

(58) トンネル掘削にともなう地山挙動に関する一考察

日本技研コンサルタント(株) 正会員 五味道義

A Study on the Behaviour of Natural Ground Due to Tunnel Excavation

Michiyoshi Gomi, Nihon Giken Consultant Inc.

Abstract

The convergence, ground displacement, and ground collapse caused by tunnel excavation are all interrelated. These events vary depending upon; rock type, overburden, natural ground strength, jointing conditions, shape and size of cross section, and excavation method.

Among these factors, natural ground strength is used as an index for judging whether convergence and ground displacement are plasticized or not. The classification of measured values by rock type shows that the extent of convergence and ground displacement differs with not only the natural ground strength but also the angle of internal friction. It is considered that natural ground strength can be used as an index for plasticizing in a cohesive-soil, but not in a sandy-soil where the internal friction angle is great.

Tunnel excavation can also cause natural ground to loosen and collapse. Although collapses are frequent, those reported are generally only large-scale types occurring in shear fracture zones.

Observation of the cutting face, investigation by advanced boring and various monitoring methods are used to help predict these collapses.

As yet, these forecasts rely only on empirical methods. The classification of measured values, however, does show that types of collapses do differ with rock types.

1. まえがき

トンネル掘削にともなう地山の内空変位、地中変位及び崩落等の挙動は、相互に関連している。これらの地山挙動は、岩種、土被り、地山強度と節理状態、掘削断面形状と大きさ及び掘削工法などにより相違する。このうち、地山の内空変位と地中変位の大きさが塑性領域を発生させるかどうかについては、地山強度比が1つの指標となってきたが、今田教授¹⁾は地山の内部摩擦角にも着目することを指摘している。そこで、これまでの計測データを地山強度比と内空変位及び地中変位との関係について岩種ごとに整理を行なった。また、地山の崩落は、トンネルを掘削することにより地山がゆるみ、その結果として発生する。この地山の崩落に関する報告は主に断層破砕帯等での大規模のもので、小規模のものはかなり発生しているものと考えられるが発表されているものは少ない。これらの現象を事前に察知する方法は、切羽前方探査、切羽観察及び種々の計測があるが、経験と感にたよっているのが現状である。そこで、これま

での崩落の形態について事例をあげ、その考察を行った。

2. 内空変位と地中変位の挙動

トンネルを掘削すると地山応力再配分にもない周辺地山がゆるみトンネル内空側に変位が表われる。このゆるみや変位は地山の岩種、土被り、地山の強度等により相違する。このうち、トンネル掘削にともなう内空変位と地中変位の大きさが塑性領域が生じるかどうかを検討する1つの指標となっているものとして地山強度比 ($\alpha = q_u / \gamma h$) がある。ここで、 q_u は岩石の一軸圧縮強度、 γ は単位体積重量、 h は土被りを示す。しかし、岩種によっては地山強度比だけでは説明がつかない地山挙動が発生している。これは、岩石の一軸圧縮強度だけでなく内部

摩擦角及び粘着力によって地山の挙動が相違すると考えられる。そこで、比較的内部摩擦角と粘着力が卓越している岩種として、砂岩、花崗岩、頁岩及び土丹について、最大内空変位と地山強度比の関係を両対数表で図-1に、地中変位と地山強度比の関係を片対数表で図-2に示すように整理した。図-1, 2に示すように、内空変位及び地中変位と地山強度比の関係は、内部摩擦角が大きい砂岩、花崗岩は地山強度比の変化にともなって内空変位、地中変位とも大きな変化は見られないが、粘性地山である頁岩と土丹は地山強度比が小さくなるにしたがって内空変位と地中変位とも除々に大きくなる傾向を示している。これは、粘着力が卓越している地山においては、トンネルを掘削することにより地山の応力再配分にもなってトンネル周辺地山が塑性化し易く、内部摩擦角が大きい地山では塑性化しないで、地山の応力再配分が行なわれるものと考えられる。このようなことを考えると、施工管理に当っては、トンネルの内空変位計測の初期の段階において、内空変位と時間又は切羽距離との関係から、その地山が脆性破壊か延性破壊するかを見きわめておく必要がある。

普通、図-3に示すように脆性破壊と考えられる地山は切羽距離で1～1.5 D以内に内空変位が収束しており、切羽距離で1.5 D程度以上になると延性破壊が

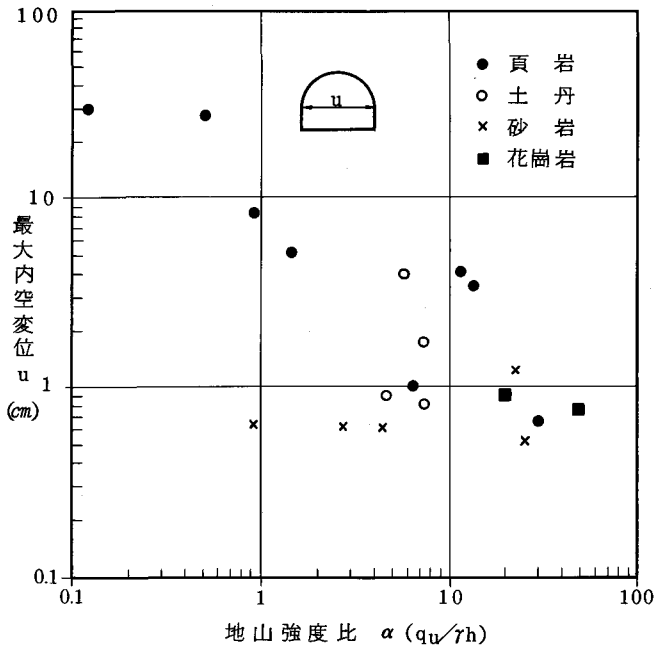


図-1 両対数で表わした最大内空変位と地山強度比の関係

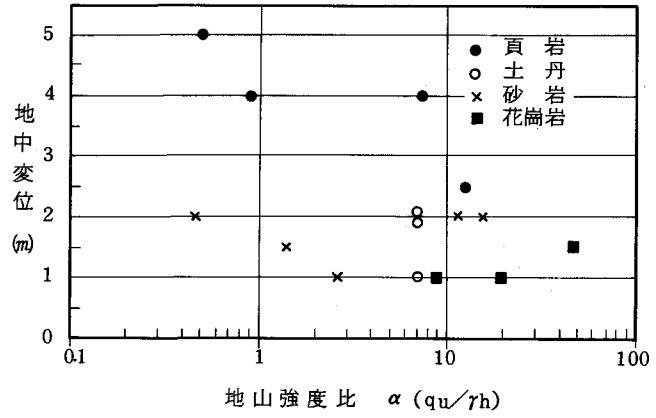


図-2 片対数で表わした地中変位と地山強度比の関係

発生しているものと考えられる。

脆性破壊する地山は、普通、節理があると微小な変位で地山が部分的に急激に落下することがあるが、変位にもなって大きな地山の崩壊は発生することはないと考えて良いと思われる。また、延性破壊する地山は切羽の進行又は時間の経過にもなって大きな地山の崩落は発生することはないと考えて良いと思われる。また、延性破壊する地山は切羽の進行又は時間の経過にもなって変位が増大するが、この変位の大きさ、収束時期を予測して施工管理に反映させていくことが重要になる。場合によっては、変位の増大にもなって支保の耐力が不足すると地山の崩落に継ながることがある。また、延性地山においては、内空変位が切羽距離1.5D以下であれば地山が塑性化がまだ始まっていないと考えられる。

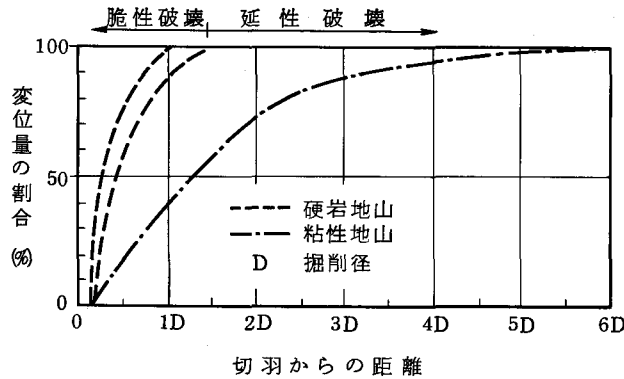


図-3 変位量の割合と切羽からの距離の関係

3. 地山の崩落

トンネルを掘削すると周辺地山がゆるみ湧水、地山の自重等種々の要因により地山が崩落する場合がある。これらの因果関係は、最近種々の計測の発達にもない除々に解明され始めてきているが、今後に残されている課題も多い。崩落の要因は地山状態と湧水によるものに大別できる。特に崩落性の地山は、未固結堆積層、風化岩、断層破砕帯、膨張性地山、節理に粘土をはさんでいる岩石等である。また、崩落を引き起こす主な要因は、湧水によるもので大崩落に継ながるものが最っとも多い。また、地山の固結度の小さい地山では発破と同時に切羽が崩壊することが考えられる。また、トンネルの掘進にともない周辺地山がゆるみ地圧により支保の耐力が不足し部分的な崩落が発生することがある。小規模なものとしては、硬岩地山における浮き石が自重で落下するもの、軟岩地山の場合には岩石の風化によって剥離することがある。これら、地山の崩落は種々の要因によるが

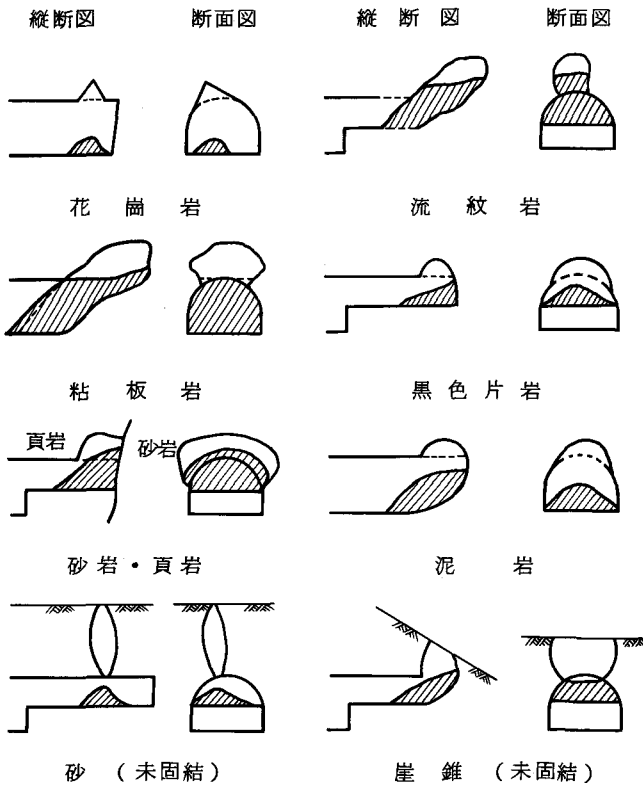


図-4 地山の崩落形態例
(□ 空洞, ▨ 崩落ブリ)

1つ1つ定量化を図っていく必要がある。
う。

次に岩種ごとの地山崩落事例を図-4に示す。これらの崩落の特徴としては節理性地山が多く、切羽先方で発生するものが多い。

花崗岩は、節理間隔が大きいので比較的クサビ状に崩落することが多いが、風化し易いので坑口等においては未固結となっている場合がある。

泥岩と粘板岩は円弧すべり状態に、砂岩と頁岩の互層の地山ではそれぞれの岩石の境界付近で崩落し易い。また、砂で

は地下水が低下して地山が乾燥状態になると不安定となり、小さな隙間があると流出し天端に大きな空隙を作成する。崖錐の場合も粘性土をかんでいる場合が多く、地山自体の固結度が小さいために切羽がすべり崩落が発生する。黑色片岩の場合には、節理の方向によって落下の仕方が相違し天端の45度範囲付近で放物線状に落下する傾向にある。掘削すると同時に天端・切羽が崩落する地山は、節理の発達したチャート、粘板岩、片岩、蛇紋岩等に多く発生し、スプリングラインにおける内空変位が30~40mm程度以上になると崩落の発生が多くなり、吹付けコンクリートにもクラックが生じてくる。また、図-5に片対数で表わした地中変位と最大内空変位の関係を示す。図に示すように、頁岩、土丹、砂岩は、最大内空変位の増加にともなって地中変位も増加するが、節理の多い粘板岩においては、内空変位が小さい時点で地中変位が大きくなっている。したがって、節理の多い地山においては小さな内空変位で地山が崩落することがうかがわれる。全体的に見て硬岩、中硬岩の内部摩擦角が大きい地山では地山の応力再配分がトンネル掘削にともなって早期に終了し、地山に節理が多いと崩落する可能性が大きい、また、内空変位量を測定する以前に収束状態になってしまうものがほとんどである。一方、粘性地山は、応力再配分が徐々に進行するため測定開始後地山が安定するまでに相当な時間を要するため、支保工耐力が不足すると崩落したり、変形が大きくなって地山の繰返しを余儀なくされる場合がある。

4. あとがき

トンネル掘削にともなう地山挙動を早期に把握することは、いかに設計・施工に反映させるかにある。普通、切羽観察により定性的に地山状況を把握し、計測にもとずいて定量的に地山の特性や安定性を判断して安全施工や支保の増減につなげているのが現状である。なお、最近の調査・計測の検討によると、粘性地山の膨張の大きさは、従来、岩石のモンモリロナイトの含有率、粒度分布、浸水崩壊度などが目安となっていたが、切羽観察で地山の節理が多いか少ないかが1つの指標と考えられ始めた。また、図-5に示したように、硬岩、中硬岩の地山においても地山の節理の多少により地中変位の大きさが相違することがうかがわれる。したがって、地山が崩落するかどうかについても、節理状況を観察して判定することが望ましいと考えられる。地山の節理状況を試験的にビデオ又は写真によって定量的に把握することを試みている段階にあり、まだ、目視観察にたよっているのが現状である。このように地山の節理状況がトンネルの安定に及ぼす影響が大きいことが判ってきた現状では、迅速に定量的に判断する道具の開発が必要に

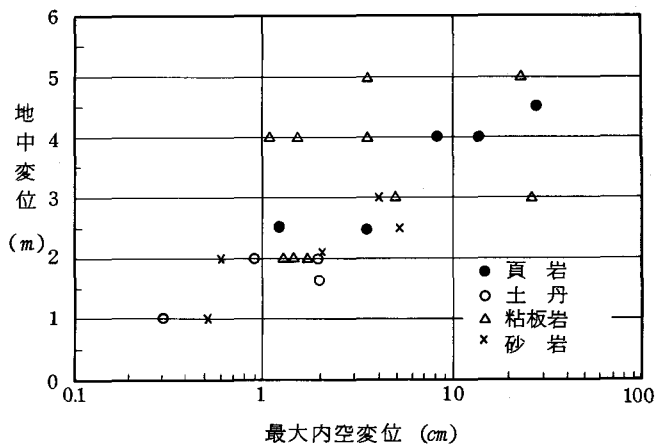


図-5 片対数で表わした地中変位と最大内空変位の関係

なってきたように思われる。今後、切羽観察は、その他の計測と同様に重要な役割をはたすものと考えられる。また、計測の初期段階において、地山が脆性破壊か、延性破壊するかを早期に把握して設計・施工に反映させ安全な施工へ結びつけていければ幸いであると考えている。

参考文献

- 1) 今田徹；岩盤力学入門，トンネルと地下，1986.1，PP.63～68
- 2) 羽根田汎美，他；新第三紀層泥岩地帯のトンネル施工にともなう計測管理と内空変位予測，第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，1987.12.1，PP.337～342