DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.03.002

多段扩大头锚杆在砂土中的模型试验研究

李 哲[1]，李 滨[1]，高 磊[1]，张建山[2]

(1.西安理工大学 土木建筑工程学院，陕西 西安 710048；2.机械工业勘察设计研究院，陕西 西安 710048)

摘要： 为了研究密实砂土中多段扩大头锚杆的几何尺寸对其承载特性的影响，并与底端型扩大头锚杆的承载特性进行对比，通过建立室内模型试验，改变多段扩大头锚杆的直径和段长等条件，进行了一系列的竖向拉拔试验，得到了相应的荷载位移曲线。试验结果表明：扩大头直径对锚杆的极限承载力影响很大，扩大头长度对极限承载力影响相对较小；随着扩大头直径的增大，锚杆的极限承载力增大幅度逐渐减缓；通过与底端型扩大头锚杆的对比分析得出，在总段长相同的条件下，多段型扩大头锚杆的极限承载力是底端型的1.2～1.3倍，并根据已有理论推导估算出多段扩大头锚杆的抗拔力计算公式。

关键词： 多段扩大头锚杆；模型试验；承载特性；极限承载力；砂土

中图分类号： TU473.2 **文献标志码：** A **文章编号：** 1006-4710(2016)03-0259-06

Research on model test of multiple underreamed anchors in sands

LI Zhe[1], LI Bin[1], GAO Lei[1], ZHANG Jianshan[2]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an 710048, China)

Abstract: The physical dimension of multiple underreamed anchors is essentially important for the ultimate bearing capacity of multiple underreamed anchors. In order to research the size effect on bearing behavior of multiple underreamed anchors in sands, a series of pull-out tests are performed by changing diameter and length based on the laboratory model tests with the typical load-displacement curves obtained. Test results show that the diameter of the expanded part has more influence on the bearing behavior, and that the length of the expanded part has less. With the increasing diameter of the underreamed anchors, the increscent range of ultimate bearing capacity of the anchor gradually reduced. By a contrastive analysis with bottomed underreamed anchors, it is indicated that the ultimate bearing capacity of multiple underreamed anchors is 1.2～1.3 times that of the bottomed underreamed anchors at the same total length.

Key words: multiple underreamed anchors; model test; bearing behavior; ultimate bearing capacity; sand

锚固技术作为加固稳定土层的有效方法，广泛应用于建筑、矿业和水利等各种大型工程建设中。随着我国基础建设的日益加快，其对锚固技术的要求也越来越高。特别是在西北的软土层地区，普通锚杆的承载力远远不能满足技术要求，而扩大头锚杆却可以有效的解决这些问题[1]。

扩大头锚杆主要有两种形式，一种是仅在锚固段底部扩成一个大的扩体，称为底端型扩大头锚杆；另一种是在锚固段上扩成多个扩大头，称为多段扩大头锚杆[2]。本次试验主要研究多段扩大头锚杆。近年来，许多专家学者都对底端型扩大头锚杆进行了一系列的室内模型与现场试验，并且取得了丰富的研究成果[3-5]。例如：陈宇佳、郝凤山、汪班桥、曾庆义、LIAO H J、MICKOVSKI S B[6-10]等做了一些关于扩大头锚杆现场测试的研究工作，提出了扩大头锚杆的设计要点和施工方法，并通过工程实例，对扩大头锚杆承载力试验的结果进行分析，得出了锚头位移与荷载的关系。胡建林、张培文[11]等做了关

收稿日期： 2015-11-09

基金项目： 陕西省科技统筹创新工程计划重大科技成果转化引导专项资助项目(2014KTCG02-04)；陕西省自然科学基金资助项目(2014JM2-5085)

作者简介： 李哲，女，教授，博士，研究方向为钢-混凝土组合结构、高层建筑结构及岩土工程。E-mail：lizhe009@163.com

于扩大头锚杆的现场抗拉拔试验,结果表明,扩大头锚杆比普通锚杆的承载力平均提高 20%～30%,最高时可达 60%;扩大头锚杆的轴向应变陡降现象明显,显示出显著的端承效应。彭文祥、曹佳文[12]等对研制的新型充气锚杆进行了模型试验研究,证实了充气锚杆较螺旋锚杆承载力有明显的提高。

但目前,对于多段扩大头锚杆的研究还比较少,其几何尺寸对极限承载力的影响还需要进一步研究。本文通过自制的多段扩大头锚杆模型,系统的对埋入密实砂土中的多段扩大头锚杆进行竖向拉拔试验,并综合分析大量的模型试验实测数据,以期对多段扩大头锚杆的承载特性进行深入分析。

1 室内模型试验

1.1 试验装置的制作

试验砂箱采用高密度板和角钢组装焊接而成,为了防止砂箱边界对拉拔试验的影响,砂箱尺寸为 0.9 m(长)×0.9 m(宽)×1.2 m(高),如图 1、2 所示。

图 1 试验装置图

Fig. 1 Model test set-up

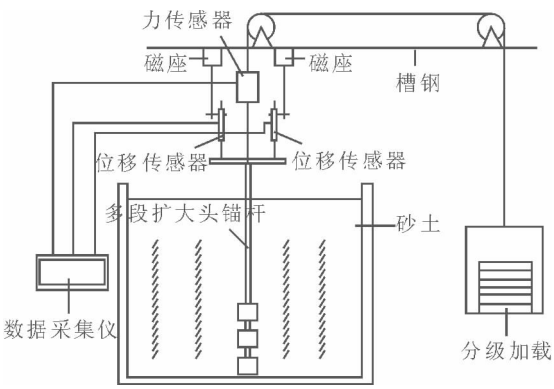
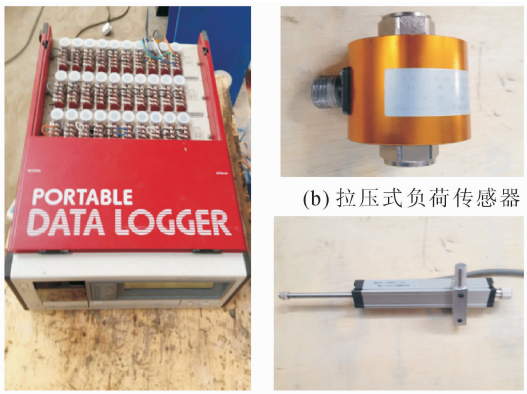


图 2 试验装置模型图

Fig. 2 Equipment schematic diagram

试验用到的主要仪器有:用于测量锚头位移的 DH821-50 位移传感器、用于测量抗拔力的 LTR-1 型拉压式负荷传感器和用来采集数据的 TDS-303 数据采集仪,以及其他加载滑轮组、钢梁、砝码等设备,如图 3 所示。



(a) TDS-303数据采集仪 (b) 拉压式负荷传感器 (c) 位移传感器

图 3 试验数据测量仪器

Fig. 3 Survey instrument

试验用砂采用分层压实法来模拟地基。其筛分试验结果和物理力学参数分别如图 4 和表 1 所示。

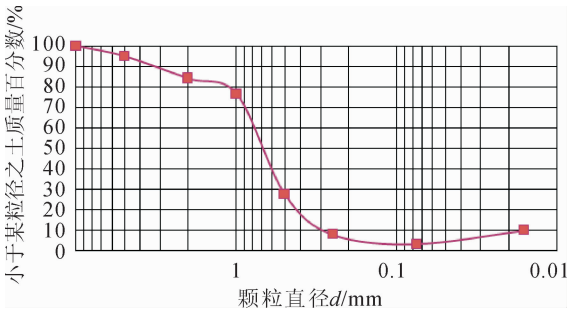


图 4 砂土颗粒大小分布曲线

Fig. 4 Grain size distribution curve

表 1 试验砂土的物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of sand

干密度/(g/cm³)	湿密度/(g/cm³)	含水率/%	粘聚力 c/(kN/m²)	内摩擦角 φ/(°)	相对密实度
1.47	1.68	14.0	0	28	0.61

1.2 多段扩大头锚杆模型

该试验采用的锚杆模型为预制模型,为了使扩大头部分的侧面摩擦力和端阻力与实际工程中相似,锚杆的扩大头部分采用水泥砂浆在不同直径的 PVC 管里浇筑成模,并在浇筑体中心预留圆孔。锚杆的自由段为 M8 的钢螺杆。将螺杆从浇筑体中心预留孔穿过后,用螺母将浇筑体两端固定。该模型不但可以有效的模拟自由段与土体之间的摩擦力,还可以调节扩大头之间的距离。另外,还制作了 4 组底端型扩大头锚杆模型,用来和多段型进行极限承载力的对比分析。其中,砂土中埋置的多段型和底端型扩大头锚杆的结构示意图如图 5 所示,用水泥砂浆和螺杆制作的锚杆模型如图 6 所示。

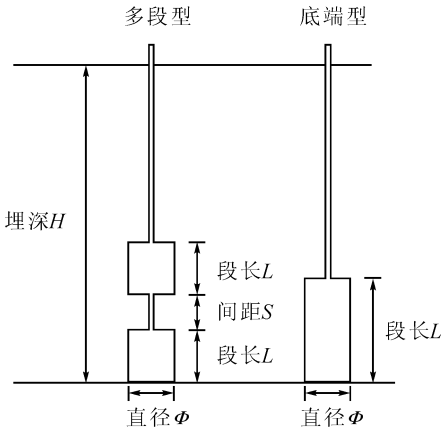


图 5　多段扩大头锚杆结构示意图

Fig. 5　Structure of multiple underreamed anchors

图 6　多段扩大头锚杆模型

Fig. 6　Model of multiple underreamed anchors

1.3　试验方案与实施

为了研究多段扩大头锚杆的扩大头直径和段长等参数的变化对锚杆极限承载力的影响，并与底端型扩大头锚杆的承载特性进行对比，本文设计了以扩大头直径 Φ 和扩大头段长 L 为控制指标的三组方案和多段型与底端型锚杆承载特性对比的四组方案。其中第一、二组分别为段数 $n=2$、$n=3$ 时直径对承载力的影响，第三组为段长对承载力的影响，第四、五、六、七组为多段型与底端型的对比方案，具体设计参数如表 2 所示。

锚杆模型的拉拔试验可以分为 6 个步骤：①反力架的安装：用吊车将反力架放置到试验位置进行组装；②模拟地基的制备：先将预制多段扩大头锚杆模型固定在砂箱底部，模拟地基由均质砂土分层压实而成，直到试验要求的预埋深度；③加载系统的安装：将高强度钢丝穿过反力架上的滑轮组合，并与砝码箱连接；④测量系统的安装：将钢丝、力传感器和锚杆锚头连接在同一竖直线上，将位移传感器底座固定在反力横梁上，将位移计的顶针顶到锚头固定的承板上，最后将力传感器和位移传感器接到数据采集仪的通道上；⑤试验加载：采用砝码分级加载，每级加载后持续 5 分钟，并记录荷载和位移的读数，直到后一级荷载产生的锚头位移增量达到或者超过前一级荷载产生位移增量的 2 倍或者锚杆被拔出时，终止试验[13]；⑥数据处理。

表 2　多段扩大头锚杆模型试验方案

Tab. 2　Model test programme of multiple underreamed anchors

组号	编号	扩大头直径 Φ/mm	扩大头段长 L/mm	扩大头段数 n	扩大头间距 S/mm
第一组	1	20	100	2	100
	2	40	100	2	100
	3	60	100	2	100
	4	80	100	2	100
第二组	5	20	100	3	100
	6	40	100	3	100
	7	60	100	3	100
	8	80	100	3	100
第三组	9	40	50	2	100
	10	40	100	2	100
	11	40	150	2	100
第四组	12	40	100	2	0
	13	40	100	2	100
第五组	14	40	100	3	0
	15	40	100	3	100
第六组	16	60	100	2	0
	17	60	100	2	100
第七组	18	60	100	3	0
	19	60	100	3	100

注：编号 12、14、16、18 且间距 $S=0$ 时为底端型扩大头锚杆；各组埋深均为 560 mm。

2　试验结果与分析

通过改变多段扩大头锚杆的直径和段长等参数进行竖向拉拔试验，得到了不同参数下的锚杆荷载位移数据，并依此归纳出各组单一变量下的各个锚杆的荷载位移曲线（Q-S 曲线），如图 7～13 所示。

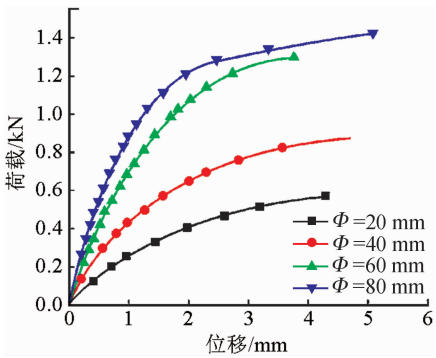


图 7　第一组 Q-S 曲线对比图

Fig. 7　Q-S curves of the first group

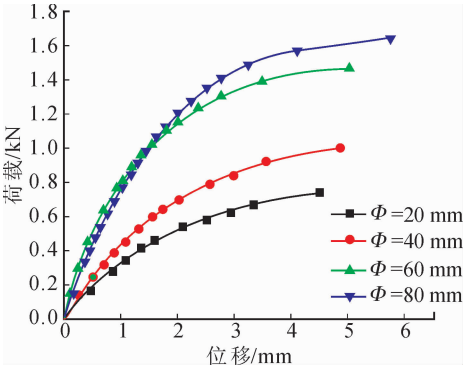


图 8 第二组 Q-S 曲线对比图

Fig. 8 Q-S curves of the second group

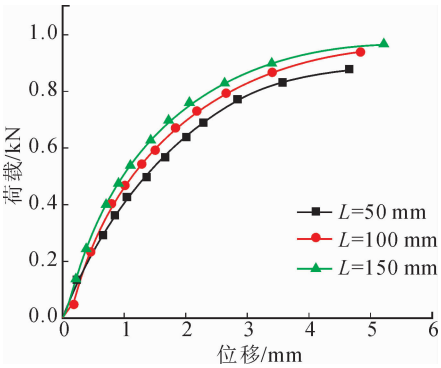


图 9 第三组 Q-S 曲线对比图

Fig. 9 Q-S curves of the third group

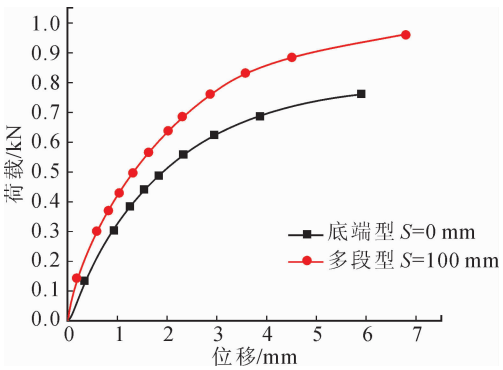


图 10 第四组 Q-S 曲线对比图

Fig. 10 Q-S curves of the fourth group

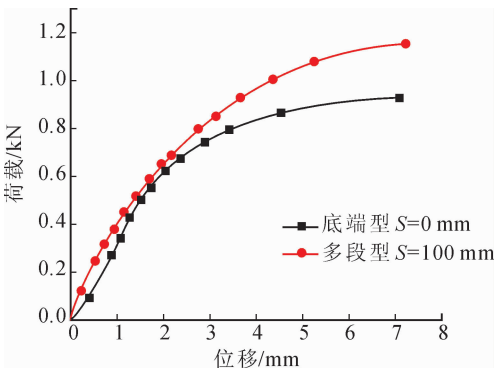


图 11 第五组 Q-S 曲线对比图

Fig. 11 Q-S curves of the fifth group

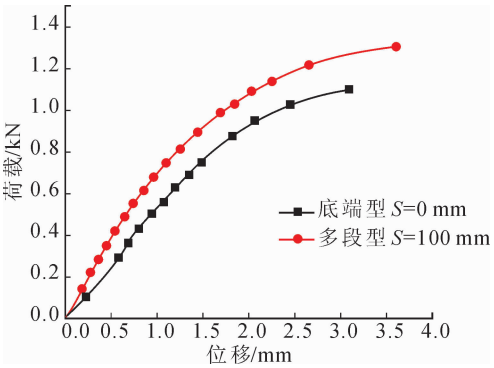


图 12 第六组 Q-S 曲线对比图

Fig. 12 Q-S curves of the sixth group

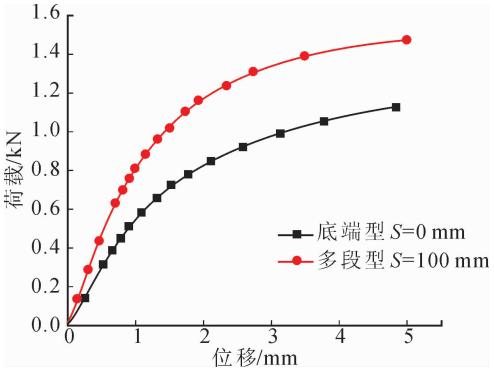


图 13 第七组 Q-S 曲线对比图

Fig. 13 Q-S curves of the seventh group

2.1 曲线表观分析

1）通过分析所有的曲线形态可以看出，所有荷载位移曲线都近似呈抛物线型，在初始拉拔时，锚头位移随荷载的变形呈线性增长。

2）从图 7、图 8 的荷载位移曲线可以看出，无论扩大头是 2 段还是 3 段，锚杆的极限承载力都随着直径的增大而增大；并且随着直径的增大，极限承载力的增大幅度逐渐减缓。

3）从图 9 中的荷载位移曲线可以看出，随着扩大头段长 L 的增加，锚杆的极限承载力也相应增加，但是增加的幅度很小。

4）从图 10～图 13 的荷载位移曲线可以看出，与同体积的底端型扩大头锚杆相比，多段型扩大头锚杆的极限承载力有所提高。

2.2 试验结果分析

根据图 7、图 8，将不同直径下锚杆的极限承载力列入表 3，用以研究直径变化对极限承载力的影响。

由表 3 可看出，在扩大头段数分别为 2 和 3 的情况下，当扩大头直径增加 1 倍时，其极限承载力分别扩大为原来的 1.62 倍和 1.64 倍；当扩大头直径增加 2 倍时，其极限承载力分别增加到原来的 2.12 倍和

2.22 倍；当扩大头直径增加 3 倍时，其极限承载力分别为原来的 2.45 倍和 2.46 倍。因此可以得出，当扩大头直径增大时，其极限承载力也随之增大，并且随着扩大头直径的增大，极限荷载的增大幅度逐渐减缓。这主要是由于土体在没有发生整体剪切破坏的情况下，随着扩大头直径的增大，拉拔过程中扩大头上部的覆土量也会增大，进而导致端承力的增大。

表 3　不同直径下锚杆的极限承载力

Tab. 3　Ultimate bearing capacity of different diameters

扩大头直径 Φ/mm	极限承载力 Q/kN	
	扩大头段数 $n=2$	扩大头段数 $n=3$
20	0.55	0.65
40	0.90	1.05
60	1.22	1.38
80	1.35	1.60

根据图 9，将 $\Phi=40$ mm 下不同段长锚杆的极限承载力列入表 4，可以看出扩大头段长这一因素对极限承载力的影响。

表 4　不同段长下锚杆的极限承载力

Tab. 4　Ultimate bearing capacity of different lengths

扩大头段长 L/mm	极限承载力 Q/kN
50	0.85
100	0.90
150	0.92

通过表 4 的三组数据可以看出，在段长增加 1 倍时，极限承载力仅增加到原来的 1.06 倍；段长增加 2 倍时，极限承载力仅是原来的 1.08 倍。可见，扩大头段长的增加对锚杆极限承载力的影响很小，仅增加段长不能有效的提高锚杆的极限承载力。这主要是由于扩大头锚杆的承载力主要由端承力和侧摩阻力组成，而端承力占有较大的比例，增加扩大头的长度仅增加了侧摩阻力，所以长度的变化对承载力的影响不大。

要确定一种新型锚杆是否比现有锚杆具有更高的承载力，最直接的方法就是与现有锚杆的极限承载力进行对比分析。其中底端型扩大头锚杆在国内已得到广泛应用，并且有很多专家学者对其进行了深入研究。本文在相同的条件下，也对底端型扩大头锚杆进行了 4 组试验。根据图 10～图 13，将多段型与底端型锚杆的极限承载力列入表 5。

从表 5 可看出，在扩大头直径为 40 mm 时，2 段和 3 段扩大头锚杆的极限承载力是对应底端型扩大头锚杆极限承载力的 1.32 倍和 1.19 倍；在扩大头直径为 60 mm 时，2 段和 3 段扩大头锚杆是对应底端型锚杆的 1.11 倍和 1.23 倍。这主要是因为与底端型扩大头锚杆相比，多段型扩大头锚杆在拉拔的过程中能够在锚杆纵向位置提供较多的端承力。

表 5　多段型与底端型扩大头锚杆极限承载力的对比

Tab. 5　Ultimate bearing capacity of multiple and bottomed anchors

扩大头直径 Φ/mm	极限承载力 Q/kN			
	$n=2$	$n=2$	$n=3$	$n=3$
	多段型	底端型	多段型	底端型
40	0.90	0.68	1.05	0.88
60	1.22	1.10	1.38	1.12

2.3　对多段扩大头锚杆承载力计算公式的探讨

在文献[3]推导出的底端型扩大头锚杆承载力计算公式的基础上，对多段型扩大头锚杆的承载力计算公式进行探讨。

在底端型扩大头锚杆的承载力计算公式中，承载力 T 是由普通锚固段的侧摩阻力 T_1、扩大头锚固段的侧摩阻力 T_2 和扩大头端面的正压力 T_3 三者组成，即：

$$T = T_1 + T_2 + T_3 \tag{1}$$

相比于底端型扩大头锚杆，多段型扩大头锚杆的承载力的三个组成部分都会有所变化，具体如图 14 所示。

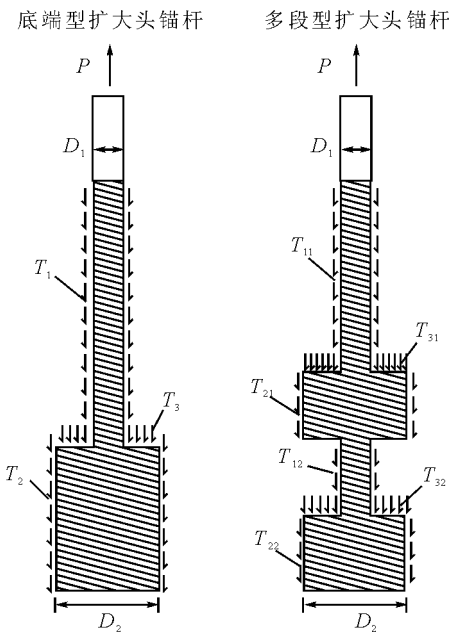


图 14　多段型和底端型扩大头锚杆受力模型

Fig. 14　Force model of multiple and bottomed underreamed anchors

其中，各部分承载力组成分别为：

$$T_1' = T_{11} + T_{12} \tag{2}$$

$$T_2' = T_{21} + T_{22} \tag{3}$$

$$T_3' = T_{31} + T_{32} \tag{4}$$

因此，当 $n=2$ 时，多段型扩大头锚杆的承载力

计算公式为：

$$T' = T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22} + T_{31} + T_{32} \quad (5)$$

以此类推，当扩大头个数 n 为任意值时(实际工程中 n 应取有限个数)，锚杆的普通段侧摩阻力 T_1'、扩大头段侧摩阻力 T_2' 和扩大头端面正压力 T_3' 都将由 n 部分构成，即可近似得到多段型扩大头锚杆在竖向拉拔中的承载力计算公式：

$$T' = \sum_{i=1}^{n}(T_{1i} + T_{2i} + T_{3i}) \quad (6)$$

$$T_{1i} = \pi D_1 L_{1i}\tau_{\mathrm{f}} \quad (7)$$

$$T_{2i} = \pi D_2 L_{2i}\tau_{\mathrm{fd}} \quad (8)$$

$$T_{3i} = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2)\frac{(K_0 - \xi)K_{\mathrm{p}}\gamma h_i + 2c\sqrt{K_{\mathrm{p}}}}{1 - \xi K_{\mathrm{p}}} \quad (9)$$

式中，T' 为多段型扩大头锚杆承载力；T_{1i} 为第 i 段普通锚固段侧摩阻力；T_{2i} 为第 i 段扩大头锚固段侧摩阻力；T_{3i} 为第 i 段扩大头端面提供的正压力；L_{1i} 为第 i 段普通锚固段长度；L_{2i} 为第 i 段扩大头锚固段长度；D_1 为普通锚固段的直径；τ_{f} 为普通锚固段侧壁和土层之间的摩阻力强度；D_2 为扩大头锚固段的直径；τ_{fd} 为扩大头锚固段侧壁和土层间的摩阻力强度；K_0 为扩大头前土体的静止土压力系数；ξ 为增量土压力系数；K_{p} 为扩大头前土体的朗肯被动土压力系数；γ 为土体的平均重度；c 为土体的粘聚力；h_i 为扩大头上部土体的高度。

3 结 论

通过锚杆模型试验，可以得出以下主要结论：

1) 不同尺寸的锚杆的荷载位移曲线均呈近似的抛物线型，在拉拔的初始阶段，荷载位移曲线近似呈线性增长；

2) 锚杆扩大头的直径对极限承载力的影响较大，相比之下，扩大头段长的影响较小。这说明在承载力的贡献上，扩大头的端承力明显大于侧面摩擦阻力；

3) 随着扩大头直径的增大，极限承载力增大的幅度逐渐变缓，这就说明存在一个比较经济合理的扩大头直径。在实际工程中，应根据现场条件综合考虑各方面因素来进行扩大头直径和长度的优化设计，这对于提高扩大头锚杆的经济效益和技术优势有很大意义；

4) 通过与底端型扩大头锚杆的对比分析，在相同总段长的条件下，多段型的极限承载力要提高20%～30%；

5) 人工加载所得到的试验结果基本符合要求，但是仍然要在试验仪器和操作上改进和完善，如采用加载仪器连续加载。另外，还需对扩大头锚杆的其它影响因素做相应的研究。

参考文献：

[1] 程良奎，胡建林，张培文. 岩土锚固技术新发展[J]. 工业建筑，2010，40(1)：98-101.
CHENG Liangkui，HU Jianlin，ZHANG Peiwen. The new development of ground anchorage in China[J]. Industrial Construction，2010，40(1)：98-101.

[2] 程良奎，李象范. 岩土锚固·土钉·喷射混凝土原理、设计与应用[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2008.

[3] 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 Qingyi，YANG Xiaoyang，YANG Changya. Mechanical mechanism and calculation method of bit expanded anchor rods[J]. Rock and Soil Mechanics，2010，31(5)：1359-1367.

[4] 郭钢，刘钟，杨松，等. 不同埋深扩体锚杆竖向拉拔破坏模式试验研究[J]. 工业建筑，2012，42(1)：123-126.
GUO Gang，LIU Zhong，YANG Song，et al. Model test research on failure modes of shallow and deep underreamed ground anchor under vertical pull out[J]. Industrial Construction，2012，42(1)：123-126.

[5] 张慧乐，刘钟，赵琰飞，等. 拉力型扩体锚杆拉拔模型试验研究[J]. 工业建筑，2011，41(2)：49-52.
ZHANG Huile，LIU Zhong，ZHAO Yanfei，et al. Pull-out model test on tension underreamed anchor[J]. Industrial Construction，2011，41(2)：49-52.

[6] 郝凤山，齐有军. 锚杆扩孔技术及锚固力试验研究[J]. 煤炭学报，2008，33(12)：1358-1361.
HAO Fengshan，QI Youjun. Research of embrasure reaming and anchoring force experimentation[J]. Journal of China Coal Society，2008，33(12)：1358-1361.

[7] 汪班桥，门玉明. 土层锚杆模型试验研究[J]. 地球科学与环境学报，2009，31(2)：195-199.
WANG Banqiao，MEN Yuming. Analysis by model test on anchors in clay[J]. Journal of Earth Sciences and Environment，2009，31(2)：195-199.

[8] 陈宇佳. 端部扩大型锚杆受力机理的现场试验研究[D]. 太原：太原理工大学，2011.
CHEN Yujia. Study of test about mechanism of headed end anchor subjecting to force on the spot[D]. Taiyuan：Taiyuan University of Technology，2011.

[9] LIAO H J，HSU S T. Uplift behavior of blade underreamed anchors in silty sand[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering，2003，129(6)：560-568.

(下转第313页)

布递减区域，5～8 km 为气溶胶微量分布区域。实验期间，水云的雷达比在 17 sr 左右。研究结果对西安地区气象研究和环境保护具有重要的研究意义。

参考文献：

[1] 张小曳. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究[J]. 地球科学进展，2007，22(1)：12-16.
ZHANG Xiaoye. Aerosol over china and their climate effect[J]. Advances in Earth Sciences，2007，22(1)：12-16.

[2] 华灯鑫，宋小全. 先进激光雷达探测技术研究进展[J]. 红外与激光工程，2008，37(增刊 3)：21-27.
HUA Dengxin，SONG Xiaoquan. Advances in lidar remote sensing techniques[J]. Infrared and Laser Engineering，2008，37(S3)：21-27.

[3] MÜLLER D，ANSMANN A，MATTIS I，et al. Aerosol-type-dependent lidar ratios observed with Raman lidar[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres，2007，112(D16)：4288-4298.

[4] CHOI S C，BAIK S H，PARK S K，et al. The measurement of the LIDAR ratio by using the rotational Raman LIDAR[J]. Journal of the Optical Society of Korea，2010，14(3)：174-177.

[5] SU Jia，LIU Zhaoyan，WU Yonghua，et al. Retrieval of multi-wavelength aerosol lidar ratio profiles using Raman scattering and Mie backscattering signals[J]. Atmospheric Environment，2013，79：36-40.

[6] 伯广宇，谢晨波，刘东，等. 拉曼激光雷达探测合肥地区夏秋季边界层气溶胶的光学性质[J]. 中国激光，2010，37(10)：2526-2532.
BO Guangyu，XIE Chenbo，LIU Dong，et al. Optical properties of aerosol in planetary boundary layer measured by Raman lidar at Hefei in summer and autumn[J]. Chinese Journal of Lasers，2010，37(10)：2526 -2532.

[7] 王玉峰，高飞，朱承炫，等. 对流层高度大气温度、湿度和气溶胶的拉曼激光雷达系统[J]. 光学学报，2015，35(3)：370-379.
WANG Yufeng，GAO Fei，ZHU Chengxuan，et al. Raman lidar for atmospheric temperature，humidity and aerosols up to troposphere height[J]. Acta Optica Sinica，2015，35(3)：370-379.

[8] 赵一鸣，潘超，王丽东，等. 激光雷达探测河北望都气溶胶[J]. 遥测遥控，2015，36(4)：64-70.
ZHAO Yiming，PAN Chao，WANG Lidong，et al. Aerosol monitoring by lidar at Wangdu，Hebei[J]. Journal of Telemetry，Tracking and Command，2015，36(4)：64-70.

[9] 刘巧君，郑玉臣，朱建华，等. 利用紫外 Mie 散射激光雷达探测澳门地区沙尘暴事件[J]. 光谱学与光谱分析，2012，32(3)：625-629.
LIU Qiaojun，ZHENG Yuchen，ZHU Jianhua，et al. Ultraviolet Mie lidar observations of aerosol extinction in a dust storm case over Macao[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis，2012，32(3)：625-629.

[10] HU Yongxiang. Depolarization ratio-effective lidar ratio relation：theoretical basis for space lidar cloud phase discrimination [J]. Geophysical Research Letters，2007，34(11)：224-238.

（责任编辑　王卫勋，王绪迪）

（上接第 264 页）

[10] MICKOVSKI S B，ENNOSL A R. Model and whole plantstudies on the anchorage capabilities of bulbs[J]. Plant and Soil，2003，255(2)：641-652.

[11] 胡建林，张培文. 扩体型锚杆的研制及其抗拔试验研究[J]. 岩土力学，2009，30(6)：1615-1619.
HU Jianlin，ZHANG Peiwen. Development of under reamed anchor and experimental study of uplift resistance[J]. Rock and Soil Mechanics，2009，30(6)：1615-1619.

[12] 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 view of studies on inflatable anchor[J]. Science and Technology Review，2010，28(5)：111-115.

[13] 中冶集团建筑研究总院. 岩土锚杆(索)技术规程：CECS22—2005[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2005.

（责任编辑　周　蓓）