

引張応力下における岩盤のせん断挙動に関する研究 —原位置せん断試験の数値解析と強度異方性に関する検討—

東北電力(株) 正会員 ○伊藤 悟郎, 大村 英昭

1. はじめに

亀裂性岩盤斜面の地震時安定解析においては、安全側に評価することを念頭に、岩盤の引張強度は存在しないと仮定し、引張応力下のせん断強度をゼロあるいは残留強度として評価している。しかし、筆者らは既報^{1),2),3)}において、引張応力下のせん断強度を見込まないと原位置せん断試験結果を解析的に再現できないことや、引張応力下の原位置せん断試験の実施により、引張応力下においても岩盤のせん断強度が存在することを確認している。

本研究は、亀裂性岩盤を対象に、引張応力下におけるせん断強度を適切に評価することにより、岩盤斜面等の設計を合理化することを目的としており、本報文では、引張応力下の原位置せん断試験結果²⁾を複合降伏モデル⁴⁾に基づく数値解析により再現し、引張応力下におけるせん断強度の異方性について評価したことから報告するものである。

2. 原位置せん断試験の数値解析

(1) 原位置せん断試験の概要

既往の研究²⁾において亀裂性のC₁級砂岩を対象に実施した引張応力下の原位置試験の一つを数値解析の対象とした。せん断面に分布する亀裂は、表-3に示す通り、せん断方向に対して傾斜9.9度(低角度)の差し目となる亀裂群1が主体であり、その他、2種類の高角度の亀裂群が分布する。地質観察の結果、亀裂群の亀裂間隔は、亀裂群1で10cm程度、高角度の亀裂群で30cm程度である。原位置せん断試験は図-1に示すように引張垂直応力29.6kN/m²を载荷した状態で行い、図-3に示すように178.2kN/m²のせん断強度が得られた。

(2) 原位置せん断試験の数値解析

原位置せん断試験の数値解析は、亀裂性岩盤の変形と強度の異方性を考慮するために亀裂性岩盤の等価連続体解析手法の一つである複合降伏モデル⁴⁾を用いた。

同じ岩盤を対象とした既往の原位置引張試験結果³⁾から、破壊面全体に対する亀裂の投影面積の割合(以下、亀裂面積率)と引張強度には、一定の相関があることが分かっている。

一方、複合降伏モデルは亀裂を無限長と仮定するため、亀裂面積率の影響を解析に考慮することができない。そこで、図-2中に示す簡易モデル(幅30cm、高さ6cmの岩盤モデル中央に水平方向の亀裂を配置)に引張応力を与えた

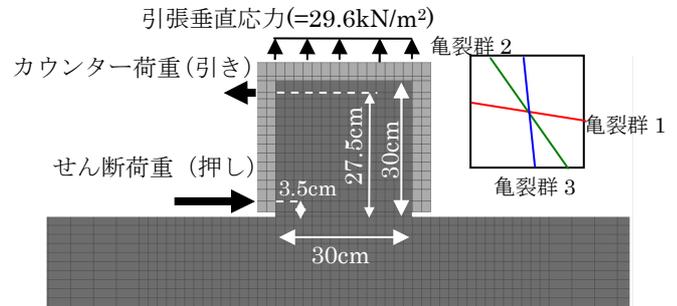


図-1 原位置せん断試験解析モデル

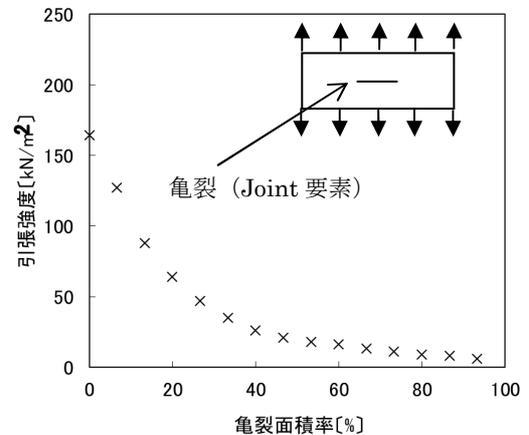


図-2 亀裂面積率—引張強度関係

表-1 岩盤基質部の解析用物性値

変形係数,	E	610 MN/m ²
ポアソン比,	ν	0.26
粘着力,	τ ₀	0.96 MN/m ²
内部摩擦角,	φ	53.0 度
引張強度,	σ _t	0.165 MN/m ²

表-2 亀裂部の解析用物性値

初期せん断剛性,	K _{ni}	6990 MN/m ³
せん断剛性の 応力依存性,	n _j	0.36
初期垂直剛性,	K _{si}	2690 MN/m ³
最大閉合量,	V _m	1mm
粘着力,	τ _{0j}	簡易モデルで評価
内部摩擦角,	φ _j	38.5 度
引張強度,	σ _{ij}	簡易モデルで評価

キーワード 亀裂性岩盤, 引張応力下のせん断強度, 亀裂面積率, 複合降伏モデル

連絡先 〒980-8550 仙台市青葉区本町1丁目7-1 TEL022-799-6103 土木建築部(火力原子力土木)

場合の、亀裂の長さや引張強度の関係を評価し、この関係を亀裂の引張強度として複合降伏モデルに考慮した。図-2に簡易モデルの解析で得られた亀裂面積率-引張強度関係を示す。亀裂面積率とせん断強度の関係についても同様の簡易モデルの解析により、亀裂のせん断強度として複合降伏モデルに考慮した。

原位置せん断試験の数値解析で用いる解析用物性値を表-1、表-2に、亀裂群の幾何学的情報を表-3に示す。これらの物性値は岩石コアの三軸圧縮試験、一軸圧縮試験、岩盤不連続面の一面せん断試験の試験結果より設定した。なお、岩盤基質部の引張強度 σ_t は、数値解析により原位置試験強度が再現できるようにコアの一軸引張試験結果(0.22MN/m²)より小さな値とした。原位置せん断試験の数値解析で得られたせん断応力-水平変位関係を図-3に示す。

(3) 引張応力下のせん断強度の異方性

原位置せん断試験を実施した供試体の亀裂群の傾斜角を基準として、せん断荷重の作用方向を回転させた場合における、引張応力下におけるせん断強度の異方性を定量的に評価した。なお解析上は、亀裂群の傾斜角を回転(以降これを回転角度と呼ぶ)させることにより数値解析を行った。回転角度は22.5度きざみに加え、各亀裂群が水平になる角度について検討した。なお、亀裂群が水平になる角度とは、亀裂群とせん断荷重の作用方向が一致する角度を意味する。

図-4にせん断荷重の作用方向とせん断強度の関係を示す。せん断強度が最小となるのは、亀裂群1が水平となる角度(170.1度=180度-9.9度)であった。亀裂面積率がわずかである亀裂群2や3についても、亀裂群が水平となる角度(124.7度、95.2度)においてせん断強度の低下がみられる。亀裂群とせん断荷重の作用方向が一致する場合においても、ある程度の強度は存在し、回転角度によるせん断強度のばらつきは約3倍程度だった。

3. おわりに

複合降伏モデルによる亀裂性岩盤解析手法を用いることにより、亀裂性岩盤の引張応力下におけるせん断強度の異方性を定量的に評価できることがわかった。数値解析の結果、亀裂性岩盤では、引張応力下におけるせん断強度の異方性は大きく、3倍程度のばらつきが確認された。

本研究を進めるにあたり、東北大学京谷教授、風間教授にご助言を頂いたことに感謝致します。

参考文献

- 1)伊藤他:引張応力下における岩盤のせん断挙動に関する研究-亀裂性岩盤を対象としたロックせん断試験の数値解析-, 土木学会第65回年次学術講演会, III-200, 2011
- 2)伊藤他:引張応力下における岩盤のせん断挙動に関する研究-亀裂性岩盤を対象とした原位置せん断試験装置の開発と試験結果-, 土木学会第66回年次学術講演会, III-379, 2012
- 3)大村他:引張応力下における岩盤のせん断挙動に関する研究-亀裂性岩盤を対象とした原位置引張試験-, III-380, 2012
- 4)佐々木他:有限要素法による節理性岩盤の複合降伏モデルに関する研究, 土木学会論文集 No.505/III, pp.59-68, 1994

表-3 亀裂群の幾何学的情報

亀裂群	傾斜角度 [※]	亀裂面積率	亀裂間隔
亀裂群1	9.9度	15.7%	10cm
亀裂群2	55.3度	1.1%	30cm
亀裂群3	84.8度	0.1%	30cm

※水平から時計回りに正

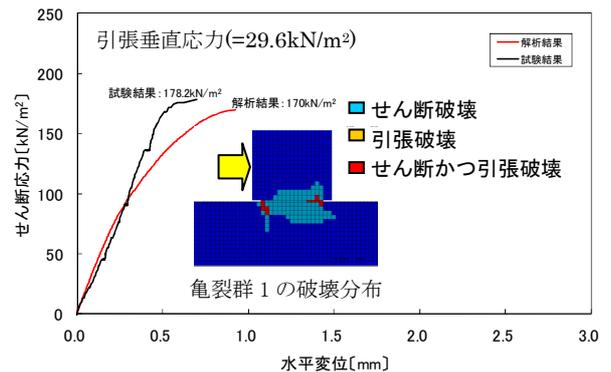


図-3 せん断応力-水平変位関係

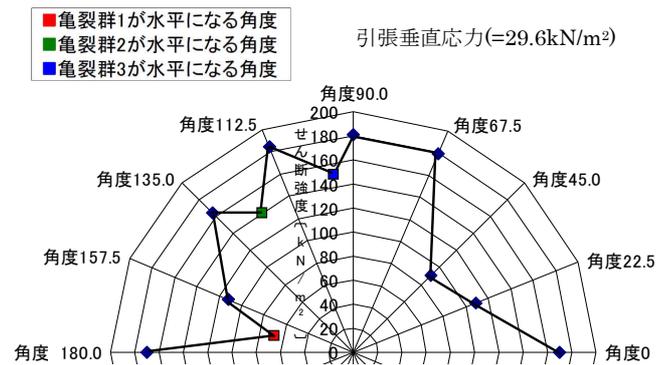


図-4 せん断荷重の作用方向とせん断強度の関係