

(20) 低拘束圧下における不連続面のロックボルトによる補強効果に関する実験的研究

埼玉大学工学部 吉中龍之進 大学院○阪口 聡
(株)熊谷組 清水昭男 加藤恵三

1 はじめに

本研究は不連続性岩盤に対するロックボルトの補強効果を解明するための基礎研究である。岩盤不連続面の分布と性状は複雑である。そのため、最も単純化した定角度の粗さを持つ面として不連続面を表現した。せん断面の垂直圧は、ボルトの効果が相対的に大きく表せるよう低圧とした。本文は、モデル節理実験で得た補強効果に関する要点および、それに基づいたボルトのモデル化に関する一つの考案をまとめたものである。

2 実験概要

2.1 実験供試体、測定方法

供試体は図1の形状と寸法のモルタル製で、その一軸圧縮強度は約 200 kgf/cm² である。せん断面上の歯形角 i は $0^\circ, 20^\circ$ とし、 20° の場合の裏面の角度は 10° となる非対称形に作成した。ボルトは D16 の異形鉄筋 (SD30) を用い、敷設角度 α は、せん断面上から時計回りに計って、 $45^\circ, 90^\circ$ となるようにした。ボルトの両端は、十分な定着長を得ることができないためアンカプレートを用いてネジ止めにした。ボルトに生ずる軸力、曲げはせん断面から軸方向に向かって 5cm, 15cm の位置に貼り付けたヒズミゲージで、また供試体の変位は、長辺、短辺に取り付けた各 4 ケツのダイヤルゲージで計測した。

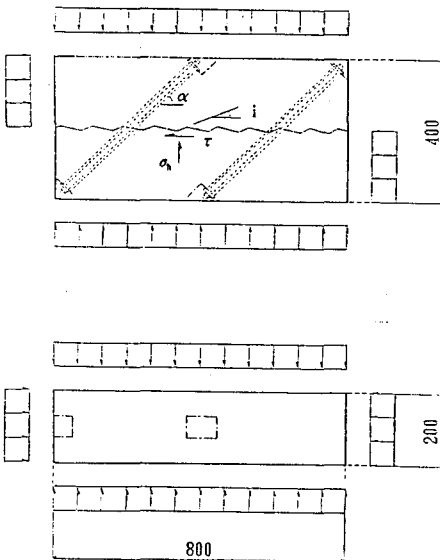


図1 実験供試体 (単位 mm)

2.2 载荷装置、载荷方法

ジャッキ群は図1に示した τ 方向からせん断応力を加え

るための 100 t 容量のもの計 2 基、同ブロックの反対側より供試体重心のモーメントを取ることを目的とした 50 t 計 2 基、せん断面上に上載圧 σ_v を加えるための 20 t $\times$ 4 計 8 基、供試体上方向から平面ヒズミ条件を目的とした 100 t 容量のもの 1 基から構成される。載荷板は、 τ, σ_v 方向に、8 cm 巾のものを何枚か用い、等分布荷重に近い状態となるよう配慮した。また載荷板と供試体の間にはテフロンシートを重ね、摩擦の影響除去につとめた。載荷は平面ヒズミ条件で、せん断面上の垂直応力一定 (0.5 kgf/cm^2) のせん断とした。なおこのさい、 τ 方向の 50 t, 100 t ジャッキは、同一油圧ユニットで結び、操作を簡単にした。

3 実験結果及び考察

3.1 応力～変位関係

上記の関係について、挿入角 90° の場合を図 2-1 に、粗度角 20° の場合を図 2-2 に示す。なおボルトなしの実験例も比較のため付記した。これらの関係から明らかになった主な事項を次に列挙する。

- (1) ボルトの有無は最大せん断強度時の変位に影響する。ボルトのある供試体は、強度発現時の変位が大きい。
- (2) $\alpha = 90^\circ$ の場合に比べ 45° の場合が、早期に強度が増加しピークを向かえる。
- (3) ピーク後、強度が一定のまま変位が増加するという現象を示す。これはボルトが降伏すること及び、せん断面の形状に影響されるためと思われる。
- (4) 垂直応力が増加するに従い、強度に対するボルトの寄与率が減少する。これはボルトの補強機構が周辺岩の破壊と密接に結び付いているためと考えられる。

3.2 変位～軸力、曲げ関係

せん断変位～軸力関係において、ボルト角 45° の場合を図 3-1 に、粗度角 20° の場合を図 3-2 に、また変位～曲げヒズミ関係において、粗度角 0° の場合を図 4-1 に、垂直応力 0 kgf/cm^2 の場合を図 4-2 にそれぞれ示す。図 5 はせん断面上において、歯形が圧着する側と離れる側に位置するボルトの曲げ～変位関係の違いを表している。それぞれに同種の曲線が 2 本づつあるのは、ゲージ位置により測定値が異なるためで例外なく上側に示されているのが、5 cm の地点での測定値である。これらの関係から明らかになった事項を次に列挙する。

- (1) $\alpha = 45^\circ$ の場合は、 90° の場合に比べ早期に軸力を発生する。純引張状態に近いものの方が軸力の発生が早い。
- (2) 粗度角 20° の方が、 0° に比べ早期に軸力を発生する。ダイレイションは軸力に影響する。
- (3) 軸力の発生機構は、 σ_v (0.5 kgf/cm^2) の大きさにはあまり影響されない。
- (4) ボルト角 90° の方が、 45° に比べて曲げヒズミが早期に発現する。軸力の発現機構と相関があると思われる。
- (5) $i = 20^\circ$ の方が、曲げヒズミが小さい。これは α にかかわらずなくその傾向を示している。
- (6) $\sigma_v = 5 \text{ kgf/cm}^2$ の方が、 0 kgf/cm^2 に比べ曲げヒズミが小さい。(5) からとも言えることであるがこの現象は、ボルト前面のモルタルの破壊により曲げの発現が影響されたためと考えられる。

- (7) 15cmの所の曲げヒズミは、 α, α, i にかかわらず減少である。
- (8) ボルト位置による曲げヒズミの発生状態の違いは、それ程見られない。

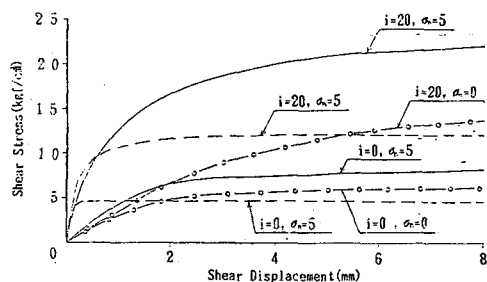


図 2-1 セン断応力-せん断変位関係 $\alpha=90^\circ$

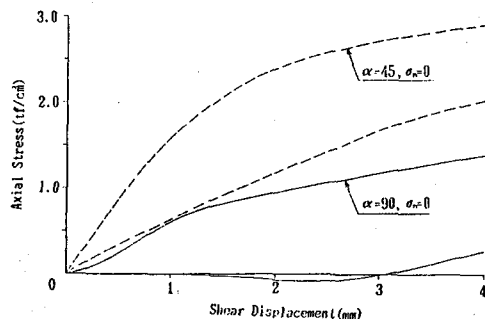


図 3-2 ボルト軸力-せん断変位関係 $i=20^\circ$

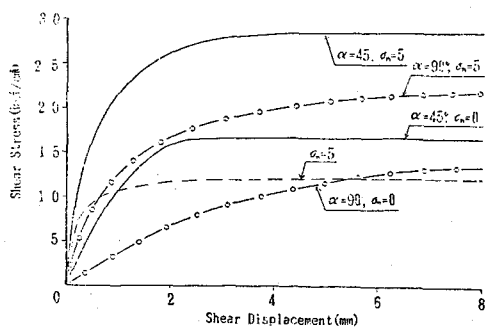


図 2-2 セン断応力-せん断変位関係 $i=20^\circ$

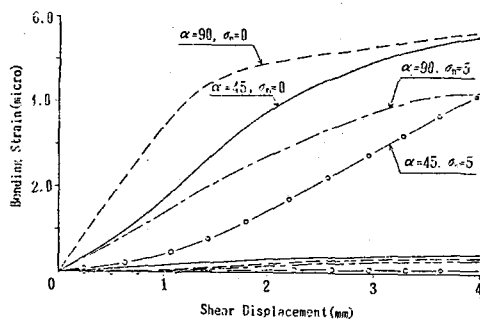


図 4-1 曲げヒズミ-せん断変位関係 $i=0^\circ$

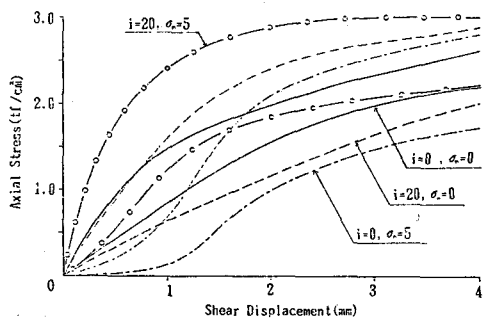


図 3-1 ボルト軸力-せん断変位関係 $\alpha=45^\circ$

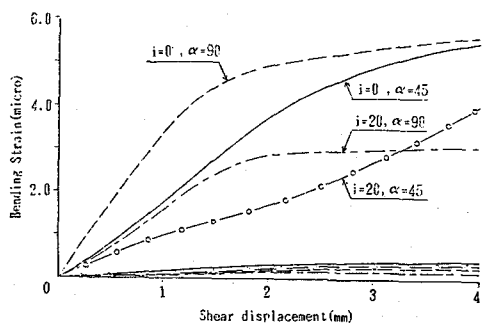


図 4-2 曲げヒズミ-せん断変位関係 $\alpha=0 \text{ kgf/cm}^2$

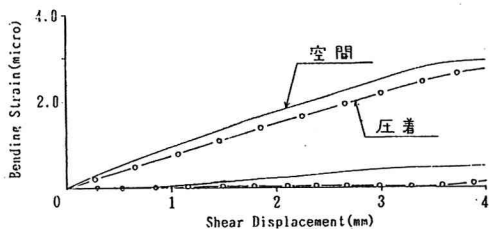


図5 ボルト挿入位置による曲げ発生の違い

3.3 実験後の供試体の観察

実験後におけるボルト周辺のモルタル破壊状況のスケッチを図6に示す。 $\alpha=90^\circ, i=20^\circ$ の場合である。せん断方向から見てボルト前面が深くえぐられ、モルタルがすべり破壊を起したようである。図7は、実験終了後供試体からボルトを取り出し、写真撮影したものである。 $\alpha=90^\circ, i=10^\circ, 0^\circ$ の場合である。上下供試体間のボルトの曲げはせん断面を境界としてほぼ同じ変形を示す。また変形の曲率が最も大きい所は、比較的浅い領域に位置する。図8-1~4は、昨年度の観察資料からのもので、実験終了後の塑性状態にあるボルトから、斜辺長、曲り角を測定したものである。

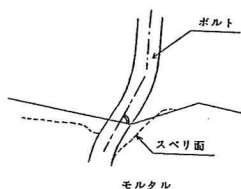


図6 ボルト周辺破壊状況

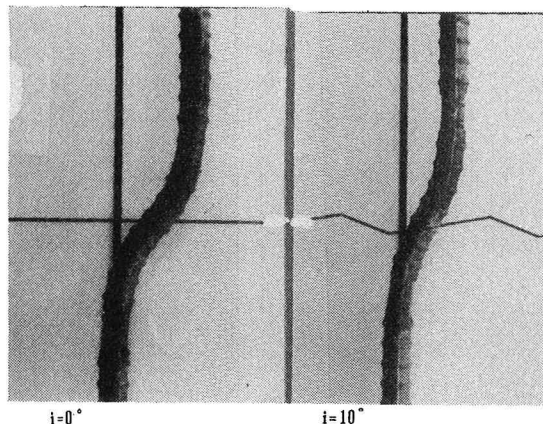


図7 ボルトの曲げ変形状況

斜辺長は、曲り領域の中心から引いた接線が、アンカプレートによるボルト固定点と曲げ不動点を結び延長した直線と交わる2点間の長さである。曲り角は、前述の延長線を基準とした接線のなす角度である(時計回り正)。この図から次のことが言える。

- (1) ボルト径の太いものは、実験終了時せん断変位にかかわらず斜辺長が長い、即ち深い所で曲っている。
- (2) 斜辺長の大きいものは曲り角が小さく、曲り角の大きいものは斜辺長が短い。このことより曲りの最終位置は、ボルトの剛性と密接な関係があるといえる。

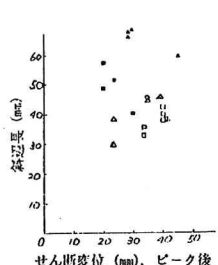


図8-1 せん断変位-斜辺長関係
(実験後供試体より)

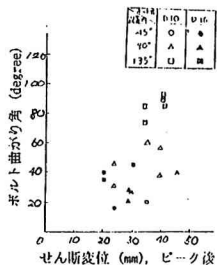


図8-2 せん断変位-曲り角関係
(実験後供試体より)

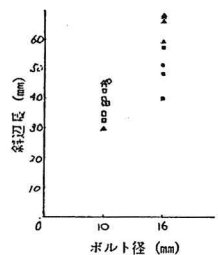


図8-3 ボルト径-斜辺長の関係
(実験後供試体より)

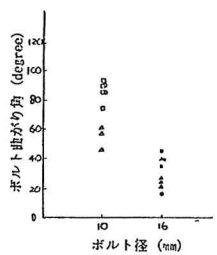


図8-4 ボルト径-曲り角の関係
(実験後供試体より)

4 モデル化のための現象の整理

せん断応力～変位関係を求めるに際して、考慮しなければならない要因を大別すると次のようである。

- (1) せん断面自身の剛性。
- (2) ボルトの引張効果。
- (3) ボルトのせん断効果。

これらが、単なる重ね合せで表現されず、互いに関係を持つため挙動が複雑である。そこで実験事実を基に次のようなモデル化が可能と考えられる。

(1) に関して

せん断面の剛性は、面自身の持つ粗さ、物性などの他に、上載圧が大きく影響する。そのため(1)に対する他の要因の寄与は、ボルトの引張効果のみとし、軸力の面直角方向成分を上載圧の増加量としてせん断面の剛性に組み込む。なおボルトの降伏後は、初期上載圧に降伏応力を加算した状態とする。

$$\tau = k \sin(1 - Rf \cdot \tau / \tau f) \cdot \delta H$$

$$k \sin = \alpha \cdot Pa \cdot ((\sigma_n + N \cos \theta) / A) / Pa)^{\beta}$$

$$\theta = \tan^{-1}(\delta V / \delta H)$$

δH ; 水平変位 δV ; 垂直変位
 N ; ボルト軸力 A ; セン断面面積
 σ_n ; 面上垂直応力(ボルト以外の要因)
 $\alpha, \beta, Rf, \tau f$; セン断面による定数
 Pa ; 大気圧

(2) に関して

ボルトの引張は、供試体の水平、垂直変位によって表現される引抜変位により導入され、反力はボルト軸方向バネによってのみ寄与される。即ちボルト軸力は、軸方向と軸直角方向に別けて処理する。

$$\sigma b = \frac{2 \cdot Eb \cdot C}{R \cdot \xi_0}$$

$$\xi_0 = \sqrt{\delta H^2 + \delta V^2} / 2$$

C ; 付着バネ係数 R ; ボルト半径
 Eb ; ボルトヤング率

ボルト軸方向バネによって反力をとる成分

$$T = 2 \pi r \cdot \sigma b \cdot \cos(\alpha - \theta)$$

地盤反力によって反力をとる成分

$$S = 2 \pi r \cdot \sigma b \cdot \sin(\alpha - \theta)$$

(3) に関して

ボルトのせん断効果は、ボルトの曲げ変形とその周辺地盤の変形という2つの相互作用によって発揮される。即ちこの効果は、ボルトの周りが弾性域を越えた後、その破壊により大きく影響される。周辺の破壊強度は上載圧が増加するとより強くなるため、ボルトの引張強度による寄与も考慮しなければならない。以上より次のモデルを考える。

(1) ボルト周りが弾性域の間は、ウィンクラーのバネモデルが利用できる。

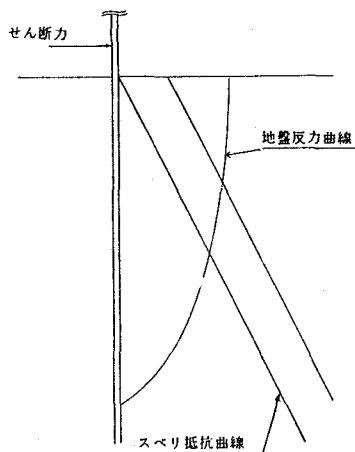


図9 スベリ点の発生位置予想図

(2) 周辺の破壊は、ボルト前面が受働スベリ面を形成すると仮定し、すべり発生位置は図9に示すように、反力分布曲線とすべり抵抗線の交点から求める。スベリ面上の抵抗せん断応力は、モール・クーロンに従うものとしその際下式のようにして引張効果を含める。

$$\tau f = \sigma f \cdot \tan \phi + \tau bf + C$$

σf ; スベリ面上に生ずる垂直応力
 τbf ; スベリ面上に生ずるせん断応力(ボルト、 σ_n による)

またスベリ面直角方向の形状は、ボルトの半断面(半円形)となる。

(3) すべり破壊後は、面上の応力を下式のように

$$\tau f = \sigma f \cdot \tan \phi + \tau bf$$

にし、残りの力を先のスベリ面より下側にかけ(2)の操作を行なう。すべり抵抗線と交わらなくなるまで繰り返しせん断力を定める。

(4) 地盤反力の深さ方向の伝達は、塑性ヒンジが形成されるまで起る。

5 おわりに

不連続面上におけるロックボルトの作用メカニズムが概略明らかになった。しかし、まだ不明な点が多い。今後定式化及び不明点の解明ということを試行錯誤しなければならない。

最後に本研究を遂行するに当り多大な労力を惜しまれなかった新井 元氏(熊谷組)、並びに羽石正隆、前島 剛の両氏に心より感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 吉中, 北川ら; 第6回岩の力学国内シンポジウム 233~238, 昭60
- (2) 斉藤敏明; 第17回岩盤力学に関するシンポジウム 246~250, 昭60
- (3) 吉中, 新井ら; 第17回岩盤力学に関するシンポジウム 281~284, 昭60
- (4) 吉中, 阪口ら; 第40回土木学会年次講演会 201~202, 昭60

(20) Experimental Study for Reinforcing Effects of Rockbolt in Jointed Rock under Low Confining Pressure.

Ryunoshin YOSHINAKA, Satoshi SAKAGUCHI (Saitama Univ)
Teruo SHIMIZU, Eizou KATO (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 laboratory experiments which obtain single joint and two rockbolts under low confining pressure.

The reason that we have selected the low confining pressure is because rockbolt develops the effect of support, clearer.

The size of specimens is 80cm X 40cm X 20cm and surface of the joint is flat or have regular asperities whose dilatancy angle $i=20$ (deg).

Rockbolts are installed intersecting the joint at the angle of 45° or 90° .

The shear tests performed under plane strain condition, and the normal stress on the joint is held constant at 0 or 5 kgf/cm² during test.

From the experimental study, it can be considered that the total shear resistance of Jointed Rock is able to divide the following three components.

- (1) Resistance of joint.
- (2) Effect of tensioning of bolt.
- (3) Effect of shearing resistance of bolt.

It is not enough to evaluate the total shear resistance by means of superposition of above three components, and so we model them as following, based on the observation and result of experiments.

- (1) Resistance of Joint.

The most important factor which contributes shear stiffness of joint is the vertical stress on the joint except for its material strength and roughness, and so we consider that the vertical direction factor only contributes shear stiffness of joint in axial force of bolt.

After yielding of bolt, this force is treated as the bolt keeps the yield stress.

- (2) Tension effect of bolt.

We assume that axial force of bolt is generated from pull out in distance which is represented by vertical and horizontal displacement on joints.

Axial force can divide for two components, one is the reaction from bond spring and the other from wall rock.

- (3) Shearing of bolt.

Shearing effect of bolt is related to the destruction of circumference rock.

This phenomenon is the effect of shear slip destruction, which occurs when wall rock reaction exceeds the shear slip resistance force.

It can be assumed that the slip line equals to passive earth pressure line, and the shape of cross section of slip plane equal to the half cross section of bolt.

Tensile effect of bolt is applied to shear resistance on slip plane as normal stress.