

個別要素法による扁平大断面トンネルの安定解析
Stability Analysis in a Large Scale Tunnel based on DEM

齊藤茂樹*・道廣一利**・木梨秀雄***・吉岡尚也・***
Sigeaki SAITO, Kazutoshi MICHIIHIRO, Hisaya YOSHIOKA and Hideo KINASHI

The effect of shotcrete and rock bolt as a tunnel support in a rock is control the inward displacement of the walls and to prevent the loosening around the opening. In order to investigate the support effect of the large scale tunnel in a rock subject to low in situ stress conditions, parametric studies were carried out utilizing a program called Universal Distinct Element Code(UDEC). The results of the parametric studies for a large scale tunnel suggest that the displacement of the walls and the loosening zone around the opening can be controlled by the rock bolt.

1. はじめに

第二東名・名神高速道路の新しいトンネルでは、交通量の増加などに伴い大断面化しており、断面形状は従来の馬蹄形から扁平なものとなっており、今後このような形状のトンネルの増加が予想される。

本研究では扁平大断面トンネルが掘削される際の扁平大断面における支保の効果を検討するため、種々の条件下における解析を個別要素法汎用プログラム UDEC を用いて行った。

まず、ビニアウスキー¹⁾の RMR 法における岩盤等級で良い岩盤(RMR=61~80)を想定し、支保効果を検討するため、無支保、吹付けコンクリート、ロックボルト、および吹付けコンクリートとロックボルトを施行したそれぞれの場合での天端部分沈下およびインバート部分の盤膨れを比較した。その際、吹付けコンクリートとロックボルトを施行した場合において、不連続面の垂直剛性とせん断剛性の大きさの違い、不連続面の間隔と形状の違い、そして側圧係数の大きさの違いを天端沈下部分およびインバート部分の盤膨れに着目して比較検討した。また無支保の場合での不連続面の垂直剛性とせん断剛性の違いや、吹付けコンクリートとロックボルトを併用した場合の地山等級の違いによる鉛直方向の変形についても考察した。

2. 解析手法と入力定数

パートン²⁾は Q 値(ビニアウスキーの RMR 値を用い換算した値で $Q=e^{(RMR-44/9)}$ 、不連続面と応力状態に関する六つのパラメーターから求められる値)が 0.1~100 のような地山では岩盤の不連続性を考慮できる DEM が適しているとしていることより今回は個別要素解析コード UDEC を用いて解析を行った。トンネルの断面形状については、第 2 東名高速道路清水第 3 トンネルを参考にし、その断面寸法は幅が 18m、高さが 12m で、掘削断面積は約 200m²の扁平な大断面である。

* 正会員 ソイルアンドロック Eng.

** 正会員 工博 摂南大学助教授 工学部土木工学科

*** 正会員 (株)大林組

解析領域は、トンネルの掘削に伴う応力開放の影響範囲がトンネル半径の 3 倍程度であることや、扁平断面であることを考慮しトンネル上方を広くし、トンネル側方をトンネル幅の 3 倍、下方をトンネル高さの 2 倍、上方を 4 倍の範囲(136m×84m)とした。

不連続面に関しては、形状による比較のため格子状と斜格子状の等間隔なものを仮定した。また、不連続面の間隔はビニアウスキーの岩盤分類より RMR 値を考慮して 1m および 2m とした。

また、岩盤の種々な入力定数は次のようにし決定した。①弾性係数はセラフィムとペレイラ³⁾によって提案された式： $E_m = 10^{(RMR-10)/40}$ に、RMR 値を代入することにより算出。②岩盤の粘着力と内部摩擦角は、ビニアウスキーの RMR 法により決定。③不連続面に関する入力定数については、単位体積重量とポアソン比に関しては、RMR 法からは求めることができないため、RMR の分類と道路公団の地山等級との関係より、道路公団の提案している入力値を用いた。④不連続面の垂直剛性およびせん断剛性については、室内試験より求めた値を用いた。⑤初期地圧については、土被りを 200m と想定し、鉛直成分は土被り圧、水平成分は側圧係数(0.7,1.0,1.3)より設定した。以上のように設定した入力定数を表-1 に示す。

また、吹付けコンクリートには、ビーム要素を用い、ロックボルトと岩盤の相互作用は、ケーブル要素を用い考慮した。ロックボルトの材料特性は、ねじり棒鋼 STD50 を想定した。表-2 に定義域に関する物性値を示す。

表-1 岩盤、不連続面および初期地圧に関する入力定数

入力定数	地山等級	良い岩盤	普通の岩盤	悪い岩盤
岩盤	弾性係数 (MPa)	35000	12000	2500
	ポアソン比	0.15	0.30	0.35
	単位体積重量 (kg/m ³)	2500	2400	2200
不連続面	内部摩擦角 (°)	35	30	20
	粘着力 (kPa)	300	250	160
	垂直剛性 (MPa/mm)	8	80	80
		300	300	300
	せん断剛性 (MPa/mm)	0.52	0.52	0.52
		6.5	6.5	6.5
初期地圧	鉛直成分 (MPa)	4.9	4.9	4.9
	水平成分 (MPa)	3.43	3.43	3.43
		4.9	4.9	4.9
		6.37	6.37	6.37

表-2 吹付けコンクリート、ロックボルトおよび定着材に関する物性値

吹付けコンクリート	弾性係数	3 GPa
	ポアソン比	0.2
	単位体積重量	2200 kg/m ³
ロックボルト	弾性係数	206 GPa
	ポアソン比	0.18
	単位体積重量	7849 kg/m ³
	圧縮強度	218 kN
	引張強度	218 kN
定着材	弾性係数	10.8 GPa
	ポアソン比	0.25
	せん断剛性	1.46×10^8 kN/m/m
	付着強度	2.16×10^5 kN/m

3. 解析結果と考察

本論文では、主に良い岩盤 (RMR=61~80、地山等級 B) での、①支保工の違い②側圧係数の違い③不連続面の間隔と形状の違い④不連続面の垂直剛性とせん断剛性の大きさの違いがトンネル断面の変形にどのような影響を及ぼすかということに着目し解析を行った。さらに地山等級の違いによる鉛直方向の変形についても検討した。

3.1 支保工の違いによる鉛直変位の変化 (良い岩盤、2m 間隔格子状、側圧係数=0.7)

支保工として、無支保、吹付けコンクリート、ロックボルト及び吹付けコンクリートとロックボルトとの併用の 4 種類で良い岩盤を対象として解析を行った。

図-1 は、4 種類の支保工での天端部分における沈下を検討したものである。吹付けコンクリートのみを施行することにより若干沈下が減少しているが、ロックボルトのみおよびロックボルトと吹付けコンクリ

ートの併用で支保した場合には天端部分の沈下はほとんど見られない。この事により、地山等級Bのような岩盤内に偏平な大断面トンネルが施行される場合には、ロックボルトによる支保が非常に効果的であることが分かる。インバート部分の変位に着目した場合にもロックボルトによる支保効果の大きいことがわかる(図-2 参照)。

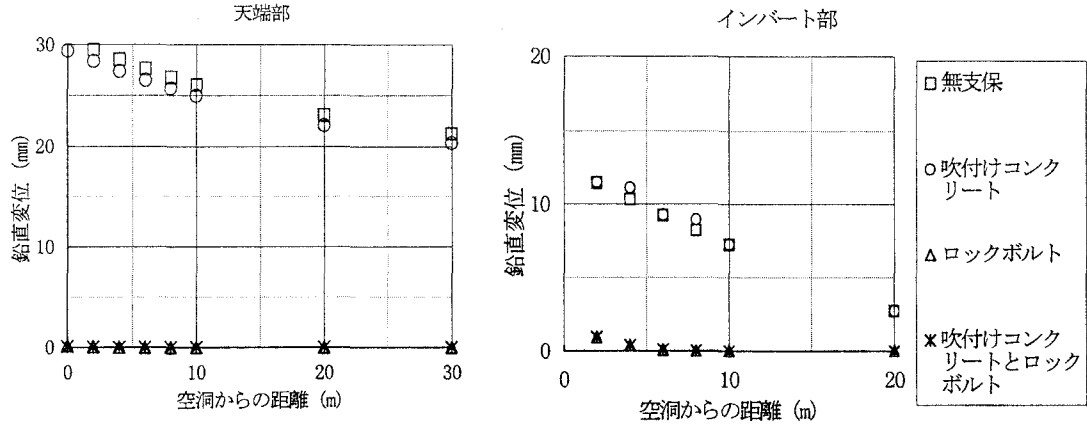


図-1(上図左)、2(上図右) 支保の違いによる天端部分およびインバート部分の鉛直変位

3.2 側圧係数の違いによる鉛直変位の変化 (良い岩盤、2m 間隔格子状)

天端部分の沈下とインバート部分の盤膨れを側圧係数を $k=0.7$ 、 1.0 、 1.3 のように変えて解析したときの結果を図-3、4 に示す。天端部分の沈下およびインバート部分の盤膨れは、側圧係数が小さいほうが若干大きくなる傾向にある。このわずかな違いは側圧係数が大きくなると側方拘束が高まり、その結果格子状のブロックが拘束を受ける結果と考えられる。

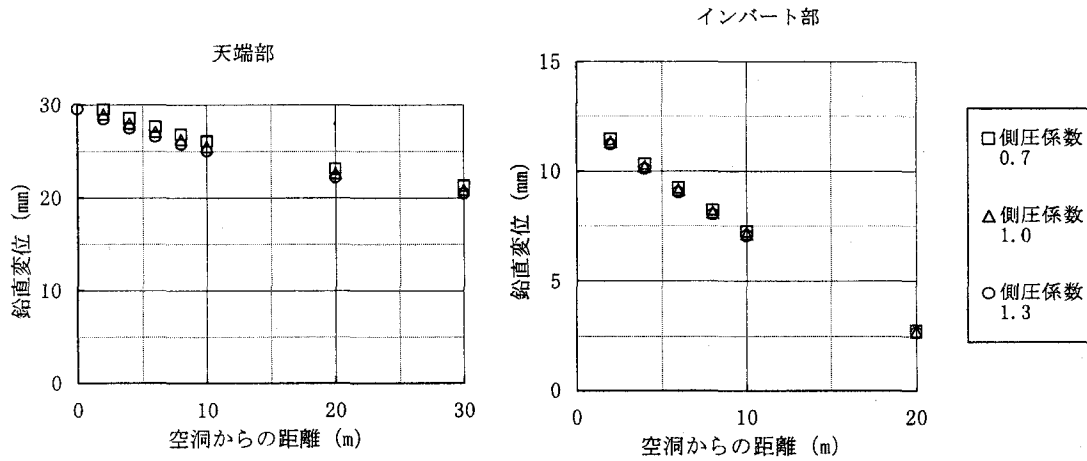


図-3(上図左)、4(上図右) 側圧係数の違いによる天端部分およびインバート部分の鉛直変位

3.3 不連続面の間隔と形状の違いによる鉛直変位の変化 (良い岩盤、側圧係数=0.7)

不連続面の間隔と形状の違いによる天端部分の沈下およびインバート部分の盤膨れの比較を行うため、不連続面を 1m 間隔の格子状、2m 間隔の格子状および 2m 間隔の斜め格子状に発生させ解析を行った。

不連続面間隔の違いによる比較を、2m 間隔格子状と 1m 間隔格子状で行った結果（図-5 参照）、天端部分では、2m 間隔の場合、ほとんど鉛直変位は発生しておらず、一方 1m 間隔では 2m 間隔の約 20 倍と非常に大きくなっている。この原因として、不連続面の間隔が小さいほどブロック自体細かくなり、ブロックの移動が容易になることや、単位面積当たりの不連続面の頻度が増え、岩盤の剛性が小さくなることなどが考えられる。また、インバート部分における間隔の違いの結果（図-6 参照）は、天端部分とは様相が異なり、格子の間隔の違い影響（2m と 1m）はほとんどなかった。つぎに格子の形状の違いを見ると、天端部分（図-5 参照）では斜格子状のほうが大きくなっているが、インバート部ではほぼ同じ値となっている。

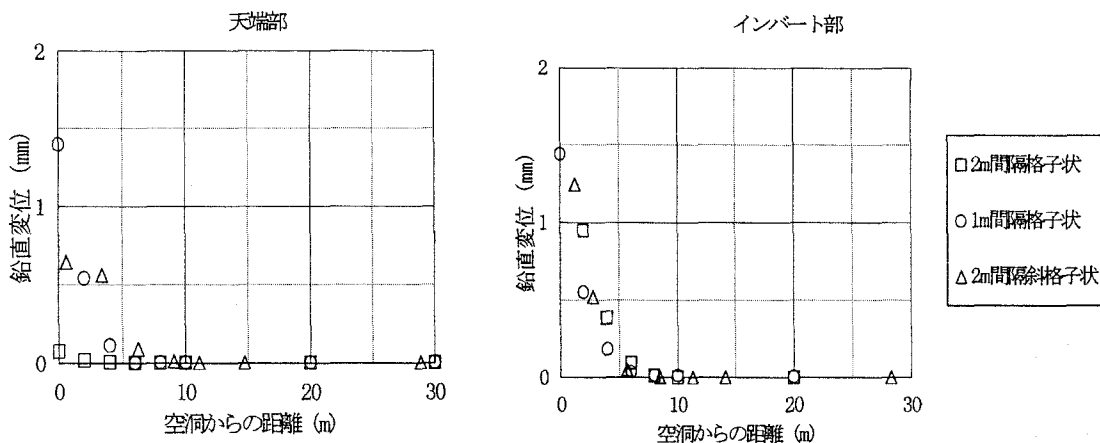


図-5(上図左)、6(上図右) 不連続面の形状の違いによる天端部分およびインバート部分の鉛直変位

3.4 垂直剛性およびせん断剛性の違いによる鉛直変位の変化（硬岩）

硬岩での垂直剛性ならびにせん断剛性の値には幅があり、ここでは、その幅における最も良い値（垂直剛性：300MPa/mm、せん断剛性：6.5MPa/mm）と最も悪い値（垂直剛性：8MPa/mm、せん断剛性：0.52MPa/mm）での天端部分の沈下およびインバート部分の盤膨れについて検討した。図-7、8 は、それぞれ天端部分における沈下とインバート部分における盤膨れを示したものである。いずれの場合も、最も良い値が最も悪い値に比して約 1/5 となった。これは不連続面における剛性が大きくなると不連続面の開口挙動が抑えられるためと考えられる。

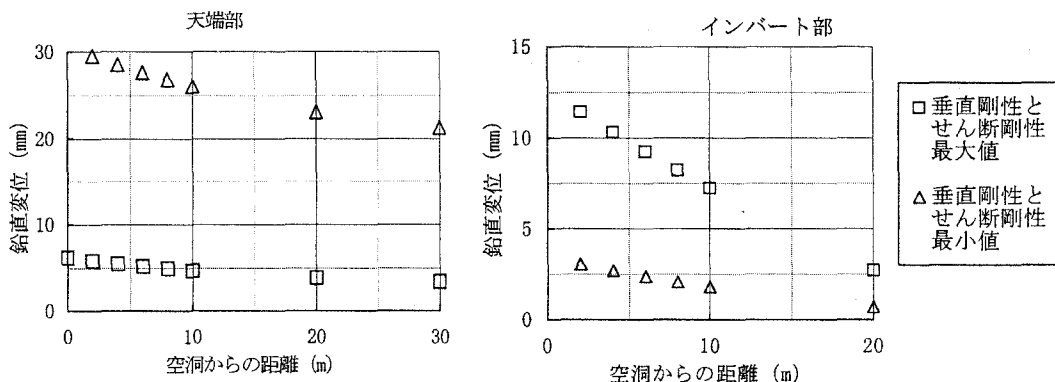


図-7(上図左)、8(上図右) 剛性の違いによる天端部分およびインバート部分の鉛直変位

3.5 地山等級の違いによる鉛直変位の変化(吹付けとロックボルトの併用)

地山等級の違いによる天端部分およびインバート部分の鉛直変位の違いを吹付けコンクリートとロックボルトを併用した場合について検討した。図-9 は天端部分の沈下を調べたもので岩盤の種類をとわず支保効果が現れており内空表面部分ではいずれも 3mm 程度であった。一方図-10 はインバート部分における盤膨れをみたもので、天端部分に比べて鉛直変位は大きくなっており空洞近辺では悪い岩盤のほうが盤膨れ量は大きい、空洞から遠ざかると逆に良い岩盤のほうが大きくなっている特徴がある。

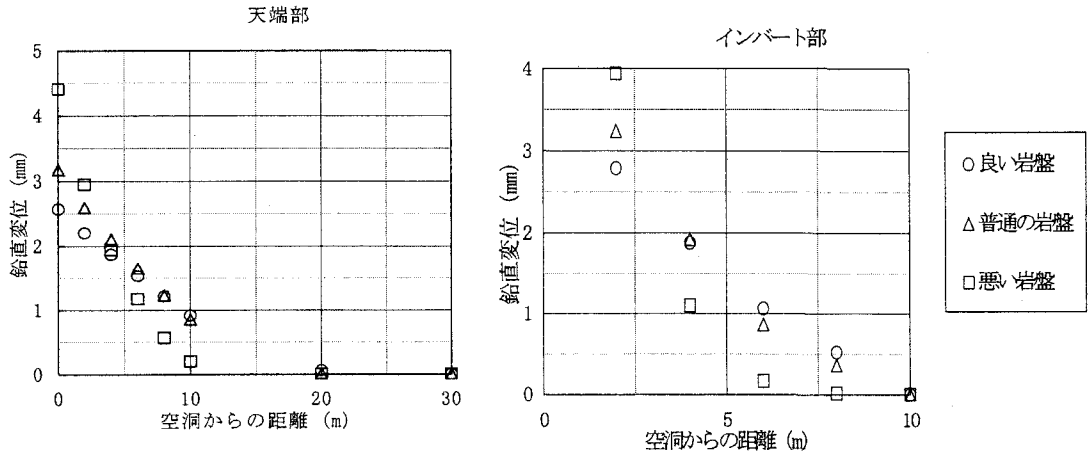


図-9(上図左)、10(上図右) 地山等級の違いによる天端部分およびインバート部分の鉛直変位

4. おわりに

本研究は、良い岩盤内に偏平な大断面トンネルを掘削した場合での解析的研究であり、天端部の沈下とインバート部の盤膨れに着目し考察した。得られた結果をまとめると以下になる。

- 1) 支保については、ロックボルトの支保効果が著しく良いが、吹付けコンクリートではあまり効果がなかった。
- 2) 側圧係数の違いでは、天端の安定性については側圧係数が大きいほうが良い。
- 3) 天端部分では、不連続面の間隔が大きいほうが鉛直変位は小さく、インバート部分では 1m と 2m の不連続面の間隔の違いでほとんど差はない。
- 4) 剛性については値の大きいほうが変形量は小さい。

今後、大断面トンネルの断面形状や、地山条件、掘削方法についての更なる検討が必要である。

5. 参考文献

- 1) Bieniawski, Z.T.: The Geomechanics Classification in Rock Engineering Application, Proceedings of 4th International Congress on Rock Mechanics, pp.41~48, 1979
- 2) Barton, N., R. Lien and J. Lunde.: Engineering Classification of Rockmasses for the Design of Tunnel Support, Rock Mechanics, Volume.6, No.4, pp189~236, 1974
- 3) Serafim, J.L. and Pereira, J.P.: Considerations of the Geomechanics Classification of Bieniawski of International Symposium on Engineering Geology and Underground Construction, LNEC, Lisbon, Portugal, Volume. 1, pp. II.33~II.42, 1983