

(46) 実地的な岩盤不連続面のロックボルト補強

埼玉大学工学部 正会員 吉中 龍之進

〃 熊谷 組 正会員 清水 昭男 新井 元

〃 〃 〇加藤 恵三 蟻坂 俊英

1. はじめに

ロックボルトは、トンネルや地下空洞等の掘削における主要支保部材として重要な役割を果たしている。ロックボルトの補強効果に関する基礎研究は、現場における施工時の観測とともに、トンネルや地下空洞の効率的な設計・施工を目差す上で意義深いことである。筆者らは、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・メカニズムを解明するため、一連の実験とその解析を通じて研究を進めている。¹⁾

これまでの実験では、岩盤不連続面を模擬するために規則的な歯型形状を持つ二次元モデルを用いてきたが、今回は自然に存在する三次元不連続面を用いることにより、より現実に近い岩盤モデルを再現しようと試みた。ここでは、三次元不連続面を持つ供試体にロックボルトを設置してせん断試験を行い、ロックボルトのせん断に対する補強効果について検討した。本報告では、この実験結果と、これまでの結果との比較を含めたボルト補強効果について述べる。

2. 実験方法

実験に用いた供試体は、図-1に示すように2つの台形を組合せた形とした。2つの台形の間の側面は、自然の露頭した岩盤不連続面から型取りした三次元の面となっている。不連続面には、比較的滑らかと思われる面A、比較的粗いと思われる面B、かなり粗いと思われる面Cの3種類の自然面を用いた。供試体は硬岩に近づけるため、一軸圧縮強度を500kgf/cm²程度の高強度モルタル製とした。また、不連続面を補強するロックボルトとして、D13の異形鉄筋1本を不連続面の中心を通るように設置した。不連続面とボルトのなす角 α は、45°、60°、75°の3種類とし、ボルトの端部には定着具として鋼製のプレートとナットを設置したものと、定着具のないものとの2種類を作製し、補強効果の比較をした。

載荷は、不連続面上の平均垂直応力が5kgf/cm²一定となるように最大主応力 σ_1 および最小主応力 σ_3 を調節し、せん断応力をステップごとに増加する方法で行った。なお、 σ_2 は平面ひずみ状態が保てるよう制御し、載荷面にはテフロンシートを挟み、摩擦を低減するよう努めた。実験に用いたパラメータは、表-1に示す通りである。

3. 実験結果および考察

3.1 せん断試験

せん断試験結果の一例を図-2に示す。同図は、粗さCの不連続面を無支保でせん断したものと、ロックボルトをそれぞれ45°、60°、75°で設置したものとの、せん断応力～せん断変位関係お

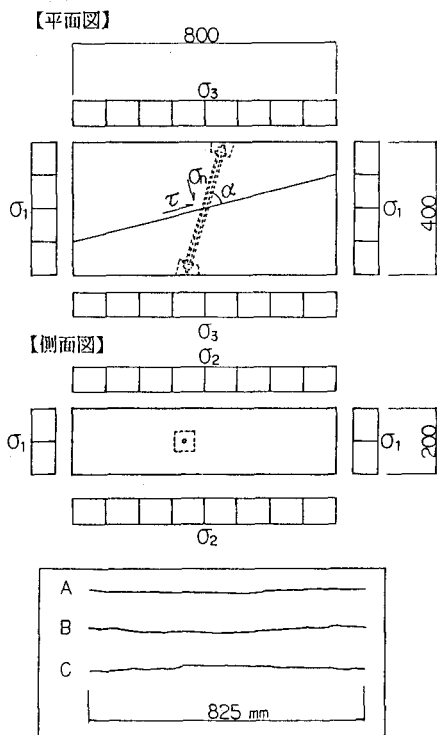


図-1 実験供試体と岩盤から型取りした不連続面

表-1 実験パラメータ

粗 度	A, B, C
ボルト設置角	45° 60° 75°
端部拘束	有, 無

よびダイレイタンスーせん断変位関係を表わしたものである。同図から、せん断変形に伴う不連続面およびロックボルトの強度特性をある程度読み取ることができる。せん断初期において、いずれのケースも不連続面の噛み合せにより非常に大きな剛性を示し、弾性的に強度が増加する。ボルト補強のないケースの強度がピークに達した辺りから、ボルト補強されたケースのせん断応力変位曲線に丸身が帯び、変形が大きくなっていることがわかる。これは、せん断により不連続面上の凹凸の強度がピークに達し、切断破壊を起こしているためである。その後、せん断力はボルトの効果により増加傾向を維持するが、ボルトの塑性変形がピークに達すると、やがて破断を起こしせん断応力は急激に低下する。ボルトの破断は 45° 、 60° 、 75° の順に早く生じ、その後せん断強度は徐々に減少し、やがてボルトなしのせん断強度に漸近していく。同図中のダイレイタンスーは、ケースにより多少の差はあるが、いずれも類似した曲線に載っており、ボルトを入れたことによるダイレイタンスーの変化は、目に見える程大きいものではないことがわかる。

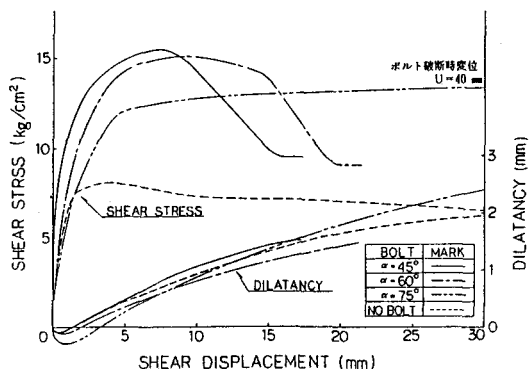


図-2 せん断応力およびダイレイタンスーとせん断変位との関係

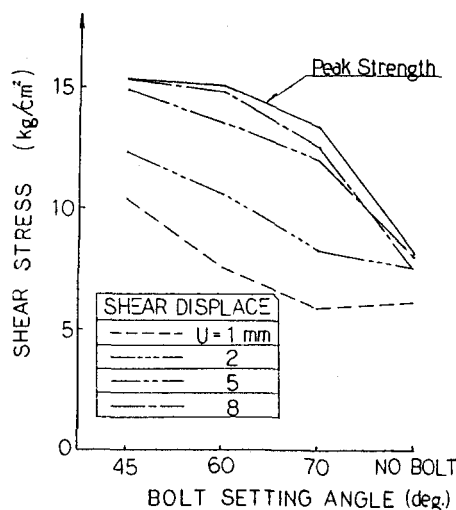


図-3 せん断応力とボルト設置角の関係

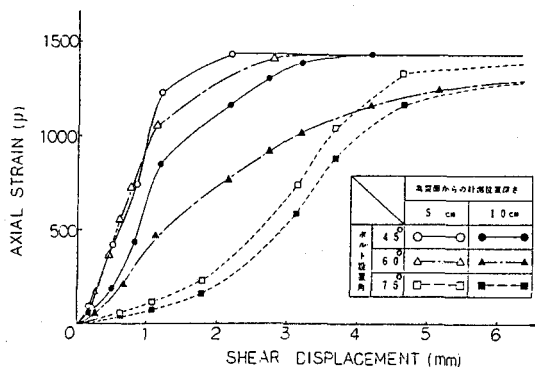


図-4 ボルト軸ひずみとせん断変位との関係

せん断強度は 45° 、 60° 、 75° の順に大きくなり、ピーク時のせん断変位は逆の順に大きくなる。これは、図-3に示すグラフからもわかるように、設置したボルトの角度により補強効果の現れ方が異なることを示している。ボルト設置角 α が大きい場合、せん断初期の段階において曲げ応力が強く働き、軸力はあまり発生しない。せん断が進行すると、ボルトはせん断方向に変形し始め、ボルトには軸力が卓越して生じるようになる。一方 α が小さい場合、不連続面のせん断によって受ける曲げの力が小さく、初期の段階から軸力が大きく働くようになる。図-4は、ボルト軸力とせん断変位の関係を示したものである。同図から、ボルト設置角が小さいもののほど、また計測位置が不連続面に近い部分ほどボルト軸力は早期に出現していることがわかる。このことは、前述のボルトの強度特性を裏付ける結果となっている。

次に、不連続面の粗度に対するせん断強度の変化を図-5に表わす。不連続面の粗度は、見かけ上C、B、Aの順に粗いと思われたが、多少の違いは見られるもののボルト補強したせん断試験ではそれほど差はなかった。また、図-6にボルトの設置角に対するせん断補強効果の違いを示した。同図は、ボルトを設置したケースのピークせん断強度から、ボルトを設置しないケースのピークせん断強度を差し引き、補強効果として図中の縦軸にプロットしたものである。 45° 、 60° 、 75° の順に補強効果は大きく現れており、この結果は従来の二次元不連続面モデルでの試験結果²⁾と全く同様であった。

3.2 ロックボルトの変形

せん断試験後の供試体から、試験後変形したボルトを取り出し、ボルトの変形を測定した。図7(a)は、ボルト設置角 $\alpha=45^\circ$ 、 60° 、 75° の変形の様子をそれぞれ示している。ボルトは、例外を除きほぼ不連続面上で破断しており、破断面を挟んでほぼ対称に変形している。写真上のボルトは、破断した2本のボルトを破断面で接着し、破断時のボルトの変形状態を再生したものである。変形測定は、写真撮影したボルトの軸線を同図(b)の

ように描き、軸線を3本の直線に置き換え、図中の斜辺長 l および曲り角度 θ を測ることにより行った。斜辺長は凡そ、不連続面からボルトの最大曲率点までの距離(最大曲率点深さ)の2倍の長さを表わしており、曲り角度はその曲率の度合を表わしている。

図-8に斜辺長 l とせん断変位 U との関係を、図-9には曲り角度 θ とせん断変位 U との関係を示した。斜辺長 l と U の間には、 $U = l \cos(\alpha - \theta)$ (α =ボルト設置角)なる関係があり、図-8において U と l が直線的に表わされているのは、不連続面と破断時のボルトのなす角度が一定であることを示している。実験からこの値は、 $30 \sim 40^\circ$ 程度であると考えられる。2つの図を大掴みに見ると、斜辺長、曲り角度共に 75° 、 60° 、 45° の順に大きな値を示すことがわかる。

母材強度とボルト変形との関係は、図-10に示す斜辺長 l ～モルタル～軸圧縮強度のグラフから推察できる。同図には、ボルト設置角やボルト径、その他不連続面粗度など条件の違う実験ケースを含んでいるためにバラツキはあるが、斜辺長と軸圧縮強度との間には反比例の関係があり、双曲線で近似できると考えられる。母材の強度が大きくなることは、相対的にボルトの剛性が小さくなることを意味しており、ボルトの剛性と斜辺長と

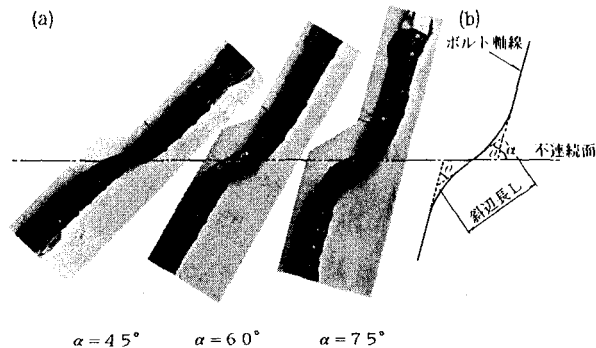


図-7 (a)ロックボルトの変形状況 (b)変形形状の測定

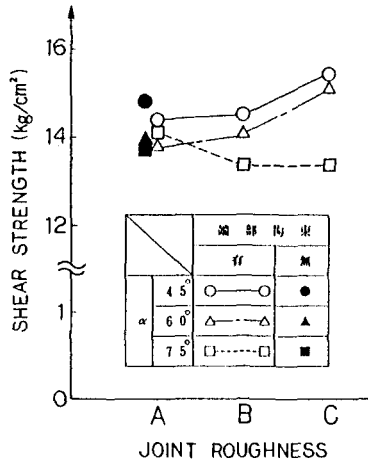


図-5 不連続面とせん断強度の関係

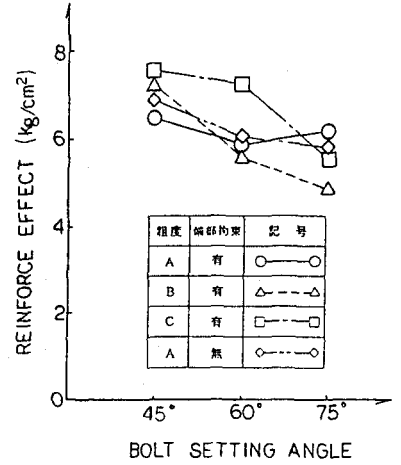


図-6 ボルト設置角とせん断に対する補強効果の関係

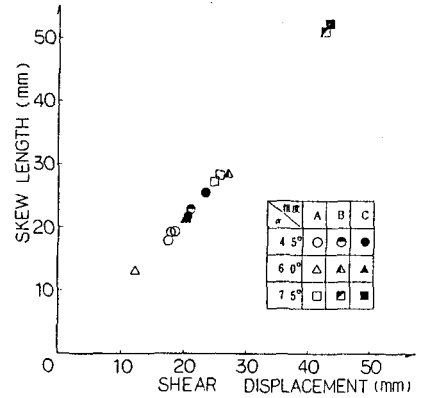


図-8 斜辺長とせん断変位との関係

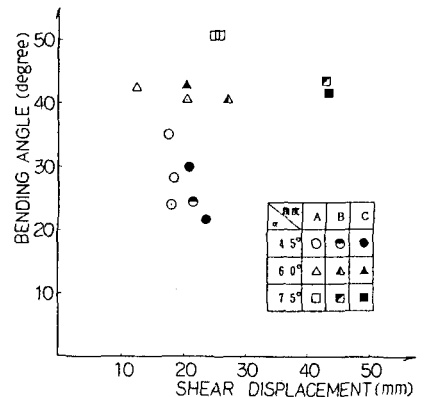


図-9 ボルト曲り角度とせん断変位の関係

の間にも相関が生じることになる。斜辺長 l から一軸圧縮強度 σ_c の影響を取除くため、2つのパラメータの積 $l \times \sigma_c$ を計算し、ボルト径との関係を図-11に示した。やはり、実験には諸パラメータの影響があるためにバラツキが見られるが、全体的に見ると正の相関が現れていることがわかる。

3.3 不連続面上の凹凸のせん断

せん断試験後、不連続面上の凹凸のせん断面積を測定し、ボルト補強に伴うせん断面破壊状況の変化を調べた。面積の測定は、試験後のせん断面上の凹凸をセロファン紙に書き取り、切断されたもの、擦傷を負ったもの、無傷だったものに分類し、それぞれをデジタイザーで入力、面積計算して行った。

凹凸のせん断面積測定の一例を図-12に示す。同図は、ボルト補強のないせん断面(a)と、ボルトで補強したせん断面(b)とを並べたものであるが、図に示した斜線部はいずれも凹凸切断部を表わしている。(a)、(b)両図を見比べると、ボルト破断位置の付近で面積が拡大していることがわかる。これは、ボルト設置箇所において供試体のダイレイタンスが抑えられ、ボルト近傍でせん断面が押え付けられたことによるためと考えられる。図-2に示したダイレイタンス～せん断変位関係では両者に大差は見られなかったが、これはボルトによる拘束効果が局部的なものであり、面全体のダイレイタンスを低減させるような強い拘束力を発揮するものではないからだと考えられる。このため、ボルト補強したケースの凹凸の切断面積は補強のないものに比べ、平均で7%程度増加するが、ボルトの設置角度による変化はほとんど見られなかった。

4. おわりに

ロックボルトを自然の岩盤から型取りした三次元不連続面に設置し、せん断に対する補強効果を多面的な視野から検討した。その結果、ロックボルトの効果として、せん断強度、せん断剛性、そして不連続面の破壊形態に影響を与えていることを示した。また、ロックボルトの効果に影響を与える要因として、不連続面の母材強度、ボルト設置角、ボルト径が深く係わっていること、さらにそれら要因がロックボルトの変形に強い相関があることを示唆した。二次元および三次元不連続面に対するロックボルト補強効果は、基本的に相違はないものと考えられるが、せん断によるダイレイタンスの生じ方によって、多少補強効果に影響が現れるのではないと思われる。

参考文献

- 1) 清水, 新井, 加藤: 亀裂性岩盤に対するロックボルトの補強効果に関する実験的研究. 熊谷技報 1987.2
- 2) 吉中, 清水, 新井, 加藤, 蟻坂: 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, 1987

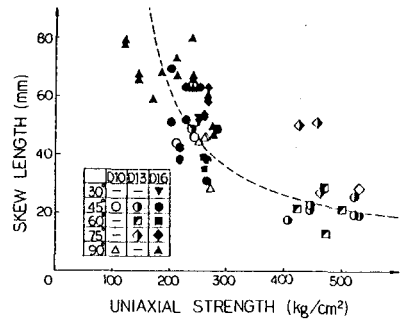


図-10 母材強度と斜辺長の関係

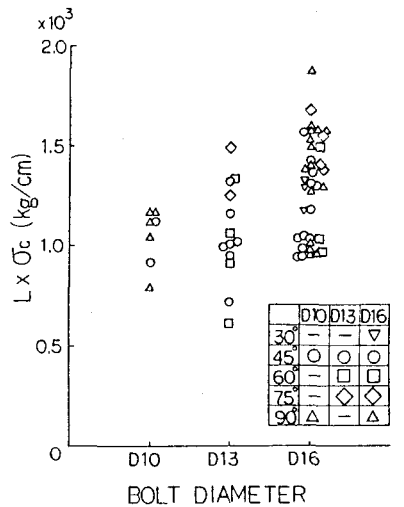


図-11 母材強度を考慮した斜辺長とボルト径の関係

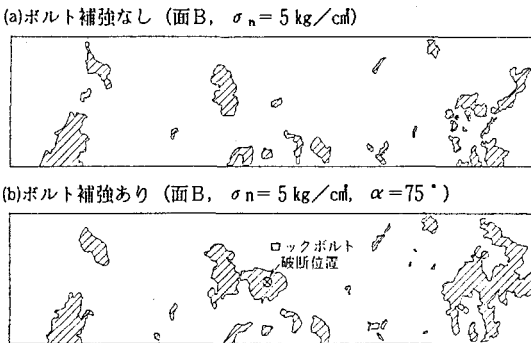


図-12 不連続面上の凹凸の切断状況

(46) Reinforce Effect of Rock Bolt in Actual Rock Joint

Ryunoshin Yoshinaka

(Saitama University)

Teruo Shimizu, Hajime Arai, Eizo Kato and Shunei Arisaka

(Kumagai Gumi Co., Ltd.)

ABSTRACT

Rock bolt has important function as one of major support members for underground and tunnel. Experimental study on the rock bolt reinforce is as significant as field measurement for efficient design and execution. So the authors push forward a research on reinforce effect and mechanism of rock bolt in jointed rock through the indoor experiment and analysis.

Two-dimensional regular joint model had used before, but in order to realize the natural rock joint, practical three-dimensional joint surface has adopted.

The authors experimented the shearing test of three-dimensional rock joint reinforced by rock bolt.

The results may be summarized as follows:

- Rock bolt affects shear strength, stiffness and destructive form of rock joint.
- There are strong correlation between reinforce effect and follows; strength of rock mass, bolt setting angle and bolt diameter.
- There are also correlation between destructive form of rock bolt and follows; strength of rock mass, bolt setting angle and diameter.
- Reinforce effect of rock bolt on three-dimensional joint is mostly same as that on two-dimensional joint. However, according to dilatancy, a little differences may arise between two type of joint.