

大規模トンネルにおける 情報化設計施工のための岩盤ブロック解析

New Practical Rock Block Analysis for
Observational Design and Construction Method in Large Tunnels

黄 載允¹・里 優²
Jae-Yun Hwang and Masaru Sato

¹工学博士 地層科学研究所 (〒242-0014 大和市上和田1794)

²工学博士 地層科学研究所 (〒242-0014 大和市上和田1794)

In this paper, a new practical rock block analysis method for observational design and construction method in large tunnels is suggested, and then applied to the actual example of the large tunnel with a super-large cross-section. The large tunnel is first bored by a 5m diameter Tunnel Boring Machine (TBM) and is enlarged to a main tunnel cross section by New Austrian Tunneling Method (NATM). The suggested analysis method considers finite persistence of discontinuities. To illustrate the applicability of this method for observational design and construction method in large tunnels, the analysis results are compared and examined with those of the conventional method.

Key Words : rock block analysis, observational design and construction method, large tunnel, TBM, discontinuity persistence

1. 結 言

岩盤表面を近づいてよく観察すると、岩盤が節理、層理、微小亀裂などの顕著な構造特性を持っていることがわかる。また少し離れてみると岩盤が大きなスケールの多くの不連続面を内包していることがわかる。このように、岩盤は本質的に不連続体であり、不連続面が岩盤挙動を支配している^{1) - 3)}。

岩盤中に存在する不連続面は、互いに交差することにより、多数の岩盤ブロックを形成している。さらに、岩盤の掘削面上には、既存のブロックが掘削面で切断されることによってできた新たなブロックが存在している。GoodmanとShi⁴⁾により体系化されたブロック理論では、不連続面の幾何学的条件からブロックの分類を行い、挙動可能なブロックを同定することができる。また、滑動の可能性のあるブロックを決定し、その安定性と支保力を評価することもできる。しかし、ブロック理論では、不連続面は無限に広がっていることを前提としている^{4) - 5)}。す

なわち、ブロックを形成する不連続面を一律に無限に広がると仮定することになる。それによって形成される大きなブロックほど、実際は形成されている確率は小さいはずである。したがって、不連続面を無限に広がるとモデル化することは、ブロックの大きさを過大評価してしまう可能性がある。

トンネル断面が大きくなればなるほど、崩壊する可能性のある岩塊の数も大きさも増え、トンネルを掘削する過程で岩盤の破壊が生じたならば、被害はより深刻となる。このような観点から、ブロック理論を実際の大規模トンネル問題に適用するためには、不連続面の有限な連続性 (Persistence)^{6) - 8)}を考慮することが必要であると考えられる。

近年、トンネル施工においては、情報化設計施工を行うことが一般化している。トンネルでは、事前設計の段階で周辺岩盤の挙動や安定性を完全に把握することは困難である。そのため、施工中において掘削による岩盤の挙動を観察・計測し、その結果を設計・施工に反映させることが重要になる^{8) - 10)}。

本研究では、大規模トンネルにおける情報化設計施工のため、有限な連続性（Persistence）を考慮した岩盤ブロック解析手法を提案した。解析手法の作動確認のために、第二名神高速道路の大断面トンネルのTBM（Tunnel Boring Machine）導坑から取得されたデータを用いて不安定ブロックを抽出した。解析は、従来の方法と今回の研究で提案した方法の2通りで実施し、比較評価を行った。本解析に用いたデータは、TBM坑壁観察展開図上の不連続面のトレースを読み取り、不連続面の走向・傾斜を計測したものである。

2. 不連続性岩盤のモデル化

(1) 不連続面円盤モデル

ブロック理論では、不連続面は無限に広がると仮定する。しかし、有限な連続性を考慮した解析を行うためには、不連続面を適切な形で表現する必要がある。不連続面はある程度の曲面性を持っていると考えられるが、単純に平面とするのが一般的である。実際の不連続面の形状は必ずしも円とは限らないが、解析上の便利さから、一般に円として扱うことが多い^{6), 11) ~ 21)}。ここでも、円盤で不連続面を表現することとする。不連続面円盤モデルは、不連続面を岩盤内で有限の大きさを持つ平面的な存在として捉えたものである。

不連続面円盤モデルでは、図-1に示すように、単位法線ベクトル（ $\hat{n}$ ）、円盤半径（ r ）、中心位置（ x, y, z ）のパラメータだけで形状を決定することができる。トンネル問題のような十分な情報が得られない場合には、掘削面上に両端の2点が観察されれば、走向・傾斜と半径を決定だけで円盤を表現することができる。また、不連続面円盤モデルは、不連続面の交差を考慮しやすいという特徴もあり、岩盤ブロックの同定には適していると考ええる。

(2) 解析領域のモデル化

ここでは、解析領域を3次元の開閉域としてモデル化し、境界は平面多角形をつなぎ合わせた形で表現する。本来、大きな3次元閉領域であったものが不連続面により新たに小さな3次元閉領域に分割され、それがブロックとなるという発想で捉えるためである。地下空洞と斜面のモデル化の例を図-2に示す。掘削面を表現した平面以外は、解析を行うため

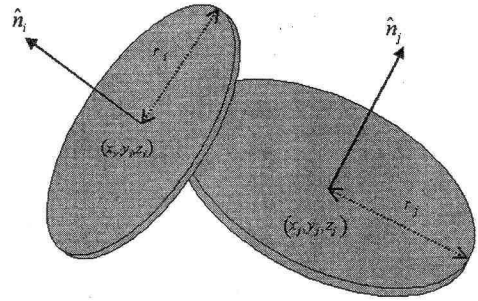
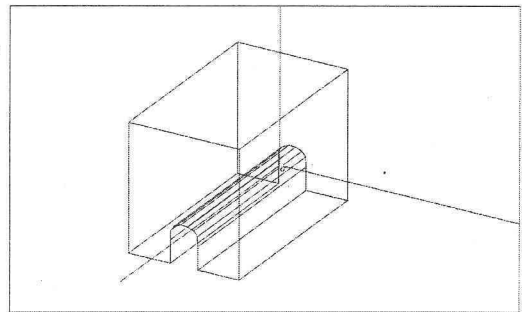
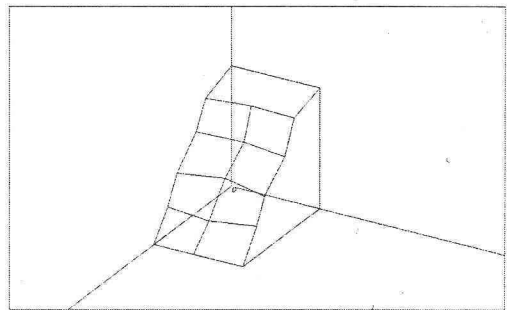


図-1 不連続面円盤モデル



(a) 地下空洞の例



(b) 斜面の例

図-2 地下空洞と斜面の解析領域のモデル化の例

に、仮想的に設けたものであり、この平面を含むブロックが検出されたとしても、仮想的な平面を設けたために形成されたブロックであるとし、除外することにする。

3. 3次元岩盤ブロックの同定手法

ブロック理論やウェッジ理論²²⁾は挙動可能ブロックの同定法としてよく知られている。ただし、これらは不連続面が無限に広がるという仮定の下で行われるものであり、不連続面の連続性は考慮されない。本研究では、不連続面円盤モデルを用い、不連続面の有限な連続性を考慮した3次元岩盤ブロック同定を行う。本手法はブロックの形状に左右されず認識でき、複雑な掘削面の問題（凹型）にも適用できる。

(1) ブロック抽出の概要

Shiら⁴⁾のブロック理論では、幾何学的に形成されるブロックの判定を実施しているが、本研究では、不連続面が有限であることから、図-3に示すように、不連続面の連結性（connectivity）を検索することでブロックの抽出を行っている。

また、ブロックの体積については、上記で決定されたブロックの中に、小さい単位体積の立方体が多くつはいるかを調べることで決定する手法を用いている。

(2) 2次元ループの同定

連結性を調べて、ブロックを形成しない不連続面を除去する方法を述べる。ここでは、モデルの簡略化を行い、2次元ループについて述べる。

最初の段階として、解析に用いる不連続面円盤の最小半径を決定し、最小半径以下の半径をもつ不連続面の除去を行う。決定論的な扱いをする場合には、十分小さな値は観察データに含まれないことが多いため、必ずしも必要ではないが、確率論的な扱いをする場合には必要となる。トレース長の観察データの記録は、ブロックの安定性問題では、施工時の条件から決定される。例えば、施工初期の支保工の強度が、一辺2m四方のブロックの滑動を抑止できる程度のものであるならば、サンプリングすべき不連続面の間隔と連続性は概ね2m以上でいいとされている。⁸⁾

次に、不連続面の連結性の観点から不連続面の除去を行う。ここで、「連結」の定義として、以下の2つの条件を満たす不連続面を連結不連続面と呼ぶことにする（図-3）。

① 少なくとも三つ以上の不連続面と交差する（掘

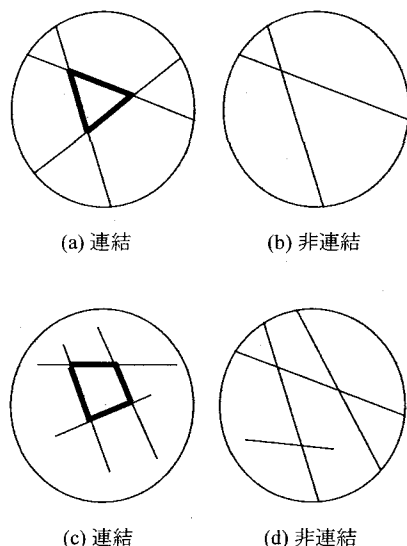


図-3 連結不連続面の定義

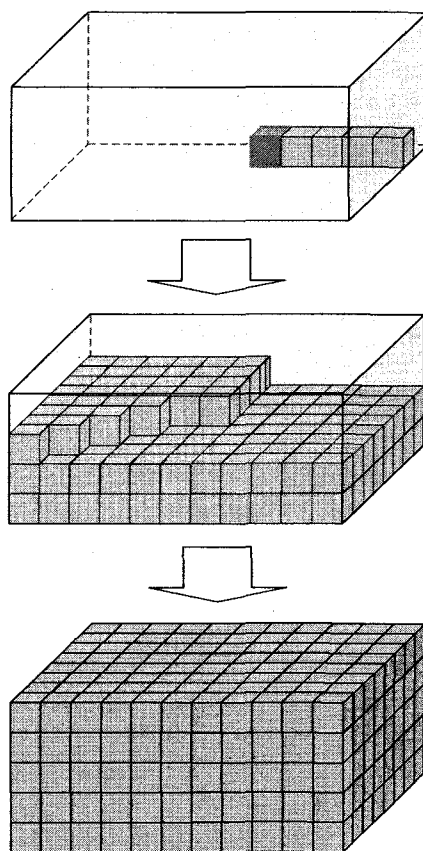


図-4 体積要素増殖法（イメージ図）

削面も含み、掘削面は平面多角形の不連続面として捉える)。

- ② 対象不連続面上で、他の不連続面との交線が少なくとも一つ以上のループを形成している。

①については、辺の本数が最小のループは三角形であり、三つ未満の不連続面としか交差しない場合には、ループが形成されることはないためである。

②については、十分大きな面を3次的に組み合わせることにより面が形成される場合には、面は他の面により切り取られることにより、面となると考えるためである。注目する面上で2次元ループが形成される必要がある。

これらの条件を満たさない不連続面を非連結不連続面と呼び、これらを除くことになる。

(3) 3次元ループの同定

すべての不連続面がブロック形成に関係するのではなく、連結している不連続面だけであると考え、前段階で非連結不連続面を除去した。この結果、不連続面上で2次元ループを形成する不連続面が同定された。次の段階では、それらの集合体として3次元ループが形成されるかどうかを調べる。

岩盤ブロック同定問題では、掘削面で2次元ル

ープが形成されていることが絶対条件となる。2次元ループが形成されていない場合には、掘削面でブロックとして出現しないことになる。ブロックが形成されるためには、掘削面上の2次元ループのすべての構成面上で、掘削面を構成要素に含む2次元ループが形成される必要がある。これらを複数回繰り返し、それが満足されていれば3次元ループが形成されているとする。

(4) ブロック形状と体積の決定

Shiら⁴⁾のブロック理論では、幾何学を用いることで形成されるブロックの判定を実施しているが、本研究では、不連続面が有限であることから、図-3に示すように、不連続面の連結性(connectivity)を検索することでブロックの抽出を行っている。

ブロックの形成が確認された次に、ブロック理論では、挙動可能かどうかの判定を行う。そのためには、ブロックの体積を知ることが重要になる。

本研究では、ブロック形状および体積を表すために、体積要素増殖手法を提案する。この方法では凹型のブロックも考慮することができるため、従来の手法より使用範囲が拡大すると考えられる。

本手法では、まず、掘削面上に開始点を設ける。

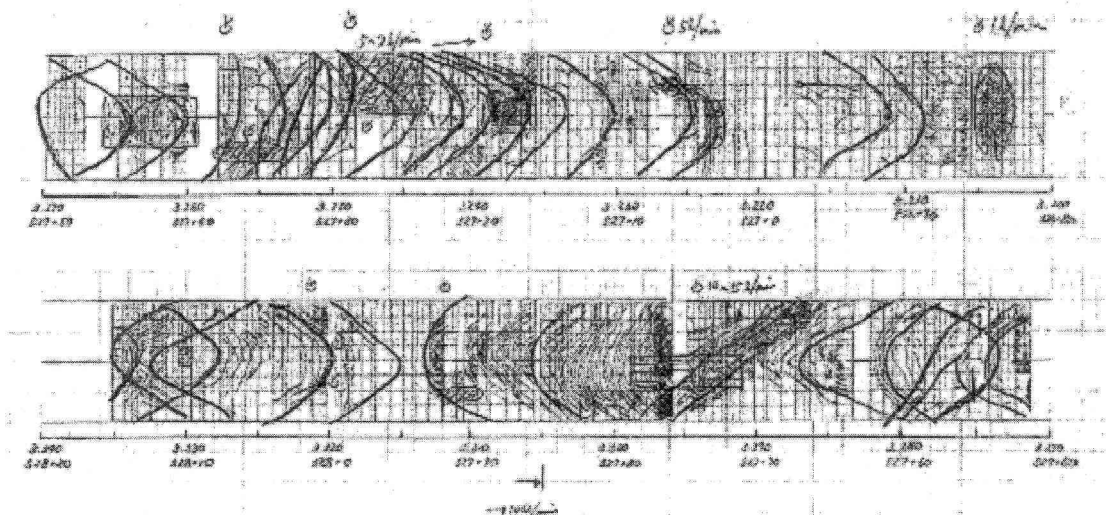


図-5 TBM先進導坑観察展開図

体積要素は，以下の4種類の属性に分けることにする．ここで， $g(x,y,z)$ という関数を用いて，体積要素の属性を示す．

$g(x, y, z) = b$ 体積要素はブロック内部に存在するが、隣接する体積要素の属性についての情報はまだない。

$g(x,y,z)=d$ 体積要素はブロック内部に存在し、隣接する体積要素についての情報もわかっている。

具体的には、初期設定として、ブロック内部では開始点の体積要素は $g(x,y,z)=b$ であるが、それ以外はすべて $g(x,y,z)=a$ となっている。ここで、隣接する体積要素の性質を調べることができるのは、 $g(x,y,z)=b$ となる体積要素のみであるという取り決めをする。これに従い、開始点の体積要素に隣接する 6 個の体積要素を調べることができる。隣接する 6 個の体積要素の情報がすべて得られれば、注目している体積要素の属性は、 $g(x,y,z)=c$ または $g(x,y,z)=d$ のいずれかになることになる。

また、ブロック内部の $g(x,y,z)=c$ か $g(x,y,z)=d$ のどちらかで表現される体積要素を数えることにより、体積も求めることができる。

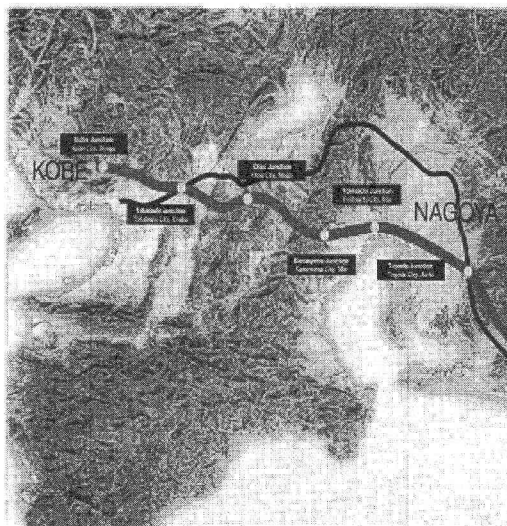


図-6 大断面トンネル位置図

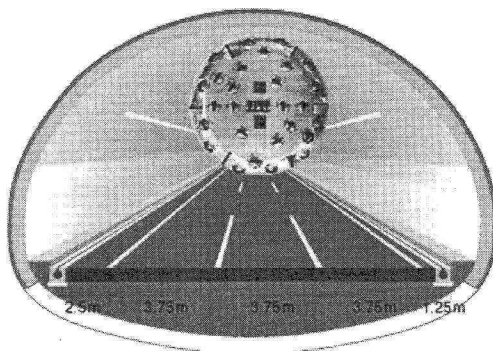


図-7 大断面トンネル断面図

4. 大規模トンネル問題への適用

(1) 不連続面の走向・傾斜を計測

一般に、NATMトンネルでは切羽で地質を観察するが、TBMでは坑壁で地質を観察することになる。しかし、TBM全体は鉄であるので、磁石を利用するク

リノメーターは使用できない。また、TBM掘進速度、工費削減、工期短縮、技術者不在などの理由で、坑壁から直接に不連続面の走向・傾斜を計測することができない場合がある。

したがって、本研究ではTBM坑壁観察展開図上の不連続面のトレースを読み取り、不連続面の位置・走向・傾斜を計測したデータを使用した。図-5に、実際にTBM先進導坑から得られた壁面観察展開図を示す。本システムでは、不連続面は完全な平面であるという仮定が行われる。ここで、不連続面を抽出する二つの方法を述べる。一つの方法はTBM坑のように完全な円形である場合のみ有用である。完全な円形であるため、不連続面はTBM坑壁観察展開図上では、正弦曲線を描く。したがって、TBM坑壁観察展開図上の3点以上を特定することにより、不連続面を求めることができる。また、求められた不連続面と円形であるTBM坑線形の位置関係より、走向・傾斜を計測することができる。この方法は円形トンネル以外には計測できないが、他のもう一つの方法はトンネルの形状に左右されず計測できる。TBM坑壁観察展開図上の3点以上を特定することにより、不連続面の平面方程式を求めることができる。ベクトル解析法を用い、不連続面の平面方程式から、走向・傾斜を計測することができる。

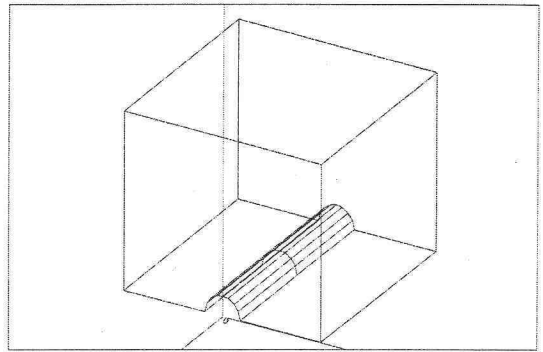


図-9 解析対象領域のモデル化

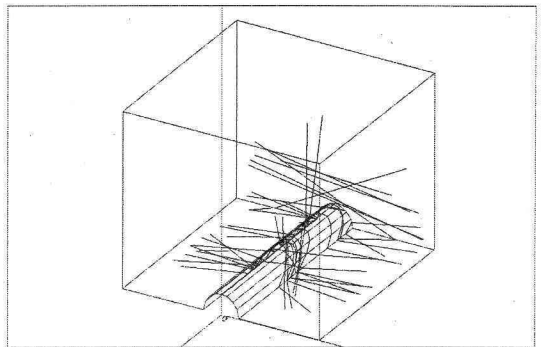


図-10 解析対象領域に発生させた不連続面トレース

(2) 大断面トンネル

日本道路公団が建設中の第二名神高速道路のトンネル（図-6）は、片側3車線で、掘削断面積は約200m²に及ぶ大断面である。これを従来の2車線高速道路と比較すれば、掘削断面積が約2.5倍となる。

この3車線の大断面で、しかも偏平断面の山岳トンネルを安全かつ効率的に施工するために、第二名神高速道路の長大トンネルではTBM（Tunnel Boring Machine）導坑先進拡幅掘削工法が採用されている。

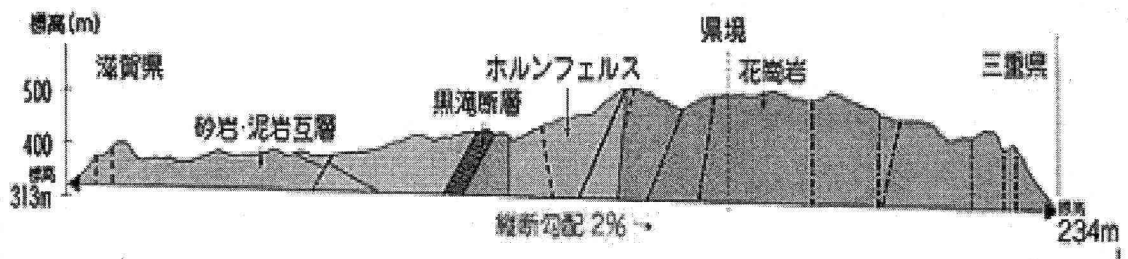


図-8 地質縦断図

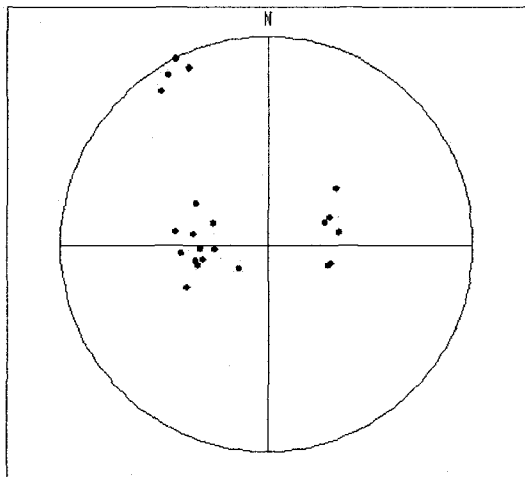


図-11 先進導坑観察展開図から計測した不連続面

表-1 挙動可能ブロック個数

方法	本手法 ($R=45\text{m}$)	従来方法 ($R=\infty$)
個数	2	2

表-2 No.1の挙動可能ブロックの体積

方法	本手法 ($R=45\text{m}$)	従来方法 ($R=\infty$)
体積	21.09	21.04

すなわち、TBM（直径5m）であらかじめ小さな導坑を掘って地質の確認をする。これにより安全に掘削できるようになるほか、崩れやすい地盤や地下水に出合った場合でも、前もって対策を立てることができる。この結果、この後に行う大断面に切り広げる掘削工事が安全に、かつスムーズに進められるという大きなメリットを享受できる。さらに、作業の省力化、工期の短縮に大きく貢献し、建設コスト縮減を図るトンネル掘削の最新技術である（図-7）。

TBM先進導坑では、観察により先に述べた方法により不連続面の連続性を評価することができる。これらの情報を活用することで、本坑大断面トンネル施工時には、不連続面の有限な連続性を考慮するこ

とにより、不安定ブロックの過大評価を防ぐことができる。

(3) 地質概要

トンネル区間は標高500m程度の山地からなり、東の三重県側が急峻で、西の滋賀県側がなだらかな斜面を形成している。地質は、三重県側は、中世代白亜紀に貫入した花崗岩からなり、一部は中世代ジュラ紀田村川層のホルンフェルスとなっている。ホルンフェルスは、火成岩が貫入したときの熱で堆積岩が変成したものであり、割れ目が多く生成されている。花崗岩の一軸圧縮強度は、100MPa程度と非常に大きい。滋賀県側は、第三紀中新世の鮎河層群の砂岩・泥岩・礫岩からなる堆積軟岩である。砂岩・礫岩の一軸圧縮強度は50MPa程度であるが、泥岩の一軸圧縮強度は10MPa以下と比較的軟質である。トンネルの中央部には黒滝断層と想定される断層があり、幅10m程度の破碎帯を形成している可能性が指摘された。実際、下り線施工時には、トンネル全体にわたり大小22箇所の破碎帯が確認された（図-8）。

滋賀県土山町の笹路川区間は、第三紀の砂岩・泥岩互層が東に向けて単調に傾斜しており、硬質な砂岩の間に一軸圧縮強度約3MPaの軟質な泥岩が挟まっている。また、調査地におけるCH級の硬質な砂岩では、層理に直交する形で節理が発達していて、岩盤が不連続性岩盤として扱いうことが地質調査により明らかになっている。

(4) 本坑施工時の不安定ブロックの予測

解析対象領域は、図-9に示すようにモデル化した。解析対象領域に発生させた不連続面トレースを図-10に示す。トンネルの中央の線は切羽を表す。不連続面円盤の半径は、トンネルの最大径（掘削幅）である約1.8mの2.5倍の4.5mに設定した。不連続面情報として、TBM先進導坑における観察展開図上の不連続面のトレースを読み取り、不連続面の位置・走向・傾斜を計測して得られたデータを用いた。先進導坑における観察展開図から計測して得られた不連続面を図-11に示す。著者が提案する岩盤ブロック解析手法を用いて、本坑大断面トンネル施工時の不安定ブロックを予測し、従来のブロック解析による結果と比較および検討を行った。従来のブロック解析では、不連続面が無限に広がるという仮定の下で行われるため、不連続面の有限な連続性の影響

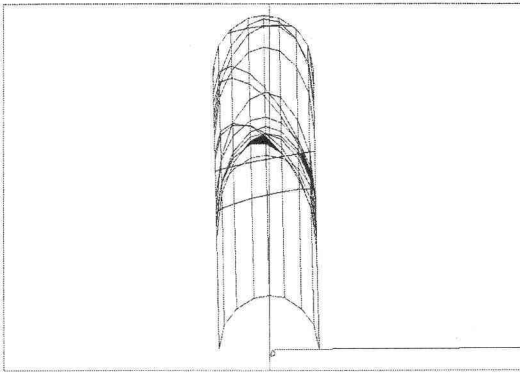
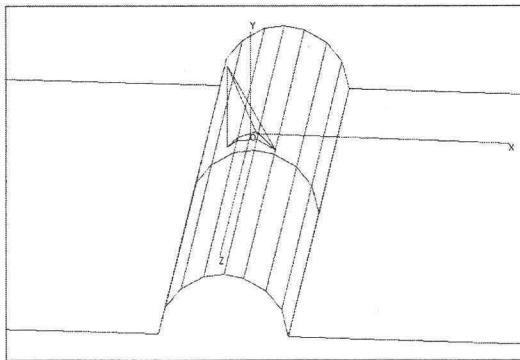
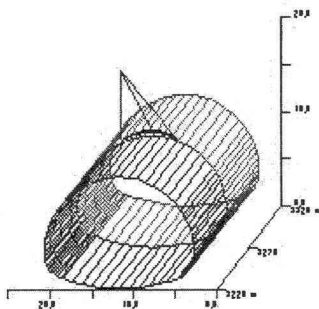


図-12 抽出した挙動可能ブロック



(a)



(b)

図-13 No. 1の挙動可能ブロック

を考慮することができなかったが、本岩盤ブロック解析手法では不連続面の連続性を考慮することができる。

得られた挙動可能ブロックの個数を、表-1に示す。本坑大断面トンネル施工時には、2個の挙動可能ブロックが抽出された。

本解析手法による挙動可能ブロック個数は、表-1に示すように、従来のブロック解析による個数と同じであった。本解析手法による挙動可能ブロックの体積は、従来のブロック解析による体積とほぼ同じであった。表-2にNo. 1の挙動可能ブロックの体積を示す。また、図-12に抽出した挙動可能ブロックを示す。

No. 1の挙動可能ブロックについて、図-13に示すように、従来のブロック解析による結果と比較を行った。図-13 (a) に本解析手法によるNo. 1の挙動可能ブロックを、図-13 (b) に従来のブロック解析によるNo. 1の挙動可能ブロックをそれぞれ示す。本解析手法により求めた挙動可能ブロックは、従来のブロック解析による結果とよく一致していることがわかった。

本トンネルに関しては、ここで提案した手法と従来の手法との明確な差異は見出されなかった。これは、無限の大きさを有する不連続面を仮定した従来の方法においても、偶然に過大なブロックが抽出されなかったためと考えられる。ただし、抽出されたブロックは、従来の手法によるものと同様であり、解析手法の妥当性は検証されたものと考ええる。

5. 結 言

本研究では、大規模トンネルにおける情報化設計施工のための岩盤ブロック解析手法を開発した。また、著者が提案した岩盤ブロック解析手法を用い、実際の大規模トンネルから得られたデータに基づいて、従来のブロック解析による結果と比較および検討を行い、本解析手法の妥当性を検証した。本解析に用いたデータは、TBM坑壁観察展開図上の不連続面のトレースを読み取り、不連続面の走向・傾斜を計測したものである。本岩盤ブロック解析を行う上での手順と特徴を、以下に簡単に述べる。

- (1) TBM先進導坑観察展開図上の不連続面のトレースを読み取り、不連続面の走向・傾斜を計測する。
- (2) 不連続面を不連続面円盤モデルで表現する。
- (3) 挙動可能ブロックの抽出は、ブロックの構成面となる可能性のある不連続面を、連結不連

統面として表現することで行う。すなわち、不連続面の連結性を2次元ループの形成により判定し、次に、それらの集合体として3次元ループの形成を評価し、ブロックを抽出する。

- (4) ブロック体積の算出は、体積要素増殖手法により行う。
- (5) 同定されたブロックに対し、挙動性および安定性の判定を行う。

以上のような手法により、本研究では、大規模トンネルにおける情報化設計施工のための岩盤ブロック解析手法の新しい手法を提案した。

本解析手法は、不連続面の有限な連結性を考慮することができるため、従来の方法では過大に見積もられていた可能性のあるブロックをさらに詳細に評価できるものと考えられる。このことで、建設コストのより縮減を図ることができると考えられる。

謝辞：第一著者の博士論文の一部である本研究を実施するにあたり、貴重なご助言とご指導をいただいた京都大学大学院工学研究科大西有三教授（岩の力学連合会理事長）に対し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 大西有三：不連続性岩盤の調査・解析と評価—講座を始めるにあたって—，土と基礎，地盤工学会，Vol.47-12，pp61-62，1999。
- 2) Hwang, J.-Y., Ohnishi, Y. and Nishiyama, S. : Key Block Analysis in Tunnel Construction for the Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste, *Proc. 2nd Japan-Korea Joint Seminar on Geoenv. Engrg.*, Japan, pp. 61-68, 2002.
- 3) Ohnishi, Y. : Keynote Lecture - Numerical Methods and Tunneling, *Proc. of the Fourth Int'l Summer Symp.*, JSCE, Kyoto, Japan, pp. 1-21, 2002.
- 4) Goodman, R. E. and Shi, G. H. : *Block Theory and Its Application to Rock Engrg.*, Prentice-Hall, 1985.
- 5) 大西有三，長野恵一，藤川富雄：ブロック理論による不連続性岩盤掘削時の安定性評価について，土木学会論文集，No.364/III-4，pp. 209-218，1985。
- 6) Priest, S. D. : *Discontinuity Analysis for Rock Engrg.*, Chapman and Hall, 1993.
- 7) 地盤工学会岩の力学委員会：不連続性岩盤と構造物に関する研究報告書，地盤工学会，1995。
- 8) Hwang, J.-Y. : *Stability Evaluation of Rock Blocks in Tunnels for Observational Method*, Ph.D. Dissertation, Kyoto University, Kyoto, Japan, pp. 289, 2003.
- 9) 手塚昌信：大規模岩盤地下空洞の合理的な設計・施工に関する研究，京都大学博士学位論文，1997。
- 10) Hwang, J.-Y., Sato, M. and Ohnishi, Y. : Quick Evaluation Method for Discontinuity Properties by Vision Metrology for Observational Design and Construction Method in Tunnels, *Proc. 33rd Rock Mech.*, JSCE, Japan, pp. 187-192, 2004.
- 11) Baecher, G. B., Lanney, N. A. and Einstein, H. H. : Statistical Description of Rock Properties and Sampling, *Proc. 18th US Symp. on Rock Mech.*, pp. 1-8, 1977.
- 12) Dershowitz, W. S. : *Rock Joint Systems*, Ph.D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 1984.
- 13) Dershowitz, W. S. and Einstein, H. H. : Characterizing Rock Joint Geometry with Joint System Models, *Rock mech. and rock eng.*, Vol. 21, pp. 21, 1988.
- 14) Dienes, J. K. : On the Inference of Crack Statistics from Observations on an Outcropping, *Proc. 20th US Symp. on Rock Mech.*, pp. 259-263, 1979.
- 15) Kulatilake, P. H. S. W., Wathugala, D. N. M. and Stephansson, O. : Joint Network Modeling with a Validation Exercise in Stripa Mine, Sweden, *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, Vol 30, No. 5, pp. 503-526, 1993.
- 16) Long, J. C. S. : *Investigation of Equivalent Porous Medium Permeability in Networks of Discontinuous Fractures*, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, USA, 1983.
- 17) Long, J. C. S., Gilmour, P. and Witherspoon, P. A. : A Model for Steady Fluid Flow in Random Three-Dimensional Networks of Disc-Shaped Fractures, *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 8, pp. 1105-1115, 1985.
- 18) Long, J. C. S. and Billau D. M. : From Field Data to Fracture Network Modeling; An Example Incorporating Spatial Structure, *Water Resources Research*, Vol. 23, No. 7, pp. 1201-1216, 1987.
- 19) Pollard, D. and Aydin, A. : Progress in Understanding Jointing over the Past Century, *Geol. Soc. of America Bulletin*, Vol. 100, pp. 1181-1204, 1988.
- 20) Yu, Q. : *Analyses for Fluid Flow and Solute Transport in*

Discrete Fracture Network, Ph.D. Dissertation, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, 2000.

- 21) 大西有三, 中川誠司, 田中 誠: 岩盤節理の幾何学的分布性状の推定に関する研究, 土木学会論文集 No.

499/III-28, 59, 1994.

- 22) Hock, E., Kaiser, P. K. and Bawden, W. F. : *Support of Underground Excavation in Hard Rock*, 1995, A. A. Balkema Publishers.