

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

A Joint Shear Test for Reinforcement by Cablebolting

丹生屋 純夫¹⁾・木梨 秀雄²⁾・鈴木 健一郎¹⁾

Sumio NIUNOYA, Hideo KINASHI, Kenichirou SUZUKI

In jointed rockmass, it is important to understand the effect of reinforcement of shearing joint by cablebolting. We tried to performed laboratory shear test under the several conditions like strength of rock, characterization of joint roughness and some kind of bolts. The experimental results indicate that the reinforcement by cablebolt give effects of confining the joint almost equally in comparison with PS anchor method.

In addition, we tried to evaluate the result of laboratory shear test by numerical analysis using shear joint model we suggested from the data of these test.

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

1. はじめに

ケーブルボルト工法は全面接着式の岩盤補強工であり、フレキシブルなストランドを使用するために狭い坑道からの長尺施工に有効である。また従来の主要補強工であるPSアンカー工法のようなプレストレスを必要としないために地下発電所などの大規模地下空洞施工において工期短縮及びコストダウン、施工性向上が期待でき、PSアンカー工法の代替工法として注目を集めつつある¹⁾。

しかし、ケーブルボルト工法を採用する際には以下の点において留意する必要がある。

①ケーブルボルトの付着特性

②ケーブルボルトによるき裂せん断補強特性

このうち、ケーブルボルトの付着特性については、試験、検証解析結果を報告した²⁾。これに対してき裂せん断補強効果については、き裂面特性などが不明確なために原位置あるいは室内においても明確な実証実験を行なっているケースはほとんど無い。今回、あるサイトを仮定し、き裂面模型を作製するなど、明確な諸条件(岩石物性、き裂特性、ボルト配置および物性)の下で、室内一面せん断試験を実施することにより、ケーブルボルトのせん断補強効果の把握を試みた。また、き裂面模型のせん断挙動特性を明らかにし、評価モデルを構築した上で、実験結果の検証解析も実施し、ケーブルボルトによるき裂面補強効果メカニズムの解明に取り組んだ。

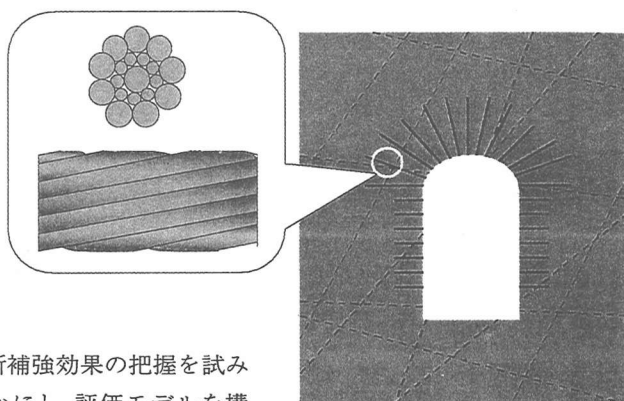
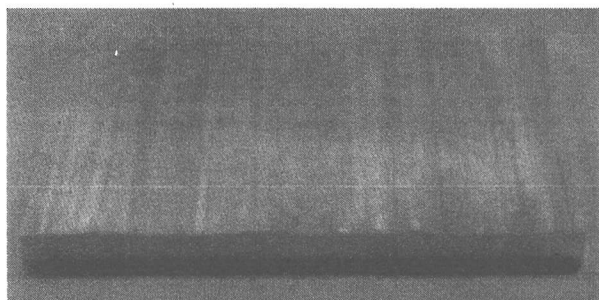


図-1 ケーブルボルト概念

1)正会員 (株)大林組 技術研究所

2)正会員 (株)大林組 土木技術本部技術第六部



図－３ アルミ製き裂鋳型

Type	Shape	JRC range
1		0~2
2		2~4
3		4~6
4		6~8
5		8~10
6		10~12
7		12~14
8		14~16
9		16~18
10		18~20
0 5 10cm Scale		

図－２ JRCに基づくき裂形状分類

２．試験方法および試験条件

以下の条件でケーブルボルトによる室内一面せん断補強試験を実施した。

(１) き裂面形状

サイトにおけるき裂面の情報からBartonら³⁾が提案したラフネスパラメータJRC (Joint Roughness Coefficient)なる粗さ

指標を算定し、図－２

に示すき裂分類表から該当する起伏タイプを抽出した。そのタイプの波形をデジタル座標として２次元データ化し、これに基づいてアルミ板を削り出し、忠実に再現した。この波形アルミ板を試験体作製のためのき裂面鋳型とした。図－３にアルミ製き裂鋳型の外形を示す。

表－１ 試験ケース一覧

ケース	き裂面長	き裂面幅	き裂形状	補強材料	仕様	打設角度	備考
1	360mm	240mm	Type3	ケーブル	$\phi 2.9\text{mm}$ (2本より)	0°	ボルト緊張力 0tf
2						60°	
3						-60°	
4						30°	
5			Type1				
6			Type5				
7			Type3	PSアンカー	D10	0°	1.5tf
8				ロックボルト		60°	0tf
9							
10	360mm	240mm	Type3	補強なし			0.10MPa
～							～
16							7.00MPa

・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。

(２) 岩質部

岩質部は、セメントモルタルによりサイトにおいて代表とみなした岩石一軸圧縮強度70MPaに相当するような配合を行なった。打設時にテストピースを採り、試験時点の正確な強度を破壊試験により把握した。

(３) ケーブルボルト

ケーブルボルトは、 $\phi 2.9\text{mm}$ P C 鋼線を2本より合せたものを使用した。本試験前に、鋼線の引張り試験およびすべての鋼線に貼り付けたひずみゲージに対する検定試験を実施

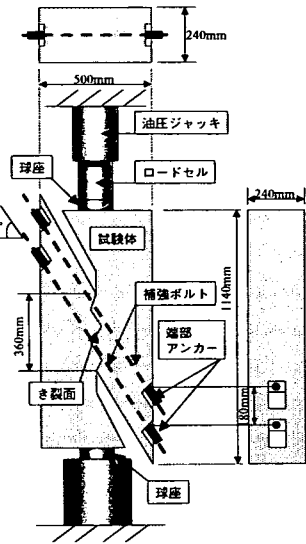
表－２ 使用材料特性

試験体構成	仕様	特性	備考
岩質部	セメントモルタル (W/C=35%)	$f_c=70\text{MPa}$	
ケーブルボルト および P S アンカー	鋼線 $\phi 2.9\text{mm}$ (2本より)	$P_{sy}=26.8\text{kN}$ $P_{su}=28.0\text{kN}$ $A_s=0.1321\text{cm}^2$	
ロックボルト	異形鉄筋 (SD30 : D10)	$P_{sy}=25.3\text{kN}$ $P_{su}=33.5\text{kN}$ $A_s=0.7133\text{cm}^2$	ケーブルボルト と同程度の引 張り荷重

し、鋼線にかかる引張り荷重とひずみの関係を把握した。一試験体に対するケーブルボルトの設置方法は、既存の地下空洞におけるP Sアンカーの配置データを調査し、その平均的な寸法を1／10縮尺とした。その結果、24cm×36cm四方のき裂面に断面積 $A_s=0.1321\text{cm}^2$ の鋼線が2組設置するケースを標準とした。

試験ケースはケーブルボルトのほかに比較ケースとしてP Sアンカーおよびロックボルトケースを実施した。P Sアンカーはケーブルボルトケースと同じ $\phi 2.9\text{mm}$ の2本よりを用い、ロックボルトケースはケーブルボルトと同等の引張り強度を持つ材料として径10mmの異形鉄筋を使用した。

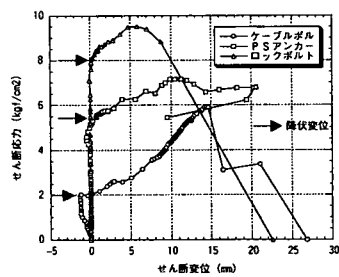
また、き裂面を載荷拘束した無補強ケースを数パターン実施した。実施した試験ケースについて整理したものを表－1に、使用材料と特性を表－2に示す。図－4は、標準試験体及び試験状況の概要図である。



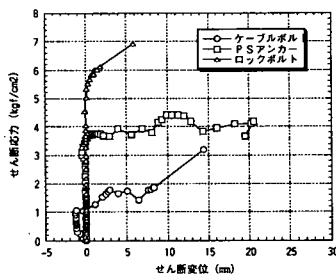
図－4 標準試験体概要図

3. 試験結果および考察

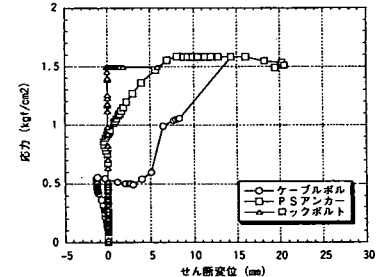
補強工別に試験結果をまとめたものを図－5～8に示す。図－5は、補強工別のせん断応力(載荷荷重をき裂面積で除したもの)－せん断変位関係を示す。また、図－6はき裂面上の測定ひずみより補強材料のせん断負担成分を求め、これを全体から差し引いたき裂面せん断負担成分である。図－7は同じく補強材料のき裂直交成分から算定したき裂面拘束応力である。ただし、ひずみ測定不能なケーブルボルトの場合における最大値は、事前に実施した引張り試験の最大荷重値を用いた。これらによると、降伏応力(開口変位開始で定義:図－5中一印)、最大応力ともにロックボルトが最も大きい値を示しているが、比較的小さい変位で破断している。付着性状が良く、小さな開口変位、せん断変位レベルで高応力が作用する結果が得られている。ケーブルボルトは比較



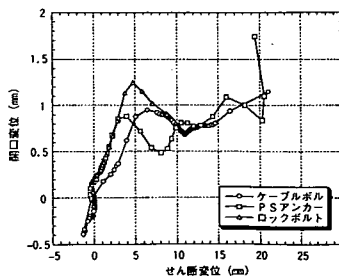
図－5 せん断応力-せん断変位関係 (補強工別)



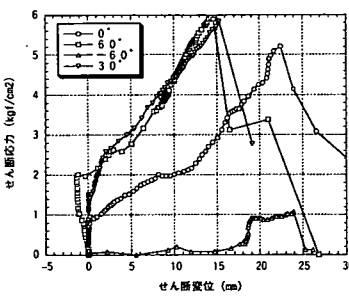
図－6 き裂面せん断負担応力-せん断変位関係 (補強工別)



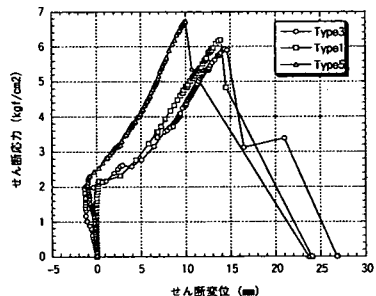
図－7 き裂面拘束負担応力-せん断変位関係 (補強工別)



図－8 開口変位-せん断変位関係 (補強工別)



図－9 せん断応力-せん断変位関係 (打設角度別)



図－10 せん断応力-せん断変位関係 (き裂形状別)

の低応力でせん断変位が生じるが、最大応力はP S アンカーと大差がない。なお、図- 8 に開口変位とせん断変位の関係を示す。比較的 low 応力でき裂起伏は破壊せず、順次乗り越えてせん断変位を生じるため、同様の関係となっている。

ケーブルボルトの打設角度別に補強効果を比較したものが図- 9 である。-60° に打設したものは圧縮応力が作用する側にケーブルボルトを設置しているのでその効果は見られない。また、0°（き裂直交方向）に打設した場合も30°、60° に打設したケースに比べると補強効果は小さい。

き裂形状の違いによるせん断補強効果を比較したものが図- 1 0 である。図- 2 に示したき裂形状の分類のうちType3 を挟みType1（JRC = 0 ~ 2）およびType5（JRC = 8 ~ 10）を比較対象とした。起伏が大きいType5 が強度、剛性とも大きくなっている。一方、Type1 とType3 に大きな相違は見られなかった。

4. き裂せん断特性モデルの設定

各試験結果より、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調べると図- 1 1 に示すモデルで表わすことができる。①の変曲点 $\tau Y1$ 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、②の $\tau Y2$ 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。なお、試験ケース1 ~ 9 の補強有ケースでは、全せん断応力から、補強材料のき裂面上において得られたひずみから割り出した軸力のき裂せん断方向成分を差し引いたものをき裂面せん断負担応力とした。

一つのき裂面に対し図- 1 1 のモデルを決定するには、図- 1 2 ~ 1 5 の結果によって各パラメータを算出する必要がある。これらの結果はそれぞれの試験データを抽出、プロットし、直線およびlog曲線で近似させたものである。図- 1 2 より、 $\tau Y1$ と $\tau Y2$ 、図- 1 3、1 4 より①および②区間のき裂せん断剛性を算出する。また、図- 1 5 より開口変位の上昇角度を求める。いずれのパラメータもき裂の拘束に依

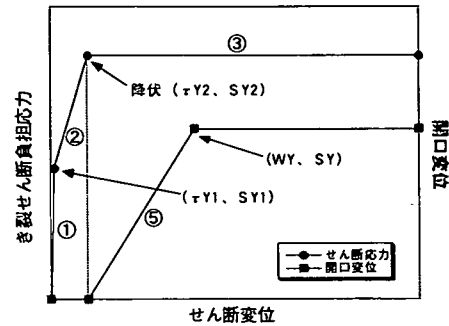


図- 1 1 き裂せん断特性モデル

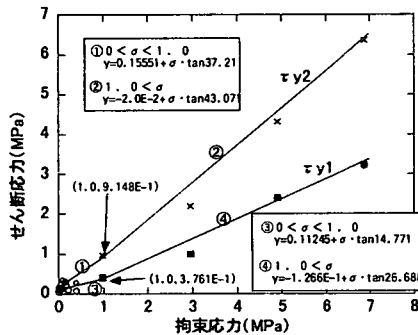


図- 1 2 変曲点算定式

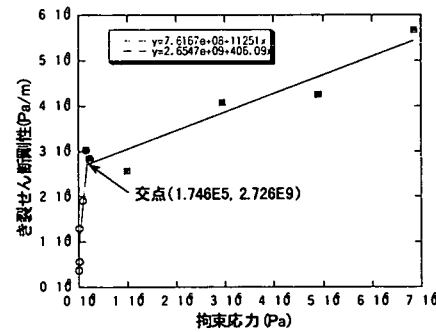


図- 1 3 き裂せん断剛性①算定式

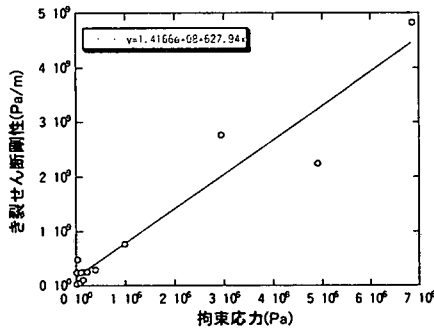


図- 1 4 き裂せん断剛性②算定式

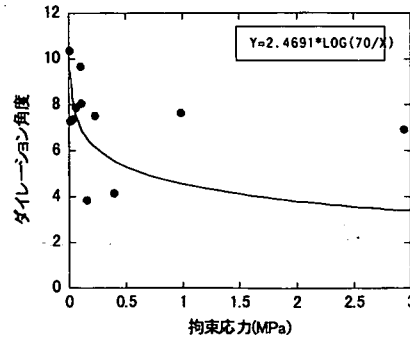


図- 1 5 ダイレーション角度算定式

存するものであり、拘束応力を調べることににより算出することが出来る。

以上の設定法により不連続体解析法 UDEC を使い、き裂面せん断解析を実施し、試験結果と比較した。一例を図-16、17に示す。モデル式より算定した入力値は、解析値と一致している。また試験値とは、データのばらつきにもよるが、概ねよく追従している。

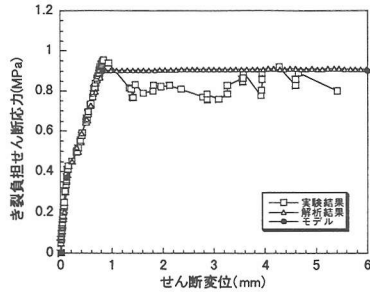


図-16 き裂面せん断解析(τ -S)

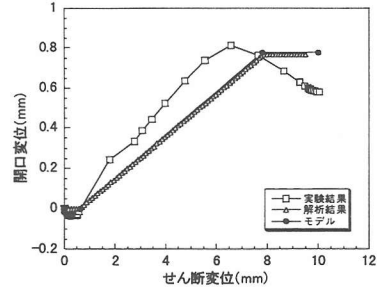


図-17 き裂面せん断解析(W-S)

5. 補強効果の検証解析

以上のき裂面せん断特性モデルを用いて、試験ケースの検証解析を実施した。入力条件は4章で提案したき裂せん断特性モデルと木梨ら²⁾が提案したケーブルボルトの付着特性モデルおよび試験に用いた物理定数を用いた。解析モデルを図-18に示す。また、せん断が生じるとき裂直上においてケーブルボルトおよびロックボルトは、ねじれ(ほぞ)現象(図-19)が起きる。この現象を適確に再現するためにケーブルボルト要素を分割する必要がある。そこで、ケーブルボルトを杭、き裂面を地表面と仮定し、地表面の杭頭に水平載荷を行なったときの軸深さにおけるばね変位を弾性解析によって計算した。図-20はケース4(ケーブルボルト角度30度)の計算結果である。試験結果から得られた最終せん断変位の半分に達したときのばね変位が生じ始める深さの2倍を、おおよそそのケーブルボルト分割要素長さと推測した。

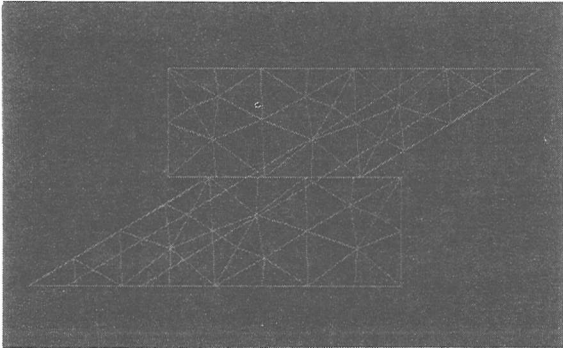


図-18 解析モデル

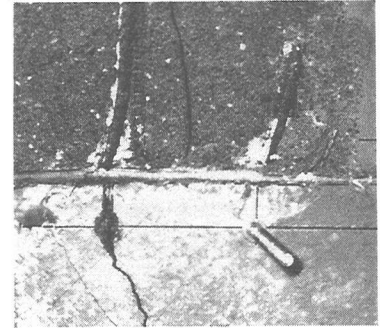


図-19 ねじれ(ほぞ)現象

PSアンカー、ケーブルボルトおよびロックボルトにおけるせん断応力 τ -せん断変位Sの比較結果を図-21~23に示す。なお、補強材料の付着応力については予め実施した引き抜き試験結果より $\tau=0.76\text{MPa}$ を与えている。

いずれのケースにおいても試験結果に対して解析結果は良く追従していると思われる。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。また、図-24はケーブルボルトケースにおける破断直前のケーブル上の軸力分布を示している。横軸の50cm位置がき裂直上にあたる。き裂直上

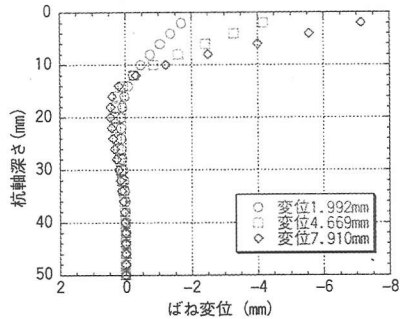


図-20 杭軸ばね水平変位計算例(ケース4)

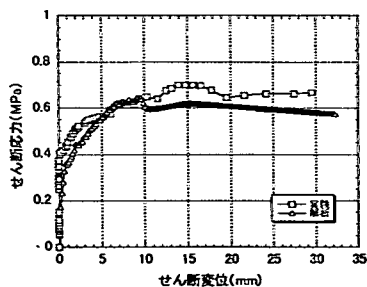


図-2 1 解析結果比較 τ -S
(P S アンカー)

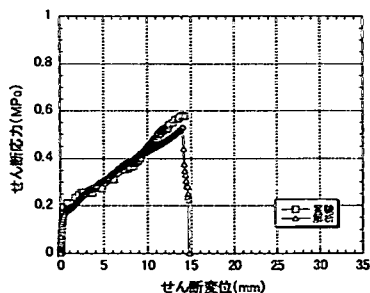


図-2 2 解析結果比較 τ -S
(ケーブルボルト)

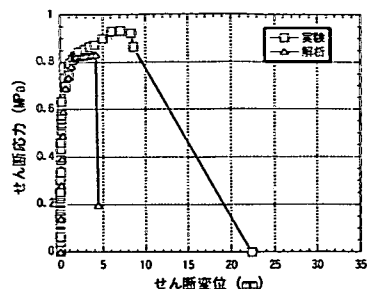


図-2 3 解析結果比較 τ -S
(ロックボルト)

は既に降伏しており、その分布を比較すると解析に入力した定着条件はほぼ試験結果と同等であることが分かる。よって、ケーブルボルトは定着が十分取れていれば、最終的には材料の持つ耐力に依存され、同等の強度ならば緊張方式の P S アンカーと同等の補強効果が期待できることが示唆された。

6. まとめ

本試験はケーブルボルト、P S アンカーおよびロックボルトの 3 ケースを実施し、その他にき裂面を載荷拘束した無補強ケースを数パターン実施した。その結果、以下の知見を得ることが出来た。

- (1) 補強工別の試験データを比較した結果、定着が十分確保されていれば、強度上ケーブルボルトは P S アンカーに比較し、遜色ない結果を得られた。
- (2) ケーブルボルトの打設角度はき裂面に垂直に打設するよりも角度をもって打設の方がせん断変位、応力とも延びていることが判明し、補強効果がより大きく発揮されることがわかった。
- (3) 試験データよりき裂面のせん断負担成分のみを抽出し整理した結果、せん断特性モデルを構築することができた。このモデルは、き裂降伏応力、せん断剛性および開口角度(ダイレーション角度)によって決定されるものであり、いずれも拘束応力に依存して左右されるものである。
- (4) このせん断特性モデルと、既存の定着モデルおよび事前の検定試験より得られたケーブルボルト物性定数より、試験結果の検証を不連続体解析で実施した。その結果、各ケースの試験結果を比較的良好に再現する事が出来た。また、き裂面直上においてケーブルボルトが歪曲する事により(ほぞ効果)、補強の効果を左右する事も判明した。

今後、き裂面の形状によりこのようなき裂せん断モデルを構築すれば補強効果の適確な検証を行なうことができることが判明した。

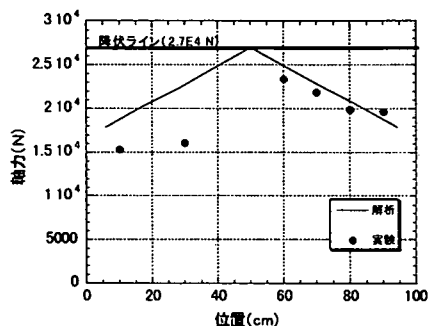


図-2 4 ケーブルボルト軸力分布(破断時)

(参考文献)

- 1) Barton, N. et. al; predicted and Mesured 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拔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) Barton, N., Choubey, V.; The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, Vol. 10, pp. 1-54, 1977