砂の純引張強度を直接測定する動的試験法の開発のための数値解析的検討

京都大学　正会員　○松倉　敏寛
京都大学　正会員　後藤　浩之
京都大学　正会員　澤田　純男
東北学院大学　正会員　吉田　望

1. はじめに

過去に起きた地震で，盛土等の土構造物がせん断とは異なるメカニズムで破壊した事例がある．その破壊モードが開口クラックであったため，慣性力による引張力が働いたものとみられる．しかし，現行の耐震設計基準では円弧すべり等によるせん断破壊によるモードのみが対象であり，引張破壊は主たる要因ではないとして考慮されていない．そこで本研究では土の引張挙動を把握するための試験方法の可能性について数値解析により検討した．

2. 土の動的引張試験のコンセプト

図-1 に示すように土材料を上下から容器で覆った試験体を作成する．試験体底面から圧縮側に立ち上がり時間の短い強制変位（**図-2**）を与え，上下部で生じる位相差を利用して容器接合部に引張応力を生じさせるものである．容器そのものを直接引き上げるのではなく，材料そのものに慣性力による物体力を作用させることができるため，容器として内面の摩擦係数が小さな材料を用いても剥離の影響をおさえることが可能となると考えた．

本方法の妥当性を検証するため，有限要素法による数値解析を実施し，引張破壊よりも先にせん断破壊が生じないこと，土材料に引張力が働くこと，マクロに観測可能な量から引張強度が求められることの三点を確認する．

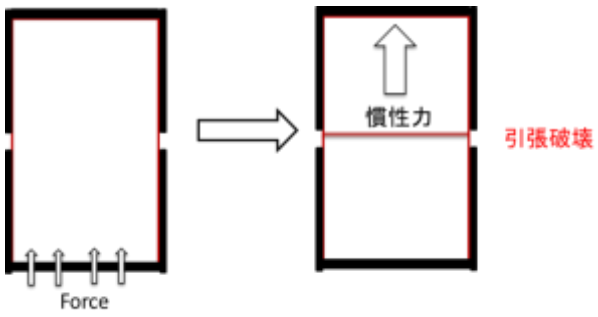


図-1 動的引試験のコンセプト

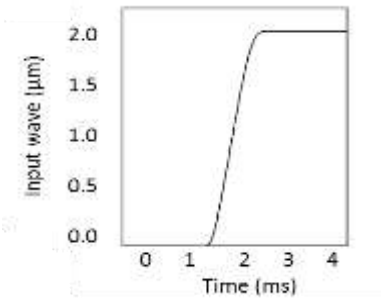


図-2 入力変位波形

3. 提案する引張試験方法の線形弾性体に対する検証

3.1 解析条件

対象とする材料はポアソン比 0.3 の密な砂質土とし，容器は剛性の高い材料を設定した．モデルの寸法は幅 10cm，高さ 20cm とする．材料の周囲を厚さ 1cm の容器で覆うが，高さ方向の中央部で容器が上下に分かれているものとする．また，土材料の各要素において応力による破壊判定を行う．せん断破壊については，内部摩擦角 20°，粘着力 2kPa のモールクーロンの破壊基準によるものとする．引張破壊については最小主応力が引張強度 1.5kPa に達するかどうかで判定する．

解析プロセスは，まず自重解析により重力下の応力状態を求めた後，下側容器底面に強制変位を与えた．変位の時刻歴u(t)は以下のような関数形状であるとした．

$$u(t) = 0.5A\left(1 + \mathrm{erf}\left[(t - t_p) * \sqrt{0.5{f_p}^2}\right]\right) \quad (1)$$

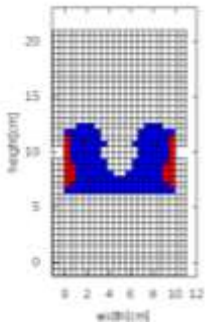
ここに，f_pは中心周波数，t_pは入力変位が与えられる時刻を制御するパラメータ，A は変位振幅である．入力変位振幅の中心周波数f_pを 6500Hz，8250Hz，10000Hz に変えたケースを実施している．

3.2 解析結果

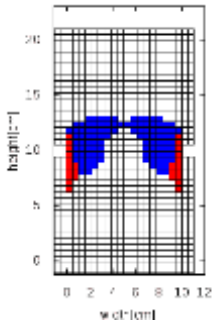
破壊と判定された要素が断面を横断した時の破壊分布を**図-3** に示す．赤色の要素はせん断破壊が先行して発生した要素を，青色の要素は引張破壊が先行して発生した要素を意味している．容器接合部付近で容器に近い部

キーワード　土の引張試験，数値解析
連絡先　〒611-0011　京都府宇治市五ヶ庄　京都大学防災研究所　ＴＥＬ0774-38-4069

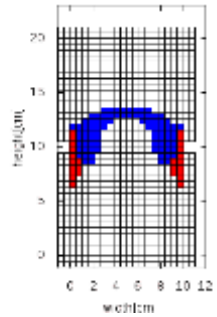
分でせん断破壊が先行して発生しているが，これらのうち上側の容器内で発生しているものは，動的変位による圧縮過程で生じていた．引張破壊はいずれもその後の引張過程で供試体内側へと進展したものである．また，破壊した要素の横断面は，入力周波数の増加に伴い上側に遷移している．



f_p：6500Hz



f_p：8250Hz



f_p：10000Hz

図-3　破壊した要素の分布

（赤：せん断破壊，青：引張破壊）

4.　土の引張強度算定の方法

入力変位を与えた時に，容器接合部で発生する引張応力及び引張ひずみはそれぞれ上下容器の重心位置（それぞれ領域Ⅰ，Ⅱ）で測定された加速度及び変位の値を元に式(2)，式(3)を用いて推定した．

$$\sigma = \frac{M_1 M_2 (a_1 - a_2)}{S(M_1 + M_2)} \qquad (2)$$

ここに，σは容器接合部に働く鉛直方向の引張応力，M_iは領域iの質量，Sは接合部の断面積，a_iは領域iの試験体重心部に対する相対加速度である．

$$\varepsilon = \frac{(u_2 - u_1)}{L} \qquad (3)$$

ここに，εは容器接合部に働く鉛直方向のひずみ，u_iは領域iの試験体重心部に対する相対変位，Lは重心間の距離である．

得られたひずみ時刻歴の初めの極大点での応力を，入力変位振幅を変えながらプロットすることで，応力-ひずみ関係を求める．このときの応力の最大値を引張強度とした．

5.　提案する引張試験法の非線形弾塑性体に対する検証

5.1　解析条件

解析モデルの寸法，供試体及び容器の材料，破壊判定基準及び入力変位は線形解析と同様で，土材料の非線形構成モデルにLi&Dafaliasモデルと Ortizモデルのカップリングモデルを採用した．

5.2　解析結果

加速度及び変位の値を元に算定されるマクロな応力とひずみの時刻歴における極大点が一致しないため，ひずみが極大値をとる時刻の前後の応力値をサンプルとして，そのサンプルの標準偏差を図-4のように誤差グラフとして表示した．マクロな応力が設定した材料の引張強度に相当する 1.5kPa に達したときに弱化が起きていることがわかる．弱化時の破壊分布を図-5に示す．容器の接合部において引張破壊する要素が認められる．

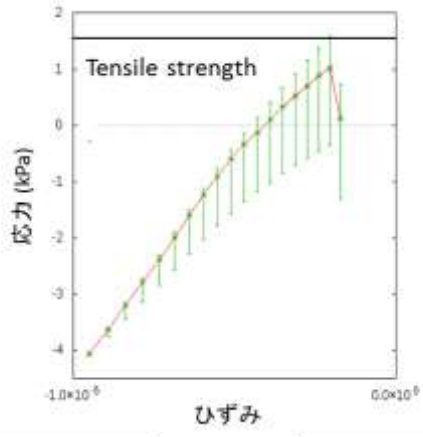


図-4　マクロな応力-ひずみ関係

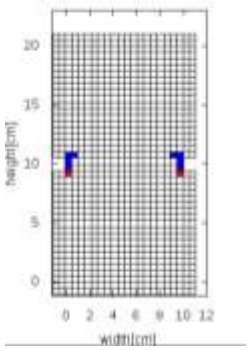


図-5　弱化時の破壊分布

（赤：せん断破壊，　青：引張破壊）