

博士論文

プレキャストコンクリート製品の
耐久性向上に関する研究

2020年7月

王 亮

岡山大学大学院
環境生命科学研究科

要 旨

プレキャストコンクリート製品は、設備の整った工場で部材を製造することで、天候に左右されることなく製造でき、また促進養生などによって製造効率を高めることが可能である。一方で、一般的な促進養生で用いられている蒸気養生は、強度発現を早めることが出来る反面、製品の耐久性低下が懸念されている。公共投資予算の増額が難しい財政状況のため、今後、建設される構造物には、高い耐久性も求められている。本研究では、プレキャストコンクリート製品の耐久性向上を目指し、一般的に広く用いられているコンクリートおよび今後活用が期待される新材料に関して、使用材料、配合、製造方法がコンクリートの品質に与える影響の検討を行った。

プレキャストコンクリート製品工場で一般的に広く用いられているコンクリートを対象に行った研究では、材料および養生方法がコンクリートの品質への影響に関する実験を行った。高い温度で蒸気養生を行うと、凍結融解抵抗性、スケーリングに対する抵抗性、塩化物イオン浸透抵抗性が低下する。とくに、塩化物イオン浸透性については、いずれのポルトランドセメントを用いた場合にも、80℃で養生した場合には、見掛けの拡散係数が著しく大きくなった。一方で、高炉セメントを用いた場合には、スケーリングに対する抵抗性は小さくなるが、凍結融解抵抗性、塩化物イオン浸透性に対しては、ポルトランドセメントの場合よりも養生温度による影響は小さい。また、粗骨材に関しては、JIS A 5005 の規格を満足する砕石を用い、AE 剤によって 5%以上の空気量を確保した場合でも、十分な耐久性指数やスケーリングに対する抵抗性が得られない砕石がある。このような砕石は、砕石そのものを塩水中で凍結と融解を繰り返したり、硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験方法において、浸漬と乾燥の繰り返しを、JIS 規格で定められた回数を超えて繰り返したりしたときの損傷状況で評価することが可能である。

高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、塩化物イオン浸透抵抗性、凍結融解抵抗性、化学抵抗性に優れる。高炉スラグ細骨材を細骨材の全量に用い、試験室および実機でコンクリートを製造し、品質の確認を行った。高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、一般的なコンクリートと同様に問題なく製品を製造できること、普通コンクリートと比べて、塩害、凍害に対して、高い抵抗性を示すことを確認した。

さらに、セメントを用いず大量のフライアッシュを用いて製造されるジオポリマーについて、製造方法、配合設計法、耐硫酸性および凍結融解抵抗性を確認した。製造時には、練混ぜ直後の温度管理が必要であること、一般のコンクリートと同じように水結合材比で強度管理が可能なこと、高い耐硫酸性を示すことを確認した。

目 次

第 1 章 序 論

1.1 本研究の背景	1
1.2 本研究の目的	2
1.3 本論文の構成	3

第 2 章 プレキャストコンクリート製品の現状と課題

2.1 プレキャストコンクリート製品の変遷	6
2.2 社会資本の老朽化	8
2.3 コンクリート構造の劣化要因	9
2.4 プレキャストコンクリート製品の品質	14
2.5 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリート	16
2.6 ジオポリマー硬化体	30

第 3 章 プレキャストコンクリートの品質

3.1 概 説	36
3.2 セメントの種類及び養生温度がコンクリートの品質に与える影響	37
3.2.1 実験概要	37
(1) 使用材料及び配合	37
(2) 養生方法	37
(3) 試験方法	38
3.2.2 実験結果及び考察	41
(1) 圧縮強度	41
(2) 凍結融解抵抗性	50
(3) スケーリング	56
(4) 乾燥収縮	60
(5) 水分浸透性	67
(6) 塩化物イオン浸透性	76
3.3 粗骨材の種類がコンクリートの品質に与える影響	84
3.3.1 実験概要	84
(1) 使用材料及び配合	84

(2) 養生方法	87
(3) 試験方法	87
3.3.2 実験結果及び考察	89
(1) 粗骨材の種類の違いが耐凍害性に与える影響	89
a) 圧縮強度及び静弾性係数	89
b) 耐凍害性	92
(2) 粗骨材に付着する微粒分量が耐凍害性に与える影響	101
a) 圧縮強度及び静弾性係数	101
b) 耐凍害性	105
3.4 本章のまとめ	114
第4章 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのプレキャストコンクリート製品への適用	
4.1 概説	117
4.2 試験室で作製したコンクリートの品質	117
4.2.1 使用材料及び配合	117
4.2.2 実験結果	118
4.3 実機で製造したコンクリートの品質	124
4.3.1 使用材料及び配合	124
4.3.2 養生方法	124
4.3.3 実験方法	126
4.3.4 実験結果	127
4.4 本章のまとめ	134
第5章 ジオポリマーの配合設計, 養生方法及び劣化抵抗性の検討	
5.1 概説	135
5.2 モルタル実験	135
5.2.1 使用材料及び配合	135
5.2.2 練混ぜ及び養生方法	138
5.2.3 試験方法	138
5.3 コンクリート実験	138
5.3.1 使用材料及び配合	138
5.3.2 練混ぜ及び養生方法	140

5.3.3	試験方法	140
5.4	実験結果及び考察	142
5.4.1	養生温度の決定	142
5.4.2	高炉スラグ微粉末及び高炉スラグ細骨材による圧縮強度への影響	142
5.4.3	NaOH混合液の温度，練り温度及び加温時間による 圧縮強度への影響	143
5.4.4	アルカリ水比による圧縮強度への影響	143
5.4.5	配合における粉体の影響	143
5.4.6	ジオポリマーモルタルの耐硫酸性	144
5.4.7	ジオポリマーコンクリートの耐硫酸性	145
5.4.8	ジオポリマーコンクリートの乾燥収縮ひずみ	145
5.4.9	溶解法によるジオポリマーコンクリートの 凍結融解抵抗性への影響	145
5.4.10	単位水量によるジオポリマーコンクリートの 凍結融解抵抗性への影響	146
5.5	本章のまとめ	160
第6章	結 論	162

第1章 序 論

1.1 本研究の背景

コンクリート構造物は、図 1.1-1 に示すように主にレディーミクストコンクリートを用いた場所打ちコンクリートによる構造物と、プレキャスト（以降、PCa と記す）コンクリート部材による構造物に大別される。場所打ちコンクリートによる構造物の場合には、プラントでコンクリートが練混ぜ・製造され、工事現場で打込み、成型、養生が所定の材齢まで行われてから供用される。これに対して、PCa コンクリート部材による構造物の場合には、工事現場付近のヤードまたは工場で製作された（工場製品）のちに、構造部材として構造物に組み込まれる。工場製品（以降、PCa 製品と記す）は、製品工場でコンクリートを練混ぜ・製造し、型枠内へ打込み、成型され、蒸気養生等の促進養生を経て、材齢 1 日で脱型される。その後、所定の材齢まで工場内で養生が行われてから、施工現場へ搬送し、製品同士を組立・接続してから供用される。また、PCa 製品は成形方法の種類、構造別の種類の 2 つに分類される。成形方法は主に、振動締固め（棒状振動機、振動台、型枠振動機）、加圧締固め、振動・加圧締固め（即時脱型）、遠心力締固め、ロール転圧締固め、高温高圧蒸気養生がある。構造別には、無筋コンクリート（URC）、鉄筋コンクリート（RC）、プレストレストコンクリート（PC）に分けられる。

日本では、PCa 製品が最初に使用されたのは、1887 年（明治 20 年）頃に築造された横浜港や小樽港の防波堤工事である。1914 年（大正 14 年）になってから、工場で本格的に生産されるようになった。1950 年には鉄筋コンクリート管として JISA5302 が、遠心力鉄筋コンクリート管として JISA5303 が、制定された。経済の高度成長期になると大型ボックスカルバートやシールドトンネルのセグメント、各種水路用矢板やフリューム、舗装用インターロッキングなどの JIS 製品、大型橋梁の PCa セグメント、高層建築用各種製品などが製造されるようになった。1990 年代に入ると経済の低迷などで JIS 全体の抜本的な見直しが行われた。現在、PCa 製品の JIS 規格は 2004 年に大改正が行われ施行された。この改正によって、PCa 製品の使用者にとっては JIS 適合製品利用の自由度が高められ、製造者にとっては顧客のニーズに対応しやすくなり、より多くの製品開発が容易となった。

一方、北欧を中心とした PCa 製品の利用率は、20～50%に対して、日本の PCa 製品の利用率は 14.8%と極めて低いのである。その原因の一つは、PCa 製品に対して学協会は重視していないことが挙げられる。また工事発注時における積算方法も一つの原因と考えられる。しかし、場所打ちと比較し、PCa 製品はまだ割高感があることも事

実であり、業界を上げてコストを下げる努力を取組むべきである²⁾。

2015 年 12 月に国土交通省は、建設現場における生産性を向上させ、魅力ある建設産業育成を目指して「i-Construction 委員会」を設置し、取組みを進めている。その主な取組みの一つとして、コンクリート工の規格の標準化等による全体最適の導入が掲げられている。PCa 製品は、施工現場でコンクリートの養生を必要としないため、工期短縮や省力化が期待される。さらに、型枠や各部材の規格を標準化し、プレキャスト化することで生産性向上を目指しており、今後、PCa 製品が、インフラ整備において大いに活用されることが期待されている³⁾。

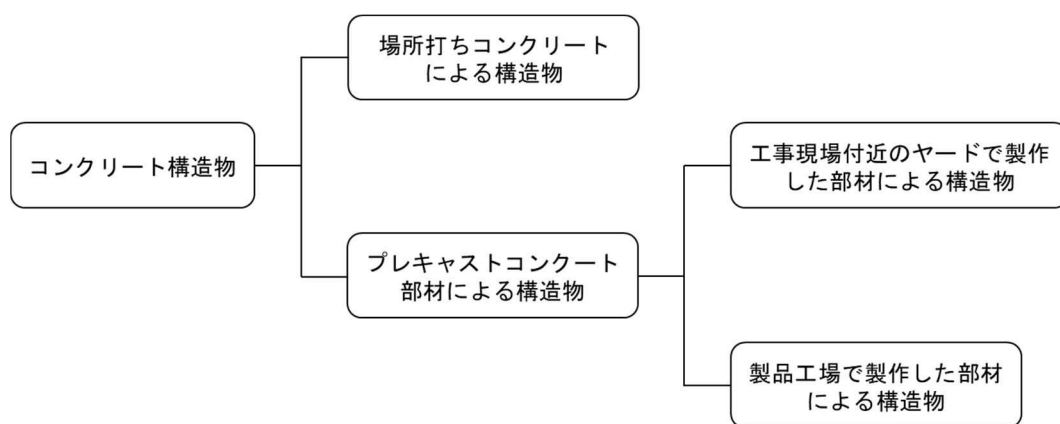


図 1.1-1 コンクリート構造物

1.2 本研究の目的

PCa 製品の製造工程で行われる蒸気養生が、コンクリートの緻密性を変化させることで、製品の耐久性に影響を及ぼすのではないかと、いった指摘がある。現在、土木学会の「コンクリート標準示方書」や各種の規準等では、PCa 製品について、養生条件や環境条件を考慮して耐久性に関する照査を行うこととしている。住吉らにより、前置き時間の不足は、コンクリート組織の緻密さを欠如させ、ひび割れや耐久性の低下を起こすことが解明された⁴⁾。また、丸山らにより、前置き時間が十分に取れない場合でも、蒸気温度の昇温速度を緩やかにすることで、コンクリートの細孔量に不具合を引き起こさないこと、前置き時間を十分長くすることで、昇温速度を高くしても細孔量に不具合を引き起こさないことが解明された⁵⁾。このように、蒸気養生の条件の違いが、コンクリートの性能に与える影響に関して、多くの研究がなされ、様々な知見を得て来たが、まだ未解明な部分も多く、現在も盛んに蒸気養生がコンクリート

に与える影響に関しての研究が行われている。

コンクリートの配合において、一般に、粗骨材は全体積のうち約 4 割を占め、コンクリートの内部構成要素（練混ぜ水、結合材、細骨材、粗骨材及び空気）のうち最大である。そのため、粗骨材の品質は、コンクリートの性能に大きな影響を与えることが考えられる。骨材の耐凍害性に関しては、JIS A 1122「硫酸ナトリウムによる骨材の安定試験方法」によって得られる安定性損失質量百分率によって評価するのが一般的となっている。この試験方法では、硫酸ナトリウムが結晶化する際の膨張圧を凍結融解作用による膨張圧に見立てて、凍結融解作用に対する抵抗性を評価する。しかし、実際の凍結融解による作用とは異なるため、試験によって得られる結果と、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解抵抗性試験方法」によって得られる結果とが、必ずしも良い対応を示すとは限らない。また、粗骨材に付着する微粒分に関しては、JIS A 1103「骨材の微粒分量試験」によって評価しているが、微粒分量がコンクリートの性能に及ぼす影響に関して、特に耐凍害性に関する検討はまだ少ないのが現状である。

高耐久性 PCa 製品として、高炉スラグ細骨材（以降、BFS と記す）を用いた PCa 製品が挙げられる⁶⁾。BFS の反応性に着目し、凍結融解抵抗性および海水や凍結防止剤などによる塩害と凍結融解の複合劣化に対する抵抗性の向上、硫酸劣化抵抗性の向上、乾燥収縮の低減などができるとしている。製鉄工場の周辺地域では材料を容易に入手ができるが、BFS を用いた高耐久性 PCa 製品の普及が課題となっている。

ジオポリマーは、1978 年にフランスの化学者ダビトビッツが提唱した用語であり、セメントクリンカーを使用せず、非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料（活性フィラー）とアルカリ溶液（アルカリ金属のケイ酸塩、炭酸塩、水酸化物の水溶液の少なくとも 1 種類）との縮重合反応で非晶質ポリマーが生成し硬化したものである。同じ構造物を建設した場合、セメントと比較して約 80% の CO₂ 排出量を削減できるとの報告もあり、次世代のコンクリートのバインダーとなりうる可能性を有している⁷⁾。

本研究では、高温常圧蒸気養生し、工場で製作した PCa 製品をメインの対象に、製品に使用されるセメントの種類、養生方法および粗骨材が、コンクリートの品質に及ぼす影響に関して実験を行い、PCa 製品を製造するための養生方法および粗骨材について検討を行った。また、BFS を用いたコンクリートは、コンクリートの耐久性を向上させることが可能であることが示されているため、PCa 製品工場の原材料を使用し、BFS を用いた PCa 製品の実機実験を実施し、試験室で製作した BFS コンクリートの品質を比較し、高耐久性プレキャストコンクリートの品質について確認した。更に、新材料として注目されているセメントを使用しないジオポリマーモルタル及びコンクリートの圧縮強度、耐硫酸性、凍結融解抵抗性を検討した。

1.3 本論文の構成

本論文は、全6章で構成されている。以下にその構成を示す。

- ・第1章「序論」では、本研究の背景、目的および論文の構成について述べた。
- ・第2章「プレキャストコンクリート製品の現状と課題」では、PCa製品の変遷、コンクリートの劣化原因に関する従来の研究、PCa製品の品質に影響を及ぼす製造過程や材料の影響に関する従来の研究およびジオポリマーに関する従来の研究について述べた。
- ・第3章「プレキャストコンクリートの品質」では、PCa製品の製造に用いられる蒸気養生の最高温度、養生期間及びセメント種別がコンクリートの品質への影響について、さらに産地や物性値の異なる骨材を用いたコンクリートの圧縮強度および耐凍害性について実験を行い、その成果を述べた。
- ・第4章「高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのプレキャストコンクリート製品への適用」では、試験室でBFSコンクリートを作製し、品質の確認を行い、更に実機でBFSコンクリートを用いたPCa製品を作製し、品質を確認し、その成果を述べた。
- ・第5章「ジオポリマーの配合設計、養生方法と劣化抵抗性の検討」では、ジオポリマーモルタルを基準にして、配合と練り方法を変え、溶解法を用いて実験を行い、さらにコンクリート実験も行い、ジオポリマーモルタルとコンクリートの圧縮強度、耐硫酸性、凍結融解抵抗性などを検討し、その成果を述べた。
- ・第6章「結論」では、本研究で得られた結果の要約を行い、本論文の結論とした。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会 HP, 月刊 コンクリート技術, 2016 年 4 月号
- 2) 日本コンクリート工学協会:「プレキャストコンクリート製品の設計と利用研究委員会」報告書, pp.2-14, 2009 年 8 月
- 3) 土木学会: コンクリート構造物における品質を確保した生産性向上に関する提案, コンクリートライブラリー, No. 148, 2016. 12
- 4) 住吉宏等: コンクリートの組織や物性におよぼす蒸気養生の影響, セメント技術年報, Vol.35, pp.290-293, 1981.12
- 5) 丸山晃平等: 蒸気養生条件が相違するコンクリート製品の強度特性および細孔構造に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No2, pp.571-576, 2011
- 6) 土木学会: 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), コンクリートライブラリー, 第 155 号, 2019.3
- 7) 日本コンクリート工学会: 建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書, 2017

第2章 プレキャストコンクリート製品の現状と課題

2.1 プレキャストコンクリート製品の変遷

日本では、プレキャストコンクリート製品（以降、PCa 製品と記す）が最初に使用されたのは、1887 年（明治 20 年）頃に築造された横浜港や小樽港の防波堤工事である。特に小樽港工事では、材料品質の長期経年変化を調査するために 100 年にわたる試験供試体が作製されたことは有名な話である。工場で本格的に生産されるようになったのは 1914 年（大正 14 年）になってから、鉄筋コンクリート管やポールの製造が開始された。大正から昭和の初めにかけて、鉄筋コンクリート管、U 字溝、マンホール、コンクリート柱、ポール、杭、ブロックなどの製品が生産され、社会基盤の整備に使用されている。PCa 製品の利用が盛んになるのを受けて基準類も整備され、1937 年（昭和 12 年）に JIS の前身である日本標準規格に JES354「下水道用鉄筋コンクリート管」が初めて制定された。1949 年（昭和 24 年）には工業標準化法が制定され、1950 年には鉄筋コンクリート管として JISA5302 が、遠心力鉄筋コンクリート管として JISA5303 が制定された。

経済の高度成長期になると種々の基礎的研究や品質管理・製造技術の開発がなされ、その成果をベースにこれまで製造されてきた製品に加えて大型ボックスカルバートやシールドトンネルのセグメント、各種水路用矢板やフリューム、舗装用インターロッキングなどの JIS 製品、大型橋梁の PCa セグメント、高層建築用各種製品などが製造されるようになった。1990 年代に入ると経済の低迷と建設予算の縮小の中で規格重視の傾向は次第に薄れていった。一方、そのころには、経済のグローバル化から各種規格の ISO への整合化が求められ、JIS 全体の抜本的な見直しが行われた。PCa 製品 JIS は 2004 年に大改正が行われた。それまで PCa 製品の JIS は 21 製品ごとの個別仕様規定であったが、5 種類の基本規格群及び 3 種類の性能規定型構造別製品規格群として階層化・整理された。この改正によって、PCa 製品の使用者にとっては JIS 適合製品利用の自由度が高められ、製造者にとっては仕様規定に縛られることなく開発した製品が JIS 適合品として認定され、顧客のニーズに対応しやすくなり、より多くの製品開発が容易になった。しかし、耐久性能に関して表 2.1-1 に示す性能の代替みなし仕様である水セメント比、空気量、かぶり等を規定するに留まってきた¹⁾。

工場から現場への運搬を前提としている PCa 製品は、薄肉断面でかぶりに余裕をもたせることができない。このようなことから、多様な製品の設計に土木学会示方書に規定されている現場打ち部材と同様な内容の性能照査方法を一律に適用するには無理である。表 2.1-2 に示すように、製品の種類、形状規模、供用予定期間に応じた耐久設

計の考え方の区分を提案された²⁾。

一方、北欧を中心とした PCa 製品の利用率は、20～50%に対して、日本の PCa 製品の利用率は 14.8%と極めて低いのである。その原因の一つは、PCa 製品に対して学協会は重視していないことが挙げられる。また工事発注時における積算方法も一つの原因と考えられる。しかし、場所打ちと比較し、PCa 製品はまだ割高感があることも事実であり、業界を上げてコストを下げる努力を取り組むべきである³⁾。

表 2.1-1 耐久性能の代替みなし仕様

水セメント比の上限値	URC※：65%	RC※：55%	PC※：45%
空気量	凍害のおそれがある場合、型枠投入時：4.5%		
ひび割れ	0.2mm		
かぶりの最小値	土木学会 示方書に規定の最小値		

※URC：無筋コンクリート，RC：鉄筋コンクリート，PC：プレストレストコンクリート

表 2.1-2 コンクリート製品の設計区分の目安

設計区分		みなし仕様 耐久性設計	性能明示型 耐久性設計	性能協議型設計	
JIS との関連		Ⅰ類またⅡ類その他類似製品		その他の製品	
説 明		比較的小型の製品 で供用期間が短い もの	比較的大型の製品 で供用期間が長い もの	小型の製品で 供用期間が短い もの	大型の製品で 供用期間が長い もの
設計耐用年数		20 年を基準	40 年以上を原則	10～50 年以上	
照 主 査 な 方 性 法 能	耐久性	性能代替仕様	劣化モデルによる	購入者と製造者との協議による	
	ひび割れ	曲げひび割れ耐力計算			
	終 局	終局曲げ耐力計算			

2.2 社会資本の老朽化

2.2.1 社会資本ストックの経年的劣化

日本の社会資本は、経済の発展と共に急激に拡大した。しかし、図 2.2-1 に示すとおり高度経済成長期に集中的に整備された日本の社会資本は、今後急速に老朽化が進んでいる。具体的には、建設後 50 年以上経過する社会資本の老朽化の割合は、2013 年とその 20 年後の 2033 年で比較すると、約 73 万橋の内、橋長 2m 以上の道路橋では約 18%から約 67%に、約 1 万本のトンネルでは約 20%から約 50%に、約 1 万箇所の河川管理施設では約 25%から約 64%に、総延長約 45 万 km の下水道管きよでは約 2%から約 24%に、約 5 千施設の港湾岸壁では約 8%から約 58%になる。社会資本の老朽化割合は、急増する⁴⁾。

2.2.2 自動車台数の増加と貨物車両の大型化

日本では、1950 年代後半から高度経済成長が始まり、国民所得の増加とともに自家用乗用車の普及、いわゆるモータリゼーションが急速に進んだ。1955 年度で 16 万台ほどだった乗用車の保有台数は、図 2.2-2 に示すとおり 1972 年度では 100 万台を突破し、今なお線形的に増加を続け、2019 年度には 6,100 万台となった⁵⁾。この保有台数は、我が国の国民 2.1 人に対して 1 台の割合であり、世界第 5 位の多さである⁶⁾。一方、貨物車の保有台数も経済成長に合わせて線形的に増加していたが、1990 年以降、平成時代に入るとバブル経済終焉とその後の長期にわたる景気低迷の影響で軟調に推移している。

貨物車についても、経済のグローバル化や産業構造の変化が進み、トラックおよびトレーラの車両総重量の規制緩和措置が講じられるようになった。具体的には、1993 年に軸距と車両全長にあわせてトレーラの総重量が最大 28t まで緩和されたこと、1998 年には ISO 国際海上コンテナのフル積載トレーラの運行が認められるようになったこと、2003 年には車両総重量 36t を上限としてトレーラによる分割可能な積載物の輸送が特例 8 車種に限り認められたこと、さらにバン型等セミトレーラをけん引するトラクタの駆動軸重が 10t から 11.5t に緩和され、車両総重量および長さ等の制限についても緩和されたこと、などが挙げられる。つまり、自動車の台数増加と貨物車の大型化に伴う重量化が併発したことになる。

道路橋における RC 床版は、交通量の増大による疲労の累積や大型車両の重量増加、経年的な劣化、設計的背景などの影響に加え、路面からの浸水による凍結融解作用や凍結防止剤の主成分である NaCl が引き起こす鉄筋腐食など様々な要因が複合して多様な劣化を引き起こしている。

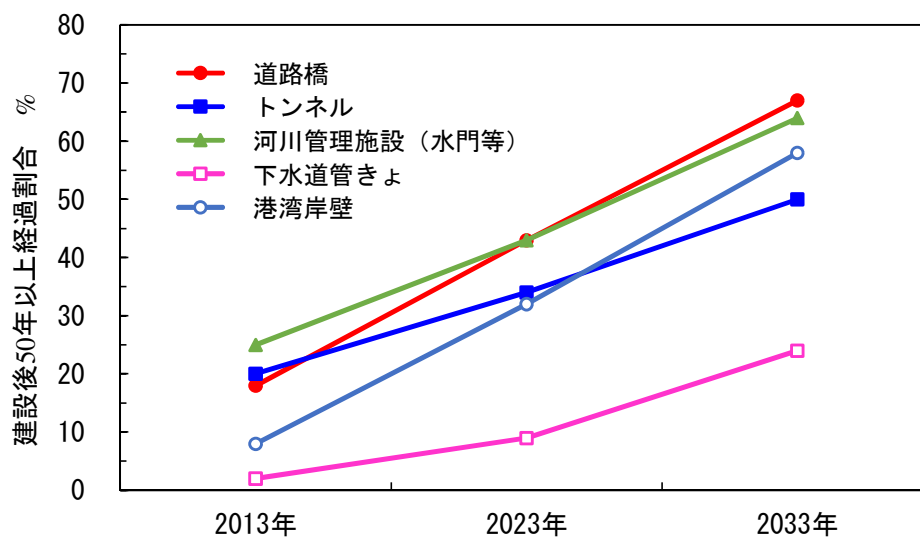


図 2.2-1 建設後 50 年が経過する社会資本の割合

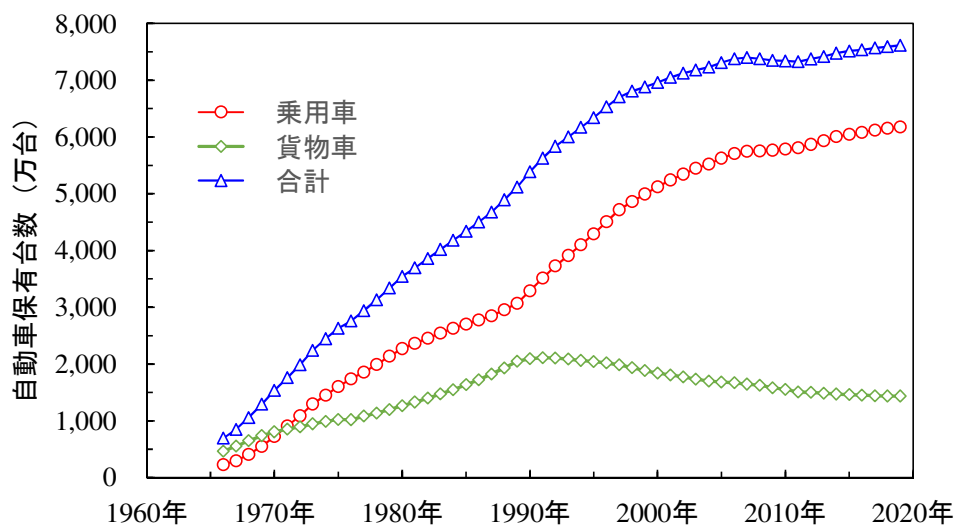


図 2.2-2 自動車保有台数の推移

2.3 コンクリート構造物の劣化要因

2.3.1 凍害による劣化

コンクリート構造物における代表的な劣化要因の一つとして「凍害」が挙げられる。一般に凍害とはコンクリート中の自由水や、吸水率の大きい骨材の水分が凍結融解作

用を繰り返し受けることによってクラックが生じたり、表層部が剥離したりして、表層に近い部分から破壊し、次第に劣化していく現象をいう。水が拘束のない自由な状態で凍結した場合、その膨張率は9%といわれている。コンクリートは凍結によって膨張変形するが、その凍結が融解した場合でも、塑性変形と組織の破壊により変形が原型まで復元しないため、コンクリート内部に膨張が残留する。膨張が残留すると給水が大きくなり、新たな水の供給があると、次の凍結融解作用によってさらに大きな残留膨張を生じる。凍結融解の繰返しによって積み重ねられた残留膨張の圧力が原因となり、ポップアウトやひび割れなどの損傷が生じる。

凍害による劣化現象として、スケーリング、ポップアウトがある。スケーリングとは、コンクリート表面が水で濡れている場合、膨張圧や移動圧による凍害に先行して表面層が剥離する現象のことである。ポップアウトとは、多孔質で吸水性の高い粘土塊や軟石を多く含む骨材が、骨材中の水分の凍結により膨張し、骨材表面のモルタル層を剥落させる現象をいう。

凍害に関しては、古くから研究が行われ、これまでに様々な知見を得ている。凍結融解抵抗性を高める方法として、代表的なものとしては、AE剤を用いたAEコンクリートがある。AE剤を用いないプレーンコンクリートでも1~2%の空気泡を含むが、これはエントラップドエア（巻き込み空気）と呼ばれ、比較的粗大でいびつな形状のものを多く含んでいる。これに対して、AE剤によってコンクリートに連行される空気泡はエントレインドエア（連行空気）と呼ばれる。エントレインドエアはきれいな球状をしておりそれぞれが独立した空気泡である。気泡の粒径は10~200 μ と極めて微細で、その数はコンクリート1 m^3 中に数千億個と言われている。図2.3-1の模式図で(1)は通常の状態を表す。(2)はコンクリート表面の温度が下がり、表面に近い所の水分が凍結した状態だが、水の凍結による膨張圧力は内部に向かう。近くに気泡があると、未凍結水を介してこの圧力を逃がすことができる。さらに、(3)(4)と水分の凍結が内部に進行しても同様の現象が繰返され、コンクリートは膨張圧による破壊を免れる。このように、コンクリート中の連行空気泡は自由水の凍結による大きな膨張圧を緩和する働きをするため、凍結融解の繰返し作用に対する抵抗性が飛躍的に増大する。また、水・セメント比を小さくすることもコンクリートの耐久性を高める上で効果があるが、凍結融解抵抗性については連行空気の有無が支配的である。ただし、空気量は多ければ多いほどよいということではない。空気量2%以下では耐凍害性の改善効果はほとんどなく、また6%を超えると強度低下や乾燥収縮が大きくなるため、空気量の目標値は一般的な普通コンクリートでは4~7%を標準としている。

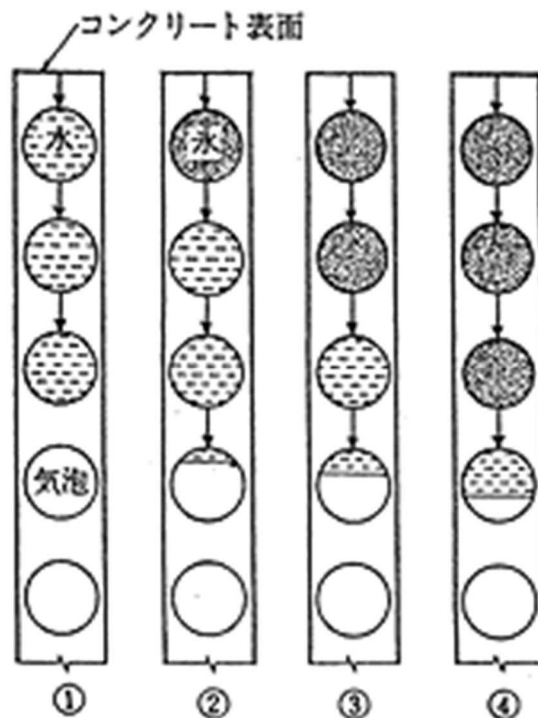
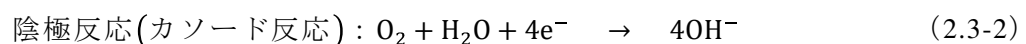


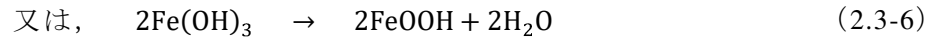
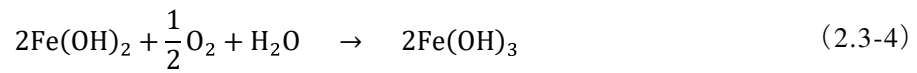
図 2.3-1 凍結防止機構の模式図 ⁷⁾

2.3.2 塩害による劣化

塩害とは、コンクリート中の鋼材（鉄筋やPC鋼材など）が、塩分の作用によって腐食し、腐食に伴う膨張圧によって、コンクリートのひび割れや剥離、鋼材の断面現象などが起こり、コンクリート構造物の耐久性、使用性、美観などの性能が低下する劣化現象である。塩害による劣化が生じた構造物の一例を、写真2.3-1に示す。鉄筋は、コンクリートの強アルカリ環境下において、その表面が、厚さ3nm程度の水和酸化物（ $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ）から成る不動態皮膜に覆われており、腐食から保護されている。しかし、コンクリートの中性化や塩害によって、鉄筋表面の不動態が破壊されると、鉄筋表面に局部電池が形成され、次のような反応が生じて、陽極領域から鉄イオン（ Fe^{2+} ）が遊離し、鉄筋の腐食が進行する。



更に、陽極領域で生じた鉄イオンは、陰極領域で生じた水酸化物イオン（ 4OH^- ）と反応し、次のような反応を生じて、赤錆が生成される。



鉄筋腐食によって生じる錆は鉄筋よりも体積が大きいため、コンクリート内で体積膨張が生じる。これにより、コンクリートに引張力がはたらき、ひび割れを生じる可能性がある。

高度経済成長の時代の構造物については崩落が起きており、これらは川産骨材資源の乏しい地域などで十分に洗浄・脱塩が行われていない海産骨材を使用したためではないかと指摘されている。また、海からの飛来塩分や塩化物イオンを含む凍結防止剤の散布などにより、建設後に侵入するものもある。これに対して、1986年に塩化物総量規制が設けられ、また、減水剤の使用によるコンクリート構造の緻密化、防錆剤による鉄筋の保護、コンクリート表面への塗装、表面仕上げなど建設後に侵入する塩害への対策も進んでいる。



写真 2.3-1 塩害による劣化が生じた構造物

2.3.3 中性化による劣化

コンクリートは、水とセメントが水和反応を起こすことで強度を持つ。水和反応が起こる際に、水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) が生成される。水酸化ナトリウムは、アルカリ性の物質であり、これによりコンクリート内部はアルカリ性状態となる。高アル

カリ環境下にある鉄筋表面には、不動態皮膜が形成される。コンクリート内部の鉄筋も同様で、コンクリートのアルカリにより不動態被膜を形成し、それにより、錆を防ぐことが可能である。

コンクリート内部は、pH が 12~13 と強アルカリ性であるが、ここに大気中の二酸化炭素 (CO_2) が侵入することにより、水酸化カルシウム等のセメント水和物と炭酸化反応を起こすことによって細孔溶液の pH を低下させる。この現象を中性化という。pH が概ね 11 より低くなると不動態被膜は破壊され、鉄筋が腐食環境下に置かれることになる。不動態被膜が破壊された後の鉄筋腐食の進行は、塩害の節 (2.3.2) で述べたとおりである。鉄筋が腐食すると腐食箇所の体積が膨張し、その膨張圧によってコンクリートにひび割れが発生する。そのひび割れを通じて水分、酸素などの劣化因子の供給が容易になることにより、さらに鉄筋腐食が促進され、コンクリートはく離やはく落、鉄筋の断面減少を生じ、構造物の耐久性能、耐荷性能が低下していく。大気中の二酸化炭素濃度は年々増加の傾向を示しており、それに加えて自動車等の排気ガス中の亜硫酸ガス (SO_x)、それを含んだ酸性雨などもコンクリートを中性化させる原因となるため、さらに中性化に対して耐久性の高いコンクリートが求められている。

2.3.4 乾燥収縮による劣化

無載荷のコンクリートが乾燥のためにその内部の湿度（含水率）が低下し、それに伴って体積が減少することを乾燥収縮という。コンクリートの乾燥収縮に影響を及ぼす要因は数多くあるが、乾燥収縮の生成機構を論ずる際に最も重要な要因は、コンクリートの含水率やそれを取り巻く環境の湿度等であると言われている。すなわち、乾燥状態におけるコンクリートの水分の挙動が重要な要因である。

一般に、コンクリート中の水分は、その存在形態によって次に示す 4 種類に分類される。

科学的結合水：セメントの水和反応によって生じる反応性生物の結合水

ゲル水：セメントゲル内部に含まれているゲル粒子間の間隙に吸着している水

毛細管水：水和物で埋められずに残ったセメント粒子の間隙（毛細管間隙）の水

遊離水：骨材およびコンクリート中の比較的大きな間隙中に存在する水

乾燥収縮は、コンクリート中の水分が逸散することに起因すると言われているが、

上記の4種類の水分のうち、乾燥収縮に直接影響を及ぼすのはゲル水であると言われている。

無拘束のコンクリートにおいて乾燥収縮が生じることは体積が減少するのみであるが、コンクリートに何らかの拘束力が働いている場合、収縮することにより引張力が加わり、そこにひび割れが生じる。ひび割れが直接コンクリート構造物の性能低下に繋がることは少ないが、ひび割れから水分や塩分が侵入することで鋼材の腐食等を引き起こし、構造物の性能低下をもたらす。コンクリートの乾燥収縮に関する研究は、これまで数多くの研究者によってなされ、現在もなお、その問題の提起および議論が活発になされている。

2.4 プレキャストコンクリート製品の品質

2.4.1 プレキャストコンクリート製品の製造工程および特徴

プレキャストコンクリート製品は、製造設備の整えられた工場によって製造されるコンクリート製品（以降、PCa製品と記す）である。PCa製品の製作フローを、図2.4-1に示す。これらの工程は、一般に屋内で行われるため、日射や降雨による天候の影響を受けにくく、工程や品質を損なうことが少ない。さらに、これらの作業は、製品の種類・形状ごとに熟練工のグループが繰り返し製造を行うため、作業のミスが少なく、品質が安定しやすい。また、PCa製品は、出荷される段階で、すでに養生が完了しており、現場での養生を行う必要がないため、工期短縮が求められる土木・建築工事等での活躍が期待されている。

図2.4-2に示すように、PCa製品の製造工場においては、生産性を向上させる目的で、蒸気養生が行われることが多い。この蒸気養生の条件（前置き時間、蒸気最高温度、最高温度の保持時間等）は、工場により異なるが、これらの設定がコンクリートの性能に及ぼす影響は大きいと考える。耐久性の高いコンクリート製品が求められる中、蒸気養生の条件がコンクリートの性能に与える影響に関する研究は、過去に多く取り組まれており、様々な知見が得られている。既往の研究により得られた知見を、つぎ（2.4.2）にまとめる。

2.4.2 蒸気養生条件の違いがコンクリートの性能に与える影響

PCa製品の製造工場においては、図2.4-2に示すように、生産性を向上させる目的で、一般に、蒸気養生が行われる。蒸気養生を行う際に決めるべき条件は、(1) コンクリートの打ち込みから蒸気養生開始までの前置き時間、(2) 蒸気温度の昇温速度、(3) 最高温度、(4) 最高温度の保持時間、(5) 冷却速度等が挙げられる。一般に、蒸気養生

を行った場合、標準養生を行ったコンクリートに比べ、長期強度が低下すること、耐久性が低下する傾向にあることは知られている。住吉らにより、前置き時間の不足は、コンクリート組織の緻密さを欠如させ、ひび割れや耐久性の低下を起こすことが解明された⁹⁾。また、丸山らにより、前置き時間が十分に取れない場合でも、蒸気温度の昇温速度を緩やかにすることで、コンクリートの細孔量に不具合を引き起こさないこと、前置き時間を十分長くすることで、昇温速度を高くしても細孔量に不具合を引き起こさないことが解明された¹⁰⁾。このように、蒸気養生の条件の違いがコンクリートの性能に与える影響に関して、多くの研究がなされ、様々な知見を得て来たが、まだ未解明な部分も多く、現在も盛んに蒸気養生がコンクリートに与える影響に関する研究が行われている。

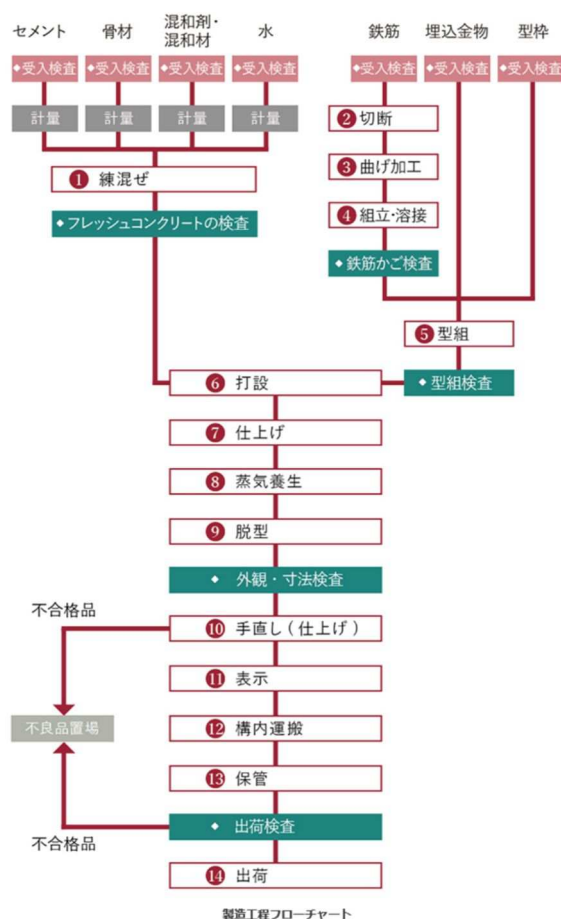


図 2.4-1 PCa 製品の製作フロー⁸⁾

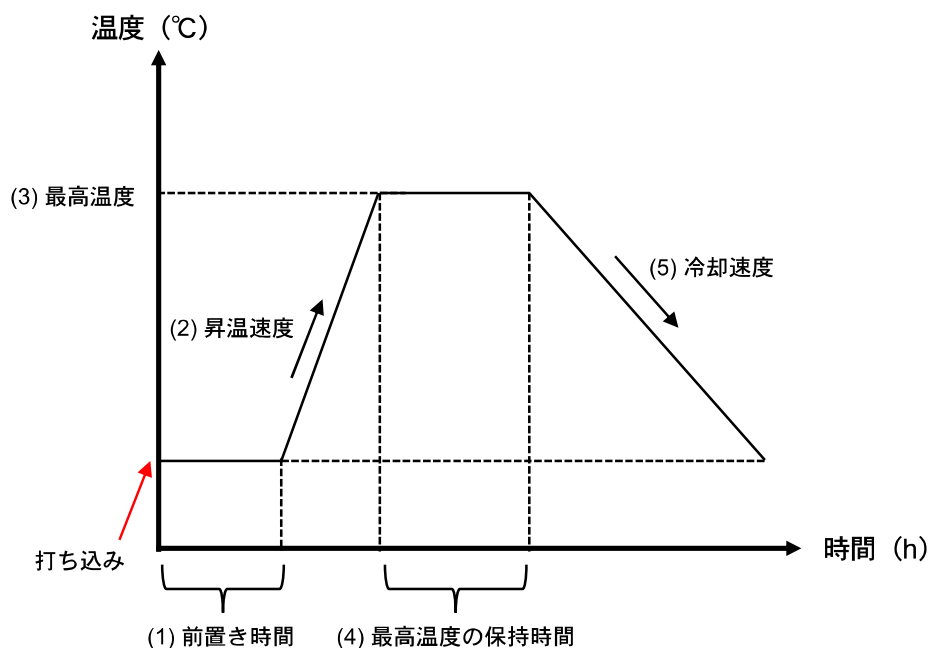


図 2.4-2 蒸気養生の工程

2.5 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリート¹¹⁾

2.5.1 高炉スラグ

(1) 鉄鋼スラグの種類および発生量

鉄鋼スラグは、鉄や鋼の製造工程で副産物として生成される。鉄鋼スラグは、鉄鉱石から銑鉄を製造する際に発生する高炉スラグと、銑鉄からリン、炭素などを除去し鋼を製造する際に発生する製鋼スラグに大別される。高炉の製鉄工程で 1,000kg の銑鉄がつくり出されるとき、約 300kg の高炉スラグが副産物として生成される。また、転炉や電気炉の製鋼工程で 1,000kg の粗鋼がつくり出されるとき、約 100kg の製鋼スラグが副産物として生成される。鉄鋼スラグの分類を、図 2.5-1 に示す。

高炉スラグは、銑鉄を製造する高炉で約 1,500°C の高温で熔融された鉄鉱石の鉄以外の成分と、石灰石やコークスの中の灰の一部と一緒に分離回収されたものである。また、約 1,500°C の熔融状態の高炉スラグは、冷却方法によって徐冷スラグと水砕スラグに大別される。製鋼スラグは、高炉で作り出される銑鉄を、ミルスケール、鉄鉱石および生石灰を副原料に、転炉で精錬する工程で生成する転炉系スラグと、合金鉄および生石灰を副原料に、スクラップを電気炉で精錬する際に生成する電気炉系スラグに大別される。

鉄鋼スラグの国内での年間使用量は毎年約 3,500 万トンである。鉄鋼スラグの成分

は、天然の岩石や土や砂とほぼ同等であり、有害物質を含まず工業製品として安定している。鉄鋼スラグは特徴に応じてセメントの原料、路盤材、コンクリート用骨材等の製品に加工され主に土木建築分野で広く利用されている。

鉄鋼スラグは天然の岩石や海砂・川砂の代替材として使用され天然資源の節約となる。また、セメントの原料として活用することにより、燃料の節約と二酸化炭素の発生が抑制されることから、鉄鋼スラグ製品は、環境への負荷を低減させるリサイクル資材としてますます脚光を浴びている。そして、さらなる可能性が模索され積極的な用途開発が促進されている。

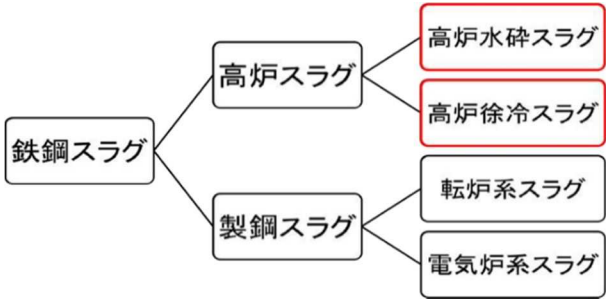


図 2.5-1 鉄鋼スラグの種類

(2) 高炉スラグの特徴と用途

高炉から排出されたスラグは、約 1,500℃の熔融状態にあり、その冷却方法によって徐冷スラグと水砕スラグに分類される。徐冷スラグは、熔融スラグを冷却ヤードに流し込み、自然放冷と適度の散水により徐冷処理することで、結晶質で岩石状のスラグとなる。水砕スラグは、熔融スラグに加圧水を噴射するなど急激に冷却処理することにより、ガラス質で粒状のスラグとなる。表 2.5-1 に高炉スラグの化学成分の一例を示す。

表 2.5-1 高炉スラグの化学成分

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	T-Fe	MgO	S	MnO	TiO ₂
33.8	42.0	14.4	0.3	6.7	0.8	0.3	1.0

a) 高炉徐冷スラグ

高炉徐冷スラグの外観は、表面は粗面、気孔があり、角張っている。粒子密度は天然砕石よりもやや小さい(絶乾密度: $2.2 \sim 2.6 \text{ g/cm}^3$)。これは凝固の過程で発生するガスが逃げ切れずスラグ中に残ってしまうためであり、空隙を多く含み吸水率はやや高い。高炉徐冷スラグは熔融状態のスラグを冷却ヤードなどに放流する際の層厚や散水などによる冷却方法によって密度や吸水率などの物理特性が変化するため、一定の範囲で製鉄所間、製造ロット間のばらつきが存在する。高炉徐冷スラグの化学組成は一般に、 CaO および SiO_2 の 2 成分を主成分としている。特に自然界の土や石の成分に比べ石灰の含有が多く、その他には Al_2O_3 、 MgO などが含まれる。高炉徐冷スラグは、 Na_2O 、 K_2O 等をほとんど含まないため、コンクリート構造物のひび割れや崩壊の原因となるアルカリ骨材反応を抑制する。また、 CaO 、 SiO_2 、 MgO を含んでいるため、珪酸石灰肥料(ケイカル)となる。スラグが水と接触すると微量の CaO や SiO_2 が溶け出し、スラグ表面に緻密な水和物を形成する(水硬性)。さらにアルカリ性の雰囲気のもとでは、 Al_2O_3 も加わった水和物を形成し、スラグ粒子をつなぐ結合材となって固結する(潜在水硬性)。以上のような性質を持っていることから、道路用路盤材、コンクリート用粗骨材、セメントクリンカー原料(粘土代替)、稲作用肥料などの利用がなされている。

b) 高炉水砕スラグ

高炉水砕スラグの粒子はガラス質であり、形状も凹凸が激しく角張った形状をしている。また、密度等の物性はスラグ温度、冷却水量、水圧をコントロールすることにより、軟質で軽いものと、硬質で重いものを造り分けることができる。硬質のものはコンクリート用細骨材として用いられるのが一般的であり、軟質のものは土木用に用いられる。高炉水砕スラグはガラス質であるため、活性が強く、アルカリ性水溶液のもとでは水和物を生成して硬化する性質がある。これを潜在水硬性といい、高炉水砕スラグの大きな特徴となっている。

高炉水砕スラグでは、熔融スラグが急激に冷却され、結晶を生成する時間的余裕がないため、図 2.5-2 に示すようなガラス構造となっている。ここにアルカリ刺激が存在すると、網目構造が切断され、網目構造中に包含されていた CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 などにより、ポルトランドセメントと同様の水和反応が起こり、 $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 系および $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ 系の水和物が生じて固結する。これが潜在水硬性である。高炉水砕スラグ単体で固結するためには、次のような条件が揃うことが必要とされている。

- ・ 高炉水砕スラグ層に適度の水分が存在する。
- ・ 高炉水砕スラグ層がある程度の密度に保たれている。

- ・ 高炉水砕スラグ層の間隙水がアルカリ性(pH11 程度)に保たれている。

一般に粒子がガラス質の場合では，塩基度(CaO/SiO_2)が大きいほど水硬性が高い。高炉水砕スラグは他に，塩化物を含まない，非アルカリ骨材反応などの性質がある。これらの性質より，高炉セメント原料，コンクリート用細骨材，珪酸石灰肥料などとして利用されている。

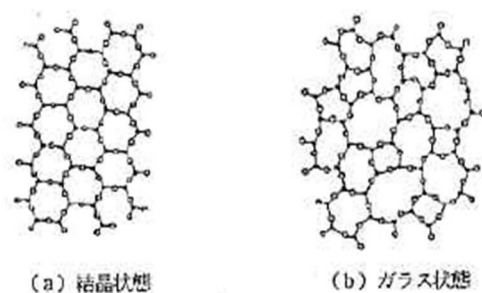


図 2.5-2 高炉水砕スラグの網目構造

2.5.2 高炉スラグ細骨材

(1) 高炉スラグ細骨材の種類および特徴と用途

高炉スラグ細骨材（以降，BFS と記す）は，水砕スラグを磨鉱機等で粒径を整えた後，ふるいを用いて粒度調整を行い，必要に応じて固結防止剤を添加して製造される。BFS は，JIS A 5011-1 : 2018(コンクリートスラグ骨材－第 1 部：高炉スラグ骨材)では，粒度によって表 2.5-2 に示す 4 区分に分類される。一般のコンクリートでは，BFS は天然細骨材や砕砂等の普通細骨材と混合して使用されることが多い。混合使用される主な目的は，細骨材の粒度調整，品質の改善，環境負荷の低減等が挙げられている。BFS を単独で使用する場合，BFS5，BFS2.5，BFS1.2 が用いられる。BFS5-0.3 については，細目の普通細骨材と混合使用を想定して製造されているものである。BFS を単独使用すると，エントラップトエアが増加する傾向がある。使用する BFS によって配合設計等で留意する必要がある。

表 2.5-2 BFS の分類

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
5～0.3 高炉スラグ細骨材	5～0.3	BFS5-0.3

(2) 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの特徴

高炉スラグ細骨材は，JIS A 5011-1 にその規格が制定されており，1983 年に建築学会から設計施工指針(案)が出されていた。その後 1993 年に土木学会から「高炉スラグ骨材コンクリート施工指針」が出版された。この 10 年の間にコンクリートの環境負荷低減や資源の有効活用に関する関心の高まりから，高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの研究が数多くなされて来た。本来，高炉スラグ細骨材は，資源の有効利用や地球環境の観点から普通骨材の代替品として使われていたが，これまでの研究によって，高い耐久性を持つことが示された。例えば，AE 剤を用いることなく高い耐凍害性が得られること，乾燥収縮ひずみが小さくなること，塩化物イオンの浸透を抑制できること硫酸に対して強い抵抗性を持つこと等が示された。

2.5.3 プレキャスト製品の製造工場で製造した BFS コンクリートの性能および品質¹¹⁾

高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは，塩化物イオンの浸透性が抑制されること，耐硫酸性が向上すること，AE 剤を用いることなく凍結融解抵抗性が得られること等，コンクリートの耐久性を向上させることが可能であることが示されている。

試験室で製造するコンクリートは，通常，打ち込み後，1 日間型枠内で養生を行い，脱型後は，十分な期間，20℃の水中で養生を行うことが可能である。それに対し，プレキャストコンクリート製品の製造工場などで実機によって製造されるコンクリートは，通常，生産効率を向上させる目的で蒸気養生が行われ，脱型後の湿潤養生期間は，試験室で製造したコンクリートに比べ短い。配合が同じであっても，蒸気養生を行い，湿潤養生期間の短い条件で製造されるコンクリートの品質は，試験室で得られたものと同等であるとは限らない。

既往の研究において，実際のコンクリート製品の製造工場で製品に打設されたコンクリートから供試体を採取し，そのコンクリートを用い，BFS コンクリートの耐凍害性に関して検討を行った。その結果を，つぎに示す。

図 2.5-3 は，製品打設時に採取したコンクリート供試体の耐久性指数の変動を示している。図中の○は，製品打設時に採取したコンクリート供試体の耐久性指数を示している。この図より，高炉スラグ細骨材を用いたものであっても，実際の製品工場での打設では，実験室とは異なり，凍結融解抵抗性にばらつきが見られることがわかる。このままでは，高炉スラグ細骨材を用いた高耐久性コンクリートの実用化には至らないため，つぎは，コンクリート製品の凍結融解抵抗性がばらつく原因となり得る要因について検討を行う。

図 2.5-4 は、粗骨材自体に、凍結融解作用を与えた場合の、粗骨材の質量残存率を示している。図中の○、□および△は、それぞれ、砂岩碎石 A、B および粘板岩の結果を示している。この図から、粗骨材の中には、凍結融解作用によって、その粗骨材自体が劣化してしまうものがあることが確認できる。粗骨材は、配合において容積で約 4 割程度を占めており、骨材自身の凍結融解に対する抵抗はコンクリートの凍結融解抵抗性に大きな影響をもたらす。高炉スラグ細骨材および高炉スラグ微粉末を用いた場合であっても、この図に示す粘板岩のような粗骨材を用いている場合には、コンクリートに十分な凍結融解抵抗性を持たせることは難しいと思われる。

図 2.5-5 は、図 2.5-3 の青色の破線で示した期間に製品打設時に採取したコンクリート供試体の耐久性指数を示している。この期間の供試体に関して、いずれの供試体も、試験開始時材齢を 56 日としており、試験開始まで蒸気養生後現場水中養生を 13 日間行っている。この期間に注目した理由は、同じ配合、同じ養生条件でコンクリート製品の打設を行った場合でも、耐久性指数に、明らかな差が生じているからである。また、この期間の配合において、粗骨材に粘板岩碎石は用いていない。この図から、供試体 No.10 以降、耐久性指数が 60 を下回っていることが確認できる。さらに、図 2.5-3 と見比べることで、この期間を境に、以後、耐久性指数が 60 を下回るものがほとんどであることも確認できる。

図 2.5-6 は、図 2.5-5 に示した供試体に用いた粗骨材の表面に付着している微粒分の量を調べた結果である。図中の○および□は、それぞれ最大寸法が、20mm および 15mm の砂岩碎石の表面に付着している微粒分の量を示している。この図から、最大寸法が 20mm の砂岩碎石において、表面に付着している微粒分の量が供試体 No.10 以降多くなっていることが確認できる。高炉スラグ細骨材および高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、高炉スラグが反応することにより、コンクリート中のモルタル部と粗骨材の界面がより密実になることにより、凍結融解抵抗性を発揮する。そのため、粗骨材自体の表面に微粒分が多く存在する場合、モルタル部と粗骨材の界面に空隙ができ、そこに侵入した水の凍結融解作用により、耐久性指数が低下した可能性があるかと推測できる。

図 2.5-7 は、図 2.5-5 に示した供試体の打設時の外気温を示している。図中の●は、製品打設時の外気温を示している。この図から、耐久性指数が 60 を下回っている頃より、打設時の外気温が 20℃以下となっていることがわかる。

図 2.4-8 は、図 2.4-5 および図 2.5-7 に示した供試体の打設時の外気温と耐久性指数の関係を示している。図中の○は、製品打設時に採取したコンクリート供試体の耐久性指数を示している。この図から、製品の打設時の外気温が高くなるにつれて、耐久

性指数も大きくなる傾向が確認できる。

図 2.5-9 および図 2.5-10 は、モルタル打設時の外気温と、製品打設時に用いた高炉スラグ細骨材を使用して打設したサイコロ小片の質量残存率の関係を示している。図 2.5-9 は、試験開始時材齢を 7 日とした供試体、図 2.5-10 は、試験開始時材齢を 14 日とした供試体の結果を示している。いずれの供試体も、試験開始まで現場水中養生を行っている。図中の△および□は、それぞれ、試験開始から凍結融解サイクルを 7 サイクル作用させた時点のサイコロ小片の質量残存率を示している。いずれの試験開始時材齢においても、打設時の気温が高いほど、質量残存率も高くなる傾向が見られる。また、試験開始時材齢を長くすることで、その傾向が顕著に見られる。サイコロ小片の結果からも、打設時の外気温がコンクリートの凍結融解抵抗性に影響することが確認できる。ただし、打設時の外気温だけでなく、養生中の水温もサイコロ小片の質量残存率に影響を与えている可能性があるため、養生中の温度を振り分けて、検討を行った。

図 2.5-11, 図 2.5-12 および図 2.5-13 は、結合材に普通ポルトランドセメントを用い、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたサイコロ小片の質量残存率に、試験開始時材齢が与える影響を示している。図 2.5-11 から図 2.5-13 は、それぞれ、打設から脱型までの気中養生および試験開始までの水中養生を 5℃, 20℃および 35℃で行った供試体の結果を示している。図中の△, □および○は、それぞれ試験開始時材齢を、7 日, 14 日および 28 日とした供試体の結果を示している。養生温度を 5℃としたものは、試験開始時材齢を長くしても、凍結融解抵抗性の改善が見られない。養生温度を 20℃および 35℃としたものは、いずれも試験開始時材齢を長くすることで、凍結融解抵抗性の改善が見られる。打設時の外気温ではなく、養生中の温度が、サイコロ小片の凍結融解抵抗性に大きく影響を与えていることが確認できる。

図 2.5-14, 図 2.5-15 および図 2.5-16 は、結合材に普通ポルトランドセメントを用い、細骨材に高炉スラグ細骨材を用いたサイコロ小片の質量残存率に、養生温度が与える影響を示している。図 2.5-14 から図 2.5-16 は、それぞれ、試験開始時材齢を 7 日, 14 日および 28 日とした供試体の結果を示している。図中の■, ○および●は、それぞれ打設から試験開始までの全ての養生温度を 5℃, 20℃および 35℃とした供試体の結果を示している。試験開始時材齢を 7 日としたものに関して、いずれの供試体も、凍結融解抵抗性に差はほとんど見られていない。試験開始時材齢を 14 日としたものに関して、養生温度を 5℃および 20℃としたものは、凍結融解抵抗性にほとんど差は見られないが、養生温度を 35℃としたものは、凍結融解抵抗性の改善が見られる。試験開始時材齢を 28 日としたものに関して、養生温度を高くするごとに、凍結融解抵抗性の改

善が見られる。これらの図からも、養生中の温度が、サイコロ小片の凍結融解抵抗性に大きく影響を与えているという傾向が確認できる。また、その傾向は、養生期間が長くなるほど、顕著に現れることも確認できる。

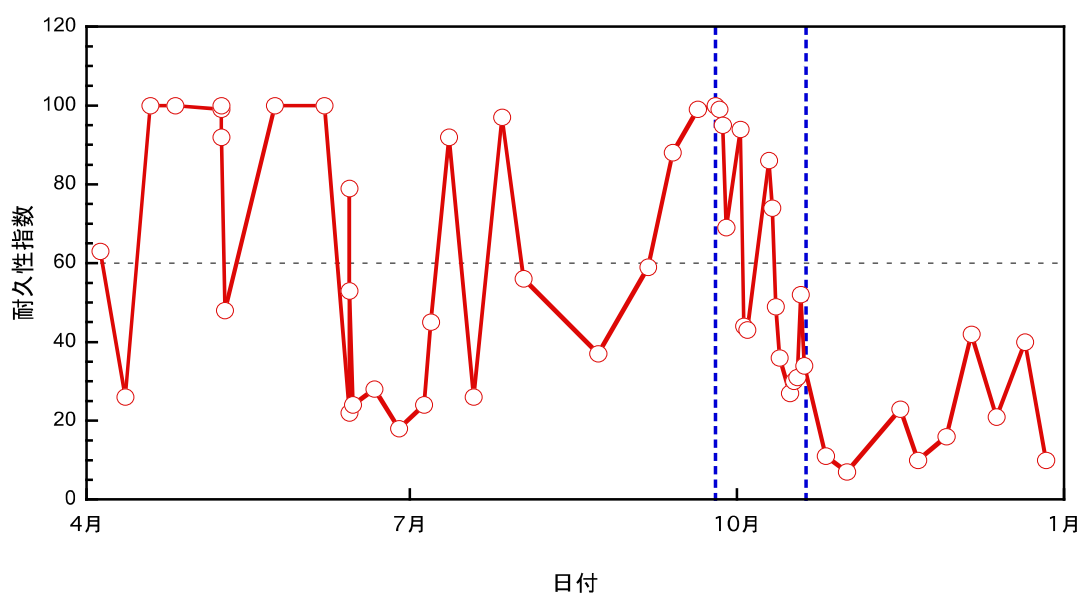


図 2.5-3 高炉スラグ細骨材および高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート製品の
耐久性指数の変動

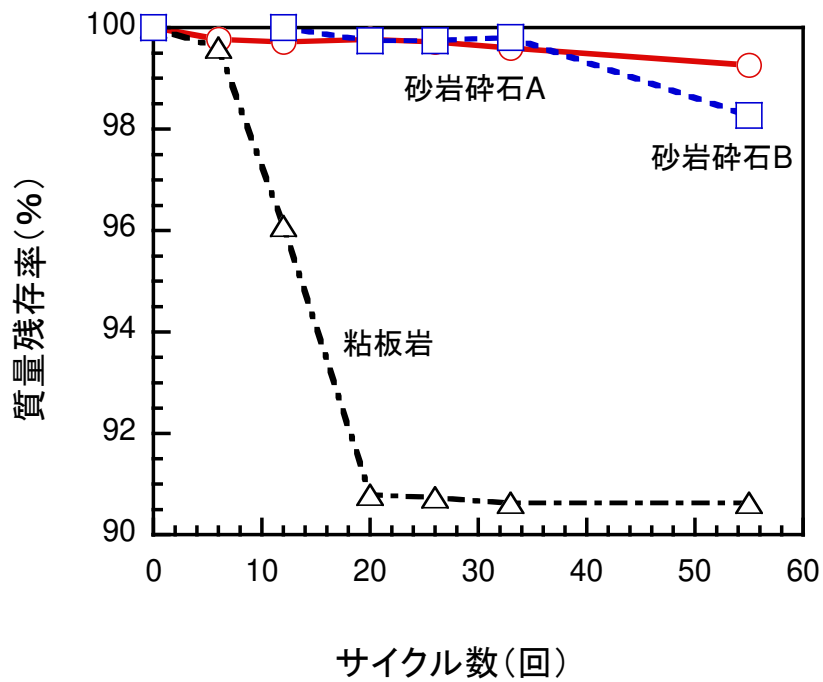


図 2.5-4 粗骨材の凍結融解抵抗性

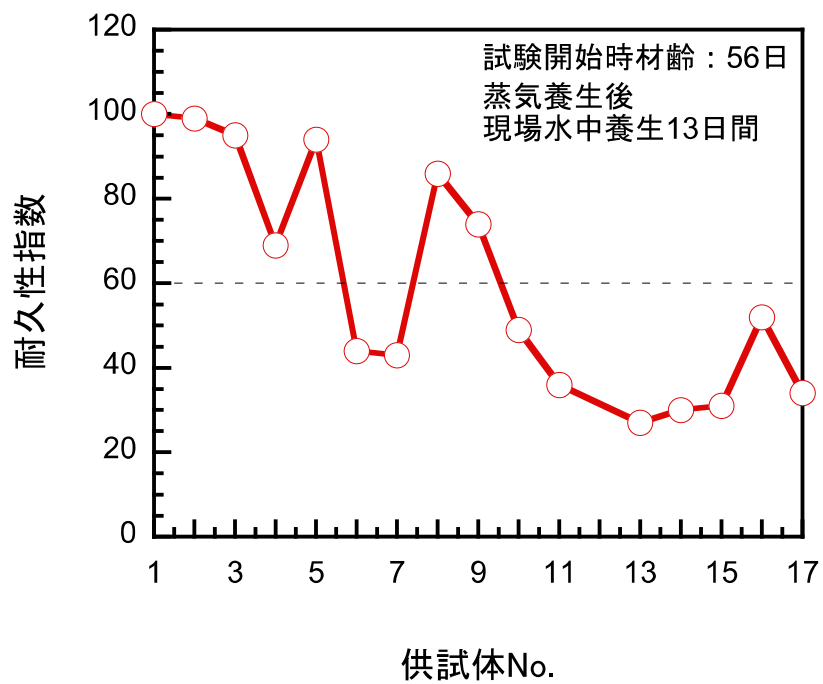


図 2.5-5 図 2.5-3 に示す青色破線区間のコンクリートの耐久性指数の変動

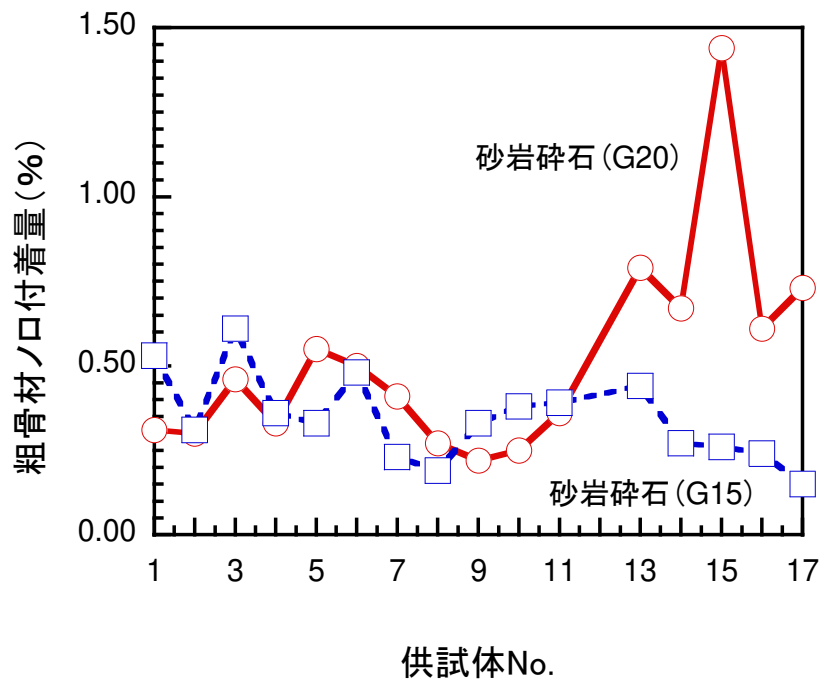


図 2.5-6 コントに用いた砂岩碎石の表面に付着する微粒分量

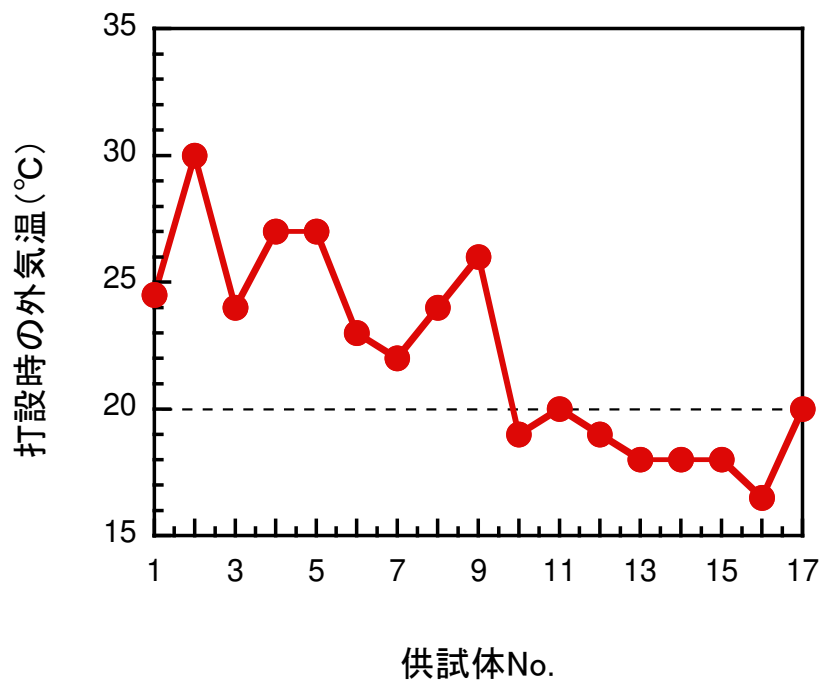


図 2.5-7 コンクリート打設時の外気温

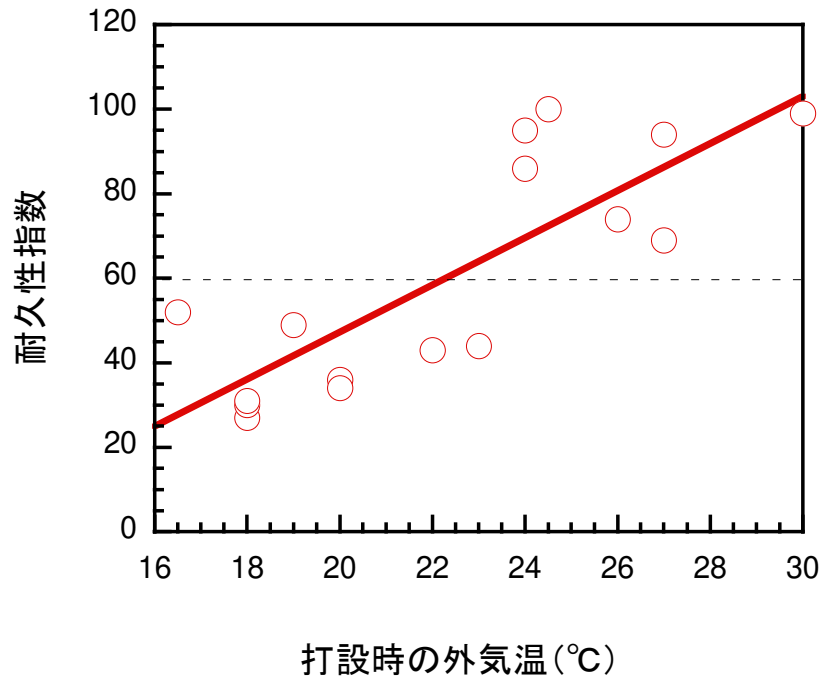


図 2.5-8 耐久性指数と外気温の関係

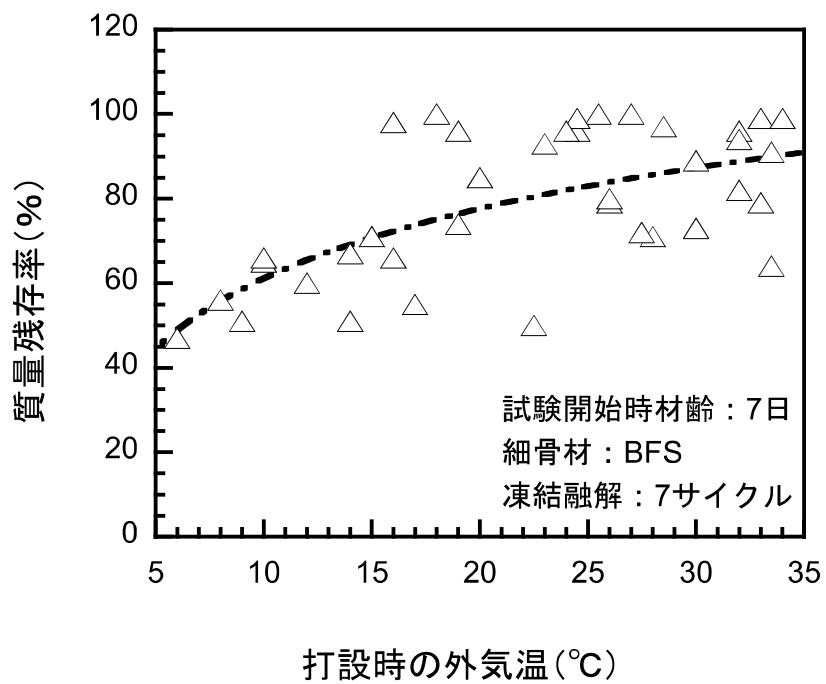


図 2.5-9 質量残存率と外気温の関係(試験開始時材齢：7 日)

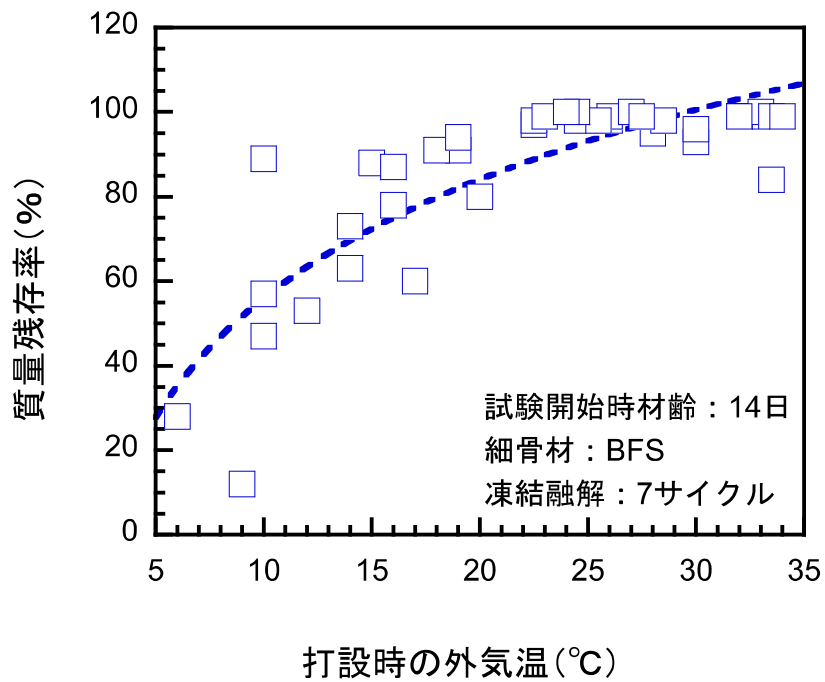


図 2.5-10 質量残存率と外気温の関係(試験開始時材齢:14 日)

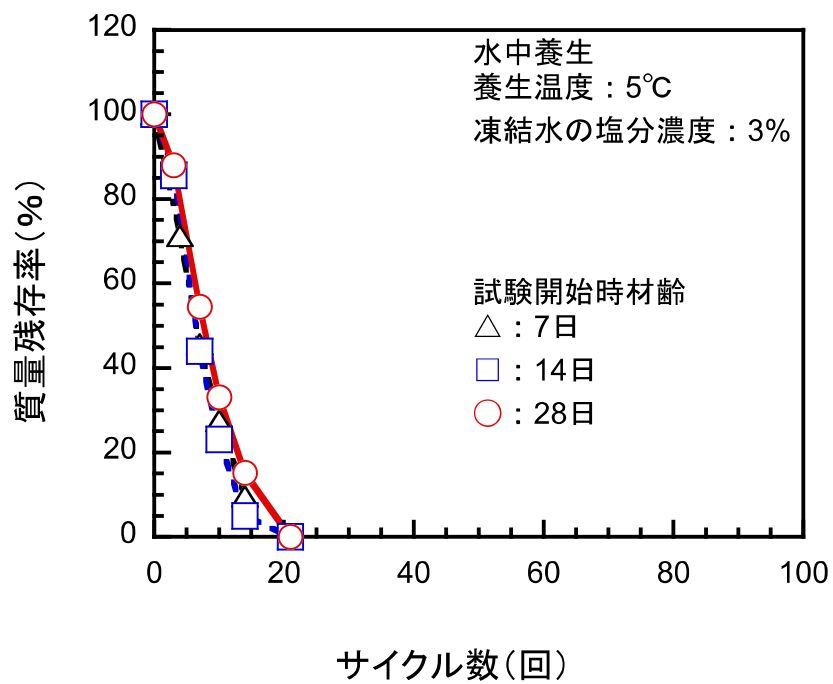


図 2.5-11 材齢が質量残存率に与える影響(養生温度:水中養生(5°C))

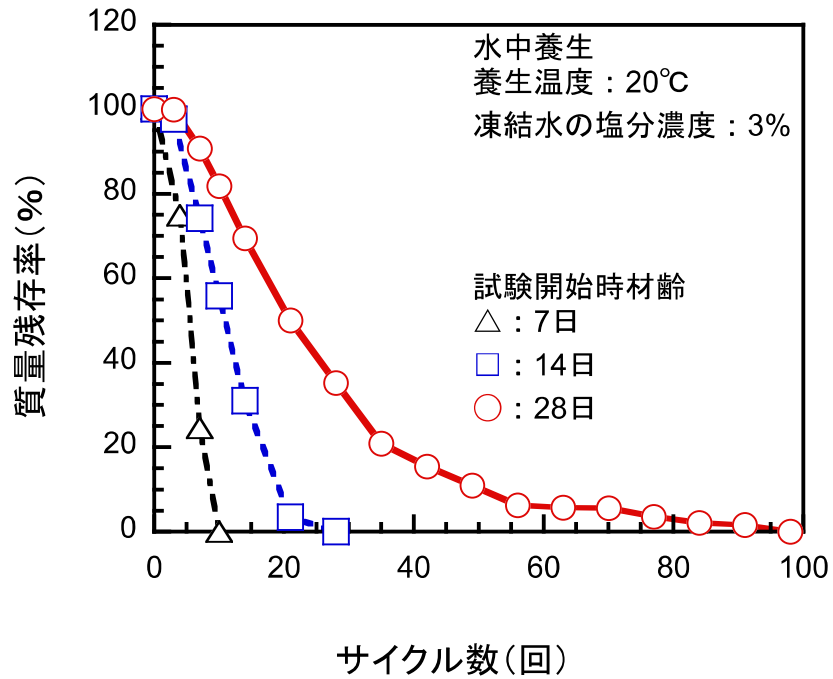


図 2.5-12 材齢が質量残存率に与える影響(養生温度:水中養生(20℃))

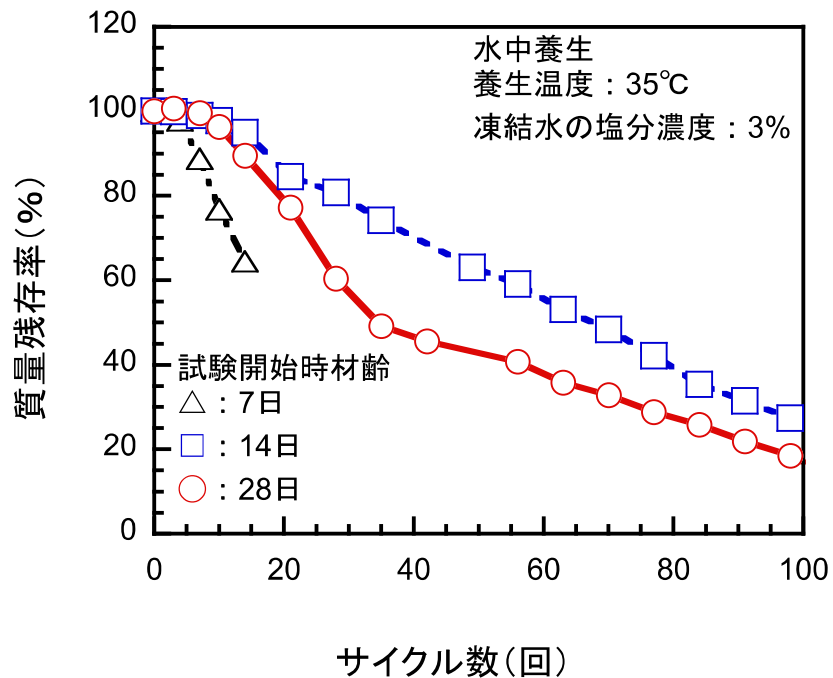


図 2.5-13 材齢が質量残存率に与える影響(養生温度:水中養生(35℃))

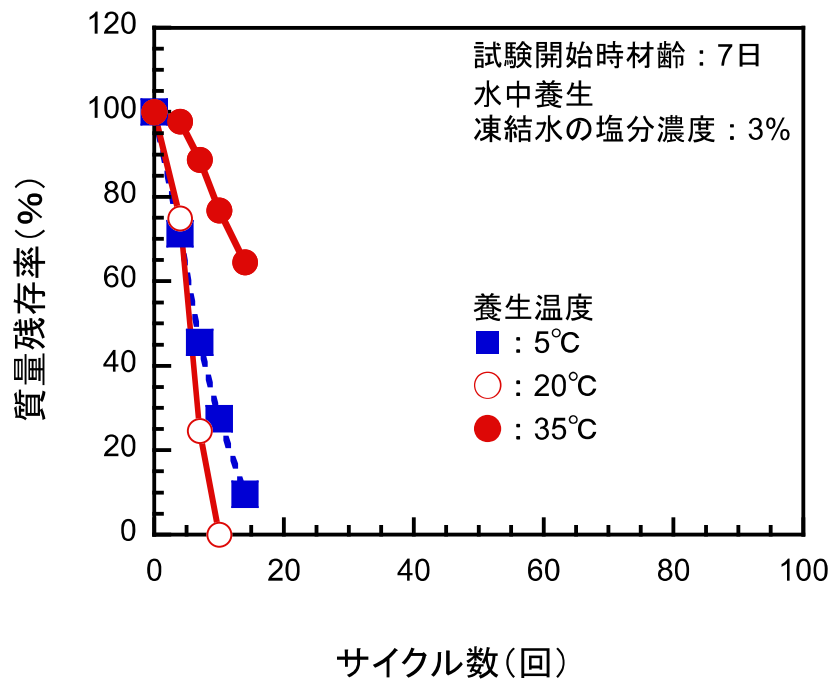


図 2.5-14 養生温度が質量残存率に与える影響(試験開始時材齢：7 日水中養生)

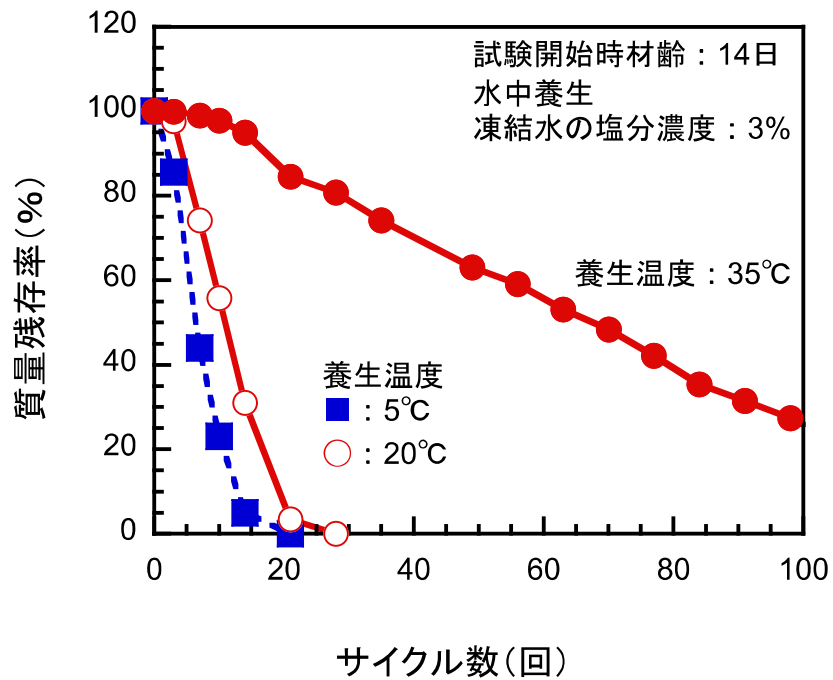


図 2.5-15 養生温度が質量残存率に与える影響(試験開始時材齢：14 日水中養生)

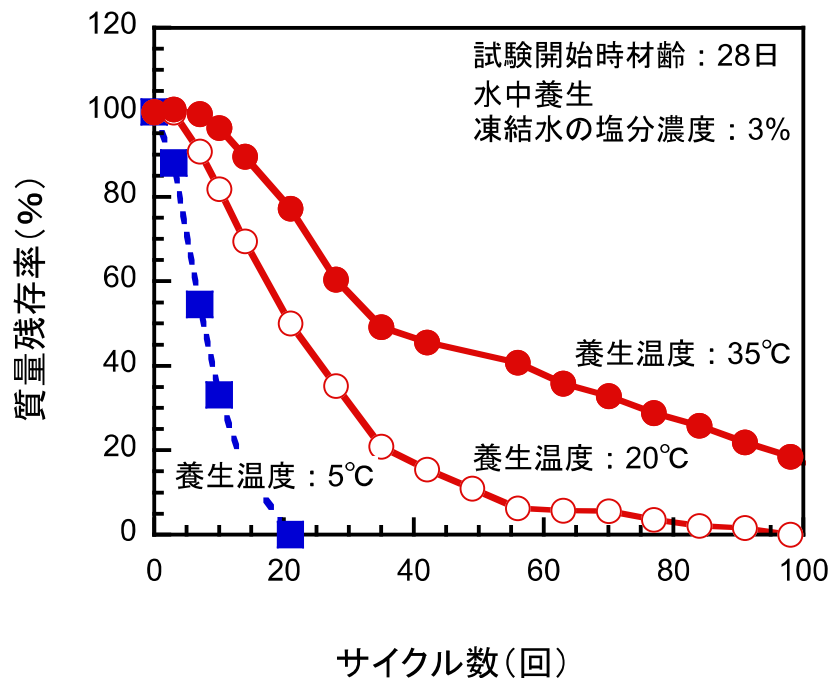


図 2.5-16 養生温度が質量残存率に与える影響(試験開始時材齢:28 日水中養生)

2.6 ジオポリマー硬化体

2.6.1 定義と反応機構

ジオポリマーとは、1978 年にフランスの化学者ダビトビッツが提唱した用語であり、セメントクリンカーを使用せず、非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料(活性フィラー)とアルカリ溶液(アルカリ金属のケイ酸塩、炭酸塩、水酸化物の水溶液の少なくとも 1 種類)との縮重合反応で非晶質ポリマーが生成し硬化したものである。同じ構造物を建設した場合、セメントと比較して約 80%の CO_2 排出量が削減できるとの報告もあり、次世代のコンクリートのバインダーとなりうる可能性を有している。また産業副産物のフライアッシュや高炉スラグ微粉末を用いる場合が多く、資源の有効利用の観点からも、ジオポリマーは環境に優しい新技術であると考えられる。

図 2.6-1 にフライアッシュからできるジオポリマーの反応メカニズムを示す。活性フィラーにメタカオリンやフライアッシュを用いた場合、強いアルカリ成分によって活性フィラーからケイ酸イオンが溶出する。ここで、活性フィラーから同様に溶出したアルミン酸イオンと、ケイ酸塩イオンが縮重合反応することで、アルミノケイ酸塩の組織が形成される。この組織にナトリウムイオンやカリウムイオンが取り込まれたものがケイ素・アルミニウム系活性フィラーのジオポリマー硬化体の構造となる。また、高炉スラグ微粉末を活性フィラーとした場合は、高炉スラグ微粉末による Ca 成

分により Ca ケイ酸塩の構造，すなわち C-S(A)-H という構造をとる。フライアッシュに高炉スラグ微粉末を添加した場合は，アルミノケイ酸塩構造の非晶質物質および高炉スラグ微粉末から生じる C-S(A)-H および，それらが相互に影響しあった生成物と考えられる¹²⁾。

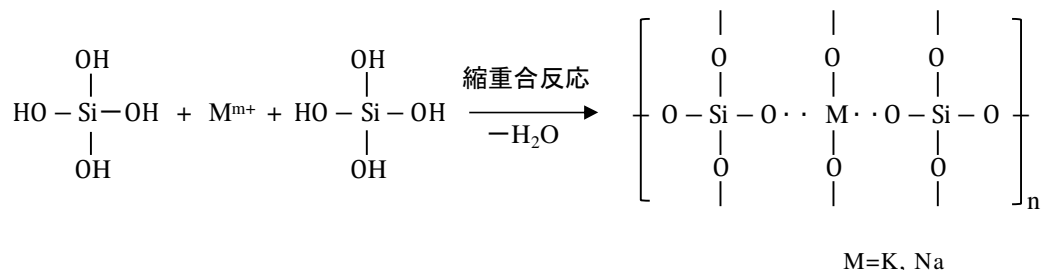


図 2.6-1 縮重合反応

2.6.2 配合設計

ジオポリマー硬化体は，溶液部と粉体部の構成材料によって作成される。溶液部分には，主な材料として水酸化ナトリウム溶液（以降，NaOH溶液と記す）あるいは水酸化カリウム（以降，KOH溶液と記す），および水ガラスである。成分で分けると，NaOH溶液は，NaOHとH₂O成分，KOH溶液は，KOHとH₂O成分，水ガラスはNaOH，SiO₂，およびH₂Oに分けられる。ジオポリマーの配合設計の際には，これらの成分比について質量比を用いず，モル比で表すことで定量的に示すことができる。すなわち，ジオポリマーの配合設計では，アルカリ成分/水のモル比(以降，A/Wと記す)，ケイ素/アルカリ成分のモル比(以降，Si/Aと記す)で表すことで構成成分比を全て表すことが可能である。ここでのアルカリ成分のモル比は，NaOHとKOHを足し合わせたモル比である。

(1) 一般法と溶解法

ジオポリマー作製の際に水ガラスを用いる方法は，一般法と呼ばれ，シリカフェュームを添加する方法が，溶解法という。上原らは，A/W 比，Si/A 比，および高炉スラグ微粉末の置換率の異なるフライアッシュを主原料としたジオポリマー硬化体を，一般法と溶解法（SF 添加法）で作製し，その関係を検討した¹³⁾。A/W 比および高炉スラグ微粉末の置換率が大きい成分領域で溶解法の適応が可能であることが報告されている。表 2.6-1 及び表 2.6-2 にジオポリマーモルタルの配合表，ジオポリマーコンクリートの配合表を示す。図 2.6-3～図 2.6-5 はその結果であり，A/W 比および高炉スラグ微粉末の置換率が大きい成分領域で溶解法の適応が可能であることが報告されている。

表 2.6-1 ジオポリマーモルタルの配合表

試 番	配合条件				単位量(kg/m ³)					
	AL/W	Si/AL	水量 kg/m ³	BS 置 換率	FA	BS	S	AS	SF	A1
6	0.174	0.257	189	13%	570	103	1311	263	29.6	13.1
7	0.174	0.302	189	13%	569	103	1307	262	34.6	13.0
8	0.174	0.355	188	13%	567	102	1303	261	40.5	13.0
9	0.174	0.257	189	22%	512	175	1311	263	29.6	13.1
10	0.174	0.302	188	22%	510	174	1307	262	34.6	13.0
11	0.174	0.355	188	22%	508	174	1303	261	40.5	13.0

AL/W:アルカリ/H₂O のモル比, Si/AL:Si/アルカリのモル比, FA:フライアッシュ(JIS I 号), BS:高炉スラグ微粉末(4000 ブレーン), S:細骨材, AS:「市販 NaOH 粉末+純水」を配合条件で混合。A1:流動化剤・遅延剤(オキシカルボン酸塩系)

表 2.6-2 ジオポリマーコンクリートの配合表

試 番	配合条件				単位量(kg/m ³)						
	AL/W	Si/AL	水量 kg/m ³	BS 置 換率	FA	BS	S	G	ASS	A1	A2
1	0.10	0.30	139	20%	335	101	757	892	193	8.71	0.52
2	0.15	0.30	133	0%	418	0	757	892	209	8.37	0.75
3	0.15	0.30	133	20%	335	101	757	892	209	8.71	0.50
4	0.15	0.30	133	30%	293	151	757	892	209	8.88	0.43
5	0.20	0.30	127	20%	335	101	757	892	224	8.71	0.35

AL/W:アルカリ/H₂O のモル比, Si/AL:Si/アルカリのモル比, FA:フライアッシュ(JIS I 号), BS:高炉スラグ微粉末(4000 ブレーン), S:細骨材, G:粗骨材, ASS:「48%KOH 溶液+JISⅢ号水ガラス+純水」を配合条件で混合。A1:流動化剤・遅延剤(オキシカルボン酸塩系), A2:助剤

アルカリ/H₂O 比=0.10: ●○, =0.15: ▲△, =0.20: ◆◇
 Si/アルカリ=0.35(固定)
 (a)塗りつぶし:SF 添加法, (b)白抜き:一般法

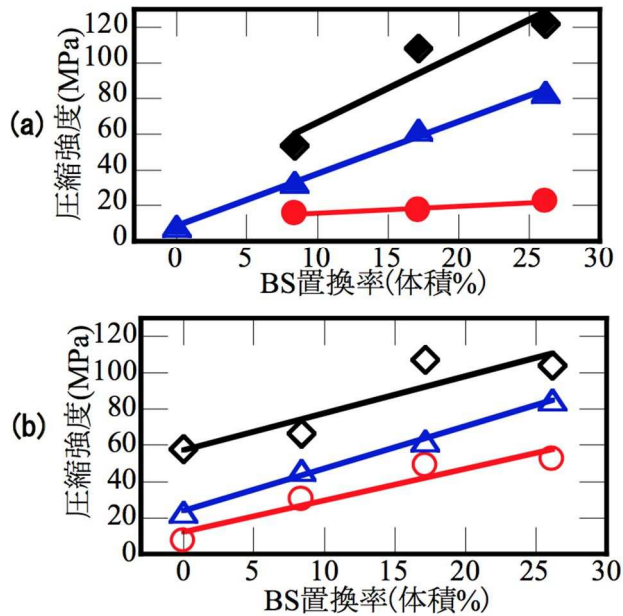
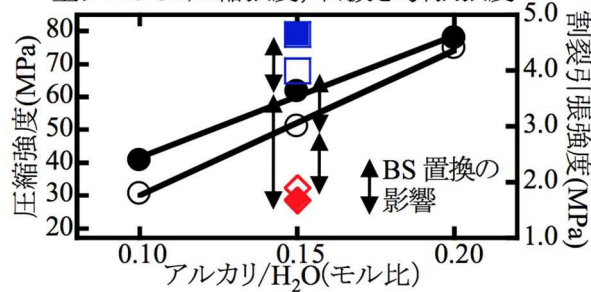


図 2.6-3 ジオポリマーモルタルの作製法と圧縮強度

BS=0 体積%: ◆◇, =20 体積%: ●○, =30 体積%: ■□
 塗りつぶし:圧縮強度, 白抜き:引張強度



アルカリ/H₂O 比=0.10: ◆◇, =0.15: ●○, =0.20: ■□
 塗りつぶし:圧縮強度, 白抜き:引張強度

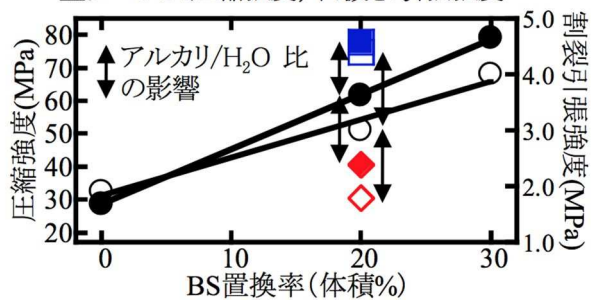


図 2.6-4 ジオポリマーコンクリートの強度

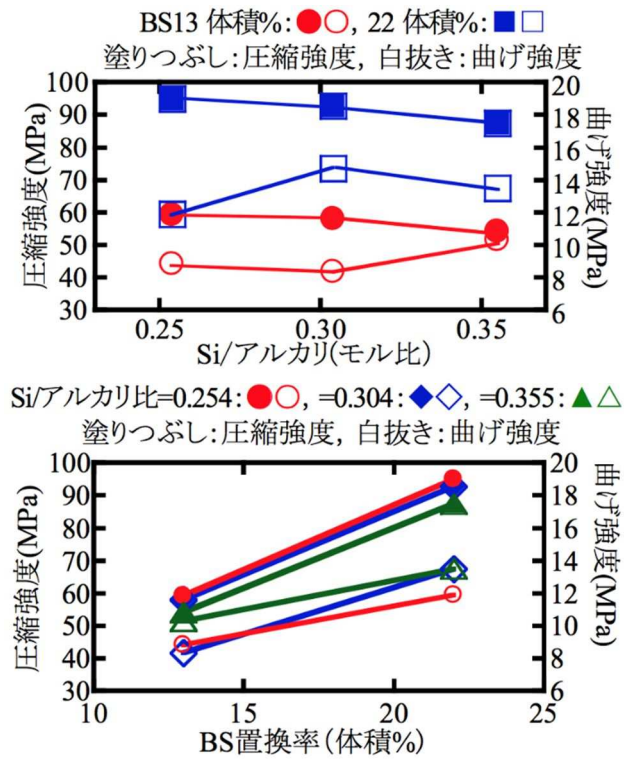


図 2.6-5 ジオポリマーモルタルの強度

参考文献

- 1) 星田典行等：テクニカルレポート コンクリート製品の性能照査型設計の構築に向けた取組，コンクリート工学，Vol.58 NO.6，p.443-450，2020.6
- 2) NPO 法人コンクリート製品 JIS 協議会：コンクリート製品の性能照査型設計の考え方，2019 年 9
- 3) 日本コンクリート工学協会：「プレキャストコンクリート製品の設計と利用研究委員会」報告書，pp.2-14，2009 年 8 月
- 4) 一般社団法人 日本建設業連合会：「建設業ハンドブック 2017」
- 5) 一般財団法人 自動車検査登録情報協会，HP より
- 6) 一般財団法人 日本自動車工業会，HP より
- 7) 藤田康彦：コンクリート用混和材料の常識 HP より
- 8) ジオスター株式会社，HP より
- 9) 住吉宏等：コンクリートの組織や物性におよぼす蒸気養生の影響，セメント技術年報，Vol.35，pp.290-293，1981.12
- 10) 丸山晃平等：蒸気養生条件が相違するコンクリート製品の強度特性および細孔構造に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No2，pp.571-576，2011
- 11) 土木学会：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)，コンクリートライブラリー，第 155 号，2019.3
- 12) 日本コンクリート工学会：建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書，2017
- 13) 上原元樹，南浩輔，平田紘子，山崎淳司：ジオポリマー硬化体の配合・作製法と諸性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1987-1192，2015.7

第3章 プレキャストコンクリートの品質

3.1 概 説

2015 年 12 月に国土交通省は、建設現場における生産性を向上させ、魅力ある建設産業育成を目指して「i-Construction 委員会」を設置し、取組みを進めている。その主な取組みの一つとして、コンクリート工の規格の標準化等による全体最適の導入が掲げられている。プレキャストコンクリート製品（以降、PCa 製品と記す）は、施工現場でコンクリートの養生を必要としないため、工期短縮や省力化が期待される。さらに、型枠や各部材の規格を標準化し、プレキャスト化することで生産性向上を目指しており、今後、PCa 製品が、インフラ整備において大いに活用されることが期待されている¹⁾。PCa 製品の製造工場では、一般に、生産性を高める目的で蒸気養生を用いる。この蒸気養生の条件は、工場により異なり、蒸気養生の条件の違いがコンクリートの性能に与える影響に関する研究は、これまで多く行われてきた。既往の研究では、蒸気養生における前置不足や急激な加熱は、ひび割れの発生や粗骨材とモルタル界面の脆弱化、粗大な細孔の増加により、標準養生を行ったコンクリートより強度や耐久性が低下することが報告されている²⁾。一方で、コンクリートの前置き時間を 5 時間程度と長くして、蒸気養生の昇温速度も緩やかにすることで、強度および耐久性の低下を抑制できることも報告されている³⁾。また、コンクリートの練混ぜ方法の変更や脱型後に再度蒸気養生を行うなどの手法によって耐久性の向上を図ることも検討されている^{4), 5)}。

コンクリートの配合において、一般に、粗骨材は全体積のうち約 4 割を占め、コンクリートの内部構成要素（練混ぜ水、結合材、細骨材、粗骨材及び空気）のうち最大である。そのため、粗骨材の品質は、コンクリートの性能に大きな影響を与えることが考えられる。

骨材の耐凍害性に関しては、JIS A 1122「硫酸ナトリウムによる骨材の安定試験方法」（以降、安定性試験と記す）によって得られる安定性損失質量百分率によって評価するのが一般的となっている。この試験方法では、硫酸ナトリウムが結晶化する際の膨張圧を凍結融解作用による膨張圧に見立てて、凍結融解作用に対する抵抗性を評価する。しかし、実際の凍結融解による作用とは異なるため、この試験によって得られる結果と、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解抵抗性試験方法」によって得られる結果が、必ずしも良い対応を示すとは限らない。

粗骨材に付着する微粒分に関しては、JIS A 1103「骨材の微粒分量試験」によって評価する。微粒分量がコンクリートの性能に及ぼす影響に関して、これまで多くの研究

がなされ、様々な知見を得た。しかし、耐久性、特に耐凍害性に関する検討はまだ少ないのが現状である。

本章では、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種の 4 種類のセメントを使用し、同一水セメント比のコンクリートについて、蒸気養生時の最高温度が、コンクリートの性能に与える影響について検討を行った。また、脱型後の水中養生の有無や水中養生期間が、コンクリートの性能に与える影響についても検討を行った。さらに、粗骨材を用いた凍結融解試験を行うとともに、その粗骨材を用いたコンクリートの凍耐凍害性に関して評価を行った。粗骨材に付着する微粒分がコンクリートの耐凍害性に与える影響に関しても検討を行った。

3.2 セメントの種類及び養生温度がコンクリートの品質に与える影響

3.2.1 実験概要

(1) 使用材料及び配合

本節に用いたコンクリートの配合を表 3.2-1 に示す。結合材には、普通ポルトランドセメント（密度：3.15 g/cm³，ブレン値：3,350 cm²/g，以降，OPC と記す），早強ポルトランドセメント（3.13 g/cm³，ブレン値：4,600 cm²/g，以降，HPC と記す），低熱ポルトランドセメント（3.22 g/cm³，ブレン値：3,440 cm²/g，以降，LPC と記す）および高炉セメント B 種（密度：3.04 g/cm³，ブレン値：3,950 cm²/g，以降，BB と記す）を用いた。細骨材には、硬質砂岩砕砂（表乾密度：2.65 g/cm³，吸水率：1.53 %，粗粒率：2.93）を，粗骨材には，硬質砂岩碎石（最大寸法：20 mm，表乾密度：2.74 g/cm³，吸水率：0.45 %，粗粒率：6.82）を用いた。化学混和剤には，高性能減水剤および AE 助剤を用いた。水セメント比は 45%，単位水量は 170 kg/m³，単位粗骨材量は，1,020 kg/m³ で一定とした。結合材の種類の違いにより生じる単位量の差は，細骨材の量を変えることで調整した。コンクリートのスランプおよび空気量は，高性能減水剤および AE 助剤の添加量を調整して，12±2.5 cm および 4.5±1.5 % の範囲内に調整した。空気量の実測値を表 3.2-2 に示す。

(2) 養生方法

コンクリートは，打込み後 18 時間型枠内で養生を行ってから脱型とした。蒸気養生の温度設定を図 3.2-1 に示す。蒸気養生は，コンクリートを型枠内に打ち込んだ後，2 時間の前置きを行った後に 15℃/時間の速さで所定の最高温度まで昇温を行った。最高温度に到達後，所定の時間保持して，その後は，自然放冷により温度を下げ

た。材齢 18 時間で脱型した後、水中養生を行う供試体は、 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ の恒温水槽内で養生を行った。水中養生を行わない供試体および水中養生終了後の供試体は、室内で気中養生を行った。

(3) 試験方法

a) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、 $\phi 100\times 200\text{mm}$ の円柱供試体を用いて、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して行った。試験は、供試体を 3 本用いて行い、その 3 本の圧縮強度の平均値をコンクリートの圧縮強度とした。

b) 凍結融解試験

凍結融解試験は、 $100\times 100\times 400\text{mm}$ の角柱供試体を用いて、JIS A 1148:2010「コンクリートの凍結融解試験方法」に規定される水中凍結融解方法（A 法）に準拠して行った。供試体は、脱型後に 0 日および 6 日間水中養生をしたものを用意した。水中養生終了後は、試験開始まで、気中で養生を行った。材齢 14 日より試験を開始し、試験開始時および凍結融解 36 サイクルを超えない間隔で測定を行い、相対動弾性係数、耐久性指数および質量減少率を求めた。

c) スケーリング試験

スケーリング試験は、JSCE-K 572「けい酸塩系表面含浸材の試験方法（案）」のスケーリングに対する抵抗性試験に準拠して行った。供試体は、脱型後に 0 日および 6 日間水中養生をしたものを用意した。水中養生終了後は、試験開始まで、気中で養生を行った。材齢 7 日から試験開始までの間に、供試体の成形を行い、所定の面をエポキシ樹脂で被覆した。材齢 14 日より試験を開始し、14, 28, 42, および 56 サイクルで、試験面より剥離したスケーリング片を採取し、乾燥後、質量を測定した。

d) 乾燥収縮試験

乾燥収縮ひずみの測定は、 $100\times 100\times 400\text{mm}$ の角柱供試体を用いて、JIS A 1129-2:2010 附属書 A（参考）に示される「モルタル及びコンクリートの乾燥による自由収縮ひずみ試験方法」に準拠して行った。乾燥開始時材齢より、温度が $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度が $60\pm 5\%$ の条件で実施した。

e) 水分浸透性試験

水分浸透性試験は、φ100×200mm の円柱供試体を用いて、JSCE-G-582-2018「短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法（案）」に準拠して行った。乾燥条件及び期間は、温度 40±2℃かつ相対湿度 30±5%の環境で 28 日の乾燥を与え、かつ 24 時間の質量変化が 0.1%以下であることを確認して乾燥を終了した。乾燥終了後、水に浸漬する面及びその対面以外の面をエポキシ樹脂で被覆した。エポキシ樹脂が硬化した後、供試体の下部が 10±1mm 水に浸かるように浸水し、5 時間、24 時間及び 48 時間の期間、浸水させた。各浸漬期間が終了した後、浸漬時の鉛直方向に供試体の中央で割裂し、割裂面に液体漏れ試験発色現像剤を噴射した。噴射後、1 本につき 5～6 ヲ所、水分浸透深さを計測し、その平均値を、水分浸透深さとした。

f) 塩化物イオンの浸透性試験

塩化物イオンの浸透深さの測定は、φ100×200mm の円柱供試体を用いて、JIS A 1154:2012「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」に規定される電位差滴定法に準拠して行った。供試体は、φ100×200mm の円柱供試体の、円形の 2 面から 25mm を切断し、切出した φ100×150mm の円柱供試体を用いた。供試体は、成形後、1 日室内で乾燥させて後、円形の 1 面を残し、他の円形の 1 面及び側面をエポキシ樹脂で被覆した。エポキシ樹脂が硬化した後、再び試験開始材齢まで各養生を行った。各試験開始材齢より、濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液に浸漬させた。また、JSCE-G-573-2013「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）」に準拠して、見かけの拡散係数及び表面塩化物イオン量を求めた。

表 3.2-1 実験で用いたコンクリートの配合

セメントの種類	水セメント比 W/C (%)	空気量 (設計値) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤(C×%)	
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能減水剤	AE 剤
OPC*1	45.0	4.5	44.0	170	378	776	1020	0.4	0.0025
HPC*2			43.9			774			
LPC*3			44.2			783		0.6	
BB*4			43.7			764		0.2	

表 3.2-2 実験で用いたコンクリートの空気量の実測値

セメントの 種類	蒸気養生の最高温度				
	20℃ (標準養生)	35℃	50℃	65℃	80℃
OPC ^{*1}	5.6%	5.8%	4.6%	4.9%	4.5%
HPC ^{*2}	3.3%		3.6%		4.5%
LPC ^{*3}	4.6%		3.7%		4.3%
BB ^{*4}	3.6%		3.7%		3.6%

*1 OPC：普通ポルトランドセメント

*2 HPC：早強ポルトランドセメント

*3 LPC：低熱ポルトランドセメント

*4 BB：高炉セメント B 種

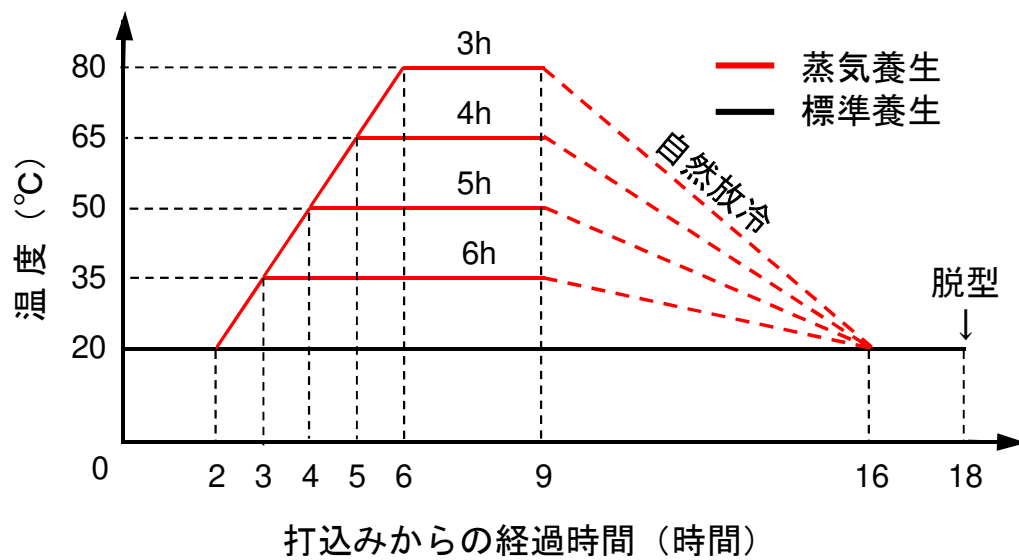


図 3.2-1 蒸気養生の設定

3.2.2 実験結果及び考察

(1) 圧縮強度

図 3.2-1 から図 3.2-6 は、それぞれ、材齢 7 日、材齢 28 日および材齢 91 日における圧縮強度を示している。水中養生期間は、それぞれ図中に示すとおりである。図中の○および●は、セメントに OPC を用いたもの、□および■は、セメントに HPC を用いたもの、◇および◆は、セメントに LPC を用いたもの、△および▲を用いたものはセメントに BB を用いたものを示している。

これらの図より、セメントに OPC を用いたコンクリートでは、試験時の材齢および脱型後の養生方法によらず、蒸気養生の最高温度が高くなると、圧縮強度は小さくなることが分かる。これに対し、セメントに LPC を用いたものは、試験時の材齢および脱型後の養生方法によらず、蒸気養生の最高温度が高くなるほど圧縮強度は大きくなることが分かる。セメントに HPC を用いたものでは、脱型後に気中養生を行った場合には、試験時の材齢が 7 日では、蒸気養生の最高温度が上がるにつれ強度は大きくなるが、試験時の材齢が大きくなるにつれ、蒸気養生の最高温度が上がるほど圧縮強度は小さくなることが分かる。水中養生を行った場合には、蒸気養生の最高温度が上がるにつれ、圧縮強度は小さくなる傾向が見られ、また、その傾向は、試験時の材齢が大きくなるにつれ顕著になっていることが分かる。セメントに BB を用いたものは、蒸気養生の最高温度が 50℃までは、圧縮強度の向上が見られるが、80℃と高温になると低下する傾向があることが分かる。また、この傾向は、水中養生を行わない方が大きく、材齢が進むにつれ顕著に現れることが分かる。

図 3.2-7 は、蒸気養生を行ったコンクリートの材齢 28 日における圧縮強度を、20℃で標準水中養生を材齢 28 日まで行ったコンクリートの材齢 28 日における圧縮強度との比(以下、材齢 28 日における圧縮強度比と呼ぶ)で表したもので、図 3.2-8 は、蒸気養生を行ったコンクリートの材齢 91 日における圧縮強度を、20℃で標準水中養生を材齢 28 日まで行ったコンクリートの材齢 91 日における圧縮強度との比(以下、材齢 91 日における圧縮強度比と呼ぶ)で表したものである。図中の○は、標準養生を行ったもの、□は、蒸気養生の最高温度が 50℃のもの、△は、蒸気養生の最高温度が 80℃のものを示している。いずれのコンクリートも、セメントには OPC を用いている。これらの図より、いずれの温度で養生した場合にも、脱型後の水中養生を長く行うことで、圧縮強度が増進することが分かる。ただし、高い温度で蒸気養生を行ったものは、水中養生を行うことによる圧縮強度の増進の効果は標準養生に比べ小さく、蒸気養生後に材齢 28 日まで水中養生を行っても、20℃で標準水中養生を行った場合に比べ、2 割から 3 割程度小さい圧縮強度となっている。

図 3.2-9 および図 3.2-10 は、セメントに HPC を用いたコンクリートの材齢 28 日における圧縮強度比および材齢 91 日における圧縮強度比を示したものである。図中の記号は図 3.2-7 に同様である。これらの図より、標準養生および蒸気養生の最高温度が 50℃の場合、脱型後に水中養生を行うことで、圧縮強度が増進することが分かる。また、材齢 7 日程度まで水中養生を行えば、材齢 28 日まで水中養生を行った場合と同程度まで圧縮強度が増進することが分かる。ただし、50℃で蒸気養生を行ったものは、水中養生を行うことによる圧縮強度の増進の効果は標準養生に比べ小さく、蒸気養生後に材齢 28 日まで水中養生を行っても、20℃で標準水中養生を行った場合に比べ、2 割程度小さい圧縮強度となっている。これに対して、蒸気養生の最高温度が 80℃と高い場合、水中養生を行っても強度の向上はほとんど見られない。また、材齢 91 日の圧縮強度は、20℃で標準水中養生を行った場合に比べ、半分程度であり、強度の伸びが非常に小さくなっていることが分かる。

図 3.2-11 および図 3.2-12 は、セメントに LPC を用いたコンクリートの材齢 28 日における圧縮強度比および材齢 91 日における圧縮強度比を示したものである。図中の記号は図 3.2-7 に同様である。これらの図より、いずれの温度で養生した場合にも、脱型後の水中養生を長く行うことで、圧縮強度が増進することが分かる。また、蒸気養生温度が高いほど圧縮強度比も高くなることが分かる。ただし、試験時の材齢が 91 日の試験結果より、蒸気養生の最高温度が 80℃と高い場合には、圧縮強度は収束気味であり、標準養生に比べ、長期強度は小さくなることが考えられる。そのため、蒸気養生の最高温度を上げることによる圧縮強度への影響がないとは言い切れない。今後も測定を続け、経過を観察する必要があると考える。

図 3.2-13 および図 3.2-14 は、セメントに BB を用いたコンクリートの材齢 28 日における圧縮強度比および材齢 91 日における圧縮強度比を示したものである。図中の記号は図 3.2-7 に同様である。これらの図より、いずれの温度で養生した場合にも、脱型後に水中養生を行うことで、圧縮強度が増進することが分かる。また、材齢 7 日程度まで水中養生を行えば、材齢 28 日まで水中養生を行った場合と同程度まで圧縮強度が増進することが分かる。ただし、高い温度で蒸気養生を行ったものは、水中養生を行うことによる圧縮強度の増進の効果は標準養生のものに比べ小さいことが分かる。

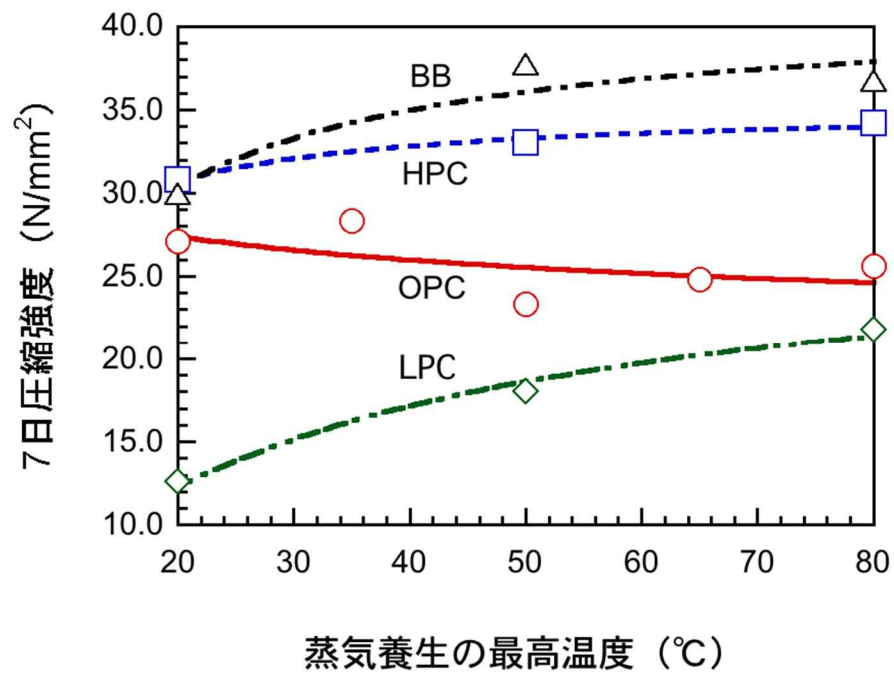


図 3.2-1 圧縮強度試験の結果 (材齢 7 日水中養生なし)

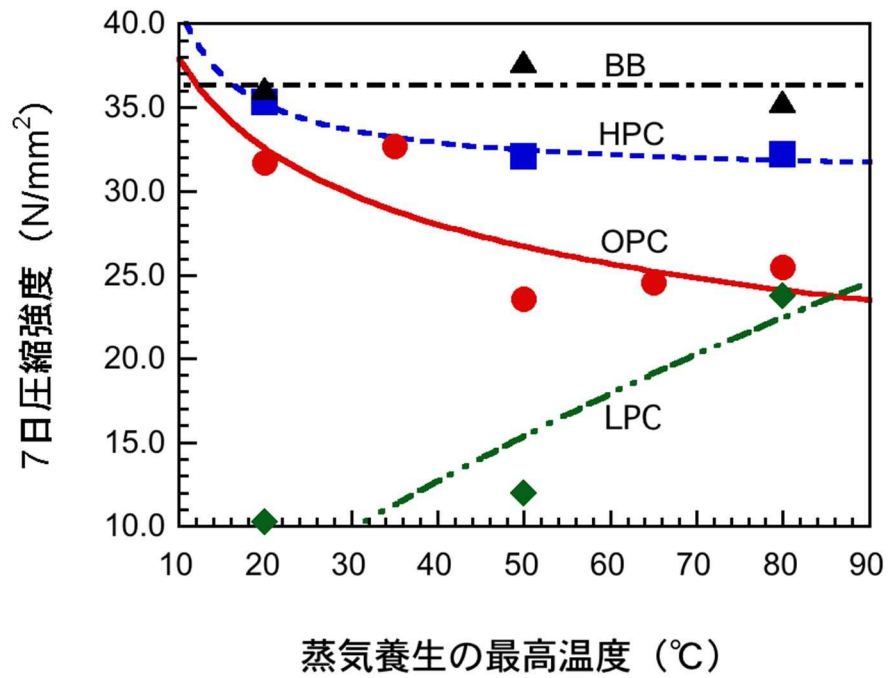


図 3.2-2 圧縮強度試験の結果 (材齢 7 日水中養生)

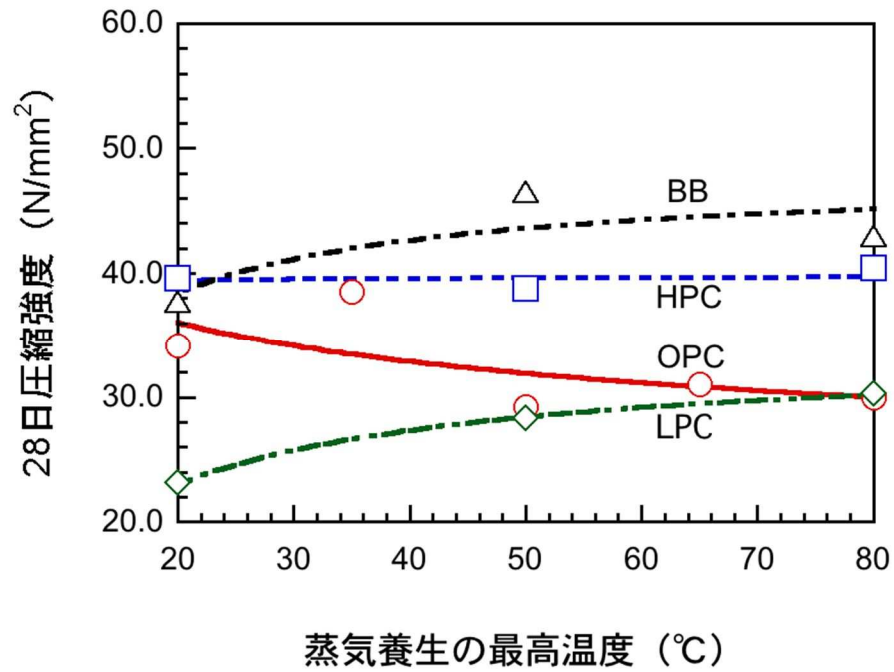


図 3.2-3 圧縮強度試験の結果 (材齢 28 日水中養生なし)

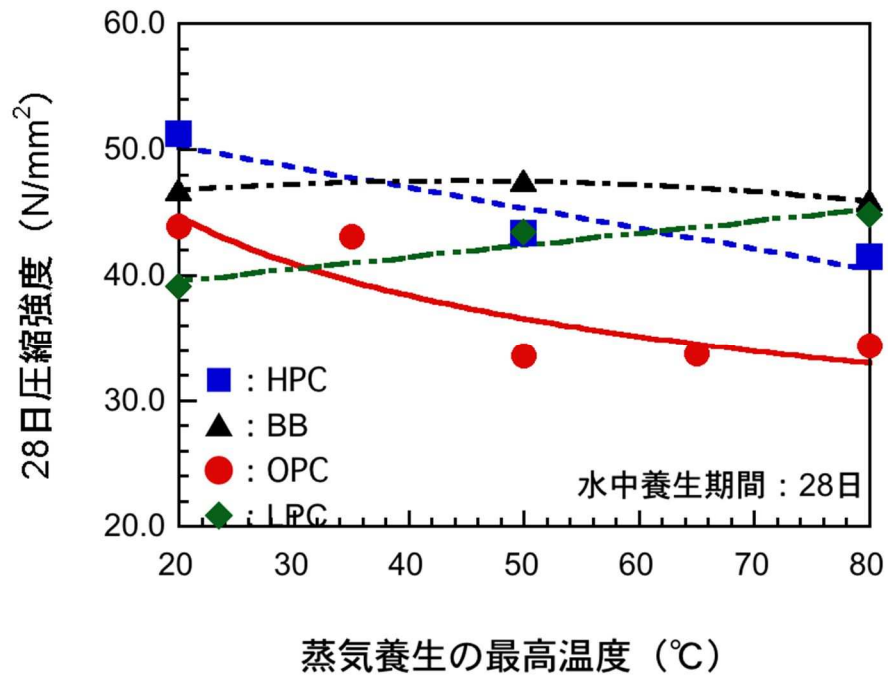


図 3.2-4 圧縮強度試験の結果 (材齢 28 日水中養生)

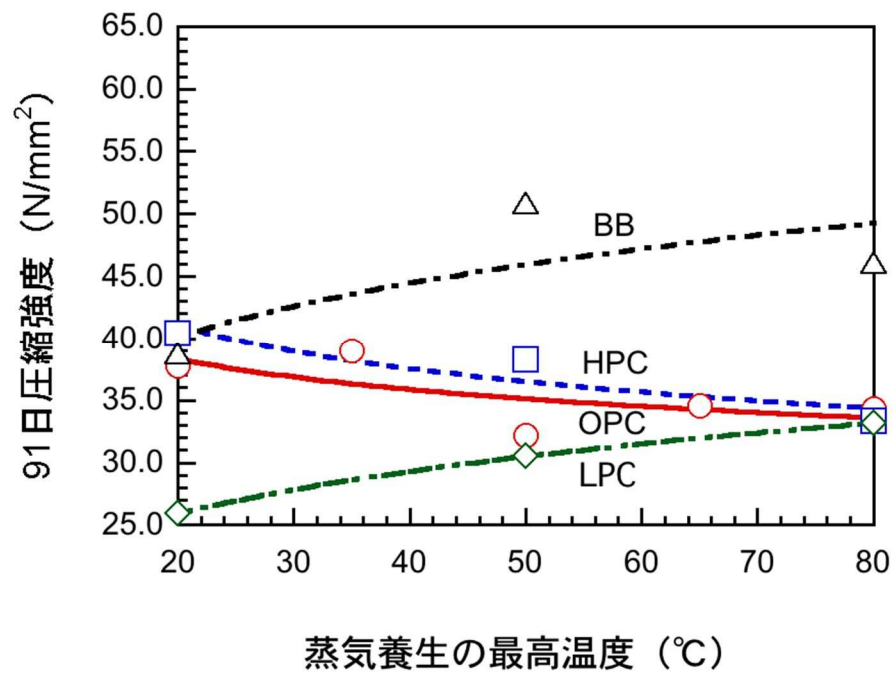


図 3.2-5 圧縮強度試験の結果 (材齢 91 日水中養生なし)

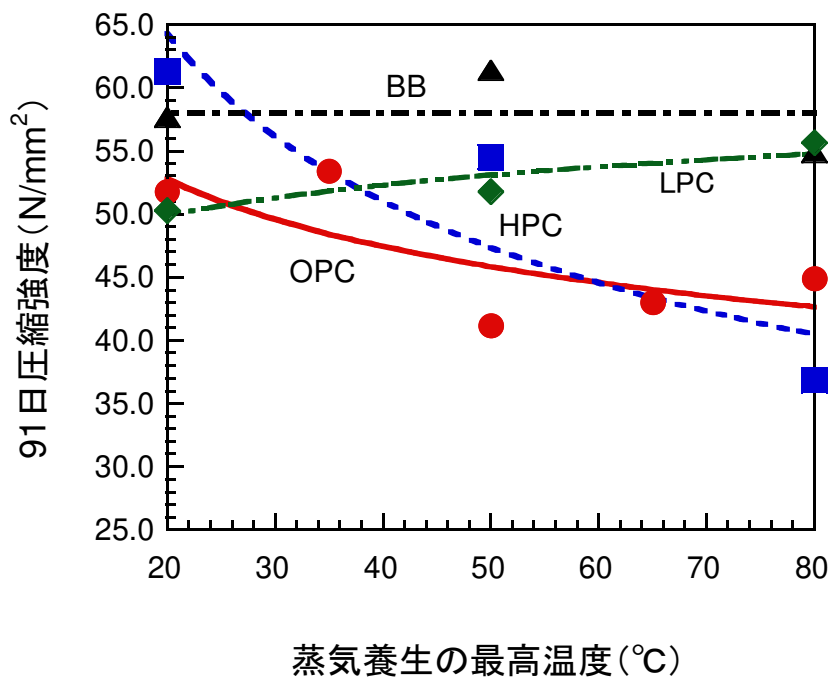


図 3.2-6 圧縮強度試験の結果 (材齢 91 日水中養生)

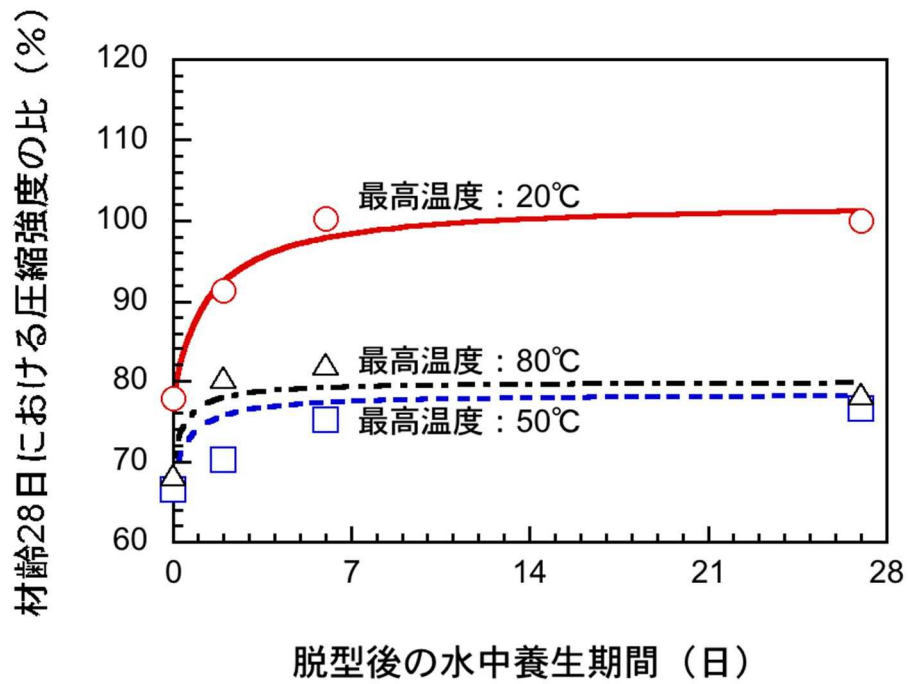


図 3.2-7 材齢 28 日における圧縮強度比(セメント : OPC)

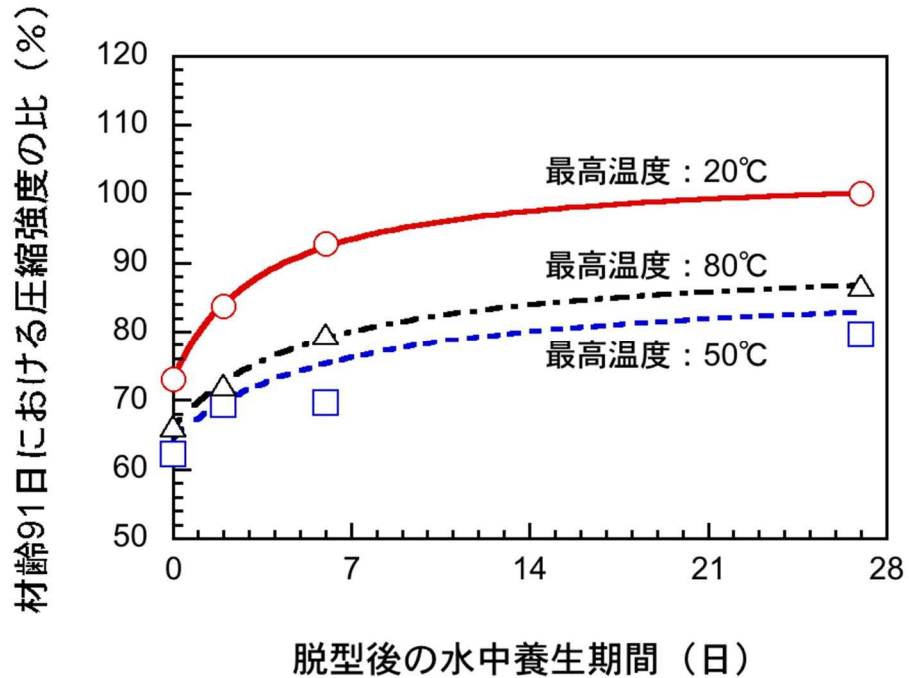


図 3.2-8 材齢 91 日における圧縮強度比(セメント : OPC)

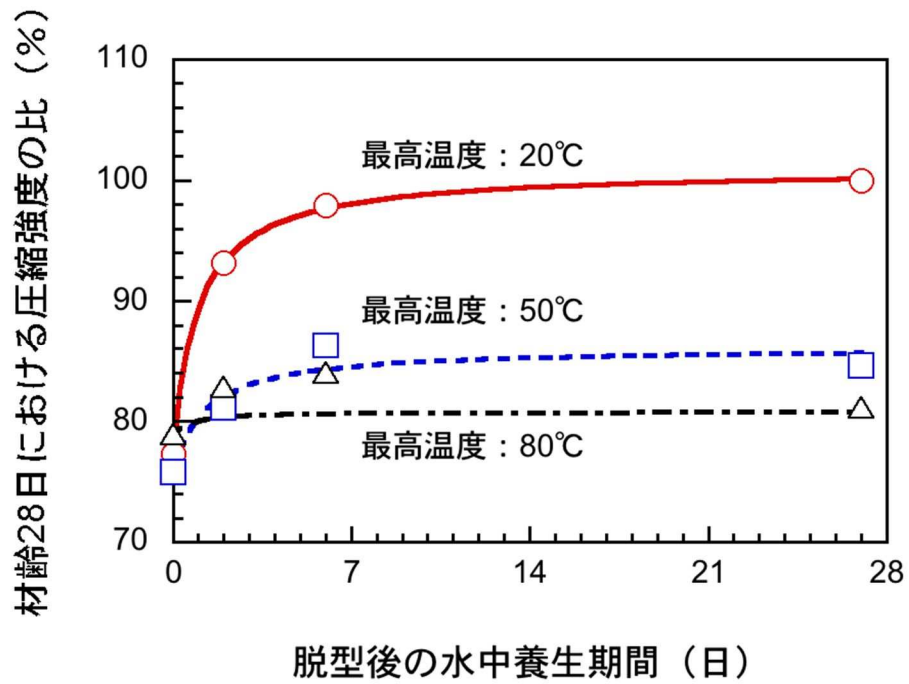


図 3.2-9 材齢 28 日における圧縮強度比(セメント : HPC)

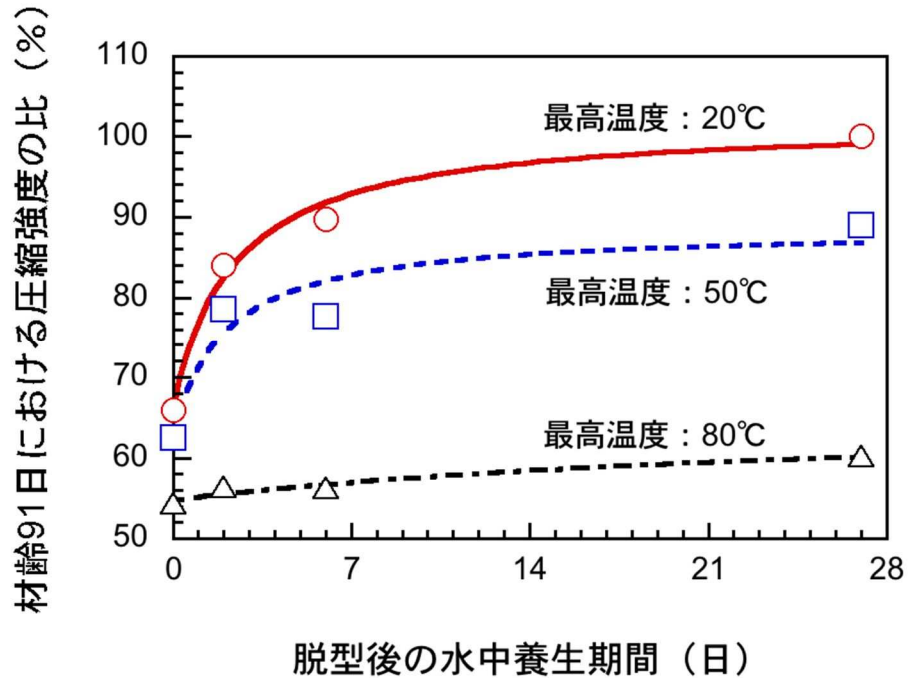


図 3.2-10 材齢 91 日における圧縮強度比(セメント : HPC)

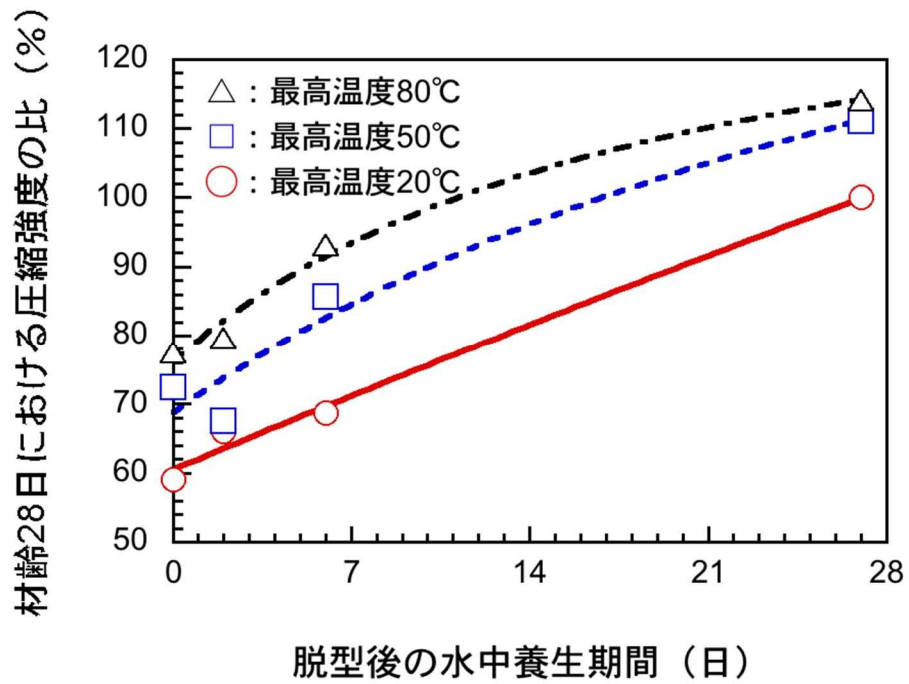


図 3.2-11 材 齢 28 日における圧縮強度比(セメント : LPC)

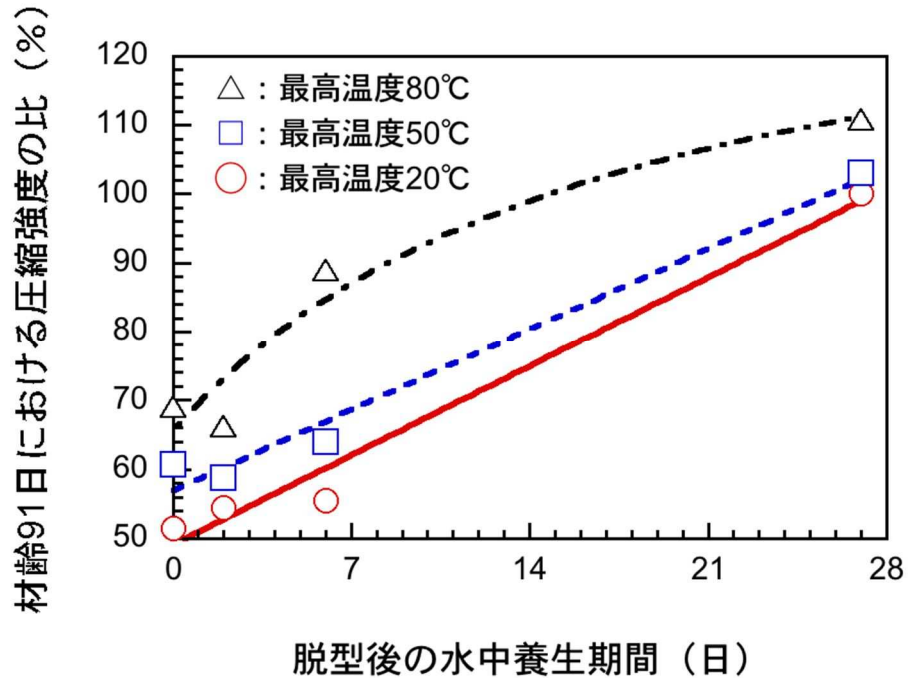


図 3.2-12 材 齢 91 日における圧縮強度比(セメント : LPC)

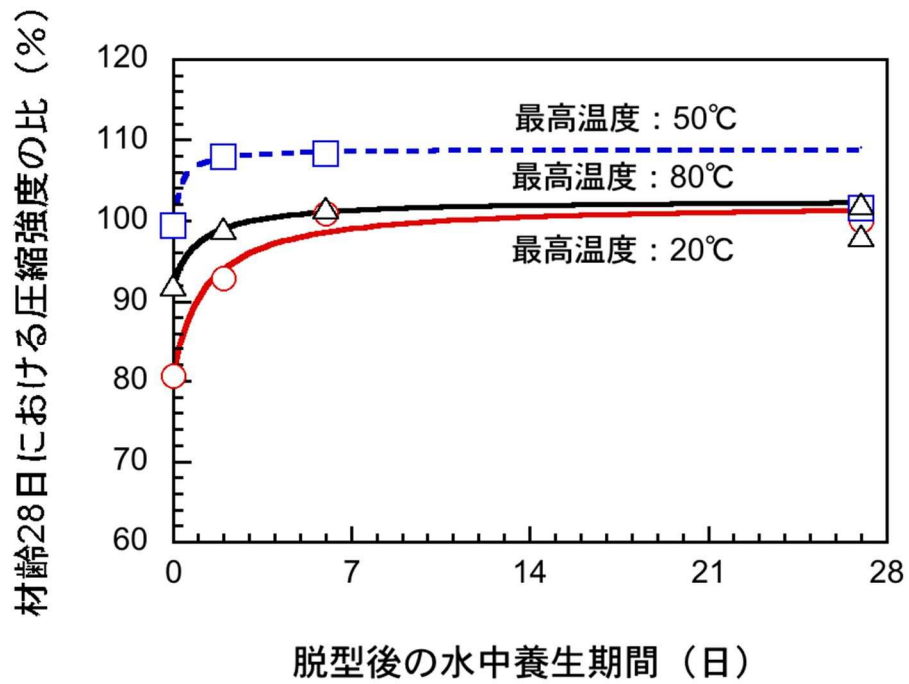


図 3.2-13 材齢 28 日における圧縮強度比(セメント : BB)

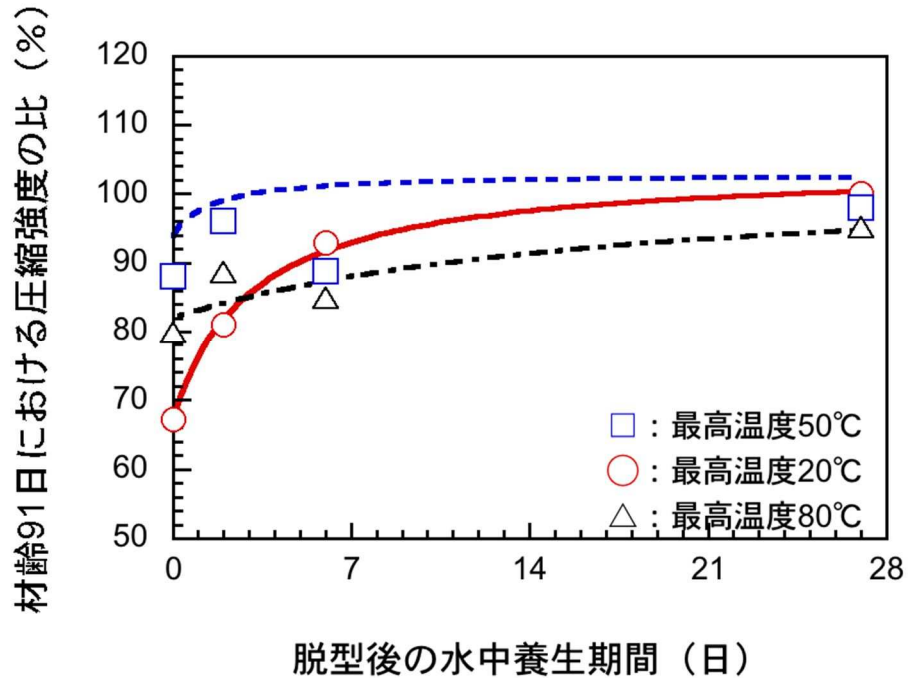


図 3.2-14 材齢 91 日における圧縮強度比(セメント : BB)

(2) 凍結融解抵抗性

図 3.2-15 および図 3.2-16 はそれぞれ、最高温度 20℃で標準養生し、試験開始日の材齢 14 日目まで気中および水中で養生したコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響を示したものである。図中の○、□、△および◇は気中養生した OPC、HPC、BB および LPC を用いたコンクリートの相対動弾性係数を、●、■、▲および◆は、水中養生した OPC、HPC、BB および LPC を用いたコンクリートの相対動弾性係数をそれぞれ示している。LPC を用いたコンクリートは脱型後の養生方法に依らず、凍結融解抵抗性が低下することが分かる。また、HPC は脱型後気中養生を行なった場合、50 サイクル目で相対動弾性係数は低下するが、脱型後水中養生を行うと、相対動弾性係数は 300 サイクルまで低下しないことが分かる。

図 3.2-17 および図 3.2-18 はそれぞれ、最高温度 50℃で標準養生し、試験開始日の材齢 14 日目まで気中および水中で養生したコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響を示したものである。図中の○、□、△および◇は気中養生した OPC、HPC、BB および LPC を用いたコンクリートの相対動弾性係数を、●、■、▲および◆は、水中養生した OPC、HPC、BB および LPC を用いたコンクリートの相対動弾性係数をそれぞれ示している。LPC を用いたコンクリートは 20℃での養生温度と同様に、脱型後の養生方法に依らず、凍結融解抵抗性が低下することが分かる。

図 3.2-19 および図 3.2-20 はそれぞれ、最高温度 80℃で標準養生し、試験開始日の材齢 14 日目まで気中および水中で養生したコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響を示したものである。図中の○、□、△および◇は気中養生した OPC、HPC、BB および LPC を用いたコンクリートの相対動弾性係数を、●、■、▲および◆は、水中養生した OPC、HPC、BB および LPC を用いたコンクリートの相対動弾性係数をそれぞれ示している。LPC を用いたコンクリートは脱型後の養生方法に依らず、凍結融解抵抗性が低下することが分かる。また、OPC および HPC は脱型後水中養生を行なった場合、相対動弾性係数は低下するが、脱型後気中養生を行うと、相対動弾性係数は 300 サイクルまで低下しないことが分かる。

図 3.2-21 から図 3.2-24 は、凍結融解試験を行った際の結果を耐久性指数で示している。図中の○および■は、水中養生を行ったものおよび水中養生を行っていないものの結果を示している。図 3.2-21 より、OPC を用いた場合には、蒸気養生の最高温度を 80℃とし、水中養生を行ったコンクリートにおいて、耐久性指数が大きく低下していることが分かる。また、図 3.2-22 より、HPC を用いた場合には、蒸気養生の最高温度を 80℃とし、水中養生を行ったコンクリートおよび標準養生を行ったのちに水中養生を行っていないコンクリートにおいて耐久性指数が大きく低下していることが分かる。

図 3.2-23 より，LPC を用いた場合には，養生方法によらず耐久性指数が低いことが分かる。それに対し，図 3.2-24 より，BB を用いた場合には，養生方法によらず耐久性指数が高いことが分かる。

既往の研究⁶⁾で，高炉スラグ微粉末を用いることで，AE 剤を用いなくても凍結融解抵抗性が向上することが示されている。セメントに BB を用いた AE コンクリートは，蒸気養生を行った場合にも，凍結融解作用による内部劣化に対して高い抵抗性が期待できることが分かる。これに対して，OPC や HPC を用いた場合には，AE コンクリートで，十分な強度が発現していても，圧縮強度と耐凍害性に相関関係はなく，養生条件によっては，十分な凍結融解抵抗性が得られない場合がある。また，LPC を用いた場合には，今回，試験を開始した材齢 14 日では，3.2.1 (2) に示すように養生方法によらず水和反応は未完了であり，凍結融解抵抗性を得るのは難しいと考えられる。

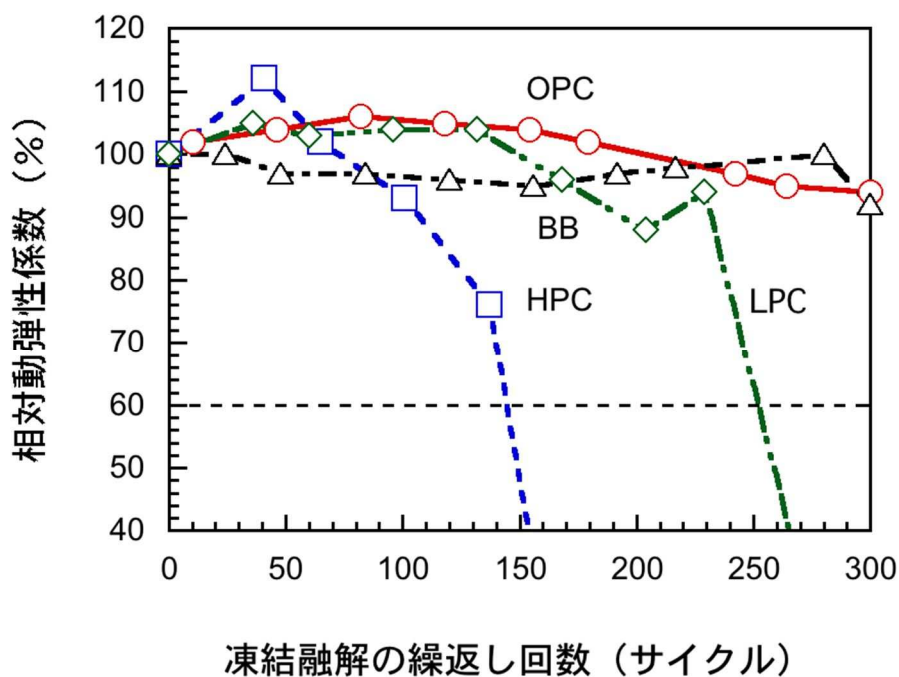


図 3.2-15 気中養生したコンクリート凍結融解抵抗性
(養生温度 20°C)

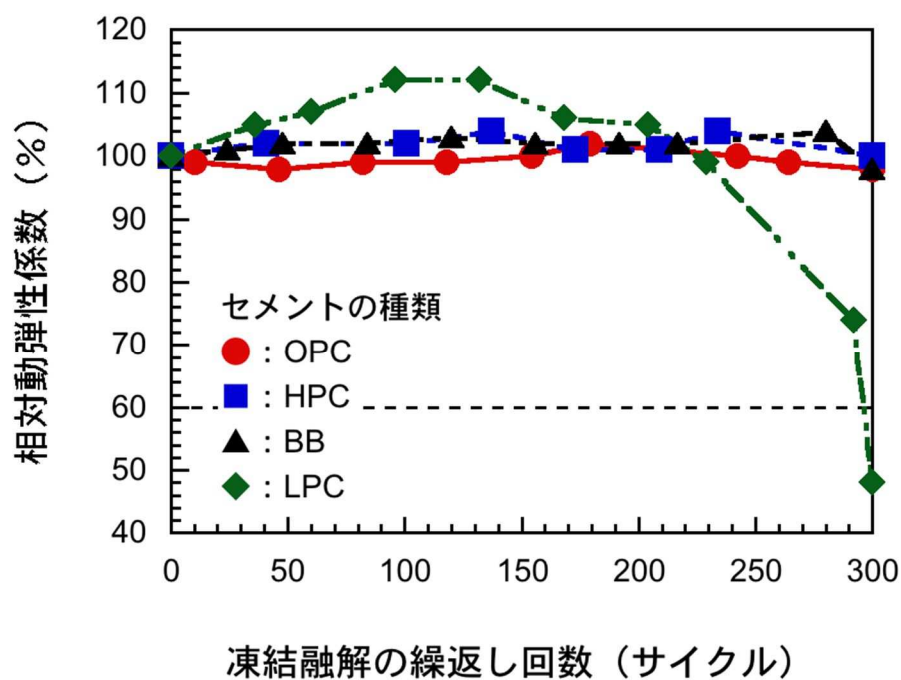


図 3.2-16 水中養生したコンクリート凍結融解抵抗性
(養生温度 20°C)

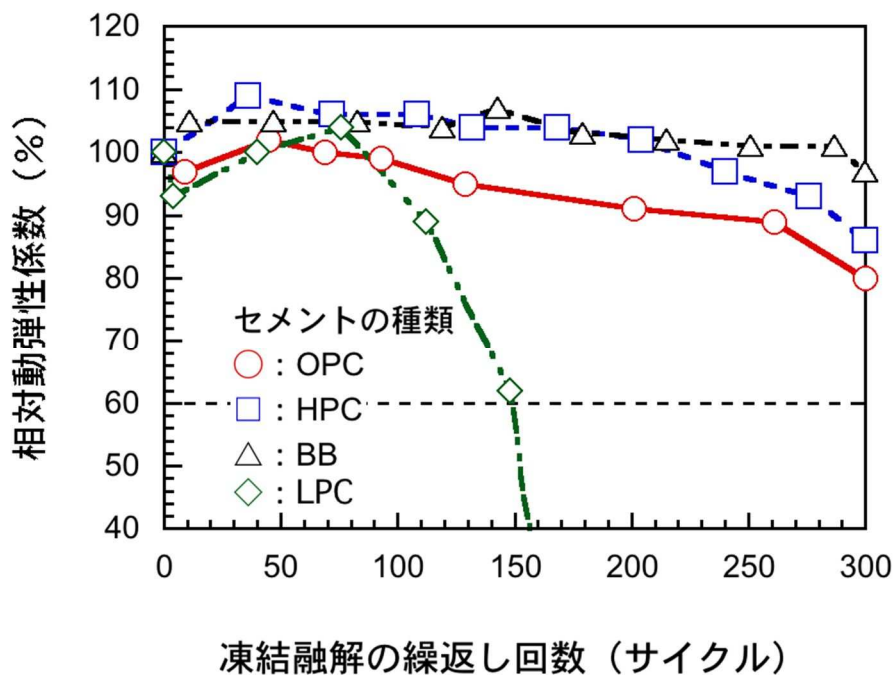


図 3.2-17 気中養生したコンクリート凍結融解抵抗性
(養生温度 50°C)

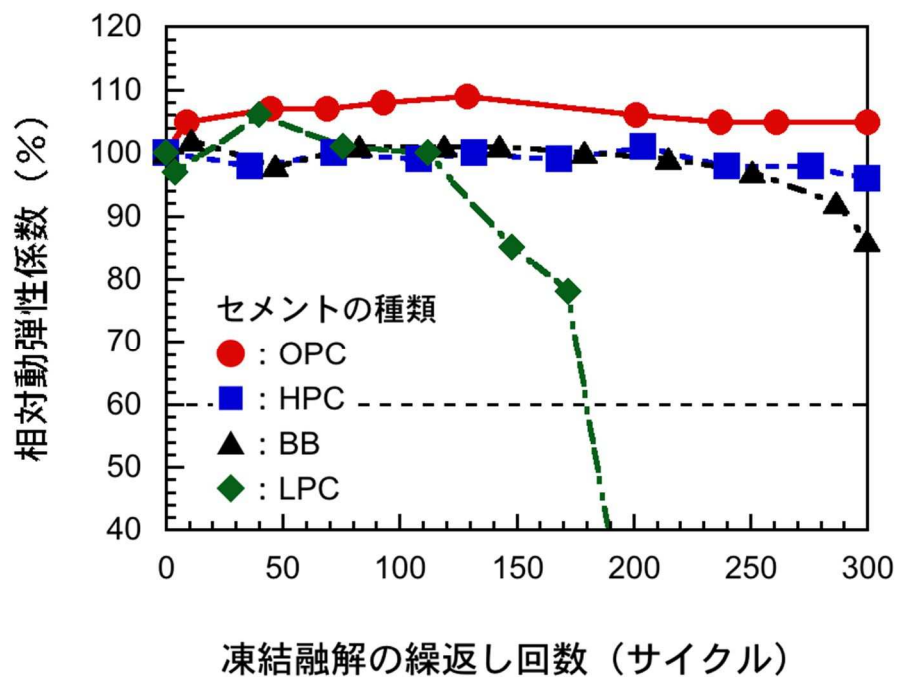


図 3.2-18 水中養生したコンクリート凍結融解抵抗性
(養生温度 50°C)

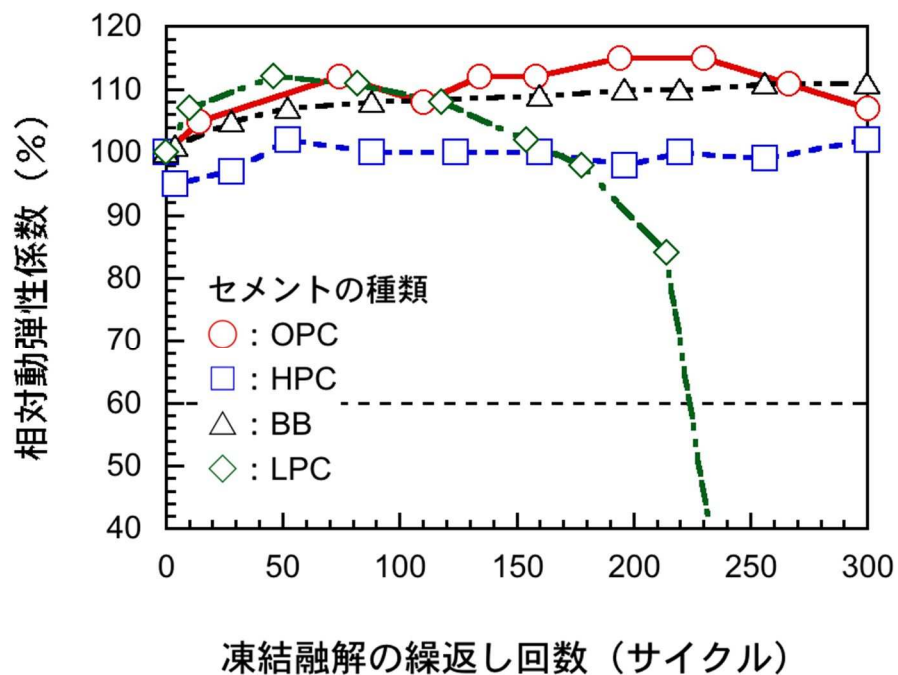


図 3.2-19 気中養生したコンクリート凍結融解抵抗性
(養生温度 80°C)

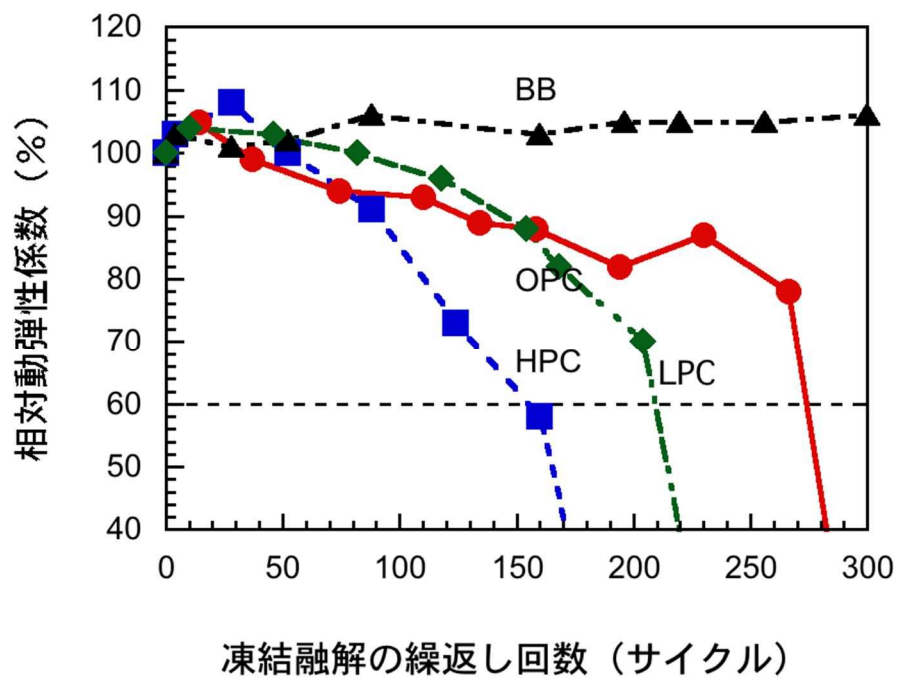


図 3.2-20 水中養生したコンクリート凍結融解抵抗性
(養生温度 80°C)

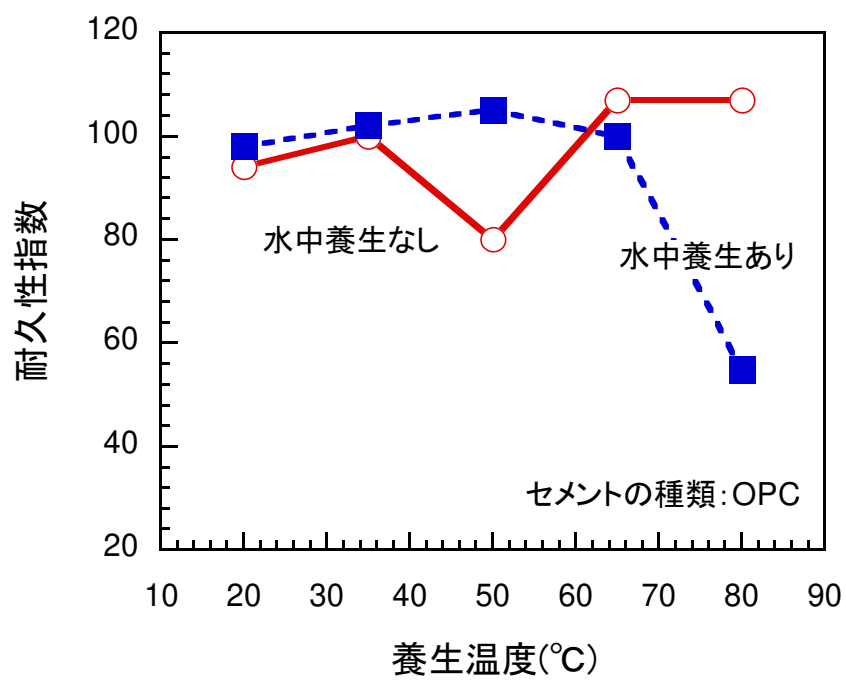


図 3.2-21 耐久性指数(セメント : OPC)

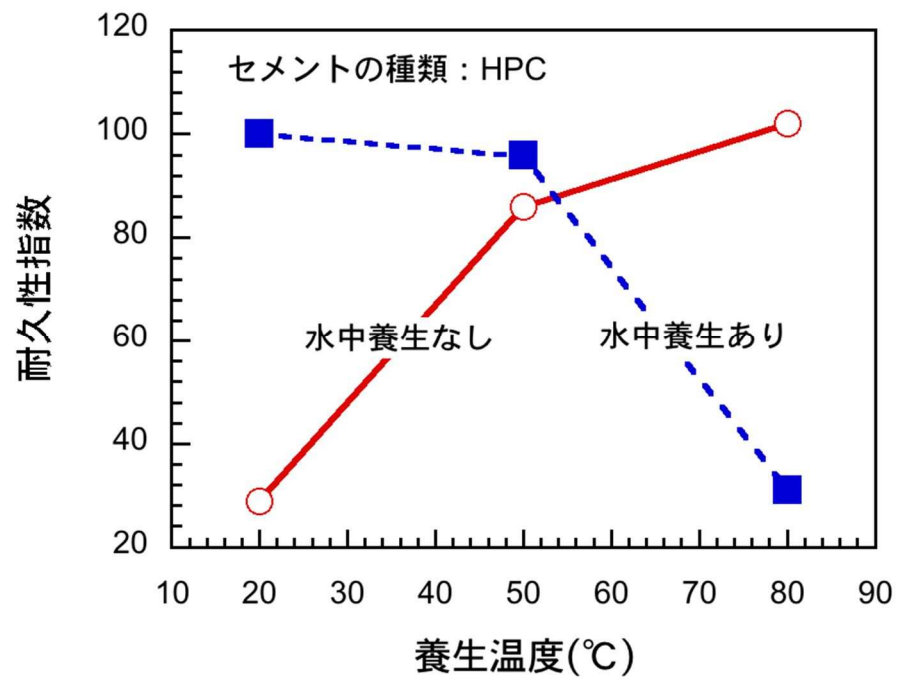


図 3.2-22 耐久性指数(セメント：HPC)

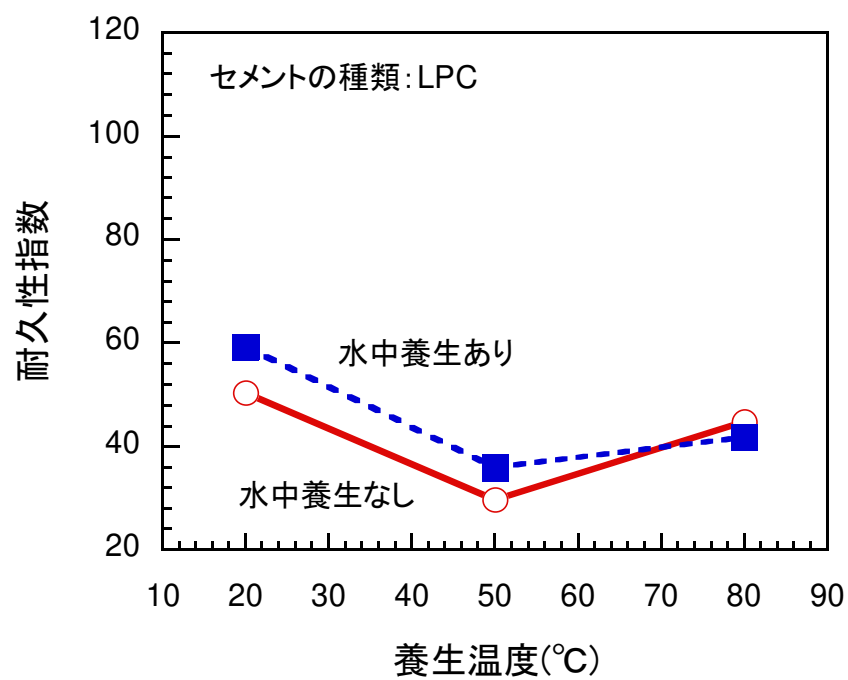


図 3.2-23 耐久性指数(セメント：LPC)

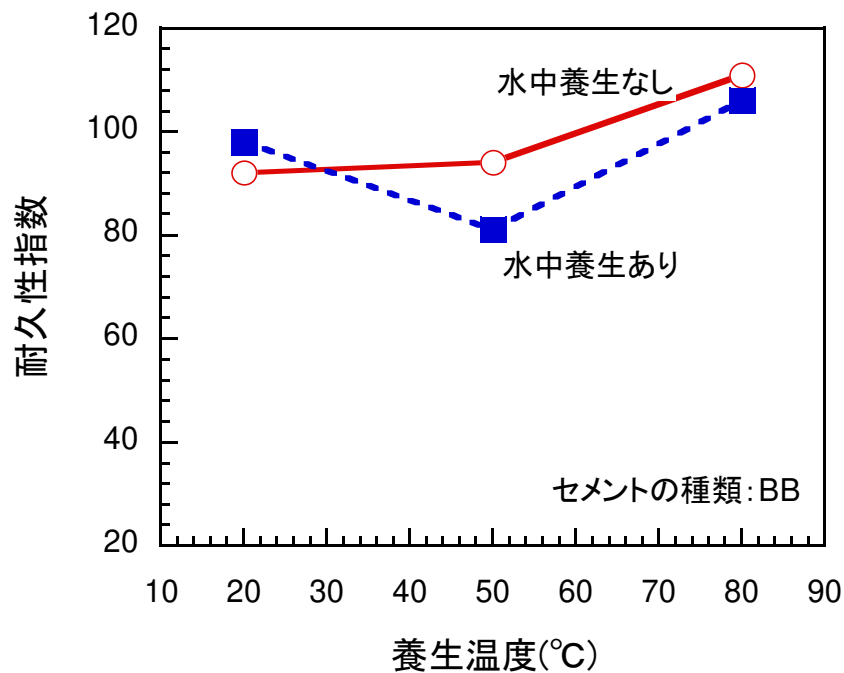


図 3.2-24 耐久性指数(セメント : BB)

(3) スケーリング

図 3.2-25 から図 3.2-28 は、スケーリング試験を行った際の結果を 56 サイクル累積スケーリング量で示している。図中の○および■は、水中養生を行ったものおよび水中養生を行っていないものの結果を示している。セメントの種類に着目すると、HPC を用いたもののスケーリング量は多くなっていることが分かる。3.2.2 (2) に述べたように、スケーリングに対する抵抗性も凍結融解抵抗性と同様に、今回、試験を開始した材齢 14 日では、養生方法によらず水和反応は未完了であり、所定の抵抗性を得るのは難しいと考えられる。その他のセメントの種類に着目すると、OPC や HPC を用いたものに比べて、BB を用いたものの方がスケーリング量は多い傾向にある。BB を用いたものでは、蒸気養生は行わず 20°C で気中養生を行ったもののスケーリング量が、ほかと比べて多くなっている。蒸気養生を行わず 20°C の気中でのみ養生を行ったものは、セメントの水和反応が十分に進む前にコンクリート表面が乾燥することで、組織が疎になりスケーリング量が多くなったと考えられる。BB を用いたコンクリートは、凍結融解作用に対して相対動弾性係数で表す内部劣化に対する抵抗性では、養生方法に寄らず高い抵抗性を示すが、コンクリート表面のスケーリングに対しては、養生方法の影響を受けやすく、特に、蒸気養生を行わず、さらに十分な水中養生を行わない場合には、スケーリングに対する抵抗性が低くなるといえる。セメントに HPC を用い

たものでは、80℃の蒸気養生を行った後、水中で養生を行ったものと、蒸気養生は行わず 20℃の気中で養生を行ったもののスケーリング量が、ほかと比べて多くなっている。

また、セメントに OPC を用いたものでは、80℃の蒸気養生を行った後、材齢 7 日までに水中養生を行ったものが、スケーリング量が多くなっている。これらのコンクリートは、図 3.2-15 および図 3.2-20 で示した凍結融解試験においても、十分な凍結融解抵抗性が得られていないものである。OPC や HPC を用いたコンクリートでは、凍結融解作用に対して、相対動弾性係数で表す内部劣化に対する抵抗性が低いコンクリートは、スケーリングに対する抵抗性も低くなる傾向にある。

蒸気養生の最高温度に着目すると、いずれのセメントを用いた場合も、50℃で養生を行ったものよりも、80℃で養生を行ったものの方が、スケーリング量が多くなっている。高温で養生を行ったことによってセメントペーストの細孔が粗大化したこと⁷⁾や、蒸気養生でコンクリート温度が下がる際にコンクリート表面に生じる引張応力により、微細ひび割れが生じたため、スケーリング量が増加したと推察される。

写真 3.2-1 にスケーリング終了時の供試体試験面の様子を示す。これらの写真においても、上に述べたものと同様の傾向が確認できる。

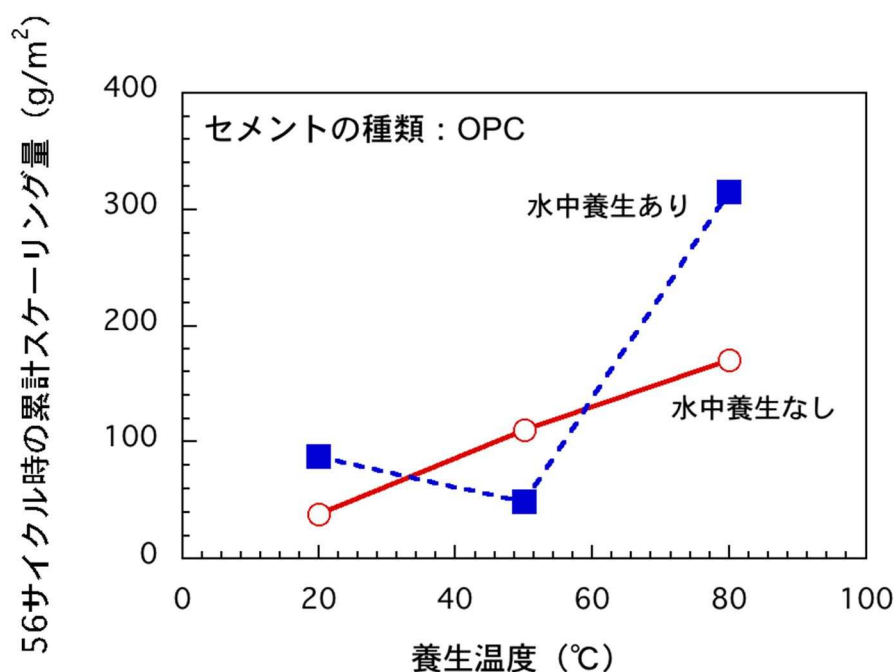


図 3.2-25 56 サイクル累積スケーリング量
(セメント：OPC)

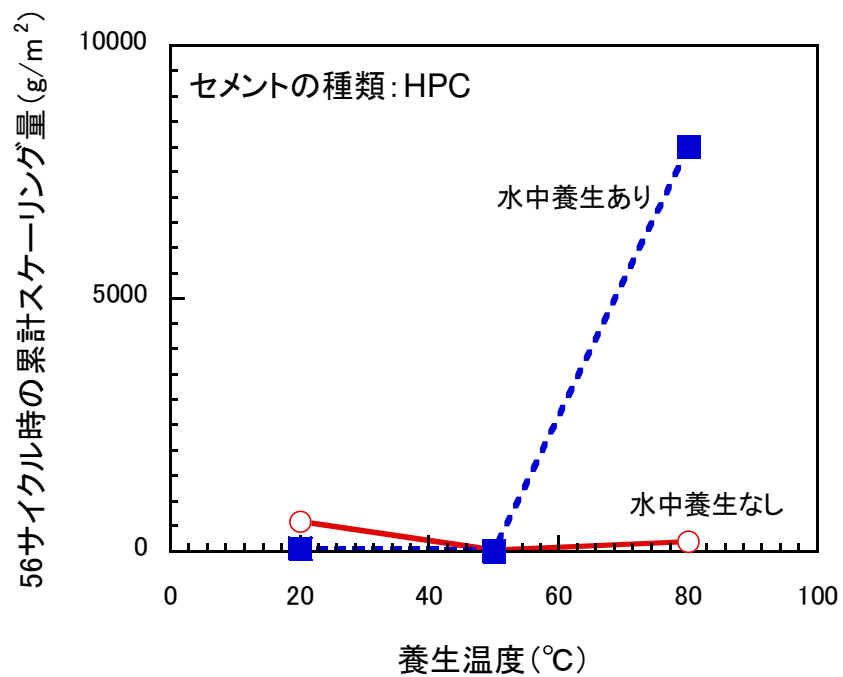


図 3.2-26 56 サイクル累積スケーリング量
(セメント : HPC)

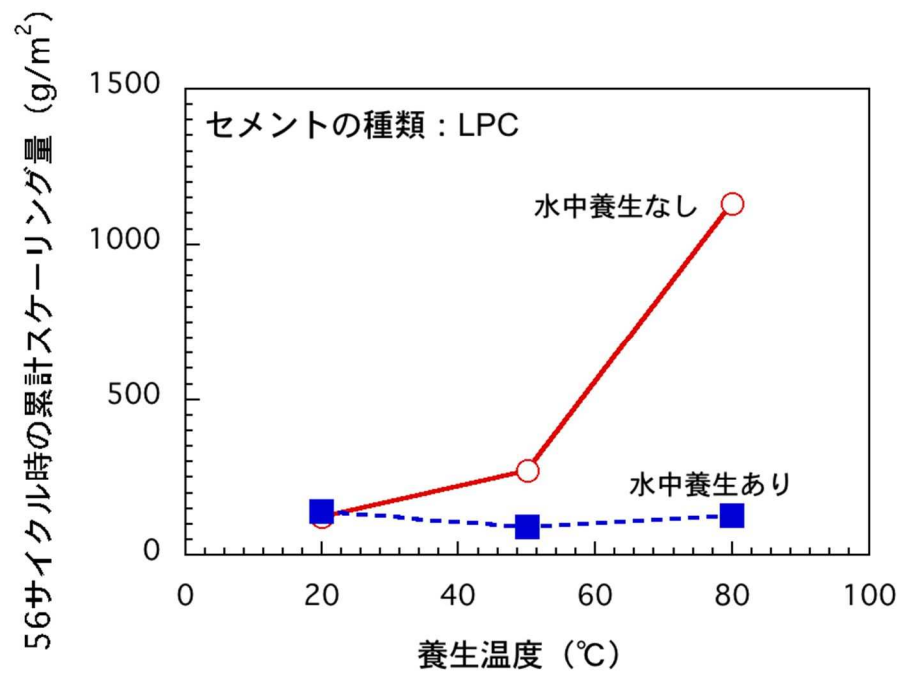


図 3.2-27 56 サイクル累積スケーリング量
(セメント : LPC)

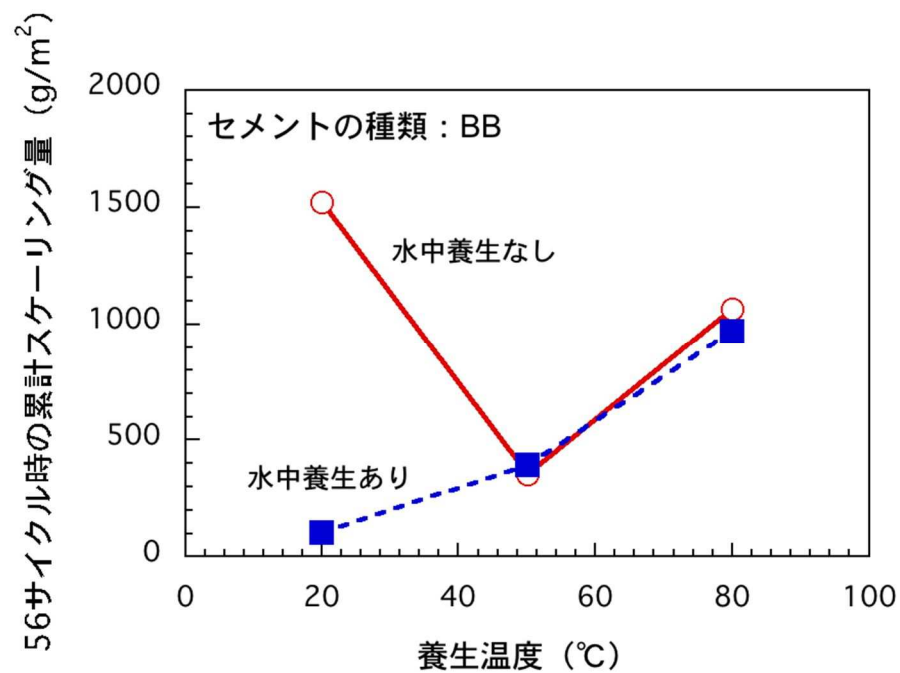


図 3.2-28 56 サイクル累積スケーリング量(セメント : BB)

写真 3.2-1 スケーリング試験終了後の供試体試験面の様子

脱型後養生		水中養生後気中養生			気中養生のみ		
最高温度		20℃	50℃	80℃	20℃	50℃	80℃
セメントの種類	OPC						
	HPC						
	LPC						
	BB						

(4) 乾燥収縮

図3.2-29は、脱型後水中養生を行わずに材齢1日で乾燥を開始したOPCを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果である。図中の○は、蒸気養生を行わずに20℃の室内で養生を行った結果で、□および△は、それぞれ、最高温度50℃および80℃の蒸気養生を行った結果である。また、図3.2-30は、脱型後から材齢7日まで水中養生を行ってから乾燥を開始したOPCを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果である。図中の●は、蒸気養生を行わずに20℃の室内で養生を行った結果で、■および▲は、それぞれ、最高温度50℃および80℃の蒸気養生を行ったコンクリートの結果である。水中養生の有無によらず、80℃で養生を行ったものの乾燥収縮ひずみが小さくなっていることが分かる。高温で養生を行うと、ペーストの細孔が粗大化することで、乾燥収縮ひずみが小さくなったと考えられる⁷⁾。

図3.2-31は、水中養生を行わずに材齢1日で乾燥を開始したHPCを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を、図3.2-32は、材齢7日まで水中養生を行ってから乾燥を開始したHPCを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。OPCの場合と同様に、最高温度が80℃の蒸気養生を行ったコンクリートの乾燥収縮ひずみが最も小さくなっている。また、OPCを用いたコンクリートに比してHPCを用いたコンクリートは相対的に乾燥収縮ひずみが小さい。これは、コンクリート供試体が硬化初期に高温で養生された影響に加え、HPCの水和熱がOPCに比して高いことによって、ペーストがより疎になり、乾燥収縮ひずみが小さくなったためと推察される。

図3.2-33は、水中養生を行わずに材齢1日で乾燥を開始したLPCを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を、図3.2-34は、材齢7日まで水中養生を行ってから乾燥を開始したLPCを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。LPCを用いたコンクリートは、水中養生を行わない場合、蒸気養生の最高温度が乾燥収縮ひずみ与える影響は小さいことが分かる。水中養生を行う場合、OPC及びHPCの場合と同様に、最高温度が80℃の蒸気養生を行ったコンクリートの乾燥収縮ひずみが最も小さくなっている。

図3.2-35は、水中養生を行わずに材齢1日で乾燥を開始したBBを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を、図3.2-36は、材齢7日まで水中養生を行ってから乾燥を開始したBBを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示したものである。BBを用いたコンクリートは、OPCやHPCを用いたものに比べて、蒸気養生の最高温度が乾燥収縮ひずみ与える影響は小さいことが分かる。

図3.2-37は、図3.2-29および図3.2-30に示したOPCを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化を双曲線で回帰して求めた乾燥収縮ひずみの最終値と養生温度との関係を示したものである。養生によって与えられる養生温度が大きくなるほど、乾燥収縮ひずみは小さくなる傾向にあることが、この図からわかる。図3.2-38、図3.2-39および図3.2-40は、それぞれ、HPC、LPCおよびBBを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値と養生時の養生温度との関係を示したものである。HPC及びLPCを用いた場合には、OPCほど顕著な差はないが、養生温度が大きくなるほど、乾燥収縮ひずみが小さくなる傾向にある。BBを用いた場合、養生温度の影響は、他のセメントに比べると小さいが、脱型後の水中養生を行わない場合には、乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向にある。

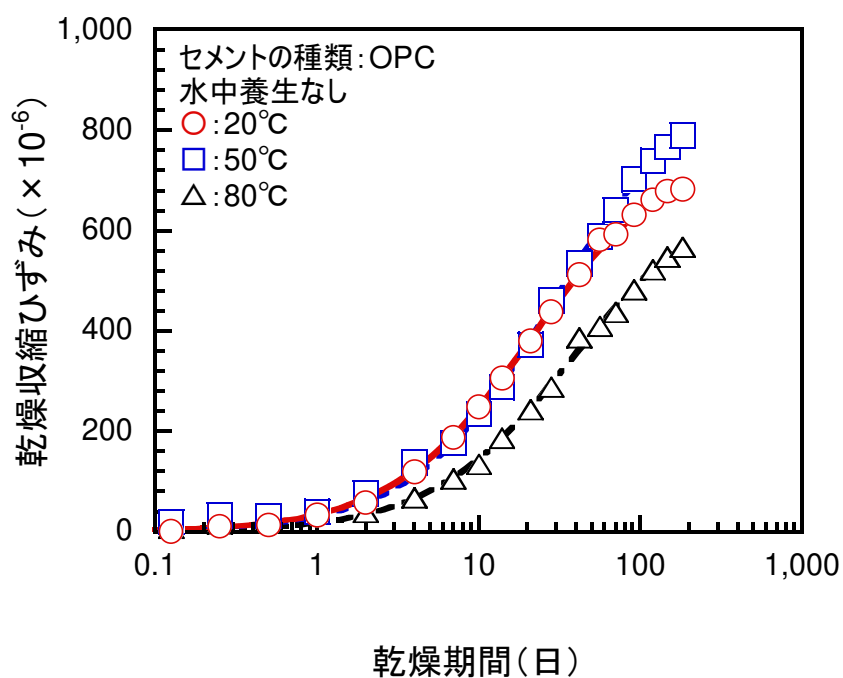


図 3.2-29 乾燥収縮ひずみ（セメント：OPC 水中養生なし）

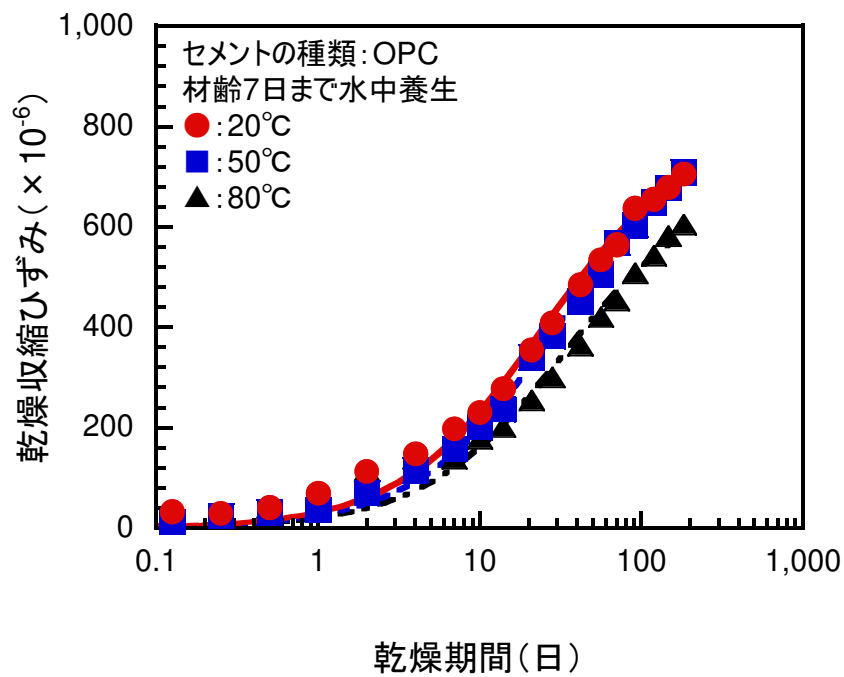


図 3.2-30 乾燥収縮ひずみ (セメント: OPC 水中養生あり)

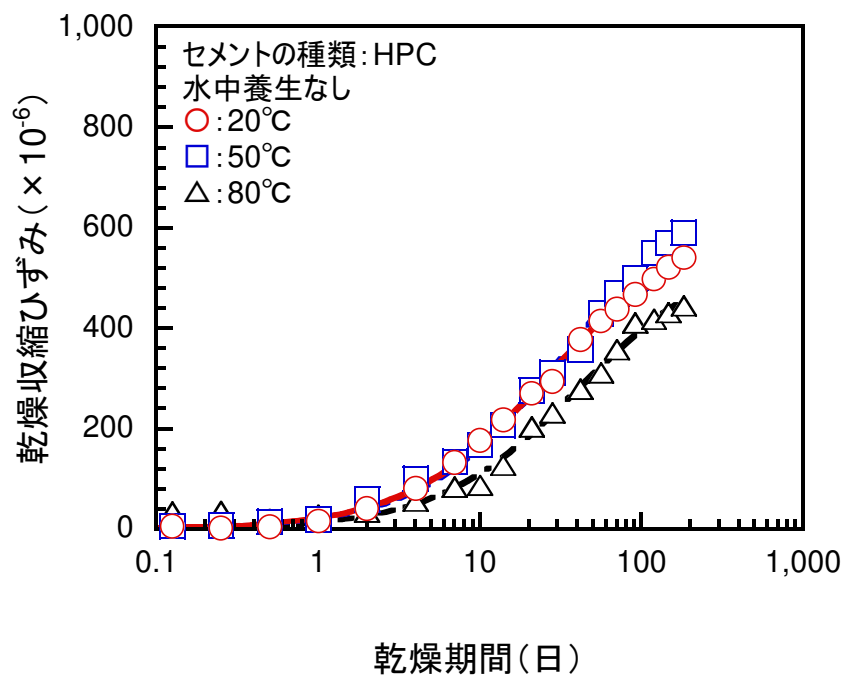


図 3.2-31 乾燥収縮ひずみ (セメント: HPC 水中養生なし)

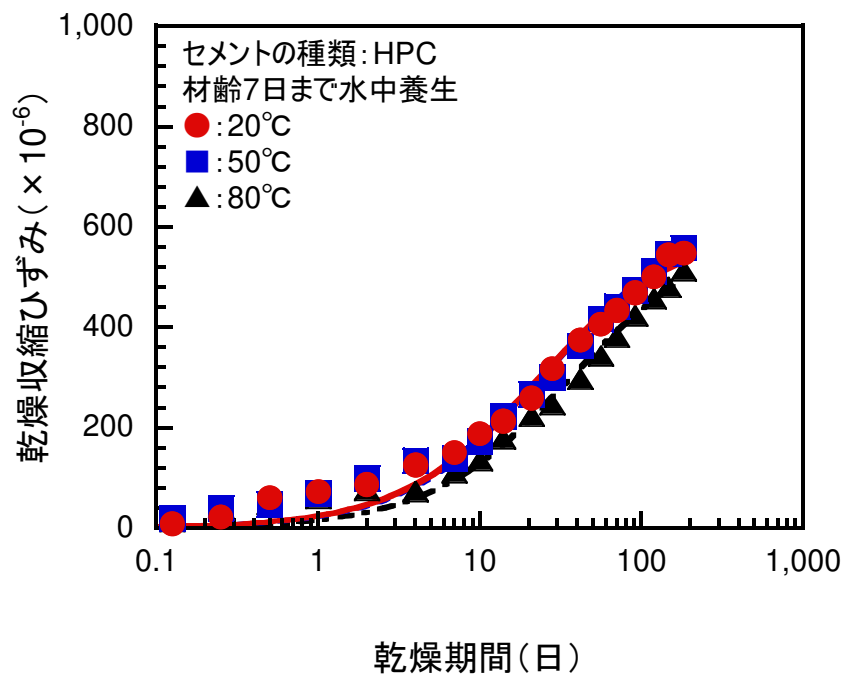


図 3.2-32 乾燥収縮ひずみ（セメント：HPC 水中養生あり）

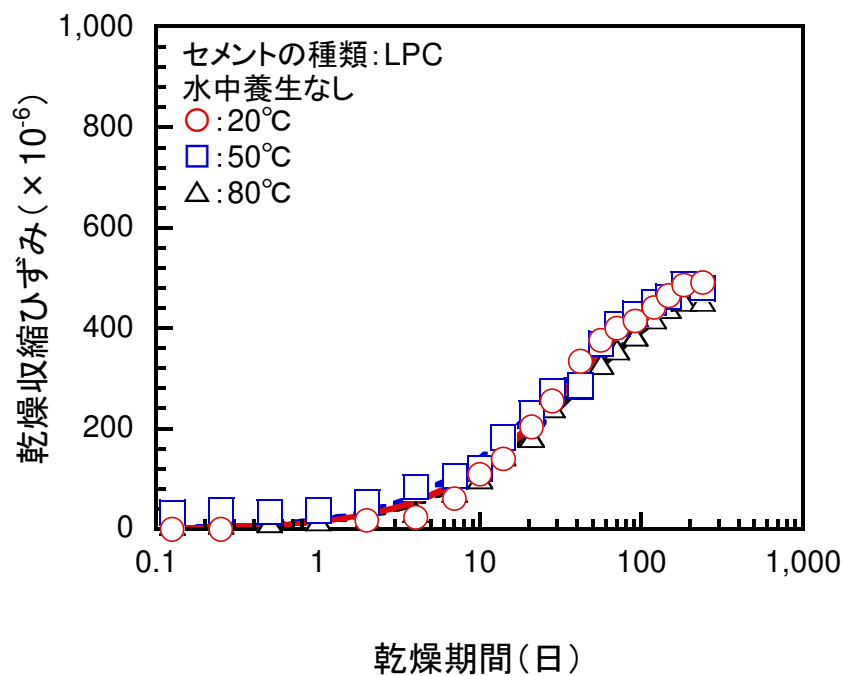


図 3.2-33 乾燥収縮ひずみ（セメント：LPC 水中養生なし）

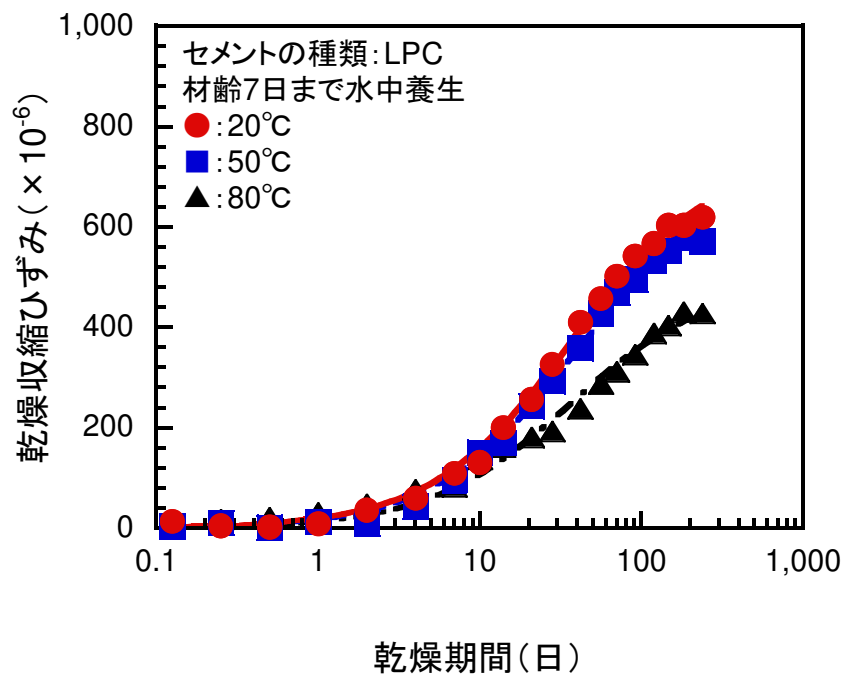


図 3.2-34 乾燥収縮ひずみ（セメント：LPC 水中養生あり）

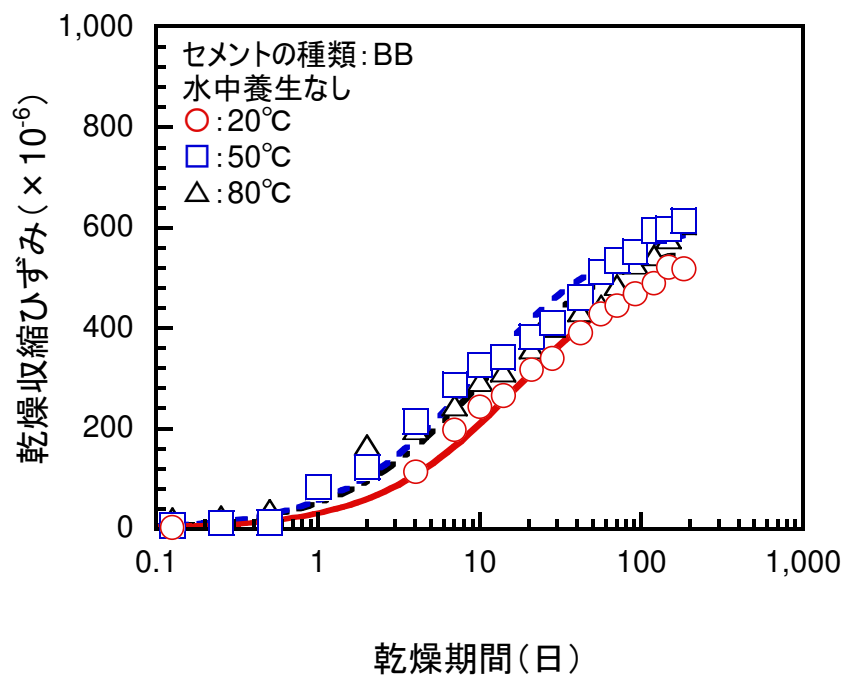


図 3.2-35 乾燥収縮ひずみ（セメント：BB 水中養生なし）

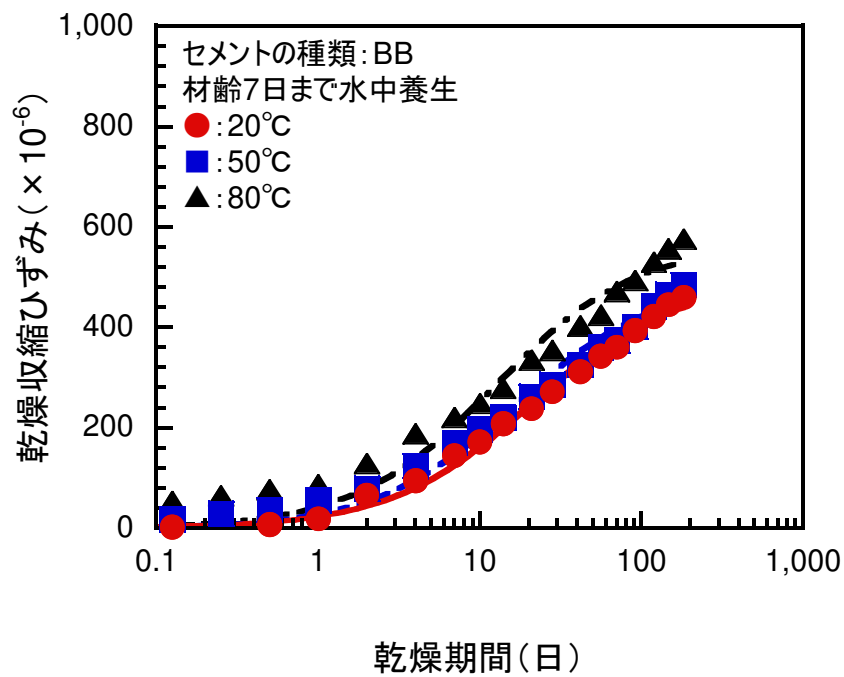


図 3.2-36 乾燥収縮ひずみ（セメント：BB 水中養生あり）

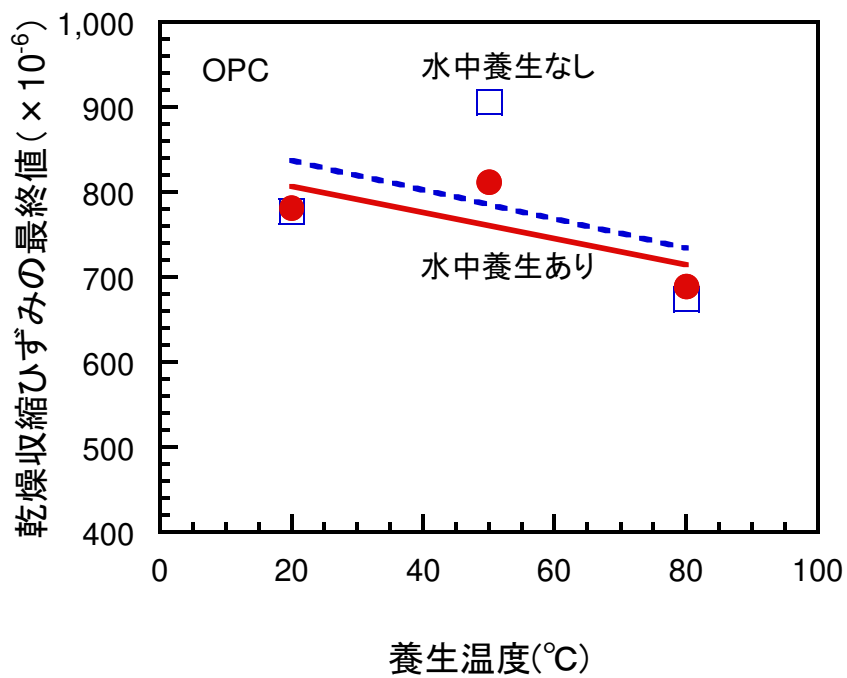


図 3.2-37 養生温度と乾燥収縮ひずみの最終値の関係（セメント：OPC）

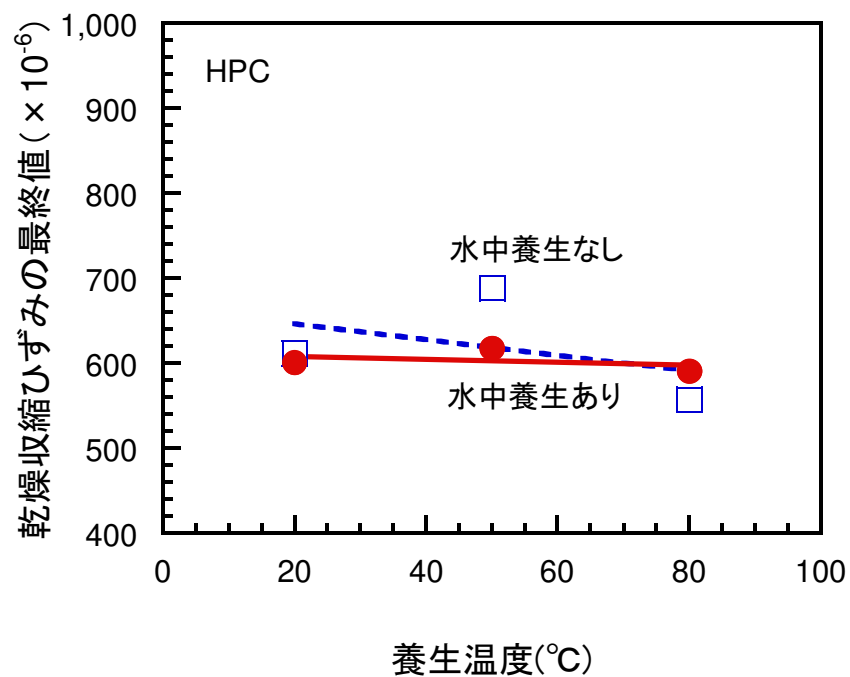


図 3.2-38 養生温度と乾燥収縮ひずみの最終値の関係（セメント：HPC）

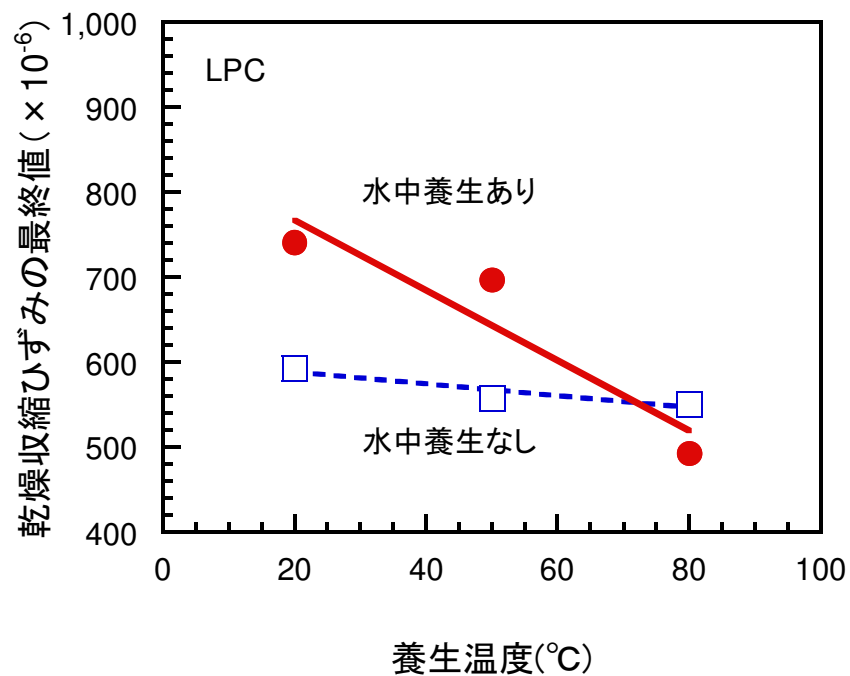


図 3.2-39 養生温度と乾燥収縮ひずみの最終値（セメント：LPC）

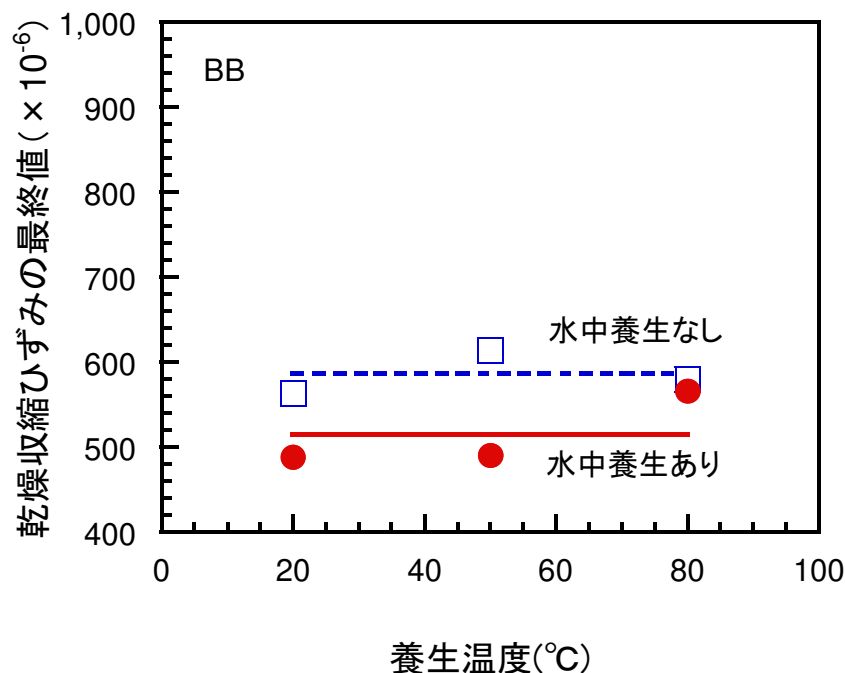


図 3.2-40 養生温度と乾燥収縮ひずみの最終値の関係（セメント：BB）

(5) 水分浸透性

図 3.2-41 及び図 3.2-42 はそれぞれ、OPC を用いた試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生及び材齢 7 日目まで水中養生し試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの水分浸透深さの変動を示したものである。図中の○, ▽, □, ◇及び△は 20°C, 35°C, 50°C, 65°C及び 80°Cの養生温度における, 試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの水分浸透深さを, ●, ▼, ■, ◆及び▲は 20°C, 35°C, 50°C, 65°C及び 80°Cの養生温度における, 材齢 7 日目まで水中養生し試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの水分浸透深さをそれぞれ示している。基本的に, 養生温度 20°Cで蒸気養生を行わない場合は, 他の養生温度のコンクリートと比較して水分浸透深さが大きくなる事が分かる。ただし, 高温で蒸気養生を行い, なおかつ水中養生も行くと, 同じく水中養生を行った 20°Cのコンクリートよりも水分浸透深さが大きくなる。

図 3.2-43 及び図 3.2-44 はそれぞれ, HPC を用いた試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生及び材齢 7 日目まで水中養生し試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの水分浸透深さの変動を示したものである。図中の○, □及び△は 20°C,

50℃，及び 80℃の養生温度における，試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの水分浸透深さを，●，■及び▲は 20℃，50℃及び 80℃の養生温度における，材齢 7 日目まで水中養生し試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの水分浸透深さをそれぞれ示している。セメントに HPC を用いた場合は，OPC の結果と同じ傾向を示している。また，浸水から 5 時間後の水分浸透深さは，蒸気養生の温度や脱型後の養生方法によらず同じぐらいの値となる。

図 3.2-45 及び図 3.2-46 はそれぞれ，LPC を用いた試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生及び材齢 7 日目まで水中養生し試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの水分浸透深さの変動を示したものである。図中の○，□及び△は 20℃，50℃，及び 80℃の養生温度における，試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの水分浸透深さを，●，■及び▲は 20℃，50℃及び 80℃の養生温度における，材齢 7 日目まで水中養生し試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの水分浸透深さをそれぞれ示している。セメントに LPC を用いたコンクリートは，脱型後水中養生を行った時の水分浸透深さは養生温度が小さいほど大きくなり，脱型後，気中養生した場合，その傾向が顕著に見られる。

図 3.2-47 及び図 3.2-48 はそれぞれ，BB を用いた試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生及び材齢 7 日目まで水中養生し試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの水分浸透深さの変動を示したものである。図中の○，□及び△は 20℃，50℃，及び 80℃の養生温度における，試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの水分浸透深さを，●，■及び▲は 20℃，50℃及び 80℃の養生温度における，材齢 7 日目まで水中養生し試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの水分浸透深さをそれぞれ示している。セメントに BB を用いた場合，脱型後に気中養生したコンクリートは養生温度が低いほど水分浸透深さが大きくなるが，脱型後に水中養生を行ったコンクリートは，蒸気養生を行っていない養生温度 20℃のコンクリートは水分浸透深さが他の高温養生方法よりも小さくなることが分かる。

図 3.2-49，図 3.2-50，図 3.3-51 及び図 3.2-52 はそれぞれ，OPC，HPC，LPC 及び BB を用いたコンクリートの水分浸透速度係数に与える蒸気養生の最高温度への影響を示したものである。図中の○及び■は試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生及び材齢 7 日目まで水中養生し試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの水分浸透速度係数をそれぞれ示している。脱型後気中養生したコンクリートは OPC，BB 及び LPC は養生温度が高くなるほど水分浸透速度係数は小さくなることが分かる。HPC を用いたコンクリートでは，蒸気養生した場合，同様の傾向が見られるが，蒸気養生をしなかった場合は，養生温度が低くても水分浸透速度係数は小さくなっている。一

方，脱型後水中養生を行った場合，セメントの種類によって蒸気養生温度による影響はそれぞれ異なることが分かる。

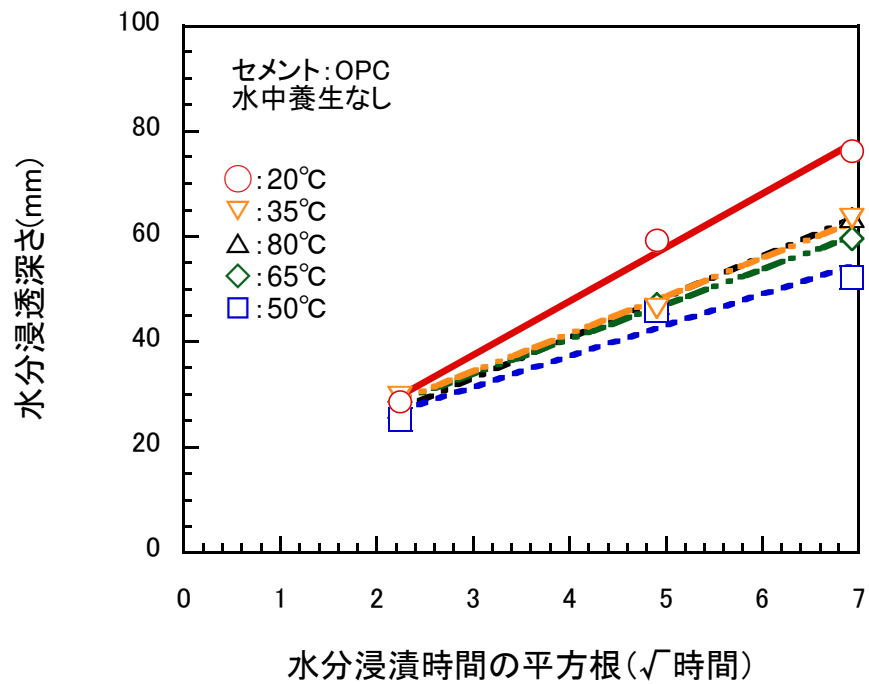


図 3.2-41 気中養生したコンクリートの水分浸透深さ
(セメント: OPC 水中養生なし)

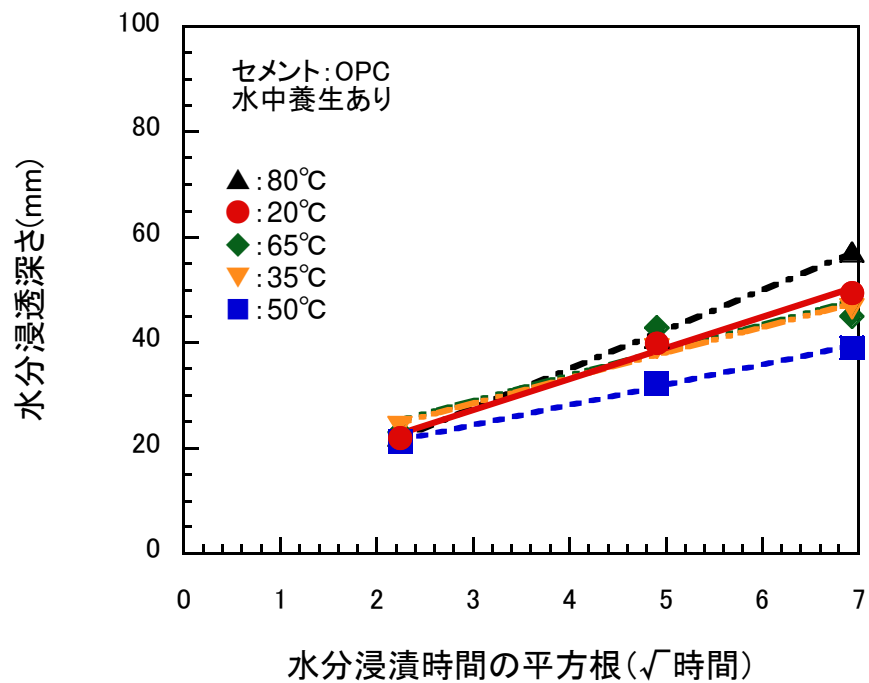


図 3.2-42 水中養生したコンクリートの水分浸透深さ
(セメント: OPC 水中養生なし)

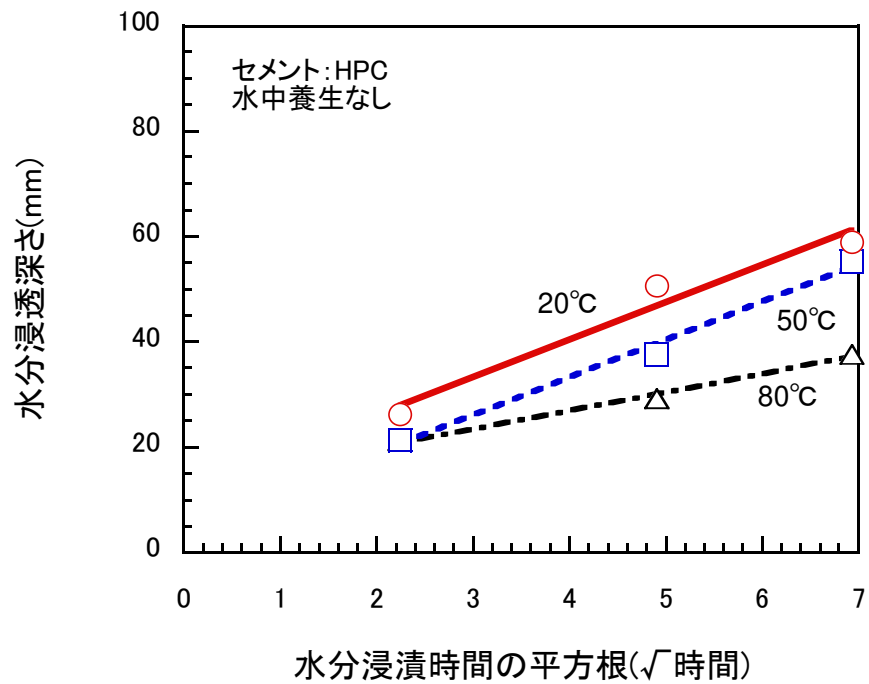


図 3.2-43 気中養生したコンクリートの水分浸透深さ
(セメント: HPC 水中養生なし)

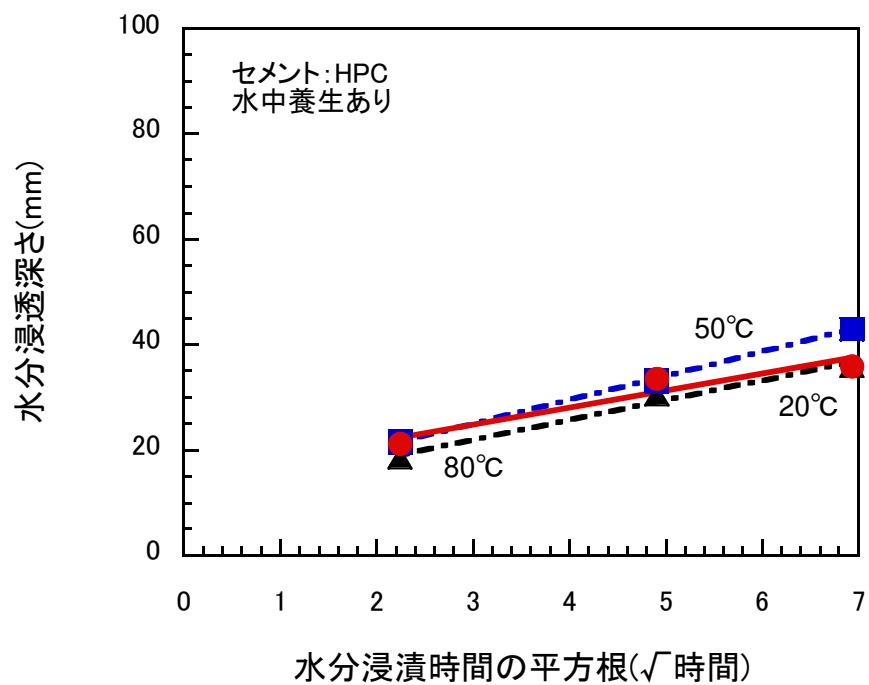


図 3.2-44 水中養生したコンクリートの水分浸透深さ
(セメント: HPC 水中養生あり)

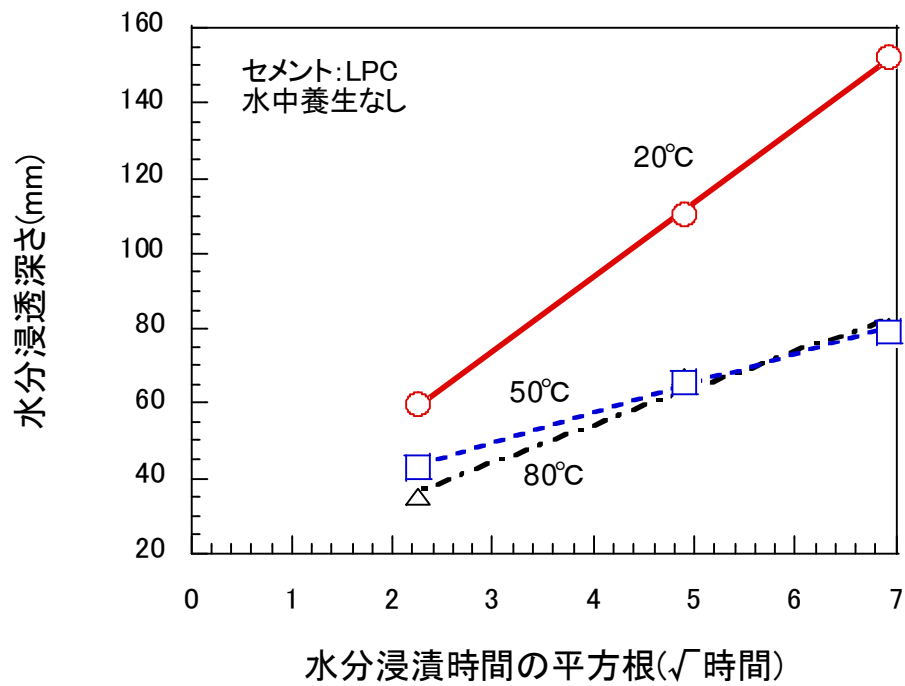


図 3.2-45 気中養生したコンクリートの水分浸透深さ
(セメント:LPC 水中養生なし)

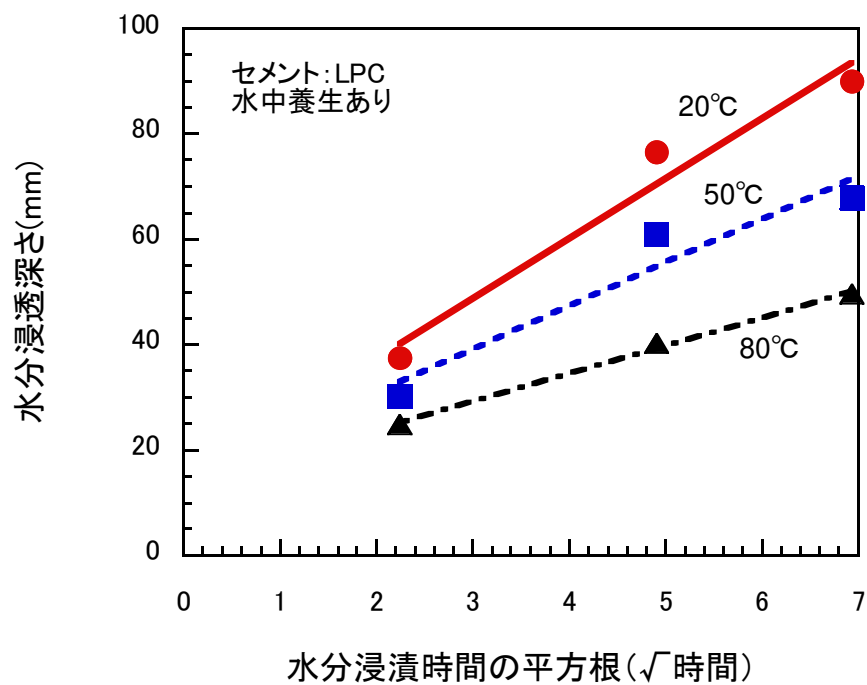


図 3.2-46 水中養生したコンクリートの水分浸透深さ
(セメント:LPC 水中養生あり)

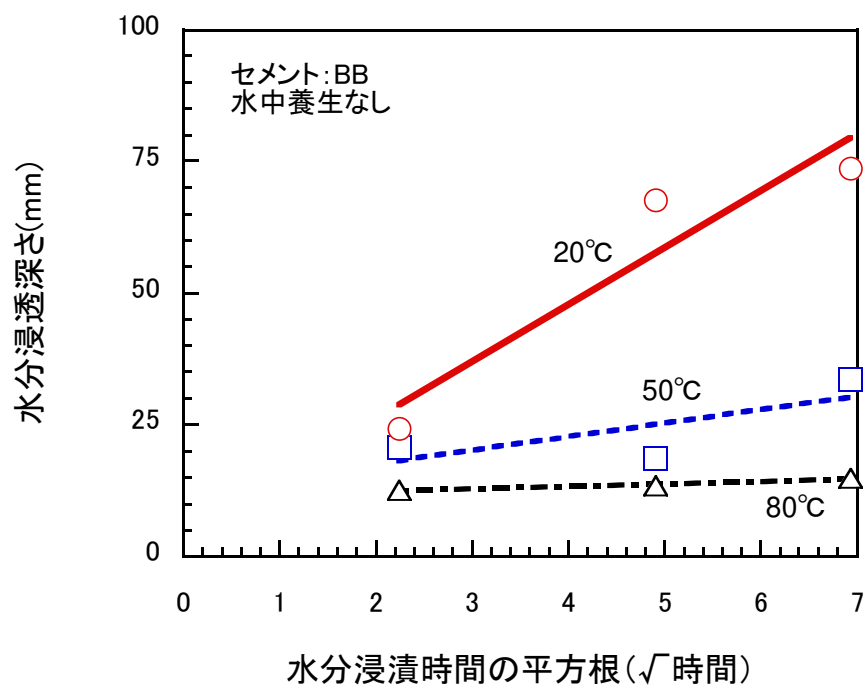


図 3.2-47 気中養生したコンクリートの水分浸透深さ
(セメント:BB 水中養生なし)

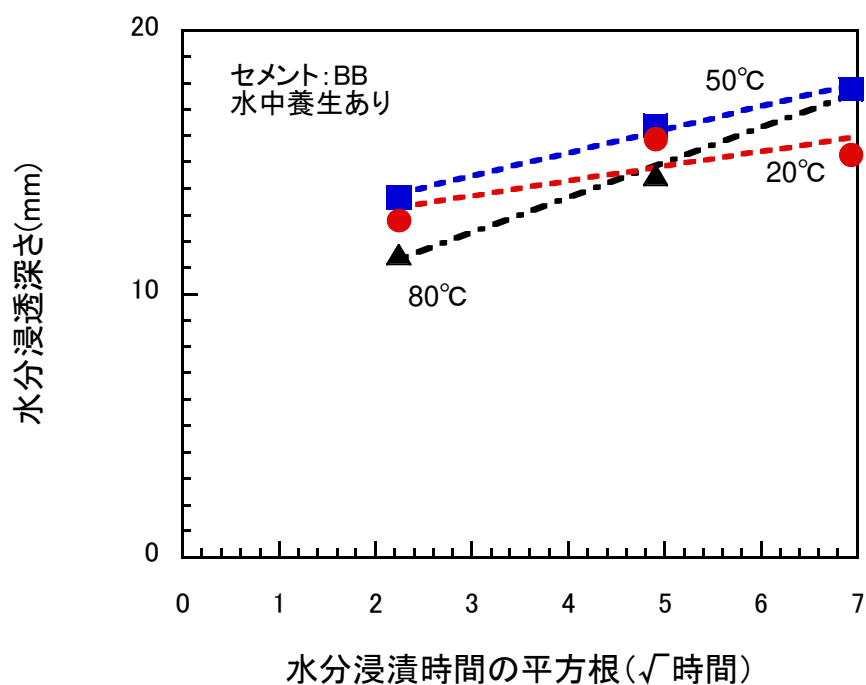


図 3.2-48 水中養生したコンクリートの水分浸透深さ
(セメント:BB 水中養生あり)

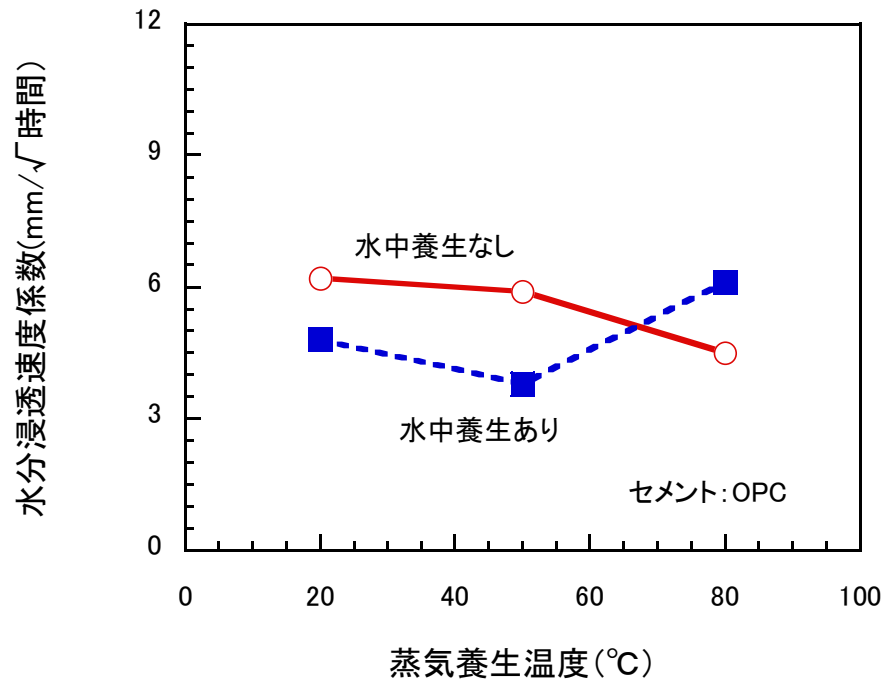


図 3.2-49 最高温度による水分浸透速度係数への影響
(セメント : OPC)

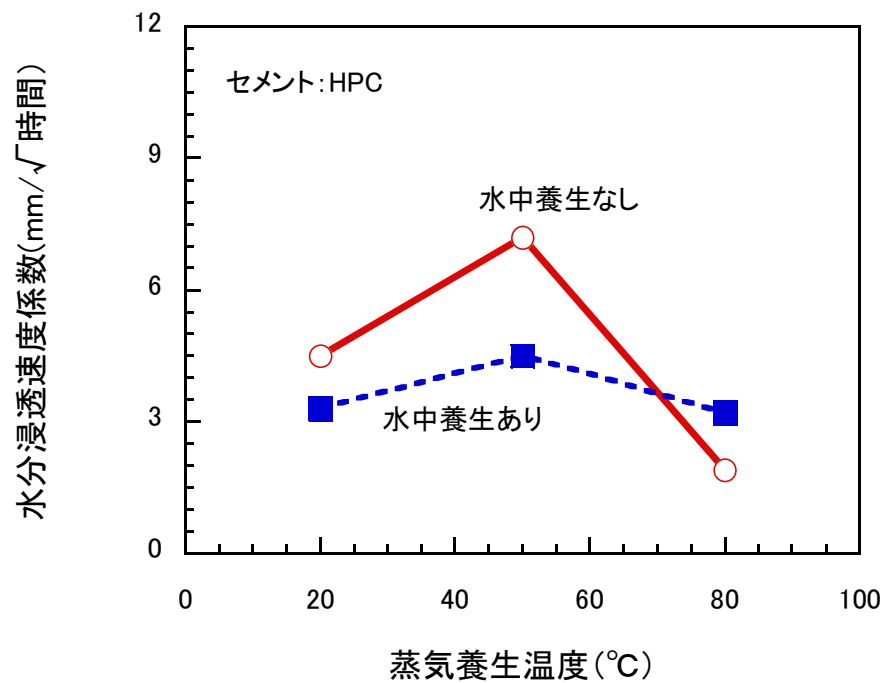


図 3.2-50 最高温度による水分浸透速度係数への影響
(セメント : HPC)

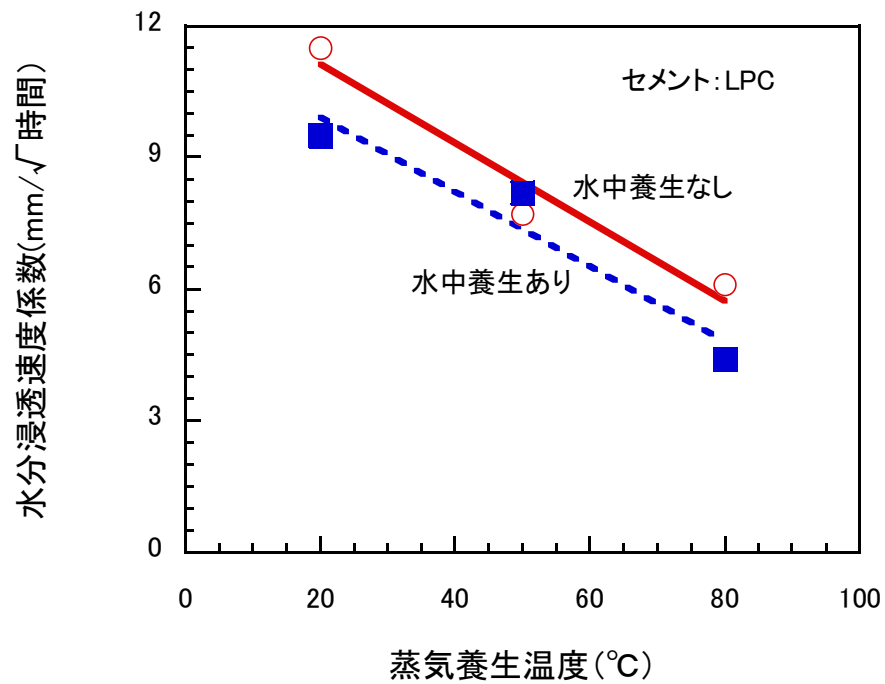


図 3.2-51 最高温度による水分浸透速度係数への影響
(セメント : LPC)

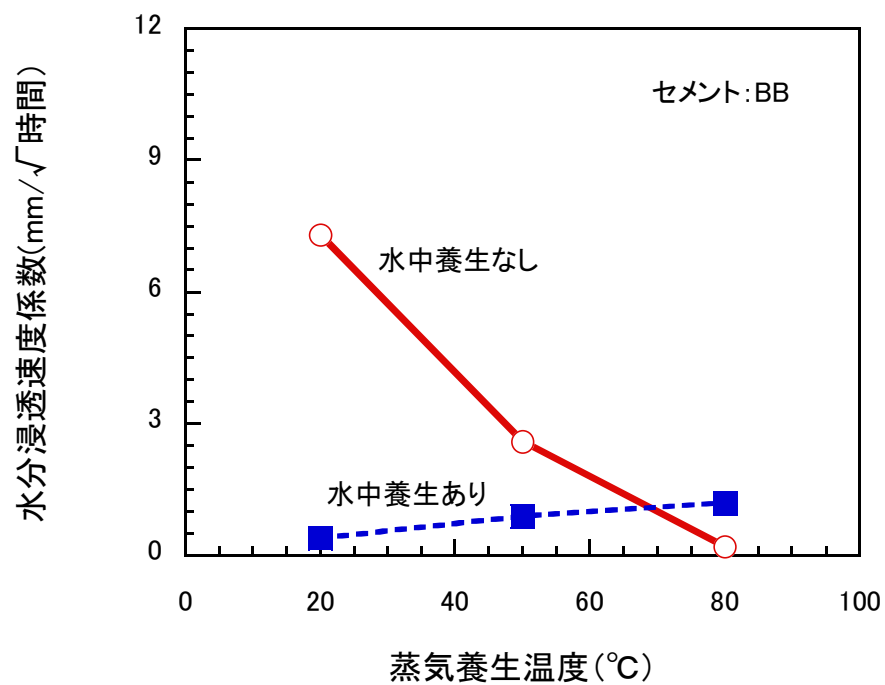


図 3.2-52 最高温度による水分浸透速度係数への影響
(セメント : BB)

(6) 塩化物イオンの浸透性

図 3.2-53 及び図 3.2-54 はそれぞれ、OPC を用いた試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生及び材齢 7 日目まで水中養生し試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの浸漬面からの距離ごとの塩化物イオン濃度を示したものである。図中の○、□及び△は 20℃、50℃及び 80℃の養生温度における、試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの塩化物イオン濃度を、●、■及び▲は 20℃、50℃及び 80℃の養生温度における、材齢 7 日目まで水中養生し試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの塩化物イオン濃度をそれぞれ示している。セメントに OPC を用いた場合、脱型後養生方法に関係なく、蒸気養生の温度が高くなるとコンクリート内部の塩化物イオン濃度が高くなることが分かる。

図 3.2-55 及び図 3.2-56 はそれぞれ、HPC を用いた試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生及び材齢 7 日目まで水中養生し試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの浸漬面からの距離ごとの塩化物イオン濃度を示したものである。図中の○、□及び△は 20℃、50℃及び 80℃の養生温度における、試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの塩化物イオン濃度を、●、■及び▲は 20℃、50℃及び 80℃の養生温度における、材齢 7 日目まで水中養生し試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの塩化物イオン濃度をそれぞれ示している。セメントに HPC を用いた場合、OPC を用いた場合と同様な結果を示した。

図 3.2-57 及び図 3.2-58 はそれぞれ、LPC を用いた試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生及び材齢 7 日目まで水中養生し試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの浸漬面からの距離ごとの塩化物イオン濃度を示したものである。図中の○、□及び△は 20℃、50℃及び 80℃の養生温度における、試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの塩化物イオン濃度を、●、■及び▲は 20℃、50℃及び 80℃の養生温度における、材齢 7 日目まで水中養生し試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの塩化物イオン濃度をそれぞれ示している。セメントに LPC を用いた場合、OPC を用いた場合と同様な結果を示した。

図 3.2-59 及び図 3.2-60 はそれぞれ、BB を用いた試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生及び材齢 7 日目まで水中養生し試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの浸漬面からの距離ごとの塩化物イオン濃度を示したものである。図中の○、□及び△は 20℃、50℃及び 80℃の養生温度における、試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの塩化物イオン濃度を、●、■及び▲は 20℃、50℃及び 80℃の養生温度における、材齢 7 日目まで水中養生し試験開始日の材齢 14 日目まで気中養生したコンクリートの塩化物イオン濃度をそれぞれ示している。セメントに BB を

用いた場合、OPC 及び HPC を用いた場合と同様な結果を示した。浸透面からの距離は同じであれば養生温度が高くなると塩化物イオンの濃度は大きくなることが分かる。

図 3.2-60 は、図 3.2-53 および図 3.2-54 に示した OPC を用いたコンクリートの塩化物イオン濃度分布から求めた見掛けの拡散係数と養生時の養生温度との関係を示したものである。養生温度が高いものほど、見掛けの拡散係数が大きくなっており、80℃で養生した場合には、20℃で養生した場合と比較して 2.2～3.5 倍大きくなっている。一方で、脱型後に水中養生を行ったものは、同じ養生温度で気中養生を行ったものよりも、塩化物イオンの見掛けの拡散係数は小さくなっている。既往の研究⁷⁾によると、蒸気養生後に水中養生を行うことで、40nm 以上の細孔量が減少することが報告されている。蒸気養生を行ったものでも、脱型後に水中養生を行うことで、塩化物イオンの浸透抵抗性が若干増加するといえる。

また、図 3.2-61 は、HPC を用いたコンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数と養生時の養生温度との関係を示したものである。OPC を用いた場合と同様に、養生温度が高いほど塩化物イオンの見掛けの拡散係数は大きい。特に、80℃で養生した場合の拡散係数は 20℃の場合と比較して約 4 倍であることから、OPC より HPC の方が、高温での養生温度の影響を受けやすいことが分かる。

図 3.2-62 は、LPC を用いたコンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数と養生時の養生温度との関係を示したものである。LPC を用いた場合にも、養生温度を 80℃とした場合の見掛けの拡散係数は、20℃の場合と比べて 5 倍以上であることから、OPC 及び HPC より LPC の方が高温での養生温度を、一番に受けやすいことが分かる。

図 3.2-63 は、BB を用いたコンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数と養生時の養生温度との関係を示したものである。BB を用いた場合にも、養生温度を 80℃とした場合の見掛けの拡散係数は、20℃の場合と比べて 3 倍程度に大きくなるが、OPC、HPC 及び LPC を用いたものの見掛けの拡散係数と比べると小さいことが分かる。

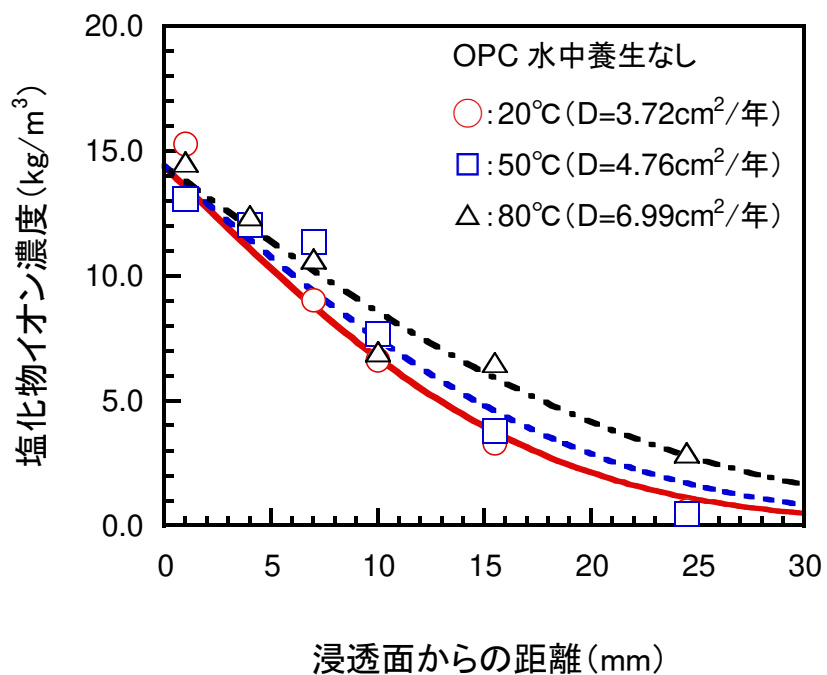


図 3.2-53 塩化物イオン濃度 (セメント : OPC 水中養生なし)

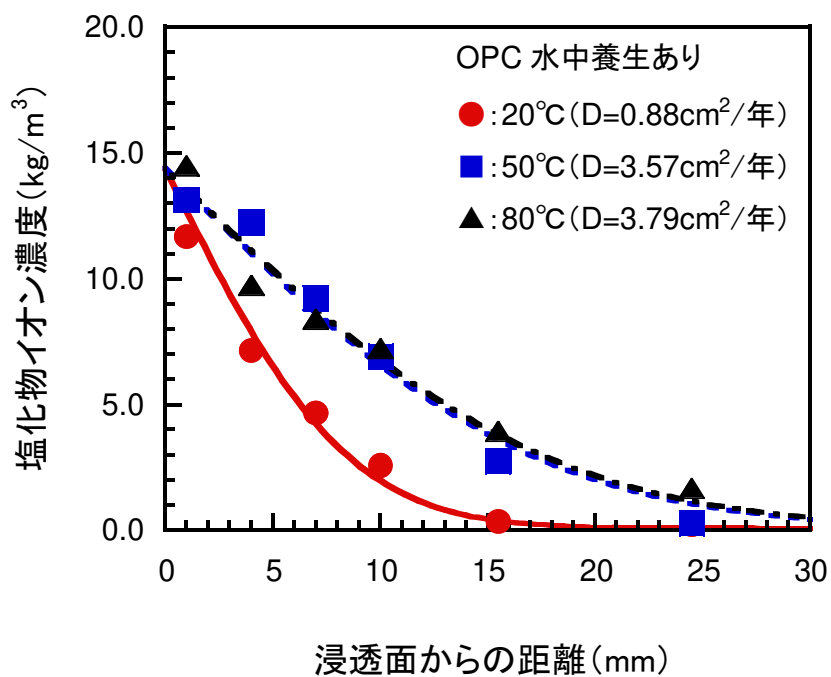


図 3.2-54 塩化物イオン濃度 (セメント : OPC 水中養生あり)

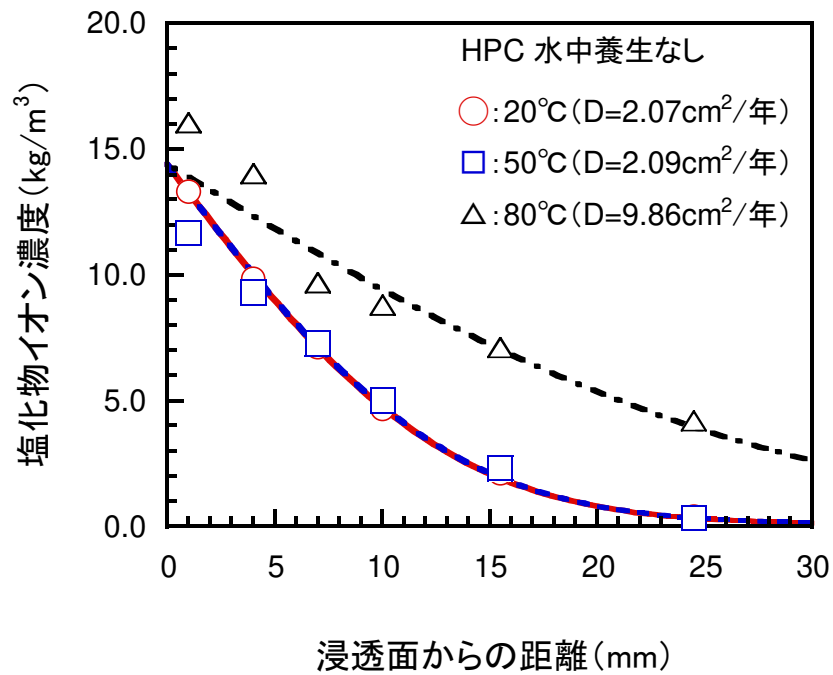


図 3.2-55 塩化物イオン濃度(セメント : HPC 水中養生なし)

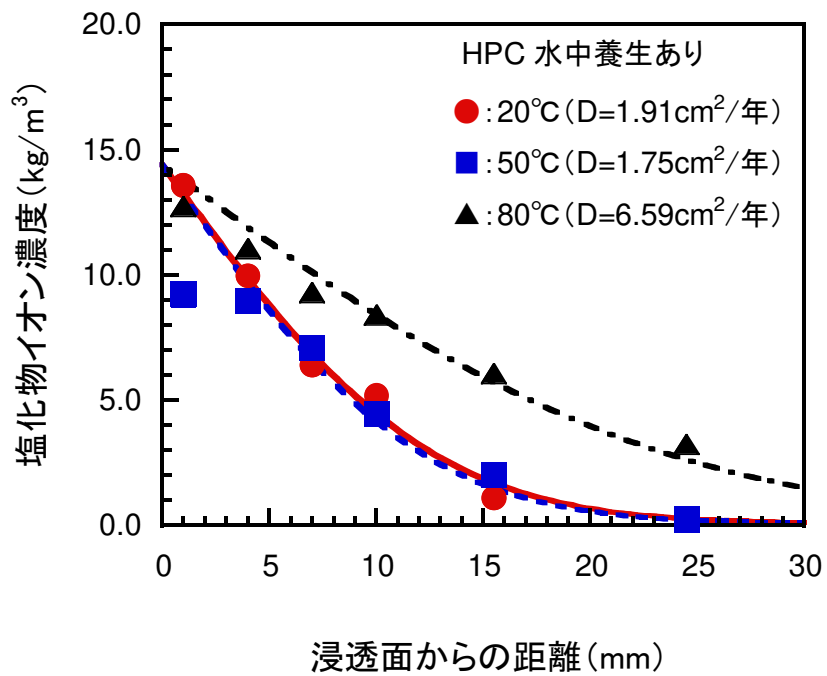


図 3.2-56 塩化物イオン濃度(セメント : HPC 水中養生あり)

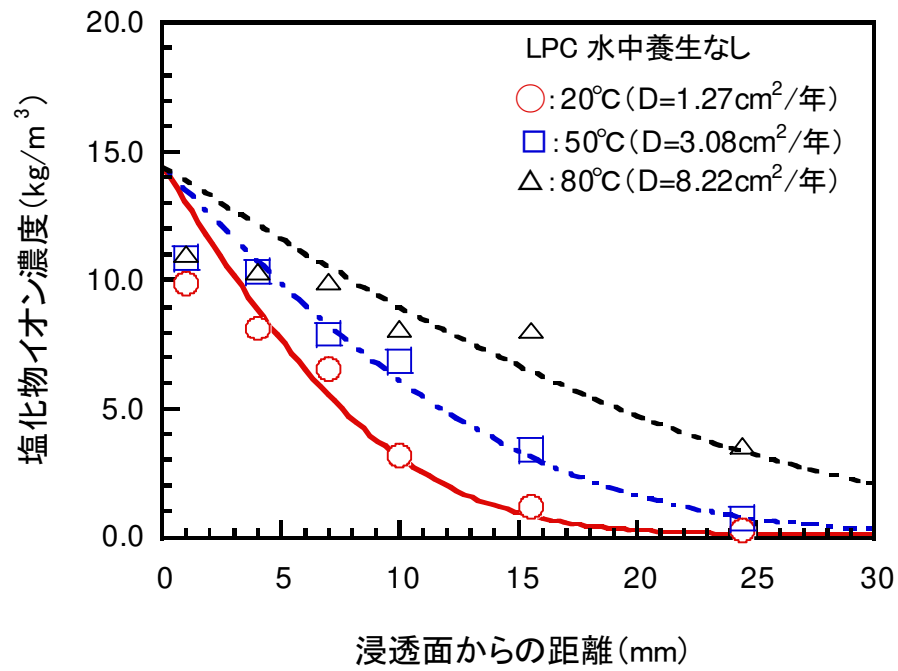


図 3.2-57 塩化物イオン濃度(セメント : LPC 水中養生なし)

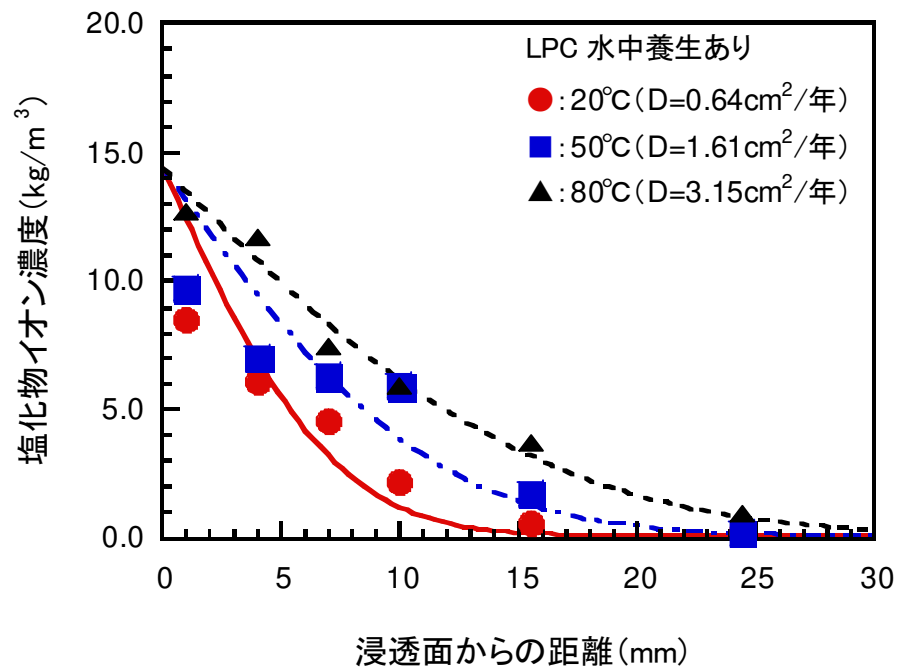


図 3.2-58 塩化物イオン濃度(セメント : LPC 水中養生あり)

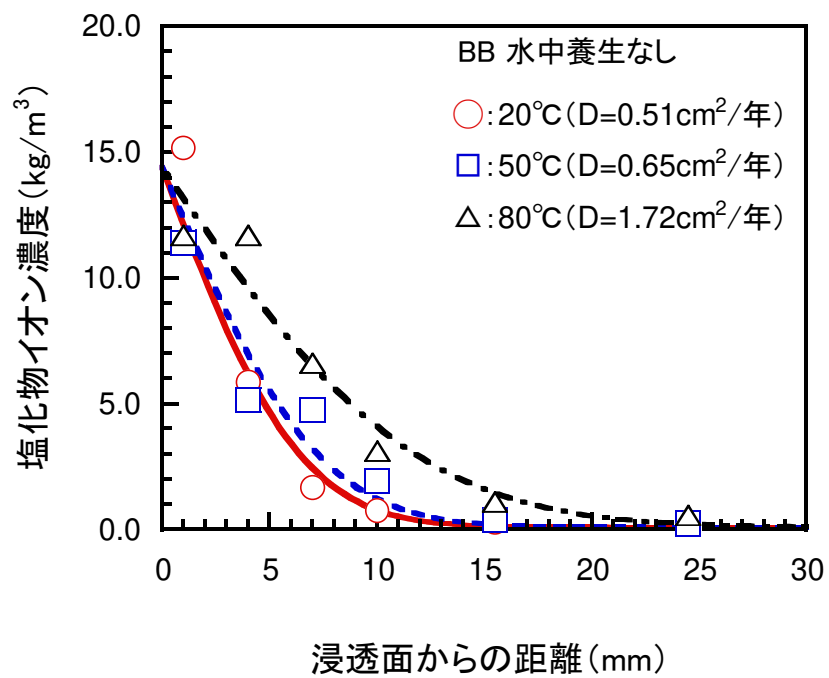


図 3.2-59 塩化物イオン濃度(セメント : BB 水中養生なし)

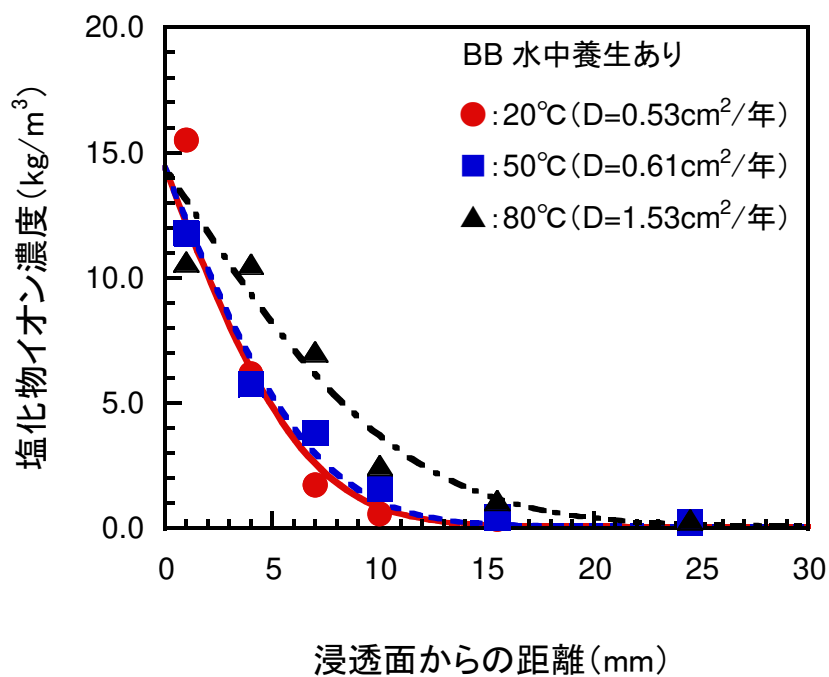


図 3.2-60 塩化物イオン濃度(セメント : BB 水中養生あり)

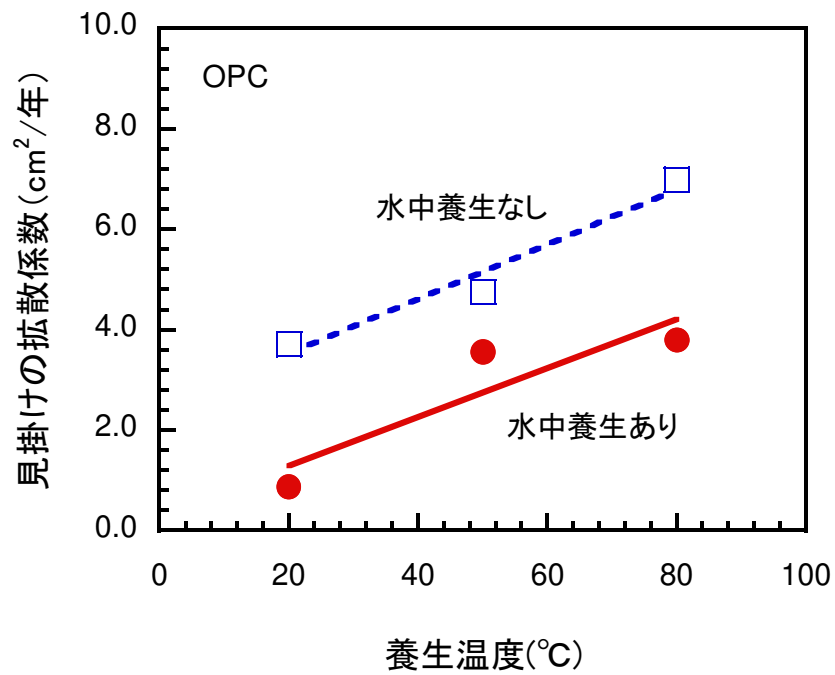


図 3.2-60 養生温度と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係
(セメント : OPC)

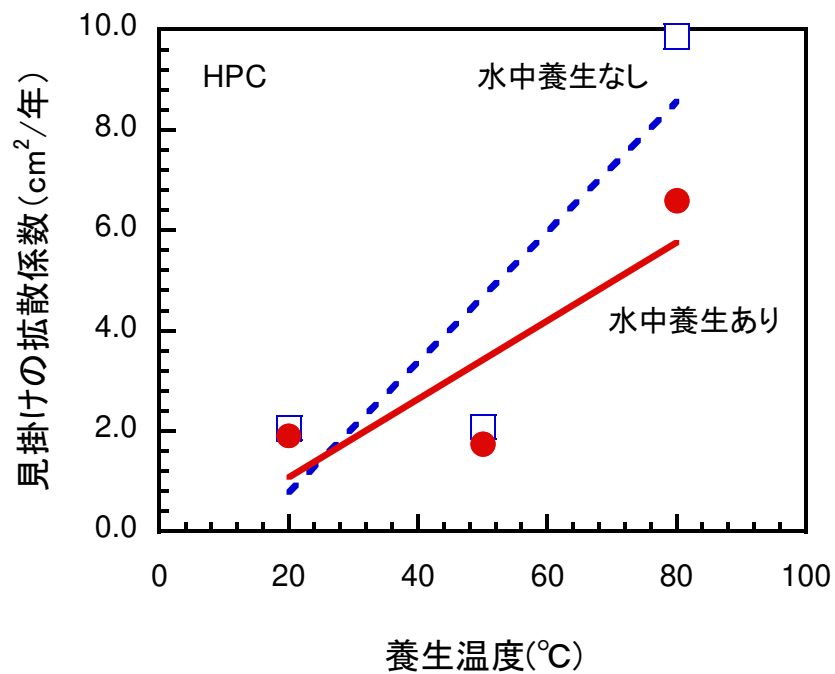


図 3.2-61 養生温度と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係
(セメント : HPC)

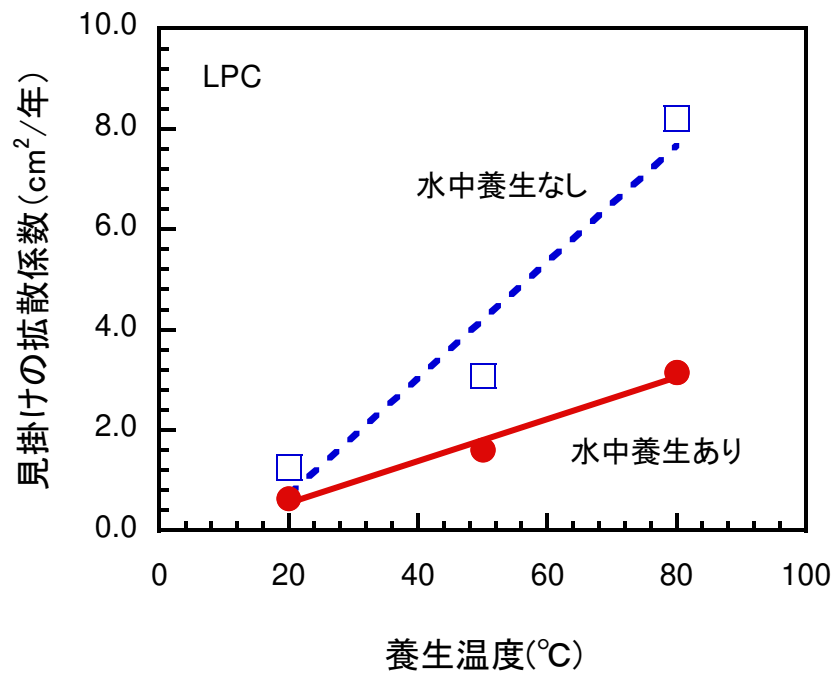


図 3.2-62 養生温度と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係
(セメント : LPC)

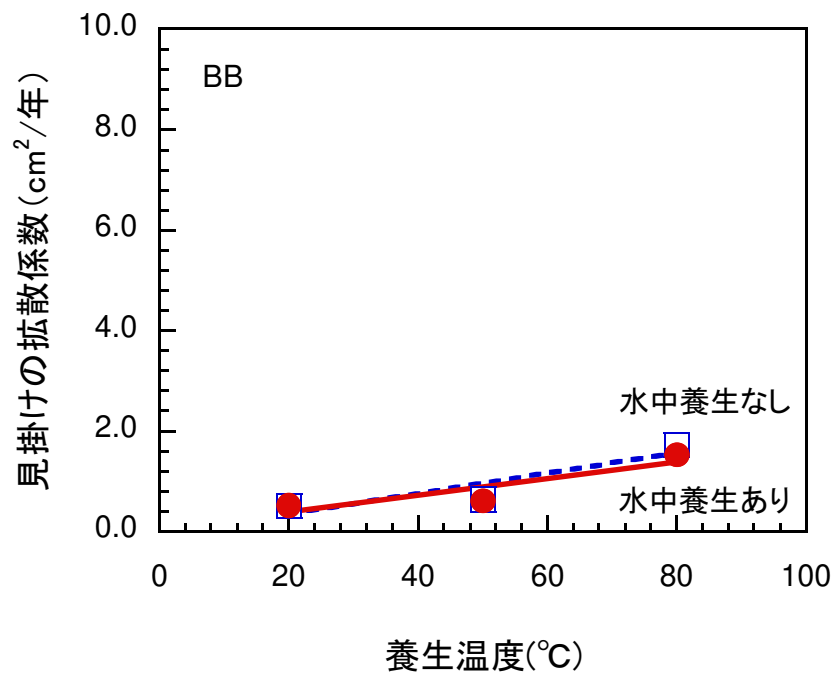


図 3.2-63 養生温度と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係
(セメント : BB)

3.3 粗骨材の種類がコンクリートの耐凍害性に与える影響

3.3.1 実験概要

(1) 使用材料及び配合

本節に用いたコンクリートの配合を表 3.3-1 にフレッシュ性状の詳細を表 3.3-3 および表 3.3-4 に示す。結合材には、普通ポルトランドセメント（密度：3.15 g/cm³，ブレン値：3,350 cm²/g）を，細骨材には，硬質砂岩砕砂（表乾密度：2.65 g/cm³，吸水率：1.53 %，粗粒率：2.93）を用いた。粗骨材には，産地および岩種の異なる 4 種類の粗骨材を用いた。各粗骨材の基本物性を表 3.3-2 に，写真を写真 3.3-1 に示す。化学混和剤には，高性能減水剤および AE 剤を用いた。フレッシュ時に測定したコンクリートの空気量は，いずれも目標値の 4.5±1.5%の範囲内である（表 3.3-3 及び表 3.3-4）。

表 3.3-1 コンクリートの配合

粗骨材の種類	粗骨材の岩種	水セメント比 W/C (%)	空気量 (設計値) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤(C×%)	
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G1	粗骨材 G2	高性能 減水剤	AE剤
T	砂岩	45.0	4.5	44.0	170	378	778	1020	-	0.2	0.0025
N								497	497		
M	流紋岩							480	480		
S	粘板岩							1006			

表 3.3-2 使用骨材の物性等

No.	粗骨材の種類	粗骨材の岩種	骨材の最大寸法 (mm)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率	微粒分付着率 (%)
1	T	砂岩	20	2.75	0.45	6.86	
2	N	砂岩	20	2.67	0.60	7.19	
3			10	2.67	0.78	6.56	0.52
4	M	流紋岩	20	2.58	1.32	7.04	0.14
5			10	2.57	1.66	-	0.44
6	S	粘板岩	20	2.70	0.97	6.57	0.44

写真 3.3-1 使用粗骨材の様子※

No.	1	2	3	4	5	6
写真						

※写真に示す骨材は，洗浄後である。

表 3.3-3 フレッシュコンクリートの詳細情報 1

砂岩碎石 T		
測定項目	測 定 値	
外 気 温 (℃)	17.8	
湿 度 (%)	56	
コンクリート温度 (℃)	17.9	
スランプ (cm)	14.0	
空 気 量 (%)	5.6	
単位容積質量 (kg/m³)	2333	
砂岩碎石 N		
測定項目	測 定 値	
外 気 温 (℃)	15.4	
湿 度 (%)	61	
コンクリート温度 (℃)	16.1	
スランプ (cm)	17.0	
空 気 量 (%)	5.0	
単位容積質量 (kg/m³)	2301	
流紋岩碎石 M		
測定項目	測 定 値	
外 気 温 (℃)	15.4	
湿 度 (%)	61	
コンクリート温度 (℃)	16.0	
スランプ (cm)	10.5	
空 気 量 (%)	3.3	
単位容積質量 (kg/m³)	2404	
粘板岩碎石 S		
測定項目	測 定 値	
外 気 温 (℃)	15.4	
湿 度 (%)	61	
コンクリート温度 (℃)	16.2	
スランプ (cm)	9.5	
空 気 量 (%)	5.0	
単位容積質量 (kg/m³)	2310	



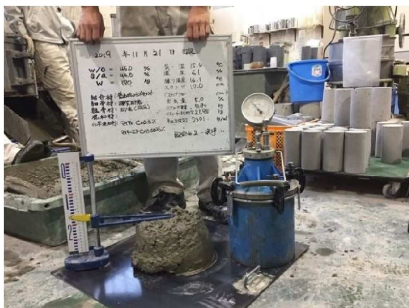






表 3.3-4 フレッシュコンクリートの詳細情報 2

砂岩碎石 N (未洗浄)		
測定項目	測 定 値	
外 気 温 (℃)	15.6	
湿 度 (%)	46	
コンクリート温度 (℃)	16.1	
スランプ (cm)	14.0	
空 気 量 (%)	5.4	
単位容積質量 (kg/m ³)	2301	
流紋岩碎石 M (未洗浄)		
測定項目	測 定 値	
外 気 温 (℃)	15.1	
湿 度 (%)	46	
コンクリート温度 (℃)	15.9	
スランプ (cm)	13.5	
空 気 量 (%)	5.4	
単位容積質量 (kg/m ³)	2266	
粘板岩碎石 S (未洗浄)		
測定項目	測 定 値	
外 気 温 (℃)	15.6	
湿 度 (%)	46	
コンクリート温度 (℃)	16.0	
スランプ (cm)	11.5	
空 気 量 (%)	4.3	
単位容積質量 (kg/m ³)	2343	

(2) 養生方法

コンクリートは、打込み後、18 時間型枠内で養生を行った。蒸気養生の温度設定を図 3.3-1 に示す。蒸気養生は、打込み後から 2 時間まで $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ の気中で静置した後、 $15^{\circ}\text{C}/\text{時間}$ の速さで 65°C まで昇温を行った。最高温度の 65°C を 3 時間保持した後、自然冷却によりコンクリートの温度を下げた。標準養生の供試体は、打込み後から脱型まで、 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ の室内で養生を行った。脱型後は、 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ の水中で材齢が 7 日になるまで養生を行い、その後は試験開始材齢になるまで気中で養生を行なった。

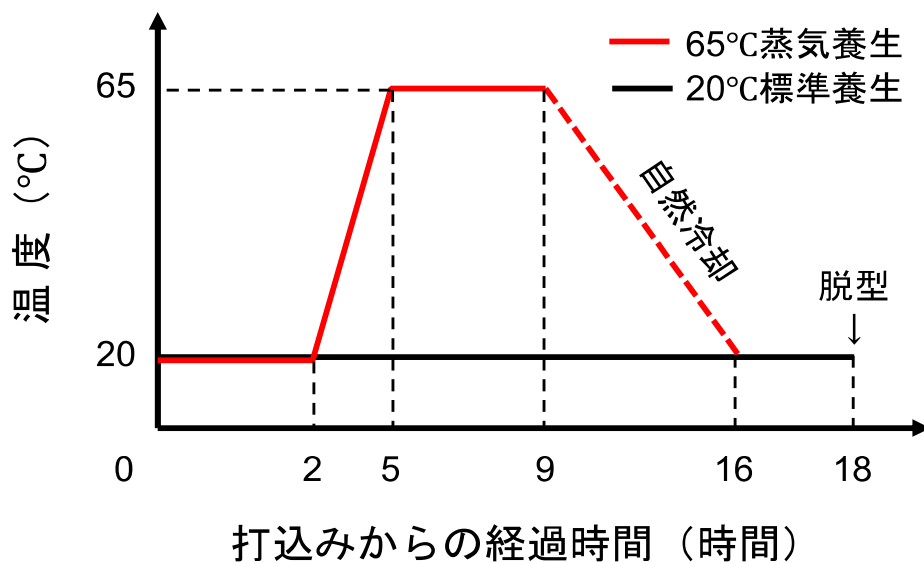


図 3.3-1 脱型までの養生方法

(3) 試験方法

a) 圧縮強度試験及び静弾性係数試験

圧縮強度試験は、 $\phi 100\times 200\text{mm}$ の円柱供試体を用いて、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従って行った。供試体は、標準養生および蒸気養生を行ったものを用意し、材齢 7 日および 28 日に試験を行った。試験は、供試体を 3 本用いて行い、その 3 本の圧縮強度の平均値をコンクリートの圧縮強度とした。

静弾性係数試験は、 $\phi 100\times 200\text{mm}$ の円柱供試体を用いて、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に従って行った。供試体は、標準養生および蒸気養生を行ったものを用意し、材齢 7 日および 28 日に試験を行った。試験は、供試体を 3 本用いて行い、その 3 本の静弾性係数の平均値をコンクリートの静弾性係数とした。

b) 凍結融解試験

凍結融解試験は、100×100×400mmの角柱供試体を用いて、JIS A 1148:2010「コンクリートの凍結融解試験方法」に規定される水中凍結融解方法（A法）に準拠して行った。供試体は、標準養生および蒸気養生を行ったものを用意し、材齢14日より試験を開始した。凍結融解の1サイクルは、供試体の中心部温度が、5℃から-18℃に下がり、また、-18℃から5℃に上がるものとし、1サイクルに要する時間は、3時間以上、4時間以内とした。試験開始時および凍結融解36サイクルを超えない間隔で測定を行い、相対動弾性係数、耐久性指数および質量減少率を求めた。

c) スケーリング試験

スケーリング試験は、JSCE-K 572「けい酸塩系表面含浸材の試験方法（案）」のスケーリングに対する抵抗性試験に従って行った。供試体は、100×100×400mmの角柱供試体から切り出した100×100×100mmの立方体供試体を用いた。供試体は、標準養生および蒸気養生を行ったものを用意した。水中養生終了後、成形を行い、1日室内で乾燥させた後、型枠に接していた2側面を残し、他の4面をエポキシ樹脂で被覆した。エポキシ樹脂が硬化した後、再び試験開始材齢の材齢14日まで気中で養生を行った。供試体は、試験容器内で、高さ10mmのスペーサーの上に試験面を下にして置き、試験面から5～10mmが浸漬するように、濃度が3%の塩化ナトリウム水溶液を入れた。試験装置の凍結融解サイクルは、16時間の凍結工程と、8時間の融解工程を1サイクルとして行う。凍結工程では試験装置内の気相の温度を-18±2℃で12時間以上保ち、融解工程では最高温度は20±2℃を標準とし、5時間以上この温度を保つ。温度上昇は15℃/時間とした。14、28、42、および56サイクルで、試験面より剥離したスケーリング片を採取し、乾燥後、質量を測定した。

d) 粗骨材の凍結融解試験

粗骨材の凍結融解試験には、15mmふるいを通過し10mmふるいにとどまる試料を用いて行った。試料を最小500g用意し、プラスチック性の容器に入れ、質量パーセント濃度5%の塩化ナトリウム水溶液に浸水させた。試験装置の凍結融解サイクルは、16時間の凍結工程と、8時間の融解工程を1サイクルとして行う。凍結工程では試験装置内の気相の温度を-18±2℃で12時間以上保ち、融解工程では最高温度は20±2℃を標準とし、5時間以上この温度を保つ。温度上昇は15℃/時間とした。5サイクル終了ごとに、試料を洗浄し、乾燥後に10mmふるいにとどまったものの質量を測定し、質量減少率を求めた。

e) 硫酸ナトリウムを用いた粗骨材の安定性試験

硫酸ナトリウムを用いた粗骨材の安定性試験には、15mm ふるいを通過し 10mm ふるいにとどまる試料を用いて、JIS A 1122「硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験方法」に従って行った。試料を最小 500g 用意し、金網かごに入れ、試験溶液^{*1}に浸水させた。16～18 時間、溶液に浸水させたのち、 $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ の温度で 4～6 時間、乾燥させ、1 サイクルとした。乾燥後、試料の温度が常温に戻り次第、再び試験溶液に浸水させ、15 サイクル時点で試験を終了とした。5 サイクル終了ごとに、試料を洗浄し、乾燥後に 10mm ふるいにとどまったものの質量を測定し、損失質量分率を求めた。

^{*1} 試験溶液：清浄な水 1L に対し、JIS K 8986 に規定される特級の硫酸ナトリウム十水和物(結晶)($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)を約 750g の割合で、かき混ぜながら溶かした溶液を用いた。なお、試験開始時には容器の底に結晶が生じていることを確認し、使用した。

f) 粗骨材の微粒分量試験

粗骨材の微粒分量試験は、JIS A 1103「骨材の微粒分量試験方法」に従って行った。対象となる試料を最小で 4kg 用意し、 $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ の乾燥炉で 24 ± 2 時間の乾燥を行った。乾燥後、試料の質料をはかり、洗う前の質量とした。その後、0.075mm のふるい上で試料を水道水で洗い、再び一定質量になるまで、 $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ の乾燥炉で 24 ± 2 時間の乾燥を行った。乾燥後に試料の質料をはかり、骨材中の微粒分率を求めた。

3.3.2 実験結果及び考察

(1) 粗骨材の種類の違いが耐凍害性に与える影響

a) 圧縮強度及び静弾性係数

図 3.3-2 及び図 3.3-3 は、材齢 7 日および材齢 28 日における 4 種類それぞれの粗骨材を用いて製造したコンクリートの圧縮強度を示している。これらの図より、各養生方法および材齢において、粗骨材の種類の違いによる圧縮強度の大きな差は見られない。コンクリートは複数の構成要因からなる複合材料であり、その破壊のメカニズムは複雑であるが、硬化コンクリートの構成要因をモルタル部分と粗骨材部分の二相に分けて考えた場合、破壊要因はつぎのように考える。

- ① モルタル部と粗骨材界面に生じる付着ひび割れ
- ② モルタル部分に生じるひび割れ
- ③ 粗骨材内部に生じるひび割れの 3 種が挙げられる⁸⁾。

本実験で使用したコンクリートの圧縮強度は、最も大きい標準養生を行った材齢 28

日の圧縮強度で 50N/mm^2 である。この場合、モルタル部分が粗骨材よりも低強度の普通コンクリートとなるため、圧縮強度の破壊要因は ① もしくは ② となることが予測される。よって、本研究では、同配合のコンクリートであるため、モルタル部分の強度は同程度であり、粗骨材の種類による強度の差は見られなかったと推測される。なお、コンクリートの強度がさらに高強度である場合には、破壊要因は③に起因し、粗骨材の種類による影響が生じると考えられる。

図 3.3-4 および図 3.3-5 は、材齢 7 日および材齢 28 日におけるそれぞれ 4 種類の粗骨材を用いて製造したコンクリートの静弾性係数を示している。これらの図より、各養生方法および材齢において、粗骨材の種類の違いによる圧縮強度の大きな差は見られない。一般に、碎石の静弾性係数は、モルタル部分の静弾性係数に比べ大きいため、これらの結果は、モルタル部分の静弾性係数に起因したと考えられる。本研究では、粗骨材の種類を除き、同配合のコンクリートで比較を行ったため、モルタル部分の性能は同等であり、静弾性係数に差は生じなかったと考えられる。

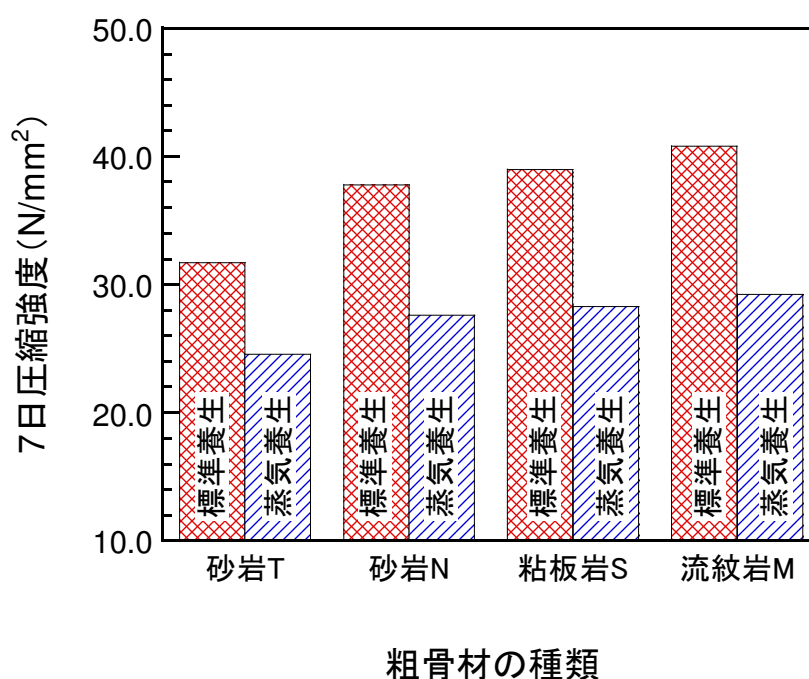


図 3.3-2 コンクリートの圧縮強度（7 日材齢）

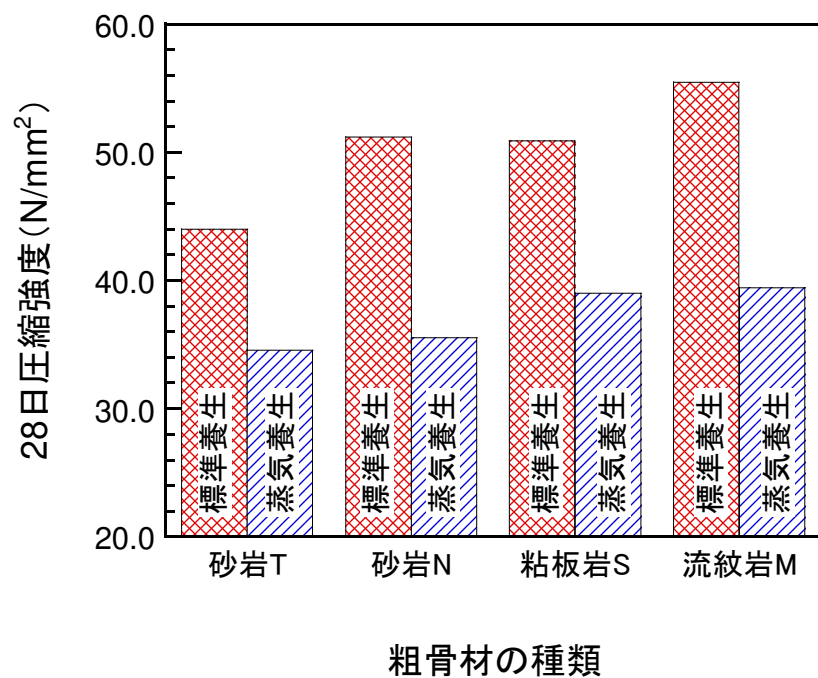


図 3.3-3 コンクリートの圧縮強度（28 日材齢）

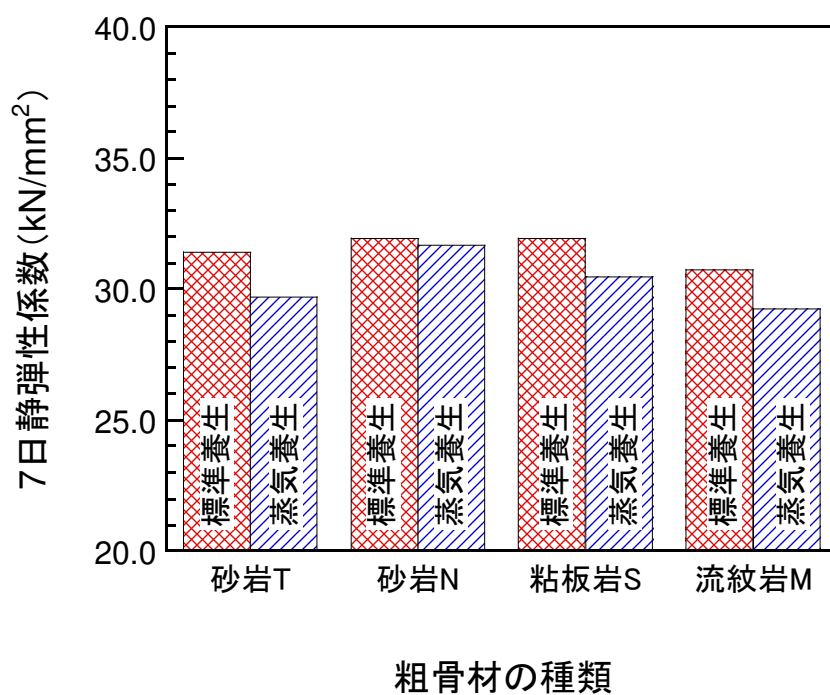


図 3.3-4 コンクリートの静弾性係数（7 日材齢）

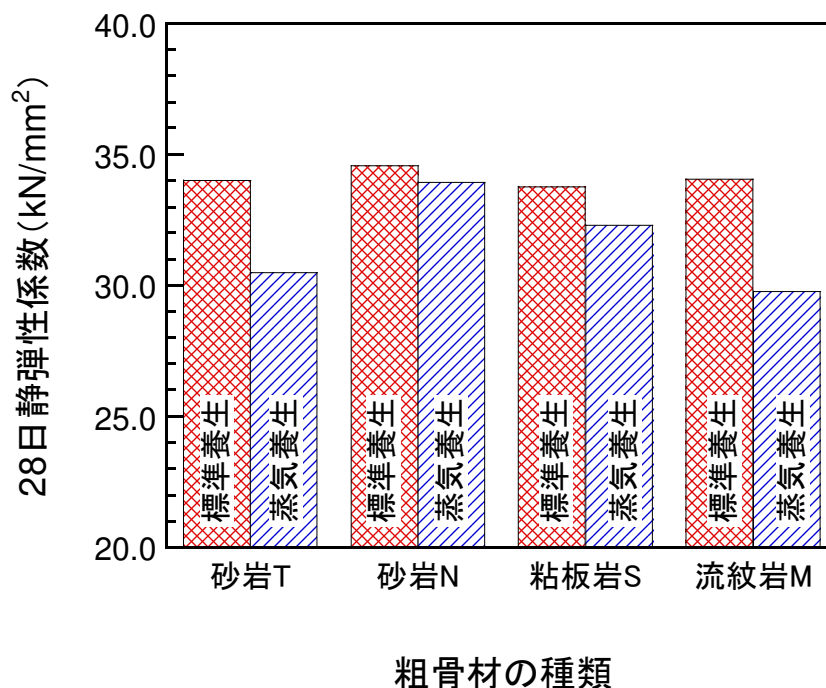


図 3.3-5 コンクリートの静弾性係数（28 日材齢）

b) 耐凍害性

・粗骨材の耐凍害性

図 3.3-6 は、本研究で使用した 4 種類の粗骨材で安定性試験を行った際の測定結果を示している。また、図 3.3-7 は、同様の 4 種類の粗骨材で骨材の凍結融解試験を行った際の測定結果を示している。図中の○は砂岩碎石 T、◇は砂岩碎石 N、□は流紋岩碎石 M、△は粘板岩碎石 S の測定結果を示している。図 3.3-6 において、S の粗骨材が突出して損失質量分率が高いことが分かる。しかし、最も損失質量分率が多い S の粗骨材であっても、4 %未満であり、JIS A 5005 に規定される 12 % 以下の基準に比べると、1/3 程度であり、十分に基準を満たしている。図 3.3-7 においては、S と M の粗骨材の質量減少率が高く、図 3.3-6 と比べると、M の粗骨材において顕著な違いが見られる。粗骨材の凍結融解抵抗性に関して、粗骨材中の氷圧の大きさと、それに抵抗する粗骨材の素材強度に関係するとの報告もあるため⁹⁾、M の粗骨材の素材強度は小さいと推移する。

図 3.3-8 から図 3.3-11 は、4 種類の粗骨材を用いたコンクリートの凍結融解試験の結果を示している。図 3.3-8 及び図 3.3-9 は、相対動弾性係数の測定結果を、図 3.3-10 及び図 3.3-11 は、質量減少率の測定結果を示している。図中の○および●は、砂岩碎

石 T, ◇および◆は, 砂岩碎石 N, □および■は, 流紋岩碎石 M, △および▲は, 粘板岩碎石 S の測定結果を示している。これらの図より, 流紋岩碎石 M は, 養生方法によらず, 相対動弾性係数が低下していることが分かる。また, 粘板岩碎石 S は, 蒸気養生を行った際に, 凍結融解が低下していることが分かる。これら 2 つの粗骨材は, 骨材の凍結融解試験における質量減少率が, 砂岩碎石 T および砂岩碎石 N に比べて大きく, 骨材自身の凍結融解抵抗性が低いため, それを用いたコンクリートも, 他の 2 つの粗骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に比べ, 低くなったと考えられる。また, これらの結果より, 骨材の凍結融解抵抗性に関して, JIS A 5005 では, 安定性試験による損失質量分率により規定しているが, この基準を満たした骨材であっても, それを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性は, 必ずしも高いとは言えないことが分かる。さらに, 図 3.3-6 において, 安定性試験の質量損失分率が多く, 骨材自身の凍結融解抵抗性が最も低いと考えられる粘板岩碎石 S に比べ, 流紋岩碎石 M の方が, それを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性は低いことが分かる。安定性試験における粗骨材の凍結融解抵抗性は, JIS A 1148 により求まるコンクリートの凍結融解抵抗性と, 必ずしも相関関係を示すとは限らないことを考える。

図 3.3-12 及び図 3.3-13 は, 図 3.3-8 から図 3.3-11 に示す試験結果より求めた耐久性指数である。写真 3.3-2 は, 凍結融解試験終了時の供試体の様子を示している。これらより, 先に述べた, 流紋岩碎石 M および粘板岩碎石 S を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性が, その他の 2 つの粗骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に比べ劣ることが分かる。

図 3.3-14 及び図 3.3-15 は, 4 種の粗骨材を用いて製造したコンクリートでスケーリング試験を行った際の結果を示している。図 3.3-14 は標準養生を行ったコンクリート, 図 3.3-15 は蒸気養生を行ったコンクリートの試験結果を示している。標準養生を行った場合は, スケーリング量に大きな差は見られず, いずれの粗骨材を用いたコンクリートにおいても, 累積スケーリング量は 70 g/m^2 前後であり, これは, 表面のセメントペースト部がはがれる程度の劣化である。標準養生を行うことで, コンクリート表面部が緻密で強固な構造となったため, スケーリングは表層部のみでとどまり, 粗骨材による影響を受けなかったと考えられる。一方, 蒸気養生を行った場合には, セメントペーストの細孔が粗大化したこと⁷⁾や, 蒸気養生でコンクリート温度が下がる際にコンクリート表面に生じる引張応力により, 微細ひび割れが生じたため, スケーリング量が増加し, 粗骨材が露出した状態になるため, 粗骨材の違いによる影響が顕著に表れたと推測する。写真 3.3-3 にスケーリング試験終了時の試験面の様子を示す。

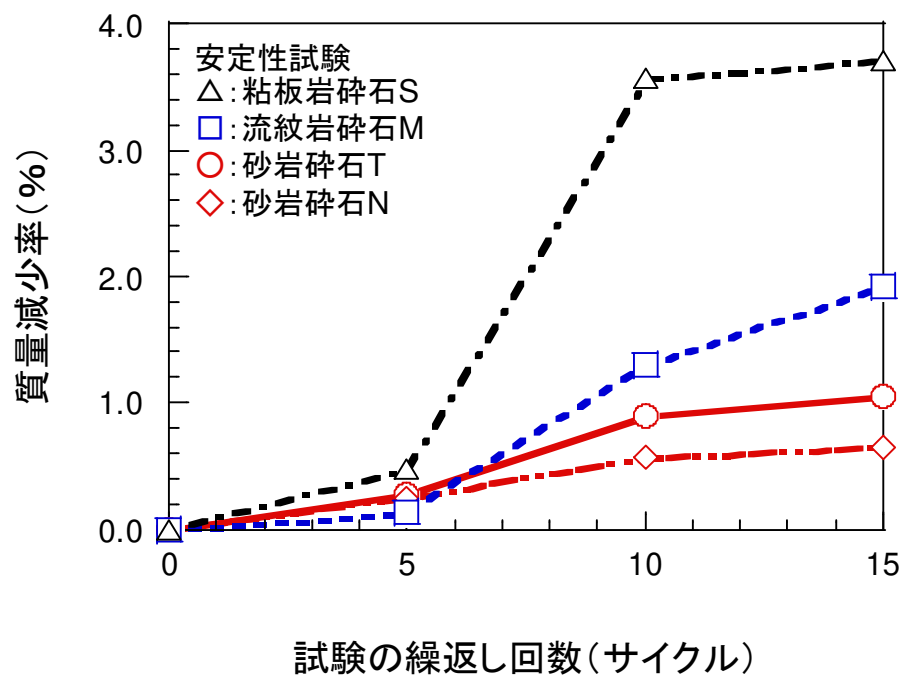


図 3.3-6 骨材の安定性試験の結果

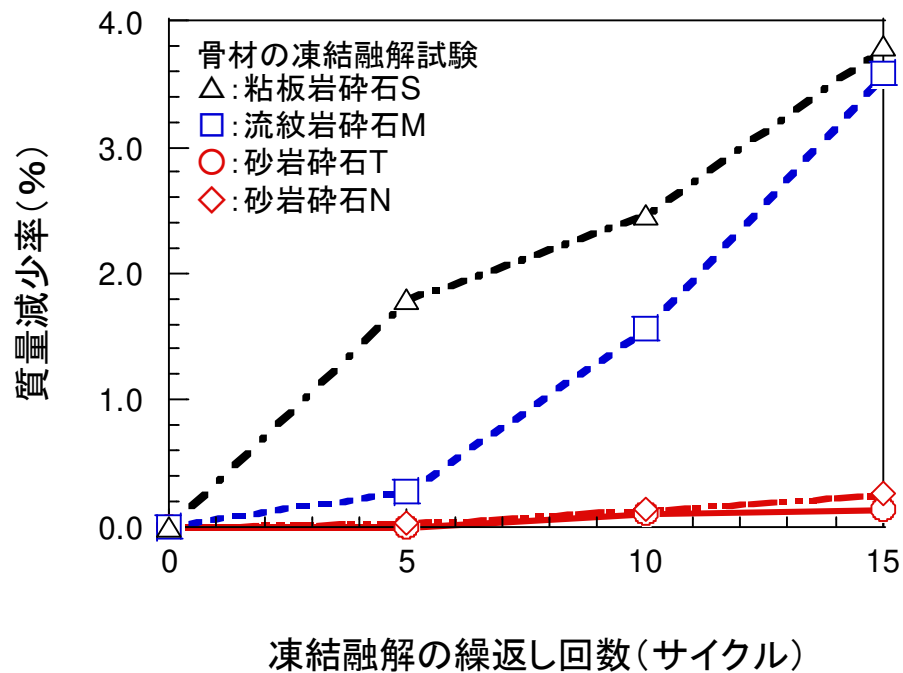


図 3.3-7 骨材の凍結融解試験の結果

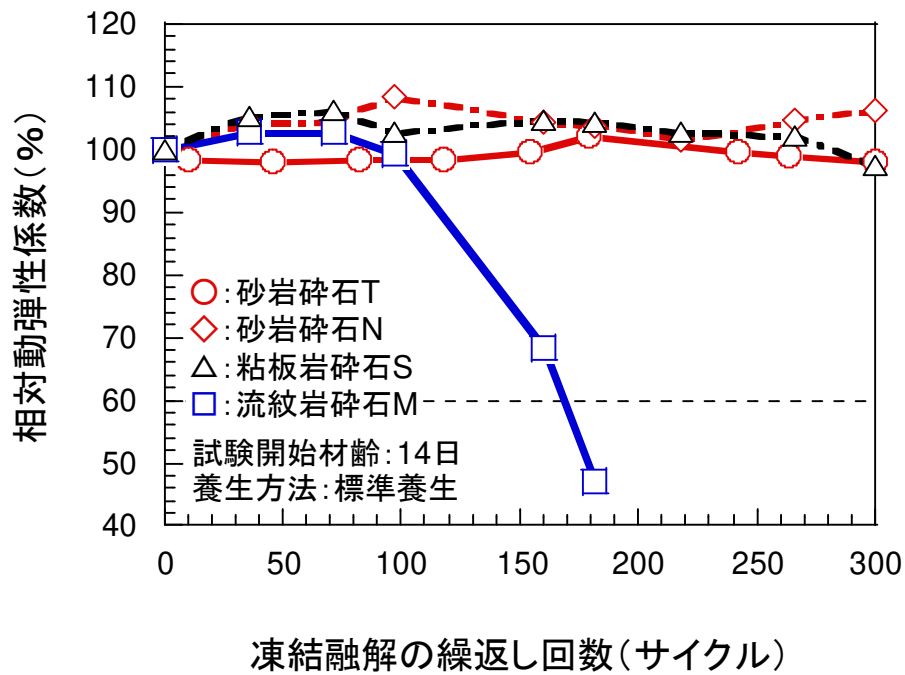


図 3.3-8 相対動弾性係数の測定結果（標準養生）

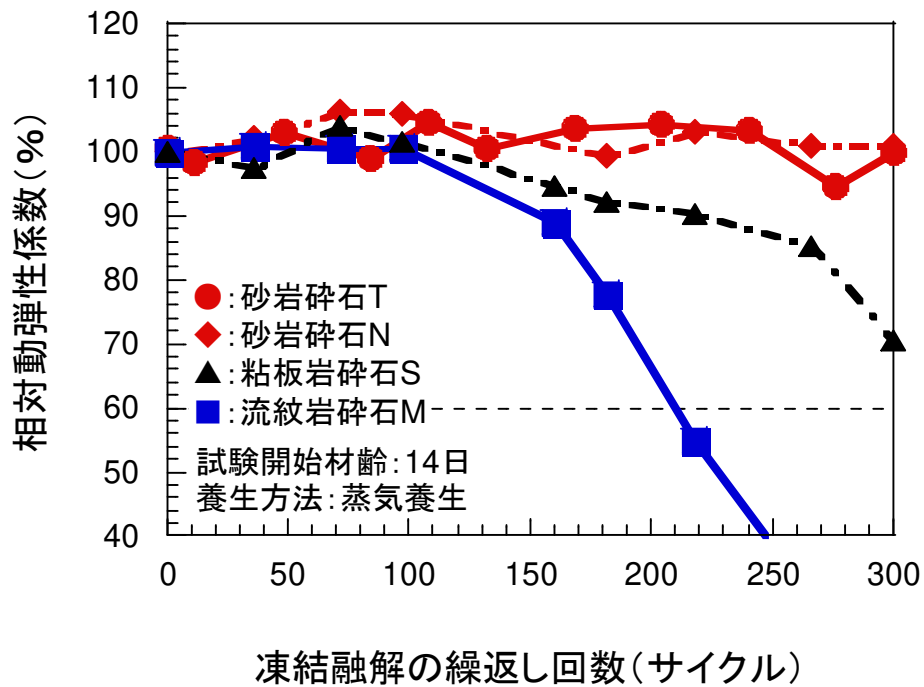


図 3.3-9 相対動弾性係数の測定結果（蒸気養生）

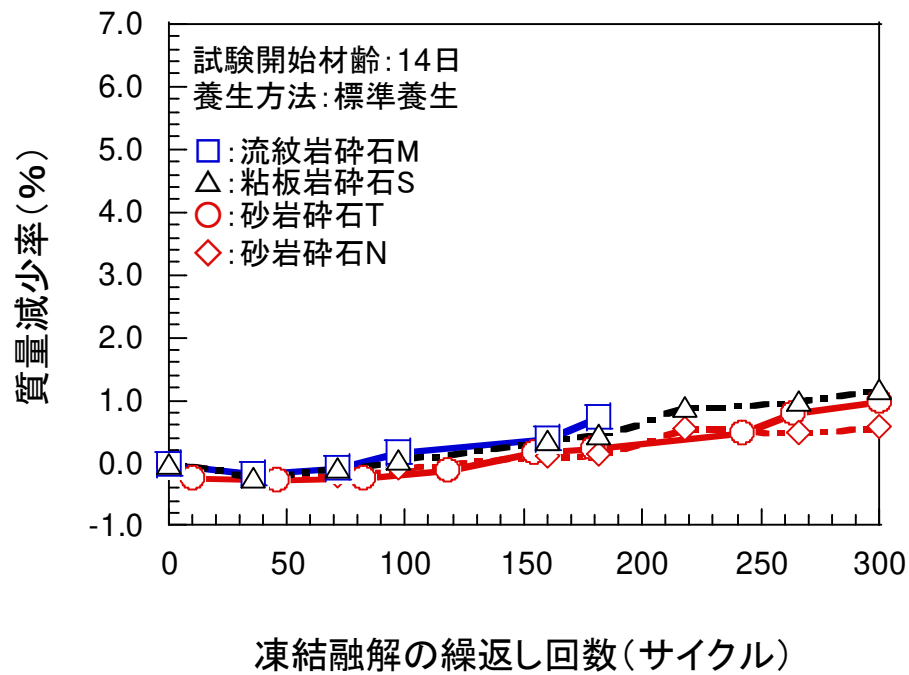


図 3.3-10 質量減少量の測定結果 (標準養生)

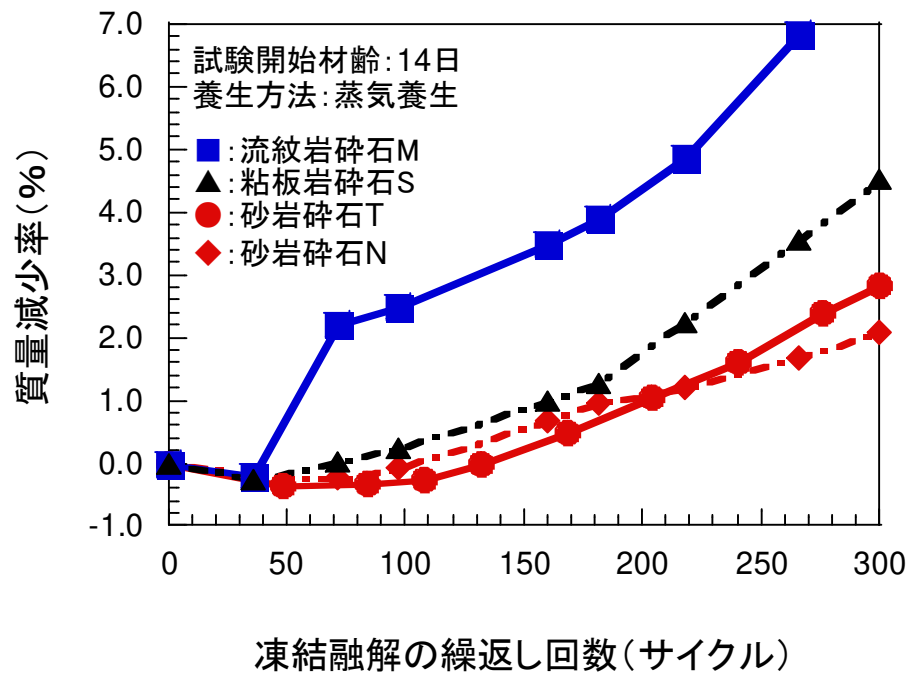


図 3.3-11 質量減少量の測定結果 (蒸気養生)

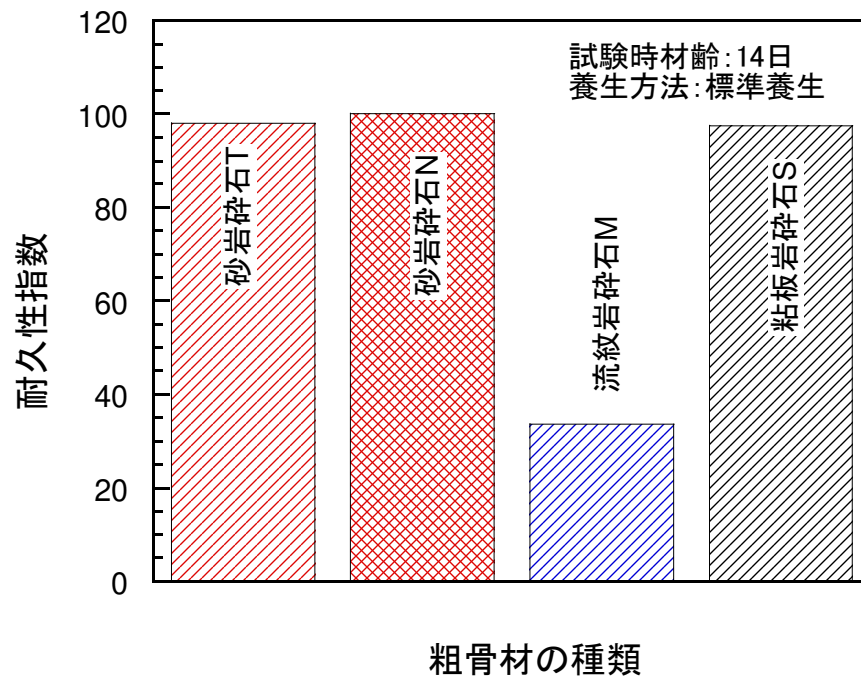


図 3.3-12 耐久性指数（標準養生）

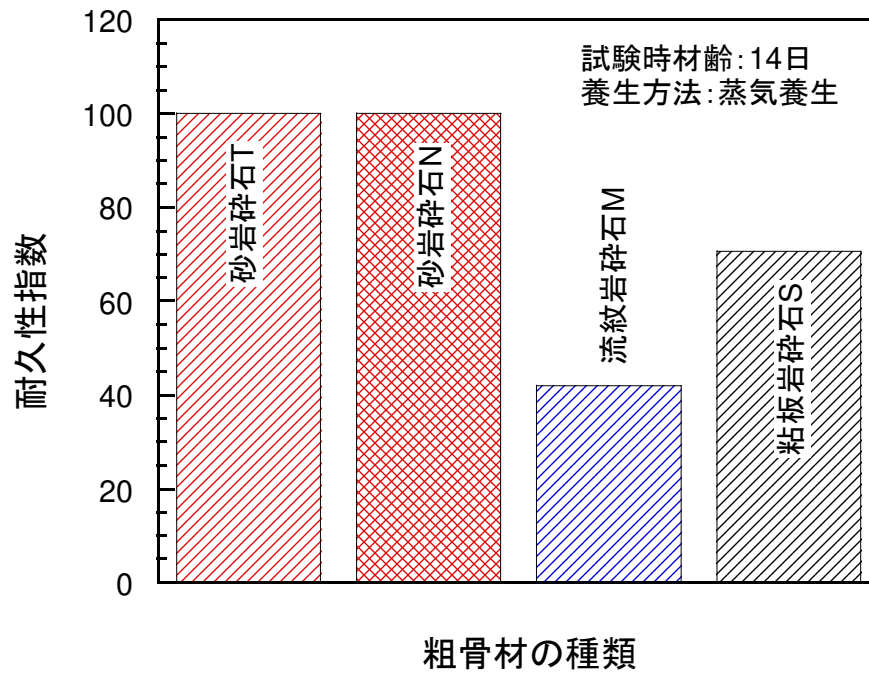


図 3.3-13 耐久性指数（蒸気養生）

写真 3.3-2 凍結融解試験終了時の供試体の様子

粗骨材 の種類	標準養生	蒸気養生
砂岩 碎石 T		
砂岩 碎石 N		
流紋岩 碎石 M	 ※182 サイクルで試験終了	 ※218 サイクルで試験終了
粘板岩 碎石 S		

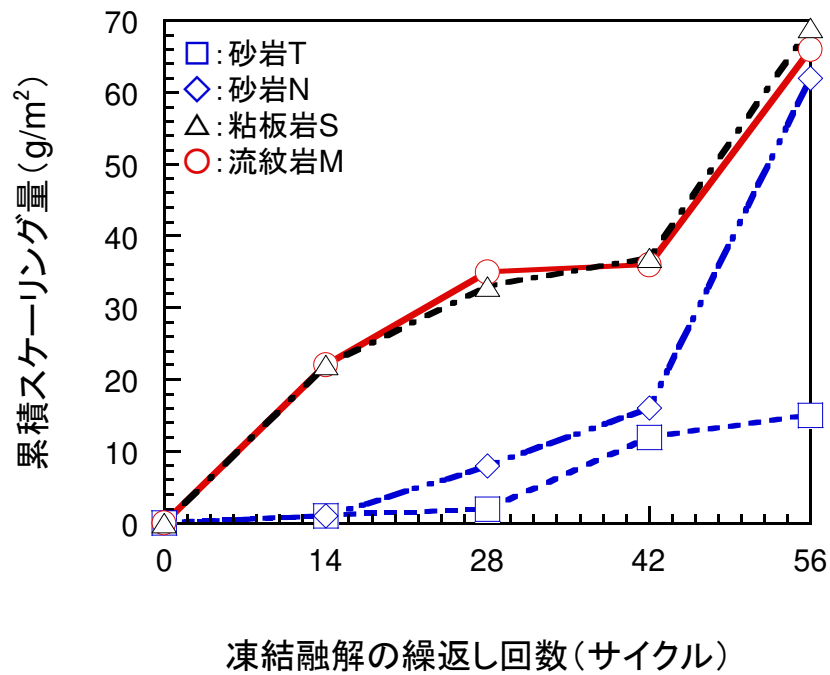


図 3.3-14 スケーリング試験の結果（標準養生）

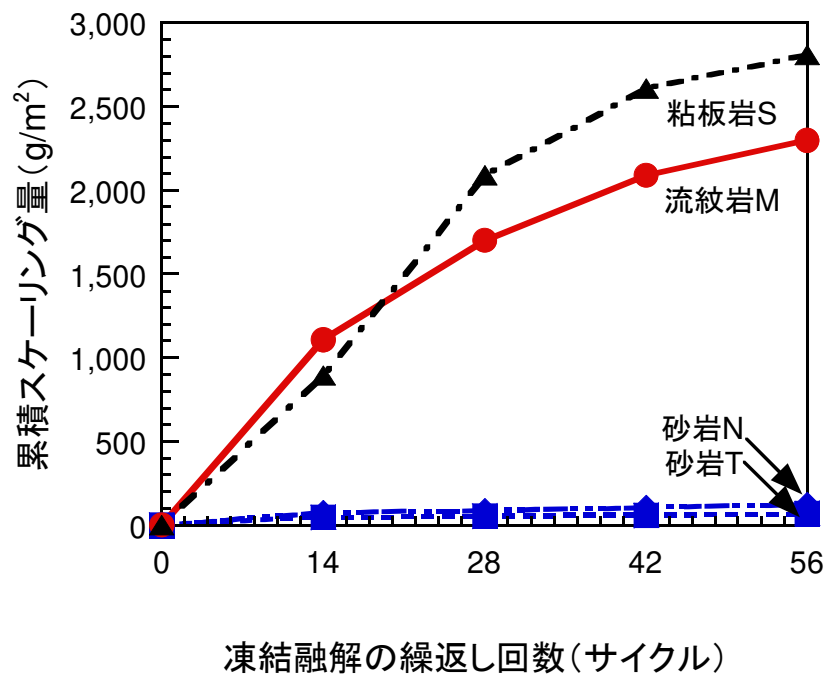
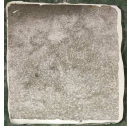
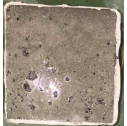
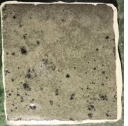
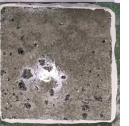
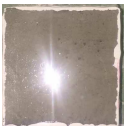
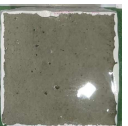
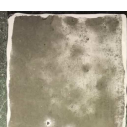
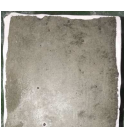
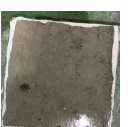
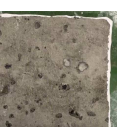
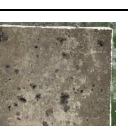
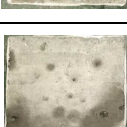
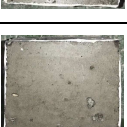
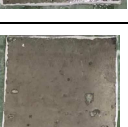
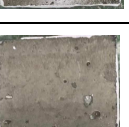
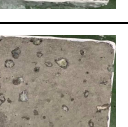
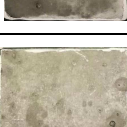
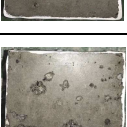
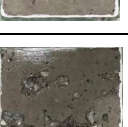
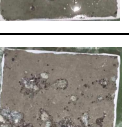
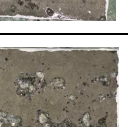
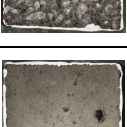
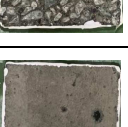
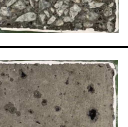
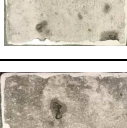
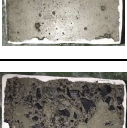
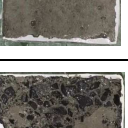
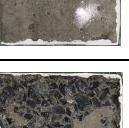
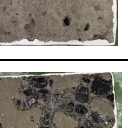


図 3.3-15 スケーリング試験の結果（蒸気養生）

写真 3.3-3 スケーリング試験終了時の試験面の様子

岩種	養生方法	0 サイクル	14 サイクル	28 サイクル	42 サイクル	56 サイクル
砂岩 T	標準養生					
	蒸気養生					
砂岩 N	標準養生					
	蒸気養生					
流紋岩 M	標準養生					
	蒸気養生					
粘板岩 S	標準養生					
	蒸気養生					

(2) 粗骨材に付着する微粒分量が耐凍害性に与える影響

a) 圧縮強度及び静弾性係数

図 3.3-16 から図 3.3-19 は、標準養生及び蒸気養生における圧縮強度試験の測定結果を示している。図 3.3-16 及び図 3.3-17 は、材齢 7 日における圧縮強度を、図 3.3-18 及び図 3.3-19 は、材齢 28 日における圧縮強度の結果を示している。これらの図より、いずれの材齢および養生方法においても、微粒分の有無による圧縮強度の差は小さく、明確な差は見られないが。微粒分量が最も多いのは砂岩砕石 N であるが、微粒分の種類および付着の仕方によっては、セメントペーストの水和反応を阻害する可能性があると考えた。以後、これらの結果を踏まえ、微粒分がコンクリートの圧縮強度の増進に与える影響に関して検討を行った。

図 3.3-20 から図 3.3-23 は、標準養生及び蒸気養生における 4 種類それぞれの粗骨材を用いたコンクリートの静弾性係数を示している。図 3.3-20 及び図 3.3-21 は、材齢 7 日におけるコンクリート、図 3.3-22 及び図 3.3-23 は、材齢 28 日におけるコンクリートの静弾性係数を示している。これらの図より、全ての粗骨材において、いずれの材齢および養生方法においても微粒分の有無によっても大きな差は見られない。よって、粗骨材の微粒分がコンクリートの静弾性係数に与える影響は小さい。

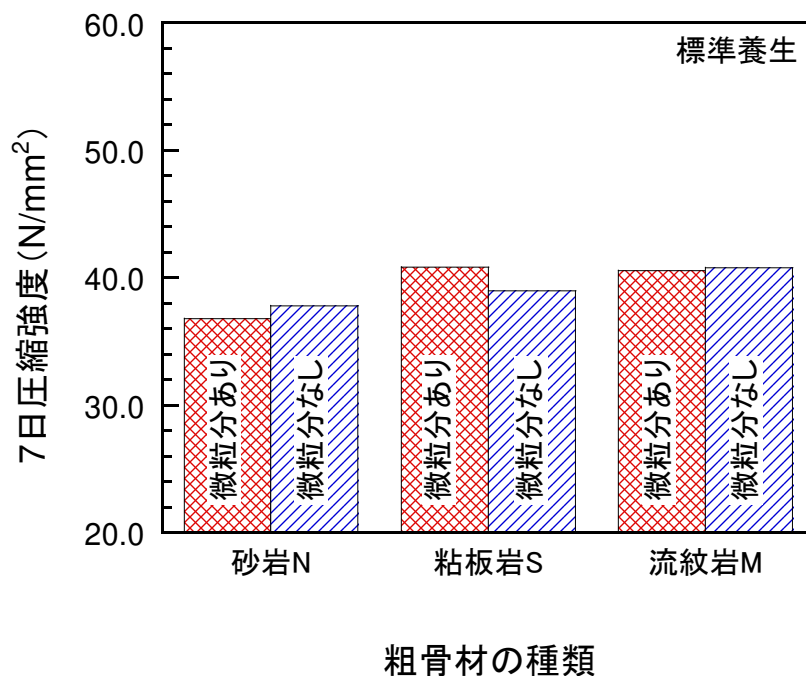


図 3.3-16 材齢 7 日における圧縮強度 (標準養生)

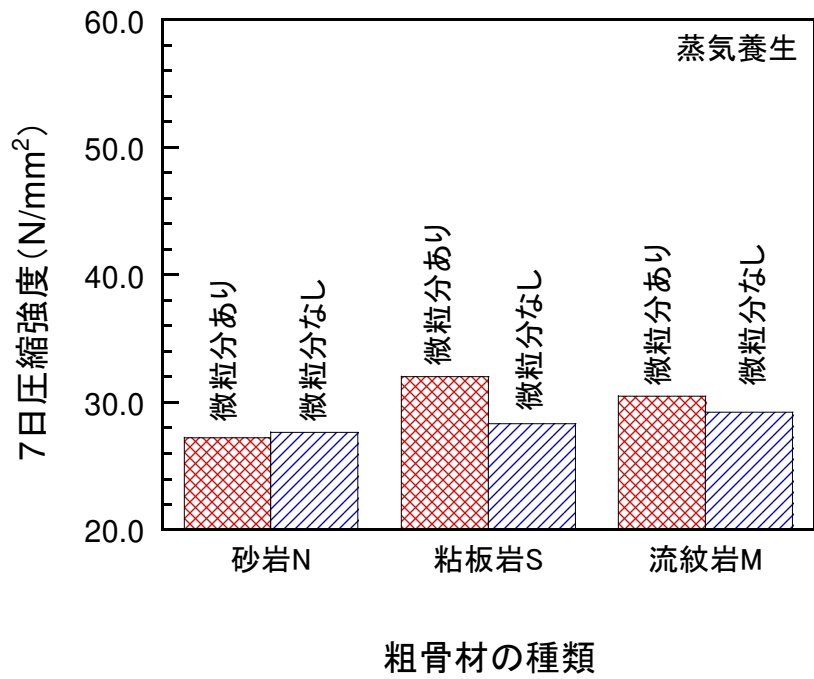


図 3.3-17 材齢 7 日における圧縮強度 (蒸気養生)

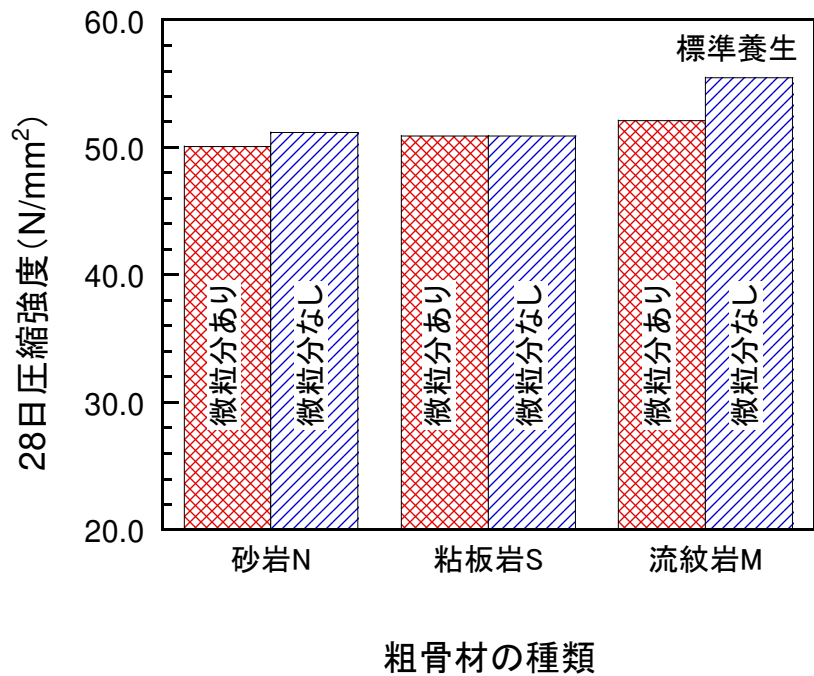


図 3.3-18 材齢 28 日における圧縮強度 (標準養生)

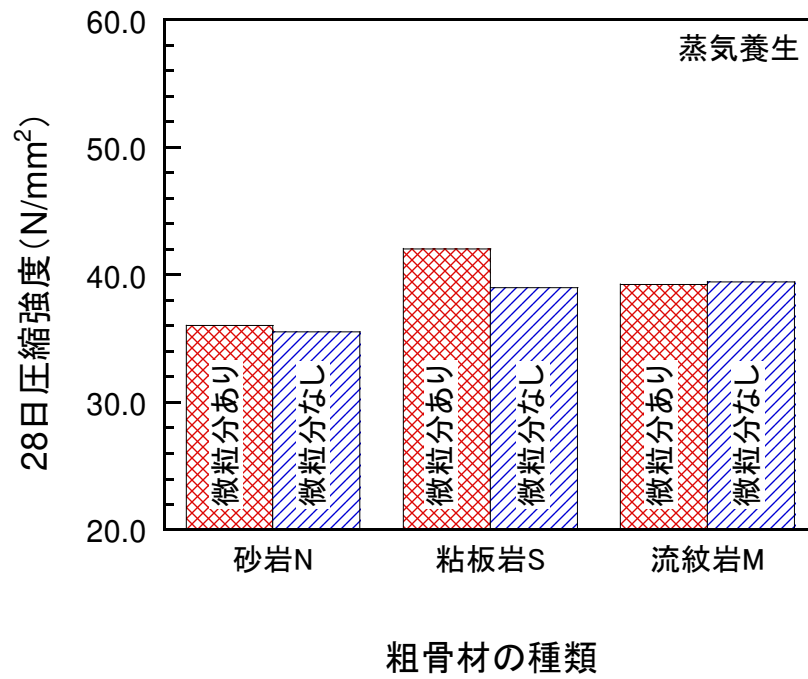


図 3.3-19 材齢 28 日における圧縮強度 (蒸気養生)

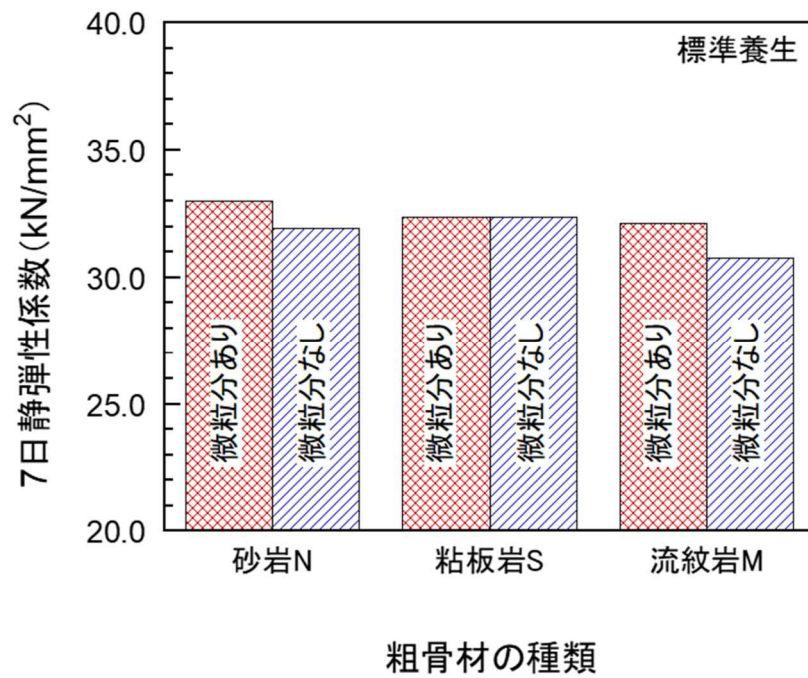


図 3.3-20 材齢 7 日における静弾性係数 (標準養生)

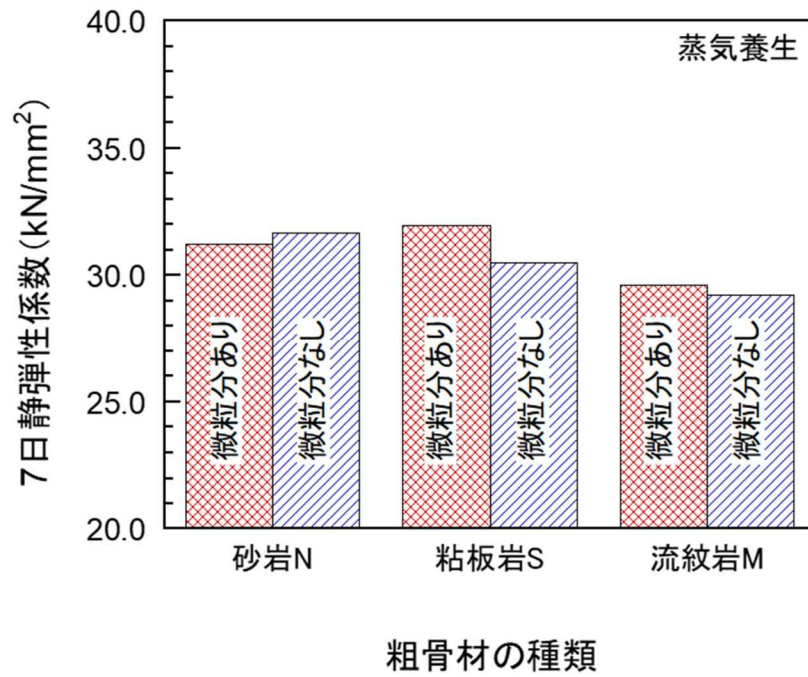


図 3.3-21 材齢 7 日における静弾性係数 (蒸気養生)

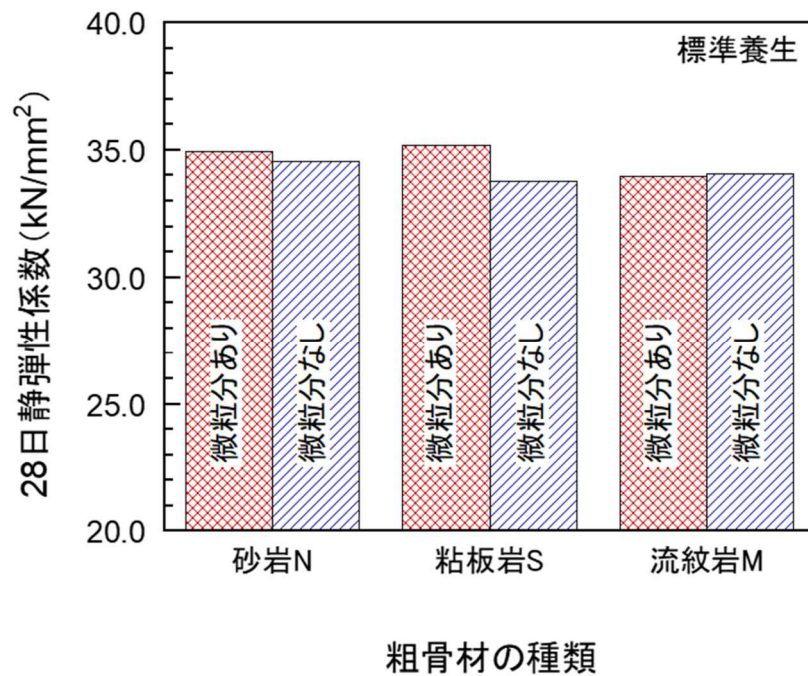


図 3.3-22 材齢 28 日における静弾性係数 (標準養生)

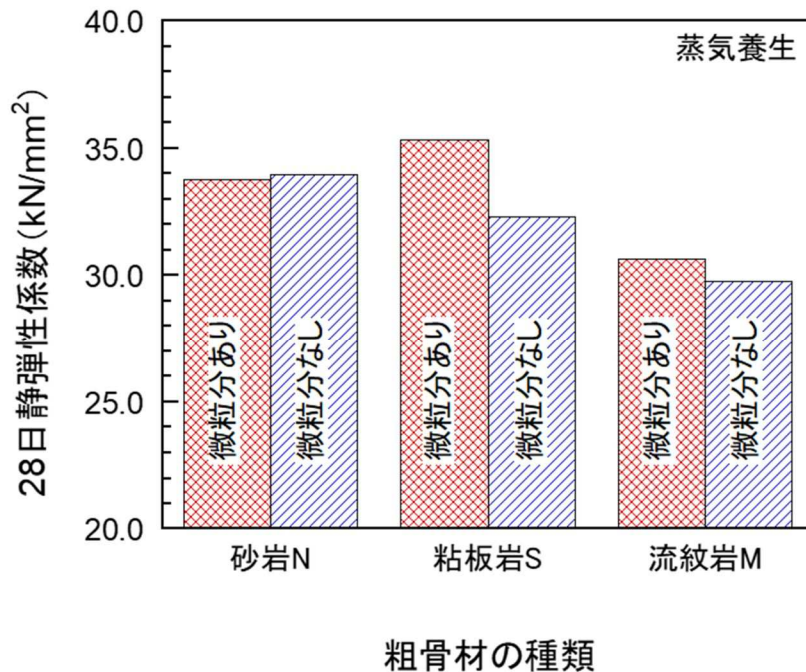


図 3.3-23 材齢 28 日における静弾性係数 (蒸気養生)

b) 耐凍害性

図 3.3-24 から図 3.3-29 は、凍結融解試験を行った測定結果を示している。また、写真 3.3-4 に凍結融解試験終了後の供試体の様子を示す^{*1}。図 3.3-24 及び図 3.3-25 は、砂岩碎石 N を用いたコンクリート、図 3.3-26 及び図 3.3-27 は、流紋岩碎石 M を用いたコンクリート、図 3.3-28 及び図 3.3-29 は、粘板岩碎石 S を用いたコンクリートの相対動弾性係数及び質量減少率の測定結果を示している。また、図中の●は、洗浄した粗骨材を用い標準養生を行ったコンクリート、○は、未洗浄の粗骨材を用い標準養生を行ったコンクリート、■は、洗浄した粗骨材を用い蒸気養生を行ったコンクリート、□は未洗浄の骨材を用い蒸気養生を行ったコンクリートで試験を行った際の結果を示している。図 3.3-24 及び図 3.3-25 より、砂岩碎石 N を用いた場合には、いずれの養生方法および粗骨材の微粒分付着の状態によらず相対動弾性係数の低下は見られない。質量減少率に関しては、蒸気養生を行ったものの方がわずかに大きい、いずれのコンクリートにおいても質量減少率は小さい。また、質量減少率に関して、微粒分の付着状況に着目すると、同じ養生方法においては、洗浄した粗骨材の方がわずかに大きくなっている。これらの結果より、砂岩碎石 N を用いたコンクリートにおいて、微粒分の付着による相対動弾性係数への影響は小さいが、質量減少率に関しては、養生方

法によらずわずかに減少する傾向があることが分かる。

図 3.3-26 及び図 3.3-27 より，流紋岩碎石 M を用いた場合には，いずれの養生方法および粗骨材の微粒分付着の状態においても相対動弾性係数の低下が見られる。4.3.1 で述べた通り，流紋岩碎石 M は吸水率が高く，骨材の凍結融解試験における質量減少率が大きいいため，骨材自身の凍結融解抵抗性が他の粗骨材に比べ低く，それを用いたコンクリートの耐凍害性も低くなるためであると考えられる。微粒分の付着状態に着目すると，微粒分が付着していない洗浄した骨材を用いたコンクリートの方が，同一養生方法において早期に劣化が進行していることが分かる。質量減少率に関しては，蒸気養生を行ったものの方が大きく，微粒分の付着状況に着目すると，同じ養生方法においては，洗浄した粗骨材の方が大きくなっている。これらの結果より，流紋岩碎石 M を用いたコンクリートにおいて，骨材に付着する微粒分は，相対動弾性係数の低下を抑制し，質量減少率に関しては，養生方法によらず減少する傾向があることが分かる。

図 3.3-28 及び図 3.3-29 より，粘板岩碎石 S を用いた場合には，蒸気養生を行った場合において，相対動弾性係数の低下が見られる。微粒分の付着による影響は小さく，同一養生方法で比較すると，ほぼ同等の変動をする。質量減少率に関しても同様で，養生方法による影響を大きく受け，微粒分の付着状態の影響は小さい。これらの結果より，骨材種類によるが，微粒分は凍結融解抵抗性を向上させる傾向があることが分かる。

図 3.3-30 から図 3.3-32 は，スケーリング試験を行った測定結果を示している。また，写真 3.3-5*2 に，スケーリング試験終了時の試験面の様子を示す。図 3.3-30 は，砂岩碎石 N を用いたコンクリート，図 3.3-31 は，流紋岩碎石 M を用いたコンクリート，図 3.3-32 は，粘板岩碎石 S を用いたコンクリートの測定結果を示している。また，図中の●は，洗浄した粗骨材を用い標準養生を行ったコンクリート，○は，未洗浄の粗骨材を用い標準養生を行ったコンクリート，■は，洗浄した粗骨材を用い蒸気養生を行ったコンクリート，□は未洗浄の骨材を用い蒸気養生を行ったコンクリートで試験を行った際の結果を示している。これらの図より，養生方法に着目すると，粗骨材の種類によらず蒸気養生を行ったコンクリートのスケーリング量が大きくなっていることが分かる。3.2 で述べたように，高温で蒸気養生を行った場合，セメントペーストの細孔が粗大化したこと⁷⁾や，蒸気養生でコンクリート温度が下がる際にコンクリート表面に生じる引張応力により，微細ひび割れが生じたため，スケーリング量が増加し，粗骨材が露出した状態になるため，粗骨材の違いによる影響が顕著に表れたと推測する。微粒分の付着状態に着目すると，流紋岩碎石 M および粘板岩碎石 S においては，

未洗浄の粗骨材を用いたコンクリート方が，洗浄した粗骨材を用いたコンクリートに比べ，スケーリング量が減少していることが分かる。また，その傾向は，凍結融解試験と同様に，粘板岩碎石 S では小さく，流紋岩碎石 M で大きい。砂岩碎石 N を用いた場合には，未洗浄の粗骨材を用い，蒸気養生を行ったコンクリートにおいてのみスケーリング量が大きくなっている。また，これらの傾向は，写真 3.3-5 から明確に分かる。

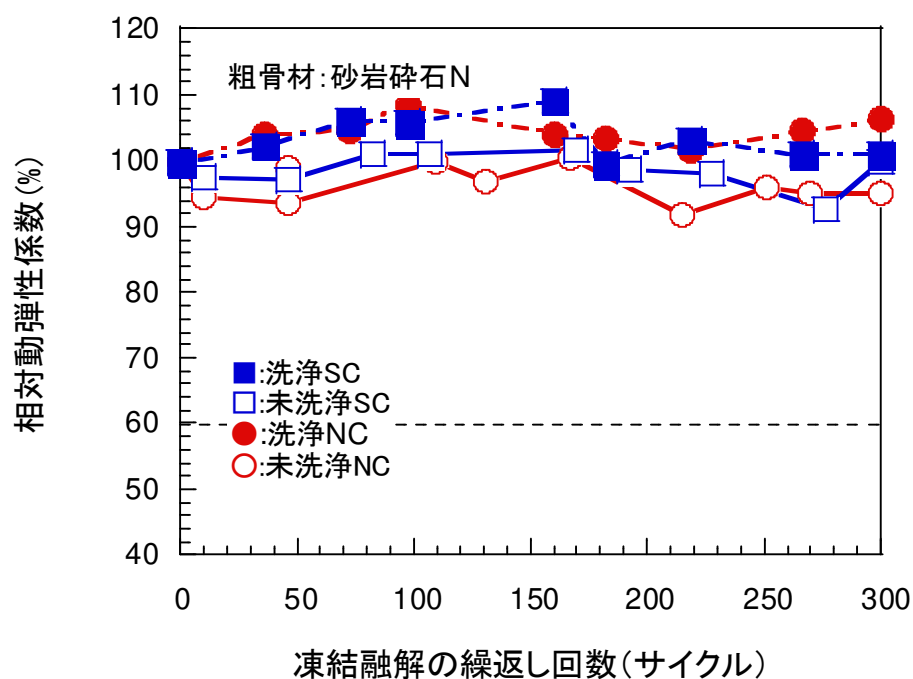


図 3.3-24 相対動弾性係数 (粗骨材：砂岩碎石 N)

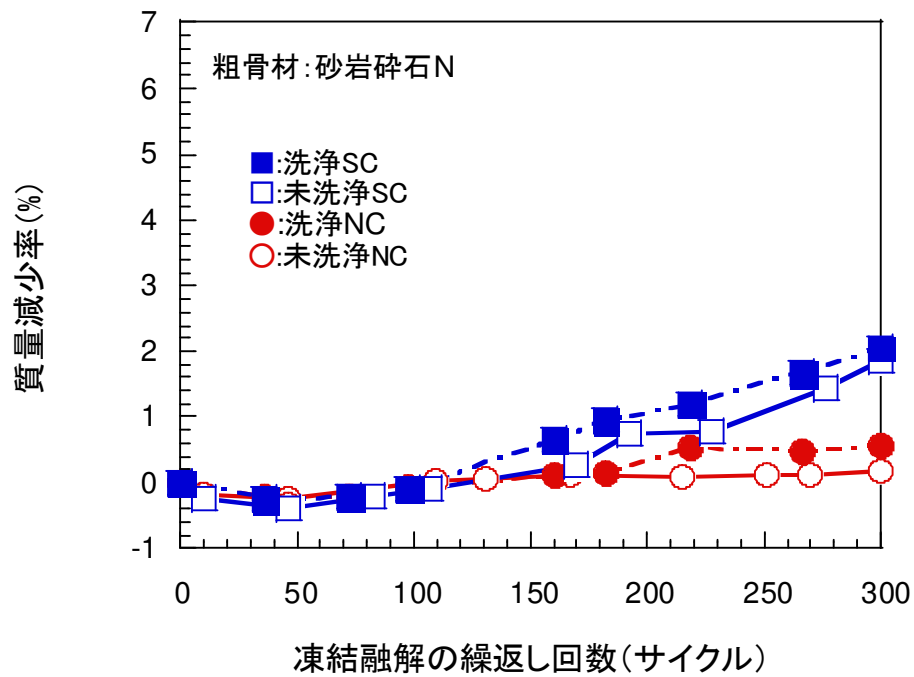


図 3.3-25 質量減少率 (粗骨材: 砂岩碎石 N)

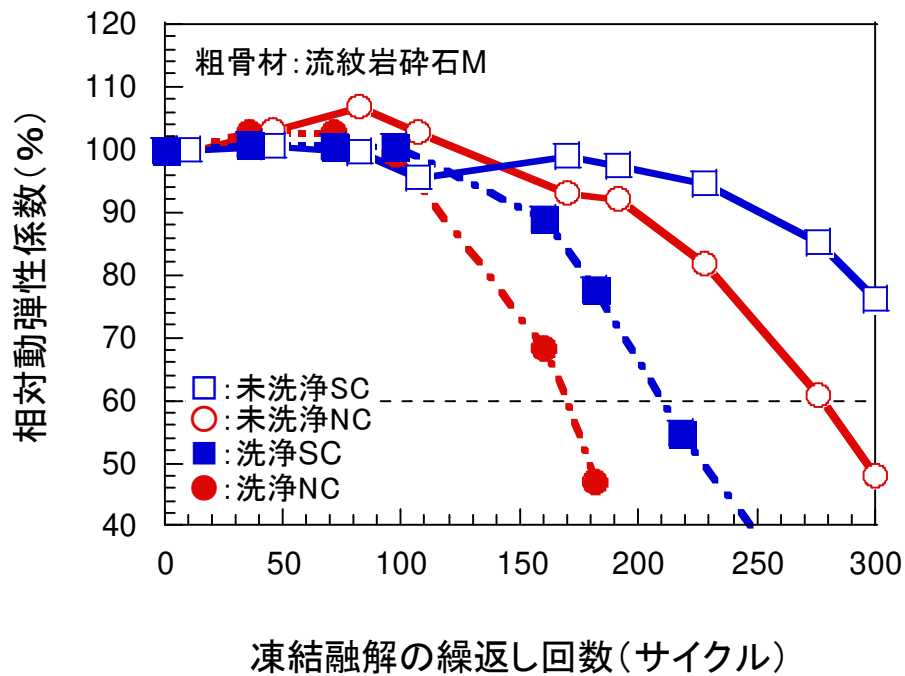


図 3.3-26 相対動弾性係数 (粗骨材: 流紋岩碎石 M)

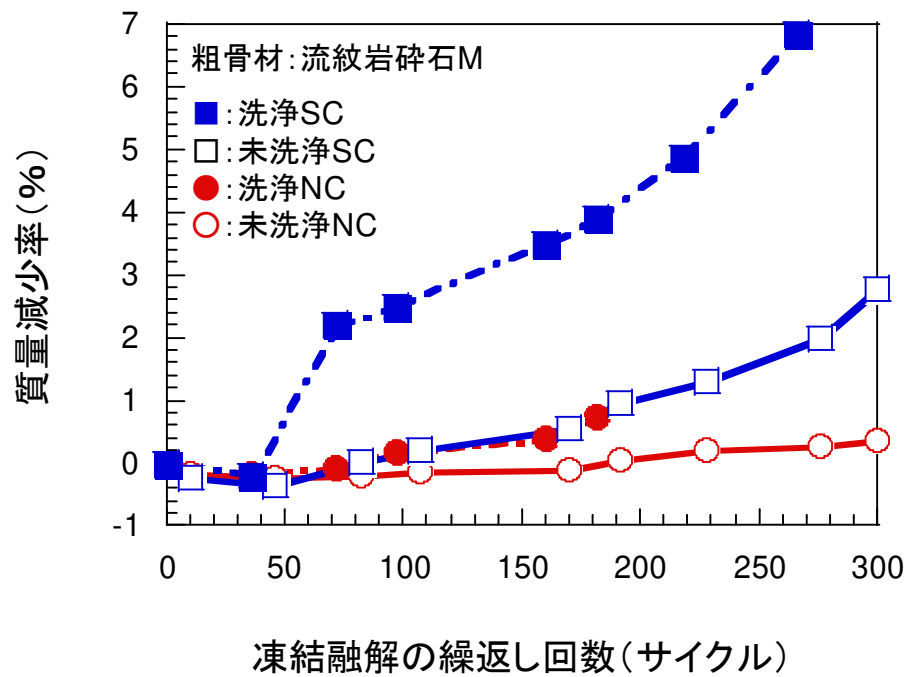


図 3.3-27 質量減少率 (粗骨材：流紋岩碎石 M)

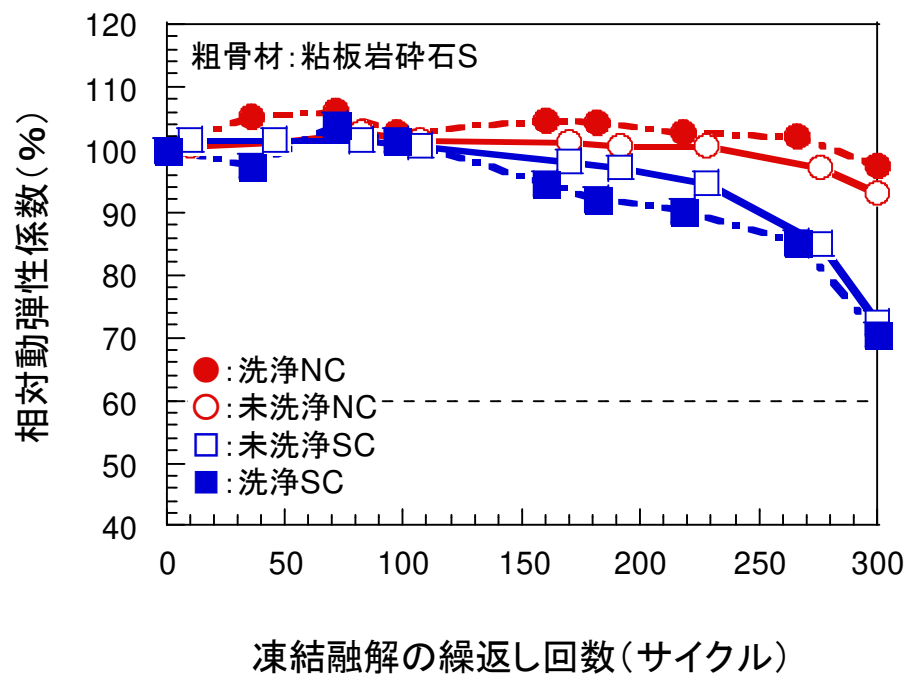


図 3.3-28 相対動弾性係数(粗骨材：粘板岩碎石 S)

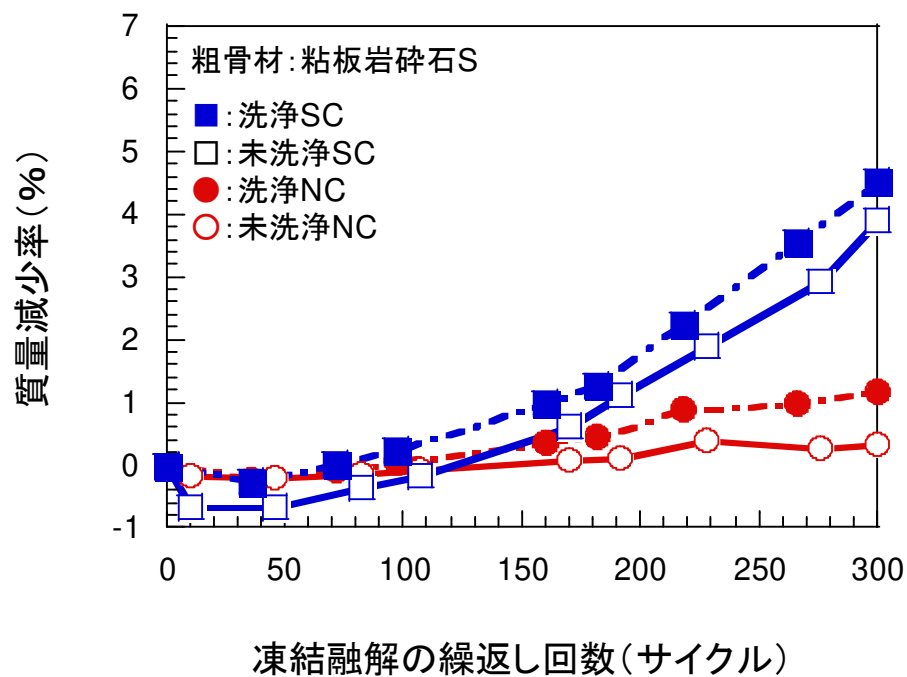


図 3.3-29 質量減少率(粗骨材：粘板岩碎石 S)

写真 3.3-4 凍結融解試験後の供試体の様子(未洗浄骨材)

粗骨材の種類	標準養生	蒸気養生
砂岩 碎石 T		
砂岩 碎石 N		
流紋岩 碎石 M		

*1 洗浄した骨材を用いたコンクリートの試験後の様子は P.98 写真 3.3-2 と同じである。

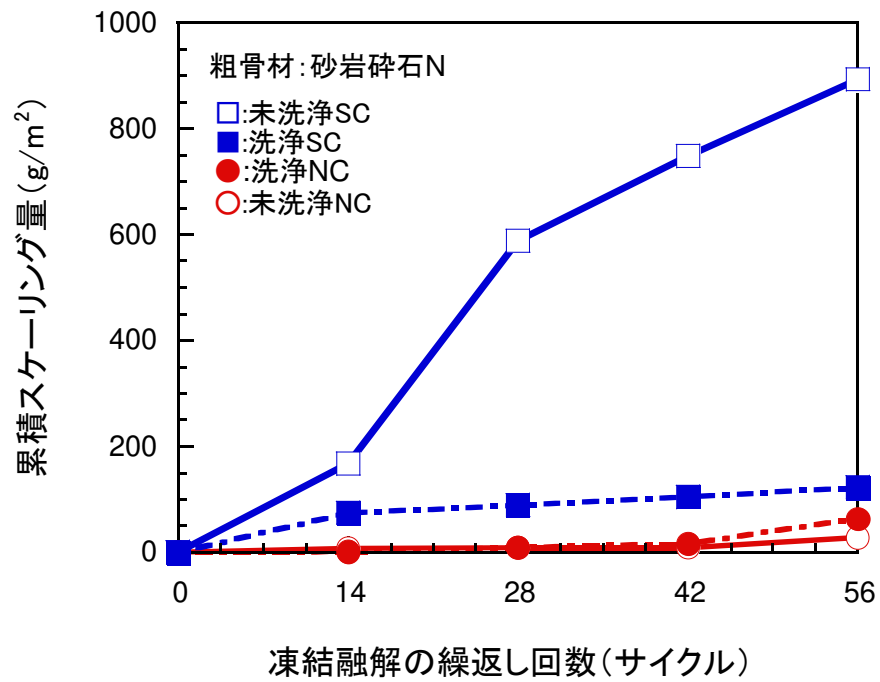


図 3.3-30 スケーリング試験 (粗骨材: 砂岩碎石 N)

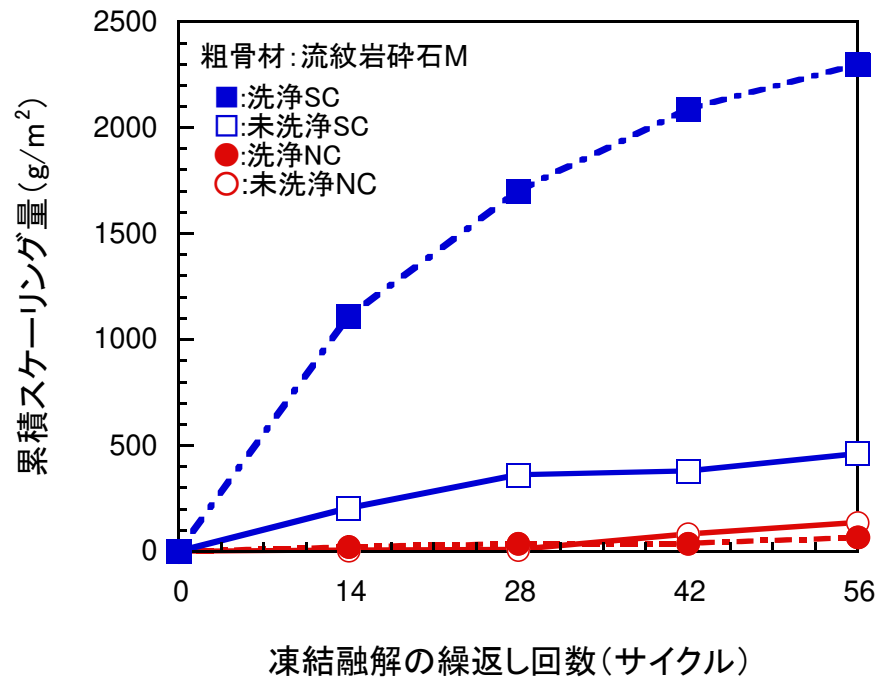


図 3.3-31 スケーリング試験 (粗骨材: 流紋岩碎石 M)

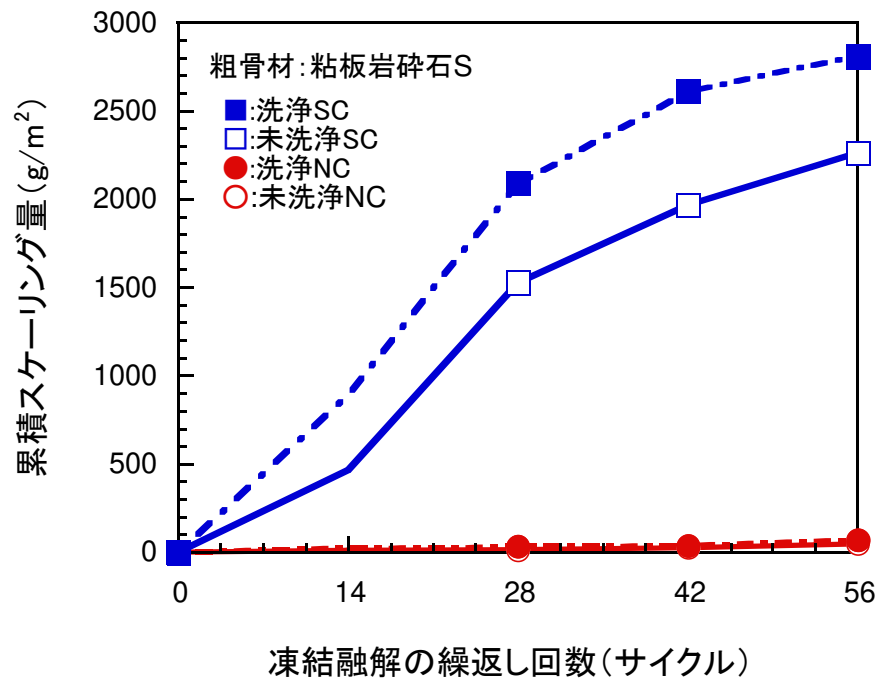
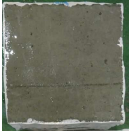
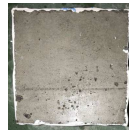
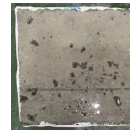
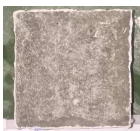
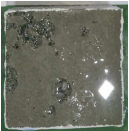
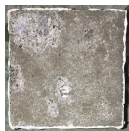
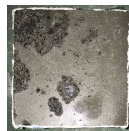
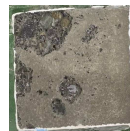
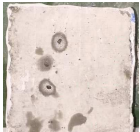
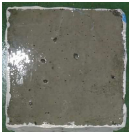
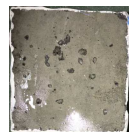
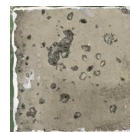
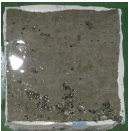
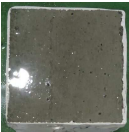
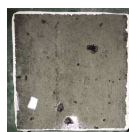
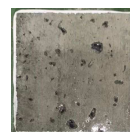
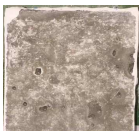
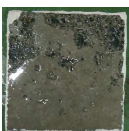
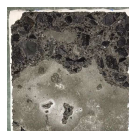
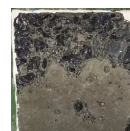


図 3.3-32 スケーリング試験 (粗骨材：粘板岩碎石 S)

写真 3.3-5 スケーリング試験終了時の試験面の様子(未洗浄骨材)

岩種	養生方法	0 サイクル	14 サイクル	28 サイクル	42 サイクル	56 サイクル
砂岩 N	標準養生					
	蒸気養生					
流紋岩 M	標準養生					
	蒸気養生					
粘板岩 S	標準養生					
	蒸気養生					

*2 洗浄した骨材を用いたコンクリートの試験後の様子は P.100 写真 3.3-3 と同じである。

3.4 本章のまとめ

本章では、OPC、HPC、LPC および BB の 4 種類のセメントを使用し、同一水セメント比のコンクリートについて、蒸気養生時の最高温度が、コンクリートの性能に与える影響について検討を行った。また、脱型後の水中養生の有無や水中養生期間が、コンクリートの性能に与える影響についても検討を行った。更に、異なる 4 種の粗骨材を用いてコンクリートを製造し、圧縮強度試験、静弾性係数試験および凍結融解試験を行い、粗骨材の違いがコンクリートの耐凍害性に与える影響に関して検討を行った。つぎに本章によって得られた知見を示す。

- (1) OPC 及び HPC を用いた場合、蒸気養生を行わずに水中養生を行う場合には、水中養生期間が長くなるほど圧縮強度は増進する。これに対して、蒸気養生を行うと、蒸気養生後に水中養生を行っても、水中養生による効果は得られにくい。また、LPC を用いる場合、蒸気養生温度が高いほど圧縮強度比も高くなることが分かる。BB を用いる場合、いずれの温度で養生した場合にも、脱型後に水中養生を行うことで、圧縮強度が増進することが分かる。ただし、高い温度で蒸気養生を行ったものは、水中養生を行うことによる圧縮強度の増進の効果は標準養生のものに比べ小さいことが分かる。
- (2) セメントに OPC または HPC を用いたコンクリートを、高温の蒸気養生を行った場合や、十分な水中養生を行わなかった場合には、エントレインドエアを連行し、十分な強度を発現しても、凍結融解抵抗性が低下する場合がある。LPC を用いたコンクリートは 20℃での養生温度と同様に、脱型後の養生方法に依らず、凍結融解抵抗性が低下することが分かる。これに対し、セメントに BB を用いたコンクリートは、養生条件に寄らず、凍結融解作用による内部劣化に対して高い抵抗性を示す。
- (3) コンクリート表面のスケーリングに対しては、養生方法の影響を受けやすく、蒸気養生を行わず気中養生のみを行った場合や、高温の蒸気養生を行った場合には、スケーリング量が多くなる。この傾向は、BB を用いた場合に顕著に表れる。
- (4) コンクリートの乾燥収縮に関しては、養生温度が大きくなるほど、乾燥収縮ひずみは小さくなる傾向がある。BB を用いた場合、養生温度の影響は、他のセメントに比べると小さいが、脱型後の水中養生を行わない場合には、乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向にある。
- (5) コンクリートの水分浸透に対しては、高温の蒸気で養生し、脱型後、気中で養生することで水分浸透速度係数を抑えることができる。脱型後水中養生を行った場合、セメントの種類によって蒸気養生温度による影響はそれぞれ異なることが分

かる。

- (6) 塩化物イオン量の浸透に関しては、蒸気養生温度が低くなるほど、塩化物イオン量の浸透を抑えることができる。また、蒸気養生温度の最高温度を高温になるほど、脱型後の養生方法の効果の差が大きくなり、特にOPC、HPC及びLPCにおいて顕著に表れる。
- (7) 粗骨材自身の耐凍害性を評価する方法として、JIS A 1122 に規定される硫酸ナトリウムによる安定性試験が用いられるが、実際に、粗骨材に質量パーセント濃度5%の塩化ナトリウム水溶液を用いた凍結融解試験を行ったところ、安定性試験における損失質量分率が小さくても、凍結融解試験による質量減少率が大きくなる粗骨材がある。
- (8) JIS A 1122 に規定される硫酸ナトリウムによる安定性試験に合格した粗骨材で製造したコンクリートであっても、所定の凍結融解抵抗性が得られない場合がある。
- (9) 骨材の凍結融解試験での質量減少率が大きい粗骨材を用いて製造したコンクリートは、蒸気養生を行った場合にスケーリング量が大きくなる。
- (10) 粗骨材に付着する微粒分は、コンクリートの耐凍害性を向上させる傾向がある。
しかし、微粒分の種類等によりその影響は異なり、さらに検討を行う必要がある。
- (11) 粗骨材の種類および微粒分による圧縮強度および静弾性係数への影響は小さい。

今回の試験結果において、今後の課題としては、水和反応の進行状況についての検討が必要であると考え。また、細骨材の種類が耐凍害性に与える影響についても検討が必要であると考え。さらに、蒸気養生温度がコンクリートの性能に与える影響は、使用するセメントの種類や養生方法によって種々の試験結果の傾向は大きく変わってくるのが分かったため、実際にプレキャスト工場で蒸気養生を行う際は、養生条件を整え、厳密な温度設定を行わなければ、製品の品質の低下やバラツキにつながる可能性がある。よりよいコンクリート製品を製造するために適切な養生温度や時間の管理が必要であると考え。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物における品質を確保した生産性向上に関する提案，コンクリートライブラリー，No. 148，2016. 12
- 2) 住吉宏，窪山潔，今橋太一，塩谷勝：コンクリートの組織や物性におよぼす蒸気養生の影響，セメント技術年報，Vol. 35，pp. 290-293，1981. 12
- 3) 丸山晃平，宇治公隆，上野敦，大野健太郎：蒸気養生条件が相違するコンクリート製品の強度特性及び細孔構造に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33，No. 2，pp. 571-576，2011. 7
- 4) 鈴木翔太，田澤栄一，Jariyathitipong Paweena，笠井哲郎：ダブルミキシングで製造したプレキャストコンクリートの耐凍害性と細孔構造に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 36，No. 1，pp. 355-360，2014. 7
- 5) 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及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. 7
- 6) 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
- 7) 大石幸紀，藤井隆史，綾野克紀：高温で養生したコンクリートの乾燥収縮ひずみと細孔径分布に関する研究，セメントコンクリート論文集，Vol. 71，pp. 288-294，2018. 3
- 8) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧（第6刷），技報堂出版，1987.7
- 9) 小林繁敏 等：コンクリート用骨材に関する調査報告(1)—物理的品質不良骨材に関する試験調査，土木研究所資料 第 1838 号，1982.6

第4章 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのプレキャストコンクリート製品への適用

4.1 概 説

高炉スラグ細骨材（以降，BFS を記す）を用いたコンクリートは，塩化物イオンの浸透性が抑制されること，耐硫酸性が向上すること，AE 剤を用いることなく凍結融解抵抗性が得られること等，コンクリートの耐久性を向上させることが可能であることが示されている。

しかし，既往の研究では，試験室で製造する BFS コンクリートは，通常，打ち込み後，1 日間型枠内で養生を行い，脱型後は，十分な期間，20℃の水中で養生を行うことが可能である。それに対し，プレキャストコンクリート製品の製造工場などで実機によって製造される BFS コンクリートは，通常，生産効率を向上させる目的で蒸気養生が行われ，脱型後の湿潤養生期間は，試験室で製造したものに比べ短い。配合が同じであっても蒸気養生を行い，湿潤養生期間の短い条件で製造されるコンクリートの品質は，試験室で得られたものと同等であるとは限らない¹⁾。

本章では，試験室で BFS コンクリートを作製し，品質の確認を行った。また実機で BFS コンクリートを用いたプレキャスト製品を作製し，品質の確認を行った。比較として普通細砂コンクリートも作製した。

4.2 試験室で作製したコンクリートの品質

4.2.1 使用材料及び配合

本章に用いたコンクリートの配合を表 4.2-1 に示す。結合材には，高炉セメント B 種（密度：3.04 g/cm³，ブレン値：3,690 cm²/g）を，細骨材には，高炉スラグ細骨材（BFS5，表乾密度：2.76 g/cm³，吸水率：0.62%，粗粒率：2.55，粒度調整した BFS 試料による質量残存率 R7：47.9%，粒度調整前の BFS 試料による質量残存率 R7：11.9%）を，粗骨材には，流紋岩碎石（最大寸法：20 mm，表乾密度：2.57 g/cm³，吸水率：1.56%，粗粒率：6.81）を用いた。化学混和剤には，ポリカルボン酸系化合物界面活性剤系特殊増粘剤の複合体を主成分とする高性能 AE 減水剤 I 種および AE 剤を用いた。

表 4.2-1 実験で用いた BFS コンクリートの配合

水セメント 比 W/C (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤(Cx%)	
				水 W	セメント C	細骨材 BFS	粗骨材 G	高性能 AE 減 水剤	AE 剤
35	15	4.5	45	160	457	795	913	0.75	0.001

4.2.2 実験結果

図 4.2-1 及び図 4.2-2 は、試験室で作製した BFS コンクリートの練混ぜ直後のスランブ及び空気量の測定結果を示したものである。スランブの設計値が 15cm であるのに対し、平均で 14.2cm であった。空気量は、設計値が 4.5%であるのに対し、4.8%以上の空気量が確保されている。

図 4.2-3 は、試験室で作製し標準養生を行った BFS コンクリートの材齢 28 日における圧縮強度を示したものである。初期のロットでややばらつきが大きくなっているが、65N/mm² 以上の強度を発現している。図 4.2-4 は、試験室で作製し標準養生を行った BFS コンクリートの材齢 28 日におけるヤング係数を示したものである。既往の研究に示す他の工場の材料で製造された BFS コンクリートと比べて、同程度のヤング係数である。

図 4.2-5 は、試験室で作製し標準養生を材齢 7 日まで行った後に乾燥を開始した BFS コンクリートの乾燥期間 182 日における乾燥収縮ひずみを示したものである。標準仕様の目標値が 400×10^{-6} であるのに対し、12 ロットの平均値は、 363×10^{-6} と小さい値であった。図 4.2-6 は、試験室で作製した BFS コンクリートの中性化速度係数を示したものである。いずれのロットのコンクリートも、中性化期間 91 日まで、中性化は生じていないことがわかる。

図 4.2-7 は、試験室で作製した BFS コンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数を示したものである。標準仕様の目標値が 0.2cm²/年であるのに対して、12 ロットの平均値は、0.27cm²/年と若干大きい値で、ばらつきもあった。

図 4.2-8 は、試験室で作製した BFS コンクリートの耐久性指数を示したものである。標準仕様の目標値は 95 であるが、試験室で作製した BFS コンクリートの耐久性指数は、48.3 と低い値である。また、図 4.2-9 は、試験室で作製した BFS コンクリートの 56 サイクル後のスケーリング量を示したものである。標準仕様の目標値は、100g/m² であるのに対し、平均値で 739g/m² と大きい。

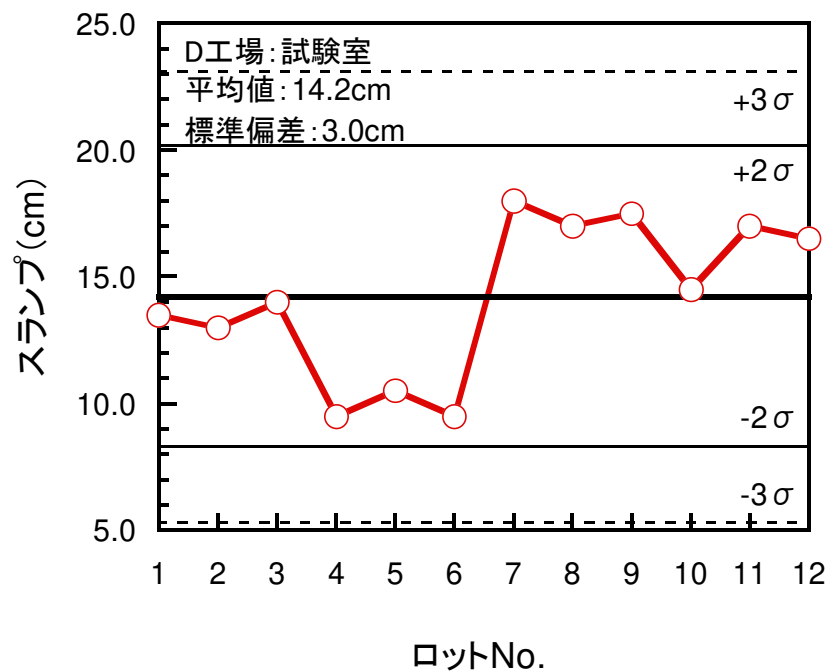


図 4.2-1 スランプの試験結果

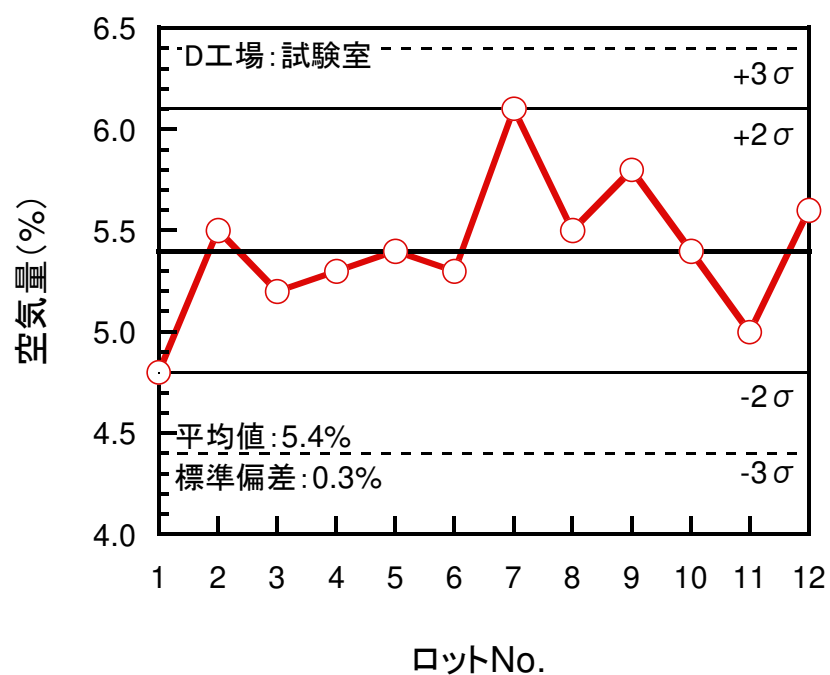


図 4.2-2 空気量の試験結果

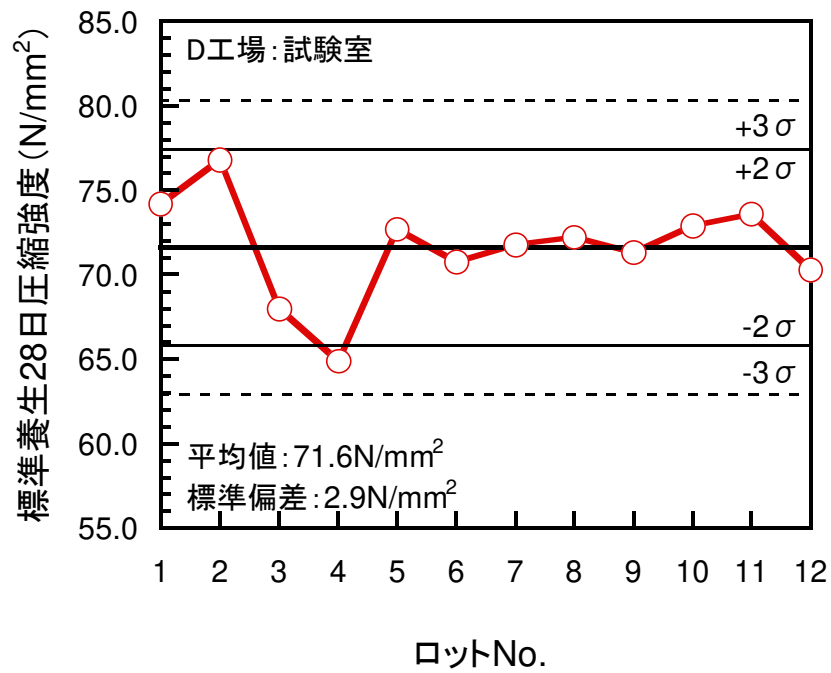


図 4.2-3 材齢 28 日の圧縮強度

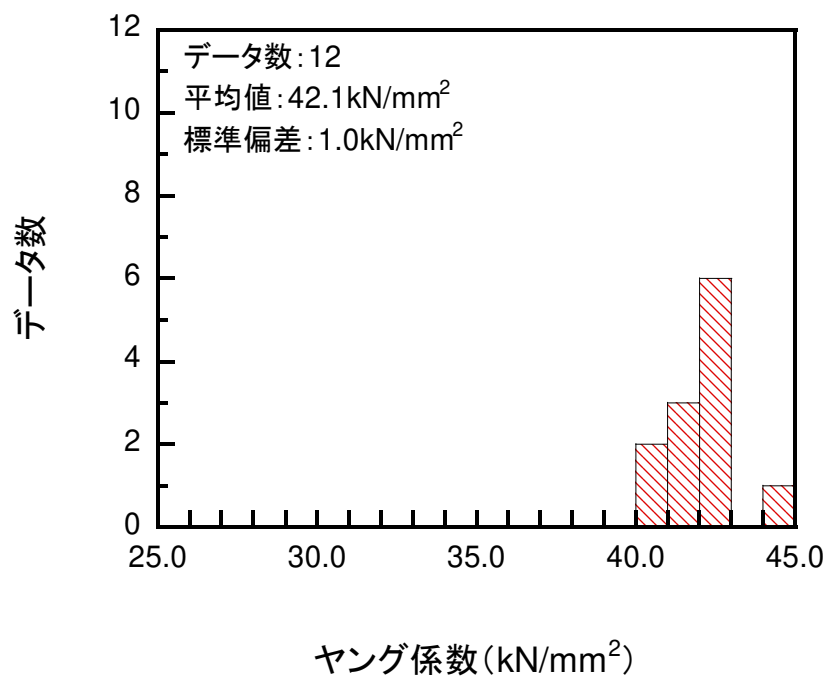
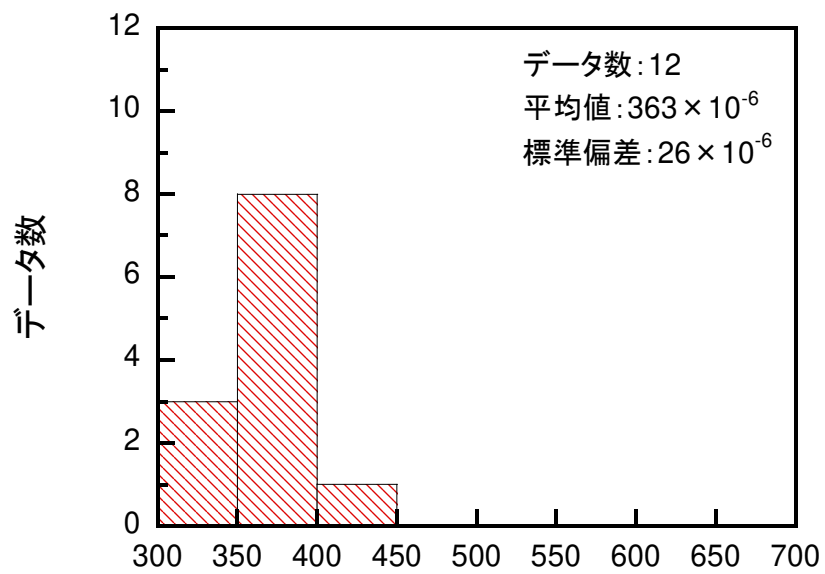
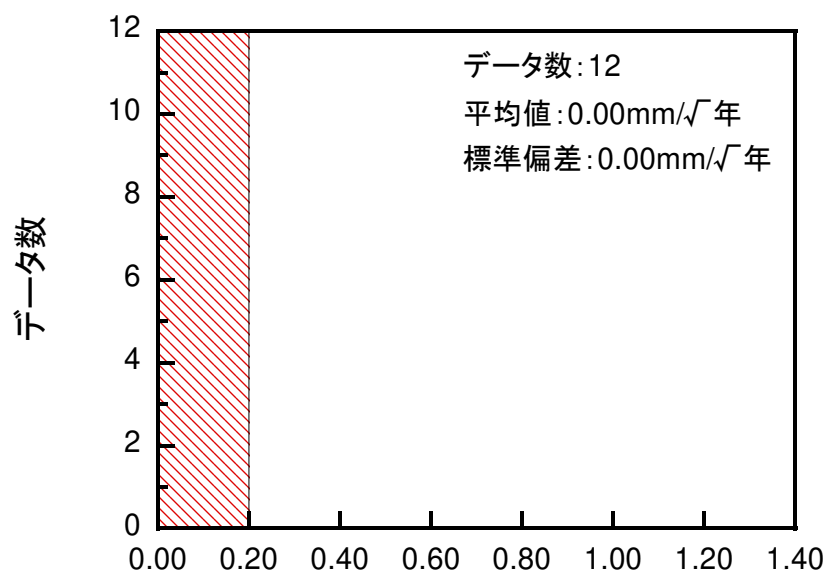


図 4.2-4 材齢 28 日のヤング係数



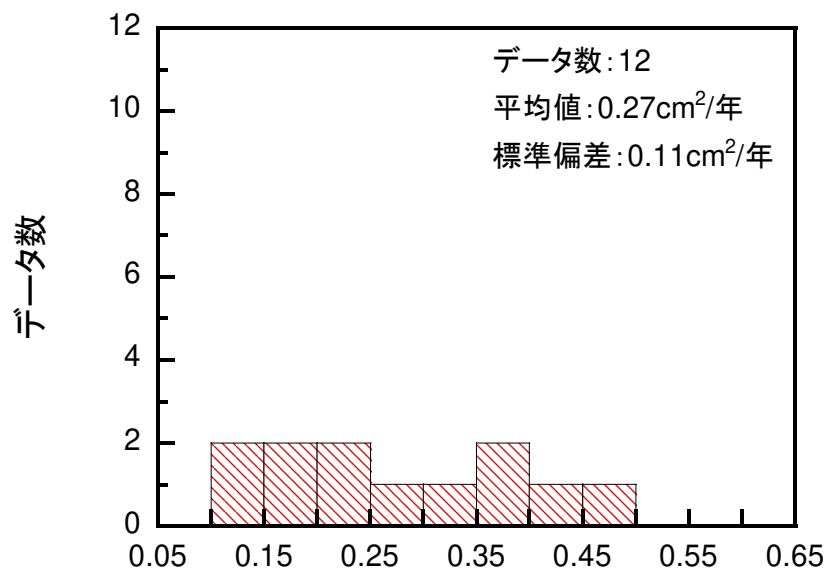
乾燥期間182日における乾燥収縮ひずみ(× 10⁻⁶)

図 4.2-5 乾燥収縮ひずみ



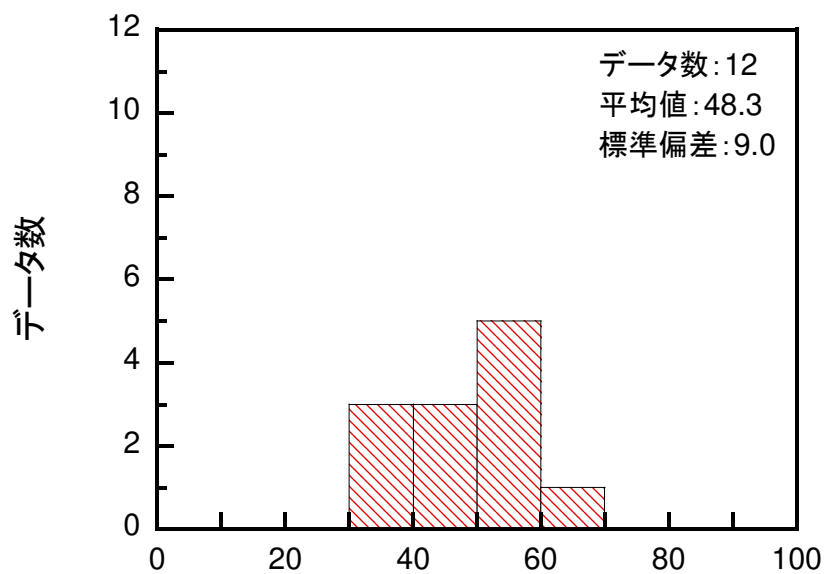
中性化速度係数(mm/√年)

図 4.2-6 中性化速度係数



塩化物イオンの見掛けの拡散係数 (cm²/年)

図 4.2-7 塩化物イオンの見掛け拡散係数



耐久性指数

図 4.2-8 耐久性指数

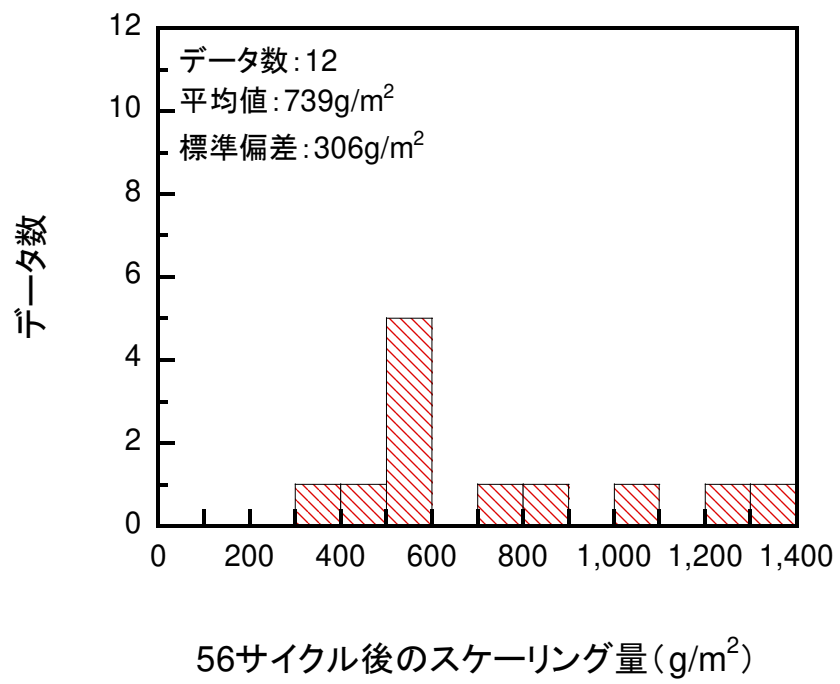


図 4.2-9 スケーリング量

4.3 実機で製造したコンクリートの品質

4.3.1 使用材料及び配合

本節に用いたコンクリートの配合を表 4.3-1 及び表 4.3-2 に示す。結合材には、高炉セメント B 種（密度：3.04 g/cm³，ブレン値：3,690 cm²/g）及び普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm³，ブレン値：3,230 cm²/g）を，混和材には，石灰石微粉末（密度：2.69 g/cm³，ブレン値：5,500 cm²/g）を，細骨材には，高炉スラグ細骨材（BFS5，表乾密度：2.76 g/cm³，吸水率：0.62 %，粗粒率：2.55）及び流紋岩砕砂（表乾密度：2.55g/cm³，吸水率：1.62 %，粗粒率：2.85）を，粗骨材には，流紋岩碎石（最大寸法：20 mm，表乾密度：2.57 g/cm³，吸水率：1.56 %，粗粒率：6.81）を用いた。化学混和剤には，ポリカルボン酸系化合物界面活性剤系特殊増粘剤の複合体を主成分とする高性能 AE 減水剤 I 種及び高性能減水剤 I 種を用いた。

表 4.3-1 実機で用いた BFS コンクリートの配合

水セメント 比 W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤(Cx%)
				水 W	セメント C	細骨材 BFS	粗骨材 G	高性能 AE 減水剤
35.0	18±2.5	4.5±1.5	45.0	155	443	810	924	0.7

表 4.3-2 実機で用いた普通砕砂コンクリートの配合

水セメン ト比 W/C (%)	水粉体比 W/P (%)	スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m³)					高性能 減水剤 (Cx%)
					水 W	粉体 P		細骨材 BFS	粗骨材 G	
						セメン ト C	石灰石微 粉末 LF			
44.0	30.5	63±10	1.0	50.7	180	410	180	794	776	0.78

4.3.2 養生方法

コンクリートは，打込み後 18 時間型枠内で養生を行ってから脱型とした。蒸気養生の温度設定を図 4.3-1 に示す。BFS コンクリートを型枠内に打ち込んだ後，4 時間の前置きを行った後に 15℃/時間の速さで 40℃まで昇温を行った。最高温度に到達後，4 時間保持して，その後は，自然放冷により温度を下げた。材齢 18 時間で脱型した後，写真 4.3-1 に示した方法により散水湿润養生を 7 日間行った¹⁾。その後製品の出荷までに気中養生を行った。普通砕砂コンクリートは，コンクリートを型枠内に打ち込ん

だ後、2時間の前置きを行った後に 20℃/時間の速さで 50℃まで昇温を行った。最高温度に到達後、2時間保持して、その後、自然放冷により温度を下げた。材齢 18 時間で脱型した後、製品の出荷までに気中養生のみを行った。

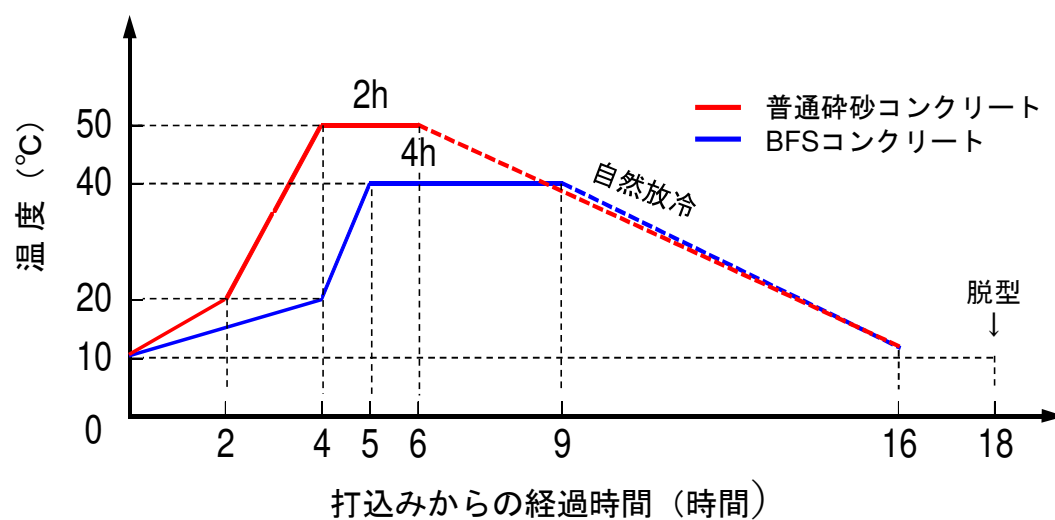


図 4.3-1 蒸気養生の設定

写真 4.3-1 散水湿潤養生



4.3.3 実験方法

表 4.3-3 に試験項目を示す。BFS コンクリートは、製品と同一の蒸気養生を行い、脱型後、7 日間の水中養生を行った後、材齢 28 日より試験を開始することを基本とした。普通砕砂コンクリートは、製品と同一の蒸気養生を行い、脱型後は気中で材齢 28 日まで養生を行った後、試験を開始することを基本とした。また、圧縮強度試験および凍結融解試験は、蒸気養生を行わず標準養生を行ったものも試験を行った。

表 4.3-3 試験項目

試験項目	試験（開始）材齢	養生方法	供試体形状及び寸法
圧縮強度試験	18 時間	製品同一養生	円柱供試体 φ100×200mm
	28 日	製品同一養生	円柱供試体 φ100×200mm
		標準養生	円柱供試体 φ100×200mm
塩化物イオン浸透性	28 日浸漬開始	製品同一養生	円柱供試体 φ100×200mm
凍結融解試験	28 日試験開始	製品同一養生	角柱供試体 100×100×400mm
		標準養生	角柱供試体 100×100×400mm
スケーリング試験	7 日試験開始	製品同一養生	角柱供試体 100×100×400mm
	28 日試験開始	製品同一養生	角柱供試体 100×100×400mm
乾燥収縮試験	普通：1 日乾燥開始 BFS：7 日乾燥開始	製品同一養生	角柱供試体 100×100×400mm
中性化試験	28 日試験開始	製品同一養生	角柱供試体 100×100×400mm

4.3.4 実験結果

表 4.3-4 にフレッシュコンクリート試験および材齢 18 時間における圧縮強度試験の結果を示す。BFS コンクリート及び普通砕砂コンクリートの供試体をそれぞれ、製品の製造時に採取した。いずれのコンクリートも、設計値の範囲内であった。製品同一養生を行った BFS コンクリートの材齢 18 時間における圧縮強度は、蒸気養生の温度を低く抑えていること、高炉セメント B 種が用いられていることから、小さい値であった。

写真 4.3-2 に作製されたプレキャストコンクリート製品の外観を示す。製品の製造は、問題なく行われ、製品の外観も良好である。材齢 7 日よりスケーリング試験を開始した供試体表面の状態を写真 4.3-3 に示す。養生が十分に行われていないこともあり、7 サイクルにおいても表面の劣化が確認できる。

図 4.3-2 に BFS コンクリート及び普通砕砂コンクリートの 28 日材齢における圧縮強度の結果を示す。点線は製品の設計基準強度を示す。いずれのコンクリートの圧縮強度も、製品の設計基準強度をクリアしたことが分かる。製品同一養生と比べ標準養生したコンクリートの圧縮強度は、約 1.2～1.3 倍高いことが分かる。

図 4.3-3 に BFS コンクリート及び普通砕砂コンクリートの 28 日材齢におけるヤング係数の結果を示す。実機で製造した BFS コンクリート製品も、試験室で採取したコンクリートも同程度の値を示した。図 4.3-4 に BFS コンクリート及び普通砕砂コンクリートの乾燥期間 182 日の乾燥収縮ひずみを示す。普通砕砂コンクリートと比べ BFS コンクリートの乾燥収縮ひずみ量は小さかったことが分かる。図 4.3-5 に BFS コンクリート及び普通砕砂コンクリートの中性化速度の結果を示す。普通砕砂コンクリートと比べ BFS コンクリートの中性化速度は遅いことが分かる。

図 4.3-6 及び図 4.3-7 にそれぞれ製品同一養生及び標準養生における BFS コンクリート及び普通砕砂コンクリートの凍結融解試験の結果を示す。養生方法に関わらず BFS コンクリートの凍結融解抵抗性が高いことが分かる。普通砕砂コンクリート製品は、通常エントレインドエアを入れずに製造するため、製品同一養生の場合において、約 50 サイクルで相対弾性係数は 60% 以下になった。図 4.3-8 に材齢 7 日開始したスケーリング試験の BFS コンクリート及び普通砕砂コンクリートの累積スケーリング量の結果を示す。普通砕砂コンクリートと比べ BFS コンクリートの表層部分の凍結融解抵抗性も高いことが分かる。図 4.3-9 に BFS コンクリート及び普通砕砂コンクリートの塩化物イオン量の試験結果を示す。普通砕砂コンクリートの塩化物イオンの見かけ拡散係数は BFS コンクリートの塩化物イオンの見かけ拡散係数の約 4.0 倍大きくなっている。

表 4.3-4 フレッシュコンクリート試験および 18 時間圧縮強度の結果

種 類	スランプまたは スランプフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	外気温 (°C)	18 時間 圧縮強度 (N/mm ²)
BFS コンクリート	18.5	4.7	14.8	13.3	7.41
普通砕砂コンクリート	64.0	-	16.3	11.4	28.7

写真 4.3-2 散水湿潤養生終了後の製品



写真 4.3-3 材齢 7 日より試験を開始したスケーリング試験の結果

種 類	BFS コンクリート	普通砕砂コンクリート
0 サイクル		
7 サイクル		
14 サイクル		
28 サイクル		
42 サイクル		
56 サイクル		

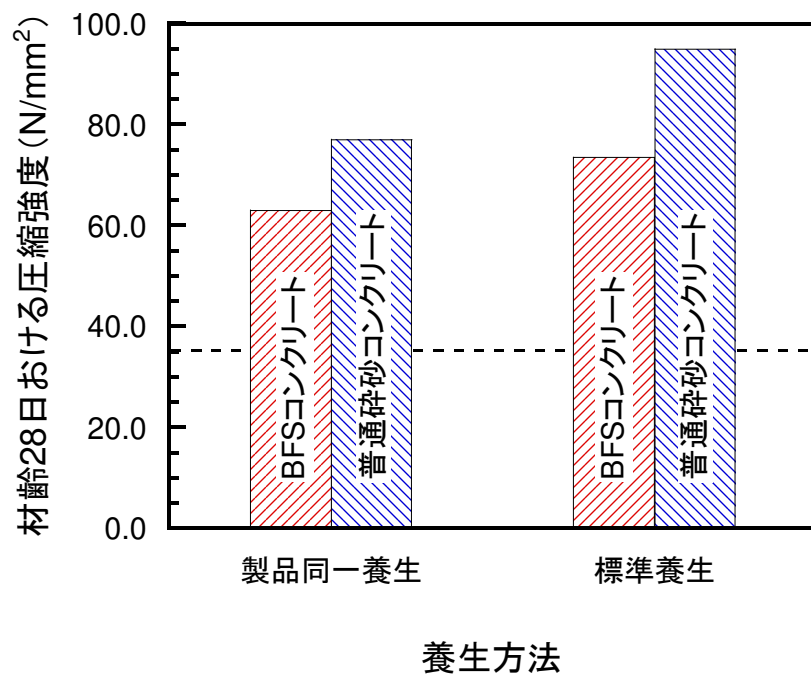


図 4.3-2 圧縮強度試験の結果

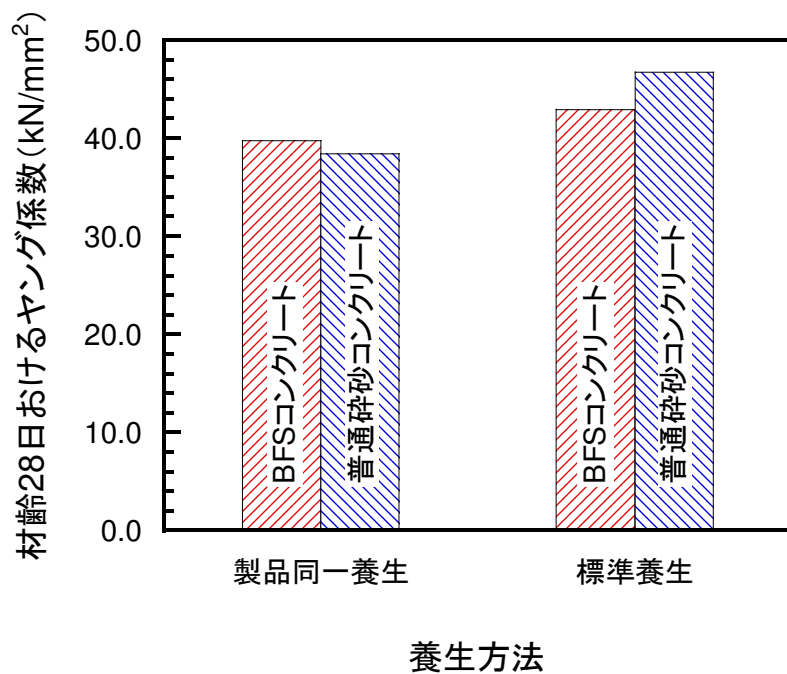


図 4.3-3 ヤング係数試験の結果

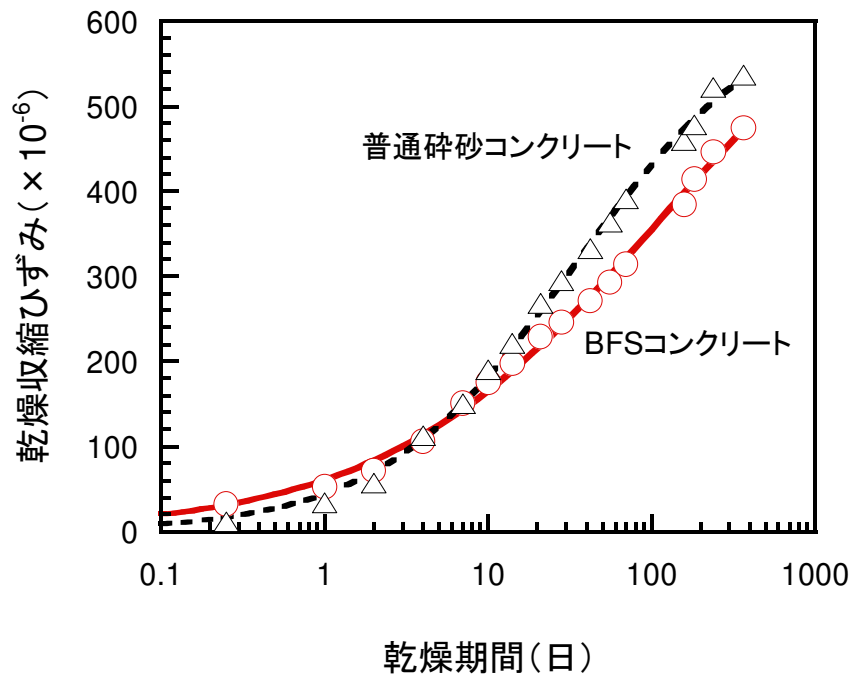


図 4.3-4 乾燥収縮ひずみの結果

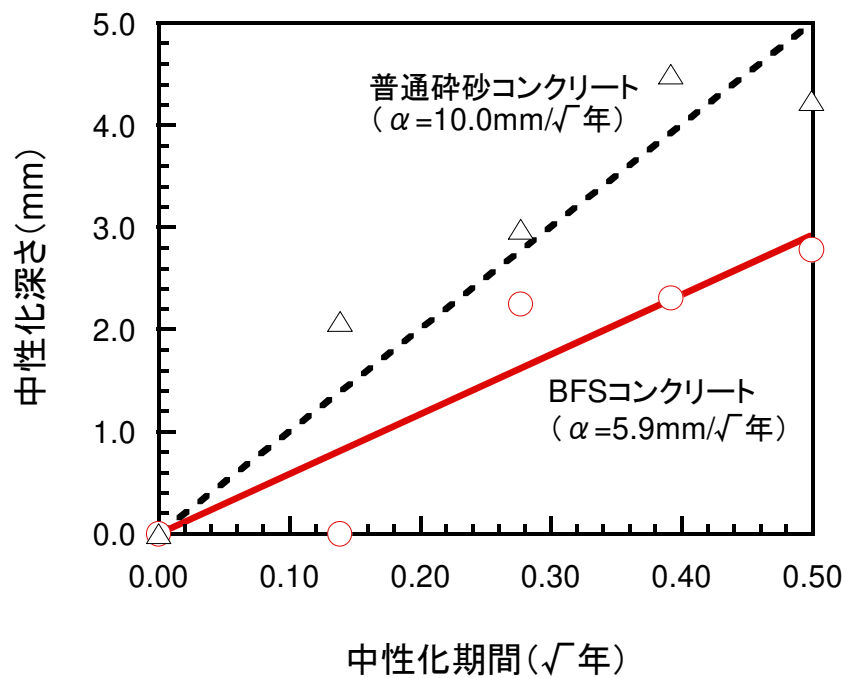


図 4.3-5 中性化試験の試験結果

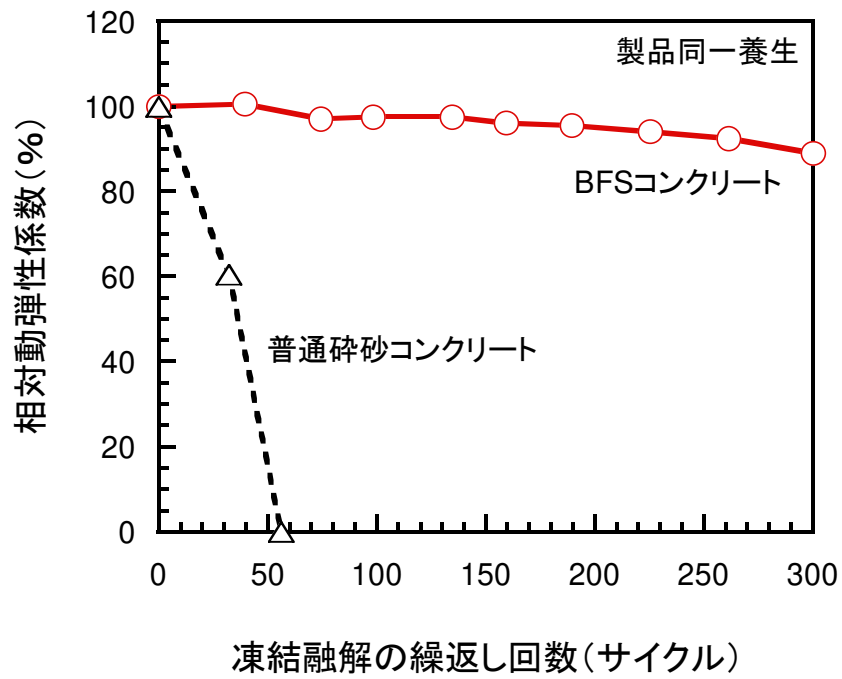


図 4.3-6 凍結融解試験の結果(製品同一養生)

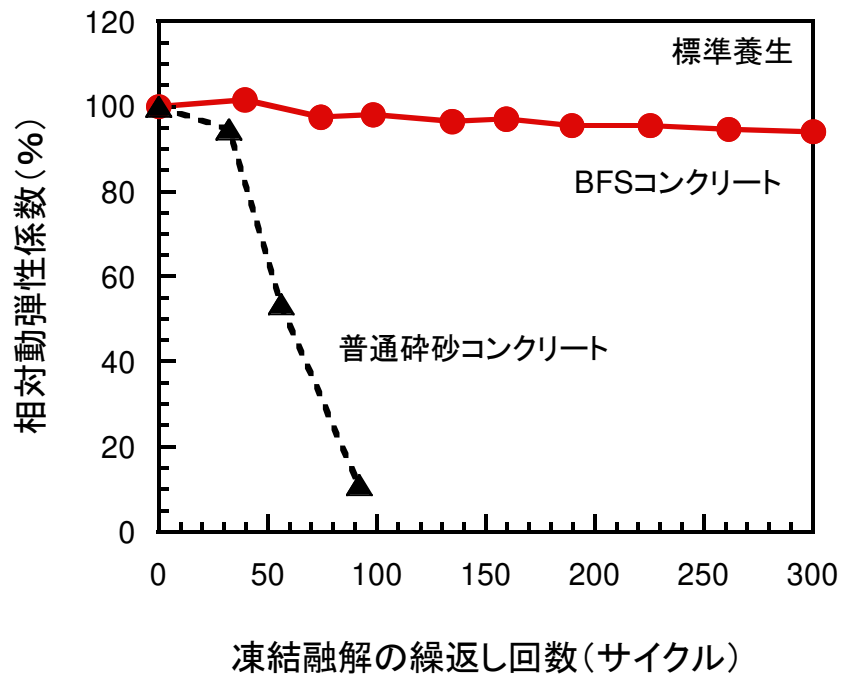


図 4.3-7 凍結融解試験の結果(標準養生)

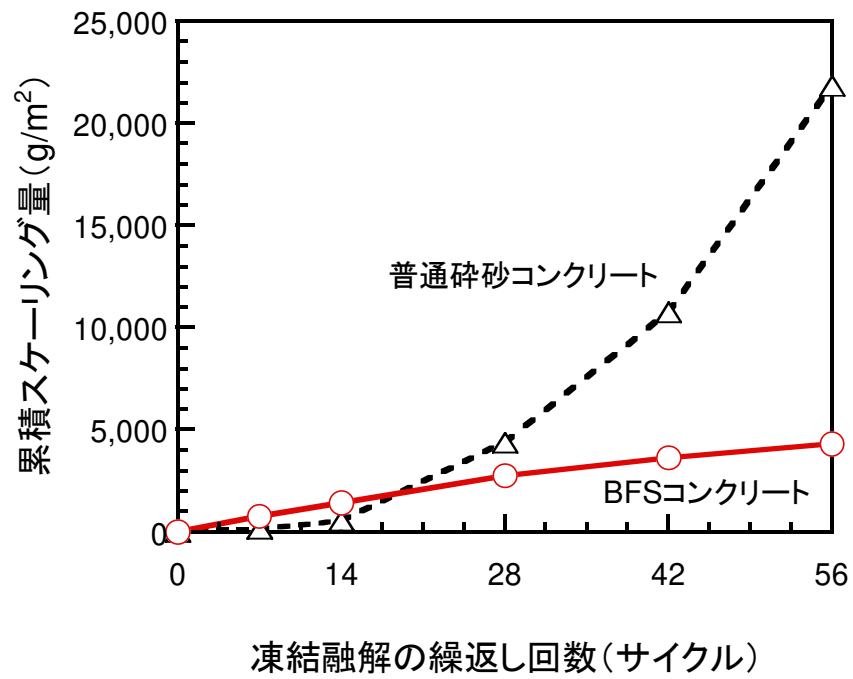


図 4.3-8 スケーリング試験の結果

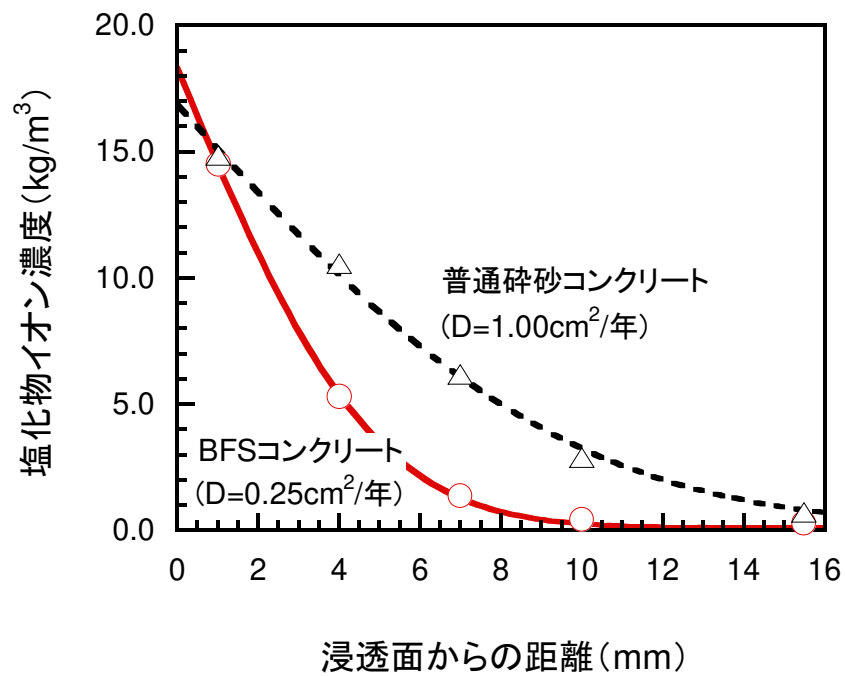


図 4.3-9 塩化物イオン濃度の結果

4.4 本章のまとめ

これまでの知見をもとに，一般的なプレキャストコンクリート製品工場で製造が可能な高耐久性 BFS コンクリートの配合および製造方法の仕様を策定した。既往の研究では，試験室で製造した BFS コンクリートの品質に大きな差はないことを確認した。しかし，実機によって製造された試験結果では，養生温度が高い場合や，単位水量が多い場合には，品質が低下しやすい傾向があった。本章では，工場の材料を用いて，試験室及び工場実機で製造した BFS コンクリートの圧縮強度，ヤング係数，乾燥収縮ひずみ，中性化速度，塩化物イオンの見掛けの拡散係数，耐久性指数およびスケーリング量について，品質の確認を行った。得られた知見を，つぎにまとめる。

- (1) 試験室で製造した BFS コンクリートの圧縮強度，ヤング係数は，他の工場のものと同程度である。また，乾燥収縮ひずみは小さく，中性化期間 91 日まで中性化が生じていないことを確認した。一方で，塩化物イオンの見掛けの拡散係数は，他の工場のものと比べて若干大きく，またばらつきもあること，耐久性指数は 50 程度と低く，スケーリング量も他の工場のものより大きかった。
- (2) BFS コンクリートを実機で製造し，品質の確認を行った。フレッシュ性状は良好で，製品の製造も問題なく行われた。材齢 7 日よりスケーリング試験を行ったが，養生が十分に行われていないことから，劣化が確認された。通常の普通砕砂コンクリート製品と比べ，BFS コンクリート製品の乾燥収縮ひずみ，中性化速度及び塩化物イオンの拡散係数などの耐久性能は優れていることを確認した。

参考文献

- 1) 土木学会：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)，コンクリートライブラリー，第 155 号，2019.

第5章 ジオポリマーの配合設計、養生方法及び劣化抵抗性の検討

5.1 概 説

ジオポリマー（以降、GP と記す）は、フライアッシュ等の非晶質粉体とケイ酸アルカリ溶液との縮重合反応し硬化したものである。CO₂ 排出量の削減や産業副産物の有効利用の観点から注目される新たな材料である¹⁾。現在、GP 製作のために使用されている方法は、大きく分けて二つある。一つはフライアッシュを出発材料として、フライアッシュとアルカリ溶液(NaOH 溶液あるいは KOH 溶液)と水ガラスの混合液を用いる「一般法」²⁾である。もう一つの方法は、水ガラスの代わりに NaOH 溶液とシリカヒュームを用いる「溶解法」である。「溶解法」は、シリカヒュームを添加することにより、凝結開始まで時間を延伸することが可能としている³⁾。

本章では、GP モルタルを基準にして、配合と練り方法を変え、溶解法を用いて実験を行い、さらにコンクリート実験も行い、GP モルタルとコンクリートの圧縮強度、耐硫酸性、凍結融解抵抗性などを検討した。

5.2 モルタル実験

5.2.1 使用材料及び配合

実験に用いたモルタルの配合は表 5.2-1、表 5.2-2 及び表 5.2-3 に示す。結合材にはフライアッシュ（フライアッシュI種，密度：2.43 g/cm³，ブレン値：5,520cm²/g，以降，FA と記す），高炉スラグ微粉末（密度：2.89 g/cm³，ブレン値：4,250cm²/g，石膏添加，以降，GGBS と記す）を用いた。細骨材には，砕砂(表乾密度：2.61，吸水率：1.88%，粗粒率：3.36，以降，CS と記す)および高炉スラグ細骨材(表乾密度:2.68 g/cm³，吸水率：0.93%，粗粒率：2.10，以降，BFS と記す)を用いた。シリカフューム（密度：2.25 g/cm³，SiO₂ 含有量：95.29%，以降，SF と記す）を用いた。アルカリ溶液には 48% の水酸化ナトリウム水溶液を用いた。遅延剤には，グルコン酸ナトリウム（以降，GNa と記す）を用い，添加率は FA 及び GGBS の重量合計の 2%とした。水は，水道水を使用した。

表 5.2-1 SF 添加量を変化したモルタル配合 (GGBS=0%, 20%, 40%)

表 5-2-1 配合量を変化したモルタル配合 (GGBS: 0%, 20%, 40%)												
No.	A/W (モル比)	Si/A (モル比)	GGBS (%)	BFS/(BFS+CS) (%)	単位量 (kg/m ³)							
					W	NaOH	SF	FA	GGBS	CS	BFS	GNa
1	0.20	0	0	0	184	82	0	746	0	1210	0	15
2		0.10					12			1196		
3		0.21					26			1180		
4		0.30					37			1167		
5		0	20		186	83	0	603	151	1222		
6		0.10					12			1207		
7		0.21					26			1192		
8		0.30					37			1178		
9		0	40		185	83	0	452	301	1248		
10		0.05					6			1241		
11		0.10					12			1234		
12		0.15					19			1227		
13		0.21					26			1218		
14		0.25					31			1212		
15		0.30					37			1205		

表 5.2-2 単位水量を変化したモルタル配合 (GGBS=0%, 40%, BFS, CS)

No.	A/W (モル比)	Si/A (モル比)	GGBS (%)	BFS/(BFS+CS) (%)	単位量 (kg/m ³)							
					W	NaOH	SF	FA	GGBS	CS	BFS	GNa
1	0.15	0.21	0	100	246	82	26	746	0	0	1044	15
2	0.17				215						1128	
3	0.20				184						1212	
4	0.24				152						1297	
5	0.15		40		249	83		452	301		1081	
6	0.17				217						1165	
7	0.20				186						1250	
8	0.24				154						1336	
9	0.15		0	0	246	82		746	0	1017	0	
10	0.17				215					1098		
11	0.20				184					1180		
12	0.24				152					1263		
13	0.15		40		249	83		452	301	1053		
14	0.17				217					1135		
15	0.20				187					1218		
16	0.24				154					1300		

表 5.2-3 アルカリ量を変化したモルタル配合 (GGBS=40%)

No.	A/W (モル比)	Si/A (モル比)	GGBS (%)	BFS/(BFS+CS) (%)	単位量 (kg/m ³)							
					W	NaOH	SF	FA	GGBS	CS	BFS	GNa
1	0.15	0.15	40	0	347	116	26	452	301	749	0	15
2		0.18			289	96				928		
3		0.25			208	69				1178		
4		0.30			173	58				1286		
5	0.20	0.15			259	116				978		
6		0.18			216	96				1119		
7		0.22			177	79				1247		
8		0.25			155	69				1316		

5.2.2 練混ぜ及び養生方法

GP 硬化体の製造方法は既報に準じて行い、モルタルの練混ぜは、モルタルミキサー(容量 10L)を用いた。材料投入及び練混ぜ方法は、細骨材を投入し、30 秒空練りをし、その後結合材を添加し 1 速で 60 秒練混ぜし、その後、水とアルカリ溶液(NaOH)を投入し 1 速で 30 秒練混ぜ、グルコン酸ナトリウム(GNa)を添加する。更に、2 速で 60 秒、3 速で 30 秒練混ぜし GP モルタルを排出する。練混ぜの際、結合材が複数ある場合は事前混合とする。水とアルカリ溶液も事前混合とし、練上がり温度は、30℃以上となるようにする。

養生方法は、加熱養生とする。打設したモルタルを乾燥炉に入れ、1 時間前置きをし、80℃になるまで 4 時間かけて昇温させ、10 時間 80℃恒温で養生した後、4 時間かけて温度を下げ、脱型後、材齢まで常温で気中養生を行う。

5.2.3 試験方法

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、φ75×150mm の円柱供試体を用いて、JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験」に従い試験を行った。供試体を採取した後、加熱養生し、打設後 1 日に脱型し、圧縮強度試験を行った。

(2) 耐硫酸試験

耐硫酸試験は、φ50×100mm の円柱供試体を用いた。供試体を採取した後、加熱養生し、1 日脱型後、材齢 7 日まで常温で気中養生を行い、濃度 5%の硫酸に浸漬させる。その後、1 週間ごとに供試体の質量を測定した。

5.3 コンクリート実験

5.3.1 使用材料及び配合

コンクリートの配合を表 5.3-1, 表 5.3-2, 表 5.3-3 及び表 5.3-4 を示す。結合材には、フライアッシュ(フライアッシュ I 種, 密度: 2.43g/cm³, ブレーン値: 5,520cm²/g, 以降, FA と記す), 高炉スラグ微粉末(密度: 2.89g/cm³, ブレーン値: 4,250cm²/g, 以降, GGBS と記す), シリカフューム (密度: 2.25 g/cm³, SiO₂ 含有量: 95.29%, 以降, SF と記す) を用いた。アルカリ溶液には 48%の水酸化ナトリウム水溶液を用いた。水ガラス 2 号 (以降, ASS と記す) を用いた。遅延材には、グルコン酸ナトリウム (以降,

GNa と記す) を用い、添加率は、FA 及び GGBS の重量合計の 2%とした。水（以降、W と記す）は、水道水を用いた。

表 5.3-1、表 5.3-2 及び表 5.3-4 に砕砂（表乾密度：2.64g/cm³，吸水率：2.03%，粗粒率：3.14，以降、CS と記す）及び高炉スラグ細骨材（表乾密度：2.76g/cm³，吸水率：0.53%，粗粒率：2.18，以降、BFS と記す）を用いた。表 5.3-3 に砕砂（表乾密度：2.61g/cm³，吸水率：1.88%，粗粒率：3.36，以降、CS と記す）及び高炉スラグ細骨材（表乾密度：2.68g/cm³，吸水率：0.93%，粗粒率：2.10，以降、BFS と記す）を用いた。

表 5.3-1 及び表 5.3-4 に粗骨材（最大寸法：20mm，密度：2.75/cm³，吸水率：0.57%，粗粒率：6.82，以降、G と記す）を用いた。表 5.3-2 及び表 5.3-3 に粗骨材（最大寸法：20mm，表乾密度：2.72/cm³，吸水率：0.52%，粗粒率：6.53，以降、G と記す）を用いた。

表 5.3-1 細骨材の違いによるコンクリート配合

No.	A/W (モル比)	Si/A (モル比)	GGBS (%)	BFS/(BFS+CS) (%)	単位量 (kg/m ³)								
					W	NaOH	SF	FA	GGBS	CS	BFS	G	GNa
1	0.15	0.33	0	0	182	60	30.3	550	0	752	0	784	11.0
2				33						504	260		
3				67						248	527		
4				100						0	787		
5			40	0				330	220	771	0	803	
6				33						516	266		
7				67						254	540		
8				100						0	806		

表 5.3-2 混合液温度，練り温度，加温時間の違いに用いたコンクリート配合

No.	A/W (モル比)	Si/A (モル比)	GGBS (%)	BFS/(BFS+CS) (%)	単位量 (kg/m ³)								
					W	NaOH	SF	FA	GGBS	CS	BFS	G	GNa
1	0.15	0.33	0	0	182	60	30.3	550	0	752	0	775	11.0

表 5.3-3 単位水量を変化したコンクリート配合

No.	A/W (モル比)	Si/A (モル比)	GGBS (%)	BFS/(BFS+CS) (%)	単位量 (kg/m ³)								
					W	NaOH	SF	FA	GGBS	CS	BFS	G	GNa
1	0.15	0.21	40	0	182	60	19.8	330	220	761	0	793	11.0
2	0.20				136					821		856	
3	0.24				113					851		887	

表 5.3-4 水ガラスを使用したコンクリート配合

No.	A/W (モル比)	Si/A (モル比)	GGBS (%)	BFS/(BFS+CS) (%)	単位量 (kg/m ³)								
					ASS	NaOH	SF	FA	GGBS	CS	BFS	G	GNa
1	0.24	1.05	0	0	190	25	30.3	550	0	752	0	784	11.0
2				100						0	787		

5.3.2 練混ぜ及び養生方法

GP コンクリートの練混ぜは、容量 60L のパン型ミキサーを用いた。水酸化ナトリウム(NaOH)と水を混ぜた混合液が、希釈により発熱するため、30～40℃までに温度を下げて用いた。材料投入及び練混ぜ方法は、乾燥状態の細骨材をミキサーに投入し、細骨材の補正水を投入し、30 秒空練りを行う。更に事前に FA、SF 及び GGBS を混ぜた混合粉を、投入し 60 秒練混ぜを行う。その後、水酸化ナトリウム混合液を投入し 120 秒練混ぜを行い、遅延材のグルコン酸ナトリウム(GNa)を投入し、60 秒練混ぜを行う。最後に、粗骨材を投入し、120 秒練混ぜした後 GP コンクリートを排出する。

養生方法は、加熱養生とする。打設したコンクリートを乾燥炉に入れ、1 時間前置きして、80℃になるまで 4 時間かけて昇温させ、10 時間 80℃恒温で養生した後、4 時間かけて温度を下げ、脱型後、試験材齢まで常温で気中養生を行う。

5.3.3 試験方法

(1) 圧縮強度試験

φ100×200mmの円柱供試体を用いて、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従って、圧縮強度を行った。

(2) 耐硫酸試験

硫酸環境においてGPは高い抵抗性を有することが知られている。本実験ではGPコンクリートの耐酸性能を確認するため、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体を用いて、1日脱型後、材齢7日まで常温で気中養生を行い、5%硫酸溶液に浸漬し、質量変化を観察した。

(3) 凍結融解試験

供試体は $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の角柱供試体を用いた。凍結融解の材齢も7日を標準とする。凍結融解試験は、JIS A 1148 : 2010に規定される水中凍結融解方法(A法)に準拠して行った。

(4) 乾燥収縮試験

GPの乾燥収縮試験の開始材齢は1日を標準とし、 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の角柱供試体を用いた。JIS A 1129-3に規定される「コンクリートの長さ変化試験」に従って行った。ビン付けの型枠の両端にゲージプラグをつけて打設した。測定期間は、1週間ごとに測定し、合計8週間測定した。

5.4 実験結果考察

5.4.1 養生温度の決定

図 5.4-1 及び図 5.4-2 に常温及び 80℃養生による GP コンクリートの圧縮強度を示す。常温より 80℃による高温養生した方の圧縮強度が高く、細骨材に CS を用いるよりも、BFS を用いた方の圧縮強度の発現性はよいことが分かる。また、高温養生の場合、その後の養生方法によらず材齢 1 日及び 28 日の圧縮強度もほぼ変わらないため、材齢による圧縮強度への影響は小さいことが分かる。常温養生の場合、その後気中養生及び水中養生の圧縮強度の伸びを確認したが、高温養生したものとは比べ圧縮強度が小さかったため、養生温度を 80℃の高温養生とした。

5.4.2 高炉スラグ微粉末及び高炉スラグ細骨材による圧縮強度への影響

図 5.4-3 はシリカ/アルカリ比(Si/A)を一定にしたとき、GGBS 置換率は 40%と 0%を用いた GP モルタルにおける単位水量と圧縮強度の関係を示しているものである。図の中の●と■は GGBS40%置換したとき、BFS と CS を用いた結果である。図の中○と□は GGBS を用いなかったとき、BFS と CS を用いた結果である。この図より、GGBS 及び BFS を用いた GP モルタルの圧縮強度が高く、また、水酸化ナトリウムを一定にし、単位水量(A/W 増加)の減少によって、混合液のアルカリ濃度が大きくなり、圧縮強度が大きくなっていることが分かる。アルカリの刺激により、潜在水硬性をもつ GGBS や BFS を用いると GP の圧縮強度の発現性が促進されたと考える。

図 5.4-4 は A/W=0.201 を一定にしたとき、GGBS の置換率が変化した場合、SF 添加量と圧縮強度の関係を示しているものである。図の中○、■および●はそれぞれ GGBS の置換率が 0%、20%および 40%を用いた GP モルタルである。この図より、GGBS を結合材の 40%使用した圧縮強度は、使用していないものと比較し約 4 倍高い値になった。また、GGBS を結合材の 20%使用したものは、使用していないものと比べて約 3 倍高い値になった。これは、潜在水硬性をもつ GGBS を添加すると、アルカリ刺激により GP モルタルの圧縮強度は増進したと考える。また、SF の添加量を変化しても圧縮強度への影響は小さいことが分かる。

図 5.4-5 及び図 5.4-6 は、A/W=0.15、Si/A=0.33 のコンクリート配合を用いて、それぞれ材齢 1 日及び 28 日の BFS 及び GGBS の置換率と圧縮強度の関係を示したものである。図中に示す●と■は、GGBS の置換率 0%及び 40%の結果である。図により、BFS の置換率と圧縮強度の相関関係はあることが分かる。GGBS40%を置換すると 30N/mm²以上圧縮強度は大きくなったことが分かる。また、材齢による圧縮強度の増進が見られなかった。

5.4.3 NaOH 混合液の温度、練り温度及び加温時間による圧縮強度への影響

図 5.4-7 および図 5.4-8 は、それぞれ材齢 1 日及び材齢 7 日における GP コンクリートの NaOH 混合液の温度及び加温時間による圧縮強度への影響を示したものである。図中の●, ■, ○, □, △および▽は、それぞれ、80.3℃, 73.5℃, 60.3℃, 50.0℃, 35.0℃及び 15.3℃の NaOH と水の混合液を用いた GP コンクリートである。80.3℃の混合液で製作した GP コンクリートを除き、加温時間の増加につれ、圧縮強度が大きくなっていることが確認できた。また、混合液の温度を変化した場合、材齢 1 日及び 7 日の圧縮強度はほぼ変わらないことが分かる。

図 5.4-9 は、GP コンクリートの加温時間と練上がり温度による圧縮強度への影響を示したものである。図の中の●, ■, および▲はそれぞれ練上がり温度 15℃, 24℃および 38℃で打設した GP コンクリートである。この図より、練上がり温度は 20℃以上にすると圧縮強度は安定し、加温時間を長くすると圧縮強度の伸びも確認できた。また、4 時間の加温時間と比べ、80℃, 8 時間以上の加温時間があれば、GP の圧縮強度は安定的に発現することが分かる。

5.4.4 アルカリ水比による圧縮強度への影響

図 5.4-10 は、GP コンクリートのアルカリ水比(A/W)と圧縮強度の関係を示したものである。A/W はそれぞれ 0.15, 0.20 および 0.24 である。Si/A=0.21 を一定にした配合で実験を行った。図中の●及び■は材齢 1 日と 7 日の GP コンクリートである。1 日材齢も 7 日材齢の GP コンクリートの圧縮強度は A/W と正の関数に成立ことが確認できた。また、材齢によって、圧縮強度の増進が小さいことを確認した。

5.4.5 配合における粉体の影響

現在セメントコンクリートの圧縮強度と結合材水比には相関があることが知られており、コンクリートを製作する際には、所要の圧縮強度を製作するために水結合材比を用いる。図 5.4-11 は、砕砂を用いたモルタルの結合材水比と圧縮強度の関係を示したものである。結合材水比と圧縮強度の関係は、ばらつきがあることがわかる。そこで、本研究で用いた GP モルタルの材齢 1 日の圧縮強度を目的変数とし、SF/W, FA/W そして GGBS/W を独立変数として重回帰分析を行った。その結果を、表 5.4-1 で示す。この結果より GGBS/W に比べて SF/W は 0.8 倍、FA/W は 0.25 倍程度の圧縮強度への影響を持つことが分かる。そこで結合材水比を、有効結合材水比(B/W)に変換して、式 (5-1) に示す。

$$\frac{B}{W} = \frac{FA + 4GGBS + 3.2SF}{W} \quad (5-1)$$

図 5.4-12 は、GP モルタルの有効結合材水比と圧縮強度の関係を示している。この図から、有効結合材水比の増加により圧縮強度が増加することが分かる。この図より、GP モルタルの圧縮強度に影響を与えるものは、GGBS、SF、そして FA の順に大きいことが分かる。図 5.4-13 は、本研究で用いた GP モルタルの作製法と同様の方法で作製した GP コンクリートの、材齢 1 日での圧縮強度と有効結合材水比の関係を追加したものである。GP モルタルも GP コンクリートも同様の関係が示された。この結果、GP 硬化体の圧縮強度に影響を及ぼす材料としては、GGBS、SF、FA の順で大きな影響を与えると考えられる。有効結合材水比と圧縮強度は、概ね比例関係にあることが分かった。

5.4.6 ジオポリマーモルタルの耐硫酸性

図 5.4-14 は耐硫酸試験における GP モルタルの質量変化率を表したものである。図の中●、■、○および□は、それぞれ A/W=0.15 及び GGBF=40%を一定に、Si/A=0.15, Si/A=0.18, Si/A=0.25 および Si/A=0.30 の配合を用いた GP モルタルである。細骨材は CS を用いた。試験の開始材齢は、7 日とする。この図により、GP モルタルの質量はほぼ変わらず、質量減少率が 5%以内であることが読み取れる。

図 5.4-15 は耐硫酸試験における GP モルタルの質量変化率を表したものである。図の中●、■、○および□は、それぞれ A/W=0.201 及び GGBF=40%を一定に、Si/A=0.15, Si/A=0.18, Si/A=0.22 および Si/A=0.25 の配合を用いた GP モルタルである。細骨材は CS を用いた。試験の開始材齢は、7 日とする。この図により、GP モルタルの質量はほぼ変わらず、質量減少率が 5%以内であることが読み取れる。

図 5.4-16 は耐硫酸試験における GP モルタルの質量変化率を表したものである。図の中●、■、○および□は、それぞれ A/W=0.201 及び GGBF=20%を一定に、Si/A=0, Si/A=0.1, Si/A=0.209, および Si/A=0.30 の配合を用いた GP モルタルである。細骨材は CS を用いた。試験の開始材齢は、7 日とする。この図により、GP モルタルの質量はほぼ変わらず、GP モルタルの質量減少率が 5%以内であることが読み取れる。

写真 5.4-1 は、図 5.4-16 の GP モルタルの 56 日間 5%硫酸溶液に浸漬した写真である。外観の変化はほとんどないことが分かる。これらの図及び写真の結果から、カルシウム物質を含む GGBS を添加しても GP モルタルの耐硫酸性は良いことが分かる。

5.4.7 ジオポリマーコンクリートの耐硫酸性

図 5.4-17 は耐硫酸試験における GP コンクリートの質量変化率を表したものである。図の中●, □及び○は, それぞれ $Si/A=0.209$ 及び $GGBF=40\%$ 一定に, $A/W=0.15, 0.20$ 及び 0.24 の配合を用いた GP コンクリートである。細骨材には CS を用いた。試験の開始材齢は, 7 日とする。この図より, GP コンクリートの質量変化率は 5%以内で, 耐硫酸性は高いことが読み取れる。この図の結果から, カルシウム物質を含む GGBS を添加しても GP コンクリートの耐硫酸性は良いことが分かる。

写真 5.4-2 は水ガラス 2 号を用いた GP コンクリートの耐硫酸試験の写真で, 5%硫酸溶液に浸漬して 56 日を経過した後の供試体の様子である。 $A/W=0.24$, $Si/A=1.05$ 及び $GGBS=0\%$ を一定とし, 細骨材は CS 及び BFS を用いた。左側 CS を用いた GP コンクリートの耐酸性はよいことが分かる。右側 BFS を用いた GP コンクリートの耐酸性は弱いことが分かる。

5.4.8 ジオポリマーコンクリートの乾燥収縮ひずみ

図 5.4-18 は GP コンクリートの乾燥試験ひずみの測定結果を示したものである。図中の●, ○及び□は, $Si/A =0.209$ 及び $GGBF=40\%$ を一定に, $A/W =0.15$ (単位水量 $=182\text{kg/m}^3$), $A/W=0.201$ (単位水量 134kg/m^3) および $A/W =0.242$ (単位水量 $=113\text{kg/m}^3$) の配合を用いた GP コンクリートである。▲はこれまで, 岡山大学で行った普通のコンクリートの乾燥収縮の実験結果である。細骨材には CS を用いた。この図より, GP コンクリートは普通のコンクリートと同じように, 単位水量が増えるにつれ, 乾燥による水分の逸散が大きくなり, 収縮ひずみも, それと比例し大きくなっていることが分かる。

5.4.9 溶解法によるジオポリマーコンクリートの凍結融解抵抗性への影響

図 5.4-19 は, 溶解法による GP コンクリートの凍結融解試験の結果を示したものである。 $A/W=0.15$, $Si/A=0.33$ 及び $GGBS=0\%$ を一定にした。細骨材に対して BFS の置換率は 0%, 33%, 67%および 100%とし, 凍結融解試験の開始の材齢は 14 日とした。図中の●, ■, ▲および○はそれぞれ, BFS の置換率は 0%, 33%, 67%および 100%を用いた GP コンクリートである。BFS の置換率は 0%, 33%, 67%および 100%を用いた GP コンクリートは 50 サイクル程度で相対動弾性係数が 60%を下回っている。この結果から, 溶解法では, GGBS を用いていないとき, 細骨材の種類関係なく GP コンクリートの凍結融解抵抗性は小さいことが分かる。それぞれの配合における 1 日の圧

縮強度は、 $12\text{N/mm}^2 \sim 22\text{N/mm}^2$ の範囲で採取したため、凍結融解抵抗性の小さい原因は、強度不足と考える。

図 5.4-20 は、溶解法による GP コンクリートの凍結融解試験の結果を示したものである。A/W=0.15, Si/A=0.33 及び GGBS=40%を一定にした。細骨材に対して BFS の置換率は 0%, 33%, 67%および 100%とし、凍結融解開始の材齢は 14 日である。図中の ●, ■, ▲および○はそれぞれ、BFS の置換率は 0%, 33%, 67%および 100%を用いた GP コンクリートである。BFS の置換率は 0%, 33%, 67%および 100%を用いた GP コンクリートは 50 サイクル程度で相対動弾性係数が 60%を下回っている。この結果から、溶解法では、細骨材の種類関係なく GGBS を用いた GP コンクリートの凍結融解抵抗性も小さいことが分かった。それぞれの配合における 1 日の圧縮強度は、 $46\text{N/mm}^2 \sim 62\text{N/mm}^2$ の範囲で採取した。ある程度強度のある GP コンクリートの凍結融解抵抗性が低下した原因を検討するため、5.4.10 の実験を行った。

5.4.10 単位水量によるジオポリマーコンクリートの凍結融解抵抗性への影響

図 5.4-19 及び図 5.4-20 に示した結果を検討するため、図 5.4-21 は、GP コンクリートの凍結融解試験の結果を示したものである。図の中 ●, □及び○はそれぞれ Si/A =0.209, GGBS=40%一定に、A/W =0.15 (単位水量 182kg/m^3), A/W =0.201 (単位水量 134kg/m^3) および A/W =0.242 (単位水量 113kg/m^3) の配合を用いた GP コンクリートである。A/W =0.15 の GP コンクリートは、凍結融解のサイクル数が 20 サイクル程度で相対動弾性係数が 60%を下回った。A/W =0.201 および A/W =0.242 の時、凍結融解サイクル数が 300 回程度で相対動弾性係数が 90%以上を維持した。この図より、GP の単位水量を少なくした場合、凍結融解への抵抗性が上がることが読み取れる。また、それぞれの配合における 1 日の圧縮強度は、 47N/mm^2 , 80N/mm^2 及び 102N/mm^2 であった。既往研究で GGBS 置換率が 20%以上の場合、GP の凍結融解に効果があるという研究結果があるが⁴⁾、この図により、A/W =0.15, GGBS=40%のとき、凍結融解抵抗性は低下していることが分かる。

図 5.4-22 は、GP コンクリートの質量減少率を示したものである。図の中 ●, □及び○はそれぞれ Si/A=0.209 一定にした時、A/W =0.15 (単位水量 182kg/m^3), A/W =0.201 (単位水量 134kg/m^3) 及び A/W =0.242 (単位水量 113kg/m^3) の GP コンクリートである。この図よりアルカリ水比が大きくなると、凍結融解による質量減少が小さくなっていることが分かる。凍結融解抵抗性のある配合を設計する場合は、単位水量の低減と GGBS 添加の両方を考慮する必要があると考える。

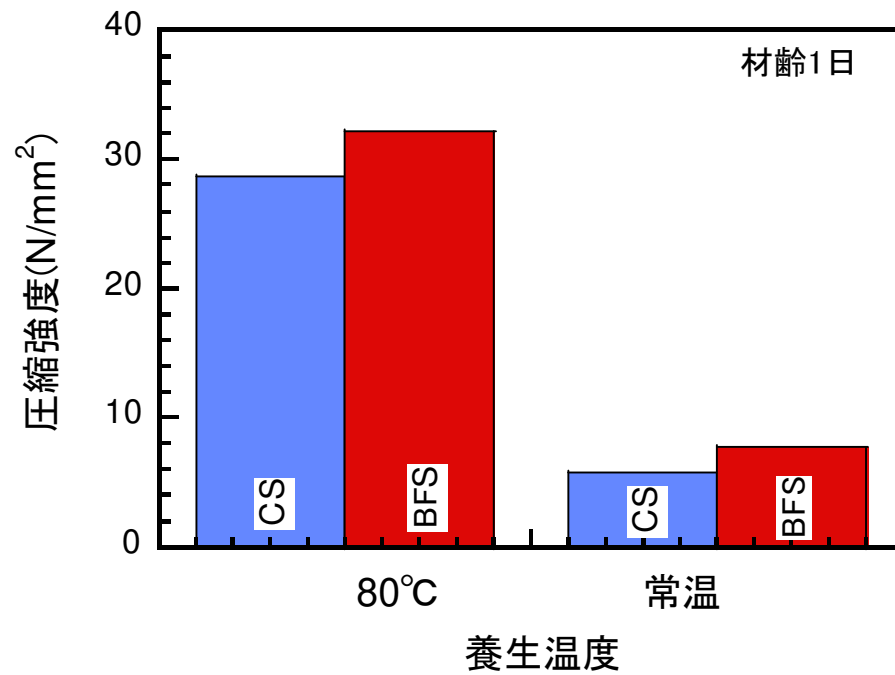


図 5.4-1 養生温度と圧縮強度の関係(材齢 1 日)

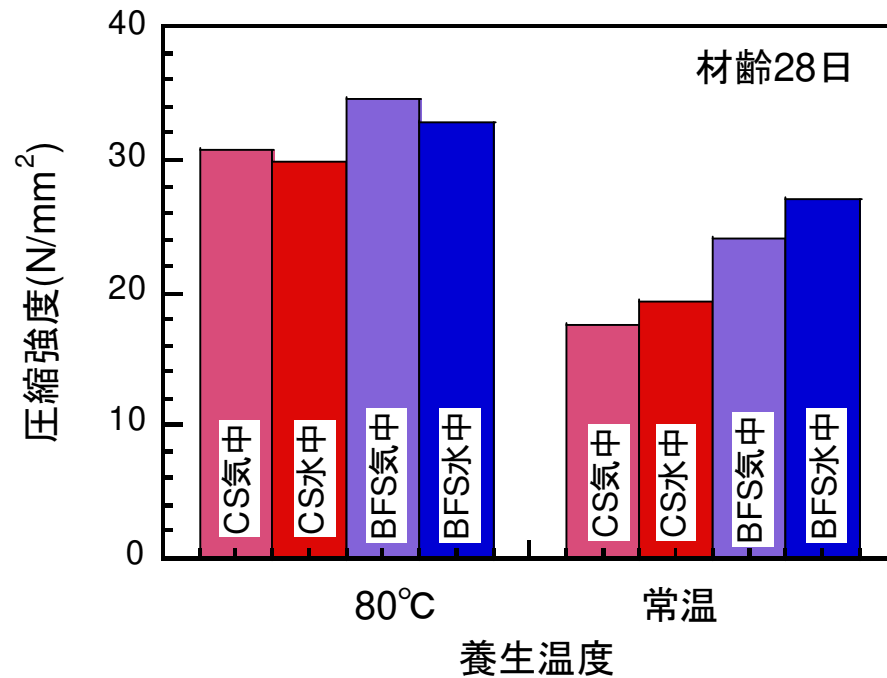


図 5.4-2 養生温度と圧縮強度の関係(材齢 28 日)

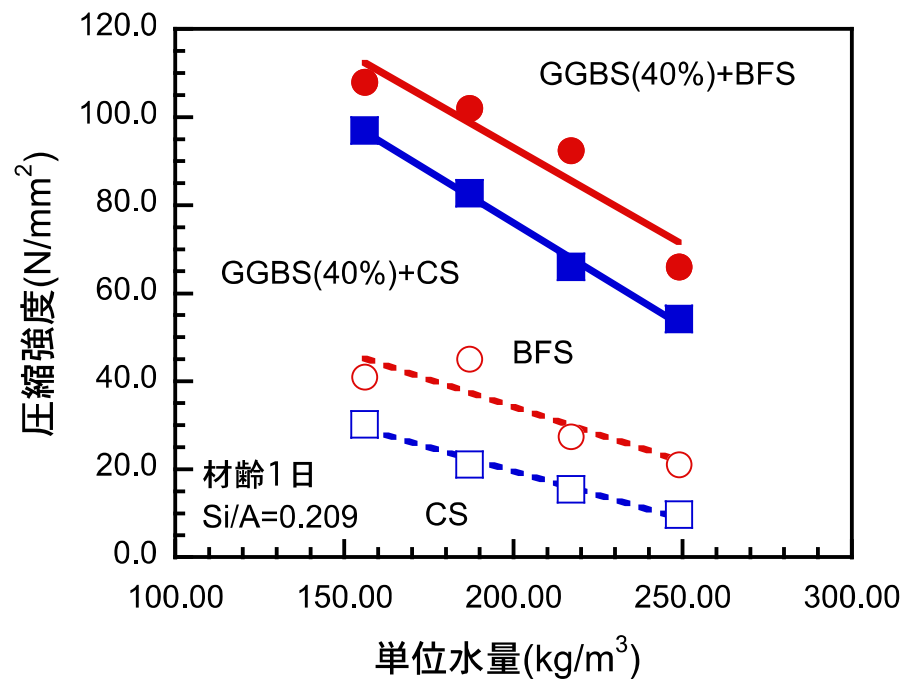


図 5.4-3 単位水量と圧縮強度の関係

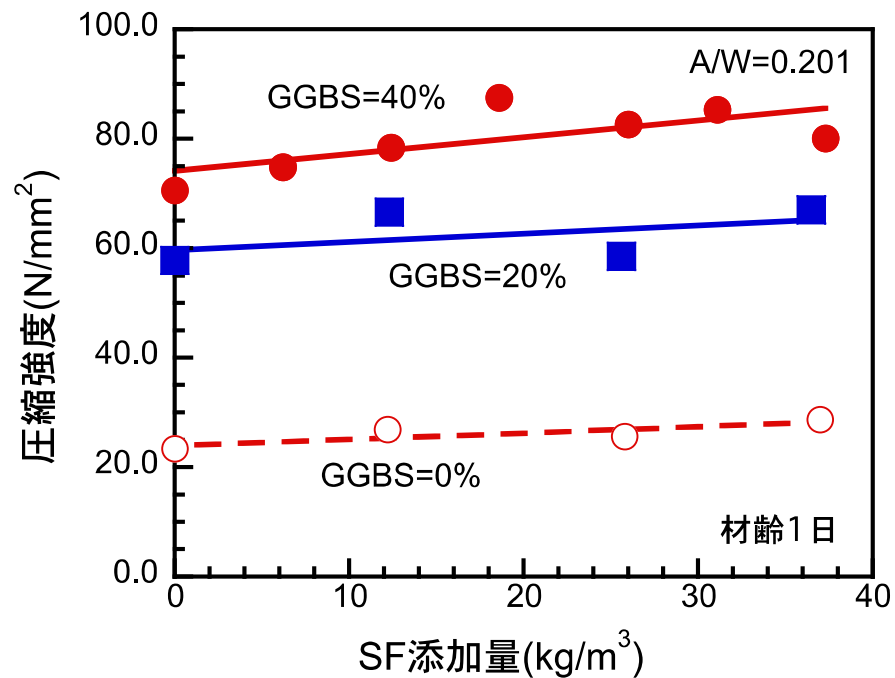


図 5.4-4 SF 添加量と圧縮強度の関係

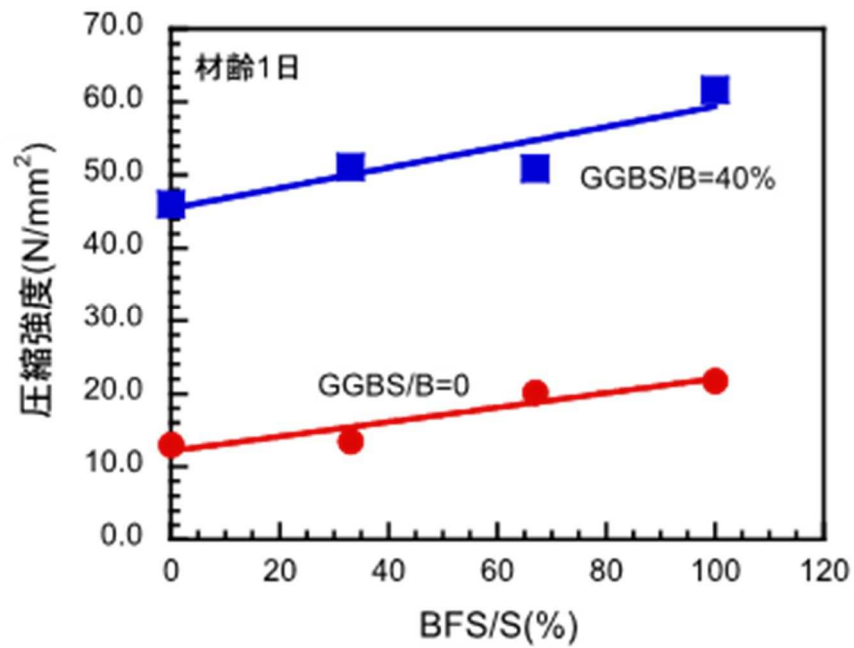


図 5.4-5 BFS の置換率と圧縮強度の関係(材齢 1 日)

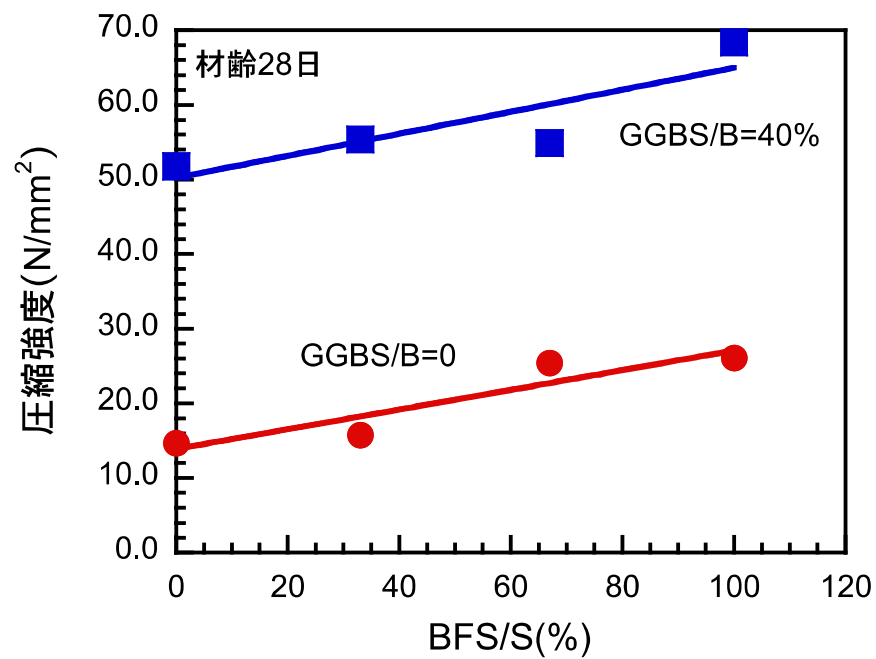


図 5.4-6 BFS の置換率と圧縮強度の関係(材齢 28 日)

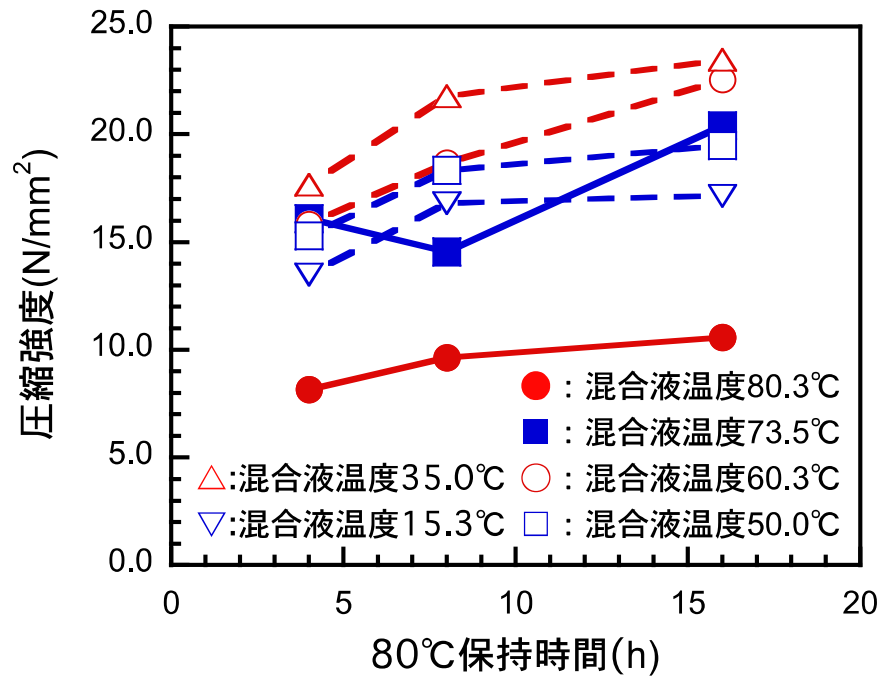


図 5.4-7 混合液の温度及び加温時間と圧縮強度の関係(材齢 1 日)

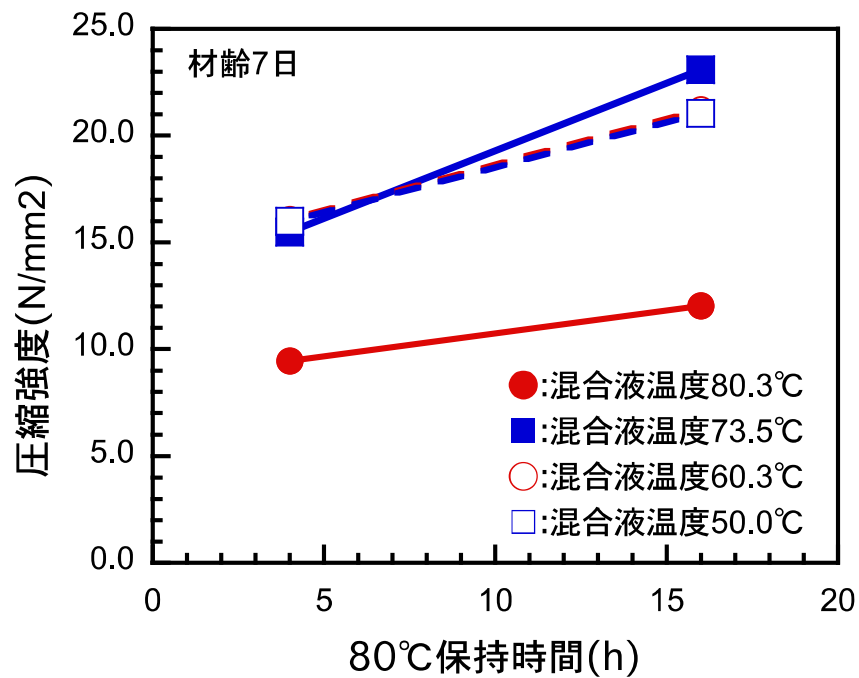


図 5.4-8 混合液の温度及び加温時間と圧縮強度の関係(材齢 7 日)

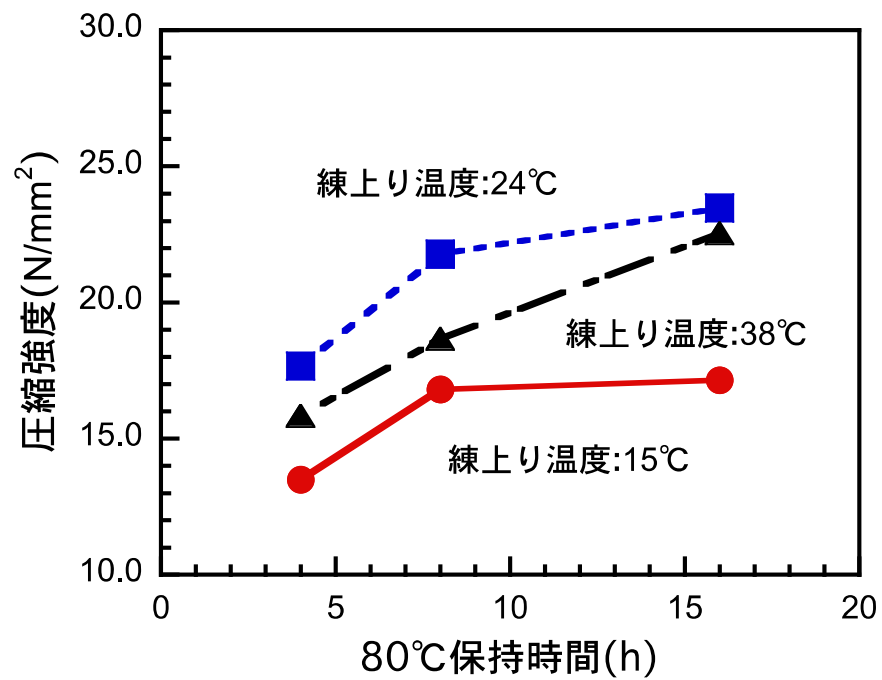


図 5.4-9 加温時間及び練上がり温度と圧縮強度の関係

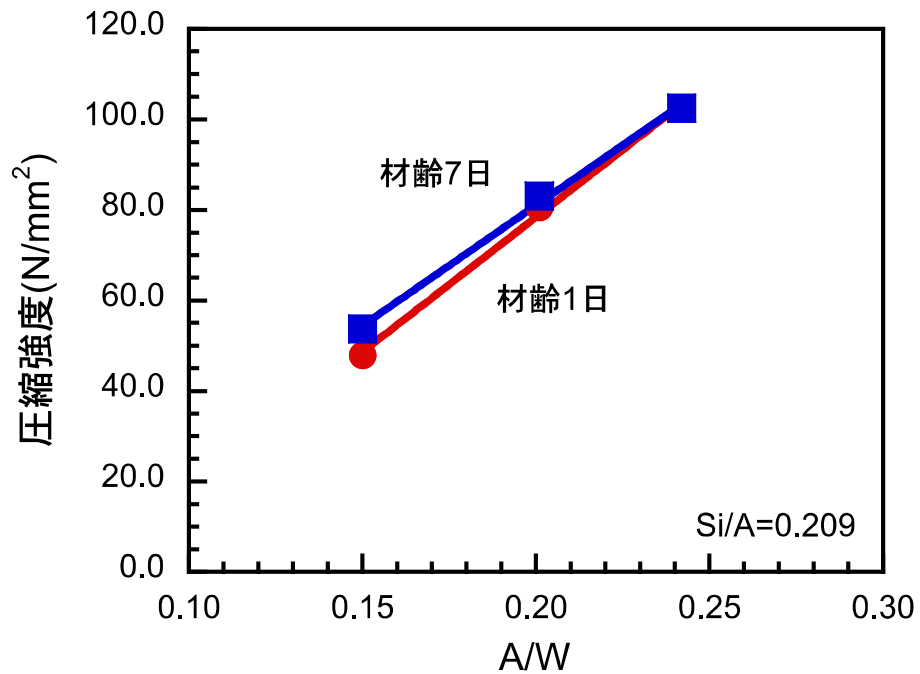


図 5.4-10 アルカリ水比(A/W)と圧縮強度の関係

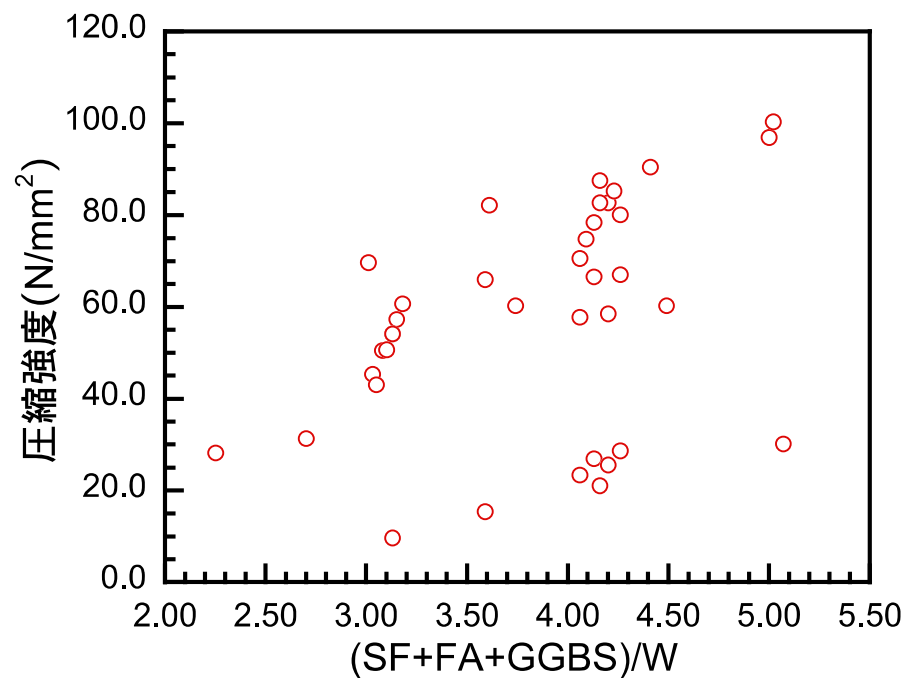


図 5.4-11 モルタルの結合材水比と圧縮強度の関係

表 5.4-1 本研究における CS を用いた GP モルタルの回帰分析結果

回帰統計								
重相関 R	0.94134747							
重決定 R2	0.88613505							
補正 R2	0.87608815							
標準誤差	8.57799266							
観測数	38							
分散分析表								
	自由度	変動	分散	測された分散	有意 F			
回帰	3	19469.739	6489.91298	88.1997863	4.0832E-16			
残差	34	2501.78658	73.5819581					
合計	37	21971.5255						
	係数	標準誤差	t	P-値	下限 95%	上限 95%	下限 95.0%	上限 95.0%
切片	-23.542009	8.46246265	-2.7819336	0.0087524	-40.739803	-6.3442161	-40.739803	-6.3442161
X 値 1	35.9743421	26.1964235	1.37325395	0.17866235	-17.263196	89.2118799	-17.263196	89.2118799
X 値 2	11.235191	2.34026388	4.80082227	3.1084E-05	6.47920254	15.9911794	6.47920254	15.9911794
X 値 3	44.2046622	3.13698792	14.0914353	9.3124E-16	37.8295357	50.5797887	37.8295357	50.5797887

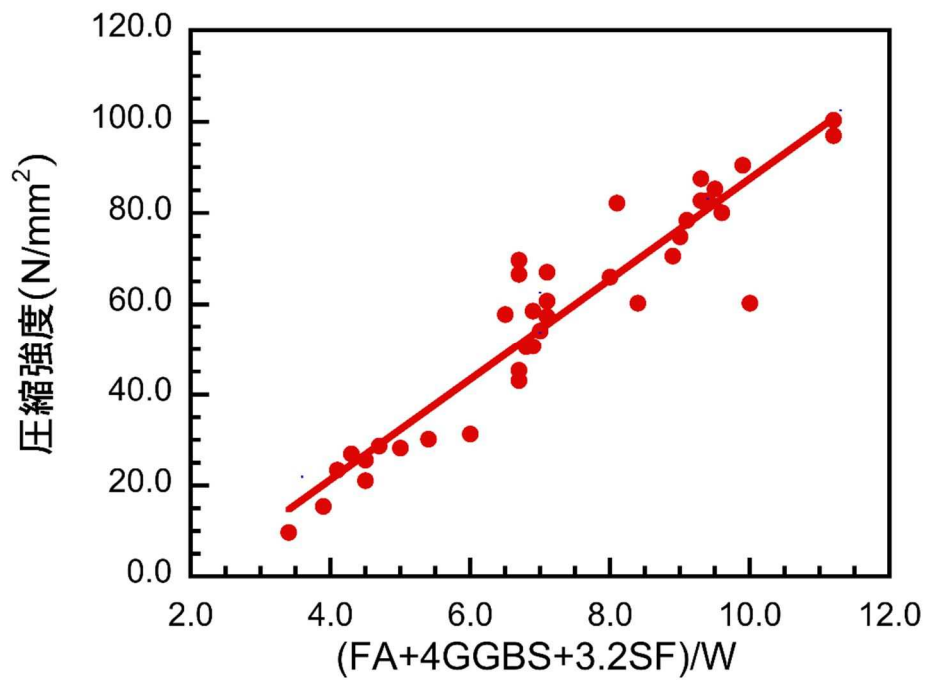


図 5.4-12 モルタルの有効結合材水比と圧縮強度の関係

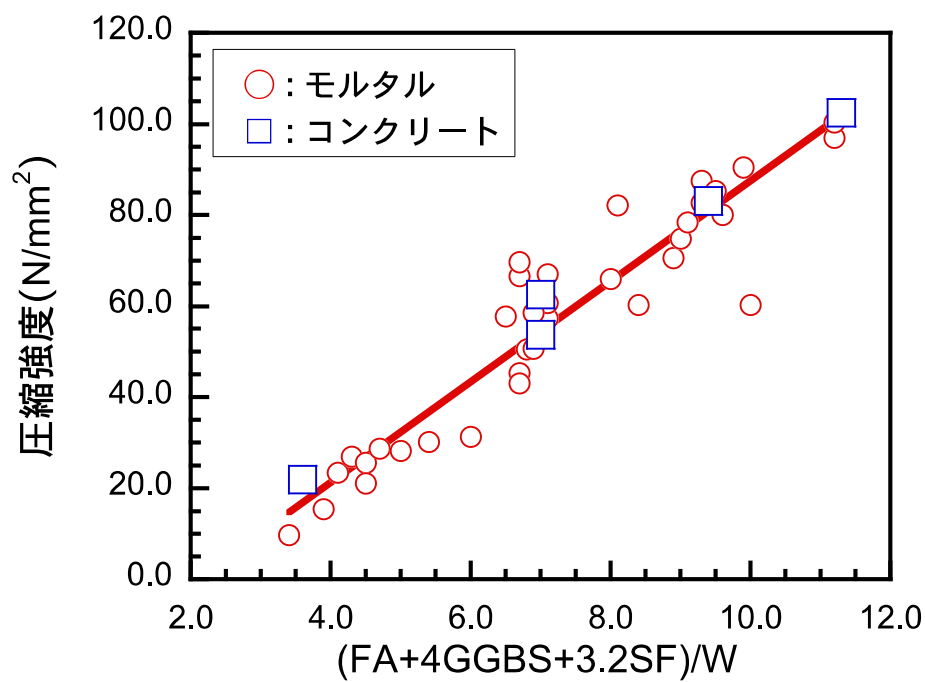


図 5.4-13 モルタルとコンクリートの有効結合材水比と圧縮強度の関係

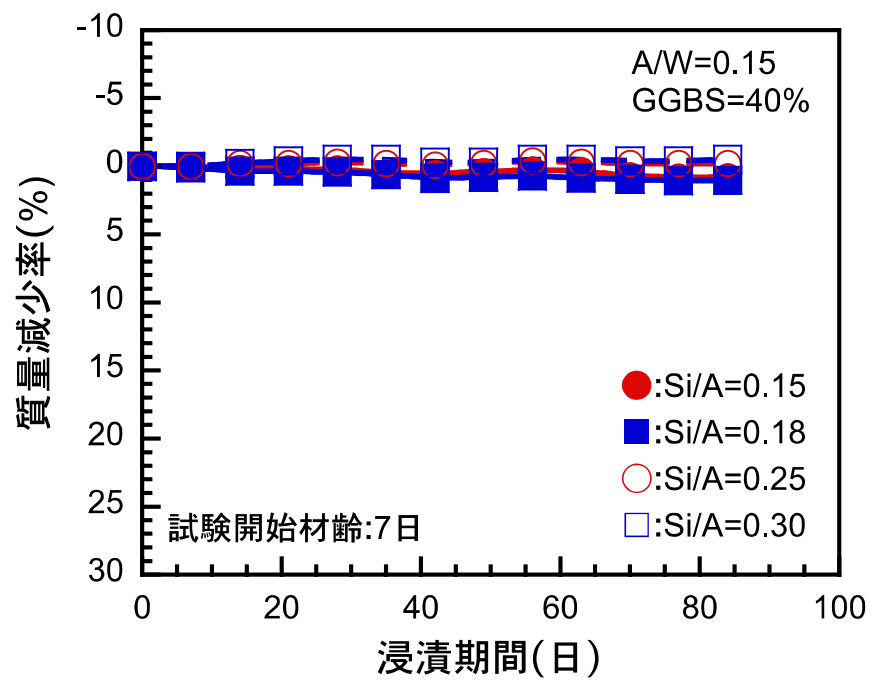


図 5.4-14 モルタルの質量変化率(A/W=0.15 GGBS=40%)

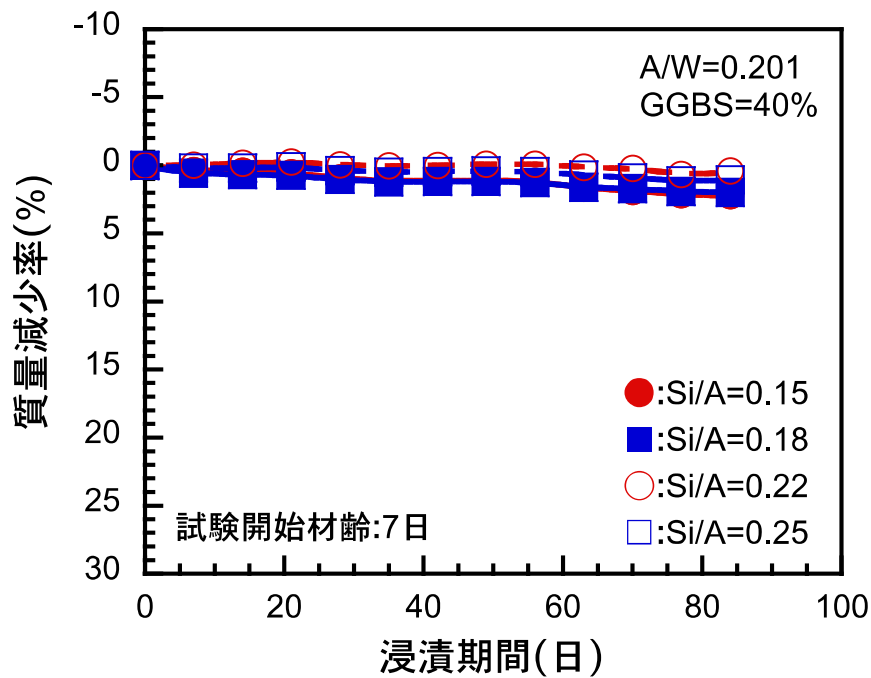


図 5.4-15 モルタルの質量変化率(A/W=0.201 GGBS=40%)

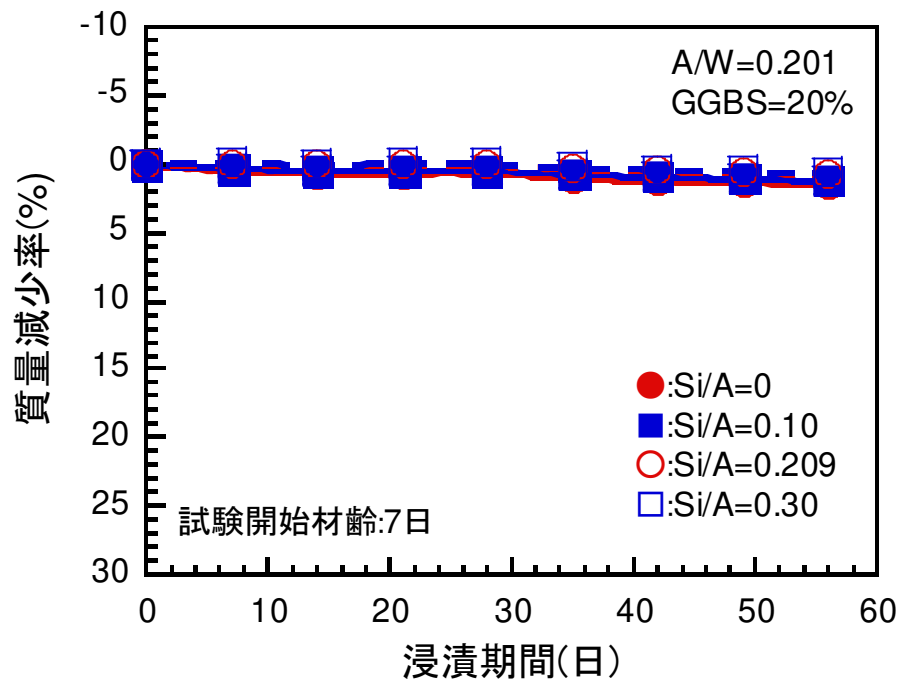


図 5.4-16 モルタルの質量変化率(A/W=0.201 GGBS=20%)

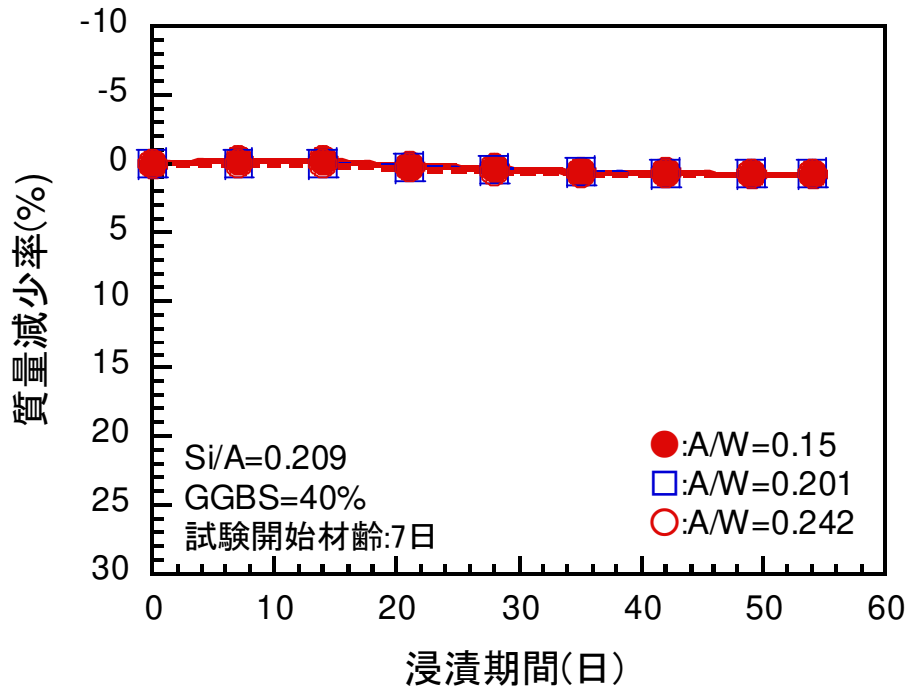


図 5.4-17 コンクリートの質量変化率

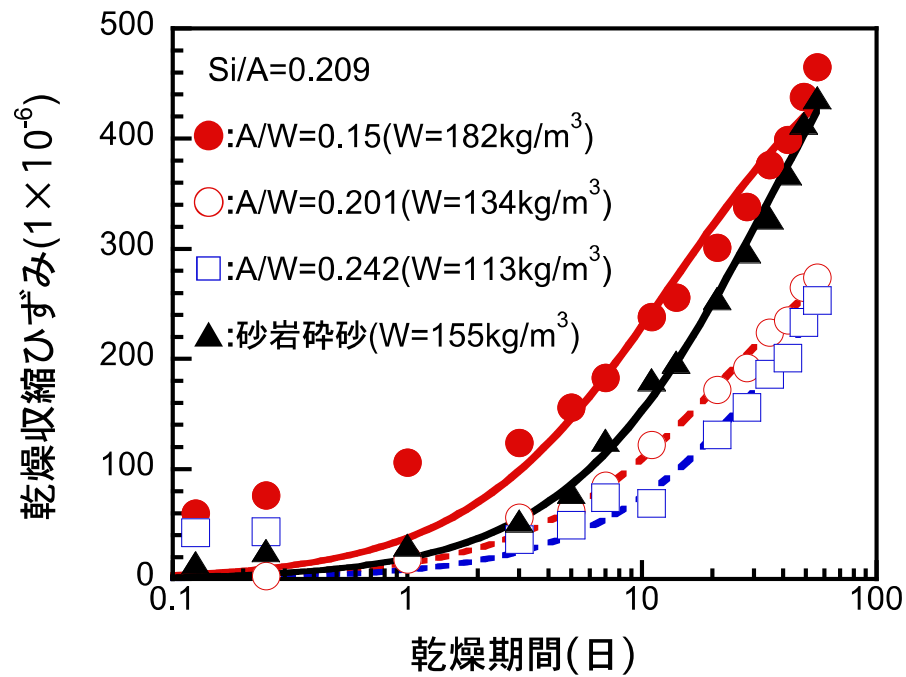


図 5.4-18 GP コンクリートの乾燥収縮ひずみ

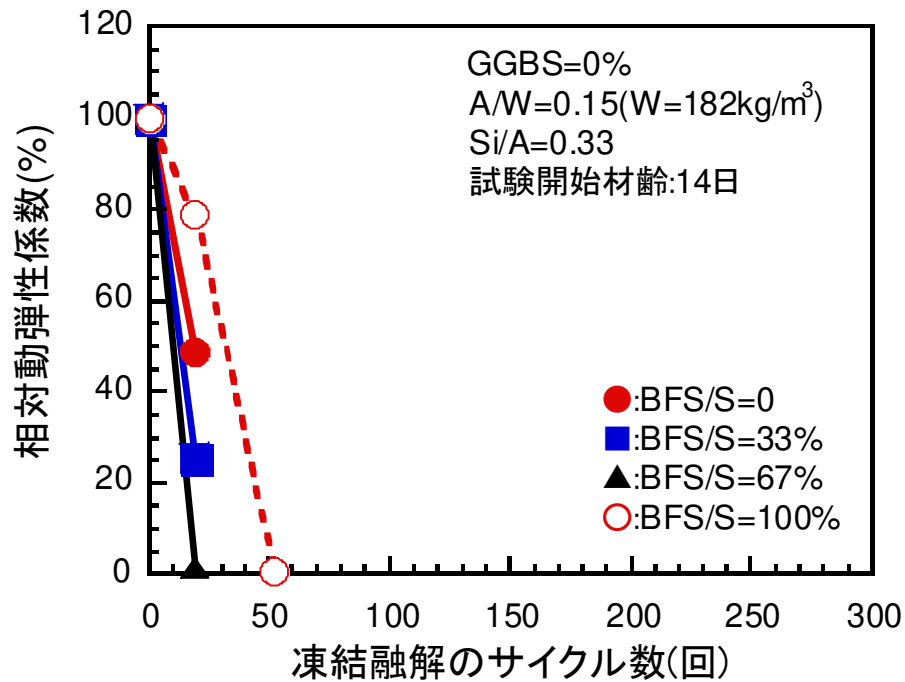


図 5.4-19 溶解法による凍結融解試験 (GGBS=0%)

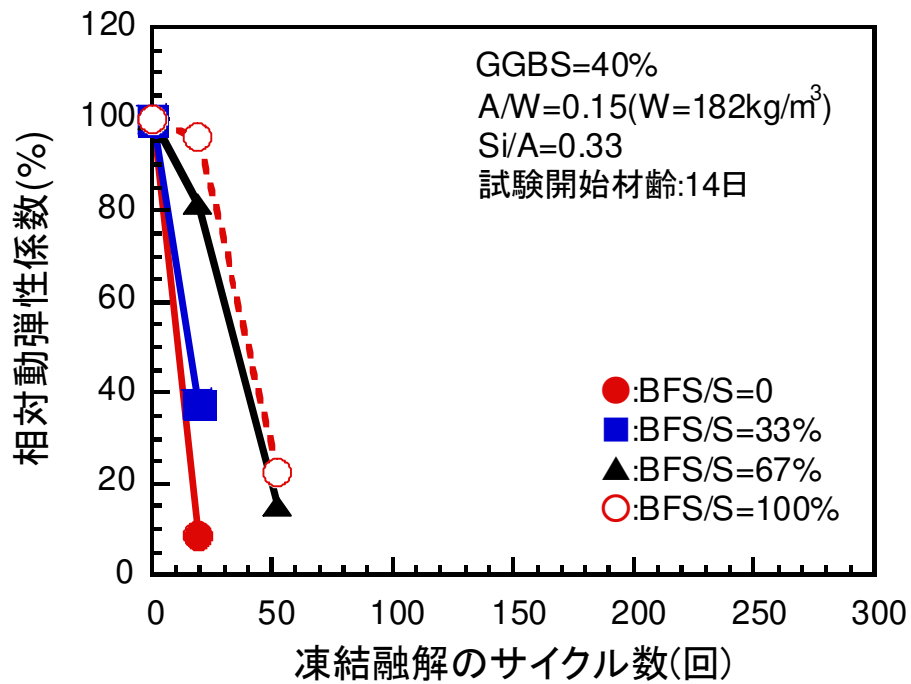


図 5.4-20 溶解法による凍結融解試験 (GGBS=40%)

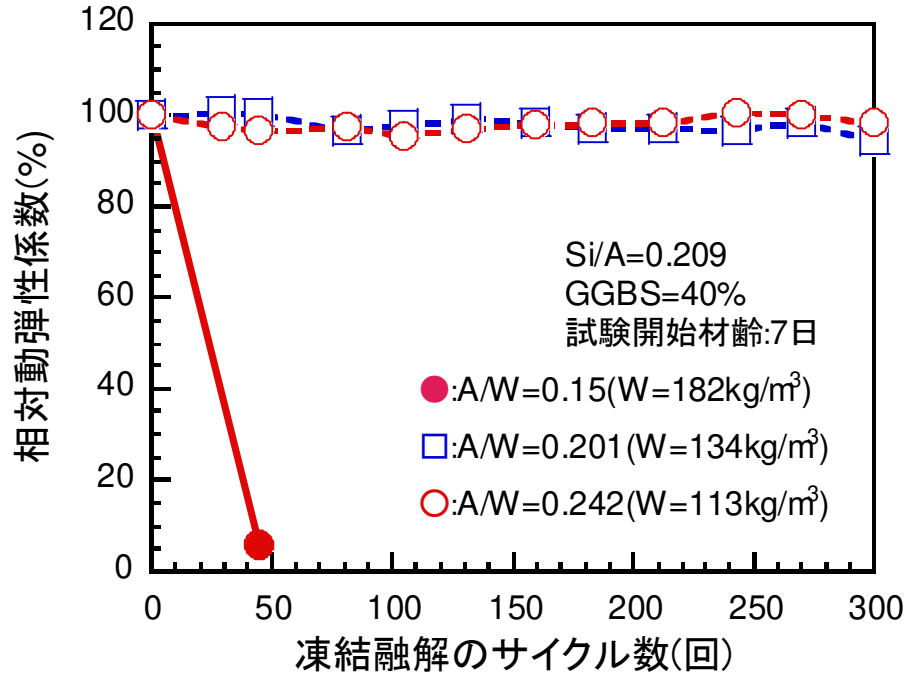


図 5.4-21 単位水量による凍結融解試験

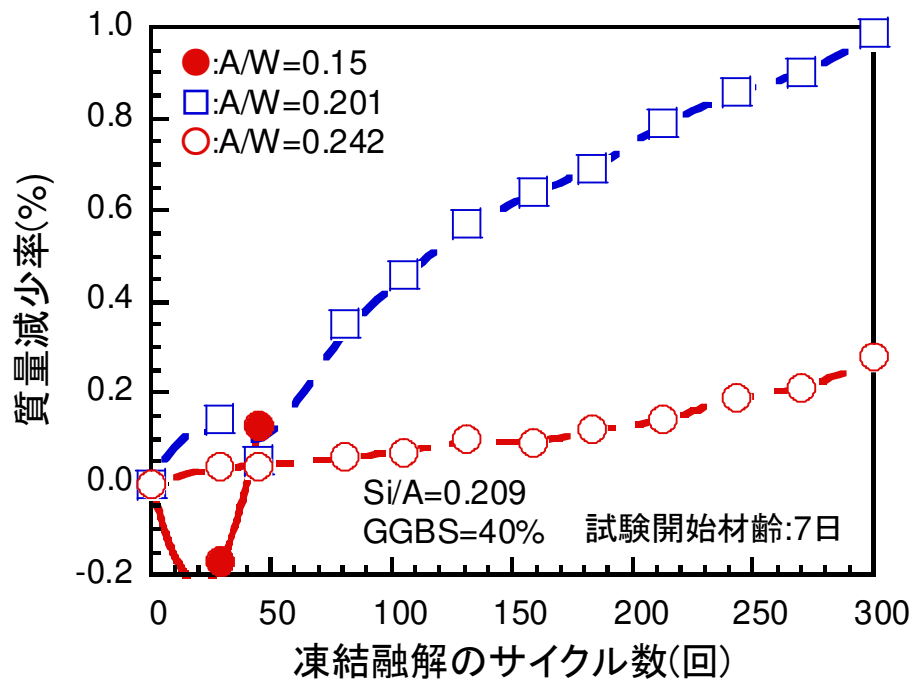


図 5.4-22 質量減少率の結果

写真 5.4-1 56 日間 5%硫酸に浸漬したモルタル供試体

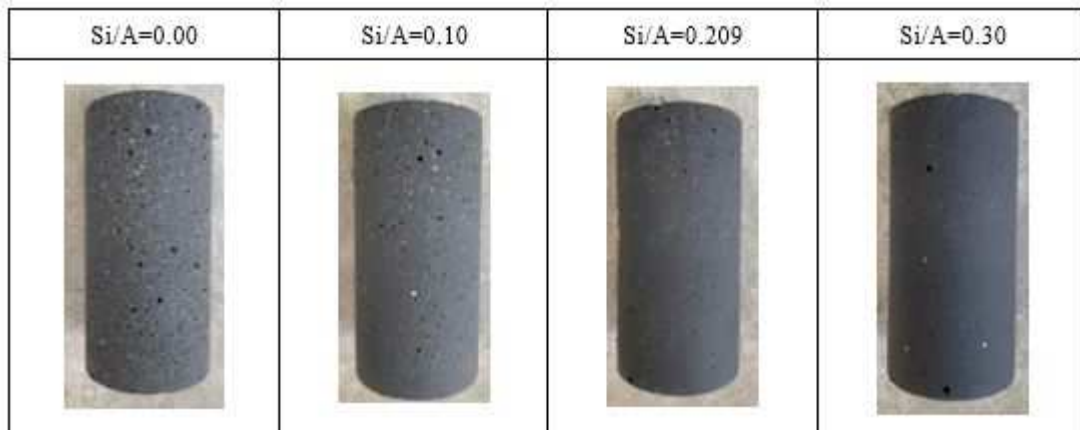


写真 5.4-2 56 日間 5%硫酸に浸漬した水ガラス 2 号を用いた GP コンクリート
(左側 CS 使用, 右側 BFS 使用)



5.5 本章のまとめ

GP 硬化体において、水ガラスの代わりに水酸化ナトリウム溶液とシリカフュームを用いる「溶解法」の GP モルタルとコンクリートの圧縮強度、耐硫酸性、凍結融解抵抗性などを検討した。得られた知見を、つぎにまとめる。

- (1) 加温時間を長くすると圧縮強度は大きくなることが分かる。今回の実験範囲では、80℃高温養生の恒温時間が 8 時間以上であればジオポリマーの圧縮強度は安定的に発現できる。また、練上がり温度が 20℃以下になると、圧縮強度の発現性は小さくなる。
- (2) 高炉スラグ微粉末と高炉スラグ細骨材を用いると、初期のジオポリマーの圧縮強度を促進することができる。
- (3) シリカフュームの添加量を変化しても圧縮強度には大きく寄与しないことが分かった。
- (4) ジオポリマーの圧縮強度に与える影響の大きいものは、高炉スラグ微粉末、シリカフューム、フライアッシュの順で、有効結合材水比と GP の圧縮強度は、概ね比例関係にあることが分かった。
- (5) 5%の硫酸溶液に浸漬し、80 日以上経過してもジオポリマー硬化体の質量減少率は 5%以内に収まり、ジオポリマーの耐酸性はよいことを確認した。高炉スラグ細骨材を用いた場合、耐酸性は弱くなる場合がある。
- (6) ジオポリマーの乾燥収縮は、普通のコンクリートと同じように、単位水量の減少により、乾燥収縮ひずみは小さくなる。
- (7) 既往の研究で、高炉スラグ微粉末 20%以上置換した場合、凍結融解抵抗性に効果があるが、本研究では 40%置換した場合、凍結融解抵抗性は小さいこともあった。凍結融解抵抗性のある GP 配合を設計する場合は単位水量の低減と GGBS の添加の両方を考慮する必要があると考える。

参考文献

- 1) 相原直樹, 辻村太郎, 上原元樹, 土屋広志: 鉄道用材料の LCA による環境評価, 鉄道総研報告, Vol.23, No.6, pp.5-10, 2009
- 2) 上原元樹, 南浩輔, 平田紘子, 山崎淳司: ジオポリマー硬化体の配合・作製法と諸性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1987-1192, 2015.7
- 3) 佐藤隆恒, 上原元樹, 南 浩輔, 山崎淳司: ジオポリマー硬化体の種々の配合, 作製法における生成物と pH 等諸性質との関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2325-2330, 2016.7
- 4) 南浩輔, 松林卓, 船橋政司: ジオポリマー硬化体の諸物性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1957-1962, 2013

第 6 章 結論

本研究では、プレキャストコンクリート製品（以降、PCa 製品と記す）に用いると考えられる普通ポルトランドセメント（以降、OPC と記す）、早強ポルトランドセメント（以降、HPC と記す）、低熱ポルトランドセメント（以降、LPC と記す）および高炉セメント B 種（以降、BB と記す）の 4 種類のセメントを使用し、蒸気養生時の最高温度、脱型後の水中養生の有無および水中養生期間が、コンクリートの性能に与える影響について検討した。粗骨材の種類および粗骨材に付着する微粒分がコンクリートの耐凍害性に与える影響について検討も行った。製品工場の材料を用いて、試験室及び工場実機で製造した高耐久性高炉スラグ細骨材（以降、BFS と記す）コンクリートの圧縮強度、ヤング係数、乾燥収縮ひずみ、中性化速度、塩化物イオンの見掛けの拡散係数、耐久性指数およびスケーリング量について、検討を行った。また、CO₂ 排出量の削減や産業副産物の有効利用の観点から注目される新たな材料のジオポリマー硬化体について、モルタルとコンクリートの圧縮強度、耐硫酸性、凍結融解抵抗性などを検討した。本研究によって得られた結果を、つぎようにまとめとともに課題点を述べ、本論文の結論とする。

1) プレキャストコンクリートの品質

- ・ OPC 及び HPC を用いた場合、蒸気養生を行わずに水中養生を行う場合には、水中養生期間が長くなるほど圧縮強度は増進する。これに対して、蒸気養生を行うと、蒸気養生後に水中養生を行っても、水中養生による効果は得られにくい。また、LPC を用いる場合、蒸気養生温度が高いほど圧縮強度比も高くなることが分かる。BB を用いる場合、いずれの温度で養生した場合にも、脱型後に水中養生を行うことで、圧縮強度が増進することが分かる。ただし、高い温度で蒸気養生を行ったものは、水中養生を行うことによる圧縮強度の増進の効果は標準養生のものに比べ小さいことが分かる。
- ・ セメントに OPC または HPC を用いたコンクリートを、高温の蒸気養生を行った場合や、十分な水中養生を行わなかった場合には、エントレインドエアを連行し、十分な強度を発現しても、凍結融解抵抗性が低下する場合がある。LPC を用いたコンクリートは 20℃での養生温度と同様に、脱型後の養生方法に依らず、凍結融解抵抗性が低下することが分かる。これに対し、セメントに BB を用いたコンクリートは、養生条件に寄らず、凍結融解作用による内部劣化に対して高い抵抗性を示す。

- ・ コンクリート表面のスケーリングに対しては、養生方法の影響を受けやすく、蒸気養生を行わず気中養生のみを行った場合や、高温の蒸気養生を行った場合には、スケーリング量が多くなる。この傾向は、BBを用いた場合に顕著に表れる。
- ・ コンクリートの乾燥収縮に関しては、養生温度が大きくなるほど、乾燥収縮ひずみは小さくなる傾向がある。BBを用いた場合、養生温度の影響は、他のセメントに比べると小さいが、脱型後の水中養生を行わない場合には、乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向にある。
- ・ コンクリートの水分浸透に対しては、高温の蒸気で養生し、脱型後、気中で養生することで水分浸透速度係数を抑えることができる。脱型後水中養生を行った場合、セメントの種類によって蒸気養生温度による影響はそれぞれ異なる。
- ・ 塩化物イオン量の浸透に関しては、蒸気養生温度が低くなるほど、塩化物イオン量の浸透を抑えることができる。また、蒸気養生温度の最高温度を高温になるほど、脱型後の養生方法の効果の差が大きくなり、特に OPC、HPC 及び LPC において顕著に表れる。
- ・ 蒸気養生を行うことによりコンクリートの性能に最も影響を受けるセメントは LPC であり、蒸気養生を行うことで圧縮強度の増進や水分浸透速度係数の低減、乾燥収縮ひずみの抑制に大きな効果が見込まれる。また、LPC に蒸気養生を行うと、スケーリングの増加や塩化物イオン浸透の拡散係数の上昇という影響があるものの、脱型後に水中養生を行うことでこれらの影響を抑えることができる。
- ・ 粗骨材自身の耐凍害性を評価する方法として、JIS A 1122 に規定される硫酸ナトリウムによる安定性試験が用いられるが、実際に、粗骨材に質量パーセント濃度 5%の塩化ナトリウム水溶液を用いた凍結融解試験を行ったところ、安定性試験における損失質量分率が小さくても、凍結融解試験による質量減少率が大きくなる粗骨材がある。
- ・ JIS A 1122 に規定される硫酸ナトリウムによる安定性試験に合格した粗骨材で製造したコンクリートであっても、所定の凍結融解抵抗性が得られない場合がある。
- ・ 粗骨材が耐凍害性に与える影響に関しては、特にスケーリング試験で顕著であり、骨材の凍結融解試験での質量減少率が大きい粗骨材を用いて製造したコンクリートは、蒸気養生を行った場合にスケーリング量が著しく大きくなる。
- ・ 粗骨材に付着する微粒分は、コンクリートの耐凍害性を向上させる傾向がある。しかし、微粒分の種類等によりその影響は異なり、さらに検討を行う必要がある。
- ・ 粗骨材の種類および微粒分による圧縮強度およびヤング係数への影響は小さい。

- 2) 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートのプレキャストコンクリートへの適用
- ・ 試験室で製造した BFS コンクリートの圧縮強度，ヤング係数は，他の工場のものと同程度である。また，乾燥収縮ひずみは小さく，中性化期間 91 日まで中性化が生じていないことを確認した。一方で，塩化物イオンの見掛けの拡散係数は，他の工場のものと比べて若干大きく，またばらつきもあること，耐久性指数は 50 程度と低く，スケーリング量も他の工場のものより大きかった。
 - ・ 実機で BFS コンクリートを製造し，品質の確認を行った。フレッシュ性状は良好で，製品の製造も問題なく行われた。材齢 7 日よりスケーリング試験を行ったが，養生が十分に行われていないことから，劣化が確認された。通常の普通砕砂コンクリート製品と比べ，BFS コンクリート製品は，乾燥収縮ひずみ，中性化速度及び塩化物イオンの拡散係数などの耐久性能は優れていることを確認した。
- 3) ジオポリマーの配合設計，養生方法及び劣化抵抗性の検討
- ・ 加温時間を長くなると圧縮強度は大きくなる。今回の実験範囲では，80℃の高温養生の恒温時間が 8 時間以上であればジオポリマーの圧縮強度は安定的発現ができることがわかった。また，練上がり温度が 20℃以下になると，硬化の進行が遅れる。
 - ・ 高炉スラグ微粉末と高炉スラグ細骨材を用いると，初期のジオポリマーの圧縮強度を促進することができる。
 - ・ シリカフュームの添加量を変化しても圧縮強度には大きく寄与しない。
 - ・ ジオポリマーの圧縮強度に与える影響の大きいものは，高炉スラグ微粉末，シリカフューム，フライアッシュの順で，有効結合材水比とジオポリマーの圧縮強度は，概ね比例関係にあることが分かった。
 - ・ 5%の硫酸溶液に浸漬し，80 日以上経過してもジオポリマー硬化体の質量減少率は 5%以内に収まり，ジオポリマーの耐酸性はよいことを確認した。高炉スラグ細骨材を用いた場合，耐酸性は弱くなる場合がある。
 - ・ ジオポリマーの乾燥収縮は，普通のコンクリートと同じように，単位水量の減少により，乾燥収縮ひずみは小さくなる。
 - ・ 既往の研究で，高炉スラグ微粉末 20%以上置換した場合，凍結融解抵抗性に効果があるが，本研究では 40%置換した場合，凍結融解抵抗性は小さいこともあった。凍結融解抵抗性のある GP 配合を設計する場合は，単位水量の低減と GGBS の添加の両方を考慮する必要があると考える。

以上のように、PCa 製品の性能に与える影響は、使用するセメントの種類、養生温度と養生方法および粗骨材の種類などによって、大きく変わってくることが明らかになった。また、セメントの種類によって、蒸気養生したコンクリートの性能に及ぼす影響は、実験の結果により明らかとなったものの、その結果において、影響を及ぼす大きな要因の一つである水和反応の進行状況について、今後の検討が必要と考える。更に、細骨材の種類が耐凍害性に与える影響についても検討が必要であると考ええる。

社会資本ストックの経年的劣化が始まって、天然骨材の供給量が減少する中、劣化の少ないインフラ整備が望まれている。産業副産物の BFS を用いた高耐久性 BFS コンクリートの配合および製造方法の仕様が策定された中、実機による BFS コンクリート製品を製造し、通常のコンクリート製品の性能と比較し、BFS コンクリート製品の性能は優れていることを確認した。今回の研究結果を踏まえ、よりよい品質の PCa 製品を製作する場合の一助になりたい。

また、CO₂ 排出量の削減や産業副産物の有効利用の観点から、セメントを使用しない、フライアッシュを大量に使用する新たな材料—ジオポリマーについて、配合設計、耐硫酸性、凍結融解抵抗性などを検討し、有効結合材水比と圧縮強度の相関関係が明らかになった。今後プレキャスト製品への適用を期待したい。

謝 辞

本研究を進めるにあたり，終始変わらず懇切なるご指導とご教示くださいました岡山大学教授綾野克紀先生に対しまして，心から感謝の意を表します。また，研究に関する実験の遂行に際しまして，ご指導いただきました岡山大学准教授藤井隆史先生，惜しみない協力を頂いた河村興志郎氏，顧書豪氏，田中湧磨氏，ならびに研究室の瀧口響君，韓旭君，および学生諸子に深く感謝いたします。

本研究を進める中で，国土交通省中国地方整備局岡山国道事務所の平成 30 年度重点テーマ「高耐久性プレキャストコンクリートの開発・普及」に関連させていただくことができたことに感謝いたします。並びにジオポリマーの製作に関しましてご指導いただきました鉄道総合技術研究所の上原元樹様に感謝いたします。

そして，このような研究成果をまとめる機会をいただき，大和クレス株式会社仲田副社長，佐伯良雄技術部長，田坂晃宏開発部長，木下製造部長，昼田輝司次長，井上雅臣課長に心より感謝いたします。業務繁忙に関わらず 3 年間，温かく見守って頂いた大和クレス株式会社の社員の皆様にお礼申し上げます。

最後に，筆者の研究を陰で支えてくれた家族に心から感謝します。

2020 年 7 月

王 亮