

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

嶋本 敬介* 野城 一栄* 小島 芳之**

Heaving of Roadbed by Swelling of Ground in Mountain Tunnels
and its Countermeasures

Keisuke SHIMAMOTO Kazuhide YASHIRO Yoshiyuki KOJIMA

Some mountain tunnels suffer from heaving of roadbed in service and require some countermeasures. Countermeasure designs often depend on empirical methods, therefore designing reasonable countermeasures becomes a significant problem. In this study, swelling of ground was focused on as one of the causes of roadbed heaving, and the model experiments and numerical analyses were carried out. The model experiments and numerical analyses could reproduce the time depending heaving behavior of the roadbed in the actual tunnels. Also it was confirmed that downward rock bolts improve the stiffness of the invert and suppress the heaving of the roadbed. Furthermore, we performed numerical analyses changing the number, diameter and length of rock bolts and the value of pre-stress, and evaluated those effects on heaving of the roadbed quantitatively.

キーワード：トンネル，路盤隆起，ロックボルト，模型実験，数値解析

1. はじめに

山岳トンネルでは、地質やトンネル構造によっては供用開始後に路盤隆起（盤ぶくれ）が発生することがある（例えば1）～4）。鉄道トンネルでは路盤隆起は列車の走行安全性に大きな影響を与える恐れがあり、また、路盤隆起が発生した場合、特にスラブ軌道のような直結軌道の場合には軌道低下工事は難しいことから、路盤隆起対策は重要な課題となっている。そこで筆者らは、路盤隆起現象とその対策工としてのロックボルトに着目し、合理的な下向きロックボルトの設計諸元の選定手法を確立することを目的として研究を実施している。

これまでの研究では、主に地山の強度低下、塑性化に伴う押し出しを対象として、下向きロックボルトの作用メカニズムやその効果等を検証してきた⁵⁾。一方で、地山の吸水膨張により路盤隆起が発生したと考えられる事例も少なからず存在する^{（例えば3）4)}が、吸水膨張を対象とした研究は見当たらない。よって、本研究ではインバートに吸水膨張圧が作用した場合を想定し、インバートや、インバートに打設したロックボルトの効果について検討することにした。具体的には、模型実験と実トンネルを想定した数値解析を実施し、路盤部の地山の吸水膨張による路盤隆起に対する対策工としての下向きロックボルトの作用メカニズム、下向きロックボルトの長さや径、

プレストレスといった設計諸元が路盤隆起の抑制効果に与える影響を検討した⁶⁾。

2. 山岳トンネルの路盤隆起メカニズム

供用開始後に路盤隆起を生じた事例を9事例収集し、計測データを分析した。対策前の路盤隆起の計測結果を図1に示す。トンネルによって隆起速度はまちまちであるが、時間の経過とともに、長期にわたって緩慢・線形的に隆起が継続することが多いことがわかる。

路盤隆起のメカニズムとして、大きく分けてスクイーピング（塑性化に伴う押し出し）とスウェリング（吸水膨張）が考えられる。スクイーピングとスウェリングの想定されるメカニズムについて、路盤隆起に限った場合における模式図を図2に示す。

スクイーピングは、地山強度比（地山の軸圧縮強度

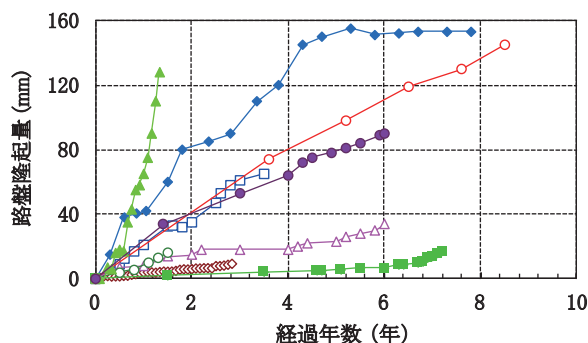


図1 路盤隆起の計測結果（対策前）⁶⁾を一部修正

* 構造物技術研究部 トンネル研究室

** 構造物技術研究部

特集：構造物技術

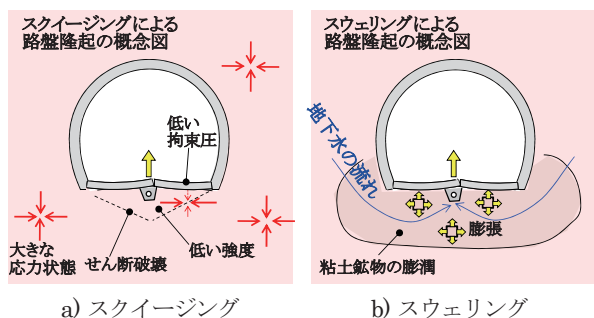


図2 想定される路盤隆起メカニズム

に対する土被り圧の比)が小さい場合、とくに拘束圧の小さい路盤部において水平方向応力に対して鉛直方向応力が小さくなり、路盤部において軸差応力が大きくなるため塑性化し、路盤が隆起する現象と考えられる。

スウェリングは、排水管のある路盤部に地下水が集まり、路盤部に存在する膨潤性粘土鉱物が吸水し膨張することで路盤が隆起する現象と考えられる。吸水膨張は軟岩に見られる性質で、軟岩中に含まれる膨潤性粘土鉱物の吸水による底面間隔（結晶の底面同士の間隔）の拡大が主な原因と考えられる⁷⁾。

3. 模型実験

3.1 路盤隆起現象の再現方法

実トンネルにおける供用後の路盤隆起現象の特徴としては、以下の①、②が挙げられる。

- ①路盤下のトンネル近傍において、地山が体積膨張を伴い上方に変位する。
- ②時間の経過とともに徐々に隆起が進行する。

本研究では上記①②を表現するために、インバート下部に静的破砕剤を混入したモルタル（以下、膨張モルタル）を打設することにより、経時的な路盤隆起を表現することとした。静的破砕剤の膨張は式(1)に示すように、その成分である生石灰(CaO)が化学変化することによって体積膨張するものである。



これにより、境界に変位を与えるなどにより間接的に路盤隆起を表現するのではなく、実際の路盤隆起現象に近い状況を再現する事ができる。

3.2 実験条件

実験の概要図を図3に示す。トンネル模型はモルタル製（強度約26N/mm²）で、新幹線標準断面の1/50縮尺である。覆工とインバートは別々に作製し、接合部で曲げモーメントを伝達せず、ずれも生じないように工夫した。

模擬地山は、軟岩を想定して表1に配合を示す低強度モルタルとした。本材料はベントナイトと減水剤、分離

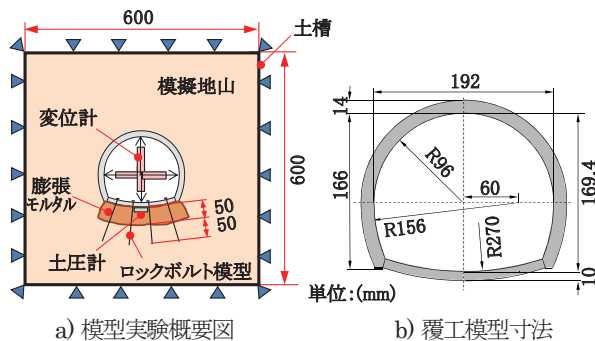


図3 模型実験概要図

表1 模擬地山の配合

使用材料	材料	単位量 (kg/m ³)
水		650
セメント	早強ポルトランド	185
細骨材	珪砂6号	650
混和材	ベントナイト	65
混和剤	減水剤	17
	分離防止剤	0.29

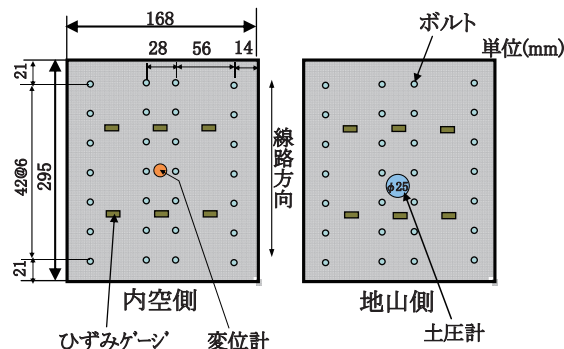


図4 インバート平面図（ボルトあり）

防止剤を使用することにより、貧配合であるにも関わらず分離が起きにくく、流動性のよい材料となっている。養生期間は7日間としている。

膨張モルタルには、表1の配合の低強度モルタルに静的破砕剤を重量比で24%混合したものをを用いた。なお、この配合は、静的破砕材の配合率をパラメータとして膨張圧試験を実施し、実際に路盤隆起が発生したトンネルの地山のコアの膨張圧試験の結果を目安として設定した。

実験は、ロックボルトなしとありの2ケースを実施した。ロックボルト（以下ボルト）は、図4に示すとおり1断面あたり4本、トンネル線路方向に42mmピッチで打設した。ボルト模型には直径1mmのステンレス棒を用いた。ここで、ボルトと地山との付着力を表現するため、ボルト模型の周面にエポキシ系接着剤により珪砂6号をまぶしてある。ベースプレートは10mm角のプレートで表現している。

実験では、図4に示すように、インバートに作用する圧力と、トンネル模型の内空変位、インバート中央位置

の変位等を計測した。

実験手順は以下のとおりである。

- ①図3に示すように、土槽の中央に、トンネル線路方向を鉛直方向としてトンネル模型を設置する。ボルトありのケースについては予め、インバート部に穴を開け、ボルト模型をインバートに固定しておく。
- ②低強度モルタル（模擬地山）をトンネル模型の周囲に打設し、翌日スペーサーの木材を引き抜き、インバート背面に空洞を作る。
- ③低強度モルタルの打設から7日間経過後、インバート背面の空洞部に膨張モルタルを打設し、アクリル板の蓋を被せて実験を開始する。
- ④120時間経過後、実験を終了する。

3.3 実験結果

実験結果は、膨張開始からの経過時間を横軸として整理した。以下に実験結果を示す。

a) インバートの隆起量と作用圧

図5にインバート中央部の隆起量とインバート背面に作用する圧力の経時変化を示す。

これより、ボルトありのケースでは全体的に隆起量が小さくなっており、120時間経過後でみると隆起量が40%程度抑制されていることがわかる。

ひびわれ発生時のインバートへの作用圧は、ボルトありのケースの方が40kPa程度大きくなっており、ボルトによりインバートの耐力が向上していることがわかる。ボルトなしのケースでは、ひびわれ発生直後にインバートへの作用圧が急激に低下しているのに対して、ボルトありのケースでは、ひびわれが発生した後も作用圧は急激には低下していないことがわかる。

図6に、インバート隆起量と作用圧との関係を示す。ボルトなしのケースではひびわれ発生によりインバートの作用圧が急激に低下したのに対し、ボルトありのケースは、ひびわれ発生後も程度の作用圧を保っている（見かけの剛性を保っている）ことがわかる。

b) インバートの隆起速度

図7にインバート隆起速度の経時変化を示す。ここで、隆起速度は20分間の隆起量を24時間あたりの隆起量に換算したものである。これより、ボルトなしのケースは、ボルトありのケースと比較してひびわれ発生直後の隆起速度が大きいことがわかる。また、ボルトなしのケースでは、ひびわれ発生後も一時的に隆起速度が急増することがあるのに対し、ボルトありのケースでは、隆起速度は滑らかに推移していることがわかる。これは、ボルトがあることで、ひびわれ発生後もひびわれの進展が抑制されているためと考えられる。ただし、膨張発生から48時間後（隆起量1.2mm）以降の隆起速度を見ると、両者は同程度であった。すなわち、ボルトによる隆

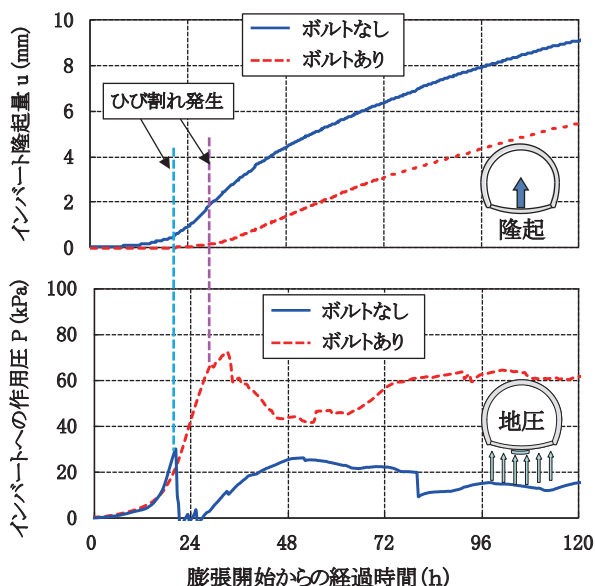


図5 隆起量と作用圧の経時変化

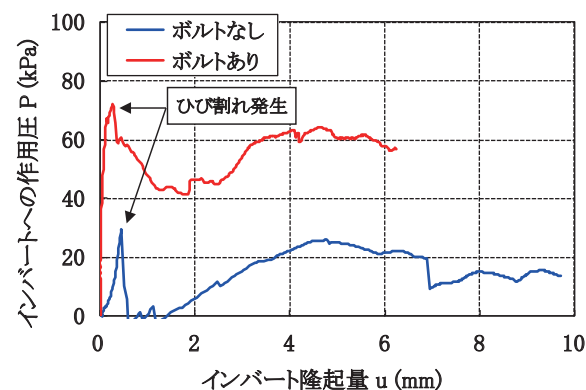


図6 インバート隆起量と作用圧の関係

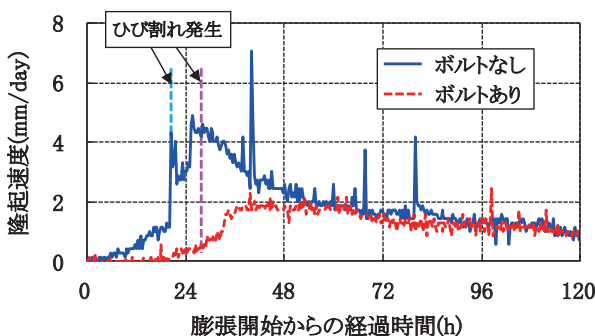
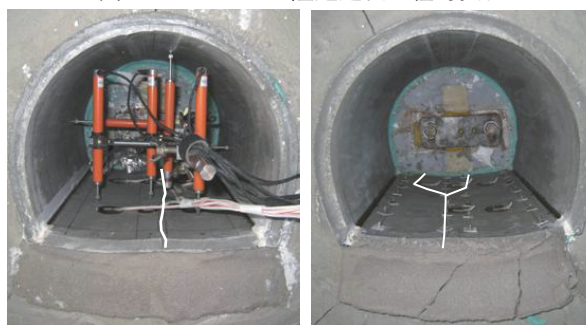


図7 インバート隆起速度の経時変化



a) ボルトなし b) ボルトあり

写真1 実験終了後の覆工模型の状況（白線はひびわれ）

特集：構造物技術

起速度抑制効果は隆起量 1.2mm までに発揮されており、それ以降は大きな効果は見られなかった。その場合でも、ボルトありの場合はボルトなしと比較して隆起速度の推移が滑らかであるという傾向は最後まで継続した。

c) 実験終了時の覆工模型の状況

写真 1 に実験終了時（膨張開始から約 140 時間後）の覆工模型の状況を示す。インバート下の膨張モルタルの体積が増加してインバートが隆起し、インバート中央においてひびわれが発生していることがわかる。

3.4 まとめ

模型実験により、ボルトにより隆起量が抑制され、ひび割れ発生後のインバートの見かけの剛性が保たれることがわかった。下向きボルトは路盤隆起対策として効果的であることが確認された。

4. 数値解析

前章では実験の都合上、ボルトが打設された状態で膨張圧が作用し、インバートが隆起する状況を想定して実験を行った。しかし、実際のトンネルでは、インバートに変状が発生し、隆起がある速度で徐々に進行しているような状況でロックボルトが打設されるのが通常である。本章では、インバートに膨張圧が作用し、変状が発生してからロックボルトを打設する状況を数値解析でモデル化し、ボルトの本数や長さ、直径といった仕様の違いがボルトの効果に与える影響について検討することとする。

4.1 解析条件

解析は有限差分コード FLAC3D により行った。解析モデルを図 8 に示す。奥行き方向については、単位長さとしてモデル化した。膨張圧に着目するため、初期応力、重力加速度は 0 とした。なお、本論文では割愛したが、解析に先立って、模型実験の再現解析を実施し、解析手法の妥当性を評価した⁶⁾。

解析入力物性値を表 2 に示す。覆工については、ひびわれを適切に表現するため、コンクリートの引張破壊を表現し、引張破壊後、塑性引張ひずみの増加に伴って引張強度を指数関数で低下させるモデルを用いた。吸水膨張範囲は温度上昇によって熱膨張する等方線形熱弾性体としてモデル化した。具体的には、1 ステップ 0.25℃ずつ、100 ステップ温度上昇させ、完全拘束の場合の膨張圧換算で 250kPa に相当する膨張圧を発生させた。ボルトには Cable 要素⁸⁾を使用した。Cable 要素はせん断ばねを有しており、これにより周辺要素の節点との相互作用を表現し、付着切れによる周辺要素との滑りも表現できる。Cable 要素の頭部とインバートの上面に相対変位が発生しないようにすることで、ベースプレートを表現

した。ボルト～地山間のせん断ばね剛性 k_g 、付着強度 c_g については、以下の式 (2)、式 (3) で算出⁸⁾した。

$$k_g = \frac{2\pi G}{10 \ln(1+2t/D)} \quad (2)$$

$$c_g = \pi(D+2t)\tau_{peak} \quad (3)$$

ここで D はボルト径、 t は定着材厚さであり、標準のケースで $D=25\text{mm}$ 、 $t=20\text{mm}$ としている。 G は定着材のせん断弾性係数であり、一般的な値として 8750MPa としている。 τ_{peak} は地山のせん断強度として設定している。吸水膨張範囲は付着強度が小さく、その範囲ではボルトは十分に定着が取れないと考えられるため、今回の解析では、吸水膨張範囲内ではボルトの付着強度 c_g を周辺地山の 1/20 とした。

解析ケースを表 3 に示す。表中において、「本数」は 1 断面あたりのボルト本数である。「ピッチ」はトンネル線路方向の打設間隔であり、打設間隔 0.5m のケースは奥行き方向 1m に 2 断面分のボルトをモデル化した。「直径」は式 (2)、式 (3) の D の値であり、 $D=50\text{mm}$ とした時は、 t についても 2 倍の 40mm とした。プレストレス 50kN のケースは、まずボルトをモデル化し、イン

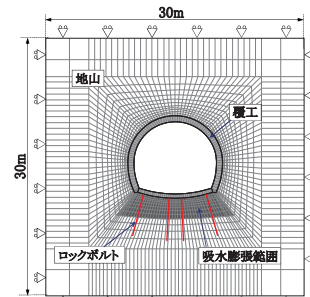


図 8 解析モデル図（正面図）

表 2 解析入力物性値

	項目	解析入力値
地山	弾性係数 E (MPa)	80
	ポアソン比 ν	0.3
	せん断強さ c (MPa)	0.15
	内部摩擦角 ϕ (°)	13
覆工	弾性係数 E (MPa)	15,000
	ポアソン比 ν	0.2
	せん断強さ c (MPa)	4.9
	内部摩擦角 ϕ (°)	40
吸水膨張範囲	引張強度 σ_t (MPa)	1.75
	弾性係数 E (MPa)	4.0
	ポアソン比 ν	0.3
ボルト	線膨張係数 ($^{\circ}\text{C}$)	1.0×10^{-3}
	弾性係数 E (GPa)	210
	単位長さ当たりのせん断ばね剛性 k_g (MN/m ²)	5750
	単位長さ当たりの付着強度 c_g (kN/m)	30.6
	ばねの摩擦角 ϕ_g (°)	0

表3 解析ケース

	呼称	本数 (本)	ピッチ (m)	直径 (mm)	長さ (m)	PS (kN)
ケース1	ボルトなし	0	-	-	-	-
ケース2	ボルトあり (基準仕様)	4	1.0	25	5.5	0
ケース3	6本/断面	6	1.0	25	5.5	0
ケース4	ピッチ0.5m	4	0.5	25	5.5	0
ケース5	径50mm	4	1.0	50	5.5	0
ケース6	長さ8m	4	1.0	25	8	0
ケース7	PSあり	4	1.0	25	5.5	50
ケース8	全採用	6	0.5	50	8	50

PS：プレストレス

パート部および膨張域の k_g を0として、定着部でのみ定着している状態で、インバートで反力を取りつつボルト頭部を50kNの荷重で引き上げ、その後ボルト頭部とインバートとの相対変位を発生させないようにすることでベースプレートをモデル化する、という手順で実際のプレストレスの導入に則した表現とした。

なお、ケース2～8は、変状が発生し、インバートの隆起がある程度生じた時点で対策工として下向きロックボルトを施工することを想定しており、ケース1においてインバート隆起量が30mmに到達した時点で下向きロックボルトの対策をモデル化することにした。

4.2 解析結果

a) ボルトの効果

ケース1とケース2について、解析ステップ（経過時間に相当）と、インバート隆起量およびインバートへの作用圧との関係を図9に示す。模型実験結果（図5）と同様に、ボルトの打設により路盤隆起を抑制できること、ひび割れの発生に伴いインバートへの作用圧が減少し

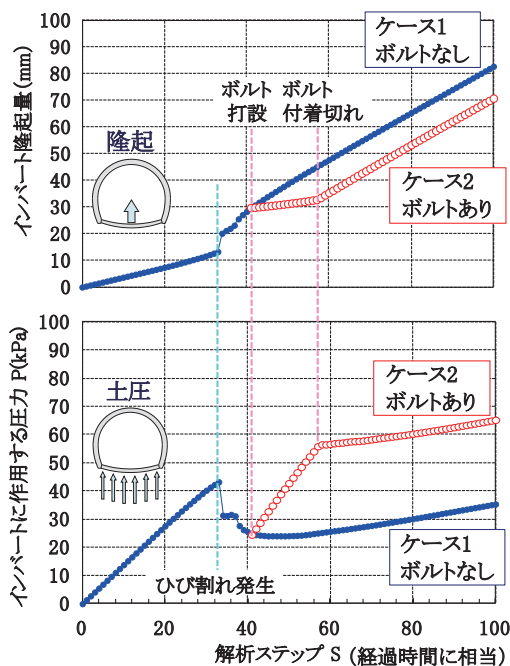


図9 インバートの変位と作用する荷重との関係

ンバート隆起が増大すること、ボルトの打設によりインバートへの作用圧が増大すること等が確認できる。

同様に、インバート隆起量とインバートに作用する圧力との関係を図10に示す。ケース2は、ボルトの打設によりインバートの見た目の剛性が大きく向上するが、一方で付着切れによりこの剛性は大きく低下していることがわかる。ケース2は付着切れが生じるとインバートの剛性はケース1とほとんど差がなくなり、ボルトの隆起抑制効果が見られなくなっている。

これらの解析結果と実験結果とから、ロックボルトの作用メカニズムを考察した。地山の強度低下、塑性化による路盤隆起に対する下向きロックボルトの作用メカニズムは、主に路盤部地山を補強し、せん断帯の発生・拡大を防ぐことにある⁵⁾。一方で、吸水膨張に対する下向きロックボルトの作用メカニズムを図11に示す。ボルトがない場合はインバート下地山の膨張がそのまま隆起として現れるが、ボルトがある場合には、ボルトが膨張圧に対する定着力を発揮するため、インバートの見かけの剛性が向上し、現れる変位が小さくなったものと考えられる。

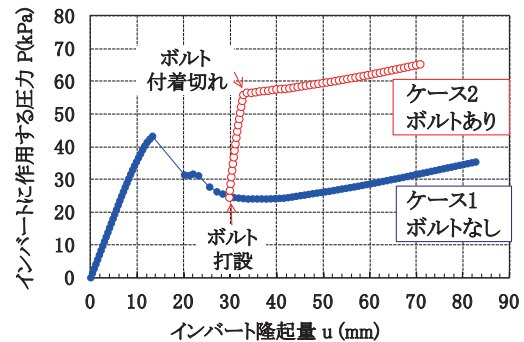


図10 インバート隆起量と作用圧との関係

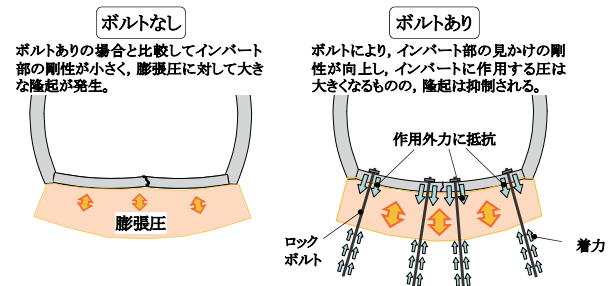


図11 吸水膨張に対する下向きロックボルトの作用メカニズム

b) ボルトの仕様が効果に与える影響

次に、ボルト本数、ボルトピッチ、ボルト径、ボルト長さ、プレストレスの有無を変化させて、ボルトの仕様が効果に与える影響を把握した。図12に解析ステップ（経過時間）とインバート隆起量の関係を、図13に、打設後付着切れが起きるまでの隆起速度 (mm/ステップ)、付着切れが生じるまでのステップ数をまとめる。

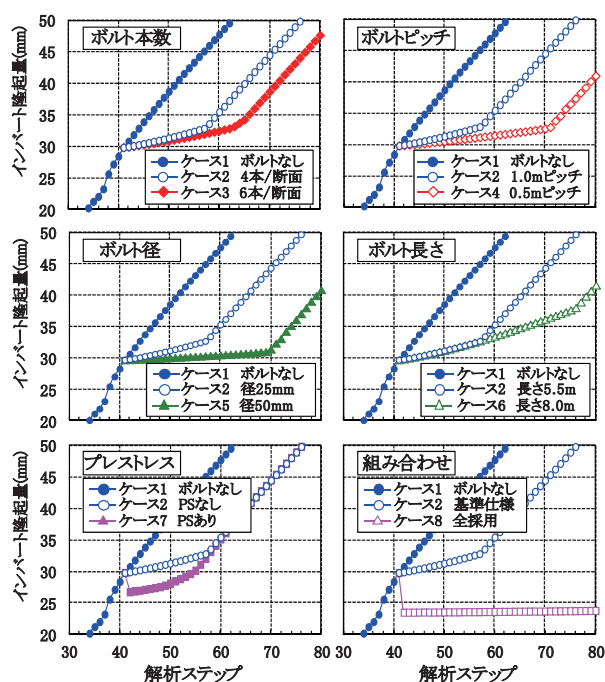


図12 解析ステップ（経過時間）とインバート隆起量との関係

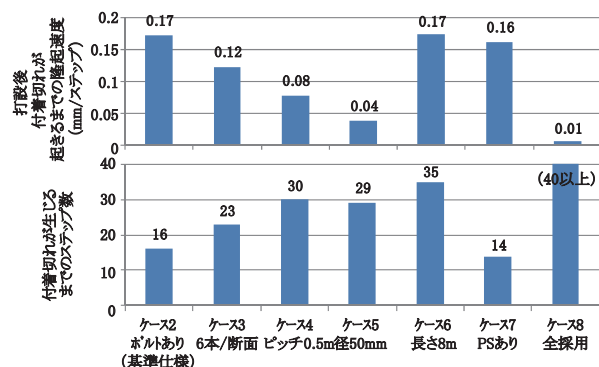


図13 各ケースの比較

ボルト本数、ボルトピッチ、ボルト径については、図13より、仕様を上げることにより、付着切れが起きるまでの隆起速度が小さくなるとともに、ボルトが効果を発揮できる期間も長くなっていることがわかる。

ボルト長については、長くすると、隆起速度あまり変わらないが、隆起抑制効果を発揮する期間は長くなるということがわかる。

プレストレスについては、図12より、本解析では、打設直後に効果が認められるが、効果は一過性でその後はプレストレスなしの場合と同じ状態となった。プレストレスには、施工管理の一面もあるので本結果のみからその要否を判断する必要はないが、ボルトに付着切れが生じるとその効果が失われるという前提に立つと、プレストレスにより付着切れに至るまでの期間が短くなるので、恒久対策として適用する場合でプレストレスを導入する場合には十分に定着が取れるように設計する必要があるといえる。

ボルト本数、ボルトピッチ、ボルト径、ボルト長さ、プレストレスの対策を全て採用してボルトを高仕様にした場合には、ほぼ完全に隆起が抑えられ、恒久対策とみなせる結果が得られた。ただし、前記したように、プレストレスについては恒久対策の観点からは検討が必要である。

5. まとめ

本研究では、吸水膨張を想定した路盤隆起を再現する模型実験を実施した。また、吸水膨張を想定した数値解析を実施した。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- 1) スウェリングによる路盤隆起に対して、下向きロックボルトは、インバートの見かけの剛性を向上させ、隆起を抑制する。
- 2) ボルトの本数や径の増加、ボルトピッチを詰めることにより、ボルト打設後の隆起速度が抑制され、ボルトが効果を発揮する期間も長くなる。
- 3) ボルト長を長くしてもボルト打設後の隆起速度は変わらないが、ボルトが効果を発揮する期間は長くなる。
- 4) プレストレスを導入すると、付着切れに至るまでの期間が短くなり、吸水膨張を対象とした今回のモデル化では隆起抑制効果の向上は見られない。

参考文献

- 1) 原田聡：ロックボルト補強トンネルの長期計測，鉄道土木，Vol.27, No.11, 1985
- 2) 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, 2007.9
- 3) 奥井裕三，鶴原敬久，太田裕之，佐久間智，中田主税：盃山トンネルに発生した急激な路面隆起変状の計測および解析による変状メカニズムの考察，トンネル工学報告集，Vol.19, pp.173-180, 2009.11
- 4) 鈴木哲也，岩淵武，林満，森田英俊：変質した地山中のトンネルにおける変状調査と対策，開発土木研究所月報，No.449, 1990
- 5) 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
- 6) 嶋本敬介，野城一栄，小島芳之，塚田和彦，朝倉俊弘：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に関する研究，土木学会論文集 F1 特集号，Vol.68, No.3, pp.65-79, 2012.11
- 7) 石田良二：スメクタイトを含む軟岩の諸性質および劣化に関する基礎的研究，早稲田大学学位論文，1995
- 8) ITASCA Consulting Group, Inc. : FLAC^{3D} Version 4.0 Structural Elements, 2009.