

切羽形状がトンネル安定性に及ぼす 影響に関する模型実験

疋島 大彰¹・土門 剛²・西村 和夫³

¹学生会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: hiroaki-hikishima@ed.tmu.ac.jp

²正会員 首都大学東京大学院 助教 都市環境科学研究科 (同上)

³正会員 工博 首都大学東京大学院 教授 都市環境科学研究科 (同上)

NATMによるトンネル施工において、最も重要となるのは切羽の安定性を得ることである。切羽の安定性を得るためには一般的に鏡ボルト工・鏡吹付け工などの鏡面への補助工法適用を考えるが、切羽をドーム状に保ちながら掘削を行えば、地山のアーチ効果により切羽の安定性が得られると考えられ、それらの補助工法適用を減らし、経済的な施工が実現できると考えられる。本研究では、未固結粒状体地山での全断面掘削を想定し、切羽形状の違いが無支保トンネルの安定性に及ぼす影響をベースフリクション装置を用いた模型実験により解明した。

Key Words : model test, base friction apparatus, face stability, face shape

1. はじめに

近年、都市部における未固結地山において、NATMによるトンネル施工が増加している。また、施工コスト縮減を目的とした大型機械による全断面掘削も増えてきている。しかし、このような地山での全断面トンネル施工では、一時的に無支保となる切羽の面積が大きくなり、切羽の安定性確保が困難になることが想定される。

そこで、切羽の安定性を確保するために一般的には鏡面への補助工法の適用を考えるが、切羽をドーム状に保ちながら掘削を行えば、切羽面をアーチ効果により安定させることができると考えられる。

このような観点から本研究では、未固結粒状体地山での全断面掘削を想定して、切羽の形状がトンネルの安定、崩壊に及ぼす影響とメカニズムについて、ベースフリクション装置を用いた模型実験より解明することを目的とした。

2. 模型実験

(1) 実験概要

a) ベースフリクション実験装置

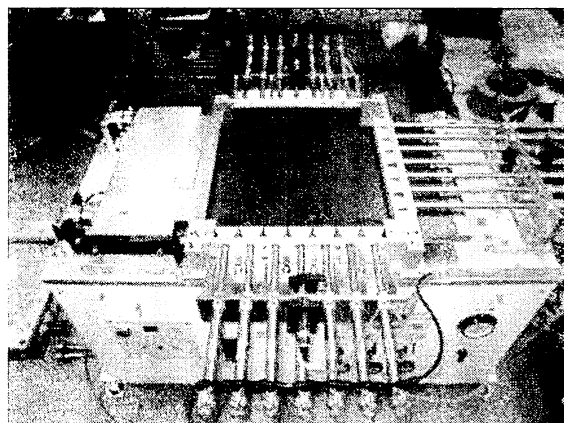


図-1 ベースフリクション装置外観

本研究では図-1のベースフリクション装置を用いた模型実験により、様々な切羽形状における周辺地山挙動の解明を行う。

この装置では、地山材料の下部に設置されたスライド板をスライドさせることによって、フレームで拘束された地山材料とスライド板との間に摩擦力を生じさせることができる。これが擬似重力となって地山に作用する。また、重力作用下で瞬間的に起こる地盤の挙動を、この装置では静的に観察することが可能となる(図-2)。

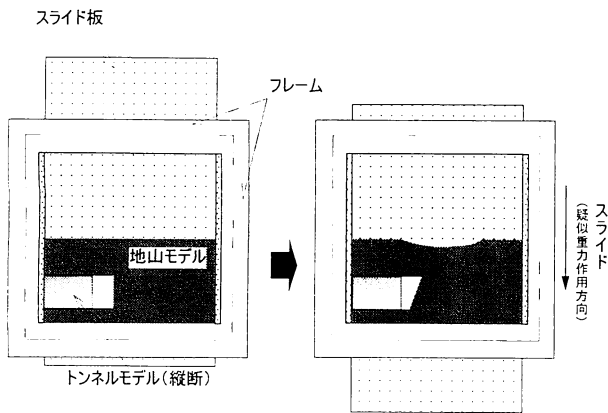


図-2 ベースフリクション装置の概念

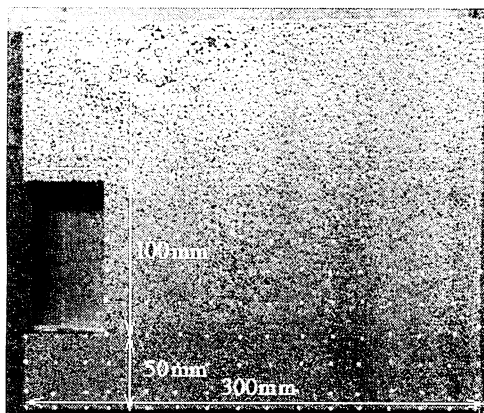


図-3 地山およびトンネルモデル設置状況

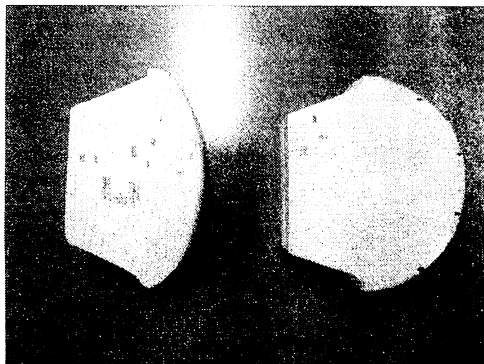


図-4 トンネル切羽用木製型枠
(左：楕円型，右：半円型)

b) 地山およびトンネルモデル

本研究では，地山材料として直径が 2.5mm と 5.0mm でいずれも高さ 40mm の円柱形状の磁性ステンレス棒を使用し，重量配合比を 3:2 としたものを地山モデルとした。

ステンレス棒は図-3のように配置し，トンネルの土被りをトンネル直径 $D (=100\text{mm})$ に対して 1D とした。

実験ケースは，切羽形状の違いにおける切羽安定性のみを検討するため，鏡補強工をはじめとする各種補強工ならびに支保工は考慮せず，全てのケースで無支保とした。実験ケースは，切羽形状として i) 直壁型，ii) 楕円型および iii) 半円型（図-4）の3種類とした。

c) 実験方法の改良

ここで前回までの実験方法からの改良点について述べる。

本実験では，スライド板の移動中のステンレス棒が直立したまま移動することが望ましい。しかし，直径に比して高さのある棒であるため，スライド移動の初期の段階から棒が転倒してしまう。このことは，周辺からの拘束の少ない切羽および地表面のステンレス棒において顕著であった。そこで，前回までは，切羽および地表面に低反発性スポンジを置くことで棒の転倒に対処していた。

しかし，スポンジを設置する方法では，切羽と地表面のステンレス棒の動きが拘束されるため無支保の実験とはならない。そこで今回の実験では，直径 3.0mm のネオジウム磁石を切羽部と地表面部のステンレス棒頭部に等間隔（10～20mm 間隔，実験ケースにより間隔を変える）に設置した。これによりスライド板とステンレス棒間さらにはステンレス棒どうしの磁力が増し，実験中の転倒を防ぐことが可能となった。また，この磁石を切羽や地表だけでなく地山内部にも設置することにより，みかけの粘着力を持たせることもできた。

この改良により，切羽や地表面のステンレス棒の自由度を上げるとともに，実験中のステンレス棒の転倒を防ぎ，二次元的な地山挙動を模擬する実験手法を確立することに成功した。

(2) 実験および画像解析手順

実験では，スライド板移動中の地山挙動を高解像度カメラで撮影した。その後，地山に等間隔に配置したマーカーを撮影データとして取り込み，画像解析ソフト（Move-Tr）を用いて変位ベクトルを，地山内最大せん断ひずみ分布はひずみ解析ソフト（Strain）を用いて描画した。以下に手順を示す。

a) 実験手順

ベースフリクション装置のスライド板上に，トンネル切羽モデルを配置した状態でステンレス棒を重量混合比 3:2 で敷き詰める。地山作成がほぼ完成したらスライド板を少し動かして地山モデルの締固めを行う。締固め後に隙間が生じたら，さらに，ステンレス棒を埋めていく。この作業を数回繰り返して地山モデルを完成させる。つぎに，変位を計測する

ため地山内に約 20mm 間隔で格子状に白色マーカーを配置する。

高解像度カメラは三脚を脚立に固定し、地山全体が撮影できるよう装置直上に設置する。

実験準備が完了したら、スライド速度を 0.5mm/sec とし、録画インターバル 4 500 fps で実験を実施した。なお、実験に要する時間は 30 ～ 40 分程度である。

b) 画像解析

まずは画像のスケールと実際のスケールを変換する。つぎに、カメラ撮影された白色マーカーを追尾する。最後にこの追尾データを専用ソフトによって、変位ベクトル図や最大せん断ひずみ分布図などを作成する。

3. 実験結果

3つの切羽形状による実験結果を図-5～図-7に示す。各図において、上段が実験状況の撮影写真、中段が変位ベクトル図、そして下段が最大せん断ひずみ分布図である。また、左列がスライド量 0.5cm、

中列が同 1.0cm、そして右列が同 1.5cm の結果である。

(1) 直壁型切羽の挙動

図-5上段の変形状況を見ると、スライド量が増すにしたがって、切羽中央よりやや下付近がはらみだしていく様子がわかる。このことは中段の変位ベクトル図からも裏付けられる。とくに変位ベクトル図から明らかなことは、スライド量 0.5cm 時には切羽中央やや下の水平方向変位が卓越しているが、スライド量が増すにしたがって、切羽中央よりやや下の変位がさらに増加するとともに、切羽から地山内部の水平から左下向きの変位も増加、最終的には切羽下端から地山内部へ水平とのなす角が約 60° 程度の範囲（切羽天端部程度）とそれ以降は 90° でほぼ地表面に達する範囲の変位が顕在化している。

同図下段の最大せん断ひずみ分布をみると、最初は切羽下端と天端部のひずみがみられるが、その後最大せん断ひずみは、地山内に広がりを見せ最終的には地表面に達することが分かる。なお、最大せん断ひずみの最も大きい個所は切羽上下端近傍である。

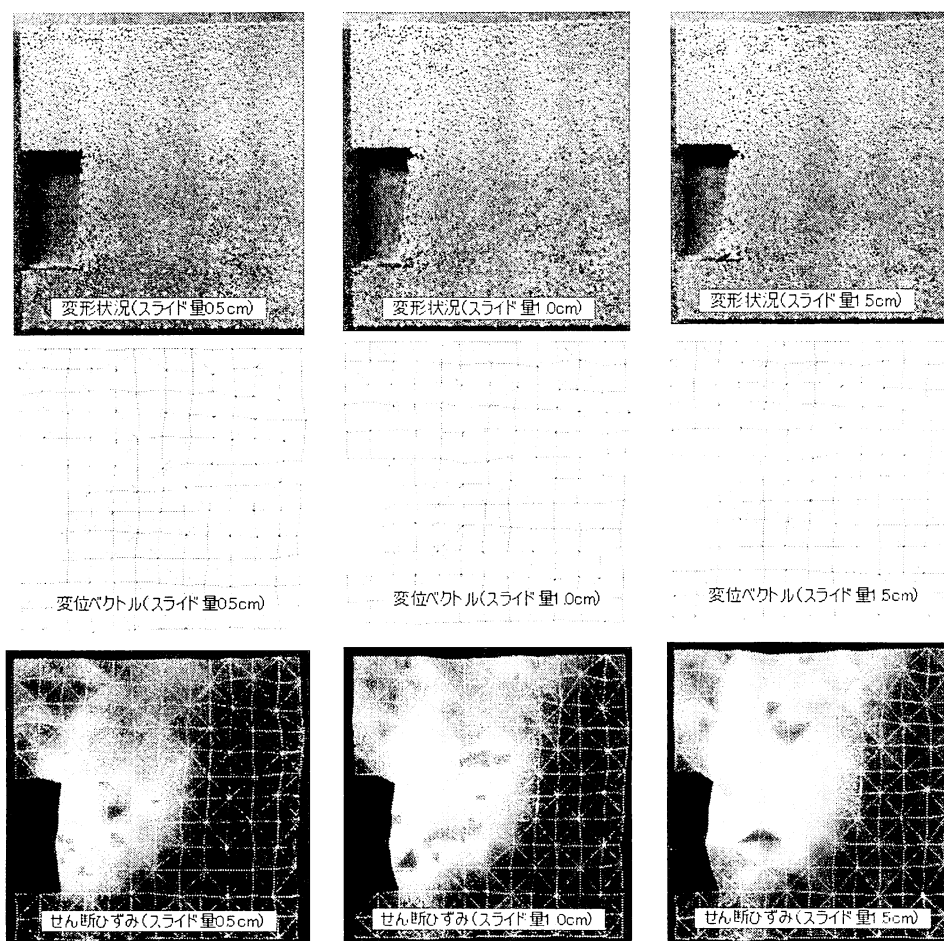


図-5 直壁型切羽の挙動（変形状況，変位ベクトル，最大せん断ひずみ分布）

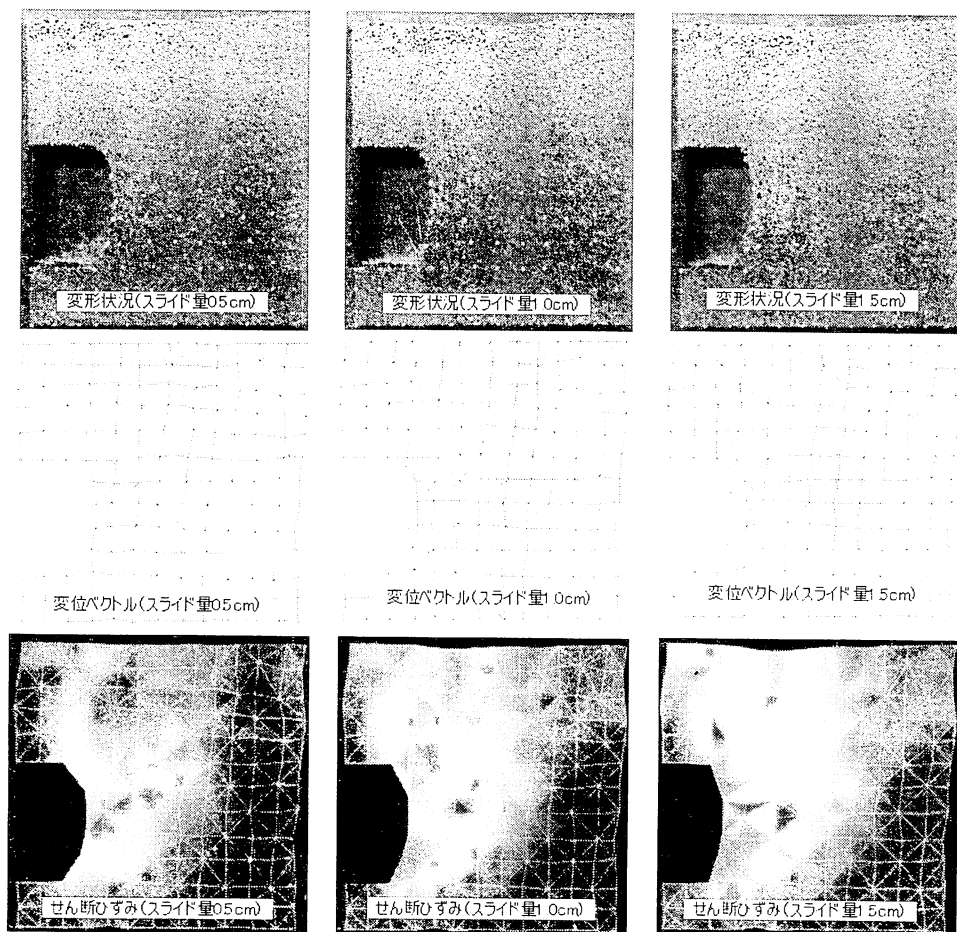


図-6 楕円型切羽の挙動（変形状況，変位ベクトル，最大せん断ひずみ分布）

(2) 楕円型切羽の挙動

図-6上段の変形状況を見ると，スライド量が増すにしたがって，切羽前方から地表面にいたる広い範囲のステンレス棒間の隙間が広がっている様子が分かる．このことは，直壁型切羽よりも顕著である．また，スライド量が大きくなるにつれて地山内部からトンネル内空部に切羽が押し出されるように変位していき，楕円が直壁に近づくように変形していることもわかる．

この挙動を変位ベクトル図から見てみると，初期の段階から楕円の中心にむかう切羽面近傍の変位がみられ，やがて変位の生じる範囲が地山内部さらには地表面に達していく．最終的な最大変位は直壁型切羽のそれよりも大きい．

最大せん断ひずみ図をみると，やはり初期の段階で切羽面全体にひずみが広がっている．興味深いのは，顕著なせん断帯が2つみられることである．すなわち，切羽天端から直上の地表面に至る弧を描くせん断帯と，もうひとつは切羽下端から地山内部そして地表面に至る弧状のせん断帯である．この2つのせん断帯で挟まれた領域をさらに分析すると，最

終段階では切羽から地山へ 1D 程度まではかなり大きなせん断ひずみが発生しているものの，それよりも上方ではむしろひずみレベルが低下している．したがって，2つのせん断帯に挟まれた領域のうち，ひずみレベルの低下した部分は，剛体的にトンネル内空側に向かって移動しているものと考えられる．

また，上段・右の地表面変位をみても，直壁型と比べて明らかに沈下量が多いことがわかる．このように，切羽や地表面における変位が直壁型切羽に比べて大きい一因として，切羽の無支保領域が大きいことにあると考えられる．

(3) 半円型切羽の挙動

実験および画像解析結果を図-7に示す．変形，変位ベクトルおよび最大せん断ひずみ分布いずれにおいても楕円形のそれと類似の傾向が見られるが，最大せん断ひずみの値や高いひずみレベルの範囲など，その大きさや規模は楕円形に比べて大きくなっている．このことは，スライド量 1.5cm における最大せん断ひずみ分布図から鮮明にわかる．

これは，楕円形よりも半円形のほうが，さらに無

支保領域が広いと、粒状体材料かつ無支保の場合には、わずかな重力作用でアーチアクションの崩壊を来し、それが原因で変形規模の拡大を許してしまうものと思われる。

4. まとめ

3種類の切羽形状の挙動を疑似重力作用下で実験した結果、無支保時において変位は曲率を持つほど大きいことがわかった。また、各形状の最大せん断ひずみ図からその最大値を読み取ると、円形が最も大きい43.6%となり、つぎに楕円型が38.7%、直壁型が27.8%となった。このことから無支保時の切羽の安定性は直壁型>楕円型>半円型の順に高い結果となった。したがって、今回対象とした地山材料やトンネルの条件下においては、曲率の大きい切羽ほど安定性が低くなるとの結論に達した。

また、直壁型と曲率を有する楕円型・半円型では、せん断帯の形状やその発生および進展メカニズムが

異なることがわかった。

5. 今後の課題

連続体力学の見地からは、半円形切羽がアーチアクションの効果により最も安定する形状であると考えられる。今回、無支保時の結果では、矩形である直壁型が安定する形状となった。したがって、非連続体的な挙動を呈す粒状体地山において、曲率を有する切羽形状がアーチアクションを発揮するためには、周辺地山を連続体的に挙動するように鏡補強する方法もひとつと考えられる。

したがって、今後は鏡補強工として鏡ボルトや鏡吹付けを考え、それらをモデル化して実験することを試みる。それと同時に、数値解析的にもそれらのモデルを検証する。推測の域を超えないが、鏡補強によって、少なくとも切羽近傍においては地山が連続体的な挙動を呈すようになり、曲率切羽の優位性が発揮されるものと思われる。

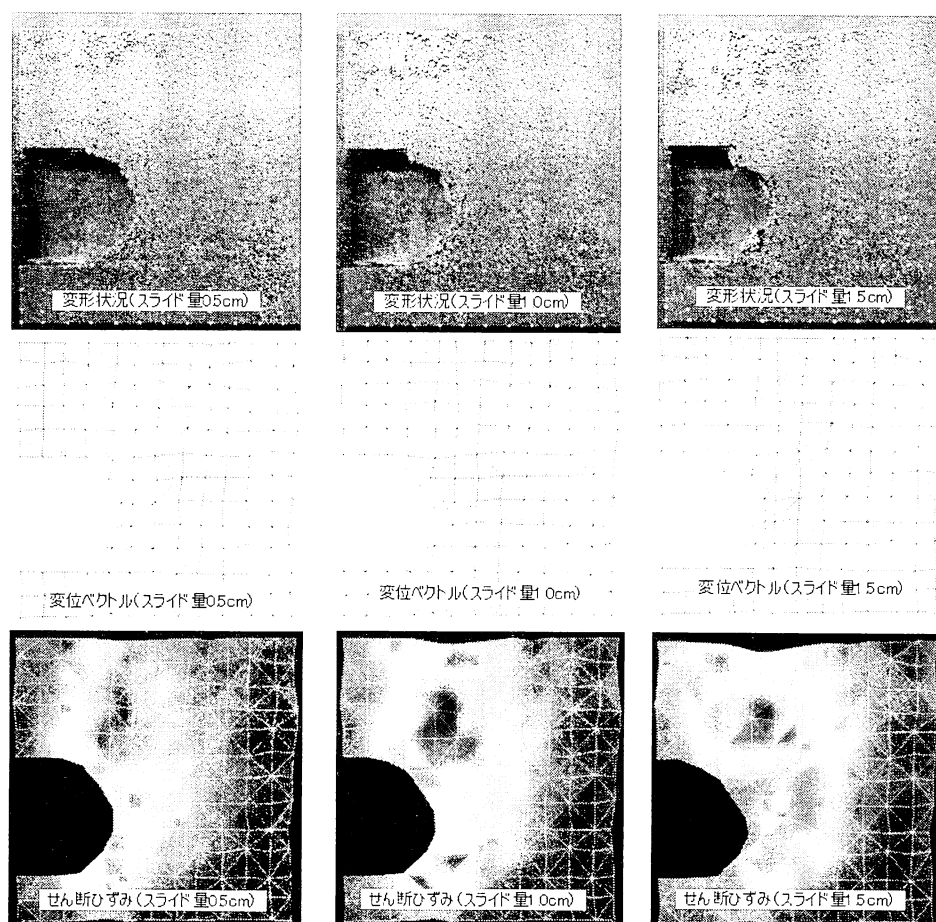


図-7 半円型切羽の挙動（変形状況，変位ベクトル，最大せん断ひずみ分布）

MODEL TESTS ON THE INFLUENCE OF FACE SHAPES FOR UNSUPPORTED TUNNELS IN GRANULAR MATERIAL

Hiroaki HIKISHIMA, Tsuyoshi DOMON and Kazuo NISHIMURA

Maintaining the stability of tunnel face is one of the most important factors in the construction of large sectional tunnels. These tunnels have been increasingly employed in present tunnel construction due to the active use of large size tunnelling machine to improve productivity. On the other hand, the use of the machine allows us to employ new type of face shape such as concave or circular face.

In this study, several model tests were performed using base friction apparatus to investigate the possibility of face stability for different face shapes in granular material. From these tests, the most stable face shape was rectangular shape for unsupported tunnel.