

(71) 花崗岩の不連続面に対するロックボルト補強効果の実験的研究

埼玉大学工学部 正会員 吉中龍之進 ○丹沢昭義
(株)熊谷組 正会員 清水昭男 新井 元
蟻坂俊英 西村良司

Reinforcing effect of rockbolt for discontinuity of granite

Ryunoshin Yoshinaka, Akiyoshi Tanzawa
(Saitama university)

Teruo Shimizu, Hajime Arai, Shunei Arisaka, Ryouji Nishimura
(Kumagai-gumi Co., Ltd.)

ABSTRACT

Recently, the utilization of underground excavation has been attracted attention for tunnels, storage facilities and so on. Under The existing circumstance, NATM that is efficient for safety and economical has being established as one of the standard method for that constructing.

The authors have been studying to clarify the effect of reinforcement and mechanism of rock-bolt in jointed rock mass through the experiments and analysis. Previous investigation proved the shearing resistance of two-dimensional regular jointed molded models and natural like irregular three-dimensional jointed molded models. The main aim of this paper is to describe the shearing resistance and its deformation characteristics of reinforced discontinuity of fresh granite and three-dimensional molded model.

1. はじめに

現在、トンネル、地下貯蔵施設等においての地下空洞の利用が大いに注目をあびている。その中で、安全性、経済性において有意な NATM 工法は、その建設においてひとつの標準工法として定着している。そこで著者らは、特に岩盤不連続面の、せん断に対するロックボルトの補強メカニズムを明らかにするため一連の実験と解析を行っている。²⁾

本研究では、これまでにモルタルを用いて、定型歯形モデル、天然の三次元不連続モデルで亀裂面を模擬した実験を行ってきたわけだが、今回は、実際に新鮮な花崗岩を用いてそのせん断特性等を解明することを試みた。本報告は、その実験結果とそれに基づいたモデル化に関する一考察をまとめたものである。

2. 実験方法

実験に用いた供試体の形状及び寸法を図-1に示す。台形を2つ組み合わせた物であり、せん断面は、花崗岩供試体の場合、せん断方向に沿って何点かノミをいれ人工的に不連続面を作り、モルタル供試体の場合は、その花崗岩面を3次元的に型どりの面を用いた。面の形状はA, B, Cの3種類であるが、人工的なため3者に大きな差は見られなかった。また、花崗岩の物性は表-1に示すとおりであり、モルタルにおいては一軸圧縮強度500kgf/cm²程度の高強度のものを用いた。補強用ロックボルトはD13とD16の異形鉄筋を

不連続面中央を通るように1本配し、端部はプレートとナットにより拘束した。さらに、不連続面に対するボルト設置角 α を変え、各々の補強効果を比較した。なおここでの α は、不連続面に対しせん断方向から測った角度である。具体的なパラメータは表-2に示す。

載荷方法は、垂直応力一定、平面ひずみ状態を保つよう、せん断応力を増加していく方法で行った。なお、ボルトに生じる軸力等は、不連続面から5cmと、10cmの位置に張り付けたヒズミゲージから、また、供試体に生じる変位は、長辺短辺それぞれ4ヶ所に設置したダイヤルゲージにより測定した。全ての載荷面にはテフロンシートをはさみ、摩擦の低減を図った。

3. 実験結果及び考察

3. 1せん断試験

図-2に、直接せん断試験の応力-変位曲線を示す。同図は代表的な一つの面の花崗岩供試体と、同面を型どりしたモルタル供試体各々の無支保、支保の両状態で行った試験結果であり。設置角は両者とも60°であり、垂直応力は5kg/cm²一定である。これより、花崗岩のせん断特性およびモルタルとの相関を検討する。

まず、花崗岩の無支保、支保ケースについてみると、せん断初期においては両者とも非常に高い剛性を示している。特に無支保ケースについてはその傾向が顕著であり小さな変位でピークに近い値に達している。これと比較して、支保ケースはせん断変位の増加にともない徐々にせん断応力が上がっていく傾向が認められる。これは、支保ケースに用いた面は実験の都合上、垂直応力を5kg/cm²、10kg/cm²、20kg/cm²、5kg/cm²、という順で変化させて繰り返しせん断を行った後の面であるのに対し、無支保ケースの場合は、その繰り返しせん断の最後の試験結果なので、多少面形状の違いが現れたのだと思われる。無支保ケースの場合ピークに達した以降ほぼ横ばい状態になるのに対して、支保ケースの場合ある点まで直線的にせん断力が増加し、それ以降は徐々に上がっていきピークに達する。つまり、せん断初期では面自体の摩擦や凹凸によるせん断抵抗とボルトによ

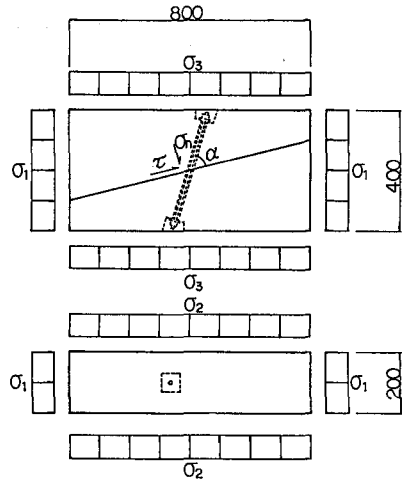


図-1 実験装置

表-1 花崗岩の物性

一軸圧縮強度	1300 kg/cm ²
ヤング率	5.8 × 10 ⁵ kg/cm ²
ポアソン比	0.21
摩擦角	31°

表-2 実験パラメータ

粗 度	A , B , C
ボルト設置角	45° , 60° , 75°
ボルト径	D13 D16

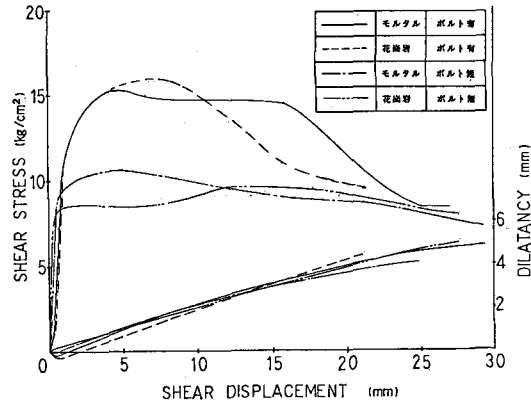


図-2 せん断応力およびダイレイタンスーとせん断変位との関係

る面の拘束のためせん断力が弾性的に増加するが、面の凹凸が破壊され変位が大きくなるにつれ、ボルトの伸びや曲がりなどの、変形による抵抗へと移り変わり、塑性的な応力の増加がみられる。ボルト破断後は急激に応力が低下し、ほぼ無支保ケースの曲線へと漸近していく。多少残留強度に差が現れるのは破断後のボルトの引っかかりや、別の凹凸への乗り上げの影響が現れたためと考えられる。同図中のダイレイタンスーの変化はやや支保ケースの方が小さく現れるが、それほど大差はないことが判る。

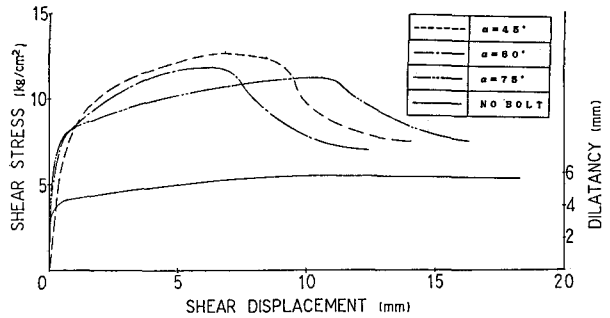


図-3 せん断応力およびせん断変位との関係

次に、花崗岩供試体と、モルタル供試体のせん断特性の現れ方の違いを検討する。ここで、同図中に用いられている花崗岩の面は前述と同様、繰り返しせん断後の面であるのに対し、モルタルの面は、繰り返しせん断前の不連続面を型どりのしたものであることを断わっておく。初期の段階ではグラフの立ち上がりはほぼ同一の傾向を示しているが、グラフが直線から曲線へと移行していく当りから、モルタル供試体は早めにピークに達し、それ以降は横ばいか減少していくのに比べ、花崗岩はピークに達するまでにある程度変位している。また、ピーク強度を比較すると、花崗岩の方が大きく現れている。ところが破断変位を比べると花崗岩よりもモルタルの方が大きいことがわかる。これは、花崗岩は面の摩擦角の小ささや、モルタルに比べて面の粗さが少ないことからボルトの軸力の発現が早く、また、母材強度が大きいためボルトの大きな変形がなされないで早めに切断されてしまう一方、モルタルの場合は母材強度が小さいためボルトの大きな変形が可能となり、ピークを過ぎてもボルトの大きな変形によりある程度せん断応力が維持できると考えられる。なお、ダイレイタンスーに関しては両者に殆ど差はみられない。

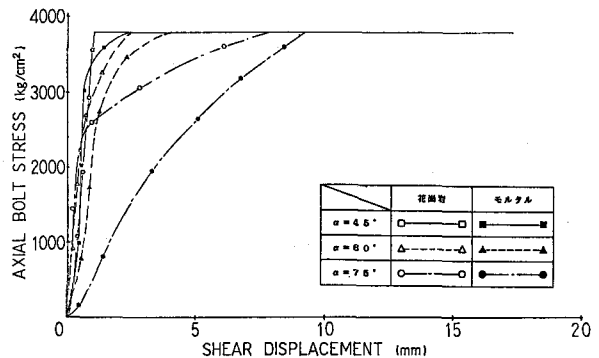


図-4 軸力とせん断変位との関係

図-3に設置角別に比較した、応力-変位曲線を示す。ここに用いられている供試体は、せん断面がフラットな花崗岩である。同図中において、ピークせん断強度には $45^\circ > 60^\circ > 75^\circ$ の関係がみられ、ピーク時のせん断変位はほぼ逆の順になる。また、ボルト破断後は3ケースとも一定の値へと漸近していくが、この値が無支保ケースの残留強度よりもやや大きめに現れているのは、破断後のボルトの引っかかりであろう。ここで、今回行ったモルタル供試体や過去のモルタル供試体を用いた場合の設置角度別実験比較との対応を見てみると、ピーク強度の大小、さらにその変位の関係は同様の結果が認められるが、せん断初期においてのグラフの立ち上がりには違いが現れている。今回や過去のモルタル実験等においては $45^\circ > 60^\circ > 75^\circ$ という関係がみられるが、花崗岩においては3者に差が認められず、逆に設置角が大きい方がやや高めに現れる傾向がある。そこで図-4に、図-3で用いた供試体と、同条件で実験したモルタル供試体の軸力-変位曲線を示す。同図は、不連続面から5 cmの位置にはり付けたヒズミゲージから測定した軸力と、せん断変位と

の関係を表したものである。これより、花崗岩はモルタルほど3つの角度によって初期の段階での軸力の現れ方に差が無いことが判る。つまり、母材強度が大きいため、設置角が大きくなっても広範囲での曲がりがなく、局所的な曲がりであるため、早くから卓越方向に軸力が発生したので、3者とも似たような傾向が現れたと考えられる。従って、設置角別に応力-変位曲線の立ち上がりに大差がなかったのはこの影響と考えられる。

3. 2ロックボルトの変形

写真1に実験後に供試体から取り出したボルトの曲がり形状を示す。写真はモルタルと花崗岩の設置角度別の変形の様子を示している。変形測定は写真撮影したボルトの軸線を図-5の様

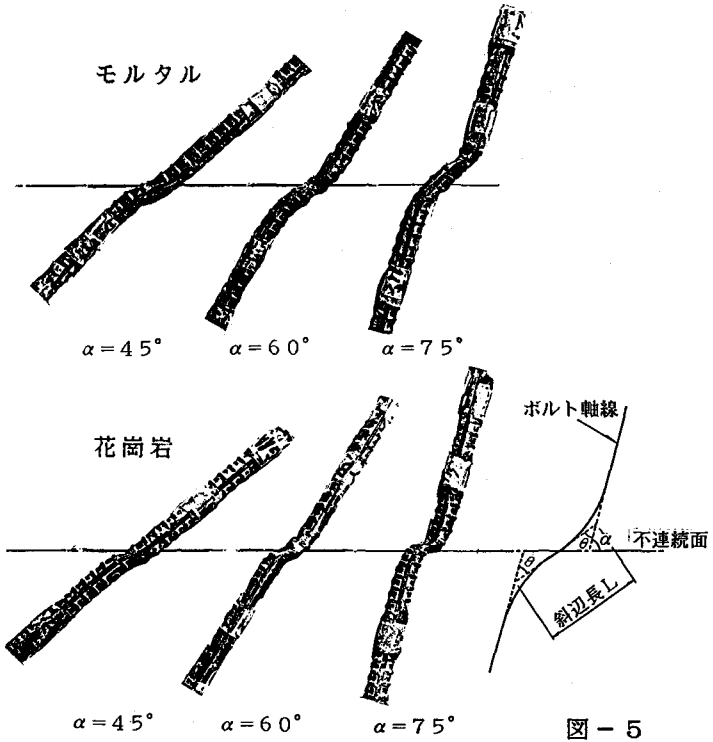


図-5

写真1 ボルトの曲がり形状 ボルトモデル図

に描き、軸線を3本の直線に置き換え同図中の斜辺長 L および曲がり角 θ を測定することにより行った。形状を全体的にみて、母材強度が低いモルタルは広範囲でボルトの曲げや伸びが認められるのに対し、母材強度の大きい花崗岩は、曲がりは大きい、局所的であるため、モルタルより、せん断による小さな範囲で破断した感じが強い。これは、図-6の母材強度-斜辺長関係からも推察できる。同図は過去の実験結果も載せているため、実験条件の違いからバラツキはあるが、母材強度と斜辺長の間に明らかに反比例の関係がみられる。今回、母材強度 1300kg/cm^2 の供試体の実験結果が加えた事で、いっそうその関係が確かめられた。また、この関係は点線のように双曲線で近似できると考えられ、母材強度の増加にともなう斜辺長をある程度限定できると思われる。

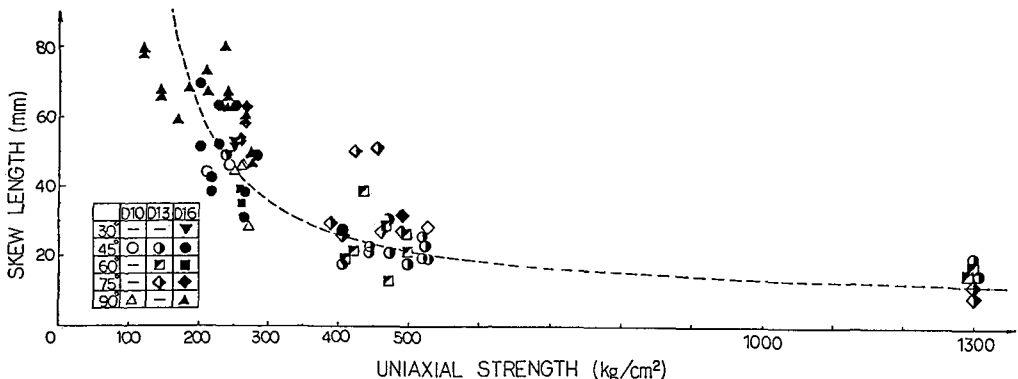


図-6 母材強度と斜辺長の関係

同様に、図-7にせん断変位Uと斜辺長Lとの関係を示す。ここで、UとLと θ の間には $U=L \sin \theta / \sin \alpha$ の関係があり、同図中のUは実測されたLと θ より上式を用いて計算した値である。これより、UとLの間に比例関係があることが判り、任意の変位にともなうボルトの斜辺長、さらには伸び量の推定が可能となる。

次に、ボルトの変形及び母材強度とボルト補強効果との関連性を図-8に、設置角度別の補強効果で示す。ここでの補強効果とは支保ケースのピークせん断強度から無支保ケースのそれを差し引いた値である。面の影響を取り除き補強効果のみをみるため、せん断面は全てフラット面で統一してある。同図を角度別に見ると全体的な右下がりの傾向があり、従来の結果と一致している。しかし、モルタルと比較して花崗岩の方が、補強効果において大きな値を示している。この原因は、基本的には母材強度の違いによるボルトの変形形態の違いに起因するが、軸力の発現とせん断変位の関係、破断形態の違いが深く関係している。この詳細は別途報告の予定である。

4. おわりに

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) ボルトの効果の現れ方は、面の摩擦角の違いにより異なる。つまり、摩擦角が小さいとボルトに依存する傾向が強くなり、早い段階で軸力が発現する。
- 2) モルタルにくらべ、花崗岩の方が大きな補強効果を示した。母材強度の違いがボルトの変形に大きな影響を及ぼし、その変形の仕方が補強効果に深くかかわっていると考えられる。
- 3) ボルトの変形は、モルタルが広範囲に、花崗岩は局部的に生じている。
- 4) せん断変位-斜辺長、及び、母材強度-斜辺長の間の相関が確認できた。

参考文献

- 1) 吉中, 清水, 新井, 加藤, 磯坂: 岩盤不連続面のせん断に対するロックボルトの補強効果, 第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, p 431~p 436, 1987
- 2) 吉中, 清水, 新井: 岩盤不連続面に対するロックボルトの補強効果, 土質工学会論文報告集V o 1 2 8 No 2, p 177~186, 1988

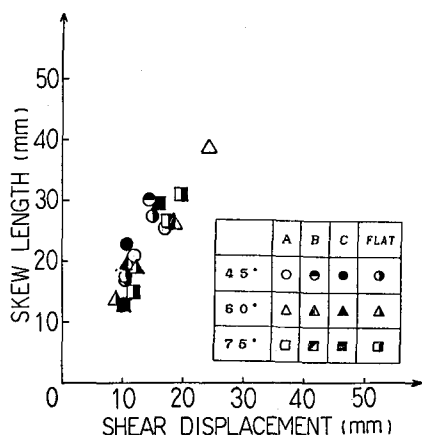


図-7 せん断変位と斜辺長との関係

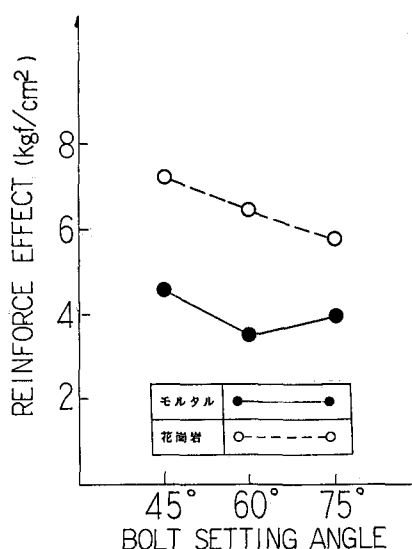


図-8 設置角度と補強効果との関係