

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.116



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 含 EPS 垫层及轻量填土挡墙的墙后土压力及其减载效应

许晓亮<sup>1</sup>, 王鑫佩<sup>1</sup>, 曾林凤<sup>1</sup>, 张庭凤<sup>1</sup>, 乔素云<sup>2</sup>

(1. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 宜昌富强工程有限责任公司, 湖北 宜昌 443000)

**摘要:**挡墙后铺设柔性垫层或回填轻量土, 对其优化设计和降低成本有着重要的工程意义。通过开展不同级别荷载下的挡土墙物理模型试验, 分析墙后铺设 EPS 柔性垫层、回填泡沫轻量土及二者同时施加时的墙后土压力大小及分布特征, 并探讨相应的减载效应。结果表明: 挡土墙铺设柔性垫层、回填轻量土或二者同时施加时, 墙后土压力均随埋深呈先增大后减小的“鼓肚”状非线性特征, 土压力最大值多出现在 1/2 墙高处; 同等荷载作用下, 仅回填轻量土的减载效果相对较弱, 减载率为 10%~25%, 而铺设柔性垫层的最大减载率较之提高了 1.5 倍, 当二者同时施加时, 减载效果最佳, 最大减载率相应提高了近 3 倍; 柔性垫层减载效果随着厚度的增加逐渐降低, 但泡沫掺量对墙后回填轻量土的减载率影响更为敏感。工程中可考虑采用中等厚度的垫层, 若墙后填土附加荷载较大, 可适当提高回填泡沫轻量土的掺量。

**关键词:**柔性垫层; 轻量填土; 挡土墙; 墙后土压力; 减载效应

中图分类号: TU432 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2025)01-0054-09

## Lateral earth pressure and load-reducing effect behind retaining wall with EPS cushion and light-weight soil

XU Xiaoliang<sup>1</sup>, WANG Xinpei<sup>1</sup>, ZENG Linfeng<sup>1</sup>, ZHANG Tingfeng<sup>1</sup>, QIAO Suyun<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, P. R. China; 2. Yichang Fuqiang Engineering Group Co., Ltd., Yichang 44300, Hubei, P. R. China)

**Abstract:** Laying a flexible cushion or backfilling lightweight soil behind the retaining wall has important engineering significance for its optimized design and cost reduction. By carrying out model tests of retaining walls under different level of loads, the magnitude and distribution characteristics of the lateral earth pressure when laying EPS flexible cushion, backfilling lightweight soil and applying it simultaneously are analyzed, and

收稿日期: 2022-07-20

基金项目: 湖北省自然科学基金创新群体项目(2020CFA049); 湖北省交通运输厅科研项目(2022-11-6-4)

作者简介: 许晓亮(1989-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程可靠性分析及库岸边坡灾害防治研究, E-mail: sichuan106@ctgu.edu.cn。

乔素云(通信作者), 男, 正高级工程师, E-mail: 1357249766@qq.com。

Received: 2022-07-20

**Foundation items:** Innovative Group Project of Natural Science Foundation of Hubei Province (No. 2020CFA049); Scientific Research Project of Department of Transport of Hubei Province (No. 2022-11-6-4)

**Author brief:** XU Xiaoliang (1989-), PhD, associate professor, main research interests: reliability analysis of geotechnical engineering and disaster prevention and control of reservoir bank slope, E-mail: sichuan106@ctgu.edu.cn.

QIAO Suyun (corresponding author), professor of engineering, E-mail: 1357249766@qq.com.

the load-reducing effect is discussed. The result shows: when the retaining wall is paved with flexible cushion, backfilled with lightweight soil, or both applied, the lateral earth pressure exhibits a “bulging” nonlinear feature that increases first and then decreases with the burial depth, and the maximum value of earth pressure generally appears at half of the wall height; under the same loading, the load-reducing effect of backfilling lightweight soil is relatively weak, achieving a reduction rate of 10%-25%, the maximum load-reducing rate of laying a flexible cushion is increased by 1.5 times compared with lightweight soil, when both are applied, the load-reducing effect is the most significant, and the maximum load-reducing rate is increased by nearly 3 times; the load-reducing effect of the flexible cushion decreases with the variation of thickness, the foam content is more sensitive to the load-reducing rate of the backfill lightweight soil. In the engineering project, a medium-thickness cushion is an optimal choice, if the applied load of the backfill is large, the content of the backfill lightweight soil can be appropriately increased.

**Keywords:** flexible cushion; lightweight soil; retaining wall; lateral earth pressure; load-reducing effect

作为工程中常见的支挡结构,挡土墙主要用于防止墙后土体坍塌,保障岩土体安全稳定等。墙后土压力大小及分布是挡墙设计的重要依据,减小墙后土压力可实现挡墙体形尺寸及配筋的优化设计。研究表明,在挡土墙后设置一定厚度的粒料层,在起到排水作用的同时也能减小作用在挡墙上的土压力<sup>[1]</sup>。此外,墙后采用轻量级填土,如 EPS 颗粒和水泥、原料土(素土)等混合泡沫轻量土,亦可减小墙后的土压力水平<sup>[2]</sup>。

泡沫类轻量土可以有效解决软土地区路基、路堑、桥涵地基沉降量大、沉降不均匀、稳定性差等土木工程难题<sup>[3]</sup>,因此被广泛应用于山区高陡边坡、狭窄地段直立路基挡墙及环境保护等工程中。董金梅等<sup>[4]</sup>研究发现,轻质混合土抗压强度与水泥掺入比、含水量、密度、龄期和破坏应变的关系。李明东等<sup>[5]</sup>以新安江电厂的道路工程为例,发现 EPS 颗粒混合轻量土可以有效降低填土竖向土压力。王超等<sup>[6]</sup>通过模型试验研究,发现 EPS 颗粒混合轻量土可以有效降低台背侧向土压力,且随着 EPS 颗粒含量增加,减压效果逐渐增强。Kaneda 等<sup>[7]</sup>研究了轮胎碎屑夹杂砂土的土压力降低机制。高洪梅等<sup>[8-10]</sup>研究了交通荷载作用下 EPS 颗粒轻质混合土的动变形特性,分析了初始应力状态和 EPS 颗粒配比对压实型(未添加水泥)EPS 颗粒轻质混合土动模量和阻尼比特性的影响。侯天顺等<sup>[11-13]</sup>通过挡土墙模型试验及有限元数值模拟对轻量土静止土压力、静止土压力系数、沉降变形特性等进行了分析,同时对 EPS 颗粒轻量土摩擦系数、刚度比和黏结强度等细观参数对骨干曲线的影响规律进行了研究。

学者们对 EPS 板在挡土结构物和涵洞顶部应用时的变形特性和减压机理进行了大量研究。Roy 等<sup>[14]</sup>通过建立的有限元模型研究了 EPS 材料作为

隧道隔震有效缓冲层的可行性。Ni 等<sup>[15]</sup>通过模型试验发现, EPS 板厚度越大,填土产生的位移量越大,土压力更接近主动土压力。Bathurst 等<sup>[16]</sup>对地震工况下 EPS 缓冲层减载效应进行了研究。王德玲等<sup>[17]</sup>用有限元软件验证了 EPS 缓冲层通过吸收振动能量从而减少挡土墙上的动力荷载。郑俊杰等<sup>[18-20]</sup>结合模型试验和数值模拟,详细分析了弹性模量和厚度对 EPS 板减压性能的影响。

众多学者针对 EPS 轻量填土和 EPS 缓冲层在不同结构中的减载作用开展了富有成效的研究工作,分析了其减载性能及相应的作用原理。但对于挡墙结构,若能综合考虑墙后铺设 EPS 柔性垫层及回填轻量填土,将在发挥 EPS 垫层便捷、高效施工及消能减载作用的同时实现固废利用,对于节约资源、降低成本有着重要的工程意义。为此,开展铺设 EPS 垫层及回填轻量填土的重力式挡墙模型试验,研究墙后土压力分布规律及减载效应,以期为类似工程条件下的挡墙设计提供参考和借鉴。

## 1 挡土墙模型试验设计

### 1.1 试验材料

试验所用原料土为取自宜昌地区的黏土。选取原料土按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[21]</sup>开展常规试验,通过标准轻型击实试验,得到其最优含水率为 14.40%,最大干密度为 1.644 g/cm<sup>3</sup>。原料土基本物理性质如表 1 所示。

试验所用的泡沫材料为发泡聚苯乙烯颗粒,粒

表 1 原料土基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of soil

密度 $\rho/$ (g/cm <sup>3</sup> )	比重 $G_s$	含水率 $w/\%$	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	孔隙 比 $e$
1.68	2.71	2.46	14.3	35.9	0.79

径为 1~5 mm,其堆积体密度为 0.032 g/cm<sup>3</sup>。试验中采用定制的 EPS 泡沫板作为挡土墙后柔性垫层材料,表面光滑平整,厚度为 2 cm,密度为 12 kg/m<sup>3</sup>,在单轴压缩处于弹性阶段时,其弹性模量为 3 MPa。

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[21]</sup>规定,将称好的水均匀地喷洒入原料土中,用调土刀拌和均匀并充分搅拌;加入 EPS 颗粒,再次搅拌直至获得均匀的轻量填土;采用质量控制法用电子天平称量预定的轻量填土分别加入到高 20 mm、直径 61.8 mm 的环刀中,用千斤顶进行压样法制样。依据文献[11-12],将泡沫颗粒掺量定义为泡沫颗粒的质量与干土质量之比,且发现当泡沫掺量高于 0.3% 时,对应的泡沫体积占比将大于 30%,而过大掺量的泡沫将会引起受荷变形问题,故选取 4 种泡沫颗粒掺量(0、0.1%、0.2%、0.3%)分别配制成轻量填土标准环刀试样进行快剪试验<sup>[22]</sup>。表 2 给出了不同 EPS 泡沫掺量下轻量填土试样快剪试验结果。不难看出,随着 EPS 泡沫掺量的增加,EPS 混合轻量填土的内摩擦角增大,黏聚力整体略有减小。

表 2 EPS 轻量填土快剪试验结果

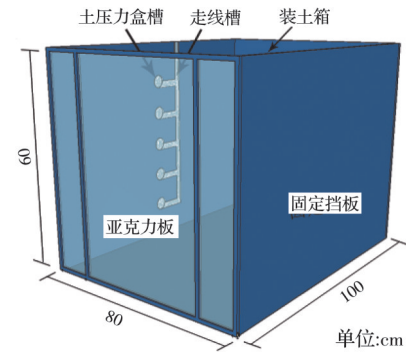
Table 2 Fast shear test results of EPS lightweight soil

组别	泡沫掺量/%	密度 $\rho$ / (g/cm <sup>3</sup> )	黏聚力 $c$ / kPa	内摩擦角 $\varphi$ / (°)
1	0	1.86	14.04	8.44
2	0.1	1.82	13.99	8.55
3	0.2	1.78	13.96	9.40
4	0.3	1.72	12.98	11.90

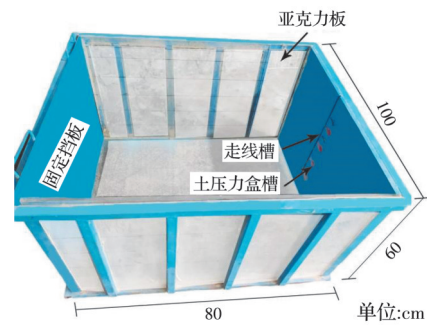
## 1.2 模型箱设计

物理模型试验以概化的挡墙模型为对象,重点研究墙后土压力分布特征及减载效应响应规律。模型试验使用自主设计制作的模型箱,尺寸为 100 cm×80 cm×60 cm,如图 1 所示。模型箱侧壁中,挡墙面板及对面挡板为钢板,另外两侧为透明的亚克力板,底板为钢板。挡墙面板和各侧板均垂直嵌固在底部框架上,模型底板及四周均为刚性位移约束,顶部按试验方案工况堆载。为了减小两侧壁摩阻力对试验结果的影响,试验时为在侧壁涂抹润滑油,同时,在挡墙侧面板中心线上距顶部 10、20、30、40、50 cm 位置设有直径为 30 mm、深度为 10 mm 的土压力盒槽及走线槽,用以埋设土压力盒及走线,以减少土压力盒埋设对挡土墙平面平整度的影响。

试验采用 DMTY 振弦式土压力盒和 DM-YB1820 型动静态应变测试分析系统。土压力盒为



(a) 示意图



(b) 实物图

图 1 挡土墙模型箱

Fig. 1 Schematic diagram of retaining wall model box

圆盘形,其直径为 28 mm,厚度为 10 mm,在满足测量精度要求的条件下,静荷载试验选择量程为 0~10 kPa 的土压力盒,其精度为 0.05 kPa。DM-YB1820 型动静态应变测试分析系统,是一种对各种电阻应变计及应变式传感器进行应变测试分析的系统,能同时显示和采集 20 个通道的全部数据。试验中土压力盒测得的是微应变,通过式(1)换算可得到不同深度处的墙后土压力。

$$P = \mu\epsilon \times K \quad (1)$$

式中: $\mu\epsilon$  为微应变; $K$  为灵敏度系数。土压力盒 CH1~CH5 的灵敏度系数见表 3。

表 3 土压力盒的灵敏度系数

Table 3 Sensitivity coefficient of earth pressure cell

编号	$K$
CH1	0.023 547
CH2	0.020 337
CH3	0.021 457
CH4	0.020 475
CH5	0.020 628

## 1.3 填土方式

试验采用分层填筑、人工压实的方法。填土分 6 层填筑压实,每层填土高度为 10 cm,总高度为 60 cm。根据填土的高度和压实度,采用质量控制法填筑并夯实填土,以 90% 压实度控制压实,即填



土密度控制为 $1.48\text{ g/cm}^3$ ,因此,填筑每一层填土的质量约为 $71.03\text{ kg}$ 。待全部填土填筑完成后,静置直至土压力盒示数不再变化。

考虑到泡沫颗粒的疏水性,为避免泡沫颗粒与土体混合不均匀,制作轻量填土时需先将泡沫颗粒过水,使其表面均匀沾上水分,然后根据配合比,将称量好的泡沫均匀撒至原料土上,多次搅拌使其混合均匀;最后采用质量控制法,将轻量填土均以 $90\%$ 压实度控制,分层填筑,人工压实。

对于挡土墙后设置有EPS柔性垫层的工况,在固定好土压力盒后,于挡墙内侧铺设EPS垫层(垫层尺寸统一为 $100\text{ cm}\times 60\text{ cm}\times 2\text{ cm}$ ),使其与挡土墙面板紧密贴合,并按照上述填土方式回填原料土和轻量填土。为防止试验过程中出现土压力盒应力集中的现象,在预留的土压力盒槽中使用纱布包裹土压力盒避免黏土直接接触。

#### 1.4 试验方案

填筑完成后,根据《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60—2015)<sup>[23]</sup>,通过在填土顶部堆载模拟加载情况,形成的荷载近似为均布面荷载。在距离墙顶内侧 $5\sim 57\text{ cm}$ 范围分4级加载,加载区域大小为 $0.84\text{ m}\times 0.52\text{ m}$ 。4级荷载加载重物质量分别为 $64,128,200,280\text{ kg}$ ,均匀布置在加载面,对应荷载分别为 $1.45,2.91,4.55,6.37\text{ kPa}$ ,加载中需等土压力值趋于稳定后( $30\text{ min}$ 内示数变化不超过 $0.05\text{ kPa}$ )再进行下一级荷载加载;待试验完成,卸除荷载,清空填土,将圆孔及土压力盒上附着黏土清除。试验方案见表4。

表4 试验方案表  
Table 4 Test scheme

实验材料	组别	泡沫掺量/%	EPS柔性垫层厚度/cm	荷载情况/kPa
原料土	1			$0\rightarrow 1.45\rightarrow 2.91\rightarrow 4.55\rightarrow 6.37$
EPS柔性垫层	1		2	$0\rightarrow 1.45\rightarrow 2.91\rightarrow 4.55\rightarrow 6.37$
	2		4	
	3		6	
轻量填土	1	0.1		$0\rightarrow 1.45\rightarrow 2.91\rightarrow 4.55\rightarrow 6.37$
	2	0.2		
	3	0.3		
EPS柔性垫层及轻量填土组合	1	0.1	2	$0\rightarrow 1.45\rightarrow 2.91\rightarrow 4.55\rightarrow 6.37$
	2	0.1	4	
	3	0.2	2	
	4	0.2	4	
	5	0.3	2	
	6	0.3	4	

## 2 挡土墙墙后土压力分析

### 2.1 柔性垫层厚度对墙后土压力的影响

在自重情况下按试验方案依次加载,测得不同埋深处墙后土压力曲线如图2所示,此时墙后未铺设轻量填土。由图2可知,不同柔性垫层厚度下墙后土压力呈以下特点:

1)不同荷载级别下,墙后土压力分布随埋深呈先增大后减小的非线性特征,这与已有研究得出的结论一致<sup>[24]</sup>。一般地,较大埋深处土体竖向应力较大,其土拱效应更显著,墙后土压力会出现拐点并开始减小。铺设EPS柔性垫层后,相对于一、二级荷载拐点出现在 $1/2$ 墙高处,荷载级别更高时,拐点上移出现在 $2/3$ 墙高处,可见荷载级别较高时,EPS柔性垫层的减载范围更大。

2)与无垫层时相比,铺设EPS柔性垫层时墙后土压力有明显的降低,且当荷载增大时,墙后土压力减小的效果更为明显。同级荷载下,墙后土压力随着垫层厚度增加而显著减小,原因在于EPS柔性垫层上部受荷载作用产生的压缩量较下部大,厚度越大,压缩量也越大,相应地填土产生的变形也越大,因此墙后土压力相应减小。

3)对比4种级别荷载下的土压力分布曲线可以发现,墙后土压力减小量并非随着垫层厚度变化均匀增大,而是逐渐趋于平缓;换言之,垫层的减载效应并非越厚越明显,其与所在墙高位置及附加荷载均有关,一般墙后中下部的垫层及较大附加荷载下的减载效应相对更为明显。

### 2.2 轻量填土泡沫掺量对墙后土压力的影响

为研究轻量填土泡沫掺量对墙后土压力的影响,图3给出了不同荷载作用下原料土和各掺量轻量填土对应的墙后土压力分布,此时墙后未铺设EPS柔性垫层。由图可知,轻量填土泡沫掺量对墙后土压力的影响呈现出以下特点。

1)整体来讲,回填轻量土时的墙后土压力分布与原料土及铺设EPS柔性垫层时的结果比较类似,即土压力分布随深度出现“鼓肚”现象,且与原料土一致,均在 $1/2$ 墙高处出现拐点。

2)EPS泡沫颗粒在轻量填土中起到填充与减重作用,与原料土相比,由于自重变轻,回填轻量土后挡墙土压力明显变小,且随着泡沫掺量的增加土压力持续减小;由于试验中整体掺量水平均不高,相应地墙后土压力减小幅度比较接近。

3)对比图2仅铺设柔性垫层的土压力分布曲线,回填轻量填土的墙后土压力“鼓肚”现象较为缓

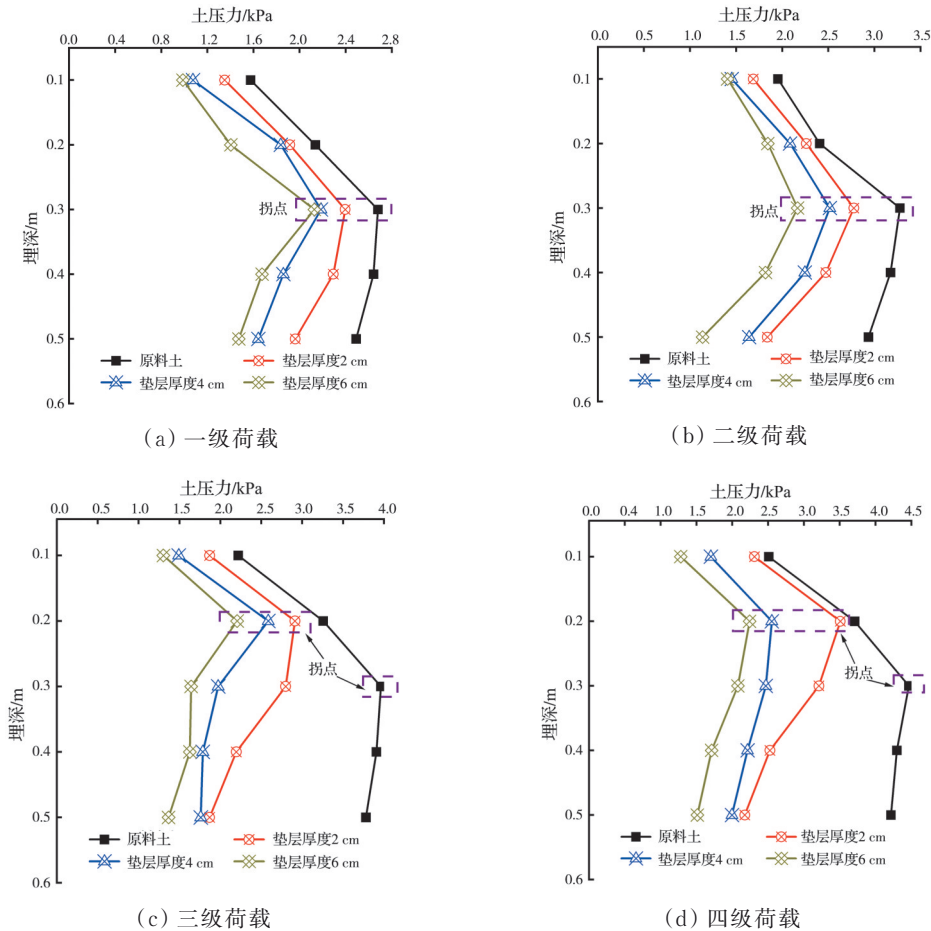


图 2 不同柔性垫层厚度下墙后土压力分布曲线

Fig. 2 Distribution curves of lateral earth pressure with different cushion thickness

和,非线性程度较低,墙体下部土压力分布比较接近。这是由于掺入轻量填土后自重减小,土体黏聚力虽略有减小,但内摩擦角变大,靠近墙体下部的土体在竖直向压力作用下,整体不易发生变形,内力分布接近,见图 3(a)~(c),除非在更大的外荷载条件下,才会出现更显著的“鼓肚”现象(图 3(d))。

### 2.3 EPS 柔性垫层及轻量填土组合下墙后土压力

当墙后铺设 EPS 柔性垫层并回填 EPS 轻量土时,相比上述两个因素单独施加,图 4 以 2 级荷载和 4 级荷载为例,给出了相应的土压力分布曲线。不难发现,相较于分别布置 EPS 柔性垫层和回填 EPS 轻量土情况,在其组合系统中,挡墙墙后土压力分布既符合呈现出“鼓肚”的非线性特征,但又由于轻量填土的存在,其非线性程度较低,墙后中下部土压力比较接近,更为平稳,而当外荷载较大时,才进一步体现出较强的非线性特征。

与铺设 EPS 柔性垫层或回填轻量土单独作用下的减载作用类似,在二者组合系统中,墙后土压力减小程度更为明显,且比两个因素单独作用下的减载效应明显。

## 3 墙后土压力减载效应研究

为了进一步探究 EPS 柔性垫层、轻量填土及其组合系统对挡墙结构的减压效果,引入减载值  $\lambda$  和减载率  $\gamma$  对减载效应进行分析,其定义分别为

$$\lambda = P_0 - P_n \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{P_0 - P_n}{P_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $P_0$  为不同荷载下仅回填原料土时墙后土压力合力(数值上等于土压力曲线与坐标轴所围成的面积);  $P_n$  为不同荷载下设置墙后垫层或轻量填土工况下墙背土压力合力。

### 3.1 铺设 EPS 柔性垫层的减载效应分析

挡土墙后铺设柔性垫层可以有效减小墙背土压力,图 5 为不同荷载作用下减载值及减载率随柔性垫层厚度变化曲线。由图 5 可知,随着柔性垫层厚度及附加荷载的增加,柔性垫层发挥出来的减载值逐渐增加,减载率约从 15% 提高至 50%。但随着垫层厚度增加,减载率曲线整体上移的距离变小,且随着荷载增大趋于平缓,可见,柔性垫层的减载幅度随着垫层厚度或者荷载级别的增加而逐步降低。

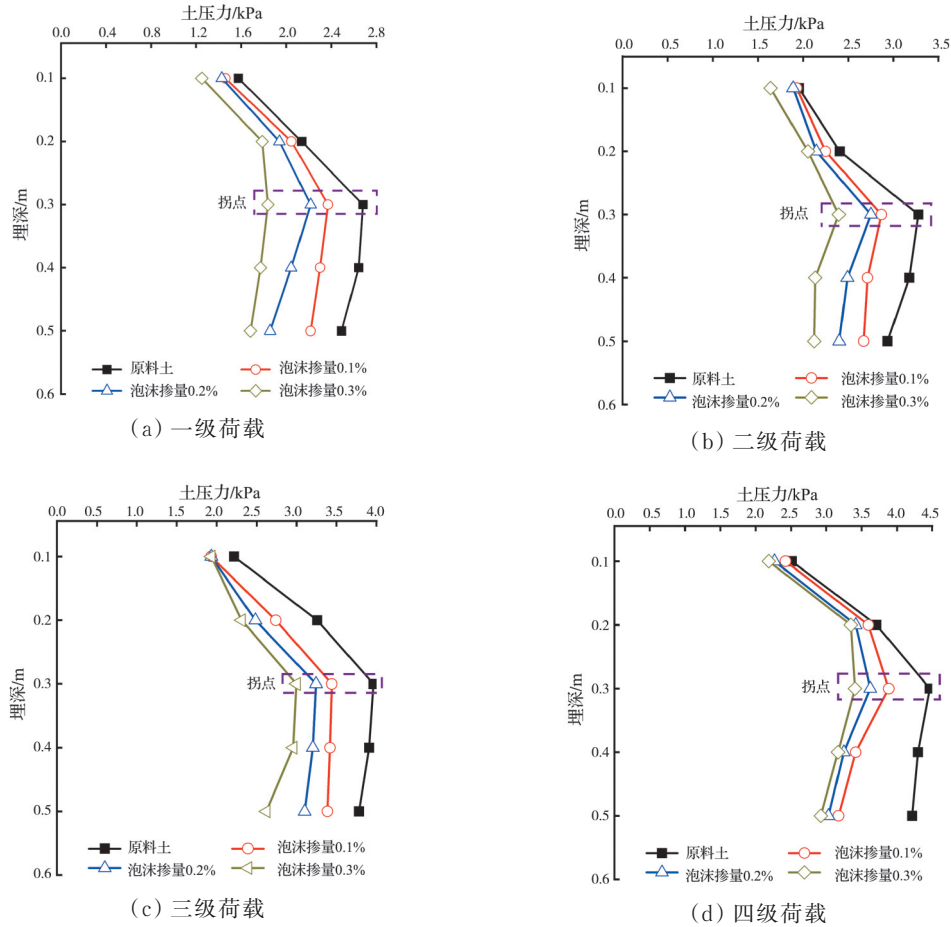


图 3 不同泡沫颗粒掺量下墙后土压力分布曲线

Fig. 3 Distribution curves of lateral earth pressure with different amount of foam

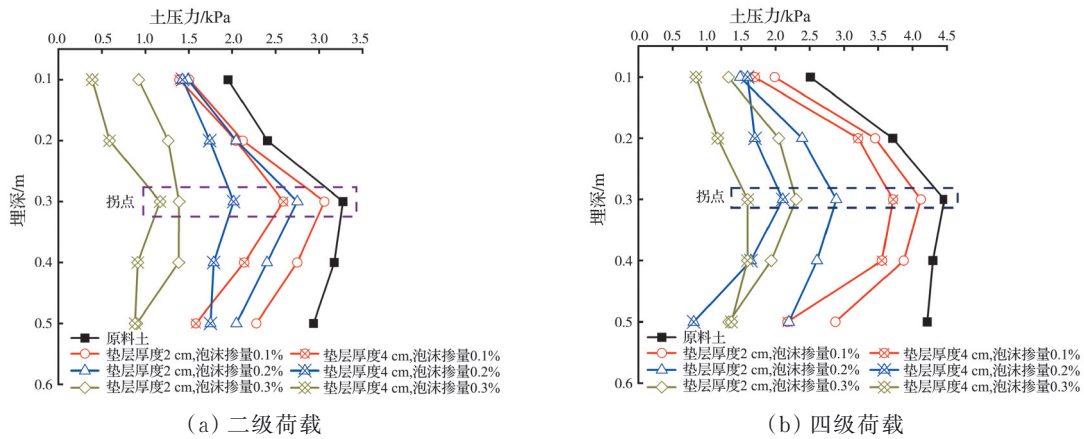


图 4 不同组合工况下墙后土压力随埋深变化曲线

Fig. 4 Variation curve of lateral earth pressure with burial depth under different combinations

分析原因,由于在一定荷载作用下,土体能发生的变形有限,其对较薄和较厚的垫层挤压效果比较接近,除非进一步提高荷载值,土体发生更大的变形,此时对于较厚的垫层所能吸收的位移更大,才能更好地发挥减压作用;同理,当垫层厚度一定时,附加荷载增大到一定程度时(如四级荷载),土体自身在竖向压力周围约束条件下,变形增加也趋于平缓,垫层协调变形吸能的作用也不再显著。在

工程中,挡墙服役期的正常荷载一般均在相对稳定的一个范围内,故可设计对应中等厚度的垫层,即可发挥较好的减载作用。

### 3.2 回填EPS泡沫轻量填土的减载效应分析

与铺设EPS柔性垫层类似,在挡土墙后回填轻量土也可以有效减小墙背土压力。图6为不同荷载作用下减载值及减载率随轻量填土泡沫掺量变化曲线。从图6可知,随着泡沫掺量的增加,墙后土压



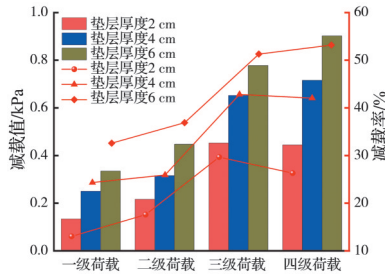


图 5 柔性垫层减载值及减载率

Fig. 5 Load-reducing value and rate of flexible cushion

力减载值和相应减载率都有明显增加,且在一级荷载和二级荷载时,随着掺量的增加,减载率由约 10% 先后提升到 16% 和 26%,提升幅度约为 10%,而在三级荷载和四级荷载(分别约为墙底土体自重应力的 1/2 和 2/3)作用下,相应提升幅度有所降低,约在 5% 以内。

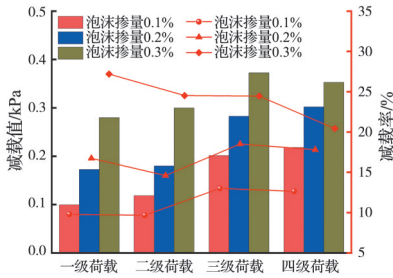


图 6 轻量填土减载值及减载率

Fig. 6 Load-reducing value and rate of lightweight soil

在不同级别荷载作用下,相同掺量的轻量填土减载效果比较接近,减载率变化整体在 5% 左右。可见,相对于荷载级别,墙后回填轻量土的减载率对于泡沫掺量更为敏感,主要还是由于泡沫的添加能显著降低土体的重度,增大其协调变形能力。

### 3.3 EPS 柔性垫层及轻量填土组合下的减载效应分析

图 7 和图 8 分别给出了不同荷载级别下墙后铺设 EPS 柔性垫层及轻量填土时的土压力减载值及减载率,结合图 5~图 8 分析可知,相比上述 EPS 柔

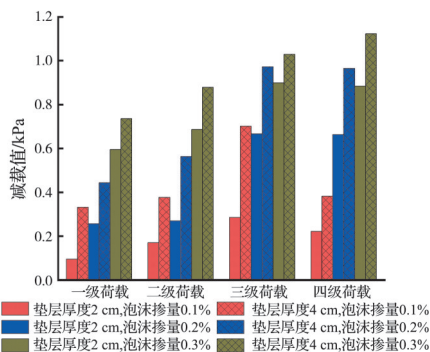


图 7 柔性垫层-轻量填土减载值

Fig.7 Load-reducing value of flexible cushion - lightweight soil

性垫层及轻量填土单独施加,二者组合作用下,墙后土压力减载值及减载率更大,减载效应更为显著。以二级荷载为例,仅铺设垫层时,减载值和减载率范围分别约为 0.21~0.45 kPa 和 18%~38%;回填轻量土时,相应的减载值和减载率分别为 0.12~0.30 kPa 和 10%~25%;而在二者组合作用下,减载值可达到 0.20~0.85 kPa,减载率提高至 15%~70%。

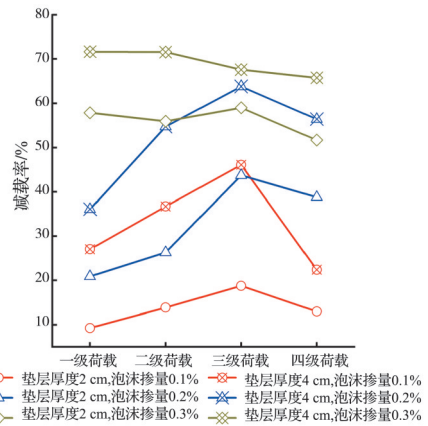


图 8 柔性垫层-轻量填土减载率

Fig. 8 Load-reducing rate of flexible cushion - lightweight soil

可以看出,单独作用下,墙后铺设柔性垫层比回填轻量土的减载效应要明显,在二者组合系统中,前者仍是主要影响因素,除非继续增加轻量填土泡沫的含量。故受荷载作用下挡墙柔性垫层及轻量填土组合系统减载效果最强,柔性垫层次之,而仅回填轻量土的减载效果相对最弱。此外,与单独作用条件的减载率变化类似,当荷载等级增大到一定量值后,EPS 柔性垫层及轻量填土组合系统的减载效率也趋于稳定,换言之,需增加与之相应的更大厚度和含量的垫层和轻量填土。

## 4 结论

1) 与仅回填原料土时挡墙墙后土压力分布特征类似,铺设 EPS 柔性垫层、回填轻量土以及二者共同施加时,墙后土压力随着埋深均呈现“鼓肚”状,具有显著的非线性特性,土压力最大值(拐点)多出现在 1/2 墙高处;铺设垫层可使拐点上移,进而增大减载范围,而回填轻量土可使墙体下部土压力分布接近,降低了土压力分布的非线性程度。

2) 在挡土墙墙后铺设 EPS 柔性垫层或回填轻量土均可减小墙后土压力,与仅回填轻量土最大减载率相比,铺设柔性垫层时的最大减载率提高了 1.5 倍,而同时铺设柔性垫层及轻量填土时减载效果最佳,最大减载率相应提高了约 3 倍。

3) 随着柔性垫层厚度的增加,其减载效果会逐

渐增强,但增幅会逐渐降低;而墙后回填轻量土的减载率对于泡沫掺量更为敏感,主要是由于泡沫的添加降低了土体重度,增大了其协调变形能力。故在类似工程中,建议采用中等厚度的垫层,若墙后填土的附加荷载较大,可考虑适当提高回填轻量土的掺量。

4)主要探讨挡墙铺设EPS柔性垫层及回填轻量土对墙后土压力大小、分布特征的影响,并结合已有研究结果分别对两种因素各自的影响规律进行初步分析。但在二者共同作用下,其组合体系与土体、附加荷载等的相互作用及其减载机制更为复杂,还需开展更为深入的研究。此外,相应的施工技术和成本控制等也有待于持续的关注。

### 参考文献

- [1] 张颖钧. 裂土挡土墙模型试验缓冲层设置的研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(1): 38-45.  
ZHANG Y J. Study on the buffering cushion installed in retaining wall model test with expansive soil as backfill [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(1): 38-45. (in Chinese)
- [2] 徐光黎, 杨银湖. 轻量土及其在工程中的应用[J]. 地质科技情报, 2005, 24(4): 94-98.  
XU G L, YANG Y H. Light-weight soils and their applications [J]. Geological Science and Technology Information, 2005, 24(4): 94-98. (in Chinese)
- [3] 顾欢达, 顾熙. 塑料发泡颗粒轻质填土的土压力计算[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(5): 93-98.  
GU H D, GU X. The calculation of earth pressure of foamed beads light soil by slice method [J]. Sichuan Building Science, 2008, 34(5): 93-98. (in Chinese)
- [4] 董金梅, 刘汉龙, 高玉峰, 等. 聚苯乙烯轻质混合土抗压强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1964-1968.  
DONG J M, LIU H L, GAO Y F, et al. Study on compressive strength properties of light heterogeneous soil mixed with expanded polystyrene [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(12): 1964-1968. (in Chinese)
- [5] 李明东, 朱伟, 马殿光, 等. EPS颗粒混合轻质土的施工技术及其应用实例[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 533-536.  
LI M D, ZHU W, MA D G, et al. Construction technology and application in situ of expanded polystyrene treated lightweight soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(4): 533-536. (in Chinese)
- [6] 王超, 高洪梅, 王志华, 等. EPS混合土处理桥台软土地基模型试验[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2017, 39(6): 118-123.  
WANG C, GAO H M, WANG Z H, et al. Model test of abutment on soft soil retaining EPS composite soil [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2017, 39(6): 118-123. (in Chinese)
- [7] KANEDA K, HAZARIKA H, YAMAZAKI H. Examination of earth pressure reduction mechanism using tire-chip inclusion in sandy backfill via numerical simulation [J]. Soils and Foundations, 2018, 58(5): 1272-1281.
- [8] 高洪梅, 纪展鹏, 徐琪尔, 等. 基于直接位移的回填EPS混合土挡墙抗震设计方法[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(5): 13-21.  
GAO H M, JI Z P, XU Q E, et al. Seismic design method of retaining wall filled with EPS lightweight soil based on direct displacement [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(5): 13-21. (in Chinese)
- [9] 高洪梅, 卜春尧, 王志华, 等. 回填EPS混合土的防滑悬臂式挡墙地震稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 2278-2286.  
GAO H M, BU C Y, WANG Z H, et al. Seismic stability of anti-sliding cantilever retaining wall with EPS composite soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(12): 2278-2286. (in Chinese)
- [10] GAO H M, CHEN Y M, LIU H L, et al. Creep behavior of EPS composite soil [J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(11): 3070-3080.
- [11] 侯天顺. 淤泥发泡颗粒混合轻量土力学性质的试验研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2008.  
HOU T S. Experimental study on mechanical properties of foamed particle light weight soil mixed with silt [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2008. (in Chinese)
- [12] 侯天顺, 杨凯旋. 挡土墙后EPS颗粒混合轻量土填料静止土压力特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(12): 3249-3259, 3270.  
HOU T S, YANG K X. Model test on earth pressure at rest of light weight soil mixed with EPS particles behind a retaining wall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(12): 3249-3259, 3270. (in Chinese)
- [13] HOU T S. Influence of expanded polystyrene size on deformation characteristics of light weight soil [J]. Journal of Central South University, 2012, 19(11): 3320-3328.
- [14] ROY N, BHARTI S D, KUMAR A. Seismic isolation of tunnels in blocky rock mass using expanded polystyrene (EPS) Geofom [J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2019, 4(1): 1-17.
- [15] 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): 1-13.
- [16] BATHURST R J, ZARNANI S. Earthquake load



- attenuation using EPS geofam buffers in rigid wall applications [J]. *Indian Geotechnical Journal*, 2013, 43(4): 283-291.
- [17] 王德玲, 沈疆海. 挡土墙振动台试验的EPS压缩变形数值模拟比较[J]. *长江大学学报(自然科学版)理工卷*, 2010, 7(3): 140-142.
- WANG D L, SHEN J H. Comparison of EPS compression deformation numerical simulation for retaining wall shaking table test [J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition) Sci & Eng*, 2010, 7(3): 140-142. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 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)
- [20] 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)
- [21] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [22] 朱伟, 姬凤玲, 马殿光, 等. 疏浚淤泥泡沫塑料颗粒轻质混合土的抗剪强度特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(Sup2): 5721-5726.
- ZHU W, JI F L, MA D G, et al. Shear strength properties of lightweight bead-treated soil made from dredged silt [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(Sup2): 5721-5726. (in Chinese)
- [23] 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- General code for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)
- [24] 陈页开. 挡土墙上土压力的试验研究与数值分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- CHEN Y K. Model test and numerical analysis of earth pressures on retaining wall [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)