

# 博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

xin junqing  
氏名 辛 軍青  
学位の種類 博士 (工学)  
学位記番号 博 甲 第 52 号  
学位授与 平成 28 年 9 月 8 日  
学位授与条件 学位規定第 3 条第 3 項該当  
論文題目 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  
論文審査委員 (主査) 教授 呉 承寧<sup>1</sup>  
(審査委員) 教授 岩月 栄治<sup>1</sup> 教授 鈴木 森晶<sup>1</sup> 教授 山田 和夫<sup>2</sup> 教授 中村 光<sup>3</sup>

## 論文内容の要旨

### 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

従来、産業副産物・廃棄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、CO<sub>2</sub>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。

これらの混和材をコンクリートに使用した場合は、材料の種類や構成によってコンクリートの性能が大きく異なり、特に、初期強度が要求され、早強ポルトランドセメントを使用するプレストレストコンクリート構造物（以下、P C 構造物と略す）に適用する場合は、各種特性値の究明は極めて重要である。

P C 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に使用し、コンクリートの耐久性向上に関する研究は多数行われている。しかし、2 種類混和材の併用により、更なる高耐久性を有する P C 構造物に関する研究はほとんどなく、その材料特性は必ずしも明確になっていない。

本論文は、P C 構造物を対象に、コンクリートの耐久性向上ならびに環境負荷低減を図る目的で、早強ポルトランドセメントを使用するコンクリートに、高炉スラグ微粉末とフライアッシュの 2 種類の混和材を併用し、コンクリートの耐久性および諸特性に及ぼす影響を検討した。

その結果、A S R 抵抗性や塩化物イオン浸透抵抗性などの耐久性、およびコンクリートの強度を把握し、セメントの水和反応および硬化体の微細組織構造の観点から使

用材料とコンクリートの諸特性の関係を究明した。さらに、2 種類混和材の併用による相乗効果があり、コンクリートの耐久性が向上できることを確認した。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、P C 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産業廃棄物であるフライアッシュを使用し、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試料を作成し、X 線回折分析法を用いて各材齢においてセメントの主要な化合物であるユーライト (C<sub>3</sub>S) 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、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混和材の種類および構成の影響を明らかにした。

次に、混和材がセメント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

1 愛知工業大学 工学部 土木工学科 (豊田市)

2 愛知工業大学 工学部 建築学科 (豊田市)

3 名古屋大学大学院 (名古屋市)

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、混和材を使用した各種配合の細孔構造の特徴を把握した上に、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。

第3章～第5章は、コンクリートの耐久性に及ぼす2種類混和材併用の影響について、ASR抵抗性、塩化物イオン浸透抵抗性、中性化抵抗性、凍結融解抵抗性および収縮特性を検討したものである。

まず、第3章ではASR抵抗性に及ぼす2種類混和材併用の影響を検討した。これまで、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抑制効果は不明確であった。

そこで、ASR促進試験を行った結果、2種類混和材の併用による優れた相乗効果があることを判明した。第2章で検討したセメント硬化体中の水酸化カルシウム含有量と、ASR促進試験における限界膨張量に到達する日数は負の比例関係があると判明し、2種類混和材併用のセメント硬化体に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解明できた。

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種類混和材併用の配合は、塩化物イオン浸透量が最も低く、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、高炉スラグ微粉末を単独に混合する配合に比べても3～6割を低減でき、塩化物イオンの浸透抵抗性は最も優れたことを判明した。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場合、PC構造物の長寿命が期待できることがわかった。

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、促進試験結果から耐用年数の予測を行い、2種類混和材併用による中性化抵抗性の低下は生じないことを確認し、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種類混和材併用による耐凍害性の低下は生じ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、2種類混和材

併用による乾燥収縮の低減が確認された。

第6章では、本研究の実用化に向けて施工性に関連するコンクリートのフレッシュ性状と構造特性に関連する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は、スランプ、空気量、ブリーディング量および凝結時間などの試験を行い、通常のコンクリートと同程度であることを確認した。

コンクリートの力学特性については、圧縮強度、割裂引張強度、静弾性係数の試験を行い、2種類混和材併用によって、必要な初期材齢の圧縮強度が確保でき、長期強度の増加が大きいことが確認された。また、第2章で検討した総細孔空隙率は0.006～10 $\mu$ mの範囲において、圧縮強度（自然対数値）と良好な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まとめたとともに、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。以上のように、2種類混和材の併用によるPC構造物用コンクリートの耐久性向上に関して有用な知見が得られた。

#### 論文審査結果の要旨

従来、産業副産物・廃棄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、CO<sub>2</sub>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。

これらの混和材をコンクリートに使用した場合は、材料の種類や構成によってコンクリートの性能が大きく異なり、特に、初期強度が要求され、早強ポルトランドセメントを使用するプレストレストコンクリート構造物（以下、PC構造物と略す）に適用する場合は、各種特性値の究明は極めて重要である。

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に使用し、コンクリートの耐久性向上に関する研究は多数行われている。しかし、この2種類混和材の併用により、更なる高耐久性を有するPC構造物に関する研究はほとんどなく、その材料特性は必ずしも明確になっていない。

本論文は、PC構造物を対象に、コンクリートの耐久性向上ならびに環境負荷低減を図る目的で、早強ポルトランドセメントを使用するコンクリートに、高炉スラグ微粉末とフライアッシュの2種類混和材を併用し、コンクリートの耐久性および諸特性に及ぼす影響を検討した。その結果、ASR抵抗性や塩化物イオン浸透抵抗性などの耐久性、およびコンクリートの強度を把握し、セメントの水和反応および硬化体の微細組織構造の観点から使用材料とコンクリートの諸特性の関係を究明した。さ

らに、2種類混和材の併用による相乗効果があり、コンクリートの耐久性が向上できることを確認した。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産業廃棄物であるフライアッシュを使用し、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試料を作成し、X線回折分析法を用いて各材齢において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、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混和材の種類および構成の影響を明らかにした。

次に、混和材がセメント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、混和材を使用した各種配合の細孔構造の特徴を把握した上に、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。

第3章～第5章は、コンクリートの耐久性に及ぼす2種類混和材併用の影響について、ASR抵抗性、塩化物イオン浸透抵抗性、中性化抵抗性、凍結融解抵抗性および収縮特性を検討したものである。

まず、第3章ではASR抵抗性に及ぼす2種類混和材併用の影響を検討した。これまで、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抑制効果は不明確である。そこで、ASR促進試験を行った結果、2種類混和材の併用による優れた相乗効果があることを判明した。第2章で検討したセメント硬化体中の水酸化カルシウム含有量と、ASR促進試験における限界膨張量に到達する日数は負の比例関係があると判明し、2種類混和材併用のセメント硬化体に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解明できた。

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種類混和材併用の配合は、塩化物イオンの浸透量が最も低く、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、高炉スラグ微粉末を単独に混合する配合に比べても3～6割を低減でき、塩化物イオンの浸透抵抗性が最も優れたことを判明した。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場合、PC構造物の長寿命が期待できることが分かった。

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。中性化については、促進試験結果から耐用年数の予測を行い、2種類混和材併用による中性化抵抗性の低下は生じないことを確認し、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種類混和材併用による耐凍害性の低下は生じ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、2種類混和材併用による乾燥収縮の低減が確認された。

第6章では、本研究の実用化に向けて施工性に関連するコンクリートのフレッシュ性状と構造特性に関連する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は、スランプ、空気量、ブリーディング量および凝結時間などの試験を行い、通常のコンクリートと同程度であることを確認した。力学特性については、圧縮強度、割裂引張強度、静弾性係数の試験を行い、2種類混和材併用によって、必要な初期材齢の圧縮強度が確保でき、長期強度の増加が大きいことが確認された。また、第2章で検討した総細孔空隙率は $0.006 \sim 10 \mu m$ の範囲において、圧縮強度(自然対数値)と良好な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。

本研究で得られた2種類混和材の併用によるPC構造物用コンクリートの耐久性向上方法についての知見は、橋梁などの重要なPC構造物の長寿命化、および産業副産物・廃棄物である高炉スラグ微粉末とフライアッシュの有効利用による環境負荷低減において工学的に高い価値が認められる。以上のことから当該論文が生産・建設工学専攻の博士論文の水準に十分に達していると判定する。