

投稿論文 (和文ノート)

**TECHNICAL
NOTE**

ロックボルトによって補強された不連続性岩盤のモデル化について

櫻井春輔*・川嶋幾夫**

不連続面を有する岩盤の補強にロックボルトは非常に有効である。しかし、その効果を数値解析によってシミュレートしようとする場合、岩盤をそれと力学的に等価な疑似連続体としてモデル化する従来の方法では、その効果を過小評価することになる。本ノートでは、まずその原因が岩盤のモデル化にあることを指摘し、従来の疑似連続体モデルの問題点を明らかにする。つぎに、不連続面を拘束するロックボルトの効果を明らかにするために実施した室内のモデル実験の結果に基づき、ロックボルトによって補強された岩盤のモデル化に対する一つの考え方を提起する。

Keywords : jointed rock mass, rock bolt, modeling, laboratory model test

1. はじめに

我国において、NATM工法は山岳トンネルにおける標準工法として定着した。また、最近それは都市トンネルにおいても、その経済性や、掘削断面の形状を自由に選択できるなどの理由により、積極的に採用されるようになってきた。しかし、この工法の主要支保部材であるロックボルトの設計は、その作用機構が複雑なため、多くの研究がすでに発表されているにもかかわらず、いまだ不明確な点が多い。

もちろん、最近の有限要素法に代表される優れた数値解析法をもってすれば、ロックボルトによって補強された岩盤の力学的挙動の予測も可能であろう。しかし、その場合、十分に注意しなければならないことは、岩盤およびロックボルトのモデル化である。ロックボルトによって補強された岩盤のモデル化は、①不連続体的アプローチ、②疑似連続体的アプローチに大別することができる。前者は、岩盤内に存在する不連続面およびロックボルトを忠実にモデル化するものであり、不連続面とロックボルトの相互作用を詳細に調べることができる利点を有している。しかし、解析には、不連続面の位置、性状、力学特性などの詳細なデータが必要であるために、多くの不連続面が存在する場合は、その適用は非常に困難となる。一方、後者は、不連続面を有する岩盤を、それと力学的に等価な連続体(疑似連続体)にモデル化し、連続体力学に基づき解析を行うものである。この方法は、岩盤内の不連続面の位置および性状を詳細に調べる必要がないため、岩盤構造物を設計する実務的な立場からは、一般に有利なアプローチであると考えられる。

しかし、その場合には、不連続面を含む岩盤を、疑似連続体としてどのように定量的にモデル化するかということが問題となる。そこで、本ノートにおいては、まず、従来の疑似連続体モデルにおける問題点を明らかにし、ついで不連続性岩盤に打設されたロックボルトの補強効果を室内におけるモデル実験により考察する。そして、その結果から、ロックボルトによって補強された岩盤のモデル化の考え方について一つの方法を提案する。

2. 従来の問題点

ロックボルトは、不連続面を有する岩盤の支保部材として、非常に有効であることは経験的によく知られている。しかし、その効果を数値解析によってシミュレートすることは一般に容易でない。ロックボルトによる補強効果を数値解析によって調べるために、大久保はトンネルを対象にして岩盤を連続体と考え、平面要素によってモデル化し、その接点間にロックボルトを線材として付加することによって有限要素解析を試みている。その結果、吹き付けコンクリートとロックボルトの支保効果に対して、**Fig.1**のような結果を得ている。なお、図において縦軸は、支保の無い状態で得られる変位と、支保の有る場合の変位の差を百分率で表わしたものである。**Fig.1**から、ロックボルトの支保効果は非常に小さいことがわかる。この点について、大久保は、ロックボルトが地山の割れ目を縫い付け、地山を一体化する効果や、地山塑性後の残留強度を改善する効果等が十分にモデル化されていないためロックボルトの効果が過小に評価される結果になったと述べている。そして、ロックボルトによる地山の補強効果については、モデル化を含め、今後の検討課題であると結論づけている¹⁾。また、Aydan等も不連続性岩盤を疑似連続体としてモデル化し、有限要素法によってロックボルトの補強効果を調べている。その結果、ロックボルトは硬岩においてその効果はあま

*正会員 工博 Ph. D. 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657 神戸市灘区六甲台町 1-1)

**学生会員 修(工) 神戸大学大学院生 自然科学研究科 博士課程

Table 1 Cases of experiments

Case	Type of Joint	Type of Rock Model	Reinforcement	Rate of Cement:Clay:Sand:Water
1	Jointed Model	Hard Rock	with Bolts	1 : 0 : 3 : 1
2			without Bolts	
3		with Bolts		
4		without Bolts		
5	Non Jointed Model	Soft Rock	with Bolts	1 : 3 : 0 : 3.6
6			without Bolts	
				1 : 9 : 0 : 7.5

Table 2 Experimental results

Case	Young's Modulus (MPa)	Rate of Young's Modulus	Compressive Strength (KPa)	Rate of Compressive Strength
1	383	4.7	980	3.5
2	82	1.0	280	1.0
3	137	1.9	450	1.6
4	72	1.0	280	1.0
5	118	1.5	340	1.2
6	78	1.0	280	1.0

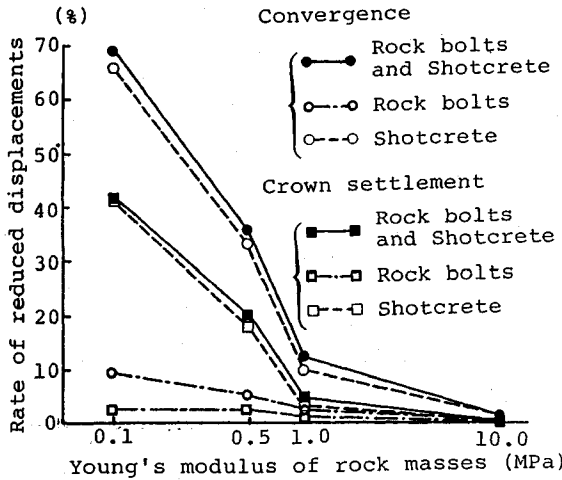


Fig.1 Displacements reduced by installation of rock bolts¹⁾

り見られず、軟岩に対してやっとその効果が見られると述べている²⁾。しかし、これは、岩盤を連続体としてモデル化したことにより得られる当然の結果である。この結果をふまえて、川本らは、ロックボルトがその効果を発揮するのは不連続性の岩盤に対してであり、したがって、軸力、せん断や曲げを受けるような状態でのボルトの解析が必要であると述べている³⁾。いずれにしても、不連続性岩盤内に挿入されるロックボルトの作用効果を、有限要素法によって解析する場合、通常用いられている疑似連続体としての岩盤のモデル化には多くの解決すべき問題が含まれていることがわかる。

3. モデル実験

(1) 実験の目的および概要

不連続性岩盤を不連続体としてモデル化する場合と、それと力学特性が巨視的に等価な連続体としてモデル化する場合のそれぞれについて、ロックボルトの補強効果の違いを、モデル実験により明らかにする。

モデル実験は、不連続面をもつ不連続供試体（不連続体モデル）およびそれとほぼ同じ応力～ひずみ関係を示す均質供試体（連続体モデル）について、それぞれボルトを打設したもの、および打設しないものに対して行った。実験には、縦および横それぞれ 100 mm、高さ 200 mm のモルタル供試体を用いた。不連続供試体には

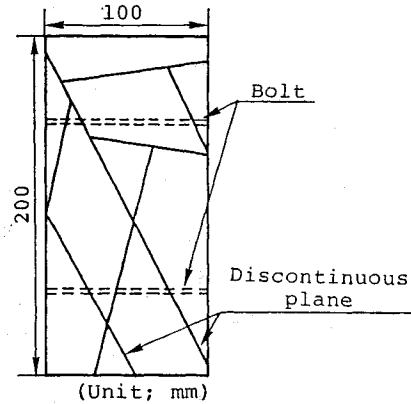
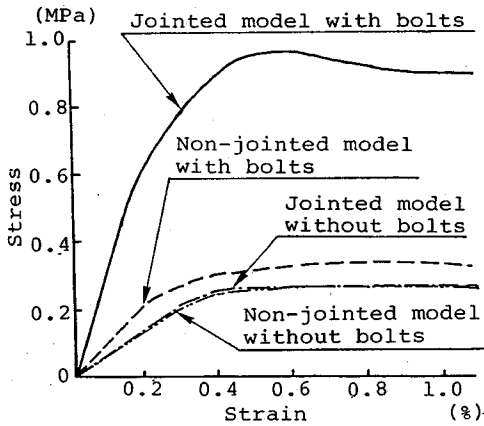


Fig.2 Specimen representing a jointed rock mass

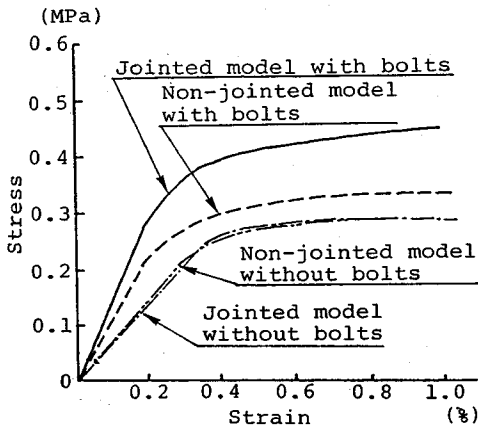
Fig.2 に示すような不連続面を 2 次的に配置した。不連続面はその配置する箇所に仕切り板を設置した型枠を用いて材料を打設し、脱型後、不連続面を分離させ、そこに粘土シーム層を挟み、その後再びブロックを接合することによって作成した。シーム層の厚さは約 0.4 mm、その材料の配合比は、早強セメント：カオリン粘土：水 = 1 : 4 : 4.5 とした。不連続面の接合から（均質供試体については打設から）48 時間後に、供試体の 2 箇所（Fig.2 参照）に $\phi 4$ mm のドリル孔を穿孔し、そこに全面接着型のロックボルトのモデルとして、周囲にグラウト（配合：早強セメント：水 = 1 : 0.5）をした $\phi 3$ mm の真ちゅう総ネジボルトを挿入した。不連続面の接合から（均質供試体については打設から）7 日後に、平面ひずみ状態を再現するようボルトと平行な側面の変形を拘束した供試体に、定ひずみ（0.05%/分）で鉛直方向に載荷し、そのときの荷重および載荷軸方向の変位を測定した。実験は、不連続供試体および均質供試体について、ボルトを設けたものおよび設けのないものについて行った。また、ここでは、岩盤が硬岩の場合と、軟岩の場合のロックボルトの補強効果の違いを調べるため、基質の強度を変えた供試体を用いて実験を行った。実験のケースを Table 1 に示す。

(2) 実験結果および考察

硬岩を想定したモデルの応力～ひずみ関係を Fig.3 (1) に示す。図中、不連続供試体にボルトを打設した場合の応力～ひずみ関係は実線、打設していない場合は



(1) Hard rock type



(2) Soft rock type

Fig.3 Stress-strain curves obtained by model tests

一点鎖線で、また、均質供試体の場合はそれぞれ破線、二点鎖線で示す。それぞれの応力～ひずみ関係から得られる変形係数および一軸圧縮強度を Table 2 に示す。この表には、ボルトを挿入した場合、ボルトのない場合に対する増加の割合をも示してある。表から明らかなように、不連続供試体の場合はボルトの打設により変形係数で、4.7 倍、強度で 3.5 倍、ボルトのない場合に対して改良効果が現われている。一方、同じボルトを設けた均質供試体では、変形係数で 1.5 倍、強度で 1.2 倍の改良効果しか現われていない。これらの結果より、不連続供試体のボルトによる改良効果は変形係数、強度ともに非常に大きいことがわかる。一方、軟岩を想定したモデルの応力～ひずみ関係を Fig.3 (2) に示す。この図から明らかなように、軟岩モデルは、硬岩モデルに比べてボルトによる改良効果は、かなり小さい結果となっている。この場合、変形係数の改良効果は、不連続供試体の場合は 1.9 倍、均質供試体の場合は 1.5 倍、また、強度の改良効果はそれぞれ 1.6 倍、1.2 倍である。このこと

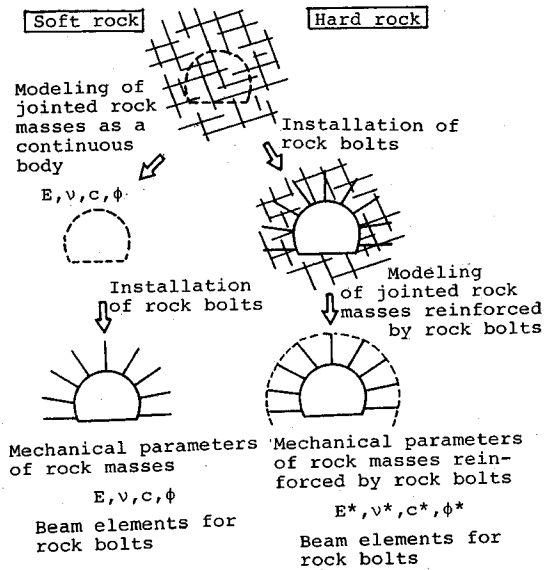


Fig.4 Modeling of jointed rock masses reinforced by rock bolts

から、軟岩を想定したモデルでは、不連続供試体と均質供試体におけるボルトによる改良効果の差は、硬岩モデルに比して小さいことがわかる。この実験の結果から、不連続性岩盤のロックボルトの解析において、岩盤を疑似連続体としてモデル化すると、ロックボルトの作用効果が過小評価される結果になることがわかる。また、その誤差は、岩盤が硬くなればなるほど大きくなる。従来の連続体力学に基づく有限要素解析において、ロックボルトの作用効果が硬岩の場合には計算上ほとんど現われず、軟岩においてのみ若干現われることがこの実験結果からよく理解される。また、この実験結果は、軟岩においては不連続面が存在しても、それを疑似連続体としてモデル化して解析できることを示している。そして、そのモデル化の精度は、岩盤が軟らかくなればなるほど向上することが予想される。また、軟岩の場合、ロックボルトの作用効果は、硬岩に比較して小さいことも、この実験結果から推定できる。これは、現場における経験とも一致するところである。

4. 不連続性岩盤とロックボルトのモデル化の考え方

前節で示したモデル実験の結果から、不連続性岩盤に打設したロックボルトのモデル化について、次のことが明らかとなった。すなわち、不連続性岩盤の変形係数やせん断強度は原位置岩盤試験によって求めることができるが、通常の原位置平板載荷試験やせん断試験によって求められる変形係数、粘着力、内部摩擦角などはそれ自身連続体に対する力学定数であり、不連続面の影響を考慮してそれらの値をいくら小さくとっても、もはや不連

統面は存在しないため不連続面を拘束するロックボルトの効果を表現することはできない。したがって、有限要素解析においても、まず、岩盤を連続体としてモデル化し、そこにロックボルトを棒要素として挿入する方法では、不連続性岩盤に打設されるロックボルトの補強効果を十分にシミュレートすることはできないことがわかる。そこで、これに代わるモデル化の方法として、**Fig.4** に示す方法が考えられる。すなわち、硬岩においては、まず、不連続性岩盤にロックボルトを打設した状態を考え、その後で、ロックボルトの作用効果も考慮して岩盤を等価な連続体としてモデル化する方法である。この方法によれば、硬岩において、不連続面を拘束するロックボルトの効果が大きく、変形特性およびせん断特性が大きく改善されるような場合でも、トンネル周辺の岩盤の変形係数やせん断強度をロックボルトによる補強効果を含めて評価すれば、連続体力学の枠組みの中に、その補強効果を的確に取り込むことができる。なお、ここで、ロックボルトの補強効果を考慮して得られる岩盤の等価な変形係数やせん断強度は、通常の前位置岩盤試験などによって得られる値とは異なることに注意しなければならない。一方、軟岩の場合には、前節に示したモデル実験の結果から明らかなように、ここで提案するモデル化によって得られる解析結果は、従来のモデルによるものと大差ないと考えられる。そこで、軟岩の場合には**Fig.4** に示すような、従来のモデル化が可能であろう。すなわち、前位置試験などによって得られる岩盤の力学定数を連続体モデルの中にそのまま用いて解析することができよう。

5. 結 論

本ノートでは、まずロックボルトによって補強された不連続性岩盤を疑似連続体としてモデル化する際の問題

点を指摘した。そして、岩盤の不連続面を拘束するロックボルトの効果を明らかにするために、室内のモデル実験を実施し、その結果に基づき、ロックボルトによって補強された不連続性岩盤のモデル化に対する一つの考え方を示した。

すなわち、硬岩においては、不連続面をジョイント要素などによって忠実にモデル化する不連続体的アプローチの場合には問題ないが、連続体的アプローチをとる場合には、不連続性岩盤を疑似連続体としてモデル化した後に、ロックボルトを挿入するのではなく、まず、不連続性岩盤にロックボルトを打設した状態を考え、ロックボルトが打設された岩盤を、不連続面とロックボルトの相互作用を考慮に入れて疑似連続体としてモデル化しなければならない。

一方、軟岩においては、岩盤を、まず、それと力学的に等価な疑似連続体としてモデル化し、その後にロックボルトを挿入することによってロックボルトを有する岩盤のモデル化が可能となる。

謝辞：本研究の実験において、本学学部学生大谷達彦君に協力頂いた。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 大久保雅憲：有限要素法の利用（その5）—トンネル及びトンネル周辺地山の解析—，土木技術資料第27巻第8号，pp.50～56，1985年8月。
- 2) 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発表講演集(2分冊の1), pp.923～926, 1987年6月。
- 3) 川本眺万・アイダン, オメル：ロックボルトの支保機構について，電力土木，No 214, pp.3～13, 1988年5月。
(1991.12.4 受付)

MODELING OF JOINTED ROCK MASSES REINFORCED BY ROCK BOLTS

Shunsuke SAKURAI and Ikuo KAWASHIMA

It is well known that rock bolts are extremely effective for reinforcement of jointed rock masses. However, it is not easy to simulate the rock bolt effects properly by using numerical analysis methods. This is mainly due to the difficulty of modeling jointed rock masses. In modeling the rock masses, there are two approaches available; one is the continuum approach and the other is the discontinuum approach. As far as design works are concerned, the continuum approach is preferable. In this paper, we first pointed out a problem in modeling jointed rock masses, particularly in the continuum mechanics approach. Second, we proposed a basic concept for modeling jointed rock masses reinforced by rock bolts by considering laboratory test results.