

## ダイレタンシーがトンネルの変位と岩盤のひずみ分布におよぼす影響についての検討

大林組 技術研究所 正会員 ○中岡 健一 正会員 畑 浩二  
大林組 トンネル技術部 正会員 木梨 秀雄

## 1. はじめに

トンネル掘削解析において、ダイレタンシー角 $\psi$ を考慮せず0とする場合は、せん断ひずみの大きな領域はトンネルから帯状をなして地表に向かって伸び、考慮すれば、その領域はトンネル周辺に集中することが示されている<sup>1)</sup>。そのため $\psi$ は、地山の変形係数や強度定数などと共に、解析結果に影響をおよぼす重要なパラメータであると考え、一方、トンネルの数値解析に関する報告を調べると、解析条件として $\psi$ が示されている割合は少なく、その扱いの重要度は低いと言える。同じように、ダイレタンシー角 $\psi$ をパラメータとして内空変位や周辺岩盤のひずみ分布に及ぼす影響を明確にした報告は見られない。内空変位は地山の安定性を評価する指標になり得ることが示されており<sup>2)</sup>、重要な量と言える。本報告の目的は $\psi$ が内空変位に及ぼす影響や、ひずみ分布に及ぼす影響を示すこととする。

## 2. 解析条件

## 1) 材料モデル

本報告で用いる岩盤は Drucker-Prager の降伏条件を用いた弾塑性モデルとし、ひずみ軟化を考慮する。降伏関数を式(1)に示す。 $I_1$ と $J_2$ は応力の第一不変量と偏差応力の第二不変量を表す。

$$f = -\alpha I_1 + \sqrt{J_2} + \kappa \quad (1)$$

## 2) 岩盤物性

表-1に岩盤物性を示す。式(1)の $\alpha=0.2$ は内部摩擦角 $26.3^\circ$ に相当する。 $\psi$ と $\kappa$ はパラメータとし、 $\psi$ は0から関連流れ側となる $26.3^\circ$ 、 $\kappa$ はトンネルが自立する下限値から十分自立する範囲で設定した。ここで、 $\kappa$ は粘着力に相当する。その結果、D級相当の強度となり、変形係数もD級相当の値とした。岩盤が破壊すると $\kappa$ は初期値から0.2倍、 $\alpha$ は0.8倍まで低下すると仮定した。 $\psi$ は拘束圧やひずみレベルによって変化することが示されている<sup>1,3)</sup>ものの、ここでは $\psi$ と解析結果との単純な関係を調べるため一定とした。上述した岩盤の変形、応力特性として、図-2に $\kappa=0.5$  N/mm<sup>2</sup>とした一軸、および、三軸圧縮試験の1要素解析の結果を示す。図中、赤破線は体積ひずみの塑性成分である。

## 3) 解析モデル

ダイレタンシー角以外の影響を除くために、トンネル形状は円形とし、無支保とした。図-2に解析モデルを示す。モデル上面は地表まで、モデル側方と下方は300mの領域をモデル化した。境界条件は、モデル上面は自由、側方と下方は固定し、二次元平面ひずみ状態の解析を行った。1ステップは自重解析、2ステップは掘削解析とし、有限差分法を用いた。

## 4) 初期地圧

土被りは100mとし、地山の単位体積重量を21 kN/m<sup>3</sup>として、自重を考慮した。側圧係数はトンネル軸方向も含めて1とした。

表-1 岩盤物性

| D<br>N/mm <sup>2</sup> | $\nu$ | $\alpha$                | $\kappa$<br>N/mm <sup>2</sup> | $\psi$ |
|------------------------|-------|-------------------------|-------------------------------|--------|
| 500                    | 0.35  | 0.2<br>( $26.3^\circ$ ) | パラメータ                         |        |

D: 変形係数、 $\nu$ : ボアソン比、 $\psi$ : ダイレタンシー角

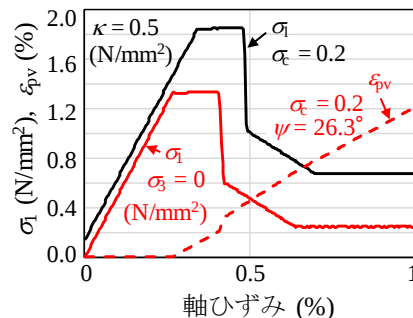


図-1 要素試験の計算結果

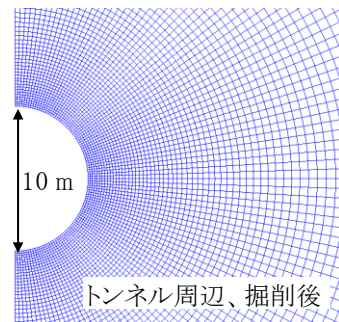


図-2 解析モデル

キーワード ダイレタンシー、ひずみ軟化、トンネル掘削解析、弾塑性解析

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 042-495-9603

### 3. 解析結果

図-3 にダイレタンシー角  $\psi$  と壁面変位の関係を示す。解析ステップは 20,000 とした。  $\kappa=0.2, 0.4, 0.6 \text{ N/mm}^2$  のとき、一軸圧縮強度  $q_0=0.54, 1.07, 1.60 \text{ N/mm}^2$  である。  $\psi$  は、  $q_0$  には影響しない。図-3(上)は壁面全体の平均変位で、変位によって減じられたトンネルの断面積を壁面周長で除して求めた。図-3(下)は壁面変位の最大である。図-3(上, 下)から、  $\kappa$  が大きいほど岩盤の強度が高まるため、変位は小さくなる。図-3 下の  $\triangle$  印は 200,000step までの計算結果であり、  $\blacksquare$  と重なっていることから、  $\psi \leq 20.6^\circ$  の計算では収束している。ただし、  $\psi=26.3^\circ$  ,  $\kappa=0.3 \text{ N/mm}^2$  のケースは 200,000step においても収束傾向は見られなかった。一方、  $\kappa=0.4 \text{ N/mm}^2$  のケースでは、全ての  $\psi$  について計算は収束した。図-3 から  $\psi$  が大きくなれば、内空変位は線形的ではなく、加速的に大きくなることが分かる。  $\kappa=0.2 \text{ N/mm}^2$  のケースでは、  $\psi=7.2^\circ$  ,  $13.8^\circ$  のケースは収束し、  $0^\circ$  ,  $20.2^\circ$  ,  $26.3^\circ$  のケースは収束しない結果となり、今回の計算では、  $\psi$  と解析上のトンネルの自立性との間には一定の関係を持たない。また、解析上、トンネルが自立する  $\kappa$  の下限値は  $0.2 \sim 0.3 \text{ N/mm}^2$  程度と判断できる。

図-4 に、解析最終 step における最大せん断ひずみの分布を示す。図から、  $\psi$  が  $13.8^\circ$  よりも小さいケースはせん断ひずみの大きい領域が帯状に延び、分布の傾向も近似的である。一方、  $\psi$  が  $20.2^\circ$  よりも大きければ、帯状の分布は見られなくなり、せん断ひずみの大きい領域は塊状へと変化する。

#### まとめ

- ・ 内空変位は、  $\psi$  がある値、本検討では  $26.3^\circ$  において急増する。それは粘着力が低い地山ほど顕著になることが分かった。
- ・ せん断ひずみの分布形状は、  $\psi$  の増加とともに線状から塊状に変化し、報告されている結果<sup>1)</sup>と同じ傾向となることを確認した。今回の検討では、その変化が生じる  $\psi$  は、本検討では  $20.2^\circ$  であった。
- ・  $\psi$  を大きくすると拘束圧が高まり、地山は安定化すると考えたものの、壁面はたとえ円形であっても自由面であり、そのような効果は生じないことが分かった。ただし、支保工があれば、ダイレタンシーによる拘束効果が発揮される可能性があると考え。

#### 参考文献

- 1) 中川光雄：トンネル掘削解析における実用的なひずみ軟化モデルの提案と適用，土木学会論文集 F1，2014。
- 2) 櫻井春輔：NATM における現場計測と管理基準値，土と基礎，1986。
- 3) 大槻英夫，田坂嘉章，鈴木康正，大森剛志，岸田潔，足立紀尚：土・水連成ひずみ軟化型弾粘塑性モデルの拡張と堆積軟岩空洞掘削問題への適用，第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，2006。

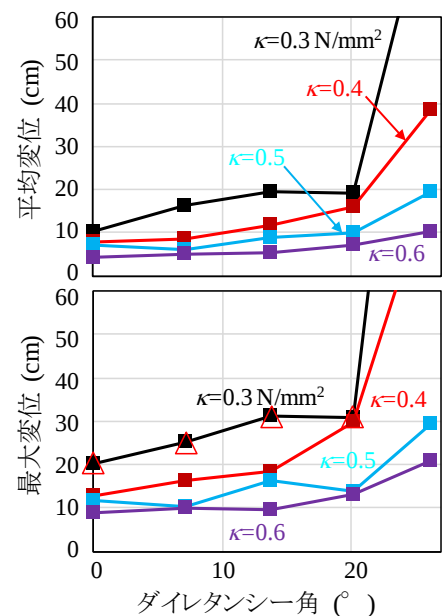


図-3 壁面変位

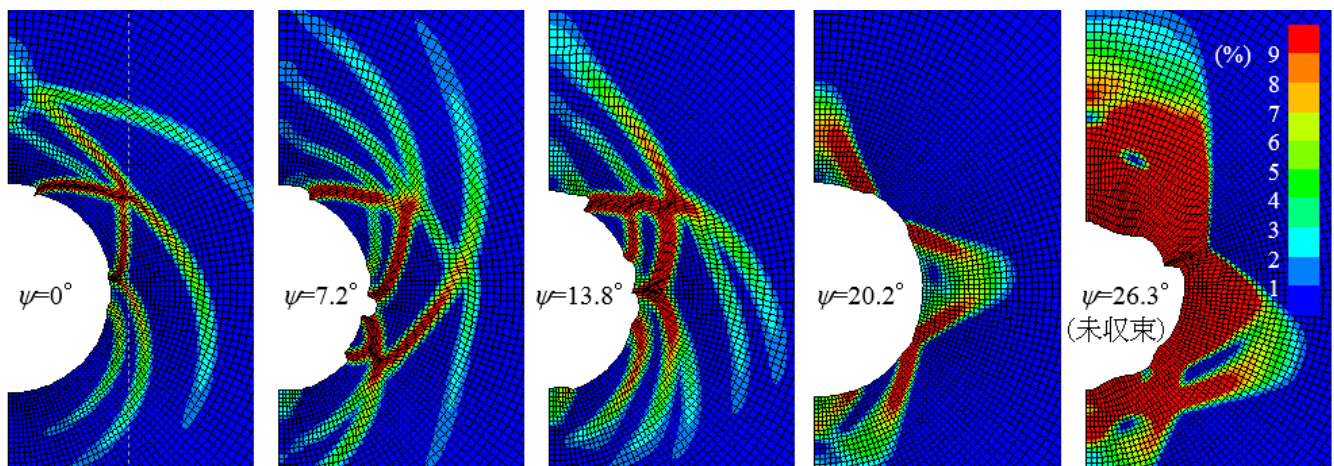


図-4 最大せん断ひずみの分布 ( $\kappa=0.3 \text{ N/mm}^2$ )  $\psi=0 \sim 13.8^\circ$  : 変形は5倍、 $\psi=20.2, 26.3^\circ$  変形は実スケールで描画