

| 学位論文内容の要旨 | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 学位論文題目 | 山岳トンネル覆工コンクリートの表面気泡の定量評価と低減方法 |
| 氏名 | 前田 智之 |
| <p>近年、コンクリート構造物には長期的な耐久性に加え美観性（見栄え）の向上が求められるようになっており、本研究ではコンクリートの表面欠陥のひとつである表面気泡に着目した。表面気泡はトンネル覆工コンクリート側壁部に発生しやすく、見栄えに影響を及ぼすことからこれまでも施工時の問題となっていた。問題視されるものの、確立された低減手法がないのが現状であった。そこで本研究では、トンネル覆工コンクリートの美観性向上を目的に、表面気泡の定量的な評価、発生機構と特性および低減方法に関する実験的検討を行った。さらにコンクリートの耐久性の評価指標のひとつである透気係数に表面気泡がおよぼす影響について調査した。</p> <p>本論文は序論を含め、計7章で構成されている。各章の主な内容を以下に概説する。</p> <p>第1章では、コンクリート構造物に求められている美観性に関してまとめ、その中で表面欠陥のひとつである表面気泡について、トンネル覆工コンクリート側壁部における課題を明らかにした。これらを背景に本研究の目的を明らかにし、本論文の構成および各章の内容を概説した。</p> <p>第2章では、コンクリートの表層品質、表面気泡を含む仕上がり面の美観性およびコンクリート表面状態の定量評価方法に関する既往の研究をレビューした。</p> <p>第3章では、覆工側壁部を模擬した型枠を用いて、仕上がり面の角度が表面気泡の発生におよぼす影響を評価した。仕上がり面の傾斜は気泡発生量に影響をおよぼすが、両者は比例関係でなく、少なくとも30°以上になると急激に発生量と大きさが増加することを示した。さらに剥離剤の種類、振動締固め時間、型枠表面の性状と表面気泡の発生量の関係を調査して、気泡の発生特性を評価した。これらの基礎的実験において、振動締固めは気泡低減効果があるが長時間締固めても気泡を完全に除去できないこと、気泡はコンクリート内部から連続的に発生し型枠とコンクリートの界面に達した時点で振動エネルギーを受けて型枠上方に移動し、界面に残存するものが表面気泡として仕上がり面に生じること、径が10mm程度以上の大きな気泡は径が5mm程度の小さな気泡が連結して発生すること、径が大きいほど移動速度が速く1mm以下ではほとんど移動しないことを示した。また型枠性状は気泡低減効果に影響を与えること、剥離剤の種類による表面気泡発生量への影響を確認できなかったことを述べた。</p> | |

第4章では、評価対象面に透明なアクリル板の型枠を用いて、締固め過程における表面気泡を測定し、表面気泡の発生機構を明らかにすることを試みた。締固め過程において、表面気泡の総数は、収束傾向を見せるが、振動時間が長くなるにつれ小さな気泡数が減少し、大きな気泡が増えることで、徐々に増加することが分かった。本研究では少なくとも5mm以下の気泡が増加している。表面気泡面積率は、減少後、増加に転じ、振動締固め初期では径が大きな気泡が、長くなると径が小さい気泡が占める割合が多くなることが分かった。これらは気泡が振動締固め中、継続的にコンクリート内部から発生すること、小さい気泡程、移動速度が遅いためであることが考えられること、振動締固めは表面気泡低減に一定の効果があるものの限界があり、効率良く表面気泡を低減するためには、移動速度が遅い小さい気泡の低減・除去が有効であることを示した。表面気泡を定量的に評価するにあたり、デジタル撮影画像のカラー画像解析によって表面気泡量を計測する手法を考案した。考案した表面気泡量を計測する手法は、従来の手法よりも誤検出が少ないことを示した。

第5章では、型枠を物質透過性があるシート材で被覆して型枠前面からの気泡排出を促すことで、表面気泡の低減を試みた。さらにシート材の物質透過性（透気抵抗度、耐水圧）を変化させ、表面気泡発生量との関係を調査した。その結果、シート材で型枠を被覆することで表面気泡の発生量を低減し、気泡径を小さくできるが、耐水圧がコンクリート側圧を大幅に下回るシート材の被覆では色むらが発生することを示した。また、被覆したシート材の透気抵抗度と耐水圧が小さくなると、表面気泡面積率は小さくなることが分かった。ただしその効果には限界があり、本研究では透気抵抗度が少なくとも10sec/100cc以上、耐水圧が100kPa以上では気泡低減効果を得ることができなかったことを報告した。

第6章では、室内実験で用いた供試体および実際の覆工コンクリートの仕上がり面に発生した表面気泡量と耐久性の評価指標の一つである透気係数の関係を調べた。脱型後早期に乾燥しやすい室内供試体および実際の覆工コンクリートにおいて、表面気泡面積率が大きくなると透気係数が大きくなる傾向があり、特に表面気泡面積率2%以下でその傾向が強く、表面気泡は透気係数に影響をおよぼす可能性があることがわかった。

第7章では、本論文の研究成果を総括し、今後の研究課題と展望について述べた。

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

| | |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 学位論文題目 | Quantitative Evaluation and a Reducing Method of Bugholes on Lining Concrete of NATM Tunnels |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------|

| | |
|-----|----------------|
| 氏 名 | Tomoyuki MAEDA |
|-----|----------------|

Aesthetics of concrete structures have been required as well as durability. This study focuses on bughole which affects concrete surface quality. Bugholes often remain on concrete surface of sidewall of tunnel lining even in an appropriate construction. Note is that an appropriate method for reducing bugholes is not established even now. To improve surface quality of tunnel lining concrete, this study aimed at quantitative evaluation of bughole, examined characteristics of bughole generated during construction, and proposed a reducing method of bughole. In addition, the study conducted a gas permeability test to evaluate the effect of bughole quantitatively.

The thesis consists of seven chapters. Contents of each chapter are described below:

Chapter 1 presents the research background and the purpose of this study. This chapter shows importance of aesthetic for concrete construction, and presents the concern of bugholes of sidewall of tunnel lining concrete. The foci of this study are described and the contents of this thesis are summarized in this chapter.

Chapter 2 presents the review of previous studies dealing with aesthetics of concrete, including quantitative evaluation methods for concrete bugholes.

Chapter 3 shows the fundamental test of bugholes distributed on concrete surface made with variable angle form. The results revealed the effect of concrete angle on bugholes. It was observed that quantity and size of bugholes increase at 30 degrees of concrete angle. The variations in the experimental investigation were remover type, time of vibrating consolidation, and form materials. Longer vibrating consolidation can decrease bugholes, but cannot reduce bugholes completely. It was observed that air and water in concrete, source of bugholes, were continuously appeared during vibration. Also, the observation showed that small bugholes (diameter of 5 mm or lower) combined and became a large bughole (diameter of 10 mm or greater). The fundamental test confirms that large bugholes easily move up during vibration. In addition, the observation shows the significant effect of form materials and little influence of remover type on the bugholes.

Chapter 4 presents the detailed investigation of generating process of bugholes during the vibrating consolidation. For the detailed observation of bugholes, a new detecting system using colored images was developed in this study. The system was firstly used in the observation of bugholes during vibrating consolidation. The result confirmed that the developed system has higher accuracy for bughole detection than conventional methods. The primary observation is that relatively small bugholes (diameter of 5 mm or smaller) remained on concrete surface while large bugholes disappeared by vibrating consolidation. The area-ratio of bughole increased after long-term vibration although the ratio was temporarily decreased by vibrating consolidation. The observation confirms that bugholes continuously appeared during vibration and small bugholes move slowly up. It was confirmed that the developed system enables the detailed observation and quantitative evaluation of bugholes generation during the vibration consolidation.

Chapter 5 presents the experimental investigation on reducing bugholes. The study uses a concrete form simulating tunnel sidewall of negative angle and various sheets covering the form. The sheets used in the test are water and/or gas-permeable type which can discharge air from inside of concrete. The primary parameters in the comparative test are water-pressure resistance and air-permeability of the covering sheet. The results revealed the gas-permeable and waterproofing material sheet contributes to decrease color-irregularity as well as reduction of bugholes. It should be noted that the covering sheet having the gas-permeability of 10sec/100cc or higher and the water pressure-resistance of 100kPa or higher cannot decrease bugholes and color-irregularity.

Chapter 6 shows the relation between the bugholes and the gas-permeability of concrete. The focus of the experimental investigation was to examine durability of concrete having bugholes. The gas-permeability of test specimens and actual lining concrete were examined. It was confirmed that the gas permeability of concrete increases in accordance with the bughole area ratio. In particular, the tendency was remarkable under the area-ratio of 2 %.

Chapter 7 presents the conclusions of this study and describes the future research at the end of the thesis.

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

(博士後期課程博士用)

山口大学大学院理工学研究科

| | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------|-------|
| 報告番号 | 理工博甲 第 715 号 | 氏名 | 前田 智之 |
| 最終試験担当者 | 主査 審査委員 審査委員 審査委員 審査委員 | 吉武 勇 清水 則一 関根 雅彦 中村 秀明 高海 克彦 | |
| 【論文題目】 | | | |
| 山岳トンネル覆工コンクリートの表面気泡の定量評価と低減方法 | | | |
| 【論文審査の結果及び最終試験の結果】 | | | |
| <p>コンクリート構造物には長期的な耐久性に加え、美観性（見栄え）の向上が求められるようになってきた。本研究では耐久性にも関連する表層品質のうち、コンクリートの表面欠陥のひとつである表面気泡に着目し、その定量評価と低減方法について検討している。ここでトンネル覆工コンクリートの側壁部は、表面気泡が残存しやすい部位である。そのような側壁部の表面気泡は、コンクリートの見栄えにも影響を及ぼすことから、これまでも問題となっていたが、効率的な低減手法はみられない。本研究では、トンネル覆工コンクリートの表面気泡の発生メカニズムを調べるため、新たに表面気泡を検出・定量評価できる画像解析法を開発するとともに、トンネル覆工側壁部を模擬した要素実験を通じて、表面気泡の特性について明らかにしている。さらに表面気泡を効率的に低減するため、型枠シート材を用いた表面気泡の低減効果について実験的検討を行っている。また、表面気泡と耐久性の関連性を調べるため、室内実験のコンクリート供試体に加え、実際のトンネル覆工コンクリートの透気係数を測定し、考察を加えている。本研究は、これらの実験的研究成果をまとめたものである。</p> <p>本論文は序論を含め、計7章で構成されている。各章の主な内容を以下にまとめて示す。</p> <p>第1章「序論」では、コンクリート構造物に求められている美観性に関してまとめ、その中で表面欠陥のひとつである表面気泡について、トンネル覆工コンクリート側壁部における課題を明らかにしている。これらを背景に本研究の目的を明らかにし、本論文の構成および各章の内容を概説している。</p> <p>第2章「既往の研究」では、コンクリートの表層品質、表面気泡を含む仕上がり面の美観性、コンクリート表面状態の定量評価方法に関する既往の研究をレビューし、本研究の目的と構成を明確にしている。</p> <p>第3章「室内実験による表面気泡発生特性の検討」では、覆工側壁部を模擬した型枠を用いて、仕上がり面の角度が表面気泡の発生におよぼす影響を評価している。仕上がり面の傾斜は気泡発生量に影響をおよぼすが、両者は比例関係でなく、少なくとも30°以上になると急激に発生量と大きさが増加することを報告している。さらに剥離剤の種類、振動締固め時間、型枠表面の性状と表面気泡の発生量の関係を調査して、表面気泡の発生特性を報告している。これらの基礎的実験において、振動締固めは気泡低減効果があるが長時間締固めても気泡を完全に除去できないこと、気泡はコンクリート内部から連続的に発生し型枠とコンクリートの界面に達した時点で振動エネルギーを受けて型枠上方に移動し、界面に残存するものが表面気泡として仕上がり面に生じること、径が10mm程度以上の大きな気泡は径が5mm程度の小さな</p> | | | |

気泡が連結して発生すること、径が大きいほど移動速度が速く 1mm 以下ではほとんど移動しないことを報告している。

第4章「締め固め過程におけるコンクリート表面気泡の発生機構の実験的調査」では、評価対象面に透明なアクリル板の型枠を用いて、締め固め過程における表面気泡を測定し、表面気泡の発生機構を明らかにしている。締め固め過程において、表面気泡の総数は、収束傾向を見せるが、振動時間が長くなるにつれ小さな気泡数が減少し、大きな気泡が増えることで、徐々に増加することを述べている。表面気泡面積率は、減少後、増加に転じ、振動締め固め初期では径が大きな気泡が、長くなると径が小さい気泡が占める割合が多くなることを明らかにした。これらは気泡が振動締め固め中、継続的にコンクリート内部から発生すること、小さい気泡程、移動速度が遅いためであることが考えられること、振動締め固めは表面気泡低減に一定の効果があるものの限界があり、効率良く表面気泡を低減するためには、移動速度が遅い小さい気泡の低減・除去が有効であることを述べた。表面気泡を定量的に評価するにあたり、デジタル撮影画像のカラー画像解析によって表面気泡量を計測する手法を考案し、従来の手法よりも誤検出が少ないことを示した。

第5章「コンクリート表面気泡の低減に関する実験的検討」では、型枠を物質透過性があるシート材で被覆して型枠前面からの気泡排出を促し、表面気泡の低減を図っている。シート材の物質透過性（透気抵抗度、耐水圧）を変化させ、表面気泡発生量との関係を調査している。その結果、シート材で型枠を被覆することで表面気泡の発生量を低減し、気泡径を小さくできるが、耐水圧がコンクリート側圧を大幅に下回るシート材の被覆では色むらが発生することを報告した。また、被覆したシート材の透気抵抗度と耐水圧が小さくなると、表面気泡面積率は小さくなることを述べている。

第6章「表面気泡と透気係数の関係の調査」では、室内実験で用いた供試体および実際の覆工コンクリートの仕上がり面に発生した表面気泡量と耐久性の評価指標の一つである透気係数の関係について調べている。脱型後早期に乾燥しやすい室内供試体および実際の覆工コンクリートにおいて、表面気泡面積率が大きくなると透気係数が大きくなる傾向があり、特に表面気泡面積率 2%以下でその傾向が強くなり、表面気泡は透気係数に影響をおよぼす可能性を指摘している。

第7章「結論」では、本論文の研究成果を総括し、今後の研究課題と展望について述べている。

公聴会には、学内外から 44 名の聴講者があった。公聴会での主な質問は、現場において問題となる表面気泡の大きさ、表層の透気係数と表面気泡の関連性、表面気泡面積率や気泡径の測定方法、コンクリート温度が表面気泡に与える影響、表面気泡低減方法のコスト比較、内部空隙と表面気泡の関連性などであった。いずれの質問に対しても発表者から適切な回答がなされた。

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、公聴会での質疑に関する応答などから、最終試験を合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記の通りである（関連論文：計 7 編、参考論文：計 0 編）。

【主な関連論文】

- 1) 平野正幸, 前田智之, 本間宏記, 原田沙里, 棚瀬富弘, 吉武 勇: トンネル覆工コンクリート側壁部に生じる表面気泡低減のための基礎実験, 土木学会論文集 F1, Vol.71, No.2, pp.95-105, 2015.10.
- 2) 原田沙里, 前田智之, 森内麻衣, 吉武 勇: トンネル覆工コンクリートの表面品質に与える型枠被覆シート材の影響, 土木学会論文集 F1, Vol.72, No.2, pp.76-81, 2016.11.
- 3) 前田智之, 原田沙里, 森内麻衣, 藤原正稔, 吉武 勇: デジタルカラー画像解析による締め固め過程のコンクリート表面気泡の評価, 材料, Vol.66, No.3, 2017.3. ほか 4 編