

土被りの深いトンネル掘削時の地山挙動計測例

Linewise Measurements of Ground behavior due to deep Tunnel Excavation

木村正樹

Masaki KIMURA

The 4,350m long tunnel is now under construction through the volcanic zone, in the center of which Mt. Yakedake as the active volcanic mountain in the North Japan Alps.

We measured the vertical and horizontal displacement of volcanic deposit between some interval including the point of pilot tunnel face using inclinometer and sliding-micrometer which was installed borehole drilled crossing to tunnel.

Displacement at any point of volcanic deposit begins to occur before tunnel face do not arrived at the measurement line, and it increases gradually according to approach of tunnel face.

Keyword: volcanic zone, volcanic deposit, vertical and horizontal displacement

1. まえがき

安房トンネルは、中部山岳地帯の岐阜・長野の県境に位置する安房峠（標高1,790m）を貫く全長約4,350m、1種3級（設計速度80km/h）の高規格道路トンネルである（図-1）。昭和42年から地質調査が行われ、昭和55年から調査坑、平成元年10月からは本坑の掘削が行われている。トンネルルートには約600mの区間にわたり大量の地下水を胚胎する第四紀の未固結火山碎屑物が分布し、土被りが400mと深く、本トンネル最大の難工事区間となっている。本稿では、この火山碎屑物分布区間における平行する調査坑と水抜坑を利用して行なわれた、トンネル掘削に伴う地山挙動の計測例を紹介する。

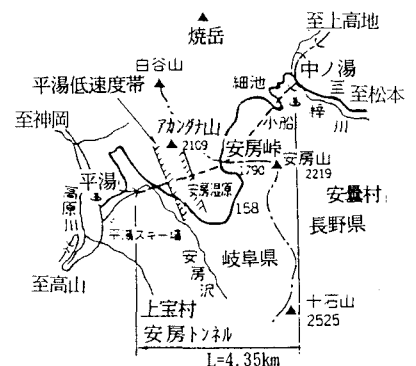


図-1 調査地案内図

2. トンネルルート周辺の地形・地質とトンネル建設上の問題点

安房トンネルルートは、図-1に示すように北に焼岳、白谷山、アカンダナ山、南に十石山といった標高2,000~3,000m級の山が連なっている。トンネルルート沿いの地質は、中生代の粘板岩、チャート、砂岩などの堆積岩類と、これを貫く中生代~新生代第三紀の貫入岩類および新生代第四紀の未固結の火山碎屑物からなる（図-2）。

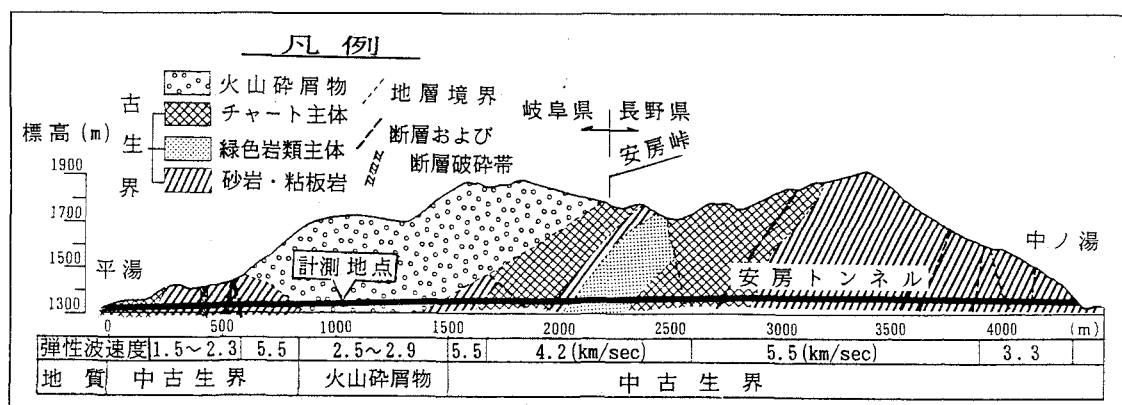


図-2 安房トンネルルート地質断面図

火山砕屑物は中古生界よりなる山体の谷地形部を埋めて、平湯側からの坑口距離850m~1,450mの約600mの区間に分布し、土被りは約400mである。火山砕屑物は、安山岩の角礫や同質の粗砂などで構成されており、挟在する木片の炭素同位体による年代測定の結果、約1万1千年前の堆積物と分析されている（表-1）。この区間の弾性波速度は地表からの探査結果によると 2.5~2.9 km/secであり、透水係数は 10^{-1} cm/secオーダーである。

このような地質状況から、土被りが400mに及ぶ火山砕屑物分布区間での大量の湧水と掘削時の地山の挙動、覆工・支保工応力が問題となった。実際に昭和62年には水抜坑切羽で最大湧水量 $180\text{m}^3/\text{min}$ 、流出土砂約 3000m^3 の異常出水があった。

このうち、湧水対策としては長尺水抜きボーリングや水平バキューム工法による積極的な地下水排除工がとられた。これによって計測時には施工基面付近まで地下水が低下し、さらに、補助工法として注入式フォアパイリング工法を使用したため、調査坑の切羽は自立していた。

表-1 火山砕屑物の性質

		砂 層	砂礫層
粒 度 区 分	レ キ 分 %	30.5	62.5
	砂 分 %	59.5	32.0
	シルト分 %	6.0	3.5
	粘 土 分 %	4.0	2.0
均 等 係 数 U _c		23.0	19.1
自然含水比 %		10.3	8.9
変形係数 * kgf/cm ²		4,800	6,400
せん断 強度	Cd kgf/cm ²	1.2	1.1
	φ	36°	38°

* 孔内水平載荷試験による

3. 計測方法

トンネル掘削時の変位計測として通常のA計測・B計測を用いた場合には、切羽到達後に変位計測を開始するため、掘削に伴う全変位を計測することができない。そこで今回の計測では、調査坑の掘削に伴う地山挙動を計測し、本坑の設計や計測管理に必要な物理定数、力学定数を得るために、先行変位比率・緩み領域の形状と緩み程度を求めることとした。

トンネル掘削に伴う全変位を計測する方法としては、

- (a) 地表から変位計を設置する方法
- (b) 先進ボーリング孔を利用して計測する方法
- (c) 隣接するトンネルから変位計を設置する方法

などが考えられる。安房トンネルの調査坑の掘削に伴う全変位の計測では、土被りが400mと深く、かつ

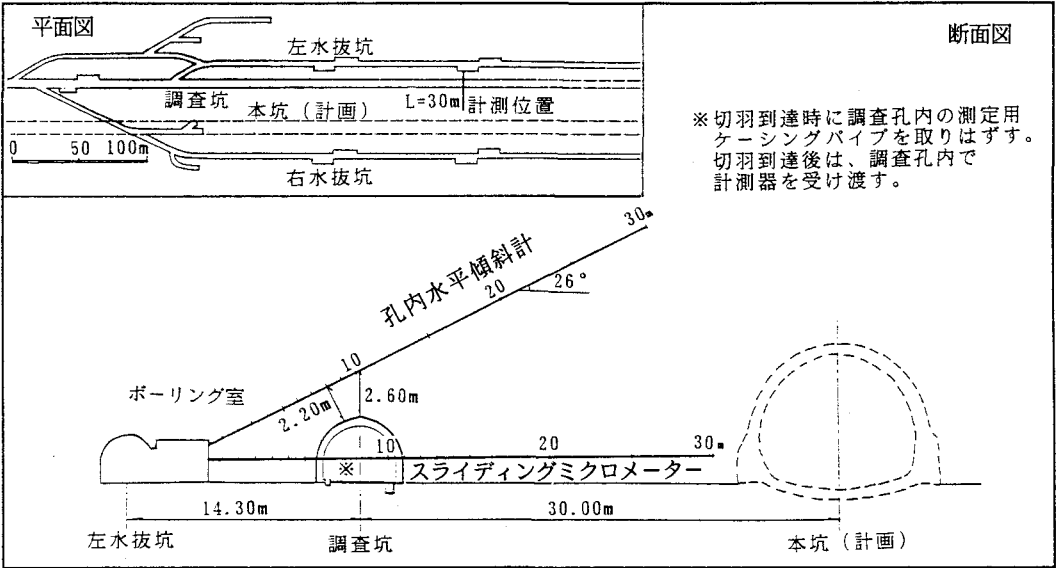
調査坑の掘削が昼夜連続して行われていたため、図－3に示すように、先行して掘削されていた左水抜坑のボーリング室から調査坑に向けて計測器を設置した。

計測器は、微小な変位を切羽通過後も連続的に計測でき、かつ、逆解析に使用する鉛直・水平変位を計測できる以下の2種類の変位計とした（表－2）。

- (a) スライディングマイクロメーター（調査坑側方の水平変位の計測用）
- (b) 孔内水平傾斜計（調査坑上方の鉛直変位の計測用）

表－2 計 測 器 と 計 測 孔 の 諸 元

計 測 器	計測変位	計測間隔	計測孔方向	計測孔長	計 測 精 度	計 測 レ ン ジ
スライディング マイクロメーター	水平方向	1.0m	水 平	30m	1/1000mm/1m	±5mm/1m 硬岩用
					1/ 100mm/1m	±50mm/1m 軟岩用
孔内水平傾斜計	鉛直方向	0.5m	上向き26°	30m	1/100mm/50cm	±30°



図－3 各トンネルの位置関係と計測孔配置図

調査坑を横断するスライディングマイクロメーターは、計測孔内に1m間隔に測点を固定しており、2測点間の距離を孔内に挿入するゾンデにより計測するものである。切羽通過後には、調査坑内でゾンデを受け渡すことにより連続的に本坑側の計測を行った。

計測器の埋設長は、調査坑の本坑側の壁面から2D（Dはトンネル直径：5.6m）以上の計測ができるよう各々30mとした。また、孔内水平傾斜計計測孔は調査坑の補助工法であるフォアパイリングの打設の影響を避けるために、調査坑の天端上方に向けて26°上向きに設置した。

4. 変位計測結果

スライディングマイクロメーターと孔内水平傾斜計の計測は、切羽距離－4D～＋11Dにかけて行った。地山挙動の計測結果を図－4に、切羽の進行と変位・変位比率の関係を図－5、6に示す。

4・1 スライディングマイクロメーター計測結果

スライディングマイクロメーターによる水平方向の変位計測では、次の (a)～(c) に示すように調査坑と本坑との間（本坑側）と、調査坑と左水抜坑の間（左水抜坑側）では、異なった挙動が計測された。

- (a) 本坑側では、切羽が約-0.5Dを通過する時に縮みの傾向が現れたのに対し、左水抜坑側では-1Dのころから伸びが生じた。
- (b) 切羽の通過後からは、本坑側も伸びに転じた。本坑側の区間変位量は左水抜坑側に比べ約 1/2の変位量で、切羽が2 Dの位置を通過した時点で本坑側では壁面から1区間、左水抜坑側では4区間で硬岩用スライディングマイクロメーターの計測レンジ（1 mあたり±5 mm）を越える伸びの区間が現れた。
- (c) 変位の収束までに明瞭な伸びの変位が認められた区間は、本坑側は調査坑の壁面から3 m区間（0.5D程度）に限られたが、左水抜坑側は5 mの計測区間すべてが変位した。

本坑側と左水抜坑側の変形の相違は、先行した左水抜坑周辺の緩みと本坑側に分布する固結度の高い黒色沈殿物の分布によるものと推定される。

4・2 孔内水平傾斜計測定結果

孔内水平傾斜計による鉛直変位の計測結果は、次の (a)～(c) のとおりである。

- (a) 切羽が約-1Dの位置を通過した時点で、下向きの変位が現れ始めた。
- (b) 調査坑上方の変位は、計測孔が掘削面に最も近い深度8.5m付近で最大で、切羽が2 Dの位置を通過した後も最終変位（11.2Dでの計測値：16.6mm）の約11%（1.86mm）程度の変位増加が認められた。
- (c) 変位分布で見ると、調査坑掘削の影響は深度22m（調査坑天端から約12m≒2 D）まで及んでいる。

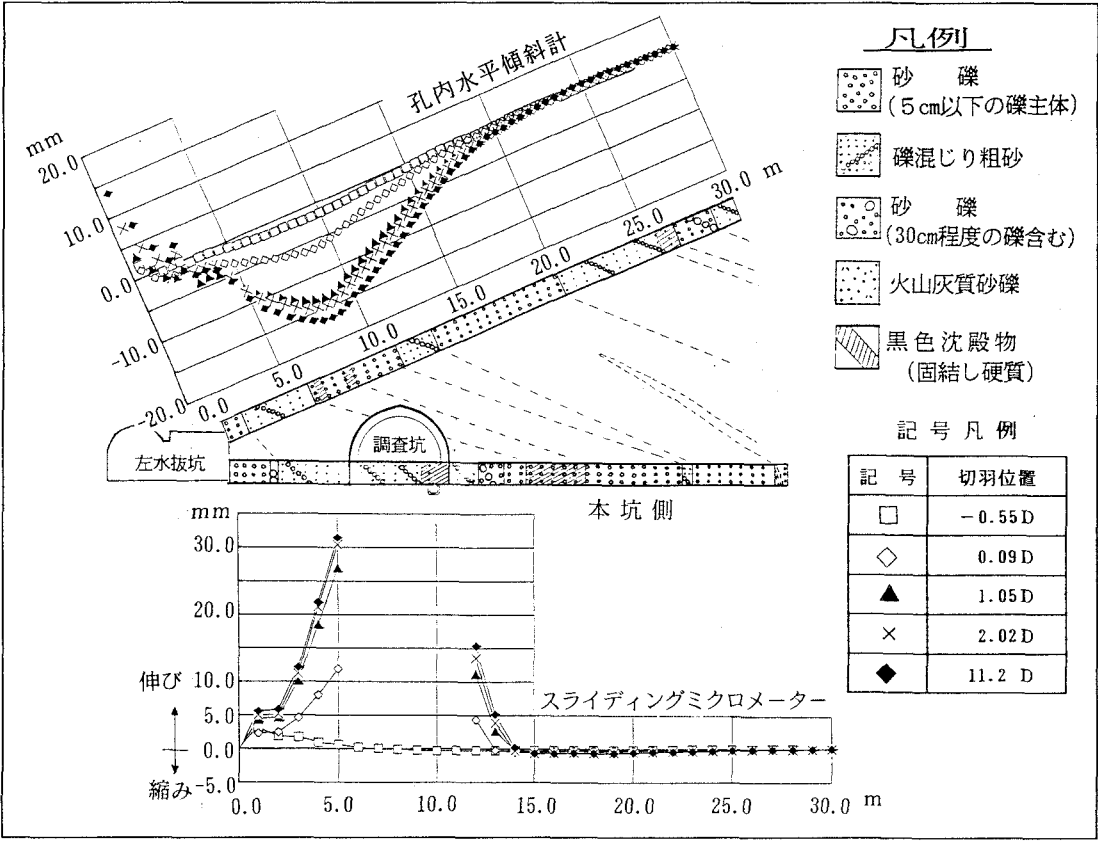


図-4 地山挙動計測結果
-170-

4・3 先行変位比率

先行変位は、水平変位・鉛直変位ともおおむね切羽が-1Dの位置を通過した時点で現れ、切羽到達時点では、最終変位に対して0.25～0.33の変形が発生した。切羽通過後の変位比率は、1Dの位置を通過の時点で0.74～0.86の割合であり、3Dの位置を通過した時点では0.95～0.99であった（図-5）。

また、トンネルとの距離の相違による変位出現傾向を孔内水平傾斜計の計測結果から整理すると、図-6のようになる。これによると、トンネルに近い計測ポイントほど変位発現が切羽通過前後に集中するのに対しトンネルから離れた計測ポイントほど切羽通過後の変位発現が穏やかで、収束までに時間がかかる傾向が認められた。

これは、地山が粘弾性体的な挙動を示し、トンネル壁面に近い地山から周辺部にむけて徐々に変形が進展していく過程を捕らえているものと考えられる。

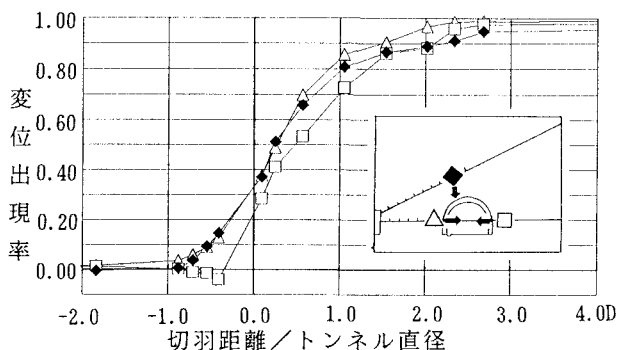


図-5 計測器別変位比率

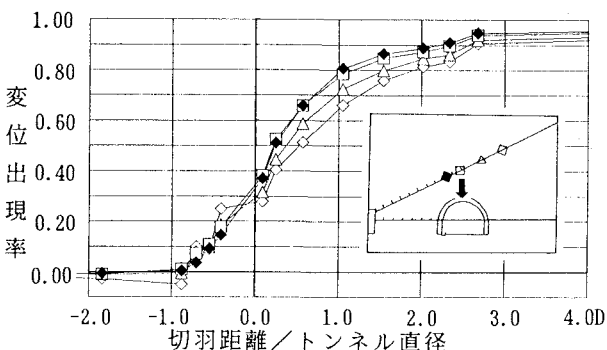


図-6 計測深度別変位比率（孔内水平傾斜計）

5. 計測手法の利点と今後の応用

今回の計測結果で得られた鉛直変位や水平変位や緩み領域をモデル化して逆解析を行ったところ、緩み領域の弾性係数を周辺地山の1/5程度に低減すると計測変位と計算変位が比較的良く一致した。

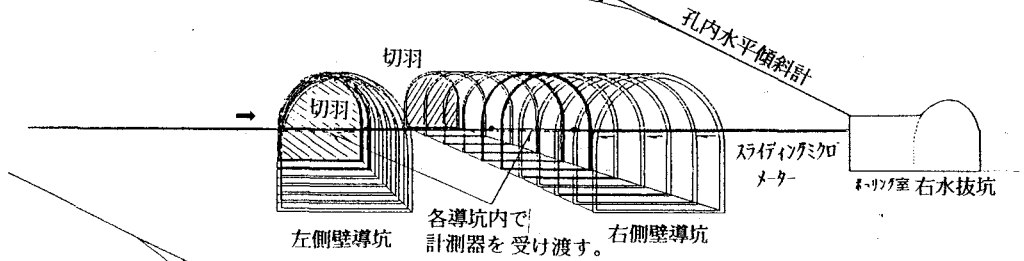
調査坑は平成3年7月に貫通し、本坑も平成5年9月末現在で平湯側より約1250m進行して、低速度帯におけるB計測も実施されている。変位計測は天端沈下、内空変位の他にトンネル壁面から設置した地中変位計を使用している。埋設深度はロックボルト長（6m）と調査坑での変位計測結果を参考にして10mとしたが、前述のように未固結の火山砕屑物より構成される地山のため、ジャンボドリルやロータリーパーカッション式のボーリングマシンによる削削では孔壁が自立せず、ロータリー式のボーリングマシンでケーシング掘りを行った。このため、5本の地中変位計の埋設に2日以上を費やし、この間の内空変位や鋼アーチ支保工応力・吹付けコンクリート応力の測定結果では、変位増加や応力増加が認められた。B計測の主目的には地山の安定性評価と支保の妥当性の評価があるため、地中変位計の計測開始前に地中変位や部材応力が増加することは望ましくない。

安房トンネル低速度帯はサイロット工法で施工されているが、調査坑での計測手法を利用すれば、図-7に示すように左右の側壁導坑それぞれの掘削時の鉛直・水平変位、上半および大背掘削時の鉛直・水平変位の全変位が計測可能である。これにより、変位計設置の時間を低減し切羽を停止する時間を最小限に抑えることができるとともに、変位出現率から先受け工法の検討やA・B計測の評価を行うことができる。

今回のような計測手法は、パイロットトンネルから本坑トンネル、I期線トンネルからII期線トンネルといった利用が可能である。また、2つのトンネルの位置関係によってはスライディングマイクロメーター、水平傾斜計の他に3成分の変位計（トリベック等）の利用が可能である。本手法による計測結果が最近多用される3次元解析の比較データになれば幸いである。

側壁導坑掘削時の地山挙動計測例

左右の側壁導坑の切羽通過後は各導坑内で計測器を受け渡し、反対方向の計測を連続的に行なう。



上半～大背掘削時の地山挙動計測例

計測孔の周辺を箱抜することにより側壁コンクリート打設後も連続的に計測を行なう。

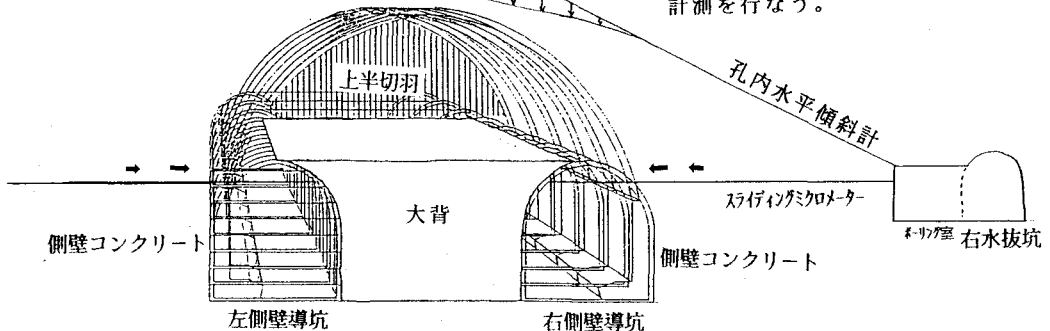


図-7 本坑側壁導坑～上半～大背掘削時の変位計測例

6. 参考文献

—参考文献—

- 1) 成田賢・松山泰治・堀伸三郎：孔内傾斜計による計測結果から見たトンネル掘削に伴う地山の挙動
応用地質調査事務所年報No.6, PP. 49～68, 1984
- 2) 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
応用地質年報No.8, PP. 25～41, 1987
- 3) 松下敏郎：高熱帯と高水圧低速度帯を克服して調査坑が貫通 [一般国道 158号安房トンネル]
トンネルと地下, 23-3, PP.7～14, 1992