

軟岩トンネルの非線形挙動

（株）地崎工業 正会員 ○渋谷 卓
近畿大学理工学部 正会員 久武 勝保

1. 緒論

本研究は軟岩トンネルの膨張特性を明らかにするために、応力-ひずみ関係の非線形性、拘束圧依存性¹⁾に加えて、降伏前後の体積変化特性を考慮して、等方初期応力P下の二次元円形トンネル（半径= r_i ）の理論解を導き、パラメトリックスタディにより、考察を加えたものである。

2. 解析手法

軟岩の応力-ひずみ関係の非線形性を表現するために、八面体平面上のせん断応力 τ_{oct} とせん断ひずみ γ_{oct} の関係式（1）の双曲線で近似し、図-1(A)に示す様な構成関係を仮定する。

$$\tau_{oct} = \frac{\gamma_{oct}}{e + f \cdot \gamma_{oct}} \quad (1)$$

$$\text{ここに、} e = \frac{1}{G_i}, \quad f = \frac{R_f}{\tau_{oct, f}}, \quad R_f = \frac{\tau_{oct, f}}{\tau_{oct, ult}}$$

G_i は、初期接線せん断弾性係数、 $\tau_{oct, f}$ は、測定される最大応力、 $\tau_{oct, ult}$ は、双曲線モデルでの終局最大応力である。また、非線形パラメター R_f は0~1の間の値をとり、1に近づく程非線形性が強い。岩に対する降伏条件式は普通非線形で表されるので、以下の様な降伏条件式を採用する。

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + s \cdot \sigma_c^2} \quad (2)$$

ここに、 σ_c は、一軸圧縮強度、 s と m は、岩の特性に応じて決まる材料定数である。

また体積変化特性として、降伏するまでは体積減少し、降伏後体積膨張するものとし図-1(B), (C)に示す様な構成関係を仮定する。

ここに、応力、ひずみとも圧縮を正、体積減少を正とする（図-1）。

3. 考察

本研究で用いた解析条件を表-1に示す。図-2は、地山強度比が小（ $\sigma_c/P = 0.5$ ）で線形的（ $R_f = 0.001$ ）な場合における、半径方向変位分布であり、

体積変化を考慮しない場合○、体積膨張のみを考慮した場合●、体積減少のみを考慮した場合△、体積減少と膨張の両者を考慮した場合▲の結果である。さらに降伏域半径を矢印で示している。当然の事ながら●の変位は、降伏域内で○よりも大であり、▲と△についても同様のことが言える。また体積減少を考慮しない○と●の場合の降伏域半径 r^*/r_i は1.934であり、これを考慮する△と▲の場合の値1.637に比べて大きい。すなわち体積膨張を考慮しない場合と考慮する場合の変位の差は、体積減少を考慮した場合よりも、体積減少を考慮しない場合で大である。従って、体積変化を考慮した支保工等の設計を、最も安全側で行うには、三軸圧縮試験等で測定される体積変化係数のうち、体積減少係数 Q_1 は0または最小値、体積膨張係数 Q_2 は最大値を採用する必要がある事がわかる。体積減少のみを考慮する△の壁面変位は、○に比べて小さいが、壁面から離れるに従って両者の関係は逆転し△

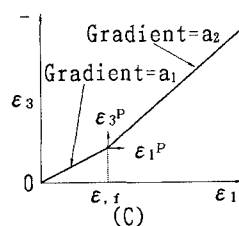
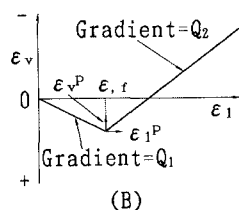
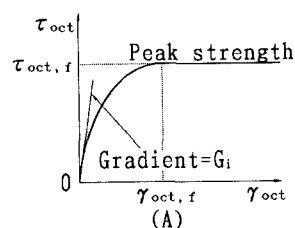


図-1 仮定した構成関係

表-1 解析条件

トンネル半径(r_i)	3.0(m)
強度パラメーター(m)	2.5
強度パラメーター(s)	1.0
一軸圧縮強度(σ_c)	154~924(tf/m ²)
初期応力(P)	308.0(tf/m ²)
σ_c/P	0.5~3.0
$G_i/\tau_{oct, f}$	184.0
非線形パラメーター(R_f)	0.001~0.999
体積減少係数(Q_1)	0.00, 0.50
体積膨張係数(Q_2)	0.00, -1.00

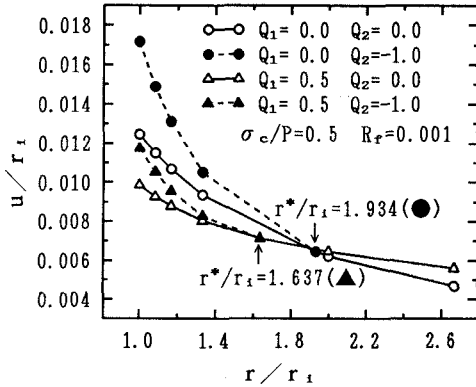


図-2 線形性が強い場合の変位分布

の方が大きくなる。これは、図-3により理解できる。

図-3は、図-2の場合における半径方向の応力分布であり、体積変化を考慮しない場合○と体積減少を考慮した場合▲の結果である。また円周方向応力についても同様の結果が得られた。掘削による応力解放の影響は、▲の方が地山に深く伝播するので、▲の σ_r は、○に比べ初期応力Pに漸近にくい。このため図-2における△と○の変位逆転は、体積減少の影響により深く伝播した応力によって引き起こされることが理解できる。

図-4は、 $\sigma_c/P=0.5$ で非線形性が強い（ $R_f=0.999$ ）場合のトンネル半径方向の変位分布である。地山強度比が小であっても非線形性が強いいため、降伏域は発生していない。図-2と同様、体積減少に起因する変位の逆転が見られるが、これは図-2、3と同じ理由である。

図-5は、 $\sigma_c/P=0.5$ の場合における、 R_f の変化に対応した壁面変位である。非線形性が大なる程（ $R_f \rightarrow$ 大）壁面変位は大であるが、しかし体積膨張を考慮しない場合（○と△）に比べて、体積膨張を考慮する場合（●と▲）は、壁面変位の増加傾向は緩慢である。また体積減少を考慮しない場合（○と●）の壁面変位は、体積減少を考慮する場合（△と▲）のそれより大である。地山が降伏しなければ、 R_f が大なる場合よりも R_f が小なる場合で壁面変位は小であるが、 R_f が小である地山程降伏し易く、さらに降伏すると変位が多く発生し易いので注意を要する。

4. 結論

- ① 体積減少を考慮する場合は、考慮しない場合に比べて、降伏域は小であり、壁面変位も小となる。
- ② 地山の膨張特性を考慮して支保工等の設計を最も安全側で行うには、体積変化係数は減少係数で0、膨張係数で最大値を採用すればよい。
- ③ 地山が降伏しなければ、 R_f が大なる場合よりも R_f が小なる場合で壁面変位は小であるが、しかし R_f が小である地山程降伏し易いので注意を要する。

参考文献 1)久武、桜井、伊藤：「軟岩トンネルの非線形弾塑性挙動」、土木学会論文集、第418号/Ⅲ-13、1990年

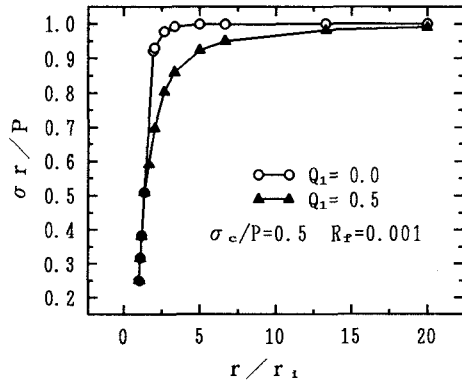


図-3 線形性が強い場合の応力分布

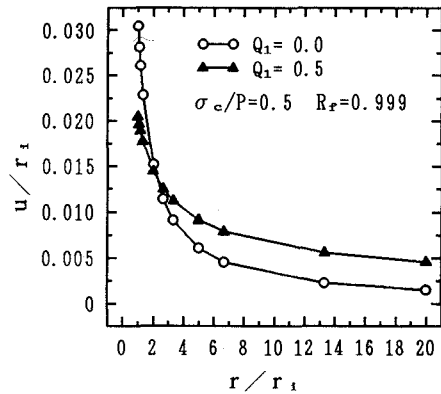


図-4 非線形性が強い場合の変位分布

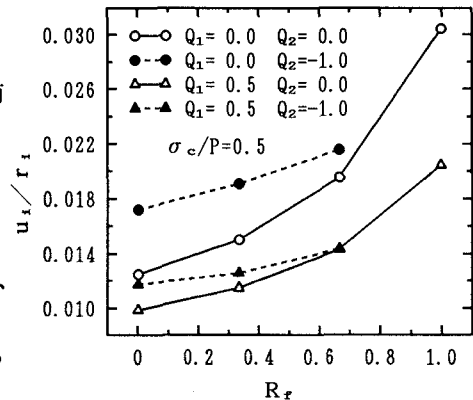


図-5 R_f の変化によるトンネル壁面変位