

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

山岳トンネルを補強する

トンネルは地山に囲まれたアーチ構造をしているため、変形に強い構造であるといえますが、変形量が多いと、建築限界外余裕がなくなったり、覆工が破壊してコンクリートの剥落につながったり、軌道変位（高低変位）により列車の走行に影響したりする恐れがあり、トンネルに対し適切な補強をしなければならないこともあります。ここでは、トンネルの変形現象や、変形に対抗する補強についてご紹介します。



野城 一栄
Kazuhide Yashiro
構造物技術研究部
トンネル研究室
主任研究員
[専門分野]山岳トンネル



嶋本 敬介
Keisuke Shimamoto
構造物技術研究部
トンネル研究室
副主任研究員
[専門分野]山岳トンネル

はじめに

山岳トンネルは固い地山中に建設されることが多く、通常は安定した環境にあるといえますが、やむを得ない理由により軟らかく強度が小さい地山に建設されることがあります。作用する力に比べて地山の強度が不足している場合はトンネルが変形してしまう場合もあります。図1に、変形したトンネルの例を示します。図1(a)は塑性圧(トンネル周囲の地山が破壊することで発生する地圧)によりトンネルが変形し、天端部で覆工が破壊(曲げ圧縮破壊)して剥落を生じた事例、図1(b)は同じく塑性圧により路盤部の地山が破壊したことによる路盤隆起の模式図です。

山岳トンネルの変形の原因

トンネルは地中に地山を掘削して建設される構造物なので、トンネル自体の他、周囲の地山の性状(特に、強さやかたさ)に大きな影響を受けるという特徴をもっています。トンネルを建設する前は地山内の応力はほぼ均一ですが(図2(a))、地中にトンネルを建設すると、トンネルを掘った部分の応力はトンネル周囲の地山が受け持たなければならなくなります(図2(b))。このとき、大きくなった応力に対して地山の強度が十分にあれば問題は起きませんが、地山の強度が小さい場合は、増加した応力により地山が破壊してしまい、トンネルに対して周囲から「押

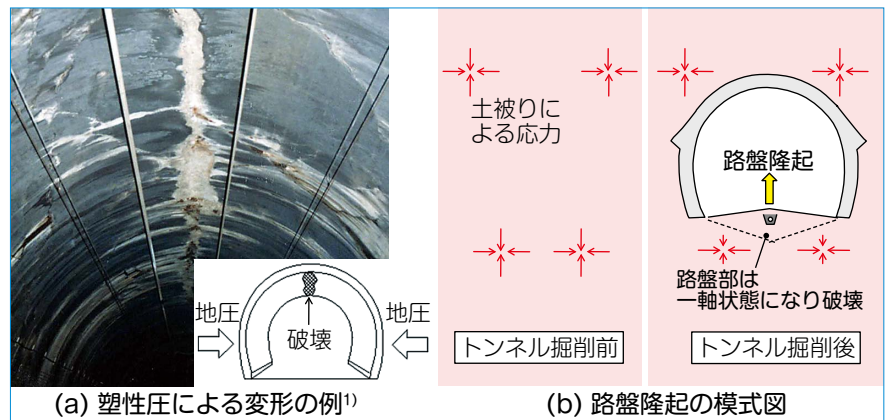


図1 トンネルの変形の例

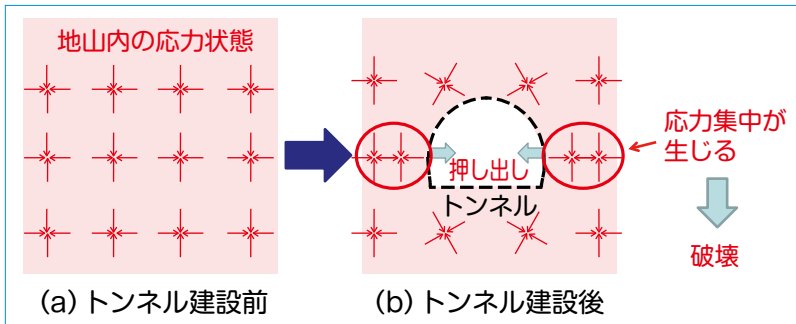


図2 トンネルの建設による地中応力の変化(模式図)

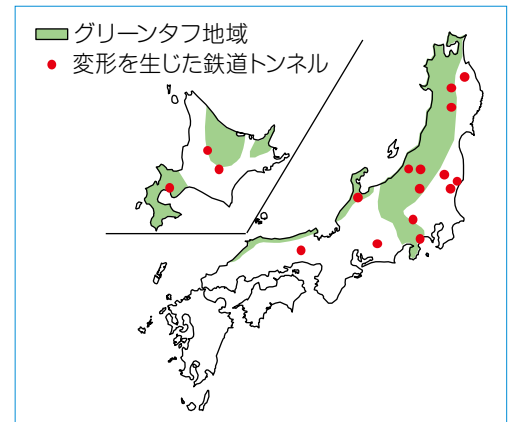


図3 塑性圧により変形を生じた鉄道トンネルの分布

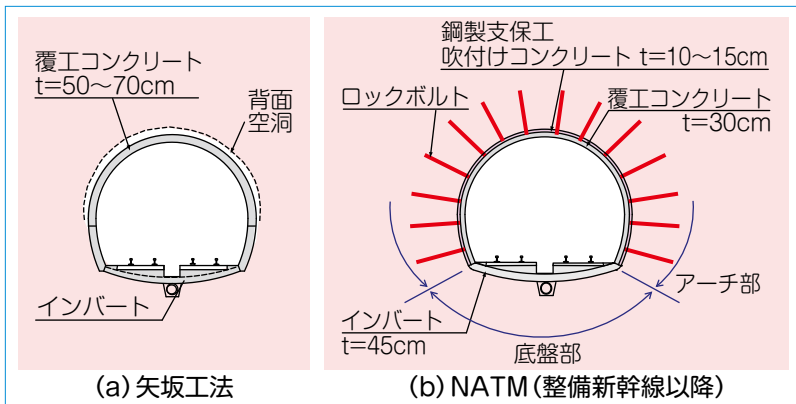


図4 建設工法によるトンネル構造の違い

し出す」力が働きます。トンネルには、覆工(ふっこう)と呼ばれるレンガやコンクリートでできた壁があり、地山からの力に抵抗しますが、「押し出す」力が大きくトンネルが負けてしまうと変形をきたすことになります。このようなトンネルの変形は「塑性圧による変形」と呼ばれていて、比較的好くみられる変状現象です。図3に、「塑性圧による変形」を生じた鉄道トンネルの全国分布を示します。とくに、日本海側の「グリーンタフ」と呼ばれる新第三紀につくられた地山は強度が小さい場合が多く、塑性圧による変形が起きやすい条件にあるといえます。

トンネルの建設法と変形に関連

昭和50年代前半ごろまでは、山岳トンネルは「矢板工法」により建設されていました。矢板工法では、掘削後、地山を矢板と鋼製支保工で支持して、その内側に覆工コンクリートを打設してトンネルを構築しますが、当時の

技術的な問題から、覆工と矢板の間にも空洞が残ったり、覆工の厚さが不足することが多くありました(図4(a))。こうなると、地山の「押し出す」力に対するトンネル側の抵抗力が大きく低下することが分かっています。

一方、昭和50年代後半になると、NATM(図4(b)) (☞参照) という新工法が導入されるようになりました。NATMは、掘削から時間を空けることなく鋼製支保工、吹付けコンクリート、ロックボルトを施工して地山を支持するため、地山を緩めることが少なく、また、併せて覆工コンクリートの施工法も改善され、覆工背面に空隙が

残ることはほとんどなくなり、図1(a)に示した塑性圧による変形は矢板工法に比べて大幅に少なくなりました。

この一方で、近年、NATMトンネルにおいて目立つようになってきた変形として、図1(b)に示した路盤隆起の問題があります。NATMでもトンネルの底盤部は、アーチ部とは異なり、吹付けコンクリート、鋼製支保工、ロックボルトが施工されず、アーチ部と比べ曲線半径が大きい無筋コンクリートによるインバートのみです。矢板工法時代と比べてトンネルの底盤部の構造はほとんど変化していないといえ、路盤隆起の変形事例が目立つようになった原因の1つとも考えられています。

変形により何が問題となるか

トンネルが変形するとまず覆工にひび割れが入ることになります。山岳トンネルの覆工は、地山に囲まれたアーチ構造であるため、小さなひび割れであれば実際ほとんど問題はありませ

☞ NATM (ナトム)

New Austrian Tunneling Method の略。地山掘削後に、吹付けコンクリート、ロックボルトを主体とする支保を早期に施工することにより、地山の緩みを少なくしてトンネルを建設する工法です。地山の支保機能を積極的に利用することに特色があります。日本では、昭和51年に初めて上越新幹線中山トンネルにおいて試験施工されました。当トンネルは、膨張性地山により困難を極めていましたが、本工法の採用により好結果が得られたことから注目を浴び、また、安全性、経済性にも優れていることが確認されたため、その後急速に普及しました。

が、変形量が大きくなると、ひび割れが太くなり、漏水が発生することがあります。変形量がさらに大きくなると、覆工が建築限界に抵触したり、覆工が破壊してコンクリートの剥落につながったりする場合があります。また、トンネルの変形が路盤隆起の形で現れた場合、軌道変位（高低変位）により列車の走行に影響したりする恐れがあります。

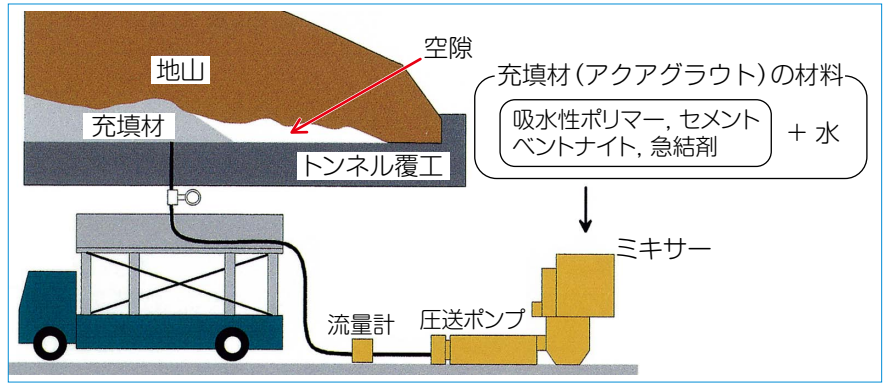


図5 裏込注入工（アクアグラウト工法の例）

トンネルの変形に対する対策

トンネルが変形してしまった場合、トンネルに対して何らかの補強工事を行う必要が出てきます。変形したトンネルを補強するための代表的な対策工として、①裏込注入工、②ロックボルト補強工、③内巻工があります。

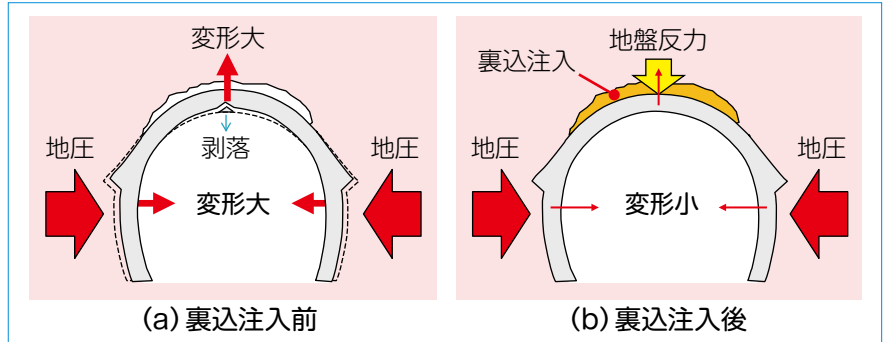


図6 裏込注入工の効果

裏込注入工

裏込注入工は、覆工の裏側に背面空洞がある場合に採用される工法です。背面空洞にモルタルなどの充填材を注入します(図5)。背面空洞があると、側方から地圧を受けた場合にトンネルが変形しやすくなりますが、裏込注入を行うとトンネルの変形に対して地山から反力が得られるようになり、トンネルに剥落などの変状が現れにくくなります(図6)。また、併せてトンネルにゆるみ荷重がかかりにくくなるという利点も得られます。鉄道総研では、充填時に材料が分離しにくく、空洞に隙間なく充填できる注入工法として、清水建設・日本触媒・ラサテックと共同で、「アクアグラウト工法」を開発しており、多くの事業者にご利用頂いています。

ロックボルト補強工

ロックボルト補強工(図7)は、棒状の鋼材をトンネル内側から地山側に向けて打設する工法です。地山がトンネル側に向かって変形しようとする

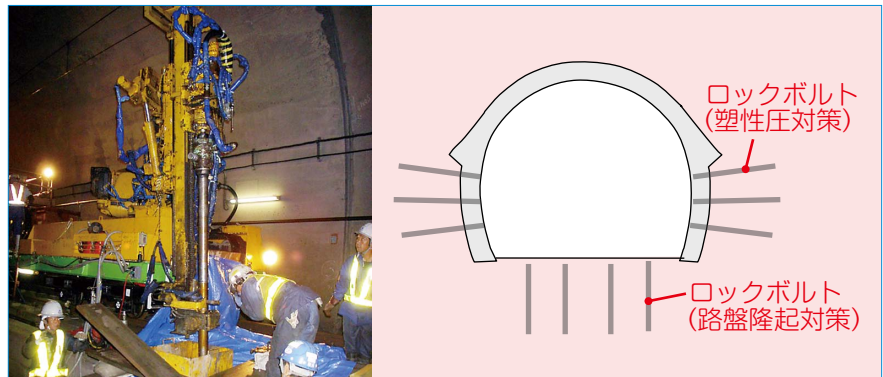


図7 ロックボルト補強工

ルトに引張力が作用し、トンネル覆工の変形を抑制するように働きます。背面空洞がある場合は裏込注入工を優先的に行いますが、裏込注入工は変形自体を直接抑制する工法ではないため、変形が生じているトンネルでは、裏込注入工と同時にロックボルトも施工される場合もあります。また、路盤隆起に対しては裏込注入工は効果がないため、ロックボルトが第1の対策工として選択されます。なお、路盤隆起対策としては根本的にはインバートの新設や改築が有効ですが、そのためには線

路下の掘削が必要となり、施工時間が長くなります。供用中の鉄道トンネルにおいて長期間の作業を実施するには、列車の運休やダイヤ変更の手配が必要となるため、社会的影響を考えると現実的に困難であることが多く、インバートによる対策と比較して短い作業時間で施工可能なロックボルトによる対策が多く行われています。図8にロックボルトの効果を数値解析により評価した事例を示しますが、対策工の施工により路盤隆起量を抑制できていることがわかります。

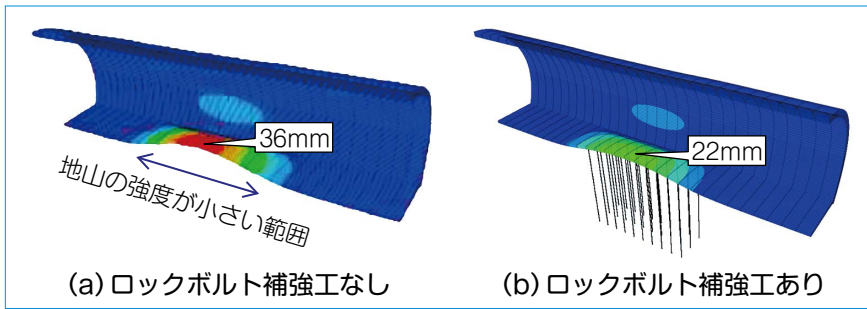


図8 ロックボルト補強工の効果の解析例(変形量)

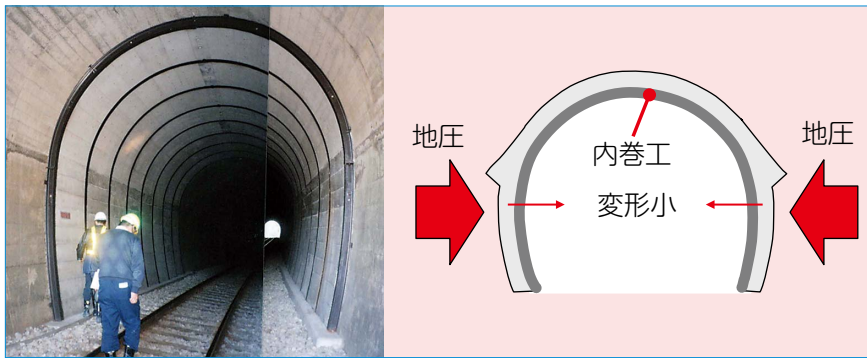
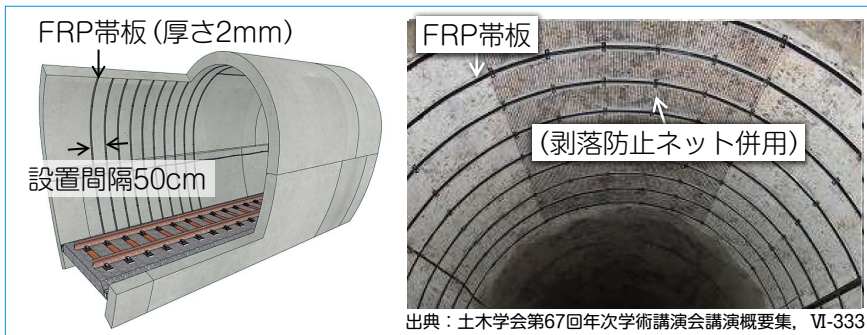


図9 内巻工



出典：土木学会第67回年次学術講演会講演概要集，VI-333

図10 剥落対策工(FRP帯板接着工の例)²⁾

内巻工

内巻工(図9)は、覆工の内側にコンクリートなどを巻くことによりトンネルを補強する工法です。工法としては、吹付けコンクリートや場所打ちコンクリートを打設する工法と、プレキャスト材料を現地施工する工法とがあります。覆工の厚さを増すことによりトンネルの変形に対抗する力を増加させようというもので、最も直接的なトンネルの補強法として位置づけられます。一方で、トンネルを供用させつつトンネルの内側に内巻工を設置することには施工上の制約が多く、どうしても工費は増加してしまいます。

剥落対策工

変形が問題となるトンネルでは、トンネルの剥落も同時に心配となることが多くあります。これは、トンネルの変形によりひび割れや曲げ圧縮破壊(圧ざ)がすでに起こりうる状態になっていると考えられるため、トンネル内を列車が走行する鉄道トンネルにおいては、走行安全性を確保するために、剥落対策工で対応していくことになります。剥落対策工としては、当て板、ネット、繊維シートなどがよく用いられていますが、鉄道総研では、新しい剥落対策工として、戸田建設・コニシボンドと共同で、「FRP帯板接着工法」

を開発しました²⁾。模式図および施工例を図10に示します。FRP製の帯板をパテ状接着剤により覆工に接着するものです。ここで、FRPの材料としては、導電性のない玄武岩を使用したバサルト繊維を標準としています。本工法は厚さ3mm程度で施工でき、変形により覆工と建築限界との離隔が少なくなったトンネルにも適用が可能です。また、帯板をパテ状接着剤で接着する工法であることから、覆工表面の凹凸に強く、施工性が良好です。ケーブルなどの添架物がある場合でも、10mm程度以上の離隔があれば施工可能です。さらに繊維シート系の剥落対策工と比べ、施工後も、帯板のない範囲で覆工表面の検査が引き続き可能という利点もあります。

おわりに

トンネルの変形現象や、変形に対抗する補強について紹介しました。トンネルは地中構造物であり、その挙動は不明な点が多いのですが、最近では、変形メカニズムや補強工の効果を定量的に評価したうえで設計すること^{3),4)}が求められるようになってきました。鉄道総研では、補強効果の定量化に向けた取り組みを進めていきます。[RRR]

文献

- 1) 小島芳之, 野城一栄, 高橋徹: 丈夫で長持ちするトンネルに, RRR, Vol.55, No.4, pp.28-31, 1998
- 2) 田中徹, 岡野法之, 小島芳之: バサルト繊維補強プレート帯板接着工法の開発と現場適用, 土木学会第67回年次学術講演会, VI-333, 2012
- 3) 野城一栄, 嶋本敬介, 中西祐介, 小島芳之: 山岳トンネルの路盤隆起補強工の効果とその設計手法, 鉄道総研報告, Vol.26, No.4, pp.41-46, 2012
- 4) 嶋本敬介, 野城一栄, 小島芳之: 地山の吸水膨張による山岳トンネルの路盤隆起現象とその対策工, 鉄道総研報告, Vol.28, No.8, pp.29-34, 2014