地震時盛土の引張破壊を考慮した 拡張有限要素法によるクラック進展解析

池田 貴昭¹・後藤 浩之²・澤田 純男³

¹ 学生会員 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: ikeda@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

² 正会員 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³ 正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

現在、盛土の耐震性能評価は多くの場合円弧すべりによる破壊を仮定しているが、実際の地震被害では引張破壊によると思われる開口クラックも観察されている。引張破壊を考慮した盛土の地震応答解析も行われているが、構成モデルにひずみ軟化を導入するといった連続体としての表現に留まっているため、ひずみの局在化や、クラックの開口・閉合といった現象を取り扱うことはできなかった。本研究は、クラックのように変位の不連続面が発生し進展する問題に対して有効な拡張有限要素法を用いて、動的荷重下で盛土に引張クラックが発生・進展する様子の表現を試みた。材料パラメータ等を変更することで、天端と法面から引張クラックが発生して盛土内部へと進展する破壊パターン、および円弧すべり状のせん断破壊面が発生する破壊パターンの双方を表現した。

Key Words: extended finite element method, crack, tensile failure, soil embankment

1. はじめに

巨大地震発生後に緊急輸送路の確保や河川の氾濫による二次災害を抑止するため、盛土構造物の地震時安全性は社会基盤において重要な課題の一つである。現行の盛土の耐震性能評価は震度法や Newmark 法¹⁾による変形量に基づいて行われているものが多い。これらの手法は円弧すべりを仮定して安全率や変形量を求める手法であり、せん断破壊しか考慮されていない。しかし、地震時の被害事例の中には、盛土の天端や法面などにおいて開口クラックを生じるものも多く観察されている。この破壊メカニズムは現行の評価法で想定されている円弧すべりとは異なるため、開口クラックを伴うような破壊メカニズムを検討することは極めて重要である。

中田ら²⁾は開口クラックが引張破壊によるものと仮定し、引張破壊とせん断破壊の双方を考慮した砂の弾塑性モデルを提案し、有限要素法 (Finite Element Method: FEM) に導入して盛土の地震応答解析を行った。しかし、破壊後の変形特性はひずみ軟化による表現に留まり、ひずみの局所化やクラックの開口・閉合といった現象を取り扱うことができなかった。

クラックのような変位の不連続面を FEM で精度よく表現しようとする場合、節点を重ねることにより要素間

での切り離しを可能とすればよいが、要素の境界と不連続境界を一致させる必要がある。このため、解析前に不連続面の発生位置を把握できない問題を解く場合、不連続面の発生に伴い要素の再配置を行う必要がある。Belytschko and Black³⁾や Moës *et al.*⁴⁾によって提案された拡張有限要素法 (eXtended Finite Element Method: X-FEM) は、通常形状関数に加えて不連続性を持つ関数を導入することで、要素内に不連続面を表現する手法であり、要素の再配置を行うことなく不連続面の発達を取り扱える。

新保ら⁵⁾は盛土の地震時残留変形を X-FEM により解析している。複数の円弧すべり面を仮定して X-FEM により解析した場合、単一のすべり面を考慮して Newmark 法で計算される変形量と異なることが指摘されている。川瀬ら⁶⁾は引張亀裂を有する盛土に対して X-FEM を適用し、盛土の地震時破壊性状を分析している。いずれも X-FEM を盛土に適用した先駆的な研究であるが、すべり面や引張亀裂をあらかじめ設定した解析である。新保・矢富⁷⁾は軟弱地盤上の盛土底面に亀裂を配置し、地震動によって亀裂が拡大・進展する様子を X-FEM により解析することで、側方流動により盛土が分離破壊することを示した。

地震時に発生するクラックの位置は、地震動や盛土の材料特性に依存するものであるため、事前にクラック面

を設定することなく、自発的に生成し進展するような解析が重要である。

本研究では、盛土にクラックが発生・進展する現象を表現することを目的として、X-FEM を用いた盛土のクラック進展解析を行う。盛土体を構成する材料に引張破壊とせん断破壊を考慮した砂の弾塑性モデルを導入し、クラックの発生条件、クラックの位置や傾斜角の設定方法、X-FEM でクラックを表現する上で必要な境界条件を定めた後、動的解析を行い、引張クラックや円弧状のすべり面が動的に発生する様子を表現する。

図-1 クラックを含む弾性体

2. 拡張有限要素法

(1) 定式化

図-1 のように連続体が占める領域 Ω とその境界 Γ を考える。境界 Γ は変位を規定する境界 Γ_u と表面力を規定する境界 Γ_f および変位の不連続面 Γ_c とで構成されるとする。運動方程式と境界条件は以下のように表される。

$$\rho \ddot{u}_i = \sigma_{ij,j} + b_i \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

$$u_i = \bar{u}_i \quad \text{on } \Gamma_u \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} n_j = \bar{f}_i \quad \text{on } \Gamma_f \quad (3)$$

$$\sigma_{ij} n_j^+ = -\sigma_{ij} n_j^- = \bar{T}_i \quad \text{on } \Gamma_c \quad (4)$$

ここに、 ρ は密度、 u は変位、 σ は Cauchy 応力、 b は体積力である。 n は境界 Γ 上の法線ベクトルであり、添字 $+$ 、 $-$ は不連続面により分断された近傍の 2 つの領域を区別するための記号である。 $\bar{u}$ は Γ_u 上で規定される変位であり、 $\bar{f}$ と $\bar{T}$ はそれぞれ Γ_f 上と Γ_c 上で規定される応力である。不連続面の境界条件の詳細は後述する。仮想変位 δu を導入して、式(1)-(4)と等価な積分方程式が導かれる。

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \rho \ddot{u}_i \delta u_i d\Omega + \int_{\Omega} \sigma_{ij} \delta u_{i,j} d\Omega = \int_{\Omega} b_i \delta u_i d\Omega \\ + \int_{\Gamma_f} \bar{f}_i \delta u_i d\Gamma + \int_{\Gamma_c^+} \bar{T}_i \delta u_i^+ d\Gamma + \int_{\Gamma_c^-} (-\bar{T}_i) \delta u_i^- d\Gamma \end{aligned} \quad (5)$$

FEM では領域を複数の要素に分割して上式を離散化するため、不連続面を跨ぐような要素は通常設定できない。一方 X-FEM では、要素内の形状関数に不連続性を導入することによって、不連続面を含むように要素分割を行うことができる。4 節点要素の場合、要素内変位は次式で近似される。

$$u_i^h(\mathbf{x}) = \sum_{I=1}^4 N_I(\mathbf{x}) u_{iI} + \sum_{I \in J} N_I(\mathbf{x}) \psi_I(\mathbf{x}) a_{iI} \quad (6)$$

ここに、 N は形状関数、 $\mathbf{x}$ は座標、 I は節点番号、 J は不連続性を表現するために新たに付加された節点（エンリッチノード）の集合である。 a はエンリッチノードに付加された自由度に対応する変数である。 ψ はエンリッチ関数であり、要素内の不連続性を表す関数である。本研究では、変位の不連続面を表現するためにヘビサイド型の関数（shifted Heaviside function⁸⁾）を用いる。

$$H(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\psi_I(\mathbf{x}) = H(\phi(\mathbf{x})) - H(\phi(\mathbf{x}_I)) \quad (8)$$

ここに、 $\phi(\mathbf{x})$ はレベルセット関数であり、不連続面からの距離を符号付きで表す。式(7)で表される関数は要素内で不連続となるため、エンリッチ関数として用いたならば変位の不連続面を表すことができる。また、クラックを含む要素の外では $\psi(\mathbf{x})=0$ となるため、その周辺の要素においてはエンリッチノードが変位場に影響を与えないという利点がある。

X-FEM ではエンリッチ関数とエンリッチノードに自由度が追加されるという点に注意すれば、FEM と同様にマトリクス形式の方程式が得られる。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{f\} \quad (9)$$

ここに、 $[M]$ は質量マトリクス、 $[K]$ は剛性マトリクス、 $\{f\}$ は外力ベクトルである。式(5)の右辺第 3、第 4 項は不連続面に働く表面力による仮想仕事であり、外力ベクトルの一部として導入される⁹⁾。

(2) 質量の集中化

本研究では、式(9)を陽解法である中央差分法によって解くため、質量マトリクスを対角化して効率化をはか

る。エンリッチノードの自由度に対する集中質量について、Menouillard *et al*⁽¹⁰⁾は通常のヘビサイド関数をエンリッチ関数に用いた場合の方法を運動エネルギー保存の観点から述べている。Elguedj *et al*⁽¹¹⁾はヘビサイド関数以外のエンリッチ関数に対しても適用可能な方法を提案したが、エンリッチ関数が節点ごとに定義される shifted Heaviside 関数のようなものには適用できない。Zhao *et al*⁽¹²⁾は shifted Heaviside 関数に対しても適用可能な質量集中化方法を導出しており、次のような方法で集中化を行う。

質量集中化を行う前の質量マトリクスを次のように 4 つのマトリクスに分ける。

$$M = \begin{bmatrix} M_{uu} & M_{ua} \\ M_{au} & M_{aa} \end{bmatrix} \quad (10)$$

ここに、 M_{uu} と M_{aa} はそれぞれ通常の自由度とエンリッチノードの自由度に対応する質量マトリクスであり、 M_{ua} と M_{au} はカップリング項である。カップリング項を無視しても剛体運動時の運動エネルギーは保存されるので、 $M_{ua}=M_{au}=0$ とする。次に、 M_{uu} 、 M_{aa} の各行の総和を取り、それらを対角項とした対角行列を作る。そして、対角化した質量マトリクスの通常の自由度とエンリッチした自由度に対応する部分それぞれについて、要素内の全節点の質量の平均値を取り、それを各節点の質量とする。

3. クラックの表現

(1) 発生と進展

本研究では、盛土材料が砂質土であると仮定して中田ら²⁾の弾塑性モデルを用いる。中田らのモデルは、砂の弾塑性せん断挙動を表現できる Li and Dafalias⁽¹³⁾の構成モデルに、非弾性的な引張挙動を表現できる Ortiz⁽¹⁴⁾の構成モデルをカップリングさせたもので、塑性変形を伴うようなせん断挙動と引張挙動とを同時に表現できることが特徴である。

このモデルは所定の条件下で、せん断ひずみ-せん断応力関係、および引張ひずみ-引張応力関係においてピークを発現し、ひずみ軟化挙動を示す。本研究では、せん断応力がピーク値に達した時点をせん断破壊、引張応力がピーク値に達した時点を引張破壊と定義し、せん断破壊時にはせん断クラックを、引張破壊時には引張クラックをそれぞれ不連続面として発生させる。これらの破壊基準に用いる応力の値は各要素の値とし、破壊の判定は要素ごとに行う。実材料に引張変形とせん断変形が同時に生じる場合、せん断破壊と引張破壊とを明確に分類することは難しく、砂や粘土に対して設定する破壊基準として確かなものはない。また、連続変形から不連続変

図-2 クラックの発生と進展の概念図

形を生じる問題を取り扱う際に、高度な破壊基準を用いる場合もある¹⁵⁾¹⁶⁾。本研究では簡単のため、引張破壊とせん断破壊についてそれぞれ個別に破壊判定を行う。

発生させるクラックの傾斜角は、せん断破壊時にはせん断応力最大となる面、引張破壊時には引張応力最大となる面の傾斜角とする。ただし、せん断応力最大となる面は共役で 2 枚存在するため、それらに対応した 2 枚のクラックを発生させる。実材料にみられるせん断クラックは通常 1 枚であるが、これは局所的な応力状態だけでなく、材料の不均質性や境界条件といった周囲の影響を受けた結果であると考えられる。動的なクラックの生成・進展においては、即時に広い範囲の影響が反映されるわけではないので、この影響が反映される過程も含めて解析する。すなわち、破壊時には局所的な応力状態を判断基準として 2 枚のクラックを発生させるが、周囲の要素で破壊が起きることによってそれらのクラックは進展するため、大域的に見れば、進展して盛土内にすべり面を形成するのは一方のクラックのみとなり、もう一方のクラックが盛土の挙動に与える影響は小さいと考える。

クラックの位置を決定するときは、クラックを発生させる要素の周辺要素を参照する。周辺要素に既にクラックが存在しており、その先端がクラックを発生させる要素の辺上に位置している場合、新しいクラックはその先端に接続するように発生させる。クラック先端が要素辺上に複数存在するときは各先端に接続するクラックをそれぞれ発生させる。クラック先端が要素辺上に存在しない場合、クラックは要素の中心を通るように発生させる。クラックの発生と進展の概念図を図-2 に示す。

X-FEM でクラックの交差や分岐を扱う場合、エンリッチメントの仕方に工夫が必要であり¹⁷⁾、本研究では次のようにして複数本のクラックや交差したクラックを扱う。図-2 に示されるように、生成される全てのクラックは要素内に先端を有さず、要素を 2 つの領域に分割す

図-3 粘着力とせん断摩擦力のモデル

図-4 引張クラックを発生させる解析モデル

るため、それぞれ式(8)のヘビサイド型のエンリッチ関数により表現可能である。要素内に複数のクラックを発生させる場合、クラックの枚数に対応する数のエンリッチノードの自由度とエンリッチ関数により表現する。すなわち、交差したクラックは2枚のクラックの重ね合わせとして表現する。

(2) クラック面の境界条件

エンリッチ関数を導入することでクラック位置に不連続変位を表現することはできるが、クラック面での境界条件を適切に与えないと、クラックを跨いで領域が重なる等、物理的に許容できない振る舞いをする。そこで、クラックが閉合する場合には領域が重ならないような境界条件を、その他の場合には境界面に働く表面力を定義してこれを境界条件として与えることとした。

まず、クラックが閉合する場合以外の境界条件について説明する。本研究では2次元解析を行い、開口クラック (mode I) とせん断クラック (mode II) の混合モードを扱うため、それぞれについて法線方向と接線方向の表面力をクラック表面に与える。具体的には、法線方向にはクラックを閉じる方向にはたらく粘着力、接線方向にはすべり方向と逆方向にはたらくせん断摩擦力を与える。せん断摩擦力はせん断摩擦係数で定義し、法線応力に応じてその絶対値を制御する。ここでは、クラック先端の塑性変形に伴う fracture process zone を考慮するため、

図-5 応力-ひずみ関係と応力-公称ひずみ関係 (引張)

図-6 せん断クラックを発生させる解析モデル

cohesive crack model¹⁸⁾¹⁹⁾に基づいて粘着力とせん断摩擦係数が図-3に示すように開口変位とすべり変位の大きさに応じて徐々に低下するモデルを用いる。ここに、 f_t は引張強度であり、 ω_c は粘着力が0になる開口変位である。 μ_s 、 μ_d はそれぞれ最大静止摩擦係数と動摩擦係数であり、 D_c は摩擦係数が動摩擦係数に低下するすべり変位である。

クラックが閉合する場合は、領域が重ならないように開口変位が非負という境界条件を与える。この境界条件を数値解析で実現するためにペナルティ法 (Penalty method) を用いる。ペナルティ法は、2つの物体の接触面に法線剛性を与え、食い込み量に従った法線方向の力を生じさせる手法である。これは開口変位が負になったとき、次式で定義される力をクラック法線方向の力とし

図-7 応力-ひずみ関係と応力-公称ひずみ関係（せん断）

てクラック表面に与えることと同義である。

$$P_c = \alpha \int_{\Gamma_c} (\mathbf{u}^+ - \mathbf{u}^-) \mathbf{n} \, d\Gamma \quad (11)$$

α はペナルティ定数と呼ばれるもので、十分大きい値をとることにより、許容する食い込み量を小さくすることができる。本研究では $\alpha=10^{10}$ とした。

境界条件の導入により X-FEM でクラックの挙動が表現できているかを確認するために要素レベルの数値解析を行い、引張破壊とせん断破壊についてクラック発生前後の応力-ひずみ関係の変化を追跡した。図-4 に示すような $1\text{m} \times 3\text{m}$ の 2 次元線形弾性体に対して側方に強制変位 $w=5\text{mm/s}$ を与える。弾性体の物性はポアソン比 0.4、ヤング率 200MPa 、密度 2000kg/m^3 とした。 $1\text{m} \times 1\text{m}$ の正方形要素を直列に 3 個並べ、中央の要素において水平方向の垂直ひずみが 0.001 に達すると引張破壊が起きるものとする。粘着力が 0 となる開口変位 w_c は 1mm とした。ここでは、ひずみを破壊基準としているため、粘着力の最大値となる引張強度 f_t は破壊時にクラック面に働いている法線応力とした。図-5 に中央の要素の応力とひずみ、公称ひずみとの関係を示す。ここでの公称ひずみは、節点変位から単位長さあたりの変位として算出したひずみであり、実験等で測定されるひずみ値を意識したものである。クラック発生後に応力が徐々に開放されており、ひずみ軟化挙動が表現できていることが確認できる。

次に、図-6 に示すような $3\text{m} \times 3\text{m}$ の 2 次元線形弾性体

図-8 解析対象の盛土モデル

表-1 盛土モデルの材料パラメータ

弾性定数	限界状態定数	塑性係数	その他
(盛土堤体) $G_0=200$ $\nu=0.35$ (下部地盤) $G_0=160$ $\nu=0.45$	$Mc=1.2$ $e_r=0.934$ $\lambda_c=0.019$ $\xi=0.7$	$d_0=0.38$ $m=3.5$ $h_1=3.15$ $h_2=3.05$ $n=1.0$	$p_a=101.2\text{ kPa}$ $C=20.784\text{ kPa}$ $f_t=12\text{ kPa}$ $c=0$
密度	2000 kg/m^3		
初期間隙比	0.7

図-9 入力加速度波形

に対して強制変位 $w=7.5\text{mm/s}$ を左右側面にそれぞれ下上方向に与える。弾性体の物性は引張のケースと同じものとする。クラック面で開口が生じないように等方拘束圧 100kPa を与える。要素には $3\text{m} \times 1\text{m}$ の要素を直列に 3 個並べ、中央の要素においてせん断ひずみが 0.001 に達するとせん断破壊が起きるものとする。せん断摩擦係数が動摩擦係数に低下するすべり変位 D_c は 3mm 、動摩擦係数 μ_d は $\tan 10^\circ$ とした。最大静止摩擦係数 μ_s は破壊時にクラック面に働いているせん断応力と法線応力の比とした。図-7 に中央の要素の応力とひずみ、公称ひずみとの関係を示す。クラック発生後に応力が徐々に開放されるひずみ軟化挙動と、応力が動摩擦係数に達した後に一定値をとる摩擦挙動が確認できる。

図-10 0.2 秒, 0.5 秒, および最終変形図 (変形は 50 倍に拡大して表示)

本研究で用いる弾塑性モデルでは、クラックが発生した要素は除荷状態となり弾性挙動を示す。弾性体にクラックを発生させたことによりひずみ軟化挙動が表現できるということは、弾塑性モデルとしてひずみ軟化を導入する代わりにクラックを発生させても巨視的な応力-ひずみ関係に矛盾が生じないことを示している。

4. 数値解析例

(1) 引張破壊

本研究で対象とした盛土モデルは、図-8 に示す通り堤体と下部地盤とからなる。天端幅 6m、高さ 4m、法面勾配 1:2 とし、下部地盤の厚さは 2m でその下部は剛基盤としている。盛土堤体、および下部地盤に設定するパラメータを表-1 に示す。それぞれのパラメータ変数は Li and Dafalias¹³⁾、および Ortiz¹⁴⁾ のモデルに準拠している。 M_c は限界状態における応力比を表すパラメータであり、せん断摩擦角に直接関係づけられる。 C は見かけの粘着力を表すパラメータであり、本研究では不飽和状態の砂質土を簡便に模擬するために導入している。 f_t は一軸引張強度を表すパラメータである。これら 3 つのパラメータによって各要素の破壊パターンを制御できる。表-1 に示すパラメータは C に比べて f_t を小さく設定しているため、引張破壊に誘導されることが予想される。図-3 に示すパラメータについては、 $\omega_c=1\text{mm}$ 、 $D_c=3\text{mm}$ 、

図-11 最終変形図の天端部分と法面部分の拡大図

図-12 クラック発生直前の有効拘束圧分布

$\mu_f = \tan 10^\circ$ とし、 f_t は前述の引張強度、 μ_b は破壊時のクラック面のせん断応力と法線応力の比とする。

上述した解析モデルに対して自重解析を行い初期応力状態を求めた後、図-9 に示すような 4Hz の調和振動を水平加速度として与える。なお、微小振幅時の固有周波数は 10Hz 程度であるため、低振動数側の応答解析をしていると捉えることができる。

入力加速度を与えてからの経過時間毎の変形図を図-10 に示す。また、図-10 の最終変形図の天端と法面の一部をそれぞれ拡大したものを図-11 に示す。振幅の増加に伴って盛土の天端と法面にクラックが発生し、盛土内部に進展する様子が確認できる。発生したクラックはいずれも引張破壊によるものであった。天端中央で発生したクラックは振動の正負に対応するようにクラック面の向きを変えながら鉛直下向きに進展している。一方、法面に発生したクラックは法面に垂直な方向に進展し、最終的に段差を生じている。天端と法面でのクラックの進展方向の違いは、中田ら²⁾によって示唆された傾向に一

図-13 0.14 秒, 0.22 秒, および 0.30 秒後の変形図 (変形は 50 倍に拡大して表示)

致しており, 地震時の盛土に見られる特徴的な破壊パターンに似ている. 盛土内に初めてクラックが発生する直前の有効拘束圧分布を図-12 に示す. 有効拘束圧の低い天端と法面からクラックが発生したことがわかる.

(2) せん断破壊

同様に, 要素の破壊パターンがせん断破壊に誘導されるような条件での解析結果を示す. 前節の解析条件に対して, 摩擦角と粘着力を小さくとり, かつ引張強度を大きく設定する. 具体的には, $M_c = 0.57$, $C = 3.171 \text{ kPa}$, $f_t = 5.5 \text{ kPa}$ とした. なお, 入力加速度の振幅は 2 m/s^2 に下げる. 入力加速度を与えてからの経過時間毎の変形図を図-13 に示す. 法尻からクラックが発生し, 円弧すべり面を形成していく過程が確認できる. クラックの発生はいずれもせん断破壊によるものであった. クラックは少ない時間ステップで急速に成長する傾向にあった. 盛土内に初めてクラックが発生する直前のせん断応力分布を図-14 に示す. 盛土の底部と地盤のせん断応力が高いことから, その中でも自重による拘束圧が小さい法尻付近からクラックが発生したことがわかる. この結果より本解析コードがせん断破壊による円弧すべりも表現できることが示された.

(3) メッシュサイズの影響

本章の解析で得られた解に対してメッシュサイズが与

図-14 クラック発生直前のせん断応力分布

図-15 メッシュサイズごとの最終変形図 (変形は 50 倍に拡大して表示)

図-16 メッシュサイズごとの 0.2 秒後の変形図 (変形は 50 倍に拡大して表示)

えた影響を確認するために, メッシュサイズを 1/2 倍にして, 同様の解析を行う. 引張破壊のケースの最終変形図を図-15 に示す. 天端と法面から盛土内部に向かうクラックが発生しており, メッシュサイズ変更前と同様の破壊形態が見られる. せん断破壊のケースの加振開始から 0.2 秒後の変形図を図-16 に示す. せん断破壊のケースではクラックが大量に発生した後解析が不安定にな

っており破壊形態を追い切れていないが、クラックの発生個所にはメッシュサイズ変更前と同様の傾向が見られる。せん断クラックは急速に進展するために、せん断ひずみの集中する部分にクラックが集中的に発生してしまい、クラックにより分割される領域の中に非常に小さい部分がしやすい。メッシュ数を増加させるとこの小さい領域ができる可能性も上がり、数値的不安定を引き起こす原因となると考えられる。

5. まとめ

本研究では、盛土の地震時動的解析に拡張有限要素法を用いることで、クラックの発達過程を表現できる解析コードを開発した。クラックのモデル化には *Cohesive crack model* を使い、クラックの発生によるひずみ軟化挙動を表現することができた。開発した解析コードによる盛土の動的解析を行い、天端や法面で発生した引張クラックが盛土内部へ進展していくという盛土に特徴的な破壊パターンを表現できた。このとき、法面のクラックは段差を生じることを示した。また、盛土の強度に関するパラメータを変更することで、せん断破壊が卓越し、すべり面が形成される破壊パターンも表現可能であることを示した。このとき、せん断クラックは急速に成長したことから、盛土全体でみると脆性的な破壊モードである可能性が示された。

参考文献

- 1) Newmark, N. M.: Effects of earthquakes on dams and embankments, *Geotechnique*, Vol.15, pp.139-159, 1965.
- 2) 中田光彦, 澤田純男, 後藤浩之, 吉田望, 飛田善雄: 引張破壊を考慮した液状化地盤上における盛土の地震時破壊性状に関する研究, 第 47 回地盤工学研究発表会概要集, 2012.
- 3) Belytschko, T. and Black, T.: Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.45, No.5, pp.601-620, 1999.
- 4) Moës, N., Dolbow, J. and Belytschko, T.: A finite element method for crack growth without remeshing, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.46, No.5, pp.131-150, 1999.
- 5) 新保泰輝, 鱸洋一, 高森秀次: 動的 X-FEM を用いた地震時残留変形解析手法の開発とその応用, 建設コンサルタンツ協会北陸支部業務・研究発表会, 2013.
- 6) 川瀬貴文, 新保泰輝, 鈴木達也, 矢富盟洋: 動的 X-FEM を用いた引張亀裂を有する盛土の地震時破壊形態に関する基礎的研究, 第 48 回地盤工学研究発表会概要集, 2013.
- 7) 新保泰輝, 矢富盟洋: 亀裂進展解析を用いた河川堤防盛土の分離破壊に関する研究, 第 26 回中部地盤工学シンポジウム概要集, 2014.
- 8) Zi, G. and Belytschko, T.: New crack-tip elements for XFEM and applications to cohesive cracks, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.57, pp.2221-2240, 2003.
- 9) 長嶋利夫, 三浦直樹: X-FEM による残留応力場中のき裂解析, 日本機械学会論文集 (A 編), 74 巻, 738 号, 2008.
- 10) Menouillard, T., Réthoré, J., Moës, N., Combescure, A. and Bung, H.: Mass lumping strategies for X-FEM explicit dynamics: Application to crack propagation, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.74, pp.447-474, 2008.
- 11) Elguedj, T., Gravouil, A. and Maigre, H.: An explicit dynamic extended finite element method – Part 1: Mass lumping for arbitrary enrichment functions, *Comput. Methods in Appl. Mech. Engrg.*, Vol.198, pp.2297-2317, 2009.
- 12) Zhao, J., Bessa, M. A., Oswald, J., Liu, Z. and Belytschko, T.: A method for modeling the transition of weak discontinuities to strong discontinuities: from interface to cracks, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.105, pp.834-854, 2015.
- 13) Li, X. and Dafalias, T. F.: Dilatancy for cohesionless soils, *Géotechnique*, Vol.50, pp.449-460, 2000.
- 14) Ortiz, M.: A constitutive theory for the inelastic behavior of concrete, *Mech. Mater.*, Vol.4, pp.67-93, 1985.
- 15) Borja, R. I.: Bifurcation of elastoplastic solids to shear band mode at finite strain, *Comput. Methods in Appl. Mech. Engrg.*, Vol.191, pp.5287-5314, 2002.
- 16) Borja, R. I. and Aydin, A.: Computational modeling of deformation bands in granular media. I. Geological and mathematical framework, *Comput. Methods in Appl. Mech. Engrg.*, Vol.193, pp.2667-2698, 2004.
- 17) Daux, C., Moës, N., Dolbow, J., Sukumar, N. and Belytschko, T.: Arbitrary branched and intersecting cracks with the extended finite element method, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.48, pp.1741-1760, 2000.
- 18) Dugdale, D. S.: Yielding of steel sheets containing slits, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.8, pp.100-104, 1960.
- 19) Barenblatt G. I.: The mathematical theory of equilibrium of cracks in brittle fracture, *Advances in Applied Mechanics*, Vol.7, pp.55-129, 1962.

(2016. 6. 24 受付)

CRACK PROPAGATION IN SOIL EMBANKMENT BASED ON X-FEM CONSIDERING TENSILE FAILURE MODE

Takaaki IKEDA, Hiroyuki GOTO and Sumio SAWADA

Present seismic design of soil embankment considers only shear failure, e.g., circular slip. However, open cracks likely caused by tensile failure were observed during the past earthquake. We perform the numerical analysis to reproduce failure tensile crack propagation in soil embankment. In previous study, elasto-plastic analysis for soil embankment considering shear and tensile failure was performed. The elasto-plastic model used in that study can reproduce strain-softening of dense sand by both shear and tensile deformation. We apply eXtended finite element method (X-FEM) to the dynamic behavior of soil embankment with considering crack propagation. The model enables to include typical crack behaviors such as strain concentration, crack opening and contact of crack planes. We introduce criteria of crack occurrence, crack position and angle, and then show a numerical example of dynamic analysis of soil embankment. The numerical result shows typical failure patterns of soil embankment.