

個別要素法を用いた曲面切羽に関する 模型実験の解析

前田 洸樹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:maeda-kouki@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。著者らはこれまでに、底面摩擦模型実験により曲面切羽の安定性を検証してきた。そこで、本研究では、より安定性の優れた切羽形状を考えるために、その中で安定性の優れた切羽形状を見出すには、形状を様々にし評価しうる数値解析の方が容易であると考えに至った。そのためには、物性値等の算定法を吟味した上で、これまでの実験結果を数値解析で再現性を確認する必要がある。

そこで、本研究では、模型実験による計測結果と解析手法としてDEMを採用し結果を比較することにより、DEMの底面摩擦模型実験への適用性の検討を行った。さらに、適用性を確認したDEMにより、曲面切羽の安定性について切羽形状を種々変えた解析を行った。また、本報告では、各切羽形状における切羽面に作用する荷重により切羽形状の安定性に関する評価も試みた。

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

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。この問題に対して、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、規模を抑えた補助工で切羽安定を確保できると考えられる。このような観点から、未固結粒状体地山での全断面掘削を対象として、曲面切羽の安定性を底面摩擦模型実験によって検証してきた。本研究では、より安定性の優れた切羽形状を考えるために、その中で安定性の優れたときは形状を見出すには、切羽形状を様々にし評価しうる数値解析の方が容易であると考えに至った。そのためには、物性値等の算定法を吟味した上で、これまでの実験結果を数値解析で再現性を確認する必要がある。

本報告では、模型実験による計測結果と解析手法としてDEMを採用し結果を比較することにより、DEMの底面摩擦模型実験への適用性の検討を行った。DEMは、

破壊を伴う問題や不連続な物体が大きく移動する問題に対する有力な解析手法のひとつである。さらに、適用性を確認したDEMにより、曲面切羽の安定性について切羽形状を種々変えた解析を行った。また、本報告では、各切羽形状における切羽面に作用する荷重により切羽形状の安定性に関する評価も試みた。

2. 底面摩擦模型実験

(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った。

この装置は図-2のように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。

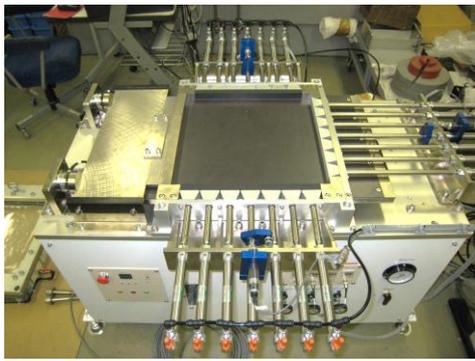


図-1 底面摩擦装置

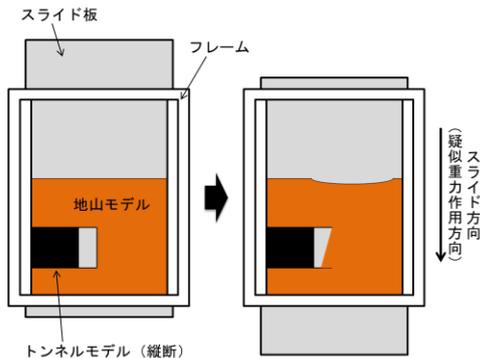


図-2 底面摩擦装置の概念

表-1 地山モデルの物性値

径	$\phi_1 = 2.5\text{mm}$	$\phi_2 = 5.0\text{mm}$
摩擦力	0.0049N	0.0222N
重量混合比	$\phi_1 : \phi_2 = 3 : 2$	
見掛けの単位体積重量	0.0375N/cm ³	
内部摩擦角	27°	
粘着力	0N/m ²	

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、スライド板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。

b) 地山およびトンネルモデル

表-1に地山モデルの物性値を示す。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0kN/m²で内部摩擦角は約27°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(=100mm)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。

(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

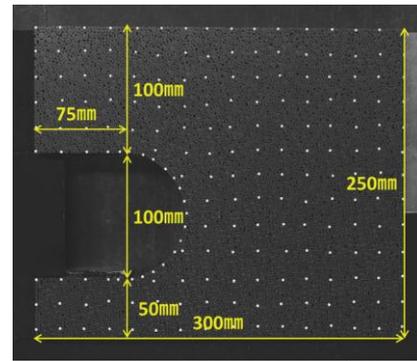


図-3 地山およびトンネルモデル設置状況

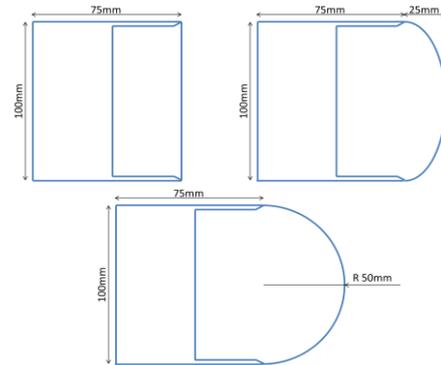


図-4 切羽形状 (左上：直壁型, 右上：楕円型, 下：円型)

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

無支保時における切羽形状による実験結果を図-5に示す。各図において、上段が実験状況の撮影写真（点線は崩壊前の切羽形状）、下段が最大せん断ひずみ分布（最小値0%、最大値20%）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り、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) 実験結果による切羽挙動

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。また、切羽崩壊後、斜面を形成している様子がわかる。楕円型も直壁型同様、トンネル内空方向に切羽が押し出されるように変位していく様子がわかる。最終的に直壁型に近づくような挙動を示した。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。円型では切羽直上に

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。

(2) 実験結果まとめ

表-2に各切羽形状における切羽面（切羽中心部）変位量、最大地表面沈下量を示す。

これをみると、切羽面変位量、地表面沈下量ともに曲率が大きくなるにつれて大きな値となっていることがわかる。これは、曲率が大きくなるほど切羽面の掘削面積が大きくなるためである。さらに、円型切羽は、切羽上部から天端部にかけてオーバーハング状態になるため、切羽直上の土塊が落下しやすくなり地表面沈下量が特に大きくなったと考えられる。

以上より、無支保時の切羽は押し出しにより崩壊し、切羽面変位量および最大地表面沈下量は曲率が大きいほど値が大きくなる。また、過去の研究¹⁾で、鏡吹付けを施せば、曲面切羽の方が直壁切羽よりも、切羽安定性を発揮することも明らかとなっている。

表-2 切羽面変位量、最大地表面沈下量（底面摩擦模型実験）

mm	直壁	だ円	円
切羽面変位量	11.53	14.52	18.48
最大地表面沈下量	3.08	5.88	11.01

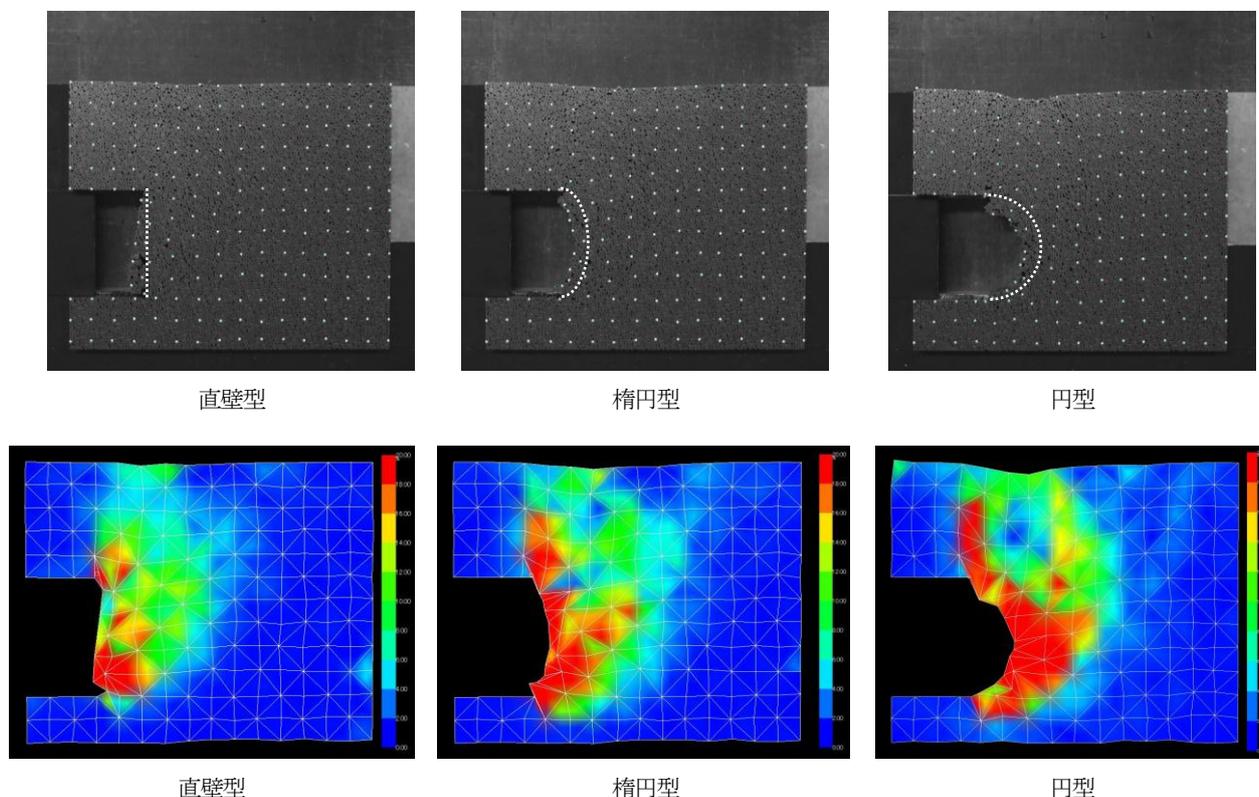


図-5 無支保モデルにおける切羽挙動（上：地山変形状況，下：最大せん断ひずみ分布）スライド量 15mm

4. 個別要素法 (DEM) による数値解析

本研究では、解析手法としてDEMを用いる。DEMは図-6に示すように剛体要素と剛体要素の間に仮想的なバネとダッシュポットを配置し、要素同士の接触を考慮しながら時々刻々の要素の運動を追跡する解析手法である。

従来の解析では、連続体変形の解析に適した有限要素法 (FEM) が主に用いられているが、FEMはその特性上、不連続体の挙動や地山の崩壊を模擬することが困難である。一方、DEMは不連続な変形を模擬することに適しており、未固結粒状体を模擬した実験における、粘着力のないステンレス棒地山の挙動を再現することに適した解析手法である。

そこで、本研究では、DEM解析の底面摩擦模型実験への適用の妥当性を検証し、トンネル切羽実験にDEM解析を適用した。

(1) 解析モデル

解析で用いる地山モデルは図-7のように模型実験と同スケールのモデルを用いる。また、表-3に解析に用いる物性値を示す。各物性は本研究の過去の結果を参考とした。解析時間とスライド速度に関しては、模型実験における最終的なスライド量と等しくなるように設定した。

(2) 解析手順

初めに、パッキングとして、地山要素を上方から落下させる。その際、地山要素に働く力は疑似重力（底面摩擦力）であり、重力ではない。また、パッキングは地山要素を十分に敷き詰めるために要素間摩擦角を 1° として行った。地山要素の速度が 0.1mm/sec 以下に収束したらパッキングを終了する。

次に、切羽部となる地山の要素を消去し、切羽を作成する。その際、切羽面に線要素を固定することで、トンネル内部への要素流出を防ぐ。パッキング同様に地山の速度が収束したら次の作業に移る。

その後、土被りを調整し地山の速度が収束したら、切羽面の線要素を除去し、実験と同じように地山に底面摩擦力を与えて地山挙動を解析する。

(3) 底面摩擦力

本解析では、底面摩擦模型実験を模擬するにあたり、地山に作用させる力を重力ではなく底面摩擦力として解析を行った。底面摩擦力は、実験における疑似重力に相当するもので、DEMを底面摩擦模型実験へ適用することを目的として、松井らの研究²⁾で定式化されている。本研究では、これを参考にして解析を行った。

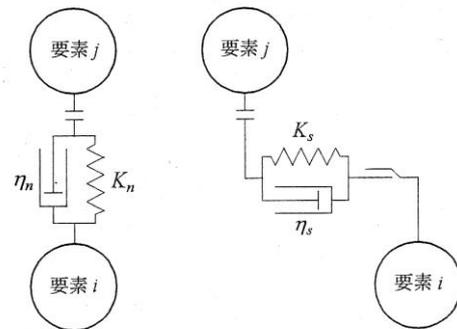


図-6 要素間モデルの模式図

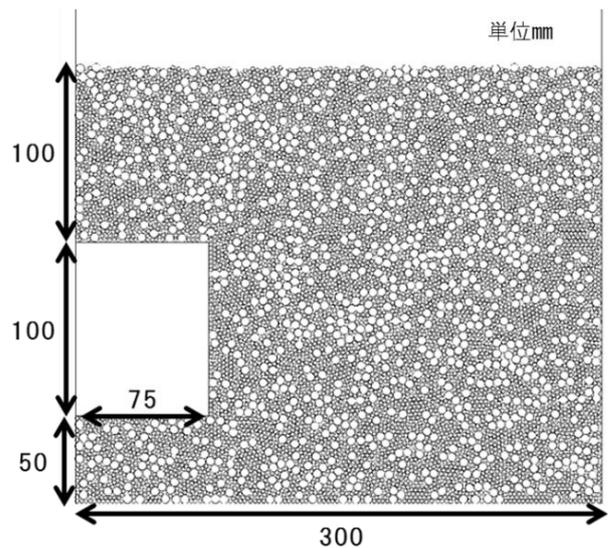


図-7 解析モデル

表-3 DEM解析に用いる物性値

	円要素-円要素	円要素-線要素
縦弾性係数	2000N/mm ²	400N/mm ²
反発係数	0.0	
粘着力	0.0N/mm ²	
要素間摩擦角	50°	
底面摩擦係数	1.946	
単位体積重量	7.7×10 ⁻³ N/mm ³	
径	2.5mm, 5.0mm	
混合比	2.5mm:5.0mm=3:2	
ステップ毎の時間増分	1.0×10 ⁻⁵ sec	
計算ステップ数	300000	
解析時間	3sec	
スライド速度	5.0mm/sec	

5. 解析結果

無支保時における切羽形状の解析結果を図-8に示す。各図において、上段が地山挙動（点線は崩壊前の切羽形状）、下段が変位図（最小値 0mm, 最大値 20mm）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り、いずれの画像も、スライド量が 15mm のときのものである。

(1) 解析結果による切羽挙動

図-8上段の地山挙動をみると、実験同様、直壁型では切羽面からの押し出しによって崩壊している様子がわかる。また、切羽崩壊後、切羽面が斜面を形成していることも確認できる。楕円型も実験同様に、直壁型に近づくような挙動を示した。さらに、円型でも最終的な切羽面が実験結果と同じような形状を示した。

次に、図-8下段の変位図をみると、各切羽形状で切羽近傍に特に大きな変位が発生していることがわかる。また、地表面に近づくにつれ変位は小さくなる様子がわかる。さらに、実験結果と同様に、解析結果でも切羽の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確認できる。

(2) 解析結果まとめ

DEMによる解析結果は、切羽挙動、地山の崩壊範囲

の観点から、底面摩擦模型実験結果よく再現していると言える。さらに両者を比較するため、表-4に各切羽形状における切羽面（切羽中心部）変位量、地表面沈下量を示す。上段がDEM解析結果、下段カッコ内が底面摩擦模型実験結果の値である。

これをみると、切羽面変位量は切羽形状によって大きな違いは見られず、実験結果とはやや異なる結果となった。これは、解析における物性値の設定の影響であると考えられる。底面摩擦力は底面摩擦係数やスライド速度に支配され、地山要素の動きに大きな影響があると考えられるため、今後、各物性値を見直す必要がある。

それに対し、地表面沈下量は、曲率が大きくなるにつれて値が大きくなり、その傾向は実験結果と近いものとなった。

以上より、切羽面変位量に関して物性値の課題は残るものの、実験結果と解析結果を比較した結果、底面摩擦模型実験にDEM解析を適用することは可能であると判断した。

表-4 切羽面変位量, 最大地表面沈下量 (DEM解析)

mm	直壁	楕円	円
切羽面変位量	16.44 (11.53)	17.76 (14.52)	16.66 (18.48)
最大地表面変位量	1.87 (3.08)	3.62 (5.88)	7.87 (11.01)

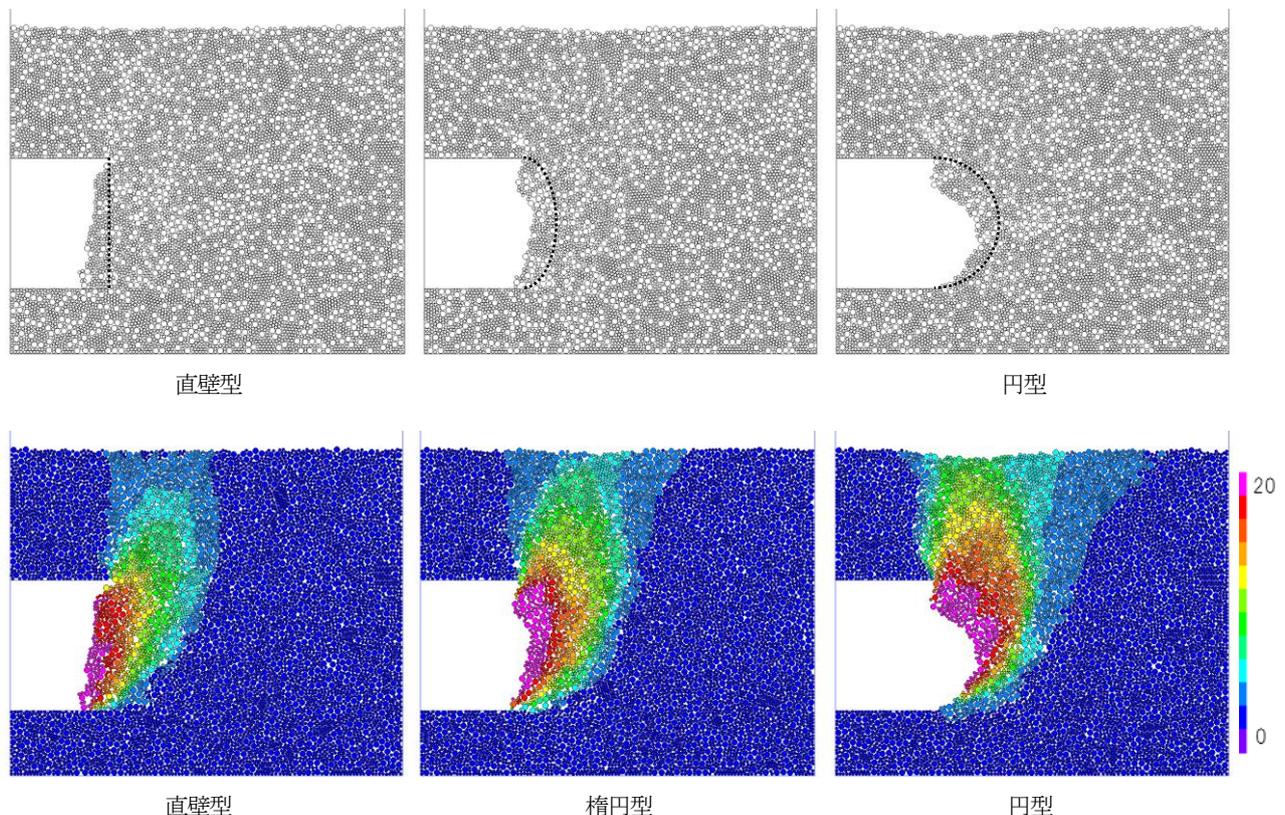


図-8 DEM解析における切羽挙動（上：地山挙動，下：変位図）スライド量 15mm

6. 切羽面に作用する荷重を求めるDEM解析

どのような切羽形状が有利であるかは、切羽の安定性で決めるべきである。そこで、より安定性の優れた切羽形状を考えるために、底面摩擦模型実験では計測することが難しい切羽面に作用する荷重を、安定性を判断するひとつの指標としてDEM解析により検証した。

(1) 解析方法

本研究では、切羽実験を模擬する際に、切羽面は境界を設けず解放して解析を行ってきたが、この方法では切羽面に作用する荷重を求めることは難しい。そこで、切羽面に線要素を完全固定して配置することで、その反力から切羽面に作用する荷重を求める。切羽面の変位が0となるように切羽面の線要素を完全に剛なものとして固定することで、切羽面に作用する荷重を解析することが可能となった。さらに、トンネル掘削における緩みを考慮するため、図-9のように、切羽面に1mm余裕を持たせて地山を配置し解析を行った。このため、地山のパッキングは、1mm余裕を持たせた位置で行った。

解析に用いる物性値は表-3と同様の値を用いた。さらに、直壁型、楕円型、円型に加え、円弧型(図-10)を新たに作成し解析を行った。また、解析は各切羽形状それぞれ3回ずつ行った。以下、その平均値を結果として示す。

(2) 解析結果

図-11に各切羽形状における切羽面に作用する荷重を示す。このとき荷重は、線要素に作用する水平方向荷重と鉛直方向荷重の合力方向の値を示している。また、荷重は、ある程度収束したと判断したステップまで示すものとする。結果は、切羽面を3等分し、それぞれ上部、中部、下部として表す。

a) 直壁型

直壁型では、初期荷重(パッキング終了直後のステップで切羽面に作用する荷重)が中部、下部で大きくなっていることがわかる。これは、切羽下部を起点として地山奥にいくにしたがいすべり線が生じているためであると考えられ、地山が切羽下端へ流れ込んでくることで荷重が大きくなったと考えられる。また、最終的な値は下部のみ上部、中部に比べ大きくなっている。

b) 円型

円型でも直壁型同様に、初期荷重が中部、下部に集中しており、すべり線の影響によるものであると考えられる。さらに、上部では初め小さな値から徐々に荷重が増加している傾向が確認できる。また、最終的には荷重が全体的に狭い範囲に収まっていることがわかる。これは、アーチ効果によって切羽面に作用する荷重がほぼ均等に

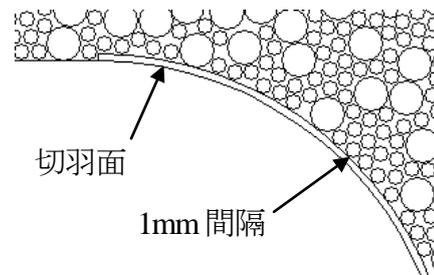


図-9 切羽面に1mm余裕を持たせた様子(円型の例)

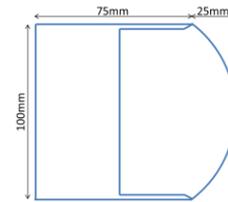


図-10 切羽形状(円弧型)

配分されているからであると考えられる。

c) 楕円型

楕円型では、中部のみ初期荷重が大きくなっている様子がわかる。これは、切羽面の曲率が一定ではないからだと考えられる。楕円の曲率は中部の方が上部、下部に比べ小さいので、中部のみ直壁型に近い挙動を示したと考えられる。最終的な値も、中部のみ大きな値を示している。円型と比較して、上部、下部の最終的な値が小さくなっているのは、切羽前方の奥行きが円型に比べ小さいからであると考えられる。

d) 円弧型

円弧型は、他の切羽形状に比べ全体的に非常に狭い幅で荷重が均等であり、荷重の幅が狭いほど曲面によるアーチ効果を発揮しやすいと考えられる。さらに、初期荷重の最大値が4つの切羽形状の中で最小となった。これは、切羽前方の奥行きが大きくなりすぎていないこと、かつ、切羽面の曲率が一定ということが理由として挙げられる。これに対し、楕円型は切羽前方の奥行きは大きくないが、曲率が一定でないため、荷重は狭い幅で収束しなかったのではないかと考えられる。

(3) 解析結果まとめ

切羽面に作用する荷重に関して得られた知見を以下にまとめる。

- 切羽面下部は、地山のすべり線の起点となるために初期荷重が大きくなる傾向がある。
- 曲率が一定の曲面切羽は荷重が狭い幅でほぼ均等に配分している。
- 曲面切羽は直壁型よりも荷重が小さくなり、切羽前方の奥行きが小さいほど荷重が安定する。

以上より、本研究の範囲では、円弧型が最も安定性の高い切羽形状であると言える。

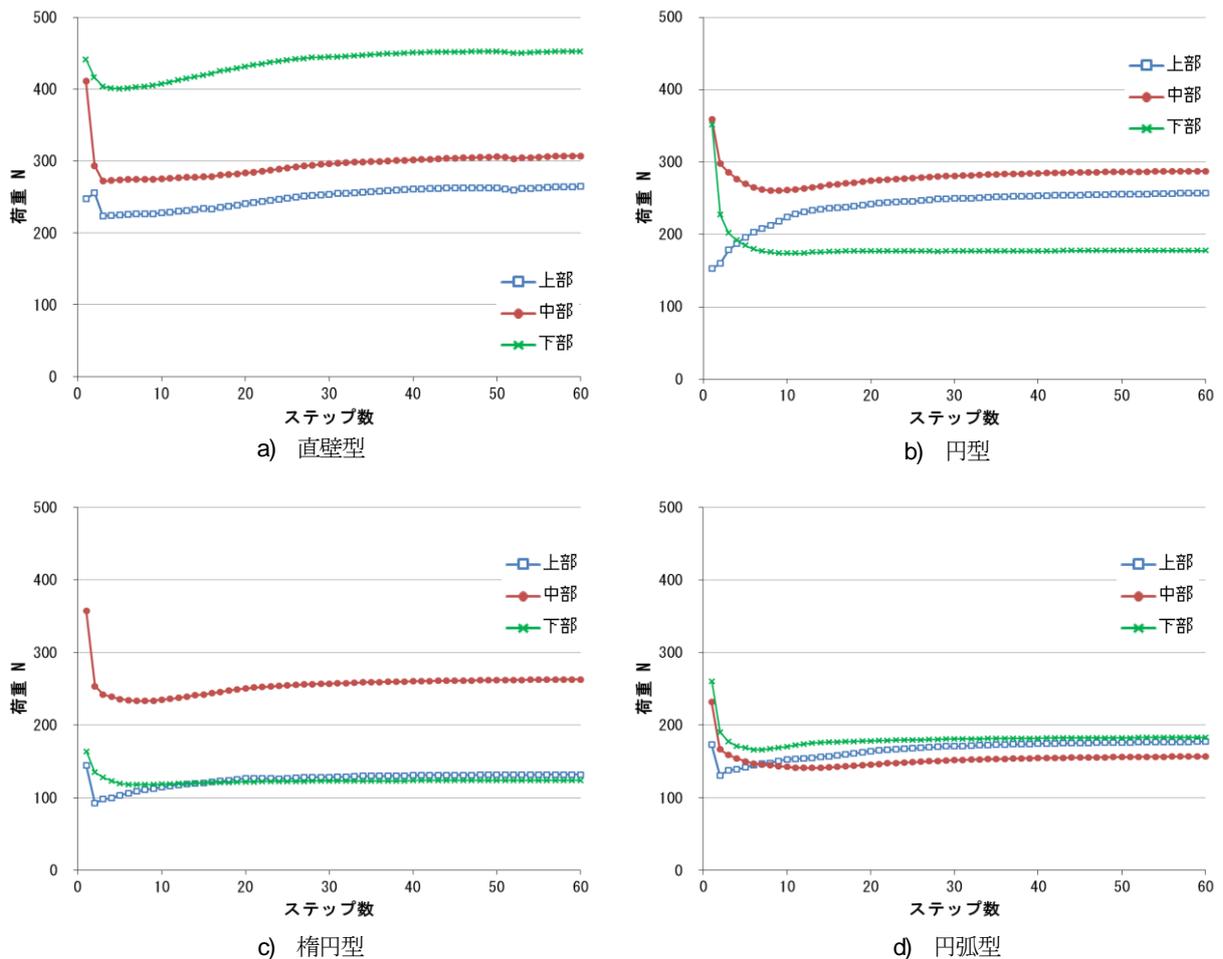


図-11 切羽面に作用する荷重

7. まとめ

本研究では、DEMの底面摩擦模型実験への適用を考え、DEM解析による切羽形状を種々変えた解析を行ってきた。

DEMの底面摩擦模型実験への適用に関しては、切羽挙動、地山の崩壊範囲の観点から、DEM解析結果は底面摩擦模型実験結果を再現していると言える。しかし、切羽面変位量に関して物性値の課題は存在する。したがって、今後、DEMを用いた切羽に関する解析を行うとともに、物性値を見直すために新たな実験や解析を行っていく。

さらに、底面摩擦模型実験への適用を確認したDEMにより切羽形状を種々変えた解析を行い、切羽面を完全固定することで切羽面に作用する荷重を求めることができた。切羽面に境界を設けず解析した結果では、曲面切羽の方が直壁型よりも変位が大きくなったことに対し、切羽面が完全固定という条件下では、曲面切羽の方が直壁型よりも荷重が小さくなった。この結果から、曲面切羽の安定性の優位性を示すことができた。つまり、曲面切羽を鏡吹付け工などである程度連続性を保つことがで

ければ、直壁型切羽よりも小さな力で切羽安定を得ることができることが明らかとなった。特に、曲面切羽の中でも、円弧型は荷重の値も小さく、かつ、切羽面上部、中部、下部それぞれに作用する荷重が均等に配分されることが明らかとなった。

したがって、本研究の範囲では、円弧型が最も安定性の高い切羽形状であると言える。

参考文献

- 1) 前田洗樹, 土門剛, 西村和夫: 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, トンネル工学報告集, Vol.19, p1-6, 2012.11
- 2) 松井幹雄, 西村和夫, 今田徹: 底面摩擦模型実験の個別要素法解析のための底面摩擦力の定式化, 土木学会論文集, No.589, III-42, p99-108, 1998.3
- 3) 今田徹, 山崎良一: 曲面切羽に関する研究, 土木学会第51回年次講演会, p110-111, 1996.

(2013.9.2 受付)

ANALYSIS OF MODEL TEST ON CURVED TUNNEL FACE USING DEM

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 this study, using the base friction model test, we've been to elucidate the stability of curved tunnel face. Therefore, in this study, in order to consider the face shape with excellent stability more, by comparing the analysis results with DEM and measurement results from model tests, and examine the applicability to base friction model tests DEM.

In this study, by comparing the analysis results with DEM and measurement results from base friction model tests to examine the applicability of the DEM for base friction model tests. Then, the analyzes of a variety of changing the tunnel face shape using a DEM, and, the objective is to propose the best tunnel face shape. As a first step, in this report, to verify the load applied to the tunnel face surface of each tunnel face shape.