

1 変状トンネルの分類と変状サイクル

1.1 定義と分類

内空断面の形状や寸法が初期の状態とは異なり、車両交通のためになんらかの防護対策を必要とする状態にあるトンネルを変状トンネルと呼ぶことにする。変状トンネルの変状の理由には、おおよそつぎのような概念が含まれる。

- (1) 老朽 (**deteriorated**): 経年のため覆工材が劣化し、覆工強度の低下がいちじるしいもの。
- (2) 変形 (**deformed**): 覆工断面の形状または位置の変化したもの。
- (3) 破壊 (**destroyed**): 覆工材の破壊したもの。
- (4) 欠陥 (**defective**): 施工上の欠陥 (漏水, 噴泥, 覆工の材質不良) を内蔵するもの。

次に異質であるが

- (5) 車両の大形化または電化などの新しい使用目的のために内空断面の不足するもの。

これらの状態がそれぞれ単独に起こる場合は少なく、二つ以上が組合わさつた状態の変状トンネルが多い。

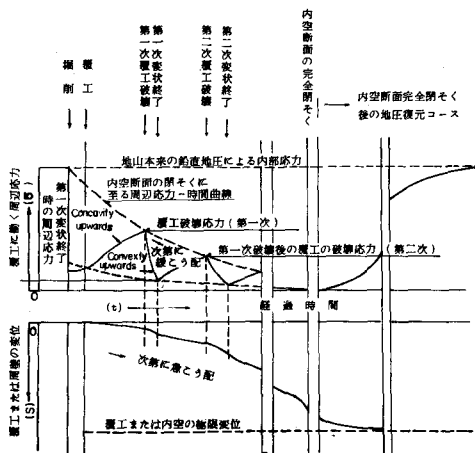
1.2 変状のサイクル

トンネルの掘削は地中応力を乱す。地中に内挿されたトンネル覆工が十分に強く、乱された応力のもとで新しい平衡状態をとり戻そうとする際に生ずる地圧に対抗しうるならば、そのトンネルは安全に保たれるが、覆工の構造上の強度が不足すれば、覆工は変状または破壊を起こすことになる。覆工の破壊後もひきつづいて地圧が作用するときはトンネルの内空断面は次第に縮小されていく。地圧の増加と覆工の破壊について地圧が解放される。覆工背面に再び地圧が蓄積されてこれが覆工の破壊を促進する。このような経過をもとにして図1のようなトンネルの変状サイクル図を抽くことができる。

2 改築に際しての問題点

営業中のトンネルの改築 (活線改築) の困難さは別にしても、トンネルの改築は、新しく掘削される場合にくらべて、いろいろの制約と困難を伴う。その原因は見掛上はある平衡を保っているにしても、既設トンネルの周囲の地山は掘削によつて一旦乱されたものであるということにある。すなわち、トンネルの改築は、それ自身つぎのような意味を持つている。

- (1) トンネル掘削は掘削前の地中応力



図・1 トンネルの変状サイクル

を乱し、覆工の施工はその周辺の地中応力を取り戻すように作用するが、乱された地山は必ずしも元の状態には戻らないし、平衡を取り戻すためには一般に長年月を必要とする。外力によつて変状したトンネルにあつては、改築の時点において末だに地圧が増加しつつあることは明らかである（下久野トンネル、宇佐美トンネルなど）。建設後のトンネルについても、北陸トンネルでは7年、下久野トンネルでは改築後9年を経過しても、覆工背面の地圧は波動的または段階的に増加している。

(2) 改築の時点において、覆工と地山との間には、なお間隙を残している部分があり、地山と覆工との接触状態は一様ではない。すなわち掘削当時に与えられた地山のゆるみは、さらに広範囲の地山のゆるみによつて補償されるという因果関係をもっている。変状が進行しつつあるトンネルにおいては、その可能性は無限にあるといふことができる。

(3) 改築のための変状覆工および周辺地山の掘削は、平衡状態を回復しつつあつた地山を再び乱し上記のような地圧現象を復活するように作用する。その際、覆工のとりこわし、または、その崩壊を防止するための防護セメントを必要とすることがある。

(4) 改築のための掘削は、隣接区間にとつては荷重の増加を来すので、旧覆工が変状している場合には、その破壊が促進、拡大されることがある。その様子は下久野トンネルの改築に際しての計測によつて明らかに認められる。

3. 変状トンネルに作用する地圧の傾向

3.1 初期の測定法と地圧（下久野トンネルについて）

3.1.1 改築前の地圧（1958年3月～1958年10月）

地質は花崗岩とこれを貫く塩基性または酸性岩脈からなるが、花崗岩は局部的に亀裂に富み、その一部が真砂状化している。岩脈の一部は、とくに変状地点では粘土化している。変状の原因は70°に傾くこの脈状粘土の非閉塞性地圧が、覆工に偏圧状に作用したためと考えられる。

改築前7カ月にわたつて測定された地圧は図2に示されるように、増加又は減少、換言すれば蓄積と解放が交互に現われながら次第に大きくなつて、ついに極限の状態に達している。変状覆工は地圧の増大に対して容易に変位を許し、変位の結果、地圧の増加は抑制される。変状覆工に防護セメントが内挿されると覆工の変位は次第に抑制される。

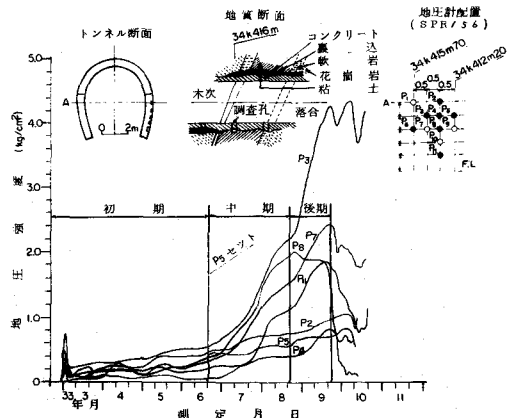
改築前の地圧の傾向はつぎの3段階にわけて考えることができる。

(1) 初期の段階（3月上旬～6月中旬）：受圧器をとり付けた直後であつて地圧は小さい波動変化を繰返している。

(2) 中間の段階（6月下旬～8月中旬）：地圧の増加が明らかに認められる。

(3) 後期の段階（8月下旬以降）：地圧の急激な増加とそれに続く降伏曲線が現われている。

3.1.2 改築後の地圧（1959年1月～1966年）



図・2 下久野トンネル改築前の地圧変化曲線

地圧測定は、改築後7年以上にわたって行なわれる。地圧の傾向は明らかに次の2つの形に分けられる。

- (1) 段階的に増加するもの
- (2) 増加と減少を波動的に繰返しながら、全体として漸次増加しているもの。

そのどちらにおいても、波動の周期はしだいに短くなっている。地圧の増加は改築後4年にしてわずかに認められるにすぎないが、その間にあつて、地圧曲線（地圧・時間曲線）には尖頭曲線（ピーク）が繰返し現われている。この地圧曲線のピークは覆工背面の受圧器に接する地山が局部的に破壊する結果であり、その繰返しは覆工と地山との間の隙間（相対的には密度差があるかもしれない）が密に、強度的には次第に強く閉塞されていく過程にあることを示すものと考えられる。（図3、図4）

3.2 最近の測定法と地圧（岩崖トンネルについて）

覆工背面と地山との接触は一樣ではない。ある場合には拱頂部に空洞状の間隙が残っている。地山が岩石であつたり粘土であつたりする。これに境界型の受圧器をセットして測定された地圧は集中荷重をうけるなど局部的に変化していて、全体の傾向とは大分かけ離れたものが求められる場合がある。

このような経験と反省から、筆者らは変状トンネルの地圧測定には、境界形受圧器よりも覆工そのものまたは防護セメントそのものを応力計または荷重計と、みなす方式の測定法を用いるのが適当であると考えられるようになった。

覆工コンクリートを通して伝えられる荷重は、変状がもつとも激しく現われたところの入口から16m (Section 1)と45m (Section 2)に挿入された防護セメント2基について測定された（図5）。覆工とセメント間の荷重の伝達を確認するため、クサビには鋼製ターンバックルが用いられた。

セメント1基に作用する荷重は

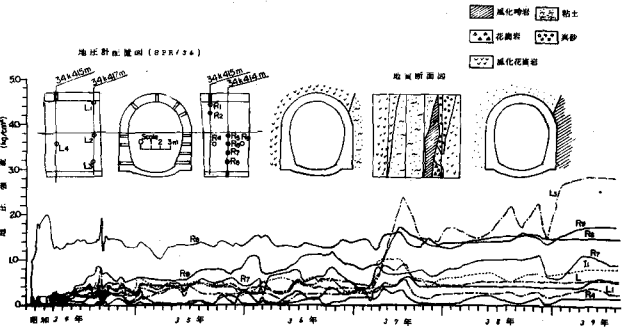
Section 1 では

$$2R_{u1} = R_{1e} + R_{1r} = 5.6 + 6.2 = 11.7^t$$

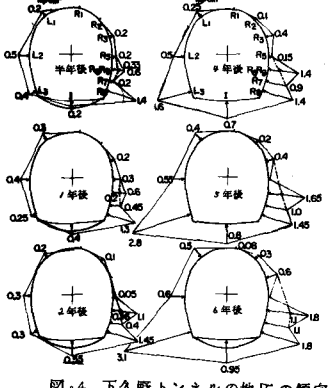
Section 2 では

$$2R_{u2} = R_{2e} + R_{2r} = 4.5 + 4.2 = 8.7^t$$

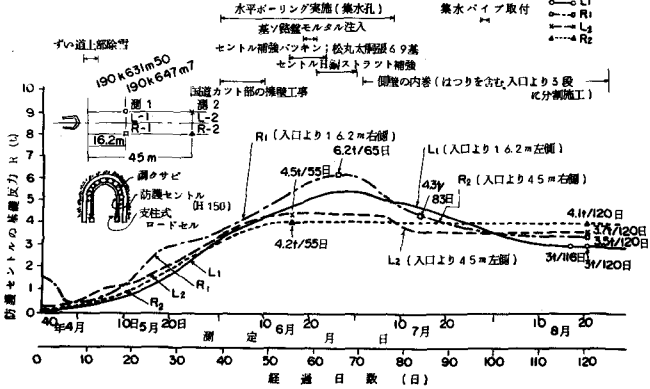
R_{u1} の最大値は $R_{1r} = 6.2^t$ (Section 1)



図・3 下久野トンネルにおける改築後の地圧変化曲線



図・4 下久野トンネルの地圧の傾向



図・5 岩崖トンネルにおける防護セメント基礎反力の測定曲線

である。

変状トンネルをさらに強化するために、側壁コンクリートの内側に鋼製セントル(H150×150×7×10)を抱いて拱起線(S.L)に達する根固め形式のコンクリートが施工された。そのため R_{1e} はそれぞれ R_{1e} が5.5t から3t、 $R_{1r}=6.2t \rightarrow 3.5t$ 、 $R_{2e}=4.5t \rightarrow 3.7t$ 、 $R_{2r}=4.2t \rightarrow 4.1t$ まで減少した。

トンネルの変状要因のすべてがとり除かれたわけではないので、近い将来、外力が増加する機会が必ずあると思われる。この変状トンネルの強度(耐力)の限界は、内挿された根固め形式のコンクリートを含めた側壁コンクリートの基礎岩盤の地耐力が決定し、その値は、鋼製セントルの各ノ基当りの荷重にして5.4tであると評価された。これを R_u に置きかえるとそれぞれ

$$R_{1e} = 4.6t, R_{1r} = 2.5t \dots \text{Section 1}$$

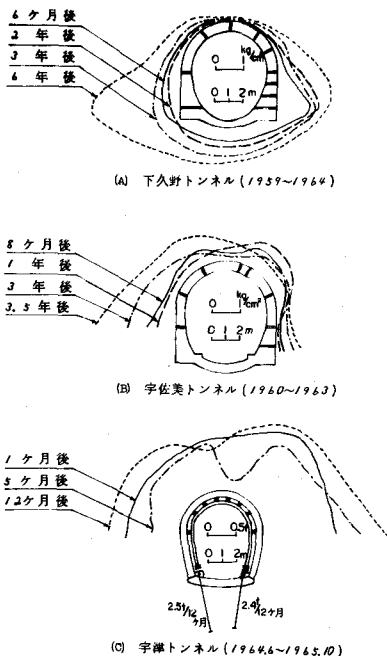
$$R_{2e} = 8.9t, R_{2r} = 1.0t \dots \text{Section 2}$$

に相当する。これは改築時、あるいは別線建設時までの営業線の安全管理の指標として用いることができる。

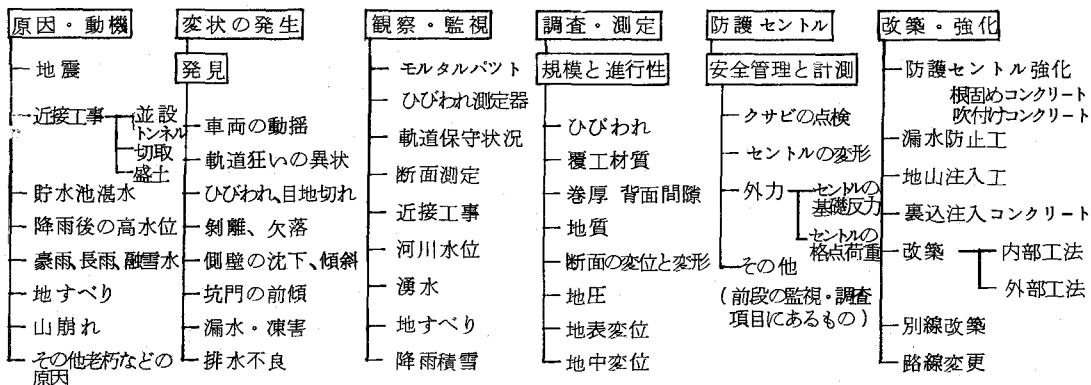
このような測定は米坂線宇津トンネルなどに用いられた。図6は各トンネルに作用する地圧の経年変化を示したものである。

4 対策の要点

変状の発見から観察・監視・変状の規模と進行性に対する調査測定・安全管理と計測、防護セントルの架設、改築強化対策に至るまでの手順・要領を系統的に一括表現すれば図7のようである。



図・6 施工背面圧力分布の変化



図・7 変状トンネル対策系統図

参考文献

- (1) 高橋，飯塚：土木学会誌 45-3， 1960-3
- (2) 高橋，飯塚，高木，鎌田，阿部：鉄道技術研究報告 46501， 1965-10
- (3) 高橋，飯塚，高木：鉄道技術研究報告 46618， 1968-1

Behaviours of earth-pressure acting on deformed railway tunnels

Hikoji TAKAHASHI

Akira IIZUKA

Morio TAKAGI

Railway Technical Research Institute

Summary

In case of tunnels being deformed, hindrances may occur more severely in railway tunnels than in other tunnels. Examinations and reconstructions of deformed tunnels had been performed by J. N. R. , hitherto. Shimokuno tunnel: In consequence of measuring mainly earth pressure behind the lining over a long period before and after reconstruction, some behaviours of earth pressure could be observed as follows:

- 1) Accumulation of earth pressure behind the deformed lining when it was protected by steel supports,
- 2) responses of earth pressure to the progress of reconstruction works, and
- 3) accumulation of earth pressure after reconstruction.

This method of examination was applied in Usami tunnel and others. Through these experiences and consideration on them an idea was obtained: that examinations of deformed tunnels should be made by pressure cells of lining itself or by load cells of protective supports themselves to estimate acting load. In the case of Iwakake tunnel load cells were planted at the base of steel supports which had steel packings for fastening. Meanwhile, seasonal effects of earth pressure on deformed tunnels were also observed.