

軟岩に対するケーブルボルトの適用性について

APPLICABILITY OF CABLEBOLTING FOR PRE-REINFORCEMENT OF WEAK ROCK TUNNELS

清水則一¹⁾・武田智治²⁾

Norikazu SHIMIZU and Tomoharu TAKEDA

The effects of cablebolting for pre-reinforcement of weak rocks are investigated by using numerical analyses. The results show that cablebolting could improve the post-peak behavior of the rock mass; i.e., it makes rockmass strengthened and more ductile. The design concept for tunnels used cablebolts as pre-reinforcing elements are also discussed. It is concluded that the possibility of reduction of tunnel support members is suggested.

Key Words: cablebolt, pre-reinforcement, weak rock, tunnel, numerical analysis

1. はしがき

緊張力を与えない全面接着型のケーブルボルト工法を大断面トンネル地山の事前補強を目的として適用することが考えられ、現在試験施工が進められている¹⁾。ケーブルボルトは、周知のように海外のcut and fill形式の鉱山における岩盤の事前補強工法として成功を収めており、岩盤分類などに基づく経験的な設計方法や解析的な方法もいくつか考えられている^{2) 3)}。しかし、適用の対象となっている地山は主に硬岩であり、我国のトンネルで問題となるような脆弱な地山に対する実績はほとんどなく、参考とすべき設計方法もないのが現状である。したがって、その適用に際して、まず、1) 効果があるかどうか、2) その効果はどのようなものか、3) ケーブルボルトの効果を設計にどのように反映させるべきか、などを検討することが重要である。そこで、本研究では軟岩地山を対象に数値解析を通して上記の3点に対して考察する。

2. ケーブルボルトに期待される効果

ケーブルボルト工法に対して期待される効果は、大きく分けて、1) 事前補強、および、2) 支保効果である。事前補強は、本坑掘削以前にケーブルを打設することによって、a) 地山の不連続面の分離やすべりを抑制することで地山の挙動を一体化させる効果、および、b) 地山の力学特性を改良する効果、などが考えられる。一方、

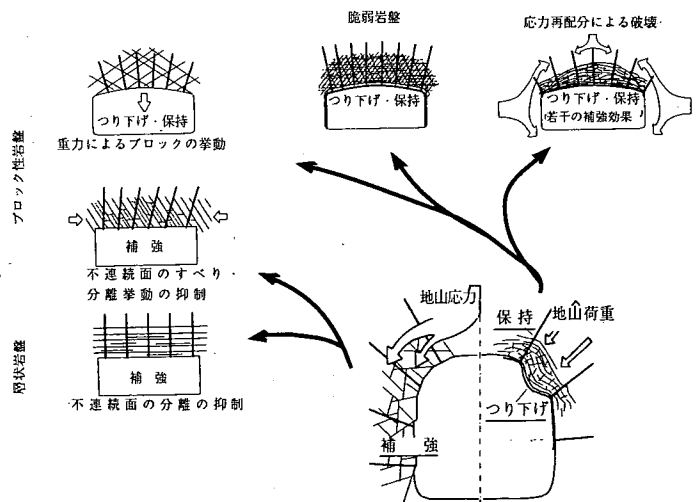


図-1 ケーブルボルトの作用効果 (Hutchinson ら原図²⁾, 筆者加筆)

¹⁾ 正会員 博士(工学) 山口大学工学部

²⁾ 学生会員 山口大学大学院理工学研究科

支保効果は、掘削後のトンネル周辺地山に対して、通常の鉄筋ボルトに期待するような地山を支える機能である。図-1にそれらの効果のイメージを示す。

一方、前述のように軟岩地山に対するケーブルボルトの作用効果についてはあまり知られておらず、また、軟岩地山は図-2に示される従来のケーブルボルトの適用範囲²⁾から見ると、必ずしも適切な適用範囲にはないようである(図-2には参考までに、RMRと比較して筆者が推定した日本道路公団の地山区分を併記している)。しかし、実際のところ軟岩地山に施工された実績はほとんどないことや、たとえば、現在使われているロックボルトも当初は脆弱な地山への適用が疑問視されていたが実際には効果的に用いることができたこと、などを考えると、まずは適用の可能性について様々な観点から検討することが大切である。本報告では、事前補強の観点からケーブルボルトの効果の特徴と設計へ反映させる方法について考察する。

3. 数値シミュレーションによる作用効果の考察

まず、ここではケーブルボルトの基本的な作用効果について考察するために、一軸圧縮試験の数値シミュレーションを行う。解析にはFLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua, ITASCA 社製, USA)を用いる。

(1) 解析モデル

解析に用いる材料モデルは、不連続面を有する弾性体の硬岩(不連続性硬岩モデル)、Mohr-Coulombの降伏基準に基づく完全塑性挙動を示す弾塑性連続体の軟岩(完全塑性軟岩モデル)、ならびに、Mohr-Coulombの降伏基準に基づくひずみ軟化塑性挙動を示す弾塑性連続体の軟岩(ひずみ軟化塑性軟岩モデル)、の3種類を考える。なお、ひずみ軟化弾塑性体として、降伏後の塑性ひずみの増加に伴って粘着力および内部摩擦角が減少するモデルを用いる。力学定数として、硬岩に対しては日本道路公団地山区分のB地山、また、軟岩に対してはCIIおよびDI地山の平均的な値を与えた⁴⁾(表-1)。

なお、軟化に関する力学定数の平均的な値は知られていないのでここでは図-3および表-1に示すように仮定した。

表-2 ケーブル・グラウトの解析パラメータ

ケーブル弾性係数 (MPa)	2.00E+05
グラウト付着剛性 kbond(MN/m/m)	6.50E+03
グラウト付着強度 sbond(kN/m)	300
ケーブル引張降伏強度 (kN)	200
ケーブル直径 (7本より線) (mm)	15.2

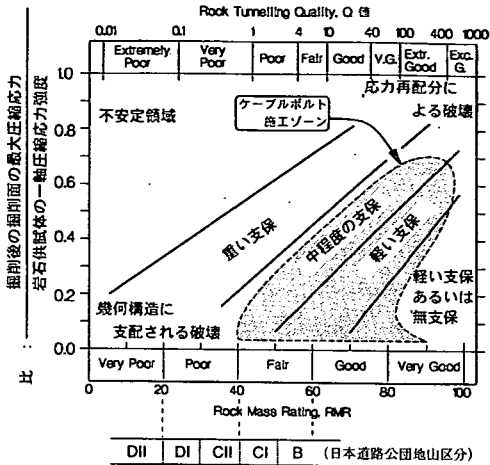


図-2 従来のケーブルボルトの適用範囲 (Hutchinsonら原図²⁾, 筆者加筆)

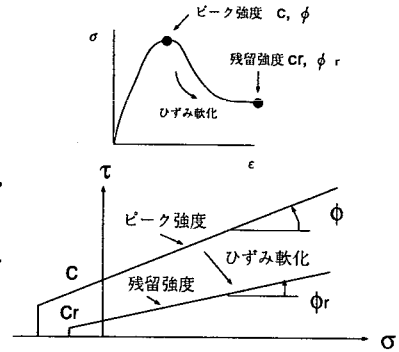


図-3 ひずみ軟化モデル

表-1 解析パラメータ (地山)

地山区分	B	C II	D I
ヤング率 E (MPa)	4900	980	490
ポアソン比 ν	0.25	0.3	0.35
粘着力 c (MPa)	ピーク時 2.94 残留時 -	0.98 0.49	0.49 0.245
摩擦角 φ (°)	ピーク時 50 残留時 -	40 30	35 25
密度 ρ (kg/m³)	2500	2300	2200
引張強度 σ (MPa)	1.62	0.42	0.188

一軸圧縮試験（平面ひずみ試験）の供試体は縦 10 m、横 5 m の直方体とし（図-4(a)）、ケーブルボルトは、3 本および 9 本の 2 つのパターンで打設する（図-4(b)）。打設間隔は 3 本の場合は 2 m、9 本の場合は 1 m である。圧縮载荷は、供試体上下面に変位速度 v を等しく与える変位制御方式によった。

一方、ケーブルボルトは、図-5 に示すように、ケーブルボルトを降伏するバネ要素で、グラウトの弾性をバネ要素で、ケーブル／グラウト間の付着特性はすべりを表現できるスライダーによってモデル化した。なお、このモデルは FLAC に組み込まれているものである⁵⁾。表-2 にケーブルボルト、グラウト、ならびにケーブル／グラウト間の物性値を示す。なお、 $kbond$ と $sbond$ はそれぞれ、グラウトのせん断剛性⁶⁾ およびケーブルボルトとグラウト間の付着強度を表すパラメータである。付着強度は Kaiser らの提案した BSM (Bond Strength Model)⁷⁾⁻⁹⁾ を用いて与えた。

（2）解析結果

a) 不連続性硬岩モデル

図-6 に供試体の载荷方向の応力-ひずみ関係を示す。ケーブルボルトのない場合は、不連続面の応力がその強度に達した後すべりを生じ、完全塑性的な挙動を示している。一方、ケーブルを打設した場合には、不連続面がすべりを生じた後に応力の増加（ひずみ硬化的挙動）が見られる。また、図-6 に併せて示しているケーブルボルト軸力の増加は、不連続面にすべりが生じた後、急激に大きくなっている。これは、ケーブルの軸力によって不連続面のすべりが抑制され、結果的に供試体としてはみかけの強度が増加するものと考えられる。この結果は、「硬岩におけるケーブルボルトはその軸力発生によって不連続面の挙動を抑制する」という従来の知見を説明するものと考えられる。

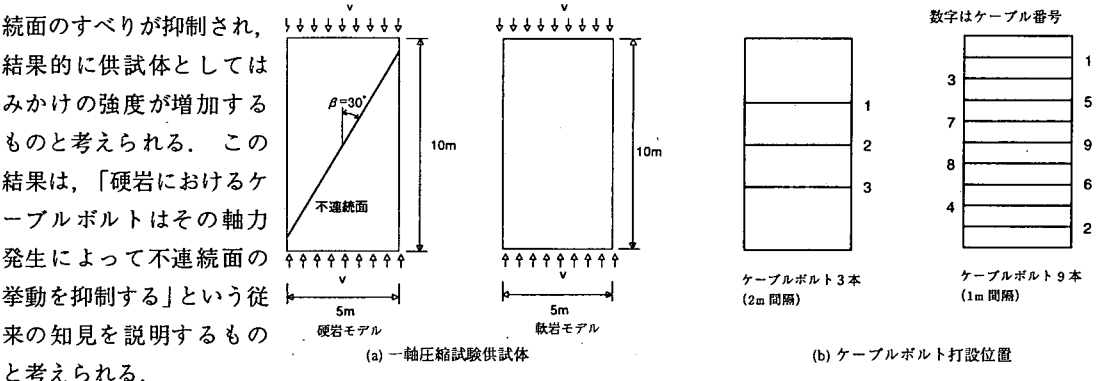


図-4 解析モデル

b) 完全塑性軟岩モデル

DI 地山相当の完全塑性軟岩モデルの载荷方向の応力-ひずみ関係を図-7 に示す。ケーブルボルトを打設すると不連続性硬岩モデルと同様に、供試体の降伏後にひずみ硬化が見られる。そして、ケーブルボルトが降伏あるいはグラウトとの付着が切れると、供試体の硬化傾向は減少し、やがて本来の完全塑性型の応力-ひずみ関係となる。しかし、最終的な強度はケーブルボルトを打設しない場合に比べれば増加しており、ケーブルボルトを打設したことによる強度の増加が見られる。

c) ひずみ軟化塑性軟岩モデル

DI 地山相当のひずみ軟化塑性軟岩モデルの载荷方向の応力-ひずみ関係を図-8 に示す。ケーブルボルトを打設することによって、ケーブルボルトのない場合にみられる降伏後の急激なひずみ軟化現象が緩和されていることが分かる。この緩和される傾向もケーブルボルトが降伏するにつれて減少するが、残留強度はケーブルボルトを打設しない場合に比べて大きくなることが示されている。

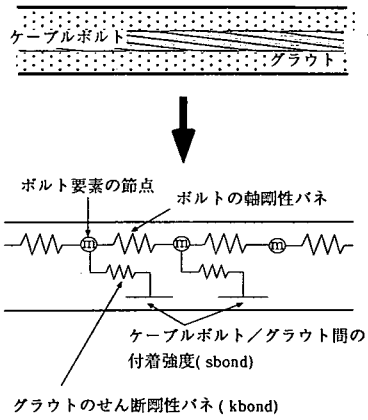


図-5 ケーブルボルトのモデル

(3) ケーブルボルトの効果に関する考察

3つのケースに対する解析結果から、ケーブルボルトは不連続性硬岩のみならず、軟岩においても効果が見られることが分かった。しかし、その効果は供試体の降伏後の挙動について最終強度の増加および延性特性の向上として現れ、降伏以前の剛性の改善にはほとんど効果がないようである(図-6~8における降伏以前の応力-ひずみ関係の傾きを参照。ケーブルの有無にかかわらず同じ傾きである。)

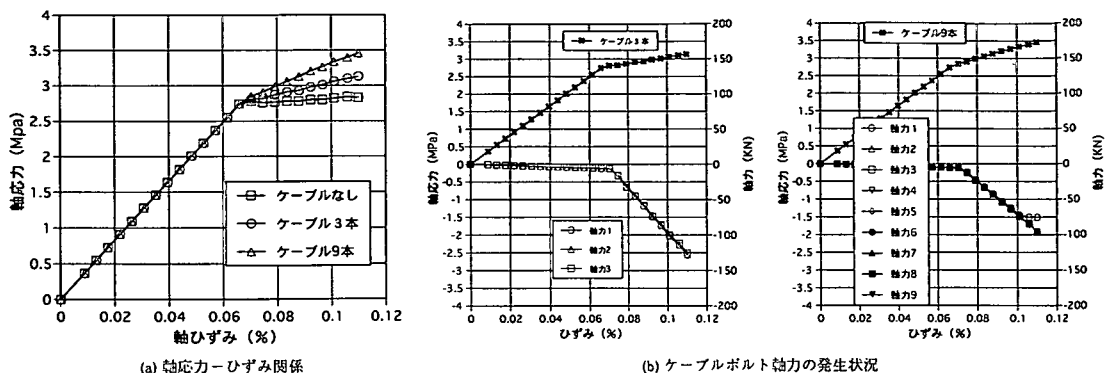


図-6 不連続硬岩モデルの結果

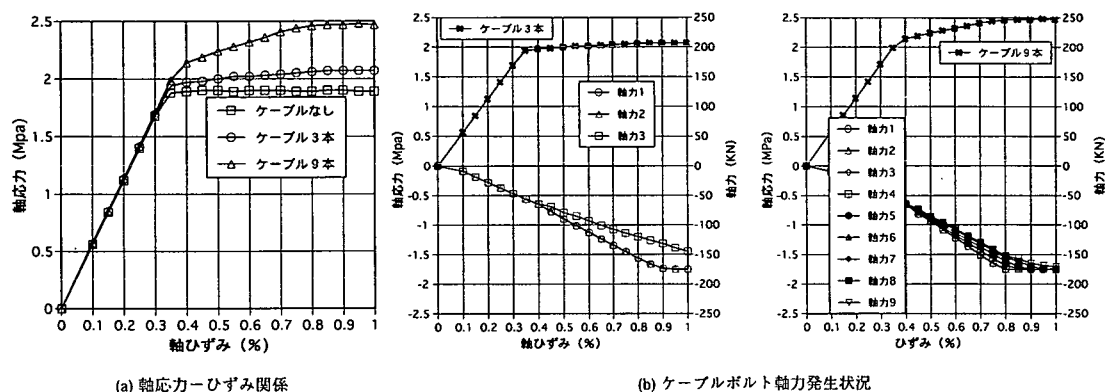


図-7 完全塑性軟岩モデルの結果

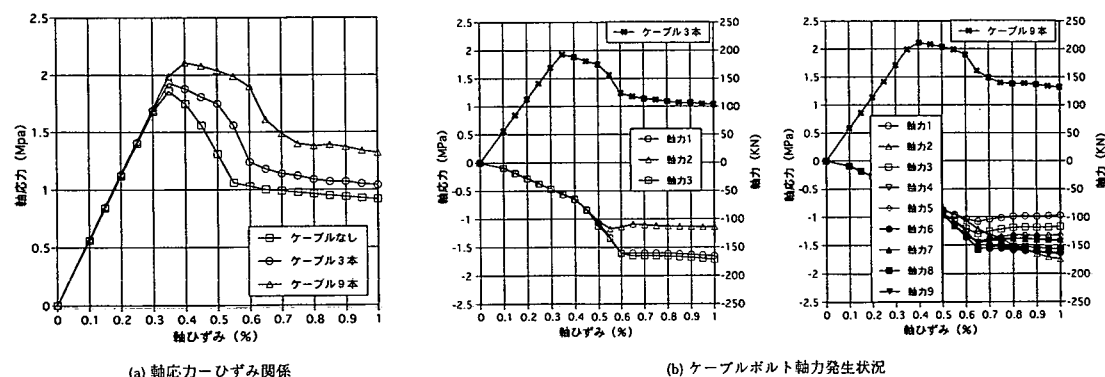


図-8 ひずみ軟化軟岩モデルの結果

また、降伏後の効果はケーブルボルト軸力によって生じ、ケーブルボルトの降伏、あるいは、ケーブルボルトとグラウトの付着が切れたときにその効果が減じていることが分かった。いずれにしても、ケーブルボルトの効果は、岩盤の降伏後の強度と延性特性の改善にあると考えられる。

そこでケーブルボルトの作用効果をもう少し定量的にみるために、図-9に示すような効果率を定義した。すなわち、硬岩モデルおよび完全塑性軟岩モデルにおいては図-9(a)に示すように、ケーブルボルトを打設しない場合から弾性挙動を示す応力-ひずみ関係までの角度を α 、ケーブルボルトを打設した場合までの応力-ひずみ関係の角度を β とし、その比 β/α を効果率とする。また、ひずみ軟化軟岩モデルにおいては図-9(b)に示すように、降伏直後の軟化曲線の接線ととり、ケーブルボルトを打設しない場合から弾性体の応力-ひずみ関係までの角度を α 、ケーブルボルトを打設した場合の応力-ひずみ関係までの角度を β とし、上記と同様に比 β/α で効果率を定義する。効果率は0の場合、ケーブルボルトの効果がないことを表し、1の場合は供試体が弾性挙動を示し、ケーブルボルトの作用効果が最大となることを表している。

図-9(c)に効果率とケーブルボルトの本数の関係を各モデルごとに示す。図にはCII地山に対する結果も併せて示している。いずれのモデルもケーブルボルトの打設本数を増加させると効果率は上昇している。ひずみ軟化塑性モデルと完全塑性モデルを比較すると、ひずみ軟化モデルの方が少ないケーブルボルトの本数で大きな効果が得られている。また、強度の低い地山ほど(DIの方がCIIより)ケーブルボルトの効果が見られることが分かる。

次に、ひずみ軟化軟岩モデルにおいて、降伏後の強度の推移を調べるために、軟化曲線(図-8の降伏後の曲線)から、発生した塑性ひずみとその時点における一軸圧縮強度を求める。図-10にその結果を示す。ケーブルボルトのない場合は、軟化曲線から得られる一軸圧縮強度は、図-3のように与えた c 、 ϕ から得られる値と同じになるが(これは当然のことである)、ケーブルボルトを打設すると、ケーブルボルトのない場合に比べて、初期(ピーク)強度が増加し、同じ塑性ひずみが発生した時点の強度も増加していることがわかる。そして、最終的には残留一軸圧縮強度も増加している(1m間隔に9本打設した場合約1.5倍となる)。

4. トンネル設計への反映

前章の数値シミュレーションの結果から得られたケーブルボルトの作用効果を、軟岩地山のトンネル設計へどのように反映させるかを、地山特性曲線を用いて考える。

ケーブルボルトの効果は地山降伏後の強度増加である点に着目して、図-11(a)に示す応力ひずみ関係の地山に掘削された円形トンネルの地山特性曲線を

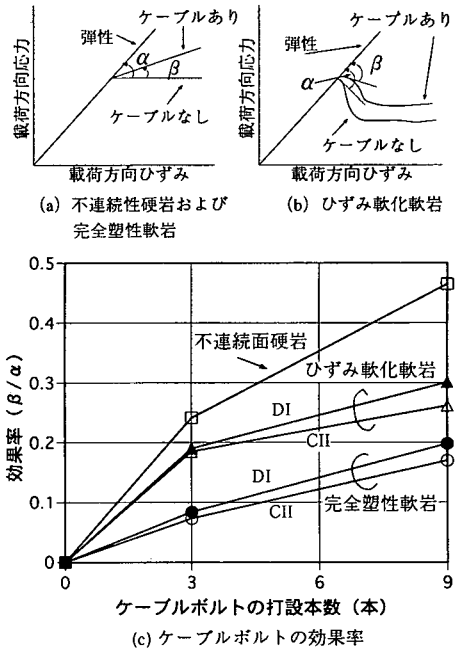
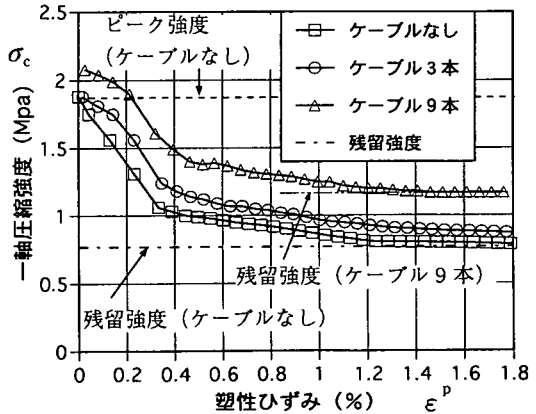


図-9 ケーブルボルトの効果率



求める（図-11(b)）。ただし、地山等級はDI、初期応力は静水圧（4.9MPa）、トンネル直径は10mとして計算する。図中、曲線Aは残留強度がピーク強度の50%となる場合、また、曲線Bは残留強度がピーク強度と等しい場合（軟化しない場合）の地山特性曲線である。ここで、曲線Aをケーブルボルトを打設しない場合の地山曲線とすると、ケーブルボルトの打設によって残留強度が増加した結果、地山特性曲線は曲線Bとなったと考えられる（これはケーブルボルトの効果が最大となるケースである）。

一方、支保リングを厚さ15cmの吹き付けコンクリートと考え（ $E_c=3000\text{MPa}$, $\sigma_c=32\text{MPa}$ ）、掘削による応力解放が50%のとき支保を導入したと仮定する。この支保曲線Cと地山特性曲線Aとの交点が、ケーブルボルトを施工しない場合の掘削後のトンネルの平衡点となり、そのときの変位は約8cmとなる。さて、ケーブルボルトによって地山が事前補強され地山特性曲線が曲線Bになると、ケーブルボルトのない場合の平衡点の変位（8cm）と同じ変位となるような支保リングを考えると支保曲線Dを得る。この支保曲線Dから支保リングの厚さを求めると約11cmである。すなわち、ケーブルボルトによる事前補強により、掘削後の支保厚さは25%低減できたことになる。これは、ケーブルボルトの効果を掘削後の支保量の削減として設計上に反映させることができることを示していると思われる。

5. むすび

本報告では、ケーブルボルトの軟岩地山に対する作用効果を数値解析によって考察し、トンネル設計への反映の方法について検討した。数値解析の結果、軟岩であってもケーブルボルトは岩盤の補強に効果があり、その効果は降伏後の強度増加および延性特性の向上として現れ、降伏以前の剛性の改善にはほとんど影響がないというものであった。そして、地山特性曲線を用いてケーブルボルトによって補強されたトンネルに対する設計の考え方について一案を述べた。簡単な計算からではあるが、ケーブルボルトによる事前補強によって、掘削後の支保量を低減できることが示された。

もっとも、本結果はあくまでも数値解析によるモデル計算であり、その妥当性の検証は実際の適用結果との比較まで待たなければならない。最初に述べたように、現在、ケーブルボルトを用いた試験施工が行われており、近い将来、その効果についての知見が得られるものと思われる。

参考文献

1. 田中 一, トンネルと地下, 28(6), pp.459-466, 1997.
2. Hutchinson, D.J. and Diederichs, M. S.: Cablebolting in Underground Mines, BiTech Publishers, 1996.
3. 清水則一, P.K. Kaiser, M.S. Diederichs, D.J. Hutchinson, トンネルと地下, 28(4), pp.43-52, 1997.
4. 建設省土木研究所トンネル研究室, 土木研究所資料第3232号, p.20, 1994.
5. FLAC ver. 3.3 user's manual, ITASCA, 1996.
6. St. John, C. M., Proc. the 24th U.S. Symposium on Rock Mechanics, pp.13-25, 1983.
7. Yazici, S. & Kaiser, P. K., Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 29(3), pp. 279 - 292, 1992.
8. Diederichs, M.S., Kaiser, P.K. and Yazici, S.: CABLEBOND / CSTRESS Version 3.1, GRC, Laurentian University, Canada, 1992.
9. Diederichs, M. S., Pieterse E., Nose, J. and Kaiser P. K., Eurock'93, Balkema, pp. 83 - 90, 1993.

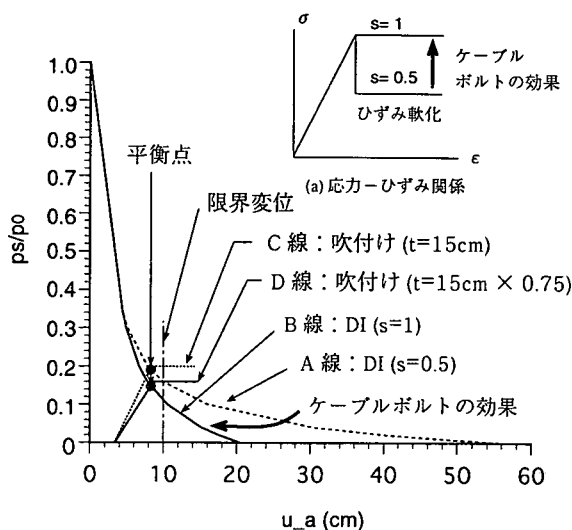


図-11 ケーブルボルトの効果による支保の低減