

DOI: 10.11779/CJGE20220474

# 砂土中倾斜条形锚板法向拉拔承载特性研究

胡伟<sup>1,2</sup>, 张翰林<sup>1,2</sup>, 孟建伟<sup>1,2</sup>, 刘顺凯<sup>2,3</sup>, 聂志红<sup>3</sup>

(1. 湖南科技大学岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室, 湖南湘潭 411201; 2. 湖南科技大学土木工程学院, 湖南湘潭 411201;  
3. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410083)

**摘要:** 锚板倾斜埋设时, 倾角对承载特性的影响研究尚不充分, 倾角与埋深耦合控制锚板承载机制的规律还不明确。基于模型试验和数字照相测量技术开展了砂土中倾斜条形锚板的承载特性研究, 得到了以下 4 点认识: ①锚板上拔承载因子  $N_y$  随埋深比增加呈先快后缓的增大趋势, 直至趋于一渐近值, 倾角越大, 上拔承载因子增速越快。②承载力增长系数  $K_i$  随埋设倾角增加表现为非线性增大, 而随埋深比的增大则呈整体下降趋势, 速率先快后慢, 且埋深比越大, 埋设倾角对拉拔承载力的影响越小。③锚周土体滑动面随埋深比和埋设倾角的演化可用椭圆来刻画, 该椭圆的长短轴比随埋深比的增大而减小, 两者之间可用幂函数来表征; 埋设倾角对椭圆大小没有影响, 将同埋深比水平锚板滑动面椭圆转动一定角度可得到倾斜锚板滑动面椭圆, 该角度可表达为埋设倾角的二次函数。④采用等效路径法可将浅埋水平锚板拉拔力学模型推演至深埋倾斜锚板拉拔力学模型, 使得在埋深和倾角全域内构建锚板拉拔力学分析模型成为可能。

**关键词:** 条形锚板; 上拔承载因子; 承载力增长系数; 滑动面; 埋深比; 倾角; 椭圆

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)07-1451-10

**作者简介:** 胡伟(1982—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地基与基础工程方面的研究工作。E-mail: yilukuangben1982@163.com。

## Normal pullout bearing characteristics of inclined strip anchor plate in sand

HU Wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Hanlin<sup>1,2</sup>, MENG Jianwei<sup>1,2</sup>, LIU Shunkai<sup>2,3</sup>, NIE Zhihong<sup>3</sup>

(1. Hunan Province Key Laboratory of Geotechnical Engineering Stability Control and Health Monitoring, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** For the inclined burial anchor plate, the researches on the influences of inclination angle on the bearing characteristics are insufficient, and the coupling effects of inclination angle and burial depth controlling the bearing mechanism are also not clear. Based on the model tests and the digital photographic measurement technology, the bearing characteristics of the inclined strip anchor plate in sand are studied, and the following conclusions are drawn: (1) The uplift bearing factor  $N_y$  of the anchor plate increases rapidly at first and then slowly with the increase of the burial depth ratio, until it approaches an asymptotic value. The larger the inclination angle, the faster the growth rate of uplift bearing factor. (2) The growth factor of bearing capacity  $K_i$  increases nonlinearly with the increase of the burial angle, but decreases as a whole with the increase of the burial depth ratio, and the growth rate is faster at first and then slower. The larger the burial depth ratio is, the smaller the influence of inclination angle on the uplift bearing capacity. (3) The evolution of sliding surface of soil around the anchor with the burial depth ratio and the inclination angle can be described by an ellipse. The ratio of the major to minor axes of the ellipse decreases with the increase of the burial depth ratio, which can be described by the power function. With the same burial depth ratio, the size of the ellipse is not affected by the inclination angle, but has to rotate the ellipse of the horizontal anchor plate by a certain angle to obtain the ellipse of the inclined anchor plate, and this rotation angle can be expressed by the quadratic function of the inclination angle. (4) The equivalent path method can be used to deduce the mechanical models from the shallow-burial horizontal anchor plate to the deep-burial inclined one, which makes it possible to establish the pullout mechanics analysis model for the anchor plate in the whole domain of burial depth and inclination angle.

**Key words:** strip anchor plate; uplift bearing factor; growth factor of bearing capacity; sliding surface; burial depth ratio; inclination angle; ellipse

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178332)

收稿日期: 2022-04-20

## 0 引言

锚板作为一种轻型抗拔基础类型,因其承载能力强、施工简便、经济性好等优点,广泛应用于高耸构筑物、边坡挡土墙以及浮式海洋平台等工程中<sup>[1-3]</sup>。为获得最佳抗拔性能,工程中锚板可根据需要采取水平( $\alpha=0^\circ$ )、倾斜( $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ )和竖向( $\alpha=90^\circ$ )三类埋设方式,如图1所示<sup>[4]</sup>。其他条件相同,但埋设角度不同时,锚板的拉拔承载力差异显著<sup>[5]</sup>。目前,国内外相关研究成果多针对水平和竖向两种特殊工况锚板<sup>[3,6-8]</sup>,而倾斜锚板的研究则较为有限<sup>[9-10]</sup>。Wang等<sup>[11]</sup>在砂土中开展了矩形锚板的拉拔试验,结果表明:相同埋深下,随着埋设倾角的增大,锚周土体滑动面持续扩大,锚板拉拔承载力也相应提高,但滑动面的扩大比例与埋深比有关。Frydman等<sup>[12]</sup>进行的倾斜锚板足尺试验和模型试验表明:当埋设倾角小于 $40^\circ$ 时,倾角对拉拔承载力影响较小,且锚周土体滑动面的发展与水平埋设时相似;而当倾角大于 $40^\circ$ 后,滑动面的长度将显著随倾角增加而增大,抗拔承载力也随之提高,但埋深的增加会降低倾角的这一影响。Murray等<sup>[13]</sup>的模型试验研究也得到类似的结论,并进一步指出承载力的变化80%以上是在埋设倾角 $45^\circ \sim 90^\circ$ 时完成的。丁佩民等<sup>[14]</sup>、Hanna等<sup>[15]</sup>的试验研究也先后证明了这一点。Ghaly等<sup>[16]</sup>观测到倾斜螺旋锚的滑动面较平时呈现在拉拔方向一侧扩大,而在另一侧收缩的非对称曲线形态,并在理论分析中使用对数螺旋线函数对其进行描述。刘君等<sup>[17]</sup>基于PFC软件模拟中密砂中 $22.5^\circ$ 和 $45^\circ$ 倾斜锚板的拉拔过程,滑动面呈曲线形态,且变化规律与Ghaly等<sup>[16]</sup>的试验结果一致。Yu等<sup>[10]</sup>基于块体集机构法从理论上对砂土中倾斜锚板法向拉拔时的滑动面变化进行了研究,与Ghaly等<sup>[16]</sup>和刘君等<sup>[17]</sup>的发现所不同的是,随着倾角增大,拉拔侧滑动面形态逐渐由直线转变为曲线,而另一侧则一直保持为直线。Hanna等<sup>[15]</sup>在其理论研究中假定的两侧滑动面均为直线型,拉拔侧平行于拉拔方向,另一侧则以一定角度延伸至地表,这与前面的研究均存在一定差异。

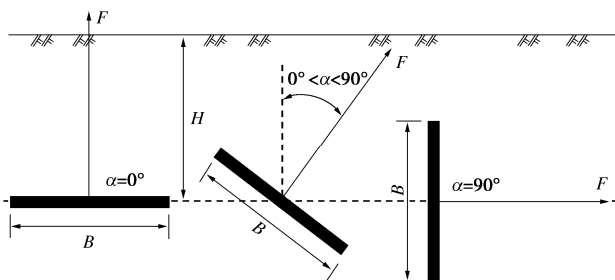


图1 不同锚板埋设倾角

Fig. 1 Different burial angles of anchor plate

上述有关倾斜锚板的研究虽然数量不多,但在定性上也达成了以下两方面的共识:①埋设倾角对滑动面影响明显,拉拔侧滑动面范围会显著扩大;②倾斜埋设锚板的拉拔承载力是大于相应水平锚板的。而在相关的定量分析上,如滑动面随埋设倾角变化的理论表征、承载力力学分析模型与相应计算方法等方面,当前的研究显然还远远不足。此外,倾斜锚板还需同时考虑埋深的影响,这进一步增加了问题分析的复杂程度。Yu等<sup>[10]</sup>的理论分析只针对浅埋类型,并认为倾角相同时,埋深对滑动面形态影响较小,该结论是否适用于所有埋深情况还有待考证。对于水平锚板,Ghaly等<sup>[16]</sup>分析了不同埋深类型时的滑动面形态变化,但其倾斜锚板理论研究也只限于浅埋类型,且埋设倾角 $\leq 60^\circ$ 。因此,如何在全域范围内针对不同埋深和倾角锚板,统一开展滑动面形态变化与表征,力学分析模型和相应承载力计算方法研究是一个尚未见相关报道又十分具有挑战性的课题。

鉴于上述分析,本文尝试在埋深和倾角全域范围内开展锚板法向拉拔的承载特性研究。为此,以条形锚板为研究对象,采用自制透明试验箱结合数字照相测量技术在砂土中开展多埋深、多角度埋设锚板的法向拉拔模型试验。在此基础上,进行承载力和滑动面变化规律分析,以期构建全域范围内锚板法向拉拔的统一力学分析模型和相应承载力计算方法提供依据和思路。

## 1 试验简介

本文采用的自制条形锚板多埋深、多角度法向拉拔可视化试验装置如图2所示,该装置以林志等<sup>[18]</sup>的试验装置为基础改进而来,不同之处在于模型锚板和数字照相系统。

为满足条形锚板长宽比和刚度以及砂箱边界效应可忽略的要求<sup>[13, 19]</sup>,条形锚板设计为 $250 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ,采用304不锈钢制作。为减小拉杆对滑动面的影响,并避免拉杆偏心造成锚板与玻璃板贴合不紧,选用直径 $10 \text{ mm}$ 的钢制拉杆,并在距观测面 $1/4$ 锚板长度处与锚板螺接;拉杆另一端焊接一环形挂钩,以便通过钢丝绳与加载装置连接。

拍摄用数码相机使用Canon EOS 90D,最大分辨率 $6000 \times 4000$ 像素。数码相机固定在三脚架上,并通过调节三脚架使相机轴向与锚板处于同一水平高度,实际每个像素对应的真实长度为 $0.225 \text{ mm}$ 。相机拍摄设置间隔时间为 $5 \text{ s}$ ,为防止相机抖动对后期图像处理产生不利影响,相机对焦模式设置为手动(MF)。后期采用图像分析软件PhotoInfor和结果后处理软件

PostViewer<sup>[20]</sup>对拉拔过程中拍摄的图片进行处理, 获得锚周土体的最大剪应变场和位移矢量场。

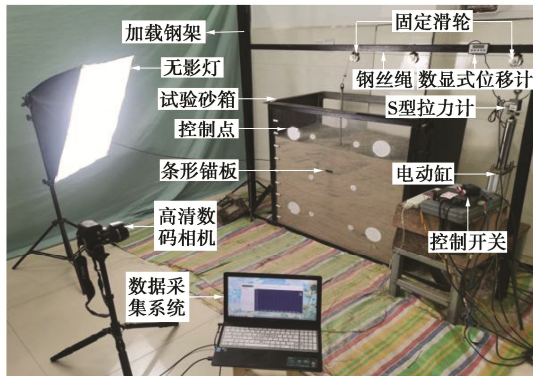


图 2 模型试验装置

Fig. 2 Apparatus for model tests

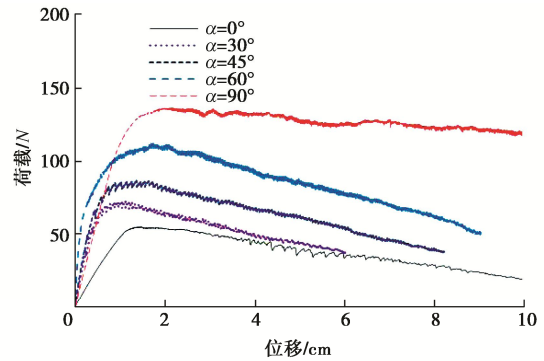
试验用砂内摩擦角  $\varphi=33.1^\circ$ , 控制砂样相对密度为 57%, 重度  $\gamma=16.6 \text{ kN/m}^3$ , 其余物理力学性质指标、地基填筑和锚板安装方法均与文献[18]保持一致。试验考虑锚板埋深比和埋设倾角两个变量, 设计 7 种埋深比 ( $H/B$  分别为 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12) 和 5 种荷载角度 (即与水平面呈  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ ), 共计 35 个试验工况, 每个工况进行两个平行试验, 若两组试验结果相近, 则取其中一组进行代表性分析; 若两组试验结果差异较大, 则开展第三组试验, 并取试验结果较为接近的两组中的一组进行代表性分析。

## 2 承载特性规律分析

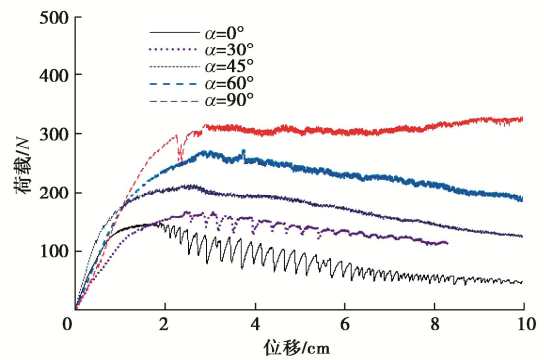
### 2.1 荷载-位移曲线

代表性荷载-位移曲线 (埋深比  $H/B=2, 4, 8$ ) 分别如图 3 (a) ~ (c) 所示。曲线形态整体上分为软化 (荷载位移曲线存在峰值) 和硬化 (荷载随位移增加而增大, 速率先快后缓, 并趋于一渐近值) 两种类型。由于试验用砂为中密砂, 软化型曲线的峰值特性表现并不是很突出。埋深比越小、倾斜角度越小, 曲线形态越倾向于前者; 而大埋深和大倾角工况下曲线形态则倾向于后者。此外, 荷载位移曲线还表现出振荡性, 产生振荡的主要原因是锚板拉拔产生位移后, 在其后侧形成空腔, 砂土从锚板边缘流泻至空腔, 导致锚板上方土体应力释放, 从而荷载降低; 随着拉拔继续, 锚板会再次压实其前方土体, 土中应力再次增大, 荷载则重新上升, 如此反复致使曲线产生振荡。另外, 埋深比越大, 土体受约束程度越强, 砂土流泻后造成的应力释放幅度就越大, 相应荷载降幅就越大, 振荡性也就越显著。倾角大小对振荡性具有显著影响, 当埋设倾角增加至  $45^\circ$  后, 曲线的振荡性明显减弱。

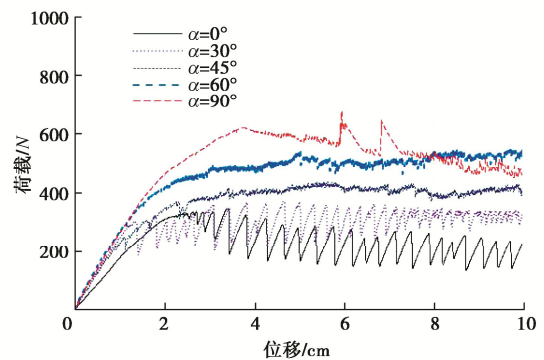
分析可知: 当锚板倾斜埋设时, 锚板前方沿拉拔方向土体受挤压, 产生高应力区; 边缘外侧虽存在一定程度的挤压, 但相较于前者而言属于低应力区, 后侧为非压实区<sup>[15]</sup>。此种状态下, 流泻至空腔的砂土主要来自于锚板后侧的非压实区土体和上侧边缘处的低应力区土体, 而对锚板前方高应力区土体影响较小, 因此应力释放幅度也较小, 曲线振荡性减弱。



(a)  $H/B=2$



(b)  $H/B=4$



(c)  $H/B=8$

图 3 代表性荷载-位移曲线

Fig. 3 Typical load-displacement curves

### 2.2 上拔承载因子

为减小模型试验尺寸效应的影响, 定义无量纲上拔承载因子  $N_\gamma$  如下<sup>[21]</sup>:

$$N_\gamma = \frac{Q_u}{\gamma AH} \quad (1)$$

式中:  $Q_u$  为极限承载力;  $\gamma$  为砂土重度;  $A$  为锚板面积;  $H$  为埋置深度。

图 4 反映了上拔承载因子  $N_\gamma$  随埋设倾角  $\alpha$  的变化。同一埋深比下,  $N_\gamma$  随埋设倾角  $\alpha$  的增加呈非线性增大。除埋深比 1 外, 其他埋深比下, 该非线性增大规律具有较好的相似性, 故取埋深比 2~12 的  $N_\gamma$  均值对整体变化趋势进行代表性分析。 $N_\gamma$  在  $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$  区间增长较缓, 增长值约占  $[0^\circ, 90^\circ]$  总增长值的 20%。 $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ , 增长速率有明显提升, 相应增长值约占总增长值的 50%;  $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ , 增长速率虽较前一区间有所下降, 但增长值仍约占总增长值的 30%。 $N_\gamma$  随埋深比变化规律如图 5 所示。不同埋设倾角下,  $N_\gamma$  随埋深比的增加均呈非线性增大规律, 增长速率先大后小, 当埋深比大于 4 后,  $N_\gamma$  变化已不明显, 并趋于一渐近值。另外, 埋设倾角  $\alpha$  越大,  $N_\gamma$  的初始增长速率也越大。

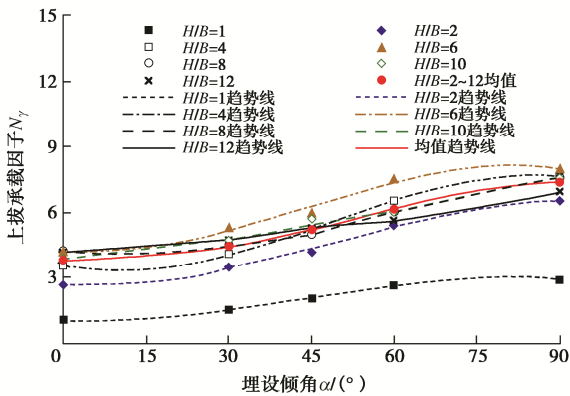


图 4 上拔承载因子随埋设倾角变化规律

Fig. 4 Variation of uplift bearing factor with burial angle

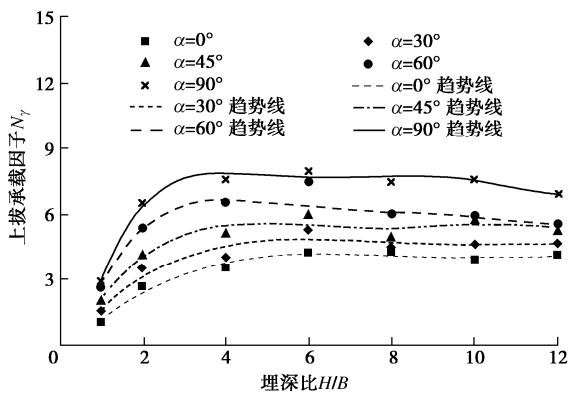


图 5 上拔承载因子随埋深比变化规律

Fig. 5 Variation of uplift bearing factor with burial depth ratio

### 2.3 归一化分析

对于倾斜条形锚板承载力的计算, Meyerhof<sup>[22]</sup>、Ghaly 等<sup>[16]</sup>、Mehrab 等<sup>[23]</sup>分别提出了简单实用型的计算方法, 相应公式分别如式 (2)~(4) 所示。式中  $Q(0^\circ)$  和  $Q(90^\circ)$  分别对应水平锚板和竖向锚板拉拔承载力。可以看出, Meyerhof 和 Ghaly 方法中任意倾角锚板承载力  $Q(\alpha)$  取决于水平锚板承载力  $Q(0^\circ)$  和

倾斜角度  $\alpha$ ; 而 Mehrab 则还与竖向锚板承载力  $Q(90^\circ)$  有关。为检验上述 3 种方法的有效性, 定义承载力增长系数  $K_i$  为  $Q(\alpha)$  与同等埋深比下  $Q(0^\circ)$  的比值, 并对本文代表性试验工况下的  $K_i$  进行计算,  $K_i$  随埋设倾角变化规律如图 6 所示。

$$Q(\alpha) = Q(0^\circ) [1 + (\alpha/90^\circ)^2] \quad (2)$$

$$Q(\alpha) = Q(0^\circ) / \cos(2\alpha/3) \quad (3)$$

$$Q(\alpha) = \frac{Q(0^\circ) \times Q(90^\circ)}{\sqrt{[Q(0^\circ) \cos \alpha]^2 + [Q(90^\circ) \sin \alpha]^2}} \quad (4)$$

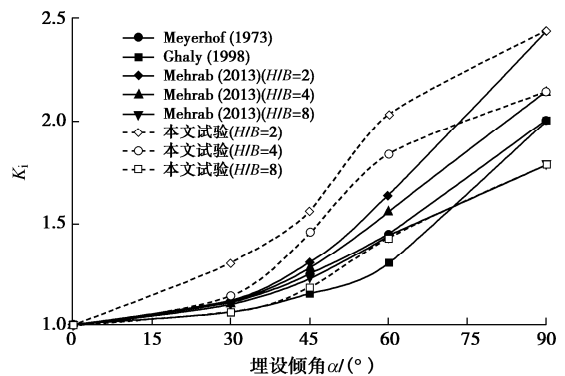


图 6 增长系数  $K_i$  随埋设倾角变化规律

Fig. 6 Variation of  $K_i$  with burial angle

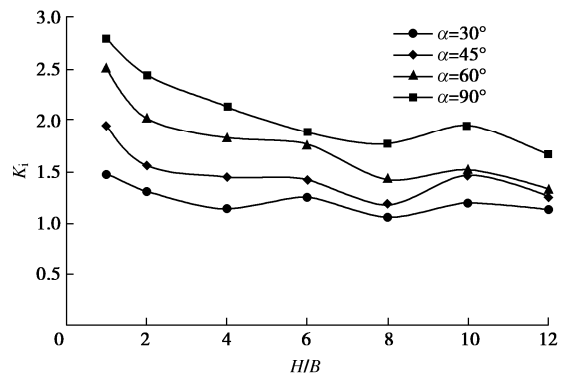


图 7 增长系数  $K_i$  随埋深比变化规律

Fig. 7 Variation of  $K_i$  with burial depth ratio

上述计算和本文试验结果均表明  $K_i$  随埋设倾角的增加呈非线性增大, 在  $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$  区间  $K_i$  增长速率较小,  $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$  区间  $K_i$  增长速率则存在较大幅度的提高, 而在  $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  区间, 计算方法规律和试验结果规律出现差异, 前者仍延续前一区间的快速增长规律, 而后者速率则有所减小。需要注意的是, 由于本试验为 1g 模型试验, 浅埋时锚周土体围压较小, 土体表现出更强的剪胀性, 土体抗力增大, 增长系数  $K_i$  将高于相同埋深比条件下的现场全尺寸或原型试验<sup>[21]</sup>, 图 6 中埋深比 2 和 4 时的试验值明显较计算值更高也正是由此导致的。此外, 前两种方法的计算  $K_i$  仅受理设倾角的影响, 与埋深比无关;



Mehrab 等<sup>[23]</sup>方法计算需同时用到水平和竖向锚板承载力, 相当于间接考虑了埋深比的影响; 本文试验结果表明在同一埋设倾角下,  $K_i$  会随埋深比的变化而改变, 显然前两种不考虑埋深比影响的方法是无法准确反映  $K_i$  的变化规律的。本次试验各工况  $K_i$  随埋深比的变化如图 7 所示。总体而言, 不同埋设倾角下  $K_i$  的变化规律较为一致, 均随着埋深比的增大呈整体下降趋势, 且下降速率先大后小。相同埋设倾角下, 埋深比越小, 倾斜锚板相比水平锚板承载力的提升幅度越大。随着埋深比的增大, 各倾斜角度锚板的承载力相差在缩小, 如埋深比为 1 时, 竖向锚板是 30° 倾斜锚板承载力的 1.9 倍, 而当埋深比达到 12 后, 该比值已减小到 1.4 左右。可以预见当埋深比足够大后, 埋设倾角对承载力影响将十分有限, 这与 Frydman 等<sup>[12]</sup>的研究结论是一致的。

### 3 滑动面形态变化规律分析

采用 PhotoInfor 图像分析软件及 PostViewer 后处理软件对拉拔过程中的数字图像进行处理, 获得与极限拉拔承载力对应的锚周土体最大剪应变场和位移

场。当变形梯度很大时, 全域显示变形区间将不利于滑动面的识别。本文设置应变显示的最小值和最大值分别为 0.01 和 0.1, 认为  $\gamma_{max} \geq 0.1$  后土体进入了工程破坏的应变范畴<sup>[24]</sup>, 则  $\gamma_{max}$  达到该一量级区域的边界可视为滑动面, 据此开展锚板埋设倾角和埋深比对锚周土体滑动面形态的影响分析。

#### 3.1 埋深比的影响

以埋设倾角 0°, 45°, 90° 为例, 埋深比 1, 2, 4, 8, 12 的锚周土体最大剪应变场分别如图 8 (a) ~ (c) 所示。水平埋设 ( $\alpha=0^\circ$ )、埋深比较小工况 ( $H/B=1, 2$ ), 滑动面呈现为左右对称的曲线形态, 但曲率很小, 并延伸至地表, 可用一长短轴比很大的椭圆部分圆周来近似刻画, 该部分圆周的曲率小, 可近似为直线; 埋深比增大到 4, 滑动面曲线形态曲率增大, 其上部表现出内倾趋势, 但仍能延伸至地表, 未发生闭合, 用于刻画的椭圆长短轴比减小, 相应部分圆周的曲率增大。埋深比增大到 8, 滑动面已不再能延伸至地表, 而是局限于土体内部, 呈气球状的闭合形态, 滑动面可用锚板以上的全部椭圆圆周进行刻

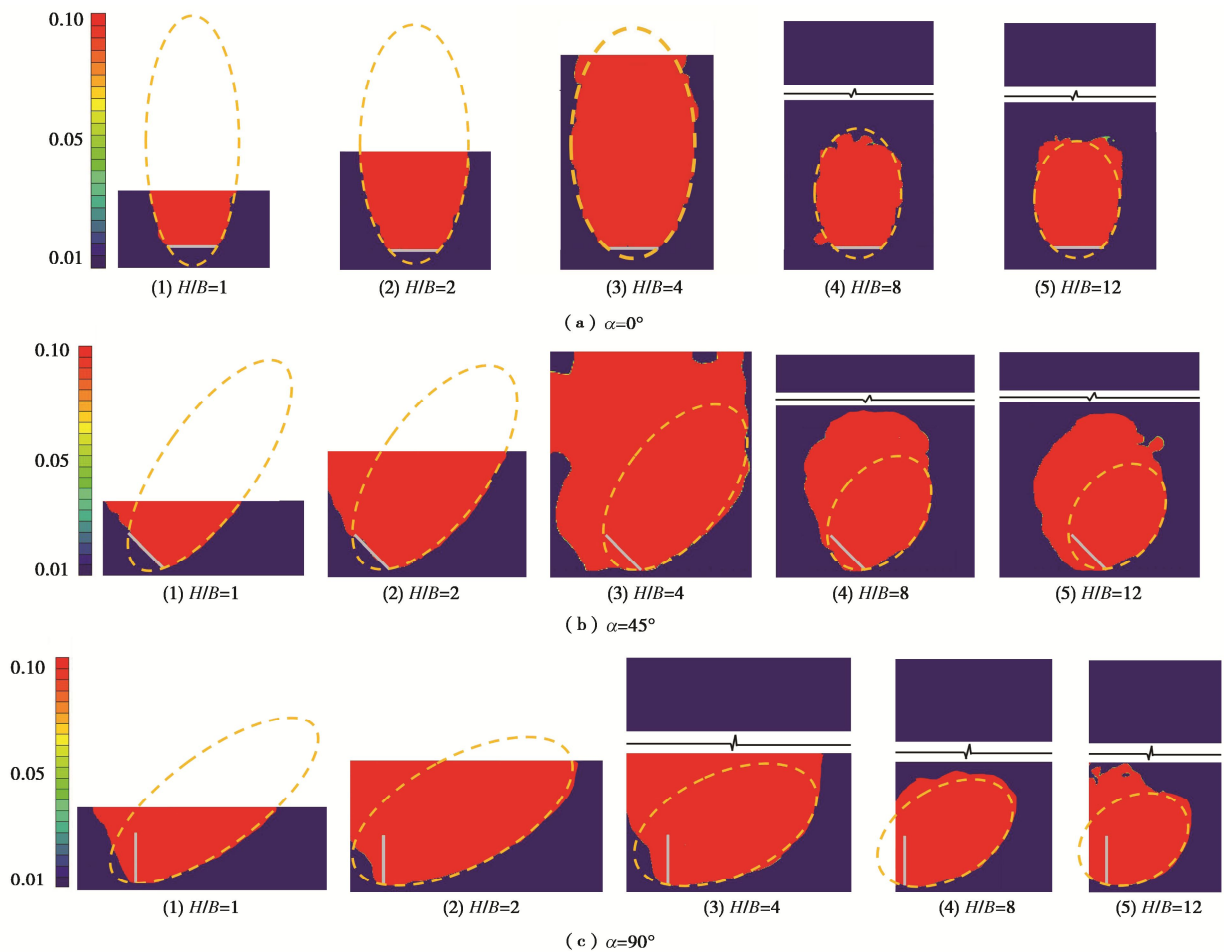
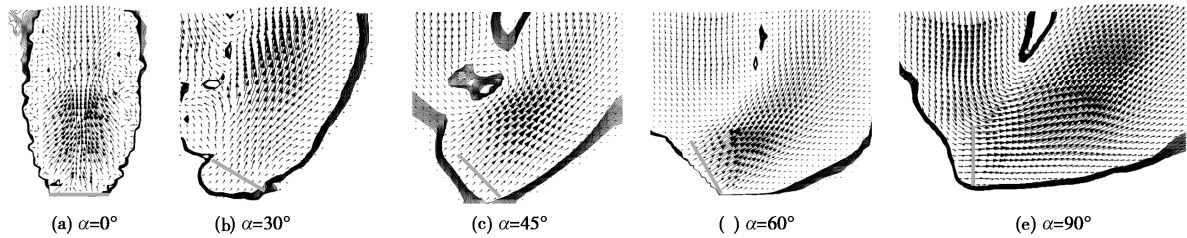


图 8 锚周土体最大剪应变场

Fig. 8 Maximum shear strain fields of soil around anchor plate

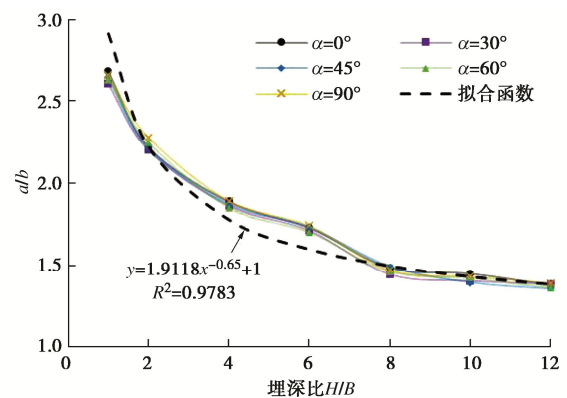
图9 锚周土体位移场 ( $H/B=4$ )Fig. 9 Displacement fields of soil around anchor plate ( $H/B=4$ )

画。埋深比进一步增大到 12, 滑动面整体形态变化不大, 但相较于埋深比 8 时有进一步向锚板方向收缩的现象, 即用于刻画的椭圆长短轴比进一步减小, 曲率继续增大, 形状趋向于圆形。刘明亮等<sup>[25]</sup>、朱长歧等<sup>[26]</sup>、史旦达等<sup>[27]</sup>的试验中也观测到这种滑动面随埋深比的连续演化规律, 但未能分析如何进行理论表征。锚板倾斜埋设后, 锚周土体的变形已不再具有对称性, 这在埋设倾角为  $45^\circ$  和  $90^\circ$  的剪应变图中表现十分明显。为进一步分析该现象的成因, 以埋深比 4 对应的不同埋设倾角为例, 锚周土体位移云图与矢量场随埋设倾角的变化如图 9 所示。随着与锚板距离的增加, 锚板右侧 (拉拔方向同侧) 土体运动方向由拉拔方向转向竖直方向, 该区域土体始终受到锚板的挤压作用, 破坏表现为压剪被动破坏。锚周土体位移梯度最大之处也意味着该处变形最为强烈, 可视为滑动面边界。从图 8 中可以看出, 相比水平锚板, 倾斜锚板的破坏范围逐渐扩大, 但右侧滑动面形态仍始终保持较为规则的曲线型。左侧 (拉拔方向异侧) 锚周土体的运动机制则变得更加复杂, 其中锚板左上侧土体运动方向与右侧相近, 由压剪被动破坏起主导; 但在锚板左外侧, 土体运动方向向下, 是因部分砂土流泻至锚板后侧形成的空腔所致, 导致该区域出现土体应力松弛, 土体趋向于主动破坏, 且其范围明显受到倾角和埋深比的影响, 埋深比越小、倾角越大, 流泻程度越强烈, 影响范围则越大。在两种破坏机制的共同作用下, 左侧土体滑动面形态变化不像右侧具有明显的规律性, 且形态较不规则。Yu 等<sup>[10]</sup>的研究结果表明: 对于倾斜锚板, 锚周土体的主动破坏对承载力贡献较小, 多数情况下则由被动破坏控制, 且埋设倾角越大, 被动控制程度越高。因此, 倾斜锚板承载机制的描述关键在于被动破坏区, 即沿拉拔方向锚周土体滑动面的刻画。鉴于此, 尝试继续用刻画水平锚板滑动面的椭圆来刻画具有相同埋深比 (以锚板中心对应的埋深进行计算) 的倾斜锚板滑动面, 我们发现对于倾斜埋设的各工况, 如图 8 (b), (c) 所示, 只需将同等埋深比水平工况下的椭圆绕着锚板中心点旋转一定角度, 并保证锚板的拉拔侧端点位于椭圆上, 则拉拔侧的滑动面与椭圆

吻合度非常高, 另一侧 (含有主动破坏) 效果相对较差, 且有小倾角工况又优于大倾角工况, 但总体上整个滑动面与椭圆的吻合比例是相当高的。进一步分析可知, 无论锚板倾角多少, 其锚周土体被动破坏区域应始终位于锚板拉拔方向。图中椭圆以外的区域由于偏离拉拔方向程度较高, 可视为土体主动破坏占主导区域。据前面分析, 土体被动破坏对锚板拉拔承载性能的贡献是主要的, 故上述刻画椭圆虽然在拉拔异侧与实际滑动面存在一定误差, 但足以抓住倾斜锚板承载机理的主导方面, 满足工程需要。

提取不同埋深比下刻画滑动面椭圆的长短轴长度  $a$  和  $b$ , 计算其比值  $a/b$ , 绘制不同倾角下该比值随埋深比的变化如图 10 所示。可见, 随着埋深比的增加,  $a/b$  逐渐减小, 且速率先快后慢, 存在渐近值, 可用一曲线函数进行拟合, 拟合参数  $m=1.9118$ ,  $n=-0.65$  如式 (5) 所示。同一埋深比下  $a/b$  随埋设倾角  $\alpha$  的变化规律如图 11 所示, 相同埋深比时,  $a/b$  几乎不随  $\alpha$  发生变化。可见椭圆长短轴之比主要与埋深比有关, 倾角对刻画滑动面椭圆的形状几乎不产生影响。这与 Yu 等<sup>[10]</sup>理论分析中采用的埋深对浅埋类型锚板的滑动面形态影响较小的观点是一致的。本次研究证实了这一观点不仅适用于浅埋锚板, 也适用于深埋锚板, 并对其原因进行了深入阐释。

$$\frac{a}{b} = m \cdot \left( \frac{H}{B} \right)^n + 1 \quad (5)$$

图10  $a/b$  随埋深比变化规律Fig. 10 Variation of  $a/b$  with burial depth ratio

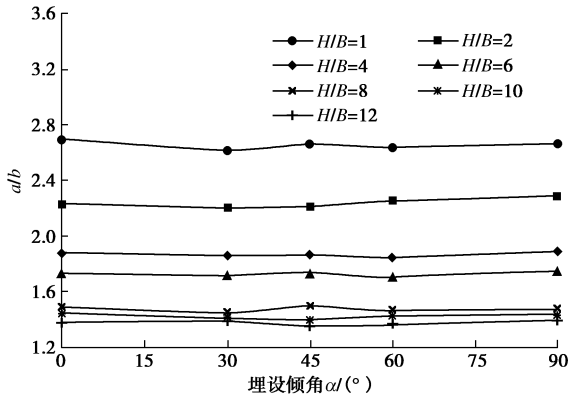


图 11 a/b 随埋设倾角变化规律

Fig. 11 Variation of a/b with burial angle

### 3.2 埋设倾角的影响

以埋深比 2 和 8 为例, 埋设倾角为 0°, 30°, 45°, 60°, 90° 的锚周土体最大剪应变场分别如图 12 (a), (b) 所示。埋深比相同时, 锚板埋设倾角越大, 椭圆的旋转角度也越大, 但两者并不相等, 而是前者小于后者。椭圆旋转角度增大, 锚板右侧埋深增大, 滑动面向更深层土体发展, 其在水平方向的投影长度也随之增大, 这对于浅埋锚板尤为突出。图 12(a) 中可以清晰看到滑动面包围区域占椭圆面积的比例在随着埋设倾角增大。这种现象对于深埋锚板则不明显, 因为椭圆全部局限于土体内部, 其描述的滑动面包围区域面积不随倾角发生变化。滑动面向深部发展和滑动面包围区域增大很明显都会提高锚板的拉拔承载力, 且埋深越浅, 提高比例越显著, 这和前面上拔承载因子的变化规律是相对应的。埋设倾角相同时, 椭圆旋转角度随埋深比的变化则不大。椭圆旋转倾角  $\beta$

与锚板埋设倾角  $\alpha$  之比  $\beta/\alpha$  随埋设倾角变化规律如图 13 所示。不同埋深比下,  $\beta/\alpha$  均随  $\alpha$  的增大整体呈线性减小趋势, 一致性较好, 可用线性函数对其进行拟合:

$$\beta/\alpha = -0.0036\alpha + 1 \quad (6)$$

$\beta/\alpha$  随埋深比变化规律如图 14 所示, 不同埋深比下, 比值虽有一定程度的波动, 但整体上具有较好的稳定性。埋设倾角越大,  $\beta/\alpha$  则越小。相应于埋设倾角 30°, 45°, 60°, 90°,  $\beta/\alpha$  平均值分别为 0.885, 0.836, 0.806, 0.695, 这进一步验证了滑动面刻画椭圆的旋转角度主要受埋设倾角的影响。

### 4 全域内力学模型构建思路分析

构建倾斜锚板拉拔力学模型的关键在于如何更好地对滑动面进行理论表征, 而影响滑动面的因素包括埋深比和埋设倾角两方面, 且两者的影响应均为连续的, 而不应是当前研究中区分浅埋埋, 人为割裂埋深比对滑动面连续影响的思路<sup>[14]</sup>。据本文研究结果, 埋深比的影响可用一长短轴比随埋深比的增大不断减小的椭圆部分圆周来刻画, 文中式 (5) 建议了长短轴比的表达函数。对于倾斜锚板, 刻画滑动面的椭圆大小与同等埋深比下水平工况锚板的椭圆大小相同, 两者长短轴比相同; 但随着埋设倾角变化, 椭圆发生转动, 其转动角度与埋设倾角并不相等, 式 (6) 建议了椭圆转动角度的表达函数。至此, 明确了埋深比和埋设倾角两个因素连续影响滑动面变化的理论表征, 奠定了在全域范围内构建锚板倾斜拉拔力学模型的基础。

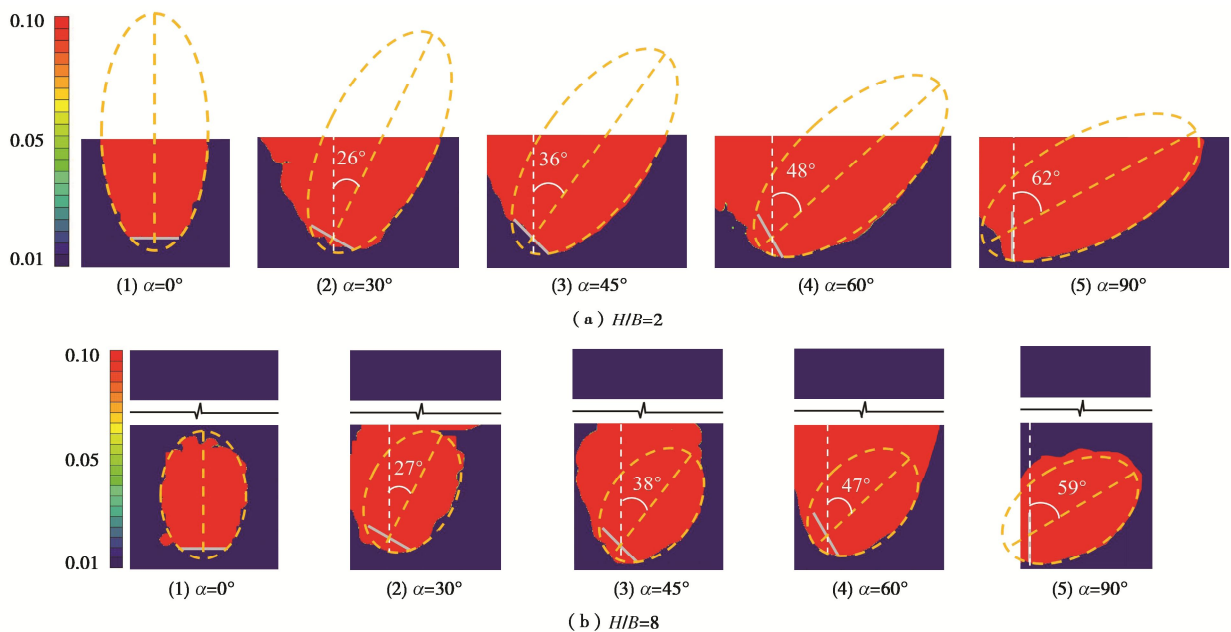


图 12 锚周土体最大剪应变场

Fig. 12 Maximum shear strain fields of soil around anchor plate

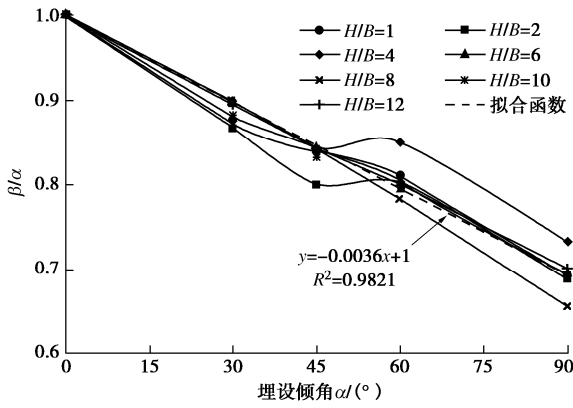


图 13  $\beta/\alpha$  随埋设倾角变化规律

Fig. 13 Variation of  $\beta/\alpha$  with burial angle

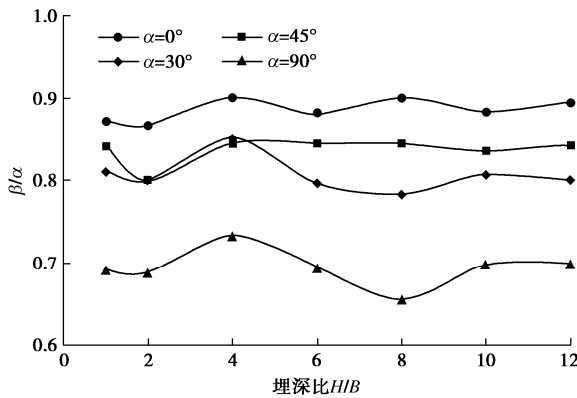


图 14  $\beta/\alpha$  随埋深比变化规律

Fig. 14 Variation of  $\beta/\alpha$  with burial depth ratio

础, 但构建任意埋深比、任意倾角下锚板力学模型仍存在一个路径问题, 即如何完成从浅埋水平锚板拉拔力学模型到深埋倾斜锚板拉拔力学模型全过程的构建。图 15 对此进行了分析, 完成这一全过程有 3 条路径: 路径 1 同时考虑埋深比和埋设倾角两个变量, 直接由状态①的水平浅埋工况推至状态④的倾斜深埋工况, 路径直接明确但需同时控制两个变量, 难度大。路径 2、3 属于等效路径, 路径 2 先由状态①的水平浅埋工况变化埋深至状态②的水平深埋工况, 再改变埋设倾角至状态④的倾斜深埋工况, 路径 3 则是改变了两个过程的先后顺序。相对于路径 1, 路径 2 和 3 在每个过程中只需控制一个变量, 难度大为降低。下面将根据本文所提出的表征滑动面随埋深比、倾角变化规律方法在路径 2 和 3 的基础上提出如下构建全域范围内倾斜锚板拉拔力学模型的步骤, 以路径 2 为例。

第一步, 根据水平浅埋工况的滑动面确定式 (5) 中椭圆函数长短轴比的系数  $m$  和  $n$ ; 此时, 滑动面可延伸至地表, 则力学模型中的隔离体为锚板、滑动面和地表之间围成的区域。

第二步, 保持椭圆倾角为 0 不变, 改变式 (5) 中埋深比, 计算水平深埋工况下的滑动面长短轴比, 确

定其大小; 此时, 滑动面局限在土体内部, 则力学模型中的隔离体为锚板与其上椭圆周围成的区域。

第三步, 保持椭圆大小不变, 据式 (6) 计算倾斜锚板滑动面椭圆需转动的角度  $\beta$ , 将椭圆绕着锚板中心旋转  $\beta$ , 并通过上下移动椭圆以确保锚板下端在椭圆上。至此, 得到倾斜深埋工况④的滑动面形态, 力学模型中隔离体为锚板及其延长线与其倾斜一侧椭圆周围成的区域。

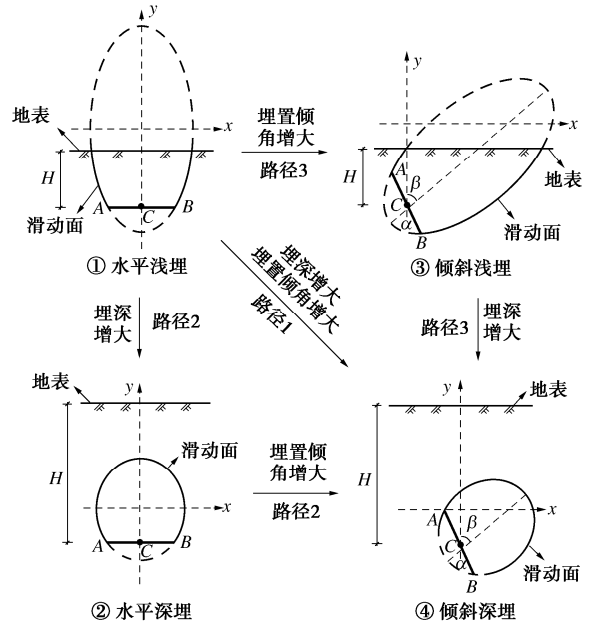


图 15 全域范围内构建力学模型路径

Fig. 15 Model paths in whole domain

### 5 结 论

本文采用模型试验研究了砂土中倾斜条形锚板的承载特性研究, 获得了以下 5 点结论。

(1) 不同埋深比下, 锚板上拔承载因子  $N_T$  随埋设倾角  $\alpha$  的非线性增大规律相似性较好 (极浅埋除外);  $\alpha$  越大,  $N_T$  的初始增长速率越大;  $\alpha$  相同时,  $N_T$  的差异则较不明显。不同埋设倾角下,  $N_T$  随埋深比的增加均呈非线性增大趋势, 增长速率先大后小。

(2) 承载力增长系数  $K_i$  随埋设倾角增加呈非线性增大,  $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$  区间速率显著提高。不同倾角下  $K_i$  随埋深比增大均呈整体下降趋势, 速率先大后小。随着埋深比增加, 埋设倾角对拉拔承载力的影响减弱。

(3) 埋深比和倾角对锚周土体滑动面的影响是连续的。滑动面随埋深比的变化可用一个长短轴比变化的椭圆部分圆周来刻画。随着埋深比的增加, 长短轴比逐渐减小, 两者之间可用幂函数来表征, 相应滑动面从近似直线延伸至地表演化至局限于土体内部。



(4) 埋设倾角对椭圆的大小几乎没有影响,即倾斜锚板滑动面对应椭圆的大小与同埋深比水平锚板的椭圆一样,但需将其转动一个角度,该角度可用锚板埋设倾角的二次函数来表达。

(5) 结合椭圆长短轴比随埋深比和椭圆转角随埋设倾角两者的变化规律,可以采用等效路径法将浅埋水平锚板拉拔力学模型推演至深埋倾斜锚板拉拔力学模型,从而实现在埋深和倾角全域范围内构建锚板拉拔力学分析模型。

#### 参考文献:

- [1] 王昊,孙玉海,江建宏,等. 考虑摩擦系数的砂土中竖向锚定板承载机理离散元分析[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(增刊 2): 117-120. (WANG Hao, SUN Yuhai, JIANG Jianhong, et al. Mechanism of bearing capacity of vertical anchor plates in sand considering interface friction based on DEM method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(S2): 117-120. (in Chinese))
- [2] 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. (in Chinese))
- [3] 朱碧堂,杨敏,郭蔚东. 竖向浅埋锚定板的侧向极限抗拔荷载[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(10): 1236-1241. (ZHU Bitang, YANG Min, GUO Weidong. Pullout capacity of vertically-buried shallow anchor plates[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(10): 1236-1241. (in Chinese))
- [4] 黄明华,李盾,李嘉成. 斜坡浅埋水平条形锚板抗拔承载力的极限分析[J]. 水文地质工程地质, 2019, **46**(1): 116-122. (HUANG Minghua, LI Dun, LI Jiacheng. A limit analysis of the ultimate pullout capacity of a shallow horizontal strip anchor plate embedded in slope[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, **46**(1): 116-122. (in Chinese))
- [5] 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征[J]. 岩土工程学报, 1992, **14**(1): 62-66. ((QIAN/XI) Pingyi, LIU Zude, LIU Yiliang. Deformation and failure characteristics of soil around shallow-buried inclined anchor plate[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, **14**(1): 62-66. (in Chinese))
- [6] 胡伟,高文华,赵璞,等. 竖向正方形锚板水平拉拔极限承载力三维统一理论解研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(1): 111-120. (HU Wei, GAO Wenhua, ZHAO Pu, et al. Three-dimensional unified theoretical researches on ultimate horizontal pullout capacity of vertical square anchors[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(1): 111-120. (in Chinese))
- [7] 高宇新,朱鸿鹄,张春新,等. 砂土中锚板上拔三维物质点法模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(2): 295-304. (GAO Yuxin, ZHU Honghu, ZHANG Chunxin, et al. Three-dimensional uplift simulation of anchor plates in sand using material point method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(2): 295-304. (in Chinese))
- [8] CHOUDHARY A K, PANDIT B, SIVAKUMAR BABU G L. Three-dimensional analysis of uplift behaviour of square horizontal anchor plate in frictional soil[J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2018, **4**(2): 14.
- [9] EMIRLER B, TOLUN M, LAMAN M. Numerical Investigation of the Uplift Capacity of Inclined Anchor Plates in Sand[C]. Fourth International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2016.
- [10] YU S B, HAMBLETON J P, SLOAN S W. Analysis of inclined strip anchors in sand based on the block set mechanism[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, **553**: 422-427.
- [11] WANG M C, WU A H. Yielding load of anchor in sand[C]// Application of Plasticity & Generalized Stress strain in Geotechnical Engineering, ASCE, 1982.
- [12] FRYDMAN S, SHAHAM I. Pullout capacity of slab anchors in sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, **26**(3): 385-400.
- [13] MURRAY E J, GEDDES J D. Discussion: Resistance of passive inclined anchors in cohesionless medium[J]. Géotechnique, 1990, **40**(2): 317-318.
- [14] 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. (in Chinese))
- [15] HANNA A, FORIERO A, AYADAT T. Pullout capacity of inclined shallow single anchor plate in sand[J]. Indian Geotechnical Journal, 2015, **45**(1): 110-120.

- [16] GHALY A M, CLEMENCE S P. Pullout performance of inclined helical screw anchors in sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, **124**(7): 617-627.
- [17] 刘君, 胡宏. 砂土地基锚板基础抗拔承载力 PFC 数值分析[J]. *计算力学学报*, 2013, **30**(5): 677-682, 703. (LIU Jun, HU Hong. PFC analysis of the uplift bearing capacity of plate anchors in sand[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2013, **30**(5): 677-682, 703. (in Chinese))
- [18] 林志, 胡伟, 赵璞, 等. 砂土中平板圆锚倾斜拉拔承载特性模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, **42**(11): 3059-3068, 3168. (LIN Zhi, HU Wei, ZHAO Pu, et al. Model test study on inclined pull-out bearing characteristics of flat circular anchor in sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, **42**(11): 3059-3068, 3168. (in Chinese))
- [19] 朱斌, 熊根, 刘晋超, 等. 砂土中大直径单桩水平受荷离心模型试验[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(10): 1807-1815. (ZHU Bin, XIONG Gen, LIU Jinchao, et al. Centrifuge modelling of a large-diameter single pile under lateral loads in sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(10): 1807-1815. (in Chinese))
- [20] 李元海. 数字照相量测技术及其在岩土工程实验中的应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009. (LI Yuanhai. *Digital Photogrammetry Technology and its Application in Geotechnical Engineering Experiment*[M]. Xuzhou, China: China University of Mining & Technology Press, 2009. (in Chinese))
- [21] BRADSHAW A S, GIAMPA J R, GERKUS H, et al. Scaling considerations for 1-g model horizontal plate anchor tests in sand[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2016, **39**(6): 20160042.
- [22] MEYERHOF G G. Uplift resistance of inclined anchors and piles[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1975, **12**(7): 97.
- [23] JESMANI M, KAMALZARE M, NAZARI M. Numerical study of behavior of anchor plates in clayey soils[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2013, **13**(5): 502-513.
- [24] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. *岩土力学*, 2021, **42**(3): 833-845. (GU Xiaoqiang, WU Ruituo, LIANG Fayun, et al. On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, **42**(3): 833-845. (in Chinese))
- [25] 刘明亮, 朱珍德, 刘金元. 基于 PIV 技术的锚板抗拉破坏模式识别[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2011, **39**(1): 84-88. (LIU Mingliang, ZHU Zhende, LIU Jinyuan. Identification of failure modes for uplift anchor plates based on PIV technology[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2011, **39**(1): 84-88. (in Chinese))
- [26] 朱长歧, 初晓锋. 钙质砂中锚定板的极限抗拔力计算[J]. *岩土力学*, 2003, **24**(增刊 2): 153-158. (ZHU Changqi, CHU Xiaofeng. Calculation of ultimate extraction resistance of anchoring plates in calcaress sands[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, **24**(S2): 153-158. (in Chinese))
- [27] 史旦达, 毛逸瑶, 杨勇, 等. 基于 DIC 技术的砂土中圆形锚板上拔土体变形特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, **41**(10): 3201-3213. (SHI Danda, MAO Yiyao, YANG Yong, et al. Experimental study on the deformation characteristics of soils around uplift circular plate anchors using digital image correlation technology[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, **41**(10): 3201-3213. (in Chinese))