

岩盤不連続面から見たトンネル周辺のゆるみ現象

京都大学工学部 正会員 谷本 親伯

1. 緒言

トンネル施工において、広く普及している地山分類では、岩盤の状態を示す一つの表現として「ゆるみ」が使用されていることが多い。例えば、古くは、Terzaghi(1946)がトンネル上部に発達するゆるみ領域と支保工規模との関係を論じ、Pacher(1964)は支保荷重とトンネル壁面荷重との関係で、壁面変位がある限度を越えると、「ゆるみ」に起因する荷重が増大すると指摘したり、広田(1942)や池田(1969)らによる国鉄方式の弾性波速度に着目したトンネル地山分類とゆるみ域の評価は、よく知られている。

しかしながら、力学的見地から見た「ゆるみ」の定量的評価方法は、いまだに確かなものが存在せず、その定義も不明瞭である。そこで、どのような見地から「ゆるみ」なる表現を用いているのか、著者の周辺にある資料から探ってみた。

2. 「ゆるみ」の対象

Terzaghi(1964)では、トンネル掘削による新たな自由面の生成が密着していた岩塊や土粒子などの分離を促進した状態を指している。ゆるんだ状態にある地山あるいはゆるみ領域内の地山材料は、重力場においてそれ自体のみでは定形を保持できず、人工的に設置する支保や周辺のゆるんでいない地山に対して、流体的な荷重として作用するとみなしている。

Pacher(1964)の概念では、密着の程度をトンネル壁面変位に置き換え、ある変位量を越えると徐々にゆるみが進行し、その領域の増加が支保反力を増大させるとみなし、Terzaghiの概念に対し、壁面変位なる指標を加えている。

一方、我国における「ゆるみ」の評価はきわめて概念的なレベルに留まり、また、間接的な定量的評価方法として弾性波伝播速度(主にP波速度)を因子とするものが挙げられる。すなわち、基本的な考え方としては、掘削によりトンネル壁面(自由面)からトンネル周辺のある深さまで一様な速度低下層が形成されることを前提として、この層をゆるみ域と考えている。地山を2層構造とみなし屈折波を利用する弾性波探査を行えば、「ゆるみ」に相当する範囲は定量的に評価できる。また掘削の影響を受けない元の状態のP波伝播速度と低速度層のそれを比較することにより速度を主因子として定量的な評価が可能である。しかしながら、速度値自体は岩盤の強度・変形とは直接的には結びつかず、一般的には単なる指標の域を出ない。勿論、いくつかの指標に対する具体的な力学定数が対応していれば、十分実用的である。岩盤中の断層や節理などの不連続面の密着度が変化し、こうした不連続面の状態に応じてP波速度が変化すると考えるのはごく自然であるが、学理的にはまだまだ不明瞭である。

その他、Rabczewicz(1957), Lauffer(1958), Müller(1963), Deereら(1966), Bieniawski(1973), Barton(1974)らのトンネル地山分類の背景にある「ゆるみ」は、トンネル掘削前の既存の不連続面の密着度が掘削の影響により減少し、容易に不安定現象を生じる状態を意味しているものと解釈される。

「発破による自由面近傍のゆるみが数mにまで及び……」なる表現をよく見かけるが、たいていの場合根拠のない単なる推測によるものである。

全般に、山岳トンネルの分野では、高圧下での山はね現象や軟岩に認められる押し出し性・膨張性、あるいは粒形の小さい土質地山に認められる塑性もしくは塑性流動を対象に「ゆるみ」という表現はとっていないようである。

敢えて総括すれば、ある不連続面に作用する接触圧力が減少し、これに伴い不連続面の開口幅が増加し密

着が不十分となることを「ゆるみ」と考えてもいい。それでは、密着が不十分とは、何を指すか。

トンネルという閉合された空間を囲む地山内のアーチ作用の形成条件から判断すれば、ゆるみの程度はダイレイタンスの発現に伴うせん断抵抗の変化として表現できる。

3. 発破工法とTBM工法によるゆるみ領域の相違

発破工法に比べ、TBM工法による掘削はゆるみを抑制するとよく言及される。TBM工法の利点として、一様な地質条件が維持される場合掘削効率が向上し、トンネル形状が円形であり壁面がなめらかであることからトンネル周辺岩盤の応力集中が小さく、また発破による衝撃がなく岩盤のゆるみが少ないこと、すなわちトンネルの安定性が得やすいことが挙げられる。

筆者が経験した両者の比較を取りあげてみる。いずれも弾性波速度の変化に着目して現場測定を実施したものである。

まず、池田(1979)は、発破工法により掘削されたトンネル内での弾性波速度と岩盤状態を調査し、多数の地点でのデータに基づき割れ目指数(k)とき裂頻度(n)について、図-1のような関係を示している。割れ目指数は、トンネル坑内弾性波速度測定から求めた岩盤のP波速度と測定区間から採取した試料のP波速度との比により定義され、き裂頻度は、1 mあたりのき裂数にて定義される。畠・谷本ら(1980)は、この関係に着目し、き裂の多い岩盤で立坑を大口径ボーリング機(TBM)により掘削した場合のゆるみを弾性波速度から調査したところ、図-2のような結果を得た。掘削前後の速度変化に着目すれば、TBM掘削が発破工法に比べ、速度変化が少ないことが明瞭である。また、現場測定と並行して、室内実験により弾性波速度の変化と力学的挙動の関係を追求している。

その結果、き裂に作用する接触応力が1 MPa以下に減少すると、P波速度は1 km/s以下に急激に低下し、き裂開口幅が0.5mm以上になれば同様にP波速度は急激に低下することが判明した。この現象は、不連続面での接触状況に起因し、岩塊相互のかみ合い、すなわち不連続面に沿うせん断抵抗が大きく異なるものと判断できる。

ほぼ同様に、10.8km長の水路トンネルを両坑口より、それぞれ発破工法とTBM工法にて掘削した工事において、周辺地山のゆるみを速度変化より比較したところ、ゆるみ域の速度およびゆるみ深さの両者とも大きな違いがあることが判明した。(谷本ら、1989) TBM工法では、き裂開口幅はおおむね0.5mmよりも小さく、き裂での接触状況も著しい変化を受けない。これに対し、発破工法ではき裂開口幅も大きく、ゆるみの程度はかなり著しい。

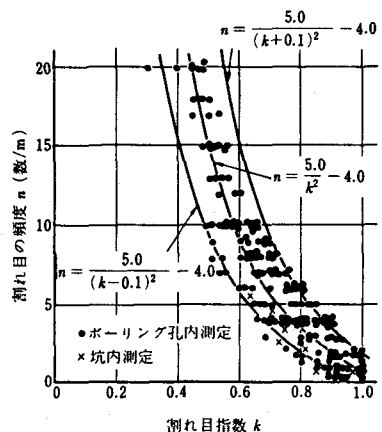


図-1 割れ目指数と割れ目頻度 (池田、1979)

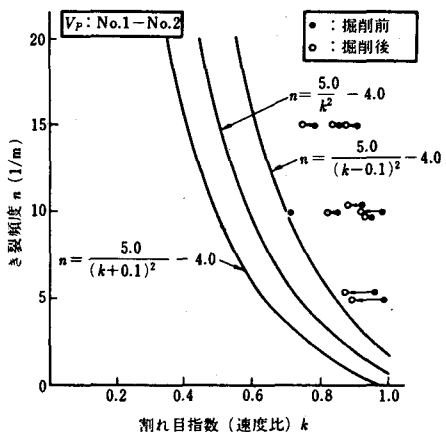


図-2 和泉層でのTBM掘削による割れ目指数の変化 (畠・谷本ら、1980)