

特性曲線法を用いた鏡止めボルトの設計方法について

大成建設（株） 正会員 ○大塚 勇，青木 智幸，小池 真史

1. はじめに

鏡止めボルトの打設本数やラップ長などの設計仕様は，過去の実績などから経験的に決定する場合が多く¹⁾，一般化された設計方法が確立されていないのが現状である．そこで，本研究ではトンネル横断面の支保パターンの検討に用いられる特性曲線法を鏡止めボルトの設計に適用することを検討する．

2. 特性曲線法を用いた長尺鏡止めボルトの設計方法

地山の特性曲線の入力条件は，トンネルの径，土被り高さ，側圧係数および地山条件として単位体積重量，弾性係数，ポアソン比，粘着力，内部摩擦角である．なお，支保の特性曲線は，鋼製支保工，吹付けコンクリートの剛性によって決まる．

この理論を，切羽前方の鏡止めボルトの設計に適用する．

図1に特性曲線法を用いた設計方法の概念図を示す．切羽前方の地山の特性曲線を理論的に求めることは難しいため，軸対称モデルなどで解析を行って，トンネル掘進に伴う切羽の押出し変位と切羽前方のトンネル軸方向応力の関係を求める．また，切羽前方のゆるみ領域の進展についても調べる．

次に，鏡止めボルトの特性曲線を求める．特性曲線は鏡止めボルトの長さ，ボルトの剛性，本数によって異なる．ボルトの長さが長いほど切羽奥からの応力解放を抑制する．打設したボルトの先端と切羽の距離から，図2に示す地山応力解放曲線によってボルト先端部での応力解放率を求め，ボルトに解放力が作用するときの先行変位を算定し，ボルトの特性曲線の始点を求める．さらに，ボルトの剛性と打設密度からボルトの特性曲線の傾きを求める．地山とボルトの特性曲線が交わる点で平衡状態となり，ボルトに作用する荷重や切羽の押出し変位量，切羽前方に発生するゆるみ領域を求めることができる．そこで，ボルトに発生する軸力がボルトの耐力以内であるか，押出し変位が許容値以内であるか，切羽前方に発生するゆるみ領域がボルトのラップ長以内であるかなどを確認し，ボルトの仕様に過不足がないかを検討する．ボルトの特性曲線の式を式(1)に示す．

$$\sigma_b = \frac{E_b \cdot A_b}{A_f} \times \frac{u}{r} \quad \text{式 (1)}$$

σ_b はボルトに作用する応力， E_b はボルトの弾性係数， A_b はボルトの断面積， A_f はボルト1本が受持つ切羽の断面積， u は切羽の押出し変位量， r はトンネルの半径である．

キーワード 特性曲線法，長尺鏡止めボルト，切羽押出し変位，解放力

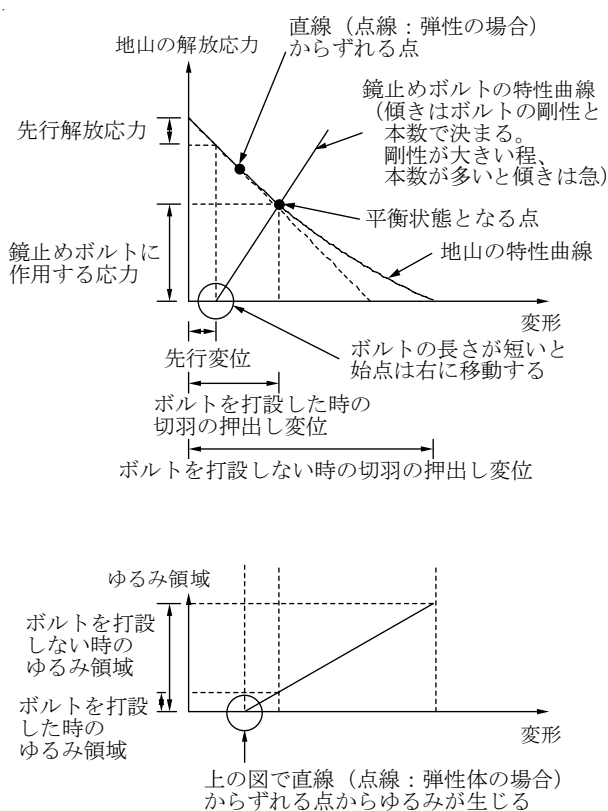


図1 特性曲線法による鏡止めボルト設計の概念

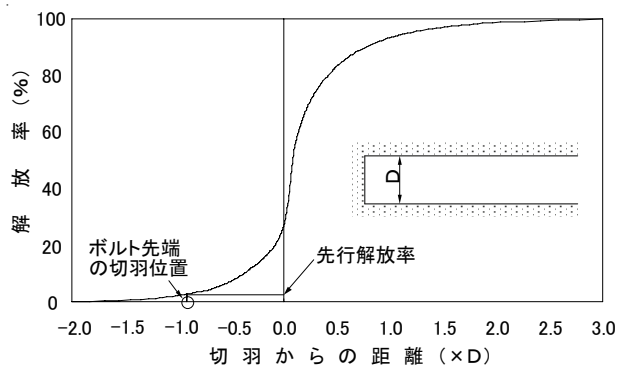


図2 地山応力解放曲線

3. 検討例

三次元掘削解析を用いて特性曲線による鏡止めボルトの設計例を示す。解析はFLAC3D (ver. 2.1) を用いた。解析モデル図を図3に示す。トンネルの断面は掘削半径 6.2m の二車線道路トンネル相当であり、上半先進掘削工法とする。土被りは約 10m であり、側圧係数は 0.5 である。地山は完全弾塑性体とし、地山の弾性係数は 150MPa、粘着力は 0.05MPa、内部摩擦角は 20° である。鋼製支保工は H150 で、吹付けコンクリートの厚さは 20cm である。なお、ロックボルトは解析では考慮していない。

鏡止めボルトの打設パターン図を図4に示す。鏡止めボルトは外径 76mm の GFRP 製ボルト (FIT ボルト) であり、長さ 12.5m のボルトを上半断面に 19 本打設している。

切羽中心 (図4□) の地山の押し出し変位とトンネル軸方向の地山応力の関係を調べ、ボルト有無の地山特性曲線を示したものが図5上図の実線である。ボルトの長さが 12.5m なので、切羽から約 1.5D 前方の地山まで鏡止めボルトの効果が作用する。図2の地山応力解放曲線より 1.5D 前方の応力解放率は約 1% となり、ボルトの特性曲線の始点が求まる。図4□の初期地圧は 0.127MPa (被り 12.7m, 単位体積重量 20kN/m^3 , 側圧係数 0.5) である。式 (1) より、鏡止めボルトの支保剛性 (特性曲線の傾き) を求める。ボルトの弾性係数は 38GPa, ボルトの断面積は 0.00171m^2 , ボルト 1 本が受持つ切羽断面積は 3.18m^2 , トンネルの換算半径は 4.38m である。支保の特性曲線を描くと図5上図の点線となり、ボルトありの地山特性曲線の端部付近と交わる。

ボルトありの押し出し変位は約 6mm, ボルト全体に作用する応力は 0.02MPa である。鏡止めボルト 1 本あたりに作用する軸力はボルト 1 本が受持つ切羽断面積を掛けて求めると、約 65kN ($0.02\text{MPa} \times 3.18\text{m}^2 \times 1000$) となる。三次元解析の結果、図4□の鏡止めボルトには約 70kN の軸力が作用し、特性曲線による結果とほぼ等しい結果となる。また鏡止めボルトを打設することによって、切羽の押し出し変位は約 10mm から 6mm 程度に低減できる。なお切羽前方のゆるみ領域は 9m から 5m に減少する。

4. まとめ

トンネル支保の設計で用いられる特性曲線法を鏡止めボルトの設計に適用した。三次元掘削解析によって検討を行った結果、特性曲線による結果と解析値はほぼ同等となり、切羽前方の特性曲線法は鏡止めボルトの設計に適用できるものと思われる。三次元解析は時間を要するので、軸対称二次元解析でも検討は可能であると考えられる。今後は、原位置計測を行った現場に適用し、本手法の妥当性をさらに追及していく予定である。

参考文献

- 1) ジェオフロンテ研究会：ケーブルボルトに関する調査研究報告書, p.28, 1997.

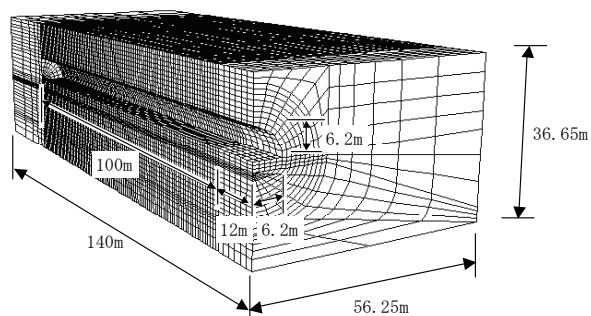


図3 解析モデル図

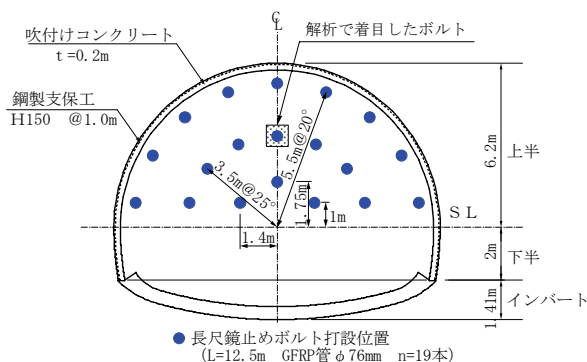


図4 鏡止めボルトのパターン図

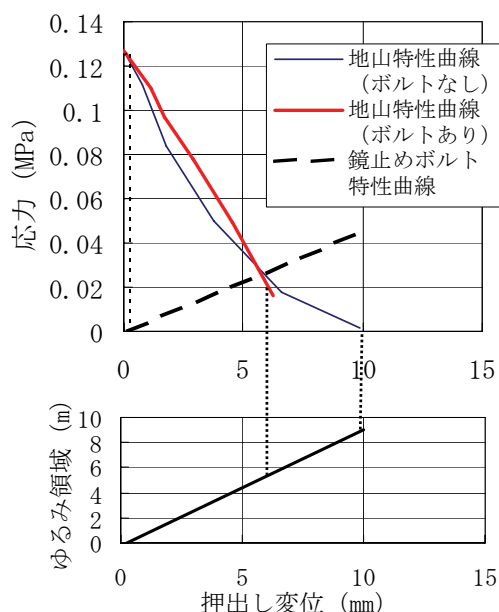


図5 特性曲線法による鏡止めボルトの設計