

博士學位論文

(論文内容の要旨及び論文審査の要旨)

第16号

令和4年4月

八戸工業大学

は し が き

博士の学位を授与したので、学位規則（昭和28年文部省令第9号）
第8条の規程に基づき、その論文の内容の要旨及び論文審査の結果の
要旨をここに公表する。

目 次

課程博士

学位記番号	博士の 専攻分野の 名称	氏 名	論 文 題 名	頁
博 第 5 8 号	博士（工学）	邴 艳华	Service Life Prediction and Economic Evaluation of Concrete Treated by a Compound Penetrant in Marine and Severe Cold Environment (厳しい寒冷地海洋環境における混合型含浸材を用いたコンクリートの耐用年数予測と経済的評価)	1

氏名	邴 艳华
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	博 第58号
学位授与年月日	令和4年3月18日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	Service Life Prediction and Economic Evaluation of Concrete Treated by a Compound Penetrant in Marine and Severe Cold Environment (厳しい寒冷地海洋環境における混合型含浸材を用いたコンクリートの耐用年数予測と経済的評価)
論文審査委員	(主査) 八戸工業大学准教授 迫井 裕樹 (副査) 八戸工業大学教授 阿波 稔 (副査) 八戸工業大学教授 月永 洋一

論文の内容の要旨

現在、多くの社会基盤構造物が老朽化に直面しており、維持管理・更新が必要となる社会基盤構造物は、今後さらに増加する。過酷な供用環境下において、コンクリートの耐用年数を効果的かつ経済的に延長することは、技術者にとって非常に重要な課題の一つである。

本論文では、混合型含浸材を用いたコンクリートの維持管理について検討を行った。第一に、室内試験により、コンクリートの各種性能に及ぼす含浸材の影響を検討した。次いで、20年間に渡る実構造物（苫小牧防波堤）の調査に基づき、寒冷地海洋環境下におけるコンクリートへの混合型含浸材の適用性について評価・検討を行った。さらに、それらの結果を用いて、ケース・スタディとして、実環境における残存性能およびLCC（Life Cycle Cost）の推定を行った。

本研究で用いた混合型含浸材は、コンクリート表面にけい酸塩系（けい酸塩ナトリウム）含浸材を塗布した後、シラン系含浸材を塗布するものである。

含浸材塗布後のコンクリートに対して、表面吸水速度、表層透気性、pH、細孔特性（細孔容積および細孔分布）および凍結融解抵抗性の測定を行った。これらの検討結果より、以下のことが示された。

含浸材を塗布したコンクリートは、無塗布のものと比較して、

- ① 表面吸水速度：大幅に減少（60.97%）
- ② 表層透気試験：ほぼ同程度。含水率の減少に伴い、透気係数がやや増加傾向
- ③ 試験時（材齢390日、含浸材施工後330日）の硬化体中のpHが増加
- ④ 表層10mmまでにおける40- 1000nmの細孔が大幅に減少

混合型含浸材の使用は、コンクリート表面をより緻密化し、かつ疎水層を形成することとなる。この疎水層は、遮水性と透気性を有する。混合型含浸材の塗布量について検討を行い、塗布前のコンクリートの表層品質に基づく適切な含浸材塗布量の提案を行った。含浸材塗布前のコンクリートの表面吸水速度が低く ($\leq 0.12 \text{ ml/ m}^2/\text{s}$)、表層品質が高い場合、含浸材塗布量は、推奨量の50%に低減することが可能である。

苫小牧防波堤では、寒冷海洋環境における混合型含浸材を用いたコンクリート構造物の調査研究を行った。この調査研究では、対象構造物の建設後、3、12 および 20 年経過後に、対象鉱物の含浸材塗布部および無塗布部よりコア供試体を採取し、各種試験の実施およびその結果に基づく残存性能の試算と維持管理計画・LCC の分析を行った。

対象構造物の建設後 3、12 および 20 年経過後に、含浸材塗布部および比較部（無塗布部）より採取したコア供試体を用いて、中性化深さ、塩化物イオン濃度分布、pH、水銀圧入式ポロシメータ（MIP）による細孔特性、含浸材再処理の有無による凍結融解（スケーリング）抵抗性の測定を実施した。これらの実験結果に基づき、対象構造物の余寿命の算出および維持管理計画・LCC の試算・分析を行った。

中性化、塩化物イオン浸透、凍結融解作用に対する対象構造物の余寿命を、決定論的計算法、確率と信頼性法、モンテカルロ法それぞれにより求めた。算出結果より、

- ① 対象環境では、含浸材塗布により中性化に対する寿命が70%程度短縮される。ただし、中性化の進行は遅く、コンクリートのかぶり厚さを50mmとすると、含浸材を塗布したコンクリートの中性化に対する寿命は最大170年となり、一般的な設計目標寿命よりも長くなる。
- ② 混合型含浸材の使用により塩化物イオン浸透性は著しく低減され、対象環境下におけるコンクリートの寿命は、含浸材無塗布の場合と比較して1.1～3.5倍程度となる。
- ③ 寒冷海洋環境下でのコンクリートの寿命は、塩化物イオン作用下での凍結融解抵抗性により決定される。つまり、含浸材の塗布により中性化抵抗性が低下するが、塩化物イオン作用下での凍結融解抵抗性が向上し、結果として耐用年数の増加につながる。
- ④ 計算においても、かぶり厚さとその品質はコンクリートの寿命に大きな影響を及ぼすことが示された。かぶり厚さが20mm以上である場合、保証率の10%増に対して、中性化による寿命は平均37年増加する。
- ⑤ 本研究で検討した混合型含浸材は、塩化物イオンの浸透および凍結融解作用に対する耐久性を著しく向上させるが、中性化に対する耐久性を向上させるものではない。したがって、中性化が進行しやすい乾燥した暖かい環境下での使用には適していない。
- ⑥ 室内における凍結融解抵抗性試験結果より、混合型含浸材の再塗布は、著しいスケーリング発生期間を約20～65サイクル遅らせる可能性が確認された。
- ⑦ スケーリング深さが2.5mmに達するまでに混合型含浸材による維持管理を行うことで、LCCが少なくとも50%効果的に削減することが可能である。構造物建設直後に複合型含浸材を施工した場合、2次メンテナンス（含浸材の再塗布）期間は33年以内とする必要があり、建設当初に含浸材を施工していない構造物の場合は、17年以内

する必要が示された。

本研究で検討した具体的な 3 つの試算のうち、コンクリートの寿命予測においては、モンテカルロ法が推奨される。

室内試験による凍結融解サイクル数（ASTM-C672 に基づく）が、実環境下における凍結融解サイクル数の何サイクルに相当するかを決定することは非常に困難であるが、耐久性予測・維持管理計画を検討する上で重要な事項の一つである。

ABSTRACT

At present, many infrastructures face the phenomenon of ageing year by year, and more and more infrastructures need to be maintained and updated. How to effectively and economically prolong the service life of concrete in harsh service environments is a significant issue facing our engineers today. It is also the obligatory social responsibility of our professionals. This thesis studies the maintenance effect of a group of composite penetrants applied to the concrete surface. First, through indoor experiments, the influence of impregnants on the performance of concrete was studied. Secondly, through the follow-up study of the actual project, Tomakomai Dam, for nearly 20 years, the dynamic evaluation of the application of this group of composite impregnants in the cold ocean environment was carried out. Moreover, its life span and economy are estimated.

This set of composite impregnation is composed of two impregnants: a sodium silicate solution applied on the surface of the concrete as the bottom layer and a silane solution applied on the sodium silicate solution as the upper layer.

- ① Concrete surface water absorption, air permeability, pH, surface micro-pore size distributions, and the anti-salt freezing-thawing properties of concrete after applying the impregnating agents were conducted indoor experiments. The results show that: Compared with the untreated groups after applied the impregnants, the concrete surface: The surface water absorption is significantly reduced by 60.97%;
- ② The air permeability is almost unaffected. When the concrete surface water content decreases slightly, there is even a slight tendency to increase;
- ③ pH increases at the time of testing (390 days after the test block is formed, about 330 days after the impregnant is applied) ;
- ④ The distribution of the pores in size range of 400-1000nm in the surface layer (0-10mm) is significantly reduced in the 12th year;

The composite impregnants can make the concrete surface denser and form a hydrophobic film on the surface of the concrete. The hydrophobic film has water-blocking and air-permeable properties. The dosage of composite impregnant was studied, and a reasonable dosage of penetrant was proposed according to the quality conditions of concrete: the water absorption of concrete is low before treatment (surface water coefficient is ≤ 0.12 (ml/m²/s)). When the quality is good, the dosage can be 50% of the recommended dosage.

In the 3rd, 12th and 20th years after the construction of Tomakomai, core samples from the part of Tomakomai project treated with impregnant and the comparison part where the impregnant is not applied were taken. The samples were delivered to the laboratory for the following experiments: carbonization

depth determination, chloride ion diffusion, pH measurement, concrete surface micropore size measurement (MIP), freeze-thaw and freeze-thaw experiments after retreated. Based on the data from the above tests, the life expectancy of Tomakomai was calculated, the selection and economic of maintenance plans and was analyzed.

Through deterministic calculation method, probability and reliability method and Monte Carlo method, the life of Tomakomai dike under carbonization, chloride erosion and freeze-thaw cycles was calculated, respectively. The results show that:

- ① In the marine environment, applying this set of impregnants on the concrete surface will shorten its life by about 70% under carbonization erosion. However, the progress of concrete carbonization is slow. When the concrete cover thickness reaches 50mm, the carbonization life of the treatment concrete can reach up to 170 years which is generally longer than the concrete designed target life.
- ② The impregnants can effectively reduce the corrosion of chloride ions and extend the life of concrete in this situation to 1.1-3.5 times the group without treatment.
- ③ In the 20th year, the alkalinity of the treated concrete surface is lower than that of the untreated group, and It is consistent with the conclusion that the concrete life is shortened by applying penetrants under the carbonization environment.
- ④ In the cold ocean environment, concrete life is determined by the deterioration of the salt-freezing-thawing. Therefore, although the impregnating agents on the concrete surface will lose part of the carbonization life, it is helpful to extend the concrete life in the salt-freezing-thawing erosion environment and finally extend the actual concrete service life.
- ⑤ The calculation also shows that the construction quality related to the thickness of the concrete protective layer has a significant impact on the life of the concrete. If the construction quality improves, the probability of the concrete cover construction deviation of 10mm is reduced from 15% to 5%; the guaranteed rate is increased from 85% to 95%, the life under chloride ion attack can be extended by 10%, and the concrete carbonization life will be significantly improved. When the concrete cover is more than 20mm (30mm in the treatment groups), when the guaranteed rate is increased by 10%, the total carbonization life of the concrete can be prolonged by an average of 37 years. The untreated groups are slightly longer than the treatment groups.
- ⑥ Different impregnating agents should be used for concrete under different service environments. As far as the conclusions of this article are concerned: Impregnant used in this study significantly improve the resistance of concrete to chloride corrosion and freeze-thaw deterioration, but it is not conducive to the resistance to carbonization. Therefore, they are not suitable for the dry and warm environment easily corroded by carbon dioxide.
- ⑦ The pore size larger than 1000 nm distribution of the concrete surface layer is small at the 12th year. However, It increased a lot in the 20th year with the passage of service years, indicating that the effect

of the impregnants is gradually weaker by year.

- ⑧ The re-application of the compound impregnants can delay the appearance time of concrete rapid scaling for about 20 to 65 cycles under salt-freezing-thawing (ASTM-C 672) erosion in indoor experiments.
- ⑨ The use of composite penetrant maintenance before the scaling depth reaches 2.5 mm can effectively reduce the life cycle cost by at least 50%. For the infrastructures treated with composite penetrant in the construction year, the secondary maintenance time should be ≤ 33 years. For the infrastructures without maintenance in the construction year, the maintenance interval should be ≤ 17 years. The impregnant can make the concrete "freeze age" for 17 years.
- ⑩ The calculation also shows that the construction quality related to the thickness of the concrete protective layer has a significant impact on the life of the concrete. If the construction quality improves, the probability of the concrete cover construction deviation of 10mm is reduced from 15% to 5%; the guaranteed rate is increased from 85% to 95%. At this time, the concrete carbonization life will be significantly improved. When the concrete cover is more than 20mm (30mm in the treatment groups), when the guaranteed rate is increased by 10%, the total carbonization life of the concrete can be prolonged by an average of 37 years. The untreated groups are slightly longer than the treatment groups.

Among the three concrete life calculation methods, the Monte Carlo method is recommended. This method not only considers the random distribution characteristics of the calculated parameters and the failure probability of the material but also has a high degree of computerization, and the calculation speed and calculation accuracy are also more excellent than the other two methods.

論文の審査結果の要旨

近年、積雪寒冷地域におけるコンクリート構造物の耐久性確保・維持管理計画の重要性が高まっている。コンクリート構造物の耐久性を低下させる要因の多くは、外部周辺環境からの劣化因子の浸入に起因するものが多く、耐久性確保のためにはコンクリート構造物の表層品質の確保が重要となる。外部からの劣化因子の浸透を抑制し、耐久性向上を図るための一手法として、含浸材による表層改質が注目されている。既往研究により、表面含浸材を用いることによる耐久性向上効果は確認されている。一方で、含浸材はその種類が多岐に渡ることから、その使用法、耐久性向上効果には差異が生じる。それら検討の多くは室内試験に基づくものであり、表面含浸材を用いたコンクリートの実環境における効果については、不明な点が多い。さらに、含浸材を用いることによる効果の一つとして、構造物の維持管理を含めたライフサイクルコストの低減が挙げられるが、含浸材施工による耐久性向上効果とライフサイクルコストに関する検討も少ないのが現状である。本論文は、実構造物の維持管理計画に資する資料を得ることを目的として、実環境における含浸材の耐久性向上効果、その継続性と含浸材再施工による効果の再付与について検討を行ったものである。

本研究では、積雪寒冷地域における海洋構造物を対象として、反応型けい酸塩系表面含浸材とシラン系含浸材の混合型含浸材を用いた長期的な耐久性および、対象構造物から採取したコア供試体を用いた含浸材再施工がその後の耐久性に及ぼす影響を検討した。さらに、それら検討結果を用いてライフサイクルコストの試算を行い、含浸材施工の有無および含浸材再施工による効果の再付与が、実構造物の維持管理に及ぼす影響について評価・検討を行った。その結果、過酷な環境下における実構造物の含浸材による耐久性向上効果を示すとともに、ライフサイクルコストに基づく含浸材再施工の時期に関する効果・影響を評価・検証した。

本研究で得られた成果は、将来的に予想される技術者不足および、今後ますます増加することが想定される構造物の維持管理において、効率的かつ適切な維持管理計画立案のための基礎資料として多くの重要な知見を示している。

よって、本論文を博士（工学）の学位論文として合格と認める。

最終試験の結果の要旨

令和4年2月3日、論文審査員および関係教員出席のもと、学力確認のための試問を行った。その試問、特別研究を通じて、本人は社会基盤工学に関する十分な学力・専門知識、高度な研究者・専門技術者としての能力を有することを確認した。よって、最終試験に合格と判断した。

