

DOI: 10.11779/CJGE2021S2028

考虑摩擦系数的砂土中竖向锚定板承载机理离散元分析

王昊¹, 孙玉海², 江建宏², 刘明朋¹, 张宏博^{*1}

(1. 山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南 250061; 2. 山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250002)

摘要: 为明确锚定板拉拔造成的土体内部剪切带的形成机制与演化机理, 基于离散元方法, 采用 FLAC-PFC^{2D} 耦合计算程序建立了相应的颗粒流数值模型。研究了锚定板埋深、锚定板-砂土界面摩擦系数对锚定板受拉过程中的抗拔力-位移曲线、板周土体位移场的影响, 分析了拉拔过程中的力链变化。结果表明: 随着锚定板的埋深增大, 锚板在土体中的极限抗拔力随之增大, 且土体破坏模式在埋深比为 8 左右时由整体剪切破坏逐渐转化为局部破坏。通过对锚定板被动区、模型整体的力链分析, 进一步明确了竖向条形锚定板受拉过程中的锚定板存在对周围土体承受水平荷载的调动作用微观机理。

关键词: 竖向锚定板; 承载力; 破坏机理; 颗粒流; 界面摩擦

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0117-04

作者简介: 王昊(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事支挡结构相关研究。E-mail: 2579348445@qq.com。

Mechanism of bearing capacity of vertical anchor plates in sand considering interface friction based on DEM method

WANG Hao¹, SUN Yu-hai², JIANG Jian-hong², LIU Ming-peng¹, ZHANG Hong-bo¹

(1. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Shandong Provincial Communications Planning and

Design Institute, Jinan 250002, China)

Abstract: In order to clarify the mechanism of formation and evolution of the shear zone of soils near the anchor plate, based on the discrete element method, a particle flow code model by coupling FLAC-PFC^{2D} is established. The effects of embedment depth of the anchor plate and friction coefficient of anchor plate-sand soil interface on the pullout force-displacement curve, soil displacement around the plate and the trend of force chain development in the model during the process of pullout are investigated. The results show that the ultimate pullout force of the anchor plate increases as the embedment ratio of the anchor plate in the soils increases, and the failure mode of the soils gradually changes from the general failure mode to the local one when the embedment depth ratio is about 8. Through the force chain analysis of the whole model and passive zone, the mobilization effects of the anchor plate during pullout process of the vertical strip anchor on the surrounding soils subjected are further clarified.

Key words: vertical anchor plate; bearing capacity; failure mechanism; particle flow code; interface friction

0 引言

锚定板结构在近些年来常被用于挡土墙、海上油井等设施的建造中, 用于为结构提供反力以保证稳定性^[1-2]。锚定板结构由于造价低、形式简单, 且易于与其它结构组合的优点, 已衍生出多种支挡结构形式^[3-5]。但由于锚定板应用时的埋深、土质不同, 锚定板在使用过程中可能具有不同的破坏模式和承载能力。在路基工程中, 目前国内常用的方法^[6]存在仅适用于浅埋工况的缺陷。

既有研究表明, 竖向锚定板的极限承载力主要受到锚定板埋深、锚周土体种类、土体密实度、锚定板粗糙度以及锚定板几何尺寸等因素的影响^[7-8]。国内外

诸多学者都提出了评估锚定板承载力的理论解^[9-11], 胡伟等^[9]通过假设竖向条形锚定板板前存在刚性的三角形土核、锚定板前方土体的破坏形式为对数螺旋线, 推导了竖向锚定板水平抗拔承载机理的统一理论解。Shahriar 等^[10]假设以埋深比 3 为界, 锚定板板前土体的破坏模式由浅埋的直线型转为深埋的对数螺旋线型, 通过极限平衡法获得了理论解。类似的理论解均是建立在假设土体破坏模式的基础上, 由于土质、锚定板自身属性的不同, 这一破坏模式可能存在偏差。目前常通过使用粒子图像测速 (particle image

收稿日期: 2021-08-25

*通信作者 (E-mail: zhanghongbo@sdu.edu.cn)

velocimetry, PIV) 技术研究锚定板的破坏模式问题。Yue 等^[12]Geo-PIV 技术对竖向锚定板在水平荷载下的拉拔特性进行了研究, 结果表明, 锚定板在较大埋深、较小密实度土体的情况下可能存在非整体剪切破坏模式。然而, 目前关于竖向锚定板结构深浅埋界定方法的问题仍未有定论^[9, 13], 因此对单锚锚定板的承载力大小和板周土体的破坏机理仍需更多研究。

为了直观研究砂土介质中锚定板的实际受力性状与破坏机理, 本文通过离散元-有限差分耦合的方法, 对压力分散型锚定板的受力与板周土体的位移模式进行了研究, 分析了锚定板埋深和锚定板-土体间的摩擦特性对板前力链和被动区土体位移模式的影响, 以期从细观的角度解释锚定板的承载机理。

1 颗粒流模拟模型

1.1 模拟砂土性质反演

采用密实 ($D_r = 83\%$) 的砂土进行大型直剪试验, 所用直剪仪为 TH-L 土工合成材料直剪拉拔摩擦试验仪, 采用该直剪仪进行砂土直剪试验, 并建立相关的 PFC^{2D} (particle flow code, PFC)^[14]直剪试验数值模型, 并进行参数标定, 结果如表 1 所示。

表 1 直剪试验模型的细观接触参数

Table 1 Contact parameters of direct shear tests

| 颗粒性质/接触类型 | k_n | k_s | μ | cb_tenf | cb_shearf |
|-----------|-------------------|-------------------|-------|-------------------|-------------------|
| wall | 3.0×10^7 | 3.0×10^8 | 0 | — | — |
| ball | 2.5×10^7 | 1.0×10^8 | 0.95 | — | — |
| ball-ball | 1.6×10^7 | 5.0×10^6 | 0.95 | 3.0×10^5 | 1.0×10^5 |

对比显示直剪试验结果与模拟结果在应力路径上存在一定差异, 但峰值应力相近。模拟结果的峰值比试验结果略小, 模拟得到的摩擦角约为 36.61° , 略低于密砂的试验结果, 介于密砂与中密砂之间。表明按照表 1 所选取的接触关系可以较好地模拟中密砂的物理力学性质。

1.2 锚定板拉拔模型

拉拔承载力模型同样采用 PFC^{2D} 颗粒流程序来模拟, 但生成锚定板采用 FLAC-PFC 耦合的方法, 利用 FLAC 命令生成实体的锚定板单元, 这一做法的好处在于对锚定板采用有限差分法, 可以直接提取锚定板上各个节点上的受力和位移。锚定板的尺寸为 $2 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 。锚定板长度与最大粒径的比值 L/D_{\max} 为 $100/4=25$ 。认为锚定板尺寸选择较为合理。

数值模拟具体方法为: 在模型底部生成 20 cm 以上的砂垫层, 在其上分层生成砂试样。采用测量圆监测整体密度, 保证锚定板拉拔颗粒流模型中的密度与

直剪试验中的一致。数值模型建立的具体流程如图 1 所示。赋值锚定板的速度为 1 mm/min , 通过监测锚定板的位移状况, 在锚定板位移为 $1, 2, 3 \text{ cm}$ 三个状态记录锚定板的土体破裂面和土体的力链状况。同时通过监测锚板单元上各个节点受力, 结合节点位移得到整个锚板抗拉过程中的抗拔力-位移曲线。

为研究锚定板在不同埋深、不同界面摩擦情况下的抗拔特性, 设置锚定板的埋深比 H/h 分别为 $2, 4, 6, 8$, 锚定板界面的摩擦系数为 $0.5, 1$, 共计 8 组数值模型。

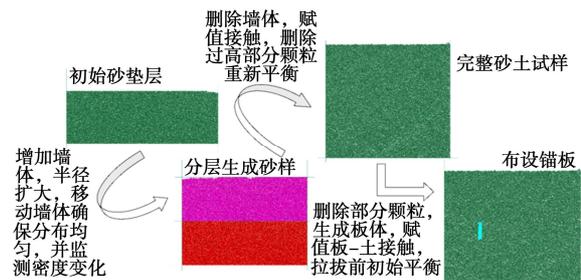


图 1 锚板拉拔模型的建立步骤

Fig. 1 Procedure of establishing pullout model

2 锚定板拉拔的宏观力学特性分析

2.1 承载力分析

锚定板在砂土中宏观力学特性的研究内容主要包括锚定板抗拔力和板周土体的宏观位移场两个部分。首先, 提取砂土中竖向锚定板在不同埋深、不同接触摩擦系数下的荷载-位移曲线, 如图 2 所示。锚定板的位移可以分为两个阶段, 即①峰前弹塑性阶段, ②峰后软化/峰后硬化阶段。其中锚板在小埋深 ($H/h = 2, 4$) 时表现为峰后软化性质, 而在较大埋深 ($H/h = 6, 8$) 时表现为峰后硬化性质。试验结果均有一定的波动, 某些位移条件下小埋深状态下的抗拔力反而可能高于大埋深, 这可能是因为模型颗粒数目有限, 存在一定的颗粒因运动、旋转等原因脱离了锚定板接触导致的。

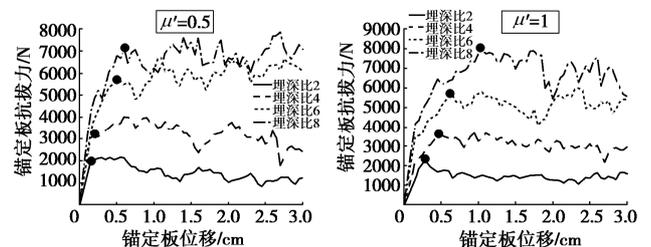


图 2 锚定板的拉拔位移-承载力曲线

Fig. 2 Pullout force-displacement curves of anchor plate

对于峰后软化曲线, 取第一阶段峰值点的最大锚板抗拔力作为锚定板的极限承载力, 对于峰后硬化曲线则取峰后的稳定段作为极限承载力, 如图 2 中的标记所示。显然, 随着埋深的增加, 锚定板的极限承载力会增加, 同时达到极限承载力需要经过的锚定板位移量也会增大。

各个工况下锚定板的极限承载力如表 2 所示。显然, 锚定板的极限承载力随着锚定板埋深的增加而增大。同时, 在相同埋深的情况下, 锚 - 土界面摩擦系数 $\mu'=1$ 工况的极限承载力比 $\mu'=0.5$ 工况要略大, 埋深比较低时, 这一提升的幅度不大, 而在埋深比为 8 时增加的幅度较大。相比于 $\mu'=0.5$ 工况, 在埋深比为 8 的情况下的极限承载力提升约为 11.7%。

表 2 各工况下的极限承载力与破坏模式

Table 2 Peak resistances and failure modes

| 摩擦系数 μ' | 埋深比 (H/h) | 极限承载力/N | 破坏模式 |
|-------------|---------------|---------|------|
| 0.5 | 2 | 2169.9 | 整体剪切 |
| | 4 | 3249.5 | 整体剪切 |
| | 6 | 5721.6 | 整体剪切 |
| | 8 | 7181.3 | 局部破坏 |
| 1 | 2 | 2276.9 | 整体剪切 |
| | 4 | 3633.2 | 整体剪切 |
| | 6 | 5763.8 | 整体剪切 |
| | 8 | 8025.9 | 过渡模式 |

2.2 位移特性分析

选取板体位移为 3 cm 的状态, 绘出锚定板拉拔过程中的板周土体位移状态 ($\mu'=0.5$) 图 3 所示。土体在较小埋深下表现为整体破坏, 较大埋深下为局部破坏, 这与 Yue 等^[12]的试验结果一致。但 Yue^[12]的试验结果表明, 中密砂中的锚定板在 $H/h=9$ 工况下转变为局部破坏, 在 $H/h=7$ 工况下为过渡型破坏。这可能是由于本模拟中采用的锚定板尺寸高度为 10 cm, 因此达到预定埋深时的土体高度也更大, 在模型考虑重力作用的情况下, 锚定板板周土体的位移场更难发展到土体顶面。

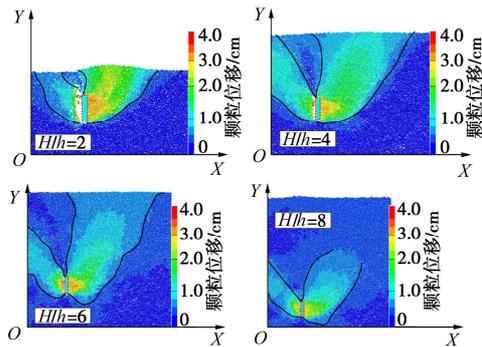


图 3 板周土体位移云图 ($\mu'=0.5$)

Fig. 3 Displacement contours around anchor ($\mu'=0.5$)

采用 Roy^[15]的方法, 对于被动区, 以颗粒位移分界面绘出上下两条曲线, 如图 3 所示。在较小埋深下, 模型破裂面为近似的悬链线形式, 较大埋深下则表现为局部破坏。局部破坏模式下形成的被动区剪切带形式呈椭圆形向前发展。同样注意到板前存在着一定大小的刚性三角形区域 (图中黄橙色区域), 该区域内的土体位移与板位移几乎相同, 与胡伟^[9]等通过试验验证假设的板前存在刚性的三角形土核相似, 但本文研究中得到的结果近似于等腰三角形, 即三角形土核的

上下两个角度相差很小。且证明了土核的形状会随着埋深和锚定板 - 砂土界面接触摩擦的改变而改变。

板后土体存在明显的主动区, 板后主动区中, 下部边界的形状近似为近似为悬链线, 而上部边界的形状则近似为一条直线, 在主动区与被动区之间存在近似的板上三角形区域。

图 4 所示为当板 - 土摩擦系数为 1 时土体的破裂面情况。显然, 当 $\mu'=1$ 时, 虽然破坏模式仍为局部破坏, 但显然锚定板对锚周土体的影响范围比 $\mu'=0.5$ 工况影响范围更大。其它工况下破坏模式均为整体破坏, 也显示出同样的规律和更大的影响范围。过渡状态下对比局部破坏, 锚定板会调动更多的锚周土体用于承载, 对位移图分析得到的结果也可以解释锚定板 - 土接触界面参数对极限承载力的影响在埋深比为 8 时增长幅度比其余工况更大的原因。

结合图 4 与其他颗粒运动状况下的位移速度矢量图可知, 板前被动区在拉拔过程中会产生斜向上的位移, 而板后土体则会有斜向下流动以填充新产生的土体空隙的趋势, 因此在板上形成小位移区, 该部分土体的移动状态并不明显, 其位移矢量场在主动区与被动区之间形成了“拱形”区域。

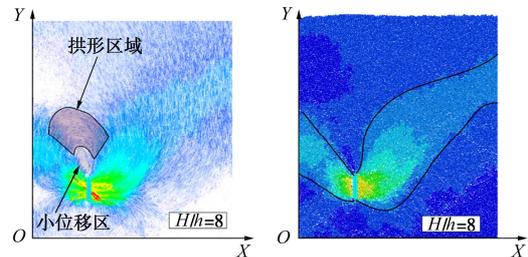


图 4 $H/h=8$ 时的位移云图与矢量图 ($\mu'=1$)

Fig. 4 Displacement contours and vector distribution under embedment ratio $H/h=8$ ($\mu'=1$)

3 锚定板拉拔过程的细观力学特性分析

力链是颗粒流模型中颗粒间作用力沿着接触网络传递的路径, 可以通过力链从细观的角度对其大小、分布、密度等性状进行定性分析。以埋深比为 4, 摩擦系数 0.5 为例, 提取初始状态和水平位移达到 3cm 状态下的模型力链如图 5 所示。由于模型考虑了重力作用, 初始力链的分布明显表现出上部细而下部较粗的趋势。此外, 从图 5 的拉拔部分判断可得, 锚定板的抗拔力应主要由锚板正前方的土体提供。在对宏观力学特性的分析中, 当水平位移达到 1cm 时, 土体的破裂面已经发展到地表。结合图 5 的力链图可知, 随着位移的增大, 被动区土体的力链分布开始向板中央部分集中, 说明上述的模型被动区内接触力总和的下降可能是由于板前被动区的破坏模式逐渐从整体剪切破坏转化为刺入破坏模式产生的。

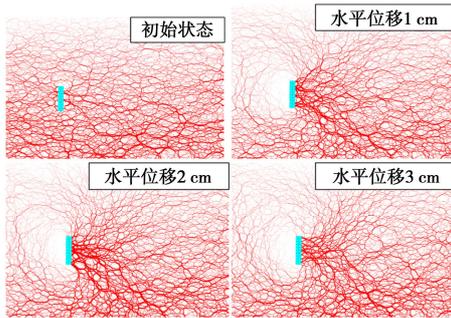


图5 拉拔过程中的模型力链图

Fig. 5 Force chains of pullout procedure

4 结 论

通过离散元结合有限差分法,反演得到砂土的基本物理力学性质,对砂土中锚定板的拉拔力学响应进行研究,揭示了锚定板在砂土中的拉拔作用机理,结论如下:

(1)选取的接触黏结模型各个参数可以较好地模拟中密砂土的性质,但对密砂的模拟效果欠佳。

(2)锚定板的埋深、板土界面粗糙度的增加都会导致埋置于砂土中的锚定板极限承载力增加,且锚定板的破坏模式也会随之变化。锚定板破坏模式由整体剪切破坏转变为局部破坏的临界埋深大约为 7,同时板土界面接触越粗糙,这一转变发生需要的埋深越小。

(3)对力链的分析显示,锚定板的抗拔力主要由被动区砂土剪切提供被动力产生,在剪切破坏发生后,破坏模式逐渐转化为刺入破坏,被动区的接触力降低。

参考文献:

- [1] DASH S K, CHOUDHARY A K. Pullout behavior of geocell-reinforced vertical plate anchors under lateral loading[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2019, **19**(8): 04019082.
- [2] 蔡正银, 侯伟, 关云飞. 遮帘式板桩码头的工作机理[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(10): 1745 - 1750. (CAI Zheng-yin, HOU Wei, GUAN Yun-fei. Mechanism of sheet-pile wharf with barrier piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(10): 1745 - 1750. (in Chinese))
- [3] 厉超, 郝伟. 压力分散型悬锚式挡墙位移及受力特性分析[J]. *北方交通*, 2015(9): 36 - 39. (LI Chao, HAO Wei. Analysis of pressure-dispersed anchored cantilever retaining wall's displacement and stress[J]. *Northern Communications*, 2015(9): 36 - 39. (in Chinese))
- [4] 吴建清, 宋修广, 厉超, 等. 压力分散型挡土墙在施工期和运营期的受力特性分析[J]. *公路*, 2014, **59**(6): 36 - 40. (WU Jian-qing, SONG Xiu-guang, LI Chao, et al. Analysis of mechanical properties for dispersed pressure retaining wall during construction and operations[J]. *Highway*, 2014, **59**(6):

36 - 40. (in Chinese))

- [5] 薛志超, 宋修广, 陈宝强, 等. 压力分散型挡土墙支护高填土路基施工过程的受力特征[J]. *公路交通科技*, 2013, **30**(4): 11-16. (XUE Zhi-chao, SONG Xiu-guang, CHEN Bao-qiang, et al. Stress characteristics of pressure dispersive retaining wall for supporting high-filling embankment during construction[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, **30**(4): 11 - 16. (in Chinese))
- [6] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. 公路挡土墙设计与施工技术细则[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008. (CCCC Second Highway Engineering Co Ltd. Technical Guidelines for Design and Construction of Highway Retaining Walls[M]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese))
- [7] 岳红亚. 基于 PIV 技术的浅埋锚定板和管道抗拔破坏机理及计算理论研究[D]. 济南: 山东大学, 2020. (YUE Hong-ya. Research of Pullout Failure Mechanism and Computational Method of Shallow Plate Anchors and Pipelines Based on PIV Technology[D]. Jinan: Shandong University, 2020. (in Chinese))
- [8] GIAMPA J R, BRADSHAW A S, GERKUS H, et al. The effect of shape on the pull-out capacity of shallow plate anchors in sand[J]. *Géotechnique*, 2019, **69**(4): 355 - 363.
- [9] 胡伟, 刘顺凯, 邹贵华, 等. 竖向条形锚定板水平拉拔极限承载力统一理论解研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(2): 296 - 304. (HU Wei, LIU Shun-kai, ZOU Gui-hua, et al. Unified theoretical solution for ultimate bearing capacity of vertical strip anchor[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(2): 296 - 304. (in Chinese))
- [10] SHAHRIAR A R, ISLAM M S, JADID R. Ultimate pullout capacity of vertical anchors in frictional soils[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, **20**(2): 04019153.
- [11] KAME G S, DEWAIKAR D M, CHOUDHURY D. Pullout capacity of a vertical plate anchor embedded in cohesion-less soil[J]. *Earth Science Research*, 2012, **1**(1): 27.
- [12] YUE H Y, ZHUANG P Z, ZHANG H B, et al. Failure and deformation mechanisms of vertical plate anchors subjected to lateral loading in sand[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, **20**(11): 04020210.
- [13] MERIFIELD R S, SLOAN S W. The ultimate pullout capacity of anchors in frictional soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, **43**(8): 852 - 868.
- [14] Itasca Consulting Group, Inc. PFC2D (particle flow code in 2 dimensions) [M]. Version 6.0. Minneapolis: ICG, 2019.
- [15] ROY K S. Numerical Modeling of Pipe-Soil and Anchor-Soil Interactions in Dense Sand[D]. St. John's: Memorial University of Newfoundland, 2018.

(编校: 明经平)