

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.047

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 挡土墙后 EPS 板减压性能模型试验研究

郑俊杰, 邵安迪, 谢明星, 景丹

(华中科技大学 土木工程与力学学院, 武汉 430074)

**摘要:**在刚性挡土墙后设置柔性垫层能有效减小墙背土压力。聚苯乙烯土工泡沫(EPS)是一种常见的柔性材料,具有受力易压缩的特性。通过开展室内挡土墙模型箱试验,对铺设不同弹性模量以及不同厚度的 EPS 板的各工况下墙背土压力分布规律进行了研究,详细分析了弹性模量和厚度对 EPS 板在不同填土表面荷载作用下的减压性能的影响;并通过 FLAC<sup>3D</sup> 建立有限差分数值模型,对不同压缩量情况下土压力分布规律进行了分析。研究表明;EPS 板能有效地减小挡土墙墙后土压力;EPS 板的弹性模量越小、厚度越大、墙后填土表面的外荷载越大,EPS 板的减压效果越明显;EPS 板厚增加到一定程度后,EPS 板的减压效果不会再有明显提升,EPS 板厚达到 0.1 倍墙高即可获得最佳减压效果。

**关键词:**挡土墙;聚苯乙烯土工泡沫;模型试验;数值模拟;土压力

**中图分类号:**TU432 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)04-0001-09

## Model test study on decompression performance of EPS boards behind retaining walls

Zheng Junjie, Shao Andi, Xie Mingxing, Jing Dan

(School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. China)

**Abstract:** Setting a flexible pad cushion behind the rigid retaining wall can effectively reduce the lateral earth pressure. Expanded polystyrene (EPS) geofoam is a common flexible material that has the characteristic of easy compression. In this paper, through the retaining wall model test in laboratory, the lateral earth pressure distribution of different EPS boards with different elastic modulus and thickness is studied; the influence of elastic modulus and thickness on the decompression performance of EPS boards under different loadings on the filling surface is analyzed in detail. The influence of compression value of EPS board on the lateral earth pressure on retaining wall is also analyzed by FLAC<sup>3D</sup> numerical modeling. The research results show that the EPS board can effectively reduce the lateral earth pressure behind the retaining wall; the smaller the elastic modulus of the EPS board, and the larger the thickness, as well as the external load on the surface of the backfill wall, the decompression effect of the EPS board becomes more significant. After the EPS board thickness increases to a certain extent, the decompression effect of the EPS board will not increase significantly. The best decompression effect can be obtained when the EPS board thickness

**收稿日期:**2020-03-05

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

**作者简介:**郑俊杰(1967-),男,教授,博士生导师,主要从事岩土工程与隧道研究,E-mail:zhengjj@hust.edu.cn。

**Received:**2020-03-05

**Foundation items:**National Key Research and Development Program (No. 2016YFC0800200); National Natural Science Foundation of China (No. 51678267, 51878313, 51808243)

**Author brief:**Zheng Junjie (1967-), professor, doctoral supervisor, main research interests: geotechnical engineering and tunnel engineering, E-mail: zhengjj@hust.edu.cn.

reaches 0.1 times the wall height.

**Keywords:** retaining wall; EPS; model test; numerical simulation; earth pressure

挡土墙是土木工程、交通工程领域重要的结构物之一,其主要功能是抵抗侧向土压力,并防止墙后土体发生滑动或坍塌,目前已广泛应用于房屋建筑、水利工程、公路与铁路工程中。减小挡土墙墙背土压力对于保障工程安全、降低工程造价具有重要意义。迄今为止,诸多学者对挡土墙土压力进行了大量试验研究。Terzaghi<sup>[1-2]</sup>最早开展模型试验,证实了挡土墙土压力沿墙高呈非线性分布,该结论在岳祖润等<sup>[3]</sup>的离心试验中得到再次验证。对挡土墙土压力的研究很早便不局限于静止土压力,陈页开<sup>[4]</sup>和周健等<sup>[5]</sup>通过试验对不同挡土墙变位模式下的土压力开展了进一步研究。此外,也有学者采用有限差分软件FLAC<sup>3D</sup>对挡土墙土压力进行研究。谢明星等<sup>[6]</sup>分别对有限填土条件下挡土墙的土压力大小和分布进行了研究。加筋土挡墙作为极具应用价值的挡土墙,其土压力分布规律的研究更为必要,贾良<sup>[7]</sup>和陈建峰等<sup>[8]</sup>开展了数值模拟。Green等<sup>[9]</sup>对某混凝土悬臂式挡土墙在动态荷载作用下的侧向土压力进行了分析。

聚苯乙烯土工泡沫(EPS)是一种具有优良性能的轻型高分子材料,具有密度低、压缩变形大、缓冲隔振和隔热效果好的优点,可被用来解决许多岩土工程中的难题,如用于结构隔振、边坡稳定、软基处理、地理结构减荷、冻土路基等诸多方面<sup>[10]</sup>。EPS的压缩变形特性可以有效减小刚性挡土墙的墙背土压力,学者们对此进行了大量试验研究。Tsukamoto等<sup>[11]</sup>的试验验证了在挡土墙和墙背填土之间沿竖向铺设压缩性EPS板能显著减小刚性挡土墙的静止土压力,Ikizler等<sup>[12]</sup>对其机理进行了深入探讨。EPS除了能减小静态荷载作用下的土压力,Gaskin<sup>[13]</sup>和Bathurst等<sup>[14]</sup>的振动台试验结果表明,在振动荷载作用下,土工泡沫材料对侧向土压力的减压作用仍然显著,其最大减小量可以达到60%。Bathurst等<sup>[15]</sup>也对EPS缓冲层减轻刚性基底和挡土墙地震负荷的效果进行了进一步论证。汪益敏等<sup>[16]</sup>基于考虑时间因素的有限差分原理,建立了水平条分法的数值模型,对挡土墙后的EPS土工泡沫缓冲层进行了分析,主要分析其对减小振动作用下挡土墙受力与变形的作用。

笔者基于直剪试验和无侧限抗压强度试验,测试砂土和EPS土工泡沫的力学性能及相关参数。在此基础上,开展挡土墙模型试验,采用有限差分软件FLAC<sup>3D</sup>进行数值模拟,研究不同上覆荷载作用下EPS板的弹性模量和厚度等参数对墙背土压力的影响程度,为实际工程中挡土墙后设置EPS板提供设计参考。值得注意的是,同时考虑挡土墙的移动与EPS板的压缩两个因素较为复杂,笔者的研究仅为挡土墙在静止状态下EPS板的减压性能。

## 1 试验砂土和EPS材料特性测定

### 1.1 试验砂土抗剪强度参数测定

对试验砂土进行直剪试验,以得到其黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ ,由于砂土不需考虑排水固结的问题,试验采用快剪方法。试验采用ZJ型应变控制式直剪仪,装置构造如图1所示。



图1 ZJ型应变控制式直剪仪

Fig. 1 ZJ strain-controlled direct shear instrument

通过直剪试验可得到剪应力-剪切位移关系曲线,如图2所示。剪应力-剪切位移曲线上的剪应力峰值即为该砂土试样的抗剪强度。线性拟合得出抗剪强度-垂直压力关系曲线,如图3所示。

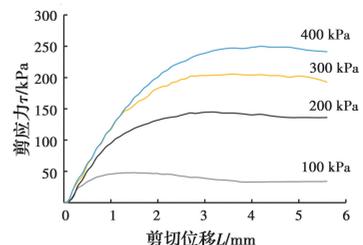


图2 剪应力-剪切位移关系曲线

Fig. 2 Relation curves of shear stress-shear displacement

土体的抗剪强度关系为

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

由式(1)可知:直线的截距为土样的黏聚力 $c$

值,直线的斜率即为土样内摩擦角  $\varphi$  的正切值。由图 3 可知,此组试验砂土的黏聚力为 0 kPa,内摩擦角为  $37.29^\circ$ 。按同样的方式进行第 2 组直剪试验,得到砂土的黏聚力为 0 kPa,内摩擦角为  $38.66^\circ$ 。将两组试验数据取平均值,即砂土的黏聚力为 0 kPa,内摩擦角为  $37.98^\circ$ 。

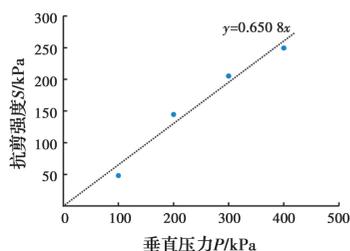


图 3 抗剪强度-垂直压力关系曲线

Fig. 3 Relation curve of shear strength-vertical pressure

## 1.2 EPS 材料弹性模量值测定

模型箱试验共采用 5 种规格的 EPS 材料,分别对应不同的 EPS 密度。可通过对各规格 EPS 材料特制成的相同尺寸的圆柱体试样进行质量测量并求得密度;对圆柱体试样开展无侧限抗压强度试验,根据绘制出的弹性应变阶段的轴向应力-应变曲线得出 EPS 材料弹性模量值。试验采用南京宁曦土壤仪器有限公司生产的 TSZ 系列应变控制式三轴仪,仪器如图 4 所示。



图 4 试样及三轴仪装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of sample and triaxial apparatus

图 5 为通过试验绘制出的 5 种规格 EPS 试样的轴向应力-应变曲线。由图 5 可见, EPS 材料的应力-应变关系大致在  $0 \sim 2\%$  的轴向应变范围内为线性,即在初始阶段表现为线弹性材料,这与 Kim 等<sup>[17]</sup>选取的 EPS 材料线弹性区段一致。取该区段的应力-应变曲线进行线性拟合,由式(2)可求出这 5 种规格 EPS 材料的弹性模量  $E$ 。

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (2)$$

对每种规格的 EPS 另取一试样进行第 2 组无

侧限抗压强度试验,取两组试验结果的平均值作为弹性模量  $E$ ,见表 1。由表 1 可以看出,随着 EPS 材料密度的增大,其弹性模量也相应地增大。

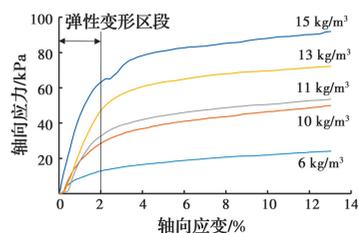


图 5 EPS 试样轴向应力-应变曲线

Fig. 5 Axial stress-strain curve of EPS

表 1 不同密度下的 EPS 压缩力学性能

Table 1 Compression mechanical properties of EPS with different densities

EPS 规格	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	第 1 组 $E / \text{MPa}$	第 2 组 $E / \text{MPa}$	平均值 $E / \text{MPa}$
A	6	0.74	0.67	0.71
B	10	1.58	1.67	1.63
C	11	1.68	1.94	1.81
D	13	2.33	2.35	2.34
E	15	3.70	3.37	3.54

## 2 挡土墙模型箱试验

### 2.1 挡土墙模型箱

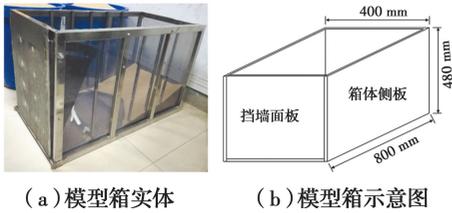
试验使用的自制模型箱长 0.8 m、宽 0.4 m、高 0.48 m。箱体外部框架由 30 mm 方钢焊接而成,顶部无盖,模型箱侧板与底板的材质均为 20 mm 厚 ABS 塑钢,侧板与底板嵌固在外部不锈钢框架上,并使用密封胶对缝隙进行密封处理。挡墙面板为 50 mm 不锈钢板,底端固定、上端可通过铆钉改变其倾角。通过改变可移动挡板的位置来改变挡土墙后的填土宽度。EPS 板均为定制,其面积与挡土墙面板尺寸一致。挡土墙模型箱如图 6 所示。

### 2.2 试验步骤

1) 模型箱就位,固定挡墙面板,将 EPS 板用玻璃胶固定在挡墙面板内壁。

2) 在挡墙面板特定高度处(0、0.1、0.2、0.3、0.4 m),用玻璃胶将土压力传感器固定于 EPS 板表面,具体布置如图 7 所示。梳理接线并从挡墙面板

侧边缘引出,将土压力传感器与应变采集仪连接,试验采用江苏东华测试技术有限公司的 DH3816N 静态应变测试系统,如图 8 所示。



(a) 模型箱实体 (b) 模型箱示意图

图 6 挡土墙模型箱

Fig. 6 Model box for retaining wall



(a) 无EPS板 (b) 有EPS板

图 7 土压力盒分布方式

Fig. 7 Distribution of earth pressure boxes

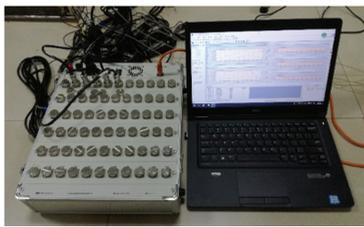


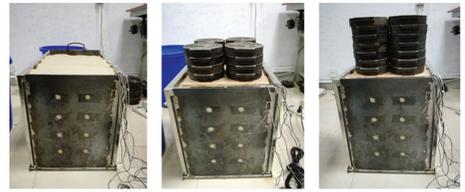
图 8 DH3816N 静态应变测试系统

Fig. 8 DH3816N static strain testing system

3)对土压力传感器的白色通气管吹气,传感器的输出值由 0 开始有明显跃升,停止吹气输出值又逐渐减小为 0,则表明土压力传感器安装正确。做好所有相关的准备工作后开始采样(采用 5 s 一次的定时采样)。

4)向模型箱内回填砂土,采用人工落雨法,使砂土从高于箱顶 20 cm 处自由下落,每回填 10 cm 高砂土静置 30 min,分层铺设直至挡土墙顶部。待测试系统实时窗口中输出的土压力大小趋于稳定时测得的值即为无外加荷载时的墙背土压力。

5)稳定后开始逐级加载,如图 9 所示。在木板上均匀放置砝码来模拟施加在墙后填土表面的均布荷载,荷载均施加在墙后宽 43 cm 的填土表面。每增加一级荷载,需等待测量土压力值稳定后再增加下一级荷载。各级荷载大小见表 2。



(a) 无荷载 (b) 四级荷载 (c) 七级荷载

图 9 分级加载过程(部分)

Fig. 9 Hierarchical loading process (partial)

表 2 各级荷载大小

Table 2 Load at different levels

荷载级数	砝码重量/kg	等效均布荷载/(kN · m <sup>-2</sup> )
一	20.4	1.162
二	40.8	2.325
三	61.2	3.487
四	81.6	4.649
五	102	5.812
六	122.4	6.974
七	142.8	8.136

6)在砂土回填和砝码加载阶段始终保持静态应变采集仪的工作,测量和记录在各级荷载下,土压力沿挡墙高度的变化,并对数据结果进行分析。

7)卸掉荷载,清空砂土,取下土压力传感器,更换 EPS 板按同样的步骤进行下一工况的试验。完成每一工况试验后填写试验说明。试验包含 8 个工况,见表 3。

表 3 试验工况

Table 3 Test conditions

工况	EPS 板厚 $t$ /cm	EPS 规格
1	0	
2	4	A
3	2	A
4	1	A
5	4	B
6	4	C
7	4	D
8	4	E

## 2.3 试验结果分析

2.3.1 墙背土压力理论值计算 对于不含 EPS 板的工况 1,理论上可计算静止土压力沿挡墙墙高的分布。对于本试验,试验砂样内摩擦角为  $\varphi =$

37.98°, 重度  $\gamma=16 \text{ kN/m}^3$ , 墙高  $H=0.48 \text{ m}$ , 静止土压力系数可根据式(3)求得。

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (3)$$

由此计算出无荷载情况下墙背土压力的分布。

图 10 为无荷载情况下土压力实测值与理论值对比图。由图 10 可看出:由试验得到的实测土压力强度与理论值较为接近,在靠近墙踵处,实测值略小于理论值,但相差不大,证明了模型箱试验结果的可靠性。

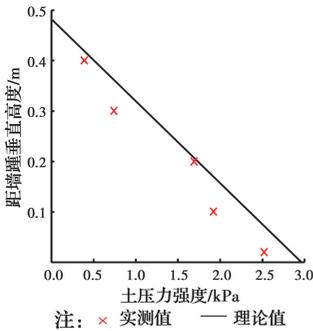


图 10 无荷载情况下土压力实测值与理论值对比图  
Fig. 10 Comparison of measured and theoretical values of lateral earth pressure without external load

2.3.2 EPS 板厚度的影响 图 11 为在无荷载、三级荷载、五级荷载和七级荷载条件下,工况 1、2、3 和 4 中土压力沿墙高的分布图。4 个工况中 EPS 的弹性模量  $E$  相同,厚度  $t$  不同。对 4 种荷载条件下的土压力分布进行对比分析,结果表明:墙后填土表面荷载的增加对挡土墙靠近顶部部分影响较大,上部墙背土压力强度增加较为明显;放置 EPS 板后,墙背土压力相对于无 EPS 工况有明显减小,且在工况 1 下存在较大土压力强度对应的高度处减压效果更明显;从无荷载到七级荷载,墙背土压力越大,EPS 的减压效果越明显;在同级荷载下,EPS 板厚度越大时墙背土压力减小得越明显,这是由于随着 EPS 板厚度的增加,其压缩量也会相应增加,也就允许墙后土体发生更大的变形。

2.3.3 EPS 板弹性模量的影响 图 12 为在无外荷载、三级荷载、五级荷载、七级荷载条件下,工况 1、2、5、6、7 和 8 中土压力沿墙高的分布图。除工况 1 未铺设 EPS 外,其余 5 个工况中 EPS 的厚度  $t$  相同,弹性模量  $E$  不同。

对 4 种荷载条件下的土压力分布进行对比分析,结果表明:墙后填土表面荷载的增加对挡土墙靠

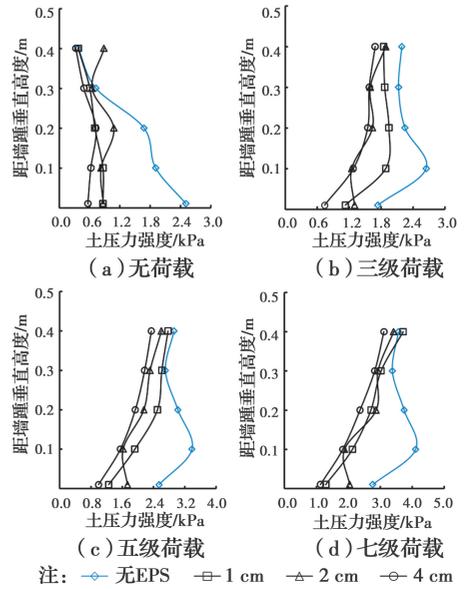


图 11 不同厚度工况下土压力强度沿墙高分布曲线  
Fig. 11 Distribution curves of lateral earth pressure along wall height for EPS board of different thickness

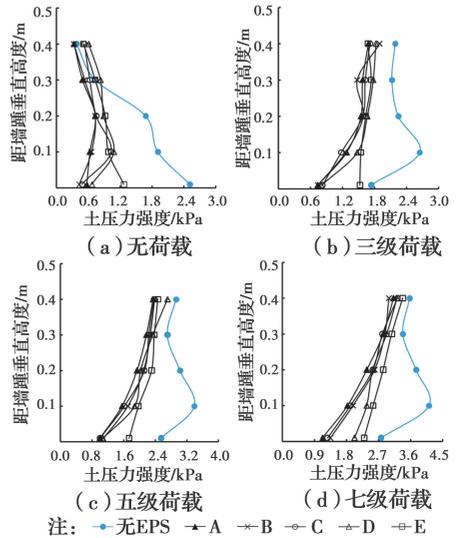


图 12 不同弹性模量工况下土压力强度沿墙高分布曲线  
Fig. 12 Distribution curves of lateral earth pressure along wall height for different EPS elastic modulus

近顶部部分影响较大,墙背上部土压力强度增加较明显;放置 EPS 板后,墙背土压力相对于无 EPS 时有明显减小,且在工况 1 下存在较大土压力强度对应的高度处减压效果越明显的情况;从无外荷载到七级荷载,墙背土压力越大,EPS 的减压效果就越明显;EPS 材料弹性模量  $E$  越小,EPS 板越柔,越容易发生压缩和变形,这使得采用  $E$  值更小的 EPS 板时墙背土压力减小的现象更为明显。

观察未施加荷载时无 EPS(工况 1)和有 EPS 工

况下的土压力分布。明显看到工况 1 的土压力分布从上至下接近线性增大,而其余工况下的土压力强度均呈现从上至下先增大后减小的分布趋势。这是由于在有 EPS 的工况下,EPS 产生的压缩量可视为挡土墙产生的位移,这与杨明辉等<sup>[18]</sup>通过试验得到的平动模式下的土压力强度分布规律相吻合。有无 EPS 工况下不同的土压力分布规律也表明 EPS 有均匀土压力分布的作用。

### 3 数值模拟

#### 3.1 数值模型的建立

在试验过程中,由于 EPS 板的压缩量过小,用位移计无法测出,因此,采用数值模拟方法对 EPS 的压缩量与墙背土压力的分布之间的关系进行分析。

采用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 进行建模,所建数值模型尺寸均以模型箱的实际尺寸为标准。模型中,填土采用摩尔-库仑模型,EPS 材料、挡墙面板和模型箱箱壁均采用弹性模型。材料具体参数的选取见表 4。根据挡土墙模型箱的实际情况,模型的边界条件为:模型底部用全约束限制所有方向的位移;可移动挡板以及挡墙面板对应的面则限制其水平方向的位移。建模过程中荷载的施加完全按照试验工况中的从无荷载逐级施加到七级荷载。

表 4 材料参数

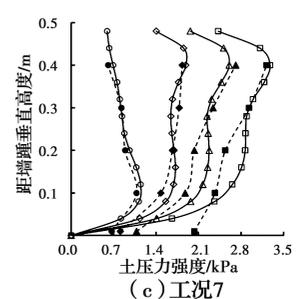
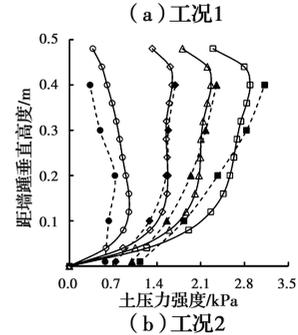
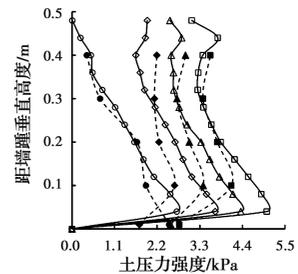
Table 4 Material parameters

材料	$E/\text{MPa}$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$\mu$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
砂性填土	20	0	38	0.30	1 600
EPS(A)	0.71			0.20	6
EPS(B)	1.63			0.20	10
EPS(C)	1.81			0.20	11
EPS(D)	2.34			0.20	13
EPS(E)	3.54			0.20	15
挡墙、箱壁	200			0.25	7 000

#### 3.2 数值模拟结果分析

3.2.1 土压力强度模拟值与实测值对比 图 13 为工况 1、2、7 土压力强度模拟值与实测值的对比。由图 13(a)可以看出,工况 1 无荷载情况下的土压力强度模拟值与实测值吻合良好,区别仅在墙踵处土压力强度模拟值减小至零。由图 13(a)~(c)均可看

到,在不同工况及不同荷载作用下,模拟值与实测值均能较好地吻合。将工况 2、工况 7 的土压力强度分布情况与工况 1 进行对比,可以明显看到工况 1 中土压力强度从墙顶至墙踵大致呈线性增加,只是在接近墙踵处减小至零;而工况 2 及工况 7 均呈现挡墙中部土压力强度大、上下部较小的分布规律。如前文所述,由于 EPS 板压缩可视作挡土墙发生了移动从而导致了该现象。以上结果验证了数值模型的正确性。



注:—○—无荷载模拟值 —●—无荷载实测值  
—◇—三级荷载模拟值 —◆—三级荷载实测值  
—△—五级荷载模拟值 —▲—五级荷载实测值  
—□—七级荷载模拟值 —■—七级荷载实测值

图 13 不同工况下土压力强度模拟值与实测值对比图

Fig. 13 Comparison of simulated and measured lateral earth pressures intensity under different cases

3.2.2 EPS 压缩量分析 图 14 为工况 2 中 EPS 压缩量沿墙高变化分布图。由图 14 可以看出:EPS 板沿墙高压缩量与土压力强度分布情况一致,尤其在无荷载作用时明显呈现出 EPS 板中部压缩量大、上下部压缩量较小的情况;随着荷载级数增加,EPS 板的压缩量也增大,但由于荷载增加对墙体上部土

压力影响更大,故 EPS 板上部的压缩量增加得更明显。这也导致施加外荷载后,EPS 板的中上部压缩量均大于下部压缩量。

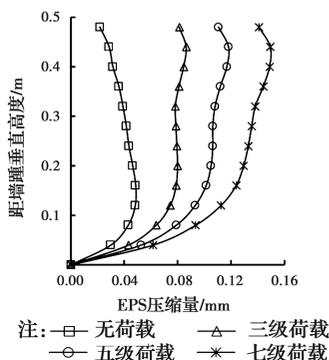


图 14 不同荷载作用下的 EPS 压缩量沿墙高变化曲线

Fig. 14 Curves of EPS compression along wall height under different loads

图 15 为七级荷载下 A 规格 3 种厚度的 EPS 板沿墙高的压缩量示意图。由图 15 可以看出:七级荷载作用下,EPS 板中上部的压缩量大、下部压缩量小;厚度越大的 EPS 板,其压缩量也越大,允许土体产生更大的变形,因此,减小的墙背土压力也就越多。这也验证了板厚  $t$  越大 EPS 的减压效果越显著的结论。

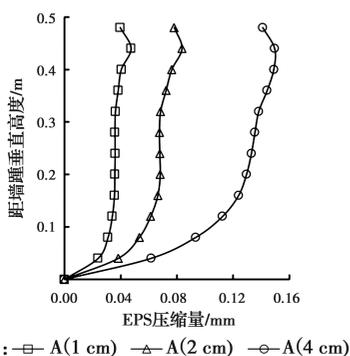


图 15 七级荷载作用下不同厚度的 EPS 压缩量沿墙高变化曲线

Fig. 15 Curves of EPS compression of different thicknesses along wall height under seven-stage load

图 16 为七级荷载下 EPS 厚度为 4 cm 时,不同弹性模量的 EPS 压缩量沿墙高变化曲线。由图 16 可以看出:在 EPS 板厚度  $t$  一定时,弹性模量  $E$  越小,其压缩量也就越大,减小的墙背土压力也就越多。弹性模量  $E$  差距较大的 EPS 板压缩量的差别在图中表现得尤为显著,如 EPS(A)和 EPS(E)。这也验证了弹性模量  $E$  越小 EPS 板减压效果越显著

的结论。

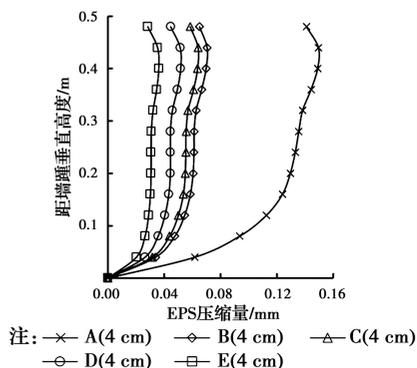


图 16 七级荷载作用下不同弹性模量的 EPS 压缩量沿墙高变化曲线

Fig. 16 Curves of EPS compression of different elastic modulus along wall height under seven-stage load

### 3.3 EPS 静止土压力减压系数

挡土墙位移、墙高、墙后土体参数、EPS 板厚度和密度等参数均对设置 EPS 板的挡土墙土压力有直接影响。该研究挡土墙位移为 0,为进一步减少影响土压力的参数,定义 EPS 静止土压力减压系数

$$K = E_n/E_0 \quad (4)$$

式中: $E_n$  为铺设 EPS 板的不同工况下静止土压力, $E_0$  为无 EPS 板工况下静止土压力。利用式(4)得出  $K$  值即可近似忽略墙高对减压效果的影响。针对试验中采用的砂土,基于数值模拟计算结果,对  $K$  值进行拟合。

EPS 板密度  $\rho=6 \text{ kg/m}^3$  时, $K$  随 EPS 板厚度  $t$  变化关系的拟合表达式为

$$K = \frac{1}{(1 + 21.548t)^{0.278}} + 0.283 \quad (5)$$

EPS 板厚度  $t=4 \text{ cm}$  时, $K$  随 EPS 板密度  $\rho$  的变化关系拟合表达式为

$$K = 0.467 + 0.015\rho \quad (6)$$

利用多项式拟合 EPS 静止土压力减压系数  $K$  关于密度  $\rho$  和厚度  $t$  的变化关系为

$$K = 0.423 + 0.121\rho - 0.135t - 0.009\rho^2 - 0.008\rho t + 0.035t^2 - 0.003t^3 \quad (7)$$

根据式(5)可得出  $K$  随 EPS 板厚度  $t$  的变化曲线,如图 17 所示。由图 17 可以看出:EPS 板密度一定时, $K$  均随板厚  $t$  增大而减小。如密度为  $6 \text{ kg/m}^3$  的 EPS 板板厚为 1 cm 时  $K$  值为 0.712,板厚为 6 cm 时  $K$  值减小为 0.547;其减小趋势呈非线性,随

板厚  $t$  增加,在 EPS 板厚达到 5 cm 后, $K$  值减小的趋势明显减缓。

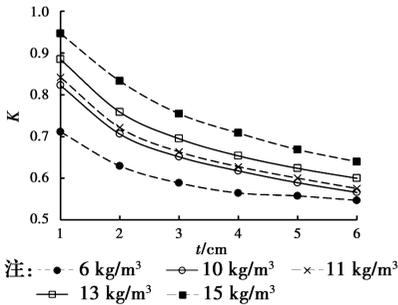


图 17  $K$  随 EPS 板厚度  $t$  变化曲线

Fig. 17 Variation in  $K$  with EPS board thickness  $t$

这表明增大 EPS 板厚虽然能提高减压效果,但并非每单位厚度的 EPS 板都发挥了相同程度的减压作用,即部分 EPS 材料未能充分发挥作用。板厚增加到一定程度后, $K$  值不会再有明显减小,但此时 EPS 板的压缩量仍在不断增大,故在实际工程中应根据经济效益和土体变形允许范围选择合适厚度的 EPS 板。由于 EPS 板压缩量可视为挡土墙位移,挡土墙主动土压力随挡土墙位移的增大而减小。根据上述分析,墙高  $H$  为 0.48 m 时, EPS 板厚达到 5 cm 即为较佳状态,即 EPS 板厚达到  $0.1H$  即可获得最佳减压效果,此时, EPS 板的平均压缩量约为  $0.0001H$ 。

不同 EPS 板厚度工况下, $K$  随 EPS 板密度  $\rho$  的变化曲线如图 18 所示。由图 18 可以看出: EPS 板厚度一定时, $K$  均随密度  $\rho$  减小而减小,板厚为 4 cm 的 EPS 板密度为  $15 \text{ kg/m}^3$  时, $K$  值为 0.708,密度为  $6 \text{ kg/m}^3$  时, $K$  值减小为 0.565,且  $K$  值随密度  $\rho$  减小而减小的趋势大致呈线性,这与式(6)反映的变化规律一致。进一步证实了较低密度的 EPS 板能发挥较大的减压作用。 $K$  值越小,表明 EPS 的减压

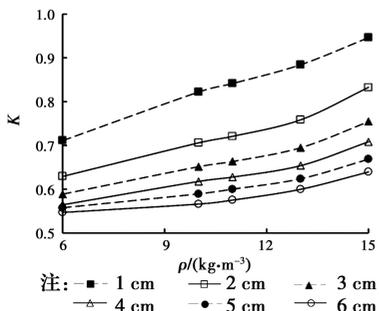


图 18  $K$  随 EPS 板密度  $\rho$  变化曲线

Fig. 18 Variation in  $K$  with EPS board density  $\rho$

效果越好。 $K$  值最小值约为 0.5,此时静止土压力仅为无 EPS 时的 1/2,可见将 EPS 应用于挡土墙减压的研究极具价值。

## 4 结论

为探究挡土墙后 EPS 板的减压性能,通过室内试验和 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟对铺设 EPS 板的挡土墙墙背土压力进行了研究,得到以下主要结论:

1) 挡土墙模型箱试验和数值模拟结果均表明:有 EPS 工况下呈现出墙体中部土压力强度大,墙顶、墙踵处小的分布规律,这是由于 EPS 板产生的压缩量可视作挡墙移动;随着 EPS 弹性模量  $E$  减小, EPS 材料的减压效果会增加;随着 EPS 板厚  $t$  增加, EPS 材料的减压性能会提高;施加的外荷载越大, EPS 的减压效果越好。

2) 依托模型箱试验进行的数值模拟结果表明: EPS 板沿墙高的压缩量与土压力强度分布情况一致,且 EPS 弹性模量  $E$  越小,板厚  $t$  越大,压缩量就越大。

3) 根据模拟结果,拟合出试验土体的 EPS 静止土压力减压系数  $K$  关于 EPS 密度和厚度的计算公式,结果表明: $K$  值随着密度  $\rho$  减小而减小,且变化趋势接近于线性; $K$  值随着板厚  $t$  增大而减小,但随板厚  $t$  增加, $K$  值减小的趋势明显减缓。 EPS 板厚达到  $0.1H$  可获得最佳减压效果。

## 参考文献:

- [1] TERZAGHI K. Large retaining wall tests II—pressure of saturated sand [J]. Engineering News Record, 1934, 112(22): 259-262, 316-318, 403-406, 503-508.
- [2] TERZAGHI K. Record earth pressure testing machine [J]. Engineering News Record, 1932, 109(29): 365-369.
- [3] 岳祖润, 彭胤宗, 张师德. 压实粘性填土挡土墙土压力离心模型试验 [J]. 岩土工程学报, 1992, 14(6): 90-96.  
YUE Z R, PENG Y Z, ZHANG S D. Centrifuge model tests on lateral pressure on walls retaining compacted clayey backfill [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(6): 90-96. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 周健,高冰,彭述权. 不同位移模式下挡土墙的模型试验及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30 (Sup2): 3721-3727.
- ZHOU J, GAO B, PENG S Q. Model test and numerical simulation of retaining wall under different displacement modes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (Sup2): 3721-3727. (in Chinese)
- [6] 谢明星,郑俊杰,曹文昭,等. 有限填土路堤挡土墙主动土压力研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 1-6.
- XIE M X, ZHENG J J, CAO W Z, et al. Study of active earth pressure against embankment retaining wall of limited backfill [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(2): 1-6. (in Chinese)
- [7] 贾良. 加筋土挡墙的土压力试验与数值分析[J]. 深圳大学学报(理工版), 2016, 33(1): 55-61.
- JIA L. Soil pressure test and numerical calculation about reinforced earth retaining wall [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2016, 33 (1): 55-61. (in Chinese)
- [8] 陈建峰,郑希,李辉利,等. 软土地基加筋土挡墙二维离散-连续耦合模拟[J]. 土木工程学报, 2011, 44 (Sup2): 33-36.
- CHEN J F, ZHENG X, LI H L, et al. Coupling discontinuum-continuum simulation of a geogrid-reinforced soil retaining wall (RSW) on soft soil [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(Sup2): 33-36. (in Chinese)
- [9] GREEN R A, EBELING R M. Modeling the dynamic response of cantilever earth-retaining walls using FLAC [C]//3rd International Symposium on FLAC: Numerical Modeling in Geomechanics, Sudbury, Canada, 2003.
- [10] HORVATH J. The compressible inclusion function of EPS geofoam [J]. Geotextiles and Geomembranes, 1997, 15(1/2/3): 77-120.
- [11] TSUKAMOTO Y, ISHIHARA K, KON H, et al. Use of compressible expanded polystyrene blocks and geogrids for retaining wall structures [J]. Soils and Foundations, 2002, 42(4): 29-41.
- [12] IKIZLER S B, AYTEKIN M, NAS E. Laboratory study of expanded polystyrene (EPS) geofoam used with expansive soils [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(2): 189-195.
- [13] GASKIN P A. Geofoam buffers for rigid walls: an investigation into the use of expanded polystyrene for seismic buffers [D]. Kingston, Ontario: Queen's University, 2000.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 汪益敏, BATHURST R J. 振动条件下 EPS 缓冲层对挡土墙受力与变形影响的水平条分法模型研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(10): 73-80.
- WANG Y M, BATHURST R J. Horizontal slice method for force and displacement analysis of EPS geofoam seismic buffers for rigid retaining walls [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(10): 73-80. (in Chinese)
- [17] KIM H, WITTHOEFT A F, KIM D. Numerical study of earth pressure reduction on rigid walls using EPS geofoam inclusions [J]. Geosynthetics International, 2018, 25(2): 180-199.
- [18] 杨明辉,戴夏斌,赵明华,等. 墙后有限宽度无黏性土主动土压力试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38 (1): 131-137.
- YANG M H, DAI X B, ZHAO M H, et al. Experimental study on active earth pressure of cohesionless soil with limited width behind retaining wall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(1): 131-137. (in Chinese)