簡易な構成式を用いた斜面の地震時すべり破壊解析における異方性の影響について

東北大学　(正)　○河井　正
日本大学　(正)　中村　晋
理工ソフト　有留　義晃

１．はじめに

従来，斜面の安定性の評価は，地震応答解析を実施したとしても，力の釣り合いを基本としたすべり面の設定と安全率，さらにすべり面における変位量評価などにより実施されてきた．しかし，力の釣り合いのみでは，瞬間的に不安定になるのみで，変状がほとんど生じないケースについても，その斜面が危険であると判断することになるため，地震動が増大すると，ほとんどすべての岩盤斜面が NG と判定されたり，不合理な地中深くの想定すべり面が NG と判定されることになる．そこで，設計用地震動を超える地震動に対する備えを要求される近年の情勢を踏まえ，実際の斜面の変形挙動を考慮した新たな評価フローが提案された [1),2)]．

ところで，一般の斜面を念頭に置いた場合，その材料条件，境界条件などは地点ごとに千差万別であり，それぞれが複雑に影響し合うため，それらすべてを考慮した真の地震応答値（＝変形量，etc.）を求めることは不可能である．そのため，解析手法の良否は安全側の評価が可能であるかという観点から判断されるべきであり，それを容易にするためには，材料の基本的な応答を再現することが可能な構成式を用いた上で，設定した種々の材料定数と解析結果の関係が分かり易いことが必要である．そこで，著者の一部は，モデル化すべき特性を破壊前の非線形性（いわゆる G-γ 関係で表されるせん断応力～せん断ひずみ関係の非線形性）と破壊後の残留強度と定め，これまでに，簡易な構成式を用いた検討を行ってきた [3),4)]．そのモデルでは，FEM 要素の応答が，c，φ で定める要素強度に達すると，その後，その要素は残留強度相当しか抵抗を発揮できないため，変形と共に徐々に残留強度まで応力が低下するものとした．その際，モデル化を容易にするために，想定破壊面の方向によらず，強度は等方的に低下するものとした．しかし，実験の観察によれば，砂質土のような粘着力の小さな材料であっても，全体的なすべり面が形成されるまでに，局所的な不連続部分が生じ，FEM 要素に当てはめた 1 メッシュ分相当の大きさにおいても，要素挙動に大きな異方性の生じることが示唆された [5)]．そのため，破壊後の異方性が，全体的な安定性の評価にどのような影響を与えるのか確認することを目的とし，図 1 のように破壊後の異方性を考慮したモデルを用い，まずは基礎的な検討を実施した．

２．解析ケース・結果

図 1 のような局所座標系の導入は，Mohr-Coulomb の破壊基準による定義では共役な 2 つの破壊面が存在するため，恣意的な選択を伴う．すなわち，破壊応力面がどのような方向となるか自体は，地震応答解析時の要素応力に依存するため恣意性はないが，共役な破壊応力面からの二者択一に関して図 2 に示すように恣意性が生じる．ここでは．模型実験 [5)] の数値シミュレーションにおいて，共役な破壊応力面から局所座標を選択する際の選択基

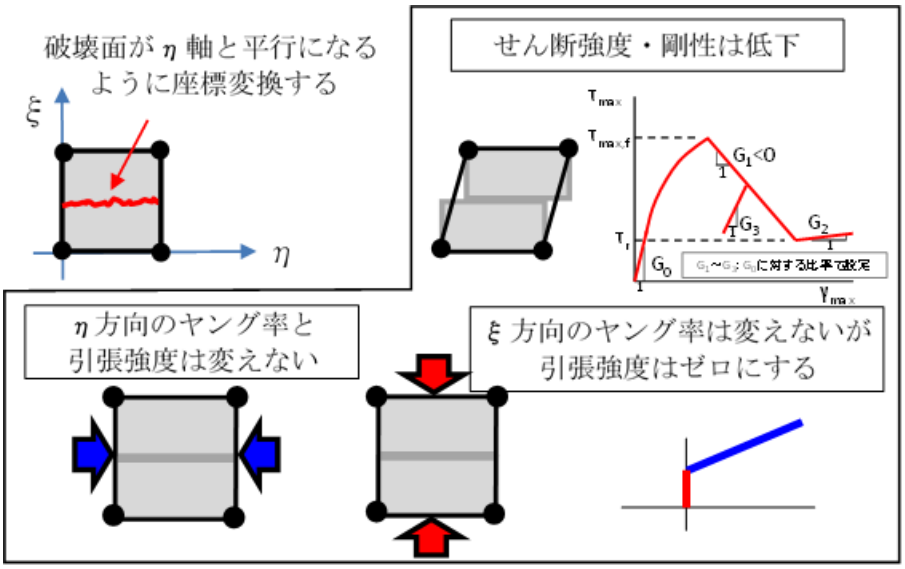

図 1　破壊後の異方性を考慮した構成則の概要

キーワード　斜面，異方性，数値解析
連絡先　〒980-8579　仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06　東北大学大学院工学研究科土木工学専攻　TEL022-795-7433

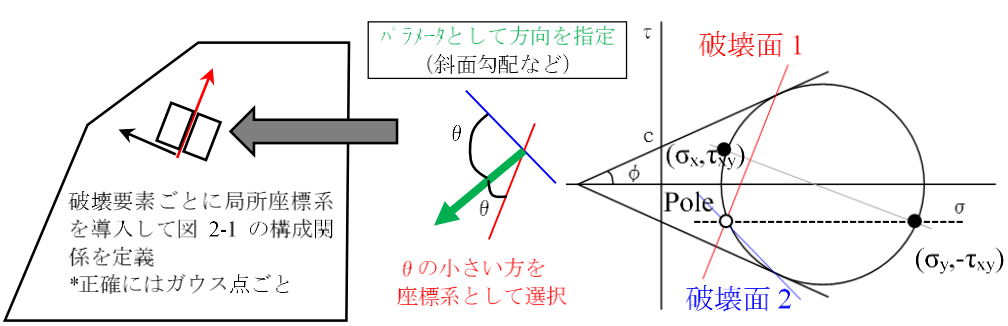

図 2　破壊判定と破壊面選択（座標変換）ルールの概要

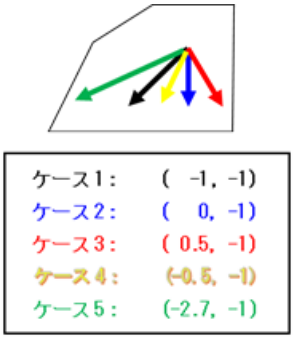

図 3　破壊面採用のガイド方向

準の影響について検討した．解析は汎用解析コード ABAQUS にユーザー定義の構成式を組込み，自重による変形の継続を考慮できるように有限変形で計算した．紙面の都合上，解析モデルについての詳細（寸法，物性パラメータ，入力波形，etc.）は割愛する．破壊応力面から局所座標系を選択する際は，図 3 に示すベクトルの方向を基準に，共役な破壊応力面のうち，そのベクトルに近い方向の面を選択するものとした．ここでは，そのベクトルとして図 3 に示す 5 ケースを設定し，それぞれの要素破壊進展の状況を比べたものが図 4 である．この図を見ると，左下向きのケース 1，ケース 4，ケース 5 については，破壊の進展のタイミングに多少ずれが生じているものの，破壊要素の分布は概ね一致している．それに対して，鉛直下方のケース 2，斜面勾配と逆向きのケース 3 は，初期に点在する破壊要素の位置は他のケースと概ね一致するが，その後の破壊進展は，他のケースでは横に破壊が拡大するよりも，上方から下方へ先に破壊が進展していくのに対してケース 2 とケース 3 では，やや水平方向への破壊の拡大が先に進む傾向にあり，弱層下部の最終的な破壊要素の分布も異なっている．さらに，図 5 は各ケースの法肩鉛直変位の時刻歴であるが，ケース 3 以外は全て下方へ変位している．したがって，今回実施した条件では，共役な 2 つの破壊応力面から破壊後の局所座標系を選択する際は，定量的に若干の差はあるものの，斜面の勾配に合わせて選択すれば，それほど大きな影響は生じないことがわかる．

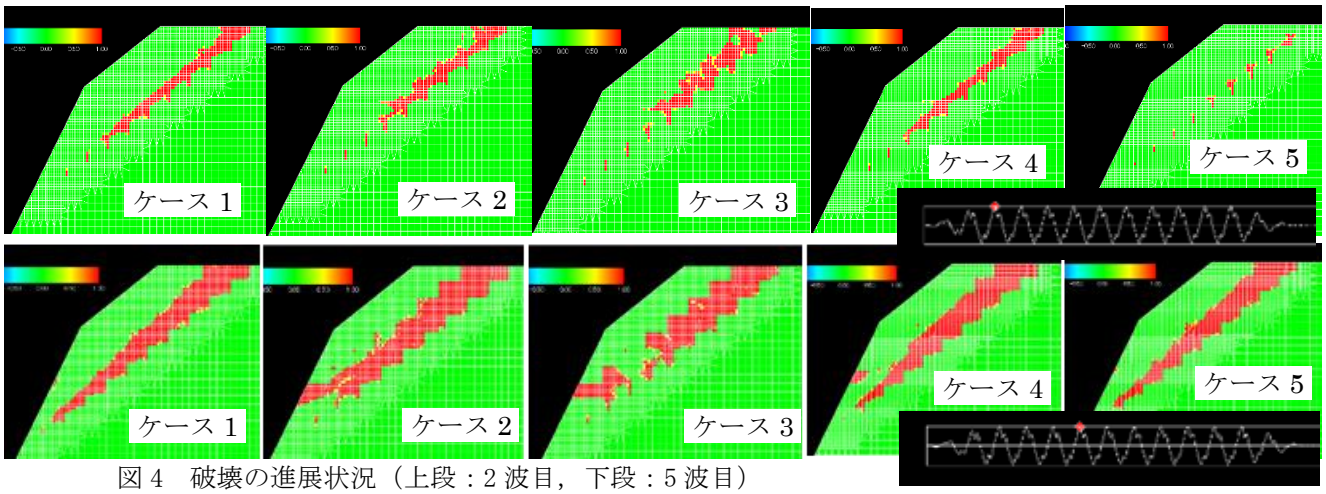

図 4　破壊の進展状況（上段：2 波目，下段：5 波目）

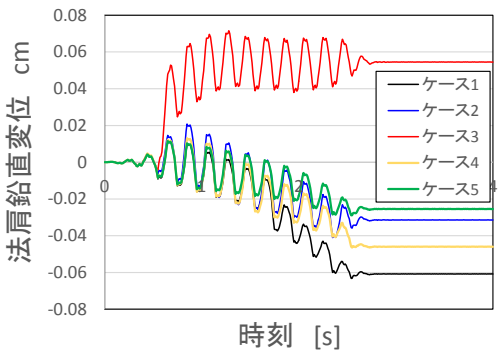

図 5　各ケース法肩鉛直変位時刻歴

謝辞　本研究の成果は，原子力規制庁「斜面崩壊に伴う原子炉施設への影響評価手法の整備」事業の受託研究により得られたものです．

参考文献　1) 河井他：地震時のすべり安全率と斜面の滑落の関係に着目した岩盤斜面の耐震安定性評価フローの提案，電力中央研究所研究報告書 N09030(2010)，2)原子力安全基盤機構（現 原子力規制庁）基礎地盤及び斜面の安定性に係る設計・リスク評価手引き，JNES-RE-2013-2037，3)河井他：岩盤斜面の地震時挙動に関する遠心力模型実験の数値ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ，第 47 回地盤工学研究発表会（八戸），pp. 1623-1624，4)岩盤斜面の遠心場模型振動実験とその数値ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ，第 65 回土木学会全国大会，Ⅲ-388，pp. 775-776，5)S. Nakajima, et. al. : Consideration on evaluation of seismic slope stability based on shaking table model test, The 15th ARC, JPN-100