

## 様々な形状の地下空洞を有する地盤の安定解析

西日本工業大学大学院 学生員○ 邱実      西日本工業大学 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、様々な形状を有する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例となる Fig. 1 に示した、土被りが浅い馬蹄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、 $B$ : 空洞の高さ、 $H$ : 空洞上面までの土被りを表す。また、地盤との interface は smooth と rough、載荷条件は flexible loading (柔荷重) と設定した。

### 3. 数値極限解析

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 には馬蹄形空洞 ( $H/B=2$ , smooth 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 half mesh とその境界条件の一例を示す。smooth interface のため、荷重と地盤との境界面においてせん断応力が  $\tau=0$  となる。また、降伏規準にはモール・クーロンの降伏規準を用いた。

### 4. 解析結果と考察

Figs. 3-6 には様々な形状の空洞に対しての数値極限解析の結果を示す。(a) 塑性領域と下界値、(b) 内部消散、変位速度ベクトルと上界値を示す。内部消散と塑性領域の大きさはカラーの濃淡で表され、赤色が大きく、青色が小さい。まず、全体的に各々の図面で、内部消散と塑性領域の状況は一致し、正解値を上下界値で挟み撃ちにできていることがわかる。Fig. 3 は正方形空洞のケースであるが、上下面での角が特異点となり、(a), (b) から塑性領域、内部消散ともに一様に生じていないことがわかる。破壊モードはベクトル図から判断しやすいが、上方と側面からのベクトルが顕著である。次に、Fig. 4 は馬蹄形空洞である。Fig. 3 と比較すると上半分のみが円形となり、アーチ効果が働き、上下界値ともに増加していることがわかる。ベクトル図からも上面での角が弱点となる様子は見られず、大きなすべり面が下面での角から、 $\phi'=20^\circ$  のため、地表に向かってカーブしながら生じていることがわかる。Fig. 5 は、Fig. 4 よりも下方の矩形空間を半分に狭くした扁馬蹄形空洞である。弱点となりうる矩形空間が半分となったため、Fig. 4 よりも上下界値ともに増加した。

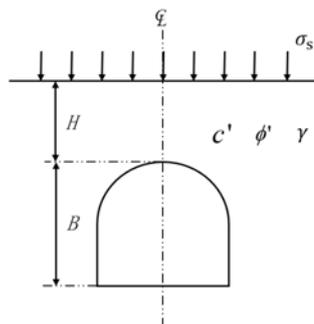


Fig. 1 平面ひずみ条件下での馬蹄形空洞

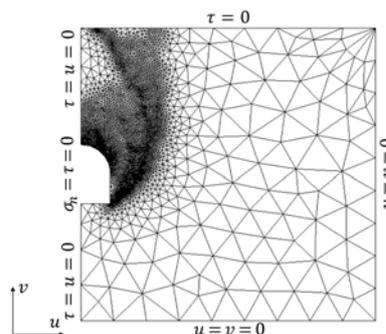
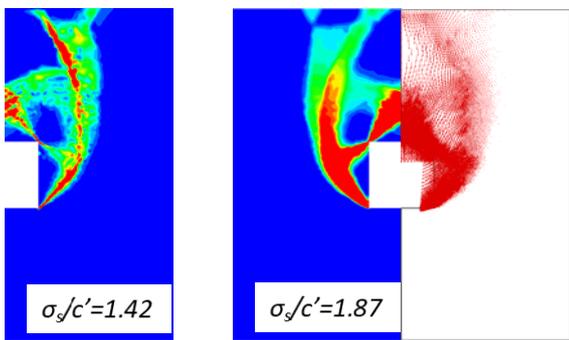


Fig. 2 典型的な有限要素half mesh (smooth interface)

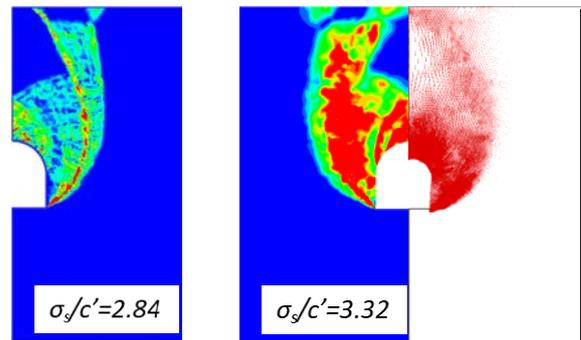
破壊モード自体は、Fig. 4 と比べて、下方断面の大きさのみが異なるため、類似した破壊モードと言える。さらに、Fig. 6 は Fig. 5 の矩形である下半部を楕円形にした異形空洞である。特異点である角が完全になくなり、空洞表面は円滑になった。また、塑性領域、内部消散ともに空洞下面からも生じていることがわかる。ベクトル図からは Fig. 5 と比較すると、形状が異なる下半面において破壊モードが異なる様子が観察できる。Fig. 3 から Fig. 6 を見ると、上下界値が次第に大きくなり、より安定していく様子がわかる。

最後に、Fig. 7 には、様々な空洞形状を有する地盤の設計チャートの一例として、馬蹄形空洞のケースを示す。(a)には  $H/B=2$  の時、 $\sigma_s/c'$  と  $\phi'$  の関係を示し、(b)は  $\phi'=20^\circ$  の時、 $\sigma_s/c'$  と  $H/B$  の関係を示す。これを見ると、(a)からは  $\phi'$  の増加に伴い、 $\sigma_s/c'$  が増加することがわかる。次に、(b)からは土被りである  $H/B$  の増加に伴い、 $\sigma_s/c'$  の値が単調に増加することがわかる。なお、 $\gamma B/c'$  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。

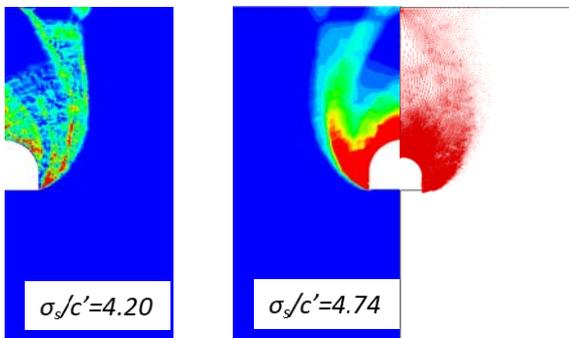
参考文献 1) Sloan, S. W. and Assadi, A.: Stability of shallow tunnels in soft ground, *Predictive soil mechanics*, Thomas Telford, London, pp.644-663, 1992. 2) Lyamin, A. V. and Sloan, S. W.: Stability of a plane strain circular tunnel in a cohesive-frictional soil, *Developments in theoretical geomechanics*, Balkema, Rotterdam, pp.139-153, 2000. 3) K. Yamamoto, A.V. Lyamin, D.W. Wilson, S.W. Sloan and A.J. Abbo: Stability of dual square tunnels in cohesive-frictional soil subjected to surcharge loading, *Canadian Geotechnical Journal* 51(8), pp.829-843, 2014.8.



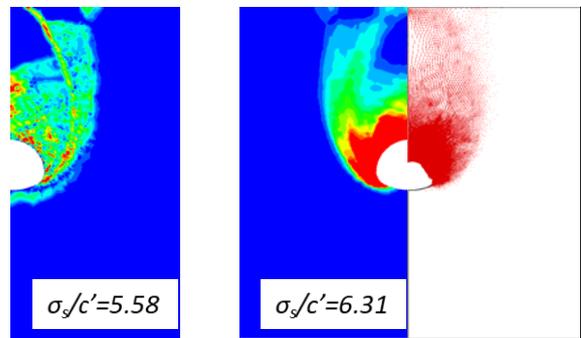
(a)塑性領域 (b)内部消散と変位速度ベクトル  
Fig. 3 正方形空洞( $H/B=2, \phi' = 20^\circ, \gamma B/c' = 2$ )



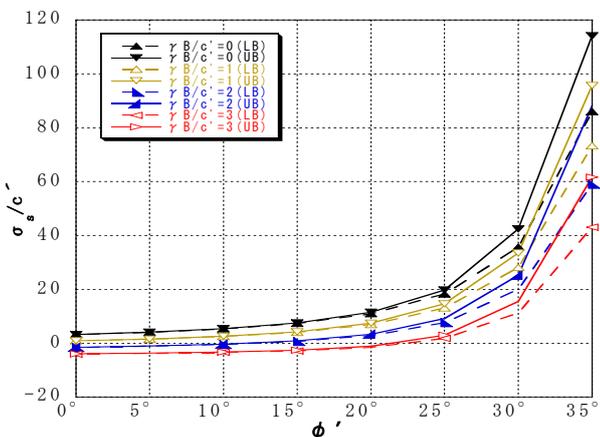
(a)塑性領域 (b)内部消散と変位速度ベクトル  
Fig. 4 馬蹄形空洞( $H/B=2, \phi' = 20^\circ, \gamma B/c' = 2$ )



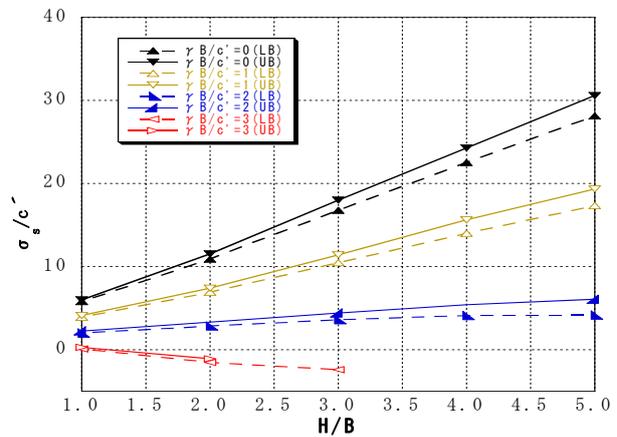
(a)塑性領域 (b)内部消散と変位速度ベクトル  
Fig. 5 扁馬蹄形空洞( $H/B=2, \phi' = 20^\circ, \gamma B/c' = 2$ )



(a)塑性領域 (b)内部消散と変位速度ベクトル  
Fig. 6 異形空洞( $H/B=2, \phi' = 20^\circ, \gamma B/c' = 2$ )



(a)  $\sigma_s/c'$  と  $\phi'$  の関係( $H/B=2$ )



(b)  $\sigma_s/c'$  と  $H/B$  の関係( $\phi' = 20^\circ$ )

Fig.7 馬蹄形空洞の設計チャート