

大成建設 正会員 泉 博 允
大成建設 正会員 亀 村 勝 美

1. ま え が き

強度の比較的小さい軟岩領域におけるトンネル等の掘削においては、空洞が応力解放によって、弾塑性的変形とともにクリープ変形が顕著に現われる場合が多く見られる。このクリープ変形は特に土被りが厚く、地山のせん断強度が弱い場合ほど大きく現われ、膨圧となって支保に作用するために施工に種々の障害が生じている。これらの膨圧現象を定性的にまた定量的に把握するために種々のシュミレーションが実施されているが、このような場合には以下に示す点を考慮した解析を行なうことが重要であると思われる。

- ①地山が空洞掘削によりクリープ破壊する場合（支保なしで空洞を放置した場合完全に空洞が崩壊する膨圧現象の場合）においては、早期に吹き付けコンクリートやロックボルト等の支保を行ない、地山の応力を改善した場合の支保に作用する荷重は、支保を時間的に遅れて施工した場合に比較し、小さいという現象が見られる。また、

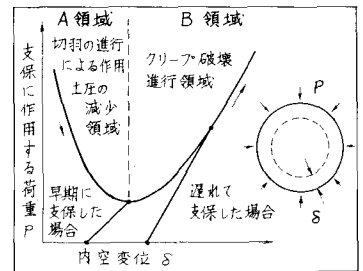


図-1 支保荷重-内空変位

同時期の支保であっても、吹き付けコンクリートを行った場合と木矢板等で支保した場合では前者の方が後者に比較し、作用荷重が小さいといった傾向もある。すなわち、早期に、空洞全体を剛に支保し、地山の応力を改善すれば発生する地山のクリープ歪量が小さくなるということである。（図-1参照）（ただし、図-1に示すA領域では切羽の進行による応力解放力の影響を受けるために、早期支保には荷重が大きく作用する傾向がある。）

- ②クリープ現象は一定応力下における歪の増大として取らえるが、この時にクリープ歪は増大しても材料そのものの剛性は変わらないとする考え方と、クリープ歪の増大は見かけ上剛性の低下によるものであるとする考え方がある。しかし、膨圧現象の顕著な地山から採取した供試体のクリープ変形前後における荷重試験結果からはクリープ歪を生じた場合には剛性が低下すると判断することができる。したがって解析においては後者の特性を考慮する必要があると思われる。

以上、①、②に示す問題点を解析において考慮するためには、①に対してはクリープ歪の発生量に関する係数を、地山の応力に依存させることが必要であり、また②に対してはクリープ歪の発生による剛性の低下を考慮するために、剛性をクリープ歪に依存させることが必要である。ここではこれらの2点を考慮した解析の一方法について報告する。

2. 解 析 方 法

応力の偏差成分と歪の偏差成分との関係をせん断弾性係数 G で、応力の体積成分と歪の体積成分との関係を体積弾性係数 K で、また応力の偏差成分を代表する八面体せん断応力と歪の体積成分（膨張）との関係を新たな係数（ダイヤランシー係数） H で表示し、全歪が(1)式のようにこれらの歪の和として表わせると仮定する。

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon'\} + \{\varepsilon_{m1}\} + \{\varepsilon_{m2}\} = \frac{1}{2G} \{\sigma'\} + \frac{1}{3K} \{\sigma_m\} + \frac{1}{3H} \{\gamma_{oct}\} \quad (1)$$

解析上、クリープ歪をこれらの各剛性に組み入れて表示するために、クリープ歪をせん断変形に関する偏差成分と体積変化に関する体積成分に分け、偏差成分はせん断弾性係数 G に、体積成分は体積弾性係数 K およびダイヤランシー係数 H に組み入れることとする。 G, K, H がクリープ歪を組み入れて表示されれば、数値解析上においてのクリープ現象は G, K, H の剛性が時間の経過とともに低下するために生じるものと考えることができ、剛性の変化による見かけ上の力を求め、これを外力として解析を進めて行くことができる。それぞれの剛性 G, K, H が G_1, K_1, H_1 から時間の経過によって G_2, K_2, H_2 に変化した場合には解析で用い

る見かけ上の一要素の外力 $\Delta\{F\}_e$ は(2)式のように表わされる。

$$\Delta\{F\}_e = \{B\}^T \{ [D_1] - [D_2] \} \{B\} d_{vol} \cdot \{\delta\}_e \quad (2)$$

$[D_1][D_2] \dots G_1, K_1, H_1$ および G_2, K_2, H_2 による弾性マトリックス, $\{\delta\}_e$ 要素の変位

3. せん断弾性係数 G の表示例

せん断弾性係数 G に応力依存性を考慮したクリープ歪の偏差成分を組み入れた一表示法について示す。せん断弾性係数 G は τ_{oct} (八面体せん断応力) - ϵ_{oct} (八面体せん断歪) 曲線の勾配を示す。一般に τ_{oct} が作用すると八面体せん断歪 ϵ_{oct} は弾塑性歪 ϵ_{octe} の発生とともに、時間の経過によって増大する現象が見られる。 τ_{oct} の応力レベルが高ければ歪の増大が一層顕著になる傾向を示すが、ここでは図-2に示すように、等方応力 σ_m による影響を考慮し、 τ_{oct} と破壊時八面体せん断応力 τ_{octf} との比が大きくなれば、 ϵ_{oct} が増大する傾向があるものと仮定する。これらの曲線の定常的な挙動部分を取り上げ、A. Shingh¹⁾等が提案している応力依存性を考慮したクリープ歪の表示式を修正し、 τ_{oct}/τ_{octf} 一定のもとでの八面体せん断歪 ϵ_{oct} と時間 T との関係に適用した。すなわち図-3、図-4に示すように、 ϵ_{oct} の速度 $\dot{\epsilon}_{oct}$ と時間 T との関係が対数表示で直線性を示し、 $\dot{\epsilon}_{oct}$ の対数と τ_{oct} と破壊時せん断応力 τ_{octf} との比も直線性を示すと仮定すれば、これらの関係より(3)式のように ϵ_{oct} を表示することができる。

$$\epsilon_{oct} = \frac{1}{1-m} A \cdot \left\{ \exp\left(\alpha \frac{\tau_{oct}}{\tau_{octf}}\right) - 1 \right\} (T)^{1-m} + \epsilon_{octe} \quad (3)$$

ここで m, A, α は定数である。(3)式のうち時間に関与しない弾塑性歪 ϵ_{octe} には(4)式に示す双曲線近似²⁾を適用する。

$$\epsilon_{octe} = a \cdot \tau_{oct} / (1 - b \cdot \tau_{oct})^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

この応力-歪曲線は図-5に示すように、補正係数 n の値を小さく取れば弾性的挙動を示す応力の範囲が拡大する傾向を示す。

次に、 $1/a$ は図-5、図-6に示す初期勾配。すなわち初期せん断弾性係数 G_0 を示すが、拘束圧が高ければ大きい値を示すという定性的傾向を考慮し、等方応力 σ_m の関数として(5)式のように表示する。

$$1/a = G_0 = C_0 \sigma_m^{d_0} + e_0 \quad (C_0, d_0, e_0 \dots \text{定数}) \quad (5)$$

一方 $1/b$ は図-6の漸近線を示すが、これには(6)式に示す破壊規準を適用する。この破壊規準は図-7に示すように応力の不変量の τ_{oct} と σ_m を用いて表示しており、中間主応力の影響を取り入れている。

$$1/b = \tau_{octf} = (1 - \sigma_m/\sigma_{mo})^{\frac{1}{2}} \cdot \tau_{octo} \quad (6)$$

以上より、八面体せん断歪 ϵ_{oct} は(7)式のように応力依存を考慮して表示することができる。これより、せん断弾性係数 G は(8)式のように、クリープ歪の偏差成分を組み入れて表示することができる。

$$\epsilon_{oct} = \frac{1}{1-m} A \cdot \left\{ \exp\left(\alpha \frac{\tau_{oct}}{\tau_{octf}}\right) - 1 \right\} (T)^{1-m} + a \tau_{oct} / (1 - b \cdot \tau_{oct})^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

$$G = \frac{\partial \tau_{oct}}{\partial \epsilon_{oct}} = \frac{1}{\left\{ \frac{1}{1-m} \cdot \frac{\alpha}{\tau_{octf}} \exp\left(\alpha \frac{\tau_{oct}}{\tau_{octf}}\right) (T)^{1-m} + \frac{a}{(1-b \tau_{oct})^{\frac{1}{n}}} \left(1 + \frac{b \tau_{oct}}{1-b \tau_{oct}} \cdot \frac{1}{n}\right) \right\}} \quad (8)$$

参考文献) 1) Shingh他 "General Stress-Strain-Time Function For Soil" ASCE, SM1, 1968

2) Duncan他 "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils" ASCE, SM5, 1970

3) 泉 他 "岩盤掘削解析の一試案" 第14回土質工学研究発表会, 1979

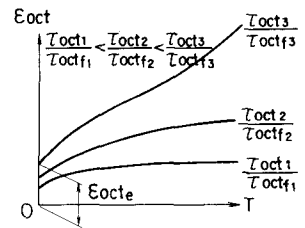


図-2 $\epsilon_{oct} - T$

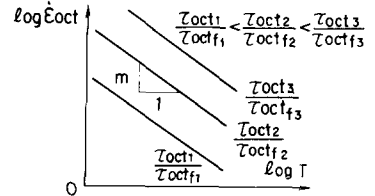


図-3 $\dot{\epsilon}_{oct} - T$

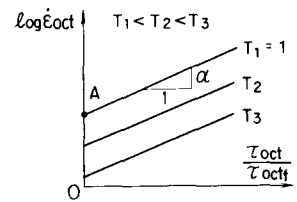


図-4 $\dot{\epsilon}_{oct} - \frac{\tau_{oct}}{\tau_{octf}}$

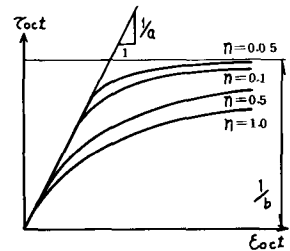


図-5 $\tau_{oct} - \epsilon_{oct}$

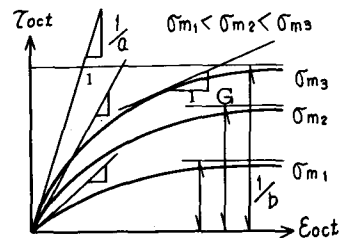


図-6 $\tau_{oct} - \epsilon_{oct}$

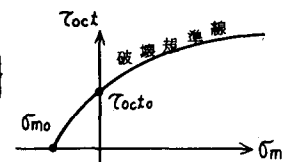


図-7 破壊規準