

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.056



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 含柔性垫层的刚性挡土墙土压力计算方法

梁利生<sup>1</sup>, 郭俊源<sup>2</sup>, 王慧芳<sup>1</sup>

(1. 山西工程技术学院 土木工程系; 矿区生态修复与固废资源化省市共建山西省重点实验室培育基地, 山西 阳泉 045000; 2. 太原理工大学 土木工程学院, 太原 030024)

**摘要:**在刚性挡土墙与填土之间设置柔性垫层能减小作用于挡土墙的土压力,但目前仍缺乏针对设置聚苯乙烯土工泡沫(EPS)柔性垫层的刚性挡土墙土压力计算方法。将EPS柔性垫层的压缩量视为墙后填土的位移量,考虑挡土墙后土拱效应,基于挡土墙土压力-位移的关系曲线,引入迭代法进行收敛计算,得到设置EPS柔性垫层的刚性挡土墙土压力计算方法。该计算方法的优势是可在EPS柔性垫层压缩量未知的情况下求解土压力,即可应用工程设计阶段。建立FLAC3D有限差分数值模型,对推导的理论解进行验证,并对EPS柔性垫层减载效果进行分析。结果表明:基于土压力-位移关系曲线并采用迭代法得出的墙后设置EPS柔性垫层的刚性挡土墙土压力理论解具有较好的合理性。在EPS柔性垫层弹性模量不变的情况下,EPS柔性垫层减小土压力的效果随着EPS柔性垫层厚度的增加而增强;在EPS柔性垫层厚度一定的情况下,随着EPS柔性垫层弹性模量的增加,其减小土压力的效果逐渐减弱。

**关键词:**挡土墙;EPS柔性垫层;土压力;减载;土拱效应

**中图分类号:**TU476.4 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2023)06-0158-07

## Calculation for lateral earth pressure on rigid retaining wall with flexible cushion

LIANG Lisheng<sup>1</sup>, GUO Junyuan<sup>2</sup>, WANG Huifang<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering; The Cultivation Base of Shanxi Key Laboratory of Mining Area Ecological Restoration and Solid Wastes Utilization, Shanxi Institute of Technology, Yangquan 045000, Shanxi, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China)

**Abstract:** The installation of polystyrene geofom (EPS) inclusions between the rigid retaining wall and backfill can reduce the earth pressure acting on the retaining wall. To date, there is a lack of the calculation method for the earth pressure on rigid retaining walls with EPS inclusions. In this study, the compression from geofom inclusions is equated to the displacement of the backfill, and the soil arching behind the retaining wall is considered. Based on the displacement-dependent earth-pressure model (DDEP), the iterative method is introduced for the convergence calculation, and then the theoretical solution is obtained to calculate the earth pressure on the rigid retaining wall with EPS inclusion. The advantage of the proposed method is that it can be used to solve the earth pressure when the EPS compression modulus is not provided. A series of FLAC3D

**收稿日期:**2023-02-22

**基金项目:**国家自然科学基金(52008285)

**作者简介:**梁利生(1972-),男,副教授,主要从事岩土工程研究,E-mail:mnliangll\_009@163.com。

**Received:** 2023-02-22

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 52008285)

**Author brief:** LIANG Lisheng (1972-), associate professor, main research interest: geotechnical engineering, E-mail: mnliangll\_009@163.com.

numerical models is established to verify the proposed method and analyze the load reduction effect of EPS inclusions. The proposed theoretical solutions based on the DDEP model and iterative method are in preferably consistency with the numerical results. Effect of EPS on reducing the earth pressure increases with increase of the thickness of EPS inclusions when EPS elastic modulus is constant, and decreases with increase of the elastic modulus of EPS inclusions while EPS thickness is constant.

**Keywords:** retaining wall; EPS flexible inclusion; earth pressure; load reduction; soil arching

挡土墙广泛应用于土木工程领域中,作用于挡土墙的侧向土压力计算是其设计的关键指标。聚苯乙烯土工泡沫(EPS)是一种具有密度小、压缩变形大、强度高和减振性能好等优点的柔性材料。将EPS垫层设置于刚性挡土墙和填土之间后,EPS垫层受到的土压力将会使其产生一定的压缩量,该部分压缩量即转化为填土的位移。在刚性挡土墙自身位移量很小的情况下,设置EPS垫层后,挡土墙受到的土压力将会明显减小<sup>[1]</sup>。

已有诸多学者对设置EPS的刚性挡土墙开展了研究。Bathurst等<sup>[2-3]</sup>开展了室内振动台试验研究不同密度的EPS缓冲层减小刚性挡土墙在动荷载作用下的墙背土压力的效果。Ikizler等<sup>[4]</sup>开展针对墙后填土为膨胀土的EPS垫层减载试验,得出EPS垫层可减小水平压力和竖向压力。Ertugrul等<sup>[5-6]</sup>开展了缩尺模型试验,得出EPS垫层的厚度和刚度对于土压力的减小有主要影响。Ni等<sup>[7]</sup>开展缩尺模型试验,分析EPS垫层的厚度与刚度对于减压效果的影响。Kim等<sup>[8]</sup>基于模型试验建立FLAC数值模型,分析EPS垫层的材料类型和厚度对土压力的影响,并提出刚性挡土墙后EPS垫层的分段设计方案。郑俊杰等<sup>[9-11]</sup>开展一系列模型试验,对EPS减载挡土墙土压力的效果及挡土墙后EPS垫层的设计方案进行了研究。谢明星等<sup>[12]</sup>建立设置EPS垫层的刚性挡土墙数值模型,分别对挡土墙后填土的静止、主动及被动3种位移状态进行了研究。许晓亮等<sup>[13]</sup>通过开展不同级别荷载下的模型试验,分析墙后铺设EPS柔性垫层、回填泡沫轻质土及其同时施加时的墙后土压力大小及分布特征。

目前,仍缺乏设置EPS垫层后刚性挡土墙土压力的计算方法。笔者将EPS垫层的压缩量视为墙后填土的位移量,基于Mei等<sup>[14]</sup>提出的挡土墙土压力-位移的关系曲线,推导设置EPS垫层的刚性挡土墙土压力的理论解。首先,考虑挡土墙后土拱效应,推导出考虑土拱效应的主动和被动土压力系数;其次,将所推导的主动和被动土压力系数代入土压力-位移关系曲线,并将静止土压力作为初始状态,引入迭代法进行收敛计算,求解EPS的压缩量和对应的土压力;最后,建立FLAC3D有限差分数值模型,验证所得到理论解的合理性,并对EPS垫层减载效果进行分析。

## 1 挡土墙土压力-位移的关系曲线

Mei等<sup>[14]</sup>将挡墙背离土体方向的位移记为负值、朝向土体方向的位移记为正值,假定存在一个函数 $p(s)$ 可表示土压力 $p$ 和位移 $s$ 之间的关系(图1),则该函数 $p(s)$ 满足以下条件:

1) $p(s)$ 为单调递增的函数。

2) $p(s)$ 函数存在上下限,下限为主动土压力 $p_a$ 及其对应的位移 $s_a$ ,上限为被动土压力 $p_p$ 及其对应的位移 $s_p$ 。

3)当 $s=0$ 时, $p$ 为静止土压力 $p_0$ 。

4) $s=0$ 处为 $p(s)$ 的拐点; $s<0$ 时, $\frac{d^2 p(s)}{ds^2}<0$ ; $s>0$ 时, $\frac{d^2 p(s)}{ds^2}>0$ 。

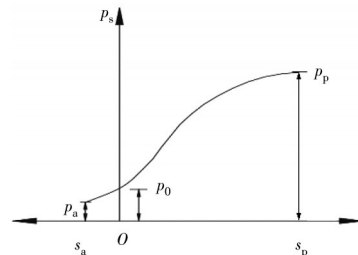


图1 土压力随位移的变化曲线

Fig. 1 Variation of earth pressure with displacement

进而基于上述条件提出土压力-位移的关系曲线

$$p(s) = \left( \frac{k}{1 + e^{-As}} - \frac{k-4}{2} \right) \frac{p_0}{2} \quad (1)$$

其中

$$k = 4 \left( \frac{k_p}{k_0} - 1 \right) \quad (2)$$

$$A = \frac{\ln(k_p - 2k_0 + k_a) - \ln(k_p - k_a)}{s_a} \quad (3)$$

式中: $k_0$ 、 $k_a$ 、 $k_p$ 分别为静止、主动、被动土压力系数。

## 2 考虑土拱效应的土压力系数

挡土墙无位移的情况下,目前最常用的土压力系数计算方法为Jaky<sup>[15]</sup>针对粗粒土得出的半经验半理论的静止土压力系数公式。

$$k_0 = 1 - \sin \varphi \quad (4)$$

式中: $\varphi$ 为墙后填土的内摩擦角。

在墙后填土达到主动或被动状态过程中,由于挡土墙墙背并非绝对光滑,挡土墙与填土之间存在的摩擦作用必将引起土体应力偏转,形成土拱效应,从而对土压力的分布产生影响。为便于计算,研究基于以下假定:

- 1)挡土墙为刚性挡土墙,且挡土墙墙背垂直;
- 2)挡土墙与基岩之间的填土为无黏性土,符合Mohr-Coulomb破坏准则,且不考虑孔隙水作用;
- 3)土压力求解视为平面应变条件下的二维问题;

4)对于刚性挡土墙,其自身的位移量通常非常小。因此,忽略挡土墙的位移量,将EPS垫层的压缩量视为墙后填土的位移;

5)考虑土拱效应时,主动状态下填土的小主应力轨迹线和被动状态下的大主应力轨迹线均假定为圆弧形。

朗肯土压力理论中假定主动和被动状态下填土内滑动面的倾角 $\theta_a, \theta_p$ 分别为 $\pi/4 + \varphi/2, \pi/4 - \varphi/2$ 。图2为主动和被动状态下填土的小主应力轨迹线。为便于计算,Paik等<sup>[16]</sup>将小主应力轨迹假定为圆弧形。笔者将小主应力轨迹和大主应力轨迹均假定

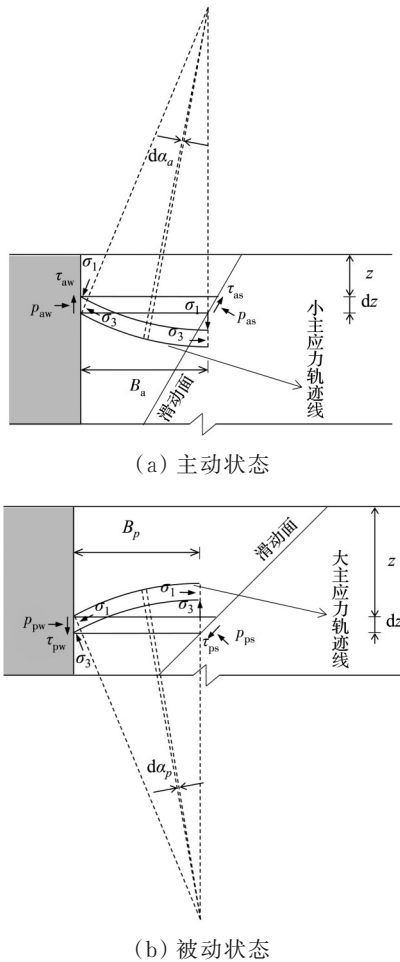


图2 主动和被动状态下填土的主应力轨迹线  
Fig. 2 Principal stress trajectory of backfill at active and passive state

为圆弧形。图3为主动和被动状态下墙背上和填土内滑动面上任意一点土体的应力莫尔圆。

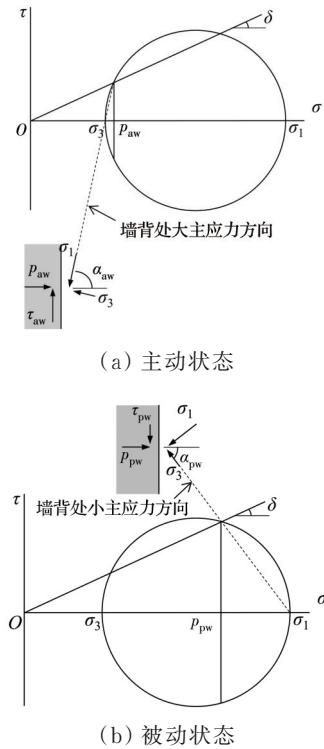


图3 主动和被动状态下应力莫尔圆

Fig. 3 Mohr's stress circle at active and passive state

可求出主动状态下两处土体对应的主应力偏转角 $\alpha_{aw}$ 和 $\alpha_{as}$ 为

$$\alpha_{aw} = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \left( \arcsin \frac{\sin \delta_w}{\sin \varphi} - \delta_w \right) \quad (5)$$

$$\alpha_{as} = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} + \theta_a \quad (6)$$

被动状态下的主应力偏转角 $\alpha_{pw}$ 和 $\alpha_{ps}$ 为

$$\alpha_{pw} = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \left( \arcsin \frac{\sin \delta_w}{\sin \varphi} + \delta_w \right) \quad (7)$$

$$\alpha_{ps} = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} + \theta_p \quad (8)$$

主动状态下微单元体在墙背处的侧向应力 $p_{aw}$ 和微单元中任意点的垂直向应力 $p_{az}$ 表示为

$$p_{aw} = \frac{\sigma_1 [1 + \cos(2\alpha_{aw}) \sin \varphi]}{1 + \sin \varphi} \quad (9)$$

$$p_{az} = \frac{\sigma_1 [1 - \cos(2\alpha_a) \sin \varphi]}{1 + \sin \varphi} \quad (10)$$

式中: $\alpha_a$ 为主动状态下该点的主应力偏转角。

被动状态下微单元体在墙背处侧向应力 $p_{pw}$ 和微单元任意点的垂直向应力 $p_{pz}$ 可表示为

$$p_{pw} = \frac{\sigma_3 [1 - \cos(2\alpha_{pw}) \sin \varphi]}{1 - \sin \varphi} \quad (11)$$

$$p_{pz} = \frac{\sigma_3 [1 + \cos(2\alpha_p) \sin \varphi]}{1 - \sin \varphi} \quad (12)$$

式中: $\alpha_p$ 为该点在被动状态下的主应力偏转角。

根据图 2 的几何关系可求得小主应力轨迹线半径  $r_a$  和大主应力轨迹线半径  $r_p$ 。

$$r_a = \frac{B_a}{\cos \alpha_{aw} - \cos \alpha_{as}} \quad (13)$$

$$r_p = \frac{B_p}{\cos \alpha_{pw} - \cos \alpha_{ps}} \quad (14)$$

式中: $B_a$ 和  $B_p$ 分别为主动和被动状态下挡土墙与填土内滑动面之间土体微分单元的宽度。将作用于微单元体的垂直方向的合力除以微单元体的宽度,

$$K_a = \frac{p_{aw}}{p_{az}} = \frac{1 + \cos(2\alpha_{aw}) \sin \varphi}{1 + \sin \varphi - \frac{2}{3} \sin \varphi (\cos^2 \alpha_{aw} + \cos \alpha_{aw} \cos \alpha_{as} + \cos^2 \alpha_{as})} \quad (17)$$

$$K_p = \frac{p_{pw}}{p_{pz}} = \frac{1 - \cos(2\alpha_{pw}) \sin \varphi}{1 - \sin \varphi + \frac{2}{3} \sin \varphi (\cos^2 \alpha_{pw} + \cos \alpha_{pw} \cos \alpha_{ps} + \cos^2 \alpha_{ps})} \quad (18)$$

根据作用在水平微单元片上的应力平衡条件可得出

$$\frac{dp_{az}}{dz} = \gamma + \frac{1 - CK_a}{H - z} p_{az} \quad (19)$$

$$\frac{dp_{pz}}{dz} = \gamma + \frac{1 - DK_p}{H - z} p_{pz} \quad (20)$$

其中

$$C = \tan \theta_a (\tan \theta_a + \tan \delta_w) \quad (21)$$

$$D = \tan \theta_p (\tan \theta_p - \tan \delta_w) \quad (22)$$

不考虑填土表面荷载的情况下,边界条件为  $p_{az} |_{z=0} = p_{pz} |_{z=0} = 0$ 。则可求出

$$p_{az} = \frac{\gamma(H-z)}{CK_a - 2} \left[ 1 - \left( \frac{H-z}{H} \right)^{CK_a - 2} \right] \quad (23)$$

$$p_{pz} = \frac{\gamma(H-z)}{DK_p - 2} \left[ 1 - \left( \frac{H-z}{H} \right)^{DK_p - 2} \right] \quad (24)$$

挡土墙上任意一点主动土压力系数  $k_a$  和被动土压力系数  $k_p$  为

$$k_a = \frac{K_a p_{az}}{\gamma z} = \frac{K_a(H-z)}{(CK_a - 2)z} \left[ 1 - \left( \frac{H-z}{H} \right)^{CK_a - 2} \right] \quad (25)$$

$$k_p = \frac{K_p p_{pz}}{\gamma z} = \frac{K_p(H-z)}{(DK_p - 2)z} \left[ 1 - \left( \frac{H-z}{H} \right)^{DK_p - 2} \right] \quad (26)$$

### 3 迭代法的引入

在挡土墙与填土之间设置 EPS 垫层后, EPS 的压缩是一个逐渐变化的过程。在这一过程中挡土

即可得到主动状态下微单元体的垂直应力平均值  $\bar{p}_{az}$  [16]。

$$\bar{p}_{az} = \frac{\int_{\alpha_{aw}}^{\alpha_{as}} p_{az} r_a \sin \alpha_a d\alpha_a}{B_a} \quad (15)$$

同理,被动状态下微单元体的垂直应力平均值  $\bar{p}_{pz}$  为

$$\bar{p}_{pz} = \frac{\int_{\alpha_{pw}}^{\alpha_{ps}} p_{pz} r_p \sin \alpha_p d\alpha_p}{B_p} \quad (16)$$

微单元体在挡土墙上的侧向应力除以微单元体的垂直应力平均值即为侧向应力比 [17], 则侧向主动应力比  $K_a$  和侧向被动应力比  $K_p$  为

墙的土压力  $p$  随着 EPS 压缩量  $s$  的增大而减小, 直至  $p$  和  $s$  的值稳定。假定 EPS 为理想线弹性, 将这一过程分为  $n$  步、每一步分为两个独立求解的部分: 1) EPS 受到一个已知的土压力发生弹性变形产生一个压缩量, 在这一部分的求解过程中该已知的土压力保持不变; 2) 通过式 (1) 可求得在该压缩量下的土压力, 在这一部分的求解过程中该压缩量保持不变, 得出的土压力将作为下一步中已知的土压力。然后, 引入迭代法, 计算每一步中 EPS 的压缩量和作用于挡土墙的土压力, 具体计算步骤如下。

初始状态: EPS 未发生变形, 即  $s_0 = 0$ , 挡土墙受到的土压力为静止土压力  $p_0$ 。

$$p_0 = k_0 \gamma z \quad (27)$$

第 1 步: EPS 在  $p_0$  的作用下产生压缩量  $s_1$ , 进而求得在  $s_1$  的位移下挡土墙所受到的土压力  $p(s_1)$ 。

$$\begin{cases} s_1 = \frac{p_0 t}{E} \\ p(s_1) = \left( \frac{k}{1 + e^{-As_1}} - \frac{k-4}{2} \right) \frac{p_0}{2} \end{cases} \quad (28)$$

第  $n$  步: EPS 在  $p(s_{n-1})$  的作用下产生压缩量  $s_n$ , 进而求得在  $s_n$  的位移下挡土墙所受到的土压力  $p(s_n)$ 。

$$\begin{cases} s_n = \frac{p(s_{n-1}) t}{E} \\ p(s_n) = \left( \frac{k}{1 + e^{-As_n}} - \frac{k-4}{2} \right) \frac{p_0}{2} \end{cases} \quad (29)$$

当  $p(s_n)$  约等于  $p(s_{n-1})$  时, 停止迭代,  $s_n$  和  $p(s_n)$  分别

为 EPS 的最终压缩量和设置 EPS 后挡土墙的最终土压力。需要注意的是,上述计算过程中,需用土与 EPS 之间的界面摩擦角  $\delta_E$  代替土与挡土墙之间的界面摩擦角  $\delta_w$ 。

### 4 计算结果验证及分析

目前, EPS 减载挡土墙土压力在实际工程中的应用较少,缺乏现场试验数据。既有研究大多为室内缩尺试验研究,受限于挡土墙的高度,所得到的土压力远小于实际工程中挡土墙所受到的土压力。而 EPS 的减载效果随着作用于挡土墙的土压力的减小而减小,这将导致室内缩尺试验不能如实反映 EPS 的减载效果。因此,笔者采用有限差分数值软件 FLAC3D 建立与实际工程中相符合的挡土墙模型(图 3),对所提出计算方法的合理性进行验证。以 EPS 厚度和弹性模量为变量建立多个数值模型。各模型中 EPS 的弹性模量参考文献[18]取值,且 EPS 垫层横断面尺寸均与挡土墙一致。此外,为验证数值模拟的准确性,建立墙后未设置 EPS 板的工况,以便于模拟结果与 Jaky 静止土压力和库仑主动土压力进行对比。数值模拟方案见表 1。

表 1 数值模拟方案

Table 1 Numerical simulation scheme

| 工况   | 厚度/m | 弹性模量/MPa |
|------|------|----------|
| 基本工况 | 0    |          |
| 工况 1 | 0.30 | 2.34     |
| 工况 2 | 0.40 | 2.34     |
| 工况 3 | 0.50 | 2.34     |
| 工况 4 | 0.50 | 1.63     |
| 工况 5 | 0.50 | 1.81     |
| 工况 6 | 0.50 | 3.54     |

填土为砂土,采用 Mohr-Coulomb 模型,黏聚力  $c=0$  kPa,内摩擦角  $\varphi=32^\circ$ 。挡土墙为刚性挡土墙,墙高  $H$  为 5 m,完全限制其侧向位移。地基采用线弹性模型,并取较大的弹性模量值,以减弱地基土沉降对填土应力状态的影响。填土与挡土墙之间(墙后未设置 EPS 板的工况)以及填土与 EPS 板之间(墙后设置 EPS 板的工况)均设置接触面,接触面摩擦角分别为  $\varphi/2$  和  $\varphi/3$ [12]。数值模型中各材料的参数取值见表 2。

图 4 为未设置 EPS 时(基本工况)的静止和主动模拟值与 Jaky 静止土压力和库仑主动土压力理论解的对比。静止土压力的理论解与数值解能够吻合;主动土压力的理论解与数值解在 0~4.5 m 范围

表 2 物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters

| 材料  | 弹性模量/MPa | 泊松比  | 重度/(kN/m <sup>3</sup> ) |
|-----|----------|------|-------------------------|
| 地基  | 11 000   | 0.20 | 23.00                   |
| EPS | 5.4      | 0.16 | 0.18                    |
| 挡土墙 | 21 000   | 0.20 | 24.00                   |
| 填土  | 60       | 0.33 | 18.00                   |

内也能吻合,但在挡土墙底部位置的数值解明显小于理论解。这是由于,为减小地基土沉降对土压力的影响,数值模型中地基土弹性模量的取值远大于墙后填土。当墙后填土产生位移的过程中,填土与地基土之间存在一定的边界摩擦效应,从而会导致土压力模拟值的减小[8]。综上,不考虑边界效应的情况下,数值模型具有较好的准确性。

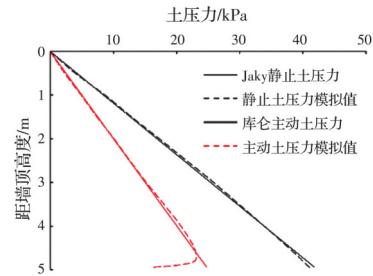


图 4 未设置 EPS 时挡土墙土压力模拟值与经典理论解对比  
Fig. 4 Comparison of earth pressure on retaining wall without EPS inclusion between numerical results and classical theories

图 5 对比了设置 EPS 后各工况的土压力数值解与理论解(式(29)迭代计算的结果)。可以看出,在距墙顶高度 0~4 m 范围内模拟值略大于理论解。土压力迭代计算中任意点的 EPS 压缩量均按照离散点受压的弹性变形计算,尽管 EPS 材料的泊松比较小,但 EPS 垫层受压方向面积较大,各点的弹性变形并非都发生在一维应力状态下,可能导致 EPS 垫层压缩量的模拟值略小于理论值,从而使土压力的模拟值略大于理论解。同样受数值模型边界条件的影响,在挡土墙底部位置各工况的模拟值均明显小于理论解。因此,忽略边界条件的影响,提出的理论解总体上与数值解能较好地吻合,验证了提出方法的合理性。

图 6、图 7 对比了设置 EPS 后各工况的土压力减小效果。随着距墙顶高度的增加,各工况的土压力减小效果均越来越明显。对比工况 1~工况 3,即在 EPS 弹性模量不变的情况下( $E=2.34$  MPa),EPS 减小土压力的效果随着 EPS 的厚度的增加而增强;对比工况 3~工况 6,在 EPS 厚度一定的情况下( $t=0.5$  m),EPS 减小土压力的效果随着 EPS 的弹

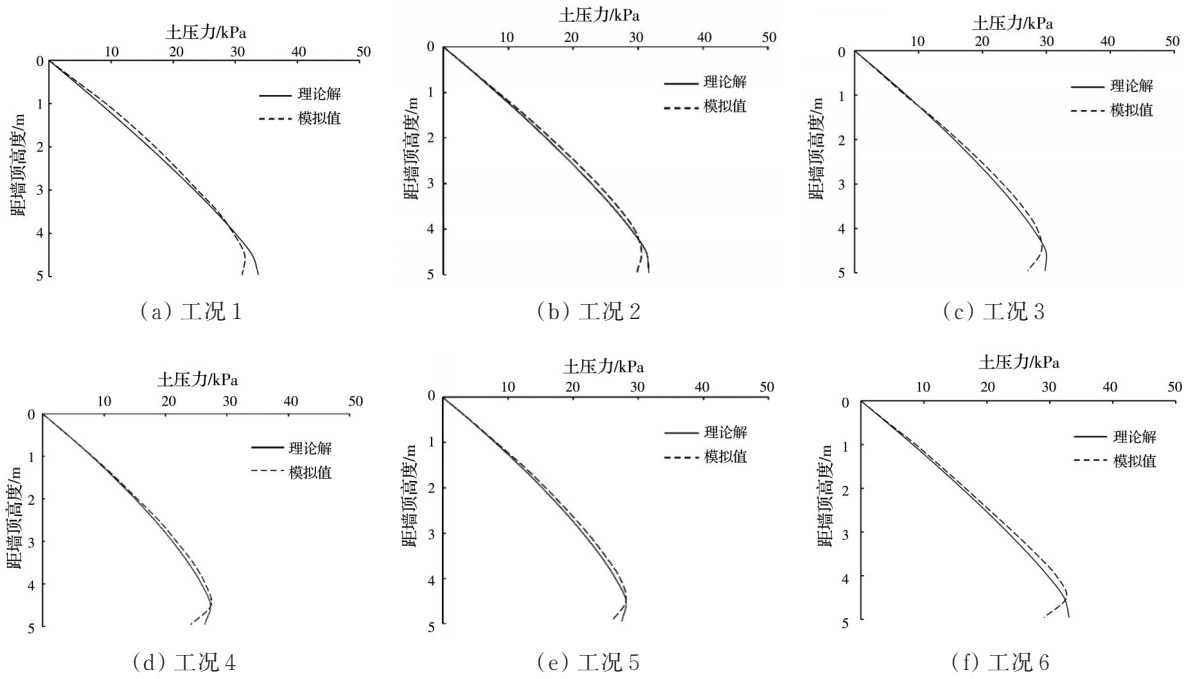


图 5 挡土墙后设置EPS时理论解和模拟值的对比

Fig. 5 Comparison between theoretical solution and numerical result when installing EPS inclusion

性模量的增加而减弱。EPS 的弹性模量随着其密度的减小而减小,但当采用低密度的EPS时,其屈服强度也较低,若挡土墙土压力值较大,会导致EPS处于屈服或非线性硬化阶段。同时,EPS厚度若过大,将会导致紧邻挡土墙区域路面出现不均匀沉降。因此,在实际工程中,需综合考虑EPS的设计参数和减载效果,避免为追求减载效果而导致工程隐患。

### 5 结论

1)将EPS垫层的压缩量视为墙后填土的位移量,推导了考虑土拱效应的挡土墙主动和被动土压力系数解析解,将其代入挡土墙土压力-位移的关系方程,并引入迭代法进行收敛计算,解决了设计阶段EPS实际压缩量未知这一关键问题,最终得出设置EPS垫层的挡土墙土压力解析解。

2)建立一系列有限差分数值模型,得到的模拟值与理论解总体上能较好地吻合,验证了提出方法的合理性。

3)在EPS弹性模量不变的情况下,EPS减小土压力的效果随着EPS的厚度的增加而增强;而在EPS厚度一定的情况下,随着EPS的弹性模量的增加,EPS减小土压力的效果逐渐减弱。

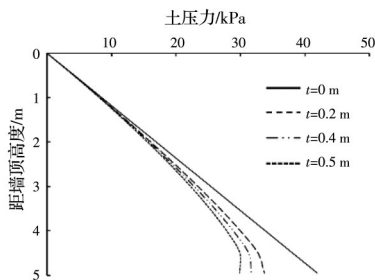


图 6 相同EPS弹性模量下EPS垫层减小土压力的效果

Fig. 6 Effect of EPS inclusion on reducing earth pressure with a same EPS elastic modulus

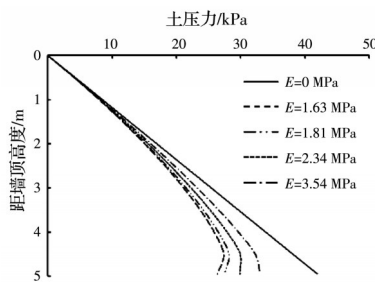


图 7 相同EPS厚度下EPS垫层减小土压力的效果

Fig. 7 Effect of EPS inclusion on reducing earth pressure with a same EPS thickness

### 参考文献

[1] HORVATH J S. The compressible inclusion function of EPS geofoam [J]. Geotextiles and Geomembranes, 1997, 15(1/2/3): 77-120.

[2] BATHURST R J, ZARNANI S, GASKIN A. Shaking table testing of geofoam seismic buffers [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(4): 324-332.

[3] BATHURST R J, ZARNANI S. Earthquake load attenuation using EPS geofoam buffers in rigid wall applications [J]. Indian Geotechnical Journal, 2013, 43 (4): 283-291.

- [4] IKIZLER S B, AYTEKIN M, NAS E. Laboratory study of expanded polystyrene (EPS) geofom used with expansive soils [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2008, 26(2): 189-195.
- [5] ERTUGRUL O L, TRANDAFIR A C. Reduction of lateral earth forces acting on rigid nonyielding retaining walls by EPS geofom inclusions [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011, 23(12): 1711-1718.
- [6] ERTUGRUL O L, TRANDAFIR A C. Lateral earth pressures on flexible cantilever retaining walls with deformable geofom inclusions [J]. *Engineering Geology*, 2013, 158: 23-33.
- [7] NI P P, MEI G X, ZHAO Y L. Displacement-dependent earth pressures on rigid retaining walls with compressible geofom inclusions: Physical modeling and analytical solutions [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, 17(6): 04016132.
- [8] KIM H, WITTHOEFT A F, KIM D. Numerical study of earth pressure reduction on rigid walls using EPS geofom inclusions [J]. *Geosynthetics International*, 2018, 25(2): 180-199.
- [9] 郑俊杰, 景丹, 谢明星, 等. 刚性挡土墙后设置 EPS 垫层的设计方法研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(12): 96-101.  
ZHENG J J, JING D, XIE M X, et al. Study on design scheme of installing EPS cushion behind the rigid retaining wall[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(12): 96-101. (in Chinese)
- [10] 郑俊杰, 邵安迪, 谢明星, 等. 挡土墙后 EPS 板减压性能模型试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(4): 1-9.  
ZHENG J J, SHAO A D, XIE M X, et al. Model test study on decompression performance of EPS boards behind retaining walls [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(4): 1-9. (in Chinese)
- [11] 郑俊杰, 邵安迪, 谢明星, 等. 不同填土宽度下设置 EPS 垫层挡土墙试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(2): 324-332.  
ZHENG J J, SHAO A D, XIE M X, et al. Experimental study on retaining wall with EPS cushion under different backfill widths [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(2): 324-332. (in Chinese)
- [12] 谢明星, 郑俊杰, 邵安迪, 等. 设置 EPS 柔性垫层的刚性挡土墙土压力研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41 (Sup1): 65-68.  
XIE M X, ZHENG J J, SHAO A D, et al. Lateral earth pressure on rigid retaining walls with EPS deformable geofom inclusions [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(Sup1): 65-68. (in Chinese)
- [13] 许晓亮, 王鑫佩, 曾林风, 等. 含 EPS 垫层及轻量填土挡土的墙后土压力及其减载效应[J/OL]. *土木与环境工程学报(中英文)*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20221202.1110.001.html>.  
XU X L, WANG X P, ZENG L F, et al. Lateral earth pressure and load-reducing effect behind retaining wall with EPS cushion and light-weight soil [J/OL]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20221202.1110.001.html>. (in Chinese)
- [14] MEI G X, CHEN Q M, SONG L H. Model for predicting displacement-dependent lateral earth pressure [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, 46(8): 969-975.
- [15] JAKY J. The coefficient of earth pressure at rest [J]. *Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers*, 1944: 355-358.
- [16] PAIK K H, SALGADO R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects [J]. *Géotechnique*, 2003, 53(7): 643-653.
- [17] HANDY R L. The arch in soil arching [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 111(3): 302-318.
- [18] XIE M X, ZHENG J J, SHAO A D, et al. Study of lateral earth pressures on nonyielding retaining walls with deformable geofom inclusions [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2020, 48(5): 684-690.

(编辑 胡玲)