

不連続性岩盤におけるトンネル掘削時の 地山挙動に関する数値実験

NUMERICAL INVESTIGATION FOR THE BEHAVIOUR OF TUNNEL EXCAVATED IN JOINTED ROCK MASSES

永井哲夫¹⁾・張 玉軍²⁾・小谷野康之³⁾

Tetsuo NAGAI, Yujun ZHANG, Yasuyuki KOYANO

Recently, the need for shallow tunnel with large cross-section which has three vehicular lanes such as the New Tomei and Meishin Expressway is increasing. In the case of these tunnels, influence of geometrical and mechanical properties of rock joints on stability of surrounding rock masses are not enough to be investigated for lack of enough experiences.

Therefore, in this research, some numerical investigation by using distinct element method (UDEC code) is carried out. Then, the effect of deformation property of rock joints on the behaviour of surrounding rock masses is discussed.

Key Words : jointed rock masses, shallow tunnel, large cross section, tunnel excavation analysis, distinct element method

1. はじめに

近年、第二東名・名神高速道路などに見られるように、3車線に対応した扁平大断面トンネルなどの超大断面トンネルの建設が増加する傾向にある。節理などの不連続面の影響は、従来の2車線に対応したトンネル程度の規模の断面であればあまり問題にならなかった。しかし、超大断面の場合には、これまでに十分な経験がないことから、トンネル周辺地山の安定性に不連続面の諸特性（幾何学および力学特性）が及ぼす影響はどの程度であるか明らかにされていない。また、土被りの小さい超大断面トンネルの掘削に際しては、地山に応じた掘削工法により分割施工を行う必要がある。ところが、不連続面の影響を考慮して掘削順序を適切に評価できる方法はないのが現状である。そこで本研究では、不連続体的解析手法の一つである個別要素法の汎用プログラム（UDEC）を用いて数値実験を行い、不連続面の変形特性のモデル化がトンネル掘削時の周辺地山の挙動に及ぼす影響について考察する。さらに、土被りの小さい大断面トンネルの分割施工に関して、著者らが提案する不連続面のせん断剛性モデルを用いてUDECによる数値実験を行い、掘削順序がトンネル周辺地山の挙動に及ぼす影響について比較検討する。ただし、ここでは支保工や補助工法の影響を考慮していない。

1) 正会員 博士（学術） (株)青木建設 研究所 土木研究室

2) 正会員 工学博士 中国科学院 武漢岩土力学研究所（現、(株)青木建設 客員研究員）

3) 正会員 (株)青木建設 研究所 土木研究室

2. 岩盤不連続面の変形特性のモデル化

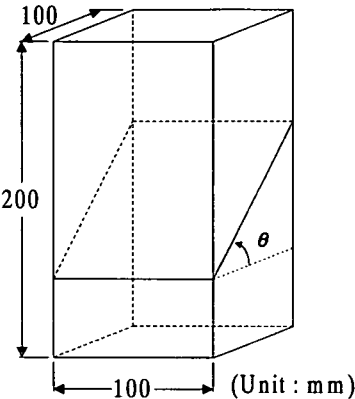
不連続性岩盤を対象に岩盤構造物を構築する場合、その力学的挙動を解析的に評価するためには、岩盤不連続面の諸特性（幾何学および力学特性）が岩盤構造物の力学的挙動に及ぼす影響を適切に考慮することが重要である。そこで本研究では、岩質材料を用いて作製した不連続供試体による三軸圧縮実験を行い、その結果に関して個別要素法の汎用プログラム（UDE C）によるシミュレーション解析を実施し、岩盤不連続面の変形特性のモデル化について検討する。

(1) 実験概要および結果

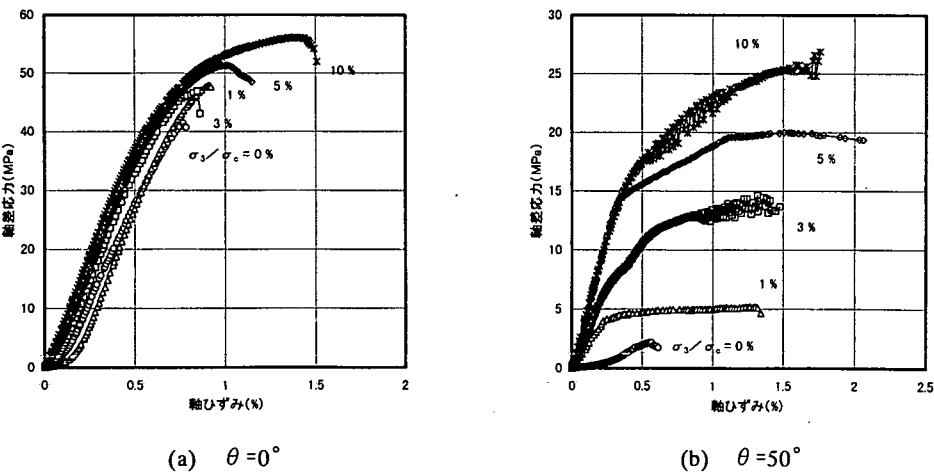
まず、図－1 に示すように実験では卓越する一群の平滑な不連続面を含む不連続供試体を作製し、平面ひずみ拘束装置にセットしてこれを特製大型三軸セルの中に設置した。そして、不連続面の角度および数を変化させて、通常の三軸圧縮実験と同様の応力経路で実験を行った。なお、岩石実質部の材料をモルタルとし、その一軸圧縮強度および弾性係数の平均値は材令 7 日でそれぞれ 41.2MPa および 9.3GPa であった。

いま、実験により得られた代表的な見かけの軸差応力－軸ひずみ曲線を図－2 に示す。図－2 (a) から不連続面の角度が 0° の場合、不連続面が不連続供試体の巨視的挙動に及ぼす影響は小さく、インタクト供試体とほぼ同様の挙動を呈する。一方、図－2 (b) から不連続面の角度が 50° の場合、不連続面の影響は大きく、インタクト供試体とは大きく異なる挙動を示している。ただし、後者の場合でも、側圧比が大きくなるとインタクト供試体の挙動に近づく傾向にある。ここで、側圧比 (σ_3/σ_c) は、側圧とモルタルの一軸圧縮強度の比として定義されるものである。

以上のことから、不連続面の角度によっては、不連続供試体の見かけの力学特性を材料固有の値として取り扱えない場合があることが分かる。また、不連続供試体の見かけの力学特性は顕著な拘束圧依存性を示すことも分かる。そこで、このような不連続供試体特有の挙動をどのように評価するかが問題となる。



図－1 不連続供試体の概要

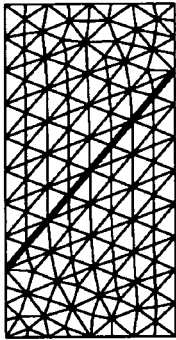


図－2 不連続供試体の見かけの軸差応力－軸ひずみ曲線

(2)解析概要、結果および考察

不連続体的解析手法は、モデル実験のシミュレーションや数値実験において有効である。その中でも個別要素法の汎用プログラム（UDEC）は、岩盤不連続面の諸特性（応力依存性、不連続面のラフネスおよびダイレイタンスーなど）を直接モデル化することが可能で取扱いも容易である。そこで、著者らは本シミュレーション解析にUDECを用いている。

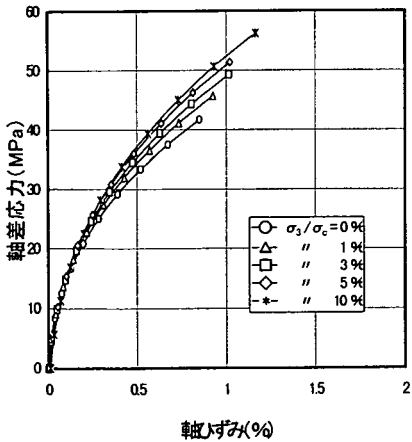
ここでは、解析対象として前述の代表的な実験結果（図－2 参照）を取り上げた。そして、図－3 に示すような解析モデルを用いて、別途実験により求めた岩質部および不連続面の力学特性を入力値（表－1 参照）として解析を行った。表－1 から明らかなように、本研究では不連続面のせん断挙動が支配的になる岩盤の挙動を表現するため、不連続面の垂直剛性（ K_n ）を定数、せん断剛性を応力依存性（ $K_t = a \sigma_n^b$ ）としてモデル化している。解析においては、見かけの最大軸差応力を 10 ステップに分けて载荷し、得られた軸変位から見かけの軸ひずみを算出して見かけの軸差応力－軸ひずみ曲線を求めている。そこで、図－2 に示した実験結果に対応する解析結果をまとめると図－4 のようになる。この図から、本研究で提案した不連続面の変形特性モデルにより、不連続供試体の巨視的挙動をよく表現できることが分かる。なお、 K_t を定数として剛性比（ K_n/K_t ）のみを変化させても、このような挙動を十分には表現できないことが分かっている¹⁾。



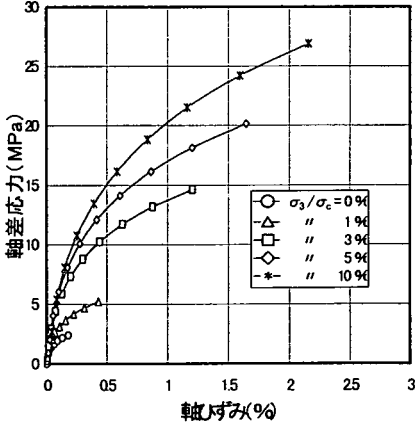
図－3 解析モデル

表－1 解析の入力値

岩質部	弾性係数	9.3×10 ³ MPa
	ポアソン比	0.3
	粘着力	9.5MPa
	内部摩擦角	43°
不連続面	垂直剛性	5×10 ⁵ MN/m ³
	せん断剛性	a 4.6×10 ³ /m
		b 0.9
	見かけの粘着力	0.0MPa
	せん断抵抗角	34°



(a) $\theta=0^\circ$



(b) $\theta=50^\circ$

図－4 解析により得られた見かけの軸差応力－軸ひずみ曲線

3. 土被りの小さい大断面トンネルの掘削解析

前章における不連続面の変形特性のモデル化に関する検討の結果、不連続面のせん断挙動が支配的になるような不連続供試体の巨視的挙動を表現するために、不連続面の垂直剛性を定数、せん断剛性を応力依存性（式(1)参照）として取り扱う方法は有効であることが分かった。

$$K_s = a \sigma_n^b \quad (a : \text{せん断剛性数}, b : \text{せん断剛性指数})$$

.....(1)

そこで本章では、土被りの小さい大断面トンネルを対象に、不連続面の変形特性のモデル化がトンネル掘削時の周辺岩盤の挙動に及ぼす影響について考察する。

(1) 解析概要

ここでは、不連続面の変形特性のモデルとして、剛性比をパラメータとするモデル（垂直およびせん断剛性はともに定数）およびせん断剛性の応力依存モデルを取り上げる。そして、図-5に示すような解析モデルを用いて、硬岩を対象とした要素実験²⁾により求めた岩質部および不連続面の力学特性を入力値（表-2参照）とした。ただし、不連続面の変形特性としては、表-3に示すようなケースに対応するものを用いた。表-3から分かるように、剛性比をパラメータとするモデルに関して、ここでは3種類の剛性比を設定して（ $K_n/K_s=5, 20, 2000$ ）、 K_s を K_n に対してそれぞれ一定値だけ低減させている。一方、応力依存モデルとしては、硬岩を対象とした要素実験より求めた値を用いるケースに加え、寸法効果の影響を考慮して1/10に低減した K_s を用いるケースを設定した。寸法効果による低減率は著者らがこれまで岩盤不連続面に関して行った実験的研究の成果に基づいて選定している。

また、本解析では土被りを30m、トンネル形状を扁平大断面（幅18.3m、高さ12.0m）、初期応力比（ σ_v/σ_H ）を1としている。そして、不連続面を2群として、傾斜角と間隔をそれぞれ60°と1mおよび150°と3mに設定した。なお、時間ステップはdefault値、反復回数は10000である。

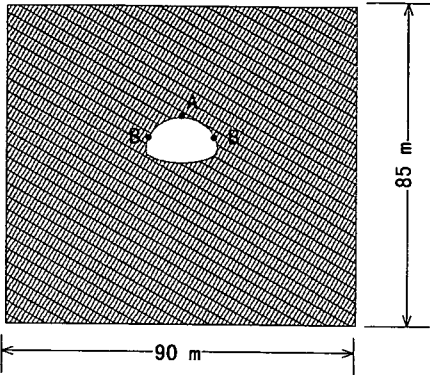


図-5 解析モデル

表-2 解析の入力値

岩質部	弾性係数	2.0×10 ⁴ MPa
	ポアソン比	0.3
	粘着力	20MPa
	内部摩擦角	50°
不連続面	見かけの粘着力	0.0MPa
	せん断抵抗角	35°

表-3 解析ケースと不連続面の変形特性のモデル

ケース	$K_n(\text{MN/m}^2)$	$K_s(\text{MN/m}^2)$	備 考
1	1.0×10^6	2.0×10^5	$K_s = K_n/5$ 、剛性比をパラメータとするモデル
2	〃	5.0×10^4	$K_s = K_n/20$ 、〃
3	〃	5.0×10^2	$K_s = K_n/2000$ 、〃
4	〃	$K_s = 3200 \sigma_n^{0.8}$	硬岩を対象とした要素実験の値を採用、 σ_n :MPa
5	〃	$K_s = 320 \sigma_n^{0.8}$	寸法効果を考慮してケース4の K_s を1/10だけ低減

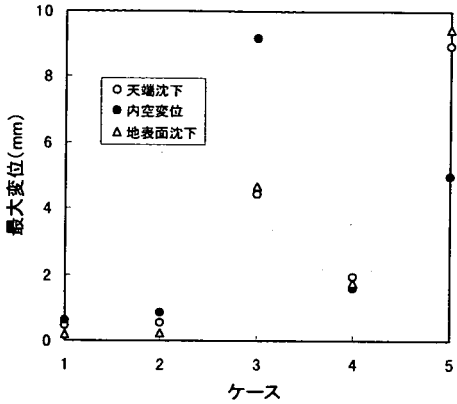
(2) 解析結果および考察

まず、土被りの小さいトンネルで計測管理項目としてよく用いられる天端沈下（点A）、内空変位（測線BB'）および地表面沈下を取り上げ、表－3の各ケースに対して解析値をまとめて示すと図－6のようになる。この図から、不連続面の変形特性のモデル化によりトンネル周辺地山の挙動は大きく異なると考えられる。

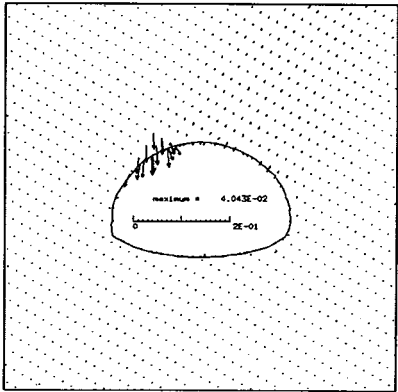
次に、トンネル周辺地山の挙動について検討するため、代表的な解析ケースとしてケース3およびケース5を取り上げて最終変位ベクトルをまとめると図－7が得られる。図－7(a)のように K_s を K_n に対して $1/2000$ 低減させても、不連続面に沿うせん断挙動はわずかに見られるだけで、不連続面の開口に伴う局所的な崩落現象が主として表現されるだけである。

それに対して、図－7(b)のように K_s として寸法効果を考慮した応力依存モデルを用いると、不連続面の開口に伴う局所的な崩落現象と不連続面に沿うせん断挙動に伴う地表面沈下などの複合現象が表現されている。このように、不連続面の変形特性のモデル化により地山挙動は大きく異なることが分かる。

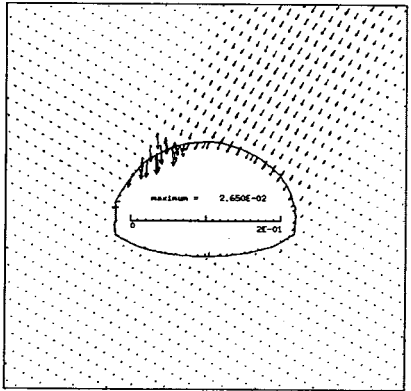
以上のことから、不連続性岩盤内に設けられる土被りの小さい大断面トンネルの場合、掘削に伴い周辺地山においては不連続体的挙動が支配的になると考えられる。それに対して、土被りの大きいトンネルや標準断面のトンネルの場合、同様の応力依存モデルにより解析を行うと連続体的挙動が支配的であり、ここで得られた地山挙動とは大きく異なっている。また、図－6と図－7を比較すれば分かるように、天端沈下、内空変位および地表面沈下などの連続体的挙動に関する計測管理項目を用いて不連続体的挙動を把握することは困難である。



図－6 各ケースの解析変位



(a) ケース 3



(b) ケース 5

図－7 周辺地山挙動の相違

4. 分割施工を考慮した大断面トンネルの掘削解析

超大断面トンネルの掘削に際しては、地山に応じた掘削工法により分割施工を行う必要がある。ところが、不連続面の影響を考慮して掘削順序を適切に評価できる方法はないのが現状である。そこで本章では、前章で提案した寸法効果を考慮した応力依存モデルを用いて数値実験を行い、掘削順序が空洞周辺地山の挙

動に及ぼす影響について検討する。

ここでは、前章で用いた解析条件と同一のものを用いて、掘削順序のみを図-8に従って変化させて解析を行った。つまり、解析メッシュは図-5、入力値は表-2および表-3のケース5に示す値とした。なお、解析における時間ステップはdefault値、反復回数は15000としている。

いま、図-8の各ケースに対して解析結果をまとめると図-9のようになる。また、ケース1およびケース3に関して最終変位ベクトルをまとめて示すと図-10が得られる。これらの図から、掘削順序による影響はあまり顕著ではないことが分かる。これは、本解析においては掘削断面の分割および掘削順序のみを変化させて、支保工などによる地山の補強効果を考慮していないことによると考えられる。しかし、掘削に伴う応力再配分により潜在的に地山がどのように挙動するかを知るには有効であろう。図-8に示すケースの中では、TBM導坑先進工法が全断面および上半先進工法に比べると天端および地表面沈下を若干抑制できているようである。これについては、支保工や補助工法を考慮した解析により今後さらに考察する必要がある。

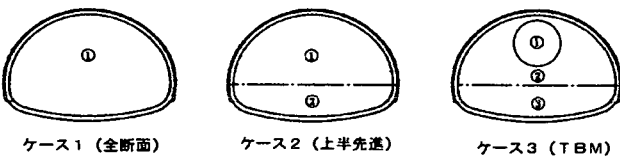


図-8 解析ケースと掘削順序

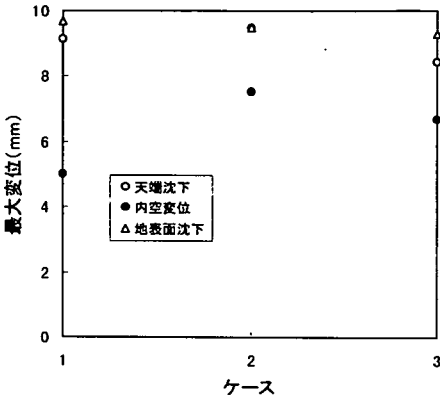


図-9 各ケースの解析変位

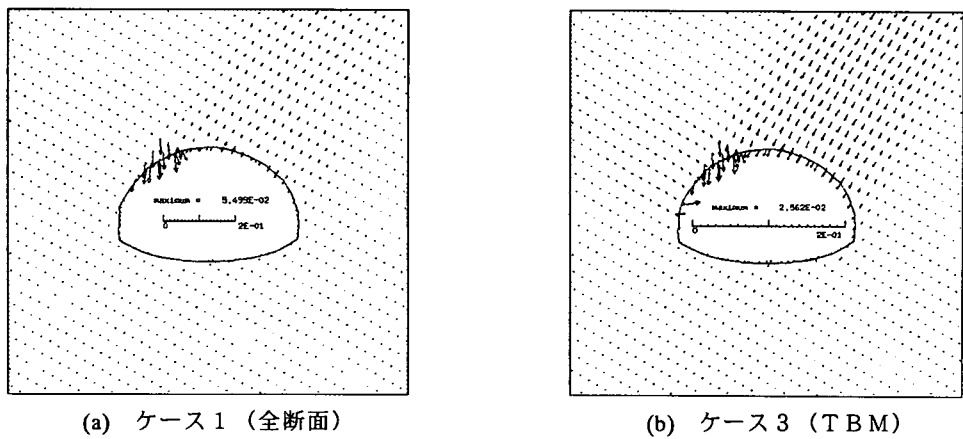


図-10 掘削順序による周辺地山挙動の相違

【参考文献】

1) 張 玉軍, 小谷野康之, 永井哲夫: 岩盤不連続面の変形特性評価に関する解析的検討, 第32回地盤工学研究発表会, pp. 1263-1264, 1997.

2) 永井哲夫: ロックボルトにより補強された不連続性岩盤の力学的挙動に関する研究, 神戸大学学位論文, pp. 82-93, 1992.