

ロックボルトの作用効果に関する実験

○ 建設省工本研究所 正会員 花岡 信一
千葉工業大学 岩瀬 康陽
香山 茂

1. まえがき

この10年程の間にヨーロッパで発達してきたトンネル工法にNATM(NEW AUSTRIAN TUNNELL METHOD)がある。我国においても昭和51年上越新幹線中山トンネルのサイロット懸宕区間に初めて導入され非常な成功を収めたことが報告されている。¹⁾ この工法の特徴は従来の鋼製支保工に替わりロックボルトとショットクリートで地山の補強工として用いている点である。特に、ロックボルトについては、従来の先端接着式にとりかわり堅粘りモルタルによる全面接着式ロックボルトの発達が目ざましく、硬岩だけでなく軟岩あるいは土砂の場合にも適用できるようになったことがこのNATMを一層発展させたといわれている。

しかしながら、全面接着式ロックボルトの作用効果についてはわかっていない点が多く、ラヴィセヴィッツ²⁾、Egger³⁾、岡⁴⁾、山本⁵⁾、等が種々の考え方を発表しているが、いまだ確定するまでに到っていない。したがって、ロックボルトの挿入長さ、設置間隔などの設計にあたっては過去の施工実績よりどこをとしていた場合が多く、わずかにFEM等を用いて現場計測の値と比較するような手法がとられているにすぎない。

本研究は線材を入れたモルタルあるいは石膏の一軸破壊試験およびセラケンと地山材料とした縮尺約 $\frac{1}{100}$ の円形トンネルにより、全面接着式ロックボルトの作用効果を明らかにしようとするものである。

2. 実験内容

本研究はモルタルあるいは石膏を材料とした線材入り供試体の破壊以後までも考慮した一軸破壊試験およびセラケンと地山材料とした模型実験の2つからなっている。前者はトンネルのロックボルトが挿入されている領域の地山の強度特性について明らかにするためのものであり、表-1に示す供試体計22ケースについて行った。後者はロックボルトが挿入されたトンネルの挙動特性を明らかにするためのものであり、計4ケースの供試体について載荷試験を行った。この場合ボルトが挿入されている地山とされていない地山の挙動が比較できるように各供試体ともトンネルの半分だけボルトを挿入した。

表-1 実験ケース

供試体 材 料	線材間隔 (cm)	試料数
モルタル	∞	4
	7.5	4
	6.0	5
石 膏	∞	6
	7.5	4
	6.0	4
	3.0	5

3. 実験方法

3.1 一軸破壊試験

供試体寸法 $150 \times 150 \times 300 \text{ mm}$ の直方体で、材料の配合モルタルの場合 W/C が 60%, C/S が 50% で養生日数 7 日とした。また、石膏については W/P が 60% であった。線材は $\phi 2.0 \text{ mm}$ の番線を用い、設置間隔として $\infty, 7.5, 6.0, 3.0 \text{ cm}$ を選んだ。

図-1は供試体の概略図である。

載荷にあたっては図-2に示すようにアムスラー型載荷試験機およびX-Yレコーダを直結させて、載荷力と変位と同時に図化できるようにした。載荷速度については降伏点まではモルタル5 $\frac{\text{kg}}{\text{分}}$ 、石膏2 $\frac{\text{kg}}{\text{分}}$ であり、以後、破壊するまで放置しておいた。

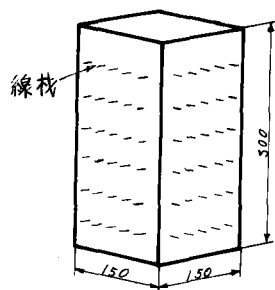


図-1 供試体

3.2 トンネル模型実験

供試体は寸法 $600 \times 600 \times 200 \text{ mm}$ のゼラチンを主成分とするもので、その配合は重量比でゼラチン15%、グリセリン20%、水65%であり、養生日数は2日とした。三軸試験によるこのときの材料の物性値は表-2のとおりである。

供試体作成にわたって、ゼラチンを二層に分けて打ち込み、この層間に釘あるいは砂利を敷きつめ、載荷によるトンネル近辺のゼラチンの動きを目視できるようにした。

ロックボルトは $\phi 0.9 \text{ mm}$ の番線を二本ふたつたものに接着強度を増すため $\phi 1.7 \text{ mm}$ の番線とよきつけ、その全長を 7 cm とした。また、挿入間隔は 1.5 cm であった。これの挿入方法は火にあぶられたボルト自身の熱により地山のゼラチンを溶かしつつ挿入し固結をもってボルトと地山の接着を得た。

載荷は図-3の装置を用いて行った。この装置は二次元方向の二系統に分かれた計8台の油圧ジャッキと2台の手動ポンプにより載荷できるようになっている。ジャッキの反力は反力棒を通して計8本のロッドの引張で支える構造となっている。さらに供試体はその上下面と厚さ 1.8 mm のアクリル板で被いボルトの締め付けにより平面ひずみ状態に近づけてある。

載荷は4面等圧とし載荷板の変位をコントロールするように行った。まず載荷板に 4 mm の変位を与え、その後さらに 4 mm 変位させた。フルビングリンプにより最初の 4 mm (載荷圧 0.125 kg/cm^2) に相当する。

地山およびトンネル内空の変位については、ほう遠カメラによる写真と目盛り入り拡大鏡により測定する方法をとった。

4. 実験結果

4.1 一軸破壊試験

表-3は一軸破壊試験の結果を示している。表中の「強度減少率」は降伏点ひず

アムスラー型載荷試験機

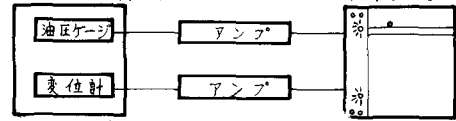


図-2 載荷概略図

表-2 物性値

圧縮強度 (kg/cm^2)	ポアソン比	内部摩擦角 (度°)	単位体積重量 (kg/m^3)	変形係数 (kg/cm^2)
0.08	0.5	0.27	1.102	1.02

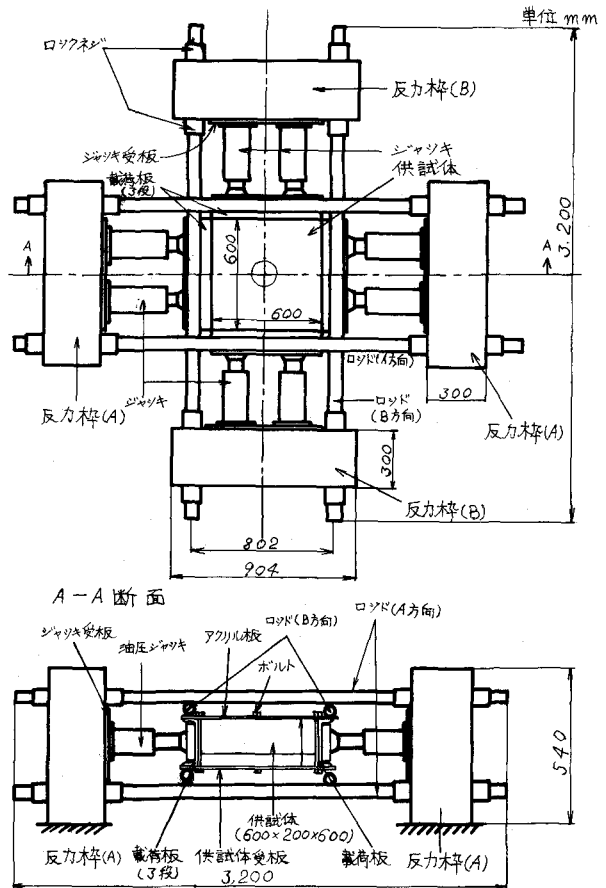


図-3 載荷装置

4の2倍のひずみにあたる破壊強度の降伏強度に対する割合を表わしている。これは供試本の破壊過程における降伏点以後の強度減少率を表わす一つの指標と考えられる。

この表より検定した結果モルタル、石膏とも線材の破壊強度および強度減少率への影響は特にみられない。また、ヤング率については線材を入れることによりむしろ低くなっているようである。全体的には線材による供試本への影響は余りみられなかった。

4.2 トンネル模型実験

写真1はゼラチンの地山にロックボルトを挿入した模型と載荷している状況の写真である。中央の円形孔が径13cmのトンネルであり、その上部にはり出した13本の黒い線がロックボルトである。また、地山内の黒い点が前述した釘の頭でありこれらの動きによりトンネル及び地山の動きが目視できる。写真1によるとロックボルトが挿入されている領域のトンネル壁変位は挿入されていない領域に比べて小さくなっているのがわかる。また、地山の動きについても挿入されている方は載荷前の円形を保っているが、挿入されていない方は地山内4.0cmのところまで変形しているのがわかる。

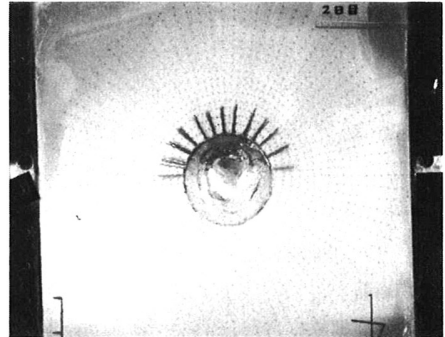
写真2はロックボルトが挿入されている領域とそうでないところの境界の写真である。これによると挿入域でないところの地山内変位は内空に近づく程極端に大きくなっているが挿入域では比較的一定した変位がみられる。

図-4は載荷後2日を全たときの釘頭の動きから地山内のひずみと出し図にしたものである。図中横軸はトンネル壁からの距離、縦軸はひずみであり、破線がボルト挿入域、実線がそうでないところのものである。これによるとボルト域に比べてボルトのない方は内空に近づく程半径方向ひずみが大きくなっている。

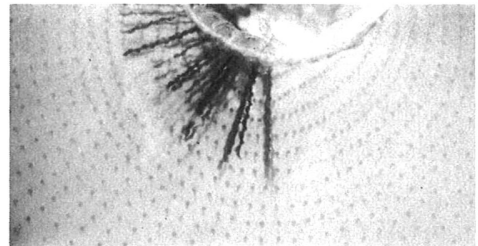
写真3は細骨材がけうまかれた供試本についてのロックボルトが挿入されている領域の写真である。これによると最初均等にけうまかれた細骨材がロックボルトの挿入されていない領域で疎になっているのに対し、挿入されている領域で密になっている。これは先端接着式ロックボルトの締め付けによる圧縮帯の形成⁽¹⁾と同様全面接着式ロックボルトにおいても締め付けによる圧縮帯が形成されることを表わしている。

表-3 一軸破壊試験結果

供試体 材料	線材間隔 (cm)	弾 度 (kg/cm ²)	変形係数 (kg/cm ²)	強 度 減少率
モ ル タ ル	∞	132.54	2.55	0.30
	7.5	117.40	1.40	0.29
	6.0	138.50	1.50	0.43
石 膏	∞	52.62	1.22	0.63
	7.5	49.90	0.92	0.76
	6.0	52.45	1.14	0.53
	3.0	63.50	1.94	0.70



写 - 1



写 - 2

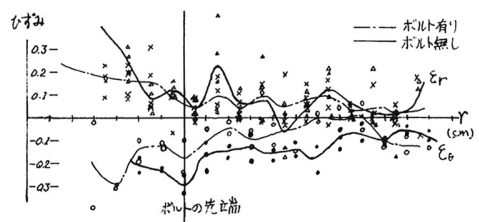
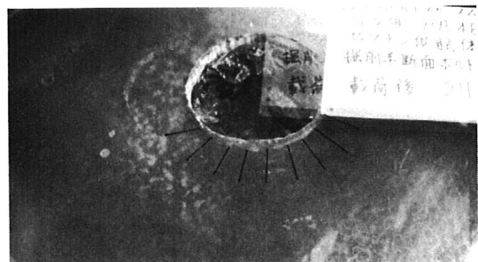


図-4 地山内ひずみ



写 - 3

写-4]ロックボルトが挿入されていない地山の応力集中による座屈を写したものである。このような座屈はすべての供試体でみられたが、ロックボルトが挿入されている側の地山にはみられなかったものである。このことからロックボルトは応力集中を防止する作用効果があると思われる。

本実験に用いたゼラチンの場合、トンネル塑性変位とロックボルト支保効果についてのeggerの式は次のようになる。

$$\sigma = \frac{(1+\mu)R^2}{Er} \left\{ 2(1-\mu)P_0 - \frac{2P_0 - \sigma_{gd}}{\lambda_p + 1} \right\}$$

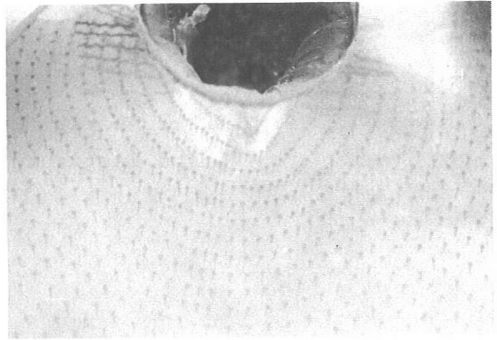
式中の R' はゆるみ域で、ロックボルトが挿入されていないトンネルに対しては、

$$R' = R_0 \exp \left(\frac{P_0 - \sigma_{gd}}{\sigma_{gd}} - \frac{1}{2} \right)$$

ロックボルトが挿入されているトンネルでは

$$R' = R_0 \frac{2}{\lambda_p + 1} \left\{ \frac{P_0 (\lambda_p - 1) + \sigma_{gd}}{P_0 (\lambda_p - 1) + \frac{R_0 (\lambda_p - 1)}{R_0} + \frac{R_0 (\lambda_p - 1)}{R_0} \sigma_{gd}} \right\}^{\lambda_p - 1}$$

この式から導いたトンネル内空変位の値と実験値と比較したのが図-5である。図中の実線が測定値、破線が計算値を表わしている。この計算の中でロックボルトによる内空抵抗 $P_0 = 0.03 \text{ kg/cm}^2$ とした。



写 - 4

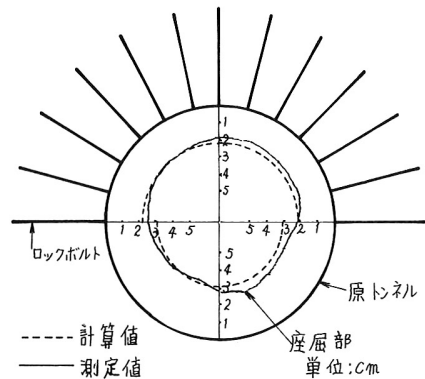


図-5 理論値との比較

5. 考察及びまとめ

— 軸破壊試験の結果、供試体に線材を入れることによる物性値の増加は顕著に認められなかった。むしろヤング率などは線材が入ったため小さくもなった。これは線材の破壊抵抗が線材とモルタル、石膏との境界の弱点による強度低下をよそわれなかったものと思われる。

ゼラチンのような内部摩擦角の小さい地山についてはロックボルトの効果がないと云われてきたが、今回の実験のようなゆるみ領域以内のボルト長に対しても内空変位を50%程度小さくすることができ、充分効果のあることがわかった。これはロックボルトのセリ持作用によりゆるみ域の変形がおさえられたものと思われる。ロックボルトによる半径方向の圧縮応力の増加により、ゆるみ域に圧縮帯が形成されるが、ゼラチンのような内部摩擦角の小さい材料は圧縮による強度増加が小さいが、そうでない地山では圧縮帯の強度増加が期待できると考えられる。

参考文献

- 1) 須賀 武 中山トンネルのNATM施工例 NATM施工技術講習会 1977年7月 社団法人日本トンネル技術協会
- 2) Rabecwicz, L.V. The New Austrian Tunnelling Method Water Power Nov, Dec, 1964, Jan 1965
- 3) P. EGGER Einfluss des Post-Failure Verhaltens von Fels auf den Tunnelausbau, V.I, 130, F.U.K. 1973(en allemand) traduction française
- 4) 岡 行俊 NATMの理論 NATM施工技術講習会 1977年7月 社団法人日本トンネル技術協会
- 5) 山本 稔 ロックボルトの作用効果と模型実験 1978年11月 トンネルと地下
- 6) Lang T. A. Rock behavior and Rock bolt support in large Excavation ASCE 1957年10月

EXPERIMENT IN ACTING MECHANISM OF ROCK BOLT

Public Works Research Institute
Chibe Institute of Technology

Shinnichi HANAOKA
Kouyou IWASE
Shigeru HARUYAMA

ABSTRAKT

The reinforcement mechanism of a ended anchorage rock bolt has successfully been studied up to this time, and its field experience is enough. However, as to a fully bonded rock bolt, experience is not enough and the reinforcement mechanism also is not distinct. The fully bonded rock bolt is applicable for various tunnel grounds compared with the ended anchorage. Especially, it was reported to be effective for the swelling ground. I believe this report can give some information about the reinforcement mechanism of the fully bonded rock bolt.

The experiments we have done are.

- 1) One-dimensional compressive tests of which the test piece has some wires in it.
- 2) Two-dimensional loading tests on gelatin model tunnel.

From results of these experiment it has been cleared that even if it set some wires in test piece, the strength have not increased much.

It is generally believed that the rock bolt is not effective for the small inner friction angle material like gelatin. However, in this experiment the displacement could be decreased about 30%. I consider that it is because, not only the concentration of stress is decreased, but also compressive zone is formed.