

(72) 亀裂性岩盤における

ロックボルト支保効果の実験的研究

三井建設(株)技術研究所 正会員 ○ 中田 雅夫

正会員 平井 正雄

正会員 山地 宏志

A Study on the Effect of Rock bolts in the Jointed Rock Masses

Masao Nakata, Masao Hirai, Hiroshi Yamachi

(Technical Research Institute of Mitsui Construction Co., LTD.)

ABSTRACT

The installation of rock bolts has been recognized as one of the most effective support measures for stabilizing rock masses around rock caverns. However, the supporting mechanism of rockbolts is extremely complex, so that it would be difficult to evaluate the effect of rock bolts quantitatively.

In order to clarify how the rock bolts can improve the jointed rock masses, laboratory tests have been conducted, from which following results have been obtained, as to the effect of rock bolts.

- (1) In the elastic region, axial force occurred in the rock bolts is comparatively small, but rock bolts can increase both uniaxial compressive strength and modulus of elasticity.
- (2) In the plastic region, rock bolts are remarkably providing a large perfect plastic deformation after yielding.
- (3) Jointed rock masses with large axial force keeps stable up to a large strain level.

1. まえがき

ロックボルトは地下構造物の安定性確保のために最も重要な支保の一つである。しかしその作用機構は複雑であるため、支保効果を定量的に評価するまでには至っていない。ロックボルトの挙動についての研究は多く報告されているが、ロックボルトの効果についてマクロ的に評価し、実務的な設計にとり入れることも今望まれるところである。

本研究は亀裂性岩盤において、ロックボルトが地山をどのように改良するのかを明らかにするために、模型実験を実施し、ロックボルトの支保効果について検討を加えたものである。

2. 実験方法の概要

2-1 亀裂性岩盤の限界ひずみと供試体モデル

地下構造物の設計にあたっては地山の变形特性と強度特性が重要な設計パラメータである。したがって亀裂性岩盤の供試体モデルを作製する場合においても、モデルが岩盤のこれらの特性を正しく表現することが望ましい。

櫻井¹⁾らによって式(2.1)に示す限界ひずみの概念が提案され、一般にトンネルの施工管理基準値として用いられている。

$$\varepsilon_0 = \sigma_c / E \quad (2.1)$$

ここで、 ε_0 は限界ひずみ、
また σ_c はコアの一軸圧縮強度、
さらにEは弾性係数を示す。
一般に地山の限界ひずみはコア
の限界ひずみと工学的に十分な
精度で一致するとされている。
これは地山中に存在する大小の

亀裂面によって強度と弾性係数が低減し、その低減の割合がほぼ同程度であるためによる。なお、厳密に言えば弾性係数の方が一軸圧縮強度よりも低減率が大きいようであり、地山の限界ひずみはコアよりも若干大きいものとなる。したがって亀裂性供試体モデル作製にあたっては、これらの要件を満足することが望ましいものと考えられる。岩石、岩盤を表す供試体モデルはすでに多くの研究者によって提案されているが、^{2), 3)}ここでは本邦地山にしばしばみられる、ランダムな亀裂を有する地山モデルを考える。すなわち今回使用した供試体モデルの諸元は表-1のようであるが、セメントベントナイトによって作製した立方体のブロックに、正方形に裁断した紙をランダムに挿入し亀裂性岩盤を表現したものである。亀裂数すなわち挿入した紙の枚数は10、30、50の3種類で、これらの一軸圧縮試験による応力-ひずみ曲線を図-1に示す。また亀裂数の増加に伴う弾性係数、一軸圧縮強度、及び限界ひずみの変化の様子は図-2に示すものである。なお図中で弾性係数及び一軸圧縮強度はインタクトな供試体の値に対する比で示している。

図より明らかなように亀裂数の増加にともない変形係数、一軸圧縮強度は低下するが、限界ひずみはわずかに増加傾向を示しており、これは先に述べた現位置における限界ひずみの傾向と定性的に一致する。また、各亀裂数においてその応力-ひずみ曲線の再現性は概ね良好であることより、比較試験に供するモデルとして適当と言えよう。

表-1 供試体モデルの諸元

供試体材料	セメント・ベントナイト	W/C=40% (100×100×100)	B/C=5% 7日養生
亀裂面	コピー用紙	ランダム配置 (20×20×0.05)	

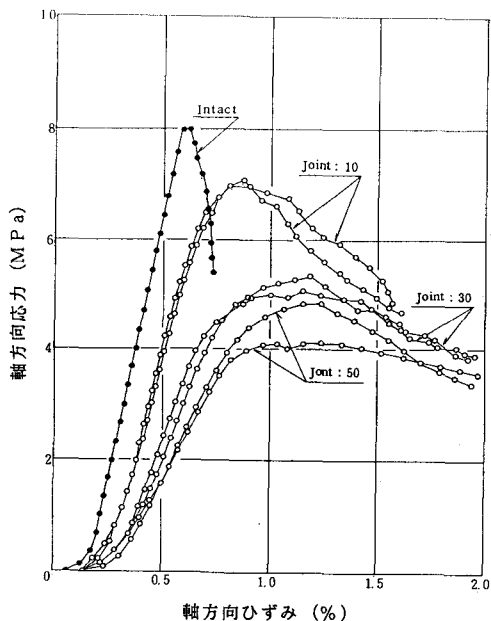


図-1 亀裂数の増加に伴う
応力-ひずみ曲線の変化

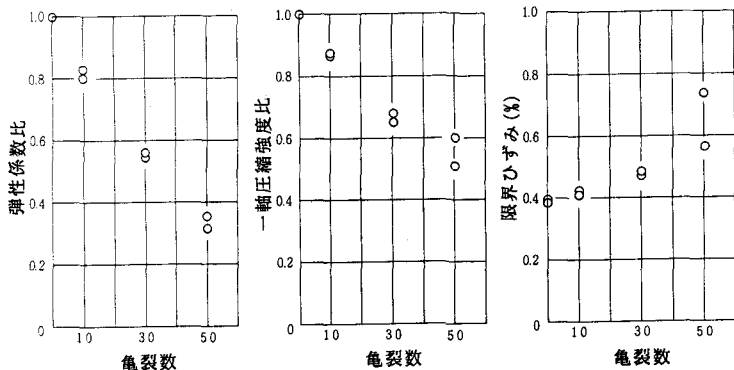


図-2 亀裂数の増加に伴う弾性係数、一軸圧縮強度、
限界ひずみの変化

2-2 ロックボルト模型実験

ロックボルト模型実験では上記の要領で製作した亀裂性供試体モデルに、 $\phi 4\text{ mm}$ のボアホールを穿孔し、この中に端部をねじ切りしたボルト（真鍮性、 $\phi 3\text{ mm}$ ）を挿入し、ベアリングプレート（真鍮性、 $15\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ ）によって両端を固定したものを使用した。さらにロックボルトに発生する軸力を測定するためにボルトの中央部に図-3に示すような形で、ひずみゲージを貼付した。なお、今回行った試験でのロックボルトの本数及び打設位置は図-4に示すものである。

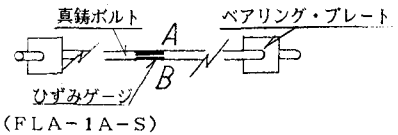


図-3 軸力計測用ロックボルト

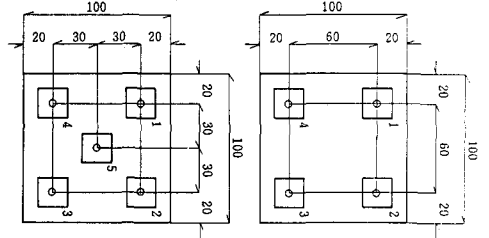


図-4 ロックボルトの配置

またロックボルトに発生する軸力を等価な拘束圧として評価するために、図-5に示すような供試体の側方を一定の圧力で加圧出来るような装置を製作し、これによって側方拘束下での圧縮試験も併せて実施した。

3. 亀裂性岩盤におけるロックボルトの支保効果

図-6に亀裂数30における応力-ひずみ曲線を示す。図にみられるように支保された供試体の弾性係数ならびに一軸圧縮強度は無支保の供試体に比べ向上している。さらに支保されたものは降伏後直ちにひずみ軟化に至らず、しばらくは完全塑性の挙動がみられる。

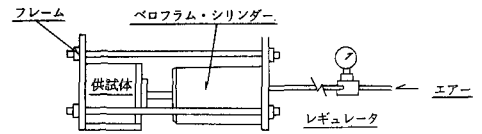


図-5 側方加圧装置

図-7は支保下における弾性係数、一軸圧縮強度及び限界ひずみの亀裂数の増加に伴う変化を、先に示した無支保の場合とともに示したものである。弾性係数、一軸圧縮強度とも支保した場合は無支保に比べてその値は高いが、亀裂数の増加とともに低下していることがわかる。一方、限界ひずみについては支保下及び無支保下であまり変わらず、また亀裂数によらずほぼ一定であり、インタクトな供試体の限界ひずみと概ね一致する。このことからボルト支保下においても、限界ひずみがその有用性を失わないことを示しているものと考えられる。

以上の結果から、亀裂性岩盤におけるロックボルトの支保効果として次のように言える。すなわち弾性領域においては地山の弾性係数を向上させることにより、地山のひずみレベルを低いものとどめ、また強度の向上をはかる。このとき限界ひずみはロックボルト支保下においても岩盤の限界ひずみとほぼ一致する。一方、限界ひずみを越える領域においては地山の力学挙動をひずみ軟化から完全塑性へ転移させ、地山の耐荷力を持続させる。ひずみ軟化を地山の安定性の損失と考えるならば、ロックボルトで支保された地山は限界ひずみを越えるひずみに対してもその安定性を失わないものと言えよう。

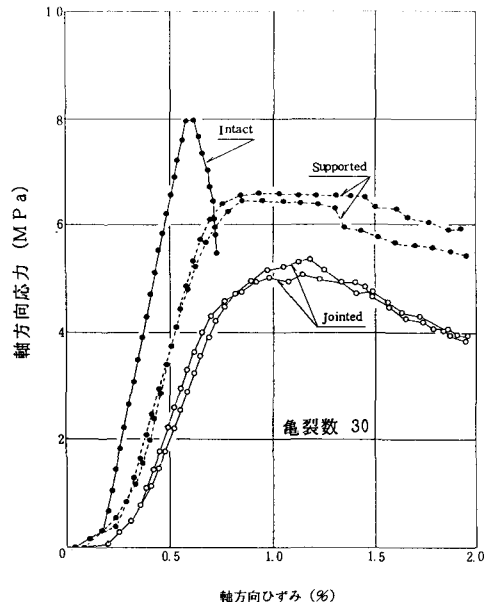


図-6 ボルト支保下における亀裂数30の応力-ひずみ曲線

4. ロックボルト軸力と支保効果

NATMにおいてはロックボルトの軸力計測が頻繁に行われており、計測結果の解釈については種々の論議がなされている。一般には大きな軸力値が得られる場合に有効な支保がなされているというものであろう。

図-8に先に示した亀裂数30での応力-ひずみ曲線とボルト軸力の発生状況を示す。このケースにおけるボルト本数は4本である。図より明らかに弾性領域においては発生軸力がかなり低いのにに対し、降伏点前から急激に軸力が増加し、塑性域ではかなり大きなものとなる。

一方、図-9はこのケースにおいて、軸力発生方向に供試体外側から拘束圧を作用させた試験結果である。図にはロックボルト支保下での曲線も併記しているが、これによればロックボルトに支保された供試体の挙動は、0.5MPaの拘束力を受けたものと類似している。ところがボルト軸力によって得られる拘束圧は、塑性域においても0.13~0.26MPaと0.5MPaの1/2~1/4程度にすぎず、弾性域においてはこれよりも相当に低い。このことより単に軸力を等価な拘束圧としただけではロックボルトの効果は判定出来ないようである。

図-10は各ひずみレベルに対応する支保面積あたりのボルト軸力の総和をを載荷軸方向の応力で除してプロットしたものである。ここでは亀裂数10, 30, 50のすべてケースを扱っている。図中、ピーク強度以下もしくは完全塑性状態にあるものは○の記号を用い、またひずみ軟化（ここではピーク強度の95%とした）状態にあるものは●の記号を用いた。図にみられるように、ピーク強度以下もしくは完全塑性とひずみ軟化の間には右上がりの境界線が存在することがわかる。これは大きなひずみレベルまで耐荷力を失わないものは大きな軸力（拘束圧）が発生しているということである。したがって管理基準値としての許容ひずみは軸力（拘束圧）の増加によって大きく取ることができる可能性を示唆しているものと思われる。

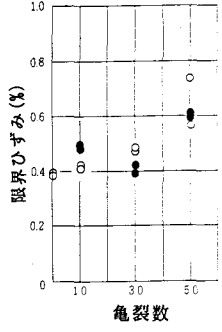
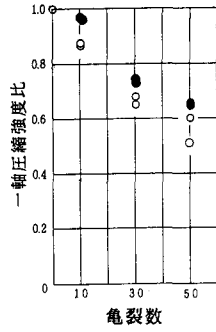
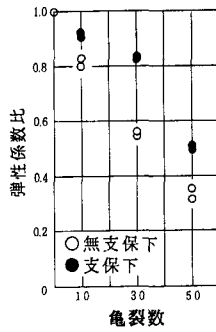


図-7 ロックボルト支保下での亀裂数の増加に伴う弾性係数、一軸圧縮強度、限界ひずみの変化

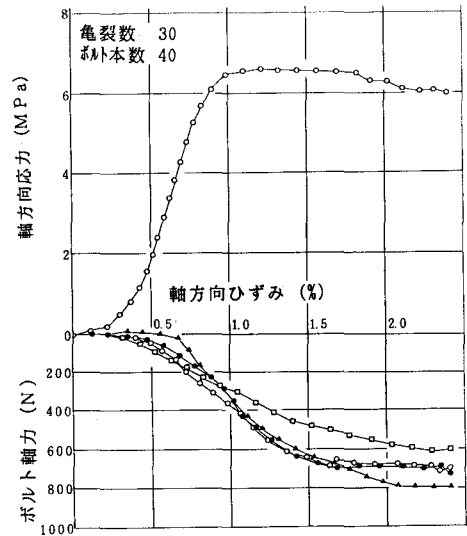


図-8 応力-ひずみ曲線とボルト軸力の発生状況

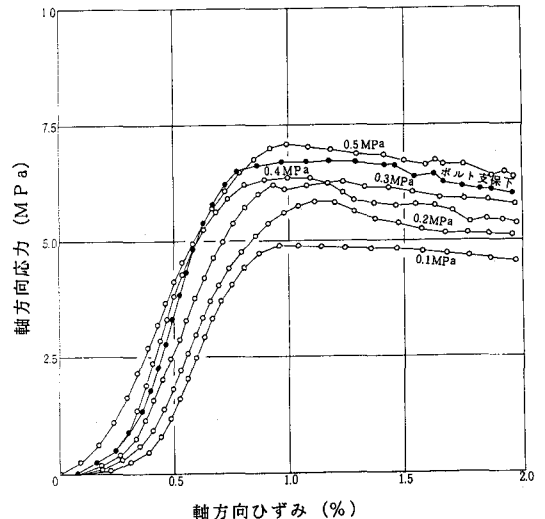


図-9 側方拘束下における応力-ひずみ曲

5. まとめ

亀裂性岩盤モデルを作製して、ロックボルトの支保効果に関する模型実験を実施した。今回の実験によって得られた知見をまとめると以下の通りである。

すなわち、弾性域においてはロックボルトに発生する軸力は小さいが、弾性係数及び一軸圧縮強度の向上として寄与し、地山のひずみを低いものとどめる。またロックボルトで支保した場合の限界ひずみは支保しない場合とあまり変わらず、亀裂数によらずほぼ一定であり、インタクトな供試体の限界ひずみと概ね一致する。

一方、塑性領域においてロックボルトには大きな軸力が発生し地山の耐荷力を持続させ、ひずみ軟化から完全塑性へと転移させる。さらにロックボルトに発生する軸力の大きなものほど高いひずみレベルまで安定性を維持（ひずみ軟化が発生しない）していることがわかった。

今後実際の地山においてこのひずみをどの程度まで許容できるかが明らかになれば、さらに経済的なロックボルトの設計につながっていくものと思われる。

最後に本研究の実施にあたっては神戸大学の櫻井教授に多大な御助言をいただいた。ここに感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 櫻井春輔: トンネル工事における変位計測結果の評価法, 土木学会論文報告集, 第315号, pp93~100, 1982
- 2) Stimpson, B. (1970) "Modelling materials for engineering rock mass", IJRM & MS, v7. p77
- 3) R. D. Lama・V. S. Vutukuri: Handbook on mechanical properties of rocks, Trans Tech Publications, pp111 ~ 190, 1978

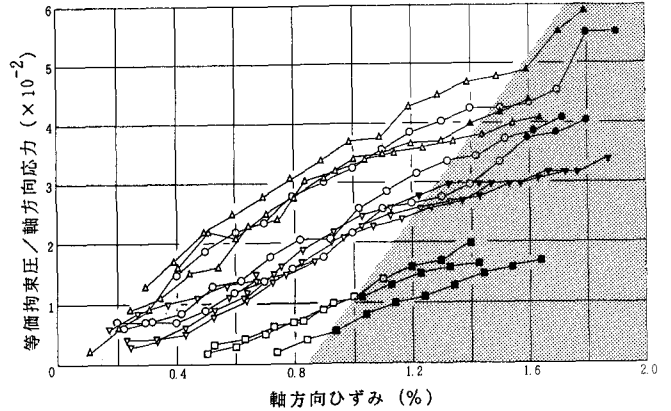


図-10 ひずみ軟化と完全塑性の境界線及び軸力（拘束圧）発生状況