

串联式双锚定板临界埋深及临界间距研究

刘杰, 汪智, 贺斯顿, 刘学慧

湖南工业大学土木工程学院, 湖南 株洲
Email: 2860557969@qq.com

收稿日期: 2020年11月25日; 录用日期: 2020年12月18日; 发布日期: 2020年12月28日

摘要

在对常规锚定板抗拔能力对比分析之后, 提出了串联锚定板抗拔结构。通过模型试验, 比较了常规单锚板和串联双锚板抗拔结构的抗拔性能。基于FLAC三维有限差分软件的传统单、串联双锚定板抗拔结构与土壤相互作用的数值模型, 同时, 以方形串联式双锚定板结构为例, 探讨了串联式双锚定板结构的埋深及上下锚定板间距对抗拔承载力的影响。研究表明: 1) 传统单锚定板结构的抗拔承载力远低于串联式双锚定板结构。2) 在上下锚定板间距恒定时, 当下锚定板埋深比 H/D (H 为下锚定板埋深, D 为方形锚定板边长)小于某一埋深比, 双锚定板结构的抗拔力系数随埋深比的增大而增大。当下锚定板埋深比 H/D 大于某一埋深比, 双锚定板结构抗拔力系数随埋深比的增大反而降低, 其临界埋深比 H/D 在9~11之间。3) 在下锚定板埋深恒定时, 当上下锚定板间距比 S/D (S 为上下锚定板间距)小于某一间距比, 双锚定板抗拔力系数随间距比的增大而增大。当上下锚定板间距比 S/D 大于某一间距比, 双锚定板抗拔力系数随间距比的增大反而降低, 其上下锚定板临界间距比 S/D 在4~5之间, 同时, 锚定板周围土体破坏模式从“圆柱形破坏模式”转变为“局部独立破坏模式”。

关键词

锚定板, 上拔力-位移关系曲线, 临界埋深, 临界间距

Study on Critical Depth and Critical Spacing of Double Anchor Plates in Series

Jie Liu, Zhi Wang, Sidun He, Xuehui Liu

College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan
Email: 2860557969@qq.com

Received: Nov. 25th, 2020; accepted: Dec. 18th, 2020; published: Dec. 28th, 2020

Abstract

After the comparative analysis of the pullout resistance of the conventional anchoring plate, a series anchoring plate is proposed. The bearing characteristics of traditional single anchored plate and double anchored plate in series were studied by model test. FLAC 3D software differences, a numerical model was established for the interaction between the anchored plate anti-pull structure and soil. At the same time, taking the square double-anchored plate structure as an example, the influence of the buried depth of the double-anchored plate structure and the space between the upper and lower anchored plates on the anti-pull capacity was discussed. Results: 1) The pull load of the conventional single anchor plate structure is much lower than that of the series double anchor plate structure. 2) When the spacing between the upper and lower anchored plates is constant, the buried depth ratio of the current anchored plate H/D (H is the buried depth of the anchored plate and D is the side length of the square anchored plate) is less than a certain buried depth ratio, and the pulling force coefficient of the structure of the twin anchored plate increases with the increase of the buried depth ratio. When the buried depth ratio of the current anchored-plate is greater than a certain buried depth ratio, the tensile strength coefficient of the double-anchored-plate structure decreases with the increase of the buried depth ratio, and its critical buried depth ratio H/D is between 9~11. 3) Anka plate in Desmond, lowering standards down through many anka plate between interval ratio S/D (S is upper and lower anka plate spacing between the ratio) than a certain distance from the childhood compared, two an choring plate the withdrawal and coefficients increase with the growth of interval proportional. When the spacing ratio S/D of the upper and lower anchoring plates is larger than a certain spacing ratio, the pullout coefficient of the two anchoring plates decreases with the increase of the spacing ratio, and the critical spacing ratio S/D of the upper and lower anchoring plates is between 4~5. Meanwhile, the soil failure mode around the anchoring plates changes from "cylinder failure mode" to "independent failure mode".

Keywords

Anchor Plate, Relationship Curve of Uplift Force-Displacement, Critical Buried Depth, Critical Spacing

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于结构简单、造价经济, 锚板结构被广泛应用于岩土工程中, 如输电塔、高耸结构、海上浮式结构、边坡挡土墙等。锚板的抗拔性能和破坏模式从一开始是学者的研究热点问题。国内外许多学者对传统的锚定板(单锚定板)的承载能力影响因素和破坏方式进行了大量的室内模型试验、理论分析以及数值模拟研究。Rowe 及 Davis [1]假定锚定板绝对刚性, 运用二维有限元分析了黏性土中锚定板的抗拔承载力, 研究了影响抗拔承载力的几种因素, 其中包括锚定板采取了不同形状、不同厚度, 对锚定板进行了浅埋和深埋, 以及对上部土不同压实度和锚定板与土之间的紧密程度。Murray 和 Geddes [2] [3]通过大量室内模型试验, 其中包括在密砂中对锚定板采取了条形、圆形和矩形等抗拔承载力的试验, 得出了矩形锚定板抗拔承载力和埋深比的关系呈现正相关, 但是其和长宽比的关系却呈现相反的关系, 最后还发现锚定

板表面越粗糙,其抗拔承载力也越高。Saeedy [4]假设破坏面为对数螺旋线,按照极限平衡理论进行分析,得出了圆形锚定板抗拔承载力与埋深比呈现正相关的关系,但是随着埋深比的不断增加,其抗拔承载力却出现了下降的趋势,最后趋于平稳的现象,通过仔细研究,发现了临界埋深的存在,并经过理论分析和室内试验进行对比,得出了 $H/D-N_{\gamma}$ (N_{γ} 承载力因素)的修正系数。何思明等[5]根据室内模型试验的相关数据以及原位试验数据,基于极限平衡理论,对不同形状的竖直锚定板进行抗拔破坏模式研究,通过给定一个假定破坏面,得出了抗拔承载力-位移相应的关系曲线,并据此,分析了抗拔承载力的极限值。丁佩民等通过承载力的影响因素研究,在模型试验结果的基础上,根据砂土不同的压实程度得出埋深比 H/D 、不同的锚定板形状、差异性砂土的密实情况以及不同拉拔倾角是主要影响因素[6] [7]。余生兵等[8]基于极限分析方法,在对黏性土中锚定板进行了不同埋深的处理,分为了浅埋和深埋两种方式,经过分析其破坏面及其承载力系数,得出了深埋处理下,锚定板的承载力系数是浅埋处理下的 1~2 倍之间,粗糙面的锚定板比起光滑面也具有更大的抗拔承载力。郝冬雪等[9] [10]基于室内模型试验,通过研究锚定板不同形状、不同埋深比和不同锚定板间距对抗拔承载力的影响,得出了在差异性砂土密实度中锚板抗拔承载力的临界埋深比和临界间距。

课题组通过将室内模型试验及数值模拟分析联系起来的方法,对比研究了传统的单锚定板及串联式双锚定板抗拔结构与土相互作用机理,同时,以方形串联式双锚定板结构为例,讨论了影响双锚板结构抗拔强度的因素,主要在于下锚定板的埋深以及上下锚定板之间的间距,根据获得的室内试验数据以及数值模拟分析,获得了串联式双锚定板结构的临界埋深比及上下锚定板的临界间距比,对合理确定串联式双锚定板结构的埋深及上下锚定板间距有指导意义。

2. 串联式锚定板结构的构造

“串联锚固板结构”是指两个或多个锚板用一根拉杆(钢绞线)串联连接。锚板可以水平、垂直或倾斜埋置。和传统锚板在对比之后,发现串联锚板具有以下优点:

1) 用钢绞线代替钢筋作为拉杆材料,具有比普通钢筋更高的抗拉强度,张拉锁定设备配套,施工方便。

2) 承载力高,适应性强,可有效减少“群体锚定效应”。在使用锚定板结合肋柱和固定板支持高填方情况,抗拔承载力可以通过增加拉杆锚定板的数量来提高,从而增加锚定板的垂直和水平间距,减少锚定板层的数量,避免互相干扰的锚定板,减少了“群体锚定效应”。

3. 室内模型试验

模型试验概况和方法

室内模型试验在室内基坑中进行,该基坑的长宽比为 1:1,均为 5 米,最大深度可达到 5 米。模型试验时,500 毫米碎石的压实压实罐底部的基础,然后单锚定板和串联式锚板固定在表面的砾石上,并采用密实度控制标准填补粘土层。分层填充时,采用长度 600 mm、直径 500 mm 的混凝土圆筒进行循环碾压。填筑前根据压实度试验确定各层压紧厚度及压实所要求的碾压数量。在试验模型制作完之后,待室内放 2~3 周进行试验。土工试验测得压实黏性土的物理参数分别为:黏聚力 $c=9.8$ kPa,内摩擦角 $\varphi=19.5^{\circ}$,压缩模量 $E_s=19.3$ MPa,土的重度 $\gamma=18.6$ kN/m³。

锚定板长 \times 宽 \times 厚度 = 300 mm \times 300 mm \times 10 mm,锚杆尺寸 20 mm,在锚定板中心打孔位以便于锚杆穿过小孔,然后上下锚定板和锚杆用螺栓扣紧。为降低拉杆表面与土的摩擦阻力,在拉杆表面涂沥青及油脂。两块锚定板之间距离为 1.0 m。常规锚定板和串联式锚板埋深均为 2.5 m,本次模型试验在同一基槽内进行,对单锚定板及串联式锚定板各自进行了两个完全相同的模型试验。

锚定板室内模型抗拔试验严格按《建筑边坡工程技术规范》(GB50330-2002)中锚杆基本试验的加载方式、循环加载与卸载等级、位移观测间隔时间、破坏标准及终止加载条件的要求进行。其加载装置由千斤顶、压力传感器、反力架等组成(如图 1 所示)。

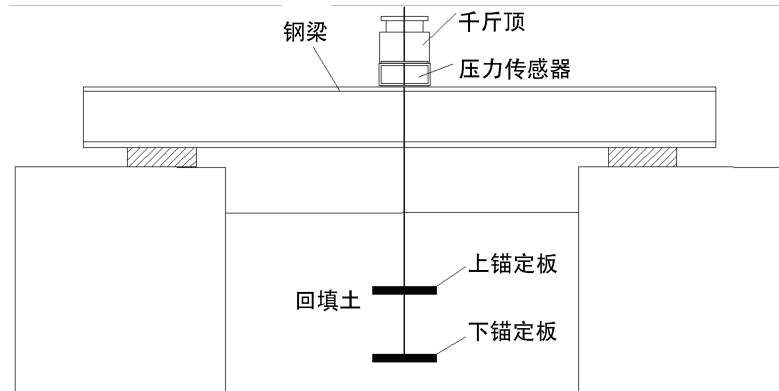


Figure 1. Schematic diagram of indoor model test
图 1. 室内模型试验示意图

4. 室内模型试验数值模拟

4.1. 网格划分及边界条件

为探讨串联式双锚定板的临界埋深及临界间距,同时验证数值模拟模型的可靠性。本文基于 FLAC3D 有限元分析软件进行数值模拟。锚杆采用 cable 单元模拟,锚板采用 shell 单元模拟;土体采用实体单元模拟。计算区域取 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ 。边界约束条件如下,计算出的区域底部和一侧边界上所有点的全向位移为零。

4.2. 本构模型及计算参数

粘性土的本构关系采用摩尔-库伦准则。锚定板的弹性模量 $E_s = 2.0 \times 10^5\text{ MPa}$, 锚定板密度 $\rho = 7800\text{ kg/m}^3$, 其他物理参数和测得物理参数一致。

5. 抗拔力与位移关系及破坏模式

图 2 为单锚板和串联式锚板上拔力-位移对比曲线,通过模拟结果与试验结果可以知道:串联式双锚定板相较于传统的单锚定板具有更大的抗拔承载能力。同时,单锚板和串联式锚板上拔力-位移曲线和双曲线轨迹相似,土体变形大概可以分为 3 个阶段:1) 弹性压缩,因为刚开始上拔力较小,位移随着拉拔力的增加而逐渐增加,锚板上部土体处在一个弹性压缩状态,此时上拔力约为极限承载力的一半;2) 局部剪切,随着上拔力的不断增加,锚定板上部土体开始出现局部剪切破坏,位移也随着上拔力的增加而出现先增加较快后逐渐平缓增加,此时上拔力约为极限承载力的 4/5 左右;3) 剪切破坏,随着上拔力稍微增加一点,位移变化很快,几乎将粘性土向上拔出,土体出现了全体剪切破坏,并产生了剪切破坏区,锚定板位移的猛烈增加将突破土体表面所能承载的抗拔力而迅速隆起,下部锚板上部分出现了局部剪切破坏,同时随着上拔力的增加其位移也会剧烈增加。

室内模型试验结果还发现:常规单锚板组其土体最大位移只有 1.3 m,串联式为 1.9 m,由此可知:串联式双锚定板土层表面竖向位移略大于单锚定板土层表面竖向位移,原因可能是串联式锚板的上锚板埋深较小导致,但从全局来看,单锚定板及串联式双锚定板土体表面的竖向位移均很小。因此,串联式

锚板也表现出单锚板一样的破坏特性。由此可推断，串联式双锚定板的下锚定板埋设深度是影响串联式双锚定板周围土体流动机制的主要因素之一。

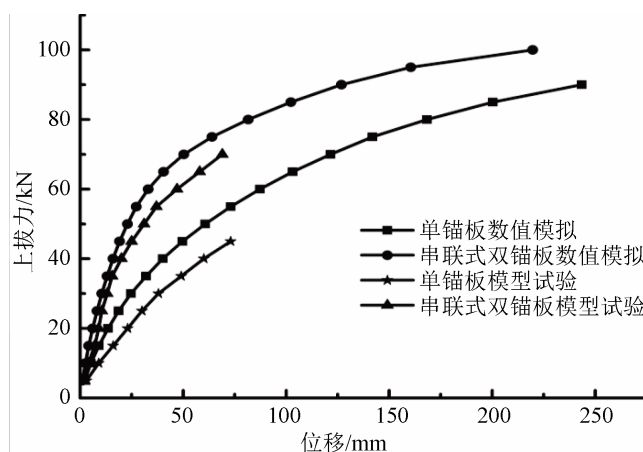


Figure 2. Uplift force-displacement curve

图 2. 上拔力 - 位移关系

6. 串联式双锚定板临界埋深及临界间距分析

6.1. 双锚定板临界埋深

图 3 为不同埋深比情况下，串联式锚板上拔力 - 位移关系曲线。由如图 3 所示可看出：随着锚定板埋深比 H/D 的逐渐增大，其上拔力 - 位移关系曲线也由较快降幅转变为平缓降幅，且抗拔极限承载力也随之增加，不过增加幅度逐渐减弱。

图 4 为锚板上拔力系数与埋深比的关系曲线。其上拔力系数定义是 $N_\gamma = Q/\gamma AH$ ， γ 为土体重量， A 为锚定板面积， N_γ 为串联式双锚定板的极限承载力。由如图 4 所示可看出：当锚定板埋深在临界埋深之下时，锚定板的上拔力系数与锚定板埋深呈现正相关的关系，当锚定板埋深超出其临界埋深时，锚定板的上拔力系数非但不随之增加，反而呈现负相关的关系，由此我们大致可以确定，锚板临界埋深 $H = (8-11)D$ 。

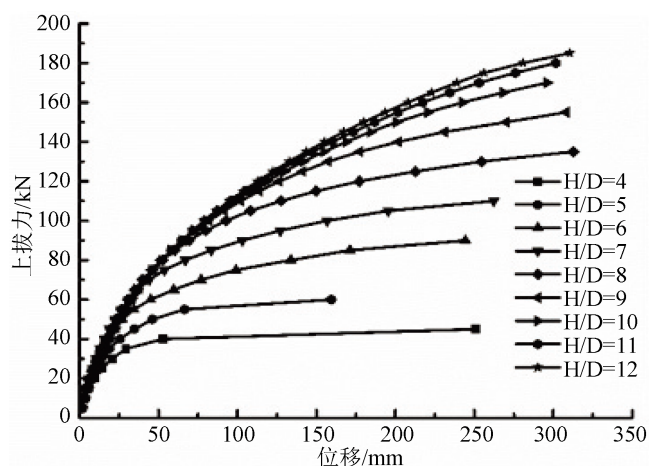


Figure 3. Relation of anchor plate uplift force-displacement

图 3. 锚板上拔力 - 位移关系

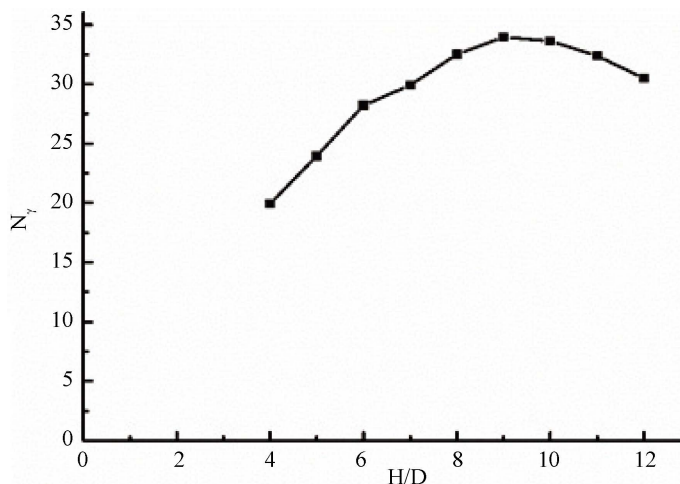


Figure 4. Relation of uplift force coefficient and burial depth ratio
图 4. 上拔力系数与埋深比的关系

6.2. 双锚定板临界间距

图 5、图 6 分别为在保持下锚定板埋深比 $H/D = 12$ 不变的条件下，上下锚定板间距变化对串联式双锚板上拔力 - 位移关系的影响及上下锚定板间距比 S/D - 上拔力系数 N_y 的关系曲线。

由如图 5 所示可看出：串联式锚定板的极限抗拔力随着锚定板埋深比 S/D 的增大而增大，但增加的幅度越来越小。由如图 6 所示可看出：当锚定板间距在临界间距之下时，锚定板的上拔力系数与锚定板间距呈现正相关的关系，当锚定板间距超出其临界间距时，锚定板的上拔力系数非但不随之增加，反而呈现负相关的关系，由此我们大致可以确定，临界间距 $S = (4 - 6)D$ 。

串联式锚板临界间距的出现，主要原因在于上下两块锚板距离较远时，几乎锚板之间不产生影响，但随着上下两块锚板逐渐接近到一点程度，一块锚板的位移会极大的影响另外一块锚板，两块锚板之间的土体相互连接，从而产生更大的位移，这对锚板的抗拔承载力来说是极大不利的，两块锚板距离太近，位移量变大，两块锚板距离太远，上锚板的位移又大的不利于控制，所以要将两块锚板控制在一个合理范围之内，也就是临界间距。

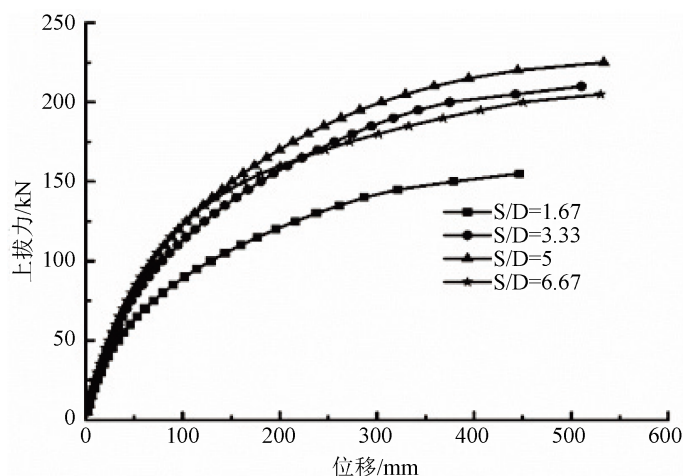


Figure 5. Relation of anchor plate uplift force-displacement
图 5. 锚板上拔力 - 位移关系

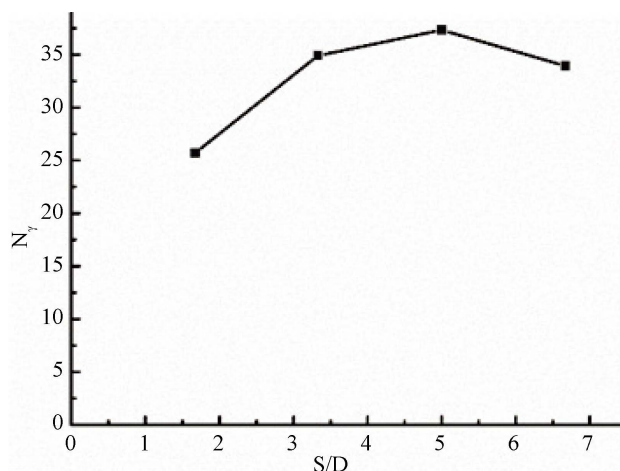


Figure 6. Relation of pull coefficient and spacing ratio
图 6. 上拔力系数与间距比的关系

6.3. 双锚定板间距对串联式锚定板破坏模式的影响

图 7 为串联式锚定板处于极限承载能力时，锚定板间距比 S/D 分别为 1.67、3.33、5.0、6.67 情况下土体位移云图。由图 7 可看出：当两块锚定板间距小于临界间距，串联式锚定板周围土体呈现出“圆柱形破坏模式”，当两块锚定板间距大于临界间距，串联式锚定板周围土体呈现出“局部独立破坏模式”。因此，对于串联式锚定板，锚板之间的间距也是影响锚定板周围土体流动机制的重要因素。

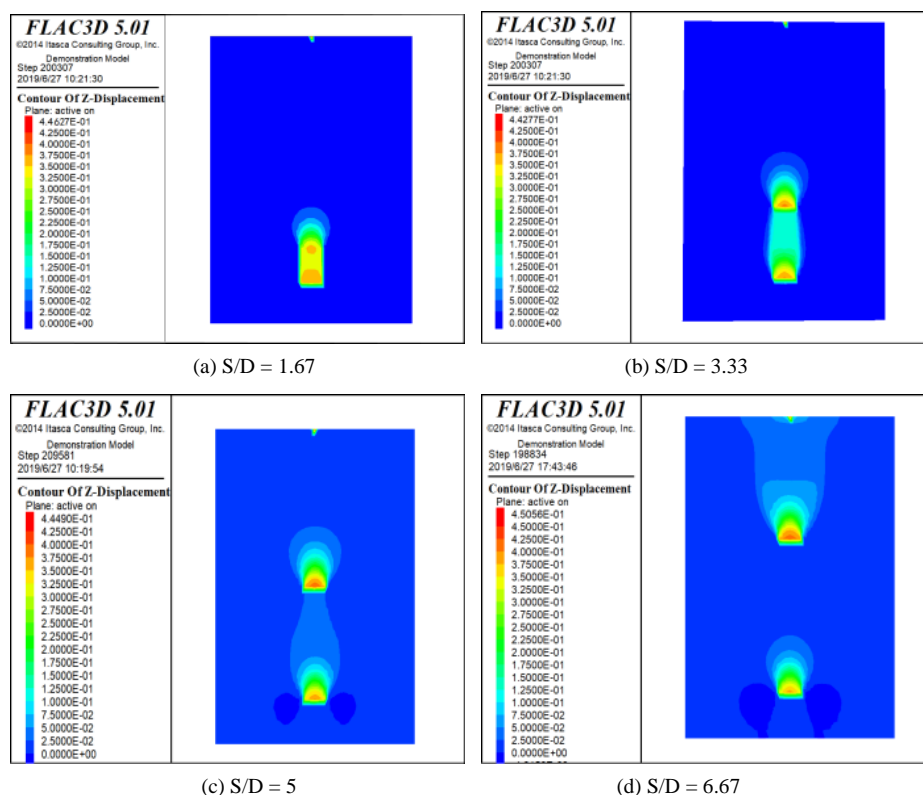


Figure 7. Location cloud map of soil at different spacing ratios
图 7. 不同间距比时土体的位移云图

7. 结论

本文在分析深埋、浅埋锚板的工作机理和流土机理的基础上,提出了一种串联锚板结构。通过室内模型试验和数值模拟相结合,对串联双锚板的工作特性和影响因素进行了探讨,主要结论如下:

1) 串联式锚板的极限承载能力要远远大于单锚板,因此采用串联式锚定板结构是提高锚定板抗拔承载力的有效途径。

2) 锚板埋置深度和两块锚板之间的间距是影响串联式锚板的主要因素,但存在临界埋深和临界间距,其临界埋深比和临界间距分别为 $(8-11)D$ 和 $(4-6)D$ 。

3) 串联式双锚定板周围土体的流动机制与锚定板埋深及上下锚定板间距密切相关。对于深埋串联式锚定板,当上下锚定板间距从小于临界间距到大于临界间距转变,串联式双锚定板周围土体的流动机制则从“土体圆柱形破坏模式”转变为“土体局部独立破坏模式”。

致 谢

感谢审稿人和编辑部提供的有益建议。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(NO: 51978260)。

参考文献

- [1] Rowe, R.K. and Davis, E.H. (1982) The Behavior of Anchor Plates in Clay. *Geotechnique*, **32**, 9-23. <https://doi.org/10.1680/geot.1982.32.1.9>
- [2] Murray, E.J. and Geddes, J.D. (1987) Uplift of Anchor Plates in Sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, **113**, 202-215. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1987\)113:3\(202\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1987)113:3(202))
- [3] Murray, E.J. and Geddes, J.D. (1989) Resistance of Passive Inclined Anchors in Cohesionless Medium. *Geotechnique*, **39**, 417-431. <https://doi.org/10.1680/geot.1989.39.3.417>
- [4] Saeedy, H.S. (1987) Stability of Circular Vertical Earth Anchors. *Canadian Geotechnical Journal*, **24**, 452-456. <https://doi.org/10.1139/t87-056>
- [5] 何思明, 张小刚, 朱平一. 水平荷载作用下深埋锚板变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 159-163.
- [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.
- [7] 丁佩民, 张其林, 肖志斌. 砂土中锚板荷载-位移特性研究及上拔位移计[J]. 土木工程学报, 2004, 37(6): 52-59+86+100.
- [8] 余生兵, 黄茂松. 基于上限法的条形锚板抗拔承载力分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 2): 160-163.
- [9] 郝冬雪, 符胜男, 陈榕, 张永建, 侯立群. 砂土中锚板拉拔模型试验及其抗拔力计算[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(11): 2101-2106.
- [10] 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(1): 126-132.