

(58) 岩盤分離面に対するロックボルトの作用効果に関する基礎研究

埼玉大学 吉中 龍之進・埼玉大学大学院 阪口 聡
(株)熊谷組 清水 昭男・〇(株)熊谷組 新井 元

1. まえがき

近年、トンネルや地下空洞の施工にNATM工法が多用される傾向にあり、したがって、節理性岩盤にロックボルトが施工される機会も増加している。しかし、ロックボルトの作用効果発現のメカニズムは十分解明されていないといえず、作用効果の定量的な把握は困難とされている。

そこで、本研究では、節理性岩盤のせん断に対するロックボルトの作用効果及びそのメカニズムを明らかにするため、その第一歩として、単一の不連続面をロックボルトで補強したモルタル供試体を用いて、室内せん断試験を行った。現実の不連続面の形状は極めて複雑であり、そのため定量的考察が容易ではないので、これを最も単純化した定角度の粗さを持つ不連続面を用いた。以下ここにその概要を報告する。

2. 試験概要

2.1 載荷試験装置

写真1に載荷試験装置の外観を示す。載荷試験装置は水平最大主応力方向 200° と($100^\circ \times 2$ 基)計4基、水平最小応力方向 80° ($20^\circ \times 4$ 基)計8基および鉛直中間主応力方向 100° の油圧ジャッキ群と、これら各軸方向を制御するための独立な3つの油圧ユニット、鋼製反力枠、および各ジャッキに対応した載荷版よりなる。油圧ポンプを除くこれらの装置は、縦 3m 、横 2m 、深さ 2.65m の鉄筋コンクリート製ピット内に収められている。

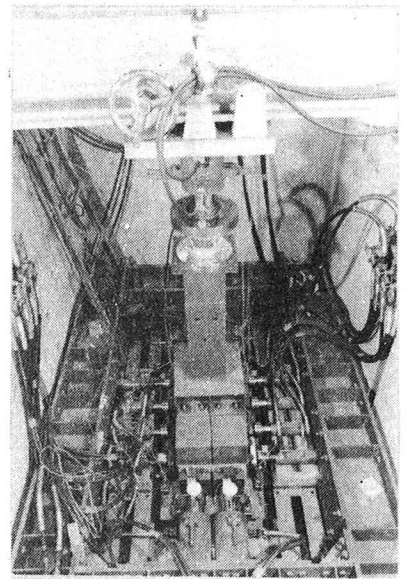


写真1 載荷試験装置

2.2 試験供試体

試験供試体は図1に示すような $80\text{cm} \times 40\text{cm} \times 20\text{cm}$ のモルタル製で、ロックボルトは市販のSD30(D10, D16)の鉄筋を用いた。供試体の作成方法は、分離面に対応した形状の仕切板を入れた鋼製型枠にモルタルを打設する。硬化後所定の位置を $\phi 27\text{mm}$ のビットで穿孔し、ボルトを挿入する。モルタルグラウト注入後に、その両端をエンドプレートおよびナットで固定する。なお固定位置は箱板をレ

ておく。分離面形状は平坦または規則的な歯形(図1参照)とし、ダイレイタニ-角 $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ の3種類を用いた。ロックボルト本数は1~3本で、敷設角(分離面とボルトのなす角、図1参照) $\alpha = 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ の3通りとした。ボルトにはひずみゲ-ジを取り付け、応力を測定した。

2.3 試験方法

載荷方法は、平面ひずみ条件を保つように鉛直方向応力 σ_3

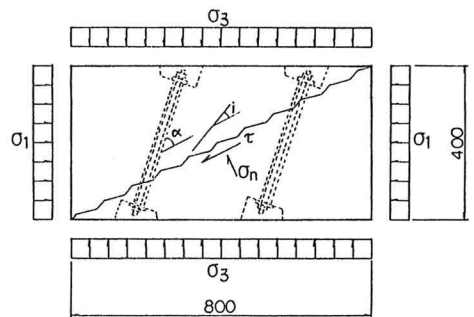


図1 せん断試験供試体

を調整する。まず水平面内を等方的に載荷し、分離面の垂直応力 σ_n を一定に保ちながらせん断応力 τ が増加するように σ_n , σ_s を変化させる。垂直応力 $\sigma_n = 20, 40, 60 \text{ kg/cm}^2$ の3通りとした。分離面のせん断応力 τ の増加ピークは、前半 4 kg/cm^2 、後半 2 kg/cm^2 で、応力の調整は1分間で行う。各載荷版の変位はダイヤルゲージで測定し、載荷版と供試体との間の摩擦はテフロンシート二枚重ねにより低減した。

実験ケースは、ボルトを含まない場合、垂直応力 σ_n とダイレイタンス角 i を各3水準とった二元配列 L_9 で実施し、ボルトを含む場合、ボルト径を2水準、他のパラメーターを3水準とした直交配列 L_{18} に従った。

3 実験結果及び考察

3.1 応力変位関係

せん断応力 τ ~ せん断変位 U 関係の一例を図2に示す。ダイレイタンス角 i が $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ でボルトを含むものと含まないものを各1ケースずつ示して比較したものである。

$i = 0^\circ$ の場合、せん断面は平坦であり、大きな変位は断続的なスベリにより発生する。ボルトを含む場合も含まない場合も、降伏後のせん断強度は、ほぼ一定あるいはやや漸増の傾向を示す。 $i = 10^\circ$ の場合歯形の傾斜が比較的ゆるいので、 $\sigma_n = 40 \text{ kg/cm}^2$ 程度の応力では、降伏後断続的なスベリが発生し、せん断強度は、漸増の傾向を示す。ボルトを含む場合 $U = 15 \text{ mm}$ 、含まない場合 $U = 21 \text{ mm}$ で強度の低下がおこっている。これは、変位の進行につれて歯形の局部的なせん断応力が増大し、変位が限界値に達して歯形のせん断がおこったためと考えられる。 $i = 20^\circ$ の場合、降伏後急激なせん断強度の低下がみられる。これは、垂直応力 σ_n が 60 kg/cm^2 と比較的高く、歯形の傾斜もきついので、スベリの発生前に、歯形の局部的応力が限界値に達して、歯形のせん断がおこったものと考えられる。

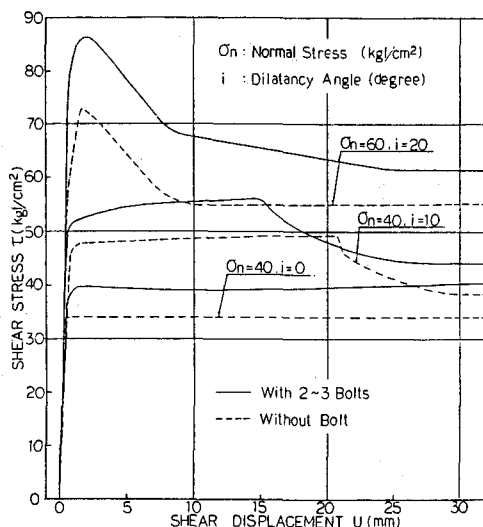


図2 せん断応力 ~ せん断変位関係

3.2 せん断強度

最大せん断強度 ~ 垂直応力 σ_n 関係を図3に、最大せん断強度 ~ ダイレイタンス角 i 関係を図4に示す。図3で、ボルトを含まない部分について考えると、 $i = 20^\circ$, $\sigma_n = 60 \text{ kg/cm}^2$ の場合を除いて、ほぼ直線状である。理論的には、歯形にそってスベる場合、最大せん断強度は、次式で表わされる。

(Patton, 1966)

$$\tau_0 = \sigma_n \tan(\phi + i) \quad (1)$$

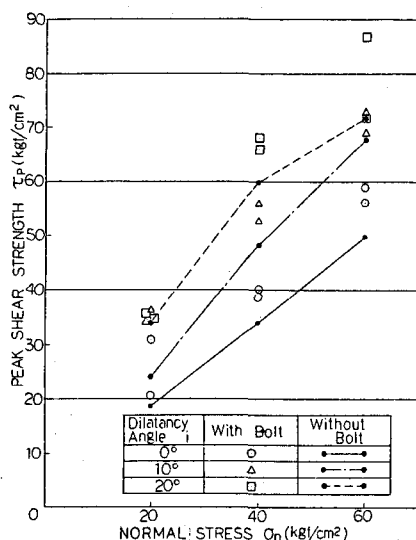


図3 最大せん断強度 ~ 垂直応力関係

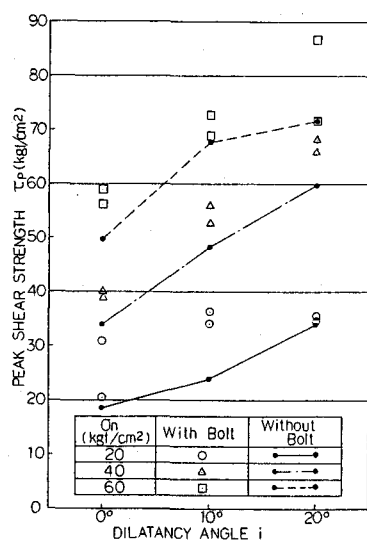


図4 最大せん断強度 ~ ダイレイタンス角関係

ここに σ_n : 垂直応力
 μ : 接触面の摩擦係数
 i : ダイレタンシー角
 これは、図3上では原点を通る直線であり、実験結果と大差はない。

最大せん断強度～ダイレタンシー角関係を図4に示す。この増加に伴いせん断応力の増加がみられる。図3、図4で、ボルトを含む場合は、含まない場合に比べて、程度の差はあるが、強度の増加がみられる。

残留せん断強度～垂直応力関係を図5に、残留せん断強度～ダイレタンシー角関係を図6に示す。この変化による強度の変化幅の縮小がみられるが、これは、曲線がせん断されたためと考えられる。図5、図6でボルトを含む場合は、含まない場合に比べ、多くの場合強度の増加がみられる。強度が低下している場合

のほとんどが、ボルト敷設角が 135° の場合であった。
 ボルトの効果を調べるため、各要因毎の平均強度を考える。平均せん断強度と各要因との関係を図7～図9に示す。斜線部分がボルトの効果を示す。図7によれば、垂直応力の变化に伴うボルト効果の変化は認められない。図8で、ダイレタンシー角の変化に伴うボルトの变化傾向は明確でない。図9によれば、ボルト敷設角の変化により、ボルト効果が変わり、 $\alpha = 135^\circ$ の場合に、ボルトの効果が小さく、特に残留強度の場合にこの傾向が著しい。これは、 $\alpha = 135^\circ$ の場合ボルトが圧縮となるため、ボルトのせん断による効果(ダウエル効果)と相殺するためと考えられる。

3.3 ボルト軸ひずみ

ボルト軸応力～せん断変位関係の一例を図10に示す。図中で、 α はボルト応力測定位置と分離面とボルトの交点からの距離であらわしたものであり、 l は分離面のせん断変位を示す。ボルト軸応力は、ボルトの同

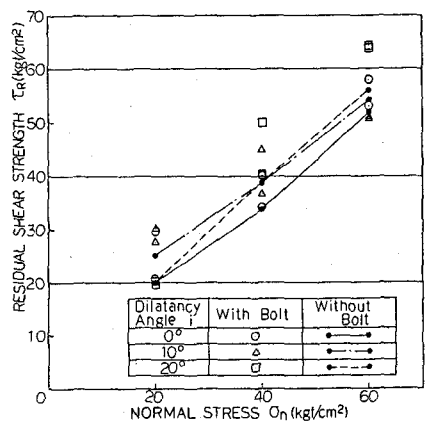


図5 残留せん断強度～垂直応力関係

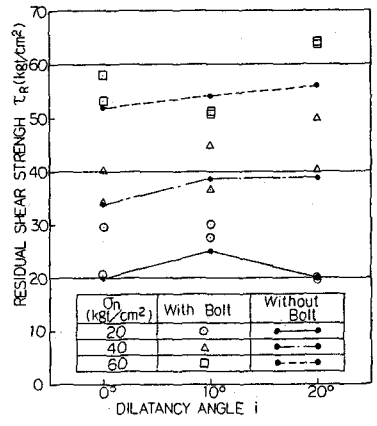


図6 残留せん断強度～ダイレタンシー角関係

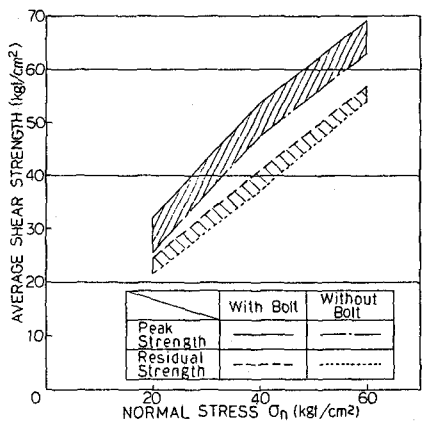


図7 平均せん断強度～垂直応力関係

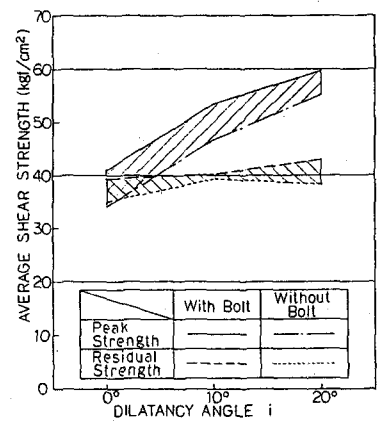


図8 平均せん断強度～ダイレタンシー角関係

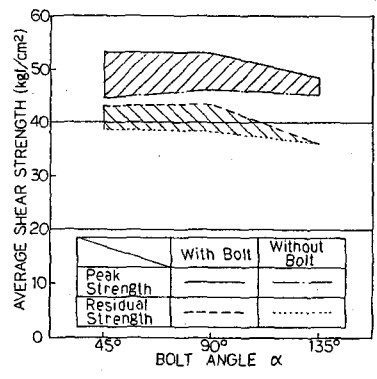


図9 平均せん断強度～ボルト敷設角関係

じ位置の表面と裏面に貼った各一枚のひずみゲージによる応力の平均として求めた。ボルトのヤング率は、常に $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ としているため、 3000 kgf/cm^2 より大きな軸応力は、厳密に言えば正しくない。縦軸はボルトのひずみであり、その目安を応力値で示したものと考えればよい。ボルト敷設角 $\alpha = 45^\circ$ 、分離面のダイレイタンシー角 $i = 10^\circ$ の場合、 U の変化に伴いボルトに引張応力が発生する。 $U = 4 \text{ mm}$ 付近で、 $d = 50 \text{ mm}$ の位置のひずみが急激に増大しているが、 $d \geq 150 \text{ mm}$ の位置ではひずみは収束傾向にある。これは、 d の小さい範囲の付着が切れてその部分のみが変位の増加に伴い急激にひびいているものと考えられる。この場合、曲げひずみの発生は比較的少ない。 $\alpha = 45^\circ$ の場合、 i の値が大きいほどボルトの引張ひずみ（特に $d = 50 \text{ mm}$ の位置の）が大きくなる傾向にある。

$\alpha = 90^\circ$ 、 $i = 0^\circ$ の場合、 $d = 50 \text{ mm}$ の位置では U が小さいうちは、軸ひずみは顕著でなく、 $U = 4 \text{ mm}$ 付近から急激に増加する。この立ち上がり点では、実際には降伏応力に近い曲げ応力が発生しており、これはボルトのせん断に伴って発生したものと考えられる。 $d = 150 \text{ mm}$ の位置では、 $U = 4 \text{ mm}$ 付近の位置から、軸ひずみが増加するが、 $d = 50 \text{ mm}$ の位置ほど、急激ではなく、また曲げ応力も小さく、軸ひずみは漸増する傾向にある。 $\alpha = 0^\circ$ の場合、 i の値が増加するにつれ、軸引張ひずみが増加する傾向にあるが、歯形のせん断が早期におこる場合には、 $i = 0^\circ$ の場合と類似している。

$\alpha = 135^\circ$ 、 $i = 20^\circ$ の場合、 U の変化に伴い、最初からボルトに圧縮ひずみが発生する。特に $d = 50 \text{ mm}$ の位置ではその変化が急激で、 $U = 3 \text{ mm}$ で降伏応力に達する。 $d \geq 200 \text{ mm}$ では、圧縮ひずみは収束傾向にあり、これは、 d の小さい範囲の付着が切れて、その部分のみが変位の増加に伴い急激に圧縮されているものと考えられる。この場合、曲げひずみの発生は比較的少ない。 $\alpha = 135^\circ$ の場合、 $d = 50 \text{ mm}$ の位置では、 i の値が小さいほどボルトの圧縮ひずみが大きくなる傾向にある。

4. あと書き

本実験における試験試体は、材令14日のモルタルであり、その一軸圧縮強度が $\sigma_c = 164.5 \sim 315.3 \text{ kgf/cm}^2$ とバラツキが大きかったため、実験誤差が発生したが、大まかな傾向は把握することができた。今後、モルタル強度の影響を補正して、定量的な検討を実施したい。最後に本研究を遂行するに当たり多大な労力を惜しまれなかった綿引猛、菊地健之の両氏（埼玉大学）ならびに飯森宏一、加藤恵三の両氏（熊谷組）に心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 北川, 吉中, 野呂瀬, 阪口; ロックボルトによる不連続面の補強効果に関する基礎研究
第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, P233~238, 1984
- 2) BJURSTRÖM, S; SHEAR STRENGTH OF HARD ROCK JOINTS REINFORCED BY GROUTED UNTENSIONED BOLTS
3rd ISRM, P1194~1199, 1974

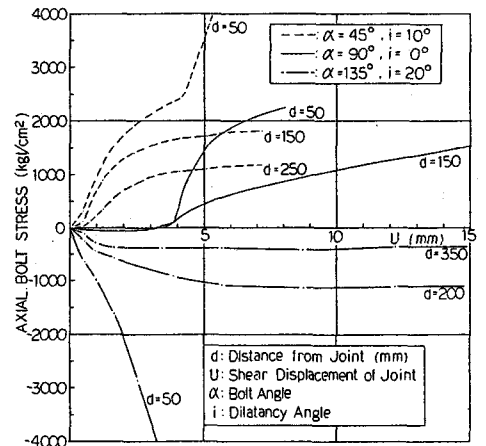


図10 ボルト軸応力～せん断変位関係

(58) Fundamental Study for Action and Effect
of Rockbolt in a Rock Joint

by

Ryunoshin YOSHINAKA, Satoshi SAKAGUCHI (Saitama Univ.)
Teruo SHIMIZU, Hajime ARAI (Kumagai-Gumi Co., Ltd.)

ABSTRACT

Recently, tunnels and underground openings tend to be constructed by New Austrian Tunnel Method, so that opportunities to use rockbolts in jointed rock mass have increased. But it is not enough to explain the mechanism of bolt action and it is much difficult to evaluate their effect quantitatively. So we performed a series of laboratory experiments by using mortar specimens, each of which contain single joint reinforced by fully grouted rockbolt, as a first step to investigate the mechanism of bolt action and bolt effect.

The size of specimens is 80cm x 40cm x 20cm and surface of the joints is flat or have regular asperities whose dilatancy angle $i=10^\circ$ or 20° . Rockbolts are installed intersecting the joint at the angle of 45° , 90° and 135° . The shear tests is performed by three dimensional test rig under plain strain condition. The normal stress of the joint is held constant at the value of 20 or 40 or 60kg/cm² during the tests.

From the test results we can get following observations.

- (1) There are three types of Shear stress-Shear displacement relations. They are, (i)Constant or Gradually increasing, (ii)Softening, (iii) Gradually increasing and Softening. They depend on normal stress and dilatancy angle. Softening occur when asperities of joint are sheared off.
- (2) Bolt effect on shear strength depends not on normal stress but on bolt angle α . In the cases when $\alpha=135^\circ$, bolt effect is relatively small, especially for residual shear strength. This is considered since compressive stress arise in bolt which reduce the effect of bolt on shear strength by dowel action.
- (3) There are three types of bolt stress, and they depend mainly on bolt angle α . They are, (i)Tension ($\alpha=45^\circ$), (ii)Bend ($\alpha=90^\circ$), and (iii)Compression ($\alpha=135^\circ$).