# 鹿児島大学 学生員〇与倉 一馬 鹿児島大学 正会員 山本健太郎

University of Newcastle A.V. Lyamin, D.W. Wilson and S.W. Sloan

#### 1. はじめに

地表面下にはトンネルのみならず、パイプラインや地下壕、廃坑なども数多く存在し、都市化などに伴い、 地下空洞を有する地盤をも基礎地盤として考慮することは少なくない。よって、地下空洞を有する地盤の安 定性を評価することは重要である。しかし、地下空洞を有する地盤の極限支持力を評価できる一般的に確立 された設計や解析手法がないのが現状である。本研究では、地下空洞を有する地盤の極限支持力を数値極限 解析により求め、地下空洞の存在が地盤の支持力と破壊メカニズムに及ぼす影響について検討を実施した。 2. 対象問題

実務上での興味の対象となる Fig. 1 に示した、土被りが浅い円形空洞を有する地盤条件に対して数値極限 解析を実施した。ここに、 $\sigma_s$ :極限支持力、c':地盤の粘着力、 $\phi'$ :地盤の内部摩擦角、 $\gamma$ :地盤の単位体積 重量、D:空洞の直径、H:空洞上面までの土被り、L:荷重の載荷幅、e:載荷幅中心と空洞中心との水平距 離を表す。また、地盤との interface は rough、載荷条件は rigid loading(剛基礎荷重)と設定した。

# 3. 数值極限解析

極限定理の利点と有限要素法を組み合わせることにより、極めて簡単に厳密な下界値と上界値を直接求めることができる数値極限解析が Sloan らによって開発されてきた<sup>1),2)</sup>。本研究では、厳密な下界、上界値を求めることが可能な数値極限解析を用いるものとする。なお、それらの定式化の詳細は参考文献 3)にゆずる。 Fig. 2 には offset となる円形空洞(*H/D*=2, *e/L*=1, rough interface)を有する場合に対する下界並びに上界解析 用有限要素とその境界条件の一例を示す。

## <u>4. 解析結果と考察</u>

Figs. 3-5 には上界有限要素解析からの(a)内部消散と(b)変位速度ベクトルと上界値(UB)を示す。(a)のコンタ ー図において、内部消散の大きさはカラーの濃淡で示され、青い箇所では塑性領域が生じていないことを示 す。また、下界有限要素解析からの塑性領域は内部消散の発生状況と良い一致を示したため、今回は省略し た。Figs. 3-5 ともに e/L=1 である offset 時のケースである。まず、Fig. 3(a)を見ると、載荷右端部と円形空洞 の上部、載荷左端部と円形空洞の下部を結ぶすべり面が見られ、(b)変位速度ベクトルからは載荷下部から円 形空洞の左半部に向かう破壊メカニズムが主であることがわかる。土被りと内部摩擦角が小さいため、この 時の上界値は 4.53 となった。次に、Fig. 3 と比較して、土被りは同じだが、内部摩擦角が大きいケースを Fig. 4 に示す。これを見ると、内部摩擦角も大きいため、載荷両端部から地表面に向かう変位速度ベクトルも見 られ、より複雑な多様な破壊メカニズムを示した。上界値も 22.77 となり大きくなったことがわかる。Fig. 5 には H/D=3, Ø'=30°の時のケースを示す。これまでのケースと比べて、土被りが大きく、Ø'も 30°のため、破 壊メカニズムからは円形空洞の影響を受けていないことが観察される。このケース時の地下空洞がない水平 地盤の上界値は 49.46 であり、Fig. 5 の上界値とほとんど同一であることもわかる。

最後に、Fig. 6 には H/D=1, 3,  $\gamma D/c'=1$  の時の設計チャートを示す。(a)からは e/L または $\phi'$ が大きくなるに つれて、上下界値のギャップが大きくなる傾向であることがわかる。(b)からは $\phi'=35^{\circ}$ の時の e/L<3のケース を除いて、ほぼ、地下空洞がない水平地盤時の上下界値が得られた。上記のケースでは、e/L=0 の時よりも offset であるため、載荷下部直下から円形空洞に向かう変位速度ベクトルも顕著に見られ、極限支持力が減 少する傾向となった。また、 $\gamma D/c'$ が大きくなると、空洞が崩壊するため、実行可能解を求めることができ なくなるケースが増加した。Fig. 6 のような設計チャートは実務に対しても有用になるものと考えられる。

## 参考文献

<sup>1)</sup> Sloan, S. W. and Assadi, A.: Stability of shallow tunnels in soft ground, *Predictive soil mechanics*, Thomas Telford, London, pp.644-663, 1992. 2) Lyamin, A. V. and Sloan, S. W.: Stability of a plane strain circular tunnel in a cohesive-frictional soil, *Developments in theoretical geomechanics*, Balkema, Rotterdam, pp.139-153, 2000. 3) Yamamoto, K. et al.: Stability of dual circular tunnels in cohesive-frictional soil subjected to a surcharge loading, *Computers and Geotechnics*, to appear.





Fig. 1. Plane-strain circular tunnel in cohesive-frictional soil.



Fig. 2. Finite element mesh for H/D=2 and e/L=1showing boundary conditions (rough interface).



(b) Velocity plot

(a) Power dissipation Fig. 3. Results of upper-bound finite element limit analysis (*H*/*D*=1,  $\phi' = 10^{\circ}, \gamma D/c' = 1, e/L = 1$ ).





(a) Power dissipation (b) Velocity plot Fig. 4. Results of upper-bound finite element limit analysis (*H*/*D*=1,  $\phi'=30^\circ$ ,  $\gamma D/c'=1$ , *e*/*L*=1).





(a) Power dissipation (b) Velocity plot Fig. 5. Results of upper-bound finite element limit analysis (*H*/*D*=3,  $\phi'=30^\circ$ ,  $\gamma D/c'=1$ , *e*/*L*=1).



Fig. 6. Stability bounds for circular tunnel ( $\phi'=0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $35^\circ$ ).