

審査の結果の要旨

氏名 石 関 嘉 一

今日、NATM (New Austria Tunnel Method) 工法はトンネル施工に導入されてから数十年が経過し、その間 NATM 工法の主要な支保部材である吹付けコンクリートは、材料や施工システムの開発により発展してきている。ここ数年では、大断面トンネルやシングルシェルライニングの導入を目的として、新たな技術開発が行われるようになった。これまでの技術開発は、吹付け機構を詳細に検討するのではなく、主に経験的要素に基づいて行われてきている。特に、コンクリートが吹付け面に付着できずに脱落してしまう現象であるリバウンドの発生は、配合条件や施工条件等の多くの要因が関係しており、経験的な施工に基づいた現状のシステムでの場合、リバウンドの発生割合が約 30%と極めて高く、多量の廃棄物を発生している。加えて、労働人口の減少にともなう技術の伝承問題の観点から、ノズルマン技術の暗黙知を形式知とするためにも、吹付け機構の解明が極めて重要な課題となってきた。本論文は、吹付けコンクリートのリバウンドの発生機構を解明するために、コンクリートの配合および施工方法の影響を把握し、これらの結果に基づいてリバウンド発生の評価指標として単位面積当たりの噴流エネルギー（吹付けエネルギー）を提案したものである。これにより、現場条件に応じてリバウンド発生率を低減させる、配合および施工条件の設計を可能としている。

第 1 章は序論であり、吹付けコンクリートの黎明期から現在まで技術的変遷を述べ、施工に対する問題点を挙げて、本研究の背景、目的および構成について述べている。

第 2 章は既往の研究であり、吹付け施工に関わる機材システム、配管内の圧送条件ならびに空気流量、施工条件、配合条件等の要因が吹付けコンクリート施工に及ぼす影響に関する既往研究を分析し、吹付け機構が十分に解明されていないことを示している。

第 3 章では、配合条件がリバウンド発生に及ぼす影響を検討している。コンクリート中のモルタルの塑性粘度が上昇すると管内圧力が増大し、それに伴い空気流量が低下し、結果としてリバウンド率が低下することを明かしている。脈動や閉塞を抑制するためには、塑性粘度を $3.0\text{MPa}\cdot\text{s}$ 以下に設定することが重要であることを提案している。

第 4 章では、吹付け距離および空気流量がリバウンド発生に及ぼす影響について検討している。その結果、吹付け距離の違いにより、リバウンド発生の原因が異なることを明らかとし、この現象を解明するために吹付け速度の必要性について言及している。

第 5 章では、吹き付けられるコンクリートの平均粒子速度を計測し、リバウンドの発生機構について検討している。高速度ビデオを用いて吹付け状況を撮影し、濃度相関法をベースとした粒子追跡法によって吹付け速度が把握できることを示している。また、吹付け距離の増加にともなう吹付けコンクリートの拡散面積に着目し、速度と拡散面積から単位

面積当たりの噴流エネルギー（吹付けエネルギー）を求め、これがリバウンドの発生に影響を及ぼしていることを提案している。実験結果より、吹付けエネルギーを $15 \times 10^2 \text{kg/s}^2 \sim 30 \times 10^2 \text{kg/s}^2$ の範囲に設定することで、リバウンドの発生を抑制できると提案している。

第 6 章では、提案した吹付けエネルギーの妥当性を実験的に検証している。通常配合と混和材置換により塑性粘度を変えた配合の 2 種類を用い、空気流量および吹付け距離を同一条件とした結果より、両者ともほぼ同一のリバウンド発生状況となったことを確認している。さらに、通常配合を用いて、2 水準の空気流量および 4 種類の吹付け距離条件で吹付け実験を行った結果、吹付けエネルギーが $15 \times 10^2 \text{kg/s}^2 \sim 30 \times 10^2 \text{kg/s}^2$ でリバウンド率がほぼ最低となることを確認している。最後に、実トンネルの実証実験では、吹付け距離 2m の時にリバウンド率が 24% となり、吹付けエネルギーの上限値とほぼ一致していることを確認している。これらの実験により、適切な吹付けエネルギーの範囲を実現できる空気流量および吹付け距離を設定することで、リバウンドを低減できることを実証している。

第 7 章は結論であり、各章ごとに得られた成果をまとめ、本研究の有用性を示すとともに、今後の技術課題を検討して本論文の結びとしている。

以上を要約すると、吹付けエネルギーという指標を用いて、リバウンド発生率を最小化するための施工条件（空気流量、吹付け距離）および配合条件（塑性粘度）を、現場条件に応じて設計することを可能としたものであり、コンクリート工学の発展に寄与するところ大である。よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。