

トンネル切羽の安定性評価に関する研究

Study on the stability of the tunnel face

真下英人*・猪熊明**

Hideto Mashimo, Akira Inokuma

In order to excavate a tunnel in safety, it is important to keep the tunnel face stable. But now there are no criteria to evaluate the stability of the tunnel face easily, so some accidents of the tunnel face collapse have happened owing to the lack of the countermeasures for the tunnel face collapse.

In this paper, model tests on unsaturated sand were carried to investigate the ground condition when the tunnel face collapse happens and the results of the model tests were analyzed by the three-dimensional stability analysis. From the model tests and the analysis, the author could obtain a criterion to evaluate the face stability.

Keywords: tunnel face, stability, model test, three-dimensional analysis

1. まえがき

山岳トンネル工法によりトンネルの掘削を行う場合は、切羽が安定していることがトンネルの掘削を可能とすることの前提条件となっている。しかし、地山条件によっては切羽の安定性が確保できない場合があり、特に、掘削直後においては崩壊が発生し易い状態にある切羽近傍での施工を行うことになるため、切羽の安定性の確保が安全面での大きな課題となる。切羽の安定性が確保できない場合には切羽から先受工や鏡ボルト、鏡吹付けコンクリート等の補助工法を実施して切羽の安定を図ることになるが、これら切羽の安定対策のための補助工法の採用の可否、選択については現在のところは基準となるものがなく、主に切羽の観察記録を利用して現場の地質状況や施工事例等を勘案しながら実施しているのが現状である。このため、切羽の安定対策を施すタイミングが遅れたり、適切な規模の対策が実施できずに、天端や切羽の崩壊を招いた事例が報告されており、切羽の安定性を定量的に簡便に評価する方法の確立が望まれているところである。

本研究は、このような問題に対応するため、切羽の崩壊が発生するときの地山の条件を明らかにするとともに切羽の安定性を評価するための指標を得ることを目的とした模型実験を行い、さらに切羽の安定解析にトンネル横断方向の崩壊形状を考慮した3次元解析の適用を試み、実験結果との比較を行ったものである。

なお、トンネル切羽の安定性は、地山の岩質、亀裂の状況、湧水の多少、地形状況等種々の要因に大きく影響され、その崩壊メカニズムも地質、地形条件等によって異なるものと考えられるが、本研究では亀裂、湧水が存在しない土砂地山を対象にした実験を行った。

* 正会員 建設省土木研究所 トンネル研究室

** 正会員 工博 建設省土木研究所 トンネル研究室長

2. 模型実験¹⁾

2. 1 実験概要

(1) 実験装置

図-1に実験装置の概要を示す。実験には、幅100cm、奥行き100cm、高さ110cmの側面が透明なアクリル板から構成される実験土槽を用いた。各側面の中央には4種類の径(10.1cm, 16.0cm, 21.6cm, 31.9cm)の円形トンネル模型を取り付けるための穴が開いている。トンネル模型は、一部の径を除いて一次覆工と二次覆工から構成される2重構造とし、一次覆工には塩ビ管(肉厚5.5および6.5mm)、二次覆工には鋼管(肉厚4.5mm)を用いた。

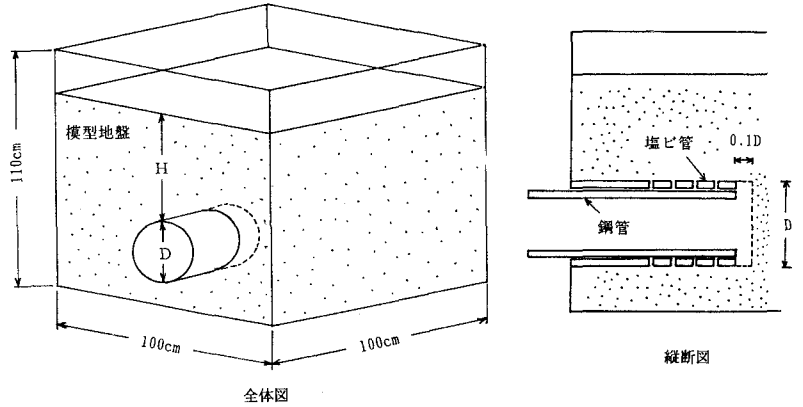


図-1 実験装置の概要

(2) 実験方法

実験方法は、実験土槽内に自由落下法により模型地盤を作製した後、土槽側面から円形トンネルを掘削し、掘削時におけるトンネル切羽の安定性を調べた。トンネル1回の掘削は、掘削用のピックにより模型地盤をトンネル径Dの0.1倍の深さまで掘削した後直ちに塩ビ管を建て込み、塩ビ管の内側に設置した鋼管を切羽面まで推進させる作業からなり、これらの作業を繰り返すことにより、トンネル径と同じトンネル延長まで掘削を進めた。ただし、トンネル径が10.1, 16.0cmの場合については作業空間が狭く塩ビ管の設置が困難であり、また、鋼管を直接地盤の中を推進させても切羽の安定に及ぼす影響は小さいことが確認されたため、鋼管だけを覆工として用いた。なお、トンネル切羽の安定性は1Dの掘削中1度でも切羽の崩壊が発生した場合を崩壊と見なし、地表面まで到達するような崩壊が発生した場合にはその時点で実験を終了した。

(3) 実験条件

実験条件は、トンネル径D、土被りH、地山の強度(特に粘着力c)を変化させ、これらが切羽の安定性に及ぼす影響について調べることにした。

トンネル径Dは上述したような4種類とし、それぞれの径に対して土被りHとトンネル径Dとの比率H/D(土被り比)を0.5~7の範囲内で3通りに変化させた。

地盤材料には、不飽和状態にある豊浦標準砂を使用し、水のサクシオン効果によりわずかの見掛けの粘着力を持たせることにした。表-1に実験に使用した模型地盤の物性値を示したが、本研究では目標とする地

表-1 模型地盤の物性値

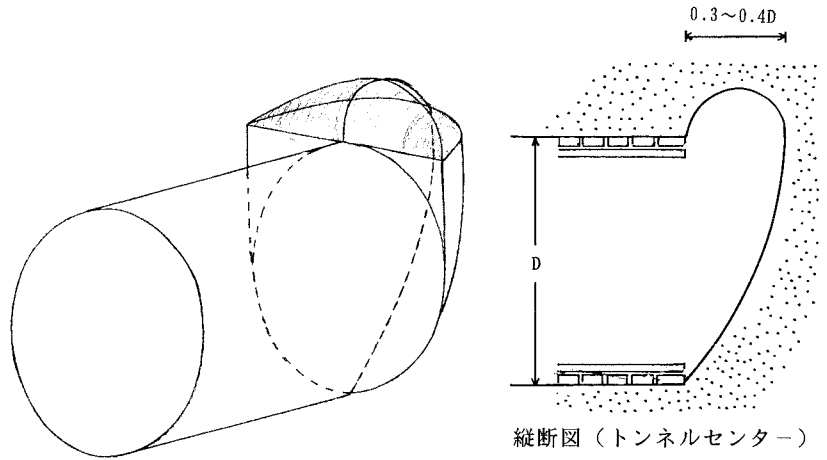
	I	II	III
単位体積重量 γ (gf/cm ³)	1.25	1.20	1.20
含水比 w (%)	1.4	2.5	3.1
粘着力 C_d (gf/cm ²) *	2.7	3.6	5.0
内部摩擦角 ϕ_d (deg) *	32.4	32.5	32.2

* C_d , ϕ_d は一面せん断試験(垂直応力 $\sigma = 30 \sim 80$ gf/cm²) により算定

盤の含水比を変化させることにより粘着力が異なる3種類の模型地盤を作製した。なお、地盤の内部摩擦角および粘着力は拘束圧の範囲を30~80gf/cm²とした一面せん断試験から求めた。

2. 2 実験結果

図－2 は、掘削中に発生した典型的な切羽の崩壊形状の外観図を示したものである。トンネルセンターにおける縦断方向の滑り面の形状は、トンネル底盤に端を發し、天端の高さで切羽前方0.3～0.4Dの深さに達して天端直上で閉じるパターンが最も多く觀察



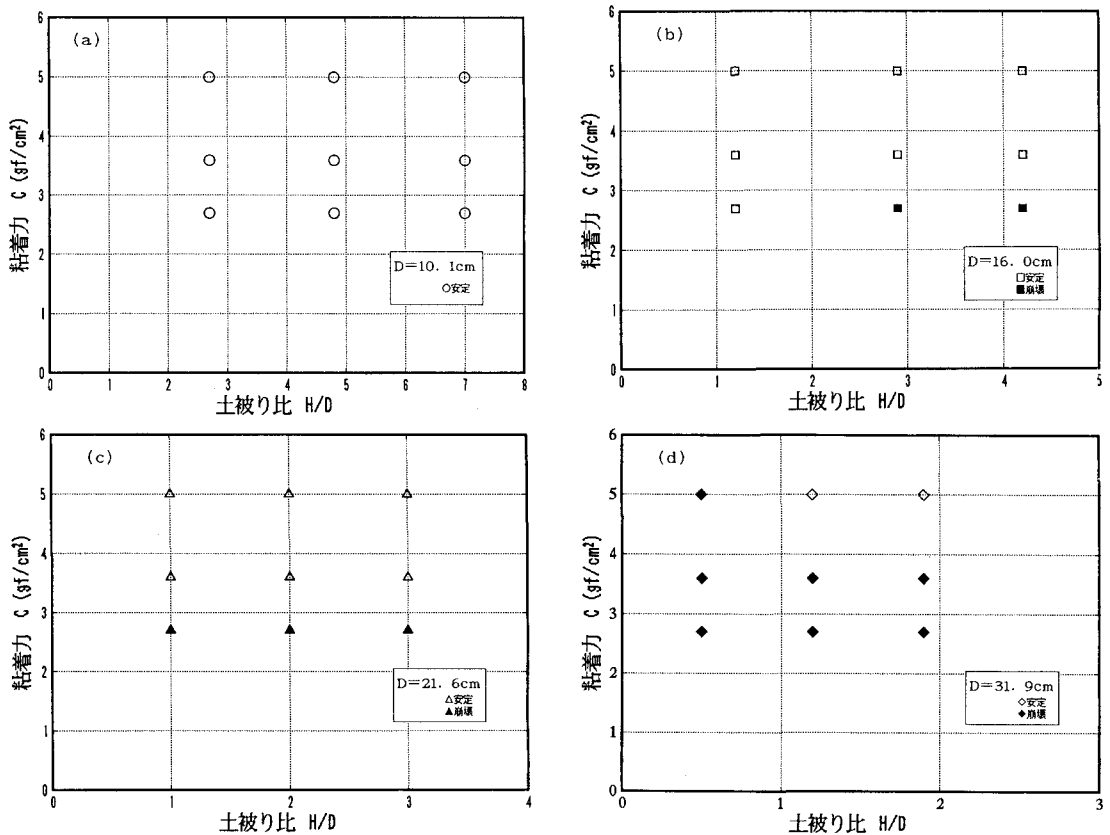
縦断面（トンネルセンター）

図－2 崩壊パターンの外観図

され、場合によっては天端直上で閉じずに地表面にまで達するパターンも觀察された。切羽の安定対策を目的としてフォアポーリングに代表されるような先受工を用いる場合、先受工の長さをどの程度にするか判断に迷う場合があるが、今回の実験結果によればトンネル径の0.3～0.4倍程度あれば天端部の崩壊に対しては対応できるものと考えられる。

また、縦断方向の滑り面の形状はトンネル横断方向の位置によって異なり、トンネルセンターから離れるに従って滑り面の深さが浅くなり、側壁部近くではほとんど滑り面が認められなくなる。したがって、後述するように滑りに対する安定解析を行う場合にはこれらを考慮した3次元解析を行う必要があるものと考えられる。

図－3 は、切羽の安定に必要な粘着力 c の大きさと土被り比 H/D との関係を各トンネル径に対して示したものである。切羽の安定性は、トンネルの径が $D = 10.9\text{cm}$ の場合は $c = 2.7\text{gf/cm}^2$ のケースにおいても崩壊



図－3 切羽安定に必要な粘着力と土被り比との関係

が発生しない結果となっているのに対して、 $D = 16.0, 21.6\text{cm}$ の場合は $c = 2.7\text{gf/cm}^2$ のケースでは崩壊が発生し、 $c = 3.6\text{gf/cm}^2$ 以上のケースで切羽が安定する結果となっている。また、 $D = 31.9\text{cm}$ の場合は、 $c = 2.7\text{gf/cm}^2$ 以下のケースで切羽の崩壊が発生し、 $c = 5.0\text{gf/cm}^2$ のケースで、 $H/D = 1$ の場合を除いて切羽が安定する結果となっている。このように、切羽の安定に必要な粘着力はトンネル径の影響を受け、トンネル径が大きくなるにともない切羽の安定に必要な粘着力は大きくなることがわかる。

一方、土被り比の違いによるトンネル切羽の安定性については、トンネルの径が同じであれば切羽の安定に必要な粘着力はほぼ一定となっており、土被り比が1程度以上ある場合には土被り比が切羽の安定性に及ぼす影響は小さいことがわかる。

以上のように、切羽の安定に必要な粘着力はトンネル径によって異なるため、切羽の安定性の評価にはトンネル径と粘着力を考慮した指標が必要となる。そこで、本研究では、切羽の安定に必要な粘着力 c を単位体積重量 γ とトンネル径 D の積で除した無次元量 $c/\gamma D$ による整理を行い、切羽の安定性との関係を調べた。図-4は、 $c/\gamma D$ と土被り比との関係を示したものであるが、トンネル径、土被り比の大きさに関係なく、 $c/\gamma D$ の値として0.13付近に切羽の安定と崩壊の境界領域が見られ、 $c/\gamma D$ が切羽の安定性を評価するための一つの指標になることがわかる。

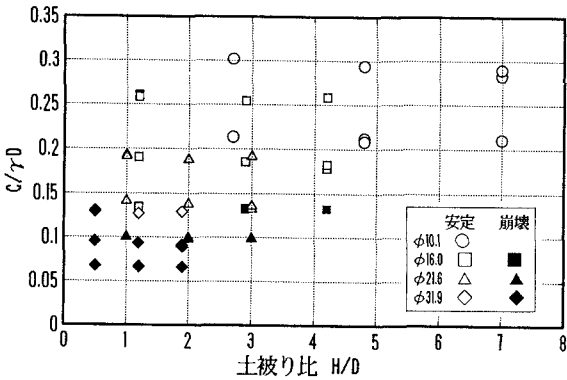


図-4 切羽安定に必要な $c/\gamma D$ と土被り比との関係

3. 切羽の安定解析

3.1 解析方法

切羽の安定解析は、これまではトンネル横断方向に同一の破壊形状を有するものと仮定した2次元解析が行われてきている。しかし、前述したように実験結果によれば切羽の崩壊形状はトンネル横断方向に対しても変化するため、本研究ではトンネル横断方向の破壊形状を考慮した3次元解析を行うこととした。

図-5は、解析に用いた地山のモデルを示したものである。本研究では、切羽前方の崩壊土塊をトンネル天端を通る水平面で分離し、

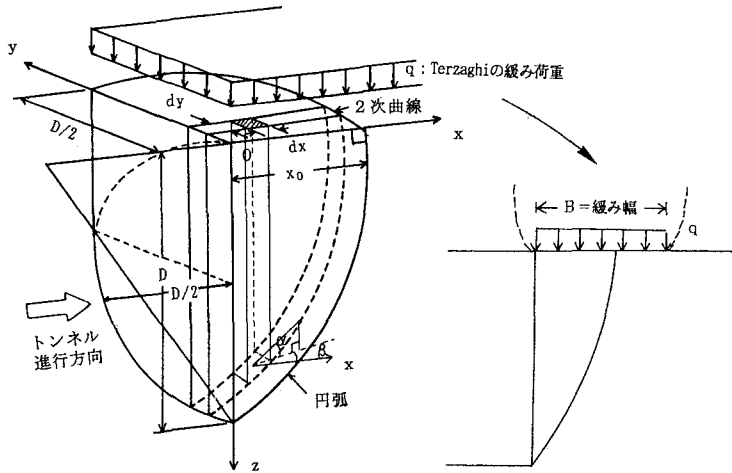


図-5 地山の解析モデル

水平面より上部の土塊の影響を水平面に作用する土圧 q に置き換え、水平面より下部の土塊の滑りに対する安全率を分割法により求めた。具体的には、切羽の崩壊形状を実験結果を参考にして図-5に示すような円弧と2次曲線から構成される曲面で近似して、崩壊土塊を xz 面、 yz 面により構成される鉛直な柱に分割し、土柱間に働く内力の伝達を無視して

各分割土柱の z 方向の釣合条件

$$W + q \, dx \, dy = P \cos \alpha + S \sin \alpha \quad \dots (1)$$

土塊全体の x 方向の釣合条件

$$\Sigma [(S \cos \alpha - P \sin \alpha) \cos \beta] = 0 \quad \dots (2)$$

各分割土柱の破壊条件式

$$F_s = (P \tan \phi + c A) / S \quad \dots (3)$$

の 3 つの式を連立させて次式により安全率 F_s を求めた。

$$F_s = \frac{1}{\Sigma (W + q \, dx \, dy) \tan \alpha \cos \beta} \cdot \Sigma \frac{c A \cos \alpha + (W + q \, dx \, dy) \tan \phi}{\cos \alpha^2 (1 + \tan \phi \tan \alpha / F_s)} \cos \beta \quad \dots (4)$$

ここに、 P ：分割土柱底面に作用する垂直力、 S ：分割土柱底面に作用するせん断力

W ：分割土柱の重量、 A ：分割土柱の底面積、 α ：底面中心における接平面と水平面のなす角度

β ：底面中心における法線の水平面への射影と x 方向のなす角度、 c 、 ϕ ：地盤の強度定数

F_s の計算に当たっては、崩壊面の位置 x_0 を変化させ、繰り返し計算により求まる最小安全率の値を F_s とした。

また、切羽前方のトンネル天端を通る水平面に作用する土圧 q については、次式で示される Terzaghi の緩み荷重を与えることとした。

$$q = B (\gamma - 2c/B) \cdot \{1 - \exp(-2 \cdot H \cdot K \cdot \tan \phi / B)\} / (2 \cdot K \cdot \tan \phi) \quad \dots (5)$$

ここに、 B ：緩み幅、 K ：側圧係数 (≈ 1)

なお、緩み幅 B については通常トンネル掘削の影響は切羽前方 1 D 程度まで及ぶと言われていることから 1 D の値を与えることとした。

3. 2 解析結果

図-6 は、粘着力の大きさが安全率に及ぼす影響を各トンネル径について示したものである。トンネル径が大きくなるほど同一の安全率に対する粘着力も大きくなっており、切羽の安定に必要な粘着力の大きさはトンネル径が大きいくほど大きくなることを示している。また、安全率が 1 となる時の粘着力の大きさを各トンネル径について求め、トンネル径 D と単位体積重量 γ で除した無次元量 $c/\gamma D$ の値を求めるとトンネル径にかかわらず概ね 0.18 となり、値としては実験値との開きがあるものの実験結果と同様トンネル径の影響を受けないことがわかる。

図-7 は、内部摩擦角の大きさが安全率に及ぼす影響を示したものである。図からわかるように粘着力に比較すると内部摩擦角が安全率に及ぼす影響ははるかに小さく、切羽の安定性は地山の強度特性のうち特に

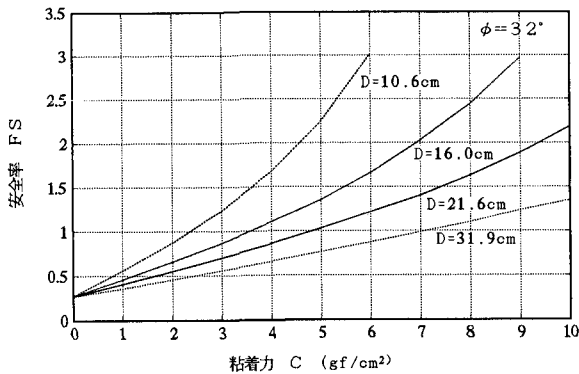


図-6 粘着力が安全率に及ぼす影響

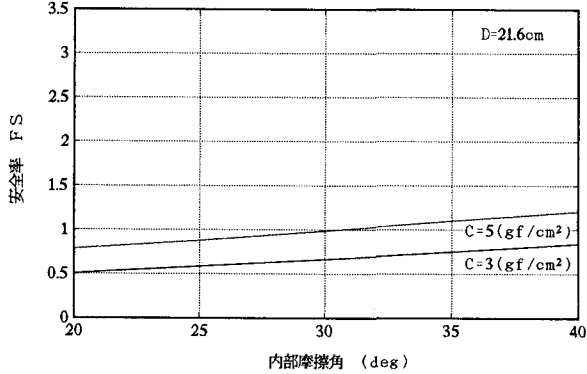


図-7 内部摩擦角が安全率に及ぼす影響

粘着力により支配されることを示している。

図-8は、(4)式において F_s が1すなわち崩壊が発生するときの粘着力 c を求め、 $c/\gamma D$ と H/D との関係について実験値との比較を行ったものである。計算に当たっては、 $\phi = 32^\circ$ で一定とし、図中には切羽の安定解析を2次元で行った場合の結果およびTerzaghiの緩み荷重を $B = 0.5D$ で与えたときの結果も示した。

土被り比が $c/\gamma D$ に及ぼす影響については、土被り比が1程度以上あれば小さく、実験結果と同様な傾向を示している。

$c/\gamma D$ の値については3次元解析から得られる $c/\gamma D$ の値は、2次元解析から得られる値に比べて2割程度小さくなるもののそれでも今回の実験結果よりは高めの値を示している。ただし、切羽前方の地盤に発生している土圧 q をTerzaghiの緩み荷重として与えるときの緩み幅 B を $0.5D$ とすることにより $c/\gamma D$ の値が大きく変化し、実験値に比較的近くなる傾向が認められることから切羽前方の地盤に発生する土圧の評価方法について今後さらに検討する必要がある。

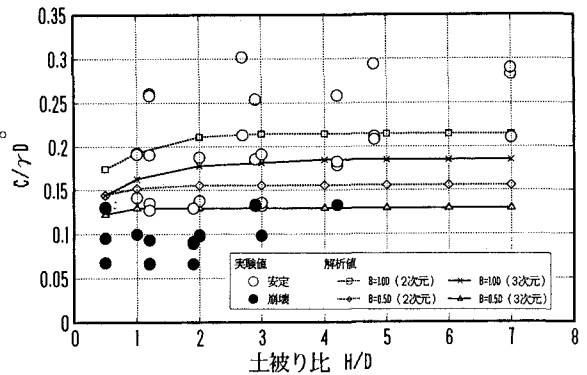


図-8 解析から得られた切羽安定に必要な $c/\gamma D$

4. 結論

本研究では、トンネル掘削時において切羽が安定するための地山条件および切羽の安定性を評価するための指標を得ることを目的とした模型実験を実施するとともに、実験結果に切羽の3次元安定解析の適用を試みた。本研究より得られた主要な結果をまとめると、以下のようになる。

(1) 切羽の安定に必要な地盤の粘着力 c はトンネル径 D の影響を受け、トンネル径が大きくなるにともない切羽の安定に必要な粘着力は大きくなる。一方、土被り比が1程度以上ある場合には切羽の安定性に及ぼす土被り比(土被り/トンネル径)の影響は比較的小さい。

(2) 湧水がない場合の切羽の安定性を無次元量 $c/\gamma D$ (γ は単位体積重量)により評価した結果、トンネル径に関係なく $c/\gamma D$ として0.13程度の値があれば切羽は安定することが明らかとなった。

(3) 切羽の安定解析を分割法により行った結果、トンネル横断方向の崩壊形状を考慮した3次元解析の方が2次元解析より実験結果により近い値を与えることが明らかとなった。ただし、切羽前方に発生する土圧の評価によって解析結果は大きな影響を受けるため、切羽前方の土圧の評価方法については今後の課題となる。

5. おわりに

今回の実験は、地盤の強度 c および γD がともに小さな領域で行われているため、強度の評価の違いが $c/\gamma D$ の値に及ぼす影響は大きい。このため、今回の実験では切羽の安定に必要な $c/\gamma D$ の値として0.13という値が得られたが、 $c/\gamma D$ の値の絶対的な評価については、今後 c および γD がともに大きな領域での実験を行うことにより検証を行い、さらに現場への適用を図っていく予定である。

6. 参考文献

- 1) 真下 英人・猪熊 明・秋山 清吾：トンネル切羽の安定に関する模型実験、土木学会第49回年次講演会講演概要集Ⅲ-608、pp1141~1142