

未固結砂質地山におけるロックボルトの引抜き耐力に関する検討

ハザマ 正会員 ○伊藤 彰、稲葉秀雄、寺内 伸
ハザマ フェロー会員 鈴木雅行

1. はじめに

山岳トンネルにおけるロックボルトは、「施工前あるいは施工の初期段階に同一地質の箇所を選んで引抜き試験を行い、その引抜き耐力から適切な定着方式やロックボルトの種類等の選定を行う」¹⁾ことが肝要である。定着材と地山の間に十分な付着力が得られない場合、引抜き耐力はロックボルトの降伏点耐力に満たないことがあるが、「地質によっては、引抜き耐力が低くてもロックボルトとしての効果があがる場合もあるので、結果の判断は総合的に行う必要がある」¹⁾と考えられる。しかし、引抜き耐力は通常、ロックボルトの降伏点耐力（通常、ねじ部の降伏点耐力）と同程度に定められることが多い。

本稿では、施工の初期段階で実施した引抜き試験にて、引抜き耐力がロックボルトの降伏点耐力に満たないことが確認された二車線道路トンネルにおいて、現場計測と数値解析によりトンネルの安定上必要となるロックボルトの引抜き耐力を検討した事例を報告する。

2. 当該トンネルの概要と現場計測結果

当該トンネルの地質は第四紀層に区分され、切羽上部には未固結な砂質土優勢層が出現する状況であった（図-1）。地山は比較的良好に締まっているものの、砂質土のため粘着力がなく、掘削とともに天端および鏡面の抜け落ちが発生する状況で、切羽安定のための補助工法を要した。

このような状況の中、切羽上部の未固結な砂質土優勢層に打設したロックボルト（図-1のNo.5～14）は、定着材と地山の間に十分な付着力が得られず、施工の初期段階で実施した引抜き試験にて、引抜き耐力が平均で100kN程度と、ロックボルトの降伏点耐力180kNに満たないことが確認された。

一般に、付着力が得られない要因としては、①定着材側の要因（定着材の流出や注入不足により未充填部が残るなど）、②地山側の要因（地山の強度不足により定着材との間にすべりが生じるなど）が挙げられる。ロックボルトの打設において孔壁は自立し、先行充填型モルタルの注入量も基準値以上であったことから、付着力が得られない要因は、地山が砂質土であることに起因するものと判断した。このような状況において、ロックボルトの降伏点耐力と同程度の引抜き耐力を確保するためには、削孔径の拡大などの対策を要するが、対策の要否については、ロックボルトの発生軸力を評価した上で判断することとした。

B計測で確認されたロックボルトの発生軸力は最大で46kN（降伏点耐力の1/4程度）であり、トンネル掘削に伴う解放応力を分担し、支保部材として機能していることが確認された。また、A計測による天端沈下・内空変位は管理レベルⅠ（天端沈下15mm、内空変位30mm）の範囲内に収まっており、トンネルは安定していると判断できる状況であった。

施工の初期段階で実施した引抜き試験では、B計測で確認されたロックボルト発生軸力の最大値46kNに対して、切羽上部の未固結な砂質土優勢層に打設したロックボルトが十分な引抜き耐力（図-1のNo.5～14の平均で100kN程度）を有することが確認されていたが、計測結果の不確実性（B計測結果が一断面でしか得られていないことなど）を踏まえて、数値解析による検討を実施し、ロックボルトの発生軸力を評価することとした。

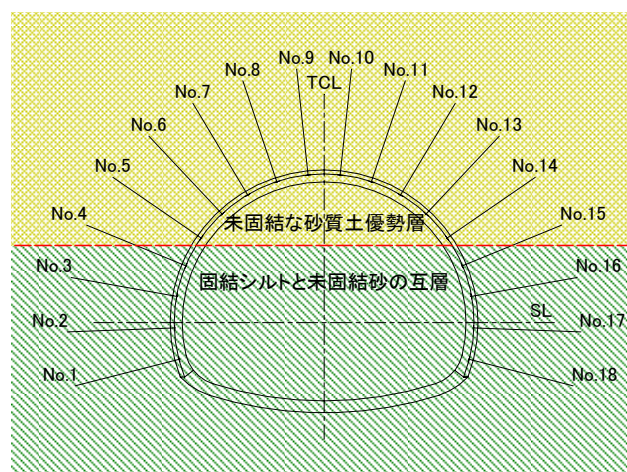


図-1 当該トンネルの地質概要

キーワード 未固結砂質地山、ロックボルト、引抜き耐力、現場計測、数値解析

連絡先 〒105-8479 東京都港区虎ノ門2-2-5、TEL 03-3588-5770、FAX 03-3588-5755

3. ロックボルト発生軸力の評価

ロックボルト発生軸力の評価に際しては、B 計測断面を対象とした 2 次元 FEM 解析を実施した。FEM 解析では、事前の地質調査結果を基に、A 計測結果（天端沈下・内空変位）をターゲットとした逆解析的アプローチを通じて、地山物性値や初期応力状態を算定した（表-1）。

B 計測断面における天端沈下・内空変位の計測および解析結果を図-2に示す。なお、図-2に示した B 計測断面における計測値は、同一支保パターンにおける計測値の平均的な値を示すものであった。

図-2に示したように、逆解析的アプローチで得られた FEM 解析結果は、トンネルの変形モードの良好に再現しており、本解析におけるロックボルトの発生軸力と B 計測結果を総合的に評価することで、本トンネルで必要となる引抜き耐力（発生軸力を担保する引抜き耐力）を算定することとした。

ロックボルト発生軸力の計測および解析結果を表-2に示す。ロックボルト発生軸力の解析値は、計測値よりも大きな値を示しているが、この原因としては以下の点が挙げられる。

- ①FEM 解析では、鋼製支保工・吹付けコンクリートの施工と同時に、ロックボルトが打設されるようにモデル化されている。これに対し、本トンネルの施工では、鏡吹付けをしながらの分割掘削や核残しにより、鋼製支保工・吹付けコンクリートの施工とロックボルトの打設には時間的なずれが生じる。
- ②FEM 解析では、ロックボルトと地山は、打設と同時に剛結条件となる。これに対し、実際の施工では、ロックボルトの打設と定着材の強度発現までには時間的なずれが生じる。
- 実際の施工においては、上述の時間的なずれの間にも地山の応力が引き続き解放される事になるため、ロックボルトに実際に発生する軸力は解析値よりも小さくなる傾向にある。
- さらに、FEM 解析では、完全な連続体として解析しているが、実際の地山は砂質主体の粒状地山であり、やや不連続な挙動も示すことも考えられることから、解析上の値は実際の発生軸力より大きめの値となることが考えられる。

FEM 解析による検討の結果、ロックボルトの発生軸力は、最大でも 80kN であることが明らかとなり、引抜き耐力として 80kN を担保すれば、支保部材として機能するものと判断できた。FEM 解析結果、および施工の初期段階で実施した引抜き試験結果を踏まえ、切羽上部の未固結な砂質土優勢層に打設するロックボルト（図-1 の No.5～14）の引抜き耐力を 80kN とし、引抜き試験荷重 80kN でロックボルトの品質管理を実施した。

4. おわりに

本稿では、引抜き耐力がロックボルトの降伏点耐力に満たないことが確認された未固結砂質地山において、現場計測と数値解析を通じてロックボルトの発生軸力を評価し、トンネルの安定上必要となる引抜き耐力を検討した事例を報告した。

定着材と地山の間に十分な付着力が得られない場合、ロックボルトの降伏点耐力と同程度の引抜き耐力を確保するためには、定着材や定着方式の変更、削孔径の拡大などの対策を要する。このような対策の要否は、ロックボルトの発生軸力を評価した上で判断することが肝要であり、このためには本事例のような検討が有効であると考ええる。

参考文献 1)土木学会:トンネル標準示方書[山岳工法編]・同解説, 1996.

表-1 逆解析的アプローチで算定した地山の変形係数

	変形係数 (kN/m ²)
未固結な砂質土優勢層	250,000
固結シルトと未固結砂の互層	350,000

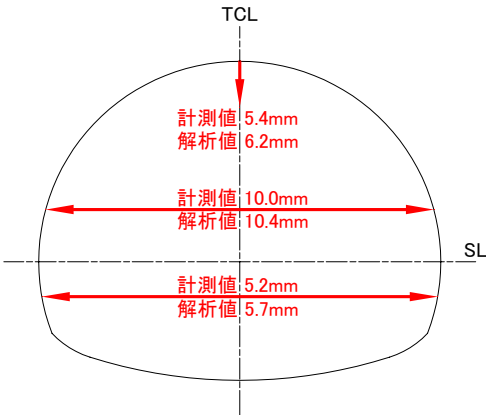


図-2 天端沈下・内空変位の計測および解析結果

表-2 ロックボルト発生軸力の計測および解析結果

		計測値 (kN)	解析値 (kN)	計測値／解析値
ロックボルト 番号 (図-1 参照)	No.2	10	79	0.13
	No.3	46	73	0.63
	No.9	8	46	0.17
	No.16	33	75	0.44
	No.17	12	80	0.15