

Experimental Study on the Limit Bearing Characteristics of Shallow Horizontal Anchor Plate

Zhenyu Yang, Xiuguang Song, Weichuan Li, Jintao Yu, Han Yu

School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong
Email: 840639052@qq.com

Received: Sep. 2nd, 2019; accepted: Sep. 13th, 2019; published: Sep. 20th, 2019

Abstract

In order to study the ultimate bearing characteristics of shallow buried horizontal anchoring plates, this paper uses steel bar similar soil instead of traditional sand, combined with GeoPIV (particle image velocimetry), through the ultimate drawing test, to study the lower anchor plate under plane strain conditions. The pullout force and displacement response characteristics are obtained. The displacement field distribution and strain characteristics of the surrounding material around the anchor plate are obtained, and the bearing mechanism of the shallow buried horizontal anchor plate is revealed. The results show that the anchor plate load and vertical displacement response can be roughly divided into three stages: including the pre-peak elastic stage, the post-peak descending stage and the wave stage. The ultimate pull-out force increases with the increase of the buried depth rate into a geometric series. During the tensioning process, symmetric oblique fracture surfaces appear on both sides of the anchor plate and gradually develop to the surface with the increase of the vertical displacement of the anchor plate. The angle between the fracture surface and the vertical direction is approximately equal to $45^\circ - \varphi/2$. A rigid triangle is formed in the range of the top height $1D$ (D is the anchoring plate width), and the size of the rigid triangle remains unchanged during the drawing process. The test results can provide reference for the establishment of the horizontal anchor plate limit equilibrium calculation model.

Keywords

Anchor Plate, Steel Rod, Pullout Resistance, PIV, Fracture Surface

浅埋水平锚板极限承载特性试验研究

杨振宇, 宋修广, 李为传, 于锦涛, 于 翰

山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南
Email: 840639052@qq.com

收稿日期：2019年9月2日；录用日期：2019年9月13日；发布日期：2019年9月20日

摘要

为研究浅埋水平锚定板极限承载特性，本文采用钢棒相似土替代传统砂土，结合GeoPIV (particle image velocimetry)粒子图像测速法，通过开展极限拉拔试验，研究平面应变条件下锚板抗拔力及位移响应特征，得出不同埋深比下锚板周围填料位移场分布及应变特性，揭示浅埋水平锚板承载机理。研究结果表明：锚板荷载与竖向位移响应大致可分为三个阶段：包括峰前弹性阶段、峰后下降阶段以及波动阶段，极限上拔力随埋深率的增加成几何级数增加；在张拉过程中，锚板两侧出现对称斜向破裂面并随着锚板竖向位移的增加逐渐发展至表面，破裂面与垂直方向的夹角大致等于 $45^\circ-\varphi/2$ ；板顶高度 $1D$ (D 为锚定板宽度)范围内形成刚性三角形，且在拉拔过程中刚性三角形的大小保持不变。试验结果可为水平锚板极限平衡计算模型建立提供参考。

关键词

锚板，钢棒，抗拔特性，PIV，破裂面

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

锚板作为一种高效可靠的锚固系统，广泛应用于输电塔、海上浮动平台、水下管道、隧道等结构，为其提供抗拔力[1]。半个多世纪以来，锚板的广泛使用促使研究人员对锚土相互作用有了更深入的了解。锚板的抗拔能力取决于锚的几何形状、埋入深度和土体参数(密度、强度指标)等因素。在之前的数十年里，国内外学者对其极限承载力与土体破裂机制展开了较为系统的研究[2]-[8]。例如：茜平一等[1]根据试验观察结果，分析了浅埋锚板周边土体的破坏特征。何思明[2]研究了条形锚板的抗拔破裂面形状。Murray等[5]对砂土中锚板抗拔承载性能进行了研究，并结合极限平衡和极限分析方法给出了锚板上限解。Yu [6]采用空腔膨胀理论和塑性区的发展规律获得了锚板的抗拔承载力。

由于锚板-土体结构相互作用的复杂性，之前的研究结果差异性较大，越来越难以满足锚板设计需求，传统的锚板极限拉拔试验采用砂土作为填料，综合采用透明有机玻璃或钢化玻璃来观测板周围土体破裂面发展情况，模拟平面应变条件下锚板承载特性。但是直接试验结果表明，砂土材料与玻璃之间的摩擦角度一般高于 10° [9]，因此该方法得到的破裂面比实际劈裂面小，难以真实模拟平面应变状态。为了克服试验缺陷，钢棒相似土由于试验条件可控、不存在压缩变形等特点，在研究中逐渐得到了应用[10]-[16]。

因此，本文在进行充分文献调研的基础上，通过室内模型试验，采用钢棒相似土作为填料，研究了不同埋深比下，锚板的极限拉拔力的变化以及破裂面的变化情况，为水平锚板极限平衡计算模型的建立提供理论依据。

2. 试验设备和步骤

2.1. 试验设备

试验设备主要是连接杆、锚板和模型箱等，如图1。锚板为长方形钢板，长 × 宽为 75×100 mm，

厚度为 10 mm；锚板连接杆可互相串联或拆卸，直径为 6 mm；试验所用模型箱为钢板，前面为有机玻璃板，其长×宽×高为 500 × 100 × 500 mm。在本锚板拉拔试验中，上拔过程采用位移控制式，由加载设备提供锚板的上拔力。本试验的数据采集系统包括加载设备、压力传感器和计算机等。计算机可以实时监控并记录上拔过程中锚板的拉拔力；本文锚板拉拔速率控制为 4 mm/min，当锚板拉拔力稳定后终止试验。在实验过程中，计算机可以自动记录锚板拉拔时的位移及拉力。

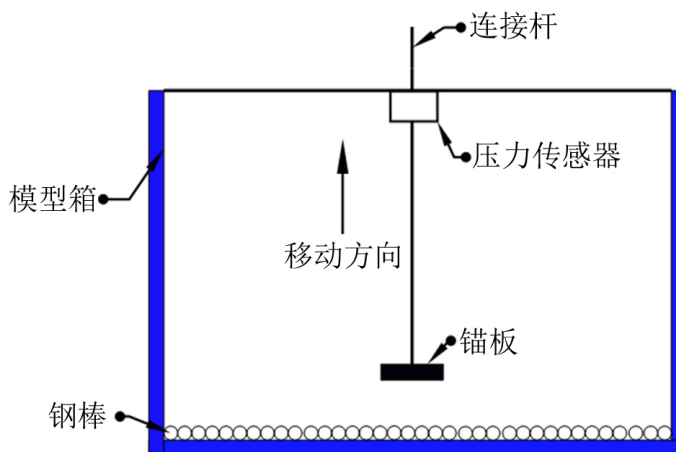


Figure 1. Test equipment
图 1. 试验装置图

为探究锚板上拔过程中破裂面和位移场的变化规律，本文采用粒子测速技术(PIV)，该技术是通过对比不同时刻的图像，从而得到拍摄区域内物体运动的轨迹和形变。本文采用 GEOPIV8 软件，为一段在 matlab 中运行的代码。通过手动选择如图中所示的分析区域，如图 2 会在该区域内自动划分多个网格。将拍摄的一系列照片按照时间顺序编号后，从第二张图片开始，matlab 自动捕捉每个网格内部中的颗粒相对于第一张图片中该网格内部的颗粒的运动轨迹，直到最后一张照片。计算完毕，手动输入各个选取的参考点的真实坐标，即可得到分析区域内土体的位移矢量以及形变。

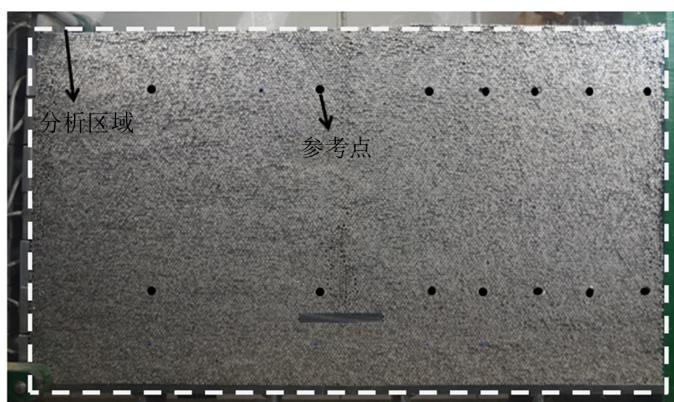


Figure 2. Image analysis area
图 2. 图像分析区域

2.2. 材料参数

本文采用长为 10 cm 的钢棒相似土作为锚板拉拔模型试验的填料。钢棒的基本参数见表 1 所示。

Table 1. Basic parameters of steel rod
表 1. 钢棒的基本参数

直径(mm)	体积(mm ³ /根)	质量(g/根)	密度(kg/m ³ /根)	重度(kN/m ³)
4	1260	9.77	7750	77.5

通过对钢棒间作用机理分析,得出内摩擦角是影响钢棒相似土力学行为的主要参数。结合试验条件,开展了系列剪切试验,测得了钢棒相似土的内摩擦角。剪应力随着剪切位移的增大,先迅速增大,当试样达到抗剪强度后,便趋于稳定且略有下降。垂直压应力越大,其相应的抗剪强度越大。

由图 3 可知,钢棒相似土更符合无粘性土的特性,其粘聚力基本为 0,根据无粘性土的抗剪强度计算公式 $\tau = \sigma \times \tan \varphi$,可以得知,在竖向应力 σ 不变的情况下,内摩擦角的大小决定了土样的抗剪强度。通过曲线的拟合,通过计算其斜率的大小,本文得到如下数据:直径 4 mm 的钢棒,其内摩擦角为 33.9°,按照表 2 中计算手册给出的土壤内摩擦角参考标准,其相当于中砂土。

Table 2. Reference standard for soil internal friction Angle
表 2 土壤内摩擦角参考标准

土的类型	粉砂土	细砂土	中砂土	粗砂土、砾砂土	碎石土
φ	15~25	20~30	25~35	30~40	40~45

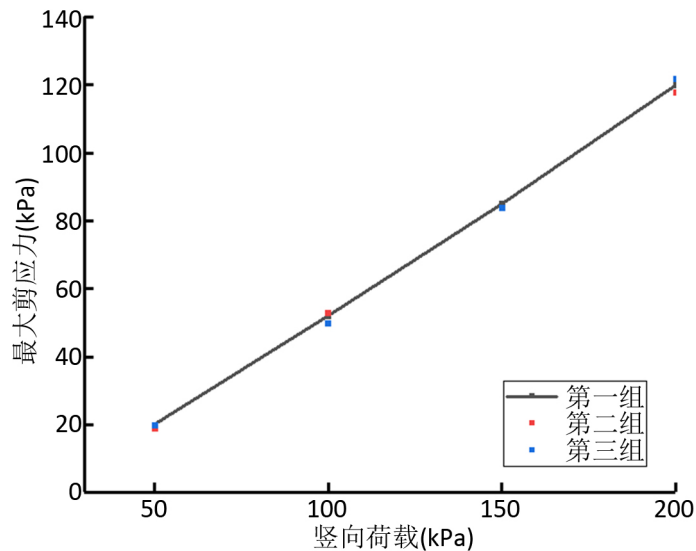


Figure 3. σ - τ relational graph
图 3. σ - τ 关系图

3. 结果分析

3.1. 上拔力与位移的关系

锚板拉拔试验中不同埋深比的拉拔力 - 位移曲线如图 4 所示。

整个拉拔过程大致可分为三个阶段:① 峰前弹性阶段,② 峰后下降阶段,③ 波动阶段。从图中可以看出,随着埋深比的增加,锚板拉拔力达到峰值的所需位移越大,其增长的拉拔力也越大。在拉拔力下降阶段,埋深比越大,其减小的拉拔力也越大,波动的幅度也越大。极限上拔力随埋深比的增加成几何级数增加,埋深比 H/D 分别为 1、2、3、4 时,极限上拔力 Q_{max} 分别为 84 N、214.8 N、302 N、475 N,

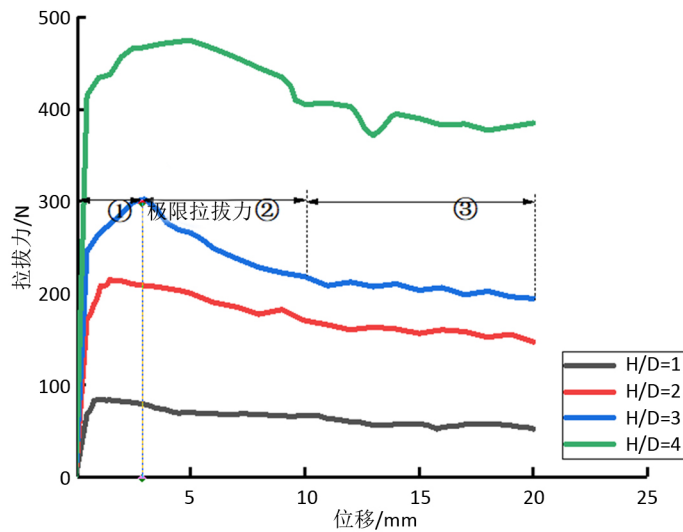


Figure 4. Drawing force-displacement diagram
图 4. 拉拔力 - 位移曲线图

位移 δ_{max} 分别为 1 mm、1.5 mm、2.8 mm、4.9 mm。

3.2. 锚板上拔过程的位移场及破裂面分析

水平锚定板破坏模式主要有三种，如图 5 所示。第一类破坏面是摩擦柱型[17]，该模式下拉拔力由锚杆正上方圆柱形破坏面内土体的重量加上沿该破坏面的摩擦阻力计算得出。由于锚杆周围受扰动的土体质量一般大于锚杆上方的土体，因此，基于这种破坏面，往往低估了锚杆的拉拔能力。第二类破坏面是斜面破坏模式[18]，该模式下拉拔能力的计算为倒梯形上土体的重量。由于忽略了沿破坏面摩擦力的影响，Mors 方法对浅层锚杆通常过于保守。然而，它高估了深锚的拉拔能力，在这种情况下，破坏面通常延伸不到地面。第三类破坏面是圆弧破裂面型破坏模式[19]。

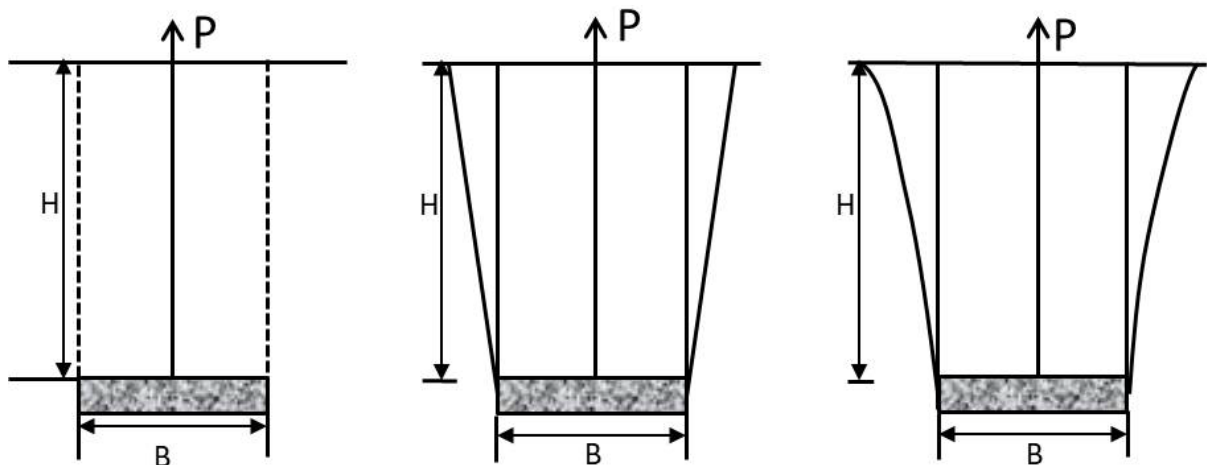


Figure 5. Three failure modes of soil around an anchor plate
图 5. 锚板周围土体 3 种不同破坏模式

为了更好的研究锚板上拔过程中破裂面的形态，本文采用了粒子图像测速技术(PIV)观察锚板上拔过程中的位移场及破裂面，该技术是通过比对不同时刻的图像来监测拍摄区域内物体运动的轨迹和形变。

图6~图9为不同埋深比达到极限拉拔力下的位移矢量图和破裂面云图。当埋深比 $H/D = 3$ 时，破裂面与竖直方向的夹角为 28° ，其角度等于 $45^\circ - \varphi/2$ ，在其余三个埋深比下，破裂面与竖直方向夹角为 22° 左右，其角度略小于 $45^\circ - \varphi/2$ 。

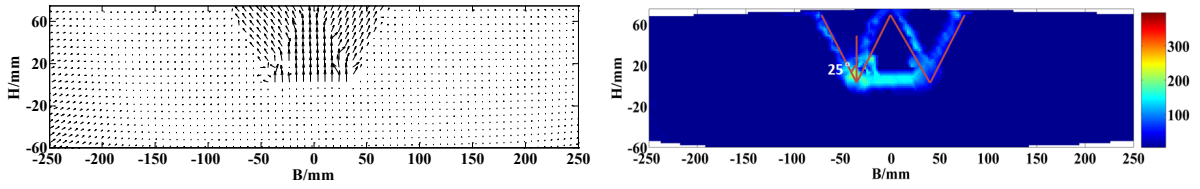


Figure 6. Buried depth ratio $H/D = 1$

图6. 埋深比 $H/D = 1$

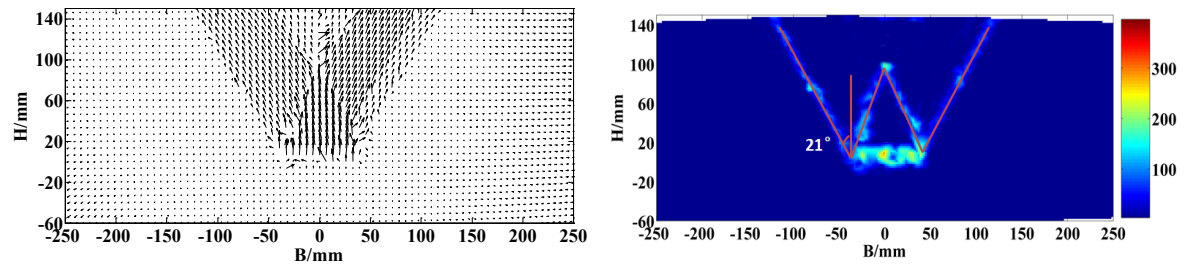


Figure 7. Buried depth ratio $H/D = 2$

图7. 埋深比 $H/D = 2$

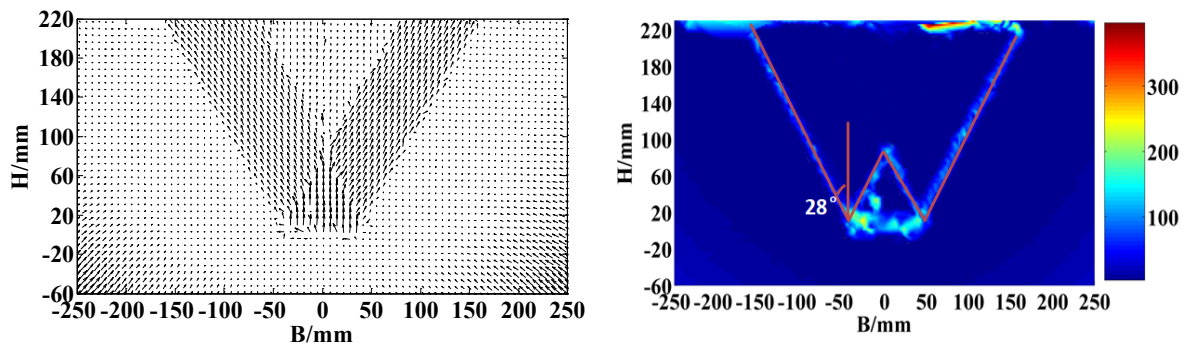


Figure 8. Buried depth ratio $H/D = 3$

图8. 埋深比 $H/D = 3$

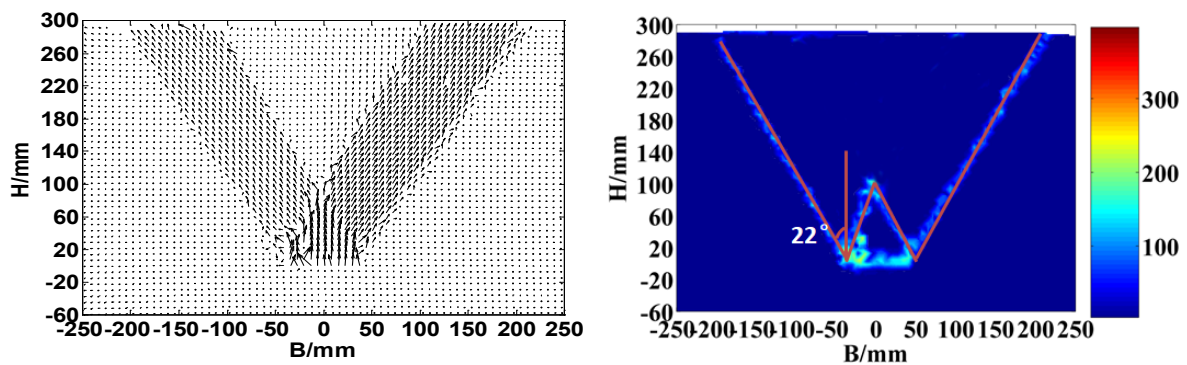


Figure 9. Buried depth ratio $H/D = 4$

图9. 埋深比 $H/D = 4$

从图中可以看出：锚板在向上拉拔过程中，在锚板上方形成了对称的破裂面，左右剪切区域相似，刚性三角形内的位移竖直向上，当埋深比 $H/D = 1$ (图 6) 时，刚性三角形顶部发展到填料的顶部，破裂面形状为“W”型；当埋深比 $H/D = 2$ (图 7) 时，刚性三角形顶部发展到填料高度的 1/2 处，除了刚性三角形区域内向上位移，其余部分均匀的向两侧移动，破裂面形状为中间凹的“W”型；当埋深比 $H/D = 3$ (图 8) 时，左右剪切区域相似，刚性三角形顶部发展到填料高度的 1/3 处，刚性三角形区域内向上位移；当埋深比 $H/D = 4$ (图 9) 时，刚性三角形顶部发展到填料高度的 1/4 处。

通过分析可知：不同埋深比下，刚性三角形的形状和大小一致，随着埋深比的增加，其上方受扰动较小的区域增加，位移量增量大的范围会减小。所以，埋深比对锚板拉拔力有较大影响，该试验结果可为锚板上拔预测模型建立以及设计提供参考依据。

3.3. 锚板大位移上拔破裂面的演化

为了更好地探究上拔位移量对破裂面的影响情况，以埋深比 $H/D = 3$ 为例，分析锚板在大位移情况下破裂面的演化情况，如图 10。

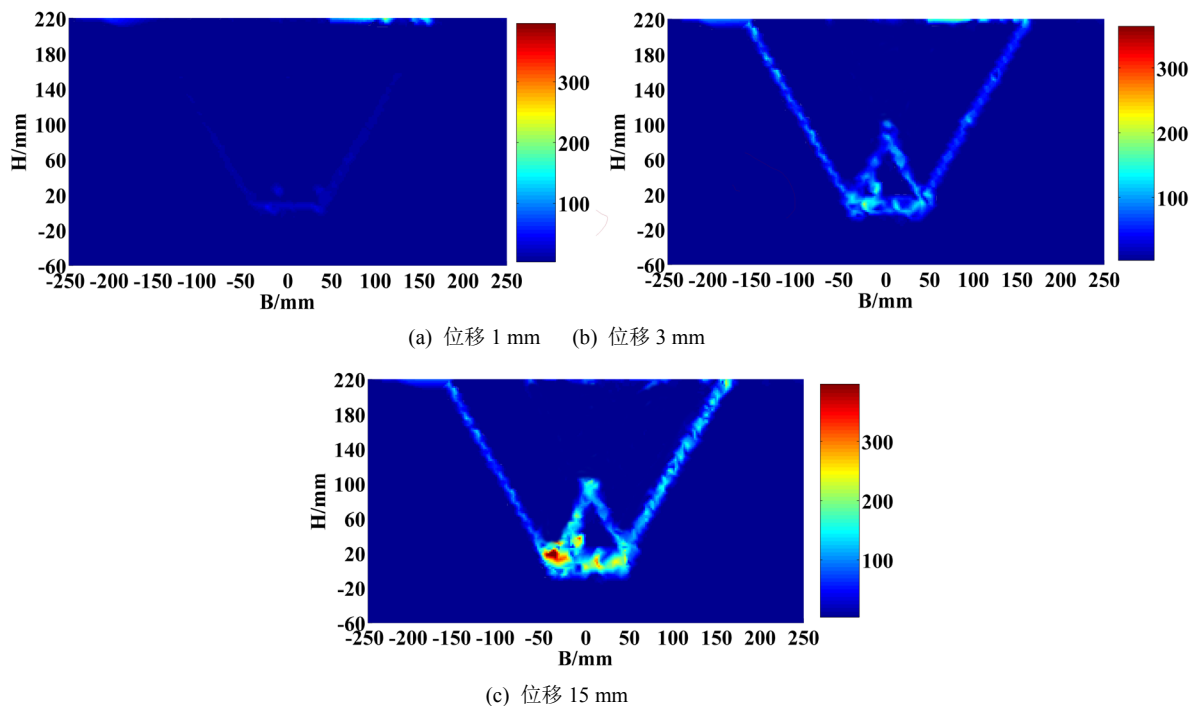


Figure 10. Evolution of fracture surface cloud map during large displacement uplift of anchor plate

图 10. 锚板大位移上拔过程破裂面云图演化

从图中可以看出：当位移 1 mm 时，破裂面首先发展到填土高度的 1/2 处；当位移 3 mm 时，破裂面已延伸到填土表面，刚性三角形也显现出形状，此时锚板拉拔力已达到峰值。随着上拔位移的增加，破裂面和刚性三角形越来越明显。

4. 结论

采用钢棒相似土替代传统砂土，通过系列模型试验，基于 PIV 图像分析，对锚板在钢棒相似土中的抗拔特性进行系统的试验研究，得出以下结论：

- 1) 采用钢棒相似土，将平面应变试验简化为二维试验条件，消除了前后挡板摩擦力的影响，直径 4

mm 的钢棒, 其内摩擦角为 33.9° , 相当于中砂土。

2) 整个拉拔过程大致可分为三个阶段: ① 峰前弹性阶段, ② 峰后下降阶段, ③ 波动阶段。随着埋深比的增加, 锚板拉拔力达到峰值的所需位移越大, 其增长的拉拔力也越大。

3) 锚板在向上拉拔过程中, 在锚板上方形成了对称的破裂面, 左右剪切区域相似, 刚性三角形内的位移竖直向上, 试验结果可为水平锚板极限平衡计算模型建立提供参考。

4) 不同埋深比下, 刚性三角形的形状和大小一致, 随着埋深比的增加, 其上方受扰动较小的区域增加。破裂面与竖直方向的夹角大致等于 $45^\circ - \varphi/2$ 。

参考文献

- [1] Merifield, R.S., Sloan, S.W. and Yu, H.S. (2001) Stability of Plate Anchors in Undrained Clay. *Geotechnique*, **51**, 141-153. <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.2.141>
- [2] 陆新洋, 何良德, 李社平, 等. 新夏港双线船闸单锚板桩结构受力特性分析[J]. 水运工程, 2017(4): 139-145.
- [3] 何思明. 抗拔锚板基础承载力研究[J]. 地下空间, 2002, 22(2): 145-148.
- [4] 邹贵华. 竖向条形锚定板水平拉拔承载机理研究[D]: [硕士学位论文]. 海口: 海南大学, 2017.
- [5] 李海亮, 黄润秋, 吴礼舟, 等. 非均质土坡降雨入渗的耦合过程及稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(4): 70-76.
- [6] 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, 2014, 31(2): 131-138.
- [7] Merifield, R.S., Lyamin, A.V. and Sloan, A.W. (2005) Stability of Inclined Strip Anchors in Purely Cohesive Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**, 792-799. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:6\(792\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:6(792))
- [8] 黄阜, 杨小礼, 赵炼恒, 等. 基于 Hoek-Brown 破坏准则的浅埋条形锚板抗拔力上限分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 179-175.
- [9] White, D.J., Take, W.A. and Bolton, M.D. (2003) Soil Deformation Measurement Using Particle Image Velocimetry (PIV) and Photogrammetry. *Géotechnique*, **53**, 619-631. <https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.7.619>
- [10] Ladanyi, B. (1969) A Study of the Trap-Door Problem in a Granular Mass. *Canadian Geotechnical Journal*, **6**, 1-14. <https://doi.org/10.1139/t69-001>
- [11] Jenck, O., Dias, D. and Kastner, R. (2009) Discrete Element Modelling of a Granular Platform Supported by Piles in Soft Soil-Validation on a Small Scale Model Test and Comparison to a Numerical Analysis in a Continuum. *Computers and Geotechnics*, **36**, 917-927. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2009.02.001>
- [12] Anil, B. and Jie, H. (2018) Two-Dimensional Physical Modelling of Soil Displacements above Trapdoors. *Geotechnical Research*, **5**, 68-80. <https://doi.org/10.1680/jgere.18.00002>
- [13] Caudron, M., Emeriault, F. and Kastner, R. (2006) Sinkhole and Soil-Structure Interactions: Development of an Experimental Model. HAL ID: Ineris-00145230, Version 1.
- [14] Caudron, M., Emeriault, F. and Kastner, R. (2007) Collapses of Underground Cavities and Soil-Structure Interactions: Experimental and Numerical Models. HAL ID: Ineris-00145379.
- [15] 芮瑞, 张龙, 孙义, 等. 桩承式路堤土拱演化的二维钢棒相似土模型试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(10): 8-15.
- [16] Lee, Y.-J. and Bassett, R.H. (2007) Influence Zones for 2D Pile-Soil-Tunnelling Interaction Based Onmodel Test and Numerical Analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **22**, 325-342. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2006.07.001>
- [17] Majer, J. (1955) Zur berechnung von zugfundamenten. *Osterreichischer Bauzeitschrift*, **10**, 85-90. (In German)
- [18] Mors, H. (1959) Das Verhalten von Mastgruendungen bei Zugbeanspruchung. *Bautechnik*, **36**, 367-378. (In German)
- [19] Balla, A. (1961) The Resistance to Breaking out of Mushroom Foundations for Pylons. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris, 17-22 July 1961, 569-576.