

岩盤不連続面の新しいせん断挙動モデルの提案と適用

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

九州電力(株) 正会員 安藤一郎

九州電力(株) 正会員 山下裕司

長崎大学工学部 学生員 ○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变形・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。これらの観点から幾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。さらに提案モデルを岩盤不連続面の挙動モデルとし、既存の代表モデルとの空洞掘削における変形挙動評価において比較検討を行う。

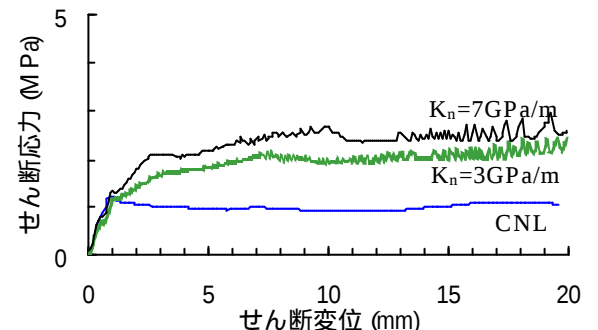
2. 岩盤不連続面のせん断試験と挙動評価

(1)試験概要

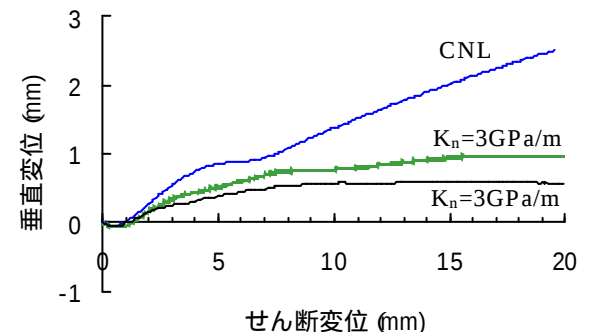
従来の岩盤不連続面せん断試験はせん断過程において垂直応力を一定(CNL)として行われた。しかし深部地下を想定した場合、せん断に伴い発生する表面損傷や乗り上げに起因したダイレイションにより不連続面に作用する垂直応力が一定となることはありえない。よってこの条件における不連続面のせん断試験は周辺岩盤からの拘束効果を考慮した垂直剛性一定制御試験(CNS)を行う必要があり、この観点から著者らはコンピュータにより自動的に剛性制御が可能なせん断試験機を開発し、その実用性を検証してきた。本研究では深部地下を想定し、垂直応力 σ_n ($\sigma_n=2, 5, 10\text{MPa}$)、垂直剛性 K_n ($K_n=3, 7\text{GPa/m}$)、表面形状(ISRM 指針の 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)試験結果と挙動評価

試験結果の一例として J2、 $\sigma_n=2\text{MPa}$ 、軟岩相当のケースのせん断挙動を図-1に示す。せん断強度において CNL 試験 ($K_n=0$) では、せん断変位約 1mm でピークを示し、軟化後に塑性流動領域に至っている。一方 CNS 試験では、CNL 試験のピーク時に対応したせん断強度後に硬化挙動を示し、その後塑性流動領域に至っている。硬化勾配も垂直剛性値に比例して高くなる傾向を示した。一方、ダイレイタンシー挙動は垂直剛性値の増加に伴い抑制される傾向を示し、せん断強度ダイレンタン



(a) せん断変位 - せん断応力



(b) せん断変位 - 垂直変位

図-1 せん断挙動

($\sigma_n=2\text{MPa}$ 、J2、軟岩相当)

キーワード：岩盤不連続面、垂直剛性一定試験、せん断挙動モデル、ひずみ硬化、大規模地下空洞

連絡先：〒852-8521 長崎市文教町 1-14 長崎大学工学部 TEL：(095)819-2611

シー挙動はダイレイタンスが抑制されるほどせん断強度が増加する関係にある。CNS 試験では乗り上げに起因したダイレイタンスの増加に伴う周辺岩盤からの拘束効果より壁面に働く垂直応力が増加し、せん断強度が増加すると考えられる。よって不連続面のせん断強度は載荷応力に依存し、垂直剛性値が高くなるほどせん断強度は高くなる。

3. 新しいせん断挙動モデルの提案と適用

(1) せん断挙動の評価とモデル化

CNL 試験と CNS 試験の違いは post-failure 挙動に現れ、前者はピーク後に軟化挙動を示し、その後塑性流動領域に至る。一方後者は、前者のピークに対応した値後の post-failure 挙動で硬化もしくは延性的挙動を示すが、今回硬化挙動に着目しモデル化を行った。post-failure 段階でのひずみ硬化によるせん断強度増加を考慮すると、提案モデルは図 - 2(a)に示す概念で表されるが、不連続面の構成則とするために強度定数(c_j, ϕ_j)に着目してモデル化を行った。

CNS 試験では post-failure 段階で強度が増加し塑性流動領域に至ることから、不連続面の強度定数もせん断変位の増加に伴い図 - 2(b)のように変化すると考えられる。よって提案モデルは弾性領域、ひずみ硬化領域、塑性流動領域の各区間で強度定数を変化させモデル化を行った。

(2) 提案モデルの挙動解析における適用

地下空洞の挙動解析において、提案モデルと既存の代表モデルである Coulomb モデルと比較して挙動評価を行った。解析モデルを図 - 3 に示すが、空洞形状は幅 25m、高さ 48m で、深さ 400m に位置する大規模地下空洞を想定した。また空洞周辺には任意に不連続面を発生させ、岩盤物性値は C_H 級とし、不連続面物性値は既往研究に従うものとした。また不連続面の挙動確認のために支保は打設せず、掘削方法も全断面一括で行った。解析結果の一例としてアーチ部中央計測線(上方に 20m 計測)及びジョイントの挙動を示す。アーチ部中央の変位は奥行方向にはほぼ変化は見られないが、壁面近傍で両者に顕著な差が生じている。これは奥行方向ではほとんど変位が生じておらず弾性領域であるが、壁面近傍で生じた変位に起因して塑性領域に達し、ひずみ硬化の影響によって顕著な変位の差が生じたと考える。またジョイントの挙動も全体的に提案モデルの変位は抑制され、塑性領域におけるひずみ硬化挙動は空洞変形に対し大きく影響を及ぼすと考えられる。

4. 結論と今後の展望

本研究は深部地下を想定したせん断試験結果から、ひずみ硬化を考慮した不連続面のせん断挙動モデルを提案し、地下空洞解析の構成則として挙動評価を行った。この場合、ひずみ硬化により不連続面のせん断強度は増加し、空洞の壁面変位が抑制されることが確認された。今後は提案モデルを一般化したせん断強度式を導き、その適用性を検証して行く。

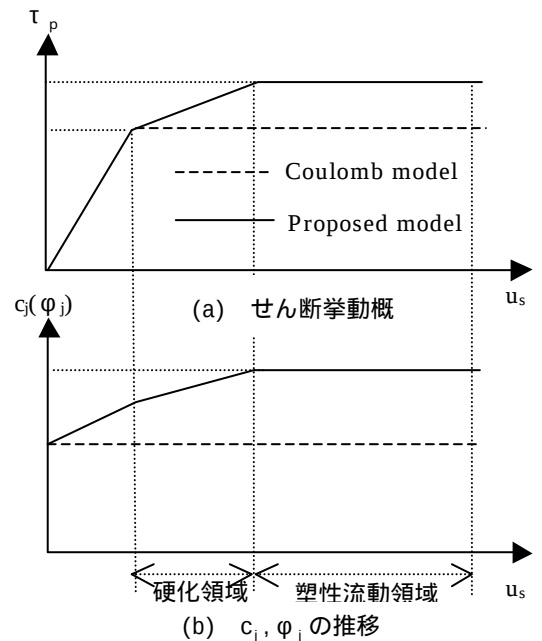


図 - 2 せん断挙動のモデル化概念

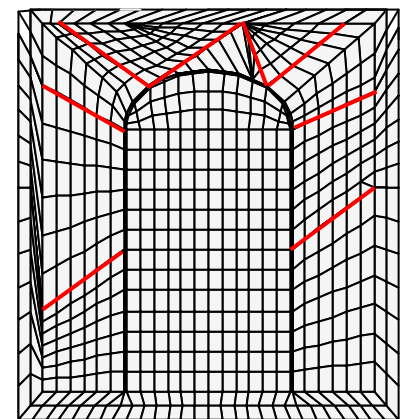


図 - 3 解析モデル

アーチ中央

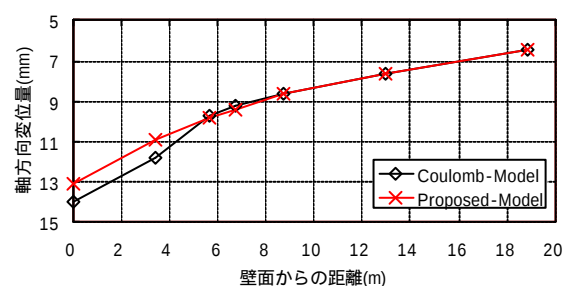


図 - 4 アーチ部中央変位量

ジョイント5

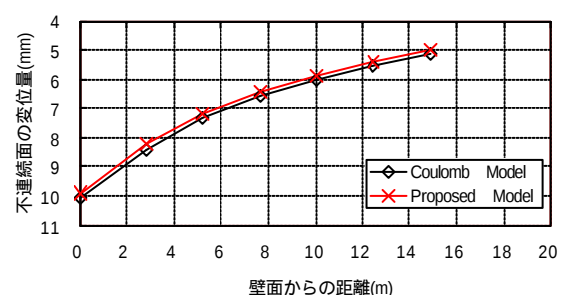


図 - 5 不連続面の変位(ジョイント5)