

ケーブルボルトによるせん断補強に関する き裂模型試験結果の解析

Numerical Analysis of a Joint Shear Test for Reinforcement by Cablebolting

○丹生屋 純夫※・木梨 秀雄※※・鈴木 健一郎※
Sumio NIUNOYA, Hideo KINASHI, Kenichirou SUZUKI

For designing of reinforcement method of shearing joint by cablebolting, it is important to understand the characterization of reinforcing joints in the numerical analysis. In last report, new shearing joint model had been suggested by analyzing some data of shear test. New shear model was represent of three parts of linear shape on relationship between shear stress and shear displacement. We had called that the tri-linear model.

In this report, we tried to study two technical issues about tri-linear model. The one of them is that we tried to compare the tri-linear model to general, so called bi-linear, model for reinforcement effect. And the other is that we investigated that the behavior of cablebolt above the joint give some effects to results of numerical analysis.

Key Words : cablebolt, shear joint test, numerical analysis of joint

1. はじめに

ケーブルボルト工法¹⁾を地下空洞掘削時の岩盤安定化のための一つの補強工法として採用し、設計するためには、ケーブルボルトの補強特性を数値解析に的確に取り込む必要がある。特にき裂のせん断特性の補強を考えた場合、き裂のせん断特性のモデル化とケーブルボルトの付着特性の評価が重要になると考えられる。これまで、著者らは、ケーブルボルトの付着特性について、引抜試験を実施し、特性を捉えた²⁾。また、き裂のせん断特性については、JRCに基づくき裂面模型を用いた一面せん断試験により、き裂面のせん断応力とせん断変位の関係において、ピークせん断応力に達する前に変曲点が存在することを示した³⁾。ピークせん断応力に達するまでのせん断応力～せん断変位関係を直線で近似するのではなく、変曲点で折れ曲がるパイリニアとして、その後流れるモデル化を提案した⁴⁾。

この報告では、せん断応力～せん断変位関係の変曲点に注目した提案モデル(ピーク後の挙動と合わせて3直線で近似したこのモデルを以後トリリニアモデルと呼ぶことにする。)について次の2点について考察を行った。第一にこのトリリニアモデルと従来のピークまでの直線を仮定したモデルとの、ケーブルボルトによる補強効果の解析結果の比較。第二に、ボルトのほぞ効果⁴⁾がき裂のせん断特性の解析結果に与える影響についてである。

2. 試験結果概要^{3), 4)}

き裂模型は、図-1に示したようにコンクリート製のJRCでタイプ3のプロファイルを持つものである。載荷は、岩盤多機能試験装置⁵⁾他を用いた。今回のモデル構築に適用した試験ケースは、岩盤多機能試験装置による追加試験と合わせて表-1の通りとなる。

き裂面におけるせん断応力～せん断変位関係の一例を図-2に示す。図は、せん断変位に対して、き裂のせん断応力と開口変位を取ったものである。図は正方

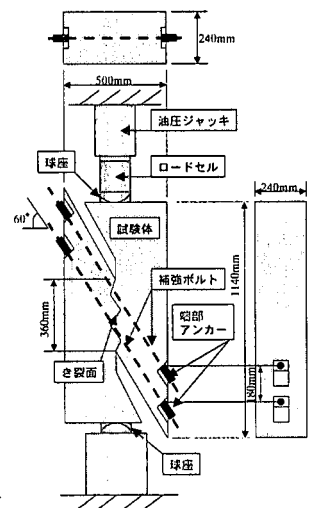


図-1 標準試験体概要図

※ 正会員 (株)大林組 技術研究所

※※ 正会員 (株)大林組 土木技術本部技術第二部

向がき裂開口を表している。ここで、き裂のせん断変位および開口変位は、き裂をはさむ100mm間隔の2点の相対変位をもって考えている。き裂をせん断応力～せん断変位関係では、せん断応力がピーク（ τ_{Y2} ）に達する前に線形関係の勾配が変化する変曲点（ τ_{Y1} ）が存在することを示している。開口変位はピークせん断強度到達時点で閉塞から開口側に移行する。ピーク後は、若干のせん断応力低下後にフローする。

表－1 試験ケース一覧

ケース	異質点	き裂面長	き裂面積	き裂形状	補強材料	仕様	打設角度	緊張力	備考
1	打設角度	360mm	240mm	Type3	ケーブル	φ2.9mm 2本より	0°	01f	ボルト間隔 180mm
2							60°		
3							-60°		
4							30°		
5							0°		
6							60°		
7							60°		
8	補強方法	360mm	240mm	Type3	P S アンカー	D10		1.5tf	01f
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15	補強材料	360mm	240mm	Type3	ロックボルト				拘束応力 0.10MPa 0.23MPa 0.40MPa 1.00MPa 3.00MPa 5.00MPa 7.00MPa
16									
17									

注) ケーブルボルトの打設角度はき裂面に直交する方向を基準(0°)としている。

3. き裂せん断特性のモデル化

表－1に示した各試験ケース結果より、き裂面の持つせん断負担応力とせん断変位および開口変位とせん断変位の関係を図－3に示すモデルで表わせると仮定する。ここで、補強されたき裂面のせん断負担応力 τ_{joint} とは、図－4に示すようにき裂で発生するせん断応力からボルトが負担するせん断応力を差し引いたき裂が直接負担するせん断応力を意味する。すなわち、

$$\tau_{joint} = \frac{P_1}{A} - \tau_{cable}$$

ここで、 τ_{joint} はき裂が直接負担するせん断応力、 τ_{cable} はボルト材料が負担するせん断方向応力成分、 P_1 はせん断載荷荷重、 A はき裂面積を表す。

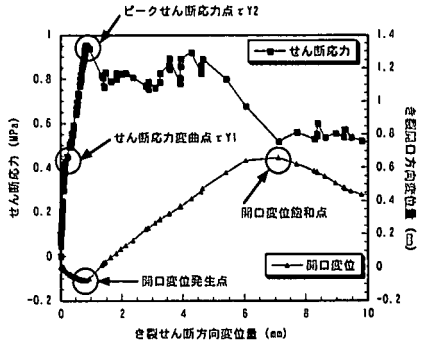
である。き裂の垂直負担応力（これを拘束応力と呼ぶ） σ_{joint} は同様の考え方より、次式で評価した。

$$\sigma_{joint} = \frac{P_2}{A} + \sigma_{cable}$$

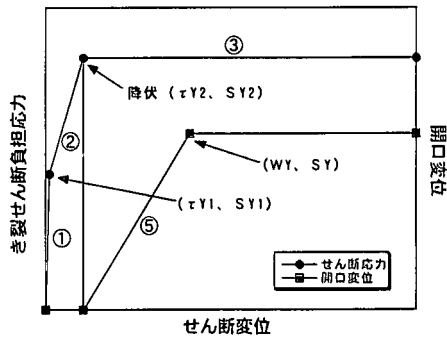
ここで、 σ_{joint} はき裂にかかる垂直負担応力、 σ_{cable} はボルト材料が負担するき裂拘束方向の応力成分、 P_2 は垂直載荷荷重、 A はき裂面積を表す。

①の変曲点 τ_{Y1} は、開口は生じていないがわずかにせん断が生じ始める点であり、②の τ_{Y2} は開口変位が本格的に始まる、いわゆるき裂面の降伏点と考えられる。その後、開口変位はせん断変位 S_Y で飽和する。

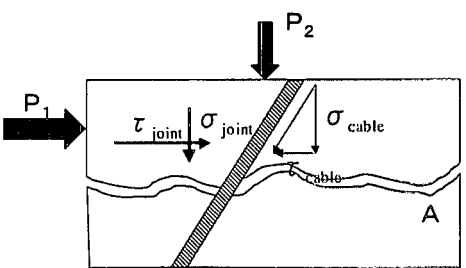
一つのき裂面に対して図－3のモデルの定数を決定するために、それらのき裂の拘束応力依存性を調べる必要がある。これまでの結果に岩盤多機能試験装置ケースを追加した結果を基に、 τ_{Y1} 算定に関する各データを図－5、 τ_{Y2} に関するそれを図－6に示す。これらは、異なるケーブルボルト打設角度および拘束応力の結果を同一直線として近似できることを示している。すなわち、き裂が負担するせん断応力は拘束応力に対して直線の包絡線が近似できることを意味する。また、図－7は開口変位の上昇具合、いわゆるダイレーション角度を設定するための近似log曲線グラ



図－2 試験結果例



図－3 き裂せん断特性モデル



図－4 き裂せん断特性モデル

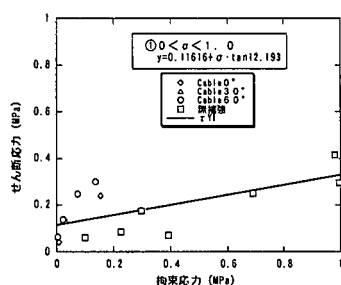


図-5 変曲点算定式($\tau Y1$)

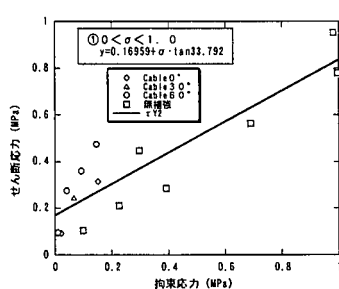


図-6 変曲点算定式($\tau Y2$)

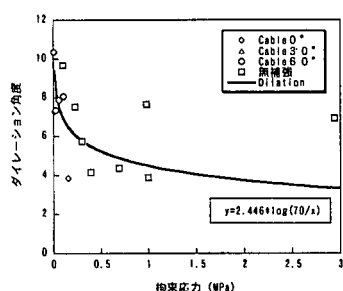


図-7 ダイレーション角度算定式

フであり、この場合も様々な試験ケースを統一的に表現できていることが示された。

以上の設定法により算出した各パラメータを用いて不連続体解析法UDE C⁶⁾を実施した。図-8はケース11(拘束応力1.0MPa)についてせん断応力～せん断変位の関係について解析を行ったものである。一方、図-9はケース9(拘束応力0.23MPa)について開口変位～せん断変位の関係について解析を行ったものである。

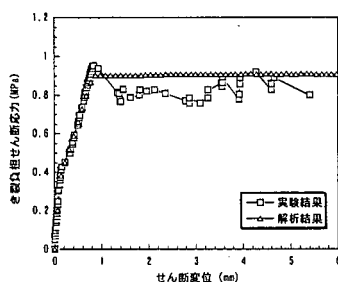


図-8 き裂面せん断解析($\tau-S$)

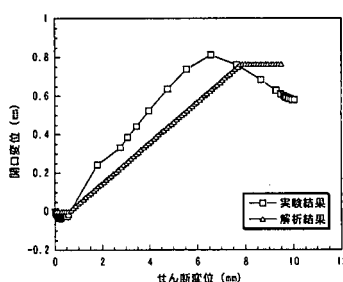


図-9 き裂面せん断解析(W-S)

せん断変位の関係について解析を行ったものである。ピークまでの試験結果をよく表現している。したがって、以上のように構築したき裂せん断モデルに補強材料の関する入力値を加えて解析を行うことにより、対象き裂面における適切なせん断補強効果を推測することができる。

これまでき裂せん断挙動を評価するモデルは、ピーク強度到達まで線形に仮定するバイリニアとして設定されていたのに対し⁷⁾、今回実験結果より設定したモデルはピーク強度に到達する以前に変曲点を1箇所設定したトリリニアなものとした。今回の入力条件を用いて従来のバイリニアモデルより、ピーク時のき裂せん断応力を推定し、トリリニアモデルによる算定結果と比較すると図-10のようになる。これより、低拘束応力状態においてはバイリニアモデルはトリリニアモデルにおいてピークせん断応力と設定した $\tau Y2$ モデルとほぼ同勾配を示しており、拘束応力が大きくなると、バイリニアモデルは $\tau Y1$ と $\tau Y2$ のほぼ中間を推移していることが分かる。図-10より、試験値から出したこの折れ線は、バイリニアモデルでの拘束圧依存性より高拘束圧部(1MPa以上)での影響を評価するのに良い。

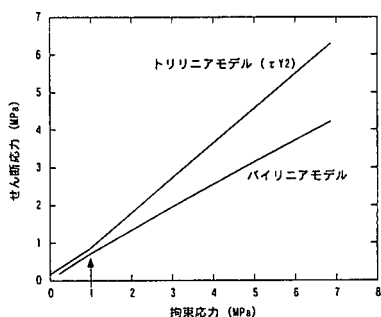


図-10 ピークせん断強度算定モデル比較

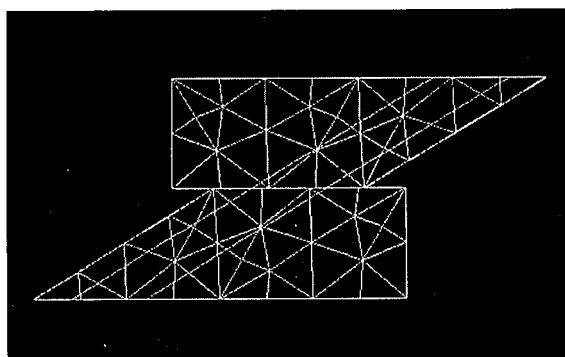


図-11 解析モデル

4. 補強ケースの解析結果

4.1 解析結果

トリリニアによるき裂面せん断特性モデルを用いて、試験ケースのシュミレーションを実施した。解析モデルを図-11に示す。

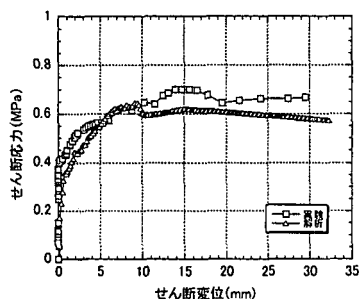


図-1 2 解析結果比較 τ -S
(PSアンカー)

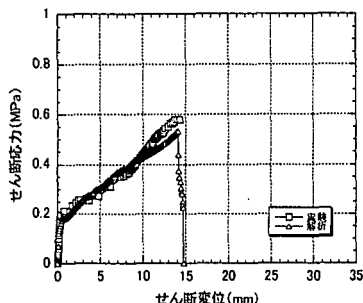


図-1 3 解析結果比較 τ -S
(ケーブルボルト)

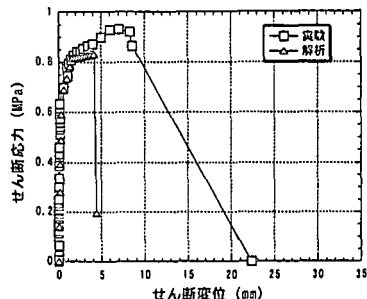


図-1 4 解析結果比較 τ -S
(ロックボルト)

①せん断応力～せん断変位関係

図-1 2～1 4にPSアンカー、ケーブルボルトおよびロックボルトケースにおけるせん断応力～せん断変位関係における試験と解析値の比較を示す。いずれの補強ケースにおいても試験結果に対して良く追従している。ケーブルボルトケースでは、低せん断応力レベルでせん断変位が生じ、その後も上昇を続け最大せん断応力はPSアンカーと大差ないことが確認できた。一方、ロックボルトはケーブルボルトよりも定着が良好であり、せん断初期に高せん断応力が発生するが、ケーブルボルトのケースと比較して試験結果では約半分、解析結果では3分の1のせん断変位で破断した。

②軸力分布

各補強材料別における軸力分布ではその特徴を的確に把握することができた。代表して図-1 5にロックボルトケースにおける破断直前の軸力分布結果を示す。横軸がケーブル延長を示しており、50cm位置がき裂直上を示す。ロックボルトケースではき裂直上において降伏に至っており、き裂から離れるにしたがって軸力が低下している。急激な低下により、端部付近では未だ定着が残っていることが分かる。これに対して、ケーブルボルトの勾配は比較的緩やかであり、端部において定着がすでになくなっていることが分かった。これより、ケーブルボルトの補強効果は定着と密接な関係があることが示唆される。

4. 2 ほぞ効果の影響

き裂面上でせん断変形が生じた時に起こるボルトのほぞ現象(写真-1)を適確に再現し、ピークせん断強度を推定するためには、要素分割を適切に行い、軸力を計算する必要がある。そこで、き裂片面について、ケーブルボルトの各深度に水平地盤ばねを想定し、その変位を弾性解析によって計算し、分割要素長さの目安とすることを考えた。ケーブルボルトが破断した時点のせん断変位の1/2の強制変位をき裂面上で与え、その点とボルトの変形が始まる深度との距離をほぞの1/2とした(図-1 4参照)。ほぞの長さは、き裂面の両側で考えるので、この距離を2倍し、これを分割すべき要素長さの目安とした。0°(き裂直交)ケースでは分割要素長さは22mm、30°ケースでは30mmであった。60°ケースは算定結果よりももう少し大目にとり90mmとした。この分割により計算した各ケースにおけるせん断応力 τ ～せん断変位Sの関係を図-1 7～1 9に、それらの軸力の分布を図-2 0に示す。図-1 7の0°ケースは、ほぞの開始深度が最も浅く、

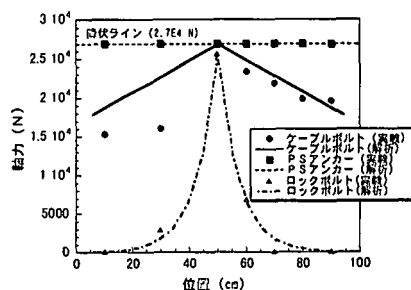


図-1 5 軸力分布比較
(ロックボルト)

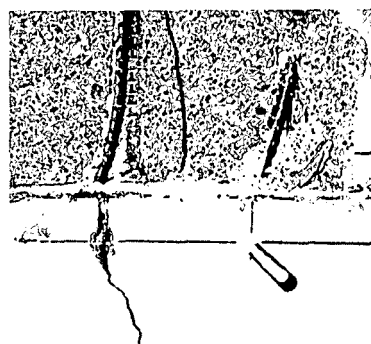


写真-1 ねじれ(ほぞ)現象

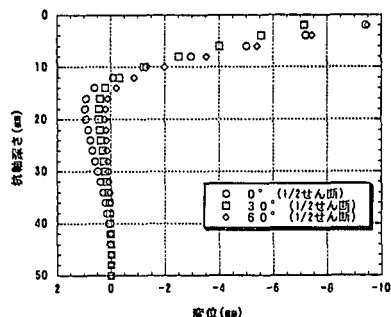


図-1 6 杭軸ばね水平変位計算例
(ケース4)

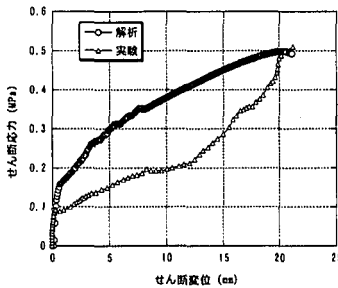


図-17 解析結果比較 τ -S
(打設角度 0°)

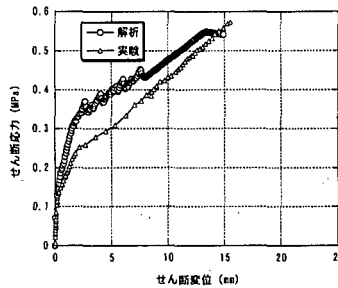


図-18 解析結果比較 τ -S
(打設角度 30°)

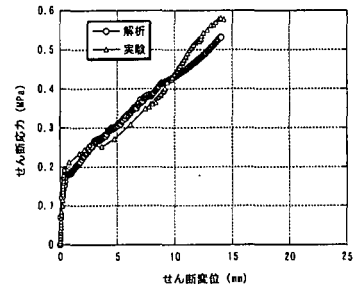


図-19 解析結果比較 τ -S
(打設角度 60°)

その間で軸力のほとんどが受け持たれることになる。ピークまでの解析結果と試験結果の間および軸力分布には顕著な相違が見られるが、ケーブルボルト破断時点を適確に再現している。一方、図-18, 19に示すケーブルボルトとき裂面が鋭角に交わるケースでは、せん断過程および軸力分布まで再現できることが分かる。これより、き裂に直交にケーブルボルトを打設すると、ほぞ効果によるせん断補強効果が期待できる可能性が示唆される。その場合の強度評価にケーブルボルトの適確な要素分割が必要である。

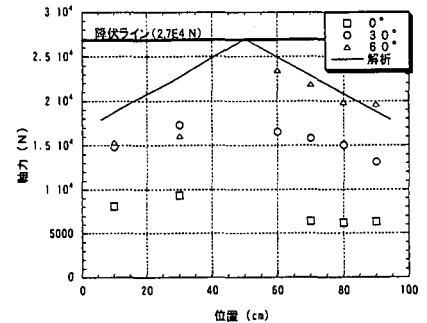


図-20 打設角度別軸力分布比較
(ケーブルボルト)

5. まとめ

ケーブルボルトなどで補強したき裂のせん断試験結果を解析的に評価することを試みた結果、以下の知見を得た。

- (1) き裂のせん断特性を表現するモデルとして、き裂面の拘束応力に依存する4つのパラメータ(き裂降伏応力、せん断剛性の変曲点、最大開口変位およびダイレーション角度)によって決定されるモデルを提案した。実験的にこれらのパラメータを決定することで、ピークまでのき裂のせん断応力-せん断変位関係を表現することが可能である。
- (2) ケーブルボルトのせん断補強を再現するのに重要となるほぞ効果を適切に考慮するためのケーブルボルトの要素分割法を提案した。
- (3) 提案モデルおよび提案要素分割法を適用した個別要素法解析により、異なる打設角度を持つケーブルボルト補強き裂のせん断強度およびせん断変位を表現することができた。ただし、ケーブルボルトとき裂が直交する場合の、せん断過程およびケーブルボルトの軸力分布については表現できず、今後の課題となった。

(参考文献)

- 1) Barton, N. et. al; predicted and Measured Performance of the 62m Span Norwegian Olympic Ice Hockey Cavern at Gjovik, int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech, Vol.31, No.6, pp.617~641, 1994
- 2) 木梨、大内、大西; 付着応力分布に基づくケーブルボルトの引抜定着特性に関する研究、トンネル工学研究論文・報告集第9巻、31~38、1999
- 3) 丹生屋、木梨、大内、大西; ケーブルボルトによる岩盤き裂面のせん断補強試験、土木学会第54回年次学術講演概要集・第3部B、96~97、1999
- 4) 丹生屋、木梨、鈴木; ケーブルボルトによる岩盤き裂面せん断補強効果に関する要素試験、トンネル工学研究論文・報告集第10巻、2000
- 5) 鈴木、松尾、堀井、平間; 亀裂性岩盤の大型岩盤ブロック室内せん断試験、土木学会第55回年次学術講演概要集 (CD-ROM)、部門Ⅲ、2000
- 6) UDEC Ver.3.0, Itasca Consulting Group, Inc, 1996
- 7) Barton, N., Choubey, V.; The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, Vol.10, pp.1~54, 1977