

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1362

注浆支盘式锚杆拉拔试验及极限承载力计算

杨 坚¹, 简文彬^{1,2}, 黄 炜¹, 黄聪惠¹, 罗金妹³, 李先忠³

(1. 福州大学 环境与资源学院 岩土与地质工程系, 福建 福州 350116; 2. 福州大学 福建省地质灾害重点实验室, 福建 福州 350003;
3. 中化地质矿山总局福建地质勘察院, 福建 福州 350013)

摘 要: 注浆支盘式锚杆是自主研发的一种新型锚杆, 具有广阔的应用前景。为了探究支盘式锚杆的承载特性, 构建室内试验模型, 针对不同的埋置深度、支盘直径和双支盘间距等条件进行拉拔试验, 获取相应的荷载-位移曲线, 并对部分数据采取无量纲化处理得到埋深比与荷载系数关系曲线, 最后通过简化力学模型推导出支盘式锚杆的端阻力与拉拔极限承载力的计算公式。研究结果表明, 埋置深度与极限承载力呈非线性关系且存在临界埋深; 盘径对抗拔承载力的影响最为显著, 与极限承载力呈线性增长关系, 极限承载力较普通锚杆提高了 2~5 倍多; 双支盘的分界间距为 4 倍支盘直径时可充分调用双支盘的承载力, 由于双支盘锚杆在加载初期时土体主要为剪切变形, 故其荷载-位移曲线开始阶段斜率较单支盘锚杆要大得多; 埋深比与荷载系数关系曲线的斜率突变点为临界埋深比, 其值为 3.02; 该计算公式所得结果与 4 组试验结果基本一致, 验证了计算公式的有效性。研究结果对支盘式锚杆的设计和工程应用具有重要的理论及实际意义。

关 键 词: 支盘式锚杆; 极限承载力; 拉拔试验; 端阻力; 黏土

中图分类号: U 418.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2021) 04-1126-07

Pull-out test and ultimate bearing capacity calculation of grouting branch-type anchor

YANG Jian¹, JIAN Wen-bin^{1,2}, HUANG Wei¹, HUANG Cong-hui¹, LUO Jin-mei³, LI Xian-zhong³

(1. Institute of Geotechnical and Geological Engineering, College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China;
2. Key Laboratory of Geohazard Prevention of Fujian Province, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350003, China;
3. Fujian Geological Exploration Institute of Geology and Mine Bureau, Fuzhou, Fujian 350013, China)

Abstract: Branch-type anchor is a new type of bolt independently developed by the authors, which has broad application prospects. In order to explore the load-bearing characteristics of branch-type anchors, an indoor test model was constructed, and a series of pull-out tests was carried out for different embedding depths, branch diameters, and double-branch spacing. The corresponding load-displacement curves were obtained, and non-dimensional processing for part of the data was conducted to obtain the relationship curve between the buried depth ratio and the load factor. Finally, a simplified mechanical model was used to derive the calculation formula for the end resistance and the pull-out ultimate bearing capacity of the branch-type anchor. The research results show that there is a nonlinear relationship between the embedment depth and the ultimate bearing capacity, and a critical embedment depth exists. The plate diameter has the most significant impact on the pull-out bearing capacity, which has a linear growth relationship with the ultimate bearing capacity. The ultimate bearing capacity is 2–5 times higher than that of a straight bolt. The bearing capacity of the double plate can be fully used when the separation distance of the double plate is 4 times of the plate diameter. Since the soil is mainly sheared at the initial stage of loading, the initial slope of the load-displacement curve of the double-branch anchor is much larger than that of the single-branch anchor. The sudden change point of the slope of the relationship between the embedment depth ratio and the load factor is the critical embedment ratio, which is 3.02. The results obtained by this formula are basically consistent with those of the four testing groups, which verifies the validity of the calculation formula. The research results have important theoretical and practical significance for the design and engineering application of the branch-type anchor.

Keywords: branch-type anchor; ultimate bearing capacity; pull-out tests; end resistance; clay

收稿日期: 2020-09-09

修回日期: 2020-11-08

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 41861134011); 中化地质矿山总局科技创新团队基金项目 (No. 201806291)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41861134011) and the Science and Technology Innovation Team Fund Project of China Chemical Geology and Mine Bureau (201806291).

第一作者简介: 杨坚, 男, 1995年生, 硕士研究生, 主要从事边坡工程方面研究工作。E-mail: yj_fzu@163.com

通讯作者: 简文彬, 男, 1963年生, 博士, 教授, 主要从事边坡工程、地质灾害及其防治、岩土工程防灾减灾方面的研究。E-mail: jwb@fzu.edu.cn

1 引言

锚固技术在边坡加固、基坑支护以及公路交通等工程中得到了广泛应用^[1], 但注浆锚杆锚固段存在有效长度问题, 而通过加大锚固段的长度已不能有效增加锚固力^[2]。因此, 近年来国内外岩土工程领域针对传统锚杆的改进开展了大量的研究, 各种新型锚固技术不断创新并应用于实际工程。郭钢等^[3-4]通过模型试验发现扩体锚杆较普通锚杆在极限承载力、承载比与安全性等方面均有大幅度提高, 通过增大扩体锚固段直径可显著提高抗拔承载力; 梅国雄^[5]、徐敏^[6]等研制出新型伞式抗拔锚, 通过室内和现场试验分析了锚头有无灌浆对抗拔承载力的影响, 且与竖直抗拔桩进行对比, 表明伞状锚的承载力有了明显提高; 曹佳文等^[7-8]通过模型试验探讨充气锚杆的变形与承载特性, 得出充气压力及土体密实度是最显著的影响因素, 侧阻力提高幅度较大, 与一般锚杆相比充气锚杆具有较大的承载能力; 杨学祥等^[9]通过对充气锚杆的气囊增加保护用的端挡板、侧护板等措施, 最大充气压力、每米极限承载能力分别是现有充气锚杆的 5 倍、60 倍; 刘钟等^[10]基于扩体锚杆的众多优势, 研发了具有多重防腐功能的承压, 承载力比传统锚杆提高 2~3 倍; Liao 等^[11]通过建立砂土中桨叶式锚杆的数值模型, 从数值分析中发现下铰体沿线土壤没有逐渐屈服的迹象, 较小的下铰角就可以大幅度提高锚杆的抗拔力。不难发现, 增大锚杆内端受力面积是一种提高锚杆承载力的重要措施。

支盘式锚杆是通过扩孔之后注浆形成支盘式的锚固体, 可选择工程性能良好的土层形成多个支盘, 从而达到充分调动支盘端阻力的作用。其承载机制与传统扩大头锚杆有相似之处, 但也存在自身特点, 探究支盘式锚杆的承载特性对其工程应用有着重要的指导意义。本文以自主研发的一种注浆支盘式锚杆为研究对象^[12], 前期以预制的支盘式锚杆开展研究, 构建室内模型试验, 探讨改变埋置深度、支盘直径和双支盘间距等条件对支盘式锚杆承载特性的影响。最后通过简化力学模型, 推导出支盘式锚杆的端阻力与拉拔极限承载力的计算公式, 探究支盘式锚杆的承载特性。后续研究将采用自主研发的扩孔设备^[13](见图 1)在指定位置形成支盘状空腔, 清孔后进行注浆, 形成实际使用中的注浆支盘式锚固体系。

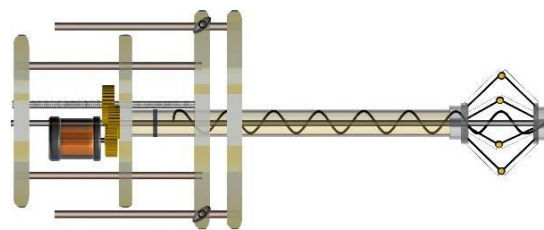


图1 多支盘锚固体系扩孔设备
Fig.1 Reaming equipment for multi branch-type anchor system

2 支盘式锚杆拉拔试验

2.1 试验设备

本次室内模型拉拔试验的装置包括模型箱、加载系统和反力辅助设备, 如图 2 所示。模型箱的尺寸为长×宽×高=3 m×2 m×1.5 m, 其外框架由钢材焊接而成, 两侧黏接 15 mm 厚的有机钢化玻璃, 其表面标注锚杆埋置位置。反力辅助设备是自制的工字型反力架, 反力架上设置的直角三棱柱(倾角 15°)能够保证设备在安装及受拉过程中千斤顶油缸与锚杆在同一轴线上, 提高测试精度。

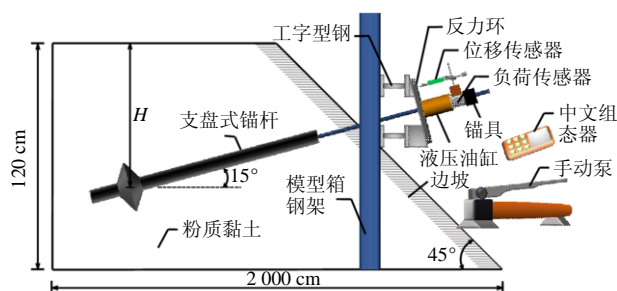
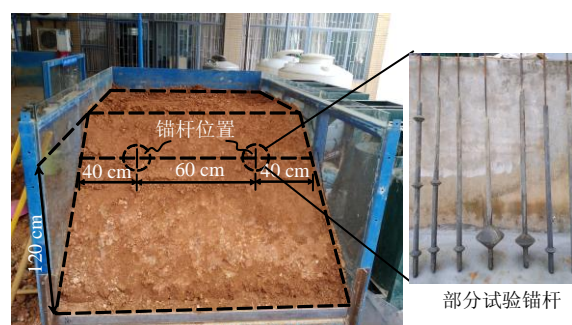


图2 室内模型示意图
Fig.2 Scheme of the indoor model test

加载系统设备是 HCYL-60 锚杆综合参数测定仪, 包括位移传感器、负荷传感器、液压油缸和中文组态器等。在试验的过程中可以把位移、力值及变化曲线定时自动存储记录在仪器中, 其压力、位移最大测量范围分别为 100 kN 和 50 mm, 显示分辨率为 0.01 kN 和 0.01 mm。

2.2 锚杆模型

支盘式锚杆由拉杆 (HRB400 螺纹钢) 和浆材 (PP42.5 硅酸盐水泥、水) 构成, 其锚固浆液配比为水泥:水=1:0.4, 将浆液倒入模具凝固养护而成。影响支盘式锚杆承载性能的因素很多, 本次室内模型试验选取其主要因素进行研究, 使用不同支盘直径 D 、不同埋深 H 和不同盘间距 L_d 的支盘式锚杆进行拉拔试验, 并与普通锚杆进行对比分析, 试验参数见表 1 (双支盘的埋深指底部支盘)。

表 1 锚杆试验参数

Table 1 Anchor test parameters

支盘直径 D/mm	埋深 H/mm	盘间距 L_d/mm	支盘数	锚杆 (体) 直径 d/mm	扩角 $\theta/(\circ)$
100	550	—	1	50	60
150	550	—	1	50	60
200	550	—	1	50	60
250	550	—	1	50	60
200	490	—	1	50	60
200	430	—	1	50	60
200	370	—	1	50	60
100	550	100	2	50	60
100	550	200	2	50	60
100	550	300	2	50	60
100	550	400	2	50	60

2.3 边坡制备

所用粉质黏土取自位于福州市晋安区的茉莉花园西北侧边坡, 具体岩土物理力学性质参数见表 2。边坡的制备是通过控制浇注结合分层填筑压实的方法^[14], 分层厚度为 5 cm, 采用打夯机压实 (每层填土来回压实一次)。当填土高度到达支盘式锚杆预设高度后, 将锚杆模型轻置于黏土面上 (与水平面呈 15°), 并同钢化玻璃上的标注线保持平行, 然后继续填筑黏土至达到预设埋置深度为止。通过填土密实度, 控制与原取样土层的相似性。在填筑过程中采用环刀及时取样进行密实度和含水率计算, 根据计算结果与原取样土层的差别, 及时调整压实次数和土体含水率, 从而尽量减小误差。

表 2 土的基本力学性质

Table 2 Basic mechanical properties of soil

含水率 $\omega/\%$	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	弹性模量 $E/(\text{kN}/\text{m}^2)$	泊松比 ν
25.2	18.6	21	15.6	7400	0.31

2.4 试验过程

覆盖塑料膜养护 48 h 后进行拉拔试验, 试验拉拔过程采用逐级加载法进行, 相邻两级荷载的加载时间间隔至少 5 min, 直至锚杆发生破坏。锚杆破

坏的判定为单位荷载下锚固体位移的增量超过前一级荷载产生的单位荷载下位移增量的 2 倍^[15]。

2.5 试验结果分析

2.5.1 埋置深度影响

在同一支盘直径 $D=200\text{ mm}$, 支盘的埋深分别为 370、430、490 mm 和 550 mm (即支盘到锚固端的距离分别为 400、600、800 mm 和 1 000 mm) 的情况下进行拉拔试验, 从图 3 中可以看出, 随着支盘埋深的增大, 极限拉拔力呈非线性增加。当支盘埋深在 430~490 mm 时, 埋深增加 60 mm, 极限承载力的增加幅度达到了 50.7%; 埋深达到 500 mm 深度后, 极限承载力增加幅度变缓仅为 18%。这是因为增加埋深仅相当于土体的自重应力增加, 而锚固体与土的摩阻力存在极值, 当达到极值后对提高锚杆的抗拔承载力的作用有限, 因此支盘式锚杆存在临界埋深。

图 4 为支盘距锚固端不同位置处的锚杆破坏现象, 从图中可知, 支盘无论位于锚固端何处, 锚杆都是由于支盘达到极限强度导致破裂失效, 最终发

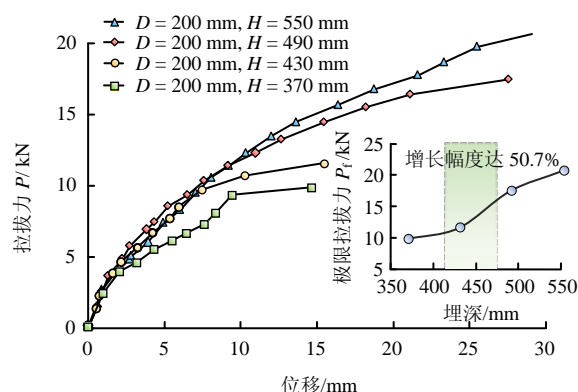


图 3 不同埋深下支盘锚杆的拉拔位移曲线

Fig.3 Pull-out displacement curves of branch-type anchor at different buried depths



(a) 距离锚固端 800 mm (b) 距离锚固端 600 mm (c) 距离锚固端 1 000 mm

图 4 支盘距锚固端不同位置的破坏现象

Fig.4 Failure phenomena at different positions between branch and anchorage end

生剪切破坏。结合图3可知, 支盘距锚固端越近, 荷载位移曲线越平缓, 抗拔极限承载力越低, 因此在支盘式锚杆设计时为防止过早发生剪切破坏和充分调用支盘端的抗拔作用, 可考虑增大近锚固端支盘的厚度。

2.5.2 盘径影响

在同一埋深 550 mm 下, 支盘直径分别取 100、150、200 mm 和 250 mm 进行拉拔试验, 并于直锚杆进行比较, 如图5所示。由图可看出以下特点: ①随着支盘直径的加大, 锚杆极限抗拔承载力增大, 相应的位移也逐步增大; ②当支盘直径从 100 mm 增至 250 mm, 支盘式锚杆比直锚杆的极限承载力分别增大了 2.3 倍、3.7 倍、4.6 倍和 5.6 倍, 说明支盘式锚杆的抗拔承载力得到了显著提高以及盘径的大小对其抗拔承载力的影响是明显的。

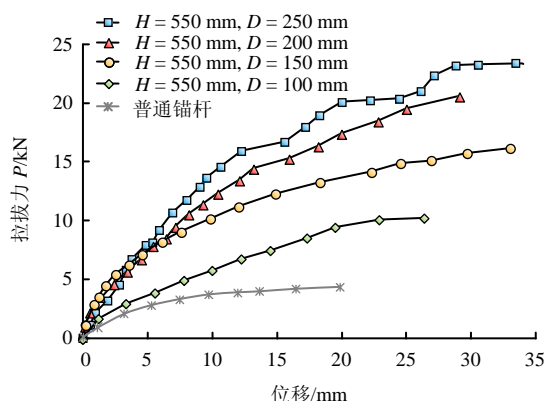


图5 不同盘径下支盘锚杆的拉拔-位移曲线

Fig.5 The drawing displacement curves of the branch-type anchor under different plate diameters

为了探究支盘直径与极限拉拔力之间的相关性, 并与 Ilamparuthi 等^[16]在密实砂中测得的试验数据进行比较, 如图6所示。从图中可以看出, 在所研究的支盘直径范围内, 对于每个埋深 H , 无论在粉质黏土还是砂土中极限拉拔力都随着 D 的增加呈线性增加, 但 P_t 并非 D 的简单倍数。且相较于砂土, 在粉质黏土中得到的关系曲线斜率要高得多, 说明了支盘在粉质黏土中可发挥更大的承载力。

2.5.3 双支盘间距影响

在同一支盘直径 $D=100$ mm, 底部支盘埋深 $H=550$ mm, 分别改变双支盘之间的间距 L_d 为 100、200 mm 和 400 mm 进行拉拔试验, 如图7所示, 从中可以发现以下特点:

(1) 随着支盘间距的增大, 极限抗拔承载力也逐步加大。当两个支盘的间距为 100、200 mm 时, 其极限承载力 (分别为 10.8、11.5 kN) 比单支盘锚

杆的极限承载力 (10.2 kN) 要高, 但远远低于双支盘锚杆的理论极限承载力 (16.05 kN)。当两个支盘的间距为 400 mm 时, 其极限抗拔承载力 (15.2 kN) 几乎达到双支盘锚杆的理论极限承载力, 故可将 4 倍的支盘直径作为分界间距。

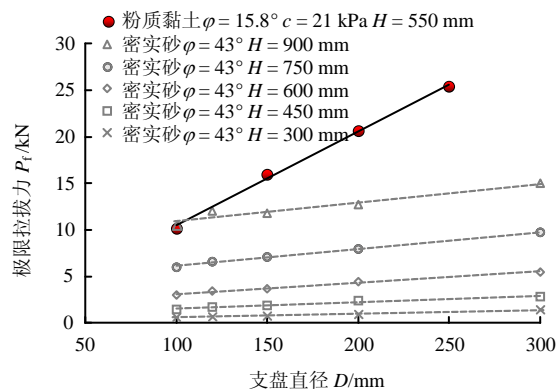


图6 支盘直径与极限拉拔力之间的关系

Fig.6 The relationship between the diameter of the plate and the ultimate drawing force

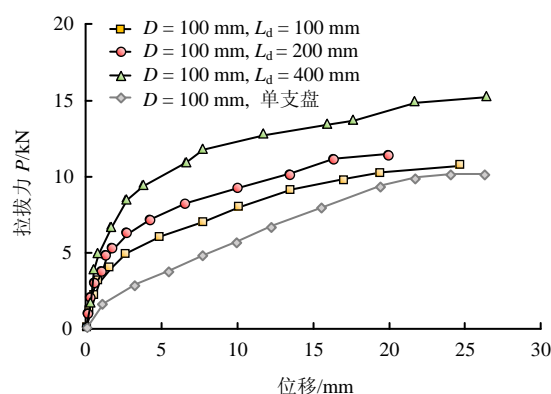


图7 不同盘间距下双支盘锚杆的拉拔位移曲线

Fig.7 Drawing displacement curves of double-branch anchor rod under different plate spacings

(2) 双支盘锚杆与图5单支盘锚杆的拉拔曲线最明显的区别是, 在加载阶段初期土体表现出很大的刚度, 其荷载-位移曲线斜率较陡, 即在相同荷载作用下, 其位移要比相同支盘直径的单支盘锚杆的位移要小。这是由于在加载初期双支盘锚杆在拉拔过程中引起的土体变形主要为剪切变形, 是以两个支盘为端截面的短柱与土体间的摩擦力来平衡加载, 而在相同的位移下, 剪应力比压应力增加得快。

2.5.4 无量纲荷载系数

图8为经无量纲化处理后描述锚杆的支盘埋置深度对极限抗拔力的影响, 以及其他研究人员^[16-18]对于圆形锚的试验数据。无量纲荷载系数 N_{pf} 定义为

$$N_{pf} = P_f / AK_0\gamma H \quad (1)$$

式中: P_f 为锚杆的极限拉拔力; A 为支盘面积 ($A = \pi R^2$); K_0 为支盘前土体的静止土压力系数; H 为支盘埋置的深度; γ 为上覆土的重度。

Ilamparuthi 等^[16]研究表明, 对于给定的土体密度, N_{pf} 仅取决于埋深比 H/D , 而在圆盘锚直径 D (100~400 mm) 所研究范围内不受 D 影响, 且斜率的突变点为临界埋深比 $(H/D)_{CR}$, 故将不同直径 D 、不同埋深 H 的单支盘数据用式 (1) 进行无量纲化处理。

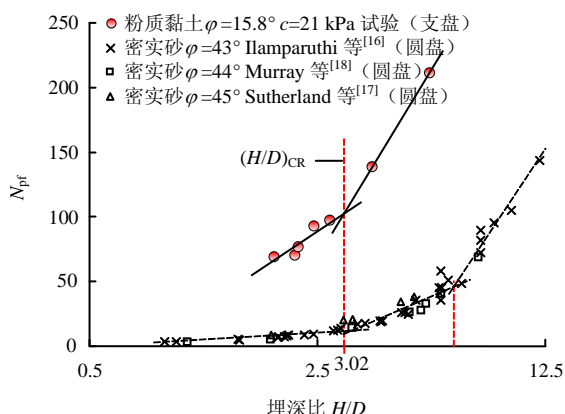


图8 无量纲荷载系数与埋深比之间的关系

Fig.8 Relationship between the dimensionless load coefficient and embedment ratio

从图8可以看出, 试验数据无量纲荷载系数 N_{pf} 相对于埋深比 H/D 的变化趋势与其他研究测试得到的数据基本一致, 其中斜率的突变点, 即临界埋深比 $(H/D)_{CR} = 3.02$ 。但是, 本试验在埋深比相同下较其他研究得到的 N_{pf} 要更高, 而 $(H/D)_{CR}$ 要更小, 说明在相同条件下相较于砂土, 在黏土中支盘完全发挥承载特性所需的埋深较浅。

3 支盘式锚杆极限承载力计算分析

3.1 支盘式锚杆力学模型

支盘式锚杆的力学模型如图9所示, 锚杆的承载力主要有两部分组成: 支盘端阻力与锚固段的侧阻力。在拉拔试验加载过程中, 支盘与土体的相互作用与静力触探试验的锥头相似, 土体挤压变形引起盘周围土体的径向位移, 同时压缩挤密盘端土体, 提高了支盘式锚杆的抗拔承载力, 故其极限承载力可表示为

$$P_f = P_s + Q \quad (2)$$

$$P_s = \pi d(L - L_p)q_s \quad (3)$$

式中: P_f 为锚杆极限抗拔承载力; P_s 为锚杆的侧摩阻力; Q 为锚杆的支盘端阻力; d 为锚杆 (体) 拉杆半径; L 为锚杆长度; L_p 为支盘段高度; q_s 为锚固体与周围岩土体间的黏结强度值, 与锚杆周边土体应力及摩擦系数等相关。

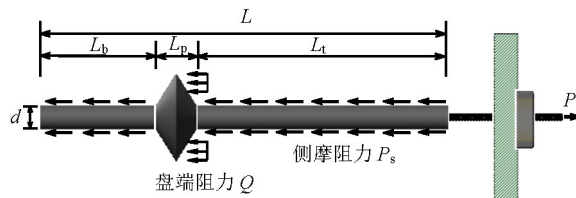


图9 支盘式锚杆力学模型

Fig.9 Mechanical model of branch-type anchor

3.2 极限状态下的盘端阻力

在支盘挤压前端土体的过程中, 土体单元除了锚杆轴向方向应力 σ_x 增加外, 纵向应力 σ_z 也会增加。如图10所示, 支盘前端土体变形是压缩效应和剪切效应共同作用的结果, 土体压缩与剪切变形的相对比例会随着 σ_x 与 σ_z 应力比的增加不断发生调整, 同时土体的应力状态也不断发生改变, 当土体单元达到极限平衡状态时, 支盘式锚杆达到极限抗拔承载力。

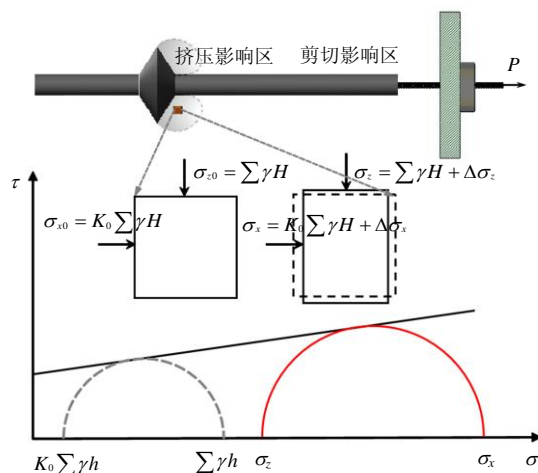


图10 支盘前端土应力状态随锚杆拉拔过程的变化

Fig.10 Change of the stress state of the soil at the front end of the plate with the pulling process

其中, 锚杆轴向方向应力 σ_x 与纵向应力 σ_z 可表示为

$$\sigma_x = K_0 \sum \gamma H + \Delta \sigma_x \quad (4)$$

$$\sigma_z = \sum \gamma H + \Delta \sigma_z \quad (5)$$

用 ξ 表征土体中某点某方向上力的单位增量在

该点该方向的垂直方向上所引起力的增量^[19], 因此可以把 $\Delta\sigma_x$ 与 $\Delta\sigma_z$ 的关系表示为

$$\Delta\sigma_z = \xi\Delta\sigma_x \quad (6)$$

式中: $\xi = (0.5 \sim 0.95) K_a$, 土的强度越高 ξ 取值越大; K_a 为朗肯主动土压力系数。

σ_x 为最大主应力 σ_1 , σ_z 为最小主应力 σ_3 , 代入摩尔-库仑强度理论 (即下式):

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) + 2c \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (7)$$

整理可得应力增量 $\Delta\sigma_x$:

$$\Delta\sigma_x = \frac{K_0(K_P - 1)\sum\gamma H + 2c\sqrt{K_P}}{1 - \xi K_P} \quad (8)$$

将式 (8) 代入式 (4), 可得

$$\sigma_x = \frac{(1 - \xi)K_0 K_P \sum\gamma H + 2c\sqrt{K_P}}{1 - \xi K_P} \quad (9)$$

式中: K_P 为支盘端前土体的朗肯被动土压力系数; φ 为支盘端前土体的内摩擦角; c 为支盘端前土体的黏聚力; H 为支盘的埋置深度, 即支盘中心点到地面的埋深; γ 为支盘上覆土层重度。

图 11 为上支盘几何模型示意图, 盘端阻力 Q 可表示为

$$Q = \int_0^{L_{pt}} 2\pi(R - x \tan\theta)P_x dx \quad (10)$$

式中: $L_{pt} = (R - r) / \tan\theta$; $P_x = \sigma_x$ 。

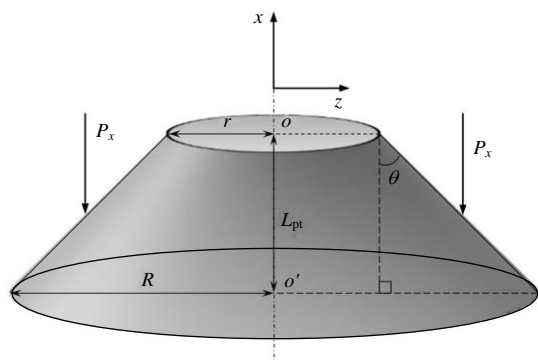


图 11 上支盘几何模型示意图

Fig.11 Schematic of the upper plate geometric model

将式 (9) 代入式 (10) 整理后可得

$$Q = \frac{\pi(R^2 - r^2)\left[(1 - \xi)K_0 K_P \sum\gamma H + 2c\sqrt{K_P}\right]}{(1 - \xi K_P) \tan\theta} \quad (11)$$

3.3 试验值与计算值对比

为了验证上述支盘式锚杆极限承载力计算公式的正确性, 进行拉拔试验和理论计算的对比分析。将不同支盘直径条件下的支盘式锚杆理论计算值与试验值列于表 3。从表中可以看出: ①盘端阻力承

担的荷载随支盘直径增大而增大, 当支盘直径为 250 mm 时, 盘端阻力与侧摩阻力均衡承担荷载; ②理论计算值与试验值基本接近, 除盘径为 100 mm 外其余计算误差都在 5% 以内, 误差过大的锚杆可能是试验过程存在误差。

表 3 支盘式锚杆抗拔承载力计算值与试验值对比
Table 3 Comparison between the calculated value and the test value of anti-pull bearing capacity of branch-type anchor

支盘直径 D/mm	侧摩阻力 P_s/kN	盘端阻力 Q/kN	极限承载力 P_f/kN	试验值 P_f/kN	误差 /%
100	12.79	1.57	13.36	10.70	25.0
150	12.62	4.19	16.81	16.13	4.2
200	12.44	7.85	20.29	20.63	1.6
250	12.27	12.56	24.83	23.78	4.4

4 结 论

(1) 支盘式锚杆的埋置深度与极限承载力呈非线性增加, 当埋深达到 500 mm 后极限承载力变化幅度逐步降低 (存在临界埋深); 盘径与极限承载力呈线性增长关系, 不同支盘直径 D 的锚杆较直锚杆的极限承载力提高了 2~5 倍, 说明盘径对抗拔承载力的影响最为显著。

(2) 随着双支盘间距的增大, 极限抗拔承载力也逐步加大, 当分界间距为 4 倍支盘直径时, 可充分调用双支盘的承载力, 双支盘锚杆荷载-位移曲线初始阶段斜率较单支盘锚杆要大得多, 这是由于在加载初期时土体主要为剪切变形, 而在相同的位移下, 剪应力比压应力增加得快; 埋深比与荷载系数关系曲线的斜率突变点为临界埋深比, 其值为 3.02。

(3) 随着拉拔力的增加, 盘端土体产生压缩挤密作用, 锚杆轴向土体应力转化为第一主应力并达到极限压力, 盘端阻力显著增加, 推导得出的支盘式锚杆极限承载力计算公式与试验结果基本一致, 验证了计算公式的有效性。

参 考 文 献

- [1] 程良奎, 张培文. 岩土锚固工程的若干力学概念问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 668-682.
CHENG Liang-kui, ZHANG Pei-wen. Several mechanical concepts for anchored structures in rock and soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 668-682.
- [2] 黄明华, 赵明华, 陈昌富. 锚固长度对锚杆受力影响分析及其临界值计算[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 4033-4041.

- HUANG Ming-hua, ZHAO Ming-hua, CHEN Chang-fu. Influence of anchorage length on stress in bolt and its critical value calculation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(11): 4033-4041.
- [3] 郭钢, 刘钟, 邓益兵, 等. 砂土中扩体锚杆承载特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3645-3652.
- GUO Gang, LIU Zhong, DENG Yi-bing, et al. Model test research on bearing capacity characteristics of underreamed ground anchor in sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(12): 3645-3652.
- [4] 郭钢, 刘钟, 李永康, 等. 扩体锚杆拉拔破坏机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1677-1684.
- GUO Gang, LIU Zhong, LI Yong-kang, et al. Model test research on failure mechanism of underreamed ground anchor[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(8): 1677-1684.
- [5] 梅国雄, 徐敏, 宋林辉, 等. 新型伞状抗拔锚现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6): 892-896.
- MEI Guo-xiong, XU Min, SONG Lin-hui, et al. In-situ tests on new umbrella-shaped anti-float anchors[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(6): 892-896.
- [6] 徐敏, 宋林辉, 周峰, 等. 新型伞状抗拔锚现场试验与数值模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 1): 24-28.
- XU Min, SONG Lin-hui, ZHOU Feng, et al. In-situ test and numerical simulation of the umbrella-shaped uplift anchor[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(Suppl. 1): 24-28.
- [7] 曹佳文, 彭文祥, 彭振斌, 等. 充气锚杆在砂土中变形与承载特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(5): 1369-1374.
- CAO Jia-wen, PENG Wen-xiang, PENG Zhen-bin, et al. Experimental study on deformation and bearing features of inflatable anchors in sands[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2011, 42(5): 1369-1374.
- [8] 曹佳文, 彭振斌, 彭文祥, 等. 充气锚杆在砂土中的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 1957-1962.
- CAO Jia-wen, PENG Zhen-bin, PENG Wen-xiang, et al. Model test study of inflated anchors in sands[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(7): 1957-1962.
- [9] 杨学祥, 焦园发, 杨语驿. 充气膨胀控制锚杆的研制与试验[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 869-876, 904.
- YANG Xue-xiang, JIAO Yuan-fa, YANG Yu-yi. The development and test of aerated expansion controlled anchors[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(3): 869-876, 904.
- [10] 刘钟, 郭钢, 张义, 等. 囊式扩体锚杆施工技术与工程应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 2): 205-211.
- LIU Zhong, GUO Gang, ZHANG Yi, et al. Construction technology and engineering applications of capsule-type under-reamed ground anchor[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(Suppl. 2): 205-211.
- [11] LIAO H J, HSU S T. Uplift behavior of blade-underreamed anchors in silty sand[J]. **Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering**, 2003, 129(6): 560-568.
- [12] 简文彬, 黄炜, 罗金妹, 等. 多支盘锚固结构: CN211256969U[P]. 2020-08-14.
- JIAN Wen-bin, HUANG Wei, LUO Jin-mei, et al. Multi-branch anchor structure: CN211256969U[P]. 2020-08-14.
- [13] 简文彬, 杨坚, 罗金妹, 等. 一种多支盘锚固体系扩孔设备及施工方法: CN110700760A[P]. 2020-01-17.
- JIAN Wen-bin, YANG Jian, LUO Jin-mei, et al. Hole reaming equipment and construction method of multi-branch anchor solid system: CN110700760A[P]. 2020-01-17.
- [14] 中华人民共和国水利部. GB/T50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T50123—2019 Standard for geotechnical testing method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [15] 中国建筑科学研究院. JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- China Academy of Building Sciences. JGJ 120—2012 Technical specification for building foundation pit support[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [16] ILAMPARUTHI K, DICKIN E A, MUTHUKRISNAIAH K. Experimental investigation of the uplift behaviour of circular plate anchors embedded in sand[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2002, 39(3): 648-664.
- [17] SUTHERLAND H B. Uplift resistance of soils[J]. **Géotechnique**, 1988, 38(4): 493-516.
- [18] MURRAY E J, GEDDES J D. Uplift of anchor plates in sand[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1987, 113(3): 202-215.
- [19] 曾庆义, 杨晓阳, 杨昌亚. 扩大头锚杆的力学机制和计算方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1359-1367.
- ZENG Qing-yi, YANG Xiao-yang, YANG Chang-ya. Mechanical mechanism and calculation method of bit expanded anchor rods[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(5): 1359-1367.