

山岳トンネルの路盤下地山における動的な応答の計測

東日本旅客鉄道株式会社 正会員 ○水野光一朗, 小瀬喜巳, 神山真樹, 阿部光三

1. 研究の背景と目的

山岳トンネルの路盤部の安定性は列車の安全な運行に対して重要である。そのため、筆者らは強度や固結度といった物性や地下水位に着目して山岳トンネルの路盤下地山の特性の調査^(例えば1)を行っている。また、路盤部の安定性を評価するに際し、路盤下地山への作用の評価も重要と考えられる。以上を背景に、本稿では山岳トンネルの路盤下地山を対象に列車荷重による間隙水圧や空気圧の変動といった動的な応答の計測を行い、その結果を報告する。

2. 計測内容

(1) 対象としたトンネルの概要

計測の対象としたトンネルは、矢板工法で建設された複線断面の山岳トンネルである。計測位置では、図-1のようにインバートのないりょう盤コンクリートの路盤構造となっている。当該トンネルは新第三紀青麻層に位置し、ボーリングおよびコア観察の結果では、路盤下地山は一部割れ目沿いに脆い部分がある弱風化砂岩であった。土被りは20m程度で、トンネル上部が宅地用に開発されている。計測箇所でも過去に行った調査⁽²⁾による路盤下地山の物性の一例を表-1に示す。なお、一軸圧縮強さの試験結果は、採取したコアを供試体として成形できる最も浅い位置のものである。また、透水試験は原位置透水試験（非正常法の回復法）の結果である。後述の計測器を設置した際の地下水位は路盤面から45cm程度の位置であり、路盤下地山は地下水位以下であった。

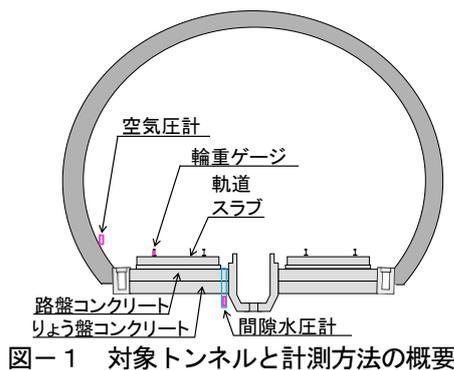


図-1 対象トンネルと計測方法の概要

表-1 路盤下地山の物性

項目	代表値
一軸圧縮強さ q_u [MPa]	2.15
密度 ρ_s [kN/m ³]	24.7
透水係数 k [cm/sec]	5.84×10^{-4}
浸水崩壊度*	C~A

※D: 原形を止めない C: 稜角部が崩壊する
B: 粒子の分散はない A: ほとんど変化が認められない

(2) 計測内容および方法

今回の計測では、列車荷重による作用を計測する輪重ゲージをレールに貼付した。また、路盤下の動的な応答のうち、間隙水圧に着目し、間隙水圧計を設置した。間隙水圧計は、過去のボーリング孔を活用し、路盤面から60cmの位置に設置した。さらに、トンネル側壁に空気圧の変動を計測する機器（間隙水圧計）を設置した。路盤下の間隙水圧計の計測結果から空気圧の変動を控除して両者の差圧を求めることで、列車荷重に起因した間隙水圧の変動を計測し、路盤下地山の閉塞された箇所における水の変動を想定できると考えた。計測器の配置を図-1に併せて示す。計測時間の間隔は1/1000secとした。計測位置はトンネル坑口から220m程度の箇所である。

3. 計測結果

計測結果の一例を以下に示す。これらの結果は、計測器を設置した側の線路を列車が通過した場合の結果の例である。

(1) 列車接近から通過までの結果

計測位置に列車が接近し、通過した際の計測結果を図-2に、計測位置を列車が通過した時間の前後に着目した結果を図-3に示す。

輪重については、図-3より、各車軸が輪重ゲージの上を通過するごとの応答がみられた。当該の列車編成の車両数、台車数、車軸数から考えられる作用の数と計測で得られた輪重の応答は一致していた。

間隙水圧については、図-3より、列車の通過に対する相対的に大きな応答がみられる。また、その応答は列車の最後の車軸の通過後までであることがわかる。

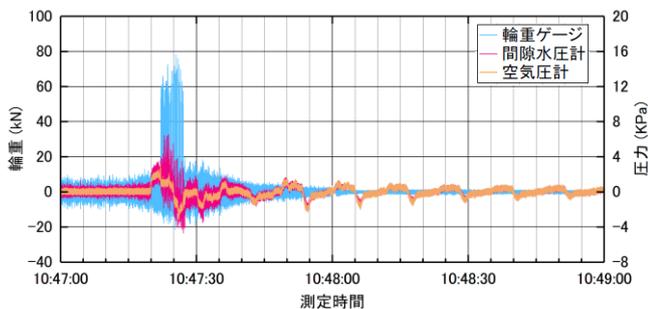
空気圧については、その平均値が間隙水圧の挙動の平均値と概ね一致しているが、列車の通過に伴う相対的に大きな応答はみられなかった。

(2) 列車通過時に着目した場合の結果

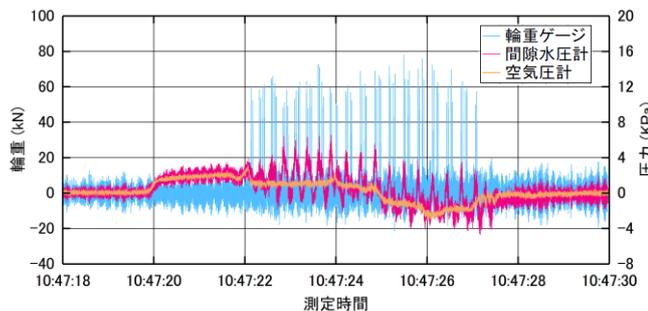
続いて、列車荷重による間隙水圧の変化を把握することを目的に、列車の車軸が通過する時間に着目した場合の結果を図-4に示す。この結果は、2つの台車（車両の後部2車軸と次車両の前部2車軸）が計測箇所を連続して通過した時刻のものである。図-4をみると、間隙水圧は各車軸の通過に対して若干の応答がみられるが、複数の車軸に対して1つのピークを持つ形態で応答していることがわかる。図-4の事例では、応答の時間は0.2sec程度と短い時間であり、他の車軸についても同様

キーワード：山岳トンネル, 地山特性, 動的応答, 間隙水圧, 路盤, 鉄道

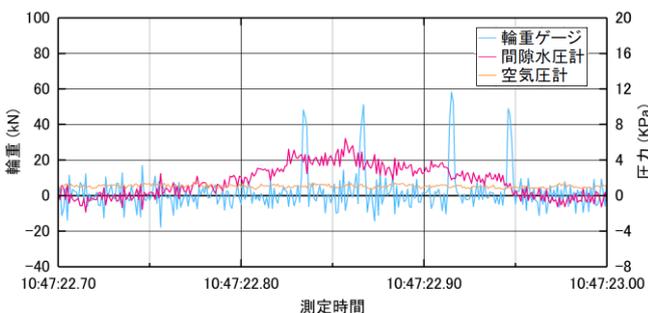
連絡先 〒163-0231 東京都新宿区西新宿2-6-1 新宿住友ビル31階 JR 東日本 構造技術センター TEL 03-6851-0086



図一 計測結果（列車接近～通過後）



図二 計測結果（列車通過時）



図三 計測結果（車軸通過着目時）

の応答が繰り返されていた。また、空気圧は大きな変動はみられない。間隙水圧と空気圧の差圧から求まる列車荷重による間隙水圧の変動について、今回の計測事例では8kPa程度の振幅（正側5kPa程度、負側3kPa程度）で正負交番に反応していた。

（3）列車通過前後に着目した場合の結果

図一および図二において列車の通過前後の変動に着目すると、計測箇所の通過前から間隙水圧および空気圧が同様の波形で変動していることがみられるほか、通過後も差圧を生じることなく、同様の波形で減衰しながら周期的に変動している。前述の通り、間隙水圧と空気圧に差を生じていない場合、路盤下の間隙水圧計の計測結果は空気圧の変動によるものと考えられる。この検証を試みると、列車がトンネル内に入るとトンネル内の空気に圧縮波を生じ、大気圧よりも高い空気圧がトンネル内を音速で伝わり、反対側の坑口で反射することが繰り返されることがいわれている²⁾。今回の計測結果について、原の式²⁾を用いてトンネル内空断面積や列車断面積、列車の速度などから列車のトンネル進入による圧縮

波の圧力上昇量を算出したところ、2kPa程度となり、理論値と計測値は概ね一致することがわかった。また、圧縮波による変動の周期について、トンネルの延長と圧縮波の速度から求まる圧縮波の伝播時間は10sec程度となり、今回の計測結果と概ね一致した。

（4）計測結果のまとめ

以上より、今回の計測では、ノイズはみられるものの、列車通過時の輪重、間隙水圧、空気圧を計測し、路盤下地山の動的な応答を計測できたと思われる。特に、列車通過による路盤下地山の間隙水圧の応答を計測し、間隙水圧と空気圧の差圧に着目することにより、路盤下地山における間隙水圧が路盤コンクリートを介して複数の車軸の通過時にまとめて応答していることや、作用としての振幅は小さいが、正負交番で作用していること、作用時間が短いことがわかった。

4. まとめ

本稿では路盤下地山という閉塞された空間における列車荷重による間隙水圧の応答に特に着目し、計測を行った。その結果、路盤下地山への作用としての振幅や周期の特徴を把握することができたと思われる。

水が介在することの作用について考えると、鉄筋コンクリート床版は水が介在することで疲労強度が大きく低下する⁴⁾といわれている。そのため、路盤下地山が地下水位以下にあり、路盤下の地山の固結度が低い場合や、水の影響を受けやすい場合、地山が潜在的な亀裂を有する場合には、列車荷重の载荷に伴って短時間で変動する水的作用を受け、地山の弱部において地山の強度低下や細粒化を生じる可能性があると思われる。

今後は地質年代や地層区分の違いも加味し、調査・試験により、山岳トンネルの路盤下地山の特性の評価を行い、予防保全を含めたトンネルの維持管理に活用したい。

本計測に際し、JR 東日本コンサルタンツ（株）、（株）北杜地質センター、（株）応用地質の関係技術者に尽力頂いた。ここに記して感謝したい。

参考文献

- 1) 小瀬喜巳, 水野光一郎, 山村啓一, 藤田健史: トンネル路盤下の地山評価, 土木学会第74回年次学術講演会, III-319, 2019.9
- 2) 原朝茂: 列車が高速で隧道に突入する場合の流体力学的諸問題, 鉄道技術研究報告, 第153号, 1960.9
- 3) 土木学会: 2016年制定トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説, 2016
- 4) 松井繁之: 床版損傷に対する水の振舞い, 土木学会第43回年次学術講演会, PS I-3, 1988.10