

開口クラックの力学的挙動を考慮した盛土の動的破壊解析

京都大学 学生会員 ○池田 貴昭

京都大学 正会員 後藤 浩之

京都大学 正会員 澤田 純男

1. はじめに

盛土構造物の地震時安全性は社会インフラの整備や維持管理上重要な課題である。耐震性照査が行われている主要な盛土構造物も増えつつあるが、現行の評価方法は基本的に盛土堤内にすべり面を仮定するものである。しかし、東北地方太平洋沖地震をはじめとする主要な地震被害事例を整理すると、すべり面により盛土が破壊した事例に加えて、天端・法面に開口クラックを伴うような破壊様式も多く認められる。これは、すべり面を形成するせん断破壊と原理的に異なり、現行の評価では想定されない引張破壊によるものであるため、対策を講じるためにも、開口クラックを伴うような盛土の地震時破壊性状を検討することは重要な課題である。

本研究では、開口クラックが引張破壊によるものと仮定し、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、拡張有限要素法(X-FEM)を用いた液状化地盤上の盛土の動的解析を行う。

2. 拡張有限要素法に基づくクラックの表現

X-FEMは通常の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。本研究ではヘビサイド型の関数を用いてクラックを表現する。

クラックが閉合する場合、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。また、接線方向にすべり方向と逆方向に働くせん断摩擦力を与える。

クラック先端について、塑性変形に伴う破壊進展領域(Fracture process zone)を考慮するため、Cohesive crack modelに基づき粘着力とせん断摩擦力を与える。これらの力は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と仮定する。

本研究では、盛土材料が砂質土であると仮定して中田ら¹⁾の弾塑性モデルを用いる。このモデルは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り、所定の条件下でひずみ-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。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。

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、引張破壊時には主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に2枚存在するため、その要素の変形勾配からよりすべりやすいと考えられる1枚を選択する。

クラックの位置は周辺要素を参照して決定する。周辺要素に既にクラックが存在している場合、クラックはその先端に接続するように発生させる。存在しない場合、クラックは要素の対角線の交点を通るように発生させる。

上述したクラック表現手法を用いて要素レベルの数値解析を行い、引張クラック発生前後のひずみ-応力関係の変化を追跡する。図-1に示すモデルに対して側方に強制変位を与える。中央の要素は弾塑性体であり、クラックの発生を考慮する。左右の要素は弾性体である。図-2に中央の要素の水平方向の垂直ひずみと垂直応力、公称垂直ひずみと垂直応力の関係をそれぞれ示す。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。ひずみ-応力関係はクラック発生後に要素が除荷になり弾性挙動を示している。公称ひずみ-応

キーワード 盛土, 引張破壊, クラック, 拡張有限要素法

連絡先 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学防災研究所 TEL 0774-38-4069

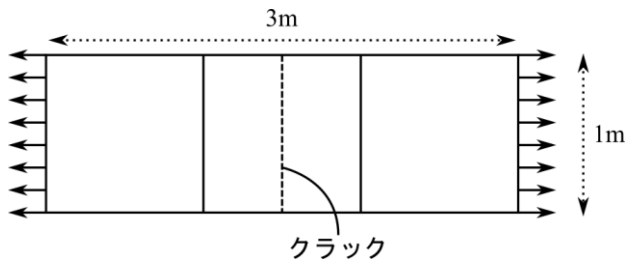


図-1 引張クラックを発生させる解析モデル

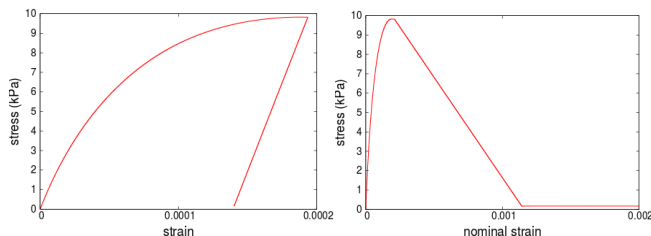


図-2 ひずみ-応力関係 (左) と公称ひずみ-応力関係 (右)

力関係はクラック発生後にひずみ軟化挙動を示している。このひずみ軟化挙動はクラックが徐々に成長する過程を表現しており、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たとしても巨視的なひずみ-応力関係に矛盾が生じないことを示している。

3. 盛土の動的破壊解析

対象とする盛土モデルは、図-3 に示す通り堤体と下部地盤とからなる。盛土堤体は弾塑性モデルを適用しクラックを発生させる。地盤1は弾塑性媒質であり有効応力解析を行う。地盤2は弾性媒質である。地盤側方は周期境界、地盤下方は変位境界である。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決定した後、最大振幅を157galとする1Hzの調和振動を下方境界から与える。

図-4 に経過時間ごとの変形図を示す。図中の白線はクラックを強調したものである。地盤の液状化に伴い法面と天端でクラックが発生し、盛土内部に向かって徐々に進展した。最終的にクラックは盛土底部にまで到達した。発生したクラックは全て引張破壊によるものであった。

また、盛土堤体のモデルパラメータを変更してせん断強度が低いケースの解析を行う。図-5 に15秒経過時の変形図を示す。法面と天端でクラックが発生し、盛土内部に向かって進展した。発生したクラックはほぼ全てがせん断破壊によるものであった。円弧すべりのような実際の被害形態とは異なる方向に

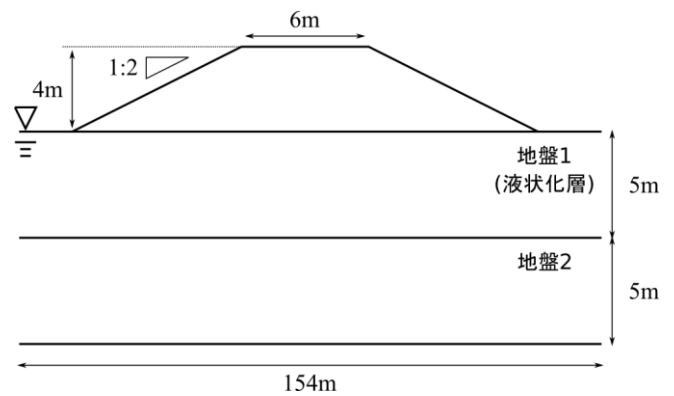


図-3 解析対象の盛土モデル

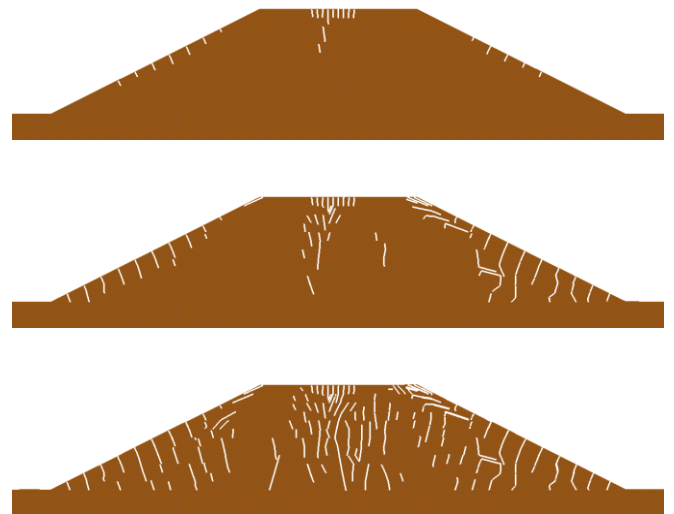


図-4 9秒, 12秒, 15秒経過時の変形図



図-5 15秒経過時の変形図

せん断クラックが進展したが、これは入力動による慣性力の影響よりも地盤の液状化による沈下の影響が大きかったためだと考えられる。

実被害で見られるようなすべり面の表現は今後の課題であるが、地震後に盛土で見られるような開口クラックを表現できたと考える。

参考文献

- 1) 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.