

(100) 岩盤不連続面に対するロックボルトの最適敷設角に関する実験的研究

埼玉大学工学部 正員 吉中龍之進 ○腰塚憲一
(株)熊谷組 正員 清水昭男 新井元 蟻坂俊英

1. はじめに

現在、ロックボルトによる岩盤補強は、斜面、地下空洞、トンネルなどの標準的工法の一つとして定着しており、様々な補強効果を示すことが知られている。本研究は、岩盤不連続面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の一連の実験・研究の一環として行われたものである。今回の実験では、筆者らが行ってきたこれまでの実験で、不十分であったロックボルトの敷設角度をパラメータとして取り上げた。敷設角の影響が明瞭に表れるように他の条件は、単純化している。

本報告では、ボルトを含む不連続面の強度・変形特性、ボルト応力状態について述べ、最適ボルト敷設角に関する考察を行う。

2. 実験方法

図1に供試体の形状と寸法を示す。供試体はモルタル製で一軸圧縮強度は約250kgf/cm²、不連続面は歯形角 $i = 0^\circ$ のフラット面として単純化した（摩擦角 $\phi = 42^\circ$ 、垂直応力 $\sigma_n = 5\text{kgf/cm}^2$ ）。ロックボルトはD16の異形鉄筋（SD30、降伏強度約3000kgf/cm²、破断強度4900～6300kgf/cm²）をもちい、モルタルグラウトにより全面付着型とした。ボルトの先端は5cm角のアンカープレートを用いてナットで固定してある。不連続面に対する敷設角度は図に示す方向に計り $30^\circ \sim 90^\circ$ まで 15° ぎざみで取った。ボルトには不連続面から計って、5cm、15cmの位置に歪ゲージを各2枚貼り付け、軸力、曲げを測定している。また供試体の変位は、長・短辺に2個ずつ計8個のダイヤルゲージで測定した。

载荷は、図1に示した方向から油圧ジャッキにより行う。ジャッキ群は、①方向:100t容量1基、②方向:20t容量4基 ③方向:100t容量1基を用いて载荷した。③方向からの载荷は平面歪状態を想定している。各载荷板にはテフロンシートを2～3枚重ねて摩擦の影響を除き、また、载荷幅10cmあたり8cm幅の载荷板を用いて等分布荷重に近い状態を再現した。

以上の実験をばらつきを考慮して各2回行った。

3. 実験結果および考察

応力-変位: 図2に不連続面上のせん断応力 τ と水平変位 u の関係を（同図にボルトなしのケースも示す）、図3には、各変位段階におけるせん断応力と敷設角の関係を示す。 $u \geq 20\text{mm}$ の値は実験最終段階の強度を示す。この両図から、ボルトの敷設角 α が小さいほど、変位が初期の段階でボルトの効果が大きく

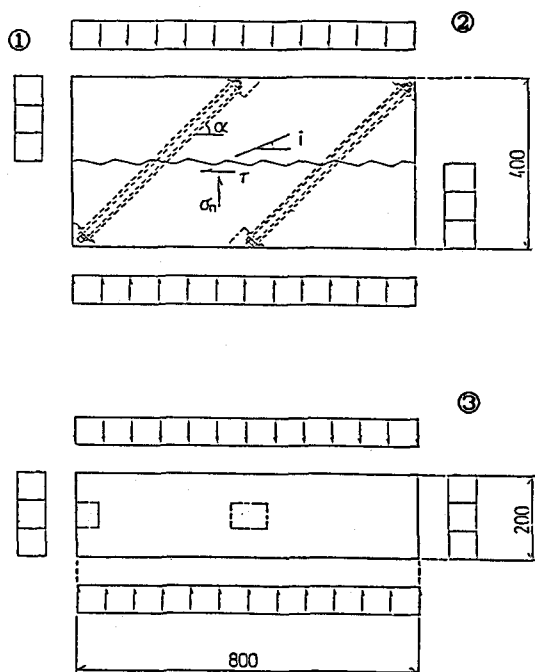


図1. 実験供試体 「単位mm」

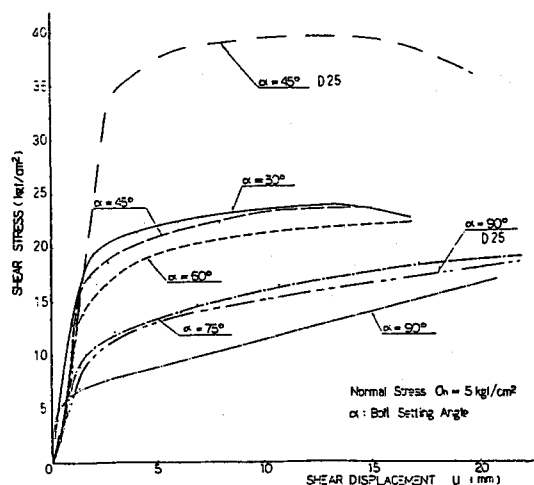


図2. せん断応力 τ -水平変位 u の関係

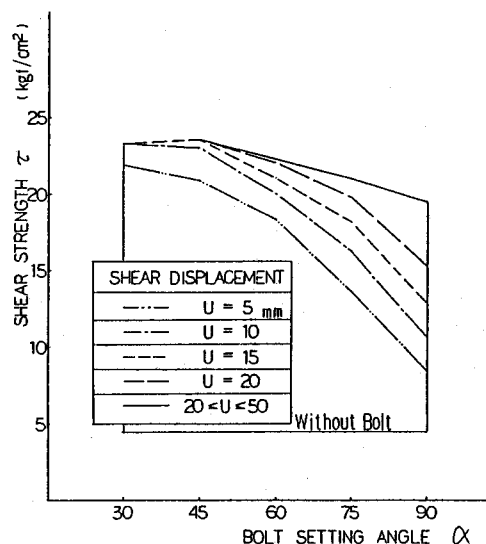


図3. せん断応力 τ -ボルト敷設角 α の関係

現れ、降伏後は、強度増加はあまりないことがわかる。 α が大きい場合には、最大強度の発現が遅れることがわかる。ボルトの破断は、 α が小さいものほど少ない変位で起こり、 $\alpha=90^\circ$ の場合には実験の最終変位約30mmにおいても破断は見られなかった。

また、図2には、参考のためD25の異形鉄筋を用いた実験結果を示してあるが、降伏点付近から供試体の破壊が起こり、強度は十分に発揮されているとは言えない。 α の違いによる傾向はD16の場合と類似している。

軸力-変位： 図4、5に不連続面から50mm、150mmの位置におけるボルトの軸力と変位の関係を示す。これらの図と図2を比較する事により、ボルトによる補強効果と軸力の発生状況はよく対応していることがわかる。軸力はボルトが不連続面を切る位置 $D=0$ mmで最大値を取り、その位置でのボルトの降伏は、 $D=50, 150$ mmの位置での軸力発生量の勾配の減少という形で伝わると考えられる。 $\alpha=30, 45^\circ$ では、 $\tau-u$ 曲線が降伏する時点あるいはそれ以前に、 $\alpha=60, 75^\circ$ では、ほぼ $\tau-u$ 曲線の降伏時に $D=0$ mmでのボルトも降伏していると考えられる。 $\alpha=90^\circ$ ではそれよりも遅れる。この様に各変位段階における軸力の発生状況はボルトの補強効果の多くの部分を説明できると推定される。

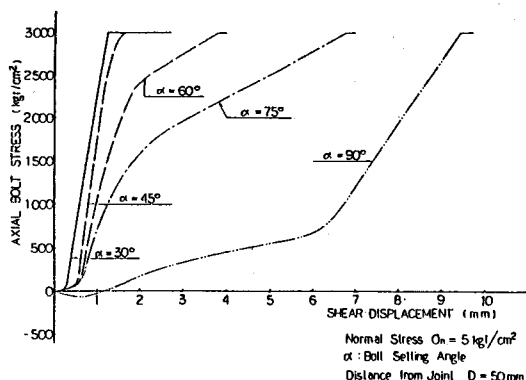


図4. ボルト軸力 N -水平変位 u の関係 ($D=50$ mm)

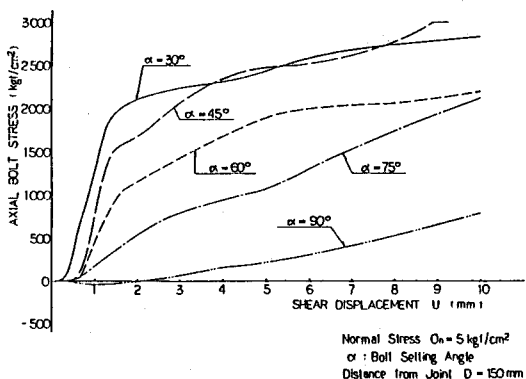


図5. ボルト軸力 N -水平変位 u の関係 ($D=150$ mm)

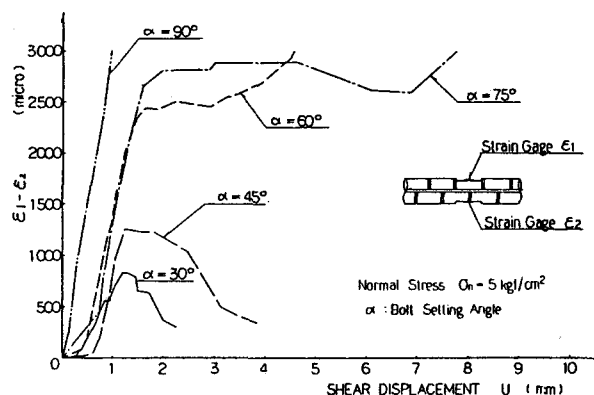


図6. 曲げ歪 ($\varepsilon_1 - \varepsilon_2$) - 水平変位 u の関係
($D=50\text{mm}$)

曲げ歪み-変位: 曲げモーメントに関係する量 ($\varepsilon_1 - \varepsilon_2$) と変位の関係 ($D=50$) を図6に示す。軸力とは逆に曲げモーメントの発現は、 $\alpha=90^\circ$ で最大で α が小さくなるほど、少なくなる。

実験後のボルトの変形状態: 図7に示す様にボルトの変形状態をパラメータ: 曲がり角 θ と斜辺長 L 、変位 u で表現する。 L は図8に示すように変位の進行により長くなる傾向にある。また、斜辺長 L は、杭の横抵抗の考え方から導かれる特性値 β から計算される最大曲げモーメント点とその2倍の長さの第一不動点の間の長さをもつことがわかっている (文献1))。よって、 L はほぼ弾性状態に近い状態で決定され、その後変位の進行により伸びる傾向があると推測される。

強度特性: これまで著者らは、既存のジョイント要素の特性に容易に取り込むことができるようにボルトを含むジョイントの $\tau-u$ 関係を双曲線近似を用い表現した。

$$\tau = K_{si} \cdot \tau_{ult} \cdot u / (\tau_{ult} + K_{si} \cdot u) \quad \text{----- (1)} \quad K_{si}: \text{初期剛性} \quad \tau_{ult}: \text{極限值}(u \rightarrow \infty)$$

特にせん断強度 τ_{ult} は図7に示すように実験終了時に発生していると予測されるボルト軸力 N 、せん断力 S に注目し、それらの寄与をジョイント特性に加えることによって求めた。(文献2)参照)

ボルト敷設角による強度 τ_{ult} を推定するにはボルトの変形状態を考慮することが必要である。しかし、不連続面から数cmの間のボルト及び周辺の状態は複雑で実験終了時の状態から各変形状態の値を推測しなければならない。以下、比較的評価し易いボルト軸力に注目して考察を行う。図9は実験終了時の ($\alpha - \theta$) の値とせん断応力 τ の関係を示す。図中の太線はボルト敷設角 α と実験終了時の強度 τ の関係を表し、点線は変形量 θ を示している。また、ボルト破断強度 ($\sigma_f = 4900 \sim 6300 \text{ kgf/cm}^2$) の軸力が作用した時の強度範囲を次式により計算し、一点鎖線で示した。

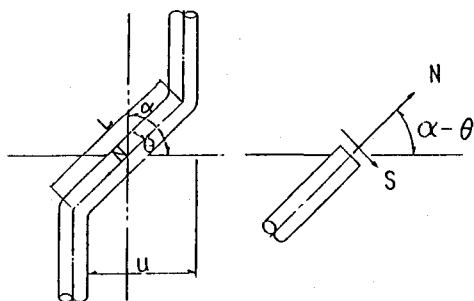


図7. ボルトの変形モデル図

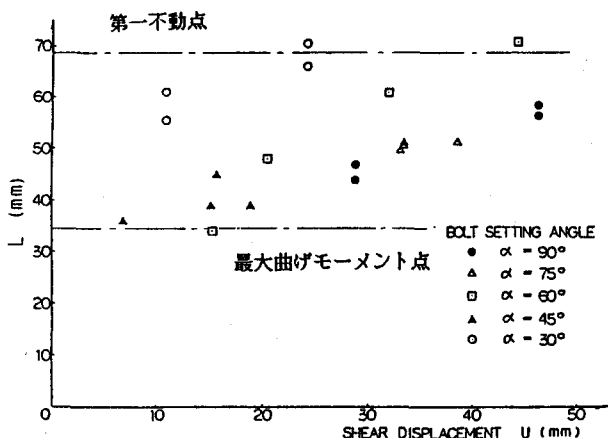


図8. 斜辺長 L - 水平変位 u の関係

$$\tau_{ult}^N = N \{ \cos(\alpha - \theta) + \tan(\phi) \cdot \sin(\alpha - \theta) \} / A$$

A: せん断断面面積 ----- (2)

($\alpha - \theta$) = ϕ に近い角度では、ボルトのせん断力 S が存在していたとしても強度に対する寄与

$$\tau_{ult}^S = S \{ \sin(\alpha - \theta) - \tan(\phi) \cdot \cos(\alpha - \theta) \} / A$$

----- (3)

は、面直角方向と水平方向成分が打ち消し合いゼロに近くなり、また、($\alpha - \theta$) < ϕ では τ を減少させる効果を持つ。従って、せん断強度 τ_{ult} はボルトの軸力に主として支配されていることが分かる。また、変位が進むに従ってボルトは ($\alpha - \theta$) = 30 ~ 45° に変形してくるが、

($\alpha - \theta$) の同じ値に対しても α によって強度に差が生じる。これは α が大きいものほど変形も大きく、その間に曲げ、せん断等の応力を受け、ボルト破断強度の低下が起こっているためと考えられる。図10はこの関係を α による強度低下を考慮し、簡単な仮定（塑性ヒンジの形成、斜辺長一定、ボルトのせん断力無視、等）のもとに試算して描いたものである。実際のボルトもこれに近い挙動を示していると思われる。

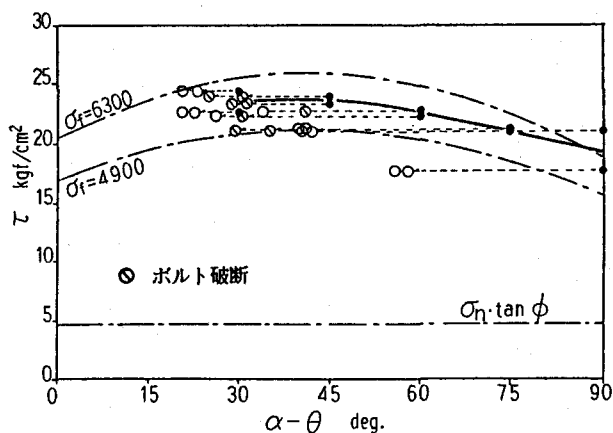


図9. 最終せん断応力 τ -ボルト曲げ角度 ($\alpha - \theta$) の関係

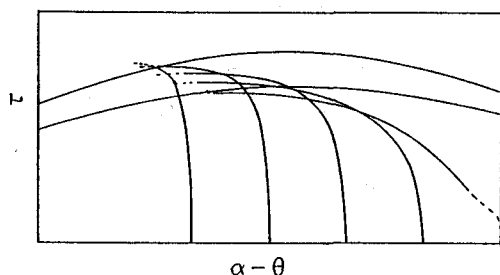


図10. せん断応力 τ -ボルト曲げ角度 ($\alpha - \theta$) の関係 (模式図)

5 まとめ

今回行われた実験結果から次のことが言える。 $\phi = 42^\circ$ のフラットな不連続面に対する最大強度を得る角度は $30^\circ \sim 45^\circ$ 程度の値であった。これは、ボルト敷設角方向に軸力のみが作用すると仮定した時（図9参照）の理論的な角度 $\alpha = \phi$ とほぼ一致する。ただし、 α が大きい場合には最大せん断強度に達するまでにボルトの曲がり角は極めて大きくなることに注意する必要がある。また、 $\alpha = \phi$ の前後でボルトを打設するとき、 α が多少変化しても ($\pm 15^\circ$ 程度)、せん断補強効果（強度、変形特性）にはそれほど大きな差は現れないという点も注目される。ある程度の変形が見込まれる様な場合は $\alpha > \phi$ の角度を持たせた方がボルトの破断がないものと予想される。

今後、これらの実験結果にこれまでの実験結果を加えて考察し、ボルト作用効果のモデル化手法を、追って提案する予定である。

5 謝辞

本研究を遂行するにあたり、埼玉大学 石川清治、田中俊一 両氏の御協力と（株）熊谷組 加藤恵三氏の御助言を頂きました。深く感謝いたします。

- 参考文献 : 1) 吉中、坂口、清水、新井、腰塚; "不連続岩盤モデルにおけるロックボルトの変形特性について" : 第41回土木学会年次学術講演会講演概要集
- 2) 吉中、坂口、清水、新井、加藤; "ロックボルトで補強した節理岩盤モデルの強度特性について" : 第41回土木学会年次学術講演会講演概要集

(100) Experimental Study for Best Setting Angle of Rock-bolt in Jointed Rock

Saitama University Yoshinaka, R. & Koshizuka, K.
Kumagai-gumi Co., Ltd. Shimizu, T., Arai, H. & Arisaka, T.

Rock-bolt have been used as one of the major supports member for various kind of rock structures. But its mechanism and effect in jointed rock installed are very complicated and ,therefore, not enough to be clarified.

The paper presents the result of a series of laboratory shear tests to explain and propose the mechanism of rock bolt action in jointed rock subject to shear deformation.

Test specimens used are made with mortar, $80 \times 40 \times 20$ cm in size and have a single joint . The surface of joint plane is flat in order to simplify the interaction between bolt and rock.

Rock-bolts used are 16mm diameter and installed in various angle to joint plane ; 30, 45, 60, 75 and 90° , respectively.

Shear testings are of plane stain condition and under normal stress on joint, ; 5 kgf/sq.cm

The concluding remarks are summerized as follows ;

- (1) For the flat joint with contact friction angle $\phi = 42^\circ$, the most effective angle for instillation is about $35 \sim 45^\circ$ to joint. This angle neary equal to the theoretical angle derived from assumption that the direction of bolt axial force is taken as initial bolt setting angle.

But, it should be considered that the bolt deformation after shearing is remarkable.

- (2) Main effects of bolt could be divided into two actions ; ① axial force effect, and② shear effect . Howeve, the former is more important.
- (3) When bolt setting angle is small, its effect can expect in the smaller shear displacement . But in this case, bolt failure occurs at small shear deformaton.