

載荷重を受けた幅狭となる地下空洞を有する地盤の極限解析

(有) 福田組 正会員 ○福田和純 大分大学 正会員 山本健太郎
University of Newcastle 非会員 A.V. Lyamin Aurecon Company 非会員 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⁾。さらに、道路橋示方書²⁾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、空洞を有する地盤へ適用することができない。ゆえに、本研究では、地表面下で載荷重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 ：極限載荷重、 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

極限解析では、土の弾性変形は十分小さく無視できるものとして、土を塑性変形のみを生じる剛塑性体として考える。極限解析法は、極限定理に基づいて問題を解く方法であり、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。なお、数値極限解析が Sloan らによって開発されてきた^{3),4)}。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5)にゆずる。

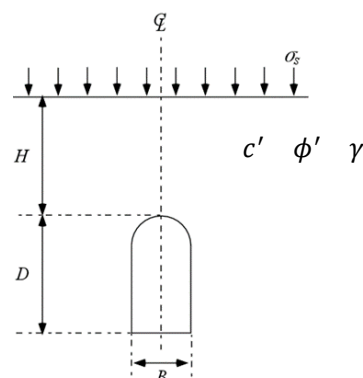


Fig.1 馬蹄形空洞を有する地盤モデル

4 解析結果と考察

Figs.2-5 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。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。Figs.2-5 の破壊メカニズムは空洞底部からの破壊モードによる盤膨れを示している。盤膨れが見られるケースでは破壊メカニズムも大きくなり安定係数の値も大きくなる傾向を示した。空洞上部において、矩形空洞では塑性領域が一様には生じず、馬蹄形空洞ではアーチ効果のために一様に生じ、同じ解析結果では馬蹄形空洞の安定係数が矩形空洞と比べて大きくなった。Fig.6 には地下空洞を有する地盤の安定係数 σ_s/c' と B/D の関係の設計チャートの一例を示す。馬蹄形空洞と矩形空洞における安定係数の上下界値の平均値をプロットしたものになるが、概ね馬蹄形、矩形の空洞は B/D の増加に伴い安定係数の値は減少傾向にある。Fig.6 から $\gamma D/c' = 3$ では、 B/D の増加に伴い馬蹄形空洞に対し矩形空洞の形状の安定係数の値が大きくなることを示している。これは、土被りもある程度あり、地盤の単位体積重量も大きくアーチ効果があまり発揮されなかったためである。

Key words: tall tunnel, tunnel shape, stability, limit analysis, finite elements

〒750-0322 山口県下関市菊川町檜崎 77 番地 Fukuda Gumi Co.,Ltd., 77 narazaki, Shimonoseki City, Yamaguchi

E-mail: fukuda.k@fukudagumi-co-ltd.jp

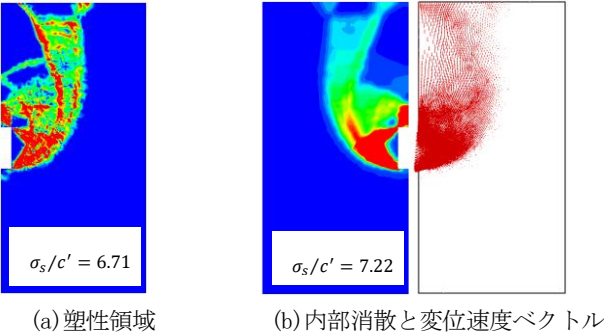


Fig.2 矩形空洞における解析結果

($H/D = 3, \phi' = 15^\circ, \gamma D/c' = 1, B/D = 0.5, \text{smooth interface}$)

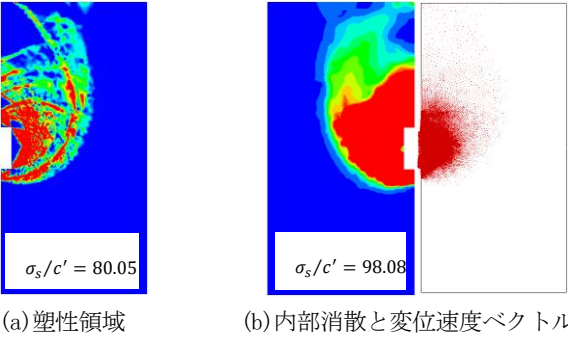


Fig.3 矩形空洞における解析結果

($H/D = 3, \phi' = 30^\circ, \gamma D/c' = 1, B/D = 0.5, \text{smooth interface}$)

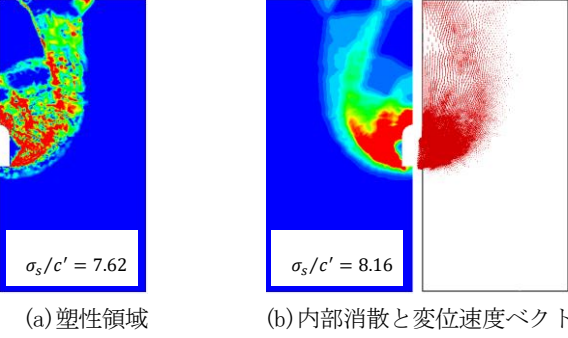


Fig.4 馬蹄形空洞における解析結果

($H/D = 3, \phi' = 15^\circ, \gamma D/c' = 1, B/D = 0.5, \text{smooth interface}$)

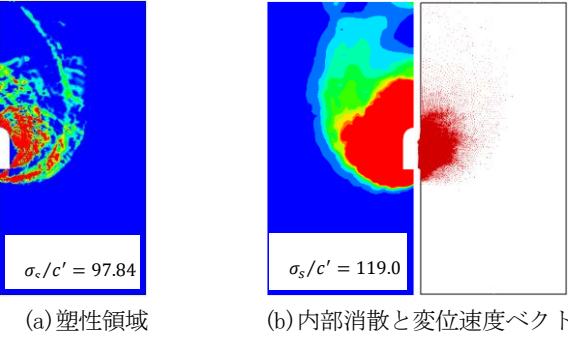


Fig.5 馬蹄形空洞における解析結果

($H/D = 3, \phi' = 30^\circ, \gamma D/c' = 1, B/D = 0.5, \text{smooth interface}$)

5 推定式の開発

数値極限解析から得られた上下界値の平均値を用いて、浅い地下空洞を有する地盤の載荷圧を推定できる式の適用を試みた。推定式は式(2)の形で示され、二つの無次

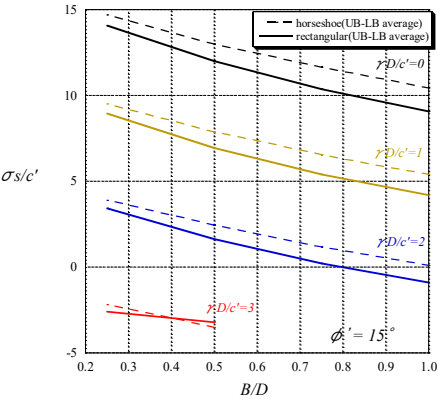


Fig.6 $\phi' = 15^\circ$ における σ_s/c' と B/D との関係

($H/D = 3.0, \gamma D/c' = 0,1,2,3, \text{smooth interface}$)

元化変数 H/D と $\gamma D/c'$ 、内部摩擦角 ϕ' の関数で表される。

$$\sigma_s/c' = [a + \exp(b\phi'^c)] \left(\frac{H}{D}\right)^{d \exp(e\phi'^f)} [1 + (g + h\phi')(H/D)^{k+m\phi'}(\gamma D/c')] \tag{2}$$

解析パラメータ、 $a, b, c, d, e, f, g, h, k, m$ は数値極限解析から得られた上界値と下界値の平均値をうまく近似し、誤差が最小となるように最小二乗法により定めた。回帰係数は空洞形状や載荷重を受ける地表面との interface condition により異なるが、例として馬蹄形空洞、空洞幅を $B/D = 0.5$ としたパラメータを Table 1 に示す。

Table 1 推定式の係数 (馬蹄形空洞, $B/D = 0.5$)

parameter	smooth interface	rough interface
a	2.007521	1.982370
b	0.072375	0.075416
c	1.081903	1.080890
d	0.404373	0.430922
e	0.018114	0.012653
f	1.292617	1.383024
g	-0.474923	-0.459926
h	0.010942	0.010196
k	0.477169	0.493935
m	-0.014067	-0.015013

参考文献

1) 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.

2) 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.

3) Sloan, S. W. and Assadi, A.: Stability of shallow tunnels in soft ground, Predictive soil mechanics, Thomas Telford, London, pp.644-663, 1992.

4) 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.

5) Yamamoto, K., Lyamin, A. V., Wilson, D. W., 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.