

文章编号: 1000-7598 (2011) 07-1957-06

# 充气锚杆在砂土中的模型试验研究

曹佳文<sup>1</sup>, 彭振斌<sup>1</sup>, 彭文祥<sup>1</sup>, 何忠明<sup>2</sup>, 尹 泉<sup>1</sup>

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 长沙 410004)

**摘 要:** 为探讨充气锚杆的承载特性, 通过建立室内试验模型, 改变锚杆充气压力大小、埋设深度、土体密度、橡胶膜长度、厚度等条件, 进行了一系列的抗拔试验, 得到相应的荷载-位移曲线。研究表明: 在影响充气锚杆抗拔承载力的诸多因素中, 充气压力及土体密实度与承载力成一定倍数增长关系, 是最显著的影响因素; 其次是橡胶膜长度, 成显著线性增长关系; 充气锚杆的极限位移主要来自橡胶膜的弹塑性变形, 反映了充气锚杆在抗拔过程中橡胶膜的力学行为; 通过与常用锚杆的对比分析, 得出充气锚杆的极限抗拔承载能力约是单锚片螺旋锚的 4.3 倍, 是双锚片螺旋锚的 1.9 倍, 其极限侧阻力约为一般注浆扩大头锚杆的 2~4 倍。

**关 键 词:** 充气锚杆; 抗拔试验; 极限承载力; 橡胶膜; 位移

**中图分类号:** TU 473

**文献标识码:** A

## Model test study of inflated anchors in sands

CAO Jia-wen<sup>1</sup>, PENG Zhen-bin<sup>1</sup>, PENG Wen-xiang<sup>1</sup>, HE Zhong-ming<sup>2</sup>, YIN Quan<sup>1</sup>

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** In order to investigate the bearing features of inflated anchors, a series of scaled physical model tests are done in a calibration chamber using dry sands and anchors of various inflation pressures, embedment depths, soil densities, membrane lengths and thicknesses; and the relevant load-displacement curves are obtained. The results show that the inflation pressure, soil density and anchor length are the dominant factors affecting the pullout capacity of the inflated anchor system in sands. The utmost displacement of inflated anchor is mainly from the elastoplastic deformation of the membrane, which reflects the mechanical properties of the membrane during the pullout test. By contrastive analysis with common anchors, it is indicated that the limit tensile load of inflated anchor is 4.3 times of that of the single-blade screw anchor, 1.9 times of that of the double-blade screw anchor. And its ultimate lateral resistance is 2 to 4 times of that of common anchors.

**Key words:** inflated anchor; pullout test; limit load; membrane; displacement

## 1 引 言

我国砂性土及软土地层分布广泛, 且多处于经济发达地区, 基坑工程日益趋多, 城市空间环境的重要性尤显突出。基坑支护中, 常见的注浆锚杆支护形式已经取得了巨大的成就<sup>[1-2]</sup>, 但注浆锚杆亦有它的不足之处, 如基坑完工后埋在地下, 锚固体易超出用地红线范围, 给地下环境带来了影响, 从注浆到凝固受力间隔时间长, 施工后不能立即起到支护作用等。针对上述问题, 各类可回收型锚杆相继问世<sup>[3-5]</sup>。

充气锚杆是一种全新概念的新型锚杆, 是针对

软土在压力作用下可产生挤压变形的特性而研发的。简单地说, 充气锚杆就是在锚杆端部外套高强度、高气密性橡胶膜, 杆体采用钢管, 橡胶膜套在钢管外部, 上下两端用钢环紧固在钢管上, 在包橡胶段的钢管段钻适量小孔以供充气, 将锚杆安置在软土中后, 从钢管口对其进行高压充气, 锚杆端部橡胶膜在高压气体下膨胀, 挤压周围土体形成一个圆柱或腰鼓状的扩大头, 充当锚固段的作用, 如图 1 所示。

充气锚杆的提出源于海洋工程, 为在海底施工作业和机器(机器人)提供抗浮锚固力, 国外研究刚刚起步。澳大利亚 Dundee 大学土木工程系 Tim

收稿日期: 2010-09-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50878212)。

第一作者简介: 曹佳文, 男, 1979 年生, 博士研究生, 工程师, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: caoao@163.com

Newsom 等<sup>[6]</sup>于 2000 年进行了充气锚杆的简单室内试验, Newsom 和 Smith 以及澳大利亚 Scolt Offshore MS 公司的 Brunning 于 2003 年进行了充气锚杆在近海岸软土中的试验研究<sup>[7]</sup>, 2007 年加拿大西安大略大学地质研究中心 Hinchberger 和 Lang 利用 Newsom 的试验数据, 对充气锚杆用 Plaxis 有限元程序进行数值分析<sup>[8-9]</sup>, 得出了一系列有意义的结论, 但国内尚未见相关研究的报道。

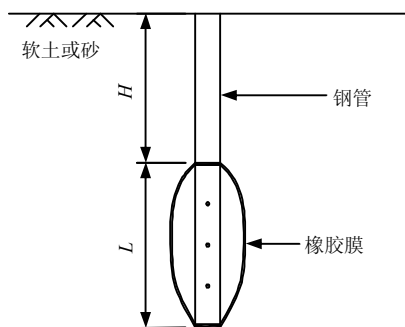


图 1 充气锚杆示意图  
Fig.1 Sketch of inflated anchor

充气锚杆具有可回收性、可再次利用、施工后可立即施加锚固力等特点, 且可根据实际受力情况增减锚固的应力, 其承载机制及设计理论与一般锚杆存在明显差异。为尽快将该新锚杆应用到软土基坑支护工程领域当中, 研究与探讨其锚固机制与承载力计算方法具有重要的理论意义及实用价值。本文从室内试验着手, 建立了充气锚杆试验模型, 进行了一系列抗拔试验, 分析了充气锚杆的主要影响因素, 探讨了其极限承载力的变化规律。

## 2 室内试验方案

### 2.1 充气锚杆结构模型

试验锚杆选用  $\phi 27$  mm 无缝不锈钢钢管作杆体, 壁厚为 3 mm, 长为 1.2 m, 底端密封, 距杆底约 5、12.5、20 cm 处错开各加工 2 个  $\phi 4$  mm 进气小孔, 距杆底 0.9 m 处安装压力表 1 只, 压力表上部约 0.50 m 处安装密封阀, 密封阀上部约 0.5 m 处加工充气(水)进口管, 顶部安装泄气阀及吊环。底部开小孔部分为锚杆膨胀体位置, 膨胀体采用厚约 1 mm 的双层橡胶膜, 采用不锈钢环扣卡紧, 如图 2 所示。

### 2.2 试验装置模型

试验在一个装满干砂的长方体形 (1.2 m  $\times$  1.2 m  $\times$  1.0 m) 钢槽中进行。试验用到的主要仪器设备有: 测定抗拔力的 WTP301S 形拉压称重传感

器与 PY500 智能数字压力表, 测量位移的 JMDL-2100 智能数码位移计, 采集试验数据的 JMZX-3001 综合测试仪和计算机数据采集系统以及其他诸如加压氮气罐、加载滑轮组、工字钢梁、角钢架、量筒、钢尺等辅助设备。图 3 为充气锚杆的抗拔试验装置模型图。

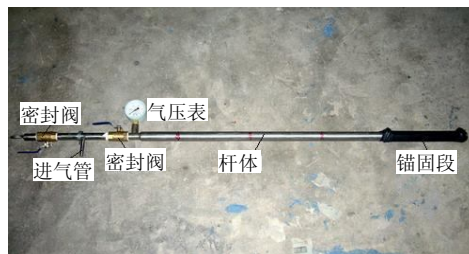


图 2 充气锚杆实物图  
Fig.2 An inflated anchor

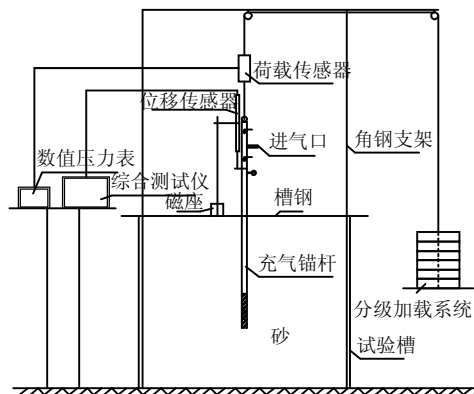


图 3 模型试验装置图  
Fig.3 Model test set-up

### 2.3 砂土的物理力学性质

试验土料为中粗砂, 取自河滩, 经自然风干后过 5 mm 筛, 其不均匀系数  $C_u=2.65$ ,  $d_{10}=0.23$  mm,  $d_{60}=0.61$  mm, 其基本物理力学参数见表 1。

表 1 试验用砂土的物理力学参数

| Table1 The physico-mechanical parameters of sands |                                   |               |                              |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------|------------------------------|
| 密实度                                               | 干密度<br>$\rho_d / (\text{g/cm}^3)$ | 相对密度<br>$D_r$ | 内摩擦角<br>$\varphi / (^\circ)$ |
| 松散                                                | 1.52~1.55                         | 0.20~0.31     | 22~26                        |
| 密实                                                | 1.66~1.68                         | 0.69~0.76     | 36~43                        |

### 2.4 试验步骤

影响充气锚杆承载性能的因素很多, 试验选取其主要因素进行研究, 如充气压力  $P$ 、埋置深度  $H$ 、土的密度  $\rho$ 、橡胶膜长度  $L$  及厚度  $t$  等。试验始于 200 mm 的锚固段与不同的充气压力, 然后是不同

的埋深,再改变土的密度,接着变化橡胶膜长度、厚度。

试验中用到的膨胀介质主要为空气,部分试验使用了水。所有试验都达到破坏状态,破坏标准为:①锚杆被拔出;②橡胶膜爆破;③土面或后一级荷载作用下的锚头位移增量达到或超过前一级荷载作用下锚头位移增量的2倍。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 试验基准值与试验结果

在进行抗拔试验之前,需确定各主要影响因素的基准值。根据试验条件及材料的相关性能,考虑边界条件,按一定的相似比例,确定锚杆橡胶膜长度  $L=20$  cm、充气压力  $P=100$  kPa、埋置深度  $H=40$  cm、橡胶膜厚度  $t=2$  mm、松砂等作为各试验的基准值,估算分级加载基准值为  $0.03$  kN。

在试验基准值基础上,通过改变其中的某一条件,进行了一系列抗拔试验,其成果见表2及图4~8。

表2 不同条件下锚杆的极限荷载与位移  
Table 2 Ultimate load and displacement for different conditions

| 序号 | 充气压力<br>$P/\text{kPa}$ | 土体密度<br>$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$ | 埋置深度<br>$H/\text{cm}$ | 橡胶膜长度<br>$L/\text{mm}$ | 橡胶膜厚度<br>$t/\text{mm}$ | 极限荷载<br>$Q/\text{kN}$ | 极限位移<br>$s/\text{mm}$ |
|----|------------------------|---------------------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1  | 0                      | 1.53                                  | 40                    | 200                    | 2                      | 0.028                 | 7.02                  |
| 2  | 50                     | 1.53                                  | 40                    | 200                    | 2                      | 0.126                 | 8.84                  |
| 3  | 100                    | 1.54                                  | 40                    | 200                    | 2                      | 0.303                 | 34.05                 |
| 4  | 100                    | 1.54                                  | 20                    | 200                    | 2                      | 0.208                 | 23.48                 |
| 5  | 100                    | 1.53                                  | 40                    | 200                    | 2                      | 0.301                 | 33.44                 |
| 6  | 100                    | 1.54                                  | 60                    | 200                    | 2                      | 0.345                 | 34.11                 |
| 7  | 100                    | 1.67                                  | 40                    | 200                    | 2                      | 0.639                 | 40.00                 |
| 8  | 100                    | 1.53                                  | 40                    | 100                    | 2                      | 0.214                 | 17.95                 |
| 9  | 100                    | 1.52                                  | 40                    | 200                    | 2                      | 0.299                 | 30.38                 |
| 10 | 100                    | 1.52                                  | 40                    | 300                    | 2                      | 0.398                 | 52.66                 |
| 11 | 100                    | 1.53                                  | 40                    | 200                    | 1                      | 0.519                 | 70.89                 |

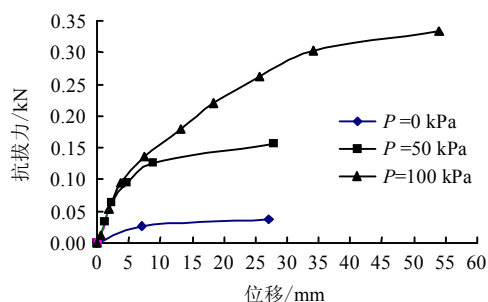


图4 不同充气压力的抗拔力-位移图  
Fig.4 Anchor pullout load vs. displacement curves for inflation pressure changes

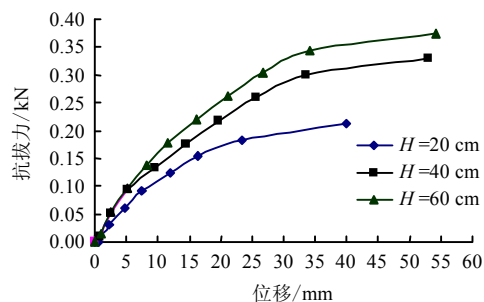


图5 不同埋置深度的抗拔力-位移图  
Fig.5 Anchor pullout load vs. displacement curves for changes in embedment depth

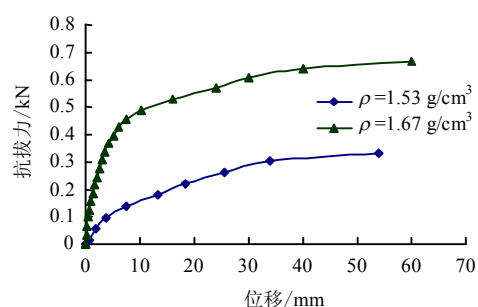


图6 不同土体密度的抗拔力-位移图  
Fig.6 Anchor pullout load vs. displacement curves for different soil densities

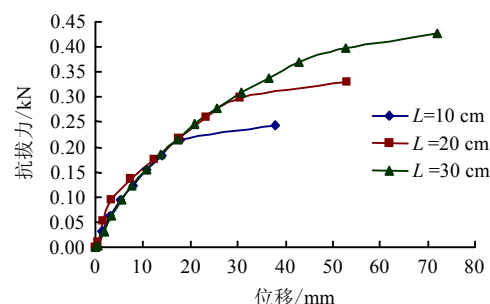


图7 不同橡胶膜长度的抗拔力-位移图  
Fig.7 Anchor pullout load vs. displacement curves for different anchor lengths

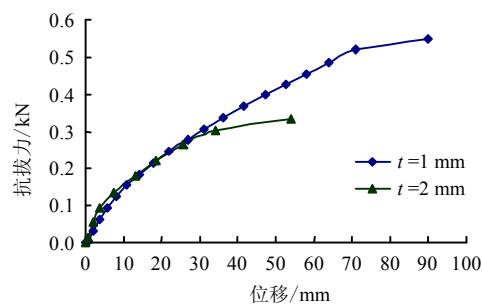


图8 不同橡胶膜厚度的抗拔力-位移图  
Fig.8 Anchor pullout load vs. displacement curves for different membrane thicknesses

### 3.2 影响因素分析

#### 3.2.1 充气压力的影响

在试验基准值基础上, 充气压力分别取 0、50、100 kPa 进行拉拔试验, 根据试验成果表 2 与图 4 可看出以下特点:

(1) 锚杆在未加压时, 其极限荷载较小, 随着充气压力的增大, 极限抗拔承载力逐步增大, 相对应的位移也逐步增大。

(2) 锚杆在未加压时, 锚杆的抗拔力为土体自重应力对橡胶膜产生的摩擦作用力, 在充气压力达到一定值时, 橡胶膜形成了较大的膨胀体, 周边土体受到了挤密作用, 产生了较大的附加应力, 土体与橡胶膜的摩擦作用力增大, 膨胀体扩大头亦产生相应的端阻力, 因而抗拔承载力显著增大。如在 50 kPa 的充气压力下的极限抗拔承载力约是无压情况下的 3 倍, 在 100 kPa 的充气压力下的极限抗拔承载力约是无压情况下的 6 倍, 充气压力对锚杆的极限抗拔承载力影响十分显著。

(3) 锚杆在未加压及压力较小时, 橡胶膜尚未膨胀或膨胀体很小, 土体对橡胶膜的摩擦作用力小, 故锚杆破坏时位移较小; 橡胶膜在充气产生较大膨胀体后, 摩阻力较大, 橡胶膜在拉拔力作用下产生较大的弹塑性变形, 因而在锚破坏前将产生较大的位移。

#### 3.2.2 埋置深度的影响

在试验基准值基础上, 锚杆埋置深度分别取 20、40、60 cm 进行拉拔试验, 根据表 2 与图 5 可看出如下特点:

(1) 当埋深较浅时 ( $H \leq 40$  cm), 在埋深增加 1 倍的条件下, 极限承载力相应的增加幅度约 45%, 对应的位移增加约 42%; 当埋深较深时 ( $H > 40$  cm), 在埋深增加 50% 的条件下, 极限承载力相应的增加幅度约 15%, 位移增幅仅 2%。可见, 随着埋深的增加, 极限抗拔承载力及位移增加, 但增加的幅度变小。

(2) 充气锚杆埋深过浅时, 上覆土压力小, 锚杆因橡胶膜膨胀致使上部土体破坏而失效; 埋深达到一定深度后, 增加埋深仅相当于土体的自重应力增加了, 对提高锚杆的抗拔承载力的作用不显著, 故充气锚杆存在临界埋深。

#### 3.2.3 土体密度的影响

在试验基准值基础上, 分别在松散和密实的砂土中进行拉拔试验, 根据试验成果表 2 与图 6 可看出以下特点:

(1) 在密实的砂土中, 充气锚杆极限抗拔承载

力增加显著, 相应的位移增加较小。

(2) 在密实的砂土内, 充气锚杆在充气膨胀过程中径向围压大, 相对变形小, 抗拔试验初始阶段主要承载力由扩大头端阻力承载, 密实砂土具有一定结构咬合力, 刚度较大, 故位移较小; 在端阻力达到极限状态后, 锚杆橡胶膜的侧向摩擦力发挥作用, 橡胶膜受到拉伸使位移增大。

(3) 图中 2 条曲线从位移增加较快开始, 形态相似, 拉力与位移的增长幅度相近, 说明在密实砂土中与松散砂土中具有相似的力学行为段, 即橡胶膜受摩擦力后拉伸变形段。

#### 3.2.4 橡胶膜长度的影响

在试验基准值基础上, 橡胶膜长度分别取 100、200、300 mm 进行拉拔试验, 根据表 2 与图 7 可看出以下特点:

(1) 随着橡胶膜长度的增长, 极限抗拔承载力增大, 相对应的位移也逐步增大。

(2) 当橡胶膜长度从 10 cm 增至 20 cm 及 30 cm, 即增加了 1 倍与 2 倍时, 极限荷载分别增加了 0.42 倍及 0.86 倍, 最大位移分别增加了 0.897 倍与 1.934 倍, 误差小于 10%, 说明橡胶膜长度与极限承载力及位移呈较好的线性相关性。

(3) 从橡胶膜长度与极限位移的相关性倍数关系可知, 橡胶膜的长度对位移的影响则十分显著。由此可推断, 锚杆的位移主要来自橡胶膜的拉伸弹塑性变形。

#### 3.2.5 橡胶膜厚度的影响

在试验基准值基础上, 橡胶膜厚度分别取一层膜 ( $t=1$  mm)、两层 ( $t=2$  mm) 进行拉拔试验, 根据试验成果表 2 与图 8 可看出以下特点:

(1) 在较薄的橡胶膜厚度条件下, 有较大的极限抗拔承载力, 其实质相当于增大了充气压力。这是因为在相同的充气压力下, 较薄的橡胶膜的自身约束力小, 相应对土体的压力大, 橡胶膜与土体间的摩擦力大, 且橡胶膜膨胀体体积增大, 相应的端阻力也增大, 故极限抗拔承载力增大。

(2) 当橡胶膜厚度从 2 mm 减到 1 mm, 即减小 1/2 时, 最大位移增加了 108%, 即约 1 倍, 橡胶膜的横截面积减小了 1/2, 对应的拉伸长度增加了 1 倍, 由此进一步说明锚杆的变形主要来自橡胶膜的拉伸弹塑性变形。

## 4 极限承载力对比分析

为了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常用的另一种锚

杆进行对比分析。

#### 4.1 试验对比分析

螺旋锚杆在国内外应用广泛，已有很多学者<sup>[10-12]</sup>对其进行了深入的研究。在松散状态砂土中，文献[11-12]试验条件与本文相当，将其成果列于表3。

表3 不同类型锚杆极限抗拔承载力实测值  
Table 3 Ultimate loads for different types of anchors

| 锚杆类型                       | $H$<br>/m | $D$<br>/m | $L$<br>/m | $\gamma_m$<br>/(g/cm <sup>3</sup> ) | $\varphi$<br>/(°) | $Q_u$<br>/kN |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------------------------------|-------------------|--------------|
| 单锚片<br>螺旋锚 <sup>[11]</sup> | 0.4       | 0.050     | 0         | 14.5~14.6                           | 21.4~26.2         | 0.07         |
| 双锚片<br>螺旋锚 <sup>[12]</sup> | 0.4       | 0.050     | 0.20      | 14.877                              | 40.59             | 0.16         |
| 充气锚杆                       | 0.4       | 0.056*    | 0.20      | 14.9~15.1                           | 22.0~26.0         | 0.303        |

注：\*为膨胀等体积圆柱体直径。

从试验结果可以看出，在松散状态砂土中，螺旋锚杆的极限承载力较低，充气锚杆的极限承载力约为单锚片螺旋锚杆的4.3倍，约为双锚片螺旋锚杆的1.9倍。相比螺旋锚杆，充气锚杆的承载能力优势明显。

#### 4.2 理论对比分析

充气锚杆的实质是端头扩大型锚杆。针对扩大头锚杆极限抗拔承载力的估算，刘明振<sup>[13]</sup>、胡建林<sup>[14]</sup>、曾庆义<sup>[15]</sup>等对其极限承载力的主要影响因素进行了详细探讨，部分研究者也借鉴扩大头桩基础的抗拔承载力公式来进行估算，比较典型的有摩擦圆柱法、Meyerhof-Adams法等<sup>[16]</sup>，其共同点即扩大头极限抗拔承载力的主要由扩大头侧表面与土体的摩阻力与扩大头端阻力组成，其通用公式如下：

$$Q_u = Q_s + Q_p \quad (1)$$

$$Q_s = \pi D L q_s \quad (2)$$

$$Q_p = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \beta_c \gamma_m H \quad (3)$$

式中： $Q_u$ 为锚杆极限抗拔承载力； $Q_p$ 为锚杆的扩大头圆柱体端阻力； $Q_s$ 为锚杆扩大头圆柱体侧阻力； $D$ 为扩大头圆柱体直径； $d$ 为锚杆拉杆直径； $L$ 为扩大头长度； $q_s$ 为锚固体与周围岩土体间的黏结强度值，与扩大头周边土体应力、扩大头与土体的摩擦系数等相关； $H$ 、 $\gamma_m$ 分别为锚固段上覆土层厚度与加权平均重度； $\beta_c$ 为扩大头承载力系数，与扩大

头大小、埋深及摩擦角等因素相关<sup>[17]</sup>。

充气锚杆扩大头呈椭圆柱体，根据充水压力与体积关系，按等体积原则，以圆柱体代替椭圆柱体，故其极限抗拔承载力亦可按上述公式进行估算。与其他类型扩大头相比，其差别主要体现在 $q_s$ 值上。一般类型锚杆的扩大头周边土体应力为静止土体应力，充气锚杆的周边土体在压力作用下，其应力从静止土压力不断扩大，最大达到土体的被动土压力。对砂性土而言，当内摩擦角介于20°~40°时，其被动土压力系数 $K_p$ 为2.04~4.60，相当于充气锚杆极限侧阻力是一般锚杆的2~4倍。

## 5 结 论

(1) 增大充气锚杆的充气压力、埋置深度、橡胶膜长度、土体密度等，都可使得其抗拔承载力增加。在诸多影响因素中，最显著的影响因素为充气压力及土体密实度，成一定倍数增长关系；其次是橡胶膜长度，成显著线性增长关系。埋置深度对充气锚杆承载力的提高不显著，而橡胶膜厚度对承载力的影响实质是充气压力的影响。

(2) 充气锚杆的极限位移受橡胶膜的长度、抗拔力大小影响显著，其值的大小主要来自橡胶膜的弹塑性变形，反映了充气锚杆在抗拔过程中橡胶膜的力学行为。

(3) 通过与常用锚杆的对比分析可知，充气锚杆的极限抗拔承载能力约是单锚处螺旋锚的4.3倍，是双锚片螺旋锚的1.9倍，充气锚杆的极限侧阻力约是一般注浆扩大头锚杆的2~4倍。

充气锚杆具有较大的承载潜能，但因研究尚处于初步阶段，仍有待于进一步的试验与理论研究，如进行充气压力与体积变形的研究、承载特性与失效机制的研究以及现场试验研究。

## 参 考 文 献

- [1] 苏自约. 岩土锚固技术的新发展与工程实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [2] 程良奎. 岩土锚固[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [3] 盛宏光, 聂德新, 傅荣华. 可回收式锚索试验研究[J]. 地址灾害与环境保护, 2003, 14(4): 68~72.  
SHENG Hong-guang, NIE De-xin, FU Rong-hua. A test study on removable anchor[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2003, 14(4):

- 68—72.
- [4] 赵海生. 基坑支护可拆型锚杆技术研究及应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1766—1774.
- ZHAO Hai-sheng. Study and application of technique of removable anchor rod to foundation pit engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(11): 1766—1774.
- [5] 孙玉宁, 周鸿超, 宋维宾. 端锚可回收锚杆锚固段力学特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊): 3014—3021.
- SUN Yu-ning, ZHOU Hong-chao, SONG Wei-bin. Research on mechanical character of bonding segment of end-anchored retrievable resin bolt[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.): 3014—3021.
- [6] NEWSON T A, SMITH F W, BRUNNING P, et al. An experimental study of inflatable offshore anchors[C]//ISOPE 2003 Conference. Hawaii: [s. n.], 2003.
- [7] NEWSON T A, SMITH F W, BRUNNING P. An experimental study of inflatable offshore anchors in soft clays[C]//ICOPE2003, BGA Conference on Foundations, Dundee: [s. n.], 2003.
- [8] NEWSON T, HINCHBERGER S, LIANG Y. A numerical study of an inflatable anchor system[C]//The 60th Canadian Geotechnical Conference and 8th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference. Ottawa: [s. n.], 2007.
- [9] 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.
- [10] GHALY A, HANNA A, RANJIAN G, et al. Uplift behavior of screw anchors in sand[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1991, 117(5): 773—793.
- [11] 郭方胜. 螺旋锚垂直抗拔承载力室内试验研究[J]. 武汉冶金科技大学学报, 1997, 20(2): 223—229.
- GUO Fang-sheng. Experimental studies on anti-uplift capacity of single-screw Anchors[J]. **Journal of Wuhan Yejin University of Science and Technology**, 1997, 20(2): 223—229.
- [12] 王杰, 孙海峰, 杜秋男, 等. 双锚片螺旋锚极限抗拔承载力研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2008, 24(1): 54—57.
- WANG Jie, SUN Hai-feng, DU Qiu-nan, et al. Regression study on the ultimate uplift bearing capacity of double-blade screw anchor[J]. **Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)**, 2008, 24(1): 54—57.
- [13] 刘明振. 扩底土锚抗拔承载机制的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报, 1996, 28(2): 186—190.
- LIU Ming-zhen. Experimental study on mechanism of pull-out resistance of belled tieback[J]. **Journal of Xi'an University of Architecture and Technology**, 1996, 28(2): 186—190.
- [14] 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 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.
- [15] 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.
- [16] 刘祖德. 抗拔桩基础[C]//桩基工程技术. 北京: 中国建材工业出版社, 1996.
- [17] MITSCH M P, CLEMENCE S P. The uplift capacity of helix anchors in sand[C]//Uplift Behavior of Anchor Foundations in Soil. New York: [s. n.], 1985.