

鹿島建設技術研究所 ○ 正会員 信田 佳延
同 上 正会員 田沢 雄二郎
同 上 正会員 中里 吉明

I. 始めに

トンネル断面の変形は、地山物性・かぶり厚さ・支保条件、等に応じて異なるとともに、施工時における切羽の拘束の程度に応じて変化することが知られている。しかしながら、切羽の拘束による3次元的な応力条件下でのトンネルの変形特性については十分に究明されているとは言い難い。筆者らはこれまでにNATMで用いられる各種支保材の支保効果について実験検討を進めてきた⁽¹⁾⁽²⁾。本報文はその一環として、低強度（一軸強度 $g_u \approx 4 \text{ kg/cm}^2$ ）の人工軟岩を用いた3次元トンネル模型実験により、切羽の拘束を受ける領域でのトンネルの変形特性について検討したものであり、実験結果を中心に、有限要素解析結果の一部を含めて報告する。

II. 実験方法

供試体は円柱状の模擬地山の中心部にトンネルに相当する空洞を設けたものであり、その形状・寸法を表-1に示す。空洞の長さはトンネル径の約3倍とし、模型内部に切羽に相当する部分を設けた。縮尺の算定にあたっては単線鉄道トンネル（径6m）を想定した。地山材料にはベントナイトモルタルを用い、その物性は一軸強度 $g_u = 4 \text{ kg/cm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi = 10 \sim 15^\circ$ 、初期弾性係数 $E_0 \approx 500 \sim 1500 \text{ kg/cm}^2$ である。ロックボルトは鋼製ネジ切りボルト（径3mm）を用いた。ライニングはセメントモルタルとし圧縮強度 $\sigma_c \approx 180 \text{ kg/cm}^2$ である。実験の種類及び支保条件は表-2に示すとおりである。なお、スリットはトンネル軸方向に4か所に設置し、内空変位率が約4%で閉合するよう計画した。載荷方法は、トンネル軸方向の変位を拘束する状態で、供試体側方から、等圧に載荷を行った。載荷装置は図-1に示すとおりである。

表-1 供試体概要図

項目	シリーズ	シリーズ-I	シリーズ-II
縮 尺		1/36	1/30
トンネル相当部の径 D (cm)		16.5	20
トンネル相当部全長 H (cm)		45	60
供試体の径 d (cm)		60	100
供試体の高さ h (cm)		75	100

概 要 図

III. 実験結果及び結果の検討

図-2～図-5に、荷重 P_0 と内空変位率 u/D （ u ：トンネル半径方向変位量、 D ：トンネル径）の関係を示す。ここでは、切羽からの距離 L とトンネル径 D との比 L/D が0.5から2.5までの5断面での結果を示した。

図-2は、無支保の場合の結果である。これによると、同一荷重では、 L が大きくなるにつれて変位量も増加することがわかる。ただし、 $L/D \geq 1.5 \sim 2.0$ の位置では、ほぼ同様の変形性状が示されており、 L の差による影響は小さくなることがわかる。また、 $L/D = 0.5$ の位置における変位は小さく、最大荷重時においても u/D は2%以下であった。

ロックボルトを設置した場合の結果を図-3に示す。無支保の場合に比較すると $L/D \geq 1$ の位置では変位が抑制される。しかしながら $L/D = 0.5$ の位置では、ロックボルト支保の方が大きな変位を生じており、トンネル相当部全長にわたって変位が平均化された傾向が認められる。これは、ロックボルトが設置されている領域の地山が、ロックボルトによって均一に補強され剛性が増加するために、その領域の地山がより剛性の大きな構造体として挙動する傾向が強くなることによるものと思われる。このことは、ロックボルトにより地山を補強し、地山自体を支保材として活かすというNATMの

表-2 実験の種類

No.	支保形式	実験シリーズ	地山物性	ロックボルト			スリット
				長さ (cm)	間隔 (cm)	方向 (度)	
1	無支保	I	R-15	—	—	—	—
2	ロックボルト支保		R-15	8.3	3.5	16	—
3	無支保	II	R-15	—	—	—	—
4	ロックボルト支保			10	4.25	16	—
5	ロックボルト支保+ライニング支保			10	4.25	16	5
6	ロックボルト+ライニング支保 (スリットあり)			10	4.25	16	5 有

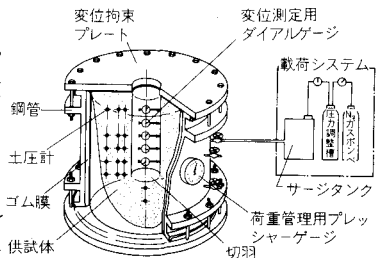


図-1 載荷装置

理論を裏付けているものと考えられる。

図-4はロックボルトとライニングを併用した場合の結果である。ライニングが破壊するまでの内空変位は非常に小さく、ライニングによる変位抑制効果が明確に示されている。

また、ライニングに変状をきたすまでは、切羽からの距離の差による影響はほとんど認められず、各測定断面ともに内空変位率は0.5%程度以下である。ライニング破壊後は変位が増加し始めるが、この時点からロックボルトの効果が発揮され、ロックボルトが単独で用いられた場合よりもかなり高い荷重(約2倍以上)を支えることになる。この場合でも切羽からの距離の差による影響はほとんど認められない。

これまでに述べた3種類の支保条件下での実験結果から、切羽の拘束がトンネルの変形特性に及ぼす影響の程度は、用いられている支保材の変形に対する抵抗性に依りて大きく異なることが明らかとなった。

図-5はライニング中にスリットを設けた場合の結果である。これによるとスリットが閉合するまでは、荷重の増加とともに変位も増加している。また、切羽からの距離が大きくなるに従って、変位も大きくなっており、切羽からの距離の影響が明らかに認められる。特に、 L/D が1.5を超える位置ではほとんど同様の变形特性が示されており、ロックボルト単独使用の場合と同様の傾向が認められる。スリットの効果については、地山強度の2倍以上の荷重($P_0 = 95 \text{ ton/m}^2$)までロックボルト・ライニングとともに大きな変状をきたすことなく支保材としての効果を発揮していることから、大きな変位が予測される場合にはスリットの設置が有効であることが、実験上でも確かめられた。

IV. 軸対称有限要素解析

軸対称有限要素法を用いた非線型解析結果と実験結果との対比較計を行った。その一例を図-6に示す。最終的なトンネル破壊時を除けば、ほぼ実験結果を再現できることが示され、3次元応力条件下においても、有限要素法による数値解析は、トンネルの変位予測のための有効な手段であることが確かめられた。

V. 終わりに

今回の検討により、実施工条件に近い応力状態でのトンネルの变形特性・支保材の効果・数値解析手法の適用性等に関する基礎的資料を得た。ただし、模型実験のような等方均質な地山は理想条件に近いものであることから、実験結果を実際の設計・施工に反映させるためには、実施工計測データとの対比較計が不可欠であろう。

〈参考文献〉(1)中里・稲葉ら：軟岩を対象としたロックボルト及び薄肉覆工の支保効果に関する模型実験，第33回土木学会年次講演集，S.53

(2)中原・岡村ら：NATMの開発研究(その1～3)，鹿島建設技術研究所年報，第26～28号，1978～1980

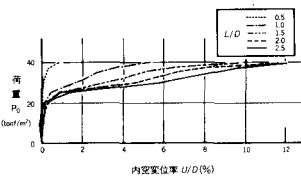


図-2 $P_0 \sim U/D$ (無支保シリーズ I)

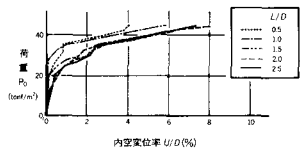


図-3 $P_0 \sim U/D$ (ロックボルト支保，シリーズ I)

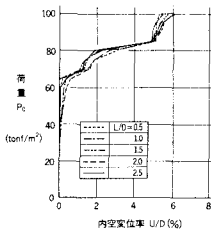


図-4 $P_0 \sim U/D$ (ロックボルト+ライニング支保，シリーズ II)

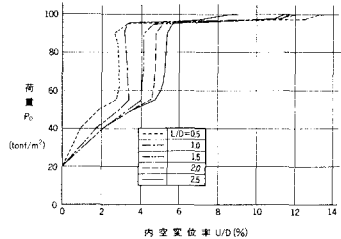


図-5 $P_0 \sim U/D$ (ロックボルト+ライニングスリット有，シリーズ II)

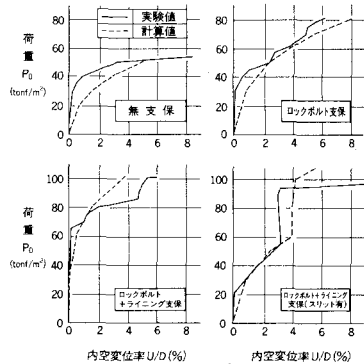


図-6 解析結果 (シリーズ II, $U/D = 1.0$)