

III-369

繰返し段階载荷時の不連続面の変形挙動の表現

東電設計(株)正会員 田坂 嘉章 蔡 明
同上 正会員 宇野 晴彦 加藤 秀人

1. はじめに

節理性岩盤のように不連続面を多数有する岩盤の変形挙動を取り扱った解析手法では、岩盤の力学挙動に支配的な不連続面の力学特性の把握が重要となる。節理性岩盤モデルの実岩盤への適用例としては、平板载荷試験のシミュレーションが挙げられ、原位置試験の困難な岩盤や試験坑掘削による緩みの影響が無い岩盤の等価な変形係数を推定することが考えられる。一般的に、平板载荷試験では、繰返し段階载荷が行われるため、シミュレーションに当たっては、繰返し载荷時の不連続面の変形特性が必要となる。そこで、本研究では、不連続面を一条有する岩石供試体の繰返し段階载荷試験を実施し、不連続面の圧縮特性構成モデルを用いて、試験で得られた不連続面の変形挙動の再現を試みた。

2. 不連続面の繰返し段階载荷試験

試験に用いた試料は、一軸圧縮強度 $\sigma_c=34\text{MPa}$ の泥岩であり、潜在的な不連続面に対するハンマーの軽い打撃により試験対象の不連続面を抽出した。供試体は、一枚の不連続面を含むブロック(W60*H40*L60cm)に整形し、岩石側面にパイゲージ(LDT:Local Deformation Transducer)とひずみゲージ(ロゼットゲージ)をセットした(下図参照)。

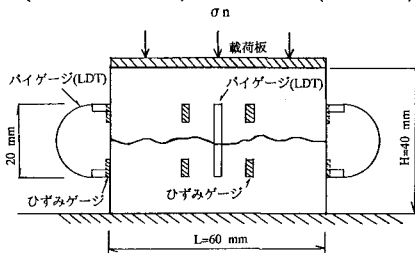


図-1 不連続面の圧縮試験の概要

試験は、載荷速度 0.5MPa/min の応力制御による繰返し段階载荷で行った。載荷・除荷時の岩石部の変形量は、ひずみゲージで計測し、LDTにより計測した不連続面の変形量を含む岩石変形量から岩石部の変形量を差し引くことにより、不連続面そのものの変形量を求めた。なお、供試体は、不連続面が噛み合った状態でセットした。

岩石部(ひずみゲージ)および不連続面を含む岩石部(パイゲージ)の載荷応力～ひずみ関係を図-2に示す。不連続面を含む岩石部は、載荷・除荷に伴うヒステリシスを有し、強い非線形性を示している。一方、岩石部は、ほぼ弾

性的な挙動を示している。

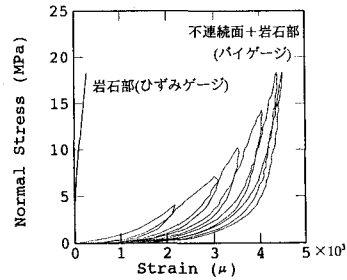


図-2 不連続面の圧縮試験結果

3. 繰返し段階载荷時の不連続面の変形挙動の表現

Barton & Bandis¹⁾らは、Duncan-Chang(1970)らが土や岩の応力～ひずみ関係に適用した双曲線近似を不連続面の圧縮変形特性にも適用できるものと考え、以下の式を誘導した。

$$K_n = K_{ni} \left[1 - \frac{\sigma_n}{V_m K_{ni} + \sigma_n} \right]^2 \quad (1)$$

ここに、

K_n : 不連続面の法線方向の接線剛度(MPa/mm)

K_{ni} : 不連続面の初期剛度(MPa/mm)

V_m : 不連続面の最大閉塞変位量(mm)

σ_n : 不連続面の法線方向に作用する応力(MPa)

上式は、単調載荷時の不連続面の法線方向の接線剛度 K_n を表す式である。本研究では、平板载荷試験などの繰返し段階载荷にも適用できるように、(1)式に基づいて、次の式²⁾を与えた。

$$K_n = K_{ni} \left[1 - \frac{\sigma_n}{K_{ni}(V_m - \sum V_i) + \sigma_n} \right]^2 \quad \text{載荷時} \quad (2)$$

$$K_n = K_{ni} \left[1 - \frac{\sigma_n}{K_{ni}(V_m - \sum V_i)(1 - \eta^M) + \sigma_n} \right]^2 \quad \text{除荷時} \quad (3)$$

ここに、 K_{ni} : 不連続面の初期剛度(MPa/mm)

V_i : 除荷時($\sigma_n=0$)の不連続面の変位量

η^M : 非弾性変位比率(V_i^M/V_m^M) (M : サイクル)

である。圧縮試験の整理では、まず、一つの載荷・除荷の過程を1サイクルとし、各サイクルごとに載荷・除荷時の K_{ni} と V_m^M を(1)式に基づいて求めた。

(2)式、(3)式に示すように、繰返し載荷時の不連続面の

K_{ni} の変化を表現するためには、初期剛度 K_{ni} 、最大閉塞変位量 V_m 、および非弾性変位比率 η^M が必要となる。 V_m については、各サイクルごとの V_m^M を総和して、各サイクルごとの η^M については、ばらつきが大きいため、ここでは、パラメータスタディにより設定した。 K_{ni} については、Bandis(1980)が多くの種類の岩に介在する不連続面の圧縮試験ならびにせん断試験を行い、下式を提案している。

$$K_{ni} = -7.15 + 1.75JRC + 0.02 \frac{JCS}{a_j} \quad (\text{Bandis 1980}) \quad (4)$$

ここに、JRC、JCS、 a_j は、それぞれ、不連続面の粗度係数、圧縮強度(MPa)および初期開口量(mm)である。彼らの試験では、不連続面は噛み合った状態にあり、載荷時の初期拘束圧(上載圧)は、自重レベルの1 Kpaとなっている。Barton、Bandis(B&B)らの試験結果¹⁾を再整理し、不連続面の特性を表すJRC、 V_m^M およびJCSと K_{ni} の相関をまとめたものを図-3に示す。

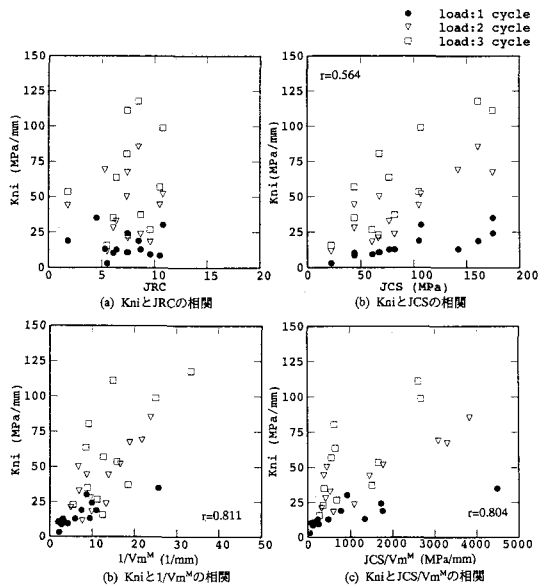


図-3 B&Bによる試験値 K_{ni} と各パラメータの相関

これらの図によると、 K_{ni} は、JCS、 $1/V_m^M$ および JCS/V_m^M と相関があり、特に $1/V_m^M$ との相関が高くなっているが、不連続面のラフネスを表すJRCとは、ほとんど相関が無い。一般に、不連続面の垂直剛性は、不連続面の寸法、形状(ラフネス、開口幅)および垂直応力に依存するとされているが、ここでの整理結果によると、 K_{ni} は、不連続面が噛み合った状態では、ラフネスにはあまり影響しない結果が得られている。

そこで、本試験の K_{ni} の設定に当たっては、JCSと V_m^M を

説明変数とし、載荷・除荷時の K_{ni} を別々に回帰した。なお、JCSは、原位置における不連続面のシュミットロックハンマー試験結果(JCS=34MPa)を用いている。図-4に重回帰結果を示す。ここでは、載荷時・除荷時の K_{ni} に対して、図中の関係式を用いた。

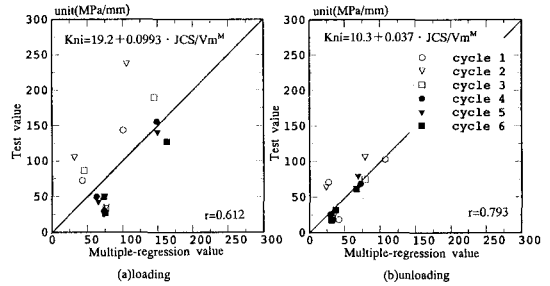


図-4 不連続面の K_{ni} の回帰値と試験値の比較

非弾性変位比率 η^M のパラメータスタディを行い、試験結果を最もよく再現する η^M を設定した。図-5に試験結果と構成モデル(2)、(3)式を用いた解析結果が比較的良好に対応している場合の両者の比較とその時用いた η^M を示す。試験結果をうまく再現する η^M は、荷重レベルが小さいサイクル(塑性変形の大部分が生じる荷重レベル)に対しては、0.4~0.5程度の一定値を与え、荷重レベルが高くなる(弾性変形が支配的になる)に従って、小さくしていき、最終的には0.2程度の値を与えれば良いことが分かった。

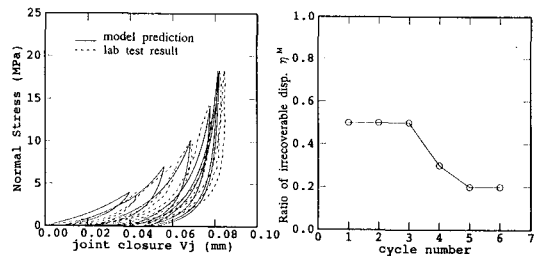


図-5 構成モデルによる不連続面の变形特性と η^M

4. おわりに

繰返し段階載荷時の不連続面の变形挙動は、非弾性変位比率 η^M を導入した構成モデルにより、概ね推定できることが分かった。この η^M は、荷重履歴によって変化するものと考えられ、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) Bandis, S.C. et al. 1983, Fundamentals of rock joint deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 20, No.6, pp.249-268.
- 2) Cai, M. et al. 1993, Numerical Analysis of Deformation Behavior of Jointed Rock Masses under Loading-Unloading conditions, Proc. 48th annual meeting JSCE, vol.3, pp.836-837.