

楕円トンネルの安定性に関する二次元有限要素解析

鳥取大学 〇田村 学
 大成建設 正会員 文村 賢一
 鳥取大学 正会員 河野 勝宣
 鳥取大学 フェロー 西村 強

1. 緒言

トンネル掘削時の力学的安定性を保持するためには、地盤の強度や初期応力状態に加えてトンネル形状も重要な因子と考えられる。つまり、力学的には円形が有利な形状であるが、道路トンネルそして地下鉄の駅部など偏平な形状となっている例が多い。このようなトンネルでは、空洞形状の偏平度によって空洞まわりの応力や変形の状態が円形の場合とは大きく異なっており、周辺地盤の安定性は空洞形状を考慮しながら検討する必要がある。このようなことから、楕円トンネル周辺地盤の事前設計法が報告されている¹⁾。その事例では、楕円トンネルとして取り扱うべき形状、側圧係数に注目した安定性評価の指標などが論じられている。空洞形状を楕円(側壁中央間長を a 、天端-インバート間長を b 、偏平比 $f=b/a$ と表示)と仮定して、 f ($=2/3, 1.0, 3/2$) と側圧係数 k ($\sigma_h=k\sigma_v$) の数例の組合せについて二次元有限要素解析を実施した。トンネル掘削は掘削部要素の応力解放で表現し、地盤はモールクーロンの破壊規準に従う材料として塑性域の進展も報告する。ここに示す解析例では、土被り厚の大小について2つの例を示している。このような解析の目的は、空洞周辺地盤に不安定を与える条件を例示して、安定性保持のための側圧係数と偏平度に対する与条件を考察することである。

2. 楕円形トンネル周辺地盤の有限要素解析

この報告では、(1) トンネル断面は楕円断面である、(2) トンネル空洞が設置される前の地山内応力は、鉛直方向に土被り圧が、水平方向には鉛直方向応力に側圧係数を乗じたものが作用すると仮定する。トンネル覆工の設置を考慮しない素掘り状態における地盤内応力を解析する。図-1, 2に解析モデル、表-1に解析に関係する諸定数の値を記載する。1.に述べたように2例を実施する。解析に際しては、初期応力状態を求めた後に、トンネル空洞に当たる部分の要素内の応力解放によって掘削の進行を表現した。応力解放率を λ と表記して、 $\lambda=0$ が初期地盤、 $\lambda=1$ が完全掘削の状態を表す。図-1の境界条件の記載で示される通り、土被り厚が小さい場合(Case 1)は側方拘束の条件であり、側圧係数は $k=v/(1-v)$ となる(v はポアソン比)。一方、土被り厚が大きい場合(Case 2)では、 $\sigma_0=\gamma h$ ($h=100m$)を上面に作用させるとともに、側圧係数を与える条件とした。この解析には、有限解析ソフト 2D- σ を使用した。

表-1: 物性値

	Case 1	Case 2
ヤング率 $E(MPa)$	500	1000
単位体積重量 $\gamma(kN/m^3)$	24	24
内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$	30	30
粘着力 $c(MPa)$	0.2	1.0
ポアソン比 ν	0.1/0.25/0.49	0.25

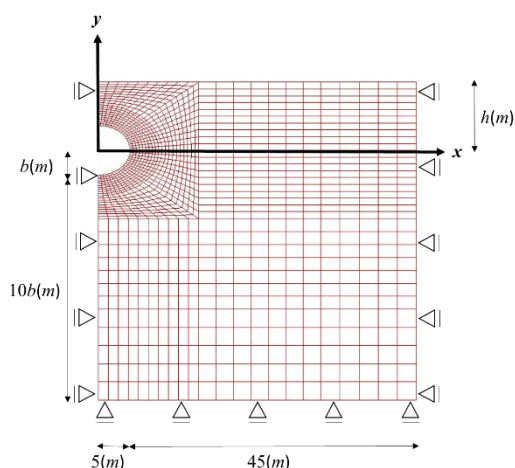


図-1: 解析モデル Case 1

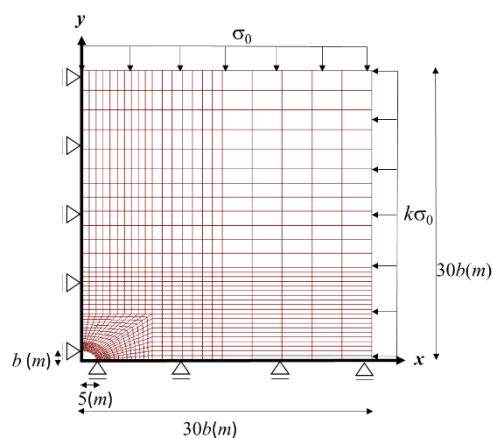


図-2: 解析モデル Case 2

キーワード 偏平トンネル, 楕円, 側圧係数

連絡先 〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4丁目101 鳥取大学大学院 TEL: 0857-31-5297

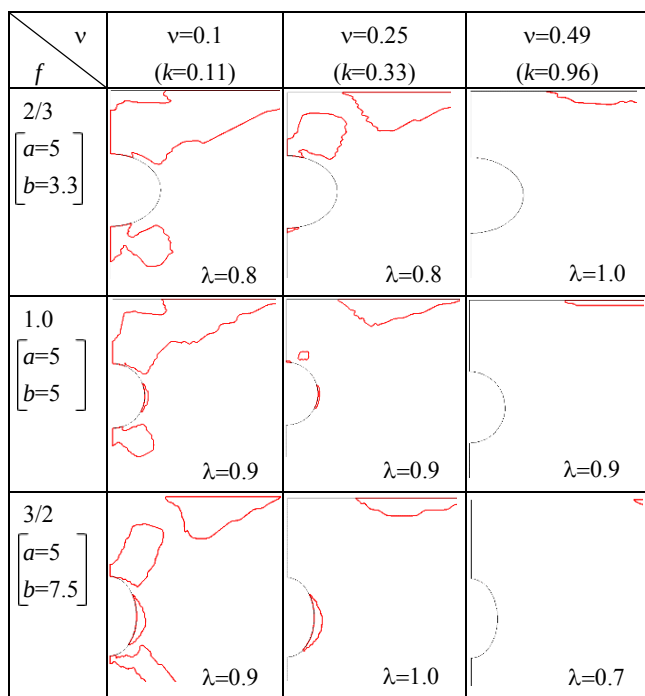


図-3：空洞周辺の塑性域 Case 1

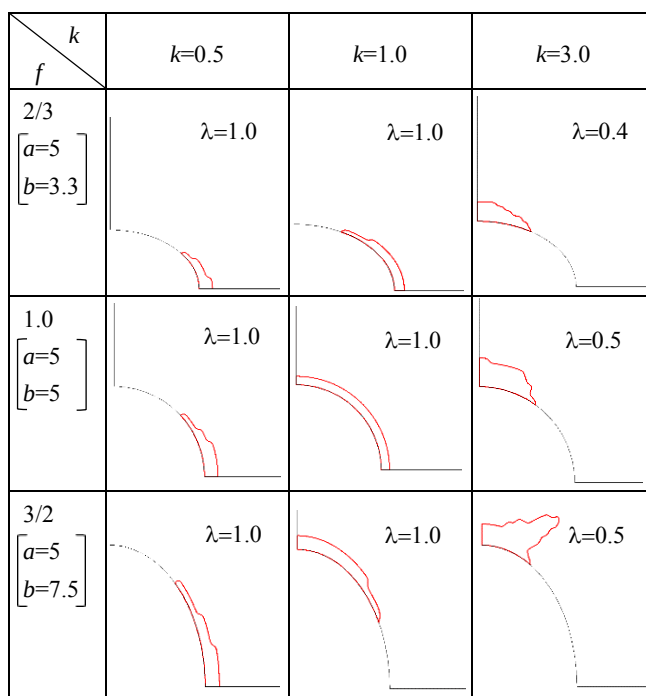


図-4：空洞周辺の塑性域 Case 2

Case 1 について、塑性化した領域の進展を図-3 に示した。λを0より0.1刻みで増加（つまり応力解放）させる手順において、図中に示すλの値が0.9以下であれば次段階では（つまり0.1大きい）解析結果が得られていない。このことは、応力解放に対してつり合い状態に至っていないと判断している。同図では、k がポアソン比vの関数となることから、vとfを注目因子としてまとめ、図中の赤線で囲まれた部分が塑性化していることを示す。この図のうち、(f=2/3,v=0.1)、(f=2/3,v=0.25)の結果では、天端付近と地表面付近に塑性域の発生が見られる。そして、これらの例で、f=1.0、3/2 とすれば、λの値を大きく設定できる、あるいは塑性域の縮小が観察できる結果となる。

Case 2 について、塑性化した領域の進展を図-4 に示した。解析手順および図中のλの値の示す内容は Case 1 に同じである。この例では、k と f を注目因子としてまとめている。同図より、(f=1.0, k=1.0)つまり等方応力下の円形トンネルでは、塑性域の外周がトンネル中心をその中心とする円として表現されている。そして、k の値より塑性域が発生する部分が天端部付近あるいは側壁付近と変化する様子がわかる。

3. 地下浅所トンネルの形状と周辺地盤の力学的安定性

ここでは(Case 1, f=2/3)で得られた結果を照らして、空洞安定性保持のために目安となる側圧係数 k と f の関係について考察する。例えば、 $\sigma_v = \sigma_0$, $\sigma_h = k\sigma_0$ の圧縮状態下の円形空洞 $a=b$ を考える。地盤材料の引張強度に空洞安定性への寄与を期待しないとの前提を導入すれば、 $\theta = \pi/2, 3\pi/2$ で周方向応力 $\sigma_\theta > 0$ となるためには、 $k > 1/3$ となる。 $a \neq b$ でない場合にもこのようなことが利用できるとすると、図-5 の点 B において次式が必要になる。

$$\sigma_x = k\sigma_0 \left(1 + \frac{2b}{a} \right) - \sigma_0 > 0$$

これより、

$$\frac{b}{a} > \frac{1}{2} \left(\frac{1}{k} - 1 \right) \text{ あるいは } k > \frac{a}{a+2b} \quad (1)$$

以上の記述には、多くの仮定が含まれている。楕円孔周辺の応力状態については、荒井²⁾や杉本らにより厳密な解が得られている。式(1)において $a=5, b=3.3$ (f=2/3) とすれば $k > 0.43$, $a=5, b=7.5$ (f=3/2) とすれば $k > 0.25$ である。この k の下限値をもとに、図-3 の v=0.1 をみると、f が小さいつまり横長の楕円ほど応力解放率λの値が小さくなるようである。今後、既往の研究における厳密解を利用した検討を実施する予定である。参考文献：1)杉本光隆：エネルギー論に基づく楕円トンネルの安定解析，土木学会論文集，第 424 号/III-14, pp.197-205, 1990. 2)荒井利一郎：巻き立て無き楕円形隧道付近に於ける應力の状態について，土木学会誌，第 28 巻，第 12 号，pp.1126-1147. 1942.

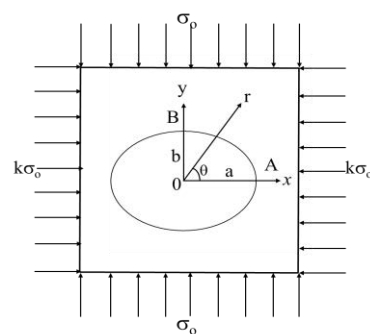


図-5 楕円孔周りの応力状態