

地下空洞を有する地盤の支持力解析

鹿児島大学 正会員 山本 健太郎

University of Newcastle A.V. Lyamin, S.W. Sloan and A.J. Abbo

1. はじめに

近年、都市部においては地下空間の開発が盛んに押し進められており、河川からの排水道や交通あるいは下水道などのためのトンネル上に構造物を設置しなければならない事例が増加してきている¹⁾。また、全国的には1万箇所以上の地下壕が残っており、地下壕の老朽化、都市開発の進展に伴い、特殊地下壕などに関連した陥没事故が発生している。さらに、沖縄地方においてはサンゴ礁堆積物で構成された琉球石灰岩層が基盤層となる島尻層泥岩上に広く分布し、空洞を有する琉球石灰岩層をも経済性の観点から、構造物基礎の支持層とする、合理的で経済的な基礎の設計手法を確立することが望まれている²⁾。しかし、地下空洞を有する地盤の安定性に関してはあまり解明されていない。上記の事を背景に、本研究では地下に円形空洞を有する地盤の極限支持力並びに破壊メカニズムを厳密に求めることを目的に、数値極限解析の適用を試みた。

2. 解析条件

実務上での興味の対象となる Fig. 1 に示した解析条件に対して数値極限解析を実施した。空洞の直径 D に対する地表面から空洞上面までの深さ比 H/D を 1, 2, 3, 4, 5 の 5 ケース、内部摩擦角 ϕ' を 10, 20, 30, 35° の 4 ケース、地盤の単位体積重量 γ と空洞の直径 D の積を粘着力 c' で除した無次元化量 $\gamma D/c'$ を 0, 1, 2, 3 の 4 ケースと変化させた。なお、本報告では空洞内部の圧力を 0 と見なし ($\sigma_t = 0$)、荷重の載荷幅 L は無限大、地盤との interface は rough として考慮した。また、本解析手法の詳細に関しては、参考文献 3), 4) にゆずるものとする。特徴としては従来の数値極限解析と比べて、非線形計画法が適用され、計算時間の短縮が大きく図られている。

3. 解析結果と考察

Figs. 2(a), (b) には下界並びに上界解析用有限要素 half meshes の一例を示す。できるだけより良い解を得るために、円形空洞周辺においては十分にメッシュを細かくすることを実施した。Figs. 3(a), (b) には $H/D=3$, $\phi'=10^\circ$, $\gamma D/c'=1$ (rough interface) のケースに対する解析結果からの塑性領域と内部消散を示す。Fig. 3(a) で塑性領域は黄緑、Fig. 3(b) で内部消散が大きい領域は赤で示されている。これを見ると、(a) と (b) はよく対応しており、すべり面が円形空洞の下方から地表面にほぼ真っすぐに伸びていることがわかる。次に、Figs. 4(a), (b) には $H/D=3$, $\phi'=35^\circ$, $\gamma D/c'=1$ (rough interface) のケースに対する解析結果を示す。このケースは Fig. 3 と比べて、 ϕ' が大きくなっている。これらの図を見ると、 ϕ' が大きいため、空洞周辺においても塑性領域と内部消散が大きく表れていることがわかる。塑性領域と内部消散は良い一致を示しており、すべり面が円形空洞の下方から拡がり、円形空洞の斜め上方で中心線に向かってカーブし、地表面に達していることがわかる。なお、smooth interface の場合は rough の場合と比べて、円形空洞の下方から生じたすべり面が中心線に向かって大きくカーブする様子が観察された。

Fig. 5 には $\phi'=10^\circ$ (rough interface) に対する無次元化した極限支持力 σ_s/c' と H/D の関係を示す。これを見ると、 $\gamma D/c'$ の増加とともに極限支持力は小さくなり、 $\gamma D/c'=3$ で $H/D=4, 5$ の時には実行可能解が求まらなかったことがわかる。これは空洞が崩壊したためである。 $\pm \text{Error}(\%) = \pm 100 \times (UB - LB) / (UB + LB)$ で評価した誤差は最大でも 4% 以内であった。Fig. 6 には Fig. 5 と同様に、 $\phi'=35^\circ$ の場合を示す。この図を見ると、 $\gamma D/c'$ あるいは H/D が増加する場合に誤差が大きくなることがわかる。Fig. 5 と比較して、誤差が一般的に大きくなる傾向が見られるが、最大の誤差でも 10% 以内であった。よって、Figs. 5, 6 とともに工学的に十分な精度で極限支持力が得られ、これらの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】 1) Wang, M. C. and Hsieh, C. W.: Collapse load of strip footing above circular void, *J. Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, 113(5), pp.511-515, 1987. 2) 清住真、彭芳榮、大内正敏、日下部治: 空洞を有する地盤の支持力特性に関する数値解析, 構造工学論文集 Vol.50A, pp.1251-1260, 2004. 3) Lyamin, A. V. and Sloan, S. W.: Lower bound limit analysis using non-linear programming, *Int. J. Numer. Meth. Engrg.*, 55, 573-611, 2002. 4) Lyamin, A. V. and Sloan, S. W.: Upper bound limit analysis using linear finite elements and non-linear programming, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 26(2), 181-216, 2002.

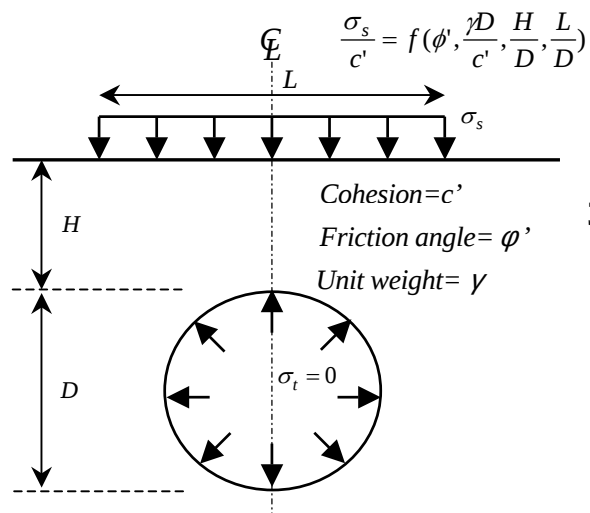
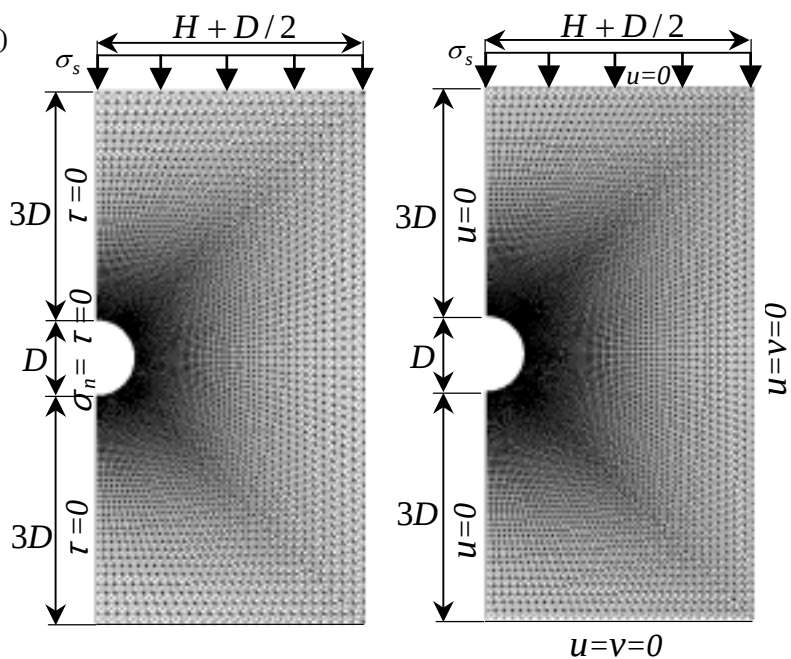


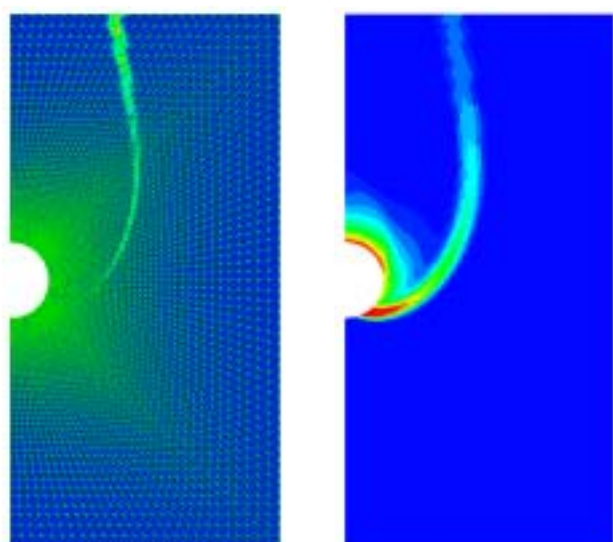
Fig. 1. Plain strain circular tunnel in cohesive frictional soil.



(a) lower bound mesh

(b) upper bound mesh

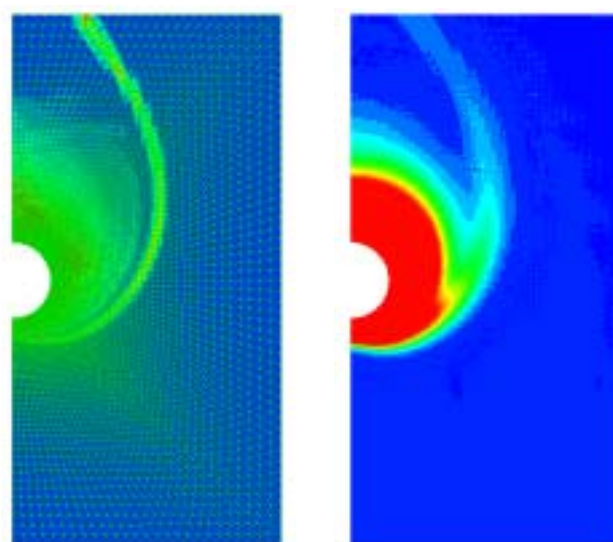
Fig. 2. Lower bound (a) and upper bound (b) meshes for $H/D=3$ (rough interface).



(a) plastic zones

(b) power dissipations

Fig. 3. Plastic zones and power dissipations for $H/D=3$, $\varphi'=10^\circ$, $\gamma D/c'=1$ (rough interface).



(a) plastic zones

(b) power dissipations

Fig. 4. Plastic zones and power dissipations for $H/D=3$, $\varphi'=35^\circ$, $\gamma D/c'=1$ (rough interface).

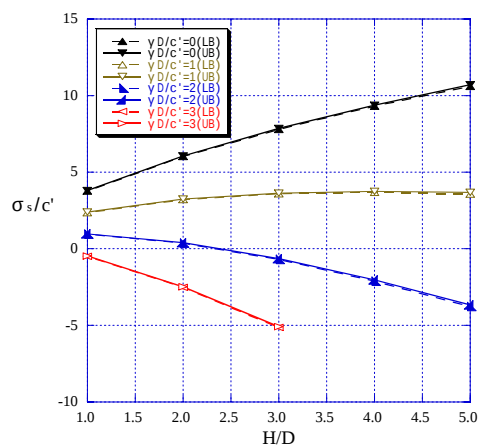


Fig. 5. Stability bounds for $\varphi'=10^\circ$ (rough interface).

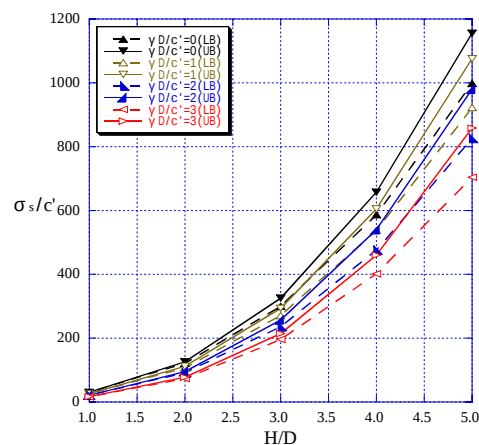


Fig. 6. Stability bounds for $\varphi'=35^\circ$ (rough interface).