

学 位 論 文 題 名

Chloride penetration into fiber reinforced concrete undre loading

(外力が作用する繊維補強コンクリートの塩分浸透性)

学位論文内容の要旨

Concrete structures in marine environment are subjected to chloride penetration, which significantly degrades the structural performance and their lifetime. When the critical concentration of chloride ions in the reinforcement is reached, corrosion of the reinforcement starts. The corrosion of the steel reinforcement rapidly degrades the performance of the structures. Therefore, it is necessary to examine the chloride penetration rate into concrete structure in actual condition.

The influence of loading on the chloride penetration into concrete was investigated because it represents the actual condition of concrete structures at service time. During the service period, concrete structures are subjected to its self weight, service load such as traffic load or wind load and also accidental loading such as earthquake or impact load. These loading conditions could change the chloride penetration rate into the concrete structure and consequently change the service life time of the structure.

Inclusion of fibers into concrete has some benefits that include increased energy absorption, fracture toughness, and so on. Synthetic fiber such as polypropylene fiber has been recommended for application in marine structures. The combination of polypropylene short fiber with steel reinforcement is expected to improve the behavior of concrete material by increasing its ductility and energy absorption capacity. Moreover, fiber reinforced concrete under loading could perform better to resist the chloride penetration as the fiber have a crack bridging effect that reduces the crack propagation.

The dissertation is composed of eight chapters as follows:

Chapter 1 presents the introduction, background and objective of this research.

Chapter 2 contains a literature review of the test methods about the measurement of chloride penetration into concrete. The test conducted in this study which based on NT Build 492 - non-steady state chloride migration test with modification in the loading condition was also described here.

Chloride penetration into fiber reinforced concrete under non loading application was discussed in Chapters 3 to 5. The effects of fiber content, air content, fiber type and fiber orientation based on the casting direction, on the durability performance of the fiber reinforced concrete against chloride penetration were discussed in Chapter 3. Three types of different shape and length fiber were used to make fiber reinforced concrete. Contrary to the other findings that showed an increase in the chloride penetration due to inclusion of fiber, the study showed that the inclusion of short polypropylene fiber into concrete did not change the chloride penetrability of fiber reinforced concrete with different volume fractions. However, the chloride penetration would increase if excessive fiber was included into concrete that could reduce the soundness of the concrete. The effect of air content was also found to be insignificant to the chloride penetration into fiber reinforced concrete. Furthermore, there is a reduction of chloride penetrability for long fiber reinforced concrete depending on its orientation in the concrete.

Chapter 4 discusses the relation of the pore structure and durability properties shown by chloride penetration. The pore structure of concrete was investigated also to clarify the relation between chloride penetration and pore properties. The pore properties were measured by Mercury Intrusion Porosimetry (MIP). The study shows that the chloride penetration in concrete is not only influenced by the pore size distribution but also by the pore connectivity. With the increase of pore connectivity, chloride penetration also increases as the chloride would penetrate through this connected porosity.

In Chapter 5, methods to reduce the chloride penetration into concrete by means of orienting the long fibers to resist chloride penetration and the use of silane as water-repellent treatment in the concrete were discussed. The result showed a reduced chloride penetration for fiber reinforced concrete when the long fiber was oriented in the direction perpendicular to chloride penetration and an excellent chloride penetration resistance when the surface of concrete was treated with water repellent agent.

Chapters 6 and 7 discuss the effects of loading on the chloride penetration into plain concrete and fiber concrete. Chapter 6 presents the result of chloride penetration into three different types of fiber reinforced concrete under static compressive and tensile loading. The results from the experiment showed that there was a slight reduction in the chloride penetration under low level of compressive stress while an increase in the chloride penetration into concrete was found at higher level of compressive stress. Plain concrete give the highest increase of chloride penetration at higher compressive loading. Different fiber types have different resistance in the chloride penetration under loading. Shorter fibers have better performance against chloride penetration under loading as they were better dispersed in concrete. The effect of the tensile loading was also conducted in the experiment. The result showed that there was a significant increase in chloride penetration for all types of concrete even at low levels of tensile stress. Nevertheless, fiber reinforced concrete still has a better performance compared to plain concrete under tensile loading.

The experiment also showed the influence of the aggregate size on the chloride penetration in concrete under loading. Larger aggregate size showed an increase in the chloride penetration at a loading of 50% of the maximum compressive strength while smaller aggregate size showed a small increase even at 80% of the maximum compressive strength.

Chapter 7 presents the influence of cyclic loading on the chloride penetration into concrete. After being subjected to cyclic loading, the specimen was tested for chloride penetration under applied compressive loading. Chloride penetration increases even more when the specimen was subjected to cyclic loading compared to static loading condition. The penetration rate increases with an increase in the number loading cycles when the concrete was subjected to higher level cyclic loading. Under moderate level of cyclic loading, fiber reinforced concrete showed a reduced increase in the chloride penetration with increase in the loading cycle while the plain concrete showed a continuous increase with increase in the loading cycles. For low level cyclic loading, the chloride penetration increases compared to static loading, however there was no increase in chloride penetration with increase in the loading cycle.

Chapter 8 concludes the dissertation with the findings in this study and recommendations for future researches. The changes in the chloride penetration when concrete is subjected to loading shows the need to consider the effect of actual loading condition in the service life assessment of the structure exposed to marine or other salt-laden environment. Based on the loading distribution in the structure, the member subjected to high stress concentration would have higher possibility of performance degradation due to corrosion and the inclusion of fibers in concrete structures is very beneficial not only in improving its mechanical properties but it also increasing its durability. The effect of loading on the chloride penetration into the concrete structure should be included in the life assessment as it could also have a high influence on the life cycle costs (LCC) of concrete structures.

学位論文審査の要旨

主 査	助 教 授	堀 口	敬
副 査	教 授	佐 伯	昇
副 査	教 授	大 沼	博 志
副 査	教 授	千 歩	修

学 位 論 文 題 名

Chloride penetration into fiber reinforced concrete undre loading

(外力が作用する繊維補強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。従来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。すなわち、外力の影響では静的な圧縮荷重と引張荷重だけではなく、繰返し荷重による動的な外力下における塩分浸透特性について検討を行っている。さらに、コンクリートの新しい補強材としてのポリプロピレ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。

本論文は 8 章から構成されており、各章の概要は以下のように要約される。

第 1 章は序論であり、本研究の背景および目的、意義などを述べている。

第 2 章では、塩分浸透試験方法に関する国内外の既往研究をまとめ、本研究で採用した試験方法の特徴と提案する荷重載荷方式塩分浸透試験方法について述べている。提案した塩分浸透試験は非定常状態における電気泳動法が基礎となっており、ヨーロッパでは既に多くの実績を有して

いる規格試験 NT Build492 である。国内では未だ研究例は少ない試験法である。

第 3 章から第 5 章は、外力を考慮しない状態での繊維補強コンクリートの塩分浸透性について、繊維補強コンクリートの配合因子の影響、コンクリートの微細構造との関係、二種類の代表的な耐浸透性の改善手法の提案について検討を行っている。続いて、第 6 章と第 7 章で、外力を考慮した状態での普通コンクリートと繊維補強コンクリートの塩分浸透特性について、静的な外力と動的な外力の影響とに分けて検討を行っている。

第 3 章では、繊維の種類と形状や繊維の配向、繊維混入率、連行空気量が繊維補強コンクリートの耐久性の一つである塩分浸透性に関する影響について検討している。ポリプロピレン短繊維の適切な混入はコンクリートの塩分浸透特性に悪影響を与えない事を提示し、従来報告されている繊維の悪影響は必ずしも正しくないことを指摘している。しかしながら、繊維を過剰に混入した場合は悪影響が認められ、適切な配合が重要であることを示している。

第 4 章では、コンクリート中の空隙構造と塩分浸透性について検討している。水銀圧入法(MIP)による繊維補強コンクリートの空隙構造の測定結果から、塩分浸透性に影響する空隙構造は従来指摘されている空隙分布だけではなく、空隙の連結特性に影響することを明らかにしている。

第 5 章では、コンクリートの塩分浸透性に対する改善手法を表面保護による手法とコンクリート内部の品質改善法の大きく二種類に分類し、繊維補強コンクリートにおける 2 種類の適切な改善手法を提案している。シラン樹脂による表面含浸保護により塩分浸透性が格段に改善されることを示し、品質改善では混入する短繊維の配向を制御することにより大きな改善が可能であることが示されている。

第 6 章では、静的な外力が繊維補強コンクリートの塩分浸透性に及ぼす影響について検討を行っている。試験の結果から、低圧縮応力レベルが作用する塩分浸透特性では僅かな浸透係数の減少が認められるが、高圧縮応力レベルが作用する場合には浸透係数が増加する傾向を示す。この傾向は普通コンクリートが最も顕著であり、繊維補強コンクリートでは繊維長の短いもののほど有効である。引張応力が作用する塩分浸透性では、低い応力レベルから既に顕著な浸透係数の増加が認められるものの繊維補強コンクリートの有効性が認められることが示されている。

第 7 章では、動的な外力が繊維補強コンクリートの塩分浸透性に及ぼす影響について明らかにしている。全体的に動的圧縮载荷による浸透係数は繰返し回数の増加および応力レベルの増加とともに増加し、高応力レベルの動的载荷では特に顕著な直線的な増加を示す。応力レベルが圧縮強度の 50%程度までは浸透係数の増加を繊維の混入により効果的に抑制することが可能であるが、それ以上の応力レベルでは繊維混入効果は認められなくなる。さらに、繰返し回数が 1000 サイクル以上からの急激な浸透係数の増加を繊維の混入により抑制することが可能であることを明らかにしている。

第 8 章では、各章で得られた知見についてまとめ、本研究の総括を行った。

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。