

III-280 間隙水の挙動を考慮したDEM解析の問題点と弾塑性型DEMの提案

日本通信建設株式会社 正員 ○井筒博明
鳥取大学工学部 正員 木山英郎
鳥取大学工学部 正員 藤村 尚
鳥取大学工学部 正員 西村 強

1. まえがき

すでに、間隙水の挙動を考慮した離散剛要素法を提案し、数個の要素からなる圧密モデルを用いて粒子間接触力や粒子の動きとともに、間隙水圧の変化の様子あるいは間隙水の流れ等を時々刻々と解析できることを報告した¹⁾。ここでは、その解析手法の問題点について述べるとともに、弾塑性型DEMの提案を行う。

2. 間隙水の挙動を考慮したDEM解析の問題点

図-1に示す $e-\log p$ 曲線において、①→②に至る過程は、圧密モデルの数値実験から得られたものである。解析の詳細については、既報¹⁾を参照されたい。ところで、②の状態から除荷すれば、従来のDEM解析（以下、粘弾性型DEMと呼ぶ）では、負荷経路（①→②）を逆向きにたどり、塑性変形は生じない。粘弾性型DEMでは、接触点間に弾性スプリングと粘性ダッシュポットを仮定し（図-2）、粘性ダッシュポットは速度に比例して抗力を生じるため、要素が静止状態に達した後は、接触力は弾性スプリングによる力のみとなる。それゆえ、本解析のような場合、要素に生じている変形は弾性成分のみであり、履歴等に依存せず、その時の荷重状態で決まるためである。この修正案として、図-1、②→③に至る過程は、弾性スプリングの剛性定数を負荷過程の2倍程度に大きくして、除荷を行った場合である。個々の要素において、開放される変形が1/2になるため、あたかも塑性変形を生じたかのような除荷曲線を示す。上記の修正は不完全であるが、土の静的な応力履歴を表現するのに、塑性変形の考慮が有効であることがわかる。そこで、従来の粘弾性型DEMに代わる弾塑性型DEMの定式化を図ることにした。

3. 弾塑性型DEMの概要

弾塑性型DEMの基本仮定は以下のようなものである。図-3(a)に示すように、2つの要素I、Jが f なる力を受けて、中心間距離が u だけ縮まる変形をしたとする。このとき、 $f-u$ 関係は図-3(b)のOAで与えられたとする。もし、要素が完全弾性体であれば、力 f に対する変位 u^e を生じて、 $f-u$ 関係はOBで表わされる。これに、塑性変形 u^p を伴い、 $u = u^e + u^p$ となり、OAで表わされる。そして、この塑性変形により、除荷過程において $f-u$ 関係は、OBに平行な経路ACをたどる。負荷、除荷の1サイクル（0→A→B→C）により、負荷過程の塑性変形 $\triangle OBA$ に相当する $\triangle OAC$ のエネルギー損失を生じる。このような、接触による弾塑性変形モデルとして図-3(c)に示すような弾性スプリングと塑性スプリング（塑性スライダーであるが、取扱いは、スプリングに相当）の直列配置を仮定する。要素は剛体とし、接触により生じる変形はこれら2つのスプリングで表現する。弾性スプリングと塑性スプリングのそれぞれの $f-u$ 関係として、たとえば、図-4(a)のような場合を考える。弾性スプ

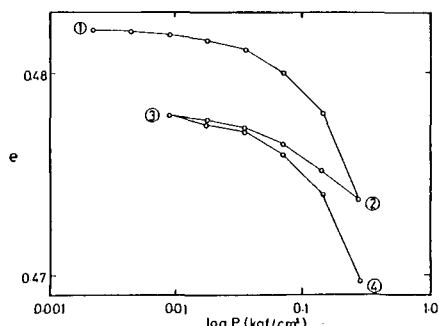


図-1 $e-\log p$ 曲線

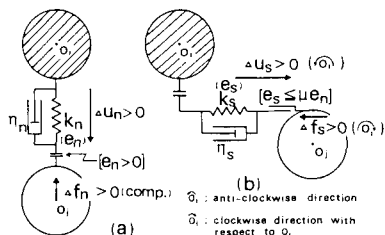


図-2 接触点における弾性スプリング(K)と粘性ダッシュポット(η) (粘弾性型DEM)

リング(OE)は負荷、除荷過程とも直線と仮定し、剛性Kで与える。塑性スプリング(OP)は負荷過程では剛性 $-L$ の直線、除荷過程において除荷されず、塑性変形を保持する分力を有するものとする(図中の点線)。以上のことを定式化すると以下のようなものである。

1) 負荷過程 (図-4(b), OA) $u : 0 \rightarrow u_1$

$$e = Ku, \quad p = -Lu$$

$$f = e + p = (K - L)u$$

(1)

除荷開始を図-4(b)のA($u=u_1$)とすれば、

$$e_1 = Ku_1, \quad p_1 = -Lu_1, \quad f_1 = e_1 + p_1 = (K - L)u_1$$

(2)

2) 除荷過程 I (図-4(b), AB) $u : u_1 \rightarrow u_0$

$$e = Ku, \quad p = -Lu_1 = \text{const}$$

$$f = e + p = Ku - Lu_1 = f_1 - K(u_1 - u) \quad (3)$$

このまま $u=0$ まで除荷過程として延長するとBCの径路をたどり、逆方向の負荷が弾性的(剛性K)に行われることになり、不合理である。そこで、式(3)で $f=0$ となる点B($u=u_0$)から先は次のような新たな負荷過程となるように修正する。

3) 除荷過程 II (逆方向負荷) (図-4(b), BC') $u : u_0 \rightarrow 0$

$$e = K(u - u_0) (<0), \quad p = -L(u - u_0) (>0)$$

$$f = e + p = (K - L)(u_0 - u) \quad (4)$$

これにより、 u_0 を基点とした $-u$ 方向への弾・塑性的な新たな負荷が開始され、剛性 $(K - L)$ を有する径路BCが定まる。以上のモデルで負荷→除荷→逆方向負荷→負荷の1サイクルを行うと、 $f-u$ 面上の径路は図-4(c)に示されるように①、②、③、④となり、無負荷状態を示す接触開始点は点Oから点O'に移る。ただし、通常の過程においては、接触判定が容易な基準点Oを不変としたモデル図-4(d)を用いるのがよい。このとき、除荷過程II(図-4(e), BC), $u : u_0 \rightarrow 0$ は式(4)に代って、次式となる。

$$e = Ku, \quad p = -e,$$

$$f = e + p = 0 \quad (5)$$

以上のことを、1要素(質量 m 、慣性モーメント I)に注目すれば、並進 u 、回転 ϕ に関して次式の運動方程式が得られる。

$$m\ddot{u} + (K - L)u = 0 \quad \Delta u > 0$$

$$m\ddot{u} + Ku = 0 \quad \Delta u < 0$$

$$I\ddot{\phi} + (K - L)\phi = 0 \quad \Delta u > 0 \quad (6)$$

$$I\ddot{\phi} + K\phi = 0 \quad \Delta u < 0$$

式(6)を従来のDEMと同様に差分近似すれば、要素の塑性変形を考慮した解析が可能である。なお、間隙水の取扱いは従前通りである。

参考文献

1) 井筒、木山、藤村、西村：間隙水の挙動を考慮したDEM解析、第21回土質工学会研究発表会講演集(投稿中)

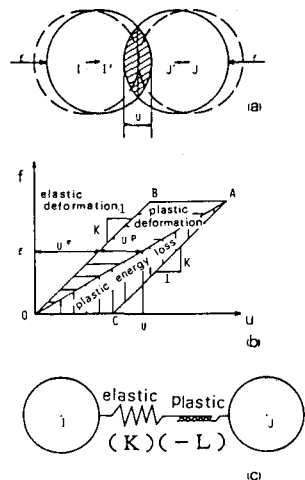


図-3 弾性スプリング(K)と塑性スプリング(-L)(弾塑性型DEM)

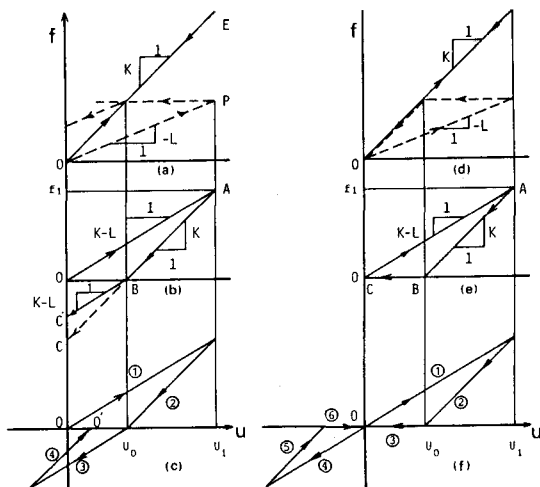


図-4 接触力と変位の関係