

トンネルの薄肉支保工に関する基礎的研究

首都大学東京大学院
 首都大学東京大学院
 首都大学東京大学院

学生会員 ○中島 秀
 正会員 土門 剛
 正会員 西村 和夫

1. 目的

山岳トンネルの標準工法となっている NATM では、地山自身が有する支保機能を有効に利用することにより、支保に作用する土圧を軽減して合理的に設計することが基本であるが、地山自身の支保機能を評価することは難しい。これまでも単純化した、紙や薄肉モデルによるトンネルの安定実験は行われているが、定量的にそのメカニズムを示すまでには至っていない。本研究では、基礎的実験としてコピー用紙で超薄肉円筒のトンネル支保をモデル化し、アルミ棒積層体で周辺地山をモデル化した実験を行い、その挙動をDEM（個別要素法）による解析で再現し、周辺地山と吹付け支保の相互作用に着目することで土圧と薄肉支保工の作用効果を検討する。

2. 模型実験

(1) 実験材料

地山材料には、簡便で再現性も期待できることや一般の砂の内部摩擦角に近いことなどより、表 1-1 に示す物性のアルミ棒積層体を使用した。トンネル模型は、厚さ 0.09mm のコピー用紙（坪量 64g/m²）1 枚をアルミ材質の内型に巻き付け、スティックのりで筒状に接着して作成した。奥行きは 100mm である。

(2) 方法

内型にコピー用紙を巻き付けてトンネル模型を作成し、地山モデルに埋設し、その後内型のみを引き抜くことで掘削を表現した。掘削後トンネルが安定した場合は、コピー用紙にどの程度の軸力が作用しているかを定性的に把握するために、トンネル模型のインバート部を切断し、コピー用紙の挙動を目視で観察した。トンネルの下方領域は 50mm とした。埋設、掘削模擬の様子を図 2-1、図 2-2 に示す。

(3) 実験ケース

実験は円形断面 1 つと、縦横比が 0.6, 0.7, 0.8 の楕円形断面 3 つに対し、土被り 1D, 2D, 3D の 3 ケースの計 12 ケースで行った。

(4) 実験結果

表 2-1 のように、掘削後に全てのケースでトンネルは安定し、また多くのケースでインバート部切断後もトンネルは安定した。今回行った 12 ケースではトンネルの崩壊パターンの確認ができなかったため、コピー用紙よりも剛性が弱い厚さ 0.042mm の薄手紙（坪量 29g/m²）でトンネル模型を作成し、ケース 1 の土被り 3D で実験を行ったところ、トンネルは掘削後すぐに崩壊した。

キーワード： トンネル， 薄肉支保工， 模型実験， DEM

連絡先： 首都大学東京 住所〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL042-677-1111（代表）

表 1-1 地山材料の物性

材質	アルミ合金
長さ(mm)	100
径(mm)	1.6,3.0
重量比	3:2
地山密度(kN/cm ³)	21.5
粘着力(kN/cm ²)	0
内部摩擦角(°)	30



図 2-1 埋設（円形断面, 土被り 3D）



図 2-2 掘削（円形断面, 土被り 3D）

表 2-1 実験結果

ケース	土被り	掘削後	切断後 (自立数/実験数)
1 (円:径50mm)	1D	全て自立	2/3
	2D		3/3
	3D		2/3
2 (縦横比0.8)	1D		3/3
	2D		1/3
	3D		2/3
3 (縦横比0.7)	1D		1/3
	2D		1/3
	3D		1/3
4 (縦横比0.6)	1D		0/3
	2D		2/3
	3D		0/3

3. DEMによる再現解析

(1) 解析方法

今回、解析手法としてDEM（個別要素法）を用いた。従来のトンネルの解析ではFEM（有限要素法）やFDM（有限差分法）が主に用いられているが、これらは連続体の変形解析に適していて不連続体の表現や地山の崩壊を模擬することは難しい。DEMは不連続体や様々な崩壊現象を模擬することができるため、本実験のような粘着力のない砂質土を模擬したアルミ棒積層体の挙動を再現するのに適している。なお、ここで用いる地山モデルの円形要素は、接触点は1点のばねであるが、(3)で述べる吹付け支保のモデルの円形要素は接触部に分布ばねを配することができるため、接触点で軸力、せん断力、曲げモーメントを伝達できる。

(2) 物性値

解析にあたって、コピー用紙をモデル化するために実験でコピー用紙の軸剛性、曲げ剛性を求め、その後DEMによるたわみ試験、一軸圧縮試験でコピー用紙の軸剛性、曲げ剛性に近くなるような物性値を決定した。地山（アルミ棒）の物性は、DEMによる単純せん断試験で仮想縦弾性係数と要素間摩擦角の設定値を決定した。地山および吹付け支保の各物性値を表3-1に示す。また、実験においてアルミ棒の直径は1.6mmと3.0mmとしているが、解析時間の短縮を図るため解析では3.2mmと6.0mmとしている。

(3) 解析ケース

解析は実験と同様に12ケースで行い、トンネル断面、土被りによる支保効果への影響を比較する。ここでは、そのうちケース1（円形断面）の土被り3Dの結果のみを図3-1、図3-2に示す。なお、吹付け支保は分布ばねを有する円要素1列でモデル化した。

(4) 結果

周辺地山に比べ吹付け支保の接触圧（軸力）は非常に大きく、土被りが大きくなるほど吹付け支保の接触圧も大きくなった。また、吹付け支保周辺の地山に大きな接触圧は見られず、グラウンドアーチの明確な形成は確認できなかった。

4. 結論

実験では全ケースでトンネルは安定し、かつ多くのケースでインバート部切断後、支保モデル奥行き100mmの数点で紙が相互に突き当たっていれば安定した。また、薄手紙ではトンネルは崩壊したことなどより、コピー用紙もある程度の土被り荷重を受け持って支持はしているものの、作用する土被り荷重は小さく、トンネルは主にグラウンドアーチの形成により安定していると考えられる。

一方、解析では明確なグラウンドアーチの形成は確認できず、土被りが大きくなるほど吹付け支保の接触圧も大きくなるなど、周辺地山に比べ吹付け支保に大きな接触圧が生じ、土被り荷重は主にコピー用紙に作用していて、トンネルの安定は主にコピー用紙の軸力によるものと考えられ、実験結果と異なった。

この主な要因としては、解析の限界から支保モデルの軸剛性と曲げ剛性の両方を実験に合わせるができず、コピー用紙のモデル化ができていなかったことが考えられるため、今後モデル化の工夫、改善が必要である。

表 3-1 DEM 要素の物性値

	地山円	吹付け円
仮想縦弾性係数(N/mm ²)	1000	300
反発係数	0	0
仮想せん断弾性係数比	0.25	0.25
要素間粘着力(N/mm ²)	0	10
要素間摩擦角(°)	12	50
許容引張応力(N/mm ²)	0	50
単位体積重量(N/mm ³)	2.14*10 ⁻⁵	6.97*10 ⁻⁶
径(mm)	3.2, 6.0	0.5

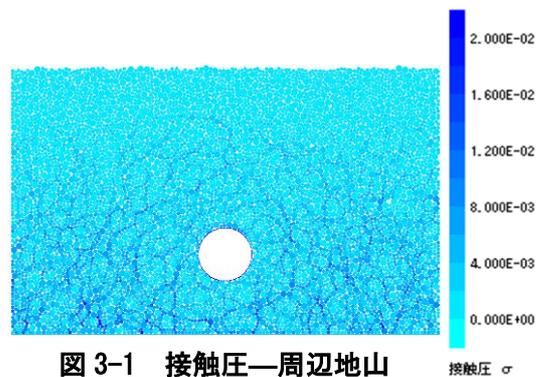


図 3-1 接触圧—周辺地山

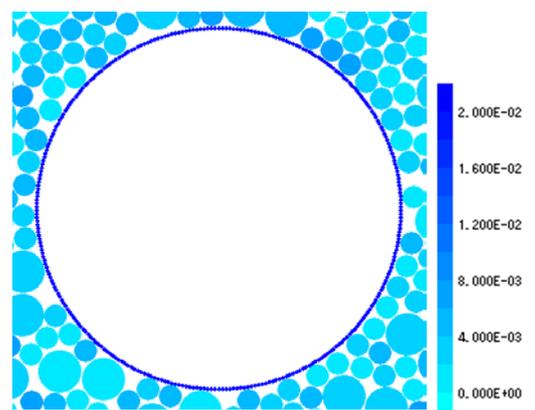


図 3-2 接触圧—吹付け支保