

|            |   |
|------------|---|
| 氏名         | 新保 泰輝   |
| 学位の種類      | 博士(工学)  |
| 学位記番号      | 博甲第 1101 号  |
| 学位授与の日付    | 平成 21 年 3 月 23 日  |
| 学位授与の要件    | 課程博士(学位規則第 4 条第 1 項)  |
| 学位授与の題目    | 地盤岩盤材料のモード II 型のせん断破壊に関する破壊力学的研究                                    |
| 論文審査委員(主査) | 矢富 盟祥(理工研究域・教授)   |
| 論文審査委員(副査) | 梶谷 浩(理工研究域・教授), 五十嵐 心一(理工研究域・教授),<br>宮島 昌克(理工研究域・教授), 田村 武(京都大学・教授) |

## Abstract

In the geomechanical studies the mechanism of the shear failure for the Mode II crack extension is still an open problem. A new fracture criterion of the share failure for the geomaterials is presented which predict a straight extension of a crack in the elastic plastic materials under the compressive loads called "The maximum frictional shear stress criterion".

We examine the criterion by using both the singular and the constant terms in the asymptotic expansion of the crack tip stress fields for an associate and an non-associate linear hardening Drucker-Prager elastic-plastic material.

Next we examine a pressure sensitive material Cam-Clay elastic-plastic material. We then obtain a theoretical solution of the incremental plastic singular stress fields and an asymptotic solution of the elastic-plastic singular stress fields.

We finally examine a crack extension analysis by using an elastic-plastic with the frictional contact by a perfect plastic material X-FEM.

## 学位論文要旨

地盤の地滑りなどの土の破壊現象のほとんどは、通常、弾塑性体と仮定される地盤内の典型的な変位不連続面(き裂)の進展現象であり、破壊力学で対象とされる破壊現象である。したがって、地滑り現象などの変位不連続面の進展現象の解明には破壊力学の意味での破壊の研究が必要不可欠なものである。土木材料においても、コンクリートや岩盤などの破壊力学の研究も近年になって急速に行なわれるようになった。しかし、土質力学の分野ではこのき裂進展を考究する破壊力学の研究はほとんど行われていない。土質力学において汎用される Mohr-Coulomb 破壊規準も滑り面あるいはき裂面の進展の規準ではなく、一切の破壊力学的な考究は行われていない。また、この Mohr-Coulomb 破壊規準から得られるき裂を供試験体中央に挿入し圧縮荷重を与えた場合、破壊力学的にみればウイングき裂という折れ曲がりき裂が発生する。しかし、簡易な土質試

験である一軸圧縮試験であっても地盤材料ではせん断破壊する。

図 1 に示す（き裂を挿入しない）供試体の圧縮荷重下での破壊形態は、上下からの最大圧縮応力に対し、側圧が小さな場合は、図 1 (a) のような縦割れ破壊となり、側圧が大きくなると、図 1 (b) のようなモード II 型のせん断型の破壊となる（以後、この型の破壊を単にせん断破壊と表記する。）。さらに側圧を大きくし、等方圧に近い状態になると、供試体はバルジ型に変形するが、明確な破

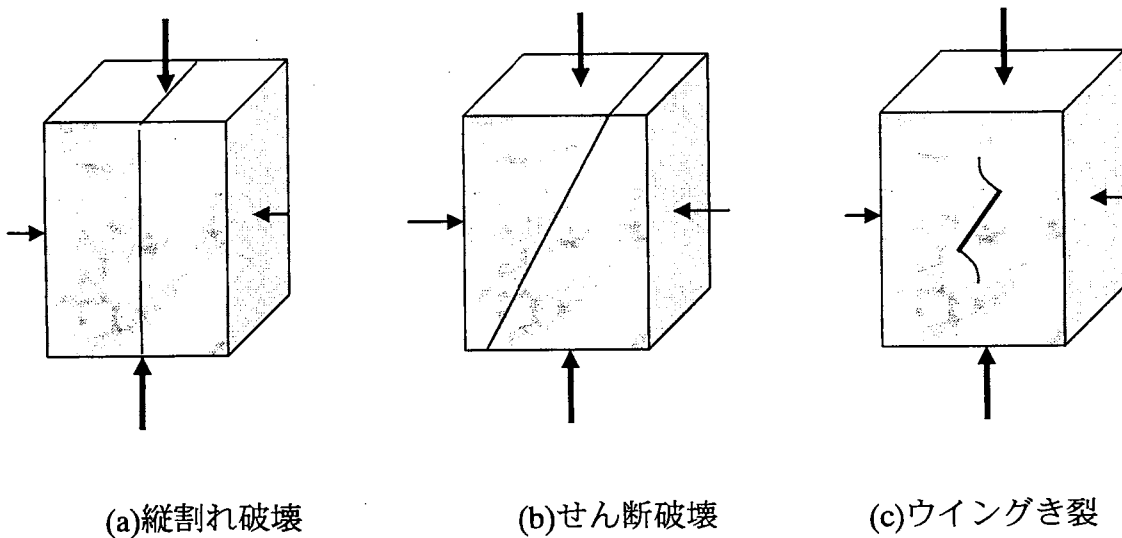


図 1 圧縮荷重下の破壊形態

壊面は観察されなくなる。縦割れ破壊は、前述のウイングき裂が、最大圧縮方向に進展する実験事実に基づいて説明される。すなわち、物体の中には無数の微小き裂が存在し、大きな圧縮荷重が作用するとウイングき裂が多数発生するが、これが縦方向に連なり、マクロにはこれが最終的には縦割れき裂になると解釈される。

一方、図 1 (b) のような、一軸あるいは三軸圧縮試験でしばしば見られるせん断破壊は、地滑りや地震の主要因である活断層の滑り現象に密接に関連した非常に重要な破壊形態であるにもかかわらず、この破壊形態になる破壊規準に関しては、いまだ未解決問題である。地震の活断層生成メカニズム解明を意図して、S.Melin は、“When does a crack grow under mode II conditions?” と題した論文を報告しており、線形等方弾性体を仮定し、き裂面に対して等方圧縮応力とせん断応力の比を用い、 $K_{II}$  最大破壊規準を使用した議論を行っている。また、矢富らは線形等方弾性体において、エネルギー解放率最大基準を使用し、側圧が小さな場合はウイングき裂が発生し、側圧がある程度大きくなるとせん断破壊になる事を報告した。しかしながら、岩盤や地盤材料のき裂先端近傍は応力が非常に大きくなっているため、もはや線形等方弾性体とは仮定できず、弾塑性体状態になっていると考えるべきであろう。特に、地盤材料では滑り面（き裂面）が発生していない初期状態から、物体全体が塑性化していると考えられる場合が多い。そこで矢富・新保は近年、弾塑性体にも適用可能な、せん断破壊に関する破壊規準として、「最大摩擦せん断応力破壊規準」を提案した。

本論文では、第 3 章で、せん断破壊の破壊規準の解明を意図して、まず、基礎的な事であるが未解明であった、地盤、岩盤材料で重要なダイレイタンスー

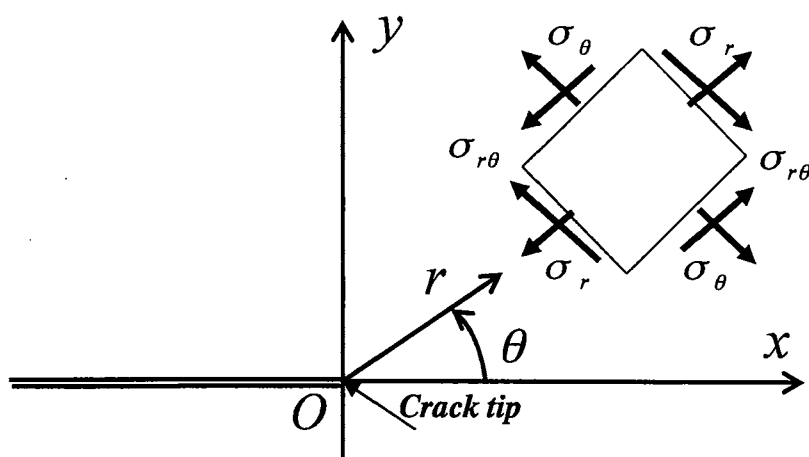


図 2 き裂先端を原点とする極座標

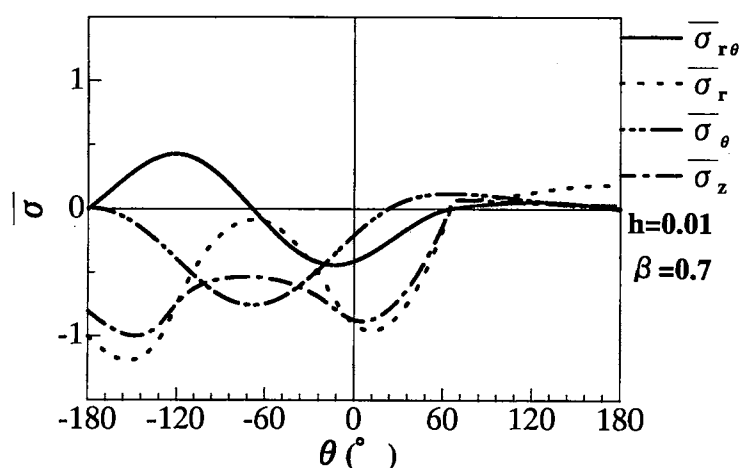


図 3 Drucker-Prager 弾塑性体のモード II 型のき裂先端近傍特異応力

を有する弾塑性体である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の漸近解を得た。図 2 に示すき裂先端を原点とした極座標を用いた。ここで、ダイレイタンスー係数  $\beta = 0.7$ 、弾性係数線形硬化係数比  $h = 0.01$  とした結果を図 3 に示す。図 3 を見て分かるように、線形等方弾性体や von Mises 弾塑性体に見られるような  $\theta = 0^\circ$  に関する対称性、反対称性は存在せず、また、ウィングき裂（引張り破壊）の発生原因であると考えられる  $\theta \approx 60^\circ$  付近の最大引張り周応力は正規化した意味で小さな値である事が分かる。なお、図中上付きのバーは  $\sigma(-\pi) = -1$  となるように正規化された応力である事を示す。

また、関連型の流れ則では、ダイレイタンスーによる体積変化が過剰に見積もられる事から、地盤の解析では非関連型の構成式が用いられる事が多く、し

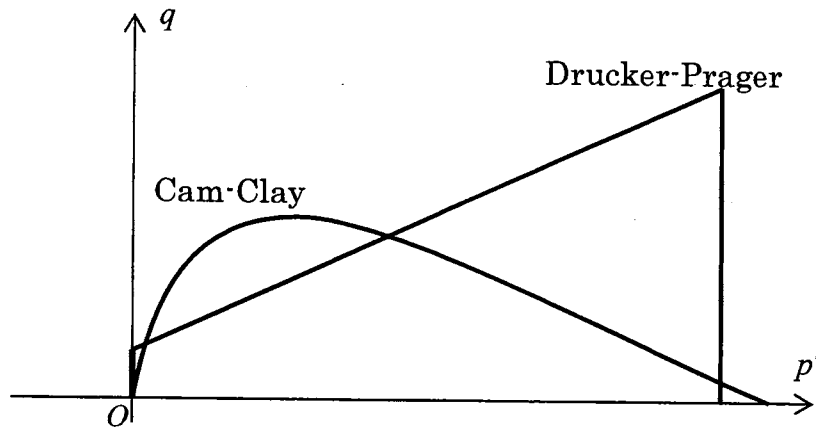


図4 引張り圧力に抵抗しない降伏関数

たがって、非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ている。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、矢富・新保が提案した『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せん断破壊の説明が可能な破壊規準を用いる事でせん断破壊に対する考察を行い、き裂面の動摩擦係数、ダイレイタンシー係数や内部摩擦係数、弾性係数硬化係数比などが応力分布に及ぼす影響を評価し、ダイレイタンシー係数  $\beta$  が大きくなると、き裂先端近傍のせん断応力によるダイラタンシー効果の体積膨張を抑制するための圧縮応力が発生し、この応力が、特に引張り応力であった全ての直応力成分を圧縮側に下げる効果となり、引張り破壊は、抑制され、せん断破壊が生じやすくなる、 $\beta$  による応力低下の影響が比較的小さい  $\beta = 0.3$  の場合でも、内部摩擦係数  $\hat{\mu}$  が大きくなると、塑性の応力拡大係数が小さくなり、相対的に均一圧縮応力の影響が大きくなり、これにより最大引張り周応力が小さくなり、引張り破壊が抑制され、せん断破壊が生じやすくなるなどの知見を得た。

前述の線形硬化する Drucker-Prager 弾塑性体は、圧縮圧力に対し降伏しない簡易なモデルであるが、しかし、地盤材料に用いられる粘性土材料では、圧縮圧力により塑性化するようにキャップ或いは楕円型の構成式を用いる事が多い。また、この時、粘性土材料は引張りに抵抗しないとして図4に示すような  $p'$ - $q$  座標系で引張り圧力に一切抵抗しない降伏関数を仮定する事が多い。図中  $p'$  は平均有効応力であり、 $q$  は一般化偏差応力である。

したがって、前述のき裂先端近傍応力場の漸近解は、関連型、非関連型を問わず引張り圧力に抵抗するため、応力分布は引張り圧力が存在する事もあり、Drucker-Prager 弾塑性体の漸近解を粘性土材料への適用には注意が必要である。また、特に一軸圧縮荷重下でのせん断破壊に関しては引張り圧力に抵抗しない材料として仮定した場合の方が、最大引張り周応力の低下が見込めるため、最大摩擦せん断応力破壊規準によるせん断破壊となりやすいと予想される。そこで、第4章では、圧縮圧力に対し降伏する粘性土材料に汎用される Cam-Clay 弾塑性体に対して、ある応力状態まで物体内部のき裂は滑らず、ある応力状態に達した際にき裂が滑るという条件を与える事で、Riemann-Hilbert 法を応用して

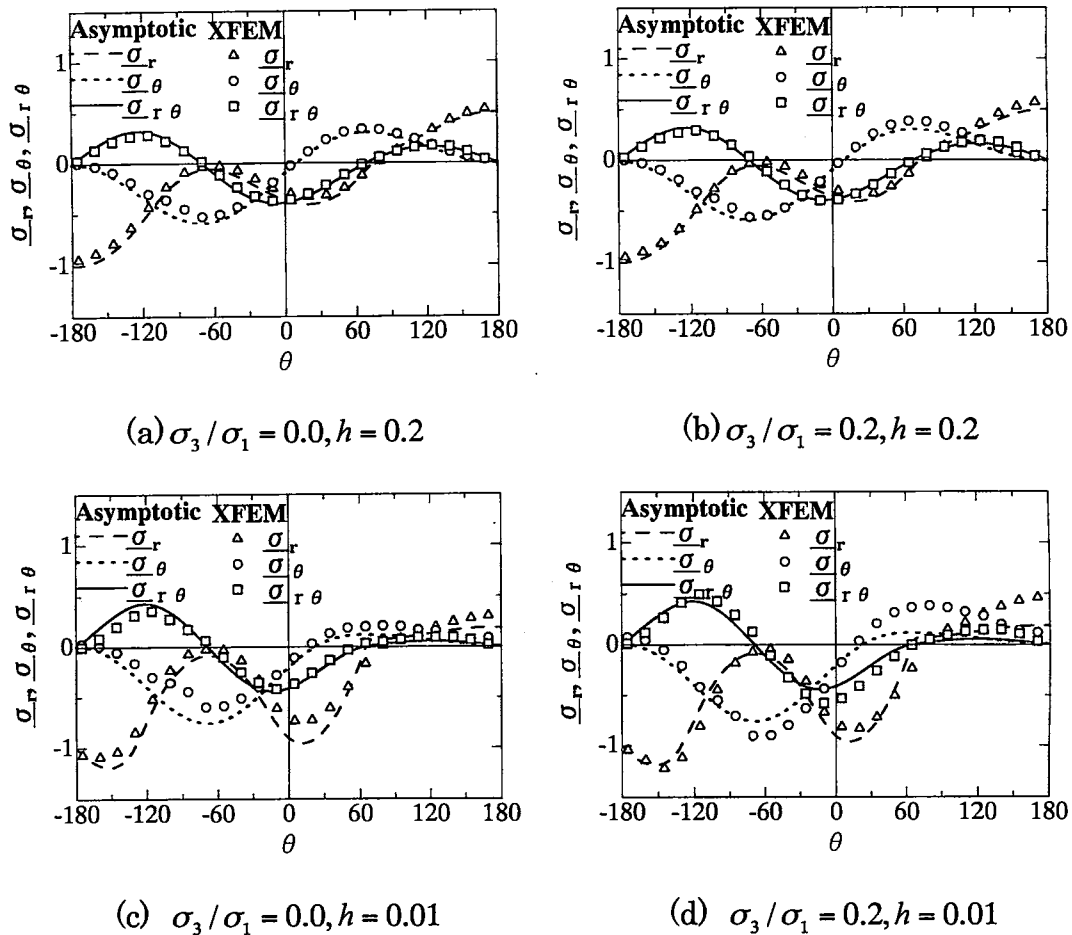
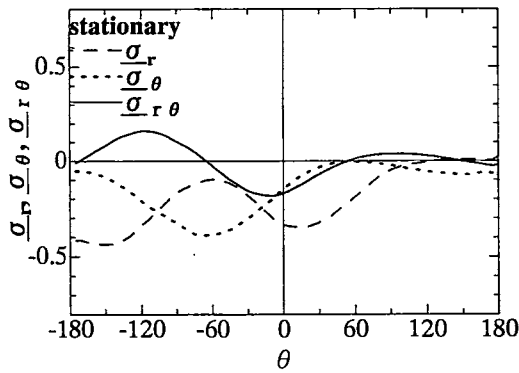


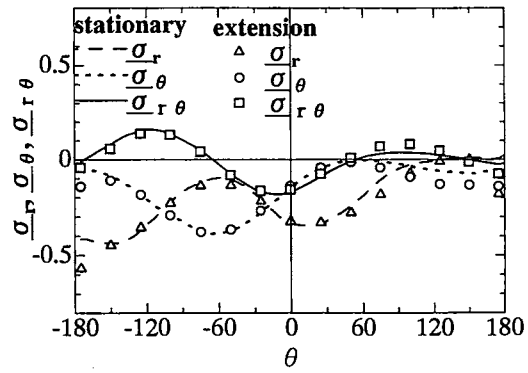
図5 Drucker-Prager 弾塑性体の漸近解特異項と X-FEM の解析解から均一応力項を引いた応力の比較 ( $\tau_y = 0, \beta = 0.7$ )

得られる応力関数を用いた線形異方弾性体の理論解を応用して、き裂先端近傍での増分応力場の理論解（塑性増分解）を得た。ここで、粘性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。この塑性解の結果より、排水条件、非排水条件では有効応力増分はまったく異なる結果を示し、また、非排水条件下ではき裂面上で全応力では釣合うが、水圧、有効応力がそれぞれ釣合わず、き裂面に摩擦が働かない事が判明した。また、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ため、そこで、弾性除荷を考慮した弾塑性漸近解を求め、塑性理論解と弾性除荷を考慮した漸近解の比較を行う事で、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ことを示し、また均一増分項第二項を足し合わせた場合の増分応力分布に関する考察を行った。

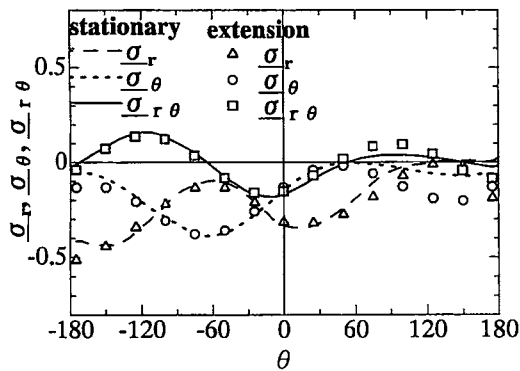
また、第5章では、関連型の Drucker-Prager 弾塑性体を用いた、モードII型のき裂進展を行うために、Newton-Raphson 法に整合した接線剛性を得る事ができ、また応力が降伏関数を必ず満たすなどのメリットのある、陰解法 Return-Mapping 手法と、き裂面上の接触摩擦条件として弾完全塑性接触摩擦モデルを適用した拡張有限要素法 (X-FEM:eXtended Finite Element Method) の開発を行い、関連型



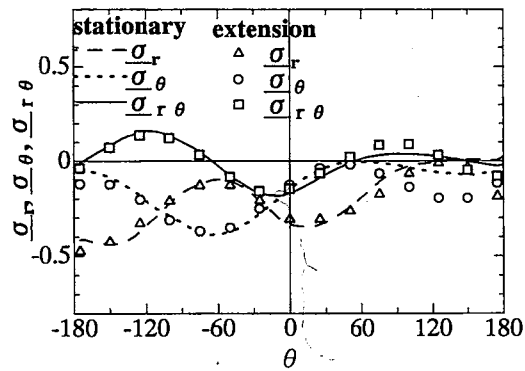
(a)  $\Delta a/l_0 = 0.0$



(b)  $\Delta a/l_0 = 1/60$



(c)  $\Delta a/l_0 = 1/30$



(d)  $\Delta a/l_0 = 1/15$

図 6 き裂進展前とき裂進展後のき裂先端近傍応力場の比較

$$(h = 0.01, \mu = 0.5)$$

の Drucker-Prager 弾塑性体の漸近解を用いて精度の検証を行った。その結果、線形硬化する Drucker-Prager 弾塑性体の比例負荷における漸近解と、X-FEM より得られる解析解の比較を行い、小規模降伏条件下では比較的良く一致することを示した。また、小規模降伏を仮定しない場合、漸近解第一項の特異応力と X-FEM より得られる解に対して均一応力を差し引き正規化した応力は、 $\tau_y$  を初期せん断降伏応力とすると図 5 に示すように弾性係数硬化係数比  $h$  が大きい場合には良い一致を示し、 $h$  が小さい、数値解析上完全塑性に近い剛塑性材料では、応力はあまり上昇せず均一応力の影響が実際に作用している物体境界からの応力よりも相対的に小さい事が判明した。また、この時、均一応力項を考慮せず、正規化した X-FEM の解析解と漸近解は比較的良い一致を示す事が分かった。

また、 $\Delta a$  はき裂進展長さの半分とし、 $l_0$  は初期き裂長さとして、 $\mu$  はき裂面の動摩擦係数とした場合の、X-FEM を用いて、き裂進展に伴う進展き裂後方の弾性除荷領域を考慮したき裂進展解析を行い、図 6 に示すように、初期き裂と同方向に進展するモード II 型の場合、応力分布は殆ど変化せず、せん断破壊の議論には、初期き裂の先端近傍応力場の議論で十分である事を示した。

## 学位論文審査結果の要旨

平成20年12月8日に、上記審査員による予備審査を行った結果、新保泰輝君を学位審査委員会に提出するに値すると決定した。平成21年1月30日に開催した公聴会ならびに公聴会後に開催した学位審査委員会にて協議の結果以下の通り判定した。

モードII型のせん断き裂進展は「圧縮荷重下において元のき裂と同方向に進展するせん断破壊」のことであり、岩盤や地盤の構造物や地震発生後に見られる活断層などにもしばしば見られる基本的な破壊形状であるにもかかわらず、なぜ、途中で折れ曲がらず元の方向に進展するのかの破壊規準に関しては、未解決問題であり、世界的に精力的に研究されている分野である。本論文は、弾塑性材料のモードII型せん断き裂先端近傍特異応力場の理論解を世界に先駆けて得ており、また、この理論解を用い、上記のせん断破壊の破壊規準として「最大摩擦せん断応力破壊規準」を提唱し、モードII型のせん断破壊の可能性を解明した非常に独創的な新しい結果を得ている。また、本論文では、上記の理論解を用いてX-FEM(拡張有限要素法)による数値解析解との比較検証、ならびに粘性土地盤で汎用されるCam-Clay弾塑性体の増分理論解を得ている。

以上より、本論文は、岩盤や地盤のモードII型のせん断破壊の解明に非常に有用かつ重要な成果を得ており、博士(工学)に値すると判断する。