

文章编号: 1000-7598 (2012) 12-3645-08

砂土中扩体锚杆承载特性模型试验研究

郭 钢¹, 刘 钟^{1,2}, 邓益兵³, 杨 松^{1,2}, 马利军^{1,2}

(1. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088; 2. 中国京冶工程技术有限公司, 北京 100088;

3. 上海海事大学 海洋环境与工程学院, 上海 201306)

摘 要: 在 25 个室内模型试验基础上, 研究了均质砂土中竖向拉拔扩体锚杆的几何尺寸及埋深对其承载特性的影响。试验结果表明, 根据深径比的不同, 扩体锚杆可以分为浅埋与深埋扩体锚杆 2 种形式, 它们在拉拔过程中均经历了土体弹性变形阶段、非扩体锚固段-土界面剪切破坏阶段、土体弹塑性变形阶段以及剪切破坏阶段, 破坏特征分别表现为整体剪切破坏与局部剪切破坏。通过扩体锚杆与普通拉力型锚杆模型试验对比发现: 与普通拉力型锚杆相比, 扩体锚杆极限承载力、承载比与安全性均有大幅度提高。而通过增大扩体锚固段直径的方式提高扩体锚杆承载力的优势较为明显。此外, 根据承载比分析, 扩体锚杆存在最优扩体锚固段直径, 因此, 在实际工程中应寻找一个满足需要的最优扩体锚固段尺寸以取得较好的经济效益。

关 键 词: 扩体锚杆; 深径比; 极限承载力; 承载比; 砂土

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

Model test research on bearing capacity characteristics of underreamed ground anchor in sand

GUO Gang¹, LIU Zhong^{1,2}, DENG Yi-bing³, YANG Song^{1,2}, MA Li-jun^{1,2}

(1. Central Research Institute of Building and Construction of MCC Group, Beijing 100088, China;

2. China Jingye Engineering Corporation Limited, Beijing 100088, China;

3. College of Ocean Environment and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The effects of size and embedment depth of underreamed ground anchor under vertical pullout on its bearing capacity characteristics were researched through 25 model tests. The test results exhibited two different modes of underreamed ground anchor depending on depth/diameter ratio, namely shallow and deep underreamed ground anchor. During pullout, the two type underreamed ground anchors experienced several phases, such as soil elastic deformation, shear failure on normal anchor section-soil interface, soil elastoplastic deformation phase and shear failure as well. And they manifested general shear failure and local shear failure. In comparison between underreamed ground anchor and normal tension-type anchor, the test results indicated that in ultimate bearing capacity, bearing capacity ratio and safety, underreamed ground anchor had substantial superiority in comparison with normal tension-type anchor. In order to improve the bearing capacity, expanding diameter of underreamed section had more obvious advantages. Furthermore, there was an optimal diameter of underreamed section by the bearing capacity ratio analysis. So it is highly recommended to seek an optimal dimension of underreamed ground anchor to get more economic benefits in practice.

Key words: underreamed ground anchor; depth/diameter ratio; ultimate bearing capacity; bearing capacity ratio; sand

1 引 言

自 20 世纪初叶岩土锚固技术在国内外广泛应用以来, 其在工程与研究领域取得了丰硕的成果^[1]。随着工程界对高承载力锚杆需求的增加, 近年来国内外都在大力开发各类锚固新技术^[2]。扩体锚固技术也以其承载力高、成本低、经济环保、安全高效

等优点日益受到工程界的关注^[3]。在我国, 中国京冶工程技术有限公司率先研发了具有多重防腐功能的承压型囊式土层扩体锚杆 (简称 CJY-KT 锚杆), 取得了多项国家发明专利, 并且投入了工程应用, 如图 1 所示。然而对这一新兴扩体锚固技术, 尚存在以下问题: 扩体锚杆的锚固机制尚未得到清楚的认识; 其承载变形特性还需要进一步深入研究; 国

收稿日期: 2011-08-31

基金项目: 新型扩体锚固技术及机具装备研发 (No. 财企[2012]171)。

第一作者简介: 郭钢, 男, 1986 年生, 硕士研究生, 主要从事岩土锚固方面的研究工作。E-mail: charlie4322@163.com

内外学者和规程、标准曾提出多种极限承载力计算方法^[4-6],但计算结果差别很大,并且缺乏必要的对比试验分析。随着高承载力锚杆需求的增加,扩体锚杆的工程应用量越来越大^[7-9]。因此,对于扩体锚杆的承载变形特性分析及其极限承载力计算方法的探讨就显得越来越重要。



图1 多重防腐囊式扩体锚杆(CJY-KT 锚杆)
Fig.1 Multiple anti-corrosion capsule-shaped underreamed ground anchor(CJY-KT anchor)

为了深入研究扩体锚杆的极限承载力问题,首先要分析扩体锚杆拉拔试验的荷载-位移曲线规律,并了解不同形式扩体锚杆在不同埋深条件下的承载特性。为此,本文进行了系列室内模型试验,对扩体锚杆承载特性进行探讨。文献[10-16]曾进行过扩体锚杆或锚定板的室内模型试验,而本文的研究特点是通过综合分析大量模型试验实测数据,考虑锚杆深径比(锚杆扩体锚固段顶面距土体表面距离与扩体锚固段直径之比,即 H/D)的影响,并与

普通拉力型锚杆试验实测数据对比,较为完整地分析了不同几何尺寸及埋深的扩体锚杆承载变形特性及经济性能,并提出了扩体锚杆承载比(扩体锚杆极限承载力与其体积之比)的概念。

2 室内模型试验

2.1 模型试验设备与仪器

为了避免模型试验产生边界效应,扩体锚杆模型试验采用0.8 m(长)×0.7 m(宽)×1.2 m(高)的分层组装式试验砂箱。试验砂箱由24层均为50 mm×5 mm的等边角钢制成的0.8 m(长)×0.7 m(宽)的矩形框组成。通过分层砂箱框的组装,可以控制扩体锚杆的不同埋置深度。试验采用干石英中砂,模拟地基应用分层砂雨法^[17]制备(见图2),试验落砂高度为1.0 m,每层落砂厚度大于5 cm,落砂后用铝合金方管沿砂箱边框将箱内砂土刮平。试验制备的模拟地基的物理力学指标见表1。



图2 分层砂雨法制备模拟地基
Fig.2 Model foundation preparation with sand rain

表1 模拟地基的物理力学参数表

Table 1 Physico-mechanical parameters of model foundation

密度 /(g/cm ³)	含水率 /%	干密度 /(g/cm ³)	土粒相对密度	最大干密度 /(g/cm ³)	最小干密度 /(g/cm ³)	相对密实度	黏聚力 /(kN/m ²)	内摩擦角 /(°)	泊松比 ν	不均匀系数
1.49	0.0	1.49	2.67	1.60	1.30	0.673	0.0	40.0	0.26	1.9

模型试验考虑几何相似,相似比采用1:10。扩体锚杆的扩体锚固段模型尺寸如表2所示。

表2 扩体锚固段模型尺寸表

Table 2 Size of model underreamed anchor section

扩体锚固段类型	扩体锚固段长度 /mm	扩体锚固段直径 /mm
1	100	100
2	100	80
3	100	60
4	100	40
5	100	20
6	150	60
7	200	60

锚杆扩体锚固段模型采用钢制圆柱体(如图3所示)。为了增加锚杆扩体锚固段与周围砂土的摩阻力,将圆柱形扩体锚固段周围制成浅螺纹状,此外还制作了直径为6、8、12 mm直螺杆模拟普通拉力型锚杆。

试验采用自行研制的手摇式锚杆加载试验台车,试验台车主要由行走装置、手摇加载轮、加载对中装置以及配重等部分组成(见图4)。手摇式锚杆加载试验台车具有以下特点:(1)能够持续均匀地对模型锚杆进行加载;(2)试验加载时间及持荷时间可以人为控制;(3)每级加载完成后能够锁定,从而实现稳定持荷;(4)能够对加载滑轮位置微调,

实现竖直对中；(5) 模型锚杆拉拔破坏后能够继续对模型施加位移,从而描绘出可能发生的荷载-位移曲线的下降阶段。

试验测量装置采用量程为 500 kg 的锚杆测力计以及精度为 0.01 mm 的电子位移计。



图 3 扩体锚杆模型

Fig.3 Model of underreamed ground anchors



图 4 扩体锚杆模型试验系统

Fig.4 Model test system of underreamed ground anchor

2.2 试验方案与实施

为了研究扩体锚杆尺寸及埋深对其承载变形特性的影响,并与普通拉力型锚杆承载变形特性进行对比,设计了以锚杆埋深 H (扩体锚杆的扩体锚固段上表面到砂土层表面的长度,普通锚杆为锚杆埋入砂土的总长度)、扩体锚固段直径 D 、扩体锚固段长度 L 以及普通拉力型锚杆直径 d 为控制指标的 25 组模型试验,模型试验现场见图 5,试验方案见表 3。



图 5 扩体锚杆模型试验照片

Fig.5 Photo of underreamed ground anchor model test

表 3 扩体锚杆与普通拉力型锚杆的模型试验方案

Table 3 Model test programme of underreamed ground anchors and normal tension-type anchors

序号	扩体锚固段长度 L / mm	扩体锚固段直径 D / mm	锚杆埋深 H / mm	扩体锚杆深径比 H/D	锚杆体积 V / 10^3 mm^3
1	100	100	1 050	10.5	838
2	100	80	1 050	13.1	556
3	100	60	1 050	17.5	336
4	100	40	1 050	26.3	181
5	100	20	1 050	52.5	85
6	100	100	950	9.5	833
7	100	80	950	11.9	551
8	100	60	950	15.8	331
9	100	40	950	23.8	176
10	100	20	950	47.5	80
11	100	100	850	8.5	828
12	100	80	850	10.6	546
13	100	60	850	14.2	326
14	100	40	850	21.3	171
15	100	20	850	42.5	75
16	100	60	650	10.8	316
17	100	40	550	13.8	156
18	100	60	500	8.3	308
19	100	40	450	11.3	151
20	100	80	650	8.1	536
21	150	60	850	14.2	467
22	200	60	850	14.2	608
23		12	1 050		119
24		8	1 050		53
25		6	1 050		30

注: 锚杆体积包括锚杆所有埋入砂土部分的体积。

模型试验步骤:

(1) 将模型锚杆竖立于砂箱底座定位块之上,并用分层砂雨法制备模型地基。

(2) 安放电子位移计托架,并将加载台车移动至指定位置,将加载钢丝绳、拉力计和锚杆杆体连接好,利用加载对中装置将整个竖向拉拔系统调至竖直,并在台车后部安放配重。

(3) 将电子位移计安装于托架上,并使其测针与固定于锚杆自由段的水平金属板上表面接触。

(4) 试验开始采用人工缓慢加载,每级荷载持荷 3 min,并通过拉力计与位移传感器对每级荷载读取荷载值 Q 与位移值 S 。

(5) 进行试验数据处理。

3 试验结果及分析

3.1 扩体锚杆荷载-位移曲线特征

通过归纳 22 组扩体锚杆 $Q-S/D$ 拉拔曲线可以发现,不同几何尺寸的扩体锚杆在不同埋深条件下所得到的荷载-位移曲线,可以根据扩体锚杆深径比的大小分为 2 种基本形式(如图 6、7 所示),在本

文试验条件下, $H/D \geq 9.5$ 的扩体锚杆表现出深埋特性, 定义为深埋扩体锚杆, $H/D \leq 8.5$ 的扩体锚杆表现出浅埋特性, 定义为浅埋扩体锚杆。从图 6、7 可见, 这 2 种扩体锚杆的 $Q-S/D$ 曲线特性具有显著的差异性。图中图例为扩体锚固段直径-长度-埋深(深径比), 扩体锚固段直径、长度以及埋深单位均为 mm。

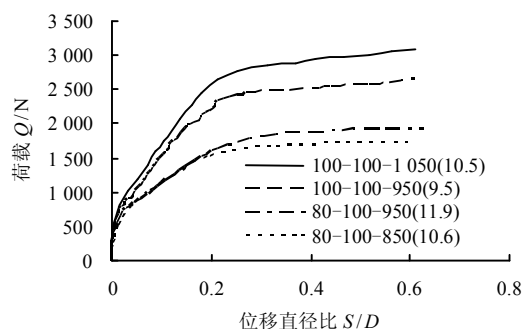


图 6 部分深埋扩体锚杆试验 $Q-S/D$ 曲线

Fig.6 Part of $Q-S/D$ curves of deep underreamed ground anchors in model tests

根据图 6 可知, 深埋扩体锚杆试验曲线从直观上可以分为以下 3 个阶段:

第 1 阶段为加载初期的直线段, 其位移直径比值小于 0.03。在此阶段内, 扩体锚杆的扩体锚固段及非扩体锚固段均提供承载力, 其变形主要表现为扩体锚杆的非扩体锚固段的伸长, 而变形速率最慢并且呈现弹性变形特征。

第 2 阶段出现在曲线的第 1 个拐点之后, 为荷载-位移直线段, 在此阶段内非扩体锚固段与其周围土体已出现界面剪切破坏, 非扩体锚固段承载力大幅降低, 主要由扩体锚固段提供承载力, 锚-土系统变形速率增加, 线段前期锚固土体的变形仍可视作弹性变形, 这一阶段末期锚固土体开始进入塑性阶段。

第 3 阶段出现在曲线的第 2 个拐点之后, 近似呈现为直线段, 锚-土系统变形速率进一步加快, 这时扩体锚固段周围土体塑性区不断扩大, 在荷载增加很小的情况下变形量急剧增长, 这表明锚周土体已经发生局部剪切破坏。

值得指出的是, 在第 3 阶段, 深埋扩体锚杆的 $Q-S/D$ 曲线仍呈小幅单调上升趋势, 即深埋扩体锚杆在较大的位移条件下仍然会有较小的承载力提升。其原因在于, 经过扩体锚固段上端土体的压缩, 扩体锚固段的端承力会随着压力泡的逐渐扩大而增加。

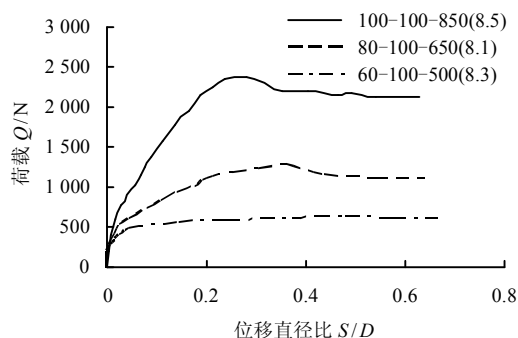


图 7 浅埋扩体锚杆试验 $Q-S/D$ 曲线

Fig.7 $Q-S/D$ curves of shallow underreamed ground anchor in model tests

根据图 7, 浅埋扩体锚杆试验曲线可以分为以下 4 个阶段:

浅埋扩体锚杆试验曲线的最初阶段与深埋扩体锚杆相似, 分别经历了弹性变形阶段、非扩体锚固段界面剪切破坏, 并使锚周土体进入塑性阶段 2 个阶段。

在曲线的第 2 个拐点之后, 随着锚杆拉拔位移的持续增加, 土-锚系统承载能力出现明显降低, 表明浅埋扩体锚杆已进入了整体剪切破坏阶段, 这是浅埋扩体锚杆承载变形发展的第 3 阶段。

在承载力逐渐降低达到稳定值时出现了 $Q-S/D$ 曲线的第 4 阶段, 即随着拉拔位移的增加, 承载力值不再发生显著的提高或降低。

为便于工程应用, 经过综合简化可以得到 2 类扩体锚杆拉拔试验的 $Q-S/D$ 特征曲线, 如图 8、9 所示, 其中深埋扩体锚杆的主要特征可以归纳如下:

(1) OA 为直线段, 在荷载快速增长的情况下位移发展缓慢, 这一阶段的土-锚系统处于弹性变形状态。

(2) 在达到第 1 拐点 A 之后, 出现了第 2 阶段, 在这一阶段直线段 AB 的位移速率增大, 土-锚系统由最初的弹性变形状态进入塑性状态。

(3) 在达到第 2 拐点 B 之后, 随着荷载持续增加, 直线段 BC 的位移速率出现大幅度增大, 在这一阶段锚周土体处于弹塑性状态, 并且发生了局部剪切破坏, 达到了深埋扩体锚杆的极限承载力。

同样, 依据图 9 的浅埋扩体锚杆 $Q-S/D$ 特征曲线, 将其主要特征描述如下:

(1) 浅埋扩体锚杆的 OA 、 AB 直线段的基本特征与深埋扩体锚杆基本相似, 并且在 B 点达到承载力的极大值。

(2) 当荷载-位移特征曲线超过 B 点后, BC 直线段呈现出荷载-位移特征曲线急剧下降, 土体开始

出现整体剪切破坏。

(3) 当荷载位移特征曲线超过 C 点后, 线段 CD 逐渐趋近于水平直线, 锚-土系统的承载能力基本不再变化。

拉拔模型试验结果表明, 浅埋扩体锚杆的 $Q-S/D$ 曲线的位移速率随着荷载的增加而不断加快, 并且在达到 B 点荷载峰值后, 承载力值会逐渐下降, 锚杆周围土体从弹性状态逐渐发展为弹塑性状态, 表现为整体剪切破坏, 随着位移进一步增加, 锚杆将会被拔出。所以在实际工程中必须避免采用浅埋形式的扩体锚杆, 以防止工程产生灾难性后果。

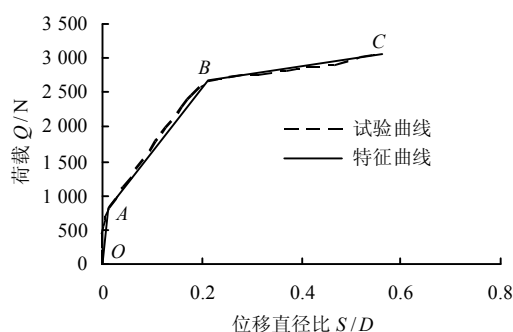


图 8 深埋扩体锚杆试验的 $Q-S/D$ 特征曲线

Fig.8 Typical $Q-S/D$ curve of deep underreamed ground anchor in model test

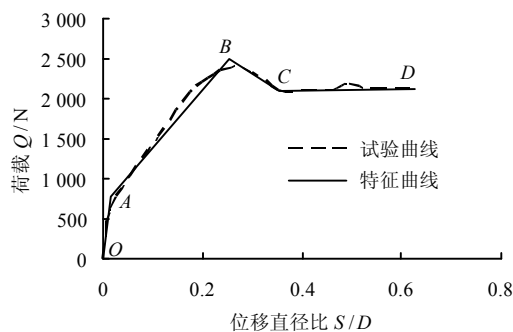


图 9 浅埋扩体锚杆试验 $Q-S/D$ 特征曲线

Fig.9 Typical $Q-S/D$ curve of shallow underreamed ground anchor in model test

3.2 扩体锚杆与普通拉力型锚杆的承载特性

图 10 展示了 3 组普通拉力型锚杆试验的 $Q-S/D$ 曲线, 在施加拉拔荷载后, 锚杆首先经历了弹性变形阶段, 并在发生较小位移后达到了极限荷载。3 种尺寸的普通拉力型锚杆的极限承载力对应的位移直径比值均小于 0.5, 在达到极限承载力之后, 3 条 $Q-S/D$ 试验曲线均出现了陡降段, 其后, 3 条曲线表现为平缓下降, 在这一阶段锚杆仅剩余较小的承载能力。由图还可以发现, 当锚杆长度相同时, 直径越大的普通锚杆的极限承载力越大, 残余承载

力也越大。此外, 普通拉力型锚杆都发生了整体剪切破坏, 其承载能力与安全性均低于扩体锚杆。

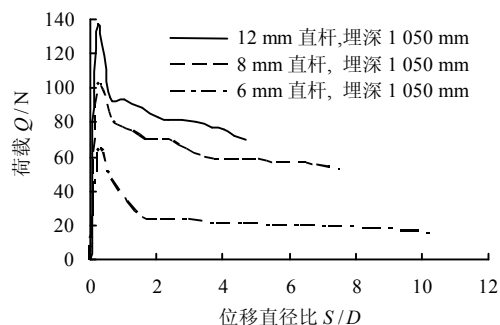


图 10 埋深 1 050 mm 普通拉力型锚杆试验 $Q-S/D$ 曲线

Fig.10 $Q-S/D$ curves of tension-type anchor in model test with 1 050 mm embedment

经过 25 组模型试验实测结果的整理, 将各组试验锚杆极限承载力 Q_u 及极限承载力对应的位移 S_u 结果列于表 4。

表 4 锚杆模型试验极限承载力与对应位移、承载比

Table 4 Ultimate bearing capacity and corresponding displacement, bearing capacity ratio of anchors in model test

序号	深径比 H/D	极限 承载力 Q_u/N	对应 位移 S_u / mm	锚杆 体积 V / 10^3 mm^3	承载比 Q_u/V / (10^{-3} N/mm^3)
1	10.5	2 830	28.6	838	3.377
2	13.1	2 390	28.3	556	4.299
3	17.5	1 550	27.7	336	4.613
4	26.3	990	28.1	181	5.470
5	52.5	363	29.2	85	4.270
6	9.5	2 460	27.2	833	2.953
7	11.9	1 860	27.5	551	3.376
8	15.8	1 340	26.8	331	4.048
9	23.8	820	27.7	176	4.659
10	47.5	283	26.2	80	3.538
11	8.5	2 390	26.4	828	2.886
12	10.6	1 650	24.3	546	3.022
13	14.2	1 160	27.8	326	3.558
14	21.3	700	28.2	171	4.094
15	42.5	280	27.5	75	3.733
16	10.8	1 030	26.5	316	3.228
17	13.8	490	27.8	156	3.077
18	8.3	625	27.3	308	2.045
19	11.3	340	27.4	151	2.219
20	8.1	1 270	28.1	536	2.369
21	14.2	1 300	27.6	467	2.784
22	14.2	1 400	27.0	608	2.303
23		14	2.8	119	0.116
24		10	2.1	53	0.194
25		7	1.9	30	0.217

分析图 6 与表 4 可知, 深埋扩体锚杆的极限承载力越高, 其 $Q-S/D$ 曲线弹性阶段的荷载-位移直

线段坡度越大, 位移速率越小。扩体锚杆试验曲线的共同特点是直线段较长, 锚周土体的弹塑性阶段均开始于扩体锚杆位移 15 mm 以上, 这说明扩体锚杆具有较大的弹性承载范围。扩体锚杆发生极限承载力的对应位移在 24.3~29.2 mm 区间, 这说明扩体锚杆具有较高的承载变形能力。

综合图 6、10 和表 4 的试验结果可知, 当锚杆长度和埋深相同时, 与普通拉力型锚杆相比, 扩体锚杆的极限承载力有较大幅度的提升。对比扩体锚杆与普通锚杆的 $Q-S/D$ 曲线形态, 扩体锚杆相对于普通锚杆具有更大的弹性承载范围。普通锚杆在较小位移达到极限承载力后承载能力大幅下降, 而深埋扩体锚杆在较大位移条件下依然具有承载力小幅上升的能力。这主要是由于在土体没有发生整体剪切破坏的情况下扩体锚杆的扩体锚固段端承力将会持续增加。因此, 在实际工程中采用扩体锚杆具有更高的安全性。

3.3 扩体锚杆的承载力影响因素与承载比

根据表 4, 当扩体锚固段长度为 100 mm, 埋深分别为 850、950、1 050 mm 时, 以扩体锚固段直径 20 mm 为基准, 扩体锚固段直径分别为 40、60、80、100 mm 的扩体锚杆极限承载力提高幅度计算结果列于表 5。

表 5 扩体锚固段直径变化对极限承载力影响 ($L=100$ mm)
Table 5 Effect of diameter of underreamed anchor section on ultimate bearing capacity ($L=100$ mm)

扩体锚固段直径 /(mm)	不同锚杆埋深(mm)下的极限承载力提高幅度		
	850	950	1050
20	1.00	1.00	1.00
40	2.73	2.90	2.50
60	4.27	4.73	4.14
80	6.58	6.57	5.89
100	7.80	8.69	8.54

由表 5 可以发现, 当扩体锚固段直径增加一倍时, 在 3 种埋深条件下锚杆极限承载力提高了 1.5~1.9 倍。当扩体锚固段直径增加 2 倍时, 锚杆极限承载力提高 3.14~3.73 倍。当扩体锚固段直径增加 3 倍时, 其极限承载力提高 4.89~5.58 倍, 而当扩体锚固段直径增加 4 倍时, 其极限承载力提高 6.80~7.69 倍。由此可见, 当扩体锚固段直径增大时, 其极限承载力随之同步提高, 扩体锚固段直径按照原尺寸每增加一倍, 承载力就提高 1.7 倍左右。

采用表 4 的扩体锚杆第 13、21、22 项试验数据进行分析, 当埋深同为 850 mm, 扩体锚固段直径均为 60 mm, 以长度 100 mm 为基准, 长度分别为

150、200 mm 时, 极限承载力分别提高 12%、21%。由此可见, 通过增加扩体锚固段长度的方式提高扩体锚杆极限承载力的效果远逊于通过增大扩体锚固段直径的方式。

表 6 分析了扩体锚杆埋深对其极限承载力的影响。对于 5 种扩体锚固段直径, 以扩体锚杆埋深 850 mm 为基准, 当埋深增加 100 mm (约 11.8%) 时, 极限承载力提高幅度为 1%~17%; 当埋深增加 200 mm (约 23.5%) 时, 极限承载力提高幅度为 18%~45%。由此可见, 采用增加埋深的方式, 也能够有效提高扩体锚杆的极限承载力。

表 6 扩体锚杆埋深因素对极限承载力影响 ($L=100$ mm)
Table 6 Effect of embedment depth of underreamed anchor on its ultimate bearing capacity ($L=100$ mm)

埋深 /(mm)	不同扩体锚固段直径(mm)下极限承载力提高幅度				
	20	40	60	80	100
850	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
950	1.01	1.17	1.16	1.13	1.03
1 050	1.30	1.41	1.37	1.45	1.18

在工程实践中将锚杆锚固体扩大需要增加成本, 因此, 引入锚杆承载比 Q_u/V 作为 1 个重要指标加以分析, 根据锚杆承载力分析表 4 绘制了扩体 $Q_u/V-V$ 关系曲线, 如图 11 所示。

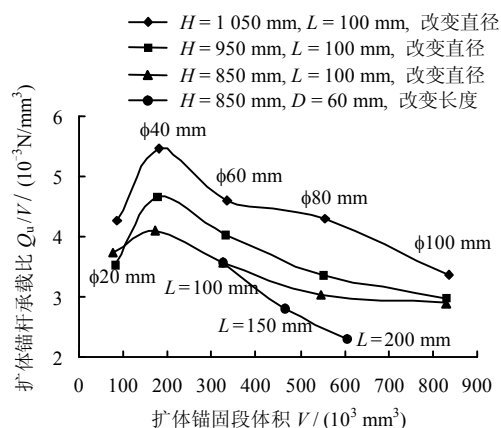


图 11 承载比-体积关系曲线图

Fig.11 Curves of bearing capacity ratio versus volume

由图可知, 在同一埋深条件下, 随着扩体锚固段直径的增加, 承载比曲线均表现出先升高后降低的趋势。当扩体锚固段直径为 40 mm 时, 埋深分别为 1 050、950、850 mm 的扩体锚杆的承载比均出现了极大值。这说明在本试验条件下, 40 mm 直径的扩体锚固段的单位体积提供的极限承载力最大, 材料经济效益趋于最好。当扩体锚固段直径大于

40 mm 时, 扩体锚杆承载比逐渐降低。对比图 11 中最下面的 2 条分析曲线可以发现, 通过增加锚杆扩体锚固段直径提高极限承载力的方式比通过增加扩体锚固段长度的方式可以获得更高的承载比。

另一方面, 通过表 4 还可以看到, 相同试验条件下的扩体锚杆的极限承载力和承载比, 比普通拉力型锚杆均有较大幅度的提高, 而通过增加扩体锚固段直径提高锚杆承载力的方式比增加扩体锚固段长度的方式更加经济合理。这主要是由于扩体锚杆的承载力中, 端承力占有较大的比例, 当增加扩体锚固段直径时, 端承力与侧摩阻力均有提高, 而增加扩体锚固段的长度方式仅增大了其侧摩阻力。因此, 在工程实践中应结合地质条件及经济效益等因素选取最优的扩体锚杆尺寸和埋设深度。

4 结 论

(1) 不同尺寸扩体锚杆的荷载-位移实测曲线均存在弹性变形阶段、非扩体锚固段-土体剪切破坏阶段、锚周土体塑性变形阶段以及剪切破坏阶段。

(2) 扩体锚杆根据深径比的不同可以分为深埋扩体锚杆和浅埋扩体锚杆, 在本文的试验条件下, 深埋与浅埋扩体锚杆的临界深径比为 9.5。

(3) 深埋扩体锚杆在发生局部剪切破坏后, 其承载力仍会有小幅提高, 而浅埋扩体锚杆达到极限承载力之后发生整体剪切破坏, 承载力下降幅度较大。

(4) 与普通拉力型锚杆相比, 扩体锚杆的极限承载力及其所对应的位移与弹性承载范围均有较大幅度提高, 通过增加锚杆扩体锚固段的直径、长度和埋深均能提高锚杆的承载性能。

(5) 与普通拉力型锚杆相比, 扩体锚杆承载比有大幅度提高, 并且通过增加扩体锚固段直径提高其承载力的方式经济性更好。在本试验条件下, 当扩体锚杆的扩体锚固段直径达到 40 mm 时, 其承载比最大, 经济性较好。

(6) 在实际工程中, 深埋扩体锚杆具有更高的承载能力、安全度与经济性。在工程设计中应结合现场条件综合考虑扩体锚杆极限承载力与扩体锚固段尺寸和埋深等因素, 以增加扩体锚固段直径的方式寻求更高的承载比与极限承载力, 以便获取更大的经济效益。

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.
- [2] 翟金明, 周丰峻, 刘玉堂. 扩大头锚杆在软土地区锚固工程中的应用与发展[C]//锚固与注浆新技术——第二届全国岩石锚固与注浆学术会议论文集. 北京: 中国电力出版社, 2002, 26—31.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [6] 江苏省建设厅. 苏 JG/T 033—2009 高压喷射扩大头锚杆(索)技术规程[S]. 江苏: 江苏科学技术出版社, 2009.
- [7] 曾庆义. 高吨位土层锚杆扩大头技术的工程应用[J]. 岩土工程界, 2004, 11(8): 58—61.
- [8] 刘念, 刘凤易, 王少敏. 扩大头锚杆在人防工程抗浮中的应用[J]. 浙江建筑, 2010, 27(4): 17—20.
- [9] 张小平, 牛道纯, 张元平. 扩大头锚索技术在基坑支护工程中的应用[J]. 西部探矿工程, 2008, 20(12): 27—29.
- [10] 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.
- [11] GHALY A, HANNA A, HANNA M. Uplift behaviour of screw anchors in sand. I: Dry sand[J]. *Journal of Industrial Construction*, 2010, 40(1): 98—101.
- [12] CHENG Liang-kui, HU Jian-lin, ZHANG Pei-wen. The new development of ground anchorage in China[J]. *Industrial Construction*, 2010, 40(1): 98—101.
- [13] HU Jian-lin, ZHANG Pei-wen. Development of underreamed anchor and experimental study of uplift resistance[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(6): 1615—1619.
- [14] ZENG Qing-yi, YANG Xiao-yang, YANG Chang-ya. Mechanical mechanism and calculation method of bid expanded anchor rods[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(5): 1359—1367.
- [15] LIU Nian, LIU Feng-yi, WANG Shao-min. Application of end enlarged anchor stock in anti-floatation in air-defense engineering[J]. *Zhejiang Construction*, 2010, 27(4): 17—20.
- [16] ZHANG Hui-le, LIU Zhong, ZHAO Yang-fei, et al. Pull-out model test on tension underreamed anchor[J]. *Industrial Construction*, 2011, 41(2): 49—52.
- [17] GHALY A, HANNA A, HANNA M. Uplift behaviour of screw anchors in sand. I: Dry sand[J]. *Journal of*

- Geotechnical Engineering**, 1991, 117(5): 773—793.
- [12] 郭钢, 刘钟, 卢璟春, 等. 砂土中扩体锚杆竖向拉拔破坏模式试验研究[C]//第七届全国青年岩土力学与工程会议论文集. 北京: 人民交通出版社, 2011, 95—100.
- [13] HSU S T, LIAO H J. Uplift behaviour of cylindrical anchors in sand[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1998, 35(1): 70—80.
- [14] MURRAY E J, GEDDES J D. Uplift behaviour of plates in sand[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1987, 113(3): 202—215.
- [15] ILAMPARUTHI K, MUTHUKRISHNAIAH K. Anchors in sand bed: delineation of rupture surface[J]. **Ocean Engineering**, 1999, 26(12): 1249—1273.
- [16] 刘明亮, 朱珍德, 刘金元. 锚板抗拉破坏机制试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 697—702.
- LIU Ming-liang, ZHU Zhen-de, LIU Jin-yuan. Experimental study of failure mechanism of uplifting anchor[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(3): 697—702.
- [17] WALZ B. Bodenmechanische modelltechnik als mittel zur bemessung von grundbauwerken(Bericht-Nr.1)[R]. Wuppertal: [s. n.], 1982: 45—90.
-
- 上接第 3644 页
- [13] 沈明荣, 朱根桥. 规则齿形结构面的蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 223—226.
- SHEN Ming-rong, ZHU Gen-qiao. Testing study of creep characteristic of regularly dentate discontinuity[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(2): 223—226.
- [14] 徐卫亚, 杨圣奇. 节理岩石剪切流变特性试验与模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2): 5536—5542.
- XU Wei-ya, YANG Sheng-qi. Experiment and modeling investigation on shear rheological property of joint rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Supp.2): 5536—5542.
- [15] 闫子舰, 夏才初, 李宏哲, 等. 分级卸荷条件下锦屏大理岩流变规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2153—2159.
- YAN Zi-jian, XIA Cai-chu, LI Hong-zhe, et al. Experimental study of rheological properties of marble in Jinping hydraulic power station under unloading condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(10): 2153—2159.
- [16] 朱杰兵, 汪斌, 邬爱清. 锦屏水电站绿砂岩三轴卸荷流变试验及非线性损伤蠕变本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 528—534.
- ZHU Jie-bing, WANG Bin, WU Ai-qing, et al. Study of unloading triaxial rheological test and its nonlinear damage constitutive model of Jinping hydropower station green sandstone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(3): 528—534.
- [17] 徐卫亚, 杨圣奇, 杨松林, 等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(I): 试验结果[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 531—537.
- XU Wei-ya, YANG Sheng-qi, YANG Song-lin, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of green schist specimen(I): experimental results[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(4): 531—537.
- [18] 张志刚, 乔春生, 李晓. 单节理岩体强度试验研究[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(4): 34—39.
- ZHANG Zhi-gang, QIAO Chun-sheng, LI Xiao. Experimental study of the strength of single joint rock mass[J]. **China Railway Science**, 2007, 28(4): 34—39.