

熱の影響による珪藻泥岩の力学特性変化

Effect of temperature on the mechanical behaviours of a diatomaceous mudstone

城まゆみ*・青木智幸*・小川豊和*・山辺正**

Mayumi JO, Tomoyuki AOKI, Toyokazu OGAWA and Tadashi YAMABE

In a geological disposal of high-level radioactive wastes, host rock is subjected to high temperatures for a long period of time. In long-term stability evaluations, it is therefore imperative to understand the mechanical behaviours of rock mass under elevated temperatures. Performing uniaxial and triaxial compression tests and creep tests on a diatomaceous mudstone at different temperatures, the authors have observed decreases in strength, creep time to failure, and the minimum strain rate at high temperatures. An excavation simulation analysis using a linear Burger type model formulated based upon the creep test results also suggests that creep deformation can abruptly increase due to increase in temperature.

Key Words : creep behavior, diatomaceous, temperature-dependent behavior

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物を地層処分した場合、空洞周辺岩盤は廃棄体からの熱の影響を長期間受けるため、岩盤の長期安定性を検討する際には、高温下での岩盤の力学特性を把握する必要がある。しかし、堆積軟岩を対象とした岩盤の力学特性の温度依存性についての研究はまだ少ない。そこで、著者らは珪藻泥岩のコアによる室内試験（一軸・三軸圧縮試験、一軸・三軸クリープ試験）を実施し、力学特性の温度依存性を把握を行った。また、室内試験の結果から、各温度条件における岩石物性パラメータを使用した空洞掘削の試算を実施した。

表-1 試料の物理特性

項目	値
飽和密度 (g/cm ³)	1.34~1.38
乾燥密度 (g/cm ³)	0.61~0.68
土粒子の密度 (g/cm ³)	約2.38
有効間隙率 (%)	約74
吸水率 (%)	104~121

2. 試料、実験装置、試験方法

試料は、能登半島の珠洲市付近で産出する珪藻泥岩（中新世後期前半の海成層）を使用した。試料の主な物理特性を表-1に示す。

試験体は直径 5cm 高さ 10cm で、予め蒸留水中で一週間以上真空脱気して飽和させた。ひずみゲージを貼付する際には表面を 30 分程度乾燥させ、2 液性接着剤で下塗りをした上で、瞬間接着剤でひずみゲージを貼付した。また、試験体表面に温度ゲージを貼付した。次に、側面にゲージを避けて帯状ろ紙によるサイドドレーンを取り付け、ペダスタル、キャップとともにシリコンゴムを塗ってシールし、試験体の準備を完了した。圧縮試験、クリープ試験ともに圧密排水条件で行った。なお、一軸試験の場合についても試験体を三軸試験機にセットした状態で実施した。図-1 に試験機の

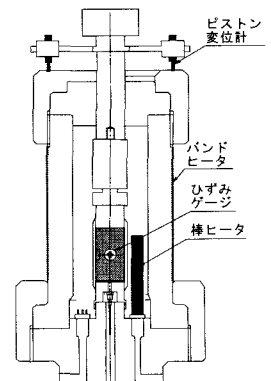


図-1 試験機概略図

* 正会員 大成建設（株） 技術センター 土木技術研究所

** 正会員 助教授 埼玉大学 工学部 建設工学科

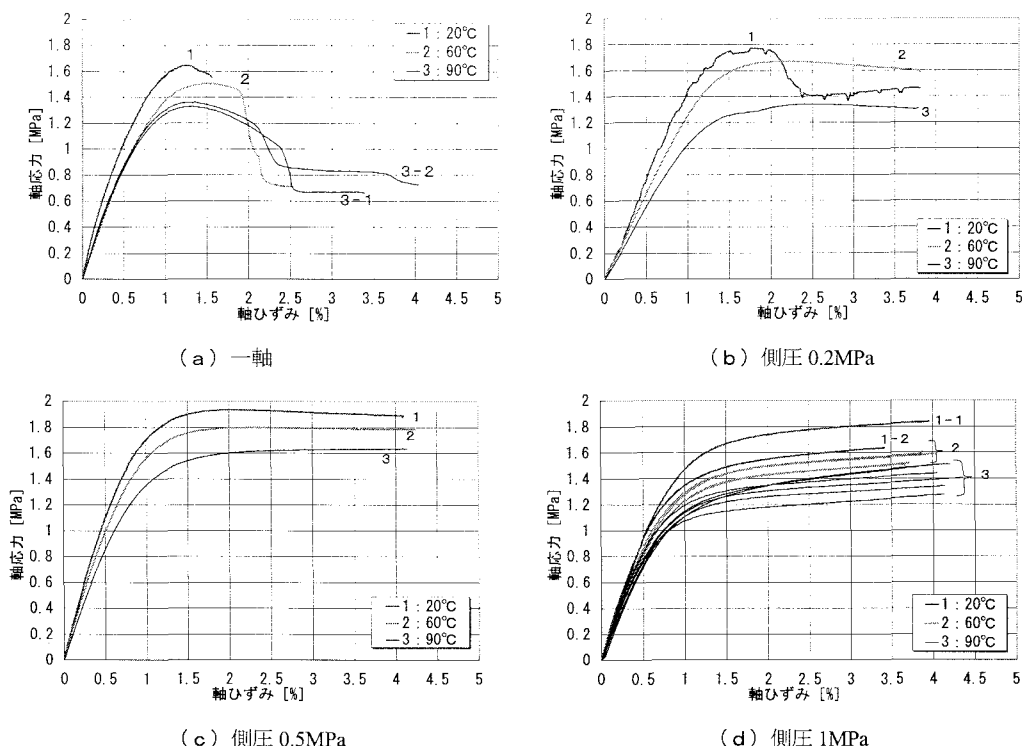


図-2 一軸・三軸圧縮試験結果

概略図を示す。

試験手順としては、まずセル内に作動油を充填し、次にセル内の棒状ヒーターとセル外周のバンドヒーターとを使用して油を介して試料温度を上昇させた。昇温時間は約 24 時間である。温度条件は常温 (20℃)、60℃、90℃の 3 種類とした。次に、セル圧 (油圧) を所定の側圧まで上昇させた。側圧条件は一軸 (0MPa)、0.2MPa、0.5MPa、1MPa の 4 条件とした。このとき、間隙水圧ラインは大気圧に開放して排水させている (軸圧縮中、クリープ中も同様)。軸圧縮過程としては圧縮試験の場合には変位速度 (0.01mm/min) 一定制御で軸変位 3mm 以上まで载荷した。クリープ試験の場合、クリープ応力レベルまでの軸载荷速度は、過剰間隙水圧の消散を考慮し、圧縮試験時の軸载荷速度 (0.01%/min) に相当する応力速度 (0.014MPa/min) 制御とした。なお、クリープ応力レベルは、各温度・側圧条件における圧縮強さの 93%とした。これは、圧縮強さのばらつきを考慮しつつ比較的短期でクリープ破壊する応力レベルとして設定したものである。

3. 一軸・三軸圧縮試験結果

(1) 応力-ひずみ関係

図-2 (a) ~ (d) にそれぞれの側圧条件の応力-ひずみ線図を示す。ここでは、軸ひずみとして軸载荷ピストンの変位より換算した値で示した。ひずみゲージは、接着剤とのベストの組合せを求めて試行錯誤したが、ピーク応力の 80% 程度以上で剥離するものがあった。これは、側圧 1MPa で 90℃の条件のものに多く、この試験条件の試験数が多い理由でもある。

どの側圧条件でも、常温、60℃、90℃と温度が高くなるにつれて、強度が低下していることがわかる。ばらつきはあるが、試験数の多い封圧 1MPa の条件でも強度低下傾向が明瞭に見えている。なお、ここでの強度とは、ピーク応力が見られる場合にはピーク応力、ピーク応力が見られない場合は軸ひずみ 3%の軸応力を強度とした。また、一軸、お

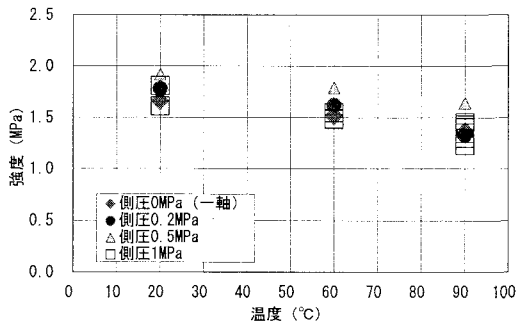


図-3 強度と温度の関係

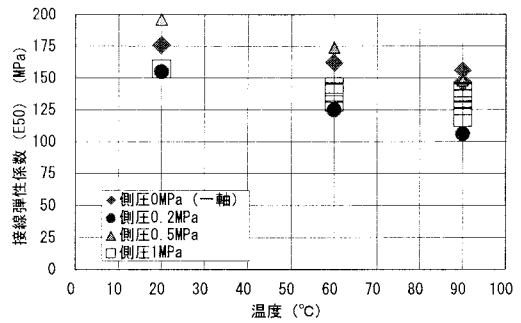
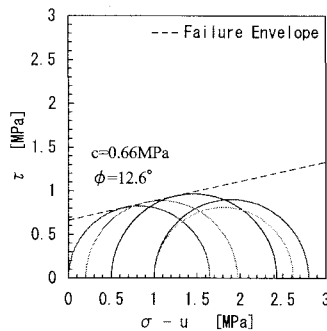
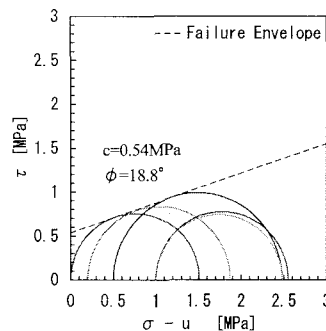


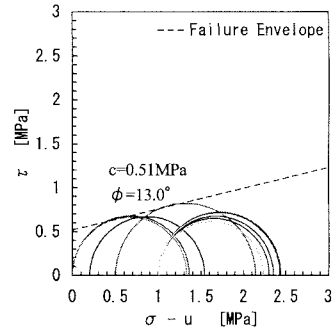
図-4 接線弾性係数 (E_{50}) と温度の関係



(a) 20°C



(b) 60°C



(c) 90°C

図-5 温度別のモール円と破壊包絡線

および側圧 0.2MPa の 20°C はピーク応力後ひずみ軟化が見られるが、側圧 0.2MPa の 60°C、90°C、および側圧 0.5MPa、1MPa では見られなくなる。側圧 0.2MPa では、温度が高くなるとピークが現れなくなり延性的になることが分かる。

(2) 強度・変形特性

図-3 に、強度と温度の関係を示した。図-3 より、温度が高くなると強度は低くなることが分かる。また、一軸圧縮強度に比べて側圧 0.2MPa と 0.5MPa では強度が増加するが、側圧 1.0MPa の条件では一軸圧縮強度と同程度に低下している。これは、図-2 の応力-ひずみ曲線を見ると非常に延性的になっていることから分かるように、応力状態が等方圧縮応力で降伏する領域に入っていると考えられる。

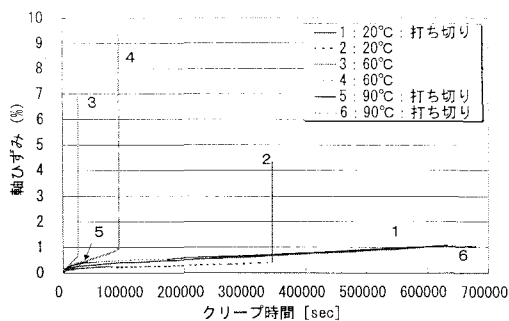
図-4 は、ピストン変位計から求めた強度の 50% 応力レベルでの接線弾性係数と温度の関係を示した。図より、温度が高くなると接線弾性係数は小さくなる傾向が見られた。

図-5 に温度別のモール円と破壊包絡線を示した (τ : せん断応力、 σ : 直応力、 u : 間隙水圧=0MPa)。ただし、側圧 1MPa の場合には等方圧縮応力で降伏していると考えられるため、強度定数の決定には側圧 0MPa (一軸)、0.2MPa、0.5MPa の試験結果を使用した。図より、90°C の側圧 0.2MPa は強度が若干低い、どの温度の場合も概ね包絡線は直線で表すことができる。また、粘着力 (c) は温度上昇により低下するが、内部摩擦角 (ϕ) については温度による顕著な傾向は見られないことが分かる。

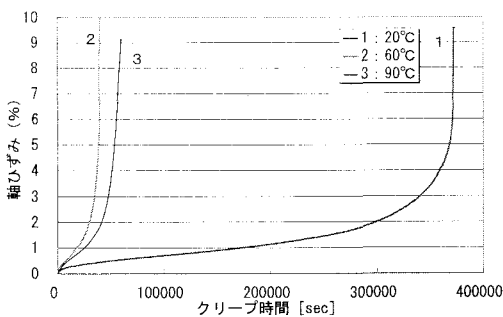
4. 一軸・三軸クリープ試験結果

(1) 軸ひずみクリープ時間関係

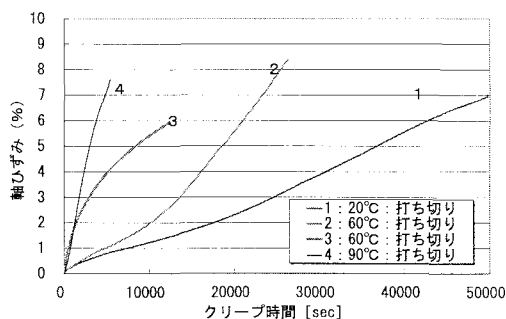
図-6 に一軸・三軸クリープ試験のクリープ過程におけるひずみの時間変化を示す。図中の軸ひずみは、圧縮試験結果の場合と同様にピストン変位計の変位量より換算した値である。



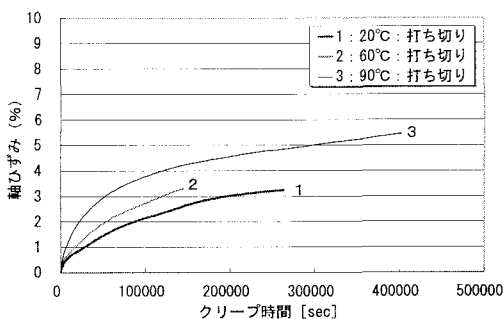
(a) 一軸



(b) 拘束圧 0.2MPa



(c) 拘束圧 0.5MPa



(d) 拘束圧 1MPa

図-6 一軸・三軸クリープ試験結果

一軸および側圧 0.2MPa では、20℃よりも 60℃で、クリープ破壊時間が大幅に短くなったが、90℃の場合は一軸では破壊せず、側圧 0.2MPa では 60℃よりも若干クリープ破壊時間が長くなっている。また、三次クリープ過程の加速傾向が、一軸よりも側圧 0.2MPa の方が緩やかになる傾向が見られた。

側圧 0.5MPa では、一軸、側圧 0.2MPa、1MPa の場合と異なり、クリープ変形が単調に進んでいることがわかる。その変位速度は、一軸や側圧 0.2MPa の場合よりも（三次クリープ過程を除けば）むしろ速い。これは、圧縮試験においてひずみ軟化傾向を示さずにどの温度条件でも延性的な挙動を示す条件であるため、すなわち破壊パターンが変化するためと考えられる。ひずみ速度は、温度が高いほど速い。

また、側圧が 1MPa の場合も、クリープ変形の傾向が一軸や側圧 0.2MPa、0.5MPa の場合と大きく異なり、試験を実施した時間内では二次クリープや三次クリープを示さないことが分かる。軸ひずみは温度が高いほど早く増加する傾向を示す。

(2) 軸ひずみ速度－クリープ時間関係

図-7 に、側圧 0.2MPa における軸ひずみ速度とクリープ時間関係を両対数軸で示した。軸ひずみ速度は、クリープ初期段階では徐々に減少し最小軸ひずみ速度に到達する。どの温度でもその後、破壊に至る場合には急激に速度を増加させる傾向を示す。

クリープ初期段階で軸ひずみ速度が減少する傾向は、岡本らの研究によれば、軸ひずみ速度とクリープ時間の両対数関係において、傾きが約 -1 であることが示されている。

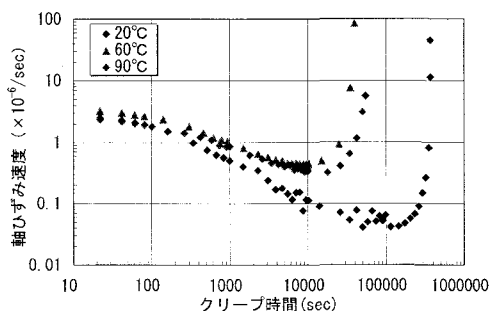


図-7 軸ひずみ速度－クリープ時間の両対数グラフ

しかし、今回実施した一軸・三軸クリープ試験で約0.5程度であった。これは、材料の特性と考えられるが、理由については今後の検討で明らかにしていく予定である。

また、軸ひずみ速度の最小値は、温度が高い方が速い傾向にあるが、60℃と90℃ではあまり違いはみられず、90℃の方が若干小さい。

(3) 最小クリープひずみ速度－クリープ破壊時間

山田ら²⁾は、斎藤³⁾の示した最小クリープひずみ速度とクリープ破壊時間の関係図に、彼らの実施したクリープ試験結果を修正、加筆した図を示し、両対数軸上で傾きが約-1の直線関係で説明できることを示した。同様に、今回実施した試験結果のうち破壊した試験結果を新たに同図に追加し比較した(図-8)。図より、試験データが少ないものの、昇温によりクリープ破壊時間を加速した場合でも、同様の関係が成立するようである。また、一軸の場合と比べ、側圧0.2MPaの場合は近似直線が右側に移動し、同じ最小クリープひずみ速度に対し拘束圧の効果と考えられるがクリープ破壊時間が長くなっている。

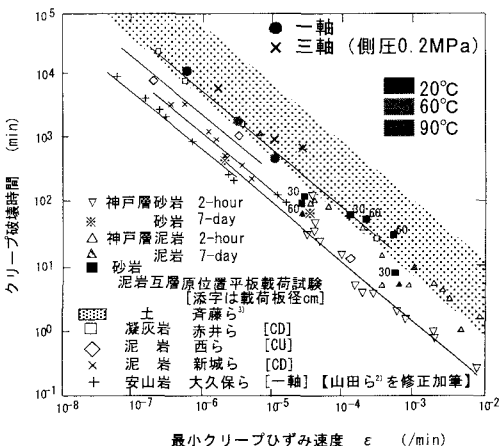


図-8 最小クリープひずみ速度とクリープ破壊時間

5. 空洞変形挙動の検討

(1) 目的

一軸・三軸圧縮試験、および一軸・三軸クリープ試験結果より、昇温による強度低下やクリープ変形の加速などの、熱による力学特性への影響が明らかになった。そこで、本岩石中の地下深部に空洞を掘削した場合、空洞周辺岩盤の変形が温度によりどの程度影響を受けるかを把握することを目的とし、試験結果に基づいた物性値を設定して、空洞掘削の試計算を実施した。

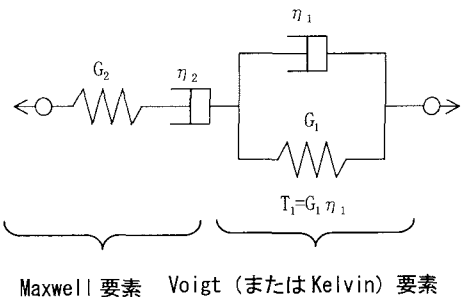


図-9 Burger モデル

(2) レオロジーモデルの適用

今回の試計算では、クリープ挙動を表現するモデルとして、レオロジーモデルの1つであるBurgerモデルを採用する(図-9)。Burgerモデルはパラメータ数が少ないにもかかわらず、実際のクリープ挙動を比較的良く表現することができ、また、パラメータの値はクリープ試験のみで決めることができる長所がある。

クリープ挙動の温度依存特性は、図-7により、2次クリープ(最小ひずみ速度)に顕著に表れることが推察できる。そのため、Burgerモデルにおいては、岩盤の温度による影響を2次クリープを表現するMaxwell要素の η_2 の性質として組み込むこととした。一方、 η_2 以外(G_1 、 G_2 、 η_1)は、温度の影響は受けないと仮定した。

温度条件を考慮した岩盤の物性値は、温度の影響を受けない G_1 、 G_2 、 η_1 の値については温度20℃、側圧0.2MPaのクリープ試験結果から算出し、どの温度条件の場合においてもこの値を採用したが、温度依存特性を示す η_2 は、図-7から各温度条件での最小軸ひずみ速度を

表-2 温度条件を考慮した岩盤の物性値

温度 (℃)	G_1 (MPa)	η_1 (min・MPa)	G_2 (MPa)	η_2 (min・MPa)	K (MPa)
20	2.02E+02	1.85E+04	6.38E+01	6.88E+05	62.7
60				5.74E+04	
90				6.58E+04	

求め、クリープ応力をその最小軸ひずみ速度で除した値として個別に求めた。物性値一覧を表-2 に示す。

Burger モデルでは、2 軸応力状態にある円形空洞を無支保で掘削する場合の、時間依存性を考慮した半径向の変位 $U_r(t)$ は、次の式で与えられる⁴⁾⁵⁾。本検討では、次式によって求まる変位から、温度の影響の程度を把握する。

$$u_r(t) = \left(A - C + B \frac{d_2}{d_4} \right) \frac{m}{q} + \left(\frac{B(d_2/G_1 - d_1)}{G_1 d_3 - d_4} - \frac{(A - C)}{G_1} \right) e^{-(G_1/\eta_1)t} + B \left(\frac{d_2(1 - m/\alpha) + d_1(m - \alpha)}{G_2(G_1 d_3 - d_4)} \right) e^{-(\alpha/\eta_2)t} + \frac{(A - C + B/2)}{\eta_2} t \quad (1)$$

$$A = \frac{P_1 + P_2}{4} \frac{a^2}{r}, \quad B = (p_1 - p_2) \frac{a^2}{r} \cos 2\theta, \quad C = \frac{P_1 - P_2}{4} \frac{a^4}{r^3} \cos 2\theta$$

$$m = G_1 + G_2, \quad d_1 = 3K + 4G_2, \quad d_2 = 3Km + 4q$$

$$d_3 = 6K + 2G_2, \quad d_4 = 6Km + 2q, \quad q = G_1 G_2, \quad \alpha = \frac{3Km + q}{3K + G_2}$$

ここで、 K は体積弾性率、 G_1 は遅延弾性係数、 G_2 はせん断弾性係数、 η_1 、 η_2 は遅延係数、 a は円形空洞の半径、 r は円形空洞の中心からの距離、 P_1 は最大主応力、 P_2 は最小主応力、 θ は P_1 方向からの角度を表す。

その他の条件としては、深度 150m、密度 1340kg/m³、半径 2.5m の等方応力状態にある円形空洞を無支保で掘削する場合を考えた。

(3) 計算結果

図-11 は 20℃、60℃、90℃ の一定温度下の等方応力状態の岩盤に、円形空洞を無支保で掘削した場合において、空洞壁面の半径方向の変位の経時変化を示した図である。これらの変位は式 (1) から算出しており、半径方向の変位には弾性変形分も含まれている。図より、岩盤の温度が高いと空洞のクリープ変形が大幅に増加することが分かった。

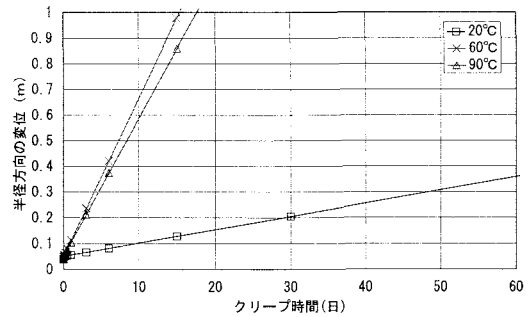


図-11 温度条件別の半径方向の変位の経時変化

6. まとめ

一軸・三軸圧縮試験、および一軸・三軸クリープ試験により、温度上昇により強度が低下すること、温度が高い方が破壊までのクリープ時間が短く、最小軸ひずみ速度が速い、などの知見を得ることができた。また、各温度条件下で行った室内試験結果に基づいて岩盤モデルの物性値を設定し、地下深部に空洞を掘削した場合の試算を実施した結果、空洞周辺岩盤の変形は、温度が高くなると大幅に増大することがわかった。ただし、このような温度の影響については未だ不明な点が多く、そのメカニズムについては今後さらに検討を要する。特に、地球化学的な観点から検討を進める予定である。また、温度依存性を考慮した岩盤より詳細なモデルを構築し、放射性廃棄物処分施設への影響について検討していきたい。

参考文献

- 1) 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、No.382012、1983。
- 2) 山田勝彦・松村真一郎・西垣好彦：軟岩の長期クリープ強度の一推定法、第 8 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.339-344、1990。
- 3) 斎藤迪孝：斜面崩壊発生時期の予知に関する研究、鉄道技術研究所報告所、No.626。
- 4) R.E.Goodman : Introduction to rock mechanics、1980。
- 5) P.F.Gnirk, and R.E.Johnson : The deformational behavior of a circular mine shaft situated in a viscoelastic medium under hydrostatics stress、Proceedings 6th Symposium on Rock Mechanics (University of Missouri Rolla) 、 pp.231-259。