

不連続体解析法を用いた原位置せん断試験の数値シミュレーション

九州電力(株) 正会員 生貞幸治
九州電力(株) 正会員 溝上 建
長崎大学 正会員 蔣 宇静
九州大学 正会員 江崎哲郎

1. はじめに

岩盤構造物の安定性評価を行うため、ある調査地点にて高角度の不連続面が卓越する岩盤を対象に原位置せん断試験を実施した結果、最大せん断応力時のせん断変位(試験ブロックの水平変位で定義)が非常に大きい延性的なせん断挙動を示す特徴が認められた。本研究では、そのメカニズムを解明してせん断強度の妥当性を評価することを目的に、個別要素法に基づく不連続体解析法を用いた数値シミュレーションを行った。

2. 対象岩盤の概要と原位置せん断試験結果

対象岩盤は中生代の粘板岩で、基質部は新鮮であるが連続性の高い層理面が卓越する。その間隔は0.03m程度が主体で傾斜角は約70°と高角度のものが多い。また層理面に直交または斜交する節理も僅かに存在するが、その連続性は乏しい。このような岩盤を対象に原位置せん断試験(ブロックせん断試験)を実施した。傾斜荷重の方向は層理面の傾斜方向に対して流れ目の方向とした。図-1に示す試験結果によると最大せん断応力は突出したピーク値を示さず、そのときのせん断変位が約25mm~40mmと非常に大きい延性的なせん断挙動を示す特徴がみられる。礫岩や砂岩などの塊状岩盤を対象とした既往の試験結果¹⁾によれば、その値は10mm以内であることが多い。

3. 原位置せん断試験の数値シミュレーション

(1) 岩盤のモデル化と解析手順

図-2に示すように試験箇所付近で観察された不連続面が一様に分布する個別要素解析モデルを作成した。層理面(Set1)は間隔0.03m、傾斜角70°で連続的にモデル化した。節理(Set2)は間隔0.09mでSet1と直交する方向に千鳥状に配置した。不連続面の挙動モデルにはCoulomb滑りモデルを採用し、調査地点から採取した自然の不連続面サンプルの室内試験結果に基づいて表-1に示す力学的特性値を設定した。一方、基質部は表-2に示す力学的特性値を有する弾性体としてモデル化し、内部応力が与えられた破壊条件(Mohr-Coulomb規準を採用)に達した場合、新規の亀裂を発生させることで破壊後の挙動が表現される。ここでは新規亀裂の発生が予測される位置に予め潜在的な境界面(Set3)を定義しておく方法を取る²⁾。Set3はSet1に直交する方向に0.015mの間隔で配置した。なお、試験ブロックは試験面寸法0.6mのコンクリートブロックでモデル化した。

荷重の載荷方法は実際の試験と同じく荷重制御方式とし、

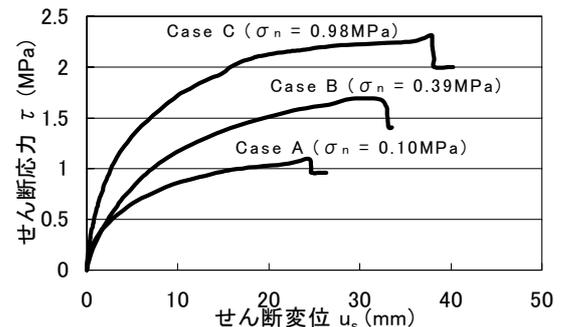


図-1 原位置せん断試験結果

表-1 不連続面の力学的特性値

垂直剛性 K_n	1.833×10^4 (MPa/m)
せん断剛性 K_s	0.088×10^4 (MPa/m)
粘着力 c	0 (MPa)
内部摩擦角	34.3 (°)
引張強度 t	0 (MPa)
ダйлーション角 i	0 (°)

表-2 基質部の力学的特性値

弾性係数 E	1.481×10^4 (MPa)
ポアソン比	0.19
密度	2.66 (g/cm ³)
粘着力 c	3.04 (MPa)
内部摩擦角	46.0 (°)
引張強度 t	1.41 (MPa)

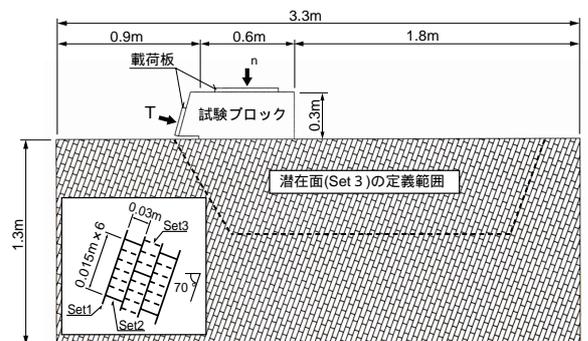


図-2 解析モデル

キーワード：原位置せん断試験，不連続体解析法，数値シミュレーション，不連続面

連絡先：〒810-8720 福岡市中央区渡辺通 2-1-82 TEL 092-761-3031 FAX 092-771-9541

初期垂直応力を 0.39MPa まで載荷して、その値を一定に保ちながら傾斜荷重を 0.02MN ステップで段階的に増加させた。傾斜荷重の増加はせん断応力増分を $\Delta\tau$ 、せん断変位増分を Δu_s とし、その比 $\Delta\tau / \Delta u_s$ が 10MPa/m に達した時点(図-1の試験結果ではほぼ最大せん断応力時に相当)の載荷ステップまで継続した。

(2) 解析結果

図-3(a)にせん断応力とせん断変位の関係を示す。解析結果は試験結果と同様に延性的なせん断挙動を示す。ただし、せん断応力の絶対値は一致しない。図-3(b)にせん断応力 3 MPa における岩盤内部の破壊現象を示す(試験面の左端を A 点、右端を B 点とする)。傾斜荷重の増加に伴い A 点付近に Set1 と Set2 の剥離が生じると同時に試験面近傍に新規亀裂が発生する。また、B 点を起点として約 20° 下方に Set2 に沿った新規亀裂も発生する。なお、発生した新規亀裂のほとんどが引張破壊によるものである。図-3(c)に試験面の 50mm 下方の岩盤に対する試験ブロックの相対水平変位分布を示す。せん断応力 1MPa の時点では相対水平変位の平均値は 0.5mm と微小である。これは比較的低いせん断応力では試験ブロックとその下部の岩盤が一体となって挙動していることを意味する。そして、せん断応力の増加に伴い試験面近傍における基質部の破壊が進行するため相対水平変位は徐々に大きくなる。解析結果から相対水平変位の平均値 ($u_b - u_r$) とせん断応力 (τ) の関係を求めると次式が得られる。

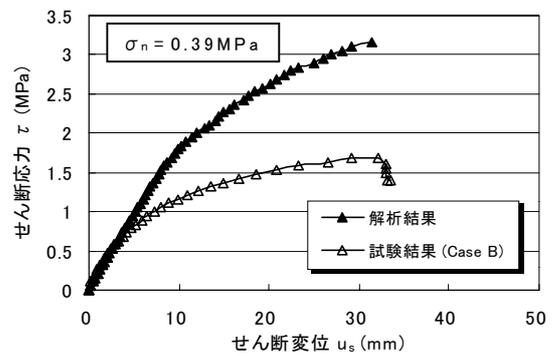
$$\frac{u_b - u_r}{u_b} = 0.083 \exp \left(0.655 \frac{\tau}{p} \right) \quad (1)$$

ここに、 u_b は試験ブロックの水平変位、 u_r は試験面の 50mm 下方の岩盤の平均水平変位、 τ はせん断応力、 p は最大せん断応力である。このように不連続面が卓越する岩盤では試験ブロックとその下部の岩盤が一体となって挙動するため、試験ブロックの背面で計測された水平変位には周辺の岩盤の変形量も含まれることになる。図-1の試験結果に式(1)の関係を適用して任意のせん断応力に対する相対水平変位を算出し、せん断応力との関係を整理した結果を図-4に示す。試験結果を相対水平変位で整理することで最大せん断応力は明瞭なピーク値を示すようになる。また、最大せん断応力時の相対水平変位は 4 mm ~ 6 mm であり、既往の試験結果¹⁾と同様の一般的な結果となる。

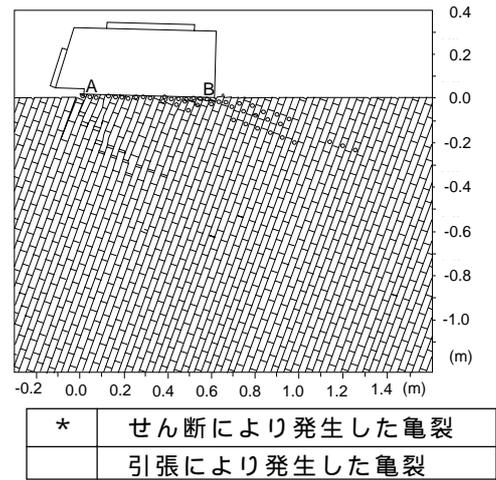
4. 結論

個別要素法に基づく不連続体解析法を用いた原位置せん断試験の数値シミュレーションを行った結果、試験結果にみられる延性的なせん断挙動は試験ブロックの移動に追従した周辺岩盤の変形に起因することが明らかとなった。

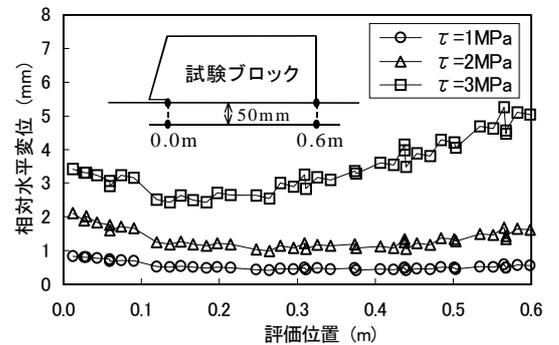
参考文献 1) 赤司六哉, 永津忠治, 溝上 建, 古賀善雄: 岩石及び岩盤の工学的諸性質, 九州電力(株)総合研究所研究報告, No.86004, pp.59-60, 1986. 2) 中川光雄, 蔣 宇静, 江崎哲郎: 個別要素法を用いた不連続性岩盤における亀裂発生・進展のモデル化, 土木学会論文集 No.631 / -48, pp.397-410, 1999.



(a) せん断応力とせん断変位の関係



(b) 岩盤内部の破壊現象 ($\tau = 3\text{MPa}$)



(c) 試験面の 50mm 下方の岩盤に対する試験ブロックの相対水平変位分布
図-3 解析結果

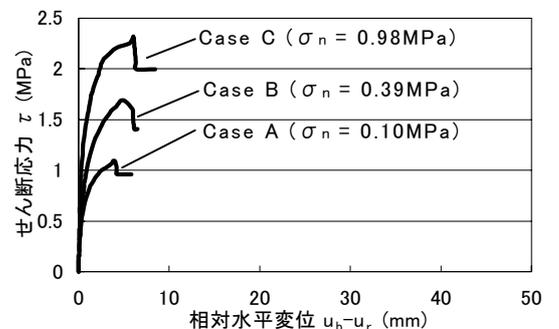


図-4 せん断応力と相対水平変位の関係