

(9) 非線形力学特性を示す軟岩トンネルでのロックボルト効果 Effects of Rock Bolts in Soft Rock Tunnel

久武勝保*・渋谷 卓**・笠屋裕康***

Masayasu HISATAKE, Taku SHIBUYA and Hiroyuki KASAYA

The purpose of this research is to investigate the effects of rock bolts in restraining displacements of squeezing soft rock tunnel.

Three dimensional finite element method with initial stress method is employed.

Non-linearity of stress - strain relationship which depends on confining pressure and Hoek - Brown type's yield criterion are taken into consideration.

Key Words : tunnel, soft rock, squeezing, non-linearity, rock bolt, finite element method, three-dimensions, initial stress method

1. 結論

従来、トンネル建設技術は経験にたよるところが多かったが、NATMの採用と相まってトンネル力学に関する研究が活発に行われ、その成果が設計・施工に生かされてきた。しかし、地山強度比が小さい軟岩トンネルにおいては、強い膨張性ゆえに現在まで多くの難工事を強いられてきたが、その挙動の解明については種々研究が行われている^{1)~10)}ものの必ずしも十分ではなく、特にロックボルトの支保効果については不明な点が少ない。

軟岩トンネルにおける吹付コンクリートの変位拘束効果については、応力-ひずみ関係の非線形性・拘束圧依存性を考慮した二次元非線形解析の結果と、二次元弾塑性解析の結果とは、地山強度比が小なる場合において大きく異なることが明らかにされている^{11), 12)}。ロックボルトの支保効果についても同様の相違が予想されるが、ロックボルトが棒状に施工されることや、中間主応力の影響を考慮する必要があること等から、その解明には三次元解析をする必要性が認められる。

そこで本研究では膨張性を強く示す軟岩トンネルにおいて、ロックボルトの変位拘束効果を究明することを目的とし、変位拘束効果に及ぼす非線形応力-ひずみ関係の拘束圧依存性の影響を初期応力法¹³⁾による三次元非線形有限要素解析により検討する。

2. 解析手法の概説

2・1 解析手法

図-1の測定値(凡例で黒塗り)は地山強度比が小さくて、施工困難を極めた軟岩地山の応力-ひずみ関係を示したものである。このような地山では、掘削により平均主応力が低下することにより、強度低下が見られるのみ

* 正会員 工博 近畿大学助教授 理工学部土木工学科

** 正会員 修(工) ㈱地崎工業 技術開発部

*** 奥村組土木興業㈱ 環境開発事業本部

ならず変形性が卓越してくるので、特に変形問題を取り扱う場合にはこの影響を考慮する必要が認められる。

そこで、本解析では上記の影響を考慮するために、ピーク強度に達するまでは八面体平面上のせん断応力 τ_{oct} とせん断ひずみ γ_{oct} の関係を式(1)のKondner¹⁴⁾の双曲線で近似し、拘束圧に依存した構成関係を仮定する。

$$\tau_{oct} = \frac{\gamma_{oct}}{e + f \cdot \gamma_{oct}} \quad (1)$$

$$e = \frac{1}{G_i}, \quad f = \frac{R_f}{\tau_{oct,f}}, \quad R_f = \frac{\tau_{oct,f}}{\tau_{oct,ult}}$$

ここに、 G_i は初期接線せん断弾性係数、 $\tau_{oct,f}$ は測定される最大応力、 $\tau_{oct,ult}$ は双曲線モデルでの終局最大応力である。また、 R_f は非線形パラメータで0~1の間の値をとり、1に近づくほど非線形性が強い。

岩に対する降伏条件式は普通非線形で表現されるので、HockとBrown¹⁵⁾により提案された式(2)の降伏条件式を採用する。

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + s \cdot \sigma_c^2} \quad (2)$$

ここに、 σ_1 、 σ_3 は最大、最小主応力、 σ_c は一軸圧縮強度、 m と s は、岩の特性により決まる材料定数である。

従って、式(1)は式(2)で規定される降伏条件に依存して、拘束圧によって異なる非線形構成式を呈する。

表-1は、図-1の測定値を表現する本構成関係のパラメータの値を示したものである。表-1の値を使った応力-ひずみ曲線は図-1に表されており（凡例で白抜き）、一部 $\sigma_3 = 15 \text{ kgf/cm}^2$ の様に表現しきれないケースもあるものの、以上の構成関係により測定値を十分表現できると思われる。

2・2 解析条件

本研究では、等方初期応力 P の作用する軟岩地山において、切羽から十分離れその影響の及ばない位置での円形トンネルを対象とし、掘削に伴い初期応力が解放されると仮定した解析をポアソン比が一定として初期応力法で行った。

解析モデルは図-2に示すように、平面ひずみを模した一定奥行き W を持っており、表-2に示すパラメータで行った。

ただし、切羽の進行に従って、ロックボルト打設時には、ある程度応力解放が進んでいるはずであるが、解析を簡略化するためこれを考慮していない。

また、ここでは、ロックボルトの材料特性は線形弾性体とし、地山と完全に一体化して作用するものと仮定している。

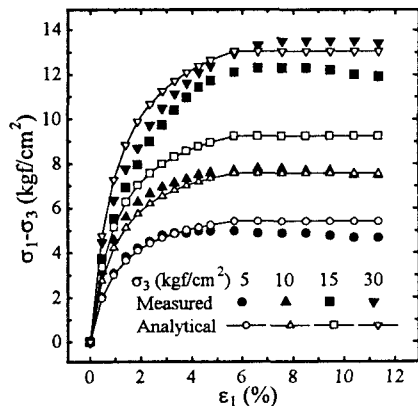


図-1 応力-ひずみ関係の測定値と計算値の比較

表-1 図-1を表現するパラメータの値

強度パラメータ	m	5.31
強度パラメータ	s	1.0
一軸圧縮強度	σ_c	1.06 kgf/cm ²
非線形パラメータ	R_f	0.84
	$G_i/\tau_{oct,f}$	169.77

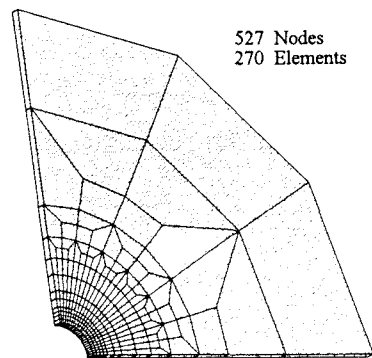


図-2 解析に用いたメッシュの鳥瞰図

表-2 解析に用いたパラメータの値

トンネル半径	r_i	3 m
強度パラメータ	m	2.5, 25.0
強度パラメータ	s	1.0
一軸圧縮強度	σ_c	154 tf/m ²
等方初期応力	P	308 tf/m ²
地山強度比	σ_c/P	0.5
	$G_i/\tau_{oct,f}$	184
非線形パラメータ	R_f	0.6
ポアソン比	ν	0.3
FEMの軸方向要素厚	W	1 m
ロックボルトの長さ		1.5, 3.0, 6.0 m
ロックボルトの断面積		$5.08 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
ロックボルトの弾性係数		$1.8 \times 10^7 \text{ tf/m}^2$
横断面あたりのロックボルト本数		6, 12, 24 本
軸方向のロックボルト打設間隔		1 m

3. 解析結果 と考察

図-3は、ロックボルトを打設した場合としない場合の壁面変位 u_i の分布を、トンネルラウン部の位置を 0° として円周方向に角度 θ をとり、 $\theta=30^\circ$ まで示した。

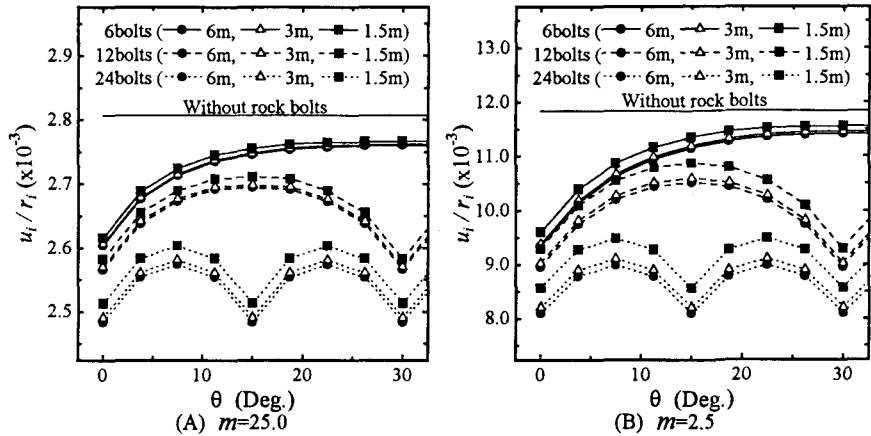


図-3 ロックボルト打設時の壁面変位

図-3(A)は応力-ひずみ関係の拘束圧依存性が高い場合 $m=25.0$ 、(B)は拘束圧依存性が低い場合 $m=2.5$ としている。なお、ロックボルト打設本数は、トンネル横断面あたり6, 12, 24本の場合で、ロックボルト長さは6, 3, 1.5mと変化させた。

壁面変位は、ロックボルトを打設する場合・しない場合ともに、応力-ひずみ関係の拘束圧依存性が低い(B)の方で大であるが、ロックボルトによる壁面変位拘束量も大である。

また(A), (B)両者に共通しているのは、壁面変位がロックボルト打設位置を支点にしたアーチ状の分布をしている。壁面変位はロックボルト打設本数が同じであれば、打設長さが1.5mよりも6mの場合、ロックボルト打設長さが同じであれば、打設本数が6本よりも24本の場合で小である。壁面変位はロックボルト長さの違いよりも、ロックボルト打設本数の影響を大きく受ける、等があげられる。

すなわち本解析条件下において、ロックボルト打設による壁面変位拘束効果は、応力-ひずみ関係の拘束圧依存性が低いほど大であり、ロックボルトの総使用量を一定にした場合を考えると、長く疎に打設するよりも短く密に打設する方でその効果が大きくなる傾向が推察できる。

そこで、ロックボルトの打設本数と長さが与える地山の力学特性の変化が、どのように生じているのか表現す

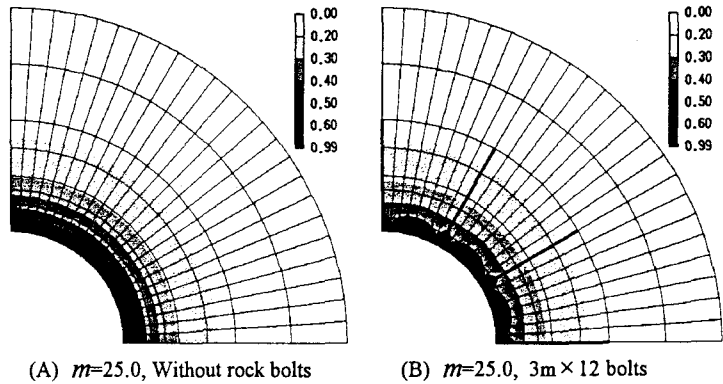


図-4 地山の破壊接近度, $\tau_{oct}/\tau_{oct,f}$

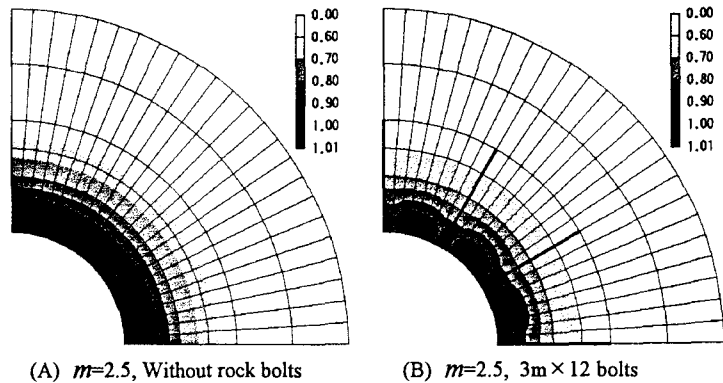


図-5 地山の破壊接近度, $\tau_{oct}/\tau_{oct,f}$

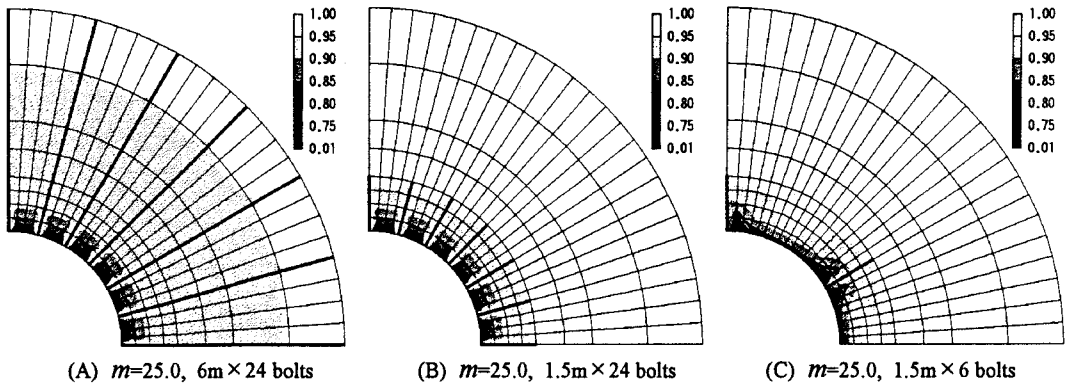


図-6 ロックボルトによる地山改良効果, $(\tau_{oct}/\tau_{oct,f})^* / (\tau_{oct}/\tau_{oct,f})^*$

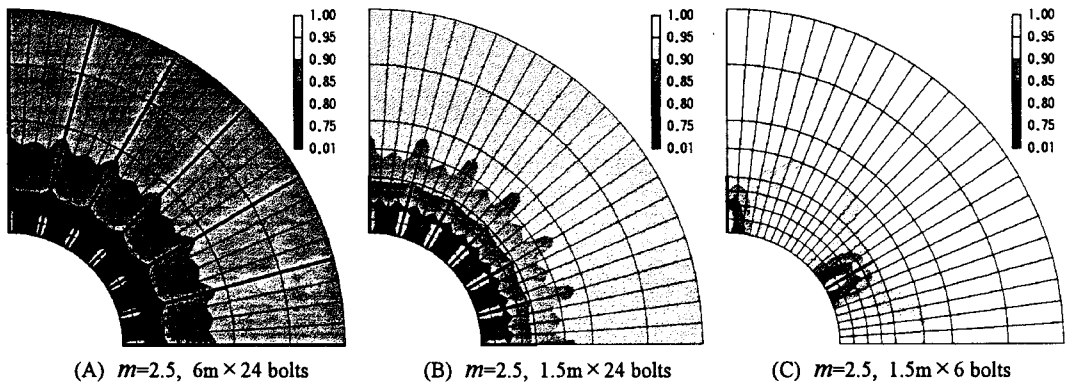


図-7 ロックボルトによる地山改良効果, $(\tau_{oct}/\tau_{oct,f})^* / (\tau_{oct}/\tau_{oct,f})^*$

るために、地山の破壊接近度をコンターで図-4、5に示した。

ここに破壊接近度とは、 τ_{oct} を $\tau_{oct,f}$ で除したものとする。

図-4は応力-ひずみ関係の拘束圧依存性が高い場合、図-5は低い場合であり、ロックボルトを打設しない素掘りの場合(A)と打設する場合(B)について示している。また、黒太線はロックボルト打設位置である。

まず、ロックボルトを打設しない素掘りの場合について両図を比較する。破壊接近度が1で地山が降伏するとすれば、図-5(A)で降伏領域が発生している。一方、この図と同様に地山強度比が0.5と小さいにも拘わらず、図-4(A)には降伏領域が見られない。これは、掘削に伴いトンネル周辺領域の平均主応力が低下するが、応力-ひずみ関係の拘束圧依存性の高い地山の方で、この低下量が小さいためである。

すなわち、地山強度比が小であっても、応力-ひずみ関係の拘束圧依存性が大であれば、トンネル周辺地山の強度低下量が小さいために、トンネル周辺領域は降伏しにくいと考えられる。したがって、地山強度比によって降伏するかしないか、また、降伏する場合の降伏領域について確定することは、困難であるといえる。

次に、(A)と(B)を比較すると、ロックボルトを打設する(B)の方で破壊接近度が低下している。この影響は、壁面近くのロックボルト周辺で顕著であり、また図-4、5ともに同様の傾向を示している。

そこで、素掘りの場合に比べてどの程度、破壊接近度が低下するかを比較するために、ロックボルトを打設した場合の破壊接近度 $(\tau_{oct}/\tau_{oct,f})^*$ を素掘りの場合の破壊接近度 $(\tau_{oct}/\tau_{oct,f})^*$ で除して、これをロックボルトによる地山改良効果と見なしてコンターで表現すると、図-6、7のようになる。

図-6は応力-ひずみ関係の拘束圧依存性が高い場合、図-7は低い場合で、トンネル横断面あたりのロックボルト打設本数とボルト長さは図に示している。

ロックボルトによる地山改良領域は、図-6、7共にトンネル壁面近くのロックボルト周辺に現れ、壁面に近づくほど顕著であるが、ロックボルトと地山が直に接する部分はせん断力のため低くなっている。

ロックボルトの打設長さによる地山改良領域の違いは、(A)と(B)により比較できるが、トンネル壁面近くに注目すればあまり大差なく、図-6の応力-ひずみ関係の拘束圧依存性が高い場合については、ほぼ同程度である。

次に、ロックボルト打設本数による地山改良領域の違いを(B)と(C)で比較すると、ロックボルトの打設間隔が広い(C)の場合では、ロックボルトによる地山改良領域はロックボルトを打設した周辺部のみに集中し、トンネル周辺地山を覆うように連続していない。また、図-6(B)の地山改良領域の分布は、単に図-6(C)を回転させて重ね合わせたような分布をしているが、図-7(B)は図-7(C)のそれよりもかなり大きくなっている。これは、トンネル掘削によりその周辺領域の拘束圧が低下するが、図-7(B)の場合において、その低下を抑止するロックボルトの効果が、図-6(B)の場合比べて大きいためであると考えられる。

すなわち、ロックボルトによる地山改良効果は、ロックボルトの打設長さよりも打設本数に影響される。また、この効果の違いは、応力-ひずみ関係の拘束圧依存性が低い場合ほど顕著である。

4. 結論

本研究で得られた結果は以下の通りである。

- (1) 本研究に用いた構成式は、実測された軟岩の応力-ひずみ関係を大局的には表現できる。
- (2) 地山強度比が小であっても、地山の強度の拘束圧依存性が高ければ、降伏領域は発生しにくい。
- (3) ロックボルトを打設した場合のトンネル円周位置での壁面変位分布は、ロックボルト打設位置を支点にしたトンネル内面に凸なアーチ状を呈す。
- (4) 地山の応力-ひずみ関係の拘束圧依存性が小なるほど、素掘り時の壁面変位は大であるが、ロックボルト打設による壁面変位拘束効果は大である。
- (5) ロックボルトの横断面あたりの総使用量を一定にした場合では、長く疎に打設するよりも、短く密に打設する方で壁面変位拘束効果は大である。
- (6) 地山の応力-ひずみ関係の拘束圧依存性が小なるほど、(5)の違いは大である。
- (7) ロックボルトによる地山改良領域は、トンネル壁面近くのロックボルト周辺に現れ、壁面に近づくほど顕著であるが、ロックボルトと地山が直に接する部分はせん断力により低下する。

参考文献

- 1) Tazawa, Y., Nakahara, Y., and Okabayashi, N.: Effects of Rock Bolts and Thin Linings As Tunnel Supports in Soft Rock, Proc. Int. Symp. on Weak Rock, Vol. 1, pp. 151-156, 1981.
- 2) 安井将文: 粘性地山におけるロックボルトの作用に関する模型実験と考察, トンネルと地下, Vol. 13, pp. 7~16, 1982.
- 3) Aydan, Ö., Kyoya, T., Ichikawa, Y. and Kawamoto, T.: Reinforcement Effects of Rockbolts and their Analysis, 第22回土質工学研究発表会, pp. 923-926, 1983.
- 4) 今田 徹: 若干の粘着力を有する粒状体地山におけるロックボルトの作用効果, 土木学会第44回年次学術講演会概要集, 第3部, pp. 308~309, 1988.
- 5) Indraratna, B. and Kaiser, P. K.: Design for Grouted Rock Bolts Based on the Convergence Control Method, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 27, No. 4, pp. 269-281, 1990.
- 6) 土屋 敬: ロックボルトのトンネル補強効果と最適設計パターンに関する実験的研究, 土木学会論文集, 第436号/Ⅲ-16, pp. 17~26, 1991.
- 7) 久武勝保, 稲葉 力, 渋谷 卓: 非線形軟岩トンネルにおけるロックボルト効果に関する考察, 第26回土質工学研究発表会, 発表講演集, pp. 1815~1816, 1991.
- 8) 久武勝保, 稲葉 力, 渋谷 卓: 非線形軟岩トンネルにおけるロックボルト効果, 土木学会第46回年次学術講演会, 概要集第3部, pp. 610~611, 1991.
- 9) 谷本親伯: ロックボルトの作用効果に関する考察, ロックボルトと岩盤支保, スウェーデン大使館科学技術部, 1993.
- 10) アイザン・オスル, 赤木知之, 伊藤 孝, 瀬崎満弘: スウェーデン・ロックにおけるトンネル周辺地盤の変形を考慮した支保工の設計法, 第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 51~55, 1995.
- 11) 久武勝保, 伊藤富雄, 朝倉俊弘: 軟岩の非線形力学特性を考慮したトンネル理論解析, 土木学会論文集, 第400号/Ⅲ-10, pp. 39~43, 1988.
- 12) 久武勝保, 桜井春輔, 伊藤富雄: 軟岩トンネルの非線形弾塑性挙動, 土木学会論文集, 第418号/Ⅲ-13, pp. 125~132, 1990.
- 13) Zienkiewicz, O. C.: マトリクス有限要素法, 吉誠雅夫・山田嘉昭 監訳, 培風館, 1984.
- 14) Kondner, R. L.: Hyperbolic stress - strain response: Cohesive soils, J. Soil Mech. Fdns. Div. ASCE, 89, SM1, pp. 115 - 143, 1963.
- 15) Hoek, E. and Brown, E. T.: Underground Excavation in Rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London, England, pp. 99 - 133, 1980.