

関門トンネルに流入する海水の流量分布

鉄道総合技術研究所 正会員 坂井宏行
 九州旅客鉄道 正会員 ○ 貝瀬弘樹
 正会員 用正直樹
 正会員 川野輝信

1. 緒 言

山陽本線下関・門司間の関門トンネルでは、その機能を維持することを目的として漏水の流量や挙動を監視している。具体的には漏水の排水経路上の区間流量を観測しており、従前はこれを三角ぜき法によっていた。しかし、作業性がよくないため、漏水の化学組成を分析することにより漏水流量を求める方法を開発した。すなわち、関門トンネルの漏水は、海水と地下水（淡水）とが混合したものであり、前者が流量一定でトンネル内に流入しているのに対し、後者は流量が季節変動するので、関門トンネルの漏水は海水が地下水によって適宜希釈されたものである。ここで、漏水の流量の変動範囲を限定すれば、漏水の流量と漏水中に含まれる海水成分の濃度との関係は一次的に近似できることがわかっており、通常の流量の変化に対してはそれらの関係を単純な一次式で表すことができた。海水由来成分は海水に元来含まれているものであれば原理的にはどの化学種でも差支えないが、プローブとしての安定性や分析操作の簡便さを考慮するとナトリウムイオンがもっとも有効であり、これをプローブとして採用し、漏水流量を校正している。ところで、トンネル内の主要な位置において海底下から定常的に侵入している海水の流量の分布をはあくしておくことは、海底トンネル上部の地盤の状態を間接的に知る手がかりとなり、有用な情報をえることができる。そこで、漏水中に含まれる海水由来成分であるナトリウムイオンの濃度と漏水流量との関係からトンネル内の各位置における海水流量を算出し、海水が多く供給されている区間の特定をおこなった。

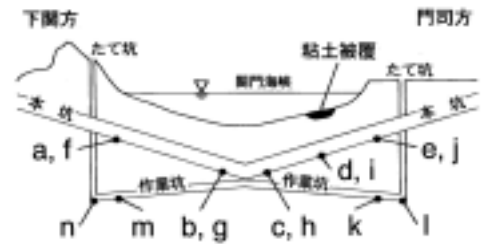


図1 関門トンネル縦断面図
 ●：漏水の調査位置。



図2 関門トンネル横断面図

2. 原 理

2.1 関門トンネルの排水経路

関門トンネルには単線断面の本坑2本が平行して築造されており、本坑工事の着手前に試掘された調査坑がそれら両本坑の間にはさまれるように位置している。この調査坑は、現在、トンネル保守用の作業坑に転用されているほか、本坑に流入した漏水を陸上部に誘導するための重要な役割もになっている。それらの位置関係は図1および図2に示すとおりで、トンネル内の漏水は、上下線別々に本坑の最深部（こう配変更点）に集約され、下り線の漏水は作業坑の門司方へ、上り線のそれは作業坑の下関方へそれぞれ排水されている。陸上部に位置しているたて坑の上部には、たて坑底に誘導された漏水を地上へ揚水するためのポンプが設備されており、関門トンネルの漏水は、下り線系統にあっては門司方の、上り線系統にあっては下関方の海岸から関門海峡へ放流されている。下り線の排水系統を図3に示すが、上り線の場合ではトンネル軸方向中間位置のこう

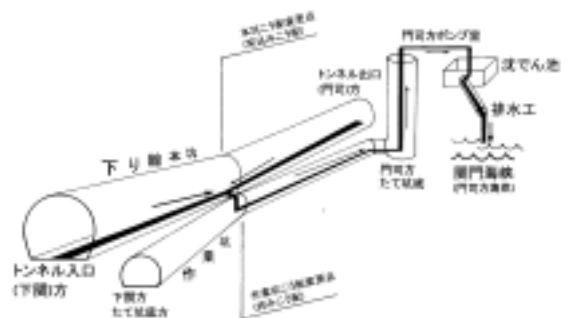


図3 関門トンネル下り線系統の排水経路

キーワード： トンネル、漏水

連絡先（JR総研）： 所在地, 185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38; 電話, 042-573-7265; FAX, 042-573-7398

配変更点を点対称にした逆方向に排水されているほかは、下り線の排水方法とまったく同様である。なお、本坑下り線ではトンネル入口→a→b→最深部←c←d←e←トンネル出口の順に、本坑上り線ではトンネル入口→f→g→最深部←h←i←j←トンネル出口の順にトンネル本坑内に流入した海水は誘導されている。

2.2 漏水の化学組成および漏水中の海水流量の算出方法

関門トンネルの漏水は、海底下からトンネル上部の地盤を通過してしみ込んでいる海水とともに陸上側から地盤内を移動してきた地下水との混合物である。海水は各種塩類を高濃度に含んでおり、なかでもナトリウムイオンは対イオンを塩化物イオンや硫酸イオンとして $11000\mu\text{g mL}^{-1}$ 溶解している。また、水 100g に対するナトリウムの塩化物と硫酸塩（無水物）の溶解度はそれぞれ 35.6g (0°C) および 19.4g (20°C) であり、通常の濃度変化の範囲内であれば溶解や濃縮に対して沈澱を生じることはない。そして、他の陰イオンとはイオン対を形成しにくく、共存イオンによって強い拘束を受けることも少ない。いっぽう、重金属イオンと異なり、希薄溶液であっても、水酸化物などを生成しないため、濃度変化を生じることがなく安定である。したがって、希釈操作に対しては、その損失を考える必要がなく、任意の希釈倍率に対する絶対量は保存される。つまり、漏水流量と漏水中のナトリウムイオン濃度がわかれば、もともと海水中に含まれているナトリウムイオンの濃度 $11000\mu\text{g mL}^{-1}$ と比較することで、その位置の海水流量を概算することができる。

3. 結果および考察

図3に示すように関門トンネルの本坑ではトンネル坑口から本坑最深部に向かうにしたがって海水の流入流量が増大する。トンネル内へ流入する海水流量は下り線よりも上り線の方がおおく、最深部ではその差は6倍に達する。また、最深部に集水される海水の流量は、上り線系統では下関側と門司側とではほとんど差がないのに対し、下り線では下関側の方が門司側よりも3倍多く、結果的に関門トンネル全体では下り線の下関側から流入する海水がもっとも多いことがわかる。いっぽう、本坑内の各区間に流入する海水流量は、図4に示すとおりであり、下り線に流入する海水はその大半が下関側の区間 a→b であるのに対し、上り線では下関側の区間 f→g およびトンネル出口→j でおもに海水が流入していることがわかる。そして、本坑の最深部付近であっても下り線では区間 e→d および d→c、上り線では区間 j→i および i→h では流入する海水の流量はちいさく、門司側の海底区間における海水の流入は少ないことがわかる。上下線とも、区間 e→d および j→i の上部は粘土被覆で補強されており、止水に寄与していることがわかる。ところで、とくに上り線ではトンネル出口→j の区間で顕著に海水の流入が多いことがわかる。これは地下水条件としては、海水と地下水（淡水）との境界部（塩淡水境界）が介在する区間であり、より深部の海底区間における海水の供給にくらべ、複雑なメカニズムにより供給されている可能性があり、今後くわしく検討するべき課題であると考えている。

ここで述べたように、関門トンネルではトンネルの最深部に向かうほど海水の流入が単純に増大するのではなく、海水の流入のしかたには区間ごとに偏りがあることがわかった。ここでえた知見をもとに、同トンネル周辺の地盤の安定性を示す指標のひとつとして、海水の流量を観測していく予定である。

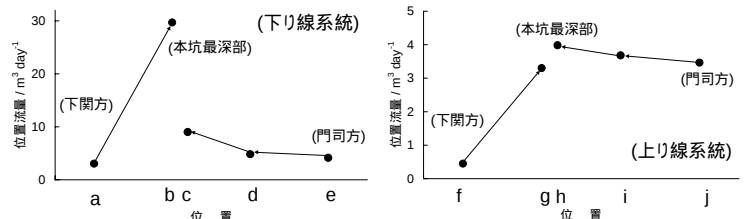


図3 本坑内の各位置における漏水中の海水の流量。
下り線系統ではa→b, e→d→cの順に、上り線系統ではf→g, j→i→hの順に漏水がトンネル内を移動し、本坑の最深部（下り線では位置bおよびc、上り線系統では位置gおよびh）に向かうにしたがって海水の流入が多くなる。

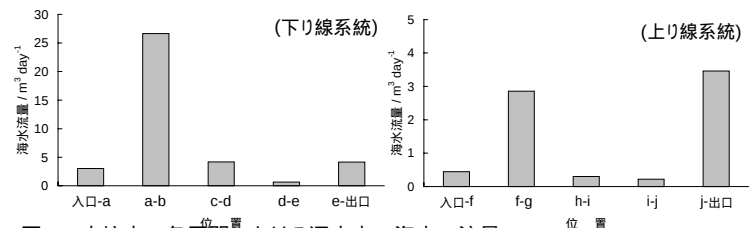


図4 本坑内の各区間における漏水中の海水の流量。
下り線系統では下関側のa→bの区間で海水の流入が多いのに対し、上り線系統ではf→本坑最深部gおよびトンネル出口→jの区間で海水の流入が多い。