

京都大学工学部 学生員 ○池田 貴昭

京都大学防災研究所 正会員 後藤 浩之

京都大学防災研究所 正会員 澤田 純男

## 1. はじめに

現在、盛土の耐震性能評価は震度法や Newmark 法<sup>1)</sup>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計算を行う手法であり、盛土材に対してせん断破壊しか考慮されていない。しかし、地震時の被害形態は天端や法面などにおいて開口クラックを生じるものが多く観察されている。そのため、盛土の耐震性を評価する場合においても、引張による破壊メカニズムを考慮する必要があると考えられる。

中田他<sup>2)</sup>は引張破壊を考慮した砂の弾塑性モデルを用いて盛土の地震応答解析を行ったが、ひずみ軟化による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ができない。そこで本研究では、クラックのような変位の不連続面が進展する問題に対して要素レイアウトを変更することなく解くことのできる拡張有限要素法<sup>3)4)</sup>を用いて、盛土に引張クラックが動的に発生する様子の表現を試みた。

## 2. 解析手法

拡張有限要素法は、有限要素法で通常用いられる形状関数に、要素内で不連続となる関数（エンリッチ関数）と対応する自由度（エンリッチノード）を加えて変位を表現する手法である。クラックに沿ってエンリッチ関数の不連続を対応させることで、要素レイアウトを変更することなくクラックを表現できる。本研究では、拡張有限要素法に中田他<sup>2)</sup>による引張破壊を考慮した砂の弾塑性モデルを導入し、せん断変形と引張変形のそれぞれにおいてひずみ軟化を生じた時点を破壊と定義して、その要素にクラックを発生させた。

クラック面は、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、隣接する要素にクラックがある場合には互いのなす角が低くなる面を採用し、隣接する要素にクラックがない場合には周囲の要素のうちせん断応力が最も大きな要素に対してクラックが進展するようにした

(図1)。なお、隣接する要素にクラックがある場合にはクラックが接続するように要素内に配置するが、隣接する要素にクラックがない場合は要素の中心を通るものとした。クラック面では、埋め込みがないようクラック法線成分の開口変位を非負に制御し、またクラック閉合時には一定の摩擦係数によるせん断摩擦力を働かせた。

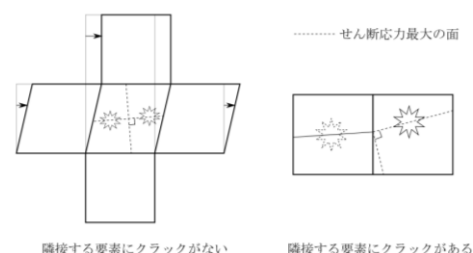


図1 クラック面の設定方法

## 3. 数値解析モデルと結果

本研究で対象とした数値解析モデルは、盛土本体と盛土下部の地盤とからなる。盛土は天端幅 6m、高さ 4m、法面勾配 1:2 とし、地盤は厚さ 2m で地盤下部は剛基盤であるとした。解析モデルのパラメータを表1に示す。本モデルに対して図2に示すような 2.5Hz の調和振動を水平加速度として与えた。

| 盛土                      |                       |              |                       |
|-------------------------|-----------------------|--------------|-----------------------|
| 弾性定数                    | 限界状態定数                | 塑性定数         | その他                   |
| $G_0 = 200$             | $M_c = 1.2$           | $d_0 = 0.38$ | $C = 20784\text{kPa}$ |
| $\nu = 0.35$            | $e_T = 0.934$         | $m = 3.5$    | $f_t = 1.5\text{kPa}$ |
| $p_a = 101.2\text{kPa}$ | $\lambda_c = 0.019$   | $h_1 = 3.15$ | $c = 0$               |
|                         | $\xi = 0.7$           | $h_2 = 3.05$ |                       |
|                         |                       | $n = 1$      |                       |
| 密度                      | 2000kg/m <sup>3</sup> |              |                       |
| 初期間隙比                   | 0.7                   |              |                       |
| 摩擦係数                    | $\tan 10^\circ$       |              |                       |

| 地盤                      |                       |              |                       |
|-------------------------|-----------------------|--------------|-----------------------|
| 弾性定数                    | 限界状態定数                | 塑性定数         | その他                   |
| $G_0 = 160$             | $M_c = 1.2$           | $d_0 = 0.38$ | $C = 20784\text{kPa}$ |
| $\nu = 0.45$            | $e_T = 0.934$         | $m = 3.5$    | $f_t = 1.5\text{kPa}$ |
| $p_a = 101.2\text{kPa}$ | $\lambda_c = 0.019$   | $h_1 = 3.15$ | $c = 0$               |
|                         | $\xi = 0.7$           | $h_2 = 3.05$ |                       |
|                         |                       | $n = 1$      |                       |
| 密度                      | 2000kg/m <sup>3</sup> |              |                       |
| 初期間隙比                   | 0.7                   |              |                       |
| 摩擦係数                    | $\tan 10^\circ$       |              |                       |

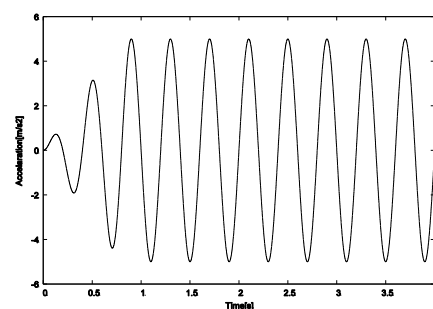


表 1 数値解析モデルのパラメータ

図 2 入力加速度の時刻歴

入力加速度を与えてからの経過時間毎の変形図を図 3 に示す．盛土の天端でクラックが発生し，鉛直下向きに進展する様子が確認できる．クラックの発生はいずれも引張破壊によるものであった．瞬間的にクラックが進展するのではなく，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徐々に進展し，これに伴い開口幅が増加している．

また，表 1 のパラメータに対して，摩擦角と粘着力が小さくなるように，かつ引張強度が大きくなるように設定したパラメータを用いて解析したところ，法尻から水平方向にクラックが進展する様子が確認された．この時，クラックの発生はせん断破壊によるものであった．ただし，瞬時的にクラックが進展したことにより数値不安定を引き起こしたため，この安定化が今後の課題である．

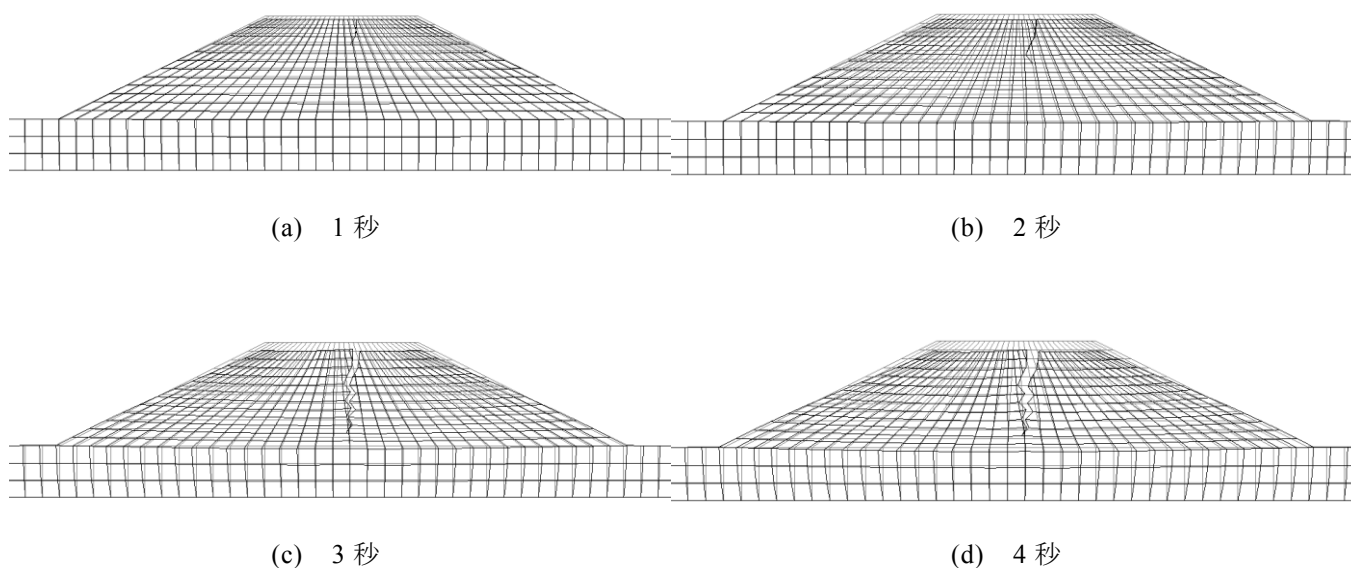


図 3 経過時間ごとの変形図（変形を 50 倍にして表示）

#### 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.