

(38) 土かぶりの薄い未固結地山における切羽及び切羽前方地山の劣化の予測に関する研究

日本鉄道建設公団 横山 章
同 上 ○ 藤森 房司
同 上 寺戸 幸雄
同 上 木村 宏

〈はじめに〉

吹付コンクリートとロックボルトを用いたトンネル支保技術の急激な進歩と都市トンネルへの山岳トンネル技術の適用を考えて土かぶりの薄い未固結地山でのトンネル工事がしばしば行なわれるようになってきた。これにともない、トンネルの施工条件も一段と厳しくなり、施工上の安全性の確保と地山崩壊の防止に対する注意も一層重要となっている。これに対し、現在行なわれているトンネルの施工が安全に行なわれているかどうかを判断し、地山の崩壊、崩落を予測し、対策をたてるという施工管理段階にまで至っていない。

本文では、土かぶりの薄い未固結地山のトンネル掘削から、地山の崩壊に至る過程を、切羽のめけという現象と地表面沈下計測をもとに推定し、施工の安全性を把握し、崩壊に備える手法を考察したものである。

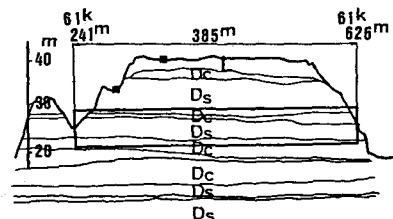
〈地質条件とトンネル〉

考察は、主として、成田新幹線堀之内トンネルと同取畜トンネルにおける計測をもとに行なった。これらのトンネルについての詳細は、参考文献1、2に示したとおりである。2本のトンネルはいずれも土かぶり10m以下で成田層と呼ばれて未固結の洪積砂層に対して施工されており、 $H/D \leq 1$ (H:土かぶり高, D:トンネル直径)となっている。(Fig.1)

〈地表面沈下と切羽周辺の不安定状態〉

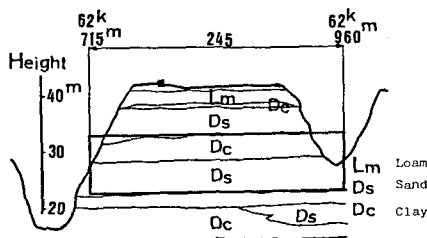
トンネルの掘進は、一般にトンネル上方地山に対して沈下を引き起こす。この沈下は、トンネルが地表から深い位置にあるときは地表面に伝わることはほとんどないが、一方、地表面近くに位置するときは、地表面にまで達する。地表面沈下量は、土かぶりが薄く、地山の固結度が低くなるほど、天端付近の沈下量に近くなるかと判断される。したがって、土かぶりの薄い未固結地山では、地表面沈下はトンネル上方地山の沈下を代表するものとみなせる。トンネルの掘進にともなう地表面沈下をトンネル縦断方向で計測すると、Fig.2のようになる。

一方、トンネル支保部材として吹付コンクリートとロックボルトが用いられるようになり、支保形態が地山を点やリングで支える構造から、面又はチューブで覆う構造に変わったことにより、支保部材としての剛性が飛躍



(a) Horinouchi T.

■ Measuring Station



(b) Tokko T.

Fig. 1 GEOLOGICAL CONDITION

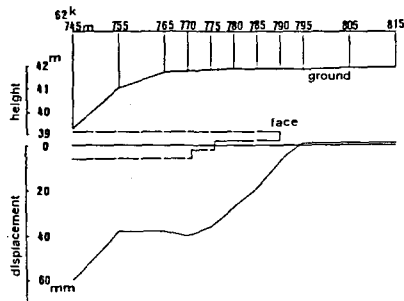


Fig. 2 ORDINARY GROUND SETTLEMENT
(Tokko Tunnel)

的に増大した。この増大により、土がぶりの薄い地山でのトンネル掘削にともなう地山の崩壊の形態は、ゆるみ荷重による支保部材の破壊から切羽周辺（ベンチ工法では、下半掘削部を含む）の自由面の崩壊という形に移って行くと考えられる。

以上のことから、トンネルの安全な施工に対しては、切羽周辺の不安定状態を把握し、これに対処することが重要となる。

＜切羽周辺の不安定化の想定＞

地表面沈下状況をもとに、切羽周辺の不安定状態から崩壊への過程を考察すると図3のようになると想定される。

(1) 平常時、安全に掘削が行なわれている場合、地表面沈下の縦断面線は、Fig. 3 (1) のようになる。

(2) 地山強度が低かったり、地山を損傷するような掘削を行なった場合には、掘削の影響は切羽の前まで伝わり、切羽から比較的離れた位置の地表面沈下が発生する。(Fig. 3. (2))

(3) (2) で影響を受けた状態にある地山は、実際の掘削の影響をさらに受けるため、切羽及びその前方のゾーンでは地表面沈下の縦断面線の勾配は急になり強いせん断応力が作用した状態になる。(Fig. 3. (3))

(4) Fig. 3. (3) の強いせん断状態に対して地山の強度が対応しきれなくなると切羽を含むゾーンに一種のせん断面が形成され、この面に沿った切羽のめず、地山の崩壊が生じる。(Fig. 3. (4))

(5) 一方、トンネル横断方向についても、一般に、Fig. 4 に示すような地表面沈下が発生し、(4) の状態と同時に、横断方向にせん断面が発生することもあり、この場合には、地山の崩壊は非常に大きなものとなる。

堀之内トンネルで発生した切羽近傍における不安定状態までの地表面沈下の経過は、Fig. 5 に示したとおりである。これにより、ここでの想定が不安定状態に至る過程を十分反映したものであることがわかる。

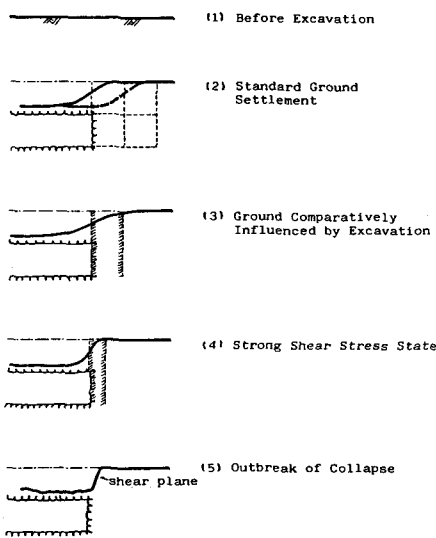
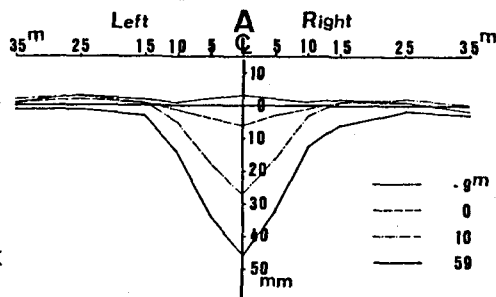


Fig. 3 PROCESS OF COLLAPSE (1)



Transversal Displacement

Fig. 4 GROUND SETTLEMENT
(Tokko Tunnel)

＜トンネル施工における安全管理の流れ＞

トンネル施工における安全管理の流れは、概ね、Fig. 6 のようになる。具体的には、前節で示したような切羽周辺の不安定化を予測する指標を管理目標として設定し、さらに施工に応じて不安定化が予測される場合には、逐次管理と、増し吹き付け、仮インバート併合等による不安定化を抑える施工を行ない、不安定状態が改善されない場合には、注入、支保全体の補強等の根本対策をとることとなる。

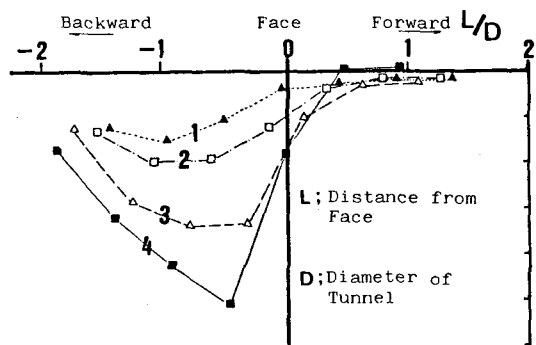


Fig. 5 PROCESS OF COLLAPSE (2)
(Horinouchi Tunnel)

<地山のせん断状態を示す指数>

Fig.5に示すようなトンネル周辺の不安定化の過程の想定に基づき、土かぶり
の薄い場合には、地表面沈下の縦断曲線を用いて次の仮定を導入し、トンネ
ル上方地山のせん断応力状態を示す指数(せん断指数と呼ぶ)を求めることが
できる。

仮定 トンネルの掘削にともない、トンネル上方のかぶりの薄い地山は
縦断的には、1つの梁部材を形成する。したがって、計測で得ら
れる地表面沈下量は、この梁のたわみ量とみなす。

一般に、切羽周辺のトンネル縦断方向の地表面沈下は、Fig.7のようになる。
せん断指数は、各測点間のゾーンに対して算出されるが、各ゾーンの評価が
一定となるように、地表面沈下の測点間隔は一定とする。地表面沈下の縦断曲
線を連続関数 $y = f(x)$ で表わすと、たわみ角(θ)、曲率モーメント(M)、
せん断力は次式で与えられる。 $\theta = f'(x)$, $M/EI = -f''(x)$

$Q/EI = -f'''(x)$, ここに、 EI ; 梁の曲げ剛性

この考え方を計測結果を適用すると

- (1) 測点間隔の平均たわみ角(θ') $\theta' = \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{L}$
- (2) 測点近傍の平均曲率モーメントに相当する指数
 $M'_i = \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{L}$

- (3) 測点間隔の平均せん断力に相当する指数 (SA)

$$SA_{i,i+1} = \frac{M'_{i+1} - M'_i}{L} \quad (1)$$

となり、SAがせん断指数を表わすことになる。SA値は、次式によって地山内の平均的せん断応力($\sigma_{i,i+1}$)
に変換できる。 $\sigma_{i,i+1} = \frac{EI SA_{i,i+1}}{A} \quad (2)$ ここに A ; 梁の断面積

したがって、地山が梁として働く断面、変形係数、梁部の平均せん断強度(T)を導入し、 $T = \sigma_{i,i+1}$ とする
と $SA_{i,i+1} = AT/EI \quad (3)$

として管理値となりうるSA値を求めることができる。このSA値に安全率を取り入れた値を管理値として設定
すれば、この管理値に対する実測の地表面沈下から算出されるSA値の割合を用いて地山の劣化の状態(せん断
応力状態)を把握することができる。(注:ここでのSA値は、参考文献3のQ値と同じものである。)

<SA値の特性>

SA値は、切羽が対象となるゾーンに近づき通過するにしたがい、
一般に、Fig.8のような挙動を示す。すなわち、切羽が対象となるゾ
ーンより遠く離れている間は、SA値は $\oplus$ の小さい値を前後し、切
羽が近づくにつれて、一旦 $\oplus$ の値が増加し、さらに接近すると $\ominus$ に転
じ切羽が、対象ゾーンの中を通過したときにピークを迎え、以後、
独自の安定状態へと進み、切羽が近づく前と同じ状態になる。

このことは

- (1) 切羽が対象となるゾーンから遠く離れている間は、計測誤差、
あるいは、微少変位しか地表面に発生しない。(Fig.8.(1))
- (2) 切羽が接近するにつれて、すでに沈下しているゾーンを切羽前方の地山に結びつけておく挙動をし、ち
ょうと、梁に地山側から荷重が上向きに作用したのと同じ形になる。(Fig.8.(2))
- (3) さらに切羽が接近すると、逆に、対象ゾーンは、切羽前方の地山に支えられるようになる。これは、ち
ょうと

地山沈下のフローチャート

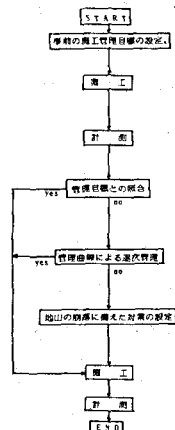


図.6 土質の悪い比較的高層の地山の
崩落に対する安全管理のフローチャート。

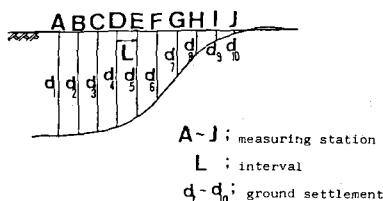


Fig. 7 GENERALIZED SHAPE OF GROUND SETTLEMENT

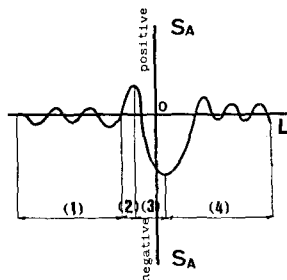


Fig. 8 CHARACTERISTIC CURVE OF S_A -VALUE

うと、地表面から荷重が下向きに作用したのと同じになる。(Fig 8.(3))

(4) 切羽が対象ゾーンをすぎ、遠く離れるにつれて、地表面沈下は収束する。(Fig 8.(4))

という切羽の進行にともなう地山の変位過程を正しく反映している。しかし、実際のところ、掘削、支保の手順、あるいは地山状況の変化に応じて、地山の最終変位量が異なるので、SA値は⊕⊖のいずれかの値(0ではない)に収束することになる。さらに切羽が2つ以上ある場合には、1つめの切羽で収束した値を初期値として変化をはじめるか、あるいは、2つ以上の切羽が複合して地山に影響を及ぼした値としてSA値に反映してくる。

<SA値の評価>

SA値は、あくまで、測点間のゾーンに対する平均的な指標としてせん断応力状態を示すものであり、トンネル上方地山全体の不安定性を評価する指標である。さらに、評価すべきゾーンに対して、現在、支保完了部の先端(切羽)がどういう位置関係にあるかによってSA値の評価は当然変わってくる。SA値の評価について重要な事項は次のとおりである。

- (1) SA値は、切羽(又は支保)が、評価ゾーンの中に到達するまで管理値を越えるかどうかを監視する。越えなければ、施工は安全に行なわれたことになる。(Fig 9の○)
- (2) SA値が、切羽が評価ゾーンの中心位置に到達した後に管理値を越えた場合には、以後のSA値の増減を監視し、さらに増大する場合には、支保の補強を行ない、地表の沈下を抑え、SA値の増大を抑える。逆に管理値に達しなかったり、管理値に達しても以後極端な増大を起さない場合には、あまり問題にしないでよい。
- (3) 切羽(支保)が評価ゾーンの中心位置に到達する前にSA値が管理値を越えた場合は、切羽の到達を早め吹付コンクリートによるシェール(チューブ)をつくるか、切羽前方に対する斜めボルト、薬液注入などの補強手段をとることになる。(Fig 9の●)

<管理値設定の問題点>

管理値を決めるにあたって問題となるのは、(1)測定間隔の設定と測定誤差 (2)梁挙動を示す地山の断面積、(3)土かぶりである。測定間隔が広くなるとSA値は小さくなり、狭くなれば現実の測量が困難となる。レベルによる測定誤差のSA値に占める割合も小さくしなければならない。梁挙動を示す地山の断面積は、トンネル掘進にともなう地表の横断方向の沈下形状を十分考慮して決める必要がある。H/D>1の土かぶりでは、SA値は敏感に挙動しない反面、H/D<1/2や地山条件の悪い所では敏感に挙動する。

<おわりに>

土かぶりの薄い未固結地山での地表面沈下の計測により同種の地山の崩壊のメカニズムが想定され、崩壊へ至る地山の変化過程を示す指標としてSA値が示された。SA値は、地山のせん断応力状態に対応する指標であり、工事の調査段階で安全管理値として設定し、簡単な計測と計算処理によって施工管理が行なえる有効性をもっている。今後上述の問題点を精査のうえ、指標の有効性を高めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 横山 手戸、木村 池田; 土かぶりの薄い未固結地山におけるトンネルの支保部材の挙動について 第15回岩盤力学に関するシンポジウム 1983
- 2) 木村 宏; 堀之内トンネルの設計・施工について 建機新報土木技術セミナー 1981.12
- 3) 小関 ほか; 未固結地山におけるNATMの現場計測-成田新幹線堀之内トンネル- トンネルと地F1982.7

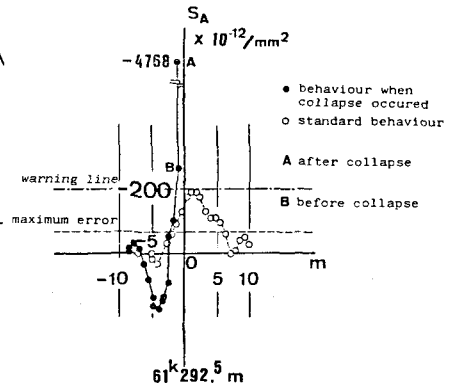


Fig. 9 BEHAVIOUR OF SA-VALUE
(Horinouchi Tunnel)

(38) ESTIMATION OF LOOSENING AROUND MINING FACE OF SHALLOW
OVERBURDEN TUNNEL IN SOIL

JAPAN RAILWAY CONSTRUCTION PUBLIC CORPORATION

Akira YOKOYAMA

Fusaji FUJIMORI

Yukio TERADO

Koh KIMURA

As tunnelling method with shotcrete and rockbolts has remarkably utilized in Japan, we have a tendency to apply it to urban tunnel which is in demand very much. Generally urban tunnel is very expensive. There is a possibility that tunnelling method with shotcrete and rockbolt enables us to make up cheap urban tunnels..

We had a chance to excavate some tunnels in soil with shallow overburden. Geological condition of these tunnels is as same as that of urban tunnel and brings us danger of collapse.

In this paper authors deduce collapse of tunnel whose support is composed of shotcrete and rockbolts from behaviour of ground caused by tunnel excavation, and shows one effective index which is called S_A -value and is derived from ground settlement to estimate loosening around mining face.