

III-342 FEM軸対称解析によるトンネルの三次元挙動についての一考察

前田建設工業	正会員	桜井孝臣
同上		藤岡宏文
同上	正会員	梨本裕
同上		高森貞彦

1. まえがき

トンネルの設計に利用されるFEM解析は一般的に二次元平面ひずみ条件で行われており、切羽の三次元的な支保効果を、応力解放法等の間接的な手法を用いて評価しているのが現状である。しかしながら、このような方法では、トンネル掘削による周辺地盤および支保工の挙動を解析するには限界があり、把握できていない挙動も少なくないと考えられる。また、先受工等の支保効果の評価方法が問題となっているが、これ等の評価も二次元解析では困難である。コンピューターがハード・ソフトの両面でますます充実してきているため、今後は便宜的に設けられていた仮定や想定をできるだけ排除して解析を行うことが必要になってくると思われる。本報告においてはトンネルの施工過程を考慮した軸対称FEM解析を行い、二次元解析の問題点と三次元解析の必要性について検討を行う。

2. 解析条件

解析手法には軸対称FEM弾塑性解析を用いた。地山については完全弾塑性体とする。解析位置は深度200mとし、均質等方応力条件下での円形トンネルを想定する。解析は施工過程を考慮し、2m掘進と、その位置の覆工（吹付コンクリート）の施工を交互に繰り返す。ただし、ロックボルトは考慮していない。解析に用いた物性値等の条件を表-1に示す。

3. 解析結果と考察

(1) 地山について

まずトンネル周辺に発生した塑性領域を図-1に示す。切羽側方に比較して、切羽前方においてかなり広範囲に塑性化しており、切羽中心付近においては0.6D（D：トンネル径）前方まで及んでいる。一方、切羽側方においては覆工を施工していない位置において、0.2D程度の幅で塑性領域が生じているが、覆工施工後に消失している。切羽進行にともなう覆工背面地山要素の応力経路は、図-2に示すようになっている。

表-1 解析条件

地盤物性	単位体積重量： $\gamma=1.8 \text{ tf/m}^3$
	弾性係数： $E=7500 \text{ tf/m}^2$
	粘着力： $c=28 \text{ tf/m}^2$
	内部摩擦角： $\phi=20^\circ$
覆工物性	ポアソン比： $\nu=0.3$
	弾性係数： $E=2.5 \times 10^4 \text{ tf/m}^2$
形状寸法	ポアソン比： $\nu=0.2$
	トンネル半径： $r=5 \text{ m}$
初期地圧	覆工厚さ： $t=0.5 \text{ m}$
	鉛直地圧： $\sigma_{yo}=360 \text{ tf/m}^2$
	側圧係数： $K_0=1.0$

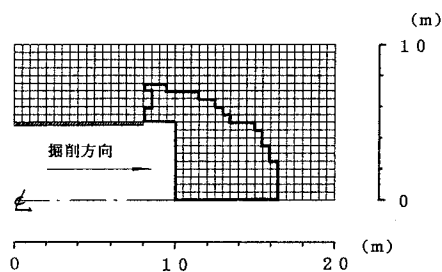


図-1 掘削により生じた塑性領域

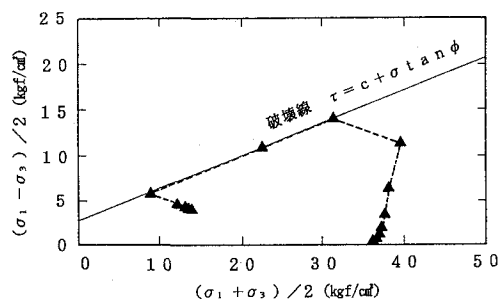


図-2 覆工背面地山要素の応力経路

ここで応力経路は、初期応力からわずかに平均応力が増加しながら破壊線に到達し、その後破壊線上を移動した後、覆工施工時より再度平均応力が増加しながら弾性領域に復帰している。これは覆工が背面地盤を押し戻すように作用するためと考えられる。ただし、ここでは中間主応力については考慮していない。

(2) 支保工について

次に覆工の周方向応力 σ_θ を図-3に示す。これより覆工の周方向応力はトンネルの位置によって異なり、切羽に近いほど大きくなること分かる。このようなトンネル軸方向の分布を、二次元解析で模擬することは困難である。この応力分布については計測・実験等で確認する必要がある。覆工応力の測定位置についても検討の余地があると考えられる。今回ロックボルトの支保効果は無視しているが、覆工と同時にロックボルトをトンネル軸直角方向に施工したと仮定し、ロックボルトのひずみ分布が地山のひずみ分布と同一と考えると、ロックボルトの軸ひずみ分布は図-4に示すようになる。これより、ロックボルトには覆工に近づくほど大きな圧縮応力が生じることが分かる。覆工設置と同時にロックボルトを施工する場合には、以後の掘削によるトンネル側壁の変位が抑制されるため、ロックボルトには側壁付近で圧縮力が作用することになる。覆工と地山の弾性係数比および覆工厚により、この分布も変化すると考えられるが、今回のような場合には側方の地山要素が覆工施工後安定化に向かうことを示している。次に地山内の節点変位ベクトルを図-6に示す。(変位の着目点については図-5参照) この図は初期の位置を同一原点上に移動したときの各節点の変位ベクトルを示している。これより①部・②部掘削とも、トンネル軸直角方向の変位が卓越していることがわかる。

4. まとめ

以上の解析結果より次のことがいえる。

ロックボルトは覆工が効果を発揮するまで地山の連続性を保持するための一時的な支保と見なしたほうが良いと考えられ、従来のロックボルトの支保効果を見直していくことが必要である。また切羽が掘削により開放されるときに、天端付近の安全性が最も低下すると考えられるため、天端位置に先受け工等の支保があらかじめ存在していることが望ましいと考えられる。この時天端部の先受け工は、地山変位の方向を考慮すると曲げ剛性の高い材料を施工する必要がある。以上、軸対称解析の結果に基づいて、二次元解析の問題点および三次元解析の必要性について検討を行ったが、今後はより実施工に即した三次元解析を行い、その結果から得られた知見を計測などによって検証していく必要があると考えられる。

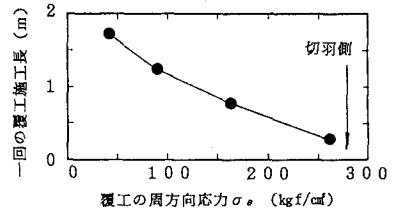


図-3 覆工周方向応力のトンネル軸方向分布

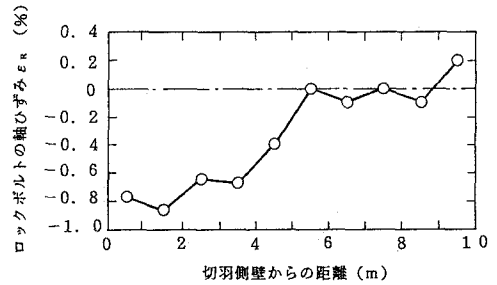


図-4 ロックボルトの軸ひずみ分布

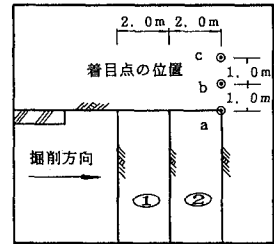


図-5 変位の着目点

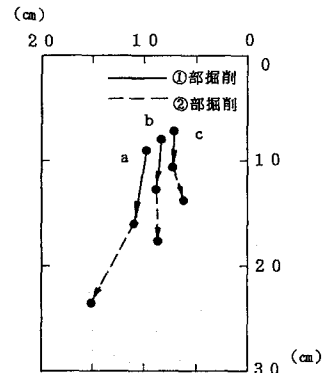


図-6 切羽進行による地山内の節点変位