

CRC総合研究所 正会員 ○中川 光雄
九州大学工学部 正会員 蔣 宇静
九州大学工学部 正会員 江崎 哲郎

1. まえがき

最近、土質・岩盤工学の分野においても大変形解析を導入しようとする試みが見受けられる。例えば軟岩は岩として見る立場からは数10kgf/cm²以下の低い強度を呈し、掘削時の内空壁面ひずみが5%-10%またはそれ以上にも達するなど、変形の大きな材料として扱われる必要がある。従って軟岩等を対象とした連続体としての数値解析を考える場合、従来の微小変形理論に基づく有限要素法などでは破壊後の大変形や塑性流動の表現が困難であるため¹⁾、大変形を正確に表現し得る解析手法が望まれるところである。著者らは、1988年 P.A. Cundallにより開発された陽解法有限差分法解析コードFLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) がこの場合に有効な解析手法であると考え²⁾、本報では一軸試験結果の再現や軟岩トンネル掘削解析を例に取り、その適用性を考察した。

2. 大変形問題とは

図-1のようなトラスを考える。変形途上のある時刻 $t=t$ において外力 N^* に対して変位 u が対応しているとすると、つりあい式は、

$$SR^*\sin\theta = 1/2 N^* \quad (1)$$

微小時間 Δt 後の $t=t+\Delta t$ において、 Δu と $\Delta\theta$ を無視すると微小変形理論となり、次式が得られる。

$$S(R^*+\Delta R)\sin\theta = 1/2 (N^*+\Delta N) \quad (2)$$

しかしながら、 Δu と $\Delta\theta$ を考慮し、2次の微小項を無視して $\cos\Delta\theta \approx 1$, $\sin\Delta\theta \approx (\Delta\theta)$ とすると、式(3)が導かれる。

$$S[R^*\Delta u/L\cos^2\theta + \Delta R\sin\theta] = 1/2 \Delta N \quad (3)$$

ひずみ増分 $\Delta\epsilon = (\Delta u/L)\sin\theta$ 、応力増分とひずみ増分の関係 $\Delta R = D\Delta\epsilon$ を(3)に代入すると、

$$S[R^*\cos^2\theta + D\sin^2\theta] \Delta u/L = 1/2 \Delta N \quad (4)$$

左辺第1項は変形による形状変化の項であり、これを無視すれば微小変形理論の結果となる。このように、変形が大きくなると、どのような状態を基準として記述するかによってつりあい式の形が異なるので、変形や運動に関する幾何学的な量が関係するようになる。この結果生じる場の方程式

の非線形性は幾何学的非線形性と呼ばれ、大変形問題の実現にはこれに対する考慮が必要となる。

3. 大変形問題の定式化²⁾

FLACは、運動方程式の陽な形の時間差分に基づき逐次計算を実行する有限差分法コードである。従って全体剛性マトリックスを必要とせず、破壊後の塑性流動に至る大変形までを解析可能としている。逐次計算の1増分変形段階あたりのプロセスを図-2に示す。また、FLACでは以下のような幾何学的非線形性を考慮している。1)座標系の取り扱い；個々の増分変形段階の変形後の状態を新たな参照基準として増分変形過程を取り扱うように定式化するUpdated Lagrange法の採用。2)ひずみ増分；刻々の変形によって更新された変形後の座標を基準として定義されたひずみ速度(速度勾配テンソルの対称部分である変形速度テンソル)の採用。3)応力増分と客観性；剛体回転による補正を考慮してJaumann微分を採用。

4. 一軸圧縮試験のシミュレーション

本報では大変形の特性を観察し易くするため、柔らかい材料の一軸圧縮試験結果を用いて数値解析による再現を試みた。試験から得られた材料の物性を表-1に示す。高さ9.03(cm)、直径4.98(cm)の円柱供試体にひずみ速度 5.0×10^{-7} で最大17%まで載荷した。解析は供試体を同一寸法の軸対称体でモデル化し、Mohr-Coulombの降伏基準に基づき、試験結果より推察される完全弾塑性とダイレタンシー角12.7°を解析条件とし、軸ひずみ17%まで載荷した。解析による変形及び塑性領域を図-3に示す。また、試験結果と解析結果を合わせて図-4に示す。これより、軸応力-軸ひずみ曲線においては解析と試験はよい一致を示した。また、体積ひずみ-軸ひずみ曲線においては、軸ひずみ2.56%付近までは両者はよく一致したが、それ以降は解析の方が大きくなる。これは、本報の解析条件には軸ひずみの増加に伴うダイレタンシー角の低下が考慮されていないことによると思われる。

5. 軟岩トンネル安定解析への適用

次に軟岩地山での地表面から深さ50m、直径10mの単一トンネル掘削を例として、大変形解析の適用性を検討した。本例はMohr-Coulombの降伏基準に基づき、ひずみ軟化特性及びダイレタンシーを考慮した。用いた物性値を表-2に示す。図-5のように、内空壁面変位に関してはダイレタンシーの影響により側壁部に大きな増加が表現されている。また、塑性領域に関しては、側壁付近に塑性領域の広がりが見られる。これは与えた

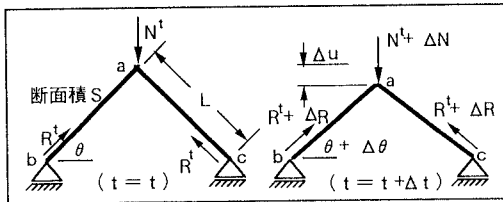


図-1 簡単な例題

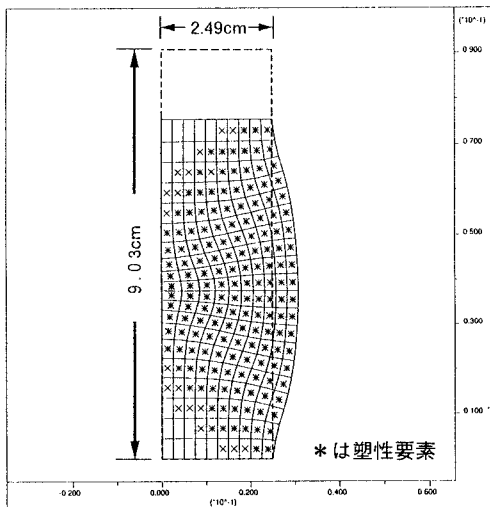


図-3 供試体の変形・塑性領域

表-1 供試体の物性

弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン 比	単位体積重量 (tf/m ³)	粘着力 (kgf/cm ²)	内部摩擦角 (deg)
519.0	0.18	1.9	0.44	29.8

表-2 軟岩地山の物性

弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン 比	単位体積重量 (tf/m ³)	粘着力 (kgf/cm ²)	内部摩擦角 (deg)
1.485×10^3	0.3	1.9	1.24	32.8

ひずみ軟化モデルによる降伏後の強度低下が表現されていることによるものと思われる。

6. あとがき

本報に示した大変形解析は、塑性流動のような大変形領域に至るまでうまく表現することができた。今後は、ダイレタンシー特性の表現に関しては、さらに検討を進め、また、微小変形理論に基づく解析との比較によって大変形解析の特徴と適用性を明らかにする事が今後の課題となる。

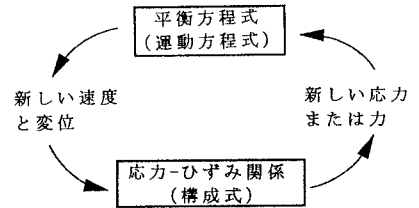


図-2 1増分あたりの計算プロセス

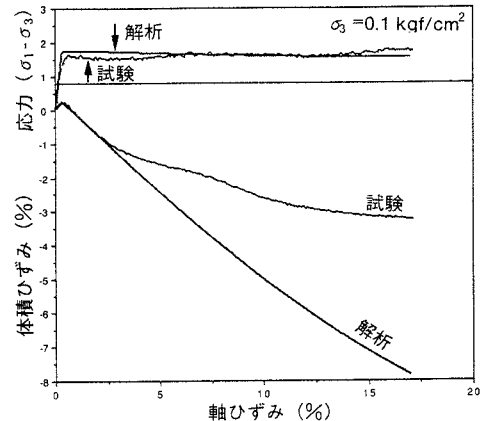


図-4 一軸圧縮試験及び解析結果

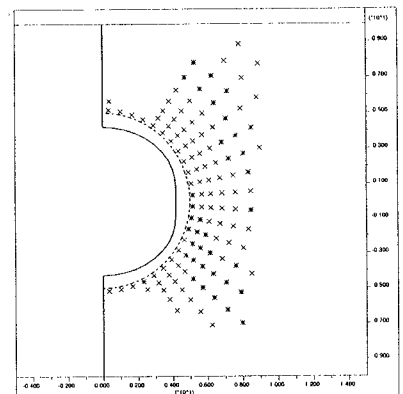


図-5 軟岩トンネル掘削解析

＜参考文献＞ 1)川本，石塚：ひずみ軟化を考慮した岩盤掘削の解析，土木学会論文集，No.321，pp.107～117，1981. 2)中川，蔭，江崎，阿部：軟岩トンネルにおける大変形解析法の適用について，第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp515～519，1994.