

京都大学大学院 学生員 ○ 藤井浩司

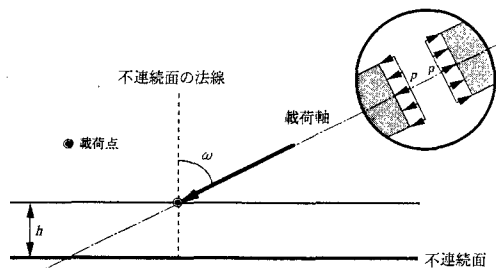
京都大学大学院 正会員 谷本親伯 岸田 潔

1. 研究の流れ

本研究では、岩盤の原位置試験の一つである孔内載荷試験の結果から不連続面剛性の算出を行い、個別剛体要素法 (*Distinct Element Method* 以下、*DEM* と略称する) への適用を検討する。解析モデルの要素形状、き裂頻度、不連続面剛性といったパラメータが *DEM* による不連続面の変形解析の結果に与える影響について考察を行った。

2. 孔内載荷試験による不連続面剛性の算定

孔内載荷試験は、ボーリング孔を利用することで、岩盤の変形特性を簡便かつ経済的に知ることができる。等変位載荷方式による孔内載荷試験の結果から不連続面剛性の値を決定する際、図1のように、不連続面の法線方向と載荷軸方向のなす角を載荷角 ω とし、載荷軸方向の不連続面剛性 $K(\omega)$ を導入することで不連続面の変形を表現できるモデルの提案を行った^[1]。

図1 載荷軸と載荷角 ω

$K(\omega)$ を求めるには、孔内載荷試験、室内試験の結果に加えて、載荷角 ω 、載荷板とその不連続面との最小距離 h を用いる。 $K(\omega)$ の算出式は、次の通りである^[1]。

$$\frac{1}{E_{mass}} = \frac{1}{E_{intact}} + \frac{d \cos^2 \omega}{2 h^2 K(\omega)} \quad (1)$$

上式に試験結果を代入すると、ただちに載荷軸方向の不連続面剛性 $K(\omega)$ が求まる。また、載荷軸方向の剛性 $K(\omega)$ と、垂直剛性 K_n 、せん断剛性 K_s 、載荷角 ω との関係は、次の通りである^[1]。

$$K(\omega) = K_n \cos^2 \omega + K_s \sin^2 \omega \quad (2)$$

これより、載荷角 ω を2通り設定して試験を行えば、2つの未知量 K_n 、 K_s に対して2つの式がたち、この連立方程式を解くことによって K_n 、 K_s を求められる。以上のようにして算出された不連続面剛性の値 K_n 、 K_s を、*DEM* 解析において要素間に挿入される弾性スプリングの垂直剛性、せん断剛性として用いる。本研究では、実際にボーリング孔で行った試験結果の平均値をもとに、次のような値を用いて解析を行う。

$$K_n = 4.1 \times 10^4 [\text{MPa/m}], K_s = 4.5 \times 10^3 [\text{MPa/m}] \quad (3)$$

3. DEM のパラメトリック・スタディ

孔内載荷試験の状況を再現するため、図2に示すような解析条件を設定した。つまり、載荷軸を通る鉛直面で切った断面に着目し、解析領域は一辺が5[m]の正方形とし、ボーリング孔の孔壁に相当する辺以外の3辺は境界辺として拘束する。載荷板は縦30[cm]、横10[cm]の一要素とし、この要素を水平方向に強制的に変位させる。なお、解析は無重力場において行う。重力が岩盤に及ぼす影響は、載荷によって岩盤が及ぼされる影響に比べて十分小さいと考えられる。

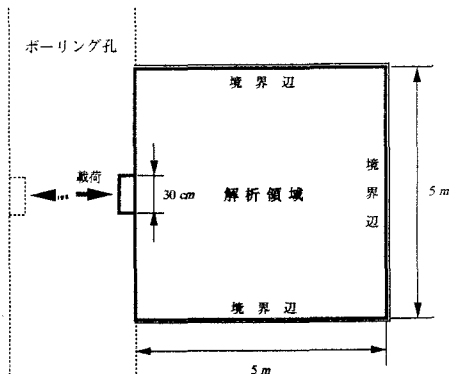


図2 DEM 解析時の載荷状態

解析結果に影響するパラメータとして、要素形状、き裂

頻度、不連続面剛性を採り上げ、これらの要因に関して荷重-変位曲線を用いて考察を行う。

要素形状の影響を考慮するために、等間隔平行要素を用い、傾斜角度を変化させた（ただし、傾斜角度は鉛直下向きから反時計回りにとっている）。傾斜角度は、図3のように0度（鉛直）、30度、45度、60度、90度（水平）の5種類を設定した。結果を図4に示す。この図より、傾斜角度が大きくなるほど荷重-変位曲線の勾配が大きくなるということが確認できる。これは、解析領域を囲む境界辺の影響が大きいと考えられる。特に、解析領域の右の境界辺の影響が大きい。

き裂頻度の影響を考慮するために、等間隔平行要素の傾斜45度について、き裂頻度を4種類用意した。結果を図5に示す。この図より、き裂頻度が大きいほど荷重-変位曲線の勾配は緩やかになっている。これは、き裂頻度が大きいほど要素数が多いので、載荷板から伝播する力が要素を経るごとに消散していき、その結果、載荷板への反力が減少するためであると考えられる。

不連続面剛性の影響を考慮するために、不連続面剛性 K_n 、 K_s の値を次のように変化させる。(3)の値をそれぞれ N 、 S とおいたとき、 K_n 、 K_s の組を $(N/2, S/2)$ 、 (N, S) 、 $(2N, 2S)$ と設定する。傾斜45度の時の結果を図6に示す。この図より、不連続面剛性の値が大きくなるほど荷重-変位曲線の勾配が大きくなる。剛性が高いほど荷重-変位曲線の勾配が大きいのは自明のことである。

4. 結論と今後の課題

本研究において、要素形状、き裂頻度、不連続面剛性の値が、個別剛体要素法を用いた孔内載荷試験の解析結果に反映することが確認できた。つまり、荷重-変位曲線の勾配が、これらのパラメータの値の変化によって前節の結果のように影響を受ける。ただし、不連続面剛性の影響について、垂直剛性とせん断剛性のそれぞれの影響について明確にする必要があると考えられる。

今後の課題として、次のようなことが挙げられる。まず、境界辺の影響が大きいので、これを緩和させるための工夫が必要であると考えられる。また、実地盤の状態を再現するには、土かぶり圧に相当する拘束圧を境界辺に作用させる必要があると考えられる。次に、本解析では、要素間の境界だけでなく、境界辺も不連続面としており、き裂の方向性を完全に表現できているとはいえないので、この点を改良する。さらに、DEM解析における載荷方法として、本研究では単調載荷法を用いたが、今後は階段載荷法を行うことができるようにし、孔内載荷試験の実測値と比較できるようにする。また、荷重-変位関係の非線形性を表現できるように、不連続面剛性の値の設定を工夫する。

参考文献 [1] 谷本親伯, 岸田潔: 岩盤不連続面剛性の評価と原位置岩盤の変形特性, 第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.119-123, 1997

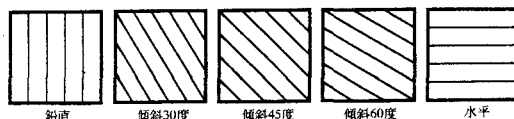


図3 等間隔平行要素

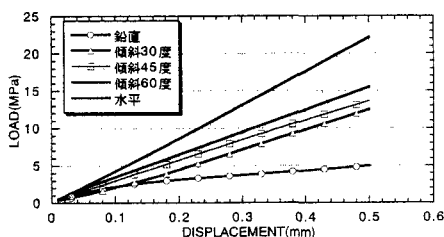


図4 荷重-変位曲線の要素形状による影響

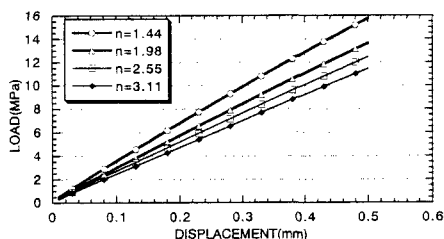


図5 荷重-変位曲線のき裂頻度による影響

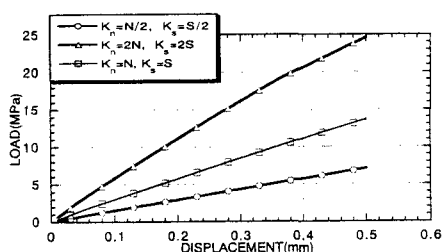


図6 荷重-変位曲線の不連続面剛性による影響