

モンテリ国際共同研究プロジェクトにおける岩盤力学解析試験

（株）大林組 正会員 ○山本修一、河村秀紀、志村友行

NAGRA Peter Blümling BGR Hans-Jochen Alheid

ANDRA Corinne Bauer IRSN Jean-Yves Boisson

1. はじめに

一般に比較的堅固な堆積岩は高レベル放射性廃棄物地層処分における母岩の1つの候補と考えられており、スイスにおいては北部地域に堆積するオパリナスクレイが検討の対象となっている。モンテリ国際共同研究プロジェクト¹⁾では、スイス北西部のモンテリ地下岩盤研究所において、各種の試験研究プロジェクトが実施されているが、堆積岩オパリナスクレイの力学挙動の調査・評価は最も重要な検討事項の1つとなっている。本報文では、モンテリプロジェクト：岩盤力学解析試験（RA: Rock mechanics Analyses）の概要を紹介する。

2. 概要

RA 試験は、原位置および室内試験データに基づいて、処分概念の成立性評価および処分施設の設計・性能評価に必要な力学挙動予測モデルの開発と検証を目的に、1999 年から5機関の共同研究として進められている。検討内容は以下の通りである。

- (1) オパリナスクレイに対する過去の岩盤力学試験（原位置・室内両試験）をレビューして試験手法・取得データの品質検証を行い、信頼性の高いデータをデータベースとしてとりまとめる。
- (2) そのデータに基づいて力学的な（変形・破壊）メカニズム、プロセスを考察し、それを記述する概念モデルを構築する。
- (3) 変形破壊挙動を適切に表現する構成則を開発し、数値解析と原位置試験結果との比較に基づいてその妥当性を検証する。

表-1 オパリナスクレイの物性値

パラメータ		パラメータ値
密度／		2.45±0.03／
乾燥密度 (g/cm ³)		2.34±0.06
土粒子密度 (g/cm ³)		2.71±0.03
含水比 (%)		6.1±1.9
間隙率 (%)		13.7±3.1
飽和度 (%)		100
ヤング率 (GPa) (等方性を仮定)		6
ポアソン比		0.27
一軸圧縮強度 (MPa)	堆積面に垂直	16
	堆積面に平行	10
一軸引張強度 (MPa)	堆積面に垂直	1
	堆積面に平行	2
粘着力 c' (MPa)		1~5 (異方性)
内部摩擦角 φ' (度)		23~25 (異方性)
膨潤応力	堆積面に垂直	1.2
	堆積面に平行	0.6
透水係数 (m/sec)		8×10 ⁻¹⁴ ~2×10 ⁻¹³ (異方性)

3. オパリナスクレイの特徴

モンテリ地下岩盤研究所のオパリナスクレイは中生代の三畳紀、ジュラ紀に沿岸～浅い海洋環境下で堆積した、比較的固結度の低い頁岩、泥岩から成る。このオパリナスクレイ層は現在土被り約 300m に位置するが、過去には少なくとも 1000m 分の土圧を経験していると見られており、過圧密状態にある。モンテリオパリナスクレイの代表的な組成は、粘土鉱物 10-40%、石英 5-40%、方解石 1-5%、菱鉄鉱 1-5%、黄鉄鉱 0-1.7%、有機物 0.1-0.5%である。

オパリナスクレイの力学的特徴は、その変形強度特性が含水比に強く依存すること、強い異方性を示すこととである。過去に実施された種々の岩盤力学試験（原位置・室内両試験）をレビューして、推奨値としてとりまとめた岩盤力学パラメータのうち代表的なものを表-1 に示す。

4. 微視的概念モデルの解析

堆積岩における力学物性の異方性は、主に図-1 の概念モデル（上図）のように堆積、圧密過程に起因する微視的構造の異方性（構造異方性）に支配されていると考えることができる。このような概念モデルに対して、個別要素法（DEM、2次元）により図-2 に示すように水和粘土鉱物、吸着水、間隙水をモデル化して堆積圧密過程をシミュレーション解析した（図-1 下図）。排水は、含水比が最終的に6%となるように堆積過程で段階的に間隙水要素をランダムに消去することで表現した。構造異方性を次式で示される構造テンソル²⁾の主値の比 (F_{11}/F_{22}) で確認したところ、堆積圧密後で $F_{11}/F_{22}=1.7\sim2.0$ とかなり高い構造異方性が確認された（異方性は堆積面＝水平面方向に卓越）。

キーワード：放射性廃棄物処分、地下岩盤研究所、岩盤力学、堆積岩、個別要素法、応力浸透連成解析
連絡先：〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 TEL:03-5769-1309、FAX:03-5769-1977

$$F_{ij} = \frac{1}{2N} \sum n_i n_j \quad (n \text{ は粘土鉱物に平行な単位ベクトル})$$

次に、この構造異方性をモデル化した大規模モデル（粘土鉱物数 1000）を用いて二軸圧縮試験シミュレーションを行った（ただし、間隙水、吸着水は考慮せず）。図-3 には軸ひずみ～軸応力関係と供試体内の内部破壊（微視的な滑り、剥離、粘土粒子破壊）パターン（上図）および変位分布（下図）を示している。内部破壊の発達、ひずみの局所化（せん断帯の発達）に伴うひずみ硬化～軟化挙動が見られ興味深い。

5. 掘削影響領域の力学モデリング

トンネル掘削による周辺岩盤の短期、長期の力学的挙動評価のためのモデリング研究の一環として、モンテリ岩盤試験場トンネルを対象に力学と透水（飽和・不飽和）を連成した掘削解析を実施した。用いた解析コードは FLAC3D³⁾で、弾塑性構成則として偏在弱面を考慮するバイリニア型のモールクーロンモデル（Bilinear Mohr-Coulomb ubiquitous joint model）を用いることで、堆積面と力学特性の異方性を考慮した（塑性ひずみ依存強度を導入することでひずみ軟化も考慮）。また、Salzer らのクリープ則⁴⁾を導入している。破壊領域とその形態（せん断/引張）を図-4 に示すが、引張破壊が支配的であるという観測結果と調和する結果となっている。トンネル壁面からの間隙圧の分布を図-5 に示すが、計算値は計測間隙圧の時・空間分布をよく表現している。

6. おわりに

モンテリ RA 試験では、堆積岩オパリナスクレイの原位置力学（水理連成）モデル（概念モデル、構成モデルおよび解析モデル）の開発、検証を行ってきた。紹介したのはその一部であるが、ここでの成果や研究プロセスは、今後、地下岩盤研究施設での研究が本格化する日本での堆積岩研究に役立つものと考えている。

参考文献

- 1) 河村、山本、志村：モンテリ国際共同研究プロジェクト、土木学会第 58 回年次講演会、2003（投稿中）。
- 2) Oda, M. and Iwasita, K：Mechanics of Granular Materials, Balkema, Rotterdam, 1999.
- 3) FLAC3D User's Manual, ITASCA.
- 4) Salzer, K et al.：A new creep law to describe the transient and secondary creep phase, NUMEG'98, Springer Verlag, Wien, 1998.

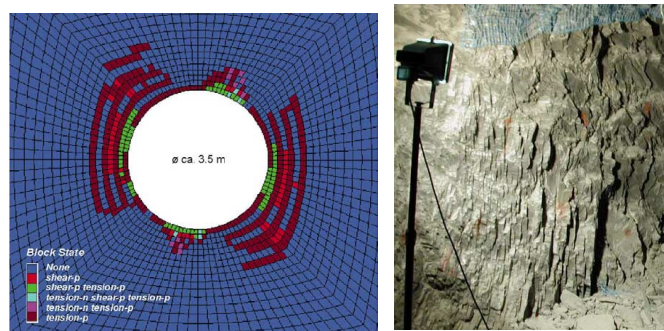


図-4 破壊領域と形態（左：解析結果、右：空洞側面の亀裂）

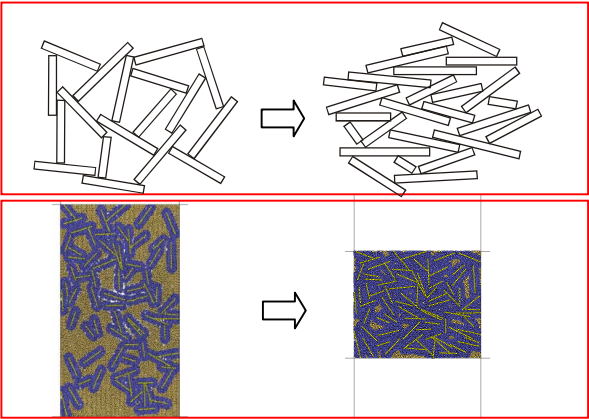


図-1 微視的概念モデル（上）と堆積過程のDEM解析（下）

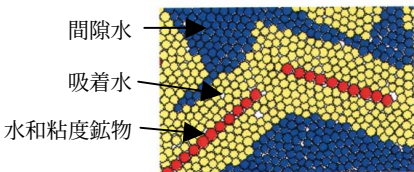


図-2 個別要素法によるモデル

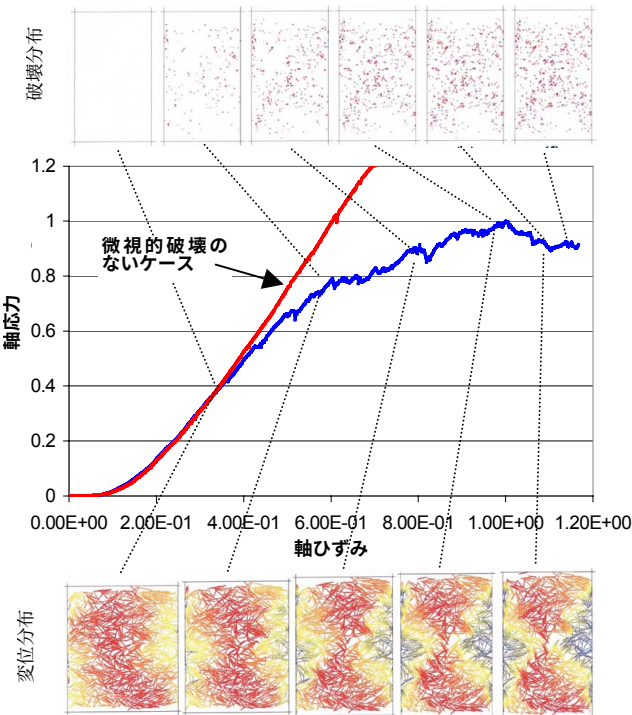


図-3 DEMによる二軸圧縮試験解析結果

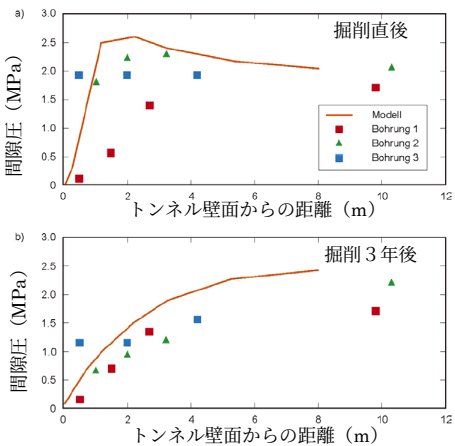


図-5 間隙圧の分布