

亀裂性岩盤のためのダイレタンシー角を考慮した非線形クラックモデルの開発

株式会社大林組 正会員 ○中岡 健一

1. はじめに

亀裂は岩盤の弱部であるため、掘削などによって外力が作用すると、亀裂が入っていない岩質部よりも亀裂の方に変位が発生する。そのため、亀裂の強度、変形特性は岩盤の挙動に大きな影響を及ぼす¹⁾。筆者は弾性体の岩質の中に亀裂が内在する連続体モデルを開発している²⁾。このモデルは、亀裂のせん断力が強度を超えると非線形のずれが生じるもので、本報告では、まず粘着力に加えて摩擦角とダイレタンシー角も考慮できるモデルを示す。ただし、ここではせん断ばねを考慮せず、亀裂はせん断力がせん断強度を超えるまではずれないものとした。次に、仮想したトンネルの掘削解析を行い、ロックボルトの効果に着目して解析の妥当性を確認した。その結果、ロックボルトの軸力は亀裂のずれが進んだ領域において大きく、ダイレタンシーを考慮すればさらに大きくなった。考察からこの傾向は妥当であり、モデルは適切に構築できていると判断した。

2. 数値モデルの概要

図—1に、有限差分コードに組み込む亀裂モデルの模式図を示す。スライダは粘着力と摩擦角によるせん断強度を表す。岩盤に、法線ベクトル n_i の亀裂が複数内在しており、これらの平均的な亀裂のずれや、開口・閉口による変位を δ_i とすると、要素の平均的なひずみ ε_{ij}^I は変位—ひずみの関係から式(1)によって表される。

$$\varepsilon_{ij}^I = \frac{S}{2V} (\delta_i n_j + \delta_j n_i) \quad (1)$$

S は同じ物性で表される領域に含まれる亀裂の面積の合計、 V はその領域の体積である。亀裂の方向が複数の場合、それぞれの方向についての式(1)の結果を足すことにより、連続体としてのひずみが求められる。図—2に収束計算の流れを示す。繰り返し計算への入力である変位増分 Δu からひずみ増分 $\Delta \varepsilon$ 、応力増分 $\Delta \sigma$ 、 σ の順に求め、 σ から亀裂に働くせん断力 τ と垂直力 p を求める。 τ がせん断強度よりも大きければ、せん断方向に微小なずれ $\Delta \delta$ を加える。 $\Delta \delta$ と式(1)から求められる新たな σ から、不釣り合い力を求める。不釣り合い力から Δu を求め、つぎのステップの計算を行う。

3. 解析条件

表—1に掘削解析に用いる物性を示す。ヤング率はCIIクラスの値に相当し、ロックボルト(RB)もCIIパターンとした。吹付と鋼製支保工はRBの効果を確認するため考慮しない。ダイレタンシー角 ψ と摩擦角は亀裂のせん断試験の報告³⁾から設定した。解析モデルはトンネル軸方向に厚みを持つものの、軸方向の変位を固定して平面ひずみ状態とした。考慮した亀裂は図—6に示すように、 45° の傾斜をもつ2系統とした。また、土被りは160m、単位体積重量は 22.5 kN/m^3 とした。初期応力状態で2,000 step 予備の収束計算を行った後、掘削を5,000 stepの荷重増分で行い、その後2,000 step追加して収束計算を行った。式(1)の左辺の係数は1とした。この場合、亀裂間隔は50cmである。解析ケースを表—2に示す。

4. 解析結果

図—3に、図—6に示す着目要素の亀裂(系統1)に作用する垂直力、せん断力、垂直力から求めたせん断強度、

表—1 入力物性値

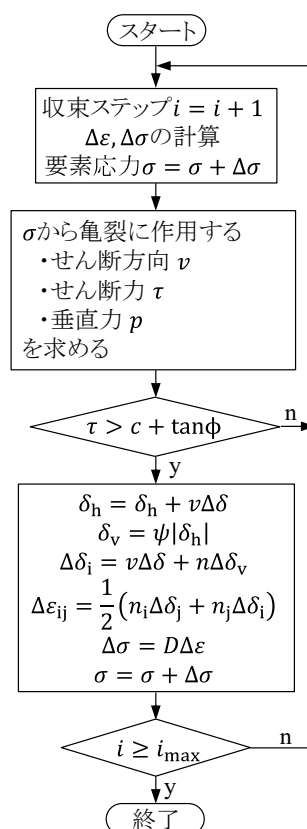
ヤング率 (MPa)	1,000
ポアソン比	0.25
粘着力 (Mpa)	0.1
摩擦角 (°)	30
ダイレタンシー角 (°)	0, 17

表—2 解析ケース

Case	ψ	RB
1	0°	なし
2	0°	あり
3	17°	なし
4	17°	あり



図—1 亀裂モデルの模式図



図—2 収束計算の流れ

キーワード 亀裂性岩盤、等価連続体、非線形モデル、亀裂モデル

連絡先 〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640 大林組技術研究所 Tel : 042-495-1015

ずれ量を示す。着目要素における亀裂の法線と壁面のなす角度は 64° であり、応力は壁面に沿った 1 軸状態であるとし、弾性状態を仮定すると、解放率 100 % (7,000 step) において予想される垂直力は約 1.4 MPa である。図では、垂直力の低下とともに、せん断強度も低下し、約 5,000 step でせん断力と一致してずれが生じ始めている。その時点までの垂直力は、7,000 step において約 1.4 MPa となる勾配で低下し、非線形のずれが生じると、壁面に沿った圧縮力が弾性状態に比べて小さくなるため、垂直力が低下する勾配が大きくなっている。

図—4 に各ケースの天端沈下量を示す。 $\psi = 17^\circ$ のケースはダイレタンシーによって岩盤が膨張するため、 $\psi = 0^\circ$ のケースよりも沈下量が多い。また、この膨張はロックボルトの軸力を増やす。この軸力は壁面変位と逆向方向であるため、 $\psi = 17^\circ$ のケースのロックボルトが沈下量を抑制する効果 (Case 3 と 4 の差) の方が、 $\psi = 0^\circ$ のケース (Case 1 と 2 の差) よりも大きい。

図—5 に Case2 と 4 のロックボルトの軸力を示す。亀裂の配置は左右対称であるため、軸力も左右対称である。 $\psi = 17^\circ$ のケース (黒色のプロット) の方が、 $\psi = 0^\circ$ (赤色のプロット) よりも大きな軸力が発生しており、前述の図—4 と同様の傾向となっている。左端から 4 番目と、右端から 4 番目のロックボルトの位置では、主応力の方向が亀裂と垂直、または平行であるため、2 つの系統の亀裂にはせん断力が働かず、非線形のずれが生じない。そのため、ロックボルトの軸力が小さく、別途実施した弾性モデルの結果に近い。

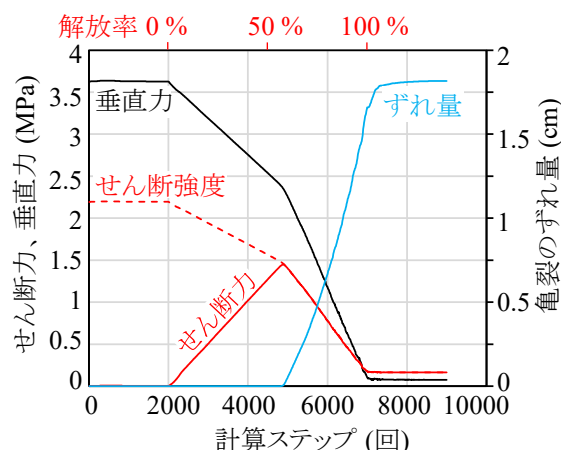
図—6 に Case3 と 4 の、系統 1 の亀裂のずれ量の分布を示す。ロックボルトによって亀裂のずれが抑制されている。系統 2 の亀裂のずれ量の分布が、系統 1 の分布の対称となっていることを考慮すると、ずれ量の大きい領域のロックボルトの軸力が大きい傾向が見られる。これらのことから、開発したモデルは非線形の亀裂が内在する岩盤におけるロックボルトの効果を評価できると考える。

5. まとめ

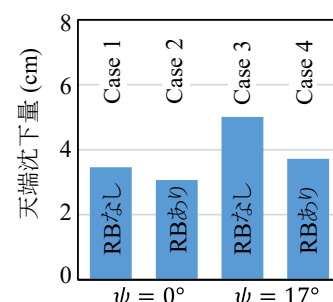
亀裂の強度定数として粘着力、摩擦角、ダイレタンシー角を考慮した非線形クラックモデルを開発し、有限差分法に組み込んだ。トンネル掘削解析を行い、着目要素の垂直力とせん断力の関係が妥当であることを確認した。ダイレタンシーを考慮すると、ずれが生じた要素が膨張するため、ロックボルトの軸力が大きくなり、天端沈下の抑制効果も大きくなった。また、軸力が大きい領域は、亀裂のずれ量が多い領域と一致した。以上から、非線形クラックモデルは適切に構築されているものと判断した。

参考文献

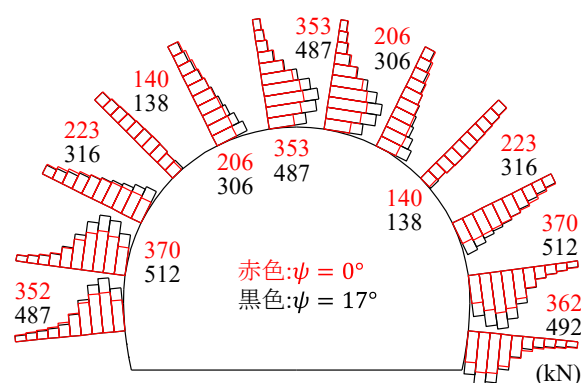
- 1) 矢野他: 垂直剛性一定一面せん断時の岩盤不連続面のせん断挙動, 土木学会論文集 No. 729/III-62, 115-130, 2003. 2) 中岡: 亀裂性岩盤のための非線形クラックモデルの開発, 土木学会第 77 回年次学術講演会, III-154, 2022. 3) 畑他: 土岐花崗岩中の割れ目を対象としたジョイントせん断試験, JNC TJ7430 2001-002, 2001.



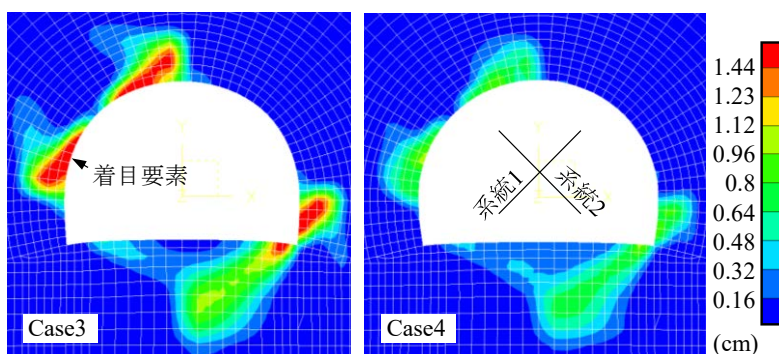
図—3 着目要素の亀裂の挙動 (RBなし、 $\psi = 17^\circ$)



図—4 各ケースの天端沈下量



図—5 ロックボルトの軸力



図—6 亀裂のずれ (左: RBなし、右: RBあり、 $\psi = 17^\circ$)