

鹿島建設技術研究所 正会員 ○中里吉明
稲葉武史
正会員 須藤英明

I. はじめに

NATMは軟弱な地質、膨張性の地質に対しても優れた工法とされているが、この工法の適用にあたっては、各支保材の支保機構や作用効果を十分にかまえた上で、地山の物性や地圧に応じた的確な支保条件の決定が従来工法に増して要求される。しかし、この工法の主たる支保材であるロックボルトと薄肉覆工の支保効果については理論的にも未解明の問題が多く、また、わが国においては施工実績もほとんどないが実情である。

筆者等は、温泉余土や泥岩などの固結度の低い軟岩におけるそれらの支保効果解明の一環として、低強度のベントナイトモルタル ($\gamma_u \approx 5 \sim 10 \text{ kg/cm}^3$) を地山材料とする小型および中型実験を行なった。

II. 実験概要

表-1, 実験内容

実験は円形空洞を有するトンネル地山模型に2方向から等圧载荷し(空洞軸方向変位拘束)、空洞の内空変位量等を測定したものであり、载荷方法は一定時間一定荷重を持続し、段階的に荷重を上げていく方法によった。

小型模型実験は $\phi 6 \text{ cm}$ 空洞をトンネル部とする模型(縮尺 $1/100$)を用い、支保効果の定性的な検討を主眼とした。中型模型実験は $\phi 40 \text{ cm}$ 空洞をトンネル部とする模型(縮尺 $1/15$)を用い、小型模型実験の結果確認および支保効果の定量的な検討を主眼とした。各々の実験内容は表-1に示すとおりである。

なお、小型模型実験は各々の支保条件について3~5個の実験を行っており、内空変位量は図-1に示すとおりトンネル部の体積変化を水量の変化で測定し、トンネル部は変形後も真円を保つと仮定して算定した。

III. 小型模型実験の結果および検討

1. 変位抑制効果(図-2, 図-3)

① ロックボルト ; ロックボルトの変位抑制効果は、主に単位面積当りの設置本数やロックボルトの引抜き特性に支配される傾向が認められた。たとえば、無支保のもので内空変位率15%になる荷重での内空変位率は、長さ3cmの2本ヨリ線をトンネル周方向に16本設置し、トンネル軸方向ピッチを変えた場合、1cmピッチで約4%, 2cmピッチで約7%, 4cmピッチで約10%であり、引抜き特性の異なる(引抜き耐力は2本ヨリ線の約1/2)単線を使用した場合には1cmピッチで約6%であった。

また、ベアリングプレートには変位抑制効果を高める効果が認められた。たとえば、無支保のもので内空変位率15%になる荷重での内空変位率は、ベアリングプレートを付けたもので約4%になるのに対し、付けないものでは約7%であった。

		小型模型実験			中型模型実験		
機 型 (供試体)	縮 尺	1/100			1/15		
	地山相当部	20×20×20cm			140×140×50 cm		
	トンネル相当部	$\phi 6 \times 20 \text{ cm}$			$\phi 40 \times 50 \text{ cm}$		
載荷方法	載荷方向	2方向等圧載荷(トンネル軸方向変位拘束)					
	載荷ピッチ	0.625~1.25 kg/cm ²			0.5~1.0 kg/cm ²		
	載荷持続時間	5~15分以下			15~120分以下		
地山模型	軸圧縮強度 $q_u(\text{kg/cm}^2)$	4~6	5~7	10~11	6~7.5		
	内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$	5~15	25~35	25~35	15~20		
	粘着力 $C(\text{kg/cm}^2)$	1~3	1~3	3~6	2~3		
ロックボルト模型	弾性係数 $E(\text{kg/cm}^2)$	500~700	3,300~4,500	2500~2700	800~1,000		
	長さ $l(\text{cm})$	2, 3	3	3	6.5, 1.3, 2.0		
	軸方向ピッチ $e(\text{cm})$	1, 2, 4	2	2	6.7		
T模型	周方向本数 $F(\text{本})$	16	16	16	16, 32		
	引抜き耐力 $A(\text{kg/cm})$	$0.8 \sim 1.5 \sim 2$	2~3	2~3	0.5~1		
	厚さ $b(\text{mm})$	1~2, 3~5	1~2	4~8, 12~13			
機 型	軸圧縮強度 $q_u(\text{kg/cm}^2)$	249			284		
	せん断強度 $\sigma_s(\text{kg/cm}^2)$	48			54		
	せん断角 $\phi_s(^{\circ})$	26			29		
測 定 項 目		時 間 荷 重 内空変位量 (空洞の体積変化測定による) 破壊状況の観察 (最終時の状況)			時 間 荷 重 内空変位量 (5断面12ヶ所での相対変位量測定による) 地山内圧力 ロックボルト張力 覆工のひずみ 覆工に作用する地圧 破壊状況の観察		

注1) 上の 軸および三軸試験方法によった。
注2) 弾性係数は $1/2 q_u$ の影響弾性係数。
注3) l, e, F, b は模型の縮尺(1/100)による。
注4) 地山のAの $0.8 \sim 1 \text{ kg/cm}^2$ は平均、他は2本ヨリ線。
注5) σ_s, ϕ_s は圧縮、引張強度よりモールのスベリ限界線を放物線 $\tau = c + \sigma \tan \phi_s$ として算定。

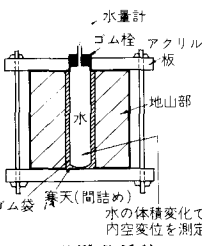


図-1, 小型模型実験での内空変位測定装置

b) 覆工：覆工の破壊に伴い内空変位率は増加するが、内空変位率が10～20%になり、覆工がかなり破壊してから変位抑制効果が認められた。これは、覆工の拘束によって地山が圧密され、地山の物性が改良されるなどの余効によるものと考えられる。(図-3)

c) ロックボルト+覆工：ロックボルトと覆工を併用した場合、その変位抑制効果はそれぞれを単独に使用した場合の効果にほぼ等しいか、やや上回る傾向が認められた。(図-3)

2. 破壊状況(図-4)

無支保のものについて、載荷後の破壊領域(図-4に示すようなびわれの生じた領域)の範囲を理論解による塑性領域と比較すると、両者は比較的良く一致する。ロックボルトを設置した場合、破壊領域の範囲は無支保のものに比べて小さく、ロックボルトの効果は塑性領域の成長抑制効果もしくは塑性域地山の劣化抑制効果としても評価できるものと考えられる。

3. 地山物性の違いによる影響

地山の軸圧縮強度、内部摩擦角等の物性の異なる場合においても、今回の実験の範囲では、定性的には上述とほぼ同様の傾向が得られた。

Ⅳ. 中型模型実験の結果および検討

現在、実験を継続中であるが、これまでに得られた結果のうち主な事項を示すと次のとおりである。

1 変位抑制効果(図-5)

ロックボルトや薄肉覆工の支保効果は小型模型実験とほぼ同様の傾向が得られており、かなりの変位抑制効果が認められた。

覆工に作用する地圧測定結果より、覆工に変状を生じる地圧は厚肉円管の破壊条件による値にほぼ等しく、覆工に変状を生じるまでの内空変位率は0.1～0.2%程度以内と極めて小さい。ロックボルトを併用した場合、ロックボルトの併用効果は覆工の変状発生後に発揮される傾向を示し、内空変位率4～5%を越えると、それぞれを単独に使用した場合の効果を足し合わせたものに近い効果を示した。これは、覆工を併用したもののロックボルトの張力が、内空変位率4～5%を越えると、ロックボルト単独のものに比べて大きく上回る傾向を示しており、覆工の併用がロックボルトの効果を高め、結果的にそれぞれを単独に使用した場合の効果を足し合わせたものに近い効果を示したことが考えられる。

2. 破壊状況

無支保の場合、地山の剝離、剥落は荷重4～4.5 kg/cm^2 で生じ、荷重5 kg/cm^2 ではトンネル全長にわたって中約30cm、深さ3～5cmの剝落を生じた。

ロックボルトを設置した場合、地山の剝離、剥落は荷重5.0～6.0 kg/cm^2 程度にならないと生じず、また、それらのほとんどは隣接するロックボルト間に限られており、鱗片状を呈した。

Ⅴ. おわりに

以上、小型および中型の模型実験についてその概要を述べたが、今後、今回の結果をもとにした詳細な理論検討を進める予定であり、合理的な設計、施工法の改良を図っていきたいと考えている。

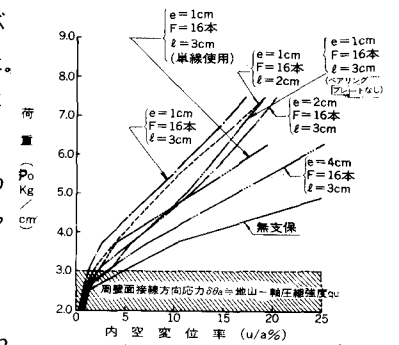


図-2. 荷重と内空変位率との関係
(小型模型, $\sigma_c = 4 \sim 6 \text{ kg}/\text{cm}^2$, $\phi = 5 \sim 15^\circ$)

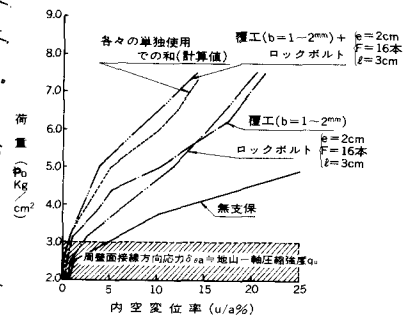


図-3. 荷重と内空変位率との関係
(小型模型, $\sigma_c = 4 \sim 6 \text{ kg}/\text{cm}^2$, $\phi = 5 \sim 15^\circ$)

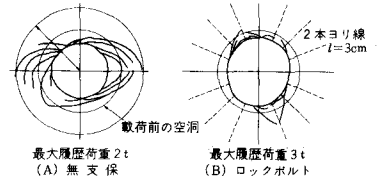


図-4. 載荷後の破壊状況の一例
(小型模型, $\sigma_c = 4 \sim 6 \text{ kg}/\text{cm}^2$, $\phi = 5 \sim 15^\circ$)

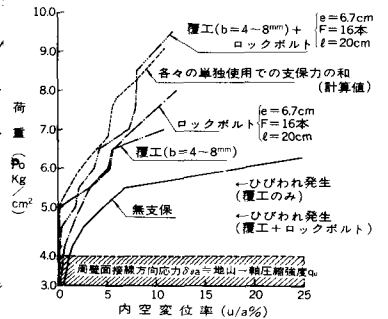


図-5. 荷重と内空変位率との関係
(中型模型, $\sigma_c = 6 \sim 7.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$, $\phi = 15 \sim 20^\circ$)