

幅狭となる地下空洞を有する地盤の数値極限解析

西日本工業大学大学院 学生会員○ 福田和純 西日本工業大学 正会員 山本健太郎
 University of Newcastle A.V. Lyamin Aurecon Company D.W. Wilson

1. はじめに

日本においては、沖縄地方で空洞を有する地盤の安定性が問題視されている。沖縄地方特有の琉球石灰岩層は鉛直・水平方向に N 値が不規則に分布していることや、岩塊状の固結した層と砂礫状の未固結な層が交互に分布する多層地盤であり、数多くの空隙と空間が存在する。これらの地盤は基礎の支持層としての信頼性が乏しく、沖縄県における基礎形式の選定および基礎の施工に様々な問題を引起している¹⁾²⁾。さらに、道路橋示方書³⁾に記載されている直接基礎、ケーソン基礎の支持力公式は、十分な厚さを有する均一な地盤に生じる全般せん断破壊を前提としているため、破壊メカニズムが未解明である空洞を有する地盤へ適用することができない。すなわち、実務でのベンチマークとなりうる崩壊メカニズムや設計チャートなどもほとんど存在しないのが現状であるため、本研究では、地表面下で載荷圧を受けた排水条件下での幅狭となる空洞を有する砂質土地盤の安定性を数値極限解析により求めた。

2. 対象問題

研究対象は土被りが浅い矩形、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。土被りが浅い空洞を有する地盤の極限支持力は ϕ' を除き、無次元化したパラメータを用いて、大まかに以下の式(1)のように表すことができると考えられる。

$$\frac{\sigma_s}{c'} = f\left(\phi', \frac{\gamma D}{c'}, \frac{H}{D}, \frac{B}{D}\right) \quad (1)$$

ここに、 σ_s : 極限支持力、 c' : 地盤の粘着力、 ϕ' : 地盤の内部摩擦角、 γ : 地盤の単位体積重量、 B : 空洞の幅、 D : 空洞の直径 H : 空洞上面までの土被りを表す。対象の一例として馬蹄形空洞の地盤モデルを Fig.1 に示す。

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⁴⁾⁵⁾。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、それらの定式化は参考文献⁶⁾にゆずる。Fig. 2 には馬蹄形空洞 ($H/D=2$, 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。

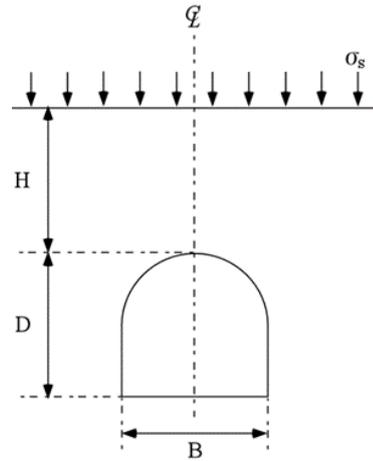


Fig.1 馬蹄形空洞を有する地盤モデル

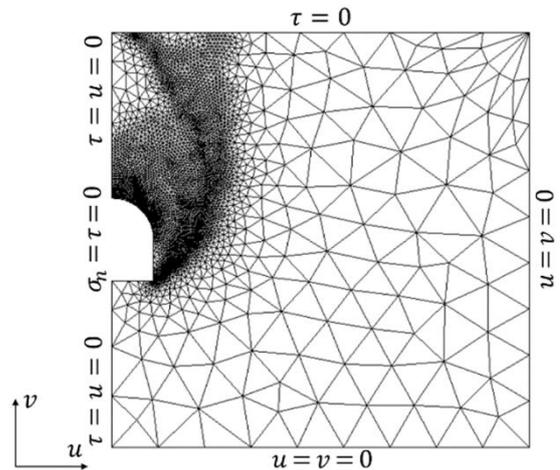
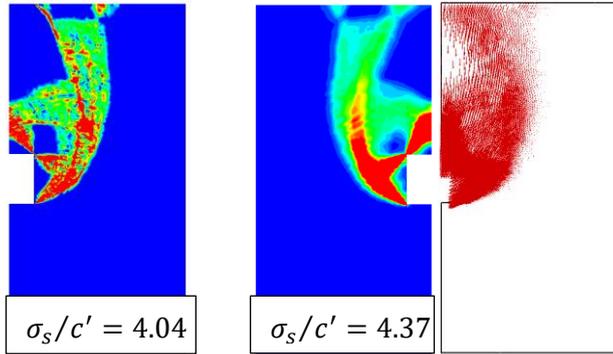


Fig.2 解析用有限要素 half mesh 一例

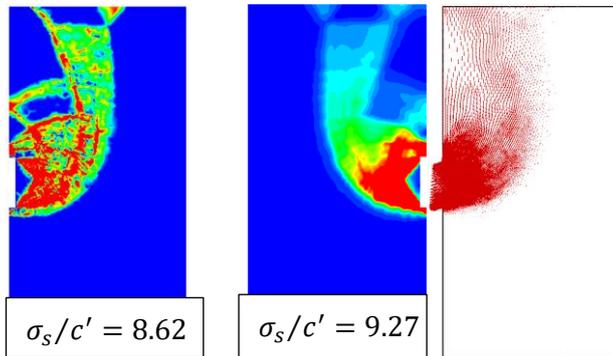
4. 解析結果と考察

Figs. 3-6 には矩形空洞および馬蹄形空洞に対しての数値極限解析の結果を示す。ここに、(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 は矩形空洞のケースであるが、上下面での角が特異点となり、脆弱であることから、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 は矩形空洞であるが、Fig. 3 と比較すると、 $B/D = 0.25$ 、つまり空洞幅のみが狭くなり、塑性領域と内部消散に大きな差はないが、安定係数 σ_s/c' の値が大きくなっている。Fig. 5 および Fig. 6 に

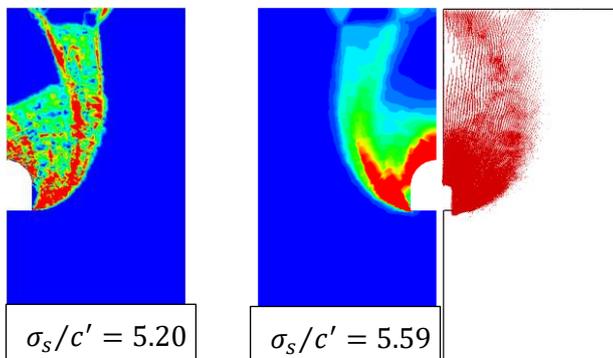
おいては, Fig. 3, 4 に加えアーチ効果が働き, 上下界値ともに増加していることがわかる. ベクトル図からも上面での角が弱点となる様子は見られず, 大きなすべり面が下面での角から, $\phi' = 15^\circ$ のため, 空洞上部に向かってカーブしながら生じていることがわかる. Fig.7 および Fig.8 には安定係数に関する設計チャートを示す. なお, (a)は矩形空洞, (b)は馬蹄形空洞である. $\gamma D/c' = 2$ および 3 の case を除き, H/D の増加に伴い安定係数 σ_s/c' が増加していることや, 上下界値から正解値を精度よく狭み撃ちにできていることがわかった.



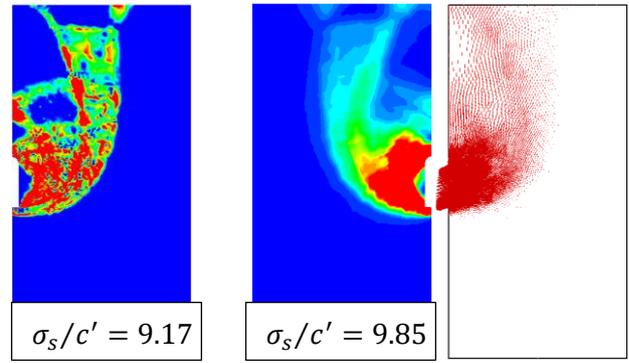
(a) 塑性領域 (b) 内部消散と変位速度ベクトル
Fig.3 (矩形空洞, $H/D=3, \phi'=15^\circ, \gamma D/c'=1, B/D=1.0$)



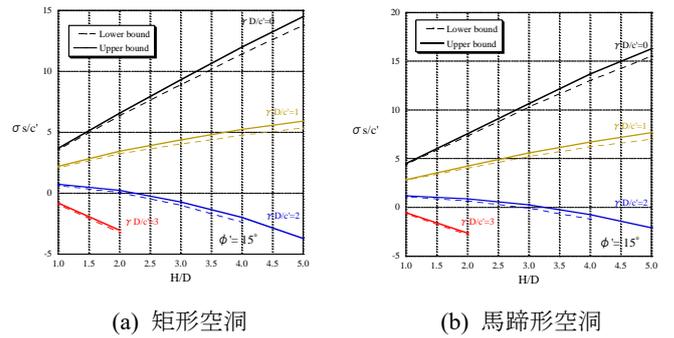
(a) 塑性領域 (b) 内部消散と変位速度ベクトル
Fig.4 (矩形空洞, $H/D=3, \phi'=15^\circ, \gamma D/c'=1, B/D=0.25$)



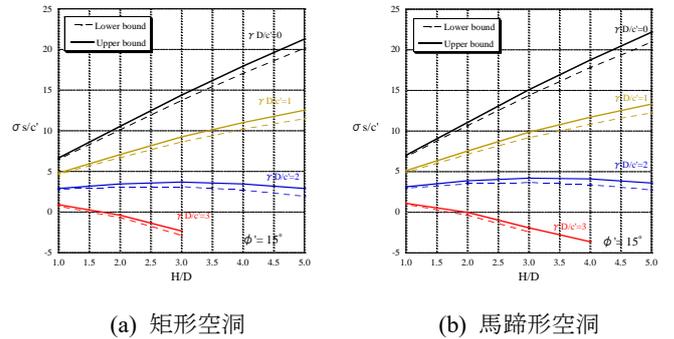
(a) 塑性領域 (b) 内部消散と変位速度ベクトル
Fig.5 (馬蹄形空洞, $H/D=3, \phi'=15^\circ, \gamma D/c'=1, B/D=1.0$)



(a) 塑性領域 (b) 内部消散と変位速度ベクトル
Fig.6 (馬蹄形空洞, $H/D=3, \phi'=15^\circ, \gamma D/c'=1, B/D=0.25$)



(a) 矩形空洞 (b) 馬蹄形空洞
Fig.7 $\phi'=15^\circ, B/D=1.0$ における σ_s/c' と H/D との関係



(a) 矩形空洞 (b) 馬蹄形空洞
Fig.8 $\phi'=15^\circ, B/D=0.25$ における σ_s/c' と H/D との関係

参考文献

- 1) 上原 方成:各論 沖縄県の地盤特性と基礎, 基礎工, Vol. 14, No.5, pp.48-55, 1986.
- 2) 上原 方成・新城 俊也・砂川 鉄男・吉沢 光三: 沖縄の土と建設工事, 土と基礎, Vol.36, No.3, Ser.No.362, pp.29-36.1988.
- 3) 日本道路橋協会: 道路橋示方書・同解説, IV 下部構造編, 10 章 直接基礎の設計, pp.266-294, 2002.
- 4) Sloan, S. W. and Assadi, A.: Stability of shallow tunnels in soft ground, Predictive soil mechanics, Thomas Telford, London, pp.644-663, 1992.
- 5) 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.
- 6) Yamamoto, K. and Lyamin, A. V. and Wilson, D. W. and Sloan, S. W. and Abbo, A. J.: Stability of dual square tunnels in cohesive-frictional soil subjected to surcharge loading, Canadian Geotechnical Journal 51(8), pp.829-843, 2014.8.