

個別要素法を用いた不連続性岩盤における 亀裂発生・進展のモデル化

中川 光雄¹・蔣 宇静²・江崎 哲郎³

¹正会員 博(工) (株)CRC総合研究所 関西支社 課長役 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

²正会員 博(工) 九州大学助教授 工学部 付属環境システム科学研究センター
(現在、長崎大学助教授 工学部 社会開発工学科 〒852-8131 長崎市文教町1-14)

³正会員 工博 九州大学教授 工学部 付属環境システム科学研究センター
(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

斜面、基礎、地下空洞などにおける岩盤の変形や破壊の大部分は、岩盤中に存在する不連続面の幾何学的分布特性と単一不連続面の力学的挙動特性に大きく支配される。一方、不連続性岩盤に立地するこれら岩盤構造物の安定機構は、既存不連続面の挙動のみならず、載荷や掘削に伴い新たに発生する亀裂の挙動によっても大きな影響を受けると考えられる。本研究では、不連続体解析手法として個別要素法を用い、既存不連続面のせん断プロセスと共に、せん断や引張による岩石基質部での新たな亀裂の発生および進展のシミュレーションを実現する解析的アプローチを提案する。そして、幾つかの代表的な問題の理論解析による解との比較によりその妥当性を検証する。また、不連続性岩盤構造物へ適用してその有効性を示す。

Key Words : discontinuous rock mass, fracture mechanics, modeling, distinct element method(DEM)

1. はじめに

岩盤上での大型構造物の建設や大規模地下空洞の掘削などによる周辺岩盤の変形・破壊の大部分は、不連続面に沿うせん断やダイレーションに起因することが多いと考えられる。この点より、設計・施工の立場から不連続性岩盤を対象とする場合、不連続面の幾何学的分布特性を把握することと同時に、単一不連続面の力学的挙動特性を把握することは、岩盤構造物の安定性の評価において重要な課題である。一方で、これら岩盤の安定機構は、既存の不連続面の挙動のみならず、載荷や掘削に起因する新たな亀裂の発生と進展、および、その発生領域の拡大により大きな影響を受けると考えられる。岩盤構造物の施工過程で新たに発生した亀裂とその影響については、今までにも幾つか報告されている。例えば、吉田^らは、地下発電所の空洞掘削時において、側壁岩盤に設けられた測定孔から得られた計測変位が示した不連続性について検討した結果、空洞掘削に伴い新たな亀裂が岩石基質部に発生したことがその原因であると指摘している。さらに、新たな亀裂の発生は、測定孔内でのボアホールテレビによっても確認されており、亀裂発生に集中箇所と計測変位の不連続な箇所が一致していることを報告して

いる。

不連続性岩盤において、施工過程で新たに発生する亀裂をどのように捕えるべきであろうか。まず、連続体と見なせる岩石基質部に着目する。伯野^は、破壊現象は、割れる、滑るなどのそれまで連続体であった物体が不連続体に変化する場合は不連続体解析が必要であることを指摘している。岩石基質部に亀裂が発生することは、物体、すなわち、岩石基質部が割れる、滑る、すなわち、破壊する現象に他ならない。次に、不連続性岩盤が岩石基質部と既存の不連続面の複合構造体であると見なすと、構造的な異方性という面から佐武^は、地盤には本来傾斜堆積や方向性節理などによる構造的な異方性(「固有異方性」と呼んでいる)と、載荷などによる応力の変化によって誘発される構造的な異方性(「誘導異方性」と呼んでいる)の2種類があると指摘している。前述の吉田^らの地下発電所の空洞掘削の例では、既存の不連続面による「固有異方性」に加えて掘削中に新たに発生した亀裂による「誘導異方性」が発揮されていることが、計測された変位から推察される。

以上のことから、不連続性岩盤の変形挙動や力学的安定性を数値解析により適切に評価し設計へ導入するには、既存の不連続面の力学的特性を適切に

評価しモデル化することと同時に、載荷や掘削に起因する新たな亀裂の発生、進展、その発生領域の拡大を適切にモデル化することが重要であると考えられる。ここで、既存の単一不連続面に関しては、現在までも各種の力学モデルが提案されており、その一部は既に実用化されている。特に、著者らは、室内せん断試験の結果を忠実に再現することを意図して、実際の応力状態やせん断履歴などを再現した室内せん断試験結果に基づいて定式化した不連続面の力学モデルを新たに提案している⁹⁾。また、これを個別要素法における不連続面の構成モデルとして組み込み、不連続面の室内せん断試験の結果と個別要素法解析の結果を比較することにより、その妥当性を検証している。一方で、応力の再配分やせん断プロセスにおける新規亀裂の発生機構とシミュレーションに関しては、過去に幾つかの研究例が見受けられるものの、既存不連続面のみに着目した研究と比べて極めて少ない。

そこで、本論文では、不連続性岩盤を対象とした数値解析手法のうち、岩盤不連続面を1つ1つ具体的に表現する不連続体解析を適用する立場を取り、岩石基質部における新規亀裂の発生機構の表現を個別要素法において実現し、発生した亀裂の挙動、進展、その発生領域の拡大をシミュレートする解析的アプローチを新たに提案する。

本論文では、まず、亀裂発生・進展解析の先駆的な分野であるコンクリートにおける亀裂の発生・進展解析を例に取り、その現状を概観して解析手法を3つのグループに分類する。そして、各グループの手法に該当すると思われる岩盤工学における既往の研究例の幾つかを考察する。そして、これに基づき、妥当性のある解析的アプローチに要求される条件を変形挙動解析の面から考察する。次に、本論文で提案する亀裂発生、進展および発生領域拡大のモデル化手法におけるアルゴリズムとして、個別要素法において実現される亀裂発生前、亀裂発生条件、亀裂発生後の一連のプロセスを仮定や適用限界と併せて示す。そして、掘削問題や斜面問題などの岩盤工学における代表的な問題を対象として、理論的に示されている塑性・破壊領域と本論文で提案するモデル化手法による解析結果を比較することにより、その妥当性を検証する。最後に、不連続性岩盤を対象とした実用例として、地下発電所空洞掘削および急傾斜岩盤斜面上における橋梁基礎の建設による亀裂発生、進展および発生領域の拡大をシミュレートした結果をそれぞれ示し考察する。

本論文では、これより、亀裂発生、進展および発生領域の拡大を、単に「亀裂の発生・進展」と言う。ここで提案する解析的アプローチにより、不連続性岩盤を対象として、載荷や掘削による既存の不連続面

の挙動および、新たに発生する亀裂の不連続面としての挙動が複合して具現される破壊のメカニズムを、不連続面の滑りや剥離などによる幾何学的影響が顕著となる大変形に至るまで追跡することが可能になると考える。また、提案する解析的アプローチの実際の適用には、岩塊ブロックを任意多角形で表現し、定式化した岩盤不連続面の力学モデルが正確に機能するよう接触機構を特殊化したCundallらによる個別要素法⁵⁾を利用した。

2. 既往の亀裂発生・進展の解析的アプローチ

亀裂の発生・進展をシミュレートする解析的アプローチに関する研究は、コンクリートを対象とした構造工学の分野において多く実施されてきた^{6) 7)}。それらの多くは、数値解析手法として有限要素法が利用されたため、厳密には連続体とは言えない亀裂を有するコンクリート部材に対して、有限要素法が要求している連続体の仮定を満足させつつ、いかに亀裂を表現するかが問題であった。この分野の亀裂発生・進展の数値解析によるアプローチは、概ね以下の3つに分類される^{6) 8)}。

- (1) 破壊力学を適用するアプローチ。
- (2) 個々の亀裂の影響を微視的にモデルするアプローチ。
- (3) 亀裂の影響を平均的に捕え、連続体に置き換えるアプローチ。

まず、破壊力学を適用するアプローチは、最近、コンクリートの亀裂発生・進展解析に適用されつつある。このアプローチの特徴は、破壊現象がその亀裂先端部分に限定され局所的な応力ひずみの分布に支配されることから、力学的パラメータとして応力やひずみに代わり応力拡大係数やエネルギー解放率などを用いる。また、従来の強度規準に代わり、破壊力学的な考察から導かれるエネルギー規準を導入することにより、従来の強度規準を用いた場合の問題点の一つである解析結果の要素寸法依存性が解消されることなどが報告されている⁷⁾。岩盤工学の分野でこのアプローチを適用した例として、LPG岩盤内貯蔵空洞周辺に予測される破壊亀裂の評価に適用した石塚らの研究⁹⁾がある。この研究では、低温貯蔵により空洞周囲は緻密な凍結領域を形成して連続体に近い状態となり、空洞周辺では引張応力による壁面からの亀裂発生が予測されることから、熱伝導熱応力解析を連成させた有限要素法を利用して、変形モードI（開口型）に対する応力拡大係数 K_I が破壊靱性値 K_{Ic} を超えると亀裂が発生すると判断してい

る。この手の研究の課題として、一旦発生した巨視的亀裂がどこまで進展するかを評価するには有効であるが、岩盤不連続面が卓越する不連続性岩盤では、岩盤不連続面自体の挙動特性が破壊現象を支配し、このような場合では破壊力学の適用が必ずしも有効ではないと述べている。

次に、個々の亀裂の影響を微視的にモデルするアプローチでは、亀裂の発生・進展が合理的にモデル化されたとしても、亀裂自体を有限要素法など連続体解析手法の中でどのようにモデル化するかが問題となる。その代表的な方法に、亀裂を面として取り扱う離散ひび割れ(Discrete crack)モデルと呼ばれる方法がある⁷⁾。この方法はさらに、A) 亀裂の進展に伴って決定された進展方向に対し図-1の例に示すように要素メッシュを逐次的に再構築する方法と、B) 亀裂進展方向が既知な場合は、その方向に予め不連続面を形成しておき、その間をCrack-link要素あるいは接合要素で連結した後、亀裂発生規準に応じて連結を切り離す方法に大別される。後者の方法B)は、亀裂の進展方向の予測が含まれない短所をもつが、局所的な挙動が全体挙動にいかに関与するかを考察する上で有用な方法である。岩盤工学の分野でこのアプローチを適用した例として、亀裂発生に伴いその効果を表現する塑性クラック要素(Cracked Triangular Element¹⁰⁾)と呼ばれる有限要素を用い、二軸圧縮試験や支持力の解析に適用した山辺らの研究¹¹⁾がある。この塑性クラック要素は、図-2に示すように亀裂発生条件に従って三角形要素内の重心Gを通るGoodmanタイプのジョイント要素を発生させることにより破断面を表現するものである。この研究は、上述の前者の方法A)に該当すると思われる。亀裂の発生は、式(1)に示すCoulomb規準により判定している。

$$f = \tau + \sigma_n \tan \phi - c \quad (1)$$

ここで、 f は塑性クラックの発生規準、 c と ϕ は岩石基質部の粘着力と内部摩擦角、 σ_n と τ は発生した亀裂面上の垂直応力とせん断応力である。また、亀裂の発生方向 θ は、せん断による場合と引張による場合に対してそれぞれ一意的に決定されている。この研究の課題として、変位や亀裂の進展の表現に限界があることが述べられている。ところで、上述の方法B)に該当すると思われる研究として、里ら¹²⁾は、発生する亀裂を有限要素法におけるジョイント要素でモデル化し、ジョイント要素の破壊の進展を亀裂の進展として表現している。そして、ジョイント要素を正六角形状に配置して円孔掘削問題に適用した例を示している。しかし、亀裂の発生条件や、適用範囲が微小

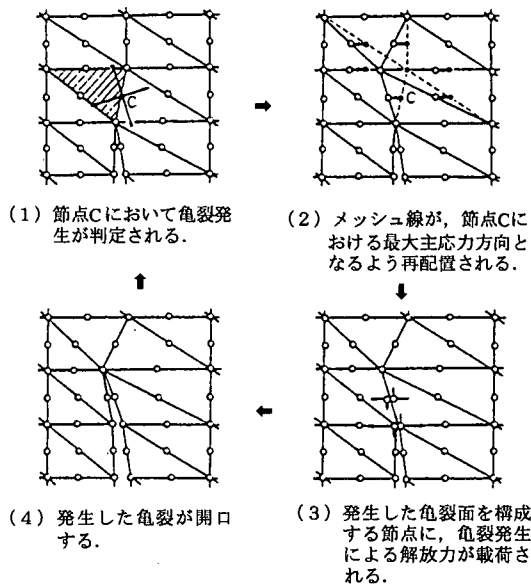


図-1 離散ひびわれモデルの例⁷⁾

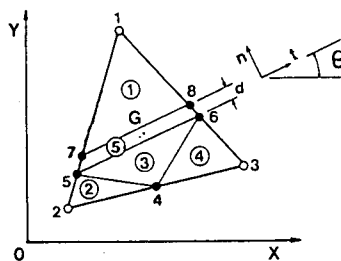


図-2 塑性クラック要素¹⁰⁾

変形に限定されるジョイント要素を用いて発生した亀裂の挙動を表現することの妥当性に対しては言及していない。

最後に、亀裂の影響を平均的に捕えて連続体に置き換えるアプローチは、分散型ひびわれ(Smeard crack)モデルと呼ばれ⁷⁾、亀裂発生を含んだ有限の領域を連続体と考え、その平均的な力学的特性を1つの有限要素モデルで表現する。そして、発生した亀裂を要素の材料特性の変化としてモデル化するので、初期に設定した幾何学的条件を変更することなく亀裂の発生・進展を追跡できる。すなわち、微視的レベルでは不連続な状態であるが、要素を適度な大きさに限定することによって巨視的な構成式を用いるものである。この方法は、数多くの亀裂が分散して発生し、個々の亀裂の発生・進展よりもむしろ

亀裂の発生が終了して安定な段階となった以降の挙動が重要となる場合に有効となる。

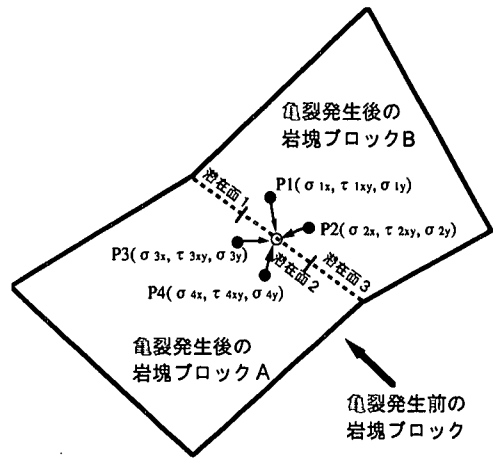
以上に挙げた代表的な解析手法は、全て連続体の仮定を前提として有限要素法を利用したものであるが、一方で、不連続体解析を利用した研究も幾つか見受けられる。竹内ら¹³⁾、¹⁴⁾は、分割した要素をボロノイ多角形としたRBSMを用いて無筋コンクリート梁や断層のせん断実験を対象とし、破壊の進展をシミュレートしている。また、都井ら¹⁵⁾、¹⁶⁾、¹⁷⁾も、同様の手法により、多結晶脆性固体のマイクロラッキング挙動をシミュレートしている。しかし、岩石基質部と不連続面から構成される岩盤の変形特性がそれぞれの変形特性の複合として具現されると考えると、岩盤を剛体要素一ばね系によるRBSMで表現することは困難な場合があると思われる。さらに、不連続性岩盤における破壊の本質である滑りや回転を伴う岩塊の崩落や基質部の大変形挙動をRBSMで表現することも困難であると思われる。Lorigら¹⁸⁾は、個別要素法を用いて、鉄筋コンクリートのほりに発生する亀裂の分布を、予めボロノイ分割で定義した不連続面でモデルし、載荷に伴う亀裂の発生・進展を表現している。また、必ずしも亀裂の発生・進展機構のモデル化を意図した研究ではないが、大西ら¹⁹⁾は、個別要素法を用いて、マッシュな岩を対象として崩壊時に発生する不連続面の分布をボロノイ分割で定義した不連続面でモデルし、岩石圧縮試験や支持力問題に適用した例を示している。これらの研究は何れも、亀裂発生の規準や判定方法が明確に示されておらず、亀裂の発生・進展機構を表現する解析的アプローチとしての妥当性に問題があると思われる。

以上より、不連続性岩盤を対象とした場合、妥当性のある解析的アプローチに要求される条件を変形挙動解析の面から考えると、

- (1) 既存の不連続面の破壊およびその破壊後の大変位挙動の表現が可能であること、
- (2) 新たな亀裂の発生・進展とその発生後の岩盤不連続面としての大変位挙動の表現が可能であること、となる。

3. 提案する亀裂発生のモデル化と進展の表現

本論文で提案する解析的アプローチ（以下、提案手法と称する）は、個別要素法にて実現され、そのアルゴリズムの一部として機能する。ここでは、提案手法を構成する要素として、発生する亀裂のモデル化、亀裂の発生条件、個別要素法の計算フローにおける提案手法の位置付け、亀裂進展および拡大の



亀裂発生前：岩塊ブロックは太線で示した1つであり、内部は連続性が維持される、
亀裂発生時：3つの潜在面が順次亀裂化して岩盤不連続面となり、岩塊ブロックはAとBの2つに分離する。

図-3 潜在面の定義と亀裂発生条件式に要する主応力の評価

表現、の各々に対する考え方や定式化を述べる。

さて、亀裂発生・進展解析には、亀裂の発生条件としてエネルギー規準を用いる動的な方法と強度規準を用いる静的な方法があることは、前章の既往の亀裂の発生・進展解析の分類に関する考察で述べた。提案手法では、亀裂の発生条件に強度規準を用い、静的平衡状態を維持しながら安定的に亀裂が発生し進展する問題を取り扱い、動的、衝撃的な荷重を受ける問題は対象としない。このため、岩石基質部は弾性体を仮定する。現場における実際の載荷や掘削の問題は、少なからずこの条件が成立する範疇にあると考える。

ところで、個別要素法は運動方程式に基づく動的な解析手法であるが、平衡状態が速やかに達成されるよう減衰係数を自動的に調節することにより、疑似静的解析として静的問題を取り扱うことが可能となる²⁰⁾。静的問題を対象とする本論文では、これを適用する。なお、静的問題に対して個別要素法などの動的な解法に基づく解析手法を適用することによる優位性は、著者らにより示されている²¹⁾。

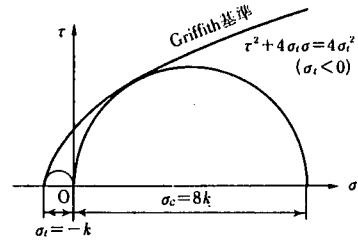
(1) 発生する亀裂のモデル化

個別要素法では、岩盤不連続面は岩塊ブロックの境界面として取り扱われ、同時に、岩塊ブロックは岩盤不連続面に囲まれた岩石基質部となる。本論文では、岩塊ブロックの境界には、岩盤不連続面の力学モデルとしてCoulombモデルを適用した。この力学モデル

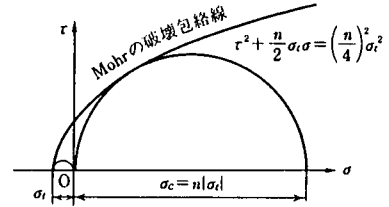
ルにおけるせん断応力とせん断変位の関係は、せん断強度が粘着力 c および摩擦角 ϕ で規定され、せん断応力がせん断強度に至るまではせん断剛性 K_s で規定される。また、垂直応力と垂直変位の関係は、垂直剛性 K_n で規定される。

提案手法は、実用的に現状の個別要素法をそのまま利用すべく、発生する単一亀裂の位置や方向を何らかの定式化により逐次的に決定し岩塊ブロックを再構築する方法ではなく、その発生が予測される位置にその方向および大きさの不連続面を岩塊ブロックの境界面として予め定義しておく方法とする。本論文では、この不連続面を「潜在面」と称する。潜在面は、図-3に示すように、亀裂となり得る不連続面の最小単位であり、隣接する2つの岩塊ブロック(図ではAとB)が接する1つの境界面(図中に点線で表示)に複数の潜在面(図の例では3つ)を定義すれば、亀裂の進展が離散化して表現される。与えられた亀裂の発生条件により亀裂発生と判定されるまでは潜在面の連続性を維持するため、ここに周囲の岩石基質部と等価な剛性と強度を与える。また、亀裂発生と判定された時、潜在面の剛性と強度は、自動的に岩盤不連続面の値に置き換えられ、以降は岩盤不連続面として挙動する。

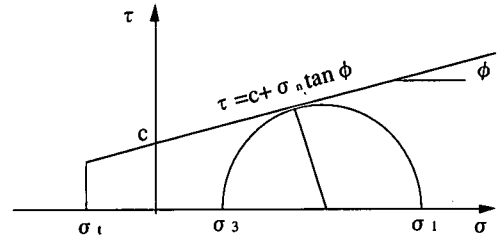
ところで、潜在面を定義した領域や方向が、実際に発生する亀裂の領域や方向と一致する保証は無い。これに対しては、亀裂が発生すると予測される領域において、予測される方向に潜在面をある程度数多く定義すれば、破壊の自由度が損なわれることはないと考えられる。例えば、前章で述べた石塚らの研究におけるLPG岩盤内貯蔵空洞の周辺では、空洞の接線方向の引張応力による壁面からの亀裂発生という形態がほぼ認識されており⁹⁾、このような場合は、空洞の接線方向にある程度多くの潜在面を定義すればよいと考える。また、亀裂の発生方向や発生領域を解析的な手段によりある程度予測するには、潜在面を定義しない弾塑性解析を実施して、得られた主応力方向の分布や塑性発生領域に基づく方法が考えられる。もっとも、潜在面を数多く定義しても、実際に亀裂となり得る潜在面は、解析対象領域の全体構造と荷重に支配され、実際には、全ての潜在面が一様に少しづつ顕在化して進展するものではなく、むしろ、局部的に集中する傾向が多いと考えられる。また、岩盤不連続面は、一般に、互に直交する2~3方向に比較的規則的な配列を有することが多く、新たに発生する亀裂も全体としては応力状態に支配されるものの、局部的に見ればこの規則的な配列方向に発生すると考えられる。以上より、発生する亀裂のモデル化は、前章で述べた離散ひび割れ(Discrete crack)モ



(a) Griffith規準



(b) Mohrの破壊包絡線



(c) Mohr-Coulomb規準

図-4 破壊規準・亀裂発生規準

デルにおける方法B)に類すると考えられる。

(2) 亀裂の発生条件

発生する亀裂をそれ以前には連続体と見なせる基質部であると考え、亀裂の発生条件としては、式(1)に示したCoulomb規準のような表面に適用する降伏・破壊条件ではなく、固体(岩石基質部)に適用する降伏・破壊条件をせん断と引張のそれぞれに対して定義すべきであると考えられる。

a) 亀裂の発生条件式

脆性破壊理論では、Griffith理論^{22) 23)}が代表的であり、材料の脆性破壊が潜在する亀裂の成長によって生じるとの考えのもとに、最も危険な潜在亀裂の先端から引張亀裂が成長する条件を、原子レベルのエネルギー収支の考え方によって求めた。この理論

は、単なる先駆的業績のみならず、現在においても明確な物理モデルを有する唯一の理論であるという点で有名である。平面応力場へ拡張されたGriffith理論は、 $\sigma_1 + 3\sigma_3 > 0$ の場合は式(2)、 $\sigma_1 + 3\sigma_3 < 0$ の場合は式(3)で示される。

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 - 8K(\sigma_1 + \sigma_3) = 0 \quad (2)$$

$$\sigma_3 = -K \quad (3)$$

ここに、 K は、材料と亀裂の寸法によってきまる定数である。引張強度 σ_t は、式(3)で $\sigma_1 = 0$ 、 $\sigma_3 = \sigma_t$ と置くと、 $\sigma_t = -K$ となる。また、圧縮強度 σ_c は、式(2)で $\sigma_1 = \sigma_c$ 、 $\sigma_3 = 0$ として $\sigma_c = 8K$ となる。さらに、式(2)、(3)を σ - τ 面に描くと、図-4(a)に示すように圧縮強度と引張強度の応力円を包絡する式(4)の2次の放物線となる。

$$\tau^2 + 4\sigma_t\sigma = 4\sigma_c^2 \quad (4)$$

これは、圧縮・引張強度比が8の場合のMohr規準である。岩石の圧縮・引張強度比は通常10前後であり、岩種によっても相当変化するので、この比を n と置いて次式(5)のように一般化した規準が図-4(b)に示すMohr規準であると言える。

$$\tau^2 + \left(\frac{n}{2}\right)\sigma_t\sigma = \left(\frac{n}{2}\right)^2\sigma_c^2 \quad (5)$$

ここでさらに簡略化して、圧縮・引張応力円の共通接線を破壊規準とし、土の場合と同様にせん断強度パラメータ c 、 ϕ および、引張強度 σ_t を用いると、図-4(c)に示すMohr-Coulomb規準となる。これを、式(6)、(7)に示す。

$$fs = (1 - \sin \phi)\sigma_1 - (1 + \sin \phi)\sigma_3 - 2c \cos \phi \quad (6)$$

$$ft = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (7)$$

ここでは、岩石基質部を等方・等質と考えて、せん断による亀裂の発生条件として式(6)を、また、引張による亀裂の発生条件として式(7)を適用する。ここで、 c 、 ϕ および σ_t は亀裂の発生を規定する強度パラメータとなる。

b) 亀裂発生条件式における主応力 σ_1 、 σ_3 の評価

提案手法において、式(6)、式(7)の主応力 σ_1 、 σ_3 は、各潜在面上でその潜在面を代表する位置において評価されるべきである。ところで、潜在面は、個別要素法におけるブロック境界面であるため、表面力として垂直応力 σ_n とせん断応力 τ が発生している。しかし、この2つの応力成分を用いても固体(岩石基質部)の応力テンソル $(\sigma_x, \tau_{xy}, \sigma_y)$ は不

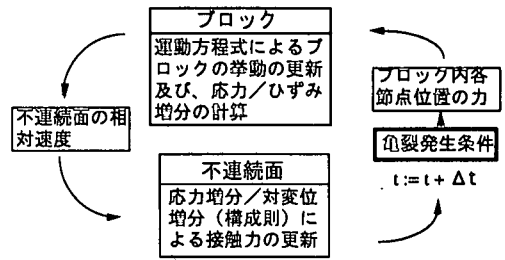


図-5 個別要素法の1計算サイクル Δt のプロセス (Δt は1計算サイクルに要する微小時間増分)

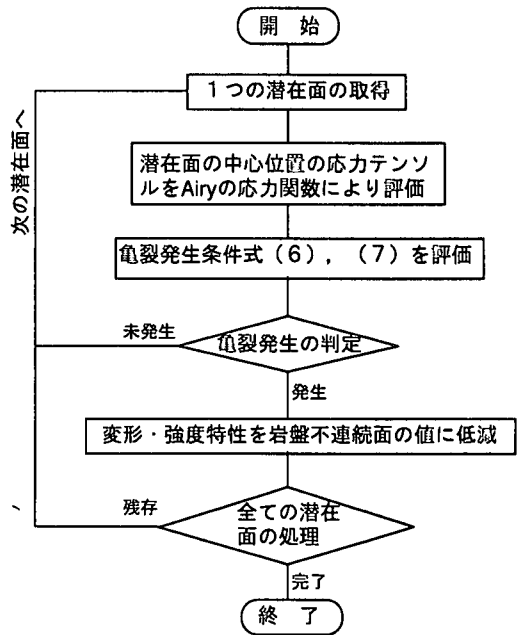


図-6 提案手法の処理の流れ

定である。そこで、提案手法では、補間関数を導入して、潜在面近傍の岩石基質部の応力テンソルから潜在面位置の応力テンソルを求めることにする。上述したように、提案手法は静的平衡状態を維持しながら安定的に亀裂が発生し進展する問題を対象とし、岩石基質部を弾性体としているので、得られる応力テンソル $(\sigma_x, \tau_{xy}, \sigma_y)$ は、平衡方程式を自動的に満足したものとなる。この場合、Airyの応力関数 $\Phi(x, y)$ が適用可能と考えられ、提案手法では、これを補間関数として用いることにする。Airyの応力関数として、式(8)に示す3次の多項式を適用した場合、未知数は a, b, c, d の4つとなる。

$$\Phi = \frac{a}{6}x^3 + \frac{b}{2}x^2y + \frac{c}{2}xy^2 + \frac{d}{6}y^3 \quad (8)$$

ここで、式(8)の4つの未知数を一意的に決定するためには、潜在面の近傍において合計4組の応力テンソル($\sigma_{nx}, \tau_{nxy}, \sigma_{ny}, n=1\sim 4$)が得られればよい。そこで、提案手法では、図-3に示すように、潜在面より一方の側の近傍2地点と他方の側の近傍2地点より4組の応力テンソルを得ることとした。決定された応力関数 Φ に基づき、各々の潜在面の代表点をその潜在面の中心位置として、その座標(x, y)を式(9)に与えると、潜在面の応力テンソル($\sigma_x, \tau_{xy}, \sigma_y$)が一意的に決定されることになる。

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \quad (9a)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} \quad (9b)$$

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \quad (9c)$$

最後に、主応力(σ_1, σ_3)は、($\sigma_x, \tau_{xy}, \sigma_y$)より容易に求まる。

(3) 個別要素法の計算フローと提案手法の関係

前節までに述べた亀裂発生の判定および発生する亀裂の処理は、図-5に示すように、個別要素法の計算サイクルにおいて、1計算サイクル毎に計算サイクル開始位置で1回実行される。さらに、この処理の具体的な流れは、図-6に示される。ここでの処理は、個別要素法モデルにおける全てのブロック境界面のうち、潜在面として定義された境界面のみが対象となる。また、全ての潜在面に対する処理が完了するまでこの処理は繰り返し実行される。

(4) 亀裂の進展および拡大の表現

発生した亀裂は、個別要素法の計算における岩盤不連続面として挙動し、その結果として潜在面を含む周囲の岩石基質部に対して逐次的に応力再配分がなされる。この応力再配分に起因して変化した応力分布により、既に亀裂となった潜在面の隣接もしくは近傍にある他の潜在面にて亀裂の発生条件が満足されるなら、これが新たな亀裂の発生となる。このメカニズムが繰り返される過程で潜在面が順次亀裂となる現象を、提案手法における亀裂の進展および拡大の表現と考える。

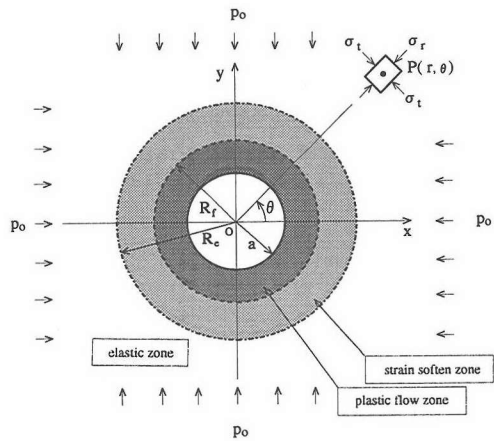


図-7 円形空洞周辺の応力状態と塑性域²⁴⁾

表-1 空洞周辺地山の物性値

ヤング係数	1.0(GPa)
ポアソン比	0.30
密度	2.50(g/cm ³)
c (亀裂発生条件)	0.34(MPa)
φ (亀裂発生条件)	35.0(°)
σ _t (亀裂発生条件)	無限大

4. 提案手法の検証

前章で述べた提案手法による亀裂発生・進展の解析的アプローチの妥当性を検証するために、本章では、円形空洞の掘削問題と斜面問題を対象とし、塑性・破壊領域の解析解と提案手法を比較する。理論的解析は、連続体を仮定しているため、解析の対象は既存不連続面の存在しないマッシュアップな岩とする。定義する潜在面の分布形状は、亀裂進展方向の任意性(自由度)をある程度有し、さらに、直線的に連続した潜在面は亀裂進展方向が恣意的となるのでこれを避けるべきと考える。因ってここでは、潜在面の分布形状として正六角形が適当であると考えた。掘削問題に対しては、蔣による静水圧を受ける円形空洞周辺岩盤の弾塑性解析²⁴⁾、斜面問題に対しては、Hoekらによる背面位置に引張亀裂を伴う臨界円弧すべり面位置の決定法²⁵⁾を用いた。

(1) 静水圧を受ける円形空洞周辺岩盤の弾塑性解析

a) 理論的解析²⁴⁾

無限遠方から一様分布の静水圧 p_0 を受ける半径 a の円形空洞を図-7のように考える。ここでは、Mohr-Coulomb規準に従いひずみ軟化特性を示す等質等方体の岩盤地山の応力-ひずみ関係が理論解として導かれている。円形空洞周りにおいて塑性流動領域とひずみ軟化領域が生じ、それぞれの塑性半径 R_e と R_f が式(10)のように求められる。

$$R_e = \left(\frac{a}{\xi}\right) \left[\frac{N \xi^{K_p} (1-K_p)(h+K_p) + \sigma_c \{ (1+h) + 2(\alpha-1) \}}{(1-K_p)(h+K_p) p_0 - \sigma_{co}(h+K_p)} \right]^{1/(K_p-1)} \quad (10)$$

$$R_f = \zeta R_e; \quad \zeta = \left[\frac{2}{\alpha(1+h) + (1-h)} \right]^{1/h}$$

ただし、 $N = \frac{2p_0}{1+K_p} - \frac{2\sigma_{co}}{1+K_p^2} - \frac{2\sigma_c(\alpha-1)}{(1-K_p)(h+K_p)}$
 $K_p = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$

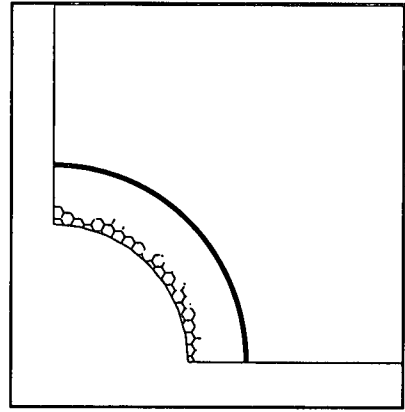
ここで、 ϕ は内部摩擦角、 α はぜい性率、 ξ は R_e と R_f の比、 h は塑性ポアソン比である。解析の対象は、地表から空洞中心まで100mの砂岩岩盤内に位置する半径5mの円形空洞とする。地山の力学的物性値は、表-1に示す。静水圧 $p_0=2.5\text{MPa}$ として、地山を弾完全塑性体とすると、式(10)より得られる塑性半径は、 $R_e=R_f=7.15\text{m}$ となる。

b) 提案手法による亀裂発生・進展解析

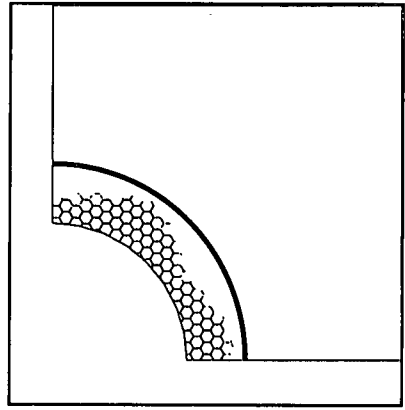
解析モデルは、対称性を考慮して1/4モデルとし、岩盤内に正六角形状の潜在面を定義した。ここで、岩石基質部は弾性体として、ヤング係数、ポアソン比、亀裂発生条件に与える強度パラメータは表-1に示した値を用いた。半径方向および円周方向に主応力 $\sigma_r = \sigma_\theta = 2.5\text{MPa}$ を与えた後、無支保の状態で半径5mの掘削領域を100%解放した。提案手法により得られた亀裂の発生・進展過程を最終的に釣合状態となるまで3段階(ステージ1~ステージ3, ステージ3は最終釣合状態)に分けて図-8に示す。なお、各ステージは、時間増分幅 Δt による同一時間増分量に対する状態を意味する。

c) 考察

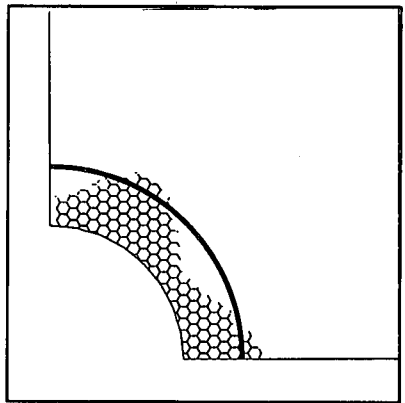
図-8より、亀裂は、空洞壁面より発生し、初期のステージでは半径方向に向かってほぼ均等に進展していることが分かる。しかし、理論解によって求まる塑性半径の位置に接近するに連れて、亀裂の発生・進展がその位置の手前付近で停滞している部分と、塑性半径の位置を超えた部分が見られる。このうち、亀裂の発生・進展がその手前付近で停滞している現象は、内空壁面付近で亀裂発生による岩塊ブロックの剥離が見られ、岩塊ブロックの剥離の箇所



(ステージ 1)



(ステージ 2)



(ステージ 3)

図-8 円形空洞周辺岩盤の亀裂の発生・進展過程(解析モデル内の実線は発生した亀裂を、太線は理論的解析による塑性半径の位置を表す。また、各ステージは、 Δt による同一時間増分量に対応する。)

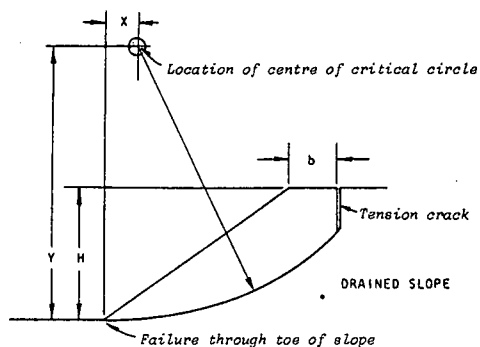
で応力の伝播が妨げられたことが原因であると思われる。また、亀裂の進展が塑性半径を超えた現象は、その部分が内空壁面付近で岩塊ブロックの剥離が発生していない箇所の半径方向に一致することから、掘削により解放された応力に上述の剥離により伝播が妨げられた応力が付加されたことが原因であると思われる。理論的検討は連続体を前提としているのに対して、提案手法は理論的検討では塑性化する領域を不連続体としているため、提案手法によっては、半径が均一である亀裂発生領域は得られなかったが、理論的検討による塑性半径と図-8に示される亀裂発生領域は、概ね一致していると思われる。

(2) 背面に引張亀裂が存在する斜面安定解析

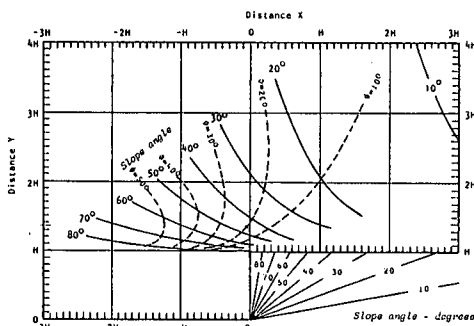
a) 理論的解析²⁵⁾

法肩からの距離 b の背面に引張亀裂のある高さ H 、内部摩擦角 ϕ を有する斜面は、図-9(a)に示すように、法肩を通り安全率が1.0の臨界円弧すべり面位置およびすべり面の一部となる背面の引張亀裂の臨界位置が一意的に決定される。ここで、臨界円弧すべり面は、図-9(b)を用いて中心座標 (x, y) で与えられると、半径は必然的に座標 (x, y) と法肩を結ぶ直線距離となる。また、引張亀裂の臨界位置 b は、図-9(c)により与えられる。

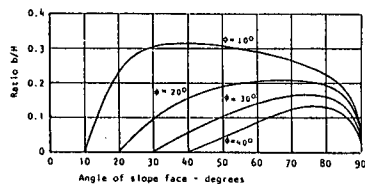
解析の対象は、高さ $H=10.0\text{m}$ 、内部摩擦角 $\phi=20^\circ$ の傾斜角が異なる2種類の均一な岩盤斜面とする。臨界円弧すべり面の中心座標および引張亀裂の臨界位置は、図-9より、傾斜角 45° の斜面に対しては、 $x=-0.05H\text{ m}$ 、 $y=1.35H\text{ m}$ 、 $b=0.175H=1.75\text{ m}$ が、また、傾斜角 60° の斜面に対しては、 $x=-0.58H\text{ m}$ 、 $y=1.60H\text{ m}$ 、 $b=0.14H=1.40\text{ m}$ が、それぞれ得られる。



(a) 背面に引張亀裂を有する斜面と円弧すべり面

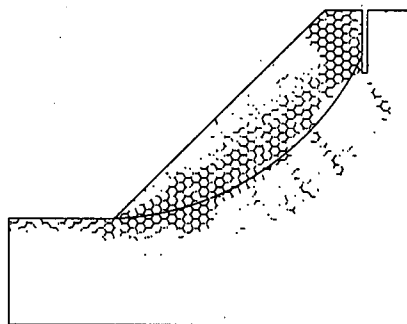


(b) 臨界円弧すべり面の中心座標の決定

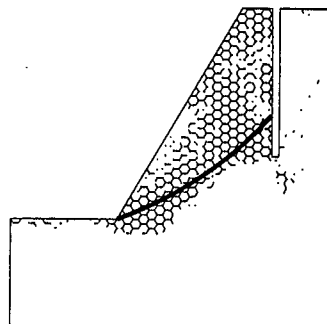


(c) 臨界引張亀裂の位置の決定

図-9 斜面の臨界すべり面と臨界引張亀裂の位置決定²⁵⁾



(a) 傾斜角 45° の斜面



(b) 傾斜角 60° の斜面

図-10 岩盤斜面の亀裂発生と臨界すべり面

(解析モデル内の実線は発生した亀裂を、太線は理論的解析による臨界すべり面の位置を表す。)

b) 提案手法による亀裂発生・進展解析

解析モデルは、距離bの位置に予め鉛直方向に空隙を与えて背面の引張亀裂を表現し、岩盤斜面内に正六角形状の潜在面を定義した。岩石基質部は弾性体として、ヤング係数10.0GPa、ポアソン比0.3、密度2500.0kg/m³を与えた。亀裂発生条件の強度パラメータとして、 $\phi=20.0^\circ$ を与えた。岩盤自重を載荷して提案手法により得られた亀裂の発生・進展状況を図-10に示す。

c) 考察

図-10に示した亀裂発生領域は、斜面の傾斜角にかかわらず理論的解析により与えられた臨界円弧すべり面に沿ってその内側に発生している結果が得られている。これより、理論的解析による円弧すべり面の位置が提案手法によってよく表現されていることが分かる。

(3) 考察

円形空洞の掘削問題と斜面問題を対象として、塑性・破壊領域に関して理論的な結果が示されている既発表論文の解析結果を用い、提案手法との比較を行った。結果として、それぞれの問題に対して両者は概ね良好な一致を示した。これら以外にも解析解を有する各種の問題はあるが、ここで取り上げた空洞掘削問題と斜面問題は、岩盤工学における代表的な問題である。これより、提案手法は、妥当性を有する解析手法であると判断できる。

5. 提案手法の不連続性岩盤構造物への適用

提案手法の実際問題への適用例として、まず、不連続性岩盤内に立地する地下発電所の空洞を掘削する場合の空洞の安定問題を考える。ここでは、掘削による支保工のない場合の内空壁面および空洞周辺岩盤の変形挙動をシミュレートする。次に、不連続性岩盤斜面上に橋梁基礎を建設する場合の斜面の安定問題を考える。

(1) 地下発電所の空洞掘削における亀裂発生・進展解析

a) 解析の概要

対象とした地下発電所空洞は、地表面下300mに位置し、高さ50m、幅25mの弾頭型とする。解析モデルを図-11に示す。空洞周辺の岩盤は、砂岩を中心として新鮮、堅硬かつ風化の少ないC_M~C_L級と想定する。卓越方向を有する2つの不連続面群のうち、1つは、30°の傾斜を有する連続性のある不連続面

表-2 空洞周辺岩盤の物性値 (岩石基質部)

ヤング係数	7.81(GPa)
ポアソン比	0.25
密度	2.40(g/cm ³)
c (亀裂発生条件)	9.81(MPa)
ϕ (亀裂発生条件)	35.0(°)
σ_c (亀裂発生条件)	3.50(MPa)

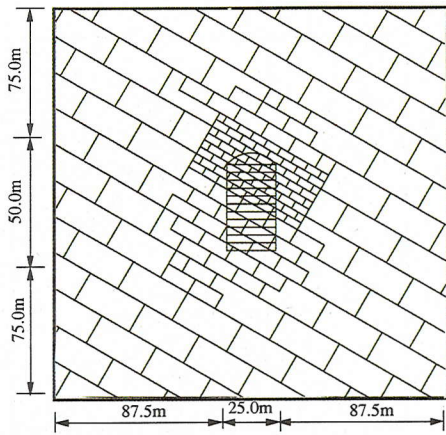
表-3 空洞周辺岩盤の物性値 (既存不連続面)

垂直剛性率(K _n)	20.0(GPa/m)
せん断剛性率(K _s)	2.0(GPa/m)
粘着力(c)	0.0(MPa)
摩擦角(ϕ)	35.0(°)

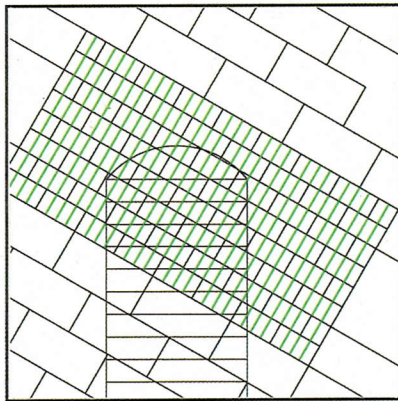
群である。これは、掘削中の空洞の右側壁面では差し目、空洞の左側壁面では流れ目となって現われる。もう1つは、これと直交する連続性の乏しい不連続面群である。岩石基質部の力学的特性は弾性体とし、ヤング係数、ポアソン比、および、亀裂発生条件式(6)、(7)に与える強度パラメータを表-2に示す。また、不連続面の室内力学特性試験²⁰の結果より得られた不連続面の物性値を表-3に示す。解析領域は、一般に、圧縮応力場における岩盤の大変形領域が空洞近傍に集中することから、空洞寸法の4~5倍を対象と考えて図-11(a)に示すように200m×200mとした。解析領域の境界周囲には、岩盤と同一の物性値を有する弾性体の無限地盤を導入した。潜在面は、図-11(b)に緑色線で示すように、30°の傾斜を有する連続性のある不連続面群と直交する方向に2.0mの間隔で定義した。解析の手順は、側圧係数K₀=1.0とした初期地山応力分布を再現した後、無支保の状態で各掘削段階で平衡状態を達成させながら、順次、アーチ部掘削、盤下げ掘削を実施した。

b) 解析の結果と考察

図-12に、アーチ部の掘削による亀裂の発生・進展状況を最終的に釣合状態となるまでの3段階(ステージ1~ステージ3、ステージ3は最終平衡状態)に分けて示す。なお、各ステージは、時間増分幅 Δt による同一時間増分量に対する状態を意味する。この図では、せん断(式(6))により亀裂発生と判定された潜在面を赤色線で、また、引張(式(7))により亀裂発生と判定された潜在面を青色線に表示している。この図では、掘削直後より天盤

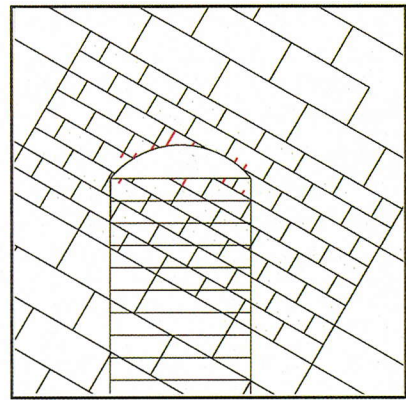


(a) 解析領域全体

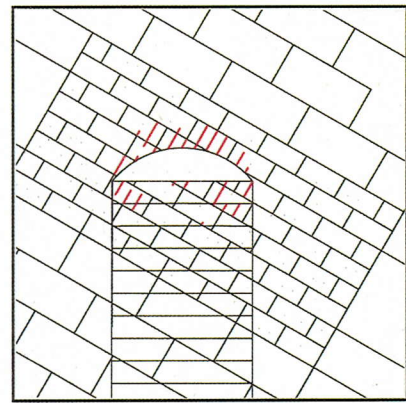


(b) 空洞付近の既存不連続面, および, 定義した潜在面 (緑色線)

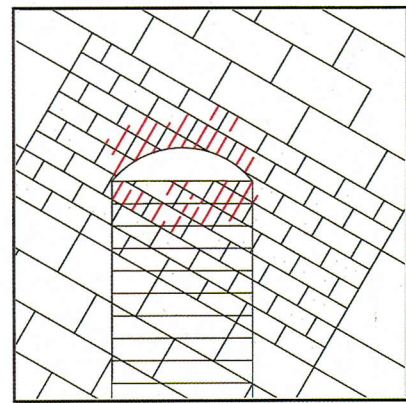
図-1 1 地下空洞掘削解析のモデル



(ステージ 1)



(ステージ 2)



(ステージ 3)

赤色線	せん断 (式(6)) により発生した亀裂
青色線	引張 (式(7)) により発生した亀裂

図-1 2 アーチ部の亀裂の発生・進展状況 (各ステージは, Δt による同一時間増分量に対応する)

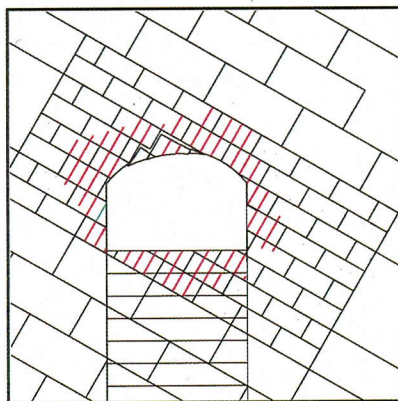


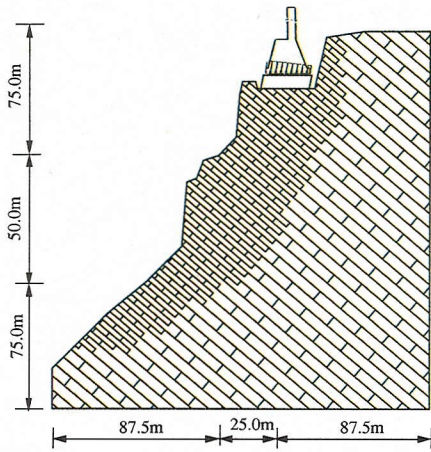
図-1 3 3段ベンチ掘削後の破壊状況 (天盤部にキープロックが発生)

表-4 基礎周辺岩盤の物性値 (岩石基質部)

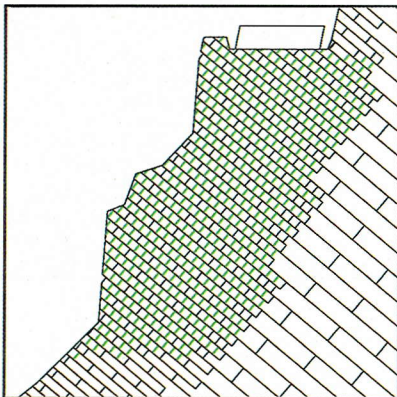
ヤング係数	843.35(MPa)
ポアソン比	0.25
密度	2.40(g/cm ³)
c (亀裂発生条件)	0.245(MPa)
ϕ (亀裂発生条件)	45.0(°)
σ_c (亀裂発生条件)	3.50(MPa)

表-5 基礎周辺岩盤の物性値 (既存不連続面)

垂直剛性率(Kn)	20.0(GPa/m)
せん断剛性率(Ks)	1.0(GPa/m)
粘着力(c)	0.0(MPa)
摩擦角(ϕ)	35.0(°)

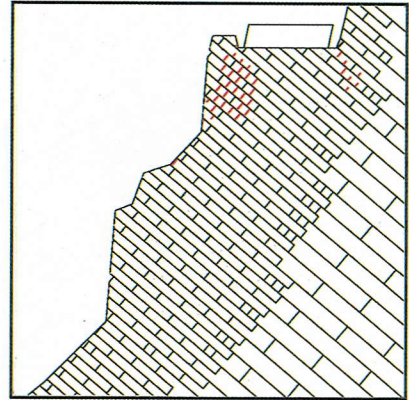


(a) 解析領域全体

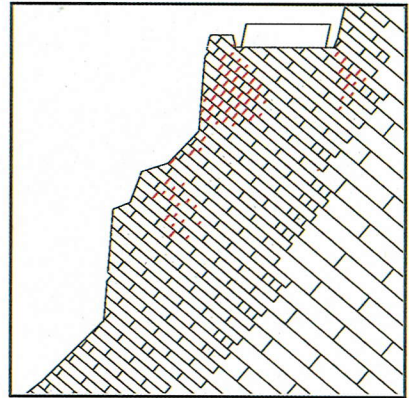


(b) 基礎付近の既存不連続面, および, 定義した潜在面 (緑色線)

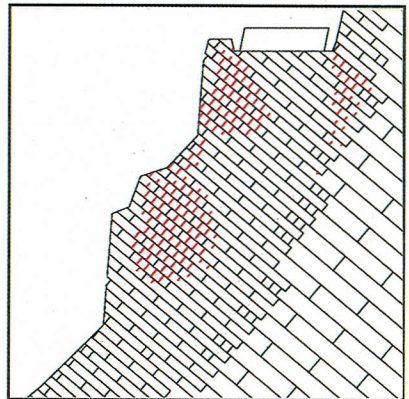
図-14 岩盤斜面上橋梁基礎の解析モデル



(ステージ 1)



(ステージ 2)



(ステージ 3)

赤色線	せん断 (式(6)) により発生した亀裂
青色線	引張 (式(7)) により発生した亀裂

図-15 岩盤斜面内の亀裂発生・進展状況 (各ステージは, Δt による同一時間増分量に対応する)

部では上方に、床盤部では下方にせん断による亀裂が発生・進展する状況が見られる。また、3段ベンチまでを盤下げした時点での空洞周辺の亀裂発生・進展状況および岩盤の挙動を、図-13に示す。

以上より、掘削前には天盤部にキープブロックが存在しないと考えられる岩盤であっても、掘削後にキープブロックと成り得る岩塊が現われ、提案手法を適用することにより、掘削による亀裂の発生に起因する崩壊メカニズムの再現が可能となることが分かる。

(2) 橋梁基礎の建設による岩盤斜面の亀裂発生・進展解析

a) 解析の概要

対象とする岩盤斜面は、 50° ～ 80° の急傾斜を有し、斜面上の高さ25mの位置に直接基礎を建設する。解析モデルを図-14に示す。基礎周辺の岩盤は、安山岩を中心とし、斜面の表面付近にやや風化が見られる。卓越方向を有する2つの不連続面群のうち、1つは、 40° の傾斜を有する差し目状の連続性のある不連続面群である。もう1つは、これと直交する連続性のやや乏しい不連続面群である。岩石基質部の力学的特性は弾性体とし、ヤング係数、ポアソン比、および、亀裂発生条件に与える強度パラメータを表-4に示す。また、室内力学特性試験²⁶⁾の結果より得られた岩盤不連続面の物性値を表-5に示す。潜在面は、図-14の緑色線で示すように、基礎直下の地表付近に流れ目方向に0.5mの間隔で定義した。解析の手順は、初期地山応力分布を再現させた後、設計上の橋台反力を基礎上面に線形増分的に与えた。

b) 解析の結果と考察

図-15に、亀裂の発生・進展状況を載荷が設計上の橋台反力に到達するまでの3段階(ステージ1～ステージ3, ステージ3は載荷が設計上の橋台反力に到達した最終状態)に分けて示す。なお、各ステージは、時間増分幅 Δt による同一時間増分量に対する状態を意味する。この図では、せん断(式(6))により亀裂発生と判定された潜在面を赤色線で、また、引張(式(7))により亀裂発生と判定された潜在面を青色線で表示している。これより、基礎直下では、ほぼ二等辺三角形に亀裂が発生していない領域が見られる。これを剛性域と考えると、載荷の進行と共にこの部分の押し込みの効果により、亀裂の発生が法面付近に沿って、下方に進展、拡大していく状況が見られる。

自然状態では流れ目状の不連続面群が連続性に乏しいため潜在的な不安定さはないと判断される岩盤

斜面でも、提案手法を適用することにより、流れ目状に発生する亀裂が表現され、すべりやトップリングなどの破壊メカニズムの再現が可能となることが分かる。因って、原位置調査による自然状態の不連続面の分布のみでは安定性や破壊モードの判断が困難である場合に対して、提案手法の適用の有用性が示されたと考える。

6. 結論

本論文では、既存不連続面のせん断プロセスのみならず、せん断や引張による岩石基質部での新たな亀裂の発生・進展のシミュレーションも実現できる個別要素法による解析的アプローチを提案した。本提案手法は、静的平衡状態を維持しながら安定的に亀裂が発生し進展する問題を対象とするが、動的、衝撃的な荷重を受ける問題に対する適用は困難である。ここでは、塑性・破壊領域が理論的に示されている既発表論文の解析手法と提案手法を同一の掘削問題と斜面問題に適用し、両者の結果を比較した。これより、それぞれの問題において両者の結果には概ね良好な一致が見られ、提案手法の妥当性が示されたと考える。また、提案手法を地下発電所空洞掘削問題と岩盤斜面上の橋梁基礎の安定問題に適用した結果、亀裂の発生・進展に起因する崩壊メカニズムの再現が可能であることが示された。

以上より、不連続性岩盤を対象とし、設計に供する不連続体解析において、本提案手法の有効性が確認されたと考える。今後は、原位置試験などの実測結果と比較することにより、本提案手法の信頼性を検証する予定である。また、潜在面の定義方法に対しても、さらに検討を加える必要がある。

参考文献

- 1) 吉田次男, 打田靖夫, 平川芳明, 森 聡: 大規模地下空洞掘削時の側壁岩盤挙動の検討, 第19回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, pp.67-72, 1998.
- 2) 伯野元彦: 破壊のシミュレーション, 森北出版, 1997.
- 3) 佐武正雄: 地盤と土の異方性, 土と基礎, Vol.32, No.11, pp.5-12, 1984.
- 4) 中川光雄, 蔣 宇静, 江崎哲郎: 地下空洞安定解析における岩盤不連続面の力学的挙動モデルの提案と適用, 土木学会論文集, No.603/III-44, pp.53-66, 1998.
- 5) Lemos, J. V., Hart, R.D. and Cundall, P. A.: A generalized distinct element program for modeling jointed rock mass, *Int. Proc. Symp. fundamentals of Rock Joints*, pp.335-343, Bjorkliden, 1985.
- 6) 岡村 甫, 前川宏一: コンクリート構造物の有限要素

- 法解析における解析モデルの評価, RC構造の有限要素法解析に関するコロキウム論文集, pp.13-20, 1984.
- 7) 岡村 甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートにおける非線形有限要素法解析, 土木学会論文集, 第360号/V-3, pp.3-12, 1985.
 - 8) 内田裕一, 六郷恵哲, 小柳 治: 仮想ひびわれモデルを組み込んだ分布ひびわれモデルによるコンクリートのひびわれの有限要素解析, 土木学会論文集, No.466/V-19, pp.79-88, 1993.
 - 9) 石塚与志雄, 木下直人: 破壊力学を用いたL P G岩盤内貯蔵空洞の亀裂進展解析に関する研究, 土木学会論文集, 第388号/Ⅲ-8, pp.171-178, 1987.
 - 10) Obara, Y., Yamabe, T., Shimizu, Y., Ichikawa, Y. and Kawamoto, T.: Elastoplastic analysis by cracked triangular elements, Proc. Int. Conf. on FEM, Shanghai, pp.756-760, 1982.
 - 11) 山辺 正, 尾原祐三, 市川康明, 川本朋万: 誘導異方性を有する地盤の弾塑性解析, 土木学会論文集, 第388号/Ⅲ-8, pp.95-102, 1987.
 - 12) 里 優, 亀村勝美, 中尾健児, 岩野政治: ジョイント要素を用いた岩盤の不連続性の表現法について, 第1回地盤工学における数値解析法シンポジウム論文集, pp.15-22, 1986.
 - 13) 竹内則雄, 上田真稔, 鬼頭宏明, 樋口晴紀, 上林厚志: ボロノイ分割を用いたRBSMによる無筋コンクリート梁の寸法効果解析, 土木学会構造工学論文集, Vol.40A, pp.519-527, 1994.
 - 14) 竹内則雄, 霜島大介, 小出 仁, 安井将文, 河野愛: 断層に関するせん断実験の離散化解析, 日本計算工学会計算工学講演会論文集, Vol.3, No.3, pp.915-918, 1998.
 - 15) 都井 裕, 諸 正信: 多結晶脆性固体のマイクロクラッキング挙動のメソスコピック・シミュレーション(その-1), 日本機械学会論文集(A編), 59巻557号, pp.240-247, 1993.
 - 16) 都井 裕, 諸 正信: 多結晶脆性固体のマイクロクラッキング挙動のメソスコピック・シミュレーション(その-2), 日本機械学会論文集(A編), 59巻557号, pp.248-255, 1993.
 - 17) 都井 裕: 有限要素法と計算不連続体力学, 応用数理, Vol.3, No.4, pp.17-33, 1993.
 - 18) Lorig, L. J., and Cundall, P. A.: Modeling of Reinforced Concrete Using the Distinct Element Method, *Fracture of Concrete and Rock*, pp.459-471, Bethel, Conn.: SEM, 1987.
 - 19) 大西有三, 河野正雄: ボロノイ分割法を適用した岩盤の個別要素解析について, 土木学会論文集, 第376号/Ⅲ-6, pp.231-239, 1986.
 - 20) Cundall, P. A.: Distinct element models of rock and soil structure, *Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics*, pp.129-163, E. T. Brown, Editor, London, George Allen and Unwin, 1987.
 - 21) 中川光雄, 蔣 宇静, 鎌田正隆, 生貞幸治, 江崎哲郎: 岩盤挙動及び安定性評価のための数値解析手法における比較的検討, 地盤工学会岩盤構造物の設計法に関する研究報告書, pp.9-15, 1997.
 - 22) Griffith, A. A.: The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, *Phil. Trans. R. Soc., Ser., A221*, pp.163-198, 1920.
 - 23) Griffith, A. A.: The Theory of Rupture, *Proc. 1st Int. Congr. Appl. Mech.*, pp.55-63, 1924.
 - 24) 蔣 宇静: 深部地下空洞の力学的安定に関する理論的および実験的研究, 九州大学学位論文, 1993.
 - 25) Hoek, E. and Bray, J.: *Rock Slope Engineering*, Revised third edition, *The Institution of Mining and Metallurgy, London*, pp.226-241, 1981.
 - 26) 蔣 宇静, 中川光雄, 江崎哲郎: 岩盤不連続体解析に必要なとする不連続面の挙動特性の評価法, 土木学会論文集, No.624/Ⅲ-47, pp.231-243, 1999.

(1998. 11. 17 受付)

A NEW APPROACH OF MODELING GENERATION AND PROGRESS OF CRACKS IN DISCONTINUOUS ROCK MASSES BY USING DISTINCT ELEMENT METHOD

Mitsuo NAKAGAWA, Yujing JIANG and Tetsuro ESAKI

Large part of deformation and failure of rock masses are governed by both characteristics of geometrical distribution of discontinuities and those of mechanical behavior in a single discontinuity in slopes, foundation ground and caverns. It is thought that stability of those rock structures extremely depend on not only existent discontinuities but also new cracks which are generated and progress due to loading or excavation. In this paper, a new approach is proposed for modeling generation and progress of cracks due to shear and tension failure in the matrix by using distinct element method. Next, appropriateness of the approach are verified by means of comparison with result of theoretical analysis for the problem of cylindrical hole and bearing capacity of strip footing on slope. As applications to field problems for discontinuous rock masses, simulation of underground opening excavation and footing of bridge on slope are also carried out.