

鋼管膨張型ロックボルトの引抜き実験と付着特性について

PULL-OUT TESTS OF A FRICTION ANCHORED ROCKBOLT AND ITS BONDING CHARACTERISTICS

青木智幸*・柴田勝実**・大塚 勇***・吉富幸雄****

Tomoyuki AOKI, Katsumi SHIBATA, Isamu OHTSUKA, Yukio YOSHITOMI

A friction-anchored rockbolt of the type of expanded steel tube has been widely used due to e.g. its early-time effects. Long face bolting for tunnels is also available with its connectable type. In order to investigate the behavior of the axial force distribution of the friction-anchored rockbolt, the pull-out tests of the long embedded rockbolts are conducted with the newly-developed axial force measurement devices installed. Numerical simulations of the pull-out tests are performed with rockbolt models in which the frictional slide mechanism is included. It is found that reduced frictional strengths need to be considered in the model of the friction-anchored rockbolt in the range of large relative shear displacements between the bolt and borehole.

Key Words: rockbolt, frictional anchor, bonding, pull-out test, rock reinforcement

1. はじめに

水圧膨張鋼管型フリクションロックボルト（以下、鋼管膨張型ロックボルト）は、その即効性と湧水部での定着性に期待した特殊条件で採用されることが多い。また、ロードヘッダなどの掘削機械による切断が容易なことから、トンネルの鏡ボルトに使用されている。近年では、継ぎ手を組み込んだ連結式タイプが開発され、10m以上の長尺鏡ボルトの施工も行われている。このような背景の中で、ボルトの軸力発生機構をモデル化し、実験によるパラメータの決定手法を確立することによって、その補強効果を定量的に評価することが望まれている。しかし、定着メカニズムが従来のグラウトによる全面定着式ロックボルトとは異なり施工時に発生する軸力分布の測定が困難であることから、その付着特性や軸力発生機構については充分解明されているとは言い難い。

著者らは、ケーブルボルトを対象に長尺ボルトの引抜き試験を行い、その軸力発生機構のモデル化の検討を行ってきた。実施工で使用される数m以上の長尺ボルトについて原位置引抜き試験を行うと、その緊張力-変位関係は強い非線型性を示し、緊張力の増加と共にボルトとグラウトとの付着切れが進行するモデル²⁾でこの現象を説明できることを示した¹⁾。また、軸力の深度分布を測定しながら引抜き試験を行うことにより、グラウトの付着強度・せん断変形特性を評価したモデルのパラメータを決定し、引抜き試験における荷重-変位関係のみならず軸力の深度分布を数値解析で良好に表現できることを示した^{3) 4)}。さらに、このパラメータの決定手法は数種のケーブルボルトに適用可能であることを示した⁵⁾。

本研究では、前述の背景を踏まえ、鋼管膨張型ロックボルトを対象にその軸力発生機構を検討する。まず、鋼管膨張型ロックボルト用に開発した軸力計を組み込んだロックボルトを用いて、定着長さ3mの試験体を用いた引抜

* 正会員 PhD 大成建設（株）技術センター土木技術研究所

**正会員 農修 大成建設（株）技術センター土木技術研究所

*** 工修 大成建設（株）技術センター土木技術研究所

**** 正会員 工博 大成建設（株）土木技術部

トのひずみ変化を測定し、軸力に換算した。

引抜き試験では、はじめにボルトと孔壁の馴染みを確認するために 5kN の初期荷重を加えて変位の初期値とした。続いて、5kN 毎に荷重を増加させて、約 200kN まで荷重を加え、その後除荷して試験を終了した。

図-4 に、引抜き試験結果の応力-変位関係を示す。通常のボルトと軸力計付のボルトとで断面積が異なるため、引抜き荷重を応力に換算して表示した。同じ種類のボルト同士では 2 本の試験の結果が良好に一致しており、再現性が良い。

通常ボルトと軸力計付ボルトとでは、応力で約 250MPa (荷重で約 120kN) 程度まではほぼ合致するが、それ以上の応力レベルでは変位が異なっている。その理由として、軸力計付ボルトの口元近傍の形状が挙げられる。

図-5 に示すように、軸力計付ボルトではボルトの口元のねじ部から約 5cm の部分は曲線形状になっているためガス管が溶接されていない。この部分は、通常ボルトと同様、ボルトを膨張させても孔壁に接触しない。また、この部分のボルト断面積は、通常ボルトと同じであるため、ガス管を溶着した部分に比べて大きい応力が生じており、特に高い応力レベルでは非線形が顕著になる。以上の理由により、図-4 に示した軸力計付ボルトの引抜き試験結果では、応力が約 250MPa (荷重で約 120kN) 以上で、このガス管が溶接されていない部分のひずみが大きくなり、通常ボルトとの差異が生じていると考えられる。

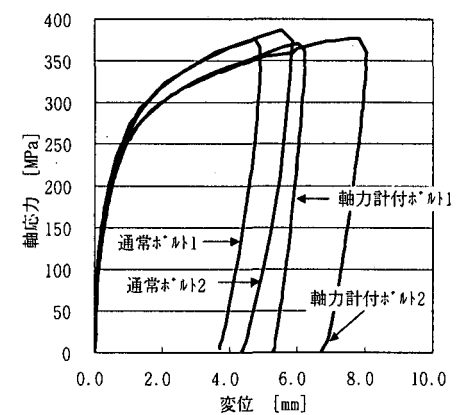


図-4 引抜き試験結果 (応力-変位関係)

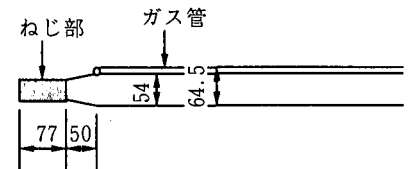


図-5 軸力計付ボルトの口元近傍の形状

3. 引抜き試験のシミュレーション

1) ロックボルトのモデル

数値解析におけるロックボルトのモデルとしては、そのせん断剛性・耐力に期待して梁要素を用いることも多い。しかし、鋼管膨張型ボルトでは中空であり、せん断剛性や耐力をあまり期待できないため、曲げモーメントが作用しないモデルでも適用できると考えられる。一方、ボルトに引張力が作用した際にボルトと孔壁間の摩擦抵抗力を超えてすべりが生じる現象は摩擦定着式ロックボルト

の主要なメカニズムであり、これを考慮したモデルが望ましい。著者らは、グラウト定着式のケーブルボルトについて、図-6 に示す Brady ら²⁾ により提案されたモデルを採用し、引抜き試験結果からそのパラメータを決定する方法について検討してきた^{3) 4) 5)}。これは、ボルトの軸剛性を節点間のバネで表現するほか、グラウトと孔壁間のせん断剛性 ($kbond$) と付着強度 ($sbond$) をそれぞれバネとスライダで表現するものである。スライダは、降伏後も変位を受けると一定の荷重を保つ。本研究でもこのモデルを用いるが、鋼管膨張型ボルトではグラウトは無いので、 $kbond$ はボルトと孔壁の接触部と孔近傍の岩盤のせん断剛性を、 $sbond$ はボルトと孔壁間の摩擦強度を表すとする。

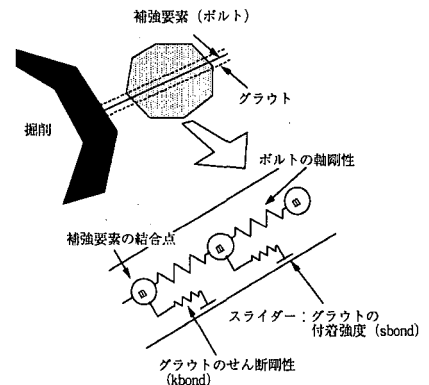


図-6 ボルトモデル

2) モデルパラメータの決定

(a) *sbond* 一定モデル

前報⁵⁾でケーブルボルトに適用したパラメータの決定方法をこ
こでも採用する。これは、*kbond* および *sbond* を一定とするモデ
ルである。

図-7 に、*kbond* の決定方法を示す。引抜き試験により得られ
た荷重-変位曲線の初期の勾配 P/ξ_0 を用いて、斎藤と天野⁶⁾ に
より提案された評価式を中空ボルト用に修正した(1)式により
kbond を算定する。ここで、 A_b と E_b はボルトの断面積およびヤン
グ率である。また、*sbond* はある引抜き荷重 P^* における岩盤内部
のボルトの軸力（以下、内部軸力）の深度分布を図-8 のように
プロットし、グラフの直線的になる分布の傾きを用いて(2)式で算
定する。

なお、同様のモデルを用いて鋼管膨張型ボルトをモデル化した
ものに亀岡と竹原の研究⁹⁾ があるが、上記のパラメータ (*kbond*
と *sbond*) を引抜き試験などの実験から決定する方法については
議論されていない。

$$kbond = \frac{1}{A_b E_b} \left(\frac{P}{\xi_0} \right)^2 \quad (1)$$

$$sbond = \frac{P^*}{l^*} \quad (2)$$

図-9 に、軸力計付ボルト 2 の引抜き試験の引抜き荷重が 100、
150、200kN の場合の軸力深度分布を示す。軸力は測定されたひ
ずみにヤング率 205GPa と表-1 に示した断面積を乗じて算定し
た。引抜き荷重が 200kN の場合は孔壁からの深さ 35cm の位置の
軸力は引抜き荷重と同じになっており、この区間のボルトと孔壁
の摩擦がほとんど無いことを示している。*sbond* は、引抜き荷重
200kN の場合の直線的な分布をした 3 点の傾きとして最小二乗
法で決定した ($sbond = 1.64 \times 10^5$ N/m)。他の引抜き荷重段階での
軸力分布の傾きもほぼ平行とみなすことができる範囲である。ま
た、*kbond* は、前述した手順で(1)式より求め、 2.67×10^9 N/m² と
なった。

(b) *sbond* 低下モデル

図-9 で見られるように、引抜き荷重の大きな状態では壁面か
らの深度が浅い領域で摩擦抵抗が無くなる現象が見られている。
すなわち、鋼管膨張型ロックボルトでは荷重が高いと膨張した鋼
管が再度縮小して孔壁から離れて摩擦抵抗力を失う現象が生じ
ていることが推定される。

そこで、図-10 に示したように、ボルトと孔壁間のせん断変位
(ずれ変位)が小さい領域では付着強度 *sbond* が一定値を取るが、

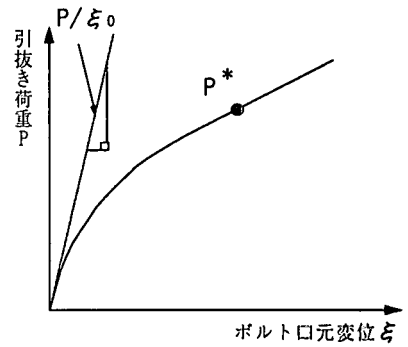


図-7 *kbond* の決定方法

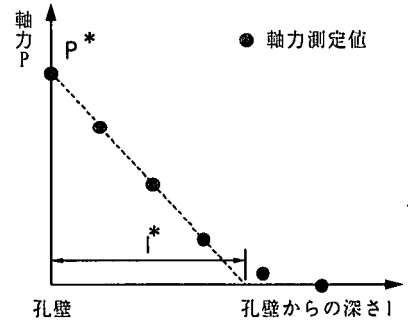


図-8 *sbond* の決定方法

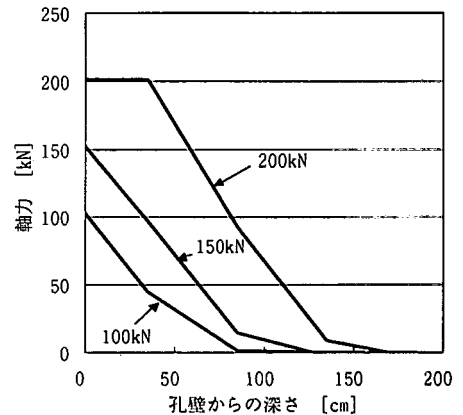


図-9 軸力の深度分布 (軸力計付ボルト 2)

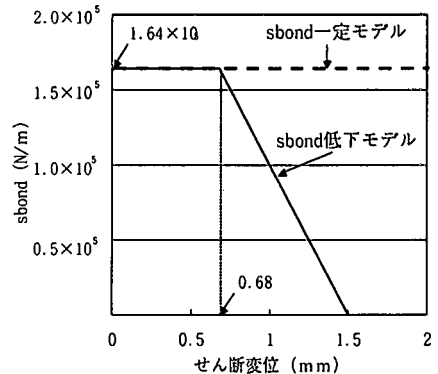


図-10 *sbond* のせん断変位による低下モデル

せん断変位が大きくなると $sbond$ が低下し、ある値以上では $sbond$ が 0 となるモデルを考えた。図-9 の軸力の深度分布を見ると、引抜き荷重 200kN では口元近傍のボルトは摩擦抵抗力をすでに失って、引抜き荷重と深度 35cm 地点の軸力が同じとなっているが、150kN ではまだ軸力分布が直線的である。そこで、ここでは引抜き荷重 150kN 以上のときの口元近傍の変位で摩擦抵抗力が 0 になると仮定した。図-11a の荷重-変位曲線を見ると、実験結果の引抜き荷重 150kN のときの口元変位は 1.5mm である。次に、図-11a より、実験結果で荷重 120kN 近傍から変位が急増する傾向が見られる。そこで、この時点の口元変位以上で $sbond$ が低下し始めて変位が増加していると仮定した。このときの変位は 0.68mm である。以上より、図-10 に示した $sbond$ の折れ曲がり点のせん断変位を 0.68mm に設定した。

3) シミュレーション結果

解析には有限差分法コード FLAC⁷⁾ を使用した。

(a) $sbond$ 一定モデル

図-11 に、 $sbond$ 一定モデルの (a) 荷重-変位関係および (b) 荷重-内部軸力関係の解析結果と実験結果の比較を示す。図-11a を見ると、荷重-変位関係の実験結果では荷重 120kN 近傍から変位が急増し曲線が曲がる傾向が見られるが、解析結果ではこれを表現できていない。一方、図-11b の荷重-内部軸力関係では、引抜き荷重の増加につれて各深度のボルトの軸力が発生し始める挙動は、解析により実験結果を大まかには表現できているといえる。ただし、引抜き荷重が大きくなると実験結果の方が内部軸力が大きくなる傾向を示し、差異が顕著になる。なお、実験では引抜き荷重が約 60~90kN の時のデータがノイズにより欠損している。

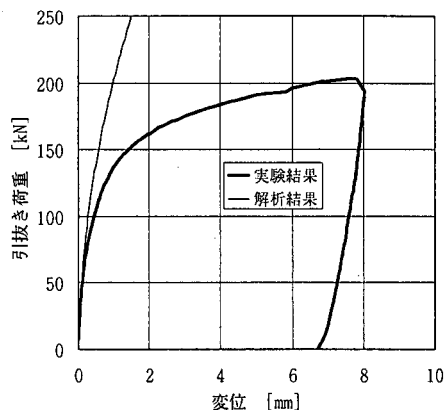
(b) $sbond$ 低下モデル

図-10 に示したせん断変位の増加により、付着強度 $sbond$ が低下する関係をモデルに組み込んで引抜き試験のシミュレーション解析を実施した。得られた結果を図-12 に示す。

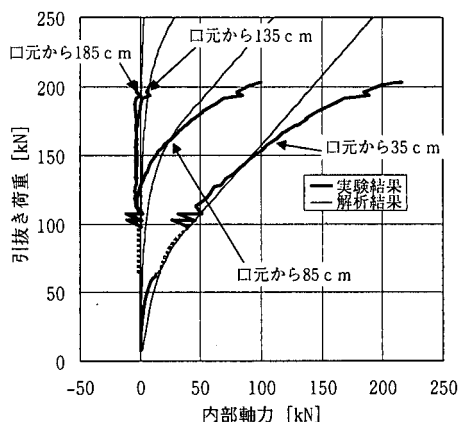
荷重-変位関係 (図-12a) では、 $sbond$ 一定モデル (図-11a) と同様に、引抜き荷重 120kN 近傍から変位が急増し曲線が曲がる傾向を表現することができなかった。その理由として、実験結果では、口元に近い部分で摩擦抵抗力を失った部分のボルトが、非線形性を示しているのに対して、今回のシミュレーションではボルトの非線形性を考慮していないことが考えられる。

荷重-内部軸力関係 (図-12b) では、 $sbond$ を低下させ付着強度の非線形性を取り入れることによって、すべての深度で、実験結果を良好に表現することができた。 $sbond$ 一定モデル (図-11b) と比較すると、 $sbond$ 一定モデルでは、初期の段階で引抜き荷重の増加につれて、内部軸力が大きめに発生しているのに対して、 $sbond$ 低下モデルによるシミュレーションでは、約 120kN までは実験結果とほぼ一致している。また、引抜き荷重が大きくなると、内部軸力が増加する傾向も表現することができた。

内部軸力の深度分布 (図-12c) を見ると、引抜き荷重 200kN で深度 35cm まで、引抜き荷重と同じ軸力が内部に伝わる挙動が表現できている。つまり、 $sbond$ の低下により口元付近で付着切れが起き、ボルトがフリーな状態と



(a) 荷重-変位関係 (軸力計付ボルト 2)



(b) 荷重-内部軸力関係 (軸力計付ボルト 2)

図-11 $sbond$ 一定モデルによるシミュレーション結果

なっているため、引抜き荷重が、直接ボルトだけで内部に伝わっていることが再現できている。また、各荷重レベルで、引抜き荷重が内部に伝わる様子も良く表現できている。

4. まとめ

今回、鋼管膨張型ロックボルト用に開発された軸力計付きロックボルトを使って、引抜き試験を行い、試験体内部のロックボルト内部の軸力分布を求めた。

ボルトを軸剛性と定着部のせん断剛性および付着強度で表すボルトモデルを使用し、数値解析により引抜き試験結果のシミュレーションを行った。

その結果、引抜き荷重－変位関係と軸力の深度分布の両方を表現するためには、ボルトの軸剛性と付着強度の両方に非線形性を考慮する必要があることが分かった。

そこで、付着強度がボルトと孔壁間のせん断変位に応じて低下するモデルを考案し、引抜き試験のシミュレーションを実施した。その結果、荷重－内部軸力関係及び内部軸力の深度分布を良好に表現できるようになった。一方、荷重－変位関係は、荷重が約120kN以上の範囲では、ボルトの軸剛性を一定としているために実験結果を十分には表現できていない。ただし、トンネル等に打設したボルトの補強効果を検討する目的においては、内部軸力の挙動に主眼を置くので、今回提案したモデルで十分実用的であると考えられる。

参考文献

- 1) 小林隆幸, 川俣和久, 伊藤文雄, 青山繁夫: 大断面トンネルにおけるTBM導坑内からの先行補強効果について, 第31回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.201-205, 2001
- 2) Brady, B. and Lorig, L.: Analysis of rock reinforcement using finite difference methods, Computers and Geomechanics, pp.123-149, 1988
- 3) 青木智幸, 柴田勝実, 中原史晴, 伊藤文雄: 長尺ケーブルボルト引抜き試験とシミュレーション, 土木学会第56回年次学術講演会, III-B117, pp.234-235, 2001
- 4) 青木智幸, 柴田勝実, 中原史晴, 伊藤文雄: 岩盤補強用の長尺ケーブルボルト引抜き試験と数値シミュレーション, 大成建設技術センター報, 第34号, pp.39-1-39-6, 2001
- 5) 青木智幸, 柴田勝実, 中原史晴, 伊藤文雄: ケーブルボルトの大型引抜き実験と軸力分布挙動の数値シミュレーション, 第11回岩の力学国内シンポジウム, F04, p.6, 2002
- 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.76-79, 1984
- 7) ITASCA: Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC), ver. 4.00, 2000
- 8) 亀岡美友, 竹原秀明: 水圧膨張鋼管型フリクションロックボルトの評価解析報告書, 建設機械化研究所, p.18, 1998

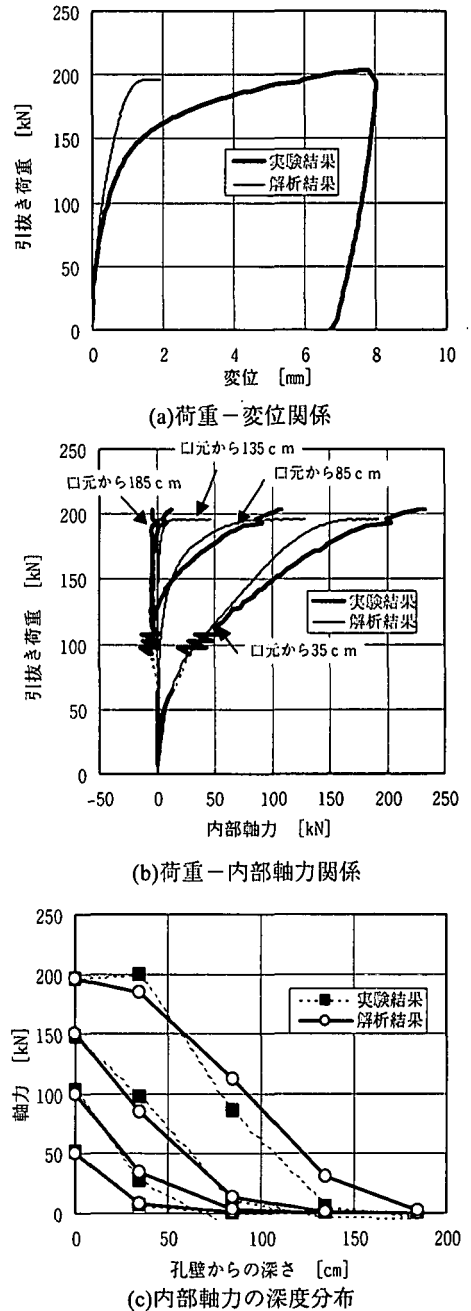


図-12 sbond 低下モデルによるシミュレーション結果