

充气锚杆循环荷载作用下的位移规律试验研究^{*}

陈秋南¹, 刘文骏^{1,2}, 赵磊军^{1,3}, 周勇全², 马向前^{1,2}

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411100; 2. 中铁第六勘察设计院集团有限公司, 天津 300000;
3. 湖南工程职业技术学院 土木工程系, 长沙 410000)

摘 要: 充气锚杆是一种新型扩大头锚杆, 在软弱地基区域工程建设以及海洋资源的利用过程中, 有其特殊的优势。笔者设计自制了充气锚杆实验槽, 利用该实验槽开展了砂土中的充气锚杆循环荷载试验, 揭示了砂土充气锚杆循环荷载作用下的位移变化规律。结果表明: (1) 充气锚杆抗拔过程分为3个阶段: 弹性位移阶段、弹塑性位移阶段和塑性位移阶段, 前2个阶段, 充气锚杆的塑性位移与荷载成指数函数关系; (2) 随着循环荷载峰值的增加, 充气锚杆在循环荷载下的位移发展速度增加, 单次循环下的残余位移量与总残余位移量增加, 最终的位移量也相应地增加。 (3) 极限抗拔承载力随着循环次数的增加而变小。

关键词: 砂土充气锚杆; 循环荷载; 位移变化规律; 室内试验

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2019)02-0373-08

Experimental Study on Displacement Law of Inflatable Anchor under Cyclic Loading

Chen Qiunan¹, Liu Wenjun^{1,2}, Zhao Leijun^{1,3}, Zhou Yongquan², Ma Xiangqian^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411100, P.R. China;
2. China Railway Liuyuan group Co., Ltd., Tianjin 300000, P.R. China; 3. Department of Civil Engineering, Hunan Vocational College of Engineering, Changsha 410000, P.R. China)

Abstract: Inflatable anchor is a new type of expanding head bolt with special advantages in soft foundation area, construction and utilization of ocean resources in the process. This paper designed a home-made inflatable anchor experiment groove. The experiment is carried out by cyclic loading test of inflatable anchor in sandy soil to reveal the displacement law of the inflatable anchor in sandy soil under cyclic loading. Indoor model test is carried out to study the displacement law of inflatable anchor under cyclic loading in sandy soil. The results show that the uplift process of inflatable anchor bolt can be divided into three stages: elastic displacement, elastic-plastic displacement and plastic displacement. In the first and second stages, the plastic displacement of the pneumatic anchor bolt is exponentially related to the load. With the increase of cyclic load peak, inflatable anchor under cyclic load displacement speed increases, the residual displacement of single cycle and the total residual displacement increases, the displacement of the corresponding increase. The ultimate pullout capacity decreases with the increase of the number of cycles.

Keywords: inflatable anchor in sand; cyclic loading; displacement variation rule; laboratory test

^{*} 收稿日期: 2018-09-13(修改稿)

作者简介: 陈秋南(1968-), 男, 江西莲花人, 博士后, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土与隧道工程研究。

E-mail: cqndoc@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(41372303)

0 引言

充气锚杆最先在海洋工程中被提出,用于提供在海底作业的设备的抗浮锚固力。随着砂土与软土地区的锚固设备的发展,这种新型锚杆被引进工程界。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还处于初级阶段。英国 Dundee 大学的 Tim Newson 博士和他的学生 Stephen T. Gallacher 等最先开始对充气锚杆进行研究,他们通过室内模型试验与理论研究得出充气锚杆极限抗拔承载力与锚杆埋深、长度与充气压力等的关系以及相应的经验公式。Newson 等^[1]和 Carter 等^[2]通过充气锚杆在近海岸的软土中的现场试验,得到了充气锚杆的极限抗拔承载力估算公式以及极限充气压力的公式。Liang 等^[3]利用 Tim Newson 的室内试验所获得的试验数据,通过 PLAXIS 有限元软件对充气锚杆进行数值分析,得到了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对其极限抗拔承载力的影响。研究表明,锚杆的长度对其极限抗拔承载力影响最大。国内对充气锚杆的研究相对较晚,彭文祥等^[4-5]利用数值模拟方法建立了充气锚杆的计算模型,得到不同锚杆充气长度和充气压力下,锚固力的变化规律。文献[6-10]通过室内模型试验、数值模拟研究以及基于修正的剑桥模型对充气锚杆的极限抗拔承载力进行了理论推导,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与位移的计算方法以及计算公式。莫建军^[12]对充气锚杆进行了改进,发明了一种串囊式充气锚杆,并采用室内模型试验以及室外试验对这种新型的充气锚杆与普通的充气锚杆进行了对比研究。目前,国内外对于循环荷载下锚杆与抗拔桩的研究主要是通过试验进行的,朱焕春等^[13-15]结合三峡永久船闸高边坡锚杆工程,通过现场试验,得出循环荷载的作用会使锚杆的受力深度不断增加,剔除锚杆变形的初始测定值所受外界因素的影响,各循环荷载作用下的最大变形值接近。张思峰^[16]通过室内模型试验,在反复荷载的作用下,随着循环次数的增加,锚杆体前端应力增幅会随之明显变小,甚至会出现负增长的情况,而深部应力的增加幅度较为明显。循环次数与荷载变幅有较大的关系,随着荷载变幅的增大而快速衰减。张建经等^[17]通过室内模型试验,得出循环荷载的加载周期降低会引起岩石锚杆体系的极限承载力降低。

以上研究主要集中在单根充气锚杆的极限抗拔承载力及其影响上,但将充气锚杆大量地应用于实际工程中,仍有许多研究工作需要开展,如循环加载、群锚效应和承载力机理等方面的研究。而国内外学者对此开展的研究极少,制约了这种新型锚杆的推广应用,本文采用室内模型试验,研究了其在循环荷载下的位移与承载力特性。

1 模型试验概况

本次模型试验在长度×宽度×高度为 2 m×2 m×1 m 的砖砌模型槽内进行,墙体宽为 240 mm,充气锚杆模型及试验布置形式如图 1 所示。自制龙门架采用槽钢、方钢、圆钢等加工而成,跨度为 2.2 m,架于试验槽两侧。加载装置由分离式液压千斤顶(10 t)以及自行设计的加载体系组成,可为单根以及多根充气锚杆提供竖直方向上的拉力。加载装置置于龙门架的横梁上。数据采集装置由百分表、WTP301S 形拉压称重传感器(1 000 N)、多功能称重显示仪、数字压力表等组成,可测充气锚杆进行拉拔试验过程中抗拔力以及竖向位移。

本文中充气锚杆的室内试验是选用砂土作为锚固土层,所选用的砂土为河砂,过筛后,室内存放 3 个月。通过砂土的土工试验结果可知,本试验所用砂土的力学参数: $c = 0$ kPa, $\Phi = 36.51^\circ$, $\gamma = 16.1$ kN/m³。不均匀系数 C_u 为 2.41,曲率系数 C_c 为 0.76,级配曲线见图 2,砂土抗剪强度-压力曲线如图 3。

为了避免砂土的密实度的差异对结果产生影响,本试验采用分层砂雨法^[18-19],每层 10 cm。试验过程中锚杆底部至试验槽底部 10 cm。

试验过程:按照图 1 的布置形式安装充气锚杆、WTP301S 形拉压称重传感器和分离式千斤顶等试验装置;定位充气锚杆在试验设计位置;悬挂锚杆于称重传感器之上;在试验槽中分层铺设砂土;通过水平尺测定锚杆的竖直位置,出现倾斜时进行调整,保证锚杆为竖直状态;安装百分表、数字压力表和多功能称重显示仪等数据采集设备;通过高压打气筒给充气锚杆充气,使锚杆达到试验气压;将百分表和多功能称重显示仪调零;通过千斤顶为充气锚杆进行分级加载,记录试验数据。

试验要点为:每级荷载施加后每隔 10 min 测读一次锚杆位移,当最后 10 min 位移变化值不大于 0.2 mm 时即可认为稳定,可施加下一级荷载。终止加载条件为:①锚头位移不收敛;②锚头的位

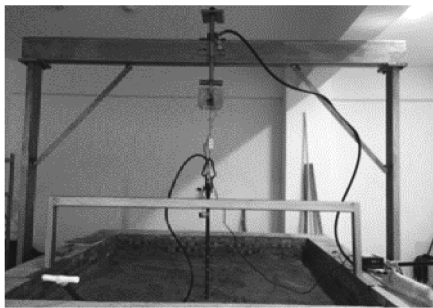


图 1 充气锚杆试验装置

Fig. 1 Inflatable anchor test device

移累计量超过其设计允许值;③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^[20]。

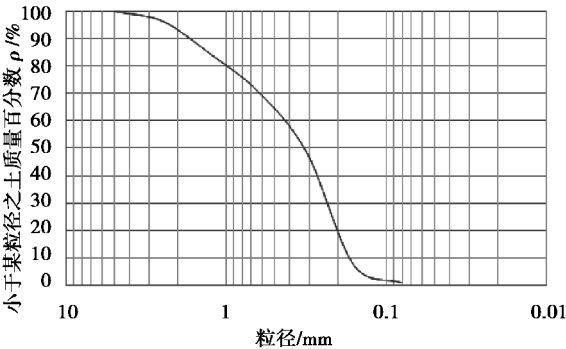


图 2 砂土颗粒级配曲线

Fig. 2 Grading curve of sand

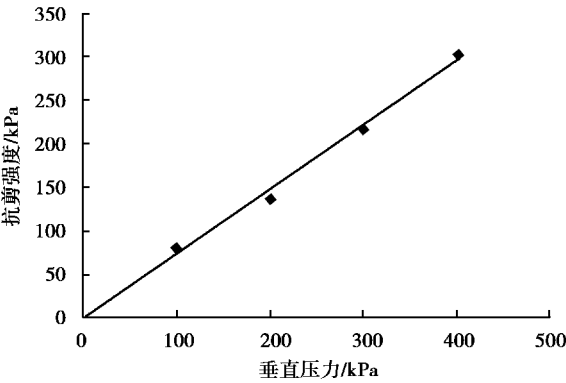


图 3 砂土抗剪强度-压力曲线

Fig. 3 Shear strength and pressure curve of sand

2 不同荷载循环下的承载特性

2.1 试验方案与实施

为了研究充气锚杆在抗拔的过程中的位移特性,通过自行设计的模型试验装置采用上述的试验方法,对其进行加载-卸载试验。埋深采用 40 cm 与 60 cm,分别进行 5 组与 6 组试验,试验分组情况如表 1 所示。

表 1 加载-卸载试验各组最大加载量

Table 1 The maximum loading capacity of the loading and unloading test

| 埋深/cm | 编号 | 最大加载量/N |
|-------|----|---------|
| 40 | A1 | 100 |
| | A2 | 200 |
| | A3 | 300 |
| | A4 | 370 |
| | A5 | 380 |
| 60 | B1 | 150 |
| | B2 | 250 |
| | B3 | 350 |
| | B4 | 400 |
| | B5 | 450 |
| | B6 | 460 |

2.2 试验结果与分析

(1)由试验 A1、B1 与 B2 的试验结果可知,荷载较小时,锚杆的抗拔力与位移呈线性关系。另一方面,试验的残余变形分别为 0.01 mm、0.02 mm 和 0.04 mm,对于充气锚杆的整个位移来说非常小。A1 试验残余位移仅为其最大位移量的 3.85%; B1 试验残余位移量占 5%;而 B2 试验的残余位移量也仅占 5.56%。也就是说,在加载过程中锚杆体系产生的位移在卸荷过程中几乎全部恢复。由此可以判断 A1 与 B1 的抗拔试验过程中,充气锚杆的位移基本上为弹性位移。

(2)由试验 A2、A3、B3 与 B4 可知,当荷载加大到一定程度后,充气锚杆的抗拔力与位移不再呈线性变化,抗拔力的增加速度变缓。

与 A1、B1、B2 试验相比,A2、A3、B3、B4 试验的残余位移显著变大,分别上升到了各试验总位移的 16.90%、21.39%、17.61%与 27.85%,残余位移相对于最大位移已经不再可以忽略。而且从发展趋势来看,这部分位移在不断发展,且发展速率不断增大。这也说明了此阶段锚杆在试验过程中,塑性位移在不断积累。

(3)A4、A5、B5 与 B6 试验相对于其他组的试验,充气锚杆残余位移进一步增大,A5 与 B6 试验的残余位移已经超过了总位移的一半。由此可见,塑性位移在后期已经占了总位移中很大一部分,另一方面,弹性位移已经不再占主导地位。

(4)对比 40 cm 埋深与 60 cm 埋深的充气锚杆

的试验结果可知,二者遵循着相同的规律,相同阶段的试验抗拔力-位移曲线的形状相同,残余位移以及总位移遵循的规律也相同。

由于两种埋深下,各编号锚杆设置的最大加载量不相同,故无法比较相同荷载下不同埋深下的最大位移与残余位移。但是,由 A2 与 B2、A3 与 B3 以及 A4 与 B4 三组对比可以很容易判断,相同荷载作用下,60 cm 埋深的锚杆比 40 cm 的总位移与残余位移普遍偏小。但是在极限荷载下,40 cm 埋深的锚杆总位移比 60 cm 的小,如图 4 所示。

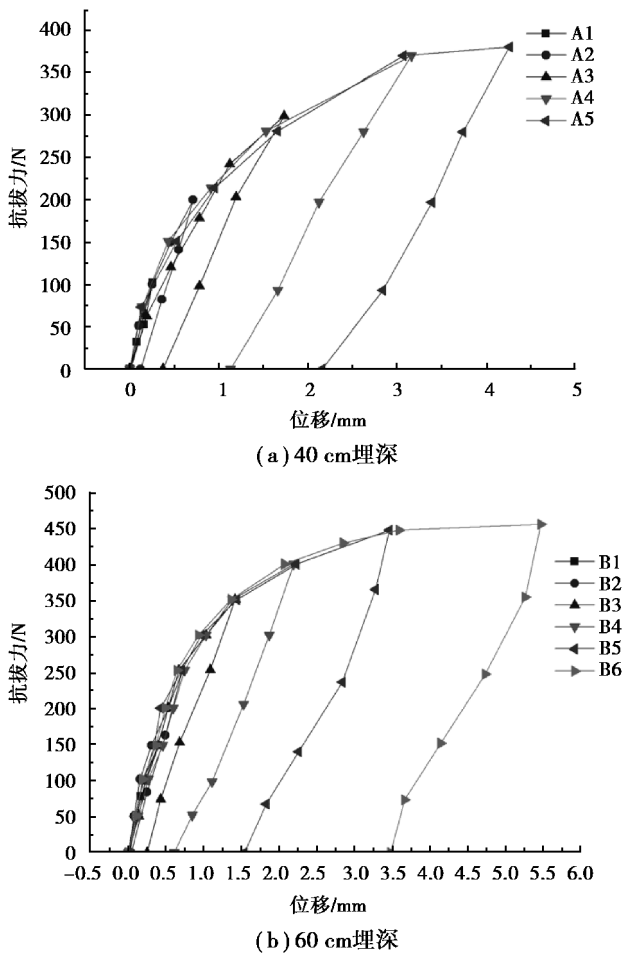


图 4 充气锚杆加载-卸载图

Fig. 4 Loading- unloading curves of inflatable anchor

为了进一步分析充气锚杆在抗拔试验过程中的位移变化特性以及承载特性,现将相同埋深下不同编号的试验结果整合为图 5。

由图 5 可知,不同埋深下,各阶段的弹性位移、塑性位移以及总位移遵循着相同的变化发展规律。

荷载较小时(即 40 cm 埋深下的 0~150 N 与 60 cm 埋深下的 0~250 N),位移几乎全是弹性位

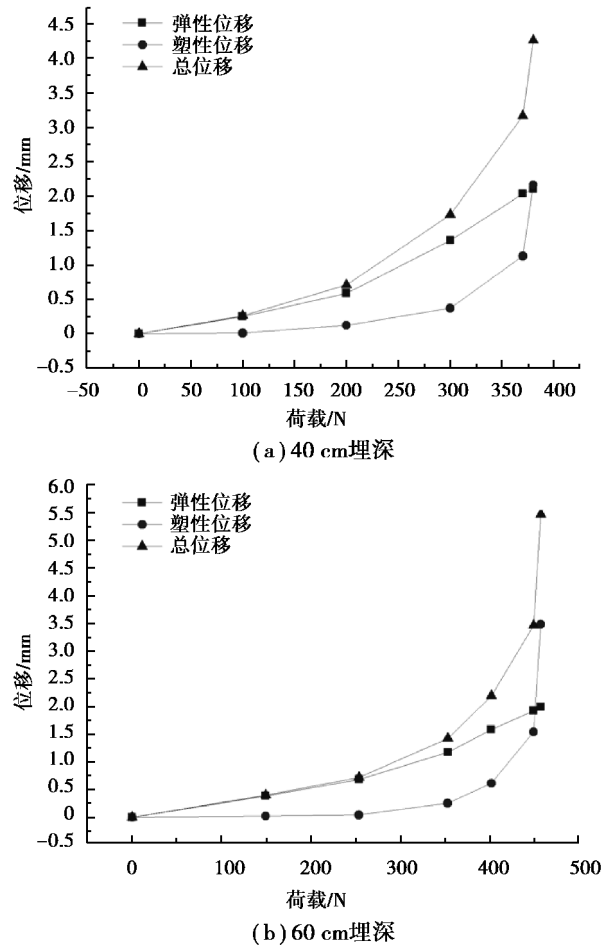


图 5 充气锚杆弹性位移与塑性位移曲线

Fig. 5 Elastic displacement and plastic displacement curves of inflatable anchor

移,弹性位移曲线与总位移曲线重叠,塑性位移非常小。此阶段弹性位移与总位移均近似呈线性增长,而塑性位移增加缓慢。

40 cm 埋深下的 150~370 N 与 60 cm 埋深下的 250~450 N,塑性位移速率发展很快,并逐渐超过弹性位移速率,位移迅速增长,而弹性位移依然呈直线增长。

40 cm 埋深下的 370 N 与 60 cm 埋深下的 450 N 之后,塑性位移超过弹性位移速率,并占据主导地位。最终,塑性位移曲线与总位移曲线形状相似。

根据上述试验结果与分析,可将充气锚杆抗拔过程分为 3 个阶段:

第一阶段,弹性位移阶段。此阶段绝大部分为弹性位移,随着位移的增大,抗拔力迅速发展,与位移呈线性关系。在此阶段卸载,绝大部分位移可恢复。

第二阶段,弹塑性位移阶段。充气锚杆系统弹

性位移稳步发展,塑性位移加速发展,但位移仍以弹性位移为主。在此阶段卸载,锚杆系统的位移可部分恢复,工程设计中的抗拔承载力可在此阶段确定;

第三阶段,塑性位移阶段。在此阶段,锚杆系统塑性位移已经超过弹性位移并迅速发展,锚杆抗拔力不再提高,继续加载,锚杆系统破坏,抗拔力迅速降低。工程使用过程中,决不可达到此阶段。此阶段卸载,锚杆系统的位移少部分可恢复。

基于最小二乘法对于塑性位移-荷载曲线进行回归分析,如图 6(第三阶段为破坏阶段,塑性位移-荷载曲线不进行此阶段拟合):

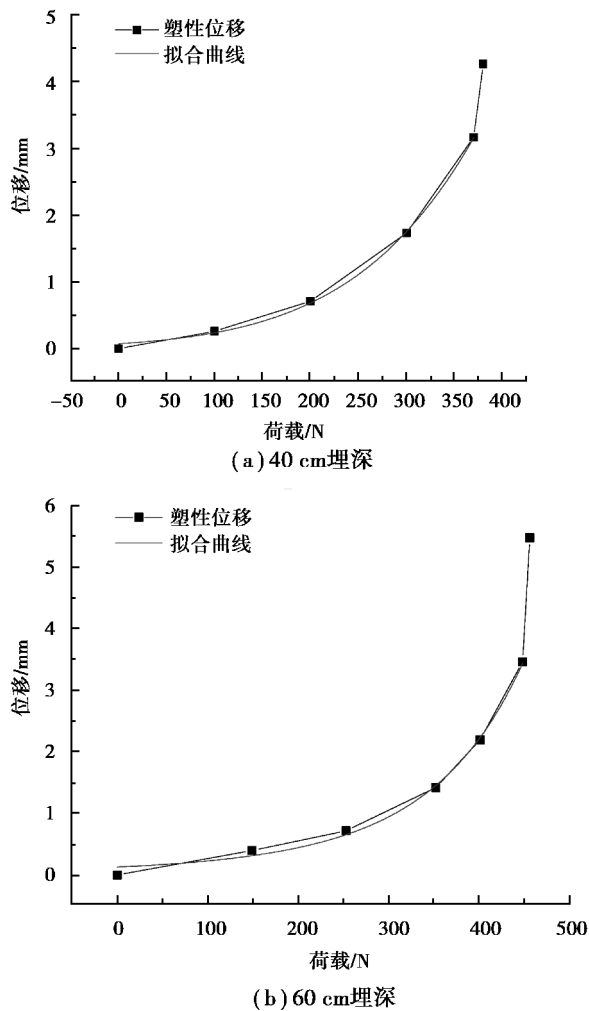


图 6 塑性位移荷载拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of plastic displacement load

40 cm 与 60 cm 埋深的位移-荷载曲线回归函数曲线方程分别为: $y = e^{(-2.166+0.090x)}$ 与 $y = e^{(-2.623+0.008x)}$, R^2 分别为 99.69% 和 99.30%, 拟合程度非常高,由此可以判断,充气锚杆的塑性位移与

荷载成指数函数关系。

3 相同荷载循环下的承载特性

3.1 试验方案与实施

为了研究充气锚杆在循环荷载作用下的承载特性以及变形规律,通过自行设计的模型试验装置对循环荷载作用下的充气锚杆系统在砂土中的位移与荷载规律进行试验研究。

试验中充气锚杆的埋深为 60 cm,分为三组,循环荷载最大值分别为 250 N、350 N 与 450 N,前两组试验进行 10 次循环,后一组进行 5 次循环,具体分组情况如表 2 所示。各循环包括加载与卸载两部分,加载与卸载过程均分级进行,各级加卸载的持续时间均为 1 min,所测位移为各级时间结束时的位移。

表 2 循环加载试验分组情况

Table 2 Cyclic loading test grouping

| 编号 | 最大加载量/N | 循环次数 |
|----|---------|------|
| 1 | 250 | 10 |
| 2 | 350 | 10 |
| 3 | 450 | 5 |

3.2 试验结果与分析

本试验可得到各组试验中充气锚杆的最终位移量,试验结果如表 3 所示。同时,还能得到各组试验的抗拔力-位移曲线,如图 7、图 8 和图 9 所示。将试验中的各循环荷载下的残余沉降描绘成残余沉降-循环次数曲线如图 10、图 11 和图 12 所示。

表 3 循环加载试验结果

Table 3 Results of cyclic loading test

| 编号 | 循环次数 | 最终位移量/mm |
|----|------|----------|
| 1 | 10 | 0.33 |
| 2 | 10 | 1.06 |
| 3 | 5 | 20.52 |

由上述试验结果可得到如下结论:

(1)由表 3 可得,第 1、2 和 3 组试验的最终位移值依次增加。由此可知,循环荷载试验中,随着

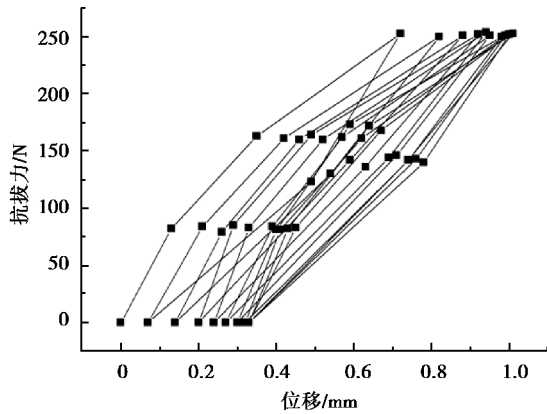


图7 第一组循环加载图

Fig. 7 The first cyclic loading curve

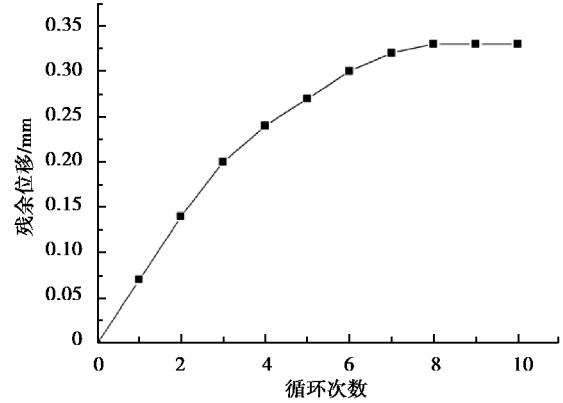


图10 第一组循环累计位移

Fig. 10 The first group cyclic accumulated displacement

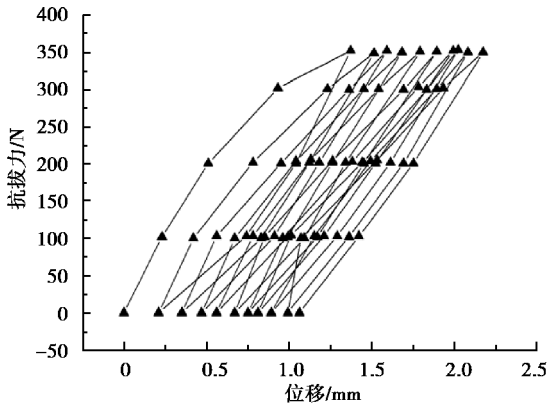


图8 充气锚杆第二组循环加载图

Fig. 8 The second cyclic loading curve of inflatable anchor

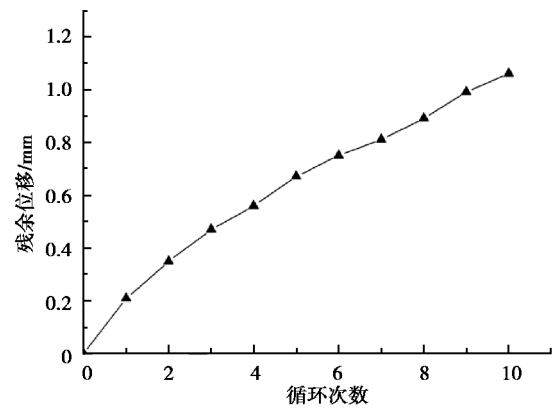


图11 充气锚杆第二组循环累计位移

Fig. 11 The second group cyclic accumulated displacement of inflatable anchor

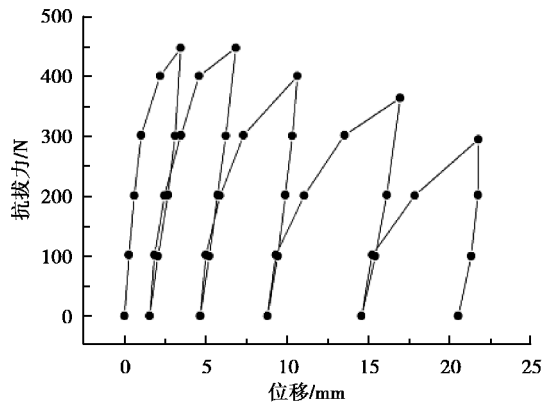


图9 充气锚杆第三组循环加载图

Fig. 9 The third cyclic loading curve of inflatable anchor

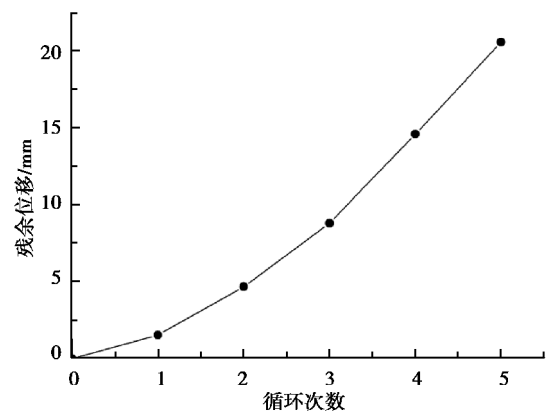


图12 充气锚杆第三组循环累计位移图

Fig. 12 The third group cyclic accumulated displacement of inflatable anchor

循环荷载峰值增大,相同循环荷载次数下充气锚杆的累计位移增大。

(2) 3组试验的抗拔力-位移曲线的形状不同。第1组试验中,随着循环次数的增加,相邻2次循

环下的抗拔力-位移曲线叠加增大,单次循环下的最大位移与残余位移逐渐减小;第2组试验中,各循环荷载下的抗拔力-位移曲线形状类似,单次循

环下的残余位移及最大位移变化不明显;第三组试验中,随着循环次数的增加,相邻2次循环下的抗拔力-位移曲线叠加部分减少,单次循环下的最大位移以及残余位移不断增大。由此可见,随着循环荷载峰值的增加,充气锚杆在循环荷载下的位移发展速度增加,单次循环下的残余位移量与总残余位移量增加。

(3)由各试验的累计残余位移图可知,第一组试验中,随着循环次数的增加残余位移量增加速率不断变缓,最后稳定下来,残余位移不再发展;第二组试验中,残余位移与循环次数近似呈线性关系,残余位移的增加速率不变;第三组试验中,残余位移的发展速率随循环次数的增加不断增大。

(4)第三组试验采用的荷载峰值为极限抗拔承载力值,由其试验结果可知,随着循环次数的增加,充气锚杆的极限抗拔承载力不断减少。由此可见,循环荷载使得充气锚杆体系出现累计破坏。故充气锚杆的设计与使用中,极限荷载不应达到极限抗拔承载力值,荷载设计值应该按照实际情况在前两组试验的循环荷载峰值的范围内进行选择。

4 结论

开展了充气锚杆的加载-卸载以及循环加载的室内模型试验,并对其承载能力进行了分析,得到了如下结论:

(1)充气锚杆抗拔过程分为3个阶段:

第一阶段为弹性位移阶段,充气锚杆系统的位移绝大部分为弹性位移,随着位移的发展,抗拔力迅速发展,与位移呈线性关系。在此阶段卸载,绝大部分位移可恢复。

第二阶段为弹塑性位移阶段,此阶段锚杆系统弹性位移稳步发展,塑性位移加速发展,并超过弹性位移,但位移仍以弹性位移为主。此阶段卸载,锚杆系统的位移可部分恢复,前两个阶段,充气锚杆的塑性位移与荷载成指数函数关系。

第三阶段为塑性位移阶段,在此阶段锚杆系统塑性位移已经超过弹性位移,并迅速发展,锚杆抗拔力不再提高,继续加载,锚杆系统破坏,抗拔力迅速降低。在此阶段卸载,锚杆系统的位移少部分可恢复。

(2)随着循环荷载峰值的增加,充气锚杆在循环荷载下的位移发展速度增加,单次循环下的残余

位移量与总残余位移量增加,最终的位移量也相应地增加。另外,循环荷载下,锚杆的残余位移表现出3种不同的形式。循环荷载峰值较小时,随着循环次数的增加,残余位移的发展速率减小,最后不再有残余位移。循环荷载峰值增加到一定程度时,残余位移随循环次数呈线性增长。循环荷载峰值较大时,锚杆残余位移的发展速率不断变大,另一方面,极限抗拔承载力随着循环次数的增加而变小。

参考文献(References)

- [1] Newson T A, Smith F W, Brunning P. An experimental study of inflatable offshore anchors in soft clay [A]// Proceedings of ICOF2003, BGA Conference on Foundations [C]. Dundee, 2003: 695-704.
- [2] Carter J P, Booker J R, Yeung S K. Cavity expansion in cohesive frictional soil [J]. Géotechnique, 1986, 36 (3): 349-358.
- [3] Liang Y, Hinchberger S D, Newson T A. Non-linear analysis of pullout tests on inflatable anchors in sand [A]// Proceedings of the Canadian Geotechnical Conference [C]: GeoHalifax, 2009: 1-8.
- [4] 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. (in Chinese))
- [5] 彭文祥,王苑,曹佳文. 充气锚杆数值单元的建立与分析[J]. 工程勘察, 2010, 38(6): 6-9. (Peng Wenxiang, Wang Yuan, Cao Jiawen. Formation and analysis of the numerical simulation element for the inflatable anchor [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38(6): 6-9. (in Chinese))
- [6] 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. (in Chinese))
- [7] 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 Geotechnical Engineering, 2011, 33 (9): 1399-1404. (in Chinese))
- [8] 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 Jiawen, Peng Wenxiang, Peng Zhenbin, et al. Experimental study on deformation and bearing features of inflatable anchors in sands[J]. Journal of Central South University (Science and Technology Edition), 2011, 42(5): 1369-1374. (in Chinese))
- [9] 尹泉. 充气锚杆的试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011. (Yin Quan. Study on the test of inflatable anchor [D]. Changsha: Central South University, 2011. (in Chinese))
- [10] 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 (Supp. 1): 3104-3109. (in Chinese))
- [11] 曹佳文. 充气锚杆力学特性试验研究与数值模拟分析[D]. 长沙: 中南大学, 2011. (Cao Jiawen. Test study and numerical simulation analysis of inflatable anchors mechanism [D]. Changsha: Central South University, 2011. (in Chinese))
- [12] 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. Experimental study on mechanical characteristics of inflatable anchor of several airbags [D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese))
- [13] 朱焕春, 吴海滨. 反复张拉荷载作用下锚杆工作机理试验研究[J]. 岩石工程学报, 1999, 21(6): 662-665. (Zhu Huanchun, Wu Haibin. Experimental study on bolting mechanism under cyclic tensile load [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21 (6): 662-665. (in Chinese))
- [14] 朱焕春, 郭冬生. 永久船闸高强锚杆锚固效果分析[J]. 人民长江, 2001, 32(8): 29-31. (Zhu Huanchun, Guo Dongsheng. Analysis on anchoring effect of permanent shiplock's high strength anchor rod [J]. Yangtze River, 2001, 32(8): 29-31. (in Chinese))
- [15] 朱冠, 朱焕春, 杨松林, 等. 三峡工程永久船闸高强锚杆现场试验研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(2): 171-175. (Zhu Guan, Zhu Huanchun, Yang Songlin, et al. In-situ study on bolting at permanent shiplock of Three Gorges Project [J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(2): 171-175. (in Chinese))
- [16] 张思峰. 预应力内锚固段作用机理及其耐久性研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. (Zhang Sifeng. Study on the anchorage mechanism and durability of interior bond section of prestressed anchorage cable [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))
- [17] 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. (in Chinese))
- [18] 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 Geotechnical Engineering, 2014, 36(10): 1791-1801. (in Chinese))
- [19] 李浩, 罗强, 张正, 等. 砂雨法制备砂土地基模型控制要素试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10): 1872-1878. (Li Hao, Luo Qiang, Zhang Zheng, et al. Experimental study on control element of sand pourer preparation of sand foundation model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(10): 1872-1878. (in Chinese))
- [20] 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 loading behavior and group anchor effect for inflatable anchor bolts in sandy soil [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2016. (in Chinese))