

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 学生会員 ○中島 秀
 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. 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、作用する土圧を軽減して薄肉支保工によって合理的に支持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、単純化した薄肉モデルによるトンネルの模型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、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

アルミ材質の内型にコピー用紙 1 枚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。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、トンネル横断面形状と土被りをパラメータとし、円形断面 1 つと、縦横比が 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 の楕円形断面 5 つに対し、土被り 1D ~ 3D（D:トンネル幅で 50mm）の 3 つの計 18 ケースで行った。

(4) 実験結果

縦横比 0.5~1.0 では掘削後に全てのケースで 10 分以上トンネルは自立した。しかし、今回の実験ケースで最も扁平な断面である縦横比 0.4 での結果は表 2-1 によくなり、土被り 1D では掘削後に 10 分以上自立するというケースが見られたが、土被り 2D では 10 分以上自立するケースはなく、掘削直後、又は数十秒後に崩壊した。また、崩壊挙動としては、天端部から崩壊するケースと、インバート部から崩壊するケースの 2 パターンを確認した。

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
単位体積重量(kN/m ³)	21.4
粘着力(N/mm ²)	0
内部摩擦角(°)	30



図 2-1 埋設（円形断面）



図 2-2 掘削（円形断面）

表 2-1 実験結果

ケース6(縦横比0.4)			
土被り	回数	掘削直後	自立時間
1D	1	自立	10分以上
	2	自立	10分以上
	3	自立	1分20秒
2D	1	崩壊	0
	2	崩壊	0
	3	自立	26秒

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。接触点で軸力、せん断力、曲げモーメントを伝達できる。

表 3-1 DEM要素の物性値

	地山円要素	吹付け円要素
仮想縦弾性係数(N/mm ²)	1000	6000
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	無限
要素間摩擦角(°)	12	50
許容引張応力(N/mm ²)	0	1000
単位体積重量(N/mm ³)	2.14×10^{-5}	6.97×10^{-6}
径(mm)	1.6, 3.0	0.09

(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、一軸圧縮試験で吹付け支保がコピー用紙の剛性になるよう物性値を決定した。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。

(3) 解析ケース

解析は実験と同様に18ケースで行い、断面形状、土被りによる支保効果への影響を比較する。ここでは、円形断面の土被り3Dにおける変位と接触圧を図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

実験と同様に縦横比0.5~1.0では全ての土被りで自立し、図3-1に示すように変位はほとんどなく、図3-2に示すように、吹付け支保周辺の接触圧が小さいことが確認できる。また、縦横比0.4では実験と同様に崩壊し、その崩壊挙動は実験と同様に天端部、又はインバート部からの崩壊の2ケースとなり、どちらも実験での崩壊挙動を概ね再現できた。天端からの崩壊の例として図3-3に解析での、図3-4に実験での崩壊挙動を示す。

4. 結論

縦横比0.5~1.0では実験、解析ともに自立し、実験において剛性の弱いコピー用紙1枚でも支保効果を発揮したことや、解析において支保周辺に緩み領域が形成されていることから、グラウンドアーチが形成されていることが分かる。また、実験、解析ともにトンネルが崩壊した縦横比0.4では、断面が扁平なため生じる曲げモーメントが大きくなり崩壊したと考えられる。以上のことから今回行った実験モデルにおいては、縦横比0.4以下ではグラウンドアーチが形成され難いことが確認できた。今後は吹付け支保の軸力に着目し、周辺地山と支保工の相互作用を確認していく。

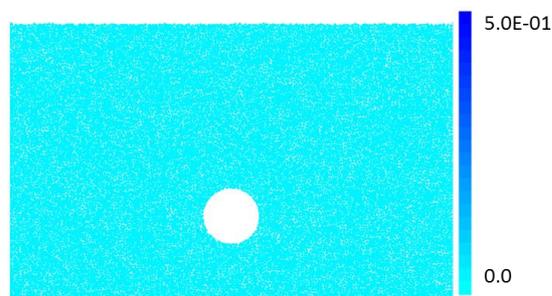


図 3-1 変位 (mm)

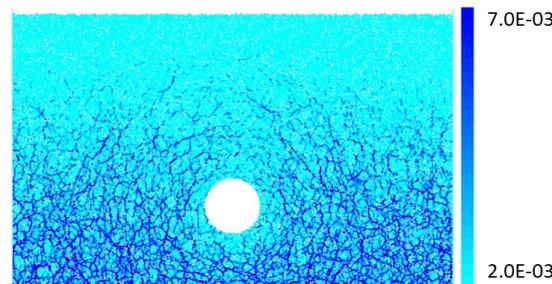


図 3-2 接触圧 (N/mm²)

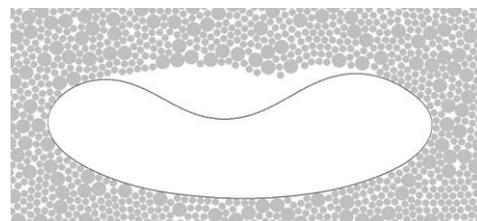


図 3-3 崩壊挙動(解析)



図 3-4 崩壊挙動 (実験)