

空洞周辺岩盤のクリープと内部充填材との力学的相互作用

MECHANICAL INTERACTION BETWEEN TUNNEL FILLING MATERIAL AND CREEP BEHAVIOR OF SURROUNDING ROCK MASS

澤田昌孝*・岡田哲実**・大波正行***・宮本泰志****

Masataka SAWADA, Tetsuji OKADA, Masayuki OHNAMI and Yasushi MIYAMOTO

In the multi-layer barrier system of radioactive waste disposal, it is predicted that corrosive expansion of canister, swelling of buffer material, creep behavior of surrounding rock mass etc... cause long-term mechanical interaction of barrier materials.

In order to understand above problem, numerical investigation is carried out in this paper. To represent creep behavior of rock, two different models are prepared, and one of them is selected by judging if stress condition is over the residual strength. Numerical simulation for tunnel excavation problem and long-term mechanical interaction between buffer material and surrounding rock mass is carried out using soil-water coupled FEM code based on proposed model.

Key Words: rock mass, creep behavior, tunnel filling material, mechanical interaction

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物を深部地層に処分する場合、数千年以上という超長期のオーダーで廃棄物を格納しておく空洞あるいはその内部に充填される人工バリア材の健全性を議論しておく必要がある。処分坑道・処分孔掘削時には、掘削に伴う応力解放によって、周辺岩盤に変位が発生する。その後、廃棄体の定置、埋め戻しが行われるまでのしばらくの間、坑道は開放されており、クリープ変形が進行すると考えられる。埋め戻し後においても処分坑道周辺では再冠水に伴う空洞周辺岩盤の挙動、緩衝材の膨潤等が互いに影響を与え合う複雑な力学的相互作用が働くと考えられる。日本における処分サイトはまだ決定されていないが、比較的強いクリープ挙動を示す堆積軟岩地点がサイトとして選定される可能性もある。

そこで本研究では、クリープ変形の収束・継続を応力状態によって評価するモデルを作成する。また、そのモデルを用いた有限要素解析によって、高レベル放射性廃棄物の処分孔掘削、その後のクリープ過程において周辺岩盤がどのような挙動を呈するか、空洞内部に充填材が置かれることで岩盤の挙動がどのような影響を受けるかについて、充填材自身の構成モデル、間隙水の挙動の影響を含めて検討を行う。

2. レオロジーモデルによるクリープの表現

一般に軟岩は、ひずみ軟化現象、ダイレイタンス特性および時間依存性挙動などの性質を有する材料である。

* 正会員 修士(工学) (財)電力中央研究所 地圏環境部 研究員

** 正会員 修士(工学) (財)電力中央研究所 地圏環境部 主任研究員

*** 正会員 修士(工学) (株)構造計画研究所 解析技術本部

**** 正会員 博士(工学) (株)構造計画研究所 解析技術 1 部 耐震技術室

そのうち、時間依存性挙動とは、材料に外力が作用したときの応答に時間的な影響が生じることをいい、具体的にはひずみ速さ効果、クリープ挙動、および応力緩和現象などが挙げられる。

時間依存性挙動を解釈する場合には、単純な基本的法則を表す模型要素をいくつか定め、それらを組み合わせた力学的模型により表現する方法がしばしば用いられる。赤井ら¹⁾は、軟岩の堆積膨張を伴う粘塑性挙動を実験によって明らかにした後、ある限界応力以下では最終的にクリープ変形が落ち着き（粘弾性）、それ以上では終局的にクリープ破壊が生じる（粘完全塑性）特性を考慮に入れ、先行履歴応力以下の拘束圧下での構成式を導いている。また、大久保ら²⁾の提案したコンプライアンス可変型構成式は数学的に取り扱いやすく、非線形粘弾性挙動および破壊強度以降の挙動の表現に優れている。足立ら³⁾は堆積軟岩に対して、排水定ひずみ速さ三軸圧縮試験、排水クリープ試験の結果に基づき、時間依存性挙動およびひずみ軟化挙動を統一的に説明できるモデルを提案した。

本研究では、赤井らと同様にクリープ応力によるモデルの場合わけを行い、境界となる応力として残留強度を用いる。すなわち、残留強度以上のクリープ応力のもとでは最終的に破壊に至るものと考え、軟岩のレオロジーモデルを誘導する。間隙水との連成問題への拡張を視野にいれ、有効応力を用いて定式化する。

応力-ひずみ関係として、林・日比野⁴⁾による非線形粘弾性モデルを用いる。弾性係数 E の非線形性の効果は、破壊包絡線との接近度から求まる緩み定数 R を変化させることにより評価する。破壊包絡線と破壊接近度 d_{min} の関係を図-1に示す。また、緩み係数 R と弾性係数 E およびポアソン比 ν の関係を以下に示す。

$$R = \frac{k \cdot d_{min}}{\sigma_t - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}} \quad (1)$$

$$\begin{cases} E = E_0 & (R \geq 1) \\ E/E_0 = R^{1/2} & (0 \leq R \leq 1) \\ E = E_{min} & (R \leq 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \nu = \nu_0 & (R \geq 1) \\ \frac{0.45 - \nu}{0.45 - \nu_0} = R^{1/4} & (0 \leq R \leq 1) \\ \nu = 0.45 & (R \leq 0) \end{cases} \quad (3)$$

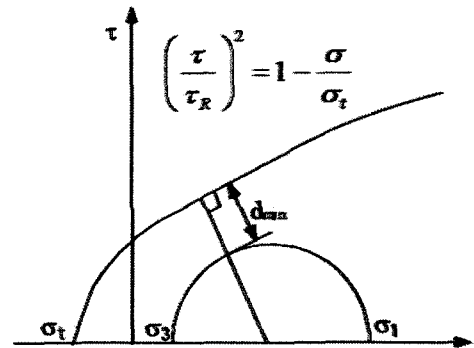


図-1 破壊包絡線とモールの円

堆積軟岩について、応力状態が残留強度以下であればクリープ破壊が発生せず、残留強度以上であれば、変形が進行して破壊に至るという知見が得られている⁵⁾ (図-2)。これに基づき図-3のようなレオロジーモデルを仮定する。クリープ変形に関しては、せん断変形と体積変形を分けて考えることとする。残留強度以下では、図-3(a)に示すように、せん断変形については Voigt モデル、体積変形については単純バネモデルとする。一方、残留強度以上では、図-3(b)に示すように新たにダッシュポットを直列に加え、せん断変形については Burger モデル、体積変形については Maxwell モデルとする。残留強度以上で加わるダッシュポットは応力状態に対応した非線形性を有し、せん断・体積変形に関して連動するものとする。詳細については後述する。なお、破壊後は体積変形を起こさず、せん断に対して抵抗しないモデルとする。

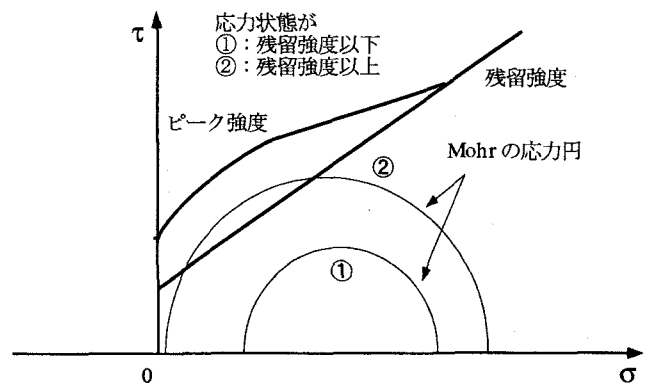


図-2 クリープ応力によるクリープ特性の変化

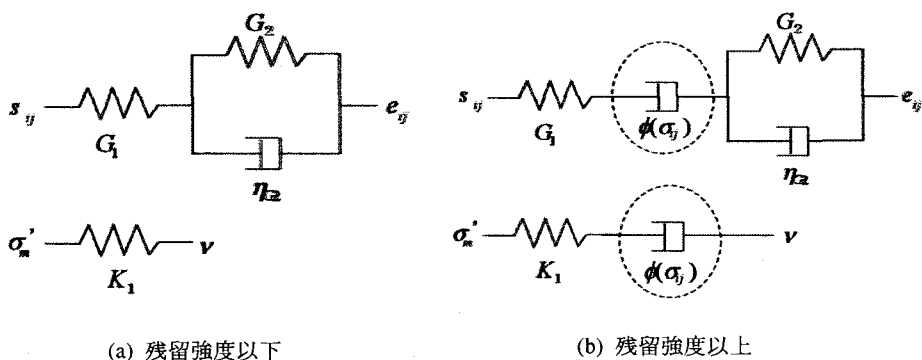


図-3 レオロジーモデル

図-3 において、 s_{ij} :せん断応力、 e_{ij} :せん断ひずみ、 σ'_m :平均有効応力、 v :体積ひずみ、 G_1 、 G_2 :せん断弾性係数、 K_1 :体積弾性係数、 η_{G2} :せん断粘性係数、 $\phi(\sigma_{ij})$:非線形クリープを表す関数である。

3. クリープモデルの特性評価

ここでは、非線形クリープの定式化について述べるとともに、室内実験に対してクリープモデルを適用する。

岡本らは、軟岩の部類に入る第3紀堆積岩の泥岩を用いて、圧密排水と圧密非排水の2条件で三軸クリープ試験を行った⁶⁾。圧密圧力と軸差応力を種々組み合わせた条件の下で実験を行い、それらの影響を調べた。また、クリープ試験に先んじて、圧密試験、三軸圧縮試験によって、圧密特性、強度・変形特性を調べた。圧密降伏応力は3.5～5.0MPaであった⁷⁾。ここでは、モデルの適用範囲を先行履歴応力以下の拘束圧条件と考え、岡本らの行った実験のうち、拘束圧 σ_3' が0.1MPaおよび0.6MPaの実験結果に基づいて議論する。これらにより、表-1のようなモデル定数が求められる。

表-1 モデル定数

ピーク強度(放物線型)		残留強度(直線型)		k
τ_{kp} [MPa]	σ_{ip} [MPa]	c_r [MPa]	ϕ_r [°]	
0.65	0.244	0.55125	25.61	4
レオロジー定数				圧密降伏応力
G_1 [MPa]	G_2 [MPa]	K_1 [MPa]	η_{G2} [MPa/min]	σ_{mc}' [MPa]
255.7	406.2	220.0	7.179×10^5	3.5～5.0

クリープ変形の継続による破壊を考える。一般に三軸クリープ試験においては、3次クリープに至る直前に最小クリープひずみ速さ $\dot{e}_{1s}$ を取る。クリープ破壊に至るまでに要する時間を知る手段として、最小クリープひずみ速さ $\dot{e}_{1s}$ と破壊の生じる時間 t_r との以下の関係を用いる方法がある。

$$\dot{e}_{1s} \cdot t_r = e_c \quad (4)$$

ここで、 e_c は定数であり、その次元がひずみと等しい。ここでは、 $e_c = 7.67 \times 10^{-3}$ である。また、最小クリープひずみ速さ $\dot{e}_{1s}$ は軸差応力・平均有効応力と以下のような関係式で表すことができる(図-4)。

$$\log \dot{e}_{1s} = A(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma'_m)^\beta + B \quad (5)$$

ここで、 A 、 B は定数、 β は軟岩の強度をべき関数で表現した際の指数として知られ、材料固有の一定値をとるものとする。さらに、定常クリープ時のダイレイタンス比と応力比の関係をクリープ試験の破壊到達ケースから求めると以下の関係が得られる(図-5)。

$$(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma'_m = \alpha(-\dot{v} / \dot{e}_1) + C \quad (6)$$

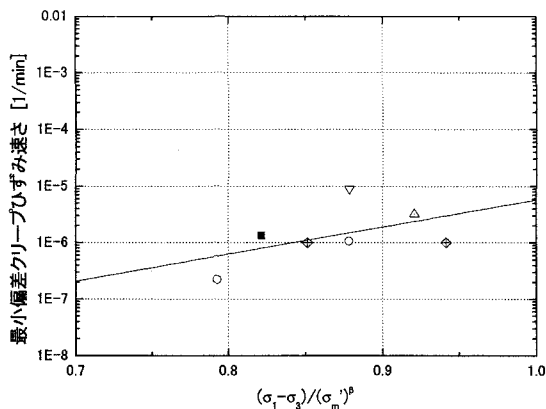


図-4 クリープ速度の応力依存性

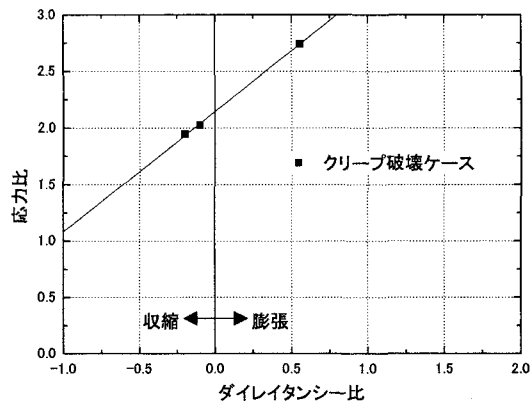
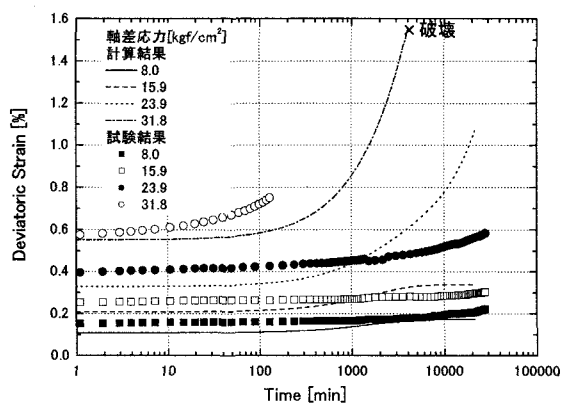
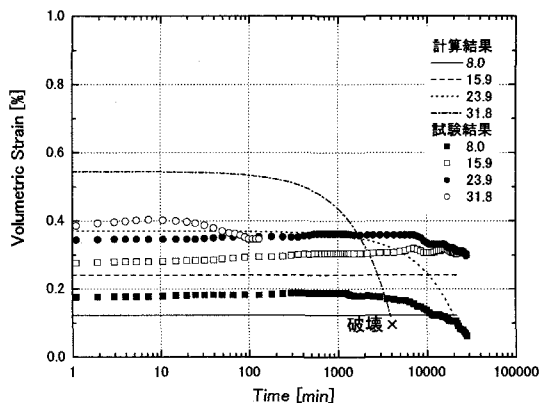


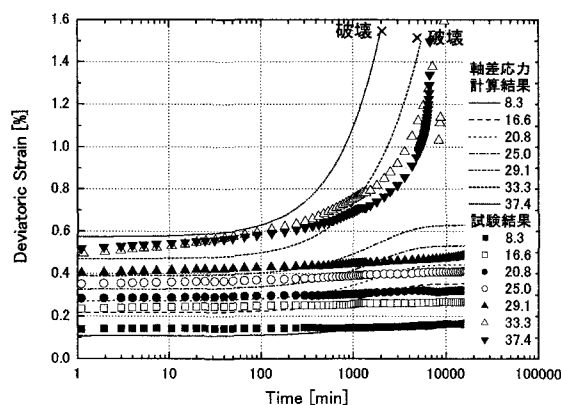
図-5 応力比とダイレイタンス比



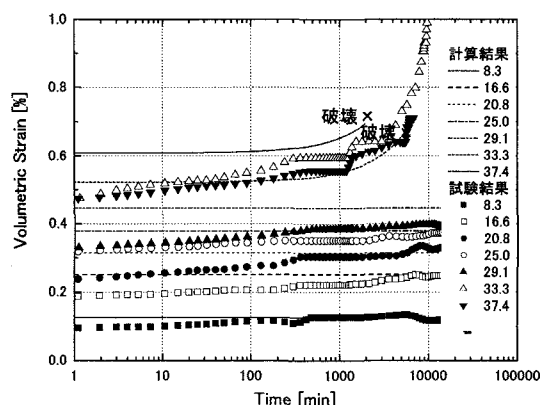
(a) 時間-偏差ひずみ関係 (拘束圧=0.1MPa)



(b) 時間-体積ひずみ関係 (拘束圧=0.1MPa)



(c) 時間-偏差ひずみ関係 (拘束圧=0.6MPa)



(d) 時間-体積ひずみ関係 (拘束圧=0.6MPa)

図-6 モデルによる三軸クリープ試験結果の表現

ここで、 α , C は定数である。図-4 および図-5 より式(5), 式(6)の定数は、 $A=4.803$, $B=-10.05$, $\beta=0.2002$, $\alpha=1.0658$, $C=2.1472$ となる。式(5)および式(6)により図-3(b)の非線形クリープを表す関数 $\phi(\sigma_d)$ が表現できる。

以上により導かれたモデルを用いて排水三軸クリープ試験を表すと図-6 のようになる。拘束圧一定の試験において、軸差応力が小さい場合には、変形はやがて収束し、軸差応力が大きい場合には変形が加速し、破壊に至る。拘束圧 0.1MPa のケースでは、破壊時に体積が膨張し、拘束圧が 0.6MPa のケースでは、体積が収縮している。計

算において限界クリープひずみ e_c に到達したものはその時点で計算を終了し、グラフには「破壊」と表示した。
(a)の軸差応力 23.9kgf/cm^2 の計算は、クリープ変形は継続しているが破壊に至る前に計算が終了したものである。
計算結果は、破壊に至る場合と至らない場合の区別、破壊時の体積膨張・収縮をよく表現し、ひずみ量・ひずみ速度については、解析用物性値算出の際のばらつきに起因し乖離が認められるものの、定性的にはモデル化できていると考えられる。

4. 処分孔周辺岩盤の挙動解析

前述した岩盤クリープモデルを FEM に組み込み、岩盤掘削時およびその後の岩盤クリープ挙動の解析を行う。想定する構造物は、高レベル放射性廃棄物処分の処分孔である。処分孔は縦置きと考え、単一として取り扱う。解析対象範囲は、1.7m の孔径の 5 倍 (8.5m) とし、対称性を考慮して 1/4 モデルとする。解析メッシュを図-7 に示す。周辺岩盤は第 3 紀堆積軟岩として、解析用物性値は前章に記した値を用いる。また、岩盤クリープモデルの適用可能な応力範囲を考慮し、実際の想定深度とは異なるが、土盛り 150m 程度の地盤を掘削する問題を設定する。

解析の手順は、初期地圧を作用させた後、外側境界の変位を固定し、孔外縁に掘削相当外力を作用させる (0.0001 年)。緩衝材を充填する場合には、0.001 年に要素を導入する。水との連成解析では、外側境界に 50m のポテンシャルを与え、掘削と同時に孔外縁のポテンシャルを 0m とし、再冠水を表現する。

解析ケースを表-2 に示す。ケース 1 を基本ケースとし、ケース 2 およびケース 3 は地圧に異方性を与えている。壁面での変位を図-8 に示す。掘削時の変位もその後のクリープ変位も地圧が最大主応力方向に卓越する。いずれのケースにおいても変形は 0.01 年を

過ぎると収束する。これは、壁面から数層が掘削時にクリープ特性を与えていない破壊要素となり、クリープ継続する応力状態となる要素はその奥の数層のみであるため、地山全体としてはクリープが収束する状態となるためと考えられる。ケース 4, 5, 6 は緩衝材によって処分孔内部を充填するケースであるが、異なる弾性係数を与えて、その影響を調べている。解析結果を図-8 に示す。ケース 1 と比較して緩衝材が導入される 0.001 年からクリープ変位の伸びが減少し、弾性係数が大きいほど小さい変位で収束する。なお、緩衝材の内部の平均応力は弾性係数が大きいほど大きくなる (最終的にケース 4 : 0.0086MPa , ケース 5 : 0.019MPa , ケース 6 : 0.022MPa)。

地下水との連成解析の結果 (ケース 7, ケース 8, ケース 9) を図-9 に示す。緩衝材の力学的構成モデルを自由に選択できる機能を解析コードに加え、ここでは弾性体と関口・太田モデル⁹⁾を用いた。関口・太田モデルの物性値は文献⁹⁾を参考とした。図-9 における緩衝材内と岩盤内のポテンシャルはいずれも処分孔外縁近傍での値である。再冠水に要する時間以外は緩衝材の構成モデルによる違いはほとんどなかった。緩衝材を設置したケース

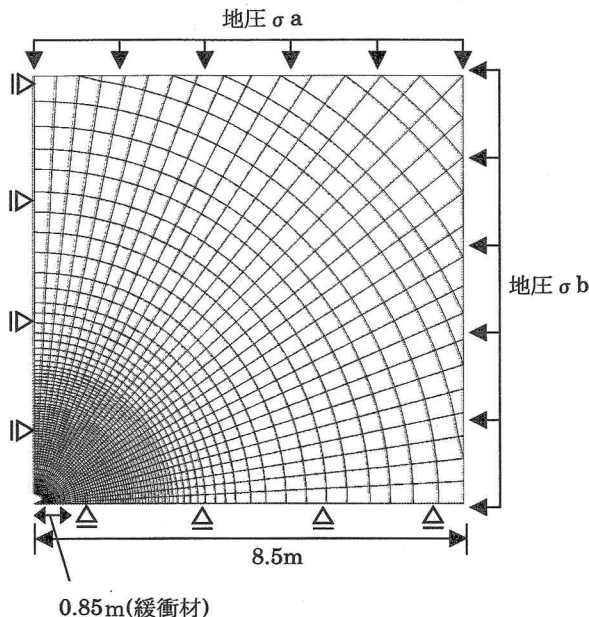


図-7 掘削解析モデルメッシュ図

表-2 解析ケース

番号	σ_a (MPa)	σ_b (MPa)	緩衝材	水との連成
1	2.775	2.775	なし	なし
2	3	2.5	なし	なし
3	3.5	2	なし	なし
4	2.775	2.775	弾性体 (E=5MPa)	なし
5	2.775	2.775	弾性体 (E=50MPa)	なし
6	2.775	2.775	弾性体 (E=500MPa)	なし
7	2.275	2.275	なし	あり
8	2.275	2.275	弾性体 (E=50MPa)	あり
9	2.275	2.275	関口・太田	あり

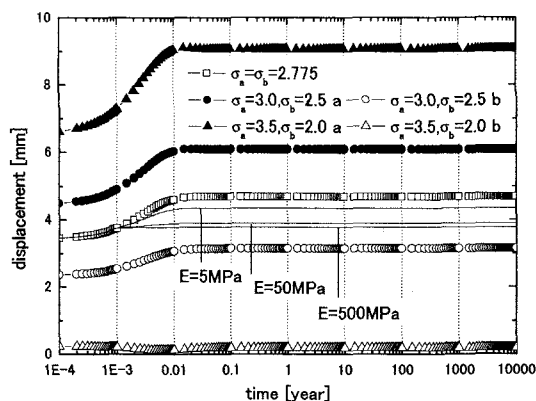


図-8 解析結果 (その 1、異方性、緩衝材の剛性)

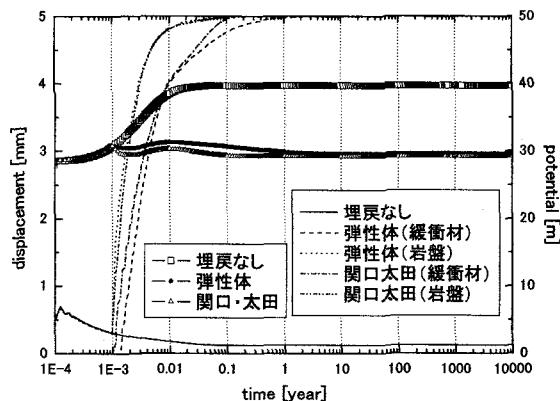


図-9 解析結果 (その 2、連成解析)

では、設置直後と 0.01 年から 1 年にかけて変位が戻っている。これはクリープの影響よりも地下水の回復による有効応力の減少に伴う変形であると考えられる。

5. おわりに

掘削後の長期的なクリープ変形、埋め戻し後の相互作用を検討するため、クリープモデルを作成し、緩衝材に複数の構成モデルを選択し解析を行った。今回の掘削解析では変位が収束したが、破壊後のクリープ特性やひずみ軟化を考慮するとクリープを継続する可能性がある。また、緩衝材は再冠水時の膨潤挙動に対しては、より詳細な構成モデルを検討する必要がある。

参考文献

- 1) 赤井浩一，足立紀尚，西好一：堆積軟岩（多孔質凝灰岩）の時間依存特性と構成式，土木学会論文報告集，282号，pp.75-87，1979.
- 2) 大久保誠介：コンプライアンス可変型構成方程式の解析的検討，資源・素材学会誌，108巻，8号，pp.601-606，1992.
- 3) 足立紀尚，岡二三生，曾良岡宏，小池真史：軟岩の時間依存性挙動とその統一的な説明，土木学会論文集，No.596/III-43，pp.1-10，1998.
- 4) 林正夫，日比野敏：岩盤掘削時の安定解析のための電子計算プログラムの開発，電力中央研究所報告，研究報告：377012，1978.
- 5) 地盤工学会編：堆積軟岩の工学的性質とその応用，地盤工学ライブラリー30，1987.
- 6) 岡本敏郎，西好一，松井家孝：泥岩の力学特性に関する研究（その 2）クリープ特性，電力中央研究所報告，研究報告：382012，1983.
- 7) 岡本敏郎，西好一，松井家孝：泥岩の力学特性に関する研究（その 1）せん断特性，電力中央研究所報告，研究報告：382011，1982.
- 8) Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced anisotropy and time dependency in clays, Constitutive Equations of Soils, Proc. Specialty Session 9, 9th Int. Conf. Soil Mech. & Found. Eng., Tokyo, pp.306-315, 1999.
- 9) 核燃料サイクル技術開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ— 分冊 2 地層処分の工学技術，1999.