

平成 28 年度 修士論文

トンネル掘削工法の違いによる
曲面切羽の有効性評価に関する
解析的検討

首都大学東京大学院 都市環境科学研究科

都市基盤環境学域

15885405 富樫 真美

指導教授 西村 和夫 教授

目 次

| | |
|--|-----|
| 目 次 | iii |
| 第 1 章 序論 | 1 |
| 1.1 研究の背景と目的 | 1 |
| 1.2 曲面切羽 | 2 |
| 1.3 既往研究 | 4 |
| 1.3.1 実験による研究 | 4 |
| 1.3.2 解析手法による研究 | 5 |
| 1.4 本研究の位置づけ | 6 |
| 1.5 論文構成 | 6 |
| 第 2 章 数値解析モデル | 7 |
| 2.1 解析方法 | 7 |
| 2.1.1 数値解析の概要 | 7 |
| 2.1.2 三次元有限差分プログラム | 7 |
| 2.2 解析モデル | 9 |
| 第 3 章 吹付けコンクリートの材齢を考慮した曲面切羽の有効性の比較解析 | 15 |
| 3.1 概要 | 15 |
| 3.1.1 モデルの説明 | 15 |
| 3.1.2 解析条件 | 16 |
| 3.1.3 解析方法 | 19 |
| 3.2 地山等級 C II の解析結果 | 20 |
| 3.2.1 変位量 | 20 |
| 3.2.2 塑性領域 | 21 |
| 3.3 地山等級 D II の解析結果 | 22 |
| 3.3.1 変位量 | 22 |
| 3.3.2 塑性領域 | 23 |
| 3.4 地山等級 E の解析結果 | 24 |
| 3.4.1 変位量 | 24 |
| 3.4.2 塑性領域 | 25 |
| 3.5 まとめ | 26 |

| | |
|----------------------------------|----|
| 第4章 鏡面ボルト設置と曲面切羽の有効性の比較解析 | 29 |
| 4.1 概要 | 29 |
| 4.1.1 モデルの説明 | 29 |
| 4.1.2 解析方法 | 30 |
| 4.2 地山等級CⅡの解析結果 | 30 |
| 4.2.1 変位量 | 30 |
| 4.2.2 塑性領域 | 30 |
| 4.3 地山等級DⅡの解析結果 | 31 |
| 4.3.1 変位量 | 31 |
| 4.3.2 塑性領域 | 32 |
| 4.4 地山等級Eの解析結果 | 33 |
| 4.4.1 変位量 | 33 |
| 4.4.2 塑性領域 | 33 |
| 4.5 まとめ | 34 |
| 第5章 ベンチカット工法と曲面切羽の有効性の比較解析 | 37 |
| 5.1 概要 | 37 |
| 5.1.1 モデルの説明 | 37 |
| 5.1.2 解析方法 | 37 |
| 5.2 地山等級CⅡの解析結果 | 37 |
| 5.2.1 変位量 | 37 |
| 5.2.2 塑性領域 | 39 |
| 5.2.3 主応力 | 39 |
| 5.3 地山等級DⅡの解析結果 | 40 |
| 5.3.1 変位量 | 40 |
| 5.3.2 塑性領域 | 42 |
| 5.3.3 主応力 | 42 |
| 5.4 地山等級Eの解析結果 | 43 |
| 5.4.1 変位量 | 43 |
| 5.4.2 塑性領域 | 45 |
| 5.4.3 主応力 | 45 |
| 5.5 まとめ | 46 |
| 第6章 考察と結論 | 49 |
| 6.1 考察 | 49 |
| 6.2 結論 | 49 |

| | |
|-----------------|----|
| 6.3 今後の課題 | 49 |
| 付 録 | 51 |
| 参考文献 | 61 |
| 謝 辞 | 62 |

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

近年、山岳トンネル工事においては全断面掘削の施工法が増加の傾向にある。この掘削工法は、掘削機械の大型化による作業能率の向上や早期閉合による変位抑制効果が利点として挙げられている。しかし一度に掘削する面積が大きいことから、切羽の自立性が劣るという欠点も挙げられる。

従って現在、切羽の自立性を保つため、鏡対策の補助工法や施工断面分割方式のトンネル掘削工法が採用されている。具体的には、ベンチカット工法や導坑先進工法、また切羽の外周部の地山前方に長尺鋼管を施工して薬液を注入する長尺鋼管先受け工や、切羽に直接長尺ボルトを施工する長尺鏡ボルト工などの施工事例が増えている。しかし、これらのトンネル掘削方式はコストがかかるだけではなく、切羽での作業の輻輳が多くなり、機械、設備、作業人員の規模が増大し、サイクルの時間も増加して工期が長くなることが問題視されている。

そこで、切羽安定対策のコスト・工期縮減のため、既往の研究では様々な検討が行われている。最近では、従来直立させていた切羽（以下、直面切羽）を、アーチを描くように前方へ掘り込むことで、地山を安定させる切羽形状（以下、曲面切羽）の検討が行われている。曲面切羽は掘削時に緩みやすい地山にアーチアクションを積極的に生じさせ、切羽を安定化させる方法であり、直面切羽やベンチ付き切羽などより安定性が高いとされている。曲面切羽についての詳細は次節で述べる。実際に施工された全断面掘削の現場では、切羽が崩壊したとき、切羽中央部分が自然に半球面状に破壊して安定したという事例がよく見られる。また東海北陸道飛騨トンネルの全断面 TBM 掘削の現場でも、切羽中心部分の崩落が発生し、切羽が自然に曲面状になって安定するケースが多発したという報告がある。これらの報告より、崩落が起こりそうな部分を掘削時に事前に排除し切羽を形成することが重要であり、切羽の安定性という点では曲面切羽は理想的な切羽の状態ではないかと考えられている。既往の研究では曲面切羽の優位性を示しているものの、実際の施工における適応事例が多くないことから、採用には心理的抵抗感があるという現場からの報告がある。ここ数年では、実施工において研究的位置づけで曲面切羽を用いた施工をおこない、切羽の安定性の評価が行われているが、曲面切羽の合理性の検討に関してはまだ解明されていない。そのため、施工に向けた詳細の解析が必要と考える。

この現状をふまえて、本研究では実施工に基づいた解析手法による曲面切羽の有効性評価の検討、また実施工で採用例の多い切羽安定化対策と曲面切羽の有効性を比較検討した。

1.2 曲面切羽

トンネルの断面を決定するには、力学的に合理的な形状とする必要がある。トンネル断面の力学的な合理性とは、トンネルの掘削に伴う応力再配分の点からの合理性と支保構造としての合理性である。地山の側圧係数が1の場合、重力を無視すれば円形トンネルでは周辺の掘削周面接線方向応力はすべての点で初期地山応力の2倍になり、トンネル周辺のどの部分でも応力が同じ値になり、最も合理的な形状と見なせる。

また、楕円形のトンネルの周辺の応力分布から、側圧係数を κ とすると楕円の水平軸/縦軸の長さの比が κ の値のとき σ_t はすべて $(1+\kappa)p_y$ となり、周方向応力は一定の値をとる。トンネル断面を楕円形の扁平断面や、縦長断面にするのは、応力再配分の点からは、合理的である。

トンネルの用途から決まる必要断面は、矩形であることが多い。その場合、隅角部での応力集中が大きくなり、地山の安定に不利である。山岳トンネルの安定が地山によって基本的には保たれ、掘削に伴う応力再配分によって地山に過度の応力集中が起こらないようにすることが、断面形状を決定する際の重要な留意点である。実際の山岳トンネル断面では矩形断面はほとんどがなく、円形、馬蹄形や楕円形に近い断面になっている。もしくは、矩形断面の隅角部を丸くしている。これは応力の再配分、支保工構造として望まし形状を総合的に考慮した結果である。

上記と同様に、地山の応力再配分によるトンネル形状決定と同じように、切羽での応力集中係数を低減する点から、形状に曲率を持たせるのが合理的である。切羽部分は支保としてその前方の地山を負担し、地圧と釣り合っている。切羽に曲率を持たせた形状にすることにより、切羽部分の地山が適度にシェル構造（ドーム）になり、かつ、NATMにおいて重要な支保部材である吹付けコンクリートをもシェル構造にさせ、より強い支持効果を働かせる。この二重シェル構造により、低コストで簡単にかつ迅速な切羽の安定性の向上を期待できると考える。

シェル構造は形態抵抗型の構造システムであり、加えられる荷重を圧縮軸力に変換する形態を取ることで、薄肉でも非常に高い剛性を発揮する構造として知られている。教会やイスラム寺院の建物の特徴として屋根(図-1.1)や壁、窓などに円形の構造が使われ、美しい景観をみせている。お椀を伏せたような屋根は石材の重さに耐えてどっしりとした安定感を感じさせる。

おわん型の屋根はドーム構造と呼ばれる(図-1.2)。ドーム構造は部材にとって厳しい曲げが減り、屋根の面全体で、半球の面に沿って外側に広がろうとする力に変えられる。また、シェル構造は同様に外力が面内を流れる力によって伝達されるため、軽くて強い構造物を作ることができる。

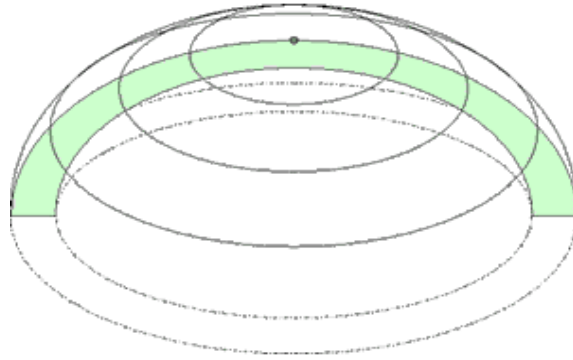


図 - 1.1 ドーム屋根の透視図

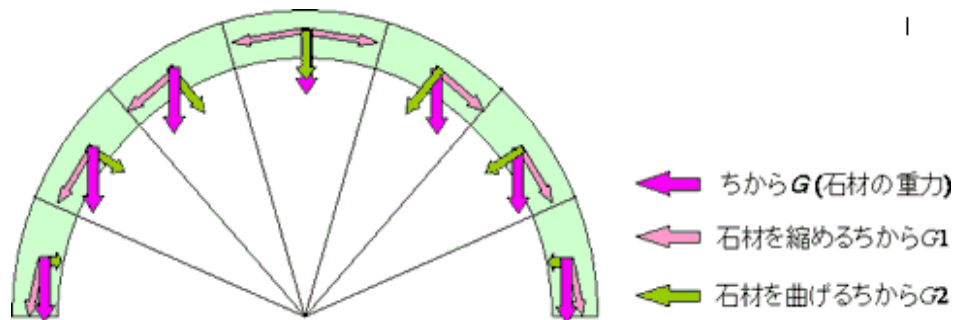


図 - 1.2 ドームに加わる重力の応力配分図

ドーム構造では垂直方向の重力に耐えられるだけでなく、地震、風圧などの横方向の力に対しても強く、また、局部的にかかる力が平面全体に広がるためにもとても大きな力にも耐えることができる。曲面切羽まさにこのような構造の特性を利用し、もともと肌落ち防止程度の効果しか発揮できない鏡吹付けは、強い支持効果を持つドーム状シェル部材に変わる。奥の地山からの地圧だけではなく、鏡での不連続面で囲まれた不安定な岩塊、あるいは掘削により緩んだ岩塊の抜け落ちにも強く耐えられると推定できる。

曲面切羽においては、切羽奥の地山部も支持リングになり、ドーム状シェル構造の一部効果を持てると考えられる(図-1.3)。更に、トンネルの掘削面を円滑にすることによって、切羽周辺地山の局所の応力集中を分散でき、二次地山応力は滑らかになり、局部的な破壊を防ぐと、切羽の安定性が向上できると考えられる。

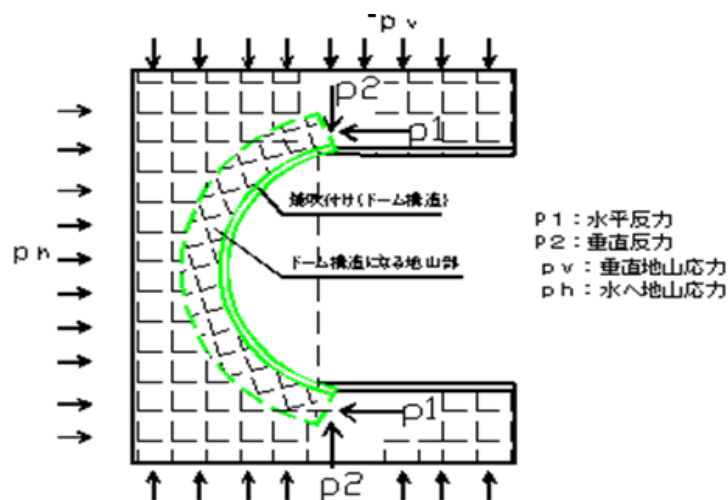


図 - 1.3 曲面切羽によるドーム構造効果のイメージ

切羽鏡面で掘削により応力が解放されると、三次元的な応力再配分の結果、鏡面の地山が降伏し、あるいは破壊し、鏡面に応力が解放された領域が形成されることがある。すなわち、形状が平面の鏡面では、切羽の応力再配分の結果、破壊による応力解放域が緩んで地山としての一体性が失われた緩み領域ができる。この部分は応力が小さく、切羽の安定性に寄与する程度は低いと考える。切羽面地山は掘削の影響を受けて、緩みやすく、重力の直接の影響を受けて不安定になりやすい部分である。それゆえ、緩んで崩壊し易い部分を予め掘削して、曲面の切羽に仕上げておけばこのような形態の崩壊は防ぎ、切羽の安定にとって有利であることと考える。

1.3 既往研究

本節では、既往の研究における切羽形状の検討について説明する。

トンネルを安全に施工するうえで、切羽面の安定性を保つことが最も重要である。そこで本研究に必要となる曲面切羽に関する既往の研究について、研究内容と結果をまとめる。

1.3.1 実験による研究

西村ら¹⁾は、切羽の形状の違いによる切羽近傍の地山内応力の違いを調べるため、3次元光弾性実験を行った。実験では、エポキシ樹脂で作成した地山に横断面三次元馬蹄形トンネルを作り、切羽形状が全断面と、ベンチ長が $0.25D, 0.5D$ のベンチ型、 $1/4$ の円筒型にした。実験結果より以下の知見を得ている。

- ① 隅角部はどの切羽形状でも応力集中する。

② 全断面型切羽の場合、切羽面の中央付近の接線応力 σ_t は他のケースに比較して相対的に小さい。

③ 1/4 円筒形切羽の場合、天端から切羽下部への接線応力 σ_t は滑らかに流れるため、切羽面に沿う σ_t も比較的小さい。

以上より、連続体地山では、4つの形状の切羽の中で、1/4の円筒形切羽が応力集中に対して有利であると報告した。

また、西村ら²⁾は、粘着力のない粒状体地山での切羽形状の違いによる切羽の安定性の違いについて底面摩擦実験装置を用いて調べ、以下の結果を得ている。半円筒形切羽の場合、天端の支保されない自由面が大きいと、切羽面に生じる移動崩壊領域も、その上方に形成される三角形の移動崩壊領域も大きいと、粘着力の強く、曲げ剛性が小さい吹付コンクリートを模擬したセロテープを貼りつけた場合、半円筒形の切羽は地山の安定に有利である。

今田ら³⁾は切羽に曲面を与えた時の切羽の安定性について模型実験により、検討を加えた。実験した切羽は直壁切羽、円形切羽、楕円形切羽及び参考としてベンチ型切羽の4種類である。その観測結果から、曲面切羽は安定に優れた形状であるとしている。

1.3.2 解析手法による研究

森崎ら⁴⁾は、三次元有限差分法による連続体解析を行い、各土被りや地山条件による曲面切羽の力学的効果の違いについて検討した。その結果、曲面切羽は力学的に見れば、地山内部応力の再配分、支保としての切羽安定対策の点から有効であるとしている。

平田ら⁵⁾は有限要素差分法を用いた三次元弾塑性解析を実施し、核残しと直立切羽、曲面切羽の効果を比較した結果、曲面切羽は、鏡吹付けコンクリートを施工することによって、変位が抑えられる効果が大きいことを示している。

更に、岩野ら⁶⁾は、MM130Rによる施工を反映した逐次弾塑性有限要素解析を実施した結果、平面形状の切羽に比べ、球形型掘削切羽面の安定性が良く、地山の緩みが抑制されることを示した。また、切羽前方地山の地山特性変化域を弾性波速度という一つの指標を用いて計測したところ、緩みを表す速度低下域は深度約 1.5m であり、同様な地山の通常の NATM における平面切羽の場合の約半分であり、切羽前方の緩み領域が小さくなるとしている。

また、今田⁷⁾は曲面切羽について検討し、切羽面を曲面にしても、応力の点からは大きな変わりなく、むしろ切羽面直近の不安定になりやすい部分ができるのを回避でき、切羽の安定にとって有利であるとしている。

海外では切羽前方地山を補強する ADECO⁸⁾に関する論文があり、縦断方向の断面形状が曲率を持ったものとして図示しているものの、その形状の切羽安定性については論じていない。

実施工による研究では、阪神高速高取山トンネル⁹⁾の花崗岩の機械掘削のものと北陸道山王トンネル二期線¹⁰⁾の泥岩の機械掘削のものがある。

1.4 本研究の位置づけ

既往の研究により、曲面切羽の特徴において様々な知見が得られ、実施工の現場で試験施工も行われている。しかし既往の研究で報告された解析結果では、いまだ実務に反映することができず、理論上の合理性の検討を行うためには、不十分であるといえる。そこで本研究では、さらに研究を深め切羽を曲面にすることによる近傍地山の挙動を究明し、その安定性向上効果を評価することを目的としている。理論上の切羽安定性の検討を行うため、数値解析ソフトを用い三次元数値解析を行う。実務には、馬蹄形などのトンネル断面が一般的に使われているが、本研究は簡便のため、トンネル断面を真円形にした。

1.5 論文構成

本論文は6章から構成されている。

第1章では、研究の背景と本論文の目的、ならびに既往の研究、さらに論文の概要と構成について述べた。

第2章では、本研究で用いる数値解析手法及び解析モデルの考え方について述べ、直面切羽、曲面切羽の特徴について説明した。

第3章では、現実に即した曲面切羽を採用した際の地山挙動を把握するために、トンネル掘削解析における吹付けコンクリートの設定の違いによる、曲面切羽の有効性の差異について検討を行った。検討方法としては、三次元数値解析を行い、直面切羽と曲面切羽の安定性を、吹付けコンクリートの弾性係数の設定方法の違いにより比較した。比較した設定方法は、弾性係数を一定とした簡略式設定と、実施工に基づき材齢による弾性係数の変化を再現した設定の2種類である。また、地山条件は3種類で比較し、解析結果をまとめ、曲面切羽の有効性について評価した。

第4章では、曲面切羽の有効性をより明確にするために、トンネル掘削時に鏡ボルトを設置した直面切羽と、曲面切羽の切羽安定効果の差異について検討を行った。トンネル掘削解析の結果を比較し、曲面切羽の有効性の傾向について検討した。なお本章では、第3章で用いた山条件及び実施工に基づいた吹付けコンクリートの設定方法を用いて、三次元数値解析を行った。

第5章では、前章と同じく曲面切羽の有効性をより明確にするために、部分断面掘削工法のうちのベンチカット工法と曲面切羽の切羽安定効果の差異について検討を行った。前章と同じ条件化で、トンネル掘削解析結果を比較し、曲面切羽の有効性の傾向について検討した。

第6章では、本論文の結論及び考察、今後の課題について記述した。

第2章 数値解析モデル

2.1 解析方法

2.1.1 数値解析の概要

トンネルを掘削した後の地山の応力、変位を求めるための方法には、理論解析法と数値解析法がある。理論解析法は、力学に基づく定量的な結果が得られ、簡便で計算コストも安い。が、トンネルの断面形状、掘削手順、支保の効果、などの重要な要素が十分にモデル化出来ず、非常に限られた仮定条件下での解析のため、適用にあつたてはその適用条件を十分に考慮しておく必要がある。

理論解析法の基本的な考え方は、種々の変形や強度特性を有する地山条件のもとで、無限弾塑性体にモデル化された地山内に内圧を有する円孔を開けた場合の解析を行い、得られた壁面変位や塑性領域が許容値内に入るために必要な内圧を求め、それと同等以上の内圧効果を有する支保量を求めようとするものである。

トンネルの切羽から十分離れたところの地山応力状態は、平面ひずみ状態と見なし、理論解析解が得られるが、切羽近傍における状況は三次元の現象であるので、施工順序、掘進速度、支保工の施工時期などの施工方法の影響をうけ、現象は非常に複雑で、理論解析法では再現に限界がある。

対象とする岩盤を連続体と見なす安定性評価のための数値解析法には、有限要素法のほか、境界要素法、個別要素法などがある。有限要素法とは、連続体を幾つかの要素に分けて考え、要素ごとに剛性方程式を作り、それをもとに全体方程式を組み立てて解く方法のことをいう。複雑な地盤形状、調査で得られた物性値、さらには、初期応力の異方性も入力条件として設定でき、今日では施工過程のシミュレートが一般的に行われるようになっている。

しかし、通常のトンネル解析に用いる有限要素法は微小変形理論に基づく解析手法であるため、大変形の表現には適さない恐れがある。地盤を連続体とみなして、小さな荷重を受けた弾性状態から大きな荷重による破壊状態に至る過程を連続的に再現できる解析法には有限差分法がある。有限差分法は、差分法にベースをおく離散化解析手法である。この解析法は、弾塑性解析において、掘削や载荷の結果として釣り合い状態となる場合、または、降伏後も変形が刻々と進行し累積して崩壊状態となる場合のどちらの結果も得られる。崩壊挙動の過程が安定的にシミュレートでき、有限要素法に見られる発散という状況は存在しない。

2.1.2 三次元有限差分プログラム

本研究では、トンネルの解析に実績のある有限差分法プログラム **FLAC3D** を用いる。**FLAC3D** は、陽解法の時間差分に基づいた解析方法である **FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)**の三次元版である。陽解法とは、時間差分法において「 Δt 後の解」

を「現時点の解」から直接求める定式化法であり、全体剛性マトリクスを解く必要がないことを特徴としている。以下にこのプログラムの概要を述べる。

FLAC の定式化には、動的な運動方程式が含まれており、この運動方程式から対象とする問題の静的な解を得ることができる。これは、モデル化している系が不安定な場合にも、静的な釣り合い状態を求めるためには重要である。非線形材料の場合、常に物理的に不安定な状態が滞在する。すなわち、安定な状態から不安定な状態へモードが変化する場合であり、たとえば、塑性流動や山はねがあげられる。このような現象では、物理的には、系のひずみエネルギーの一部が、不安定な運動をする箇所で運動エネルギーに変換される。FLAC では、このような過程に慣性項を含ませて直接モデル化している。

FLAC の一般的な計算手順を示したものが図 2-1 である。この手順では、新しい速度と変位を得るために応力もしくは力を用いて運動方程式を解く。つぎに速度からひずみ速度を導き、ひずみ速度からは新しい応力が得られる。この計算過程で重要なことは、図 2-1 の枠内の過程にある間、既知数は固定されて計算され、この既知数から全要素の変数を更新することである。たとえば、図 2-1 の下側の枠においては、既知の速度値からそれぞれの要素に対して新しい応力を計算するが、速度はその枠においては固定され変化しないと仮定する。すなわち、新しく計算した応力は速度に影響を与えないことになる。このことは、ある場所で応力が変化した場合、応力はそれと隣接する場所に影響を与え、速度に影響するという一般的な考え方において、不合理のように思われる。しかしながら、差分の時間ステップを非常に微小に設定するので、微小な間隔で要素から要素へと物理的な情報が伝達される。

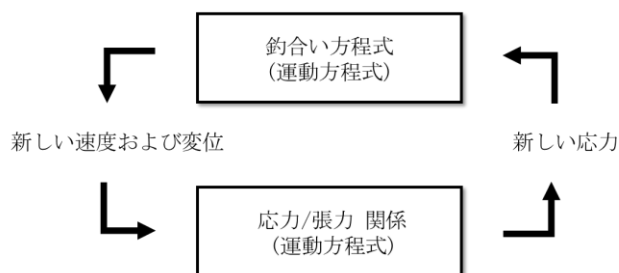


図 - 2.1 FLAC の一般的な計算手順

現在、一般的に最も良く用いられている有限要素法と FLAC を比較してみると、両者ともに接点における変位と力に関係づける微分方程式を、各要素のマトリクス方程式で置き換えるものである。FLAC における方程式は、有限差分法によって導かれるが、弾性体に対して得られる要素マトリックスは、有限要素法によって得られるマトリクスと同じものに

なる。しかし、FLAC は次の点において、有限要素法とは異なっている。

- 塑性破壊力と塑性流動をモデル化することができる。
- 本質的に静的な系に対するモデル化においても、動的な方程式が用いられる。
- 陽解法を用いており、非線形問題においては、有限要素法のように陰解法を用いるものよりも、計算時間が非常に縮小できる。陽解法では、応力—ひずみ関係が線形的な場合と同じ計算時間で非線形計算が可能である。

さらに、陽解法の場合は、全体剛性マトリクスが必要ないので、以下のような利点がある。

- 膨大な量の要素でもわずかなメモリで計算できる。
- 全体剛性マトリクスを用いないので、大変形の解析でも微小変形の場合と同じ計算時間で済む。

一方で、以下の欠点がある。

- 線形問題の解析では、有限要素法のような陰解法よりも計算時間を要してしまう。
- FLAC の解析所要時間は、隣接する要素の大きさや弾性係数にギャップがある場合、計算時間を要してしまう。

本研究においては、上記の特徴に重点を置き、FLAC3D を利用した。

2.2 解析モデル

地山材料は連続体とする。その変形成分は弾性成分と塑性成分から成り、各々の成分はせん断変形成分と体積変化成分の和で表せる。地山材料の構成式とは、力もしくは応力成分が変形成分とどのような法則および数式で表せるかを表現したものである。これまで多くの構成則が提案された。しかし高度で複雑な構成式は利用者にとって理解が困難なことが多く、実用的な問題解決のために、弾塑性解析上でそれらの構成則を組み込む価値は少ない。

実際にはより単純なモデルの利用や、問題の種類に応じた簡便な構成式の構築が必要である。トンネルの解析で用いられる地山の力学モデルとしては、線形モデル、非線形弾性モデル、弾塑性モデル、残留強度モデルがあり、これらを図-2.2 に示す。また、これらのモデルにひずみの時間依存性、すなわち粘性機能を付加したものなどがある。

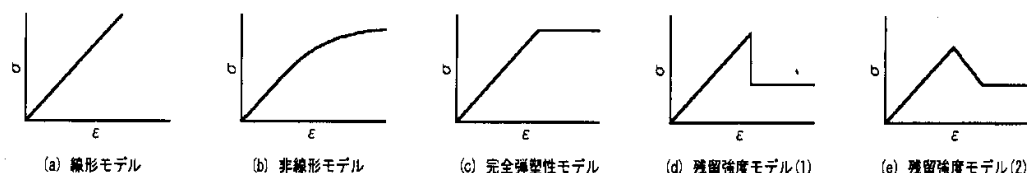


図 - 2.2 力学モデル

弾塑性モデルについて以下に述べる。弾塑性論に基づく構成則を用いた変形解析を弾塑

性解析という．弾塑性論では，**図-2.3**のように，全ひずみ $\{\epsilon\}$ が，除荷すると元に戻る弾性ひずみ $\{\epsilon^e\}$ と，除荷しても残留する塑性ひずみ $\{\epsilon^p\}$ との和で表されると仮定する．現在の応力状態を **P** 点とし，全ひずみ $\{\epsilon\}$ の次の瞬間の微小変化量を全ひずみ増分 $\{d\epsilon\}$ とすると， $\{d\epsilon\}$ も $\{\epsilon\}$ と同様に弾性成分と塑性成分の和で表される(**式 2. 1**)．

$$\left. \begin{aligned} \{\epsilon\} &= \{\epsilon^e\} + \{\epsilon^p\} \\ \{d\epsilon\} &= \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^p\} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

降伏点に到達前の弾性域では，線形弾性の場合にはフック法則が成り立つ式と，降伏点に達した後に**式 2.3** からならって応力増分とひずみ増分の関係を**式 2.2** に記述する．

$$\left. \begin{aligned} \{d\sigma\} &= [D^e]\{d\epsilon^e\} \\ \{d\sigma\} &= [D^{ep}]\{d\epsilon\} \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

$[D^e]$ は弾性係数マトリクス（各成分は定数）であり， $[D^{ep}]$ は同様に応力ひずみ曲線の接線勾配を表し，弾塑性マトリクスである．**式 2.2** を用いて，任意のひずみ増分に伴う応力増分を予測でき， $[D^{ep}]$ を定式化することが一般の弾塑性構成則の目指す共通の目的である． $[D^e]$ と異なり， $[D^{ep}]$ の各成分は応力値などの関数であり，载荷とともに逐次変化する．この特性を有する材料の降伏関数 f は，一般に塑性ひずみ $\{\epsilon^p\}$ の関数を含む．

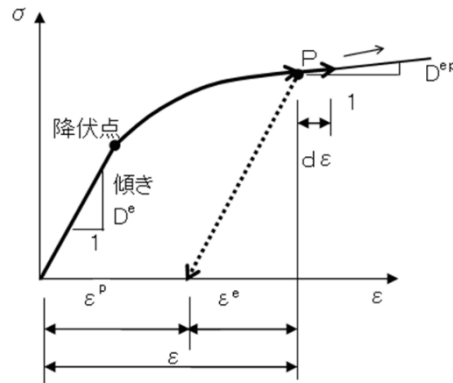


図 - 2.3 弾塑性構成則

地盤の弾塑性解析では，応力状態が所定の降伏状態に達した後，応力は一定のままひずみが急激に増大する材料は弾完全塑性体になるモデルを使うことが多い．**図-2.4** に示すように，応力とひずみの関係をグラフで表示すると弾性変形状態と完全塑性状態の二直線の折れ線（バイーリニア）になる．変形が小さいうちは材料が弾性を示し，応力とひずみの間に直線関係が仮定される．応力が降伏点に至ると材料は一気に降伏し完全塑性状態になり，降伏応力を一定値に維持した状態で塑性変形が進行する．降伏状態にある点 **B** で応力を完全に除荷すると弾性的に変形が回復するが，点 **C** では塑性変形が残る．点 **C** から再载荷を行

うと除荷時と同じ経路を辿って点 B に戻った後に点 D へ移行する。

実際の材料はひずみ硬化やひずみ軟化を生じ、弾完全塑性モデルの傾向とはやや異なる。弾完全塑性という状態は現実にはあり得なく、解析上の仮定に過ぎない。しかし、弾塑性モデルの中で最も簡単なモデルであるため、地盤の変形状や破壊状態の調査には便利でありよく利用される。この仮定によれば、弾性と塑性と応力-ひずみ曲線上で二分することが可能となるので、両者の性質が地盤などの変形にどのように影響するかを、おのこの独立に調べることができる。また地盤材料内の破壊領域と非破壊領域を明確に区別したい時に便利である。土圧、斜面安定のような安定問題においては、解析結果における弾性成分の寄与分は小さいので、モデルの完全塑性の部分で対応可能である。このモデルはトンネル地盤などの挙動解析においては重要である。

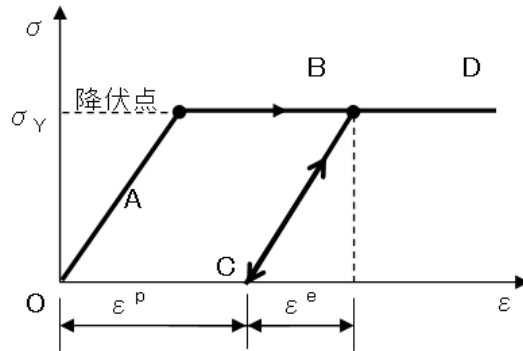


図 - 2.4 弾完全塑性構成則

材料の降伏は応力 $\{\sigma\}$ が降伏基準の式を満足した場合に発生すると考える。弾性域では一般に降伏関数 f は $f < 0$ である。地盤材料、土を含む各種材料の変形、破壊解析の構成則としてよく用いる f の関数形を以下に列挙する。

Tresca 基準 : $f = \sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_Y$

von Mises 基準 :

$$f = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} - \sigma_Y$$

Drucker-Prager 基準 :

$$f = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} - \alpha(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) - \kappa$$

σ_Y , α , κ , c , ϕ は強度定数である。

本研究では降伏基準に適用するのは Mohr-Coulomb 式である。この式は地盤材料の降伏が最大主応力 σ_1 と最小主応力 σ_3 で規定され、地盤材料において多くの破壊問題がこれに基づいて解かれる。Mohr-Coulomb 式は次式 2.3 で表される。

$$\text{Mohr-Coulomb 基準: } f = (\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi - 2c \cos \phi \quad (2.3)$$

ここで、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角となる。降伏後の塑性ひずみの大きさと方向を記述する流れ則に用いる塑性ポテンシャル関数 g は、降伏関数と同様に、三次元主応力空間内で曲面として定義される。式 2.4 となり、 ψ はダイレイタンシー角である。

$$\left. \begin{aligned} g(\sigma) &= \sigma_1 - \sigma_3 N_\psi \\ N_\psi &= (1 + \sin \psi) / (1 - \sin \psi) \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

降伏関数においては、主応力表示となっており、それらは座標系に依存しない。Mohr-Coulomb の降伏関数 $f=0$ の面は剪断降伏に対応して、応力空間内三次元平面になる。一例として図-2.5 に角錐状の形状となるのを示す。 $f>0$ となる場合、剪断降伏になる。2つの強度定数 c と ϕ は三軸試験から得られる。

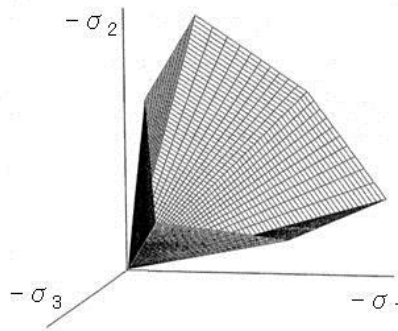


図 - 2.5 Mohr-Coulomb モデルの降伏面の例 ($c=0$ の場合)

解析モデルは弾完全塑性体を前提とし、各弾性定数と降伏関数だけを物性値として扱う。降伏関数 f は塑性ひずみ $\{\epsilon^p\}$ の関数を含まなく、降伏後降伏曲面の大きさや形状が変わらないと仮定する。この基準において、主応力は引張となる場合、適用できなくなるが、簡便のため、降伏面が一軸引張強度 σ^t までに延伸する。最小主応力が引張強度を超えると、下の式 2.5

$$f_t = \sigma_3 - \sigma^t \quad (2.5)$$

は $f_t > 0$ となり，引張破壊と判定し， σ_3 が 0 までに下がり，変形を続ける．岩石引張強度は圧裂試験によって得られ，その最大値は式 2.6 による求められる。

$$\sigma_{tmax} = c / \tan \varphi \quad (2.6)$$

また，Mohr-Coulomb 破壊基準を平面内のせん断力と直応力の関係に表現すると，式 2.7 となる．

$$\tau_f = c + \sigma_f \tan \varphi \quad (2.7)$$

σ_f ：破壊面上の垂直応力

τ_f ：せん断強度

c ：粘着力

φ ：せん断抵抗角もしくは内部摩擦角

岩石や土の破壊は，この式が成立するとき起こると考える．また降伏規準に中間主応力 σ_2 が含まれない特徴がある．必要となる材料物性の入力パラメータは，変形係数 E ，ポアソン比 ν ，単位体積重量 γ ，粘着力 c ，内部摩擦角 φ である．ただし，ダイレイタンシー角 ψ は，一般的に内部摩擦角 φ と関係付けられ地盤材料などを考慮して決定される．岩石三軸強度試験結果より破壊包絡線を描き（図 - 2.6），これらの特性値は設定できる．岩石のせん断強度は試験では直ちに得られなく，一軸圧縮強度と引張り強度の関係から間接的にせん断強度を知る方法が多く用いられている（図 - 2.7）．

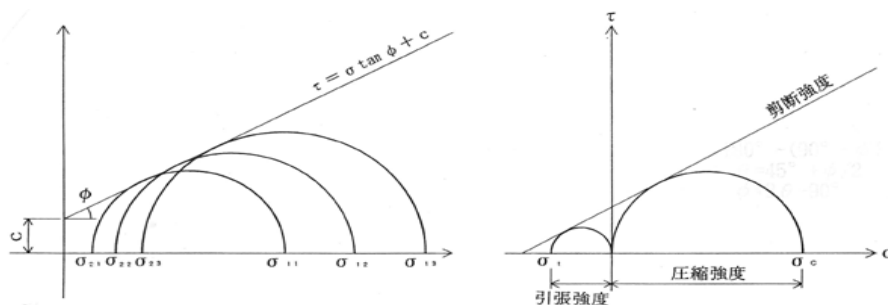


図 - 2.6 三軸圧縮試験，引っ張り試験

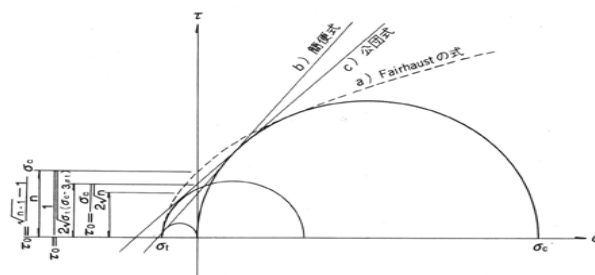


図 - 2.7 岩石のせん断強度の求め方

また，ここでは，破壊包絡線の形は砂等の土質材料と同じ直線近似することが多いが，硬い岩石の場合，曲線となることが多く，二次式の放物線式 (2.8) で表現できる(図-2.8)．

$$(\tau/\tau_R)^2 = 1 + \sigma/\sigma_t \quad (2.8)$$

τ_R, σ_t は，それぞれ破壊包絡線の τ 軸， σ 軸との切片であり，剪断強度と引張強度を示す．ただし，岩盤の地圧が比較的に小さい場合，岩石の挙動は一次式で十分表現できる．

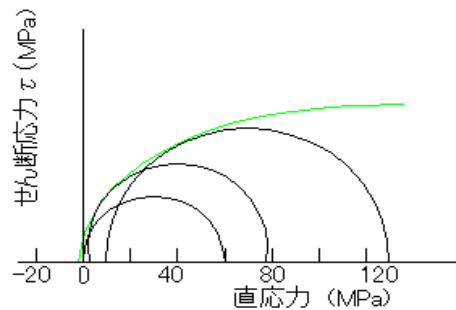


図 - 2.8 ひん岩供試体の三軸試験による破壊包絡線

Mohr-Coulomb モデルでは，引張応力は引張応力限界に達すると引張破壊が発生し，圧縮応力が圧縮応力限界に達するとせん断力破壊が発生すると判定する．モデルのパラメータとしての粘着力 c ，内部摩擦角度 ϕ ，ダイレイタンシー角 ψ は，定数であって，破壊に至っても変化しないと仮定している．本解析ではダイレイタンシー角 ψ は0としている．

本研究では，弾完全塑性モデルを取り入れ，有限差分法による解析を行うこととしている．

第3章 吹付けコンクリートの材齢を考慮した曲面切羽の有効性の比較解析

3.1 概要

直面切羽に対する曲面切羽の有効性については、第1章で紹介した既往研究より、数値解析と実験によって検討されている。しかし実施工での曲面切羽の採用に向けての検討という観点から考えると、既往研究では吹付けコンクリートの材齢変化を考慮していないという問題点が挙げられる。したがって、より実施工に近い条件での直面切羽に対する曲面切羽の有効性の検討を行うために、本章ではトンネル掘削時における吹付けコンクリートの材齢変化を考慮した数値解析を行った。

3.1.1 モデルの説明

本研究で使用した要素モデルはブリック要素、ケーブル要素、シェル要素を組み合わせ作成した。解析はモデルの幾何形状及び载荷方向の対称性を考慮し、1/2の部分について行う。高さ、半分幅、長さはそれぞれ221m、66m、198mとする。地山は弾完全塑性体でMohr-Coulombの破壊基準を適用した。トンネルの軸方向はY方向、鉛直方向はZ方向、評価する切羽面の所在するトンネル軸位置はY=60mである。トンネル部分のメッシュはY方向に1m、半径方向は0.6mの間隔とした。

なおトンネルの基本的な挙動を調べるため、モデルを単純化した。解析領域の設定について、トンネル掘削に伴う地山応力の変化は2D程度の範囲まで及ぶと言われているので、モデル領域の広さの設定は充分である。境界条件は、上面を地表面として自由面に、下面を鉛直変位固定、外周面境界を側方変位固定とした。初期応力は $\sigma_x : \sigma_y : \sigma_z = 0.5 : 0.5 : 1$ と設定した。掘削するトンネル形状は円形(D=12m)とした。切羽の曲率半径は8.0mとした。解析はFLAC3Dによる完全弾塑性解析を行った。本研究で使用する三次元数値解析モデルを図-3.1に示す。また、切羽付近のモデルを図-3.2に示す。

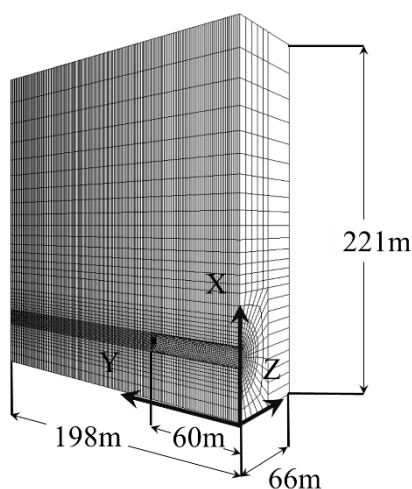


図 - 3.1 解析モデル

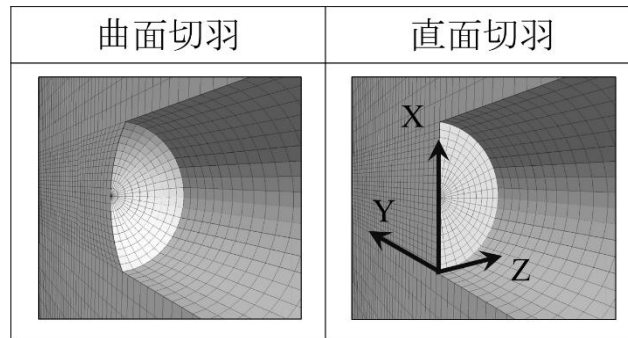


図 - 3.2 切羽付近モデル

3.1.2 解析条件

地山の物性値には、地山等級 CII・DII・E の 3 種類を採用した。表-3.1 に使用した物性値を示す。

表 - 3.1 地山物性値

| | 地山等級 | | |
|--------------------------------|------|------|-----|
| | CII | DII | E |
| 弾性係数 (MPa) | 1000 | 150 | 50 |
| 単位体積重量 (kN/m ³) | 23 | 20 | 20 |
| ポアソン比 | 0.3 | 0.35 | 0.4 |
| 粘着力 (kPa) | 1000 | 200 | 100 |
| 内部摩擦角 (°) | 40 | 30 | 30 |

支保部材は、鏡面は吹付けコンクリート、周面は鋼製支保工と吹付けコンクリートを合成部材とし、シェル要素としてモデル化した。合成部材の入力物性値は鋼製支保工と吹付コンクリートの両方の物性値から換算したものを使用した。モデル設定の簡便化のために、すべての地山等級で周面の支保は H-200、吹付け暑さ 20cm、鏡吹付け厚さ 10cm とした。また鏡吹付けの材齢依存のデータは高強度のものを使用した。

吹付けコンクリートの弾性係数は材齢と共に変化するが、材齢依存を考慮しないケースを case1 とする。また、実施工に基づき、吹付けコンクリートの弾性係数の材齢依存を考慮したケースを case2 とする。case1 で使用した物性値を表-3.2 に、case2 で使用した物性値を表-3.3・表-3.4 に示す。case2 の材齢依存の弾性係数の設定においては、トンネルを 1 日に 6m 掘削することを仮定とし、鏡面吹付けコンクリートは、材齢 0 時間のものを設定した。材齢対応強度の公式を式 3.1 及び図-3.3・図-3.4、圧縮強度と弾性係数の関係の公式を式 3.2 及び図-3.5 に示す。またトンネル掘削工法は、全断面工法で検討を行った。

本章では吹付けコンクリートの材齢変化を考慮した直面切羽に対する曲面切羽の有効性評価を行うとともに, case1 と case2 の曲面切羽の有効性の差を比較した. この比較により, 曲面切羽の有効性評価を数値解析で行う際, 吹付けコンクリートの弾性係数の材齢依存を考慮の必要があるのかどうかを検討した.

表 - 3.2 case1 支保部材

| | 合成1次支保 | 鏡面吹付 |
|--------------------------------|--------|------|
| 単位体積重量 (kN/m ³) | 25 | 25 |
| ポアソン比 | 0.2 | 0.35 |
| 弾性係数 (MPa) | 8100 | 4000 |

表 - 3.3 case2 支保部材

| | 合成1次支保 | 鏡面吹付 |
|--------------------------------|--------|------|
| 単位体積重量 (kN/m ³) | 25 | 25 |
| ポアソン比 | 0.2 | 0.35 |
| 弾性係数 (MPa) | 材齢設定値 | 400 |

表 - 3.4 case2 合成 1 次支保材齢対応弾性係数

| 材齢(時間) | 弾性係数(MPa) |
|---------|-----------|
| 4 | 4500 |
| 8 | 5900 |
| 12 | 6100 |
| 16 | 6200 |
| 20 | 6300 |
| 24 | 6600 |
| 28 | 7000 |
| 28～36 | 7300 |
| 36～44 | 7500 |
| 44～60 | 7700 |
| 60～76 | 7900 |
| 76～108 | 8000 |
| 108～140 | 8200 |
| 140～188 | 8500 |
| 188～240 | 8800 |

$$y_{(x \leq 6)} = 6.366e^{-1} \cdot \exp(3.722e^{-1} \cdot x)$$

$$y_{(x \geq 6)} = 6.366e^{-1} \cdot \exp(3.722e^{-1} \cdot x)$$

x : 材齢(h)

y : 強度(N/mm²)

} (3. 1)

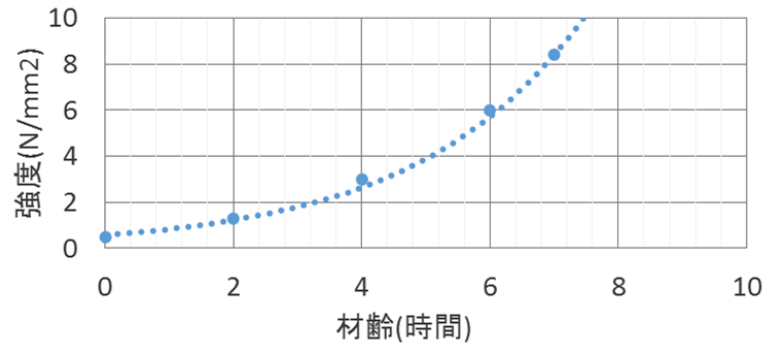


図 - 3.3 吹付けコンクリートの材齢と強度の関係 (0～6h)

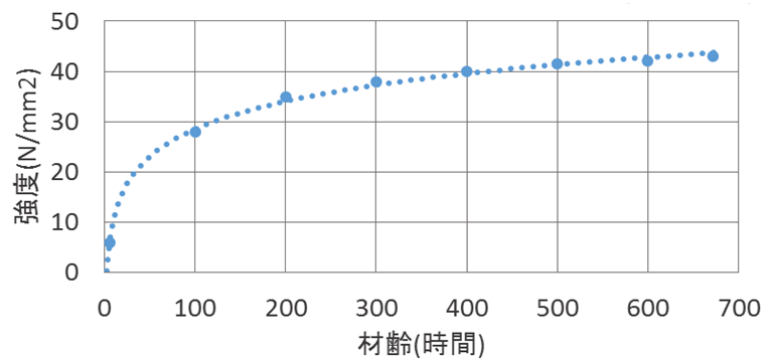


図 - 3.4 吹付けコンクリートの材齢と強度の関係 (6～672h)

$$y = 7.48 \cdot (1 - \exp(-2.629e^{-2} \cdot (x)))$$

x : 圧縮強度(N/mm²)

y : 見かけ静弾性係数(kN/mm²)

(3. 2)

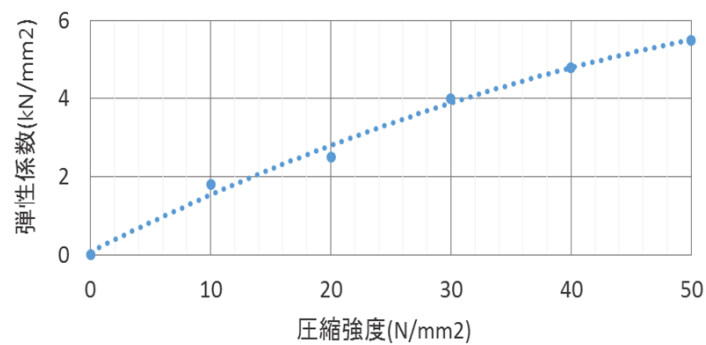


図 - 3.5 圧縮強度と弾性係数の関係

case2 の吹付けコンクリートの材齢設定の概念を図-3.6 に示す。なお、吹付けコンクリートの材齢においては表-3.4 に示したとおりである。

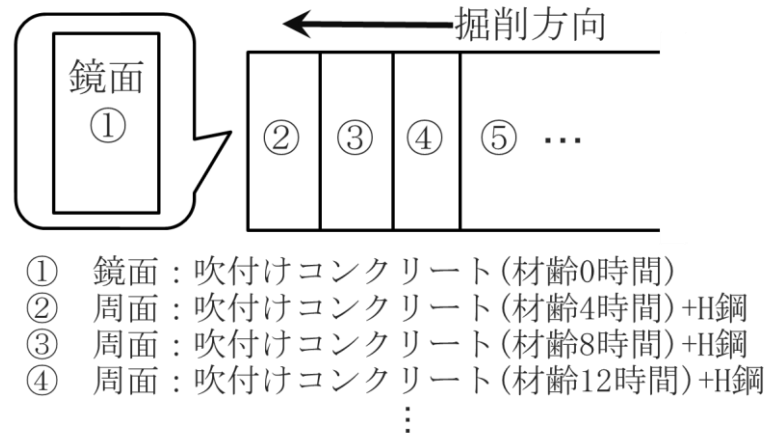


図 - 3.6 吹付けコンクリートの材齢設定の概念

また、トンネル逐次掘削解析終了時である、60m 掘削後の鏡面吹付けコンクリート及び合成一次支保の弾性係数の区分を図-3.7 に示す。

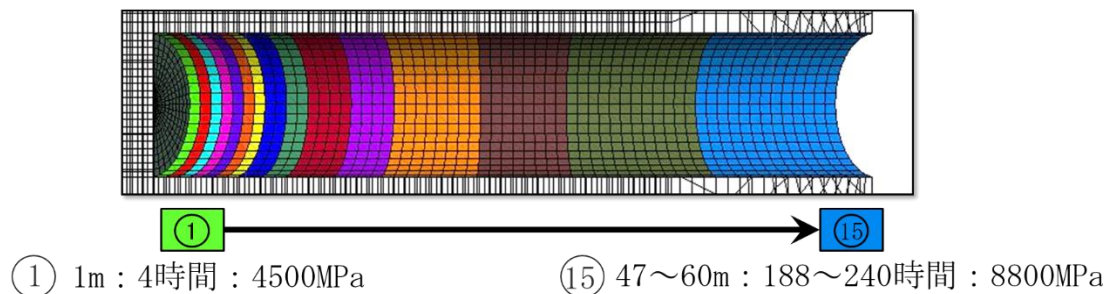


図 - 3.7 60m 掘削後の鏡面吹付けコンクリート及び合成一次支保の弾性係数の区分

3.1.3 解析方法

- ① 初期状態として、掘削前の初期応力状態にあると仮定する。
- ② 1m のトンネルを掘削する。
- ③ 掘削した直後に切羽 1m 手前から切羽まで鋼製支保工及び吹付けコンクリートを設置。
- ④ 鏡面吹付けコンクリートを設置する。
- ⑤ 解析を繰り返す。

3.2 地山等級CⅡの解析結果

解析結果を示す。ボルトの施工は省略している。

3.2.1 変位置

図 - 3.8 に切羽押出し量を示す。

切羽の押出し量は，case1，case2 とともに直面切羽に比べて曲面切羽の方が小さくなり，曲面切羽の有効性が確認できる。変位置が大きくなる鏡面中心部で最も直面切羽と曲面切羽の差が大きくなった。鏡面中心部で直面切羽と曲面切羽の変位置の差を比較すると，case1 では7mm，case2 では7.5mm である。

よって，鏡吹付けの初期強度(剛性)を確保することは重要である。

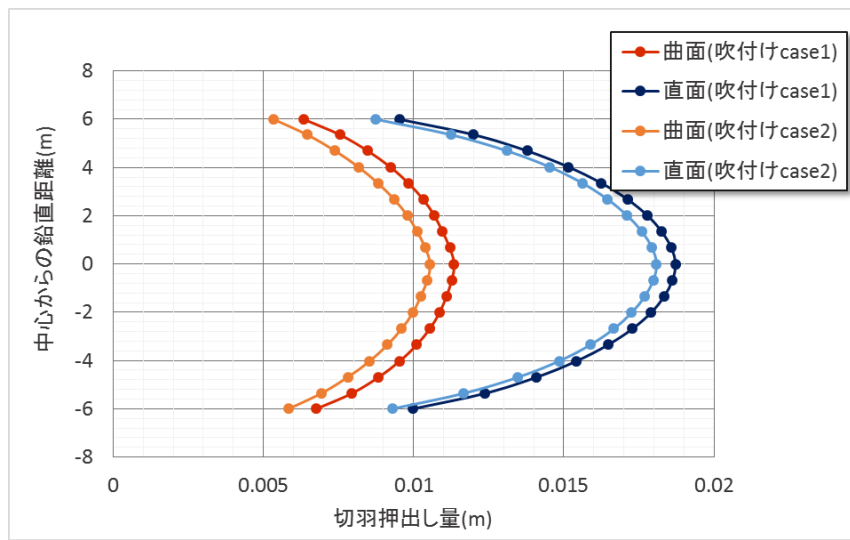


図 - 3.8 切羽押出し量

図-3.9 に天端沈下量を示す。

天端沈下量は，切羽天端部においては case1，case2 とともに直面切羽に比べて曲面切羽の方が沈下量は大きい。また収束変位においては，case1 は直面切羽に比べて曲面切羽の方が沈下量は大きいものの，case2 は直面切羽と曲面切羽の沈下量は同じである。

case1 では直面切羽の方が天端沈下量においては有効性が大きいという結果であったが，case2 では曲面切羽に対する直面切羽の有効性は小さくなる。

よって，吹付けコンクリートの設定の違いによる曲面切羽の有効性にはごくわずかな差が生じる。

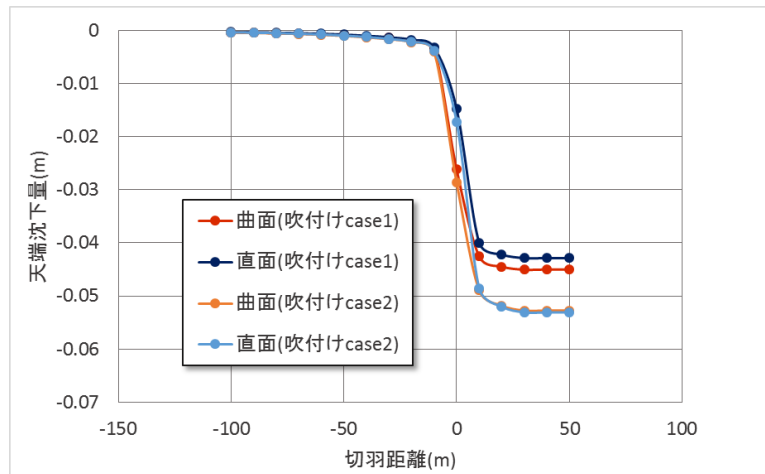


図 - 3.9 天端沈下量

3.2.2 塑性領域

図-3.10 に塑性領域図を示す。

塑性領域は、case1, case2 とともに直面切羽に鏡面において引張破壊が見られる。この部分は施工中剥落の恐れのある部分と考える。この原因として、直面切羽は鏡吹付コンクリートによる拘束力が曲面切羽に比べ小さかったことが考えられる。

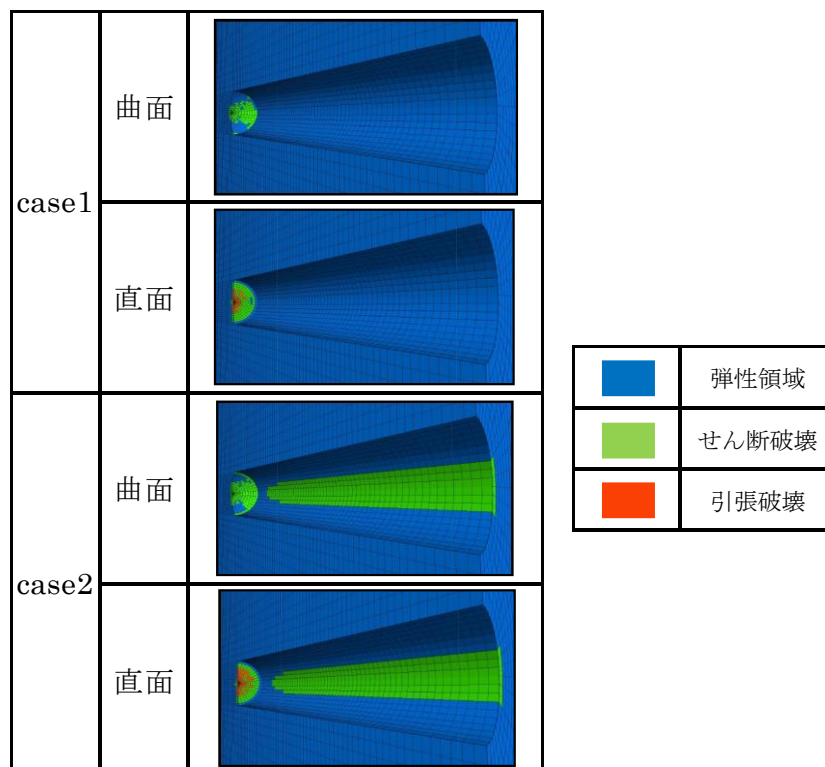


図 - 3.10 塑性領域図

case2 では周面の吹付けコンクリートの弾性係数の時間変化の影響より、鏡面だけではなく周面にも塑性領域が発生している。case2 の結果より実施工では周面への配慮も必要になることが分かるが、吹付けコンクリートの設定の違いによる曲面切羽の有効性の大きな差は生じない。

3.3 地山等級DⅡの解析結果

解析結果を示す。ボルトの施工は省略している。

3.3.1 変位量

図 - 3.11 に切羽押出し量を示す。

切羽の押出し量は、case1、case2 とともに直面切羽に比べて曲面切羽の方が小さくなり、曲面切羽の有効性が確認できる。変位量が大きくなる鏡面中心部で最も直面切羽と曲面切羽の差が大きくなった。鏡面中心部で直面切羽と曲面切羽の変位量の差を比較すると、case1 を 1 とすると case2 は 0.80 であり、case2 の方が曲面切羽の有効性は小さくなる。

よって、低強度地山であるほど、鏡吹付けの初期強度(剛性)を確保することは重要である。

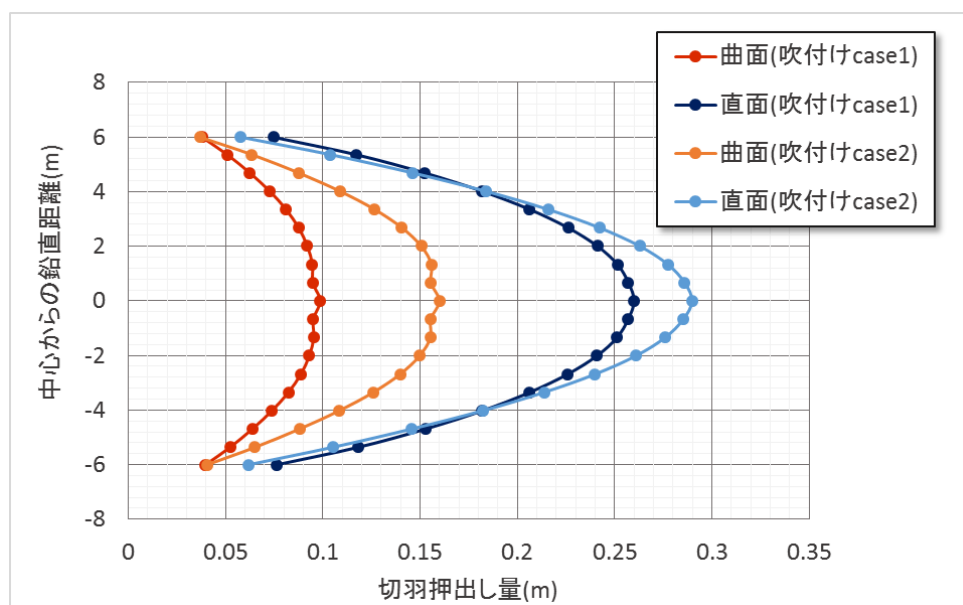


図 - 3.11 切羽押出し量

図-3.12 に天端沈下量を示す。

天端沈下量は、切羽天端部においては case1 では直面切羽、case2 では曲面切羽の方が沈下量は大きい。直面切羽と曲面切羽の沈下量の差を比較すると、case1 を 1 とすると、case2 は 2.89 である。

case1 では曲面切羽の方が天端沈下量においては有効性が大きいという結果であったが、case2 では曲面切羽の有効性は小さくなり、直面切羽の方が有効性は大きい。

よって、吹付けコンクリートの設定の違いによる曲面切羽の有効性には差が生じる。

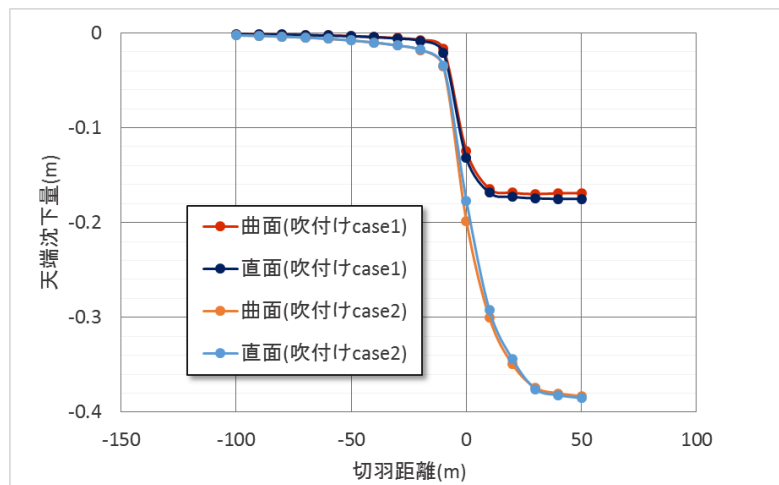


図 - 3.12 天端沈下量

3.3.2 塑性領域

図-3.13 に塑性領域図を示す。

塑性領域は、case1、case2 とともに直面切羽に鏡面において引張破壊が見られる。この部分は施工中剥落の恐れのある部分と考える。この原因として、直面切羽は鏡吹付コンクリートによる拘束力が曲面切羽に比べ小さかったことが考えられる。また、case1 よりも case2 の方が直面切羽の引張破壊領域は狭い。case1 での引張破壊はでの鏡面と周面の吹付けコンクリートの弾性係数の大きさの差から生じていることが考えられる。

周面の塑性領域において、case2 では周面の吹付けコンクリートの弾性係数の時間変化の影響より、case1 よりも周面の塑性領域が広域になっている。また、case1 では直面切羽よりも曲面切羽の方が広域であったが、case2 では直面切羽と曲面切羽に差はない。

よって、周面の塑性領域において、吹付けコンクリートの設定の違いによる曲面切羽の有効性には差が生じる。

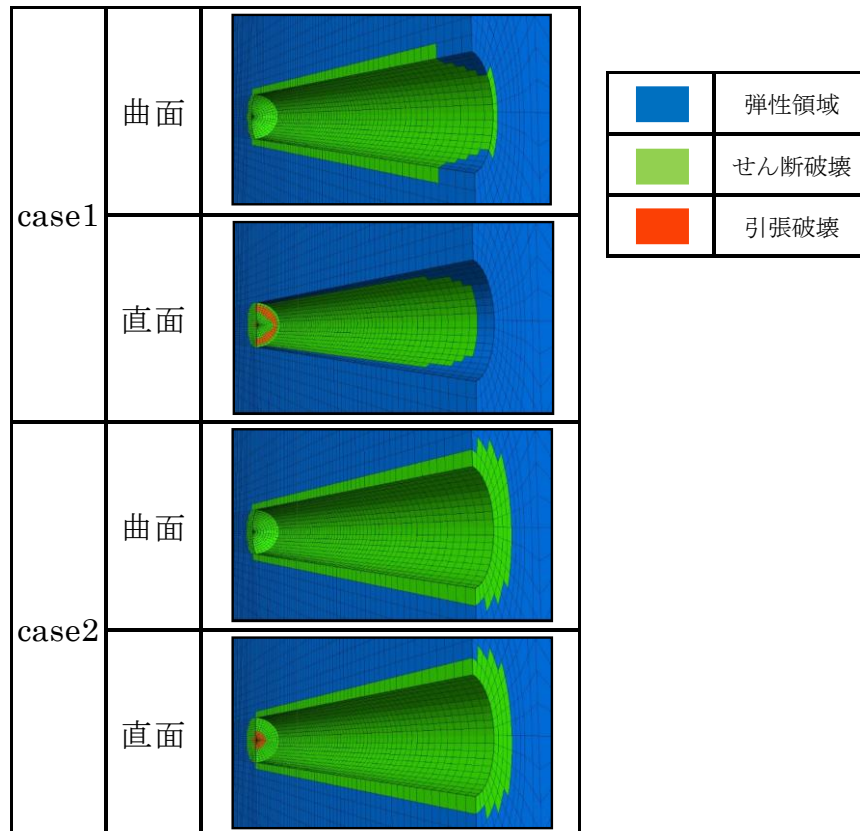


図 - 3.13 塑性領域図

3.4 地山等級 E の解析結果

解析結果を示す。ボルトの施工はなしである。

3.4.1 変位量

図 - 3.14 に切羽押出し量を示す。

切羽の押出し量は、case1, case2 とともに直面切羽に比べて曲面切羽の方が小さくなり、曲面切羽の有効性が確認できる。変位量が大きくなる鏡面中心部で最も直面切羽と曲面切羽の差が大きくなった。鏡面中心部で直面切羽と曲面切羽の変位量の差を比較すると、case1 を 1 とすると、case2 は 0.83 であり、case2 の方が曲面切羽の有効性は小さい。よって、吹付けコンクリートの設定の違いによる曲面切羽の有効性の差は生じる。

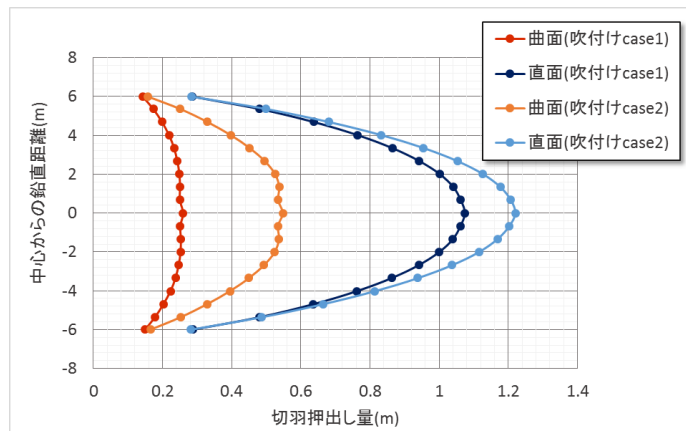


図 - 3.14 切羽押出し量

図-3.15 に天端沈下量を示す。

天端沈下量は、case1, case2 とともに直面前切羽に比べ曲面切羽の方が沈下量は小さく、曲面切羽の有効性が確認できる。切羽天端部の直面前切羽と曲面切羽の沈下量差を比較すると、case1 を 1 とすると、case2 は 0.16 であり、case2 の方が曲面切羽の有効性は小さい。

よって、吹付けコンクリートの設定の違いによる曲面切羽の有効性には差が生じる。

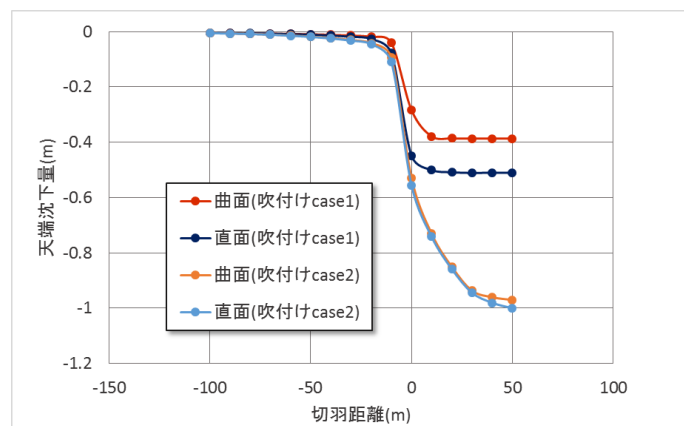


図 - 3.15 天端沈下量

3.4.2 塑性領域

図-3.16 に塑性領域図を示す。

塑性領域は、case1, case2 とともに直面前切羽に鏡面において引張破壊が見られる。この部分は施工中剥落の恐れのある部分と考える。この原因として、直面前切羽は鏡吹付コンクリートによる拘束力が曲面切羽に比べ小さかったことが考えられる。

周面の塑性領域において、case2 では周面の吹付けコンクリートの弾性係数の時間変化の

影響より，case1 よりも周面の塑性領域が広域になっている．また，case1 では直面切羽よりも曲面切羽の方が広域であったが，case2 では直面切羽と曲面切羽に大きな差はない．

よって，周面の塑性領域において，吹付けコンクリートの設定の違いによる曲面切羽の有効性には差が生じる．

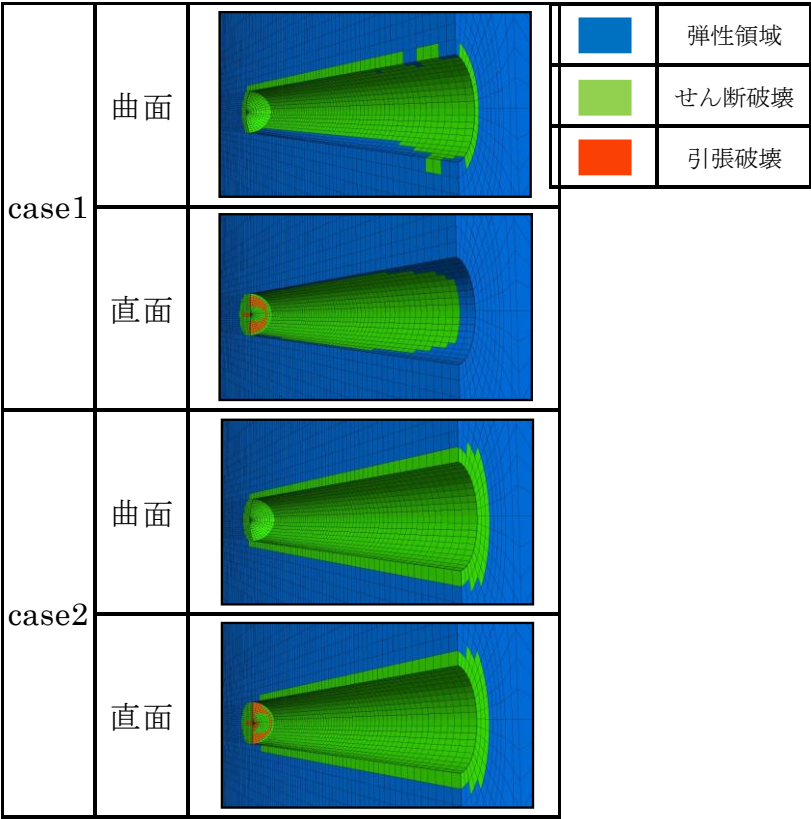


図 - 3.16 塑性領域図

3.5 まとめ

本章では吹付けコンクリートの材齢変化を考慮した直面切羽に対する曲面切羽の有効性評価を地山等級別で検討した．得られた結果をまとめると以下ようになる．

- ① 地山等級 CII の地山の場合，変位量において case1 に比べて case2 では，切羽押出しは直面切羽に対する曲面切羽の有効性に変化は見られなかった．天端沈下は曲面切羽に対する直面切羽の有効性が小さくなったものの，若干の差であった．また塑性領域においては，直面切羽に対する曲面切羽の有効性に変化は見られなかった．

よって，数値解析で地山等級 CII においては，直面切羽に対する曲面切羽の有効性の検討をする際に，吹付けコンクリートを数値一定の簡略化で設定しても大きな支障はないと考えられる．

- ② 地山等級 **DⅡ** の地山の場合、変位量において **case1** に比べて **case2** では、切羽押出し及び天端沈下では直面切羽に対する曲面切羽の有効性が小さくなった。また塑性領域においては、塑性領域及び引張破壊領域においての直面切羽に対する曲面切羽の有効性に差が見られた。

よって、数値解析で地山等級 **DⅡ** においては、直面切羽に対する曲面切羽の有効性の検討をする際に、実施工に基づいて吹付けコンクリートの材齢対応弾性係数を考慮した設定が望ましいと考えられる。

- ③ 地山等級 **E** の地山の場合、変位量において **case1** に比べて **case2** では、切羽押出し及び天端沈下では直面切羽に対する曲面切羽の有効性が小さくなった。また塑性領域においては、直面切羽に対する曲面切羽の有効性が大きくなった。

よって、数値解析で地山等級 **E** においては、直面切羽に対する曲面切羽の有効性の検討をする際に、実施工に基づいて吹付けコンクリートの材齢対応弾性係数を考慮した設定が望ましいと考えられる。

以上より、直面切羽に対する曲面切羽の安定効果を検討する際、地山等級 **CⅡ** 程度の弾性係数が大きい地山では、地山自体の自立性より、吹付けコンクリートの弾性係数の値による地山挙動の大きな違いは見られないため、吹付けコンクリートの簡略式設定でも支障はないと考えられる。また、地山等級 **DⅡ** 程度以下の弾性係数が小さい地山では、吹付けコンクリートの補強効果が地山挙動に大きく関係してくるため、吹付けコンクリートの材齢対応弾性係数を考慮した設定が望ましいと考えられる。

第4章 鏡面ボルト設置と曲面切羽の有効性の比較解析

4.1 概要

実施工では、切羽安定化対策として、鏡面ボルトを設置するケースが多い。今回検討対象としている曲面切羽を採用した際の切羽安定効果と、鏡面ボルトの切羽安定効果を比較することにより、曲面切羽の有効性の検討を行った。比較対象としては、鏡面ボルトを設置した直面前切羽と、鏡ボルトを設置しない曲面切羽とした。トンネル掘削工法においては、どちらも全断面工法で検討を行った。なお、鏡ボルト自体の切羽安定効果の確認のため、鏡ボルトを設置しない直面前切羽も比較対象に加えた。

4.1.1 モデルの説明

地山のモデルや物性値は第3章同様である。鏡面吹付けコンクリート及び合成一次支保の物性値においては、第3章で検討した case2 の、実施工に基づいて弾性係数を材齢設定したものを採用した。詳細は第3章にて提示した。

図-4.1 に鏡ボルトの配置を示す。実際の施工においては、工事の安全上、高い位置からの地山崩落を懸念しているため、通常は鏡面の上半に同心円状に配置することが多いが、ここでは、簡便のため、直線状に二列に配置した。ボルトは FLAC3D の構成要素として用意されている Cable 要素でモデル化した。長さ 12.5m、外形 76mm、内径 60mm のボルトを円周上 2 列の 14 本/断面に配置し、ラップ長は 9m とした。表-4.1 に使用したボルトの物性値を示す。X、Z 軸方向において同列に配置しているボルト間の距離は 2m とする。

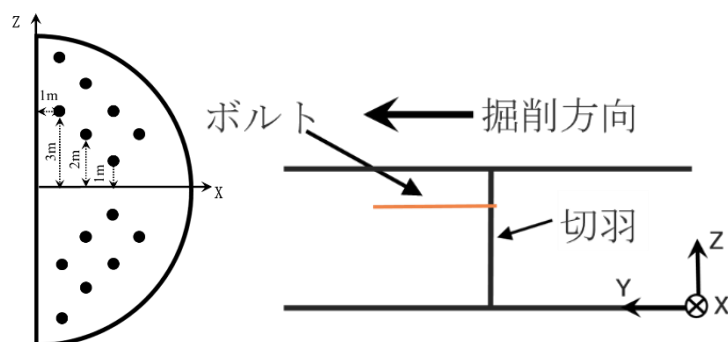


図 - 4.1 鏡面ボルトの配置

表 - 4.1 鏡面ボルト物性値

| 弾性係数 (GPa) | 単位体積重量 (kN/m ³) | 断面積 (m ²) | グラウトせん断力 (MN/m ²) | グラウト付着強度 (kN/m ²) |
|---------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 205 | 17.5 | 5.39×10^{-4} | 2.26×10^9 | 1.00×10^2 |

4.1.2 解析方法

- (A) 初期状態として、切羽までの施工が完了した状態にあると仮定する.
- (B) 1m のトンネルを掘削する.
- (C) 掘削した直後に切羽 1m 手前から切羽まで鋼製支保工及び吹付けコンクリートを設置.
- (D) 鏡面吹付けコンクリートを設置する.
- (E) 鏡面ボルト $L=12.5\text{m}$ を施工 (9m ごと).
- (F) 解析を繰り返す.

4.2 地山等級 CII の解析結果

解析結果を示す. 曲面切羽においてはボルトの施工は省略している.

4.2.1 変位量

図 - 4.2 に切羽押出し量を示す.

切羽の押出し量において、鏡面中心部の変位量を比較すると、鏡面ボルト有りの直面切羽を 1 とすると曲面切羽は 0.61 であり、鏡面ボルトの大きな抑制効果は見られず、曲面切羽の方が変位抑制効果は大きいことがわかる. 検討した地山の弾性係数が高いことから、鏡面ボルトの変位抑制力が十分に発揮されなかったと考えられる.

よって、曲面切羽には鏡面ボルト設置以上の有効性があることがわかる.

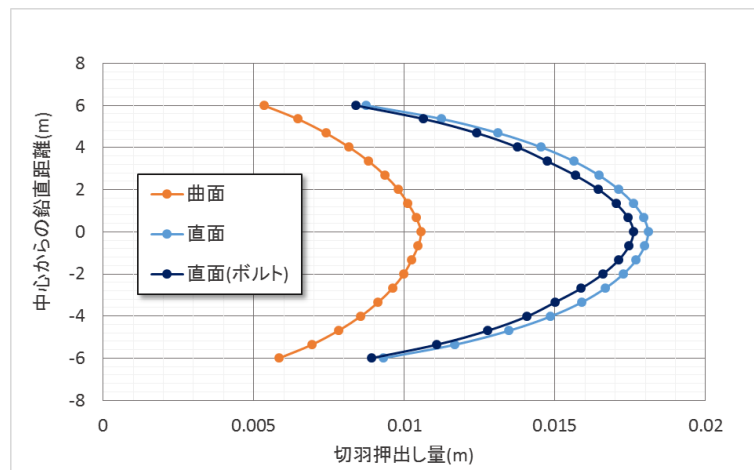


図 - 4.2 切羽押出し量

4.2.2 塑性領域

図-4.3 に塑性領域図を示す.

鏡面において、ボルトを施工することにより塑性領域が曲面切羽よりも小さくなってい

る。しかしボルトを施工したケースにおいても鏡面には引張破壊が見られ、この部分は施工中剥落の恐れのある部分と考えられる。

よって、引張破壊の点から考えると、曲面切羽には鏡面ボルト設置以上の有効性があることがわかる。

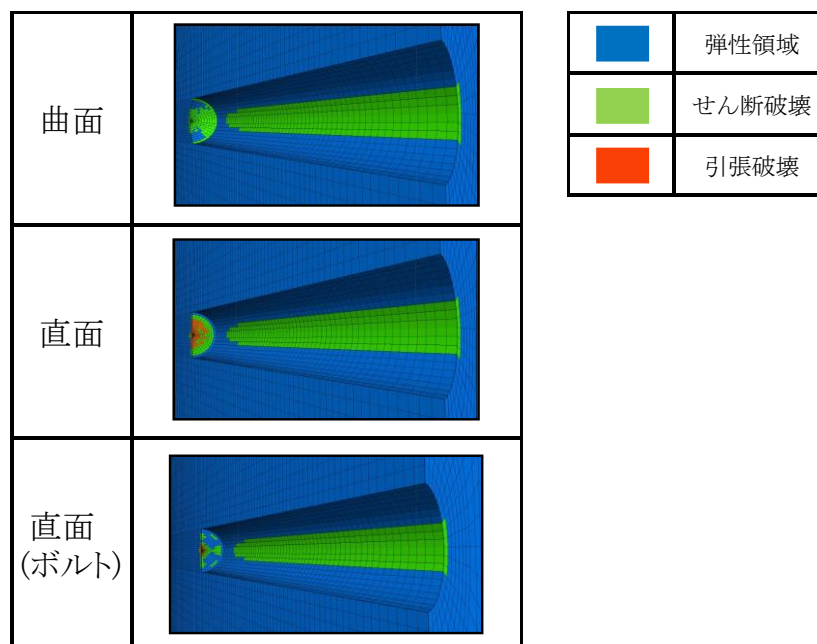


図 - 4.3 塑性領域図

4.3 地山等級 D II の解析結果

解析結果を示す。曲面切羽においてはボルトの施工は省略している。

4.3.1 変位量

図 - 4.4 に切羽押出し量を示す。

切羽の押出し量において、鏡面中心部の変位量を比較すると、鏡面ボルト有りの直面切羽を 1 とすると曲面切羽は 0.85 であり、曲面切羽の方が変位抑制効果は大きいことがわかる。また、鏡面中心部以外では、曲面切羽と鏡面ボルト有りの直面切羽の変位量に大きな差は生じない。よって、曲面切羽には鏡面ボルト設置以上の有効性があることがわかる。

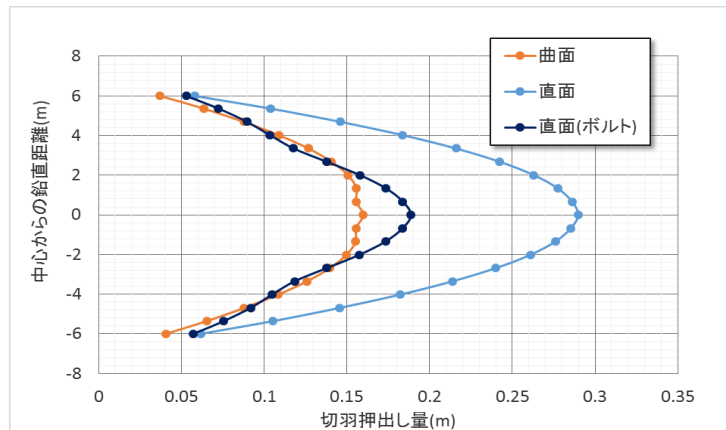


図 - 4.4 切羽押し出し量

4.3.2 塑性領域

図-4.5 に塑性領域図を示す。

鏡面の引張破壊において、ボルトを施工することにより領域は小さくなるものの、中心に一部発生しており、この部分は施工中剥落の恐れのある部分と考えられる。

よって、引張破壊の点から考えると、曲面切羽には鏡面ボルト設置以上の有効性があることがわかる。

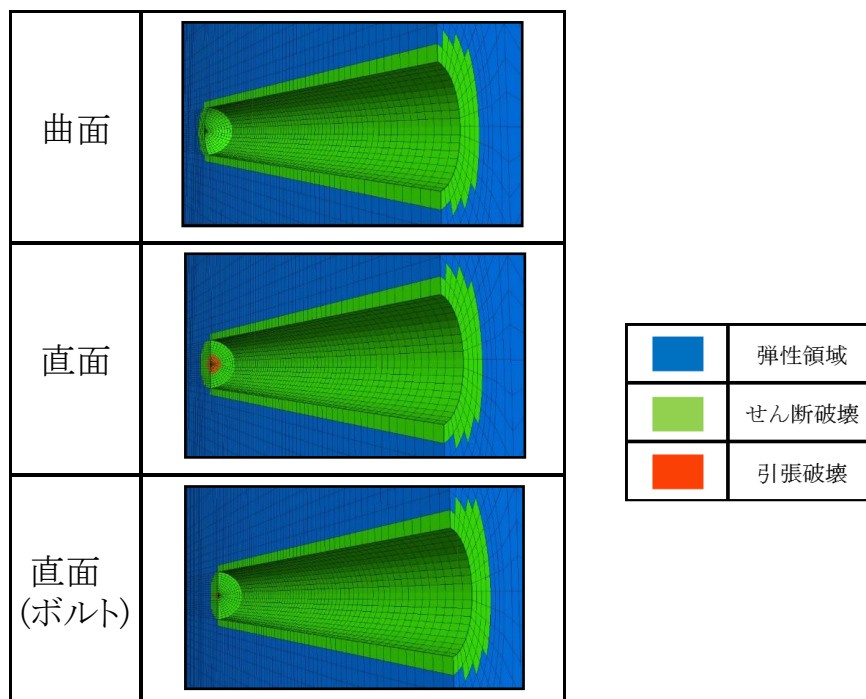


図 - 4.5 塑性領域図

4.4 地山等級 E の解析結果

解析結果を示す。曲面切羽においてはボルトの施工は省略している。

4.4.1 変位量

図 - 4.6 に切羽押出し量を示す。

切羽の押出し量において、鏡面中心部の変位量を比較すると、鏡面ボルト有りの直面切羽を 1 とすると曲面切羽は 0.85 であり、曲面切羽の方が変位抑制効果は大きいことがわかる。また、鏡面中心部以外では、曲面切羽と鏡面ボルト有りの直面切羽の変位量に大きな差は生じない。

よって、曲面切羽には鏡面ボルト設置以上の有効性があることがわかる。

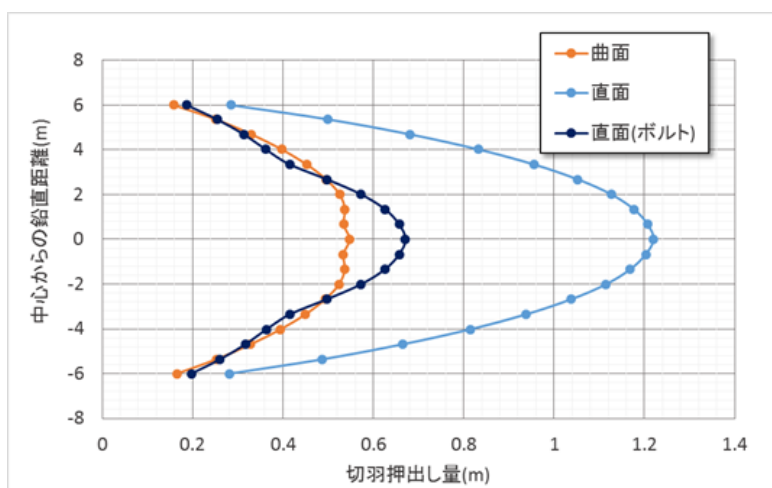


図 - 4.6 切羽押出し量

4.4.2 塑性領域

図-4.7 に塑性領域図を示す。

鏡面の引張破壊において、ボルトを施工することにより領域は小さくなるものの、中心に一部発生しており、この部分は施工中剥落の恐れのある部分と考えられる。

よって、引張破壊領域の点から考えると、曲面切羽には鏡面ボルト設置以上の有効性があることがわかる。

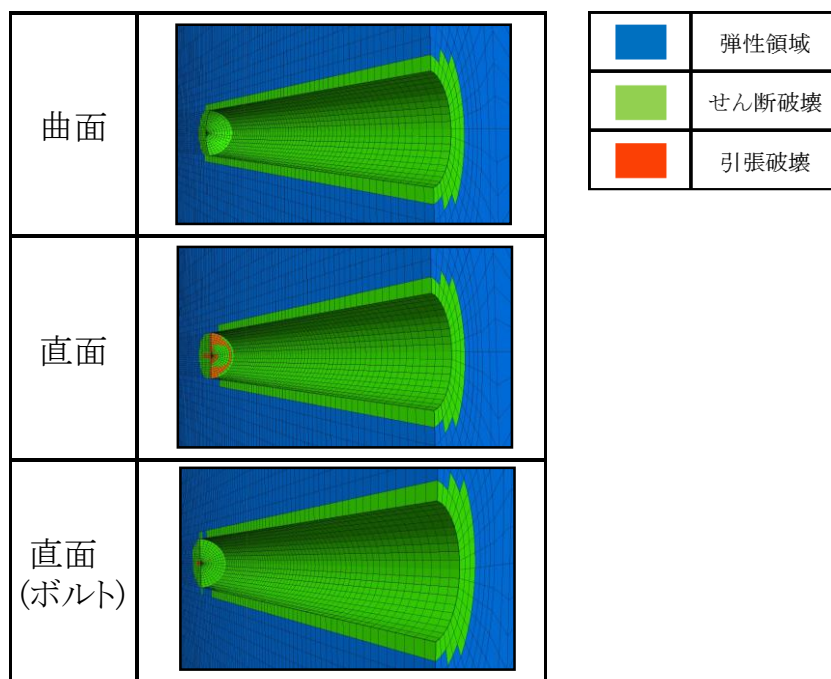


図 - 4.7 塑性領域図

4.5 まとめ

本章では実施工で採用例の多い，トンネル切羽に鏡ボルトを設置する切羽安定化対策に対する，曲面切羽の有効性評価を地山等級別で検討した．得られた結果をまとめると以下のようになる．

- ① 地山等級 CⅡ の地山の場合，切羽押出し量において，鏡面ボルトよりも曲面切羽の方が変位抑制効果は高い．また塑性領域では，曲面切羽よりも鏡面ボルトの方が鏡面内の塑性領域縮小効果が見られるが，鏡面ボルト設置時には曲面切羽には発生しない鏡面に引張破壊が見られる．この部分は施工中剥落の恐れのある部分と考えられる．従って，塑性領域においては引張破壊を重視し，鏡面ボルトよりも曲面切羽の方が有効性は高い．

よって，地山等級 CⅡ においては，鏡面ボルトを設置するよりも，曲面切羽で施工を行う方が施工時の地山の安定効果において有効性が高いと考えられる．

- ② 地山等級 DⅡ の地山の場合，切羽押出し量において，鏡面中心部付近において，鏡ボルトよりも曲面切羽の方が変位抑制効果は高い．また塑性領域において，鏡面ボルト設置時には，曲面切羽には発生しない鏡面に引張破壊が見られ，この部分は施

工中剥落の恐れのある部分と考えられる。従って、塑性領域では鏡ボルトよりも曲面切羽の方が有効性は高い。

よって、地山等級 **DⅡ** においては、鏡面ボルトを設置するよりも、曲面切羽で施工を行う方が施工時の地山の安定効果において有効性が高いと考えられる。

- ③ 地山等級 **E** の地山の場合、切羽押出し量において、鏡面中心部付近において、鏡ボルトよりも曲面切羽の方が変位抑制効果は高い。また塑性領域において、鏡面ボルト設置時には、曲面切羽には発生しない鏡面に引張破壊が見られ、この部分は施工中剥落の恐れのある部分と考えられる。従って、塑性領域では鏡面ボルトよりも曲面切羽の方が有効性は高い。

よって、地山等級 **E** においては、鏡面ボルトを設置するよりも、曲面切羽で施工を行う方が施工時の地山の安定効果において有効性が高いと考えられる。

以上より、地山物性値に関わらず実施工で打設されている鏡面ボルトの支保効果よりも、曲面切羽の安定効果の方が大きく、有効性が高いことが分かる。
ただし、有効性の差は大きなものではなく、比較観点においては同程度の有効性とも言える。

第5章 ベンチカット工法と曲面切羽の有効性の比較解析

5.1 概要

実施工では、切羽安定化対策として部分断面掘削工法のうちのベンチカット工法が一般的な工法となっている。今回検討対象としている曲面切羽を採用した際の全断面工法における切羽安定効果と、直面切羽のベンチカット工法の切羽安定効果を比較することにより、曲面切羽の有効性の検討を行った。なお、ベンチカット工法自体の切羽安定効果の確認のため、直面切羽の全断面工法も比較対象に加えた。

5.1.1 モデルの説明

地山のモデルや物性値は第3章同様である。吹付けコンクリートにおいては、第3章で検討した case2 の実施工に基づいて弾性係数を材齢設定したものを採用した。詳細は3章にて提示した。

ベンチカット工法においては、ベンチ長 5m とした。また、解析ステップは、上半掘削・下半掘削を交互に繰り返し、上半切羽が 60m 進むまで掘削を行う。

5.1.2 解析方法

- (a) 初期状態として、切羽までの施工が完了した状態にあると仮定する。
- (b) トンネルの上半を 1m ずつ 7m まで掘削する。
- (c) 下半を 1m ずつ 2m 掘削する。
- (d) 上半を 1m ずつ 2m 掘削する。

～(c)・(d)を上半切羽が 60m に達するまで繰り返す～

なお、合成一次支保及び鏡面吹付けコンクリートの解析サイクルは、前章と同様である。

5.2 地山等級 CII の解析結果

解析結果を示す。曲面切羽においては全断面工法である。

5.2.1 変位量

図 - 5.1 に切羽押出し量を示す。

切羽の押出し量において、全断面では鏡面中心部が最大になっているのに対し、ベンチ設置ケースでは上半に切羽の押出しが集中している。最大変位は曲面切羽で 10.5mm、ベンチカット工法では 13.0mm であり、ベンチカット工法の最大変位を 1 とすると、曲面切羽の最大変位は 0.81 となり、曲面切羽の方が、切羽押出し量が抑制された。

よって、曲面切羽にはベンチカット工法以上の有効性があることがわかる。

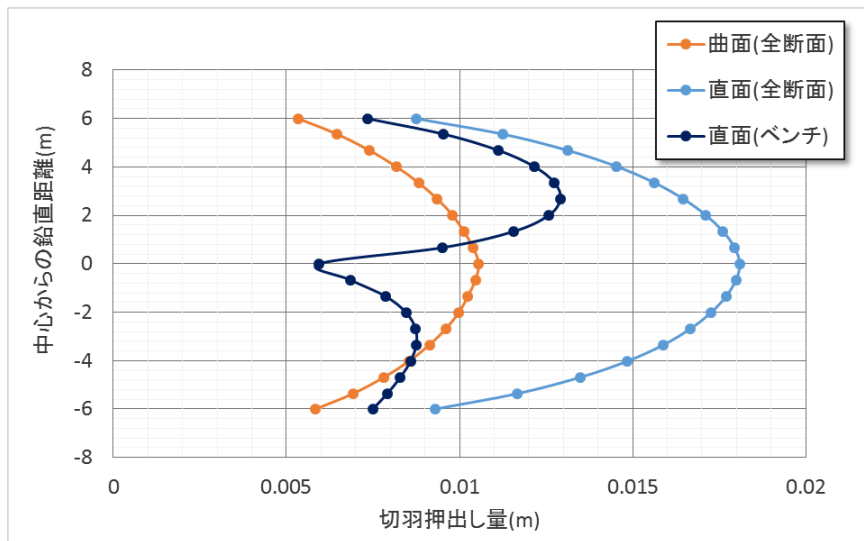


図 - 5.1 切羽押し出し量

図 - 5.2 に天端沈下量を示す。

天端沈下量において、収束変位に差はないが、切羽部では曲面切羽よりもベンチカット工法の方が、沈下量が抑制されている。

よって、天端沈下量においてはベンチカット工法と比べて、曲面切羽の有効性は見られない。

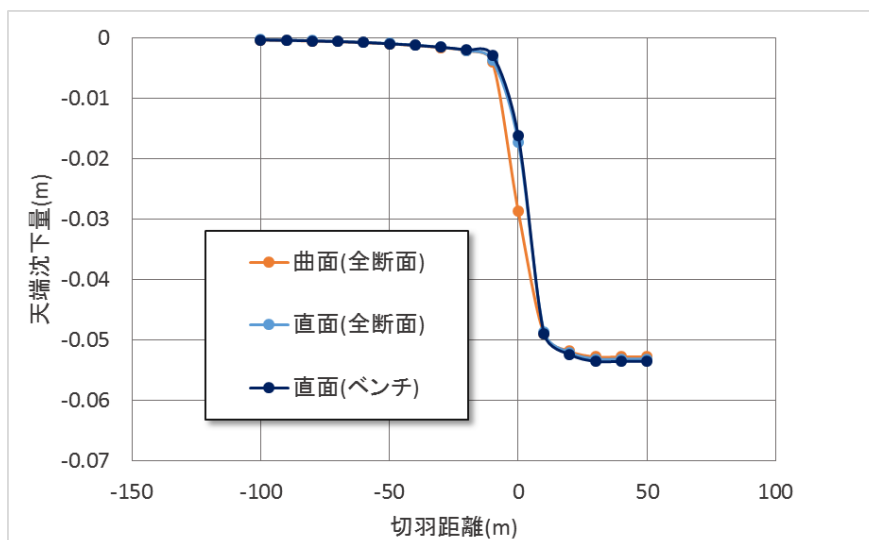


図 - 5.2 天端沈下量

5.2.2 塑性領域

図-5.3 に塑性領域図を示す。

鏡面において、直面切羽を全断面工法からベンチカット工法にすることで、切羽上半の引張り破壊がせん断破壊に変わったが、切羽下半に引張り破壊は集中した。この部分は施工中剥落の恐れのある部分と考えられる。曲面切羽は鏡面に弾性領域も見られ、また引張り破壊は発生しない。

また、ベンチカット工法においては、天端に所々引張破壊領域が見られた。

よって、曲面切羽にはベンチカット工法以上の有効性があることがわかる。

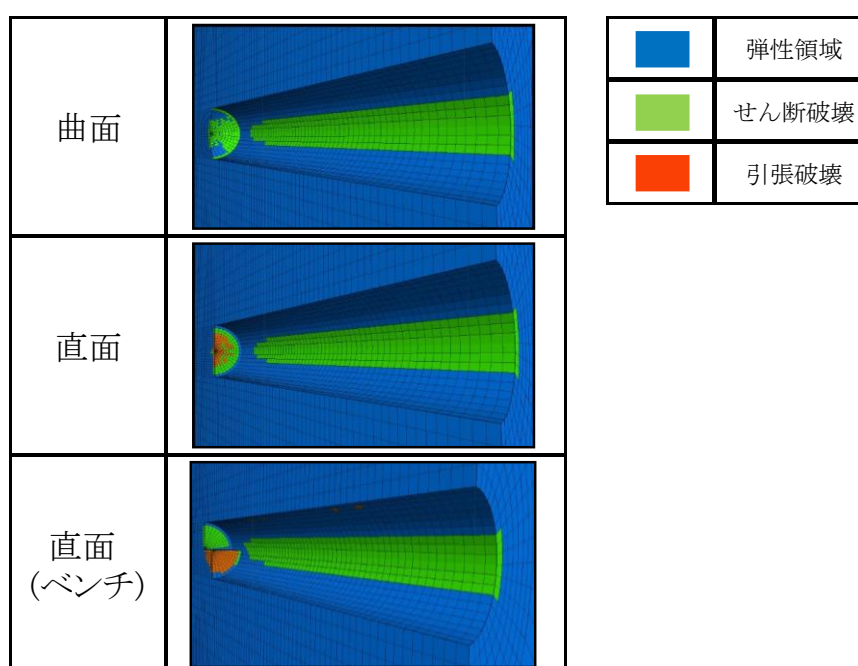


図 - 5.3 塑性領域図

5.2.3 主応力

図-5.4 に主応力の流れを示す。図中の“アーチアクション”の青線は、切羽付近の主応力の流れをトレースしたものである。掘削により応力が解放されると 3 次元的な応力再配分の結果、切羽直近のアーチアクションの流れから取り残された応力が解放された領域(以下、緩み領域)が形成されることがある。曲面切羽には緩み領域は生じないが、ベンチカット工法においては切羽上半に若干の緩み領域が確認できる。緩み領域は崩壊が生じる可能性が高いものと考えられている。

よって、曲面切羽にはベンチカット工法以上の有効性があることがわかる。

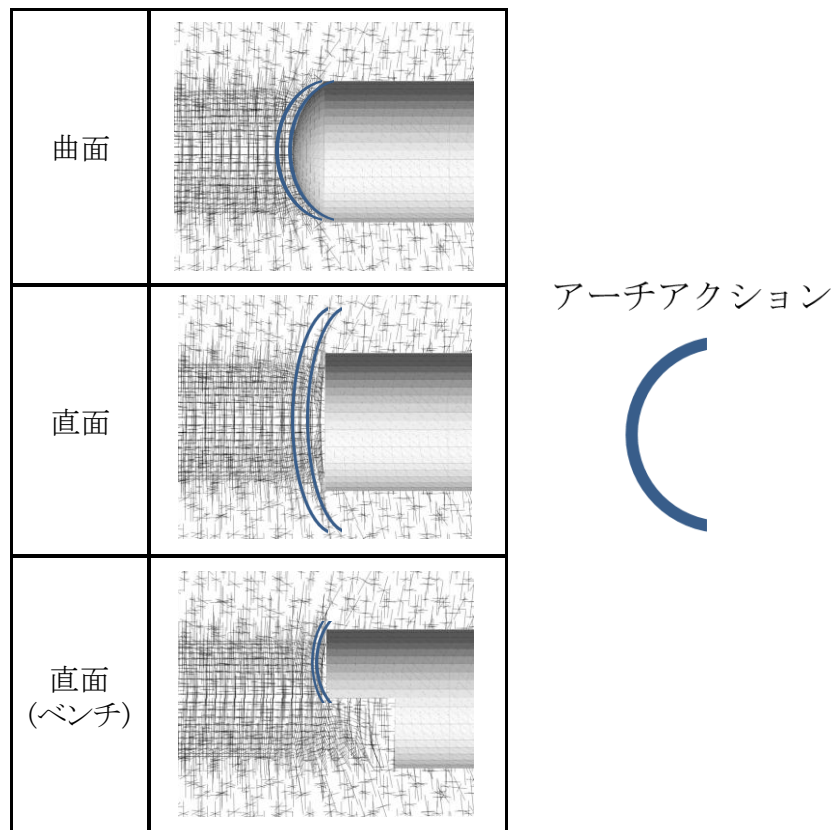


図 - 5.4 主応力の流れ

5.3 地山等級DⅡの解析結果

解析結果を示す。曲面切羽においては全断面工法である。

5.3.1 変位量

図 - 5.5 に切羽押出し量を示す。

切羽の押出し量において、全断面では鏡面中心部が最大になっているのに対し、ベンチ設置ケースでは上半に切羽の押出しが集中している。最大変位は曲面切羽で 16.0cm、ベンチカット工法では 24.4cm であり、ベンチカット工法の最大変位を 1 とすると、曲面切羽の最大変位は 0.66 となり、曲面切羽の方が、切羽押出し量が抑制された。

よって、曲面切羽にはベンチカット工法以上の有効性があることがわかる。

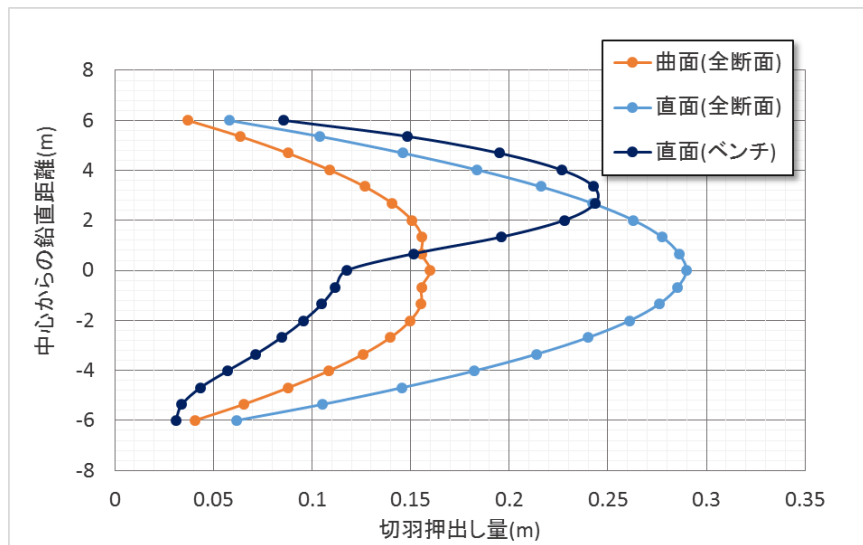


図 - 5.5 切羽押出し量

図 - 5.6 に天端沈下量を示す。

天端沈下量において、切羽部から坑口にかけて、ベンチカット工法よりも、曲面切羽の方が、沈下量が抑制されている。

よって、曲面切羽にはベンチカット工法以上の有効性があることがわかる。

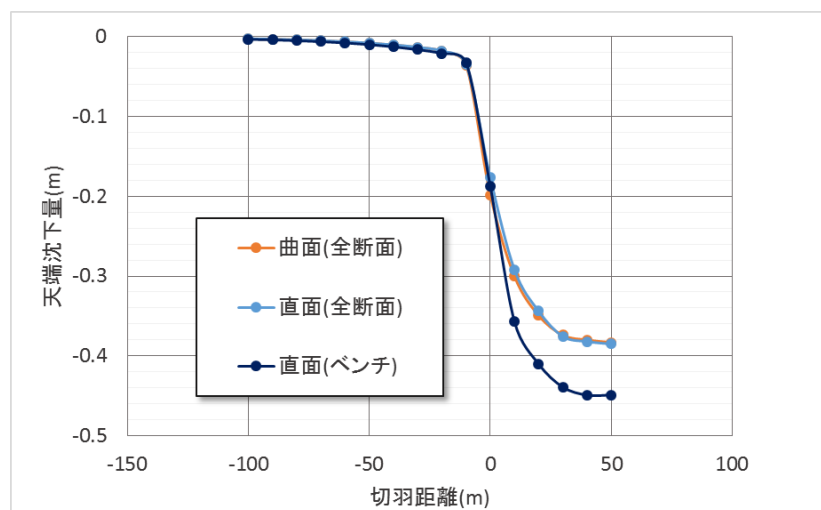


図 - 5.6 天端沈下量

5.3.2 塑性領域

図-5.7に塑性領域図を示す。

鏡面において、直面切羽を全断面工法からベンチカット工法にすることで、切羽中心部の引張り破壊は一部せん断破壊に変わったが、切羽下半に引張り破壊が集中した。この部分は施工中剥落の恐れのある部分と考えられる。曲面切羽は鏡面において引張り破壊は発生しない。

また、切羽付近の天端部において、ベンチカット工法は曲面切羽よりも塑性領域が大きくなった。

よって、曲面切羽にはベンチカット工法以上の有効性があることがわかる。

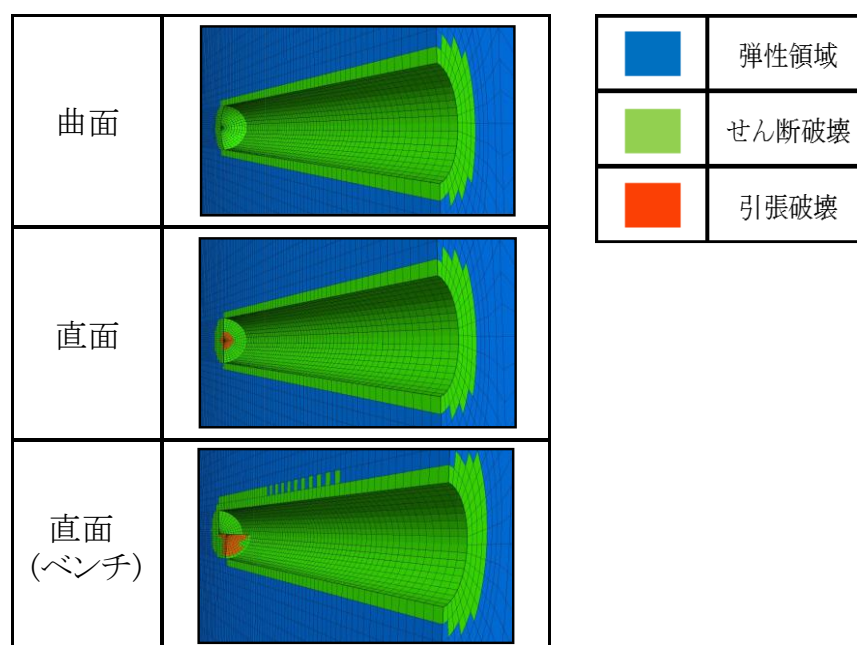


図 - 5.7 塑性領域図

5.3.3 主応力

図-5.8に主応力の流れを示す。図中の“アーチアクション”の青線は、切羽付近の主応力の流れをトレースしたものである。

曲面切羽には緩み領域は生じないが、ベンチカット工法においては切羽上半に緩み領域が確認できる。緩み領域は崩壊が生じる可能性が高いものと考えられており、曲面切羽の方が切羽安定化の面で有効性が高いと考えられる。

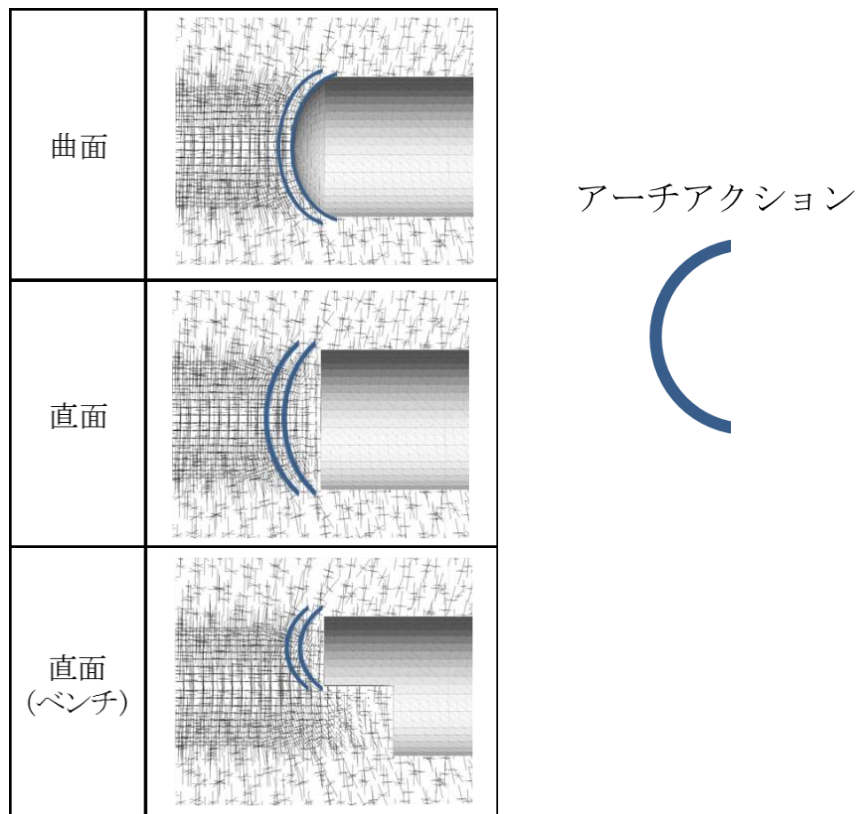


図 - 5.8 主応力の流れ

5.4 地山等級 E の解析結果

解析結果を示す。曲面切羽においては全断面工法である。

5.4.1 変位量

図 - 5.9 に切羽押出し量を示す。

切羽の押出し量において、全断面では鏡面中心部が最大になっているのに対し、ベンチ設置ケースでは上半に切羽の押出しが集中している。最大変位は曲面切羽で 54.8cm，ベンチカット工法では 108.7cm であり，ベンチカット工法の最大変位を 1 とすると，曲面切羽の最大変位は 0.50 となり，曲面切羽の方が，切羽押出し量が抑制された。

よって，曲面切羽にはベンチカット工法以上の有効性があることがわかる。

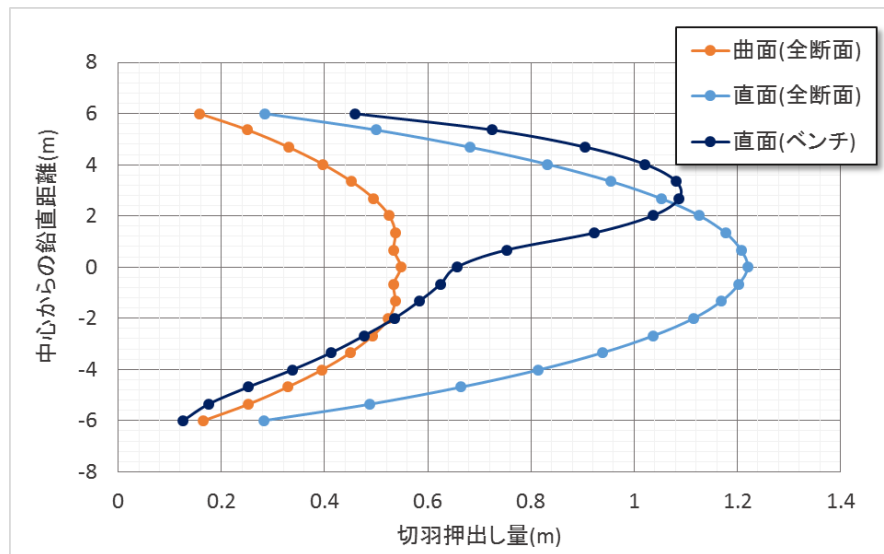


図 - 5.9 切羽押し出し量

図 - 5.10 に天端沈下量を示す。

天端沈下量において、切羽部及び坑口にかけて、ベンチカット工法よりも、曲面切羽の方が、沈下量が抑制されている。

よって、曲面切羽にはベンチカット工法以上の有効性があることがわかる。

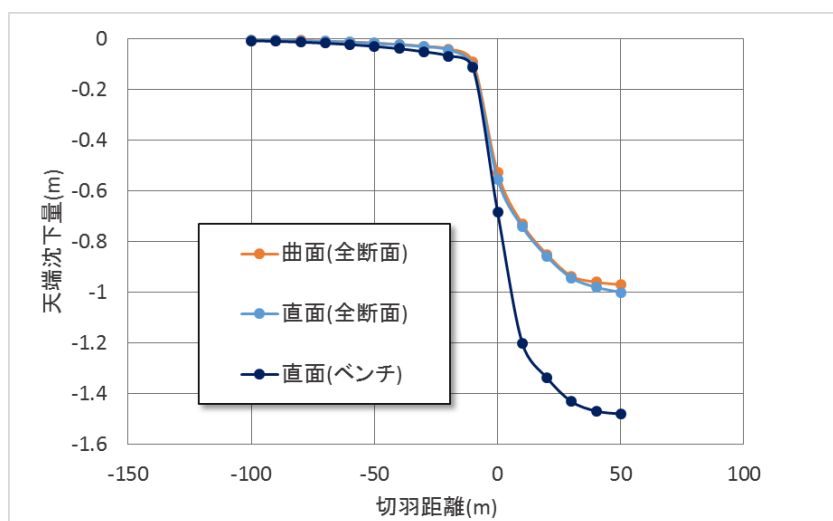


図 - 5.10 天端沈下量

5.4.2 塑性領域

図-5.11 に塑性領域図を示す。

鏡面において、直面切羽を全断面工法からベンチカット工法にすることで、切羽上半の引張り破壊は一部せん断破壊に変わったが、切羽下半に引張り破壊が集中した。この部分は施工中剥落の恐れのある部分と考えられる。曲面切羽は鏡面において引張り破壊は発生しない。

また、天端部及び切羽奥部において、ベンチカット工法は曲面切羽よりも塑性領域が大きくなった。

よって、曲面切羽にはベンチカット工法以上の有効性があることがわかる。

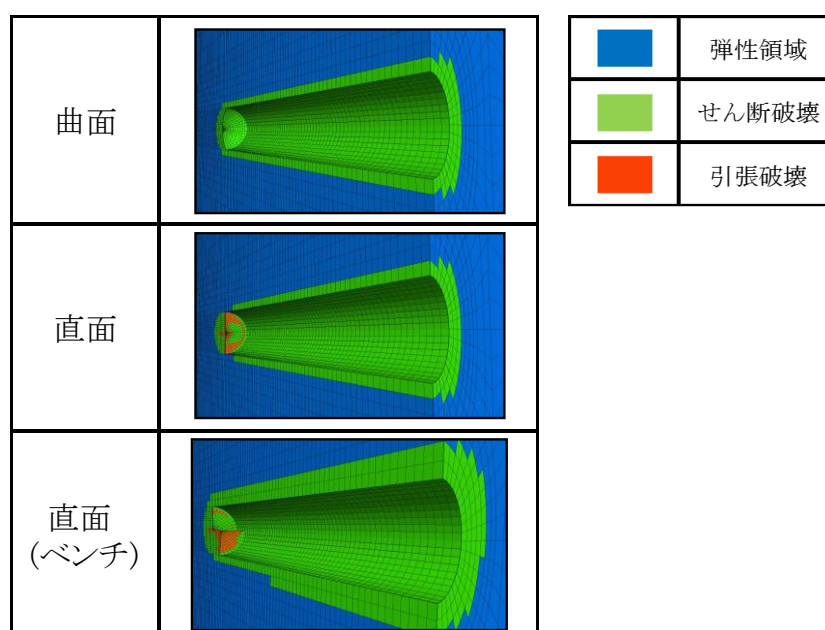


図 - 5.11 塑性領域図

5.4.3 主応力

図-5.12 に主応力の流れを示す。図中の“アーチアクション”の青線は、切羽付近の主応力の流れをトレースしたものである。

曲面切羽には緩み領域は生じないが、ベンチカット工法においては切羽上半に緩み領域が確認できる。緩み領域は崩壊が生じる可能性が高いものと考えられており、曲面切羽の方が切羽安定化の面で有効性が高いと考えられる。

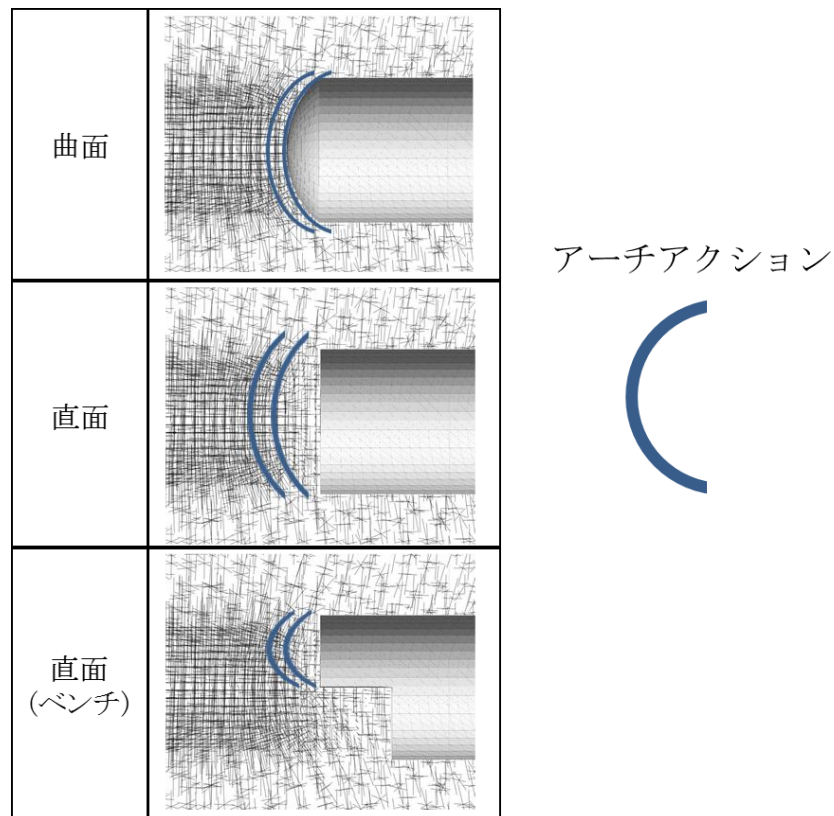


図 - 5.12 主応力の流れ

5.5 まとめ

本章では実施工で採用例の多い，トンネル掘削工法においてベンチカット工法を採用する切羽安定化対策に対する，曲面切羽の有効性評価を地山等級別で検討した．得られた結果をまとめると以下のようになる．

- ① 地山等級 CⅡの地山の場合，変位量において，切羽押出しでは最大変位を比較すると，ベンチカット工法よりも曲面切羽の方が変位抑制効果は高い．天端沈下では切羽付近のみでベンチカット工法の方が変位抑制効果は高い．塑性領域においては，鏡面の塑性領域範囲及び引張破壊発生面より，ベンチカット工法よりも曲面切羽の方が有効性は高い．また主応力の流れを確認すると，緩み領域発生面より，曲面切羽のほうが有効性は高い．

よって，地山等級 CⅡにおいては，ベンチカット工法での施工よりも，全断面工法での曲面切羽で施工を行う方が有効性は高いと考えられる．

- ② 地山等級 DⅡの地山の場合，変位量において，切羽押出しでは最大変位を比較すると，ベンチカット工法よりも曲面切羽の方が変位抑制効果は高い．天端沈下では切羽部から坑口にかけてベンチカット工法よりも曲面切羽の方が変位抑制効果は高

い。塑性領域においては、切羽付近の塑性領域範囲及び引張破壊発生面より、ベンチカット工法よりも曲面切羽の方が有効性は高い。また主応力の流れを確認すると、緩み領域発生面より、曲面切羽のほうが有効性は高い。

よって、地山等級 **DII** においては、ベンチカット工法での施工よりも、全断面工法での曲面切羽で施工を行う方が有効性は高いと考えられる。

- ③ 地山等級 **E** の地山の場合、変位量において、切羽押出しでは最大変位を比較すると、ベンチカット工法よりも曲面切羽の方が変位抑制効果は高い。天端沈下では切羽部から坑口にかけてベンチカット工法よりも曲面切羽の方が変位抑制効果は高い。塑性領域においては、切羽付近の塑性領域範囲及び引張破壊発生面より、ベンチカット工法よりも曲面切羽の方が有効性は高い。また主応力の流れを確認すると、緩み領域発生面より、曲面切羽のほうが有効性は高い。

よって、地山等級 **E** においては、ベンチカット工法での施工よりも、全断面工法での曲面切羽で施工を行う方が有効性は高いと考えられる。

地山等級別で比較すると、変位量において、低強度地山であるほど、ベンチカット工法の変位量に対する曲面切羽の変位量の比率が小さくなった。また、ベンチカット工法における緩み領域は、低強度地山であるほど大きくなることが確認された。よって、低強度地山において、よりベンチカット工法に対する曲面切羽の有効性が高くなることが分かる。

以上より、地山物性値に関わらず実施工において一般的な工法となっているベンチカット工法よりも、曲面切羽の方が有効性は高いことが分かる。

なお、地山等級 **DII**・地山等級 **E** において、全断面工法の直面切羽よりベンチカット工法の方が天端沈下量は大きいことが確認される。ベンチカット工法は天端沈下量の抑制効果が期待されているが、村田ら¹¹⁾での検討より、地山等級 **DII** 及び土被り **10D** の地山において同様の傾向が確認されている。

第6章 考察と結論

6.1 考察

第4章では全断面工法の曲面切羽は鏡ボルト設置時と同程度の変位量抑制効果があることを示した。鏡ボルトを設置した場合は、ボルトが存在することによってボルト軸方向に拘束圧が発生し、ボルト軸直角方向の地山の強度を増加させることになり、この強度増加によってアーチの強度が増加して切羽の安全性が増加している。これに対して、曲面切羽はあらかじめ緩み領域を掘削しており、曲面切羽と鏡ボルト施工ではどちらも応力と切羽形状が比較的揃っていることより、効果が近似したと考える。

また、第5章では全断面工法の曲面切羽はベンチカット工法以上の変位量抑制効果があることを示した。ベンチカット工法において、施工断面を小さくしたことにより、上半部に作用するアーチアクションの曲率が小さくなったことで、低強度地山の切羽部の天端沈下量が増加したと考える。

本研究では補助工法の鏡ボルト、トンネル掘削工法のベンチカット工法との比較において、曲面切羽の有効性を唱えたが、曲面切羽は緩み領域をあらかじめ掘削することによって応力の流れと切羽形状が揃い、切羽面直近の不安定になりやすい部分の発生を回避していると考えられる。

6.2 結論

本研究では、数値解析を用いた曲面切羽の有効性の検討における、吹付けコンクリートの弾性係数の設定について検討した。解析結果より、吹付けコンクリートの弾性係数を材齢別設定で解析を行うと、弾性係数一定の簡略式解析に対して、曲面切羽の有効性に違いが見られた。地山の弾性係数が小さくなるにつれて、直面切羽に対する曲面切羽の有効性の差が大きくなることが確認された。よって、弾性係数が地山等級CⅡ程度よりも小さい地山の曲面切羽の有効性評価を行う際には、鏡吹付けの初期強度(剛性)を確保することは重要であると考えられる。

また、鏡面ボルト施工及びベンチカット工法の直面切羽よりも、全断面工法の曲面切羽を採用した場合の方が、変位量、塑性領域、緩み領域(ベンチカット工法のみ)の面で有効であるという結果となった。

したがって、以前から安定性が謳われている曲面切羽において、実施工で採用例の多い切羽安定の他の補助工法に対する有効性が実証できた。

6.3 今後の課題

今後の課題を以下にあげる。

土被り：本研究は3種の地山等級において、土被りを15Dのモデル

ルで解析を行った。しかし、土被りの変更によって地山強度比を変化させることによって、曲面切羽の安定効果及び他の切羽安定化対策に対する有効性が異なる可能性があると考えられる。

トンネルの形状：円形のトンネルを想定したが、馬蹄形トンネル、扁平型トンネルでは応力集中に違いがあり、切羽における挙動も異なると考えられることから、検討が必要である。

ほかの補助工法についての検討：トンネルの補助工法としては、先受け工なども使用することも多い。他の工法を加えて地山挙動を解明するべきである。

ほかの掘削工法についての検討：部分断面掘削工法としては、中壁分割工法や導坑先進工法を採用する場合も多い。掘削工法によって地山の挙動が大きく異なることから、曲面切羽との比較検討が必要である。

岩盤の不均質性：実際の地山は一定物性値ではなく岩盤は不均質である。地山条件により曲面切羽の有効性は大きく異なることから、検討が必要である。

付 録

以下に解析プログラムを示す.

モデル作成(曲面)

```
gen zon cyl p0 0 0 0 p1 6 0 0 p2 0 198 0 p3 0 0 6 size 10 198 10
gen zone reflect nor 0 0 1 ori 0 0 0
group tunnel ::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::トンネル部分

gen zone cshell p0 0 0 0 p1 22 0 0 p2 add 0 198 0 p3 add 0 0 22 &
dim 6 6 6 6 size 7 198 10 r 1.1 1 1
gen zon radcyl p0 0 0 0 p1 35 0 0 p2 0 198 0 p3 0 0 35 &
dim 22 22 22 22 size 6 198 10 2 rat 1 1 1 1.1
gen zone reflect nor 0 0 1 ori 0 0 0 range group tunnel not
gen zone brick p0 35 0 -35 p1 66 0 -35 p2 35 198 -35 p3 35 0 35 size 1 198 10 ra 1.1 1 1
gen zone brick p0 0 0 35 p1 35 0 35 p2 0 198 35 p3 0 0 186 size 5 198 15 ra 1 1 1.1
gen zone brick p0 35 0 35 p1 66 0 35 p2 35 198 35 p3 35 0 186 size 1 198 15 ra 1 1 1.1

; assign names to groups of zones
group rock range group tunnel not ::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::地山部分

::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::rr=8 曲面作成
def get_parray
    isize=(thetasize+1)*(phisize+1)*(pysize+1)
    parray=get_mem(isize)
end
;
def set_pointer
    ioffset=((thetasize+1)*(phisize+1)*iypos)+(thetasize+1)*iphi+itheta
    mem(parray+ioffset)=pnt_set
end
;
def retrieve_pointer
    ioffset=((thetasize+1)*(phisize+1)*iypos)+(thetasize+1)*iphi+itheta
    pnt_return=mem(parray+ioffset)
end
```

```

;
def fill_pointers
  get_parray
  loop iypos(0,pysize)
    itheta=0
    iphi=0
    fxpos=0
    fzpos=0
    fypos=float(iypos)
    pnt_set=gp_near(fxpos,fypos,fzpos)
    set_pointer
  ;
  loop itheta(0,thetasize)
    loop iphi(1,phisize)
      phi=float(iphi)/float(phisize)*pi/2.0
      theta=float(itheta)/float(thetasize)*pi
    ;
    fxpos=r*float(iphi)/float(phisize)*sin(theta)
    fypos=float(iypos)
    fzpos=r*float(iphi)/float(phisize)*cos(theta)
    pnt_set=gp_near(fxpos,fypos,fzpos)
    set_pointer
  endloop
endloop
endloop
end
;
def create_cylinder
  thetasize=20
  phisize=10
  pysize=71
  pysize2=61
  r=6.0
  rr=8
  phi_c=asin(r/rr)
  fill_pointers

```

```

    parray01=parray
end
@create_cylinder
;

def shape_sphere
loop iypos(0,pysize2)
    fypos=float(iypos)
    iphi=0
    itheta=0
    retrieve_pointer
    gp_ypos(pnt_return)=rr*(1.0-cos(phi_c))+gp_ypos(pnt_return)
loop itheta(0,thetasize)
loop iphi(1,phisize)
    retrieve_pointer
    phi=float(iphi)/float(phisize)*phi_c
    theta=float(itheta)/float(thetasize)*pi
    gp_xpos(pnt_return)=rr*sin(phi)*sin(theta)
    gp_zpos(pnt_return)=rr*sin(phi)*cos(theta)
    gp_ypos(pnt_return)=rr*(cos(phi)-cos(phi_c))+gp_ypos(pnt_return)
endloop
endloop
endloop
end
def shape_end
loop iypos(62,pysize)
    fypos=float(iypos)
    iphi=0
    itheta=0
    retrieve_pointer
    fypos1=float(iypos-61.0)
    length=float(pysize-61.0)
    ii= fypos1/length*(10.0-rr*(1-cos(phi_c)))
    gp_ypos(pnt_return)=61.0+rr*(1-cos(phi_c))+ii
loop itheta(0,thetasize)
loop iphi(1,phisize)
    retrieve_pointer

```

```

phi=float(iphi)/float(phisize)*phi_c
  theta=float(itheta)/float(thetasize)*pi
  gp_xpos(pnt_return)=rr*sin(phi)*sin(theta)
  gp_zpos(pnt_return)=rr*sin(phi)*cos(theta)
  iii=fypos1/length*(10.0-(rr*cos(phi)-rr*cos(phi_c)))
  gp_ypos(pnt_return)=rr*cos(phi)-rr*cos(phi_c)+61.0+iii
endloop
endloop
endloop
end
;
@shape_sphere
@shape_end

```

初期狀態解析(地山 DII 等級)

```
rest 曲面 model
,,,,,,,,,,,,,,モーラークロン

mo mohr
,,,,,,,,,,,,,,物性値

pro bulk 167e6   she 56e6    fric 30 coh 200e3 ten 2e4 dil 0 range z -35 186
,,,,,,,,,,,,,,境界条件

fix x range x -.1 .1
fix x range x 65.9 66.1
fix z range z -35.1 -34.9
fix y range y -.1 .1
fix y range y 197.9 198.1
,,,,,,,,,,,,,,初期条件

set grav 0 0 -9.81


ini density 581.1
ini szz -2.65e6 grad 0 0 5700.6
ini sxx -1.325e6 grad 0 0 2850.3
ini syy -1.325e6 grad 0 0 2850.3


apply sxx -1.325e6 range x -0.1 0.1
apply sxx -1.325e6 range x -65.9 66.1
apply syy -1.325e6 range y -0.1 0.1
apply syy -1.325e6 range y 197.9 198.1
apply szz -2.65e6 range z -35.1 -34.9
apply szz -2.65e6 range z 185.9 186.11
,,,,,,,,,,,,,,エクセル

hist add gp ydis id 20708
hist add gp ydis id 20707
hist add gp ydis id 20706
hist add gp ydis id 20705
hist add gp ydis id 20704
hist add gp ydis id 20703
hist add gp ydis id 20702
hist add gp ydis id 20701
```

```
hist add gp ydis id 20700
hist add gp ydis id 1261
hist add gp ydis id 40600
hist add gp ydis id 40601
hist add gp ydis id 40602
hist add gp ydis id 40603
hist add gp ydis id 40604
hist add gp ydis id 40605
hist add gp ydis id 40606
hist add gp ydis id 40607
hist add gp ydis id 40608
```

```
hist add gp zdis id 20409
hist add gp zdis id 20509
hist add gp zdis id 20609
hist add gp zdis id 20709
hist add gp zdis id 20809
hist add gp zdis id 20909
hist add gp zdis id 21009
hist add gp zdis id 21109
hist add gp zdis id 21209
hist add gp zdis id 21309
hist add gp zdis id 21409
hist add gp zdis id 21509
hist add gp zdis id 21609
hist add gp zdis id 21709
```

```
solve
```

掘削解析(地山 DⅡ 等級・吹付けコンクリート材齢別設定)

rest 初期状態 D 曲面

;;;;;;;;;;;;;荷重初期化

ini xdis 0.0 ydis 0.0 zdis 0.0

;;;;;;;;;;;;;逐次掘削設定

def excav

y0=0

; -3 > 0

loop cut(1,60)

local cut_cur = cut

step_name = string(cut)

local ii = out(step_name)

y0 = 1*(cut-1) ;;0>>

y1 = y0+1

y3 = y0-1

y4 = y1-1

y5 = y0-2

y6 = y1-2

y7 = y0-3

y8 = y1-3

y9 = y0-4

y10 = y1-4

y11 = y0-5

y12 = y1-5

y13 = y0-6

y14 = y1-6

y15 = y0-8

y16 = y1-7

y17 = y0-10

y18 = y1-9

y19 = y0-14

y20 = y1-11

y21 = y0-18

y22 = y1-15

```

y23 = y0-26
y24 = y1-19
y25 = y0-34
y26 = y1-27
y27 = y0-46
y28 = y1-35
y29 = y0-47
y30 = y1-47

;;;3>>

id_ = 10
rr= 8
rr1=rr+0.1
y_sphere=y1-rr*cos(asin(r/rr))
id_ = 10*(cut+1)          ; use if shells unconnected

command
; excavate next cut
model mech null range sphere cen 0 @y_sphere 0 rad @rr group
tunnel ;;;;3>>
model mech null range group tunnel y @y0 @y1          ;;;;0>>3
end_command
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;シェル要素設定
if cut>0 then
command
sel delete shell range id=11
sel delete shell range id=10
sel delete shell range id=12
sel delete shell range id=13
sel delete shell range id=14
sel delete shell range id=15
sel delete shell range id=16
sel delete shell range id=17
sel delete shell range id=18
sel delete shell range id=19
sel delete shell range id=20

```



```

sel delete shell range id=21
sel delete shell range id=22
sel delete shell range id=23
sel delete shell range id=24

endcommand
endif

if cut>0 then
command
sel shell id 10 group rock range cyl end1 0 @y0 0 end2 0 @y1 0 rad 6.1
sel shell prop isotropic 45e8,0.2 thickness 0.2 density 2500 rang y @y0 @y1

sel shell id 12 group rock range cyl end1 0 @y3 0 end2 0 @y4 0 rad 6.1
sel shell prop isotropic 59e8,0.2 thickness 0.2 density 2500 rang y @y3 @y4

sel shell id 13 group rock range cyl end1 0 @y5 0 end2 0 @y6 0 rad 6.1
sel shell prop isotropic 61e8,0.2 thickness 0.2 density 2500 rang y @y5 @y6

sel shell id 14 group rock range cyl end1 0 @y7 0 end2 0 @y8 0 rad 6.1
sel shell prop isotropic 62e8,0.2 thickness 0.2 density 2500 rang y @y7 @y8

sel shell id 15 group rock range cyl end1 0 @y9 0 end2 0 @y10 0 rad 6.1
sel shell prop isotropic 63e8,0.2 thickness 0.2 density 2500 rang y @y9 @y10

sel shell id 16 group rock range cyl end1 0 @y11 0 end2 0 @y12 0 rad 6.1
sel shell prop isotropic 66e8,0.2 thickness 0.2 density 2500 rang y @y11 @y12

sel shell id 17 group rock range cyl end1 0 @y13 0 end2 0 @y14 0 rad 6.1
sel shell prop isotropic 70e8,0.2 thickness 0.2 density 2500 rang y @y13 @y14

sel shell id 18 group rock range cyl end1 0 @y15 0 end2 0 @y16 0 rad 6.1
sel shell prop isotropic 73e8,0.2 thickness 0.2 density 2500 rang y @y15 @y16

sel shell id 19 group rock range cyl end1 0 @y17 0 end2 0 @y18 0 rad 6.1
sel shell prop isotropic 75e8,0.2 thickness 0.2 density 2500 rang y @y17 @y18

```

```

sel shell id 20 group rock range cyl end1 0 @y19 0 end2 0 @y20 0 rad 6.1
sel shell prop isotropic 77e8,0.2 thickness 0.2 density 2500 rang y @y19 @y20

sel shell id 21 group rock range cyl end1 0 @y21 0 end2 0 @y22 0 rad 6.1
sel shell prop isotropic 79e8,0.2 thickness 0.2 density 2500 rang y @y21 @y22

sel shell id 22 group rock range cyl end1 0 @y23 0 end2 0 @y24 0 rad 6.1
sel shell prop isotropic 80e8,0.2 thickness 0.2 density 2500 rang y @y23 @y24

sel shell id 23 group rock range cyl end1 0 @y25 0 end2 0 @y26 0 rad 6.1
sel shell prop isotropic 82e8,0.2 thickness 0.2 density 2500 rang y @y25 @y26

sel shell id 24 group rock range cyl end1 0 @y27 0 end2 0 @y28 0 rad 6.1
sel shell prop isotropic 85e8,0.2 thickness 0.2 density 2500 rang y @y27 @y28

sel shell id 25 group rock range cyl end1 0 @y29 0 end2 0 @y30 0 rad 6.1
sel shell prop isotropic 88e8,0.2 thickness 0.2 density 2500 rang y @y29 @y30

sel shell id 11 range sphere center 0 @y_sphere 0 r @rr1 group tunnel
sel shell prop isotropic 4.0e8,0.25 thickness 0.05 density 2500 rang id=11
endcommand

endif

;;concrete liner
command
step 1000

endcommand

end_loop
end
@excav
ret

```

参考文献

- 1) 西村和夫・今田徹・山崎良一・松井幹雄：トンネル切羽の形状と安定性についての一考察，トンネルと地下，Vol.27,No5,pp.43-50,1996.5
- 2) 西村和夫・今田徹・山崎良一・松井幹雄：トンネル切羽の形状と安定性についての一考察，トンネルと地下，Vol.27,No5,pp.43-50,1996.5
- 3) 今田徹：山岳トンネル設計の考え方，土木工学社，p 54,2010.10
- 4) 森崎泰隆・今田徹：山岳トンネルへの曲面切羽の適用に関する解析的検討，トンネルと地下，Vol.41,No11,pp.55-65,2010.11
- 5) 平田亮・森本真吾・進士正人・中川浩二：トンネル切羽の形状の違いによる切羽安定性に関する研究，土木学会第 59 回年次学術講演会，3-084，pp.167-168、2004
- 6) 岩野政浩・真下秀明・田村寿夫・宮本義広・藤井康男：硬岩自由断面掘削機 (MM130R) によるトンネル施工時の切羽安定性に関する考察，第 51 回土木学会年次学術講演会，1996
- 7) 今田徹：山岳トンネル設計の考え方，土木工学社，p 140,2010.10
- 8) Fulvio Tonon : Sequential excavation,NATM and ADECO:What they have in common and how they differ, Tunnelling and Underground Space Technology 25, 245-265, 2010.
- 9) 横山正治・寺本哲・岩野正浩：硬岩自由断面掘削機(MM130R)によるトンネル施工時の球面切羽効果に関する検討，第 31 回地盤工学研究発表会発表講演集，Vol.31, No2-2, pp.2253～2254, 1996
- 10) 田名瀬寛之・芹川博・山本宏司・菅正：軟岩トンネルの TWS による急速施工(2)，トンネルと地下，Vol.29, No11, pp.15～25, 1998.
- 11) 村田洋一・高橋浩・重田佳幸・進士正人・中川浩二：三次元数値解析によるトンネル掘削工法の評価，山口大学工学部研究報告. 52(2)

謝 辞

本研究におきまして、首都大学東京都市環境学部教授 西村和夫博士、同助教、土門剛氏には、解析から論文作成に至るまで事細かなご指導と多くの貴重なご教示を賜り、ここに心より深く感謝を申し上げます。

また、トンネル・地下空間研究室で共に研究に励んだ、住田亮介氏、石橋拓也氏、梅澤麻理花氏、中島秀氏、川瀬洸佑氏、近藤紹仁氏、田中祐弥氏、宮石雅子氏、の惜しみないご協力を心より感謝いたします。

また、本研究の解析ソフトの使用方法におきまして、山口大学の岡崎泰幸氏と株式会社ジオ・ソリューションの樽井稔氏には大変親身に相談にのっていただいたことをここに感謝申し上げます。