

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19310120

研究課題名（和文）不連続有限要素法を用いた地盤災害の破壊力学的解明

研究課題名（英文）Fracture mechanical explanation of ground disaster using a discontinuous finite element method

研究代表者

矢富 盟祥（YATOMI CHIKAYOSHI）

金沢大学・環境デザイン学系・教授

研究者番号：90135541

研究成果の概要（和文）：要素節点に特異変位の不連続量を組み込むことにより，リメッシュが不要な，拡張有限要素法を使用し，新たに多軸圧縮荷重下での弾塑性体の地盤材料の破壊にも適用可能な有限要素法の開発を行った．弾塑性体の場合は特異変位場が未知なため，弾塑性体の特異変位場の漸近理論解を得た．また圧縮応力場では，滑り面に摩擦やダイラタンシーが生じるため，これらの現象を取り入れた Cohesive 領域の構成式を考え，弾塑性体物体とき裂面の摩擦則を一貫してリターンマップ陰解法が可能なプログラムを開発し地盤の滑り現象の解析を行った．

研究成果の概要（英文）：The extended finite element method was used with success in the past few years for linear elastic fracture mechanics. In the case of elastic-plastic fracture mechanics, this method does not give an accurate solution without asymptotic solutions to enrich the shape functions basis. Then we obtained several asymptotic solutions for an elastic-plastic material under the compressive shear load. Using the solutions and making the cohesive fracture surface with frictional conditions and a dilatancy effect, we develop a systematic program, which is an implicit return map method and analyze several geo-mechanical fracture problems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
総計	6,400,000	1,920,000	8,320,000

研究分野：応用力学，連続体力学

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：弾塑性体，破壊力学，非線形連続体力学

1. 研究開始当初の背景

地滑りなどの地盤災害の破壊現象のほとんどは、弾塑性体である地盤内の変位が不連続になる典型的な亀裂（滑り面）の進展現象である。破壊力学の範疇にある破壊現象である。したがって、地滑り現象などの解明には、「破壊力学」での意味での亀裂の進展に関する研究が必要不可欠である。しかしながら地盤材料である土を対象とした「土質力学」では、破壊という用語はしばしば使用されるが、亀裂進展現象を問題とする「破壊力学」的研究は皆無に近い。具体的に言えば金属の破壊力学の研究のように、供試体中に真の亀裂を作り、それに荷重をかけて亀裂の進展現象を考究するのと同じように、土供試体内に亀裂を作って、1軸ないし3軸圧縮試験などを行うことによって、亀裂進展開始、および進展条件に必要な破壊靱性値、また、どの方向に亀裂が進展するかを決定する破壊力学での意味での破壊基準に関する実験や数値解析的研究は全く行われていないのが実情である。土質力学で常識として使用されている破壊と言う用語は、例えば3軸圧縮試験中、増加させた最大圧縮応力ないし軸差主応力が一定になった状態のことをさすのであって、実際にはその状態となる以前に供試体内に発生する滑り面、すなわち亀裂の発生進展とは無関係に定義された用語である。

岩石では、斜めになった初期き裂の上下から圧縮応力を与えると、斜めのまま亀裂は伸展せず、き裂先端近傍の周応力が最大になる方向に折れ曲がって伸展するウイング亀裂⁽¹⁾になる。一方、通常の土質材料では、軟化が生じる以前は、3軸圧縮試験をすると、最大圧縮応力方向から45°以下の斜めの亀裂（滑り線）がほぼ供試体全体に貫いて発生する。先に述べた岩石の場合でも側圧がある程度大きくなると必ずこのような斜め亀裂が発生する。地震の場合でも、活断層（亀裂）が、海洋プレートの沈み込や移動による力の方向に対し斜めに、すなわち、もとあった活断層の方向に伝播する例が多い。このように、現実では当たり前のように見られるこの斜め亀裂の進展現象（破壊力学ではモードⅡ型、モードⅢ型進展亀裂ないしせん断亀裂とも呼ばれている）は、実は、現在の破壊力学の知識でもって、未解決問題なのである。にもかかわらず、土質力学の分野では、依然として、この亀裂進展を考慮した破壊力学的な実験・数値解析的研究は、国内・国外を問わずほとんど行われていない状況である。そこで研究代表者は、地滑りなどの地盤災害を真の意味で変位が不連続と見る破壊力学的

解明を着想するに至った。

2. 研究の目的

目的を短的に言えば、前記した研究の背景で記したように、斜め亀裂の進展現象（破壊力学ではモードⅡ型、モードⅢ型進展亀裂ないしせん断亀裂とも呼ばれている）の破壊力学的解明にある。それが出来て初めて地滑りなどの地盤災害の予測、対策などが可能になる。地滑り地盤は、通常、過圧密状態にある粘土層で生じる。この過圧密状態にある粘土をせん断変形させると、最初は、せん断ひずみの増加とともにせん断応力はピーク状態になり、それを越えて、せん断変形を与えるとせん断応力は小さくなるひずみ軟化現象が生じる。土質力学では、この軟化特性をも構成式として与え境界値問題として解析される。しかし、実験で使われた過圧密粘土は、せん断応力が最大になったとき、あるいはそれ以前に供試体内には、き裂が発生しているのである。したがって、軟化状態での応力-ひずみ関係はもはや構成式ではなく、境界値問題の解となってしまっている。言い方を変えれば、硬化する物質でも、内部にき裂が発生・伸展すれば、応力-ひずみ関係は軟化するの自明の事である。このような見方から構正式自身の正当性をも明らかにする目的をもって本研究を行った。

3. 研究の方法

(1) 陰解法リターンマップ手法を用いたによる微小変形弾塑性体の有限要素法解析プログラムの開発：不安定挙動になっても、計算時間も早く、解が絶対収束する事が保証されていて、精度よく応力が降伏面にのるリターンマップ手法を用いた、微小変形の陰解法による有限要素法解析プログラムの開発を行う。

(2) ドラッカー-プラガ弾塑性体の漸近変位の理論解を得る。後述する拡張有限要素法では、精度の良い解を得るため、変位の特異漸近場の解を使用する。今まで、弾塑性体のモードⅡの場合の変位特異解は得られていないので、本研究において不可避的に必要な、その漸近解を得る。

(3) 要素内部にすべり面を組み込んだ圧縮荷重下での拡張有限要素法解析のプログラムの開発：要素内に変位、すなわち、変位の不連続を組み込むことにより、リメッシュが不要な、多軸荷重下での線形等方弾性体の場合の拡張有限要素法（X-FEM）の手法を、き裂面に摩擦やダイラタンシー特性を組み込んだ地盤材料にも適用可能なように開発する。

(4) 弾塑性体の要素内部に変位不連続面を

組み込んだ拡張有限要素法のプログラムの開発：上記（3）で開発した線形等方弾性体のプログラムを，（2）で得た弾塑性体のモードIIの場合の特異性を考慮した拡張有限要素法のプログラムを開発する。

（5）開発した拡張有限要素法のプログラムによる地盤の滑り面の進展解析による破壊現象の解明：開発したプログラム適用し，研究目的のところ述べてきた，実際現象ではしばしば見られるが，現在の破壊力学では，未解決問題であった斜め亀裂の進展現象を再現する解析を行う。斜面崩壊で生じる地盤中の進行性破壊現象など，種々の実際的かつ具体的な亀裂や滑り面の生成・進展の拡張有限要素法解析を行いその破壊現象の解明を行う。

4. 研究成果

関連型の線形硬化する Drucker-Prager 弾塑性体のモード II 型のき裂先端近傍特異応力場を求めた。その後，Drucker-Prager 弾塑性体と異なり，等方圧縮圧力に対しても降伏する，より地盤材料の特性に近い Cam-Clay 弾塑性体を用い，任意の均一応力状態まで物体内部のき裂内は滑らず，ある応力状態に達した際にき裂内が滑るという条件を与え，き裂先端近傍での応力増分場の漸近理論解を得た。ここで，粘土材料で重要となる間隙水の流れに対しては完全排水条件，非排水条件下を想定した。なお，このき裂先端近傍で常に塑性負荷と仮定する塑性増分解では弾性除荷領域が発生することが判明したため，弾性除荷を考慮した弾塑性漸近解を求め，初期き裂と同方向に進展するモード II 型のせん断破壊の議論に対しては実用上塑性理論解で十分である事を示した。これらの特異応力場の漸近解に対し，漸近解第二項である均一項を足し合わせ，新しく「最大摩擦せん断応力破壊規準」なる弾塑性体にも適用可能な破壊規準を新たに提案し，これを使用すれば，今まで，力学的説明が出来なかった元のき裂と同方向に進展するせん断破壊の可能性を明確に説明できることが分かった。また，この破壊規準を使用した場合のき裂面の動摩擦係数，ダイレイタンス係数や内部摩擦係数，弾性係数硬化係数比などがせん断破壊におよぼす影響などの考察を行った。

より現実的な地盤の滑り状態を再現するため，滑り面自身を，最大静止摩擦から運動摩擦係数へと軟化する弾塑性体と仮定し，摩擦則だけでなく接触面の滑りによるダイレイタンス効果も取り入れることにより，物体および接触面を一貫してリターンマップ手法による陰解法解析を行える整合性のとれた新しい不連続面伸展の解析手法を考案した。

また，地盤災害を考える時，地盤は水で飽和されている場合が多い。

このような水で飽和された地盤の破壊進展プロセスを解明する目的で，土骨格と水との相互作用を考慮に入れた，完全飽和状態の排水・非排水状態の連成解析および土・水連成弾塑性体内の滑り面進展解析が可能な拡張有限要素法プログラムの開発を行った。この場合，滑り面中における応力と不連続変位との関係として，上記に加え，水との相互作用を考慮した摩擦やダイレイタンス係数を考慮に入れた構成関係を取り入れた。最後に，開発した不連続有限要素法プログラム適用し，滑り面が要素辺上でなく，要素内を通過していることにより，リメッシュが不要な斜面崩壊滑りなどの破壊現象など，種々の実際的かつ具体的な亀裂や滑り面の生成・進展の拡張有限要素法解析を行い，硬化する弾塑性体でも，滑り面が伸展すれば，軟化現象が説明可能なこと，したがって，軟化の構成式は，構成式とは言えないことが確認できた。地滑り現象は，初期には，物体内で局所的にせん断滑り生成され，それが次第に成長し最終的な崩壊に至る進行性破壊の現象が明確に把握可能となった。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計8件）

1. 新保 泰輝，矢富 盟祥：任意の不連続曲線を高精度に表せる HB-Spline 補間手法，Transactions of JSCEs, Vol. 2009 (2009) . 20090020, 電子ジャーナル，査読有
2. 龍野梅吉，服部孝之，矢富盟祥：アンカー張力の地中応力分布と支圧効果に関する研究，土木構造・材料論文集，第 24 号 (2008)137-144, 査読有
3. 矢富盟祥，新保泰輝：Drucker-Prager 弾塑性体の漸近解を使用した最大摩擦せん断応力破壊規準によるせん断破壊の考察，材料，第 57 巻，第 12 号，(2008)，1224-1231，査読有
4. 新保泰輝，矢富盟祥：非関連型の Drucker-Prager 弾塑性体の漸近解を使用した最大摩擦せん断応力破壊基準によるせん断破壊の考察：応用力学論文集，土木学会，Vol. 11，(2008)，319-330，査読有
5. 新保泰輝，矢富盟祥：Drucker-Prager 弾塑性体のモード II 型き裂先端近傍特異場の漸近解析，材料，第 57 巻，第 9 号，(2008)，936-943，査読有
6. 橋本堅一，矢富盟祥，島袋 淳：圧縮荷重下の面内および面外せん断変形を受けるき裂による破壊現象の実験的考察，材料，第 56 巻，第 10 号，(2007)，970-976，査読有

7. 鱸洋一, 大熊俊明, 矢富盟祥: 圧縮荷重下にある地盤材料内の亀裂進展開始に対する最大摩擦せん断力破壊基準の検討, 応用力学論文集, 土木学会, Vol. 10, (2007), 331-342, 査読有

8. 阿部孝弘, 矢富盟祥, 鱸洋一, 高橋圭太: エネルギー解放率破壊規準による圧縮混合モード下における平行き裂の進展挙動について, 土木学会応用力学論文集, Vol. 10, (2007), 37-46, 査読有

[学会発表] (計3件)

1. 新保泰輝, 矢富盟祥: 非関連型のDrucker-Prager 弾塑性体の漸近解を使用した最大摩擦せん断応力破壊基準によるせん断破壊の考察, 応用力学シンポジウム, 2008年9月9日, 東北大学(宮城県)

2. 阿部孝弘, 矢富盟祥, 鱸洋一, 高橋圭太: エネルギー解放率破壊規準による圧縮混合モード下における平行き裂の進展挙動について: 応用力学シンポジウム, 2007年9月11日, 広島国際会議場(広島県)

3. 鱸洋一, 大熊俊明, 矢富盟祥: 圧縮荷重下にある地盤材料内の亀裂進展開始に対する最大摩擦せん断力破壊基準の検討, 応用力学シンポジウム, 2007年9月11日, 広島国際会議場(広島県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢富 盟祥 (YATOMI CHIKAYOSHI)
金沢大学・環境デザイン学系・教授
研究者番号: 90135541