

# 扩体抗拔构件承载力计算方法研究

李永辉<sup>1</sup>,孙利琴<sup>1</sup>,郭院成<sup>1</sup>,周同和<sup>2</sup>

(1. 郑州大学土木工程学院,河南 郑州 450001;2. 郑州大学综合设计研究院有限公司,河南 郑州 450002)

**摘要** 目的 分析扩体抗拔构件破坏模式,并以此建立承载力计算方法,为扩体抗拔构件工程实践提供参考. 方法 通过大比例尺室内模型试验,研究扩体抗拔构件的破坏模式,将扩体抗拔构件分为浅埋和深埋两种形式,分析其拉拔破坏特征. 基于局部指数函数滑裂面假设,利用土体的极限平衡,建立浅埋扩体抗拔构件抗拔承载力的计算方法;根据 Vesic 圆孔扩张理论,建立考虑扩体段顶阻对其侧阻影响的深埋扩体抗拔构件抗拔承载力的计算方法. 结果 用建立的计算方法对室内试验模型及现场试验实例进行抗拔承载力计算,计算结果与实测结果较为一致. 结论 建立的扩体抗拔构件承载力计算方法分为浅埋和深埋两种形式,符合扩体抗拔构件破坏规律,算例计算承载力与实测承载力的基本一致性表明建立的计算方法合理可行,可为扩体抗拔构件工程实践提供参考.

**关键词** 扩体抗拔构件;浅埋;深埋;抗拔承载力

中图分类号 TU470.3 文献标志码 A

## Study on Calculation Methods of Bearing Capacity of Expanded Anti Pull-out Members

LI Yonghui<sup>1</sup>, SUN Liqin<sup>1</sup>, GUO Yuancheng<sup>1</sup>, ZHOU Tonghe<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, China, 450001; 2. Zhengzhou University Comprehensive Design and Research Institute Co. Ltd., Zhengzhou, China, 450002)

**Abstract:** To analyze the failure mode of the expanded anti pull-out members, and then establish the calculation method of bearing capacity, a series of large-scale model tests were carried out. The expanded anti pull-out members were divided into two types; shallow-buried ones and deep-buried ones; and the failure characteristics were respectively analyzed. Based on the assumption of local exponential function for the slip surface and the limit equilibrium of soil, a method for calculating the anti pull-out capacity of shallow-buried expanded members was established; The Vesic's expansion of cavities in infinite soil mass theory was used to establish the calculation method for the anti pull-out capacity of deep-buried expanded members, which considers the influence of the

收稿日期:2019-11-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51508522);河南省产学研合作计划项目(162107000021)

作者简介:李永辉(1983—),男,博士,主要从事地基基础、深基坑工程等方面研究.

top resistance of expanded segment on its side resistance. The bearing capacities of the test models and a field example were calculated with the established methods, and the calculated results were almost consistent with the measured ones, indicating that the established methods are reasonable and feasible and could provide references for the engineering practice of expanded anti pull-out members.

**Key words:** expanded anti pull-out members; shallow-buried; deep-buried; the anti pull-out bearing capacity

近年来地下空间开发利用进入快速发展阶段,当地下水位较高时,地下工程的抗浮措施一般有压载法、抗浮构件法、降排截水法等.扩体抗拔构件作为一种特殊的抗浮构件,以抗拔力高、位移小、质量稳定等优点<sup>[1-3]</sup>,在工程中得到越来越广泛的应用.研究扩体抗拔构件受力特性和破坏模式,进而确定扩体抗拔构件的极限承载力,是进行抗浮设计的关键,国内外学者针对此问题做了大量试验研究.H. Park 等<sup>[4-7]</sup>分别通过数值模拟研究了扩体抗拔构件的承载特性及影响抗拔特性的影响因素.Guo Gang 等<sup>[8-11]</sup>通过模型试验研究了扩体抗拔构件的承载特征、破坏形态及破坏机制.赵鹤飞<sup>[12]</sup>通过大比例尺室内模型试验,研究了扩体抗拔构件承载变形性状、扩体段顶阻力和侧摩阻力发挥规律及破坏特征,并基于试验结果指出扩体段顶阻对其侧摩阻力的发挥具有一定的影响.文献[13-15]给出了相应扩体抗拔构件极限承载力的计算方法;曾庆义<sup>[16]</sup>提出了考虑侧压力系数及端压力影响因素的扩体抗拔构件承载力计算方法;陈帅等<sup>[17]</sup>基于工程实际提出了抗浮锚杆极限承载力计算公式;李粮纲等<sup>[18]</sup>采用 Boussinesq 解推导了扩体抗拔构件极限拉拔力计算公式;P. Perazzelli<sup>[19]</sup>运用极限分析的上限定理估算扩体锚杆的极限抗拔力.

已有文献研究表明,扩体抗拔构件扩体段顶阻对其侧摩阻力的发挥具有一定的影响,而上述计算方法中主要由非扩体段侧摩阻力、扩体段侧摩阻力和扩体段端承力三部分组成,均未从计算理论上体现扩体段顶阻对侧阻的影响.因此,笔者通过扩体抗拔构件

室内模型试验,分析扩体抗拔构件拉拔破坏模式.根据试验构件拉拔破坏现象和规律,将其分为浅埋和深埋两种类型.对于浅埋扩体抗拔构件,假设其破坏滑移面为部分指数函数形式,通过极限平衡,建立其极限抗拔承载力计算方法;对于深埋扩体抗拔构件,运用 Vesic 圆孔扩张理论,建立考虑扩体段顶阻对其侧阻影响的极限抗拔承载力计算方法.通过室内试验模型、现场试验实例的计算与结果分析,验证所建立计算方法的合理可行性,以为扩体抗拔构件的工程设计提供依据.

## 1 扩体抗拔构件破坏模式

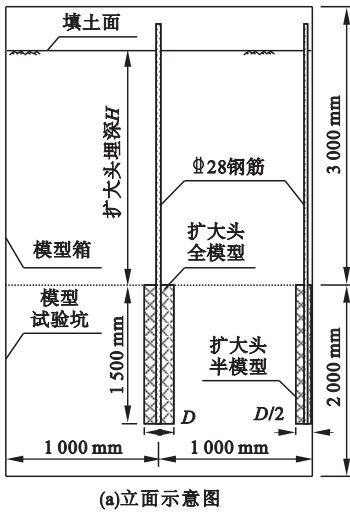
### 1.1 模型试验概况

本次模型试验平台主要由模型箱、模型试验坑、反力架及加载系统等组成.模型箱长×宽×高为 2 m×2 m×3 m,其中一侧面设置为高强钢化玻璃面.扩体抗拔构件室内模型试验概况如表 1 所示.试验模型几何缩尺比例为 1:3,采用预制方式制作,扩体段由 C40 混凝土浇筑养护而成,扩体段之上为一根直径 28 mm 的 HRB400 钢筋,且沿扩体段形心通长进入扩体段内并构成扩体段主筋(见图 1).模型试验地基土为较纯净的粉砂,试验地基土制备采用分层填筑人工夯土的方法,即每层铺填 10 cm,夯至 7 cm,以保证填土质量.此外,地基土制备过程中及拉拔试验开始前,均进行浸水,使地基土处于饱和状态.在地基土制备过程中,取环刀样进行土工试验,获得地基土物理力学指标,如表 2 所示.

表1 扩体抗拔构件模型参数

Table 1 Parameters for the models of the expanded anti pull-out members

| 试验内容  | 编号        | 扩体段长度 $L/m$ | 扩体段直径 $D/mm$ | 扩体段埋深 $H/m$ |
|-------|-----------|-------------|--------------|-------------|
| 全模型试验 | Q-200-1.5 | 1.5         | 200          | 1.5         |
|       | Q-200-2.0 | 1.5         | 200          | 2.0         |
|       | Q-200-2.5 | 1.5         | 200          | 2.5         |
|       | Q-300-2.0 | 1.5         | 300          | 2.0         |
| 半模型试验 | B-200-1.5 | 1.5         | 200          | 1.5         |
|       | B-200-2.5 | 1.5         | 200          | 2.5         |
| 无顶阻试验 | W-200-2.0 | 1.5         | 200          | 2.0         |



(a)立面示意图

(b)实景

图1 扩体抗拔构件模型

Fig. 1 The model of the expanded anti pull-out members

表2 地基土物理力学指标

Table 2 Physical and mechanical indexes of the ground soil

| 土粒相对密度<br>$G_s$ | 密度<br>$\rho/(g \cdot cm^{-3})$ | 压缩系数<br>$a_{0.1-0.2}/MPa^{-1}$ | 压缩模量<br>$E_s/MPa$ | 黏聚力<br>$c/kPa$ | 内摩擦角<br>$\varphi/(\circ)$ |
|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------|----------------|---------------------------|
| 2.69            | 2.0                            | 0.16                           | 10.24             | 2              | 33                        |

试验过程除量测构件拉拔受力及变形外,在钢化玻璃面附近扩体段上覆土层中设置白色细砂薄铺层,在扩体抗拔构件半模型拉拔试验过程中,观测白细砂层的位移变化,分析扩体段上覆土体位移场变化,并结合试验结果及文献定性推断扩体抗拔构件破坏模式.白色细砂薄铺层的设置如图2所示.

经过扩体抗拔构件定位、填土、测量元件设置等工序,静置一周后进行拉拔试验.试验

采用电液伺服控制系统进行加载,采用位移加载方式,拉拔位移达100 mm;前十级每级拉拔位移为3 mm,此后十级每级拉拔位移为5 mm,最后两级均为10 mm;每级位移加载后,待拉拔力稳定后方进行下一级拉拔位移施加.

## 1.2 扩体段上覆土体位移及破坏模式

扩体抗拔构件拉拔过程,通过对地基土表面裂缝发展变化进行观测,探讨扩体段上

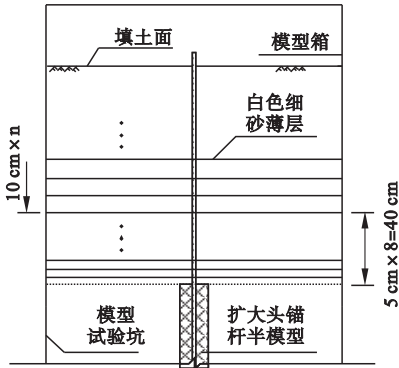


图2 钢化玻璃侧白色细砂薄铺层设置示意图

Fig.2 The layout diagram of white fine sand thin layers at the toughened glass side

覆土体破坏特征. Q-200-2.5 组模型试验拉拔位移较小(最大仅为 27 mm),其试验过程地基土顶面无裂缝出现;Q-200-2.0 组模型

试验在拉拔位移达到 100 mm 时,地基土顶面未出现裂缝;Q-200-1.5 组模型试验在拉拔位移为 55 mm 时,地基土表面出现三条互成约 120° 的微裂缝,随拉拔位移增加,裂缝逐渐增大,当拉拔位移达到 80 mm 时裂纹长度达到 500 mm 左右,继续施加拉拔位移,裂缝长度不再扩展,其地基土表面最终裂缝形态如图 3(a) 所示. Q-300-2.0 组模型试验在拉拔位移为 50 mm 时,地基土表面亦出现三条互成约 120° 的微裂缝,拉拔位移达到 65 mm 时,裂缝长度增长至 500 mm 左右,继续施加拉拔位移至 90 mm 时,裂纹长度达到 700 mm 左右,之后裂缝长度不再扩展,地基土表面最终裂缝形态如图 3(b) 所示.

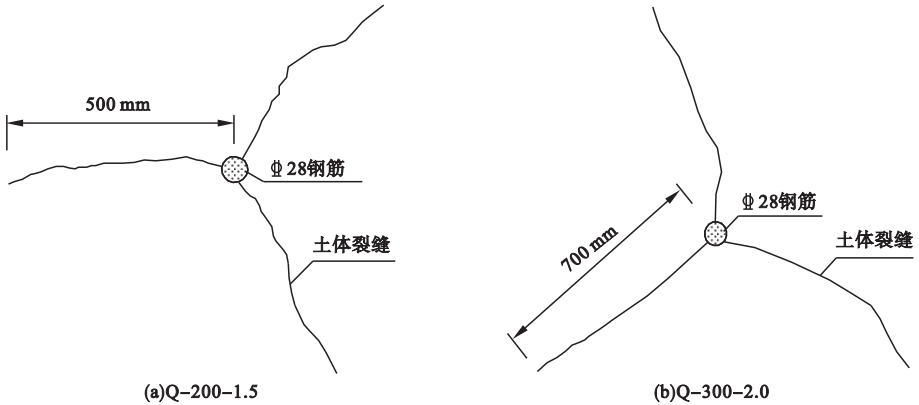


图3 扩体抗拔构件模型试验地基土表面裂缝形态

Fig.3 Cracks at the surface of the foundation soil in the model tests of the expanded anti pull-out members

扩体抗拔构件深径比(扩体段埋深  $H$  与扩体段直径  $D$  的比值)越小,地基土表面越易产生裂缝.若以土体破坏面是否延伸至地面来判定扩体抗拔构件为浅埋或是深埋,则扩体段埋深 2.0 m、直径 200 mm 的构件为深埋形式,其深径比为 10;扩体段埋深 1.5 m、直径 200 mm 及埋深 2.0 m、直径 300 mm 的构件为浅埋形式,其深径比分别为 7.5 和 6.7.此外,对于浅埋扩体抗拔构件,根据地基土表面裂缝扩展长度,可知其破坏面延伸至地面的范围约为  $5D$ .

根据两组扩体抗拔构件半模型试验在钢

化玻璃侧观测到的白色细砂薄铺层相对于其初始位置的位变情况,绘制扩体段上覆土体竖向位移场范围的变化示意图(见图4).由图可知,扩体段埋深不同,其上覆土层竖向位移场范围的扩展形态存在较为明显的差异.相同拉拔位移下,扩体段埋深较大时,其上覆土体产生竖向位移的范围在竖直方向略大,但在水平方向稍小,且对于扩体段顶面处竖向位移场范围外包络线的切线与水平面夹角,扩体段埋深较大时,其值稍大.分析原因,扩体段顶阻随扩体段埋深增加而增大,扩体段对上覆土体的作用增强,使得扩体段上覆

土体产生竖向位移的土体范围扩大,但随着上覆土层厚度增大,土体自重应力及约束作用增大,使得扩体段对土体的挤压作用引起

周围土体产生向上位移的效应消弱,这导致竖向位移场范围水平方向有所减小.

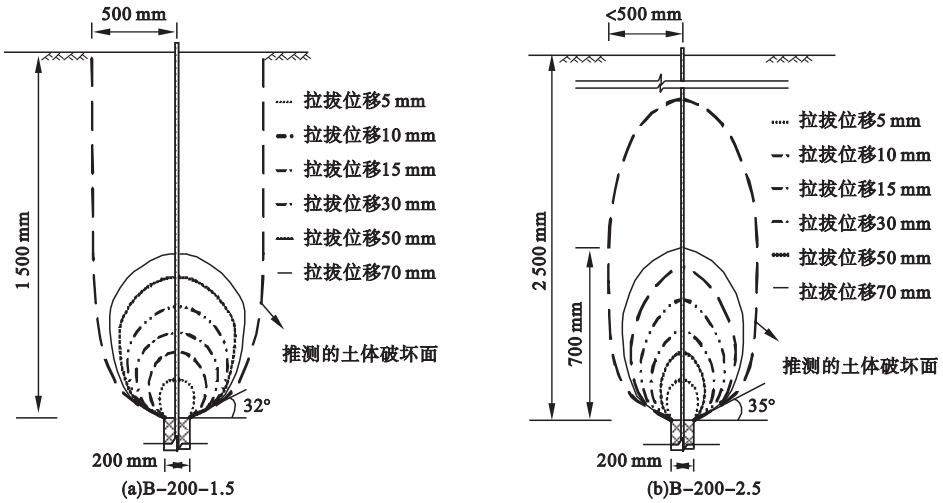


图4 半模型试验中上覆土体竖向位移场变化示意图

Fig. 4 Development diagrams of the vertical displacement of the overlying soil in the half model test

基于前述,笔者对扩体段上覆土体破坏面进行推测.扩体段直径 200 mm、埋深 1.5 m 的构件(深径比 7.5)为浅埋形式,其扩体段上覆土体破裂面延伸至地面,并在地表形成宽度 500 mm 的裂缝;相同扩体段尺寸的构件,当埋深为 2.5 m 时(深径比为 12.5)为深埋形式,其扩体段上覆土体破坏面水平向宽度小于相应的浅埋扩体抗拔构件,且破裂面在地基土内闭合,呈现为“椭球形”.

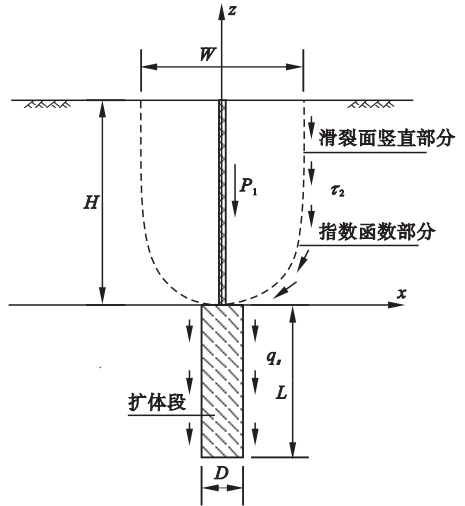


图5 浅埋扩体抗拔构件受力及扩体段上覆土体滑动破裂面示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the force of the shallow-buried member and the sliding surface of the overlying soil

## 2 扩体抗拔构件承载力计算方法建立

### 2.1 浅埋扩体抗拔构件

假设浅埋扩体抗拔构件扩体段上覆土体破坏面下部分为指数函数形式,上部分为竖直形式(见图5),根据极限平衡,扩体抗拔构件(扩体段)的承载力主要是由土体自重、破坏面土体抗剪强度、锚杆自重以及扩体段侧摩阻力四部分构成,由于锚杆自重较小,可忽略不计.

假定扩体段顶面上覆土体滑裂面指数部分函数关系式为

$$z = e^{\alpha x} + b. \tag{1}$$

由边界条件  $x = D/2, z = 0$ , 可得:

$$b = -e^{\alpha D/2}. \tag{2}$$

因此:

$$z = e^{\alpha x} - e^{\alpha D/2}. \tag{3}$$

式中: $D$ 为扩体段截面直径,m; $\alpha$ 为表征破裂面形状的参数。

(1)上覆土体自重

滑裂面内土体自重包括两部分:

$$P_{11} = \int dP_{11} = \int_{0.5D}^{0.5W} \alpha \pi \gamma x^2 e^{\alpha x} dx \quad (4)$$

$$P_{12} = \pi (0.5W)^2 (H - e^{0.5\alpha W} + e^{0.5\alpha D}) \gamma \quad (5)$$

$$P_1 = P_{11} + P_{12} \quad (6)$$

式中: $P_1$ 为上覆土体的自重,kN; $P_{11}$ 为指数函数滑裂面部分对应的土体自重,kN; $P_{12}$ 为竖直滑裂面部分对应的土体自重,kN; $H$ 为扩体段顶面埋深,m; $\gamma$ 为扩体段上覆土层的重度,kN/m<sup>3</sup>; $W$ 为地基土表面裂缝范围宽度。

(2)滑裂面剪切力

由摩尔-库仑强度准则得:

$$P_{21} = \int dP_{21} = \int_{0.5D}^{0.5W} A x e^{\alpha x} dx - B x e^{2\alpha x} dx \quad (7)$$

$$P_{22} = \int dP_{22} = \int_{e^{0.5\alpha W} - e^{0.5\alpha D}}^H \pi W [K_0 \gamma (H - z) \tan \varphi + c] dz \quad (8)$$

$$P_2 = P_{21} + P_{22} \quad (9)$$

其中: $A = 2\pi\alpha K_0 \gamma \tan \varphi H + 2\pi\alpha c + 2\pi\alpha K_0 \gamma \tan \varphi e^{\alpha D/2}$ ; $B = 2\pi\alpha K_0 \gamma \tan \varphi$ 。

式中: $\tau_2$ 为滑裂面剪切应力,kN/m<sup>2</sup>; $P_2$ 为扩体段顶面上覆土层滑裂面抗剪切力的竖向分量,kN; $P_{21}$ 为下部指数函数滑裂面部分对应的抗剪切力,kN; $P_{22}$ 为竖直部分对应的抗剪切力,kN; $c$ 为地基土的黏聚力,kPa; $\varphi$ 为土的内摩擦角,(°); $K_0$ 为土体静止压力系数,在黏性土中, $K_0 = 0.95 - \sin \varphi$ ;在砂土中, $K_0 = 1.0 - \sin \varphi$  [20]。

(3)扩体段侧摩阻力

由土与结构物之间摩擦应力与正应力的关系可知:

$$P_3 = \int dP_3 = \int_{-L}^0 [K_0 \gamma (H - z) f + c] \pi D dz \quad (10)$$

式中: $P_3$ 为扩体段侧摩阻力,kN; $q_s$ 为单位

面积上的侧摩阻力,kN/m<sup>2</sup>; $L$ 为扩体段长度,m; $f$ 为扩体段与土体的摩擦系数, $f = \tan \delta$ , $\delta$ 为扩体段与土体界面摩擦角,(°)。

因此,浅埋扩体抗拔构件的极限承载力  $P$  的计算公式为

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \quad (11)$$

2.2 深埋扩体抗拔构件

对于深埋扩体抗拔构件,采用 Vesic 圆孔扩张理论计算扩体段顶部端承力及因扩体段顶面受力对其周围土体产生的反压力,并将反压力作为附加荷载,确定反压力对扩体段侧面法向应力的增强作用,进而考虑扩体抗拔构件端承力对其侧摩阻力的影响(见图6)。

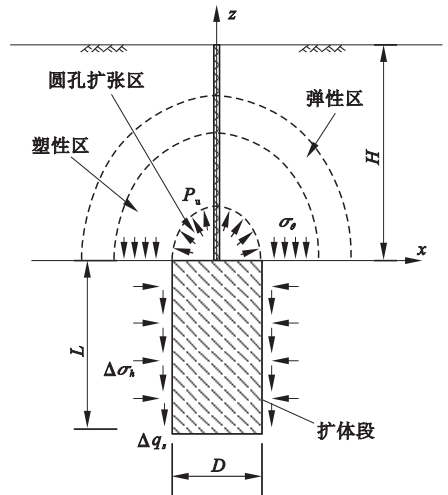


图6 深埋扩体抗拔构件受力示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the force of the deep-buried expanded anti pull-out member

根据圆孔扩张假定及理论 [21],其基本表达式如下:

$$p_u = \frac{3(1 + \sin \varphi)}{3 - \sin \varphi} (p_0 + c \cdot \cot \varphi) \left( \frac{R_p}{R_u} \right)^{\frac{4 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} - c \cdot \cot \varphi \quad (12)$$

$$R_u = \frac{D}{2} \quad (13)$$

$$p_0 = \gamma H \quad (14)$$

式中: $p_u$ 为圆孔内部极限扩张压力,kPa; $R_u$ 为圆孔半径,m; $D$ 为扩体段截面直径,m; $R_p$ 为塑性区半径,m; $p_0$ 为初始应力,kPa; $H$ 为

扩体段顶部埋深,  $m$ ;  $\gamma$  为扩体段上覆土层的重度,  $\text{kN/m}^3$ ;  $\varphi$  为内摩擦角, ( $^\circ$ );  $c$  为黏聚力,  $\text{kPa}$ .

圆孔扩张形成的塑性区内:

$$\sigma_r = \frac{3(1 + \sin\varphi)}{3 - \sin\varphi} (p_0 + c \cdot \cot\varphi) \left( \frac{R_p}{r} \right)^{\frac{4\sin\varphi}{1 + \sin\varphi}} - c \cdot \cot\varphi. \quad (15)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_r \frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} - \frac{2c \cos\varphi}{1 + \sin\varphi}. \quad (16)$$

$$\varepsilon_{\theta R} = \frac{\sin\varphi}{G(3 - \sin\varphi)} (p_0 + c \cot\varphi). \quad (17)$$

式中:  $\sigma_r$  为塑性区内径向应力,  $\text{kPa}$ ;  $\sigma_\theta$  为塑性区内环向应力,  $\text{kPa}$ ;  $r$  为以圆孔圆心为原点的径向变量,  $m$ ;  $\varepsilon_{\theta R}$  为环向应变;  $G$  为土体的剪切模量,  $\text{kPa}$ ,  $G = E/2(1 + \mu)$ , 其中  $E$  为土体的弹性模量,  $\text{kPa}$ ;  $\mu$  为泊松比.

塑性区半径可由式(18)确定:

$$R_p = \sqrt[3]{I_{rr} R_u}. \quad (18)$$

式中:  $I_{rr}$  为修正的刚度指标, 其可由式(19)迭代求解:

$$I_{rr} = \frac{1 - 3\varepsilon_{\theta R} (I_{rr} - A I_{rr}^{\frac{1-\beta}{3}} - B I_{rr}^{\frac{1+\alpha}{3}} - F)}{m}. \quad (19)$$

其中,

$$A = \frac{T}{1 + \alpha}; B = -\frac{Z}{1 - \beta}. \quad (20)$$

$$F = 1 - A - B. \quad (21)$$

$$m = \varepsilon_{\theta R}^3 - 3\varepsilon_{\theta R}^2 + 3\varepsilon_{\theta R}. \quad (22)$$

$$\alpha = \frac{2}{M}; \beta = 1 - \frac{2(N-1)}{N}. \quad (23)$$

$$Z = \frac{6x}{\alpha + \beta}. \quad (24)$$

$$T = Z + 3. \quad (25)$$

$$M = \frac{1 + \sin\psi}{1 - \sin\psi}. \quad (26)$$

$$N = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}. \quad (27)$$

$$x = \frac{2(1 - \mu) - 2\mu(M + N) + MN}{(1 + \mu)MN}. \quad (28)$$

式中:  $\psi$  为土体的剪胀角, ( $^\circ$ ).

(1) 扩体段顶部端承力

扩体段顶部端承力为小孔内部均布压力  $p_u$  在竖直方向上的合力, 即:

$$P_1 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2\pi R_u \cos\theta R_u p_u \sin\theta d\theta = \pi R_u^2 p_u. \quad (29)$$

式中:  $P_1$  为扩体段顶部端承力,  $\text{kN}$ .

(2) 扩体段侧摩阻力

由土与结构物之间摩擦应力与正应力的关系可知:

$$P_2 = \int dP_2 = \int_{-L}^0 \pi D [K_0 \gamma (H - z) f + c] dz. \quad (30)$$

式中:  $P_2$  为扩体段侧摩阻力,  $\text{kN}$ ;  $L$  为扩体段长度,  $m$ ;  $K_0$  为静止土压力系数;  $f$  为扩体段侧面与土体摩擦系数,  $f = \tan\delta$ ,  $\delta$  为扩体段与土体截面摩擦角, ( $^\circ$ );  $c$  为地基土的黏聚力,  $\text{kPa}$ .

(3) 扩体段顶阻对其侧阻增强作用

采用 Vesic 圆孔扩张理论, 可得其塑性区环向应力  $\sigma_\theta$  (弹性区内部土体的环向应力  $\sigma_{e\theta}$  为负值, 由于土体不受拉, 不考虑该区域对计算结果的影响), 将  $\sigma_\theta$  的均值作为反压力作用于扩体段顶部周围土体表面, 计算该反压力在扩体段侧面产生的法向力的增量, 以此计算扩体段顶阻对其侧阻增强作用.

$$\bar{\sigma}_\theta = \frac{\int_{R_u}^{R_p} \sigma_\theta dr}{R_p - R_u}. \quad (31)$$

式中:  $\bar{\sigma}_\theta$  为  $\sigma_\theta$  的均值.

扩体段侧面总的水平侧压力增量为

$$F_h = K_0 \bar{\sigma}_\theta \pi D L_1. \quad (32)$$

式中:  $L_1 = \min(R_p - R_u, L)$ .

扩体段顶阻对其侧阻的增强作用量  $P_3$  为

$$P_3 = F_h f. \quad (33)$$

深埋扩体抗拔构件极限承载力公式为

$$P = P_1 + P_2 + P_3. \quad (34)$$

### 3 算例计算与验证分析

#### 3.1 室内试验模型计算与分析

对于扩体抗拔构件 Q-200-1.5 及扩体

抗拔构件 Q-300-2.0 的模型,其深径比分别为 7.5 和 6.7,为浅埋扩体抗拔构件. 采用文中浅埋扩体抗拔构件计算方法对两组模型极限承载力进行计算,计算时土体物理力学指标取值如表 2 所示. 其他计算参数:扩体段与土体截面摩擦角  $\delta = 22^\circ$ , 破裂面的

形状参数  $\alpha = 0.58$ ,地基土表面破坏范围直径  $W = 5D$ . 计算结果与试验结果对比见表 3. 由表可知,采用笔者建立的浅埋扩体抗拔构件计算方法,计算的极限承载力与模型试验结果较为接近,表明该方法具有合理性和可行性.

表 3 浅埋扩体抗拔构件承载力计算值与试验值汇总与对比

Table 3 Comparison of the calculated bearing capacities and the test ones of the shallow-buried models

| 锚杆类型      | $P_1/\text{kN}$ | $P_2/\text{kN}$ | $P_3/\text{kN}$ | 计算值 $P/\text{kN}$ | 试验值/ $\text{kN}$ | 计算值/试验值 |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|------------------|---------|
| Q-200-1.5 | 21.06           | 26.86           | 9.68            | 57.6              | 48.95            | 1.18    |
| Q-300-2.0 | 61.70           | 64.12           | 17.12           | 142.94            | 126.8            | 1.13    |

对于扩体抗拔构件 Q-200-2.0 及扩体抗拔构件 Q-200-2.5 的模型,其深径比分别为 10 和 12.5,为深埋扩体抗拔构件. 采用文中深埋扩体抗拔构件计算方法对两组模型极限承载力进行计算,计算时土体物理力学指标取值如表 2 所示. 其他计算参数:土体的弹性模量  $E = 10E_s = 102.4 \text{ MPa}$ ,泊松比  $\mu = 0.3$ ,土体的剪胀角  $\psi = \varphi - 30^\circ$ .

侧阻以及顶阻对侧阻的影响值,并与试验结果对比如表 4 所示. 由表可知,采用笔者建立的深埋扩体抗拔构件计算方法,对于构件 Q-200-2.0,计算的极限承载力与模型试验结果较为接近;对于构件 Q-200-2.5,计算值与试验结果有些偏差,分析原因可能是在试验过程中,该锚杆顶部填土夯击较为密实,导致实际压缩模量、扩体段与土体的摩擦系数大于计算采用的值,最终使计算值小于试验值.

求得极限承载力、扩体段顶阻力、扩体段

表 4 深埋扩体抗拔构件承载力计算值与试验值汇总与对比

Table 4 Comparison of the calculated bearing capacities and the test ones of the deep-buried models

| 锚杆类型      | $P_1/\text{kN}$ | $P_2/\text{kN}$ | $P_3/\text{kN}$ | 计算值 $P/\text{kN}$ | 试验值/ $\text{kN}$ | 计算值/试验值 |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|------------------|---------|
| Q-200-2.0 | 55.64           | 17.21           | 8.43            | 81.28             | 92.73            | 0.88    |
| Q-200-2.5 | 62.09           | 19.98           | 9.26            | 91.33             | 132.6            | 0.69    |

### 3.2 现场实例计算与分析

某现场试验扩体抗拔构件扩体段埋深为 8.5 m,扩体段长度为 4 m,采用双管高压喷射技术进行旋喷施工. 该扩体抗拔构件现场加载位置标高为 -6.9 m,周围土层分布如图 7 所示,土体物理力学指标见表 5. 工程场地地下水类型为孔隙潜水,地下水位埋深 -14.0 m. 现场施工完成后,当混凝土达到规定龄期,按规范采用循环加载方法进行拉拔载荷试验<sup>[22]</sup>.

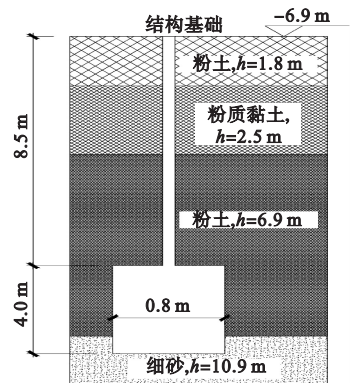


图 7 扩体抗拔构件及土层剖面示意图

Fig. 7 Diagram of the expanded anti-pull-out member and the soil layers



表5 土层物理力学指标

Table 5 Physical and mechanical indexes of the soil layers

| 土层 | 土性   | 状态    | 平均厚度/m | 承载力特征值/kPa | 黏聚力/kPa | 内摩擦角/(°) |
|----|------|-------|--------|------------|---------|----------|
| ②  | 粉土   | 稍密    | 8.2    | 120        | 11      | 20       |
| ③  | 粉质黏土 | 可塑    | 2.5    | 140        | 17      | 11       |
| ④  | 粉土   | 中密~密实 | 6.9    | 160        | 13      | 21       |
| ⑤  | 细砂   | 密实    | 10.9   | 240        | 0       | 30.5     |

该扩体抗拔构件扩体段深径比为10.625,可判断为深埋,采用文中建立的深埋扩体抗拔构件承载力计算方法进行计算.计算顶阻时,圆孔扩张部分为粉土,其弹性模量取为 $E = 3 \times 10^4$  kPa,泊松比 $\mu = 0.25$ ,黏聚力 $c = 13$  kPa,内摩擦角 $\varphi = 21^\circ$ ,土的重力密

度 $\gamma = 18$  kN/m<sup>3</sup>;计算侧阻时,扩体段在粉土中长度为2.7 m,扩体段与粉土截面摩擦角 $\delta = 14^\circ$ ,在细砂中长度为1.3 m,与细砂截面摩擦角 $\delta = 20.3^\circ$ .计算结果与现场实测结果汇总如表6所示.

表6 扩体抗拔构件承载力计算值与现场实测值汇总与对比

Table 6 Comparison of the calculated bearing capacity and the measured one of the field test

| 锚杆类型      | $P_1$ /kN | $P_2$ /kN | $P_3$ /kN | 计算值 $P$ /kN | 试验值/kN | 计算值/试验值 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|--------|---------|
| Q-800-8.5 | 486.33    | 311.67    | 78.83     | 876.83      | 840    | 1.04    |

由表6可知,该扩体抗拔构件极限承载力计算值与现场实测结果较为接近,表明笔者建立的扩体抗拔构件计算方法应用于工程实际具有合理可行性.

力、扩体段顶阻对其侧阻增强作用三部分.

## 4 结论

(1)扩体抗拔构件可分为浅埋和深埋两种类型.在拉拔试验中,对于浅埋扩体抗拔构件,上覆土体破坏延伸至地面,并在地面形成三条互成约 $120^\circ$ 微裂缝,且扩体段直径越大,土体破坏范围及地表裂缝宽度越大;深埋扩体抗拔构件土体破裂面水平宽度小于同尺寸浅埋构件,且在上覆地基土内闭合,呈“椭圆形”.

(2)浅埋扩体抗拔构件上覆土体破裂面部分指数函数假定比较合理,浅埋扩体抗拔构件抗拔承载力包括破裂面内土体自重、破坏面土体抗剪强度和扩体段侧摩阻力.

(3)对于深埋扩体抗拔构件,运用圆孔扩张理论考虑顶阻对侧阻的增强作用,其抗拔承载力包括扩体段顶部端承力、扩体段侧摩阻

## 参考文献

- [1] 张世轩.囊式扩体锚杆现场试验分析及承载力计算模式研究[D].郑州:郑州大学,2017. (ZHANG Shixuan. Study on the field test and bearing capacity calculation method of the capsule type of underreamed anchor [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.)
- [2] 程良奎,张培文,王帆.岩土锚固工程的若干力学概念问题[J].岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 668-682. (CHENG Liangkui, ZHANG Peiwen, WANG Fan. Several mechanical concepts for anchored structures in rock and soil [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2015, 34(4): 668-682.)
- [3] ZHU Honghu, MEI Guoxiong, XU Min, et al. Experimental and numerical investigation of uplift behavior of umbrella-shaped ground anchor [J]. Geomechanics and engineering, 2014, 7(2): 165-181.
- [4] PARK H, LEE S R, KIM T H, et al. Numerical modeling of ground borehole expansion induced by application of pulse discharge technology [J]. Computers and geomechanics, 2011, 38: 532-545.
- [5] HSU S T, LIAO H J. Uplift behaviour of cylindrical anchors in sand [J]. Canadian geotechnical journal, 2011, 35(1): 70-80.
- [6] PARK H, LEE S R, KIM N K, et al. A numerical study of the pullout behavior of grout anchors underreamed by pulse discharge

- technology [J]. Computers and geosciences, 2013, 47(1): 78-90.
- [7] ZHANG Rongjun, ZHENG Junjie, LI Peiying, et al. A method for predicting mechanical behaviour of HPJG-anchors -part II: prediction procedure, verifications and parametric studies [J]. Computers and geosciences, 2012, 45: 44-52.
- [8] GUO Gang, LIU Zhong, TANG Aiping, et al. Model test research on bearing mechanism of under reamed ground anchor in sand [J]. Mathematical problems in engineering, 2018, 16: 1-14.
- [9] 郭钢. 扩体锚杆承载特性与破坏模式模型试验与数值模拟研究[D]. 北京: 中冶集团建筑研究总院, 2012.  
(GUO Gang. Model test and numerical simulation research on bearing capacity characteristics and failure modes of underreamed ground anchor [D]. Beijing: Central Research Institute of Building and Construction, MCC Group, 2012.)
- [10] 彭文祥, 张旭, 莫建军, 等. 串囊式充气锚杆在砂土中的模型试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(7): 93-99.  
(PENG Wenxiang, ZHANG Xu, MO Jianjun, et al. Model test study on bladder-type inflatable anchor [J]. Journal of Hu'nan university (natural sciences), 2015, 42(7): 93-99.)
- [11] 郭钢, 刘钟, 李永康, 等. 扩体锚杆拉拔破坏机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1677-1684.  
(GUO Gang, LIU Zhong, LI Yongkang, et al. Model test research on failure mechanism of under reamed ground anchor [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2013, 32(8): 1677-1684.)
- [12] 赵鹤飞. 扩大头锚杆抗拔试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.  
(ZHAO Hefei. Expanded head anchor pull-out test [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.)
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程: JGJ120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
(Ministry of Construction of the PRC. Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations: JGJ120—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高压喷射扩大头锚杆技术规程: JGJ/T 282—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
(Ministry of Construction of the PRC. Technical specification for under reamed anchor by jet grouting: JGJ/T 282—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.)
- [15] The British Standards Institution. Code of practice for grouted anchors: BS8081 [S]. Britain: BSI Standards Limited, 2015.
- [16] 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.)
- [17] 陈帅, 卢廷浩, 马露. 抗浮锚杆的抗拔承载力分析和数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(5): 39-44.  
(CHEN Shuai, LU Tinghao, MA Lu. Uplift bearing capacity analysis and numerical simulation of anti-floating anchor [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2013, 11(5): 39-44.)
- [18] 李粮纲, 易威, 潘攀, 等. 扩大头锚杆最大抗拔力计算公式探讨与分析[J]. 煤炭工程, 2014, 46(1): 102-104.  
(LI Lianggang, YI Wei, PAN Pan, et al. Discussion and analysis of the formula for calculating the maximum pull-out resistance of expanded head bolts [J]. Coal engineering, 2014, 46(1): 102-104.)
- [19] PERAZZELLI P, ANAGNOSTOU G. Uplift resistance of strip anchors in cohesive frictional mediums of limited tensile strength [J]. International journal of geomechanics, 2017, 17(9): 1-14.
- [20] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.  
(LI Guangxin, ZHANG Bingyin, YU Yuzhen. Soil mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2018.)
- [21] 李月健, 陈云敏, 凌道盛. 土体内空穴球形扩张问题的一般解及应用[J]. 土木工程学报, 2002, 35(1): 93-98.  
(LI Yuejian, CHEN Yunmin, LING Daosheng. General solution and Application of spherical expansion problem of holes in soil [J]. China civil engineering journal, 2002, 35(1): 93-98.)
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.  
(Ministry of Construction of the PRC. Technical code for testing of building foundation piles: JGJ 106—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)