

覆工にひび割れのあるトンネルの健全性の検討

Stability of Tunnels Including Cracks in the Concrete Linings

呉佳曄¹・江川顕一郎²・栗原千鶴子³

Jiaye Wu, Kenichirou Egawa and Chizuko Kurihara

¹正会員 工博 ㈱セントラル技研 (〒192-0063 東京都八王子市元横山町1-2-13)

E-mail:jiayewu@centralg.co.jp

²正会員 ㈱セントラル技研 (〒192-0063 東京都八王子市元横山町1-2-13)

E-mail:egawa@centralg.co.jp

³正会員 逆問題研究会 (〒270-2261 千葉県松戸市常盤平3-29-1)

There are many reasons to cause cracks of tunnel linings made by concrete. The main factors are shrinkage by drying of concrete, temperature fall after hydration reaction and pressures of surrounding earth. The former two factors will converge after several years in the tunnel linings, so that, mechanically important part is earth pressure, especially the change of pressure and its distribution. It can be estimated the stability of existing tunnel structures by analytical methods, especially by inverse method. In this paper, some parameter studies are performed in the depth of crack, distribution of earth pressures and so on.

Key Words : stability estimation, existing tunnel, crack of lining concrete, inverse method

1. はじめに

本検討は建設後数年以上が経過した発電用水路トンネルの例を対象としたが、既設の道路トンネルや鉄道トンネルにも適用可能と考えられる。コンクリート覆工には種々の方向に伸びたひび割れや密集した状態のひび割れが入っており、これらは概略次のように分けられる。

(1) 縦断方向(軸方向)あるいは若干斜方向
長さは2~3mから長い場合には横断方向の継目全体、時として継目を越えて数十mに達することがある。トンネルの安定性を検討するには最も重要なひび割れである。

(2) 横断方向あるいは若干傾いた方向
全周にわたって横断方向あるいは若干斜行して入っており、人為的に設けた施工継目(間隔は10~15m程度)か施工途中でトラブルが生じた場合のコールドジョイントになっていることもある。変動がない限りトンネルの安定性には関係しない。

(3) 比較的規模は小さいが、ランダム方向に密集したひび割れも稀ではあるが見られる。

覆工表面に対する角度は、(3)のひび割れを除きほぼ90度に近い。ここでは、長さが1m以上に伸びていて深さも幅もきちんと測れるものを、卓越ひび割れと称する。卓越ひび割れの原因として考えられるのは、覆工コンクリートの乾燥収縮、コンクリートの水和に伴う温度上昇その後の降下によるもの、及び覆工に作用する外荷重すなわち土圧の変動が挙げられる。

このうちの前2者はコンクリートの本来的な欠陥で、コンクリートの打設、水和、硬化の過程で避けられないものである。なお、ひび割れを伴う変状としては、前記の通り密集した比較的狭い範囲のひび割れがあるが、原因としてはコンクリート材料の化学的作用によるもの、施工不良によるものや、局部的な応力集中、あるいは水流の作用による形状の劣化等があるが、それらは非常に稀であり、本論では対象としない。

前記の乾燥収縮やコンクリート温度変化に伴う変状は、覆工コンクリートのように厚さが比較的薄い場合には4～5年で収束し、それ以降の覆工のひび割れの変化は周辺土圧の変化によるものと考えてよいと思われる。

そのような外荷重によるものについては、逆解析手法を用いてひび割れ深さを主体として残存耐力を推算し安全診断法を検討したが、その部分は別稿で述べることにした。

本稿では、土圧荷重によりひび割れの入ったと考えられる覆工コンクリートについて、土圧荷重（偏圧）とひび割れの深さについて数ケースのパラメータスタディーを行ったので、それについて述べる。

2. 既設水路トンネル覆工に見られるひび割れ

(1) 典型的なひび割れパターン

覆工コンクリートに生じるひび割れについては、その概略は1章に示した。

ここでは、竣工後70年と50年経過している古い水路トンネルでの実測例を示す。

a・Sトンネルの例

Sトンネルは約70年経過した水路トンネルで、サイズは直径が5.5mの標準馬蹄形断面である。延長は約10kmであるが、ひび割れを主体とした探査はこのうち約4kmについて行われた。なお、本トンネルの横断方向の打継目は約10mであり、設計巻厚は30cmと45cmの2種であった。ひび割れ分類すると次のとおりである。

①縦方向ひび割れ（縦断に近い斜方向も含む）

アーチ天端中心±20°の範囲 43本
それ以外の位置 5本

長さの分布5m以内 32本
10m～5m 15本
10m以上 1本

深さの分布10cm以内 23本
10cm～15cm 8本
15cm～20cm 8本
20cm以上 9本

②横断ひび割れ

約10m間隔で設けられた施工継目に沿った横断方向ひび割れは多数に存在していた。長さはアーチか

ら側壁まで全体に伸びていた。この中で、比較的明確に開口している部分の深さを一部コア抜きで調べるといずれも30cmであり、これはその部分の巻厚を示していると思われた。また、他の部分の深さは15cm～22cm程度であり、これはひび割れ部が圧縮力を受けている状態であったと考えられた。

b・Hトンネルの例

Hトンネルは約50年経過した水路トンネルで、サイズは直径が約3mの標準馬蹄形断面である。延長は約9.5kmであるが、このうちの約3kmの区間は至近年に修繕工事が行われ、ひび割れは全く見られなかった。

縦断方向ひび割れは、アーチ天端の上2mの範囲（63本）とスプリングライン（44本）に多く見られた。なお、スプリングラインは型枠より判断すると施工継目になっていると考えられた。

アーチ上部に見られたひび割れは、長さの長いのはそれ程なく、トンネルの長さ方向の施工継目と思われる10～12mより長く伸びているのは2本であり、他はそれ以内であった。ただし、本トンネルは水垢が非常に多くひび割れ長さを正確に特定するのが非常に困難であった。このため横断方向のひび割れ探査はほとんど行わなかった。

アーチ部のひび割れの深さは5～20cmの間にばらついており、平均10.4cmであった。これに対しスプリングライン部のひび割れの深さは平均22.7cmとかなり大きく、この部分が施工継目であることが推測された。

(2) 覆工に発生するひび割れの原因

覆工コンクリートに発生するひび割れの原因として考えられるのは、次のとおりである。

- a・コンクリート打設時の温度上昇、下降
- b・コンクリートの乾燥収縮
- c・外荷重の変動
- d・施工不良

この中で施工不良は人為的条件であり、これは防ぐ努力をすれば無くすることができるが、他の3種はコンクリートの特有なものと外力に係わるもので、防止することは不可能である。

a・コンクリート打設時の温度上昇とその後の降下
普通セメントを用いた、典型的なコンクリートの打設から水和反応による温度上昇その後の温度降下の過程は図-1の様に示されている。

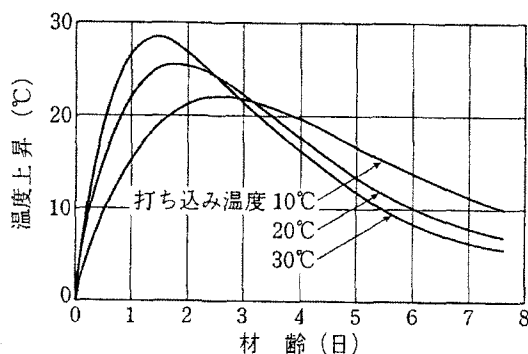


図-1 コンクリート温度上昇の1例
(普通セメント300kg/m³)

これによると打設初期の1～2日程度で温度は最大値に達し、約1週間後には最終安定温度に達している。この時期はコンクリートの耐引張歪に対する能力は低いので、条件によってはひび割れの入る可能性はある。

b・コンクリートの乾燥収縮

コンクリートの乾燥収縮については種々の実験式が表されているが、ここでは一例として単位セメント量 (C) と単位水量 (W) より表したものをを用いる。乾燥収縮量 (E_c) は時間的に次のような実験式で表している。

$$E_c = pC + qW$$

ここで p と q は実験で得られた定数で1週間、7週間、終局値で次のように与えられている。

$$1\text{週間} \quad E_c = 0.176C + 0.586W$$

$$7\text{週間} \quad E_c = 0.287C + 2.671W$$

$$\text{最終値} \quad E_c = 0.067C + 5.371W$$

この式にコンクリートの覆工で一般的に使われている C=250kg, W=150kg を入れると

$$1\text{週間} \quad E_c = 132$$

$$7\text{週間} \quad E_c = 471$$

$$\text{終局値} \quad E_c = 822$$

となる。これを図で示すと図-2のとおりであり、ほぼ2～3年経過で終局値に近くなっており乾燥収縮は

この程度で収束するといえる。

以上より、コンクリートの特性上発生すると考えられるひび割れは早くて1週間、遅くて3年程度であり、それ以降の段階で発生あるいは深さの変化するひび割れは、何らかの外荷重によるものと判断される。

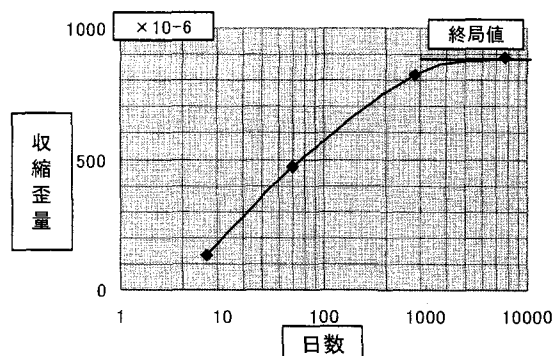


図-2 コンクリート乾燥収縮曲線の例
(C=250kg/m³, W=150kg/m³)

(3) 覆工の外荷重によるひび割れ

トンネル構造の安定性を検討するには、変位計測が用いられることが多いが、実運用されている水路トンネルでは、次のような難点がある。

①水流が常に動いており、停止して計測できるのは、数年に1回程度が標準であり、早いものではまれに年に1回のものもある。

②出来上がった地下構造物の変位量の動きは少なく、高々2mm程度でありそのうち計器の公差が約1mmあり、正確な値を得るのはかなり難しい。

これに対して覆工に生じるひび割れの深さを知ることとは比較的に簡単であるがそのひび割れがコンクリート特有の性質によるものか、外荷重の作用によるものかの識別は非常に難しい。

しかし、前記のとおりコンクリート打設後3年程度以上経過したコンクリートでは、それ特有の動きは収束しておりコンクリートだけでは新たにひび割れの発生すること、あるいはその深さが変動することは考えにくい。すなわち、そのような時点ではトンネル周辺の外力 (=土圧) の変化により、ひび割れも変化すると考えられる。

なお、2章に示した例は、ひび割れ深さが探査出来るようになってから2年以内に行われたもので、いずれの探査も1箇所でしかやられておらず、その

経時変化を知るには至ってなく、相当の年数の経たトンネルにもかかわらず外荷重の変動がどうかは判っていない。今後多くのトンネルで同一位置での複数回の測定を長期にわたって行うことにより、外荷重の変動の有無を検討できると期待している。

なお、ひび割れが外荷重によるものだけということが判ると、ひび割れ深さとコンクリートの物性により、力学的にバランスする土圧の大きさや分布を逆解析手法により推定でき、トンネル覆工の有する耐力を算定し、健全性診断が可能になると考えられる。

3. 覆工にひび割れの入ったトンネルでのケーススタディ

実際に運用されているトンネルをモデルとして逆解析を織り込んだケーススタディを行った。ただし、トンネルの条件として、覆工には剥離・空洞はなく、周辺は0以上の外力で押されていることとした。トンネルのサイズは以下のとおりである。

アーチ半径=3.3m、側壁高さ=2.4mの幌型断面のトンネルで、巻厚は30cmである。

アーチ右側45°の位置の覆工に深さ15cmのひび割れが発生していた。

覆工コンクリートの力学特性は非破壊探査の結果次のとおりであった。

圧縮強度=25N/mm²

引張強度=2.5N/mm²

弾性係数=22GPa

逆解析の計算は、覆工の深さ方向に9個のエレメントを設けた有限要素法の単純計算で行った。

ひび割れが発生している付近の応力状態に着目し、この部分の応力が引張強度を超えていると、ひび割れが1箇所発生している場合と等価であると判断した。また、トンネルには元々等分布の土圧が作用していてひび割れのない安定な状態が得られているが、そこに等分布でない偏圧が作用して覆工にひび割れが入るものと仮定した。このような条件のもとで次の2ケースについてスタディーを行った。

- ① 等分布土圧の大きさとひび割れの変化
- ② 偏圧の大きさとひび割れ深さとの関係

なお、トンネルモデルと等圧、偏圧の载荷モデル

を図-3に示す。

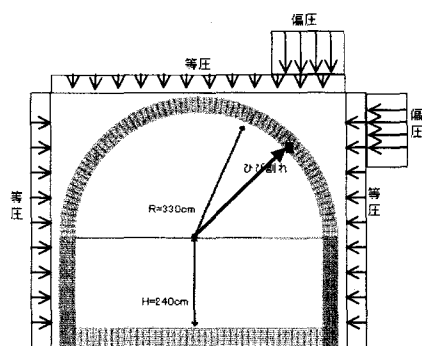


図-3 トンネルモデルと载荷モデル

①分布が等圧で（2，5，10MPa）の3種ある時、図示の偏圧载荷して、ひび割れ深さが15cmになるための偏圧の大きさを求めると次のようになる。

等圧 (MPa)	偏圧の大きさ (MPa)
2	14.8
5	15.2
10	18.5

表-1 逆解析によるケーススタディ その1

このことは、周辺から強く押されている程加えられる偏圧も大きいものが必要で、逆に言うと周辺から等分に強く押されている程トンネルは安定であることを示している。

②等圧分布を5MPaに固定したときのひび割れの深さと偏圧の大きさを比べると次のとおりである。

偏圧の大きさ (MPa)	ひび割れの深さ (cm)
13.0	13
15.2	15
21.0	18

表-2 逆解析によるケーススタディ その2

この中で応力状態が最も厳しくなる偏圧=21.0MPaの引張り応力状態を見ると図-4の通りで断面内はすべて引張応力状態であり、約半分が引張り強度2.5N/mm²を超えている。引張り強度を超えない部分が約半分あり、応力的には安全となる。

ただし、本解析は応力状態を1回だけ有限要素法の単純計算で行っただけで、強度からひび割れを評価しているが、厳密にはひび割れの初期の状態から引張り強度を調べ、ひび割れが入った場合には応力

の再配分を検討し、ひび割れが逐次に入っていくような非線型的な解析が必要である。

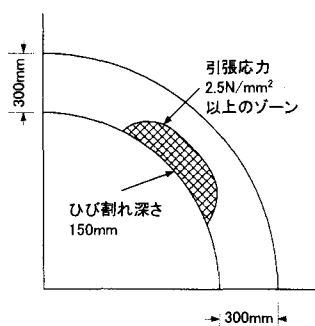


図-4 ひび割れ発生の様式図

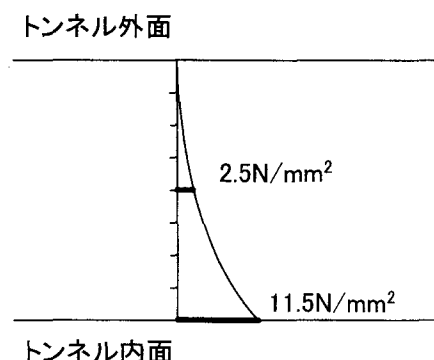


図-5 ひび割れ部の応力状態の例（引張り）

4. おわりに

トンネルの安定性の検討にあたり、覆工コンクリートに発生するひび割れの有無を指標とすることを考えたが、コンクリートの覆工には種々の原因でひび割れが発生していた。

これらを乾燥収縮や温度応力等コンクリートが本来有する性質により発生するものか、あるいは外荷重の作用によって発生するものかを判別する必要がある。しかし、建設後数年経過したトンネルに於いては、前者によるひび割れを伴う変動はほとんど収束しており、適切に施工されたトンネルでは、ひび割れの変動=外荷重の変動とすることができる。

このようなトンネルでは、同一位置での継続観測を実施し、ひび割れの深さやその延長の程度を探索しておくことが重要である。

また、トンネルに作用する外荷重（=主に土圧）の大きさや分布形状を直接知ることは非常に難しい。そこで、土圧を直接探知しないで覆工のひび割れ深

さとコンクリートの力学特性から、それにバランスする土圧の大きさや分布を逆解析手法で推測する方法を検討した。その結果を用いて、周辺土圧や偏圧荷重とひび割れの関係について数例のケーススタディを試みた。ただし、ここでは線型の有限要素法で応力だけに注目したものであり、厳密にはひび割れ発生から発生後の応力緩和までを含んだ解析が必要と思われる。しかし、トンネルの点検の都度このような解析を行うのは実用的でないで、実用的な最適解を得るための検討が必要である。

【参考文献】

- 1) 土木学会，トンネル工学委員会：山岳トンネル覆工の現状と対策，土木学会 2002年9月
- 2) 山田順二，有泉昌：わかりやすいセメントとコンクリートの知識，鹿島出版会，1976年4月
- 3) 舎川徹，安保秀範，田中雅弘，江川顕一郎，呉佳暉：新しいひび割れ深さ探査技術の開発，トンネル工学研究，論文・報告集，Vol.10，pp55-62，2000年
- 4) 桜井春輔：情報化施工における逆解析，土木学会論文集，No.652/Ⅲ-51，pp1-10，2000年6月，
- 5) 池尻健，江川顕一郎，峯村一夫，大久保晴司：延長10km発電用水路トンネルの安全診断試案，第11回岩の力学シンポジウム講演論文集，The 11th Japan National Symposium for Rock Mechanics 2002，2002.
- 6) 久武勝保，村上譲二，村上敏男：変位計測によるトンネル覆工保守管理の一手法，トンネルと地下，Vol.33，No.10，pp47-56，2002年10月