

大成建設(株) 正員 ○ 里 優
同 上 正員 木村 洋行
同 上 正員 亀村 勝美

1. まえがき

中硬岩から成る岩盤の力学的挙動は、岩盤の有する不連続面の存在に強い影響をうけ、異方性を伴う非弾性的挙動を示すことが知られている。筆者らは、このような岩盤に特有な性質を連続体力学の範囲で平易に表現することを目的として、弱面や破壊面に対する岩盤の挙動に着目した比較的簡単な力学モデルによる弾塑性解析を実施している。⁽¹⁾ 本報告では、この解析手法をトンネルの掘削問題に適用し、層理の卓越した岩盤におけるトンネル計測例を基に数値解析結果を検討し、弱面がトンネル周辺の岩盤に与える影響を考察した。あわせて直交異方性解析結果と比較し、その差異について論じた。

2. 岩盤の性質のモデル化と計算手法

岩盤の挙動は、破壊以前に呈する変形の非線形性や異方性に比べ、層理、節理などの弱面や新たに発生した巨視的な破壊面における分離的挙動により特徴づけられる。解析においてはこのような特性を重複し破壊に至るまでの剛性の異方性、非線形性等は無視するものとし、弱面あるいは破壊面の存在による弾塑性挙動を次のようにモデル化した。すなわち、これらの面の存在する角度では、健全な岩盤部分に比べ抵抗できる応力が小さいため、異方的な破壊特性を帯びる。そこで、これらの面の応力状態を満たすべき条件を次のように与えるものとする。

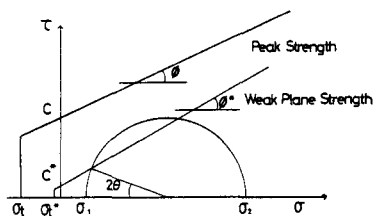


図-1 破壊基準

$$\begin{aligned} |\tau_w| + \mu^* \sigma_w &= C^* & \sigma_w &\leq 0 & (1) & \sigma_w, \tau_w : \text{弱面に作用する垂直応力及びせん断力} \\ \sigma &= \sigma_t^* & \sigma_w &> 0 & & \mu^*, C^*, \sigma_t^* : \text{弱面の摩擦係数及びびくかけの粘着力, 引張強度} \end{aligned}$$

面上のせん断応力と垂直応力がこの条件を越えた場合、面は滑動、分離すると考える。有限要素法を用いた数値解析にあたっては、面の存在する角度での応力状態を算定し、これを(1)式の条件を越えていないかを判定し、越えている場合には適切なせん断応力又は引張応力を周囲の岩盤に再配分し、面上のつり合いを回復するようにする。この修正計算には初期応力法を用い、弾性回復時における処理を容易にした。なお、健全な部分の破壊条件は(2)式で与え、弱面で破壊が生じない場合はこの条件で破壊を判定する。破壊後の残留強度条件は(1)式と同様な手法で扱う。

$$\begin{aligned} |\tau| + \mu \sigma &= C & \sigma &\leq 0 & (2) \\ \sigma &= \sigma_t & \sigma &\geq 0 \end{aligned}$$

ここに、 C 、 μ 、 σ_t は健全な岩盤部の粘着力、摩擦係数、引張強度である。なお、破壊面は主応力に対し、 $\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\mu}{1}$ の角度に形成されると仮定する。

3. 現場計測例

潜在的に破壊した面を持つ岩盤に対する本手法の適用性を検討するため、頁岩層中に掘削されたトンネルの計測結果を参考にした。本トンネルはNATMにより施工され、土被りは約120mで、

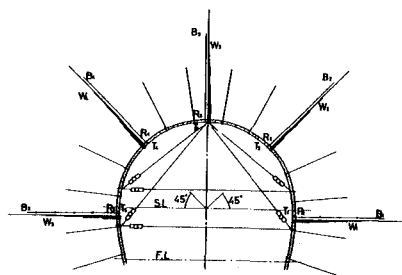


図-2 計測計器配置図

水平面に対し $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ の顕著な層理面を持つ。

図-2に主計測断面における測定器の配置を示す。図-3は多点式変位計による地山内変位の分布を示したものである。トンネル左側壁部の押出しが大きいことわかる。実際、左肩部において層理面に沿った岩塊の剥離が多く観察されており、この変形の偏りは岩盤強度の異方性が主要因であると考えられる。

4. 有限要素法による数値シミュレーション

解析は素掘り状態にて行ない、解析に用いた定数は以下の通りである。

弾性係数 $E = 5 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$, ポアソン比 $\nu = 0.25$
 健岩の強度 $C = 50 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi = 37^{\circ}$
 弱面の強度 $C = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$, $\mu^* = 1.0$
 弱面の角度 $0 \sim 90^{\circ}$

以上のうち、弱面の条件以外はボーリングコアの一軸圧縮試験に基づき決定し、弱面の条件は推定による。

解析結果を図-4～図-7に示す。図-4より弱面の角度がトンネル内空変位に与える影響の様子がわかる。図-5は弱面の角度を 60° とした場合の破壊領域を示す。破壊領域は弱面の角度とほぼ直角方向に発達し、左肩部に顕著な破壊がみられる。この様子は現場の状況とよく一致している。図-6のトンネル接線方向応力(σ_{θ})分布図によれば、左肩部の破壊により応力低下が深部まで及び、両側壁では表面付近で応力低下する様子わかる。図-7は地山内変位量を計測点に対応させて図示したものである。破壊の着しい左肩部から左側下部の領域では、弾性解より変位が大きくなっている。図-7には直交異方性($E_1/E_2 = 2$)の解析結果を合わせて図示したが、両側下部の変位の傾向は、本解析とも計測結果とも異なり、逆方向に変位している。(計測結果によれば、特に左側下部において破壊に伴う大きな押出し変位が発生している。)このことは、単に変形の異方性を考慮した解析では現象を十分に説明しきれないこと、強度の異方性という面から破壊後の挙動を取扱う必要があることを示唆している。

5. あとがき

変位量そのものは計測値に比べ著しく小さく、地山の変位モードも必ずしも実測と一致していない。これは、岩盤物性、初期地圧、ライニングの剛性及切羽の進行などの要因が十分吟味されていないためである。しかしながら、今回の解析を通じて、トンネル周辺の岩盤の破壊や変位の傾向から、弱面を有する岩盤の解析として本解析法が有効な方法であるとの知見を得た。今後、上記の点を含め、さらに検討を加える予定である。

1) 林, 亀村, 原田, 里; 破壊面を考慮した岩盤挙動の解析, 第16回土工学研究発表会

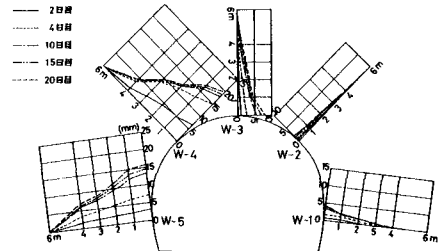


図-3 地山内変位計測結果

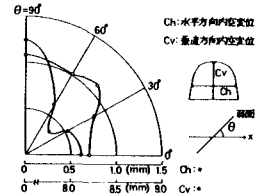


図-4 弱面の角度がトンネル内空変位に与える影響

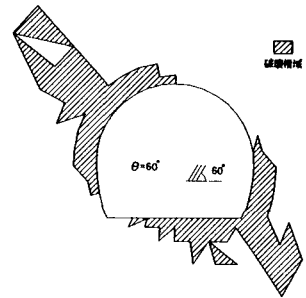


図-5 破壊領域

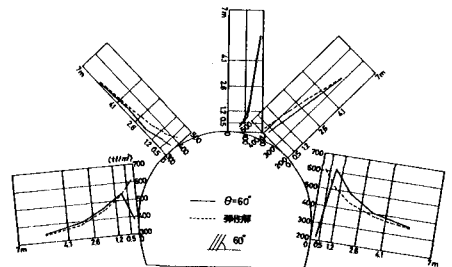


図-6 地山内応力(σ_{θ})分布図

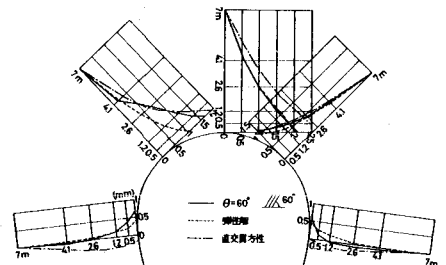


図-7 地山内変位分布図