

# 未固結粒状体地山における曲面切羽の 安定性に関する模型実験

前田 洸樹<sup>1</sup>・土門 剛<sup>2</sup>・西村 和夫<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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:maeda-kouki@ed.tmu.ac.jp

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>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。とくに未固結地山では、切羽の安定性を得るためには一般的に補助工法の適用を考えるが、切羽形状を曲面にすれば、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。それにより、規模を抑えた補助工法で切羽安定を確保でき、施工コストの縮減が期待できる。本研究では未固結粒状体地山での全断面掘削を対象として、補助工法の一つである吹付けコンクリートを施した場合の曲面切羽の安定性を、模型実験により解明した。

**Key Words :** model test, carved tunnel face, granular material, face shape

## 1. はじめに

近年、NATMによるトンネル施工において施工の合理化を図ることを目的として大型機械による全断面掘削や未固結地山での早期閉合の需要が拡大している。しかし、全断面掘削トンネルでは一時的に無支保となる面積が大きくなりその安定性が問題となる。さらに、強度の低い未固結地山では切羽安定性の確保が難しい。

切羽安定を得るには一般的に補助工法の適用を考えるが、切羽形状を曲面にすれば、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。それにより、規模を抑えた補助工法で切羽安定を確保でき、施工コストの縮減が期待できる。

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対象として、補助工法の一つである鏡吹付けコンクリートを施した場合の曲面切羽の安定性を、模型実験に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) 底面摩擦実験装置

本研究では図-1の底面摩擦装置を用いた模型実験により、曲面切羽における地山挙動の解明を行う。

この装置は図-2のように2次元平面上で重力を疑似的に作用させ、重力作用下では瞬間的に起こる地盤の挙動を静的に観察することができる装置である。スライド板上に地山材料となるステンレス棒を敷き詰め、地山モデルを作成する。この時点では疑似重力が作用していないが、スライド板をスライドさせることで地山材料とスライド板の間に摩擦力が発生し、その摩擦力によってトンネルモデルはスライド方向に疑似重力が作用することとなる。この疑似重力作用下の地山挙動を静的に観察する。スライド板と地山材料となるステンレス棒間の摩擦力は、スライド盤上にマグネットシートを張り付け、マグネットの持つ磁力により増加させている。

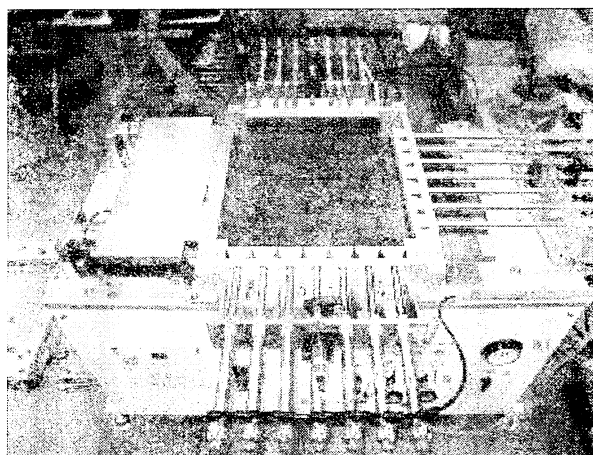


図-1 底面摩擦装置

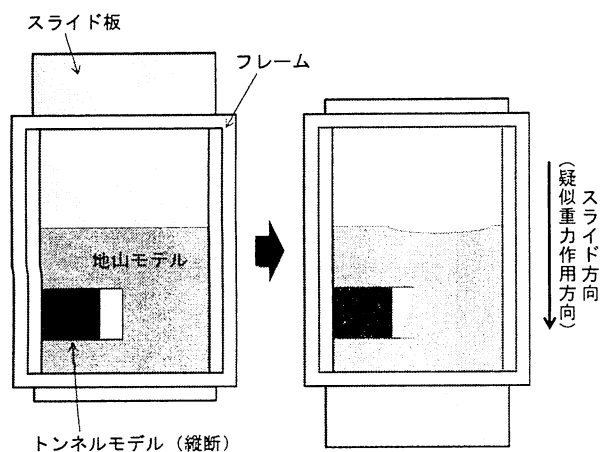


図-2 底面摩擦装置の概念

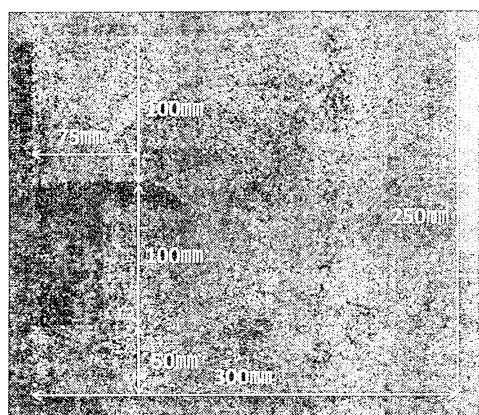


図-3 地山およびトンネルモデル設置状況（円型）

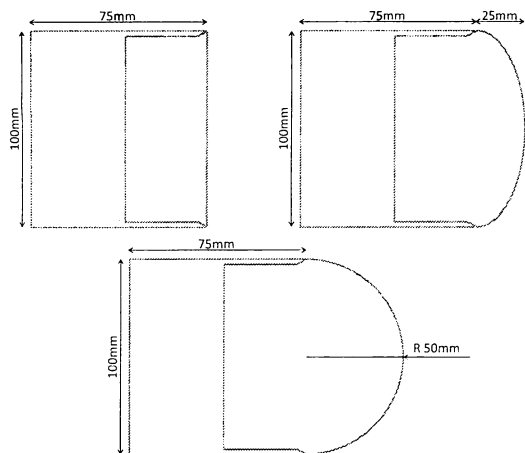


図-4 切羽形状（左上：直壁型，右上：楕円型，下：円型）

#### b) 地山およびトンネルモデル

本研究では、地山材料として長さ 40mm，直径 2.5mm および 5.0mm の磁性ステンレス棒を、重量混合比 3:2 で使用した。この地山は粘着力  $0\text{kN/m}^2$  で内部摩擦角は約  $27^\circ$  である。

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。また、切羽形状は、図-4に示すように、直面切羽の直壁型と、曲面切羽の楕円型、円型の3種類を設定した。

表-1 吹付けモデルの物性値

|            | 幅  | 厚さ    | 粘着力     |
|------------|----|-------|---------|
|            | mm | mm    | N/10mm※ |
| ケント紙+両面テープ | 24 | 0.290 | 3.90    |
| ケント紙       |    | 0.190 | 0.00    |
| セロハンテープ    |    | 0.050 | 3.93    |
| マスキングテープ   |    | 0.094 | 1.19    |

※10mm 幅のテープを長手方向に  $180^\circ$  度（折り返して）剥がすときに約  $3.90\text{N}$  の重量が必要

表-2 吹付けモデルの剛性と粘着力の関係

| 剛性 | 粘着力 | 強          | 弱        |
|----|-----|------------|----------|
|    |     |            |          |
| 強  |     | ケント紙+両面テープ | ケント紙     |
| 弱  |     | セロハンテープ    | マスキングテープ |

表-3 実験ケース

|            | 直壁型     | 楕円型     | 円型      |
|------------|---------|---------|---------|
| 無支保        | Case 1  | Case 2  | Case 3  |
| ケント紙+両面テープ | Case 4  | Case 5  | Case 6  |
| ケント紙       | Case 7  | Case 8  | Case 9  |
| セロハンテープ    | Case 10 | Case 11 | Case 12 |
| マスキングテープ   | Case 13 | Case 14 | Case 15 |

#### c) 吹付けコンクリートモデル

吹付けコンクリートモデルは、市販のケント紙、両面テープ、セロハンテープ、マスキングテープを用いて計4モデル作成した。吹付けモデルの物性は表-1の通りである。また、吹付けモデルは、剛性と粘着力それぞれの強弱によって、表-2のように分類した。この剛性と粘着力は、それぞれ実際の吹付けコンクリートの吹付厚と付着強度を想定している。

#### (2) 実験ケース

本実験では、無支保モデルと吹付けモデルを比較することで、吹付けコンクリートを施した曲面切羽の安定性を解明する。したがって、実験は表-3のように全15ケース行った。

#### (3) 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、ひずみ解析ソフト（Strain）を用いて地山内最大せん断ひずみ分布を描画した。以下に手順を示す。

#### a) 実験手順

底面摩擦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。次に、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に装置上に設置する。

実験準備が完了したら、スライド速度を 0.5mm/min とし、録画インターバル5分で実験を実施した。なお、実験に要する時間は 30 ～ 40分程度である。

#### b) 画像解析

まずは画像スケールと実際のスケールを変換する。次に、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

無支保モデル、吹付けモデルにおける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、下段が最大せん断ひずみ分布である。また、左列が直壁型、中列が楕円型、右列が円型の結果である。いずれの画像も、スライド板のスライド量が 15mmのときのものである。

#### (1) 無支保モデルの切羽挙動

図-5上段の地山変形状況を見ると、直壁型では切羽面からの押し出しによって切羽が崩壊した様子がわかる。一方、円型では切羽面の押し出しに加え、天端部から地山が沈むような動きが見られ、直壁型よりも崩壊範囲が広がっている。この理由として、切羽を曲面にすると掘削断面が大きく、かつ無支保面が大きくなるため、無支保では切羽近傍のアーチ形成が期待できないことが考えられる。

次に、図-5下段の最大せん断ひずみ分布を見てみると、各切羽形状で切羽近傍に大きなひずみが発生していることがわかる。また、曲率が大きくなるにつれて崩壊範囲が大きくなっていることがわかる。切羽直上にせん断ひずみ進展のやや小さい領域が見られるが、これはその領域の土塊が落下するように剛体的に変位したものと考えられる。

以上より、未固結粒状体地山における曲面切羽では、切羽面を無支保で掘削することはトンネルの安定性の面で非常に危険であることがわかった。また、楕円型は直壁型と円型の間中間的な挙動を示した。

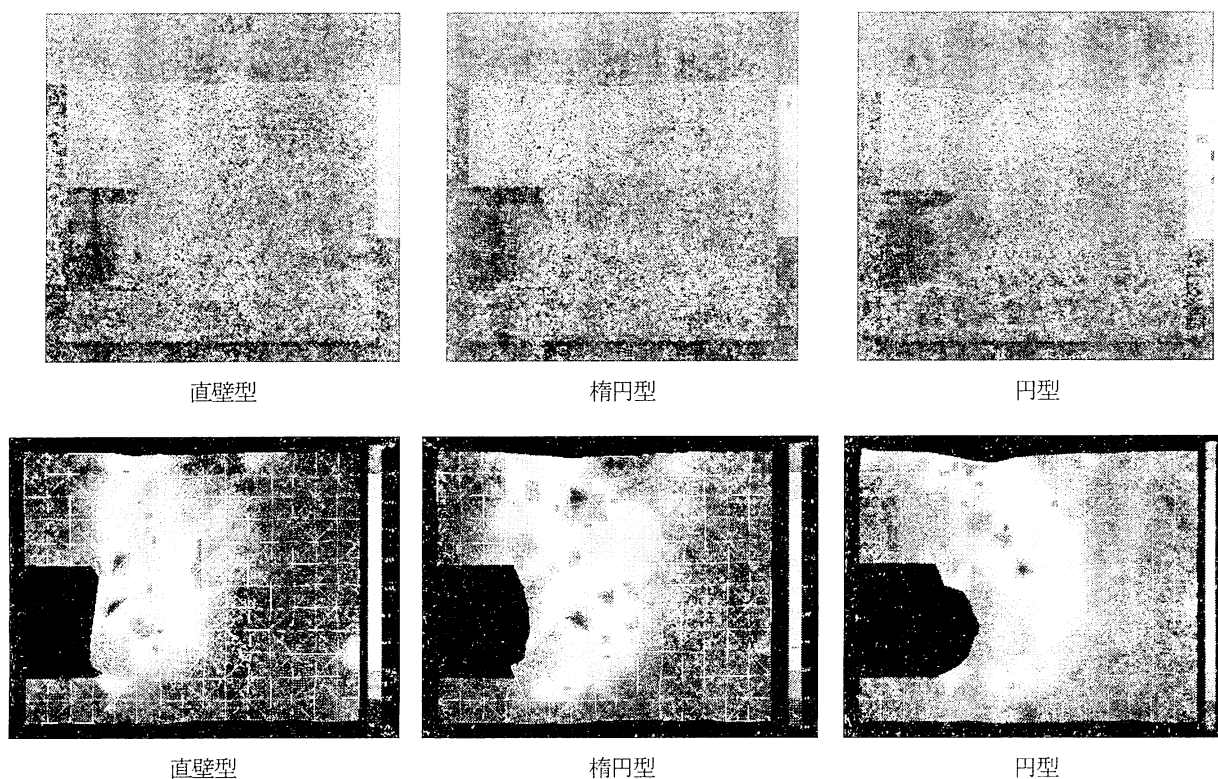


図-5 無支保モデルにおける切羽挙動（上：地山変形状況，下：最大せん断ひずみ分布）スライド量 15mm

## (2) 吹付けコンクリートモデルの切羽挙動

### a) 無支保モデルとの比較

同一の吹付けモデル（ケント紙+両面テープ：剛性および粘着力ともに強）で無支保モデルと比較する。

図-6上段の地山変形状況を見ると、直壁型では無支保時に比べ崩壊範囲は狭くなったが、切羽面の押し出しに耐えられず切羽は崩壊した。吹付けモデルが地山からの押し出しを抑えているが、実際の吹付けコンクリートは引張に対する耐力にそれほど期待できないため、切羽面が膨らむような挙動は危険な状態である。一方、楕円型、円型切羽は安定した。これは、吹付けモデルが無支保モデルよりも鏡面を形成する粒状体がテープによって隣接する粒状体と一体的に挙動しやすくなった、つまり、アーチ形成がしやすくなったためであると考えられる。その結果、切羽は、吹付けモデルのアーチ効果により地山からの押し出しに耐えるとともに、地山と一体化し連続体として作用することで安定することができた。また、直面切羽に比べ曲面切羽の方が、吹付けモデルが機能していることがわかった。

次に、図-6下段の最大せん断ひずみ分布を見てみると、直壁型切羽は無支保モデルに比べ崩壊範囲が小さくなっていることがわかる。また、楕円型、円型切羽はひずみがわずかしき発生していないことがわかる。これは、吹付けモデルのアーチ効果によりひずみが均等に分散したため、切羽の崩壊を防いだものと考えられる。楕円型では、トンネル天端部が折れるように変位する動きからひ

ずみが発生しているが、スライド量を大きくしてもその部分から崩れだすような動きはなく、切羽は安定した。

以上より、曲面切羽に対して吹付けコンクリートは高い支保効果を発揮することがわかった。また、吹付けモデルにおける切羽挙動から、いずれの切羽形状についても無支保モデルに比べ吹付けモデルでは支保効果があることが確認できた。また、未固結粒状体地山における曲面切羽のように比較的不利な状況でも、吹付けコンクリートを施せば切羽安定を得られることがわかった。さらに、最大せん断ひずみ分布から、円型と楕円型を比較すると、曲率が一定の切羽の方が安定性が高くなることもわかった。

### b) 吹付けモデル特性の違いによる切羽挙動比較

吹付けコンクリートを施した曲面切羽の安定性を、吹付けコンクリートの特性を比較することで検討する。

図-7 左列を見てみると、ケント紙を使用したモデルでは、粘着力が弱いものの切羽は安定した。したがって、吹付けコンクリートの機能のうち、支保剛性の機能が優位であれば、切羽はアーチ形状を維持できることがわかった。

それに対して、剛性の弱いテープのみを使用したモデルでは、粘着力の強弱によって切羽挙動に違いが出た（図-7 中列、右列）。粘着力の強いセロハンテープの吹付けモデルでは、粘着力により切羽がアーチ形状を維持することができ、地山からの押し出しに耐えることができた。一方、粘着力の弱いマスキングテープの吹付け

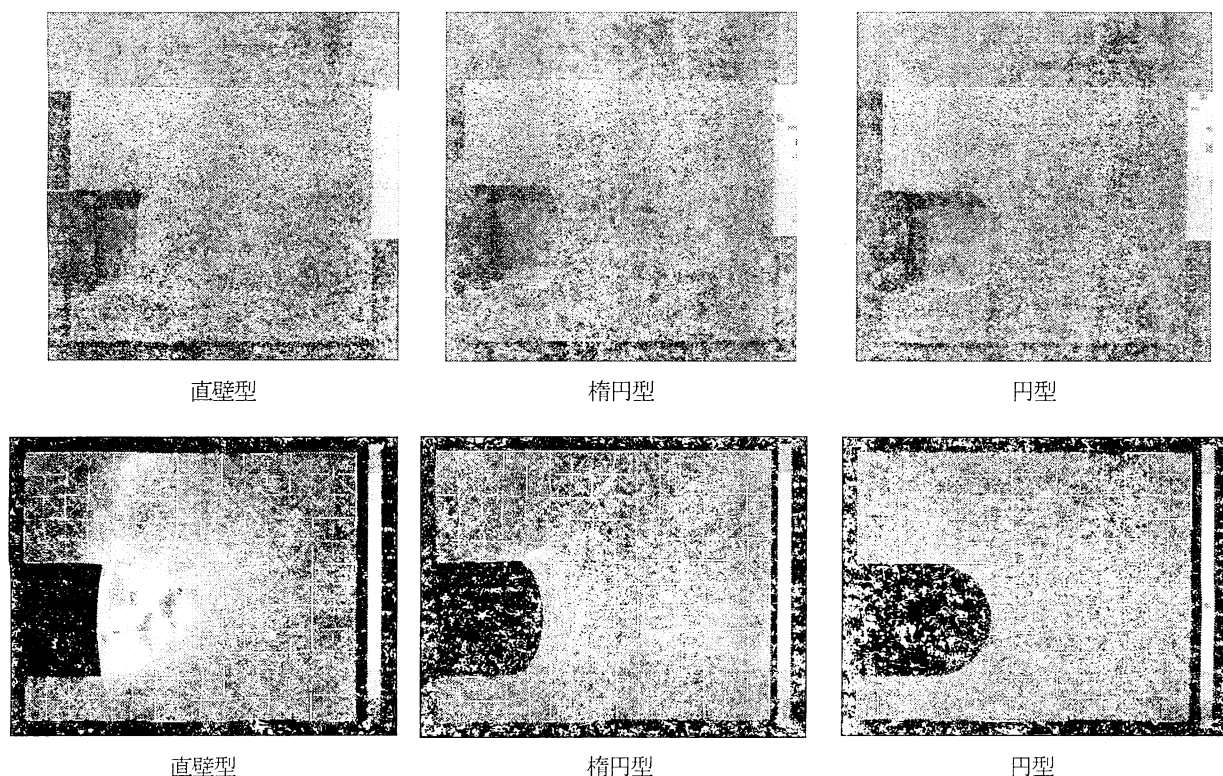


図-6 吹付けモデル（ケント紙+両面テープ）における切羽挙動（上：地山変形状況，下：最大せん断ひずみ分布）  
スライド量 15mm

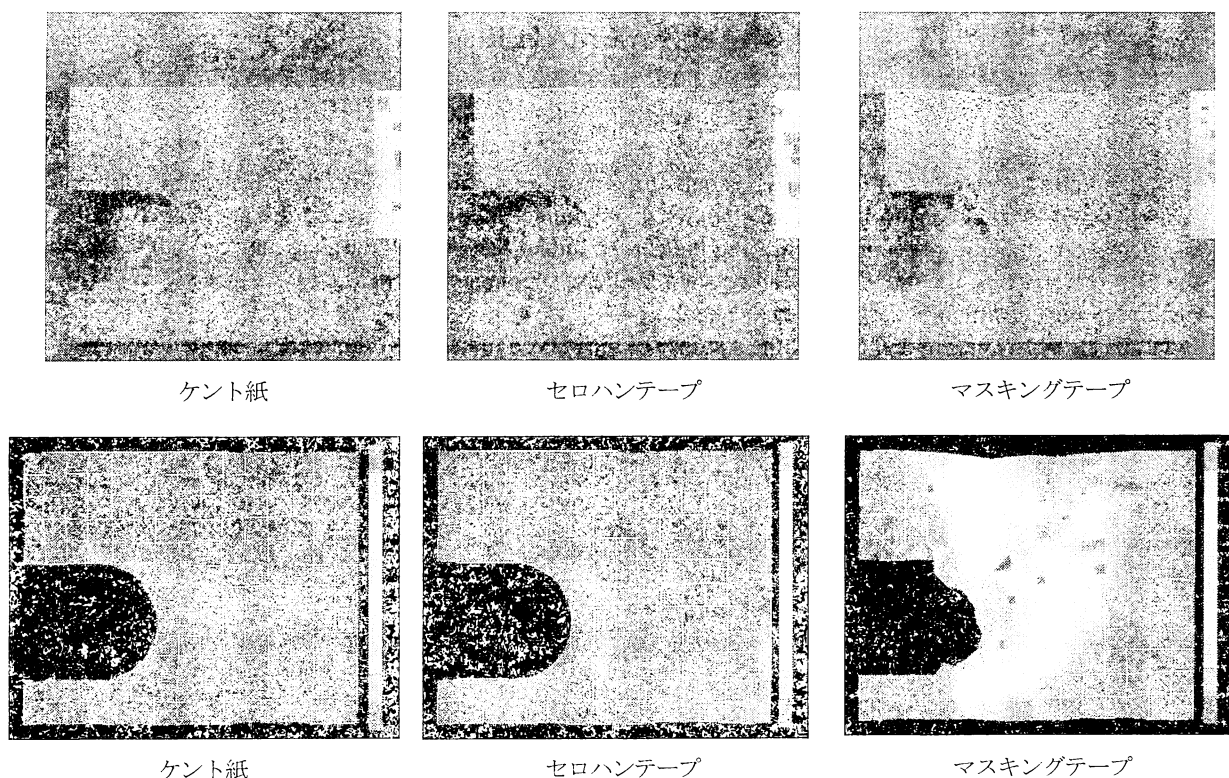


図-7 吹付けモデルにおける切羽挙動（上：地山変形状況，下：最大せん断ひずみ分布）スライド量 15mm

モデルでは、剛性、粘着力がともに弱いため、切羽をアーチ形状に維持することができず、切羽は崩壊した。これは、テープの粘着力が吹付けコンクリートの付着特性を発揮したかどうかによるものと考えられる。したがって、吹付けモデルにおける粘着力の強さ、すなわち、吹付けコンクリートにおける付着特性は、曲面切羽の安定性に大きく寄与していると考えられる。

表-4 各実験ケースにおける切羽安定の関係

|            | 直壁型 | 楕円型 | 円型 |
|------------|-----|-----|----|
| 無支保        | ×   | ×   | ×  |
| ケント紙+両面テープ | ×   | ○   | ○  |
| ケント紙       | ×   | ○   | ○  |
| セロハンテープ    | ×   | ○   | ○  |
| マスキング      | ×   | ○   | ×  |

○：切羽安定，×：切羽崩壊

#### 4. まとめ

本研究では、未固結粒状体地山における曲面切羽の安定性に関する定性的な評価を試みた。

無支保モデル実験では、切羽が曲率を持つほど崩壊領域が大きいくことがわかり、無支保時における曲面切羽は、切羽安定性の面で不利な結果が得られた。それに対し、吹付けモデル実験では、曲面切羽はアーチ効果により安定し、吹付けコンクリートを施すことにより曲面切羽は高い支保効果を発揮することがわかった。表-4は各実験ケースにおける切羽の安定、崩壊を表したものであるが、これを見ると、楕円型ではすべての吹付けモデルで切羽安定が得られたことがわかる。このことから、本研究の範囲では、実施工で曲面切羽を採用する際は、楕円型が最もふさわしい切羽形状であると言える。

また、吹付けモデルの剛性が強ければ曲面切羽は安定し、吹付けコンクリートの付着特性は曲面切羽の安定性に大きく寄与していることがわかった。

#### 5. 今後の課題

本研究により、未固結粒状体地山における吹付けコンクリートを施した曲面切羽の安定性について実験を行ってきたが、切羽モデル実験では様々な課題がある。

本研究で切羽安定を得られなかった実験ケースに対し、先受け工や鏡補強工として鏡ボルト工を施し実験を新たに行う。これにより、切羽近傍がより連続体のような挙動を示し、吹付けモデルと合わせて曲面切羽に対し高い支保効果を発揮すると思われる。

現在、地山のステンレス棒上部にマグネットを配置することで、地山に疑似的に粘着力を発生させた場合の切羽挙動について実験を行っている。

(2012.9.3 受付)

# MODEL TEST ON THE STABILITY OF CURVED TUNNEL FACE IN GRANULAR MATERIAL

Koki MAEDA, 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. In order to obtain the stability of the tunnel face is considered the application of the supplementary method generally, by making the curved tunnel face, the tunnel face may be stabilized by the arch effect. Thus, the tunnel face can be stabilized at a supplementary method to reduce the scale, reduction of the construction cost can be expected.

In this study, several model tests of the stability of the curved tunnel face shotcrete is applied were performed using base friction apparatus. From these tests, the curved tunnel face shotcrete is applied was found to exhibit sufficient stability.