

平动条件下有限成坡土体挡土墙土压力分布规律研究^①

吴顺川^{1,2,3}, 贾文松¹, 韩龙强^{2,3}, 刘兴雷¹

(1.北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室,北京 100083; 2.昆明理工大学 国土资源工程学院,云南 昆明 650093; 3.自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室,云南 昆明 650093)

摘要:以河北腾龙露天矿止水固坡工程为背景,建立了挡土墙和有限成坡土体的三维数字模型,首先对模型的有效性进行了验证,然后利用该模型对平动条件下墙背上土压力分布规律进行数值模拟分析。结果表明,有限成坡土体滑裂面倾角随平台宽度增大先逐渐减小到零然后逐渐增大;平台宽度9 m时墙背上被动土压力数值解与解析解的变化规律基本一致,充分验证了该模型的有效性;被动土压力呈非线性分布,主动土压力呈凸曲线分布。综合考虑挡土墙稳定性与施工成本,建议将边坡坡角设为30°,平台宽度设为9 m。

关键词:露天矿; 挡土墙; 有限成坡土体; FLAC^{3D}; 土压力; 边坡坡角; 平动

中图分类号: TU432

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.05.003

文章编号: 0253-6099(2023)05-0011-06

Distribution Law of Earth Pressure on Retaining Wall with Finite Slope Under Translational Motion

WU Shunchuan^{1,2,3}, JIA Wensong¹, HAN Longqiang^{2,3}, LIU Xinglei¹

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mine, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 3. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological Restoration in Plateau Mountainous Area, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Kunming 650093, Yunnan, China)

Abstract: With a water cut-off and slope reinforcement project in Tenglong open-pit mine in Hebei Province as the background, a three-dimensional numerical model was established for finite slope with a retaining wall. Firstly, this numerical model was verified for its validity, and then was adopted in numerical simulation and analysis for the distribution law of earth pressure on the back of wall under translational motion. The results show that as the bench becomes wider, the angle of inclination for sliding surface of finite slope falls down to zero first, and then is gradually increased. When the bench is 9 m wide, the numerical solution of passive earth pressure on the back of wall is almost consistent with the analytical solution in term of its variation rule, which fully verifies the validity of this numerical model. The passive earth pressure presents nonlinear distribution, and the active earth pressure presents convex curve distribution. With both the stability of retaining wall and the construction cost taken into consideration, it is recommended that the slope degree should be set at 30° and the bench should be 9 m wide.

Key words: open-pit mine; retaining wall; finite slope; FLAC^{3D}; earth pressure; slope degree; translational motion

挡土墙土压力理论计算普遍采用以极限平衡为理论基础的朗肯土压力和库仑土压力计算方法,但在挡土墙后为有限成坡土体条件下,这2种经典理论计算方法均不适用。

目前大多采用模型试验或理论推导方法研究挡土墙有限土体土压力问题^[1-4],但利用模拟手段建立三维模型分析露天矿工程中某些因素对土压力分布规律影响的研究较少。本文以河北腾龙露天矿止水固坡工程

① 收稿日期: 2023-05-15

基金项目: 云南省创新团队资助项目(202105AE160023)

作者简介: 吴顺川(1969—),男,安徽无为,人,教授,博士研究生导师,主要从事采矿工程、岩土工程灾害机制与防控等方面的教学与研究工作。

通信作者: 韩龙强(1989—),男,河北邯郸人,博士,主要从事岩土工程稳定性评价与支护等方面的研究工作。

为研究对象,在挡土墙后有限成坡土体简化模型的基础上,利用FLAC^{3D}软件建立挡土墙和有限成坡土体的三维数字模型,通过有限成坡土体滑裂面倾角变化规律、有限成坡土体被动土压力随墙后土体深度的变化规律来验证该三维数字模型的有效性,然后依据该模型模拟分析平动条件下挡土墙土体参数、边坡坡角、平台宽度等参数对土压力的影响。

1 工程概况

腾龙露天铁矿位于河北省迁安市西南部,地处平原,因北接燕山山脉,整体地势南低北高。矿区内工程地质情况较好,岩石种类繁多,如片麻岩、石英岩等,但岩体风化严重,呈破碎状态,最上层由第四系地层覆盖。第四系地层主要为粗砂、卵石、砂砾等颗粒,透水性较好,大气降水通过第四系地层补给地下水。采场附近有滦河和沙河两条河流,受河流以及大气降水的影响,该采场地下水丰富,严重影响了采场开采工作以及靠帮边坡稳定性,容易导致滑坡,甚至无法形成边坡^[5]。为了解决地下水对边坡稳定性的重大影响,必须采取合理的堵排水措施。文献[6]提出利用大型单一结构地下连续墙进行固坡止水,该措施成功解决了腾龙露天矿边坡高水压-低强度复杂条件下的止水固坡技术难题。单一结构地下连续墙布设如图1所示。本文在该措施的基础上简化得到有限成坡土体模型(见图2)进行土压力分布规律的模拟研究。

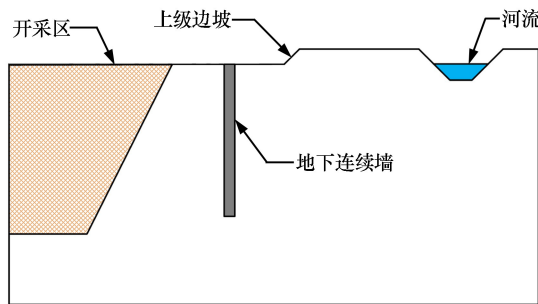


图1 单一结构地下连续墙结构布设图

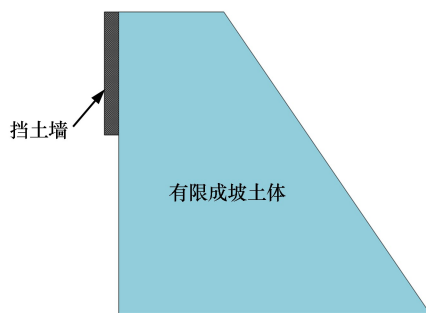


图2 有限成坡土体简化模型

2 挡土墙后有限成坡土体有限元分析模型

2.1 模型建立

模型由挡土墙和有限成坡土体两部分组成,二者以六面块体的方式建立,通过两个六面块体之间的相互作用来模拟墙土之间的实际关系。挡土墙为矩形,其中墙长设为 b ,墙高设为 h 。墙后土体为有限成坡土体,土体截面为梯形,为了减小边界效应对模拟计算结果的影响,模型中墙后有限成坡土体 Y 方向长度设为 $15b$, Z 方向高度设为 $3h$, X 方向上部平台宽度为 a 、下部土体宽度为 $a+H\cot\beta$,其中 β 为墙后土体的坡角。建模时,刚性挡土墙的一面与填土竖直面相接触,坐标原点位于墙土接触面顶部,且模型整体关于 $X-Z$ 面对称,挡土墙平动方向与 X 轴方向一致。三维实体模型如图3所示。为了保证模型更加符合实际工程,依据腾龙铁矿南侧一剖面确定挡土墙和土体尺寸,并在模拟计算过程中保持不变,最终确定挡土墙墙长 $b=3\text{ m}$,墙高 $h=12\text{ m}$,墙后有限成坡土体 Y 方向长度为 $15b=45\text{ m}$, Z 方向高度 $H=36\text{ m}$ 。

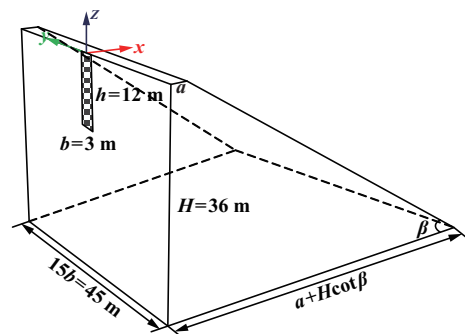


图3 三维实体模型示意图

图4为三维数字模型的网格划分情况,以六面体单元对模型进行网格划分,为了保证墙土之间更好地相互作用,墙土接触面上的节点需要重合,墙后土体为模拟观察部分,故该部分划分的网格间距更小,以便更好地反映土体的变形。墙土间的接触面假定为刚性

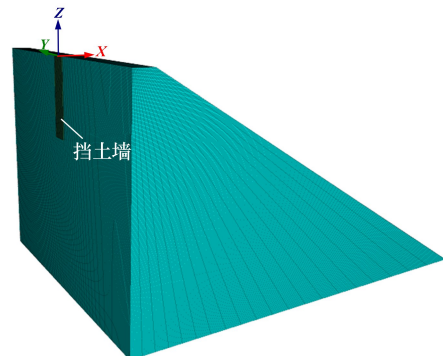


图4 三维数字模型网格划分图

的,在挡土墙平动过程中可以更好地将墙土间的摩擦表现出来。挡土墙也设置为绝对刚性,保证挡土墙在平动过程中仍然保持稳定状态,土体整体保持均匀状态并且各个方向性质一致,破坏过程遵从摩尔-库伦屈服准则^[7]。

2.2 边界条件

模型土体上表面边界为自由状态,不受约束。模型 $X=0$ 边界有限元网格节点处约束其 X 方向位移,允许其竖向沉降;在 $Y=\pm 7.5b$ 边界有限元网格节点处约束其 Y 方向位移;模型底部 $Z=-3h$ 边界有限元网格节点处约束其 Z 方向位移,允许其在 $X、Y$ 方向有变形。

2.3 模拟参数选取

影响因素和参数取值如表 1 所示。土体本构模型采用 FLAC^{3D} 中的 Mohr-Coulomb 模型,针对所选剖面的实际工程地质情况,为了使模拟结果更加符合实际,确定挡土墙后有限土体为无黏性土,即 $c=0$ kPa,有限土体其他参数列于表 2 中。将有限成坡土体和挡土墙之间的接触以接触面的形式呈现,该接触面参数如表 3 所示。表 2 和表 3 参数取值均依据腾龙露天矿实际勘察资料确定。

表 1 影响因素及参数取值一览

影响因素	单位	参数取值
平台宽度 a	m	3, 6, 9, 12, 15
内摩擦角 φ	(°)	25, 30, 35, 40, 45
边坡坡角 β	(°)	25, 30, 35, 40, 45

表 2 有限土体参数

体积模量/MPa	剪切模量/MPa	密度/(g · cm ⁻³)	剪胀角/(°)
106	54.7	2	$\psi = \varphi$

表 3 接触面参数

切向刚度/MPa	法向刚度/MPa	黏聚力 c_1 /kPa	摩擦角 δ /(°)
17 890	17 890	0	21

2.4 模拟过程

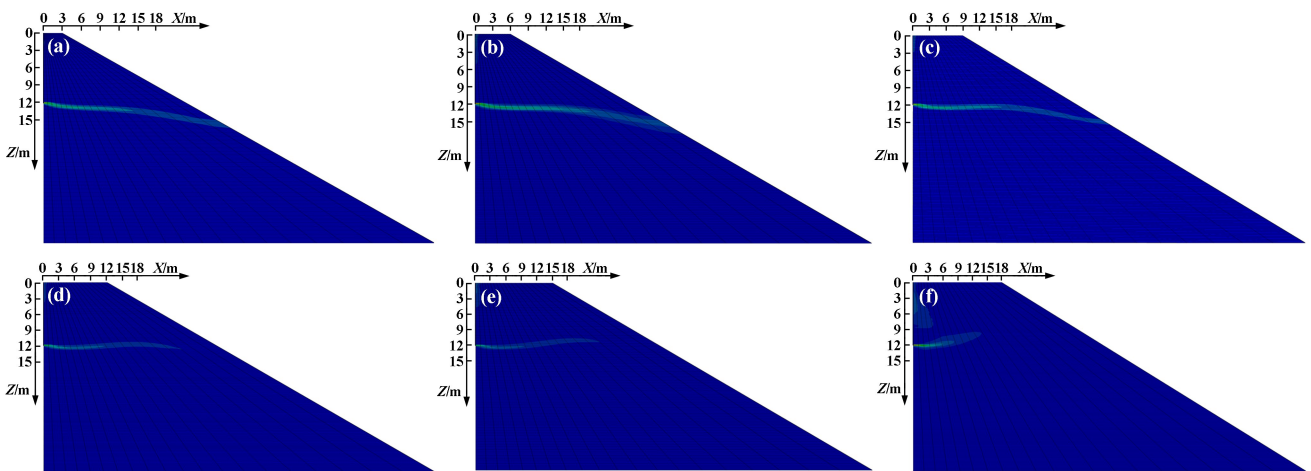
在自重以及外界初始条件下,经过一定步骤计算,模型达到初始平衡。达到平衡后,开始对平动条件下的挡土墙和有限成坡土体进行整体计算,得到墙背上的土压力。挡土墙沿 X 方向匀速移动,速度施加在挡土墙有限元网格节点上,模型计算再次达到平衡,墙后土体达到临界状态,此时作用在墙背上的土压力为极限值,即为进行土压力分布规律分析的参考值。本文以下分析所需要的参考值均沿 Z 轴负方向获取,即沿墙后土体深度方向,并且土体深度用 h_0 表示。

3 有限元模型有效性验证分析

为了保证模拟分析结果的准确性,在进行墙背上土压力分布规律影响分析之前需要对有限元模型的有效性进行验证。下面通过有限成坡土体滑裂面倾角变化规律以及有限成坡土体被动土压力解析解和数值解随深度的变化规律这两方面来验证本文根据实际工程建立的有限元模型的有效性。

3.1 有限成坡土体滑裂面倾角变化规律

以平台宽度 a 为变量,按照表 1 进行参数取值,其他因素为定值,分别为 $\varphi = 40^\circ, \beta = 30^\circ$,来模拟分析不同平台宽度 a 对有限成坡土体滑裂面倾角的影响规律。选取模型中 $Y=0$ 位置处的剖面来观察滑裂面,不同有限填土上部宽度的最大剪切应变速率云图如图 5 所示。



(a) $a=3$ m; (b) $a=6$ m; (c) $a=9$ m; (d) $a=12$ m; (e) $a=15$ m; (f) $a=18$ m

图 5 不同平台宽度下有限成坡土体剪切应变速率云图

由图5可知,不同平台宽度 a 的滑裂面与水平面的夹角随着平台宽度增大而逐渐减小,逐渐接近水平面,当平台宽度达到一定值时,滑裂面沿斜向上方向发展。滑裂面的剖面基本上呈直线形式,在坡体内沿斜向下或斜向上的方向发展,逐渐接近坡面并实现贯通,该结果符合无黏性土情况下的平面滑裂面假定。利用该模型模拟得到的破裂角变化规律以及滑裂面的

变化情况与文献[6]结论一致,该模型的有效性得到验证。

3.2 被动土压力解析解和数值解

根据式(1)^[6],可以确定该模型下沿墙后土体深度 h_0 分布的被动土压力解析解。平台宽度 $a=9\text{ m}$ 时有限成坡土体被动土压力解析解与数值解的变化规律对比如图6所示。

$$\sigma_p = K_p \gamma y = \begin{cases} \gamma y \cdot \frac{\cot\theta_{cr} \cot\alpha + 2 \frac{l}{h} \cot\theta_{cr} - \left(\frac{l}{h}\right)^2}{\cos\delta \cdot (\cot\theta_{cr} + \cot\alpha) [\cot(\theta_{cr} + \varphi) - \tan\delta]} & -\alpha < \theta_{cr} < \arctan \frac{h}{l} \\ \gamma y \cdot \frac{\cot\theta_{cr}}{\cos\delta \cdot \cot(\theta_{cr} + \varphi) - \sin\delta} & \arctan \frac{h}{l} \leq \theta_{cr} < 90^\circ \end{cases} \quad (1)$$

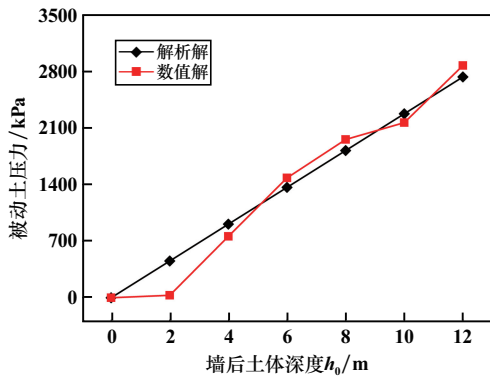


图6 平台宽度 $a=9\text{ m}$ 时有限成坡土体被动土压力解析解与数值解对比

由图6可知,墙背上被动土压力数值解和解析解均随 h_0 增大而增大,与实际土压力分布规律一致。在同一土体深度处,被动土压力数值解和解析解基本一致,并且变化规律也基本一致,充分验证了该有限元模型的有效性。

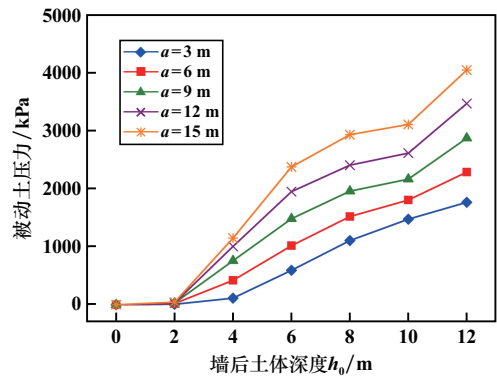


图7 不同平台宽度下有限成坡土体被动土压力变化规律

4 挡土墙土压力分布规律影响分析

4.1 被动土压力分布规律影响分析

4.1.1 平台宽度

$\varphi=40^\circ, \beta=30^\circ$ 时,不同平台宽度 a 下有限成坡土体被动土压力随墙后土体深度 h_0 的变化规律如图7所示。

由图7可知,不同平台宽度 a 下有限成坡土体被动土压力变化趋势大致相同,均随 h_0 增大而增大,且为非线性变化。 $h_0 < 2\text{ m}$ 时,不同平台宽度 a 下有限成坡土体被动土压力大小基本一致; $h_0 = 2 \sim 10\text{ m}$ 时,随着平台宽度 a 增大,有限成坡土体被动土压力逐渐增大,但增长幅度越来越小; $h_0 > 10\text{ m}$ 后,随着 h_0 增大,不同平台宽度 a 下有限成坡土体被动土压力呈现陡升现象,在挡土墙最底部达到最大值。

4.1.2 有限土体内摩擦角

$a=3\text{ m}, \beta=30^\circ$ 时,不同内摩擦角 φ 下有限成坡土体被动土压力随墙后土体深度 h_0 的变化规律如图8所示。

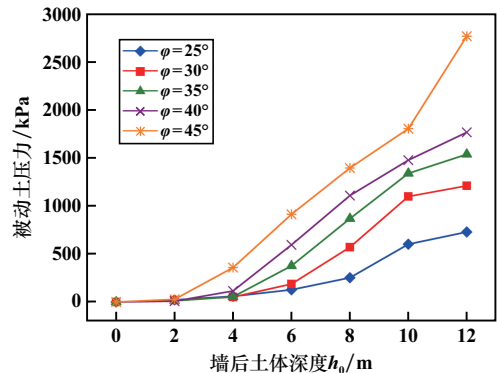


图8 不同内摩擦角下有限成坡土体被动土压力变化规律

由图8可知,不同内摩擦角 φ 下有限成坡土体被动土压力变化趋势大致相同,均随 h_0 增大而增大,且为非线性变化; $\varphi < 40^\circ$ 时,有限成坡土体被动土压力呈“S”形增长,随着 h_0 增大,有限成坡土体被动土压力增长速度先快后慢; $\varphi = 40^\circ$ 时, $h_0 > 4\text{ m}$ 后有限成坡土体被动土压力基本呈线性增长; $\varphi > 40^\circ$ 时,有限成坡土体被

动土压力呈折线形式增长,增长速度在 $h_0=4\sim 10\text{ m}$ 时随深度增大基本不变,在 $h_0>10\text{ m}$ 后增长速度变大,出现陡升现象。同一土体深度下,随着内摩擦角 φ 增大,有限成坡土体被动土压力逐渐增大。

4.1.3 有限成坡土体边坡坡角

$a=3\text{ m}, \varphi=40^\circ$ 时,不同边坡坡角 β 下有限成坡土体被动土压力随墙后土体深度 h_0 的变化规律如图9所示。

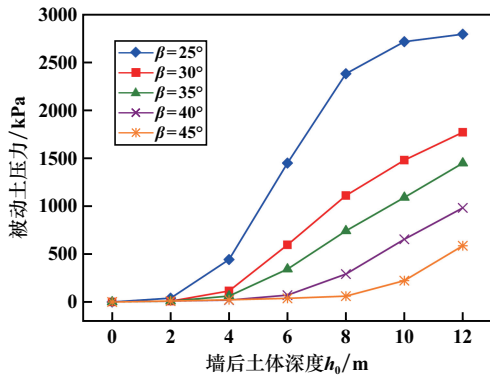


图9 不同边坡坡角下有限成坡土体被动土压力变化规律

由图9可知,不同边坡坡角 β 下有限成坡土体被动土压力变化趋势大致相同,均随 h_0 增大而增大,且为非线性变化。 $\beta>30^\circ, h_0<4\text{ m}$ 时,不同边坡坡角下的有限成坡土体被动土压力大小基本一致, $h_0>4\text{ m}$ 后,不同边坡坡角下有限成坡土体被动土压力基本呈线性增长; $\beta=30^\circ, h_0<4\text{ m}$ 时,不同边坡坡角下有限成坡土体被动土压力增长速度较慢, $h_0>4\text{ m}$ 后,随着 h_0 增大,有限成坡土体被动土压力基本呈线性增长; $\beta<30^\circ$ 时,随着 h_0 增大,有限成坡土体被动土压力呈“S”形增长,增长速度先快后慢。在同一土体深度处,随着边坡坡角逐渐增大,有限成坡土体被动土压力逐渐减小。

4.1.4 小结

综合以上分析可得,针对平动条件下的挡土墙,在不同平台宽度 a 、不同内摩擦角 φ 、不同边坡坡角 β 影响下,墙后有限成坡土体被动土压力沿墙后土体深度 h_0 的分布规律基本不变。边坡坡角 β 对有限成坡土体被动土压力的影响较大, β 较大时,在平动条件下,挡土墙向着土体方向产生较小位移,墙后有限成坡土体可能已经被破坏,坡体的稳定性难以保证。为了保证露天矿开挖安全,应尽量减小边坡坡角 β ^[8]。根据模拟分析结果,并综合考虑经济效益情况下,建议将边坡坡角 β 取为 30° ,该结果也得到了实际工程的验证,说明本文数值分析结果的可靠性。

该工程措施在实际工作过程中,主要承受来自墙后有限成坡土体的被动土压力,为了保证墙后有限成坡土体的稳定性,针对此情况并结合图7,墙后平台宽

度 $a=9\text{ m}$ 左右即可。该分析结果与布设地下连续墙后边坡上部平台的宽度基本一致,进一步证明了本文数值分析结果的可靠性。

4.2 主动土压力影响规律分析

4.2.1 平台宽度

$\varphi=40^\circ, \beta=30^\circ$ 时,不同平台宽度 a 下有限成坡土体主动土压力随墙后土体深度 h_0 的变化规律如图10所示。

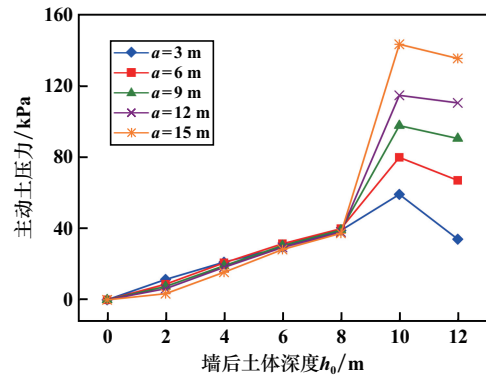


图10 不同平台宽度下有限成坡土体主动土压力变化规律

由图10可知, $h_0<10\text{ m}$ 时,主动土压力随 h_0 增大而增大; $h_0>10\text{ m}$ 后,主动土压力随 h_0 增大而减小,变化曲线出现凸起。 $h_0<8\text{ m}$ 时,不同平台宽度 a 的有限成坡土体主动土压力的大小基本上呈线性增长; $h_0>8\text{ m}$ 时出现陡升现象,同一土体深度处有限成坡土体主动土压力大小随着平台宽度 a 增大而增大。

4.2.2 有限土体内摩擦角

$a=3\text{ m}, \beta=30^\circ$ 时,不同内摩擦角 φ 下有限成坡土体中的主动土压力随墙后土体深度 h_0 的变化规律如图11所示。

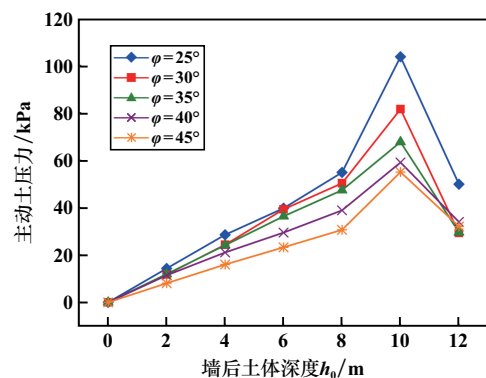


图11 不同内摩擦角下有限成坡土体主动土压力变化规律

由图11可知, $h_0<10\text{ m}$ 时,主动土压力随 h_0 增大而增大; $h_0>10\text{ m}$ 后,主动土压力随 h_0 增大而减小,但减小幅度不同,随着内摩擦角 φ 增大,主动土压力减小幅度逐渐减小,变化曲线出现凸起。挡土墙平动条件下,随着内摩擦角 φ 增大, $h_0<10\text{ m}$ 时,同一土体深

度处的有限成坡土体主动土压力整体呈减小变化。

4.2.3 有限成坡土体边坡坡角

$a=3\text{ m}$, $\varphi=40^\circ$ 时,不同边坡坡角 β 下有限成坡土体中的主动土压力随墙后土体深度 h_0 的变化规律如图12所示。

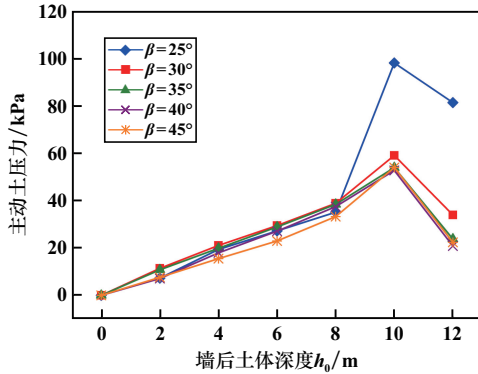


图12 不同边坡坡角下有限成坡土体主动土压力变化规律

由图12可知, $h_0 < 8\text{ m}$ 时,不同边坡坡角 β 下有限成坡土体主动土压力均随 h_0 增大而增大,且大小基本一致; $h_0 = 8 \sim 10\text{ m}$ 时,随着边坡坡角 β 增大,有限成坡土体主动土压力逐渐减小; $h_0 > 10\text{ m}$ 后,随着 h_0 增大,有限成坡土体主动土压力均减小,减小幅度随着边坡坡角 β 增大而逐渐增大。

4.2.4 小结

综合以上分析可得,针对平动条件下的挡土墙,在不同平台宽度 a 、不同内摩擦角 φ 、不同边坡坡角 β 影响下,墙后有限成坡土体主动土压力沿墙后土体深度 h_0 先增大再减小,与试验结果以及现场监测结果基本一致^[9-10]。内摩擦角 φ 对有限成坡土体主动土压力分布值的影响较大。在平动条件下,挡土墙向远离土体的方向产生位移时, φ 较小时,挡土墙上主动土压力较大,土体可能会发生破坏,边坡稳定性受到影响; φ 较大时,挡土墙上主动土压力较小,墙后土体能够较好地保持稳定状态。为了使挡土墙和露天矿边坡更好地保持稳定状态,可以采取有效措施(如注浆^[11]或置换^[12]等)增大墙后填土内摩擦角,从而减小墙背上的主动土压力,为矿山安全开采提供保障。

5 结论

1) 有限成坡土体滑裂面倾角随平台宽度增大先逐渐减小到零后逐渐增大,滑裂面由斜向下发展变为斜向上发展,平台宽度 $a=9\text{ m}$ 条件下,利用该模型得到的墙背上被动土压力数值解和已有推导公式得到的解析解基本一致,且变化规律基本相同,充分验证了本文数值模型的有效性。

2) 挡土墙在平动条件下,墙后有限成坡土体达到极限状态时,被动土压力在不同平台宽度 a 、不同内摩擦角 φ 、不同边坡坡角 β 影响下均随 h_0 增大而增大,呈非线性增加分布。内摩擦角 φ 和边坡坡角 β 均会影响有限成坡土体被动土压力的增长形式,平台宽度 a 不会影响有限成坡土体被动土压力的增长形式。边坡坡角 β 对墙后有限成坡土体被动土压力的影响较大。综合考虑矿山实际情况,建议将边坡坡角与平台宽度分别定为 30° 和 9 m 。

3) 在不同平台宽度 a 、不同内摩擦角 φ 、不同边坡坡角 β 影响下,墙后有限成坡土体主动土压力沿 h_0 的分布规律基本一致,在 $h_0 = 10\text{ m}$ 处发生转折, $h_0 < 10\text{ m}$ 时挡土墙后主动土压力均随深度增大而增大, $h_0 > 10\text{ m}$ 时均随深度增大而减小。有限填土上部宽度 a 和边坡坡角 β 对有限成坡土体主动土压力分布影响较小,内摩擦角 φ 对有限成坡土体主动土压力分布影响较大,为了减小挡土墙主动土压力,可以采取有效措施(如注浆或置换等)增大墙后填土内摩擦角,以保证挡土墙和边坡的稳定性,为矿山安全开采提供保障。

参考文献:

- [1] 李世俊,周云东. 挡土墙与土之间摩擦角对土压力的影响[J]. 四川建筑科学研究, 2015,41(2):158-161.
- [2] 竺明星,姜开渝,龚维明,等. 考虑 $c-\varphi$ 回填土坡面倾角影响的挡土墙非线性主动土压力研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019,52(S1):70-75.
- [3] 李飞,孙俊,张飞,等. 基于极限平衡法的临河基坑有限主动土压力分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019,44(4):1076-1084.
- [4] 王闰超,晏鄂川,陆文博,等. 无黏性有限土体主动土压力解析解[J]. 岩土力学, 2016,37(9):2513-2520.
- [5] 韩龙强,吴顺川,高永涛,等. 富水砂卵石地层露天矿止水固坡技术研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2022(12):2460-2472.
- [6] 韩龙强. 富水砂砾露天矿边坡稳定性分析方法与处治技术研究[D]. 北京:北京科技大学, 2021.
- [7] 史克宝,卢坤林,陈一鸣,等. 平移模式下刚性挡土墙三维被动土压力分布研究[J]. 水电能源科学, 2018,36(11):132-135.
- [8] 李小双,罗浪,王运敏,等. 露天转地下开采覆岩采动响应的坡角影响效应研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(4):33-37.
- [9] 克列因 F K. 散粒体结构力学[M]. 陈万佳译. 北京:人民交通出版社, 1983.
- [10] 方焘,孙书翰,徐长节,等. 考虑挡墙变位模式的有限土体主动土压力试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019,16(5):1178-1185.
- [11] 曹萍,王帮建,李强,等. 基于BIM的地下金属矿区垮塌注浆加固风险数值模拟[J]. 矿冶工程, 2020,40(4):23-27.
- [12] 王在泉. 边坡工程系统泥化夹层置换监测与分析[J]. 矿冶工程, 1999(2):19-21.

引用本文: 吴顺川,贾文松,韩龙强,等. 平动条件下有限成坡土体挡土墙土压力分布规律研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(5):11-16.