

(69) 水平傾斜計によるトンネル切羽前方地山の変位挙動の計測例

応用地質株式会社 関西支社 ○岡 部 幸彦  
" 技術本部 近 藤 達 敏  
" 関西支社 庄 野 俊太郎  
" 関西支社 杉 田 理

1. まえがき

トンネルの掘削において、切羽前方の地山に生じる変位挙動を計測することは、トンネルを安全にかつ経済的に施工する上で最も重要である。近年、NATMによるトンネル掘削工法は、土被りのうすい都市トンネルにも採用されるケースが多くなってきており、ますます情報化施工の重要性が求められている。そのため、トンネル掘削する以前に、すなわち、切羽前方の地山挙動をいかに早く予測するかが特に重要である。

筆者らは、特に花崗岩の強風化帯や段丘砂礫層等の砂質地盤のトンネルにおいて、トンネル天端近傍の縦断方向に設置した水平あるいは水平に近いボーリング孔内でボーリング孔を含む鉛直面内の変位が精度良く計測出来る孔内傾斜計を用いて、トンネル切羽前方から後方までの連続した変位挙動を計測する機会を得た。その結果、トンネル切羽前方における変位挙動が地山の变形特性と密接な関連が認められ、切羽前方における変位挙動の特徴から、計測値そのものから直接、切羽前方を含む切羽近傍の地盤物性を予測出来る手掛りを得ることが出来た。

本文では、いくつかのNATMトンネルで行なわれた、水平傾斜計の計測結果を紹介するとともに、トンネル切羽到達時の先行変位比率や切羽前方における変位の出現と切羽位置の関係について考察し、切羽前方の地盤物性評価の可能性について述べるものである。

2. 水平傾斜計の特徴と較正

水平傾斜計は、水平あるいは水平に近い形で埋設された溝付きのケーシングパイプに前後2輪で支えられたプローブを挿入し、プローブ内のサーボアクセルメーターにより傾きを検出して、指示計により換算された変位量がデジタル表示される。

ケーシングパイプは、 $\phi 139$ mm程度のボーリング孔内に設置され、地山とケーシングの間をグラウトによって密着させる。測定は、ケーシングの溝に合せてロッド等によりプローブを挿入し、 $50\text{cm}$ 間隔に移動しながら行う。指示計における表示は、 $2.5 \times \sin \theta$ の値が表示される。測定は、図-1に示した様に正確に $50\text{cm}$ 間隔に車輪がセットされたプローブで行なっているため、2つの車輪間の変位は、 $50 \times \sin \theta$ である。しかし、測定器には、固有誤差が含まれるため、プローブを $180^\circ$ 反転された2回の測定を行って固有誤差を相殺することが出来る。

現場での測定において経時変化あるいは、切羽位置との関係で変位量の変化を把握する場合、測定値の再現性が問題となる。本測定器には、その自体の較正器がないため、温度変化や指示計内部電圧の変化によって指示値の誤差を避けることが出来ない。そのため、固定点となるべき一方の端における指示値の測定回毎の変化を測定上の誤差と考え、固定点における測定回毎の指示値と初期値との差を全測点の指示値から差し

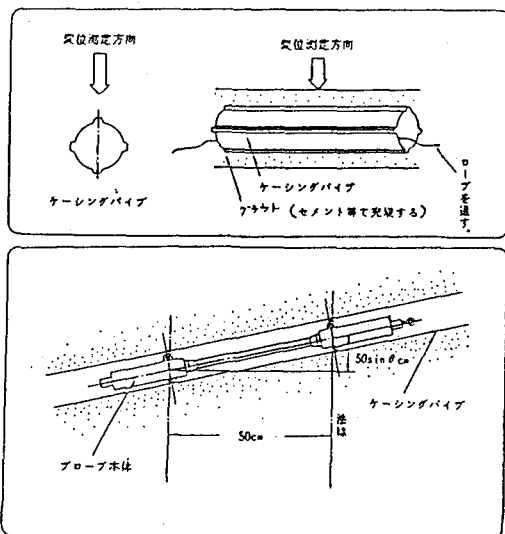


図-1 孔内水平傾斜計のプローブ及びケーシングパイプ

くことによって較正を行っている。

この較正方法を原点較正と呼んでいる。

図-2には、原点較正前と較正後の計測値を比較したものである。測定長の長い場合は、その累積変位に相当な誤差を生ずるため、原点較正は、必要不可欠と考えられる。

### 3. 測定結果

砂質地盤のトンネルにおいては、特に切羽の近傍でしかもトンネル天盤の変位量を把握することが、切羽の崩壊やトンネル支保の妥当性を検討する上で重要である。したがって、水平傾斜計はトンネル天端に設置され地山の鉛直変位を計測することが有効である。

図-3は、花崗岩と第三紀の境界付近に掘削されたAトンネルの実測例である。花崗岩は、著しく風化した花崗岩と比較的硬質な花崗岩が、ほぼ帯状に分布している状況である。水平傾斜計は、図-3(a)に示したように、トンネル内から6°の角度で設置された例である。

強風化花崗岩の軟質な部分と花崗岩の硬質部との間に著しい物性の差があり、同時に硬質な花崗岩が5°の流れ盤の形状で分布しているのが特徴である。

図-5は、洪積層の砂礫を主体として、全体的には、均一な地山であるが、補助工法としてのバイブルーフが施工された区間があり、それが他の区間に比較して天端沈下を抑制する効果が計測されているのが特徴である。

いずれの実測例も、トンネル切羽の進行に伴って、切羽近傍および切羽前方の変位量が変化して行く様子がよくわかる。

図-3(a)および図-5(d)に示した全変位量は、切羽通過後の変位量を最小自乗法で最終値を計算し、切羽通過時の先行変位を加えたものである。これ等の全変位量は、地質状況ならびに補助工法の有無によく合致しており、硬質なところは変位量が少なく、軟質なところは、大きい変位量を示している。特に、軟質な部分から硬質な部分に入るところは、局端に大きい変位挙動が認められる。

図-3(a)に示される様に先行変位の全変位量に対する比率も、地質状況とよく一致しており、花崗岩の硬質な部分は、比率が25~40%であるのに対し、強風化花崗岩の軟質な部分は40~60%にも達

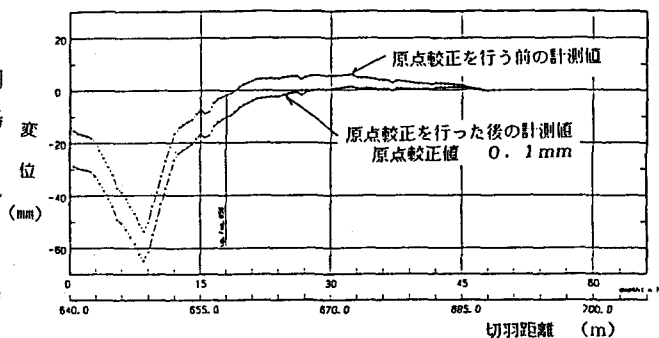


図-2 原点較正を行う前と行った後の計測値比較

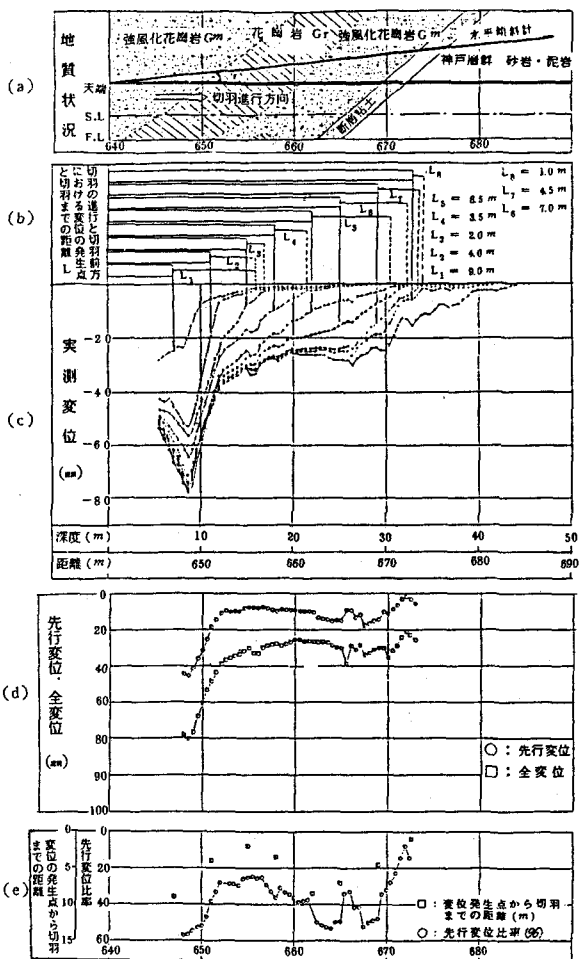


図-3 Aトンネルにおける水平傾斜計計測結果

している。一般的に弾性体においては、先行変位の比率が30%前後であることから考えると、強風化花崗岩の軟質な部分は、すでに完全な弾性体ではなく、塑性化が進んでいるものと考えられる。

一方、同じ図-3(e)に示した切羽前方の変位発生点から切羽までの距離についても、花崗岩の硬質な部分は短く、軟質な部分は長いという傾向が明瞭に認められる。切羽前方における変位発生点の定義は図-4に示したように切羽前方における変位勾配度換点であるが、先行変位の比率とよく一致することは、何らかの力学的な意味を有しているものと考えられる。

図-5に示したBトンネルの測定結果においてもAトンネルで認められた傾向とはほぼ同様である。すなわち、パイプルーム区間の全変位量は、他の区間に対して $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ 程度に減少しており、同時に先行変位や先行変位の比率および切羽前方の変位発生点から切羽までの距離も同様に小さくなる傾向が認められる。

以上述べてきたように、砂質地盤に掘削されたA、B両トンネルの計測結果からその変位挙動の特徴をまとめると次の様になる。

1) 切羽後方における全変位量は、地質状況とよく一致している。但し、変位量の絶対値からみると軟質な部分から硬質な部分に入る場合の方が極端に大きく、硬質な部分から軟質な部分に入る方が小さい。

2) 先行変位の全変位量に対する比率と切羽前方における変位発生点から切羽までの距離(L)との間に密接な関係があり、地盤が硬質な部分は軟質な部分に比較して先行変位比率も小さくLも短い。このことは、水平傾斜計の測定によって切羽前方における地盤の変形特性を切羽が到達する以前に予測出来ることを示唆している。

### 3. 切羽前方地山の変形特性の予測

水平傾斜計の変位挙動から切羽前方の変形特性(主に弾性係数)を予測する場合、特に切羽前方における変位発生点と切羽までの距離(L)と先行変位の全変位量に対する比率に注目して検討することが有効と考えた。

そこで、切羽前方における変位発生点から切羽までの距離(L)を定式化するため、Lをトンネル直径(D)で割って $\frac{L}{D}$ とする。この値を $\frac{L}{D}$ 値と呼ぶ。一方、

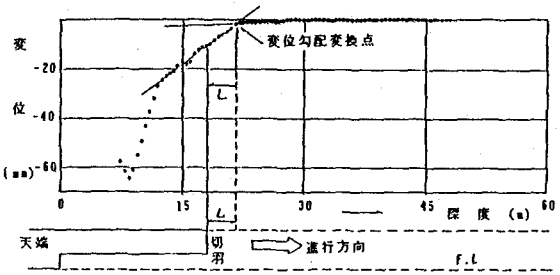


図-4 切羽前方における変位発生点と切羽までの距離(L)の決定

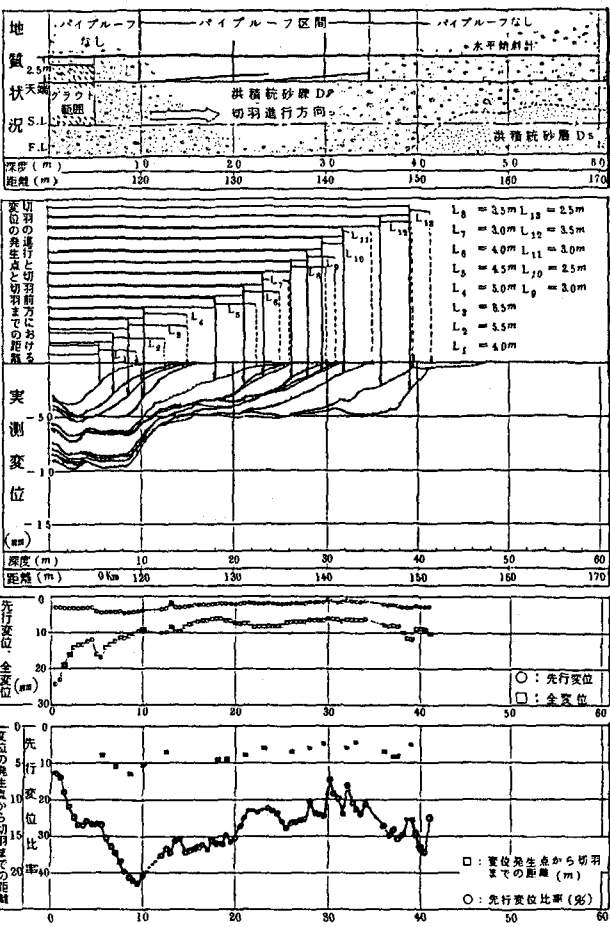


図-5 Bトンネルにおける水平傾斜計計測結果

先行変位の全変位量に対する割合を%で表わしたものをR値と呼び、 $L/D$ 値とR値の関係を図-6に示した。図-6には、データ数を増すためにA, B両トンネルの他にC, Dの2つのトンネルで行なわれた実測値も含め51個のデータとなっている。

$L/D$ 値とR値の間に比較的良い相関が認められ、次の様な関係がある。

$$R = 50.14 \log \frac{L}{D} + 51.00 \dots (1)$$

図-6  $L/D$ 値とR値の関係

但し、R値は10%以上に適用し、砂質地盤に適用するものとする。

$L/D$ 値とR値の関係をを使用して、切羽到達した時点における先行変位 ( $U_0$ ) が実測出来るため、全変位量 ( $U_{max}$ ) は次式で求めることが出来る。

$$U_{max} = 100 \times U_0 / R \dots (2)$$

$U_{max}$ が求められると、円形素堀りトンネルにおける弾塑性計算式から導き出される簡略式(3)式によって、みかけ弾性係数を求めることが出来る。

$$E_i' = \alpha \cdot P_o \times a^2 / U_{max} \times r_i \dots (3)$$

$E_i'$  : みかけ弾性係数  $\alpha$  : 補正係数

$P_o$  : 初期応力 (土被り荷重)

$a$  : トンネル半径  $r_i$  : トンネル中心から水平傾斜計測点までの距離

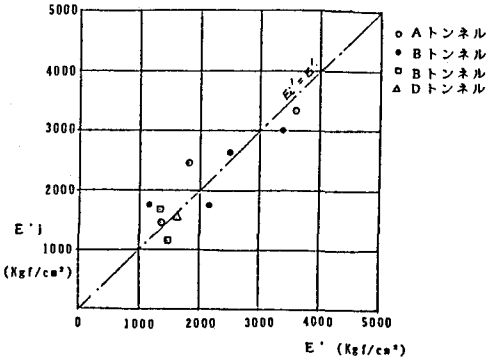


図-7 水平傾斜計から求めたみかけ弾性係数 ( $E_i'$ ) と内空変位、天端沈下から求めたみかけ弾性係数 ( $E'$ ) との関係

図-7には、水平傾斜計の実測値から(3)式によって求めたみかけ弾性係数 ( $E_i'$ ) と内空変位や天端沈下から逆算によって求めたみかけ弾性係数 ( $E'$ ) の関係であるが、かなり良く一致している。すなわち、水平傾斜によって切羽前方の変位形状と先行変位量を計測することによって、他の計測による逆算方法と同様な方法によって切羽近傍および切羽前方地山の变形特性を直接計測値から予測出来る可能性を示しているものと判断される。

#### 4. あとがき

水平傾斜計によってトンネル縦断方向の連続的な変位挙動が把握出来る。同時に、計測結果から切羽前方における変位勾配変換点を検出することによって、 $L/D$ 値とR値の関係から切羽前方の变形特性を把握出来る可能性を示した。しかし、この様な関係は、地盤の有する不変的な特性であるか否かについて実証されたものではない。今後さらに、データを蓄積すると共に、その適用範囲と力学的な理論づけを行いたい。

#### 参考文献

横山 章, 木村宏他 土被りの薄い未固結地山における切羽および切羽前方の劣化に関する研究, 第15回岩盤シンポジウム P180~183, 1982  
 近藤達敏, 岡部幸彦 内空変位の実測値に基づくトンネル地山のみかけ弾性係数の評価, 昭和57年土木学会年次大会講演集, 1982

(69) Example of the Measured Deformation Behaviours in Soft Rocks forward Tunnel Face by Horizontal Inclinator

OYO Corp. Yukihiro Okabe  
 OYO Corp. Tatutosi Kondo  
 OYO Corp. Shyuntaro Syono  
 OYO Corp. Osamu Sugita

We set inclinometers horizontally along the centerline of the tunnel longitudinally.

We had analysed these data measured by inclinometers and had found the following features on the deformation behaviours.

1. Overall displacement by inclinometer is compatible with rock ground condition relatively.
2. The ratio of the displacement of forward tunnel face to the overall displacement (R value) is comparable with the rock ground condition.
3. The distance from the moving point forward the face to the face (L) is well comparable with the rock ground condition.

Therefore we have named  $L/D$  value, which is given to divide L value by the tunnel diameter (D) and have found the following relation between  $L/D$  value and R value

$$R (\%) = 50.14 \times \log \frac{L}{D} + 51.00 \dots \dots (1)$$

(1) equation and data enable to presume the overall displacement ( $U_{max}$ ), when we take in L value and the forward displacement ( $U_0$ ).

And we make a suggestion of the simple equation which gives apparent Young's modulus based on the data measured by inclinometers.

The simple equation is following.

$$E_i' = \alpha \times P_0 \times a^2 / U_{max} \times r_i \dots \dots (2)$$

$E_i'$  : apparent young's modulus (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\alpha$  : correction coefficient

$P_0$  : initial stress (kgf/cm<sup>2</sup>)

$a$  : tunnel radius (cm)

$r_i$  : distance from tunnel Center to the inclinometer (cm)

Apparent Young's modulus, which is given by (2) equation is compatible with apparent young's modulus ( $E_i'$ ), which is calculated from convergence and with equivalent Young's modulus by the F.E.M back analysis (DBAP).

It may be get the deformation characteristics by (1) and (2) equation when we have the measured displacements of the grounds forward tunnel face.