

地盤の異方性

8. 岩石・岩盤と異方性の表示

山 辺 正 (やまべ ただし)
埼玉大学助教授 工学部建設工学科

京 谷 孝 史 (きょうや たかし)
名古屋大学助教授 工学部地圏環境工学教室

8.1 はじめに

一般に岩盤には多数の不連続面が存在し、その規模の大小や成因により断層・層理・節理などと呼ばれている。このような不連続面を多数含む岩盤の力学特性を把握することは、岩盤内にエネルギー施設などを安全かつ経済的に建設するための実用的な側面から重要であると同時に不連続体の力学に関する理解を深める上でも必要な課題である。特に、我が国のような地質変動帯において、複雑な応力履歴をうけた岩盤を対象とする場合には、慎重で、かつ合理的な設計をするための幅広い検討が必要であろう。

岩盤の力学挙動を考える上で不連続面の特性を取り込まなければならないことは言うまでもないが、この特性を表現する際の特徴的な指標として、不連続面の幾何学特性と力学特性が挙げられる。これらを指標として取り上げるのは、不連続面によって形成される力学的な異方性をいかに表現するかの指標にもなるからである。また、岩盤を考える上で岩石そのものの力学特性を考慮しなければならない場合もある。この認識に立って、岩盤が不連続面と岩石実質部分とで形成されるとした場合の指標を列挙すれば、表-8.1のように表現できる。同表において、不連続面の幾何学特性を表現する量には、方向、間隔、広がり、開口幅などがある。また、ほぼ同一の地質学的な特性を有すると考えられる一連の不連続面群を系と呼ぶことがあるが、その系が岩盤の中に含まれる個数も幾何学特性を理解するうえでは重要である。一方、不連続面の力学特性を表現する量には、不連続面の間に充填された介在物の強度・変形特性、浸透性などが考えられる。これらの指標の影響を無理なく表現できる力学モデルを用いて岩盤の力学特性を論ずるの必要があり、その力学モデルに含まれるパラメーターは、原位置で計測・決定でき

るものでなくてはならない。従来から行われてきたように、断層などの規模の大きな不連続面を、数値解析的に取り扱う上では Joint 要素などに置き換えることは一般的であるが、その数において圧倒的多数をしめる規模の小さな不連続面をすべて Joint 要素に置き換えるためにはそれらの位置と規模を確定し、さらに物性を決定しなければならず、不可能ではないにしても合理的とはいえない。不連続面を含む岩盤あるいはそれによって形成される異方性岩盤を何らかの手法を用いてそれと等価な材料に置き換える必要がある。

以上のことから本文では、まず岩石そのものの力学特性としての異方性に関する研究と岩盤を対象として実施された異方性に関する実験的研究について述べる。次に、不連続性岩盤を数値解析的にあつかう上で参考になるであろう手法について概観した後、岩盤をそれと等価な連続体に置き換えるための最近の手法としてクラックテンソル理論と損傷力学理論をとりあげ、それらの岩盤への適用性について述べる。なお、異方性岩盤の調査方法などについては他の成書を参考にされたい。

8.2 岩石および岩盤の異方性に関する実験的研究

岩石の異方性に関する初期の実験は、1960年代の Donath (ドナース) らの一連の研究¹⁾に始まる。Donath は片岩を用いて主に一軸圧縮強度の異方性を確認した。実験においては岩石ブロックの片理方向から15度ごとに長軸方向を変化させた供試体をボーリングコアとして抜き取り一軸圧縮試験に用いている。同じ時期に Jaeger (イエガー) は異方性の実験結果を表現するための降伏条件の実験式を提案²⁾している。これは周期関数の組合わせで片理の存在に伴う異方性を表現しようとするものである。この

講座

表—8.1 不連続性岩盤の力学特性の評価に関する指標

岩石の力学特性	不連続面の幾何学特性	不連続面の力学特性
強度 変形 透水性	方向 間隔 広がり 連結性 クラック系列数 ブロックサイズ 開口幅 壁面粗度	充填物 壁の強度 透水性

実験式を拡張して多数の亀裂群が存在する場合の強度特性を表す試みも行われている。赤井らは緑色片岩を用いた異方性に関する実験結果を発表³⁾しており、強度特性のみならず変形特性についても言及している。これらの成果は供試体内に含まれる片理面からの角度の変化に応じて強度特性・変形特性が著しく変化することを示している。

一方、岩盤力学の発展の契機になったとされるマルパッセ (Malpas) ダムの崩壊の原因を探るための研究として Bernaix (ベルネー) を中心とした研究⁴⁾がある。これはダムの基盤に露出した片麻岩の応力依存性を検討したもので、その研究範囲は多岐にわたっている。すなわち、既存の片麻岩の地質構造に依存する固有な異方性のみならず、浸透現象の応力誘導異方性を考慮した実験結果などを用いてマルパッセ崩壊原因についての広範な見解を示している。なお、マルパッセダム崩壊の調査に関する経緯や地質状況などについては Jaeger に詳しい⁵⁾。また、Müller (ミューラー) らの一連の研究成果は、Rock Mechanics (1974) にまとめられていてそのなかには、岩盤における透水係数の異方性を論じた Louis (ルイス) の研究⁶⁾も含まれている。

岩盤内において観察される比較的規則的な亀裂群のもたらす力学的効果を直交異方性体として評価しようとする試みも多く実施された。そのような応用弾性論の延長上で岩盤を捕らえようとした研究には、Barden (バーデン)⁷⁾、川本⁸⁾、Gerrard (ジェラルド)^{9), 10)}、Amadei (アマデイ)¹¹⁾などがある。また、このような規則的な亀裂群を室内において再現し、主に実験的な立場から亀裂性岩盤の強度異方性や変形特性の特徴を研究した例として、林ら¹²⁾、Reik (ライク)ら¹³⁾、吉中ら¹⁴⁾の研究がある。特に、林らはモルタル供試体の破壊時のダイレイタンスの異

方性に着目した。また、異方性の降伏曲面を提案した小林の研究もある¹⁵⁾。その後の解析手法の発展を経て、異方性の効果を踏まえた数値解析が可能になってからの計算例は多い¹⁶⁾。

実岩盤を対象として実験的に異方性の効果を確認した研究は少ないが、Pratt (プラット) らの実施した原位置での調査・研究¹⁷⁾は一辺が約3 mの立方体の花崗岩供試体を原位置で作成した。この供試体の表面は水平な岩盤であるが、この表面から鉛直下向きにスリットを設け、フラットジャッキを挿入して周囲の岩盤を反力として載荷している。このフラットジャッキに加える圧力を変化させることにより、各種の荷重経路での亀裂性岩盤の挙動を調べている。具体的な計測項目は、荷重～変位関係・弾性波速度・透水係数・比抵抗値などであり、これらの物性値が応力レベルと載荷方法に依存して変化することを確認している。また、原位置での弾性波速度の異方性と亀裂分布の関係を確認した小田らの研究¹⁸⁾もある。

8.3 解析手法の分類

前節に述べたような実験結果の積み重ねを経て、異方性に関する理解が深まるとともに数値解析手法の発展により各種の現象を記述するための多くの構成関係が提案されてきた。実験結果を見ても明らかのように、不連続性岩盤の取扱いを不透明にしている原因は、とりもなおさず不連続面の影響そのものであるが、対象とする現象は、「変形・浸透・熱」の3種類に分類できる。さらに、それらの任意の組み合わせからなる連成問題があると考えられる。そこで、これらの現象に関する分類を基に、解析手法の分類を行いそれに関連した解析手法の名称を以下に列挙する。

- 1) 不連続面あるいは、それに囲まれたブロックの変形や破壊を主体とする方法
 - ① Joint Element, Linkage Element
 - ② Cundall model (Distinct Element Method)
 - ③ Key block theory
 - ④ Kawai model (Rigid Body & Spring Model)
 - ⑤ Cracked Triangular Element
- 2) 不連続面を含む領域を等価な連続体に置き換える方法 (変形)

- ⑥ Equivalent elastic model
- ⑦ Damage mechanics
- ⑧ Crack tensor theory
- 3) 不連続面の浸透を主体とする方法
 - ⑨ Seepage analysis
- 4) 不連続面を含む領域を等価な連続体に置き換える方法 (変形・浸透・熱)
 - ⑩ Coupling model

対象とする現象と解析手法は上記のように分類できる。一方、岩盤構造物やその支保の計画と調査・解析手法との関係で考えれば、第一段階として、構造物や支保の計画に伴う地質調査を経て、大規模な不連続面 (断層) と中・小規模の不連続面 (ジョイント・亀裂) の判定を行う。第二段階として、各々の手法に応じたパラメータを決定し数値解析を実施する。これらの解析結果を総合的に判断して、調査精度の検討を必要とするか否かを決定することが第三段階であり、計画の見直しを必要としない場合には具体的な設計に取り掛かることになる。これらの流れの中で各々の項目が重要な意味を持っており、いずれもおろそかにすることはできないが、解析に必要なパラメータとその特徴を把握しておくことが必要であろう。

次節では、亀裂による異方性の効果を取り込んだ掘削解析例を紹介する。具体的な解析においては、原位置で計測した不連続面の分布状況から亀裂の幾何学性を決定し、その効果を表現した構成式を用いて掘削変形解析を実施している。

8.4 クラックテンソルによる解析例

8.4.1 等価な弾性体の定義

岩盤で計測されるひずみ ϵ_{ij} が岩石実質部分に生じるひずみ $\epsilon_{ij}^{(m)}$ と亀裂部分に生じるひずみ $\epsilon_{ij}^{(c)}$ の和であるとすれば $\epsilon_{ij}^{(c)}$ は次式で表される¹⁹⁾。

$$\epsilon_{ij}^{(c)} = \left[\left(\frac{1}{h} - \frac{1}{g} \right) F_{ijkl} + \frac{1}{4g} (F_{ik}\delta_{jl} + F_{il}\delta_{jk} + F_{jk}\delta_{il} + F_{jl}\delta_{ik}) \right] \sigma_{kl} \dots (1)$$

すなわち、各々の部分に生じているひずみを重ね合わせるにより、岩盤全体のひずみを定義することになる。クラック相互には互いに弾性干渉が存在することは知られている²⁰⁾が、式(1)では単純化

したモデルとして重ね合わせをしている。

ここで F_{ij} と F_{ijkl} は、各々2階と4階のクラックテンソルであり式(2), (3)によって表現される。これらの量は無次元量であり、それぞれの物理的意味は文献²¹⁾に詳しいがここでは、岩盤中に含まれる亀裂群の幾何学的な特徴を表す指標であると考えておけばよい。表—8.1 でいえば不連続面の幾何学特性に相当する。また g , h は、クラックのせん断および垂直剛性を表現する力学量であり、特に、クラックの閉塞や開口に伴う非線形挙動を表現する上で重要なパラメータとなる。すなわち、表—8.1 でいえば不連続面の力学特性を表現している。

$$F_{ij} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{r_m} \int_{\Omega} r^3 n_i n_j E(n, r) d\Omega dr \dots (2)$$

$$F_{ijkl} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{r_m} \int_{\Omega} r^3 n_i n_j n_k n_l E(n, r) d\Omega dr \dots (3)$$

ここで ρ は単位体積に含まれるクラックの個数、 $E(n, r)$ は n と r の分布を表す確率密度関数である。 n はクラックに立てた法線ベクトル、 r はクラックを円で近似したときの直径、 Ω は全立体角を表す。また、亀裂を含む岩盤を対象として異方性を考慮する場合、実質部分の弾性を表現する上では等方弾性体とすれば十分である。なぜなら一般には亀裂群のつくる異方性の効果が岩石実質部分のそれより大きいと考えられるからである。したがって、岩石実質部分に生じているひずみ $\epsilon_{ij}^{(m)}$ は次式となる。

$$\epsilon_{ij}^{(m)} = \frac{1}{E} [(1+\nu)\delta_{ik}\delta_{jl} - \nu\delta_{ij}\delta_{kl}] \sigma_{kl} \dots (4)$$

ただし、実質部分の異方性が無視しえない程度に大きなものであれば式(4)を異方性の構成則に変更してもさしつかえない。

以上のことから、変形解析に用いる構成式は式(1)~(4)であり、これは亀裂性岩盤をそれと等価な直交異方性体に置換したことを意味している。なお、原位置調査に対応して次式に示されるテンソル量も重要である。

$$N_{ij} = \int_{\Omega} n_i n_j E(n) d\Omega \dots (5)$$

ここに n_i , n_j などは、式(2), (3), (5)に共通してベクトル n の成分を表している。

8.4.2 原位置岩盤におけるクラックテンソルの決定と入力パラメータ

実岩盤において、クラックテンソルを決定するには基本的に以下に示すいずれかの方法による。

講 座

表—8.2 クラックテンソルによる解析に用いた力学パラメーター

弾 性 係 数	1.99×10 ⁵ kgf/cm ²
ポ ア ソ ン 比	0.21
ク ラ ッ ク 剛 性	1.33×10 ⁵ kgf/cm ²
単 位 体 積 重 量	2.72 gf/cm ³
粘 着 力	192 kgf/cm ²
内 部 摩 擦 角	54.3°

- (1) 調査領域内の岩盤に対し対象とするクラックの大きさ・方向・開口幅の頻度分布を求め、式(2)または式(3)の確率密度関数を決定する。
- (2) 露頭面において領域内に存在する対象とするクラックの二次元的なトレースを行い、露頭面における二次元のクラックテンソルを決定する。決定された二次元情報をもとに三次元のクラックテンソルを推定する。

以上の検討を踏まえて必要な原位置調査を行い、亀裂の幾何学性を決定できる。その際、従来の地質調査で一般的に実施されているクラック分布に関するステレオ投影図から直接、式(5)のテンソル量を決定できることは特徴的である。さらに、亀裂長のデータ（例えばトレース分布）などが利用できれば式(2)中の r の分布を表現する確率密度関数に関する情報を直接得られる。クラック剛性 g 、 h の応力依存性に関しては多くの実験的研究が知られている²²⁾が、対象とした岩盤不連続面に関するデータが得られていない場合にはクラックの形状を三次元のコイン状 (penny-shape) のものとすれば、岩石実質部分の弾性係数 E を用いてクラックの垂直剛性 h を $3\pi E/8$ と推定することができ、さらに過去の多くの実験結果を参照にして第1近似としてせん断剛性として $g = h/10$ と置くことができる。

8.4.3 クラックテンソルによる掘削解析

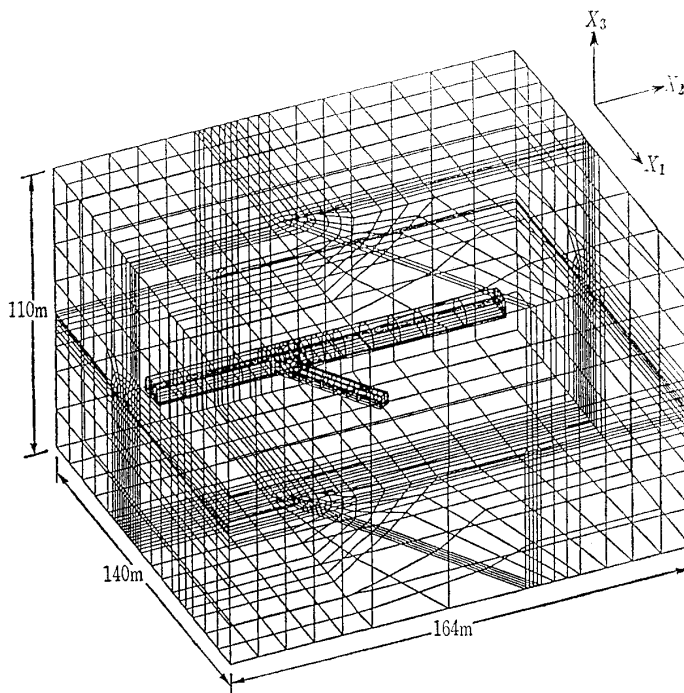
岩盤内に大規模な地下空洞を掘削する場合には、地下空洞本体に種々の形状を有するトンネルが連結し、それらが互いに斜交するなど複雑な幾何形状を示すことが多い。また、初期地圧や地質構造など多くの計測結果と共に、数値解析を通じて事前の精度良い予測が的確に行われることが必要となる。ここでは、不連続面による力学的異方性の効果を等価な異方線形弾性体で表現した構成式を用いて三次元掘削変形解析を実施した例を示す。原位置における亀裂調査結果から得られた次式のクラックテンソルで

亀裂群の幾何学特性を代表させる。

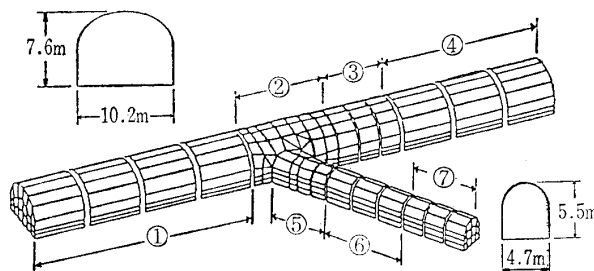
$$F_{ij} = \begin{bmatrix} 14.16 & 4.03 & 6.03 \\ & 2.67 & 1.75 \\ \text{sym.} & & 2.94 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(6)$$

解析領域は図—8.1に透視図として示すとおり内部に分岐部分を含む直方体であり、節点数8084、要素数7107とした。初期応力は主トンネル天端での土被り圧相当として49kgf/cm²を等方応力状態で加えた。図—8.2は、掘削過程を①から⑦の順序に分割して計算したことを示している。座標軸は図—8.2に示すように断面の大きなトンネル（主トンネル）の長軸方向を X_2 、鉛直上方を X_3 とした右手系である。

分岐部分掘削前（①～④）の最大せん断応力分布を、等方線形弾性解析の結果と比較した。計算に用いた入力パラメーターのうちクラックの幾何学特性は式(6)に示したとおりであり、力学性に関するものは表—8.2に示した。クラックの剛性については、式(1)において $h = 3\pi E/8 = 10g$ と置いた。



図—8.1 要素分割（透視図）



図—8.2 トンネル分岐部分（拡大図）

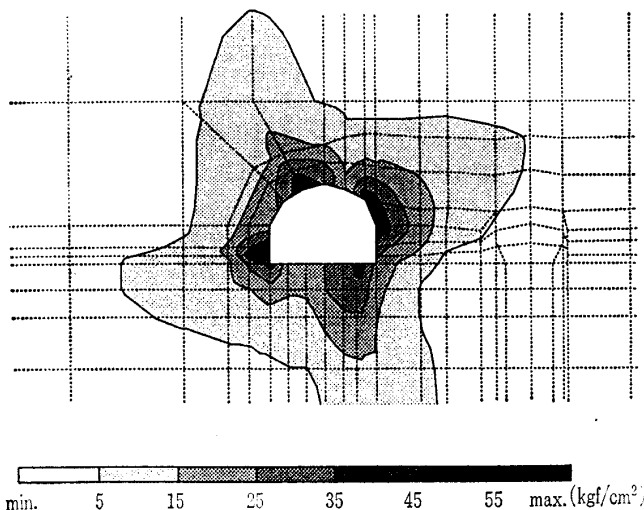


図-8.3 クラックテンソルによる解析

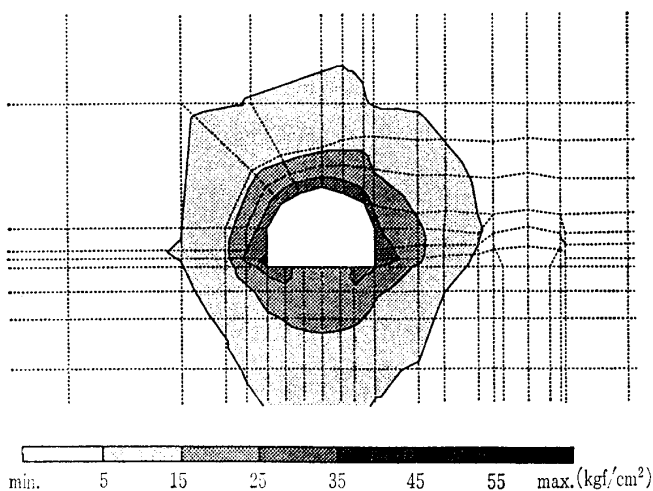


図-8.4 等方線形弾性解析

これらのパラメーターを用いた解析結果を図-8.3に示す。また、参考のために等方線形弾性解析もあわせて実施し、図-8.3と同一断面における最大せん断応力分布として図-8.4を得た。いずれの断面も、図-8.2における②と③の境界を通る X_1X_3 面である。これらの解析結果の比較から、等方な初期応力を与えても岩盤内部に発生する応力状態は異方性の効果を反映して、異方的になることがわかる。なお、同一の問題に対して、内空変位の計算結果と実測値も比較されており両者はよく対応していることが示されている^{23),24)}。ただし、ここで言う内空変位とは相対変位であることに注意が必要である。

8.5 損傷解析の方法

8.5.1 損傷テンソル

岩盤中に分布する不連続面に対して損傷テンソルは次式で定義される^{25~27)}。

$$\Omega = \frac{3}{S} \sum_{k=1}^N a^k (n^k \otimes n^k) = \frac{l}{V} \sum_{k=1}^N a^k (n^k \otimes n^k) \quad \dots\dots(7)$$

ここに、 V : 岩盤中のある領域の体積、 N : V に含まれる不連続面の総数、 l : V を構成する基本岩石ブロックの代表的長さ、 a^k : k 番目の不連続面の面積、 n^k : k 番目の不連続面の単位法線ベクトル、 \otimes : テンソル積、である。式(7)で定義される損傷テンソル Ω は、不連続面の三次元的な配置によって岩盤内部の有効断面積が失われる割合を表している。こうして定義された損傷テンソルを用いて、岩盤内の有効断面積に働く実質応力が

$$\sigma^* = \sigma + \phi \quad \dots\dots(8)$$

で与えられる。不連続面群の損傷としての力学的効果は、右辺第2項の2階のテンソル ϕ に表現されていることがわかる。ただし

$$\begin{aligned} \phi &= T^t [\sigma_t^* (C_t \Omega') + H(\sigma_n^*) \Omega' \\ &\quad - H(-\sigma_n^*) (C_n \Omega')] T = T^t [\sigma_t' (\phi_t - I) \\ &\quad + H(\sigma_n') (\phi - I) - H(-\sigma_n') (\phi_n - I)] T \\ \phi &= (I - \Omega')^{-1}, \quad \phi_n = (I - C_n \Omega')^{-1}, \\ \phi_t &= (I - C_t \Omega')^{-1} \quad \dots\dots(9) \end{aligned}$$

である。また、 H は、

$$\begin{aligned} (H(x))_{ij} &= H_{ij}(x_{ij}) \\ &= \begin{cases} 0 & \text{if } x_{ij} \leq 0 \\ x_{ij} & \text{if } x_{ij} > 0 \end{cases} \quad (i, j; \text{総和をとらない}) \end{aligned} \quad \dots\dots(10)$$

という2階のテンソルに対する作用素であり、 C_t 、 C_n は0から1の間の値をとり、不連続面のかみ合わせの程度により Ω で表された不連続面群の有効断面積欠損効果を低減する係数である。式(9)は $C_n=1.0$ 、 $C_t=1.0$ の場合

$$\phi = \sigma^* \Omega = \sigma (I - \Omega)^{-1} \Omega \quad \dots\dots(11)$$

となる。

分布不連続面を含んだ岩盤を一つの構造系とみると、式(8)で定義した実質応力は、実質部分からなる岩盤の構造骨格に働く平均的な応力という意味をもつ。損傷理論では、この実質応力が不連続面を含んだ岩盤全体の変形を引き起こす力であると、構成則に用いる応力は実質応力である。例えば、岩盤の弾性的挙動を扱う場合には、岩石供試体の弾性定数から決まる4階の弾性係数テンソル D を用い、線形構成則が

$$\frac{1}{2}(\sigma^* + \sigma^{*t}) = D \epsilon, \quad \epsilon = D^{-1} \left[\frac{1}{2}(\sigma^* + \sigma^{*t}) \right] \quad \dots\dots(12)$$

講 座

と与えられる。ただし、式(12)の右辺は実質応力の対称部分を表している。

以上の枠組みに対して、有限要素離散近似式は

$$[K]\{U\} = \{F\} + \{F^*\} \dots\dots\dots(13)$$

となる。ここに、

$$[K] = \int_V [B]^t [D] [B] dV \dots\dots\dots(14)$$

$$\{F\} = \int_{S_t} [N]^t \{t_0\} dS_t + \int_V [N]^t \{f\} dV \dots\dots(15)$$

$$\{F^*\} = \int_V [B]^t \{\phi\} dV \dots\dots\dots(16)$$

である。式(13)に見るように、剛性マトリックス[K]は母岩材の材料特性のみに依存し、分布不連続面の損傷効果は付加的な節点荷重ベクトル {F*} で表現されるのが損傷モデルの特徴である。式(13)は {F*} が応力に依存する準線形方程式であり、一般には繰返し計算によって解かれる。

8.5.2 損傷モデルによる掘削解析結果

不連続面の進展を考慮しない弾性損傷解析では、解析に必要な入力は構成則と損傷テンソルである。構成則は岩石コアの材料特性を表すものを用いればよい。また、式(7)に定義された損傷テンソルは、不連続面の諸量を用いて算定できる。ここで示す解析例で対象とした岩盤は花崗岩で構成されており、母岩の材料特性は表—8.3のように求められている。また、斎藤らが不連続面の原位置観察から透水テンソルを決定しており²⁸⁾、そのデータから次のように損傷テンソルが決定される。以下、解析のための座標軸は、空洞長軸方向(N127° E)に Z' 軸、鉛直上向きに Y' 軸、それらと右手系をなす水平方向(N37° E)に X' 軸を取ることとする。

式(7)に定義された損傷テンソルは、不連続面の諸量の平均値を用いて次のように近似的に算定できる。

$$\Omega_{ij} = \frac{l}{V} \sum_{k=1}^N a^{(k)} n_i^{(k)} n_j^{(k)} \approx \frac{l}{V} N \bar{a} n_i n_j \dots\dots\dots(17)$$

ここに、

\bar{a} : 不連続面の平均面積

表—8.3 損傷解析に用いた岩石コアの物性値

ヤ ン グ 率	$E = 2.57 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
ポ ア ソ ン 比	$\nu = 0.28$
粘 着 力	$c = 170 \text{ kgf/cm}^2$
内 部 摩 擦 角	$\phi = 45^\circ$
単 位 体 積 重 量	$\gamma = 2.68 \text{ gf/cm}^3$

n_i : 不連続面の平均単位法線ベクトルである。

一方、斎藤らの記号²⁸⁾と式(17)中の量の間には次の関係が成立する。

$$\left. \begin{aligned} N/V = \rho &: \text{単位体積中の不連続面の個数} \\ \bar{a} = \frac{\pi}{4} \langle r^2 \rangle &: \text{不連続面の平均面積} \\ &\quad (\text{円盤を仮定}) \\ n_i n_j = \langle N_{ij} \rangle &: \text{法線ベクトルのテンソル積の} \\ &\quad \text{平均値} \end{aligned} \right\} \dots\dots(18)$$

よって、式(17)はこれらの記号を用いて

$$\Omega_{ij} = l \rho \frac{\pi}{4} \langle r^2 \rangle \langle N_{ij} \rangle \dots\dots\dots(19)$$

と表される。これらの値はそれぞれ

$$\langle N_{ij} \rangle = \begin{bmatrix} 0.43 & -0.08 & 0.00 \\ & 0.40 & 0.05 \\ \text{sym.} & & 0.17 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(20)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\pi}{4} \langle r^2 \rangle &= \frac{N^{(q)}/h}{\langle |n_k q_k| \rangle} = \frac{1.12 + 1.30}{2} \\ &= 1.21 \text{ m}^{-1} \dots\dots\dots(21) \end{aligned}$$

のように与えられる。ただし、ここでは、座標軸は東に X 軸、北に Y 軸、鉛直上方に Z 軸を取っている。また、l は、測線に交わるクラック数が A 斜面で 0.824 本/m、B 斜面で 0.532 本/mであった²⁸⁾ことから、その逆数の平均をとることにより

$$l = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{0.824} + \frac{1}{0.532} \right) = 1.5 \text{ m} \dots\dots\dots(22)$$

と推定される。これらの値を式(19)に代入して、X-Y-Z系における損傷テンソルが

$$\begin{aligned} \Omega' &= 1.5 \times 1.21 \times \langle N_{ij} \rangle \\ &= \begin{bmatrix} 0.780 & -0.145 & 0.000 \\ & 0.726 & 0.000 \\ \text{sym.} & & 0.309 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(23) \end{aligned}$$

となる。X-Y-Z座標軸系を X'-Y'-Z'系に

$$\begin{aligned} \Omega_{ij} &= T_{ik} \Omega_{kl}' T_{jl} \\ T_{ij} &= \begin{bmatrix} \sin 37^\circ & \cos 37^\circ & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \\ \cos 37^\circ & -\sin 37^\circ & 0.0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

と座標変換することにより、所望の損傷テンソルが

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0.607 & 0.073 & -0.014 \\ & 0.309 & -0.055 \\ \text{sym.} & & 0.900 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(24)$$

と得られる。

式(24)の損傷テンソルの成分を見ると、非対角項は対角項に比べて1オーダー小さい。また、対角項の中では Ω_{zz} (空洞長軸に垂直な面内の損傷) が一番

大きくなっている。このことは空洞の配置が不連続面分布を考慮してうまく配置されていることを表している。

解析に用いた有限要素分割図は図-8.5、掘削過程は図-8.6に示したとおりの4段階掘削である。掘削に伴う内空変位の変化を図-8.7にまとめて示す。また、図-8.8に各掘削段階における局所安全率分布を示す。ただし、図の等高線は安全率が2.0

以下の部分を0.1刻みで示している。対称な構造物に等方応力が作用し、岩石実質部分の力学特性を等方性としても、岩盤内に存在する不連続面によって生じた異方性の効果を反映していずれの場合にも異方的な変形を生じていることがわかる。

8.6 おわりに

岩盤の力学挙動を考える上で不連続面の特性を取り込む手法として、岩盤をそれと等価な異方連続体に置き換えるためのクラックテンソルと損傷力学の理論をとりあげ、それらの岩盤への適用性について述べた。なお、本文においては変形問題だけを対象

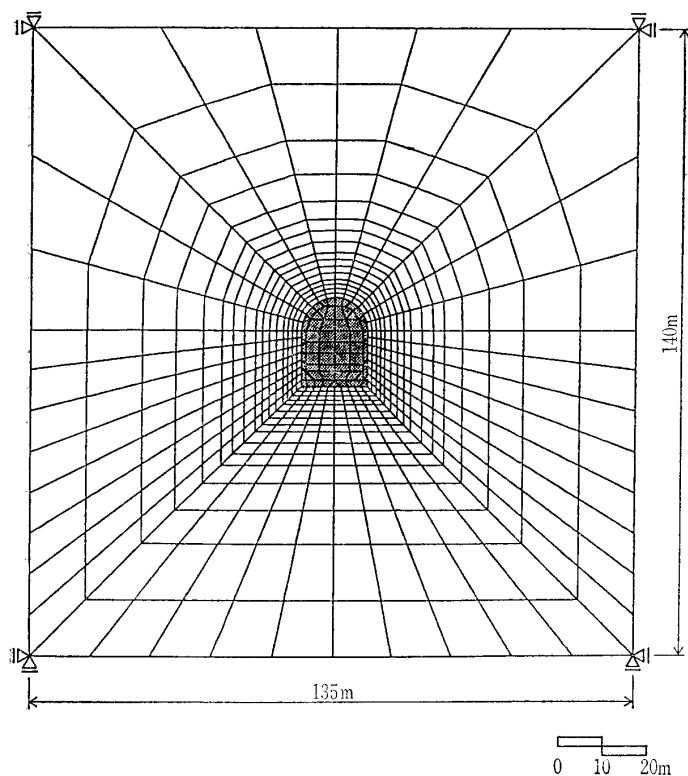


図-8.5 変形解析用メッシュ

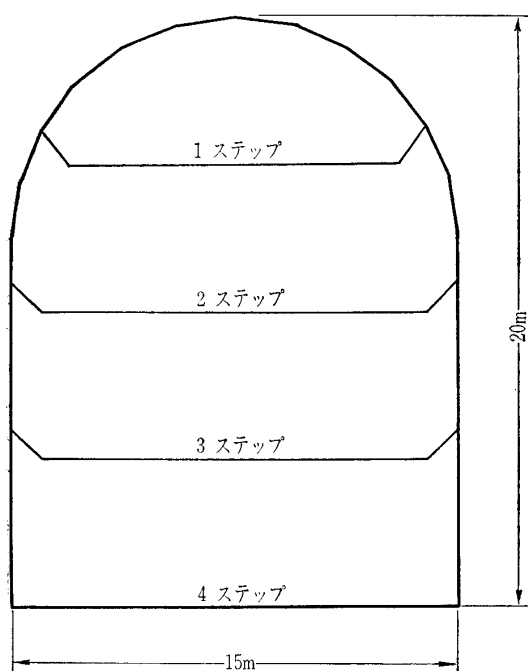


図-8.6 掘削解析ステップ

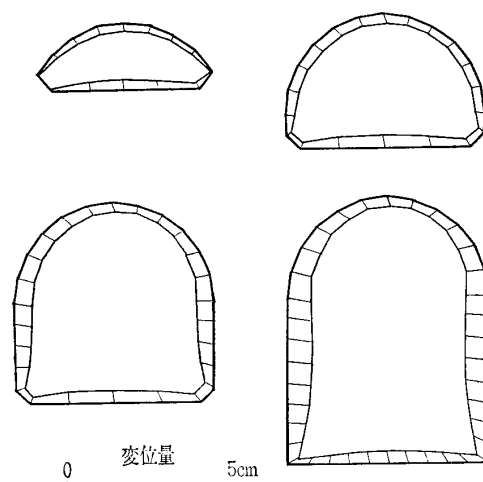


図-8.7 損傷解析による内空変位の変化

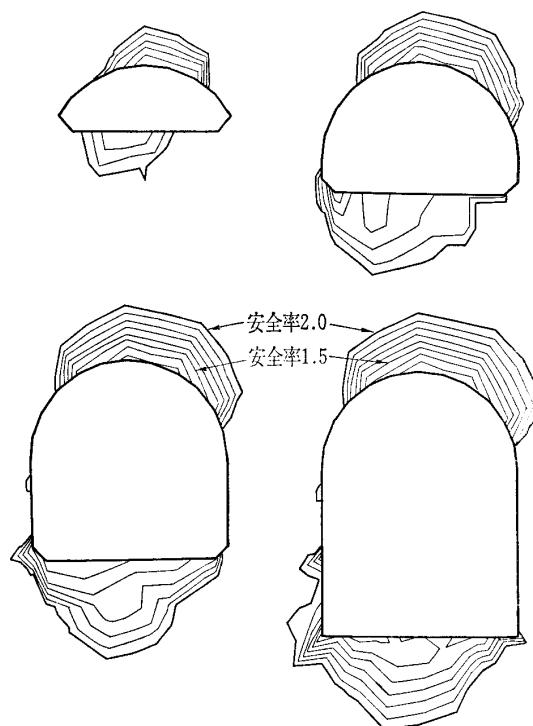


図-8.8 損傷解析による各掘削段階における局所安全率分布 (2.0以下)

講 座

としたが、浸透問題への適用などの事例もあり、参考文献の分類に従って対象とする問題ごとに適切な手法を選ぶ必要がある。

参 考 文 献

- 1) Donath, F.A.: Experimental study of shear failure in anisotropic rocks, *Bull. Geol. Soc. Am.*, Vol. 72, pp. 985~990, 1961.
- 2) Jaeger, J.C.: Shear failure of anisotropic rocks, *Geol. Mag.*, Vol. 97, No. 1, pp. 65~72, 1960.
- 3) 赤井浩一・山本和夫・有岡正樹: 結晶片岩の構造異方性に関する実験的研究, *土木学会論文報告集*, No. 170, pp. 13~26, 1969.
- 4) Bernaix, J.: New laboratory methods of studying the mechanical properties of rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 6, pp. 43~90, 1969.
- 5) Jaeger, C.: *Rock Mechanics and Engineering*, Cambridge Univ. Press, 1979.
- 6) Louis, C.: Rock hydraulics, in *Rock Mechanics*, ed. by L. Müller, pp. 299~389, 1972.
- 7) Barden, L.: Stresses and displacements in a cross anisotropic soil, *Géotechnique*, Vol. 13, pp. 198~210, 1963.
- 8) 川本脩万: 基礎岩盤の変位状態におよぼす地山の異方性の影響について, *土木学会論文集*, No. 126, pp. 16~26, 1966.
- 9) Gerrard, C.M.: Equivalent elastic moduli of a rock mass consisting of orthorhombic layers, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 19, pp. 9~14, 1982.
- 10) Gerrard, C.M.: Elastic models of rock masses having one, two and three sets of joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 19, pp. 15~23, 1982.
- 11) Amadei, B.: *Rock anisotropy and the theory of stress measurements*, Lecture Notes in Engineering, Springer Verlag, 1983.
- 12) 林 正夫・藤原義一: 積層体のせん断抵抗とダイレイタンス異方性およびその機構, 第3回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 17~21, 1965.
- 13) Reik, G. & Zacas, M.: Strength and deformation characteristics of jointed media in true triaxial compression, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 15, pp. 295~303, 1978.
- 14) Yoshinaka, R. & Yamabe, T.: Joint stiffness and the deformation behaviour of discontinuous rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 23, No. 1, pp. 19~28, 1986.
- 15) Kobayashi, S.: Fracture criteria for anisotropic rocks, *Memo. Faculty of Kyoto Univ.*, 32, pp. 307~333, 1970.
- 16) 例えば Wittke, W.: New design concept for underground openings in rock, in *Finite elements in geomechanics*, ed. by Gudehus, G., pp. 413~478, 1977.
- 17) Pratt, H.R., Swolfs, H.S., Brace, W.F., Black, A. D. & Handin, J.W.: Elastic and transport properties of an in-situ jointed granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 14, pp. 35~45, 1977.
- 18) Oda, M., T. Yamabe, & K. Kamemura: Crack Tensor and its Relation to Anisotropy of Longitudinal Wave Velocity in Jointed Rock Masses, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 23, No. 6, pp. 387~397, 1986.
- 19) Oda, M., Suzuki, K. & Maeshibu, T.: Elastic compliance for rock-like materials with random cracks, *Soils & Found.*, Vol. 24, No. 4, pp. 27~40, 1984.
- 20) Horii, H. and Nemat-Nasser, S.: Overall moduli of solids with microcracks: load induced anisotropy, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 31, No. 2, pp. 155~171, 1983.
- 21) Oda, M.: An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses, *Water Resources Research*, Vol. 22, No. 3, pp. 1845~1856, 1986.
- 22) Bandis, S., Lumsden, A.C. and Barton, N.R.: Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 18, pp. 1~21, 1981.
- 23) 多田浩幸ほか: 岩盤の不連続性がトンネル交差部に与える影響, 第27回土質工学研究発表会, pp. 1299~1300, 1992.
- 24) Oda, M., Yamabe, T., Ishizuka, Y., Kumasaka, H., Tada, H. and Kimura, K.: Elastic stress and strain in jointed rock masses by means of crack tensor analysis, *Rock Mechanics and Rock Engng.*, Vol. 26, No. 3, pp. 89~112, 1993.
- 25) 京谷孝史・市川康明・川本脩万: 岩盤の力学特性評価における損傷テンソルの適用について, *土木学会論文集*, No. 358/III-3, pp. 27~35, 1985.
- 26) Kyoya, T., Ichikawa, Y. & Kawamoto, T.: A damage mechanics theory for discontinuous rock mass, *Proc. 5th ICONMIG*, Nagoya, 1985.
- 27) Kawamoto, T., Ichikawa, Y. & Kyoya, T.: Deformation and fracturing behaviour of discontinuous rock mass and damage mechanics theory, *Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 12, No. 1, pp. 1~30, 1988.
- 28) 斎藤禎二郎ほか: 現地調査による透水テンソルの決定法, 第21回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 386~390, 1989.