

水平傾斜計測定結果に基づく切羽前方地山の最終変位の予測
PREDICTION OF THE OVERALL DISPLACEMENT OF ROCKS IN FRONT OF TUNNEL FACE
BASED ON THE ACTUAL DATA BY MEANS OF INCLINOMETER CARRIED OUT DURING EXCAVATION

服部 康浩*・中川 渉**・岡部 幸彦***
Yasuhiro HATTORI, Wataru NAKAGAWA, Yukihiko OKABE

Concerning the displacement behaviors of rocks in front of tunnel face, we attempted to predict overall displacements prior to excavation of tunnel face by means of inclinometer measurement, based on empirical method that OKABE and KONDOH(1987) proposed. The result indicates that overall displacement predicted by this method might be a good agreement with actual displacement for practical use.

We reconsidered to improve the method being more accurate with respect to the method proposed by us. The results provide following equation.

$$R (\%) = 26.70 \log K + 60.55, K = \ell / A$$

R : pre-displacements ratio to overall displacements, A : area of tunnel section,
 ℓ : critical distance from tunnel face to the point where displacement is nearly equal to zero in front of tunnel face.

Keyword: Inclinometer, prediction of the overall displacement, pre-displacement, ratio R,
critical distance ℓ

1. まえがき

最近ではNATMによるトンネル掘削工法が、被りの薄い都市トンネルにも採用される傾向にある。したがって、工事の安全性に対する信頼度の向上が強く望まれるようになり、情報化施工の重要性が増してきている。このためには、工事中において、これから掘削しようとする切羽前方の地山の正確な挙動を掘削に先立って把握しておく必要がある。

筆者らは、掘削断面積の異なる、E、F、G、3トンネルにおいて水平傾斜計の測定を行ない、岡部らが提案した方法によって切羽前方地山の全変位を推定した。その結果、全変位の水平傾斜計によって測定された実測値と、上記の方法を用いて推定した予測値との間に、比較的良い関係を得た。さらに、筆者らは、今回計測したトンネルの結果を含む7トンネル(表-1参照)の再検討を行ない、岡部らが提案した方法における改善点を見だし、より精度の高い全変位の予測法を提案しようとするものである。

* 正会員 応用地質株式会社 神戸支店 技術一課
** 正会員 応用地質株式会社 神戸支店 技術一課
*** 正会員 応用地質株式会社 関西事業本部 岩盤技術部

2. 水平傾斜計による全変位の予測法

図-1 は水平傾斜計の測定によって求められる変位曲線の典型例である。このような変位曲線の切羽前方において、変位がほとんど零に等しく、曲線の勾配がほとんど平行になる最初の点を、変位曲線の”変換点”、切羽から変換点までの距離を、”変換点距離 (ℓ)”と呼ぶ。変換点はいいかえると、切羽の位置に関し、そのときの、トンネル掘削による地山の変形に対する影響が及んでいる位置を示している。

砂質地盤のトンネルにおいて、切羽前方の地山の变形特性を切羽における变形特性との関係において考察し、変換点距離 (ℓ) と先行変位の全変位に対する比に着目した。すなわち、 ℓ は、トンネル掘削によって切羽前方の地山に及ぼす影響の範囲を表すもので、その値が大きいほど変形し易い地山と考えることができる。図-2 に、実際の切羽前方の地山の見掛け弾性係数 E^* と ℓ の関係を示した。そこで、先行変位の全変位に対する比を百分率で表わしたものを R とし、 R が ℓ/d の対数に対して直線関係にあるとしてプロットすると、 R と ℓ/d との間には比較的良好な相関 (相関係数 : $r=0.832$) があり、次のように表わすことができる。

$$R(\%) = 48.57 \log(\ell/d) + 50.70 \quad (\text{ただし、} 0.2 < \ell/d < 1.5 \text{ (} 15\% < R < 60\% \text{)}) \text{ とする} \cdots (1)$$

(1) 式におけるトンネルの直径 d は既知であり、変換点距離 (ℓ) や先行変位 (U_0) は、水平傾斜計による変位計測データから求め、(1) 式に代入して先行変位比率 R を求める。 R が求めれば、(2) 式によって全変位量 ($U_{\max}$) を予測することができる。

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

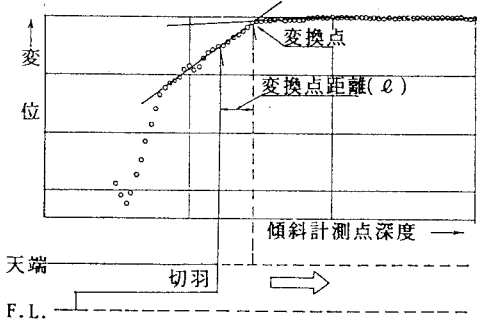


図-1 変換点および変換点距離の定義

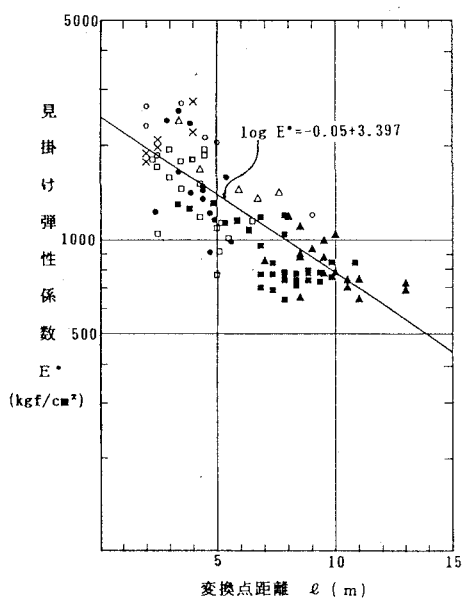


図-2 変換点距離と見掛け弾性係数の関係

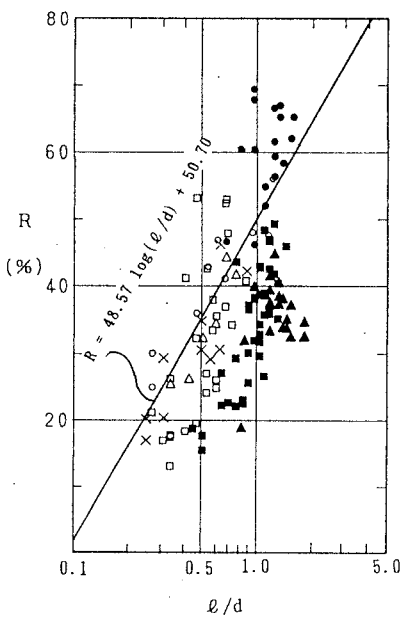


図-3 R と ℓ/d の関係

3. 切羽位置における全変位量の予測例

今回、筆者らは、掘削断面積の異なる、E、F、G、3トンネルにおいて水平傾斜計の測定を行ない、岡部らの提案した方法により、これから掘削しようとする切羽前方地山における全変位の推定を行なった。以下に、このうち、E、Fトンネルにおける測定結果を代表例として紹介する。

EおよびFトンネルは、同一地域において並行して掘削された掘削断面積の異なるトンネルであり、Eトンネルは 9.6m^2 で、Fトンネルは 44.2m^2 である。両トンネルの土被り高さは、0～30mである。

両トンネルにおける施工上の課題は、近接する重要構造物に影響（不等沈下）を与えることなく施工することであった。このトンネルの地質は、段丘堆積物の砂礫および、花崗岩の断層破碎帯である。段丘堆積物は、全体的には均質であるが、花崗岩のクサリ礫が多く入っている。花崗岩は、全体に著しく破碎を受け、粘土状～マサ状になっているが、断層を境に断層から離れるに従い次第に硬質となる。

地山の力学特性は、事前調査における孔内載荷試験結果によれば、段丘堆積物の砂礫、 $100 \sim 450\text{kgf/cm}^2$ 花崗岩の断層破碎帯 450 kgf/cm^2 、花崗岩（断層より終点側） $6000 \sim 9000\text{kgf/cm}^2$ である。

両トンネルともに、トンネル切羽からの湧水はなかったが、切羽の自立性が悪い状態であったため、補助工法としてパイプルーフ工が行なわれた。

水平傾斜計は、両トンネルとも、トンネル天端の上方付近に、坑口からトンネル縦断方向に、トンネルと水平に設置している。天端からの離れは、Eトンネルは1m、Fトンネルは1.5mである。

EおよびFトンネルにおいて、切羽の進行に伴って生じた変位の水平傾斜計による測定結果は、図-4に示すとうりである。これは、水平傾斜計によって測定された各測点での実測全変位および、予測した全変位をプロットしたものである。

図-4に示すように、EおよびFトンネルともに、水平傾斜計の測定によって求められる全変位と、前述した方法を用いて推定した全変位とは、施工上の問題のない精度で良い対応を示している。

図-4の、Fトンネルの40～50m間は、予測した全変位量が、実測全変位量に対して小さい値となっているが、これは、断層粘土であり砂質地盤ではないため、切羽近傍の変形挙動が砂質地盤とは異なっているものと考えられる。

表-1 各トンネルの掘削断面積と地質

トンネル名	トンネル断面形状		土被り高さ	分布地質
	掘削断面積 (A)	トンネル直径 (d)		
A	45.0m^2	740cm	80m	花崗岩の断層破碎帯
B	72.7m^2 { 上半: 42.5m^2 下半: 30.2m^2 }	上半: 740cm 下半: 960cm	17m	洪積世の砂礫
C	76.9m^2	990cm	15m	中古生代の 風化粘板岩
D	72.3m^2 { 上半: 49.0m^2 下半: 23.3m^2 }	上半: 800cm 下半: 960cm	16m	大阪層群の砂礫
E	9.6m^2	350cm	0～30m	段丘堆積物の砂礫 花崗岩の断層破碎帯
F	44.2m^2	750 cm	0～30m	段丘堆積物の砂礫 花崗岩の断層破碎帯
G	59.3m^2 { 上半: 41.1m^2 下半: 18.2m^2 }	上半: 720cm 下半: 870cm	0～20m	花崗岩の断層破碎帯

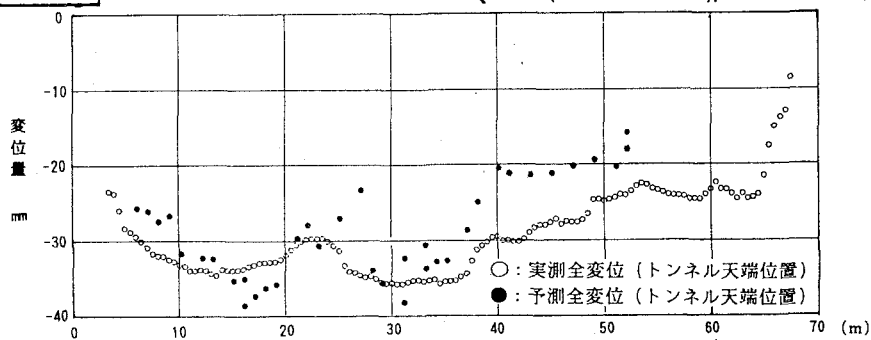
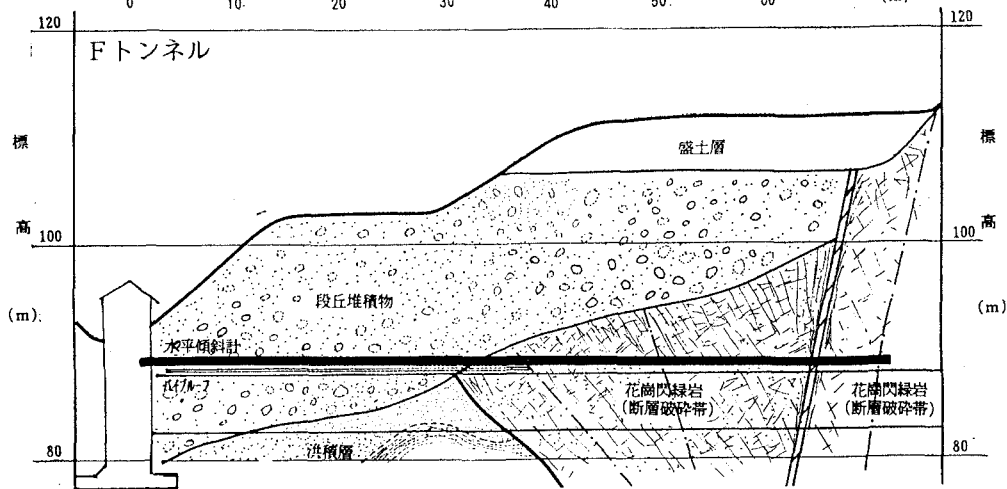
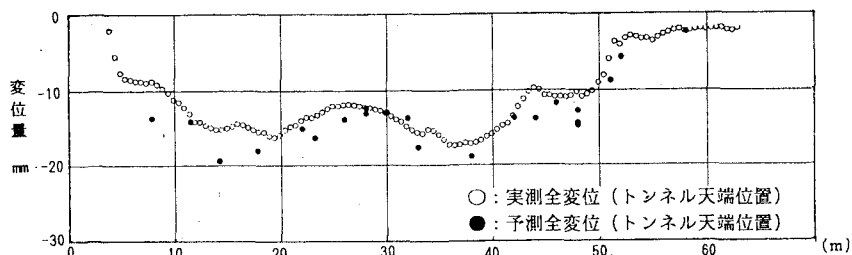
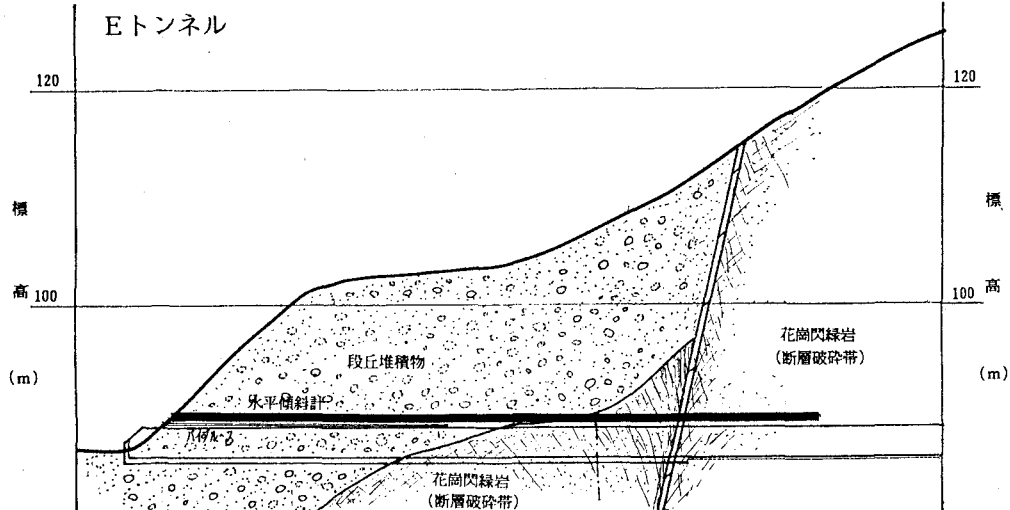


図-4 E, F トンネルにおける実測全変位と予測全変位

4. 結 論

前章で述べたように、岡部らの提案した全変位の予測方法は、水平傾斜計の測定によって解析された全変位と良い対応を示す。しかし、今回実施した、E、F、Gトンネルの間に、Rおよび (ℓ/d) の違いが顕著に認められる。このようにデータのばらつきが大きくなった原因については、次のように推察される。

Eトンネルと、他のトンネルとの最も大きな相違点は、トンネルの掘削断面積（上半先進の場合、上半部の断面積）の大きさである。表-1に示すように、Eトンネルの掘削断面積は 9.6m^2 と小断面のトンネルであるに対し、他のトンネルの掘削断面積は、 $41.1\sim 76.9\text{m}^2$ と掘削断面積が大きく、両者の掘削断面積における比は、 $1:4\sim 8$ と、極端に大きく異なっている。すなわち、Rを ℓ との関係において推定しようとした場合、トンネルの掘削断面積が大きく影響すると考える。そこで、今まで実施した7トンネルについて、トンネル直径(d)ではなく、トンネル断面積(A)の影響を重視して、Rと ℓ/A の相関関係を作成し、図-5に示した。

図-5に示すように、Rと ℓ/A の対数とは比較的良好な相関関係（ $\pm 15\%$ の誤差）があり、次式で表すことができる。

$$R(\%) = 26.70 \log K + 60.55 \quad (\text{ただし、} 0.05 < K < 0.5 \quad (15\% < R < 60\%) \text{ とする}) \cdots (3)$$

ここに、Kは係数で、 ℓ/A である。

そこで、実測全変位($U_{\max}$)と(1)式および(3)式を用いて求められた予測全変位($U'_{\max}$ 、 $U''_{\max}$)の相関性を比較したものが図-6である。

実測全変位と予測全変位との関係の原点を通る回帰曲線を求めると、

(1) 式の場合、 $U''_{\max} = 0.800 U_{\max}$ となり、

(3) 式の場合、 $U'_{\max} = 0.983 U_{\max}$ となる。

したがって、(1)式を用いて推定した全変位よりも、(3)式を用いて予測した全変位の方が、実測値に対してより良い相関を得ることができた。

また、(3)式を用いて予測した全変位($U'_{\max}$)と実測の全変位($U_{\max}$)の変位量の誤差は30%以内におさまっている。先行変位の全変位に対する比(R)が、変換点距離とトンネル掘削断面積の比(ℓ/A)との関係で表すことの方が、より実際的であることを示している。

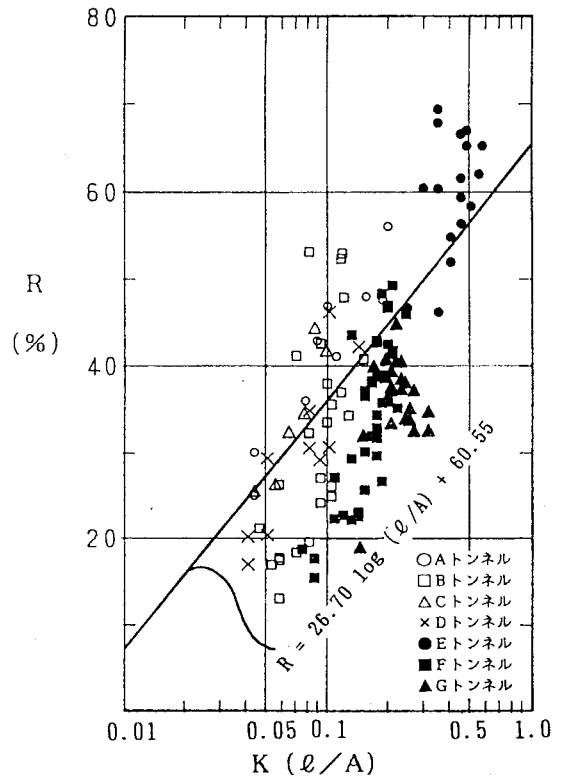
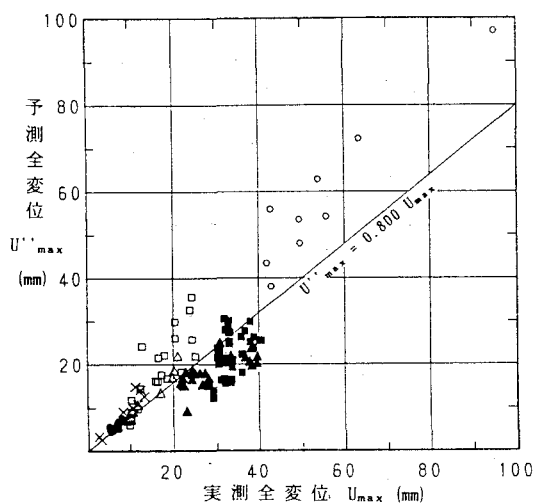
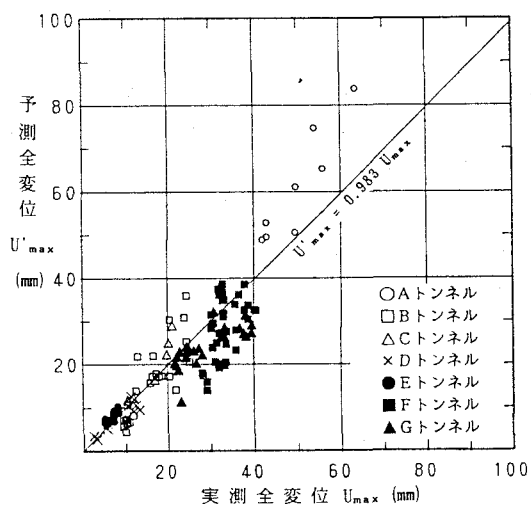


図-5 RとK (ℓ/A) との関係



(a) (1) 式による予測



(b) (2) 式による予測

図-6 全変位の実測値と予測値との関係

5. あとがき

トンネル天端の上部の地盤において、水平あるいは水平に近い方向に水平傾斜計を設置・測定し、(2)式を使うことによって、トンネル切羽到達時点において、切羽前方地山の全変位を推定することができ、その精度は、30%程度と考えている。

しかしながら、地質状況（砂質地盤か粘土質地盤か）の違いや、土被り高さの違い、施工法の違い等によって、切羽前方の変形挙動の形態が異なると考えられ、実測例における各種関係図中に見られるデータのバラツキの中にそれらの要素が内包されているものと考えられる。したがって、今後、土被りや、地質状況の違い、補助工法の有無などに対する切羽前方の変形挙動を比較検討していきたい。

6. 参考文献

- 1) 岡部幸彦・近藤達敏：トンネル掘削時におけるインクリノメーターによる地山変位挙動計測と切羽近傍の地山物性値の推定，応用地質株式会社年報 NO.8，PP.25～41, 1987.3.
- 2) 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見かけ弾性係数の評価，土木学会第37回年次学術講演概要集第3部，PP.323～324, 1982.