

計測結果に基づく 長尺鏡止めボルトの設計方法について

Design method of the long facebolting based on the measured results

大塚勇¹・青木智幸²

Isamu Ohtsuka, Tomoyuki Aoki

¹正会員 工博 大成建設株式会社 土木設計部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

E-mail: ohtsuka@ce.taisei.co.jp

²正会員 PhD 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

The design specification of facebolts including the number and the lap length of bolts is decided based on the experience. Then authors have been examining the application of the characteristic curve method to the design of the facebolting for the support pattern of the tunnel cross-section. In this study, the results of this method are compared with the field measurement and three-dimensional analyses to verify the validity of the design technique of the facebolting using the characteristic curve method.

Key Words : design method, long facebolting, measured result, characteristic curve method

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、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、著者ら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してきた¹⁾。本研究では、特性曲線法による鏡止めボルトの設計手法の妥当性を検証するために、現場で得られた計測データとの比較を行った。また、地山の強度特性や土被りを変化させて、異なる検討条件においても本設計手法が適用できることを確認する。

2. 特性曲線法による長尺鏡止めボルトの設計方法の概念

鏡止めボルトの施工実績は増加しているものの、トンネルの土被りや地山条件がほぼ同様で参考となる実績は、ほとんど存在しないのが実情である。土被りや地山条件から、簡易に鏡止めボルトの仕

様を決定することが望まれており、比較的容易に設計できる方法に着目した。そこで、鏡止めボルトの簡易的な設計方法として、地山の特性曲線法を用いることについて検討を行った。

図-1 に特性曲線法による鏡止めボルトの概念図を示す。

今回は、実際に現場で得られた測定結果をもとに、三次元掘削解析によって地山の物性値を同定する。その解析結果から、切羽前方の応力と変位の関係を求め、地山の特性曲線を作成する(手順①)。計画段階であれば、地山の物性値を想定して、軸対称モデルなどの簡易なモデルで地山特性曲線を作成する。

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、本数などによって異なる。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(手順②)。図-2 の地山応力解放曲線は、二次元の掘削解析で掘削解放率を求める際に用いる解放曲線の

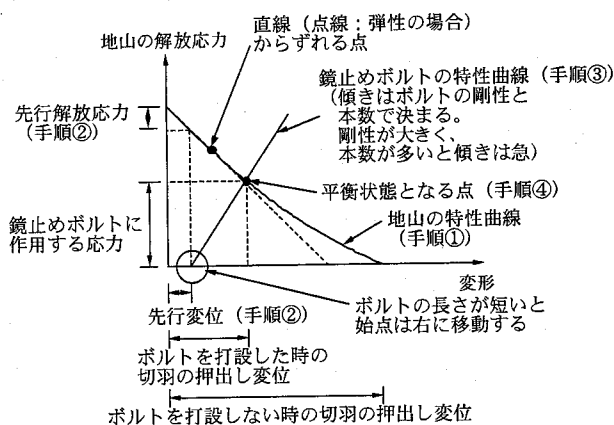


図-1 特性曲線法による鏡止めボルトの概念図

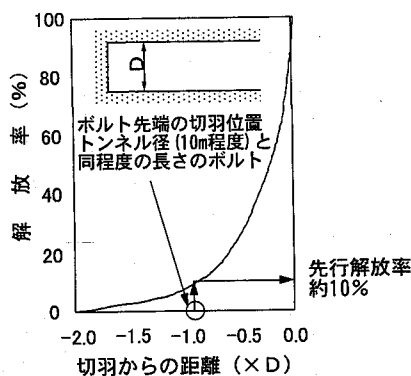


図-2 地山応力解放曲線

切羽到達までのグラフであり、切羽到達時の解放率を100%としている。ボルトの長さがトンネル径（約10m）程度であれば、先行解放率は約10%である。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（支保剛性）を求め、線を引く（手順③）。地山の特性曲線とボルトの特性曲線が交わる点で釣り合い状態となり、ボルトに作用する荷重や切羽の押出し変位量を求めることができる（手順④）。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。

3. 計測結果に基づく本設計手法の検証

(1) 計測結果から同定した地山物性値

計測を行った現場は、近畿自動車道（紀勢線）南部工事高田山トンネルであり、地質の特徴としては付加体堆積物の頁岩を主体としている²⁾。切羽の安定対策として、継ぎ手タイプの鋼管膨張型ロックボルトを長尺鏡止めボルトに採用した。計測は、A計測、鋼製支保工軸力計、地中変位計測

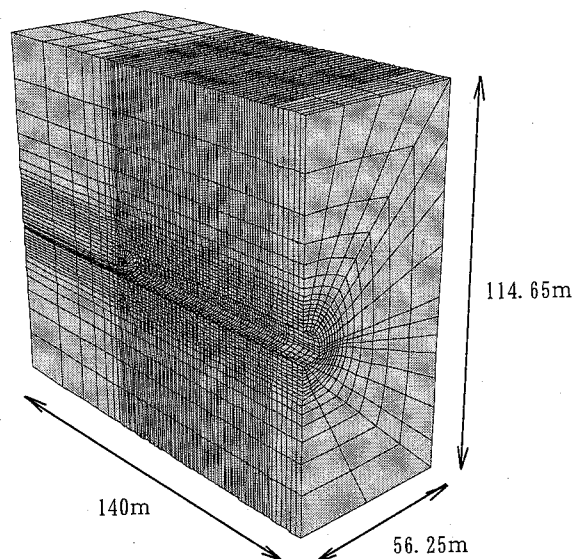


図-3 解析モデル図

表-1 物性値一覧表

	名称	単位	入力パラメータ
地山	弾性係数	MPa	500
	ポアソン比		0.35
	G	MPa	185
	K	MPa	556
	密度	10^6 kg/m^3	2.30E-03
	粘着力	MPa	0.05
	摩擦角	°	30
鋼管膨張型 ロックボルト	断面積	m^2	4.81E-04
	弾性係数	GPa	205
	引張降伏荷重	kN	220
	kbond	MN/m^2	2.26E+03
	sbond	MN/m	1.00E-01
吹付コンクリート	厚さ	m	0.25
	密度	10^6 kg/m^3	2.30E-03
	弾性係数	GPa	4
	ポアソン比		0.2
鋼製支保工 (H200)	断面積	m^2	6.35E-03
	断面二次モーメント(強)	m^4	4.72E-05
	断面二次モーメント(弱)	m^4	1.60E-05
	密度	10^6 kg/m^3	7.85E-03
	弾性係数	GPa	205
	ポアソン比		0.3

および鏡止めボルトの軸力測定である。三次元掘削解析によって、上記計測結果を表現できる地山の物性値を同定した³⁾。

解析には有限差分法コードFLAC3D ver2.1 (ITASCA社製)を使用した。検討を行った区間は、DⅡ-k-kの支保パターンで、支保工サイズはH200、吹付けコンクリートの厚さは250mm、ロックボルトは長さ4mのツイストボルトを周方向に1.2mピッチで、1断面に上半15本、下半4本打設した。1掘進長は1.0mで、上半先進工法で施工した。上半は掘削半径6.25mである。解析モデル図を図-3に示す。境界条件は、地表面はフリーとし、その他はローラー境界とし、対称性を考慮して半断面とした。土被りは55mである。

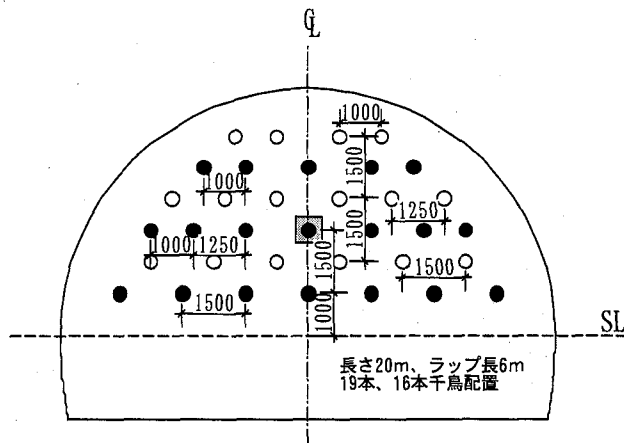


図-4 長尺鏡止めボルトのパターン図

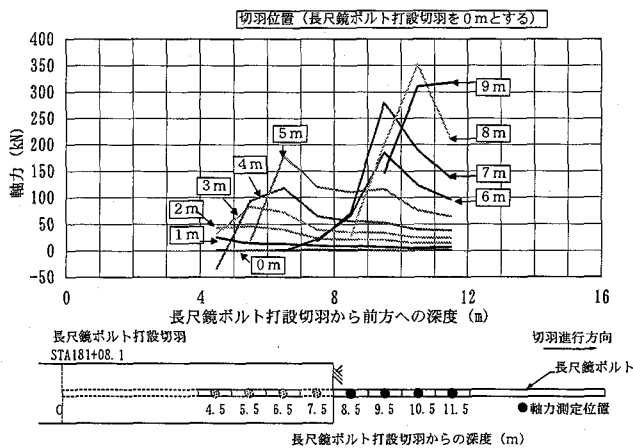


図-5 長尺鏡止めボルトの軸力経距分布図

解析で求められた地山の物性値および解析に用いた支保の物性値を表-1に示す。鋼管膨張型ロックボルトの k_{bond} （せん断剛性）、 s_{bond} （付着強度）は地山とボルトとの付着を表す定数であり、軸力測定を行った地質と同様な地山で同トンネルにて行った引抜き試験の結果から求めた⁴⁾。

鏡止めボルトのパターン図を図-4に示す。長さ20mのボルトを、16本と19本の千鳥配置としており、ラップ長は6mである。ただし、計測を行ったボルトは計測用に1本だけ打設しているため、発生軸力が大きい。図-5に鏡止めボルトの軸力測定結果を示す。ボルトを弾性体として軸力換算しているため、ボルトの降伏強度220kNを越える最大約350kNの軸力が発生しており、ボルトは降伏している⁵⁾。

鉛直土圧は土被り圧相当とし、水平土圧は側圧係数1.0で設定した。

解析手順は施工手順を順守し、上半先進工法で上半のみを掘削した。解析は、鏡止めボルトがある場合とない場合の2ケースを行った。

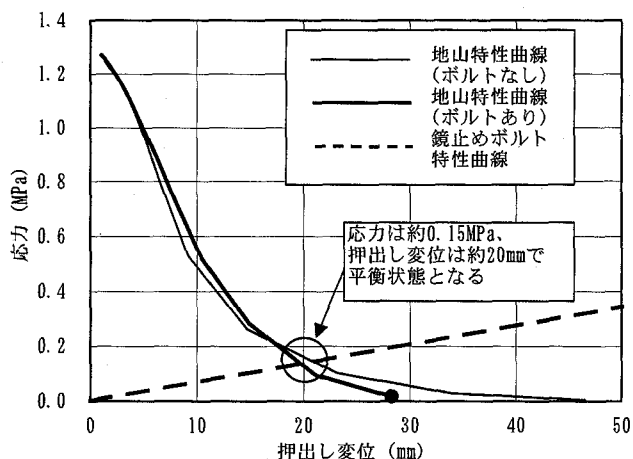


図-6 解析結果による特性曲線

(2) 計測データに基づく特性曲線法

先ずは、三次元解析の結果を使って、地山特性曲線を作成する。鏡止めボルト有無の2ケースの解析結果より、上半切羽中央（図-4□）のトンネル軸線上の切羽押し変位と軸方向応力を抽出し、地山の特性曲線をプロットしたものを図-6に示す。鏡止めボルトがない場合には、約45mmの押し変位が生じ、ある場合では約30mmである。また、鏡止めボルトがある場合には、ボルトの内圧効果により応力は0とならない。

次に、鏡止めボルトの特性曲線を作成する。トンネル周辺の初期水平地圧は、55m（土被り） $\times$ 23kN/m³（地山の単位体積重量） $\times$ 1.0（側圧係数）= 1265 kN/m² = 1.265 MPaとなる。長尺鏡止めボルトの長さが20mなので、図-2の地山応力解放曲線より、先行変位率は0%とであり、原点が鏡止めボルトの特性曲線の始点となる。

ボルトの特性曲線の式を式(1)に示す。

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

σ_b はボルトによる内圧、 E_b はボルトの弾性係数（205GPa）、 A_b はボルトの断面積（ $4.81 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ）、 A_f はボルト1本が受持つ切羽の断面積（上半断面積 61.4 m^2 / ボルトの本数19本 = 3.23 m^2 / 本）、 r はトンネルの換算半径（4.42m）、 u は切羽の押し変位量である。

ボルトの特性曲線の傾き（支保剛性）は（ $E_b \cdot A_b / A_f \cdot r = 0.091 \text{ MPa/mm}$ ）となり、この傾きの直線を描くと図-6の点線となる。地山の特性曲線とボルトの特性曲線が交差する点で平衡状態となる。平衡点における応力は約0.15MPa、押し変位は約20mm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

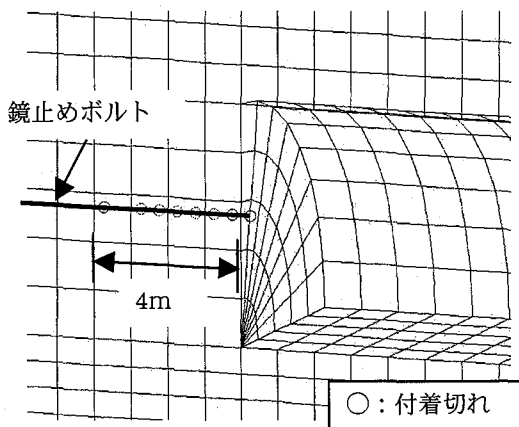


図-7 鏡止めボルトの付着切れ

ると、約485kN ($0.15\text{MPa} \times 3.23\text{m}^2 \times 1000$) となる。実際に計測された鏡止めボルトの軸力は約350kNであり、三次元解析結果では約220kNの軸力が作用している。いずれの場合でも、特性曲線法で求めたボルトの軸力は大きな値である。

この理由として考えられるのは、地山とボルトの付着である。特性曲線法では、地山とボルトは完全に定着されており、地山の動きに対してボルトも同様な挙動を示す。実際は、地山の变形が大きくなると、ボルトはその变形に追従することができなくなり、付着切れを起こす。解析では、実現象を表現するために、地山とボルトの付着切れを考慮しており、解析結果では図-7 に示すように、切羽から4m程度付着切れを起こしている。付着切れが起きると、ボルトの変位抑制効果は小さくなり、押し出し変位は大きく、ボルトに発生する軸力は低下する。

よって、鏡止めボルトの特性曲線の傾き（支保剛性）は、付着切れを考慮して、低減させる必要がある。

4. 異なる解析条件における本設計手法の検証

地山の強度定数および土被り、側圧係数を変化させて、三次元掘削解析を行い、特性曲線法による鏡止めボルトの設計手法の検証を行った。解析はFLAC3D (ver. 2.1) を用いた。解析ケースを表-2 に示す。ケース1とケース2では、地山の強度定数の違いによる比較を、ケース1とケース3では土被り、側圧係数を変えて地圧の違いによる比較を行う。土被りが10mの場合の解析モデル図を図-8 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10mと30mであり、側圧係

表-2 解析ケース

解析 ケース	地山		土被り (m)	側圧 係数
	粘着力 (MPa)	内部摩擦角 (°)		
ケース1	0.01	30	10	0.5
ケース2	0.05	15	10	0.5
ケース3	0.01	30	30	1.0

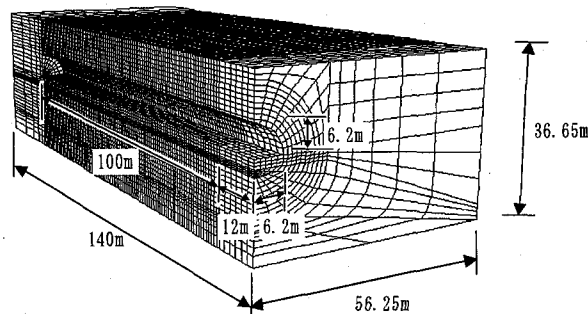


図-8 解析モデル図

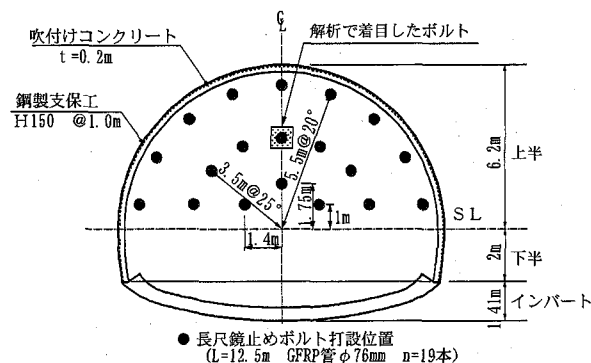
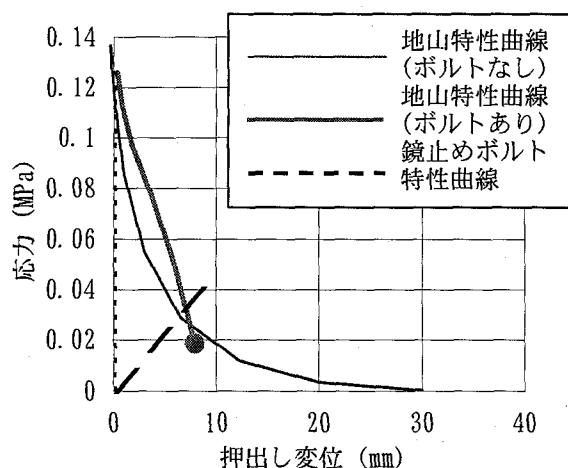


図-9 鏡止めボルトのパターン図

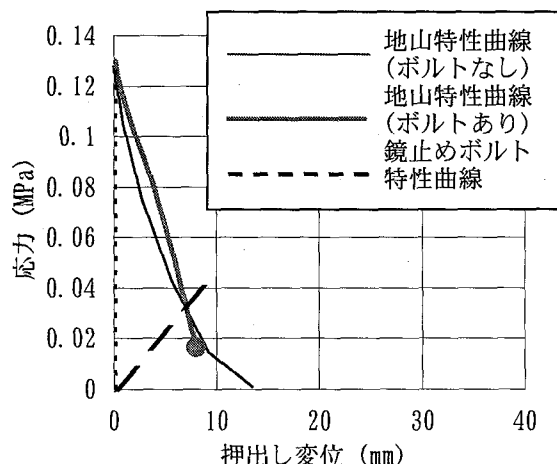
数は土被り10mで0.5、土被り30mで1.0である。地山は完全弾塑性体とし、地山の単位体積重量は 20kN/m^3 、地山の弾性係数は 150MPa 、強度定数は砂質土系地山（ケース1：粘着力 0.01MPa 、内部摩擦角 30° ）と粘性土系地山（ケース2：粘着力 0.05MPa 、内部摩擦角 15° ）でそれぞれ設定した。鋼製支保工はH150で、吹付けコンクリートの厚さは20cmである。なお、ロックボルトは解析では考慮していない。地山とボルトの付着定数は、高田山トンネルで行った引抜き試験の結果を用いて、 k_{bond} （せん断剛性）を 820MN/m^2 、 s_{bond} （付着強度）を 0.28MN/m とした⁶⁾。

鏡止めボルトの打設パターン図を図-9 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。

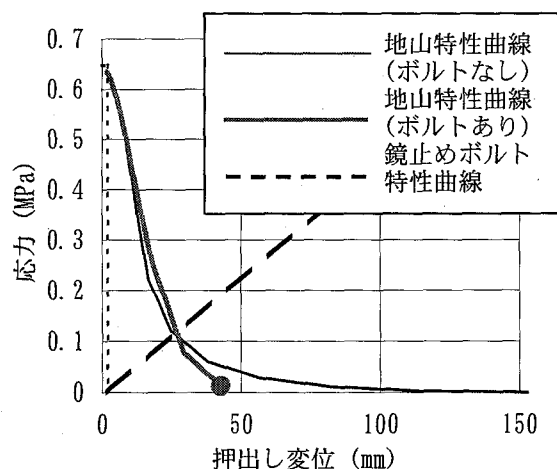
最も切羽の押し出し変位量大きい切羽中央（図-9□）のトンネル軸線上のトンネル軸方向の押し出し変位と地山応力の関係を調べた。各ケースでボルト有無の地山特性曲線を示したものを図-10 に実線で示す。鏡止めボルトがある場合には、押し



(a) ケース 1: 砂質土系地山 (土被り 10m)



(b) ケース 2: 粘性土系地山 (土被り 10m)



(c) ケース 3: 砂質土系地山 (土被り 30m)

図-10 特性曲線法による鏡止めボルトの設計

し変位量が抑制され、ボルトの内圧効果によって応力は全て解放されない。

鏡止めボルトの長さが 12.5m なので、ボルトは切羽から約 1.5D 前方の地山まで効果を発揮する。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 3% となり、ボルトの特性曲線の始点が

表-3 解析結果

解析 ケース	押出し変位量 (mm)		
	ボルトあり		ボルトなし
	特性曲線法	三次元解析	
ケース1	6.5	7.9	30
ケース2	7.0	8.0	14
ケース3	25	43	153

解析 ケース	ボルトに発生する軸力 (kN)	
	特性曲線法	三次元解析
ケース1	95	138
ケース2	102	139
ケース3	350	358

求まる。土被り 10m の場合、図-9□の初期地圧は 0.127MPa (土被り 12.7m, 単位体積重量 20kN/m³, 側圧係数 0.5) である。式 (1) より、鏡止めボルトの特性曲線の傾き (支保剛性) を求める。ボルトの弾性係数は 38GPa, ボルトの断面積は 0.00171m², ボルト 1 本が受持つ切羽断面積は 3.18m², トンネルの換算半径は 4.38m である。鏡止めボルトの特性曲線を描くと図-10 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。

表-3 に解析結果を示す。押出し変位量は前章と同様に、三次元解析結果のほうが特性曲線よりも大きな値となる。一方、鏡止めボルトの軸力は前章の結果と異なり、三次元解析結果のほうが特性曲線よりも大きな値となっている。地山とボルトとの付着切れは土被りが 10m のケース 1 と 2 で起きてなく、土被り 30m のケース 3 では、切羽から 1m の区間で付着切れが起きている。前章のように、土被りが 55m と大きく、切羽の押出し変位も大きい場合や付着強度が低い場合には、付着切れの影響を取り入れて、鏡止めボルトの特性曲線の傾きを低減する必要があるが、土被りが浅く付着切れが起きない場合には、計算式 (1) から求められる特性曲線の傾きを適用すべきであると考えられる。付着切れの影響を考える必要のないケース 1 と 2 で、特性曲線のほうが三次元解析結果よりも押出し変位量、ボルトの軸力ともに小さくなった。三次元解析の結果は、切羽で最も大きな押出し変位量、軸力となる切羽中央付近の結果であり、特性曲線は切羽全体の平均的な値である。そのため、最大値である三次元解析結果よりも平均値の特性曲線法のほうが小さくなる。よって、設計を行う際には、特性曲線で求められた値に安全率を考慮する必要がある。

5. 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。現場計測結果と三次元掘削解析によって検討を行った結果、以下のことがわかった。

- ① 土被りが大きい場合や地山とボルトとの付着強度が小さい場合には、付着切れを考慮して、鏡止めボルトの特性曲線の傾き（支保剛性）を低減すべきである。
- ② 特性曲線法から求められた鏡面の押出し変位量と鏡止めボルトの軸力値に安全率を考慮して、鏡止めボルトの設計を行う必要がある。

地山の特性曲線を求めるには、理論的な定式化が望まれるが、本検討で行った三次元解析でも設定することができ、比較的容易に設定するには軸対称二次元解析によって行ってもよい。特性曲線法を用いた本手法は、現場に適した条件で、鏡止めボルトの設計を簡易にできる。今後は、上述した特性曲線の傾き（支保剛性）の低減率や安全率について詳細な検討を進め、本手法を確立していきたい。

参考文献

- 1) 大塚勇, 青木智幸, 小池真史: 特性曲線法を用いた鏡止めボルトの設計方法について, 土木学会第61回年次学術講演会, pp.113-114, 2006.
- 2) 村瀬貴巳夫, 田中崇生, 小川哲司, 足達康軌: 付加帯中の先行緩み探査と対策, トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第12巻, pp.19-30, 2002.
- 3) 大塚勇, 青木智幸, 小川哲司, 足達康軌, 田中崇生: 長尺鏡ボルトによる岩盤補強効果の三次元掘削解析, トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第13巻, pp.135-140, 2003.
- 4) 大塚勇, 青木智幸, 田中崇生, 小川哲司, 足達康軌: 鋼管膨張型ロックボルトの原位置引抜き試験とシミュレーション解析結果, 第38回地盤工学研究発表会, pp.1737-1738, 2003.
- 5) 田中崇生, 足達康軌, 小川哲司, 青木智幸, 大塚勇: トンネル掘削時の長尺鏡ボルトの軸力発生・分布挙動, 土木学会第58回年次学術講演会, pp.33-34, 2003.
- 6) 大塚勇, 青木智幸, 小川哲司, 足達康軌, 田中崇生: 各種ボルト材による鏡ボルトの岩盤補強効果について, 第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文, pp.73-78, 2004.