

## Ⅲ-B50 原位置試験によるケーブルボルトの解析定数の決定と適用

清水建設(株)技術研究所 フェロー会員 石塚与志雄  
技術研究所 正会員 安部 透  
土木本部 正会員 今津 雅紀

## 1. はじめに

ケーブルボルトは、フレキシブルで長尺ボルトの施工が容易であることなどから、大断面トンネルや地下空洞の先行補強やロックボルトの代替として期待されている<sup>(1)</sup>が、付着力がロックボルトと比較して小さいとの課題がある。筆者ら<sup>(2)(3)</sup>は、室内・原位置試験により、PC鋼線にインデント（凹）を設けることにより、付着力が飛躍的に向上することを検証した。一方、地山補強・支保の設計に際しては、ボルト／グラウト間の付着強度・剛性の評価が必要である。これらの定数は、地山剛性や定着材の種類、施工状況、穿孔径などに影響されるため、原位置で評価するのが好ましい<sup>(4)</sup>。そこで、今回、実際のトンネル現場での引抜試験から解析定数を決定するとともに、その結果を用いたトンネル支保解析を実施し、ケーブルボルトによる支保効果について検討した。

## 2. 解析定数の決定方法と原位置試験

## (1)解析定数の決定方法

既往の検討<sup>(4)</sup>から、付着強度（単位長さ当たりの付着力）は、引抜荷重が定着長にほぼ比例することから最大引抜荷重を定着長で除することにより求めることができる。一方、付着剛性（単位長さ当たりの軸剛性）は、ボルト／グラウト間のせん断変形に寄与する範囲（有効定着長： $L_e$ ）は限定され定着長に依存しないため、原位置引抜試験結果から $L_e$ を評価し、付着剛性を軸剛性／有効定着長で評価する方法が有効と考える。その決定フローを図-1に示す。具体的には、引抜試験の軸荷重－変位関係から初期弾性軸剛性 $E_{ax}$ を求め、 $L_e$ をパラメータ（0.1～1.0m範囲で0.1mピッチで変化）として引抜試験のシミュレーションを行い、試験結果とよい対応を示す $L_e$ を決定して付着剛性を算定する。

なお、解析では、全面定着型ボルトのボルト／グラウト間の付着特性（付着強度、付着剛性）を考慮した構造要素として、FLACのケーブル要素を用いた。

## (2)原位置試験

トンネル現場の地山は、日本道路公団の地山分類でCⅠクラスである。引抜試験に供したボルトは、表-1に示すように2種類のケーブルボルト（通常（JIS規格）のPC鋼より線、PC鋼線にインデントを設けたPC鋼より線（以下、インデント付と呼ぶ））とねじり棒鋼（ロックボルト）の3種類とした。

定着長は1.0m、穿孔径は42mm、グラウト材は「プレミックスドライマタル」とし、材令3日で試験を行った。引抜最大荷重はボルト自体の引張耐力を考慮して196kN（20ton）とした。

## 3. 試験結果と定数決定

## (1)試験結果

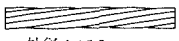
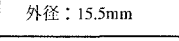
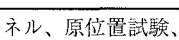
図-2に3種類のボルトの軸荷重－変位関係を、表-2に試験結果を示す。

PC鋼より線の引抜荷重は115kNに対して、インデント付とねじり棒鋼は196kN以上の引抜荷重を示した。軸剛性はねじり棒鋼（95MN/m）と比較すると、PC鋼より線は18%、インデント付は23%と小さい。

## (2)解析定数の決定

図-1の決定フローに基づいて行った引抜試験の解析結果を図-3に示す。この結果、各ボ

表-1 原位置引抜試験のボルト種類

| 種類              | 縦断面                                                                                              | 横断面                                                                                 |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| PC鋼より線          | <br>外径：15.2mm |  |
| インデント付（凹0.33mm） | <br>外径：15.5mm |  |
| ねじり棒鋼           | <br>外径：23.8mm |  |

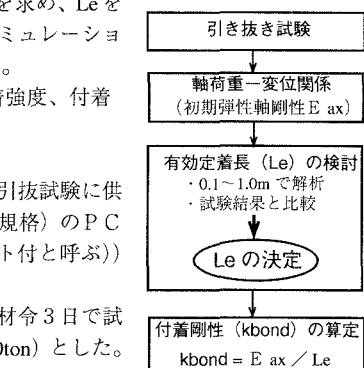


図-1 付着剛性の決定フロー

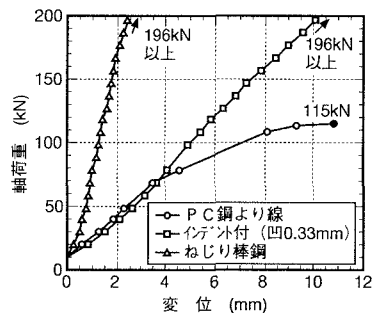
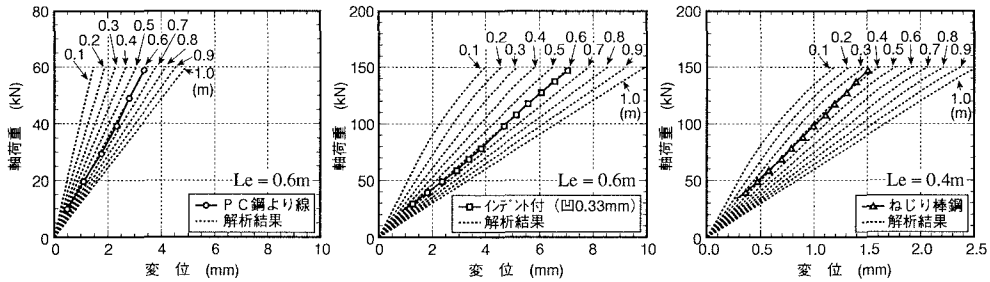


図-2 軸荷重－変位関係

キーワード： ケーブルボルト、支保、トンネル、原位置試験、解析

連絡先：〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17 清水建設(株)技術研究所 TEL:03-3820-5569, FAX:03-3643-7260



図－3 有効定着長決定のための解析

ルトの $L_e$ はケーブルボルトで0.6m、ねじり棒鋼で0.4mとなった。この結果から算定した付着剛性を表－2に示す。付着強度は、定着長が1mのため、引抜荷重値がそのまま付着強度となる。インデント付とねじり棒鋼の引抜荷重が196kN以上であるため、付着強度は196kN/mとした。

#### 4. トンネル支保解析

##### (1)解析ケース

解析モデルを図－4に示す。対象は幅7m、高さ6.3mのトンネルであり、ボルトは長さ3mで7本（トンネル軸方向の間隔は1.5m）である。解析では、2次元解析を考慮し、50%の掘削応力解放後にボルトを設置して残りの50%を解放する方法とした。初期地圧は土被りを100mで等方状態、地山物性は地山分類C Iの代表的な値（弾性係数1.96GPa、粘着力1.96MPa、内部摩擦角45度、ポアソン比0.3、密度2400kg/m<sup>3</sup>）とした。ボルトはねじり棒鋼とインデント付の2種類とし、解析定数は表－2の付着強度・剛性とボルト自体の機械的性質値を用いた。

##### (2)解析結果

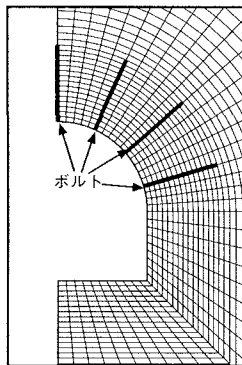
図－5にねじり棒鋼とインデント付を打設した場合の主応力、ボルト軸力分布と天端沈下値を示す。両者ともボルト／グラウト間の付着切れの発生はない。ボルトの最大軸力は、ねじり棒鋼で28.4kN、インデント付で8.3kNであり、ともにボルトの引張荷重値（ねじり棒鋼227kN、インデント付P C鋼より線261kN）と比較してかなり余裕がある。インデント付は、剛性が小さいために変形はやや大きくなるが、付着力、軸力とも全く問題がないことが確認された。

#### 5. まとめ

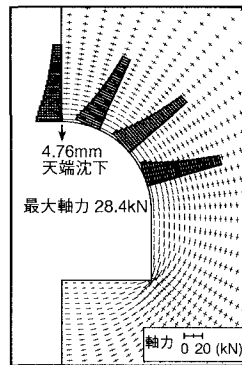
ボルトの原位置引抜試験結果からボルトの付着強度・剛性を評価し、その結果を用いたトンネルの支保解析を行った。その結果、インデント付P C鋼より線は、ねじり棒鋼と比較して付着剛性が小さいが、十分な付着強度を有し、地山分類C Iにおいては、ねじり棒鋼等のロックボルトの代替として適用できるものと考えられる。

今回検討した地山は硬岩であるため、今後、中硬岩、軟岩等についても検討を行い、ケーブルボルトの適用性について検討していく予定である。

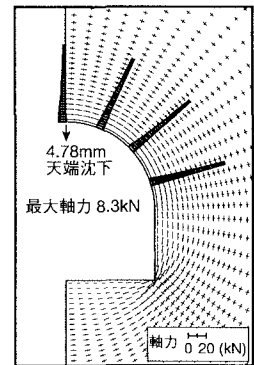
なお、試験に供したケーブルボルトは東京製綱(株)殿から提供頂いたものです。ここに、謝意を表します。



図－4 解析モデル図



(1) ねじり棒鋼



(2) インデント付

図－5 解析結果（軸力分布、天端沈下）

#### 【参考文献】

- (1)清水ら（1997）：海外におけるケーブルボルトの設計法、トンネルと地下、第28号、4号、pp.43-52.
- (2)石塚・安部・今津（1998）：インデントを付けたP C鋼より線の付着抵抗に関する研究、第33回地盤工学研究発表会講演論文集
- (3)石塚・安部（1998）：地盤剛性がケーブルボルトの付着抵抗特性に与える影響、土木学会第53回年次学術講演会概要集
- (4)石塚・安部・今津（1998）：ケーブルボルトの定着長と解析定数の決定方法、第8回トンネル工学論文・報告第8巻、報告(2)