

## 学位論文題名

## 圧縮及び引張応力下におけるコンクリートの塩分浸透性

## 学位論文内容の要旨

コンクリート構造物の多くは、重要な社会基盤を構成するものであり、それらの耐久性を向上させることは最優先の課題である。海洋構造物はもちろんのこと、多くのコンクリート構造物においては、塩化物イオンの浸透・拡散により、鉄筋の腐食・ひび割れあるいはかぶりコンクリートの剥落等の劣化が生じ、性能および使用期間の低下を招くこととなる。実環境において、コンクリート構造物には、プレストレスを含む種々の構造外力、風荷重、地震力などによる多くの応力が生じている。その応力の影響により生じるひび割れなどを含む内部微細構造の変化は、コンクリート中への物質移動に影響を及ぼすと考えられる。さらにその結果、構造物の耐久性能および、供用期間の低下につながるものと考えられる。つまり、応力作用の影響を考慮し、コンクリートの内部構造の変化を的確に捉えた塩分浸透性の検討が必要であると考ええる。しかしながら、応力環境下での塩分浸透性に関する報告は非常に少なく、実環境下におけるコンクリート構造物の塩分浸透性の把握は難しい状況にある。

本研究ではまず、応力作用の無い状態において、種々の混和材料を混入したコンクリートの塩分浸透性に関して検討を行い、短繊維の混入は混入率よりも長さの違いによる影響を受けることを示している。また高炉スラグ微粉末の影響は、混入率の増加に伴い拡散係数が減少することを示している。さらにフライアッシュを一般に用いられる量および、それよりも多量に内割置換した場合の塩分浸透性を比較し、前者では普通コンクリートと同等であるのに対して、後者では置換率の増加に伴い拡散係数が著しく増加することを示している。次いで応力作用の影響として、圧縮および引張応力が作用した状態における各種コンクリートの塩分浸透性に関して検討を行い、応力作用の有無により拡散係数は異なることを明らかにしている。短繊維を混入したものは、応力作用下において塩分浸透性を抑制する傾向にあることを示し、高炉スラグ微粉末の混入は、応力作用下においても有効であることを明らかにしている。フライアッシュに関しては、圧縮応力下における相対拡散係数は普通コンクリートよりも低くなるが、引張応力作用下においては普通コンクリートと同等となることを明らかにしている。さらに本研究では、応力作用下におけるひび割れ観察等を実施し、応力作用の有無により、内部微細ひび割れの性状が異なることを明らかにし、これが塩分浸透性に大きく影響を及ぼすことを示している。

本論文は、以下の8章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章では、本研究の背景および目的、さらに関連する既往の研究を説明し、本研究の位置付けを示すとともに、本論文の構成を示している。

第2章では、コンクリートへの塩分浸透性を検討するにあたり、まずセメント系材料中へのイオンの移動に関する基本メカニズムおよび、セメント系材料に対してそれらを適用した既往の試験方法等について述べるとともに、各試験法の関連性について検討している。

第3章では、本研究で実施した各種試験の特性について詳しくまとめている。特に荷重を載荷することが可能な塩分浸透試験装置を開発し、その特性について詳しく述べている。さらに本研究で採用したコンクリート内部の微視的变化を検討する手法について述べている。

第4章から第6章では、本研究で実施した塩分浸透性試験の結果についてまとめている。まず第4章では、応力作用の無い状態におけるコンクリートの塩分浸透性を検討したものであり、普通コンクリートのほかに混和材の影響について検討を行っている。その結果、短繊維を混入したコンクリートに関しては、混入率の違いによる影響は少ないことが明らかとなり、また、繊維長の長いものの方が有効である傾向を明らかにしている。また高炉スラグ微粉末の置換率の増加に伴い、拡散係

数が大きく減少することを指摘している。さらにフライアッシュを混入したコンクリートにおいて、一般に用いられている内割置換率 10～20% と同程度の置換率の場合は、普通コンクリートと同程度の性能を示すが、それを超過する多量のフライアッシュを混入した場合は、置換率の増加に伴い拡散係数が著しく増加することを示している。

第 5 章では、圧縮応力下における各種コンクリートの塩分浸透性を検討している。繊維混入率 0.1%vol. において、相対拡散係数は繊維無混入のものよりも抑制されることを明らかにしている。高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの相対拡散係数は無混入のものよりも高くなるが、拡散係数の絶対値は圧縮応力下においても低い値を示し、圧縮応力状態においても高炉スラグ微粉末の有効性が確認されている。フライアッシュの混入率の違いによらず圧縮応力の増加に伴う拡散係数の変化挙動は類似しているが、相対拡散係数は、無混入のものよりも抑制されており、その有効性が示されている。

第 6 章では、コンクリートの塩分浸透性に及ぼす引張応力の影響を検討している。その結果、引張応力が作用する状態における拡散係数の変化は、圧縮応力状態とは異なり、応力強度比の増加に伴い拡散係数も増加することを明らかにしている。短繊維を混入することにより、相対拡散係数を抑制することが可能であり、その傾向は混入率 0.1%vol. において顕著であることを明らかにしている。また高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートにおいては、引張応力の増加に伴う相対拡散係数は無混入のものよりも高い値を示すが、拡散係数の絶対値は低く、圧縮応力作用下と同様、引張応力が作用する状態においても高炉スラグ微粉末の混入による効果が示されている。フライアッシュを多量に置換した場合、非常に低品質なコンクリートに関わらず、一部の値を除き、普通コンクリートと同程度の相対拡散係数を示すが、拡散係数の絶対値は普通コンクリートよりも高い値となる。つまり、引張応力下における拡散係数および相対拡散係数に対して、フライアッシュを混入することによる顕著な改善効果は認められないことを明らかとしている。

第 7 章では、第 4 章から第 6 章で述べた塩分浸透の結果と内部欠陥の関連性について検討を行っている。コンクリート中の内在的および外力による欠陥について実験的考察を行い、拡散係数の変化に及ぼす影響について検討を行っている。外力による欠陥については、圧縮応力作用下でのひずみ変化に基づく微細ひび割れ面積、水銀ポロシメータの測定に基づく細孔分布および、応力作用下におけるコンクリートの顕微鏡観察によるひび割れ性状の観察を基に考察を行っている。その結果、圧縮応力に伴う微細ひび割れ面積は、短繊維の混入および高炉スラグ微粉末 70% 混入時に低下し、抑制される傾向にあることを示している。またフライアッシュを置換したものは、置換率の増加とともに同一応力強度比におけるひび割れ面積が低下することを示している。さらに顕微鏡によるひび割れ性状の観察結果から、応力の有無によりひび割れ性状は異なることを明らかとしている。

第 8 章は、本論文の総括であり、本研究により得られた結果をまとめ、結論を述べるとともに、今後の展望について述べている。

# 学位論文審査の要旨

主 査 助 教 授 堀 口 敬  
副 査 教 授 大 沼 博 志  
副 査 教 授 杉 山 隆 文  
副 査 教 授 千 歩 修

## 学 位 論 文 題 名

### 圧縮及び引張応力下におけるコンクリートの塩分浸透性

近年、国の内外を問わずコンクリート構造物の耐久性低下が深刻な問題となっている。コンクリート構造物は、『堅固』や『頑丈』の代名詞となるほど長い実績のある耐久性に優れた材料によって作られている。従って適切な施工と管理を行えば長期間の耐久性を確保することは難しいことではない。しかしながら、コンクリートは同時に、複雑な化学反応を経て強固な材料となる人工の建設材料であり、十分な耐久性を確保するためには注意深い製造管理と適切な維持が必要であり、さらには耐久性に関する科学的な材料特性の把握が必要となる。

コンクリート中の過剰な塩分の浸透は鉄筋の腐食を加速させ、コンクリート構造物の性能を急激に低下させる。コンクリート中の塩分浸透はコンクリート構造物が対面する耐久性の低下に関する典型的な現象である。コンクリート構造物の耐久性を確保するためには、実際の環境に対応した塩分浸透特性の把握が非常に重要となる。ところが、コンクリートの塩分浸透特性に関しての耐久性の予測手法の確立や実環境に即した外力の影響を考慮した研究などは非常に少ない。

本論文は、コンクリート構造物の耐久性に大きく影響するコンクリートの塩分浸透性について、電気泳動法による非定常状態の試験方法を中心に、外力の影響がどの程度塩分浸透性に寄与するかを詳細に検討している。さらに、コンクリートの新しい補強材としてのビニロン短繊維による補強効果について、外力によるマイクロクラックの発生の可能性や繊維混入による空隙構造の変化等を考慮し、コンクリートの耐久性向上に対する高性能化を検討したものである。

応力作用を考慮しない状態におけるコンクリートの塩分浸透性に関して、普通コンクリートのほかに混和材の影響について検討を行っている。その結果、短繊維を混入したコンクリートに関しては、混入率の違いによる影響は少ないことが明らかとなり、また、繊維長の長いものの方が有効である傾向を明らかにしている。また高炉スラグ微粉末の置換率の増加に伴い、拡散係数が大きく減少することを指摘している。さらにフライアッシュを混入したコンクリートにおいて、一般に用いられている内割置換率 10~20% と同程度の置換率の場合は、普通コンクリートと同程度の性能を示すが、それを超過する多量のフライアッシュを混入した場合は、置換率の増加に伴い拡散係数が著しく増加することを示している。

圧縮応力下における各種コンクリートの塩分浸透性を検討し、繊維混入率 0.1%vol. において、相対拡散係数は繊維無混入のものよりも抑制されることを明らかにしている。高炉スラグ微粉末を用

いたコンクリートの相対拡散係数は無混入のものよりも高くなるが、拡散係数の絶対値は圧縮応力下においても低い値を示し、圧縮応力状態においても高炉スラグ微粉末の有効性が確認されている。フライアッシュの混入率の違いによらず圧縮応力の増加に伴う拡散係数の変化挙動は類似しているが、相対拡散係数は、無混入のものよりも抑制されており、その有効性が示されている。

コンクリートの塩分浸透性に及ぼす引張応力の影響を検討し、引張応力が作用する状態における拡散係数の変化は、圧縮応力状態とは異なり、応力強度比の増加に伴い拡散係数も増加することを明らかにしている。短繊維を混入することにより、相対拡散係数を抑制することが可能であり、その傾向は混入率 0.1%vol. において顕著であることを明らかにしている。また高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートにおいては、引張応力の増加に伴う相対拡散係数は無混入のものよりも高い値を示すが、拡散係数の絶対値は低く、圧縮応力作用下と同様、引張応力が作用する状態においても高炉スラグ微粉末の混入による効果が示されている。フライアッシュを多量に置換した場合、非常に低品質なコンクリートにも関わらず、一部の値を除き、普通コンクリートと同程度の相対拡散係数を示すが、拡散係数の絶対値は普通コンクリートよりも高い値となる。つまり、引張応力下における拡散係数および相対拡散係数に対して、フライアッシュを混入することによる顕著な改善効果は認められないことを明らかとしている。

塩分浸透の結果とコンクリート中の内在的および外力による欠陥について実験的考察を行い、拡散係数の変化に及ぼす影響について検討を行っている。外力による欠陥については、圧縮応力作用下でのひずみ変化に基づく微細ひび割れ面積、水銀ポロシメータの測定に基づく細孔分布および、応力作用下におけるコンクリートの顕微鏡観察によるひび割れ性状の観察を基に考察を行っている。その結果、圧縮応力に伴う微細ひび割れ面積は、短繊維の混入および高炉スラグ微粉末 70% 混入時に低下し、抑制される傾向にあることを示している。またフライアッシュを置換したものは、置換率の増加とともに同一応力強度比におけるひび割れ面積が低下することを示している。さらに顕微鏡によるひび割れ性状の観察結果から、応力の有無によりひび割れ性状は異なることを明らかとしている。

これを要するに、著者は、コンクリート構造物の鉄筋の腐食に対する耐久性を向上するために不可欠なコンクリートの塩分浸透性に関して実構造物に即して、外力が作用する状態の挙動を明らかにするとともに、繊維補強の塩分浸透抑制効果を指摘するなどの新知見を得たものであり、コンクリート工学および維持補修工学の発展に寄与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。