

ビーライト系セメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた コンクリートの長期耐久性設計

学位論文内容の要旨

コンクリートは安全性や経済性の面から有利とされ、耐久性も高くメンテナンスの必要が無い半永久材料としてこれまで大量に使用されてきた。しかしながら、1980年代に入るとコンクリート構造物の早期劣化が全国的に顕在化するようになり、施工後 10～20 年程度でコンクリート内部の鋼材の腐食や、それに伴うコンクリートのはく離、はく落事例が相次いで発生した。このため、近年では、コンクリートの耐久性への関心が高まっており、コンクリートの耐久性を向上するための対策が求められている。

コンクリートの耐久性の向上には、基本的には水セメント比を低減が有効である。しかし、従来の仕様規定に基づく設計では流動性や収縮ひび割れなど低水セメント比コンクリートに特有な問題に対応できず、これらを克服する材料の開発とそれを認可する設計方法の構築が必要であった。このような中、土木学会のコンクリート標準示方書が性能設計型に改訂され、新しい材料を使用できる環境が醸成された。しかし、経年劣化に対して十分な耐久性が 100 年程度の長期まで確保されるような極低水セメント比領域のコンクリートに対応できる材料に関する研究は不十分であり、詳細な検討が切望されていた。

なお、低水セメント比のコンクリート用の材料としては、低発熱・高強度化と高い流動性を可能にするビーライト系セメントが開発されていた。しかし、ビーライト系セメントを用いたコンクリートは、初期の強度発現や中性化などの耐久性について課題を有している状況にある。他方、産業副産物として知られる高炉スラグ微粉末は、セメントの一部を置換することにより用いられており、環境負荷低減に資するリサイクル材として大きな効果をもたらしているだけでなく、塩分浸透抵抗性などの向上が期待できることに加え、流動性や分離抵抗性が向上するため高流動コンクリートにも適用されるなど多くの実績がある。しかし、収縮が大きいなどひび割れ抵抗性について課題を有している。これらの材料はそれぞれ課題を有しているが、耐久性向上にもたらす効果は高く、これらを組み合わせることで欠点を補完することにより更なるコンクリートの高性能化が期待される。しかし、これらを組み合わせたコンクリートの低水セメント比領域における物性および耐久性に関する研究や実際に使う上で必要となる設計法に関する研究はほとんど無い。

本研究では、積雪寒冷地に適用可能な高耐久性コンクリートの開発を目的として、上述の背景から、高微粉末化したビーライト系セメントと高炉スラグ微粉末を組み合わせたコンクリートの強度、収縮および耐久性について検討し、これらのセメント系材料を用いたコンクリートの配合設計手法の提案を行った。本論文はこれらの研究成果をまとめたものであり、6 章から構成されている。以下に各章の概要を述べる。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的について述べるとともに、既往の研究を概観し、本論文の構成について述べた。

第2章は「ビーライト系セメントおよび高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの強度特性」であり、粉末度を高めたビーライト系セメントと、その一部を粉末度が異なる高炉スラグ微粉末で置換したコンクリートの強度特性について検討を行った。ビーライト系セメントと高炉スラグ微粉末の組み合わせにより、低水結合材比領域において任意の強度発現性を有するコンクリートの配合設計を確立した。また、強度と細孔径の関係を示すとともに、各種結合材を用いたコンクリートの圧縮、引張強度およびヤング率の予測式を示し、強度設計を確立した。

第3章は「ビーライト系セメントおよび高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの収縮挙動」であり、各種結合材を用いたコンクリートの自己収縮および乾燥収縮特性とひび割れ抵抗性に関する検討を行った。高粉末度の高炉スラグ微粉末で置換したコンクリートは高炉スラグ微粉末に含まれるSO₃量により自己収縮が抑制されること、および質量変化の抑制効果により乾燥収縮ひずみが抑制されることを示し、各収縮量の予測式を示した。各コンクリートの拘束応力および拘束ひずみの予測モデルを提案し、今後クリープの影響を詳細に検討することにより精度の高い予測が可能となることを示した。高強度領域のコンクリートのひび割れ発生確率は、従来、土木学会コンクリート標準示方書で示されているS-Rモデルによるひび割れ発生確率曲線ではなく、ワイブル分布を用いたひび割れ発生確率曲線により適切に評価できることを示し、ひび割れの設計方法を確立できた。

第4章は「ビーライト系セメントおよび高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの耐久性」であり、中性化については、水結合材比を0.3まで低減することにより中性化速度は低下し、特にビーライト系セメントやその一部を高炉スラグ微粉末で置換したコンクリートは、促進試験による中性化速度が促進試験後4週以降に極めて小さくなり、 $\sqrt{t}$ 則に従わないこと、および細孔構造と中性化の関連性を見出し、中性化速度を予測できる式を提案した。塩分浸透抵抗性は、高炉スラグ微粉末の使用により塩化物イオンの実効拡散係数が極めて小さくなり、細孔の緻密化の影響を受けること、および水結合材比から実効拡散係数を予測できる式を提案した。凍結融解抵抗性は、強度、細孔および気泡の影響を受け、強度が大きい場合でもある程度の空気は必要であることを示し、圧縮強度と空気量から凍結融解抵抗性を予測する方法を提案した。

第5章は「ビーライト系セメントおよび高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの配合設計方法」で、2章～4章までの設計論を統合したものであり、要求性能を満足する材料、配合の決定方法と、選定されたコンクリートの収縮ひび割れの照査と耐凍害性の照査方法を体系化した、低水結合材比領域における高耐久性コンクリートの配合設計方法を提案した。

第6章は総括であり、本研究で得られた結果を総括し、ビーライト系セメントおよび高炉スラグ微粉末の使用による高耐久性コンクリートの実用化に向けた今後の課題についての見解を述べた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 名 和 豊 春

副 査 教 授 三 上 隆

副 査 教 授 恒 川 昌 美

副 査 准教授 胡桃澤 清 文

学 位 論 文 題 名

ビーライト系セメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた コンクリートの長期耐久性設計

コンクリート構造物は、かつては限りなくメンテナンス・フリーな材料と考えられてきたが、近年では鋼材腐食や乾燥収縮ひび割れなどの早期劣化が顕在化しており、コンクリートの剥落事故が相次いで発生した。このため、近年では、コンクリートの耐久性への関心が高まっており、コンクリートの耐久性を向上するための対策が早急に求められている。

著者は、コンクリートの耐久性向上の方策として、従来からの対策であるセメント硬化体組織の緻密化を達成できる低水セメント比でのコンクリートの製造を可能とする材料の開発と同時に、今世紀の大きな課題である環境負荷低減も併せて実現できる材料を見出すことを研究の目的としている。そこでは、製造時の二酸化炭素排出量の低減が可能なビーライト系セメントと製鉄産業の副産物である高炉スラグ微粉末を組み合わせ、それぞれが有する長所を生かし、かつ初期強度発現の低減や収縮ひび割れの発生などの欠点を補完することによりコンクリートの高性能化を試みている。また、従来の強度主体の配合設計でなく、収縮ひび割れ抵抗性、中性化抵抗性、塩分浸透抵抗性および凍結融解抵抗性などの耐久性を重視したコンクリートの配合設計の手法についても提案を行っている。本論文はこれらの研究成果をまとめたものであり、全6章から構成されている。以下に各章の概要を述べる。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的について述べるとともに、既往の研究を概観し、本論文の構成について述べている。

第2章では、ビーライト系セメントと高炉スラグ微粉末を組み合わせたコンクリートの強度特性について検討しており、ビーライト系セメントの粉末度および高炉スラグの置換率、粉末度および SO_3 量を変化させることで任意の強度発現性が得られることを明らかにしている。また、養生温度が変化したときの圧縮強度は、アレニウス則に基づいた有効材齢により予測評価が可能であることを示した。さらに、コンクリートの引張強度およびヤング率についても材料特性を考慮した予測式を構築し、力学的性状に関する要求性能を満足する設計式を確立している。

第3章では、ビーライト系セメントと高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性について検討している。その結果、高炉スラグ微粉末に添加される SO_3 量が多い場合は材齢

初期に膨張挙動が生じ自己収縮ひずみが抑制され、さらに粉末度 6000 以上の高炉スラグ微粉末を用いた場合には質量変化の抑制効果により乾燥収縮ひずみが抑制されるという新知見を得るとともに、これらの材料特性や配合量を考慮した自己収縮量および乾燥収縮量の予測式を構築している。また、コンクリートの拘束試験を行い、収縮ひび割れの発生基準を定量化するとともに、ひび割れ発生確率についても検討している。その結果、従来の応力分布関数に正規分布を用いたひび割れ発生確率曲線は実験結果と一致せず、応力分布関数をワイブル分布としたひび割れ発生確率曲線によりひび割れ発生を適切に予測できることを示し、わが国で初めて低水セメント比領域での乾燥によるひび割れ制御設計方法を構築している。

第 4 章では、ビーライト系セメントおよび高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの耐久性として、中性化抵抗性、塩分浸透抵抗性、凍結融解抵抗性を取り上げ検討している。その結果、水結合材比を 30% まで低減しても中性化速度は極めて小さくなるものの進行し、特に高炉スラグ微粉末で置換したコンクリートは $\sqrt{t}$ 則に従わないことを明らかにし、従来の各種設計指針で提示されていなかった低水結合材比における中性化速度を明らかにし、長期的な耐久性の予測を可能にしている。また、塩分浸透抵抗性として、粉末度 6000 以上の高炉スラグ微粉末を高置換することにより微細な空隙孔が増大し、塩分浸透抵抗性が極めて向上することを示すとともに、材料・調合を考慮した実効拡散係数を予測する式を提案している。さらに、ビーライト系セメントの高粉末化および高炉スラグ微粉末を用いることにより凍結融解抵抗性が向上することを確認するとともに、フレッシュコンクリートの空気量から耐久性指数を予測する式を提案している。

第 5 章では、前章までに構築した各種の設計式を統合したコンクリートの耐久設計方法を提案している。そこでは、収縮ひび割れ抵抗性や中性化抵抗性、塩分浸透抵抗性、凍結融解抵抗性などの耐久性に対する要求性能を満足するための材料および配合の選定方法と照査方法について体系化が行われている。

第 6 章は結論であり、本研究で得られた知見を総括するとともに、今後の展望と課題について言及している。

これを要するに、著者はコンクリート構造物の耐久性向上に資する高耐久性コンクリートの材料・配合設計方法を構築したものであり、建設資源工学およびコンクリート工学に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。