

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210808001

不同截面抗滑桩的土拱效应对比研究*

苏培东¹, 张海传¹, 戚宗轲², 王茂琿³, 邱鹏¹

(1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 2. 中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000;
3. 中国五冶集团有限公司, 四川 成都 610066)

摘要: 土拱效应是桩土作用理论研究的重要依据, 但由于对不同截面形式抗滑桩的土拱效应作用机理研究较少, 在抗滑桩设计中大多采用传统截面形式, 考虑到传统矩形抗滑桩在形成土拱效应方面的不足, 提出梯形截面优化抗滑桩截面形式。基于材料力学理论, 利用轴向受压杆件的斜截面应力计算模型推导出梯形桩桩侧土拱拱脚受压区应力状态, 并结合摩尔—库伦强度准则得出梯形桩桩侧极限承载力, 通过算例对比分析梯形与矩形桩桩侧土拱极限承载力, 结合数值模拟分析验证理论与计算结果。研究表明: 梯形截面桩桩侧极限承载力相较于矩形截面有较为明显的提升, 最大约为矩形桩的2.5倍; 相同条件下梯形截面桩桩间土位移与剪应变增量更小, 应力集中现象更明显, 梯形截面桩对土拱效应的形成与发展更有利。

关键词: 土拱效应; 抗滑桩截面; 梯形抗滑桩; 数值模拟

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)02-0405-08

Comparative Study on Soil Arching Effect of Anti-slide Piles with Different Sections

SU Peidong¹, Zhang Haichuan¹, Qi Zongke², WANG Maohui³, QIU Peng¹

(1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;
2. Northwest Research Institute Co., Ltd of C.R.E.C., Lanzhou 730000, China;
3. China MCC5 Group Corp.Ltd., Chengdu 610066, China)

Abstract: Soil arching effect is an important basis for theoretical research of pile-soil interaction. But due to less research on the soil arching effect mechanism of anti-slide piles with different cross-sections, the traditional cross-section is mostly used in the design of anti-slide piles. Considering the shortcomings of traditional rectangular anti-slide piles in forming soil arching effect, the trapezoidal cross-section was proposed to optimize the design of the anti-slide piles. Based on the theory of material mechanics, the stress state in the compression zone at the foot of the soil arch on the side of the trapezoidal piles was deduced by using the oblique section stress calculation model of the axial compression bar, and the ultimate bearing capacity of the trapezoidal piles was obtained by combining the Mohr-Coulomb strength criterion. The ultimate bearing capacity of the soil arch on the side of the trapezoidal and rectangular piles was analyzed by a numerical example, and the theory and calculation results were verified by a numerical simulation analysis. The results show that the ultimate bearing ca-

* 收稿日期: 2021-08-08; 修回日期: 2021-10-08

基金项目: 四川省科技厅应用基础研究项目(19YYJC1060)、云南省建设投资控股集团科技项目(2019DJR010)资助

作者简介: 苏培东(1973—), 男, 教授, 博士。主要从事地质灾害方面的研究。E-mail: spdong@126.com

capacity of the trapezoidal piles is significantly improved compared with that of the rectangular piles, and the maximum bearing capacity is about 2.5 times that of the rectangular piles; Under the same conditions, the increment of soil displacement and shear strain between trapezoidal piles is smaller, while the stress concentration is more obvious. The trapezoidal sectional pile is more favorable to the formation and development of soil arching effect.

Keywords: soil arching effect; anti-slide pile sections; trapezoidal cross-section piles; numerical simulation

0 引言

近年来,抗滑桩在滑坡治理工程中广泛应用^[1],但由于对抗滑桩土拱效应理解不足,特别是对不同截面形式抗滑桩的作用机理研究不足,在抗滑桩设计中大多采用传统截面形式,造成了大量工程浪费^[2-3]。土拱效应作为桩土作用理论研究的重要依据,对抗滑桩设计有着重要的指导意义^[4]。以往学者对此类问题进行了大量的研究,K. T. Terzaghi^[5]根据著名的活板门实验证明了土拱效应的存在。D. M. Potts等^[6]和 T. Li等^[7],以及 F. Huang等^[8]研究了土拱效应对隧道稳定性的影响。C. Y. Chen等^[9]详细地分析了土拱产生的机理,说明了土拱的形成源自土体本身特殊的力学性能,即抗压不抗拉引起的剪应力迁移现象。贾海莉等^[10]对土拱形成机制和土拱拱脚的存在形式、拱形、拱体几何参数及微观特性等进行了探讨。Y. T. Zhou等^[11]分析了考虑土拱效应的微分扁单元竖向静力平衡方程不合理的问题,导出了主动土压力分布的新公式及其合力的大小和作用高度。但没有将土拱效应推广到抗滑桩桩土作用机理研究中。

王培勇等^[12]考虑了前人在对土拱效应理论推导过程中未考虑充分的强度控制条件等因素,引入了最不利截面和“三角应力受压区”的概念,对土拱效应下的抗滑桩桩间距的推导,并在前人的基础上引入了材料力学的观点,对单元体下任意斜截面应力计算模型进行延展并运用到“三角应力受压区”拱脚破坏面,结合M-C准则与摩尔应力圆构建了大小主应力表达式,但未考虑抗滑桩桩侧土拱效应影响。陈龙等^[13]和邱子义等^[14]同时考虑了矩形桩桩后及桩侧土拱效应的存在,对两者的相互作用机制进行了探讨。王成华等^[15]和冯君等^[16]基于桩侧摩阻力之和不小于桩间滑坡剩余下滑力,并结合拱脚

强度条件对桩间土拱力学特性进行分析。文兴等^[17]和李登峰等^[18]通过数值模拟认为不同截面抗滑桩(不同尺寸组合的桩背和桩宽)在边坡推力作用下桩背桩宽的受力不同,且增大桩截面尺寸有利于土拱效应增强。王羽等^[19]通过理论分析认为,桩的截面高度越高,矩形桩桩侧摩擦拱越稳定。C. Li等^[20]提出了一种新的荷载分配规律模型,考虑了桩后土拱、桩侧摩擦土拱和桩前滑体,利用抗滑桩与滑坡体之间的土拱效应,研究了不同情况下的荷载分配规律,采用显式有限差分数值模型方法研究得出土拱只存在一定桩间距内。以上研究均基于矩形抗滑桩,未考虑其他截面形式桩。

廖方等^[21]和彭瑜等^[22]在对比传统矩形抗滑桩的研究成果发现,梯形桩桩侧土拱效应对于桩土作用的影响有不可忽略的影响,究其利弊,认为梯形截面抗滑桩相较于传统矩形抗滑桩,在桩侧有着出色的受力性能,有助于桩侧土拱的形成与土拱效应整体作用的加强,但并未考虑两种桩型在桩后和桩侧土拱作用下的抗滑作用的差异。

以上研究对土拱形成的原理和力学特性进行分析,并对矩形抗滑桩桩后以及桩侧土拱效应的作用机理详细讨论,提出梯形截面形式的抗滑桩,并认为梯形截面抗滑桩截面形式对土拱形成有一定积极作用,但未对两种不同桩截面形式的桩型进行具体对比分析,也未得出梯形截面抗滑桩在土拱效应形成中具有积极作用的根本依据。因此本文总结以上学者研究成果,对梯形截面桩侧极限承载能力进行理论分析,并对比前人对矩形截面桩侧摩擦土拱的成果,对梯形截面抗滑桩相较于矩形截面抗滑桩的优势进行讨论。

1 土拱极限承载力

1.1 极限承载力理论分析

由于土体产生土拱效应同时存在桩后以及桩

侧,林治平等^[23]研究认为两者共同作用的极限承载力可近似取为两者单独作用时的极限承载力之和,而对于矩形截面和梯形截面抗滑桩桩后土拱,当桩背宽度 a 相同时,认为两种不同抗滑桩桩后土拱极限承载力相同,参考邱子义等^[14]对土拱极限承载力的理论推导,如图 1 所示,桩后土拱极限承载力 q_1 如表达式(1):

$$q_1 = \frac{2ac \sin(45^\circ + \varphi/2) \sin(45^\circ - \varphi/2)}{L \cos^2(45^\circ + \varphi/2)} \quad (1)$$

式中, a 为桩背宽度; c 、 φ 为土体的抗剪强度指标(黏聚力和内摩擦角); L 为桩间距(桩净间距)。

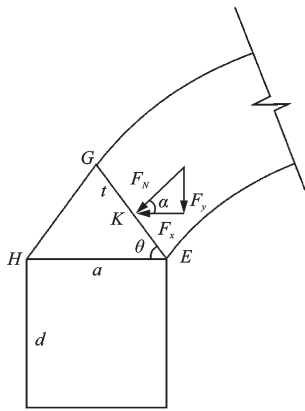


图1 矩形桩后土拱计算简图

Fig.1 Soil arch diagram behind rectangular pile

桩侧土拱结合贾海莉等^[10]和 L. S. Liu 等^[24]的研究,土拱采取拱形结构最为合理,故参考结构力学中“合理拱轴线”对土体所具有的基本不受拉特性进行计算模型的简化,由结构力学三铰拱受力模型对桩侧土拱进行受力分析,如图 2 所示,易得出桩侧土拱的合理拱轴线表达式,如式(2):

$$y_2 = \frac{4h_2}{L^2}(Lx - x^2) \quad (2)$$

式中, q_2 为桩侧水平推力; h_2 为桩侧土拱高度; x 为任意点距 y 轴的距离; L 为抗滑桩桩间净距。

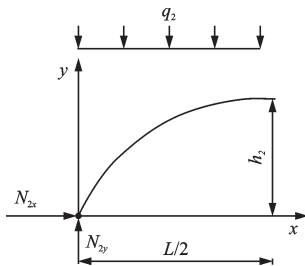


图2 桩侧土拱合理拱轴线计算简图

Fig.2 Reasonable axis of soil arch on pile side

通过对拱轴线任意点进行合力矩求解,即 $\sum M_k = 0$, 可得出:

$$N_{x2}y - N_{y2}x + \frac{1}{2}q_2x^2 = 0 \quad (3)$$

由 Y 轴方向静力平衡条件:

$$2N_{y2} - q_2S = 0 \quad (4)$$

X 轴方向静力平衡条件为一对相等铰座反力,为天然平衡条件,故不作考虑。结合合理拱轴线路程可进一步推得支座反力:

$$N_{x2} = \frac{q_1L^2}{8h_2} \quad (5)$$

$$N_{y2} = \frac{q_1L}{2} \quad (6)$$

对于梯形截面抗滑桩桩侧土拱效应,取梯形桩桩侧单位厚度土拱分析,建立受力分析简图,如图 3 所示。当抗滑桩桩后土体处于极限平衡状态时,拱脚三角形应力受压区发生剪切破坏。取 BD 面中点为土拱轴线对三角形应力交汇区作用点,过该点轴向应力 N_2 方向为该点在合理拱轴线的切线方向,与水平面夹角为 α 。结合(3)、(4)式,有:

$$\tan \alpha = \frac{N_{y2}}{N_{x2}} = \frac{4h_2}{L} \quad (7)$$

可得桩侧土拱拱高表达式为:

$$h_2 = \frac{L \tan \alpha}{4} \quad (8)$$

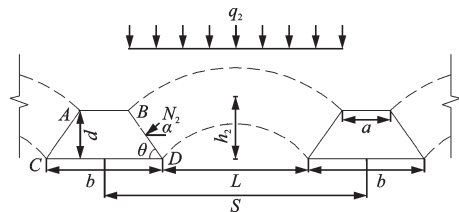


图3 梯形桩侧土拱计算简图

Fig.3 Soil arch on the side of trapezoidal pile

土拱在满足静力平衡条件的前提下,为保证土拱发挥效应,即土拱本身不失稳,应满足应力极限强度条件,通过合理拱轴线方程,可得拱轴线任一点水平分力均为 $q_2L/8h_2$, 竖向分力为 q_2x , 易知土拱轴向应力是关于 x 的增函数,分析可得土拱在拱脚处轴向应力达到最大,对于拱脚模型的简化,分别选取拱脚截面作为最不利应力强度控制截面。

在滑坡剩余下滑推力作用之下,桩侧土拱两侧拱脚轴向应力达到最大,当土拱拱脚失稳时,抗滑桩因受 BD 面最大轴向应力,沿着桩身内剪出,为简化分析,取 BD 边中点进行应力分析,如图 4 所示。

考虑到土拱本身为大主应力拱,故可通过轴向受压强度理论对OB截面应力进行求解。设该点正应力为 σ_{BD} ,切应力为 τ_{BD} ,以摩尔-库伦强度准则对该截面强度进行验算^[25]。

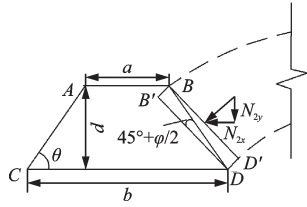


图4 梯形桩侧土拱拱脚应力计算图

Fig.4 Stress at soil arch foot on trapezoidal pile side

建立单元体 $BB'DD'$,视作轴向受压杆件模型, BD' 所受轴向应力为 σ_0 ,由桩侧合理拱轴线方程可以求得 σ_0 :

$$\sigma_0 = \frac{N_2}{|BD'|} = \frac{q_2 L \sqrt{L^2 + 16h_2^2} \sin \theta}{8dh_2 \cos \delta} \quad (9)$$

式中, $|BD'| = \frac{d \cos \delta}{\sin \theta}$; $\delta = 45^\circ + \varphi/2$ 。

取单元体 $BB'DD'$ 隔离分析,如图5所示,由材

$$q_2 = \frac{8dh_2 c}{L \sqrt{L^2 + 16h_2^2} \sin \theta (\sin(45^\circ + \varphi/2) - \tan \varphi \cdot \cos(45^\circ + \varphi/2))} \quad (13)$$

而对于矩形截面抗滑桩桩侧摩擦土拱,参考邱子义等^[14]对桩后以及桩侧土拱共同作用的分析,桩侧土拱拱脚处受力分析如图6所示,由静力平衡条件结合摩尔-库伦强度准则得矩形桩侧土拱极限承载力表达式为:

$$q_2 = \frac{2dc}{L(1 - \tan(45^\circ - \varphi/2) \tan \varphi)} \quad (14)$$

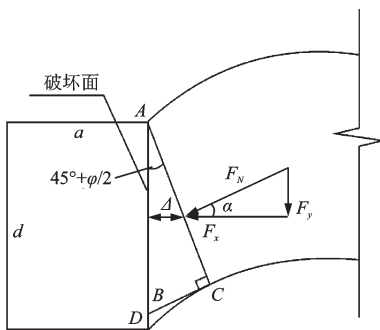


图6 矩形桩侧土拱拱脚应力计算图

Fig.6 Stress at soil arch foot on rectangular pile side

1.2 算例分析

前文通过对梯形截面抗滑桩拱脚强度条件分

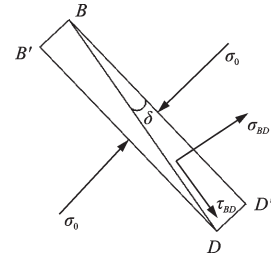


图5 $BB'DD'$ 单元体轴向受压斜截面计算模型图

Fig.5 Calculation model of axial compression oblique section of $BB'DD'$ unit

料力学轴向受压状态下斜截面应力公式可得:

$$\sigma_{bd} = \sigma_0 \cos^2 \delta = \frac{q_2 L \sqrt{L^2 + 16h_2^2} \sin \theta \cos \delta}{8dh_2} \quad (10)$$

$$\tau_{bd} = \sigma_0 \sin \delta \cos \delta = \frac{q_2 L \sqrt{L^2 + 16h_2^2} \sin \theta \sin \delta}{8dh_2} \quad (11)$$

同时基于摩尔库伦准则对破裂面的计算方法^[26],可得 BD 截面切应力 τ_{BD} :

$$\tau_{bd} = \sigma_{bd} \tan \varphi + c \quad (12)$$

将式(10)、(11)带入式(12)可得梯形桩侧土拱极限承载力:

析,得出土拱极限承载力公式,为说明梯形截面抗滑桩和矩形截面的支护与抗滑效果,对比矩形与梯形截面不同桩净间距和不同桩侧角的土拱极限承载力,取梯形与矩形截面尺寸 $a = 1.5 \text{ m}$, $d = 1.5 \text{ m}$, $\theta = 55^\circ$,土体参数 $c = 90 \text{ kPa}$, $\phi = 17^\circ$ 情况下,对梯形和矩形桩侧摩擦土拱极限承载力进行讨论。

桩侧极限承载力随桩净间距变化如图7所示,当梯形截面侧角 $\theta = 55^\circ$ 时,两种截面桩型的桩侧极限承载力都随净间距增大而减小,净间距1~3 m时

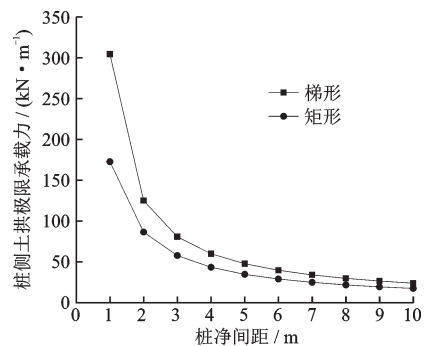


图7 桩侧极限承载力随桩净间距变化图

Fig.7 The ultimate bearing capacity of pile side varies with pile spacing

变化率较大,3 m之后趋于平稳,桩净间距过大对桩侧土拱形成不利。对比梯形桩与矩形桩的桩侧极限承载力发现,梯形桩的桩侧极限承载力较矩形桩有明显提高,其中桩净间距为1 m时提高最大,增大大约70%。

桩侧极限承载力随桩侧角变化如图8所示,当桩净间距为3 m时,矩形桩侧极限承载力约为57 kN/m,而梯形截面桩侧极限承载力随桩侧角增大而减小,在桩侧角20°~30°之间变化率较大,30°之后趋于平稳,并无限接近矩形桩侧极限承载力,梯形截面桩侧角过大对桩侧土拱形成不利。对比梯形与矩形截面桩侧极限承载力发现,梯形截面在桩侧角较小时桩侧极限承载力相较于矩形有明显提升,其中桩侧角为20°时,梯形截面桩侧极限承载力约为矩形的2.5倍。

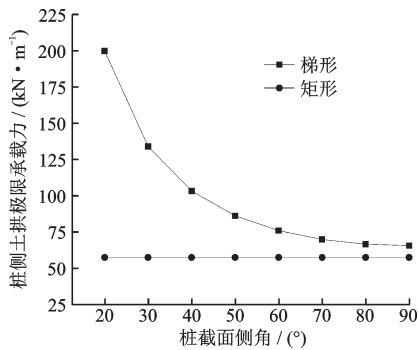


图8 桩侧极限承载力随桩截面侧角变化图

Fig.8 The ultimate bearing capacity of pile side varies with the side angle of pile section

综上所述可得,对比梯形截面与矩形截面桩侧极限承载力,梯形截面相较于矩形截面有较为明显

的提升,说明梯形截面抗滑桩对于桩侧土拱形成以及对土体抗滑作用都有较大的积极作用,在实际工程中可以通过改变矩形截面形状为梯形来提升抗滑桩抗滑能力。

2 数值模拟分析

结合前人对土拱效应数值模拟分析研究^[27-30],利用 flac-3d 有限元分析软件建立两种不同截面抗滑桩的边坡模型,抗滑桩截面分别为1.5 m×1.5 m的矩形和1/2(1.5 m+2 m)×1.5 m(1/2(上底+下底)×截面高度)的梯形截面,桩长均为9 m,嵌固段为3 m,净间距均为4.5 m,土体力学参数为泊松比 $\nu=0.35$,弹性模量 $E=6.5\times 10^3$ kPa,粘聚力 $c=30$ kPa,内摩擦角 $\varphi=17^\circ$,抗滑桩力学参数为泊松比 $\nu=0.20$,弹性模量 $E=3\times 10^7$ kPa。对比两种桩型在相同边坡环境下引发的土拱效应差异以及抗滑性能的优劣。通过分析两种桩型桩周土体位移(m)、桩间土应力(Pa)分布和桩土变形来对比分析两种桩型抗滑能力。

通过对两种桩型位移云图分析,在距离桩顶4 m即桩深4 m处,如图9(a)、(b)所示,矩形桩桩间土位移形成贯穿区,桩间土位移量约为11 cm左右,矩形桩的桩间土拱效应已经基本丧失,而梯形桩在桩深4 m处土拱效应明显,间土位移约为5 cm左右;在桩深6 m处,如图9(c)、(d)所示,矩形桩桩间土位移量缩小至7 cm,梯形桩桩间位移降低至1.1 cm,此时梯形桩桩间位移约为矩形桩的14%。随着桩深增大,桩间土位移减小,说明上覆土层的自重限制了下覆土层继续发生位移。

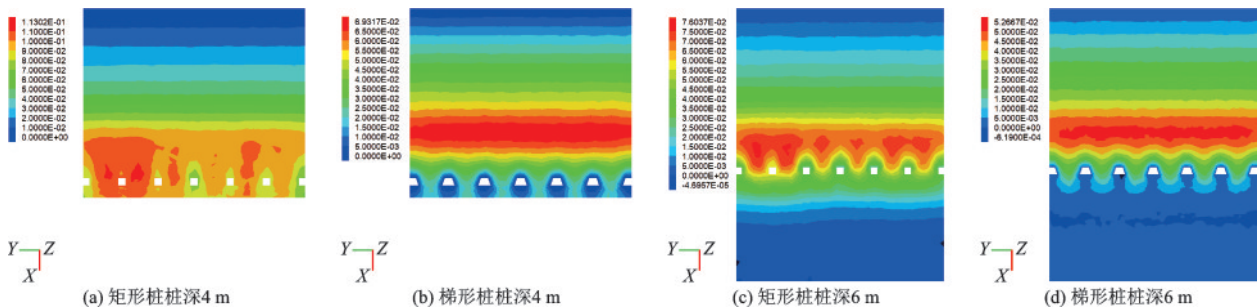


图9 两种桩型在不同桩深下位移云图

Fig.9 Displacement contour of the two pile types at different pile depths

通过对两种桩型最大主应力云图分析,在4 m桩深处,如图10(a)、(b)所示,矩形桩桩间土应力与桩周应力未出现应力差异,说明没有形成明显有效

的土拱,而梯形桩在桩深4 m处拱形应力等值区已经出现,且桩背出现明显的应力集中,说明土拱效应已经形成;而在桩深6 m处,如图10(c)、(d)所示,

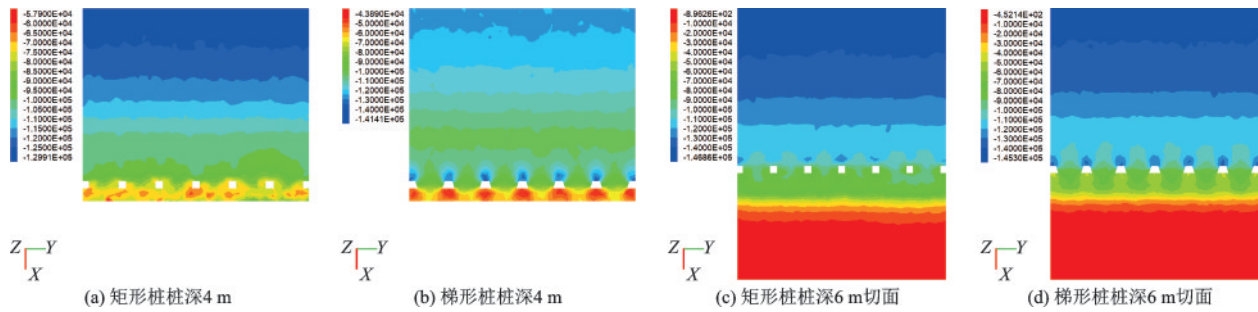


图10 两种桩型在不同桩深下应力云图

Fig.10 Stress contour of the two pile types under different pile depths

矩形桩桩间土局部出现了拱形应力等值区,且桩背出现了应力集中现象,但并不明显,而梯形桩在桩深6 m拱形应力等值区和应力集中都更为明显。随着桩深增大,两种桩型拱形应力等值区高度增大,且桩背以及桩侧的应力集中现象变得更为明显,说明土拱效应随桩深增大更加明显。

通过对两种桩型桩间土最大剪应变增量云图分析,对于矩形截面如图11(a)、(c)所示,可以发现矩形桩从桩背(迎土面)至桩前(背土面),桩间土中最大剪应变增量由“中间小两边大”转变为“中间大两边小”,说明桩间土沿水平推力方向剪应变增长

速度更快,即桩间土受桩侧约束不足,桩间土在跨中出现薄弱区域,更容易发生剪切破坏;而在梯形桩支护下,如图11(b)、(d)所示,从桩背至桩前,桩间土中最大剪应变增量由“中间小两边大”转变为“均匀分布”,梯形桩桩间土体受推力作用后,由桩背所在截面到桩前所在截面的剪应变增量明显减小,说明梯形桩桩间土拱的形成使得剪应力迁移至桩体,由桩侧部分承担,此时桩侧促进了桩间水平土拱效应的发展。同时对比两种桩型的抗滑桩桩背最大剪应变增量云图可以发现,矩形桩桩侧附近最大剪应变增量明显高于梯形桩,增幅约为50%。

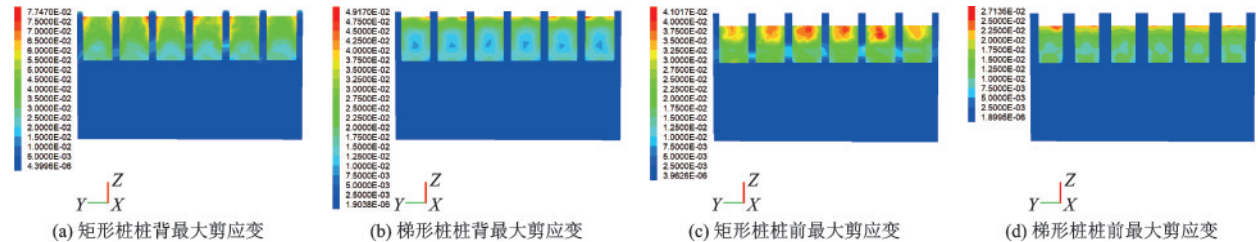


图11 两种桩型桩间土最大剪应变增量图

Fig.11 Maximum shear strain increment diagram of soil between piles for the two pile types

综上所述,通过对比两种桩型在桩间土位移、最大主应力和最大剪应变增量等方面的差异,得出梯形截面桩较于矩形截面桩桩间土位移和最大剪应变增量更小,以及应力集中更为明显,说明梯形截面桩对土拱效应的形成与发展有着更加积极的作用,梯形截面桩侧形成的土拱相较于矩形截面桩侧的摩擦土拱更加明显,与算例中梯形截面桩侧极限承载力相较于矩形截面有较为明显的提升的结果吻合。

3 结论

(1)基于梯形截面抗滑桩受力特性与土拱效应

的形成机理,结合材料力学轴向受压杆件的斜截面应力计算模型和摩尔-库伦强度准则得出梯形抗滑桩桩侧极限承载力计算公式。

(2)通过算例对两种桩型桩侧极限承载力对比分析,结果表明梯形截面相较于矩形截面有较为明显的提升,不同桩净间距下最大提升约为70%,不同桩侧角时梯形截面桩侧极限承载力最大约为矩形的2.5倍。

(3)利用数值模拟得出两种桩型桩间土位移、最大主应力和剪应变增量云图,结果显示梯形桩桩间土位移和最大剪应变增量均明显小于矩形桩,梯形桩应力集中现象和拱形应力等值区都更为明显,说明梯形桩更加有利于土拱效应形成,而矩形桩桩

间土受桩侧约束不足,更容易发生剪切破坏。

(4)通过理论计算并对比梯形与矩形抗滑桩桩侧极限承载力,结合数值模拟分析得出梯形截面桩相较于矩形桩更有利于土拱效应的形成与发展的结论,为抗滑桩截面优化设计提供了依据,为梯形截面抗滑桩的设置提供了理论条件与参考。

参考文献:

- [1] 王恭先.王恭先滑坡学与滑坡防治技术文集[M].北京:人民交通出版社,2010.
Wang G X.Wang Gongxian's collection of landslide science and landslide prevention technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese)
- [2] 刘新荣,梁宁慧,黄金国,等.抗滑桩在边坡工程中的研究进展及应用[J].中国地质灾害与防治学报,2006,17(1):56-62.
Liu X R,Liang N H,Huang J G, et al.Progress and applications of anti-sliding piles in slope reinforcing project [J].The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2006,17(1):56-62. (in Chinese)
- [3] 罗强.公路抗滑桩的类型及应用[J].公路,2001(8):113-114.
Luo Q.Classification and application of highway anti-slide Piles [J]. Highway, 2001 (8) : 113-114. (in Chinese)
- [4] 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,2005,25(3):275-277.
Xiong L X,Li T B.Application of soil arching effect on the anti-sliding pile engineering [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2005, 25 (3) : 275-277. (in Chinese)
- [5] Terzaghi K T. Theoretical Soil Mechanics [M]. New York:Richard Dennis Publications,1966.
- [6] Potts D M,Atkinson J H .Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soil[J]. Geotechnique, 1977, 27(2): 203-215.
- [7] Li T, Yang X L.Stability of plane strain tunnel headings in soils with tensile strength cut-off [J]. Tunneling & Underground Space Technology,2020,95: 103138.
- [8] Huang F, Zhang M, Wang F, et al.The failure mechanism of surrounding rock around an existing shield tunnel induced by an adjacent excavation[J]. Computers & Geotechnics,2020,117: 103236.
- [9] Chen C Y, Martin G R. Soil-structure interaction for landslide stabilizing piles [J]. Computers & Geotechnics, 2002, 29(5):363-386.
- [10] 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,2003,38(4):398-402.
Jia H L, Wang C H, Li J H. Discussion on some issues in theory of soil arch [J].Journal of Southwest Jiaotong University,2003,38(4):398-402. (in Chinese)
- [11] Zhou Y T, Chen Q S, Chen F Q, et al. Active earth pressure on translating rigid retaining structures considering soil arching effect [J].European Journal of Environmental & Civil Engineering,2018,22(7/8):910-926.
- [12] 王培勇,董彤,李秀地.基于土拱耦合效应的合理桩间距分析[J].地下空间与工程学报,2018,14(6):1634-1638.
Wang P Y, Dong T, Li X D. Analysis on rational spacing between adjacent anti-slide piles based on interaction effect of soil arches [J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14 (6) : 1634-1638. (in Chinese)
- [13] 陈龙,刘成禹,林雪彬,等.考虑桩后及桩侧土拱间相互作用的合理桩间距[J].水利与建筑工程学报,2018,16(6):15-20,31.
Chen L, Liu C Y, Lin X B, et al. Reasonable pile spacing considering interaction between pileside arch and soil arch behind pile [J].Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2018, 16 (6) : 15-20, 31. (in Chinese)
- [14] 邱子义,韩同春,豆红强,等.桩后及桩侧土拱共同作用的抗滑桩桩间距分析[J].浙江大学学报(工学版),2016,50(3):559-565.
Qiu Z Y, Han T C, Dou H Q, et al. Analysis of spacing between anti-slide piles considering soil arch on lateral sides and back [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition, 2016, 50 (3) : 559-565. (in Chinese)
- [15] 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,2001,19(6):556-559.
Wang C H, Chen Y B, Lin L X. Soil arch mechanical character and suitable space between one another anti-sliding pile [J]. Journal of Mountain Science, 2001, 19 (6):556-559. (in Chinese)
- [16] 冯君,吕和林,王成华.普氏理论在确定抗滑桩间距中的应用[J].中国铁道科学,2003(6):80-82.
Feng J, Lyu H L, Wang C H. Application of M.M.Promojyafakonov theory to solution of distance between anti-slide piles [J]. China Railway Science, 2003(6):80-82. (in Chinese)
- [17] 文兴,裴向军,刘云鹏.特殊截面抗滑桩受力特征与土拱效应分析[J].工程地质学报,2013,21(5):797-803.

- Wen X, Pei X J, Liu Y P. Stress characteristics and soil arch effect analysis of anti-sliding piles with special cross-section[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(5):797-803. (in Chinese)
- [18] 李登峰, 胡卸文, 赵晓彦, 等. 花岗岩残积土边坡水平拱高竖向变化规律[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5): 1024-1032.
- Li D F, Hu X W, Zhao X Y, et al. Variation of horizontal arch height of granite residual soilslope in vertical direction[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(5):1024-1032. (in Chinese)
- [19] 王羽, 赵波. 双排桩多层土拱效应分析及计算理论[J]. 北京工业大学学报, 2015(8):79-85.
- Wang Y, Zhao B. Multilayer soil arching effect calculation and soil pressure analysis in double-row anti-sliding piles[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015(8):79-85. (in Chinese)
- [20] Li C, Tang H, Hu X, et al. Numerical modelling study of the load sharing law of anti-sliding piles based on the soil arching effect for Erliban landslide, China [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2013, 17(6): 1251-1262.
- [21] 廖方, 杨志永, 孟德宇, 等. 梯形断面抗滑桩桩间距计算方法研究[J]. 人民长江, 2018, 49(3):72-76.
- Liao F, Yang Z Y, Meng D Y, et al. Study on spacing calculation method of anti-slide piles of trapezoidal cross-section[J]. Yangtze River, 2018, 49(3): 72-76. (in Chinese)
- [22] 彭瑜, 陈洪凯. 基于桩间距计算的梯形抗滑桩桩侧角取值[J]. 水运工程, 2018, 549(12):211-216.
- Peng Y, Chen H K. Side angle of trapezoidal anti-slide pile based on distance calculation between piles[J]. Port & Waterway Engineering, 2018, 549(12):211-216. (in Chinese)
- [23] 林治平, 刘祚秋, 商秋婷. 抗滑桩结构土拱的分拆与联合研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10):3109-3115.
- Lin Z P, Liu Z Q, Shang Q T. Research on soil arch of anti-slide pile structure with methods of separation and combination [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10):3109-3115. (in Chinese)
- [24] Liu L S, Wu S G. Calculation of earth pressure on baffle of cantilever anti-slide piles based on soil arching effects [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37:153-157.
- [25] Chen G, Zou L, Wang Q, et al. Pile-spacing calculation of anti-slide pile based on soil arching effect[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020:1-6.
- [26] 杨雪强, 吉小明, 张新涛. 抗滑桩桩间土拱效应及其土拱模式分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(1):30-37.
- Yang X Q, Ji X M, Zhang X T. Analysis of soil arching effect between anti-slide piles and different arch body modes [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(1):30-37. (in Chinese)
- [27] 方景成, 邓华锋, 李建林, 等. 桩土刚度比及布桩位置对桩身内力分布的影响研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(3):487-493.
- Fang J C, Deng H F, Li J L, et al. Effect of pile-soil stiffness ratio and pile distribution on pile internal force distribution [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(3):487-493. (in Chinese)
- [28] 胡田飞, 杜升涛, 梁龙龙. 微型桩-锚组合抗滑新结构支撑效果的数值分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(2):212-218.
- Hu T F, Du S T, Liang L L. Numerical analysis of retaining effect supported by new micropile-anchor composite anti-sliding structure [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(2): 212-218. (in Chinese)
- [29] 吴润泽, 周海清, 胡源, 等. 基于FLAC3D的锚索抗滑桩滑坡推力分布规律研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(5):548-555.
- Wu R Z, Zhou H Q, Hu Y, et al. Research on distribution law of landslide thrust of anchored anti-slide pile based on FLAC3D [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(5): 548-555. (in Chinese)
- [30] Pardo G S, Sáez E. Experimental and numerical study of arching soil effect in coarse sand [J]. Computers and Geotechnics, 2014, 57(4):75-84.

(本文编辑: 苏泽云)