

トンネル観測化施工の新しいパラダイムを目指して

Aiming to a New Paradigm of the Observational Tunneling Method

櫻井 春 輔 (さくらい しゅんすけ)

独立建設工学研究所 理事長

岡野 成 敏 (おかの しげとし)

元㈱エーティック 企画本部長

板倉 賢 一 (いたくら けんいち)

室蘭工業大学教授

山地 宏 志 (やまち ひろし)

三井住友建設㈱技術研究所 主任研究員

1. はじめに

昭和50年代中旬における NATM の導入を端初として、現場計測と切羽観察を中心とする観測化施工の手法が山岳トンネル施工に導入された。

しかし、現在のところ現場計測を基に地山挙動や適切なトンネル支保を予測・評価し得る手法は示されていない。また、土木構造物全般が維持・管理、および更新を前提としたライフサイクル・コストの最適化を求められる今日にあって、トンネルの観測化施工のあり方もこれに適した形態への移行が迫られている。

筆者らの一人は、現場計測結果を力学的な系で評価し、施工へのフィードバックを実現するためには地山の安定性をひずみで評価することが最も実用的であると考え、その安定性評価基準として限界ひずみを提案した¹⁾。さらに、トンネル掘削によって発生するひずみ分布が、等価な線形地山における初期応力と地山変形係数の比を逆解析することで簡便に求め得ることを示した²⁾。この二つの考えは、我が国のトンネル施工に広く採用され、それがトンネル施工の実務に耐えうるものであることが実証されている。

さらに筆者らは、亀裂性模型供試体を利用した実験を通して、ロックボルトの打設が地山に発生するひずみを抑制するとともに、地山の許容ひずみを増大させる可能性が高いこと、および地山挙動を脆性的なものから延性なものへ転移させる可能性が高いことを示し³⁾、従前に提案した逆解析との融合によって、最適なロックボルト支保量等を算定する手法を提案した⁴⁾。しかしながら、支保部材の効果発現は地山の地質条件に依存し、これを詳らかにすることが難しいために、現在のところこの手法は実用には至っていない。

観測化施工のもう一つの柱である切羽観察は地山の地質条件を明らかにすることを目的とするが、その評価は観測者の主観と資質に依存するため、客観的な評価がなされているとは言い難く、これをより定量的、客観的な評価に近づけようとする試みが種々行われている⁵⁾。しかし、それらの多くは情報機器や画像処理技術を利用することで省力化や客観化の面で大きな改善がみられるものの、地山評価そのものは RMR (Rock Mass Rating) 等の旧来手法の改良にとどまっているように思われる。

結局のところ、現場計測と切羽観察を主とした現在の観測化施工が一つのパラダイム、すなわちある一時代の人々のものの見方・考え方を根本的に規定している概念的枠組であるならば、現在のパラダイムの範疇で山岳トンネル施工に積み残された諸問題を解決することは難しいものと判断され、新しい観測化施工のパラダイム構築が求められる。

筆者等は、このパラダイム構築にあたって、これまで見過されてきたトンネル施工状況や重機稼動状況等を積極的に活用することが重要であると考えた。また、これがパラダイムとして成立するには経済的な費用対効果が確保されると共に、それに要する人的負荷も可能な限り低減されることが必要であるとも考えた。

本文は、トンネル工事に汎用的に用いられる油圧削岩機の稼動状況から地山の地質特性を推定する削孔検層手法を日常の削孔業務に適用することで観測化施工に活用した事例を紹介し、その妥当性を問うものである。

2. トンネル観測化施工としての削孔検層⁷⁾

今日の現場計測結果をフィードバックする上で、もっとも問題となるのが、設計に要求されるモデル精度に比べ、事前調査や切羽観察から与えられる地質調査精度が著しく劣ることである。また、トンネルの安定性を評価し、維持・管理、更新を適切にマネジメントする上で、掘削によって空洞周辺に形成される緩み領域を把握することが重要であるにもかかわらず、これを可能とする手段は示されていない。筆者らの一人は、非線形の逆解析手法を用いることで地山計測変位から緩み領域を推定する手法を提案した⁸⁾が、この手法はこれに供すべき計測変位に特殊な条件が設けられること、および解の唯一性が保障し難いなどの問題を内包する。また筆者らは、空洞周辺の緩み域を精査することのできる真空透気試験法を開発した⁹⁾が、測定機器の小型化に限界があり、また測定にも比較的時間を要する。

この他にも、トンネル切羽前方、およびトンネル空洞周辺の地質精査手法は、種々、考案されているが、そのほとんどは測定のために長時間にわたる切羽停止が必要で、特殊な測定機器を要し、試験・分析に専門家が必要となる場合も多い。このため、トンネルの施工管理に容易に導入できるものではない。しかしながら、これらの

手法の中で、切羽前方探査に用いられる削孔検層手法は観測化施工に供し得るようそのシステムを改良することで、われわれの望む地質精査を実現しうる可能性があるものと考えた。

トンネル施工切羽における観察からわかるように、各種削孔機械の作動状況、例えばノミ下がりやシャクレ、さらにはスライム状況等も密接に削孔位置の地質状況と関係する。したがって、これを連続的に、かつ定量的に測定するならば、トンネル周辺地山の地質状況のある程度の精度で把握できる可能性が高い。

筆者らの一人は、このような考え方に基づいて鉱山坑道におけるロックボルト削孔のトルクデータから地山天端部の地質をCG上に再構成する研究を実施した⁷⁾。この方法は、基礎実験から得られた岩盤の硬軟、および不連続面と削孔に要するトルクの関係を図-1に示す六つのパターンに分類し、削孔時に測定されたトルクがこのうちのどのパターンに当てはまるかをニューラルネットワークによって認識させるものである。

図-2に、鉱山坑道のある断面内に削孔された4孔(各削孔長 1.9 m)に対するトルク分布とニューラルネットワークで識別された不連続面位置を示す。図中の軸上の黒丸が、推定された不連続面の位置を表している。岩層の境界は不連続面であるため、不連続面位置間の平均トルク値を比較することにより岩層の違いを判断している。この現場の岩相の成層面方向はほぼ水平であるが、同図の結果でも比較的硬い岩層(トルクの高い箇所)と柔らかい岩層が交互に現れていることがわかる。すなわち、相対的な岩盤の硬軟がかなりの精度で再現されたものと考えられる。この分析結果をもとに坑道天端部の地質状況をCG上で再現したものが図-3である。このように、連続的なデータ採取から立体的な岩盤の硬軟の分布、あるいは不連続面分布の把握が可能となり、直感的な理解を助けるだけでなく、地山変位等の挙動をより精密に分析することができ、設計に供することのできる力学モデルを提供し得る。

これは削孔が回転のみで行われる比較的単純な削孔機械のために開発された手法であるが、同様のシステムをトンネル施工で汎用的に用いられる打撃式の油圧削岩機に対して構築できるならば、トンネル施工に伴う各種の削孔作業、例えばロックボルト孔や発破孔の穿孔がそのまま地質調査資料として蓄積することができるのである。このような考えから開発した汎用削孔に対する削孔検層システムの、実務への適用事例を以下に示す。

3. 削孔検層手法のトンネル施工へのフィードバック⁷⁾

削孔検層手法をトンネルの観測化施工に導入する第一の目的は、トンネル周辺地山の地質状況を的確に把握することにある。これまでの切羽前方探査などに用いられた削孔検層では、地山を評価する指標として打撃圧と削孔速度の比から求められる破壊エネルギーで評価されることが多かった。しかしながら、トンネル施工に供せら

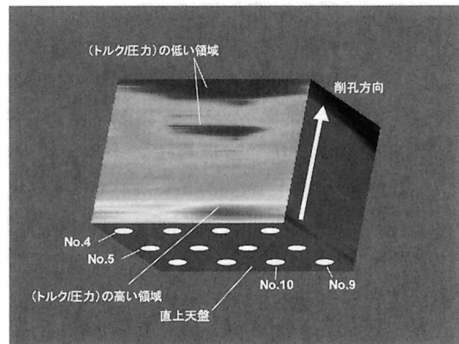
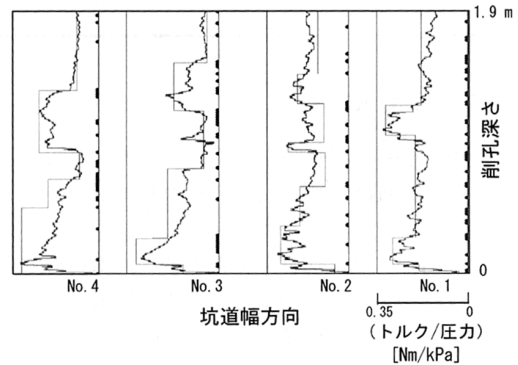
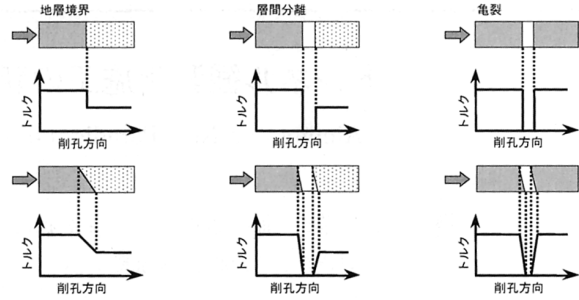


図-3 坑道天端部の3次元地質構造推定図⁷⁾

れる最近の油圧削岩機は、効率的で安定した削孔を行うことを目的とした各種の制御機構が設けられている。これらの制御機構が作動する場合、破壊エネルギーのみによる地山評価は誤った理解を生む可能性があるとともに、制御機構を考慮することによってより詳細な地質構造の理解を与えることが明らかとなりつつある⁷⁾。

しかしながら、制御の方法は油圧削岩機の種類に依存し、地山状況によっては全く異なる作動を行う場合もある。このため、統一的な地山の評価方法はいまだ見出せていないが、トンネルの安定性や支保設計を考える上で興味深い成果がいくつか得られている。

ある種の地山では、特殊な指標を導入したり、制御機構を考慮せずとも地山評価が可能な場合がある。口絵写真-13はその一例を示すものであり、トンネル天端部のロックボルト削孔時の削孔速度 3 m/min 以上の領域を抽出し、これを3次的に補間した図である。当該地山の地質は流紋岩質凝灰岩で全体として比較的均質な地山であったためか、削孔機械の制御機構が作動すること

はなく、打撃圧、フィード圧等は削孔中ほぼ一定に作動した。しかしながら、トルクには若干の変動が見られ、その箇所では削孔速度が著しく大きく、他の領域では0.5~1.0 m/min未満の削孔速度しか生じないのに対し、3 m/min以上の削孔速度が生じた。この領域を補間すると口絵写真-13に見られるように一定の連続性を空間的に保持していることが分かる。すなわち、連続した地質弱部が存在する可能性が高いのである。このうち、トンネル天端30 cm程度の領域に現れる弱部は掘削に伴う緩み域、2~3 m程度の領域に現れる弱部は潜在的な不連続面と判断することが工学的には妥当であろう。

これとは逆に、制御機構が作動することによって地山弱部が同定される場合もある。たとえば、花崗岩地山における切羽前方探査では途中の1~2 m程度の区間で、突然、打撃圧が低下する事象が見られた。この事象は複数の隣接する孔でも生じ、連続性が高いと判断された。このとき用いた削孔機械の制御機構はトルクが急上昇し、フィード圧を低下させてもトルクが低下しない場合、孔荒れが激しいものと判断して打撃圧を急降下させる機構であった。このことから、当該地点近傍に1~2 m程度の断層、もしくは破碎帯が存在するものと予想されたが、果たして予想箇所にはそれほど粘土化の進んでいない断層が現れた。そのときの探索区域打撃圧平面分布を口絵写真-14に示す。この削孔は探索深度が30 m、図の上部が探査を開始した切羽に当たり、探索孔はトンネル中心を軸に左右1.5 m間隔で5点実施した。そして、深度10 m近傍に推定された断層が確認された。

また、口絵写真-15は前述の打撃エネルギーの変化率をもとにトンネル周辺の地質弱部を推定した図である。図に表示された区間の支保パターンはいずれもD-1であり、探索区間のトンネル延長は約80 mである。この区間で推定された地質弱部はいずれもトンネル掘削に伴う緩み領域であると判断されたが、同一支保パターン区間でも緩み域の発生形態が異なっているようである。ここでは、図に示すようにA, B, Cの三つの発生形態に区分したが、Aは比較的良好な地山であり、掘削による考えられる緩み域も小さく、また潜在的な弱部も見られない。これに対して、C部はトンネル壁面の1.8~2.4 m範囲がかなり緩んでいるものと判断され、広がりとしては左肩部のほうが若干その範囲が広い。これは当該箇所の地山が他の箇所(D-1パターンの他の箇所)と比較して脆弱なため、掘削の影響が比較的広い範囲に及んだと判断することが妥当であろう。また、B部はこの遷移領域と判断してよからう¹⁷⁾。トンネル支保の規模は緩み域のみで評価されるものではないが、この評価が正しいとするならば、より細分化した標準パターンを構築できる可能性を示唆している。

また、油圧削岩機の作動状況を支配する地質要因、例えば岩盤の硬軟、割れ目の性状、不連続面の性状(孔荒れしているか、粘土化しているなど)等が、トンネルの切羽観察項目と比較的共通することに着目すると、切羽評価点と整合性のある支保分類が可能ではないかと考え

る⁷⁾。このように削孔検層結果の分析は端緒に付いたばかりであるが、多くの新しい視点をトンネル観測化施工にもたらしつつある。

4. おわりに

本文では、トンネル観測化施工のパラダイム再構築に向けた筆者らの取組みの一環を紹介した。末尾にあたって、筆者らの示した手法が必ずこのパラダイムを再構築しようというのではなく、観測化施工本来の目的を再確認し、その問題のあり方(Problem Configuration)を認識し、どのように解決するかをトンネル施工に携わる各人が模索することが観測化施工の現状の課題を打破し得る最良の方法であることを申し添えたい。

また、コンクリート構造物等は設計段階からライフ・サイクルと維持・管理を考慮した計画が立案されつつあるが、現地の一品生産品であるトンネルでは、このような計画立案を望むことは困難である。筆者らは、せめて施工時に地山弱部のあり方を把握することで、以後の維持・管理、および更新の計画を立案するのに資することができるのではないかと考えた。これが本特集に小文を寄せた大きな理由の一つである。

最後に、本文は財団法人先端建設技術センターの平成12, 13年度研究開発助成の成果の一部を基にしたものです。また、削孔検層システムの構築に当たっては嵯峨正信様を始めとする日本道路公団中部支社岐阜工事事務所の皆様のご指導・ご協力をいただきました。ここに深甚の感謝を表し、本小文の結びといたします。

参考文献

- 1) 桜井春輔: トンネル工事における変位計測結果の評価法, 土木学会論文報告集, 第317号, pp. 93~100, 1982.
- 2) 桜井春輔・武内邦文: トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析法, 土木学会論文報告集, 第337号, pp. 137~145, 1983.
- 3) 山地宏志・桜井春輔・平井正雄・中田雅夫: 現場計測に基づくロックボルトの作用効果の評価, 土木学会論文集, No. 529/Ⅲ-33, pp. 1~9, 1995.
- 4) 山地宏志・桜井春輔: ひずみ制御によるトンネル支保工の最適化, 土木学会論文集, No. 448/Ⅲ-19, pp. 83~89, 1992.
- 5) 中田雅博・三谷浩二・八木 弘・西 琢郎・西村和夫・中川浩二: 観察記録の分析に基づく新しい切羽評価システムの提案, 土木学会論文集, No. 623/Ⅵ-43, pp. 131~141, 1999.
- 6) 嘉指登志也・近久博志・筒井雅行・石黒真一: 新第三紀堆積岩地山における切羽画像を利用した3次元地質分析, 第34回地盤工学研究発表会, pp. 1749~1750, 1999.
- 7) 桜井春輔・板倉賢一・岡野成敏・山地宏志: 情報化施工におけるトンネル施工法および支保工の最適化に関する研究, 平成12, 13年度財団法人先端建設技術センター研究助成報告書, 2001.
- 8) 桜井春輔・清水則一・松室圭介: 変位計測に基づく地下空洞周辺地山に発生する塑性領域の推定法, 土木学会論文集, No. 394/Ⅲ-9, pp. 89~96, 1988.
- 9) Nakayama, A., F. Yamada and S. Sakurai: Air Permeability as Measure of Rock Mass Behavior, Journal of Geotechnical Engineering and Geo-environmental Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 3, pp. 223~230, 1980.

(原稿受理 2004.1.13)