

# 長尺ケーブルボルト引抜き試験とシミュレーション

大成建設（株） 正会員 青木智幸 柴田勝実  
 正会員 中原史晴 正会員 伊藤文雄

## 1. はじめに

ケーブルボルトはフレキシブルであるため、本坑掘削断面に対し小さな導坑から長尺のボルトを打設し地山を事前補強することができるという特徴があり、地下空洞や大断面トンネルに適用されている。筆者らは、コンクリート製模擬岩盤を用いた短尺ケーブルボルトの引抜き試験<sup>1)</sup>およびせん断試験<sup>2)</sup>を実施し、岩盤およびグラウトの物性やケーブルの種類によるケーブルボルトの補強効果を検討してきた。実施工で使用される長尺ボルトでは軸力発生機構はグラウトの付着切れの進行過程と密接に関係しており非線型性の強い挙動を示す<sup>3)</sup>。本研究では、長尺ケーブルボルトの引抜き試験を短尺ボルトと共に実施し、その荷重 - 変位挙動や軸力分布を統一的に表現できる数値解析モデルおよびそのパラメータの決定方法について検討した。

## 2. ケーブルボルト引抜き試験

図1に、ケーブルボルト引抜き試験の試験体のレイアウトを示す。模擬岩盤は、CM 級を想定し軽量骨材を使用したコンクリートで作成した ( $E=1.9\text{GPa}$ )。ケーブルの種類は、15.2 の PC 鋼より線である。定着長 4m の長尺ボルトおよび 0.35m の短尺ボルトを W/C=40% のセメントペーストグラウトで打設し、引抜き試験を実施した。長尺ボルトは、模擬岩盤内部のボルトの 5ヶ所にひずみゲージを貼付し、軸力を測定した。

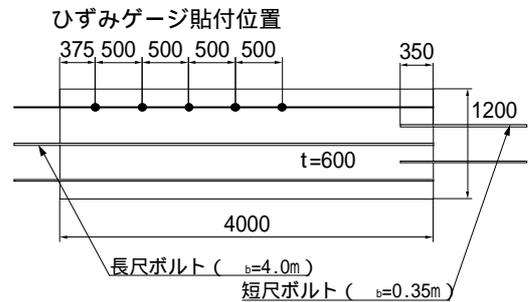


図1 試験体のレイアウト

図3と図4に引抜き試験結果の引抜き荷重 - 変位線図を示す。短尺ボルトは全長にわたって付着切れが発生して引き抜けているが、長尺ボルトは引抜き荷重が PC 鋼より線の降伏荷重に達した時点で試験を終了している。

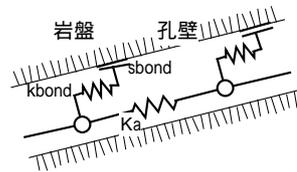


図2 Brady らのモデル

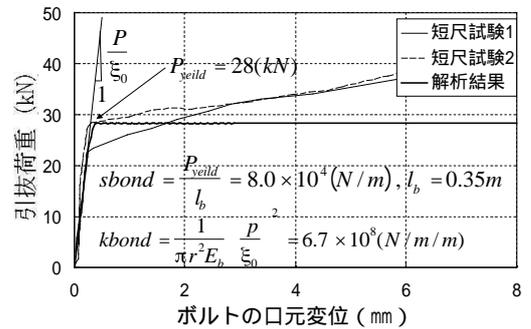


図3 短尺引抜き試験結果及び解析結果

## 3. ケーブルボルトのモデル化とシミュレーション

ケーブルボルトの解析モデルとし

ては、広く使用されている Brady ら<sup>4)</sup>のスプリングとスライダーによるモデルを用いた (図2)。数値シミュレーションには、有限差分法解析コード FLAC を使用した。短尺ボルトの引抜き試験結果 (図3) より、付着強度 sbond は、ボルト全長にわたり付着切れが進展したと考えられる図示した軸力レベルと定着長より算定した。また、kbond は既報<sup>2)</sup>のように、荷重 - 変位曲線の初期勾配より斎藤・天野の式を用いて算定した。これらのパラメータを使用して実施したシミュレーション解析結果を同図に示した。

短尺ボルトの試験結果より決定したパラメータ (図3) を使用

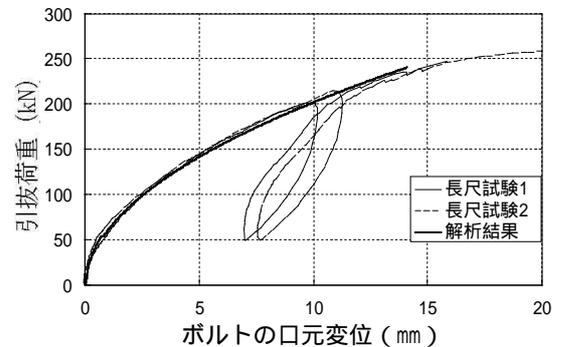


図4 長尺引抜き試験結果及び解析結果

キーワード: ケーブルボルト、岩盤補強工、引抜き試験、軸力分布、数値シミュレーション

連絡先: 横浜市戸塚区名瀬町344-1 大成建設 (株) 技術センター Tel.045-814-7237 Fax.045-814-7237

して、長尺ボルト引抜き試験のシミュレーションを実施した。図4にはその結果を共に示した。長尺ボルトの引抜き試験では、軸荷重が増加するにつれてボルト - グラウト間の付着切れがより深部に進行し荷重 - 変位関係が上に凸の非線型曲線を描くが、シミュレーションはこの挙動を非常に良く表現できている。図5は、引抜き荷重と5深度地点のボルト軸力との関係について、また、図6には、3段階の各引抜き荷重レベルでのボルト軸力の深度分布について、計測結果とシミュレーション結果を示した。どちらの図でも、軸荷重の増加につれてグラウトの付着切れが進行 (sbond 降伏) しながら軸力がより深部まで伝わっていく挙動の傾向を、シミュレーションは比較的良く表現できている。

短尺ボルトの引抜き試験結果 (図3) では、ボルト全長にわたり付着切れが進展した後、変位が進むと軸力が増加する硬化挙動が現れている。ボルトの解析モデルにはこの効果を組み入れていない。したがって実際の長尺ボルトの挙動に関しては、グラウトとボルトとの相対変位がより大きい部分がより大きなグラウトとの付着力を分担することになる。図5のボルト軸力の深度分布で計測値が解析結果より小さくなっているのは、孔口付近で大きな付着力が分担されて、より深部では付着力分担が少なくなっているためと解釈できる。一方、この程度の差異はあるものの軸力が上昇し始める深度はほぼ一致しており、今回使用した簡素なボルトモデルでも、軸力の深度分布を実用的に十分な精度で表現できていると考える。

共著で筆者らは、長尺ケーブルボルトの原位置引抜き試験結果より kbond および sbond を決定する方法を提案した (図7)<sup>3)</sup>。この方法を本研究の試験結果に適用すると、sbond はほぼ同じとなり、一方、kbond は約6倍の値となった (図8)。この値を用いてシミュレーション解析を行い、得られた引抜き荷重と深度別ボルト軸力の関係を図8に示す。図4と比較して、ボルトの各深度地点に軸力が伝わる際の立ち上がり曲線が急カーブとなり、より測定結果に近い挙動が得られるようになった。これは、kbond がより大きいことの効果である。

4. まとめ

今回使用したケーブルボルトの解析モデルにより、短尺および長尺のボルトの引抜き荷重 - 変位挙動やボルト軸力の深度分布を、同じモデルとパラメータで良く表現できることが分かった。また長尺ボルト試験から求めたパラメータを使用した解析では、岩盤内部のボルト軸力分布変化挙動をより正確に表現することができた。

以上より、今回提案したケーブルボルトモデルのパラメータの決定方法の妥当性が示された。

参考文献

- 1) 谷, 他: 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、vol.2、pp.1167-1168、1999
- 2) 中原, 他: 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、第31回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.62-66、2001
- 3) 小林, 他: 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
- 4) Brady, B., et al: Analysis of rock reinforcement using finite difference methods, Computers and Geomechanics, pp.123-149, 1988

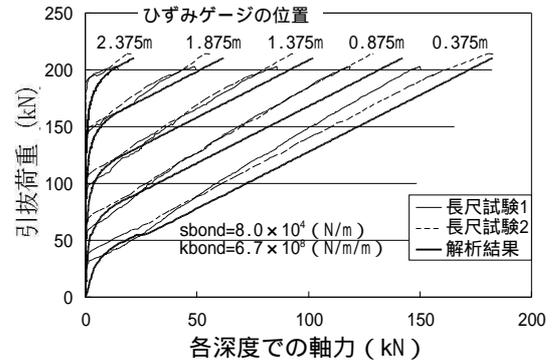


図5 引抜き荷重と深度地点の軸力

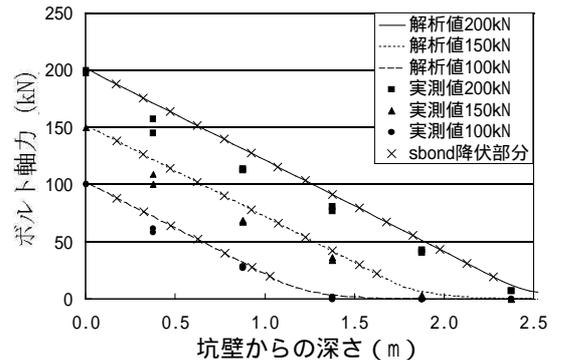


図6 各引抜き荷重レベルでの軸力の深度分布

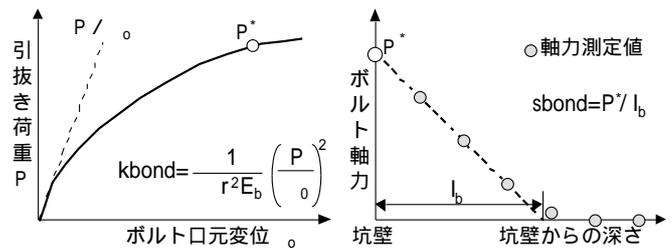


図7 sbond、kbond 決定方法

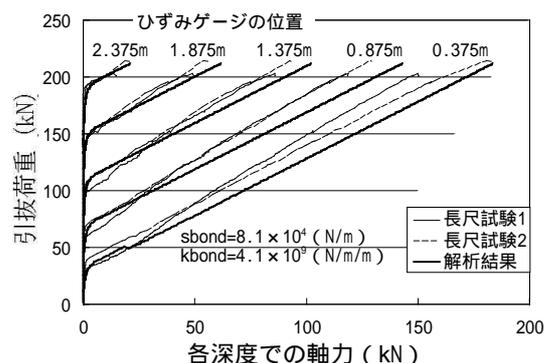


図8 引抜き荷重と深度地点の軸力