

# 山岳トンネルの路盤隆起補強工の効果とその設計法

構造物技術研究部 トンネル研究室

室長 小島芳之

## 1. はじめに

供用中の山岳トンネルでは、地圧の作用により路盤部の隆起が年々進行することがある。また、大規模地震時にその挙動が誘発されることもある。路盤隆起が発生すると、高速で列車が走行するトンネルや建築限界余裕量が小さなトンネルでは、列車運行の安全に影響を及ぼすことになる。

一般に路盤隆起対策にはインバートの新設や改築が有効であるが、供用中の施工が困難なため、比較的短い作業時間で施工可能な路盤部へのロックボルトによる補強を行うケースが多い(図1)。しかしながら、路盤ロックボルトは、変状抑制効果や最適な配置・寸法等の仕様が不明であり、過去の事例を参考にして経験的に設計するのが現状である。

そこで、路盤ロックボルトの補強メカニズムの解明と設計法を確立するため、事例調査、模型実験、数値解析を行い、その成果に基づいて設計マニュアルを整理したので、その概要を報告する。

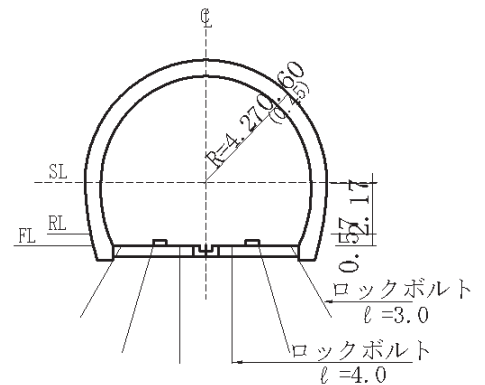


図1 路盤ロックボルトの施工事例<sup>1)</sup>

## 2. 路盤隆起事例の調査

まず、路盤隆起の基礎データやその発生と関連の強いパラメータを明らかにするため、路盤隆起事例の調査を行った(16トンネル、図2)。

図2(a)より、路盤隆起が生じたトンネルはグリーンタフ地域と呼ばれる新第三紀の泥質軟岩が広

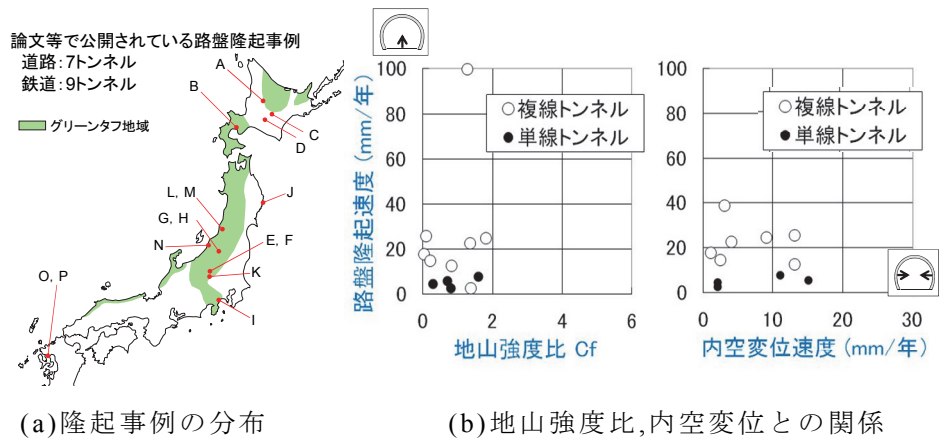


図2 路盤隆起事例の調査結果の例

範に分布する地域に集中することが分かる。また、図2(b)より、路盤隆起が生じたトンネルは地山強度比  $C_f$  ( $C_f=q_u/\gamma H$ ,  $q_u$ : 地山一軸圧縮強度,  $\gamma$ : 地山単位体積重量,  $H$ : 土被り) が2以下の場合で、水平内空断面の縮小も同時に進行することから、塑性圧による変状の現れであることを認識できる<sup>1)</sup>。一方、路盤隆起速度についてみると、年間20~30mmまでの事例が多いものの100mm/年を超える深刻な事例もあることや、単線トンネルよりも複線トンネルの場合の方が隆起速度が大きい傾向にあることも読み取れる。このように、路

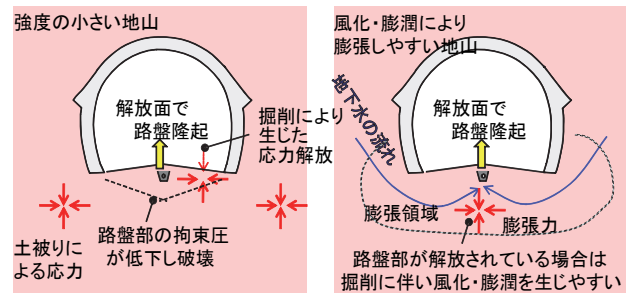
盤隆起は、トンネル構造の長期的な安定性の低下に加えて列車の走行安全に直接影響を及ぼす現象なので、状況に応じて的確な対策が必要である。

### 3. 模型実験による隆起メカニズムと補強工の効果の再現

#### (1) 隆起メカニズムの想定

塑性圧の変状要因は、一般にスクイージングとスウェリングに分類されている。スクイージングは、トンネル掘削に伴う応力の再配分により周辺地山応力が強度を越えて破壊することにより発生し、スウェリングは、地山中に存在するスメクタイト等の膨潤性粘土鉱物の吸水膨張に伴って発生するものである。

両者の要因による変状現象を路盤隆起に着目して整理すれば、図3のようになる。2つの変状現象は複合して作用するものと考えられるが、本研究では、路盤隆起を再現する実験として、①スクイージングに対応する力学的载荷実験、②スウェリングに対応する地盤膨張実験の2種類を行った。ここでは①の結果の概要を紹介する。



(a) スクイージング (b) スウェリング

図3 塑性圧による変状現象の分類

#### (2) 力学的载荷実験

実験は、図4に示す装置を用いて、図5に示すようにトンネル模型（新幹線断面、 $s=1/50$ 、モルタル）を模擬地山（ $q_u=0.5\text{MPa}$ の低強度モルタル）中に埋設し、ジャッキにより地山を介して変位を与えるものである<sup>2)</sup>。ロックボルトは実物に近い挙動が得られるように工夫した。

図6は、地山のひずみ  $D/L$  とトンネルの変形率  $\delta/B$ 、路盤隆起  $u$  の関係を示した例である。ここでは、路盤部が無補強の場合、インバートを有する場合、路盤ロックボルトが各々4本、6本施工されている場合の結果が示されている。図より、トンネルの変形と路盤隆起の抑制にはインバートが最適であるが、ロックボルトの場合でも、補強量（ここではボルト

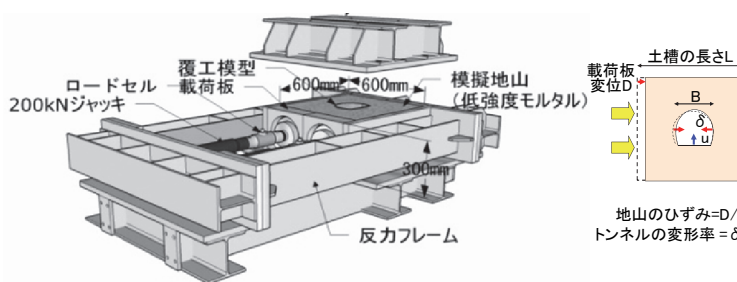


図4 载荷模型実験装置<sup>2)</sup>

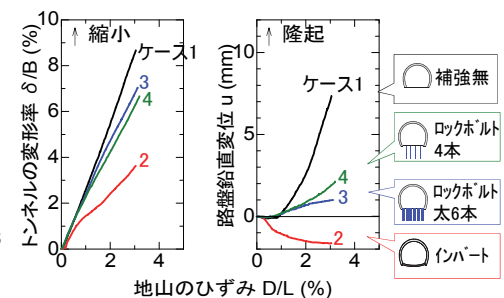


図6 実験結果の例

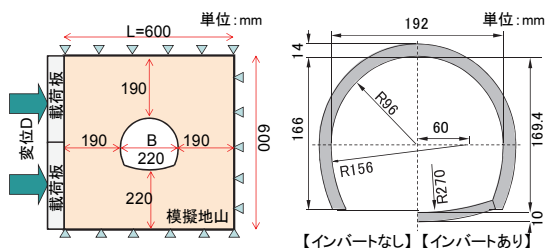


図5 土槽と覆工模型の寸法

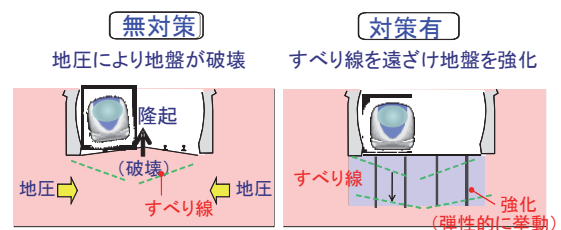


図7 路盤ロックボルトの補強メカニズム

本数) に応じて隆起抑制効果が得られることが分かる。また、無対策では  $D/L=2\%$  までは弾性的な挙動を示すが、それ以降隆起勾配が急増した。この挙動と実験後の路盤部の状況を観察した結果から、スクイーミングによる路盤隆起現象は、図7に示すように、路盤下の地山で発生したせん断破壊によりくさび状にブロック化した領域が上方に抜け上がるようにして発生するが、ボルトにより路盤下の地山を弾性状態に保つことができるものと考えられる。

#### 4. 数値解析によるシミュレーション

上述の载荷実験の再現解析を行って路盤隆起メカニズムと路盤ロックボルトの隆起抑制効果を検証した上で、実トンネルを想定した解析を行った。ここでは後者の結果を示す。

##### (1) 路盤隆起を生じた実トンネル挙動<sup>3)</sup>の再現

トンネル周囲の地山の強度を経時的に低下させることにより路盤隆起を表現する「強度劣化モデル」<sup>4)</sup>を用いて、図8のような路盤ロックボルトを表現した3次元モデルを作成し、変状の再現を行った。検討対象トンネルは複線断面のトンネルであり、供用開始直後から40m弦で最大15mm/年の軌道隆起が確認され、供用開始10年後にロックボルトによる路盤補強工が施工された。変状区間の土被りは200m程度であり、新第三紀の凝灰岩類を主体とした膨張性地山内に位置する。

図9は、供用開始後からの路盤隆起の推移について、計測結果と解析結果とを比較して示したものであり、供用開始後10年後の路盤ロックボルトによる対策工施工までと施工後の隆起の進行状況をよく再現できている。図10は、供用開始後20年の隆起量の3次元的な分布を、対策工を施工しなかった場合と施工した場合を並べて示したものである。図9と図10から分かるように、このモデルを用いることにより、将来の長期的な挙動について、隆起量(mm)や隆起速度(mm/年)といった実務的な指標により予測評価することが可能であり、要求レベル以内に隆起を抑えるための補強工の仕様と対策時期を定量的に表現できる。

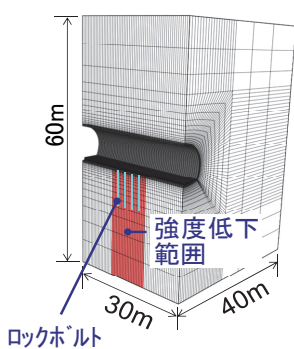


図8 数値解析モデル

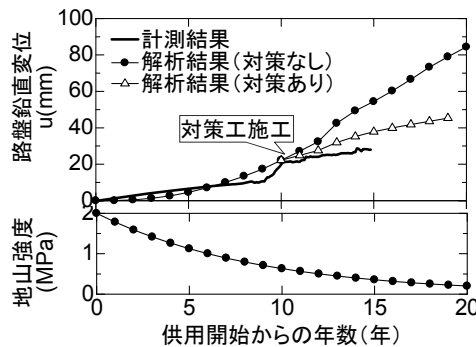


図9 計測結果と解析結果の比較

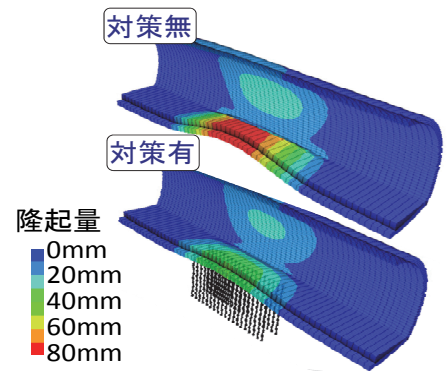


図10 供用20年後の隆起予測

##### (2) 実トンネルを想定したパラメータ解析

上記のモデルを用いて、実トンネルを想定していくつかの補強パターンについてパラメータ解析を行い、路盤ロックボルトの最適な諸元(本数・位置、角度、間隔)を検討した。

検討の結果、一般的な条件の複線トンネルであれば、標準的な線路方向の打設間隔である打

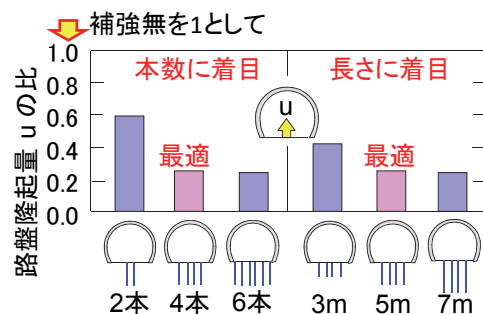


図11 数値解析による補強工の効果

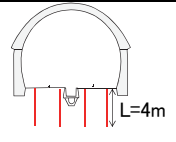
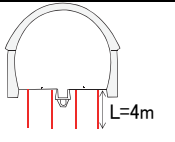
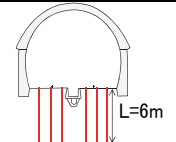
設間隔 1m の場合、長さ 5m のロックボルトを 1 断面に 4 本程度打設すれば良いことが分かった（図 11）。また、鉛直に打設するのが最も効果的であるが、20° 程度であれば打設角度の影響は小さいこと、ボルト長については路盤下に形成されるくさび領域（隆起範囲）の外側まで打設する必要があるが、必要以上に定着長を確保しなくてよいこと、なども分った。

## 5. 補強工の設計法の作成

表 1 標準設計（案）

以上の成果を反映し、路盤路盤隆起速度を抑制したい割合に応じて 3 つの補強ランク（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ）を設定し、それぞれについて路盤ロックボルトの標準設計（案）を、表 1 のように作成した。

さらに、路盤隆起が発生しているトンネルを対象として、ロックボルトによる路盤隆起

	補強ランクⅠ	補強ランクⅡ	補強ランクⅢ
略図			
ボルト諸元	D25×4 本/断面 L=4m, ctc=1.5m	D29×4 本/断面 L=4m, ctc=1.0m	D35×6 本/断面 L=6m, ctc=0.5m
プレストレス	50kN	50kN	100kN
備考	鉛直変位速度を 60%程度に抑制	鉛直変位速度を 40%程度に抑制	鉛直変位速度を 20%程度に抑制

補強工の設計方法をマニュアルの形に取り纏めた。このマニュアルでは、上記の標準設計に加えて、数値解析法を用いた検討例や、類似事例を参照して設計を行う場合のための変状対策事例集も紹介している。

## 6. まとめ

山岳トンネルの路盤隆起補強工として路盤部へのロックボルトに着目し、事例調査、模型実験、数値解析を行うことにより、路盤隆起とその補強のメカニズムを解明した上で路盤ロックボルトの標準設計法と数値解析法を提案し、マニュアルの形に取り纏めた。今後、この成果を「変状トンネル対策工設計マニュアル」（1998）<sup>1)</sup> の改訂に反映させたい。

山岳トンネルの路盤隆起は、供用期間をとおして徐々に進行する時間依存挙動であるが、路盤部の対策を的確に進めることにより、耐震性の向上にも繋がるものと考えられる<sup>2)</sup>。また、提案した解析法は、対策の時期と規模に応じて将来の長期挙動を予測できるので、路盤部の変状が問題となるトンネルの維持管理計画を行う際に活用できる手法であると考えられる。今後、この観点からも更なる研究を進め、この種の問題を抱えたトンネルの安全性の向上と長寿命化に寄与したいと考えている。

## 参考文献

- 1) (財)鉄道総合技術研究所：変状トンネル対策工設計マニュアル，1998.
- 2) 野城一栄，小島芳之，深沢成年，朝倉俊弘，竹村次朗：地質不良区間における山岳トンネルの地震被害メカニズム，土木学会論文集，Vol.65，No.4，pp.1045-1061，2009.
- 3) 渡邊康夫，藍郷一博，鈴木尊：供用中の新幹線トンネルで発生した路盤隆起の原因とその対策，トンネルと地下，Vol.38，No.9，pp. 7-16，2007.
- 4) 野城一栄，嶋本敬介，小島芳之，高橋幹夫，松長剛，朝倉俊弘：地山劣化モデルによるトンネル変状の再現解析とその長期予測への適用，土木学会論文集 C，Vol.65，No.1，pp.107-119，2009.