

トンネルの変状原因の推定方法

砂金伸治* 真下英人** 角湯克典***

1. はじめに

高度経済成長期に建設された多くのトンネルの老朽化が進んできたのに伴い、ひび割れなどの変状が覆工コンクリートに発生するトンネルが増加してきている。変状は放置しておくコンクリート片のはく落やトンネル構造の破壊に至る場合もあり、トンネルの維持管理を効率的に進めるためには、トンネルの変状を早期に発見し、変状状態に応じた適切な対策を実施することが重要となる。

トンネルの変状の発生原因は、大きくは外力の作用によるものと、材料や施工に起因するものに分類されるが、トンネルに発生した変状の対策を検討する場合、これらの原因を推定することが非常に重要になる。その理由としてトンネルに対して必要となる対策や対策実施後の監視体制は、変状原因によって大きく異なるものになるためである。しかし、その原因推定に関しては確立された方法がなく、過去の類似事例を参考に現場技術者の経験に委ねた判定を行っているのが現状であり、変状の原因の推定方法の確立が求められている。

本報ではトンネルの変状事例の分析、数値解析、覆工載荷実験などから得られた、現場の技術者が変状の発生原因の推定を行う上で参考となる基本的事項およびチャート図を用いた変状の発生原因の推定方法を紹介する。

2. 変状の原因

変状の種類としてはひび割れ、うき・はく離、はく落、漏水が代表的なものとして挙げられるが、それ以外にも変形や隆起、沈下、移動、そして段差を伴う事例もあり、原因によって発生する変状が異なる。

2.1 外力により発生する変状

外力により発生するトンネルの変状は、局所的に見れば引張によるひび割れや圧縮による**圧ざ**※、せん断によるひび割れ等の組合せである。作用外

力とひび割れの状態には密接な関係があり、現場で問題となるのは、外力によってひび割れが発生した場合に、それがどのような外力によって発生したものか、また、ひび割れの発生がどの程度構造の安定性に影響を及ぼしているかということになる。外力により変状が発生する原因としては、(1)緩み土圧※(突発性崩壊も含む)、(2)偏土圧、(3)膨張性土圧、(4)水圧・凍上圧、(5)地すべり、(6)地震力、そして(7)支持力不足などがあり、発生した変状は放置するとトンネルの構造の破壊まで至ることがあり注意を要する。

2.2 材料や施工に起因する変状

材料や施工に起因して覆工コンクリートにうき・はく離やはく落等を生じる場合がある。また、ひび割れが発生したり、豆板が現れることもある。原因として材料や施工による影響に加えて、トンネルの置かれている環境の影響を受ける場合もある。材料や施工に起因して変状が発生する原因は、(1)温度応力(コンクリート硬化時)・乾燥収縮(トンネル坑内の湿度の低下)、(2)施工方法、(3)使用材料(鉄筋の腐食やアルカリ骨材反応)、そして(4)自然環境による誘発(時間経過といった不可避な事象も含む)などが挙げられる。

写真-1はトンネルの天端付近でトンネル縦断方向に発生した乾燥収縮によるひび割れの事例である。このようなひび割れは一見しただけでは外力の影響によって発生している引張ひび割れと区別することが困難である場合が多い。一方、写真-2は横断目地付近で三日月状に発生したひび割れであり、セントルの型枠を据え付け時に過度に押し上げてしまうことによって何らかの力が既設の覆工コンクリートに作用して発生した事例である。このようにひび割れの形状と位置によって発生原因を推定できるものもある。

3. 変状の原因の推定

3.1 ひび割れと変状原因との関係

トンネルの変状の中で比較的発見しやすく、維持管理上、最も着目すべき変状は覆工等に発生す

Estimate of Deformation Cause for Road Tunnel
*土木用語解説：圧ざ、緩み土圧

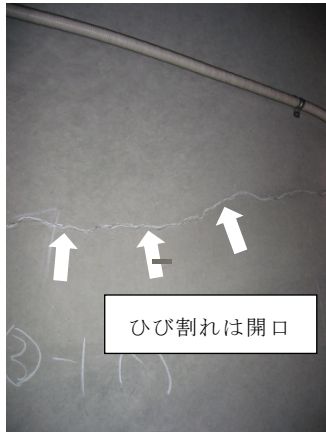


写真-1 乾燥収縮による引張ひび割れの例



写真-3 圧ぎの例



写真-2 型枠押し上げによるひび割れの例



写真-4 せん断によるひび割れの例

るひび割れである。ひび割れの発生にはそれぞれ原因があることから、変状の発生原因を推定する上で重要な手がかりとなる。

①ひび割れの性状

覆工に発生するひび割れの性状は、力学的な発生メカニズムからは曲げ圧縮・引張・せん断によるひび割れに分類され、曲げ圧縮のひび割れが進展すると曲げ圧縮破壊(圧ぎ)が生じる。写真-3および写真-4に圧ぎおよびせん断によるひび割れの例を示す。ひび割れの外見としては、引張によるひび割れは開口し、圧縮やせん断によるひび割れは密着しているが、ひび割れ部分で段差を生じる場合もある。このうち、せん断ひび割れや曲げ圧縮ひび割れはかなり大きな外力の作用により発生することから多大な注意を要する。一方、引張によるひび割れは、外力の作用以外にも写真-1に示したように温度応力・乾燥収縮などによっても発生する。

②ひび割れの発生位置・発生方向

ひび割れの発生位置は天端、肩部、側壁部、路面の4種に、また、発生方向に関しては縦断方向、斜め方向、横断方向、その他(ランダム等)に分類

することができる。これら両者を組み合わせて考えることにより、変状の発生原因とある程度関連づけることが可能となる。また、側溝や監査歩廊の縁石といった、トンネル本体に付属している構造物にせり出しやゆがみが生じている場合や路面にひび割れや盤ぶくれがある場合は、外力が作用しているものと考えられる。

③ひび割れの進行性

変状の進行を判断するためにはひび割れの進行性を考慮するのが効果的である。ひび割れ幅や長さの計測や、覆工の打設単位であるスパン毎にひび割れ長さの総延長をスパンの表面積で除したひび割れ密度を算定して判断することが多い。

図-1は、温度応力・乾燥収縮に起因する推定されたひび割れの密度と供用後の経過年の関係を NATMによって施工されたトンネルについて示したものである¹⁾。図より完成後5年程度でひび割れ密度が一定値または微増に留まる傾向にあることが分かる。また、温度応力・乾燥収縮によるひび割れは、覆工コンクリートの打設後6ヶ月程度から発生し、新たな発生は打設後20ヶ月程度までであった例も報告されている²⁾。これらより、

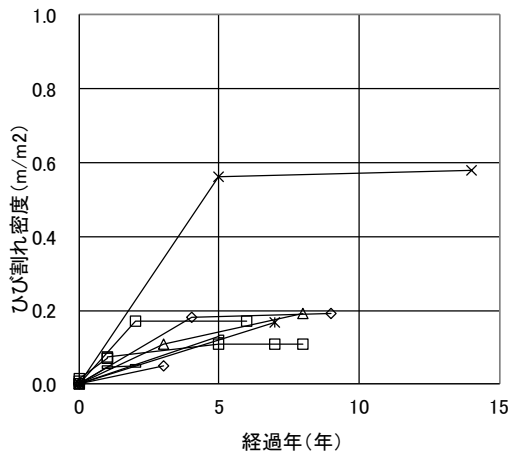


図-1 温度応力・乾燥収縮に起因すると考えられるひび割れ密度と経年変化(NATM)

温度応力・乾燥収縮に起因するひび割れは、建設後5年程度経過していればその進行はほとんどおさまると考えてよく、ひび割れの進行性の有無は外力が作用しているかどうかを判断するための重要な指標になると言える。

④貫通の程度

引張りひび割れの場合は温度応力・乾燥収縮によるものか、外力によるものかの判断がつかない場合が多いが、ひび割れの貫通の程度が判断材料になることがある。外力が作用している場合のひび割れは、圧縮側ではひび割れがほぼ閉じることが示されている³⁾。一方、棒状のコンクリート供試体を用いた実験によれば、供試体に温度応力・乾燥収縮によるひび割れが発生した場合には、輪切り状の開口したひび割れが供試体を貫通する形で発生することが報告されている²⁾。これより、開口したひび割れが貫通している場合は、温度応力・乾燥収縮によるひび割れである場合が多い。

⑤断面内のひび割れの方向

覆工コンクリートに対して放射状の方向、すなわちトンネルの中心から外側に向かった半径方向に発生しているか、ほぼ水平方向に発生しているかによって判断材料になる場合がある。コールドジョイントではひび割れが水平方向に発生する場合が多く、温度応力・乾燥収縮、または外力によるひび割れは一般に半径方向に発生する。ただし、ひび割れの発生位置によっては、水平方向と半径方向が重なる場合もあることに留意する必要がある。

3.2 トンネルの条件と変状との関係

変状発生原因の推定には、ひび割れに関する情

報だけにとどまらず、トンネルの条件に関する情報をもとに検討を行うことで可能になる場合がある。本節ではその着目点について列挙する。

①トンネルの施工法～NATMか矢板工法か～

建設されたトンネルがNATMによる施工の場合、支保工が地山の安定化を図っているため、外力の作用による変状は矢板工法の場合よりは少なく、ひび割れの原因は温度応力・乾燥収縮など材料や施工に起因する場合が多い。しかし、事例としては少ないが、外力の作用により変状が発生することもあり、その場合は膨張性土圧や地すべり、支持力不足、水圧の作用によるものが多い。

②施工時のトンネル挙動

NATMの場合は覆工コンクリートの施工は支保工等の変位が収束してから行われることが原則である。しかし、施工時に計測された変位が時間依存性を持つ場合には外力が作用して変状が発生する可能性がある。また、支保工の変形量が一般的な範囲に収まっているかどうかや、内空変位と天端沈下の比率に着目することによって、外力の作用する方向やその種類を判断する材料となる場合もある。トンネル施工時のデータは、設計図面と同様の価値を持つと考えられることから、後に活用できる形で保存しておくことが望ましい。

③トンネル周辺地山の地形、地質、土被り

泥岩、蛇紋岩、黒色片岩などは膨張性土圧が作用する場合が多く、変状が発生しやすい地質といえる。また、トンネルが偏圧地形や地すべり地帯に位置する場合にも外力の作用が疑われる。さらに、沢部の直下や大量湧水箇所等では水圧が作用することもある。大土被り、断層・破碎帯など、施工が容易ではなかった区間においても外力に起因する変状が発生する可能性が高く、底盤の地山の強度が小さい場合は支持力不足が疑われる。

④周辺の地下水の状態

矢板工法、またはNATMによって施工されたトンネルではともに排水構造となっており、基本的には覆工に水圧は作用しない。しかし、排水機能の阻害や集中的な降雨によって排水能力を上回る地下水が集まった場合は、覆工に水圧が作用して、側壁付近に縦断方向のひび割れが発生する可能性があることに留意すべきである。

上記以外にも⑤トンネルの形状、大きさ、構造、

⑥周辺構造物の有無、⑦周辺地山の挙動等を把握

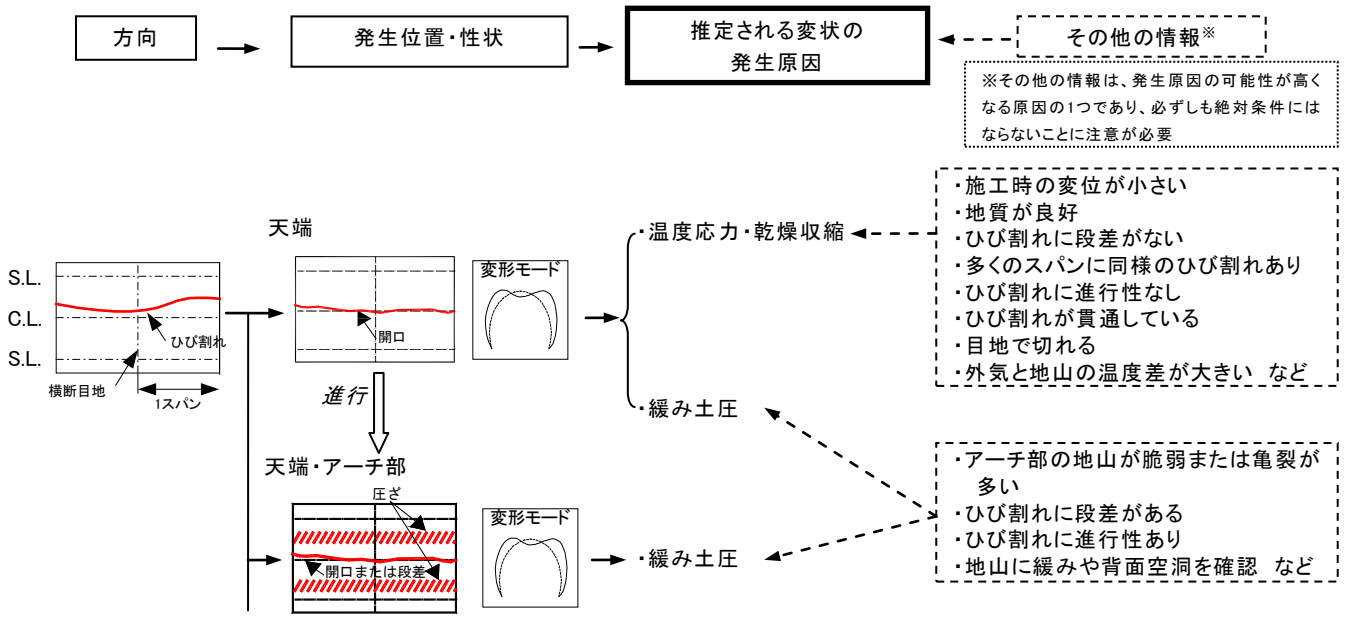


図-2 縦断方向のひび割れに対する変状原因推定のためのチャート図の例

することで変状原因の推定が可能となる場合がある。

3.3 チャート図を用いた変状原因の推定

上述のように覆工に発生したひび割れの特徴およびトンネルの条件とひび割れの発生原因は密接に関係するため、特に点検によって確認されたひび割れの情報の中から、ひび割れの方向、発生位置、性状といった特徴に着目することで変状の発生原因を絞り込むことがある程度可能となる。絞り込まれた変状原因に対しては、原因の推定に有効と考えられるトンネルの条件といったその他の情報を勘案して総合的に発生原因を推定することになる。図-2にこのような一連の作業が簡易に行えるように作成したチャート図の一例を示す。

4. おわりに

高度経済成長期に建設された多くのトンネルの老朽化が進んできたのに伴い、ひび割れなどの変

状が覆工コンクリートに発生するトンネルが増えてきている。今後、財源が制約される中でトンネルの維持管理を効率的に進めるためには、トンネルの変状を早期に発見し、変状状態・原因に応じた適切な対策を実施することが重要となる。今後は道路トンネルにおいて合理的な点検手法の確立に加え、トンネルが置かれている状態の評価に関する手法の確立が望まれる。

参考文献

- 1) 森本智、真下英人、角湯克典：トンネル覆工のひび割れの進展に関する一考察、第62回年次学術講演会講演概要集、pp.297～298、2007.9
- 2) 真下英人、砂金伸治、木谷努、遠藤拓雄：トンネル覆工の収縮ひび割れに関する研究、トンネル工学論文集、第15巻、pp.1～11、2005.12
- 3) 真下英人、日下敦、砂金伸治、木谷努、海瀬忍：トンネル覆工の破壊メカニズムと補強材の効果に関する実験的研究、土木学会論文集F、Vol. 64、No.3、pp.311～326、2008.9

砂金伸治*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所道路技術研究グループトンネルチーム 主任研究員、博士(工学)
Dr. Nobuharu ISAGO

真下英人**



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所道路技術研究グループ長、博(工)
Dr. Hideto MASHIMO

角湯克典***



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所道路技術研究グループトンネルチーム 上席研究員
Katsunori KADOYU