

弾・塑性接触モデルを用いた新しい離散剛要素法 (DBM) の提案

鳥取大学 正会員 ○ 藤村 尚
 " 学生員 西村 強
 " 正会員 木山 英郎

1. はじめに

二つの岩石ブロックが衝突するとき、岩石は完全弾性体ではないのでそこにエネルギー損失を生じる。カンドルは粘性抵抗 (変形速度に比例) によるエネルギー損失を仮定してモデル化した。岩石における粘性定数の決定は容易でない。そこで、塑性変形抵抗 (変形に比例) によるエネルギー損失を仮定してモデル化したのが本法である。

2. 弾・塑性接触モデルにおけるエネルギー損失

Fig. 1 (a) に示すように二つの岩石ブロック (中心 I, J) が互に力を受けて、中心間距離が u だけ縮まる接触変形をした場合を考える。このとき $f-u$ 関係は Fig. 1 (b) の $\vec{OA}$ と与えられるとする。もし、岩石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 $\vec{OB}$ 上にくる。これに塑性変形による u^p を伴い $u = u^e + u^p$ となって $\vec{OA}$ 上に来たと考える。この塑性変形の影響は除荷過程において陽に表われ、 $f-u$ 関係は $\vec{OB}$ に平行な $\vec{AC}$ 径路をたどることとなる。つまり、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ととなる。

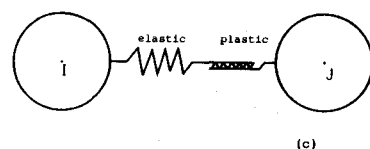
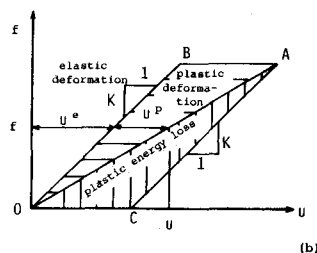
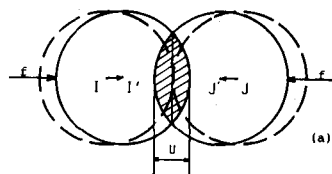


Fig. 1

このような、接触による弾・塑性変形のモデルとして、Fig. 1 (C) に示すように、弾性スプリングと塑性スプリング (塑性スライダーズ) あるいは取扱いはスプリング相当) を用いることにする。岩石ブロックは剛体とし、接触によって生ずる変形は接触点に挿入されたこれら二つのスプリングによって表現するものとする。

3. 接触力 - 変位曲線

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、Fig. 2 (a) のような場合を考える。弾性スプリング ($\vec{OE}$) 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 ($\vec{OP}$) は負荷過程は剛性 $-L$ の直線、除荷過程においては除荷される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である。

負荷過程 (Fig. 2 (b) $\vec{OA}$), $u: 0 \rightarrow u_1$

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

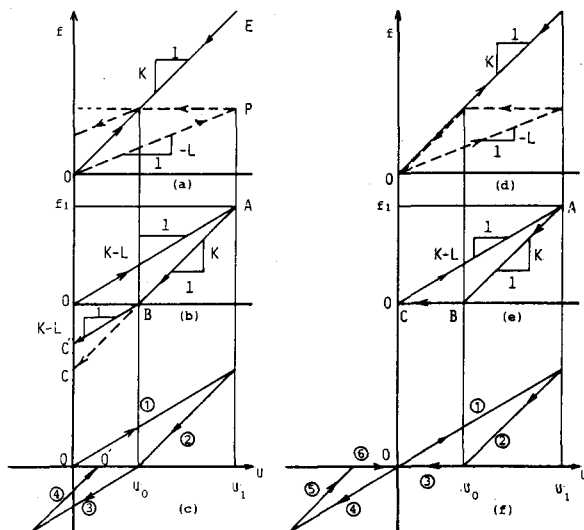


Fig. 2

$$f = e + p = (K - L)u \quad \dots (1)$$

降荷開始点を Fig. 2 (b) の点 A ($u = u_1$) とすれば, $e_1 = Ku_1$, $p_1 = -Lu_1$, $f_1 = e_1 + p_1 = (K - L)u_1$, $\dots (2)$

降荷過程 I (Fig. 2 (b), $\overrightarrow{AB}$), $u : u_1 \rightarrow u_0$,

$$e = Ku, p = -Lu_1 = \text{const}, f = e + p = Ku - Lu_1 = f_1 - K(u_1 - u) \quad (\geq 0) \quad \dots (3)$$

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

降荷過程 II (逆方向負荷過程) (Fig. 2 (b), $\overrightarrow{BC'}$), $u : u_0 \rightarrow 0$

$$e = K(u - u_0) \quad (< 0), \quad p = -L(u - u_0) \quad (> 0), \quad f = e + p = (K - L)(u - u_0) \quad (< 0) \quad \dots (4)$$

これにより、 u_0 を基点として $-u$ 方向への弾・塑性性的な新たな負荷が開始され、剛性 $(K - L)$ を有する経路 $\overrightarrow{BC'}$ が定まる。

以上のモデルで、負荷→降荷→逆方向負荷→負荷の一サイクルを行くと $f - u$ 面上の経路は Fig. 2 (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' に移動する (永久変形を残す)。バウシinger 効果や shake-down 現象を表現する場合に有効なモデルとなる。ただし、それ以外の通常の解析においては、接触判定の操作が容易な、基準点 O を不変としたモデル Fig. 2 (d) を用いるのがよい。

このとき、降荷過程 II (Fig. 2

(e), $\overrightarrow{BC}$ 経路), $u : u_0 \rightarrow 0$ は式 (4) に代り、次のようになる。

$$e = Ku, p = -e, f = e + p = 0 \quad \dots (5)$$

これによって、点 B ($u = u_0$)

以降は、Fig. 2 (e) に示すように点負荷状態の変形回復過程として経路 $\overrightarrow{BC}$ を経て接触開始点 O に復する。このモデルで負荷→降荷→逆方向負荷→降荷の一サイクルを行くと、Fig. 2 (f) に示すように ①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥ のヒステリシスを描いて常に基準点 O に復することになる。

4. 解析例

昨年度全国大会で報告した地下式断のトンネル掘削に伴う地表沈下の解析と同じ例について本法で解析したものを示すと Fig. 3 のようになり、塑性スプリングの剛性 $(-L)$ を適切に選定することによってカンドルの弾・粘性モデルより良好な収束性が得られることがわかった。

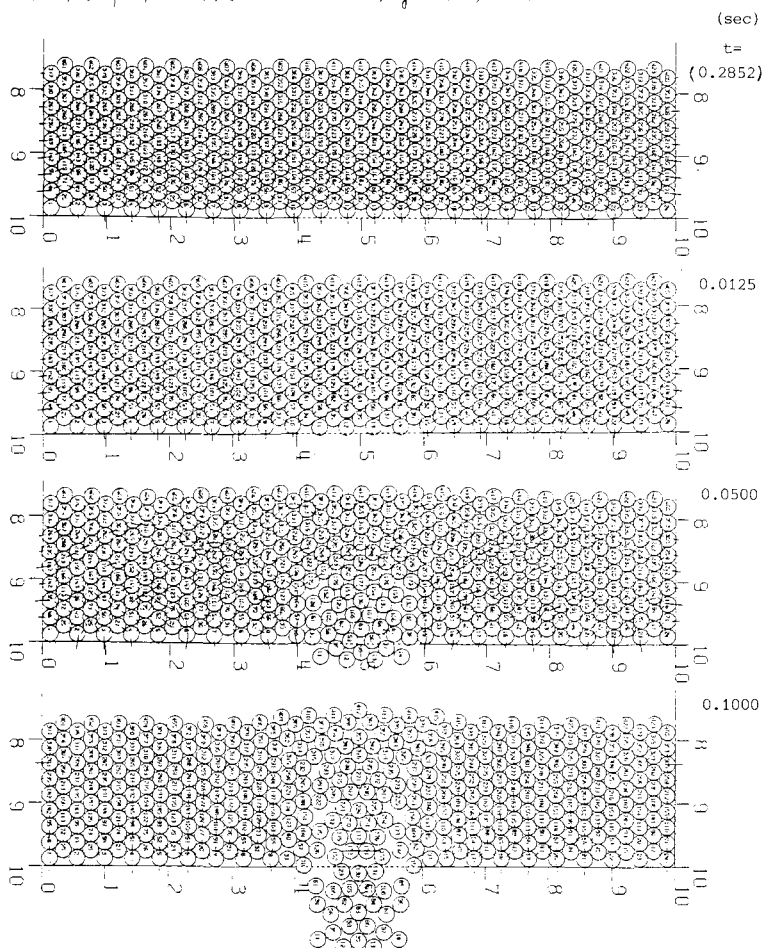


Fig. 3

23/24 図列