

文章编号: 1673-9469 (2019) 01-0080-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.01.017

似粘聚力对砂土地层成孔性影响分析

李靖宇¹, 李新生¹, 严明康², 白琴琴¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710000; 2. 中国建筑材料工程地质勘察中心广州总队, 广州 510000)

摘要: 工程上处理砂土地层作为持力层时, 多将其视为粘聚力为零的无粘性土, 这种忽视似粘聚力存在的做法过低得估计了土体强度, 使得设计参数相对保守, 工程造价也因此增加。此外, 在砂土地层的基坑中采用土钉支护时, 成孔不易, 容易坍塌, 无法正常施工。本文通过引进非饱和砂土的似粘聚力, 采用力学方法对砂土地层进行稳定性分析, 得到了砂土地层在孔洞挖成后重分布的应力场及位移场, 并且以西安某大厦基坑支护项目为依托, 结合 Flac3D 数值模拟来进行成孔稳定性的分析研究。结果表明, 砂土地层的成孔性与砂土似粘聚力相关, 在一定的密实度下, 砂土的似粘聚力与其含水率有关。在工程实践中, 可通过改变砂土含水率来保证砂土地层的土钉成孔。

关键词: 砂土地层; 似粘聚力; 成孔性; 稳定性; 含水率

中图分类号: TU442

文献标识码: A

Analysis of the Effect of Cohesive Force on the Pore Formation of Sandy Soil

LI Jingyu¹, LI Xinsheng¹, YAN Mingkang², BAI Qinqin¹

(1.College of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an710000, China; 2.Guangzhou Corps of China Building Materials Engineering Geological Survey Center, Guangzhou510000, China)

Abstract: When treating sand layer as a bearing layer, it is regarded as a non-cohesive soil with zero cohesion. This neglect of cohesive force is too low to estimate the strength of the soil, which may lead to relatively conservative design parameters and high engineering cost. In addition, when soil nailing is used in the foundation pit of the sand layer, the hole is not easy to form, and it is easy to collapse and cannot be properly constructed. By introducing the cohesive force of unsaturated sand, In this paper, the mechanical method is used to analyze the stability of the sand layer. The stress field and displacement field redistributed after the hole-forming are obtained., Based on the foundation pit support project of a building in Xi'an, the pore stability is analyzed by numerical simulation software Flac3D. The results show that the pore-forming property of sand-soil layer is related to the clay-like cohesive force. Under a certain degree of compactness, the cohesive force of sand is related to its water content. In the engineering practice, the soil nailing of the sand layer can be ensured by changing the moisture content of the sand.

Key words: sandy soil layer; cohesive force; pore formation; stability; water content

在西北地区, 砂土作为一种常见的地基, 正在在砂土地基上进行基坑支护这一难题仍未得到解决^[1]。对于砂土的似粘聚力, 有学者将其称之为表观粘聚力^[2-4], 还有学者将其称之为湿吸力^[5-6], 国内外的研究都相对较少。崔嶝、李宣与孙德安^[7]等人都研

究了砂土具有似粘聚力这一现象, 砂土在非饱和状态之下具有似粘聚力^[7]。

本文通过控制含水率这单一因素^[8], 通过重复三轴试验、直剪试验并辅以基质吸力试验来进行研究, 得出似粘聚力 c 值的大小, 以及其随着含水率

收稿日期: 2018-10-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41372330)

作者简介: 李靖宇 (1995-), 男, 安徽亳州人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程的研究工作。

变化情况。并通过数值模拟来进行变形验证，得出结论。对砂土基坑土钉墙土钉成孔性问题具有指导性意义。

1 非饱和砂土地层成孔性分析

1.1 无衬砌非饱和砂土洞室应力场研究

在同一砂土地层中，如果靠上层的砂土中能够成孔性完好，那么靠下层的砂土中一定能够成孔。本文选砂土地层 1 m 深度为研究点，通过现场实测获得砂土实际的密实度，并结合土工试验获得所需的参数。

根据对现场勘察试验资料的分析，可得出：

(1) 孔洞深度相对于半径要大很多，本文分析模型尺寸为半径 10 cm，洞深为 10 m，故可将其视为平面问题进行解答；

(2) 洞室周围砂土纯净，颗粒大小集中，可近似将其视为均质的，将洞周砂土近似为均质体，对于应力分析，不仅可以简化计算，而且和实际接近；

(3) 洞周砂土基本上是连续的：砂土纯净，杂质较少，且密实度足以使颗粒之间紧密接触，故可视为周围砂土是连续的；

(4) 在浅层砂土地层中，在竖向应力比较小的范围内，洞周砂土可近似看成直线变形体：由三轴试验的主应力差与轴向应变之间的变化规律可以得出这个结果，如图 1 所示，在主应力差较小时，主应力小于 150 kPa 时，其轴向变形是成线性变化的；所以，当竖向应力较小时，是可以将砂土地层近似看成是直线变形体。

对于将均质的非饱和砂土地层视为均质的、连续的直线变形体，便于分析非饱和砂土孔洞的应力

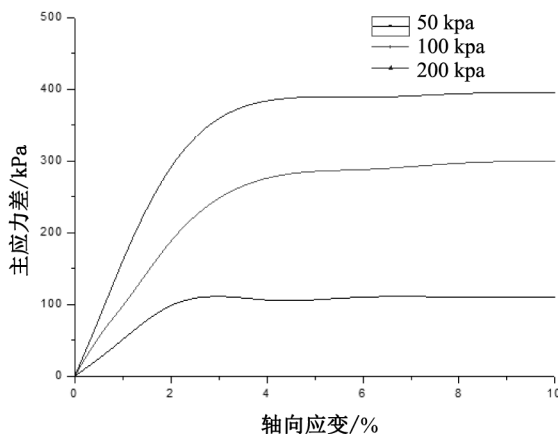


图 1 砂土轴向应变

Fig.1 Axial strain of sand

状态，可采用弹性理论的分析计算成果，这样处理既是理论分析所必须的，而且也比较接近实际。

得出非饱和砂土地层无衬砌洞室的应力场及位移场规律如下：

砂土地层圆形洞室一次应力状态，即原始应力状态，地层任一点初始应力为^[9]

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \int \gamma_z dz \\ \sigma_x &= \lambda \sigma_z \\ \tau_{xz} &= 0\end{aligned}\quad (1)$$

转换成极坐标为

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_x) - \frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_x) \cos 2\theta \\ \sigma_\theta &= \frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_x) + \frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_x) \cos 2\theta \\ \tau_{r\theta} &= \tau_{\theta r} = \frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_x) \sin 2\theta\end{aligned}\quad (2)$$

孔洞开挖后，原始应力场发生变化，叠加二次应力如下

$$\begin{aligned}\sigma_r(r, \theta) &= \frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_x) \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_x) \\ &\quad \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2}\right) \cos 2\theta \\ \sigma_\theta(r, \theta) &= \frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_x) \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_x) \\ &\quad \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \\ \tau_{r\theta} &= \frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_x) \left(1 - \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2}\right) \sin 2\theta\end{aligned}\quad (3)$$

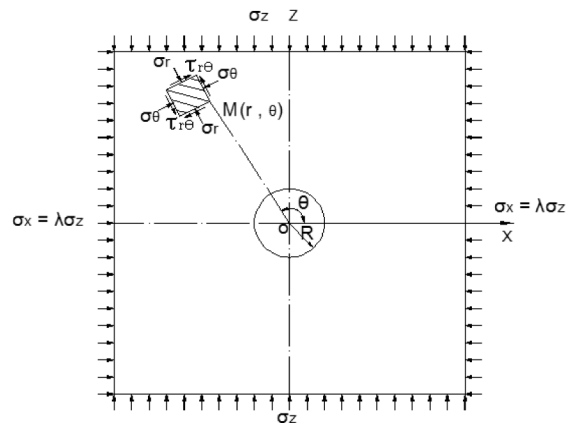


图 2 圆形洞室围岩重分布应力计算图

Fig.2 Calculation of stress distribution of surrounding rock of circular cavern

洞壁上的应力:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= 0 \\ \sigma_\theta &= (\sigma_z + \sigma_x) - 2(\sigma_z - \sigma_x) \cos 2\theta \\ \tau_{r\theta} &= 0\end{aligned}\tag{4}$$

圆形隧道无衬砌的位移场:

$$\begin{aligned}u_r(r, \theta) &= \frac{1-\mu}{2E} \left\{ (\sigma_z + \sigma_x) \frac{a^2}{r^2} - (\sigma_z - \sigma_x) \right. \\ &\quad \left. \left[(1-\mu) \frac{4a^2}{r} - \frac{a^4}{r^3} \right] \cos 2\theta \right\} \\ u_\theta(r, \theta) &= \frac{1+\mu}{2E} (\sigma_z - \sigma_x) \left[(1-2\mu) \frac{2a^2}{r} + \right. \\ &\quad \left. \frac{a^4}{r^3} \right] \sin 2\theta\end{aligned}\tag{5}$$

洞口边沿位移 ($r=a$):

$$\begin{cases} u_r(r, \theta) = \frac{(1+\mu)a}{2E} [(\sigma_z + \sigma_x) - \\ (\sigma_z - \sigma_x)(3-4\mu)\cos 2\theta] \\ u_\theta(r, \theta) = \frac{(1+\mu)a}{2E} (\sigma_z - \sigma_x)(3-4\mu)\sin 2\theta \end{cases}\tag{6}$$

1.2 非饱和砂土无衬砌洞室稳定性分析

将纯净的砂土地层近似看做成弹性体, 得出了上述砂土地层在孔洞挖成后重分布的应力场及位移场, 结合极限平衡理论, 来建立非饱和砂土成孔的强度条件, 即孔洞稳定性的强度条件。

由重分布的应力场知, 在无衬砌的砂土地层圆形孔洞中, 洞壁上只受切向应力, 不受竖向应力, 所以洞壁的成孔性只与洞壁上的切向应力相关。在工程应用中, 一般按公式 (7) 来取砂土地层的侧压力系数。在本文情况下, $\lambda < 1/3$, 洞壁处于拉应力状态, 所以在该状态下, 圆形洞室周边的稳定性, 只要洞顶处稳定, 即可保证整个洞室的稳定。

$$\lambda = k_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)\tag{7}$$

根据极限平衡理论, 砂土的抗拉强度限来自于非饱和砂土的强度包络线, 根据摩尔库伦强度准则, 可以得出非饱和砂土的抗拉强度限

$$[H] = \frac{2c \cdot \cos \varphi}{1 + \sin \varphi}\tag{8}$$

式中: c —非饱和砂土的似粘聚力

φ —非饱和砂土的内摩擦角

由式 (4) 知, 在洞顶处达到拉应力最大值,

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta=90} &= (\sigma_z + \sigma_x) - 2(\sigma_z - \sigma_x) \\ \sigma_{\theta=90} &= [H] = \frac{2cc \cos \varphi}{1 + \sin \varphi}\end{aligned}$$

$$c_{\text{临}} = \frac{\sigma_z(3\lambda - 1)(1 + \sin \varphi)}{2 \cos \varphi}\tag{9}$$

根据以上分析, 无衬砌非饱和砂土孔洞欲稳定, 就必须满足砂土似粘聚力大于 $c_{\text{临}}$ 。

本文的计算模型取为 $2\text{ m} \times 10\text{ m} \times 2\text{ m}$, 在正中间位置开挖一个直径为 20 cm , 长度为 10 m 的孔径, 砂土地层的参数如表 1。

在工程应用中, 浅层砂土地层的侧压系数取自主动土压力系数, 计算得到的地层的侧压系数以及临界粘聚力值如下表 2:

将浅层的砂土地层和无衬砌砂土孔洞进行适当简化, 通过弹性理论来进行应力场分析以及极限平衡理论来获取强度条件, 我们得出在本文的地层条件下, 砂土孔洞在无衬砌的条件下自稳的条件是其似粘聚力值要大于 5.099 kpa , 这样才能满足在该砂土地层中成孔。

2 成孔性的 Flac3D 数值模拟

因为 Flac3D 采用的是弹塑性理论, 所以为了论证上述稳定性分析的合理性, 现利用 Flac3D 进行数值模拟。模型大小为 $2\text{ m} \times 10\text{ m} \times 2\text{ m}$, 在模型正中心开孔, 孔径大小为半径 $r=0.1\text{ m}$, 采用摩尔库伦模型, 砂层完全来自于现场数据值, 参数为表 3:

先在自重下进行自稳计算, 然后进行孔洞开挖, 模拟得到洞周砂土层的水平位移和竖直位移云图, 同时获得洞顶位置以及右侧水平位置点的位移图如图 3、图 4。

表 1 砂土地层参数

Tab.1 Sand layer parameters

重度 $\gamma/\text{KN}\cdot\text{M}^{-1}$	弹性模量 E/kpa	泊松比 μ	内摩擦角 $^\circ$	半径 r/m
20	6.25×10^4	0.3	37	0.1

表 2 临界粘聚力值

Tab.2 Critical cohesion values

取值方式	λ	$C_{\text{临}}/\text{kpa}$
$\lambda = K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$	0.248 6	5.099

表 3 模型参数

Tab.3 Model parameters

体积模量 $/\text{pa}$	剪切模量 $/\text{pa}$	泊松比	内摩擦角 $^\circ$	粘聚力 $/\text{pa}$	密度 $/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
5.21×10^7	2.40×10^7	0.3	37	6 000	2 039

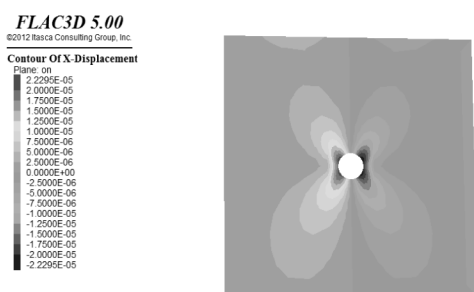


图 3 洞室 X 方向位移云图

Fig.3 X-direction displacement cloud map of the cavern



图 4 洞室 Z 方向位移云图

Fig.4 displacement map of the Z-direction of the cavern

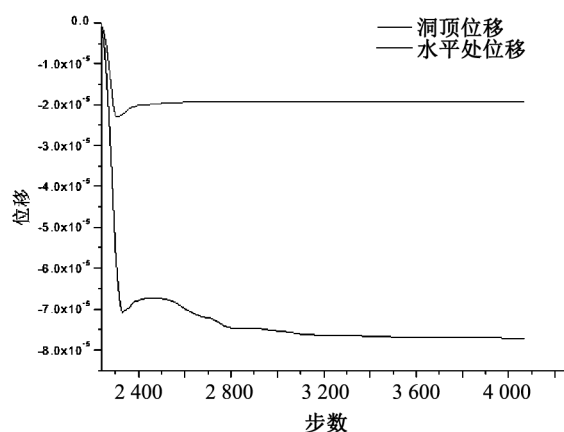


图 5 洞顶及洞周右侧水平处位移变化图

Fig.5 Displacement changes at the top of the hole and at the right side of the hole

从以上模拟结果，可以得出洞顶位移与洞周右侧水平处位移值，将洞顶位置定为 A 点，洞周右侧水平位置定为 B 点，A、B 随着孔洞的开挖，呈现出先急剧增大，后趋于稳定的变化过程。

现将 A、B 两点位移的模拟结果与根据上文公式理论计算所得结果进行对比，如下表 4：

表 4 计算与模拟结果对比

Tab.4 Comparison of calculation and simulation results

位置	计算结果 $\lambda = K_a$	模拟
洞顶 A	5.2×10^{-5}	7.71×10^{-5}
洞壁 B	2×10^{-5}	2.22×10^{-5}

通过对比结果，发现计算得出的结果与模拟结果及其相近。证实了将较为纯净的砂土，近似通过弹性理论来进行应力场分析是合理可靠的，以及非饱和砂土无衬砌洞室稳定性强度理论分析的准确性。

3 结论

1) 将较纯净的浅层非饱和砂土地层近似的视为均质的、连续的直线变形体，并直接采用弹性理论的计算成果，来分析非饱和砂土孔洞的应力状态，可以简化分析过程、方便求解。得出在干密度为 1.511 g/cm^3 情况下，含水率在 6% ~ 9% 时，似粘聚力达到最大值，能够达到 10 kpa 上下。

2) 较纯净的非饱和砂土地层中成孔不塌的强度条件为：似粘聚力 $c > c_{\text{临}} = [\sigma_z (3\lambda - 1)(1 + \sin \phi)] / (2 \cos \phi)$ ，即可保证洞顶不塌，便可以成孔，可保证土钉的顺利施工；在本文条件下，求得的似粘聚力为 5.1 kpa，而与之对应满足的含水率范围为 5%-12%。

3) 通过进行砂土地层在 1 m 处开挖直径为 0.1 m 孔洞的仿真模拟计算，求得洞周位移与弹性理论下计算所得结果几乎一致；证实了本文分析方式的正确性，以及求得的关于 $c_{\text{临}}$ 的强度条件的可用性。

参考文献：

- [1] 董建军，赵超. 不同含水率下非饱和细粒尾矿土的强度与变形实验研究 [c]. 北京：非饱和土的应力 - 强度理论与变形特性学术研讨会 .2016.
- [2] 崔 頔. 非饱和砂土的表现粘聚力研究 [J]. 北方交通 .2014(2): 86-87.
- [3] 李 宣，孙德安. 非饱和砂土和粉土的抗剪强度及其预测 [J]. 工业建筑 .2017(3): 102-105.
- [4] 庞 冬. 土钉支护技术在砂土基坑中的应用 [D]. 西安：长安大学 .2017.
- [5] 张 平，殷洪建，吴 昊. 非饱和土砂土湿吸力 [J]. 辽宁工程技术大学学报 .2011, 30(3): 389-391.
- [6] 蔡国庆，车睿杰，孔小昂，等. 非饱和砂土抗拉强度的试验研究 [J]. 水利学报 .2017(5): 623-635.
- [7] 刘丰收. 非饱和砂土的表现粘聚力研究 [J]. 水利水电科技进展 .2001.
- [8] 张鹏程，汤连生，姜力群，等. 基质吸力与含水量及干密度定量关系研究 [J]. 岩石力学与工程学报 .2013(增刊 1): 2792-2797.
- [9] 唐辉明. 工程地质学基础 [J]. 北京：化学工业出版社 .2007.

(责任编辑 李新)