

ケーブルボルトの付着特性およびせん断補強効果について

BONDING PROPERTIES AND SHEAR REINFORCING EFFECTS OF FULLY GROUTED CABLE BOLTS

中原 史晴*・伊藤 文雄**・清水 則一***

Fumiharu NAKAHARA, Fumio ITO and Norikazu SIMIZU

The cable bolting method is expected to be widely used for tunnels and caverns. The reinforcing behaviors of cable bolts need to be quantitatively modeled for the rational support design. In this paper, the simulation analyses of the load-displacement behaviors of pull-out tests and block shear tests were conducted using the cable bolt elements proposed by Brady et al. It was found that the pull-out tests were sufficiently traced by properly evaluating the bonding properties between the cable and grout. However, we found that the shear reinforcing effects of the cable itself need to be considered in the simulation of block shear tests in addition to the normal reinforcing effects resulting from the axial force of the cable.

Key Words : cable bolt, pull-out test, block shear test, bonding properties, shear reinforcing effect

1. はじめに

近年、その施工性や経済性の利点を生かして、大断面トンネルや地下発電所において先行補強を目的としたケーブルボルト工法が採用されてきた。しかし、ケーブルボルトの岩盤補強効果を定量的に評価した設計方法は確立していないのが現状である。支保設計の一手法として数値解析によるアプローチがあるが、これには岩盤補強効果を十分に再現できるケーブルボルトのモデル化が必要である。筆者らは、コンクリート製の模擬岩盤を用いたケーブルボルトの室内引抜き試験¹⁾と、ケーブルボルトにより補強した人工的な不連続面に対するせん断試験²⁾を実施した。各々の試験では、ケーブルボルトの付着特性とせん断補強効果を比較評価する目的で、模擬岩盤供試体およびグラウト物性値とケーブルボルト付着長、種類などの試験条件を統一した。

本研究では、Brady らにより提案されたケーブルボルト要素³⁾を用いて、この室内引抜き試験およびせん断試験のシミュレーションを行った。その結果、引抜き試験におけるケーブルボルトとグラウト間の付着特性はケーブルボルト要素によって十分評価可能であることがわかった。しかし、せん断試験は軸方向の付着抵抗のみをモデル化しているケーブルボルト要素では十分評価しきれず、ケーブルボルトの不連続面補強効果にせん断方向の補強効果があることが明らかになった。

2. ケーブルボルト要素のモデル化

ケーブルボルト要素は、全面接着型ケーブルボルトやロックボルトの軸力発生機構をモデル化したもので、ケーブルとグラウト間の付着特性は、付着剛性 (kbond) および付着強度 (sbond) の二つのパラメータで構成された

* 正会員 大成建設株式会社 技術研究所
** 正会員 大成建設株式会社 土木技術部
*** 正会員 工博 山口大学工学部 社会建設工学科

スプリング／スライダシステムおよびケーブルの軸剛性によりモデル化されている。図-1 にケーブルボルト要素のモデル概念図を示す。

図-2 に、1つのケーブルボルト要素におけるケーブルボルトとグラウト間の相対変位と、付着長で正規化した軸荷重との関係を示す。 k_{bond} は弾性変形領域における剛性を、 s_{bond} ($=F_s^{max}/L$) はグラウトの付着強度をモデル化している。このようにケーブルボルト要素は、ボルト-グラウト間の付着特性を、剛性・強度の単純な二つのパラメータで代表させていることが特徴的である。ここで、ケーブルボルトがせん断を受けるような場合のせん断方向の変形に対する抵抗力はケーブルボルト要素のモデル上考慮していないことに注意する必要がある。

3. 引抜き試験概要とシミュレーション結果

これまで、ケーブルボルトの付着特性については、室内試験や原位置試験において種々の検討がなされてきている⁴⁾。本試験ではコンクリート製の模擬岩盤を作成し、原位置試験と同様の手順で室内引抜き試験を行った¹⁾。

室内引抜き試験における模擬岩盤として、CH級岩盤を想定し、一軸圧縮強度 80MPa を目標とした 500×500×1000mm のコンクリート供試体を作成した。この模擬岩盤に $\phi 65\text{mm}$ のボアホールを設け、ケーブルボルトを挿入してグラウト材の充填を行った。ケーブルボルトの定着長は 350mm とし、グラウト材は水セメント比 (W/C) 35% の早強ボルトランドセメントによるセメントペーストを用いた。試験日における模擬岩盤とグラウト材の物性値を表-1 に、引抜き試験の概要を図-3 に示す。

引抜き試験の変位計測は、ケーブルボルト口元部における挙動を明らかにするために、ボルト先端と口元部の 2 カ所で計測した。口元の変位量は、コンクリートの上面から 20mm の位置に変位計測用の治具を取り付け、台座隙間より 2 方向で変位を計測して平均値をとった。

ケーブルボルトの付着特性は、岩盤・グラウト物性値とケーブルボルト種類や打設本数などにより異なる。ここでは、最も一般的に用いられている 7 本より線 $\phi 15.2\text{mm}$ のプレーンストランドを 1 本打設した引抜き試験結果について考察する。この引抜き試験では、ケーブル打設全長にわたって付着切れが進行し、グラウトされたケーブルボルトは完全に引抜かれた。

図-4 にその引抜き試験結果の荷重－変位関係を示す。引抜き荷重 49kN 程度までは、比較的変形量は小さいものの若干の非線形性を示している。これは、部分的な付着切れが進行していることによると考えられる。さらに荷重が大きくなると変位が急増するが、変位の増加に

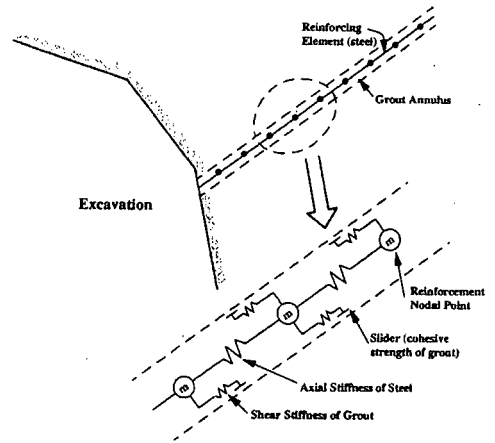


図-1 ケーブルボルト要素モデル概念図

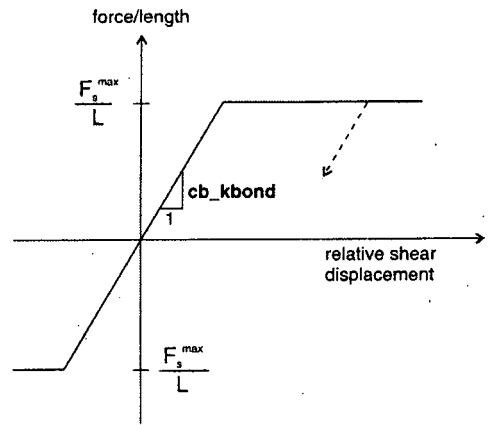


図-2 ケーブルボルト付着特性パラメータ

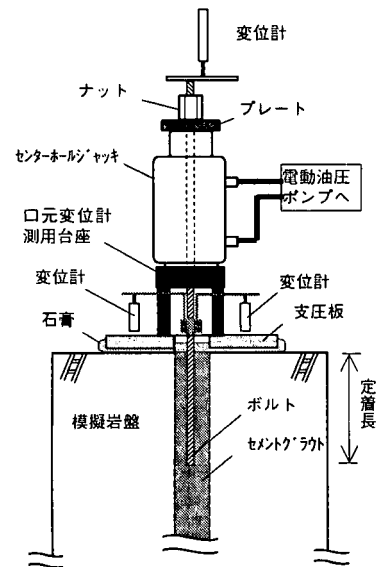


図-3 引抜き試験概要図

表-1 模擬岩盤およびグラウト物性値

種類	比重	圧縮強度 [MPa]	引張強度 [MPa]	ヤング率 [GPa]	ポアソン比	備 考
コンクリート（模擬岩盤）	2.41	82.3	4.83	35.1	0.22	21日強度（引張強度は25日）、現場発生
セメントペースト（グラウト材）	2.06	89.7	3.59	21.2	0.25	17日強度

表-2 解析ケースおよび入力物性値一覧表

解析ケース	kbond (kN/m/m)	sbond (kN/m)	備考
Case①	1.17E+06	1.40E+02	
Case②	1.17E+06	3.36E+02	
Case③	1.17E+06	1.40E+02～3.36E+02	sbond硬化モデル

ともなって荷重が増加する“硬化挙動”が見られる。これは、付着切れがボルト全長にわたって発生した後、グラウトの破壊が進行することによって発生するダイレイタンスの影響でその部分の拘束圧が増して引抜き抵抗が増加することによるものと解釈できる。グラウトの破壊がある程度以上進行すると、引抜き荷重がピークとなっている。今回の試験では、引抜き変位 32mm で最大引抜き荷重 118kN を示した。

この引抜き試験結果のシミュレーションを、前述のケーブルボルト要素を用いて実施した。解析には、有限差分法プログラム FLAC⁵⁾ を用いた。シミュレーションに用いたケーブルボルト要素の付着特性パラメータを表-2 に示す。

今回のシミュレーションでは、付着剛性 kbond は、斎藤・天野⁶⁾によって提案されている方法を応用して算定した。すなわち、荷重－変位曲線の初期直線部における傾きとケーブルボルトの径 (r) と剛性 (Eb) より kbond を算定するものである。

また、付着強度 sbond は 3 通りの方法で算定し、結果の比較検討を行った。sbond の算定方法として、Case①は、引抜き試験における荷重－変位関係のピーク荷重である最大引抜き荷重を限界荷重と考えて sbond＝最大引抜き荷重／付着長として算定している。Case②は、ケーブルボルトとグラウト間の付着切れが全長にわたり発生した荷重を付着限界荷重と考えて sbond＝付着切れ時の荷重／付着長として算定している。Case③は、付着切れの発生後、変位の増加にともなう sbond が硬化挙動を示すモデルとして、sbond を変位の関数として試験結果を表現するような折線状の関数で与えたものである。

3 ケースについて実施した解析結果と実験値の比較を図-5 に示す。初期変形挙動を示した図-5a を見ると、引抜き初期段階の弾性変形領域の勾配に着目すると、解析結果と実験結果はほぼ一致しており、今回採用した手法により算定した kbond の値によって、付着切れ前の弾性挙動を良く表現できている

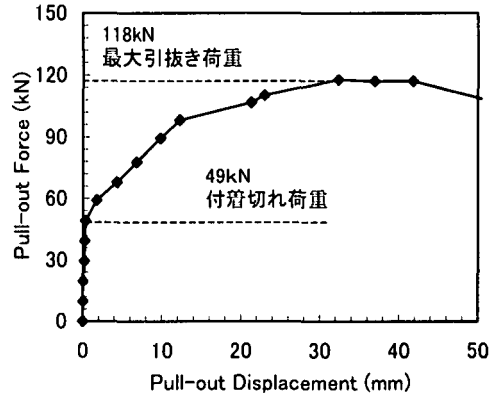
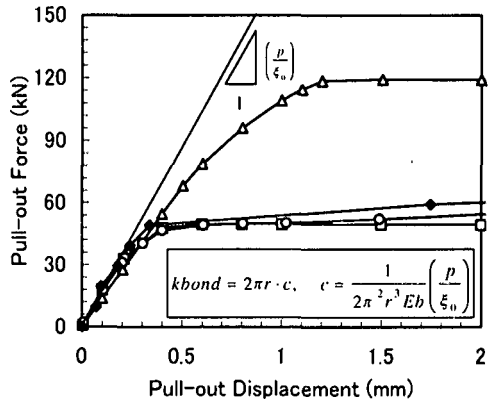
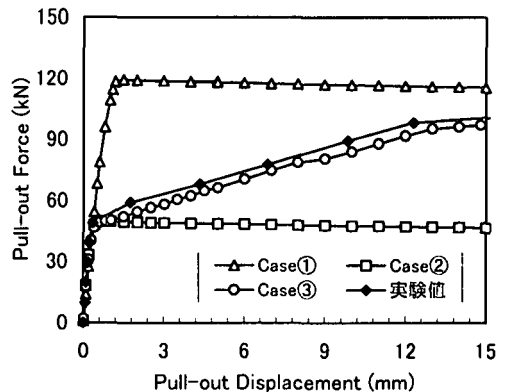


図-4 引抜き試験結果



(a) 初期変形挙動



(b) 全変形挙動

図-5 シミュレーション結果

と考えられる。さらに、付着切れの進行による非線形な挙動も解析で良く表現できていることがわかる。

次に、全長にわたり付着切れが発生した後の挙動（図-5b）に着目すると、 s_{bond} を最大引抜荷重より算定した Case①については、付着切れ後の荷重を過大に評価する結果となり、 s_{bond} を付着切れ時の荷重より算定した Case②においては、付着切れ後の荷重を過小評価する結果になった。Case③では、変位が大きい範囲まで、変位が増加するにつれ荷重が増加する“硬化挙動”を良好にシミュレートすることができている。これより、付着切れが全長にわたり発生した後の付着強度特性をもケーブル要素で評価可能であることがわかった。

4. セン断試験概要とシミュレーション結果

筆者らは、ケーブルボルトの不連続面補強効果を調べる目的で、室内せん断試験を実施した²⁾。せん断試験に用いた模擬岩盤は中央に 45° の不連続面を作成した 1000×700×500mm のコンクリート供試体とし、不連続面を横断するように ϕ 65mm のボアホールを設け、ケーブルボルトを挿入しグラウト材を充填した。せん断試験の概要を図-6 に示す。載荷装置には 1000kN の油圧ジャッキを用い、ジャッキ側の模擬岩盤は側方への変位を自由にするためにテフロンシートで摩擦を低減させ、他方の模擬岩盤は反力ブロックにより変位を固定して載荷をし、岩盤変位は亀裂に沿った 3 箇所、亀裂に垂直な成分と平行な成分を測定した。また、ボルト補強を行ったせん断試験に先立って、ボルト部材を打設しない供試体を用いて亀裂の物性を評価する試験を実施している。せん断試験では、引抜き試験によって得られた付着特性パラメータをシミュレーションに適用する目的で、岩盤・グラウト物性値とケーブルボルト種類、付着長を引抜き試験と同様にしている。

せん断試験においても、有限差分法プログラム FLAC のケーブルボルト要素を用いてシミュレーションを実施した。シミュレーションに用いた付着特性パラメータは、引抜き試験と同様の 3 ケースである。不連続面の物性値は、ボルト補強なしのケースのシミュレーションを実施して、内部摩擦角 $\phi = 30.0^\circ$ 、粘着力 = 4.0kPa と決定した。

一般的にケーブルボルトはロックボルトなどの棒材と比較して断面積が小さく、せん断方向の抵抗力をあまり期待できないものと考えられており、前述のとおりケーブルボルト要素では軸方向の付着抵抗のみをモデル化している。ケーブルボルトの補強メカニズムがボルト軸方向の抵抗力で決定されていれば、引抜き試験を評価可能であったケーブルボルト要素を用いてせん断試験結果もシミュレーション可能であると考えられる。

図-7 に 3 ケースのシミュレーション結果とせん断試験結果の比較図を示す。図は不連続面方向成分のせん断荷重－せん断変形関係を示している。せん断が進行してボルトの付着切れが進行した後のせん断荷重に着目すると、最大引抜き荷重より s_{bond} を算定した Case①では、引抜き試験評価時と同様にせん断荷重を過大に評価する結果となった。 s_{bond} を付着切れ時の荷重より算定した Case②ではせん断荷重は実験結果の 50%程度となり補強効果を過小に評価する結果となった。引抜き試験を良好にシミュレーションできた s_{bond} に硬化モデルを組込んだ Case

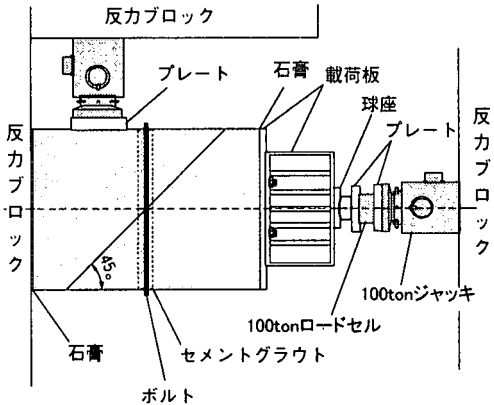


図-6 セン断試験概要図

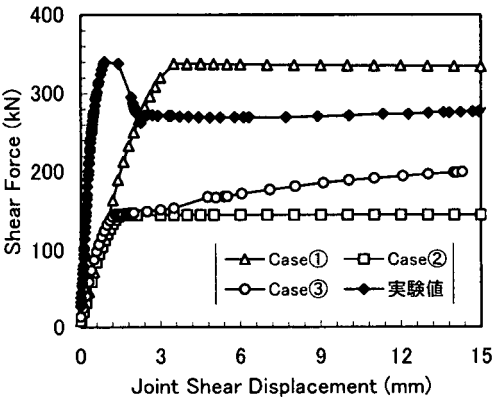


図-7 シミュレーション結果

③についても、せん断荷重レベルを十分に表現できていない。

一方、せん断初期における荷重－変位の勾配（せん断剛性）に着目すると、3 ケースのシミュレーション結果では、いずれのケースについても試験結果より剛性が小さくなっている。これは、試験結果においては不連続面におけるボルトの存在によって剛性が大きくなっているためと考えられる。

以上の結果より、ケーブルボルトが不連続面を補強する効果として、軸方向の付着抵抗による不連続面の締め付け効果のみならず、ケーブルボルト自体のせん断方向におけるせん断抵抗効果もかなり大きいといえる。この補強効果をケーブルボルトの特性として設計的に見込むことでより合理的な設計が可能になると考える。

なお、筆者らはここに示した試験結果および文献⁷⁾のせん断試験結果について、ケーブルボルトのせん断強度を不連続面の見かけ上の粘着力として考慮することでせん断補強効果を表現可能であることを示している⁸⁾。

5. まとめ

今回の引抜き試験およびせん断試験のシミュレーションより以下のことが明らかになった。

- ・ ケーブルボルト要素を用いた引抜き試験のシミュレーション結果より、全長にわたり付着切れが発生する前の弾性部分および付着切れが進行する過程の変形挙動を良く表現できることがわかった。
- ・ sbond が硬化するモデルを用いることで、付着切れが全長にわたり発生した後の付着強度特性も良好に評価可能であることが明らかになった。
- ・ せん断試験におけるケーブルボルトによる不連続面補強効果は、せん断初期におけるせん断剛性および最終的なせん断荷重ともに、ケーブルボルト要素による軸方向の補強効果のみでは表現できない。
- ・ ケーブルボルトが不連続面を補強する効果としてせん断方向の補強成分が存在しており、その補強効果をケーブルボルトの特性として設計的に見込むことでより合理的な設計が可能になると考えられる。

6. 参考文献

- 1)谷卓也, 伊藤文雄, 清水則一: 室内試験によるケーブルボルトの付着特性評価, 第 34 回地盤工学研究発表会講演集, Vol2, pp.1167-1168, 1999
- 2)中原史晴, 伊藤文雄, 清水則一: 室内試験によるケーブルボルトのせん断特性評価, 第 54 回土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.3-B, pp.304-305, 1999
- 3)B.Brady and L.Lorig : Analysis of Rock Reinforcement Using Finite Difference Methods, Computers and Geotechnics, pp.123-149, 1988
- 4)A.J.Hyett, W.F.Bawden and R.D.Reichert : The Effect of Rock Mass Confinement on the Bond Strength of Fully Grouted Cable Bolts, Int. J. Rock Mech. Min. Sec. & Geomech. Abstr. ,Vol.29 ,No.5 ,pp.503-524, 1992
- 5)Itasca Consulting Group, Inc. : FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) Version 3.40 User's Manual, 1998
- 6)斎藤敏明, 天野悟: ロックボルト支保の設計に関する基礎的考察, 第 14 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.76-80, 1982
- 7)Stillborg, B.: Experimental Investigation of Steel Cables for Rock Reinforcement in Hard Rock, Doctoral Thesis 1984:33D, Lulea University of Technology, Sweden, 1984
- 8)成川麻里子, 清水則一, 伊藤文雄: ケーブルボルトのせん断補強効果に関する実験と数値解析, 土木学会中国支部第 52 回研究発表会, pp.395-396, 2000