
6.3 試験結果	145
6.3.1 大型試験体の強度特性およびヤング係数に及ぼす塩素固定化材の影響	145
6.3.2 大型試験体の変形特性に及ぼす塩素固定化材の影響	146
6.3.3 大型試験体の耐久性に及ぼす塩素固定化材の影響	151
(1) コンクリートの塩分浸透抵抗性	151
(2) コンクリートの中酸化抵抗性	154
(3) 非破壊検査手法を用いた $CA_2$ の評価	154
a) 自然電位による鋼材腐食の評価	154
b) 電気抵抗率による耐久性評価	155
c) 表層透気係数による評価	157
d) 透気係数と電気抵抗率を用いた評価	158
6.4 大型試験体の曲げ耐力に及ぼす塩素固定化材の影響	160
6.5 本章のまとめ	170
参考文献	171

第7章 プレストレストコンクリートの耐用年数に及ぼす 塩素固定化材の影響に関する FEM 塩分浸透解析	172
7.1 本章の目的	172
7.1.1 解析の方法	172
(1) 解析用ソフト	172
(2) 解析条件および解析パラメーター	173
(3) 解析モデル	173
7.2 プレストレストコンクリートの耐用年数に及ぼす塩素固定化材の影響	174
7.2.1 コンクリート中の塩化物イオン濃度の経年変化の予測	174
7.2.2 コンクリート構造物寿命に及ぼす塩素固定化材の影響	177
7.2.3 $CA_2$ の設計計算への反映方法に関する検討	178

7.3 本章のまとめ .....	181
参考文献 .....	182
第8章 結論 .....	183
謝辞 .....	190

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

コンクリートは圧縮力には強いが引張力に対しては極めて弱い構造材料である。したがって、曲げ部材として使用する場合には、コンクリート断面の引張側を何らかの方法で補強しなければ有効に利用することはできない。プレストレストコンクリート（以下、PC という）は、断面に発生する引張応力を予測し、それに見合う圧縮応力をあらかじめ計画的に部材断面に与えることで、ひび割れを生じさせない構造とすることや、ひび割れ幅を制御することも可能であり、コンクリートの弱点を克服できる工法である。PC 構造物は強度、耐久性および耐震性などに優れているため、橋梁、建築、容器、防災施設および港湾施設などのインフラ施設に広く利用されており、自然災害が多発するわが国において防災および減災に対して PC 技術の果たす役割は大きい。PC 構造物を対象にさまざまな研究が行われている中で、考慮すべき社会背景として、構造物の耐久性向上と環境負荷低減が今後より求められると考えられる。

### 1.1.1 PC 構造物の耐久性向上

近年、少子高齢化や国の財政が逼迫する中で、社会インフラの長寿命化や維持管理の合理化が求められる中、PC 構造物は維持管理の負担軽減や長寿命化を求められている。また、PC 構造物は過酷な使用条件や環境条件にあるにもかかわらず、当初の設計供用期間を超えても供用を継続している構造物も増加している<sup>1.1)</sup>。

PC 構造物はひび割れを制御できることに加え、使用するコンクリートの設計基準強度が高く設定されているため、鉄筋コンクリート（以下、RC という）構造物と比較して耐久性が高く経年劣化が生じにくいとされている。しかしながら、すべての施工段階、部位、発生方向などにおいてひび割れ発生リスクを防止できるとは言い切れない。さらに、構造物の長期供用期間中に塩化物イオンなどの劣化因子がコンクリート内に浸透することによってコンクリートの劣化や鉄筋の腐食が発生し、さらに PC 鋼材位置まで浸透が進めば構造物の耐荷性や耐震性に直接影響する PC 鋼材の腐食や破断が発生する可能性が高まり、PC 鋼材の破断は破壊が脆性的となり重大な被害につながる。なお、PC 構造物の劣化進行後に補修や補強を行う場合は、PC 構造物はプレストレスが導入されているため RC 構造物に比べてコンクリート断面の除去や修復に配慮が必要となる。さらに、PC 構造物は長支間の橋梁や大容量の容器など、RC 構造物に比べて大規模で重要な構造物に使用されることが多いことから、劣化後の撤去や交換が容易に行えないため、PC 構造物は耐久性確保の優先度および重要性が非常に高いと言える。

PC 構造物の主な劣化現象には塩害やアルカリシリカ反応（以下、ASR という）などが挙げられ、これらの劣化を抑制するための設計施工の基準類が整備されている。しかし、現状

の対策では十分と言い難い。例えば、塩害対策としてはコンクリートの品質および耐久性の向上対策以外に、鉄筋のかぶりの増加やエポキシ樹脂鉄筋の使用や表面改質材の塗布などの対策<sup>1.2)</sup>である程度の効果は見込めるが、構造物の死荷重の増加やコストアップなどの課題が生じる。また、ASR に対して無害と判定される骨材の使用や、アルカリ総量を規定値以下に抑える対策など、すでに ASR 対策を講じたコンクリート構造物であっても ASR の劣化が発生した報告があり<sup>1.3), 1.4)</sup>、既存の基準類に準拠しても完全に劣化を抑えることができない場合がある。

以上により、PC 構造物はインフラの重要性や優先度が高く、構造的特性から補修補強の難易度が高く、劣化・損傷を引き起こす前段階での耐久性確保が重要な課題となる。さらに、道路橋示方書・同解説<sup>1.5)</sup>では平成 29 年度の改定に伴い適切な維持管理を行うことを前提に設計供用期間として 100 年を標準とすることが規定された。長期供用が求められる中で、既存の耐久性向上技術や対策では不十分となる場合も考えられることから、PC 構造物のさらなる耐久性向上技術に関する研究開発が望まれる。

### 1.1.2 PC 構造物の環境負荷低減

地球温暖化を緩和するために二酸化炭素排出量の少ない社会、すなわち、低炭素社会の構築が世界的な課題となっている。世界全体の CO<sub>2</sub> 排出量の約 5% がセメントの製造に由来されることが報告<sup>1.6)</sup>されており、日本国内における PC 橋梁を対象とした試算例では、建設工事で発生する二酸化炭素排出量の約 40% がコンクリート関連部門に起因することが報告<sup>1.7), 1.8)</sup>されている。PC 構造物に使用されるコンクリートは水セメント比が低くセメント量が多いため、セメントの代わりに産業廃棄物や産業副産物由来の混和材を使用することで二酸化炭素削減効果が期待できる。また、無尽蔵にあると思われていた天然の細骨材についても年々良質な細骨材の入手が難しくなっており、限られた資源の有効活用の面からも高炉スラグ細骨材の有効利用が望まれている。

今後も世界の二酸化炭素排出量は増加する可能性が高く、国内では二酸化炭素排出量の削減が強く求められている。低炭素社会の構築に向けて、コンクリート関連部門においても二酸化炭素排出量を削減するための対策を講じることは必須の課題であり、その対策のひとつとして、副産物である高炉スラグ微粉末や高炉スラグ細骨材を積極的に用いることが期待されている。

## 1.2 研究の目的

PC 構造物の長寿命化を図るためには、現在適用されている塩害対策の手法の問題点を早急に解決し、できるだけ早く実装フェーズに進める必要がある。これは、高いコストパフォーマンスと特殊技術を必要としない簡便な施工性を両立したうえで、高い耐久性向上効果を有する技術の開発が求められるということに他ならない。

本研究で対象としたカルシウムアルミネートの一種  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$  (以下,  $\text{CA}_2$  という) は塩害対策用混和材として開発されたものである。 $\text{CA}_2$  は, ポルトランドセメントに数%混和することで, セメントの水和反応により生成された水酸化カルシウムと反応してハイドロカルマイト族の水和物を多量に生成するため, セメント硬化体の細孔構造をより緻密化し, 外部からの劣化因子の侵入を抑制する物理的な自己防衛機能をコンクリートに付与することができる。さらに, 生成されたハイドロカルマイト族の水和物がセメント硬化体中に侵入した塩化物イオンと反応してフリーデル氏塩として固定化することで, 内部鋼材の劣化因子を無害化するという化学的な自己防衛機能の付与も期待される材料である。これらは,  $\text{CA}_2$  がかぶりの増厚や水セメント比の低減を行うことなく耐久性向上に寄与することを示唆している。また, コストの大幅な増大を抑制するとともに, あらかじめセメントと混和するだけの簡便な施工性を兼ね備えた材料であるといえる。

ここで,  $\text{CA}_2$  と同様にコンクリートの耐久性向上に寄与する材料として知られる高炉スラグを用いた材料について述べる。高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートでは, 硬化体の空隙構造が緻密になることや水和生成物の塩化物イオンの固定化能力が高まることなどによって, ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートよりも塩化物イオンの浸透を抑制することができることは広く知られている<sup>1.9) ~1.11)</sup>。また, 高炉スラグ微粉末の使用割合を一定以上にすると, コンクリートの細孔溶液中の水酸化物イオンの濃度の低下などによって, ASR の発生を抑制することができる<sup>1.9), 1.10), 1.12)</sup>。一方で, 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートにおいては, 高炉スラグ細骨材の反応によって細骨材の界面が緻密化することで, 高炉スラグ微粉末とは異なりコンクリートの炭酸化を大きくすることなく, 乾燥収縮やクリープを小さくし, 塩化物イオンの浸透に対する抵抗性や硫酸の侵食に対する抵抗が改善される。

このようにそれぞれがコンクリートの高耐久化に貢献する材料でありながら, これまで PC 構造物を対象とした早強ポルトランドセメントをベースとしたコンクリートに対して  $\text{CA}_2$  を混和したコンクリートや高炉スラグ微粉末や高炉スラグ細骨材と  $\text{CA}_2$  を組み合わせたコンクリートについて十分な性能評価は行われておらず, 強度特性や耐久性についても解明されていない点が多い。

本研究では, 早強ポルトランドセメント単味, 早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を組み合わせた配合, 早強ポルトランドセメントと高炉スラグ細骨材を組み合わせた  $\text{CA}_2$  を混和した配合のそれぞれに対し, コンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性を指標として, 物理的防御機能および化学的防御機能の 2 つの自己防衛機能に対する向上効果を定量的に把握する。また, その他にも PC 構造物として必要とされる強度などの力学特性, 中性化抵抗性, 凍結融解抵抗性, ASR 抵抗性などの耐久性能, ヤング係数やクリープなどの変形特性, さらに乾燥収縮などの体積変化におよぼす影響などを検討し, それらの結果を総合的に評価し,  $\text{CA}_2$  の有効活用により長寿命の PC 構造物を構築することを目的とする。

### 1.3 本論文の構成

本論文は、全 8 章で構成されている。各章の概要を以下に示し、本論文のフローを図-1.1 に示す。

**第 1 章「序論」**では、研究の背景および目的、対象範囲ならびに本論文の構成を示した。

**第 2 章「既往の研究」**では、既往の研究の概要を整理し、本論文の位置づけを示した。

**第 3 章「ペーストの特性に及ぼす塩素固定化材の影響に関する評価」**では、ペースト試験体を用いて、セメントの水和生成物、塩化物イオンの固定作用および硬化体の細孔構造に及ぼす結合材種類および塩素固定化材の併用による影響についての検討について述べている。コンクリート中のマトリックス部分であるペースト供試体を作製し、X 線回折分析法を用いて各材齢において硬化体を緻密化させ、さらに塩化物イオンを固定化させる機構を有するハイドロカルマイト族の水和物を定性的に分析し、結合材の種類、塩素固定化材の有無、給熱養生の有無および中性化の有無によりポルトランドセメントの水和反応に及ぼす影響について明らかにした。次に、塩水浸せきした硬化ペーストを用いて、ペースト中の全塩分量と細孔中の液相を拡散移動する可溶性の塩化物イオン量を測定し、 $CA_2$ の塩化物イオンの固定化率で評価を行い、さらに、結合材種類および塩素固定化材併用により硬化体の細孔構造に及ぼす影響についての検討結果を述べている。

**第 4 章「モルタルの特性に及ぼす塩素固定化材の影響に関する評価」**では、高炉スラグ細骨材と塩素固定化材を併用した際の影響を評価するために、モルタル試験体を用いて、ペーストと骨材界面に存在する遷移帯の状況を含めて見かけの拡散係数に与える影響についての評価を述べている。さらに、**第 3 章**の試験と同様に結合材種類、細骨材種類および塩素固定化材併用により細孔構造に及ぼす影響についての検討結果を述べる。

**第 5 章「コンクリートの特性に及ぼす塩素固定化材の影響に関する評価」**では、 $CA_2$ を用いた場合のコンクリートの施工性能を確認するために、スランプの経時変化、凝結およびブリーディングなどのフレッシュ性状に及ぼす影響についての評価を述べている。さらに、強度特性として圧縮強度、割裂引張強度および曲げ強度、変形特性として静弾性係数およびクリープ、体積変化として自己収縮および乾燥収縮それぞれについて、 $CA_2$ を用いた場合の影響を評価した結果を示している。圧縮強度については、蒸気養生や湿潤養生期間を変化させた場合の影響についての評価も行っている。さらに、耐久性については、コンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性、中性化抵抗性、凍結融解抵抗性および ASR の抵抗性について  $CA_2$ による影響を評価した結果を示している。

**第 6 章「大型試験体によるプレストレストコンクリートへの塩素固定化材の適用性に関する検証」**では、 $CA_2$ を混和したコンクリートを用いて、プレテンション方式を用いて大型の梁状試験体を作製し、室外環境で塩水浸せきと乾燥を繰り返す暴露試験を 2.5 年間実施した結果について述べる。暴露状況で埋め込みゲージを用いて長さ変化率を測定し、クリープに与える影響について評価を行った結果や、非破壊試験を用いてコンクリートの耐久性や PC 鋼材の腐食状況に与える  $CA_2$ の影響を評価した内容について示す。最終的に、暴露試験

体を用いて静的曲げ載荷試験を行い曲げ耐力に与える  $CA_2$  の影響を評価した内容について報告する。

第7章「プレストレストコンクリートの耐用年数に及ぼす塩素固定化材の影響に関するFEM塩分浸透解析」では、第5章、第6章で得られたコンクリートの物性値をもとに実際の構造物を再現したFEM塩分浸透解析を実施し、構造物の耐用年数に与える  $CA_2$  の影響について評価を行った結果を報告する。

第8章「結論」では、本論文で得られた知見および成果をとりまとめている。

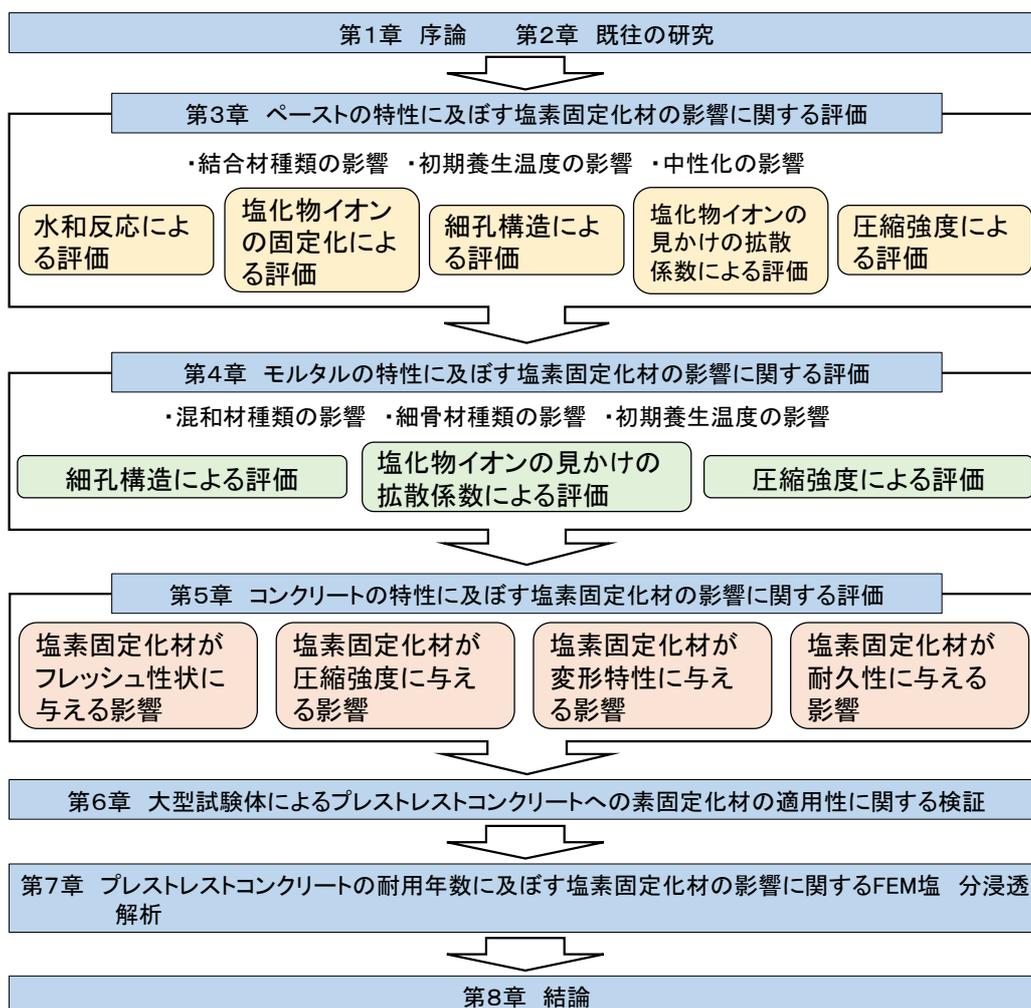


図-1.1 本論文のフロー

## 【参考文献】

- 1.1) プレストレストコンクリート工学会：PC 技術規準シリーズ PC 構造物高耐久化ガイドライン，2015.
- 1.2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IIIコンクリート橋・コンクリート部材編，pp.183，2017.
- 1.3) 古賀裕久，百武壮，渡辺博志，脇坂安彦，西崎到，守屋進：屋外に23 年以上暴露したコンクリートの観察結果に基づく骨材のASR 反応性の検討，土木学会論文集E2（材料・コンクリート構造）Vol.69，No.4，pp.361-376，2013.
- 1.4) 鳥居和之：アルカリシリカ反応にいかに対応するか，セメント・コンクリート，pp.1-9，2005.
- 1.5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IIIコンクリート橋・コンクリート部材編，pp.30，2017.
- 1.6) IPCC: Climate Change 2007 Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the IPCC, Cambridge University Press, pp.467-469, 2007.
- 1.7) 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.91-94，2010.
- 1.8) 樋口雅也，河合研至：コンクリートの環境負荷評価における環境要因に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.1531-1536，2002.
- 1.9) 土木学会：コンクリートライブラリー86，高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，1996.
- 1.10) JIS A 6206 「コンクリート用高炉スラグ微粉末」
- 1.11) 日本材料学会：高炉スラグ微粉末を使用した高耐久性プレストレストコンクリート構造物の開発，1998.
- 1.12) 石田裕一，江崎守，前田悦孝，坂本賢次，松下博通：高炉スラグ微粉末を用いた高耐久PC 橋の設計・施工ー熊本高森線俵山4号橋ー，プレストレストコンクリート，Vol.42，No.3，pp.45-51，2000.

## 第2章 既往の研究

### 2.1 本章の概要

本章では、塩素固定化材、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートに関する既往の研究や規格、基準類の概要を整理し、塩素固定化材の実用化に向けた課題を抽出した上で、本論文の位置づけを示す。

### 2.2 混和材および高炉スラグ細骨材の使用に関する既往の研究

コンクリート構造物の設計を行う際に、要求性能に対する照査が必要であり、設計耐用期間を通じて、構造物が耐久性、安全性、使用性および復旧性などに関して要求された性能を満足するように照査する必要がある<sup>2.1)</sup>。そのため、使用されるコンクリート自体の品質を考慮する必要も必要不可欠であり、その品質は、性能照査上の必要に応じて、強度特性、変形特性および耐久性などで評価される。しかしながら、わが国で  $\text{CA}_2$  が塩害対策用混和材として本格的に検討されたのは 2000 年頃からであり、PC 上部工に使用される高強度コンクリートに適用された事例はなく、さらに耐久性向上や環境負荷低減を高めるために検討されてきた高炉スラグ微粉末や高炉スラグ細骨材と塩素固定化材を併用した配合について検討された事例もなく、その性能については明らかとなっていない。そこで本研究では、PC 構造物への塩素固定化材の適用を目指して、配合種類や養生条件が異なる場合の耐久性や硬化特性について評価を行うこととした。

#### 2.2.1 $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ 系塩素固定化材

$\text{CA}_2$  の反応のメカニズムの概要を図-2.1 に示す。 $\text{CA}_2$  は、式(2.1)に示す通り  $\text{CA}_2$  水和物とセメントの水和反応により生成された  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  が反応し、体表的な水和物としてハイドロカルマイトと呼ばれる  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  を生成する。これは固相を増加させる反応であり、硬化体を緻密化させる効果を有している<sup>2.2)</sup>。その後、コンクリート中に塩化物イオンが存在する、あるいは侵入した場合にも式(2.2)の反応のように塩化物イオンを取り込んでフリーデル氏塩を生成するだけでなく、固相の増加により硬化体を緻密化しその後の塩化物イオンの拡散を抑制する効果が期待できることがわかる。



カルシウムアルミネイトの塩化物イオンの固定化のメカニズム

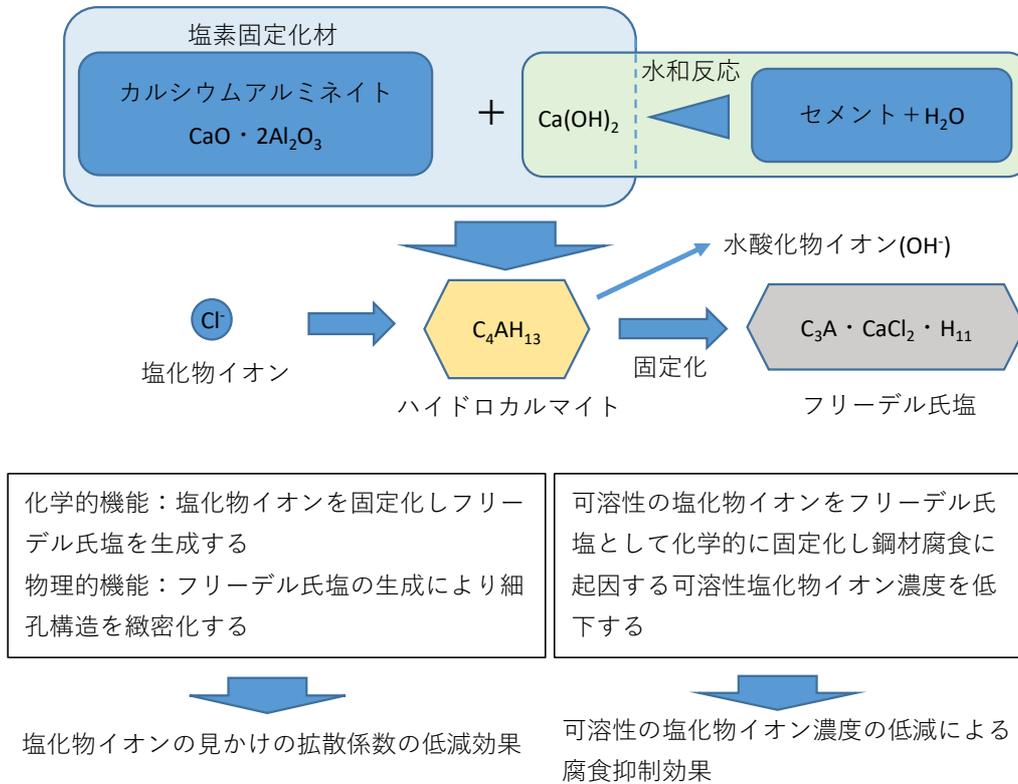


図-2.1  $\text{CA}_2$ の反応メカニズム

ハイドロカルマイト族は層状複水酸化物 (Layered Double Hydroxide : LDH) に属している<sup>2.3), 2.4)</sup>。ハイドロカルマイト族は、2 価のカルシウム水酸化物に 3 価のアルミニウムイオンが固溶した複水酸化物で、水酸化物基本層が正電荷を持つため、層間に負に帯電する陰イオンを挟んだ積層構造の化合物である。ハイドロカルマイト族の代表的な鉱物は層間に  $\text{OH}^-$  を保有するハイドロカルマイトであり、 $\text{OH}^-$  以外には層間に  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , などのさまざまなアニオンが入る。 $\text{SO}_4^{2-}$ が入ったものはモノサルフェート、 $\text{CO}_3^{2-}$ が入ったものはヘミカーボネートとモノカーボネートとして知られている。ヘミカーボネートとモノカーボネートは  $\text{CO}_3^{2-}$ の置換量で分類される。フリーデル氏塩についてもハイドロカルマイト族に分類される。ハイドロカルマイトのアニオンの固定の模式図を図-2.2 に示す。

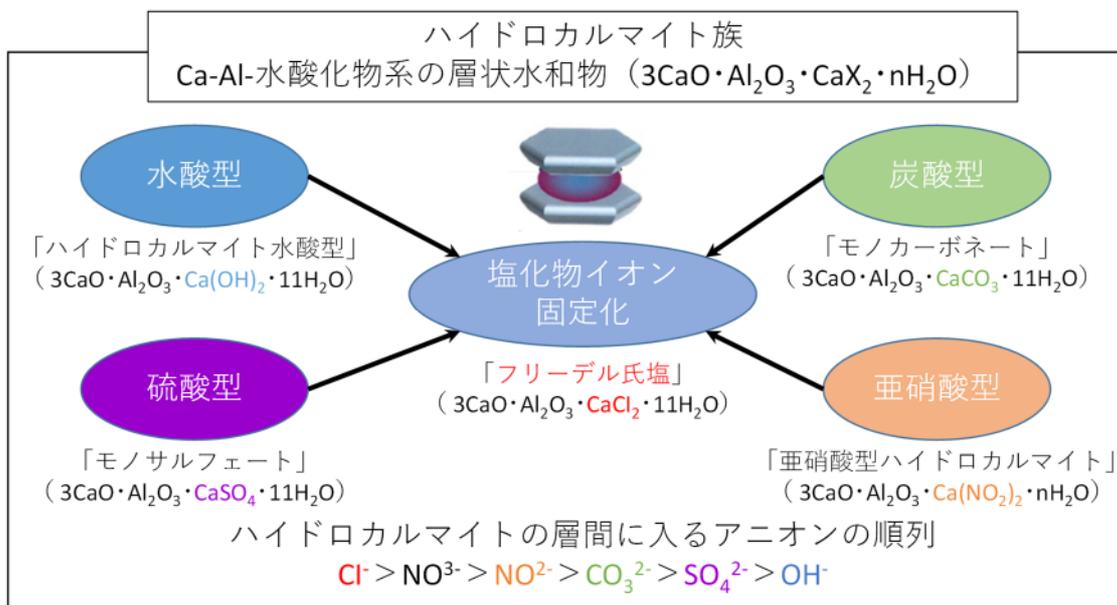


図-2.2 ハイドロカルマイト族のアニオンの固定

本研究で用いた  $\text{CA}_2$ 、ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材の化学組成を蛍光 X 線装置 (XRF) により測定した結果を表-2.1 に示す。普通ポルトランドセメントの  $\text{Al}_2\text{O}_3$  が約 5.18%，早強ポルトランドセメントの  $\text{Al}_2\text{O}_3$  が約 4.97%，高炉スラグ微粉末の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  が約 13.46%，高炉スラグ細骨材の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  が約 13.65% であるのに対して  $\text{CA}_2$  の化学成分は  $\text{Al}_2\text{O}_3$  が約 67.74% を占めており  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の含有量が非常に多いことがわかる。一方、 $\text{SiO}_2$  の含有量はその他の結合材と比較して非常に少ない特徴を有している。このことより、高炉スラグ微粉末の持つ特徴である潜在水硬性による長期的な強度発現性は期待できないものの、塩化物イオンをフリーデル氏塩として固定化するためのハイドロカルマイト族の水和物の生成量は多くなり、塩化物イオンの固定化能力の向上が期待できる材料であることが示唆される<sup>2.5)</sup>。

表-2.1 蛍光 X 線による成分含有量分析結果

材料種類	Ig.loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (FeO)	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Cl
塩素固定化材	0.50	2.34	67.74	1.21	25.80	0.28	0.24	0.20	0.31	1.63	0.07	0.01	0.0002
普通ポルトランドセメント	2.24	20.22	5.18	2.96	64.10	1.60	2.17	0.28	0.38	0.33	0.47	0.09	0.015
早強ポルトランドセメント	0.91	20.45	4.97	2.57	64.95	1.44	2.97	0.25	0.37	0.30	0.42	0.08	0.007
高炉スラグ微粉末 6000	0.07	33.14	13.46	(0.29)	43.76	5.69	2.83	0.25	0.26	0.57	0.01	0.12	0.004
高炉スラグ細骨材 BFS1.2	—	32.41	13.65	0.42	46.12	3.99	1.56	0.29	0.51	0.57	0.02	0.20	0.006

## 2.2.2 高炉スラグ微粉末

高炉スラグ微粉末（以下，GGBS（Ground Granulated Blast-Furnace Slag）という）は，溶鉱炉で銑鉄を製造する際に副産物として生じるスラグであり，熔融している高炉スラグを急冷，粉碎したものである。この高炉スラグ微粉末は，混和材としてセメントに加えた際にセメントの水和反応で生じた水酸化カルシウムなどに刺激されることによって水和反応を起こす潜在水硬性を有している<sup>2.6)</sup>。コンクリート混和材として使用される高炉スラグ微粉末は，比表面積に応じて3000，4000，6000，8000の4種類がJIS A 6206:2013<sup>2.7)</sup>に分類されており，比表面積が大きいほど，活性度指数が大きく，フロー値が小さくなるように品質を定めている。高炉スラグ微粉末の品質を表-2.2に示す。

表-2.2 高炉スラグ微粉末の品質

品質		高炉スラグ 微粉末 3000	高炉スラグ 微粉末 4000	高炉スラグ 微粉末 6000	高炉スラグ 微粉末 8000
密度	g/cm <sup>3</sup>	2.80 以上	2.80 以上	2.80 以上	2.80 以上
比表面積	cm <sup>2</sup> /g	2750 以上	3500 以上	5000 以上	7000 以上
		3500 未満	5000 未満	7000 未満	10000 未満
活性度指数 %	材齢 7 日	—	55 以上	75 以上	95 以上
	材齢 28 日	60 以上	75 以上	95 以上	105 以上
	材齢 91 日	80 以上	95 以上	—	—
フロー値比	%	95 以上	95 以上	90 以上	85 以上
酸化マグネシウム	%	10.0 以下	10.0 以下	10.0 以下	10.0 以下
三酸化硫黄	%	4.0 以下	4.0 以下	4.0 以下	4.0 以下
強熱減量	%	3.0 以下	3.0 以下	3.0 以下	3.0 以下
塩化物イオン	%	0.02 以下	0.02 以下	0.02 以下	0.02 以下

高炉スラグ微粉末は産業副産物であるため，セメントの一部として置き換えることでコンクリート製造におけるCO<sub>2</sub>排出量を抑制することによる環境負荷低減効果を有すると言える。また，前述の通りコンクリートの耐久性向上効果を有していることから，近年，その有効性がさらに注目されており，土木学会から『高炉スラグ微粉末を用いてコンクリートの設計・施工指針<sup>2.8)</sup>』や『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)<sup>2.9)</sup>』が発刊されるなど，その活用に関する研究・検討が盛んにおこなわれている。

既往の研究として，早強ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末6000で置換し，PC構造物を対象としたコンクリートの耐久性向上に関する研究が多くみられる<sup>2.10) ~ 2.19)</sup>。これらの研究では，コンクリート初期強度の改善を図るため粉末度が比較的大きい高炉スラグ微粉末6000を使用し，置換率50%と70%を比較しながら，コンクリートの物性値から長期耐久性まで総合的に検討している<sup>2.10)</sup>。その結果，高炉スラグ微粉末を混和した配合は，置換率50%の条件で結合材量を20~30 kg/m<sup>3</sup>増加することで早強単味の配合と同等の強度発現性になると報告されている。これに対し，置換率70%の場合は結合材量を大幅に調整す

る必要があり、施工性およびコストの面では実用性に欠けることが判明した。上記研究においては、高炉スラグ微粉末50%の置換率は高炉セメントB種の40~45%より高く設定されており、初期強度を確保した上に、従来の高炉セメント配合より耐久性の向上効果が高いとされる。塩化物イオン浸透抵抗性に関しては長期暴露の供試体や実構造物の試験により浸透抑制効果が確認され<sup>2.10), 2.16), 2.17), 2.18)</sup>、ASR抑制効果もPC梁の8年間促進試験により確認されている<sup>2.13), 2.16), 2.19)</sup>。また、高炉スラグ微粉末4000を高炉セメントB種の30%置換し、PC構造物の環境負荷低減を考慮したコンクリート材料も研究されている<sup>2.20), 2.21)</sup>。この研究は、流通量が多い高炉スラグ微粉末4000を使用し、高炉セメントB種より少ない混和率で検討された。結果として、コンクリートの高流動化が実現でき、塩化物イオン浸透抵抗性の向上効果が浸せき試験により確認されるとともに、高炉スラグ微粉末の置換率がコンクリート初期強度に及ぼす影響は大きいと指摘されている。上記の二つの研究はともに実構造物に適用されており、プレキャストPC部材が要求される初期強度を満足し、橋梁上部工を中心としたPC構造物での施工実績を伸ばしている<sup>2.22)</sup>。これ以外に、鉄道のPC桁のASR抑制を目的として高炉セメントB種を使用した事例もある<sup>2.23)</sup>。一方、プレストレスの導入材齢については、早強ポルトランドセメント配合の3日に対して、高炉セメントB種を使用した配合は初期材齢の強度発現性が低く、材齢10日頃に達したと報告されている。高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの強度発現性は、実用面では大きな課題であると考えられる。一般に、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、スラグの粉末度が大きいほど、また置換率が高いほど、塩化物イオンの遮蔽効果が優れる<sup>2.24)</sup>。しかし、より高品質の高炉スラグ微粉末を求めようとしても、粉末度の規格が6000以上のものは価格が高く流通量が非常に少ない。また、置換率は原則としてセメントの40~70%の範囲内と規定されるが<sup>2.8)</sup>、置換率を高めることと初期材齢の強度発現を確保することは相反する要求であり<sup>2.24)</sup>、これらの要求事項を満足するよう材料・配合設計を行うことは容易ではないことがわかった。参考例として、参考文献<sup>2.8)</sup>に示される高炉スラグ微粉末の種類と効果が期待できる微粉末の種類と置換率の範囲を表-2.3に示す。

以上より、本研究では橋梁上部工などでも多数の実績があり、表-2.3に示す効果も期待できる早強ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末6000で置換した配合と塩素固定化材の組み合せた場合の効果について検討を行うこととした。

表-2.3 高炉スラグ微粉末の種類と効果が期待できる置換率の範囲

使用目的	種類	高炉スラグ微粉末	高炉スラグ微粉末	高炉スラグ微粉末
		3000	4000	6000
水和熱による温度上昇の抑制		50~70%	50~70%	60~70%
塩化物イオンなどの浸透に対する抵抗性の向上		40~70%	40~70%	40~70%
アルカリシリカ反応の抑制		40~70%	40~70%	40~70%
硫酸塩に対する抵抗性の向上		50~70%	50~70%	50~70%

### 2.2.3 高炉スラグ細骨材

高炉スラグ細骨材（以下、BFS（granulated Blast-Furnace slag Sand）という）は、高炉スラグ微粉末と同様に溶鉱炉で銑鉄を製造する際に副産物として生じるスラグであり、溶融している高炉スラグを急冷、粉砕した後に粒度調整したコンクリート用細骨材である。一般に、水によって急冷するケースが多く、この場合は水砕スラグと呼ばれている。急冷スラグは、冷却のされ方によって軟質のものと硬質のものに大別されるが、コンクリート用細骨材には硬質のものが用いられる。急冷により粒状化しただけのスラグは、一般に粒形が角張っているばかりでなく、多孔質で弱い粒、内部にひび割れを有する粒、鋭くとがった針状の粒などを部分的に含み、また比較的単粒度でもあるため、そのままではコンクリート用細骨材には適さない。そこで、通常は粒形、粒の品質、粒度などを改善するためにクラッシャーで粉砕し、粒度を調整したものがコンクリート用細骨材として出荷されている。JIS A 5011-1:2018<sup>2,25)</sup>には、高炉スラグ細骨材として粒度が異なる4種類が規定されている。高炉スラグ細骨材の粒度による区分を表-2.4に示す。

表-2.4 高炉スラグ細骨材の粒度による区分

区分	粒の大きさの範囲 (mm)	記号
5mm 高炉スラグ細骨材	5 以下	BFS5
2.5mm 高炉スラグ細骨材	2.5 以下	BFS2.5
1.2mm 高炉スラグ細骨材	1.2 以下	BFS1.2
5~0.3mm 高炉スラグ細骨材	5~0.3	BFS5-0.3

高炉スラグ骨材は、1980年前後にJIS化されて以降、安定して利用が進んでおり、電気炉酸化スラグ骨材も2003年にJIS化された。これらは、川砂の枯渇問題に対応する要請もあって早い段階でJIS化活動が開始され、1977年に粗骨材、1981年には細骨材のJISが制定されている<sup>2,25)</sup>。また、(一社)土木学会、(一社)日本建築学会が制定する各種施工指針にも順次織り込まれており、さらに、2019年に土木学会から『高炉スラグ細骨材を用いたプレキャストコンクリート製品の設計・製造・施工指針(案)<sup>2,26)</sup>』が発刊され、主要な資材としての地位を占めるに至っている。

高炉スラグ細骨材の特性として、①十分な品質管理のもと生産された工業製品である、②アルカリ骨材反応の恐れがない、③有機不純物や貝殻、シルトなどのコンクリートの耐久性に悪影響を及ぼす物質を含まない、④微粉から粗粒に至るまで同じ化学成分構成からなるなどの特徴がある。固結やブリーディングなどにおける欠点があるものの、砕砂などの天然砂と混和することでその欠点を抑える対策がとられている。高炉スラグ細骨材を20~60%の範囲で天然骨材と均一に混和された高炉スラグ混合細骨材を使用したコンクリートの品質は、天然骨材を使用したコンクリートとなんら相違がないことが確認されており、コンクリート用骨材として天然砂の代用として活用されている<sup>2,27)</sup>。

高炉スラグ細骨材のコンクリート用骨材への利用についてはさまざまな研究機関で研究が行われており、PCを想定した水結合材比30～45%程度で高炉スラグ細骨材を25～50%程度置換したコンクリートについては、天然細骨材のみを使用したコンクリートと同等のフレッシュ性状を示し、乾燥収縮および自己収縮が低減し、耐久性として凍結融解抵抗性および中性化抵抗性も増加することが確認されている<sup>2.28)</sup>。さらに、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、骨材界面に析出する水酸化カルシウム量が少なくなるために凍結融解抵抗性が向上すること、高炉スラグ細骨材の使用量を多くするほど凍結融解抵抗性が向上することが報告されている<sup>2.29)</sup>。さらに、実構造物への適用を目指した研究として、高炉スラグ細骨材を100%使用したコンクリートについて、RC部材の梁の曲げ試験やせん断試験や版部材の押し抜きせん断試験が実施されており、通常天然骨材を用いたコンクリート比較して同等以上の性能を有していることが確認されている<sup>2.26), 2.30)</sup>。また、PC床版取替工事への適用を目指した検討として、輪荷重走行試験が実施されており、輪荷重による疲労耐久についても通常天然骨材を用いた場合と同等以上の性能を有し、高速道路を想定した載荷荷重を想定した試験を行った場合も100年間使用する場合に必要な乗り心地に関わる使用性および輪荷重の繰り返しに対する安全性が確保されていることが確認されている<sup>2.31), 2.32)</sup>。

以上より、本研究では、橋梁上部工として今後の適用が期待されており、環境負荷低減効果を最大限に活用できるように高炉スラグ細骨材を100%使用したコンクリートと塩素固定化材の組み合わせた場合の効果について検討を行うこととした。

### 2.3 コンクリート構造物の耐久性向上に関する既往の研究

CA<sub>2</sub>は、これまで普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント<sup>2.33)</sup>、高炉セメントB種<sup>2.34)</sup>、低熱ポルトランドセメント<sup>2.35)</sup>および中庸熱ポルトランドセメントなどの結合材種類として、さらにフライアッシュや膨張材<sup>2.36)</sup>などの混和材として組み合わせた場合の塩化物イオンの固定化について検討されている。化学的機能としてCA<sub>2</sub>を混和することでフリーデル氏塩として固定化する効果を有するとともに、物理的機能としてフリーデル氏塩の生成により細孔構造を緻密化<sup>2.37)</sup>することで塩化物イオンの見かけの拡散係数を低減する効果が確認されている。これらの研究において、CA<sub>2</sub>を使用した際の塩化物イオン浸透抵抗性について詳細な検討が行われているが、その他の耐久性についての検討については、一部、中性化<sup>2.38), 2.39)</sup>については検討が行われているものの事例がないのが実状である。

高炉スラグ微粉末は、JIS A 6206:2013 に適合する高炉スラグ微粉末 4000 と高炉スラグ微粉末 6000、JIS A 5011-1:2018 に適合する高炉スラグ細骨材が結合材の一部または細骨材としてコンクリートに用いられることが多い。高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材の基礎的な反応機構について次のように整理されている。

高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材はともに、銑鉄製鉄所で発生する副産物であり、高炉から取り出した熔融スラグを急冷および粉碎して製造されるガラス質の物質である。高炉スラグ微粉末は、潜在水硬性を有し、アルカリ刺激剤の存在によって水と反応して

硬化および強度発現に寄与する。コンクリート内部では、ポルトランドセメントがアルカリ刺激剤の役割を果たすことが多く、カルシウムシリケート水和物 (C-S-H) や水酸化カルシウム ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )、モノサルフェート (AFm)、エトリンガイト (AFt) などを生成する。一方、高炉スラグ細骨材については、一般的な天然骨材を使用した際には観察することはできないが、高炉スラグ細骨材を用いた場合にモルタル中で高炉スラグ細骨材が水和反応し、高炉スラグ細骨材の表面でクリンカー相の核生成が増加し、骨材界面が緻密化することで塩化物イオンの浸透などの抑制にも寄与していると考えられている<sup>2.40)</sup>。

このような反応機構を有する高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材と  $\text{CA}_2$  を組み合わせて使用した場合に、コンクリートの塩化物イオン浸透や中性化、凍結融解、ASR に影響を与えると考えられる。これらの詳細について以下個別に述べる。

### 2.3.1 塩化物イオン浸透抵抗性

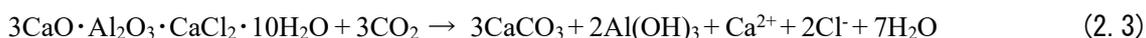
高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートでは、硬化体の空隙構造が緻密になること、水和生成物の塩化物イオンの固定化能力が高まることからポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して塩化物イオン浸透抵抗性が向上することが多い。また、高炉スラグ細骨材についても、普通天然細骨材を用いたコンクリートと比較して骨材界面が緻密化することなどから、同様の効果が認められる。塩化物イオン浸透抵抗性の向上効果については、さまざまな暴露試験や実構造物の調査で確認されている。例えば、高炉セメント B 種を用いた供試体の 10 年間の暴露試験<sup>2.41)</sup>、早強ポルトランドセメントの一定割合を高炉スラグ微粉末 6000 で置換した供試体の 10 年間の暴露試験<sup>2.42)</sup>、高炉セメント B 種やフライアッシュセメント B 種を用いた供試体の 3 年間の暴露試験体などの調査結果が報告<sup>2.43)</sup>されている。いずれの調査結果においても、混和材を用いることでポルトランドセメントのみのコンクリートよりも塩化物イオンの浸透が抑制されたこと、塩化物イオンの拡散係数が経時的に減少したことなどが確認されたことが報告されている。

$\text{CA}_2$  の塩化物イオン浸透抵抗性については、前述の通り、さまざまな結合材および混和材を組み合わせた場合についての検討が行われている。しかしながら、早強ポルトランドセメントをベースとして、高炉スラグ微粉末 6000 や高炉スラグ細骨材と組み合わせた検討は行われていないのが実状であることから、 $\text{CA}_2$  を単独で使用した場合と高炉スラグ微粉末 6000 や高炉スラグ細骨材と  $\text{CA}_2$  を組み合わせた際の塩化物イオン浸透抵抗性について明らかにすることは喫緊の課題と言える。

### 2.3.2 中性化抵抗性

ポルトランドセメントの内割りで混和材を使用する場合は、ポルトランドセメントの使用量が少なくなり水酸化カルシウムの含有量が少なくなることから、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、中性化抵抗性が低下することがある<sup>2.44)</sup>。

既往の研究<sup>2.39)</sup>において、 $CA_2$ を単独で混和したコンクリートの中性化抵抗性について検討がなされており、 $CA_2$ をセメントに対して9%まで混和した場合においては普通コンクリートと同等の中性化抵抗性を示すことが確認されている。さらに、塩害と中性化の複合劣化を受けた際には、フリーデル氏塩として固定された塩化物イオンが中性化によって分解され、可溶性の塩化物イオンがコンクリートの内部へ濃縮し鋼材腐食に影響を及ぼすことが知られている<sup>2.45)</sup>。炭酸化によって固定化された塩化物イオンが遊離する現象については式(2.3)のような反応となることが知られている。



これらのイオンは、図-2.3に示されるようなメカニズムで未炭酸化部分に移動・濃縮し鋼材の腐食に影響を及ぼすことになる<sup>2.46)</sup>。一方で $CA_2$ を用いて固定化された塩化物イオンについても同様の現象が生じるかについて検討された事例は少ない。 $CA_2$ においても、水和物として塩化物イオンを固定化することを特徴としていることから、中性化による影響を把握しておく必要がある。

### 2.3.3 凍結融解抵抗性

混和材を用いたコンクリートでは、化学混和剤の使用によってAEコンクリートとし、十分な強度を確保することで、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同程度の凍結融解抵抗性を確保できることが確認されている<sup>2.47)</sup>。一方、混和材を多量に使用した場合として、高炉スラグ微粉末の置換率を50%以上としたコンクリートについては、中性化の進行後に硬化体の空隙構造が粗大化し、コンクリート内部において凍結可能な水分の量が増加することによって凍結融解抵抗性が低下する可能性があることが報告されている。

骨材界面についてブリーディングなどの影響を受けて組織が脆弱な層(遷移体)が存在することが知られており、このことが凍結融解の劣化起因の1つとなる。また、高炉スラグ細骨材の置換率が増加するとブリーディング量の増加に伴い凍結融解抵抗性が低

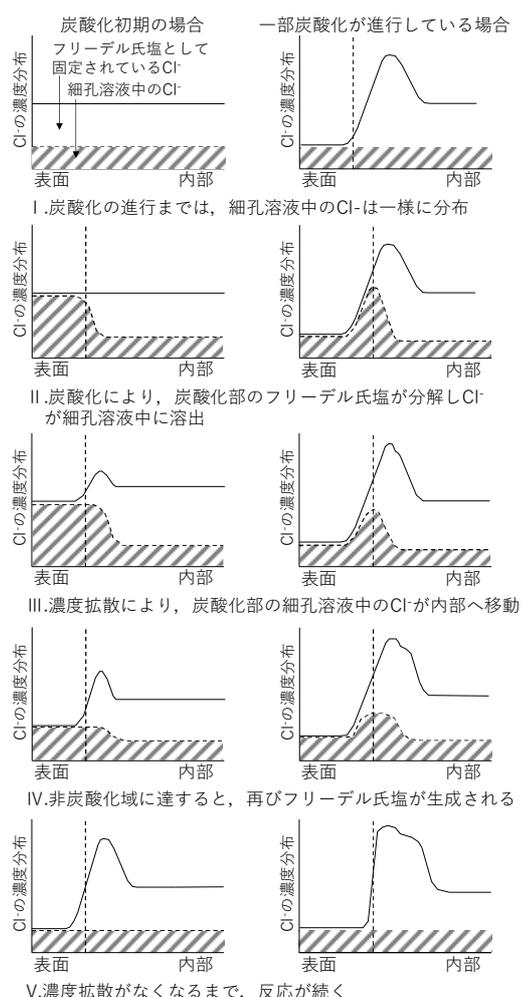


図-2.3 塩化物イオンの濃縮現象の概念図

下することも報告されている<sup>2.48)</sup>。一方で、高炉スラグ細骨材を用いた場合に、高炉スラグ微粉末と同様に高炉スラグ細骨材自身が反応することによって周囲の細孔溶液にイオンを供給することで、水/イオン比が低水セメント比と類似した状況になり緻密化が進行して凍結融解抵抗性が改善される可能性が示されている<sup>2.49)</sup>。

CA<sub>2</sub>を用いたコンクリートについて凍結融解に関して検討された事例は少なく、高炉スラグ微粉末や高炉スラグ細骨材と組み合わせた検討も行われていないため、凍結融解抵抗性による影響を把握しておく必要がある。

#### 2.3.4 ASR 抵抗性

国土交通省では、構造物に使用されるコンクリートおよび工場製品に適用するコンクリートについて、アルカリ骨材反応を抑制するために次の 3 つの対策のいずれかについて確認が必要であるとしている。

##### ①コンクリート中のアルカリ総量の抑制

アルカリ量が表示されたポルトランドセメントなどを使用し、コンクリート 1m<sup>3</sup>に含まれるアルカリ総量を Na<sub>2</sub>O 換算で 3.0 kg 以下にする。

##### ②抑制効果のある混合セメントなどの使用

JIS R 5211 高炉セメントに適合する高炉セメント (B 種または C 種) あるいは JIS R 5213 フライアッシュセメントに適合するフライアッシュセメント (B 種または C 種)、もしくは混和材をポルトランドセメントに混入した結合材でアルカリ骨材反応抑制効果の確認されたものを使用する。

##### ③安全と認められる骨材の使用

骨材のアルカリシリカ反応性試験 (化学法またはモルタルバー法) の結果で無害と確認された骨材を使用する。

高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの ASR の膨張を抑制する理由として、水酸化カルシウムの減少、アルカリイオンの移動速度の減少およびアルカリの希釈効果などが考えられている。高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートについて、本論文で検討する配合は早強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た配合であるため上記の対策の②に該当すると考えられる。

高炉スラグ細骨材については、骨材の潜在反応性試験方法 (化学法) を実施した場合に溶解シリカがほとんど検出されないことが確認<sup>2.49)</sup>されており、JIS A 5011-1 (コンクリート用スラグ骨材-第 1 部) においても ASR についての規定が設けられていない。上記の対策の③に該当すると考えられる。

CA<sub>2</sub>を用いたコンクリートについて ASR に与える影響について検討された事例はないが、コンクリート中の水酸化カルシウムを消費する機構や物質移動抵抗性が向上する働きによって ASR を抑制する効果が期待できると考えられる。また、高炉スラグ微粉末と CA<sub>2</sub>を組み合わせた際に ASR 抑制の相乗効果が得られるか、さらに、高炉スラグ細骨材と反応性を

有する粗骨材を使用した際に  $CA_2$  の有無でどのような影響を及ぼすか検討の必要があると考えられる。

## 2.4 現状の課題と本論文の位置づけ

本章では、 $CA_2$ 、高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材についてそれぞれの材料の特徴、規格や各種耐久性に及ぼす影響について既往の研究を整理し、 $CA_2$ を用いたコンクリートの実用化に向けての課題を抽出した。これらの課題と本論文の位置づけについて、次のように整理できる。

### I プレストレストコンクリートを想定した配合における $CA_2$ の影響評価

これまで  $CA_2$  の塩化物イオン浸透抵抗性に与える効果についてさまざまな結合材種類について検討が行われている。プレストレストコンクリートは、プレストレスを導入するために高い初期強度発現性が求められるために、一般的に早強ポルトランドセメントを用いられている。さらに、設計基準強度として  $40\sim 60\text{N/mm}^2$  程度の高強度が必要なため、結合材量が多くなる傾向にある。また、耐久性向上や環境負荷低減を目的として高炉スラグ微粉末や高炉スラグ細骨材の適用が増えてきている状況であり、それらの材料と  $CA_2$  を組み合わせた場合の影響についても検討が必要である。よって、本論文では第3章でペースト、第4章でモルタルを用いてプレストレストコンクリートへの適用を想定した結合材の  $CA_2$  の塩化物イオン浸透抵抗性について化学的機能と物理的機能の両面から詳細な検討を行い、塩害と中性化の複合劣化などの影響についてもその影響の程度を明らかにする。

### II $CA_2$ のプレストレストコンクリートへの適用性について

ペーストおよびモルタルを用いてプレストレストコンクリートを想定した配合における  $CA_2$  の性能を評価した配合を用いて、第5章でコンクリートを用いてコンクリートの施工性に影響を及ぼす  $CA_2$  のフレッシュ性状に与える影響から、プレストレストコンクリートの設計に必要な長さ変化率やクリープに与える影響を評価する。また、耐久性としてプレストレストコンクリートでも問題となる可能性がある、塩害、中性化、凍結融解および ASR に及ぼす  $CA_2$  の影響を評価する。第5章の室内試験で評価したコンクリートの物性を確認するために、第6章では大型のプレテンション方式でプレストレスト導入した PC 梁試験体を用いて、室外環境で塩水浸せき乾燥繰返し暴露試験を行った。暴露試験を行った大型梁試験体を用いて、プレストレスを導入した際の長さ変化率やクリープに与える影響を評価した。最終的には静的曲げ載荷試験を行い、 $CA_2$  を用いたコンクリートの曲げ耐力を評価し、コンクリート標準示方書 [設計編] に示される計算式で曲げ耐力を評価できるかについて検討を行い、 $CA_2$  を用いたコンクリートの総合的な性能を明らかとする。

### III CA<sub>2</sub>を用いたコンクリートの耐久設計

CA<sub>2</sub>を使用したコンクリートの実用化に向けてさまざまな検討が個別に行われているが、PC 橋梁などの実構造物に適用された事例はない。今後、CA<sub>2</sub>を実構造物に適用するために、CA<sub>2</sub>の効果について長期的な耐久設計の評価が不可欠である。そこで、第 7 章では本論文で得られたコンクリートのパラメータを用いて、FEM の塩分浸透解析を行いコンクリート構造物の長期性能の評価を行い、CA<sub>2</sub>を使用したコンクリートの耐久設計の考え方を提案する。

## 【参考文献】

- 2.1) 2017年制定コンクリート標準示方書 [設計編：本編]
- 2.2) 田原和人，宮口克一，盛岡実，武若耕司：CaO・2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を混和した種類の異なるセメント硬化体の水和挙動及び塩化物イオン固定化能力，セメント・コンクリート論文集，No.65，pp.427-434，2011.
- 2.3) 成田榮一：層状複水酸化物のインターカレーション特性とその利用，粘土科学，Vol.46，No.4，pp.207-218，2007.
- 2.4) 毛利真明，山本崇人，森永祐加，名和豊春：Ca-Al層状複水酸化物へのポリカルボン酸系分散剤の吸着・収着メカニズムの解明，セメント・コンクリート論文集，Vol.70，pp.47-53，2016.
- 2.5) 米澤敏男，V.Ashworth，R.P.M.Procter：セメント水和物によるモルタル細孔溶液中のCl<sup>-</sup>固定のメカニズム，コンクリート工学年次論文報告集，第2巻，pp.475-480，1988.
- 2.6) 土木学会：コンクリートライブラリー86，高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，1996.
- 2.7) JIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」
- 2.8) 土木学会：コンクリートライブラリー151，高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針，2018.
- 2.9) 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），2018.
- 2.10) 日本材料学会：高炉スラグ微粉末を使用した高耐久性プレストレストコンクリート構造物の開発，1998.3
- 2.11) 石田裕一，江崎守，前田悦孝，坂本賢次，松下博通：高炉スラグ微粉末を用いた高耐久PC橋の設計・施工—熊本高森線俵山4号橋—，プレストレストコンクリート，Vol.42，No.3，pp.45-51，2000
- 2.12) 小島孝昭，豊福俊泰，小林一輔：塩害に対応した高耐久性PC構造物の建設と性能評価に関する研究，土木学会論文集，No.802/V-69，pp.235-253，2005.
- 2.13) 蓑田理希，鳥居和之，横山博司，古川柳太郎：PC梁部材のASR劣化に及ぼす高炉スラグ微粉末の効果の確認を目的とした暴露試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，pp.839-844，2006.
- 2.14) 石井豪，堅田茂昌，西尾浩志，蓑田理希：高炉スラグ微粉末を用いたプレストレストコンクリート製配水池の水道水耐久性確認のための基礎的研究，第59回全国水道研究発表会論文集，pp.394-395，2008.
- 2.15) 福永靖雄，石塚純，田中正裕，吉村徹：高炉スラグ微粉末を用いた沖縄自動車道・億首川橋におけるリニューアル工事，コンクリート工学，Vol.47，No.2，pp.53-58，2009.
- 2.16) 松山高広，石井豪：高炉スラグ微粉末を用いたPC構造物の耐久性向上技術-高炉スラグ微粉末6000の適用例-，プレストレストコンクリート，Vol.52，No.2，pp.72-79，2010.

- 2.17) 後藤剣也, 石井豪, 辛軍青, 大村一馬: 高炉スラグ微粉末を適用した橋梁における長期耐久性について, 第21回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.93-96, 2012.
- 2.18) 角本周, 武知勉, 俵道和, 原健悟: 高速道路橋の大規模更新における高炉スラグ微粉末の適用, コンクリート工学, Vol.52, No.5, pp.426-431, 2014.5
- 2.19) 國富康志, 石井豪, 辛軍青, 鳥居和之: 高炉スラグ微粉末6000を混和したPC梁部材のASR劣化に対する耐荷力特性, 第24回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.323-326, 2015.
- 2.20) 福田昌明, 徳光卓, 添田政司, 大和竹史: 高炉スラグ微粉末を用いた早強性高流動コンクリートの耐久性に関する研究, 第11回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.905-908, 2001.
- 2.21) 篠原貴, 久湊豊, 中沢金光, 清水正志: 長桜架道橋への環境負荷軽減コンクリートの適用, 土木学会第60回年次学術講演会論文集, pp.691-692, 2005.
- 2.22) 日本コンクリート工学会: 混和材積極利用によるコンクリート性能への影響評価と施工に関する研究委員会報告書, pp.148-151, 2013.
- 2.23) 坂口伸也, 宮本秀樹, 武若耕司, 山口明伸, 白根勇二: 高炉セメントB種を用いたコンクリートのPC桁への適用, 土木学会第70回年次学術講演会論文集, pp.1275-1276, 2015.
- 2.24) 国立研究開発法人土木研究所, 一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会: 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書(II)ー混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の設計・施工マニュアル(案), 2016.1
- 2.25) JIS A 5011-1「コンクリート用スラグ骨材ー第1部: 高炉スラグ細骨材」
- 2.26) 土木学会: コンクリートライブラリー155, 高炉スラグ細骨材を用いたプレキャストコンクリート製品の設計・製造・施工指針(案), 2019.
- 2.27) 土木学会: コンクリートライブラリー76, 高炉スラグ細骨材コンクリート施工指針, 1993.
- 2.28) 齊藤和秀, 木之下光男, 伊原俊樹, 吉澤千秋: 高炉スラグ細骨材を使用した耐久性向上コンクリートの性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.139-144, 2009.
- 2.29) 綾野克紀, 藤井隆史: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究, 土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造), Vol.70, No.4, pp.417-427, 2014.12
- 2.30) 俵道和, 杉田篤彦, 二井谷教治: 高炉スラグ細骨材を用いたはり部材の曲げおよび版部材の押抜きせん断載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.93-98, 2018.
- 2.31) 俵道和, 二井谷教治, 芦塚憲一郎, 綾野克紀: 高炉スラグ細骨材を用いたPC床版の開発, 構造工学論文集, Vol.65A, No.1, 2019.3

- 2.32) 俵道和, 二井谷教治: 高炉スラグ細骨材を用いたプレキャスト PC 床版の適用性について, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.23-28, 2020.
- 2.33) 田原和人, 宮口克一, 盛岡実, 武若耕司:  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$  を混和した種類の異なるセメント硬化体の水和挙動及び塩化物イオン固定能力, セメント・コンクリート論文集, No.65, No.1, pp.427-434, 2011.
- 2.34) 福留祐一, 武若耕司, 山口明伸, 前菌祐也:  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$  微粉末を混和したコンクリートの耐久性に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, No.1, pp.472-478, 2012.
- 2.35) 新杉匡史, 新大軌, 樋口隆行, 坂井悦郎: 低熱ポルトランドセメント- $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ -膨張材系の水和生成物と表面炭酸化した硬化体の溶脱抵抗性と塩化物イオン浸透抵抗性, セメント・コンクリート論文集, Vol.70, No.1, pp.162-168, 2016.
- 2.36) 沼波勇太, 森泰一郎, 宮口克一, 坂井悦郎: 中庸熱ポルトランドセメント-膨張材- $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$  系の水和反応と炭酸化反応の利用, セメント・コンクリート論文集, Vol.71, No.1, pp.56-61, 2017.
- 2.37) 伊藤慎也, 盛岡実, 伊藤孝文, 伊代田岳史: 塩素固定化材と膨張材を併用した低熱ポルトランドセメントの耐塩害性評価, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, No.1, pp.221-227, 2015.
- 2.38) 伊藤慎也: 膨張材とカルシウムアルミネート系混和材を併用したコンクリートの塩害抵抗性に関する研究, 芝浦工業大学, 博士論文, 2019
- 2.39) 福留祐一:  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$  を混合したコンクリートの塩分浸透特性に関する基礎的研究, 鹿児島大学, 博士論文, 2014
- 2.40) 土木学会: コンクリート技術シリーズ, 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートに関する研究小委員会 (354 委員会) 成果報告書, 2018.7
- 2.41) 竹田宣典, 迫田恵三, 十河茂幸: 海洋環境下に 10 年間暴露した鉄筋コンクリートの経年変化, コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.1, pp.753-758, 1996
- 2.42) 谷口秀明, 渡辺博志, 手塚正道, 藤田学: 塩害暴露試験によるコンクリートの塩分浸透性の評価—その 2: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート—, プレストレストコンクリート, Vol.55, No.1, pp.45-51, 2013.
- 2.43) 細川佳史, 高橋晴香, 山田一夫: 各種セメント材料を用いた相組成・空隙構造が異なるコンクリートの各種環境条件下における塩化物イオン拡散係数, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1027-1032, 2009.
- 2.44) 水野博貴, 末木博, 伊代田岳史: 高炉スラグ微粉末高置換セメントを用いたコンクリートの炭酸化進行に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.579-584, 2018.
- 2.45) 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.

- 2.46) 小林一輔, 白木亮司, 河合研至: 炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物, 硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮, コンクリート工学論文集, Vol.1, No.2, pp.69-82, 1990
- 2.47) 古川雄太, 市川直輝, 大岡督尚: 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの基礎物性および断熱温度上昇特性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.163-168, 2017.
- 2.48) 堤嵩示, 吉野公, 黒田保, 吉澤千秋: 高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.69-74, 2016.
- 2.49) 土木学会: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートに関する研究小委員会 (354 委員会) 成果報告書, コンクリート技術シリーズ, 2018.

## 第3章 ペーストの特性に及ぼす塩素固定化材の

### 影響に関する評価

#### 3.1 本章の目的

プレストレストコンクリートに適用されるコンクリートは、水結合材比が 30~40%と比較的高強度の配合が使用される。さらに、プレストレスを材齢初期で導入するため強度発現性の高い早強ポルトランドセメントが使用され、蒸気養生などの給熱養生も実施されている。また、プレストレストコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性や ASR 反応を抑制するために高炉スラグ微粉末の適用事例も多くなっている。CA<sub>2</sub>について、これまでさまざまな結合材種類や混和材と組み合わせた検討がなされているが、設計基準強度が 50N/mm<sup>2</sup> 程度で、初期強度発現性や蒸気養生などの給熱養生の影響について検討された事例は少ない。

以上より、本章ではセメント種類、混和材使用の有無、給熱養生の温度条件および中性化の有無などによる塩素固定化材の固定化効果への影響について、ペーストを用いた検討を行い、塩素固定化材の塩化物イオン浸透抵抗性の向上効果について、化学的・物理的両面から評価を行い明らかにすることを目的とする。

#### 3.2 試験概要

##### 3.2.1 試験材料および配合

表-3.1 に本試験で使用した使用材料を示す。セメントは普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントを使用し、混和材は高炉スラグ微粉末 6000 と塩素固定化材を使用した。水は上水道水（愛知県豊田市）を用いた。

表-3.1 セメント硬化体に使用した材料の一覧表

材料分類	種類	記号	特性値
セメント	普通ポルトランドセメント	N	密度 3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 3,310cm <sup>2</sup> /g
	早強ポルトランドセメント	H	密度 3.14g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 4,470cm <sup>2</sup> /g
混和材	高炉スラグ微粉末 6000	GGBS	密度 2.91g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 5,800cm <sup>2</sup> /g 三酸化硫黄 2.89% (無水石こう添加)
	塩素固定化材	CA <sub>2</sub>	密度 2.97g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 3,300cm <sup>2</sup> /g, カルシウムアルミネイト含有率 91.4%

表-3.2 にセメント硬化体の配合一覧を示す。水和生成物の分析はコンクリート配合から細骨材および粗骨材を除いたセメントペーストを使用した。結合材の種類は、普通ポルトランドセメント (N)、初期強度を確保する目的で PC 橋梁上部工に一般的に使用される早強ポルトランドセメント (H) および PC 橋梁上部工に 300 橋以上の実績があり、耐久性向上効果が確認されている早強ポルトランドセメントの 50%を高炉スラグ微粉末 6000 で置換し

た配合とした。水結合材比は 35% の 1 種類とし、 $CA_2$  の混和率の違いによる塩化物イオン浸透抑制効果を確認するために 0%、6% および 12% の 3 水準を設定した。

表-3.2 ペーストの配合

各配合の記号	結合材種類	W/B <sub>1</sub> (%)	GGBS/B <sub>2</sub> (%)	CA <sub>2</sub> /B <sub>1</sub> (%)	1 バッチの計量値 (kg)				
					水 W	セメント C	高炉スラグ微粉末 GGBS	塩素固定化材 CA <sub>2</sub>	
N35	普通	35.0	0	0	5.25	15.00	0	0	
N35CA <sub>2</sub> -6%				6	5.25	14.10	0	0.90	
N35CA <sub>2</sub> -12%				12	5.25	13.20	0	1.80	
H35	早強		0	0	5.25	15.00	0	0	
H35CA <sub>2</sub> -6%				6	5.25	14.10	0	0.90	
H35CA <sub>2</sub> -12%				12	5.25	13.20	0	1.80	
H35B650	早強 +GGBS		50	0	0	5.25	7.50	7.50	0
H35B650CA <sub>2</sub> -6%					6	5.25	7.05	7.05	0.90
H35B650CA <sub>2</sub> -12%					12	5.25	6.60	6.60	1.80

※B<sub>1</sub>=C+GGBS+CA<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>=C+GGBS

### 3.2.2 試験方法および試験項目

ペースト試験の概要を表-3.3 に示す。セメント硬化体は、室温約 20℃ の環境で図-3.1 に示す公称容量 20 リットルのモルタルミキサーを用いて製造した。1 バッチ当たりの製造量は 10 リットルとした。練り混ぜ手順を以下に示す。

①セメントと混和材を投入 → ②高速で空練り 60 秒 → ③水を投入 → ④低速で練混ぜ 30 秒 → ⑤かき落とし → ⑥低速で練混ぜ 60 秒 → ⑦停止 → ⑧ペーストを排出

試験体形状は、圧縮強度、塩化物イオン分布および中性化深さの測定は直径 50mm、高さ 100mm の円柱試験体を用いた。塩化物イオンの分布および中性化深さの測定については、直径 50mm、高さ 100mm の円柱試験体の底面を 2~3mm 程度研磨した後に、研磨面以外の面をエポキシ樹脂で塗布して、研磨面から浸透した塩化物イオンの分布および中性化深さを測定した。ブリーディングの影響を受けないように試験体の底面を試験面とした。材齢 1 年および 1 年半後に測定を行う試験体については、材齢 3 ヶ月から塩水浸せき(温度 20℃, 10%NaCl 溶液)を 9 ヶ月間行い、促進中性化(温度 20℃, 相対湿度 60%, 二酸化炭素濃度 5.0%)を 6 ヶ月間行った。比較として行った促進中性化無しの試験体は、試験体を封かんした状態で、温度 20℃, 相対湿度 60%の恒温恒湿槽で保管した。中性化深さは、JIS A 1152 および JIS A 1153 に準拠し測定した。

表-3.3 ペースト試験の概要

試験期間		材齢 1 日～材齢 3 ヶ月			材齢 3 ヶ月～材齢 1 年	材齢 1 年～材齢 1 年半
試験手順	試験体の作製	封かん養生			塩水浸せき	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">促進中性化無</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">促進中性化有</div>
	養生温度 20,40,60°C の 3 種類	封かん養生期間は 3 ヶ月間			塩水浸せき期間は 9 ヶ月間	促進中性化の有無の期間は 6 ヶ月間
試験材齢		材齢 1 日	材齢 28 日	材齢 91 日	材齢 1 年	材齢 1 年半
測定項目	・水和生成物	—	○	—	○	○
	・水酸化カルシウム量	—	○	—	○	○
	・細孔構造	—	○	—	○	○
	・塩化物イオン量	—	○	—	○	○
	・塩化物イオンの分布	—	—	—	○	○
	・中性化深さ	—	—	—	—	○
	・圧縮強度	○	○	○	—	—

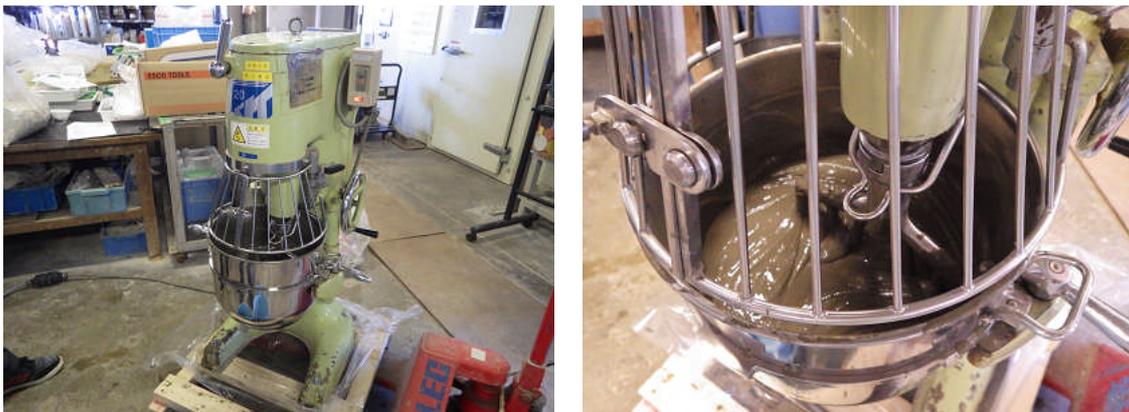


図-3.1 モルタルミキサー

水和生成物，水酸化カルシウム量，細孔構造および塩化物イオン量の測定については，幅 50mm，奥行 50mm，深さ 30mm のプラスチック容器に 80g のペースト試料を採取し板状の試験体を作製した。水和生成物，水酸化カルシウム量および塩化物イオン量の測定については板状試験体を 1.2～2.5mm，細孔構造の測定については 2.5～5.0mm に粒度を調整した試料を用いた。材齢 28 日で測定を実施する試験体については，測定直前に粒度調整各種測定を行った。材齢 1 年および 1 年半後に測定を実施する試験体については，材齢 3 ヶ月で粒度調整を行い，塩水浸せき（温度 20°C，10%NaCl 溶液）を 9 ヶ月間，その後，促進中性化（温度 20°C，相対湿度 60%，二酸化炭素濃度 5.0%）を 6 ヶ月間行った。比較として行った促進中性化無し試験体は，試験体を封かんした状態で，温度 20°C，相対湿度 60%の恒温恒湿槽で保管した。試験体製作状況を図-3.2 に示し，試験体の製作方法および試験手順の概要を図-3.3 に示す。



図-3.2 ペースト試験体製作状況

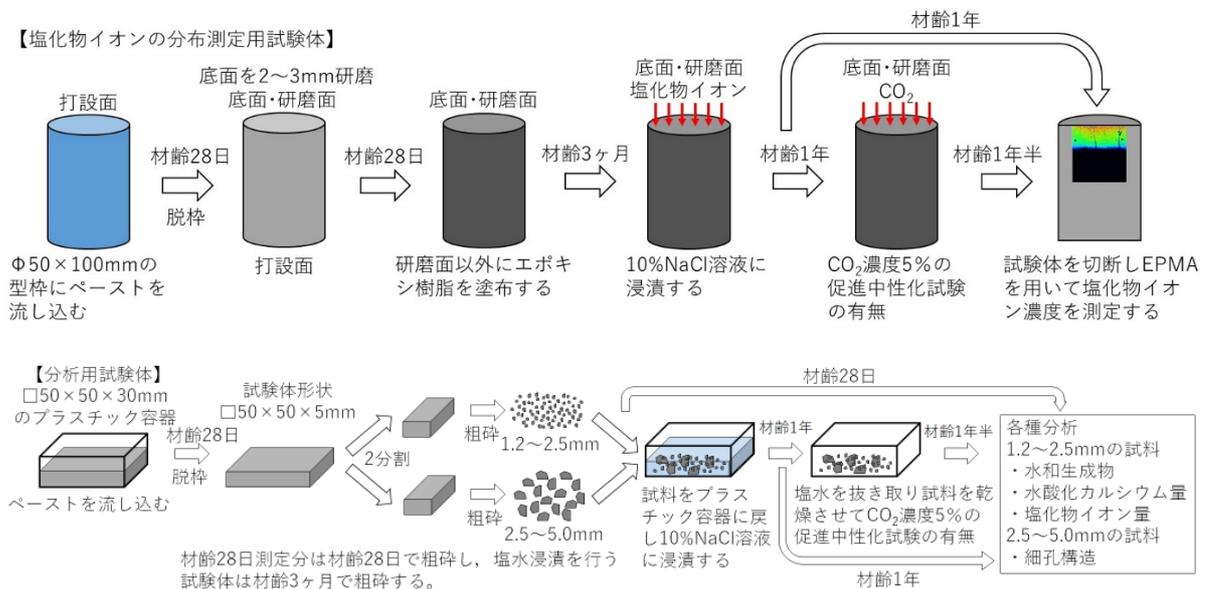


図-3.3 試験体の作製方法および試験手順

試験体の材齢 24 時間以内の初期養生は、20℃一定とした封かん養生とプレキャスト PC (以下、PCaPC という) 部材での適用を想定し、蒸気養生を模擬した温度履歴を設定した。封かん養生の試験体については、打込み直後から温度 20℃、相対湿度 60%の環境で養生を行った。蒸気養生を模擬した温度履歴を図-3.4 に示す。蒸気養生の最高温度については 40℃ および 60℃の 2 種類を設定した。蒸気養生を模擬した温度履歴を与えた試験体は、恒温恒湿槽で所定の温度履歴を与えた後は封かんした状態で、温度 20℃、相対湿度 60%の恒温恒湿槽で保管した。試験体の養生状況を図-3.5 に示す。給熱養生後は各試験材齢まで 20℃一定の条件で養生を行った。

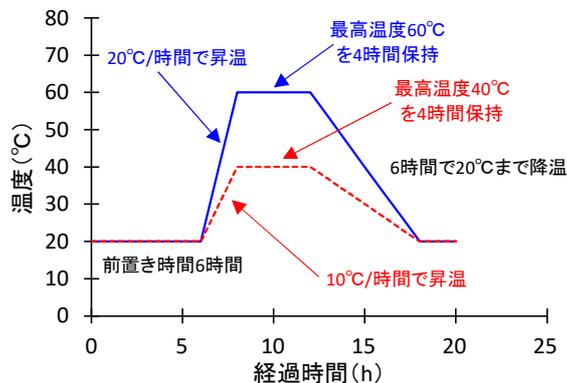


図-3.4 蒸気養生を模擬した温度履歴



図-3.5 試験体の養生状況

本試験で実施した各種試験の試験項目を表-3.4 に示し、各試験の詳細な試験方法について以下に示す。

表-3.4 試験項目

項目	試験方法
水和生成物	X線回折(XRD)で定性分析を行い、水和生成物を同定した。 X線源の条件: CuK $\alpha$ ( $\lambda=1.54186 \text{ \AA}$ ) 管電圧・管電流の条件: 40 kV-45 mA
水酸化カルシウム量	参考文献 <sup>3.1)</sup> に準拠し熱分析(TG-DTA)により定量した。
細孔構造	JIS R 1655 および参考文献 <sup>3.1)</sup> に準拠し水銀圧入式ポロシメーターを用いて測定を行った。
塩化物イオン量	JIS A 1154 に準拠し、全塩化物イオン量を定量した。また、JIS A 1154 の附属書に準拠し温水抽出塩化物イオン量についても定量し、温水抽出塩化物イオン量を可溶性塩化物イオンとみなした。
塩化物イオンの分布	JSCE-G574-2005「EPMA法によるコンクリート中の元素の面分析方法(案)」に準拠して測定を行った。
中性化深さ	JIS A 1152 および JIS A 1153 に準拠し、中性化深さを測定した。
圧縮強度	JIS A 1108 に準拠し、圧縮強度を測定した。

水和物成分分析はX線回折装置MULTI-FLEX【(株)リガク社製】を使用した。分析用のソフトについてはPDXL【(株)リガク社製】を用いた。試験状況を図-3.6に示す。

サンプル試料は、プラスチック容器(容器の寸法は50×50×30mm)に流し込んだペーストを所定材齢まで養生を行った後にペンチを用いて細かくし、ふるいを用いて1.2~2.5mmに調整したものをアセトン溶液中に保管し水和停止状態を保持した。また、養生期間中に炭酸ガスによる微細組織の変化が生じないように試料の上面にラップフィルムで封かん養生を行った。

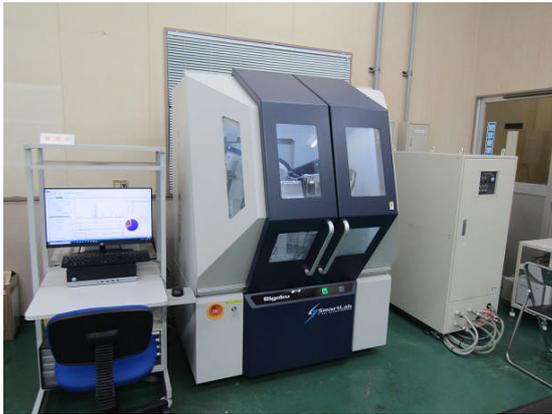


図-3.6 X線回折装置を使用した試験状況

XRDの測定は、アセトンを用いて水和を停止させた試料についてディスクミルを用いて粗砕し、 $150\mu\text{m}$ 以下にふるったものをメノウ乳鉢で調整した。上記の微粉碎試料に内部標準物質として平均粒径 $3\mu\text{m}$ のコランダム ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) を、乳鉢を用い内割10%混合して行った。XRDの測定条件は、ターゲットCuK $\alpha$ 、管電圧40kV、管電流45mA、走査範囲 $5\text{-}70\text{deg.}2\theta$ 、ステップ幅 $0.01\text{deg}$ 、スピード $5^\circ/\text{min}$ とし半導体検出器を使用した。測定基本回数は1回としたが、データのバラツキが大きいケースまたは異常値が出たケースにおいて、2~3回追加して測定し、その平均値を使用した。

水酸化カルシウムの生成量については熱分析装置 TG-DTA2020S【ネッチジャパン(株)社製】を使用した。試験状況を図-3.7に示す。

サンプル試料は、X線回折と同様にプラスチック容器（容器の寸法は $50 \times 50 \times 30\text{mm}$ ）に流し込んだペーストを所定材齢まで養生を行った後にペンチを用いて細かくし、ふるいを用いて $1.2\text{-}2.5\text{mm}$ に調整したものをアセトン溶液中に保管し水和停止状態を保持した。また、養生期間中に炭酸ガスによる微細組織の変化が生じないように試料の上面にラップフィルムで封かん養生を行った。



図-3.7 熱分析装置を使用した試験状況

熱分析の測定は、アセトンを用いて水和を停止させた試料についてディスクミルを用いて粗砕し、 $150\mu\text{m}$ 以下にふるったものをメノウ乳鉢で調整した。使用する試料の量は $50\text{mg}$ とし、温度範囲は室温から $1000^\circ\text{C}$ までとした。測定時の槽内には、窒素ガスを $100\text{ml}/\text{min}$ で注入し熱分析の測定を行った。測定基本回数は1回としたが、データのバラツキが大きい

ケースまたは異常値が出たケースにおいて、2～3 回追加して測定し、その平均値を使用した。

ペースト試験体の全塩化物イオン量は、硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法（JIS A 1154-2012）に準拠し、可溶性の塩化物イオン量については、硬化コンクリート中に含まれる温水抽出塩化物イオンの分析方法（JIS A 1154-2012 附属書 B）に準拠し測定を行った。塩化物イオン量の測定は、汎用自動滴定装置 GT-200/Win 型【(株)三菱ケミカルアナリテック社製】を用いた。

図-3.8 に自動滴定塩分分析装置を使用した試験状況を示す。

サンプル試料は、X 線回折と同様にプラスチック容器（容器の寸法は 50×50×30mm）に流し込んだペーストを所定材齢まで養生を行った後にペンチを用いて細かくし、ふるいを用いて 1.2～2.5mm に調整したものをアセトン溶液中に保管し水和停止状態を保持した。また、養生期間中に炭酸ガスによる微細組織の変化が生じないように試料の上面にラップフィルムで封かん養生を行った。

細孔径分布測定は、Auto Pore 9520【マイクロメリティックス社製】を使用した。試験状況を図-3.9 に示す。水銀圧入式ポロシメーターの最大圧力は 414MPa（60,000psi）であり、測定細孔径は 0.002～100 $\mu$ m とした。

サンプル試料は、X 線回折と同様にプラスチック容器（容器の寸法は 50×50×30mm）に流し込んだペーストを所定材齢まで養生を行った後にペンチを用いて細かくし、ふるいを用いて 2.5～5.0mm に調整したものをアセトン溶液中に保管し水和停止状態を保持した。また、養生期間中に炭酸ガスによる微細組織の変化が生じないように試料の上面にラップフィルムで封かん養生を行った。測定前に試料が恒量になるまで 40℃乾燥を実施し、その後は、着色シリカゲル乾燥剤が入るデシケーターに速やかに移し、約 20℃の室温になるまで静置した。測定基本回数は 1 回としたが、データのバラツキが大きいケースまたは異常値が出たケースにおいて、2～3 回追加して測定し、その平均値を使用した。



図-3.8 自動滴定塩分分析装置を使用した試験状況



図-3.9 水銀圧入式ポロシメーター装置を使用した試験状況

ペースト試験体の見かけの拡散係数は、浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数試験方法(案)(JSCE-G 572-2018)およびEPMA法によるコンクリート中の元素の面分析法(JSCE-G 574-2013)に準拠して測定を行った。EPMAの測定は、JXA-8230電子プローブマイクロアナライザ【日本電子(株)社製】を使用した。試験状況を図-3.10に示す。



図-3.10 EPMAを使用した試験状況

サンプル試料は、直径50×高さ100mmの円柱試験体を用いた。材齢1日で温度履歴を与えた試験体を材齢28日まで20℃一定の湿潤養生を行った後に、試験体の打ち込み低面から2~3mmを研磨した後に研磨面以外をエポキシ樹脂で塗布した。エポキシ樹脂が乾燥し硬化したことを確認した後に、10%塩化ナトリウム水溶液に浸せきし所定の材齢で見かけの拡散係数の測定を行った。EPMAの測定用の試料は乾式カッターで、幅50×深さ70×厚さ10mmに切断した後にエポキシ樹脂で包埋して研磨を行った。

### 3.3 試験結果

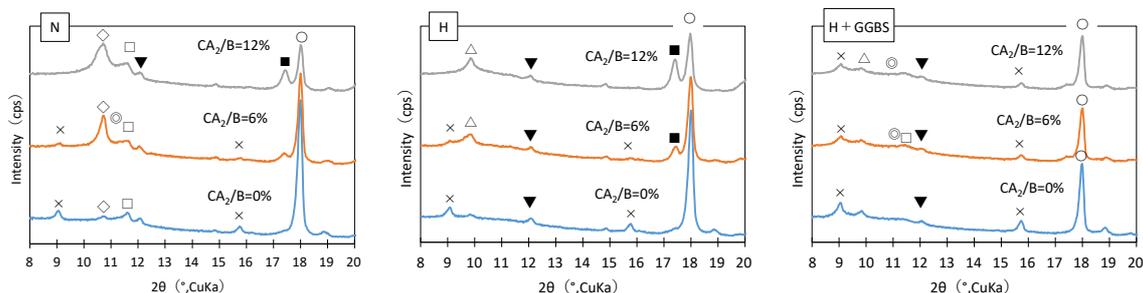
#### 3.3.1 セメントの水和生成物に及ぼす塩素固定化材の影響

##### (1) 結合材種類の影響

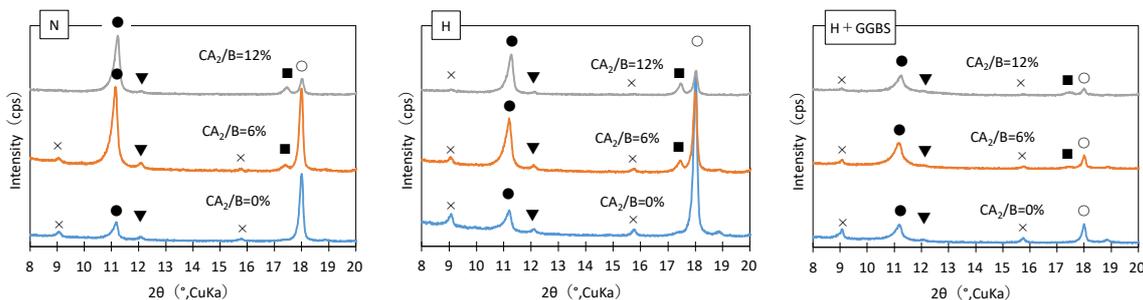
セメントの水和生成物に及ぼす塩素固定化材の影響を評価するために、X線回折(XRD)を用いて定性分析を行い、水和生成物を同定した。さらに、 $CA_2$ の混和により hidroカルマイトが生成されるため、この際に式(2.1)に示すようにセメントの水和で生じる水酸化カルシウムを消費すると考えられ、塩化物イオンの作用を受けた際の水酸化カルシウムの溶脱挙動に影響を及ぼすと考えられる。これは、水酸化カルシウムが塩化物イオンの作用を受けた際に、溶解度の高い塩化カルシウムに変化し、溶脱すると考えられたためである。

20℃の場合の材齢28日および塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体のXRDの結果を図-3.11に示す。全ての配合について材齢28日時点で未水和の $CA_2$ は確認されず、エトリンガイト、hidroカルマイト族の水和物、hidroガーネットおよび水酸化カルシウムが形成されていることを確認した。hidroカルマイト族の水和物は、 $2\theta = 10 \sim 12^\circ$ 付近にピークが存在し、各水和物のピーク位置を、モノサルフェートは $2\theta = 9.9^\circ$ 付近、ヘミカーボネートは $2\theta = 10.7^\circ$ 付近<sup>3.2)</sup>、モノカーボネートは $2\theta = 11.6^\circ$ 付近<sup>3.2)</sup>、hidroカルマイトは $2\theta = 11.2^\circ$ 付近<sup>3.3)</sup>として同定を行った。

【材齢 28 日（塩水浸せき前）】



【材齢 1 年（塩水浸せき 9 ヶ月後）】



○：水酸化カルシウム，×：エトリンガイト，△：モノサルフェート，◎：ハイドロカルマイト  
□：モノカーボネート，◇：ヘミカーボネート，●：フリーデル氏塩，■：ハイドロガーネット，▼：C<sub>4</sub>AF

図-3.11 20 °C の場合の材齢 28 日および塩水浸せきを 9 ヶ月間行った試験体の XRD の測定結果

CA<sub>2</sub>を混和した場合は、普通ポルトランドセメントではモノカーボネートとヘミカーボネートの生成が顕著となり、早強ポルトランドセメントではモノサルフェートの生成が顕著となったのは、セメント中の SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>や CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>が CA<sub>2</sub>の反応により生成されたハイドロカルマイトの OH<sup>-</sup>との交換が生じたためと推察される。既往の文献<sup>3.4), 3.5), 3.6)</sup>においても、水酸化物イオンは他のイオンに比べて安定性が低く、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>や CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>に交換されやすいことが報告されている。ハイドロカルマイト族の他にハイドロガーネット (3CaO・Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>・6H<sub>2</sub>O) が生成されていることが確認された。CA<sub>2</sub>の混和率が高くなるほどハイドロガーネットのピーク強度は高くなる傾向にある。このことは、CA<sub>2</sub>混和率の上昇により結合材中の CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>比が低下し、ハイドロカルマイト族の水和物よりも CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>比が低いハイドロガーネットの方が安定相と変わったことにより生じていると推察される。

CA<sub>2</sub>の混和率が高くなると、水酸化カルシウムのピーク強度が低下する傾向にあり、CA<sub>2</sub>の反応によるハイドロカルマイト族の水和物やハイドロガーネットの生成により消費されたことが考えられる。結合材種類が H+GGBS の配合では、他の配合に比べて水酸化カルシウムのピーク強度が小さくなった。これは、早強ポルトランドセメントのみを用いた配合と比較した場合に、高炉スラグ微粉末および CA<sub>2</sub>の混和によってセメント量が少なることでセメント由来の水酸化カルシウムが少なくなったためと考えられる。ピーク強度が全体的に低い傾向にあるのは、高炉スラグ微粉末が結合材の半数程度を占めており非晶質な水和

物が多くなっているためと考えられる<sup>3.7)</sup>。

塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体は材齢28日時点で確認されたモノサルフェート、ヘミカーボネートやモノカーボネートのピーク強度が減少または消失し、フリーデル氏塩のピーク強度が高くなる傾向が確認された。これは hidroカルマイト族の水和物のOH、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>やCO<sub>3</sub><sup>2-</sup>が、Clと置換しフリーデル氏塩に変化し塩化物イオンを固定したためと考えられる。CA<sub>2</sub>を混和した配合は無混和に比べてフリーデル氏塩のピーク強度は高くなる傾向となった。また、CA<sub>2</sub>/B=6%とCA<sub>2</sub>/B=12%で比べると、フリーデル氏塩のピーク強度はCA<sub>2</sub>/Bが変化しても大きく変化しない結果となった。

XRDの測定結果より、CA<sub>2</sub>を混和することで水酸化カルシウムのピークが減少しモノカーボネート、ヘミカーボネートおよび hidroカルマイトのピークが出現したが、これは式(2.1)によって水酸化カルシウムとCA<sub>2</sub>が反応して hidroカルマイト族の水和物を生成していることを示唆している。それを確認するために、熱分析によってペースト中の水酸化カルシウム量を測定した。

20°C条件の熱分析による材齢28日および塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体の水酸化カルシウム量を定量した結果を図-3.12に示す。結合材種類に応じて水酸化カルシウム量に違いが生じており、H+GGBS < N < Hの順で多くなる傾向が確認された。また、CA<sub>2</sub>の混和率に応じて水酸化カルシウム量が小さくなり、XRDのピーク強度の変化と同様の傾向が確認された。

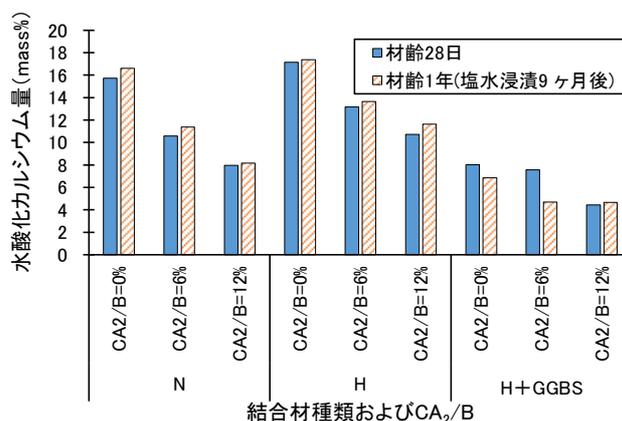


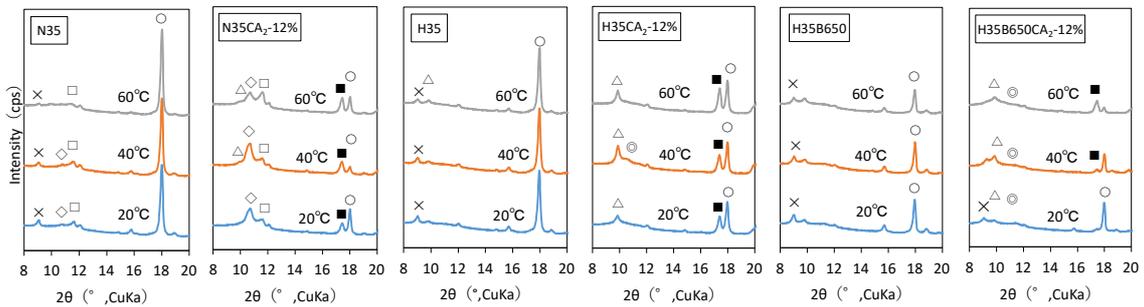
図-3.12 結合材種類およびCA<sub>2</sub>の混和率による水酸化カルシウム量

## (2) 初期養生温度の影響

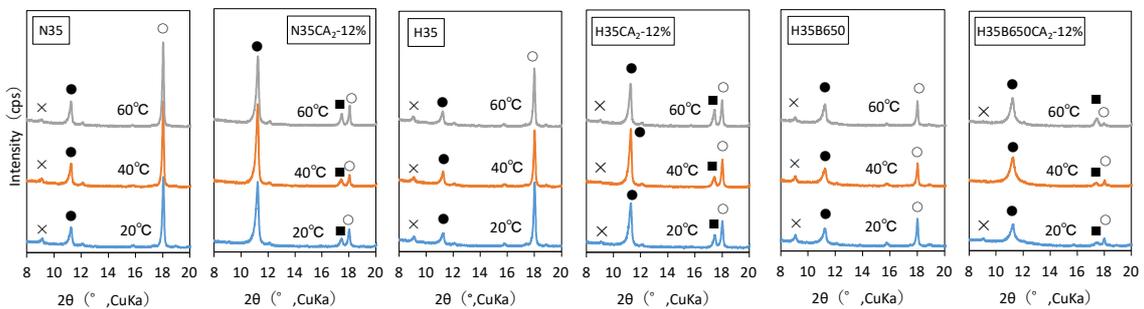
近年、生産性向上の観点からPCaPC部材の活用が注目されている<sup>3.8)</sup>。PCaPC部材は、工場などで管理された条件で製造されるために、CA<sub>2</sub>や高炉スラグ微粉末などの混和材や高炉スラグ細骨材などを活用しやすく、さらに品質を高めやすいなどの特徴がある。

PCaPC部材はその製造過程において、初期強度を確保するために蒸気養生などの促進養生が行われている。既往の研究において、蒸気養生を行ったコンクリートについて、標準養生を行った試験体と比較して中性化<sup>3.9)</sup>や塩化物イオン浸透深さ<sup>3.10)</sup>が大きくなる報告がなされており、この原因として細孔構造<sup>3.11)</sup>の影響が検討されている。本研究では、促進養生による初期の温度履歴を変化させた際のCA<sub>2</sub>の影響について、化学的効果と物理的効果の両面について検討を行った。

【材齢 28 日（塩水浸せき前）】



【材齢 1 年（塩水浸せき 9 ヶ月後）】



○：水酸化カルシウム，×：エトリンガイト，△：モノサルフェート，◎：ハイドロカルマイト  
 □：モノカーボネート，◇：ヘミカーボネート，●：フリーデル氏塩，■：ハイドロガーネット

図-3.13 初期養生温度ごとの材齢 28 日および塩水浸せきを 9 ヶ月間行った試験体の XRD の測定結果

CA<sub>2</sub>/B=0%および 12%の配合について、初期養生温度ごとの材齢 28 日および塩水浸せきを 9 ヶ月間行った試験体の XRD の結果を図-3.13 に示す。初期養生温度を変化させた場合においても材齢 28 日時点で未水和の CA<sub>2</sub>は確認されなかった。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において、20°Cと 40°Cでは、同定される水和物とそのピーク強度は大きく変化しない結果となった。普通ポルトランドセメントに CA<sub>2</sub>を混和した配合は、60°C養生を施すとヘミカーボネートのピークが減少し、モノカーボネートのピーク強度が増加する結果となった。早強ポルトランドセメントにおいては、60°C養生によるピーク強度の変化は小さい結果となった。H+GGBS の配合では、40°Cでエトリンガイトのピークが減少しモノサルフェートのピークが確認され、60°Cでエトリンガイトのピークが消失する結果となった。

塩水浸せきを 9 ヶ月間行った試験体については、結合材種類および CA<sub>2</sub>の有無にかかわらずフリーデル氏塩のピークが確認され、CA<sub>2</sub>の混和によりピーク強度が高くなる傾向が確認された。また、CA<sub>2</sub>を混和した場合は、60°Cに比べて 40°Cの方がフリーデル氏塩のピーク強度が高い傾向を示した。

図-3.14 に塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体の初期養生温度ごとの水酸化カルシウム量の結果を示す。CA<sub>2</sub>/B=0%および12%の結果を示すが、結合材種類にかかわらずCA<sub>2</sub>無混和の場合は初期養生温度による水酸化カルシウム量に大きな違いは確認されなかった。CA<sub>2</sub>を混和した場合は、初期養生温度が20℃より40℃または60℃とした場合の水酸化カルシウム量が小さくなる傾向が

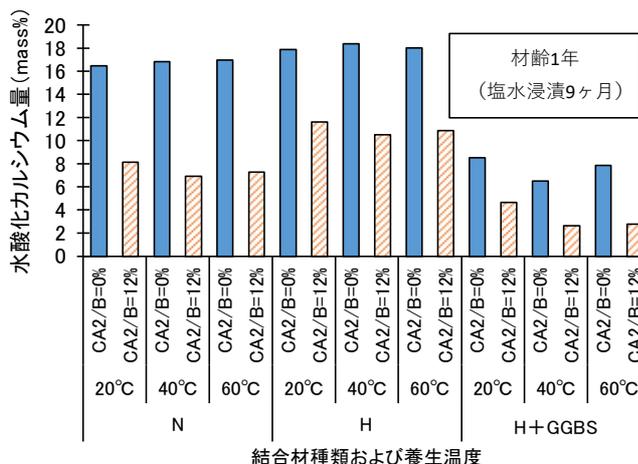
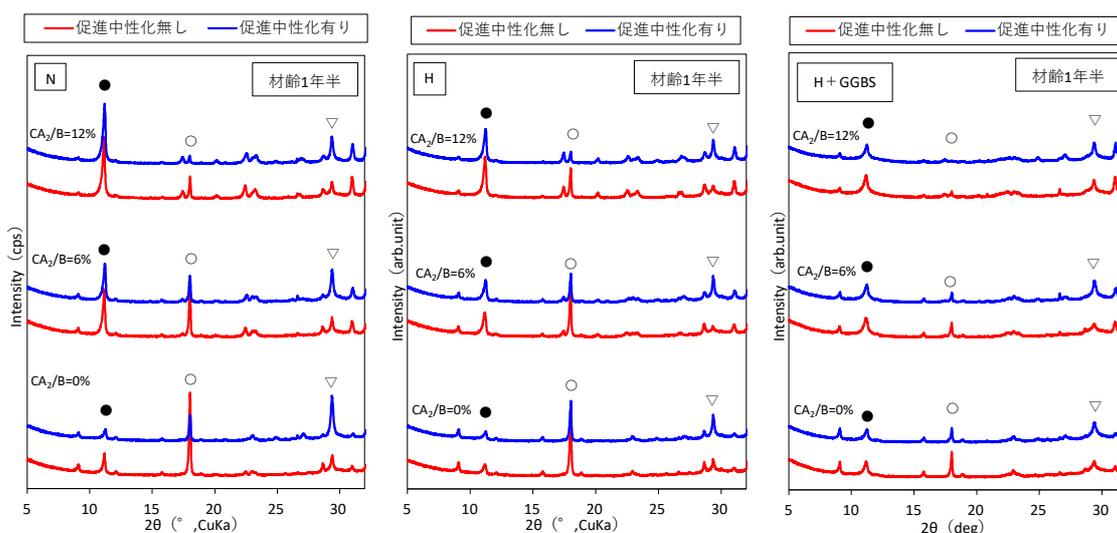


図-3.14 初期養生温度ごとの水酸化カルシウム量

確認された。また、結合材種類の影響については、NやHよりH+GGBSの方が養生温度を高くすることで水酸化カルシウム量がより小さくなる傾向が確認された。この原因については、養生温度を高くすることで高炉スラグ微粉末の反応が活性化されたために水酸化カルシウムの消費量が多くなったと推察される。

### (3) 促進中性化の影響

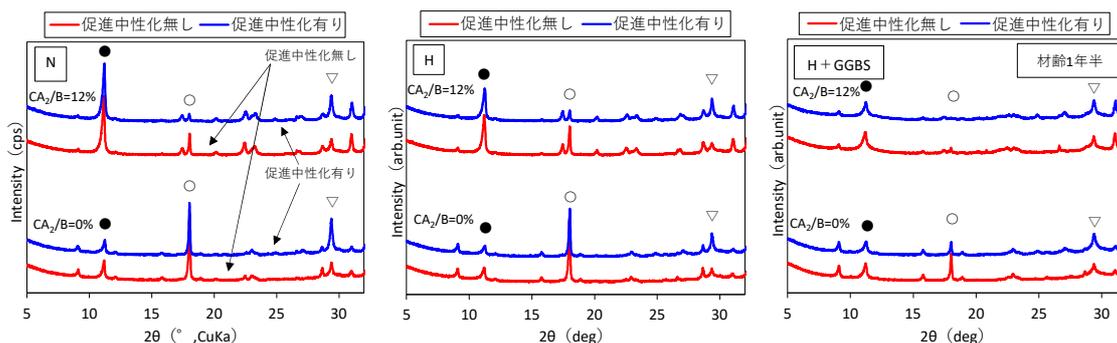
9ヶ月間塩水浸せきした後に、6ヶ月間の促進中性化試験の実施の有無による試験体について、XRDを用いて水和生成物の測定を行った結果を図-3.15に示す。CA<sub>2</sub>/Bは0, 6および12%で、20℃条件での試験結果を示す。結合材種類にかかわらず9ヶ月間の塩水浸せき後には確認されなかったカルサイトのピークが促進中性化の有無にかかわらず確認された。



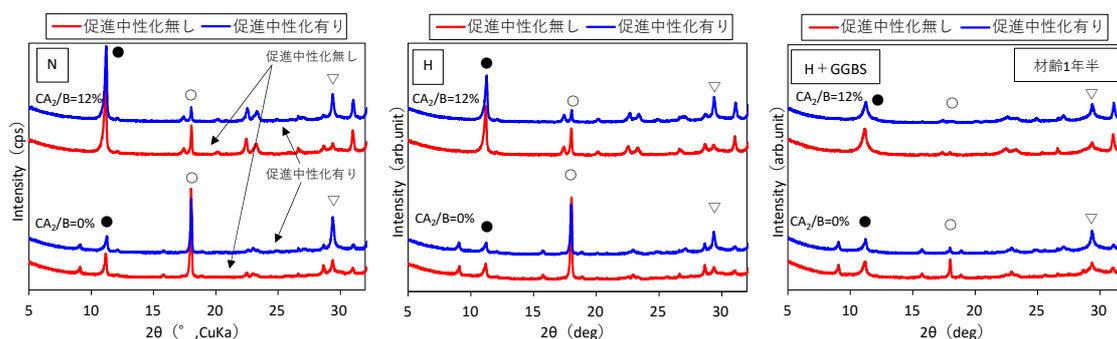
○：水酸化カルシウム，●：フリーデル氏塩，▽：カルサイト

図-3.15 促進中性化の有無によるXRDの測定結果 (CA<sub>2</sub>/B=0,6,12%, 養生温度20℃)

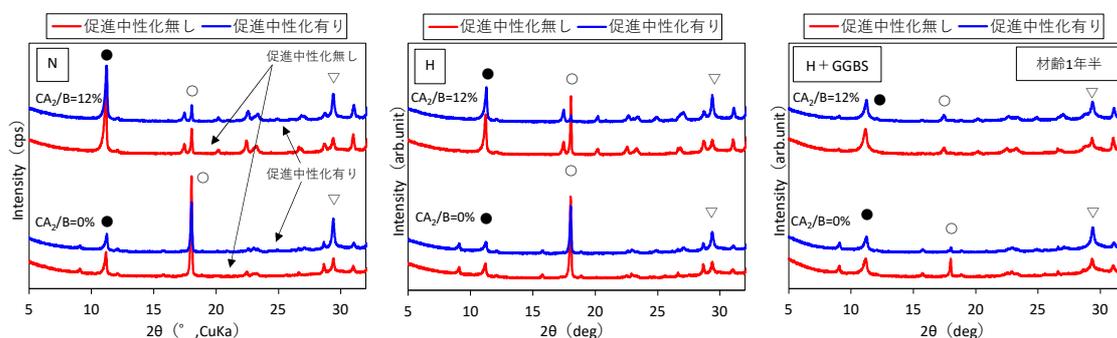
カルサイトのピーク強度は促進中性化有りの方が大きくなっており、それに伴い水酸化カルシウムのピーク強度は小さくなっていることから促進中性化の影響を受けて中性化が進行していることが確認できる。また、フリーデル氏塩のピーク強度について、結合材種類にかかわらず  $CA_2$  を混和させた際のピーク強度が高くなる傾向を示したが、促進中性化の有無による大きな違いは確認されなかった。



【温度条件 20°C】



【温度条件 40°C】



【温度条件 60°C】

○ : 水酸化カルシウム, ● : フリーデル氏塩, ▽ : カルサイト

図-3.16 初期養生温度ごとの促進中性化の有無による XRD の測定結果  
( $CA_2/B=0\%$ および  $12\%$ , 養生温度 20, 40, 60°C)

図-3.16にCA<sub>2</sub>/Bは0%および12%で、温度条件について20、40、60℃の試験結果を示す。水酸化カルシウム、フリーデル氏塩およびカルサイトの变化について検討を行ったが、

図-3.15と同様にフリーデル氏塩およびカルサイトについてピーク強度に大きな違いは確認されておらず、高い温度履歴を受けた場合においてもCA<sub>2</sub>で固定化された塩化物イオンについて中性化の影響を受けることによる分解などの現象は確認されなかった。

9ヶ月間塩水浸せきした後に、6ヶ月間の促進中性化試験の実施の有無による試験体について熱分析により水酸化カルシウム量を測定した結果を図-3.17に示す。CA<sub>2</sub>/Bは

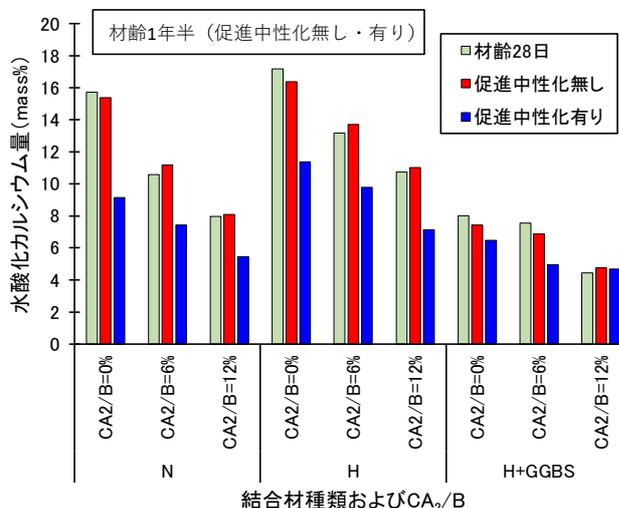


図-3.17 促進中性化の有無による水酸化カルシウム

の試験結果を示す。比較として材齢28日の結果を示す。XRDから得られた水酸化カルシウムのピーク強度と同様の傾向を示しており、結合材種類にかかわらずCA<sub>2</sub>を混和することで水酸化カルシウムが減少していることから hidroカルマイト族の水和物を生成した後に塩化物イオンをフリーデル氏塩として固定化していることが示唆された。さらに促進中性化無しより促進中性化有りの水酸化カルシウム量が減少していることから、促進中性化有りについて中性化が進行していることが確認された。

図-3.18にCA<sub>2</sub>/Bは0%および12%で、温度条件について20、40、60℃の試験結果を示す。水酸化カルシウム量に関して、図-3.16のXRDの測定結果と同様に、初期の養生温度を変化させた際の影響は見られなかった。

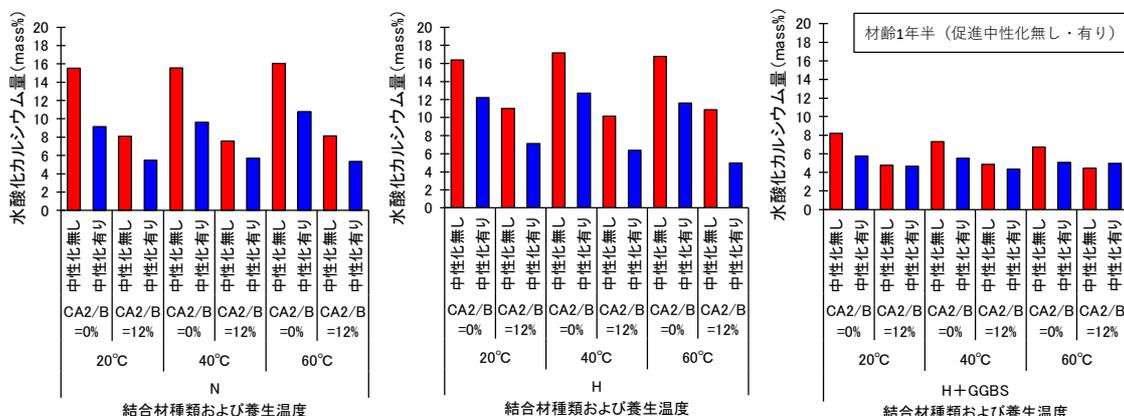


図-3.18 初期養生温度ごとの促進中性化の有無による水酸化カルシウム量

### 3.3.2 塩化物イオンの固定作用に及ぼす塩素固定化材の影響

#### (1) 結合材種類の影響

塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体を用いて可溶性塩化物イオン量と全塩分量を測定し、塩化物イオン固定化率を算出した。塩化物イオン固定化率の算出式を式(3.1)に示す。

$$Cl_{fix} = (Cl_a - Cl_s) / Cl_a \quad (3.1)$$

ここに、 $Cl_{fix}$  : 塩化物イオン固定化率 (%)  
 $Cl_a$  : 全塩化物イオン量 (mass %)  
 $Cl_s$  : 可溶性塩化物イオン量 (mass %)

20℃条件でCA<sub>2</sub>の混和率を変化させた場合の可溶性塩化物イオンと固定塩分量と塩化物イオン固定化率を図-3.19に示す。結合材種類にかかわらず、CA<sub>2</sub>の混和率に応じて塩化物イオン固定化率が大きくなることが確認された。CA<sub>2</sub>/B=6%についてはCA<sub>2</sub>/B=0%と比較して塩化物イオン固定化率は10~15%増加したが、CA<sub>2</sub>/B=12%についてはCA<sub>2</sub>/B=6%と比較して0~5%の増加であることが確認された。

本試験の結果からCA<sub>2</sub>の混和率に応じて可溶性塩化物イオン量が増加する傾向が確認された。図-3.20に既往の研究<sup>3,4)</sup>で結合材種類およびCA<sub>2</sub>の混和率を変化させて場合の塩化物イオンの定量分析結果を示す。図-3.20については、2×2×8cmのペースト試験体を作製し、10%NaCl溶液に91日間浸せきさせた後に、試料を粉砕し塩化物イオン量を測定した結果である。図-3.19については、1.2~2.5mmに粗砕した状態で塩水に浸せきしており、図-3.20については、2×2×8cmのブロックの状態で行った後に粗砕して塩化物イオン量を測定しており、図-3.19については試料全体に塩化物イオンが浸透していたため

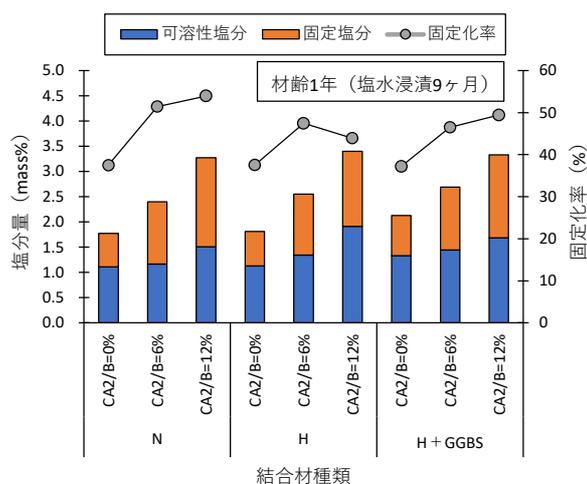


図-3.19 可溶性塩化物イオン量と固定塩分量と塩化物イオンの固定化率の関係

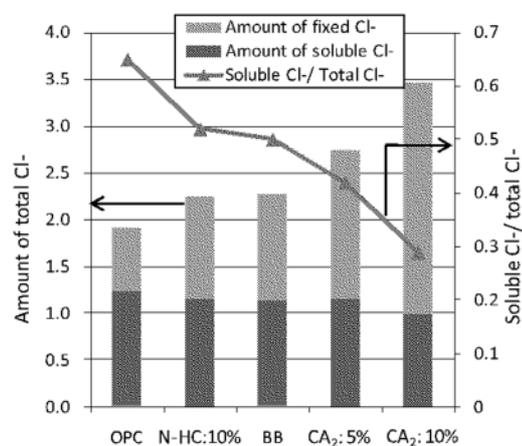


図-3.20 塩化物イオンの定量分析結果<sup>3,4)</sup>

に  $CA_2$  の混和率に応じて可溶性塩化物イオン量と全塩分量の両方が大きくなったものと推察される。

## (2) 初期養生温度の影響

$CA_2/B$  は 0%および 12%で、温度条件について 20, 40, 60 °Cと変化させた場合の可溶性塩化物イオン量と固定塩分量と塩化物イオン固定化率を図-3.21 に示す。 $CA_2/B$  が 0%の配合については、養生温度が高くなるにつれて塩化物イオン固定化率が数%程度ではあるが減少する傾向が確認された。 $CA_2/B$  が 12%の配合の塩化物イオンの固定化率は、20°Cと 60°Cについては同程度の傾向を示し、40°Cでピークとなる傾向を示した。この原因について、図-3.16 に示す XRD の結果から、材齢 28 日時点では 60°Cよりも 40°Cの方のハイドロカルマイト族のピーク強度が高くなる傾向を示しており、また、材齢 9 ヶ月まで塩水浸せきを行った結果について、フリーデル氏塩のピーク強度が 60°Cよりも 40°Cの方が高くなっていることから、養生温度を変化させることで水和物の生成が変化することで塩化物イオンの固定化に影響を与えていることが確認された。

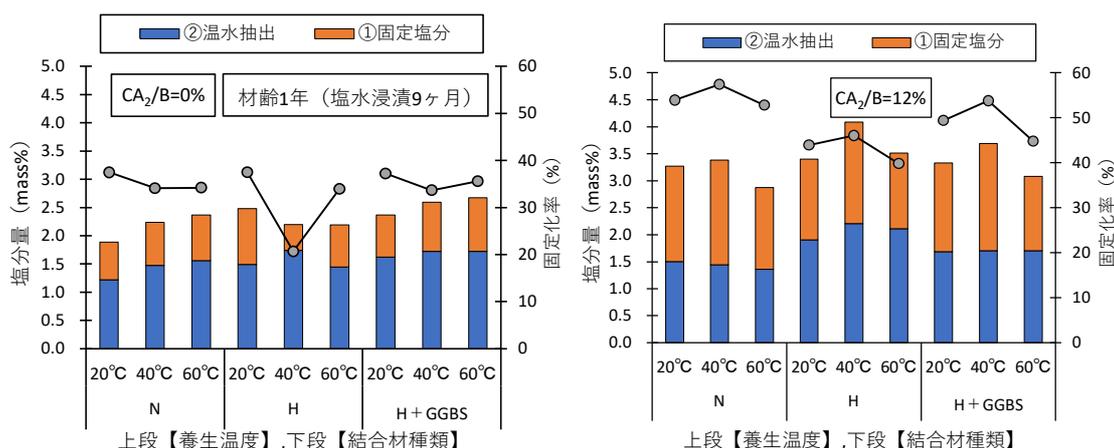


図-3.21 初期養生温度ごとの可溶性塩化物イオンと固定塩分量と塩化物イオンの固定化率の関係

図-3.22 に塩水浸せきを 9 ヶ月間行った試験体の水酸化カルシウム量と塩化物イオン固定化率の関係を示す。結合材種類にかかわらず  $CA_2$  の混和率に応じて水酸化カルシウム量が減少している。この原因は、 $CA_2$  と水酸化カルシウムとの反応によるものと、 $CA_2$  を結合材の内割りで混和したことも影響していると考えられる。N と H については、 $CA_2/B$  の変化に応じて水酸化カルシウム量と塩化物イオン固定化率の関係について同程度の傾向を示すことが確認された。H+GGBS については、水酸化カルシウム量は N および H の 1/2 以下であるが塩化物イオン固定化率は N および H と同程度となることが確認された。これは高炉スラグ微粉末をセメントの 50%程度置換した配合であっても  $CA_2$  が反応するための水酸化カルシウム量が確保されていたためと考えられる。また、20°Cと 60°Cで温度条件を変化

させた場合においても、水酸化カルシウム量と塩化物イオン固定化率の関係について大きな違いは確認されなかった。

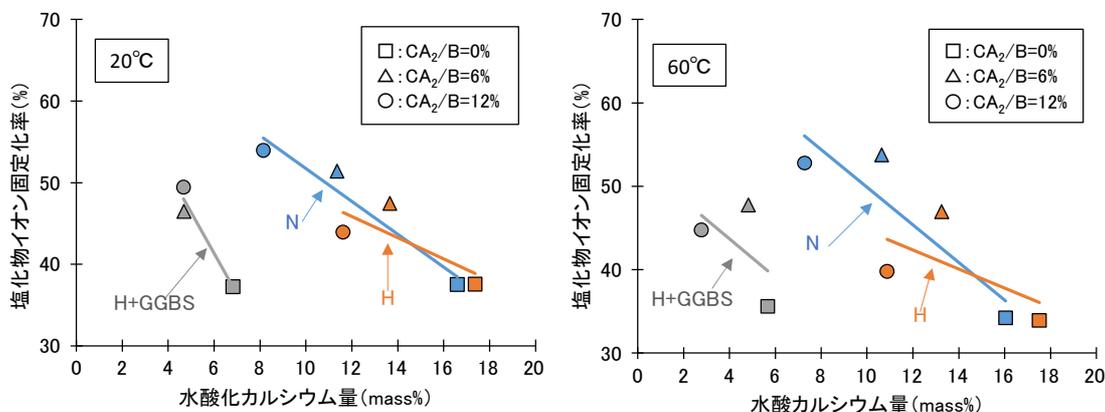


図-3.22 水酸化カルシウム量と塩化物イオン固定化率の関係

### (3) 促進中性化の影響

9ヶ月間塩水浸せきした後に、6ヶ月間の促進中性化試験の実施の有無による試験体について、可溶性塩化物イオン量と固定塩分量と塩化物イオン固定化率の結果を図-3.23に示す。CA<sub>2</sub>/Bは0、6および12%で、20°C条件での試験結果を示す。促進中性化無しの試験体について、可溶性塩化物イオン量は大きな違いはなく CA<sub>2</sub>の混和率に応じて固定塩分量が増加する傾向が確認された。また、結合材種類にかかわらず CA<sub>2</sub>の混和率に応じて塩化物イオンの固定化率が増加する傾向が確認された。一方、促進中性化を行った試験体については、促進中性化無しと比較して CA<sub>2</sub>の混和率が増加するとともに可溶性塩化物イオン量が増加

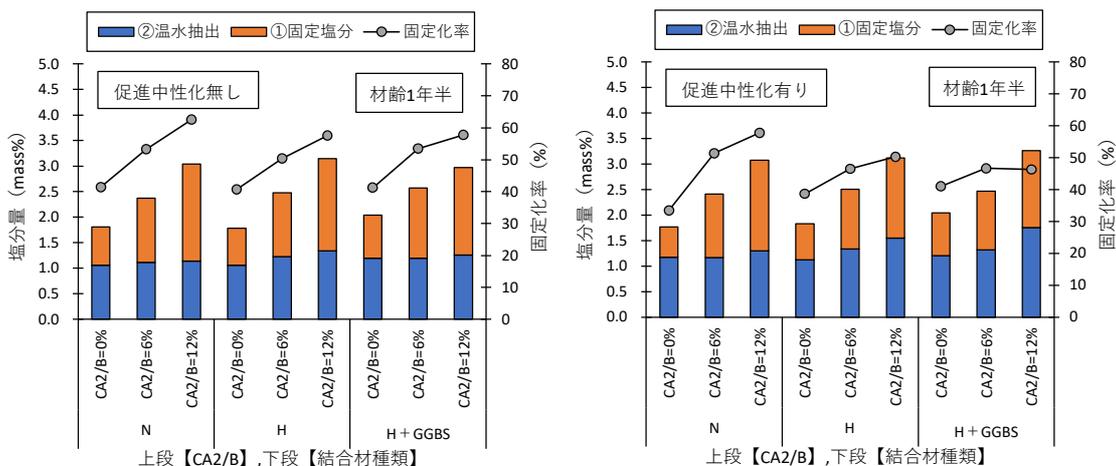


図-3.23 促進中性化の有無による可溶性塩化物イオン量と固定塩分量と塩化物イオンの固定化率の関係

し、塩化物イオンの固定化率も低下する傾向が確認された。この現象について、固定化された塩化物イオンが中性化の影響を受けて分解された可能性が考えられるため、以下の見かけの拡散係数の試験結果を踏まえて詳細な検討を行う。

CA<sub>2</sub>/B は 0% および 12% で、温度条件について 20, 40 および 60°C と変化させた場合の可溶性塩化物イオン量と固定塩分量と塩化物イオン固定化率を図-3.24 に示す。初期養生温度の違いで比較した場合においても、CA<sub>2</sub> を混和していない配合については中性化の有無による影響は確認されなかった。CA<sub>2</sub> を混和した場合は中性化無しの場合において初期養生温度を 60°C とした場合に塩化物イオンの固定化率が低下する傾向が確認された。さらに、促進中性化有りの場合において、塩化物イオンの固定化率が低下する傾向が確認された。以上より、CA<sub>2</sub> で固定化された塩化物イオンについて、60°C 程度の高温の温度履歴を受けた場合には塩化物イオンの固定化率が低下し、さらに中性化の影響を受けた場合は固定化された塩化物イオンの分解現象が生じている可能性が示唆された。

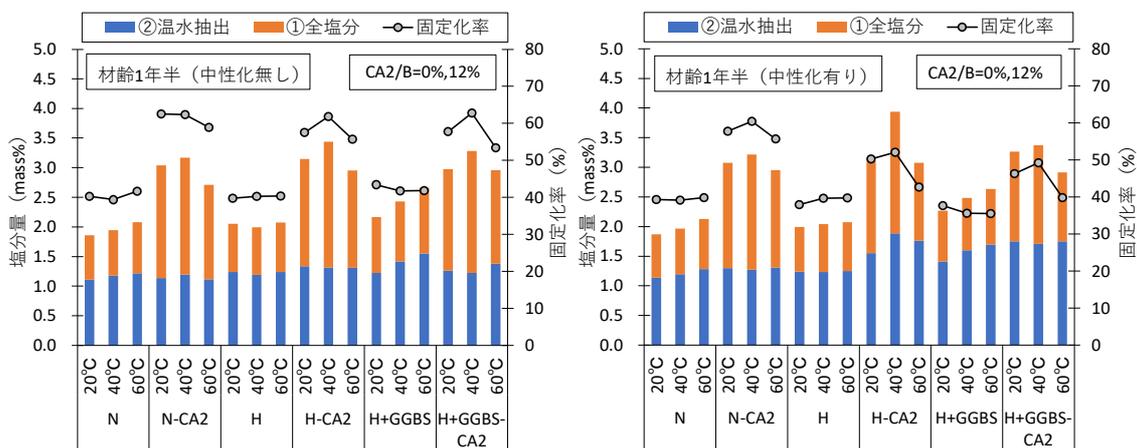


図-3.24 初期養生温度ごとの促進中性化の有無による可溶性塩化物イオン量と固定塩分量と塩化物イオンの固定化率の関係

### 3.3.4 ペースト硬化体の細孔構造に及ぼす塩素固定化材の影響

#### (1) 結合材種類の影響

CA<sub>2</sub>の塩化物イオン浸透抑制効果に関する物理的な機能を確認するために水銀圧入式ポロシメーターを用いてペーストの細孔構造に着目した検討を行った。

20℃条件でCA<sub>2</sub>の混和率を変化させた場合の各空隙径における空隙率を図-3.25に示す。

H+GGBSのCA<sub>2</sub>/B=6%のみ一部異なる傾向を示しているが、その他の配合については結合材の種類にかかわらず材齢28日から塩水浸せきを9ヶ月間行うことで総空隙量が小さくなることが確認された。また、塩水浸せき9ヶ月後の試験体については、CA<sub>2</sub>/Bの混和率に応じて総空隙量が小さくなる傾向が確認された。結合材種類の影響については大きな違いは確認されなかった。

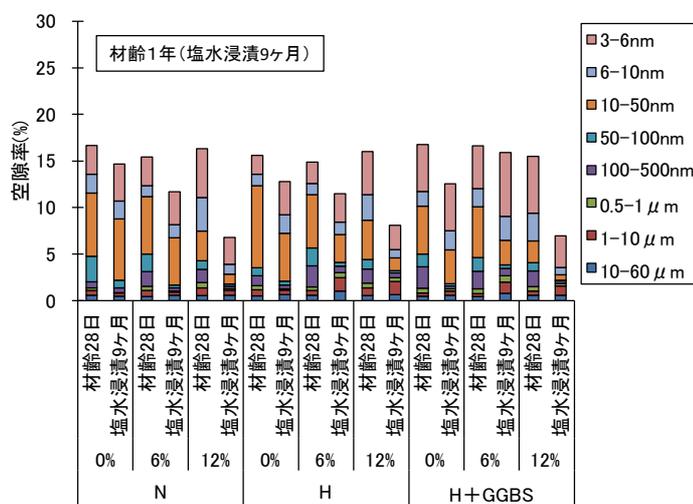


図-3.25 結合材種類およびCA<sub>2</sub>の混和率による各空隙径における空隙率

#### (2) 初期養生温度の影響

CA<sub>2</sub>/Bは0%, 6%および12%で、温度条件について20℃, 40℃および60℃と変化させた場合の各空隙径における空隙率を図-3.26に示す。の材齢28日および塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体の結果を示す。

材齢28日の空隙率について、NおよびHについてCA<sub>2</sub>を混和することで50nm以上の粗

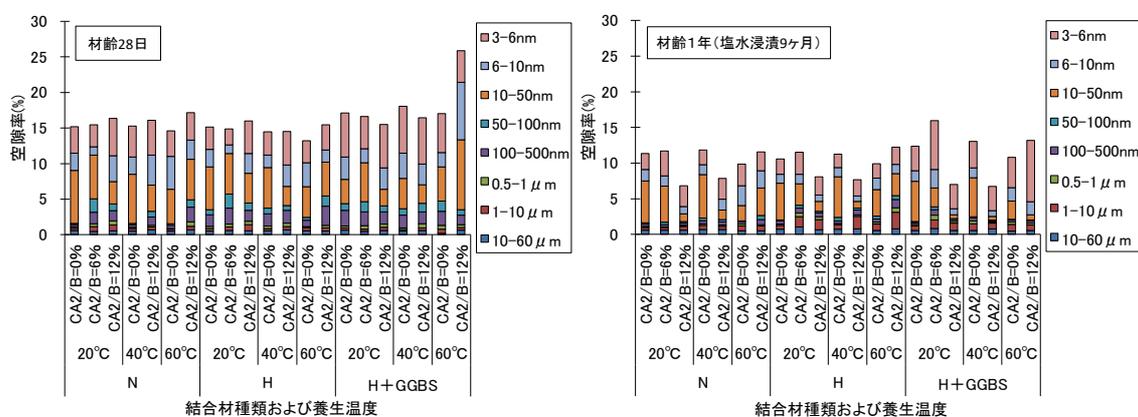


図-3.26 初期養生温度ごとの材齢28日および塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体の各空隙径における空隙率

大径が増加していることが確認された。この空隙率の変化については、圧縮強度についても影響を与えるものと考えられるため以下の節で検討を行う。また、N および H の CA<sub>2</sub> を混和した 60℃の配合について、材齢 28 日で 50nm 以上の粗大径が多く残存しており、これは高温養生により水和が急速に進展したためと考えられる。

次に、塩水浸せきによる空隙率の変化に着目すると、塩水浸せきを 9 ヶ月間行った試験体の結果について、いずれの結合材種類においても初期養生温度 20℃および 40℃の条件においては CA<sub>2</sub> を混和した配合の総空隙量が減少していることが確認できる。初期養生温度を 60℃とした場合は、いずれの結合材種類も CA<sub>2</sub> を混和することで総空隙量が大きくなっており、初期養生温度の違いが空隙構造に影響を与えることが確認された。これについて、CA<sub>2</sub> の混和率を変化させた場合の傾向も確認する必要があると考えられるが、CA<sub>2</sub> を適用して蒸気養生などの給熱養生を行う場合は必要以上に初期養生温度を高くすることは望ましくないことが示唆された。既往の研究<sup>3,12)</sup>では、CA<sub>2</sub> の混和による塩化物イオンの拡散抑制効果は、水和物による固定に加えて硬化体の空隙構造の変化によることが報告されている。この効果は、結合材種類や温度条件によって CA<sub>2</sub> の混和に伴うフリーデル氏塩の生成量に違いが生じることで空隙構造に影響を与えていると考えられる。

### (3) 促進中性化の影響

初期養生温度 20℃で 9 ヶ月間塩水浸せきした後に、6 か月間の促進中性化試験の実施の有無による試験体の各空隙径における空隙率を図-3.27 に示す。比較として材齢 28 日の結果を示す。総空隙量について、結合材種類や促進中性化試験の実施の有無にかかわらず小さくなることが確認され、CA<sub>2</sub> を混和したもののほうがさらに小さくなることが確認された。また、促進中性化有りについて促進中性化無しより総空隙量が小さくなっており、水酸化カルシウムがカルサイトに变化し空隙構造が緻密化したものと推察される。CA<sub>2</sub> の混和率の影響については、6%より 12%とした方がより緻密化している傾向が確認された。

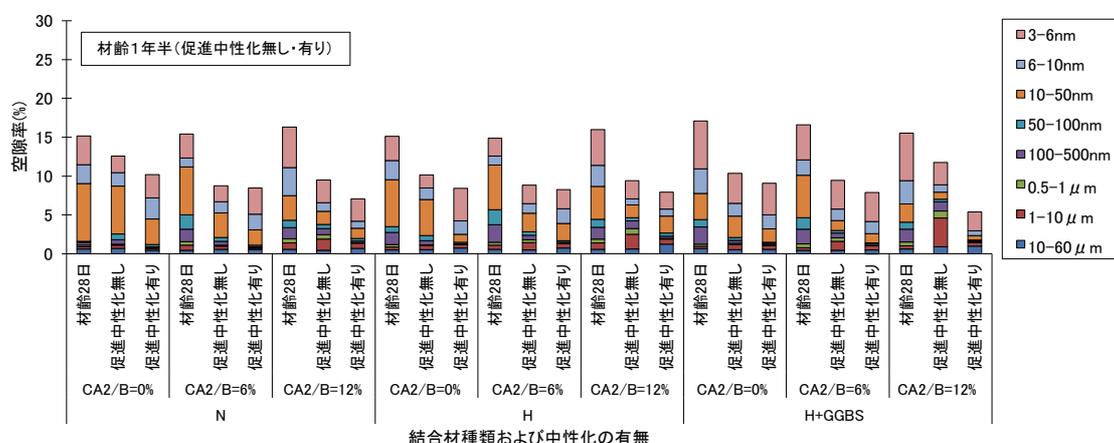


図-3.27 促進中性化の有無による各空隙径における空隙率

CA<sub>2</sub>/Bは0%および12%で、温度条件について20、40および60℃と変化させた場合の促進中性化の有無による試験体の各空隙径における空隙率を図-3.28に示す。初期養生の温度の影響について、図-3.27に示す塩水浸せきを9ヶ月間行った材齢1年時の結果と同様の傾向を示しており、促進中性化を行うことで緻密化する傾向についても初期養生温度ごとに同程度の傾向を示した。結合材種類の影響については、H+GGBSのCA<sub>2</sub>を混和した20℃と40℃について促進中性化を行うことで総空隙量が他の結合材種類と比較して小さくなる傾向が確認された。

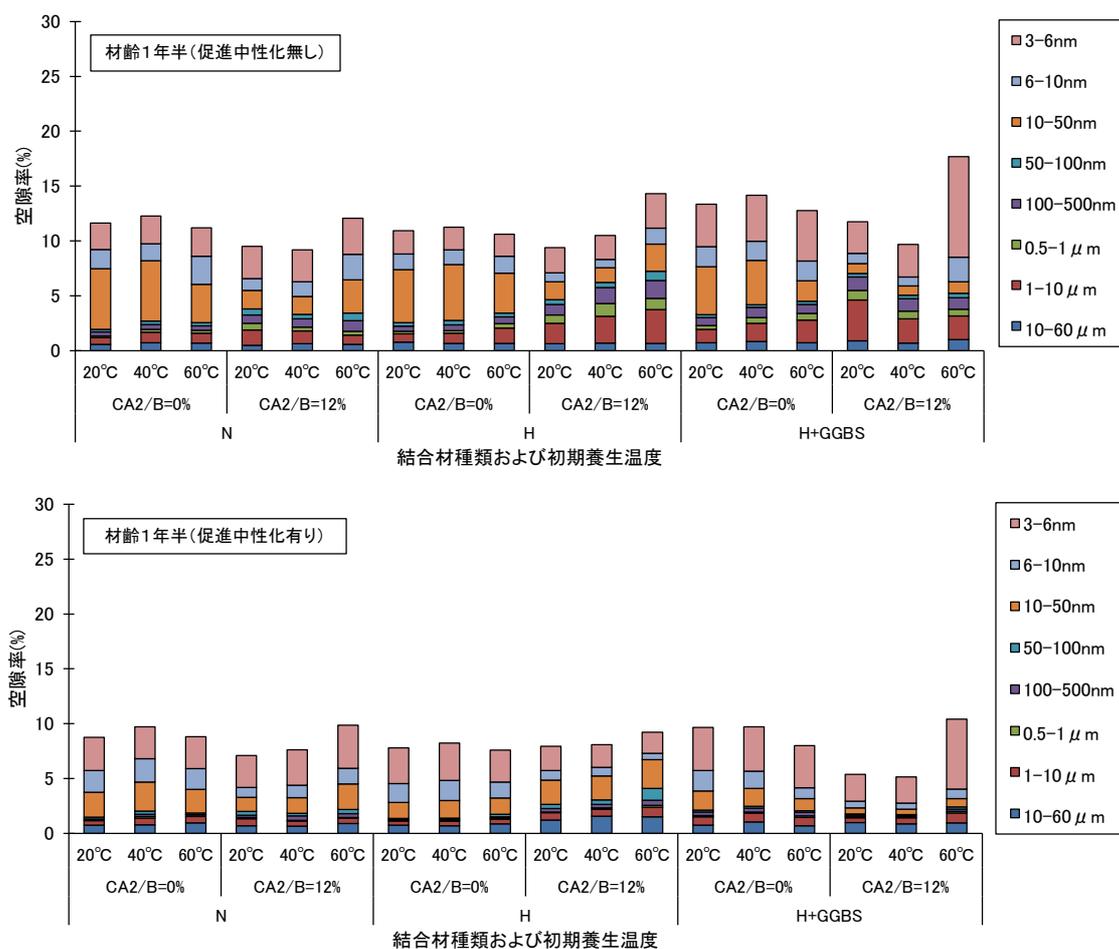


図-3.28 初期養生温度ごとの促進中性化の有無による各空隙径における空隙率

### 3.3.4 ペースト硬化体の塩化物イオン見掛けの拡散係数に及ぼす塩素固定化材の影響

#### (1) 結合材種類の影響

20°Cの場合の塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体のEPMA法による面分析から得られた塩素のマッピング画像および試料深さと塩化物イオン濃度の関係の結果を図-3.29に示す。結合材種類Hについて、一部CA<sub>2</sub>/B=6%よりCA<sub>2</sub>/B=12%の塩化物イオンの浸透深さが大きくなる部分も確認されたが、おおよそCA<sub>2</sub>の混和率に応じて、塩化物イオンの浸透深さが小さくなる傾向が確認された。NおよびHについては、CA<sub>2</sub>/B=0%と6%を比較した場合に、CA<sub>2</sub>/B=6%の方が表層の塩化物イオン濃度が高くなり浸透深さは小さくなる傾向が確認された。この現象は、ペースト内に浸透した塩化物イオンがCA<sub>2</sub>の混和で生成した hidroカルマイト族の水和物と反応してペースト表層部分で塩化物イオンを固定化し、さらに細孔構造の結果からもわかるようにCA<sub>2</sub>を混和することで細孔構造が緻密化し塩化物イオンがペースト内部まで浸透しにくくなったためペーストの表層部分の塩化物イオン濃度が高くなったと考えられる。また、NおよびHのCA<sub>2</sub>/B=6%とCA<sub>2</sub>/B=12%を比較した場合は、

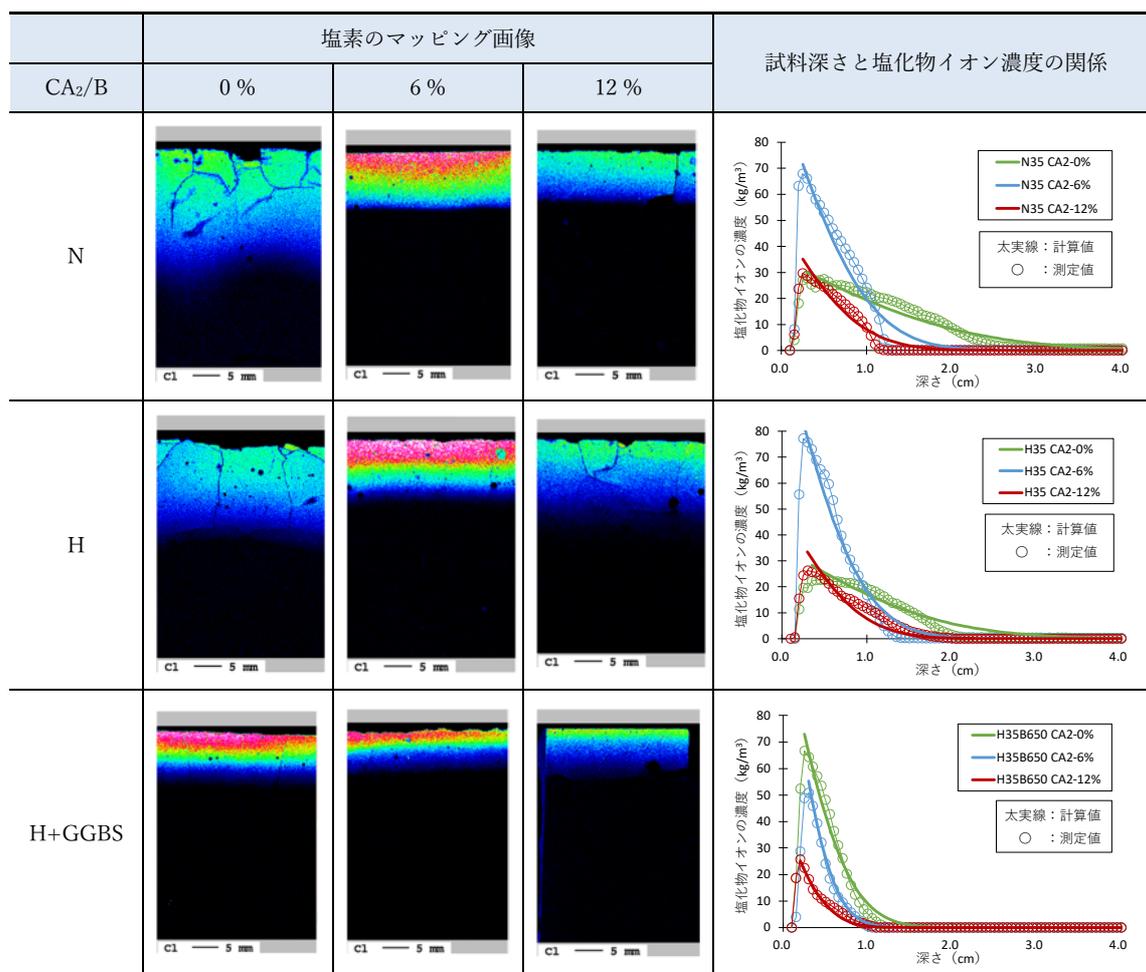


図-3.29 塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体の塩素のマッピング画像および試料深さと塩化物イオン濃度の関係

CA<sub>2</sub>/B=6%より CA<sub>2</sub>/B=12%の方が表面の塩化物イオン濃度および浸透深さともに小さくなる傾向が確認された。CA<sub>2</sub>/B=12%とした場合は、図-3.19に示す CA<sub>2</sub>/B=6%と CA<sub>2</sub>/B=12%を比較した場合に塩化物イオンの固定化率は同程度であり、また、図-3.25に示すように CA<sub>2</sub>/B=6%よりも CA<sub>2</sub>/B=12%の空隙構造が緻密化しており、固定化する能力よりも緻密化の効果が卓越したために CA<sub>2</sub>/B=6%よりも CA<sub>2</sub>/B=12%の方が表面の塩化物イオン濃度と塩化物イオン浸透深さの両方が小さくなる傾向を示したと考えられる。

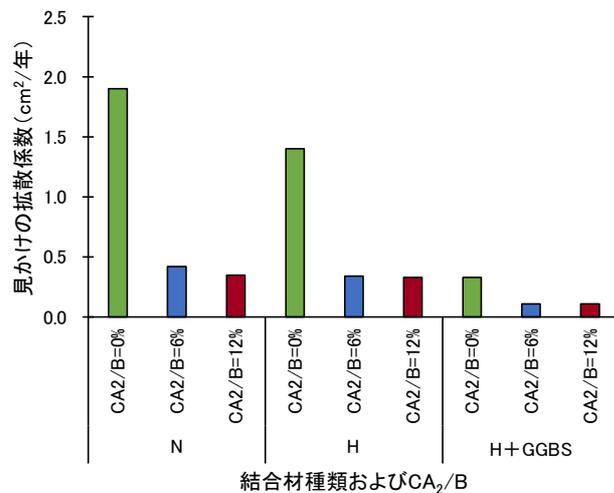


図-3.30 塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体の塩化物イオンの見かけの拡散係数

式(3.2)に示すフィックの第2法則に基づいた拡散方程式の解を用いて、EPMAの結果から算出した塩化物イオン濃度の値を回帰分析し、外部から侵入した塩化物イオンの見かけの拡散係数  $D_{ap}$  を算出した。20°C条件で CA<sub>2</sub> の混和率を変化させた場合の見かけの拡散係数の結果を図-3.30に示す。

$$C(x, t) = C_{a0} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\} + C_i \quad (3.2)$$

- ここに、 $x$  : 表面からの深さ (mm)  
 $t$  : 塩水浸せき期間 (年)  
 $C(x, t)$  : 深さ  $x$  (mm), 塩水浸せき期間  $t$  (年)において測定された塩化物イオン濃度 (%)  
 $C_{a0}$  : 採取されたコンクリート表面における全塩化物イオン濃度 (%)  
 $D_{ap}$  : 浸せき試験によるコンクリートの見かけの拡散係数 (cm<sup>2</sup>/年)  
 $C_i$  : 初期塩化物イオン濃度 (%)  
 $\operatorname{erf}$  : 誤差関数

NおよびHのCA<sub>2</sub>無混和の場合の見かけの拡散係数は1.5~2.0cm<sup>2</sup>/年程度を示し、CA<sub>2</sub>を6%混和することで見かけの拡散係数は1/3~1/5程度に低減された。CA<sub>2</sub>の混和率の影響については、CA<sub>2</sub>/B=6%と12%を比較した場合に、6%より12%の見かけの拡散係数が小さくなっているが、見かけの拡散係数の低減量は非常に小さい値であり、大きな違いは確認され

なかった。また、H+GGBS の見かけの拡散係数は、N や H と比較して 1/3 ~1/5 程度とかなり小さくなり、CA<sub>2</sub> を混和することでさらに 1/2 以下に低減された。

### (2) 初期養生温度の影響

図-3.31 に初期養生温度ごとの塩化物イオンの見かけの拡散係数の結果を示す。N および H については CA<sub>2</sub> の有無にかかわらず初期養生温度が高くなるにつれて見かけの拡散係数が高くなる傾向が確認された。また、

N および H で CA<sub>2</sub> を混和した場合の初期養生温度が 60°C の結果について、20°C や 40°C と比較して見かけの拡散係数が大きくなる傾向が確認された。これについては、図-3.26 に示す総空隙量が 60°C 場合に大きくなる傾向があり、その影響で見かけの拡散係数も大きくなる傾向を示したと考えられる。H+GGBS について CA<sub>2</sub> を混和した場合においても初期養生温度の影響は小さいことが確認された。

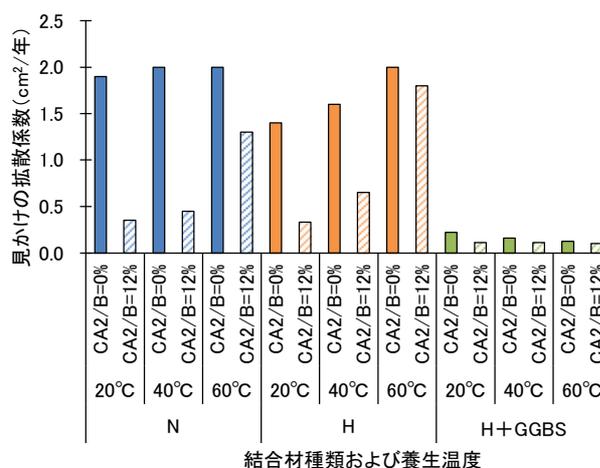


図-3.31 塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体の初期養生温度ごとの見かけの拡散係数

### (3) 促進中性化の影響

9ヶ月間塩水浸せきした後に、6ヶ月間の促進中性化の有無による試験体の塩素のマッピング画像および中性化深さを図-3.32 に示し、試料深さと塩化物イオン濃度の関係を図-3.33 に示す。結合材種類および促進中性化の有無にかかわらず CA<sub>2</sub> を混和した配合の方が塩化物イオンの浸透深さが小さくなることが確認された。図-3.32 の塩素のマッピング画像について促進中性化の有無で比較した場合に、促進中性化を行った試料は、固定化されていた塩化物イオンが分解され内部に移動するような現象は確認されなかった。また、フェノールフタレイン液を噴霧後の試験体を用いて中性化深さの測定を行った。その結果、H の CA<sub>2</sub>/B=6% の試験体について中性化の有無にかかわらず数ミリ程度の中性化深さが確認されたが、その他の試験体については確認されなかった。図-3.33 の試料深さと塩化物イオン濃度の関係について、CA<sub>2</sub> の有無および促進中性化の有無で比較した場合に同程度の傾向を示しており、塩化物イオンが内部に移動する状況は確認されなかった。本試験で使用したペーストの水結合材比は 35 %であったため中性化の影響を受けにくい配合であったと考えられるため、水結合材比が 50 %程度の範囲での検討も必要であると考えられる。

	結合材種類 N			
	CA <sub>2</sub> /B=0 %		CA <sub>2</sub> /B=6 %	
	促進中性化無し	促進中性化有り	促進中性化無し	促進中性化有り
塩素のマッピング画像				
中性化深さ	 0mm	 0mm	 0mm	 0mm
	結合材種類 H			
	CA <sub>2</sub> /B=0 %		CA <sub>2</sub> /B=6 %	
	促進中性化無し	促進中性化有り	促進中性化無し	促進中性化有り
塩素のマッピング画像				
中性化深さ	 0mm	 0mm	 3.84mm	 0.19mm
	結合材種類 H+GGBS			
	CA <sub>2</sub> /B=0 %		CA <sub>2</sub> /B=6 %	
	促進中性化無し	促進中性化有り	促進中性化無し	促進中性化有り
塩素のマッピング画像				
中性化深さ	 0mm	 0mm	 0mm	 0mm

図-3.32 促進中性化の有無による塩素のマッピング画像および中性化深さ

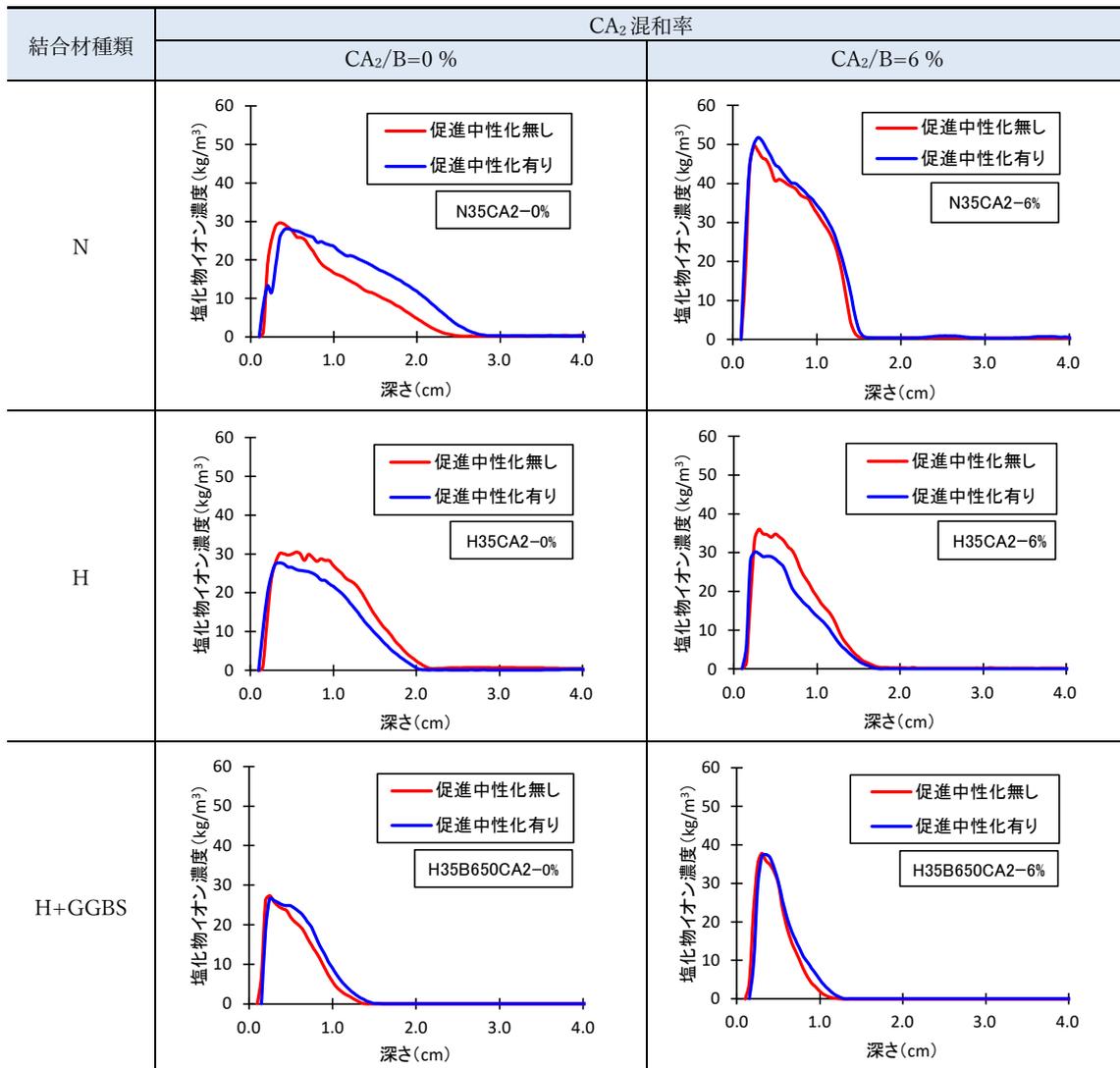


図-3.33 促進中性化の有無による試料深さと塩化物イオン濃度の関係

### 3.3.5 ペースト硬化体の圧縮強度に及ぼす塩素固定化材の影響

#### (1) 結合材種類の影響

直径 50×高さ 100mm の試験体を用いて JIS A 1108 に準拠し圧縮強度を測定した。材齢 1 日まで 20℃一定または最高温度 40℃および 60℃とした後は、20℃一定の封かん養生をとり、材齢 1 日、28 日および 91 日で試験を実施した。20℃一定の封かん養生を行った試験結果を図-3.34 に示す。

N および H+GGBS の材齢 1 日について、 $CA_2/B=0\%$  および 6%と比較して 12%とした配合について 30%程度圧縮強度が小さくなる傾向が確認された。材齢 28 日以降の傾向について、 $CA_2$  を混和した配合の圧縮強度が同等か低くなる傾向を示した。本試験では  $CA_2$  を結合材の内割りで混和したため、結合材の希釈効果で強度低下が生じたものと考えられる。また、図-3.25 に示すように、材齢 28 日時点での総空隙量や 50nm 以上の粗大な空隙が増加したためと考えられる。初期強度の低下が問題となる場合には  $CA_2$  を結合材の外割りで混和することで改善できると考えられる。

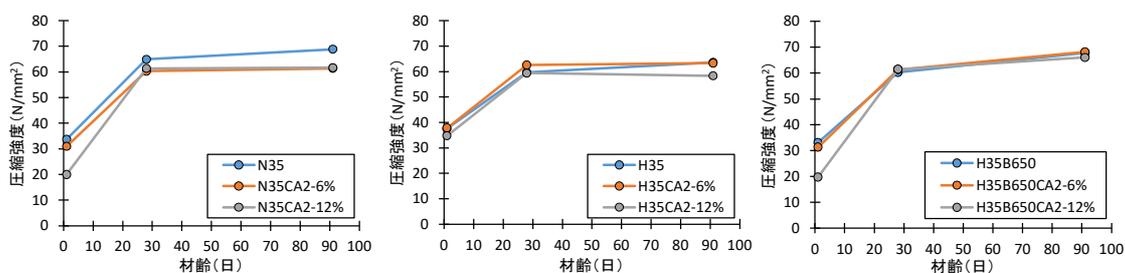


図-3.34 20℃一定条件のペースト試験体の圧縮強度

#### (2) 初期養生温度の影響

図-3.35 に初期養生温度ごとのペースト試験体の圧縮強度を示す。 $CA_2/B$  は 0%および 12%の結果を示す。 $CA_2$  の混和によって材齢 1 日の初期強度については数%程度低下する傾向が確認されたが、材齢 28 日および 91 日については同程度の強度発現であることが確認された。初期養生温度の影響については、 $CA_2$  の混和の有無にかかわらず養生温度が高い場合に材齢 1 日の圧縮強度が高くなるが、材齢 28 日および 91 日においては数%程度低下し強度の伸びが小さくなる傾向が確認された。

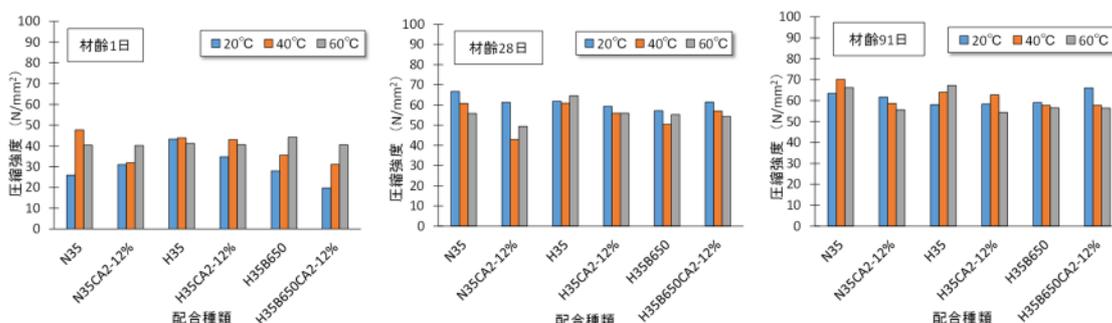


図-3.35 初期養生温度ごとのペースト試験体の圧縮強度

### 3.4 本章のまとめ

CA<sub>2</sub>の塩化物イオン浸透抵抗性向上効果を評価するために、結合材種類、CA<sub>2</sub>/Bの混和率、初期養生温度および中性化の有無を変化させた試験を行った。CA<sub>2</sub>の影響について化学的効果と物理的効果の両面から塩化物イオン浸透抑制効果に与える影響について評価を行った。本試験で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) CA<sub>2</sub>を混和したペーストの水和生成物について、結合材種類にかかわらず hidroカルマイト、モノカーボネート、ヘミカーボネートおよびモノサルフェートなどの塩素固定化能力を有する hidroカルマイト族の水和物が生成されていることが明らかとなった。
- 2) 水酸化カルシウム量は CA<sub>2</sub>の混和率に応じて減少し、水酸化カルシウムを消費し hidroカルマイト族の水和物が生成されることが示唆された。結合材種類による影響については水酸化カルシウム量が N より H が大きく、H+GGBS は早強セメントの 50%を高炉スラグ微粉末 6000 で置換することで水酸化カルシウム量も H の 1/2 程度になり、結合材種類によって水酸化カルシウム量が異なることで、CA<sub>2</sub>の塩化物イオンの固定化に影響を与える可能性が示唆された。
- 3) 結合材種類に応じて CA<sub>2</sub>の混和率と水酸化カルシウムの減少量と塩化物イオン固定化率に比例の関係があることが確認された。この傾向については初期の養生温度後変化させた場合においても同様の傾向が認められた。
- 4) 結合材種類および CA<sub>2</sub>の混和率にかかわらず材齢 28 日時点での総空隙率に違いはないが、塩水浸せきを 9 ヶ月（材齢 1 年）行うことで CA<sub>2</sub>の混和率に応じて総空隙率が小さくなる傾向が認められた。初期養生温度を変化させた場合は、20℃と 40℃については大きな違いは確認されなかったが、CA<sub>2</sub>を混和して 60℃とした場合は総空隙量が大きくなる現象が確認された。
- 5) 塩水浸せき後に 6 ヶ月間の促進中性化を行った試験体は、水酸化カルシウムが炭酸化しカルサイトに変化することで総空隙量が小さくなり緻密化することが明らかとなった。
- 6) 結合材種類にかかわらず CA<sub>2</sub>の混和率に応じて見かけの拡散係数が小さくなる傾向が確認された。早強ポルトランドセメント単味の配合と比較して早強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た配合について見かけの拡散係数が小さくなることが確認されているが、早強ポルトランドセメントに CA<sub>2</sub>を 6%混和した配合は早強ポルトランドセメントの 50%を高炉スラグ微粉末 6000 で置換した配合と同程度の見かけの拡散係数が得られることが確認された。
- 7) N および H については、初期の養生温度を変化させた場合に、養生温度が高くなるにつれて見かけの拡散係数が大きくなる傾向が確認されたが、高炉スラグ微粉末を混和した配合は初期養生温度を変化させた場合も見かけの拡散係数に与える影響は小さいことが明らかとなった。さらに塩水浸せき後に 6 ヶ月間の促進中性化を行った試験体について

は、試験体の深さと塩化物イオン濃度の関係から固定化された塩化物イオンが分解されて拡散係数が大きくなるような現象は認められなかった。

- 8) ペーストの圧縮強度について、 $CA_2$  を混和した場合に初期強度が低下する傾向が確認された。この現象について、 $CA_2$  を結合材の内割りで混和したため、結合材の希釈効果で強度低下が生じたものと考えられる。また、材齢 28 日時点での総空隙量や 50nm 以上の粗大な空隙が増加したことが影響したものと考えられる。

#### 【参考文献】

- 3.1) 公益社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリートの耐久性に関する研究委員会，コンクリートの試験・分析マニュアル，2000.
- 3.2) 李琮揆，大場陽子，坂井悦郎，大門正機： $3CaO \cdot Al_2O_3 - CaSO_4 \cdot 2H_2O - CaCO_3 - Na_2SO_4 - H_2O$ 系水和物の合成，無機マテリアル，Vol.4，pp.196-204，1997.
- 3.3) 田原和人，宮口克一，盛岡実，武若耕司： $CaO \cdot 2Al_2O_3$  を混和した種類の異なるセメント硬化体の水和挙動及び塩化物イオン固定能力，セメント・コンクリート論文集，No.65，No.1，pp.427-434，2011.
- 3.4) 田原和人，山本賢司，芦田公伸，盛岡実： $CaO \cdot 2Al_2O_3$  を混和したセメント硬化体の塩化物イオン固定能力，セメント・コンクリート論文集，No.64，No.1，pp.428-434，2010.
- 3.5) 成田榮一：層状複水酸化物のインターカレーション特性とその利用，粘土科学，Vol.46，No.4，pp.207-218，2007.
- 3.6) C.A.J.Appelo.: The anion exchange properties of AFm (hydrocalumite-group) minerals defined from solubility experiments and crystallographic information, *Cement and Concrete Research*, Vol.140, pp.106270, 2021.
- 3.7) 檀康弘：高炉スラグ微粉末，コンクリート工学，Vol.52，No.5，pp.387-392，2014.
- 3.8) 国立研究法人土木研究所，一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会：新設プレストレストコンクリート橋の品質・信頼性向上方法の構築に関する共同研究報告書，2022.
- 3.9) 大和功一郎，増渕敏行，安田弘喜，阿部道彦：PCa コンクリートの促進中性化に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.943-948，2009.
- 3.10) 藤原斉，堀水紀，細谷多慶，藤木昭宏：高炉スラグがコンクリートの塩分浸透抵抗に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.757-762，2017.
- 3.11) 佐々木優衣，宇治公隆，上野敦，原洋介：細孔構造に着目した蒸気養生コンクリートの中性化特性および塩化物イオン浸透性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1483-1488，2015.
- 3.12) 盛岡実，田原和人，山本賢司，荒木昭俊： $CaO \cdot 2Al_2O_3$  の塩化物イオンの拡散抑制効果とその機構，コンクリート技術シリーズ No. 89，混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会（333 委員会），pp.443-448，2011.

## 第4章 モルタルの特性に及ぼす塩素固定化材の

### 影響に関する評価

#### 4.1 本章の目的

プレストレストコンクリート（PC）構造物の耐久性向上や資源の有効利用を目的として高炉スラグ細骨材（BFS）の適用が検討されている。高炉スラグ細骨材を適用することで、ペーストと高炉スラグ細骨材の界面での反応により、凍結融解抵抗性、塩分浸透抵抗性などの耐久性向上効果が期待される。しかしながら、高炉スラグ細骨材について  $CA_2$  と組み合わせた際の効果について評価された事例や、ペースト試験と同様に初期強度発現性を考慮し蒸気養生などの給熱養生の影響について検討された事例はない。

以上より、本章では細骨材種類、混和材使用の有無、給熱養生の温度条件および中性化の有無などによる塩素固定化材の固定化効果の違いについてモルタルを用いた検討を行い、塩素固定化材の塩分浸透抵抗性の向上効果を明らかにすることを目的とする。

#### 4.2 試験概要

##### 4.2.1 試験材料および配合

表-4.1 に本試験で使用した使用材料を示す。セメントは、早強ポルトランドセメントを使用し、混和材は高炉スラグ微粉末 6000 と塩素固定化材を使用した。細骨材は、普通砕砂として茨城県桜川市飯渕産の砕砂と既往の研究<sup>4.1), 4.2), 4.3)</sup>で PC に適用した際に十分な性能を有することが確認されている高炉スラグ細骨材を使用した。水は上水道水（愛知県豊田市）を用いた。化学混和剤は、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用し、BFS の配合についてはブリーディングを抑制するために増粘剤一液タイプの高性能 AE 減水剤を使用した。

表-4.1 モルタルに使用した材料の一覧表

材料分類	種類	記号	特性値
セメント	早強ポルトランドセメント	H	密度 3.14g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 4,470cm <sup>2</sup> /g
混和材	高炉スラグ微粉末 6000	GGBS	密度 2.91g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 5,800cm <sup>2</sup> /g 三酸化硫黄 2.89% (無水石こう添加)
	塩素固定化材	CA <sub>2</sub>	密度 2.97g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 3,300cm <sup>2</sup> /g, カルシウムアルミネイト含有率 91.4%
細骨材	普通砕砂	S	密度 2.64g/cm <sup>3</sup> , 硬質砂岩砕砂, 茨城県桜川市飯渕産
	高炉スラグ細骨材	BFS	密度 2.77g/cm <sup>3</sup> , BFS1.2, JFE スチール株式会社倉敷工場産
化学混和剤	マスターグレニウム SP8SV	SP1	普通砕砂用, 高性能 AE 減水剤, BASF 社製
	マスターグレニウム 6500	SP2	BFS 用, 増粘剤一液タイプ高性能 AE 減水剤, BASF 社製

表-4.2 にモルタルの配合一覧を示す。試験体は、コンクリートの配合から粗骨材を除いたモルタルを使用した。結合材の種類は、初期強度を確保する目的で PC 上部工に一般的に使用される早強ポルトランドセメント (H) および PC 上部工に 300 橋以上の実績があり耐久性向上効果が確認されている、早強ポルトランドセメントの 50%を高炉スラグ微粉末 6000 で置換した配合とした。水結合材比は 35%, CA<sub>2</sub>の混和率は 6%に設定した。細骨材種類は、普通砕砂と BFS の 2 種類を選定した。15 打フローが 150±20mm となるように化学混和剤の使用量を調整した。

表-4.2 モルタルの配合

配合の記号	細骨材種類	W/B <sub>1</sub> (%)	GGBS/B <sub>2</sub> (%)	CA <sub>2</sub> /B <sub>1</sub> (%)	1 バッチの計量値 (kg)					
					W	C	GGBS	CA <sub>2</sub>	S	BFS
H35-S	普通砕砂	35.0	0	0	1.70	4.85	—	—	7.29	—
H35-S-CA <sub>2</sub>				6	1.70	4.56	—	0.29	7.29	—
H35B650-S			50	0	1.70	2.42	2.42	—	7.18	—
H35B650-S-CA <sub>2</sub>				6	1.70	2.28	2.28	0.29	7.18	—
H35-BFS	BFS	35.0	0	0	1.70	4.85	—	—	—	7.65
H35-BFS-CA <sub>2</sub>				6	1.70	4.56	—	0.29	—	7.65

※B<sub>1</sub>=C+GGBS+CA<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>= C+GGBS

#### 4.2.2 試験方法および試験項目

モルタル試験の概要を表-4.3に示す。モルタルは、室温約20°Cの環境でペースト試験と同様の公称容量20リットルのモルタルミキサを用いて製造した。1バッチ当たりの製造量は6リットルとした。練り混ぜ手順を以下に示す。

- ①セメントと混和材と砂を投入 → ②低速で空練り30秒 → ③水と高性能AE減水剤を投入 → ④低速で練混ぜ60秒 → ⑤かき落とし → ⑥中速で練混ぜ60秒 → ⑦停止 → ⑧モルタルを排出

表-4.3 モルタル試験の概要

	試験期間	材齢1日～材齢3ヶ月			材齢3ヶ月～材齢1年	材齢1年～材齢1年半
試験手順	試験体の作製	封かん養生			塩水浸せき	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">促進中性化無</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">促進中性化有</div>
	養生温度 20,40,60°C の3種類	封かん養生期間は3ヶ月間			塩水浸せき期間は9ヶ月間	促進中性化の有無の期間は6ヶ月間
	試験材齢	材齢 1日	材齢 28日	材齢 91日	材齢1年	材齢1年半
測定項目	・細孔構造	—	○	—	○	○
	・塩化物イオンの分布	—	—	—	○	○
	・圧縮強度	○	○	○	—	—

試験体形状は、圧縮強度の測定は直径50mm、高さ100mmの円柱試験体を用いた。塩化物イオンの分布の測定については、直径50mm、高さ100mmの円柱試験体の底面を2～3mm程度研磨した後に、研磨面以外の面をエポキシ樹脂で塗布して、研磨面から浸透した塩化物イオンの分布および中性化深さを測定した。ブリーディングの影響を受けないように試験体の底面を試験面とした。材齢1年および1年半後に測定を行う試験体については、材齢3ヶ月から塩水浸せき（温度20°C、10%NaCl溶液）を9ヶ月間、促進中性化（温度20°C、相対湿度60%、二酸化炭素濃度5.0%）を6ヶ月間行った。比較として行った促進中性化無し試験体は、試験体を封かんした状態で、温度20°C、相対湿度60%の恒温恒湿槽で保管した。中性化深さは、JIS A 1152 および JIS A 1153 に準拠し測定した。

細孔構造の測定については、幅50mm、奥行50mm、深さ30mmのプラスチック容器に45gのモルタル試料を採取し板状の試験体を作製した。細孔構造の測定については2.5～5.0mmに粒度を調整した試料を用いた。材齢28日で測定を実施する試験体については、測定直前に粒度調整し各種測定を行った。材齢1年および1年半後に測定を実施する試験体については、材齢3ヶ月で粒度調整を行い、塩水浸せき（温度20°C、10%NaCl溶液）を9ヶ月間、その後、促進中性化（温度20°C、相対湿度60%、二酸化炭素濃度5.0%）を6ヶ月間行った。

比較として行った促進中性化無し試験体は、試験体を封かんした状態で、温度 20℃、相対湿度 60%の恒温恒湿槽で保管した。試験体製作状況を図-4.1 に示し、試験体の製作方法および試験手順の概要を図-4.2 に示す。

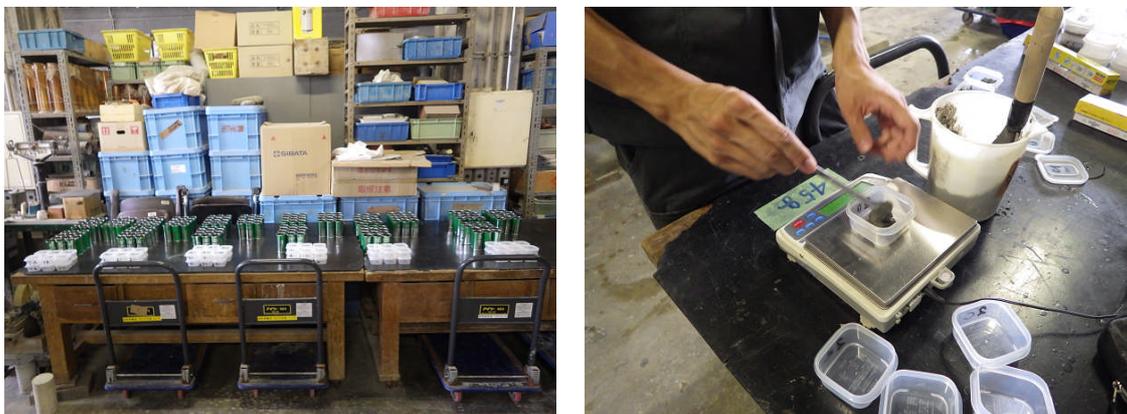


図-4.1 モルタル試験体製作状況

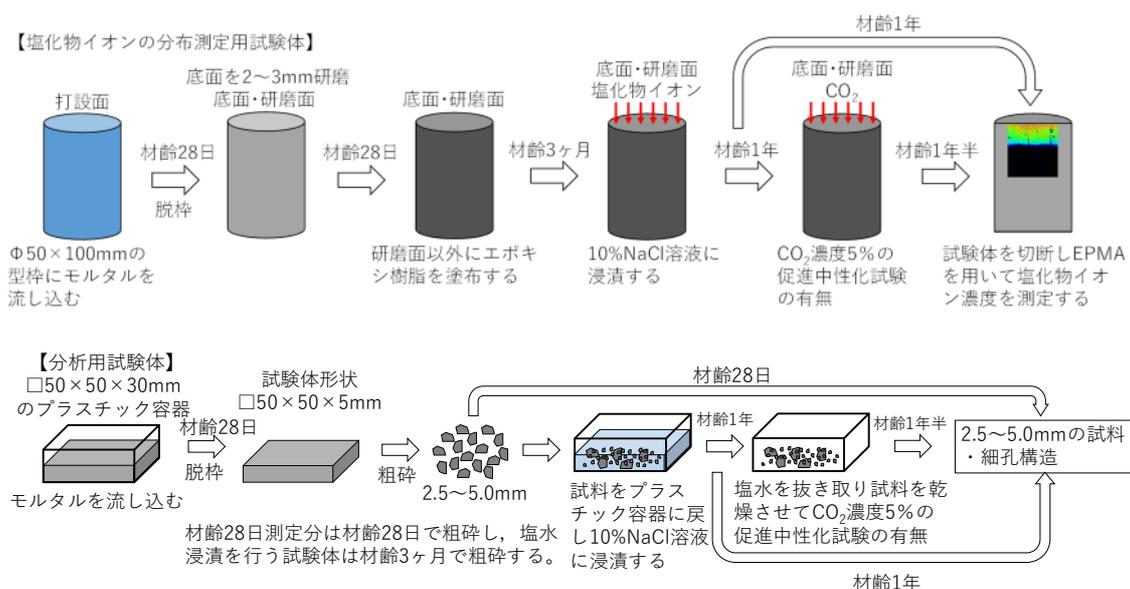


図-4.2 試験体の作製方法および試験手順

試験体の材齢 24 時間以内の初期養生は、20℃一定とした封かん養生と PCaPC 部材での適用を想定し、蒸気養生を模擬した温度履歴を設定した。封かん養生の試験体については、打込み直後から温度 20℃、相対湿度 60%の環境で養生を行った。蒸気養生を模擬した温度履歴を図-4.3 に示す。蒸気養生の最高温度については 40℃および 60℃の 2 種類を設定した。蒸気養生を模擬した温度履歴を与えた試験体は、恒温恒湿槽で所定の温度履歴を与えた

後は封かんした状態で、温度 20℃、相対湿度 60%の恒温恒湿槽で保管した。試験体の養生状況を図-4.4 に示す。給熱養生後は各試験材齢まで 20℃一定の条件で養生を行った。

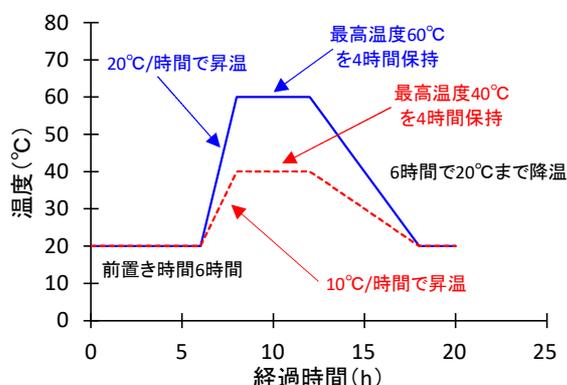


図-4.3 蒸気養生を模擬した温度履歴



図-4.4 試験体の養生状況

本試験で実施した各種試験の試験項目を表-4.4 に示す。サンプル試料の採取方法は、ペーテスト試験と同様の方法で採取した。

表-4.4 試験項目

項目	試験方法
細孔構造	JIS R 1655 および参考文献 <sup>4.4)</sup> に準拠し水銀圧入式ポロシメーターを用いて測定を行った。
塩化物イオンの分布	JSCE-G574-2005「EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析方法(案)」に準拠して測定を行った。
圧縮強度	JIS A 1108 に準拠し、圧縮強度を測定した。

### 4.3 試験結果

#### 4.3.1 モルタルのフレッシュ性状に及ぼす塩素固定化材の影響

モルタルの化学混和剤の使用量、フロー値および空気量の推定値の結果を表-4.5 に示す。15 打フローが 150±20mm が得られるように化学混和剤の使用量を調整したが、CA<sub>2</sub>を混和した配合は所定の流動性を得るための化学混和剤の使用量が多くなることが確認された。既往の研究<sup>4.5)</sup>において高炉スラグ細骨材は、粒形が角張っているため、空気を巻き込みやすい傾向にあることが知られている。単位容積質量の実測値と計算値の差からモルタルの空気量を推定した結果を図-4.5 に示す。本試験の結果においても、高炉スラグ細骨材を用いた配合についても CA<sub>2</sub>の有無にかかわらず空気量が大きくなる傾向が確認された。高炉スラグ細骨材を用いた 15 打フローを図-4.6 に示す。高炉スラグ細骨材を使用した配合はブリーディングが生じやすい<sup>4.6)</sup>ことが知られているが、本試験においては増粘剤一液タイプの高性能 AE 減水剤を使用することでブリーディングの発生は確認されなかった。

表-4.5 モルタルのフレッシュ性状試験結果

配合の記号	細骨材種類	W/B <sub>1</sub> (%)	GGBS/B <sub>2</sub> (%)	CA <sub>2</sub> /B <sub>1</sub> (%)	化学混和剤 の使用量 (g)		モルタル フロー (mm)		空気量の 推定値 (%)
					SP1	SP2	0打	15打	
H35-S	普通 砕砂	35.0	0	0	17.5	—	104.5	136.0	1.7
H35-S-CA <sub>2</sub>				6	19.0	—	105.0	139.0	1.6
H35B650-S			50	0	17.6	—	101.0	157.0	1.5
H35B650-S-CA <sub>2</sub>				6	17.5	—	101.5	131.5	2.1
H35-BFS	BFS	35.0	0	0	—	16.8	102.5	152.5	4.2
H35-BFS-CA <sub>2</sub>				6	—	18.1	100.5	132.5	4.4

※B<sub>1</sub>=C+GGBS+CA<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>=C+GGBS

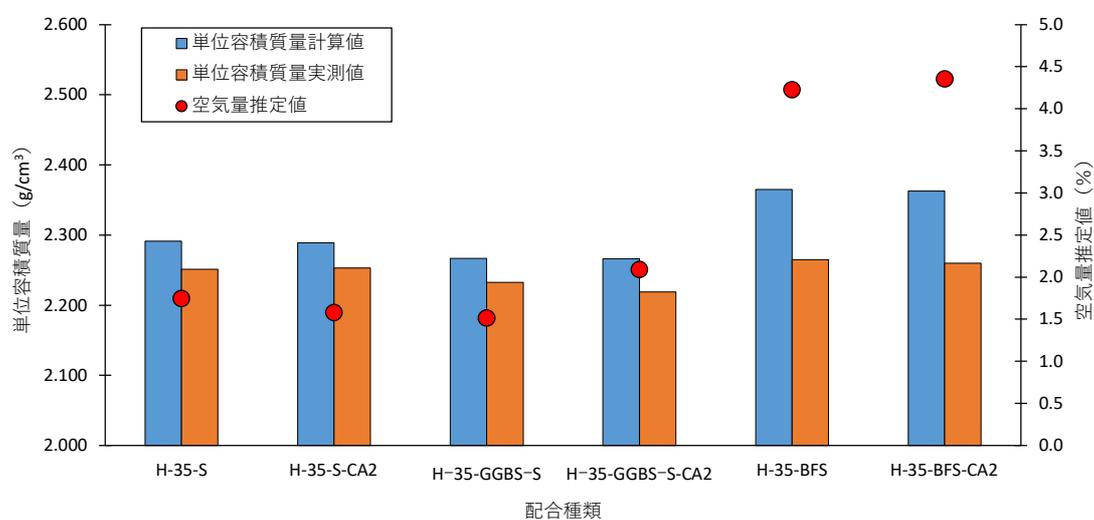


図-4.5 単位容積質量から算出した空気量の推定値



CA<sub>2</sub>/B=0%

CA<sub>2</sub>/B=6%

図-4.6 高炉スラグ材骨材を用いた配合の15打フロー

### 4.3.2 モルタルの細孔構造に及ぼす塩素固定化材の影響

#### (1) 結合材種類の影響

20℃条件で CA<sub>2</sub> の混和率を変化させた場合の各空隙径における空隙率を図-4.7に示す。材齢28日の空隙率について、ペースト試験と同様に H および H+GGBS について CA<sub>2</sub> を混和することで 50nm 以上の粗大径が増加していることが確認された。また、ペースト試験と同様に結合材の種類にかかわらず材齢 28 日から塩水浸せきを9ヶ月間行うことで総空隙量が小さくなることが確認された。CA<sub>2</sub> の混和による影響につ

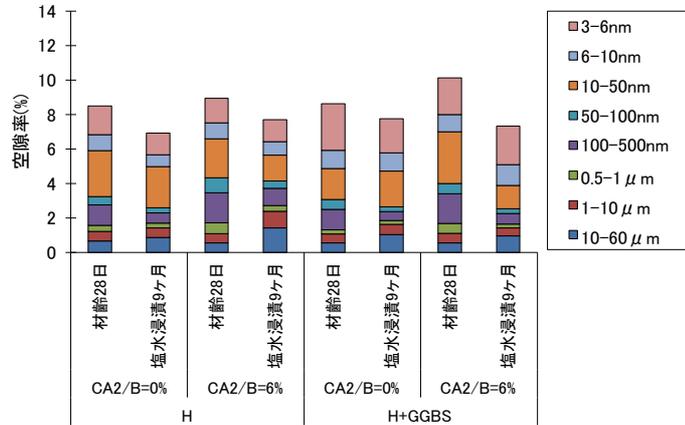


図-4.7 結合材種類および CA<sub>2</sub> の混和率による各空隙径における空隙率

いて、H+GGBS は CA<sub>2</sub> を混和することで総空隙量の低下が確認されたが、H については若干ではあるが増加する傾向が確認された。この傾向についてはペースト試験の結果とも異なる傾向であるため、最終的には EPMA を用いた見かけの拡散係数について検討を行う。

#### (2) 初期養生温度の影響

CA<sub>2</sub>/B は 0% および 6%、温度条件について 20℃ および 60℃ と変化させた場合の各空隙径における空隙率を図-4.8に示す。材齢28日および塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体の結果を示す。

材齢28日の空隙率について、ペースト試験と同様に H および H+GGBS について CA<sub>2</sub> を混和することで養生温度にかかわらず 50nm 以上の粗大径が増加していることが確認され

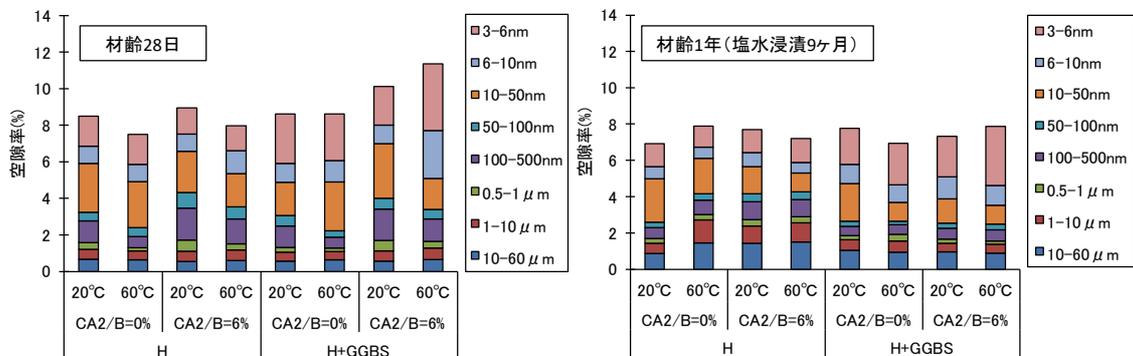


図-4.8 初期養生温度ごとの材齢28日および塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体の各空隙径における空隙率 (結合材種類による影響)

た。

次に、塩水浸せきによる空隙率の変化に着目すると、塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体の結果について、HについてはCA<sub>2</sub>を混和しない配合については、60℃とした場合に総空隙量が大きくなる傾向を示したが、CA<sub>2</sub>を混和した場合は養生温度の違いによる影響は確認されなかった。H+GGBSについてもCA<sub>2</sub>の混和の有無や養生温度を変化させた場合においても空隙率に大きな違いは確認されなかった。

### (3) 骨材種類の影響

普通骨材と高炉スラグ細骨材について、CA<sub>2</sub>/Bは0%および6%、温度条件について20℃および60℃と変化させた場合の各空隙径における空隙率を図-4.9示す。材齢28日および塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体の結果を示す。

BFSを使用した配合について、普通骨材と比較して材齢28日においては総空隙量が大きくなる傾向が確認された。材齢1年後の塩水浸せきを9ヶ月行った試験体については、細骨材の種類による影響はほとんど確認されなかった。本試験では、BFSを用いた場合に増粘剤一液タイプの高性能AE減水剤を用いたが、材齢初期においてはペーストとBFSの遷移体にブリーディングが生じ空隙率の増加につながったと考えられるが、材齢が経過し、さらに塩水浸せきを行うことで、遷移体部分が緻密化し材齢1年時での総空隙量は同程度になったものと考えられる。

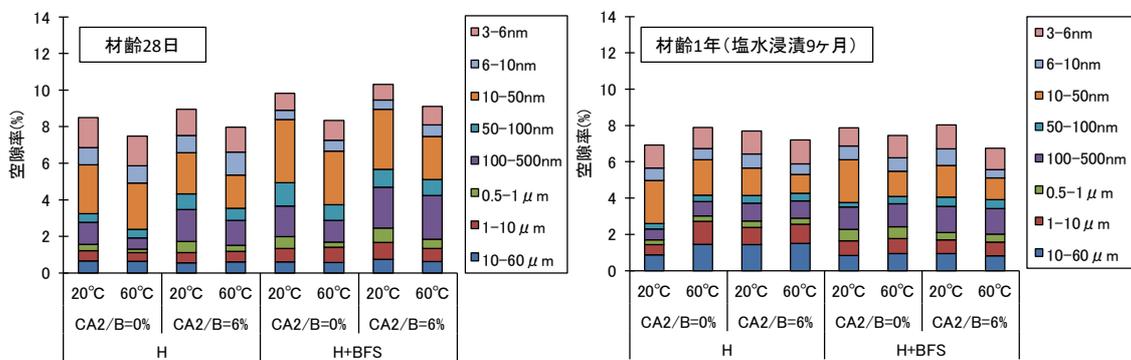


図-4.9 初期養生温度ごとの材齢28日および塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体の各空隙径における空隙率（骨材種類による影響）

### (4) 促進中性化の影響

初期養生温度20℃および60℃で9ヶ月間塩水浸せきした後に、6ヶ月間の促進中性化試験の実施の有無による試験体の各空隙径における空隙率を図-4.10に示す。比較として材齢28日および塩水浸せきを9ヶ月行った材齢1年の結果を示す。ペースト試験と比較して若干のバラツキはあるが材齢28日と比較して塩水浸せきを9ヶ月行った材齢1年の総空隙量は初期の養生温度にかかわらず減少する傾向が確認された。促進中性化の影響については、

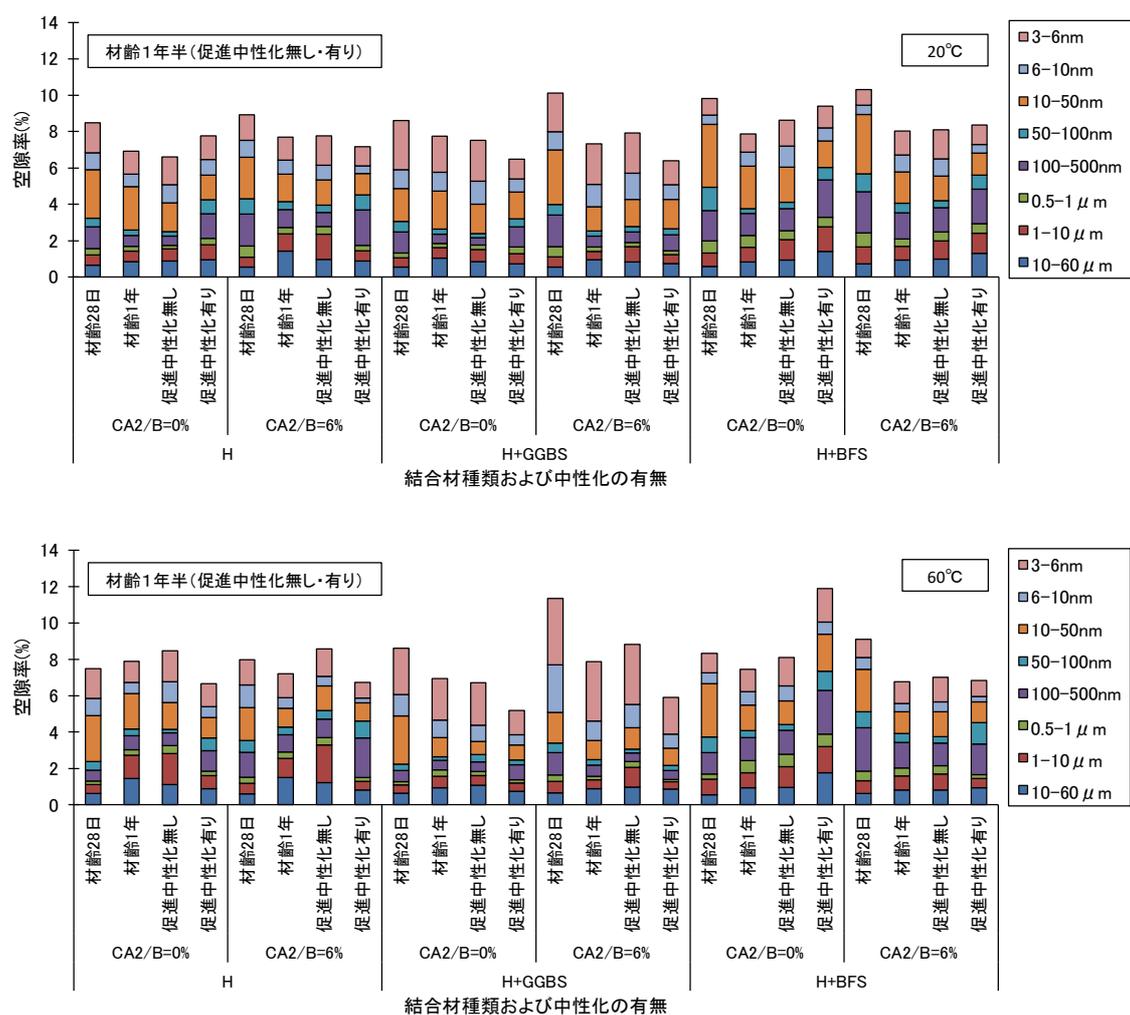


図-4.10 促進中性化の有無による各空隙径における空隙率

普通砕砂を用いた場合はペースト試験と同様に、促進中性化を行うことで総空隙量が小さくなる傾向が確認された。BFSを用いた場合は、初期養生温度にかかわらず促進中性化を行った試験体は総空隙量が促進中性化無しと同等もしくは若干大きくなる影響が確認された。ペーストと細骨材の遷移体で違いが生じていると考えられるが、以下の見かけの拡散係数の結果を踏まえて骨材種類の影響について検討を行う。

### 4.3.3 モルタルの塩化物イオンの見掛け拡散係数に及ぼす塩素固定化材の影響

#### (1) 結合材種類の影響

20℃の場合の塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体のEPMA法による面分析から得られた塩素のマッピング画像および試料深さと塩化物イオン濃度の関係の結果を図-4.11に示す。結合材種類にかかわらずCA<sub>2</sub>を混和することで、塩化物イオンの浸透深さが小さくなる傾向が確認された。また、ペースト試験と同様にCA<sub>2</sub>を混和することで表面の塩化物イオン濃度が増加し、塩化物イオンが内部に浸透しにくくなる傾向が確認された。

20℃条件でCA<sub>2</sub>の混和率を変化させた場合の見かけの拡散係数の結果を図-4.12に示す。見かけの拡散係数について、Hと比較してH+GGBSは1/3程度となり、さらにCA<sub>2</sub>を混和することにより1/2程度に低減されることが確認された。CA<sub>2</sub>を混和することで見かけの拡散係数が低減できることは確認されたが、4.3.2「モルタルの細孔構造に及ぼす塩素固定化材の影響」で確認した通り、総空隙量に関してCA<sub>2</sub>を混和することによる見かけの拡散係数の違いほど大きな違いは確認されなかった。ペースト試験で検討した通り、化学的な塩化物イオンの固定効果が卓越している可能性も考えられるが、既往の研究<sup>4.7)</sup>においては連続空隙量について検討されている。これは、図-4.13の塩水浸せき前後でのCA<sub>2</sub>混和率と全空隙量、全空隙量に占める連続空隙量(斜線部分)の関係、図-4.14のCA<sub>2</sub>混和率0%および9%における塩水浸せき前後の細孔径分布が参考となる(破線:塩水浸せき前、実線:塩水浸せ

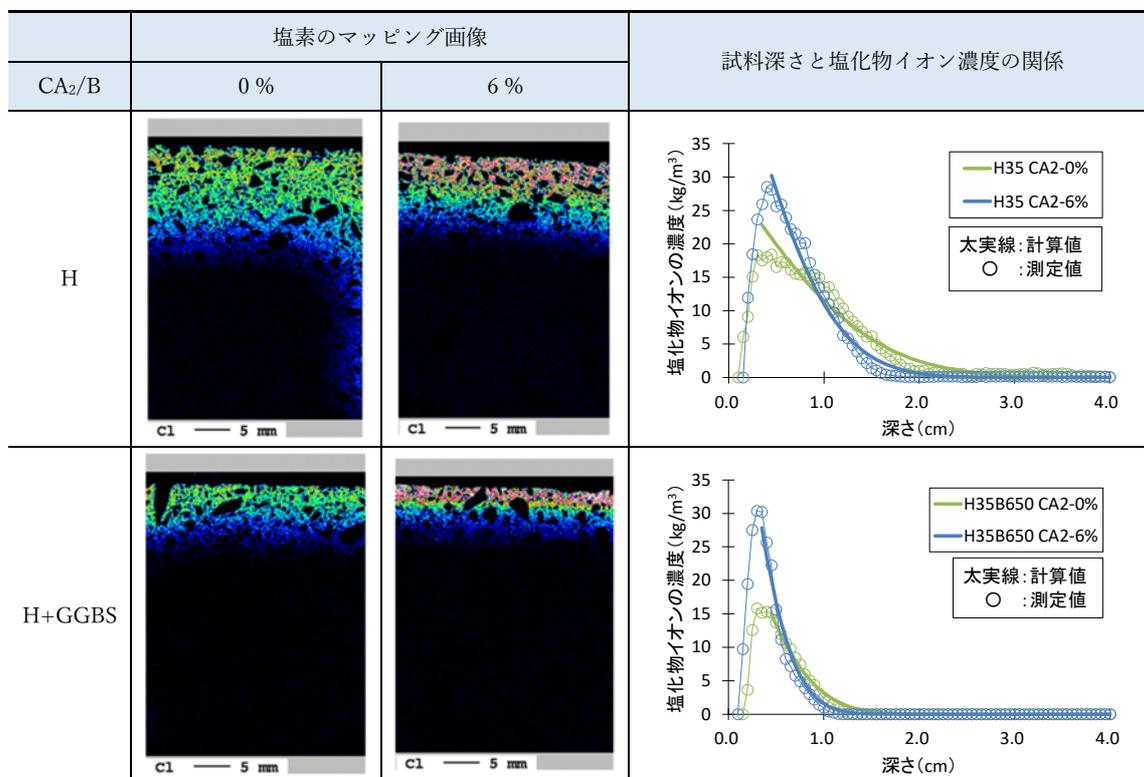


図-4.11 塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体の塩素の

マッピング画像および試料深さと塩化物イオン濃度の関係

き後)。図-4.13よりCA<sub>2</sub>の混和率が增加することで総空隙量が増加しており、図-4.14よりCA<sub>2</sub>を混和することで0.1~1.0μmの細孔が増加していることが確認できる。一方、CA<sub>2</sub>の混和率の増加に伴い図-4.13に斜線で示した連続空隙量は減少していることが確認できる。連続性を有する空隙が減少することで物質透過性が減少するため、塩化物の浸透などに対する耐久性向上が期待できる(4.8)4.9)。本試験のモルタルでの検討においても全空隙量についてCA<sub>2</sub>の有無による明確な違いは確認されなかったため、連続空隙に着目した検討が今後は必要であると考えられる。

(2) 初期養生温度の影響

図-4.15に初期養生温度ごとの塩化物イオンの見かけの拡散係数の結果を示す。モルタル試験の結果についてもペースト試験と同様の傾向を示しており、Hについては初期養生温度が高くなるにつれて見かけの拡散係数が大きくなる傾向を示し、H+GGBSについては、養生温度が高くなるにつれて見かけの拡散係数は小さくなる傾向が確認された。初期養生温度の影響について、ペースト試験においては細孔空隙量との相関が確認されたが、モルタル試験については見かけの拡散係数と細孔空隙量の関係について相関性は確認されなかった。(1)「結合材種類の影響」で示した通り連続空隙に着目した検討が必要であると考えられる。

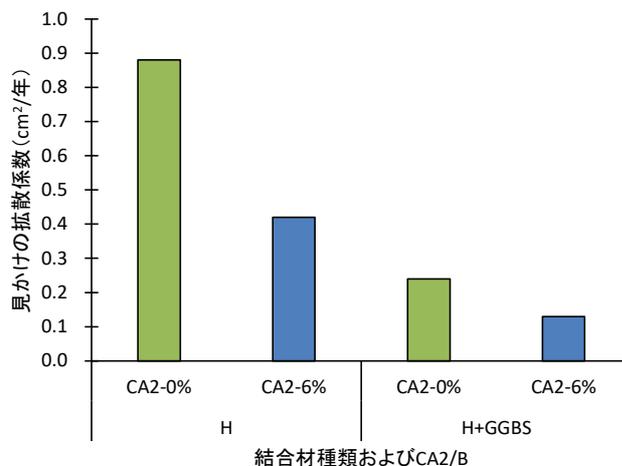


図-4.12 塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体の塩化物イオンの見かけの拡散係数

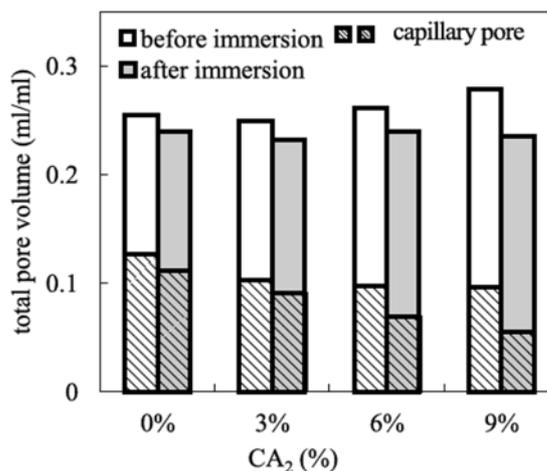


図-4.13 硬化セメントペーストの細孔容積<sup>4.7)</sup>

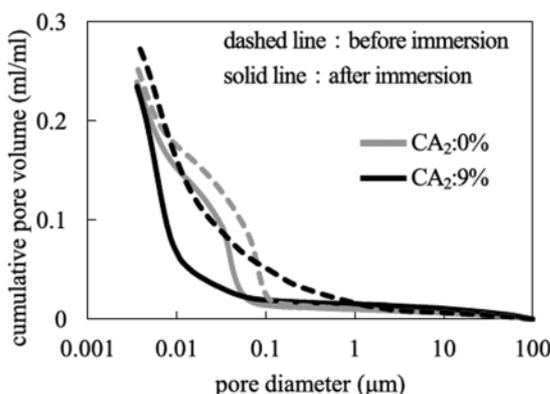


図-4.14 累積細孔容積<sup>4.7)</sup>

### (3) 骨材種類の影響

20℃の場合の塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体のEPMAを用いて測定した塩素のマッピング画像および試料深さと塩化物イオン濃度の関係の結果を図-4.16に示す。細骨材種類にかかわらずCA<sub>2</sub>を混和することで、塩化物イオンの浸透深さが小さくなる傾向が確認された。また、ペースト試験と同様にCA<sub>2</sub>を混和することで表面の塩化物イオン濃度が増加し、塩化物イオンが内部に浸透しにくくなる傾向が確認された。

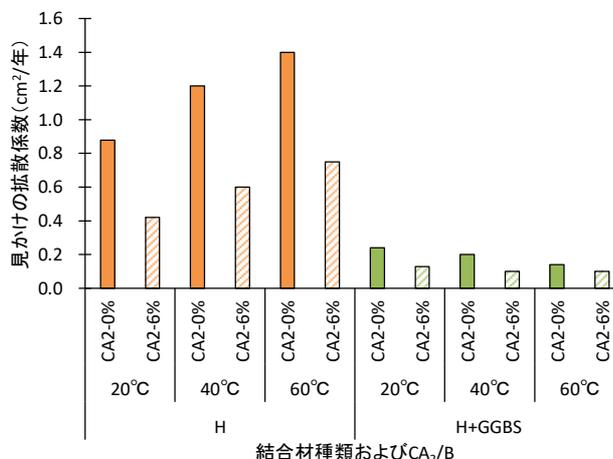


図-4.15 塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体の初期養生温度ごとの見かけの拡散係数

20℃条件でCA<sub>2</sub>の混和率を変化させた場合の見かけの拡散係数の結果を図-4.17に示す。見かけの拡散係数について、Hと比較してH+BFSは1/3程度となり、さらにCA<sub>2</sub>を混和することにより10%程度に低減されることが確認された。

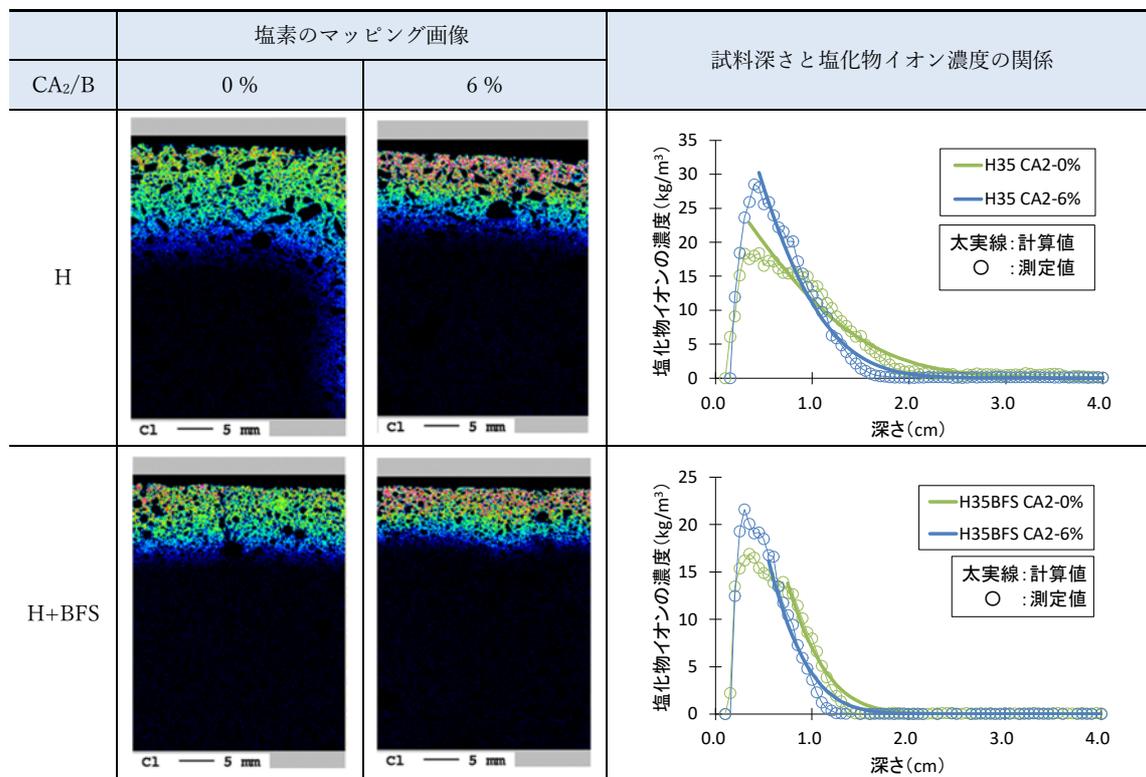


図-4.16 塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体の塩素のマッピング画像および試料深さと塩化物イオン濃度の関係

図-4.18 に初期養生温度ごとの塩化物イオンの見かけの拡散係数の結果を示す。高炉スラグ微粉末と高炉スラグ細骨材の材質は同じであるが、養生温度による影響について、高炉スラグ細骨材を用いた場合は普通砕砂を用いた場合と同様の傾向を示しており、初期養生温度が高くなるにつれて見かけの拡散係数が大きくなる傾向が確認された。温度変化による影響については結合材に与える影響が大きいと考えられるため、結合材を H とした場合は同様の傾向が得られたと考えられる。骨材を BFS とした場合に見かけの拡散係数を低下させる効果が確認されているが、図-4.9 に示す通り細孔構造については普通砕砂と同程度であったので、既往の研究<sup>4.10)</sup>で示されている通り、ペーストと細骨材の遷移体の部分が緻密化することで見かけの拡散係数が低下したものと考えられる。

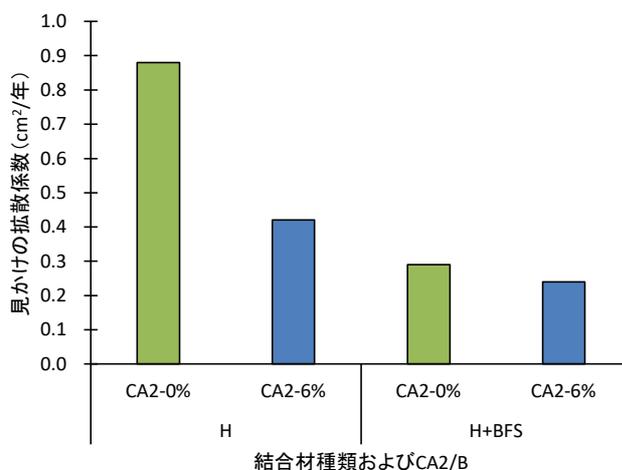


図-4.17 塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体の塩化物イオンの見かけの拡散係数

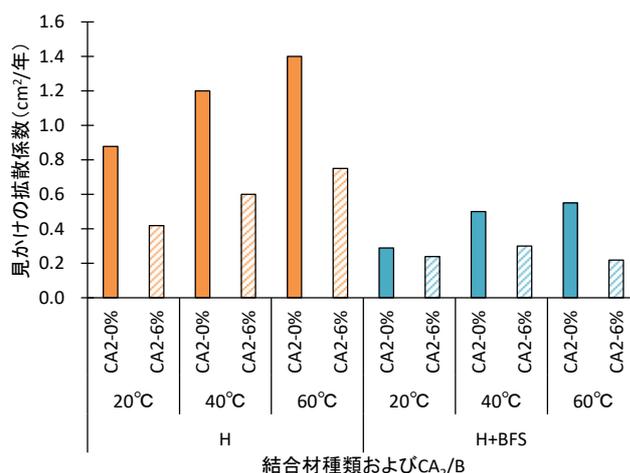


図-4.18 塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体の初期養生温度ごとの見かけの拡散係数

#### (4) 促進中性化の影響

9ヶ月間塩水浸せきした試験体(促進中性化無し)と9ヶ月間塩水浸せきした後に、6ヶ月間の促進中性化試験の実施した試験体(促進中性化有り)の塩素のマッピング画像を図-4.19に示し、試料深さと塩化物イオン濃度の関係を図-4.20に示す。

H35CA<sub>2</sub>-0%の60°C、H35CA<sub>2</sub>-6%の40°C、H35-BFS-CA<sub>2</sub>-0%の40°Cと60°Cの4水準について中性化無しより中性化有りの塩化物イオン濃度が高くなる傾向が確認された。CA<sub>2</sub>を混和した配合について、中性化有りの塩化物イオン濃度が高くなる傾向を示したのはH35CA<sub>2</sub>-6%の40°Cのみであったが、図-4.19の塩素のマッピング画像を確認すると試験体の両側部から塩化物イオンが浸透している状況が確認され、塩水浸せきを行う前のエポキシ樹脂のコーティングが適切に実施されていなかったため、塩化物イオンの浸透深さが大きくなったものと考えられる。以上より、その他の配合についてもCA<sub>2</sub>を混和した配合について、

固定化された塩化物イオンが中性化の影響を受けて分解するような現象は確認されなかった。

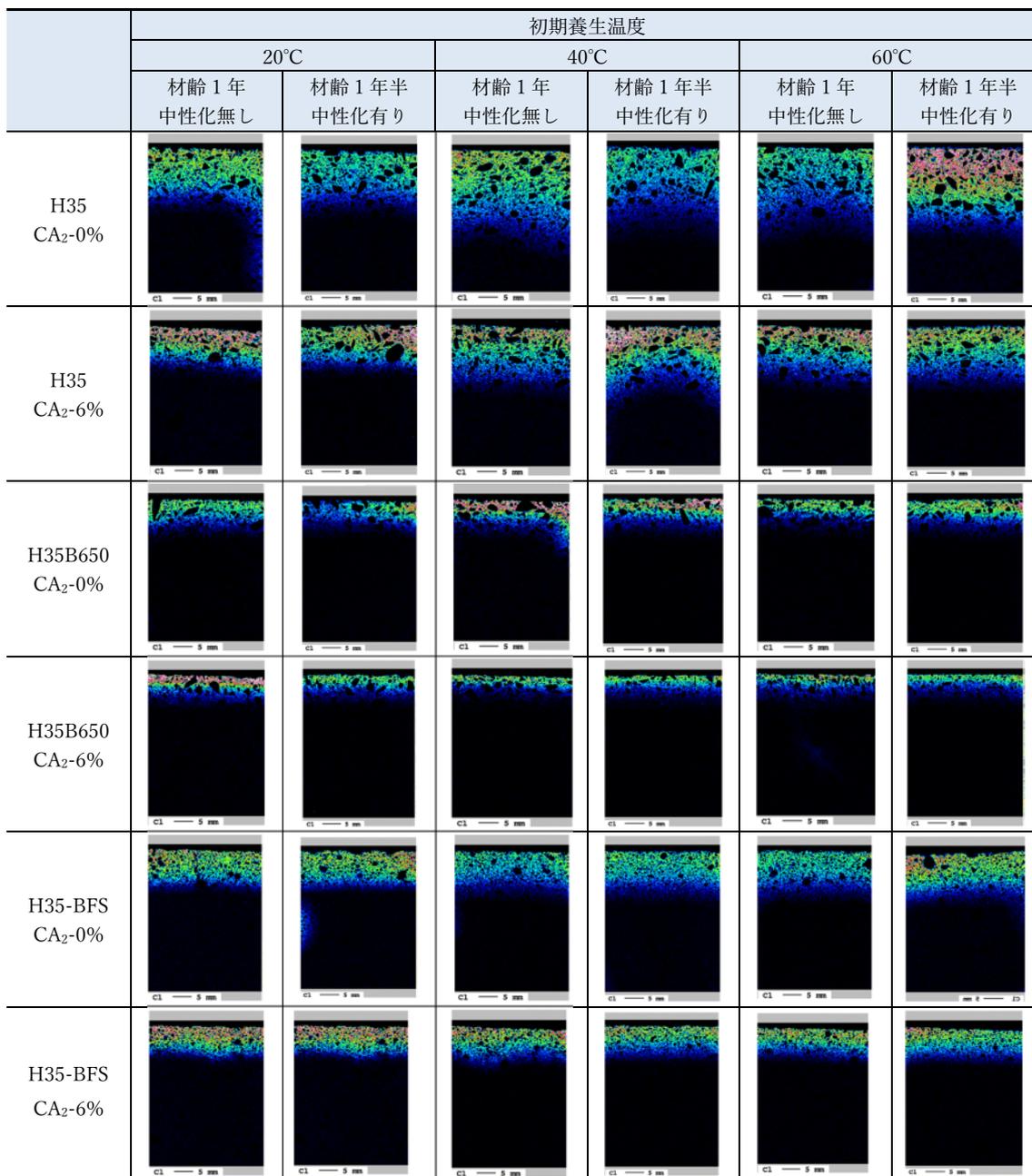


図-4.19 促進中性化の有無による塩素のマッピング画像

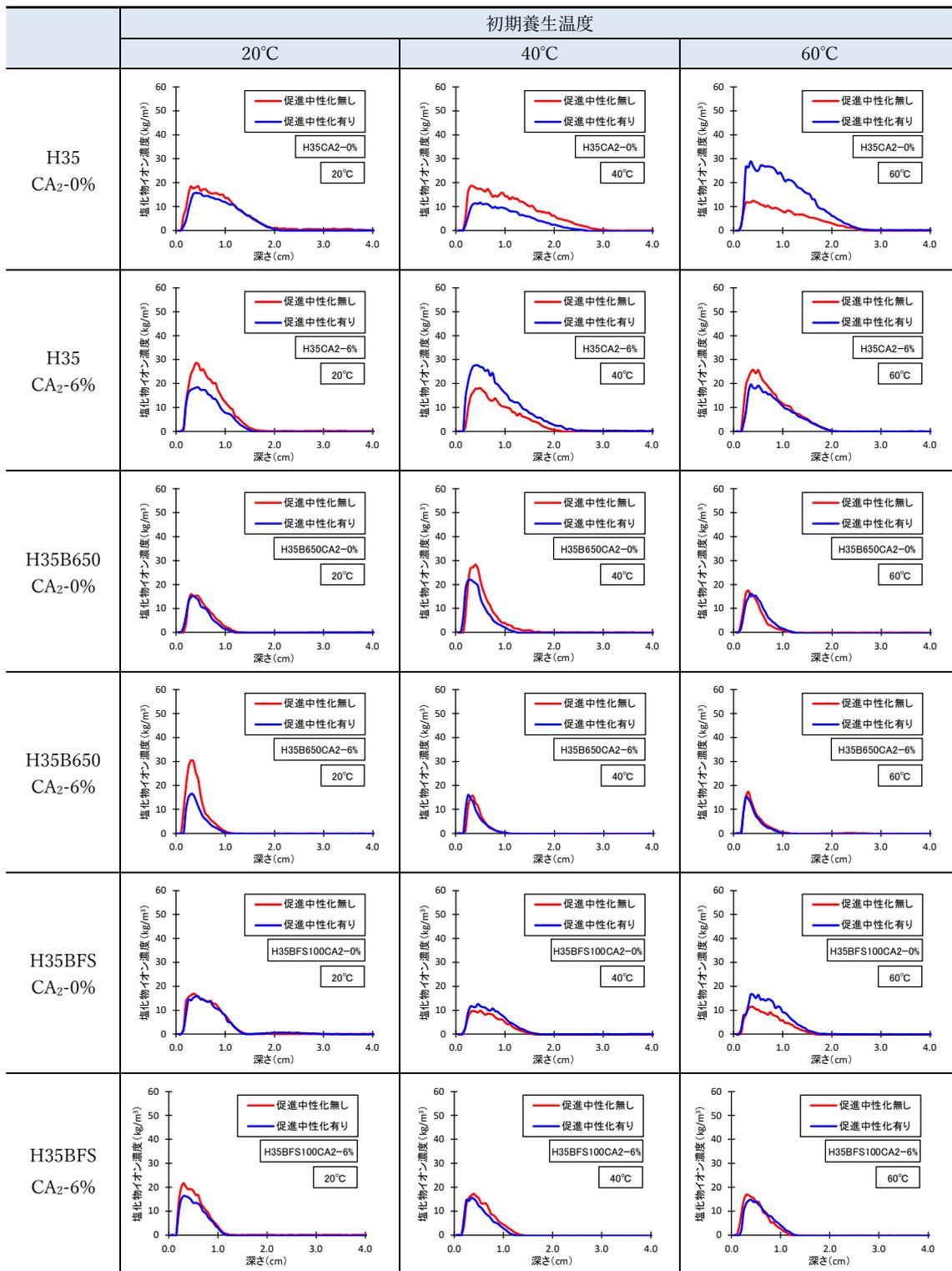


図-4.20 促進中性化の有無による試料深さと塩化物イオン濃度の関係

#### 4.3.4 モルタルの圧縮強度に及ぼす塩素固定化材の影響

##### (1) 結合材種類の影響

H および H+GGBS の 20°C 一定の封かん養生を行った試験結果を図-4.21 に示す。H および H+GGBS の材齢 1 日について、ペースト試験と同様に H より H+GGBS の材齢 1 日の強度発現が低くなる傾向が確認された。CA<sub>2</sub> を結合材の内割りで混和したことでセメント量が減少し、初期の水和物生成量が少なくなったことで材齢初期での総空隙量や 50nm 以上の粗大な空隙が増加したためと考えられる。H と H+GGBS は材齢 7 日では H+GGBS の強度が高くなったが、材齢 91 日では同程度になることが確認された。CA<sub>2</sub> の影響については、H+GGBS の材齢 1 日では強度低下が確認されたが、材齢 28 日以降は同等以上の強度発現が確認された。

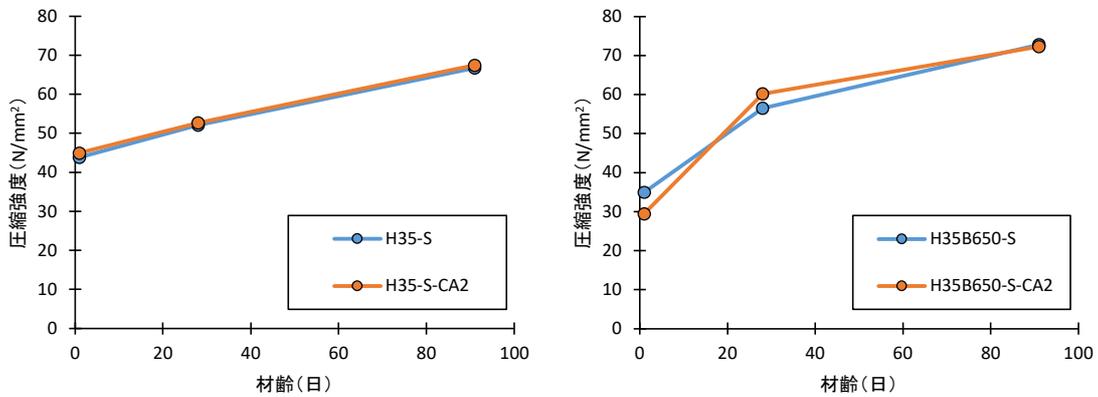


図-4.21 20°C一定条件のモルタル試験体の圧縮強度

## (2) 初期養生温度の影響

図-4.22 に初期養生温度ごとのモルタル試験体の圧縮強度を示す。H+GGBS について、20℃ではHと比較して強度低下が確認されたが、40℃および60℃とした場合はH単味と同程度の強度発現になることが確認された。材齢28日および材齢91日においては、結合材の種類やCA<sub>2</sub>の有無にかかわらず同程度の強度発現となることが確認された。

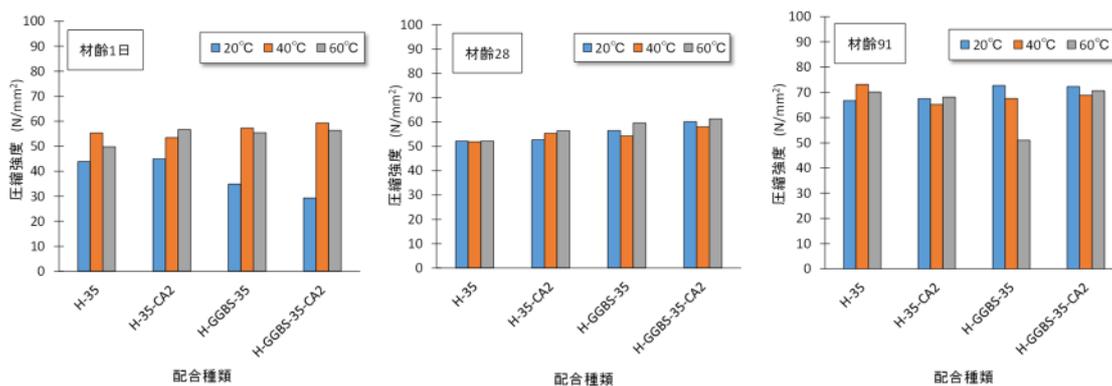


図-4.22 初期養生温度ごとのモルタル試験体の圧縮強度

## (3) 骨材種類の影響

図-4.23 に CA<sub>2</sub>の有無および初期養生温度の違いによる普通砕砂およびBFSを用いたモルタルの圧縮強度を示す。既往の研究<sup>4.11)</sup>ではコンクリートの圧縮強度について高炉スラグ細骨材を用いた配合の方が高い強度が得られることが確認されている。本試験のモルタルについては、高炉スラグ細骨材を用いた配合の方が材齢にかかわらず圧縮強度が10%程度低下する傾向が確認された。この原因について、図-4.5に示す通りBFSを用いたモルタル中の空気量が大きくなったことが影響していると考えられる。BFSとCA<sub>2</sub>を組み合わせた場合においても圧縮強度に与えるCA<sub>2</sub>の影響は確認されなかった。

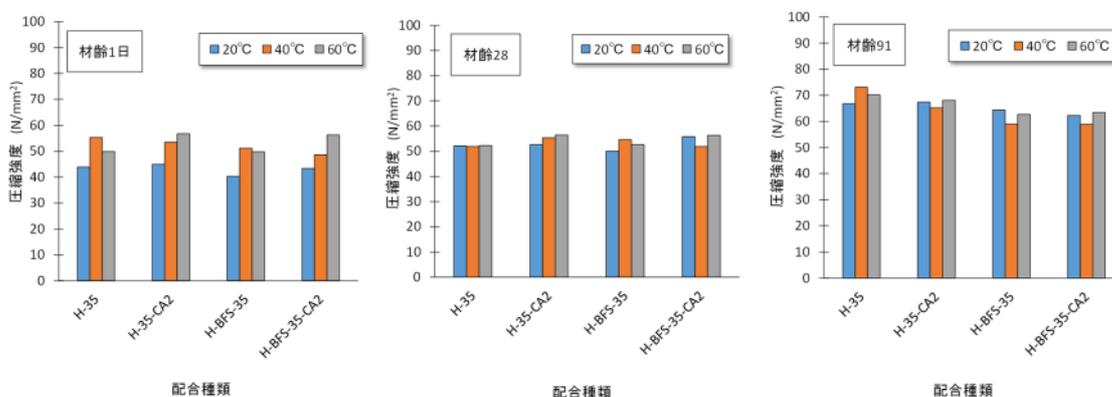


図-4.23 普通砕砂およびBFSを用いたモルタルの圧縮強度

#### 4.4 本章のまとめ

CA<sub>2</sub>の塩分浸透抵抗性向上効果を評価するために、結合材種類、CA<sub>2</sub>/Bの混和率、初期養生温度および中性化の有無を変化させ、さらに、細骨材の違いによる影響を確認するためにモルタルを用いた評価を行った。CA<sub>2</sub>の影響について細孔構造に着目した物理的效果について検討を行った。本試験で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 結合材種類およびCA<sub>2</sub>の混和率にかかわらず材齢28日時点での総空隙率に違いはないが、塩水浸せきを9ヶ月（材齢1年）行うことでCA<sub>2</sub>の混和率に応じて総空隙率が小さくなることが確認された。この現象についてペースト試験と同様の傾向であるが、ペースト試験と比較してモルタル試験の場合はCA<sub>2</sub>を混和することによる総空隙量の差は小さくなった。
- 2) 普通砕砂とBFSを用いた場合の総空隙率について大きな違いは認められなかった。ペースト試験において、CA<sub>2</sub>を混和して60℃とした場合は総空隙量が大きくなる傾向を示したが、モルタルとした場合は細骨材の影響で初期養生温度の影響が小さくなることが示唆された。
- 3) ペースト試験と同様に、結合材種類および細骨材種類にかかわらずCA<sub>2</sub>を混和することで見かけの拡散係数が小さくなる傾向が示された。初期養生温度の影響については、ペースト試験と同様にHは初期養生温度を高くした場合に見かけの拡散係数が大きくなり、GGBSおよびBFSについては、初期養生温度による影響は認められなかった。
- 4) 細孔構造に着目した検討を行ったがペースト試験ではCA<sub>2</sub>の混和により空隙構造が緻密化する傾向が確認されたが、モルタル試験においては顕著な差は認められなかった。総空隙率について違いは見られなかったが、既往の研究において連続空隙で評価した際にCA<sub>2</sub>を用いることによる違いが確認されており、今後は連続空隙に着目した検討も必要であると考えられる。促進中性化の影響については、ペースト試験と同様にCA<sub>2</sub>を混和した場合に固定化された塩化物イオンが分解されるような現象は認められなかった。

#### 【参考文献】

- 4.1) 俵道和, 杉田篤彦, 二井谷教治: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究, プレストレストコンクリート工学会, 第 26 回シンポジウム論文集, pp.109-114, 2017.10
- 4.2) 俵道和, 杉田篤彦, 二井谷教治: 高炉スラグ細骨材を用いたはり部材の曲げおよび版部材の押抜きせん断載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.93-98, 2018
- 4.3) 俵道和, 杉田篤彦, 二井谷教治: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリート床版の輪荷重走行疲労試験, プレストレストコンクリート工学会, 第 27 回シンポジウム論文集, pp.117-182, 2018.11
- 4.4) 公益社団法人日本コンクリート工学協会: コンクリートの耐久性に関する研究委員会, コンクリートの試験・分析マニュアル, 2000.
- 4.5) 依田彰彦: 高炉スラグを細骨材としたコンクリートの性質について, セメント技術年報, No.34, pp.133-136, 1980
- 4.6) 博多正貴, 吉野公, 黒田保, 吉澤千秋: 高炉スラグ細骨材を多量に使用したコンクリートの性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2229-2234, 2016
- 4.7) 宇城将貴, 森泰一郎, 保利彰宏, 盛岡実:  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$  を混和した高炉セメント硬化体の塩化物イオンの拡散挙動, セメント・コンクリート論文集, Vol.71, pp.191-196, 2017
- 4.8) 斎藤豪, 大即信明, 橋本勝文, 坂井悦郎: 水銀圧入式ポロシメーターの加圧減圧履歴曲線を用いたモルタル供試体の空げき連続性評価, Journal of the Society of Inorganic Materials, Vol.16, No.340, pp.158-164, 2009
- 4.9) 吉田亮, 水野浩平, 岸利治, 梅原秀哲: 水銀漸次繰返し圧入法で抽出するモルタル硬化体のインクボトル空隙および連続空隙に関する一考察, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp.235-242, 2015
- 4.10) 土木学会: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートに関する研究小委員会 (354 委員会) 成果報告書, コンクリート技術シリーズ, 2018
- 4.11) 藤井隆史, 綾野克紀: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの強度, 収縮, クリープおよびアルカリシリカ反応抑制効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.99-104, 2018

## 第5章 コンクリートの特性に及ぼす塩素固定化材の

### 影響に関する評価

#### 5.1 本章の目的

ここまで、ペースト試験およびモルタル試験において、 $CA_2$ の塩化物イオン浸透抵抗性に及ぼす影響について化学的効果と物理的効果に着目した検討を行った結果を示した。 $CA_2$ を用いることによる化学的効果および物理的効果について、例えば緻密化することで塩化物イオン浸透抵抗性以外の長さ変化や中性化および凍結融解などの耐久性について有利に働く可能性が考えられる。また、実際の構造物に適用する際は、塩化物イオン浸透抵抗性に及ぼす効果だけではなく、フレッシュ性状、体積変化および塩化物イオン浸透抵抗性以外の耐久性についても $CA_2$ を混和した際の評価を行う必要がある。

練り混ぜ直後から、型枠内に打ち込まれて、凝結・硬化に至るまでのフレッシュ性状は、コンクリートの施工を適切かつ効率的に行い、欠陥部の少ないコンクリート構造物を造るために極めて重要である。これまでも述べた通り、 $CA_2$ は、ペーストやモルタルでの評価は多く行われているが、コンクリートでの評価事例が少ない材料である。 $CA_2$ を用いたコンクリートについて、スランプ、空気量、またそれらの経時変化、凝結およびブリーディングなど、フレッシュ性状に影響を及ぼす指標について評価を行った。

また、硬化コンクリートに要求される基本的な性能は、構造安全性に関連する性能であり、強度特性として、圧縮強度、引張強度および曲げ強度などが挙げられる。 $CA_2$ を用いたコンクリートについて圧縮強度については検討されているが、引張強度や曲げ強度について検討された事例は少ないため、圧縮強度、引張強度および曲げ強度などの強度特性に $CA_2$ が与える影響について評価を行った。また、蒸気養生や湿潤養生期間を変化させた場合の圧縮強度についても評価を行い、 $CA_2$ を用いた場合の適切な養生日数の検討を行った。

コンクリートの変形特性および体積変化を示す特性値として、ヤング係数、クリープ、乾燥収縮および自己収縮などが挙げられる。本研究では $CA_2$ をPC上部工で使用するコンクリートに適用することを検討しているため、これらの特性値は重要な項目であり、 $CA_2$ を用いた場合にどのような影響を与えるか評価する必要がある。

さらに、 $CA_2$ に期待される耐久性効果についてである。コンクリートの劣化現象には、塩害、中性化、化学的浸食、アルカリシリカ反応などの化学的なものと、凍害、すり減り作用などの物理的なものがある。 $CA_2$ を用いることによる第一の目的は塩害対策であるが、 $CA_2$ を用いることで緻密化する効果や、水酸化カルシウムを消費することで凍結融解やアルカリシリカ反応に対しても抑制効果が得られる可能性なども考えられる。一方、水酸化カルシウムを消費することによって、中性化抵抗性が低下する可能性も考えられる。 $CA_2$ を用いたコンクリートについて、塩化物イオン浸透抵抗性以外の耐久性について検討された事例が

少ないため、本章では塩化物イオン浸透抵抗性とその他の耐久性についても  $CA_2$  が与える影響について評価を行う。

以上より、本章では  $CA_2$  を適用したコンクリートについてフレッシュ性状、体積変化および耐久性について評価を行いその効果を明らかにすることを目的とする。

## 5.2 試験概要

### 5.2.1 使用材料および配合

表-5.1 に本試験で使用した使用材料を示す。セメントは、早強ポルトランドセメントを使用し、混和材は高炉スラグ微粉末 6000 と塩素固定化材を使用した。細骨材は、普通砕砂として茨城県桜川市飯渕産の砕砂とモルタル試験で使用したものと同等の高炉スラグ細骨材を使用した。水は上水道水（栃木県真岡市）を用いた。化学混和剤は、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用し、BFS の配合についてはブリーディングを抑制するためにモルタル試験と同様に増粘剤一液タイプの高性能 AE 減水剤を使用した。使用材料の外観を図-5.1 に示す。

表-5.1 コンクリートに使用した材料の一覧表

材料分類	種類	記号	特性値
セメント	早強ポルトランドセメント	H	密度 3.14g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 4,470cm <sup>2</sup> /g
混和材	高炉スラグ微粉末 6000	GGBS	密度 2.91g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 5,800cm <sup>2</sup> /g 三酸化硫黄 2.89% (無水石こう添加)
	塩素固定化材	CA <sub>2</sub>	密度 2.97g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 3,300cm <sup>2</sup> /g, カルシウムアルミネイト含有率 91.4%
細骨材	普通砕砂	S	密度 2.64g/cm <sup>3</sup> , 硬質砂岩砕砂, 茨城県桜川市飯渕産
	高炉スラグ細骨材	BFS	密度 2.78g/cm <sup>3</sup> , BFS1.2, JFE スチール株式会社倉敷工場産
粗骨材	普通粗骨材	G	密度 2.66g/cm <sup>3</sup> , 硬質砂岩碎石, 茨城県桜川市飯渕産
化学混和剤	マスターグレニウム SP8SV	SP1	普通砕砂用, 高性能 AE 減水剤, BASF 社製
	マスターグレニウム 6500	SP2	BFS 用, 増粘剤一液タイプ高性能 AE 減水剤, BASF 社製
	マスターエア 202 (AE 剤)	AE	砕砂および BFS 用
	マスターエア 404 (消泡剤)	T	BFS 用



図-5.1 主要材料の外観

表-5.2にコンクリートの配合一覧を示す。単位水量は  $165\text{kg/m}^3$  一定とし水粉体比は 35%、45%および 55%の 3 種類とした。塩素固定化材の混和率は 6%を中心とし、水粉体比 35%については塩素固定化材の混和率を 4%、6%および 8%の 3 種類を設定した。結合材の種類は、早強セメント単味と早強セメントの 50%を高炉スラグ微粉末 6000 ブレーンで置換した 2 種類を選定した。早強セメント単味の配合については、細骨材の種類を一般的な砕砂と 100% 高炉スラグ細骨材で置換した 2 種類を選定した。目標スランプは  $12\pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量は  $4.5\%\pm 1.5\%$  と設定した。

コンクリートの製造は、公称容量  $0.060\text{m}^3$  の強制二軸練りミキサを用いて、下記の図-5.2 の手順で行う。流動性が得にくい配合については、静置やモルタルの練り混ぜ時間を延長して減水剤の使用量が極端に大きくならないような練り混ぜ方法を適用した。また、 $\text{CA}_2$  については図-5.3 に示すようにセメントと  $\text{CA}_2$  をビニール袋の中で 30 秒程度プレミックスした状態でミキサへ投入した。1 バッチの練り量は  $0.030\sim 0.060\text{m}^3$  とする。

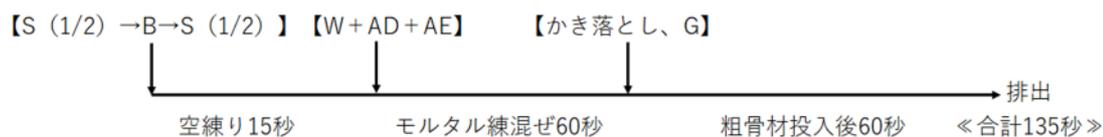


図-5.2 コンクリートの製造手順

表-5.2 コンクリートの配合

配合の記号	水粉 体比 W/B <sub>1</sub> (%)	細骨 材率 s/a (%)	GGBS/B <sub>2</sub> (%)	CA <sub>2</sub> /B <sub>1</sub> (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
					水	セメ ント	混和材		細骨材		粗骨材
							早強	高炉スラ グ微粉末 6000	塩素固 定化材	普通 砕砂	
					W	C(H)	GGBS	CA <sub>2</sub>	S	BFS	G
H55	55.0	46.0	—	0.0	165	300	—	0.0	843	—	998
H45	45.0	44.0	—	0.0	165	367	—	0.0	782	—	1003
H35	35.0	42.0	—	0.0	165	471	—	0.0	709	—	987
H35CA <sub>2</sub> -4%	35.0	42.0	—	4.0	165	453	—	19	709	—	987
H55CA <sub>2</sub> -6%	55.0	46.0	—	6.0	165	282	—	18	843	—	997
H45CA <sub>2</sub> -6%	45.0	44.0	—	6.0	165	345	—	22	782	—	1002
H35CA <sub>2</sub> -6%	35.0	42.0	—	6.0	165	443	—	28	709	—	986
H35CA <sub>2</sub> -8%	35.0	42.0	—	8.0	165	434	—	38	709	—	986
H55B650	55.0	46.0	50.0	0.0	165	150	150	0.0	839	—	992
H45B650	45.0	44.0	50.0	0.0	165	183	183	0.0	777	—	996
H35B650	35.0	42.0	50.0	0.0	165	236	236	0.0	703	—	978
H35B650CA <sub>2</sub> -4%	35.0	42.0	50.0	4.0	165	226	226	19	703	—	978
H55 B650CA <sub>2</sub> -6%	55.0	46.0	50.0	6.0	165	141	141	18	839	—	992
H45 B650CA <sub>2</sub> -6%	45.0	44.0	50.0	6.0	165	172	172	22	777	—	996
H35 B650CA <sub>2</sub> -6%	35.0	42.0	50.0	6.0	165	222	222	28	703	—	978
H35 B650CA <sub>2</sub> -8%	35.0	42.0	50.0	8.0	165	217	217	38	703	—	978
H55BFS100	55.0	46.0	—	0.0	165	300	—	0.0	—	888	998
H45BFS100	45.0	44.0	—	0.0	165	367	—	0.0	—	823	1003
H35BFS100	35.0	42.0	—	0.0	165	471	—	0.0	—	747	987
H35BFS100CA <sub>2</sub> -4%	35.0	42.0	—	4.0	165	453	—	19	—	747	987
H55 BFS100CA <sub>2</sub> -6%	55.0	46.0	—	6.0	165	282	—	18	—	888	997
H45 BFS100CA <sub>2</sub> -6%	45.0	44.0	—	6.0	165	345	—	22	—	823	1002
H35 BFS100CA <sub>2</sub> -6%	35.0	42.0	—	6.0	165	443	—	28	—	747	986
H35 BFS100CA <sub>2</sub> -8%	35.0	42.0	—	8.0	165	434	—	38	—	746	986

※B<sub>1</sub>=C+GGBS+CA<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>=C+GGBS



図-5.3 CA<sub>2</sub>のプレミックス状況

## 5.2.2 試験方法および試験項目

### (1) フレッシュ性状に関する試験方法

コンクリートのスランプは JIS A 1101 に準拠し、空気量は JIS A 1128 に準拠して行った。

### (2) 強度特性に関する試験方法

コンクリートの圧縮強度は JIS A 1108 に準拠し、割裂引張強度は JIS A 1113 に準拠し、曲げ強度試験は JIS A 1106 に準拠して行った。圧縮強度試験および割裂引張強度は  $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ 、曲げ強度試験は  $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$  の試験体を用いて行った。

### (3) 変形特性および体積変化に関する試験方法

コンクリートのヤング係数は JIS A 1149 に準拠し、クリープは JIS A 1157 に準拠し、乾燥収縮は JIS A 1129-3 (ダイヤルゲージ法) に準拠し測定を行った。自己収縮ひずみは、JCI 超流動コンクリート研究委員会の「(仮称) 高流動コンクリートの自己収縮試験方法」に準拠し、 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$  の鋼製型枠を用いて、試験体中央に測温機能付きの埋込み型ひずみ計 (東京測器研究所 KM-100BT, 見かけの弾性係数約  $40 \text{N/mm}^2$ ) を設置して測定する。試験体は、打込み後直ちに封かんし、恒温恒湿室 (温度  $20^\circ\text{C}$ 、湿度 60%) で養生する。打設翌日に脱枠しアルミテープを張り付け後も恒温恒湿室 (温度  $20^\circ\text{C}$ 、湿度 60%) で保管する。実測ひずみから温度ひずみ (線膨張係数  $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  一定) を差し引いて自己収縮ひずみとし、自己収縮ひずみは凝結の始発をゼロとする。ヤング係数およびクリープ試験は  $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ 、乾燥収縮試験および自己収縮試験は  $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$  の試験体を用いて行った。

### (4) 耐久性に関する試験方法

$\text{CA}_2$  による塩化物イオン浸透抑制効果を確認するために、10%の NaCl 溶液に浸せきを行った試験体について、各材齢で試験体を割裂して硝酸銀溶液を噴霧し目視で塩化物イオン浸透深さを測定した。その後、材齢 1 年塩水浸せきを行った試験体について EPMA を用いた見かけの拡散係数の測定を行った。塩化物イオン浸透抵抗性に関する試験は JSCE-G 572-2018 浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数試験方法 (案) および JSCE-G 571-2013 電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散試験方法に準拠して行った。塩水浸漬浸せき法は  $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ 、電気泳動法は  $\phi 100 \times 200 \text{mm}$  の試験体を用いて行った。

中性化に与える影響を確認するために、温度  $20^\circ\text{C}$ 、湿度 60%、二酸化炭素濃度 5% の環境で促進養生を行った試験体について、各材齢で試験体を割裂してフェノールフタレイン溶液を噴霧し目視で中性化深さを測定した。中性化試験は JIS A 1152 および JIS A 1153 に準拠して行った。中性化試験は  $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$  の試験体を用いて行った。

凍結融解試験は JIS A 1148 に準拠し、 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$  の試験体を用いて行った。

ASR 促進試験は、飽和 NaCl 溶液浸せき法（通称：デンマーク法）に準拠し試験を行った<sup>5.1)</sup>。ASR 試験の配合種類を表-5.3 に示す。反応性を有する細骨材および粗骨材は富山県産の砂（密度：2.61g/cm<sup>3</sup>）および川砂利（粗骨材最大寸法：25mm，密度：2.61g/cm<sup>3</sup>）を用いた。W/B は 35%とし，CA<sub>2</sub>/B は 0%および 6%で比較を行った。試験条件と判定基準を表-5.4 に示す。コンクリート試験体

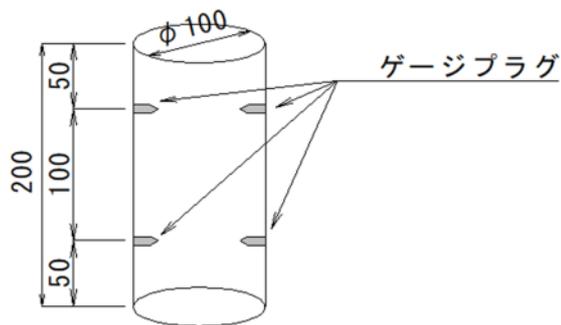


図-5.4 ゲージプラグ取付け位置図

(φ100×200mm) を用いて試験を行う。長さ変化率測定用のプラグの取り付け方法を図-5.4 に示す。コンクリート試験体は、材齢 28 日まで 20°C一定の水中養生を行った後に温度 50°C の飽和 NaCl 溶液に浸せきし膨張率の変化を測定する。膨張率の測定は、飽和 NaCl 溶液に浸せき後、1 ヶ月に 1 回の測定を行う。圧縮強度およびヤング係数の測定は、φ100×200mm の円柱試験体を用いて、ASR 試験前に材齢 28 日で測定を行い、さらに ASR 試験体と同様に 50°Cの飽和 NaCl 溶液に浸せきし ASR が進展した時点の材齢でも実施した。

表-5.3 ASR 試験の配合種類

配合名	CA <sub>2</sub> の有無	細骨材の種類	粗骨材の種類
H35	無し	普通砕砂	反応性粗骨材
H35CA <sub>2</sub> -6%	有り	普通砕砂	反応性粗骨材
H35(SR)	無し	反応性細骨材	反応性粗骨材
H35CA <sub>2</sub> -6%(SR)	有り	反応性細骨材	反応性粗骨材
H35B650	無し	普通砕砂	反応性粗骨材
H35B650CA <sub>2</sub> -6%	有り	普通砕砂	反応性粗骨材
H35B650(SR)	無し	反応性細骨材	反応性粗骨材
H35B650CA <sub>2</sub> -6%(SR)	有り	反応性細骨材	反応性粗骨材
H35BFS100	無し	高炉スラグ細骨材	反応性粗骨材
H35BFS100 CA <sub>2</sub> -6%	有り	高炉スラグ細骨材	反応性粗骨材

表-5.4 飽和 NaCl 溶液浸せき法の試験条件と判定基準

試験方法	促進養生の条件	判定基準
飽和 NaCl 溶液浸せき法 (デンマーク法)	温度 50°C の飽和 NaCl 溶液中に浸せきする	デンマーク法の判定基準：試験開始後 3 ヶ月での膨張量で以下のように判定する。 0.10%以下の場合：膨張性なし 0.10~0.40%の場合：不明瞭 0.40%以上の場合：膨張性あり

### 5.3 試験結果

#### 5.3.1 コンクリートのフレッシュ性状に及ぼす塩素固定化材の影響

##### (1) コンクリートのスランプおよび空気量

コンクリートの化学混和剤の添加率とスランプおよび空気量の結果を表-5.5 に示し、フレッシュ性状の結果を図-5.5 に示す。スランプ性状に関して、H および H+GGBS は  $CA_2$  の有無にかかわらず良好なスランプ性状を示している。H+BFS については、 $CA_2$  を混和した場合に多少割れが生じていることが確認された。既往の研究<sup>5.2)</sup>において BFS は単一粒度であるためスランプが著しく低下することが知られている。本試験においても  $CA_2$  を混和することで、粘性が増加しスランプに割れが生じたと考えられる。スランプの割れが生じる場合には、細骨材率の調整や別途、増粘剤の使用などの検討が必要であると考えられる。

水粉体比ごとのスランプと減水剤添加率の関係を図-5.6 に示し、 $CA_2$  の混和率ごとのスランプと減水剤添加率の関係を図-5.7 に示す。結合材種類が早強セメント単味および高炉スラグ微粉末を用いた配合について、水粉体比が小さくなるにつれて同一スランプを得るための減水剤添加率は増加傾向にあることが確認された。さらに、 $CA_2$  の混和率を増加した場合についても、減水剤添加率は増加傾向にあることが確認された。

表-5.5 化学混和剤の添加量とスランプおよび空気量の結果

配合の記号	SP/B (%)	AE/B (%)	T/B (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	練り上がり温度 (°C)
H55	0.650	0.60	—	10.0	5.0	20.0
H45	0.700	0.50	—	13.5	3.7	21.0
H35	0.800	0.55	—	12.0	3.3	21.5
H35CA <sub>2</sub> -4%	0.900	0.65	—	13.5	3.8	22.0
H55CA <sub>2</sub> -6%	0.700	0.65	—	10.0	4.7	21.0
H45CA <sub>2</sub> -6%	0.700	0.65	—	11.5	5.5	21.0
H35CA <sub>2</sub> -6%	0.975	0.70	—	10.5	4.0	21.0
H35CA <sub>2</sub> -8%	1.050	0.75	—	12.0	4.1	21.5
H55B650	0.650	0.60	—	10.0	3.6	17.0
H45B650	0.600	0.60	—	13.5	3.9	18.0
H35B650	0.650	0.65	—	10.0	3.3	20.0
H35B650CA <sub>2</sub> -4%	0.700	0.70	—	14.0	3.4	20.0
H55B650CA <sub>2</sub> -6%	0.700	0.65	—	13.5	4.5	19.5
H45B650CA <sub>2</sub> -6%	0.650	0.65	—	14.5	3.8	20.0
H35B650CA <sub>2</sub> -6%	0.750	0.80	—	14.5	3.1	20.5
H35B650CA <sub>2</sub> -8%	0.750	0.90	—	14.0	3.5	21.0
H55BFS100	0.750	0.25	0.00	10.0	5.4	21.0
H45BFS100	0.750	0.50	0.20	12.0	5.5	21.0
H35BFS100	0.750	0.50	0.30	14.5	3.5	22.0
H35BFS100CA <sub>2</sub> -4%	0.800	0.50	0.15	12.0	4.8	22.0
H55BFS100CA <sub>2</sub> -6%	1.300	0.20	1.00	10.5	5.0	22.0
H45BFS100CA <sub>2</sub> -6%	1.300	1.00	1.50	12.0	3.0	22.0
H35BFS100CA <sub>2</sub> -6%	1.200	1.20	1.50	14.5	3.1	23.0
H35BFS100CA <sub>2</sub> -8%	1.200	1.20	1.50	11.0	3.1	23.0

※B=C+GGBS+CA<sub>2</sub>

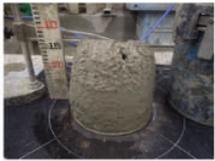
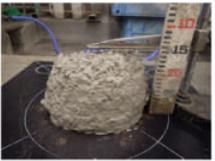
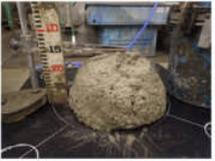
				
配合名	H55	H45	H35	H35CA <sub>2</sub> -4%
スランプ (cm)	10.0	13.5	12.0	13.5
空気量 (%)	5.0	3.7	3.3	3.8
				
配合名	H55CA <sub>2</sub> -6%	H45CA <sub>2</sub> -6%	H35CA <sub>2</sub> -6%	H35CA <sub>2</sub> -8%
スランプ (cm)	10.0	11.5	10.5	12.0
空気量 (%)	4.7	5.5	4.0	4.1
				
配合名	H55B650	H45B650	H35B650	H35B650CA <sub>2</sub> -4%
スランプ (cm)	10.0	13.5	10.0	14.0
空気量 (%)	3.6	3.9	3.3	3.4
				
配合名	H55B650CA <sub>2</sub> -6%	H45B650CA <sub>2</sub> -6%	H35B650CA <sub>2</sub> -6%	H35B650CA <sub>2</sub> -8%
スランプ (cm)	13.5	14.5	14.5	14.0
空気量 (%)	4.5	3.8	3.1	3.5
				
配合名	H55BFS100	H45BFS100	H35BFS100	H35BFS100CA <sub>2</sub> -4%
スランプ (cm)	10.0	12.0	14.5	12.0
空気量 (%)	5.4	5.5	3.5	4.8
				
配合名	H55BFS100CA <sub>2</sub> -6%	H45BFS100CA <sub>2</sub> -6%	H35BFS100CA <sub>2</sub> -6%	H35BFS100CA <sub>2</sub> -8%
スランプ (cm)	10.5	12.0	14.5	11.0
空気量 (%)	5.0	3.0	3.1	3.1

図-5.5 フレッシュ性状の結果

高炉スラグ細骨材を用いた配合は、普通砕砂を用いた配合と比較して同一スランプを得るための減水剤添加率は増加傾向があることが確認された。減水剤種類が異なることや、高炉スラグ細骨材の粒度が砕砂と比較して小さいことが影響していると考えられる。また、CA<sub>2</sub>を混和した配合について、砕砂を使用した場合の減水剤添加率は0.1%程度の増加であったが、高炉スラグ細骨材を使用した場合は0.4~0.5%程度増加することが確認された。高炉スラグ細骨材を用いた配合については、増粘剤一液タイプの高性能AE減水剤を使用しているため、高性能AE減水剤の中に含まれる減水成分の割合が一般的な高性能AE減水剤と異なるために使用量が多くなったと考えられる。

空気量の調整について、結合材種類が早強セメント単味および高炉スラグ微粉末を用いた配合については、AE剤のみの調整で管理値に調整することが可能であった。高炉スラグ細骨材については、練り混ぜ時の巻き込み空気が大きくなる傾向があり、消泡剤を用いてエンラップトエアを消して、AE剤を用いてエントレインドエアを連行させる調整を行った。CA<sub>2</sub>を混和することで空気量に大きな影響を与えることは確認されなかった。

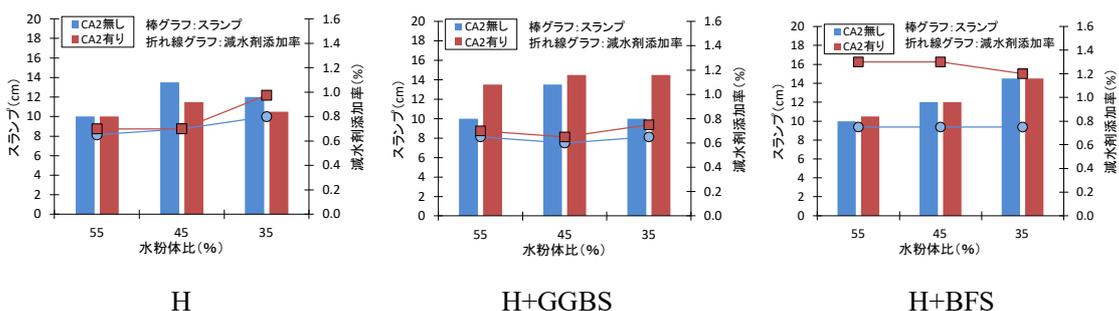


図-5.6 水粉体比ごとのスランプと減水剤添加率の関係 (CA<sub>2</sub>/B=0%および6%)

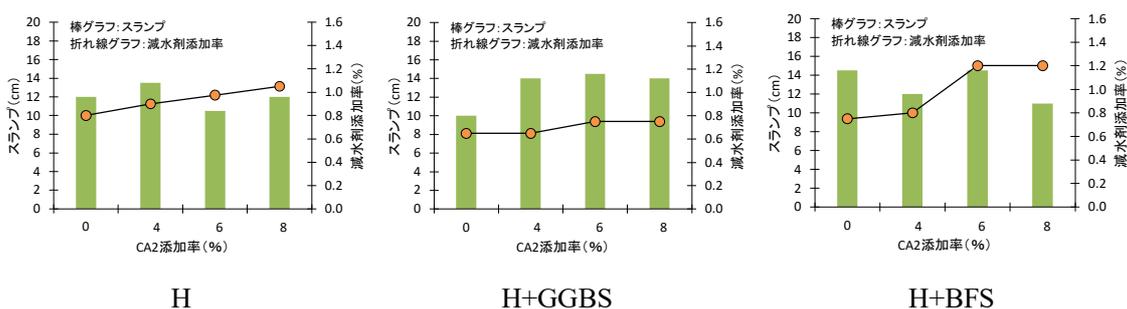


図-5.7 CA<sub>2</sub>の混和率ごとのスランプと減水剤添加率の関係 (W/B=35%)

スランプの経時変化を図-5.8 に示す。水粉体比 45%の配合について、塩素固定化材の有無による比較を行った。その結果、CA<sub>2</sub>を混和しない配合については、60分で 2~3cm 程度のスランプロスが確認されたが、CA<sub>2</sub>を混和した配合については、CA<sub>2</sub>を混和しない配合と比較して、30分程度で 6.0~7.0cm 程度スランプが減少し、60分では 7.0~10.0cm 程度のスランプロスが確認された。CA<sub>2</sub>を混和することでスランプロスが大きくなる傾向は、結合材種類や細骨材種類にかかわらず同様の傾向が確認された。

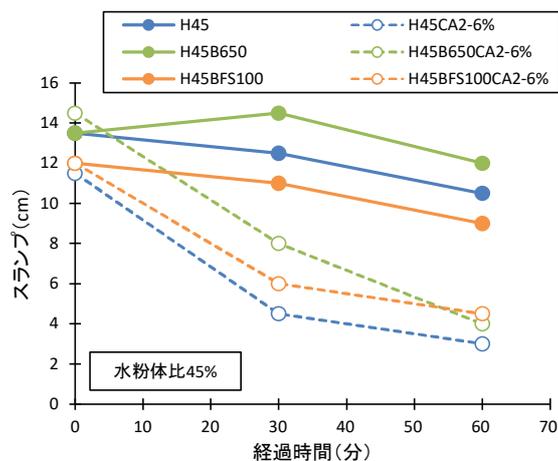


図-5.8 スランプの経時変化

スランプロスのメカニズムとして物理的な要因と化学的な要因に区分される。既往の研究<sup>5.3)</sup>において、物理的な要因については粒子同士の衝突による凝集が挙げられるが、セメントの比表面積の変化は時間の経過でほとんどないことが確認されている。一方、化学的な要因としては、セメント中の間隙相と石こうの反応で生じるエトリンガイトの生成量は時間の経過で増加し、セメント粒子同士が凝集・接合するためとされており、塩素固定化材を用いた場合に初期に hidroカルマイト族の水和物を生成する際に同様な現象が生じているものと推察される。

## (2) コンクリートのブリーディング

ブリーディング試験の結果を図-5.9 に示し、ブリーディング試験状況を図-5.10 に示す。結合材種類や細骨材種類にかかわらず CA<sub>2</sub>を混和することでブリーディング量が小さくなることが確認された。H45CA<sub>2</sub>-6%および H45BFS100CA<sub>2</sub>-6%の配合についてはブリーディングが生じなかった。また、CA<sub>2</sub>を混和していない配合については、ブリーディング量は 0.05cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup> 程度であり、建築学会<sup>5.4)</sup>で規定されている 0.30cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup> 以下と比較しても非常に小さな値であることが確認された。

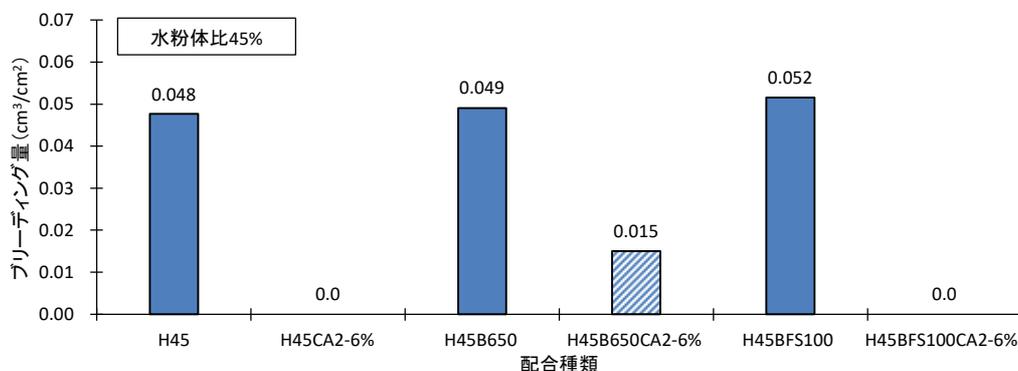


図-5.9 ブリーディング試験の結果



図-5.10 ブリーディング試験状況

### (3) コンクリートの凝結時間

凝結試験の結果を図-5.11 に示す。凝結試験状況を図-5.12 に示す。CA<sub>2</sub>を混和しない配合については早強セメント単味、早強+高炉スラグ微粉末、高炉スラグ細骨材の順で凝結時間が遅くなることが確認された。CA<sub>2</sub>を混和した配合については、配合種類にかかわらず始発および終結ともに1~2時間程度早くなることが確認された。高炉スラグ細骨材について凝結が遅くなった理由については、減水剤の種類が異なることや高炉スラグ細骨材に使用されている固結防止剤が影響していると考えられる。

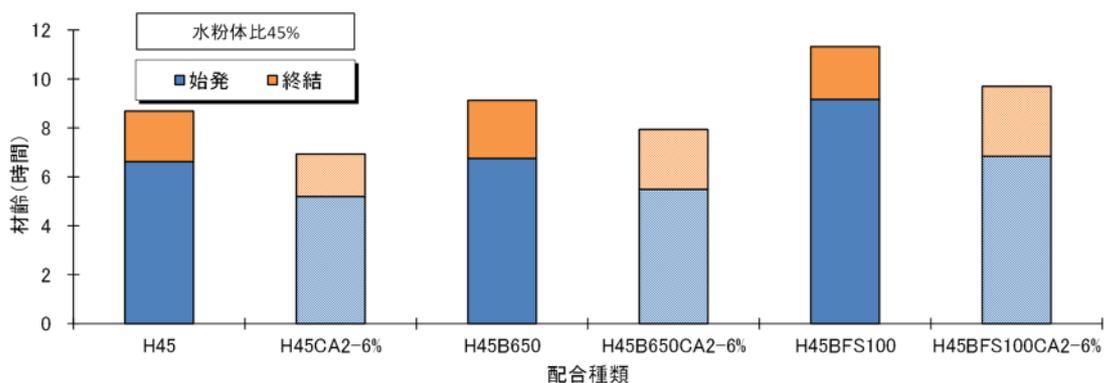


図-5.11 凝結試験結果



図-5.12 凝結試験状況

凝結とブリーディングの関係を図-5.13 に示す。凝結とブリーディングの関係について、凝結開始から始発までの間でブリーディングが終了する傾向が確認された。CA<sub>2</sub>を混和した配合については、高炉スラグ微粉末を用いた配合についてのみブリーディングの発生が確認されたが、CA<sub>2</sub>を混和しない配合と同様の傾向が確認された。既往の研究より、高炉スラグ細骨材に使用されている固結防止剤の影響で凝結が長くなり、相対的にブリーディング量も増加することが報告されている。本試験の結果から、高炉スラグ細骨材を用いた配合はその他の配合と比較しても凝結時間は長くなる傾向が確認されたが、増粘型の減水剤やCA<sub>2</sub>を混和することで、高炉スラグ細骨材を用いた配合についてブリーディング量については抑制されその他の配合と比較しても同程度のブリーディング量になったものと考えられる。

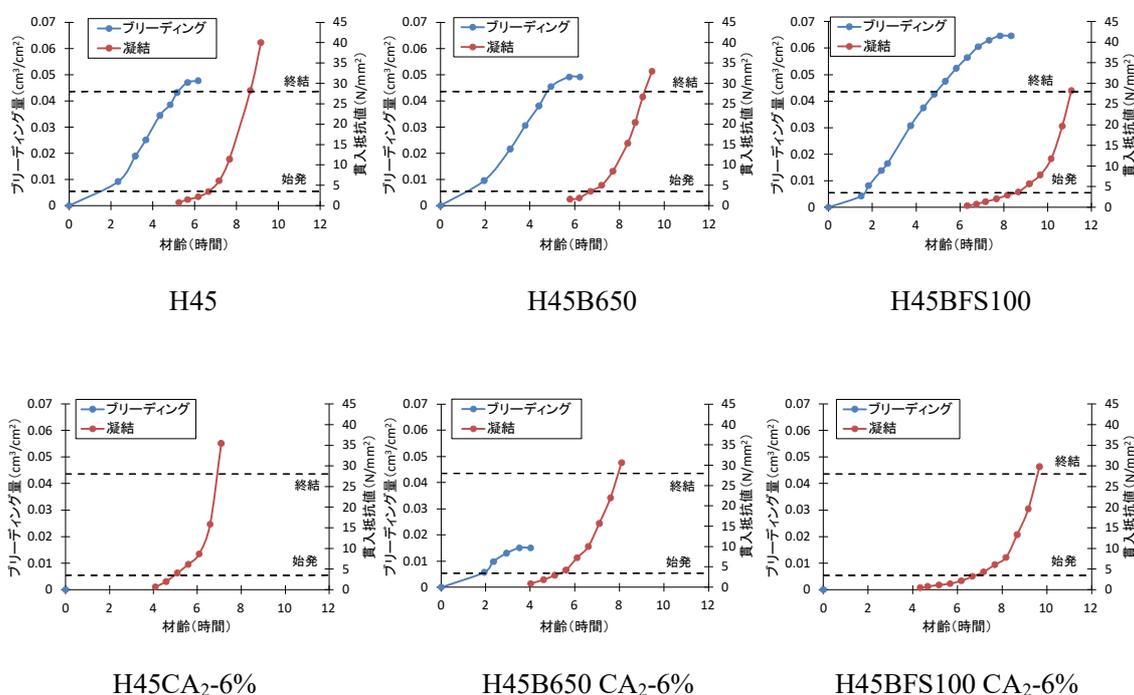


図-5.13 凝結とブリーディングの関係

### 5.3.2 コンクリートの強度特性に及ぼす塩素固定化材の影響

#### (1) 標準養生を行った試験体の強度特性

塩素固定化材の有無 (CA<sub>2</sub>/B=6%) および水粉体比ごとの材齢と圧縮強度の関係を図-5.14 に示す。養生方法は、20°C一定の水中養生とした結果を示す。GGBS を用いた配合について、H や H+BFS と比較して材齢 1 日および 7 日の初期強度が小さくなる傾向が確認された。その後、材齢 28 日同程度の強度となり、材齢 91 日の長期強度については GGBS の配合の圧縮強度が高くなる傾向が確認された。この傾向については、CA<sub>2</sub> の有無による影響は確認されなかった。

CA<sub>2</sub> の混和率ごと (CA<sub>2</sub>/B=0, 4, 6, 8%) の材齢と圧縮強度の関係を図-5.15 に示す。CA<sub>2</sub> の混和率に応じて圧縮強度が低下する傾向が確認された。セメントの内割りで CA<sub>2</sub> を混和

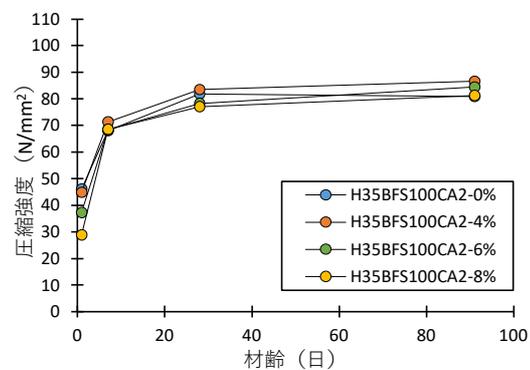
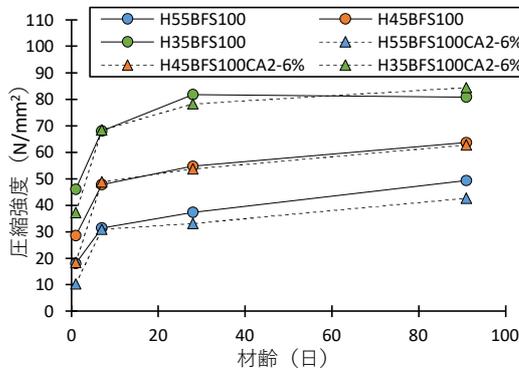
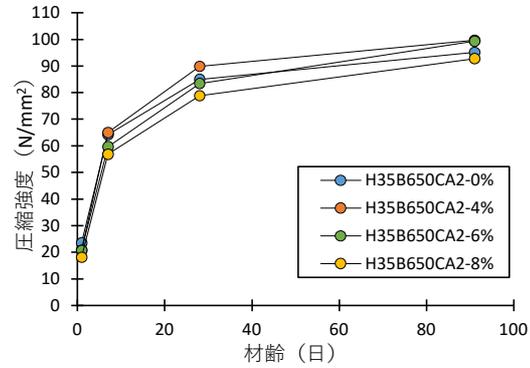
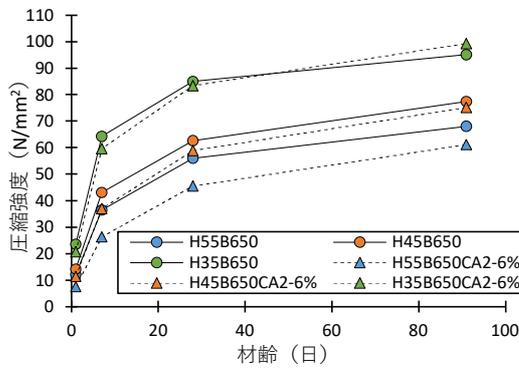
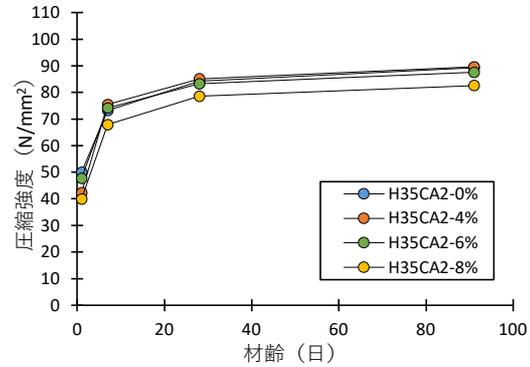
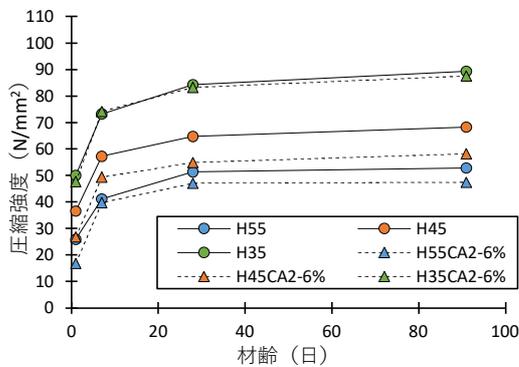


図-5.14 材齢と圧縮強度の関係 図-5.15 CA<sub>2</sub> の混和率ごとの材齢と圧縮強度の関係

していることが影響していると考えられるが、CA<sub>2</sub>を0~8%程度変化させた場合において圧縮強度の低下率は5~10%程度であることが確認された。

水粉体比35%の配合について、CA<sub>2</sub>の混和率とCA<sub>2</sub>無混和に対する圧縮強度の発現率の試験材齢ごとの関係を図-5.16に示す。配合種類にかかわらず、CA<sub>2</sub>の混和率が大きくなるにつれて、CA<sub>2</sub>無混和に対する強度発現率は小さくなる傾向が確認された。強度低下から検討した場合に、CA<sub>2</sub>の混和率が6%から8%にかけて強度減少する傾向が確認されているので、6%程度であれば大きな問題にはならないと考えられる。ただし、H+BFSについてはCA<sub>2</sub>を6%混和した場合に20%程度の低下減少が確認されているため初期強度が必要な場合は水粉体比を調整するか、外割方法で混和する必要があると示唆された。

材齢28日における圧縮強度と割裂引張強度の関係を図-5.17に示す。同図にコンクリート標準示方書<sup>5.5)</sup>に示される圧縮強度と引張強度の計算値の結果を示す。配合種類にかかわらず圧縮強度に対する割裂引張強度は若干小さくなる傾向が確認されたが、コンクリート標準示方書に示

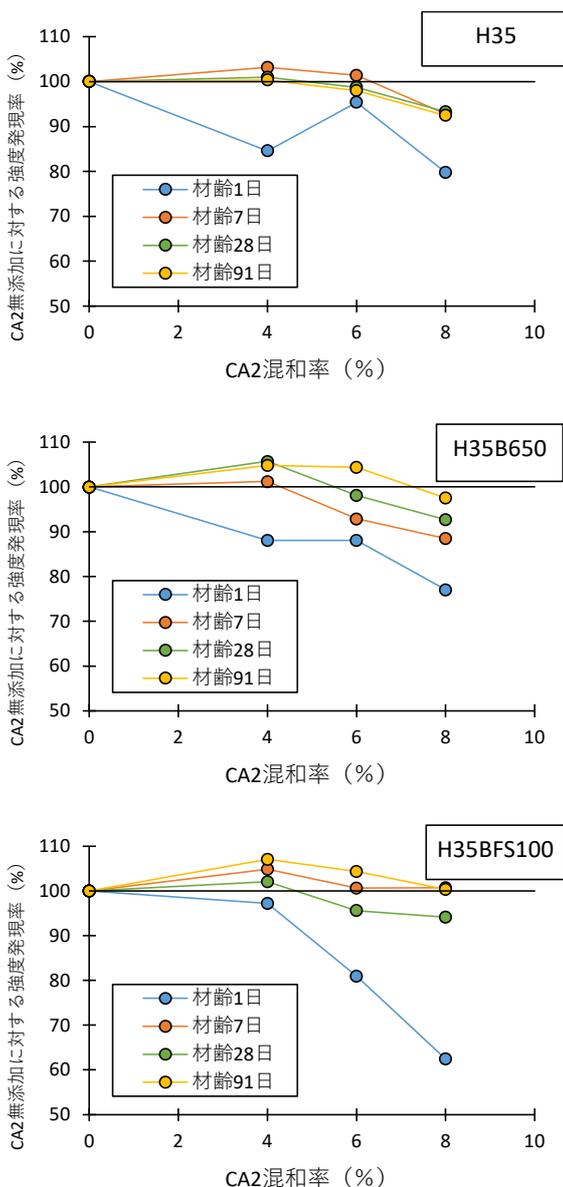


図-5.16 CA<sub>2</sub>無混和に対する圧縮強度の発現

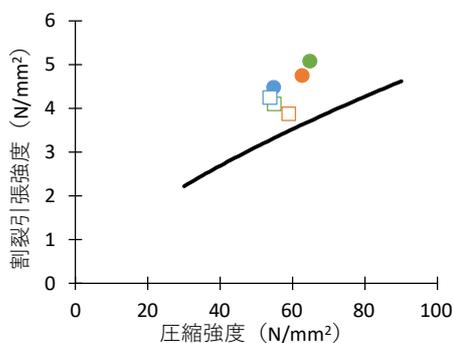


図-5.17 圧縮強度と割裂引張強度の関係

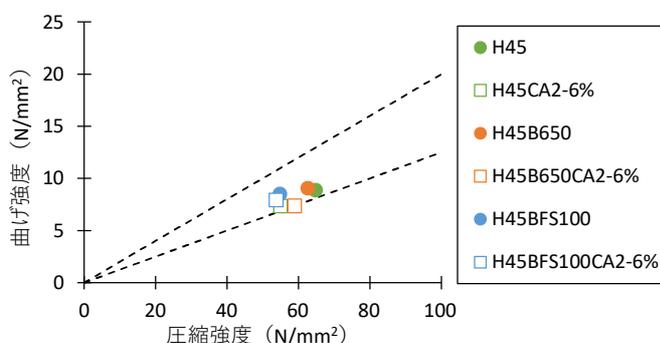


図-5.18 圧縮強度と曲げ強度の関係

される計算値よりも大きくなる傾向を示しており、CA<sub>2</sub>無混和のコンクリートと同程度の傾向を示すことが確認された。

材齢 28 日における圧縮強度と曲げ強度の関係を図-5.18 に示す。一般的に、曲げ強度は圧縮強度の 1/5～1/8 程度と言われている。図-5.18 に破線で圧縮強度の 1/5～1/8 の範囲を示すが、圧縮強度と割裂引張強度の関係と同様に CA<sub>2</sub> を混和することにより圧縮強度に対する曲げ強度は若干小さくなる傾向が確認されたが、圧縮強度の 1/5～1/8 の曲げ強度が得られており、CA<sub>2</sub>無混和のコンクリートと同程度の傾向を示すことが確認された。

## (2) 蒸気養生の影響

PCaPC 部材への適用を想定し、図-5.19 に示す最高温度を 60°Cとした温度履歴を与えた場合の圧縮強度に及ぼす CA<sub>2</sub> の与える影響について評価を行った。PCaPC 部材への適用を想定し、W/B=35%について検討を行った。60°Cの温度履歴を与えた後は 20°C一定の水中養生を行った結果を図-5.20 に示す。

図-5.16 に示すように蒸気養生を行わなかった場合に CA<sub>2</sub> の混和率に応じて材齢初期において強度低下が確認されたが、蒸気養生を行った場合は材齢初期においても CA<sub>2</sub> の有無による影響はほとんど確認されなかった。標準養生を行った際と同様に CA<sub>2</sub> を混和した配合の方が数%の強度低下が確認されたが、CA<sub>2</sub> をセメントの内割りで混和した影響と考えられる。CA<sub>2</sub> を混和した配合においても、材齢 1 日でのプレストレスト導入時に必要とされる圧縮強度の 35N/mm<sup>2</sup> を超えることが確認された。

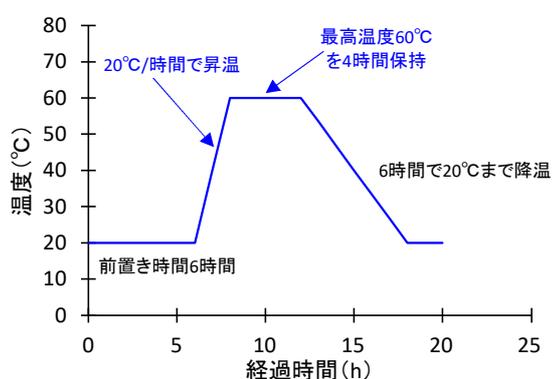


図-5.19 蒸気養生を模擬した温度履歴

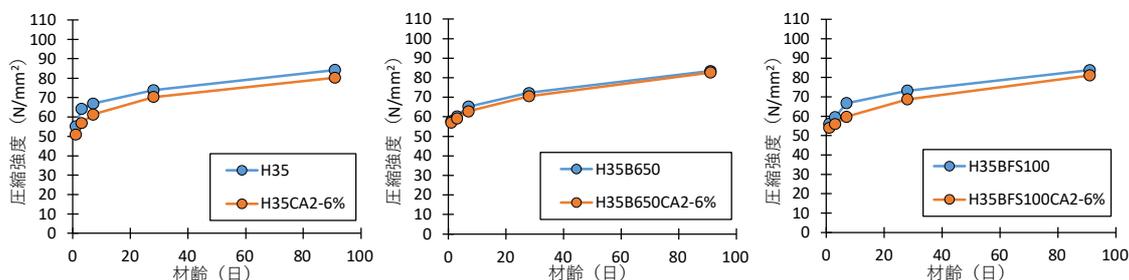


図-5.20 蒸気養生を模擬した温度履歴を与えた場合の材齢と圧縮強度の関係

## (3) 湿潤養生期間の影響

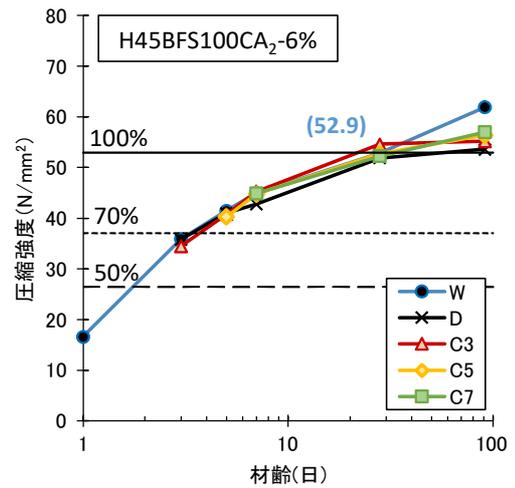
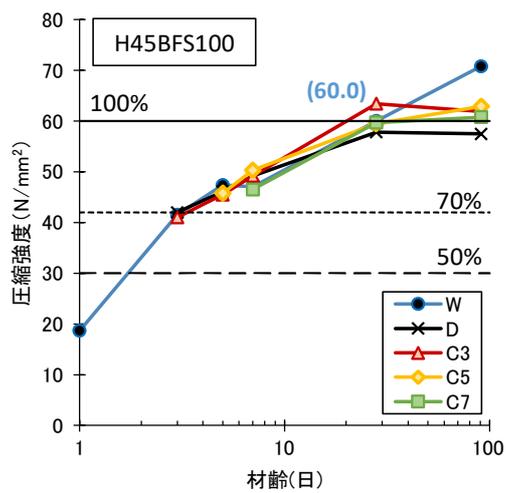
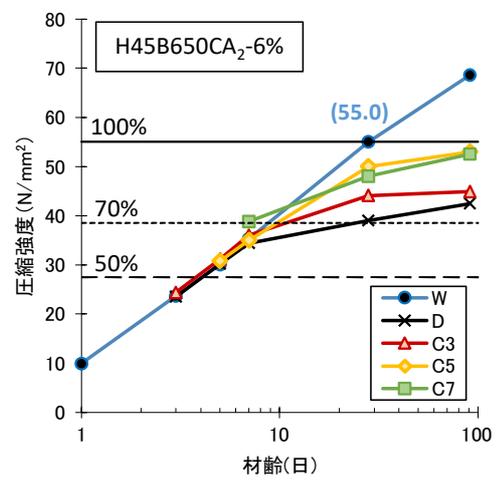
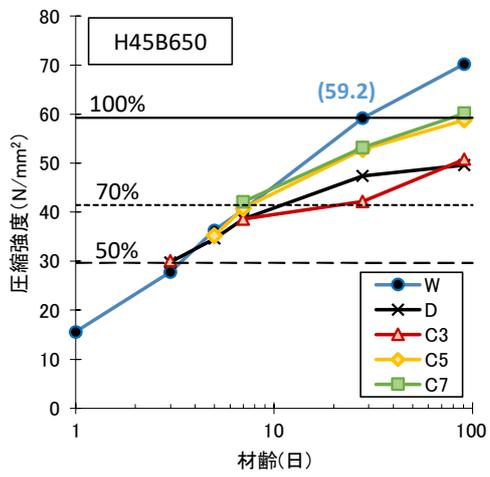
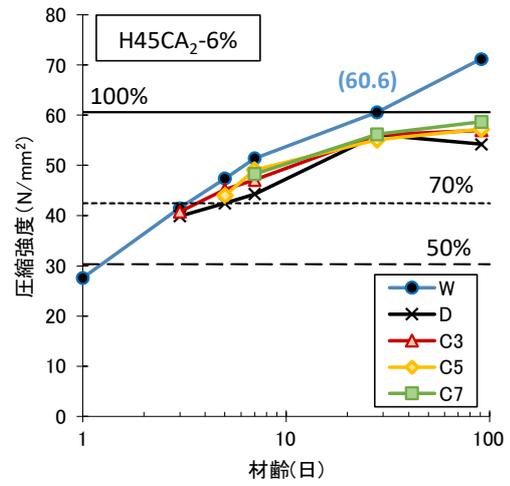
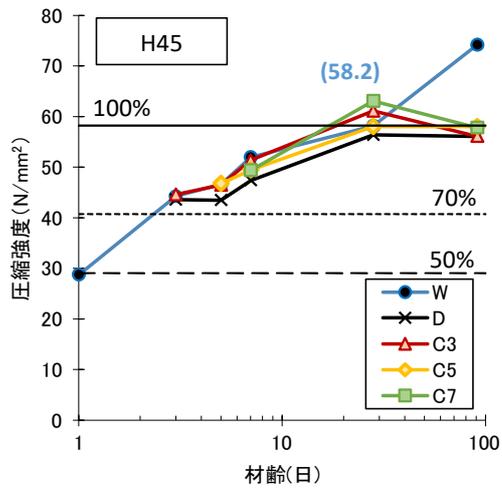
図-5.14 に示す結果の通り、混和材 (CA<sub>2</sub> および高炉スラグ微粉末) や高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して、強度

発現が遅く、強度発現や耐久性が初期材齢の湿潤養生期間の影響を受けやすい。本研究で検討している混和材や高炉スラグ細骨材を用いた PC 橋において、所要の強度や耐久性を確保するには、初期材齢の湿潤養生期間の違いが強度発現と耐久性に与える影響を把握した上で、適切な湿潤養生日数を設定する必要がある。しかし、混和材や高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの湿潤養生期間の設定方法は明確でなく、場所打ち PC 橋に混和材や高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートを適用する際に検討の必要がある。また、主要な規準類<sup>5.6)~5.9)</sup>を対象として、混和材および高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの湿潤養生に関する規定を調査した結果、次のことが確認された。①早強ポルトランドセメントの一部を混和材で置換したコンクリートの湿潤養生期間については、明確な規定が定められていない。②混和材や高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの湿潤養生期間については、ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも長く設定する必要があること、低温時には湿潤養生期間をさらに延長する必要があること。③湿潤養生期間を検討する際に考慮すべき項目として、強度と耐久性が挙げられていた。そこで、早強ポルトランドセメントの一部を混和材で置換したコンクリートの湿潤養生期間の妥当性を検討するため、湿潤養生期間の異なるコンクリート試験体を作製して湿潤養生期間が強度発現に与える供強について検討を行った。耐久性に与える影響については 5.5「コンクリートの耐久性に及ぼす塩素固定化材の影響」に検討結果を示す。

場所打ちコンクリートを想定し W/B=45%の配合について検討を行った。試験体の養生条件を表-5.6 に示す。養生条件は、標準養生 (W)、気中養生 (D)、湿潤養生 (C3, C5, C7) とした。湿潤養生は、十分に湿らせた養生マットを用いて試験体を覆い、1日1回の頻度で散水して水分を供給した。湿潤養生期間については、3日 (C3)、5日 (C5)、7日 (C7) の3種類とした。圧縮強度については φ100×200mm を用いて、標準養生 (W) は材齢 1, 3, 5, 7, 28, 91 日、気中養生 (D) と湿潤養生 3日 (C3) は材齢 3, 5, 7, 28, 91 日、湿潤養生 5日 (C5) は材齢 5, 7, 28, 91 日、湿潤養生 7日 (C7) は材齢 7, 28, 91 日で測定を行った。

表-5.6 試験体の養生条件

養生条件	記号	養生方法
標準養生	W	コンクリート打込み翌日に脱枠し、水温 20℃の養生槽内で材齢 28 日まで水中養生した後に室温 20℃、湿度 60%の室内で試験時まで気中養生
気中養生	D	コンクリート打込み翌日に脱枠し、室温 20℃、湿度 60%の室内で試験時まで気中養生
湿潤養生	C3	コンクリート打込み翌日に脱枠し、材齢 3 日まで室温 20℃、湿度 60%の室内で湿潤養生した後、室温 20℃、湿度 60%の室内で試験時まで気中養生
	C5	コンクリート打込み翌日に脱枠し、材齢 5 日まで室温 20℃、湿度 60%の室内で湿潤養生した後、室温 20℃、湿度 60%の室内で試験時まで気中養生
	C7	コンクリート打込み翌日に脱枠し、材齢 7 日まで室温 20℃、湿度 60%の室内で湿潤養生した後、室温 20℃、湿度 60%の室内で試験時まで気中養生



※ ( ) 内の数字は標準養生を行った試験体の材齢 28 日の圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>) を示す。

図-5.21 養生種類ごとの材齢と圧縮強度の関係

湿潤養生日数を変化させた場合の圧縮強度の結果に基づき、一般的に蒸気養生を行わない場所打ちコンクリートの PC 部材を想定した湿潤養生期間について検討を行った。養生種類ごとの材齢と圧縮強度の結果を図-5.21 に示す。高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、早強ポルトランド単味のコンクリートと比較して湿潤養生の違いによる圧縮強度の差が大きくなり、この傾向は CA<sub>2</sub> を混和した配合の方が大きくなる傾向を示した。また、標準養生を行った試験体は、長期的な強度増加が確認され、早強セメント単味の配合は細骨材の種類にかかわらず材齢 28 日から 91 日までの圧縮強度の増加が大きくなったが、高炉スラグ微粉末を用いた配合は材齢 7 日から 91 日までの強度増加が顕著に現れた。上記について CA<sub>2</sub> の有無による大きな影響は確認されなかった。

圧縮強度試験の結果に基づき、PC 部材の湿潤養生期間について検討を行った。前述の図-5.21 には、標準養生を行った試験体の材齢 28 日の圧縮強度に対する比率が 50%および 70%となる位置を破線で示している。50%はコンクリート標準示方書<sup>5.6)</sup>の「湿潤養生」の「湿潤養生期間の標準」を設定するために適用された値であり、70%は ACI 308R-01 Guide to Curing Concrete<sup>5.9)</sup>で圧縮強度を確保するために養生を継続することが望ましいとされている値である。また、「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針」<sup>5.7)</sup>では、標準養生を行った試験体の材齢 28 日の圧縮強度に対する比率が 50%程度に達する材齢を基準として標準養生期間の目安を定めている。上記を踏まえて、標準養生を行った試験体の材齢 28 日の圧縮強度に対する比率が 50%以上および 70%以上となるために必要な湿潤養生期間を表-5.7 に示す。

表-5.7 強度発現の観点から必要とされる湿潤養生期間

判断基準	H45		H45B650		H45BFS100	
	CA <sub>2</sub> /B					
	0%	6%	0%	6%	0%	6%
標準養生を行った試験体の材齢 28 日の圧縮強度に対する比率が <u>50%以上</u> となる湿潤養生期間	3 日	3 日	3 日	5 日	3 日	3 日
標準養生を行った試験体の材齢 28 日の圧縮強度に対する比率が <u>70%以上</u> となる湿潤養生期間	3 日	5 日	7 日	7 日	3 日	5 日

この結果、標準養生を行った試験体の材齢 28 日に対する比率が 50%以上となる湿潤養生期間は H45B650 CA<sub>2</sub>-6%は 5 日であり、その他の配合は 3 日であった。また、標準養生を行った試験体の材齢 28 日に対する比率が 70%以上となる湿潤養生期間について、H45 および H45BFS100 は 3 日、H45CA<sub>2</sub>-6%および H45BFS100CA<sub>2</sub>-6%は 5 日、H45B650 および H45B650 CA<sub>2</sub>-6%は 7 日となり CA<sub>2</sub> を混和した配合について圧縮強度に着目した場合は養生日数を長くすることが望ましいことが確認された。

次に、PCaPC 部材を想定し、蒸気養生を模擬した温度履歴を与えた W/B=35%の配合について検討を行った。試験体の養生条件を表-5.8 に示す。図-5.19 に示す温度履歴を与えた後

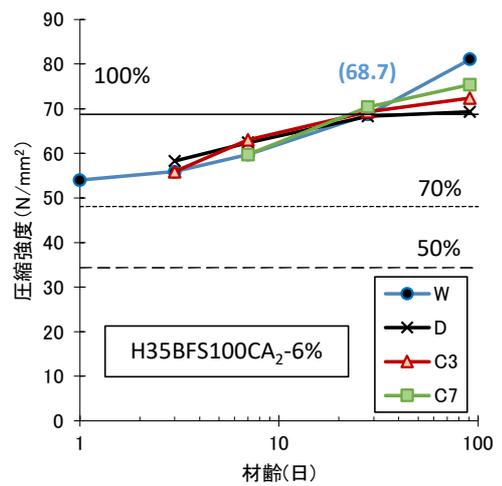
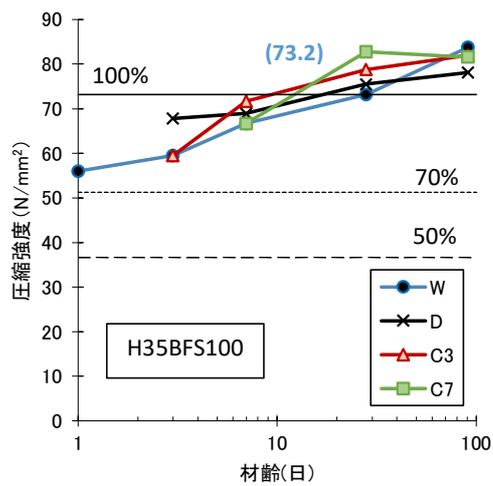
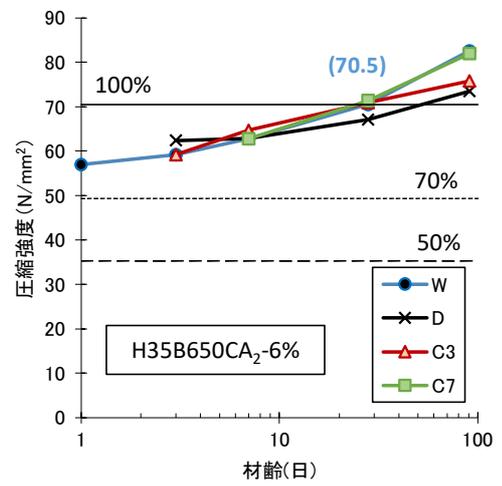
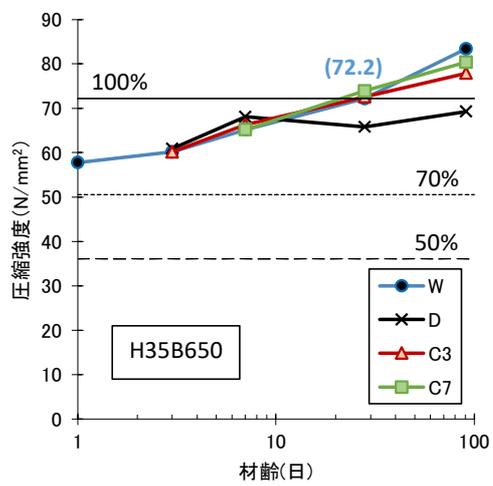
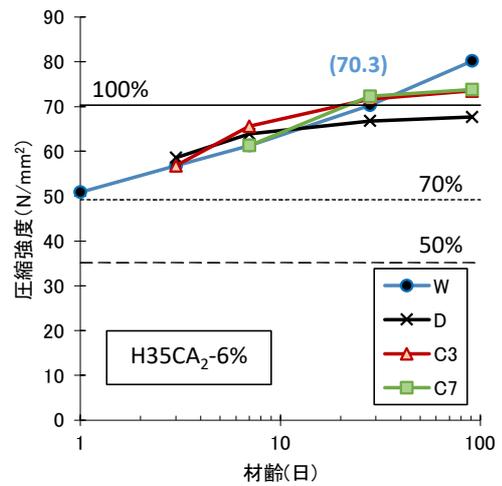
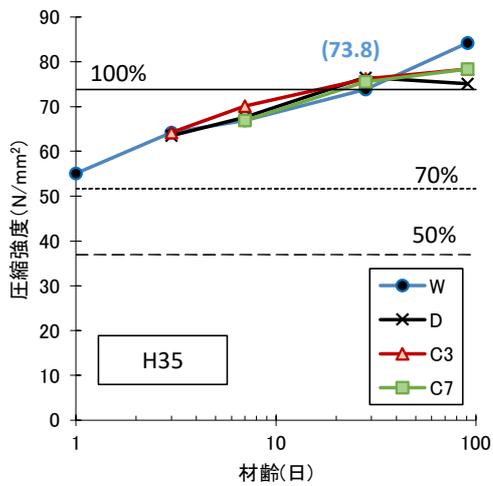
の養生条件として、標準養生 (W)、気中養生 (D)、湿潤養生 (C3, C7) とした。湿潤養生は、十分に湿らせた養生マットを用いて試験体を覆い、1日1回の頻度で散水して水分を供給した。湿潤養生期間については、3日 (C3)、7日 (C7) の2種類とした。圧縮強度については  $\phi 100 \times 200 \text{mm}$  を用いて、標準養生 (W) は材齢 1, 3, 7, 28, 91 日、気中養生 (D) と湿潤養生 3日 (C3) は材齢 3, 7, 28, 91 日、湿潤養生 7日 (C7) は材齢 7, 28, 91 日で測定を行った。

表-5.8 試験体の養生条件

養生条件	記号	養生方法
標準養生	W	コンクリート打込み後に図-5.19 に示す温度履歴を与え、材齢 1 日で脱枠し、水温 20°C の養生槽内で材齢 28 日まで水中養生した後に室温 20°C、湿度 60% の室内で試験時まで気中養生
気中養生	D	コンクリート打込み後に図-5.19 に示す温度履歴を与え、材齢 1 日で脱枠し、室温 20°C、湿度 60% の室内で試験時まで気中養生
湿潤養生	C3	コンクリート打込み後に図-5.19 に示す温度履歴を与え、材齢 1 日で脱枠し、材齢 3 日まで室温 20°C、湿度 60% の室内で湿潤養生した後、室温 20°C、湿度 60% の室内で試験時まで気中養生
	C7	コンクリート打込み後に図-5.19 に示す温度履歴を与え、材齢 1 日で脱枠し、材齢 7 日まで室温 20°C、湿度 60% の室内で湿潤養生した後、室温 20°C、湿度 60% の室内で試験時まで気中養生

湿潤養生日数を変化させた場合の圧縮強度の結果に基づき、蒸気養生を模擬した温度履歴を与えた PCaPC 部材を想定した湿潤養生期間について検討を行った。温度履歴を与えた試験体の養生種類ごとの材齢と圧縮強度の関係を図-5.22 に示す。高炉スラグ微粉末を用いた配合は、温度履歴を与えていない結果と異なり、早強セメント単味より材齢 1 日の初期強度が高くなり、材齢 28 日から 91 日までの強度増加は小さくなる傾向が確認された。高炉スラグ細骨材を用いた配合は、普通砕砂を用いた配合と近い傾向を示した。また、温度履歴を与えた場合においても  $\text{CA}_2$  の有無による影響は確認されなかった。

この結果、温度履歴を与えた後に標準養生を行った試験体の材齢 28 日に対する比率が 70% 以上となる湿潤養生期間はすべての配合において 3 日であった。温度履歴を与えた場合は、初期強度が改善され早強セメント単味より高炉スラグ微粉末を用いた方が、強度が改善され、湿潤養生日数が初期強度に与える影響は見られなかった。以下の章では、強度だけでなく湿潤養生日数が中性化や塩害などの耐久性に与える影響についても評価を行う。



※ ( ) 内の数字は標準養生を行った試験体の材齢 28 日の圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>) を示す。

図-5.22 温度履歴を与えた試験体の養生種類ごとの材齢と圧縮強度の関係

### 5.3.3 コンクリートの変形特性に及ぼす塩素固定化材の影響

#### (1) 自己収縮と乾燥収縮

図-5.23 に始発材齢から材齢 3 日までの短期の材齢と自己収縮およびコンクリート温度を示し、図-5.24 に始発材齢から材齢 1 年までの長期の材齢と自己収縮およびコンクリート温度を示す。自己収縮ひずみの測定は、W/B は 35%で  $CA_2$  の混和率は 0%と 6%の配合について測定を行った。

材齢 3 日までの短期の自己収縮について、H35 と H35BFS100 について、 $CA_2$  を混和することで自己収縮は大きくなる傾向が確認された。細骨材の違いについては、BFS を用いることで砕砂より自己収縮が小さくなる傾向が確認された。高炉スラグ微粉末を用いた H35B650 については、H35 および H35BFS100 の傾向とは異なり  $CA_2$  を混和した場合に材齢初期に膨張傾向を示すことが確認された。H35B650 の配合について、コンクリート配合から粗骨材を抜いたモルタル配合について自己収縮を測定した結果を図-5.25 に示す。モルタルについては、打込み直後からの変化を示すが、コンクリート試験と同様にモルタルについても材齢初期に膨張傾向を示すことが確認された。

材齢 1 年での自己収縮について、H35 と H35BFS100 について、 $CA_2$  を混和することで自己収縮は  $50 \times 10^{-6}$  程度大きくなる傾向が確認された。細骨材の違いについては、高炉スラグ細骨材を用いることで砕砂より自己収縮が小さくなる傾向が確認された。高炉スラグ微粉末を用いて配合について、材齢 1 年においても初期膨張の影響を受けており  $CA_2$  を混和することで自己収縮が小さくなる傾向が確認された。

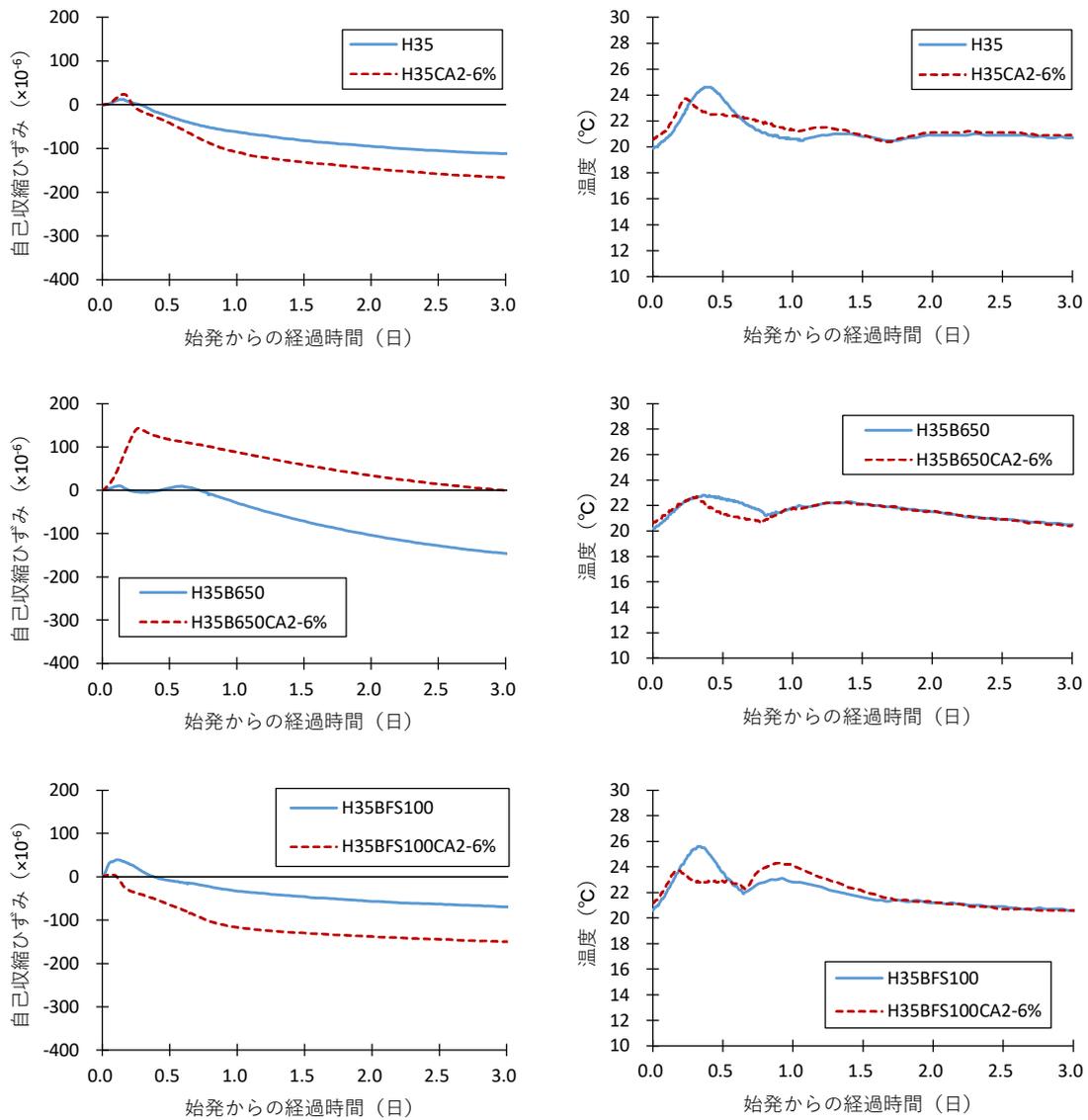


図-5.23 始発から材齢3日までの短期の自己収縮およびコンクリート温度

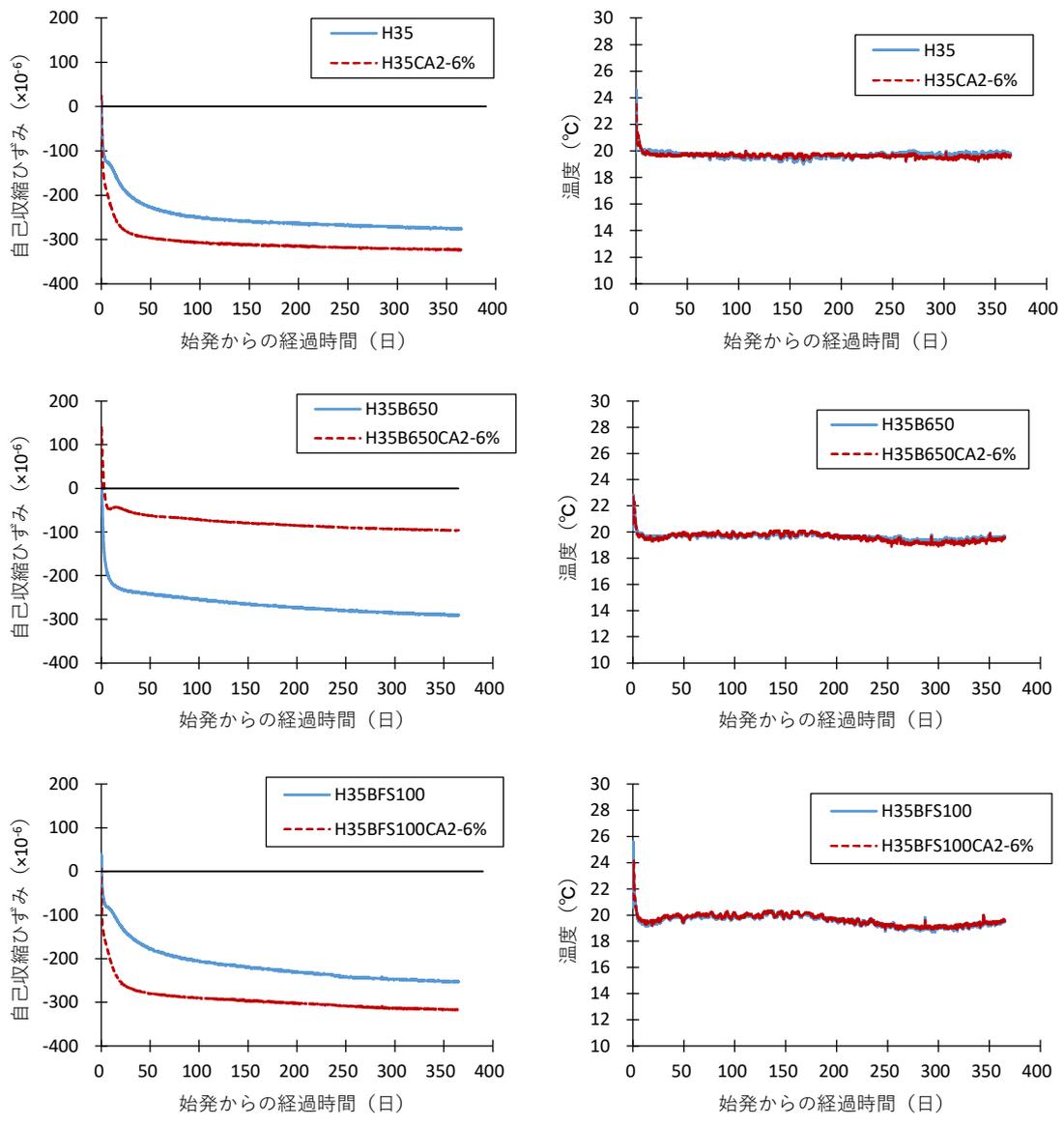


図-5.24 始発から材齢1年までの長期の自己収縮およびコンクリート温度

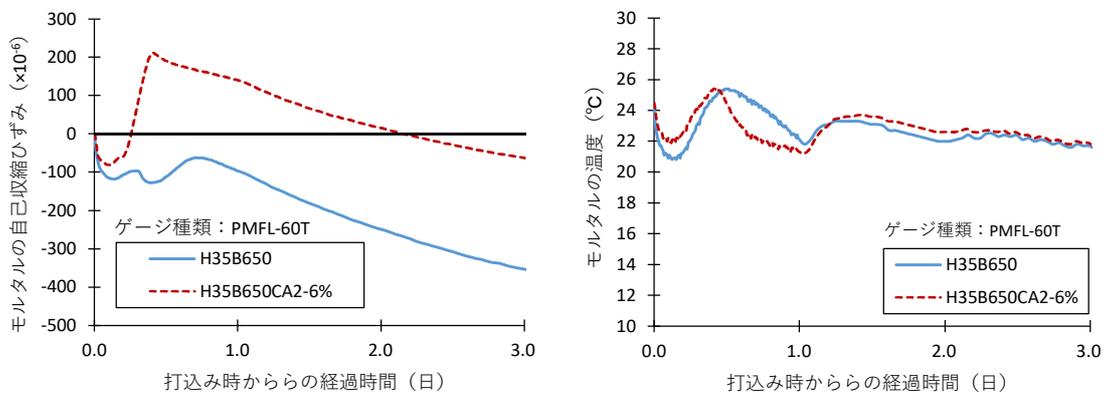


図-5.25 H35B650 のモルタル配合の自己収縮およびモルタル温度

高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートについて、CA<sub>2</sub>を混和していない配合については材齢初期から収縮傾向を示していたが、CA<sub>2</sub>を混和した配合については材齢初期に150×10<sup>-6</sup>程度の膨張傾向を示し、その後、収縮傾向を示すことが確認された。高炉スラグ微粉末について、初期強度を改善し、乾燥収縮を減じ、水和熱を抑制できるなどの理由で石こうを三酸化硫黄(SO<sub>3</sub>)で3%程度添加したものが一般的に使用されている。高炉スラグ微粉末に添加されて石こうとCA<sub>2</sub>が反応することで初期の膨張が生じていることが考えられたために、高炉スラグ微粉末の石こう有無、CA<sub>2</sub>の有無について自己収縮の違いについて検討を行った。配合表を表-5.9に示す。配合種類は、H35B650とH35B650CA<sub>2</sub>-6%の2種類について、高炉スラグ微粉末の石こう添加の有無による4配合とした。

表-5.9 石こう添加の有無による自己収縮比較用の配合表

配合番号	セメント種類	W/B (%)	CA <sub>2</sub> /B (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							
						W	C	GGBS	CA <sub>2</sub>	細骨材(S)	粗骨材(G)	SP	AE剤
H35B650(石こう無し)P	早強	35	0	4.5	42	165	236	236	0	703	978	2.59	3.77
H35B650(石こう有り)G	早強	35	0	4.5	42	165	236	236	0	703	978	3.06	4.24
H35B650CA <sub>2</sub> -6%(石こう無し)P	早強	35	6	4.5	42	165	222	222	28	703	978	3.06	4.24
H35B650CA <sub>2</sub> -6%(石こう有り)G	早強	35	6	4.5	42	165	222	222	28	703	978	3.30	4.71

高炉スラグ微粉末を用いた配合について、石こうの有無およびCA<sub>2</sub>の有無を組み合わせた配合について自己収縮および温度の測定を行った。石こうの有無による自己収縮の比較を図-5.26に示す。その結果、CA<sub>2</sub>無しの配合について、石こうを添加することで自己収縮を低減できる効果が確認された。CA<sub>2</sub>を混和した配合については、石こうを添加しないものはCA<sub>2</sub>を混和しないものと比較して同程度の自己収縮であることが確認された。石こうを添加した配合については、前回の試験と同様に初期に150×10<sup>-6</sup>程度の膨張を示すことが確認された。今回の試験の結果より、高炉スラグ微粉末に含まれる石こうとCA<sub>2</sub>が反応することでエトリンサイトなどが生成されて膨張傾向を示していると考えられる。

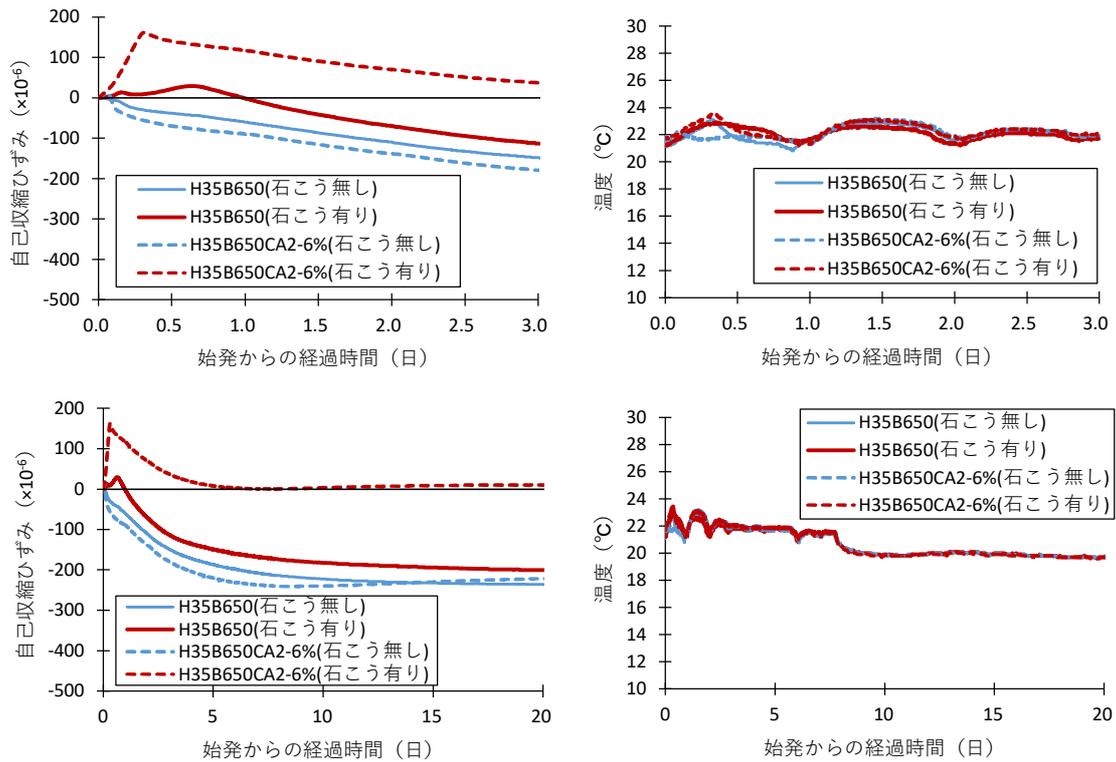


図-5.26 石こうの有無による自己収縮および温度の比較

次に、乾燥収縮は、JISA 1129-3 (ダイヤルゲージ法) に準拠し、 $\square 100 \times 100 \times 400 \text{mm}$  の鋼製型枠の両端部にプラグを取り付け、長さ変化率を測定する。試験体は、打込み後直ちに封かんし、恒温恒湿室 (温度  $20^\circ\text{C}$ 、湿度  $60\%$ ) で養生する。材齢 1 日で脱枠し、材齢 7 日まで  $20^\circ\text{C}$  一定の水中養生を行う。水中養生終了後に基長を測定し、その後、材齢 1,2,3,4,8,13,26,52 週で長さ測定を行った。乾燥収縮ひずみの測定は、W/B は  $35\%$  で  $\text{CA}_2$  の添加量は  $0\%$ 、 $4\%$ 、 $6\%$ 、 $8\%$  の配合について測定を行った。

図-5.27 に材齢と乾燥収縮による長さ変化率および質量変化率の関係を示す。長さ変化率について、H35B650 は塩素固定化材の混和率が大きくなるにつれて長さ変化率が大きくなる傾向が確認され、H35 および H35BFS100 については、材齢が長くなるにつれて塩素固定化材を混和した方が、長さ変化率は同等かもしくは小さくなる傾向が確認された。質量変化率については、いずれの結合材においても  $\text{CA}_2$  の混和率に応じて質量変化率も大きくなる傾向が確認された。

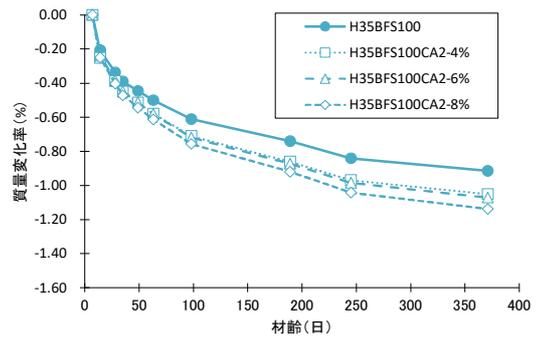
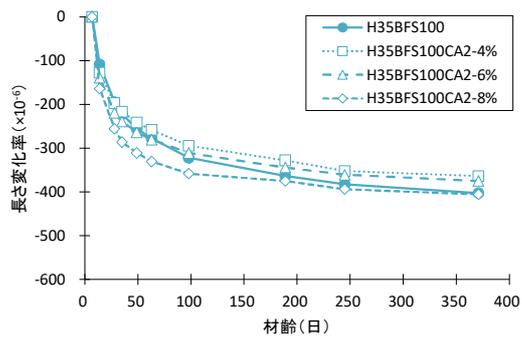
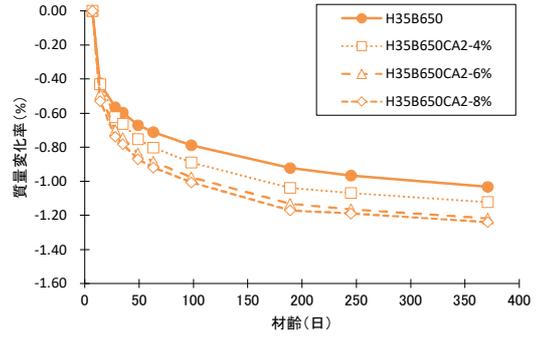
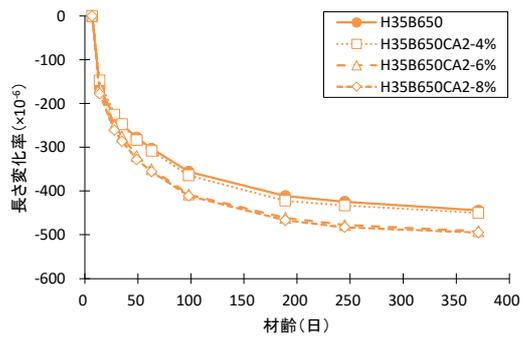
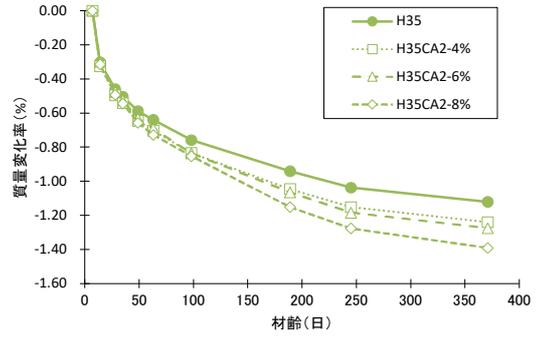
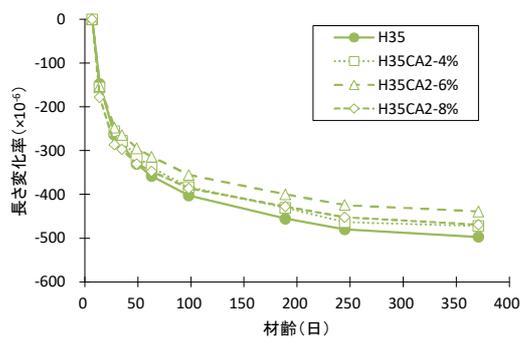


図-5.27 材齢と乾燥収縮による長さ変化率および質量変化率の関係

乾燥収縮ひずみの測定値を用いて、乾燥収縮ひずみの最終値の推定を行った。乾燥収縮ひずみの最終値は、コンクリート標準示方書【設計編】<sup>5.5)</sup>に示される式(5.1)および式(5.2)を用いて推定を行った。

$$\varepsilon'_{sh}(t,7) = \frac{\varepsilon'_{sh,inf} \cdot (t-7)}{\beta + (t-7)} \quad (5.1)$$

$$\beta = \frac{30}{\rho} \left( \frac{120}{-14 + 21C/W} - 0.70 \right) \quad (5.2)$$

ここに、 $\varepsilon_{sh}(t,t_0)$	: 乾燥収縮ひずみ
$\varepsilon_{sh,inf}(t,t_0)$	: 乾燥収縮ひずみの最終値
$t, t_0$	: コンクリートの材齢および乾燥開始材齢 (日) ( $t_0 \geq 3$ 日)
$\beta$	: 乾燥収縮ひずみの経時変化を表す係数
$C/W$	: セメント水比
$\rho$	: コンクリートの単位容積質量 ( $\text{g/cm}^3$ )

コンクリートの収縮は、乾燥収縮、自己収縮、炭酸化収縮を含み、構造物の周辺の温度・湿度、部材断面の形状・寸法、コンクリートの配合のほか、骨材の性質、セメントの種類、コンクリートの締固め、養生条件などの種々の要因によって影響を受ける。骨材の性質には地域特性が認められ大きな要因となることがあり、場合によっては材齢6ヶ月で $1000 \times 10^{-6}$ に達する大きな収縮を示すことがある。これに、材齢7日以前の自己収縮と材齢6ヶ月以降の収縮分 $200 \times 10^{-6}$ を見込んで、設計では収縮ひずみの最終値として $1200 \times 10^{-6}$ を想定されている<sup>5.10)</sup>。

材齢1年時の乾燥収縮ひずみの測定値から推定した乾燥収縮の最終予測値を図-5.28に示す。H35およびH35B650の最終予測値の推定値は $500 \times 10^{-6}$ 程度であり、H35BFS100については $400 \times 10^{-6}$ 程度で収縮抑制効果が確認された。それぞれの配合について、 $\text{CA}_2$ の混和率を変化させた場合の収縮量の変化量は10%以下であり、 $\text{CA}_2$ がコンクリートの収縮に与える影響は小さいことが確認された。

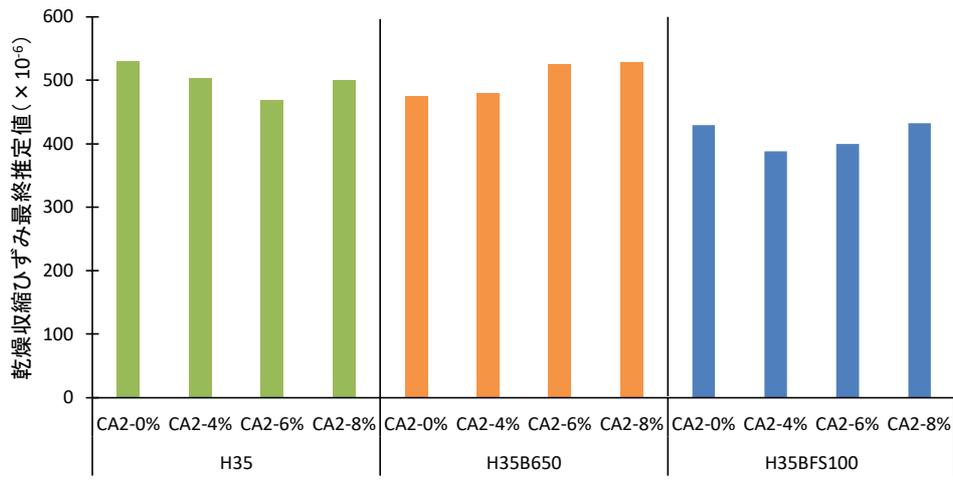


図-5.28 材齢1年時の乾燥収縮ひずみの測定値から推定した乾燥収縮の最終予測値

蒸気養生を模擬した温度履歴を与えた場合の自己収縮および乾燥収縮について検討を行った。図-3.4に示す最高温度 40℃または 60℃の温度履歴を与えた試験体の自己収縮の結果を図-5.29に示す。打ち込みから材齢 1 日までの短期の結果と材齢 210 日まで長期の結果を示す。材齢 3 日までの短期の自己収縮について、H35 と H35BFS100 について、20℃環境の試験体と同様に CA<sub>2</sub> を混和することで自己収縮は大きくなる傾向が確認された。細骨材の違いについては、高炉スラグ細骨材を用いることで普通砕砂より自己収縮が小さくなる傾向が確認された。高炉スラグ微粉末を用いた H35B650 については、20℃環境の場合は材齢初期で  $150 \times 10^{-6}$  程度の膨張傾向が確認されたが、蒸気養生を行った場合は初期の膨張は確認されなかったがその後の収縮は H35 および H35BFS100 の傾向とは異なり CA<sub>2</sub> を混和した自己収縮が小さくなる傾向を示した。

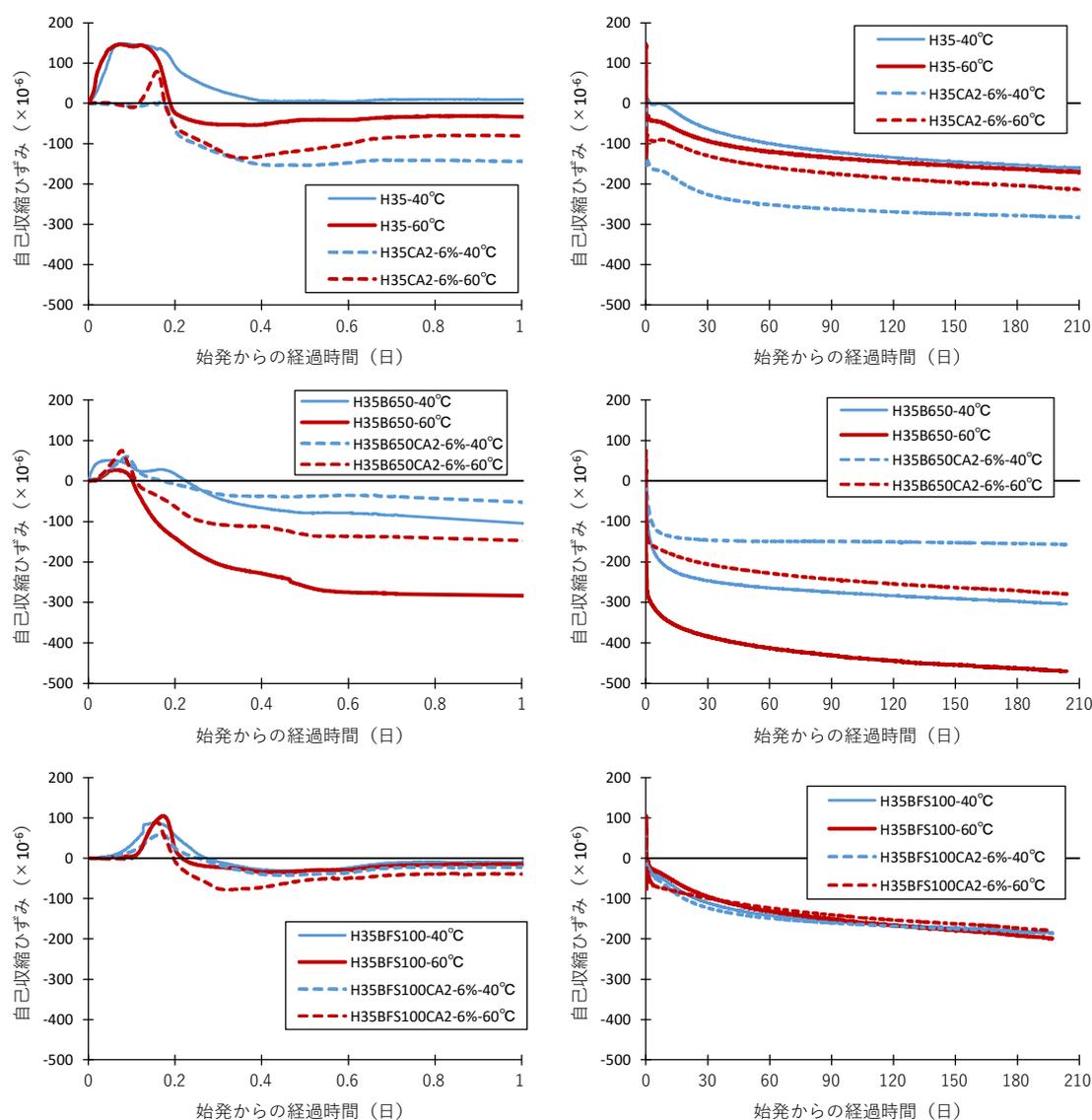


図-5.29 温度履歴を受けた場合の自己収縮

図-3.4 に示す最高温度 40℃または 60℃の温度履歴を与えた試験体の乾燥収縮の結果を図-5.30 に示し、質量変化率の結果を図-5.31 に示す。材齢 1 日後の脱枠直後に基長を行った結果を示す。長さ変化率について、H35 については CA<sub>2</sub> を混和したものが収縮は小さくなる傾向が確認された。H35B650 および H35BFS100 については、CA<sub>2</sub> を混和したものが収縮は大きくなる傾向が確認された。蒸気養生の温度による影響については、早強セメント単味および H35BFS100 については 60℃で養生したものが収縮は大きくなる傾向を示しており、高炉スラグ微粉末については 40℃で養生したものが収縮は大きくなる傾向が確認された。H35B650 については質量変化率についても同様の傾向を示しており、材齢初期で急激に質量が減少し、その後は緩やかな減少傾向を示しており、蒸気養生後の初期養生の重要性が示唆された。

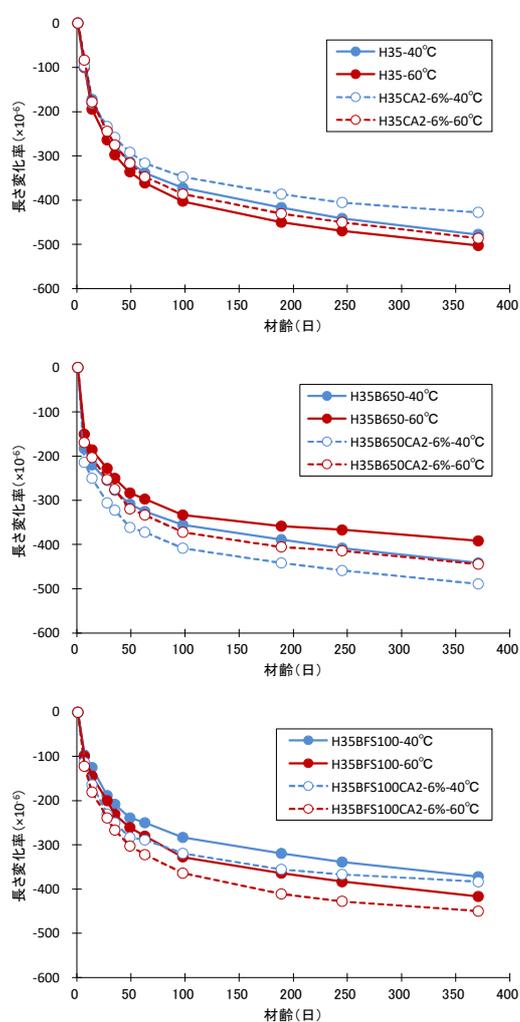


図-5.30 材齢と長さ変化率の関係

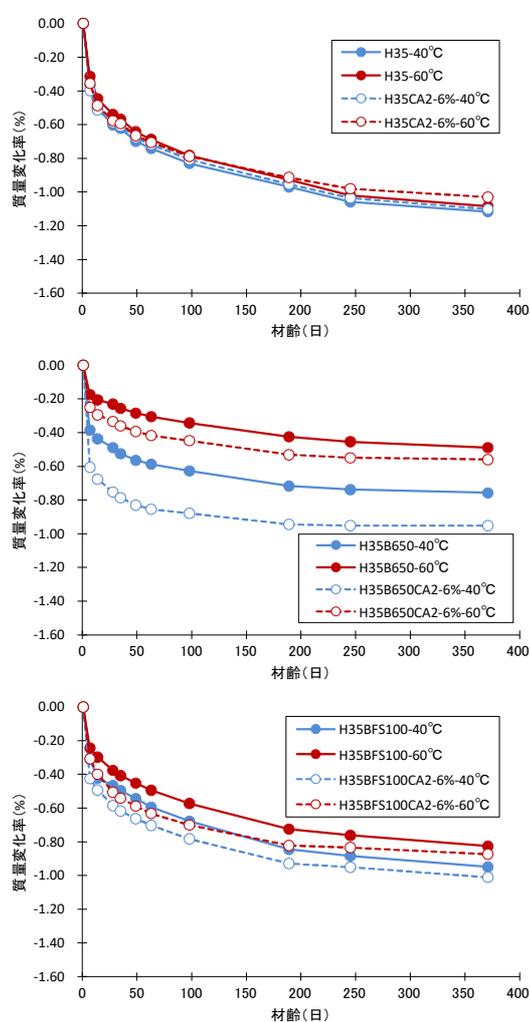


図-5.31 材齢と質量変化率の関係

## (2) ヤング係数

塩素固定化材の有無 ( $CA_2/B=6\%$ ) および水粉体比ごとの材齢とヤング係数の関係を図-5.32に示し、 $CA_2$ の混和率ごと ( $CA_2/B=0,4,6,8\%$ ) の材齢とヤング係数の関係を図-5.33に示す。材齢と圧縮強度の関係について、圧縮強度の結果と同様にヤング係数についても  $CA_2$ を混和することで数%減少する傾向が確認された。また、 $CA_2$ の混和率を変化させた場合においても  $CA_2$ の混和率に応じてヤング係数の低下が確認された。ヤング係数が減少する傾向についても、圧縮強度と同様に  $CA_2$ を結合材の外割りで混和することで改善されると考えられる。

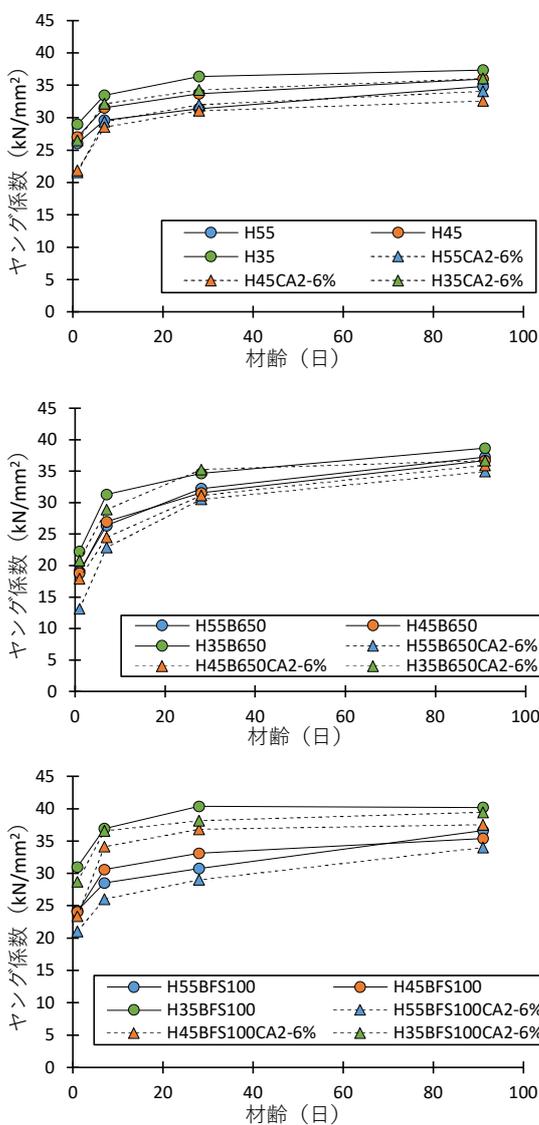


図-5.32 材齢とヤング係数の関係

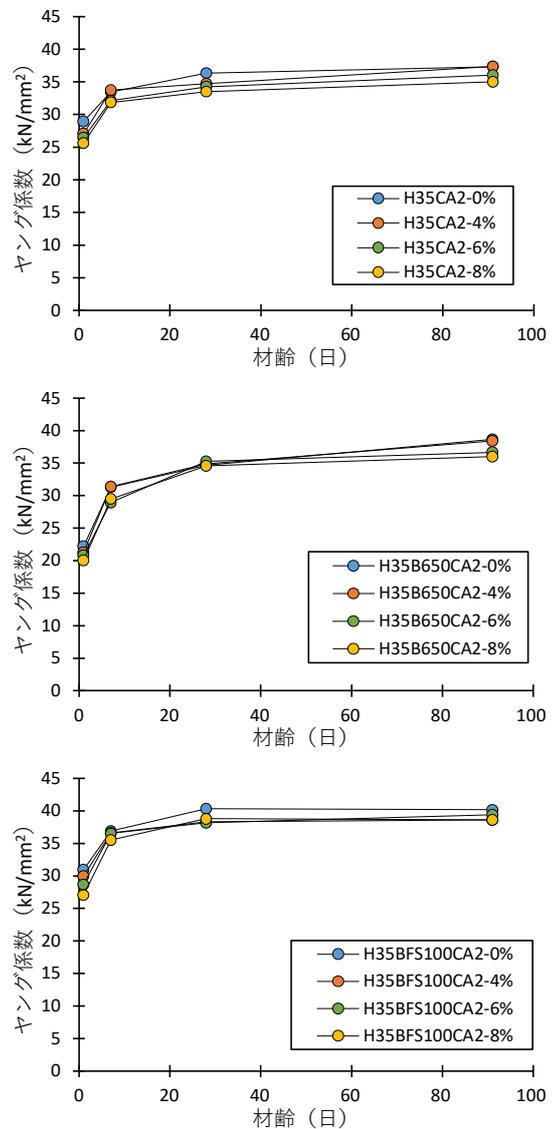


図-5.33  $CA_2$ の混和率ごとの  
材齢とヤング係数の関係

圧縮強度とヤング係数の関係を図-5.34 に示す。同図にコンクリート標準示方書<sup>5.5)</sup>に示される圧縮強度とヤング係数の計算値の結果を実線で示す。既往の研究で示されている通り、H35BFS100 は H35 や H35B650 と比較して圧縮強度に対するヤング係数が大きくなる傾向が確認された。また、CA<sub>2</sub>の有無によるヤング係数の違いについては、配合種類にかかわらず CA<sub>2</sub>の有無による影響は少ないことが確認された。

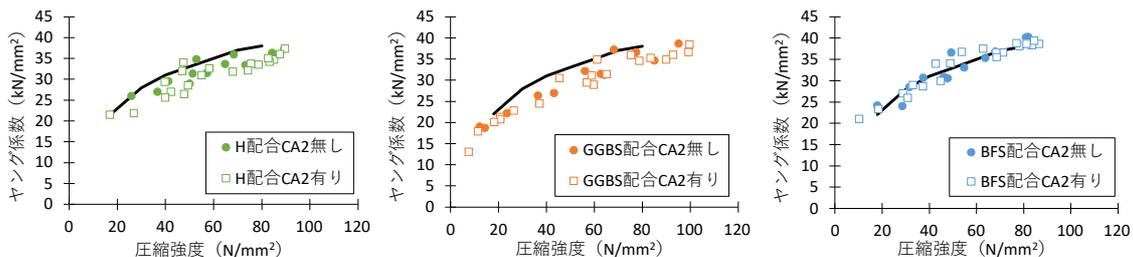


図-5.34 圧縮強度とヤング係数の関係

### (3) クリープ係数

クリープひずみの測定状況を図-5.35 に示し、図-5.36 に載荷材齢とクリープ試験の結果を示す。同図に式(5.3)から求めたクリープ係数の回帰式を示す。結合材種類や細骨材種類を変化させた配合について CA<sub>2</sub>の有無によるクリープ係数の違いは確認されなかった。結合材種類の影響についてクリープ速度係数が H35 および H35BFS100 が 0.18 を示したが H35B650 については 0.16 を示しており小さくなる傾向を示した。既往の研究<sup>5.11)</sup>においても高炉スラグ微粉末を用いた配合についてはクリープ係数が小さくなることが確認されており、本試験においても同様の傾向が確認された。



図-5.35 クリープひずみの測定状況

$$\phi(t) = A \cdot \log_e(t+1) \quad (5.3)$$

ここに、 $\phi(t)$  : 載荷期間  $t$  (日) におけるクリープ係数  
 $A$  : クリープ速度係数  
 $t$  : 載荷材齢 (日)

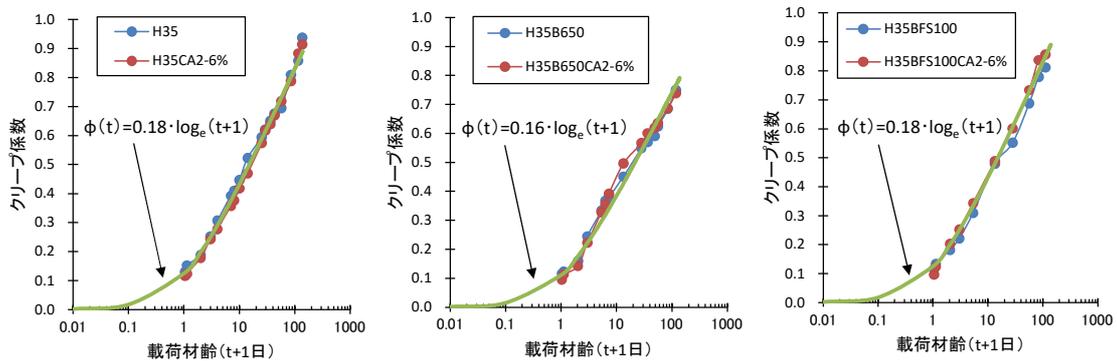


図-5.36 載荷材齢とクリープ係数の関係

### 5.3.4 コンクリートの耐久性に及ぼす塩素固定化材の影響

#### (1) コンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性

##### a) 塩化物イオンの見掛け拡散係数

事前に塩分浸透深さを確認するために、硝酸銀溶液の噴霧によって現れる変色境界を目視で測定を行った結果を図-5.37に示す。W/Bは35%で、CA<sub>2</sub>の混和率は0, 4, 6, 8%で材齢28日まで標準養生を行った後に塩水浸せきを行った結果を示す。配合種類について、H35 > H35BFS100 > H35B650の順序で塩化物イオンの浸透深さが小さくなる傾向が確認された。また、CA<sub>2</sub>の混和率による影響は、配合種類にかかわらずCA<sub>2</sub>の混和率が大きくなるにつれて塩化物イオン浸透深さが小さくなる傾向が確認された。

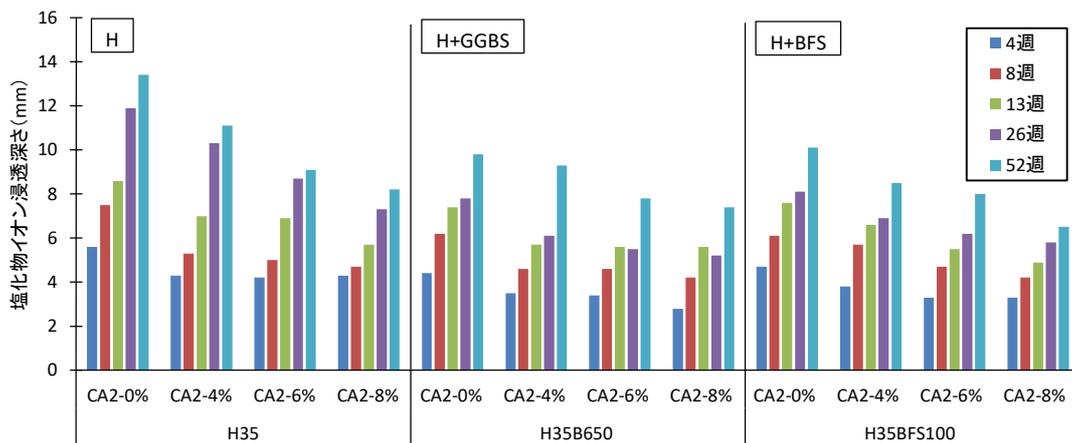


図-5.37 塩化物イオンの浸透深さ

10%のNaCl溶液に1年間浸せきを行った試験体について、W/Bは35%で、CA<sub>2</sub>の混和率は0, 4, 6, 8%で標準養生を行ったEPMA法による面分析から得られた塩素のマッピング画像を図-5.38に示す。試料深さと塩化物イオン濃度の関係を図-5.39に示し式(3.2)を用

いて算出した見かけの拡散係数を図-5.40に示す。塩素のマッピング画像および試料深さと塩化物イオン濃度の関係から、配合種類にかかわらず  $CA_2$  の混和率の増加に応じて表面の塩化物イオン濃度が高くなり、塩化物イオンの浸透深さは小さくなる傾向が確認された。配合種類の違いについては  $H35 > H35BFS100 > H35B650$  の順で塩化物イオン浸透深さが小さくなる傾向が確認された。測定値から算出した見かけの拡散係数についても同様の傾向が確認された。さらに、図-5.37に示す硝酸銀噴霧法で測定した塩化物イオンの浸透深さと見かけの拡散係数についても同様の傾向が確認された。

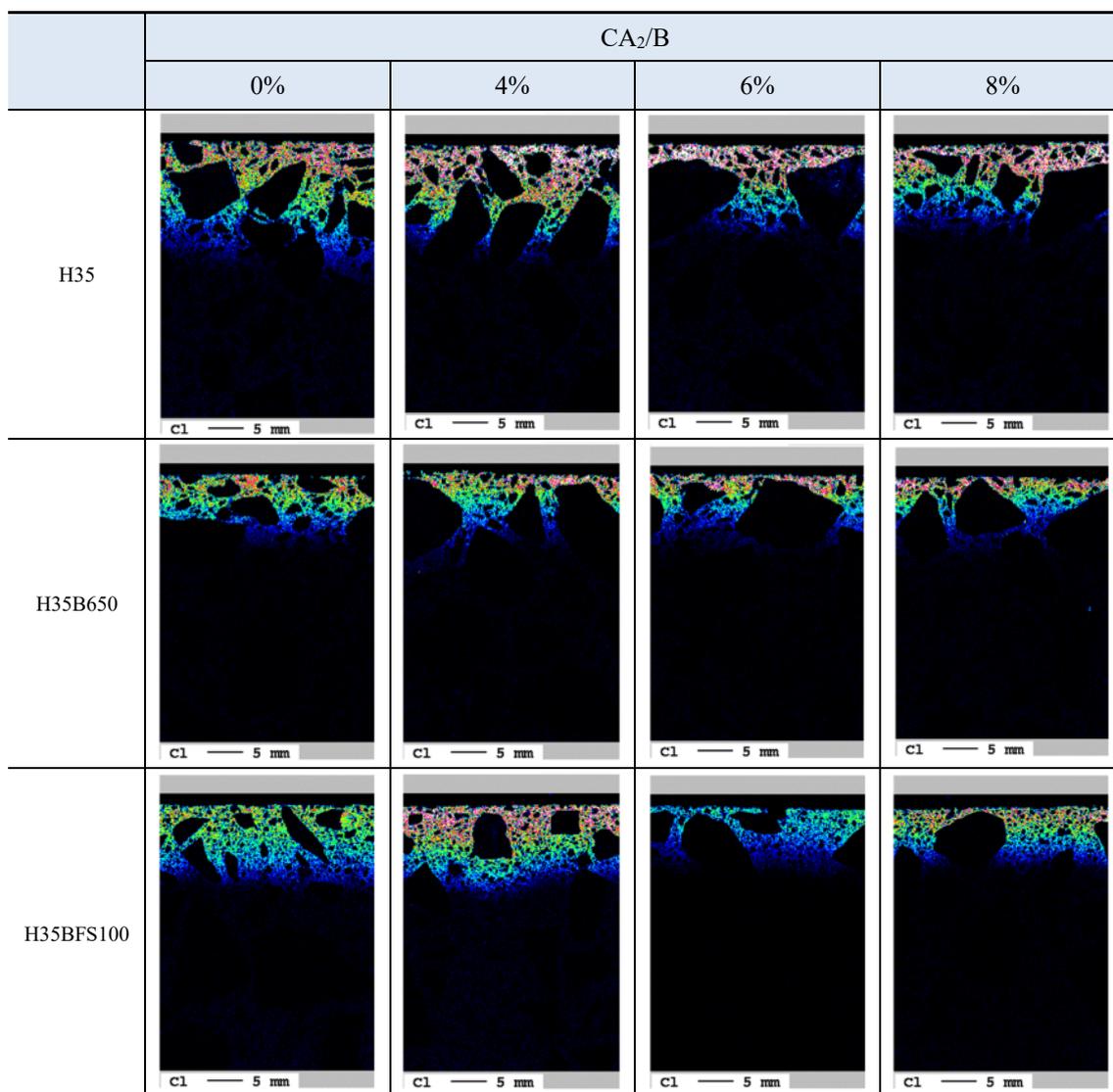


図-5.38 標準養生を行った試験体の塩素のマッピング画像

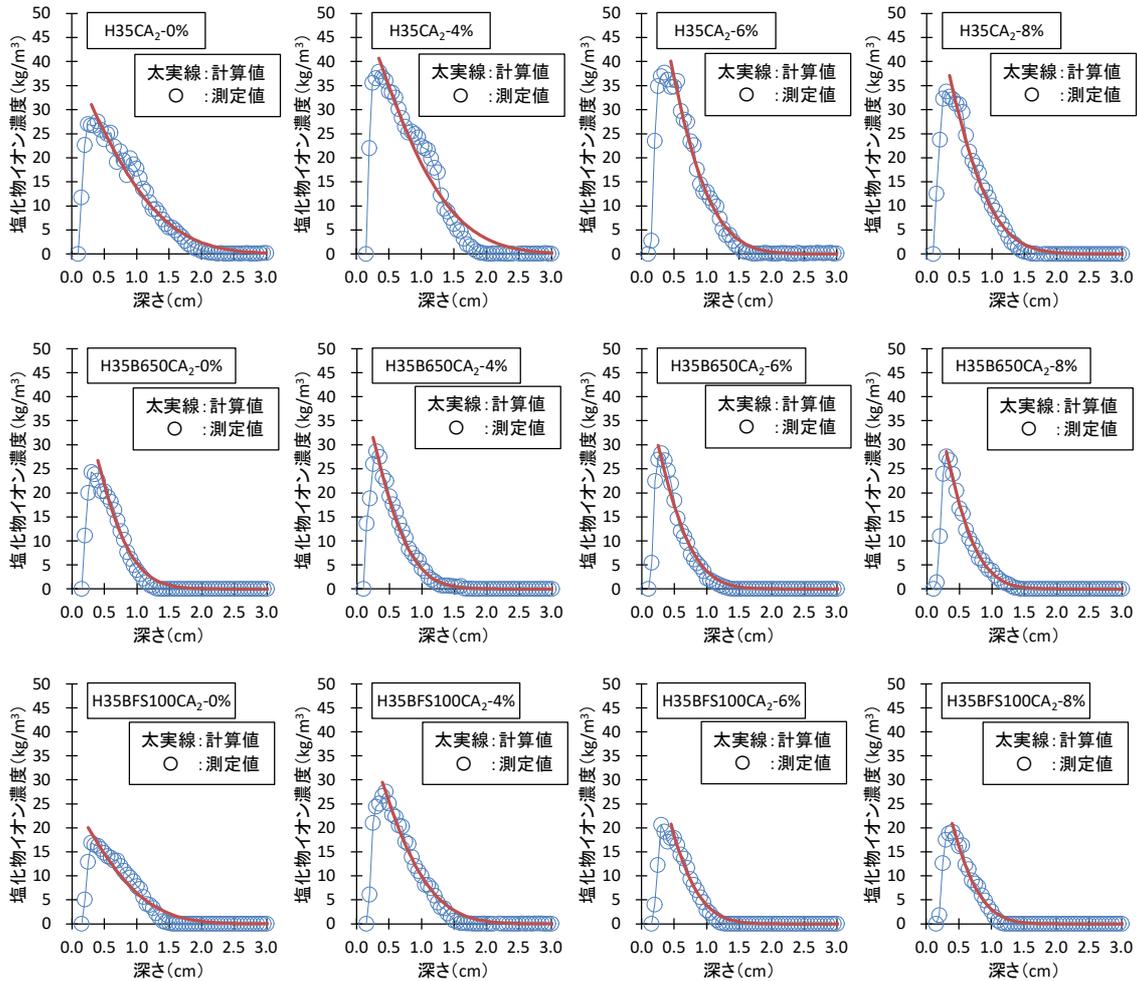


図-5.39 標準養生を行った試験体の試料深さと塩化物イオン濃度の関係

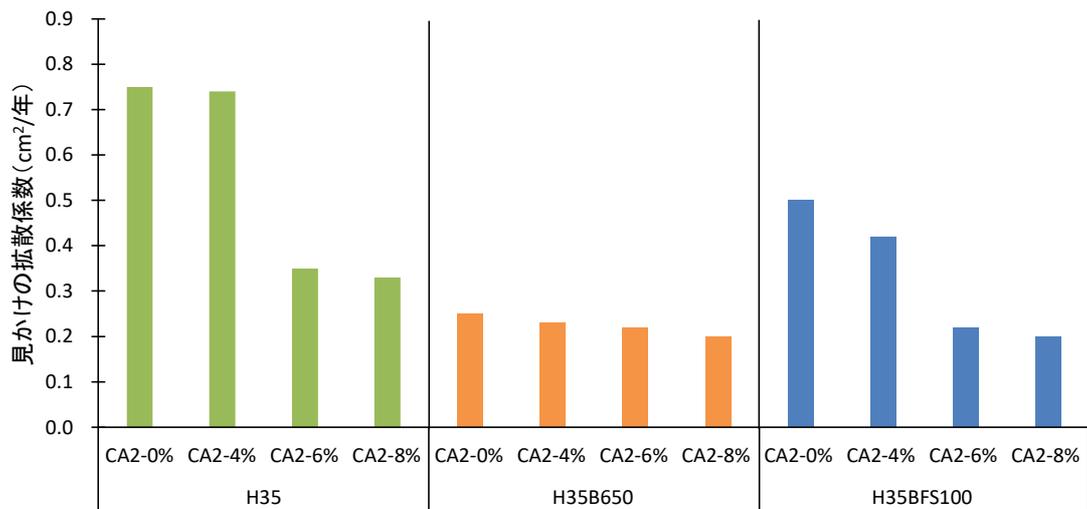


図-5.40 CA<sub>2</sub>混和率ごとの見かけの拡散係数

本試験で得られた見かけの拡散係数について、2012年制定コンクリート標準示方書【設計編】<sup>5.12)</sup>に示される見かけの拡散係数の計算値との比較を行った。普通ポルトランドセメントを使用する場合の見かけの拡散係数の計算式を式(5.4)、高炉セメントB種相当、シリカフュームを使用する場合の見かけの拡散係数の計算式を式(5.5)に示す。早強ポルトランドセメント<sup>5.13)</sup>のコンクリート試験体の暴露試験結果から得られた式(5.6)を示す。

普通ポルトランドセメントを使用する場合

$$\log_{10}D_k=3.0(W/B)-1.8 \quad (0.3\leq W/B\leq 0.55) \quad (5.4)$$

高炉セメントB種相当、シリカフュームを使用する場合

$$\log_{10}D_k=3.2(W/B)-2.4 \quad (0.3\leq W/B\leq 0.55) \quad (5.5)$$

早強ポルトランドセメントを使用する場合

$$D_k=15.768 \cdot e^{-1.6(B/W)} \quad (5.6)$$

ここに、 $D_k$  : コンクリートの塩化物イオンの見かけの拡散係数 (cm<sup>2</sup>/年)

$W/B$  : 水結合材比

見かけの拡散係数の実測値と計算値の比較を図-5.41に示す。H35は式(5.6)の計算値を示し、H35B650は式(5.5)の計算値と比較として示す。実測値と計算値についてセメント単味の結果と混和材を使用することで見かけの拡散係数が低下する傾向については実測値と計算値で同様の傾向が確認された。式(5.4)および式(5.5)を算出した際の見かけの拡散係数と水粉体比の関係を図-5.42に示す<sup>5.14)</sup>。赤の破線で水粉体比35%の位置を示すが、バラツキのあるデータから回帰された計算式であり、本試験の実験値についてもバラツキの範囲内には収まっていることが確認できる。

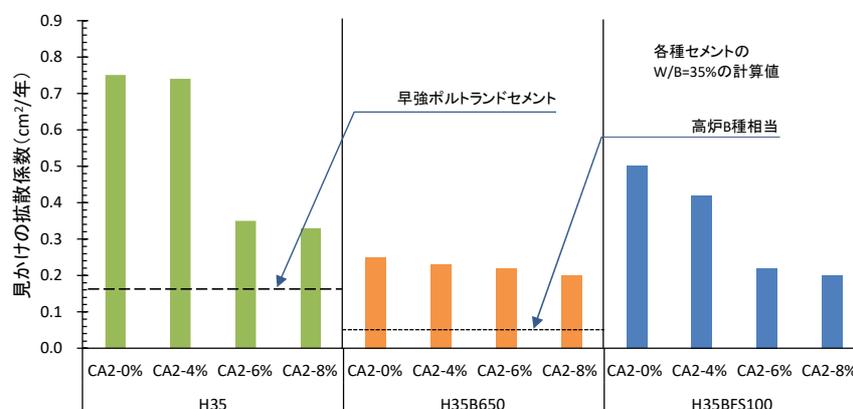


図-5.41 見かけの拡散係数の実測値と計算値の比較

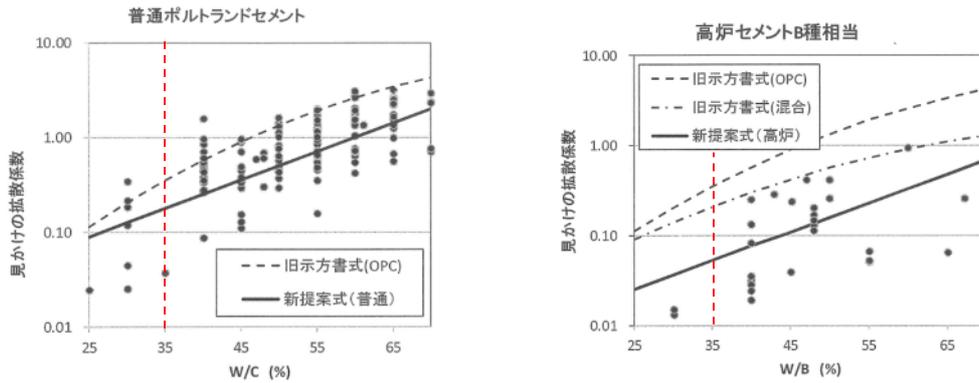


図-5.42 見かけの拡散係数と水粉体比の関係<sup>5.14)</sup>

次に、10%のNaCl溶液に1年間浸せきを行った試験体について、W/Bは35%で、 $CA_2$ の混和率は0%および6%で図-3.4に示す温度履歴を与えたEPMA法による面分析から得られた塩素のマッピング画像を図-5.43に示す。温度履歴を与えた試料深さと塩化物イオン濃度の関係を図-5.44に示し、式(3.2)を用いて算出した見かけの拡散係数を図-5.45に示す。塩素のマッピング画像および試料深さと塩化物イオン濃度の関係から、H35およびH35BFS100については養生温度が高くなると見かけの拡散係数が大きくなる傾向が確認された。H35B650については、養生温度の違いによる影響は確認されなかった。

CA <sub>2</sub> /B	0%			6%		
	20℃	40℃	60℃	20℃	40℃	60℃
H35						
H35B650						
H35BFS100						

図-5.43 温度履歴を与えた試験体の塩素のマッピング画像

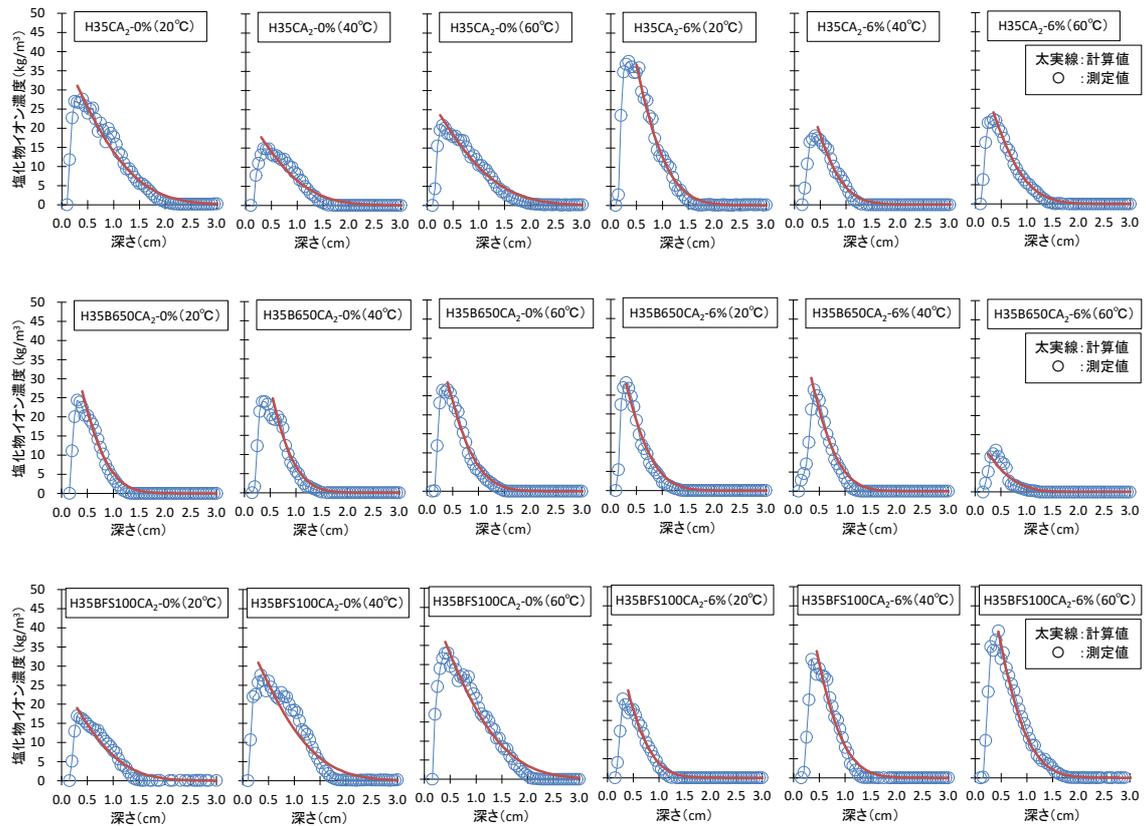


図-5.44 温度履歴を与えた試験体の試料深さと塩化物イオン濃度の関係

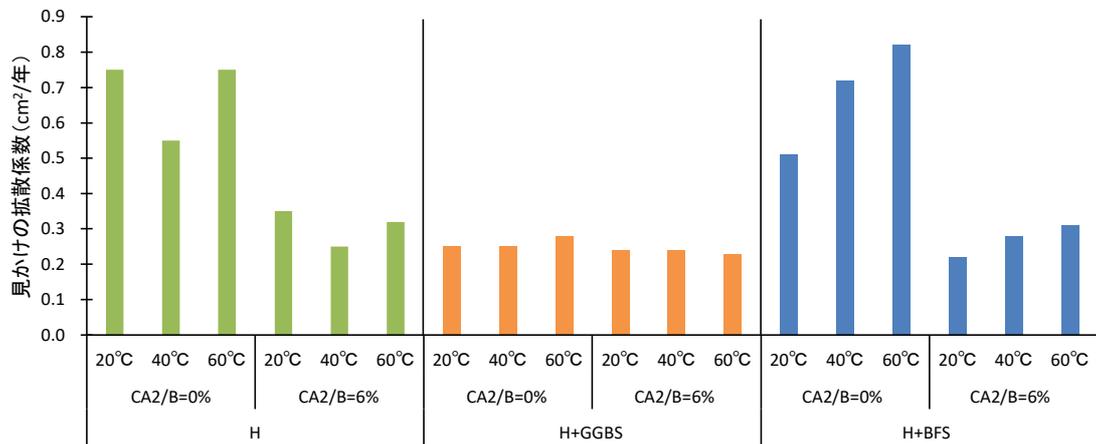


図-5.45 温度履歴を与えた試験体の見かけの拡散係数

ペースト、モルタルおよびコンクリートで測定した W/B=35%で、CA<sub>2</sub>/B=0%および6%の養生温度ごとの見かけの拡散係数の比較を図-5.46に示す。ペーストおよびモルタルについては塩水浸せき期間が9ヶ月、コンクリートは1年の結果を示す。配合種類の違いについては、H35およびH35BFS100は近い傾向を示しており、H35よりH35BFS100の方が見かけの拡散係数は小さくなっており、CA<sub>2</sub>を混和することで見かけの拡散係数が1/2程度に低減される傾向が確認された。一方、H35B650についてはCA<sub>2</sub>の混和により見かけの拡散係数の低減効果は確認されたが、高炉スラグ微粉末自体の塩化物イオン浸透抑制効果が高いためCA<sub>2</sub>による効果は数%程度であった。養生温度による影響については、H35およびH35BFS100については、養生温度を高くすることで見かけの拡散係数が大きくなる傾向を示したが、H35B650については養生温度の影響が少なく、むしろ養生温度を高くした場合の方が見かけの拡散係数が小さくなる傾向が確認された。ペースト、モルタルおよびコンクリートの見かけの拡散係数について比較を行ったところ、塩水浸せき日数が異なるため絶対値については違いが見られたが、CA<sub>2</sub>の混和による影響や養生温度の影響については相関性が確認された。

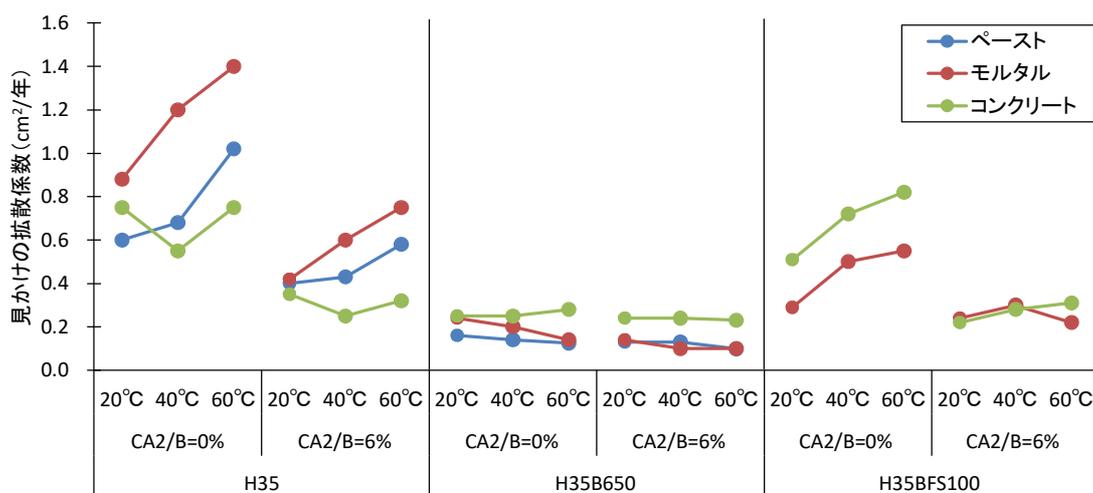


図-5.46 ペーストとモルタルとコンクリートの見かけの拡散係数の比較

## b) 塩化物イオンの実効拡散係数

塩水浸せきによる見かけの拡散係数の評価よりも迅速に判定が可能である電気泳動法を用いて  $CA_2$  の塩化物イオン浸透抵抗性について評価を行った。電気泳動試験は、JSCE G 571-2013『電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法』に準拠して行った。試験体形状は  $\phi 100 \times 50\text{mm}$  ( $\phi 100 \times 200\text{mm}$  試験体から切断する) とし、材齢 1 日で脱枠し材齢 28 日まで  $20^\circ\text{C}$  一定の水中養生を行った後に電気泳動試験を実施する。電気泳動試験の概要図を図-5.47 に示す。W/B=35% で  $CA_2/B=0, 4, 6, 8\%$  の配合について測定を行った。

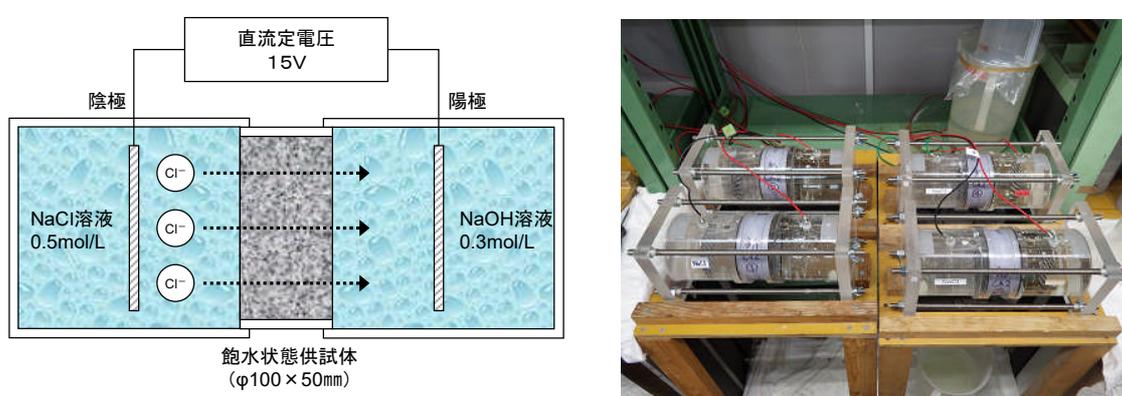


図-5.47 電気泳動試験の概要図

図-5.48 に通電時間と電流値、電圧値、抵抗値の関係を示す。混和材を使用せずに水粉体比だけを変化させ電気泳動試験を行った場合は、水粉体比が小さく塩化物イオン浸透抵抗性が大きい配合の方がコンクリートの抵抗値も大きくなるため電流値は小さくなる傾向を示す。今回、検討を行った配合については、通電初期においては塩素固定化の混和率が大きくなるにつれて電流値が大きくなる傾向が確認された。しかしながら、通電時間が 10 日当たりから傾向が逆転し塩素固定化材を混和したものの電流値が小さくなる傾向が確認された。電流値および電圧値は試験体表面間の測定値を示しており、電流値および電圧値の測定結果から算出した抵抗値について、 $H < H+BFS < H+GGBS$  の順序で大きくなっており、さらに  $CA_2$  の混和率に応じて抵抗値も大きくなる傾向が確認された。物理的に測定したコンクリートの抵抗値についても  $CA_2$  を混和することで大きくなることを示しており、コンクリートの組織が緻密化していることが示唆された。

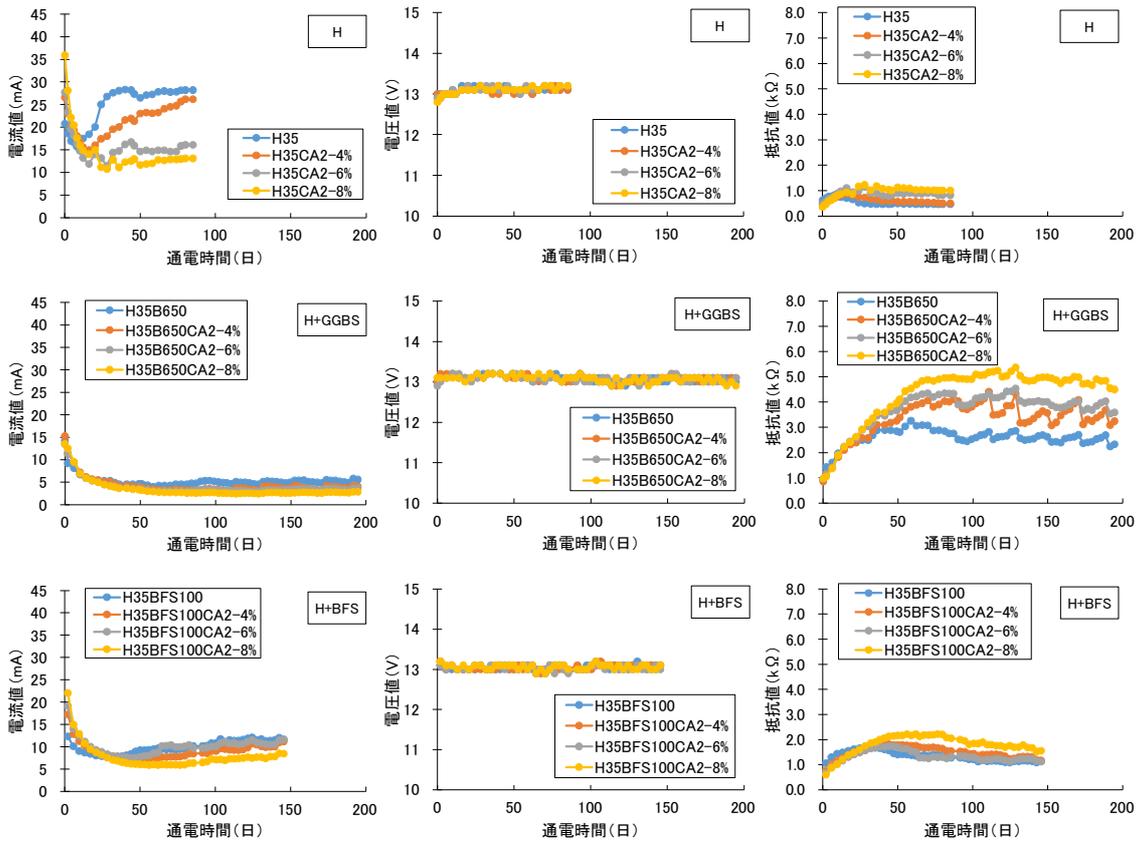


図-5.48 試験体間の電流値・電圧値から算出した抵抗値

図-5.49 に通電時間と陰極側の塩化物イオン量の減少量の関係を示し、図-5.50 に通電時間と陽極側の塩化物イオンの増加量の関係を示す。陰極側からコンクリート中に浸透する塩化物イオン量は、 $CA_2$  の混和率が増加するにつれて H については若干大きくなる傾向が確認されたが H+GGBS および H+BFS については大きな違いは確認されなかった。また、陽極側の塩化物イオンの増加量は、配合種類にかかわらず  $CA_2$  の混和率が増加するにつれて、塩化物イオンの増加量が小さくなる傾向が確認された。この現象について、 $CA_2$  を混和することで物理的な緻密化の効果と化学的な塩化物イオンの固定化の両方の影響で塩化物イオンの移動量に違いが生じたものと考えられる。

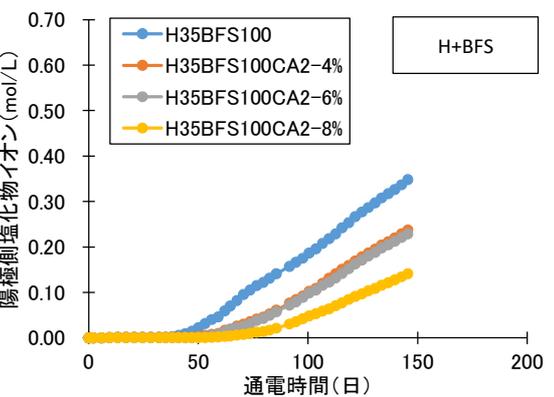
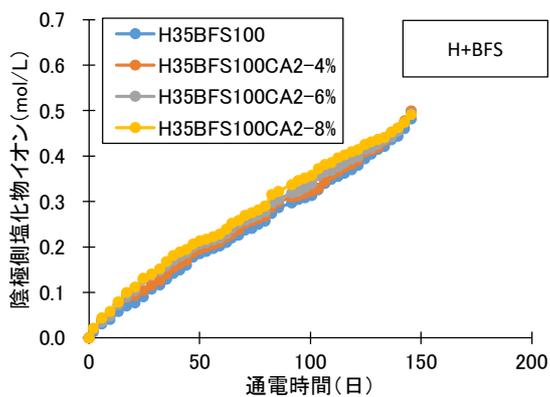
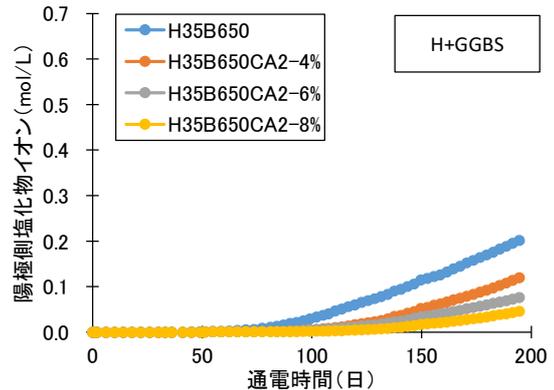
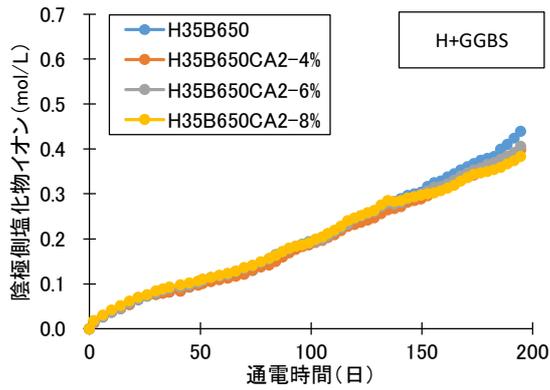
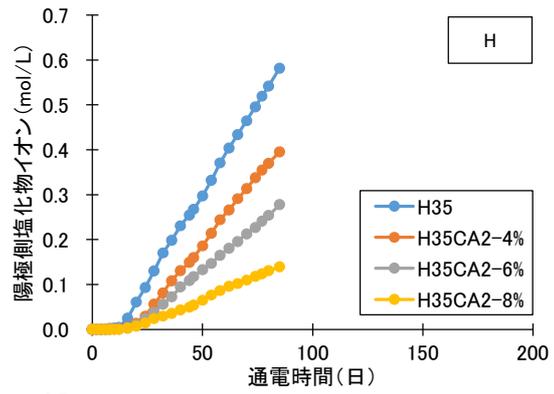
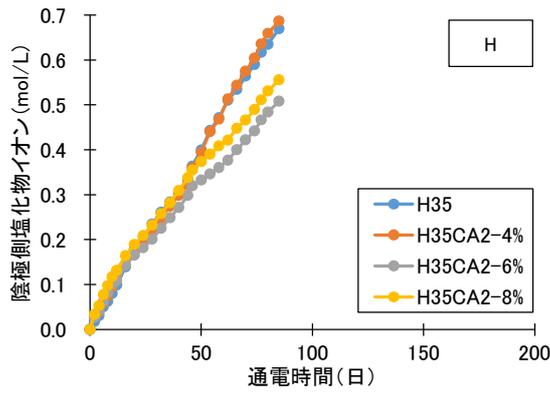


図-5.49 陰極側の塩化物イオン減少量

図-5.50 陽極側の塩化物イオンの増加量

定常状態における塩化物イオンの流束は式(5.7)により算出し、コンクリートの塩化物イオンの実効拡散係数は式(5.8)により算出した。陽極側の定常状態における塩化物イオン濃度の増加割合の結果を図-5.51に示し、束流の計算結果を表-5.10に示し、実効拡散係数の計算結果を表-5.11および図-5.52に示す。

$$J_{Cl(t)} = \frac{V_{(t)}^{\text{II}}}{A} \cdot \frac{\Delta c_{Cl(t)}^{\text{II}}}{\Delta t} \quad (5.7)$$

ここに、 $J_{Cl(t)}$  : 塩化物イオンの各測定間における流束(mol/(cm<sup>2</sup>/年))

$V_{(t)}^{\text{II}}$  : 塩化物イオン濃度測定時の陽極側の液体体積(L)

$A$  : 試験体断面積(cm<sup>2</sup>)

$\Delta c_{Cl(t)}^{\text{II}} / \Delta t$  : 各測定間における陽極側塩化物イオン濃度の増加割合((mol/L)/年)

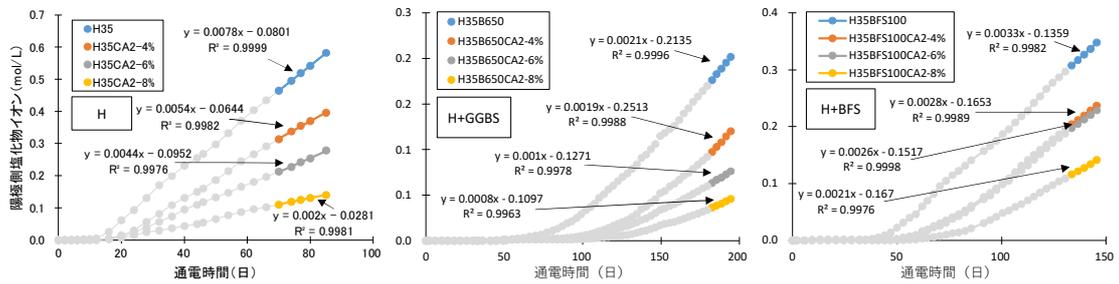


図-5.51 陽極側の定常状態における塩化物イオン濃度の増加割合

表-5.10 東流の計算結果

配合番号	$V_{(t)}^{\text{II}}$	$A$	$\Delta c_{Cl(t)}^{\text{II}} / \Delta t$	$J_{Cl(t)}$
H35	0.981	78.72	2.85	0.0355
H35CA <sub>2</sub> -4%	0.977	79.10	1.97	0.0243
H35CA <sub>2</sub> -6%	0.971	78.95	1.61	0.0198
H35CA <sub>2</sub> -8%	0.972	78.78	0.73	0.0090
H35B650	0.976	79.08	0.77	0.0095
H35B650CA <sub>2</sub> -4%	0.974	79.30	0.69	0.0085
H35B650CA <sub>2</sub> -6%	0.98	79.13	0.37	0.0045
H35B650CA <sub>2</sub> -8%	0.979	79.17	0.29	0.0036
H35BFS100	0.976	78.89	1.20	0.0149
H35BFS100CA <sub>2</sub> -4%	0.979	78.89	1.02	0.0127
H35BFS100CA <sub>2</sub> -6%	0.981	78.67	0.95	0.0118
H35BFS100CA <sub>2</sub> -8%	0.979	78.83	0.77	0.0095

$$D_e = \frac{J_{Cl}RTL}{|Z_{Cl}|FC_{Cl}(\Delta E - \Delta E_c)} \times 100 \quad (5.8)$$

- ここに、 $D_e$  : 実効拡散係数( $\text{cm}^2/\text{年}$ )  
 $R$  : 気体定数( $8.31\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ )  
 $T$  : 絶対温度測定値(K)  
 $Z_{Cl}$  : 塩化物イオンの電荷(=-1)  
 $F$  : ファラデー定数( $96,500\text{C}/\text{mol}$ )  
 $C_{Cl}$  : 陰極側の塩化物イオン濃度測定値( $\text{mol}/\text{L}$ )  
 $\Delta E - \Delta E_c$  : 試験体表面間の測定電位(V)  
 $L$  : 試験体厚さ(L)

表-5.11 実効拡散係数の計算結果

配合番号	$R$	$T$	$Z_{Cl}$	$F$	$C_{Cl}$	$\Delta E - \Delta E_c$	$L$	実効拡散係数 $D_e$
H35	8.31	293.5	-1	96500	0.469	13.1	49.88	0.73
H35CA <sub>2</sub> -4%	8.31	293.5	-1	96500	0.466	13.1	50.26	0.51
H35CA <sub>2</sub> -6%	8.31	293.4	-1	96500	0.467	13.2	50.51	0.41
H35CA <sub>2</sub> -8%	8.31	293.3	-1	96500	0.467	13.2	50.20	0.19
H35B650	8.31	293.3	-1	96500	0.476	13.0	49.91	0.19
H35B650CA <sub>2</sub> -4%	8.31	293.2	-1	96500	0.482	13.1	50.09	0.17
H35B650CA <sub>2</sub> -6%	8.31	293.3	-1	96500	0.483	13.0	49.69	0.09
H35B650CA <sub>2</sub> -8%	8.31	293.2	-1	96500	0.488	13.0	50.45	0.07
H35BFS100	8.31	293.2	-1	96500	0.464	13.0	49.81	0.31
H35BFS100CA <sub>2</sub> -4%	8.31	293.2	-1	96500	0.462	13.1	50.48	0.27
H35BFS100CA <sub>2</sub> -6%	8.31	293.2	-1	96500	0.469	13.0	49.67	0.24
H35BFS100CA <sub>2</sub> -8%	8.31	293.2	-1	96500	0.477	13.0	50.14	0.19

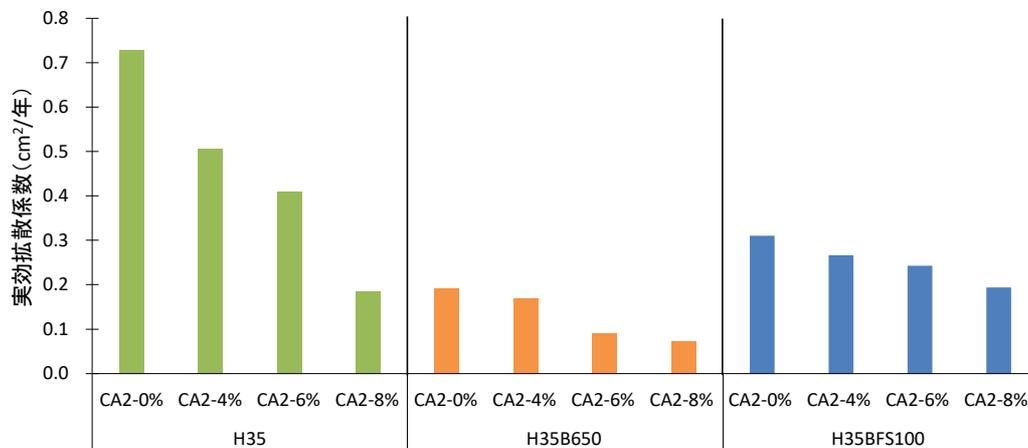


図-5.52 CA<sub>2</sub>の混和率ごとの実効拡散係数

電気泳動法は、コンクリートに直流定電圧を印加することによって、強制的に塩化物イオンを移動させ、その移動速度から拡散係数を求めるものである。低水粉体比のコンクリートのように浸せきによる方法では試験が長期化する場合には、電気泳動による方法は有効である。しかし、この方法から求まる拡散係数はコンクリート標準示方書で示しているような見かけの拡散係数ではなく、コンクリートの細孔溶液中における塩化物イオンの移動のしやすさを表す実効拡散係数を測定する方法であるため、得られた値はそのまま照査などに使用することはできない。本試験の結果からもわかるように、見かけの拡散係数と実効拡散係数に相関性が見いだせることから、実効拡散係数を見かけの拡散係数に変換して照査に用いる必要がある。実効拡散係数の実測値から見かけの拡散係数を得る際に、試験を行わずに変換する場合には、以下の式(5.9)が適用されている。本試験では、見かけの拡散係数と実効拡散係数の両方について測定を実施しているため、実測値から係数  $k_1 \cdot k_2$  を算出した。

$$D_{re} = k_1 \cdot k_2 \cdot D_e \quad (5.9)$$

ここに、 $D_{re}$  : 電気泳動試験による実効拡散係数から換算した見かけの拡散係数 (cm<sup>2</sup>/年)

$D_e$  : 電気泳動試験による実効拡散係数 (cm<sup>2</sup>/年)

$k_1$  : コンクリート表面におけるコンクリート側, 陰極側溶液側それぞれの塩化物イオン濃度の釣合に関わる係数

$k_2$  : セメント水和物中への塩化物イオンの固定化現象に関わる係数

本試験で得られた見かけの拡散係数と実効拡散係数の実測値から式(5.9)を用いて係数  $k_1 \cdot k_2$  を算出した結果を表-5.12に示す。本試験の実験値から得られた係数  $k_1 \cdot k_2$  を使用することで、電気泳動試験で得られた実効拡散係数を算出することにより見かけの拡散係数を短時間で推定することが可能となる。

表-5.12 見かけの拡散係数および実効拡散係数の実測値から算出した係数  $k_1 \cdot k_2$

配合種類	CA <sub>2</sub> /B (%)	見かけの拡散係数 (cm <sup>2</sup> /年)	実効拡散係数 (cm <sup>2</sup> /年)	係数 $k_1 \cdot k_2$
H35	0	0.75	0.73	1.03
	4	0.74	0.51	1.45
	6	0.35	0.41	0.85
	8	0.33	0.19	1.74
H35B650	0	0.25	0.19	1.32
	4	0.23	0.17	1.35
	6	0.22	0.09	2.44
	8	0.20	0.07	2.86
H35BFS100	0	0.50	0.31	1.61
	4	0.42	0.27	1.56
	6	0.22	0.24	0.92
	8	0.20	0.19	1.05

## (2) コンクリートの中性化抵抗性

W/B は 35% で、 $CA_2$  の混和率は 0, 4, 6, 8% で材齢 28 日まで標準養生を行った後に促進中性化試験を行った試験体について、促進中性化試験を 1 年間行ったがすべての配合について中性化深さは確認されなかった。

図-3.4 に示す最高温度 40℃ および 60℃ の温度履歴を与えた後に促進中性化試験を行った結果を図-5.53 に示す。材齢 28 日まで標準水中養生を行った試験体については中性化が確認されなかったが、蒸気養生後に水中養生を行わない場合については中性化が進行することが確認された。中性化深さは、H35 や H35BFS100 と比較して H35B650 が大きくなる傾向を示しており、さらに  $CA_2$  を混和したものが中性化深さは大きくなる傾向が確認された。蒸気養生の温度については、60℃ より 40℃ の方が中性化深さは大きくなる傾向が確認された。

図-5.54 に促進材齢の平方根と中性化深さの関係を示す。図中の回帰直線は、中性化深さ  $C$  が促進期間  $t$  の平方根に比例する  $\sqrt{t}$  則をもとに  $C = A' \sqrt{t}$  として導いた回帰直線である。求められた中性化速度係数と式 (5.10) を用いて 100 年後の中性化深さを推定した。

$$C = A' \sqrt{CO_2 / 5.0} \cdot \sqrt{t} \quad (5.10)$$

ここに、 $C$  : 中性化深さ (mm)  
 $CO_2$  : 炭酸ガス濃度 (%) (=0.05%)  
 $A'$  : 促進中性化試験における中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$ )  
 $t$  : 材齢 (年)

中性化速度係数と 100 年後の中性化深さの関係を図-5.55 に示す。二酸化炭素濃度は、気象庁<sup>5.15)</sup> から報告されている 2020 年度の二酸化炭素濃度の年間平均値が 416 ppm (0.0416%) であり、平均 2.0 ppm/年の増加傾向にあるため 100 年後の二酸化炭素濃度を想定し 600 ppm (0.06%) を設定した。その結果、中性化速度係数について、配合種類の影響については早強セメント単味と比較して高炉スラグ微粉末を混和した配合については中性化速度係数が大きくなる傾向を示し、高炉スラグ細骨材を用いた配合は中性化速度係数が小さくなる傾向を示した。蒸気養生の温度については、60℃ より 40℃ の方が中性化速度係数は配合種類にかかわらず大きくなる傾向が確認された。 $CA_2$  の影響については、配合種類にかかわらず  $CA_2$  を混和することで中性化速度係数は大きくなる傾向を示した。 $CA_2$  を混和することで中性化深さが大きくなる傾向があるが、100 年後の中性化深さの推定値で評価した場合に、中性化速度係数が最も大きい値となった配合 H35B650 $CA_2$ -6% についても 100 年後の中性化深さは 12.1 mm と推定された。道路橋示方書に示される鋼材の腐食を生じさせないための最小かぶりとして塩害の影響の度合いが激しい対策区分 S は 70 mm と設定されており、中性化深さが大きくなる傾向にある高炉スラグ微粉末と  $CA_2$  を組み合わせた配合についても中性化深さ

が問題となることは無いと考えられる。

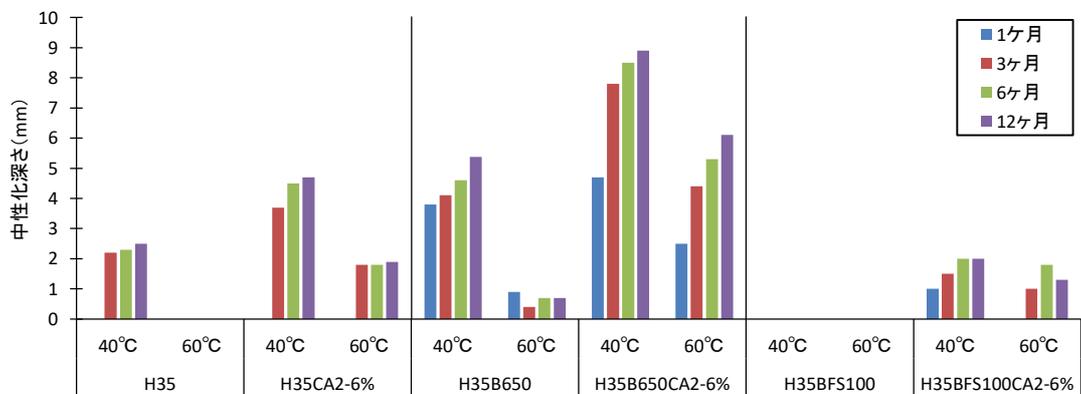


図-5.53 促進中性化試験による中性化深さ

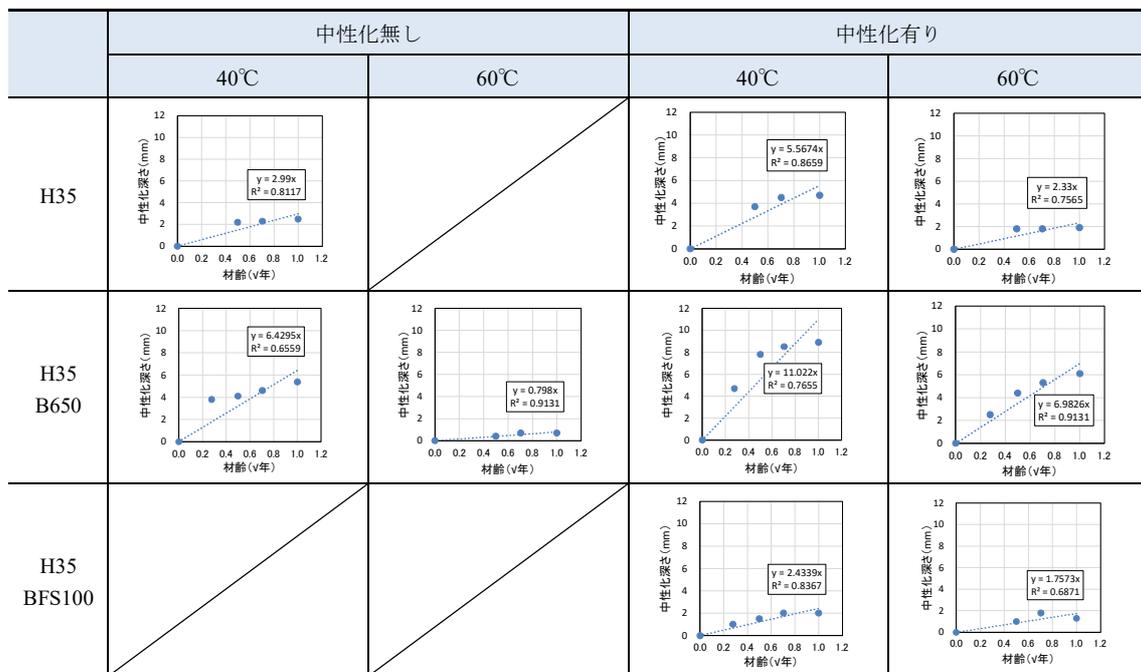


図-5.54 促進材齢と中性化深さの関係

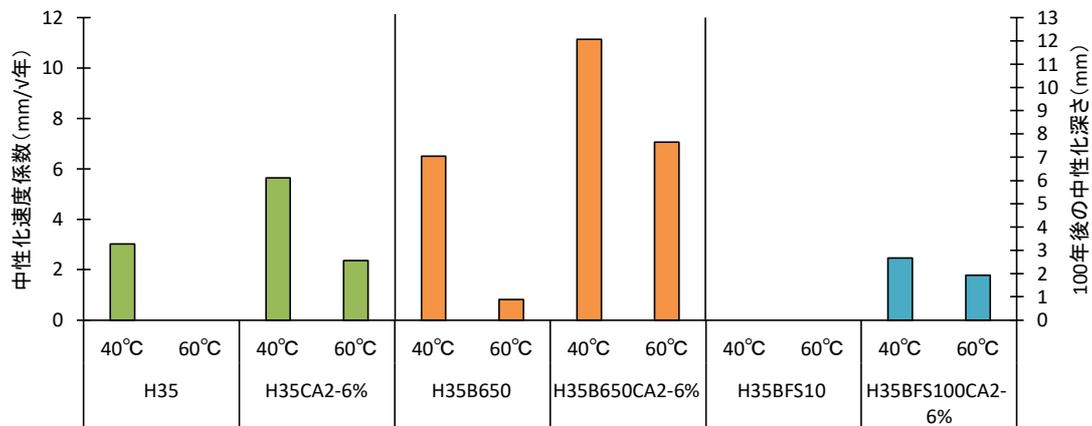


図-5.55 中性化速度係数と100年後の中性化深さの関係

### (3) コンクリートの凍結融解抵抗性

W/Bは35%で、CA<sub>2</sub>の混和率は0, 4, 6, 8%で材齢28日まで標準養生を行った後に凍結融解試験を行った。凍結融解サイクルと質量変化率の関係を図-5.56に示し、凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係を図-5.57に示す。凍結融解315サイクル後の試験体の外観性状を図-5.58に示す。標準養生を行った試験体について、配合種類や塩素固定化材の有無に関わらず凍結融解による質量変化や相対動弾性係数について変化は見られなかった。CA<sub>2</sub>を混和することで凍結融解抵抗性に影響を及ぼすことは確認されなかった。

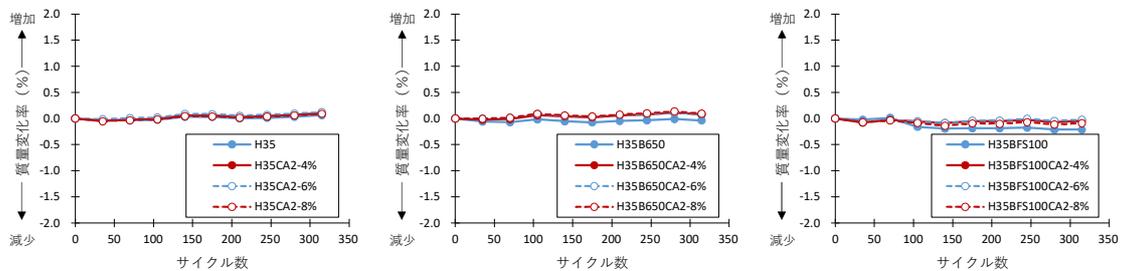


図-5.56 凍結融解サイクルと質量変化率の関係

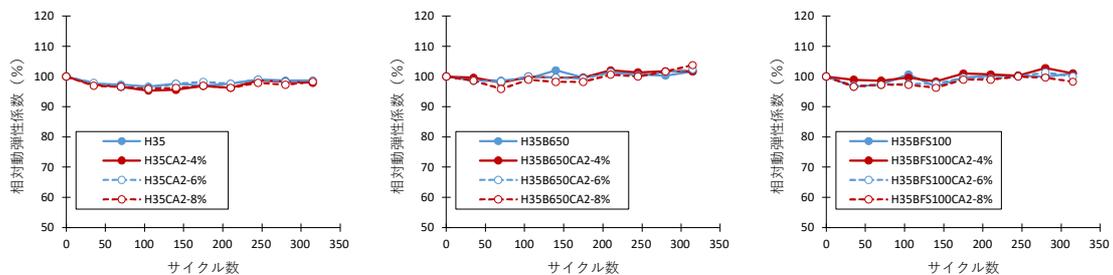


図-5.57 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係

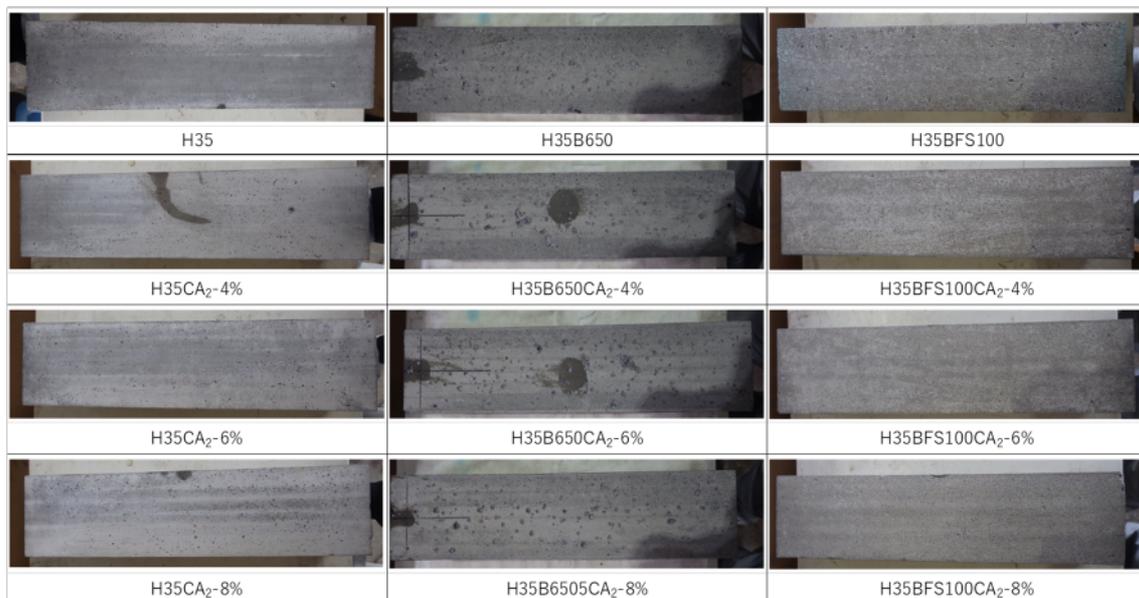


図-5.58 凍結融解サイクル 315 サイクル後の試験体の外観性状

次に、図-3.4 に示す最高温度 40℃および 60℃の温度履歴を与えた後に凍結融解試験を行った。凍結融解サイクルと質量変化率の関係を図-5.59 に示し、凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係を図-5.60 に示す。凍結融解 315 サイクル後の試験体の外観性状を図-5.61 に示す。

H35B650 について、蒸気養生 40℃で CA<sub>2</sub> を混和したものについてスケーリングによる質量低下が確認されたが、相対動弾性係数について低下は確認されなかった。

早強セメント単味および H35BFS100 について、蒸気養生 60℃で CA<sub>2</sub> を混和した配合について 150~200 サイクルから質量変化率が増加し、相対動弾性係数が 300 サイクルで 80%程度まで低下する傾向が確認された。凍結融解を受けることで微細なひび割れが進展し、水分を吸収し凍結融解を繰り返すことでコンクリートの内部が破壊され相対動弾性係数の低下につながったものと考えられる。H35CA<sub>2</sub>-6%-60℃は空気量が 3.8%であり、H35BFS100CA<sub>2</sub>-6%-60℃は空気量が 3.7%であったため、空気量が小さいことが凍結融解抵抗性の低下につながった可能性も考えられる。いずれにせよ相対動弾性係数が低下した H35CA<sub>2</sub>-6%-60℃および H35BFS100CA<sub>2</sub>-6%-60℃について、300 サイクルで相対動弾性係数 60%以上であり JIS の規定値を満足しているため運用上は問題ないと考えられるが、原因を確認するために、硬化時の空気量や気泡間隔係数についてより詳細な検討を行った。

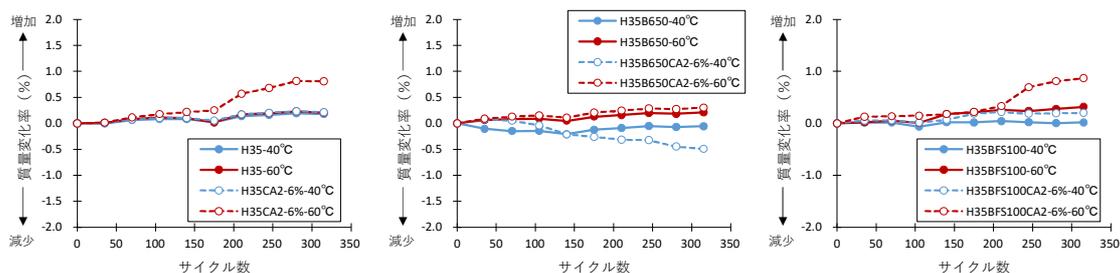


図-5.59 凍結融解サイクルと質量変化率の関係

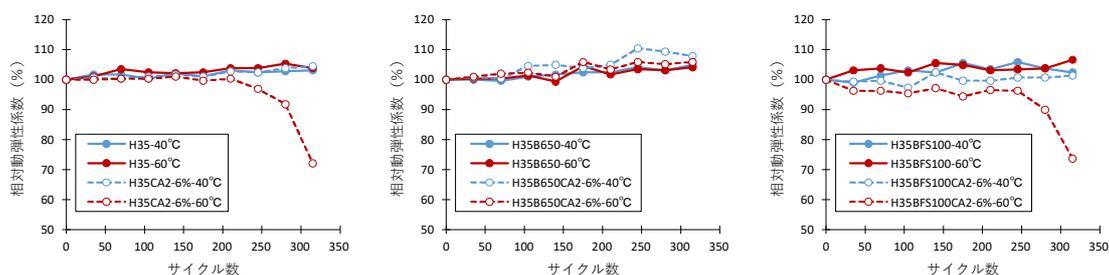


図-5.60 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係

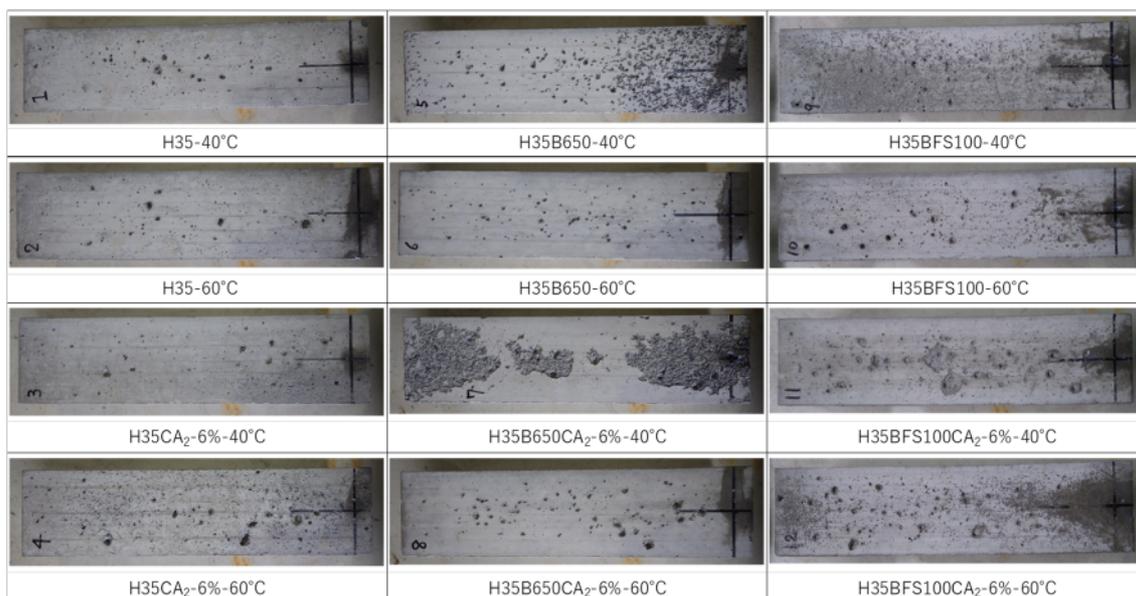


図-5.61 凍結融解サイクル 315 サイクル後の試験体の外観性状

相対動弾性係数が低下した H35CA<sub>2</sub>-6%-60°C および H35BFS100CA<sub>2</sub>-6%-60°C について気泡間隔係数および細孔径分布の測定を行った。比較として、塩素固定化材を混和していない H35-60°C および H35BFS100-60°C についても同様の測定を行った。

リニアトラバース法に準拠して測定した気泡間隔係数と空気量の測定結果を図-5.62 に示し、各気泡径範囲の中心値と空気量の関係を図-5.63 に示し、気泡分布状況を図-5.64 に

示す。一般的に凍結融解の繰り返し作用を受ける恐れがある場合には、気泡間隔係数を 200 $\mu\text{m}$  以下とする事が望ましいとされている。H35 については、気泡間隔係数は  $\text{CA}_2$  の有無にかかわらず 200 $\mu\text{m}$  以下であったが、 $\text{CA}_2$  を混和した配合について硬化後の空気量が 2.0% と最も小さくなっていることが相対動弾性係数の低下した原因であると推測される。H35BFS100 については、 $\text{CA}_2$  の有無にかかわらず気泡間隔係数が 200 $\mu\text{m}$  以上であり凍結融解抵抗性が低い可能性があり、 $\text{CA}_2$  を混和したものはさらに空気量が小さかったために相対動弾性係数が低下したと考えられる。

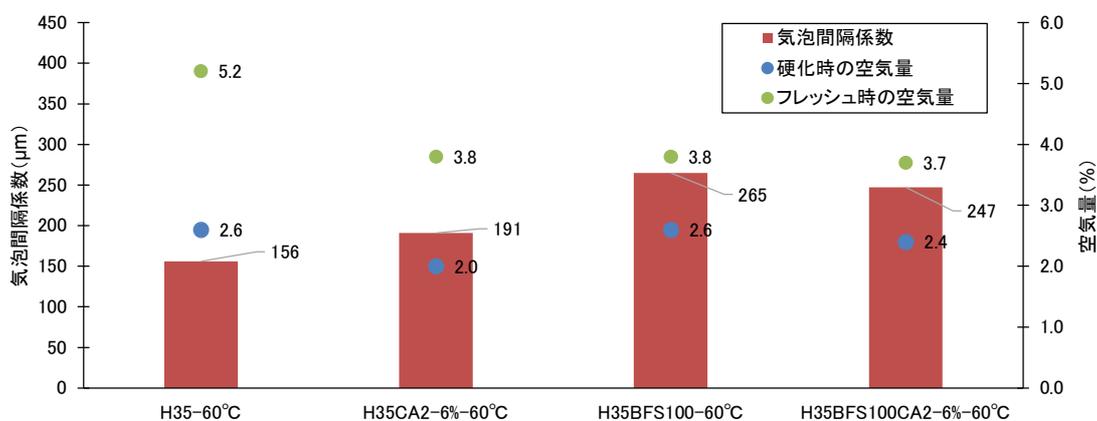


図-5.62 配合種類ごとの気泡間隔係数

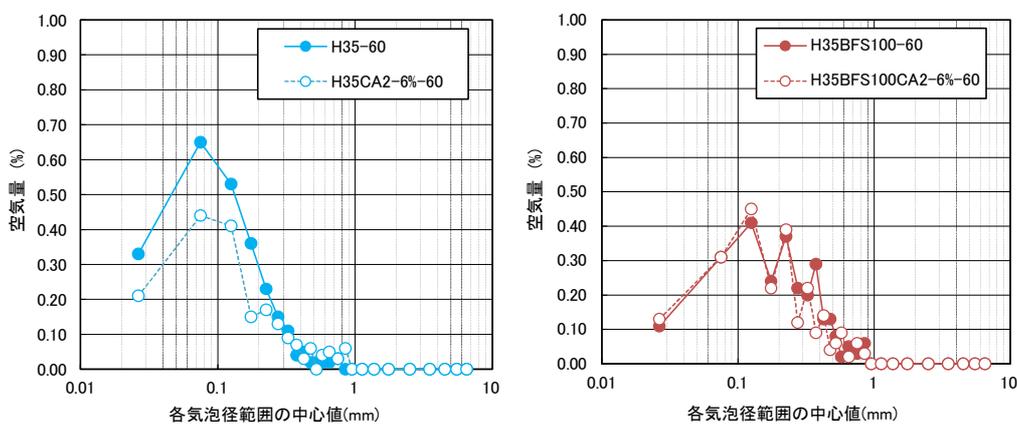


図-5.63 各気泡範囲の中心値と空気量の関係

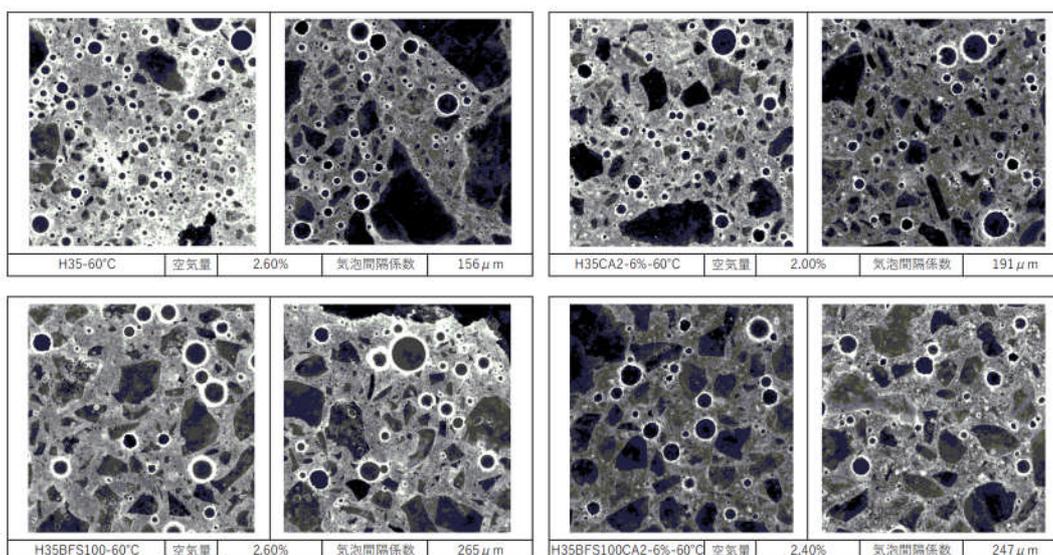


図-5.64 気泡分布状況

相対動弾性係数が低下したH35CA<sub>2</sub>-6%-60°CおよびH35BFS100CA<sub>2</sub>-6%-60°Cの配合について、蒸気養生後の後養生を行うことによる凍結融解抵抗性の改善効果について検討を行った。プレキャストPC床版について、発注者からの指定で水中養生が標準的に行われることも増えつつある。本試験では、蒸気養生後の後養生として水中養生を3日および7日とした場合の凍結融解抵抗性の評価を行った。凍結融解試験体の養生条件を表-5.13に示し、フレッシュ性状の測定結果を表-5.14に示す。

表-5.13 養生条件

	材齢(日)											
	0	1	2	3	4	5	6	7	~	28	28日以降	
D	蒸気養生	気中養生										凍結融解試験開始
C3	蒸気養生	水中養生			気中養生							凍結融解試験開始
C7	蒸気養生	水中養生							気中養生			凍結融解試験開始

表-5.14 フレッシュ性状の測定結果

配合種類	SP/B(%)	AE/B(%)	T/B(%)	スランプ(cm)	空気量(%)	コン温度(°C)
H35-60°C	0.85	0.55	-	13.5	5.2	23.0
H35CA <sub>2</sub> -6%-60°C	0.80	0.55	-	13.5	5.1	23.0
H35BFS100-60°C	0.90	1.00	1.50	12.5	5.8	24.0
H35BFS100CA <sub>2</sub> -6%-60°C	1.05	1.00	1.75	9.5	5.8	24.0

凍結融解サイクルと質量変化率の関係を図-5.65に示し、凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係を図-5.66に示す。凍結融解500サイクル後の試験体の外観性状を図-5.67に示す。

今回の試験では 300 サイクルにおいても相対動弾性係数が低下する傾向が確認されなかったため 500 サイクルまで計測を継続した。しかしながら、500 サイクルまで継続したが養生方法の種類にかかわらず相対動弾性係数の低下は確認されなかった。図-5.67 に示す凍結融解試験体の外観性状について、配合 H35CA<sub>2</sub>-6%-60°C の蒸気養生後に水中養生を行った試験体はスケーリングが確認されたが、相対動弾性係数については良好な状況を示した。先の実験で相対動弾性係数の低下が確認された H35CA<sub>2</sub>-6%-60°C および H35BFS100CA<sub>2</sub>-6%-60°C についてはフレッシュ性状時の空気量が 3.7~3.8% であり小さい傾向にあり、再試験を行った際はフレッシュ性状時の空気量は 5.1~5.8% と大きい傾向にあったために、養生方法を改善した場合においても凍結融解抵抗性について良好な結果が得られたと考えられる。

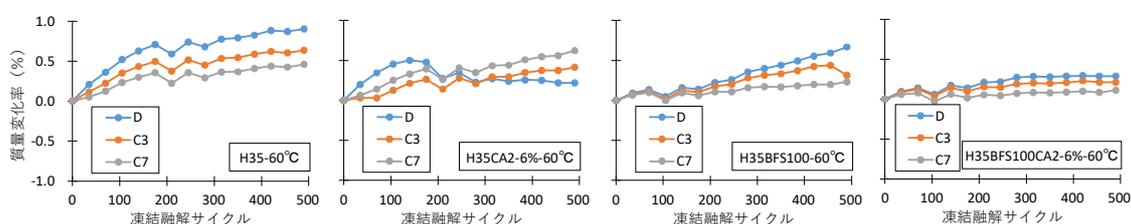


図-5.65 凍結融解サイクルと質量変化率の関係

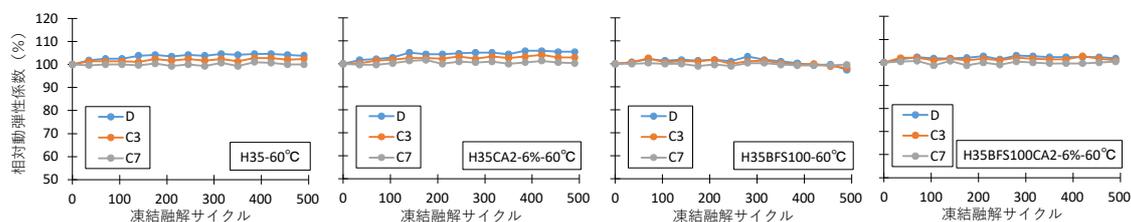


図-5.66 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係

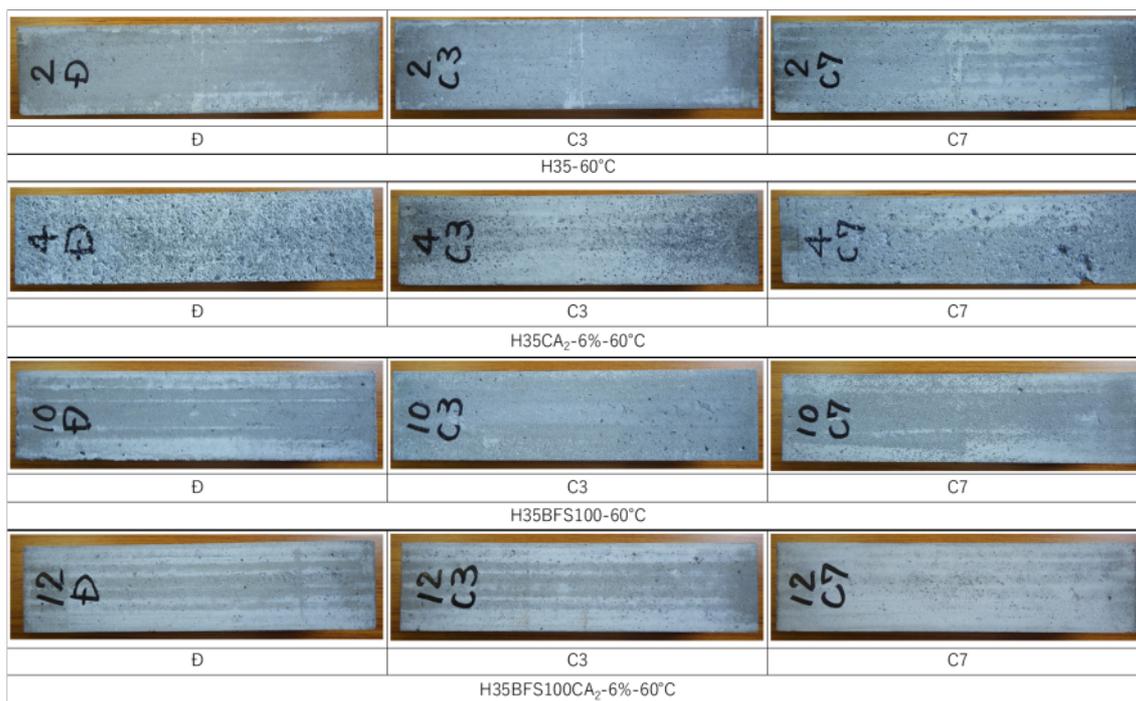


図-5.67 凍結融解 500 サイクル後の試験体の外観性状

#### (4) コンクリートの ASR 抵抗性

コンクリートのアルカリシリカ反応 (ASR) は、コンクリート内部のアルカリにより反応性の高いシリカ ( $\text{SiO}_2$ ) がゲル状物質に変化する現象であり、ゲルの吸水により異常膨張やひび割れを発生することで耐久性の低下を起す反応である。ペースト試験の結果より、 $\text{CA}_2$ を用いることで水酸化カルシウムを消費する効果や塩化物イオンを固定化させ細孔径分布の結果からコンクリートを緻密化させる効果などが確認されており、それらの機能で ASR 抑制する効果も期待される。よって本試験では骨材の種類や  $\text{CA}_2$ の有無を変化させた場合の ASR による膨張量の比較を行い、 $\text{CA}_2$ による ASR の抑制効果について検討を行った。

図-5.68 に ASR 促進試験体と同じ条件で養生を行った試験体の圧縮強度およびヤング係数の結果を示す。早強セメント単味で反応性細骨材および反応性粗骨材を用いた H35(SR)および H35CA<sub>2</sub>-6%(SR)の配合について、塩水浸せき 3 ヶ月時点で ASR によるひび割れが発生しており、圧縮強度およびヤング係数について急激な低下が確認された。結合材種類が H35B650 で反応性細骨材および反応性粗骨材を用いた H35B650(SR)および H35B650CA<sub>2</sub>-6%(SR)については、塩水浸せき 3 ヶ月時点でも圧縮強度およびヤング係数の低下は確認されておらず、高炉スラグ微粉末の効果によって ASR が抑制されていると考えられる。 $\text{CA}_2$ の有無については、H35 および H35B650 について、塩水浸せき 3 ヶ月時点で  $\text{CA}_2$ を用いた配合の方が圧縮強度およびヤング係数の低下が抑制されている傾向が確認されている。高炉スラグ細骨材を用いた H35BFS100 の配合については塩素固定化材の有無による違いは確認さ

れなかった。

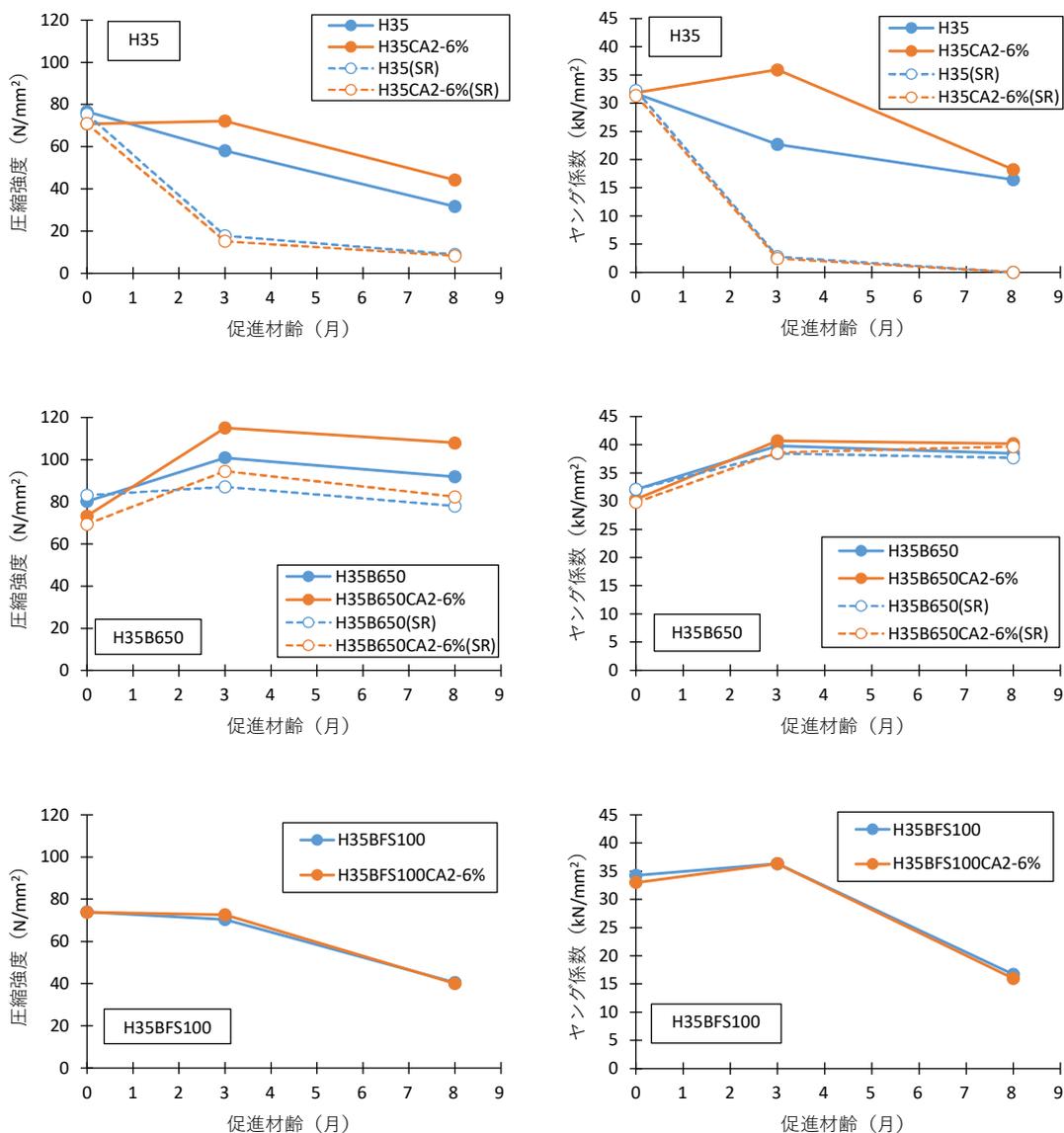


図-5.68 圧縮強度およびヤング係数の結果

図-5.69～図-5.71 に試験体の長さ変化率を示し、図-5.72～図-5.74 に試験体の外観変状を示す。図-5.69 は粗骨材のみ反応性骨材を用いた結果を示し、図-5.70 は細骨材と粗骨材ともに反応性骨材を用いた結果を示し、図-5.71 は、図-5.69 および図-5.70 の高炉スラグ微粉末の結果についてY軸の膨張率を拡大した結果を示す。圧縮強度およびヤング係数の低下からも判断できるように、H35(SR)および H35CA<sub>2</sub>-6%(SR)については、促進材齢 1～2 ヶ月で急激な膨張を示しており、促進材齢 3 週目で計測器の測定範囲を超えたため測定を終了した。細骨材に反応性骨材を用いた H35B650(SR)の配合については促進材齢 10 ヶ月程

度から膨張傾向を示したが、膨張量は0.01~0.02%程度であり高炉スラグ微粉末を用いた配合は高いASR抑制効果を有していることが確認された。CA<sub>2</sub>を用いた場合のASRの長さ変化率に与える影響について、CA<sub>2</sub>を混和したH35については大きな膨張抑制効果が確認された。CA<sub>2</sub>を混和したH35BFS100については、0.1%程度であるが膨張抑制効果が確認された。H35B650については、H35およびH35BFS100と比較して膨張量が極端に小さくなる傾向を示しており、さらにCA<sub>2</sub>を混和した場合は膨張を抑制する効果が確認された。

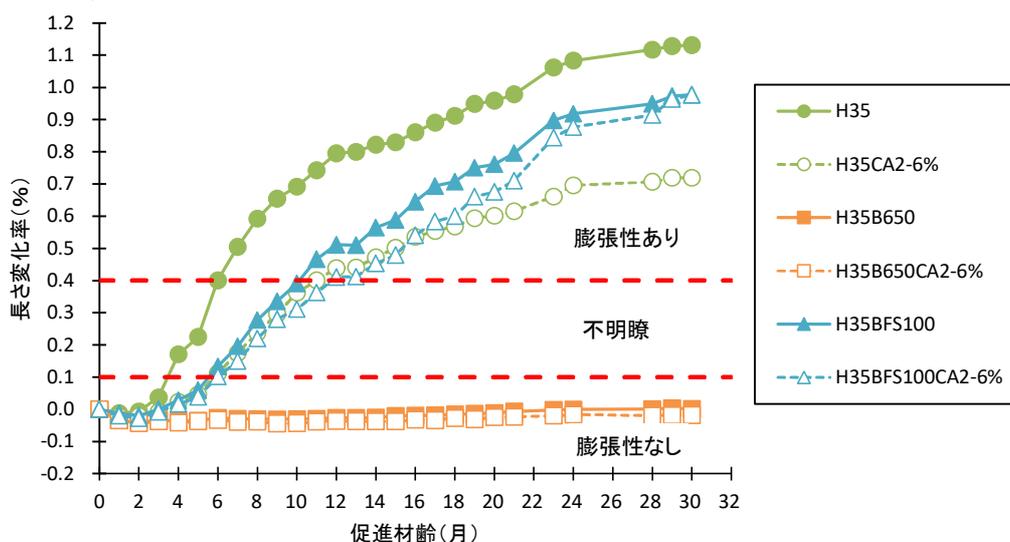


図-5.69 粗骨材のみ反応性骨材を用いた結果

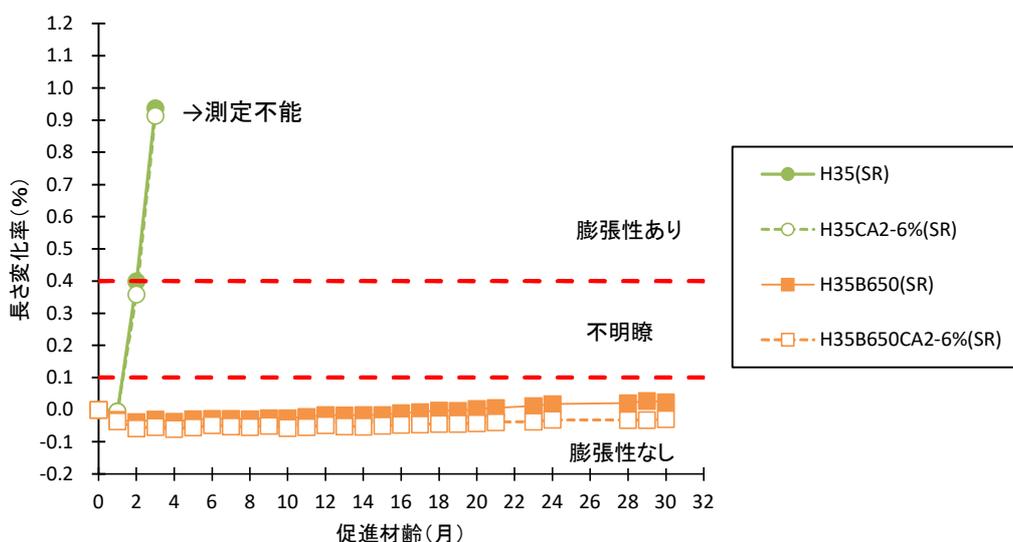


図-5.70 細骨材と粗骨材ともに反応性骨材を用いた結果

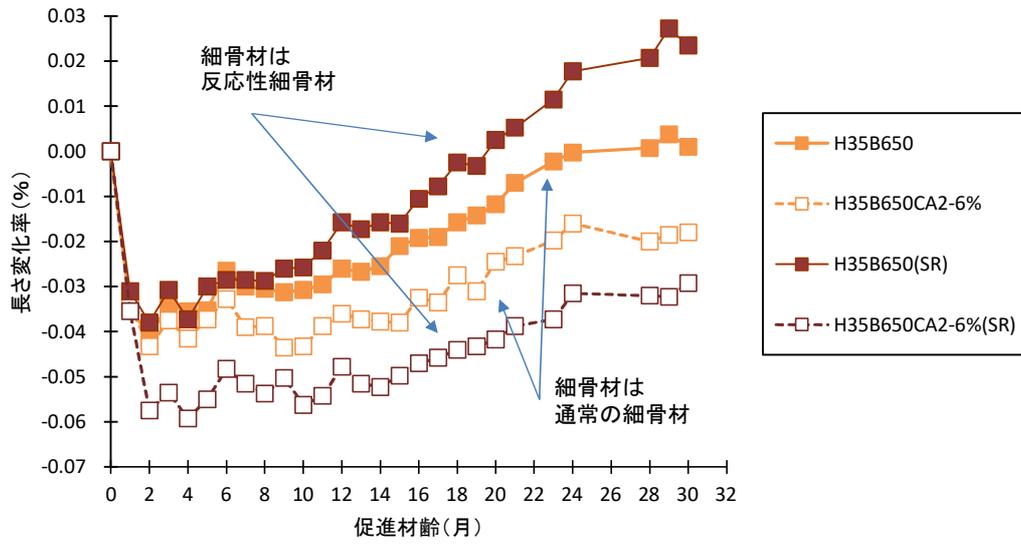


図-5.71 高炉スラグ微粉末を用いた結果

	H35			
	普通細骨材		反応性細骨材	
	CA <sub>2</sub> /B=0%	CA <sub>2</sub> /B=6%	CA <sub>2</sub> /B=0%	CA <sub>2</sub> /B=6%
	H35	H35CA2-6%	H35(SR)	H35CA2-6%(SR)
1ヶ月				
3ヶ月				
6ヶ月				
12ヶ月				
24ヶ月				
30ヶ月				

図-5.72 ASR 試験体の外観変状 (H35 配合)

	H35B650			
	普通細骨材		反応性細骨材	
	CA <sub>2</sub> /B=0%	CA <sub>2</sub> /B=6%	CA <sub>2</sub> /B=0%	CA <sub>2</sub> /B=6%
	H35B650	H35B650CA2-6%	H35B650(SR)	H35B650CA2-6%(SR)
1ヶ月				
3ヶ月				
6ヶ月				
12ヶ月				
24ヶ月				
30ヶ月				

図-5.73 ASR 試験体の外観変状 (H35B650 配合)

	H35BFS100	
	高炉スラグ細骨材	
	CA <sub>2</sub> /B=0%	CA <sub>2</sub> /B=6%
	H35BFS100	H35BFS100CA2-6%
1ヶ月		
3ヶ月		
6ヶ月		
12ヶ月		
24ヶ月		
30ヶ月		

図-5.74 ASR 試験体の外観変状 (H35BFS100 配合)

### 5.3.5 湿潤養生日数が耐久性に及ぼす影響

#### (1) コンクリートの塩分浸透抵抗性

塩化物イオン浸透抵抗性について湿潤養生日数が及ぼす影響を評価するために表-5.6 に示す養生方法を変化させた際の塩化物イオン浸透深さについて評価を行った。硝酸銀噴霧法で測定した塩化物イオン浸透深さを図-5.75 に示す。養生方法の違いによる影響が確認されやすいように W/B=45%について検討を行った。CA<sub>2</sub>/B=0%および6%の配合の結果を示す。H45 については湿潤養生を長くすることによる塩化物イオン浸透深さについて明確な差は確認されなかった。一方、H45B650 および H45BFS100 については湿潤養生日数を長くすることで塩化物イオン浸透深さが抑制される効果が確認された。以上より、H45B650 および H45BFS100 については湿潤養生日数を長くすることでコンクリートの塩化物イオン浸透抑制効果の能力を引き上げる効果が確認されたが、いずれの養生条件でも H と同等以上の塩化物イオンの浸透に対する抵抗性を確保できると考えられる。

次に、蒸気養生後の湿潤養生日数が及ぼす影響を評価するために表-5.8 に示す養生方法を変化させた際の硝酸銀噴霧法で測定した塩化物イオン浸透深さを図-5.76 に示す。蒸気養生の温度履歴については図-5.19 に示す最高温度 60℃とした温度履歴を与えた結果を示す。H45 および H45B650 の結果を示すが、温度履歴を与えた場合については養生方法を変化させた場合も大きな違いが確認されなかった。温度履歴を与えることで材齢初期において水和が進展することで、その後の養生方法の違いの影響が生じなかったと考えられる。

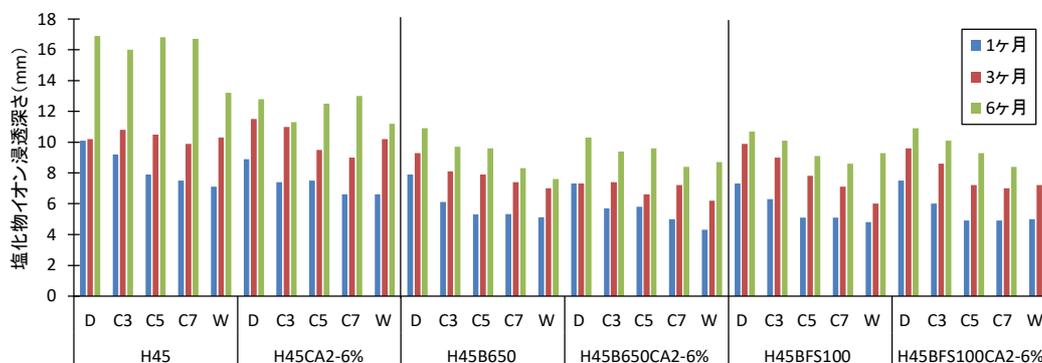


図-5.75 養生方法を変化させた場合の塩化物イオン浸透深さ

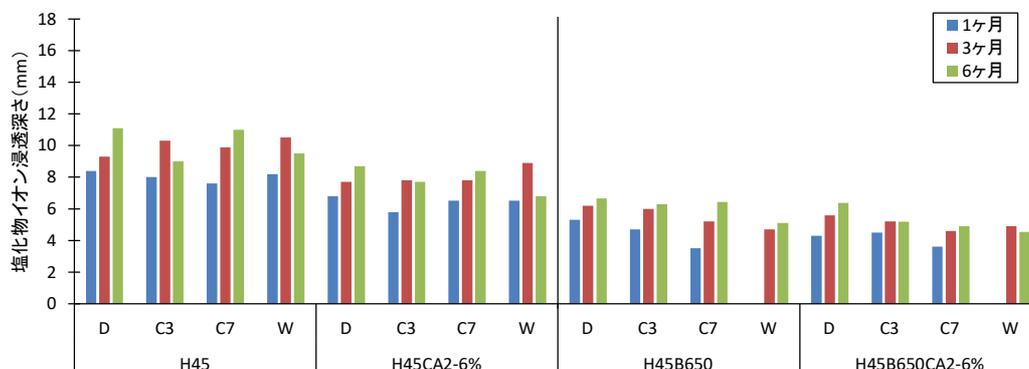


図-5.76 温度履歴を与えた後の養生方法を変化させた場合の塩化物イオン浸透深さ

## (2) コンクリートの中性化抵抗性

中性化抵抗性について湿潤養生日数が及ぼす影響を評価するために表-5.6 に示す養生方法を変化させた際のフェノールフタレイン液噴霧法で測定した中性化深さを図-5.77 に示す。養生方法の違いによる影響が確認されやすいように W/B=45%について検討を行った。CA<sub>2</sub>/B=0%および 6%の配合の結果を示す。W/B=35%の際は材齢 28 日まで水中養生を行った W については材齢 1 年まで中性化深さが確認されなかったが、W/B=45%とした場合は配合種類にかかわらず 0~5mm 程度の中性化深さが確認された。養生方法の違いによる中性化深さに与える影響については、塩化物イオン浸透深さよりも顕著な差が確認された。CA<sub>2</sub>の有無にかかわらず初期養生を延長することで中性化深さを抑制できることが確認された。CA<sub>2</sub>を混和した配合の方が、中性化深さが深くなる傾向が確認されたため、CA<sub>2</sub>を混和した配合については初期養生の必要性が確認された。

次に、蒸気養生後の湿潤養生日数が及ぼす影響を評価するために表-5.8 に示す温度履歴を与えた後の養生方法を変化させた際のフェノールフタレイン液噴霧法で測定した中性化深さを図-5.78 に示す。温度履歴については図-5.19 に示す最高温度 60℃とした温度履歴を与えた結果を示す。初期養生の中性化に与える影響について、温度履歴を与えた場合と与えていない場合で同様の傾向が確認された。中性化深さについて、塩化物イオン浸透深さと同様に温度履歴を与えることで中性化深さは小さくなることが確認された。

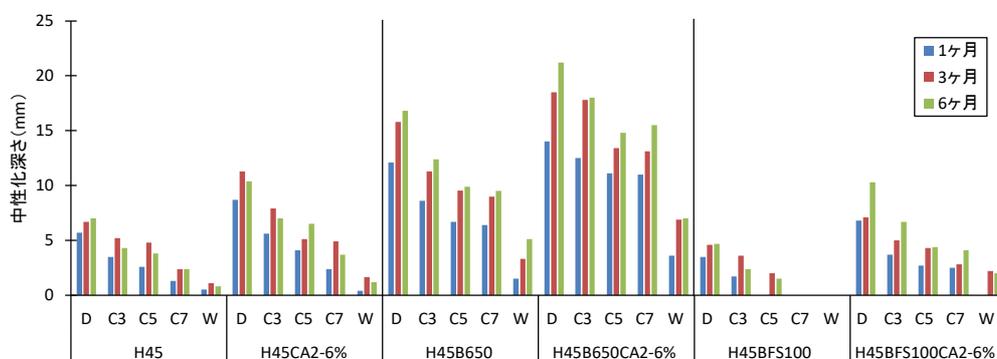


図-5.77 養生方法を変化させた場合の中性化深さ

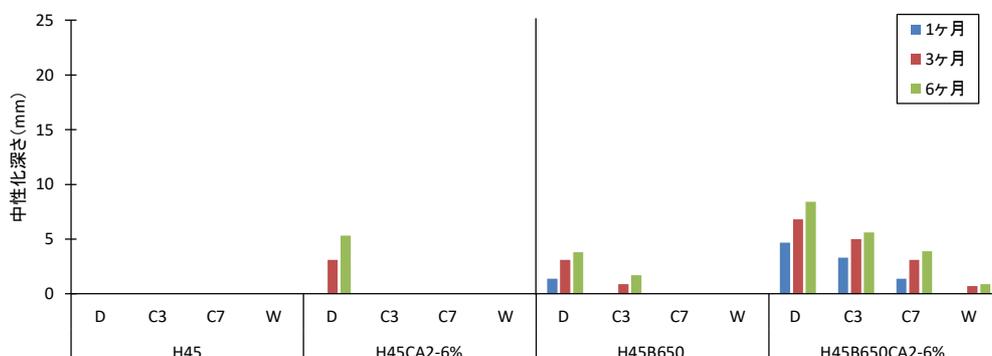


図-5.78 温度履歴を与えた後の養生方法を変化させた場合の中性化深さ

#### 5.4 本章のまとめ

CA<sub>2</sub>を混和したコンクリートについて、結合材種類、CA<sub>2</sub>の混和率および初期養生温度を変化させた試験を行った。CA<sub>2</sub>を用いたコンクリートの実施工への適用を目指して、フレッシュ性状、硬化特性、体積変化および耐久性に関する検討を行った。本試験で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) CA<sub>2</sub>用いたコンクリートのフレッシュ性状に与える影響について、特徴的な変化として可使時間および凝結時間が短くなる傾向が確認され、さらに、ブリーディングが減少する効果が認められた。可使時間および凝結時間が短くなる効果について、施工サイクルを短縮できる可能性があるため PCaPC 部材の製造に関しては有利に働くものと考えられる。高炉スラグ微粉末を使用した配合について高性能 AE 減水剤の使用量が大きくなる傾向があり、それに伴い仕上げのタイミングが遅くなる可能性もあるため、CA<sub>2</sub>の混和により可使時間および凝結時間が短くなる効果がさらに有利に働くものと考えられる。一方、場所打ちコンクリートに使用する場合は、可使時間および凝結時間が極端に短くなると施工時に不具合が生じる可能性があるため、練り上がり直後のスランプを大きくすることや遅延型の高性能 AE 減水剤を使用するなどの検討が必要であると考えられる。また、CA<sub>2</sub>を用いることでブリーディングが減少する効果についても、耐久性向上に寄与するものと考えられる。
- 2) CA<sub>2</sub>用いたコンクリートの硬化性状として圧縮強度に与える影響については、CA<sub>2</sub>の混和率が大きくなるにつれて初期の圧縮強度の低下が確認されたが、長期材齢においては影響が少なくなる傾向が確認された。その他の割裂引張強度および曲げ強度に及ぼす影響は認められなかった。
- 3) 自己収縮に関して、H および H+BFS は材齢 1 年で CA<sub>2</sub>無しと比較して  $50 \times 10^{-6}$  程度大きくなる傾向が示された。一方、H+GGBS は CA<sub>2</sub>を混和した場合に材齢初期に  $150 \times 10^{-6}$  程度膨張する傾向が確認され、CA<sub>2</sub>無しと比較して材齢 1 年で  $150 \times 10^{-6}$  程度小さくなる傾向を示した。この原因について、GGBS に含まれる石こうの有無で比較した場合に、石こうを含んだ GGBS と CA<sub>2</sub>が反応することでエトリンガイトなどを生成し膨張傾向を示したものと考えられる。乾燥収縮については、配合種類にかかわらず CA<sub>2</sub>の有無による最終値での変化は  $50 \times 10^{-6}$  程度であり CA<sub>2</sub>による影響は小さいことが確認された。その他の変形特性として、ヤング係数やクリープについても CA<sub>2</sub>の混和による大きな影響は認められなかった。
- 4) CA<sub>2</sub>を用いた場合のコンクリートの塩化物イオン浸透抑制効果について、硝酸銀溶液噴霧法、実効拡散係数および見かけの拡散係数で比較を行った。その結果、配合種類および CA<sub>2</sub>の混和率を変化させた場合においても試験方法ごとの相関性が示された。

- 5) 中性化抵抗性については、 $CA_2$  を混和した場合に中性化深さが大きくなる傾向が確認されたが、蒸気養生の有無にかかわらず脱砕後の湿潤養生日数を長く設定することで中性化深さを抑制できる可能性が示唆された。
- 6) 凍結融解抵抗性について、 $CA_2$  を用いた場合に相対動弾性係数が低下する現象が確認されたが、フレッシュ性状時の空気量を 4.5~6.0%程度確保することで  $CA_2$  を用いないコンクリートと同程度の凍結融解抵抗性が得られることが示された。
- 7) ASR に対する  $CA_2$  の影響を確認したところ、 $CA_2$  を用いることで緻密化する効果、さらに水酸化カルシウムなどのアルカリ分を消費する効果によって ASR による膨張を抑制できる効果が示唆された。
- 8) 湿潤養生日数を変化させた場合の圧縮強度、中性化深さおよび塩化物イオン浸透抵抗性について評価を行った。場所打ちコンクリートを想定し、蒸気養生を模擬した温度履歴を与えない場合を想定した場合について、標準養生を行った試験体の材齢 28 日に対する比率が 70%以上となる湿潤養生期間について、H45B650 および H45B650 $CA_2$ -6%は 7 日であり、その他の配合については 3 日であった。塩化物イオン浸透深さについては、養生条件を変化させた場合においても塩化物イオン浸透深さに大きな違いは認められなかった。また、中性化深さについて、 $CA_2$  を混和することで大きくなる傾向が確認されており、湿潤養生日数を長くすることで中性化深さを抑制できる効果が確認された。PCaPC 部材を想定した温度履歴を与えた試験体について、温度履歴を与えた後に標準養生を行った試験体の材齢 28 日に対する比率が 70%以上となる湿潤養生期間はすべての配合において 3 日であった。塩化物イオン浸透深さおよび中性化深さについて、養生条件を変化させた場合において大きな影響は認められなかった。

## 【参考文献】

- 5.1) 公益社団法人日本コンクリート工学会：ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書，pp.104-105，2014
- 5.2) 浦野真次，田中博一，藤井隆史，綾野克紀：高炉スラグ細骨材がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1267-1272，2017
- 5.3) C3 クリップボード [コンクリート化学編]，社団法人セメント協会，2013
- 5.4) 十河茂幸，加藤佳孝，福留和人，陳内浩，田中善久：構造物の耐久性向上のためのブリーディング制御，コンクリート工学，テクニカルレポート，Vol.55，No.11，pp.975-982，2017.11
- 5.5) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】，2022
- 5.6) 土木学会：コンクリート標準示方書【施工編】，2022
- 5.7) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートライブラリー86，1996
- 5.8) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説，JASS5，鉄筋コンクリート工事，2009
- 5.9) ACI Committee308：Guide to Curing Concrete，ACI 308R-01，2001
- 5.10) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】，2007
- 5.11) 国立研究開発法人土木研究所，一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会：低酸素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書(II)-混和材を用いたプレスとレストコンクリート橋の設計・施工マニュアル(案)-，pp.90-92，2016
- 5.12) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】，2012
- 5.13) 国土交通省土木研究所，プレストレストコンクリート建設業協会：ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書(III)-PC 橋の塩害対策に関する検討-，共同研究報告書第 270 号，pp.9-47，2001
- 5.14) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書改定資料基本原則編・設計編・施工編，コンクリートライブラリー138，2013
- 5.15) 気象庁ホームページ，[https://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/obs/co2\\_monthave\\_ryo.html](https://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/obs/co2_monthave_ryo.html)

## 第6章 大型試験体によるプレストレストコンクリートへの塩素固定化材の適用性に関する検証

### 6.1 本章の目的

塩素固定化材に関して、これまでにプレストレストコンクリート（PC）構造物に適用された事例は報告されていない。塩素固定化材を用いた PC 構造物への適用を目指して、室内試験によりフレッシュ性状、硬化性状、変形性状および耐久性性状などについて検討を行い、主要な目的である耐塩害性を高めた高耐久性コンクリートとして適用できることが確認された。この結果を受け、室内試験で確認した項目について、実際にプレストレスを導入したコンクリート試験体においても室内試験で得られた知見と同様の耐久性性状と耐荷性能を確認することができるかについて、大型試験体を用いた検証を行うこととした。

### 6.2 試験概要

#### 6.2.1 試験材料および配合

本試験で使用した使用材料を表-6.1 に示す。配合は、水粉体比 35%で、結合材種類は早強単味および早強ポルトランドセメントの 50%を高炉スラグ微粉末 6000 で置換した結合材の 2 種類、CA<sub>2</sub>/B は 0%および 6%の 2 種類とし、表-6.2 に示す H35, H35CA<sub>2</sub>-6%, H35B650 および H35B650CA<sub>2</sub>-6%の 4 配合について詳細な検討を行った。

表-6.1 大型試験体に使用した材料の一覧表

材料分類	種類	記号	特性値
セメント	早強ポルトランドセメント	H	密度 3.14g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 4,470cm <sup>2</sup> /g
混和材	高炉スラグ微粉末 6000	GGBS	密度 2.91g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 5,800cm <sup>2</sup> /g 三酸化硫黄 2.89% (無水石こう添加)
	塩素固定化材	CA <sub>2</sub>	密度 2.97g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 3,300cm <sup>2</sup> /g, カルシウムアルミネイト含有率 91.4%
細骨材	普通砕砂	S	密度 2.64g/cm <sup>3</sup> , 硬質砂岩砕砂, 茨城県桜川市飯渕産
粗骨材	普通粗骨材	G	密度 2.66g/cm <sup>3</sup> , 硬質砂岩碎石, 茨城県桜川市飯渕産
化学混和剤	マスターグレンウム SP8SV	SP	高性能 AE 減水剤, BASF 社製
	マスターエア 202 (AE 剤)	AE	BASF 社製

表-6.2 大型試験体のコンクリート配合

配合の記号	水粉 体比 W/B <sub>1</sub> (%)	細骨 材率 s/a (%)	GGBS/B <sub>2</sub> (%)	CA <sub>2</sub> /B <sub>1</sub> (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )					
					水	セメント	混和材		細骨材	
						早強	高炉スラグ微粉末	塩素固 定化材	普通	
							6000		砕砂	
W	C(H)	GGBS	CA <sub>2</sub>	S	G					
H35	35.0	42.0	—	0.0	165	471	—	0.0	709	987
H35CA <sub>2</sub> -6%	35.0	42.0	—	6.0	165	443	—	28	709	986
H35B650	35.0	42.0	50.0	0.0	165	236	236	0.0	703	978
H35 B650CA <sub>2</sub> -6%	35.0	42.0	50.0	6.0	165	222	222	28	703	978

※B<sub>1</sub>=C+GGBS+CA<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>= C+GGBS

### 6.2.2 大型試験体の概要

大型試験体は、断面 150mm×300mm、長さ 3000mm の梁部材に 1S15.2 (SWPR7AL) の PC 鋼材を 1 本配置し、プレテンション方式でプレストレスを導入した。本試験では PC 鋼材の腐食について着目するため、スターラップ鉄筋および軸方向の組立筋は塩害に対して耐久性に優れ、さらに非磁性を特徴とする愛知製鋼株式会社製のステンレス鉄筋を使用した (スターラップ鉄筋 :  $\Phi$ 10 (種類の記号 : SUS304-SD, 強度区分 : 295B), 軸方向の組立鉄筋 : CD6 (鋼種 : SUS304 相当, 強度区分 : 295))。大型試験体の製作状況を図-6.1 に示し、大型試験体形状図を図-6.2 に示す。橋軸方向の中心位置にコンクリートのひずみを測定するために埋込ゲージ (KM-100BT) を設置し、PC 鋼より線のひずみを測定するために PC 鋼より線にひずみゲージを設置した。PCaPC 部材への適用を想定し、図-6.3 に示す蒸気養生を実施し、打設後 18 時間後にプレストレス (導入直後の応力 : 1300N/mm<sup>2</sup>) を導入した。プレストレス導入後に、プライマー (デンカ RIS211E) および断面修復材 (デンカ RIS321 エース) を用いて試験体端部の PC 鋼より線の後埋めを行った。その後、図-6.4 に示す乾湿繰返し養生を実施した。また、その他の小型試験体についても、養生方法は大型試験体と同様の条件とした。蒸気養生を行った後に、材齢 1 日で脱枠を行い、材齢 8 週まで室外環境で気中養生を行った後に、室外暴露環境での 3 日間塩水に浸せきし、4 日間乾燥状態で保管する乾湿繰返しの促進養生を行う。塩水の濃度は、JSCE-G 572-2013 『浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法』に準拠し 10%NaCl 溶液とした。



鉄筋およびPC鋼より線組立



PC鋼より線緊張作業



コンクリートの打ち込み状況



蒸気養生状況



脱枠状況



塩水浸せき状況

図-6.1 大型試験体の製作状況

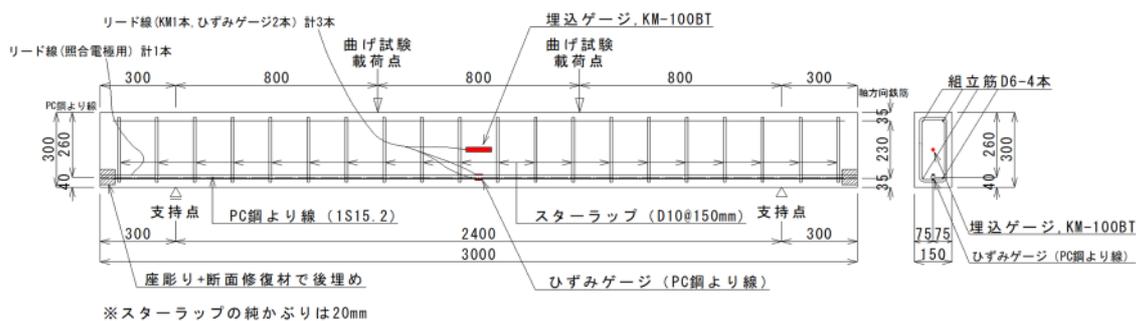


図-6.2 大型試験体形状図

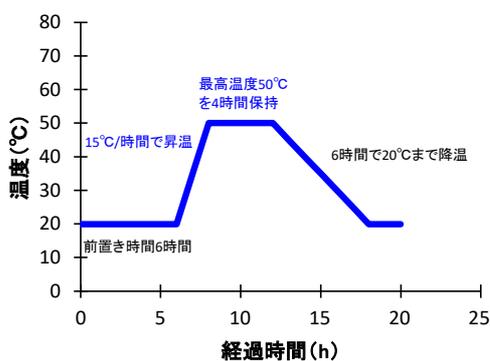


図-6.3 蒸気養生の温度履歴

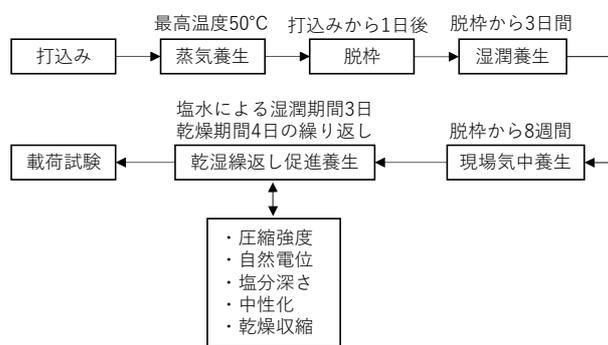


図-6.4 大型試験体の養生手順

### 6.2.3 試験項目および試験方法

フレッシュ性状としてスランプおよび空気量の測定を行った。目標スランプは  $12 \pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量は  $4.5\% \pm 1.5\%$  とした。

硬化特性として、圧縮強度、割裂引張強度およびヤング係数は、材齢 1 日、28 日、91 日および載荷試験時に実施した。試験体の寸法は  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  とした。養生方法は部材同一養生とし、別途、材齢 28 日および載荷試験時は標準養生試験体についても測定を行った。

変形状として、乾燥収縮は JIS A 1129-3 (ダイヤルゲージ法) に準拠し測定を行った。型枠は、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$  の鋼製型枠を用いて、ゲージプラグは試験体の両端面中央に配置されるように型枠に取付けておく。コンクリート硬化後にコンクリートの両端面に取付けたプラグ間の長さを測定する。試験体は、打込み後直ちに封かんし蒸気養生を行う。材齢 1 日で脱枠し、基長を測定した後に大型試験体と同様の体積表面積比 (V/S) が 48mm になるように表面の一部分にエポキシ樹脂を塗布し、材齢 1、2、3、4、8、13、26、52 週、その後 3 ヶ月に 1 回測定を行う。養生条件は、大型試験体と同じ条件とし、長さ測定時のみ温度  $20^\circ\text{C}$ 、湿度 60% の恒温恒湿室に試験体を移動して長さ測定を行った。

耐久性状として、大型試験体と同じ条件で養生を行った試験体を用いて、塩分浸透深さおよび中性化深さの測定を行った。また、コンクリートの塩分浸透抵抗性については、非定常・

電気泳動試験による評価を行った。非定常・電気泳動試験は、第5章で実施した JSCE G 571-2013 に準拠した定常状態の電気泳動試験と比較して試験期間が短く、より簡略化した試験方法である。

非定常・電気泳動試験は、20°C一定の標準水中養生を行った φ100×200mm の試験体から φ100×50mm に切断した試験体を用いて行った。試験は、材齢 91 日で実施した。JSCE-G 571-2013 と同様の方法で真空飽和処理を行った試験体を電気泳動セルに設置し、通電を行って塩化物イオンを電気泳動させた。試験方法の概要を図-6.5 に示す。印加電圧は 30V とし、通電時間は 6 時間と 24 時間とした。その後、試験体の割裂面に 0.1mol/L 硝酸銀溶液を噴霧して塩化物イオンの浸透深さを測定し、式(6.1)を用いて非定常・電気泳動試験による塩化物イオン拡散係数  $D_{nssm}$  を算出する。

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} K \quad (6.1)$$

ここで、 $D_{nssm}$  : 塩化物イオン拡散係数 (m<sup>2</sup>/s)、 $R$  : 気体定数 (=8.31J/(K·mol))、 $T$  : 通電時の陽極側と陰極側の溶液温度の平均値 (K)、 $z$  : 塩化物イオンの電荷の絶対値 (=1)、 $F$  : ファラデー定数 (=9.65×10<sup>4</sup>J/(V·mol))、 $E$  : 電位勾配 (試験の開始時との両溶液間の電圧の平均値を試験体厚さ (=0.05m) で除した値, V/m)、 $K$  : 塩化物イオン浸透速度係数 (m/s) である。なお、塩化物イオン浸透速度係数  $K$  は、通電時間 6 時間と 24 時間の塩化物イオン浸透深さの差分を通電時間の差分で除して求めた。 $D_{nssm}$  は、試験体 1 体の値とした。

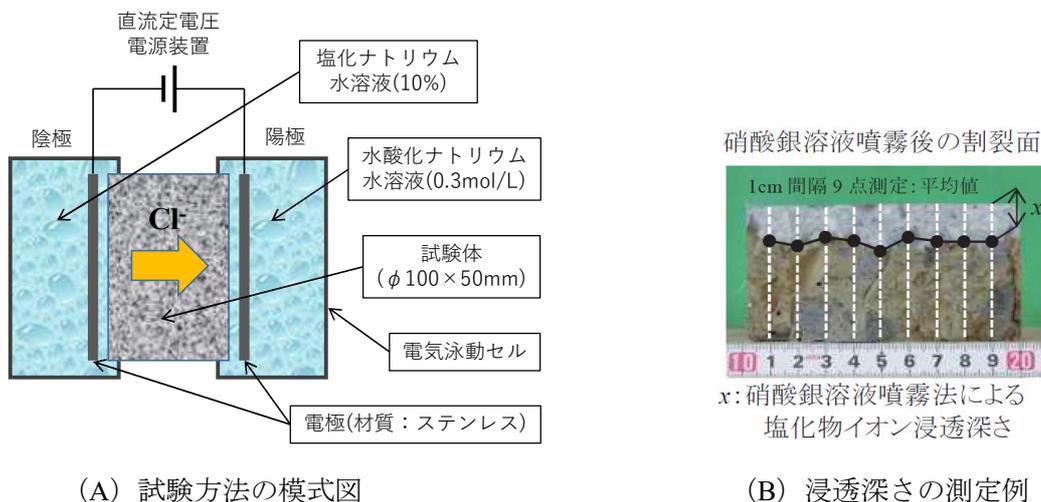


図-6.5 非定常・電気泳動試験の概要

大型試験体については、乾湿繰返し養生中に 1 ヶ月に 1 回、PC 鋼より線の自然電位の測定を行う。自然電位の測定位置図を図-6.6 に示し、自然電位の測定方法を図-6.7 に示す。

PC 鋼より線の下面の最短距離の位置において照合電極を用いて自然電位の測定を行う。照合電極は、飽和塩化銀照合電極を用いた。式(6.2)を用いて、飽和硫酸銅照合電極基準への換算を行った。測定箇所は、下面 5ヶ所とする。また、1ヶ月に1回の間隔で大型試験体のひび割れや錆汁の発生などの外観観察を行う。その後、材齢1年まで促進養生を行った後に梁の曲げ試験を行い曲げ耐力を評価する。

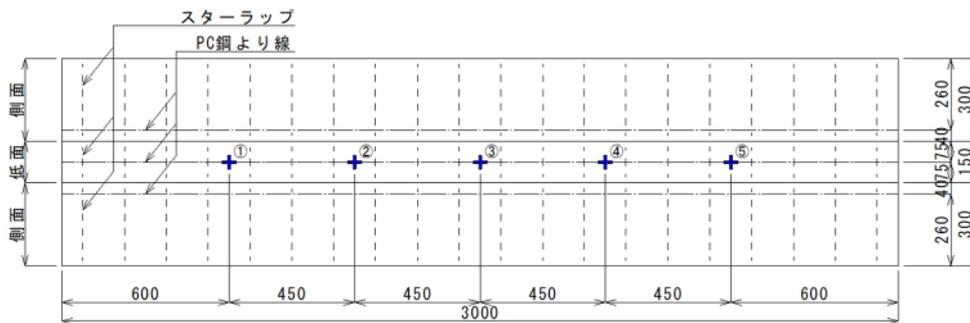


図-6.6 自然電位測定位置図

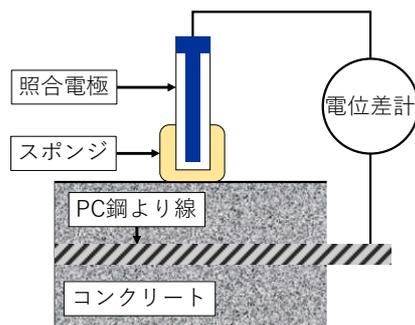


図-6.7 自然電位の測定方法

$$\text{鋼材電位 [mV vs CSE]} = \text{鋼材電位 [mV vs SSE]} - 120 - 2.66 \times (t - 25) \quad (6.2)$$

ここに、CSE : 飽和硫酸銅照合電極  
 SSE : 飽和塩化銀照合電極  
 t : 温度 (°C)

非破壊でコンクリートの耐久性を評価するための手法として JSCE-G 581-2018 に準拠した電気抵抗率の測定および二重チャンバー方式の表層透気試験 (NDIS 3436) により表層透気係数の測定を行った。

電気抵抗率は、4プローブ法の測定装置 (電極間隔 50mm, 周波数 40Hz, 測定可能範囲 10 ~ 10000Ωm) を用いて行う。測定は、材齢 1, 3, 7, 14, 28, 42, 56, 70, 84, 91 日、その後 1 月に 1 回測定する。20°C一定の標準水中養生および部材同一養生を行った φ100×200mm

の試験体を用いて、試験体の側面を4方向から測定し、その平均値をJSCE-G 581-2018 附属書1（参考）に例示されたセル定数を用いて、装置の仕様や試験体の形状および寸法に依存しない値に換算した。なお、試験体の含水量の変化や温度の影響を受けないように30分以上20℃一定の水中養生槽に浸せきした後に試験体の温度が20℃±2℃であることを確認した後に電気抵抗率の測定を行う。図-6.8に試験体の温度および電気抵抗率の測定状況を示す。



図-6.8 試験体の温度および電気抵抗率測定状況

表層透気係数の測定は、電気抵抗率試験と同じ材齢で大型試験体の側面を用いて測定を実施する。表層透気係数測定時には同時にコンクリート表面の含水率の測定も実施する。表層透気係数の測定位置を図-6.9に示し、表層透気係数の測定機器の概要を図-6.10に示し、表層透気係数のグレーディングを表-6.3に示す。

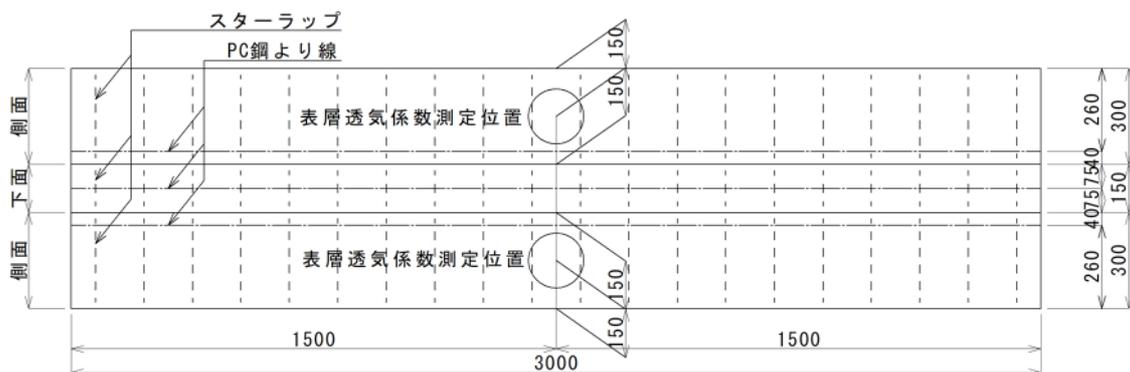


図-6.9 表層透気係数測定位置図（試験体展開図）

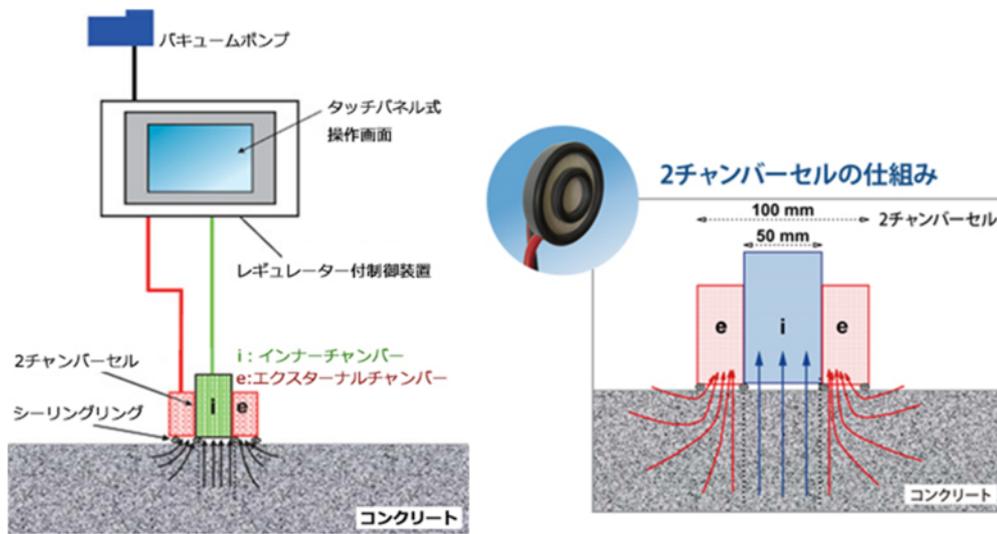


図-6.10 表層透気係数測定機器の概要

表-6.3 表層透気係数のグレーディング

	優	良	一般	劣	極劣
表層透気係数 $K_t$ ( $10^{-16}m^2$ )	0.001~0.01	0.01~0.1	0.1~1.0	1.0~10	10~100

塩水浸せき乾燥繰返しを所定の期間行った大型試験体を用いて曲げ試験を行う。曲げ試験時の測定項目を表-6.4に示し、曲げ試験時の載荷ステップを図-6.11に示す。

表-6.4 曲げ試験時の試験項目

計測項目	計測内容
載荷荷重	ロードセルを用いて測定する。
変位	支間中央，載荷点2ヶ所，支点2ヶ所の5ヶ所について変位計を用いて測定する。
PC鋼より線のひずみ	PC鋼より線の試験体中央部に貼り付けたひずみゲージを用いて測定する。
コンクリートのひずみ	試験体上縁および試験体下縁の等曲モーメント区間に3ヶ所（合計6ヶ所）に貼り付けたひずみゲージを用いて測定する。
ひび割れの追跡	ひび割れの進展（ひび割れ本数，ひび割れ幅）を載荷荷重とともに測定する。

ステップ0~2：なじみを取るため20kNまで載荷し，除荷する。

ステップ 2～4：ひび割れ発生荷重（約 60kN）まで載荷し，除荷する。  
ステップ 4～6：100kN まで載荷し，除荷する。  
ステップ 6～7：終局荷重まで載荷する。

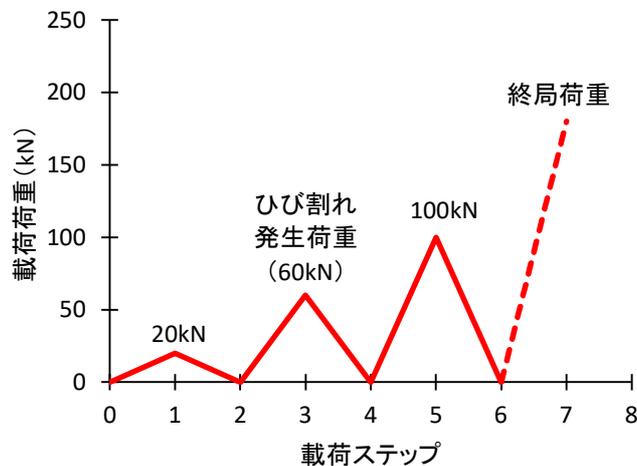


図-6.11 曲げ試験の載荷ステップ図

### 6.3 試験結果

#### 6.3.1 大型試験体の強度特性およびヤング係数に及ぼす塩素固定化材の影響

図-6.12 に部材同一養生時の材齢と圧縮強度およびヤング係数の結果を示す。室内試験の結果と同様に， $CA_2$  を混和した場合に圧縮強度の低下が確認された。H35 より H35B650 の強度が低下し，さらに  $CA_2$  を混和した場合に 10%程度の強度低下が確認されたが，材齢 1 日のプレストレスト導入強度の管理値  $35\text{N/mm}^2$  を満足することが確認された。材齢 28 日までは H35B650 より H35 の方が圧縮強度およびヤング係数ともに高くなる傾向が確認されたが，材齢 91 日においては  $CA_2$  の有無にかかわらず同程度の値を示すことが確認された。

図-6.13 に材齢 28 日における部材同一養生と標準水中養生の圧縮強度およびヤング係数の比較を示す。養生方法の違いによる影響については，H35 は部材同一養生より標準水中養生の圧縮強度が低下し，一方，H35B650 は部材同一養生より標準水中養生の圧縮強度が高くなる傾向を示し，H35B650 の方が湿潤養生で保管することで強度増進に対してより良好な効果が得られることが確認された。

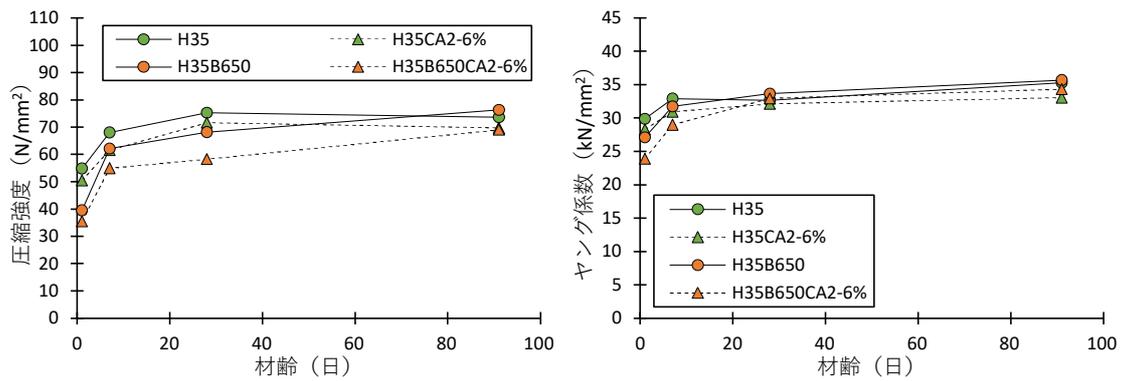


図-6.12 材齢と圧縮強度およびヤング係数の関係

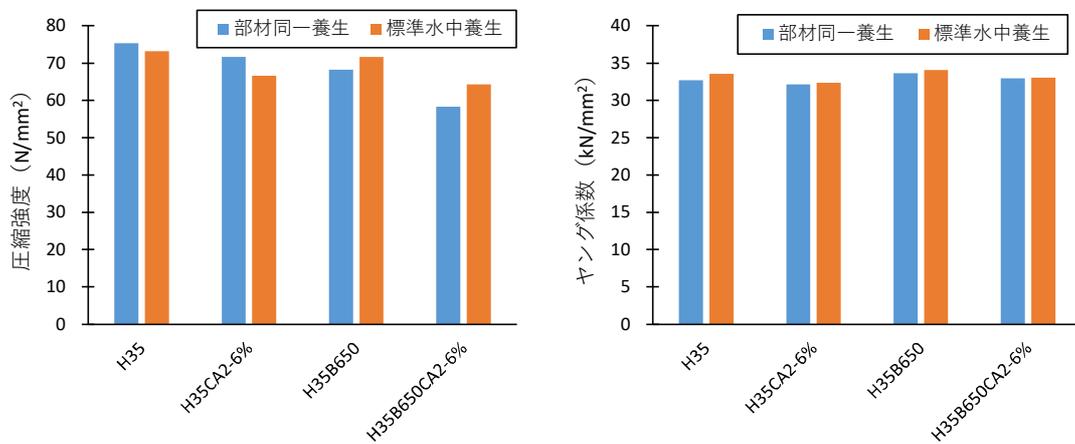


図-6.13 養生方法の違いによる材齢 28 日における圧縮強度およびヤング係数の比較

### 6.3.2 大型試験体の変形特性に及ぼす塩素固定化材の影響

乾燥収縮については、大型試験体と体積表面積比 (V/S) を同一とした  $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$  の小型試験体を用いて測定を行った。試験体は野外環境で保管し、測定時のみ恒温恒湿槽に移動させ試験体の温度が  $20^\circ\text{C}$  であることを確認した後に長さ測定を行った。小型試験体の形状図を図-6.14 に示す。小型試験体を用いて測定した長さ変化率を図-6.15 に示す。長さ変化率について、塩水浸せき前までと塩水浸せき前から塩水浸せき後の結果を示す。H35B650 より H35 の方が、長さ変化率が大きくなる傾向を示しており、どちらの配合についても  $\text{CA}_2$  を混和した方の長さ変化率が小さくなる傾向が確認された。H35 については室内試験と同様の傾向を示したが、H35B650 については  $\text{CA}_2$  を混和した配合の長さ変化率が小さくなる傾向が確認された。

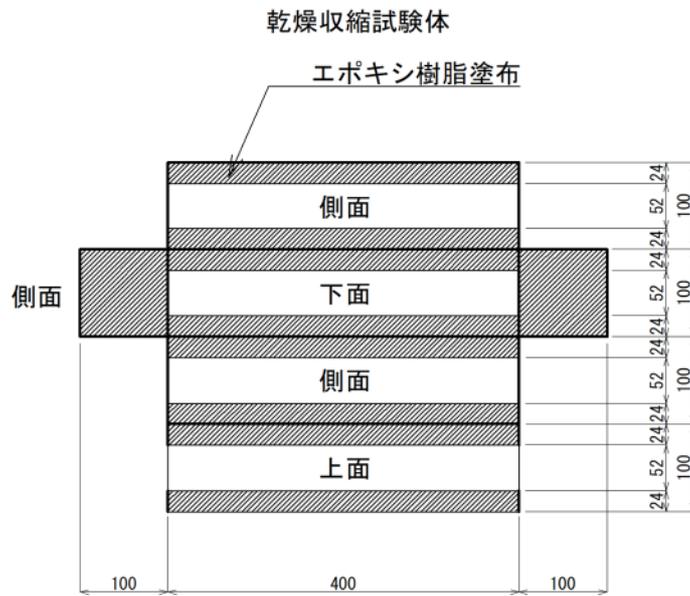
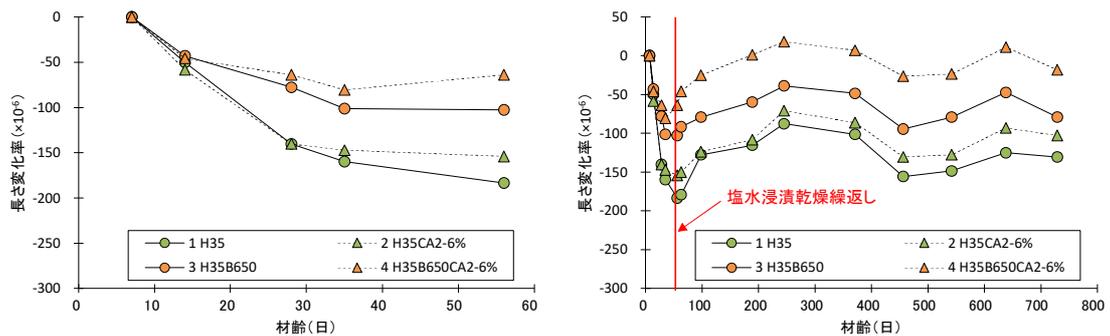


図-6.14 小型乾燥収縮試験体（試験体展開図）



【塩水浸せき前】

【塩水浸せき前から塩水浸せき後】

図-6.15 小型試験体の長さ変化率

次に、大型試験体の中央に配置した埋め込みゲージ（KM-100BT）を用いて試験体の温度および長さ変化率の測定を行った。

埋め込みゲージ（KM-100BT）を用いて測定した大型試験体の中心温度と熱電対を用いて測定した外気温度の変化を図-6.16に示す。大型試験体4体について、外気温度の変化に応じて大型試験体の温度も変化し、最高温度が約 35℃、最低温度が-5℃であり配合種類にかかわらず温度変化に違いがないことが確認された。また、外気温度の変化と比較して大型試験体についてコンクリート中の温度であるため日変化が外気温度の変化より小さくなることが確認された。

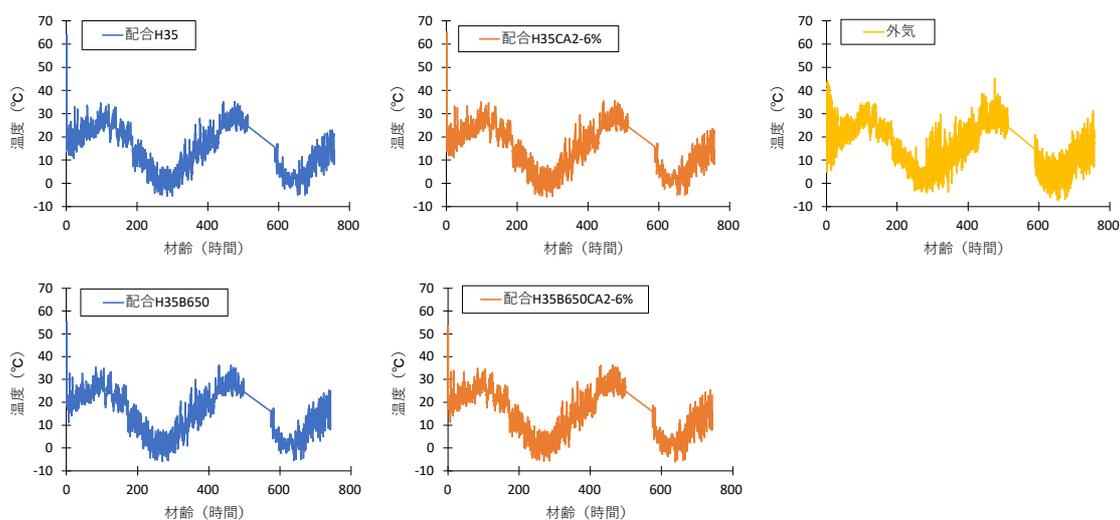


図-6.16 大型試験体の中心温度および外気温度

大型試験体のコンクリート打込み後からの長さ変化率を図-6.17に示す。全ひずみから温度ひずみを差し引いて収縮ひずみを算出した。プレストレス導入直後からひずみが増加するが、塩水浸せき直後に  $50 \times 10^{-6}$  程度ひずみが回復し、その後の塩水浸せき乾燥期間においてひずみの変化はほとんど生じていないことが確認された。

コンクリート打込み後、プレストレス導入時およびプレストレス導入後から材齢 740 日までの各段階でのひずみ値を図-6.18に示す。H35、H35CA<sub>2</sub>-6%および H35B650 については、打込み後から材齢 740 日までのひずみ変化について大きな違いがないことが確認された。しかしながら、H35B650CA<sub>2</sub>-6%についてはその他の配合と比較して打ち込みからプレストレス導入までとプレストレス導入から材齢 740 日までの収縮ひずみが小さくなり、全体のひずみ変化が 20%程度小さくなることが確認された。この現象について、第 5 章で検討を行った通り、CA<sub>2</sub>と GGBS に含まれる SO<sub>3</sub>が反応することで収縮を抑制することで、収縮ひび割れの発生やプレストレスロスの低減に有利に働くと考えられる。

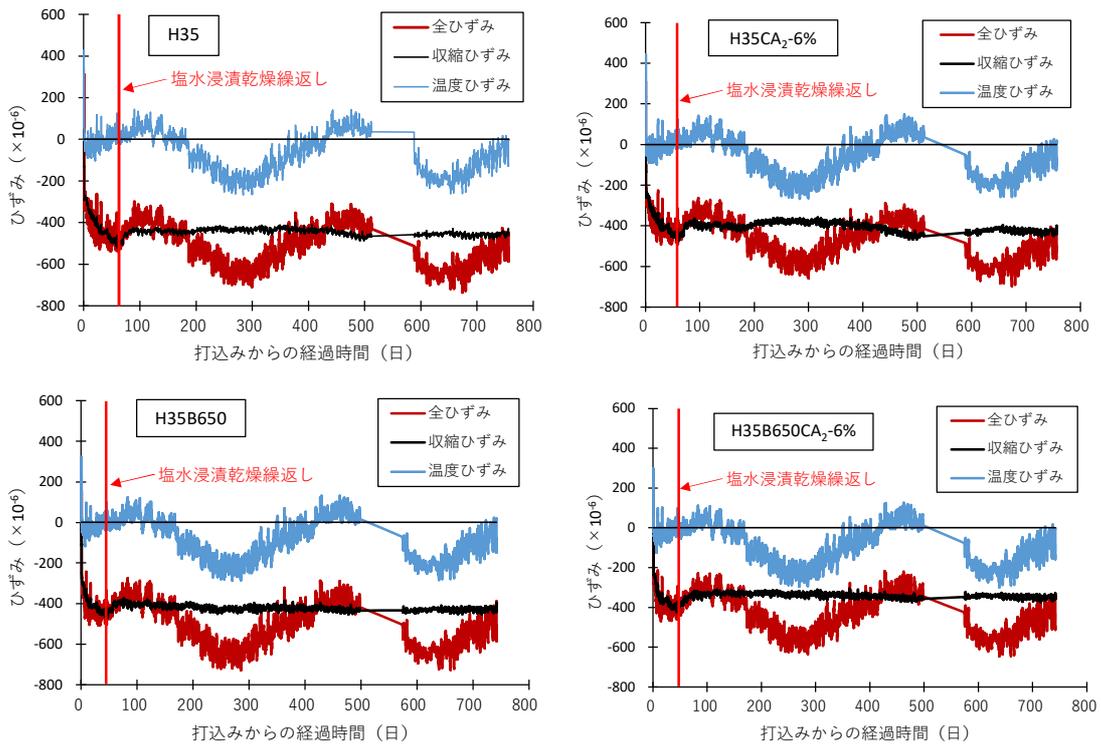


図-6.17 大型試験体のひずみ変化

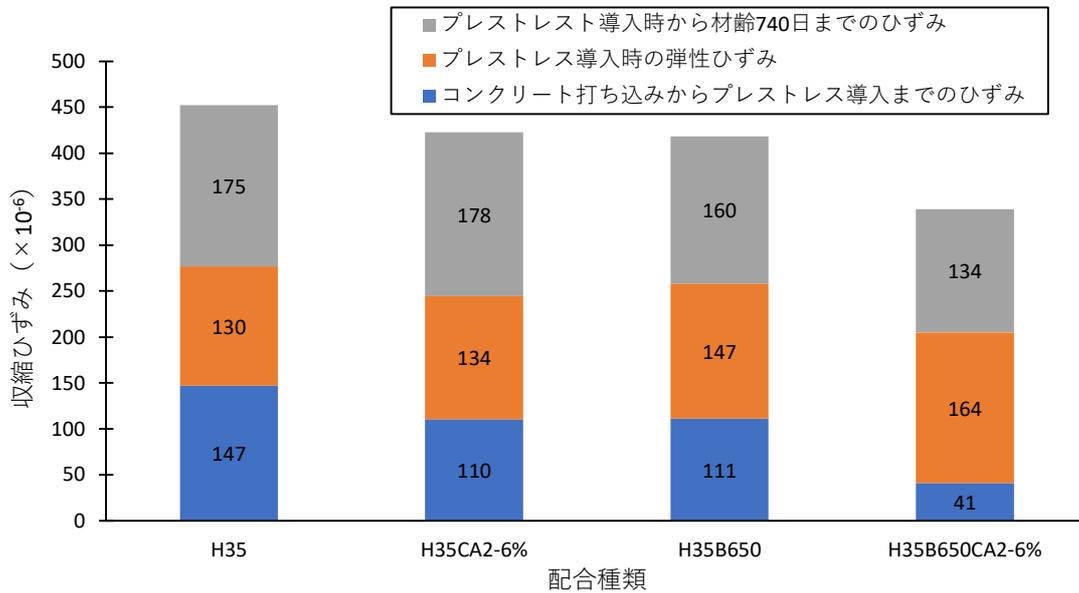


図-6.18 各段階でのひずみ変化

大型試験体を用いて測定したプレストレス導入時の弾性ひずみと収縮ひずみと小型試験体を用いて測定した無載荷ひずみを用いてクリープ係数を算出した。クリープ係数の計算式を式(6.3)および式(6.4)に示す。材齢 740 日時点でのそれぞれの測定値を用いてクリープ係数を算出した結果を表-6.5 に示す。

$$\varepsilon_{ct} = \varepsilon_{at} - \varepsilon_e - \varepsilon_{st} \quad (6.3)$$

$$\varphi_t = \varepsilon_{ct} / \varepsilon_e \quad (6.4)$$

ここに、 $\varepsilon_{ct}$ ：クリープひずみ

$\varepsilon_{at}$ ：全ひずみ（プレストレス導入後の収縮ひずみ）

$\varepsilon_e$ ：載荷時弾性ひずみ

$\varepsilon_{st}$ ：無載荷ひずみ

$\varphi_t$ ：クリープ係数

表-6.5 クリープ係数の算出値

	大型試験体		小型試験体	クリープひずみ =収縮ひずみ- (弾性ひずみ+ 無載荷ひずみ)	クリープ 係数	第5章の室内 試験で求めら れたクリープ 係数
	弾性 ひずみ	プレストレス導入後 の材齢 740 日での 収縮ひずみ	無載荷 ひずみ			
H35	-130	-305	-131	-44	0.34	0.18
H35CA <sub>2</sub> -6%	-134	-312	-103	-75	0.56	0.18
H35B650	-147	-307	-79	-81	0.55	0.16
H35B650CA <sub>2</sub> -6%	-164	-298	-18	-116	0.71	0.16

表-6.5 に示す大型試験体を用いた結果について、H35 および H35B650 のいずれも CA<sub>2</sub> を混和した配合のクリープ係数が大きくなる傾向が確認された。

大型試験体を用いて測定した弾性ひずみおよびプレストレス導入後の収縮ひずみについて CA<sub>2</sub> の有無による違いは見られなかったが、無載荷ひずみについて大型試験体と V/S を揃えた小型試験体を用いたことにより無載荷ひずみについて違いが生じている可能性が考えられる。今後の検討においては無載荷ひずみの測定についてもプレストレスを導入した大型試験体と同型の試験体を用いる必要があると考えられる。参考値として第 5 章の室内試験で求められたクリープ係数の結果を同表に示すが、一般的な温度 20℃、湿度 60%の環境で測定した乾燥収縮ひずみと塩水浸せき乾燥の影響を受けた場合の乾燥収縮ひずみの違いが影響していると考えられるため、環境条件の違いが収縮に与える影響についてもより詳細な検討が必要であると考えられる。その他に、大型試験体については PC 鋼より線とコンクリートの付着によりコンクリートに圧縮力を導入しているため、室内試験の結果と異なり PC 鋼より線とコンクリートの付着性能の違いも影響しているため、CA<sub>2</sub> を用いた場合の付着性能についても検討を行う必要がある。

### 6.3.3 大型試験体の耐久性に及ぼす塩素固定化材の影響

#### (1) コンクリートの塩分浸透抵抗性

大型試験体と同じ条件で試験体作製および養生を行った小型試験体（ $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ ）を用いて塩分浸透深さを測定した結果を図-6.19に示す。室内試験と同様に暴露環境で塩水浸せき乾燥を繰り返し行った試験体についても  $\text{CA}_2$  による塩分浸透抑制効果が確認された。

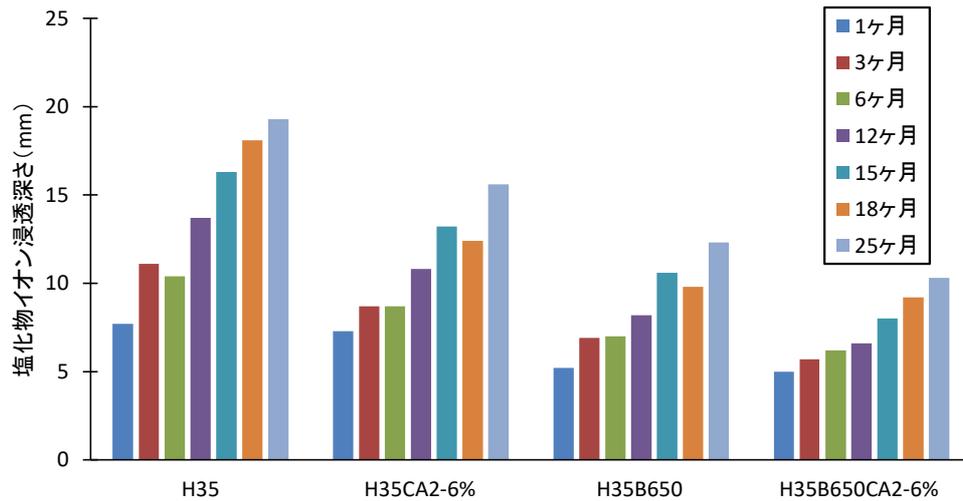


図-6.19 暴露試験体と同じ条件で製造を行った小型試験体の塩分浸透深さ

次に、暴露試験体と同じ条件で試験体作製および養生を行った小型試験体 ( $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ ) を用いて非定常・電気泳動試験により塩化物イオン拡散係数の測定を行った。非定常・電気泳動試験の試験状況を図-6.20 に示し、試験結果を図-6.21 に示す。硝酸銀溶液を噴霧して目視で測定した結果を比較して、H35 と H35B650 の差が大きくなる傾向が確認された。いずれの配合についても、CA<sub>2</sub>を用いることで塩化物イオン拡散係数が低減できることが確認された。

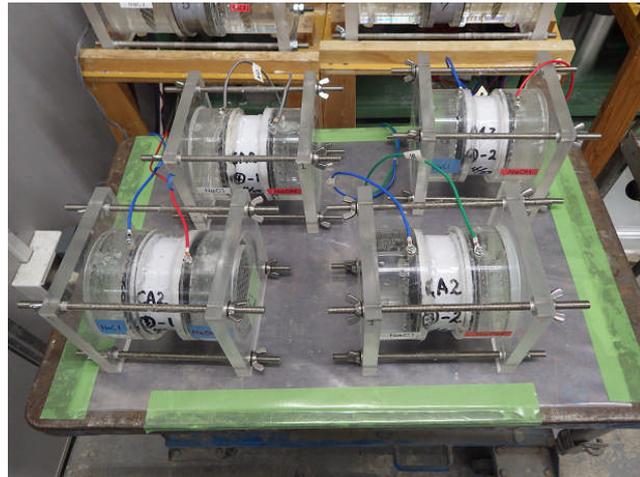


図-6.20 非定常・電気泳動試験の試験状況

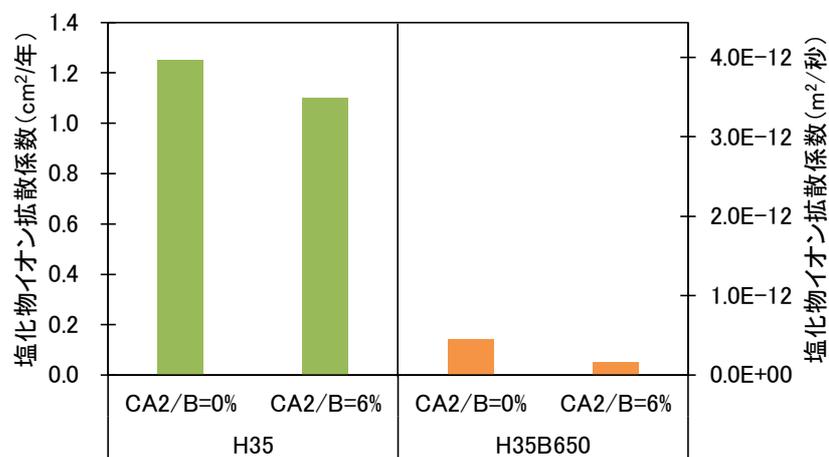


図-6.21 塩化物イオン拡散係数

大型試験と同様の養生条件で保管した 100×100×400mm の試験体を用いて EPMA 法による面分析から得られた塩素のマッピング画像を図-6.22 に示し、試料深さと塩化物イオン濃度の関係を図-6.23 に示し、EPMA による見かけの拡散係数を測定した結果を図-6.24 に示す。その結果、海岸沿いなどの暴露環境を想定した塩水浸せきと乾燥を繰り返し受ける状況においても CA<sub>2</sub> を混和した配合について塩分浸透抑制効果が得られることが確認された。

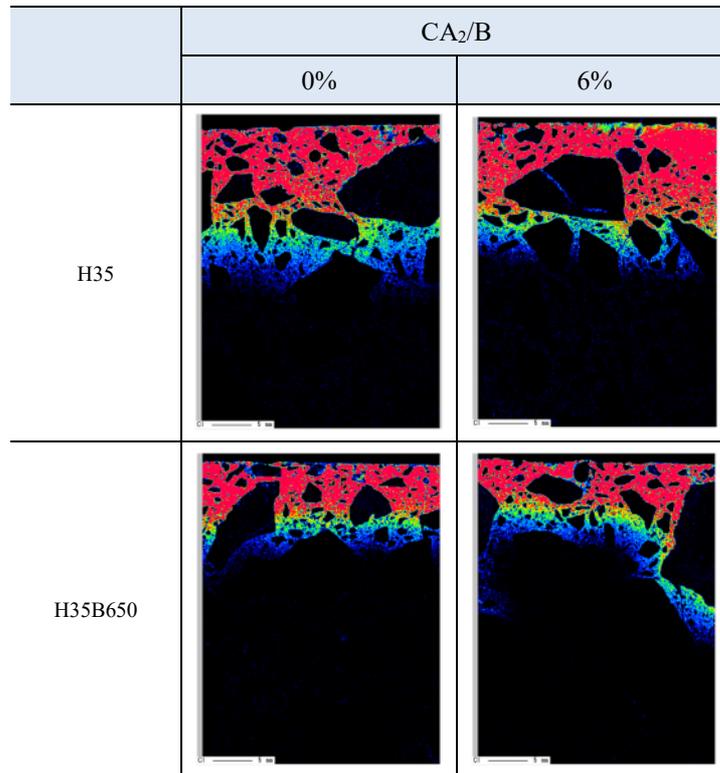


図-6.22 標準養生を行った試験体の塩素のマッピング画像

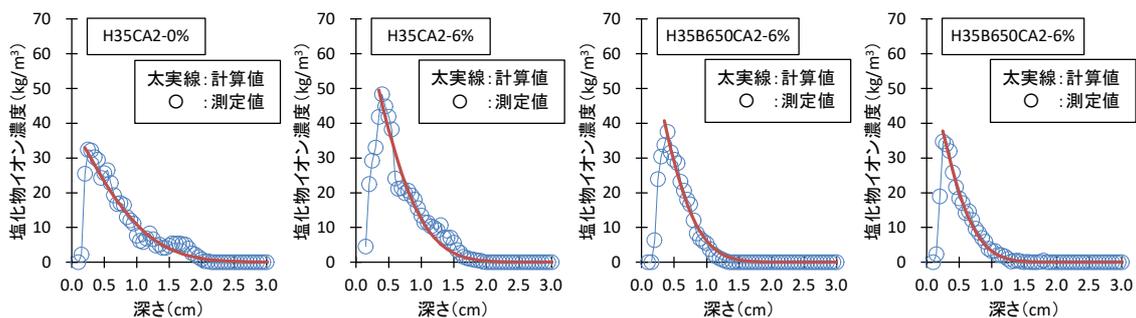


図-6.23 試験体の試料深さと塩化物イオン濃度の関係

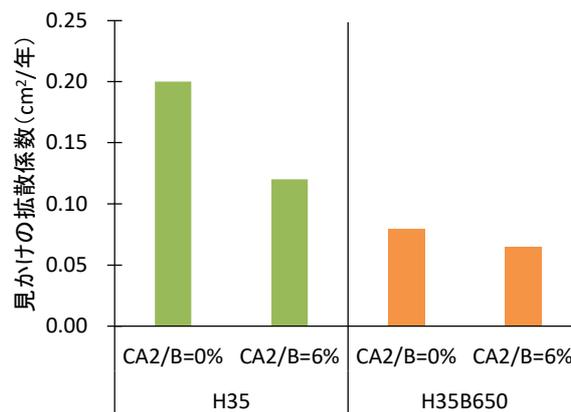


図-6.24 大型試験体と同一養生を行った試験体の見かけの拡散係数

## (2) コンクリートの中性化抵抗性

大型試験体と同じ条件で試験体作製および養生を行った小型試験体（ $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ ）を用いて中性化深さの測定を行ったが、乾湿繰返して湿潤状態の期間が長い条件であったため中性化については促進環境ではなかったために材齢 30 ヶ月まではすべての配合について中性化深さは確認されなかった。

## (3) 非破壊検査手法を用いた $\text{CA}_2$ の評価

### a) 自然電位による鋼材腐食の評価

PC 鋼より線の腐食状況を確認するために自然電位の測定を行った。自然電位の測定結果を図-6.25 に示す。1 試験体当たり 5 点の平均値の結果を示す。すべての試験体について外気温度の影響を受けて自然電位が変化していることが確認できる。H35 および H35CA<sub>2</sub>-6%については、自然電位の値が $-300 \sim 0\text{mVvsCSE}$ を示しており、材齢 30 ヶ月までは鋼材の腐食は生じていないことが確認できる。一方、H35B650 および H35CA<sub>2</sub>-6%については、自然電位の値が $-350\text{mVvsCSE}$ 以下の卑の傾向を示すことが確認された。既往の研究<sup>6.1)</sup>においても、高炉スラグ微粉末を用いた試験体について塩水浸せきした場合に自然電位が卑の傾向が強い試験体が存在することが確認されている。その原因として、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは鉄筋の不動態被膜が不安定になるなどの報告<sup>6.2)</sup>もあるため今後のさらなる検討が必要であると考えられる。

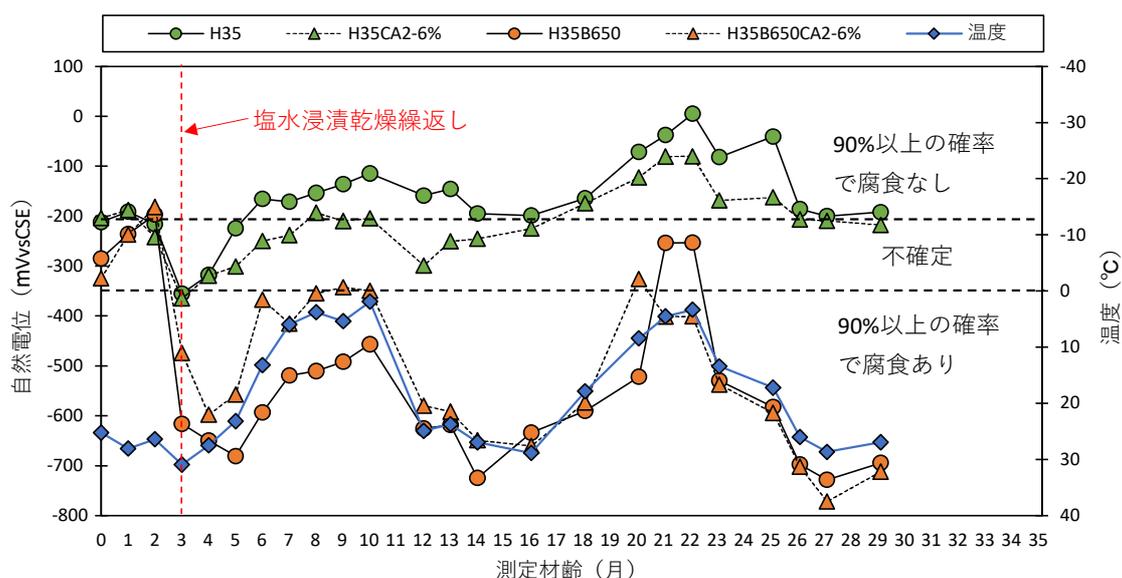


図-6.25 暴露試験体の自然電位の変化

b) 電気抵抗率による耐久性評価

混和材を活用した PCaPC 部材は塩化物イオン浸透に対して高い抵抗性を有するが、その抵抗性の程度を定量的に評価して配合を選定したり、製造した PCaPC 部材の抵抗性を品質管理で確認したりする方法は確立されていない。本試験でも実施している通り、塩化物イオン浸透に対する抵抗性を評価する手法は複数存在するが、結果が得られるまでに長期間を要するものは、配合の検討や品質管理の手法に用いるのは現実的ではない。電気抵抗率は、比較的短期間で結果を得ることが可能であり、試験による得られる電気抵抗率と浸せき試験による見掛けの拡散係数および非定常・電気泳動試験より得られる塩化物イオン拡散係数の関係から塩化物イオン浸透に対する抵抗性を評価できることが可能である<sup>6.3)</sup>。

図-6.26 に材齢と電気抵抗率の関係を示す。図-6.27 に参考文献 6.3) に示されている電気抵抗率の結果を示すが、H35 および H35B650 の電気抵抗率について同程度の傾向を示していることが確認された。本試験で測定を行った図-6.26 については、H35 と H35B650 については明確な電気抵抗率の差が確認され、H35B650 の方が高い塩分浸透抑制効果を有していることが確認された。しかしながら、硝酸銀噴霧法や非定常・電気泳道試験で CA<sub>2</sub> の有無による明確な違いが確認されたが電気抵抗率については CA<sub>2</sub> の有無による差が確認されなかった。今後、CA<sub>2</sub> を用いたコンクリートについて電気抵抗率を用いた管理を行う場合は、より詳細な検討が必要であると考えられる。

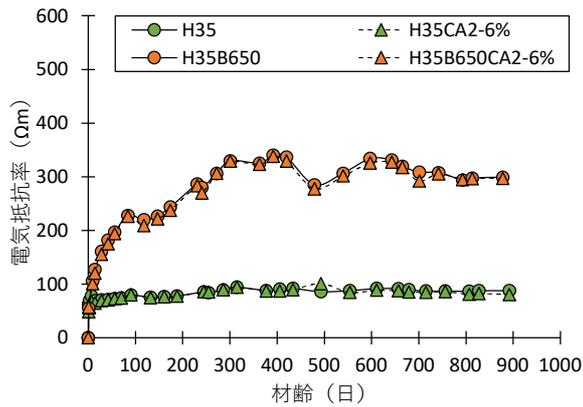


図-6.26 材齢と電気抵抗率の関係

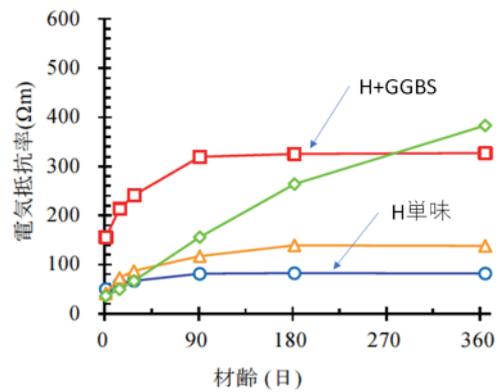


図-6.27 電気抵抗率の測定結果<sup>6.3)</sup>

参考文献 6.3) に示されている材齢 91 日の電気抵抗率と非常常・電気泳動試験による塩化物イオン拡散係数の関係を図-6.28 に示す。本試験で得られた H35 および H35B650 の結果をプロットした場合に、電気抵抗率と非常常・電気泳動試験の関係について反比例の傾向を示しており既往の研究と同程度の傾向を示すことが確認された。また、塩化物イオン浸透抵抗性の分類を表-6.6 に示すが、H35 は区分 1 に分類され、H35B650 については区分 3 に分類されることが確認された。

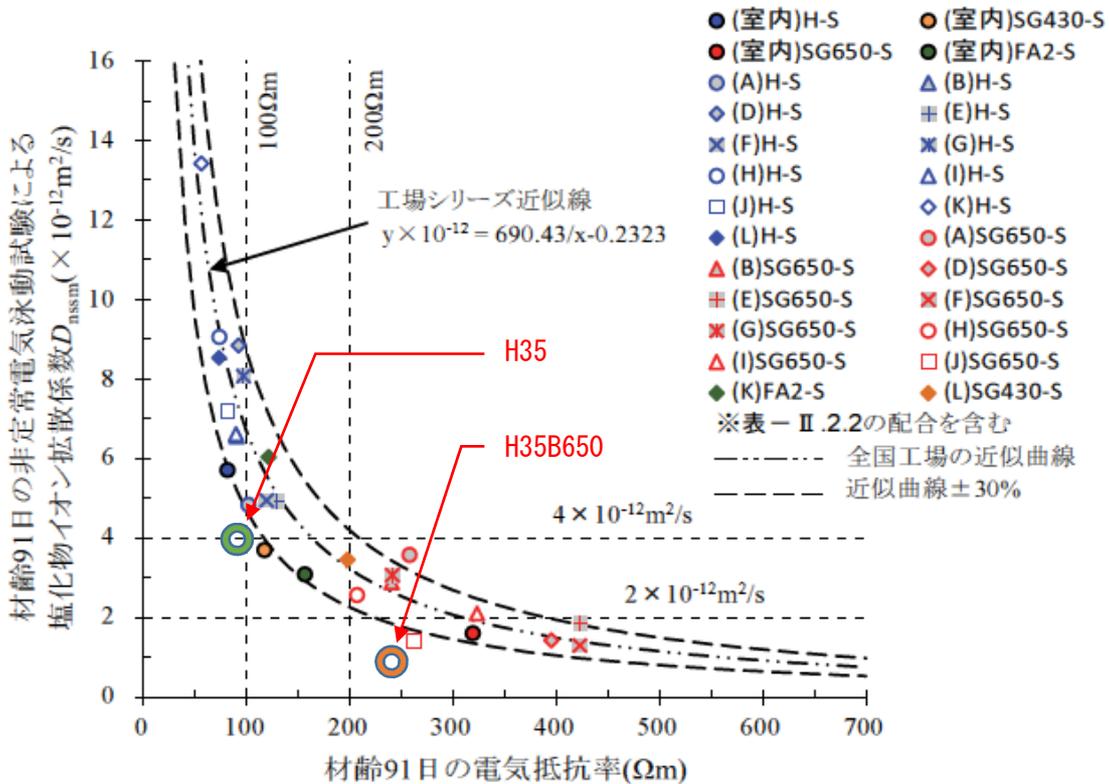


図-6.28 材齢 91 日の電気抵抗率と非常常・電気泳動試験による塩化物イオン拡散係数の関係<sup>6.3)</sup>

表-6.6 塩化物イオン浸透抵抗性の分類<sup>6.3)</sup>

塩化物イオン浸透に対する抵抗性に 応じた方針の区分	非定常電気泳動試験による 塩化物イオン拡散係数 $D_{nssm}$ ( $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ )	電気抵抗率 ( $\Omega\text{m}$ )	各区分に対応する結合材の例 (水結合材比:32~40%)
区分1 塩害の影響度合いが最も厳しい区分 では、かぶりのみでは防食できず、 塗装鉄筋等を併用	4<	< 100	早強ポルトランドセメント単味
区分2 塩害の影響度合いが最も厳しい区分 でも、100年間で、かぶり70mm位置の 塩化物イオン濃度が腐食限界値に 達しない	2~4	100~200	早強ポルトランドセメント +高炉スラグ微粉末4000(置換率30%)
区分3 塩化物イオンの浸透が停滞するため 塩害の影響を受けない	<2	200<	早強ポルトランドセメント +高炉スラグ微粉末6000(置換率50%) 早強ポルトランドセメント +フライアッシュII種(置換率20%)

c) 表層透気係数による耐久性評価

コンクリートの鉄筋腐食は、水分や酸素、二酸化炭素、飛来塩分の浸透によって発生し、促進されることが知られている。これらは、コンクリート表層部の緻密性（透気性能）との関係があることから、かぶり厚さとともにコンクリート表層部の品質確認が耐久性能を考える上で非常に重要である。表層部の緻密性の確認試験の一つとして表層透気試験方法がある。大型試験体について表層透気試験方法を用いて測定した結果を図-6.29に示す。脱枠後から塩水浸せき乾燥繰返しまでの期間においては表層透気係数が  $0.1 \sim 1.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$  で一般のグレードを示していたが、塩水浸せき乾燥返し試験後は配合種類にかかわらず  $0.1 \times 10^{-16} \text{m}^2$  以下の良または優のグレードを示した。表層透気試験方法においても電気抵抗率試験と同様に  $\text{CA}_2$  の塩分浸透抵抗性の向上効果を評価するためにはより詳細な検討が必要であると考えられる。

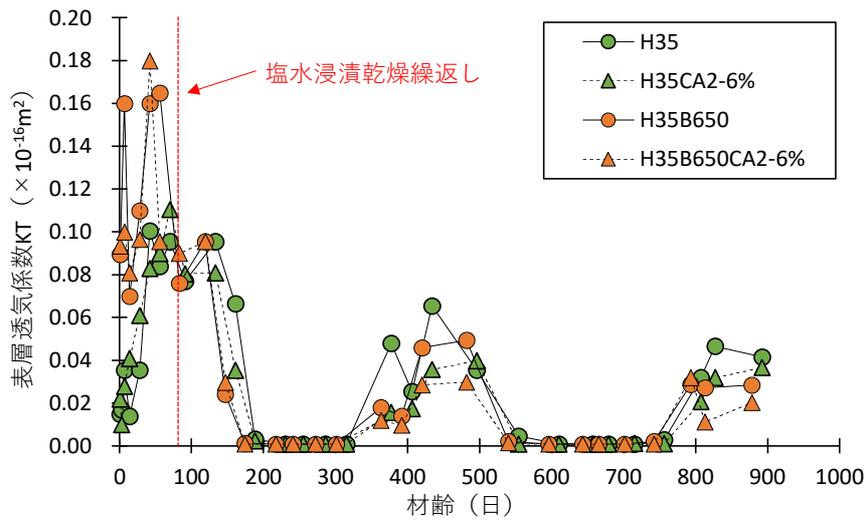


図-6.29 材齢と表層透気係数の関係

d) 表層透気係数と電気抵抗率を用いた耐久性評価

Torrent らはコンクリート表層の含水率を Wenner 法で測定される電気抵抗率で間接評価し、表層透気係数の測定結果と照合することで透気性グレードを 5 段階に区分評価する方法を提案している<sup>6.4)</sup>。図-6.30 に本試験で得られた表層透気係数と電気抵抗率の結果を、評価ノモグラムに当てはめた結果を示す。H35 と H35B650 を比較した場合に、表層透気係数の変化については大きな違いは生じておらず、電気抵抗率が H35 より H35B650 の方が高くなる傾向が確認された。いずれにせよ配合種類にかかわらず品質評価は、材齢が進むにつれて『Good』から『Very good』に推移しており、一部分気温上昇に伴い表層透気係数が大きくなる傾向が確認されているが、塩水浸せきと乾燥状態を繰り返すことで養生効果が得られたものと考えられる。CA<sub>2</sub>の有無により非定常・電気泳動試験や EPMA による塩化物イオンのマッピング画像および見かけの拡散係数については CA<sub>2</sub>による塩分浸透抑制効果が確認されたが、非破壊試験では明確な違いは確認されておらず、CA<sub>2</sub>の効果を非破壊試験でも評価する手法についてより詳細な検討が必要であると考えられる。

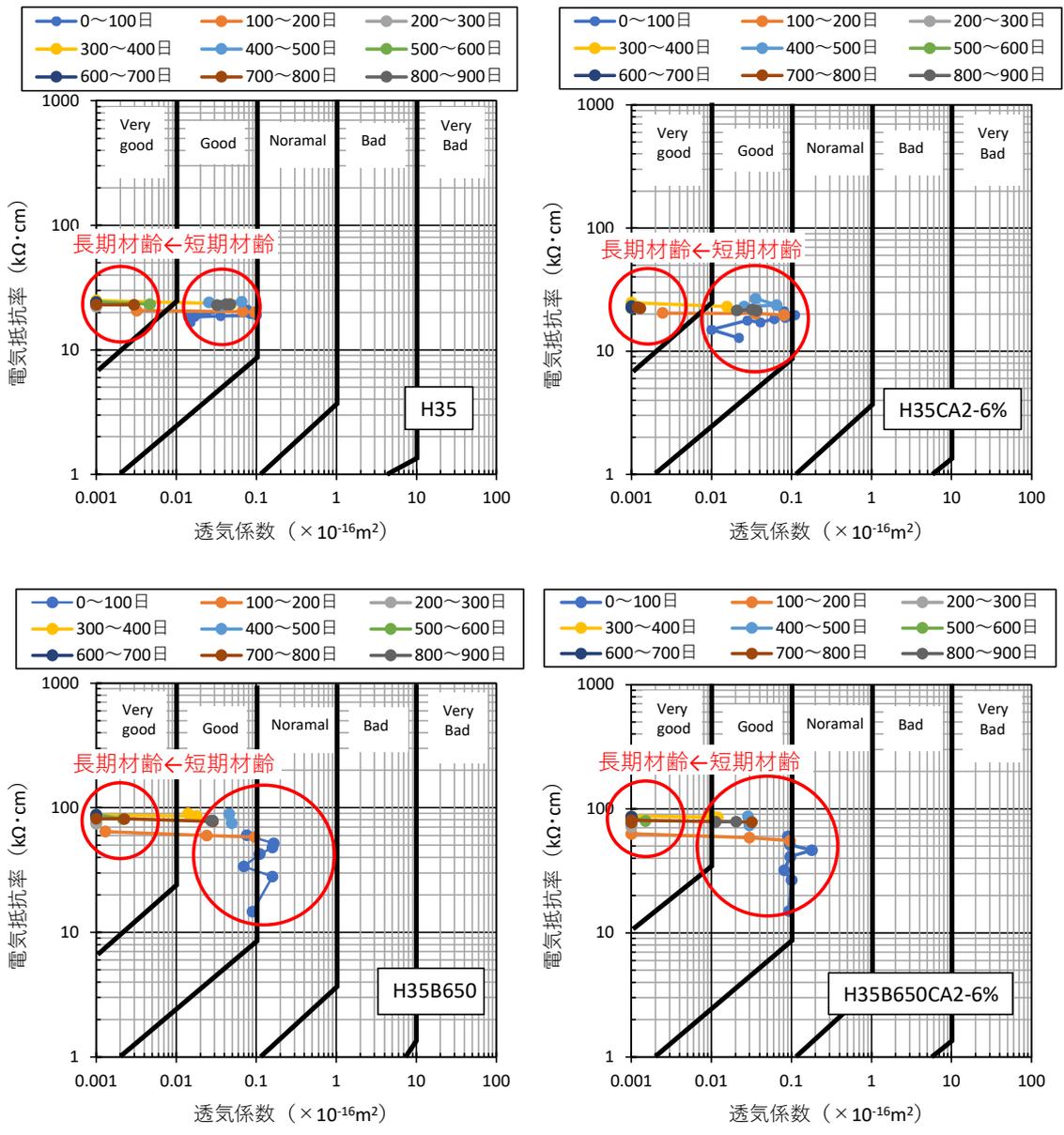


図-6.30 表層透気係数と電気抵抗率の関係

#### 6.4 大型試験体の曲げ耐力に及ぼす塩素固定化材の影響

塩水浸せき乾燥繰返しを約 2.5 年間行った大型試験体の外観性状を図-6.31 に示し、曲げ  
載荷試験状況を図-6.32 に示す。塩水浸せき乾燥の繰返し試験を行った試験体の外観性状  
について、H35 について少量の白い析出物が確認されたが、その他の試験体についてはひび  
割れなどの発生もなく塩水浸せき乾燥繰返し前から大きな変化は確認されなかった。

① H35



② H35CA<sub>2</sub>-6%



③ H35B650



④ H35B650CA<sub>2</sub>-6%



図-6.31 塩水浸せき乾燥繰返しを 2.5 年間行った大型試験体



図-6.32 曲げ載荷試験状況

載荷試験時の硬化コンクリートの特性値を表-6.7に示す。H35 および H35CA<sub>2</sub>-6%は材齢 902 日の結果を示し、H35B650 および H35B650CA<sub>2</sub>-6%は材齢 888 日の結果を示す。参考値として材齢 28 日の圧縮強度およびヤング係数の結果を示すが、配合種類にかかわらず材齢約 2.5 年後で圧縮強度およびヤング係数ともに 10~20%程度増加していることが確認された。

表-6.7 載荷試験時の硬化コンクリートの特性値

配合種類	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
	標準養生	塩水浸せき 乾燥繰返し	標準養生	塩水浸せき 乾燥繰返し	標準養生	塩水浸せき 乾燥繰返し
H35	86.0(73.2)	91.1(75.3)	39.8(33.6)	40.6(32.7)	5.22	6.18
H35CA <sub>2</sub> -6%	79.0(66.6)	88.9(71.6)	37.6(32.4)	38.7(32.1)	5.08	5.75
H35B650	87.8(71.6)	86.7(68.2)	40.0(34.1)	40.2(33.7)	4.92	5.08
H35B650CA <sub>2</sub> -6%	82.0(64.2)	77.7(58.3)	39.1(33.0)	39.7(33.0)	4.72	3.95

※( )内の値は材齢 28 日の結果を示す。

図-6.33 に変位計およびひずみゲージの設置位置図を示す。図-6.34 に支間中央たわみと載荷荷重の関係を示す。当初の予定では、ひび割れ発生荷重を 60kN 程度と予想していたが、すべての試験体について 110kN であったため、20kN、100kN および 110kN で繰返し載荷を行った。繰返し載荷時においても支間中央たわみと載荷荷重の関係について、H35 と H35CA<sub>2</sub>-6%を比較すると、H35 は載荷荷重 160kN あたりから荷重の伸びの低下が見られたが、H35CA<sub>2</sub>-6%については最大荷重に到達するまでそのような現象は確認されず、最大荷重について H35 より H35CA<sub>2</sub>-6%の方が 5kN 程度大きくなった。H35B650 と H35B650 CA<sub>2</sub>-6%を比較すると、最大荷重について H35B650 CA<sub>2</sub>-6%より H35B650 の方が 5kN 程度大きくなった。これについては、試験時のコンクリートの圧縮強度が H35B650 より H35B650 CA<sub>2</sub>-6%の方が 5%程度小さくなっていることが影響していると考えられる。全ての試験体について、中央たわみが 30mm あたりで試験体上部の圧壊後に荷重が低下し、支間中央たわみが 45mm に到達するまで載荷した後に荷重を除荷した。除荷後のたわみの戻り量についても配合種類にかかわらず同程度であることが確認された。

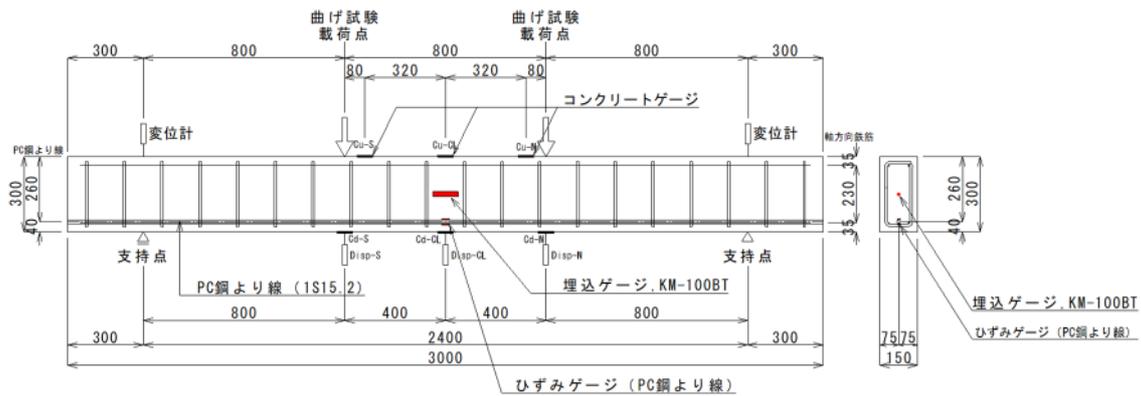


図-6.33 変位計およびひずみゲージ設置位置図

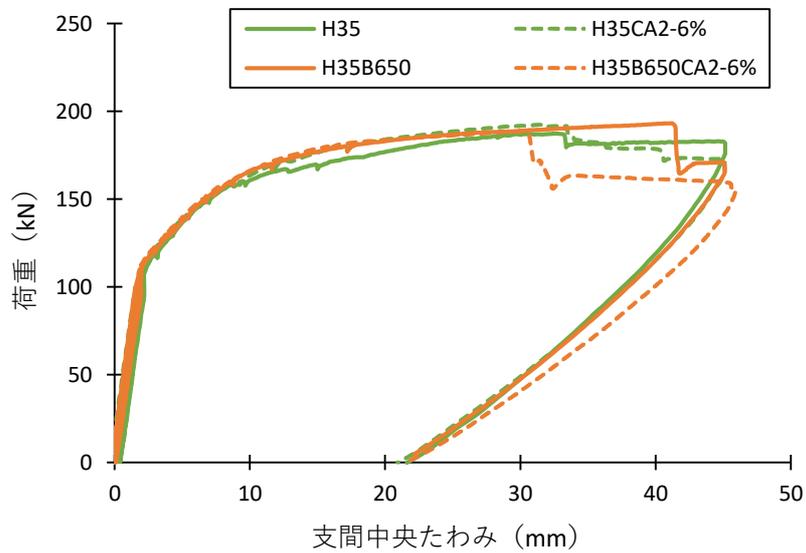


図-6.34 支間中央たわみと載荷荷重の関係

図-6.35 に PC 鋼より線のひずみと荷重の関係を示す。H35B650 および H35B650CA<sub>2</sub>-6% の試験体については、塩水浸せき乾燥繰返し試験中に PC 鋼より線に貼り付けたひずみゲージまたはリード線に不具合が生じていたため測定ができない状況であった。H35 と H35CA<sub>2</sub>-6% の比較を示すが、PC 鋼より線のひずみと載荷荷重の関係について大きな違いは確認されなかった。

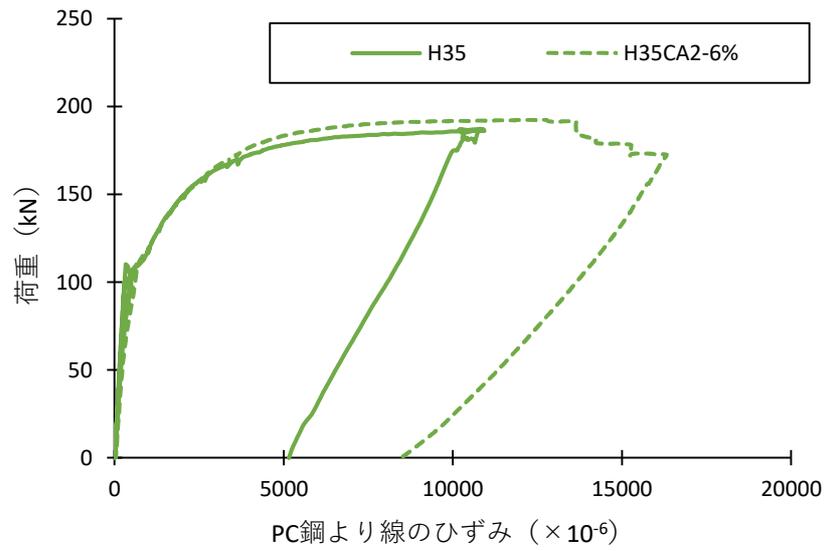


図-6.35 PC 鋼より線のひずみと荷重の関係

図-6.36 にコンクリート上縁の圧縮ひずみと荷重の関係を示す。配合種類にかかわらず  $3,500 \sim 4,000 \times 10^{-6}$  の圧縮ひずみが生じた時点で上縁のコンクリートが圧壊し破壊に至った。

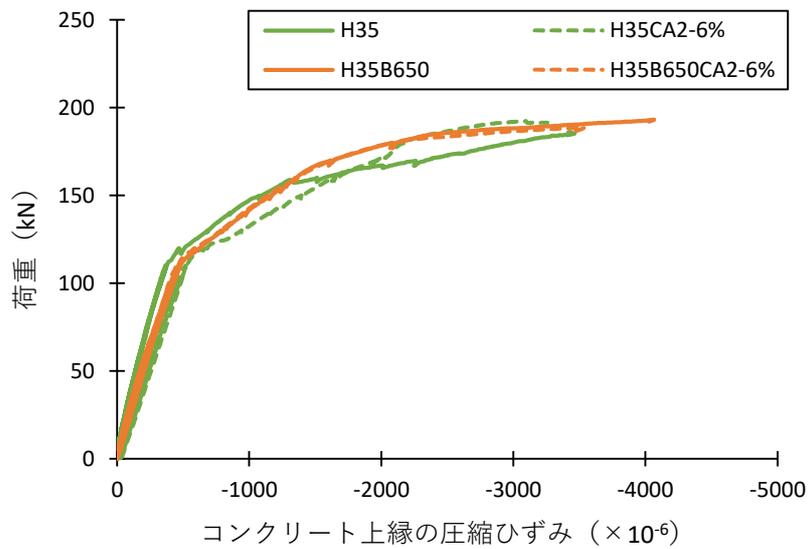


図-6.36 コンクリートのひずみと荷重の関係

図-6.37 にひび割れ発生状況の写真を示し、図-6.38 にひび割れ図を示す。ひび割れ図については、黒線でひび割れ発生から載荷荷重 170kN までに発生したひび割れを示し、赤線で破壊時点のひび割れを示す。すべての試験体について、ひび割れ発生荷重は 110kN であった。その後、載荷荷重の増加に伴い等曲げ区間のひび割れが増加し、最終的にはコンクリート上面の圧壊で破壊に至った。

① H35



② H35CA<sub>2</sub>-6%



③ H35B650



④ H35B650CA<sub>2</sub>-6%



図-6.37 ひび割れ発生状況の写真

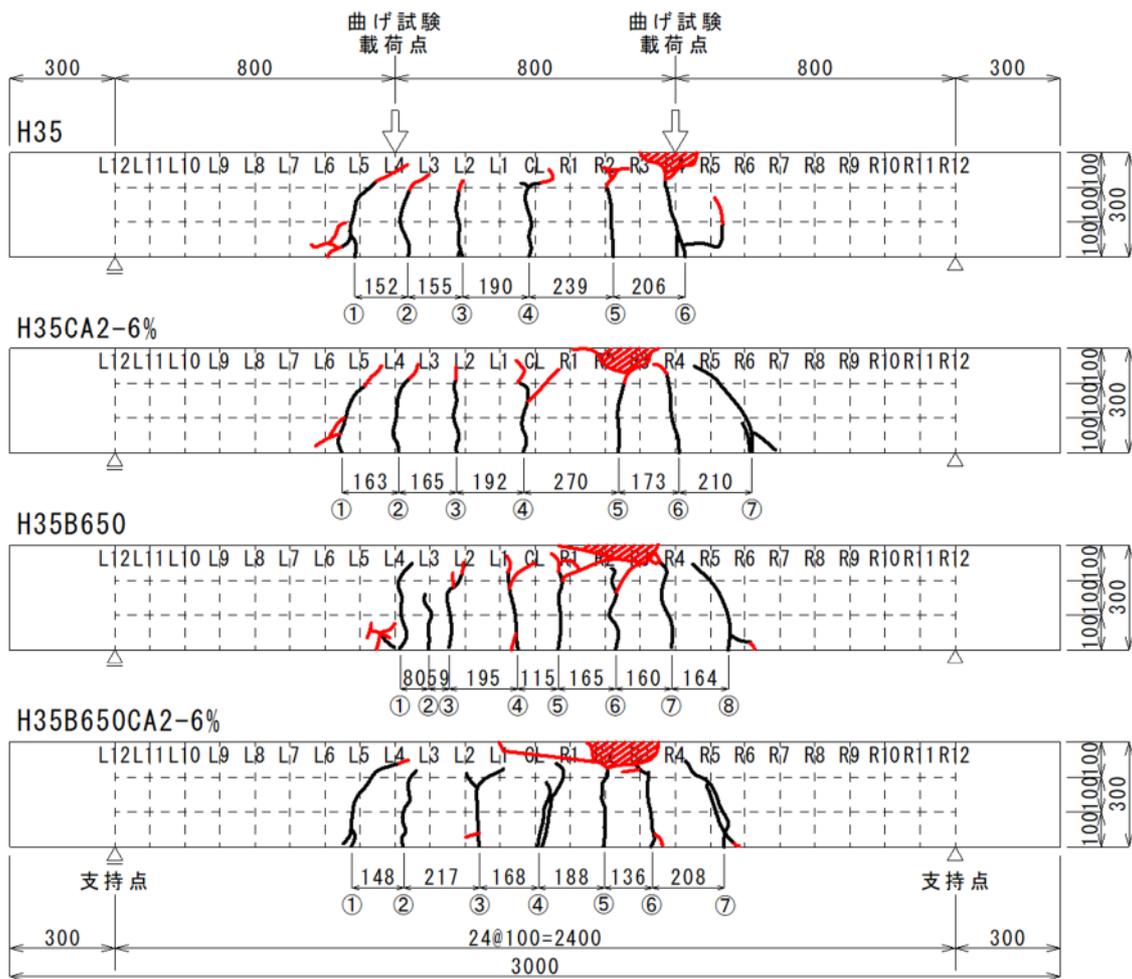


図-6.38 ひび割れ図

ひび割れ幅の結果を表-6.8 に示し、載荷荷重とひび割れ幅の合計値の関係を図-6.39 に示す。ひび割れ発生荷重時の載荷荷重 110kN から 170kN までのひび割れ幅の進展状況について配合種類で大きな違いは確認されなかった。載荷荷重とひび割れ幅の合計値の関係については、150kN から H35B650 よりも H35 のひび割れ幅の合計が大きくなる傾向が見られた。CA<sub>2</sub> の有無による影響については、CA<sub>2</sub> を混和した場合の方がひび割れ幅の合計は同等か小さくなる傾向が確認された。

表-6.8 ひび割れ幅の結果

H35

荷重 (kN)	PC鋼より線位置でのひび割れ幅 (mm)							合計
	①	②	③	④	⑤	⑥		
110					0.05			0.05
120		0.05	0.05	0.05	0.05	0.05		0.25
130		0.05	0.05	0.10	0.10	0.05		0.35
140		0.10	0.10	0.10	0.10	0.10		0.50
150	0.10	0.20	0.10	0.15	0.15	0.10		0.80
160	0.30	0.30	0.20	0.35	0.30	0.70		2.15
170	0.70	0.40	0.40	0.60	0.35	1.50		3.95

H35CA<sub>2</sub>-6%

荷重 (kN)	PC鋼より線位置でのひび割れ幅 (mm)							合計
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	
110			0.05	0.05	0.05			0.15
120		0.05	0.05	0.05	0.10	0.05		0.30
130		0.05	0.05	0.10	0.10	0.10		0.40
140		0.10	0.10	0.15	0.15	0.15		0.65
150	0.10	0.10	0.15	0.20	0.20	0.20	0.10	1.05
160	0.15	0.30	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30	1.85
170	0.25	0.50	0.30	0.65	0.60	0.60	0.60	3.50

H35B650

荷重 (kN)	PC鋼より線位置でのひび割れ幅 (mm)								合計
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	
110				0.05					0.05
120		0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05		0.30
130		0.05	0.10	0.05	0.10	0.05	0.05		0.40
140	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10		0.70
150	0.10	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.10		0.95
160	0.15	0.20	0.20	0.20	0.25	0.20	0.15	0.10	1.45
170	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.50	0.30	0.40	2.90

H35B650CA<sub>2</sub>-6%

荷重 (kN)	PC鋼より線位置でのひび割れ幅 (mm)							合計
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	
110				0.05				0.05
120		0.05	0.05	0.05		0.05		0.20
130		0.05	0.05	0.10	0.05	0.05		0.30
140		0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.05	0.55
150		0.10	0.20	0.25	0.20	0.15	0.10	1.00
160	0.10	0.15	0.25	0.25	0.30	0.25	0.25	1.55
170	0.15	0.30	0.50	0.40	0.40	0.40	0.50	2.65

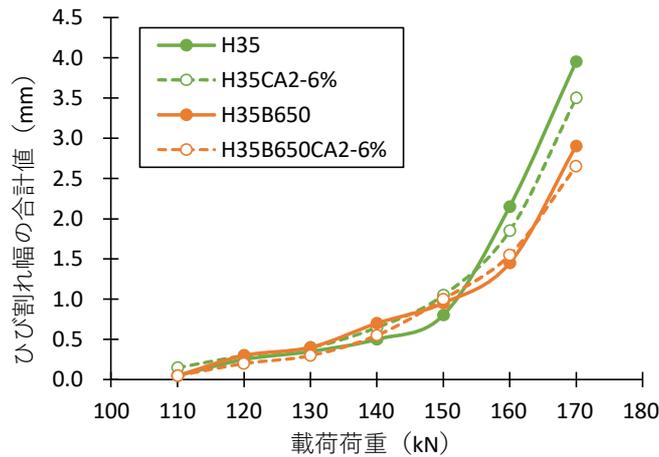


図-6.39 載荷荷重とひび割れ幅の合計値の関係

コンクリート標準示方書<sup>6.5)</sup>に示されるひび割れ間隔算定式を用いて計算した値と実測値との比較を行った。ひび割れ間隔の算定式を式(6.5)に示す。ひび割れ間隔の算定値と実測値の比較を表-6.9に示す。平均ひび割れ間隔の実測値は、H35B650が134mmとなりその他の配合と比較して若干小さくなる傾向を示したが大きな違いは確認されなかった。ひび割れ間隔算定値との比較については、実測した最大ひび割れ間隔と同程度の値を示しており、実測値の平均ひび割れ間隔の方が30%程度小さくなる傾向が確認された。

$$l_{\max} = 1.1 \times k_1 \times k_2 \times k_3 \times \{4c + 0.7(C_s - \varphi)\} \quad (6.5)$$

ここに、 $k_1$ ：異形鉄筋は1.0、丸鋼およびPC鋼材は1.3

$k_2$ ：コンクリートの品質がひび割れに及ぼす影響を表わす係数

$k_3$ ：引張鋼材の段数の影響を表わす係数

$c$ ：かぶり (mm)

$C_s$ ：鋼材の中心間隔 (mm)

$\varphi$ ：鋼材径 (mm)

表-6.9 ひび割れ間隔の算定値と実測値の比較

	最小ひび割れ 間隔 (mm)	最大ひび割れ 間隔 (mm)	平均ひび割れ 間隔 (mm)	ひび割れ 間隔の算定値 (mm)
H35	152	239	188	266
H35CA <sub>2</sub> -6%	163	270	196	266
H35B650	59	195	134	267
H35B650CA <sub>2</sub> -6%	136	217	178	271

曲げ耐力の計算値と実測値の比較を表-6.10に示す。ひび割れ発生荷重については、実験値については目視でのひび割れ発生荷重を示しているため計算値と比較して実験値が大きくなったものと考えられる。終局荷重については、配合種類にかかわらず実験値/計算値は1.2程度を示しており結合材の種類にかかわらず、またCA<sub>2</sub>を混和した場合においても十分な曲げ性能を有していることが確認された。

表-6.10 曲げ耐力の計算値と実測値の比較

		計算値 (kN)	実験値 (kN)	実験値/設計値
H35	ひび割れ発生荷重	67.5	110.0	1.63
	終局荷重	155.5	187.4	1.21
H35CA <sub>2</sub> -6%	ひび割れ発生荷重	67.5	110.0	1.63
	終局荷重	155.2	192.4	1.24
H35B650	ひび割れ発生荷重	67.5	110.0	1.63
	終局荷重	155.0	193.1	1.25
H35B650CA <sub>2</sub> -6%	ひび割れ発生荷重	67.5	110.0	1.63
	終局荷重	154.0	188.5	1.22

曲げ載荷試験後の試験体について、図-6.40 に示す試験体の一部分をはつり取り、PC 鋼材の腐食状態を確認するために解体調査を行った結果を図-6.41 に示す。すべての試験体について自然電位の結果からもわかるように PC 鋼より線に腐食等の発生は確認されなかった。

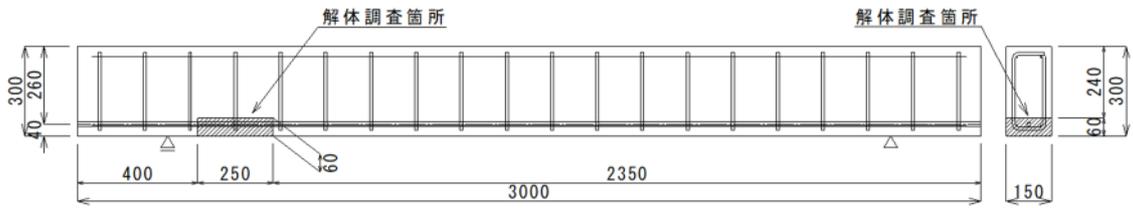


図-6.40 解体調査箇所



①H35



②H35CA<sub>2</sub>-6%



③H35B650



④H35B650CA<sub>2</sub>-6%

図-6.41 解体調査箇所の PC 鋼より線の状況

## 6.5 本章のまとめ

CA<sub>2</sub>を混和したコンクリートを用いて大型試験体（PC 梁部材）を作製し、暴露環境での塩水浸せき乾燥返しによる塩害を想定した促進試験を行った。暴露環境での CA<sub>2</sub> の耐久性状を確認するとともに、大型試験体を用いて曲げ載荷試験を行い、CA<sub>2</sub>を用いたコンクリートの耐荷性能について評価を行った。本試験で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 大型試験体を作製したコンクリートの圧縮強度について、CA<sub>2</sub>を内割りで混和した配合においても蒸気養生を行うことで材齢 1 日のプレストレスト導入時の管理強度となる 35N/mm<sup>2</sup> が得られた。
- 2) 大型試験体のひずみ変化について、CA<sub>2</sub>を混和した場合にコンクリートの打込みからプレストレスト導入までのひずみ変化が小さくなることで、長期的なひずみ変化も小さくなることが確認された。室内試験でも確認されたように H35B650 に CA<sub>2</sub>を混和した場合は特にひずみ変化が抑制され、ひび割れやプレストレスロスの低減に寄与することが明らかとなった。
- 3) 大型試験体のひずみ変化から推定したクリープ係数について、乾燥収縮の補正を行うために大型試験体と V/S をそろえた小型試験体を用いたことにより無載荷ひずみについて乖離が生じている可能性が考えられるので、今後の検討においては無載荷ひずみの測定についてもプレストレストを導入した大型試験体と同型の試験体を用いる必要があると考えられる。
- 4) 耐久性状に関して、大型試験体を作製したコンクリートを用いて測定を行った硝酸銀噴霧法、EPMA を用いた見かけの拡散係数および非定常・電気抵抗率試験について、CA<sub>2</sub>を用いることによる明確な塩分浸透抑制効果が確認された。しかしながら非破壊試験として実施した電気抵抗率および表層透気試験については、CA<sub>2</sub>の有無による明確な差は認められなかったため今後より詳細な検討が必要である。
- 5) PCaPC 部材の曲げ耐力について、配合 H35 および H35B650 について CA<sub>2</sub>を混和した場合においてもひび割れ性状や変形状について大きな影響は見られなかった。曲げ耐力についても実験値を計算値で除した値は 1.2 以上の値を示しており、CA<sub>2</sub>を混和した配合についても十分な曲げ性能を有していることが明らかとなった。

**【参考文献】**

- 6.1) 小林孝一, 服部篤史, 宮川豊章: 石灰石微粉末または高炉スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートにおける塩分浸透と鉄筋腐食, 土木学会論文集, Vol.613/V-42, pp.175-187, 1999.2
- 6.2) Macphee, D. E. and Cao, H. T.: Theoretical description of impact of blast furnace slag (BFS) on steel passivation in concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 45, No. 162, pp. 63-69, 1993
- 6.3) 国立研究開発法人土木研究所, 一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会: 新設プレストレストコンクリート橋の品質・信頼性向上方法の構築に関する共同研究報告書, -プレキャスト PC 部材の高耐久化に向けた混和材を用いたコンクリートの設計・製造マニュアル (案) -, 2022.3
- 6.4) R.Torrent and G.Frenzer : A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the “covercrete”, Proceedings of the International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), pp.985-992, 1995
- 6.5) 土木学会 : コンクリート標準示方書【構造性能照査編】, 2002

## 第7章 プレストレストコンクリートの耐用年数に及ぼす 塩素固定化材の影響に関する FEM 塩分浸透解析

### 7.1 本章の概要

コンクリート構造物は、さまざまな環境作用の影響を受けて劣化が進行する。コンクリート構造物の劣化現象を引き起こす劣化因子は、構造物が晒されている外部環境から供給される。よって、コンクリート構造物の長期性能の評価、すなわち劣化進行の予測においては、環境作用を適切に評価したうえで検討することが極めて重要である。このコンクリート構造物への環境作用（劣化因子の供給量）を劣化進行に及ぼす外力として環境外力と表す。環境外力は、マクロ環境（構造物が建設される地域を包含する気象条件）、メゾ環境（構造物の部位・部材周囲の環境）、ミクロ環境（外部環境とコンクリート表面との境界）の3つに分類されており、マクロ環境は環境データベース（気象データ）を用いて評価することができる。メゾ環境の評価は、コンクリート表面に飛来する塩化物イオン量の予測によって行う。この塩化物イオン量予測モデルには、コンクリートへの浸透塩分量から付着塩分量を回帰式により推定するモデル<sup>7.1)</sup>や、実測の飛来塩分量に基づくモデル<sup>7.2) 7.3)</sup>がある。ミクロ環境の評価は、コンクリート表面における塩化物イオンの浸透現象をシミュレーションするモデル<sup>7.4)</sup>などによって行うことができる。

本章では、実験で得られた見かけの拡散係数の結果と、コンクリート構造物の長寿命化のための設計や維持管理に必要な情報である構造物の各種性能の時間的な変化、なかでも劣化による経時的な性能低下を予測するための支援ツールとなる FEM 解析ソフトを用いて、PC 構造物の耐用年数の評価を行った結果を述べるものとする。

#### 7.1.1 解析の方法

##### (1) 解析用ソフト

構造物の長期性能を評価できる解析ソフトとして、株式会社計算力学研究センターのコンクリート構造物の長期性能シミュレーションプログラム『LECCA2』を用いた。LECCA2 は、日本コンクリート工学会（JCI）「コンクリート構造物の長期性能シミュレーションソフト作成委員会」で実施しているコンクリート構造物の各種劣化現象のモデル化に関する検討成果を基に作成された劣化シミュレーションソフトであり、コンクリート構造物の長寿命化のための設計や維持管理に必要な情報である構造物の各種性能の時間的な変化、なかでも劣化による経時的な性能低下を予測するための支援ツールとして使用することができるものである。

## (2) 解析条件および解析パラメーター

解析条件として塩害の被害が報告されている沖縄県と新潟県の2つの地域特性の違いによる影響を評価した。道路橋示方書・同解説<sup>7.5)</sup>のかぶりによる内部鋼材の防食に示される通り、沖縄県の対策区分は海岸線からの距離として100mを越えて300mまでとし、新潟県の対策区分も同様に100mを越えて300mまでとした場合に対策区分はいずれも区分Iに分類される。部材・部位を「工場で製作されるプレストレストコンクリート」とした場合の鋼材の腐食を生じさせないための最小かぶりは50mmと設定した。

解析に必要な各項目の設定値を表-7.1に示す。工場製品のプレキャストセグメント桁を想定し、セメント種類は早強ポルトランドセメントとし、コンクリート強度は50N/mm<sup>2</sup>、水セメント比は35.0%に設定した。初期含有塩化物イオン量はHおよびH+BFSは0.3kg/m<sup>3</sup>とし、H+GGBSはセメント量が1/2となるため0.15 kg/m<sup>3</sup>に設定した。

表-7.1 解析に用いた設定値

項目	設定値		
	H	H+GGBS	H+BFS
セメント種類	早強セメント	早強セメント	早強セメント
コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )	50	50	50
W/C (%)	35.0	35.0	35.0
初期含有塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> )	0.30	0.15	0.30

見かけの拡散係数は、図-5.40に示す標準養生を行った試験体の見かけの拡散係数の実験値を用いた。解析に用いた配合ごとの見かけの拡散係数を表-7.2に示す。

表-7.2 解析に用いた見かけの拡散係数

結合材種類	H		H+GGBS		H+BFS	
	0%	6%	0%	6%	0%	6%
CA <sub>2</sub> /B						
解析に用いた見かけの拡散係数 (cm <sup>2</sup> /年)	0.75	0.35	0.25	0.22	0.50	0.22

## (3) 解析モデル

塩分浸透抵抗解析を行った解析モデルは、橋長27m、総幅員7.2mのポストテンション方式単純合成桁橋(PC合成床版タイプ：コンボ橋)を想定し、図-7.1に解析モデル図および着目点を示す。塩分浸透解析の解析位置として、一般的にウェブと下床版の接合位置にあたる隅角部が、両側から塩化物イオンが浸透してくるため着目点とされている。本橋でのかぶりは、ウェブおよび下床版位置ともに純かぶりが50mmである。解析位置として厳しい条件となるウェブおよび下床版から50mmの地点を着目点とする。解析モデルとして、コンボ橋の主桁の下フランジ部分を200×200mmで切り出したモデルを用いた。

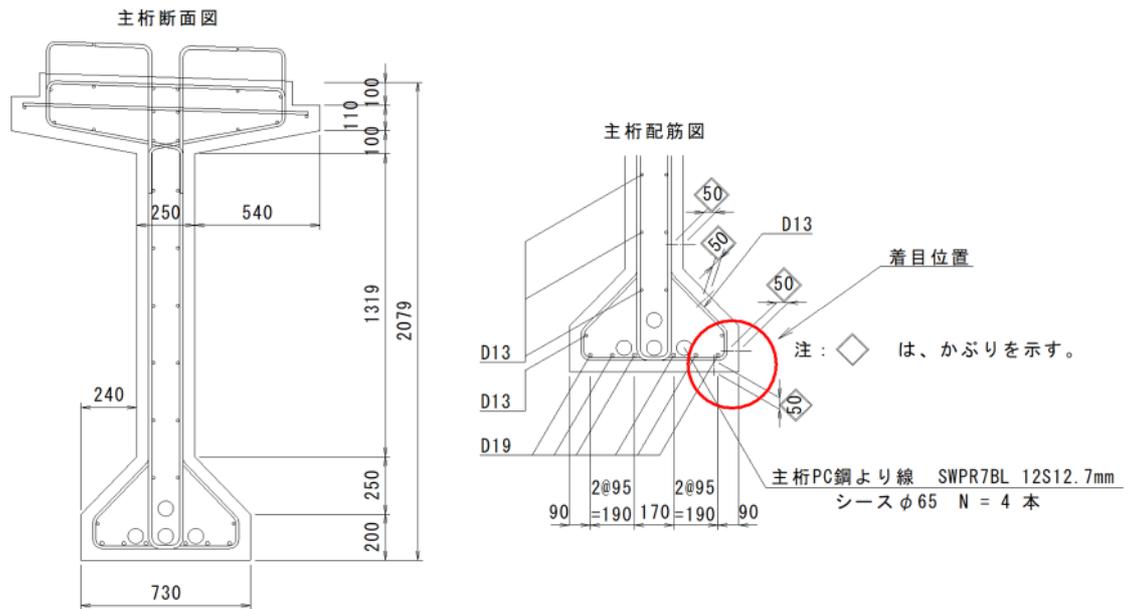


図-7.1 解析位置および解析モデル図

## 7.2 プレストレストコンクリートの耐用年数に及ぼす塩素固定化材の影響

### 7.2.1 コンクリート中の塩化物イオン濃度の経年変化の予測

上記で定めた解析条件を用いて経過時間とコンクリート中の塩化物イオン濃度の関係について評価を行った。沖縄および新潟を想定した FEM 解析結果との比較として式(7.1)に示すフィックの第 2 法則の拡散方程式の解を解いてコンクリート中の塩化物イオン濃度の経時変化を予測した結果を図-7.2 に示す。コンクリート表面塩化物イオン濃度  $C_0$  kg/m<sup>3</sup> は表-7.3 に示す、飛来塩分が多い地域の海岸からの距離が 0.1km の 4.5kg/m<sup>3</sup> を用いた。

$$C(x, t) = C_{a0} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\} + C_i \quad (7.1)$$

ここに、 $x$  : 表面からの深さ (mm),

$t$  : 塩水浸漬期間 (年),

$C(x, t)$  : 深さ  $x$  mm, 塩水浸漬期間  $t$  年において測定された塩化物イオン濃度(%)

$C_{a0}$  : 採取されたコンクリート表面における全塩化物イオン濃度 (%) ,

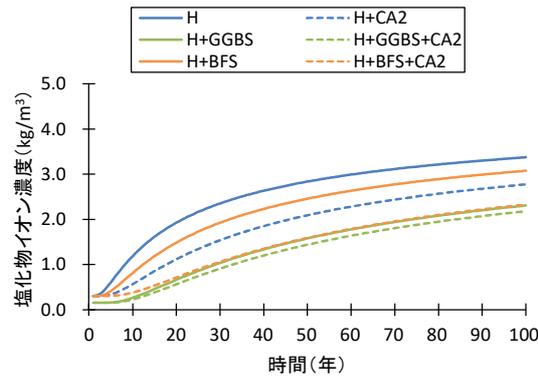
$D_{ap}$  : 浸漬試験によるコンクリートの見かけの拡散係数 (cm<sup>2</sup>/年),

$C_i$  : 初期塩化物イオン濃度 (%) ,

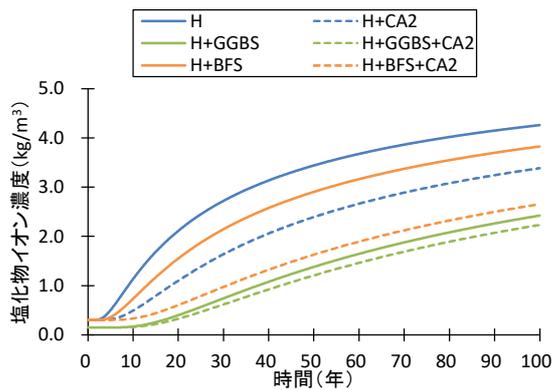
$\operatorname{erf}$  : 誤差関数

表-7.3 コンクリート表面塩化物イオン濃度  $C_0$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

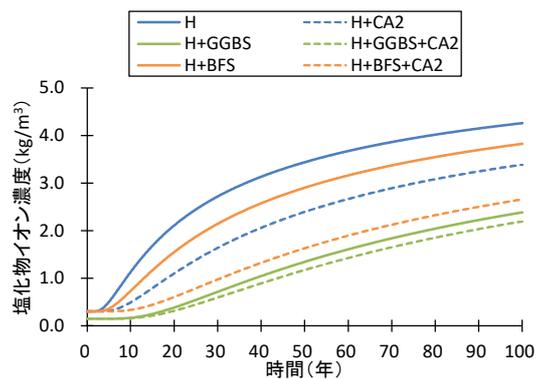
		飛沫帯	海岸からの距離 (km)				
			汀線付近	0.1	0.25	0.5	1.0
飛来塩分が多い地域	北海道, 東北, 北陸, 沖縄	13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5
飛来塩分が少ない地域	関東, 東海, 近畿, 中国, 四国, 九州		4.5	2.5	2.0	1.5	1.0



フィックの拡散方程式を用いた結果



FEM 解析を用いた結果 (沖縄県)



FEM 解析を用いた結果 (新潟県)

図-7.2 コンクリート隅角部鉄筋位置の塩化物イオン濃度の経時変化予測

フィックの拡散方程式と FEM 解析から求められた経時変化による塩化物イオン濃度の関係について、フィックの拡散方程式から求めた場合の方が FEM 解析の結果より塩化物イオン濃度の上昇の立ち上がりが大きくなる傾向を示しており、100 年後の塩化物イオン濃度の値についても FEM 解析の結果の方が大きくなる傾向が確認された。FEM 解析の結果について沖縄県と新潟県の地域の解析地域を変化させた場合について沖縄県より新潟県の方が小さくなる傾向が確認された。既往の研究<sup>7.6)</sup>において、沖縄と新潟での暴露試験を行い表面からの塩化物イオン濃度を測定した結果を図-7.3 に示すが、新潟より沖縄の方が塩化物イオンの浸透量が大きくなることを確認されており、FEM 解析ソフトを用いた場合も地域の

違いによる影響を評価できているものと考えられる。

図-7.4 に配合 H の FEM 解析から求められた塩化物イオン濃度のグラフィック画像を参考例で示す。本解析ソフトを使用することで、隅角部などの両面から塩化物イオンが浸透する場合においても実際の現象を再現できていることが確認できる。

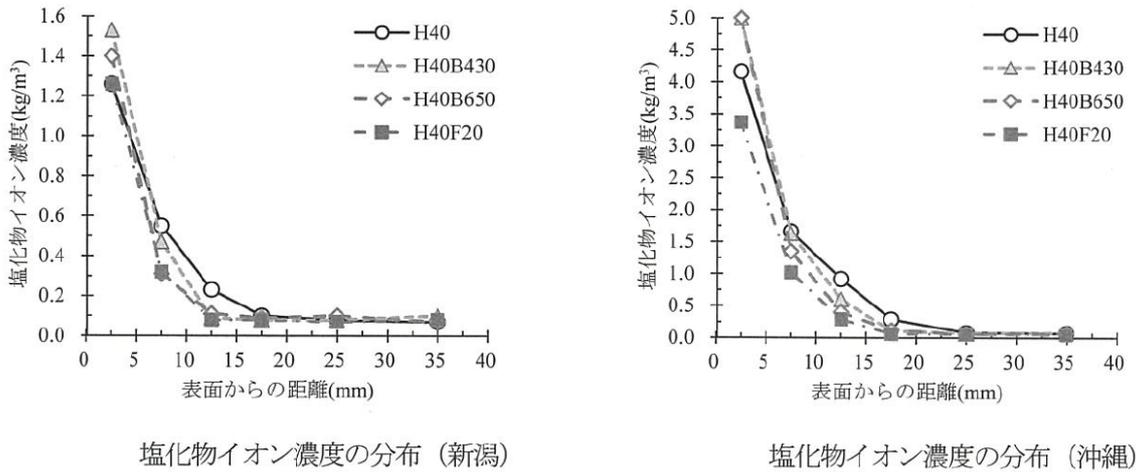


図-7.3 暴露試験体を用いて測定した試験体深さ方向の塩化物イオン濃度<sup>7.6)</sup>

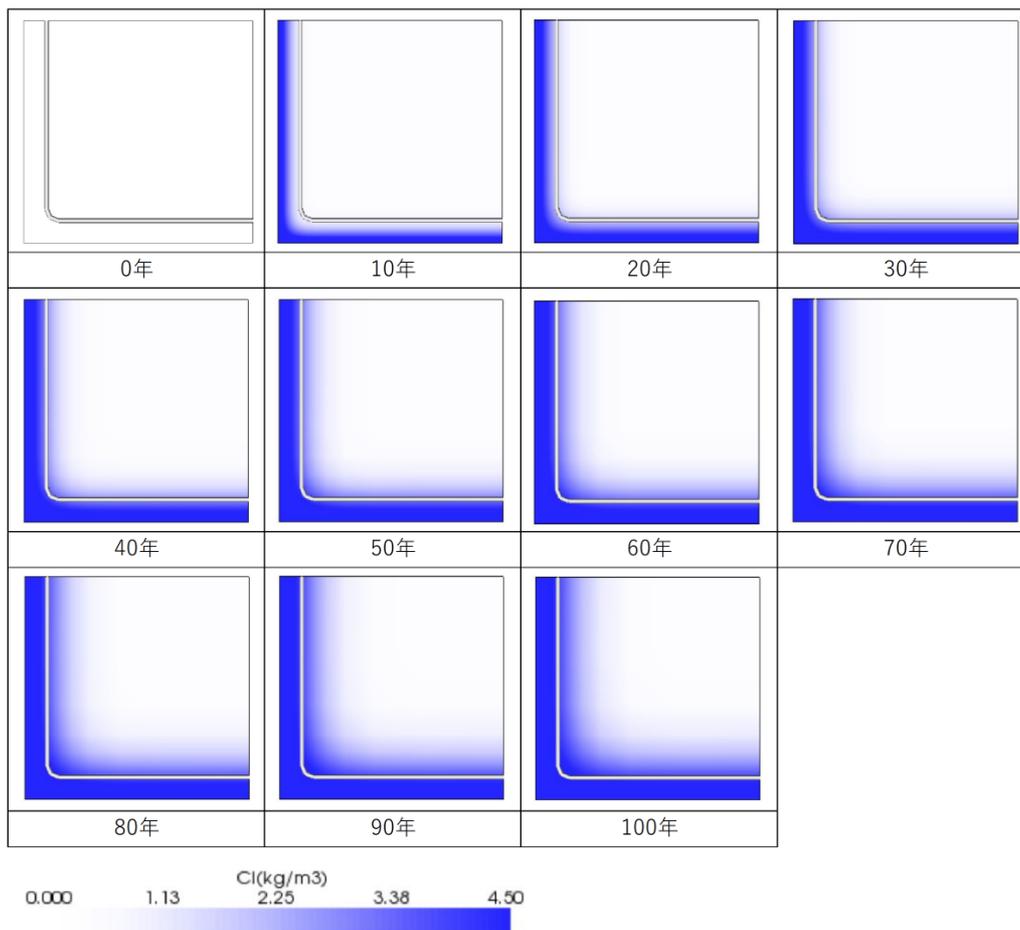


図-7.4 FEM 解析から求められた塩化物イオン濃度（配合 H，沖縄県の解析例）

### 7.2.2 コンクリート構造物寿命に及ぼす塩素固定化材の影響

フィックの拡散方程式を用いて算出した塩化物イオン濃度と FEM 解析を用いて沖縄と新潟を想定した塩化物イオン濃度について鉄筋かぶり部分で鋼材腐食塩化物イオン濃度に達する年数について比較を行った。鋼材腐食塩化物イオン濃度については，2022 年制定コンクリート標準示方書【設計編】に示される式(7.2)および式(7.3)を用いた。配合 H および配合 H+BFS の鋼材腐食発生限界濃度は式(7.2)を用いて算出し，配合 H+GGBS は式(7.3)を用いて算出した。W/C は 0.35 とし，配合 H および配合 H+BFS の鋼材腐食発生限界濃度は  $1.83\text{kg/m}^3$ ，配合 H+GGBS の鋼材腐食発生限界濃度は  $2.19\text{kg/m}^3$  とした。

（早強ポルトランドセメントを用いた場合）

$$C_{\text{lim}} = -2.2 (W/C) + 2.6 \quad (7.2)$$

（高炉セメント B 種相当を用いた場合）

$$C_{\text{lim}} = -2.6 (W/C) + 3.1 \quad (7.3)$$

ここに、 $C_{lim}$ ：耐久設計で設定する鋼材腐食発生限界濃度 (kg/m<sup>3</sup>)  
W/C：水セメント比 (0.30~0.55)

配合種類および環境種類ごとの鋼材腐食発生限界濃度に達する時間の比較を図-7.5 に示す。フィックの拡散方程式およびFEM解析を用いた場合にかかわらず、鋼材腐食発生限界に達する時間についてCA<sub>2</sub>を用いることで長くなることが確認された。フィックの拡散方程式とFEM解析値から求めた鋼材腐食発生限界濃度に達する時間について、FEM解析値については側面と下面の両面からの影響を受けるので鋼材腐食発生限界濃度に達する時間が短くなったと考えられる。鋼材腐食発生限界濃度に達する時間について、H+GGBSは85~90年程度であったが、CA<sub>2</sub>を適用することで耐用年数100年を満足できる可能性が示唆された。また、沖縄と新潟で比較したFEM解析の結果については、地域に違いによる大きな違いは確認されなかったが、新潟より沖縄の鋼材腐食発生限界に達する時間の方が若干短くなる傾向が確認された。

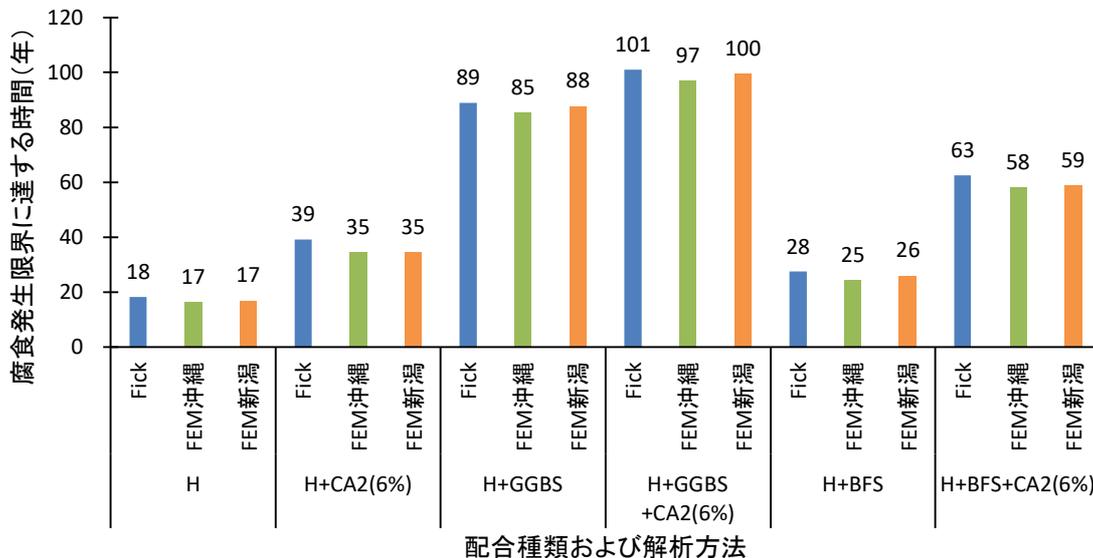


図-7.5 配合種類および環境種類ごとの鋼材腐食発生限界濃度に達する時間

### 7.2.3 CA<sub>2</sub>の設計計算への反映方法に関する検討

CA<sub>2</sub>を用いることで塩化物イオンの見かけの拡散係数が低減できる効果について、設計へ反映する手法について検討を行った。図-7.6 に水粉体比が35%で標準養生を行ったコンクリートのCA<sub>2</sub>/Bと見かけの拡散係数の関係を示す。結合材種類ごとにCA<sub>2</sub>/Bと見かけの拡散係数の関係を示す。CA<sub>2</sub>/Bが0%から8%の範囲について見かけの拡散係数の低減効果を評価し、式(7.4)から式(7.6)で低減係数を算出し、式(7.7)で算出した見かけの拡散係数を設計計算に適用することでCA<sub>2</sub>の効果を評価でき、さらにFEM解析ソフトなどにも適用することでCA<sub>2</sub>の効果を汎用的に評価できると考えられる。

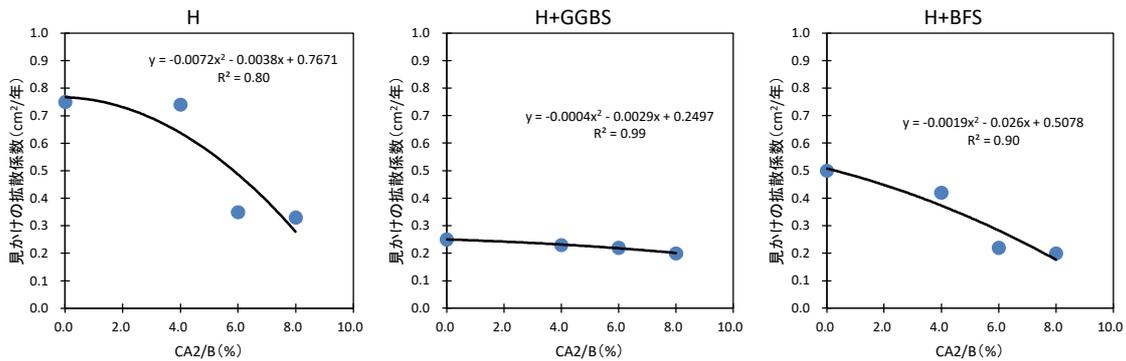


図-7.6 CA<sub>2</sub>/B と見かけの拡散係数の関係

結合材種類ごとの見かけの拡散係数の低減係数の計算式を式(7.4)～式(7.6)に示す。

(早強ポルトランドセメントのみを用いた場合)

$$\alpha = (-0.0072 \cdot CA_2/B^2 - 0.0038 \cdot CA_2/B + 0.7671) / D_{k0} \quad (7.4)$$

(早強ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末6000で置換した場合)

$$\alpha = (-0.0004 \cdot CA_2/B^2 - 0.0029 \cdot CA_2/B + 0.2497) / D_{k0} \quad (7.5)$$

(結合材は早強ポルトランドセメント単味で高炉スラグ細骨材を用いた場合)

$$\alpha = (-0.0019 \cdot CA_2/B^2 - 0.026 \cdot CA_2/B + 0.5078) / D_{k0} \quad (7.6)$$

ここに、 $\alpha$  : CA<sub>2</sub>を使用することによる見かけの拡散係数の低減係数

CA<sub>2</sub>/B : CA<sub>2</sub>混和率 (%) (0% ≤ CA<sub>2</sub>/B ≤ 8%)

D<sub>k0</sub> : CA<sub>2</sub>無混和の見かけの拡散係数 (cm<sup>2</sup>/年)

設計計算に使用する見かけの拡散係数の計算式を式(7.7)に示す。

$$D_{kcv} = \alpha \cdot D_{k0} \quad (7.7)$$

ここに、D<sub>kcv</sub> : CA<sub>2</sub>を用いた場合の設計計算に使用する見かけの拡散係数 (cm<sup>2</sup>/年)

本研究で得られた知見をまとめて提案した式(7.4)～式(7.7)の適用方法および検討手順について以下の図-7.7に示すようにフロー図に示す。

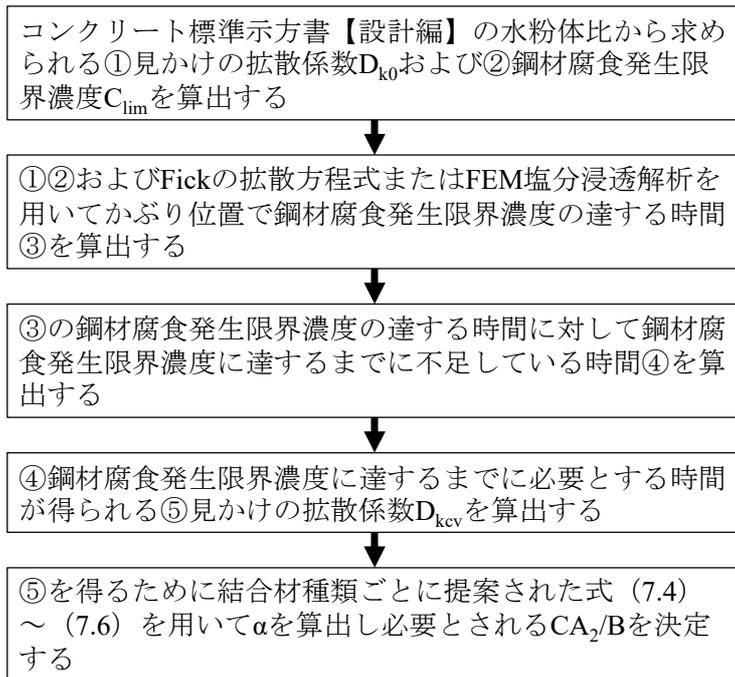


図-7.7  $CA_2/B$  を検討に組み込む場合のフロー図

### 7.3 本章のまとめ

実験値から得られた見かけの拡散係数と FEM 解析を用いてコンクリート構造物の耐用年数に関する検討を行い、得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 配合 H および H+BFS の鋼材腐食発生限界に達する時間について、 $CA_2$  を混和することで 2 倍程度に延長できることが示唆された。
- 2) 配合 H+GGBS については、GGBS を混和することで鋼材腐食発生限界に達する時間は H および H+BFS より 3 倍程度延長できることが確認され、 $CA_2$  を用いることでさらに 10 ~20%程度延長できることが確認され、 $CA_2$  を用いることによる鋼材腐食抑制効果が明らかとなった。
- 3) フィックの拡散方程式と FEM 解析値から求めた鋼材腐食発生限界濃度に達する時間について、FEM 解析値については側面と下面の両面からの影響を受けるので鋼材腐食発生限界濃度に達する時間が短くなることが明らかとなった。
- 4) FEM 解析を用いて沖縄と新潟の地域の違いによる影響を評価した場合に、新潟より沖縄の地域の方が鋼材腐食発生限界に達する時間が短くなることが確認されており、実環境で測定した結果と同様の傾向を示しており、環境条件の差による影響も評価できることが明らかとなった。
- 5) 結合材種類および  $CA_2/B$  を変化させた場合の見かけの拡散係数の実験値から設計計算に使用するための  $CA_2$  を用いることによる見かけの拡散係数の低減係数の計算方法を提案し、FEM 解析などに  $CA_2$  の効果を組み込むことで  $CA_2$  の効果をより汎用的に検討できる方法を提案した。

**【参考文献】**

- 7.1) 前田聡, 武若耕司, 山口明伸: 塩害データベースを用いたコンクリート中への塩化物イオン拡散の定量評価, 土木学会論文集, No.760, V-65, pp.109-120, 2004.5
- 7.2) 浜田純夫, 日野伸一, 兼行啓治, 長谷川博: 海岸付近の飛来調査とコンクリートに浸透する塩分, コンクリート工学年次論文集報告集, vol.8, pp.85-88, 1986.6
- 7.3) 宇多高明, 小俣篤, 小西正純: 海岸からの飛来塩分計算モデル, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp.1051-1055, 1992
- 7.4) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム, 委員会報告書論文集, 2004
- 7.5) 公益社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, IIIコンクリート橋・コンクリート部材編, 2017.11
- 7.6) 国立研究開発法人土木研究所, 一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会: 低酸素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書(II)-混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の設計・施工マニュアル(案)-, pp.98-99, 2016

## 第8章 結論

本研究では、重要なインフラ資本であるプレストレストコンクリート構造物における塩害劣化に着目し、 $CA_2$ のコンクリートに与える影響についてペースト、モルタルおよびコンクリート構造物での実用化に向けた段階的な評価を行った。第3章のペーストを用いた試験については、 $CA_2$ の塩分浸透抵抗性に及ぼす影響について、化学的効果および物理的効果について検討を行い、第4章のモルタルを用いた試験については、 $CA_2$ と高炉スラグ細骨材を組み合わせた場合の評価を行った。これらをうけ、第5章ではコンクリートに $CA_2$ を適用した際の物性全般について評価を行ったうえで、第6章でプレストレストコンクリート梁の実物大レベルの試験体を用いて塩水浸せき乾燥状態を模擬した暴露試験での評価を行った。第7章では実験で得られた見かけの拡散係数およびFEM解析ソフトを用いて環境条件の違いやフィックの拡散方程式で求められた結果との比較を行い、さらに $CA_2$ を用いた際の塩分抑制効果をFEM解析に組み込む方法について提案を行った。以下に、本研究の範囲において明らかとなった知見を含め、各章における結論を総括する。

「第1章 序論」では、社会環境を踏まえた本研究の目的および論文構成について示した。

「第2章 既往の研究」では、 $CA_2$ について反応のメカニズムや塩化物イオンの固定化に関する既往の研究成果について整理した。さらに、耐久性向上および環境負荷低減を念頭に置いて $CA_2$ と組み合わせる材料として選定した高炉スラグ微粉末および高炉スラグ細骨材の特性についても整理するとともに、 $CA_2$ の新規材料として検討すべき課題についてまとめた。

「第3章 ペーストの特性に及ぼす塩素固定化材の影響に関する評価」では、塩素固定化材の塩分浸透抵抗性の向上効果を化学的効果と物理的効果の両面について評価からその効果を明らかにし、 $CA_2$ を用いて固定化された塩化物イオンについて中性化の影響を受けた際の分解現象に着目した評価を行った。

化学的効果については、XRDを用いて水和生成物に着目した評価を行い、 $CA_2$ を混和することで水酸化カルシウムと反応して塩化物イオンを固定化する能力を有するヒドロカルマイト、モノサルフェート、ヘミカーボネートおよびモノカーボネートなどのヒドロカルマイト族に分類される水和生成物が生成することを明らかとした。さらにヒドロカルマイト族の水和物が生成されることで、その後、塩水浸せきを行った試験体についてフリーデル氏塩の生成量も多くなることが明らかとなった。上記のメカニズムについて、熱分析装置を用いて測定した水酸化カルシウムの生成量や塩分分析で測定した全塩分と可溶性塩分量から算出した塩化物イオンの固定化率の関係からも $CA_2$ の塩化物イオンの固定化が評価

された。これらの効果について初期養生温度の違いによる大きな影響は見られなかった。当初の想定では、 $CA_2$ は水酸カルシウムと反応しハイドロカルマイト族の水和物を生成するためセメントの種類としては、普通ポルトランドセメントより水酸化カルシウムの生成量が多い早強ポルトランドセメントの方が塩化物イオンの固定化率も高くなると想定していたが、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で水酸化カルシウム量と塩化物イオン固定化率の関係は同程度となることが明らかとなった。また、早強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た配合については、水酸化カルシウムの生成量は早強ポルトランドセメント単味の1/2程度であったが、塩化物イオン固定化率は普通ポルトランドセメント単味および早強ポルトランドセメント単味と同程度となっており、 $CA_2$ が反応するための水酸化カルシウム量は十分に確保されていたと考えられる。さらに、塩化物イオンが固定化した状況で中性化の影響を受けた場合について検討を行った。既往の研究では中性化の影響を受けた場合に固定化された塩化物イオンについて分解現象が生じる可能性が報告されているが、塩化物イオン量やEPMAの結果から塩化物イオンの分解現象は $CA_2$ の有無にかかわらず確認されなかった。また、塩化物イオンの固定化率について、中性化無しより中性化有りの方が小さくなる傾向が確認されたが $CA_2$ の有無による違いは見られなかった。この結果について、試験体の水粉体比が35%と中性化の影響を受けにくい配合であった可能性が考えられるので、水粉体比が50%程度の配合についても同様の検討が必要であると考えられる。

$CA_2$ による塩化物イオンの浸透抑制に及ぼす物理的な効果として細孔構造に着目した検討を行った。その結果、材齢28日時点では $CA_2$ を混和することで0~3%程度、全空隙率が大きくなる傾向が確認された。しかしながら、その後材齢3ヶ月から9ヶ月間(材齢1年)10%の塩水に浸せきすることで、 $CA_2/B=6%$ の場合は0~5%、 $CA_2/B=12%$ の場合は5~10%程度全空隙量が $CA_2$ の混和率に応じて小さくなることが確認された。全空隙率が小さくなった要因として、上記のXRD、水酸化カルシウム量および塩化物イオン固定化率などの化学的効果から確認されているように、 $CA_2$ が水酸化カルシウムと反応しハイドロカルマイト族の水和物を生成し、さらにコンクリート中に塩化物イオンが浸透することでフリーデル氏塩が生成され、全空隙率を減少させることが明らかとなった。初期の養生温度の影響について、材齢28日については、20℃と40℃については大きな違いは確認されなかったが、60℃については $CA_2$ を混和した場合に50nm以上の粗大径が多く残存しており、高温養生により水が急速に進展したためと考えられる。次に、塩水浸せきによる空隙率の変化に着目すると、塩水浸せきを9ヶ月間行った試験体の結果について、いずれの結合材種類においても初期養生温度20℃および40℃の条件においては $CA_2$ を混和した配合の総空隙量が減少していることが確認できた。初期養生温度を60℃とした場合は、いずれの結合材種類も $CA_2$ を混和することで総空隙量が大きくなっており、初期養生温度の違いが空隙構造に影響を与えることが確認された。これについて、 $CA_2$ の混和率を変化させた場合の傾向も確認する必要があると考えられるが、 $CA_2$ を適用して蒸気養生などの給熱養生を行う場合は必要以

上に初期養生温度を高くすることは望ましくないことが示唆された。しかしながらこの現象について、 $CA_2/B=12\%$ での結果であるため、 $CA_2/B=6\%$ 程度の配合についても検討の必要があると考えられる。塩水浸せきを9ヶ月行った後に促進中性化試験を6ヶ月実施した試験体についても空隙率の測定を行った。その結果、XRDの結果から水酸化カルシウムが中性化することでカルサイトに変化することで総空隙率が小さくなりより緻密化する効果が確認された。

見かけの拡散係数に与える  $CA_2$  の混和率および初期養生温度による影響について、結合材種類にかかわらず  $CA_2$  の混和率が増加するにつれて見かけの拡散係数が低下する傾向が確認されたが、 $CA_2/B=6\%$ と  $12\%$ で大きな違いは見られなかったため本研究を行った配合の範囲については  $CA_2/B=6\%$ で十分な塩分浸透抑制効果が得られることが明らかとなった。初期養生温度の影響については、結合材種類が N および H については、養生温度が高くなるにつれて見かけの拡散係数も大きくなる傾向が確認され、細孔構造でも検討した通り必要以上に養生温度を高くすることは望ましくないことが示唆された。結合材種類 H+GGBS は H や N と異なり初期養生温度を高くしても見かけの拡散係数に与える影響は見られなかった。高炉スラグ微粉末を使用した配合について初期強度を改善するために初期養生温度を高く設定される傾向があるため  $CA_2$  を有効に活用できると考えられる。

「第4章 モルタルの特性に及ぼす塩素固定化材の影響に関する評価」では、高炉スラグ細骨材について  $CA_2$  と組み合わせた際の塩素固定化材の塩分浸透抵抗性の向上効果について評価を行った。

結合材種類および  $CA_2$  の混和率にかかわらず材齢 28 日時点での総空隙率に違いはないが、塩水浸せきを9ヶ月（材齢1年）行うことで  $CA_2$  の混和率に応じて総空隙率が小さくなることが確認された。この現象についてペースト試験と同様の傾向であるが、ペースト試験と比較してモルタル試験の場合は  $CA_2$  を混和することによる総空隙量の差は小さくなった。骨材種類による総空隙率の違いについて普通砕砂と BFS を比較した場合に大きな違いは認められなかった。ペースト試験において、 $CA_2$  を混和して  $60^\circ\text{C}$ とした場合は総空隙量が大きくなる傾向を示したが、モルタルとした場合は細骨材の影響で初期養生温度の影響が小さくなり、 $60^\circ\text{C}$ の総空隙量が小さくなることが確認された。

ペースト試験と同様に、結合材種類および細骨材種類にかかわらず  $CA_2$  を混和することで見かけの拡散係数が小さくなる傾向が示された。初期養生温度の影響については、ペースト試験と同様に H は初期養生温度を高くした場合に見かけの拡散係数が大きくなり、GGBS および BFS については、初期養生温度による悪影響は認められなかった。細孔構造に着目した検討を行ったがペースト試験では  $CA_2$  の混和により空隙構造が緻密化する傾向が確認されたが、モルタル試験においては顕著な差は認められなかった。総空隙率について違いは見られなかったが、既往の研究において連続空隙で評価した際に  $CA_2$  を用いることによる違いが確認されており、今後は連続空隙に着目した検討も必要であると考えられる。中性化

の影響については、ペースト試験と同様に  $CA_2$  を混和した場合に固定化された塩化物イオンが分解されるような現象は認められなかった。

「第5章 コンクリートの特性に及ぼす塩素固定化材の影響に関する評価」では、コンクリートのフレッシュ性状、体積変化および塩分浸透抵抗性以外の耐久性についても  $CA_2$  を混和した際の評価を行った。

$CA_2$  を混和したコンクリートのフレッシュ性状に与える影響について、特徴的な変化として可使時間および凝結時間が短くなる傾向が確認され、さらに、ブリーディングが減少する効果が認められた。可使時間および凝結時間が短くなる効果について、施工サイクルを短縮できる可能性があるため PCaPC 部材の製造に関しては有利に働くものと考えられる。高炉スラグ微粉末を使用した配合について高性能 AE 減水剤の使用量が大きくなる傾向があり、それに伴い仕上げのタイミングが遅くなる可能性もあるため、 $CA_2$  の混和により可使時間および凝結時間が短くなる効果がさらに有利に働くとともに考えられる。一方、場所打ちコンクリートに使用する場合は、可使時間および凝結時間が極端に短くなると施工時に不具合が生じる可能性があるため、練り上がり直後のスランプを大きくすることや遅延型の高性能 AE 減水剤を使用するなどの検討が必要であると考えられる。また、 $CA_2$  を用いることでブリーディングが減少する効果についても、耐久性向上に寄与するものと考えられる。

$CA_2$  を用いたコンクリートの硬化性状として圧縮強度に与える影響については、 $CA_2$  の混和率が多くなるにつれて初期の圧縮強度の低下が確認されたが、長期材齢においては影響が少なくなる傾向が確認された。その他の割裂引張強度および曲げ強度に及ぼす影響は認められなかった。

自己収縮に関して、H および H+BFS は材齢 1 年で  $CA_2$  無しと比較して  $50 \times 10^{-6}$  程度大きくなる傾向が示された。一方、H+GGBS は  $CA_2$  を混和した場合に材齢初期に  $150 \times 10^{-6}$  程度膨張する傾向が確認され、 $CA_2$  無しと比較して材齢 1 年で  $150 \times 10^{-6}$  程度小さくなる傾向を示した。この原因について、GGBS に含まれる  $SO_3$  の有無で比較した場合に、 $SO_3$  を含んだ GGBS と  $CA_2$  が反応することでエトリンサイトなどを生成し膨張傾向を示したものと考えられる。乾燥収縮については、配合種類にかかわらず  $CA_2$  の有無による最終値での変化は  $50 \times 10^{-6}$  程度であり  $CA_2$  による影響は小さいことが確認された。その他の変形性状として、ヤング係数やクリープについては  $CA_2$  の混和による大きな影響は認められなかった。

$CA_2$  を用いた場合のコンクリートの塩分浸透抑制効果について、硝酸銀溶液噴霧法、実効拡散係数および見かけの拡散係数で比較を行った。その結果、配合種類および  $CA_2$  の混和率を変化させた場合においても試験方法ごとの相関性が示された。実効拡散係数から見かけの拡散係数を推定する際に使用する係数  $k_1 \cdot k_2$  について  $CA_2$  を用いた場合の値を算出した。本試験の実験値から得られた係数  $k_1 \cdot k_2$  を使用することで、電気泳動試験で得られた実効拡散係数を算出することにより見かけの拡散係数を短期間で推定することが可能となる。

中性化抵抗性について、CA<sub>2</sub>を混和した場合に中性化深さが大きくなる傾向が確認されたが、蒸気養生の有無にかかわらず脱枠後の湿潤養生日数を長く設定することで中性化深さを抑制できる可能性が示唆された。

凍結融解抵抗性について、CA<sub>2</sub>を用いた場合に相対動弾性係数が低下する現象が確認されたが、フレッシュ性状時の空気量を4.5～6.0%程度確保することでCA<sub>2</sub>を用いないコンクリートと同程度の凍結融解抵抗性が得られることが確認され、通常のコンクリートと同様に制御できることが確認された。

ASRに対するCA<sub>2</sub>の影響を確認したところ、CA<sub>2</sub>を用いることで緻密化する効果、さらに水酸化カルシウムなどのアルカリ分を消費する効果によってASRによる膨張を抑制できる効果が示唆された。

湿潤養生日数を変化させた場合の圧縮強度、中性化深さおよび塩分浸透抵抗性について評価を行った。場所打ちコンクリートを想定し、蒸気養生を模擬した温度履歴を与えない場合を想定した配合について、標準養生を行った試験体の材齢28日に対する比率が70%以上となる湿潤養生期間について、H45B650CA<sub>2</sub>およびH45B650CA<sub>2</sub>-6%は7日であり、その他の配合については3日であった。塩分浸透深さについては、養生条件を変化させた場合においても塩分浸透深さに大きな違いは認められなかった。また、中性化深さについては、CA<sub>2</sub>を混和することで大きくなる傾向が確認されており、湿潤養生日数を長くすることで中性化深さを抑制できる効果が確認された。PCaPC部材を想定した温度履歴を与えた試験体について、温度履歴を与えた後に標準養生を行った試験体の材齢28日に対する比率が70%以上となる湿潤養生期間はすべての配合において3日であった。塩分浸透深さおよび中性化深さについて、養生条件を変化させた場合において大きな影響は認められなかった。

「第6章 大型試験体によるプレストレストコンクリートへの塩素固定化材の適用性に関する検証」では、室内試験で確認した項目について、実際にプレストレスを導入したコンクリート試験体についても、室内試験で得られた知見と同様の耐久性状と耐荷性能を確認することができるか実物大試験体を用いた検証を行った。

大型試験体を作製したコンクリートの圧縮強度について、CA<sub>2</sub>を内割りで混和した配合においても蒸気養生を行うことで材齢1日のプレストレス導入時の管理強度となる35N/mm<sup>2</sup>が得られた。

大型試験体のひずみ変化について、CA<sub>2</sub>を混和した場合にコンクリートの打込みからプレストレスト導入までのひずみ変化が小さくなることで、長期的なひずみ変化も小さくなることが確認された。室内試験でも確認されたようにH+GGBSにCA<sub>2</sub>を混和した場合は特にひずみ変化が抑制され、ひび割れやプレストレスロスの低減に有利に働くことが示唆された。大型試験体のひずみ変化から推定したクリープ係数について、乾燥収縮の補正を行うために大型試験体とV/Sをそろえた小型試験体を用いたことにより無載荷ひずみについて乖離が生じている可能性が考えられるので、今後の検討においては無載荷ひずみの測定につ

いてもプレストレスを導入した大型試験体と同型の試験体を用いる必要があると考えられる。さらに、一般的な温度 20°C、湿度 60%の環境で測定した乾燥収縮ひずみと塩水浸せき乾燥の影響を受けた場合の乾燥収縮ひずみに違いが生じていることが考えられるので、環境条件の違いが収縮に与える影響についてもより詳細な検討が必要であると考えられる。

耐久性状に関して、大型試験体を作製したコンクリートを用いて測定を行った硝酸銀噴霧法や非定常・電気抵抗率試験については、 $CA_2$ を用いることによる明確な塩分浸透抑制効果が確認された。しかしながら非破壊試験として実施した電気抵抗率および表層透気係数については、 $CA_2$ の有無による明確な差は認められなかったため今後より詳細な検討が必要である。

PCaPC 部材の曲げ耐力について、配合 H35 および H35B650 について  $CA_2$  を混和した場合においてもひび割れ性状や変形性状について大きな影響は見られなかった。曲げ耐力についても実験値を計算値で除した値は 1.2 以上の値を示しており、 $CA_2$  を混和した配合についても十分な曲げ性能を有していることが明らかとなった。

「第 7 章 プレストレストコンクリートの耐用年数に及ぼす塩素固定化材の影響に関する FEM 塩分浸透解析」では、実験で得られた見かけの拡散係数の結果とコンクリート構造物の長寿命化のための設計や維持管理に必要な情報である構造物の各種性能の時間的な変化、なかでも劣化による経時的な性能低下を予測するための解析ソフトを用いて、PC 構造物の耐用年数の評価を行った。

配合 H および H+BFS の鋼材腐食発生限界に達する時間について、 $CA_2$  を混和することで 2 倍程度に延長できることが示唆された。配合 H+GGBS については、GGBS を混和することで H および H+BFS より 3 倍程度延長できることが確認され、 $CA_2$  を用いることでさらに 10~20%程度延長できることが確認され、 $CA_2$  を用いることによる鋼材腐食抑制効果が明らかとなった。

フィックの拡散方程式と FEM 解析の結果を比較したところ、FEM 解析を用いた場合には隅角部で 2 面からの塩化物イオンの浸透状況を再現できることから安全側に評価されたと考えられる。さらに、FEM 解析を用いて沖縄と新潟の地域の違いによる影響を評価した場合に、新潟より沖縄の地域の方が鋼材腐食発生限界に達する時間が短くなることが確認されており、実環境で測定した結果と同様の傾向を示しており、環境条件の差による影響も評価できることが明らかとなった。

結合材種類および  $CA_2/B$  を変化させた場合の見かけの拡散係数の実験値から設計計算に使用するための  $CA_2$  を用いることによる見かけの拡散係数の低減係数の計算方法を提案し、FEM 解析などに  $CA_2$  の効果を組み込むことで  $CA_2$  の効果をより汎用的に検討できる方法を提案した。

わが国は島国であることから、海岸に面した場所に多くの人々が生活をし、多くのコンクリート構造物も臨海部に建設されている。これらの構造物では、海からの飛来塩分により、

鉄筋腐食が生じ劣化が進展しているケースが多い。一方、山間部のコンクリート構造物においても、冬季には凍結防止剤の散布による塩化物の供給により、臨海部と同様の鉄筋腐食による変状も見受けられる。特に近年は、塩害に伴うコンクリート片の剥落だけではなく、架け替えを余儀無くされるほど耐荷力や耐久性が低下した橋梁も散見されている。このような現状を踏まえ、コンクリートの耐久性を向上させるための材料開発には大きな意義があると考えられる。本研究では、プレストレストコンクリートの塩害劣化因子である塩化物イオンの浸透に着目し、セメント種類は早強ポルトランドセメントを基本として、環境負荷低減効果を有する混和材として高炉スラグ微粉末、細骨材として高炉スラグ細骨材とカルシウムアルミネート系混和材  $CA_2$  の併用による塩化物イオンの固定化機能を活用した材料的対策について検討を行った。ペーストでは  $CA_2$  の効果について化学的効果と物理的効果の両面から塩化物イオンの浸透抑制効果に与える影響について検討を行い、モルタル試験では高炉スラグ細骨材と  $CA_2$  を併用した際の塩化物イオンの浸透抑制効果に与える影響について検討を行い、コンクリート試験では塩化物イオンの浸透抑制効果だけでなくコンクリートのその他の物性に与える影響について総合的な検討を行い、 $CA_2$  をプレストレストコンクリートに適用することで構造物の長寿命化に寄与できる可能性を示した。今後、暴露試験のデータ蓄積と実構造物データとの照合による精査が必要と考えられるが、材料的な塩害対策の一手法として活用されることを期待する。

## 謝 辞

本論文は、筆者がオリエンタル白石株式会社において平成三十一年四月から令和五年十月にかけて実施した研究にもとづき、 $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ 系塩素固定化材を用いたプレストレストコンクリートの耐久性向上効果について検討した結果を取りまとめたものです。

本論文の取りまとめにあたり、御指導、御鞭撻を賜りました愛知工業大学 教授 呉承寧先生に、深甚なる感謝の意を表します。呉先生との出会いは、筆者が平成十六年七月に弊社の技術研究所に配属された時に遡ります。呉先生は、弊社の技術研究所でプレストレストコンクリートに関する研究開発などに携わっておられました。筆者は、呉先生のコンクリート材料に関する知識だけでなく、新しい技術を生み出す発想力や情熱に魅了されました。その当時に受けた強烈な印象は筆者の心の中に今も強く残っております。本研究において  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$  系塩素固定化材のプレストレストコンクリートへの適用性を見出すために、さまざまな試験方法を駆使した調査を実施し、大型のプレストレストコンクリート梁試験体を用いた模擬塩害環境での暴露試験を実施することで実環境下での挙動確認までを行えたことは、呉先生の研究に対する姿勢を目の当たりにしてきたからに他なりません。心より感謝の意を表します。

愛知工業大学工学部土木工学科材料研究室の皆様には、試験体製作や耐久性試験を実施する際には大変御世話になりました。心より感謝の意を表します。

デンカ株式会社の七澤章様、保利彰宏様、佐々木崇様、入内島克明様、本間一也様、田中館悠登様には、研究内容に関するアドバイスをいただくなど多大な御協力を賜りました。心より感謝の意を表します。

そして、このような研究成果をまとめる機会をいただき、終始ご支援賜りましたオリエンタル白石株式会社 大野達也社長、正司明夫技術本部長、二井谷教治技師長、井隼俊也技術研究所所長、渡瀬博技術部長に心より感謝の意を表します。また、セメント化学に関する検討を行う際には、吉澤千秋様に多数の貴重な御助言を賜りました。心より感謝の意を表します。業務繁忙にもかかわらず、温かく見守って頂きましたオリエンタル白石株式会社技術研究所の職員の皆様にも、お礼を申し上げます。

オリエンタル白石の福岡支店（現：九州支店）に所属していたころから技術研究所に異動した後も大事な節目で声をかけて頂きました角本周様（現：NEXCO 西日本コンサルタンツ株式会社）、大仁田朝生様、吉村徹様に心より感謝の意を表します。

サンコー計測 高野昭三様、株式会社アルファエンジニアリング 櫻井強様、秋山司圭様には計測関係について、株式会社スズキピーシー 鈴木広美様には、試験体製作、暴露試験の実施において多大な御協力を賜りました。心より感謝の意を表します。

最後に、筆者をふるさとから見守ってくれる父と母、常に陰から支えてくれる妻 綾子、長男 和都、次男 大智に心からの感謝の意を表して、謝辞といたします。

令和五年十二月 俵 道和