

Hoek-Brown の破壊基準を適用したクリープモデルの開発

株式会社大林組 技術研究所 正会員 ○中岡健一 畑浩二

1. はじめに

山岳トンネルにおける膨張性による変状、あるいは、供用中の盤膨れなどの変状を予測するため、クリープモデル¹⁾が開発されている。このモデルは、一次クリープ～三次クリープと、ひずみ軟化を区別なく評価できることが特徴となっている。ただし、クリープの進行速度を定めるために、Drucker-Prager による破壊基準が用いられていた。

一方、岩盤の強度特性をより適切に表すために提案された、Hoek & Brown による破壊規準 (HB 破壊規準) を適用した弾塑性モデル²⁾も開発されている。そこで、筆者らはクリープモデルの精度を向上させるため、HB 破壊規準を適用したクリープモデルを開発した。本報告は、HB 破壊規準のクリープモデルへの適用方法と、開発したモデルによる試計算の概要を述べる。

2. クリープモデルの概要¹⁾

クリープモデル¹⁾の詳細については既に報告しているため、ここでは概要を述べる。本モデルは、クリープの進行を無次元のスカラ量で表すことができるものとし、その値を s とおいた。そして s は式(1)に則った速度 \dot{s} で増加するものとした。

$$\dot{s} = \frac{\alpha}{f(p) \cdot g(s)} \quad (1)$$

$$p = \sqrt{2J_2} \quad (2)$$

ここで、 J_2 は第二不変量である。 $f(p)$ と $g(s)$ は式(3)と式(4)のようにおいた。

$$f(p) = \exp\{q(c + \sigma_n \tan \phi - p)\} \quad (3)$$

$$g(s) = \exp\left\{-\left(\frac{s - a_v}{\sqrt{2}b_n}\right)^2\right\} \quad (4)$$

ただし、 σ_n は平均応力であり、 α 、 q 、 a_v 、 b_n は時間に関するパラメータ、 c と ϕ は強度定数である。このモデルでは、式(2)に示す p がリラクゼーションによって時間とともに、式(5)に則って低下するものとした。

$$\Delta p = \frac{kp^2 \Delta t s}{\sigma_n} \quad (5)$$

ここに、 k は入力パラメータ、 σ_n は平均応力、 Δt は時間刻みである。クリープ解析は式(5)から得られた Δp を用いた応力の修正を、繰り返し行いながら進める。

3. Hoek & Brown による弾塑性モデルの概要²⁾

Hoek & Brown (HB) 弾塑性モデル²⁾の概要を以下に述べる。HB の破壊規準は式(6)で表される。

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(\frac{m\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{\frac{1}{a}} \quad (6)$$

ここに、 σ_1 と σ_3 は最大・最小主応力、 σ_c は一軸圧縮強度、 a 、 m 、 s は材料パラメータである。 π 平面上において、HB 破壊規準は図-1 の赤色線のように表される。本研究では、降伏曲面が HB 破壊規準に外接する楕円を組み合わせることで、降伏関数を定式化した。解析過程において、応力が降伏曲面の内側にある場合は弾性体で、降伏曲面に達すれば塑性ひずみ $d\varepsilon^p$ が発生する。主応力空間における $d\varepsilon^p$ の方向は、 $d\varepsilon^p$ の π 平面への投影が、図-1 の降伏曲面に直角になるとした。ダイレタンシー角に対応する静水圧軸方向の方向については (図-1 では面外方向の角度)、入力値として設定できるようにした。降伏関数は $d\varepsilon^p$ を定式化し、弾塑性構成則を求められるように、応力の不変量によって記述されている。

4. Hoek & Brown とクリープ統合モデルの定式化

図-2 に示すように、降伏曲面 F_b の主応力空間における π 平面上の断面を L_b 、解析過程の現応力 σ_{ijA} を点 A 、静水圧軸を点 E とする。点 E と点 A を通る直線と L_b との交点を点 B とし、その点の応力を σ_{ijB} とすると、リラクゼーションによる π 平面上での応力の変化 $d\sigma_{ij}$ の方向は、点 B における L_b の法線に一致するものとした。また、リラクゼーションの速さを定める式(3)の q を係数とする強度定数および p を含む項の代わりに、点 A と L_b との距離を用いた。 σ_{ijB} は HB 破壊規準式²⁾と σ_{ijA} から求められる。このように、点 E 、 A 、 B が直線上に並ぶ場合、 σ_{ijA} と σ_{ijB} の偏差応力を s_{ijA} と s_{ijB} とすると、簡単な計算から、式(7)の関係が得られる。

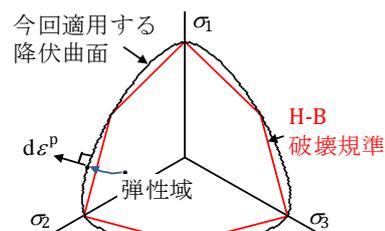


図-1 π 平面上における降伏曲面

キーワード：クリープモデル、Hoek & Brown 破壊規準、リラクゼーションモデル

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

$$\sigma_{ijA} = \beta(\sigma_{ijB} - \delta_{ij}\sigma_{mB}) + \delta_{ij}\sigma_{mB}, \quad s_{ijA} = \beta s_{ijB} \quad (7)$$

ここで、 σ_{mB} は σ_B の平均応力で、 β は s_{ijA} と s_{ijB} の第2不変量 J_{2A} と J_{2B} を用いて

$$\beta = \sqrt{\frac{J_{2A}}{J_{2B}}} \quad (8)$$

となる。破壊規準式²⁾を f とすると、 $d\sigma_{ij}$ は未知数 λ を用いて式(9)によって求められる。

$$d\sigma_{ij} = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ijB}} \quad (9)$$

$d\sigma_{ij}$ の主応力空間におけるベクトルを v_B とすると、幾何学的に、 v_B の π 平面上への投影 v_{BP} は L_b に垂直となる。式(8)から、 J_{2A} が J_{2B} の β 倍になるため、点Aは L_b を、点Eを中心に β 倍に拡大、または、縮小した曲線 L_a 上にあり、幾何学的に v_{BP} は L_a に対しても垂直となる。ここで、リラクゼーションによる応力変化の方向を $d\sigma_{ij}$ とする場合、点A₁から、 $\sigma_{ijA} + d\sigma_{ij}$ までのベクトル v_A が、 v_B と等しいことを示す必要がある。

主応力空間において、 v_B の方向が λ に関わらず一定である場合、 σ_{ijB} の主応力を σ_{iB} 、応力 $\sigma_{ijB} + d\sigma_{ij}$ の主応力を $\sigma_{iB} + nq_1$ とすると、式(10)で表される関係が得られる。

$$(\sigma_{iB} + nq_1) \begin{Bmatrix} n_{11} \\ n_{12} \\ n_{13} \end{Bmatrix} = \{\sigma_{ijB} + \lambda d\sigma_{ij}\} \begin{Bmatrix} n_{11} \\ n_{12} \\ n_{13} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

ここで、 $n_{11} \sim n_{13}$ は $\sigma_{ijB} + d\sigma_{ij}$ の主応力の方向である。式(10)を展開すれば、任意の λ において、この式を満たすためには、 $n = \lambda$ となること、 q_1 は $d\sigma_{ij}$ の主応力に等しいこと、 σ_{ijB} と $d\sigma_{ij}$ の主応力の方向は一致することが得られる。次に、式(7)から、簡単な計算により、 σ_{ijA} と σ_{ijB} の主応力の方向は等しいことが分かる。以上から、 σ_{ijA} と $d\sigma_{ij}$ の主応力の方向は一致し、 $v_A = v_B$ となる。

5. 試計算

本研究で構築したクリープモデルを用いて、1要素モデルのリラクゼーション解析を行った結果を図-3に示す。初期応力(7通り)を設定し、節点の変位を固定して時間を進める解析を行った。また、ダイラタンシーは考慮せず、そのため、応力は π 平面上を移動することになる。用いたパラメータを表-1に示す。図中、赤色の曲線は降伏曲面の断面で図-2の L_b に相当する。青色線は L_b を、静水圧軸を中心として9通りのスケールに縮小したもので、○印のプロットが施された黒色線が、リラクゼーションによって変化する応力の経路である。応力経路の L_a に近い方の端部(白抜き○)が初期応力で、いずれの応力経路も時間とともに、せん断力が小さくなり、静水圧軸に近づいている。各応力経路は降伏曲

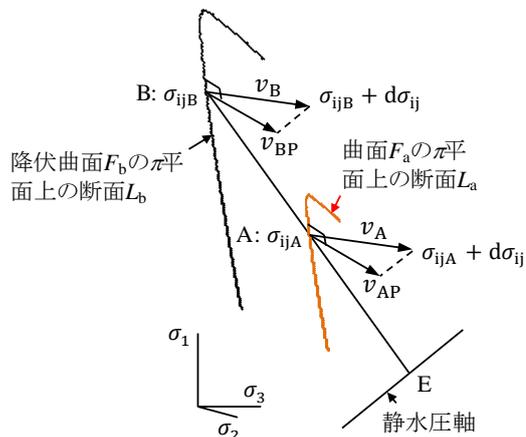


図-2 主応力空間上の応力と π 平面上の降伏曲面

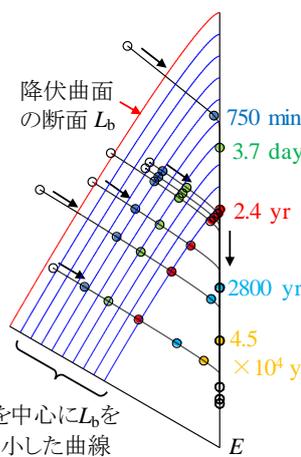


図-3 リラクゼーションによる応力の変化

表-1 試計算の入力パラメータ

パラメータ	値	根拠
α/min	10^{-3}	文献 ¹⁾
q	21	文献 ¹⁾
a_v	300	文献 ¹⁾
b_n	40	文献 ¹⁾
k	0.01	文献 ¹⁾
σ_c/MPa	22	仮定
a	2	一般的値
m	3	亀裂の少ない岩盤
s	0.02	

面の断面や、それを縮小した曲線に垂直であり、定式化とコーディングは妥当に行われていると考える。

6. まとめ

本報告では、既存のクリープモデルの精度向上のために、Hoek & Brownの破壊規準を適用した。次に、試計算を行い、ダイラタンシーを考慮しない場合の妥当性を確認した。今後は、ダイラタンシーを考慮した場合の妥当性の確認、トンネルの掘削解析への適用を通じた検証などが課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 中岡健一, 畑浩二, 蔣宇静: 岩石のクリープとひずみ軟化を評価する数値モデルの提案, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol. 70, No.3 (特集号), pp. I_43 - 56, 2014.
- 2) 中岡健一, 畑浩二, 蔣宇静: 一般化 Hoek - Brown の破壊規準に基づいた三次元弾塑性モデルの構築, 第 14 回岩の力学シンポジウム, 2017.