

要素間結合力を導入した個別要素解析

鉄建建設 ○辻岡恵介

鳥取大学 木山英郎, 藤村尚, 西村強

1. はじめに 最近、大型土木構造物の基礎岩盤として、不均質岩盤である礫岩を対象とするケースが増えている。しかし、礫と基質に関する複数の要因が力学特性に関与するため、未解明の部分が多いのが現状である。本研究は、要素間に一定の結合力が作用し続けるよう個別要素法¹⁾(以下DEM)の拡張を試み、礫岩のような複合材料の解析への適用性を検討したものである。本文では、粒状体の二軸圧縮解析を実施して、粒子配列とともに、粒子間の結合の程度が供試体の基本的物性にどのように影響するかを示す。

2. 要素間結合力の導入 結合力モデルは図-1 に示したとおりであり、法線方向の結合応力として $-\sigma_n$ (反発力を正)を与えると、要素間に発生する結合力 P_n は、 A を結合物質の存在範囲として、

$$P_n = -\sigma_n \cdot A \quad (1)$$

2要素が接触状態にある間は $A=A_0$ で変化しないとして、一定の結合力 P_n が作用しつづけるが、2要素が非接触となった時の存在範囲は図-2 のように減少するものと仮定した。すなわち、 δ_n を2要素間の接触量とすると、

$$\begin{aligned} 0 < \delta_n (\text{接触}) &: A = A_0 \\ \delta_n' < \delta_n < 0 &: A = A_0 (\delta_n' - \delta_n) / \delta_n' \\ \delta_n < \delta_n' (\text{非接触}) &: A = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

また、ばねによる接触力 e_n, d_n は、 K_n を剛性定数、 η_n を減衰定数として、

$$\Delta e_n = K_n \cdot \Delta \delta_n \quad \Delta d_n = \eta_n \cdot \Delta \delta_n / \Delta t, \quad e_n = e_n + \Delta e_n \quad d_n = \Delta d_n \quad (3)$$

ゆえに、任意時刻 t において、要素に作用する法線方向の総作用力は

$$f_n = e_n + d_n + P_n \quad (4)$$

一方、結合応力 σ の接触面平行方向成分 σ_s は、図-1 に示したように、左右大きさが同じで方向が逆であるので、接線方向の接触力 f_s は、ばねおよびダッシュポット e_s, d_s のみとした。すなわち

$$f_s = e_s + d_s \quad (5)$$

また、要素間の表面摩擦についても、従来通りであり、ばねによる接触力に関してのみ適用している。なお、一度減少した結合物質の存在範囲は、次に要素が接近しても増加することはないとする。

3. 解析手順の概要 図-3 に示すように、解析モデルとして幅60cm、高さ120cmの2軸圧縮試験用の供試体を設定する。解析領域は供試体の対称性を考慮し、ABCD断面とし、要素を $S, S-1, S \cdots$ と規則正しく配列する。境界条件は、AB, BC辺をそれぞれ法線方向に変位固定した。解析では結合応力 σ_n の大きさと側方拘束圧 σ_r の関係を検討するために、 $\sigma_r = 0.1, 0.5, 1.0 (\text{kgf/cm}^2)$ 、 $\sigma_n = 0, 0.1, 1.0 (\text{kgf/cm}^2)$ について解析した。また、粒子配列の違いによる検討を行うために、10/11, 11/12, 12/13の3種の配列での解析も行った。これらの配列の特徴は、接触法線方向の x 軸からの傾きを要素間接触角 α と定義すると、 α はそれぞれ $43^\circ, 50^\circ, 54^\circ$ となっており、 α はこの積層体を安定に保つための側圧と軸圧の比、さらに強度定数にも影響を与える²⁾ものである。

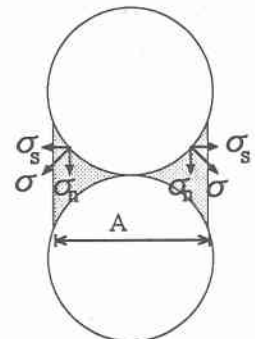


図-1 結合力モデル

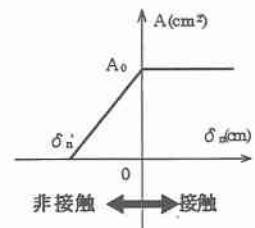


図-2 結合物質存在範囲の減少

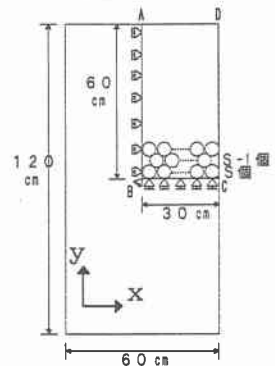


図-3 解析モデル

解析手順は、要素を配列した対象領域に、結合応力 σ_n による静止状態を求める。次に、図-3のAD辺を変位固定した条件の下で、側方拘束圧 σ_r を加えて静止状態に至らせる。そのうち、AD辺を一定速度1cm/s(ひずみ速度1.7%/s)で変位させる。このとき、AD面への接触力の総和を辺長で除したものを軸圧 σ_a とし、y方向変位を初期高さ h_0 で除して軸方向ひずみ ε_y として結果の整理に用いる。

4. 解析結果 図-4($\sigma_r=1.0\text{kgf/cm}^2, \sigma_n=0$)は、配列の影響を見るために行った例である。縦軸は σ_a で相対化してあるので、 $\varepsilon_y=0$ のときの σ_a/σ_r の値は配列を安定に保つための(軸圧/側圧)の変化を示すものとなる。この図より積層体として示す剛性は配列に依存していることが分かる。次に、 σ_n の大きさが応力ひずみ曲線に与える影響をまとめたものが図-5($\sigma_r=0.5\text{kgf/cm}^2$)、図-6($\sigma_r=1.0\text{kgf/cm}^2$)である。両図はともに12/13配列($\alpha=54^\circ$)である。この図より、結合力の導入によって、軸方向荷重 σ_a の最大値には大きな変化は見られないが、破壊ひずみは大きくなること、しかし σ_r が大きくなるにつれその効果は小さくなることが読み取れる。次に、破壊形態の数例を図-7に示す。この図より σ_r, σ_n の大きさや配列の違いにより、破壊形態にも若干の変化が見られる。

5. まとめ 本研究では、要素間の結合力を考慮できるよう個別要素法の拡張を試みた。今後、実材料の力学特性を考慮に入れた検討ができるよう進めていきたい。

(参考文献) 1) Cundull, P.A: Explicit Finite-Difference Methods in Geomechanics (edited by desai, C.S) vol.1 pp132~pp150.1976 2) 木山英郎・藤村尚・西村強: 土木学会論文集, pp.167~pp.174, 1987.4

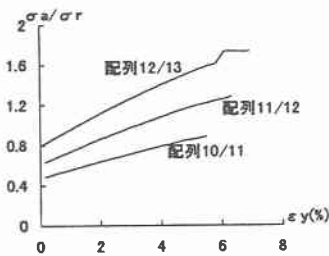


図-4 応力ひずみ曲線
($\sigma_r=1.0, \sigma_n=0$)

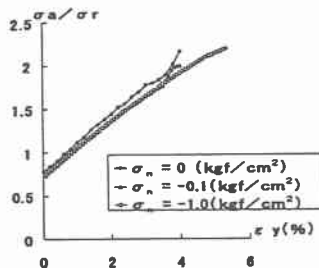


図-5 応力ひずみ曲線
($\sigma_r=0.5$)

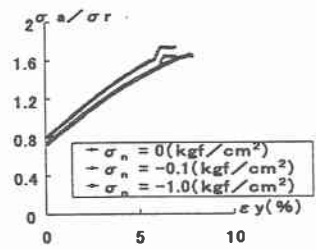


図-6 応力ひずみ曲線
($\sigma_r=1.0$)

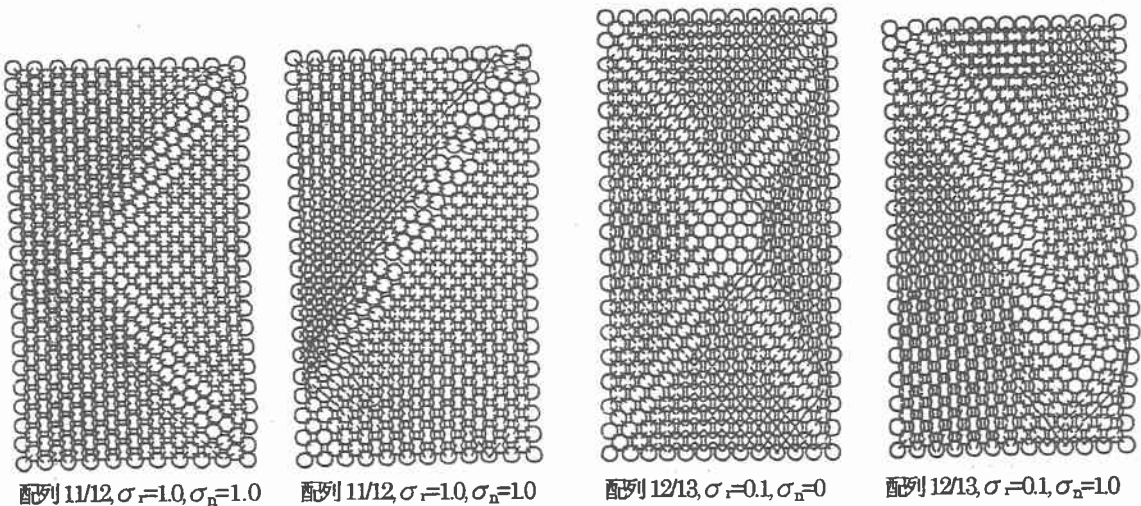


図-7 破壊形態