

大断面扁平トンネルの力学的挙動について

Study on mechanical behavior and stability of tunnels with large section

蔣 宇静*・江崎哲郎**・末松史朗***・田中陽子****

Yujing JIANG, Tetsuro ESAKI, Siro SUEMATSU and Yoko TANAKA

The mechanical behavior and face stability of road tunnels with large scale section are examined by using the model test and the three dimensional numerical analysis method. Compared with two-lane tunnels with circle and standard section, it is clarified that the tunnel face with the large section tends easily to unstable due to the progress of plastic zone and large deformation of ground in front of the tunnel face. The effects and the existing problems of both excavation methods for the large section tunnel, upper half method and middle wall method, on increasing the stability of tunnel face are also investigated. Finally, a new analytical model which can be used to assess the instability condition of tunnel face is presented based on the detailed three dimensional analysis of tunnel behavior.

Keywords: large section tunnel, tunnel face stability, mechanical behavior, three dimensional analysis excavation method

1. はじめに

道路トンネルの断面は、昨今の社会情勢へ対応した土木技術の進歩の結果、着実に大型化してきた。社会情勢の変化により、第二東名・名神高速道路におけるトンネルをはじめ、掘削断面積が200m²を越える3車線断面の道路トンネルが計画される例も多くなっており、大断面トンネルの技術的、経済的対応が強く迫られている。道路トンネルの場合、車線数や幅員が変化しても必要な高さは変わらないので、掘削断面積を出来るだけ小さなアーチ状断面とするためには、大断面トンネルは横長の扁平断面となる。大断面扁平トンネルでは、掘削断面積が大きいため、従来の2車線トンネルと比較して、とくに側壁部での大きな応力集中が生じると予想される。また、切羽面はその前方の地山の塑性化によって押し出されて、崩壊に至る可能性が高いため、切羽面の安定性の評価と適切な対策が求められている¹⁾。

そこで、本研究では、掘削に伴う大断面扁平道路トンネルの周辺地山および切羽面の変形挙動と安定性について、円形断面および2車線標準断面の場合と比較しながら、断面形状による塑性領域の発生状況と地山変位の相違を模型実験および三次元有限差分解析を実施することによって解明する。また、切羽面の安定性から大断面を分割して施工する場合の切羽面の安定化効果について、分割掘削工法（上半先進工法、中壁分割工法）を用いる場合と全断面掘削の場合を比較検討する。

2. トンネルの周辺地山の挙動の比較

2.1 研究手法の概要

模型実験には、底面摩擦模型実験装置²⁾を用い、均質な地盤材料として硫酸バリウム、酸化亜鉛、ワセリンを質量比70:21:9で混合したうえで、密度1.9g/cm³に押し固めたものを用いた³⁾。実型との幾何学的および力学的相似に基づいて、

* 正会員 博(工) 九州大学 工学部環境システム工学研究センター
** 正会員 工博 九州大学 工学部環境システム工学研究センター
*** 学生会員 九州大学大学院 工学研究科土木工学専攻
**** 学生会員 九州大学 工学部建設都市工学科

幾何学スケールと応力スケールを設定し、模型の挙動を定量的に把握する。また、掘削に伴うトンネルの周辺地山と切羽面の力学的挙動を調べるために、三次元を取り扱える大変形差解析法⁹⁾を用いる。解析モデルとして地山の物性値を Table 1 に示す。地山の弾塑性挙動が Mohr-Coulomb の破壊規準に従い、ピーク後はひずみ軟化挙動を呈するものとし、ひずみ軟化が終了して塑性流動状態に入る時の塑性せん断ひずみを 5.0%，残留強度をピーク強度の 50% とした。

トンネルの断面形状は、円形断面(直径10.6m)、2車線トンネルの標準断面(日本道路公団の設計要領¹⁾で2級A・Bクラス)および扁平大断面(第二東名高速道路、清水第三トンネルの計画断面¹⁾、Fig.1)とする。トンネルの深さを地表からスプリングラインまで150m、側圧係数を0.54とする。

2.2 トンネル断面周りの地山の挙動

断面形状と周辺応力の集中との関係を考えるために、円形断面、標準断面と扁平大断面の3つの断面形状について、弾性状態でのトンネル壁面における最大主応力比(掘削時における最大主応力 σ_1 / 初期地山応力 p_0) の分布を Fig.2 に示す。最大主応力比は、円形断面にくらべて標準断面および大断面の場合では、脚部(標準断面では $\theta = -19.31^\circ$ 、大断面では $\theta = -7.61^\circ$ 、ここに θ はスプリングラインから反時計回りを+、時計回りを-とする)付近においてピークが見られ、特に大断面の場合、初期応力の3倍以上の応力集中が発生した。また、壁面に鋭いピークが現れることから、切羽面から離れた断面では、最大主応力が側壁の下部に集中していることが分かる。

Fig.3には、模型実験において計測された大断面トンネル掘削後の内空変状(掘削前は点線、掘削後は実線で示す)とトンネル断面の周りに発生したクラックと塑性領域を示す。トンネル掘削後の応力再配分によって、トンネルの断面形状は上下方向に押し縮められ、トンネルのスプリングラインよりやや下方の位置から脚部にかけて、側壁が剥離するように破壊した。また、トンネル隅部にクラックが発生し、広がるように進展した。このため、トンネルアーチによって脚部が下方に押し込まれるようにして下盤膨れが生じた。これは、解析的にも明らかになったように、側壁から隅部にかけて、大きな応力集中が発生し地山が塑性化したためと考えられる。

Table 1 Mechanical properties of rock mass.

Elastic Young's modulus (MPa)	500
Poisson's ratio	0.35
Mass density (kg/cm ³)	0.0024
Cohesion (MPa)	0.9
Angle of internal friction (°)	25
Dilation angle (°)	20

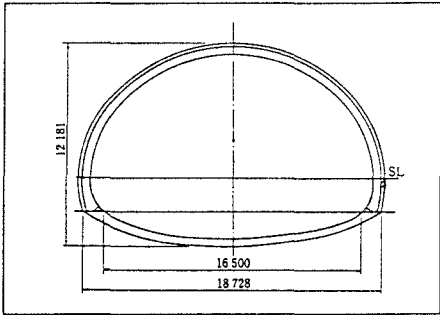


Fig.1 The cross section planned to SHIMIZU-DAISAN tunnel¹⁾.

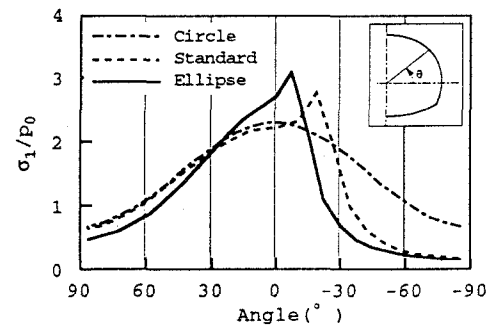


Fig.2 Distribution of the ratio of maximum principal stress to in-situ stress on tunnel wall.

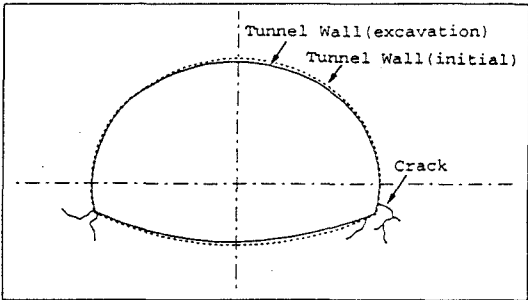


Fig.3 Propagation of crack and deformation of tunnel wall in model experiment.

2.3 断面形状による周辺地山の力学的挙動の相違と考察

掘削に伴うトンネルの周辺地山の变形と塑性領域の発生状況の三次元解析結果をFig.4に示す。この図には、トンネルスプリングラインに沿った水平面上における、変位ベクトルと塑性領域の進展状況を3つの断面形状についてそれぞれ示す。

いずれの断面形状でも、切羽面から離れるにつれて内空変位が増大し、切羽面から $1.2D \sim 1.3D$ (D はスプリングラインでのトンネル幅)以上に離れると一定量に近づく。一方、無支保工の状態においてトンネルの周りに生じた塑性領域も切羽面から離れるにつれて側方の奥部に広がり、円形と標準断面の場合では変位収束よりやや遅れて塑性領域の幅が最大となるのに対して、大断面の場合では、切羽面から約 $0.6D$ 後方からも塑性領域の側方への広がりが最大となる。切羽面のトンネル内空への変位は3つの断面形状ともに中心対称軸線付近で最大となり、最終内空変位の約 $1/2$ である。また、他の2つの断面形状の場合に比べて大断面の場合の最終内空変位は約2倍と増大している。

また、いずれの場合でも切羽面前方の地山の塑性破壊が見られ、とくに大断面形の場合には切羽面より前方向きの塑性領域の広がりが円形や標準断面の場合よりも2倍程度に拡大している。

以上のように、標準断面と円形断面に比べて、大断面扁平トンネルの場合においては内空変位や塑性領域の地山自重によるゆるみ荷重が大きく発生するなど全体的に安定性が低下し、とくに切羽面前方の地山の塑性破壊に伴う押し出しで、切羽面全体が不安定になりやすいことが分かる。

3. 大断面扁平トンネルの切羽面の安定性

大断面トンネルの施工において、切羽面の安定性を保つために、先導導坑や断面分割工法などが用いられる。ここでは、切羽面を分割掘削する場合の切羽面の安定化効果を考察するために、Fig.5に示すように、上半先導工法と中壁分割工法について、比較検討を行う。なお、先行する切羽と後発の切羽との間隔を $25m$ とする。

3.1 大断面扁平トンネルの切羽面の挙動

Fig.6は、大断面扁平トンネルを全断面掘削したとき

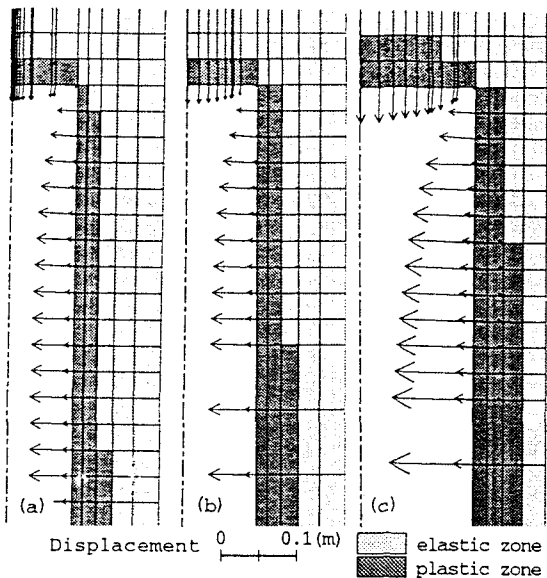


Fig.4 Development of plastic zone and deformation vector on the spring plane of tunnel during excavation for three types of cross sections: (a) Circle, (b) Standard, (c) Large scale.

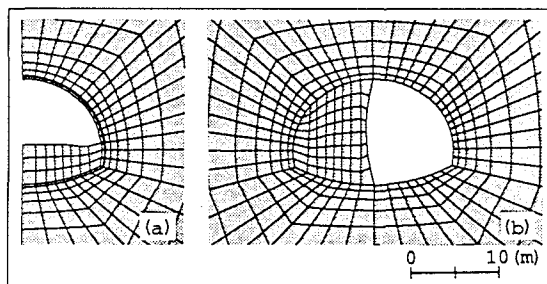


Fig.5 Excavation methods : (a) upper half method, (b) middle wall method.

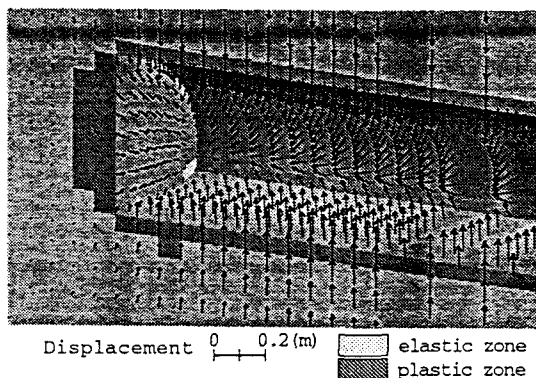


Fig.6 Plastic zone and deformation vector around the large section tunnel.

の、切羽面付近における塑性領域の発生状況と変位ベクトルを示す。トンネル側壁面に近い部分の地山は、ほぼ一様に塑性化しているが、切羽面とトンネル側壁面との接合部付近では、相互の拘束効果によって変位量も少なく、塑性化していない箇所が、断面のななめ上とななめ下に残っている。また、切羽面前方の地山に発生した塑性領域をトンネル中心面に沿って見ると、中央の膨らんだおわん状になっている。これは、トンネルの断面積が大きく、側壁面による拘束効果が切羽面の中心まで及ばず、切羽面の中心部で塑性領域が発達しやすくなっているためと考えられる。

切羽面の変位は、トンネル壁面との接合部付近ではトンネル進行方向の変位はほとんど見られず、トンネル中心向きになっているが、切羽面の中心に近づくにつれて、トンネル軸方向に平行な方向に変化している。このため、スプリングラインに沿って切羽面のトンネル進行方向の変位量をプロットすると、中央が膨らんだんだかなカーブになっており、塑性領域のダイレーション挙動に応じて切羽面の変形が発生していると考えられる。

Fig.7 は分割掘削工法を用いた場合の、トンネルスプリングラインより3.1m上方の水平面および先行切羽面と後発切羽面よりそれぞれ10m離れた位置での横断面における、塑性領域の発生状況と変位ベクトルの分布を示す。上下分割工法(Fig.7(a))を用いた場合は、全断面掘削と比較して、切羽面の変位は大差ないものの、切羽面前方の地山の塑性化範囲が小さく、切羽面を安定化するという点ではある程度は有効であると言える。しかし、先行断面が非常に扁平な形状となっているため、隅部から下向きに塑性領域が進展していること、また、後発の切羽が通過したのち、更に隅部の塑性化が進展していることなどから、トンネル隅部の安定について、とくに注意する必要があると考えられる。

トンネル断面の左右分割(Fig.7(b))をおこなった場合でも同様に、先行切羽の前方地山に発生する塑性領域の大きさと内空への変位がある程度抑制されており、切羽面の安定性は向上している。しかし、後発切羽側の周辺地山が大きな領域で塑性化しており、また、相互影響により後発の切羽面に近づくにしたがって内空変位量が大きくなっていることから、後発の切羽面や分割面に対する補強が必要である。

以上のように、断面を上下に分割した場合には、先行切羽の前方の地山に対して塑性領域の発生をある程度抑える効果があったが、逆にトンネル隅部など不安定になる箇所が発生した。また、左右に分割した場合には、先行切羽の変位量を抑える効果が見られるものの、断面の分割面と後発の切羽面が不安定になりやすい。合わせて、大型機械の使用や施工過程の煩雑さを考えると、切羽面の安定性を保つために分割掘削工法を用いることは場合によって必ずしも有利で

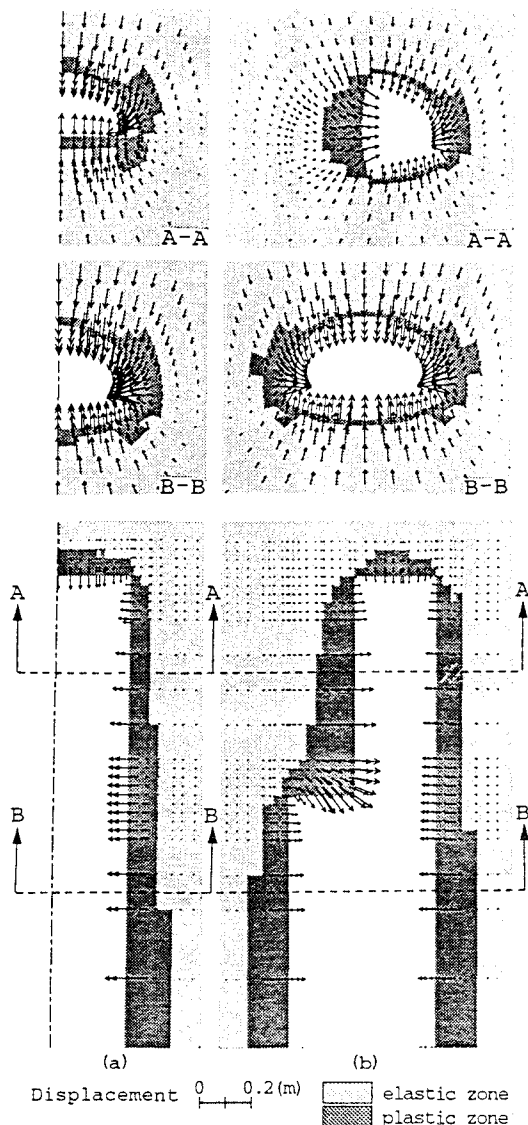


Fig.7 Comparison of mechanical behavior of ground around tunnel: (a) upper half method, (b) middle wall method.

はないと考えられる。

3.2 切羽面の安定性を評価するためのモデリングについて

トンネルの掘削断面の大型化とともに、切羽面が不安定になりやすくなるが、切羽面の安定性をいかに評価するかに関しては、例えば泥水圧式シールドトンネルの泥水圧を決定するための理論的検討⁹⁾では、上方からの土圧によってトンネルの切羽面

の下端を通る円弧すべりが発生すると考えられている(Fig.8(a))が、本研究において分かるように、軟岩中の大断面トンネルの切羽面の不安定は、砂質のような地山に生じる円弧すべりに起因する押し出しと考えるよりも、切羽面前方の地山のせん断破壊に伴うダイレーションによってトンネル内空に押し出されると考えるべきであろう。そのために、大断面トンネルの切羽面の安定評価としてはFig.8(b)に描くように、切羽面付近の上下端地山の拘束効果と切羽面前方の応力集中、地山の強度特性、トンネル断面の大きさの影響を総合に反映できるせん断破壊モデルが適当であると考えられ、その詳細は紙面上の都合で別の機会で報告することにする。

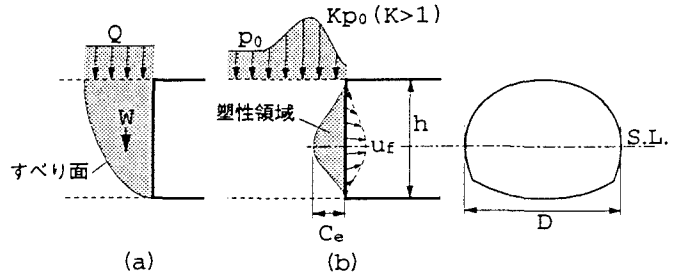


Fig.8 Modelling for stability analysis of tunnel face : (a) shear sliding model, (b) plastic failure model.

4. おわりに

本研究では、大断面扁平トンネルの周辺地山の力学的挙動を、とくに切羽面付近の地山について円形断面と標準断面と比較しながら実験的および解析的に調べることで、以下のように考察することができた。

大断面トンネルの場合では、スプリングラインよりやや下方の壁面付近では初期地山応力の3倍以上の最大主応力が作用し、このような応力集中に起因した変形モードと塑性破壊挙動は模型実験においても確認することができた。また、断面形状の異なるトンネルの変形挙動や安定性を比較した結果、大断面扁平トンネルでは、塑性領域の発生がより広がり、特に切羽面前方において標準断面の場合よりも塑性領域が約2倍に発生し、しかもそれによるトンネル内空への大変形が現れるため、切羽面の安定性が大幅に低下する。一方、トンネル断面を分割掘削した場合には、先行する切羽面前方の地山をある程度安定化させる効果があるものの、トンネル隅部や断面の分割面と後発の切羽面など、新たな部位において不安定を引き起こすため、分割施工法の選定や支保設計を行うに際してこういう素因を考慮する必要があると考えられる。今後は、切羽面付近の地山の挙動をより詳細に考察した上での切羽面安定性の評価手法の提案と、切羽面の安定性を向上させるための補助工法の効果解明を続けていきたい。

5. 参考文献

- 1). 三浦 克:大断面道路トンネルと山岳トンネル工法の現状と課題, 土木学会論文集, No.516/VI-27, pp.1- 13, 1995.
- 2). 江崎哲郎他:大深度地下利用のための定量的模型実験装置の開発, 第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.186- 190, 1990.
- 3). Egger, P: Inc. Colloguium on Physical Geomechanical Models, ISMES, Bergam ITARY, pp.67- 81, 1979.
- 4). 中川光雄・蔣宇静・江崎哲郎・阿部浩二:軟岩トンネルにおける大変形解析法の適用について, 第26回岩盤力学シンポジウム論文集, pp.515- 519, 1995.
- 5). 日本道路公団:設計要領, 第三集, 第9編トンネル, pp.16, 1985.
- 6). 福島伸二他:土かぶりの浅い軟弱地山トンネルにおける切羽安定化のための薬液注入の効果, 土と基礎, 38-12, pp.47- 52, 1990.