

CS - 30

岩盤内部のジョイントの開口変位分布の逆解析法

東京大学 学生員 本田道紀
東京大学 正 員 堀井秀之

1. まえがき

岩盤の力学的特性は、岩盤中に存在するジョイント（不連続面）に特徴づけられる。岩盤の特性を調べるために原位置試験である平板載荷試験が一般的に行われており、変形係数と弾性係数の2つのパラメーターを得ている。しかし、これらの係数はバラツキが大きく、工学的見地からみてもどの値を選ぶべきか判断に苦しむといった問題が生じている。これは、平板載荷試験の意味が不明瞭であり、試験の結果と岩盤の変形のメカニズムとの対応がついていないことにも一因があると考えられる。

本研究においては、平板載荷試験で得られる荷重変位曲線からジョイントの開口量の分布（開口変位分布）を求める逆解析手法の提案をする。荷重変位曲線からジョイント開口量の分布を逆に知ることができれば、平板載荷試験の意味も明確になる。さらに、その結果から多くの有用な情報を引き出すことが可能となる。

2. 不連続性岩盤の構成方程式モデル

ジョイントの構成則 ジョイントの変形は、垂直方向変形とせん断変形の2成分からなるが、ここでは平板載荷試験において、卓越したジョイントに対して直交に載荷することを想定し、ジョイントの垂直方向変形は垂直方向のみを考慮して、せん断変形は考えないこととした。

ジョイントの垂直応力と垂直方向変形の関係はジョイントの圧縮試験から実験的に求められている。それを参考にジョイントの構成則を以下の様に設定する。

$$V = \frac{1}{K} \sigma'_n \quad (\text{ジョイントが閉合する前 } V < V_m) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$V = V_m \quad (\text{ジョイントが閉合した後}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、垂直応力 $\sigma'_n = -\sigma_n$ は圧縮を正にとっている。また、 V はジョイントの開口量、 K は接線垂直剛性であり定数である。

不連続性岩盤の構成方程式 一方向に卓越するジョイントを含む岩盤を考える（図1）。ジョイントの寸法は、問題の代表寸法と比較して十分に大きいものとして、平均間隔を d とする。座標系は、 x_2 軸がジョイントに直交するように設ける。いまジョイントは垂直応力による垂直方向変形のみを考えるので、ジョイントが閉合する前では

$$\Delta \bar{\epsilon}_{22} = C_{22kl}^R \Delta \bar{\sigma}_{kl} + \frac{1}{dK} \Delta \bar{\sigma}_{22} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。残りの成分に関しては、

$$\Delta \bar{\epsilon}_{ij} = C_{ijkl}^R \Delta \bar{\sigma}_{kl} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。閉合後は、全ての成分について式(4)が成り立つものとする。ここで、 C_{ijkl}^R は基質岩石のコンプライアンスである。

3. 逆解析法

ジョイントは水平に存在し、その開口変位分布は深さ方向のみに変化し、ジョイントの閉合は上から順に進行するものと仮定する。鉛直方向に載荷する問題を考える。

一次元の解析 一次元の問題により、逆解析法の基本的な考え方を示す。

いま、荷重 P の時の垂直応力が $\sigma(z) = Pf(z)$ で与えられると仮定する。この時ジョイントの開口変位分布 $V_m(z)$ を与えると、載荷点での変位 δ が求まる。これが順解析であり、 $z = z_c$ まで閉じた時の載荷点変位は

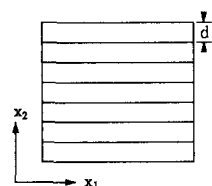


図1 ジョイントモデル

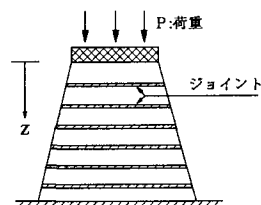


図2 1次元の問題

式(5)となる。

$$\delta = \int_0^{z_c} \left(\frac{V_m(z)}{d} + \frac{1}{E} P f(z) \right) dz + \int_{z_c}^{\infty} \left(\frac{1}{E} + \frac{1}{dK} \right) P f(z) dz \dots\dots\dots (5)$$

逆解析では、式(5)(荷重変位曲線)を用いて、ジョイントの開口変位分布 $V_m(z)$ を求める。式(5)を、 P について微分すると、

$$\frac{d\delta}{dP} = \int_0^{z_c} \frac{f(z)}{E} dz + \int_{z_c}^{\infty} \left(\frac{1}{E} + \frac{1}{dK} \right) f(z) dz \dots\dots\dots (6)$$

と求まる。式(6)から $z = z_c$ まで閉じている時の荷重変位曲線も傾きの逆数が求まる。その値と与えられた荷重変位曲線から対応する荷重 P_c が求まる。 $z = z_c$ まで閉合しているのであるから、 $z = z_c$ のジョイントの閉口量 V は開口量 V_m に等しい。従って、求まった荷重 P_c から計算される $z = z_c$ の応力をジョイントの構成則に代入し、

$$V_m(z_c) = \frac{1}{K} P_c f(z_c) \dots\dots\dots (7)$$

となる。以上が、逆解析法の基本的な考え方である。

有限要素法を用いた二・三次元への拡張 一次元の問題と考え方は同じである。但し、応力分布は有限要素法により問題を解くことにより求める。式(3)、(4)を用いて有限要素法により順解析を行い荷重変位曲線を得る。逆解析で用いる荷重変位曲線の傾きの逆数は、単位荷重 $\Delta P = 1$ をかけた時の変位 $\Delta \delta$ として計算される。この値と順解析から求まる荷重変位曲線から、対応する荷重、さらに閉合領域の最深部における V_m の値が求まる。二・三次元の場合、水平方向にもジョイントの閉合領域が広がるため、アルゴリズムに工夫が必要となる。

4. 結果

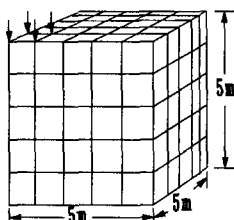


図3 解析領域

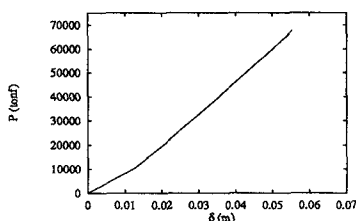


図4 荷重変位曲線

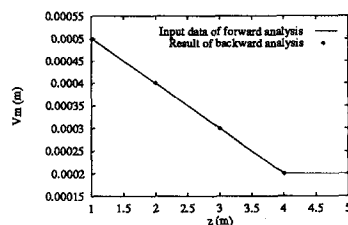


図5 ジョイントの開口変位分布

3次元の平板載荷試験の解析結果を示す。解析は左右・奥行き対象なものを想定して、1/4の領域を考えた。メッシュ数は $5 \times 5 \times 5$ とし、パラメーターは次の様に設定した。基質岩石の弾性係数 E を $4,000,000(tf/m^2)$ 、ポアソン比 ν を 0.25、ジョイントの接線剛性 K を $1,000,000(tf/m^3)$ 、ジョイントの間隔 d を $0.2(m)$ とした。開口変位分布を図5の直線として与えて順解析を行い、図4の荷重変位曲線を得た。これを用いて逆解析を行うと、求まる開口変位分布は順解析で与えたものと一致している(図5の点)。

5. まとめ

本研究では、平板載荷試験の荷重変位曲線からジョイントの開口変位分布を求める逆解析法の提案を行った。実際の試験に適用し、提案する逆解析手法を用いて求まるジョイントの開口変位分布と現地で計測されるものとが一致するかどうかを検証することが今後の課題の一つである。

参考文献

- 1) 吉田、林、堀井：マイクロメカニクスに基づく岩盤の構成式と平板載荷試験の連続体解析, 第29回土質工学研究発表会概要集(掲載予定), 1994