

地山条件が曲面切羽に及ぼす影響に関する 解析的検討

富樫 真美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: togashi-mami@ed.tmu.ac.jp

²正会員 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: dom@tmu.ac.jp

³正会員 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: knishi@tmu.ac.jp

山岳トンネル施工における，補強工法軽減の対策として，近年，曲面切羽が実施工で試みられている．しかし，実施工あるいは数値解析では曲面切羽の安定性が限定的な条件では認められてはいるものの，今後曲面切羽の採用を広げるには，どのような条件で曲面切羽が有効であるかを明らかにしなければならない．

本研究では地山条件が曲面切羽を使用したトンネルの安定性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として，弾性係数，土被り，切羽形状等に着目して数値解析を行った．その結果，切羽面に吹付けコンクリートを施したケースでは，土被りが大きく弾性係数が小さいほど，曲面切羽は直面前方に比べ，変位や最大せん断ひずみの抑制効果の観点での安定性が高いことが示された．また，地山条件別の最適切羽形状を提案した．

Key Words : *curved tunnel face, numerical analysis, ground conditions, mountain tunnel*

1. はじめに

山岳トンネル施工では，切羽の自立性を保つため補助工法が多く採用されている．しかし，補助工法はコストがかかるだけでなく，切羽での作業が輻輳し工期が長くなることもある．

そこで補強工法軽減の対策として，様々な検討が行われている．その対策の一つとして，近年では，従来の直立させる切羽（以下，直面前方）ではなく，切羽前方へ曲面状に掘り込むことで，地山のアーチ作用を発揮させる切羽（以下，曲面切羽）が実施工で一部試みられている¹⁾．しかし，実施工あるいは数値解析²⁾では，曲面切羽の安定性が限定的な条件では認められてはいるものの，今後曲面切羽の採用を広げるには，どのような条件で曲面切羽が有効であるかを明らかにしなければならない．

この現状をふまえて，本研究では弾性係数と土被りに着目して，地山条件が曲面切羽を使用したトンネルの安定性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした．また地山条件別の切羽形状にも着目し，切羽の最適曲率

半径を提案することも目的とした．

2. 解析手法

(1) 解析条件

本研究では三次元有限差分法による数値解析を実施した．解析コードはFLAC3D-Ver5.0を使用した．地山はMohr-Coulombの破壊基準を降伏条件とする弾完全塑性体とした．掘削方法については全断面工法を採用し，掘進長1mの逐次掘削とした．

(2) 解析モデル

図-1に解析に用いたモデル例を示す．本研究で使ったモデルはBrick要素，Radial Cylinder要素，Cylindrical Shell要素を組み合わせで作成した．トンネルの軸方向をY方向，それと直交する水平方向をX方向，地山鉛直方向をZ方向，評価する切羽面の位置はトンネル軸方向Y=60mとした．地山の高さ，幅，長さはそれぞれ70m，

66m, 198mとした。掘削するトンネル形状は円形（トンネル掘削径 $D=12\text{m}$ ）とした。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の部分について行った。

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、外周面境界は側方変位を固定とした。土被りはモデルに想定土被り分の上載荷重を加えて再現した。

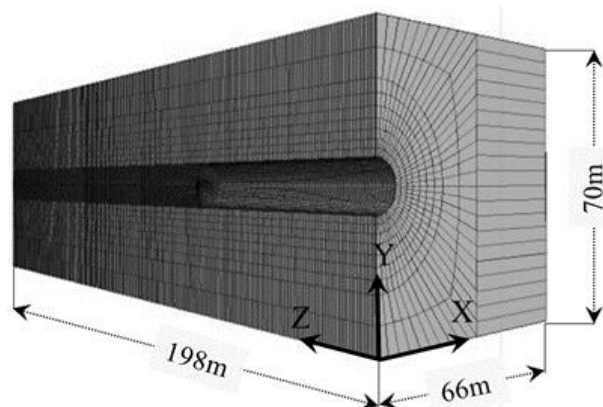


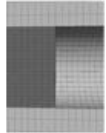
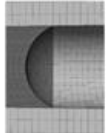
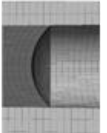
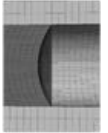
図-1 解析モデル

a) トンネルモデル

切羽形状は表-1 に示す直面切羽と曲面切羽(曲率半径 $r_1=6.5\text{m}$, $r_2=8.0\text{m}$, $r_3=10.0\text{m}$)の4種類を比較した。支保部材は鋼製支保工と吹付けコンクリートを合成1次支保としてシェル要素でモデル化した。掘削は1mごとに逐次掘削し、掘削後合成部材と鏡吹付コンクリートを施し解析計算を行った。

なお直面切羽においては、メッシュの影響が大きいいため、曲面切羽で使用したメッシュと異なるモデルで解析を行った。

表-1 切羽形状(トンネル縦断)

ケース名	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
曲率半径 $r(\text{m})$	直面	$r_1=6.5$	$r_2=8.0$	$r_3=10.0$
モデル				

b) 地山モデル

地山物性値を表-2に示す。地山等級はCII, DII, Eの3種類で比較した。土被りは3D, 10D, 15Dの3種類と変化させた。地山強度比($q_0/\gamma h$)に換算したものを表-3に示す。初期応力は鉛直方向に対して水平方向を0.5倍とする。

表-2 解析物性値

	地山等級			支保・補強工	
	CII	DII	E	合成1次支保	鏡面吹付
弾性係数 (MPa)	1000	150	50	8100	4000
単位体積重量 (kN/m^3)	23	21	20	25	25
ポアソン比	0.3	0.35	0.4	0.2	0.3
粘着力 (kPa)	1000	200	100		
内部摩擦角 ($^\circ$)	40	30	30		

表-3 解析ケース

地山等級	土被り	一軸圧縮強度(N/m^2)	地山強度比
C II	3D	4289	2.87
	10D		1.25
	15D		0.89
D II	3D	693	0.51
	10D		0.22
	15D		0.16
E	3D	346	0.27
	10D		0.12
	15D		0.08

3. 地山条件比較

地山等級3種類、土被り3種類を組み合わせせた計9種類の地山条件を比較して、曲面切羽の安定性を検討した。本章では、地山等級はEとDII, 土被りは3Dと10D, 切羽形状はケース1とケース3を比較した結果のみを紹介する。

(1) 切羽押し出し量

図-2は、地山等級Eの切羽押し出し量である。この図を見ると、土被り3Dと土被り10Dのどちらも、直面切羽よりも曲面切羽の方が切羽押し出し量が抑えられていることがわかる。また直面切羽と曲面切羽の切羽押し出し量の差を切羽中心部において比較すると、土被り3Dにおいては6.4cmの差があるのに対し、土被り10Dにおいては49.3cmの差がある。

図-3は、地山等級DIIの切羽押し出し量である。こちらも図-2と同様に、土被り3Dと土被り10Dのどちらも、直

面切羽よりも曲面切羽の方が切羽押出し量が抑えられていることがわかる。また、直面切羽と曲面切羽の押出し量の差を切羽中心部において比較すると、土被り3Dにおいては0.7cmの差があり、土被り10Dにおいては12.1cmの差がある。よって図-2の地山等級Eよりも、図-3の地山等級DⅡの方が直面切羽と曲面切羽の差が小さいことがわかる。

なお、全地山条件における直面切羽と曲面切羽の切羽中心部における切羽押出し量の差を表-4に示す。以上の結果から、切羽押出し量は、弾性係数は小さいほうが、また、土被りは大きい方が、より曲面切羽の安定効果があるということがわかる。

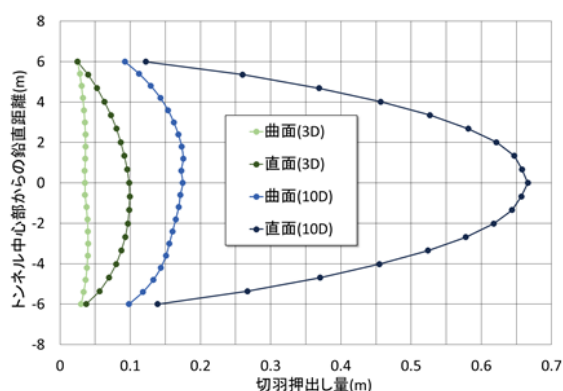


図-2 切羽押出し量(地山等級E)

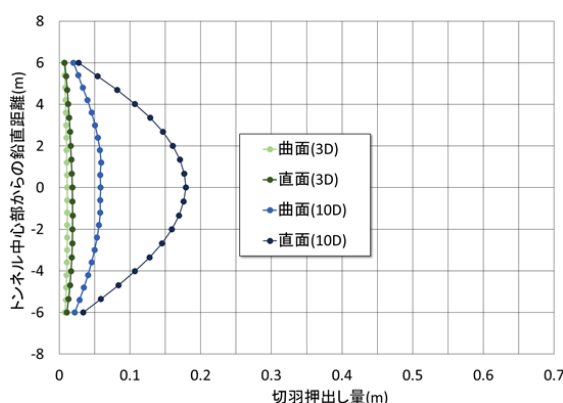


図-3 切羽押出し量(地山等級DⅡ)

表-4 切羽押出し量の差(直面切羽-曲面切羽)

		地山等級		
		CⅡ	DⅡ	E
土被り	3D	0.1cm	0.7cn	6.4cm
	10D	0.3cm	12.1cm	49.3cm
	15D	0.4cm	26.6cm	99.2cm

(2) 天端沈下量

図-4は、地山等級Eの天端沈下量である。この図をみると、土被り3Dと土被り10Dのどちらも、直面切羽よりも曲面切羽の方が天端沈下量が抑えられていることがわかる。また直面切羽と曲面切羽の天端沈下量の差を切羽到達点(切羽距離=0m)において比較すると、土被り3Dにおいては3.1cmの差があることにに対し、土被り10Dにおいては25.8cmの差がある。

図-5は、地山等級DⅡの切羽の天端沈下量である。こちらも図-4と同様に、土被り3Dと土被り10Dのどちらも、直面切羽よりも曲面切羽の方が天端沈下量が抑えられていることがわかる。また、直面切羽と曲面切羽の押出し量の差を切羽到達点において比較すると、土被り3Dにおいては0.1cmの差があり、土被り10Dにおいては6.3cmの差がある。よって図-4の地山等級Eよりも、図-5の地山等級DⅡの方が直面切羽と曲面切羽の差が小さいことがわかる。

なお、全地山条件における直面切羽と曲面切羽の切羽到達点における天端沈下量の差を表-5に示す。地山等級CⅡは直面切羽の方が沈下量が小さい(差がマイナス)が、切羽後方での沈下量は曲面切羽の方が小さいため、先行変位を抑えることができれば更に良い結果が得られると考える。以上の結果から、天端沈下量は、弾性係数は小さい方が、また、土被りは大きい方が、より曲面切羽の安定効果があるということがわかる。

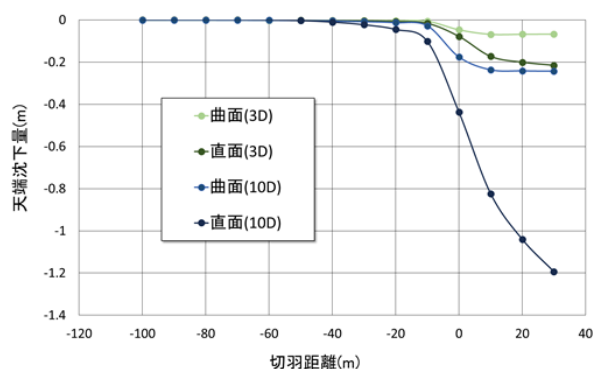


図-4 天端沈下量(地山等級E)

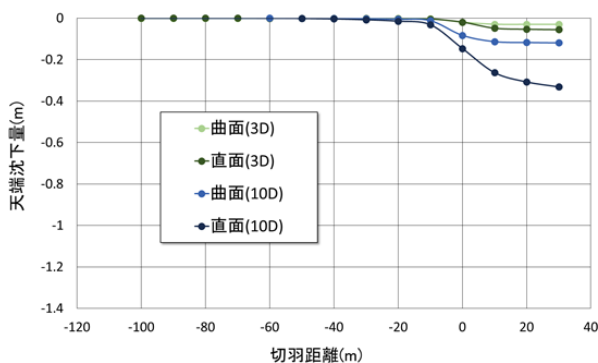


図-5 天端沈下量(地山等級DⅡ)

表-5 天端沈下量の差(直面切羽-曲面切羽)

		地山等級		
		C II	D II	E
土被り	3D	-0.2cm	0.1cm	3.1cm
	10D	-0.6cm	6.3cm	25.8cm
	15D	-0.9cm	14.4cm	49.8cm

(3) 最大せん断ひずみ

図-6は地山等級E、図-7は地山等級DIIの切羽面及びその近傍の最大せん断ひずみのコンター図である。これらの図をみると、両地山等級において土被り10Dの方が、直面切羽に比べて曲面切羽はひずみ値が小さいのがわかる。

また、地山等級Eと地山等級DIIで比較すると、地山等級Eの方が直面切羽で局所的に発生している大きなひずみが曲面切羽では緩和されているのがわかる。

以上の結果から変位抑制と同様、最大せん断ひずみでも弾性係数は小さい方が、土被りは大きい方が、より曲面切羽の安定効果があるということがわかる。なお全解析ケースで同様の傾向が見られた。

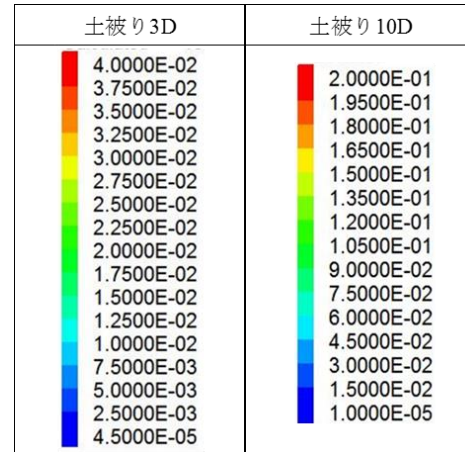
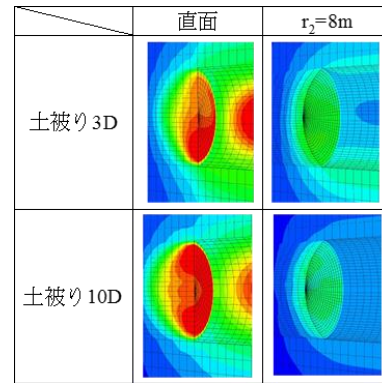


図 7 最大せん断ひずみ(地山等級 DII)

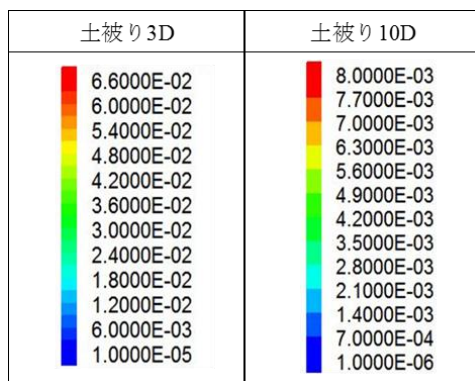
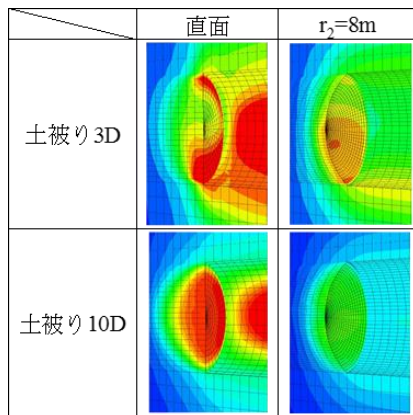


図-6 最大せん断ひずみ(地山等級 E)

4. 切羽形状比較

地山等級3種類、土被り3種類を組み合わせせた計9種類の地山条件においての最適切羽形状を求めるため、それぞれの地山条件で曲面切羽3種類と直面切羽の計4種類の切羽形状を比較した。本章では地山等級DII及び土被り15Dにおけるケース1, 2, 3(表-1)を比較した結果のみを紹介する。

(1) 切羽押し出し量

図-8 に切羽押し出し量を示す。この図をみると、直面切羽に比べて曲面切羽の方が押し出し量は小さくなる。また、曲面切羽において、曲率半径が小さくなるにつれて押し出し量が小さくなる傾向が見られる。よって切羽押し出し量においては、ケース 2 が最も最適な切羽形状ということがわかる。またケース 2 とケース 3 の切羽中心部での差は 1.8cm である。

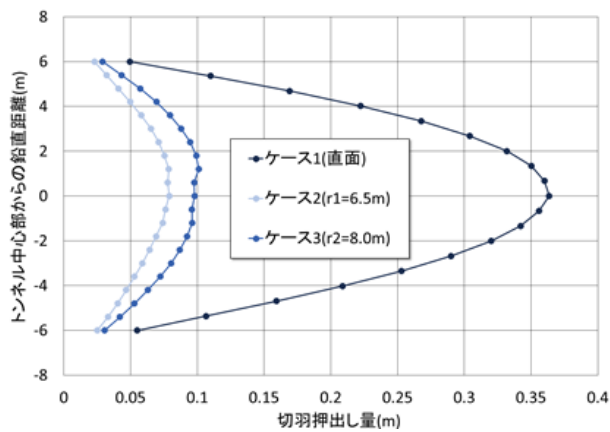


図-8 切羽押し出し量

(2) 天端沈下量

図-9 に天端沈下量を示す。この図をみると、直面切羽に比べて曲面切羽の方が沈下量は小さくなる。また、ケース3で最も沈下量が小さくなっていることから、天端沈下量においては、ケース3が最も最適な切羽形状ということがわかる。またケース2とケース3の切羽天端部での差は2.4cmである。

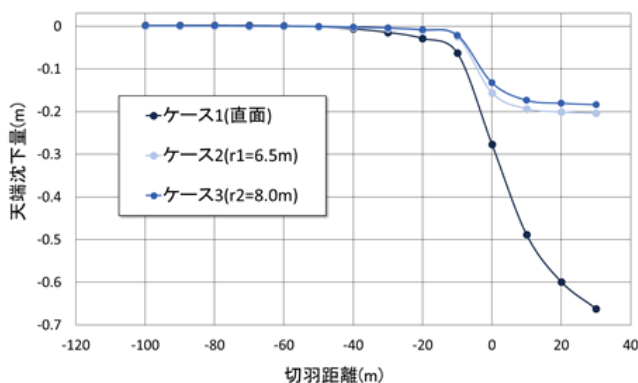


図-9 天端沈下量

(3) 最大せん断ひずみ

図-10は最大せん断ひずみのコンター図である。この図をみると、直面切羽で局所的に発生している大きなひずみが曲面切羽では緩和されているのがわかる。またケース2よりもケース3の方がひずみが小さいことから、最大せん断ひずみの面においては、ケース3が最も最適な切羽形状ということがわかる。

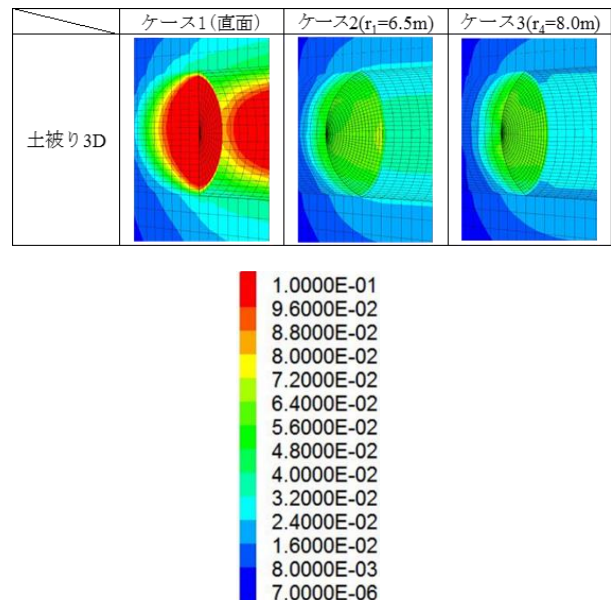


図-10 最大せん断ひずみ

以上の結果から、地山等級DⅡ、土被り15Dの地山条件での最適切羽形状は、ケース3の曲率半径 $r_2=8.0\text{m}$ であることがわかる。なお、全地山条件における最適切羽形状を表-6に示す。この表より、どの地山条件においても曲面切羽の安定効果が見られるが、地山条件の違いにより最適曲率半径は異なることがわかる。

表-6 解析結果(最適切羽形状)

		地山等級		
		CⅡ	DⅡ	E
土被り	3D	ケース2	ケース3	ケース4
	10D	ケース2	ケース3	ケース2
	15D	ケース2	ケース3	ケース2

5. 考察

解析結果より、以下のことが確認できた。

- ① 弾性係数が小さい地山において曲面切羽の安定効果が高い
- ② 土被りが大きい地山において曲面切羽の安定効果が高い

これは、弾性係数が小さい緩い地山は自立性が低いこと、土被りが大きく深度が深い場所では切羽に作用する力が大きくなることから、直面切羽の隅角部での応力集中に大きく影響したためだと考えられる。曲面切羽はアーチ作用により応力が分散されているので、直面切羽に比べてこれらの影響を受けにくかったと考えられる。

6. まとめ

本研究により明らかになったことを以下にまとめる。

- (1) 地山等級CII, DII, Eの3種類, 土被り3D, 10D, 15Dの3種類を組み合わせた9種類の地山条件全てにおいて曲面切羽の安定効果がある。
- (2) 切羽押出し量, 天端沈下量, 最大せん断ひずみの面から, 地山条件において弾性係数は小さい程, 土被りは大きい程, 曲面切羽の安定効果がある。
- (3) 地山条件の違いにより, 最適曲率半径は異なる。

参考文献

- 1) 佐藤淳・楠本太・土門剛・西村和夫：曲面切羽によるトンネル切羽安定化工法, 土木学会論文集 F1(トンネル工学), vol.71, No.1, pp.1-13, 2015.
- 2) 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, No.11, pp.891-901, 2010.

(2015. 8. 7 受付)

ANALYTICAL STUDY ON THE EFFECTS OF GROUND CONDITIONS ON THE CURVED TUNNEL FACE

Mami TOGASHI, Tsuyoshi DOMON and Kazuo NISHIMURA

Curved tunnel face is tried by actual operation in recent years as a measure of means of reinforcement work reduction in mountain tunnel building. I have to do by what kind of condition curved tunnel face is effective clearly stability of curved tunnel face is admitted by the determinative condition by actual operation or a numerical analysis, but to expand adoption of curved tunnel face from now on.

I aimed at the elastic modulus, the earth head and the face shape, etc. and did a numerical analysis for the purpose of making the influence the ground condition exerts on stability in a tunnel with curved tunnel face clear by this research. It was indicated so that displacement and stability by the angle of the inhibiting effect of maximum shear strain are high compared with a facing face for curved tunnel face that as a result, the earth head was big by the case which gave sprayed concrete to face plane, and the elastic modulus was small. And, the most suitable face shape according to the ground condition was proposed.