

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.05.006

充气锚杆扩大头的位移特性及其抗拔承载力试验研究

马向前¹, 陈秋南¹, 刘文骏², 赵磊军³

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 中铁隧道勘测设计院有限公司, 天津 300000;
3. 湖南工程职业技术学院 土木工程系, 湖南 长沙 410000)

摘要: 通过充气锚杆与普通锚杆室内对比模型试验, 研究了充气锚杆扩大头对位移特性与极限抗拔承载力的影响, 并获得不同埋深下和不同气压下充气锚杆与普通锚杆的荷载-位移曲线。试验结果表明: 相同埋深下, 充气锚杆比普通锚杆极限承载力大大提高, 其相应的位移也随之提高; 不同埋深下, 充气锚杆扩大头部分所承担的极限抗拔承载力占总极限承载力的比例均大于80%, 且随着埋置深度的增加, 其所占比例呈减小趋势; 在不同气压下, 充气锚杆扩大头部分所承担的极限抗拔承载力占总极限承载力的比例为72.6%~84.6%, 且随着气压的增大, 其所占比例随之增大; 回归分析结果表明, 充气锚杆在抗拔过程中位移与荷载呈指数函数关系。

关键词: 充气锚杆; 扩大头; 极限抗拔承载力; 极限位移

中图分类号: TU472

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2017)05-0032-07

An Experimental Study on Displacement Characteristics and Uplift Bearing Capacity of the Expanded Heads of Inflatable Anchors

MA Xiangqian¹, CHEN Qiunan¹, LIU Wenjun², ZHAO Leijun³

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China;
2. China Railway Tunnel Survey and Design Institute Co., Ltd., Tianjin 300000, China;
3. Department of Civil Engineering, Hunan Vocational and Technical College, Changsha 410000, China)

Abstract: Based on an indoor contrast model test between inflatable anchors and ordinary anchors, a study has been made of the influence of the expanded heads of inflatable anchor on the displacement characteristics and ultimate uplift capacity, thus obtaining the load displacement curves of inflatable anchors and ordinary anchors under different buried depths and different pressures. The experimental results show that under the same depth, the ultimate bearing capacity of the inflatable anchor is much higher than that of the ordinary anchor, and the corresponding displacement is also increased. Under different burial depths, the ratio of ultimate uplift capacity to total ultimate bearing capacity of expanded heads of inflatable anchors is greater than 80%, with the buried depths reduced, the proportion showing a decreasing trend. Under different inflation pressures, the ratio of its ultimate uplift capacity to its total ultimate bearing capacity is within the scope of 72.6%~84.6%, its proportion increased with the inflation pressure. The regression analysis results show that the displacement and load of the inflatable anchor rod are exponentially related to the load.

Keywords: inflatable anchor; expanded head; ultimate uplift bearing capacity; ultimate displacement

收稿日期: 2017-03-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41372303), 湖南省研究生科研创新基金资助项目(CX2015B494)

作者简介: 马向前(1990-), 男, 湖南湘潭人, 湖南科技大学硕士生, 主要研究方向为岩土与隧道工程,

E-mail: dskmax@163.com

通信作者: 陈秋南(1968-), 男, 江西莲花人, 湖南科技大学教授, 主要从事岩土与隧道工程方面的研究,

E-mail: cqndoc@163.com

1 研究背景

充气锚杆因其在软土中具有较大的抗拔承载力、经济、安装回收方便、可立即提供锚固力、可重复性利用等特性而被应用于海洋工程, 为海底作业机器人 (remote operated vehicle, ROV) 等海洋作业设备提供抗浮锚固力^[1]。随着岩土锚固技术的发展, 充气锚杆在近海岸软土地区表现出来的优于传统注浆锚杆、螺旋锚杆的承载性能, 引起了学术界的关注, 并将其使用范围扩展至岸上软土锚固工程, 如软土地区的基坑、边坡支护与加固等。充气锚杆是一种新型锚杆, 最早的研究始于2000年, T. A. Newson与T. S. Gallacher等^[2-3]先后在砂土与海相软土中进行了室内模型试验。砂土中的试验研究表明, 充气锚杆的抗拔承载力的影响因素有锚杆长度、气压大小、体积、橡胶膜厚度和埋置深度等, 且得到了相关经验公式, 并与螺旋锚杆进行了对比试验; 海相软土的试验研究表明, 超孔隙水压力的消散对承载力的提高可达30%, 并基于圆孔扩张理论得出了充气锚杆极限抗拔承载力 (也称抗拔力) 估算公式与极限充气压力公式。Liang Y.等^[4]通过PLAXIS软件对充气锚杆进行数值模拟分析, 研究结果表明充气锚杆的充气压力、长度、橡胶膜外表的粗糙程度以及埋置深度等因素中, 锚杆长度对其极限抗拔承载力的影响最为显著。国内对充气锚杆的研究起步较晚, 曹佳文等^[5-6]通过室内模型试验, 基于修正的剑桥模型, 推导了饱和黏性土不排水条件下圆孔扩张问题, 并利用FLAC3D数值模拟软件建立了充气膨胀模型, 将研究结果与充气锚杆的极限抗拔承载力理论推导公式进行对比, 得到了极限抗拔承载力的理论计算公式和充气锚杆对土体的应力计算方法以及计算公式。彭文祥等^[7]利用非线性有限元方法建立了充气锚杆的计算模拟单元, 得到了不同锚杆充气长度和充气压力下锚固力的变化规律。莫建军^[8]对充气锚杆进行了改进, 发明了一种类似于多叶片螺旋锚杆的串囊式充气锚杆, 并采用室内模型试验研究了气囊个数、间距等因素对该锚杆承载力的影响。

充气锚杆的锚固机理较为复杂, 国内外学者对其机理的研究尚处于起步阶段, 相关研究文献较少。充气锚杆本质上属于端头扩大型锚杆, 已有研究主要集中在研究单根充气锚杆的极限承载力及其影响因素上, 而对充气扩大头的影响程度的研究涉及较少。因此, 本文拟通过不同埋深及气压条件下充气锚杆与普通锚杆进行对比试验, 研究充气锚杆扩大头对位移特性及抗拔承载力的影响。

2 模型试验设计

2.1 充气锚杆模型设计

充气锚杆由3部分组成: 杆体、橡胶膜及附件。其杆体采用外径为25 mm的中空无缝钢管制成, 壁厚为3 mm, 下部钻有气孔; 橡胶膜材料为丁基橡胶, 长度为200 mm, 厚度为2 mm; 附件主要包括位于上部的吊环、固定橡胶膜的卡喉、气嘴、气阀、气压表等。充气方式为通过高压打气筒充气, 充气锚杆结构如图1所示。

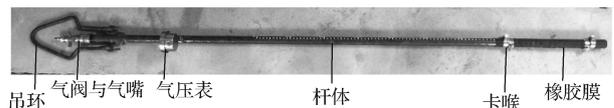


图1 充气锚杆结构图

Fig. 1 Structure chart of inflatable anchors

2.2 加载装置及加载方式

试验装置为自行研制的门式加载装置。门式加载装置结构示意图与实物图分别如图2~3所示。

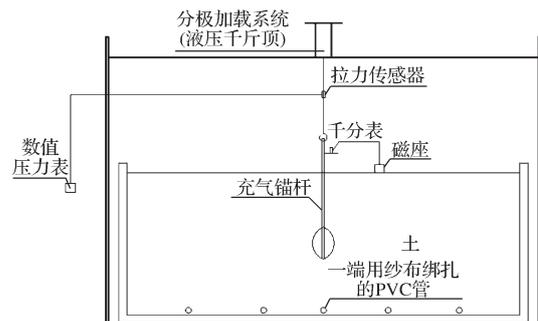


图2 门式加载装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of portal loading devices

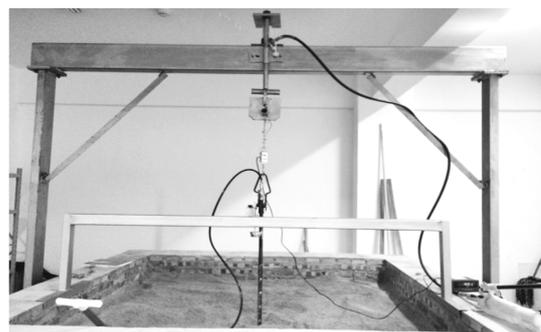


图3 门式加载装置实物图

Fig. 3 Physical map of portal loading devices

门式加载装置由试验槽、门式支架、竖向加载装置、十字型吊具、数据采集装置组成。试验槽的内部尺寸为2.0 m × 2.0 m × 1.0 m, 门式支架横跨实验槽的跨度为2.2 m, 支座对称布置于实验槽两侧, 立柱采用12#槽钢制成, 横梁采用80 mm × 200 mm空心方钢制成, 十字型吊具采用直径为30 mm的圆钢

交叉布置。竖向加载装置由以分离式液压千斤顶(10 t)为主的加载体系组成,加载装置置于龙门架的横梁上。数据采集装置由MASTERPROOF数显百分表、WTP301S型拉压称重传感器、WA-CHB力值显示表、Y-100型气压表(量程为0~0.25 MPa)等组成,可精确测定充气锚杆进行拉拔试验过程中的上拔力与竖向位移,该试验装置可满足单根以及多根锚杆同时拉拔的试验需求。

本文试验中,锚固土层所选用的砂土为湘江河砂,砂土的相对密度为2.66,最大干密度为 1.86 g/cm^3 ,最小干密度为 1.31 g/cm^3 ,平均粒径为0.24 mm,粒径在0.16~1.25 mm范围的土体占总质量的83.5%,砂土的不均匀系数为2.41,曲率系数为0.76,内摩擦角为 36.51° 。试验中的充气锚杆埋设采取预埋的方式,并采用分层砂雨法^[9]制备土样,分层厚度为100 mm。在试验过程中,保持锚杆底部距离试验槽底部100 mm。

2.3 试验方案

为了充分了解充气锚杆充气扩大头对承载力提高的影响程度,通过自制充气锚杆模型以及试验装置,设计充气锚杆在不同埋深(锚杆底端到砂土层表面的距离)和不同充气压力条件下,充气锚杆与普通锚杆的对比试验,普通锚杆为下端未覆盖橡胶模的同规格锚杆。在不同埋深条件下,充气锚杆充气压力为0.1 MPa,埋深分级为40, 60, 80 cm;不同充气压力条件下的埋深为60 cm,气压分级为0.05, 0.10, 0.15 MPa。试验步骤如下:

- 1) 安装WTP301S型拉压称重传感器,定位并安装充气锚杆,将其悬挂于称重传感器上;
- 2) 按照分层砂雨法分层铺设砂土,通过水平尺控制锚杆垂直度,当出现倾斜时进行调整;
- 3) 安装百分表、力值显示表等数据采集设备;
- 4) 通过高压打气筒给充气锚杆充气,使锚杆达到试验气压;
- 5) 将百分表和力值显示表调零;
- 6) 通过千斤顶为充气锚杆进行分级加载,记录试验数据。在试验上拔过程中需保持气压稳定,不能出现衰减现象。为了试验方便,将锚杆悬挂后对力值显示表调零,因此试验得到的充气锚杆的极限抗拔承载力不包括锚杆自重。

本试验加载方式采用分级加载,为每级荷载施加后每隔10 min测读一次锚杆位移,当最后10 min位移不大于0.2 mm时即可认为稳定,可施加下一级荷载。试验终止加载条件为:锚头位移不收敛;锚头的位移累计量超过其设计允许值;后面一级加载造成的

锚杆位移达到或者是超过前一级位移的两倍。极限抗拔承载力为试验终止加载荷载的前一级荷载^[10]。

3 试验结果与分析

3.1 充气扩大头对极限承载力的影响分析

充气锚杆与普通锚杆在不同埋深下抗拔对比试验结果,如表1所示。

表1 不同埋深下充气锚杆与普通锚杆抗拔对比试验结果
Table 1 Contrast test results of inflatable anchors and ordinary anchors under different buried depths

锚杆类别	埋深/cm	极限抗拔承载力/N	极限位移/mm
普通锚杆	40	61	0.88
	60	82	1.46
	80	101	1.51
充气锚杆	40	371	3.24
	60	448	3.59
	80	511	3.22

由表1可知,充气锚杆组与普通锚杆组均随着埋深的增加,锚杆的极限抗拔承载力提高。普通锚杆组随着埋深的增加,极限抗拔承载力呈现近似线性增加。在相同气压下,充气锚杆组60 cm埋深下,其极限抗拔承载力比40 cm埋深下提高20.8%;80 cm埋深下,充气锚杆极限抗拔承载力比40 cm埋深下提高了37.7%。在相同埋深下,充气锚杆极限抗拔承载力比相对应的普通锚杆极限抗拔承载力显著增强:埋深为40 cm时,充气锚杆的极限承载力为普通锚杆的6.08倍;埋深增加到60 cm时,充气锚杆的极限抗拔承载力为普通锚杆的5.46倍,而在埋深为80 cm时,充气锚杆的极限抗拔承载力为普通锚杆的5.06倍。

不同充气压力下充气锚杆的抗拔力-位移曲线如图4所示。

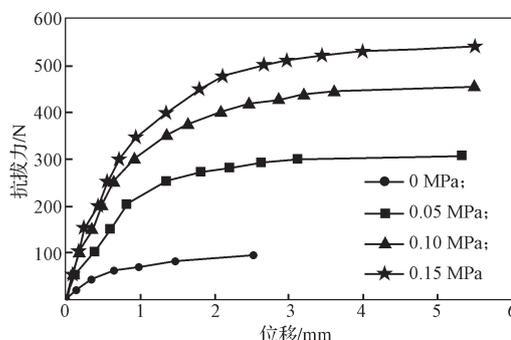


图4 不同充气压力下充气锚杆的抗拔力-位移曲线
Fig. 4 Pullout force-displacement curves under different inflation pressures

充气锚杆在不同充气压力下的抗拔试验结果如表2所示。

表 2 不同充气压力下的充气锚杆抗拔试验结果
Table 2 Contrast test results of inflatable anchors under different pressures

充气压力 /MPa	埋深 /cm	极限抗拔承载力 /N	极限位移 /mm
0.05	60	299	3.11
0.10		448	3.59
0.15		532	3.99

由表 2 可知, 随着充气压力的增加, 充气锚杆极限抗拔承载力随之增加。在相同埋深条件下, 0.1 MPa 充气压力下的充气锚杆极限抗拔承载力比 0.05 MPa 充气压力下的提高了 49.8%, 0.15 MPa 充气压力下的充气锚杆极限抗拔承载力比 0.05 MPa 充气压力下的提高了 77.9%。相对于普通锚杆, 充气锚杆充气压力为 0.05 MPa 时, 充气锚杆的极限抗拔承载力为普通锚杆的 3.65 倍; 充气压力增加到 0.10 MPa 时, 充气锚杆的极限抗拔承载力为普通锚杆的 5.46 倍, 而 0.15 MPa 时, 充气锚杆的极限抗拔承载力为普通锚杆的 6.49 倍。充气锚杆气压的增加对极限抗拔承载力的提升十分明显。

普通锚杆抗拔承载力主要由杆体与周边土体的侧摩阻力提供。充气锚杆的抗拔承载力由如下 3 部分组成: 1) 扩大头与周边土体的摩阻力; 2) 扩大头上的覆土体对扩大头的端阻力; 3) 杆体与周边土体的摩阻力。充气锚杆下端的 200 mm 部分为橡胶膜膨胀产生的扩大头, 而普通锚杆为光滑杆体。充气锚杆扩大头在高压作用下对土体产生挤压, 在橡胶膜-土体接触面上产生环向应力, 因此产生了比光滑杆体与土体接触面上更大的侧摩阻力。在本试验过程中, 所采集到的荷载数据去除了锚杆自重。因此, 扩大头部分所提供的极限抗拔承载力比充气锚杆的极限抗拔承载力减去相应的普通锚杆的极限抗拔承载力略大。因此, 按照该方法可计算得到扩大头部分所提供的极限抗拔承载力范围及其所占比例范围, 计算结果如表 3~4 所示。表 3 所示为充气压力为 0.1 MPa 时, 不同埋深下扩大头部分的抗拔承载力。表 4 所示为锚杆埋深为 60 cm, 改变充气压力时扩大头部分的抗拔承载力实验结果。

表 3 不同埋深下扩大头部分的抗拔承载力
Table 3 Uplift bearing capacity of expanded heads under different depths

埋深 /cm	极限抗拔承载力 /N	扩大头部分极限抗拔承载力 /N	扩大头部分极限抗拔承载力占比 /%
40	371	>310	>83.8
60	448	>366	>81.7
80	511	>410	>80.2

由表 3 可知, 在不同埋深下, 充气锚杆扩大头

部分所承担的极限抗拔承载力占总极限承载力的比例均大于 80%, 且随着埋深的增加, 其所占比例减小, 说明扩大头在不同埋深下对承载力的影响均较为显著, 埋深对扩大头承载力占比有削弱的趋势, 但其影响较小。

表 4 不同气压下扩大头部分的抗拔承载力

Table 4 Uplift bearing capacity of expanded heads under different inflation pressures

充气压力 /MPa	极限抗拔承载力 /N	扩大头部分极限抗拔承载力 /N	扩大头部分极限抗拔承载力占比 /%
0.05	299	>217	>72.6
0.10	448	>366	>81.7
0.15	532	>450	>84.6

由表 4 可知, 在不同充气压力条件下, 充气锚杆扩大头部分所承担的极限抗拔承载力占总极限承载力的比例均大于 72%, 且随着充气压力的增大, 其所占比例增加, 在 0.05 MPa 条件下为 72.6%, 在 0.15 MPa 条件下为 84.6%, 这说明充气压力对扩大头承载力占比影响较大, 且随着充气压力的增大其影响也增大。充气压力的改变对充气锚杆的影响非常明显, 其主要体现在: 充气压力越大, 充气扩孔时对周边土体的挤压更为显著, 作用在橡胶膜-土体界面的应力也随之增大; 随着充气压力的增大, 充气锚杆扩大头直径也随之增大, 这既增大了侧摩阻力接触面积, 也增大了端阻力接触面积。因此, 试验结果表明充气锚杆依靠高压气体获得较高侧摩阻力与端阻力, 从而使充气锚杆获得较高的承载力。

3.2 充气扩大头对位移特性影响分析

由表 1 可知, 普通锚杆试验组在埋深为 40 cm 条件下, 极限位移较小, 为 0.88 mm, 而在 60, 80 cm 下, 极限位移相近。同时, 充气锚杆试验组在各埋深下极限位移较为接近。试验过程中不同埋深下抗拔力-位移关系曲线如图 5~8 所示。

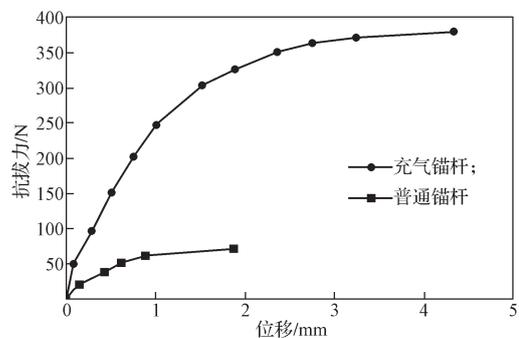


图 5 40 cm 埋深下充气锚杆与普通锚杆抗拔力-位移曲线
Fig. 5 Pullout force-displacement curves of inflatable anchors and ordinary anchors under 40 cm-depth

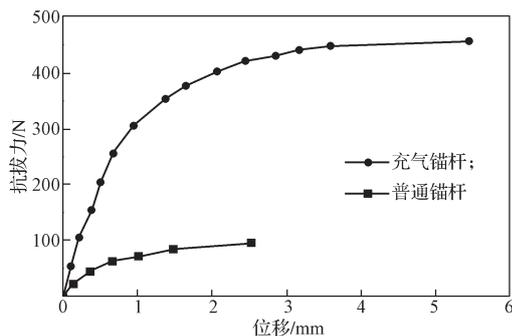


图 6 60 cm 埋深下充气锚杆与普通锚杆抗拔力 - 位移曲线

Fig. 6 Pullout force-displacement curves of inflatable anchors and ordinary anchors under 60 cm-depth

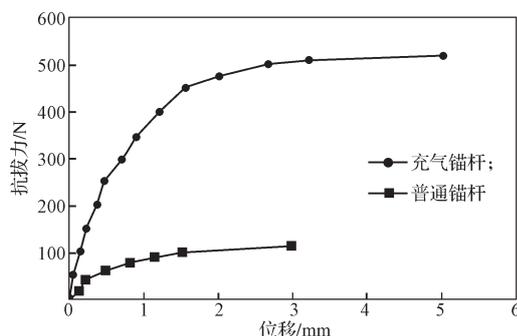


图 7 80 cm 埋深下充气锚杆与普通锚杆抗拔力 - 位移曲线

Fig. 7 Pullout force-displacement curves of inflatable anchors and ordinary anchors under 80 cm-depth

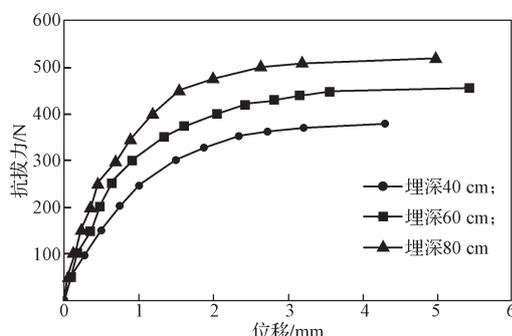


图 8 不同埋深下充气锚杆的抗拔力 - 位移曲线

Fig. 8 Pullout force-displacement curves under different depths

由图 5~8 可知, 不同埋深下, 充气锚杆的抗拔力 - 位移曲线与普通锚杆的曲线形状相似, 均为缓坡形, 且随着充气锚杆的位移增大, 抗拔力不断增大, 但增加的速率变缓。

锚杆可分为浅埋破坏、深埋破坏及介于两者之间的破坏形式。区分浅埋与深埋破坏的标准之一在于超过某一临界深度^[11], 土体塑性区在土中可得到充分的发展, 随着埋深的增加, 极限位移变化趋于平缓。因此, 普通锚杆组在 40 cm 埋深下可视为浅埋破坏, 60 cm 与 80 cm 位移相近, 可视为深埋破坏, 而充气锚杆组 40, 60, 80 cm 条件下位移趋于一致, 均呈现出深埋破坏的特点, 说明在扩大头的影响下, 改变了

40 cm 埋深下的破坏形式, 充气锚杆能以较短的锚杆长度获得深埋的性质, 具有优良的承载性能。

由表 1 可知, 充气锚杆相对于普通锚杆承载力提高的同时, 其相对应的极限位移也随之提高。由表 3 可知, 充气锚杆在承受荷载的时候, 锚杆较大部分的承载力由扩大头部分提供, 而其扩大头部分由橡胶模包裹的高压气体组成, 在承受荷载的同时产生较大变形, 这一结论与文献 [7] 中数值模拟结果相符, 故充气锚杆在极限承载力状态下, 位移相对于普通锚杆的大。这反映了充气锚杆在应用中会产生不利于结构稳定的较大位移^[12], 同时也体现了充气锚杆失效是一个缓慢的过程, 有较大的安全隐患, 在实际工程中可以通过预张拉等方法消除这一部分变形^[13]。

由表 2 可知, 充气锚杆在相同埋深条件下, 随着气压的增大, 在承载力提高的同时极限位移随之增大, 但改变量较小, 极限位移位于 3.1~4.0 mm 之间。结合前文承载力分析结果可知, 增加充气锚杆气压是提高充气锚杆锚固性能的方法之一, 在有效提高承载力的同时, 又能较好地控制位移。

4 充气锚杆荷载 - 位移关系

基于最小二乘法的回归分析是数理统计中常用的方法之一, 即将采集到的数据通过公式表示出来, 通过处理及计算找出两个变量之间的函数关系式, 得到能够较为准确地反映实际数据的位移 - 荷载拟合曲线。在 60 cm 埋深、充气压力为 0.10 MPa 下的充气锚杆进行抗拔试验时, 所得位移 - 荷载曲线如图 9 所示。

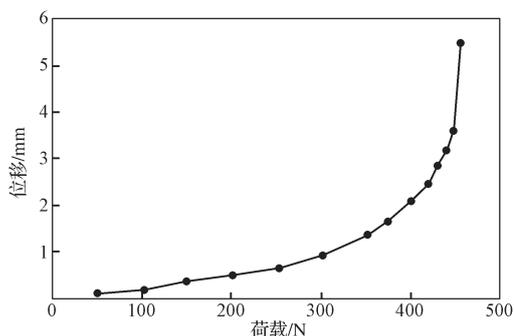


图 9 充气锚杆位移 - 荷载曲线图

Fig. 9 Displacement-load curves of inflatable anchors

对图 9 中的曲线进行分析可以发现: 随着荷载的逐步增大, 锚杆位移呈现出加速增长的变化趋势。现采用二次模型、三次模型以及指数模型作为回归函数, 分别求解其回归方程和线性相关系数, 拟合优度用 R^2 表示, 所得结果如下。

1) 二次模型回归方程与相关系数为

$$y_1 = 4 \times 10^{-5} x_1^2 - 0.014 x_1 + 1.125, R_1^2 = 0.872。$$

式中: x 为充气锚杆的荷载值;

y 为充气锚杆的位移值;

R^2 为线性相关系数。

2) 三次模型回归方程与相关系数为

$$y_2 = 2 \times 10^{-7} x_2^3 - 0.028 x_2 - 1.194, R_2^2 = 0.930。$$

3) 指数模型回归方程与相关系数为

$$y_3 = 0.078 e^{0.008 x_3}, R_3^2 = 0.980。$$

充气锚杆在 60 cm 埋深下, 位移 - 荷载曲线及指数函数拟合曲线如图 10 所示。

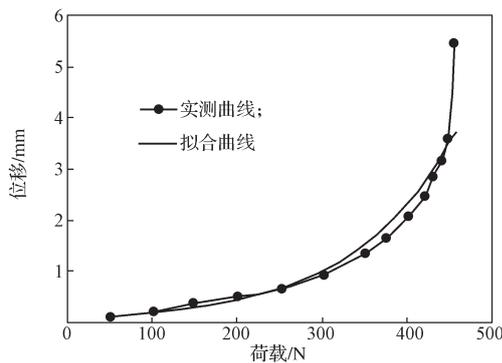


图 10 充气锚杆 (60 cm 埋深) 位移 - 荷载曲线及指数函数拟合曲线

Fig. 10 Displacement-load curve exponential function fitting figure of inflatable anchors (60 cm)

由计算结果以及图 10 可以得知, 充气锚杆的荷载 - 位移曲线的二次拟合与三次拟合的拟合程度不高, 而指数函数拟合曲线与实测曲线十分接近。另外, $R_3^2 > R_2^2 > R_1^2$, 即指数模型中相关系数最大, 为 0.980, 拟合程度最高。为了进一步验证这种拟合规律, 现将不同埋深下的位移 - 荷载曲线均采用指数函数拟合, 所得拟合结果如下:

1) 埋深为 40 cm 时,

$$y_4 = 0.085 e^{0.009 x_4}, R_4^2 = 0.966;$$

2) 埋深为 80 cm 时,

$$y_5 = 0.056 e^{0.007 x_5}, R_5^2 = 0.965。$$

由以上计算结果可知, 埋深为 40, 80 cm 时, 相关系数均比较大, R^2 均大于 95%, 表明拟合程度都非常高, 这进一步验证了充气锚杆在进行抗拔试验的过程中, 其位移与荷载呈指数函数关系。因此可得到该实验条件下充气锚杆的拉拔试验中位移的经验估算公式:

$$y = k_1 e^{k_2 x}, \quad (1)$$

式中 k_1 、 k_2 为函数相关系数, 它们的取值与锚杆及土层相关。

5 结论

课题组通过充气锚杆与普通锚杆进行室内模型抗拔对比试验, 分析了扩大头对位移特性及极限抗拔承载力的影响, 基于获得的抗拔试验数据, 对位移 - 荷载曲线进行了最小二乘法回归分析, 可以得到如下结论:

1) 充气锚杆相对于普通锚杆能有效提高抗拔承载力, 充气锚杆扩大头部分所承担的极限抗拔承载力占总极限承载力的比例均大于 80%, 且随着埋置深度的增加, 其所占比例呈减小趋势, 充气锚杆具有较好的浅埋性能;

2) 在不同充气压力条件下, 充气锚杆扩大头部分所承担的极限抗拔承载力占总极限承载力的比例为 72.6%~84.6%, 且随着充气压力的增大, 其所占比例随之增大, 增加充气锚杆的充气压力能有效提高充气锚杆的锚固性能;

3) 由于扩大头的存在, 在承载力提高的同时相应的位移随之增加, 但扩大头变形机理和位移控制方法有待进一步研究;

4) 拟合结果显示, 在抗拔过程中, 充气锚杆的位移与荷载呈指数函数关系。

参考文献:

- [1] 彭文祥, 曹佳文. 充气锚杆的研究现状及展望 [J]. 科技导报, 2010, 28(5): 111-115.
PENG Wenxiang, CAO Jiawen. A Review of Studies on Inflatable Anchor [J]. Science & Technology Review, 2010, 28(5): 111-115.
- [2] GALLACHER T S. Novel Anchoring Systems for Remotely Operated Vehicles [D]. Dundee: the University of Dundee, 2000.
- [3] NEWSON T A, SMITH F W, BRUNNING P. An Experimental Study of Inflatable Offshore Anchors in Soft Clays [C] // Proceedings of ICOF 2003, BGA Conference on Foundations. Dundee: [s. n.], 2003: 695-704.
- [4] LIANG Y, HINCHBERGER S D, NEWSON T A. Non-Linear Analysis of Pullout Tests on Inflatable Anchors in Sand [C] // Proceedings of the Canadian Geotechnical Conference. Halifax: [s. n.], 2009: 1-8.
- [5] 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 Jiawen, PENG Zhenbin, PENG Wenxiang, et al. Model Test Study of Inflated Anchors in Sands [J]. Rock

- and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 1957-1962.
- [6] 曹佳文, 彭振斌, 彭文祥, 等. 充气锚杆在软土中的力学特性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1399-1404.
CAO Jiawen, PENG Zhenbin, PENG Wenxiang, et al. Experimental Study on Mechanical Characteristics of Inflatable Anchors in Soft Clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 33(9): 1399-1404.
- [7] 彭文祥, 徐松山, 曹佳文, 等. 充气锚杆力学性能的非线性有限元分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 3104-3109.
PENG Wenxiang, XU Songshan, CAO Jiawen, et al. Nonlinear Finite Element Analysis of Mechanical Properties of Inflatable Anchors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 3104-3109.
- [8] 莫建军. 串囊式充气锚杆力学特性试验研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2014.
MO Jianjun. Model Test Study on Bladder-Type Inflatable Anchor[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [9] 马险峰, 孔令刚, 方 薇, 等. 砂雨法试样制备平行试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10): 1791-1801.
MA Xianfeng, KONG Linggang, FANG Wei, et al. Parallel Tests on Preparation of Samples with Sand Pourer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 36(10): 1791-1801.
- [10] 中华人民共和国建设部. 建筑边坡工程技术规范 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 111-112.
People's Republic of China Ministry of Construction. Construction Slope Engineering Technical Specifications [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2013: 111-112.
- [11] 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 Yibing, 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.
- [12] 刘文骏. 砂土充气锚杆循环荷载作用承载特性及其群锚效应研究 [D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2016.
LIU Wenjun. Study on Bearing Capacity Characteristic of Cyclic Behavior and Group Anchor Effect for Inflatable Anchor in Sandy Soil[D]. Xiangtan: Hunan University of Science & Technology, 2016.
- [13] 张建经, 廖蔚茗, 欧阳芳, 等. 重复荷载作用下岩锚体系力学特性和黏结性能试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 829-834.
ZHANG Jianjing, LIAO Weiming, OUYANG Fang, et al. Experimental Research on Mechanical Behavior and Bond Performance of Rock-Anchor System Subjected to Repeated Load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 829-834.

(责任编辑: 申 剑)