

2種類混和材の併用によるP C構造物用
コンクリートの耐久性向上に関する研究

2016年8月

辛 軍青

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	P C 構造物を対象とした混和材使用に関する既往の研究	3
1.3	2 種類混和材の併用について	6
1.4	本研究の目的および特徴	8
1.5	本研究における混和材混合方法の考え方	9
1.6	本論文の構成	12
第 2 章	水和反応・細孔構造と混和材併用の関係	20
2.1	はじめに	20
2.2	セメントの水和反応に及ぼす混和材併用の影響	22
2.2.1	試験概要	22
(1)	試験材料および配合	22
(2)	試験方法	24
2.2.2	セメント主要化合物の水和に及ぼす混和材併用の影響	28
2.2.3	主要水和物の水酸化カルシウムの生成に及ぼす混和材併用の影響	30
(1)	混和材使用による影響	30
(2)	混和材種類および粉末度による影響	30
2.3	セメント硬化体の細孔構造に及ぼす混和材併用の影響	33
2.3.1	試験概要	33
(1)	試験材料および配合	33
(2)	試験方法	33
2.3.2	混和材を併用したセメント硬化体の細孔構造	35
(1)	セメント硬化体の細孔径分布	35
(2)	セメント硬化体の累積細孔容積	37
2.4	第 2 章のまとめ	43

第 3 章	混和材併用による ASR 抑制効果の向上	45
3.1	はじめに	45
3.2	モルタル供試体による ASR の抑制効果の検証	49
3.2.1	モルタル供試体の ASR 促進試験の概要	49
3.2.2	モルタル供試体の ASR 促進試験の結果	51
3.2.3	モルタル供試体の ASR 促進試験結果に対する考察	52
3.3	コンクリート供試体による ASR の抑制効果の検証	55
3.3.1	コンクリート供試体の ASR 促進試験の概要	55
3.3.2	コンクリート供試体の ASR 促進試験の結果	57
3.3.3	コンクリート供試体の ASR 促進試験結果に対する考察	58
3.4	第 3 章のまとめ	59
第 4 章	混和材併用による塩化物イオン浸透抑制効果の向上	61
4.1	はじめに	61
4.2	塩化物イオン浸透抑制試験の概要	62
4.3	塩化物イオン浸透分布の試験結果	66
4.3.1	塩化物イオン浸透分布と結合材種類の関係	66
4.3.2	塩化物イオン浸透分布と結合材粉末度の関係	68
4.4	塩化物浸透抑制による構造物耐久性向上の効果	70
4.4.1	見かけの拡散係数の試算	70
4.4.2	細孔空隙率と見かけの拡散係数の関係	72
4.4.3	鋼材腐食発生の将来予測	74
4.5	第 4 章のまとめ	77
第 5 章	その他の耐久性に及ぼす混和材併用の影響	79
5.1	はじめに	79
5.2	検討方針	79
5.3	中性化特性に及ぼす混和材併用の影響	80
5.3.1	中性化特性について	80
5.3.2	促進中性化試験の概要	81
5.3.3	促進中性化試験の結果	83

(1)	中性化深さおよび中性化速度係数の結果	83
(2)	中性化に及ぼす水和生成物・細孔構造などの影響	88
5.3.4	実環境中の中性化深さの将来予測	92
5.4	凍結融解特性に及ぼす混和材併用の影響	93
5.4.1	凍結融解特性について	93
5.4.2	凍結融解試験の概要	95
5.4.3	凍結融解試験の結果	95
5.4.4	凍結融解試験結果に対する考察	97
5.5	乾燥収縮特性に及ぼす混和材併用の影響	99
5.5.1	乾燥収縮特性について	99
5.5.2	モルタル供試体による乾燥収縮特性の評価	101
(1)	モルタル供試体による長さ変化試験の概要	101
(2)	モルタル供試体による長さ変化試験の結果と考察	103
(3)	細孔空隙量と乾燥収縮特性との関連性	106
5.5.3	コンクリート供試体による乾燥収縮特性の評価	108
(1)	コンクリート供試体による長さ変化試験の概要	108
(2)	コンクリート供試体による長さ変化試験の結果	109
(3)	コンクリート供試体による長さ変化試験結果に対する考察	110
5.6	第5章のまとめ	112

第6章 コンクリートのフレッシュ性状と力学特性に及ぼす混和材併用の影響

6.1	フレッシュ性状に及ぼす混和材併用の影響	117
6.1.1	はじめに	117
6.1.2	試験概要	117
6.1.3	スランプと空気量	118
6.1.4	ブリーディング	118
6.1.5	凝結時間	122
6.2	硬化コンクリートの力学特性に及ぼす混和材併用の影響	124
6.2.1	はじめに	124
6.2.2	モルタルの圧縮強度試験	125
(1)	試験概要	125
(2)	モルタルの圧縮強度	128
6.2.3	コンクリートの力学特性試験	132

(1)	試験概要	.....	132
(2)	圧縮強度	.....	133
(3)	割裂引張強度	.....	135
(4)	静弾性係数	.....	137
6.2.4	細孔空隙率と圧縮強度との相関性	.....	140
6.3	第6章のまとめ	.....	143
第7章	結論	.....	146
7.1	本研究の成果	.....	146
7.2	今後の課題	.....	151
	【謝辞】	.....	152
	本論文に関する著者の発表論文	.....	153

第1章 序論

1.1 研究の背景

プレストレストコンクリート（以下、P Cと略す）構造物は、あらかじめ圧縮力が与えられたコンクリートである。部材の全断面または断面の一部に圧縮力を加えることで、引張には弱いというコンクリート最大の弱点を克服することができる。P C構造物は強度・耐久性・耐震性に優れているため、橋梁、建築、容器、防災施設、港湾構造物などのインフラ施設に広く利用されており、自然災害が多発する日本においては防災、減災に対してP C技術の果たす役割は大きい。

P C構造物を対象に様々な研究が行われる中で、考慮すべき二つの社会的背景が存在している。一つは耐久性向上の社会的ニーズであり、もう一つは環境負荷低減の必要性である。

1) P C構造物の耐久性向上

近年、少子高齢化や財政減少の深刻化により、社会インフラの長寿命化や維持管理の合理化が要求される中、P C構造物は維持管理の負担軽減を求められることが多くなっている。また、P C構造物は過酷な使用条件や環境条件に曝されたにも関わらず、当初の設計供用期間を超えても供用を継続される場合も多く見受けられるようになった^{1,1)}。

P C構造物は圧縮応力が導入されるため、ひび割れを制御でき、また通常の鉄筋コンクリート（以下、R Cと略す）構造物よりコンクリートの設計基準強度が高く、R C構造物に比べて経年劣化が生じにくいとされる。

しかし、P C構造物はひび割れの発生を制御できるとはいえ、すべての施工段階、部位や発生方向などにおいてひび割れの発生リスクを防止できるとは言い切れない。また、構造物の長期供用の間に塩分などの劣化因子がコンクリート内部のP C鋼材まで侵入し、構造物の耐荷性や耐震性に直結するP C鋼材の腐食・破断が発生するおそれがある。その場合は、破壊形態が脆性的となり重大な被害が生じる。なお、P C構造物の劣化進行後に補修・補強を行う場合は、プレストレスが導入されているためR C構造物に比べてコンクリート断面の除去や修復が容易にできない場合がある。さらに、P C構造物は長支間の橋梁や大容量の容器など、R Cに比べて大規模で重要な構造物に使用されることが多く、劣化後の撤去や交換が容易に行えないため、P C構造物は耐久性確保の優先度、重要性が非常に高いと言える。

P C構造物に最も多く発生した劣化現象はコンクリートのひび割れ・剥離であり、その主な劣化原因はアルカリシリカ反応（ASR）や塩害などが挙げられる。これらの

劣化を抑制するための設計施工の基準類が整備されつつあるが、しかし、現状の対策では十分と言いがたい。例えば、ASR に対して無害と判定される骨材を使用したり、アルカリ総量を規定値以下に抑えたり、すでに ASR 対策を講じたコンクリート構造物でも ASR の劣化が発生した報告^{1.2), 1.3)}があり、既存の基準類に従って対策しても安全でない場合がある。また、塩害対策としては鉄筋かぶりの増加やエポキシ塗装鉄筋の採用などの対策^{1.4)}では、ある程度の耐久性向上効果が見込まれるが、構造物の重量増やコストアップなど新たな課題が発生するため、P C 構造物に使用されるコンクリート本体の品質および耐久性を向上する対策が求められている。

以上により、P C 構造物はインフラの重要性や優先度が高く、構造および補修補強の特殊性もあり、P C 構造物の耐久性確保が極めて重要な課題である。さらに、P C 構造物は長期供用が要求される中で、既存の耐久性向上技術や対策は不十分な場合が見受けられ、コンクリートの更なる耐久性向上技術の研究開発が望まれる。

2) P C 構造物の環境負荷低減

地球環境の保全、地球温暖化防止対策としての二酸化炭素 (CO₂) 削減は、世界的にかつ緊急な対応が求められている。世界全体の CO₂ 排出量の約 5% がセメントの製造に由来することが報告され^{1.5)}、日本国内における P C 道路橋を対象とした試算例では、建設工事で発生する CO₂ 排出量の約 40% がコンクリート関連部門に起因することが報告されている^{1.6), 1.7)}。元々、P C のコンクリート配合は低水セメント比が多く使用されセメント量が多いため、エコセメントや産業副産物由来の混和材を使用した環境技術の研究を行い、P C 構造物に応用すると CO₂ 削減効果が一層大きくなる。

近年、コンクリート分野では多数の「低炭素」、「グリーン」と名付けられた環境技術が研究・応用されており、このような環境技術を推進することは、排出量削減の日本国内の数値目標を達成することだけではなく、今後、日本発の優れた環境技術の海外建設市場での活用や普及も図ることができる。したがって、P C 構造物に応用する環境技術は一過性のものに終わらせることなく、今後も発展が期待されると考えられる。

以上では、耐久性向上と環境負荷低減の二つの側面から P C 構造物を対象とした研究の背景を述べた。本研究においては、これらの背景を踏まえて、高炉スラグ微粉末とフライアッシュ、この 2 種類の産業副産物由来の混和材を使用し、P C 構造物に使用されるコンクリートの更なる耐久性向上技術の研究を行った。

注) 本論文では耐久性と耐久性能の表現を統一し、耐久性と表記する。

1.2 PC構造物を対象とした混和材使用に関する既往の研究

従来、産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどをコンクリート混和材として利用することは、資源の有効利用、CO₂排出量の削減および構造物の耐久性向上の観点から期待されている。

PC構造物に高炉スラグ微粉末またはフライアッシュを単独使用したコンクリートの材料特性に関して既に多数の研究が行われており、それぞれの特徴および使用上の課題がある。

1) 高炉スラグ微粉末の単独使用に関する既往の研究

高炉スラグ微粉末（略称 BFS）は、溶鉱炉で銑鉄を製造する際に副産物として生じるスラグであり、溶融している高炉スラグを急冷、粉砕したものである。この高炉スラグ微粉末は、混和材としてセメントに加えた際にセメントの水和反応で生じた水酸化カルシウムなどに刺激されると水和反応を起こす性質（潜在水硬性）を有している^{1.8)}。コンクリート混和材として使用される高炉スラグ微粉末は、比表面積に応じて3000、4000、6000、8000の4種類がJIS規格に分類され^{1.9)}、高炉スラグ微粉末8000以外の種類は一般的に生産・流通している。

PC構造物に高炉スラグ微粉末を適用した事例が多く、基本物性および耐久性に関する研究も盛んに行われている。

既往の研究には、早強ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末6000に内割置換し、PC構造物を対象としたコンクリートの耐久性向上に関する研究が多数あった^{1.10) ~1.19)}。これらの研究では、コンクリート初期強度の改善を図るため粉末度が比較的大きい高炉スラグ微粉末を使用し、置換率50%と70%を比較しながら、コンクリートの物性値から長期耐久性まで総合的に検討した^{1.10)}。その結果、高炉配合は、置換率50%の条件で結合材比を数パーセント低減することで早強セメント単味の配合と同等の強度発現性になると報告された。これに対し、置換率70%の場合は結合材比を大幅に調整する必要があり、施工性およびコストの面では実用性に欠けることが判明した。

上記研究においては、高炉スラグ微粉末50%の置換率は高炉セメントB種の40~45%より高く設定されており、初期強度を確保したうえで、従来の高炉セメント配合より耐久性の向上効果が高いとされる。塩化物イオン浸透抵抗性に関しては長期暴露の供試体や実構造物の試験により浸透抑制効果が確認され^{1.10), 1.12), 1.17)}、ASR抑制効果もPC梁の8年間促進試験により確認されている^{1.13), 1.16), 1.19)}。ただし、高炉スラグ微粉末を使用した配合は、早強セメント単味の配合と比較してASRの発

生を遅らせ、ASR にともなう最終膨張量は早強セメント単味の配合の 1/3～1/2 程度に抑えられるなど、一定の効果が確認されたものの、ASR の劣化を完全に抑制することが困難であることがわかった。

また、高炉スラグ微粉末 4000 を早強ポルトランドセメントの 30%と置換し、P C 構造物の環境負荷低減を考慮したコンクリート材料も研究されている^{1.20), 1.21)}。この研究は流通量が多い高炉スラグ微粉末 4000 を使用し、高炉セメント B 種より少ない混合率で検討した。結果として、コンクリートの高流動化が実現でき、塩化物イオン浸透抵抗性の向上効果が浸漬試験により確認された。また、高炉スラグ微粉末の置換率がコンクリート初期強度に及ぼす影響は大きいと指摘された。

以上の二つの研究はともに実用化されており、プレキャスト P C 部材に要求される初期強度を満足し、橋梁を中心とした P C 構造物の施工実績が多い^{1.22)}。

これ以外に、鉄道の P C 桁の ASR 抑制を目的として高炉セメント B 種を使用した事例もあった^{1.23)}。ところが、緊張力の導入材齢については、早強ポルトランドセメント配合の 3 日に対して、高炉セメント B 種を使用した配合は初期材齢の強度発現性が低く、材齢 10 日頃に達したと報告された。高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの強度発現性は、実用面では大きな課題であると考えられる。

一般に、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、スラグの粉末度が大きいほど、また置換率が高いほど、塩分の遮蔽効果および ASR の膨張抑制効果が優れる^{1.8), 1.24)}。しかし、より高品質の高炉スラグ微粉末を求めようとしても、粉末度規格 6000 以上のものは生産量および流通量が非常に少ない。また、置換率は原則としてセメントの 30～70%の範囲内と規定されるが^{1.8)}、置換率を高めることと初期材齢の強度発現を確保することは相反する要求であり^{1.24)}、これらの要求事項を満足するよう材料・配合設計を行うことは容易ではないことがわかった。

2) フライアッシュの単独使用に関する既往の研究

フライアッシュ（略称 FA）は、石炭を燃焼させた時に発生する石炭灰のうち、集じん器で採取された球形微粉末状の灰である。フライアッシュをセメントに混合すると、セメント水和の際に生成される水酸化カルシウムとポゾラン反応を起こし、コンクリートの耐久性と水密性を向上させる効果がある^{1.25)}。コンクリート混和材としてのフライアッシュは、利用目的や品質に応じ I～IV の 4 種類が JIS 規格に規定されており^{1.26)}、II 種灰は標準的なフライアッシュとして最も使用量が多い。

フライアッシュを P C 構造物に適用した事例は高炉スラグ微粉末に比べて多く見られなかった。しかし、東日本大震災後の電力事情の変化により、国内の石炭火力発電が発電量全体に占める割合が増え、電源構成は震災前に 25%であったが平成

27年度では31%を占めており^{1.27)}、石炭火力発電所から産出されるフライアッシュの有効利用が大きな課題となりつつある。そのため、PC分野においてもフライアッシュを積極的に利用する動きが広がってきた。

既往の研究の中に、俵ら^{1.28)}は、早強ポルトランドセメントの内割10%または20%でフライアッシュⅡ種を混合し、強度特性、体積変化および耐久性に関する研究を行った。その結果、水結合材比を3~7%調整することにより初期強度を確保することが可能となり、フライアッシュを混合したものが乾燥収縮およびクリープ係数共に小さくなった。耐久性として、フライアッシュの混合により中性化抵抗性は低下したが、空気量を適切に制御することで凍結融解抵抗性は確保されることが確認された。また、塩分浸透抵抗性の向上効果が確認されたが、見掛けの拡散係数は、標準養生を行ったものが蒸気養生を行ったものより低下したことから、初期材齢の養生方法が耐久性に与える影響が大きいと指摘された。

また、山村、桜田ら^{1.29)~1.31)}はコンクリート品質のばらつきを抑制できる分級フライアッシュ^{1.32)}を用いて、早強ポルトランドセメントの内割15%または20%の配合によりコンクリートの材料特性およびPC桁の耐荷特性の研究を行った。フライアッシュ混合の場合は初期強度発現が低いため、水結合材比を早強セメント単味より3.9%~6.7%ほど小さく調整した。また、置換率20%の配合を用いた耐久性試験の結果では、塩分浸漬試験から求められた見かけの拡散係数は早強セメント単味配合の1/4程度となり、ASR促進試験でも抑制効果が確認された^{1.30)}。ただし、プレテンション方式のPC橋の適用例では、初期の強度発現、塩害およびASRの抑制効果などを総合的に考慮し、フライアッシュの置換率15%の配合を用いたと解説された^{1.30), 1.31)}。

フライアッシュの置換率に関しては、コンクリートの環境負荷低減および耐久性向上の観点からできる限り大きく設定した方が有利になる。例えば、ASR抑制効果に関して、吉田、鳥居らの研究^{1.33)}では、置換率20%の分級フライアッシュと置換率50%の高炉スラグ微粉末6000は、ほぼ同等のASR膨張低減効果を示した。また、広野、鳥居らの研究^{1.34)}では、置換率15%の分級フライアッシュの比較検討対象は置換率42%の高炉スラグ微粉末4000(高炉セメントB種相当)であった。

コンクリートの耐久性向上のためにフライアッシュの高い置換率が望ましいが、しかしその一方で、フライアッシュは発電所や使用する石炭の種類などの違いにより品質の変動が大きいことが問題視され、混合量が多くなると空気量の安定性ならびに耐凍害性の保持、初期強度の確保、色むらの防止など様々な観点から実用化向けの対策が必要となる^{1.35)}。高品質のフライアッシュを使用することは一つの解決方法となるが、例えば、加熱改質および分級処理によりフライアッシュの高品質化を図る方法が考案されたが、材料のコストはセメントの約2.5倍になり^{1.36)}、普及

しにくい。一方、フライアッシュⅡ種を細骨材の一部に外割置換する方法が提唱された。置換率 10～15%の範囲内では、フライアッシュ品質の変動がコンクリートの品質に影響しないと報告され、施工指針も整備されている^{1.37)}。その他の実用化事例では、プレキャストセグメント工法が採用された沖縄県伊良部大橋の上部構造には、脱枠強度を確保し施工性に悪影響が生じないように、細骨材にフライアッシュⅡ種 22kg/m³ (セメント量の約 5%) という少ない量で外割置換したことが報告されている^{1.38), 1.39)}。これらの施工指針や実用化事例から、フライアッシュの利用拡大のためには、細骨材に外割置換の方法、さらに置換率を制限する方法を用いると、品質変動によるリスクが低減できると考えられる。ただし、これは環境負荷低減および耐久性向上の目標をある程度犠牲することを前提とする。

したがって、PC 構造物にフライアッシュを使用する際に、混合方法や置換率を適切に設定することは、解決すべき重要な課題であると考えられる。

1.3 2 種類混和材の併用について

前節に、PC 構造物を対象に高炉スラグ微粉末またはフライアッシュを単独使用したコンクリートの既往の研究を分析し、更なる耐久性向上のためにはどんな課題に直面しているのかを洗い出した。

2 種類の混和材の中には、高炉スラグ微粉末 6000 を使用したコンクリートは、水結合材比の若干の調整により初期強度発現が確保でき、ASR 抑制、塩化物イオン浸透抑制の効果も優れているが、これ以上に粉末度を高めることが難しく、置換率が大きくなれば強度発現が低下するおそれがある。一方、フライアッシュ使用の場合は、少ない混合量で大きな ASR 抑制効果が期待できるが、初期材齢の強度発現が遅く、品質の変動が大きいことから置換率の制限もある。

それならば、この 2 種類の混和材を併用すれば、ASR 劣化、塩化物イオン浸透に対する抑制効果が一層向上でき、更なる高耐久性のコンクリートが実現できるのではないかと考え出した。これが本研究に取り組んだ動機である。2 種類の混和材の作用機構は全く異なるため、コンクリートに併用した場合も互いの効果が著しく損なわれることがないと予想される。

このように、各々の材料特徴を生かしたコンクリートは、強度発現の確保と長期耐久性の向上を合わせて実現すると、PC 構造物に実用化する際に品質や工程を確保しやすく、早期劣化のリスクが低減され、高耐久性の PC 構造物を実現できる。また、混和材使用量の増加により CO₂ 発生量の削減にも繋がると考えられる。

しかし、既往の研究には、普通、早強ポルトランドセメントと単一な混和材を用いた材料の研究が多く、PC 構造物に限定せず文献調査しても、混和材の併用は主

に普通ポルトランドセメントとの組合せの研究が多く、初期の強度発現はP C構造物としての適用性に課題があった。

例えば、福井県^{1.42)}では、高炉セメントの20%をフライアッシュに置換した配合では材齢7日強度は18.5N/mm²であった。また、松家ら^{1.43)}は、普通ポルトランドセメントにフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を併用することや、高炉セメントにフライアッシュを混合するなど、材料の組合せを変えて研究を行ったが、材齢3日の圧縮強度でも35N/mm²未満であり、P C構造物が要求する強度水準に満たした配合ではなかった。

また、杉ら^{1.44)}は置換率10%のフライアッシュⅡ種と45%の高炉スラグ微粉末4000の組合せ、および置換率15%のフライアッシュと40%の高炉スラグ微粉末の組合せを使用し、普通ポルトランドセメントの一部を置換した配合で研究を行った。強度試験の結果、両方の配合は30N/mm²未満であり、このような材料の組合せはP C構造物に適用しないことが明らかになった。

なお、既往の研究によると、早強ポルトランドセメントはP C構造物によく使用されている。早強ポルトランドセメントは、普通ポルトランドセメントや高炉セメントに比べ、粉末度が高くかつセメント主要化合物であるエーライト(C₃S)量が多い^{1.40), 1.41)}。そのため、水和生成物である水酸化カルシウム(CH)がより早期に多く生成され、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性またはフライアッシュのポゾラン反応を促進させる効果がある。したがって、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを使用したコンクリートには、早強ポルトランドセメントの使用による性能向上が図れるため、優先的に検討する必要がある。

このように、早強ポルトランドセメントと2種類混和材の併用によって、更なる低炭素、高耐久のコンクリートに関する研究はほとんど行われておらず、それぞれの材料が持っている特性値の単純合計ができるかどうかはまだ解明されていない。

高炉スラグ微粉末またはフライアッシュのような混和材をコンクリートに使用した場合は、セメントおよび混和材の種類や置換率、組合せによってコンクリートの性能が大きく異なり、使用材料の種別ごとにコンクリートの材料特性を把握することが必要となっている。

したがって、2種類混和材の併用によるP C構造物用コンクリートは、その材料特性は必ずしも明確になっておらず、更なる低炭素、高耐久のコンクリートの今後を展開することを図るため、まずはコンクリートの諸特性や耐久性の究明が極めて重要であると考えられる。

1.4 本研究の目的および特徴

本研究は、プレストレストコンクリート（P C）構造物を対象に、コンクリート構造物の耐久性向上ならびに環境保全を図る目的で、早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末（BFS）とフライアッシュ（FA）を併用した混和材に置換し、この三成分の結合材がコンクリートの諸特性や耐久性などに及ぼす影響を検討した。

本研究の主な特徴は以下に示す。

1) 2種類混和材の併用

高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用することによる相乗効果が期待でき、コンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性、ASR 抵抗性などの長期耐久性の更なる向上が図れる。

2) 早強ポルトランドセメントの使用

早強ポルトランドセメントは普通ポルトランドセメントに比べ、粉末度が高くかつセメント主要化合物であるエーライト（ C_3S ）量が多いため、初期材齢に $Ca(OH)_2$ が生成し、生成量も多く、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性またはフライアッシュのポゾラン反応を有効に促進させると考えられる。

1.5 本研究における混和材混合方法の考え方

1) 高炉スラグ微粉末の混合

高炉スラグ微粉末の混合方法はセメント質量の50%内割置換とする。これは既往の研究^{1.10) ~1.21)}にて物性値が確認され、さらにP C橋梁上部工に過去の実績が多く耐久性が確認された配合であり、本研究では改めて高炉スラグ微粉末の粉末度(比表面積4000, 6000, 8000)の影響を比較検討した。

2) フライアッシュの混合

フライアッシュの混合方法は初期強度の低下を避けるため細骨材の一部と置換し、いわゆる外割置換の配合を主に使用した。また、フライアッシュの混合率について、原則としてセメントの10~30%とされており^{1.25)}、また一般的に15~20%を採用する事例が多く^{1.45)}、細骨材と置換する場合は10~15%が推奨されている^{1.37)}。混合率が低いほど、フライアッシュ中の未燃カーボンがコンクリートの空気量に及ぼす影響は小さいことから、本研究では実用面で不具合が生じない範囲で置換率となるべく大きくなるように考え、混合率をセメントまたはセメントと高炉スラグ微粉末からなる結合材の質量10%に設定した。

1.2節にも述べたように、フライアッシュの混合率が増えるほどコンクリートの耐久性向上効果が大きく、CO₂削減量も多くなるが、本研究はフレッシュ性状および強度発現とのバランス重視し、より実用性を配慮する配合と設定した。こうすることで、フライアッシュは少ない混合率でありながら、この種のコンクリートはより広い範囲に普及し長年にわたって使用されれば、結果としてフライアッシュの使用量増加が図れると考えられる。

また、本研究では最も流通量が多いフライアッシュⅡ種を使用し、産地や粉末度が異なる2種類を選定した。なお、フライアッシュは外割混合を基本としたが、上記の高炉スラグ微粉末の一部を置換し、いわゆる内割混合の配合も比較対象として1ケース実施した。

3) 水結合材比

本研究では、セメントペースト、モルタルの配合は水結合材比50%、40%、30%の3種類を使用した。水結合材比50%と40%配合の場合は現場打ちのRC構造物やポストテンション方式P C構造物を想定し、水結合材比30%配合は工場製品のプレテンション方式P C部材を想定している。水結合材比30%配合のみにおいては、後

述（2.2.1節）の給熱促進養生を実施している。

また、コンクリートの配合は水結合材比 34%の 1 種類を使用した。これも既往の研究^{1.19)}で初期の強度発現や長期耐久性の確認が行われたコンクリート配合である。

本研究で使用した材料のすべてはJIS規格品であり、比較対象となっている高炉スラグ微粉末8000を除いてすべて汎用性があり流通可能な材料である。

また、各種配合の模式図を、モルタルおよびコンクリート配合を例にして図1.1に示す。その中で、高炉スラグ微粉末単独使用の配合（HB）は既往の研究^{1.10) ~1.21)}を継承したものであり、2種類の混和材を併用した配合（HBFと表記する）は本研究の主要配合と位置付ける。

H	C(100%)	W	C		S		
HB	C(50%) +BFS(50%)	W	C	BFS	S		
HF	C(100%) +FA(外割10%)	W	C		FA	S	
HBF	C(50%) +BFS(50%) +FA(外割10%)	W	C	BFS	FA	S	
HBF内	C(50%) +BFS(40%) +FA(内割10%)	W	C	BFS	FA	S	
H	C(100%)	W	C		S	G	
HB	C(50%) +BFS(50%)	W	C	BFS	S	G	
HBF	C(50%) +BFS(50%) +FA(外割10%)	W	C	BFS	FA	S	G

【材料の略号】

W: 水 (化学混和剤の量を含む)

C: セメント, 本研究は早強ポルトランドセメント使用, 配合名に H と表記する。

BFS: 高炉スラグ微粉末

FA: フライアッシュ

S: 細骨材, ASR 試験では反応性細骨材 S-R を使用する。

G: 粗骨材, ASR 試験では反応性粗骨材 G-R を使用する。

【各配合の表記】

H: 早強ポルトランドセメントのみ (早強セメント単味)

HB: 早強 + 高炉スラグ微粉末の 50%内割

HF: 早強 + フライアッシュの 10%外割

HBF: 早強 + 高炉の 50%内割 + フライアッシュの 10%外割

HBF 内: 早強 + 高炉の 40%内割 + フライアッシュの 10%内割

図 1.1 各種配合の模式図
(上はモルタル, 下はコンクリートの例)

1.6 本論文の構成

本論文は7章の構成であり、各章の内容を以下に示す。

第1章は序論であり、PC構造物の「耐久性向上」および「環境負荷低減」の二つの社会的背景を抽出し、産業副産物である高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを使用した耐久性向上に関する既往の研究を紹介した。コンクリートの更なる耐久性向上の課題を整理したうえで、2種類の混和材を併用する方法を提案し、本研究の目的と本論文の構成を述べた。

第2章では、セメントの水和反応および硬化体の細孔構造に及ぼす2種類混和材併用の影響について検討を行った。

まず、各種混和材の組合せが早強ポルトランドセメントの水和反応に及ぼす影響について述べた。本論文はコンクリート中のマトリックス部分であるセメント硬化体の供試体を作成し、X線回折分析法を用いて各材齢において早強ポルトランドセメントの主要な化合物であるエーライト(C_3S)および主要な水和物である水酸化カルシウム(CH)を定量的に分析し、早強ポルトランドセメントの水和反応速度、2種類混和材併用による水酸化カルシウムの消費に及ぼす水結合材比や、混和材の種類および粉末度などの影響を明らかにした。

次に、混和材が硬化体の細孔構造に及ぼす影響について水銀圧入法を用いて分析した。その結果、早強ポルトランドセメントを使用したセメント硬化体は微小径の細孔が中心であり、混和材の混合が長期にわたってセメント硬化体の内部組織を緻密化させる傾向が確認された。また、2種類混和材併用配合の各々の細孔構造の特徴を把握した上で、2種類混和材併用は最も優れた緻密性を有することを明らかにした。その中で、給熱促進養生を行った配合では、フライアッシュのポゾラン反応が促進され、全空隙量が低下することを把握した。

第3章～第5章は、コンクリートの長期耐久性に及ぼす2種類混和材を併用する影響について、ASR抑制効果、塩化物イオン浸透抑制効果、中性化抵抗性、凍結融解抵抗性および収縮特性を検討したものである。

まず、第3章ではASR抑制効果に及ぼす2種類混和材併用の影響を検討した。混和材を使用したコンクリートはアルカリイオン濃度の低減や組織構造の緻密化によりASRを抑制する効果が期待されるが、2種類の混和材を併用した場合の耐久性向上効果は不明確である。そこで、ASR膨張量試験を行った結果、混和材使用の耐久性向上効果を確認できた上、特に高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用した場

合は優れた相乗効果があることを判明した。また、第2章で検討したセメント水和硬化体中の水酸化カルシウム含有量と、ASR促進試験における膨張する日数は負の相関関係があると判明し、2種類の混和材併用の配合は水酸化カルシウム含有量が最も少ないことから、ASR抵抗性が高くなることが必然であると解明した。なお、養生条件の検討では、給熱養生を行ったコンクリートはASRによる膨張が早く進行する傾向が確認された。

次に、第4章では塩化物イオン浸透抑制効果に及ぼす2種類混和材併用の影響を検討した。塩化物イオン浸透量の分析試験を行い、混和材の種類や粉末度、初期材齢時の養生方法の影響などを検討した結果、2種類の混和材併用の配合は、内部の塩化物イオン含有量が最も低く、試験結果から試算された見かけの拡散係数が早強セメント単味配合に比べて6~9割を低減でき、高炉スラグ微粉末単独使用配合に比べても3~6割を低減でき、塩化物イオンの浸透の抑制効果は最も優れていると判明した。さらに、第2章で検討した細孔構造の影響を明らかにしたとともに、PC構造物を対象に鋼材腐食を予測した結果、2種類の混和材を併用した配合は鉄筋腐食発生の予測年数が最も長く、厳しい塩害環境を想定しても長期耐久性が期待できることがわかった。これにより、2種類混和材併用は塩化物イオン浸透抑制効果が大きく、優れた相乗効果があることが判明した。

さらに、第5章では中性化抵抗性、凍結融解抵抗性および収縮特性などその他の耐久性に及ぼす2種類混和材併用の影響を検討した。中性化について、促進試験結果からPC構造物の耐用年数の予測を行い、2種類混和材併用の配合は中性化抵抗性が低下しないことを確認し、第2章で検討した水和生成物や細孔構造の中性化速度係数に及ぼす影響を明らかにした。また、耐凍害性については、高い粉末度の高炉スラグ微粉末の使用により強度発現を確保できること、凍結融解劣化と関連性がある細孔空隙が極めて少ないことにより、2種類混和材併用の耐凍害性が低下しないことを確認した。なお、モルタルおよびコンクリートを用いた乾燥収縮特性の試験結果に基づき、材料構成や養生方法の影響を把握し、第2章で検討した細孔空隙量と乾燥収縮特性の相関関係を確認した。

以上を持って、混和材を使用したコンクリートはASR、塩化物イオン浸透に対する抑制効果が向上することが確認でき、特に2種類の混和材を併用する場合は最も優れた耐久性を有することを明らかにした。

第6章では、本研究の実用化に向けてコンクリートのフレッシュ性状と力学特性に及ぼす混和材併用の影響を確認した。フレッシュ性状についてスランプ、空気量、

ブリーディング量および凝結時間の確認を実施し、凝結始発時間が遅れることなど施工上の注意点を把握した。

次に、混和材が硬化コンクリートの力学特性に及ぼす影響について述べた。硬化コンクリートの力学特性について圧縮強度、割裂引張強度、静弾性係数の試験を行い、その中の圧縮強度についてはモルタルとコンクリートの両方の試験を行って材料構成が強度特性に及ぼす影響を把握した。結果として、混和材を使用した場合は、既往の研究と同じく初期材齢では圧縮強度が小さくなることを確認した。しかし、その後の強度増加は、混和材を使用したケースは未使用より大きくなり、特に標準養生を行った場合および高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用した場合はこの傾向が顕著であることを把握した。さらに、第2章で検討された総細孔空隙率は $0.006\sim 10\mu\text{m}$ の範囲において、圧縮強度（自然対数値）と相関性があることを解明した。

第7章は結論であり、本研究で得られた知見を総括し結論を述べるとともに、2種類混和材の併用によるコンクリートの耐久性向上の今後の課題に関して見解を述べた。

以下に、本研究のフロー・各章の構成および相関図を図1.2に示す。

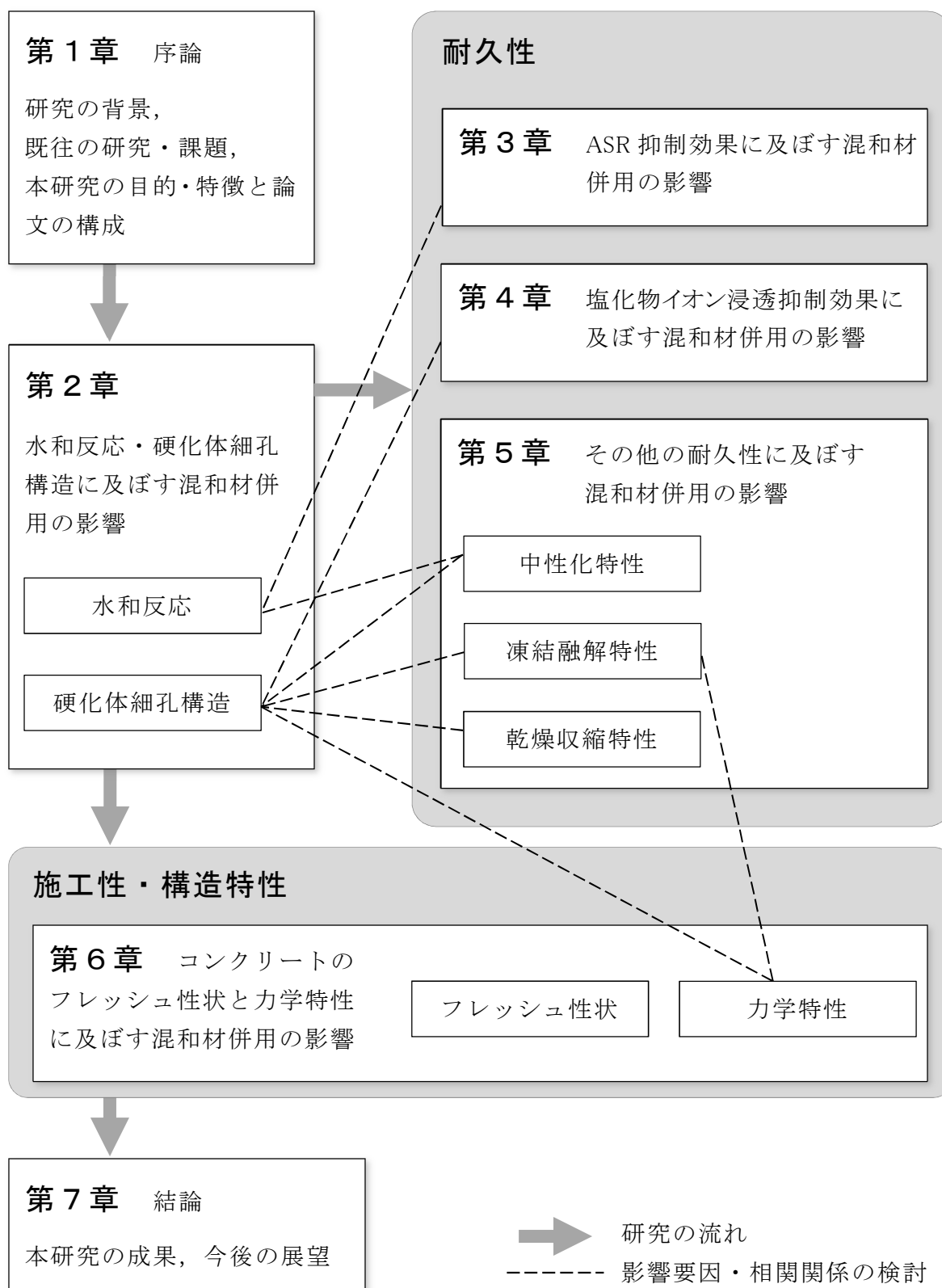


図 1.2 本研究のフロー・各章の構成および相関図

【第1章の参考文献】

- 1.1) プレストレストコンクリート工学会：P C技術規準シリーズ P C構造物高耐久化ガイドライン，2015.
- 1.2) 鳥居和之：アルカリシリカ反応にいかに対応するか，セメント・コンクリート，pp.1-9，2005.
- 1.3) 古賀裕久，百武壮，渡辺博志，脇坂安彦，西崎到，守屋進：屋外に23年以上暴露したコンクリートの観察結果に基づく骨材のASR反応性の検討，土木学会論文集E2（材料・コンクリート構造）Vol.69，No.4，pp.361-376，2013.
- 1.4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IIIコンクリート橋編，pp.172，2002.
- 1.5) IPCC：Climate Change 2007 Mitigation of Climate Change，Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the IPCC，Cambridge University Press，pp.467-469，2007.
- 1.6) 手塚正道，梶原勉，齋藤謙一，河合研至：P C橋上部工のCO₂排出量の見える化，コンクリート工学，Vol.48，No.9，pp.91-94，2010.
- 1.7) 樋口雅也，河合研至：コンクリートの環境負荷評価における環境要因に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.1531-1536，2002.
- 1.8) 土木学会：コンクリートライブラリー86 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，1996.
- 1.9) JIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」
- 1.10) 日本材料学会：高炉スラグ微粉末を使用した高耐久性プレストレストコンクリート構造物の開発，1998.
- 1.11) 石田裕一，江崎守，前田悦孝，坂本賢次，松下博通：高炉スラグ微粉末を用いた高耐久P C橋の設計・施工ー熊本高森線俵山4号橋ー，プレストレストコンクリート，Vol.42，No.3，pp.45-51，2000
- 1.12) 小島孝昭，豊福俊泰，小林一輔：塩害に対応した高耐久性P C構造物の建設と性能評価に関する研究，土木学会論文集，No.802/V-69，pp235-253，2005.
- 1.13) 蓑田理希，鳥居和之，横山博司，古川柳太郎：P C梁部材のASR劣化に及ぼす高炉スラグ微粉末の効果の確認を目的とした暴露試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，pp.839-844，2006.
- 1.14) 石井豪，堅田茂昌，西尾浩志，蓑田理希：高炉スラグ微粉末を用いたプレストレストコンクリート製配水池の水道水耐久性確認のための基礎的研究，第59回全国水道研究発表会論文集，pp.394-395，2008.

1. 15) 福永靖雄, 石塚純, 田中正裕, 吉村徹: 高炉スラグ微粉末を用いた沖縄自動車道・億首川橋におけるリニューアル工事, コンクリート工学, Vol. 47, No. 2, pp. 53-58, 2009.
1. 16) 松山高広, 石井豪: 高炉スラグ微粉末を用いたP C構造物の耐久性向上技術-高炉スラグ微粉末 6000 の適用例-, プレストレストコンクリート, Vol. 52, No. 2, pp. 72-79, 2010.
1. 17) 後藤剣也, 石井豪, 辛軍青, 大村一馬: 高炉スラグ微粉末を適用した橋梁における長期耐久性について, 第 21 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 93-96, 2012.
1. 18) 土木学会: 日本が世界に誇るコンクリート技術, pp. 131-133, 2014.
1. 19) 國富康志, 石井豪, 辛軍青, 鳥居和之: 高炉スラグ微粉末 6000 を混和したP C梁部材の ASR 劣化に対する耐荷力特性, 第 24 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 323-326, 2015.
1. 20) 福田昌明, 徳光卓, 添田政司, 大和竹史: 高炉スラグ微粉末を用いた早強性高流動コンクリートの耐久性に関する研究, 第 11 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 905-908, 2001.
1. 21) 篠原貴, 久湊豊, 中沢金光, 清水正志: 長桜架道橋への環境負荷軽減コンクリートの適用, 土木学会第 60 回年次学術講演会論文集, pp. 691-692, 2005.
1. 22) 日本コンクリート工学会: 混和材積極利用によるコンクリート性能への影響評価と施工に関する研究委員会報告書, pp. 148-151, 2013.
1. 23) 坂口伸也, 宮本秀樹, 武若耕司, 山口明伸, 白根勇二: 高炉セメント B 種を用いたコンクリートの P C 桁への適用, 土木学会第 70 回年次学術講演会論文集, pp. 1275-1276, 2015.
1. 24) 日本材料学会: コンクリート混和材料ハンドブック, pp. 327-334, 2004.
1. 25) 土木学会: コンクリートライブラリー94 フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針 (案), 1999.
1. 26) JIS A 6201 「コンクリート用フライアッシュ」
1. 27) 経済産業省エネルギー庁: 平成 27 年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2016), pp. 185-186, 2016.
1. 28) 俵道和, 呉承寧, 石川嘉崇, 滝上邦彦: プレストレストコンクリートへのフライアッシュの適用性に関する基礎試験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 197-202, 2011.
1. 29) 山村智, 鈴木雅博, 小林和弘, 鳥居和之: 分級フライアッシュを用いたコンクリートのプレテンション P C 桁への適用に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 181-186, 2013.

1. 30) 山村智, 桜田道博, 小林和弘, 鳥居和之: フライアッシュコンクリートのP C 橋梁への適用に関する実用化研究, プレストレストコンクリート, Vol. 57, No. 5, pp. 46-53, 2015.
1. 31) 桜田道博, 山村智, 鳥居和之, 山中章平: フライアッシュを用いたプレテンションP C T 桁橋 (宮坂橋歩道橋) の施工, 第 24 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 315-318, 2015
1. 32) 鳥居和之: フライアッシュの活用によるコンクリートの高耐久化ー北陸地方のASR 問題への取り組みと情報発信ー, 電力土木, No. 357, p11-15, 2012.
1. 33) 吉田匠吾, 板坂匠, Irfan Prasetia, 鳥居和之: P C 桁・P C a 製品のASR 抑制対策としての分級フライアッシュの効果, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 985-990, 2013.
1. 34) 広野真一, 安藤陽子, 大代武志, 鳥居和之: フライアッシュと高炉スラグ微粉末によるASR 抑制効果の比較, セメント・コンクリート論文集, No. 67, pp. 441-448, 2014.
1. 35) 日本コンクリート工学会: 混和材積極利用によるコンクリート性能への影響評価と施工に関する研究委員会報告書, p63-70, 2013.
1. 36) 国土交通省新技術情報提供システム (NETIS): 登録番号 QS-100005-A コンクリート混和材 (CfFA: 改質フライアッシュ)
1. 37) 土木学会四国支部: フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針 (案), 2003.
1. 38) 宜保勝, 渡久山直樹: 伊良部大橋の概要と技術的特徴, 沖縄しまたて協会建設情報誌「しまたてい」, No. 51, pp. 18-22, 2009
1. 39) 白石哲, 中村雄一郎, 平安山良和: 伊良部大橋上部工の施工: 塩害地区における100年対応の橋梁を目指して, コンクリート工学, No. 49, pp. 41-46, 2011
1. 40) JIS R 5210 「ポルトランドセメント」
1. 41) JIS R 5211 「高炉セメント」
1. 42) 福井県建設技術公社: フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート配合・製造および施工指針 (案), 2007.
1. 43) 松家武樹, 鈴木康範, 堺孝司, 福留和人: フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンコンクリートに関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, Vol. 64, No. 1, pp. 295-302, 2010.
1. 44) 杉大樹, 塚越雅幸, 上田隆雄: フライアッシュ及び高炉スラグ微粉末を使用したプレキャストコンクリート部材の長期耐久性と微細構造, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 763-768, 2013.

- 1.45) 伊藤孝明, 五十嵐浩行, 伊藤智章: レディーミクストコンクリート工場におけるコンクリート用混和材の有効利用の現状と今後の課題・展望, コンクリート工学, Vol. 52, No. 5, pp. 484-487, 2014.

第2章 水和反応・細孔構造に及ぼす混和材併用の影響

2.1 はじめに

本章では、高炉スラグ微粉末とフライアッシュという2種類混和材の併用が早強ポルトランドセメントの水和反応、ならびに硬化体の細孔構造の形成に及ぼす影響について検討を行った。

図2.1に示すように、コンクリートの強度特性と耐久性は水和反応の進行および細孔構造特性に影響される。混和材を使用した場合、特に高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用する場合は、混和材の種類や混入量、組合せによってコンクリートの性能が大きく変化し、コンクリートの強度および耐久性と密接な関係のある水和反応の進行および細孔構造特性の究明は極めて重要である^{2.1)}。

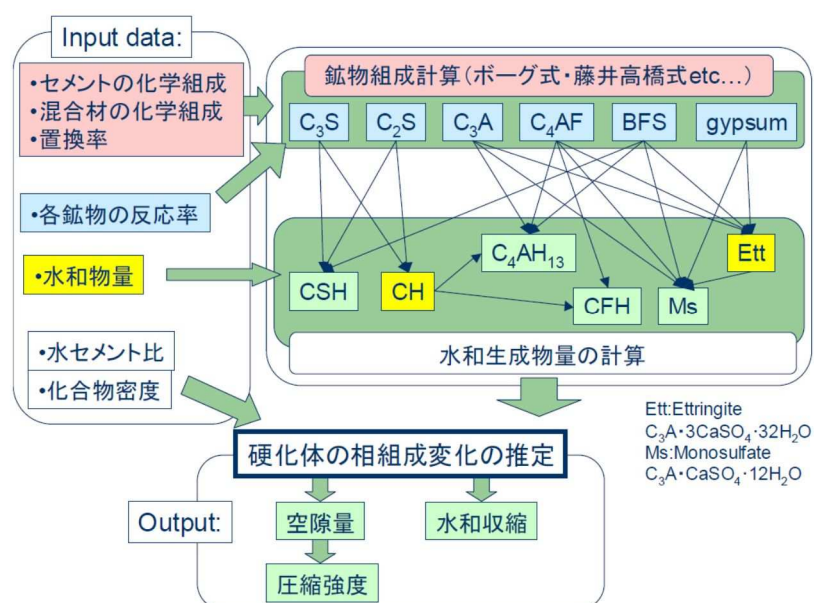


図 2.1 セメントへ適用した相組成モデルの概要^{2.1)}

水和反応に及ぼす混和材併用の影響の検討 (2.2 節) には、コンクリート中のマトリックス部分となるセメント硬化体を用いて供試体を作成し、X線回折分析法で、各材齢において早強ポルトランドセメントのメイン化合物であるエーライト (C_3S) および主要な水和物である水酸化カルシウム (CH) を定量的に分析した。また、分析結果に基づき、2種類混和材の併用がセメントの水和反応速度へ及ぼす影響、ならびに水酸化カルシウムの生成や消費に及ぼす影響の検討を行った。

また、硬化体細孔構造に及ぼす混和材併用の影響の検討（2.3 節）には、早強ポルトランドセメントを用いたコンクリート中のマトリックス部分であるセメント硬化体（セメントペースト）を対象とし、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを単独使用または併用した配合の細孔径分布を実験的に調べ、混和材の種類などが細孔構造に及ぼす影響を検討した。

また、本研究における細孔径の検討範囲は $0.0055 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ とし、既往の研究^{2.2)}によるとゲル空隙および毛細管空隙に該当する（図 2.2）。

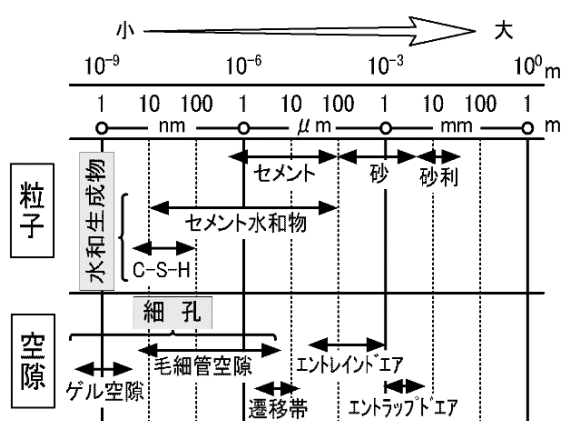


図 2.2 コンクリート中の粒子と空隙の大きさ^{2.2)}

以上の内容を整理し、第3章以降において、セメント硬化体の水和反応と細孔構造は、2種類の混和材を併用したコンクリートの耐久性およびその他特性にどのような関連性があるかを検討した（表 2.1）。

表 2.1 水和反応・硬化体組織形成とコンクリート性能の関連性検討

コンクリートの性能項目	水和反応	細孔構造	備考
ASR 劣化抑制効果	◎	○	第3章
塩化物イオン浸透抑制効果	○	◎	第4章
中性化特性	◎	○	第5章
凍結融解特性	-	◎	
乾燥収縮特性	-	◎	
強度特性	-	◎	第6章

注) ◎：コンクリート性能と関連性があるとされる。

○：コンクリート性能と副次的に関連性があるとされる。

2.2 セメント水和反応に及ぼす影響

2.2.1 試験概要

(1) 試験材料および配合

表 2.2 に本研究の使用材料を示す。セメントは早強ポルトランドセメント (H) を使用し、混和材は2種類の高炉スラグ微粉末 4000, 6000 (B4, B6) と、粉末度や産地が異なる2種類のフライアッシュ (F3, F4) を使用した。

表 2.2 セメント硬化体に使用する材料の一覧表

材料分類	種類	記号	特性値
セメント	早強ポルトランドセメント	H	密度 3.14g/cm ³ , 比表面積 4,380cm ² /g
混和材	高炉スラグ微粉末 4000	B4	密度 2.88g/cm ³ , 比表面積 4,060cm ² /g
	高炉スラグ微粉末 6000	B6	密度 2.88g/cm ³ , 比表面積 6,290cm ² /g
	フライアッシュ (II種)	F3	密度 2.28g/cm ³ , SiO ₂ 57.8%, ig-loss2.5%, 比表面積 3,550cm ² /g 活性度指数: 83(28日), 103(91日)
		F4	密度 2.30g/cm ³ , SiO ₂ 53.7%, ig-loss2.0%, 比表面積 4,550cm ² /g 活性度指数: 83(28日), 107(91日)

表 2.3 にセメント硬化体の配合一覧を示す。水和生成物の分析はコンクリート配合から細骨材および粗骨材を除いたセメントペーストを使用した。水結合材比は50%、40%、30%の3種類とした。ここで、水結合材比とは以降のモルタルやコンクリートの配合と同様に W/ (C+BFS) と定義している。セメントは早強ポルトランドセメントを使用し、配合名に記号 H と表示する。

表 2.3 セメント硬化体の配合一覧表

水結合材比 (%)	各配合 の記号	単体量 (kg/m ³)					
		水 (W)	セメント (C)	高炉スラグ 微粉末 (BFS)		フライアッシュ (FA)	
				(B4)	(B6)	(F3)	(F4)
50	H	611	1222	—	—	—	—
	HB6	601	601	—	601	—	—
	HF3	578	1156	—	—	116	—
	HB4F3	570	570	570	—	114	—
	HB6F3	570	570	—	570	114	—
	HB6F4	570	570	—	570	—	114
40	H	556	1390	—	—	—	—
	HB6	547	684	—	684	—	—
	HF3	523	1308	—	—	131	—
	HB4F3	515	644	644	—	129	—
	HB6F3	515	644	—	644	129	—
	HB6F4	515	644	—	644	—	129
30	H	485	1617	—	—	—	—
	HB6	475	792	—	792	—	—
	HF3	451	1503	—	—	150	—
	HB4F3	443	738	738	—	148	—
	HB6F3	443	738	—	738	148	—
	HB6F4	443	738	—	738	—	148
	HB6F3 内	467	778	—	622	—	156

各種材料の組合せは、早強ポルトランドセメント単味のケース（H）、高炉スラグ微粉末 6000 を 50%内割混合したケース（HB6）、フライアッシュ F3 を 10%外割混合したケース（HF3）、および各種の高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用したケース（HB*F*）の 4 ケースとした。

各配合は、早強ポルトランドセメント単味のケース（H）、高炉スラグ微粉末 6000 を 50%内割混合したケース（HB6）、フライアッシュの F3 を 10%外割混合したケース（HF3）以外に、本研究の主目的である各種高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用したケース（HB*F*）を使用した。

また、水結合材比 30%シリーズの中、フライアッシュ混合方法の比較対象として、フライアッシュ 10%内割混合のケース（HB6F3 内）も検討した。

ここで、高炉スラグ微粉末の混合率 50%の配合は、P C 橋梁上部工に 300 橋以上の実績があり耐久性向上効果が確認されたものである。また、フライアッシュの混合率を 10%に設定した理由は、フライアッシュ中の未燃カーボンがコンクリートの空気量に及ぼす影響を抑えるためである。

（2） 試験方法

1) 供試体作成と養生

セメント硬化体は、室温約 25℃の環境で容量 1 リットルのモルタルミキサーを使用し 90 秒の練混ぜを行い、直径 50mm × 高さ 100mm の円柱供試体を成形した。

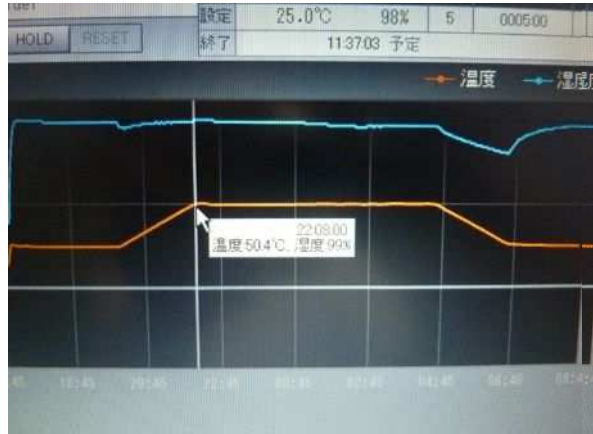
水結合材比 50%と 40%の配合の供試体は、現場打ちの構造物に使用することを想定し、打ち込んだ後に速やかに室温 20℃の封かん養生を行い翌日脱枠した。

これに対して、水結合材比 30%の配合は工場製作のプレキャスト部材に使用することを想定し、初期強度を得るために、写真 2.1 に示すような温湿度が制御できる養生槽を用いて最高温度 50℃の給熱促進養生を行い、その後に脱枠した。給熱促進養生の温度パターンは図 2.3 に示すように、養生槽内の温度は、前置きを 3 時間、50℃までの温度上昇を 2 時間、50℃保持を 6 時間、25℃までの温度降下を 2 時間の計 13 時間と設定した。また、養生期間中の相対湿度は、常に飽和状態になるように設定した。

いずれのケースにおいても、翌日に 20℃の室内で脱枠し、所定の材齢まで 20℃の水中養生を実施した。



(1) 温湿度の制御ができる養生槽



(2) 給熱促進養生の設定画面の一例
(上のグラフは相対湿度, 下のグラフは温度)

写真 2.1 養生槽を使用した給熱促進養生の状況

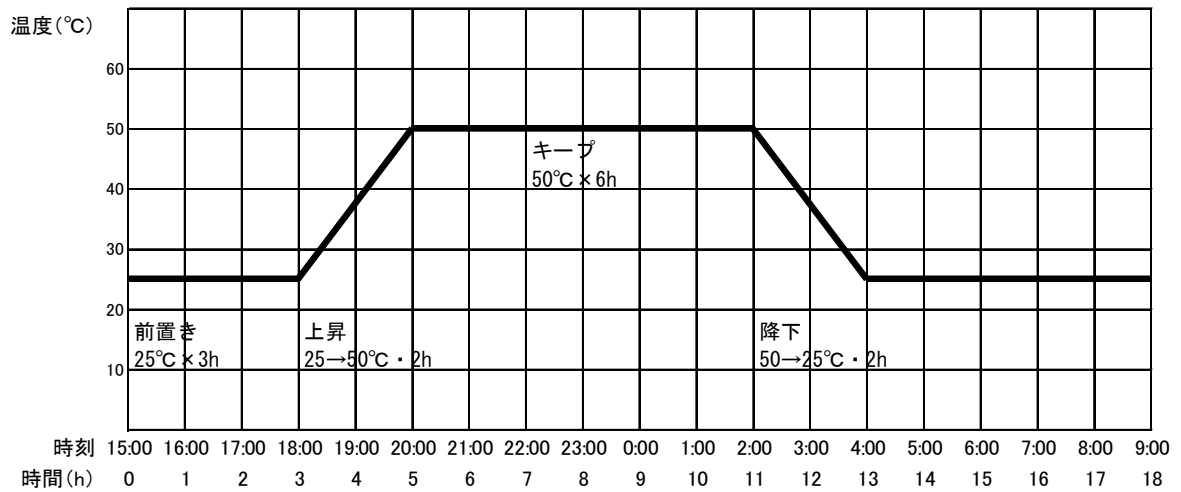


図 2.3 給熱促進養生の養生パターン (水結合材比 30%)

2) 水和物成分の分析試験

水和物成分分析は X 線回折装置 XRD-6100（島津製作所製）を使用した。試験状況を写真 2.2 に示す。

サンプル試料は、円柱供試体を所定材齢まで養生を行った後、図 2.4 に示すように供試体の高さ方向中段の部分（高さ 1/4～3/4）の断面中心部からダイヤモンドカッターにて切断し採取した。試料は供試体の内部から採取することで、表面に付着する不純物、供試体作成段階のブリーディングなどの影響を受けることがなく、また、養生期間中に炭酸ガスによる微細組織の変化も生じないと考えられる。

また、供試体採取から分析試験を実施する期間中に、試料はアセトン液中に保管し水和停止状態を保持した。

XRD 測定の試料準備は、上記の微粉碎試料に内部標準物質として平均粒径 $3\ \mu\text{m}$ のコランダム ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) を内割 10 % 混合し、乳鉢を使用して行った。XRD の主な測定条件は、ターゲット $\text{CuK}\alpha$ 、管電圧 40 kV、管電流 40 mA、走査範囲 10-60 deg. 2θ 、ステップ幅 0.02 deg. とした。測定基本回数は 1 回としたが、データのバラツキが大きいケースまたは異常値が出たケースにおいて、2～3 回追加測定を行いその平均値を使用した。

定量分析の対象はセメント由来のエーライト (C_3S) および水和生成物である水酸化カルシウム (CH) の 2 種類を選定し、測定の実施材齢は 1 日（水結合材比 30% のケースのみ）、28 日および 1 年とした。



写真 2.2 X 線回折装置を使用した試験状況

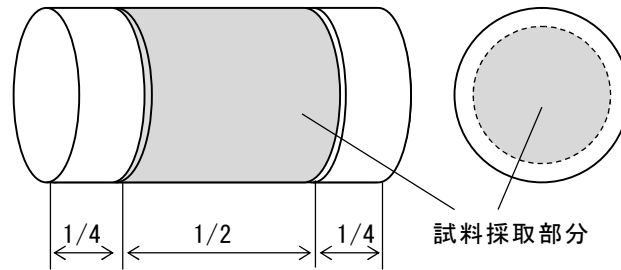


図 2.4 サンプル試料採取のイメージ図

3) エーライト (C_3S) および水酸化カルシウム (CH) の検出

図 2.5 に粉末 X 線回折パターンの一例として、HB6F3 の水結合材比 50%、材齢 1 年の結果を示す。

各分析対象の回折ピークについて、他の物質の回折ピークと重ならないように、エーライト (C_3S) は 32.2° 、水酸化カルシウム (CH) は 18.0° 、内部標準物質であるコランダム ($\alpha-Al_2O_3$) は 52.5° をそれぞれ使用した。

エーライト (C_3S) に関しては $51.4^\circ \sim 52.2^\circ$ の範囲内に回折ピークを使用する文献^{2,3)}があったが、今回は一部の試験では、その範囲の回折ピークが不明瞭であったことから、エーライト (C_3S) の回折ピークは単独ピーク 32.2° を使用することとした。

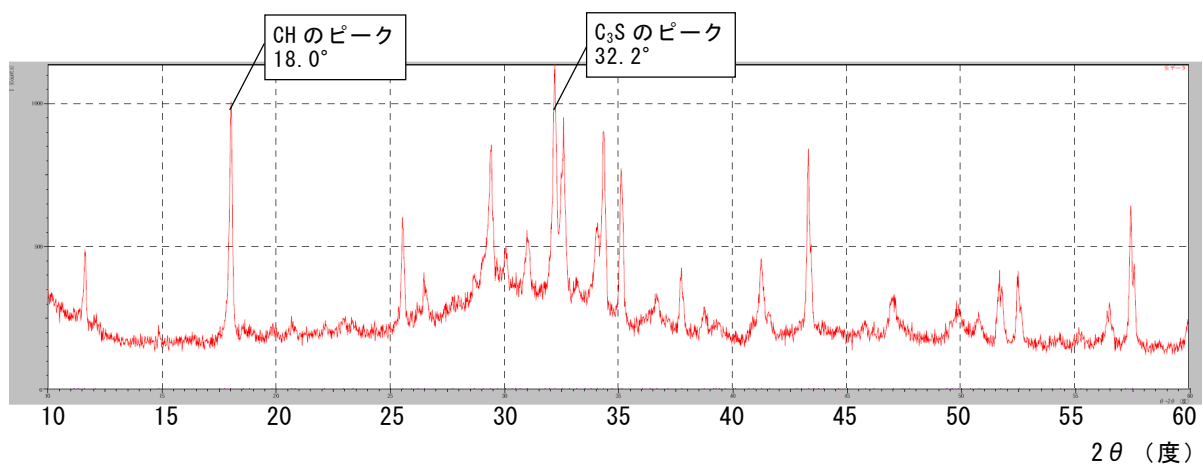


図 2.5 粉末 X 線回折パターン (生データ) の一例

2.2.2 セメント化合物エーライト (C₃S) の試験結果

エーライト (C₃S) の定量分析の結果として、水和後の C₃S 残存量と水和前の C₃S 含有量から反応率を計算した。計算式は下記の式 (2.1) を使用し、水結合材比ごとの試験結果を図 2.6 に示す。

$$\text{C}_3\text{S 反応率 (\%)} = \left(1 - \frac{\text{水和後の C}_3\text{S 残存量}}{\text{水和前の C}_3\text{S 含有量}} \right) \times 100\% \quad (2.1)$$

(外部標準物質補正)

C₃S 反応率の試験結果について、全体の傾向を見ると、水結合材比が 50%、40% の場合はすべての配合の C₃S 反応率が高い結果を示しており、混和材の使用と関係なく材齢 28 日では 80%、材齢 1 年では 90% を超えたことが確認された。

これに対し、給熱促進養生を施した水結合材比 30% の場合、まず初期材齢 (1 日) の結果を見ると、早強セメント単味 (H) の C₃S 反応率は約 65% であったのに対して、高炉スラグ微粉末 6000 とフライアッシュを併用した配合 (HB6F3, HB6F4) は 55% 未満で早強セメント単味 (H) より低い反応率を示した。その後、材齢の進行とともに各配合の C₃S 反応率は増加した。早強セメント単味 (H) は材齢 28 日の時点で約 86% に到達し、材齢 1 年でも同等な反応率を示し、28 日以降に C₃S 反応の進行はほとんど確認されなかった。一方、2 種類の混和材併用の配合 (HB6F3, HB6F4) の C₃S 反応率は材齢 28 日に 60% 前後に達した後、材齢 1 年に 65% 以上になり、初期材齢から長期材齢の 1 年までに C₃S 反応率の増加が確認された。

つまり、給熱促進養生を施した低い水結合材比のコンクリートにおいて、2 種類の混和材を併用した配合は、長期にわたって水和反応が進行する傾向を示したと考えられる。

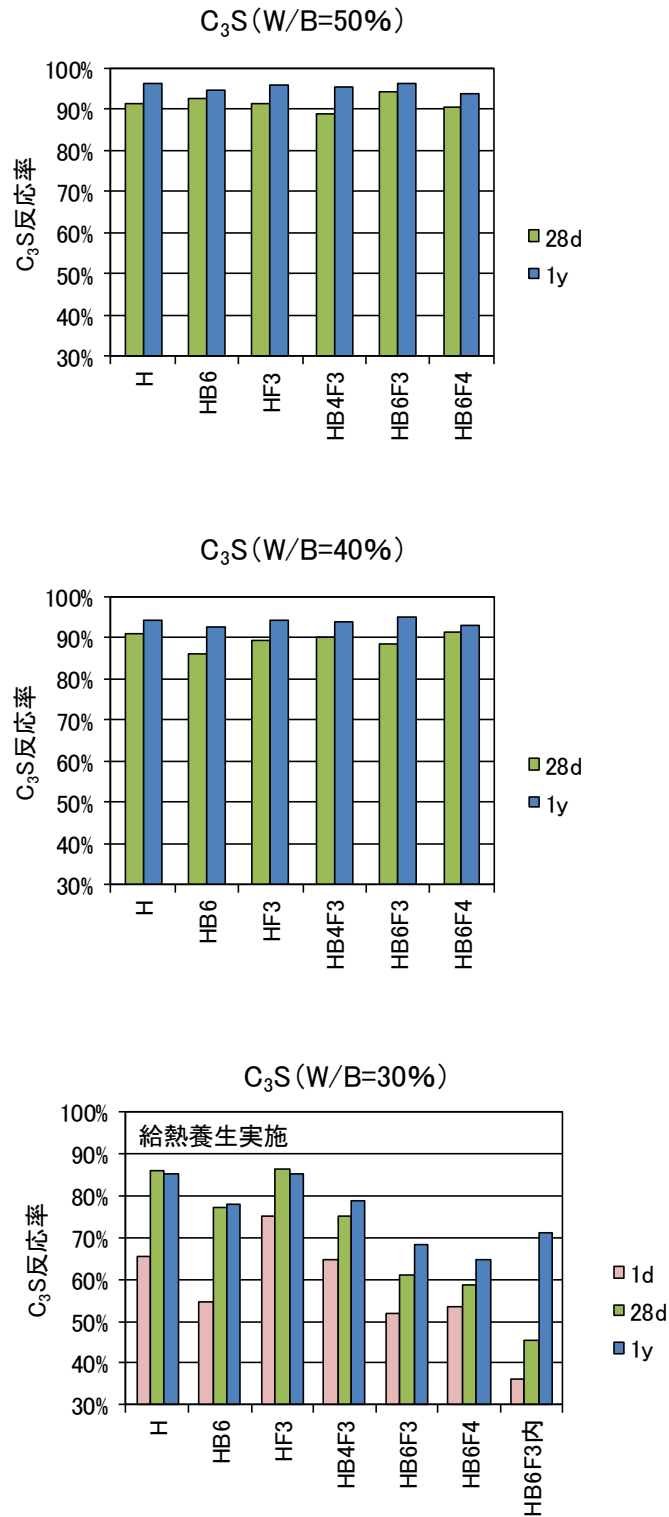


図 2.6 セメント化合物エーライト (C₃S) の試験結果

2.2.3 主要水和物の水酸化カルシウムの生成に及ぼす混和材併用の影響

主要水和物である水酸化カルシウム（CH）の定量分析の結果として、水酸化カルシウムの水和後の含有量データから含有率を計算した。計算は下記の式（2.2）を使用し、水結合材比ごとの試験結果を図 2.7 に示す。

$$\text{CH の含有率 (\%)} = \frac{\text{水和後の CH 含有量}}{\text{試料質量}} \times 100\% \quad (2.2)$$

（外部標準物質補正）

以下に、水酸化カルシウム（CH）含有率の試験結果について考察する。

（1） 混和材使用による影響

試験結果の全体の傾向を見ると、水結合材比が小さい方が水酸化カルシウムの生成量が減少した。既往の研究によると、水結合材比が小さくなるほどセメントの水和率が低下し、その理由は、セメントの水和反応の際に組織構造の緻密化による水分供給の阻害、さらに新たな水和物が生成・移動する空間の欠如などが挙げられる。

これについては、後述の 2.3 節において、水結合材比が小さい配合ではセメント硬化体の細孔構造が緻密になることが確認されており、ここでの水結合材比ごとの水酸化カルシウムの生成量の傾向を説明する裏付けの材料となると考えられる。

混和材を混合した配合、特に高炉スラグ微粉末の単独使用の配合（HB6）、またはフライアッシュと併用した配合（HB4F3, HB6F3, HB6F4）では、早強セメント単味の配合（H）に比べて水酸化カルシウムの生成量が低下し、さらに材齢 1 年の結果は材齢 1 日および 28 日の結果より小さく、材齢とともに減少することが確認された。

これについては、混和材使用による組織構造の緻密化の影響は前述のとおり緊密な関係があると考えられる。ただし、主な原因は、セメントの 50% が高炉スラグ微粉末に置換されたことで、セメントの水和に由来する水酸化カルシウム量が最初から少ないうえ、混和材のポズラン反応等により水酸化カルシウム量が材齢とともにさらに消費されたと考えられる。

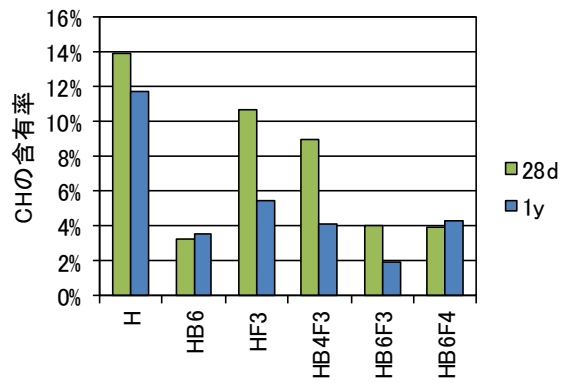
（2） 混和材種類および粉末度による影響

高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用する配合の中で、高炉スラグ微粉末

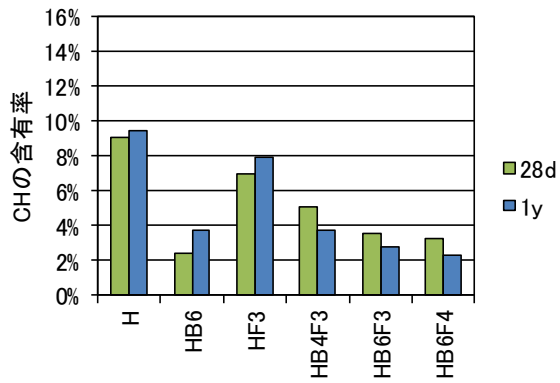
6000 を使用したケース（HB6F3, HB6F4）は高炉スラグ微粉末 4000（HB4F3）を使用したケースより水酸化カルシウム量が少ないことが確認された。これは、高炉スラグ微粉末のブレン数が大きくなるほど、潜在水硬性の反応が進行しやすいため、より多くの水酸化カルシウムが消費されたと考えられる。したがって、水結合材比や置換率などの条件が同じであれば水酸化カルシウム量を把握することで、高炉スラグ微粉末反応の進行具合を推定することができる。

一方、フライアッシュの粉末度が異なる配合（HB6F3, HB6F4）の間では、比表面積が $1,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 程度の差があるものの、フライアッシュ使用量がセメントの 10% と比較的少ないため、水酸化カルシウム量の明確な差異は認められなかった。

CH (W/B=50%)



CH (W/B=40%)



CH (W/B=30%)

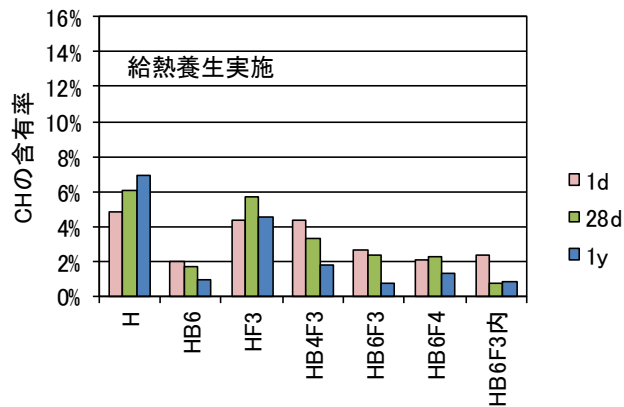


図 2.7 水酸化カルシウム (CH) の試験結果

2.3 セメント硬化体の細孔構造に及ぼす混和材併用の影響

2.3.1 試験概要

(1) 試験材料と配合

試験の供試体はコンクリート配合から細骨材および粗骨材を除いたセメント硬化体（セメントペースト）を使用した。使用材料，配合はセメントの水和反応の分析試験と同様に表 2.1，表 2.2 に示す内容であり，セメントは早強ポルトランドセメント（H）を使用し，混和材は 2 種類の高炉スラグ微粉末 4000（B4），6000（B6）と 2 種類のフライアッシュ II 種（F3，F4）を使用した。

配合は水結合材比 50%，40%，30%の 3 種類とし，材料の組み合わせは，早強ポルトランドセメント単味のケース（H），高炉スラグ微粉末 6000 を 50%内割混合したケース（HB6），フライアッシュ F3 を 10%外割混合したケース（HF3），および各種の高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用したケース（HB*F*）の 4 ケースとした。

(2) 試験方法

1) 供試体作成と養生

セメント硬化体は，室温約 25℃の環境で容量 1 リットルのモルタルミキサーを使用し 90 秒の練混ぜを行い，直径 50mm × 高さ 100mm の円柱供試体を成形した。

水結合材比 50%と 40%の配合の供試体は，現場打ちの構造物に使用することを想定し，打ち込んだ後に速やかに室温 20℃の封かん養生を行い翌日脱枠した。また，水結合材比 30%の配合は工場製作のプレキャスト部材に使用することを想定し，初期強度を得るために養生槽で最高温度 50℃の給熱促進養生を行い，その後に脱枠した。養生槽内の温度は，前置きを 3 時間，50℃までの温度上昇を 2 時間，50℃保持を 6 時間，25℃までの温度降下を 2 時間の計 13 時間と設定し，養生期間中の相対湿度を常に飽和状態になるように設定した。いずれのケースにおいても，翌日に 20℃の室内で脱枠し，所定の材齢まで 20℃の水中養生を実施した。給熱促進養生の使用装置は写真 2.1，養生パターンは図 2.3 を参照する。

2) 細孔径分布の試験

細孔径分布測定は，水銀圧入式ポロシメーター（Micromeritics 社製）により最

大圧力 228MPa, 測定細孔径 0.0055 μm まで測定を行った。

サンプル試料は, 水和物成分の分析試験と同様に, 図 2.4 に示す方法で採取した。その後, 試料は直径 2.5mm~5.0mm の粒状に粉砕し, アセトンを用いて洗浄および水和停止を行った。測定前に試料の質量が変化しなくなるまで 40°C 乾燥を実施し, その後は, 着色シリカゲル乾燥剤が入るデシケーターに速やかに移し, 約 20°C の室温になるまで静置した。

測定の実施材齢は 1 日 (水結合材比 30%のみ), 28 日および 1 年とした。測定基本回数は 1 回としたが, データのバラツキが大きいケースまたは異常値が出たケースにおいて, 2~3 回追加して測定しその平均値を使用した。

細孔径分布試験の状況を写真 2.3 に示す。



写真 2.3 細孔径分布試験の状況

2.3.2 混和材を使用したセメント硬化体の細孔構造

(1) セメント硬化体の細孔径分布

各配合のセメント硬化体の細孔径分布について、 $10\mu\text{m}$ 以下のデータを集計した測定結果を図2.8に示す。水結合材比50%、40%の配合は材齢28日、1年の試験結果であり、給熱促進養生を行った水結合材比30%の配合は材齢1日、28日および1年の結果である。

各配合の細孔分布は早強ポルトランドセメントを使用した特徴として微小径の細孔が中心であり、水結合材比が小さくなるほど累積細孔容積量が減少し、内部構造がより緻密になった。また、材齢の経過とともに累積細孔容積量が減少し、水和反応が進行したことで内部空隙が水和生成物で充填されたと推察される。

なお、材齢28日に比べ材齢1年後のグラフは、早強セメント単味(H)とフライアッシュ混合(HF3)の一部のデータを除いて累積細孔容積量が減少しているから、混和材を使用した配合は長期にわたって内部組織を緻密化させたことが確認された。

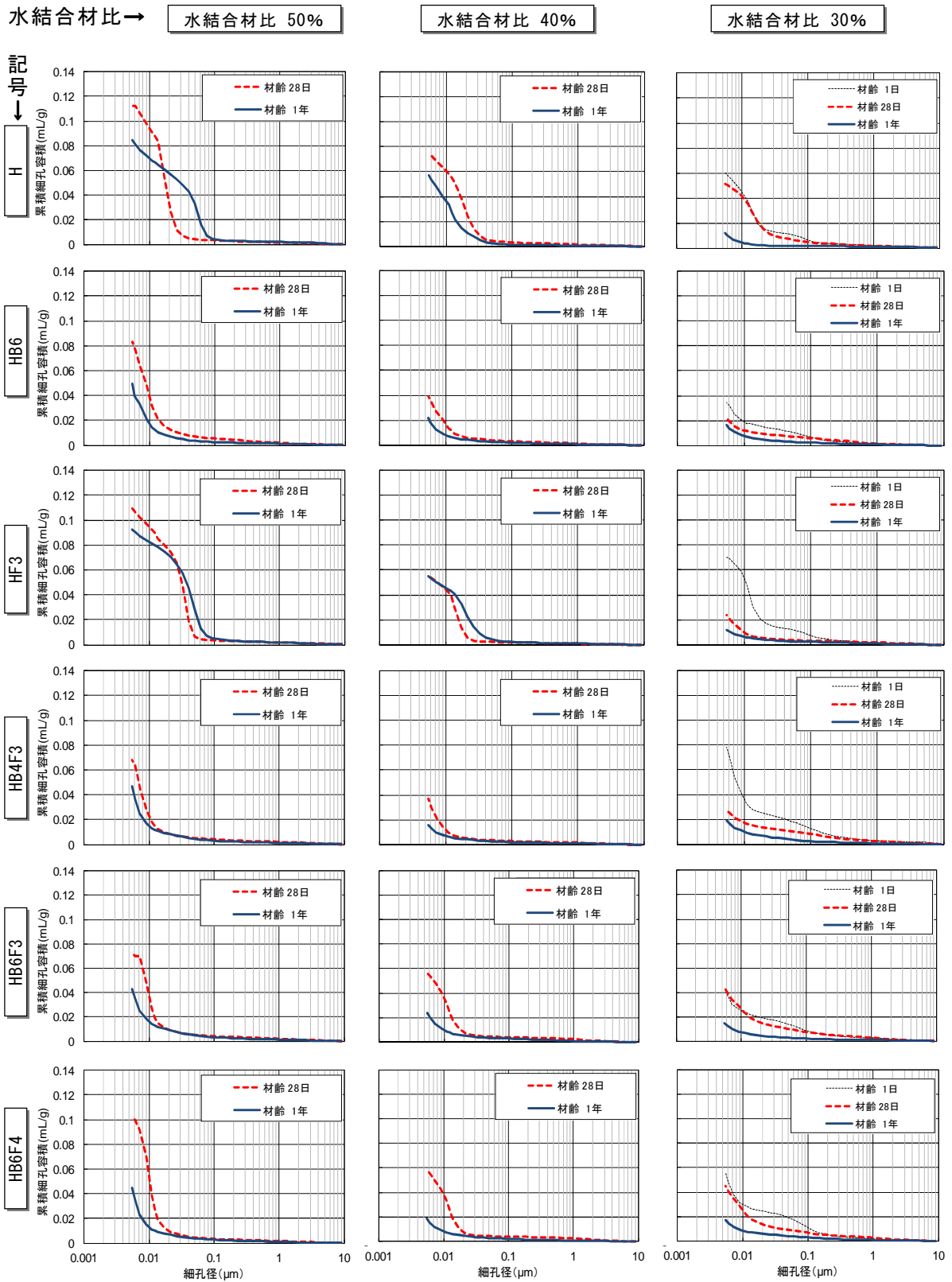


図 2.8 各配合の細孔径分布の試験結果

(2) セメント硬化体の累積細孔容積

1) 混和材種別の影響

以下に、細孔径の測定結果を $0.006\ \mu\text{m}\sim 0.02\ \mu\text{m}$, $0.02\ \mu\text{m}\sim 0.05\ \mu\text{m}$, $0.05\ \mu\text{m}\sim 1\ \mu\text{m}$, $1\ \mu\text{m}\sim 10\ \mu\text{m}$ の4区分に分けて累積細孔容積を表示し、各種混和材が細孔構造に及ぼす影響を検討した。

図 2.9 に、水結合材比ごとに、早強セメント単味、混和材として高炉スラグ微粉末とフライアッシュを単独使用または併用した配合の累積細孔容積の試験結果を示す。

早強セメント単味 (H) の配合と比べ、高炉スラグ微粉末を単独使用 (HB6)、またはフライアッシュと併用した (HB6F3) の場合は全空隙量が大幅に減少し、細孔径 $0.02\ \mu\text{m}$ 以下の微細な空隙の割合が増加した結果となり、高炉スラグ微粉末の混合によりセメント硬化体の組織が緻密化していることが確認された。この傾向は特に材齢 1 年の試験結果で顕著であり、その中でも、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用した配合 (HB6F3) は最も優れた緻密性を示した。

これに対して、フライアッシュを単独で使用した配合 (HF3) は早強セメント単味 (H) より材齢 1 日のデータに全空隙量が多く、水結合材比 50% のように材齢 28 日に細孔径 $0.02\sim 0.05\ \mu\text{m}$ の微細な空隙の割合が高くなるケースもあった。この原因はフライアッシュのポゾラン反応が遅いためと考えられる。しかし、給熱促進養生を行った水結合材比 30% のフライアッシュ単独使用の配合 (HF3) は、材齢 28 日以降の全空隙量が早強セメント単味 (H) に比べて約半分となった。フライアッシュのポゾラン反応を促進させる対策として、給熱養生の有効性が示された。

また、本研究の各配合では、細孔径 $0.05\ \mu\text{m}$ 以上の粗大な空隙は少なく、配合 H および HF3 以外のケースにおいては、材齢 1 年の測定結果からほとんど確認されなくなった。

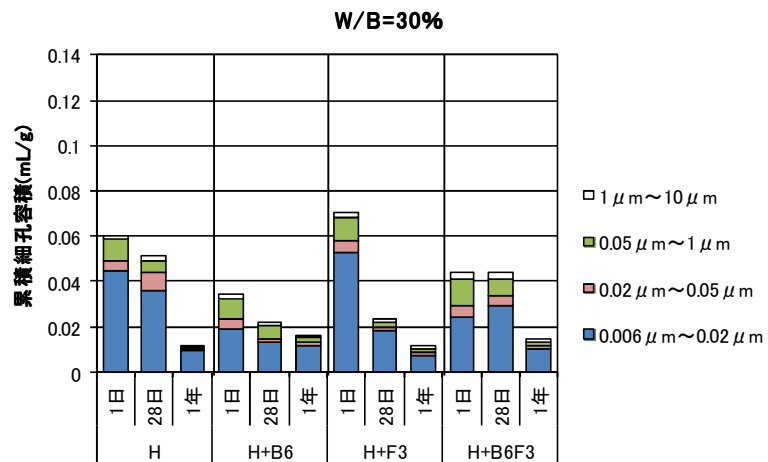
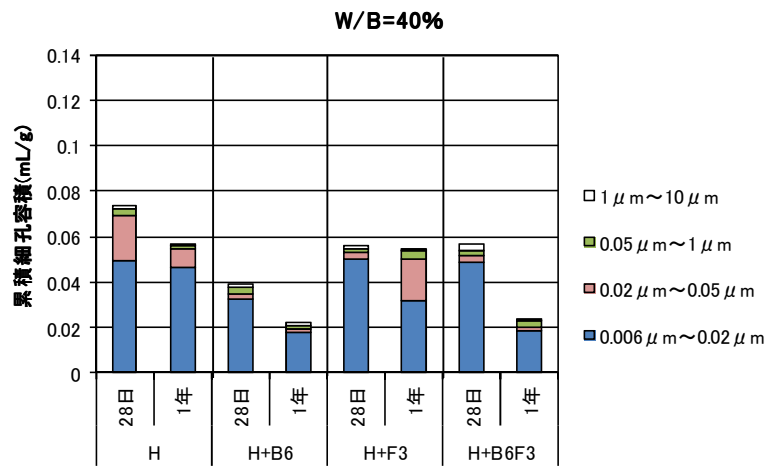
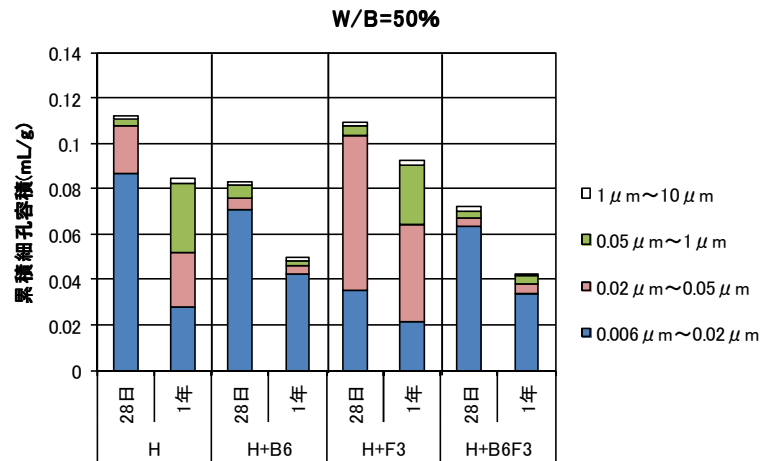


図 2.9 各種の混和材を使用した場合の細孔分布

2) 高炉スラグ微粉末の粉末度の影響

図 2.10 に、早強ポルトランドセメントの 50% を 2 種類の高炉スラグ微粉末に置換し、更にフライアッシュを 10% 外割混合した配合 (HB4F3, HB6F3) の累積細孔容積の試験結果を示す。

高炉スラグ微粉末を混合したことで、材料の比表面積の相違によらず、全空隙の減少とともに細孔径 $0.02\ \mu\text{m}$ 以下の微細な空隙の割合が増加し、セメント硬化体の内部組織が緻密化したことが確認された。この優位性は封緘養生を行った水結合材比 50%、40% の配合では全材齢にわたって示されているが、給熱促進養生を行った水結合材比 30% の配合では 1 年の長期材齢に顕著であった。

一方、給熱促進養生を行った水結合材比 30% 配合の中で、高炉スラグ微粉末 4000 を使用した配合 (HB4F3) は材齢 1 日の全空隙量が多く見られた。これは、高炉スラグ微粉末 4000 は比較的比表面積が小さいため、若材齢時に高炉スラグ微粉末の水和反応が遅れて、組織の緻密化に寄与しなかったと考えられる。

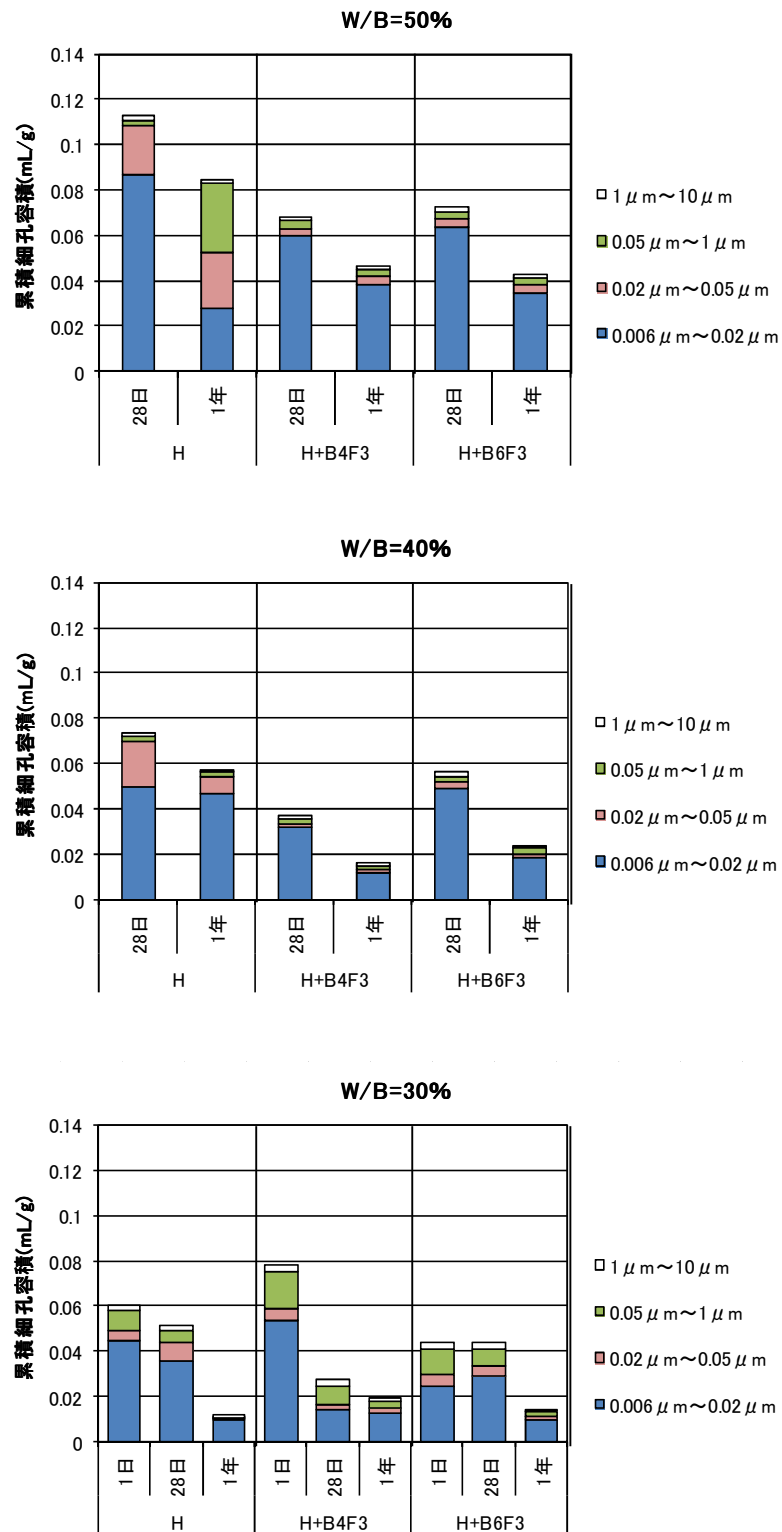


図 2.10 各種の高炉スラグ微粉末を使用した場合の細孔分布

3) フライアッシュの粉末度の影響

フライアッシュの比表面積が $3,550\text{cm}^2/\text{g}$ の配合 (HB6F3) と $4,550\text{cm}^2/\text{g}$ の配合 (HB6F4) の累積細孔容積の試験結果を図 2.11 に示す。

水結合材比 50%, 40% の配合では, 比表面積が大きいフライアッシュを使用した HB6F4 は HB6F3 より材齢 1 年の全空隙量が若干増加した傾向があるが, 細孔径 $0.02\ \mu\text{m}$ 以下の微細な空隙の割合が高くなった。一方, 水結合材比 30% の配合では, 両者の明確な差異が見られなかった。

フライアッシュの比表面積が大きいほど, ポズラン反応の促進およびフィラー効果により水和生成物の組織構造が緻密になるとされる。しかし, 本研究において, 表 2.2 に示すように, 2 種類のフライアッシュの活性度指数は大きな差異がないことからポズラン反応の進行具合が同程度であると想定され, また, 混合量は 10% であり比較的少ないことから, フライアッシュの比表面積が $1,000\text{cm}^2/\text{g}$ の違いがあるものの, 高い粉末度のものを使用しても, 条件によるが組織構造の緻密化に対する寄与度は必ずしも高いと言えないことが示された。

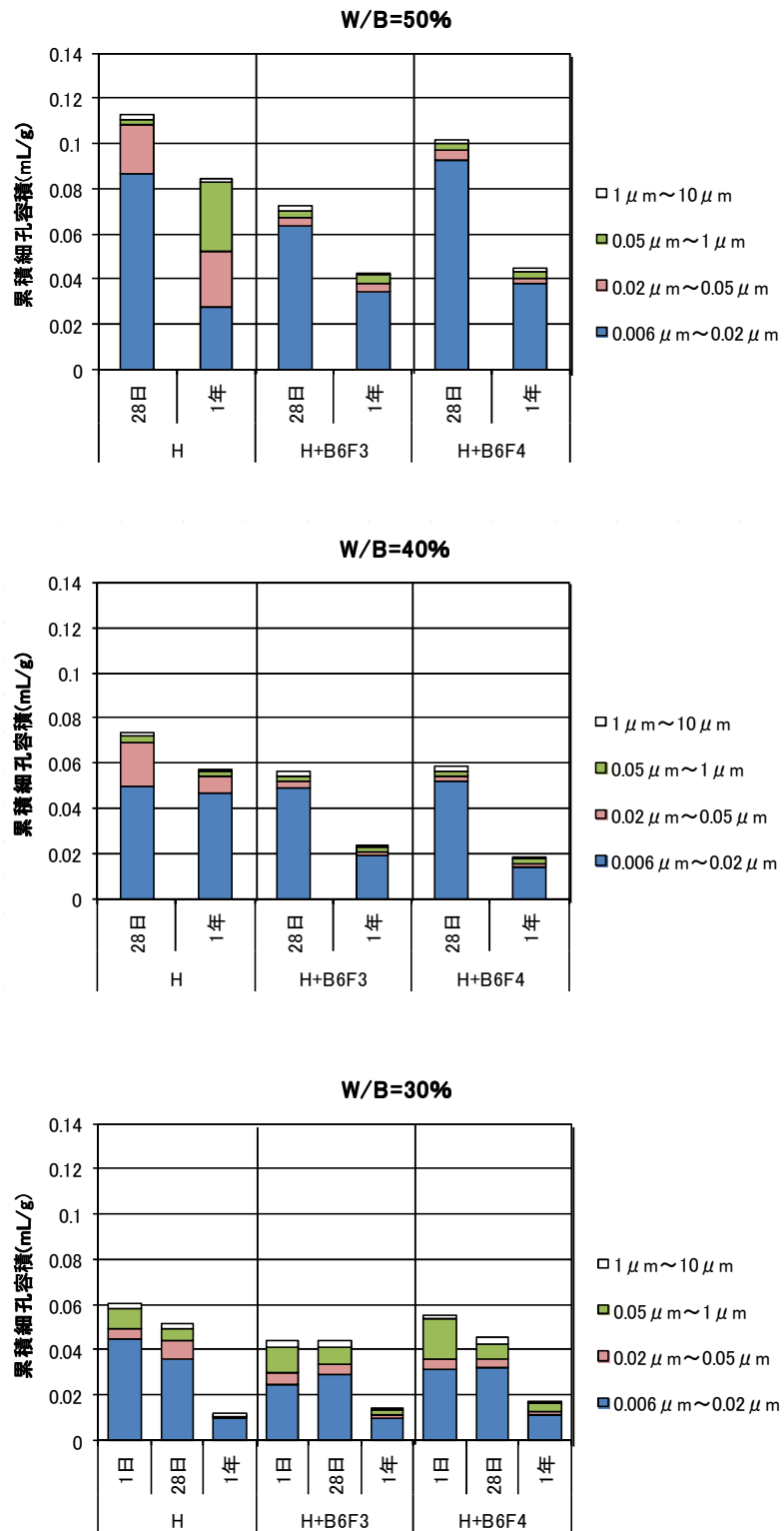


図 2.11 各種フライアッシュを使用した場合の細孔分布

2.4 第2章のまとめ

本章では、高炉スラグ微粉末とフライアッシュという2種混和材の併用が早強ポルトランドセメントの水和反応、ならびに硬化体の組織構造の形成に及ぼす影響について述べた。本研究の試験範囲内において得られた知見を以下に示す。

まず、水和反応に対して、2種混和材を併用した影響について、以下の知見が得られた。

- 1) 混和材使用の配合は、給熱促進養生を施した低水結合材比（30%）の場合に初期材齢（1日）の C_3S 反応率が低くなるが、長期にわたって水和反応が進行することが判明した。
- 2) セメント由来の水酸化カルシウム（CH）生成量について、混和材使用配合の方が早強セメント単味配合に比べ少なく、さらに、水酸化カルシウム（CH）量は高炉スラグ微粉末の潜在水硬性反応やフライアッシュのポゾラン反応により消費され、材齢の進行とともに減少することが確認された。

次に、セメント硬化体の細孔構造に対して、2種混和材を併用した影響について、以下の知見が得られた。

- 1) 本研究で用いた配合条件では、早強ポルトランドセメントを使用した特徴として細孔分布は微小径の細孔が中心であり、混和材の混合が長期にわたってセメント硬化体の内部組織を緻密化させることが確認された。
- 2) 高炉スラグ微粉末で50%置換または10%のフライアッシュと併用した場合は、早強セメント単味の配合と比べ全空隙量が大幅に減少し、細孔径 $0.02\mu\text{m}$ 以下の微細な空隙の割合が増加したことが確認された。その中でも、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用した配合は最も優れた緻密性を示した。
- 3) フライアッシュを単独混入した配合は、ポゾラン反応が遅れることにより初期材齢を中心に全空隙量が多くなった。ただし、給熱促進養生を行った配合では、フライアッシュのポゾラン反応が促進され、全空隙量が低下する。
- 4) 各種の高炉スラグ微粉末を混入した配合では、粉末度の違いによらず全空隙の減少とともに細孔径 $0.02\mu\text{m}$ 以下の微細な空隙の割合が増加し、セメント硬化体の内部組織が緻密化したことが確認された。
- 5) 各種フライアッシュの細孔径分布を比較した結果、フライアッシュの混入は、粉末度に対応した組織の緻密化効果が限定的であった。

【第2章の参考文献】

- 2.1) 坂井悦郎, 井元晴丈, 大門正機: 高炉セメント硬化体の相組成と強度発現性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 26, No. 1, pp. 135-140, 2004.
- 2.2) セメント協会: セメント硬化体研究委員会報告書, pp. 189, 2001.
- 2.3) 例えば, 五十嵐豪, 丸山一平: 普通ポルトランドセメントを用いたセメント硬化体の相組成と力学的性質の関係, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 76, No. 660, pp. 213-222, 2011.

第3章 ASR 抑制効果に及ぼす混和材併用の影響

3.1 はじめに

コンクリートの ASR 対策として、現状では一般にコンクリート中のアルカリ総量の抑制 ($3.0\text{kg}/\text{m}^3$ 以下)、抑制効果のある混合セメント等の使用、無害と認められる骨材の使用など 3 つの対策が行われている。

しかし、実構造物中には、すでに ASR に対して無害と判定された骨材を使用したり、アルカリ総量を規定値以下に抑えたり、ASR 対策を講じたコンクリート構造物でも ASR の劣化が発生した RC 構造物の報告^{3.1), 3.2)}があり、現状のこれらの対策や規定は十分とは言いがたい。また、RC 構造物に比べて数少ないが、**写真 3.1**、**写真 3.2**に示すような PC 橋および PC 軌道桁の劣化事例も報告されている^{3.3), 3.4), 3.5)}。PC 軌道桁の劣化事例^{3.5)}では、ASR が原因と推定されるひび割れが一部に発生し、PC 桁が上側に湾曲するいわゆる「そり」が生じて使用性能が損なわれた。PC 構造物の場合、使用されるコンクリートはセメント量が多く、アルカリ量も多くなる傾向があるため、ASR 反応性が疑わしい骨材が分布する地域での施工、またはアルカリや水の外部供給がある環境に使用される場合は、特に劣化の発生を抑制する対策が重要である。



写真 3.1 ASR により PC 桁橋下面に生じたひび割れ事例^{3.4)}

PC 軌道桁のひび割れ
(側面)

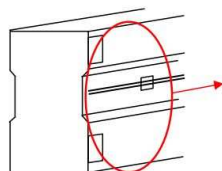


写真 3.2 PC 軌道桁の ASR による損傷状況の事例^{3.5)}

そして本研究では、混和材の使用がコンクリートのアルカリシリカ反応（ASR）劣化を抑制する効果を確認するため、反応性骨材を使用した ASR 促進試験を行った。

1) 試験方法の選定

ASR 促進試験方法の選定について、以下のように検討した。

ASR の抑制対策を考えるには、ASR の劣化具合や対策の効果を的確に定量評価できる試験方法が必要である。ただし、現状では劣化促進試験を含めて各種の確認試験方法は存在しているが、国内でも統一されていない^{3,6)}。各種促進試験方法のパラメーターは様々であり、例えば、供試体の材料種類はモルタルかコンクリート、試験環境の温度は 40℃、80℃または 127℃、試験期間は数時間から数ヶ月、アルカリの供給方法は外部供給および内部供給の方法がある。各種試験は、研究および検討の目的・目標、実施段階および使用設備などに応じて計画されていることが現状であり、研究者や試験機関によって異なる場合もある。

このように、各種試験方法は試験条件や適用範囲などに一長一短があり、本研究はアルカリの供給方法、試験期間および装置の条件などを満足するように試験方法を計画立案した。

まず、アルカリを供給する方法は一般に、外部、内部または内外供給の併用などの方法がある。本研究では、混和材使用によるコンクリートの緻密化が、劣化因子であるアルカリイオンや水の浸透を抑制することを評価する内容であるため、外部からアルカリを供給する方法を採用した。

次に、試験期間について、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性反応やフライアッシュのポズラン反応は長期的に発生するため、数日または数ヶ月の短期間で試験の結果が要求される試験方法では、混和材の長期にわたる緻密化および強度増進による ASR 抑制効果を正しく評価できないと考えられる。

長期間の試験を行う試験装置の条件については、高温高压の装置を使用せず 40℃または 50℃の試験設備を使用する計画とした。供試体浸漬用のアルカリ溶液について、本研究ではコンクリート実構造物における劣化の再現性を重視し、コンクリート中に塩化物が存在すること、さらに凍結防止剤や飛来塩分などに起因してコンクリートの外部から塩化物が侵入されることを想定し、水酸化ナトリウム（NaOH）溶液ではなく、飽和塩化ナトリウム（NaCl）溶液に浸漬する試験方法を選択した。また、混和材の効果を確認するため、長期間で継続的にアルカリを供給させることが好ましいことから、NaCl 溶液は急激な反応を起こさせることがなく、本研究に適性があると考えられる。

以上の検討結果として、40℃の養生室または50℃の養生槽を用いた飽和 NaCl 溶液浸漬法を使用し、いわゆるデンマーク法に準拠して試験を行った。また、骨材の ASR 安全性の試験では数ヶ月で結果が判断できるが、本研究は ASR 抑制効果を確認するため試験期間をより長く取る必要があるため、試験期間を2年以上と設定した。なお、反応性骨材は、既往の研究^{3.7) ~3.9)}で確実な ASR 膨張性が確認されたものとして、全量、北海道産安山岩砕石と砕砂を使用した。

2) 検討の手順および使用材料

ASR 促進試験は長い期間が必要となるため、本研究では2段階に分けて試験を行った。まずは、4種類のもルタル供試体を用いた「試験1」を先行的に行って、設定された試験条件の妥当性確認を兼ねて混和材の使用効果を確認した。その後、3種類のコンクリート供試体を用いた「試験2」を実施し、実構造物の劣化を再現するとともに、初期材齢の養生方法が ASR 抑制に及ぼす影響も合わせて検討を行った。

それぞれの ASR 促進試験の概要は表 3.1 に示し、使用材料一覧表を表 3.2 に示す。以下、もルタル供試体とコンクリート供試体の試験結果を述べる。

表 3.1 ASR 促進試験概要

	供試体	水結合 材比	材料の 組み合わせ	初期材齡 の養生方法	アルカリ の供給方法
試験 1	モルタル 角柱供試体 40×40×160mm	50%	4 種類 H, HB, HF, HBF	封緘養生	飽和 NaCl 溶液浸漬 (40℃)
試験 2	コンクリート 円柱供試体 φ 100×H200mm	34%	3 種類 H, HB, HBF	封緘養生 給熱促進養生	飽和 NaCl 溶液浸漬 (50℃)

表 3.2 ASR 促進試験の使用材料一覧表

材料分類	種類	記号	特性値など
セメント	早強ポルトランドセメント	H	密度 3.14g/cm ³ , 比表面積 4,380cm ² /g
混和材	高炉スラグ微粉末 6000	B	密度 2.88g/cm ³ , 比表面積 6,290cm ² /g
	フライアッシュ(Ⅱ種)	F	密度 2.28g/cm ³ , SiO ₂ 57.8%, ig-loss2.5%, 比表面積 3,550cm ² /g 活性度指数: 83(28日), 103(91日)
骨材	反応性骨材	S-R	北海道産安山岩砕砂 表乾密度 2.65g/cm ³ , 吸水率 2.53%
		G-R	北海道産安山岩砕石 表乾密度 2.68g/cm ³ , 吸水率 2.02%
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸コポリマー系
	AE 剤	AE	樹脂酸塩系陰イオン界面活性剤

3.2 モルタル供試体による ASR の抑制効果の評価

3.2.1 モルタル供試体の ASR 促進試験の概要

モルタル供試体の ASR 促進試験は、JIS A1146 「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法）」に準じて、40 mm×40 mm×160mm の角柱供試体（3 本/セット）を作成した。材料は表 3.2 に示す各種材料を使用し、骨材は細骨材のみであり、全量、粒度調整を施した反応性骨材の安山岩砕砂を使用した。

各種配合の一覧表を表 3.3 に示す。ここで、水結合材比とは以降のコンクリート配合と同様に $W/(C+B)$ と定義している。セメントは早強ポルトランドセメントを使用し、配合名に記号 H と表示する。また、配合は結合材の組合せが異なる 4 種類であり、早強ポルトランドセメント単味配合 (H)、フライアッシュを細骨材の 10% 外割置換した配合 (HF)、高炉スラグ微粉末を 50% 内割置換した配合 (HB)、および高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用した配合 (HBF) であった。なお、実構造物での配合条件を再現するため、既往の研究^{3.10)}と同様に、内部アルカリを供給することをせず、使用結合材のアルカリ量の調整を行わない方法を採用した。

供試体製作および膨張率測定の方法の一部は既往の研究^{3.11)}を参考にして行った。供試体は打設翌日に脱枠して材齢 4 ヶ月まで標準養生した。その後は飽和 NaCl 溶液浸漬法（デンマーク法）の試験方法に準拠し、ASR を促進させるため飽和 NaCl 溶液に浸漬し、供試体を貯蔵した容器を 40℃ 恒温の室内に設置した。40℃ 時の飽和 NaCl 溶液の溶解度は 26.65% である。膨張率測定は測定する 16 時間以上前に供試体を容器ごとに温度 20℃ に保たれた室内へ移動させ、1/1000mm ダイヤルゲージ付きの長さ変化測定器を用いて行った。膨張率の初期値は浸漬開始時の測定結果を使用した。角柱供試体促進養生の状況を写真 3.3 に、膨張率計測の状況を写真 3.4 に示す。

表 3.3 モルタル供試体の ASR 促進試験 各種配合の一覧表

水結合材比 (%)	配合の 記号	単位量 (kg/m ³)				
		水 (W)	セメント (C)	高炉スラグ 微粉末 (B)	フライ アッシュ (F)	反応性 細骨材 (S-R)
50	H	300	600	-	-	1350
	HF	300	600	-	60	1290
	HB	300	300	300	-	1350
	HBF	300	300	300	60	1290



写真 3.3 モルタル供試体の ASR 促進試験 促進養生の状況

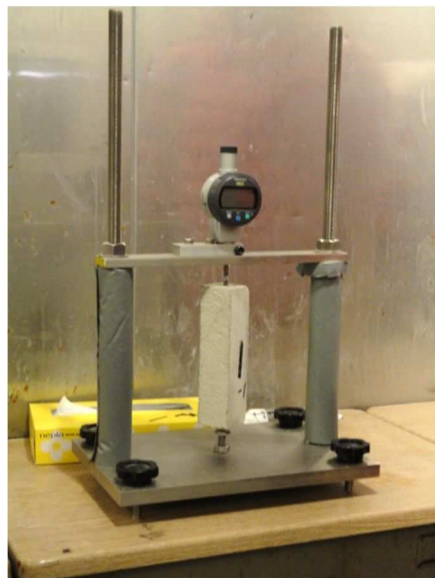


写真 3.4 モルタル供試体の ASR 促進試験 膨張率計測の状況

3.2.2 モルタル供試体の ASR 促進試験の結果

モルタル供試体を用いた膨張率の経時変化を図 3.1 に示す。

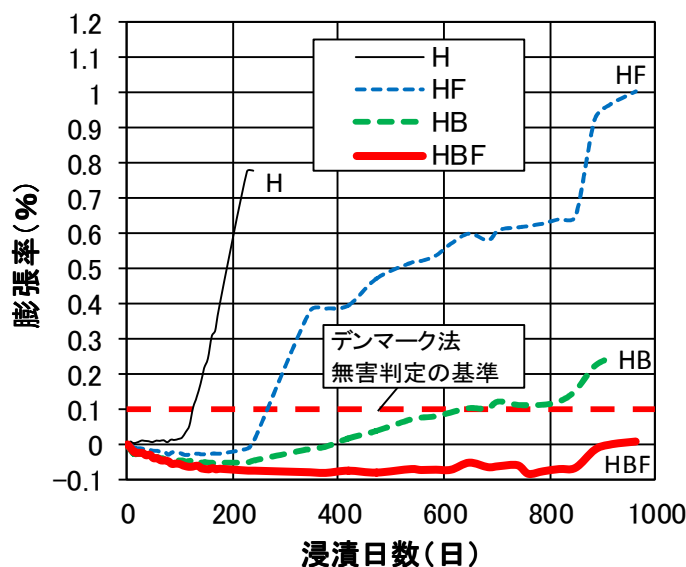


図 3.1 ASR 促進試験における膨張率経時変化（モルタル供試体，+ は膨張）

早強セメント単味配合（H）では浸漬開始から約 110 日から膨張し始めた。その後、膨張率は短時間で急に高くなり、約 125 日付近で無害判定の基準値とされる 0.1%を超えた。浸漬 240 日の時点で膨張率は約 0.8%になり、供試体の変形が大きくなり測定精度が確保できないため、このケースの膨張率計測を打ち切った。

一方、混和材を使用した配合では ASR による膨張を抑制する効果が確認された。フライアッシュを単独使用した配合(HF)、高炉スラグ微粉末を単独使用した配合(HB)は、それぞれ浸漬 240、350 日付近で膨張し始め、ASR 反応を遅らせることで一定の抑制効果が見られた。その中で、フライアッシュ単独使用配合（HF）の曲線は早強セメント単味配合（H）と近似する傾きで急に上昇し、膨張率が浸漬 264 日で 0.1%を超えた。これに対して、高炉単独使用の配合（HB）は膨張が確認された後にも曲線が緩やかに上昇し、膨張率が浸漬 635 日で 0.1%を超え、960 日の時点で 1.0%であった。

既往の研究では、ASR 抑制対策として高炉スラグ微粉末を使用する場合、概ね置換率が 40%を超えると効果が確認され^{3.12)}、また、フライアッシュを使用する場合に置換率は小さく設定でき、15%程度以上で抑制効果があるとされる^{3.13)}。他には、フライアッシュと高炉スラグ微粉末をそれぞれ単独使用の場合の ASR 抑制効果を比較した報告がある。例えば、広野ら^{3.14)}は、デンマーク法による促進膨張試験では、

分級フライアッシュ15%置換は高炉スラグ42%置換よりも優れたASR抑制効果を発揮したことを報告している。本研究では、50%内割置換の高炉スラグ微粉末配合(HB)は10%外割置換のフライアッシュ配合(HF)より抑制効果が高い理由は、HBの高い材料置換率と関係があると思われる。混和材によるASR抑制効果は、混和材種類とその混合率に依存していることが確認され、わずか数パーセントの混合率の相違があっても抑制効果が大きく変わることが想定でき、抑制効果の確認試験による直接比較の必要性、重要性が改めて証明された。

また、この試験において主な要因ではないが、反応性細骨材の10% (60kg/m^3) をフライアッシュに置換し、反応性骨材の使用量が約4.4% (表3.3に示した単位量から $60/1350 \times 100\%$ で計算した) 減少したこともASR抑制効果に貢献していると思われる。

以上の配合に対し、2種類の混和材を併用した配合(HBF)は、浸漬960日を超えてもわずかな膨張の動きしか確認されず、膨張開始材齢を遅延させる効果がある。また、HB配合の動きを参照すれば、HBF配合はHBと同様にこの後は膨張速度を低下させる効果も期待できる。これにより、2種類の混和材を併用した配合(HBF)は最も優れたASR抑制効果を有することが確認された。

3.2.3 モルタル供試体のASR促進試験結果に対する考察

一般に、混和材によるASR抑制のメカニズムにおいては、緻密化による水分やアルカリの移動量抑制、アルカリイオンの固定、材料置換による反応性骨材の低減などが考えられるが、コンクリート中のアルカリ濃度低減が最も重要とされている。ここで、図3.1に示された2種併用の配合(HBF)の併用効果はどのような条件下で得られるかを特定するため、第2章に示した各配合の水酸化カルシウム(Ca(OH)_2)含有量の試験結果とASR膨張量の試験結果の関係について検討した。

図3.2に、配合H、HF、HBの水酸化カルシウム含有量と膨張率が0.1%に達した日数の関係を示す。水酸化カルシウム含有量の試験では、水結合材比がASR促進試験と同じく50%のセメントペースト供試体を使用し、粉末X線回折法(XRD)を使用し材齢1年で測定を行った。

試験結果によると、まず、水酸化カルシウム含有量はH、HF、HBの順で減少した。その理由は混和材の使用によりセメントの水和に由来する水酸化カルシウム量が少なくないうえに、混和材の潜在水硬性やポズラン反応により水酸化カルシウム含有量が更に消費されたと考えられる。

また、2種併用の配合(HBF)については、ASR促進試験は浸漬960日の試験終了時点において膨張率がまだ0.1%に達していないため、本研究の範囲内では、配合H、HF、HBの結果から以下に示している近似式(3.1)を作り出し、2種併用の配合(HBF)

の水酸化カルシウム含有量から膨張率が 0.1%に達した日数を予測した。予測した結果は約 1,250 日であり、「HBF (予測値)」の表記として図 3.2 に示した。

$$D = 6.6985 \times CH^{-1.331} \quad (3.1)$$

ここに、

D : 膨張率が 0.1%に達した日数 (日)

CH : 水酸化カルシウム含有量 (%), HBF 配合の試験結果は 1.97%

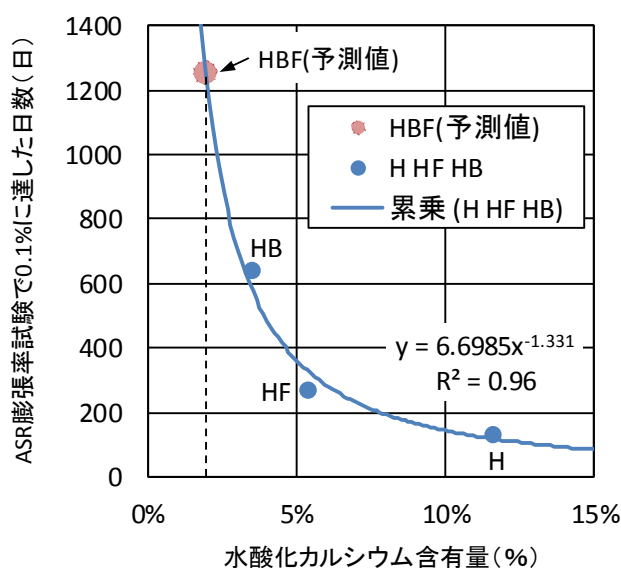


図 3.2 水酸化カルシウム含有量と膨張率が 0.1%に達した日数の関係

配合 H, HF, HB から見ると、水酸化カルシウム含有量と膨張率が 0.1%に達した日数は近似式 (3.1) に示すような負の相関関係を表している。このため、水酸化カルシウム含有量が最も少ない 2 種併用の配合 (HBF) は、膨張日数が最も長くなることは必然性があると結論付けられる。

次に、早強セメント単体配合 (H)、高炉スラグ微粉末の単独使用 (HB)、フライアッシュの単独使用 (HF) の測定データ、および 2 種類混和材併用 (HBF) の測定データと近似式から計算した予測結果を表 3.4 にまとめた。この結果によると、早強セメント単体配合 (H) に対して、フライアッシュ単独使用 (HF) は (264-125=) 139 日の遅延効果があり、高炉スラグ微粉末単独使用 (HB) は (635-125=) 510 日の遅延効果が確認された。また、混和材を各々単独に使用した配合 (HF, HB) の遅延効果を単純に重ね合わせると日数は (125+139+510=) 774 日となる。




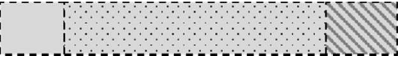

一方、2 種混和材併用 (HBF) の膨張率は、960 日を超えてもわずかな膨張の動き

しか確認されず、併用の効果が明確であった。さらに、本研究の範囲内では、水酸化カルシウム含有量を考慮した近似式によると、膨張率が 0.1%に達する日数の予測値は 1,250 日となり、これも HF と HB の抑制効果を単純に合計する結果よりははるかに長くなる。いずれにしても、2 種混和材併用の配合 (HBF) の ASR 抑制効果は、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを各々単独に使用した場合の抑制効果を単純に重ね合わせる結果に比べ、それ以上の相乗効果が期待できると言える。

したがって、混和材の使用により、コンクリート中のアルカリ濃度が低減されることで ASR を抑制することができ、特に、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用した配合 (HBF) は最も優れた抑制効果を示した。

なお、本研究の試験範囲内において、近似式 (3.1) の水酸化カルシウム (CH) 含有量と ASR の膨張日数の関係から、コンクリートの化学分析により ASR の膨張挙動を推測する可能性が示唆された。この手法の汎用性・確実性を高めるため、細孔構造の緻密性要素を加え、さらに測定パターンを増やし測定データをより多く蓄積する必要があると考えられ、今後の課題にしたい。

表 3.4 水酸化カルシウム (CH) 含有量と膨張率試験日数のまとめ

配合の記号	CH 含有量 (%)	膨張率が 0.1%に達した日数 (日)
H	11.69	 試験結果 125
HF	5.49	 試験結果 264
HB	3.59	 試験結果 635
HBF	1.97	<p>HF と HB 単純合計の予測値 $125 + (264 - 125) + (635 - 125) = 774$</p> <p> (予測値 774)</p> <p>試験結果 (>960) および近似式 (3.1) による予測値 1,250</p> <p> 960 (予測値 1,250)</p>

3.3 コンクリート供試体による ASR の抑制効果の評価

3.3.1 コンクリート供試体の ASR 促進試験の概要

コンクリート供試体の ASR 促進試験は表 3.2 に示した反応性骨材の安山岩砕砂，砕石を使用し，直径 100mm×高さ 200mm の円柱供試体（3 本/セット）を作成した。コンクリート供試体の概要図を図 3.3 に示す。

各種配合の一覧表は表 3.5 に示す。ここで，セメントは早強ポルトランドセメントを使用し，配合名に記号 H と表示する。また，配合の記号中の「Heat」の表示は初期材齢時に給熱促進養生実施のケース，無表示は封緘養生のケースである。結合材の組合せは早強ポルトランドセメント単味配合（H），高炉スラグ微粉末を 50% 内割置換した配合（HB），および高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用した配合（HBF）を使用した。実構造物での配合条件を再現するため既往の研究^{3.10)}と同様に，内部アルカリを供給することをせず，使用結合材のアルカリ量の調整を行わない方法を採用した。

水結合材比とは $W/(C+B)$ と定義しており，材齢 1 日の強度発現性がプレストレス導入に必要な強度 35.0N/mm^2 を満足するように，過去の実績を参考し 34.0% を使用した。これは，既往の研究^{3.9)}においては，高炉スラグ微粉末を単独使用し，蒸気養生を施したコンクリートの実績配合である。また，単位水量および単位結合材量も既往の研究を参考とし適宜調整した。なお，水結合材比 34.0% は第 5 章および第 6 章の一部で検討したコンクリート配合と同様である。

フレッシュ性状については，スランプ $10.0 \pm 2.5\text{cm}$ ，空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ の範囲に入るように化学混和剤使用量の微調整を行った。

初期材齢の養生方法は第 5 章および第 6 章の一部で検討したコンクリート配合と同様に，標準養生と給熱促進養生の 2 種類を使用した。標準養生は材齢 1 日の 20°C 封緘養生後に翌日脱枠した。給熱促進養生は温湿度が制御できる養生槽を用い，温度パターンは，前置き 25°C を 3 時間，温度上昇と降下を各 2 時間，最高温度 50°C 保持を 6 時間の計 13 時間と設定し，養生期間中の相対湿度を常に飽和状態になるようにプログラムした。給熱促進養生の使用装置は写真 2.1，養生パターンは図 2.3 を参照する。いずれのケースにおいても，翌日脱枠後に材齢 1 ヶ月まで恒温室で 20°C の水中養生を実施した。

その後，円柱供試体は飽和 NaCl 溶液浸漬法（デンマーク法）に準拠し，ASR を促進させるため飽和 NaCl 溶液に浸漬し，供試体を貯蔵した容器を 50°C 恒温の養生槽中に設置した。 50°C 時の飽和 NaCl 溶液の溶解度は 26.83% である。供試体の飽和 NaCl 溶液浸漬試験の状況を写真 3.5 に示す。

膨張率測定は、測定する 16 時間以上前に供試体を容器ごとに温度 20℃に保たれた室内へ移動させ、1/1000mm ダイヤルゲージ付きの長さ変化測定器を用いて行った。膨張率の初期値は浸漬開始時の測定結果を使用した。

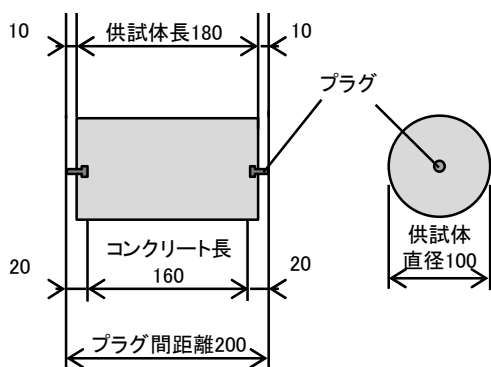


図 3.3 コンクリート供試体概要図

写真 3.5 コンクリート供試体の促進養生の状況

表 3.5 コンクリート供試体の ASR 促進試験 各種配合の一覧表

水結合材比 (%)	配合の記号	単位量 (kg/m ³)							
		水 (W)	セメント (C)	高炉スラグ 微粉末 (B)	アッシュ フライ (F)	反応性 細骨材 (S-R)	反応性 粗骨材 (G-R)	高性能 AE 減水剤 (SP)	AE 剤 (AE)
34	H H-Heat	152	447	-	-	740	1026	2.682	0.018
	HB HB-Heat	152	224	224	-	732	1015	3.584	0.018
	HBF HBF-Heat	152	224	224	45	710	984	4.032	0.027

3.3.2 コンクリート供試体の ASR 促進試験の結果

コンクリート供試体を用いた ASR 促進試験の結果として、膨張率の経時変化を図 3.4 に示す。

早強セメント単味 (H, H-Heat) の配合は、浸漬日数約 60 日付近から膨張し始めたことが確認され、初期材齢時に給熱促進養生を行った配合 (H-Heat) は 119 日に、標準養生を行った配合 (H) は 182 日に膨張率が無害判定の基準値とされる 0.1% を超えた。これに対して、混和材を使用した配合 (HB, HBF, HB-Heat, HBF-Heat) は、初期材齢時の養生条件と関係なく、270 日を超えた時点でもほとんど膨張の動きを示しておらず、ASR 反応が大幅に抑制されていることが確認された。ただし、モルタル供試体を用いた試験で明らかになった 2 種類の混和材を併用する配合 (HBF, HBF-Heat) の優位性を確認するには、より長期的な計測が必要であると考えられる。

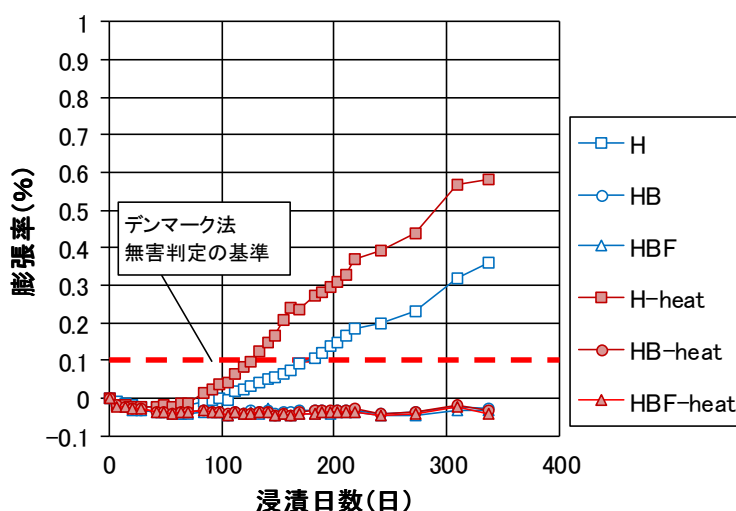


図 3.4 ASR 促進試験における膨張率経時変化
(コンクリート供試体, +は膨張)

3.3.3 コンクリート供試体の ASR 促進試験結果に対する考察

混和材を使用した配合（HB, HBF, HB-Heat, HBF-Heat）は、早強セメント単味配合（H, H-Heat）に比べ膨張率が低く、ASR の膨張劣化を大幅に抑制できる。

また、初期材齢時の養生条件がその後の ASR 反応度合いに及ぼす影響を比較すると、給熱養生を行ったコンクリートは、ASR の膨張が早く進行する傾向があり、この特徴は早強セメント単味配合（H, H-Heat）から判明した。

ASR は化学反応の一種であり、高い温度履歴を経験するほど反応が促進されることは理解しやすい。ただし、松村ら^{3,8)}はコンクリートの初期養生条件に関して、蒸気養生のものは標準養生のものと比較して、初期材齢における ASR が促進される傾向があったが、長期における両者の膨張挙動には大きな相違が認められなかったと報告している。このことから、養生条件の影響を検討する ASR 促進試験では、混和材の使用効果を継続的に確認するためにも、試験条件の設定が重要である一方、より長期的な計測計画が望ましいと考えられる。

なお、2 種類の混和材を併用した配合は最も効果が大きいため、ASR を抑制する観点からも給熱養生を行う工場製品には優先的に混和材を使用すべきと考えられる。

3.4 第3章のまとめ

本章では、ASR 抵抗性の試験を行い、各種試験で得られた知見を以下に示す。

- 1) 混和材の使用は ASR を大幅に抑制できることが確認された。モルタルを用いた ASR 促進試験において、早強セメント単味配合の膨張率は約 125 日で無害判定の基準値を超え、これに対して、2 種混和材併用の配合は 960 日を超えてもわずかな膨張の動きしか確認されず、抑制効果が最も優れている。
- 2) セメント水和硬化体中の水酸化カルシウム含有量と、ASR 促進試験における膨張率が 0.1% に達した日数は負の相関関係がある。
- 3) 2 種類の混和材併用の配合は水酸化カルシウム含有量が最も少ないことから、ASR 抵抗性が高くなることが必然であると解明した。
- 4) 養生条件の検討では、給熱養生を行ったコンクリートは ASR の膨張が早く進行する傾向が確認された。

以上の試験結果により、混和材を使用したコンクリートは ASR の抑制効果が向上し、特に 2 種類の混和材併用による相乗効果が発揮されることで、最も優れた耐久性を得られることが確認された。

【第3章の参考文献】

3. 1) 鳥居和之：アルカリシリカ反応にいかに対応するか，セメント・コンクリート，pp. 1-9，2005.
3. 2) 古賀裕久，百武壮，渡辺博志，脇坂安彦，西崎到，守屋進：屋外に23年以上暴露したコンクリートの観察結果に基づく骨材のASR反応性の検討，土木学会論文集E2（材料・コンクリート構造）Vol. 69，No. 4，pp. 361-376，2013.
3. 3) 湊俊彦，鳥居和之：北陸地方におけるASRが発生したPC橋の詳細調査，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33，No. 1，pp. 1001-1006，2011.
3. 4) プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC構造物の維持保全－PC橋の更なる予防保全に向けて－，pp. 11-12，2015.
3. 5) 北九州市 建築都市局 都市交通政策課：北九州モノレール長寿命化計画，pp. 10，2011.
3. 6) 日本コンクリート工学会：ASR診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書，pp. 364-271，2014.
3. 7) 蔡云峰，鳥居和之，横山博司，古川柳太郎：促進養生法による高炉スラグ微粉末のASR抑制効果の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 27，pp. 763-768，2005.
3. 8) 松村将充，蓑田理希，蔡云峰，鳥居和之：高炉スラグ微粉末を含有したプレストレストコンクリートのアルカリシリカ反応性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 28，No. 1，pp. 803-808，2006.
3. 9) 國富康志，石井豪，辛軍青，鳥居和之：高炉スラグ微粉末6000を混和したPC梁部材のASR劣化に対する耐荷力特性，第24回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp. 323-326，2015.
3. 10) 田中泰司，速水悠二，須藤卓哉：混和材の組み合わせがアルカリシリカ反応抑制効果に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，No. 64，pp. 406-412，2010.
3. 11) 岩月栄治，森野奎二，長瀧重義：フェロニッケルスラグ細骨材のASR抑制に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 31，No. 1，pp. 1321-1326，2009.
3. 12) 土木学会：コンクリートライブラリー第86号 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，1996.
3. 13) 土木学会：コンクリートライブラリー第94号 フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案），1999.
3. 14) 広野真一，安藤陽子，大代武志，鳥居和之：フライアッシュと高炉スラグ微粉末によるASR抑制効果の比較，セメント・コンクリート論文集，No. 67，pp. 441-448，2014.

第4章 塩化物イオン浸透抑制効果に及ぼす混和材併用の影響

4.1 はじめに

P C 構造物は一般に R C 構造物より耐久性が高いとされる。しかし、飛来塩分や凍結防止剤由来の塩分がコンクリート内部に浸透し、特に建設後 50 年以上に経過しても継続に供用された構造物を中心に、これまで数多くの劣化事例が報告されてきた。例えば、暮坪陸橋^{4.1)}、野甫大橋(写真 1.1)^{4.2)}、歌高架橋(写真 1.2)^{4.3)}などでは鉄筋や P C 鋼材が腐食、破断している事例が報告された。

コンクリートの塩害抑制対策として、コンクリート標準示方書^{4.4)}では、レディーミクストコンクリートの受入検査項目には塩化物イオン量 0.3kg/m^3 以下と規定されている。しかし、P C 構造物は過酷な使用条件や環境条件に曝されること、また当初の設計供用期間を超えても供用を継続される場合があることも考慮すると、これらの対策はまだ十分とは言いがたい。



写真 1.1 野甫大橋におけるコンクリートの劣化^{4.2)}

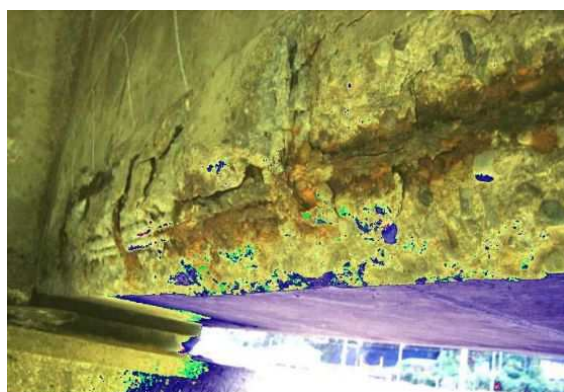


写真 1.2 歌高架橋塩害被害状況^{4.3)}

混和材を使用したコンクリートは、組織構造の緻密化や塩化物イオン固定効果などにより塩化物イオンの浸透が緩和される効果があると考えられる。この章では、塩化物イオン浸透抑制試験を行い、2種類の混和材を併用した場合のコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性を検証し、試験結果から試算された見かけの拡散係数を用いて、コンクリート実構造物の耐用年数を予測した。

4.2 塩化物イオン浸透抑制試験の概要

塩化物イオン浸透抑制試験は JIS A 1154「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」に従って、直径 100mm × 高さ 200 mm のモルタル円柱供試体（3本/セット）を作成し実施した。モルタルの使用材料を表 4.1 に示し、配合を表 4.2 に示す。ここで、セメントは早強ポルトランドセメントを使用し、配合名に記号 H と表示する。

表 4.1 モルタル供試体の使用材料

材料分類	種類	記号	特性値
セメント	早強ポルトランドセメント	H	密度 3.14g/cm ³ ，比表面積 4,380cm ² /g
混和材	高炉スラグ微粉末 4000	B4	密度 2.88g/cm ³ ，比表面積 4,060cm ² /g
	高炉スラグ微粉末 6000	B6	密度 2.88g/cm ³ ，比表面積 6,290cm ² /g
	高炉スラグ微粉末 8000	B8	密度 2.91g/cm ³ ，比表面積 7,920cm ² /g
	フライアッシュ(Ⅱ種)	F3	密度 2.28g/cm ³ ，SiO ₂ 57.8%， ig-loss2.5%，比表面積 3,550cm ² /g 活性度指数：83(28日)，103(91日)
F4		密度 2.30g/cm ³ ，SiO ₂ 53.7%， ig-loss2.0%，比表面積 4,550cm ² /g 活性度指数：83(28日)，107(91日)	
細骨材	岐阜県揖斐川産川砂	S	表乾密度 2.64g/cm ³ ，絶乾密度 2.61g/cm ³ ， 吸水率 1.09%
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸コポリマー系

表 4.2 モルタルの配合一覧表

水結合材比 (%)	配合の 記号	単位量 (kg/m ³)							
		水	セ メ ン ト	高炉スラグ微粉末 (BFS)			フライ アッシュ (FA)		細 骨 材
				(W)	(C)	(B4)	(B6)	(B8)		(F3)	(F4)	(S)
50	H	253	506	-	-	-	-	-	1518
	HB6	252	252	-	252	-	-	-	1512
	HF3	235	470	-	-	-	47	-	1551
	HB4F3	233	234	234	-	-	47	-	1545
	HB6F3	233	234	-	234	-	47	-	1545
	HB6F4	233	234	-	234	-	-	47	1545
	HB8F3	233	234	-	-	234	47	-	1545
40	H	213	533	-	-	-	-	-	1599
	HB6	212	265	-	265	-	-	-	1590
	HF3	197	493	-	-	-	49	-	1626
	HB4F3	196	245	245	-	-	49	-	1617
	HB6F3	196	245	-	245	-	49	-	1617
	HB6F4	196	245	-	245	-	-	49	1617
	HB8F3	196	245	-	-	245	49	-	1617
30	H	216	720	-	-	-	-	-	1440
	HB6	214	357	-	357	-	-	-	1428
	HF3	199	663	-	-	-	66	-	1458
	HB4F3	197	328	328	-	-	66	-	1444
	HB6F3	197	328	-	328	-	66	-	1444
	HB6F4	197	328	-	328	-	-	66	1444
	HB8F3	197	328	-	-	328	66	-	1444
	HB6F3 内	213	355	-	284	-	71	-	1420

モルタルの水結合材比はほかのコンクリート配合と同様に W/ (C+BFS) と定義しており、50%、40%、30%の3種類とした。混和材は、高炉スラグ微粉末3種類 (B4, B6, B8) とフライアッシュ2種類 (F3, F4) を使用した。使用材料の組合せは計4シリーズ、早強ポルトランドセメント単味の配合 (H)、高炉スラグ微粉末 6000 を50%内割混合した配合 (HB6)、フライアッシュ F3 を10%外割混合した配合 (HF3)、および各種の高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用した配合 (HB4F3, HB6F3, HB6F4, HB8F3) とした。なお、上記配合の比較対象としてフライアッシュを10%内割添加した配合 (HB6F3 内) も水結合材比30%のみで実施した。また、水結合材比30%の配合に限定して、供試体成形に必要なワーカビリティを確保するために少量の高性能 AE 減水剤を添加した。

初期材齢の養生方法は封緘養生または給熱促進養生の2種類を使用した。水結合材比50%と40%配合の供試体は、材齢1日の20℃封緘養生後に翌日脱枠した。また、水結合材比30%の配合は工場製作のプレキャスト部材を想定し、養生槽で最高温度50℃×6時間の給熱促進養生を行った。給熱促進養生の使用装置は写真2.1、養生パターンは図2.3を参照する。いずれのケースにおいても、翌日脱枠し、3ヶ月間標準養生後に浸透面以外にエポキシ樹脂を塗布し、環境温度40℃、10%の塩化ナトリウム (NaCl) 溶液に浸漬させた。

浸漬日数1年、2年の2回に分けて試料を切り出して、0.15mm (150 μm) 以下に微粉砕した。微粉砕分析試料に硝酸溶液を加えて30分間かき混ぜ、5分間静かに煮沸し塩化物イオンを抽出し、不溶分をろ過洗浄してろ液を作成した。その後、電位差滴定装置を用いて硝酸銀溶液で滴定し、各分析試料全塩分量 (Cl⁻%) を測定し、塩化物イオン含有量 (kg/m³) を算出した。

各円柱供試体の NaCl 溶液浸漬状況を写真4.3に、全塩分量の分析状況を写真4.4に示す。



写真 4.3 塩化物イオン浸透抑制試験 供試体浸漬状況



写真 4.4 塩分量分析装置および試験状況

4.3 塩化物イオン浸透分布の試験結果

図 4.1～4.3 に、各配合の塩化物イオン浸透分布の試験結果を示す。試験結果全体の傾向として、結合材種類が同じ配合同士を比較すると、水結合材比が小さくなるほど、塩化物イオン浸透深さが小さくなり、コンクリートへの塩化物浸透は水結合材比に大きく左右されることが明らかになっている。

以下に、各種配合の塩化物イオン浸透深さに対し、結合材の種類の影響、粉末度の影響およびフライアッシュ添加方法の影響を検討した結果を述べる。

4.3.1 塩化物イオン浸透分布と結合材種類の関係

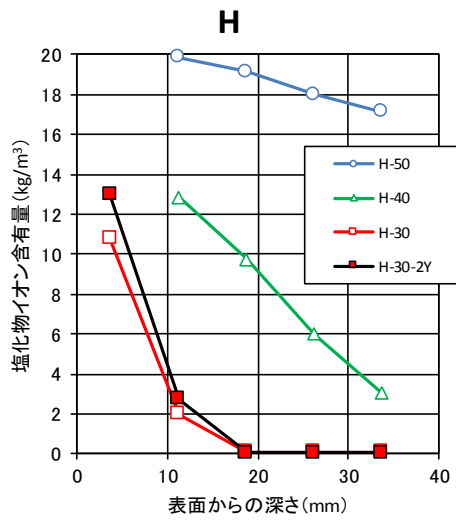
図 4.1 に、早強ポルトランドセメント単味の配合 (H)、高炉スラグ微粉末単独使用の配合 (HB6)、フライアッシュ単独使用の配合 (HF3)、および2種類の混和材を併用した配合 (HB6F3) の塩化物イオン浸透分布の試験結果を示す。

混和材を使用した配合 (HB6, HF3, HB6F3) は、早強セメント単味配合 (H) に比べ内部の塩化物イオン含有量の低下が確認されており、塩化物イオンの内部浸透を大幅に抑制できることが確認された。

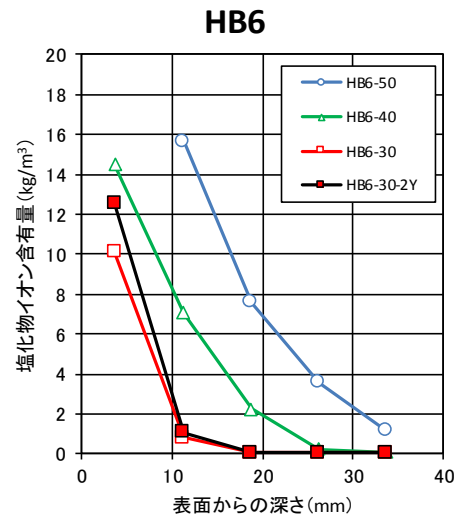
その中でも、2種類の混和材を併用した配合 (HB6F3) は、水結合材比 50%では表面からの深さ 30mm 以上に、水結合材比 40%、30%では深さ 20mm 以上に塩化物イオンがまったく浸透していない。2種類の混和材併用の抑制効果は最も大きかったことが明らかになった。

また、今回の試験では高い水結合材比の配合 (50%、40%) における抑制効果はより明確に現れたが、低い水結合材比配合 (例えば 30%の全数、40%の HB6F3) を中心に、緻密性が高いコンクリートでは塩化物イオン浸透は時間を要した。なお、浸漬2年の結果は浸漬1年の結果と比較すると、高い水結合材比の配合 (50%、40%) では塩化物イオン含有量の進展が見られるが、低い水結合材比配合 (30%) では大きな変化が見られなかった。これらのことから、低い水結合材比の配合で2種類の混和材併用の抑制効果を評価するには、長期的な試験結果が望ましいと考えられる。

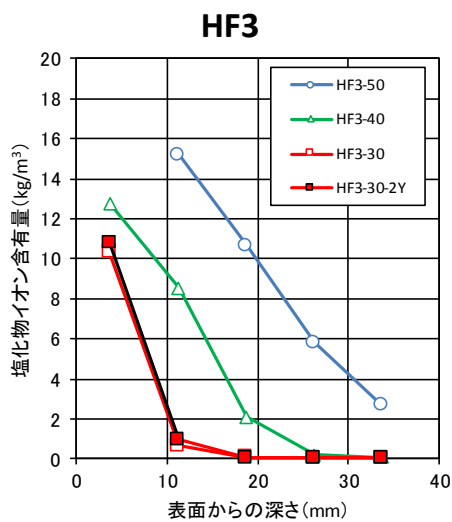
なお、実環境下のコンクリート構造物は飛来塩分や凍結防止剤などの影響を受ける以外に、二酸化炭素の影響を受け中性化も発生し、いわゆる塩害と中性化などの複合劣化の発生が予想される。本研究で行った NaCl 溶液による浸漬試験は中性化の影響を考慮していないが、第5章 5.3 節で検討した中性化試験の結果によると、2種類の混和材を併用した配合においても、早強セメント単味と同等な中性化抵抗性を有する。したがって、本研究で実施した浸漬試験は実環境下のコンクリート構造物の塩化物イオン浸透抑制効果を評価しても妥当性があると考えられる。



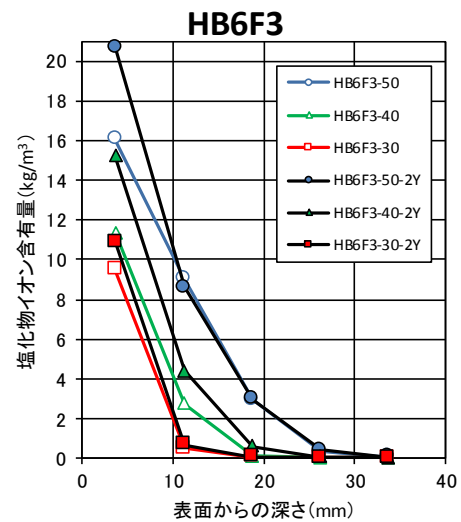
早強セメント単味配合



高炉スラグ微粉末単独使用の配合



フライアッシュ単独使用の配合



2種類の混和材を併用する配合

図 4.1 塩化物イオン浸透分布の試験結果

(1) 結合材種類の影響

次に、フライアッシュ添加方法の影響を比較するため、フライアッシュ外割で混合した配合（HB6F3）、内割で混合した配合（HB6F3 内）の塩化物イオン浸透分布の試験結果を図 4.2 に示している。

結果によると、フライアッシュ外割で混合した配合（HB6F3）はより高い塩化物イオン抑制効果が確認された。これは、フライアッシュ内割混合の場合、塩化物イオン抑制効果が高いとされる高炉スラグ微粉末の量が減少すること、内割混合に比べて実質的に水結合材比が若干高くなることが原因であると考えられる。

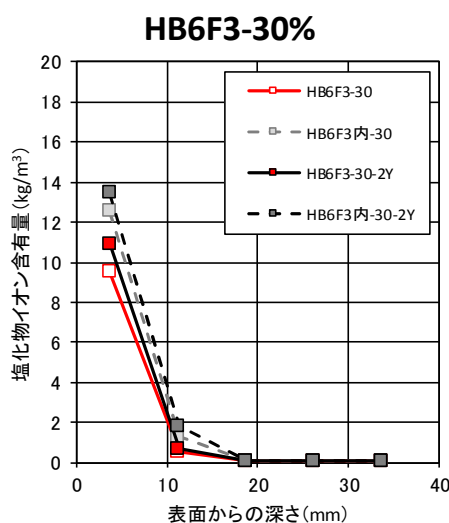


図 4.2 塩化物イオン浸透分布の試験結果
(2) フライアッシュ外割と内割の影響

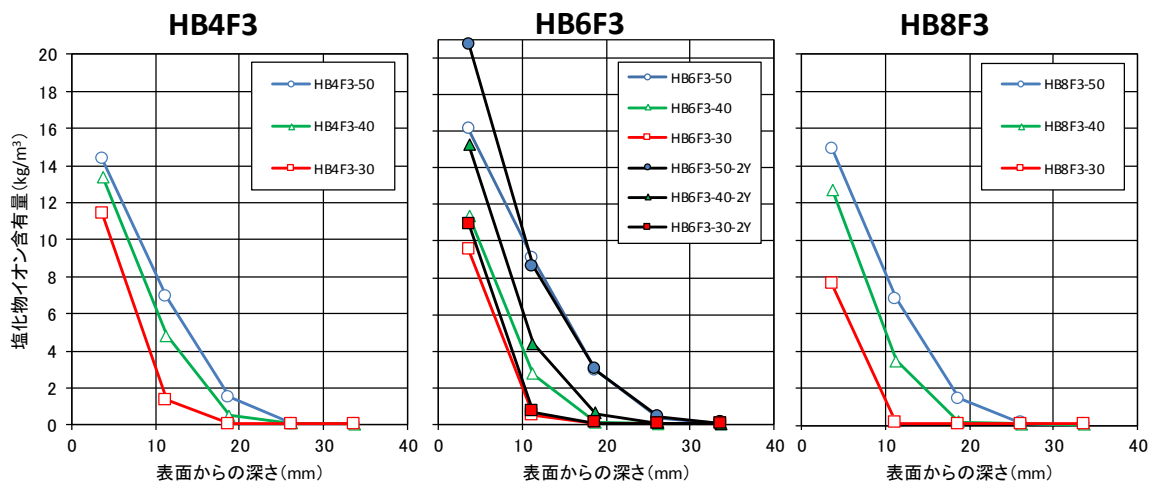
4.3.2 塩化物イオン浸透分布と結合材粉末度の関係

図 4.3 に、2 種類の混和材を併用した 4 配合の塩化物イオン浸透分布の試験結果を示す。上の列は高炉スラグ微粉末の比表面積が異なるケースの配合を示し、下の列は、上の列と異なるフライアッシュを使用した配合を示している。

上の列同士、つまり高炉スラグ微粉末 4000 使用の配合（HB4F3）、高炉スラグ微粉末 6000 使用の配合（HB6F3）、高炉スラグ微粉末 8000 使用の配合（HB8F3）を比較すると、高炉スラグ微粉末の粉末度が高くなるほど、内部の塩化物イオン含有量が低下しており、塩化物イオンの浸透が抑制されたことが確認された。ただし、HB6F3 と HB8F3 の差が縮まっており、高炉スラグ微粉末 6000 以上に粉末度を上げて抑制効果が顕著に向上することが期待できないことが示された。

また、上の列中央のグラフと下の列のグラフ、つまり異なる粉末度のフライアッ

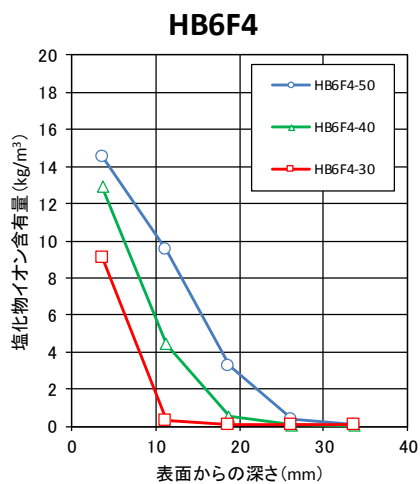
シュを使用した配合（HB6F3，HB6F4）を比較すると，より比表面積が大きいフライアッシュ使用の配合（HB6F4）を使用しても，塩化物イオン浸透深さはほぼ同程度であり，フライアッシュ粉末度の影響が限定的であったことが確認された。



B4 と F3 併用の配合

B6 と **F3** 併用の配合

B8 と F3 併用の配合



B6 と **F4** 併用の配合

図 4.3 塩化物イオン浸透分布の試験結果
(3) 結合材粉末度の影響

4.4 塩化物浸透抑制による構造物耐久性向上の効果

4.4.1 見かけの拡散係数の試算

前述の塩化物イオン含有量の浸漬期間 1 年と 2 年の一部の試験結果から、表面の全塩化物イオン濃度 (C_{a0}) および見かけの拡散係数 (D_{ap}) を試算した。

コンクリートの塩化物イオン拡散係数を予測する方法は、コンクリート標準示方書^{4.5)}では以下の方法を用いてよいと述べられている。

- 1) 対象構造物における点検結果を用いた方法
- 2) 類似の環境および構造物の点検結果、既往の研究実績に基づく方法
- 3) 促進試験によるコンクリートの拡散係数を用いる方法
- 4) 塩化物イオンの固定や乾湿繰返しの影響を考慮した数値解析による方法

本研究では、上記 3) に該当する方法を使用し、浸漬法を用いた室内試験を行い、各浸透深さの塩化物イオン含有量から見かけの拡散係数を計算した。

試算方法は、コンクリート標準示方書^{4.5)}を参考にし、Fick の拡散則を利用した下記の式 (4.1) を用いて回帰分析により表面の全塩化物イオン濃度 (C_{a0}) および見かけの拡散係数 (D_{ap}) を計算した。

$$C(x, t) = \gamma_{cl} \cdot \left[C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right] + C_i \quad (4.1)$$

ここに、

x : 浸漬面から塩化物イオン濃度を測定した箇所までの深さ (cm)

t : 供用期間 (年), ここでは浸漬期間 (年) とした。

$C(x, t)$: 深さ x (cm), 時間 t (年) における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

C_0 : 表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

D_{ap} : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

C_i : 初期含有塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

erf : 誤差関数

γ_{cl} : 予測の精度に関する安全係数, 一般的には 1.0 を用いてよい。

計算結果を表 4.3 おとび図 4.4 に示す。2 種類の混和材を併用した配合 (HBF) の見かけの拡散係数 (D_{ap}) は、早強セメント単味配合 (H) に比べて 10~36% となり、高炉スラグ微粉末単独使用の配合 (HB) に比べても 26~50% となった。水結合材比

ごとで効果が異なるが、2種類の混和材を併用した配合（HBF）の見かけの拡散係数は大幅に低下したことが判明され、塩化物イオン浸透抵抗性の向上効果が明らかになった。

表 4.3 表面塩化物イオン濃度 C_{a0} および見かけの拡散係数 D_{ap} の試算結果

水結合材比 (%)	配合の記号	高炉スラグ微粉末 (BFS)	フライアッシュ (FA)	浸漬 1 年		浸漬 2 年	
				表面濃度 (C_{a0}) (kg/m ³)	拡散係数 (D_{ap}) (cm ² /年)	表面濃度 (C_{a0}) (kg/m ³)	拡散係数 (D_{ap}) (cm ² /年)
50	H-50	-	-	-	-	-	-
	HB-50	有	-	30	1.40	-	-
	HBF-50	有	有	24	0.65	29	0.290
40	H-40	-	-	22	2.54	-	-
	HB-40	有	-	20	0.65	-	-
	HBF-40	有	有	19.5	0.25	24.5	0.150
30	H-30	-	-	19	0.22	23	0.110
	HB-30	有	-	23	0.11	28	0.058
	HBF-30	有	有	25	0.08	24.7	0.055
	HBF 内-30	有	有	-	-	27	0.075

注) 表面濃度：表面の全塩化物イオン濃度 C_{a0} (kg/m³)

拡散係数：見かけの拡散係数 D_{ap} (cm²/年)

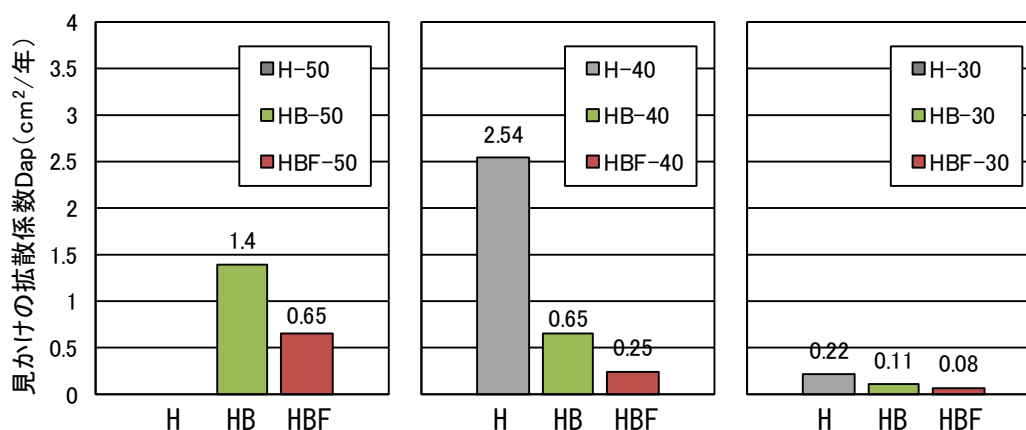


図 4.4 浸漬 1 年における見かけの拡散係数の試算結果

4.4.2 細孔空隙率と見かけの拡散係数の関係

ここで、本研究の第2章で得られた細孔空隙率の試験結果と塩化物イオン浸透の見かけの拡散係数との関係について検討した。

図4.5には、細孔空隙率（測定材齢1年）と見かけの拡散係数（浸漬1年）の関係を示す。水和硬化体の細孔空隙率は、細孔径の測定範囲 $0.006\ \mu\text{m}$ ～ $10\ \mu\text{m}$ を二つに分けて検討し、(a) $0.050\ \mu\text{m}$ 未満の結果と (b) $0.050\ \mu\text{m}$ 以上の結果を示している。

グラフには、早強セメント単味配合 (H)、高炉スラグ微粉末の単独使用配合 (HB) 以外に、2種類の混和材を併用する配合中の HB6F3 を配合 HBF と表記して示しており、相関性があると見られる試験結果はその線形近似曲線も示した。なお、早強セメント単味配合 (H) のデータは2点のみであり、参考のため近似曲線も併記した。

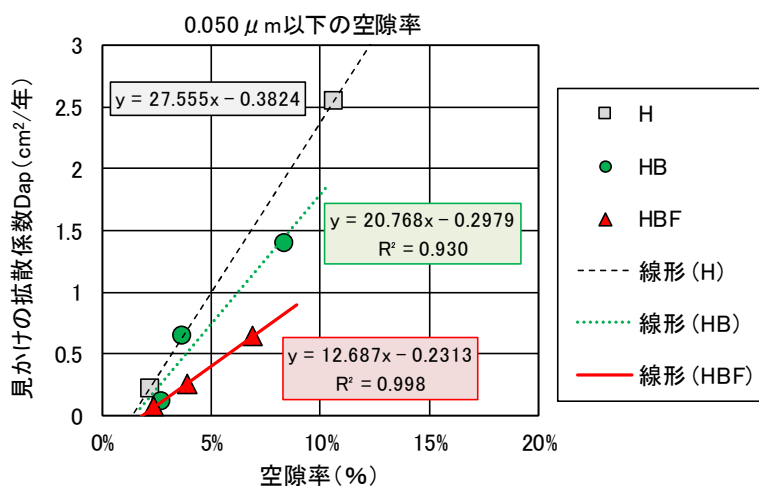
まず、細孔径の測定範囲 (a) $0.050\ \mu\text{m}$ 未満の結果を見ると、細孔空隙率と塩化物イオン浸透の見かけの拡散係数とは、比較的よい相関関係があると分かった。つまり、細孔空隙率が減少するほど、見かけの拡散係数も低くなり、コンクリートの細孔組織が塩化物イオン浸透への影響が大きいことが明確に現れたと考えられる。

既往の研究^{4,6)}においてもこのような傾向が確認され、本研究では2種類の混和材併用の場合でも、細孔空隙率と見かけの拡散係数の相関関係が確認された。

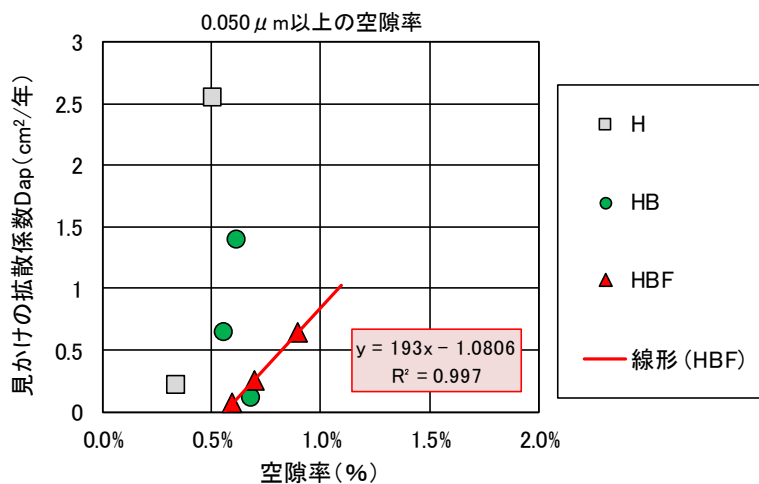
混和材の使用の影響が見かけの拡散係数にどう影響したかを調べると、同じ細孔空隙率の場合では、見かけの拡散係数は早強セメント単味配合 (H)、高炉スラグ微粉末の単独使用配合 (HB)、2種類の混和材併用の配合 (HBF) の順に低下し、2種類の混和材併用の配合 (HBF) の塩化物イオン浸透抑制効果が最も大きい。この結果では混和材併用の優位性が証明されたとともに、見かけの拡散係数は細孔空隙率だけに依存することなく、コンクリート結合材の材料構成の影響も受けていることも示されている。

一般に、混和材による塩化物イオン浸透抑制の原理では、フライアッシュを使用するとコンクリートが緻密な構造になり、また、塩化物イオンの固定に寄与する酸化アルミニウム (Al_2O_3) がセメントより多く供給され、塩化物イオンの浸透を停滞させる効果がある。一方、高炉スラグ微粉末はコンクリート微細構造の緻密化をもたらし、塩化物イオンの浸透や移動を遅らせること、いわゆる物理的な抑制効果以外に、塩化物イオンを化学的に固定するまたは電気的に吸着する効果も大きいとされる^{4,7)}。したがって、2種類の混和材併用の配合 (HBF) をコンクリートに適用する場合は、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュによる微細構造を緻密化させる効果、および塩化物イオンを固定する効果の複合的な作用により、塩化物イオン浸透抵抗性が更に向上したと考えられる。

一方、細孔径の測定範囲 (b) $0.050 \mu\text{m}$ 以上の結果を確認すると、2 種類の混和材併用の配合 (HBF) 以外に、細孔空隙率と塩化物イオン浸透の見かけの拡散係数とは、明確な相関関係が見られなかった。また、細孔径範囲 (b) $0.050 \mu\text{m}$ 以上の空隙率の結果は、最大でも 1.0%未満で (a) $0.050 \mu\text{m}$ 未満の結果に比べて約 1 割であり、塩化物イオン浸透の見かけの拡散係数の変化は主に (a) $0.050 \mu\text{m}$ 未満の比較的微細な空隙に左右されると言える。



(a) 細孔径 $0.050 \mu\text{m}$ 未満の結果



(b) 細孔径 $0.050 \mu\text{m}$ 以上の結果

図 4.5 細孔空隙率と見かけの拡散係数の関係

4.4.3 鋼材腐食発生の将来予測

各配合の浸漬期間1年の見かけの拡散係数の試験結果を用いて、コンクリート標準示方書^{4.8)}の方法に従いコンクリート構造物の鉄筋表面における塩化物イオン量の予測を行った。浸漬期間2年の方が、見かけの拡散係数が小さくなることが確認されたため、浸漬期間1年の試験結果を使用する方法を採用し、塩化物イオン量の予測結果は安全側にある。

コンクリートの表面塩化物イオン濃度は、コンクリート標準示方書^{4.9)}を参考に、最も厳しい建設環境を想定し海岸の飛沫帯における特性値 13.0kg/m^3 に統一した(表4.4)。鉄筋かぶりは道路橋示方書^{4.10)}に規定された塩害の影響が激しい対策区分「S」を参考に、橋梁上部構造における鉄筋かぶり70mmを使用した(表4.5)。

表 4.4 表面塩化物イオン濃度 C_{a0} の示方書値^{4.9)} (単位: kg/m^3)

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

表 4.5 塩害の影響による鉄筋かぶりの規定^{4.10)} (単位: mm)

塩害の影響の度合い	構造 対策区分	(1)	(2)	(3)
		工場で製作されるプレストレストコンクリート構造	(1)以外のプレストレストコンクリート構造	鉄筋コンクリート構造
影響が激しい	S	70 ^{※1}		
影響を受ける	I	50	70	
	II	35	50	70
	III	6.6.1「鉄筋のかぶり」による		50
影響を受けない				

※1 塗装鉄筋の使用またはコンクリート塗装を併用

鋼材腐食発生限界濃度はコンクリート標準示方書^{4.8)}の計算式を参考に、セメント種類ごとの特性値を使用した。

早強セメント単味配合 (H) は、「低熱ポルトランドセメント，早強ポルトランドセメントを用いた場合」に該当し，以下の式 (4.2) を使用した。

また，コンクリート標準示方書には，高炉スラグ微粉末単独使用の配合 (HB) および 2 種類の混和材併用の配合 (HBF) のような配合の鋼材腐食発生限界濃度が示されていないが，これらの配合に近い「高炉セメント B 種，フライアッシュセメント B 種を用いた場合」を参考に，以下の式 (4.3) を使用した。

$$C_{lim} = -2.2(W/C) + 2.6 \quad (4.2)$$

$$C_{lim} = -2.6(W/C) + 3.1 \quad (4.3)$$

ここに，

C_{lim} : 鋼材腐食発生限界濃度 (kg/m³)

W/C : 水セメント比 (水結合材比)，0.30~0.55 の範囲内とする。

ここでは， $W/C = 0.50, 0.40, 0.30$ の 3 配合を試算した。

鋼材腐食発生限界濃度を試算した結果として，**図 4.6** に推定年数 160 年までの各水結合材比の予測結果の推移を示す。

試算した結果，鉄筋かぶり位置に塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生限界濃度に達する時期は，早強セメント単味配合 (H)，高炉スラグ微粉末単独使用の配合 (HB)，2 種類の混和材を併用した配合 (HBF) の順に，水結合材比 40% では 3.6 年，15.8 年と 41.0 年となり，水結合材比 30% の場合はそれぞれ 44.8 年，100.9 年と 138.7 年と予測された。2 種類の混和材を併用した配合 (HBF) は鉄筋腐食発生の予測年数が最も長く，塩化物イオン浸透抑制効果が優れていることが明らかになった。

したがって，2 種類の混和材を併用した配合 (HBF) を使用した P C 構造物は厳しい塩害環境に建設されたことを想定しても，長期にわたって健全性が保たれるものと期待できる。

また，一般的な P C 構造物の水結合材比は，P C 部材の配合に関する調査結果^{4.11)}によると，コンクリートの設計基準強度 40N/mm² における水結合材比の平均値は 38.5%，50N/mm² における水結合材比は 35.3% であり，いずれも本研究で検討したモルタルの水結合材比 30%~40% の間に入る。なお，水結合材比 50% の鋼材腐食発生限界濃度に達する時期予測結果について，早強セメント単味配合 (H) はデータ不足のため欠番となるが，高炉スラグ微粉末単独使用の配合 (HB) と 2 種類の混和材を併用した配合 (HBF) はそれぞれ 6.7 年と 14.5 年と予測された。

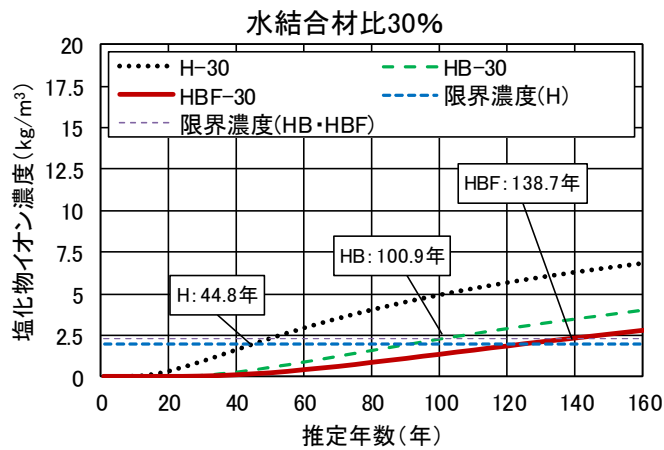
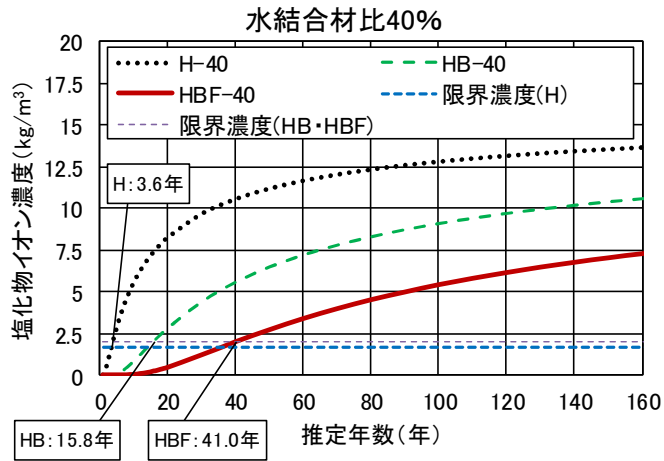
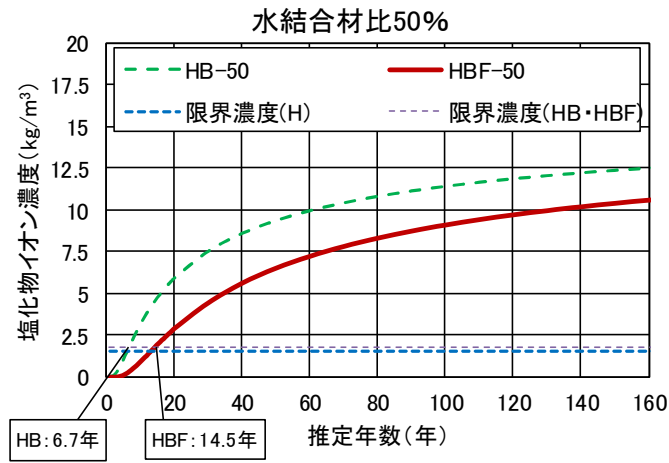


図 4.6 鉄筋表面の塩化物イオン量の予測

4.5 第4章のまとめ

本章では、塩化物イオン浸透抵抗性に関する試験を行い、各種試験で得られた知見を以下に示す。

- 1) 混和材を使用した配合は、早強セメント単味配合に比べ内部の塩化物イオン含有量の低下が確認されており、塩化物イオンの内部浸透を大幅に抑制できることが確認された。その中でも、2種類の混和材併用の抑制効果が最も大きいことが明らかになった。
- 2) 高炉スラグ微粉末およびフライアッシュなど混和材の種類の影響、粉末度の影響およびフライアッシュ添加方法の影響について比較を行い、その傾向を把握した。
- 3) 試験結果から塩化物イオン浸透の見かけの拡散係数を算出し、2種類の混和材を併用した配合の見かけの拡散係数は、早強セメント単味配合の1～3割となり、高炉スラグ微粉末を単独で使用した配合に比べても3～5割となり、塩化物イオンの浸透を最も抑制できると判明した。
- 4) 異なる浸漬期間における見かけの拡散係数の変化する傾向も見られ、浸漬期間が長いほど見かけの拡散係数が小さくなることが確認された。
- 5) PC構造物を対象に厳しい塩害環境を想定して鋼材腐食を予測した結果、2種類の混和材を併用した場合は鉄筋腐食発生の予測年数が最も長く、長期耐久性が期待できる。

以上の試験結果により、混和材を使用したコンクリートは塩化物イオン浸透に対する耐久性が向上し、特に2種類の混和材併用による相乗効果が発揮されることで、最も優れた耐久性を得られることが確認された。

【第4章の参考文献】

- 4.1) 三浦尚, 西川和廣, 見波潔, 上阪康雄: 暮坪陸橋の塩害による損傷と対策—
(2) P C鋼材の腐食とその補強対策, 橋梁と基礎, Vol. 27, No. 12, pp. 37-40,
1993.
- 4.2) 阿波根庸夫, 神谷正哲, 大城芳樹, 仲村佳輝: 海洋環境に位置するP C橋の
劣化, コンクリート工学, Vol. 40, No. 3, pp. 36-42, 2002.
- 4.3) 岩崎義一, 川尻克巳: 架橋40年海岸部に位置する塩害橋梁の更新について,
北陸橋梁保全会議(第1回)報文概要集, 2013.
- 4.4) 土木学会: コンクリート標準示方書 [施工編: 検査標準], pp. 197, 2012.
- 4.5) 土木学会: コンクリート標準示方書 [維持管理編: 劣化現象・機構別],
pp. 170-173, 2013.
- 4.6) 例えば, 吉田行, 田口史雄, 渡辺宏: 高炉スラグ微粉末を用いた改質ビーラ
イト系セメントコンクリートの塩分浸透性, コンクリート工学年次論文集,
Vol. 24, No. 1, pp. 639-644, 2002.
- 4.7) 例えば, 日本コンクリート工学会: 混和材積極利用によるコンクリート性能
への影響評価と施工に関する研究委員会報告書, pp. 129-130, 2013.
- 4.8) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編: 標準], pp. 156, 2012.
- 4.9) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IIIコンクリート橋編, pp. 172, 2002.
- 4.10) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編: 標準], pp. 148-151, 2012.
- 4.11) 土木学会: コンクリートライブラリー 126, 施工性能にもとづくコンクリ
ートの配合設計・施工指針(案) [資料編], pp. 資料-47, 2007.

第5章 その他の耐久性に及ぼす混和材併用の影響

5.1 はじめに

P C 構造物の主な経年劣化現象は、塩害、ASR、中性化、凍害、化学的侵食などが挙げられ、P C 構造物の長期耐久性を確保するため、コンクリート材料の耐久性を向上させ、これらの劣化現象を重点的に抑制することが重要である。

また、コンクリートの劣化抑制は初期変状も含めて検討すると、コンクリートの体積変化に起因する収縮ひび割れ、または水和熱に起因する温度ひび割れの抑制も考慮する必要がある。このようなP C 構造物の初期から長期にわたって発生したひび割れは外部からの劣化因子の侵入通路となるため、コンクリートの材料自体の耐久性と関係なく、鉄筋の腐食を引き起こす原因となる。

なお、収縮量やクリープが大きいコンクリートを使用するP C 構造物は、プレストレス力の過大なロスが発生するおそれがあるため、新しい材料の組合せを使用するコンクリートの収縮特性やクリープ特性を把握する必要がある。

第3章、第4章では、コンクリートのASR抑制効果および塩化物イオン浸透抑制効果に及ぼす2種類混和材併用の影響を検討した。本章では、その他の耐久性に及ぼす混和材併用の影響について検討する。

5.2 検討方針

本章では、コンクリートの長期耐久性に及ぼす2種類混和材を併用する影響について、中性化抵抗性、凍結融解抵抗性および収縮特性を検討した内容をまとめた。

これ以外に、前述の劣化現象の中に挙げられた化学的侵食は特殊な使用環境に依存するものであり、P C 構造物での劣化事例はほとんど報告されていない。温度ひび割れの抑制は重要な項目であるが、材料特性値については既に数多くの研究成果^{5.1), 5.2)}があり、P C 構造物を含めてコンクリートの温度ひび割れに対する解析検討の技術も確立している^{例えば5.3), 5.4)}。なお、混和材料を使用したコンクリートのクリープ特性については、設計値と比較して同程度か小さくなり、道路橋示方書などの示方書値を使用できることが報告され^{5.5)}、2種類混和材併用のコンクリートにおいても特に重点的に検討する項目ではないと考えられる。

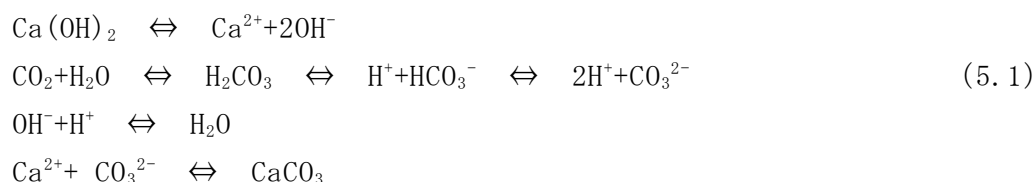
以上のように、既往の研究成果および本研究の設備条件や試験環境などを総合的に勘案し検討する項目の優先順位を決定し、比較的重要とされる中性化抵抗性(5.3節)、凍結融解抵抗性(5.4節)および乾燥収縮特性(5.5節)の3つの耐久性項目について試験を行い、各種検討を行った。

5.3 中性化特性に及ぼす混和材併用の影響

5.3.1 中性化特性について

コンクリート構造物に生じる中性化とは、大気中の二酸化炭素がコンクリート内に侵入し、水酸化カルシウムなどのセメント水和物と炭酸化反応を起こすことにより、コンクリートの細孔溶液の pH を低下させる現象である。これにより、内部の鋼材表面の不動態皮膜が失われ、酸素と水分の供給により腐食が進行しやすくなる。さらに鋼材の腐食により、ひび割れの発生、かぶりの剥落や耐力の低下などが起こるおそれがある。

中性化の反応式を式 (5.1) に示す。



高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を使用するコンクリートでは、ポゾラン反応と潜在水硬性の進行によってコンクリート中の水酸化カルシウム含有量が顕著に低下した場合、中性化抵抗性能の低下が懸念され、混和材の置換率が大きくセメント量が減少するほど、コンクリートの中性化速度が大きくなる研究報告が多数ある^{5.6)}。その一方、早強ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末に置換された配合では、コンクリート強度が確保できる場合は中性化促進試験で中性化深さが大きくなっていない報告もある^{5.7)}。また、高炉セメントを使用したコンクリートは、実環境での構造物の中性化深さ測定結果によると普通ポルトランドセメントと明確な差がなかったが、促進試験では高炉配合の中性化進行が著しく大きくなったことも報告されている^{5.8)}。したがって、中性化促進試験で得られた結果は実環境での中性化深さ測定結果より厳しく評価されている。

中性化抵抗性は混和材を使用するコンクリートの耐久性を確保する上では重要な指標である。以上に示した既往の研究を踏まえ、2種類混和材併用のコンクリートの中性化特性を究明するため、本研究ではこれらの混和材を用いたコンクリートの中性化特性を促進試験で確認した。

5.3.2 促進中性化試験の概要

コンクリートの促進中性化試験に使用する材料を表 5.1、配合を表 5.2 に示す。ここで、水結合材比とは $W/(C+B)$ と定義しており、材齢 1 日の強度発現性がプレストレス導入に必要な強度 35.0N/mm^2 を満足するように、過去の実績から 34.0% を使用した。これは、既往の研究^{5,9)} においては、高炉スラグ微粉末を単独使用し、蒸気養生を施したコンクリートの実績配合である。また、セメントは早強ポルトランドセメントを使用し、配合名に記号 H と表示する。

表 5.1 コンクリート供試体の使用材料一覧表

材料分類	種類	記号	特性値
セメント	早強ポルトランドセメント	H	密度 3.14g/cm^3 ，比表面積 $4,380\text{cm}^2/\text{g}$
混和材	高炉スラグ微粉末 6000	B6	密度 2.88g/cm^3 ，比表面積 $6,290\text{cm}^2/\text{g}$
	フライアッシュ(Ⅱ種)	F3	密度 2.28g/cm^3 ， SiO_2 57.8%， ig-loss2.5%，比表面積 $3,550\text{cm}^2/\text{g}$ 活性度指数：83(28日)，103(91日)
細骨材	岐阜県揖斐川産川砂	S	表乾密度 2.63g/cm^3 ，絶乾密度 2.59g/cm^3 ， 吸水率 1.38%
粗骨材	岐阜県揖斐川産川砂利	G	表乾密度 2.64g/cm^3 ，絶乾密度 2.61g/cm^3 ， 吸水率 1.19%
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸コポリマー系
	AE 剤	AE	樹脂酸塩系陰イオン界面活性剤

表 5.2 コンクリート供試体の配合一覧表

水結合材比 (%)	配合の記号	単体量 (kg/m^3)							
		水 (W)	セメント (C)	高炉スラグ 微粉末 (BFS) (B)	フライ アッシュ (FA) (F)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)	高性能 AE 減水剤 (SP)	AE 剤 (AE)
34	H	152	447	-	-	728	1011	2.682	0.018
	HB	152	224	224	-	720	1000	2.688	0.018
	HBF	152	224	224	45	698	970	3.205	0.027

試験は JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に従って行った。試験状況を写真 5.1 に示す。

供試体の初期材齢時の養生条件は材齢 1 日に封緘養生と給熱促進養生の 2 種類、それぞれ角柱供試体 (100mm×100mm×400 mm) 3 本/セット, 2 本/セットを作成した。給熱促進養生の使用装置は写真 2.1, 養生パターンは図 2.3 を参照する。供試体は材齢 1 日で脱枠し 28 日の水中養生を行い, その後, 促進期間 26 週まで温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 相対湿度 $60 \pm 5\%$, 二酸化炭素濃度 $5\% \pm 0.2\%$ の条件で促進中性化試験を行った。所定の頻度でフェノールフタレイン溶液を噴霧し, 変色部分までのコンクリート深さを測定した。



写真 5.1 コンクリートの促進中性化試験の試験状況

5.3.3 促進中性化試験の結果

(1) 中性化深さおよび中性化速度係数の結果

1) 中性化深さ

コンクリートの促進中性化試験の結果を図 5.1、促進試験期間 26 週時の試験状況を写真 5.2 に示す。

試験結果では、全ケースの中性化深さは 2.0mm 未満の小さな値を示している。その中で、2 種類の混和材併用 (HBF) の中性化深さは、早強セメント単味配合 (H) より大きいですが、高炉スラグ微粉末単独使用の配合 (HB) より小さくなっている。

また、混和材を使用した配合 (HB, HBF) は、2 種類の混和材併用も含めて早強セメント単味配合 (H) に比べ中性化深さが大きくなる傾向があるが、その差は最大でも 1.2mm 程度であった。なお、初期材齢時の養生方法を比べると、封緘養生の供試体は給熱促進養生より中性化深さが最大 0.7mm 程度大きいことが確認された。

混和材の使用により中性化深さは若干大きくなったが、セメントとの置換および水酸化カルシウムの消費にもかかわらず、コンクリートの組織が緻密であるため、中性化深さの試験結果は混和材未使用と大差がなかったと考えられる。

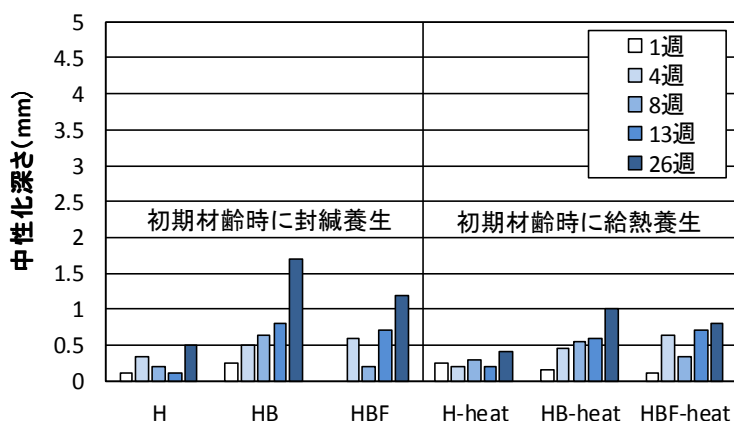


図 5.1 コンクリートの促進中性化試験の結果 (26 週まで)



H (初期材齢時に封緘養生)



H-heat (初期材齢時に給熱養生)



HB (初期材齢時に封緘養生)



HB-heat (初期材齢時に給熱養生)



HBF (初期材齢時に封緘養生)



HBF-heat (初期材齢時に給熱養生)

写真 5.2 促進期間 26 週時の供試体の試験状況

2) 中性化速度係数の算出

促進中性化試験の結果を利用して、コンクリート標準示方書^{5.10)}の規定を参照し、中性化深さ C が促進期間 t の平方根に比例する \sqrt{t} 則 (式 (5.2)) により中性化速度係数 α を算出した。この中性化速度係数の試験値は中性化深さ 2.0mm 未満の極小な値から算出した結果であり、ある程度精度が欠けた可能性があると考えられる。

$$\alpha = C/\sqrt{t} \quad (5.2)$$

ここに、

C : 中性化深さの測定値 (mm)

α : 中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$)

t : 供用期間 (年), 本研究では促進期間 0.5 年

ただし、促進中性化試験の試験条件は、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ 、二酸化炭素濃度 $5 \pm 0.2\%$ であり、供用時に構造物が置かれる屋外の環境条件と大幅に異なるため、促進中性化試験から得られた中性化速度係数は、二酸化炭素濃度の差を補正する必要がある。補正方法^{5.11)}は、中性化速度係数が二酸化炭素濃度の平方根に比例することを利用し、式 (5.3) に示すように計算した。その中で、実環境の二酸化炭素濃度は、2014 年の世界の平均濃度 0.03977% (397.7ppm) であるが^{5.12)}、建築学会では一般に屋外で 0.05%、室内で 0.2% とされる^{5.11)}。本研究では最も厳しい特性値 0.2% を使用した。

補正前後の中性化速度係数の計算結果は、後述の耐用期間 100 年後の中性化深さ予測値と合わせて表 5.3 に示す。

$$\alpha_{ACT} = A_{ACT} \cdot \sqrt{CO_2/CO_{2,ACT}} \quad (5.3)$$

ここに、

α_{ACT} : 二酸化炭素濃度の差を補正した実環境中の中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$)

A_{ACT} : 促進中性化試験から得られる中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$)

CO_2 : 実環境の二酸化炭素濃度 (%), 室内で 0.2%

$CO_{2,ACT}$: 促進中性化試験の二酸化炭素濃度 (5%)

表 5.3 促進試験結果および中性化速度係数のまとめ

配合の記号	促進試験 26 週		CO ₂ 濃度を補正した 実環境の中性化速度係数 (mm/√年)
	中性化深さ測定値 (mm)	中性化速度係数 (mm/√年)	
H	0.5	0.707	0.141
HB	1.7	2.404	0.481
HBF	1.2	1.697	0.339
H-heat	0.4	0.566	0.113
HB-heat	1.0	1.414	0.283
HBF-heat	0.8	1.131	0.226

注) 初期材齢時に封緘養生 : H, HB, HBF,
初期材齢時に給熱促進養生 : H-heat, HB-heat, HBF-heat

3) 中性化速度係数の試験値と推定値との比較

本研究では、促進中性化試験の結果を利用して、式 (5.1) および式 (5.2) から中性化速度係数 (試験値) を算出した。一方、コンクリート標準示方書^{5.10)}では、過去に行われた実験データに基づいて求めた回帰式 (推定値)^{5.13)}を提示している。ここで、中性化速度係数の試験値と推定値との比較を行った。

コンクリート標準示方書回帰式は計算式 (5.4) を使用した。

$$\alpha_k = \beta_e \cdot (-3.57 + 9.0 \cdot W/B) \quad (5.4)$$

ここに、

α_k : 有効水結合材比から推定された中性化速度係数 (mm/√年)

W/B : 有効水結合材比, $W/B = W/(C + k \times A_d)$

W : 単位水量 (kg/m³)

C : 単位セメント量 (kg/m³)

k : 混和材の種類によって定まる定数,

フライアッシュの場合は, $k = 0$, 高炉スラグ微粉末の場合は, $k = 0.7$

A_d : 単位混和材量 (kg/m³)

β_e : 環境の影響を表す係数,

乾燥しやすい環境 = 1.6 (本研究の試算条件), 乾燥しにくい環境 = 1.0

図 5.2 に、有効水結合材比と中性化速度係数の関係について、促進中性化試験から得られた中性化速度係数の試験値とコンクリート標準示方書回帰式から算出した推定値（直線）を示す。ここでは、推定値（直線）の有意義な該当範囲は有効水結合材比が 39.7%以上とされており、それ以下の中性化速度係数の推定値が 0mm となる。本研究の各配合の有効水結合材比は、早強セメント単味配合（H, H-heat）は 34.0%であり、混和材を使用した配合（HB, HB-heat, HBF, HBF-heat）の計算結果は 39.9%である。

結果によると、早強セメント単味配合を含めた全ケースにおいて、中性化速度係数の試験値は推定値よりやや大きい数値となった。推定値は様々な暴露環境での追跡調査の研究結果^{5.13)}をまとめたものである一方、促進試験は相対湿度 60%という中性化が進行しやすい条件で行い、試験値の方が比較的厳しい条件での検証結果であったと考えられる。

したがって、本研究では、試験結果ではすでに 2 種類の混和材併用の中性化深さが小さく十分な耐久性を有することが確認されたが、中性化速度係数の試験値は示方書推定値よりやや大きい結果となり、中性化深さの将来予測は試験値を用いて行うことで、より安全側の予測結果が得られると考えられる。

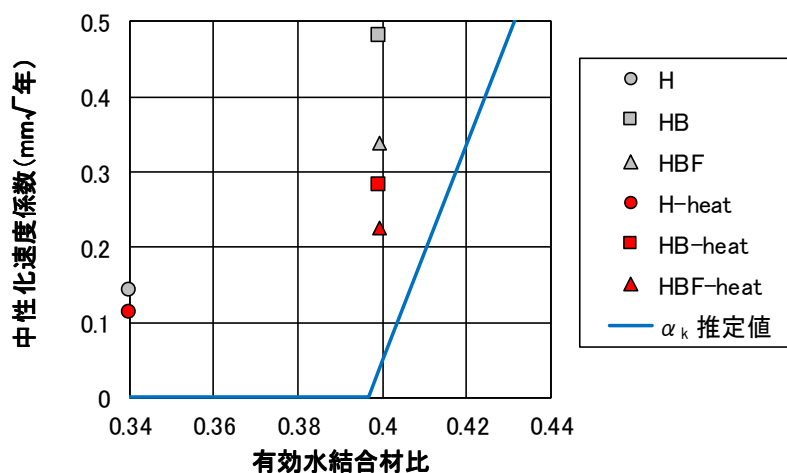


図 5.2 有効水結合材比と中性化速度係数の関係

(2) 中性化に及ぼす水和生成物・細孔構造などの影響

コンクリートの中性化は水和生成物および細孔組織構造の影響を受けている。既往の研究成果^{5,14)}によると、コンクリートの内部アルカリ濃度が低いほど、細孔空隙率が高いほど中性化が早く進行することが明らかになっている。しかし、2種類の混和材併用のコンクリートでは、早強セメント単味配合に比べて水和生成物である水酸化カルシウム(CH)の含有量が低いことから、中性化が進行しやすいおそれがある一方、内部の微細空隙が少なく二酸化炭素が内部へ浸透しにくいいため、中性化進行を遅らせる効果もある程度期待される。これらの一長一短の特徴を持つ2種類の混和材併用のコンクリートにおいては、水和生成物および細孔組織構造の要素がどのように中性化抵抗性に影響するかは未だに解明されていない。

以上の既往の研究成果を勘案し、この節では水和生成物および細孔構造などの試験結果を用いて、2種類の混和材併用のコンクリートの中性化抵抗性について評価した。

具体的に、第2章にて得られた水酸化カルシウム(CH)の含有量と細孔空隙率の試験結果から早強セメント単味配合(H)および2種類の混和材併用(HB6F3はHBFと表記する)の2ケースの結果を取り出し、実環境の中性化速度係数との関係を検討した。

ただし、水酸化カルシウム(CH)の含有量と細孔空隙率の試験は、中性化促進試験と同率な水結合材比の検討を行っていないため、**図 5.3**～**図 5.4**の検討結果には、封緘養生を行った水結合材比40%のセメント硬化体の結果を(a)グラフに、給熱促進養生を行った水結合材比30%の結果を(b)グラフに表示した。したがって、水酸化カルシウム(CH)の含有量、細孔空隙率と中性化速度係数との比較検討は、水結合材比が比較的近いとは言っても同率ではないため、初期材齢時の養生条件を揃えた相対的な結果比較となっている。また、中性化速度係数の試験材齢は6ヶ月、水酸化カルシウム(CH)の含有量と細孔空隙率の試験材齢は1年であり、両方の材齢が揃っていないものの長期材齢の測定値同士の比較検討を行うこととした。

なお、水酸化カルシウム(CH)の含有量と細孔空隙率の試験サンプルは、試験体内部から取り出したものであり、粉砕などの加工後に測定直前までにアセトンによる水和停止を行っており、中性化の影響を受けていないと考えられる。

1) 水和生成物の影響

図 5.3 に、実環境の中性化速度係数と水酸化カルシウム (CH) の関係について、早強セメント単味配合 (H) および 2 種類の混和材併用 (HBF) の結果を示している。初期材齢時の養生方法により (a) 封緘養生と (b) 給熱促進養生の二つのグラフに示しており、左縦軸である実環境の中性化速度係数は本章で述べた水結合材比 34% のコンクリートの中性化促進試験結果から試算したものであり、右縦軸である水酸化カルシウム (CH) の含有率は前述の第 2 章にて得られた試験結果である。

2 種類の混和材併用 (HBF) の試験結果では、早強セメント単味配合 (H) に比べて水酸化カルシウム (CH) 含有量の大幅な減少が見られ、これに対応して中性化速度係数がある程度増加したと確認された。これは内部アルカリ濃度の低下が中性化の進行を加速させる既往の研究成果^{5,14)}からも説明できる。なお、これらの傾向は (a) 封緘養生と (b) 給熱促進養生の両方において確認されている。

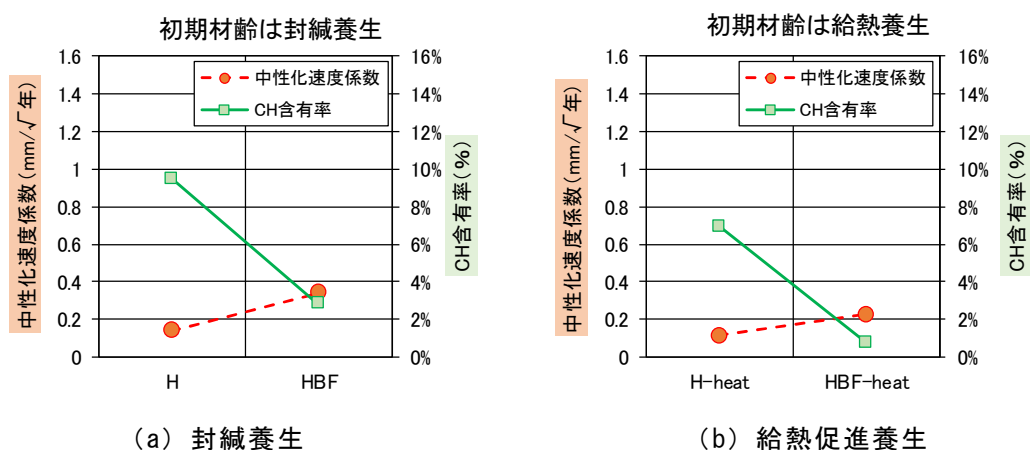


図 5.3 中性化速度係数と水酸化カルシウム (CH) の試験結果

2) 細孔構造の影響

既往の研究では中性化速度は比較的大きい細孔の容積との相関性が高いことが報告されている^{5.15), 5.16)}。本研究では細孔径 $0.05 \mu\text{m}$ を境に、 $0.05 \sim 1.0 \mu\text{m}$ の比較的粗大な径の細孔と $0.0055 \sim 0.05 \mu\text{m}$ の微細な細孔に分けて、中性化速度係数と細孔空隙率との関係を検討した。細孔空隙率の定義は以下の計算式 (5.5) に示す。

$$\text{細孔空隙率 (\%)} = \frac{\text{細孔径分布試験における空隙容積の試験データ}}{\text{各種配合の単位重量容積 (材料特性値より)}} \times 100\% \quad (5.5)$$

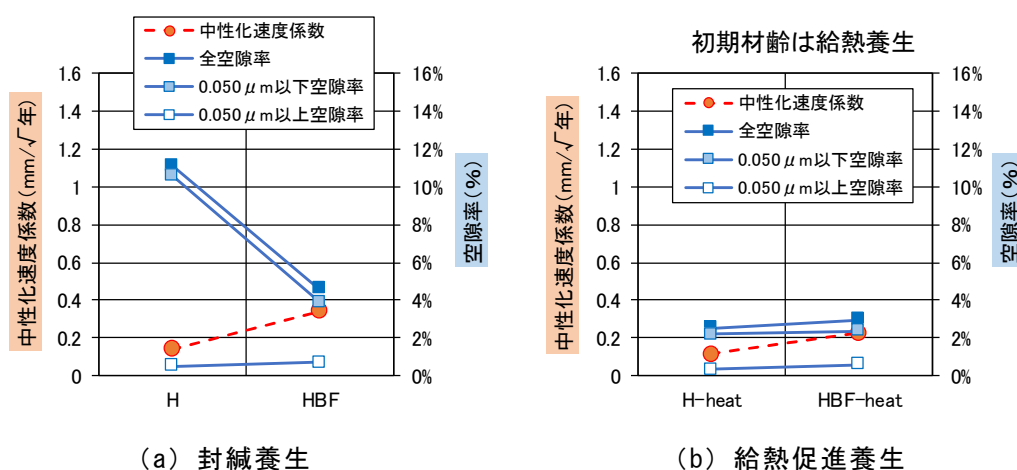


図 5.4 中性化速度係数と細孔空隙率の試験結果

図 5.4 に、実環境の中性化速度係数と細孔空隙率との関係について、早強セメント単味配合 (H) および 2 種類の混和材併用配合 (HBF) の結果を示す。左縦軸である実環境の中性化速度係数は本章で述べた水結合材比 34% のコンクリートの中性化促進試験結果から試算したものであり、初期材齢時の養生方法により (a) 封緘養生と (b) 給熱促進養生の二つのグラフに示した。細孔空隙率 (右縦軸) は前述の第 2 章にて得られた試験結果であり、「全空隙率」、「 $0.05 \mu\text{m}$ 未満の空隙率」、「 $0.05 \mu\text{m}$ 以上の空隙率」の 3 つの範囲で集計したデータを示している。

試験結果を確認すると、早強セメント単味配合 (H) および 2 種類の混和材併用 (HBF) はともに緻密な細孔構造を有しており、細孔径 $0.05 \mu\text{m}$ 以上の比較的粗大な細孔の空隙率は、初期材齢時の養生方法に関係なくわずかしか検出されておらず、その変動は中性化速度係数との関連性が明確ではなく、既往の研究で報告された高い相関関係が確認されなかった。

一方、全空隙率、および全空隙中に割合が高いとされる細孔径 $0.05 \mu\text{m}$ 未満の空隙率は、中性化速度係数の増減との関連性が薄く、既往の研究にも報告されたように中性化速度係数に影響しないと考えられる。

この空隙率と中性化速度係数の相関関係を解明するにはさらに多くの試験検証が必要であると考えられる。しかし、本研究の対象としたコンクリートは緻密性が高く、細孔径 $0.05 \mu\text{m}$ 以上の比較的粗大な細孔が非常に少なかったことは、2種類の混和材併用 (HBF) の中性化速度係数の増加が抑制された原因の一つであると推測される。

以上の内容により、定性的であるが2種類混和材併用のコンクリート (HBF) の中性化特性に影響する要因を検討した。結果は以下である。

- 1) 早強セメント単味配合 (H) と比較して、2種類混和材併用のコンクリート (HBF) は水酸化カルシウム (CH) の含有量が減少し、中性化速度係数は大きくなる傾向があった。
- 2) 中性化との関連性が高いとされる比較的粗大な細孔量について、細孔径 $0.05 \mu\text{m}$ 以上の空隙量が少ないため、中性化速度係数の大幅な増加が抑制された。

したがって、2種類混和材併用のコンクリート (HBF) は、細孔構造が緻密になったことで、水酸化カルシウム (CH) の減少という中性化抵抗性にとってマイナスの要因を打ち消し、結果として早強セメント単味配合 (H) と同程度の中性化抵抗性を有するため、耐久性が確保できるものと考えられる。

5.3.4 実環境中の中性化深さの将来予測

ここで、中性化深さの将来予測として、式(5.3)から求めた実環境中の中性化速度係数(試験値)を使用し、PC構造物耐用期間100年後の中性化深さの予測値を式(5.6)から計算した。

$$y = \alpha_{ACT} \times \sqrt{t} = \alpha_{ACT} \times \sqrt{100 \text{ 年}} \quad (5.6)$$

ここに、

y : 100年後の中性化深さの推定値(mm)

α_{ACT} : 実環境中の中性化速度係数(mm/ $\sqrt{\text{年}}$)

t : 構造物の供用年数、ここでは100年とする

これにより計算した実環境中のPC構造物100年後の中性化深さの結果を図5.5に示す。2種類の混和材を併用するコンクリート(HBF, HBF-heat)は、耐用期間100年後の中性化深さ予測値は最大でも5mm未満であった。鉄筋かぶりは通常35mmと考えると、耐用期間100年後の中性化深さは、鉄筋かぶりに比較してはるかに小さい数値であるため、PC構造物の耐用期間に対して十分な中性化抵抗性を有することが確認された。

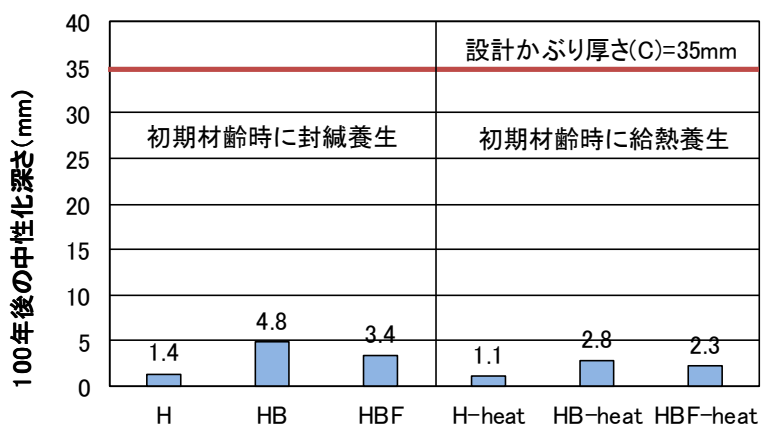


図 5.5 耐用期間 100 年の中性化深さ予測値

5.4 凍結融解特性に及ぼす影響

5.4.1 凍結融解特性について

凍害とは、コンクリート中の水分が凍結する際の体積膨張と、融解の際の水分供給という凍結融解作用を繰り返すことにより、コンクリートが徐々に劣化する現象である。凍害を受ける構造物では、コンクリート表面にスケーリング、微細ひび割れ、ポップアウト等が生じると、構造物の美観を損ねるだけでなく、コンクリートの物質移動抵抗性も低下させる。

P C構造物は高強度であり、水セメント比が小さく内部の自由水が少ないため、凍結融解抵抗性が大きいとされるが、過去にP C橋の劣化事例として凍害と塩害の複合劣化が発生した湖山橋（写真 5.1）などの事例が報告された^{5.17)}。また、図 5.6 に示すように、凍害の発生地域^{5.18)}は全国に分布しており、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用するコンクリートの普及を考えると、凍結融解特性は必要不可欠な検討項目である。

既往の研究では、高炉スラグ微粉末やフライアッシュのような混和材を使用するコンクリートの凍結融解抵抗性について、様々な研究がされている。

フライアッシュを使用したコンクリートについて、未燃カーボンの影響で空気量が減少または不安定となる事例が数多く報告され、これによりコンクリートの耐凍害性が低下するおそれがある。したがって、対策としては練混ぜ時の空気量の確保が重要である。

その一方、高炉スラグ微粉末について既往の研究では結論が分かれている。例えば、添田・大和・左東・江本^{5.19)}は高炉スラグ微粉末の使用によってコンクリート中に微細な気泡割合が増加し、凍結融解抵抗性を向上させることを示している。一方、楠・池・添田・大和は別の報告では^{5.20)}混和材を混合した場合、置換方法、置換率によってスケーリングの進行に違いがあり、高炉スラグ微粉末を用いた場合はあえてスケーリングの促進が大きかったことを指摘している。また、檀・伊代田・兼安・植木^{5.21)}は、高炉スラグ微粉末の使用は、置換率が高いほどスケーリングが増大するが、動弾性係数は低下していないことを示している。なお、セメント協会の委員会報告^{5.22)}では、高炉セメントの使用は凍結融解抵抗性を低下させることなく、普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントの間であることを示した。

以上に述べた通り、凍結融解に対する高炉スラグ微粉末の劣化抵抗性において、研究者によって評価が様々であり、同じ研究機関においても配合など試験条件によって結論は異なっている場合がある。

このため、これらの混和材を用いたコンクリートの凍結融解特性は一体どうなる

か、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用し、特に高炉スラグ微粉末を高い置換率を混合する本研究においては、コンクリートの凍結融解特性を試験で確かめることが重要である。

このように、凍結融解に対して、高炉スラグ微粉末の劣化抵抗性は評価が様々であり、また、フライアッシュを使用した場合は耐凍害性が低下するおそれがある。このため、本研究ではこれらの混和材を用いたコンクリートの凍結融解特性を試験で確認した。

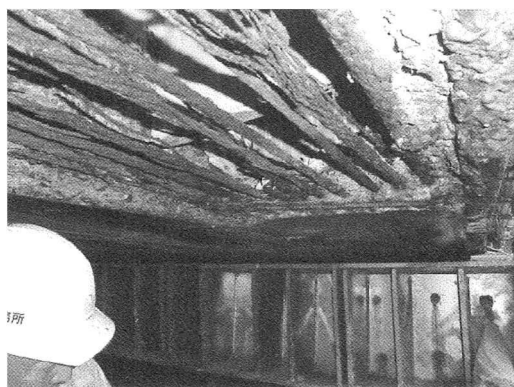


写真 5.1 凍害を含めた複合劣化が発生したPC橋の事例^{5.17)}

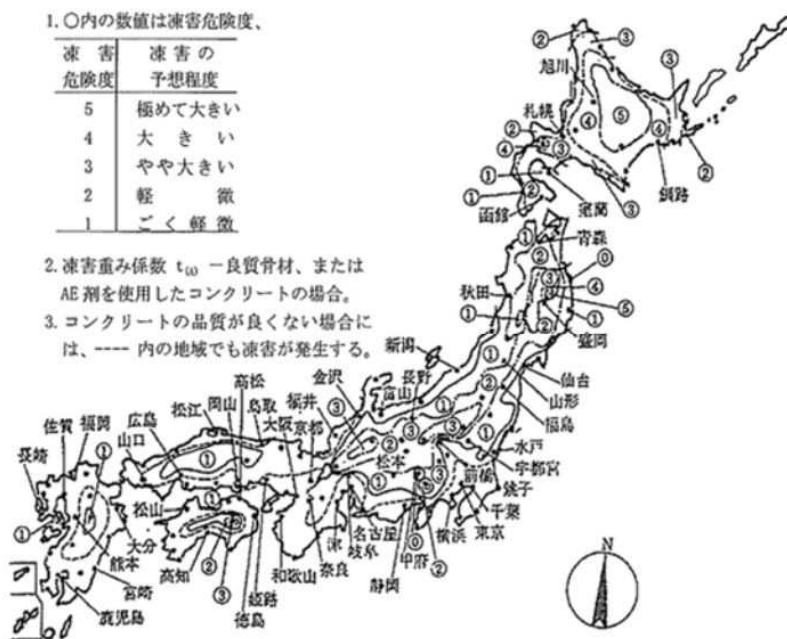


図 5.6 凍害危険度の分布図^{5.18)}

5.4.2 凍結融解試験の概要

コンクリートの凍結融解試験に使用する材料，配合は中性化促進試験と同じく表 5.1，表 5.2 に示す内容である。

凍結融解試験は JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験法 A 法（水中凍結融解試験方法）」に従い，100mm×100mm×400 mm のコンクリートの角柱供試体（3 本/セット）を作成し，試験槽の中で 5℃～-18℃ の間に温度制御を行い，300 サイクルまでに促進試験を行った。所定の頻度で相対動弾性係数と質量変化率を測定し，凍結融解特性を評価した。凍結融解試験の試験状況を写真 5.3 に示す。



写真 5.3 コンクリートの凍結融解試験の試験状況

5.4.3 凍結融解試験の結果

凍結融解試験の測定結果として，凍結融解サイクル 300 回後の相対動弾性係数と質量変化率を図 5.7，図 5.8 に示す。

コンクリート標準示方書^{5.23)}では，相対動弾性係数が 90%以上であれば，一般の構造物に適用する場合は凍害の内部損傷及び表面損傷（スケーリング）に対する照査を省略することができるとされている。

凍結融解の結果を確認すると，高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用したコンクリート（HBF）の相対動弾性係数は，早強セメント単味配合のコンクリート（H）および高炉スラグ微粉末を単独使用のコンクリート（HB）と比較しても明確な差異が見られず，300 サイクル経過後でも 95%以上であった。また，初期材齢時に給熱促進養生を行ったケースと封緘養生を行ったケースでは同等な試験結果が得られた。なお，いずれのケースにおいてもコンクリートの質量変化はわずかであり凍害に起因するスケーリングが発生しなかった。

したがって，高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用したコンクリート（HBF）は，早強セメント単味配合（H）とともに良好な凍害抵抗性を示している。

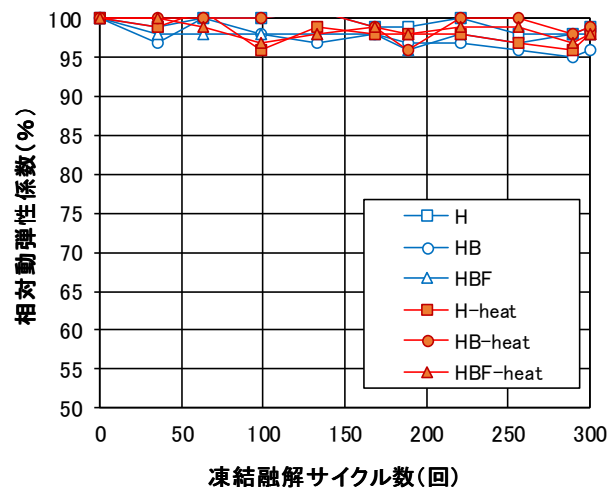


図 5.7 コンクリートの相対動弾性係数

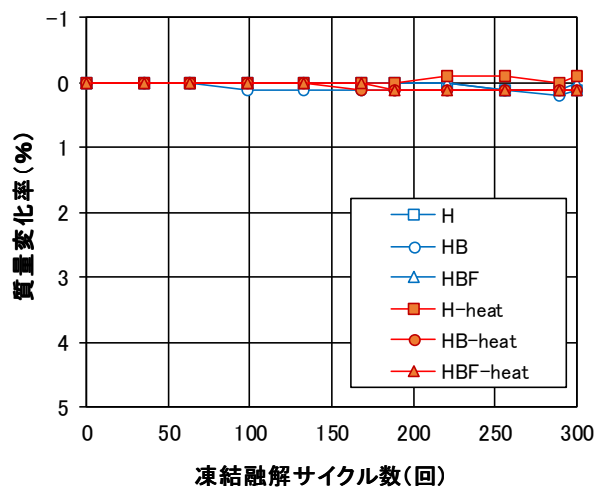


図 5.8 コンクリートの質量変化率 (+は質量減少)

5.4.4 凍結融解試験結果に対する考察

既往の研究では、コンクリートの凍結融解抵抗性はおもに連行空気（エントレインドエア）の量に左右されるが、これ以外に、微細組織構造や圧縮強度などにも関連性があるとされる。

連行空気量は、コンクリートの使用材料の特性を把握し練混ぜ時に AE 剤の使用量調整により制御することが可能であり、また空気量試験により確認できる。本研究では、フライアッシュ由来の未燃カーボンの影響を回避するため、フライアッシュの使用量を比較的少なく設定し、細骨材量の 10%とした。コンクリートの空気量試験においても、フライアッシュ使用の各配合ではほかの配合に比べて空気量の低下が確認されなかった。このように、フレッシュコンクリートの空気量低下が発生しなければ、フライアッシュに起因する凍結融解特性の低下が生じる可能性が低いと考えられる。

また、微細組織構造に関する既往の研究には、内川^{5.24)}は水の凍結による膨張圧が発生する細孔径 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 範囲の空隙量を少なくすることなどで、凍結融解の劣化が抑制されると示している。また、岡本ら^{5.25)}は細孔径 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ の細孔空隙と凍結融解の関連性を確認したとともに、細孔径 $0.05\mu\text{m}$ 未満の細孔中の水は凍結しないと予測している。

本研究にて行った第 2 章の検討結果によると、セメント硬化体の微細組織構造が緻密であり各配合の細孔径 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ の細孔空隙は極めて少ない。また、凍結融解試験のコンクリート配合と比較できる配合の空隙率を集計すると、水の凍結と関係があるとされる細孔径 $0.05\mu\text{m}$ 以上の細孔空隙率は、水結合材比 40%、30% の順では、早強セメント単味配合 (H) では 0.5% と 0.3%、高炉スラグ微粉末単独使用 (HB) では 0.6% と 0.7%、2 種類の混和材併用 (HBF) では 0.7% と 0.6% であった。これは前述の岡本らの研究^{5.25)}で凍害劣化が確認された条件の細孔空隙率 30% に比べると、いずれも極小値であった。したがって、本研究における 2 種類の混和材併用 (HBF) を含めた各配合では、凍結融解劣化と関連性がある細孔空隙が極めて少ないことにより、良好な凍害抵抗性を保持できたと考えられる。

なお、檀らの研究^{5.21)}では、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性は、材料組成よりも圧縮強度の影響が大きいと指摘している。つまり、高炉スラグ微粉末配合では、特に高い置換率で圧縮強度が低くなる場合、凍結融解抵抗性が低下しやすい。

ここで、本研究における2種類混和材併用のコンクリートの凍結融解抵抗性に影響する要因を解明するため、圧縮強度と凍結融解抵抗性の関係を検討した。図 5.9 に、第6章に示したコンクリートの圧縮強度（ σ_{168} のデータ使用）と300サイクル経過後の相対動弾性係数をプロットしたグラフを示す。コンクリートの空気量が同程度であることを前提条件とすれば、圧縮強度が約 5N/mm^2 低くなるケースでは、相対動弾性係数は2~3%の低下が見受けられ、既往の研究と同様に凍結融解抵抗性は圧縮強度の影響を受けると言える。

このことから、本研究では各配合間の強度を比較すると、高炉スラグ微粉末使用の配合でも、粉末度が高い高炉スラグ微粉末6000の使用により強度の著しい低下が生じることがなく、コンクリート組織が緻密になり水分の浸透が抑制された耐久性向上の要因も複合的に考慮し、結果として混和材使用の有無と関係なく同等な凍害抵抗性を示したと推察される。

従って、2種類の混和材併用（HBF）のコンクリートは、配合設計および施工上の配慮によりフライアッシュの使用量を適切に設定し空気量の低下を防ぐこと、微細組織構造の緻密化により凍結融解劣化と関連性がある細孔空隙が減らせること、さらに、各種混和材使用の場合でも十分な強度発現を確保することで、混和材に起因する凍結融解特性の低下が生じないと考えられる。

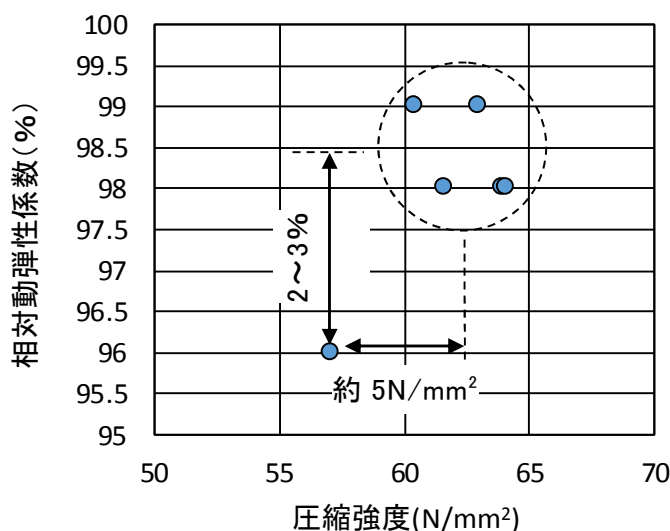


図 5.9 コンクリートの圧縮強度と相対動弾性係数の関係

5.5 乾燥収縮特性に及ぼす影響

5.5.1 乾燥収縮特性について

高炉スラグ微粉末、フライアッシュなどの混和材を使用した場合のコンクリートの収縮量について、様々な研究が行われている。

コンクリートの乾燥収縮量が過大になる場合、ひび割れ発生の危険性が高くなるとともに、P C 構造物の場合にはコンクリートの収縮によってプレストレス力が減少するおそれがある。

近年では、想定を大きく超えるコンクリートの収縮により、P C の一種である P R C 構造の橋梁上部工（図 5.10）に供用前に多数のひび割れ発生と異常な変形が発生した事例があり^{5.26), 5.27)}、乾燥収縮の影響に関心が高まっている。これらの劣化事例を契機に、土木学会ではコンクリート収縮量の最終値を $1,200\mu$ 以下と規定している^{5.28)}。

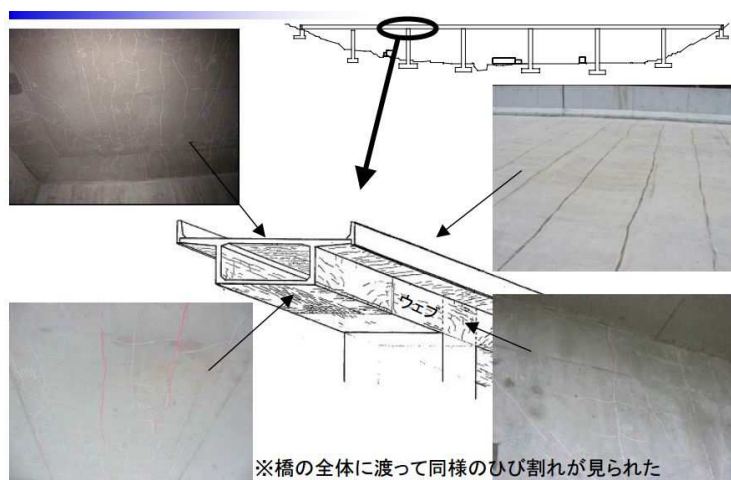


図 5.10 垂井高架橋上部工事 ひび割れの発生状況^{5.26)}

コンクリートの乾燥収縮によるひび割れの発生がP C 構造物の耐久性に大きな影響を与えるため、本研究では、モルタル供試体を用いた試験 1 およびコンクリート供試体を用いた試験 2 において長さ変化量を測定し、収縮特性を試験によって把握した。試験概要を表 5.4 に示す。

モルタル供試体を用いた試験 1 では、水結合材比を 50%、40%、30%の 3 種類に分けて、高炉スラグ微粉末 3 種類、フライアッシュ 2 種類を使用し、複数の使用材料の組合せにより計 22 種類の試験体を作成した。その中で、水結合材比 30%の種類は工場での製品製作を想定し初期材齢時に給熱促進養生を行った。また、コンクリート供試体を用いた試験 2 では、上記試験 1 の結果を踏まえて試験ケースを絞り込み、使用材料の組合せは 3 種類の試験体を作成し、初期材齢時の養生条件は 2 パターン検討した。

表 5.4 乾燥収縮特性の試験概要

	供試体	水結合材比	結合材	配合・材料の組合せ	初期材齢の養生方法
試験 1	モルタル 角柱供試体 40×40×160mm	50% 40% 30%	早強ポルトランドセメント 高炉スラグ微粉末 3 種類 フライアッシュ 2 種類	22 種類	封緘養生 または 給熱促進養生
試験 2	コンクリート 角柱供試体 100×100×400mm	34%	早強ポルトランドセメント 高炉スラグ微粉末 1 種類 フライアッシュ 1 種類	3 種類	封緘養生 および 給熱促進養生

5.5.2 モルタル供試体による乾燥収縮特性の評価

(1) モルタル供試体による長さ変化試験の概要

長さ変化試験は JIS A 1129「モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法(ダイヤルゲージ法)」に準じて行い、40mm×40mm×160mm のモルタル角柱供試体(3本/セット)を作成した。モルタルの使用材料一覧表を表 5.7 に示し、配合の一覧表を表 5.8 に示す。ここで、水結合材比とはほかのコンクリート配合と同様に $W/(C+BFS)$ と定義しており、セメントは早強ポルトランドセメントを使用し、配合名に記号 H と表示する。

モルタルの練混ぜはモルタルミキサーを使用した。水結合材比 30% の配合に限定して、供試体成形に必要なワーカビリティを確保するために少量の高性能 AE 減水剤を添加した。

表 5.7 使用材料一覧表

材料分類	種類	記号	特性値
セメント	早強ポルトランドセメント	H	密度 3.14g/cm ³ , 比表面積 4,380cm ² /g
混和材	高炉スラグ微粉末 4000	B4	密度 2.88g/cm ³ , 比表面積 4,060cm ² /g
	高炉スラグ微粉末 6000	B6	密度 2.88g/cm ³ , 比表面積 6,290cm ² /g
	高炉スラグ微粉末 8000	B8	密度 2.91g/cm ³ , 比表面積 7,920cm ² /g
	フライアッシュ(Ⅱ種)	F3	密度 2.28g/cm ³ , SiO ₂ 57.8%, ig-loss2.5%, 比表面積 3,550cm ² /g 活性度指数: 83(28日), 103(91日)
		F4	密度 2.30g/cm ³ , SiO ₂ 53.7%, ig-loss2.0%, 比表面積 4,550cm ² /g 活性度指数: 83(28日), 107(91日)
細骨材	岐阜県揖斐川産川砂	S	表乾密度 2.64g/cm ³ , 絶乾密度 2.61g/cm ³ , 吸水率 1.09%
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸コポリマー系

表 5.8 モルタルの配合一覧表

水結合材比 (%)	配合の 記号	単位量 (kg/m ³)							
		水 (W)	セ メ ン ト (C)	高炉スラグ微粉末 (BFS)			フライ アッシュ (FA)		細 骨 材 (S)
				(B4)	(B6)	(B8)	(F3)	(F4)	
50	H	253	506	-	-	-	-	-	1518
	HB6	252	252	-	252	-	-	-	1512
	HF3	235	470	-	-	-	47	-	1551
	HB4F3	233	234	234	-	-	47	-	1545
	HB6F3	233	234	-	234	-	47	-	1545
	HB6F4	233	234	-	234	-	-	47	1545
	HB8F3	233	234	-	-	234	47	-	1545
40	H	213	533	-	-	-	-	-	1599
	HB6	212	265	-	265	-	-	-	1590
	HF3	197	493	-	-	-	49	-	1626
	HB4F3	196	245	245	-	-	49	-	1617
	HB6F3	196	245	-	245	-	49	-	1617
	HB6F4	196	245	-	245	-	-	49	1617
	HB8F3	196	245	-	-	245	49	-	1617
30	H	216	720	-	-	-	-	-	1440
	HB6	214	357	-	357	-	-	-	1428
	HF3	199	663	-	-	-	66	-	1458
	HB4F3	197	328	328	-	-	66	-	1444
	HB6F3	197	328	-	328	-	66	-	1444
	HB6F4	197	328	-	328	-	-	66	1444
	HB8F3	197	328	-	-	328	66	-	1444
	HB6F3 内	213	355	-	284	-	71	-	1420

初期材齢の養生方法は封緘養生または給熱促進養生の2種類を使用した。水結合材比50%、40%の供試体は現場打ちのコンクリートを想定し封緘養生を施し、材齢1日の20℃封緘養生後に翌日脱枠した。水結合材比30%の供試体は工場での製品製作を想定し初期材齢時に給熱促進養生を施した。

給熱促進養生は温湿度が制御できる養生槽を用い、温度パターンは、前置き25℃を3時間、温度上昇と降下を各2時間、最高温度50℃保持を6時間の計13時間と設定し、養生期間中の相対湿度を常に飽和状態になるようにプログラムした。給熱促進養生の使用装置は写真2.1、養生パターンは図2.3を参照する。

いずれのケースにおいても、翌日脱枠後に材齢7日まで恒温室で20℃の水中養生を実施し、その後は温度20℃、相対湿度65%の室内に保管した。材齢7日の収縮量を 0μ として、乾燥期間182日(26週)までに、供試体の長さ変化量を1/1,000mmダイヤルゲージ付きの長さ変化測定器で測定することにより、乾燥収縮ひずみを算出した。

(2) モルタル供試体による長さ変化試験の結果と考察

乾燥収縮ひずみの測定結果を水結合材比ごとに図5.11～図5.13に示す。以下に、全体の傾向、混和材の単独使用および2種類の混和材併用の結果を考察した。

1) 全体の傾向

全体の試験結果から見ると、乾燥収縮ひずみは水結合材比50%、40%、30%の順に大きくなり、水結合材比が大きくなるほど収縮量も増加した。この結果は乾燥収縮に関する一般的な知見と一致しており、乾燥収縮が主に単位水量に左右されることを示した。また、水結合材比50%と30%の配合は比較的バラツキが大きかった。これは、水結合材比50%配合は単位水量が比較的多く、乾燥時に発生するバラツキも大きかったと考えられる。一方、水結合材比30%配合のバラツキは給熱促進養生により一部発生したと推測される。

ただし、モルタルの乾燥収縮ひずみの結果は結合材の種類に依存せず、一部のデータを除いて1,000 μ を超え、一般のコンクリートより大きい数値を計測した。これは、モルタル供試体はコンクリートと異なり収縮を緩和させる機能を持つ粗骨材が存在しないため内部拘束が小さいこと、供試体断面(40mm×40mm)が小さく乾燥が内部まで進行したことが要因であると考えられる。文献^{5.29)}によると、モルタルの乾燥収縮量はコンクリートの約3倍になる報告があり、今回の試験方法および試験結果は特に異常値ではないと考えられる。

2) 混和材の単独使用の結果

フライアッシュを単独使用した配合(HF3)は水結合材比に依存せず、早強セメント単味配合(H)より乾燥収縮量が小さくなることが確認できた。

一方、高炉スラグ微粉末を単独に混合した配合(HB6)の収縮量は早強セメント単味配合(H)と比較して5~20%程増加していることが確認された。既往の研究でも高炉スラグ微粉末の添加により自己収縮が大きくなることが報告されていることから、HB6配合の収縮量が大きくなったのは主に自己収縮によるものと推測される。

3) 2種類の混和材併用の結果

これら混和材を単独に混合する配合に対し、高炉スラグ微粉末とフライアッシュ両方を併用した配合(HB*F*)では、若干のバラツキがあるが、早強セメント単味配合(H)より収縮量が大きくなったものの、高炉スラグ微粉末を単独に混合した配合(HB6)の収縮量と比較して同等か減少していることが確認できる。

特に、水結合材比50%の配合においては、2種類の混和材を併用した4ケースの配合(HB*F*)の収縮量は、高炉スラグ微粉末を単独に混合した配合(HB6)に比べてすべて小さくなり、配合条件による高炉スラグ微粉末の単独使用より乾燥収縮量を抑制する効果があると考えられる。

ただし、2種類の混和材を併用した配合(HB*F*)の中には、高炉スラグ微粉末3種類(B4, B6, B8)、フライアッシュ2種類(F3, F4)を組み合わせて使用したが、乾燥収縮量の順位においてもバラツキがあった。各ケース間の収縮量の差が比較的小さく、混和材の粉末度と収縮量の相関関係について有意な結果が得られなかった。したがって、2種類の混和材を併用した場合は、水結合材比ごとに乾燥収縮特性を検討する必要があり、データの蓄積が重要であると考えられる。

なお、2種類の混和材を併用した配合では、水結合材比30%のケースに限定であるが、フライアッシュ内割使用の配合(HB6F3内)の試験も実施した。その結果、乾燥収縮量が大きくなったことが確認された。

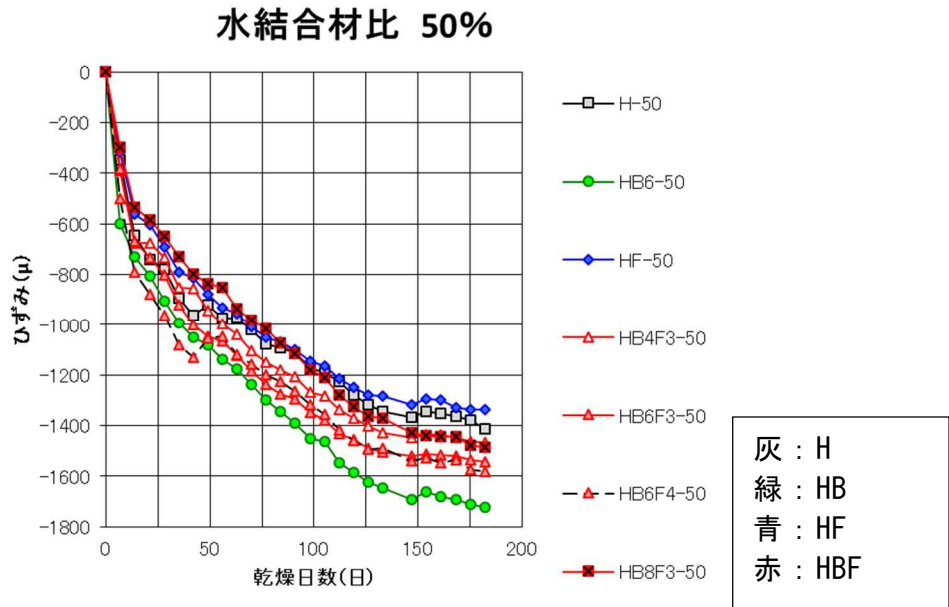


図 5.11 水結合材比 50%の長さ変化試験の結果（モルタル，-は収縮）

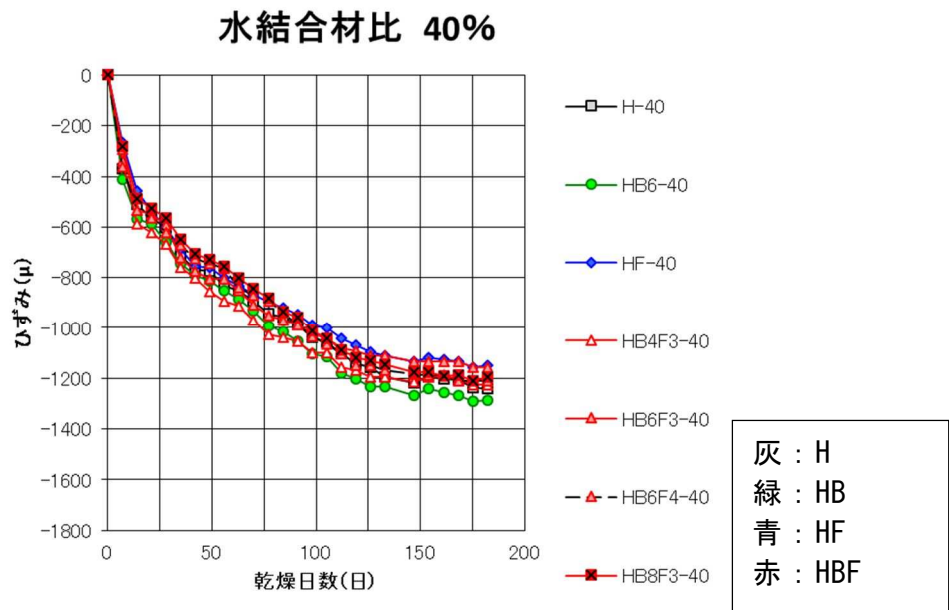


図 5.12 水結合材比 40%の長さ変化試験の結果（モルタル，-は収縮）

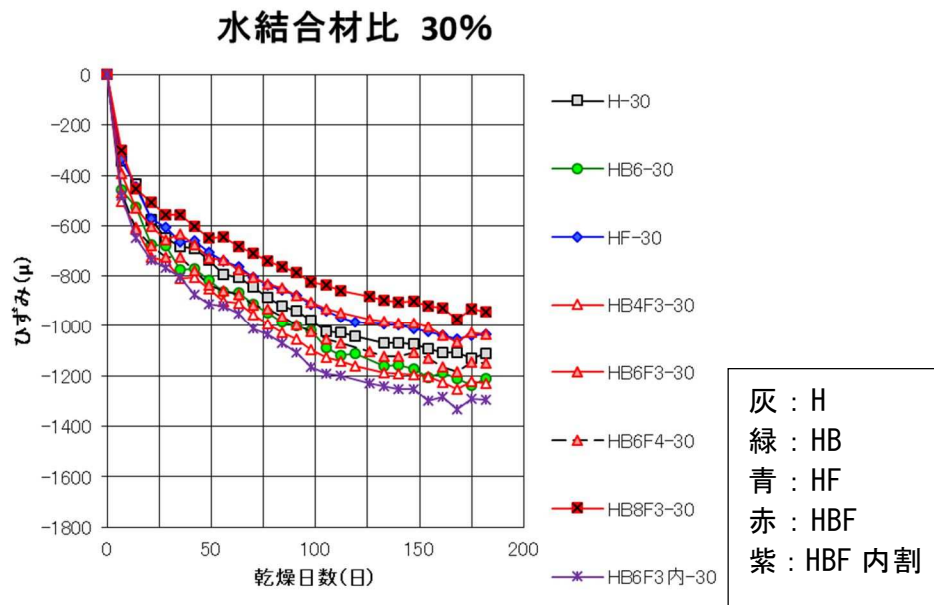


図 5.13 水結合材比 30%の長さ変化試験の結果（モルタル，-は収縮）

(3) 細孔空隙量と乾燥収縮特性との関連性

ここで、本研究の第2章で得られた細孔空隙量の試験結果とモルタル試験体の長さ変化量との関係について、長期材齢のデータを用いて検討した。

図 5.14 には、セメント硬化体における細孔径 $1\mu\text{m}$ 未満の細孔空隙量の測定値（測定材齢 1 年）とモルタル試験体の長さ変化量測定値（乾燥日数 26 週の最終値）の関係を示す。グラフには、早強セメント単味配合（H）、高炉スラグ微粉末の単独使用配合（HB）、フライアッシュの単独使用配合（HF）、2 種類の混和材併用配合（HB4F3、HB6F3、HB6F4、HB8F3）の結果を示している。また、この検討は、測定値の材齢の相違があるという前提条件の下で、長期材齢の測定値同士の比較となっている。

結果から見ると、いずれの配合ケースにおいても、細孔空隙量と長さ変化量の相関関係が確認された。つまり、ゲル空隙や毛細管空隙を中心とした細孔径 $1\mu\text{m}$ 未満の細孔空隙量が増加すると、乾燥に伴う長さ変化量が大きくなり、これは微細空隙量の増加と伴って、内部の水分が表面へ移動・逸散が生じやすくなったと考えられる。

このような傾向は、混和材使用の有無、2 種類の混和材の併用の有無と関係なく確認されている。しかし、2 種類混和材の併用の配合は早強セメント単味配合（H）に比較して、曲線の勾配が大きくなっていることが確認され、細孔空隙量が変化す

る際に長さ変化量がより敏感に動くことが予想される。また、このような傾向は高炉スラグ微粉末の単独使用配合（HB）においても確認されており、高炉スラグ微粉末の使用により現れたと考えられる。

なお、2種類混和材の併用の配合は高炉スラグ微粉末の単独使用配合（HB）と同等な細孔空隙量を有する場合、長さ変化量が減少する傾向がある。すなわち、混和材の併用は高炉スラグ微粉末の単独使用と同じ緻密性を持ちながら、収縮量を低減することができるため、収縮ひび割れ発生のリスクの低減が図れると考えられる。

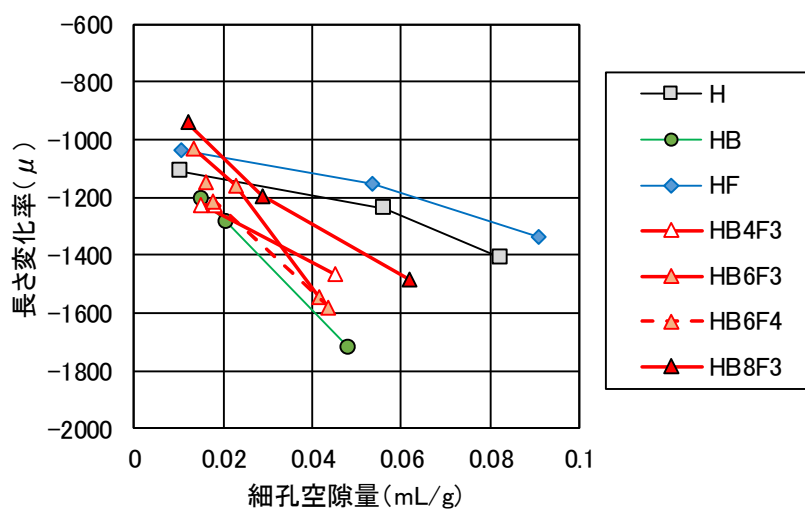


図 5.14 細孔径 $1\mu\text{m}$ 未満の細孔空隙量と長さ変化量（-は収縮）の関係

5.5.3 コンクリート供試体による乾燥収縮特性の評価

(1) コンクリート供試体による長さ変化試験の概要

試験は JIS A 1129 「モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法（ダイヤルゲージ法）」に準じて行い、100mm×100mm×400mm のコンクリート角柱供試体（3本/セット）を作成した。コンクリートに使用する材料，配合は表 5.1，表 5.2 に示す内容である。

コンクリートの練混ぜはパン型強制練りミキサを使用した。初期材齢の養生方法は封緘養生および給熱促進養生の 2 種類を使用した。封緘養生は材齢 1 日の 20℃封緘養生後に翌日脱枠した。給熱促進養生は温湿度が制御できる養生槽を用い，温度パターンは，前置き 25℃を 3 時間，温度上昇と降下を各 2 時間，最高温度 50℃保持を 6 時間の計 13 時間と設定し，養生期間中の相対湿度を常に飽和状態になるようにプログラムした。給熱促進養生の使用装置は写真 2.1，養生パターンは図 2.3 を参照する。

いずれのケースにおいても，翌日脱枠後に材齢 7 日まで恒温室で 20℃の水中養生を実施し，その後は温度 20℃，相対湿度 65%の室内に保管した。材齢 7 日の収縮量を 0 μ として乾燥期間 182 日（26 週）まで，供試体の長さ変化量を 1/1000mm ダイヤルゲージ付きの長さ変化測定器で測定することにより，乾燥収縮ひずみを算出した。測定状況を写真 5.4 に示す。



写真 5.4 長さ変化測定の様相

(2) コンクリート供試体による長さ変化試験の結果

給熱促進養生 (H-heat, HB-heat, HBF-heat) および封緘養生 (H, HB, HBF) のコンクリート長さ変化量の試験結果を図 5.15、表 5.9 に示す。また、この試験のデータは乾燥収縮以外に自己収縮の成分も入っている。

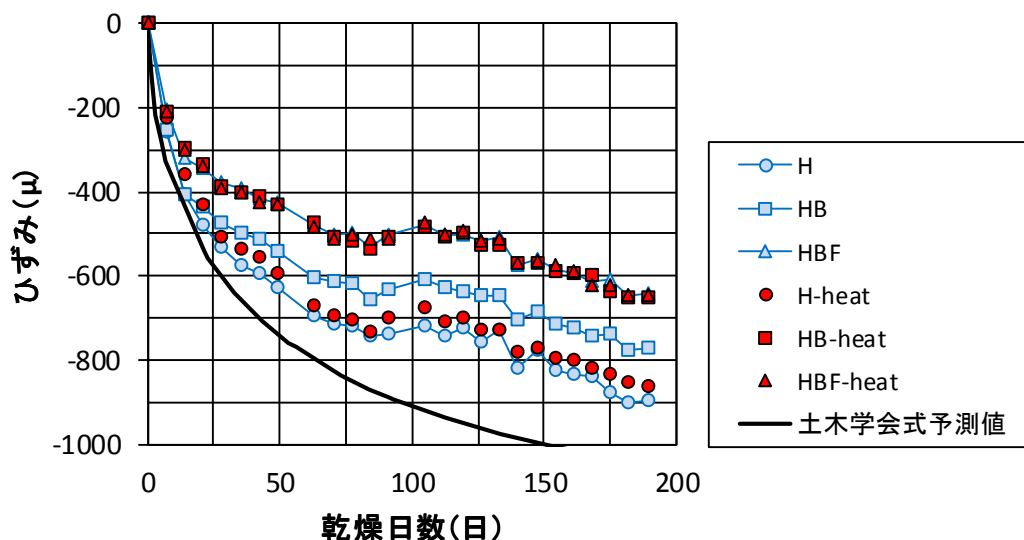


図 5.15 長さ変化試験の結果 (コンクリート, -は収縮)

表 5.9 各配合の長さ変化量の試験最終値 (コンクリート, -は収縮)

配合の 記号	初期材齢の 養生方法	混和材種類		長さ変化量 試験最終値 (μ)
		高炉スラグ微粉末	フライアッシュ	
H	封緘養生	-	-	-898
HB		有	-	-771
HBF		有	有	-642
H-heat	給熱促進 養生	-	-	-864
HB-heat		有	-	-654
HBF-heat		有	有	-647

(3) コンクリート供試体による長さ変化試験結果に対する考察

図 5.15 には比較する目安として、コンクリート収縮ひずみの土木学会式^{5.28)}による予測結果を示している。予測結果は式 (5.7) により、収縮量最終値が最大値 $1,200 \mu$ になる場合の経時的変化量を計算した。各ケースの試験結果では、収縮量最終値はいずれも土木学会が示した最大値 $1,200 \mu$ を下回っている。

$$\varepsilon'_{cs}(t, t_0) = [1 - \exp\{-0.108(t - t_0)^{0.56}\}] \cdot \varepsilon'_{sh} \quad (5.7)$$

$$\varepsilon'_{sh} = -50 + 78[1 - \exp(RH/100)] + 38 \log_e W - 5 \left[\log_e \left(\frac{V/S}{10} \right) \right]^2 \quad (5.8)$$

ここに、

$\varepsilon'_{cs}(t, t_0)$: コンクリートの材齢 t_0 から t までの収縮ひずみ ($\times 10^{-5}$)

ε'_{sh} : 収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-5}$)、環境の湿度や部材寸法の影響を加味して求める場合には式 (5.8) により計算するが、ここでは最終値の最大値 $1,200 \mu$ とした

RH : 相対湿度 (%) ($45\% \leq RH \leq 80\%$)

W : 単位水量 (kg/m^3) ($130 \text{ kg}/\text{m}^3 \leq W \leq 230 \text{ kg}/\text{m}^3$)

V/S : 体積表面積比 (mm) ($25\text{mm} \leq V/S \leq 300\text{mm}$)

t_0 および t : 乾燥開始時および乾燥中のコンクリートの有効材齢 (日)

封緘養生と給熱促進養生のケースをそれぞれ見ると、まず、初期材齢時に封緘養生を行った場合では、早強セメント単味配合(H)、高炉スラグ微粉末の単独使用(HB)、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用する配合(HBF)の順に、収縮量がそれぞれ 130μ 程度小さくなることが確認された。次に、給熱促進養生のケースでは、混和材を使用した配合(HB, HBF)は、早強セメント単味配合(H)に比べ収縮量が 200μ 以上減少しており、HBとHBFの間では大差がなかった。以上の試験結果により、混和材の使用、特に2種類の混和材を併用した配合は、初期の養生方法と関係なく収縮量が小さかったことが確認された。

さらに、養生方法の影響を比較するため、2種類の養生パターンの配合ごとの関係を図5.16に示した。

初期材齢時に給熱促進養生のケース（H-heat, HB-heat, HBF-heat）は封緘養生のケース（H, HB, HBF）に比べて給熱促進養生により収縮量が同等か小さくなる傾向があった。これは、給熱養生を実施したコンクリートは組織構造を緻密化させ乾燥が少なく、さらに第7章7.3.2節に示したように圧縮強度が大きく変形しにくくなったため、乾燥による収縮量が減少したと考えられる。

以上の内容をまとめると、2種類の混和材を併用した配合（HBF）は、早強セメント単味の配合（H）より収縮量が大幅に低減することができ、また、高炉スラグ微粉末の単独使用の配合（HB）より、収縮量が同等もしくは小さいことが確認された。これにより、PC構造物を供用している間に、過大な乾燥収縮に起因するひび割れを抑制するとともに、収縮に伴うプレストレス力の減少も過大にならず規定値以内に収まると考えられる。

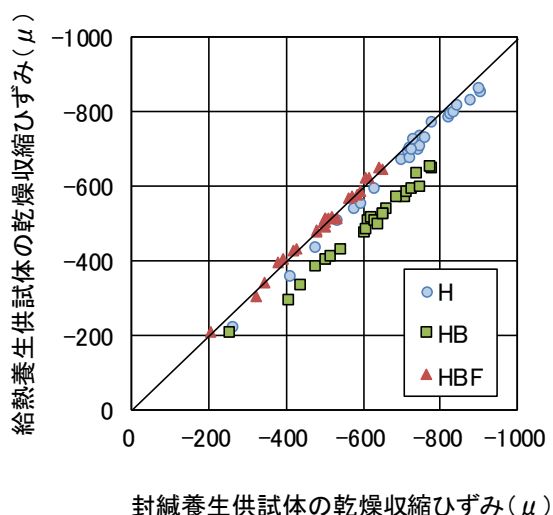


図 5.16 養生方法が乾燥収縮特性に対する影響

5.6 第5章のまとめ

本章では、中性化特性、凍結融解特性および収縮特性など長期耐久性に関わる試験を行い、各種試験で得られた知見を以下に示す。

(1)中性化特性

- 1) 全ケースの中性化深さは2.0mm未満の小さな値を示した。その中で、2種類の混和材併用(HBF)の中性化深さは、早強セメント単味配合(H)より大きい、高炉スラグ微粉末単独使用(HB)より小さくなった。
- 2) 2種類の混和材併用(HBF)の中性化特性に影響する要因に関しては、水酸化カルシウム(CH)の含有量、実質の水結合材比、細孔空隙量などが挙げられる。
- 3) 2種類の混和材併用の配合を含め、混和材を使用した各配合(HB, HB-heat, HBF, HBF-heat)の中性化速度係数の試験値は、いずれもコンクリート標準示方書推定値よりやや大きい数値となった。
- 4) 耐用期間100年後の中性化深さの予測値については、2種類の混和材を併用するコンクリートは最大でも5mm未満であり、十分な中性化抵抗性を有すると考えられる。
- 5) 2種類の混和材併用(HBF)のコンクリートは、中性化との関連性が高いとされる比較的粗大な細孔量について、細孔径 $0.05\mu\text{m}$ 以上の空隙量が少なく細孔構造が緻密化であるため、水酸化カルシウム(CH)の減少という中性化抵抗性にとってマイナスの要因を打ち消し、結果として早強セメント単味配合(H)と同程度の中性化抵抗性を有するため、耐久性が確保できるものと考えられる。

(2)凍結融解特性

- 1) 2種類の混和材併用(HBF)の相対動弾性係数は、早強セメント単味配合(H)および高炉スラグ微粉末単独使用(HB)と比較しても明確な差異が見られず、300サイクル経過後でも95%以上であり、早強セメント単味配合(H)と同等で良好な凍害抵抗性を示している。
- 2) 本研究の2種類の混和材併用(HBF)を含めたコンクリートは、微細組織構造の緻密化により凍結融解劣化と関連性がある細孔径 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ の細孔空隙が極めて少ない。
- 3) 凍結融解抵抗性はコンクリートの圧縮強度と関連性があり、空気量が一定という条件下では、圧縮強度が約 $5\text{N}/\text{mm}^2$ 低くなる場合、相対動弾性係数は2~3%の低下が見受けられ、凍結融解抵抗性が低下しやすい。

- 4) 2 種類の混和材併用 (HBF) のコンクリートは、フライアッシュの使用量を適切に設定し空気量の低下を防ぐこと、高炉スラグ微粉末使用の場合も十分な強度発現を確保することで、混和材に起因する凍結融解特性の低下が生じないと考えられる。

(3)乾燥収縮特性

- 1) モルタル供試体の試験結果によると、2 種類の混和材を併用した配合 (HBF) の収縮量は、早強セメント単味配合 (H) と高炉スラグ微粉末のみを混合した配合 (HB) の中間となることが確認された。
- 2) 細孔空隙量と長さ変化量の相関関係が確認された。これは、ゲル空隙や毛細管空隙を中心とした細孔径 $1\mu\text{m}$ 未満の細孔空隙量が増加すると、内部の水分が表面へ移動・逸散が生じやすくなることが原因であると考えられる。
- 3) コンクリート供試体の試験結果によると、2 種類の混和材を併用した配合 (HBF) の収縮量は初期材齢の養生方法と関係なく、早強セメント単味配合 (H) より大幅に低減し、高炉スラグ微粉末の単独使用の配合 (HB) より同等もしくは小さくなることが確認された。
- 4) 2 種混和材併用 (HBF) の乾燥収縮量が過大になっていないことが確認され、PC 構造物を供用している間の乾燥収縮ひび割れ発生リスクが抑制されるとともに、過大な収縮に伴うプレストレス力の減少も防止できると考えられる。

以上の試験結果により、2 種類の混和材併用のコンクリートの中酸化特性、凍結融解特性および乾燥収縮特性などの特性値を把握することができ、これらの項目の長期耐久性は早強セメント単味配合と同等であり低下していないことが確認された。

【第5章の参考文献】

- (1) 5.2 節に関連する参考文献
- 5.1) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御に関する研究委員会報告書，pp. 73-86，2006.
 - 5.2) 土木研究所，プレストレスト・コンクリート建設業協会：「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書（Ⅱ）－混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の設計・施工マニュアル（案）－」，pp. 55-62，2016.
 - 5.3) 吉川信二郎：「講座耐震設計・温度解析第4回 温度応力解析あれこれ!?－解析事例－」，プレストレストコンクリート，Vol. 44，No. 5，pp. 111-125，2002.
 - 5.4) 吉川信二郎：「講座 PC技術者のための構造解析入門 第9回 温度応力解析（その1）基礎知識・モデルの作成・評価と対策」，プレストレストコンクリート，Vol. 58，No. 3，pp. 76-82，2016.
 - 5.5) 土木研究所，プレストレスト・コンクリート建設業協会：「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書（Ⅱ）－混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の設計・施工マニュアル（案）－」，pp. 46-47，2016.
- (2) 5.3 節に関連する参考文献
- 5.6) 例えば，大賀宏行，長滝重義：促進試験によるコンクリートの中性化深さの予測と評価，土木学会論文集，No. 390/V-8，pp. 225-233，1988.
 - 5.7) 日本材料学会：高炉スラグ微粉末を使用した高耐久性プレストレストコンクリート構造物の開発，pp. 29-30，1998.
 - 5.8) 例えば，松田芳範，上田洋，石田哲也，岸利治：実構造物調査に基づく炭酸化に与えるセメントおよび水分の影響，コンクリート工学論文集，Vol. 32，No. 1，pp. 629-634，2010.
 - 5.9) 國富康志，石井豪，辛軍青，鳥居和之：高炉スラグ微粉末 6000 を混和した PC 梁部材の ASR 劣化に対する耐荷力特性，第 24 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp. 323-326，プレストレストコンクリート工学会，2015.
 - 5.10) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編：標準]，pp. 145-148，2012.
 - 5.11) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（案）・同解説，2004.
 - 5.12) 気象庁ホームページ：二酸化炭素濃度の経年変化（平成 28 年 5 月 31 日更新），http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html
 - 5.13) 土木学会：コンクリートライブラリー第 64 号，フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期研究（最終報告），pp. 37，

1988.

- 5.14) 黄光律, 野口貴文, 羽原俊祐, 友澤史紀: フライアッシュを外割混合したモルタルの中性化特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.109-114, 1999.
- 5.15) 郭度連, 宇治公隆, 國府勝郎, 上野敦: 養生条件によるコンクリートの組織変化と中性化を支配する細孔径の評価, 土木学会論文集, No.718/V-57, pp.59-68, 2002.
- 5.16) 吉田行, 名和豊春, 田口史雄, 渡辺宏: 高炉スラグ微粉末を用いたビーライトセメントコンクリートの中性化に及ぼす細孔組織の影響, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.1, pp.1-15, 2008.

(3) 5.4 節に関連する参考文献

- 5.17) 遠藤雅司: 高耐久 P C 桁の概要について -凍害, 塩害等の複合劣化に対応した P C 桁-, プレストレストコンクリート, Vol.57, No2, pp.33-36, 2015.
- 5.18) 日本コンクリート工学会: 複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会報告書, pp.34, 2001.
- 5.19) 添田政司, 大和竹史, 左東有次, 江本幸雄: 高炉スラグ微粉末を用いた早強性を有する高流動コンクリートの耐凍害性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.153-158, 1996.
- 5.20) 楠貞則, 池翰相, 添田政司, 大和竹史: 凍結融解作用による各種混和材を用いたコンクリートのスケーリング特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.1, pp.237-242, 2007.
- 5.21) 檀康弘, 伊代田岳史, 兼安真司, 植木康知: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの凍害および凍結防止剤に対する劣化抵抗性, 土木学会論文集 E Vol.65 No.3, pp.291-299, 2009.
- 5.22) セメント協会: コンクリート専門委員会報告 F-55 各種セメントを用いたコンクリートの耐久性に関する研究, pp.14-16, 2008.
- 5.23) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編: 標準], pp.157-160, 2012.
- 5.24) 内川浩: セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響, コンクリート工学, Vol.33, No.9, pp.5-17, 1995.
- 5.25) 岡本修一, 魚本健人: 細孔構造からみた凍結融解による劣化機構に関する基礎研究, コンクリート工学論文集, Vol.19, No.1, pp.901-906, 1997.

(4) 5.5 節に関連する参考文献

- 5.26) 近畿地方整備局 和歌山河川国道事務所ホームページ: 橋本道路垂井高架橋(仮称)における損傷の発生について, 2005.

<https://www.kkr.mlit.go.jp/wakayama/press/H170427/H170427.pdf>

- 5.27) 土木学会：垂井高架橋の損傷に関する調査特別委員会 最終報告書，2008.
<http://www.jsce.or.jp/committee/concrete/download.html>
- 5.28) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編 [設計編：標準]，pp. 45-49，2007.
- 5.29) 辻幸和，安藤哲也：よくわかるコンクリート技術，コンクリート新聞社，pp. 65，1998.

第6章 コンクリートのフレッシュ性状と力学特性に及ぼす混和材併用の影響

6.1 フレッシュ性状に及ぼす混和材併用の影響

6.1.1 はじめに

コンクリートの施工性に及ぼす2種類混和材の併用の影響を評価するため、モルタルやコンクリートのフレッシュ性状の確認試験を行った。この章では、その試験結果に基づいて評価結果を述べた。

フレッシュ性状確認で実施した試験項目は以下に示す。

- ・スランプ試験： JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」
- ・空気量試験： JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法（空気室圧力方法）」
- ・ブリーディング量試験： JIS A 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」
- ・凝結時間試験： JIS A 1147「コンクリートの凝結時間試験 方法」

6.1.2 試験概要

コンクリートの使用材料を表 6.1 に示す。

表 6.1 コンクリートの使用材料

材料名	種類	記号	特性値
セメント	早強ポルトランドセメント	H	密度 3.14g/cm ³ , 比表面積 4,380cm ² /g
混和材	高炉スラグ微粉末 6000	B	密度 2.88g/cm ³ , 比表面積 6,290cm ² /g
	フライアッシュ(Ⅱ種)	F	密度 2.28g/cm ³ , 比表面積 3,550cm ² /g ig-loss2.5%, SiO ₂ 57.8% 活性度指数: 83(28日), 103(91日)
細骨材	岐阜県揖斐川産川砂	S	表乾密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 1.38%
粗骨材	岐阜県揖斐川産川砂利	G	表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 1.19%
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸コポリマー系
	AE 剤	AE	樹脂酸塩系陰イオン界面活性剤

コンクリートの配合を表 6.2 に示す。ここで、セメントは早強ポルトランドセメントを使用し、配合名に記号 H と表示する。また、水結合材比とは W/ (C+BFS) と定義しており、材齢 1 日の強度発現性がプレストレス導入に必要な強度 35.0N/mm² を満足するように、過去の実績を参考に 34.0%を使用した。これは、既往の研究^{6.1)}においては、高炉スラグ微粉末を単独使用し、蒸気養生を施したコンクリートの実績配合である。

表 6.2 コンクリートの配合一覧表

番号	配合の記号	水結合材比 (%)	の粗骨材最大寸法 Gmax (mm)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							
					水	セメント	高炉スラグ微粉末	アッシュ	細骨材	粗骨材	高性能 AE 減水剤	AE 剤
					(W)	(C)	(BFS)	(FA)	(S)	(G)	(SP)	(AE)
1	H	34	20	42	152	447	0	0	728	1011	2.682	0.018
2	HB				152	224	224	0	720	1000	2.688	0.018
3	HBF				152	224	224	45	698	970	3.205	0.027

6.1.3 スランプと空気量

コンクリートの練混ぜは 50L コンクリートミキサを使用して行い、練混ぜ状況およびフレッシュ性状の試験状況を写真 6.1 に示す。

試験中のコンクリート温度は 25.3~26.0℃、環境温度は 19.3~19.8℃でほぼ一定であった。また、各配合は写真 6.2 に示すように、スランプ試験後のコンクリートは輪郭が良好であり、材料分離や崩れ、表面の割れなどが確認されなかった。

スランプおよび空気量の試験結果を表 6.3、各種化学混和剤とフレッシュ性状の関係を図 6.1 に示す。混和材使用の有無と関係なく、いずれのケースにおいてもスランプと空気量が目標値を満足している。

その中で、2 種類の混和材を併用する配合 (HBF) は粘性が若干高くなり、これは主にフライアッシュの外割混合により実質の水結合材比が低くなったことと関連すると考えられるが、高性能減水剤および AE 剤の使用量の微調整で対応した。コンクリートの実施工時の注意点として、フライアッシュ中の未燃炭素が AE 剤を吸収しやすいことも考慮しながら、早強セメント単味配合 (H) および高炉スラグ微粉末の単独使用 (HB) に比べて化学混和剤の使用量を若干調整する必要があると考えられる。



写真 6.1 コンクリート練混ぜおよびフレッシュ性状の試験状況



早強セメント単味 (H)



高炉スラグ微粉末単独使用 (HB)



高炉スラグ微粉末とフライアッシュの併用 (HBF)

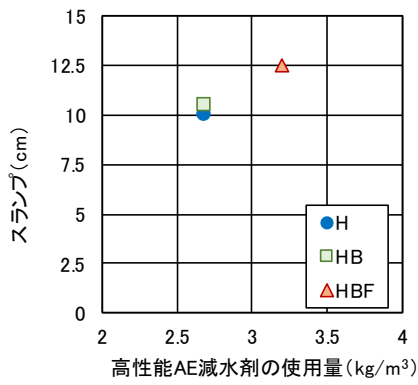
写真 6.2 スランプの試験状況

表 6.3 スランプおよび空気量の試験結果

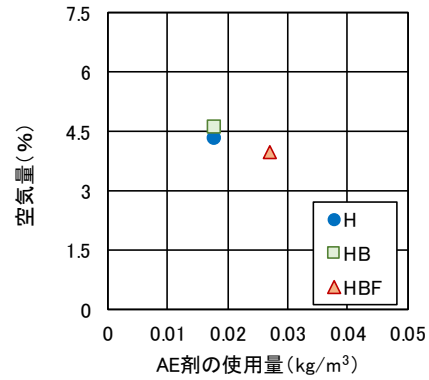
配合 の記号	スランプ	空気量	高性能 AE 減水剤 の使用量 ^{注1)} (kg/m ³)	AE 剤の 使用量 ^{注2)} (kg/m ³)
	目標値 10.0±2.5cm	目標値 4.5±1.5%		
H	10.0cm	4.3%	2.682 (0.6C)	0.018 (4A)
HB	10.5cm	4.6%	2.688 (0.6C)	0.018 (4A)
HBF	12.5cm	4.0%	3.205 (0.7C)	0.027 (6A)

注 1) 高性能 AE 減水剤の使用量：1C＝単位結合材量×1%

注 2) AE 剤の使用量：1A＝単位結合材量×0.001%



(a) 高性能 AE 減水剤とスランプの関係



(b) AE 剤と空気量の関係

図 6.1 各種化学混和剤とフレッシュ性状の関係

6.1.4 ブリーディング

ブリーディング量の試験は JIS A 1123 コンクリートのブリーディング試験方法に準拠して行い、練り上がり 4.0 時間後まで 10 分ごとに観察と浸み出した水の質量測定を行った。2 種類の混和材を併用する配合 (HBF) の試験状況を写真 6.3 に示す。本試験は室温 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ の環境で実施した。

各配合は試料 2 体を作成し、測定結果の平均値を使用した。試験の結果、混和材使用の有無と関係なくいずれのケースにおいてもブリーディングが発生せず、ブリーディング量は $0.00 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ であった。



写真 6.3 ブリーディング量の試験状況

6.1.5 凝結時間

凝結時間（注水からの経過時間）の測定は JIS A 1147 コンクリートの凝結時間試験方法に準拠し，貫入抵抗試験装置を用いて実施した。試験状況を写真 6.4 に示す。本試験はブリーディング量の試験と同様に，室温 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ の環境で実施した。各配合は試料 3 体を作成し，測定結果の平均値を使用した。



写真 6.4 貫入抵抗値の試験状況

コンクリートの貫入抵抗値の経時変化を図 6.2 に示し，計測した貫入抵抗値の近似曲線から正確な凝結時間を計算し，その結果を表 6.4，図 6.3 に示す。

早強セメント単味配合（H）の凝結時間は，始発約 3 時間，終結約 4.5 時間であった。一方，混和材使用の配合（HB，HBF）の凝結時間は早強セメント単味配合（H）に比べおおむね一致している。2 種類混和材併用の配合（HBF）は早強セメント単味（H）に比べ，始発時間は 9 分ほど遅れて，終結時間は 7 分ほど早くなった。始発時間の遅れは化学混和剤の使用量が多くなったことと関連すると考えられる。

このように，硬化し始めるから終結までの期間が若干短いこと，ならびに始発時間が遅れることに対し，本研究で実施した混和材使用の配合（HB，HBF）を用いたコンクリートの実施工時に，コンクリートの表面仕上げなどの作業を適切に設定することで対応できる。また，終結時間は早強セメント単味配合（H）と大差がないことは，例えばプレキャストコンクリート製品の製造時に蒸気養生の開始時間を，通常の混和材を使用しない配合と同様に設定することができ，工程を遅らせることが生じないと考えられる。したがって，2 種類混和材併用の場合は凝結時間による施工への影響が少ないことが確認された。

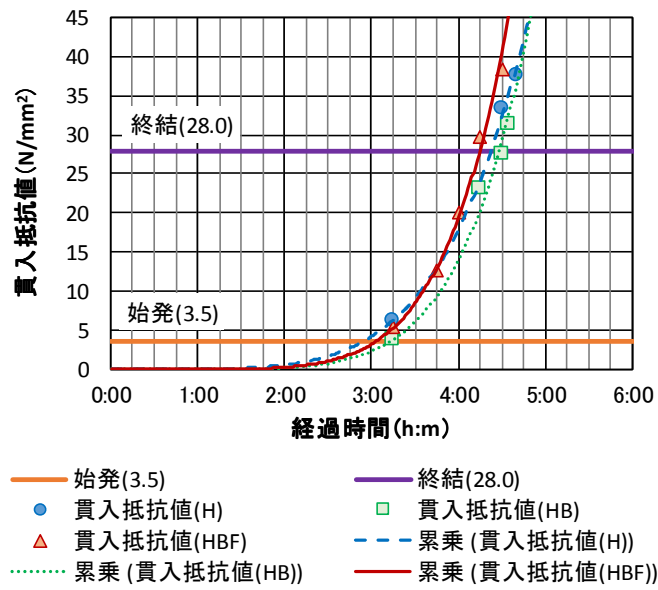


図 6.2 コンクリート貫入抵抗値の経時変化

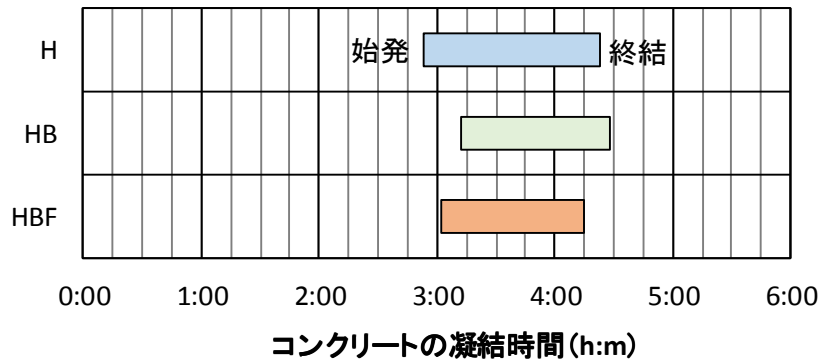


図 6.3 コンクリートの凝結時間の試験結果 (時 : 分)

表 6.4 コンクリートの凝結時間のまとめ

配合の 記号	始発時間 (1)	終結時間 (2)	終結－始発 (2)－(1)
H	2 時間 53 分	4 時間 22 分	1 時間 29 分
HB	3 時間 12 分	4 時間 28 分	1 時間 16 分
HBF	3 時間 02 分	4 時間 15 分	1 時間 13 分

6.2 硬化コンクリートの力学特性に及ぼす混和材併用の影響

6.2.1 はじめに

硬化コンクリートの力学特性の試験は図 6.4 に示すとおり、2 段階で実施した。まずはモルタル供試体を用いて、水結合材比、混和材の種類、比表面積、混合方法などが強度発現に対する影響を計 22 ケースで検討し、強度発現上に有効とされる配合ケースを絞り込み、圧縮強度と空隙率の相関性を検討した。その次に、コンクリート供試体を 6 ケース作成し、養生方法を変化させて圧縮強度、引張強度および静弾性係数特性を把握した。

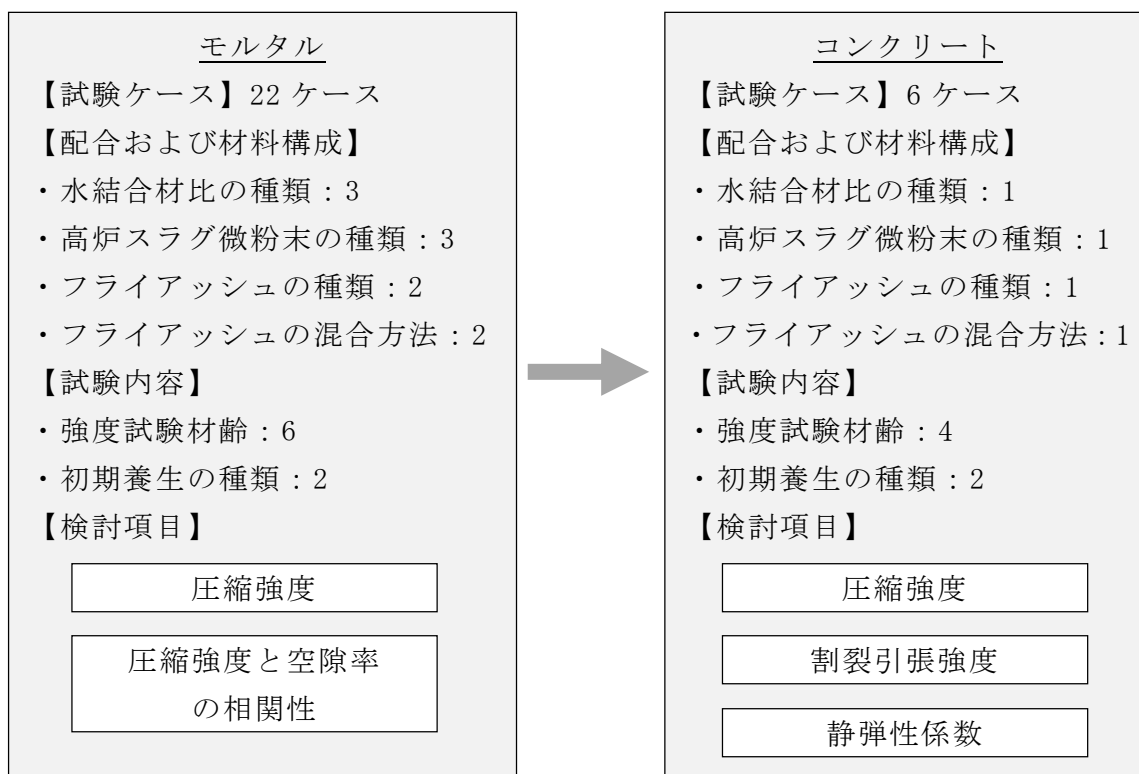


図 6.4 力学特性の検討手順と内容

6.2.2 モルタルの圧縮強度試験

(1) 試験概要

モルタル供試体の使用材料の詳細を表6.6に示す。高炉スラグ微粉末は比表面積が異なる3種類（B4=4000ブレン、B6=6000ブレン、B8=8000ブレン）、フライアッシュは産地と比表面積が異なる2種類（F3、F4）を使用した。

供試体はコンクリートから粗骨材を取り除いたモルタル供試体を使用し、計22種類を作成した。配合の詳細を表6.7に示す。ここで、水結合材比とはほかのコンクリート配合と同様に $W/(C+B)$ と定義している。セメントは早強ポルトランドセメントを使用し、配合名に記号Hと表示する。また、結合材と骨材の比率において、水結合材比50%と40%の配合は結合材B：骨材S=1:3とし、水結合材比30%の配合は結合材B：骨材S=1:2とした条件で単位量を計算した。

供試体製作の際に、モルタルミキサーで練混ぜを行い、直径50mm×高さ100mmの円柱供試体（3本/セット）を作成した。水結合材比30%の配合に限定して、供試体成形に必要なワーカビリティを確保するために少量の高性能AE減水剤を添加した。

水結合材比50%と40%の配合の供試体は、現場打ちのRC構造物やポストテンション方式PC構造物を想定し、1日の20℃封緘養生後に翌日脱枠した。

また、水結合材比30%の配合は工場製品のプレテンション方式PC部材を想定し、早期強度を得るために養生槽で最高温度50℃の給熱促進養生を行った。養生温度パターンは、前置き25℃を3時間、温度上昇と降下を各2時間、最高温度50℃保持を6時間の計13時間と設定し、養生期間中の相対湿度を常に飽和状態になるようにプログラムした。給熱促進養生の使用装置は写真2.1、養生パターンは図2.3を参照する。いずれのケースにおいても、翌日脱枠後に所定の材齢まで恒温室で20℃の水中養生を実施した。

圧縮強度試験は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。測定結果は供試体全本数の平均値を使用した。個別の供試体のデータは平均値の85%から115%までの範囲から外れたものを切り捨てて平均値を算出した。試験材齢は1日、3日、7日、28日、91日（13週）、168日（24週）とした。

表 6.6 モルタル供試体の使用材料

材料分類	種類	記号	特性値
セメント	早強ポルトランドセメント	H	密度 3.14g/cm ³ , 比表面積 4,380cm ² /g
混和材	高炉スラグ微粉末 4000	B4	密度 2.88g/cm ³ , 比表面積 4,060cm ² /g
	高炉スラグ微粉末 6000	B6	密度 2.88g/cm ³ , 比表面積 6,290cm ² /g
	高炉スラグ微粉末 8000	B8	密度 2.91g/cm ³ , 比表面積 7,920cm ² /g
	フライアッシュ(Ⅱ種)	F3	密度 2.28g/cm ³ , SiO ₂ 57.8%, ig-loss2.5%, 比表面積 3,550cm ² /g 活性度指数: 83(28日), 103(91日)
		F4	密度 2.30g/cm ³ , SiO ₂ 53.7%, ig-loss2.0%, 比表面積 4,550cm ² /g 活性度指数: 83(28日), 107(91日)
細骨材	岐阜県揖斐川産川砂	S	表乾密度 2.64g/cm ³ , 絶乾密度 2.61g/cm ³ , 吸水率 1.09%
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸コポリマー系

表 6.7 モルタルの配合一覧表

水結合材比 (%)	配合の 記号	単位量 (kg/m ³)							
		水 (W)	セ メ ン ト (C)	高炉スラグ微粉末 (BFS)			フライ アッシュ (FA)		細 骨 材 (S)
				(B4)	(B6)	(B8)	(F3)	(F4)	
50	H	253	506	-	-	-	-	-	1518
	HB6	252	252	-	252	-	-	-	1512
	HF3	235	470	-	-	-	47	-	1551
	HB4F3	233	234	234	-	-	47	-	1545
	HB6F3	233	234	-	234	-	47	-	1545
	HB6F4	233	234	-	234	-	-	47	1545
	HB8F3	233	234	-	-	234	47	-	1545
40	H	213	533	-	-	-	-	-	1599
	HB6	212	265	-	265	-	-	-	1590
	HF3	197	493	-	-	-	49	-	1626
	HB4F3	196	245	245	-	-	49	-	1617
	HB6F3	196	245	-	245	-	49	-	1617
	HB6F4	196	245	-	245	-	-	49	1617
	HB8F3	196	245	-	-	245	49	-	1617
30	H	216	720	-	-	-	-	-	1440
	HB6	214	357	-	357	-	-	-	1428
	HF3	199	663	-	-	-	66	-	1458
	HB4F3	197	328	328	-	-	66	-	1444
	HB6F3	197	328	-	328	-	66	-	1444
	HB6F4	197	328	-	328	-	-	66	1444
	HB8F3	197	328	-	-	328	66	-	1444
	HB6F3 内	213	355	-	284	-	71	-	1420

(2) モルタルの圧縮強度

水結合材比ごとの圧縮強度の試験結果を図 6.5～図 6.8 に示す。ここで、工場製品を想定した水結合材比 30%の各配合では、材齢 1 日（実質約 18 時間まで）の強度はいずれもプレストレス導入目標強度 35.0N/mm²を満足している。

1) 混和材種別の影響

図 6.5 に、早強セメント単味配合 (H)、高炉スラグ微粉末の単独使用 (HB6)、フライアッシュの単独使用 (HF3) および 2 種類混和材の併用配合 (HB6F3) の試験結果を示す。

水結合材比が同じケースの材齢 1 日、3 日の初期強度を比較すると、高炉スラグ微粉末単独使用またはフライアッシュと併用した配合 (HB6, HB6F3) は、圧縮強度が早強セメント単味配合 (H) とフライアッシュ単独使用配合 (HF3) より 2～5 割低下した。しかし、材齢 7 日以降に、2 種類混和材併用の配合 (HB6F3) は強度増加が加速する傾向が見られ、特に初期材齢時に封緘養生を行った水結合材比 50%、40%の配合においてはその傾向は顕著であった。

一般に、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートにおいては、初期・長期強度不足に対して単位結合材量を増やして水結合材比を小さく設定する対策がある。上記の試験結果から、フライアッシュの外割添加は見かけの水結合材比を変更せずに、材齢 7 日以降のコンクリート中長期強度を向上することが示された。

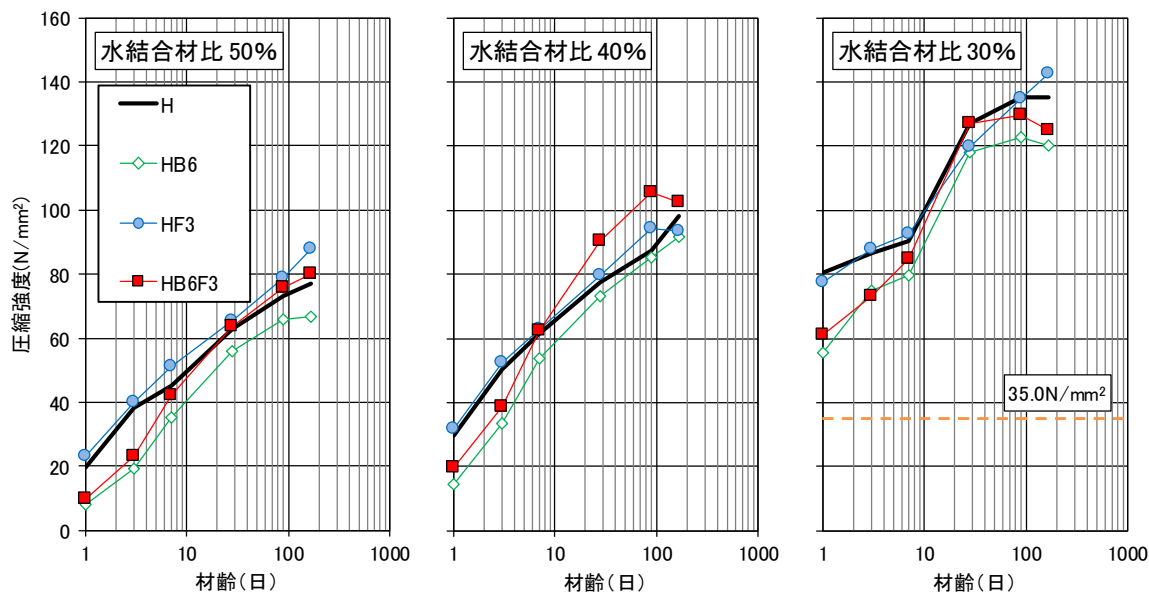


図 6.5 各種の混和材を使用した場合の圧縮強度

2) 高炉スラグ微粉末の粉末度の影響

図 6.6 に、3 種類の高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用した配合 (HB4F3, HB6F3, HB8F3) の圧縮強度試験結果を示す。比較として、高炉スラグ微粉末 6000 を単独使用の配合 (HB6) も表示している。

初期材齢において、高炉スラグ微粉末 6000 や 8000 を使用した配合 (HB6F3, HB8F3) は、高炉スラグ微粉末 4000 (HB4F3) を使用した配合より初期強度が増加しており、とくに給熱促進養生を実施した水結合材比 30% の場合ではこの傾向は顕著であった。ただし、高炉スラグ微粉末 6000 と 8000 を使用した配合の結果を比較すると、初期強度の大きな差異が確認されなかった。

一方、長期材齢において各種の高炉スラグ微粉末を使用した配合は圧縮強度が同程度であり、高炉スラグ微粉末の粉末度は長期強度発現に及ぼす影響が小さいと考えられる。

また、水結合材比 50% の配合に限り、高炉スラグ微粉末 4000 とフライアッシュを併用する配合 (HB4F3) は、高炉スラグ微粉末 6000 を単独に使用した配合 (HB6) と同じ強度発現履歴を示した。

したがって、コンクリートの初期強度の向上を図りたい場合、高炉スラグ微粉末 4000 とフライアッシュの併用、活性度が高い高炉スラグ微粉末 6000 と 8000 の使用は有効な方法である。その中で、高炉スラグ微粉末 8000 の国内生産量、流通や価格などの要因を考慮すると、高炉スラグ微粉末 6000 を使用することが望ましいと考えられる。

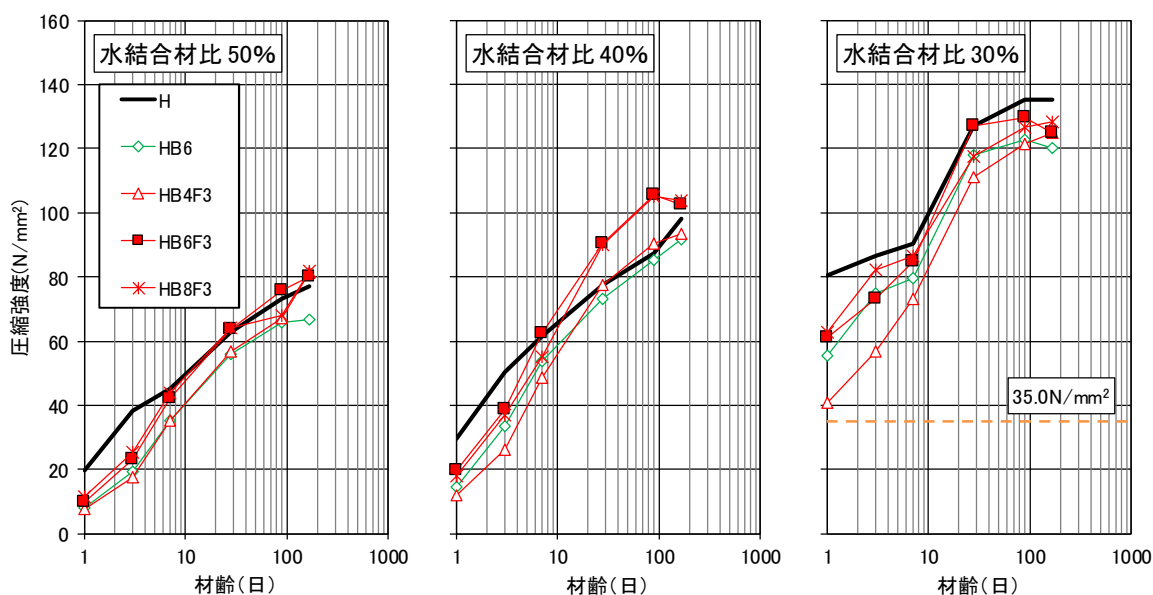


図 6.6 各種の高炉スラグ微粉末を使用した場合の圧縮強度

3) フライアッシュの種類・粉末度の影響

本研究では、表 6.1 に示す粉末度が異なる 2 種類のフライアッシュを使用した。フライアッシュ比表面積 $3,550\text{cm}^2/\text{g}$ の配合 (HB6F3) と比表面積 $4,550\text{cm}^2/\text{g}$ の配合 (HB6F4) の圧縮強度を比較すると、図 6.7 に示した各配合において、フライアッシュの粉末度に対応した強度発現の大きな差異が見られなかった。

本研究では、フライアッシュの添加量 (10%) が比較的少ないため、粉末度の強度への影響が明確に現れていないと推測される。また、表 6.1 に示すように 2 種類のフライアッシュの活性度指数は大差がなく、ポズラン反応が同程度で進行したと予想されることは、コンクリートの強度特性が同じ傾向を示した原因の一つであると考えられる。

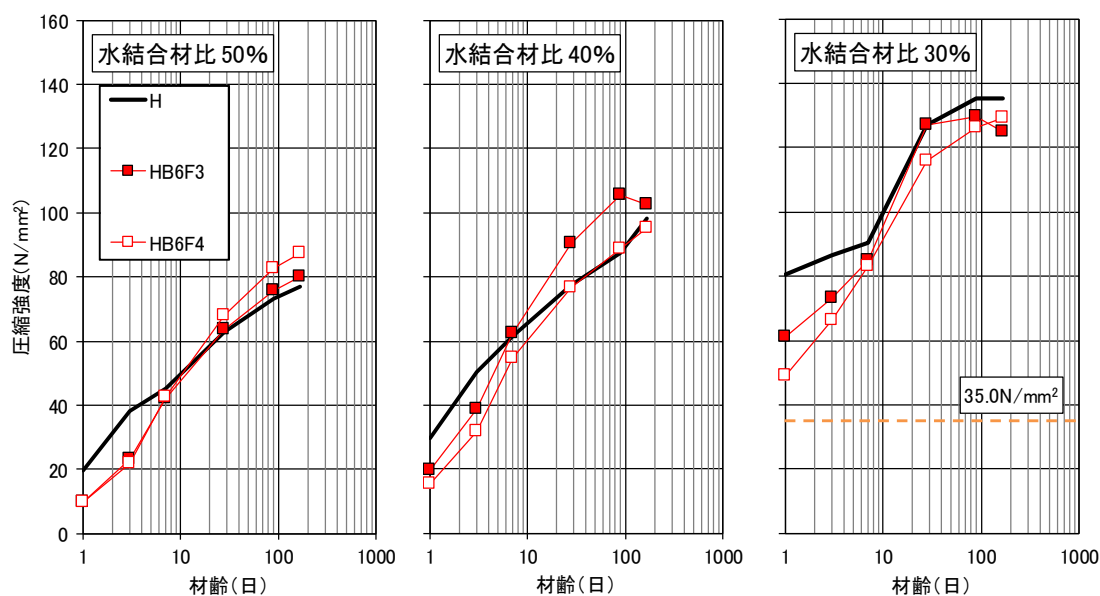


図 6.7 各種のフライアッシュを使用した場合の圧縮強度

4) フライアッシュの外割添加と内割添加の比較

水結合材比 30% のケースについて、高炉スラグ微粉末 6000 を 50% 置換したケースの中で、フライアッシュ未添加 (HB6)、10% 外割添加 (HB6F3) と 10% 内割添加 (HB6F3 内) の圧縮強度試験結果を 図 6.8 に示す。参考のため早強セメント単味配合 (H) の結果も表示している。

初期材齢では、フライアッシュ未添加の配合 (HB6) に比較して外割添加の配合 (HB6F3) は強度の低下が見られなかったが、内割添加の配合 (HB6F3 内) は圧縮強度が約 20% 低下した。これはフライアッシュのポズラン反応が緩やかに発生すること、外割添加した場合はモルタルの実質の水結合材比が若干低減されることに関連すると考えられる。一方、長期材齢ではフライアッシュのポズラン反応により強度が増加し、各ケースでは未添加の場合と同等以上の強度になった。

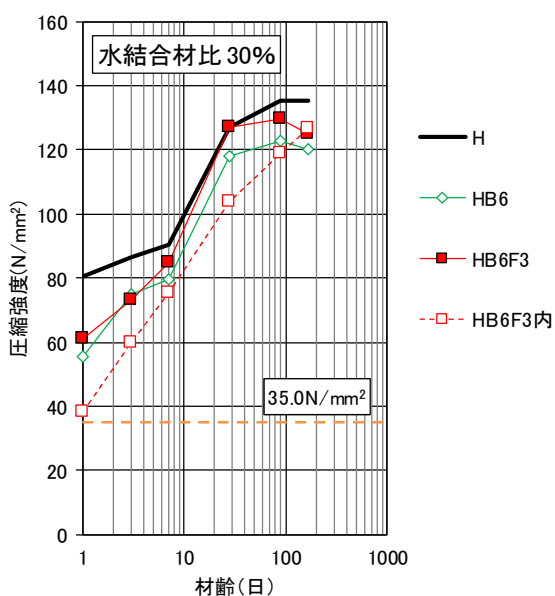


図 6.8 フライアッシュを外割添加と内割添加した場合の圧縮強度

6.2.3 コンクリートの力学特性

(1) 試験概要

コンクリート供試体を使用し、圧縮強度、割裂引張強度、静弾性係数の特性値を検証した。

コンクリートの使用材料を表 6.1、配合を表 6.2 に示す。水結合材比は材齢 1 日の強度発現性がプレストレス導入に必要な強度 35.0N/mm^2 を満足するように、過去の実績から 34.0% を使用した。これは、既往の研究^{6.1)}においては、高炉スラグ微粉末を単独使用し、蒸気養生を施したコンクリートの実績配合である。

コンクリートの練り混ぜには、パン型強制練りミキサを使用し、各種結合材をミキサに投入し 30 秒間、さらに細骨材を投入し 30 秒間の空練りを行い、その後は練り混ぜ水を投入して 1 分間、最後は粗骨材を投入して 1 分 30 秒の計 3 分 30 秒間で練り混ぜを行った。

材齢 1 日までの養生方法は 20°C の封緘養生、最高温度 50°C の給熱促進養生の 2 種類を行い、翌日に 20°C の室内で脱枠し、 20°C の水中養生を実施した後に所定の材齢まで 20°C の気中養生を行った。給熱促進養生の使用装置は写真 2.1、養生パターンは図 2.3 を参照する。

コンクリートの圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」、割裂引張強度は JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」、静弾性係数は JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」にそれぞれ準じて、直径 100mm × 高さ 200mm の円柱供試体 (3 本/セット) を用いて行った。測定結果は供試体全本数の平均値を使用したが、個別の供試体のデータは平均値の 85% から 115% までの範囲から外れたものを切り捨てて平均値を算出した。なお、試験材齢は 1 日 (初期に給熱促進養生の供試体のみ)、3 日 (初期に封緘養生の供試体のみ)、28 日および 168 日とした。

(2) 圧縮強度

給熱養生と封緘養生のコンクリート圧縮試験の結果を表 6.8、図 6.9 に示す。

混和材使用の配合(HB, HBF)は、初期材齢(給熱養生は材齢 1 日、封緘養生は材齢 3 日)の強度の低下が見られたが、全ての配合においてプレストレス導入に必要な強度 35N/mm^2 を上回り、材齢 28 日で設計基準強度 50N/mm^2 を満足した。

コンクリートの初期材齢の養生方法がその後の強度発現に与える影響については、封緘養生と給熱養生の両者を比べると、材齢 28 日および材齢 168 日の全数の配合において、給熱養生の方の圧縮強度が高くなった。これは、給熱養生を行ったことにより、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性およびフライアッシュのポゾラン反応を促進させ、強度発現が早まったためであると考えられる。しかし、高炉スラグ微粉末を単独使用した配合(HB)は、封緘養生と給熱養生と共に全材齢において各配合中で最も低い値となっている。

また、28 日以降の中長期材齢において、混和材使用の配合(HB, HBF)の強度増加が大きく、早強セメント単味の配合(H)のグラフに接近または超過し、長期材齢の 168 日ではほぼ同等程度になったことが確認できた。なお、2 種類の混和材を添加した配合(HBF)は材齢 168 日で封緘養生、給熱養生の両方において、圧縮強度はわずかであったが早強セメント単味の配合(H)の強度を上回った。

以上の圧縮強度試験結果より、高炉スラグ微粉末を単独使用した配合(HB)は圧縮強度が低下する一方、高炉スラグ微粉末とフライアッシュの両方を併用する配合(HBF)は圧縮強度を増加させることが明らかになった。

表 6.8 圧縮強度試験の結果

配合の 記号	初期材齢の 養生方法	混和材種類		圧縮強度 (N/mm ²)			
		BFS	FA	1 日	3 日	28 日	168 日
H	封緘養生	-	-	-	43.8	60.7	60.4
HB		有	-	-	36.9	54.0	57.1
HBF		有	有	-	38.6	58.7	61.6
H-heat	給熱促進 養生	-	-	43.0	-	61.9	63.9
HB-heat		有	-	36.7	-	60.2	63.0
HBF-heat		有	有	39.7	-	63.3	64.1

注) BFS:高炉スラグ微粉末, FA:フライアッシュ

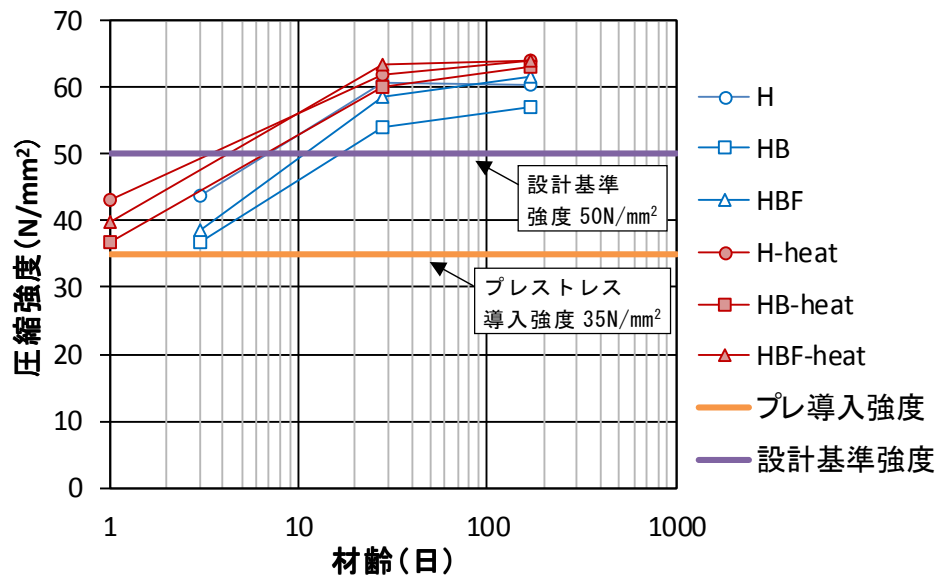


図 6.9 コンクリート圧縮強度の経時変化

(3) 割裂引張強度

コンクリートの材齢 28 日および 168 日の割裂引張強度試験の結果を表 6.9, 図 6.10 に示す。2 種類の混和材を併用した配合 (HBF) の圧縮強度と引張強度の関係は、初期材齢時の養生方法と関係なく、早強セメント単味配合 (H) および高炉スラグ微粉末単独使用配合 (HB) と同様な傾向を示している。また、両者の関係は、土木学会式 (6.1) ^{6.2)} とおおむね一致している。

$$f_{tk} = 0.23 f'_{ck}{}^{2/3} \quad (6.1)$$

ここに、

f_{tk} : コンクリートの引張強度の特性値 (N/mm²)

f'_{ck} : コンクリートの圧縮強度の特性値 (N/mm²)

材齢 168 日の早強セメント単味配合 (H) の割裂引張強度が若干高かった一点のデータを除き、2 種類の混和材を併用した配合 (HBF) を含めた材齢 28 日と 168 日の試験結果は、土木学会式の ±15% の範囲内に収まっている。また、材齢 28 日の試験結果はほとんどバラツキが確認されていないことから、材齢 168 日データのバラツキは、コンクリートの配合に依存することがなく、供試体製作および載荷試験の精度により生じたと思われる。

この結果から、2 種類の混和材を併用した配合 (HBF) は、早強セメント単味配合 (H) と同等な設計基準強度を満足すれば、コンクリートのマトリックスを構成する材料が異なっても、水和生成物が同様な結合力を有することで引張強度特性も同等であるため、コンクリート構造物のひび割れ抵抗性も同じレベルとなることがわかった。

表 6.9 割裂引張強度試験の結果

(単位：N/mm²)

配合の記号	初期材齢の養生方法	混和材種類		材齢 28 日		材齢 168 日	
		BFS	FA	圧縮強度	割裂引張強度	圧縮強度	割裂引張強度
H	封緘養生	-	-	60.7	3.5	60.4	4.1
HB		有	-	54.0	3.4	57.1	4.6
HBF		有	有	58.7	3.4	61.6	4.1
H-heat	給熱促進養生	-	-	61.9	3.7	63.9	3.1
HB-heat		有	-	60.2	3.4	63.0	3.8
HBF-heat		有	有	63.3	3.9	64.1	4.0

注) BFS:高炉スラグ微粉末, FA:フライアッシュ

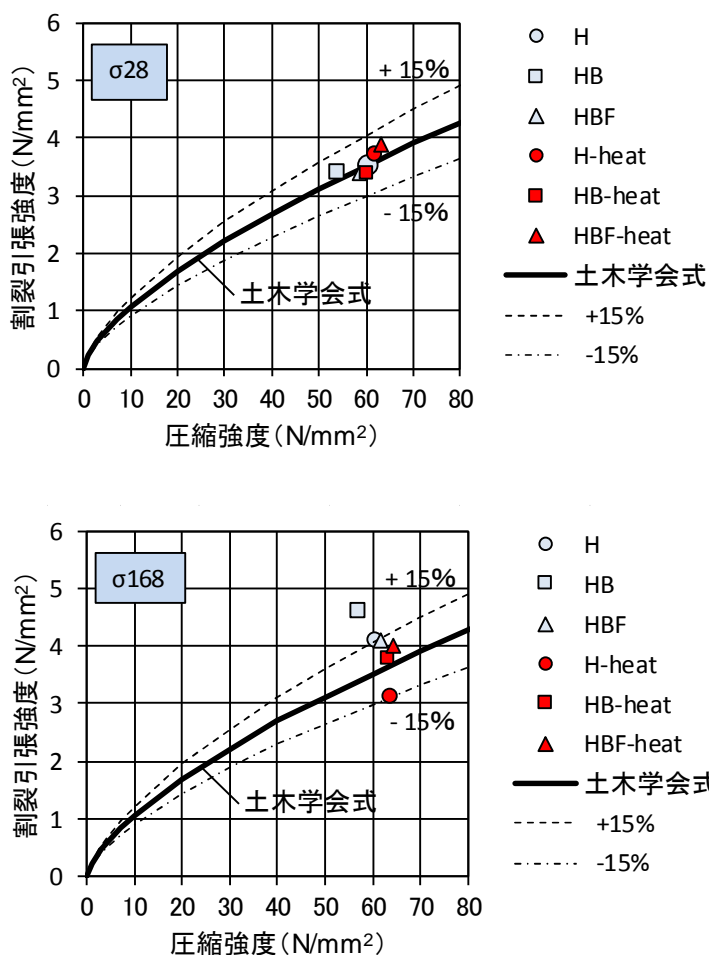


図 6.10 圧縮強度－割裂引張強度の関係（上は材齢 28 日，下は 168 日）

(4) 静弾性係数

静弾性係数の試験状況を写真 6.5 に示し、コンクリートの材齢 28 日および 168 日の圧縮強度と静弾性係数試験の関係を表 6.10、図 6.11 に示す。

2 種類の混和材を併用した配合 (HBF) の圧縮強度と静弾性係数の関係は、早強セメント単味配合 (H) および高炉スラグ微粉末単独使用配合 (HB) と同等である。また、両者の関係は土木学会式 (6.2)^{6.3)} とおおむね一致しており、土木学会式の±15%の範囲内に収まっている。

$$\begin{aligned} E_c &= \left[2.2 + \frac{f'_c - 18}{20} \right] \times 10^4 & f'_c < 30\text{N/mm}^2 \\ E_c &= \left[2.8 + \frac{f'_c - 30}{33} \right] \times 10^4 & 30\text{N/mm}^2 \leq f'_c < 40\text{N/mm}^2 \\ E_c &= \left[3.1 + \frac{f'_c - 40}{50} \right] \times 10^4 & 40\text{N/mm}^2 \leq f'_c < 70\text{N/mm}^2 \\ E_c &= \left[3.7 + \frac{f'_c - 70}{100} \right] \times 10^4 & 70\text{N/mm}^2 \leq f'_c < 80\text{N/mm}^2 \end{aligned} \quad (6.2)$$

ここに、

E_c : コンクリートのヤング係数 (N/mm²)

f'_c : コンクリートの圧縮強度の特性値 (N/mm²)

この結果から、2 種類の混和材を併用した配合 (HBF) は、早強セメント単味配合 (H) と同等な設計基準強度を満足すれば、静弾性係数も同程度となり、コンクリート構造物の部材剛性や変形能力なども同じレベルになると考えられる。

ただし、本研究では試験により直接確認していないが、2 種類の混和材を併用した配合 (HBF) は初期材齢時に強度発現が遅れる場合に、土木学会式が示したとおりに静弾性係数も低下する可能性がある。コンクリートの静弾性係数は使用する骨材の特性と緊密な関係を有するため、構造物に適用する際に実際に使用する材料による特性値の試験確認が望ましいと考えられる。



写真 6.5 静弾性係数の試験状況

表 6.10 静弾性係数試験の結果

配合の 記号	初期材齢 の 養生方法	混和材 種類		材齢 28 日		材齢 168 日	
		BFS	FA	圧縮 強度	静弾性 係数	圧縮 強度	静弾性 係数
				(N/mm ²)	(kN/mm ²)	(N/mm ²)	(kN/mm ²)
H	封緘養生	-	-	60.7	33.4	59.8	34.7
HB		有	-	54.0	37.4	57.1	37.0
HBF		有	有	58.2	39.0	61.6	38.2
H-heat	給熱促進 養生	-	-	62.0	35.4	64.0	40.0
HB-heat		有	-	60.2	33.3	63.1	33.2
HBF-heat		有	有	60.8	33.6	64.1	32.4

注) BFS:高炉スラグ微粉末, FA:フライアッシュ

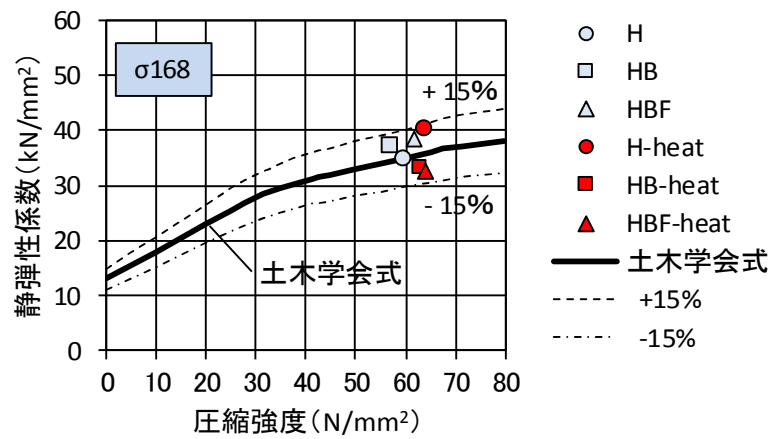
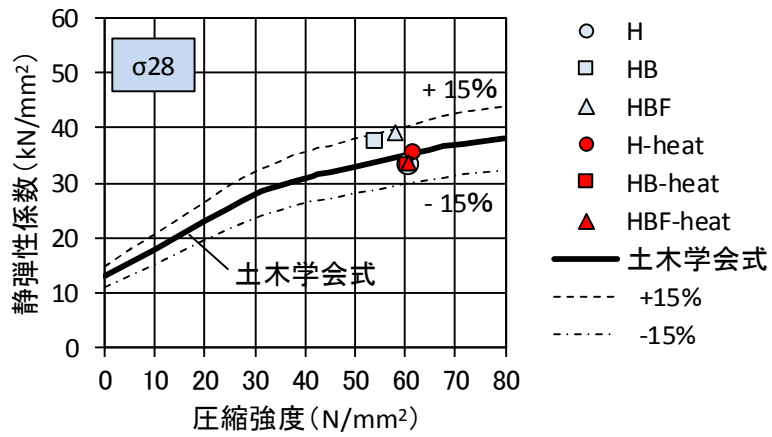


図 6.11 圧縮強度－静弾性係数の関係（上は材齢 28 日，下は 168 日）

6.2.4 細孔空隙率と圧縮強度との相関性

既往の研究では、総細孔空隙量とコンクリートの圧縮強度との関係には相関性があると報告されている^{6.4), 6.5)}。ここで、本研究の第2章で得られた細孔空隙率（空隙容積 / 試料容積）の試験結果と6.2.2節で得られた圧縮強度との関係について検討した。

細孔空隙率は第5章に示している式(5.5)を使用し、材齢1年の総細孔容積（細孔径 $0.006\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ ）を合計したデータを使用した。また、圧縮強度はセメントペースト供試体と同時に作られたモルタル供試体の長期材齢の試験結果を用いた。

ここで使用したセメントペーストの配合は、モルタルの配合から細骨材を除いた材料であり、モルタル供試体を用いた圧縮強度結果との関連性検討に妥当性があると考えられる。また、モルタルの供試体作成時にブリーディングが確認されておらず、細骨材周囲のブリーディング水の集結に起因する強度特性の変化を考慮しなくてよいと考えられる。

図6.12に、早強セメント単体配合(H)、高炉スラグ微粉末単独使用(HB6)、最も汎用性がある2種類の混和材併用(HB6F3)の試験結果に着目し、同一水結合材比(50%, 40%, 30%)、同じ長期材齢(強度は材齢168日、細孔空隙率は材齢1年)のデータをピックアップした。グラフの縦軸は比較しやすいように圧縮強度の自然対数値($\ln\sigma$)で表示している。ただし、水結合材比30%の配合は組織構造がかなり緻密化され、細孔空隙率データの差が小さいため、ここでは水結合材比50%, 40%のデータに着目し、結合材の組合せの相違が細孔空隙率および圧縮強度特性に及ぼす影響を検討した。

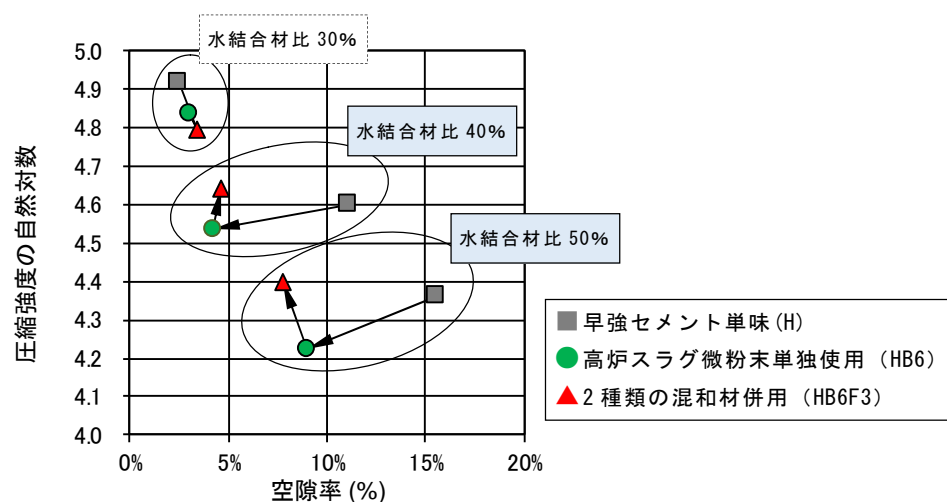


図 6.12 細孔空隙率と圧縮強度の関係（一部データ）

細孔空隙率と圧縮強度との相互関係を確認すると、まず、高炉スラグ微粉末単独使用 (HB6) は、早強セメント単味配合 (H) に比べ細孔空隙率が 6.6%~6.9%減少したが、圧縮強度がこれに伴って 6.4~10.3N/mm² (図中の対数值 0.07~0.14) 低下してしまった。この結果により、細孔空隙率の減少により耐久性の向上が期待されるが、重要な特性値である圧縮強度の大幅な低下は実構造物の製造施工に支障をもたらすことが懸念される。

一方、高炉スラグ微粉末単独使用の配合 (HB6) に新たにフライアッシュを混合し、すなわち 2 種類の混和材併用の配合 (HB6F3) は、高炉スラグ微粉末単独使用の配合 (HB6) に比べると細孔空隙率が-1.1%~0.4%で小幅に増減したが、圧縮強度が 10.6~13.2N/mm² (図中の対数值 0.11~0.18) ほど顕著に向上し、早強セメント単味配合 (H) に比べても多少上回る結果であった。

このように、2 種類の混和材併用の配合 (HB6F3) は、高炉スラグ微粉末単独使用の配合 (HB6) の長所である低空隙率をキープしながら、圧縮強度の低下という短所を早強セメント単味配合 (H) 並みに改善できることが明らかになった。

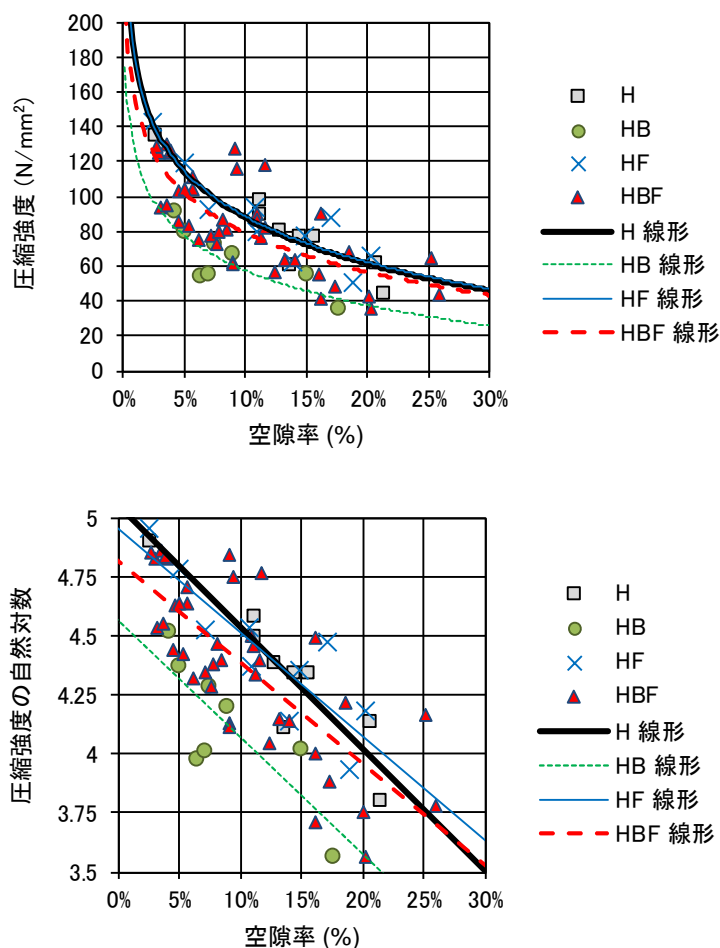
したがって、2 種類の混和材併用したコンクリートは、従来の混和材無使用の配合と同様な高強度を持ちながら、組織構造が緻密になることで高耐久性も期待でき、混和材併用ならではの相乗効果が明確となったと考えられる。

さらに、細孔空隙率と圧縮強度の全データを比較し、結合材組合せの種類ごとの相関関係を求めてみた。図 6.13 に、早強セメント単味配合 (H)、高炉スラグ微粉末の単独使用 (HB)、フライアッシュの単独使用 (HF) および 2 種類の混和材併用 (HB*F*) の 4 種類の関係を示している。ここで、H, HB, HF はそれぞれ、各水結合材比や材齢の計 10 サンプルのデータを使用し、2 種類の混和材併用 (HB*F*) のケースは、異なる種類の高炉スラグ微粉末やフライアッシュを使用した配合 (HB4F3, HB6F3, HB6F4, HB8F3) を区別せずデータをまとめたものであり、全部で 44 サンプルであった。また、上のグラフの縦軸は圧縮強度であり、下のグラフの縦軸は圧縮強度の自然対数值 ($\ln \sigma$) で表示し、本研究では主に直線の線形関係が得られた下のグラフで検討を行った。

結果全体を見ると、まず、既往の文献^{6.4), 6.5)}と同様、細孔空隙率と圧縮強度とは負の相関関係が示されており、細孔空隙率が低下するほど圧縮強度が向上する傾向が確認された。その中でも、早強セメント単味配合 (H) の相関性が比較的高い。混和材の単独使用 (HB, HF) および 2 種類の混和材併用 (HB*F*) の配合は相関係数が若干低下したものの、早強セメント単味配合 (H) の直線勾配におおむね平行している。

このことから、試験データをさらに蓄積し、強度特性と関連性が高い細孔空隙量

の範囲を特定すれば、2種類の混和材併用の配合においても、セメント硬化体の細孔空隙率から精度よく圧縮強度を推定する可能性が示唆された。



近似曲線の相関式：

H, 黒 : $\ln \sigma = -4.88 A + 5.00, R^2 = 0.81$

HB, 緑 : $\ln \sigma = -4.40 A + 4.96, R^2 = 0.75$

HF, 青 : $\ln \sigma = -4.95 A + 4.57, R^2 = 0.65$

HBF, 赤 : $\ln \sigma = -4.30 A + 4.82, R^2 = 0.58$

ここに、 σ : 圧縮強度 (N/mm²), A : 細孔空隙率 (%)

図 6.13 細孔空隙率と圧縮強度の関係 (下図 : 縦軸は自然対数)

6.3 第6章のまとめ

本章では、コンクリートのフレッシュ性状と力学特性に及ぼす混和材併用の影響を試験的に検討し、以下の知見が得られた。

(1) コンクリートのフレッシュ性状

- 1) スランプと空気量：2種類の混和材を併用した配合でも、化学混和剤の少ない調整量で早強セメント単味の配合と同等なスランプと空気量を確保でき、早強セメント単味配合と同等な目標値を満足することができる。
- 2) ブリーディング量：2種類の混和材を併用したコンクリートは早強セメント単味の配合と同じように、ブリーディングが発生しなかった。
- 3) 凝結時間：2種類の混和材を併用したコンクリートは始発時間が早強セメント単味の配合より若干遅れ、その他の項目は早強セメント単味の配合と同程度である。2種類混和材の併用の場合は施工への凝結時間による影響が少ない。

(2) 硬化コンクリートの力学特性

1) モルタル供試体（圧縮強度試験）

- a) 高炉スラグ微粉末が50%置換された場合はモルタルの初期強度が低下するが、フライアッシュの外割併用により材齢7日以降に強度増加が加速する。
- b) 高炉スラグ微粉末4000とフライアッシュの併用、高炉スラグ微粉末6000と8000の使用はコンクリート強度を向上させる効果がある。
- c) フライアッシュ粉末度がモルタルの強度発現に及ぼす影響に関して、フライアッシュの添加量10%の場合、その強度発現の差異が見られなかった。また、フライアッシュの外割添加では圧縮強度の低下が発生しないが、内割添加では初期強度が低下した。
- d) 細孔径 $0.006\sim 10\mu\text{m}$ の範囲において総細孔空隙率と圧縮強度（自然対数値）との相関性が示された。
- e) 2種類の混和材を併用した配合（HBF）は低空隙率と高強度の両方の特徴を持ち、相乗効果が明確になっている。

また、上記 a), b), c) の結果により、2種類の混和材を併用する基本的配合は、高炉スラグ微粉末6000を使用し、フライアッシュは外割添加と決定した。

2) コンクリート供試体（圧縮強度，割裂引張強度および静弾性係数試験）

- a) 混和材を使用した各種配合は，早強セメント単味配合に比べて初期材齢時の圧縮強度が低くなる。しかし，長期材齢では，2種類の混和材を併用した配合は圧縮強度の増進が大きかった。
- b) 割裂引張強度について，2種類混和材併用のケースを含め，混和材を使用した各種配合は早強セメント単味配合と同等であり，土木学会値（コンクリート標準示方書）とおおむね一致している。
- c) 静弾性係数について，2種類混和材併用のケースを含め，混和材を使用した各種配合は早強セメント単味配合と同等であり，土木学会値とおおむね一致しており，いずれも土木学会値の±15%の範囲に収まる。

以上，コンクリートのフレッシュ性状・施工性，硬化コンクリートの力学特性に及ぼす2種類の混和材を併用する影響を確認できた。

【第6章の参考文献】

- 6.1) 國富康志，石井豪，辛軍青，鳥居和之：高炉スラグ微粉末 6000 を混和した P C 梁部材の ASR 劣化に対する耐荷力特性，第 24 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp. 323-326，プレストレストコンクリート工学会，2015.
- 6.2) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編：本編]，pp. 35，2012.
- 6.3) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編：本編]，pp. 39，2012.
- 6.4) 坂井悦郎，井元晴丈，大門正機：高炉セメント硬化体の相組成と強度発現性，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26，No. 1，pp. 135-140，2004.
- 6.5) 杉山央，梶田佳寛：セメントの水和反応および微細組織形成に及ぼす初期高温履歴の影響，セメント・コンクリート論文集，Vol. 54，pp. 638-645，2001.
- 6.6) 例えば，杉大樹，塚越雅幸，上田隆雄：フライアッシュ及び高炉スラグ微粉末を使用したプレキャストコンクリート部材の長期耐久性と微細構造，コンクリート工学年次論文集，Vol. 35，No. 1，pp. 763-768，2013.

第7章 結論

7.1 本研究の成果

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

第2章では、高炉スラグ微粉末とフライアッシュという2種類の混和材の併用が早強ポルトランドセメントの水和反応、ならびに硬化体の組織構造の形成に及ぼす影響について述べた。本研究の試験範囲内において得られた知見を以下に示す。

- (1) 水和反応に対する2種類の混和材を併用した影響
 - 1) 混和材使用の配合は、給熱促進養生を施した低水結合材比（例えば30%）の場合に初期材齢の C_3S 反応率が低くなるが、長期にわたって水和反応が進行することが判明した。
 - 2) セメント由来の水酸化カルシウム（CH）生成量について、混和材使用配合の方が早強セメント単味配合に比べ少なく、さらに、水酸化カルシウム（CH）量は高炉スラグ微粉末の潜在水硬性反応やフライアッシュのポゾラン反応により消費され、材齢の進行とともに減少することが確認された。

- (2) セメント硬化体の細孔構造に対する2種類の混和材を併用した影響
 - 1) 本研究で用いた配合条件では、早強ポルトランドセメントを使用した特徴として細孔分布は微小径の細孔が中心であり、混和材の混合が長期にわたってセメント硬化体の内部組織を緻密化させることが確認された。
 - 2) 高炉スラグ微粉末で50%置換または10%のフライアッシュと併用した場合は、早強セメント単味の配合と比べ全空隙量が大幅に減少し、細孔径 $0.02\mu m$ 以下の微細な空隙の割合が増加したことが確認された。その中でも、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用した配合は最も優れた緻密性を示した。
 - 3) フライアッシュを単独混入した配合は、ポゾラン反応が遅れることにより初期材齢を中心に全空隙量が多くなった。ただし、給熱促進養生を行った配合では、フライアッシュのポゾラン反応が促進され、全空隙量が低下する。
 - 4) 各種の高炉スラグ微粉末を混入した配合では、粉末度の違いによらず全空隙の減少とともに細孔径 $0.02\mu m$ 以下の微細な空隙の割合が増加し、セメント硬化体の内部組織が緻密化したことが確認された。
 - 5) 各種フライアッシュの細孔径分布を比較した結果、フライアッシュの混入は、粉末度に対応した組織の緻密化効果が限定的であった。

第3章ではコンクリートの長期耐久性に及ぼす2種類混和材を併用する影響について、ASR抑制効果を検討したものである。以下の知見が得られた。

- 1) 混和材の使用はASRを大幅に抑制できることが確認された。モルタルを用いたASR促進試験において、早強セメント単味配合の膨張率は約125日で無害判定の基準値を超え、これに対して、2種混和材併用の配合は960日を超えてもわずかな膨張の動きしか確認されず、抑制効果が最も優れている。
- 2) セメント水和硬化体中の水酸化カルシウム含有量と、ASR促進試験における膨張率が0.1%に達した日数は負の相関関係がある。
- 3) 2種類の混和材併用の配合は水酸化カルシウム含有量が最も少ないことから、ASR抵抗性が高くなることが必然であると解明した。
- 4) 養生条件の検討では、給熱養生を行ったコンクリートはASRの膨張が早く進行する傾向が確認された。

第4章では、塩化物イオン浸透抑制効果を確認するため浸漬試験を行い、以下の知見が得られた。

- 1) 混和材を使用した配合は、早強セメント単味配合に比べ内部の塩化物イオン含有量の低下が確認されており、塩化物イオンの内部浸透を大幅に抑制できることが確認された。その中でも、2種類の混和材併用の抑制効果が最も大きいことが明らかになった。
- 2) 各種混和材の種類の影響、粉末度の影響およびフライアッシュ添加方法の影響について比較を行い、その傾向を把握した。
- 3) 試験結果から塩化物イオン浸透の見かけの拡散係数を算出し、2種類の混和材併用の見かけの拡散係数は早強セメント単味配合の1~3割となり、高炉スラグ微粉末を単独で使用した配合に比べても3~5割となり、塩化物イオンの浸透を最も抑制できると判明した。
- 4) 異なる浸漬期間における見かけの拡散係数の変化する傾向も見られ、浸漬期間が長いほど見かけの拡散係数が小さくなることが確認された。
- 5) PC構造物を対象に鋼材腐食を予測した結果、2種類の混和材を併用した配合は腐食発生の予測年数が最も長く、厳しい塩害環境を想定しても長期耐久性が期待できる。

なお、第5章では、中性化特性、凍結融解特性および収縮特性などその他の長期耐久性に関わる検討を行い、各種試験で得られた知見を以下に示す。

(1) 中性化特性

- 1) 全ケースの中性化深さは 2.0mm 未満の小さな値を示した。その中で、2 種類の混和材併用配合の中性化深さは、早強セメント単味配合より大きい、高炉スラグ微粉末単独使用配合より小さくなった。
- 2) 2 種類の混和材併用配合の中性化特性に影響する要因は、水酸化カルシウム (CH) の含有量、実質の水結合材比、細孔空隙量などが挙げられる。
- 3) 2 種類の混和材併用を含めた混和材を使用した各種配合の中性化速度係数の試験値は、いずれもコンクリート標準示方書推定値よりやや大きい数値となった。
- 4) 実環境中の耐用年数 100 年後の中性化深さ予測値については、2 種類の混和材を併用するコンクリートは最大でも 5mm 未満であり、十分な中性化抵抗性を有すると考えられる。
- 5) 2 種類の混和材併用のコンクリートは、中性化との関連性が高いとされる比較的粗大な細孔量について、細孔径 $0.05 \mu\text{m}$ 以上の空隙量が少なく細孔構造が緻密であるため、水酸化カルシウム (CH) の減少という中性化抵抗性にとってマイナスの要因を打ち消し、結果として早強セメント単味配合と同程度の中性化抵抗性を有するため、耐久性が確保できるものと考えられる。

(2) 凍結融解特性

- 1) 2 種類の混和材併用配合の相対動弾性係数は、早強セメント単味配合および高炉スラグ微粉末単独使用配合と比較しても明確な差異が見られず、300 サイクル経過後でも 95% 以上であり、早強セメント単味配合と同等であり良好な凍害抵抗性を示している。
- 2) 本研究における 2 種類混和材併用の配合を含めた各種コンクリートは、微細組織構造の緻密化により凍結融解劣化と関連性がある細孔径 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ の細孔空隙が極めて少ない。
- 3) 凍結融解抵抗性は圧縮強度と関連性があり、圧縮強度が約 $5\text{N}/\text{mm}^2$ 低くなる場合、相対動弾性係数は 2~3% の低下が見受けられ、凍結融解抵抗性が低下しやすい。
- 4) 2 種類の混和材併用配合のコンクリートは、フライアッシュの使用量を適切に設定し空気量の低下を防ぐこと、高炉スラグ微粉末使用の場合も十分な強度発現を確保することで、混和材に起因する凍結融解特性の低下が生じないと考えられる。

(3) 乾燥収縮特性

- 1) モルタル供試体の試験結果によると、2 種類の混和材を併用した配合の収縮量は、早強セメント単味配合と高炉スラグ微粉末を単独に混合した配合の中間となることが確認された。

- 2) 細孔空隙量と長さ変化量との相関関係が確認された。これは、ゲル空隙や毛細管空隙を中心とした細孔径 $1\mu\text{m}$ 未満の細孔空隙量が増加すると、内部の水分が表面へ移動・逸散が生じやすくなることが原因であると考えられる。
- 3) コンクリート供試体の試験結果によると、2種類の混和材を併用した配合の収縮量は初期材齢の養生方法と関係なく、早強セメント単味配合より大幅に低減し、高炉スラグ微粉末を単独に使用する配合より同等もしくは小さくなることが確認された。
- 4) 2種類の混和材を併用する配合の乾燥収縮量が過大になっていないことが確認され、PC構造物を併用している間の乾燥収縮ひび割れの発生リスクが抑制されるとともに、PC構造物において収縮に伴うプレストレス力の減少も過大にならず規定値以内に収まると考えられる。

以上の試験結果により、2種類の混和材併用のコンクリートの中性化特性、凍結融解特性および乾燥収縮特性などの特性値を把握することができ、これらの項目の長期耐久性は早強セメント単味配合と同等であり低下していないことが確認された。

第6章では、混和材の使用がコンクリートのフレッシュ性状および力学特性に及ぼす影響を試験的に検討し、以下の知見が得られた。

(1) コンクリートのフレッシュ性状

- 1) スランプと空気量：2種類の混和材を併用した配合でも、化学混和剤の少ない調整量で早強セメント単味の配合と同等なスランプと空気量を確保でき、早強セメント単味と同等な目標値を満足することができる。
- 2) ブリーディング量：2種類の混和材を併用したコンクリートは早強セメント単味の配合と同じように、ブリーディングが発生しなかった。
- 3) 凝結時間：2種類の混和材を併用したコンクリートは始発時間が早強セメント単味の配合より若干遅れ、凝結時間の大きな相違がなく、2種類混和材併用の場合は凝結時間による施工への影響が少ないことが確認された。

(2) 硬化コンクリートの力学特性

- 1) モルタル供試体（圧縮強度試験）
 - a) 高炉スラグ微粉末が50%置換された場合はモルタルの初期強度が低下するが、フライアッシュの外割併用により材齢7日以降に強度増加が加速する。
 - b) 高炉スラグ微粉末4000とフライアッシュの併用、高炉スラグ微粉末6000と8000の使用はコンクリート強度を向上させる効果がある。

- c) フライアッシュ粉末度がモルタルの強度発現に及ぼす影響について、フライアッシュの添加量 10% の場合、その強度発現の差異が見られなかった。また、フライアッシュの外割添加では圧縮強度の低下が発生しないが、内割添加では初期強度が低下した。
 - d) 以上に示す a), b), c) の結果により、2 種類の混和材を使用する基本的配合は、高炉スラグ微粉末 6000 を使用し、フライアッシュは外割添加と決定した。
 - e) 総細孔空隙率は細孔径 $0.006 \sim 10 \mu\text{m}$ の範囲において圧縮強度（自然対数値）との相関性が示された。
 - f) 2 種類の混和材を併用した配合は低空隙率と高強度の両方の特徴を持ち、相乗効果が明確になっている。
- 2) コンクリート供試体（圧縮強度、割裂引張強度および静弾性係数試験）
- a) 混和材を使用した配合は、初期材齢の圧縮強度が低くなる。しかし、長期材齢では、2 種類の混和材を併用した配合は圧縮強度の増進が大きかった。
 - b) 割裂引張強度について、混和材を使用した配合は早強セメント単味配合と同等であり、土木学会値とおおむね一致している。
 - c) 静弾性係数について、混和材を使用した配合は早強セメント単味配合と同等であり、土木学会値とおおむね一致し、いずれも土木学会値の $\pm 15\%$ の範囲に収まる。

以上、コンクリートのフレッシュ性状・施工性、硬化コンクリートの力学特性に及ぼす 2 種類の混和材を併用する影響を確認できた。

第 7 章は本章であり、これまで各章で得られた研究成果を総括し結論を述べるとともに、本研究の課題について述べた。

7.2 今後の課題

本研究では、限られた時間で各種試験の計画と実施を進めた関係上、一部の項目が完璧に実施したと言えず、もしくは詳細に検討されていなかった。今後の課題を以下に示す。

1) ASR 促進試験

ASR 促進試験は最初に着手して開始した試験項目であり、促進期間が 960 日を超えて実施したが、2 種類の混和材を併用した配合では膨張量が極めて少なかった。しかしながら、早強セメント単味配合は試験開始約 120 日で急速に膨張し、約 210 日で計測が終了せざるをえなかったことから、コンクリートを早期に劣化させるように試験条件を一律に厳しく設定すると、逆に非常に短期間で全試験体が急速に進展し比較できなくなる可能性がある。ASR 試験において、最適な試験条件を設定する必要がある。

2) 塩化物イオン浸透抑制効果確認試験

塩化物イオン浸透抑制効果確認の試験において、SEM-EDS による詳細分析を計画したが、設備および時間の関係で実現できなかった。これを実現できると、コンクリート内部への塩化物イオン浸透量を高い精度で確認でき、混和材使用による組織構造の緻密化の効果をより正確に評価できると考えられる。

3) 材料特性試験

一部の材料特性値、例えば、断熱温度上昇量、自己収縮、クリープ係数などに関して性能確認試験を実施しなかった。既往の研究や示方書類を参考にできるが、実構造物への応用に向けてデータを取得すると、マスコンクリートの温度ひび割れ対策を精度よく実施することができる。

4) 耐久性試験

耐久性試験の中で、透気係数や透水係数の測定を行い、コンクリート表層部分の耐久性を直接評価することができる。2 種類の混和材を併用した配合の耐久性効果の信頼性が高まる。

本研究のようなコンクリート材料の研究は、長期間にわたってステップごとに行われることが多く、試験の計画立案や一部のシビアなデータ計測は担当者の経験、技量に委ねられることも事実である。このような課題を整理し、後世の研究者、技術者の一助になるような技術継承も大事であると考えられる。

【謝辞】

本論文は、筆者が愛知工業大学大学院工学研究科生産・建設工学専攻博士後期課程に在籍中の研究成果を取りまとめたものであります。

本研究の遂行および本論文を執筆するにあたり、始終懇切丁寧にご指導いただきました、愛知工業大学工学部土木研究科教授呉承寧先生に心より感謝申し上げます。呉先生は、私が社会人プログラムを利用した研究という状況にご配慮いただき、ご指導をいただく時間を休日や夜間にも確保していただきました。また、私が研究に取り組みやすいように、学内外の環境作りにも常にご配慮いただいたこと、国内外での論文発表の機会を与えていただいたこと、心より御礼を申し上げます。

本論文の審査員をご快諾くださった、名古屋大学教授中村光先生、愛知工業大学教授山田和夫先生、同教授鈴木森晶先生、同教授岩月栄治先生には、貴重かつ的確なご意見ご助言を賜りました。心より感謝申し上げます。

愛知工業大学名誉教授長瀧重義先生、同元教授森野奎二先生、同教授・学科長奥村哲夫先生には、常に温かいお言葉で激励いただき、研究を進めていく上で大きな支えになりました。厚くお礼を申し上げます。

愛知工業大学名誉教授神谷清仁先生には、試験装置の使用をご快諾いただくとともに、試験の実施にあたってご指導をいただきました。心より感謝いたします。

日鉄住金高炉セメント（株）、エスメント中部（株）、（株）テクノ中部、電源開発（株）の皆様には、材料提供ならびに技術相談の面でご協力いただきました。また、一部試験の実施は日鉄住金高炉セメント（株）、竹本油脂（株）にご協力いただきました。なお、試験方法に関してデンカ（株）の皆様にご助言をいただきました。上記の方々に改めて厚くお礼を申し上げます。

また、本研究の実験作業には、愛知工業大学工学部土木研究科材料研究室の多くの卒業生および在学生にご協力いただきました。深く感謝するとともに、これからの皆様のご活躍をお祈り申し上げます。

社会人学生として愛知工業大学大学院博士後期課程に入学する機会を与えていただきました勤務先である（株）安部日鋼工業の関係各位に深く感謝の意を表します。高橋泰之社長、井手口哲朗副社長、西尾浩志専務取締役には、常に励ましのお言葉をいただき、深く感謝申し上げます。部署の上司である常務取締役古川幸司氏、取締役松山高広氏、江崎守氏、小林猛氏、早川岳氏には、ご理解をいただき、研究に取り組みやすいようにご配慮をいただきました。同僚である國富康志氏、石井豪氏、河合真樹氏には、様々な助言をいただきました。心より感謝申し上げます。

最後に、本研究に取り組む期間中、いつも暖かく見守り、応援してくれた妻馬励、娘千悦に心より感謝します。そして、本論文への取り組みを心から喜び、支援してくれた両親に感謝いたします。本当にありがとうございました。

本論文に関する著者の発表論文

論文題目	公表の方法及び時期	著者
1. 学位請求に関する論文等		
(1) 学術論文 (査読あり)		
1) 高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用したモルタルに関する基礎研究	第 23 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 275-280, プレストレストコンクリート工学会, 2014 年 10 月	<u>辛 軍青</u> , 呉 承寧
2) セメント硬化体の細孔構造に及ぼす各種混和材の影響	第 24 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 551-556, プレストレストコンクリート工学会, 2015 年 10 月	<u>辛 軍青</u> , 呉 承寧
3) 高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用したコンクリートの耐久性	第 25 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 395-400, プレストレストコンクリート工学会, 2016 年 10 月	<u>辛 軍青</u> , 呉 承寧
(2) 国際会議 (査読あり)		
1) The Hydration Reaction, Microstructure and Strength Development of Cementitious Material Composed of Ground Granulated Blast Furnace Slag, Fly Ash, and High-early-strength Portland Cement	The 14th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC2015), Session 4-2, No. 8, 2015. 10.	<u>Junqing XIN</u> , Chengning WU, Eiji IWATSUKI, Shigeyoshi NAGATAKI

2. その他の論文等		
(1) 学術論文 (査読あり)		
1) 三次元拘束コンクリート部材を用いた合成トラス要素の力学的特性	コンクリート工学年次論文集 (Vol. 22) , pp. 1003-1008, 日本コンクリート工学会, 2000年7月	辛 軍青, 米倉 亜州夫, 佐藤 立美, 伊藤 秀敏
2) 静電容量によるPCグラウト充填度確認手法の基礎的研究 (年次論文奨励賞を受賞)	コンクリート工学年次論文集 (Vol. 27) , pp. 1789-1794, 日本コンクリート工学会, 2005年7月	辛 軍青, 堅田 茂昌, 立石和雄, 鈴木 誠
(2) 国際会議 (査読あり)		
1) Manufacture and construction of a PC through girder type pedestrian bridge using ultra high strength fiber reinforced concrete	8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete (8HSC-HPC), pp. 1270-1275, 2008.10	Tsuyoshi ISHII, Hiroshi NISHIO, Takahiro MATSUYAMA, Akira MIYAJIMA, Kastuhiko YOKOHATA, Michihiro GOTOU, <u>Junging XIN</u> , Yasuo HIRAI