

Ⅲ-B343 不連続面の繰返し載荷挙動解析への個別要素法の適用に関する検討

清水建設 正○熊坂博夫 正 八田敏行
中部電力 正 西村 均

1. はじめに

圧縮空気貯蔵ガスタービン発電など高压気体を岩盤内に貯蔵する施設では高压気体の貯蔵・払い出しにより岩盤に繰返し荷重が作用する。特に、薄肉鋼板を用いたライニング方式では、空洞周辺の岩盤の変形予測が気密設計において重要となる⁽¹⁾。この岩盤の変形は岩盤内の不連続面の変形挙動に影響を受けるため、個々の不連続面の力学特性の把握とこの挙動を考慮した不連続性岩盤の解析方法を開発することが重要である。

本報告では、人工亀裂を入れた岩石供試体を用いて行った単一不連続面の垂直・せん断載荷試験結果⁽²⁾に対し、不連続面の挙動を直接モデル化する個別要素法によるシミュレーションを実施しその適用性を検討したので報告する。

2. 単一不連続面の試験結果と解析モデルの設定

室内試験から得られた単一不連続面の力学特性⁽²⁾は以下のものである。

- ①垂直応力～垂直変位関係は下に凸の双曲型の曲線となる
- ②せん断応力～変位関係は載荷時に上に凸の曲線で除荷時は下に凸の曲線が得られる
- ③繰返し載荷により残留変位が生じる

個別要素法解析コードUDEEC⁽³⁾には、不連続面の非線形な力学特性を考慮した不連続面構成則モデルとして、限界面モデルの考え方を取り入れたCY-Joint ModelやBartoらのBB-Joint Modelがある。本報告ではCY-Joint Modelを適用した。

3. CYモデルの概要と室内試験結果の適用

3.1 垂直応力～変位特性

不連続面の垂直応力 σ_n と垂直変位 u_n の関係は垂直剛性 k_n が垂直応力に依存するとして次式で与えられている。

$$\Delta\sigma_n = k_n \Delta u_n = (a_n \sigma_n^{e_n}) \Delta u_n. \quad (1)$$

ここに、 a_n, e_n は定数である。

一方、室内試験より得られる σ_n と u_n の関係は双曲線に近似して次式のように求まる。

$$\sigma_n = u_n / (0.686 - 1.875 u_n). \quad (2)$$

上式を微分し、最小近似により求まる垂直応力～変位関係は図-1に示されるように垂直応力の範囲により次式で表すこととした。

$$k_n = (1.0104 \times 10^4) \times \sigma_n^{1.736} \quad \sigma_n \geq 1 \text{ MPa} \quad (3.a)$$

$$k_n = (6.2914 \times 10^3) \times \sigma_n^{0.4914} \quad \sigma_n < 1 \text{ MPa} \quad (3.b)$$

3.2 せん断応力～変位特性と強度特性

σ_s とせん断変位 u_s および累積塑性せん断変位 u_s^p は次式で与えられる。

$$\Delta\sigma_s = F k_s \Delta u_s = F \cdot (a_s \sigma_s^{e_s}) \Delta u_s. \quad (4)$$

$$u_s^p = u_s^p + (1-F) |\Delta u_s| \quad (5)$$

$$F = (1 - \sigma_s / \tau_m) / (1 - r). \quad (6)$$

ここに、 k_s は初期せん断剛性、 τ_m は限界せん断応力、 F はせん断応力 σ_s が τ_m に近づくとせん断剛性が低下する比率を示す係数、 r は応力や変位が反転した時にせん断剛性を初期値に回復させるための係数である。

限界せん断応力 τ_m は u_s^p の増加に伴って減少する内部摩擦角 ϕ_m を用いたCoulomb則により次式で与えられる。

$$\tau_m = \sigma_n \tan(\phi_m). \quad (7)$$

$$\phi_m = (\phi_{mo} - \phi) \exp(-u_s^p / R) + \phi. \quad (8)$$

ϕ は岩盤の基本摩擦角、 ϕ_{mo} は初期摩擦角、 R はジョイントの粗度を表す長さの次元を持つパラメータである。式(4)～(8)の定数 a_s 、 e_s 、 ϕ 、 ϕ_{mo} 、 R を試験結果をもとに設定することにより解析できる。

初期せん断剛性 k_s は載荷・除荷開始の0～0.005mm、0.002mm程度における接線勾配から定め、各サイクルの載荷・除荷時のせん断剛性と垂直応力の関係を求めた(図-2参照)。

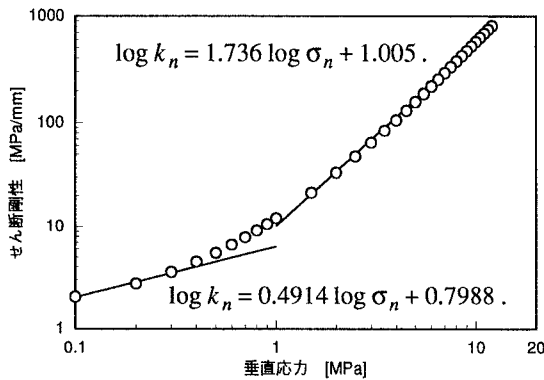
キーワード：不連続性岩盤、不連続面の構成則、個別要素法、繰返し荷重

〒105-07 東京都港区芝浦1-2-3 シーバンスS館

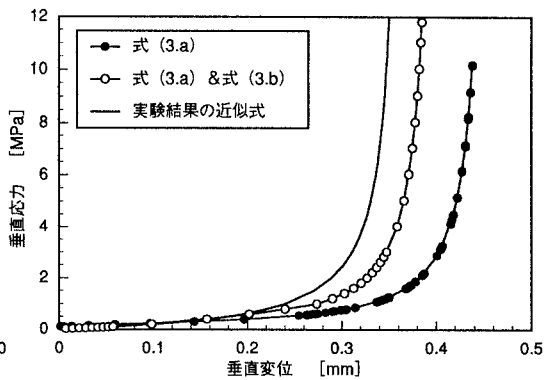
TEL 03-5441-0112 FAX 03-5441-0540

〒459 愛知県名古屋市区大高町字北関山20番地の1

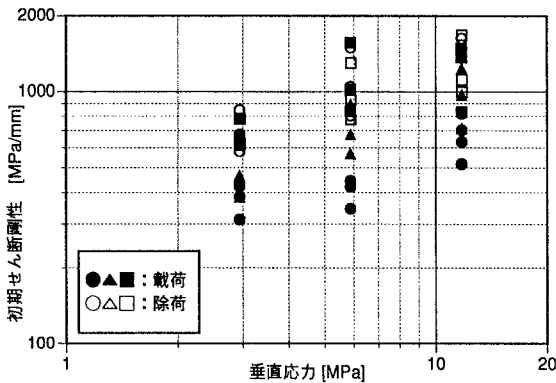
TEL 052-621-6101 FAX 052-623-5117



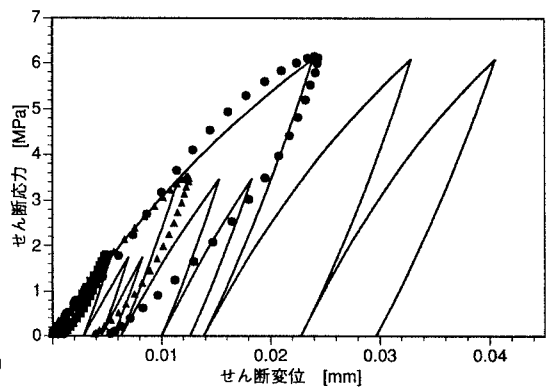
図－1 室内試験の垂直剛性の近似



図－3 解析と室内試験の垂直応力と変位の関係



図－2 室内試験における
垂直応力と初期せん断剛性の関係



図－4 解析と室内試験の
繰返しせん断荷重試験の結果

強度特性と塑性変位の定数は、一面せん断試験から得られるピーク強度における弾性変位と塑性変位および内部摩擦角から設定した。また、基本摩擦角は残留強度の値を用いた。また、実験では見掛けのせん断強度を有することより、式(8)と同様の形として次式のように修正して用いた。

$$C_m = (C_{m0} - C) \exp(-u_s^p / R) + C. \quad (9)$$

4. 解析結果と考察

試験と解析の垂直応力と垂直変位の関係を図－3に示す。式(3.a)のみを用いたときに比べ、両式を考慮した場合が試験結果に近い結果が得られた。低垂直応力の剛性変化を考慮したことによる。ただし、繰返し荷重に伴う永久変位は生じない。

垂直応力 σ_n を2.94MPaで一定とし、せん断荷重応力をピーク強度の0.2, 0.4, 0.7とした3回の繰返し荷重解析の結果を図－4に示す。図中には室内試験で得られた1回目の荷重の応力～断変位の関係をプロットしている。

1回目のせん断応力～せん断変位の関係を比較すると、除荷の垂直・せん断応力が低いところで示す非線形挙動を除き、ほぼ全体として試験結果を表現している。また、解析では垂直・せん断応力の大きさに関わらず繰返し荷重に伴うせん断変位増加があるが、その増分量は繰返し荷重とともに減少する。一方、試験結果では明瞭なせん断変位の増加は見られず、逆に減少する場合もみられた。

5. おわりに

試験結果は今回適用したCY-Joint Model に比べ強い非線形性があることがわかる。より精度の高い解析・設計が必要な場合にはこれらを考慮する必要がある。

〔参考文献〕 1) 奥田宏明, 近藤久雄, 神山博, 西崎晶士, 木全宏之, 熊坂博夫: 第48回土木学会年次学術講演会講演概要集, VI-177, pp.374-375, 1993. 2) 近藤寛通, 上田稔, 西村均, 若林成樹, 石塚与志雄, 熊坂博夫: 繰返し荷重に伴う不連続面の変形挙動, 不連続性岩盤と構造物に関するシンポジウム, pp.417-420, 1995.

3) ITASCA: UDEC User's Manual Version 2.0