

システムロックボルトに関する模型材料の選定と実験計画

首都大学東京大学院	学生会員	○福島	大貴
首都大学東京大学院	正会員	土門	剛
首都大学東京大学院	正会員	西村	和夫

1. 研究背景・目的

現在に至るまでに、数多くのトンネルが NATM で施工され、過去における数々の経験や実績により NATM は進歩・発展し、単なる山岳トンネルのみの工法ではなく、都市部山岳工法という名称で都市部にも用いられている。都市部山岳工法では、掘削による周辺への影響を事前に予測するために、FEM による数値解析が主に行われている。しかし、解析上では、ロックボルトが地山要素と節点を共有した状態でモデル化されることにより、支保効果が実際よりも過大になり得るという欠点がある。一方、地山とロックボルトの間にジョイント要素を用いるにしても物性の設定が難しい。したがって、影響予測の FEM 解析ではロックボルトをモデル化しないことが多い。

そこで本研究では、これまでに適用されている数値解析上の種々のロックボルトモデルについて、その適否を模型実験と数値解析で検証することを目的とした。今回はその第1段階として、模型実験で用いる地山モデルと吹付けコンクリートモデルの材料において物性試験および選定を行った。本報告最後に、選定した材料を用いた模型実験計画について述べる。

2. 物性試験

模型実験において、地山モデルは未固結粒状体地山を想定し、銅粒子を主体とした材料を用いる。地山モデルの物性を得るために、圧密排水三軸圧縮試験を行う。トンネルモデルのうち、ロックボルトモデルは、想定している原型トンネルとの寸法を考慮し硬鋼線を用いる。吹付けコンクリートモデルは、脆性的な挙動を示すものとして、紙粘土系材料を用いる。紙粘土系材料として石粉粘土と木質粘土を選定し、3点曲げ試験を行って比較した。

2.1 各種モデルとその材料

(1) 地山モデル

地山は、銅散弾:酸化亜鉛:ワセリンを 200:0.3:1 の重量配合比で混合したものである。この材料では、酸化亜鉛により摩擦特性を、ワセリンにより粘着性を与えることができる。また、水を使用しないため実験中の物性値が安定している。

(2) ロックボルトモデル

当研究室で実施した過去の研究では、ボルトは一辺 3mm の正方形断面の亚克力棒を使用していた。しかし、原型のトンネルを幅 10m と仮定すると実寸では一辺 30cm という非常に大きなものになってしまう。そこで、模型寸法と実寸とを相似させるために直径 0.3mm の硬鋼線を用いることとした。

(3) 吹付けコンクリートモデル

過去に実施した研究では、トンネル壁面からの肌落ちを防止するためにアルミ板を短冊状に加工したものを使用していた。しかし、アルミ板自体は壊れることがなく、トンネルの変形モードを抑制してしまう。そこで、吹付けモデルは載荷中に壊れることを想定して、紙粘土系材料を用いることとした。

2.2 三軸圧縮試験（地山モデル）

(1) 試験条件

供試体の寸法は直径 5cm 高さ 12cm とし、拘束圧は 25, 50, 100, 150kPa の 4 パターンとした。載荷速度は
キーワード ロックボルト, NATM, 模型実験, 三軸圧縮試験, 曲げ試験

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL : 042-677-2785 FAX : 042-677-2772

度はひずみ制御で行い、1%/min で 20%まで載荷した。

(2) 試験結果

図 1, 図 2 にそれぞれ応力-ひずみ曲線, Mohr-Coulomb の破壊包絡線を示す。図 1 の曲線上のシンボルは最大軸差応力を示している。図 2 より, この地山材料は拘束圧依存性があると確認できる。試験結果から得られた変形係数 E_{50} , 粘着力 C , 内部摩擦角 ϕ を表 1 に示す。

2.3 曲げ試験 (吹付けコンクリートモデル)

(1) 試験条件

供試体の寸法は 30mm × 70mm × 3mm とし, 支点間距離は 50mm とした。載荷速度は変位制御で行い, 1mm/min で載荷した。供試体は成形した後に 40℃ の乾燥炉に 3 日間入れて乾燥させた。石粉粘土, 木質粘土において 5 個ずつ実験を行った。

拘束圧 (kPa)	E_{50} (kPa)
25	2970
50	5974
100	18015
150	12145
粘着力 C (kPa)	4.5
内部摩擦角 ϕ (°)	17.8

(2) 試験結果

図 3, 図 4 に荷重-たわみ曲線を示す。多少のばらつきはあるが, おおむね同じ挙動を示している。試験結果より, 変形係数 E_{50} を求め, 表 2 に示す。両者を比較すると, 木質粘土のほうが低い値を示した。

2.4 まとめ

土の粒状体では, 一般に拘束圧が高いほど大きなせん断抵抗力を発揮し, Mohr-Coulomb の破壊包絡線では, せん断強さは拘束圧に比例して大きくなる。今回の地山モデルの変形係数は, 拘束圧によって変化することが確認できた。拘束圧が 100kPa の時を除けば, おおむね比例していると考えられる。また, 吹付けコンクリートモデルにおいては, 木質粘土が石粉粘土より脆いということが確認できた。試験結果より, 吹付けコンクリートモデルには, 石粉粘土に比べて変形係数が半分以下の木質粘土を用いることとする。

3 トンネル模型実験計画

図 5 に概略図を示す。縦横 600mm 高さ 125mm の矩形実験槽の中に, ロックボルトを挿入したトンネルを作製する。トンネルは単純化のために円形とし, 直径を 100mm とする。地山には銅粒子を主体とした材料を使用する。ロックボルトには直径 0.3mm の硬鋼線を使用し, 吹付けコンクリートには木質粘土を使用する。トンネルモデルの作製後, 実験槽側面にあるプレッシャーバックに空気を供給し載荷する。載荷中, ポテンシオメータによりトンネル内空変位を計測する。トンネル内空変位の挙動により, ロックボルトの効果を評価する。

4 今後の課題

物性試験により, 各モデル材料の物性を確認することができた。しかし, 木質粘土は吹付けコンクリートモデルとして使用された前例がないため, 吹付けコンクリートモデルの破壊に至るまでの挙動を逐次確認しながら実験を行う。そして, 実験を行って得た結果と数値解析との比較によって数値解析上の種々のロックボルトモデルの適否を検証する。

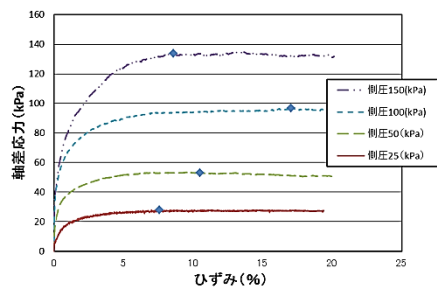


図 1 応力-ひずみ曲線

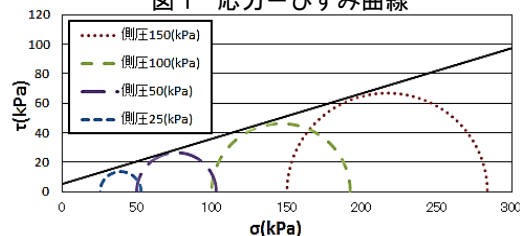


図 2 Mohr-Coulomb の破壊包絡線

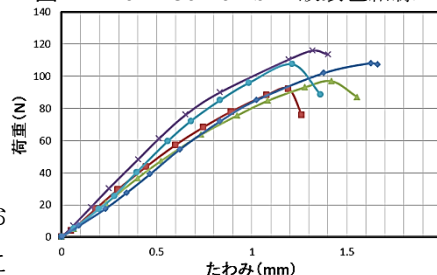


図 3 石粉粘土 荷重-たわみ曲線

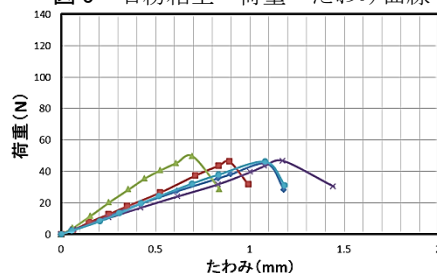


図 4 木質粘土 荷重-たわみ曲線

表 2 変形係数の比較

	石粉粘土	木質粘土
E_{50} (GPa)	5.5	2.1

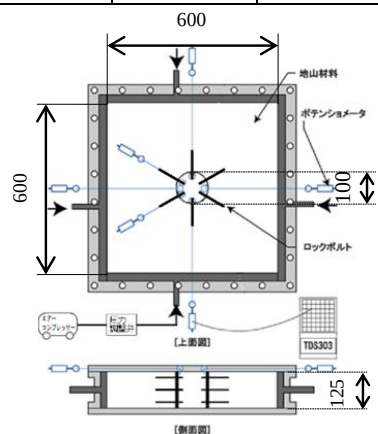


図 5 模型実験概略図 寸法 (mm)