

考虑土体自重应力影响的抗滑桩三维土拱效应

吕韶全¹, 孙狂飙¹, 王少锋¹, 陈鑫², 曾俊源²

(1. 安徽交通控股集团有限公司, 安徽 合肥 230088; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 基于 Prandtl-Reissner 地基极限承载力理论, 建立了一种新的土拱效应力学分析模型, 改进了拱脚破坏面的假设. 研究表明, 自重应力是引起土拱效应破坏的主导因素, 低于临界深度时土的剪胀效应破坏拱脚, 高于临界深度时由于土的剪切破坏拱脚失效; 研究结果与 ABAQUS 有限元数值模拟及室内模型试验结果一致. 在三维状态下, 在距桩顶表面一定深度内, 拱脚处土的竖向位移会破坏拱脚, 土拱效应减弱, 在此以下一定深度段为土拱效应形成的有利深度, 有利深度段深度下自重应力对土拱的破坏起主导作用. 研究提出了根据桩土摩擦系数求解拱脚破坏面的新思路, 为抗滑桩抗力设计提供了理论借鉴.

关键词: 土拱效应; 三向应力状态; 理论模型; 数值模拟; 模型试验

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)04-0510-08

Three-dimensional soil arching effect considering the influence of soil gravity stress on anti-slide pile

LÜ Shaoquan¹, SUN Kuangbiao¹, WANG Shaofeng¹, CHEN Xin², ZENG Junyuan²

(1. Anhui Transportation Holding Group Co., Ltd., Hefei 230088, China;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on Prandtl-Reissner's theory of ultimate bearing capacity of foundation, a new mechanical analysis model of soil arch effect is established, and the assumption of failure surface of arch foot is improved. The research shows that the self-weight stress is the main factor that causes the soil arching effect failure. When the soil is below the critical depth, the arch foot is damaged by the soil's dilatancy effect, and when the soil is above the critical depth, the arch foot fails due to the shear damage of the soil. The results are consistent with the results of ABAQUS finite element numerical simulation and laboratory model test. In the three-dimensional state, within a certain depth from the surface of the pile top, the vertical displacement of the soil at the arch foot will destroy the arch foot, and the soil arch effect will be weakened. A certain depth below this will be the favorable depth formed by the soil arch effect, and the self-weight stress at the depth of the favorable depth will play a dominant role in the soil arch failure. A new idea is proposed to solve the failure surface of arch foot according to the friction coefficient of pile and soil, which provides a theoretical reference for the resistance design of anti-slide pile.

Key words: soil arching effect; three directional stress state; theoretical model; numerical simulation; model test

土拱效应是岩土工程中存在的一种普遍效应, Terzaghi 最先通过活动门的实验所证实^[1]. 由于土体受力土颗粒产生相对位移而产生的应力偏转现象进而形成土拱效应, 土拱产生的机理是土的不均匀位移, 使土颗粒相互“楔紧”^[2]. 查明土拱作用的规律对斜坡防护的抗滑桩工程达到最大的安全程度与最大的经济效益具有重要的指导意义^[3].

在土拱形成机理上, 学者展开过大量的研究并取得了丰富的理论研究成果. 王成华^[4]等提出的

桩间距计算模型是基于以抗滑桩桩侧的侧摩阻力为主要支撑的桩间土拱, 他考虑了土拱后的被动土压力; 周德培^[5]等从桩的两侧土拱相交的等腰三角形区域着手, 认为三角形区域是土体最容易破裂的地方, 等腰边为潜在破裂面; 贾海莉^[6-7]等认为桩后拱与桩侧拱是重合的, 并认为桩间距只与土体的性质有关, 与荷载的大小无关, 并建立了桩间距的计算模型; 郑磊^[8]等考虑了土拱自身的抗力, 但推导式中并未作说明; 赵明华^[9]等基于桩侧

收稿日期: 2020-12-08

修改稿日期: 2021-07-05

基金项目: 安徽交通控股集团有限公司交通科技项目(JKKJ-2021-4); 安徽省交通运输厅科技进步计划

第一作者: 吕韶全(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事公路路基工程的科研及项目管理工作. E-mail: 690886502@qq.com

土拱理论推断,未考虑土体自重,考虑了桩间斜拱的情况;李长冬等^[10]的改进桩间距模型是假定滑坡体前缘平缓而计算的土拱与滑动面所产生的摩擦力,建立了的桩侧摩阻力与滑动面所产生的摩擦力承担滑坡推力的关系式,文献[11-17]对土拱效应进行了二维数值模拟研究,文献[18]进行了土拱效应三维理论分析,认为轴应力是最大主应力,未考虑桩两侧都有土拱,具有一定的局限性;此外,张永兴等人^[19-24]对于成拱与拱的破坏的影响因素也开展了大量数值模拟研究,认为考虑自重应力对土拱效应的影响是显著的。

既有的研究多数基于二维平面模型,对拱脚破坏面进行假定的形式。本文通过借鉴 Terzaghi 等地基承载力理论,在受压区形心建立力的平衡关系进行改进,在考虑土体自重的影响下基于 Drucker-Prager 屈服准则建立三维土拱效应理论模型。通过 ABAQUS 有限元软件进行验证,探究三向应力状态下土拱效应的影响因素。

1 二维平面土拱效应理论的改进

1.1 基本假设

(1)鉴于土受压能力较受拉能力强,假设拱轴线为合理拱轴线,土拱任意截面的剪力和弯矩均视为零。以左拱脚为起点,离拱脚水平距离和竖直距离分别为 x 和 y 轴建立平面直角坐标系,拱轴线满足合理拱轴线方程:

$$y = \frac{4f}{L^2}X(L-X) \quad (1)$$

式中: f 为土拱高度, L 为土拱跨度。

(2)假定土拱后面的推力沿着拱轴线方向均匀分布。

(3)二维平面的研究,简化土拱的分布形态,仅讨论单位厚度的土拱。

1.2 桩后拱脚受力分析

考虑桩两侧都有土拱分布,在桩端形成一个三角形受压区(地基承载计算中为楔形区),对形心 B 受力分析如图 1 所示,三角形受压区受到两边土拱拱轴力,受到桩的支撑反力,三力平衡。在对形心应力状态分析时,将轴力分解为水平方向与竖直方向,土力学规定压应力为正,拉应力为负,则竖直方向与水平方向为两个主应力 σ_1 与 σ_2 方向。由图 1 可知:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{2F_{\text{轴}} \cos\beta}{b} \quad (2)$$

其中 β 为土拱在桩端处切线与水平线的夹角,也是

破裂面与桩的夹角,其值大小与桩土摩擦系数有关,若桩看成光滑,根据莫尔库伦原理可知,潜在滑动面与最大主应力夹角为 $45^\circ - \varphi/2$,若桩土摩擦系数大于土的 $\tan\varphi$,那么 β 值与 φ 值相等,即桩土摩擦角与土的内摩擦角相等,一般情况下,据文献[25-26]黏土与混凝土桩摩擦系数为 0.3,近似将桩侧面看成光滑。

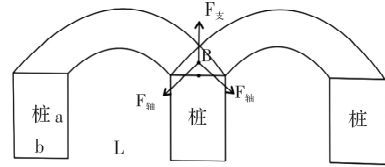


图 1 土拱受力分析示意图

Fig. 1 sketch of force analysis of soil arching

根据合理拱轴线特点:

$$F_x = \frac{qL^2}{8f}, F_y = \frac{qL}{2} \quad (3)$$

$$F_{\text{轴}} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \frac{qL}{2\sin\beta} \quad (4)$$

其中: q 为拱后均布荷载; L 为桩间距; f 为拱高; $F_{\text{轴}}$ 为土拱轴力; F_x 、 F_y 分别为轴力在水平方向与竖直方向的分力。

将式(3)、(4)带入(2)求得 σ_1 、 σ_2 ,在形心 B 处取微小的三角形单元,如图 2 所示,其中 AC 为破裂面,AC 外法线方向与 x 轴夹角为 θ ,可根据桩土摩擦系数确定,由于 x 、 y 方向为主应力方向,所以 $-\tau_1 = -\tau_2 = 0$,于是 AC 面上有

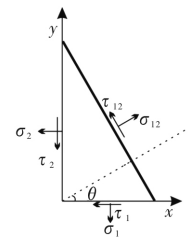


图 2 拱脚破坏面应力状态

Fig. 2 Stress state of arch foot failure surface

$$\sigma_{12} = \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_1) + \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_1)\cos 2\theta \quad (5)$$

$$\tau_{12} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\sin 2\theta \quad (6)$$

根据所求的 σ_1 、 σ_2 ,联立(5)、(6)式即可求出 AC 破坏面上的正应力与切应力,从而根据土的抗剪强度理论建立平衡关系求出在一定的土体条件与滑坡推力下的合理桩间距。

2 土拱效应三维理论模型的建立

基于上述平面状态下的理论改进建立土拱效

应三维力学模型,在竖直方向上取极小长度 d_z 的土体,在桩后微小层土体的三角形受压区的体心 B 取微小的六面体单元,单元体所受三个方向的应力分别为 σ_1 、 σ_1 、 σ_z , 应力状态如图 3 所示。

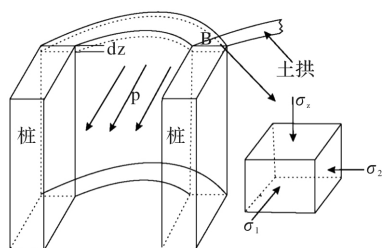


图 3 桩端楔形土柱体心应力状态

Fig. 3 Stress state of wedge-shaped soil column center at pile end

考虑土拱效应的三维空间问题就是考虑土拱沿桩深度的变化,假设土拱拱后推力呈矩形分布,其均布荷载为 q/kPa ,在深度 z 方向取无限小长度 d_z ,则

$$F_{\text{轴}} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \frac{qL}{2\sin\beta} \quad (7)$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{2F_{\text{轴}} \cos\beta}{bdz} = \frac{qL}{b} \cot\beta \quad (8)$$

考虑自重应力的影响:

$$\sigma_z = \gamma z \quad (9)$$

其中 γ 为土的重度; z 为土在竖直方向的深度。

2.1 三向应力状态下土拱效应破坏准则

三向应力状态下可考虑具角隅性质莫尔-库伦破坏准则,鉴于破坏面导数方向的不确定性,分析时运用圆滑式莫尔-库伦破坏准则,即 Drucker-Prager 破坏准则:

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (10)$$

其中 α 、 k 是 Drucker-Prager 破坏参数,其值与土的黏聚力 c 及内摩擦角 φ 有关。

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_z \quad (11)$$

$$J_2 = \frac{1}{3}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_z^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_z - \sigma_1\sigma_z) \quad (12)$$

将式(7)、(8)、(9)带入(11)、(12)得

$$I_1 = \gamma z + \frac{2qL}{b \tan\beta} \quad (13)$$

$$J_2 = \frac{1}{3}(\sigma_1 - \sigma_z)^2 \quad (14)$$

联立式(10)、(13)、(14)得

$$\alpha\left(\gamma z + \frac{2qL}{b \tan\beta}\right) + \frac{\sqrt{3}}{3}\left|\frac{qL}{b \tan\beta} - \gamma z\right| = k \quad (15)$$

2.2 三向应力状态下拱脚破坏形式分析

由(15)式可知:

(1)当 $\frac{qL}{b \tan\beta} \geq \gamma z$ 时,假设根据 Drucker-Prager

所得的临界深度为 z_0 ,求得

$$z_0 = \frac{k - \left(2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{3}\right) \frac{qL}{b \tan\beta}}{\left(\alpha - \frac{\sqrt{3}}{3}\right) \gamma} \quad (16)$$

若 $\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{qL}{b \tan\beta} \leq \frac{k}{3\alpha}$ 成立,则 z_0 满足上式条件,即在 $0 \leq z \leq z_0$ 深度段,三向应力状态下的土拱效应属于不利深度,主要为剪胀效应破坏土拱效应,位于上部土体有向上拱的趋势,在 $z_0 \leq z \leq$

$\frac{qL}{b \gamma \tan\beta}$ 深度段,土自重有利于土拱效应的形成;若

$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{qL}{b \tan\beta} \leq \frac{k}{3\alpha}$ 不成立,则三向应力状态下在此深度段土拱效应不能形成或由于应力过大而失效,土会发生桩间扰流现象。

(3)当 $\frac{qL}{b \tan\beta} < \gamma z$ 时,

$$z_0 = \frac{k - \left(2\alpha - \frac{\sqrt{3}}{3}\right) \frac{qL}{b \tan\beta}}{\left(\alpha + \frac{\sqrt{3}}{3}\right) \gamma} \quad (17)$$

若 $\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{qL}{b \tan\beta} < \frac{k}{2\alpha}$ 成立,则 z_0 满足上述条件,即在 $\frac{qL}{b \gamma \tan\beta} \leq z < z_0$ 深度段,自重效应有利于土拱效应的形成,但在 $z_0 \leq z < \infty$ 深度段,土拱效应的破坏主要是自重应力,在此深度段自重应力对拱脚的破坏起主导作用;若 $\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{qL}{b \tan\beta} \leq \frac{k}{3\alpha}$ 不成立,

则三向应力状态下在 $\frac{qL}{b \gamma \tan\beta} < \infty$ 深度段自重应力对拱脚的破坏起主导作用,土拱效应不能形成。

2.3 三向应力状态下土拱形成条件分析

土拱效应的形成具有空间效应,要形成土拱效应使桩后土体稳定,水平应力 σ_1 与 σ_2 需要满足 $\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{qL}{b \tan\beta} \leq \frac{k}{3\alpha}$,能在平面形成土拱效应的同时考虑自重应力的影响,根据 2.3 的分析可知,在自重应力的影响下对形成土拱效应的有利深度段为

$$\frac{k - \left(2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{3}\right) \frac{qL}{b \tan\beta}}{\left(\alpha - \frac{\sqrt{3}}{3}\right) \gamma} \leq z < \frac{k - \left(2\alpha - \frac{\sqrt{3}}{3}\right) \frac{qL}{b \tan\beta}}{\left(\alpha + \frac{\sqrt{3}}{3}\right) \gamma} \quad (18)$$

在此深度段之上,土体有向上运动的趋势破坏土拱效应,在此深度段之下,自重应力对土拱拱脚的破坏起主导作用,土拱效应不能形成。在实际中,如果坡前临空面过于陡峭,此原因可导

致边坡发生自重垮塌.

3 土拱效应三维数值模拟研究

基于三向应力状态下土拱效应的理论探讨, 运用 ABAQUS 对土拱效应进行三维数值模拟研究.

3.1 三维有限元模型的建立

考虑到实际状况, 在建立有限元模型时不考虑桩前被动土压力, 将桩截面长度定为 b , 桩间距 L 定为 5 m, 为更好的研究土拱效应在 z 方向上的变化, 将桩自由端深度定为 15 m, 如图 4 所示. 为了完整模拟桩后三角形受压区受力特性及考虑

桩的对称特征, 模型采用沿 x 方向分布的 2 根 1/2 桩, 中间为整桩, 垂直于 x 方向的两个面约束 x 方向的位移. 为探究三维尺寸中土拱效应, 桩与土体可设置为光滑接触, 土体与岩体接触面则采用摩擦接触. 为验证在土上拱作用下造成上部土拱效应破坏, 垂直于 z 轴的上顶面不设约束, 在 y 负方向垂直 y 轴平面施加均布荷载 40 kPa, 考虑模型的精确与计算方便在 z 方向上均布网格, y 方向上靠近桩端细化网格, 远离 y 方向粗化网格, 在 x 方向上全程细化网格, 岩体, 土体及抗滑桩物理力学参数取值见表 1.

表 1 计算参数

Tab. 1 Calculation Parameters

材料类型	弹性模量 E/kPa	泊松比 μ	重度 $\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
土体	$2 \times 10_4$	0.3	18	30	30
岩体	$2 \times 10_6$	0.2	21	350	35
桩体	$2.5 \times 10_7$	0.2	23	—	—

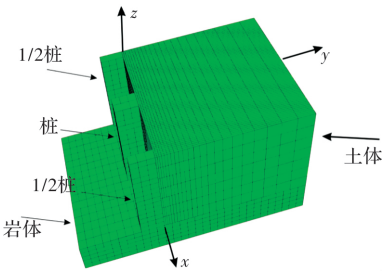


图 4 土拱效应有限元模型
Fig. 4 Finite element model of soil arching effect

3.2 三向应力状态下土拱矢跨比分布规律探究

通过对土拱从形成到开始出现微小位移的时间段进行模拟, 研究三向应力状态下土拱空间分布规律及从土拱形成、发展到破坏的过程, 揭示土拱完全形成时, 不同深度下矢跨比的变化规律. 由于土拱效应的形成是土颗粒的不均匀位移, 肉眼无法鉴别, 模拟时采用 y 方向的主应力变化进行判断. 切取 $z=0, z=5, z=10, z=15$ 位置应力 σ_2 云图切片, 如图 5 所示, 桩间红色部分为主应力 σ_2 减少部分, 其形状为拱形, 代表红色区域后形成了土拱, 土拱效应将滑坡推力传递到拱脚再传递给桩, 红色拱形区域拱顶与桩间的距离可看成拱高 f , 如图所示, 红色拱区域拱高 f 与深度 z 有明显的变化, 为准确测量形成土拱的拱高 f 与沿深度 z 方向的变化规律, 作不同深度下, 离桩不同距离的应力 σ_2 沿 x 轴变化规律图, 如图 6 所示.

由于模型建立的 y 轴与滑坡推力方向相反, σ_2 呈负值, 在模拟中当应力增加到 0.2 kPa 时在桩后可见明显的土拱效应, σ_2 沿 x 轴方向呈 M 形分布,

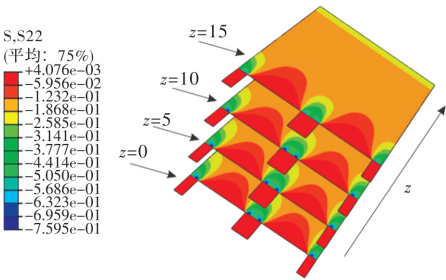


图 5 拱矢沿 z 轴变化云图
Fig. 5 Variation nephogram of arch vector along z axis

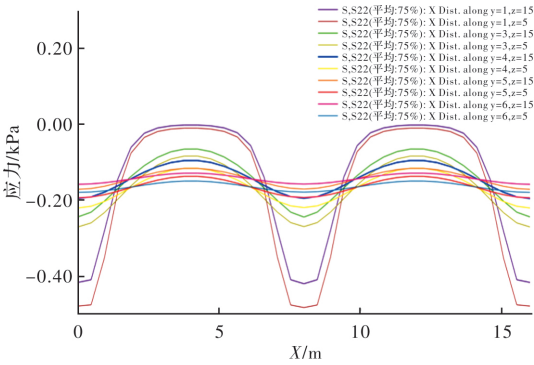


图 6 土压力沿 x 轴变化曲线图
Fig. 6 Curves of soil pressure along x axis

远离桩 σ_2 分布逐渐趋于平缓, 此时土拱效应消失, 图中曲线趋于平缓的 y 坐标值就是拱的矢高. 总体来说, 在矩形荷载分布下土拱的矢高沿深度变化不大, $z=15$ m 拱矢长度略大于 $z=5$ m 时拱矢长度, 这就意味着相同推力下, 自重应力对拱的形状影响不大, $y=4、5、6$ m 中应力线已经接近于直线, 相差不大, 本次模拟拱的矢高取 3.5 m, 即 $\tan\beta=4f/L=1.72$.

3.3 土拱效应在水平方向分布规律

借助 ABAQUS 后处理功能的位移增量探究土拱效应从形成到破坏在水平方向上的分布规律,验证基于二维平面上土拱效应理论的创新性研究.水平方向上位移增量分布如图 7 所示,水平方向上的位移增量主要是沿 y 轴方向的位移,即 ABAQUS 中的 u_2 ,如图所示,当深度 5 m($z=10$)处桩间土体发生微小位移时,在深度 10 m($z=5$)处桩间土体已经严重变形,破坏面呈 M 形分布,说明桩间土拱效应破坏滑动面与地基沉降破坏面相似,验证了将地基沉降理论运用到土拱效应中的可行性,桩中间土体的位移大于桩两侧土体的位移,此时土拱效应失效,桩间土发生绕流,进而验证了三向应力状态下,大于深度 h 时,自重应力对拱脚的破坏起主导作用,但在深度 15 m($z=0$)处土体未从桩间挤出,这是因为在建立模型时,考虑了土体与岩体滑面之间的摩擦,两接触面之间设为摩擦接触.其中 h 为:

$$h = \frac{k - \left(2\alpha - \frac{\sqrt{3}}{3}\right) \frac{qL}{b \tan \beta}}{\left(\alpha + \frac{\sqrt{3}}{3}\right) \gamma} \quad (19)$$

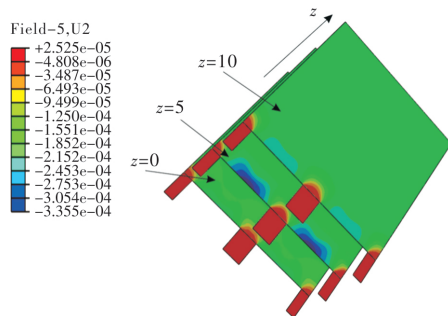


图 7 不同深度下 y 方向位移增量云图

Fig. 7 y direction displacement increment nephogram at different depths

3.4 土拱效应在竖直方向上的分布规律

考虑到实际情况,在建立模型时将坡表面不设边界条件,探究在滑坡推力作用下土体在竖直方向上的运动规律,分别采用法线为 x , y , z 轴的 u_3 位移云图切片来研究,法线为 z 轴模拟结果如图 8 所示,土体的竖向位移主要发生在桩后一小部分区域,桩间土竖向位移很小,所以竖向位移是导致桩后拱脚破坏的重要因素,越靠近桩顶,土体的竖向位移越大,深度 2.5 m($z=12.5$)竖向位移减少一半,到深度为 5 m($z=10$)时竖向位移可忽略不计,这也验证了在土体表面土拱的破坏主要是由于土向上拱导致拱脚破坏而失效.

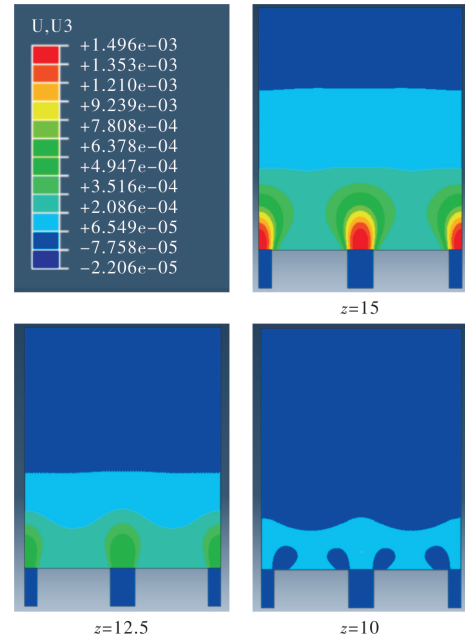


图 8 z 轴为法线的 z 方向位移云图

Fig. 8 z direction displacement nephogram with z axis as normal

法线为 x 轴模拟结果如图 9 所示,由于桩间土拱效应具有对称效应,所以只取 $z=0$, $z=4$, $z=8$ 截面云图,桩间土体 $z=4$ 较桩端土体位移小,桩端土体位移形状与地基土体沉降破坏面相似,据 Prandtl-Reissner 理论公式可推断,靠近桩部分破坏面形状为对数螺线,远离桩部分为直线被动朗肯区,进而证明了表层土拱效应是由于 σ_z 太小,三向应力处于未平衡状态,拱脚土体向上拱,呈现与地基沉降 Prandtl-Reissner 理论的反向位移.

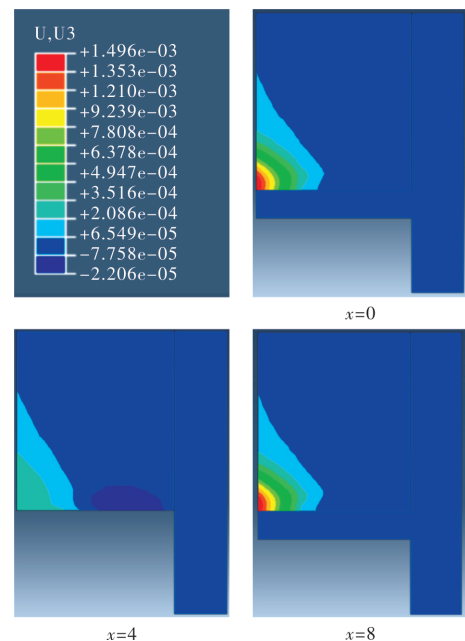


图 9 x 轴为法线的 z 方向位移云图

Fig. 9 z direction displacement nephogram with x axis as normal

法线为 y 轴模拟结果如图 10 所示, 靠近桩部分土体在竖直方向上也有明显的成拱效应, 在远离桩土体竖直成拱效应逐渐消失, 在 $y=0$ 云图中可见下方土体有明显的 y 轴负位移, 进而验证了超过深度 h 部分土体拱脚的破坏主要是由于土体的自重应力引起。

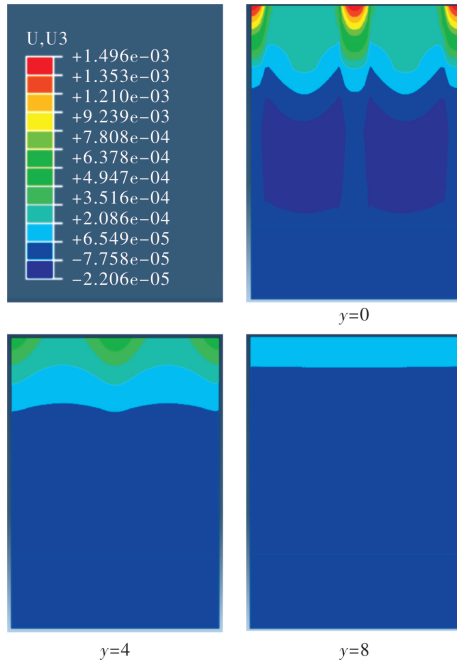


图 10 y 轴为法线的 z 方向位移云图

Fig. 10 z direction displacement nephogram with y axis as normal

4 三向应力状态下土拱效应理论模型验证讨论

Prandtl 指出受铅直均布荷载作用的、底面光滑的无限长的条形刚性板置于土体表面, 当刚性荷载板下的土体处于塑性平衡状态时, 其破坏模式如图 11 所示, 基础底面下土体为楔形, 与水平夹角为 $45^\circ - \varphi/2$, 此楔形区最大主应力方向 σ_1 为竖直方向, 此区为主动朗肯区, 基础侧面三角形区域为被动朗肯区, 与水平面夹角为 $45^\circ - \varphi/2$, 两区之间为过渡区, 滑移线为对数螺旋线, 两基础间滑移线呈 M 形分布。假设土体不动, 对桩施加作用力向土体方向运动, 如图所示, 笔者认为桩间土拱效应问题与基于平面上的地基承载力问题本质上这相似的。

由于模拟过程中施加 40 kPa 应力土拱效应被破坏, 再次使用 20 kPa 模拟, 其结果与第一次模拟过程中土拱产生微小位移时的云图相似, 只是应力大小发生改变, 限于篇幅, 所以第二次模拟结果在这里不做展示, 其计算结果直接与图做

比较。

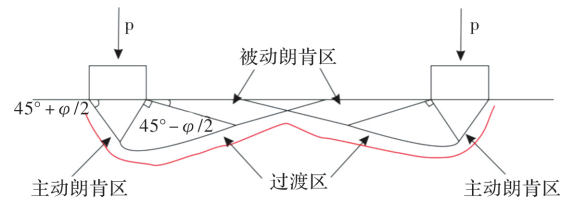


图 11 Prandtl-Reissner 地基极限承载力理论示意图

Fig. 11 Schematic diagram of Prandtl-Reissner's ultimate bearing capacity of foundation

如图, 据 Prandtl-Reissner 理论可知

$$\tan \beta = \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) = 1.732 \quad (20)$$

其结果与不考虑桩土摩擦的数值模拟结果相同, 下面模型验证计算 $\tan \beta$ 取 1.75。

根据 Drucker-Prager 破坏准则:

$$\alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin^2 \varphi)^{\frac{1}{2}}} \quad (21)$$

$$k = \frac{\sqrt{3} \cos \varphi}{(3 + \sin^2 \varphi)^{\frac{1}{2}}} \quad (22)$$

将 c, φ 值代入式 (20) 中得 $\alpha = 0.16, k = 24.96$, 据 2.3 节可知土拱是否被破坏需满足式:

$$\frac{qL}{b \tan \beta} \leq \frac{k}{3\alpha} \quad (23)$$

由式 (23) 得到 $q \leq 22.75$ kPa (本文中所取的 α, k 值 是任何 π 平面上莫尔-库伦破坏面的下限, 所得的 q 值过于保守, 在实际中最好用真三轴仪直接测定), 所以在 20 kPa 模拟过程中土拱整体上未被破坏, 再根据式 (18) 求得土拱效应存在深度为 $2.14 \leq z < 2.91$, 深度大于 2.91 m 时, 自重应力对土拱拱脚的破坏起主导作用, 在实际中也可以看作土的自重失稳, 其结果与数值模拟结果图相似, 云图中深度为 5 m 时沿 y 中负方向桩间土已发生明显的位移 (实际模拟中深度 3 m 已经开始位移, 与计算值吻合), 土拱开始破坏, 到深度为 10 m 时 y 方向增量位移云图可清晰见到呈 M 字的滑动面的存在, 图中的滑动面形状也与地基承载力破坏形状相同, 上述三点不仅验证了理论计算结果, 同时也说明了将土拱效应与地基承载力理论类比的可行性, 这也许是研究土拱效应的新的思路, 同时理论研究中认为 $z < 2.14$ m 时, 土拱效应也将失效, 数值模拟也验证了该结论, 如图所示, 但结果与模型试验结果有些许出入, 2 m 深度上的土体发生了明显的沿 z 轴正方向的位移, 但土未从桩间滑出, 其原因可能是在发生 z 轴正方向位移后, 经过应力的短暂调整再次形成土拱效应来阻止桩间土绕流, 但实际工程中桩间上部土容易垮塌,

原因是土的上拱剪胀作用使土疏松发生桩间绕流。

在讨论三向应力状态下土拱效应时,不仅要考虑由自重效应引起拱脚破坏的深度,还要考虑土表面部分的上拱段,在施工悬臂式抗滑桩时,要注意自重效应引起拱脚破坏的临界深度。

5 结论

(1)基于 Prandtl-Reissner 地基极限承载力理论,建立了一种新的土拱效应力学分析模型,改进了拱脚破坏面的研究假设,提出了根据桩土摩擦系数求得拱脚破坏面的新思路。

(2)基于建立的土拱效应力学分析模型,利用 Drucker-Prager 土的塑性破坏准则得出三向应力状态下土拱效应存在形式,在 z_1 、 z_2 中间深度段是土拱效应形成的有利深度段,此段中自重应力可增加土的抗剪强度,低于临界深度 z_1 ,或大于临界深度 z_2 时,自重应力是引起土拱效应破坏的主导因素,低于临界深度时土的剪胀效应破坏拱脚,高于临界深度时由于土的剪切破坏拱脚失效。

(3)采用 ABAQUS 有限元模拟软件验证了三向应力状态下土拱理论模型的正确性,结论表明在竖直方向上也有成拱效应,矩形荷载作用下,土拱效应的拱的形状在竖直方向有变化,但变化不大,利用位移增量得出土拱效应失效桩间土为 M 形破坏,与地基破坏形状相似。

参考文献 References

- [1] 吴子树,张利民,胡定. 土拱的形成机理及存在条件的探讨[J]. 成都科技大学学报,1995(2): 15-19.
WU Zishu, ZHANG Limin, HU Ding. Studies on the mechanism of arching action in loess[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1995 (2):15-19.
- [2] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: JohnWiley & Sons, 1943.
- [3] 熊良宵,李天斌. 土拱效应在抗滑桩工程中的应用[J]. 防灾减灾工程学报,2005(3): 275-277.
XIONG Liangxiao, LI Tianbin. Application of soil arching effect to the anti-sliding pile engineering[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2005(3):275-277.
- [4] 王成华,陈永波,林立相. 抗滑桩间土拱力学特性与最大桩间距分析[J]. 山地学报,2001(6): 556-559.
WANG Chenhua, CHEN Yongbo, LI Lixiang. Soil arch mechanical character and suitable Space between one another antisliding pile[J] Journal of Mountain Science,2001(6):132-135.
- [5] 周德培,肖世国,夏雄. 边坡工程中抗滑桩合理桩间距的探讨[J]. 岩土工程学报,2004(1): 132-135.
ZHOU Depei, XIAO Shiguo, XIA Xiong. Dis-cussion on rational spacing between adjacent anti-slide piles in some cutting slope projects [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineeri-ng,2004(1):132-135.
- [6] 贾海莉,王成华,李江洪. 关于土拱效应的几个问题[J]. 西南交通大学学报,2003(4):398-402.
JIA Haili, WANG Chenghua, LI Jianghong. D-iscussion on some issues in theory of soil arch[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2003(4):398-402.
- [7] 贾海莉,王成华,李江洪. 基于土拱效应的抗滑桩与护壁桩的桩间距分析[J]. 工程地质学报,2004(1): 98-103.
JIA Haili, WANG Chenghua, LI Jianghong. An-alysis of pile spacing between anti-sloding pilesand petaining piles in accordacne with soil arching effect[J]. Journal of Southwest JiaotongUniversity,2004(1):98-103.
- [8] 郑磊,殷坤龙,简文星,等. 抗滑桩设计中关于确定桩间距问题的分析[J]. 水文地质工程地质,2005(6): 71-74.
ZHENG Lei, YIN Kunlong, JIAN Wenxing. A-nalys- is on spacing between piles in the designof anti-slide pile[J]. Hydrogeology and Engineering Geology,2005 (6):71-74.
- [9] 赵明华,廖彬彬,刘思思. 基于拱效应的边坡抗滑桩桩间距计算[J]. 岩土力学,2010, 31(4): 1211-1216.
ZHAO Minghua, LIAO Binbin, LIU Sisi. Cal-culation of anti-slide piles spacing based on soil arching effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (4): 1211-1216.
- [10] 李长冬,唐辉明,胡新丽,等. 基于土拱效应的改进抗滑桩最大桩间距计算模型[J]. 地质科技情报,2010, 29(5):121-124.
LI Changdong, TANG Huiming, HU Xinli. Im-proved Maximum Pile Interval Model of Antislid e Pile Based on Soil Arching Effect[J]. Geological Science and Technology Information,2010,29(5):121-124
- [11] 杨明,姚令侃,王广军. 桩间土拱效应离心模型试验及数值模拟研究[J]. 岩土力学,2008(3): 817-822.
YANG Ming, YAO Lingkan, WANG Guoyun. Study of centrifuge model tests and numerical simulation on soil arching in space of piles[J]. Rock and Soil Me-chanics,2008(3):817-822.
- [12] 张建华,谢强,张照秀. 抗滑桩结构的土拱效应及其数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2004(4): 699-703.
ZHANG Jianghua, XIE Qiang, ZHANG Zhaoxiu. Arching effect of anti-slide pile structure and its nu-

- merical simuation[J]. Chinese Journal Rock Mechanics and Engineering, 2004(4):699-703.
- [13] 杨明, 姚令侃, 王广军. 抗滑桩宽度与桩间距对桩间土拱效应的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2007(10): 1477-1482.
- YANG Ming, YAO Lingkan, WANG Guangjun. Study on effect of width and space of anti-sli-de piles on soil arching between piles[J]. Chinese Journal Rock Mechanics and Engineering, 2007(10):1477-1482.
- [14] 吕庆, 孙红月, 尚岳全. 抗滑桩桩后土拱效应的作用机理及发育规律[J]. 水利学报, 2010, 41(4): 471-476.
- LÜ Qing, SUN Hongyue, SHANG Yuequan. Mechanism and development law of soil arch effect behind anti-slide piles[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4):471-476.
- [15] 向先超, 张华, 蒋国盛, 等. 基于颗粒流的抗滑桩土拱效应研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 386-391.
- XIANG Xianchao, ZHANG Hua, JIANG Guo-s-heng. Soil arching effect of anti-slide piles ba-sed on particle flow method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3):386-391.
- [16] 李明明, 程雪松, 郑刚. 基坑排桩桩间土拱效应的颗粒流模拟研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2012, 34(1):46-53.
- LI Mingming, CHENG Xuesong, ZHENG Gang. Particle flow simulation of soil arching effect between foundation pit retaining piles[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2012, 34(1):46-53.
- [17] 彭帅, 汪华斌, 周博, 等. 基于抗滑桩土拱效应形成的细观数值模拟[J]. 地质通报, 2013, 32(12): 1993-2000.
- PENG Shuai, WANG Huabin, ZHOU Bo, et al. Microscopic numerical modeling research basedon the formation of soil arching effect[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(12):1993-2000.
- [18] 韩同春, 邱子义, 豆红强. 基于颗粒离散元的抗滑桩土拱效应分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(8): 2715-2722.
- HAN Tongchun, QIU Ziyi, DOU Hongqiang. Soil arching effect between anti-slide piles based on YADE discrete element method[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(8): 2715-2722.
- [19] 张永兴, 董捷, 文海家, 等. 考虑自重应力的悬臂式抗滑桩三维土拱效应及合理间距研究[J]. 中国公路学报, 2009, 22(2):18-25.
- ZHANG Yongxing, Dong Jie, WEN Haija, et al. Research on three-dimensional soil arching effect and appropriate spacing of cantilever an-ti-slide piles with consideration of geostatic stress[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(2):18-25.
- [20] 李忠诚, 杨敏. 被动受荷桩成拱效应及三维数值分析[J]. 土木工程学报, 2006(3): 114-117.
- LI Zhongcheng, YANG Min. Soil arching effe-cton passive piles and 3-D numerical analysis[J]. China Civil Engineering Jouranal, 2006(3):114-117.
- [21] 胡焕校, 刘静, 吴海涛, 等. 抗滑桩桩后土拱效应特征的三维数值研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(3): 88-93.
- HU Huanxiao, LIU Jing, WU Haitao, et al. Three-dimensional numerical analysis of soil arching effect surrounding anti-slide pile[J]. Indu-strial Construction, 2010, 40(3):88-93.
- [22] 董捷, 张永兴, 文海家, 等. 悬臂式抗滑桩三维土拱效应研究[J]. 工程勘察, 2009, 37(3):5-10, 30.
- DONG Jie, Zhang Yongxing, WEN Haijia, et al. Research on three-dimensional soil arching effect between cantilever antislides piles[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, 37(3):5-10, 30.
- [23] 李波, 黄茂松. 长短桩组合路堤桩三维复合拱土拱效应分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 203-210, 220.
- LI Bo, HUANG Maosong. A three-dimensionalhybrid soil arching analysis method of compo-site embankment with long and short piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1):203-210, 220.
- [24] 余闯, 刘松玉, 杜广印, 等. 桩承式路堤土拱效应的三维数值模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, 39(1):58-62.
- YU Chuang, LIU Songyu, DU Guangyin, et al. Three-dimensional simulations on soil arching of piled embankmentsP[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2009, 39(1):58-62.
- [25] 许宏发, 吴华杰, 郭少平, 等. 桩土接触面单元参数分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2002(5): 10-12.
- XU Hongfa, WU Huajie, GUO Shaoping, et al. Study on the parameters of pile soil contact surface element [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2002(5):10-12.
- [26] 李青宁. 抛物线连拱精确计算的传递矩阵法[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 1998(3): 67-70.
- LI Qqingning. Transfer matrix method for the accurate calculation of parabolic multi-arch[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 1998(3): 67-70.