

ケーブルボルトによるトンネル支保効果の計測と解析

清水建設（株）技術研究所 フェロー会員 石塚与志雄・安部 透
土木本部 正会員 今津 雅紀・水戸 聡
名古屋支店 正会員 矢口 博嗣

1. はじめに

ケーブルボルトは、大断面トンネルや地下空洞の先行・事前補強やロックボルトの代替として期待されている⁽¹⁾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⁽²⁾⁽³⁾は、室内・原位試験により、P C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てきた。今回、インデント付P C鋼より線を硬岩地山のトンネル現場でパターンボルトとして打設し、軸力、内空変位等を計測するとともにトンネル掘削・支保の解析的検討を行い、ケーブルボルトによるトンネル支保効果について検討した。

2. 計測地点概要と計測結果

(1)計測地点

ケーブルボルトのパターンボルト打設と計測を行ったのは、日本道路公団東海北陸自動車道の有家ヶ原トンネルであり、地山は、白亜紀～古第三紀の白川花崗岩類で節理はやや発達しているが良好な硬岩である。岩盤等級はJH地山等級でB級と分類される。トンネル断面（幅11.8m、高さ7.9m）を図－1に示す。支保工は、吹付けコンクリート厚さ5cm、ボルト長3m（延長方向間隔2.0m、周方向間隔1.5m：1断面9本）である。

ケーブルボルトは、表－1に示すように、インデント付P C鋼より線（P C鋼線に0.33mmのインデントを設けたP C鋼より線）である（参考として、23.8mm径のねじり棒鋼を併記する）。ボルト軸力測定は、天端と左右側壁上部の3カ所、測点は壁面から0.5、1.25、2.0、2.75mの4点とした。

(2)計測結果

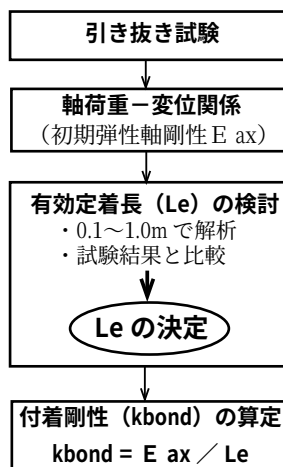
図－2に計測結果を示す。変位は、天端沈下3.0mm、水平内空変位4.0mm、軸力は天端（CB-1）の1.25m点で9.82kN、側壁左上部（CB-2）の0.5m点で5.20kNとなった。軸力はケーブルボルトの引張耐力（261kN）と比較して小さくかつ変位も安定した結果を得た。

3. 解析的検討

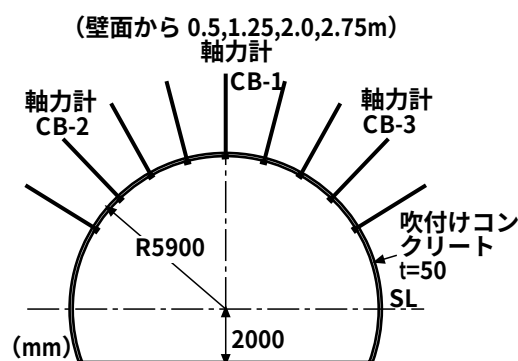
(1)解析定数の決定

解析による支保効果の検討にはFLACを用いた。全面定着型ボルトモデルはボルト／グラウト間の付着特性（付着強度、付着剛性）を考慮したケーブル要素を使用した。

ボルト効果を解析的に考慮するためには、厳密には地山／グラウト、ボルト／グラウトの付着特性をモデル化する必要があるが、硬岩地山の場合には、ボルト／グラウトの方が地山／グラウトより小さい場合が多いため、今回の解析ではボルト／グラウト間の付着特性を考慮した上記のケーブル要素を用いることにした。

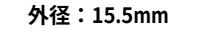


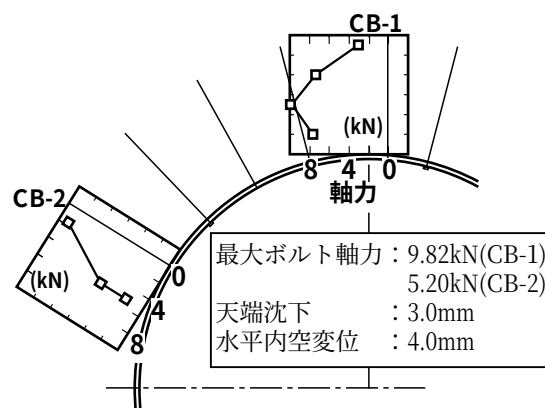
図－3 付着剛性の決定フロー



図－1 トンネル断面と支保工 軸力計設置位置

表－1 ケーブルボルトとねじり棒鋼

種 類	縦断面	横断面
インデント付 P C 鋼より線 (凹 0.33)	 外径：15.5mm	
ねじり棒鋼	 外径：23.8mm	



図－2 計測結果

キーワード： ケーブルボルト、支保、トンネル、現場計測、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:03-3820-5287, FAX:03-3820-5959

付着強度・付着剛性は、ボルト引抜試験⁽⁴⁾から求めた。付着強度は、引抜荷重を定着長で除して求める。一方、付着剛性は、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から設定した（詳細については文献⁽⁴⁾参照されたい：図－３に付着剛性の決定フローを示す）。図－４にインデント付PC鋼より線とねじり棒鋼の引抜試験結果（軸荷重－変位関係）を示す。試験では、定着長1m、グラウト材はプレミクストライムルとし材令3日で引抜いた（引抜荷重196kNまで）。前述の方法により求めた付着剛性を表－２に示す。付着強度は、最大引抜荷重が196kN以上であるため、安全側を考慮して引抜荷重を196kNとして求めた。

(2)トンネル掘削・支保解析

解析モデルを図－５に示す。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188mで等方状態、地山物性は地山分類Bの代表的な値（弾性係数4.91GM/m²、粘着力2.94MN/m²、内部摩擦角50度、ポアソン比0.25、密度2500kg/m³）とした。ボルトはインデント付PC鋼より線とねじり棒鋼の２種類である。

図－６にインデント付とねじり棒鋼の主応力、ボルト軸力分布と天端沈下、水平内空変位値を示す。両者ともボルト／グラウト間での付着切れの発生はない。最大軸力は、ねじり棒鋼で20.92kN、インデント付で5.90kNであり、ともにボルトの引張荷重値（インデント付PC鋼より線261kN、ねじり棒鋼227kN）と比較してかなり余裕がある。計測結果と比較すると、側壁上部（5.20kN）とはよい対応を示すが、天端（9.82kN）より小さい値となる。一方、変位は、天端沈下が4.38mm、水平内空変位が4.35mmと計測結果と比較すると天端（計測値は3.0mm）でやや大きい値を示すが、計測結果と解析結果は概ねよい対応を示す。

解析ではインデント付とねじり棒鋼で、軸力と変位に差が生じる。特に軸力には3.5倍の差が生じる。これは、インデント付はねじり棒鋼と比較して、ボルト断面が小さいのに加えて付着剛性が小さいためであり、ロックボルトと比較すると変形量は大きくなり、軸力は小さくなる。

４．まとめ

硬岩地山トンネルにおいて、インデント付PC鋼より線をパターンボルトとして打設し、軸力測定および解析的検討によりその支保効果を検討した。

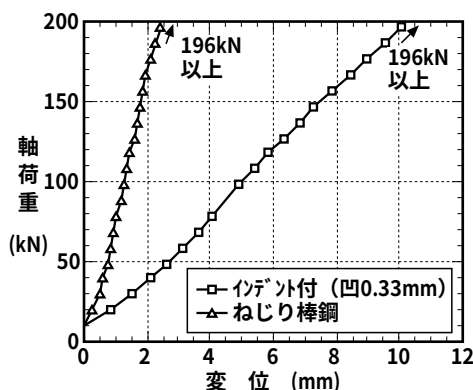
その結果、軸力はボルト引張耐力の20分1以下で変位も安定した結果を得た。また、ボルトをボルト／グラウト間の付着特性を考慮したケーブル要素でモデル化した解析を行い、解析結果が計測結果と概ねよい対応を示すことを示した。今後、ケーブルボルトをパターンボルトとして使用するのには更に様々な地山に対してデータを蓄積していく必要があると考える。

謝辞：今回、日本道路公団名古屋建設局清見工事事務所から計測の機会を頂きました。また、試験に供したケーブルボルトは東京製綱(株)から提供頂いたものです。ここに、謝意を表します。

謝辞：今回、日本道路公団名古屋建設局清見工事事務所から計測の機会を頂きました。また、試験に供したケーブルボルトは東京製綱(株)から提供頂いたものです。ここに、謝意を表します。

【参考文献】

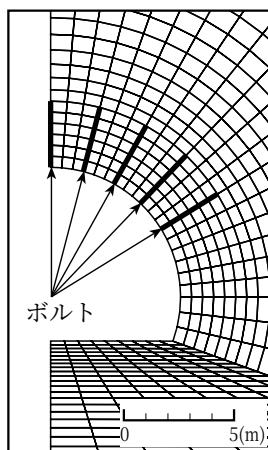
- (1)清水ら（1997）：海外におけるケーブルボルトの設計法、トンネルと地下、第28号、4号、pp.43-52.
- (2)石塚・安部・今津（1998）：インデントを付けたPC鋼より線の付着抵抗に関する研究、第33回地盤工学研究発表会講演論文集
- (3)石塚・安部（1998）：地盤剛性がケーブルボルトの付着抵抗特性に与える影響、土木学会第53回年次学術講演会概要集
- (4)石塚・安部・今津（1998）：ケーブルボルトの定着長と解析定数の決定方法、第8回トンネル工学論文・報告第8巻、報告(2)



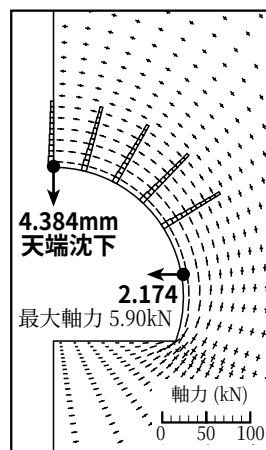
図－４ 軸荷重－変位関係

表－２ 原位引抜試験結果と解析定数

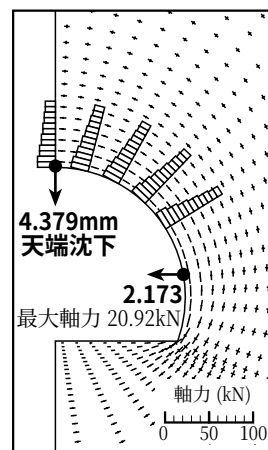
	引抜荷重 (kN)	付着強度 (kN/m)	軸剛性 (MN/m)	有効定着長 L_e (m)	付着剛性 (MN/m/m)
インデント付 PC鋼より線	196以上	196	22.3	0.6	37.2
ねじり棒鋼	196以上	196	95.0	0.4	238



図－５ 解析モデル図



(1) インデント付



(2) ねじり棒鋼

図－６ 解析結果（軸力分布、変位）