

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目
(Dissertation Title)

Influence of Surface Bugholes on Freeze-Thaw Degradation of Tunnel Lining Concrete

氏 名 (Name)

Hu Liangjun

Bugholes on concrete surface are generally considered as an aesthetic problem. The construction quality of concrete is firstly assessed by surveying the surface appearance. The existence of bughole degrades the surface qualities. Surface bugholes are regarded as an imperfection. An additional surface finishing may increase the construction cost and delays the construction project. In addition, the bughole problems also result in the conflicts of constructors and owners since there is a lack of criteria for numbers and areas of surface bugholes.

Surface bugholes can be mitigated but never eliminated. Surface bugholes often appear on the sidewalls of a tunnel's lining concrete because of the tilting concreting form. The surface bughole could make protentional durability problems, but researchers and constructors commonly ignored it. At the current research, however, the impact of surface bugholes on concrete durability is still unidentified. In cold regions, the lining concrete of a road tunnel is exposed to deicer solutions splashed by traffic, and it is additionally exposed to freeze-thaw (F-T) cycles.

Surface deteriorations such as scaling on concrete happen due to environmental factors such as frost damage and chemical corrosion. Such surface deteriorations in the F-T test are generally quantified by weight loss and/or decrease of dynamic modulus of elasticity. However, it is difficult to examine these properties of huge concrete blocks such as tunnel lining sidewalls. It is hard to quantify local scaling accurately because the current visual inspection methods are based on the slight loss of concrete surface subjected to the scaling. Image analysis has been developed to assess the deterioration of concrete surfaces accurately and efficiently.

Chapter 1 is the introductory chapter of the research work highlighting the bughole problem on concrete surface. The research motivation and scope of the present work have been discussed in detail. In addition, this chapter also includes the layout of the documented work.

Chapter 2 reviews the literature and provides in detail about the surface bugholes, detecting methods of bugholes, F-T damage on concrete, and surface treatments. In addition, this chapter summarizes the literature review and discuss the implications of the literature for the study.

Chapter 3 presents the application of colored image analysis for quantifying the local scaling, as well as the influence of surface holes on local scaling. This chapter conducted an F-T test on mortar specimens with artificial surface holes. The local scaling was quantified by the image analysis based on RGB values in the colored photograph. The results indicate that the image analysis is valid to detect and quantify the area of scaling, including invisible micro-scaling. It was concluded that surface holes negatively affect the scaling of concrete. The surface scaling increases by the initial surface bughole area-ratio. A degradation grade scale based on the area-ratio, including surface holes, is proposed for evaluating local scaling appropriately.

Chapter 4 focuses on the durability of F-T cycles of tunnel lining concrete with surface bugholes. For the objectives, the study was carried out on a laboratory-scale F-T test using large concrete blocks. Image analysis was performed to detect and quantify the deterioration of the concrete surface throughout the F-T cycles. Although severe scaling never occurred during the 300 F-T cycles, the concrete with bugholes indicated a significant local scaling at the edges of the bugholes. Some bugholes enlarged, and some merged with existing bugholes, in accordance with such local scaling. This chapter presents the synergetic and negative effects of bugholes on the local scaling of tunnel lining concrete exposed to F-T cycles.

Chapter 5 focusses on the impact of surface bugholes on chloride penetration of concrete coated with

different surface treatments. The chloride penetration of concrete is a crucial concern for reinforced concrete in the saline environment. Although normally tunnel lining concrete is plain concrete, the portal of a tunnel is embedded with reinforcement. Various surface treatments are widely used to protect concrete from environmental corrosions. However, surface imperfections, such as bugholes and cracks, may degrade the protective effect of treatment agents. In addition, bugholes' existence may accelerate the process of ingress of liquids and chlorides. Therefore, surface finishing and grinding are required before coating. This chapter was carried on a chloride immersion test. Concrete specimens with different sizes of bugholes were coated with different types of surface treatments. All specimens were immersed in the 3% sodium chloride solution for 100 days. The chloride penetration depth was determined by chromatography method using the 0.1 mol/L silver nitrate solution. The test results show that the silane-based treatment agent has an excellent water-repellent effect even on a concrete surface with bugholes. The penetration depth is increased by surface hole size when concrete was uncoated or applied with a low water-repellent surface treatment. For concrete applied with high water-repellent surface treatment, the influence of surface bugholes on chloride penetration is negligible. Therefore, finishing or grinding due to surface bugholes is not a must request before coating.

Chapter 6 summarizes the thesis covered so far and concludes the findings in this thesis work. The chapter gives a discussion of the limitations of the research and recommendations for future work.

(様式9号)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏名	胡 良軍 (Hu Liangjun)
審査委員	主 査：吉武 勇
	副 査：進士 正人
	副 査：中村 秀明
	副 査：麻生 稔彦
	副 査：中島 伸一郎
論文題目	Influence of Surface Bugholes on Freeze-Thaw Degradation of Tunnel Lining Concrete (トンネル覆工コンクリートの凍結融解劣化におよぼす表面気泡の影響)
【論文審査の結果及び最終試験の結果】	
<p>本研究では、主に寒冷地にある道路トンネルの覆工コンクリートの凍結融解劣化に着目し、特に表面気泡がおよぼす影響について実験的に明らかにしたものである。一般的にトンネル覆工コンクリートの側壁部分は、負の勾配で建設されるため、打込み時の空気が抜けにくく表面気泡が生じやすいが、このような表面気泡がコンクリートの耐久性に及ぼす影響についてほとんど研究されていない。積雪寒冷地にある道路トンネルでは、融雪・凍結防止の目的で路面に散布される塩化カルシウムや塩化ナトリウムが、通行車両によって水しぶきとして飛散するため、特に坑口近傍の覆工コンクリート側壁部はその影響を受けることとなる。実際に積雪寒冷地にある道路トンネルでは高濃度の塩水が飛散することにより、凍結融解作用に応じてコンクリート表層のスケーリング等の劣化現象が報告されている。特に側壁部のコンクリートに大きな表面気泡が多数発生している場合、表面気泡内に高濃度塩水が残存しやすくなり、コンクリートの表層劣化がいっそう助長される可能性も考えられる。</p> <p>凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化は、一般に小規模なコンクリート試験体を用い、その質量損失量や相対動弾性係数の低下によって評価される。しかしながら、トンネル覆工コンクリート側壁部などを模擬した大きなコンクリートブロックでは、繰返し作用する凍結融解作用に応じて進行する表面劣化特性を調べることは困難である。そこで本研究では、コンクリート部材レベルの表面劣化現象を定量評価するため、既往の研究で開発されたカラー画像解析を用いている。先ず、このカラー画像解析の適用性を調べるため、人工的に設けたさまざまな表面気泡を有するモルタル供試体を用いて凍結融解試験を実施している。その結果、目視では判別できない微細なスケーリングに対しても、表面気泡に起因した表面劣化現象を検出・定量化することができることを報告している。</p>	

この結果を踏まえ、本研究ではさまざまな表面気泡を有するトンネル覆工コンクリートの模擬試験体の凍結融解劣化過程について画像解析を実施し、コンクリート表層劣化機構を詳細に分析している。この結果、300 回におよぶ凍結融解サイクルにおいて、顕著なスケーリングは発生しなかったものの、表面気泡の端部から局所的なスケーリングが発生し、その気泡が拡大するとともに気泡同士が結合することで最終的にコンクリート表層が劣化していく現象を明らかにしている。

一般にトンネル覆工コンクリートは無筋構造であるが、トンネル坑口部では鉄筋などの補強材を用いるため、凍結防止材による鋼材腐食と凍結融解の複合劣化の可能性も考えられる。コンクリートを保護する表面含浸材を用いる場合、表面気泡が含浸材の保護効果を低下させる可能性がある。そこで、本研究では表面気泡のサイズが異なるコンクリート試験片に対して、各種の表面含浸材を塗布し、3%塩化ナトリウム溶液に 100 日間浸漬させる塩水浸漬試験を実施した。この結果、表面気泡のサイズによって塩分浸透深さが増加する傾向にあること、優れた撥水効果を有するシランベースの表面含浸材では表面気泡を有するコンクリートに対しても塩分浸透に対する表面気泡の影響はほぼ無視できることを明らかにしている。

本研究で得られた主な知見としては、これまで見栄え上の問題としてのみ考えられてきた表面気泡について、凍結融解作用を受けることで劣化が促進される詳細な機構を明らかにしたこと、表面気泡を有するコンクリートに対して撥水性に優れたシランベース表面含浸材の有効性を実験的に明らかにしたことである。

公聴会には、学内外から 37 名（対面式 25 名・オンライン 12 名）の聴講者があった。公聴会における主な質問内容は、主にトンネル覆工コンクリートの側壁部に着目した理由について、実際のトンネル覆工とコンクリート試験体における画像解析の評価対象領域の差異について、表面気泡がトンネル覆工コンクリートにおよぼす凍結融解劣化以外の影響について、浸漬試験に用いた表面含浸材の主成分・配合・特徴について、などであった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。（関連論文 計 3 編、参考論文 0 編）

- 1) Liangjun HU, Isamu YOSHITAKE and Tomoyuki MAEDA: A Laboratory Test on the Effect of Bugholes on Surface Degradation of Tunnel Lining Concrete under Freeze-thaw Cycles, Magazine of Concrete Research, 2020.
- 2) Liangjun HU, Isamu YOSHITAKE and Tomoyuki MAEDA: Image Analysis for Quantification of Local Scaling on Concrete Surface, Proceedings of 9th International Conference of GEOMATE, pp.682-687, 2019.
- 3) Masayuki SAYAMA, Shoichi SAYAMA, Koji MITANI, Liangjun HU and Isamu YOSHITAKE: Effect of Surface-Penetrants for Concrete under Freeze-Thaw Cycles, Proceedings of ASEA-SEC-5, 2020.