

(40) トンネル周辺の崩壊に関する考察 — エカブリの薄い地山 —

日本鉄道建設公団 木村 宏

○はじめに — トンネルの施工に現場計測が適用され、エカブリの薄い地山や、固結していない地山に対する山岳トンネル工法の安全性は確認されつつあるが、この種の条件下のトンネルは、常に、崩壊、崩落という大きな危険を孕んでおり、このような事故の防止はもとより、トンネル変状の防止は、依然として重大な関心事である。本文では、エカブリの薄い地山に対して、これまで行なわれてきた吹付コンクリートとロックボルトを主たる支保部材とした山岳トンネル方式の施工経験と、解析、模型実験等から、トンネル周辺地山の变形の特徴を探り、この特徴から、トンネル崩壊への過程とそのモードを推定し、地表面沈下測定を用いたトンネル安全管理上の留意点を述べる。

○トンネル周辺の变形と破壊 — エカブリの薄い地山でのトンネル掘削に伴う变形に対する研究は、トンネル自身の崩壊に備えるためにもとより、周辺構造物への影響を考えて古くから行なわれている。しかし、トンネルの崩壊に関連づけた研究は、トンネル施工の失敗例が詳細に公表されないこと、普通のトンネルは安全に施工されていることなどのため、専ら、模型実験に限られているようである。トンネル周辺の变形は、最も得やすい、しかも確実な情報であり、トンネル自身と周辺地山の崩壊に最も密接に関連している事柄である。

○模型実験、解析からの考察 — エカブリの薄い地山を対象とした模型実験と解析の組織的研究は、近年、Cambridge Univ.¹⁾を中心に遠心加速装置と、Limit Analysis²⁾を用いて行なわれてきた。対象とする地山材料は、砂又は粘土であり、これらの模型実験は、2次元及び3次元の幾何学的条件と重力場を想定したものであり、トンネル横断方向及び縦断方向の变形と破壊について考察されている。一方、Limit Analysisを用いた解析は、トンネルの縦断的あるいは、横断的な破壊条件を導くのに加え、トンネル切羽及び周壁近傍のLocal collapseの条件についても言及している。模型実験によれば、トンネル横断方向の变形は、Fig.1³⁾のように進行する。砂質土、粘性土を問わず、地表及び地中の沈下モードは、ほぼ正規分布曲線にしたがって進行する。 $Ss/S = \exp(X^2/2l^2)$ ここで、 Ss ；トンネルC.L.上の沈下量、 S ；沈下量、 X ；トンネルC.L.からの距離、 l ；変曲点の位置、さらに、この変曲点を与える位置には、トンネルが崩壊に近づいてもあまり変わらない。(Fig.2)³⁾ また、トンネルが崩壊に近づくにつれて、クラウン部とスプリングラインの間にせん断ひずみの集中が生じ、この付近に不連続面が生じ、地表まで伝わって崩落に

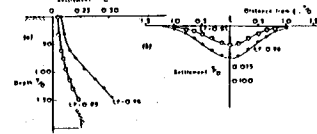


FIG. 1.—Soil Subsidence above Model Tunnel in Dense Sand; $C/D = 1.48$, $\sigma_v = 0$: (a) Vertical Settlement above Crown; (b) Profile of Surface Settlements

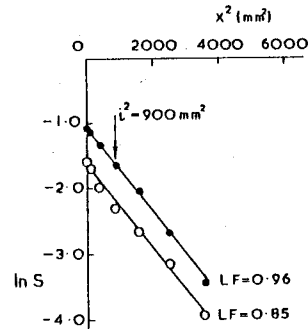


FIG. 2.—Surface Settlements above Model Tunnel in Dense Sand; $C/D = 1.48$, $\sigma_v = 0$

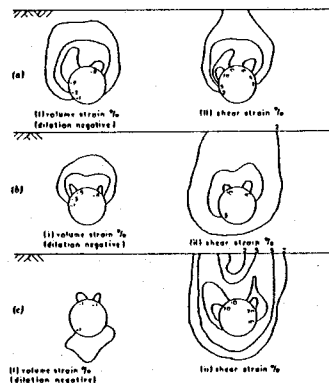


FIG. 3.—Contours of Volume Strain and Shear Strain around Model Tunnels near Collapse in Sand and in Overconsolidated Clay: (a) Dense Sand, $\sigma_v = 0$; (b) Dense Sand, $\sigma_v = 0$, Centrifuged at 75 g; (c) Overconsolidated Kaolin, $\sigma_v = 140$ kN/m

至る。このとき生ずる不連続面は、鉛直方向に近く、地表面では、正規分布曲線の変曲点付近に達するとみなすことができる。

一方、縦断方向の破壊モードは、横断方向の破壊モード同様、(1)トンネルと地表の幾何学的関係(C/D ; C :土カブリ、 D :トンネル直径)、(2)地山のせん断強度の要素に加え、(3)無支保区間長 P によって大きく異なってくる。(Fig.4)²⁾ 無支保区間長が0の場合は、切羽を中心とするゾーンのせん断破壊を呈し(Fig.5⁴⁾)、無支保区間が長くなると鉛直的な無支保区間の崩落(Fig.6⁴⁾)という形になる。無支保区間0の場合の崩壊モードは、筆者らが掘之内トンネルで推定した崩落モード⁵⁾に一致し、無支保区間の長い場合の崩落のモードも、在来の支保剛性が弱かったトンネルで経験し、ベンチ長の長すぎる場合などに対応する崩壊モードと考えられる。

塑性力学における upper bound theorem を用いた E. H. DAVIS²⁾らの limit analysis の結果によれば、トンネル横断方向の崩壊のモードは、 C/D が1~2の場合には、Fig.7. のようになり、さらに、縦断方向のモードは、Fig.8. のようになる。これらのモードは、前述の模型実験の結果を裏付けるもので、土カブリの薄い地山にトンネルを掘削した場合に生ずる大きなトンネル崩壊の典型的なモードを示しているとも判断できる。

○現場計測からの考察—土カブリの薄い地山にトンネルを掘削した場合の現場計測は、地表面沈下、地中沈下、トンネル坑内での種々の計測として、頻繁に実施されており、筆者らもいくつかの結果を発表している。⁶⁾⁷⁾ トンネル周辺の地山の崩壊や、崩壊に至る過程を考えると、地山の変形状態が1つの有力な情報を与えてくれることは、前項で示した模型実験等からも明らかである。その中でも、トンネル周辺の局所的な崩落を除く、さらに大きな崩落を考えると、地表面沈下の情報は、きわめて重要なものと言える。実際のトンネルにおける地表面沈下の性状は、Fig.9, Fig.10 に示すとおりであり、これによって表わされる連続曲線は、トンネル上に横にわたる地山のたわみ曲線の1つを表わしているわけで、たわみ曲線の性状は、地山内の1つの応力状態と対応すると思われる。筆者らはこの曲線をとり、又ハスラブのたわみ曲線と考え、地山の崩壊に対して、最も強いせん断状態にある部分を特定する試みを行ってきた。⁵⁾ この考え方は、模型実験の結果をあてはめて考えると、地表面沈下の性状から、地山の崩壊に最も注意を払わなければならない区域が理解できると推定される。

一方、地山におけるトンネル掘進方向に垂直な1つの測線と考え、この位置がトンネル掘進に伴ってどのような変位を示すかを調べてみると、Fig.11. のようになる。これによると、トンネルの掘進により、トンネル上の1つの測線において、強いせん断状態を呈する部分が、縦断方向から、横断方向に移動していく状況がわかる。

強いせん断状態を示すゾーンは、まず、切羽のすぐ手前、トンネルFig.7,8. Collapse mode from Limit Analysis センター付近に現われ、トンネルの進行にともない、徐々に側方に移動する。側方への移動は、切羽が7m程度

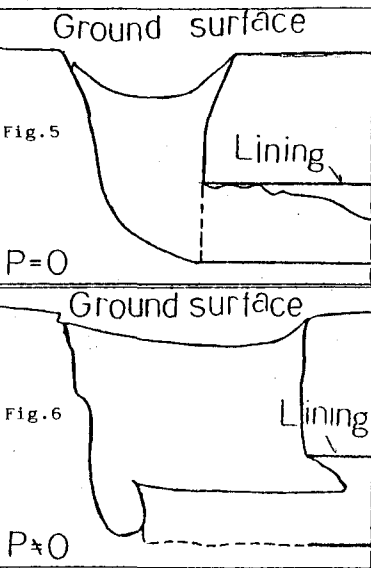
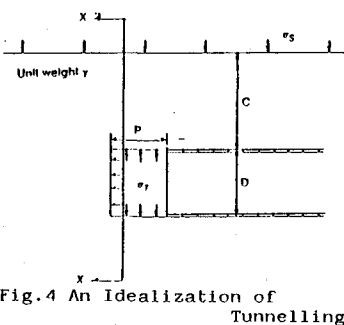


Fig.5 Fig.6 Longitudinal collapse mode

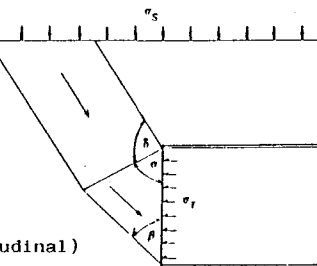
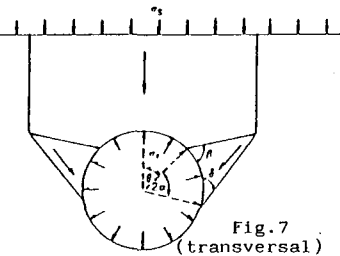


Fig.7,8. Collapse mode from Limit Analysis

進んだ所で止まり、さらに切羽が進めば、せん断状態がさらに強くなるか、あるいは一定値に収まるようになる。しかし、傾斜地形の場合には、強いせん断状態の発生する位置は、地形の影響を受け、変化することは言うまでもない。したがって、支保と地山の相互作用によって、せん断状態の強さが決まり、このせん断状態と地山強度の関係で崩落が生ずるかどうかが決まると理解できる。

○現場への適用 — 実際のトンネルから、トンネル及び周辺地山の崩壊に関する詳細な情報を得ることは、前述のとおり困難であるが、トンネル及び周辺地山の状態の反映として、トンネル内空変位の状況、応力状態、トンネル周辺の変形状態が現場計測の結果から得られる。

トンネル掘削に伴う地山の挙動は、次のように簡略化して考えられる。「トンネル周辺地山は、トンネルとして掘削された部分が負担している地山応力分を、地山自身で支えようとする。したがって、掘削部分が小さい間は、周辺部の負担は少ない。このような状態のうちに、支保部材を使ってトンネル周辺地山の手助けをするわけである。さらに掘削が進行し、トンネル周辺地山の負担分が増大するとき、地山を補助し、負担を軽減してやる支保部材が、十分な機能を発揮するように設置され、しかも期待される機能に十分な強度と剛性を有していることが必要である。この必要条件のうち、どちらかが欠けても有効な支保とは言えない。支保部材が地山に対して有効な補助とならず、地山が負担に耐えきれなくなったとき、地山の崩壊、支保の変状が生ずることになる。」このような地山と支保の関係を前提として、土カナリの薄い地山を考えると、日本におけるこの種の地山は、一般に未固結あるいは、固結度の低い土又は岩によって構成されており、地山の持つ強度も剛性も非常に低い。言い換えれば、この種の地山の変形や応力分担は、支保の剛性や強度によって非常に強い影響を受け、地山と支保の相互作用により、トンネル周辺地山の挙動が大きく左右されることになる。

したがって、私たちが現在掘削中のトンネルの安全性を確認するための情報として、

- (1) トンネル掘削の結果現れる挙動が、地山と支保の相互作用の結果を忠実に、しかも明確に反映したものであること。
- (2) 1つの情報であって、種々の掘削方法に対しても、掘削のそれぞれのStageに対して、連続的に、施工完了まで評価できるものであること。
- (3) 掘削以前の状態を初期値としていること。
- (4) トンネル周辺地山の破壊モードと対応がつくこと。
- (5) 計測がしやすく、誤差が少なく、処理が簡便なこと。

等の条件を満足している必要がある。

前項の模型実験や現場計測による破壊モードの推定と破壊への過程の考察からわかるように、連続的な地表面沈下測定が、(1)～(5)の要件を十分に満足する情報といえる。すなわち、地表面沈下のトンネル縦断方向、横断方向の測定結果は、地表面(地山)のたわみ状態を表わす曲面又は曲線を我々に与えてくれ、掘削の影響以前の値を初期値としている。支保施工後は、支保工の効果や地形、地質の状況によって、沈下量が増

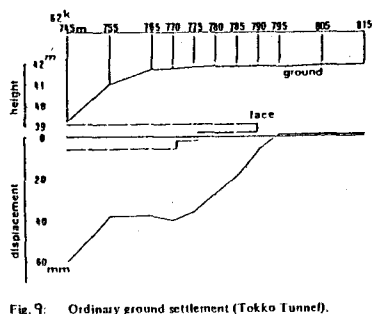
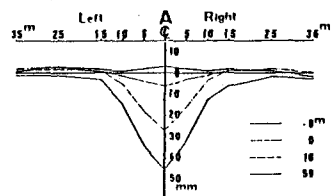


Fig. 9: Ordinary ground settlement (Tokko Tunnel).



(b) Transversal Displacement

Fig. 10: Ground settlement (Tokko Tunnel).

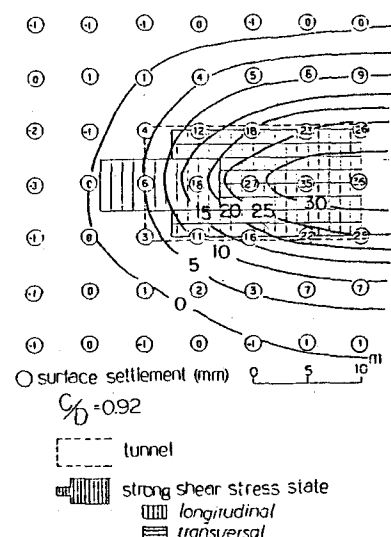


Fig. 11 Contour line & Strong shear stress zone (Tokko Tunnel)

減し、支保と地山の相互関係を反映する。
さらに、得られる連続曲線又は曲動は、継続的な計測により、連続的に、施工完了まで評価できる。

○ベンチカット工法における変状の推定—
これまで考えてきたエカブリの薄い地山における変形と崩壊のモードを、ベンチカット

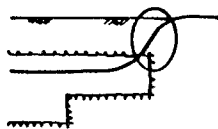


Fig. 12 Collapse mode (1)

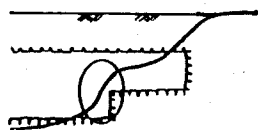


Fig. 13 Collapse mode (2)

○: dangerous zone

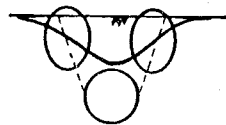


Fig. 14 Collapse mode (3)

ト工法にあてはめると次のようになる。(1) 上半切羽周辺の崩壊 (Fig. 12)
(2) 下半切羽周辺の崩壊 (Fig. 13) (3) トンネル側方の崩壊 (Fig. 14)
しかし、これらの崩壊モードのうち、どれか1つが単独で生ずる場合には、トンネルの崩壊としては、それほど大きくはならない。むしろ、これらの崩壊モードのうち、2つ以上が同時又は1つが引金となってもう1つを誘導するような場合、大きな崩落が発生すると言えよう。トンネル上方地山は、1つのスラブ材のような形で縦横断方向に応力的に依存をしてトンネル空間を支えている。縦横断いずれかの方向に応力依存ができないう状態（せん断面等の発生による連続性のときれ）が発生すると、もう一方の方向に依存する量が増し、この負担に既設の支保と地山によって構成される構造体が耐えられるかどうかの別れ目になる。トンネル掘進によって、最初に不安定な状態になるのは、上半切羽とその前方であり (Fig. 11) この部分の不安定な状態は、トンネル掘進により位置を変わるが、いつもトンネル切羽と一定の幾何学的関係をもって存在している。したがって、まず、この部分において地山に崩壊が生ずる可能性がある。しかし、上半支保自身はしっかりしたものであり、横断方向に地山の連続性は十分期待できる状態（強いせん断状態となっていて半判定できる）ならば、切羽のめり程度の現象で済むことになる。一方既に掘削した上半部分の地山の横断方向に強いせん断状態が発生している場合には、切羽付近の崩壊が引金となって上半部の地山全体の崩落という事態を引き起す。次に、上半切羽付近の崩壊が回避されたととしても、下半掘削による下半切羽周辺の不安定性が問題となる。下半掘削時には、Fig. 14 に示したように、トンネル横断方向には、かなり強いせん断状態が発生している。下半掘削により、この強いせん断状態がさらに増大すれば、トンネル横断方向の不安定性が増大する。このとき、十分な支保が下半に施されなければ、この不安定性は、なお顕著なものとなり、極限状態として、横断方向の地山の崩壊が生じることになる。横断方向の連続性を失った地山は、縦断方向の連続性に依存してトンネル空間を支保しようとする。この縦断方向の依存に対して、支えようとする縦断方向の地山のスパンが非常に長く、さらに、ベンチ工法による上半支保は、縦断的な剛性が不足しているため、縦断的な地山の崩壊を引き起しやすい。一方、横断方向は十分な安定性を確保できたととしても、下半の掘削が局所的な沈下を招き、トンネル軸線上の沈下モードが Fig. 13 のようなになったとき、トンネル縦断方向の連続性を断つような地山と支保の変状を生むことになる。

○おわりに— 本文では、地表面沈下曲線が、この種の地山の変形モードをよく反映し、トンネル周辺の破壊に対応した有効な情報を与えてくれることを示した。せん断状態の評価には、種々の問題があり、今後の研究を待つところが多いが、ここで示したような視点が、この種の地山でトンネルを掘削する際の安全管理の道標となれば幸いである。

(40) CONSIDERATIONS ON THE COLLAPSE IN THE VICINITY OF TUNNELS
—SHALLOW OVERBURDEN—

Japan Railway Construction Public Corporation

Koh KIMURA

A great number of shallow tunnels whose main support members are shotcrete and rockbolts have been excavated in Japan. We, tunnel engineers, still have deep concern for the failure of the tunnel structure and the collapse in the vicinity of tunnels.

It is frequently stressed that the field measurements are of great importance in order to judge that the tunnel is in safety. In this paper the key points in field measurements for safety of shallow tunnels are considered.

Judging from the centrifugal model studies in Cambridge University, Limit Analysis and the results of field measurements, we recognize that there are some fundamental patterns which are representative of the collapse in the vicinity of the shallow tunnel. As far as the bench cutting method is concerned they are as follows,

1. the collapse in the vicinity of the top heading (Fig.12)
2. the collapse in the vicinity of the lower face (Fig.13)
3. the collapse along the sides of the tunnel (Fig.14)

The processes of these collapses above-mentioned are predictable according to the results of the surface settlement and we can obtain the important informations about the collapse in the vicinity of the tunnel from the longitudinal and transversal curves of the surface settlement.

REFERENCES

- 1) J.H. Atkinson, D.M. Potts, A.N. Schofield; Centrifugal model tests on shallow tunnels in sand, *Tunnels & Tunnelling* January, 1977
- 2) E.H. Davis, M.J. Gunn, R.J. Mair, H.N. Seneviratne; The stability of shallow tunnels and underground openings in cohesive materials, *Géotechnique* 30 No.4 397-416, 1980
- 3) J.H. Atkinson, D.M. Potts; Subsidence above shallow tunnels in soft ground, *Journal of the geotechnical engineering division A.S.C.E.* April, 1977
- 4) T. Kimura, R.J. Mair; Centrifugal testing of model tunnels in soft clay, *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, 1981
- 5) A. Yokoyama, F. Fujimori, Y. Terado, K. Kimura; Estimation of loosening around mining face of shallow overburden tunnel in soil, *Proceedings of the 15th Symposium on Rock Mechanics J.S.C.E.* 1983
- 6) Y. Terado, K. Kimura; Field measurement and consideration on deformability of soft sedimentary, thin overburden soil in tunnel excavation, *Proceedings of the 14th Symposium on Rock Mechanics, J.S.C.E.* 1982
- 7) A. Yokoyama, Y. Terado, K. Kimura, H. Ikeda; On behaviour of tunnel supporting system applied to shallow overburden tunnel in soil, *Proceedings of the 15th Symposium on Rock Mechanics, J.S.C.E.* 1983