

考虑土拱效应及中主应力影响的桩间挡板土压力计算方法

尤静霖, 王士杰, 王昊岚

A calculation method of earth pressure on sheeting between two piles considering soil arching effect and intermediate principal stress

YOU Jinglin, WANG Shijie, and WANG Haolan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202201032>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于圆弧主应力迹线的黏性土主动土压力分析

An analysis of active earth pressure of cohesive soil based on the layering of principal stress traces

王佳宇, 曹文贵, 王雨波, 张慧姐 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 81-88

基于主应力旋转的黏性填土挡墙土压力

The earth pressure of retaining wall with cohesive fill based on principal stress rotation

王恒利, 邹正盛, 刘京敏, 王新宇 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 64-71

初始固结应力对平面应变黄土剪切破坏特性影响

Effect of initial solidification stress on shear failure characteristics of loess under the plane strain condition

李宝平, 杨倩, 张玉, 平高权, 王智 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 92-99

考虑桩桩相互作用的双排支护桩受力变形分析

Analysis of forced deformation of double row support piles considering pile interaction

张玲, 朱幸仁, 欧强 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 72-80

考虑孔隙水微观赋存形态的非饱和粉土有效应力方程及其验证

An effective stress equation for unsaturated silt considering the microstructure of pore water and its verification

曾立峰, 邵龙潭, 牛庚, 郭晓霞 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 37-46

考虑土参数自相关距离影响的单桩可靠性设计方法

Pile reliability design considering the influence of soil auto-correlation distance

刘超, 袁颖, 左朝晖, 宁志杰, 周爱红 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 122-127



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202201032](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202201032)

尤静霖, 王士杰, 王昊岚. 考虑土拱效应及中主应力影响的桩间挡板土压力计算方法 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 90-95.

YOU Jinglin, WANG Shijie, WANG Haolan. A calculation method of earth pressure on sheeting between two piles considering soil arching effect and intermediate principal stress[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 90-95.

考虑土拱效应及中主应力影响的 桩间挡板土压力计算方法

尤静霖, 王士杰, 王昊岚

(河北农业大学城乡建设学院, 河北 保定 071001)

摘要: 基于 M-C 强度准则的经典土压力理论, 因未考虑土拱效应及中主应力的影响, 导致土压力理论计算值较实际值明显偏大。在该方面, 现有研究成果亦不能同时考虑二者的影响。为考虑土拱效应、中主应力和土体黏聚力等对桩间挡板土压力的综合影响, 借助统一强度理论, 对桩间土拱强度进行分析, 给出了桩间挡板土压力计算的新方法。另外, 基于 Lode 参数与应变类型的关系, 提出了统一强度指标 φ_t 的实用计算方法。结合工程实例, 将计算结果与已有相关研究成果和现行规范确定的土压力进行了对比分析。结果表明, 采用该方法, 不同中主应力系数 b 值条件下, 计算所得总主动土压力约为经典朗肯理论土压力的 $1/3 \sim 1/2$, 与实测土压力分布规律基本吻合。研究成果对桩板支护结构的优化设计、降低工程造价, 具有重要理论指导意义和工程实用价值。

关键词: 桩板墙; 挡板; 土压力; 土拱效应; 中主应力; 统一强度理论

中图分类号: TU432

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)05-0090-06

A calculation method of earth pressure on sheeting between two piles considering soil arching effect and intermediate principal stress

YOU Jinglin, WANG Shijie, WANG Haolan

(Urban and Rural Construction Institute, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China)

Abstract: The classical theories of earth pressure are based on the M-C strength criterion, which do not consider the influence of soil arching effect and intermediate principal stress on earth pressure, so the theoretical earth pressures are significantly larger than the actual values. In this respect, the existing research results also cannot consider the impact of both. In order to consider the comprehensive effect of soil arching effect, intermediate principal stress and soil cohesion on the earth pressure on the sheeting between two piles, the unified strength theory is used to analyze the strength of soil arching between piles, and a new method for calculating the earth pressure on the sheeting between piles is derived. In addition, based on the relationship between the Lode parameters and strain types, a practical calculation method of the unified strength index φ_t is proposed. Finally,

收稿日期: 2022-01-17; 修订日期: 2022-03-23

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 河北省建设科技研究指导性计划项目 (2016-236)

第一作者: 尤静霖 (1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事边坡稳定性分析与滑坡防治研究。E-mail: Yoojiln@163.com

通讯作者: 王士杰 (1963-), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事岩土工程教学与科研工作。E-mail: wshj_wshj@163.com

combined with an engineering example, the calculated results are compared with the existing research results and the earth pressure determined by using the current code. The results indicate that the total active earth pressure calculated with this method is about 1/3 ~ 1/2 of that calculated by the traditional Rankine theory under the condition of different b values, and it is in accordance with the distribution law of the measured earth pressure. The research results are of important theoretical significance and practical value for the optimal design of pile-sheet retaining and the reduction of engineering cost.

Keywords: pile-sheet retaining; sheeting; earth pressure; soil arching effect; intermediate principal stress; unified strength theory

在我国地质结构复杂的山区,特别是西南地区,广泛分布不良地质体^[1]。桩板墙支护因其结构合理、支护效果好和易于施工等优点,在山区水利水电、工业与民用建筑、道路交通等工程的边坡防护中有着十分广泛的应用。保证边坡工程支护设计的安全与经济,关键是要正确地计算出桩板支挡结构上的土压力。现行规范对土压力的计算均是基于 M-C 强度准则的库仑与朗肯土压力理论^[2],这一传统算法存在两个明显不足之处:一是未考虑中主应力 σ_2 的影响,导致传统的朗肯土压力理论计算值偏大,最大可偏大约 50%^[3];二是忽略了桩间土拱效应的存在,同样会使得经典理论计算值较实际土压力大很多^[4]。因此,在边坡支挡结构设计时,如仍采用现行理论与方法进行计算,势必造成较大的浪费。迄今为止,我国的岩土工作者在该方面已做了不少有益的研究。如:从不同角度就中主应力对土压力的影响进行的广泛探讨,并借助统一强度理论,推导了考虑中主应力影响的土压力计算公式^[3,5-6];分别采用数值分析、室内模型试验等手段对桩间土拱效应进行的深入研究,并提出了考虑土拱效应的桩间挡板土压力计算方法^[4,7-11]。本文旨在提出一种可同时考虑中主应力与土拱效应影响的桩间挡板土压力计算方法。通过将统一强度理论引入桩间土拱强度分析,进而利用极限平衡理论,推导出桩间挡板上土压力的计算公式,并结合工程实例加以验证分析,以期对桩板支挡结构的优化设计提供参考与借鉴。

1 土的统一强度指标 c_t 、 φ_t 的确定

桩板墙属于长条形支挡结构,作用于其上的土压力可简化为平面应变问题。应捷等^[6]基于统一强度理论,考虑 σ_2 的影响,引入中间主应力参数 m ,给出了统一强度理论的黏聚力 c_t 和内摩擦角 φ_t 的表达式:

$$\sin \varphi_t = \frac{b(1-m) + (2+b+bm)\sin \varphi_0}{2+b+b\sin \varphi_0} \quad (1)$$

$$c_t = \frac{2(b+1)c_0 \cos \varphi_0}{2+b+b\sin \varphi_0} \frac{1}{\cos \varphi_t} \quad (2)$$

并定义:

$$\sigma_2 = \frac{m}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (3)$$

式中: b ——中主应力系数;

c_0 、 φ_0 ——土体的黏聚力和内摩擦角。

m 的数值可根据分析或试验适当地选取,文中并未给出具体的 m 值。

由文献^[12]可知,考虑中间主应力影响的 Lode 参数的定义表达式为:

$$\mu_\sigma = \frac{\sigma_2 - (\sigma_1 + \sigma_3)/2}{(\sigma_1 - \sigma_3)/2} \quad (4)$$

μ_σ 决定了土体发生应变的类型,在平面应变条件下 $\mu_\sigma=0$,即 $\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$,将其代入式(3),则 $m=1$ 、式(1)可简化为:

$$\sin \varphi_t = \frac{2(1+b)\sin \varphi_0}{2+b(1+\sin \varphi_0)} \quad (5)$$

利用式(2)和式(5)即可确定统一强度理论的土体黏聚力 c_t 和内摩擦角 φ_t 。

2 桩间土拱效应

由于桩板墙的桩与桩间挡板两者刚度相差很大,对其后土体的约束作用存在明显差异,在滑坡推力作用下,墙后土体的不均匀或相对位移将在墙后土体中形成图 1 所示的土拱效应。工程实践中,为保证桩间土拱效应的形成,应使桩间距在合理范围之内。综合已有研究成果^[13-14]:当桩间距介于 3~5 倍桩宽或 5~8 m 时,在滑坡推力(均布线荷载 q)作用下,桩间土会产生土拱效应,此时,面侧挡板受到的土压力基本上不受桩背土压力影响。因滑坡推力 q 为均布线荷载,故合理拱轴线为一抛物线^[15],拱体单元任一截面上剪力、弯矩均为零,建立其力学计算模型如图 2 所示。设: f 为土拱矢高/m; L 为土拱跨度/m; F_x 为拱

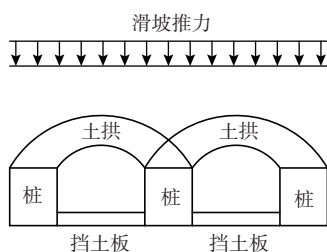


图 1 桩板墙土拱效应示意图

Fig. 1 Soil-arch effect model between sheet pile walls

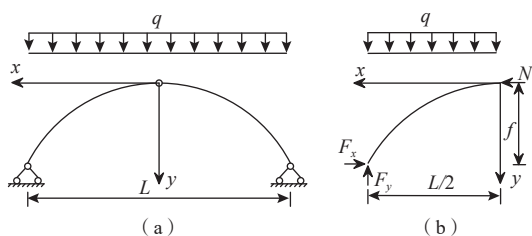


图 2 土拱受力简图

Fig. 2 Stress sketch of soil-arch effect

脚的水平反力/kN; F_y 为拱脚竖直反力/kN; N 为拱顶截面上的轴力/kN; q 为滑坡推力线荷载/(kN·m⁻¹), 则其合理拱轴线方程为:

$$y = \frac{4f}{L^2} x^2 \quad (6)$$

据已有研究成果^[8-9]可知: 影响桩板墙后土拱效应的因素除桩间距、桩径及深度外, 还有土体类别及其力学性质等。早期的研究均假定土拱效应自桩顶以下均匀一致, 不考虑土拱效应随深度的变化^[11,16]。近期研究表明^[9-11]: 土拱效应沿深度方向呈逐渐减小的规律, 故可近似假定水平土拱矢高自桩顶向下呈倒三角形分布, 如图 3 所示。

板后形成土拱区域为 AOBFDE, 该空间曲面即为

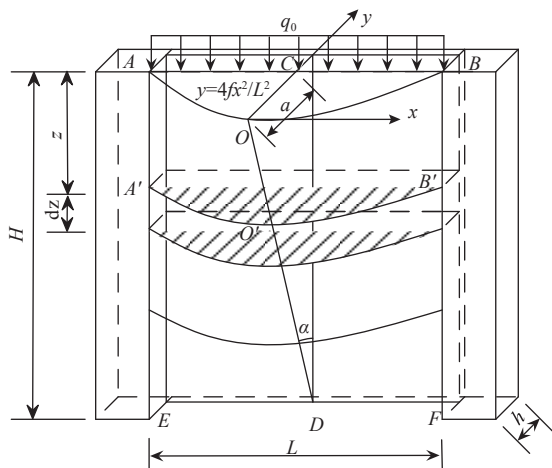


图 3 板后土拱随深度变化示意图

Fig. 3 Sketch of soil arch change with depth behind slab

潜在塌落面。在均布荷载作用下, 距桩顶任意深度 z 处的截面 ($A'O'B'$) 土拱均为抛物线, $O(O')$ 为抛物线顶点, OD 为抛物线顶点连线, OD 与竖直方向的夹角为 α , 抛物线矢高 f 为:

$$f = (H - z) \tan \alpha$$

$$\tan \alpha = a/H \quad (7)$$

式中: a ——坡顶拱高/m;

H ——抗滑桩悬臂段高度/m。

由拱脚及拱顶截面的强度条件可得坡顶拱高为:

$$a = \frac{(1 + \sin \varphi_t) L}{8 \cos \varphi_t} \quad (8)$$

由几何关系可知:

$$A = Lh + \frac{2fL}{3} \quad (9)$$

$$S = \frac{L}{2} \sqrt{1 + \frac{16f^2}{L^2}} + \frac{L^2}{8f} \ln \left(\frac{4f}{L} + \sqrt{1 + \frac{16f^2}{L^2}} \right) \quad (10)$$

式中: S ——土拱轴线弧长/m;

A ——水平微元层上下断面面积/m²;

L ——桩间净距/m;

h ——桩截面高度/m。

3 挡板上的土压力

3.1 基本假定

- (1) 将土压力计算简化为平面应变问题。
- (2) 墙后土体为均匀的各向同性体。
- (3) 滑坡推力在水平方向均匀分布。
- (4) 不计桩侧摩阻力, 将其作为安全储备, 只考虑桩承拱作用。
- (5) 墙后边坡填土表面水平, 挡板垂直。

3.2 土压力计算

3.2.1 土的侧压力系数

根据图 3 的假定, 图 4 给出了板后土拱受力分析

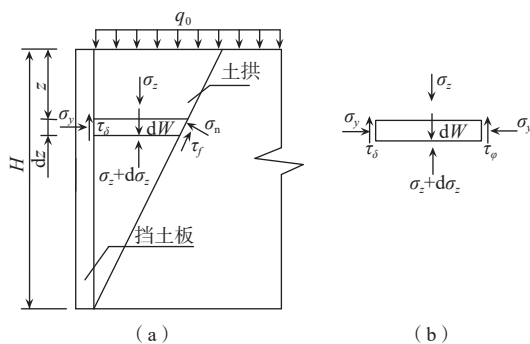


图 4 板后土拱受力分析示意图

Fig. 4 Stress analysis of soil arch behind slab

示意图。在距坡顶下深度 z 处取一水平土体微元层 dz , 忽略薄层土体拱高沿其厚度上的变化。

当墙后微元层土体达到极限平衡状态时, 其应力圆应与抗剪强度包线相切, 如图 5 所示。

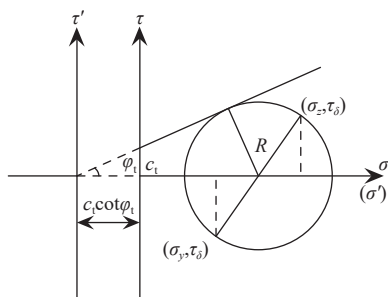


图 5 统一强度理论的极限应力圆

Fig. 5 Limit stress circles for the unified strength theory

此时, 强度条件为基于统一强度理论的抗剪强度表达式^[5]:

$$\frac{\sqrt{\tau_\delta^2 + \left(\frac{\sigma_z - \sigma_y}{2}\right)^2}}{\frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} + c_t \cot \varphi_t} = \sin \varphi_t \quad (11)$$

$$\tau_\delta = c_\delta + \sigma_y \tan \delta, \tau_\phi = c_t + \sigma_y \tan \varphi_t \quad (12)$$

式中: σ_z ——微元层竖向应力;

σ_y ——拱内土体传递给挡板的水平土压力;

τ_δ 、 τ_ϕ ——填土与挡土板的摩擦应力、土体自身的摩擦应力;

c_δ 、 δ ——土体与挡土板间的黏聚力和外摩擦角。

将图 5 极限应力圆的纵轴向左平移 $c_t \cot \varphi_t$, 得到一新坐标系, 在该坐标系下结合式(12)可得:

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_z &= \sigma_z + c_t \cdot \cot \varphi_t \\ \sigma'_y &= \sigma_y + c_t \cdot \cot \varphi_t \\ \tau'_\delta &= \sigma'_y \tan \delta \approx \tau_\delta \\ \tau'_\phi &= \sigma'_y \tan \varphi_t \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

令

$$\sigma'_y = \lambda \sigma'_z \quad (14)$$

式中: λ ——土的侧压力系数。

将式(13)(14)代入式(11), 整理后得:

$$(4 \tan^2 \delta + \cos^2 \varphi_t) \lambda^2 - 2(1 + \sin^2 \varphi_t) \lambda + \cos^2 \varphi_t = 0 \quad (15)$$

式(15)是一元二次方程, 其解的判别式为:

$$\Delta = 16(\sin^2 \varphi_t - \tan^2 \delta \cos^2 \varphi_t) \quad (16)$$

因 $\delta \leq \varphi$, $\Delta \geq 0$, 故式(15)一定有实数解, 即:

$$\lambda = \frac{1 + \sin^2 \varphi_t \pm 2 \sqrt{\sin^2 \varphi_t - \tan^2 \delta \cos^2 \varphi_t}}{4 \tan^2 \delta + \cos^2 \varphi_t} \quad (17)$$

式(17)即为本文给出的基于统一强度理论的主、被动土压力系数表达式。

3.2.2 土压力强度

假设坡顶作用均布荷载 q_0 (图 4), 基于统一强度理论、极限平衡理论, 结合水平层分析法, 则水平微元层竖向静力平衡方程为:

$$T_\delta + T_\phi + A(\sigma_z + d\sigma_z) = A\sigma_z + dW \quad (18)$$

$$T_\phi = S \tau_\phi dz; T_\delta = L \tau_\delta dz$$

$$dW = \gamma A dz$$

式中: dW ——水平微元层自重/kN;

γ ——土体重度/(kN·m⁻³)。

将式(7)(8)(9)(10)(17)代入式(18), 并令:

$$B = \frac{\lambda(S \tan \varphi_t + L \tan \delta)}{A} \quad (19)$$

则, 式(18)可简化为:

$$\frac{d\sigma'_z}{dz} + B\sigma'_z = \gamma \quad (20)$$

将坡顶处边界条件 $z=0$ 时 $\sigma_z = q_0$ 代入微分方程式(20), 求解得:

$$\sigma'_z = e^{-Bz} \left(\frac{\gamma}{B} e^{Bz} + q_0 + c_t \cot \varphi_t - \frac{\gamma}{B} \right) \quad (21)$$

因此有:

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_y &= \lambda \sigma'_z = \lambda \left[\frac{\gamma}{B} + \left(q_0 + c_t \cdot \cot \varphi_t - \frac{\gamma}{B} \right) e^{-Bz} \right] \\ \sigma_y &= \sigma'_y - c_t \cdot \cot \varphi_t \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

由式(22)即可确定桩间挡板土压力沿墙高的分布。

4 实例计算与分析

以昌都市某桩板墙为例, 采用本文方法对挡板土压力进行计算, 并将计算结果与经典朗肯土压力理论、文献[4]方法等的计算结果进行对比分析。该工程桩板墙全长约 170 m, 坡高为 14.1 m, 土质边坡, 坡顶较为平坦, 支护桩截面 1.5 m×2.0 m, 桩长 20 m, 嵌入段长度 10.0 m, 挡板高 10 m, 桩间净距 $L=3.5$ m, 墙顶以上杂填土厚度 7.24 m, 将该范围内的土重视为均布超载 $q_0=134$ kPa, 取挡板与土体间的摩擦角、黏聚力为 $\delta=\varphi/3$ 、 $c_\delta=c_t/3$, 桩长范围内各土层主要物理力学参数如表 1 所示。

经不同方法计算所得土压力沿板高的分布以及挡板所受总的主动土压力分别见图 6 和表 2。图表中采用本文方法的计算结果系在同时考虑土拱效应及中主应力影响基础上、不同 b 值条件下的理论计算值, 而文献[4]方法仅考虑了土拱效应。

表 1 土层主要物理力学参数

Table 1 Main physical and mechanical parameters of different soil layers

序号	土层名称	土层厚度/m	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
①	杂填土	3.26	18.5	6.0	13.0
②	含碎石粉质黏土	5.50	19.5	22.0	17.0
③ ₁	松散碎石	2.00	20.0	8.0	22.0
③ ₂	稍密碎石	4.00	20.5	5.0	25.0
④ ₁	稍密卵石	4.50	21.0	—	28.0
④ ₂	中密卵石	0.74	21.5	—	32.0

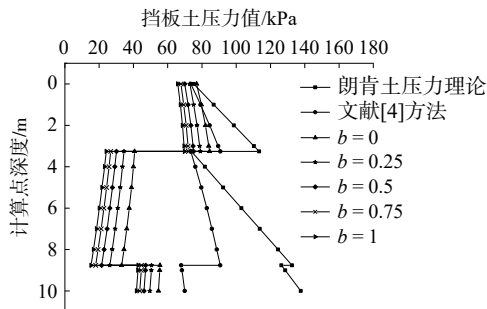


图 6 挡板土压力值随深度变化曲线

Fig. 6 Changes of earth pressure of the retaining plate with depth

表 2 不同方法计算所得挡板总主动土压力

Table 2 Total active earth pressure of baffle calculated with different methods

计算方法	总主动土压力/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)
朗肯理论	1 038.46
文献[4]方法	808.37
本文方法($b=0$)	537.62
本文方法($b=0.25$)	479.69
本文方法($b=0.5$)	438.62
本文方法($b=0.75$)	407.97
本文方法($b=1.0$)	384.19

因板高范围内共有 3 层不同土质的土层,在土压力计算时,分层界面上下分别采用相应土层的 c_i 、 φ_i 值,故土压力强度沿板高的分布均为折线型。

采用传统朗肯土压力理论计算土压力,其理论计算值较实际值明显偏大。究其原因,一是朗肯理论假设墙背光滑,无法考虑土体与墙背间的摩擦效应对土压力的影响;二是朗肯理论未考虑中主应力及土拱效应的影响。从本文实例计算结果来看:文献[4]方法假定土体黏聚力为零,考虑了桩间土拱效应对挡板土压力的影响,计算所得挡板总主动土压力为朗肯土压力的 78%;采用本文方法同时考虑了土体与挡板背侧的摩擦效应、以及中主应力和土拱效应等对挡板土压力的综合影响,在 0~1 之间选取不同的 b 值分别

计算,所得挡板总主动土压力为朗肯土压力的 37%~52%,挡板同一高度处的土压力强度及总的土压力均随 b 值的增大而减小,且所得土压力理论计算值与文献[17]经模型试验揭示的“挡板实测最大土压力为朗肯主动土压力的 1/3~1/2”的规律是一致的。

5 结论

(1)基于统一强度理论,对桩间土拱强度进行分析,给出了桩间挡板上土压力的计算公式,可同时考虑土体黏聚力、中主应力和土拱效应等对挡板土压力的综合影响,从理论上讲,较已有相关研究成果和现行规范方法更趋完善。

(2)采用本文方法,计算所得土压力与前人经模型试验实测的主动土压力分布规律基本吻合。

(3)考虑深度对土拱效应的影响,即随深度增加桩间水平土拱拱高逐渐减小至零,由此而得到的土压力理论计算值更为接近实际;不考虑土拱效应沿深度方向的变化,将会导致挡板土压力理论计算值偏于保守。

(4)中主应力系数 b 对土压力的计算值有较为显著的影响,合理确定 b 值至关重要,无当地经验时可采用真三轴试验对其进行确定。

参考文献 (References):

- [1] 向俐蓉,陈伟志,郭在旭,等.大型滑坡抗滑桩-桩板结构受力变形研究[J].水文地质工程地质,2021,48(2): 125-131. [XIANG Lirong, CHEN Weizhi, GUO Zaixu, et al. A study of the deformation of anti-slide pile and pile-plate structure in large landslide[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 125-131. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 王佳宇,曹文贵,王雨波,等.基于圆弧主应力迹线的黏性土主动土压力分析[J].水文地质工程地质,2021,48(6): 81-88. [WANG Jiayu, CAO Wengui, WANG Yubo, et al. An analysis of active earth pressure of cohesive soil based on the layering of principal stress traces[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(6): 81-88. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张健,胡瑞林,刘海斌,等.基于统一强度理论朗肯土压力的计算研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊1): 3169-3176. [ZHANG Jian, HU Ruilin, LIU Haibin, et al. Calculation study of Rankine earth pressure based on unified strength theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup 1): 3169-3176. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 刘力生,吴曙光.基于土拱效应的悬臂式抗滑桩桩间

- 挡板土压力计算[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊 2): 153 - 157. [LIU Lisheng, WU Shuguang. Calculation of earth pressure on baffle of cantilever anti-slide piles based on soil arching effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(Sup 2): 153 - 157. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 范文, 沈珠江, 俞茂宏. 基于统一强度理论的土压力极限上限分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1147 - 1153. [FAN Wen, SHEN Zhujiang, YU Maohong. Upper-bound limit analysis of earth pressure based on unified strength theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(10): 1147 - 1153. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 应捷, 廖红建, 蒲武川. 平面应变状态下基于统一强度理论的土压力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增刊 1): 4315 - 4318. [YING Jie, LIAO Hongjian, PU Wuchuan. Earth pressure theory based on unified strength theory under plane strain state[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Sup 1): 4315 - 4318. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 张建业. 基于土拱效应的桩板墙与岩土体相互作用及其优化设计研究[D]. 西安: 长安大学, 2017. [ZHANG Jianyun. The interaction between sheet-pile wall and rock-soil body and its optimization research based on the soil arching effect[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 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]. Industrial Construction, 2010, 40(3): 88 - 93. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 陈强, 董桂城, 王超, 等. 基于透明土技术的桩后土拱效应特征分析[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(3): 509 - 522. [CHEN Qiang, DONG Guicheng, WANG Chao, et al. Characteristics analysis of soil arching effect behind pile based on transparent soil technology[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(3): 509 - 522. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 李婷, 肖世国. 考虑土拱效应的抗滑桩桩间挡土板土压力计算方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(4): 85 - 91. [LI Ting, XIAO Shiguo. Calculation method of earth pressure on retaining plates between adjacent stabilizing piles considering potential soil arching effect[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(4): 85 - 91. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 刘杰, 吴昭云, 路利民, 等. 考虑三维土拱效应的桩间挡板土压力计算[J]. 中外公路, 2020, 40(5): 17 - 21. [LIU Jie, WU Zhaoyun, LU Limin, et al. Calculation of earth pressure on baffle between two piles considering three-dimensional soil arching effect[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(5): 17 - 21. (in Chinese)]
- [12] 王仲仁. Lode参数的物理实质及其对塑性流动的影响[J]. 固体力学学报, 2006, 27(3): 277 - 282. [WANG Zhongren. Physical essence of lode parameter and its effect on plastic flow[J]. Acta Mechanica Sinica, 2006, 27(3): 277 - 282. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 国家铁路局. 铁路路基支挡结构设计规范: TB 10025—2019[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2019. [National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of retaining structures of railway earthworks: TB 10025—2019[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019. (in Chinese)]
- [14] 重庆市建设委员会, 重庆市国土资源和房屋管理局. 地质灾害防治工程设计规范: DB 50/5029—2004[S]. 重庆: 重庆市建设委员会, 2004. [Construction Commission of Chongqing, Bureau of Land Resources and Housing Management of Chongqing Municipality. Design standard of geological disaster prevention and control: DB 50/5029—2004 [S]. Chongqing: Construction Commission of Chongqing, 2004. (in Chinese)]
- [15] 魏德芳, 赵继德. 三铰拱的合理拱轴线方程[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版), 1994, 20(3): 80 - 83. [WEI Defang, ZHAO Jide. On appropriate axis equation of tri-hinge Arches[J]. Journal of Qufu Normal University (Natural Science), 1994, 20(3): 80 - 83. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 焦赞, 白千千. 基于土拱效应下的地震作用与抗滑桩桩间距关系分析[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(5): 58 - 63. [JIAO Yun, BAI Qianqian. An analysis of the relationship between seismic action and pile spacing of anti-slide piles based on soil arch effect[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(5): 58 - 63. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 代军, 胡岱文, 吴曙光. 桩锚支挡结构体系挡板土压力试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2001, 23(4): 48 - 54. [DAI Jun, HU Daiwen, WU Shuguang. Experimental study of soil stress on the holding sheet of pile-anchor holding-block structure system[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2001, 23(4): 48 - 54. (in Chinese with English abstract)]