

学位論文題名

# 若材齡時におけるトンネル吹付けコンクリートの力学特性 に関する研究

(Study on Mechanical Characteristics of Young-age Tunnel Shotcrete)

## 学位論文内容の要旨

本研究では、山岳トンネルにおける主要な支保部材である吹付けコンクリートについて、打設直後から 24 時間までの若い材齡時における力学特性変化の重要性を指摘し、特に変形特性の挙動を求めるための試験方法を新たに開発・確立した。さらに、変形特性に関する力学パラメータの有効な評価方法を、提案する力学モデルとともに示し、数値解析を用いた検討により実効性を明らかにした。

このように、従来の課題であった 24 時間未満の若材齡時におけるトンネル吹付けコンクリートの力学特性の評価を簡易な室内試験により可能とし、力学モデルとそのパラメーターの評価方法を提案することで支保設計手法について今後の研究の端緒を開いた。

第 1 章では、若材齡のトンネルの吹付けコンクリートについて、特に 24 時間より若い材齡における評価の重要性を、主に国内における支保の設計事例や打設後の早期に高い剛性を得られる初期高強度コンクリートなどの開発状況や現場適用などの背景を基に示し、国内外における若材齡吹付けコンクリートの力学的性質の評価に関する研究の状況を示した。さらに、室内・原位置における吹付けコンクリートの力学特性（一軸圧縮強度・ヤング係数・粘弾性特性）が材齡の進行とともに変化していく場合の評価について、既往の研究を記すとともに本研究の特徴・目的・内容について述べた。

第 2 章では、若材齡の吹付けコンクリートおよびそのベースコンクリートについて、試験体の作成方法と試験方法を開発し、既往の研究では明確に記されていない具体的な試験方法を示した。供試体の作成については、ベースコンクリートでは専用のモールドにより、強度が十分に発現する前の試験体に損傷を与えること無く、試験に供する方法を開発した。吹付けコンクリートでは、リバウンドを除去し、一度に多くの試験体をコア抜きすること無しに作成できる方法を考案し、研究的なレベルから現場管理試験にも適用できる技術とした。また、ヤング係数といった変形係数の評価に用いる試験体の変形を、試験器の上下の載荷板からではなく、コンプレッソメータおよびクリップゲージによる変位から高い精度で評価することによって変形特性（ヤング係数、ポアソン比、粘性係数）について信頼性の高い情報を取得・提供できるようになった。

第 3 章では、若材齡コンクリートの一軸圧縮試験と多段階応力緩和試験を実施し、吹付けコンクリートとベースコンクリートに対し、一軸圧縮強度とヤング係数の発現特性を得た。また、試験結果より算定したヤング係数の値を、コンプレッソメータによる供試体中央

部 100 mm 区間の変位, 供試体の上下の載荷板間の変位, 材料試験機のクロスヘッドの変位から換算したひずみによる応力-ひずみ線図により算定し, 既往の研究例でのヤング係数の評価のばらつきが, 変位の計測方法に起因していることを確認した。その他にも以下のような知見が得られた。

- ・ベースコンクリートと吹付けコンクリートの試験結果の比較からは, 円柱形供試体の直徑が 100 mm 程度では, 急結剤の添加量のわずかな変化により強度および変形特性の評価がばらつくことがわかった。この影響は, 若材齢ほど顕著となり, 必要とする評価精度と材齢に応じて、試験数量および供試体サイズについて検討する必要があることが判明した。

- ・材齢の進行に伴う吹付けコンクリートの一軸圧縮強度とヤング係数の変化を評価した結果, 材齢 1 日を境界として発現特性が異なることが確認できた。また, 一軸圧縮強度とヤング係数の関係については, 一軸圧縮強度が 10 MPa(材齢約 1 日) 以下では, コンクリートの配合, 急結剤の有無に関係なく両者の関係が類似していることがわかった。これは, 若材齢時では、求めることが容易な一軸圧縮強度からヤング係数が間接的に評価できる可能性を示している。

- ・ベースコンクリートと吹付けコンクリートとを比較すると, 急結剤の効果で初期の剛性発現特性が明らかに異なる。特に, 材齢 1 日までは, 概ね吹付けコンクリートの方が一軸圧縮強度, ヤング係数とも大きい。ただし, 材齢 28 日で比較すると吹付けコンクリートの一軸圧縮強度, ヤング係数はともに小さいという急結剤使用時の一般的な傾向が確認された。

第 4 章では吹付けコンクリートの時間経過による粘弾性特性を含む変形特性の変化を模擬できる力学モデルについて検討した。採用するモデルは, 応力緩和挙動とクリープ挙動を同時に表現でき, かつモデルの要素数が少ない三要素のモデルに, 時間変化による要素のパラメータ変化を表現できる「係数時間依存型粘弾性モデル」とした。このモデルの妥当性を検証するために, 応力緩和試験を繰り返し行う多段階応力緩和試験を実施し, その試験結果から粘性係数および力学モデルのバネ係数を評価する手法を確立し, 試験のシミュレーションにより提案する係数時間依存型粘弾性モデルの実効性を確認した。

第 5 章では, 係数時間依存型粘弾性モデルをトンネルの逐次掘削解析に適用し, 高強度コンクリートと普通コンクリートによる支保効果の差異を検討するとともに, 他の力学モデルを採用した場合との差異を検討した。得られた知見は以下のとおりである。

- ・高強度吹付けは, 材齢一日までの剛性に関して普通コンクリートとの発現特性に差がない場合, 地山変位抑制に対する効果は顕著でないものの, 支保耐力の向上という点で普通吹付けよりも余裕があるという一般的な予想の裏付けがとれた。

- ・変形係数が急激に変化し, 普通コンクリートと高強度コンクリートの剛性差が生じた時の応力の増分から, 早期に剛性が高くなる吹付けコンクリートを用いた場合は, 初期の変位も抑制されるが, 剛性が高い分, 僅かな変位でも支保応力は大きくなることが予想され, 適用範囲が限定される可能性が示唆された。

# 学位論文審査の要旨

主査 教授 藤井 義明  
副査 教授 金子 勝比古  
副査 准教授 児玉 淳一

## 学位論文題名

### 若材齢時におけるトンネル吹付けコンクリートの力学特性 に関する研究

(Study on Mechanical Characteristics of Young-age Tunnel Shotcrete)

山岳トンネルにおいては吹付けコンクリートの打設直後から 24 時間までに大きな変形が生じる。したがって、この期間における吹付けコンクリートの力学特性は、合理的な支保を設計するために重要である。そこで、本研究では、打設 24 時間未満の吹付けコンクリートの変形特性を求めるための試験方法を新たに開発・確立した。さらに、力学パラメータの有効な評価方法を、提案する力学モデルとともに示し、数値解析を用いた検討により実効性を明らかにした。

若材齢の供試体の作製については、ベースコンクリートでは専用のモールドにより強度が十分に発現する前の試験体に損傷を与えること無く試験に供する方法を開発した。吹付けコンクリートでは、リバウンドを除去し、一度に多くの試験体をコア抜きすること無しに作製できる方法を考案した。また、試験器の上下の載荷板からではなく、コンプレッソメータおよびクリップゲージによる変位から評価することによって変形特性(ヤング係数・ポアソン比・粘性係数)について信頼性の高い情報を取得・提供できるようになった。

力学特性として、打設後 24 時間未満の一軸圧縮強度とヤング係数の発現特性を一軸圧縮試験と多段階応力緩和試験により求める方法を開発した。ヤング係数は、コンプレッソメータによる供試体中央部の変位、供試体の上下の載荷板間の変位、材料試験機のクロスヘッドの変位から換算したひずみによる応力-ひずみ線図により算定し、既往の研究例でのヤング係数の評価のばらつきが変位の計測方法に起因していることを確認した。その他にも以下のようないし見を得た。

- (1) ベースコンクリートと吹付けコンクリートの試験結果の比較から、円柱形供試体の直径が 100 mm 程度では急結剤の添加量のわずかな変化により強度および変形特性の評価がばらつくことを明らかにした。この影響は若材齢ほど顕著となり、必要とする評価精度と材齢に応じて、試験数量および供試体サイズについて検討する必要があることを示した。
- (2) 材齢の進行に伴う吹付けコンクリートの一軸圧縮強度とヤング係数の変化を評価した結果、材齢 1 日を境界として発現特性が異なることが確認できた。また、一軸圧縮強度とヤング係数の関係は、一軸圧縮強度が 10 MPa(材齢約 1 日) 以下ではコンクリートの配合

や急結剤の有無に関係無く類似していることがわかった。これは、若材齢時については、求めることが容易な一軸圧縮強度からヤング係数を間接的に評価できる可能性を示している。

(3) ベースコンクリートと吹付けコンクリートとを比較すると急結剤の効果で初期の剛性発現特性が明らかに異なる。特に、材齢 1 日までは概ね吹付けコンクリートの方が一軸圧縮強度・ヤング係数とも大きい。ただし、材齢 28 日で比較すると吹付けコンクリートの一軸圧縮強度・ヤング係数はともに小さいという急結剤使用時の一般的な傾向が確認された。

次に、吹付けコンクリートの時間に依存した粘弾性特性を模擬できる力学モデルについて検討した。採用するモデルは、応力緩和挙動とクリープ挙動を同時に表現でき、かつ、モデルの要素数が少ない三要素のモデルに、時間変化による要素のパラメータ変化を導入し、係数時間依存型粘弾性モデルとした。このモデルの妥当性を検証するために、応力緩和試験を繰り返し行う多段階応力緩和試験を実施し、その試験結果から粘性係数および力学モデルのバネ係数を評価する手法を確立し、試験のシミュレーションにより実効性を確認した。

この係数時間依存型粘弾性モデルをトンネルの逐次掘削解析に適用し、高強度コンクリートと普通コンクリートによる支保効果の差異を検討するとともに、他の力学モデルを採用した場合との差異を検討した。得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 高強度吹付けは、材齢一日までの剛性に関して普通コンクリートとの発現特性に差がない場合、地山変位抑制に対する効果は顕著でないものの、普通吹付けよりも支保耐力に余裕があるという経験的知見を裏付けできた。
- (2) 早期に剛性が高くなる吹付けコンクリートを用いた場合は、初期の変位も抑制されるが、剛性が高い分、僅かな変位でも支保応力が大きくなり、適用範囲が限定される可能性が示唆された。

これを要するに、著者は、打設 24 時間未満の吹付けコンクリートの変形特性を求めるための試験方法を新たに開発・確立し、力学パラメータの有効な評価方法を提案する力学モデルとともに示し、数値解析を用いた検討により実効性を明らかにしたものであり、岩盤工学・トンネル工学に対して貢献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。