

# 軟岩におけるすべり面の不安定進展開始条件

柳沢 賢<sup>1</sup>・堀井秀之<sup>2</sup>・星谷 寛<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 東京電力株式会社 (〒 100-0011 東京都千代田区内幸町一丁目 1-3)

<sup>2</sup>正会員 Ph.D. 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷七丁目 3-1)

<sup>3</sup>工修 電源開発株式会社 (〒 104-8165 東京都中央区銀座六丁目 15-1)

地盤の破壊問題においては、変形の局所化・進行性破壊・すべり面の不安定進展といった現象が支配的であり、ピーク荷重およびピーク荷重後の挙動に多大な影響を与える。本研究ではすべり面の不安定進展に着目し、J 積分を用いた不安定進展開始条件の提案を行う。不安定進展開始条件としては、すべり面の進展に伴い解放されるエネルギーが、完全な破壊面を形成するのに必要なエネルギーに達することとした。提案する条件を適用し有限要素解析を行った結果、上載荷重の異なるせん断試験における破壊挙動を再現し、せん断試験・進行性破壊試験におけるすべり面の不安定進展現象を再現できることを示した。

**Key Words** : soft rock, localization of deformation, progressive failure, brittle failure, J-integral

## 1. 背景

斜面や地盤の安定性評価手法においては、円弧すべりを想定した極限つり合い法による安定性解析が広く用いられている。そこではすべり面が完全に成長した状態を想定しているが、現実のすべり面の形成現象は進行的なものであり、しかも地盤の最大耐力はすべり面が比較的未発達な段階において発揮されることが分かってきた。地盤材料の破壊においては、変形の局所化が生じ、そこにすべり面が形成されるという過程をたどる。また、すべり面の進展が安定的である場合、安定的進展から不安定に変わる場合、初めから不安定進展する場合などがあり、破壊挙動は荷重条件・構造条件等に依存する。ここで言うすべり面の安定的進展とは、荷重の増加に伴いすべり面が伸びる現象を指し、不安定進展とは荷重の増加なしにすべり面が自発的に伸びる現象を意味する。これら変形の局所化・進行性破壊・すべり面の不安定進展といった現象は、ピーク荷重およびピーク荷重以降における地盤の挙動に多大な影響を与える。つまり地盤の破壊現象を把握するためには、これらの現象を予測再現しうる解析手法の構築が不可欠となる。

Palmer と Rice<sup>1)</sup>は地盤材料における進行性破壊、せん断帯の進展の問題に対して破壊力学を適用する先駆的研究を行った。建設後長時間経ってから崩壊することが知られる過圧密粘土から成る斜面の問題に着目し、破壊力学の概念、特に J-積分を用いてせん断帯の進展する条件を導いた。結果は大きな寸法効果の存在を示している。また、せん断帯の進展速度における時間依存性の原因に関する考察を行った。

Wiberg ほか<sup>2)</sup>は粘性土斜面における進行性破壊の有

限要素解析を行った。斜面崩壊は軟化挙動を示す弱層における過大なせん断変形によって引き起こされ、安定または不安定な破壊挙動が軟化特性の度合いに応じて生ずることが示された。

Chau<sup>3),4)</sup>はせん断強度がすべり履歴とクリープ速度に依存する摩擦則に基づき、地すべりの安定解析を行った。小さな不整により解が安定から不安定に分岐することを示し、過去最大の降雨よりも小さい降雨によって斜面崩壊が起こる現象を説明した。

これら研究は特定の条件下における現象については適用できるが、変形局所化・進行性破壊・すべり面の不安定進展について、一般的に適用することはできない。井上と堀井<sup>5)</sup>は変形の局所化現象とその有限要素解析について、熱力学定式化に基づく変形局所化と軟化現象の統一的理論と、不連続面を有する有限要素解析を組合わせた手法を提案している。そこでは解の安定性を判定し、不安定な場合において自然が選ぶ解を求める。この方法によれば、破壊面の位置を仮定することなく、任意な形状のすべり面進展を解析することが可能となる。

しかし変形の局所化問題と、すべり面の不安定進展の問題を同時に扱うと、解くべき問題が非常に複雑になるため、本研究では変形局所化の問題は簡略化して扱い、すべり面の不安定進展に着目することとした。また進行性破壊に対する解析手法としては、佐々木ほか<sup>6),7)</sup>の方法がある。そこでは弾塑性解析結果を基にすべり面位置を想定し、そこに interface 要素を配置する。そしてその interface 要素において相当塑性ひずみが限界値に達した時にすべり面が発生するものとしている。この方法により進行的な破壊現象を再現しうることを示されたが、すべり面の不安定な進展は再現できていない。

## 2. 目的

本研究の目的は、軟岩材料におけるすべり面の不安定進展開始条件を明らかにすることである。有限要素解析を行ない、提案するすべり面の不安定進展開始条件を適用した場合の破壊挙動を求める。同時に人工軟岩材料を用いた模型実験を実施し、すべり面の不安定な進展現象を計測確認する。そして解析結果と実験結果を比較することにより、提案するすべり面の不安定進展開始条件の妥当性を検証する。

すべり面の不安定進展開始条件としては、破壊力学の基本概念に従い、すべり面の進展に伴い解放されるエネルギーが、完全な破壊面を形成するのに必要なエネルギーに達することとする。有限要素解析においては、佐々木ほか<sup>6),8)</sup>が提案したモデルおよび解析手法を用い、その解析結果からエネルギー解放率を計算する。また比較検討に用いる実験結果としては、せん断試験の模型実験および進行性破壊試験の結果<sup>7)</sup>を用いる。

## 3. 材料挙動のモデル化と解析手法

本研究では佐々木ほか<sup>6),7),8)</sup>が提案した解析手法を用いることとした。軟岩材料のピーク前の挙動を表す弾塑性構成則に、降伏条件として Drucker-Prager の降伏条件、硬化則として等方硬化を採用し、関連流動則を用いた。

佐々木ほかがこれまでに実施した平面ひずみ圧縮試験の応力ひずみ曲線は、ピークにおいて応力がほぼ一定でひずみが増加する高原部分を有している(図-1)。ピークがはっきりと現われるケースでは、そのピーク点ですべり面が発生するとモデル化すればよいが、ここで扱う軟岩材料では高原部分が存在するため、いつ変形が局所化し、すべり面が形成されるのか明らかではない。そこで佐々木ほかは高原部分の最初、最後、その中間ですべり面が発生するという3通りについてモデル化を行い、どのケースが実際の破壊現象を再現するために適しているかを議論した。本研究では佐々木ほかの研究に基づき、高原部分の最初ですべり面が形成されるとしたモデルを用いる。

各パラメータは佐々木ら<sup>6),8)</sup>の研究に基づき、人工軟岩材料の要素試験の解析で、解析結果が実験結果と一致するように設定した。ピーク前の弾塑性構成則には図-2に示す相当塑性ひずみと相当応力の関係を用い、相当塑性ひずみが限界値 $\bar{\epsilon}_{cri}$ に達したときにすべり面が形成されることとした。相当塑性ひずみの限界値 $\bar{\epsilon}_{cri}$ は1.0%で一定とした。すべり面ではせん断応力とせん断変位の間に図-3の関係が満足されるものとした。せん断応力はピーク状態にあるせん断変位量 $L$ の間保ち、

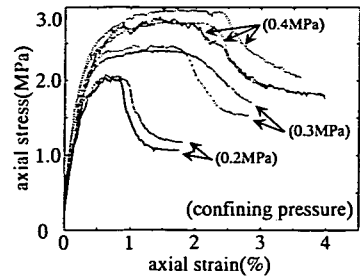


図-1 平面ひずみ圧縮試験(応力-ひずみ曲線)

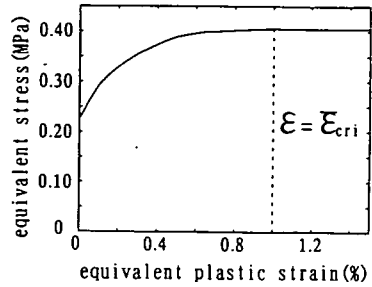


図-2 相当塑性ひずみ-相当応力関係

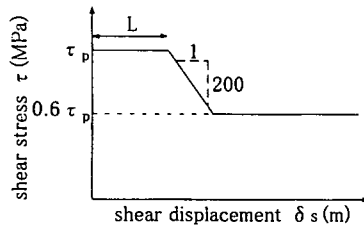


図-3 せん断応力-せん断変位関係

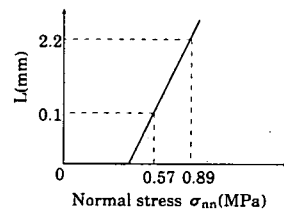


図-4  $L$ と垂直応力の関係

それからせん断応力はある一定の軟化勾配 $A$ で残留応力 $\tau_{residual}$ に至る。高原部分の長さ $L$ は図-4に示すような垂直応力 $\sigma_{nn}$ の関数であるとする。また、せん断応力のピーク値と残留応力の比は1:0.6とし、せん断応力の軟化勾配 $A$ は $A = -200$  MPa/mを用いた。

先に述べた構成則・破壊条件・破壊面特性に基づき、破壊挙動の解析を実施するために、本研究では以下に説

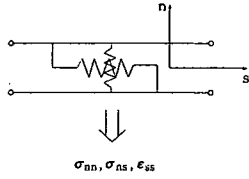


図-5 interface 要素の概念図

明する interface 要素を用いる (図-5)。本研究で用いた interface 要素は、垂直方向に相対変位は生じない。せん断方向については破壊条件が満足されるまではすべり変位を生じない。

破壊条件は弾塑性構成則において相当塑性ひずみがある限界値に達するという条件であるため、interface 要素は周辺材料の弾塑性挙動を知っておくことが必要である。そこで、interface 要素の内部でピーク前の弾塑性挙動を解析・記憶することにした。interface 要素が隣り合う Drucker-Prager タイプの弾塑性要素と連続条件を満たすとすると、内部の応力とひずみ ( $\sigma_{ns}, \sigma_{nn}, \epsilon_{ss}$ ) が得られる。ピーク前における interface 要素の s-s 方向については、周辺材料と同様に Drucker-Prager タイプの弾塑性構成則を考える。そして相当応力-相当塑性ひずみ関係において、相当塑性ひずみが限界値  $\bar{\epsilon}_{cri}$  に達したときすべり変位が生じ始める。

#### 4. すべり面の不安定進展開始条件

Griffith の理論によると、クラックが進展する時に解放されるエネルギーが、クラックが進展するために必要なエネルギーに達した時にクラックの進展が起きる。Griffith 理論は脆性材料における脆性破壊の開始条件を与えるものであるが、この考え方は脆性材料以外の材料に対しても成り立つものである。

Rice<sup>9)</sup> は非線形材料における破壊のパラメータとして、経路依存のない積分値、J 積分を導入した。この J 積分はエネルギー解放率  $G$  の拡張であり、非弾性材料において単位面積のクラックが進展する際に解放されるエネルギーを表している。図-6のように、クラック先端部分を包含する経路  $\Gamma$  を考え、この  $\Gamma$  に囲まれる領域の全ポテンシャルエネルギー  $\Pi$  を求める。

ひずみエネルギー密度関数  $W$  が存在する ( $\frac{\partial W}{\partial \epsilon_{ij}} = \sigma_{ij}$ ) 2 次元弾塑性体を考える。この時、物体  $\Sigma$  における単位厚さあたりの全ポテンシャルエネルギー  $\Pi$  は、

$$\Pi = \iint_{\Sigma} W dx dy - \int_{\Gamma} \left( \int_{\Gamma}^u t_i du_i \right) dC \quad (1)$$

で表される。すると、クラック進展に伴う全ポテンシ

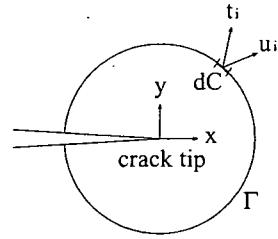


図-6 J 積分の経路

ルエネルギーの変化率は、

$$\frac{\partial \Pi}{\partial a} = \iint_{\Sigma} \frac{\partial W}{\partial a} dx dy - \int_{\Gamma} t_i \frac{\partial u_i}{\partial a} dC \quad (2)$$

である。ここで自己相似型のクラック進展 (self-similar crack growth) を想定すると、

$$\begin{aligned} u_i(x - \Delta a, y, a) &= u_i(x, y, a + \Delta a) \\ W(x - \Delta a, y, a) &= W(x, y, a + \Delta a) \end{aligned}$$

であるから、次の式が成り立つ。

$$\frac{\partial u_i}{\partial a} = -\frac{\partial u_i}{\partial x}, \quad \frac{\partial W}{\partial a} = -\frac{\partial W}{\partial x} \quad (3)$$

式 (3) を式 (2) に代入すると、

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \Pi}{\partial a} &= \iint_{\Sigma} \frac{\partial W}{\partial x} dx dy - \int_{\Gamma} t_i \frac{\partial u_i}{\partial x} dC \\ &= \int_{\Gamma} (W n_x - t_i \frac{\partial u_i}{\partial x}) dC \\ &= \int_{\Gamma} (W dy - t_i \frac{\partial u_i}{\partial x} dC) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ここで、 $J = -\frac{\partial \Pi}{\partial a}$  であるから、

$$J = \int_{\Gamma} (W dy - t_i \frac{\partial u_i}{\partial x} dC) \quad (5)$$

ただし、 $J$ : J 積分、 $\Gamma$ : ひび割れ先端を囲む任意の積分経路、 $W$ : ひずみエネルギー密度、 $t_i$ :  $\Gamma$  上の分布力、 $u_i$ :  $\Gamma$  上の変位、 $dC$ :  $\Gamma$  上の線素である。また、ここでは J 積分の概念に従うとともに、単調載荷を前提として deformation theory に従って非線形弾性体を仮定している。

本研究で扱う材料においては、破壊面形成前に非線形な弾塑性挙動を示し、破壊面形成後に破面ではせん断応力が伝達され、その値はせん断変位の増加とともに減少する。均質な連続体中に一本のクラックが入っているモデル (例えば図-7(a)) において、破壊面の周囲にはピーク前の非線形な応力ひずみ関係を満足する塑性領域が広がっており、破面ではその先端より徐々にせん

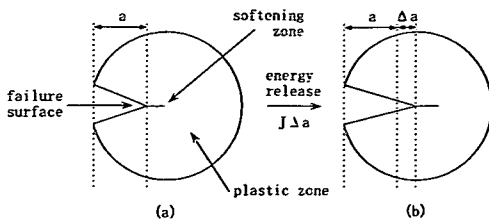


図-7 クラックの進展

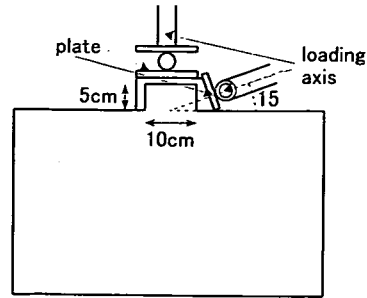


図-9 せん断試験 概略図 (15度)

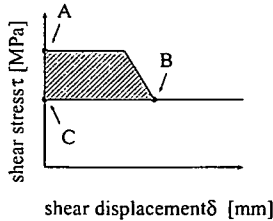


図-8 クラックにおけるせん断変位-せん断応力の状態

断変位が増加し、せん断応力が低下している (softening zone)。この状態を保ちつつ破壊面が  $\Delta a$  進展した時に解放されるエネルギーが  $J\Delta a$  である。

すべり面の不安定進展開始条件としては、どのような値を取るべきか定かではないが、本研究では、この解放エネルギーが新たな破壊面を形成するのに必要なエネルギーに達した時、すべり面は不安定に進展するものと仮定する。図-8において破壊開始点は点Aであり、点Bで完全に破壊して残留応力となる。破壊していない材料(点A)が完全に破壊される(点B)までに費されるエネルギーと、完全に破壊した材料が点Cから点Bに至るまでに費されるエネルギーの差を完全な破壊面を形成するために必要なエネルギーとし、解放されるエネルギーがこの値に達した時に破壊面の不安定進展が生ずるものと仮定する。破壊面が安定進展する時には、せん断応力とせん断変位は図-3に示すような関係を満足する。

## 5. 模型実験

### (1) 供試体

本実験の人工軟岩を作成するにあたり使用した試料は、豊浦標準砂、石膏、水であり、1回の打設で各々 418, 70, 113 N を使い、 $60 \times 40 \times 10$  cm の供試体を作成する。打設は、まず砂と石膏を十分に混ぜ合わせ、そして 0 ~ 5 度の水を入れて十分に攪拌する。その後、脱型を容易にするため内側にシリコングリースを塗布

し、底面にはさらにサランラップを貼った金属製の型枠に打設する。締め固めにはバイブレーターを用いる。石膏の水和反応の時間を考慮して、攪拌作業を 7 ~ 8 分、打設作業を 3 ~ 4 分でやる。打設作業終了後、供試体は湿潤状態で 2 日間養生する。

### (2) マッチング法

マッチング法とは画像解析の手法であるパターンマッチングを用いて、2次元変位場を計測する手法である。この方法は 西上, 堀井, 金子<sup>10)</sup>によって開発された方法であり、非接触で変位場を計測できることが特徴である。物体表面の写真を撮るだけで計測できるため、簡便であり適用範囲が広い。

マッチングに用いた主な機械は、カメラ (Mamiya 645 PRO) 及び CCD カメラ付き実体顕微鏡、XY ステージ、デジタル位置表示装置、非接触変位計である。マッチング法による変位計測は、すべり面の成長過程を記録した白黒写真を画像解析することによって行われる。被写体のメンブレンには黒色のスプレーでランダムパターンが施してあり、撮影時には 3 個の 600 W 白色ランプにより照らす。メンブレンは供試体の変形に追従して動くため、写真にはメンブレン上のパターンの移動が記録される。

変形前後の写真より拡大した画像を取得し、変形前のある部分領域におけるランダムパターンが変形後にどこに移動したかを画像解析により求めることにより変位を計測する。作業を繰り返すことにより変位場を求めることができる。精度は写真の拡大率や画像取得時の倍率等に依存するが、概ね  $50 \mu\text{m}$  程度である。

## 6. せん断試験の模型実験

### (1) 実験方法

養生を経た供試体において、ナイフエッジを用いて図-9に示すような凸形に整形する。脱型後に上部の凸部に型枠をとりつけ、そこに石膏を流し込む。石膏底

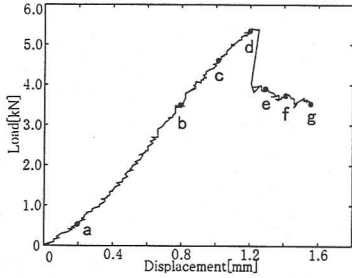


図-10 せん断試験(上載 1.5kN) 荷重変位曲線

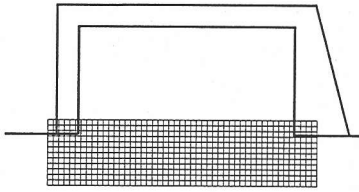


図-11 メッシュの位置

面と供試体との間は摩擦が生じないように、OHPシートを敷いて密着しないようにする。供試体を平面ひずみ状態に近づけることを目的とした拘束型枠に設置する。

荷重は図-9に示すように2方向から行う。上面に決められた値まで荷重を加え、実験中は常に一定となるように制御する。斜めからの荷重は変位制御で行い、荷重速度は3 mm/hourとした。荷重方向は水平方向から15度傾いている。荷重位置は図-9にあるように、延長線が供試体の凸な部分の中心を通るようにした。実験中、マッチング法による変位計測を行うため、写真を撮影する。

### (2) 実験結果(上載荷重 1.5kN)

上載荷重 1.5kN のせん断試験の模型実験において得られた荷重変位曲線を図-10に示す。荷重点変位の増加とともに荷重は直線的に増加し、点dを過ぎたところで荷重の急激な低下が発生している。その後e, f, gとやや軟化しつつ残留応力状態を保つが、残留強度はピーク荷重のほぼ7割程度の値となっている。

マッチング法により計測した最大せん断ひずみ分布を図-12から図-17に示す。ひずみは荷重開始時からの全変位を基に計算した。供試体における計測の範囲は図-11に示す格子点の位置である。格子は1マスの1辺が2.5 mmの正方形で、縦方向に13マス、横方向に50マスある。計測ポイントは図-10の荷重変位曲線上に、a~gの点で示した。右下に示した6段階の

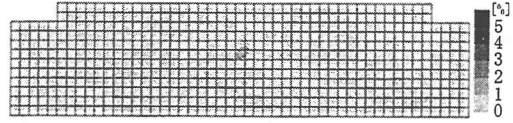


図-12 (b) 上載 1.5kN ひずみ場 荷重点変位 0.8mm

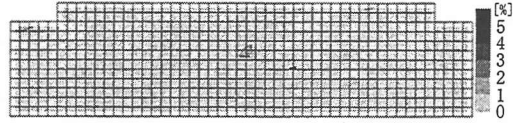


図-13 (c) 上載 1.5kN ひずみ場 荷重点変位 1.0mm

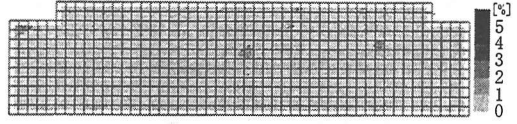


図-14 (d) 上載 1.5kN ひずみ場 荷重点変位 1.2mm

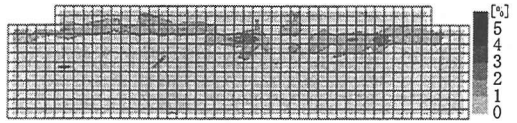


図-15 (e) 上載 1.5kN ひずみ場 荷重点変位 1.31mm

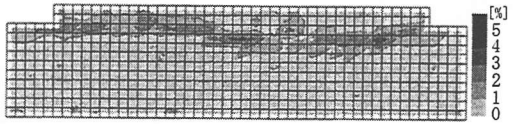


図-16 (f) 上載 1.5kN ひずみ場 荷重点変位 1.4mm

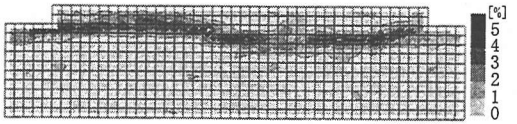


図-17 (g) 上載 1.5kN ひずみ場 荷重点変位 1.6mm

濃度はそれぞれ0~2, 2~4, 4~6, 6~8, 8~10, 10%~に対応する。

マッチングの結果において、荷重変位曲線で直線的に荷重が増加しているb, c, dにおいては、特に局所化したひずみは見られない。eのひずみ場において、供試体凸部の付根においてひずみの大きい領域が急に現われており、変形が局所化しすべり面が形成されていることが分かる。以降f, gと荷重が進むにつれ、すべり面に沿ってひずみが増加している。

### (3) 実験結果(上載荷重 3.0kN)

上載荷重 3.0kN のせん断試験の模型実験においては、写真撮影で露出調整に不備がありマッチング法に必要

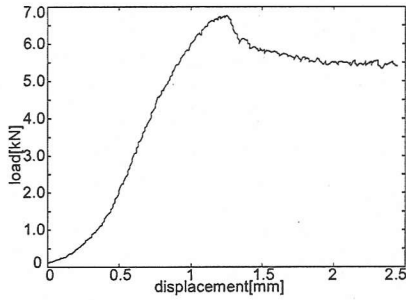


図-18 せん断試験 (上載 3.0kN) 荷重変位曲線

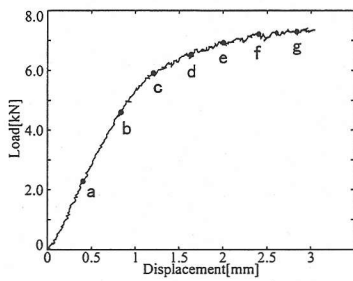


図-19 せん断試験 (上載 6.0kN) 荷重変位曲線

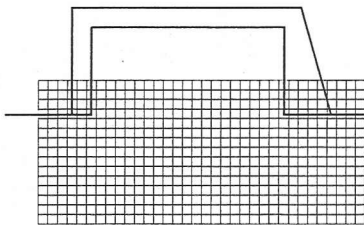


図-20 メッシュの位置

な写真が得られなかったため、変位場およびひずみ場は計測できなかった。ここでは荷重変位曲線のみを示す(図-18)。載荷が進むにつれ荷重は増加するが、始めはその増加率が徐々に増大してゆき、載荷点変位 0.6mm 付近を境に荷重の増加率は減少に転じる。載荷点変位 1mm 過ぎから曲線の勾配は急速に低下し、そして荷重の急速な低下が起きている。ここですべり面の不安定進展が発生したものと考えられる。その後も徐々に荷重は減少し、やがてピーク荷重の 8 割程度の残留強度に収束する。

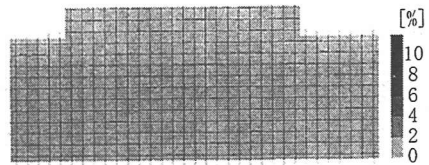


図-21 (a) 上載 6.0kN ひずみ場 載荷点変位 0.4mm

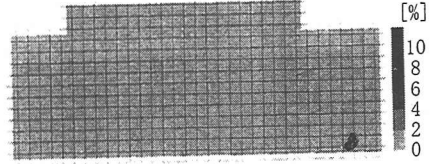


図-22 (b) 上載 6.0kN ひずみ場 載荷点変位 0.8mm

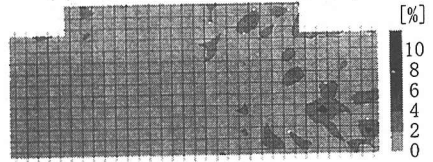


図-23 (c) 上載 6.0kN ひずみ場 載荷点変位 1.2mm

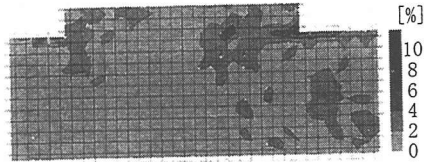


図-24 (d) 上載 6.0kN ひずみ場 載荷点変位 1.6mm

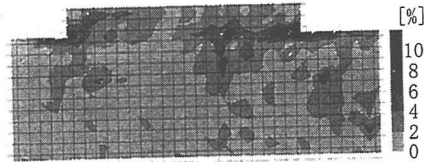


図-25 (e) 上載 6.0kN ひずみ場 載荷点変位 2.0mm



図-26 (f) 上載 6.0kN ひずみ場 載荷点変位 2.4mm



図-27 (g) 上載 6.0kN ひずみ場 載荷点変位 2.8mm

#### (4) 実験結果 (上載荷重 6.0kN)

上載荷重 6.0kN のせん断試験の模型実験において得られた荷重変位曲線を図-19 に示す。載荷開始から点 a, b にかけては載荷の進行とともに、直線的に荷重が増

表-1 解析に用いた入力パラメータ

ヤング率 (MPa)	760
ポアソン比	0.154
塑性ひずみ-応力関係	図-2 に表示

加している。c 付近からは曲線の勾配が徐々に減少してゆき、g 付近に至ると増加率はほぼ零となっている。しかし最後まで硬化挙動を示しており、荷重の低下は見られない。

マッチング法により計測した最大せん断ひずみ分布を図-21 から図-27 に示す。ひずみは載荷開始時からの全変位を基に計算した。供試体における計測の範囲は図-20 に示す格子点の位置である。格子は1マスの1辺が5mmの正方形で、縦方向に15マス、横方向に34マスある。計測ポイントは図-19の荷重変位曲線上にa~gの点で示した。右下に示した6段階の濃度はそれぞれ0~1, 1~2, 2~3, 3~4, 4~5, 5%~に対応する。

マッチング結果をみると、c においては主に載荷側である画面右半分でひずみが確認できる。そしてdのひずみ場からすべり面が確認できるようになり、大きいところでひずみは2.3%である。このdは図-19の荷重変位曲線において、ちょうど曲線の傾きが小さくなった直後である。以降載荷が進むに従って、すべり面に沿ってひずみが増加している。また、gのひずみ場を見ると、すべり面は載荷側からはほぼ水平に進展しているのに対して、その反対側からのすべり面はやや上向きに進展していることが分かる。

(5) 解析条件とメッシュ分割

軟岩材料についての入力パラメータは、佐々木ら<sup>6)</sup>が実施した、本研究と同じ軟岩材料に対する平面ひずみ圧縮試験から得られた表-1の結果を用いることとし、有限要素解析を行った。実験結果および弾塑性解析の結果から図-28において黒く塗りつぶした箇所にすべり面を想定し、3章にて説明した interface 要素を配置した。

(6) 解析結果 (上載荷重 1.5kN)

図-28において点線で示したJ積分の積分経路Γにより求められるJ値を図-29に示す。十字の点がJ積分の値で、点線で示したのがJ積分の限界値である。また、縦軸がJ積分の値で、横軸は解析におけるステップ数である。

本解析では解析の都合上、ステップ1~10の間に上載荷重を直線的に加えていっている。つまり、斜め方向からの載荷が始まるのはステップで11からとなって

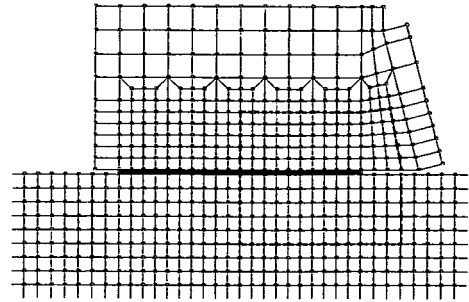


図-28 interface要素の位置とJ積分の積分経路(せん断試験)

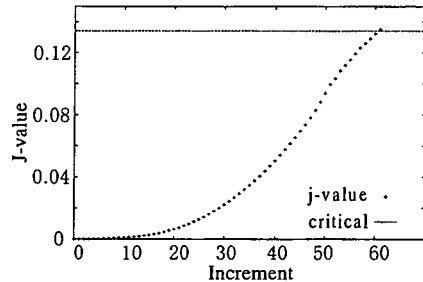


図-29 せん断試験(上載荷重1.5kN)におけるJ積分値

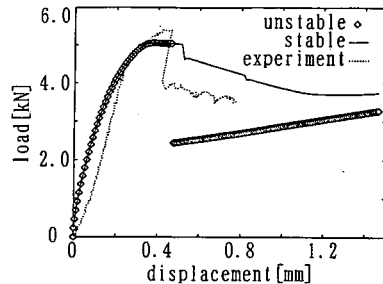


図-30 せん断試験(上載荷重1.5kN)解析結果

いる。J積分の値もステップ10まではほとんど増加せず、ステップ11以降に増加している。その増加の割合も徐々に大きくなり、限界値に達している。J積分の値が限界値に達した時に不安定進展が発生すると判断される。不安定進展発生条件が満足された後は、図-28の破壊面で全て残留応力状態にあるものとして解析を続けた。この結果得られる荷重変位曲線を図-30に示す。菱形の点が解析結果、実線で示したのが不安定進展を考慮しない解析の結果で、点線が実験結果である。なおここで用いている実験結果の変位は、載荷点変位に含まれるベッディングエラーを除くために、マッチング法により載荷点直下で計測された供試体の変位を基に載荷点変位を補正したものをを用いている。

解析においては荷重が直線的に増加していく弾性域

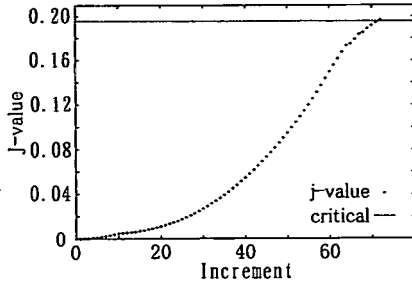


図-31 セン断試験 (上載荷重 3.0kN) における J 積分値

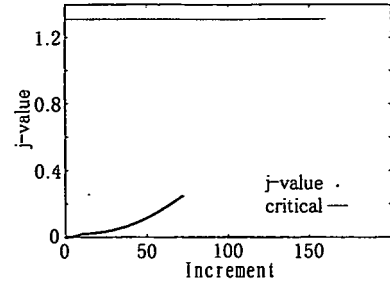


図-33 セン断試験 (上載荷重 6.0kN) における J 積分値

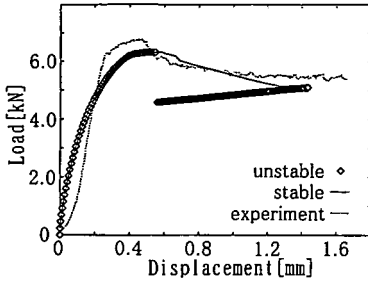


図-32 セン断試験 (上載荷重 3.0kN) 解析結果

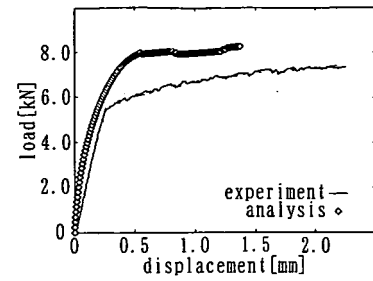


図-34 セン断試験 (上載荷重 6.0kN) 解析結果

はみられず、徐々に勾配が緩くなっていく塑性挙動がみられる。そして載荷点変位 0.3mm 過ぎにおいてピーク荷重に達し、0.4mm 過ぎまでそのピーク荷重を保持している。すべり面が不安定進展すると判定された後は一気に荷重が低下し、荷重はピークの約半分となる。その後はほぼ一定の割合で荷重が増加している。

#### (7) 解析結果 (上載荷重 3.0kN)

ここでは上載荷重が 1.5kN のケースと同様の解析を行い、得られた J 値を図-31 に、荷重変位曲線を図-32 に示す。なお図-32 においては菱形の点が解析結果、実線で示したのが不安定進展を考慮しない解析の結果で、点線が実験結果である。

荷重が直線的に増加していく弾性域はみられず、徐々に勾配が緩くなっていく塑性挙動がみられる。そして載荷点変位 0.4mm 前後でピーク荷重に達し、0.55mm 前後までそのピーク荷重を保持している。すべり面が不安定進展すると判定された後は一気に荷重が低下し、荷重はピークの約 7 割となる。その後はほぼ一定の割合で荷重が増加している。

#### (8) 解析結果 (上載荷重 6.0kN)

ここでも上載荷重が 1.5kN のケースと同様の解析を行い、得られた J 値を図-33 に示す。このケースではステップ 75 付近ですべり面が J 積分 path を貫通しているため、それ以降においては J 積分の値の持つ意味が変わるため表示しなかった。すべり面が J 積分 path

を貫通する時の J 積分値は、限界値と比べて 2 割程度と十分に小さい値になっており、その後もすべり面の不安定進展は起きないと考えるのが妥当であろう。この結果得られる荷重変位曲線は図-34 のようになる。

荷重が直線的に増加していく弾性域はみられず、徐々に勾配が緩くなっていく塑性挙動がみられる。載荷点変位 0.5mm 付近でピーク荷重に達し、その後多少の変動はあるものの、そのピーク荷重を保持している。また、曲線の勾配が急に変化しして最後まで荷重の低下が起きないという現象を再現している。

#### (9) 考察

上載荷重 1.5 kN の実験では荷重の急激な低下が起きている。マッチング結果のひずみ分布より、荷重が急減する点で破壊が不安定に発生し、すべり面が形成されたものと考えられる。上載荷重 6.0 kN の実験においては荷重の急激な低下は見られず、硬化挙動を示している。ひずみ場より破壊の進行が安定的に起きていると考えられる。上載荷重 3.0kN についてはマッチング結果はないが、荷重変位曲線において荷重の急減がみられる。これは上載荷重 1.5kN の場合と同様に、すべり面の不安定な進展が発生したものと考えられる。

解析結果では、すべり面の不安定な進展が起きるのは上載荷重が 1.5, 3.0kN の場合で、上載荷重が 6.0kN の場合においては不安定進展は発生しないと判定された。これは実験結果と一致している。また荷重変位曲線について見ると、上載荷重 1.5, 3kN の結果では、ピーク



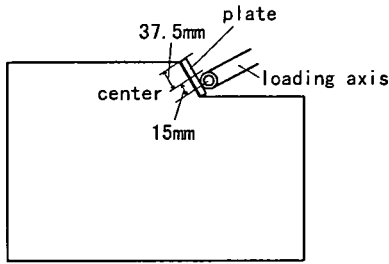


図-35 進行性破壊試験 概略図 (30度)

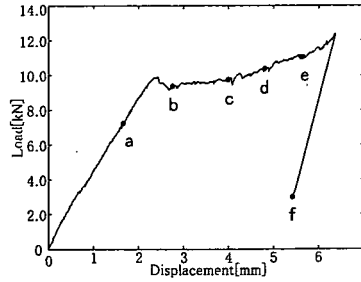


図-36 進行性破壊試験の荷重変位曲線

荷重、不安定進展が起きる変位量ともに実験結果と良好な一致を示している。

すべり面が不安定に進展した後の荷重変位曲線は実験結果を下回っている。解析では便宜上、不安定進展開始条件が満足された後はすべり面全面において残留応力状態にあるものとしている。実際に生じている現象は不明であり、全面において残留状態になるとは限らない。つまりこの解析結果は残留強度の下限を与えるものと言える。

ここで、解析においてすべり面の不安定進展が発生して荷重が急減した後に、徐々に荷重が増加していることの原因について考える。解析は微小変位解析であり、斜め上方向からの荷重によって載荷板に加わる力の方向は常に同じであり、破面に対して垂直方向成分を有している。しかし、実験においては破面が貫通した後は供試体が回転するため載荷板に加わる力の方向は変化し、破面に垂直な成分は減少するため、荷重は増加しないものと考えられる。

## 7. 進行性破壊試験

### (1) 実験方法

養生を経た供試体において、ナイフエッジを用いて図-35に示すような形に整形する。供試体を平面ひずみ状態に近づけることを目的とした拘束型枠に設置する。

載荷板は図-35に示す位置に取り付ける。荷重は変位制御で行い、載荷速度は6 mm/hourとした。また載荷位置は供試体斜面の中心から下に15 mm 偏心させることとした。実験中、マッチング法による変位計測を行うため写真を撮影する。

### (2) 実験結果

進行性破壊試験において得られた荷重変位曲線を図-36に示す。

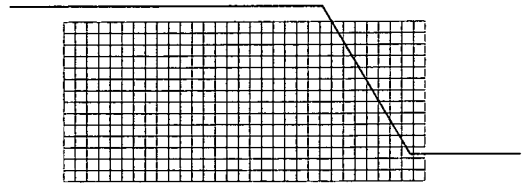


図-37 メッシュの位置

載荷開始から載荷点変位 2.3mm にかけては荷重は直線的に増加している。そして変位 2.3mm 付近において一旦ピークを迎え、1 割程度荷重が低下している。その後再び荷重は増加に転じ、徐々に増加率も増大している。しかし変位 6.3mm 付近で突然荷重の急激な減少が起きた。

進行性破壊実験においてマッチング法により計測した最大せん断ひずみ分布を図-38から図-43に示す。ひずみは載荷開始時から通算の変位を基に計算した。供試体における計測の範囲は図-37に示すメッシュの位置である。メッシュは1マスの1辺が5 mmの正方形で、縦方向に15要素、横方向に32要素ある。計測ポイントは図-36の荷重変位曲線上にa~fの点で示した。6段階の色調は、0~0.4, 0.4~0.8, 0.8~1.2, 1.2~1.6, 1.6~2, 2%~とした。すべり面の発生が確認できるのはfにおいてのみである。載荷点変位 2.3mm 付近において迎えた一旦のピーク後にあたるbにおいても、すべり面は確認できない。また、c, d, eにおいても特徴的な計測結果は得られていない。

### (3) 解析条件とメッシュ分割

構成則や入力パラメーター等については、せん断試験の模型実験と同様である。実験結果および弾塑性解析の結果から図-44において黒く塗りつぶした箇所ですべり面を想定し、interface要素を配置した。

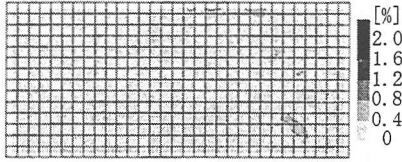


図-38 (a) ひずみ場 荷重点変位 1.6mm

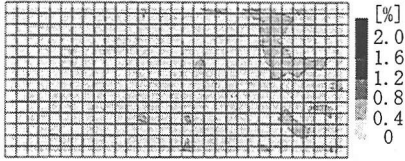


図-39 (b) ひずみ場 荷重点変位 2.8mm

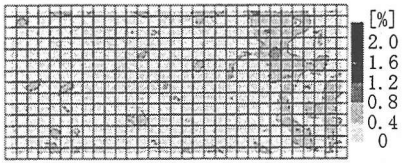


図-40 (c) ひずみ場 荷重点変位 4.0mm

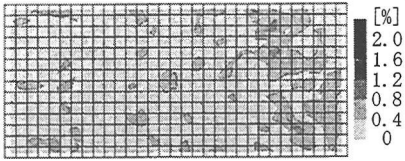


図-41 (d) ひずみ場 荷重点変位 4.8mm

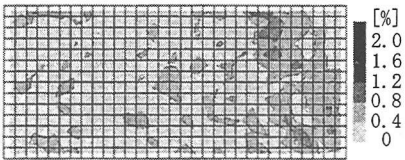


図-42 (e) ひずみ場 荷重点変位 5.6mm

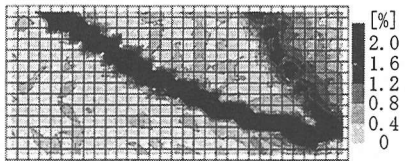


図-43 (f) ひずみ場 (荷重低下後)

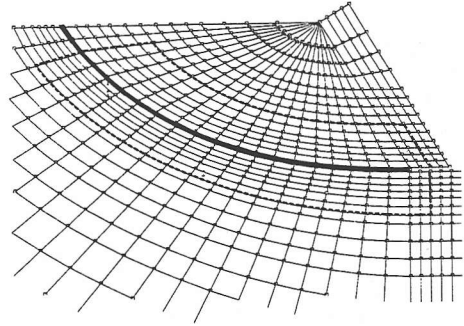


図-44 interface 要素の位置と J 積分の積分経路 (進行性破壊試験)

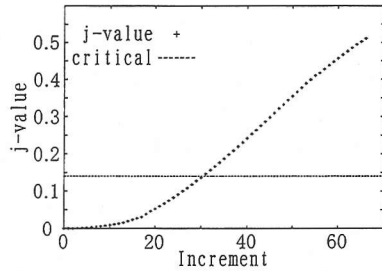


図-45 進行性破壊試験における J 積分値

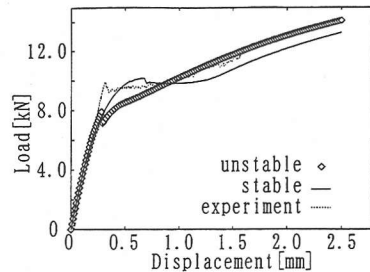


図-46 進行性破壊試験解析結果

#### (4) 解析結果

図-44において点線で示した J 積分の積分経路  $\Gamma$  により求められる J 値を図-45に示す。なお J 値の計算においては、想定すべり面上の各要素において局所座標系を設けており、J 積分の方向は各要素における局所座標系の x 軸に沿っている。十字の点が J 積分の値で、点線で示したのが J 積分の限界値である。また、縦

軸が J 積分の値で、横軸は解析におけるステップ数である。荷重開始からステップ 13 前後までは緩い傾きで増加しているが、その後徐々に増加する割合が増大し、ステップ 25 前後からは直線的に増加するようになっていく。

本研究では J 積分の値が限界値に達した時に不安定進展が発生すると判断される。不安定進展発生条件が満足された後は、図-44のすべり面で全て残留応力状態にあるものとして解析を続けた。この結果得られる荷重変位曲線を図-46に示す。菱形の点が解析結果、実線で示したのが不安定進展を考慮しない解析の結果で、点線が実験結果である。なおここで用いている実験結果の変位は、荷重点変位に含まれるベッディングエラー

を除くために、マッチング法により載荷点直下で計測された供試体の変位を基に載荷点変位を補正したものをを用いている。

解析においては変位 0.3mm 前後ですべり面の不安定進展が発生すると判断され、一時的に荷重が低下している。このピーク荷重は実験結果よりも約 2 割小さいが、ピークに達する変位は実験結果とほぼ同じである。荷重は 1 割強低下した後増加を始め、変位 0.5mm 付近で増加率が変化し、以降そのまま増加を続けている。解析結果における、一時的なピークを迎えて荷重がやや低下した後再び増加に転じるという挙動は、実験結果と一致している。

## (5) 考察

実験結果の荷重変位曲線はほぼ直線のまま鋭いピークを示し、いったん荷重が低下した後再び上昇を続け、最終的に一気に低下している。マッチング結果においてすべり面の発生が確認できるのは、最終的な荷重低落下の段階においてのみである。しかし、マッチング法の変位測定においては、50  $\mu\text{m}$  程度の誤差が含まれている。50  $\mu\text{m}$  は格子間隔が 5 mm のマッチングにおいては 1% に相当する。つまり今回の実験において、1% 程度以下のひずみレベルで破壊が進行しているのであれば、マッチング法によって進行的な破壊は確認できない可能性が高いと言える。実験で得られた荷重変位曲線の勾配は、マッチング法によりすべり面が確認された段階よりもはるかに前(載荷点変位 0.3 mm)に急激に変化しており、かなり初期の段階から破壊が起きていると考えるのが妥当である。そして最終的な荷重急落は、すべり面の不安定進展によるものではなく、既に完全に形成されていたすべり面における摩擦抵抗が突然失われたことによるものと考えられる。

解析結果では、載荷点変位 0.3 mm 付近ですべり面の不安定進展条件が満足される。それは実験における鋭いピーク点とほぼ一致している。また、荷重変位曲線におけるピーク以降の荷重増加についても再現できている。

## 8. まとめ

本研究では、すべり面の進展に伴い解放されるエネルギーが、完全な破壊面を形成するのに必要なエネルギーに達した時にすべり面の不安定進展が生じるという考えに基づき、J 積分を用いたすべり面の不安定進展開始条件を提案した。せん断試験、進行性破壊試験の計測結果を解析結果と比較したところ、提案するすべり面の不安定進展開始条件は妥当なものであると結論された。

上載荷重の異なるせん断試験の模型実験結果から、破

壊が最後まで進行的に起こる場合、進行的な破壊から不安定なすべり面進展に移行する場合、もしくは初めから不安定に進展する場合といった違いは、破壊面における応力状態(ここでは拘束圧)に依存すると解釈される。これはせん断試験の解析結果によっても裏付けられる。本研究で提案した解析手法を用いた解析において、せん断試験の解析結果は実験結果と良好な一致を示した。不安定進展が発生するかどうか、発生するとするならばどの時点で発生するのかについても、解析において実験結果を再現できている。

進行性破壊試験については、実験結果で一旦荷重のピークを迎えた部分(載荷点変位 0.3 mm)に相当する時点で、解析においては不安定進展が発生すると判定されている。このことから、実験においても載荷点変位 0.3 mm 付近ですべり面が貫通したものの、マッチングでは計測できなかったと考えるのが妥当である。ここでは少なくとも、荷重変位曲線については実験結果を再現していると言える。

また、本研究ではすべり面の位置をあらかじめ仮定するという解析手法を採用したが、本来すべり面の位置を仮定することなく、解析結果としてすべり面の位置を予測できることが望ましい。このためには変形の局所化の問題を解決することが不可欠であり、井上の方法にあるようなすべり面の位置を仮定しない解析手法を導入することが求められる。これにより、変形の局所化・進行性破壊・すべり面の不安定進展という一連の地盤の破壊現象を、全て解析により再現することが可能となる。

すべり面の進展に支配された地盤の終局耐力には寸法効果が現われることが知られている。それが大規模構造物の終局耐力を予測するために解析手法が不可欠である 1 つの理由となっている。本研究で提案した解析手法を用いて寸法効果を予測し、実験結果と比較することにより、その妥当性を検証することも今後の課題の一つである。

## 参考文献

- 1) Palmer, A.C. and Rice, J.R.: The growth of slip surfaces in the progressive failure of over-consolidated clay, *Proceedings of the Royal Society of London*, A332, pp.527-548, 1973.
- 2) Wiberg, N.E., Koponen, M. and Runesson, K.: Finite-Element Analysis of Progressive Failure in Long Slopes, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, pp.599-612, 1990.
- 3) Chau, K.T.: Landslides Modeled as Bifurcation of Creeping Slopes with Nonlinear Friction Law, *International Journal of Solids and Structures*, pp.3451-3464, 1995.
- 4) Chau, K.T.: Onset of Natural Terrain Landslides Modeled by Linear Stability Analysis of Creeping Slopes with a Two-State Variable Friction Law, *International*

*Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, pp.1835-1855, 1999.

- 5) 井上 純哉, 堀井 秀之: 熱力学的定式化に基づく変形の局所化理論と解析手法, 構造工学論文集 Vol.41A, pp.493-498, 1995.
- 6) 佐々木 規雄, 柳沢 賢, 星谷 寛, 堀井 秀之: 人工軟岩における軟化挙動のモデル化, 第 33 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1205-1206, 1998.
- 7) 柳沢 賢, 佐々木 規雄, 星谷 寛, 堀井 秀之: 人工軟岩材料における進行性破壊の解析と模型実験による検証, 土木学会年次学術講演会講演集 3-A, pp.40-41, 1998.
- 8) Sasaki,N., Horii,H., Yanagisawa,K., Hoshiya,H. and Kaneko,T.: Constitutive Modelling and Progressive Failure of Soft Rock and Validation by Model Test, *Soil and Foundations*, submitted.
- 9) Rice,J.R.: A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks, *Journal of Applied mechanics*, pp.379-386, June, 1968.
- 10) 西上 裕之, 堀井 秀之, 金子 岳夫: 固結性砂質土の平面ひずみ圧縮試験と変形局所化の計測, 第 28 回土質工学研究発表会講演集, pp.545-548, 1993.

(2000.12.25 受付)

## INITIAL CONDITION FOR UNSTABLE PROPAGATION OF FAILURE SURFACE IN SOFT ROCK

Ken YANAGISAWA, Hideyuki HORII and Hiroshi HOSHIYA

In failure problem of soil, localization of deformation, progressive failure and unstable failure is dominated. Those phenomena affect peak load and post-peak behavior. In this research, we direct our attention to unstable failure and suggest a condition for beginning of unstable failure by using J-integral. As a result of finite element analysis which is applied for the suggested condition, we can reproduce different failure phenomena for rock shear test in various vertical load. And it is shown we can reproduce an unstable failure in rock shear test and progressive failure test.