

岩盤不連続面の新しいせん断挙動モデルの提案とその適用

長崎大学工学部 正会員 棚橋由彦 長崎大学工学部 正会員 蔣 宇静
 長崎大学工学部 正会員 肖 俊 九州電力(株) 正会員 山下裕司
 長崎大学工学部 学生員 〇佐久間敦之 長崎大学工学部 学生員 永家健司

1. はじめに

今日、コンピュータ利用技術が飛躍的に進歩を遂げ、数値解析手法を用いて岩盤構造物の安定性を評価する試みが数多くなされるようになった。不連続性岩盤を取り扱う数値解析は、不連続面を含めた岩盤を等価な連続体として取り扱う連続体解析と、不連続面を1つ1つ幾何学的にモデル化する不連続体解析に大別できる。後者の場合、岩盤構造物の安定性は岩盤基質部よりも岩盤内に含まれる不連続面の変形・強度特性に支配され、解析結果の信頼性は不連続面の幾何学特性を把握すると同時に力学的挙動を如何に精度よく再現するかに依存する。これらの観点から Barton-Bandis モデルをはじめとしていくつかの不連続面挙動モデルが提案されているが、それらの妥当性や信頼性はまだ明らかにされていないように思われる。

本研究では周辺岩盤からの拘束効果を考慮した垂直剛性一定制御試験(CNS)を行い、室内試験の結果に基づいた不連続面挙動モデルを提案することを目的とする。また提案モデルを数値解析の構成則として組み込み、既存のモデルを用いた解析と比較し、妥当性を検証していく。

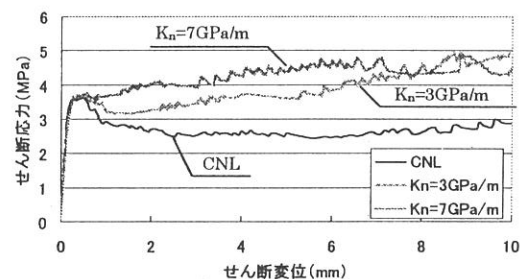
2. 岩盤不連続面のせん断挙動とそのモデリング

(1) 試験概要

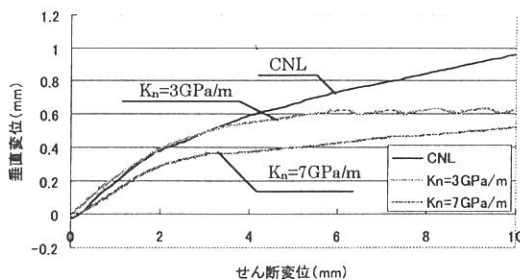
従来の不連続面挙動モデルを分類すると実験的モデル、理論的モデルと経験的モデルの3つに分けることができる¹⁾。本研究では室内せん断試験結果に基づいてせん断挙動をモデル化する。岩盤不連続面のせん断試験は、一般的にせん断過程において垂直応力を一定(CNL)として行われる。しかし深部地下を想定した場合、せん断に伴い発生する表面損傷や乗り上げに起因したダイレーションが発生するため不連続面に作用する垂直応力が一定となることはありえない。よってこの条件における不連続面のせん断試験は周辺岩盤からの拘束効果を考慮した垂直剛性一定制御試験(CNS)を行う必要があり、この観点から著者らはコンピュータにより自動的に剛性制御が可能なせん断試験機を開発し、その実用性を検証してきた¹⁾。本研究では既往研究の実績をもとに垂直剛性 K_n ($K_n=3, 7\text{GPa/m}$)、垂直応力 σ_n ($\sigma_n=2, 5, 10\text{MPa}$)、表面形状(JRC 値 4~6、8~10、12~14)、壁面強度 σ_j (中硬岩、軟岩相当) をパラメータとし、計 54 ケースで試験を行った。

(2) せん断試験結果

試験結果の一例($\sigma_n=5\text{MPa}$, JRC 値 12~14)を図-1示す。せん断に伴うせん断応力の変化は、ピークせん断強度発現後の残留段階において、CNL 条件でぜい性的挙動を示すのに対し、CNS($K_n=3, 7\text{GPa/m}$)条件においてはせん断変位の増加に伴い残留強度も増加の傾向を示し、その強度も垂直剛性値に比例して高くなる。



a) せん断応力



b) 垂直変位

図-1 せん断変位とせん断応力、垂直変位の関係

また垂直変位の変化は、垂直剛性値が高いほど著しく抑制される結果となった。これはせん断に伴い発生するダイレイションが、垂直剛性に起因した拘束圧の増加に伴い抑制された結果である。またピーク後の挙動に着目すると、残留強度が一定値で推移する延性モデルとひずみ硬化により残留強度が増加する硬化モデルに分類することができる。今回挙動モデル作成に当たりこの2つの挙動に着目して行う。

(3)提案モデル構築の基本方針

上述の試験結果をもとに提案するせん断挙動モデルを作成する。基本方針としてまず3つのJRC値毎にせん断応力とせん断変位をピークせん断応力 τ_p とピーク時のせん断変位 u_{sp} で除して無次元化した $\tau/\tau_p - u_s/u_{sp}$ 曲線を作成する。 τ_p で除すことにより初期垂直応力 σ_n の違いを考慮せずに比較が可能となる。図-2にJRC値12~14の $\tau/\tau_p - u_s/u_{sp}$ 曲線を一例として示す。 $\tau/\tau_p=1$ 後の残留段階で、低拘束圧下では硬化挙動を示し、高拘束圧下では延性挙動を示している。この原因として壁面強度 σ_j を中硬岩、軟岩を対象として設定したため、低拘束圧下では乗り上げに伴うダイレイションに起因した拘束圧の増加が見られ残留強度が増加したのに対し、高拘束圧下ではせん断変形に伴い表面損傷を起こし、ピーク後の拘束圧の増加が見られなかったと考えることができる。よって低拘束圧下では硬化モデル、高拘束圧下では延性モデルと分類した。また各々の挙動グループにおいて垂直剛性値 K_n が大きいほど残留強度も大きくなり、垂直剛性値 K_n の影響が確認できる。次に u_s/u_{sp} において硬化モデルではピーク後にせん断強度が増加するひずみ硬化領域と硬化後の残留段階である塑性流動領域において、また延性モデルではピーク後の残留段階において、それぞれ垂直剛性 K_n 毎に回帰分析することで τ/τ_p と u_s/u_{sp} の関係式を求める。次にピークせん断強度 τ_p と初期垂直応力 σ_n の関係から回帰分析して関係式を求める。これら τ/τ_p と u_s/u_{sp} の関係式と τ_p と σ_n の関係式を合わせることで、それぞれのJRC値に応じた硬化モデルと延性モデルにおけるせん断強度式が求められる。

3.おわりに

提案モデルを用いて岩盤構造物の安定性を評価するために、今後は不連続体解析手法に提案モデルを構成則として組み込み、深部地下空洞の解析を行う。まずは図-3に示す概念を、不連続面の粘着力 c_0 、摩擦角 ϕ_0 、ダイレイション角 ψ_0 に着目し、ひずみ硬化領域および塑性流動領域に分けて、せん断変形の進行に伴う強度定数の変化をモデル化する。解析モデルは不連続性岩盤内の深さ400mに位置する幅25m、高さ50mの大規模地下空洞とする。また代表的な不連続面のせん断挙動モデルとしてCoulombの滑りモデルを採用し提案モデルとの比較を行っていく。

【参考文献】

- 1) 蔣宇静, 中川光雄, 江崎哲郎: 岩盤不連続体解析に必要とする不連続面の挙動特性の評価法, 土木学会論文集, No624/III-47, pp231-243, 1999.
- 2) 棚橋由彦, 蔣宇静, 溝上建, 祐徳泰郎, 渡辺秀一: デジタル制御型岩盤不連続面一面せん断試験機の作成と応用, 第56回土木学会年次学術講演概要集, 熊本, 第III部門, CD-ROM, 2001.9

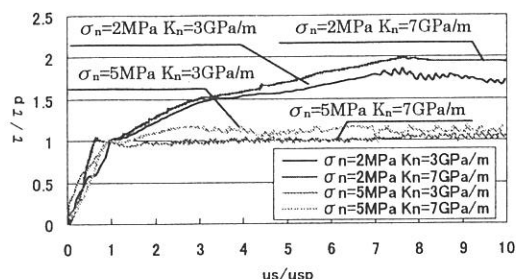


図-2 $\tau/\tau_p - u_s/u_{sp}$ 曲線(JRC 値 12~14)

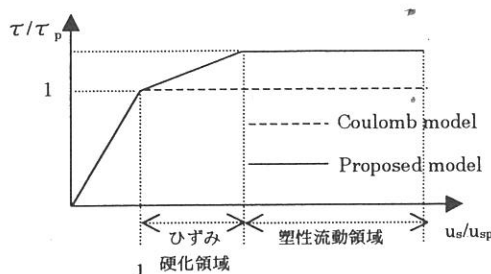


図-3 提案モデルの概念