

黄土中圆形抗拔锚板基础承载力分析

胡建芳, 李论基, 史 盛, 赵天宇, 杨钦明

(甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 甘肃 兰州 730030)

摘要:在三维状态下运用极限平衡理论,对黄土中圆形抗拔锚板基础在受到垂直于板面荷载作用下的承载力进行理论分析,该理论研究考虑了锚板在上拔过程中板周土体的破裂方程、破裂面上的正应力和剪应力、埋深率等影响因素。理论公式计算结果表明:抗拔锚板承载力系数随着锚板埋深的增加而增大,并且当深度达到一定值时,承载力系数将达到其极限值;当埋深率 $h/D=1\sim 2$ 之间时,上覆土重对承载力系数影响较小;当 $h/D=4$ 时,土体和锚板之间的吸力对承载力系数的影响大于锚板上覆土重;当 $h/D>4$ 时,上覆土重对锚板抗拔承载力起着决定作用。理论计算公式与已有学者的试验结果进行对比表明提出的模型理论计算结果和其他学者的试验结果有良好的一致性,验证了该理论的正确性,为工程中抗拔锚板的设计提供了有价值的参考。

关键词:黄土;圆形抗拔锚板;承载力;破裂面;破裂方程;埋深率

中图分类号:TU473.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)09-0052-05

Analysis of the pullout uplift bearing capacity of circular anchor plates in loess

HU Jianfang, LI Lunji, SHI Sheng, ZHAO Tianyu, YANG Qinming

(Gansu Province Transportation Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Lanzhou Gansu 730030, China)

Abstract: Based on limit equilibrium theory in three-dimension, the pullout uplift bearing capacity of circular anchor plates in loess under the loading which is vertical to the plate surface is studied. The study considers the equation of loess failure around anchor plates, normal stress and shear stress on the failure plane and buried depth rate h/D when the plates are being uplifted. It is found that the pullout uplift bearing capacity increases with the buried depth, and will reach the limit when the buried depth reaches a certain value. When $h/D=1$ to 2, the overlying soil weight puts slight effect on pullout uplift bearing capacity; when $h/D=4$, suction between the soil and the anchor plate contributes more than the overlying soil weight to the results; what is more, in the case of $h/D>4$, the overlying soil weight plays a decisive role in the pullout uplift bearing capacity. The comparison between the theoretical calculation and the test results of other researchers demonstrates that the theoretical results show consistency with the test results; thus verifying the correctness of the theory. It provides a valuable reference for the design of pullout uplift anchor plates.

Key words: loess; pullout uplift circular anchor plate; bearing capacity; failure plane; failure equation; buried depth rate

0 引言

抗拔锚板作为基础的一种形式,广泛应用于输电线路塔等高耸结构及在运行过程中产生上拔荷载作用的构筑物基础。为了施工方便,锚板基础一般设计成圆形或矩形。抗拔锚板承载力的研究一直以来是工程界的重要课题^[1-6]。目前,锚板抗拔承载力的设计大都依据实际工程经验,因此,对抗拔锚板基

础承载力的研究具有重要意义。

抗拔锚板在受到荷载作用下向上移动的过程中,由于锚板与底部的土体存在吸力的作用,使锚板与底面以下的土体不会立即脱离,而是土体和锚板向上一起运动一定距离后再逐渐脱离。由于锚板底面与土体之间的吸力极其复杂,所以通常在研究过程中将锚板和底面土体间的关系分为“立即脱离”和

收稿日期:2020-04-14; **修回日期:**2020-07-11 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2020.09.009

基金项目:甘肃省科技重大专项(编号:1302GKDA009)

作者简介:胡建芳,男,汉族,1977年生,主任工程师,高级工程师,水文地质与工程地质专业,主要从事岩土工程方面的研究工作,甘肃省兰州市城关区雁北路交通科技产业园, h j f 1305@126.com。

引用格式:胡建芳,李论基,史盛,等.黄土中圆形抗拔锚板基础承载力分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(9):52-56.

HU Jianfang, LI Lunji, SHI Sheng, et al. Analysis of the pullout uplift bearing capacity of circular anchor plates in loess[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(9):52-56.

“无脱离”2 种情况。“立即脱离”是指抗拔锚板在拉力作用刚开始时与下部土体迅速分离,而“无脱离”则假设锚板在荷载作用下与土体始终保持接触^[7]。RANJAN G 等^[8]和 MEYERHOF G G 等^[9]用模型试验分析了土的性质及压力、锚板埋深、形状对抗拔承载力的影响。目前国内一些学者^[10-11]在三维状态下基于非线性理论探究了锚板基础的极限抗拔力解析解,并分析了抗拔力的影响因素。赵炼恒等^[12]在理论上分析了锚板基础抗拔力与埋深之间的关系,并提出了锚板基础埋深的临界值。DAS 等^[13-14]和 SHIN 等^[15]运用大比例尺缩放的模型试验研究当锚板在受到荷载时“立即脱离”条件下承载力与锚板埋深的关系。张昕等^[16]研究了砂土中锚板基础的抗拔力,研究表明锚板抗拔力和砂土的内摩擦角密切相关。郝冬雪等^[17]在前人研究的基础上对砂土中锚板基础的抗拔力特性进行了模型试验。茜平等^[18]对浅埋抗拔锚板周围土体的变形破坏特征进行了室内试验,得出锚板在拉力作用下破坏面在板边附近近似垂直,而在地表处为 $45^\circ - \varphi/2$ 。MERIFIELD 等^[19]、ROWE 等^[20]基于弹塑性有限元方法分析了当抗拔锚板基础在垂直于锚板的荷载作用下“立即脱离”时的承载力,并得出一些有益的结论。MARTIN 等^[21]则利用有限元研究了锚板在荷载作用下“无脱离”时的承载力。理论研究中大都得到的是近似解,尚未考虑抗拔锚板基础在破坏时的破裂面方程及其破裂面上的正应力和剪应力的作用。何思明^[22]以原位及室内试验资料为基础,研究了抗拔锚板(包括长方形、圆形以及条形锚板)受竖直荷载作用下的破坏型式,并建议了相应的破裂面方程。

根据以上研究,本文在三维状态下考虑黄土中圆形抗拔锚板基础在受到垂直于锚板的荷载作用下锚板周围土体的破裂方程及破裂面上的正应力和剪应力,对承载力进行了研究。

1 黄土中圆形抗拔锚板基础承载力的分析模型

现有极限分析理论只能确定“无脱离”条件下的抗拔锚板的承载力^[23],抗拔锚板在加载过程中的极限承载力为锚板上覆土体破坏面上的作用力在竖直向的分量与锚板上部破坏面所切割的土体重力之和。土体在破坏过程中破裂面上破坏准则选取 Mohr - Coulomb 准则。BALLA(1961)及 MEYER-

HOF 和 ADAMS(1968)在研究抗拔基础时指出,锚板周围土体的破坏曲线的切线垂直于板边缘,而在地表处则与水平向成 $45^\circ - \varphi/2$ 的夹角,并以此为基础提出了破裂面方程,圆形锚板的破裂面方程为:

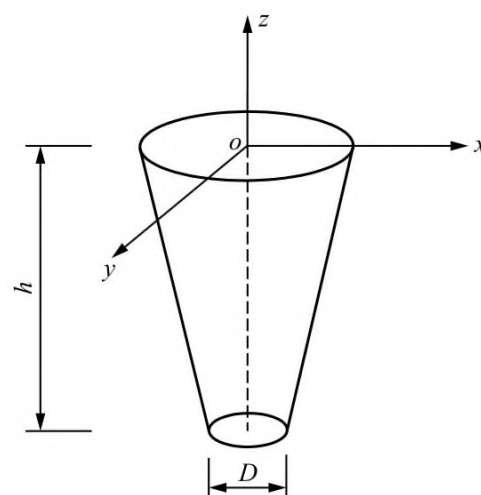
$$x = r + \frac{h}{\tan(45^\circ - \varphi/2)(n+1)} \left(\frac{z}{h}\right)^{n+1} \quad (1)$$

式中: r ——圆形锚板的半径; h ——锚板埋深; φ ——土体的内摩擦角; n ——待定系数。

由于破裂方程的复杂性,本文讨论一种特殊情形,当 $n=0$ 时,破裂方程为:

$$x = r + \frac{z}{\tan(45^\circ - \varphi/2)} \quad (2)$$

根据式(2),破裂面的空间形状如图 1 所示。



注: xoy 为地表面, h 为锚板埋深,倒置圆台侧面为破裂面

图 1 圆形锚板基础破裂面空间形状
Fig.1 Spatial failure shape of the foundation with circular anchor plates

由于抗拔锚板在荷载作用下向上运动,在此过程中锚板上部土体会产生压缩而向侧向运动,而此时土体就会受到侧向的挤压,则破坏面上的剪应力和正应力如图 2 所示。

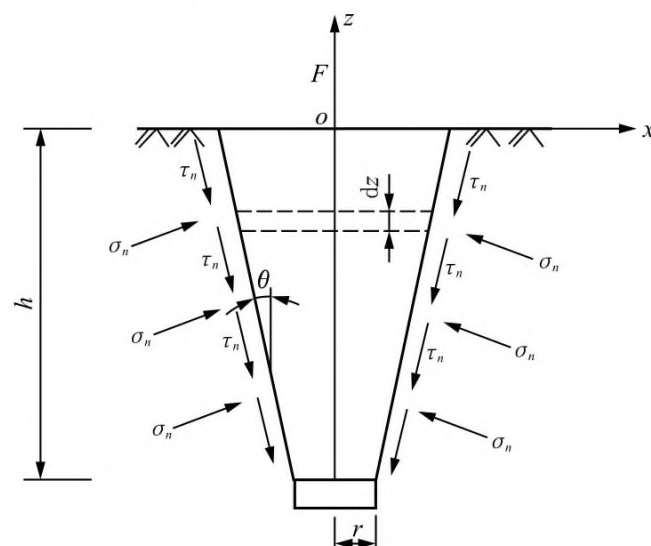


图 2 锚板抗拔的力学模型
Fig.2 Mechanical model for the uplift anchor plates

2 抗拔锚板极限承载力的理论计算公式

黄土中锚板在上拔过程中破裂面上土体的抗剪强度为 $\tau_n = \sigma_n \tan \varphi + c$, 破裂面上的 σ_n 由 2 部分组成, 即土体自重滑动面上的分力加上该处水平侧向压力在滑动面上的分力。极限状态下破裂面上的正应力和剪应力为:

$$\begin{cases} \sigma_n = \gamma z \sin^2 \theta + k_0 \gamma z \cos^2 \theta \\ \tau_n = (\gamma z \sin^2 \theta + k_0 \gamma z \cos^2 \theta) \tan \varphi + c \end{cases} \quad (3)$$

式中: γ ——土体重度; z ——土体所处的埋深; k_0 ——土体侧压力系数; θ ——破裂面与竖直向的夹角; φ ——土体的内摩擦角; c ——土体的粘聚力。

由式(3)确定了破裂面上的正应力和剪应力, 由此便可得出破裂面上正应力和剪应力的合力(见图2), 微元体的高度为 dz , 则破裂面上的微面积为:

$$dA = 2\pi \left[r + \frac{z}{\tan(45^\circ - \varphi/2)} \right] dz \quad (4)$$

根据积分原理, 则

$$\begin{cases} F_n = \int_0^h (\gamma z \sin^2 \theta + k_0 \gamma z \cos^2 \theta) \cdot \\ \quad 2\pi \left[r + \frac{z}{\tan(45^\circ - \varphi/2)} \right] dz \\ F_s = \int_0^h [(\gamma z \sin^2 \theta + k_0 \gamma z \cos^2 \theta) \tan \varphi + c] \cdot \\ \quad 2\pi \left[r + \frac{z}{\tan(45^\circ - \varphi/2)} \right] dz \end{cases} \quad (5)$$

F_n 、 F_s 在竖直方向的分力为 $F_n \sin \theta$ 、 $F_s \cos \theta$ 。锚板上部被破裂面所切割的土重为:

$$W = \int_0^h \gamma \pi \left[r + \frac{z}{\tan(45^\circ - \varphi/2)} \right]^2 dz \quad (6)$$

根据竖直向的极限平衡方程, 则锚板的极限承载力为:

$$\begin{aligned} F &= W + F_s \cos \theta - F_n \sin \theta \\ &= \gamma \pi (r^2 h + r \lambda h^2 + \frac{1}{3} \lambda^2 h^3) + \\ &\quad \pi [2c \gamma h + (\gamma r \sin^2 \theta \tan \varphi + \\ &\quad k_0 \gamma r \cos^2 \theta \tan \varphi + c \lambda) h^2 + \\ &\quad \frac{2}{3} (\gamma \lambda \sin^2 \theta \tan \varphi + k_0 \gamma \lambda \cos^2 \theta \tan \varphi) h^3] \cos \theta - \\ &\quad \gamma \pi [(r \sin^2 \theta + k_0 r \cos^2 \theta) h^2 + \\ &\quad \frac{2}{3} (\lambda \sin^2 \theta + k_0 \lambda \cos^2 \theta) h^3] \sin \theta \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\lambda = 1/\tan(45^\circ - \varphi/2)$ 。

3 理论与试验结果对比分析

定义锚板的抗拔承载力系数为:

$$N_c = F/(AS_u) \quad (8)$$

式中: F ——锚板所承受的极限拉力; A ——锚板的面积; S_u ——土体的不排水抗剪强度。

对于均质粘土, DAS 等^[14]提出锚板的极限承载力为:

$$q = S_u N_{c0} + \gamma h \quad (9)$$

式中: q ——锚板单位面积所能承受的抗拉承载力; γ ——土体重度; h ——锚板的埋深; N_{c0} ——不考虑土重时锚板的抗拔承载力系数, 一般情况 N_{c0} 由小比例尺模型试验来确定。

由于在室内按照小比例尺所做模型试验中锚板所能承受的拉力远大于锚板的上覆土重, 故模型试验所得结果可看成不考虑土重时的抗拔承载力, 另外, 根据 DAS 等^[13-14]的研究, 小比例尺得到的是“立即脱离”条件下锚板的抗拔承载力。根据式(8)、(9)可将试验得到的 N_{c0} 转化成抗拔锚板在荷载作用下立即脱离, 有土重时的抗拔承载力系数。

为了说明本文抗拔锚板承载力理论计算公式的正确性, 收集了 DAS 等^[24], SHIN 等^[15]学者的试验数据, 利用本文提出的锚板无脱离、有土重的理论计算承载力系数和试验结果及由试验结果转化成的锚板立即脱离、有土重的承载力系数三者进行对比分析。

以下通过 2 种工况来验证本文提出理论计算公式的合理性。

工况一: 取锚板直径 $D=3$ m, 厚度 $t=0.15$ m, $S_u=50$ kPa, 泊松比 $\mu=0.49$, $\gamma=14$ kN/m³。图 3 给出了理论计算结果与 DAS^[24]试验结果及由试验结果转化成的锚板立即脱离、有土重的承载力系数三者之间的关系。由图 3 可知, 抗拔锚板承载力系数随着锚板埋深的增加而增大, 并且当深度达到一定值时, 承载力系数的增大幅度明显减小, 与 DAS 试验结果相比, 当埋深率 h/D 在 1~2 之间时承载力系数很接近, 但是当 $h/D \geq 3$ 时相差就变大, 此时试验结果基本保持恒定而理论计算结果继续保持增大。这可能是由于小比例尺模型试验中土重对结果影响很小, 当锚板埋深较小时, 上覆土重对承载力系数影响不大, 随着埋深的增大, 上覆土重对结果有明显的影。与锚板立即脱离、有土重的承载力系数相比, 当 $h/D \leq 2$ 时承载力系数相差不大, 但是随着

埋深的增加两者相差增大,当 $h/D=4$ 时相差最大,之后锚板立即脱离、有土重的承载力系数逐渐接近理论计算值。这是由于在 $h/D=4$ 时,在无脱离情况下锚板下部土体对锚板的吸力大于上覆土重,而当埋深继续增大时,上覆土重对承载力系数的影响大于土体对锚板的吸力,所以二者逐渐逼近。

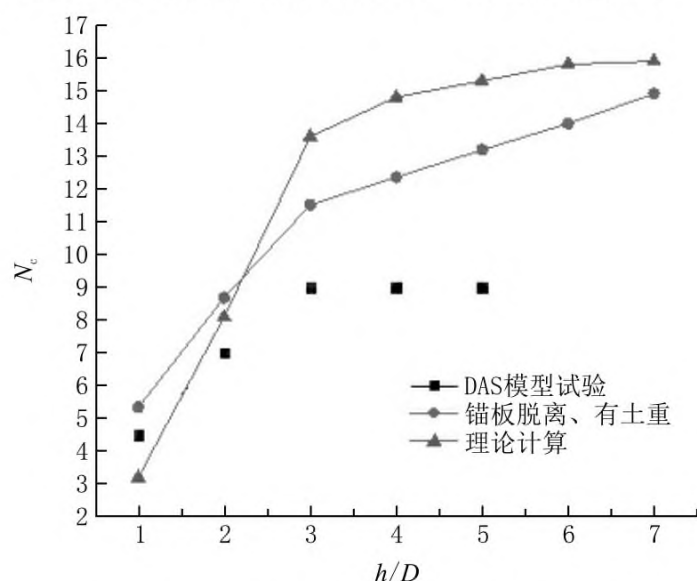


图 3 工况一中理论计算公式与试验结果的对比

Fig.3 Comparison between theoretical and test results in Case 1 condition

工况 2: $D=1\text{ m}$, $t=0.05\text{ m}$, $S_u=40\text{ kPa}$, $\mu=0.49$, $\gamma=17\text{ kN/m}^3$ 。图 4 比较了理论计算结果与 SHIN 等^[15]的模型试验结果及由试验结果转化成的锚板立即脱离、有土重的承载力系数。从图 4 可以看出模型试验中锚板在三者中的承载力系数相差很小。当埋深率 h/D 在 1~2 之间时,三者承载力系数很接近,而当 $h/D \geq 3$ 时三者相差明显增大,到 $h/D=4$ 时模型试验结果基本保持不变,而此时三者相差最大,当埋深继续增大时,则锚板立即脱离、有土重的承载力系数逐渐逼近理论计算结果。这是由于当 $h/D=1\sim 2$ 之间时,上覆土重对结果影响较

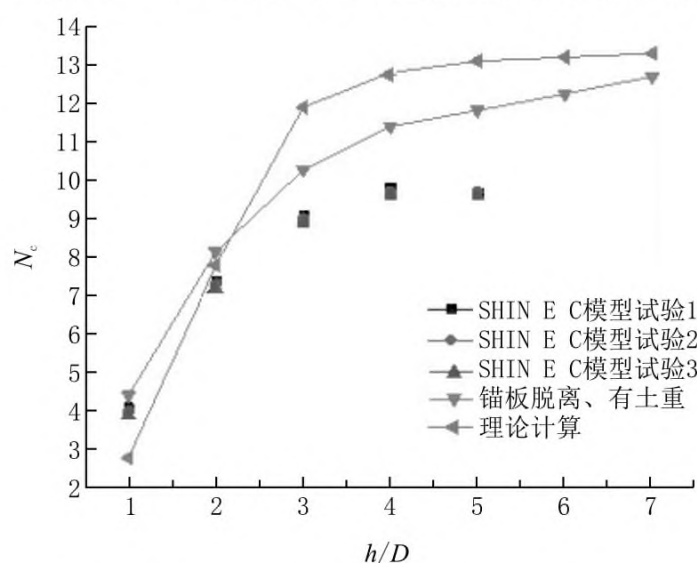


图 4 工况二中理论计算公式与试验结果的对比

Fig.4 Comparison between theoretical and test results in Case 2 condition

小, $h/D=4$ 时锚板下部土体和板之间的吸力对承载力的影响最明显,而当 h/D 继续增大过程中,上覆土重对锚板抗拔承载力起着决定作用。

4 结论

在三维状态下运用极限平衡理论对无脱离、考虑土重条件下抗拔锚板基础在受到垂直于锚板荷载作用下的承载力进行了研究,推导出黄土中圆形抗拔锚板基础承载力理论公式,对类似抗拔锚板的工程设计起参考作用,实际工程设计可将此公式作为验证方法之一与模型试验结果进行对比分析,其对比结果较一致,且得到以下结论:

(1) 抗拔锚板承载力系数随着锚板埋深的增加而增大,并且当深度达到一定值时,承载力系数将达到其极限值。

(2) 当埋深率 $h/D=1\sim 2$ 之间时,上覆土重对承载力系数影响较小,理论研究中无脱离、考虑土重条件下的承载力系数和试验中立即脱离、无土重和立即脱离、有土重结果很接近。

(3) 埋深率 $h/D=4$ 时,无脱离、有土重的理论计算值和立即脱离、有土重的试验转化结果相差很大,这是由于土体和锚板之间的吸力对承载力的影响大于锚板上覆土重。 $h/D>4$ 时,立即脱离、有土重的试验转化结果逐渐逼近无脱离、有土重的理论计算值,这说明覆土重对锚板抗拔承载力起着决定作用。

参考文献 (References):

- [1] 雒亿平,邓晓,言志信.联合板索基础抗拔机理及容许上拔力[J].土木建筑与环境工程,2016,38(5):85-89.
LUO Yiping, DENG Xiao, YAN Zhixin. Anti-tensile mechanism and allowable uplift force of joint plate cable foundation [J]. Journal of Civil Architectural and Environmental Engineering, 2016, 38(5): 85-89.
- [2] 钟宇.对锚板基础抗拔性能的分析[J].建材与装饰,2015(32): 15-16.
ZHONG Yu. Analysis of uplift performance of anchor plate foundation [J]. Construction Materials Decoration, 2015(32): 15-16.
- [3] 吴利玲.饱和粘土中圆形锚板抗拔承载力的研究[D].大连:大连理工大学,2006.
WU Liling. Study on uplift capacity of circular anchor plate in saturated clay [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [4] 雒亿平.黄土地基联合板索基础抗拔机理研究[D].兰州:兰州大学,2017.

- LUO Yiping. Study on uplift mechanism of loess foundation combined with slab cable foundation[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [5] 刘君,于龙,吴利玲,等.饱和黏土中倾斜圆形锚板承载力分析[J].大连理工大学学报,2008,48(2):229-234.
- LIU Jun, YU Long, WU Liling, et al. Pull-out capacity of inclined circular plate anchors in saturated clay[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2008,48(2):229-234.
- [6] 丁佩民,肖志斌,张其林,等.砂土中锚板抗拔承载力研究[J].建筑结构学报,2003,24(5):82-91,97.
- DING Peimin, XIAO Zhibin, ZHANG Qilin, et al. Uplift capacity of anchor plates in sand[J]. Journal of Building Structures, 2003,24(5):82-91,97.
- [7] 韩智臣.吸力锚的有限元数值分析[D].大连:大连理工大学,2013.
- HAN Zhichen. Finite element analysis of suction anchors[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [8] RANJAN G, ARORA V B. Model studies on anchors under horizontal pull in clay[C]//Proceedings of 3rd Australia, New Zealand Conference on Geomechanics. Wellington, 1980:65-70.
- [9] MEYERHOF G G, ADAMS J I. Uplift resistance of inclined anchors and piles[C]//Proceedings of 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Moscow, 1973:167-172.
- [10] 谭亦高,左仕,胡世红.三维圆形浅埋锚板极限抗拔力非线性上限解析[J].铁道科学与工程学报,2017,14(6):1166-1173.
- TAN Yigao, ZUO Shi, HU Shihong. Study on the ultimate pullout capacity of 3-D shallow circle plate anchors[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017,14(6):1166-1173.
- [11] 王洪涛,李术才,王琦,等.非线性破坏准则下水平浅埋条形锚板抗拔承载力的极限分析[J].工程力学,2017,31(2):131-138.
- WANG Hongtao, LI Shucai, WANG Qi, et al. Limit analysis of ultimate pullout capacity of shallow horizontal strip anchor plate based on nonlinear failure criterion[J]. Engineering Mechanics, 2017,31(2):131-138.
- [12] 赵炼恒,罗强,李亮,等.水平浅埋条形锚板极限抗拔力上限计算[J].岩土力学,2010,31(2):516-522.
- ZHAO Lianheng, LUO Qiang, LI Liang, et al. Ultimate pull-out capacity of strip anchor plates with upper bound theorem[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010,31(2):516-522.
- [13] DAS B M. A procedure for estimation of ultimate uplift capacity of foundations in clay[J]. Soils and Foundations, 1980,20(1):77-82.
- [14] DAS B M, SINGH G. Uplift capacity of plate anchors in clay [C]//Proceedings of 4th International Offshore and Polar Engineering Conference. Golden, 1994:436-442.
- [15] SHIN E C, DASS R N, OMAR M T, et al. Mud suction force in the uplift of plate anchor in clay[C]//Proceedings of 4th International Offshore and Polar Engineering Conference. Golden, 1994:462-466.
- [16] 张昕,乐金朝,刘明亮,等.砂土中锚板的抗拔机理与承载力计算模型研究[J].岩土工程学报,2012,34(9):1734-1739.
- ZHANG Xin, YUE Jinchao, LIU Mingliang, et al. Uplifting behavior and bearing capacity of plate anchors in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012,34(9):1734-1739.
- [17] 郝冬雪,陈榕,符胜男.砂土中螺旋锚上拔承载特性模型试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(1):126-132.
- HAO Dongxue, CHEN Rong, FU Shengnan. Experimental study on uplift capacity of multi-helix anchors in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015,37(1):126-132.
- [18] 茜平一,刘祖德,刘一亮.浅埋斜拔锚板板周土体的变形破坏特性[J].岩土工程学报,1992,14(1):62-66.
- QIAN Pingyi, LIU Zude, LIU Yiliang. The failure characteristics of soil around an inclined shallow anchor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992,14(1):62-66.
- [19] MERIFIELD R S, L YAMIN A V, SLOAN S W. Three-dimensional lower bound solutions for stability of plate anchors in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003,129(3):243-253.
- [20] ROWE R K, DAVIS E H. The behaviour of anchor plates in clay[J]. Geotechnique, 1982,32(1):9-23.
- [21] MARTIN C M, RANDOLPH M F. Application of the lower and upper bound theorems of plasticity to collapse of circular foundations[C]//Proceedings of 10th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics. Rotterdam: Balkema A A, 2001:1417-1428.
- [22] 何思明.抗拔锚板基础承载力研究[J].地下空间,2002,22(2):145-148,189.
- HE Siming. Study on bearing capacity of uplift anchor foundation[J]. Underground Space, 2002,22(2):145-148,189.
- [23] 王栋,胡玉霞,宋振河.均质黏土中圆形平板锚的抗拉承载力分析[J].岩土力学,2007,28(6):1242-1246.
- WANG Dong, HU Yuxia, SONG Zhenhe. Analysis of uplift capacity of circular plate anchors in uniform clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007,28(6):1242-1246.
- [24] DAS B M, SHIN E C, DASS R N, et al. Suction force below plate anchors in soft clay[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 1994,12:71-81.

(编辑 周红军)