

山岳トンネルにおける裏込め注入工の作用効果と変状対策に関する考え方の整理

CONSIDERATION ABOUT THE MAINTENANCE-REPAIRS AND THE EFFECT OF A BACK-FILL GROUTING FOR A MOUNTAIN TUNNEL

松田貞則*

Sadanori MATSUDA

Maintenance and efficient use of a mountain tunnel are on going problem to be solved at the maintenance section, and these problems have been improved by the intensive technical evaluation and technical proposal, and application and spread of new technology, until now. However, the situation requires that this should be immediately examined as a problem of increase in maintenance work due to aging, or a maintenance cost, or shortage of the inspector, etc.

In this report, the actual damage condition of a tunnel and the deformation of the ground were analyzed based on existing research reports, and the authors stated opinion of the maintenance-repair that satisfies the demand of related administrations. Furthermore, ambiguous mechanism of back-fill grouting was examined in this report.

Key Words : mountain tunnel , maintenance-repairs , back-fill grouting

1. はじめに

在来工法で掘削された大半のトンネルは、矢板や支保工の腐蝕などとも相まってトンネル覆工の背面に空洞が生じ、地圧の不規則な偏りからクラック等の変状がしばしば発生する。また土被りが比較的大きく、過圧密性の強い軟岩地山などでは、長期間にわたり後荷を受けることもある。そうした問題に対し、実績対応としては裏込め注入工やロックボルト工が常用されているものの、地山の緩みもつ力学的特性についての議論が少ないせいか、その作用効果や変状対策の基本原則について十分に整理されているとは言いがたい。

そこで本稿では、時間経過とともに地山が緩むことで生じる地圧現象と背面空洞の有害性について地盤力学的に考察し、そのうえで、裏込め注入工やロックボルト工といった変状対策工の作用効果に関する考え方の一つをここに解説する。

2. 地山の緩みと変状の発生機構

(1) 地山緩み挙動と変状の関係

在来工法で掘削されたトンネルでは、支保工の設置前に地山はかなり変形し、さらに地山と支保工の間に空隙が残るため、トンネル覆工が施された後も地山は比較的自由な変形を許容されていることが多い。落とし戸の実験は、そうした現実を表現する方法として、これまでに度々用いられている。

図-1に示す既往研究^{1),2)}によると、落とし戸の降下に伴う応力再配分は、粒子接触角(摩擦抵抗角)に密接に関係することが確認されている。図-1のルーフアーチとは、粒子間の相対変位や落とし戸から受ける支保反力の助けによって、自らの荷重を支えるのみの比較的弱いアーチで、現場ではほとんど自立性を失った領域と解釈できる。また、落とし戸をはずしてこのルーフアーチを崩落させると、グラウンドアーチの支点になる底壁には静止状態の2~10倍の鉛直圧が働くとしている。さらには、グラウンドアーチの支点の張出しにより、側方には静止状態の2~5倍の壁面横圧力が作用し、そのとき、比較的大きなネガティブフリクション(浮上りを抑制する方向の負の摩擦力)が観察されて

* 中央研究所 開発研究部

いる。図 - 1 (b) に示すメカニズムで説明可能な実際の変状事例の一つには、図 - 2 がある。また図 - 3 は、トンネル周辺における地山緩み挙動を模式的に示したもので、概説すると次のようになる。

トンネル掘削後、一旦は落ち着いた状態であっても、時間経過による地山材料の強度劣化から、緩みの進展や天端背面における不安定地山が崩落することで、地山内の応力は再び乱される。その後、トンネル周辺の地山内には、新たな平衡状態を取り戻そうとする動き（応力再配分）が起きる。その際に生じる負荷応力が、グラウンドアーチの支点になる側壁裏の地山に集中し、地山が降伏すると、せん断変形とともに正のダイレイタンスが生じ、側方からの押出しが強まることもある（図 - 3 (b)）。換言すれば、ネガティブフリクションを伴いながら、グラウンドアーチの支

点が張出される状態である。

トンネル覆工がもつ構造上の強度が大幅に不足している場合には、トンネル内空断面は次第に縮小し、側壁には大きな開口クラックやズレといった重大な変状が生じ、次第に崩壊の様相を呈してくる。また、トンネル覆工に変状が生じても初期の軽微な段階であれば、耐荷力を弱めながらも支保反力が発揮されるため、側方からの押出しはある程度までに抑制される。しかし、一方では、背面空洞の存在などとも相まってトンネル上方からの沈下量が相対的に増え、トンネル周辺の緩みが長い時間をかけてゆっくりと締め固められて、トンネル覆工に作用する地圧が徐々に蓄積される。このために、トンネル覆工や側壁裏の地山の破壊が促進される。（図 - 3 (c)）。

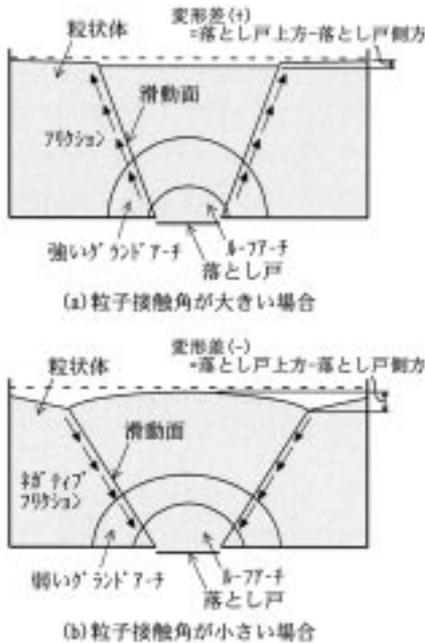


図 - 1 落とし戸の降下に伴う応力再配分⁴⁾⁵⁾

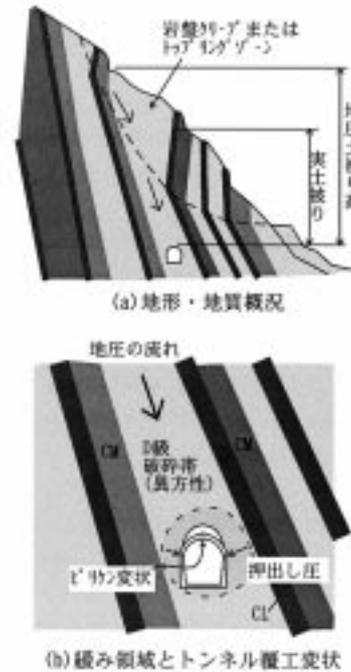


図 - 2 背面空洞のある押し出し性地圧の変状事例

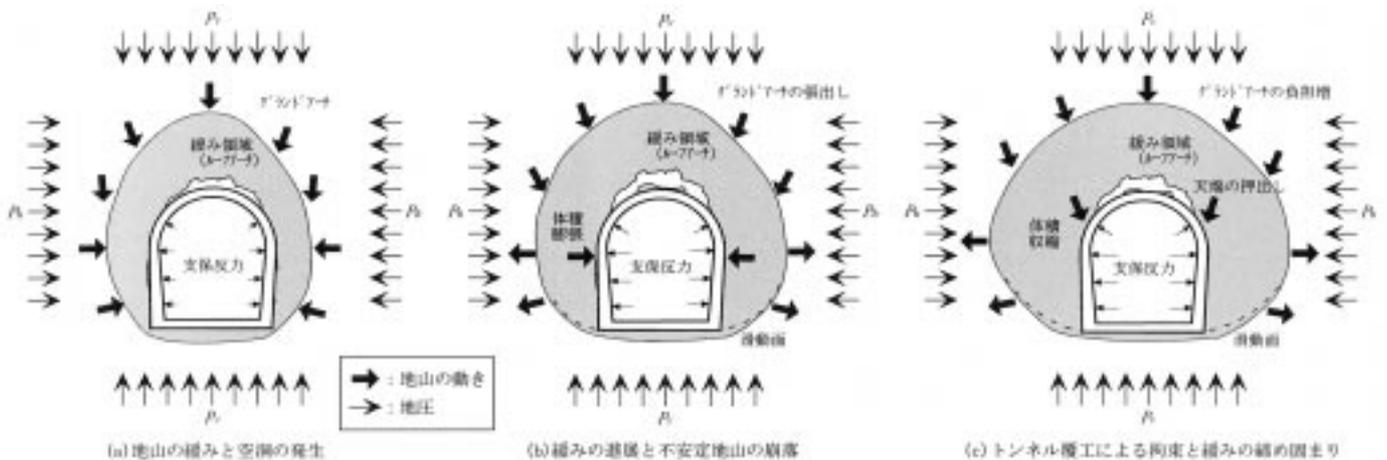


図 - 3 地山緩み挙動に伴う地山の動きと応力再配分

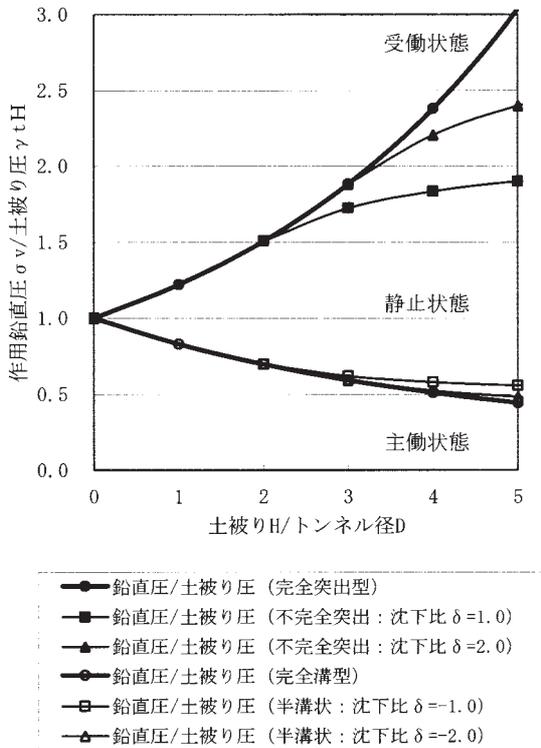


図 - 4 作用鉛直圧と土被りの関係

(2) 地山緩み挙動と地圧の関係

トンネルの動きはすべて相対的なものであるから、地圧の大きさや変形の分布も地山とトンネル覆工の相対的な動きによる。実際の現象は非常に複雑なものであるが、地山緩み挙動と地圧の関係は、きわめて簡略的にみれば、Marstonらの埋設管理論³⁾をもとに評価し得るものと考えられる。この理論をもとに、トンネルの上部と側部の沈下比に応じた作用鉛直圧を算定し、トンネル径との土被り比に基づいて整理したものが、図 - 4である。

つまり、図 - 4は、トンネル上方からの沈下量よりも側方からの押し出し量の方が大きくなるに従い、図 - 1 (b) に示すような相対的な変形差がトンネル周辺で生じると、Marstonらの定義する突出型（受働状態）に移行して地圧の増大を招くことが理解できる。

(3) 緩みがつ力学的特性

本稿では、経年的な地山緩み挙動に伴うトンネル周辺での相対的な変形差に着目し、Marstonらの埋設管理論³⁾をもとにトンネル覆工に働く地圧を考察した。より詳細な評価を行うには、次に述べる緩みがつ力学的特性を意識する必要がある。

変形の根本原理は、トンネル覆工と周辺地山の応力不均衡状態で、その発端はトンネル掘削にある。トンネルは掘削する際に初期の地圧状態を崩し、地山内応力を乱すため、トンネル周辺の地山には緩みが生じる。つまり、地山が緩

むという現象は、乱された地山内応力のもとで新たな平衡状態を取り戻そうとする応力再配分と、そうした過程で生じる地山内の局所的な破壊が、せん断帯等の形成を伴いながら次第に伝播する時間依存性の現象と捉えられる。したがって、緩みがつ力学的特性は、ひずみ軟化現象、ひずみ速度効果やクリープなどの時間依存性現象といった地山材料固有の性質に密接に関係する。さらには、せん断変形とともに正のダイレイタンスを引き起こした地山の緩みが、トンネル覆工からの支保反力と、応力再配分に伴う負荷応力によって、再び締め固まる現象も緩みの特徴とされている^{4),5)}。これらの現象を評価するには、数値解析法などを利用した研究が必要である。

3. 地山緩み挙動に対する裏込め注入工の作用効果

(1) 地山緩み挙動に対する抑制効果

一般に、裏込め注入工の作用効果は、トンネルアーチ背面への地山反力効果と表現されているが、地山緩み挙動について地盤力学的に考察してみると、変状対策における裏込め注入工の作用効果は、次のように定義できる。

裏込め注入工は、トンネル覆工背面の空洞にエアモルタル等を充填し、地山との密着性を高める目的で実施されるため、背面空洞が完全に閉塞されてしまえば、既述した“緩みの締め固まり”による緩みの二次的な挙動（緩みの圧密）は抑制される。すなわち、裏込め注入工は、そうした地山緩み挙動を抑制することで、側壁に地圧を蓄積させないといった地山緩み挙動の観点から、その力学的な作用効果を定義することが、基本原理からみて適当である。

(2) 緩み領域内における初期地圧の緩和と地下水問題

背面空洞が存在すると、地山の安定化を図るうえで所要の支保反力が一様に付加できないために、地山を緩ませる原因になる。地下水が存在する場合には、緩みによって生じた地山内のせん断帯が水みちになり、トンネル内に重力水を引き込みやすくする。漏水はトンネル覆工の経年劣化を促進させ、コンクリートの溶解流出をはじめ、酸性水であればコンクリートの中性化、寒冷地であれば凍害の原因になる。

また、一様な地下水の存在がなくとも、多孔質で含水比の高い岩盤であれば、グランドアーチ以奥の弾性域とトンネル外周部の塑性域で圧力勾配（動水勾配）が生じ、空隙中の弱結合水が自由化し、トンネル内に向う水の移動が起こり得る。これは、岩石圧縮試験の載荷の際に、汗をかいたようなしみ出しが岩石試料の側面で起こるのと同じ現象であり、膨張性の地山では、地山緩み挙動によって地山内に新たな活性面が露出し、その活性面が吸水膨張すること

で軟弱化することもある。

すなわち、裏込め注入工によって背面空洞を閉塞することは、緩みによる二次的な挙動を抑制するだけでなく、地下水の移動や岩盤空隙中の弱結合水の自由化をある程度までに抑え、地山やトンネル覆工の劣化軽減にも間接的な効果を発揮するものと考えられる。

4. 変状対策の考え方

(1) 変状対策の基本的な考え方

トンネルの地圧は、土被りの小さい良好な地山に作用するものから、土被りが大きく、かつ膨張性を有するものまで、非常に広範囲で、我々が人為的に作るトンネル覆工の強度差は、そうした地圧の差に比べると極めて小さい。換言すれば、トンネル覆工には自己の持つ強度で地圧を負担する役割以上に、地山の本来有する支保能力を発揮させ得る働きがある。そうしたトンネルの基本原理は、変状トンネルを手当てする場合でも同じである。特に、前述までの地山緩み挙動を十分に意識することが重要である。

そこで最後に、変状対策の合理化に向けた裏込め注入工を基本とする変状対策の考え方と、さらには、ロックボルト工を適用する際の問題点と幾つかの解決策を整理する。

(2) 裏込め注入工を基本とした変状対策の考え方

裏込め注入工は、経験と実績、既述した作用効果や基本原理からも、なるべく早期に実施することが基本になる。特に、水路のような小断面トンネルでは、通常、道路や鉄道に比べ空間確保に対する制約が緩いため、膨張性地山や地すべり、極度の巻厚薄や材質不良といった重大な欠陥を除けば、多くの場合、背面空洞を閉塞することで変状の進行は沈静化する。

しかし、変状原因の特定、変状規模とその進行性に対する評価、対策工の選定方法については、かなり複雑な要素が絡み合うため、なかなか一義的に取り扱うことが難しく、裏込め注入工だけでは変状対策として不完全な場合もある。変状原因を特定し難い現場では、背面空洞の持つ有害性から、当面の処置として裏込め注入工を実施し、その重要度に応じて、有望な調査・計測技術、新材料・新工法、さらには、時間軸を考慮した数値解析法を積極的に導入するなど、技術開発も推進させながら、変状の進行性を継続的に調査する。対処療法的ではあるが、その結果をもとに追加の対策工を選定するという作業を積み重ね、技術レベルを向上させていくことが肝要である。このように、トンネルは造るのも大変であるが、変状トンネルを合理的に保守していくことは、長期間にも及ぶ手間のかかる作業であることを改めて認識する必要がある。

(3) 変状対策におけるロックボルト工の要求性能

1) 設計の現状

トンネル内空断面の変形が月単位で確認できるような変状トンネルを除けば、トンネル周辺の地山内における応力再配分はかなり進行し、グランドアーチはある程度までに形成された状態にあると推察できる。これは、地山が緩む前の初期地圧状態に近い掘削直後にロックボルトを挿入し、グランドアーチの形成を補助するNATMによる新設トンネルとは、同じロックボルトでも事情が異なる。しかしながら、変状対策としてのロックボルト工の設計法には、そうした点まで十分に考慮されておらず、設計の考え方が統一的な解釈のもとで説明できていない。

以下に、既述の地山緩み挙動を意識したロックボルト工による変状対策の一例を示すとともに、その際の問題点と幾つかの解決策について整理する。

2) 対策実施方法の一例

図 - 3 をもとに既述した地山緩み挙動をロックボルトで補強する場合、まずは図 - 5 に示すように、背面空洞は裏込め注入工を行うことで可能な限り充填し、天端上方の緩み領域（ルーフアーチ）を押させる。また、ロックボルトは側壁裏の滑動面に対してのみ挿入することを基本とする。天端上方に向けたロックボルト施工は、施工における能率や品質の低下を招き、天端上方におけるせっかくのアーチ作用を崩しかねない危険性があるため、その要否については十分に慎重な判断が求められる。つまり、ここに示す対策実施方法の一例は、図 - 1 で既述した“ルーフアーチ”と“グランドアーチ”といった地山の支保能力に大きく関わる2つのアーチ作用を効果的に保持しようとする

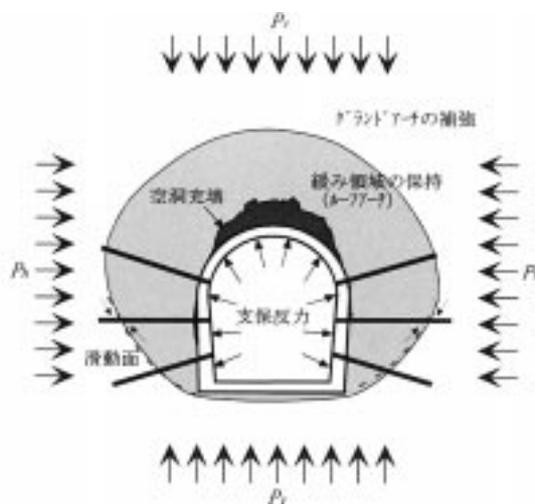


図 - 5 ロックボルトによる補強対策例

変状対策の基本原理に基づくものである。

この場合において、ロックボルトの作用効果を最大限発揮させるためには、ロックボルトを滑動面と交差させる必要があるが、現場での調査から不明瞭な滑動面を特定することはかなり難しい作業である。また、不用意にロックボルト長を長くすることは、ロックボルトの定着性などの施工品質の面からも問題が生じやすく、地山を傷める結果にもなりかねない。さらに、小断面のように作業空間の狭い箇所では、ロックボルト施工の技術的な面からも検討が必要になる。

そうした問題の解決策として、一つには、模型実験や数値解析法を利用することで、滑動面の位置（緩み領域の大きさ）とロックボルト長の関係から補強効果を評価し、設計の基本的な考え方を明確にしていきながら、特に、事業量の多い道路や鉄道などでは、試験施工による実地検証が必要である。また将来的には、地山緩み挙動に見合った標準的な配置設計法（標準パターンの作成）を整備していくことも必要になるであろう。さらに、現場でより柔軟な設計調整を可能にするには、ボアホールを利用して簡易でかつ局所的な緩み調査を可能にする真空透気試験などの調査技術や、ロックボルトの継ぎ足し作業を不要するケーブルボルトなどの工法開発が今後期待される。

5. あとがき

トンネルの保守に関わる諸問題は、ここ最近、あらゆる方面で盛んに論じられているが、そのなかでもトンネルの地圧問題は、未だ非常に分からないことが多く、本稿においても地山緩み挙動と裏込め注入工やロックボルト工といった変状対策工の作用効果に関する考え方を整理するに留めている。

今後も多くの変状トンネルと向き合い、それを実証するための現場計測や数値解析法などによる検証を試みながら、性能に着目した維持管理技術の高度化に取り組んでいく予定である。

参考文献

- 1) 木山英郎、藤村尚：カンドル離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力解析、土木学会論文報告集、第333号、pp.137-146、1983
- 2) 木山英郎、藤村尚、二木隆：粒状体地盤の離散剛要素解析と模型実験 - 地下浅所のトンネルによる地盤変形 - 、材料、第35巻第392号、pp.466-471、1986
- 3) 日本道路公団：設計要領第二集、橋梁・擁壁・カルバート、pp.8-56~8-60、1997.11.
- 4) 平山復二郎：山岳トンネル、日本工人倶楽部出版部、日本文化協会、1929
- 5) 日本トンネル技術協会：トンネル掘削によるゆるみ領域の調査報告書、pp.2-4、1982.3.