

DOI: 10.11779/CJGE2019S1017

# 设置 EPS 柔性垫层的刚性挡土墙土压力研究

谢明星, 郑俊杰\*, 邵安迪, 景 丹

(华中科技大学岩土与地下工程研究所, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 建立有限差分数值模型对设置 EPS (发泡聚苯乙烯) 柔性垫层的刚性挡土墙的土压力进行研究, 分别对挡土墙后填土的静止、主动及被动三种位移状态进行了研究, 并对不同挡土墙位移时 EPS 垫层减小土压力的效果进行了分析。研究表明: EPS 对主动状态所需要的位移影响较小。静止-主动状态时, EPS 减小土压力的效果随着位移的增大而减弱; 静止-被动状态时, EPS 减小土压力的效果随着位移的增大先增强后减弱。

**关键词:** 土压力; 刚性挡土墙; EPS 垫层; 主动状态; 被动状态; 挡土墙位移

**中图分类号:** TU432; TU476.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2019)S1-0065-04

**作者简介:** 谢明星(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事路堤支挡结构方面的研究工作。E-mail: xiemingxing@hust.edu.cn。

## Lateral earth pressure on rigid retaining walls with EPS deformable geofom inclusions

XIE Ming-xing, ZHENG Jun-jie, SHAO An-di, JING Dan

(Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The finite difference program, FLAC<sup>3D</sup>, is used to model the rigid retaining wall with EPS (expanded polystyrene) deformable geofom inclusions, and the lateral earth pressure on the wall is obtained from numerical results. The at-rest state, active state and passive state of the retained soil behind the wall are studied, and the reductions of EPS on the lateral earth pressure with different wall displacements are also analyzed. The results indicate that EPS has little influence on the wall displacement required by the active state. The reduction of EPS on the lateral earth pressure decreases with the increase of the wall displacement in the retained soil between at-rest state and active state, while that increases firstly and then decreases with the increase of wall displacement in the retained soil between at-rest state and passive state.

**Key words:** earth pressure; rigid retaining wall; EPS inclusion; active state; passive state; wall displacement

## 0 引 言

挡土墙作为一种支挡结构, 广泛地应用于土木建筑、公路交通等工程中, 侧向土压力计算是挡土墙设计的重要内容。主动/被动状态为挡土墙后填土的两种极限平衡状态。对于墙高为  $H$  的挡土墙, 达到主动状态所需的位移约为背离填土方向的  $(0.001 \sim 0.004)H$ , 而达到被动状态所需的位移约为靠近填土方向的  $(0.05 \sim 0.10)H$ <sup>[1]</sup>。但实际工程中作用于墙背的土压力往往介于主动/被动土压力与静止土压力之间。

EPS (发泡聚苯乙烯) 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。Horvath<sup>[2]</sup>提出在填土和挡土墙之间设置 EPS 垫层可以使位移较小的刚性挡土墙具有变形能力, 从而使土体由静止状态接近主动状态。Ertugrul 等<sup>[3-4]</sup>通过室内试验和 FLAC 数值模拟对设置 EPS 垫层的悬臂式挡土墙进行了研究, 结果表明作用于挡土墙下半部分的土

压力显著减小。郑俊杰等<sup>[5]</sup>提出在刚性桩基挡墙结构中设置 EPS 垫层, 研究表明: 设置柔性垫层后, 墙背土压力、抗滑桩桩身弯矩和剪力均明显减小。

然而上述成果并未对设置 EPS 垫层挡土墙的静止、主动及被动这三种受力状态进行研究。对于设置 EPS 垫层的刚性挡土墙, 墙后填土的实际位移由挡土墙的位移和 EPS 垫层的压缩量两部分组成。而 EPS 垫层的压缩量与作用于柔性垫层的土压力密切相关。本文通过建立三维数值模型, 分析了有/无 EPS 垫层挡土墙的静止、主动及被动三种位移状态, 并对不同挡土墙位移时 EPS 垫层减小土压力的效果进行了研究, 以期能够对该类挡土墙设计起到一定的指导作用。

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (2016YFC0800200); 国家自然科学基金项目 (51678267, 51878313, 51808243)

**收稿日期:** 2019-04-30

**\*通讯作者** (E-mail: zhengjj@hust.edu.cn)

1 数值分析的方法和模型

采用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 建立如图 1 所示的数值模型。填土采用莫尔-库仑模型, 抗剪强度指标依据文献[4]选取, 黏聚力  $c=0$  kPa, 内摩擦角  $\varphi=43.5^{\circ}$ , 剪胀角  $\psi=\varphi$ 。挡土墙墙高  $H$  为 10 m, 顶宽为 3 m, 底宽为 4 m, 采用线弹性模型。为忽略地基的沉降对挡土墙及填土应力状态的影响, 地基采用线弹性模型, 并取较大的弹性模量值。EPS 柔性垫层的密度  $\rho$  为 18 kg/m<sup>3</sup>, 宽度  $t$  为 1 m, 设置于挡土墙与填土之间。模型中 EPS 为线弹性模型, 弹性模量  $E$  和泊松比  $\nu$  均依据文献[4]选取。模型中各材料的参数取值见表 1。同时也建立了未设置 EPS 垫层的挡土墙模型 ( $t=0$  m)。

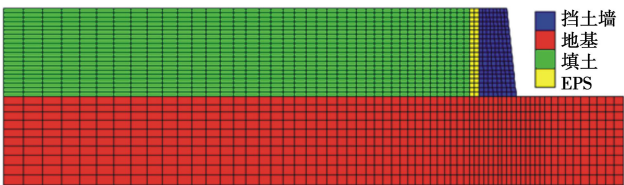


图 1 设置 EPS 的重力式挡土墙数值模型

Fig. 1 Numerical model for gravity retaining wall with EPS

表 1 物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters

材料	弹性模量/MPa	泊松比	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )
地基	11000	0.20	23.00
EPS	5.4	0.16	0.18
挡土墙	21000	0.20	24.00
填土	60	0.33	20.00

在模型中以下位置设置接触面: 挡土墙-EPS (W-E)、挡土墙-地基 (W-F)、挡土墙-填土 (W-S)、EPS-填土 (E-S)、EPS-地基 (E-F)、填土-地基 (S-F)。文献[4]采用 FLAC 对设置 EPS 的挡土墙进行数值模拟, W-E 和 E-S 界面摩擦角均基于直剪试验取值。本研究中接触面摩擦角  $\delta$  按文献[4]选取 (见表 2)。

表 2 接触面摩擦角

Table 2 Friction angles of interfaces

接触面	W-E	W-F	W-S	E-S	E-F	S-F
摩擦角/(°)	15	42	35	24	24	42

本文中挡土墙的位移为平移模式。求解主动土压力时, 对挡土墙赋予  $1 \times 10^{-7}$  m/步<sup>[6]</sup>的背离土体的水平位移速率, 监测每求解 10000 步即挡土墙水平移动 0.1 cm 时的土压力, 挡土墙的土压力达到最小值时, 即达到主动状态。求解被动土压力时, 对挡土墙赋予  $1 \times 10^{-6}$  m/步的靠近土体的水平位移速率, 监测每求解 50000 步即挡土墙水平移动 5.0 cm 时的土压力, 挡土墙的土压力达到最大值时, 即达到被动状态。定义背离土体的挡土墙位移为正, 靠近土体的挡土墙位移为负。

2 数值计算结果

2.1 静止土压力

$t=0$  m 时, 静止土压力系数  $K_{01}$  可按式 (1) 求得:

$$K_{01}=1-\sin \varphi'$$
 (1)

其中,  $\varphi'$  为填土有效内摩擦角。然而对于摩擦角较大的土体, 式 (1) 将明显低估静止土压力系数<sup>[7]</sup>。沈靠山<sup>[7]</sup>对  $\varphi=43.6^{\circ}$  的土体进行了室内试验和现场试验, 得出的静止土压力系数  $K_{01}$  的取值范围为 0.39~0.46。

图 2 为  $t=0$  m 和  $t=1$  m 两种工况中挡土墙静止状态下水平土压力数值解的分布曲线。图中  $z$  为挡土墙上某点距离墙踵的垂直距离。 $t=0$  m 时, 土压力数值解近似于线性分布, 静止土压力系数数值解  $K_{01N}=0.43$ , 符合试验值。 $t=1$  m 时, 土压力的数值解近似于抛物线分布,  $K_{02N}=0.31$ 。在墙后设置  $t=1$  m 的 EPS, 将减小墙后静止土压力,  $K_{02N}=0.72K_{01N}$ 。

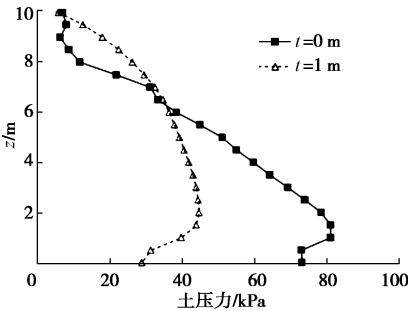


图 2 挡土墙静止土压力分布图

Fig. 2 Distribution of lateral earth pressure at rest state

2.2 主动土压力

在挡土墙墙背上选取 9 个点 ( $z=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$  m) 进行土压力监测。图 3 为  $t=0$  m 和  $t=1$  m 两种工况中不同高度处水平土压力随位移的变化曲线。可以看出两种工况中, 均在挡土墙位移达到 1.4 cm 时, 各个监测点的土压力都达到其最小值。这一数值与室内试验得出的主动状态所需要的挡土墙位移量相符合<sup>[8]</sup>, 即两种工况中墙后填土均在挡土墙位移为  $0.0014H$  时达到主动状态。

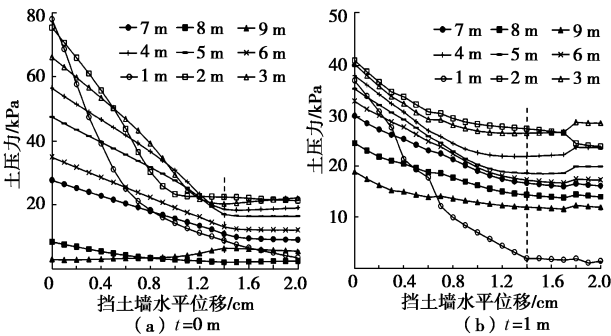


图 3 静止—主动状态下不同高度处水平土压力随位移变化规律

Fig. 3 Relationship between lateral earth pressure and lateral displacement at different depths at intermediate active state

朗肯土压力理论适用于 W-S/E-S 界面摩擦角为 0 的情况, 而库仑主动土压力理论则考虑了 W-S/E-S 界面的摩擦角。依据库仑土压力理论可计算求得  $K_{a1} = 0.14$ ,  $K_{a2} = 0.16$ 。图 4 为  $t = 0$  m 和  $t = 1$  m 两种工况中主动状态下水平土压力数值解的分布曲线。 $t = 0$  m 时, 主动土压力在距墙踵 2~10 m 范围内呈近似线性分布, 而在距墙踵 0~2 m 范围内急剧减小并趋近于 0, 主动状态时水平土压力系数数值解  $K_{a1N} = 0.14$ , 近似等于理论解。主动土压力的分布规律符合室内试验结果<sup>[8]</sup>。 $t = 1$  m 时, 主动土压力的分布规律与  $t = 0$  m 时近似相同, 但在距墙踵 2~10 m 范围内的土压力值均大于  $t = 0$  m 时的值, 土压力系数数值解  $K_{a2N} = 0.16$ , 近似等于理论解。墙后设置  $t = 1$  m 的 EPS 后, 主动土压力大于  $t = 0$  m 时的主动土压力,  $K_{a2N} = 1.14K_{a1N}$ 。

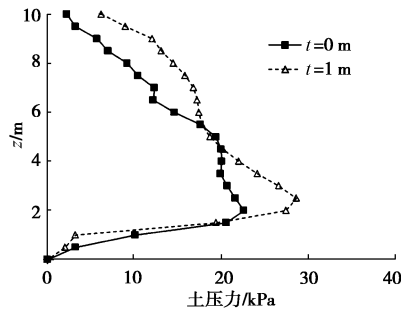


图 4 主动状态下水平土压力分布图

Fig. 4 Distribution of lateral earth pressure at active state

### 2.3 被动土压力

图 5 为  $t = 0$  m 和  $t = 1$  m 两种工况中挡土墙不同高度处水平土压力随位移的变化曲线。可以看出墙后填土达到被动状态需要的挡土墙位移： $t = 0$  m 时约为 80 cm， $t = 1$  m 时约为 90 cm，符合室内试验得出的被动状态所需要的挡土墙位移量<sup>[1]</sup>。不同于主动状态，EPS 垫层小幅地增加了被动状态所需要的位移。

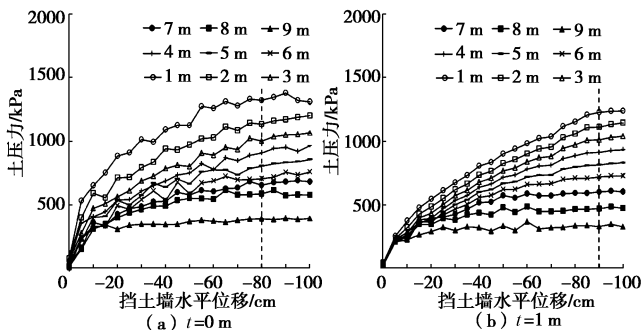


图 5 静止—被动状态下不同高度处水平土压力随位移变化规律  
Fig. 5 Relationship between lateral earth pressure and lateral wall displacement at intermediate passive state

使用库仑被动土压力理论将高估挡土墙被动土压力, 尤其当  $\varphi$  和  $\delta$  均较大时, 库仑被动土压力解与实际值相差更多, 因此不适用于本文中的算例<sup>[9]</sup>。图 6

为  $t = 0$  m 和  $t = 1$  m 两种工况中被动状态下水平土压力数值解的分布曲线。被动土压力在距墙踵 2~10 m 范围内呈近似线性分布, 而在距墙踵 0~2 m 范围内大幅增大, 符合已有研究中的被动土压力分布规律<sup>[1]</sup>。 $t = 0$  m 时, 被动状态时水平土压力系数数值解  $K_{p1N} = 8.53$ ;  $t = 1$  m 时, 被动状态时水平土压力系数数值解  $K_{p2N} = 8.08$ 。设置  $t = 1$  m 的 EPS 后, 被动土压力略小于  $t = 1$  m 时的主动土压力,  $K_{p2N} = 0.95K_{p1N}$ 。

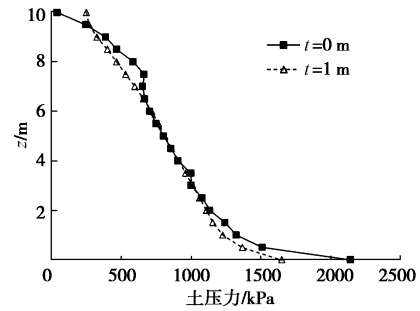


图 6 被动状态下水平土压力分布图

Fig. 6 Distribution of lateral earth pressure at passive state

## 3 EPS 减小墙背土压力的效果

挡土墙与填土间设置 EPS 后, 土体的实际位移  $s$  由挡土墙的位移  $\Delta_1$  和 EPS 的压缩量  $\Delta_2$  组成。为进一步分析 EPS 减小土压力的效果, 将  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  的值单独列出进行研究。由于  $\Delta_2$  沿 EPS 高度方向分布不均匀, 为便于对比,  $\Delta_2$  取 EPS 压缩量的平均值进行对比。

### 3.1 静止—主动状态

图 7 为静止—主动状态下土压力系数和 EPS 平均压缩量随挡土墙水平位移的变化规律。当  $\Delta_1$  较小时, 由于  $\Delta_2 > 0$ ,  $t = 1$  m 工况下的土体实际位移将明显大于  $t = 0$  m 工况, 对应的  $t = 1$  m 工况下的土压力系数将小于  $t = 0$  m 工况。当  $\Delta_1$  增大到一定量时, 由于土压力系数的减小, 相应地  $\Delta_2$  也有所减小, 两种工况下土体的实际位移差值逐渐趋于不明显。且土压力随位移增大而减小的幅度也逐渐减小, 因而两种工况下土压力系数的差值逐渐减小。而由于填土与 EPS/挡土墙界面摩擦角的差值较大,  $t = 1$  m 工况下主动土压力系数大于  $t = 0$  m 工况。因此随着  $\Delta_1$  接近于主动状态(本工况为  $\Delta_1 = 1.0$  cm 时),  $t = 1$  m 工况下的土压力系数开始大于  $t = 0$  m 工况。此时 EPS 垫层将失去减小土压力的效果, 甚至会随着  $\Delta_1$  的增加而增大土压力。

### 3.2 静止—被动状态

图 8 为静止—被动状态下土压力系数和 EPS 平均压缩量随挡土墙水平位移的变化规律。随着土压力系数逐渐增大,  $\Delta_2$  也将逐渐增大。 $|\Delta_1|$  值较小时, 由于  $\Delta_1 < 0$ ,  $\Delta_2 > 0$ ,  $t = 1$  m 工况下的土体实际位移将明显小

于  $t = 0$  m 工况, 对应的  $t = 1$  m 工况下的土压力系数将小于  $t = 0$  m 工况。静止—被动状态中, 相同  $\Delta_1$  下,  $t = 1$  m 工况的土压力系数恒小于  $t = 0$  m 工况。这可能是由于静止—被动状态中的  $\Delta_2$  远大于静止—主动状态, 且随着  $|\Delta_1|$  的增大  $\Delta_2$  仍保持较大的增幅, 即两种工况的位移差一直保持为较大值, 从而使得摩擦角对土压力系数的影响未被体现出来。当  $\Delta_1 = -80$  cm 时,  $\Delta_2 = 14$  cm, 这也是导致  $t = 1$  m 工况下被动状态所需的位移比  $t = 0$  m 工况下相差 10 cm 的主要原因。

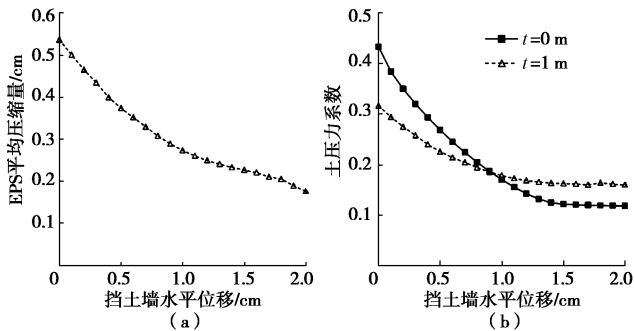


图7 静止—主动状态下 EPS 平均压缩量和土压力系数随挡土墙水平位移的变化曲线

Fig. 7 Variation of EPS average compression and earth pressure coefficient with wall displacement at intermediate active state

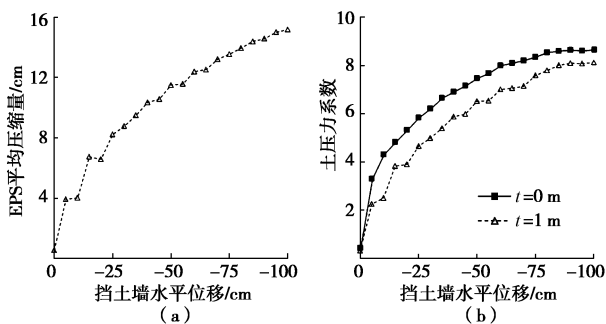


图8 静止—被动状态下 EPS 平均压缩量和土压力系数随挡土墙水平位移的变化曲线

Fig. 8 Variation of EPS average compression and earth pressure coefficient with wall displacement at intermediate passive state

## 4 结 论

本文通过有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 对设置 EPS 垫层的刚性挡土墙的静止、主动及被动三种位移状态进行了研究, 并针对不同挡土墙位移量下 EPS 减小土压力的效果进行了分析, 主要得出以下结论:

(1) 静止状态时, EPS 垫层可以大幅减小墙背土压力; 被动状态时, EPS 减小土压力的效果有所减弱; 而主动状态时, EPS 垫层则有可能会增大墙背土压力。

(2) 设置 EPS 垫层对刚性挡土墙后填土达到主

动状态所需位移的影响较小, 但会增大达到被动状态所需要的位移。

(3) 静止—主动状态时, EPS 减小挡土墙墙背土压力的效果随着挡土墙位移的增大而逐渐减弱; 静止—被动状态时, EPS 减小挡土墙墙背土压力的效果随着挡土墙位移的增大先增强而后减弱。

## 参考文献:

- [1] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Earth pressures[M]// Foundation Engineering Handbook. 2nd ed. FANG H Y, van Nostrand Reinhold. New York, 1991: 223 - 235.
- [2] HORVATH J S. Compressible inclusion function of EPS geofam[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1997, 15(1): 77 - 120.
- [3] ERTUGRUL O L, TRANDAFIR A C. Reduction of lateral earth forces acting on rigid non-yielding retaining walls by EPS geofam inclusions[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2011, 23 (12): 1711 - 1718.
- [4] ERTUGRUL O L, TRANDAFIR A C. Lateral earth pressures on flexible cantilever retaining walls with deformable geofam inclusions[J]. Engineering Geology, 2013, 158: 23 - 33.
- [5] 郑俊杰, 吕思祺, 曹文昭, 等. 高填方膨胀土作用下刚柔复合桩基挡墙结构数值模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 1 - 8. (ZHENG Jun-jie, LÜ Si-qi, CAO Wen-zhao, et al. Numerical simulation of composite rigid-flexible pile-supported retaining wall under the action of high-filled expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 1 - 8. (in Chinese))
- [6] BENMEDDOUR D, MELLAS M, FRANK R, et al. Numerical study of passive and active earth pressures of sands[J]. Computers and Geotechnics, 2012, 40: 34 - 44.
- [7] 沈靠山. 覆盖层砂卵石料静止侧压力系数研究[D]. 南京: 河海大学, 2009. (SHEN Kao-shan. Study of coefficient of earth pressure at rest on gravel soil[D]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese))
- [8] FANG Y S, ISHIBASHI I. Static earth pressures with various wall movements[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112(3): 317 - 333.
- [9] 东南大学, 浙江大学, 湖南大学, 等. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (Southeast University, Zhejiang University, Hunan University, et al. Soil mechanics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))

(责编: 明经平)