

## 缓冲层-桩板墙组合支护膨胀土边坡现场试验研究

杨果林<sup>1</sup>, 李文生<sup>1</sup>, 段君义<sup>2†</sup>, 杨啸<sup>1</sup>, 李兴琰<sup>3</sup>, 夏晓鹏<sup>1</sup>

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075;

2. 南昌大学 工程建设学院, 江西 南昌 330031;

3. 中铁九局集团有限公司, 辽宁 沈阳 110013)

**摘 要:**为研究缓冲层对桩板墙结构支护膨胀土边坡的力学与变形特性的影响,以湖北当阳某铁路膨胀土边坡的桩板墙-缓冲层[包括聚苯乙烯泡沫(EPS)缓冲层和袋装砂石缓冲层2种]组合支护结构为对象,通过实施现场试验,分析气候环境作用下该组合支护结构中的土体湿度、桩身位移、板后土压力及桩与板弯矩的变化规律,揭示不同缓冲层情况下膨胀土边坡-缓冲层-桩板墙组合支护结构的相互作用及其协同的力学与变形关系.结果表明:相比于袋装砂石缓冲层,EPS缓冲层能够更有效地降低侧向膨胀压力,在本试验中测得最大消减率为69%.同时,EPS缓冲层能够及时响应气候环境引起的膨胀土胀缩变化,继而动态改善板后侧向总土压力的分布,而袋装砂石缓冲层对气候环境的响应能力明显相对较弱.膨胀土边坡-EPS缓冲层-桩板墙结构三者之间能够形成稳定的协调相互作用,进而降低膨胀土膨胀特性对桩间板弯矩的影响.

**关键词:**膨胀土边坡;桩板墙结构;EPS缓冲层;侧向膨胀压力;桩身弯矩

**中图分类号:** TU443

**文献标志码:** A

## Study on Field Test of Expansive Soil Slopes Supported by Buffer Layer-pile-slab Wall Combination Structures

YANG Guolin<sup>1</sup>, LI Wensheng<sup>1</sup>, DUAN Junyi<sup>2†</sup>, YANG Xiao<sup>1</sup>, LI Xingai<sup>3</sup>, XIA Xiaopeng<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

3. China Railway No. 9 Group Co., Ltd., Shenyang 110013, China)

**Abstract:** To study the effects of buffer layers on the mechanical and deformation characteristics of the pile-slab wall structure supporting expansive soil slopes, the combined pile-slab wall-buffer layer [including polystyrene foam (EPS) buffer layer and bagged gravel buffer layer] supporting structure of a railway expansive soil slope in Dangyang, Hubei Province was taken as the object. Through a field test, the change laws of soil moisture, pile

\* 收稿日期:2023-10-12

**基金项目:**国家重点研发计划资助项目(2019YFC1509800), National Key Research & Development Program of China (2019YFC1509800); 国家自然科学基金资助项目(52208348), National Natural Science Foundation of China (52208348); 江西省自然科学基金资助项目(20243BCE51121, 20224BAB214064, 20232BAB204083), Jiangxi Provincial Natural Science Foundation (20243BCE51121, 20224BAB214064, 20232BAB204083); 中铁九局集团技术开发项目(XKGT-07-GGB2022-037), Technology Research of China Railway No.9 Group (XKGT-07-GGB2022-037)

**作者简介:**杨果林(1963—),男,湖南桃江人,中南大学教授,工学博士

† 通信联系人, E-mail: junyidjy@163.com

displacement, earth pressure behind the inter-pile slab, and pile and inter-pile slab bending moment of the combined supporting structure under the climate environment were analyzed. The interaction mechanism of the expansive soil slope-buffer layer-pile-slab wall combined supporting structure and its synergistic mechanical and deformation relationship were revealed under different buffer layers. The research results show that compared with the bagged gravel buffer layer, the EPS buffer layer can effectively reduce the lateral swelling pressure, with a maximum reduction rate of 69% obtained by this test. Meanwhile, the EPS buffer layer can rapidly respond to the change of swelling-shrinkage behavior of expansive soils caused by the climate environment and then dynamically improve the distribution of total lateral earth pressure behind the slab, while the bagged gravel buffer layer is relatively weak in response to the climate environment. A stable and coordinated interaction can be formed between the expansive soil slope-EPS buffer layer-pile-slab wall structure, which can reduce the influence of swelling characteristics of expansive soils on the bending moment of inter-pile slabs.

**Key words:** expansive soil slope; pile-slab wall structure; EPS buffer layer; lateral swelling pressure; pile bending moment

通常在对普通岩土体边坡的支护结构进行设计时,考虑的荷载因素主要是岩土体侧向压力和滑坡推力.在膨胀土边坡的支护结构设计中,除了以上两种因素外,还需要考虑膨胀土因含水率变化引起的力学响应<sup>[1-2]</sup>.Nelson等<sup>[3]</sup>认为膨胀土边坡挡墙后的侧向总土压力是由静止侧向土压力和侧向膨胀力构成.林宇亮等<sup>[4]</sup>通过开展膨胀土边坡桩板墙支护结构的室内模型试验研究,提出了墙后侧向膨胀力的“反K形”分布模式.目前,桩板式挡土墙(以下简称桩板墙)被广泛用于膨胀土边坡治理<sup>[5-6]</sup>.然而,考虑到膨胀土坡体或滑体破坏的危害性较大以及膨胀土复杂的工程特性,桩板墙结构的实际设计刚度往往很大,导致作用在支护结构上的侧向膨胀力无法通过结构变位得到有效降低.

为解决上述矛盾,部分学者提出在膨胀土中掺入一些化学成分<sup>[7-8]</sup>和物理成分<sup>[9-10]</sup>,对边坡土体进行改良以降低其膨胀性.但土体改良需进行大范围开挖与回填,仅适用于部分边坡工程.关于膨胀土边坡挡墙的减胀和减载工艺,国内外学者针对设置在挡墙与土体之间的缓冲层的研究取得了显著进展.Wang等<sup>[11]</sup>通过模型试验研究发现挡墙后土工袋夹层具有良好的横向压缩性,可有效降低墙后侧向膨胀力.许英姿等<sup>[12]</sup>利用自制模型试验发现刚性挡墙后设置碎石层可加快水分入渗和消减侧向膨胀力.杨果林等<sup>[13]</sup>通过现场试验研究发现桩板墙后放置砂石反滤层也有助于疏通水分和减小墙后的侧向膨胀力.可见,采用粒料作为缓冲层可减小挡墙后的侧向

压力.

近年来,聚苯乙烯泡沫(polystyrene foam, EPS)板材因具有密度小、变形小和耐久性好等特点被用作挡墙后缓冲层,有学者发现EPS与刚性支挡结构协同作用,可达到“刚柔相济”加固膨胀土边坡的目的<sup>[14]</sup>.Wan等<sup>[15]</sup>探究EPS、砂土和非膨胀性黏土3种典型材料作为缓冲层对膨胀土侧向膨胀力的影响,发现EPS的减载性能比砂土和非膨胀性黏土的减载性能好.潘诗婷等<sup>[16]</sup>、郑俊杰等<sup>[17-18]</sup>和Ertugrul等<sup>[19]</sup>指出EPS缓冲层可显著减小挡土墙上的侧向土压力,其减小程度与EPS厚度、弹性模量及挡墙相对柔度有关.Ibrahim等<sup>[20]</sup>发现挡土墙侧向土压力、滑动力和倾覆力矩随着EPS厚度增加而减小.丁鲁强等<sup>[21]</sup>则发现EPS缓冲层能使作用于挡墙的侧向土压力产生重分布.此外,Ni等<sup>[22]</sup>推导了EPS材料变形与墙后土压力的关系式.Xie等<sup>[23]</sup>基于模型试验和数值模拟,提出一种设置EPS垫层的挡墙侧向土压力的计算方法.汪益敏等<sup>[24]</sup>则分析了EPS缓冲层对动载作用下挡土墙力学与变形特性的减震效果.

综上可知,有关挡墙-缓冲层体系的力学与变形性能的研究促进了缓冲层在膨胀土边坡支护工程的应用.考虑到地形地貌条件、就地取材以及工程造价的影响,不同地区膨胀土边坡工程中使用的缓冲层不同.目前,有关不同缓冲层-挡墙体系对膨胀土边坡支护效应的对比研究尚不多.鉴于此,本文结合湖北当阳某铁路膨胀土边坡工程建设,通过现场试验对比研究自然气候环境作用下膨胀土边坡-不同缓

冲层[聚苯乙烯泡沫(EPS)缓冲层和砂石反滤层]-桩板墙组合支护结构体系的协同力学与变形特性,以期为膨胀土地区边坡工程治理与加固提供参考.

## 1 工程概况

试验工点位于当阳市某铁路左侧的膨胀土边坡,大气影响深度为3 m.地层由上至下依次为填土( $Q_4^{ml}$ )、黏土( $Q_4^{al+pl}$ )和泥质粉砂岩(K).填土( $Q_4^{ml}$ )层厚1.60~6.50 m,泥质粉砂岩(K)呈碎块、短柱状,局部风成土状,层厚1.10~5.70 m.黏土( $Q_4^{al+pl}$ )呈黄褐色、红褐色,硬塑,含少量铁锰质氧化物,切面较光滑,局部夹灰白色网纹状条带,层厚0.80~7.00 m,天然重度为19 kN/m<sup>3</sup>,天然含水率18.1%,液限为37.8%,塑限为21.9%,自由膨胀率均值为52%,内摩擦角为15.0°,黏聚力为20.1 kPa,具有中弱膨胀性,边坡主要由膨胀性黏土构成.边坡顶部为某化工厂矿石原料堆积区,场区地下水主要为上层滞水和基岩裂隙水.其中,上层滞水位于填土层及矿石堆中,上层滞水受大气降雨影响较大;基岩裂隙水主要赋存于泥质粉砂岩中,水量较小.

近50年来,在长期的坡顶堆载和气候干湿环境作用下该膨胀土边坡发生了多次滑塌事故,侵入铁路线路,引发轨道上拱,严重影响了铁路的正常运营.之前是采用重力式挡墙对边坡进行支护,为解决边坡反复垮塌的问题,本次拟改用桩板墙结构对边坡进行支护,并在墙后设置缓冲层以降低膨胀土侧向膨胀压力.桩板墙结构由11根矩形抗滑桩及相应的桩间板组成,抗滑桩截面尺寸为1.75 m×2.50 m,悬臂段长度为5.0 m,桩间距为5 m,采用C30混凝土浇筑,主筋型号为HRB400.桩后平台宽度为13 m.相邻抗滑桩之间均布设有10块预制钢筋混凝土板(桩间板,简称为板),每块板的高度为0.50 m,厚度为0.35 m.其中,8#~10#抗滑桩的桩间板后设置厚度为30 cm、密度为16 kg/m<sup>3</sup>的EPS板材作为缓冲层,并在EPS板材后放置一层麦克垫,将墙后水分导排至设置在桩间板两侧的孔洞排出,以解决桩板墙后的排水问题;其余的桩间板后设置厚度为30 cm的袋装砂石以保证良好排水及减小作用在桩板墙上的侧向土压力.此外,在距桩顶约30 cm深度范围内,采用了普通黏土回填密封缓冲层的顶部,以避免在缓冲层变形时,地表水沿缓冲层与桩间板或缓冲层后土体的界面下渗.桩板墙构造如图1所示.简便起见,规定8#~9#抗滑桩之间的桩间板称为8#~9#板,其

他桩间板的命名规则与此相同.

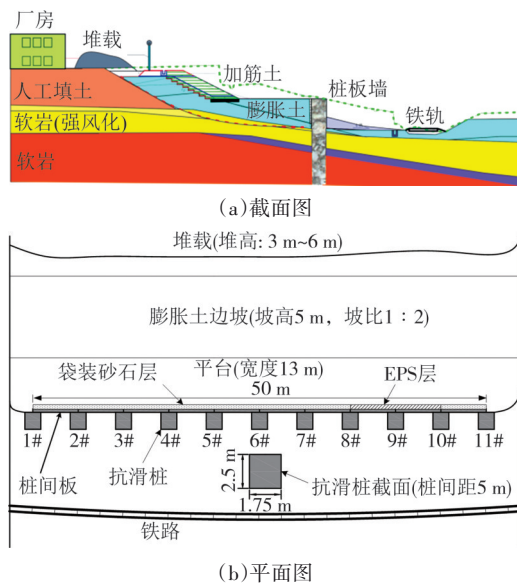


图1 现场桩板墙结构

Fig.1 Pile-slab wall structure on site

## 2 现场试验方案设计

测试内容包括墙后土体湿度、桩与板的应力、墙后土压力和桩身位移.在5#和9#抗滑桩的内、外两侧主筋上,按间隔2.2 m布设钢筋应力计.在桩后沿深度方向按间隔1 m布置5个土压力盒,同时在5#和9#抗滑桩内分别安装1个竖向测斜管.桩身的元件布置如图2所示.板上混凝土应变计、板后湿度计与土压力盒布置见图3.其中,湿度计埋设于距4#~5#板后3 m处,按竖向间距1 m布设1个湿度计,共3个;4#~5#板和8#~9#板后分别布设7个土压力盒;4#~5#板内布设5个混凝土应变计,8#~9#板内布设10个混凝土应变计.需要说明的是,在施工过程中,4#~5#板内布置的混凝土应变计被损坏,于是及时在7#~8#板内布置了与8#~9#板内相同的混凝土应变计,以尽可能弥补4#~5#板后混凝土应变计损失所造成的影响.

采用人工挖孔方式分段浇筑抗滑桩,待桩身混凝土达到设计强度,吊装桩间板体,并自下而上安装.然后,在板后安装EPS板、排水麦克垫或袋装碎石,相关施工实况如图4所示.EPS板施工完毕后,在其顶部覆盖30~50 cm厚土层,避免阳光照射造成EPS材料的老化.桩板墙和填土工程在2021年9月30日完成.



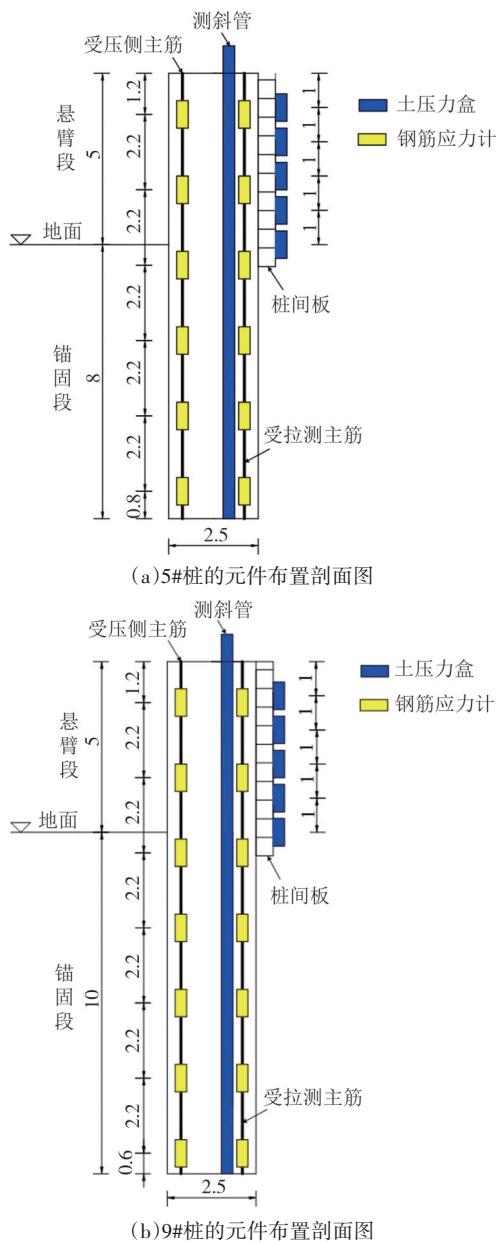


图2 桩板墙结构上的元件布置(单位:m)

Fig.2 Components arrangement on pile-slab wall structure (unit: m)

3 试验结果与分析

3.1 桩板墙后土体湿度变化

图5为桩板墙后土体含水率随时间的变化.由图5可知,将墙后土体含水率的变化曲线划分为3个阶段.填土完成后第0~40 d(阶段Ⅰ),由于当地以多云、阴天为主,仅有3天出现局部小雨,因此,该阶段内墙后土体含水率为小幅波动.填土完成后第40~70 d(阶段Ⅱ)为安装自动化采集系统和调试阶段,该阶段由于采集设备重新安装,因此土体含水率数

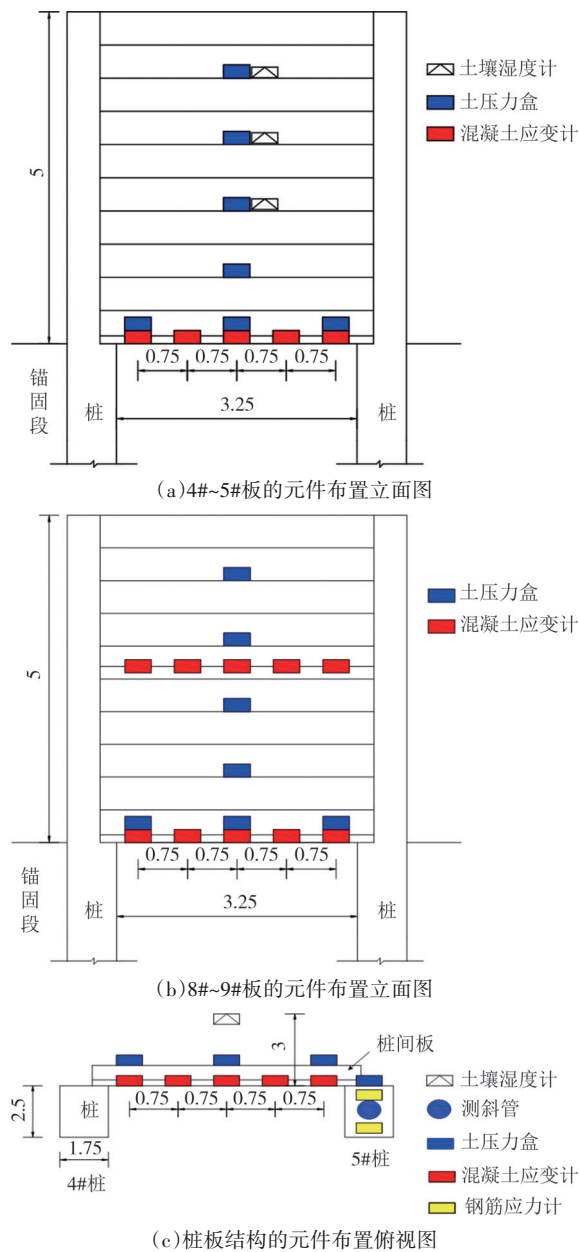


图3 桩间板的元件布置(单位:m)

Fig.3 Components arrangement of inter-pile slab (unit: m)

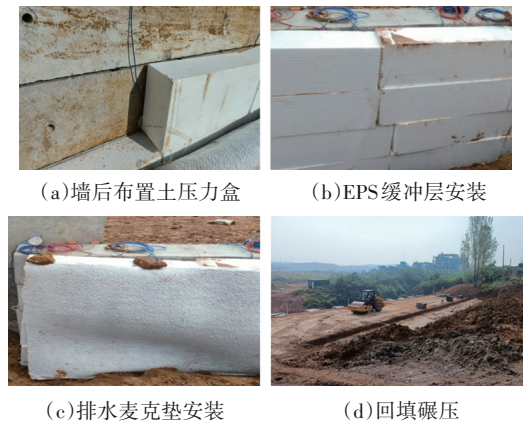


图4 桩间板后的减胀措施

Fig.4 Expansion reduction measures behind inter-pile slab

据未被测得,待自动化采集设备安装完成,便继续开展监测.该阶段初期和末期的不同深度处墙后土体含水率的变化相差不大,同时在该阶段内,当地并未出现明显降雨,因此,可认为该阶段内的墙后土体含水率未发生较大幅度的波动.在填土完成后的第70~132 d(阶段Ⅲ),距桩顶1 m深度处的墙后土体含水率明显增长,这是受该阶段内当地强降雪及后续融雪所致,其土体含水率增幅约为5%.在阶段Ⅲ初期,距桩顶2 m、3 m深度处的墙后土体含水率基本维持稳定.在阶段Ⅲ后期,距桩顶2 m、3 m深度处的墙后土体含水率出现下降,这可能与布置在墙后的排水麦克垫或袋装碎石能够有效排水有关.

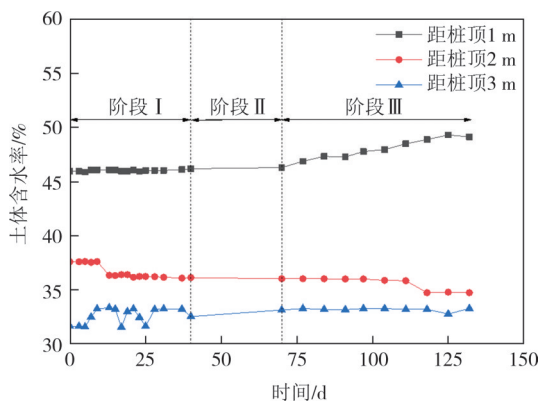


图5 桩板墙后土体含水率随时间的变化

Fig.5 Variation of water content of soil behind pile-slab wall with time

### 3.2 桩间板后的侧向土压力分布

图6和图7分别为4#~5#板(板后设置袋装砂石层作为缓冲层)和8#~9#板(板后设置EPS材料作为缓冲层)后的侧向土压力的分布情况.由图6和图7可知,板后侧向土压力随深度呈先增大后减小的变化规律,但相比于8#~9#板,4#~5#板后侧向土压力沿深度分布的不均匀性更大.8#~9#板后最大侧向土压力明显小于4#~5#板后最大侧向土压力.尽管土体含水率的变化幅度不大,但板后侧向土压力在深度3 m范围内受气候环境影响剧烈,这主要是气候环境变化导致大气影响深度内膨胀土产生了胀缩,该胀缩作用在受到支护结构约束时便在桩间板上形成了侧向膨胀压力.袋装砂石缓冲层的变形能力较低,加之随着深度增加,袋装砂石层受到的力学约束逐渐增强,这导致深度3 m范围内板后土压力随时间的变化幅度随深度增加而增大,如深度3 m处土压力最大与最小值相差达到了135 kPa.得益于EPS缓冲层因弹性模量较小而拥有的良好变形性

能,其可通过增大墙后土体变形而促使侧向土压力向主动土压力发展,发挥消能减胀作用,同时促使不同深度处板后侧向土压力同步协调变化,这可解释图7中不同深度处板后土压力随时间的变化趋势基本一致的现象,这与Ikizler等<sup>[25]</sup>的研究结论一致.侧向土压力相对消减率最大为69.0%,出现在距桩顶3 m深处.其中,侧向土压力相对消减率 $P$ 定义为:

$$P = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $E_1$ 、 $E_2$ 分别为放置袋装砂石、EPS材料时某一深度的板后侧向土压力.

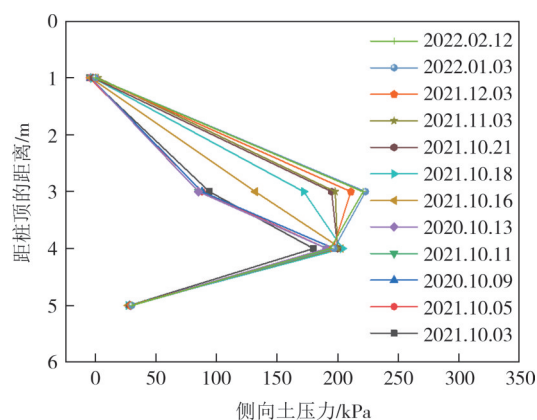


图6 4#~5#板后侧向土压力沿深度的分布

Fig.6 Distribution of lateral earth pressure behind slab 4#~5# along depth

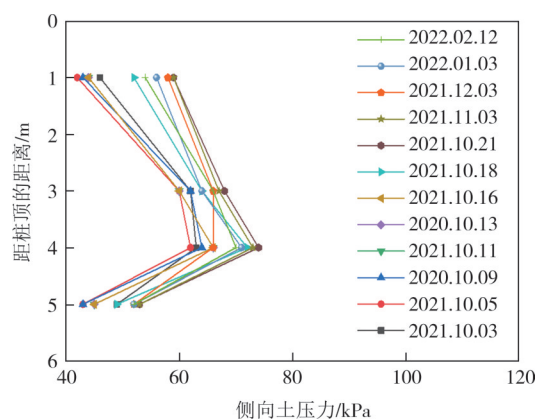


图7 8#~9#板后侧向土压力沿深度的分布

Fig.7 Distribution of lateral earth pressure behind slab 8#~9# along depth

图8为距桩顶5 m处板后侧向土压力的横向分布.由图8可知,设置袋装砂石缓冲层和EPS缓冲层的板后侧向土压力分布规律不同.其中,4#~5#板后侧向土压力沿水平方向呈中间大、两边小的非均匀分布,8#~9#板后侧向土压力沿水平方向呈中间小、两端大的非均匀分布.其原因是8#~9#桩的桩间板

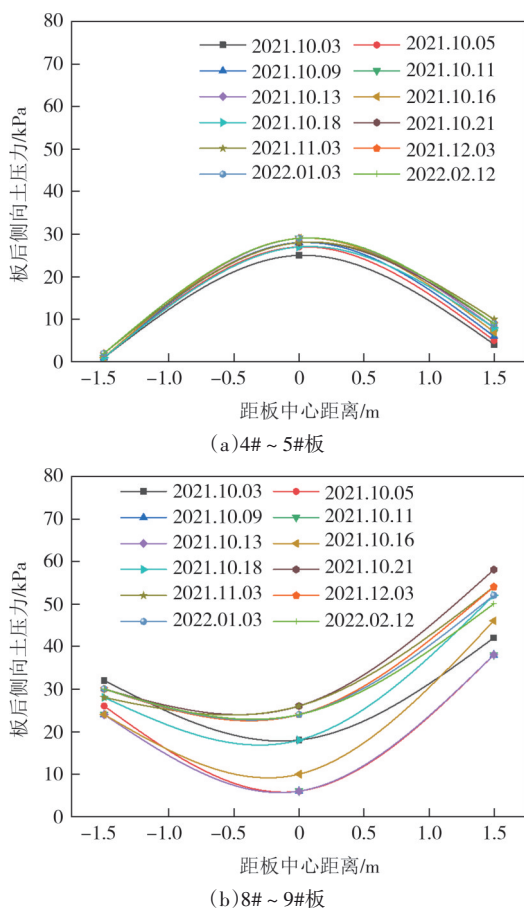


图 8 距桩顶 5 m 处板后侧向土压力的横向分布

Fig.8 Lateral distribution of lateral earth pressure behind the slab at 5 m from pile top

后放置的 EPS 材料具有良好的变形能力,可使板后土压力消减,促使板后土压力向桩间板两侧的桩体转移,从而改变了板后侧向土压力的分布.可见,相比于袋装砂石缓冲层, EPS 缓冲层可调整板后侧向土压力分布形式,改善桩间板的力学状态.需要说明的是,设置袋装砂石缓冲层情况下的板后侧向土压力小于 EPS 缓冲层情况下的板后侧向土压力,其原因是土压力盒直接埋设在缓冲层后,易受施工机械压实、回填操作步骤等现场多变因素影响,局部位置难免存在板后侧向土压力的波动.尽管如此,但板后土压力分布规律仍可反映缓冲层对支护结构体系力学行为的影响.图 6、图 7 展示的板后侧向土压力沿深度的分布能够更好地从整体性上反映两种缓冲层引起的力学效应区别.以图 6、图 7 中最后一次所测的板后侧向土压力(即 2022 年 2 月 12 日)沿深度分布数据为依据,按照传统挡墙后侧向土压力合力计算方法,得出 4#~5#板后侧向土压力合力为 540.5 kPa,合力作用点距桩顶 2.93 m, 8#~9#板后侧

向土压力合力为 276 kPa,合力作用点距桩顶 2.80 m.可见,相比于袋装砂石缓冲层,设置 EPS 缓冲层整体上使得板后侧向土压力合力降低 48.9%,合力作用点向上移动 0.13 m.

此外,监测期间, 8#~9#板后侧向土压力的变化幅度明显大于 4#~5#板后侧向土压力的变化幅度,这意味着 8#~9#板后侧向土压力与气候环境密切相关,说明 EPS 缓冲层能够及时响应气候环境的变化,调整板后土压力的变化,而袋装砂石缓冲层对气候环境的响应(即气候环境引起的膨胀土含水率变化)反馈较弱.

### 3.3 板体(桩间板)弯矩分布

图 9 和图 10 分别为设置袋装砂石缓冲层(在 7#~8#板后)和 EPS 缓冲层(在 8#~9#板后)情况下,距桩顶不同深度处的桩间板弯矩的横向分布规律.板体弯矩计算方法见式(2)、式(3):

$$x = \frac{-nA_s + \sqrt{n^2A_s^2 + 2nbA_s h_0}}{b} \quad (2)$$

$$M_1 = \frac{1}{2} bx E_c \varepsilon_c \left( h_0 - \frac{x}{3} \right) \quad (3)$$

式中:  $n$  为钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值,  $n$  近似取为 10;  $A_s$  为主钢筋的截面面积;  $b$  为矩形截面的宽度;  $h_0$  为截面有效高度;  $x$  为受压区高度;  $E_c$  为混凝土弹性模量;  $\varepsilon_c$  为混凝土的应变,由混凝土应变计测得;  $M_1$  为板体截面弯矩.

由图 9 和图 10 可知,桩间板弯矩沿横向呈现出中间大、两侧小的非均匀分布特点,这种受力状态可近似于简支梁在均布荷载下的受力情况.设置袋装砂石缓冲层时,2021 年 10 月 3 日,距桩顶 2.5 m、5.0 m 处桩间板最大弯矩分别为 60.5 kN·m、13.4 kN·m; 2022 年 2 月 12 日,距桩顶 2.5 m、5.0 m 处桩间板最大弯矩分别为 82.1 kN·m、43.2 kN·m. 设置 EPS 缓冲层时,2021 年 10 月 3 日,距桩顶 2.5 m、5.0 m 处桩间板最大弯矩分别为 25.83 kN·m、18.28 kN·m; 2022 年 2 月 12 日,距桩顶 2.5 m、5.0 m 处桩间板最大弯矩分别为 39.57 kN·m、25.48 kN·m. 由此可知,设置袋装砂石缓冲层时桩间板弯矩明显高于设置 EPS 缓冲层时桩间板弯矩,且深度越浅,两种缓冲层情况下桩间板最大弯矩的差值越大,这是因为浅层范围内膨胀土含水率受大气环境变化的影响较大,引起了膨胀土显著的反胀缩变形,而 EPS 缓冲层能够更有效地动态应对、协调该胀缩变形行为.



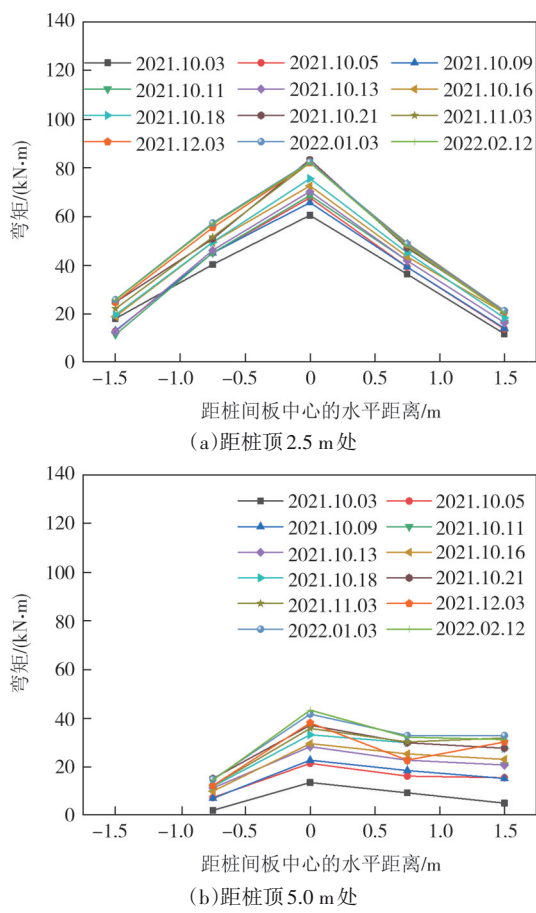


图9 袋装砂石缓冲层情况下桩间板弯矩的横向分布  
Fig.9 Lateral distribution of inter-pile slab moments with bagged gravel buffer layer

相比于袋装砂石缓冲层,设置EPS缓冲层时的桩间板弯矩在监测期间的大小及其变化相对较小,其原因是EPS缓冲层具有较好的减胀性能,其在降低膨胀土膨胀压力的同时,也减弱了浅层(1~4 m)膨胀土膨胀压力的变化幅度,继而降低了膨胀土膨胀特性对桩间板弯矩的影响.随着监测时间的延长,桩间板弯矩随时间的波动表现为变小趋势,这在设置EPS缓冲层的桩板结构中更为明显.表明随着时间增加,膨胀土边坡-袋装砂石或EPS缓冲层-桩板墙结构三者之间形成相互协调的力学与变形关系.

图11给出了2022年2月12日时,2种缓冲层下不同深度处桩间板弯矩的比较结果.由图11可知,设置袋装砂石缓冲层情况下,桩间板弯矩沿横向分布表现出更大的不均匀性.但在设置EPS缓冲层情况下,桩间板弯矩沿横向分布的不均匀性大大降低.这说明设置EPS缓冲层后,桩间板-缓冲层-膨胀土的相互作用能够优化不同深度处桩间板弯矩,进而有效降低桩间板弯矩的横向分布不均匀性.此外,设

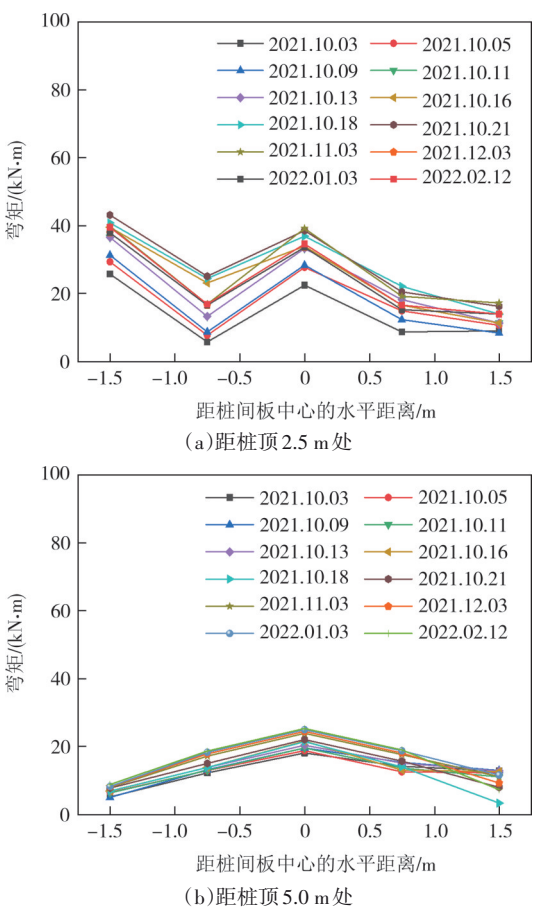
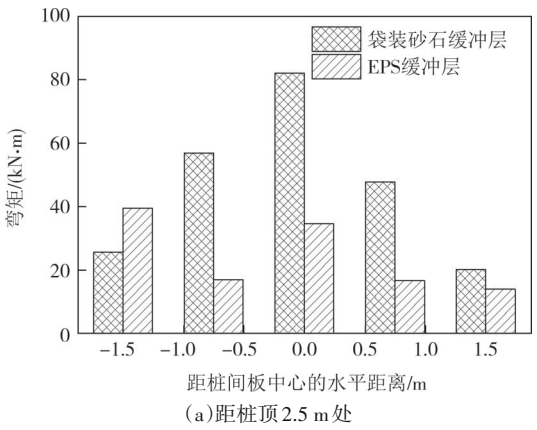


图10 EPS缓冲层情况下桩间板弯矩的横向分布  
Fig.10 Lateral distribution of inter-pile slab moments with EPS buffer layer

置EPS缓冲层时的桩间板弯矩明显小于设置袋装砂石缓冲层的情况,具体而言,相比于设置袋装砂石缓冲层,设置EPS缓冲层时的桩间板弯矩在距桩顶2.5 m处最高减小了70.1%,在距桩顶5.0 m处最高减小了75.8%,可见,EPS缓冲层具有显著的减胀作用.

3.4 桩身弯矩分布

图12为5#桩的桩身弯矩沿桩长的分布情况.需要指出的是,布置在9#桩身的钢筋应力计在施工期



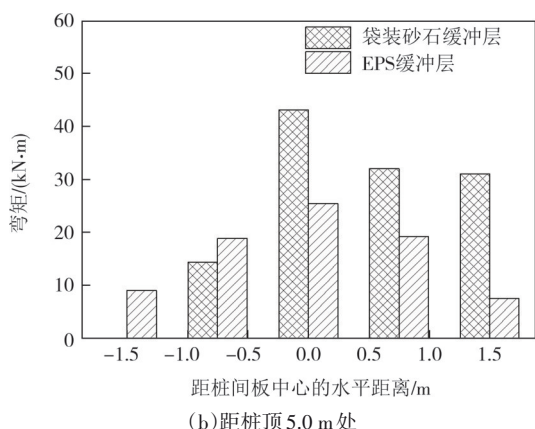


图11 不同缓冲层情况下的桩间板弯矩的对比

Fig.11 Comparison of bending moment of inter-pile slab with different buffer layers

间被破坏,致使9#桩身弯矩未能获得.桩身弯矩计算方法见式(4)、式(5):

$$x = \frac{a'\sigma_s + h_0\sigma'_s}{\sigma_s + \sigma'_s} \quad (4)$$

$$M_2 = \frac{b\sigma_s x^2}{2n(h_0 - x)} \left( h_0 - \frac{x}{3} \right) + \sigma'_s A'_s (h_0 - a') \quad (5)$$

式中: $a'$ 为受压区全部纵向钢筋合力点至截面受压边缘的距离; $h_0$ 为截面有效高度; $\sigma_s$ 、 $\sigma'_s$ 分别为受拉、受压钢筋的应力,由钢筋应力计测得; $x$ 为受压区高度; $b$ 为矩形截面的宽度; $n$ 为钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值; $A'_s$ 为受压区纵向钢筋的截面面积; $M_2$ 为矩形截面弯矩.

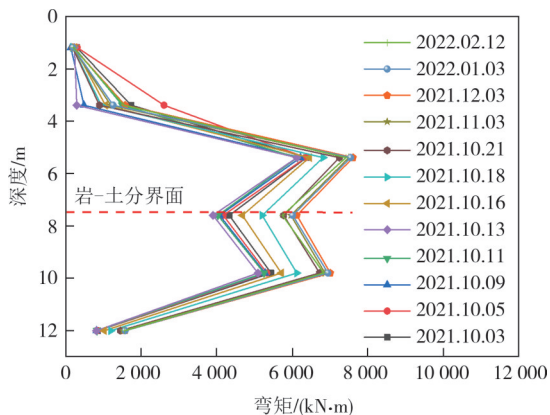


图12 5#桩弯矩沿深度的分布

Fig.12 Distribution of bending moment of pile 5# along depth

由图12可知,5#桩的桩身弯矩分布大致呈“M”型,弯矩最大值为7 609.12 kN·m,位于深度5.4 m处.深度5.4~9.8 m范围内,桩身弯矩随深度增加呈先减小后增大的变化规律,并且在岩土分界面(岩层与土层的分界面)附近出现拐点,其原因是在岩土分界面

处,桩前抗力小于桩后土压力.

### 3.5 桩身位移分布

通过测斜管测得2021年10月6日至2022年2月12日期间5#和9#桩桩身侧向位移增量随桩长的变化见图13.该桩身位移增量以2021年10月6日为起始时间,2022年2月12日为终止时间,在此期间产生的位移.其中,侧向位移以朝向临空侧为正值.由图13可知,5#桩桩身侧向位移较小,而9#桩桩身侧向位移较大,最大值为15 mm,位于距桩顶以下9 m处.其原因是EPS缓冲层在墙后能够发挥减载作用,使得墙后侧向土压力更多地传递至桩身,从而导致桩身产生较大的侧向变形.

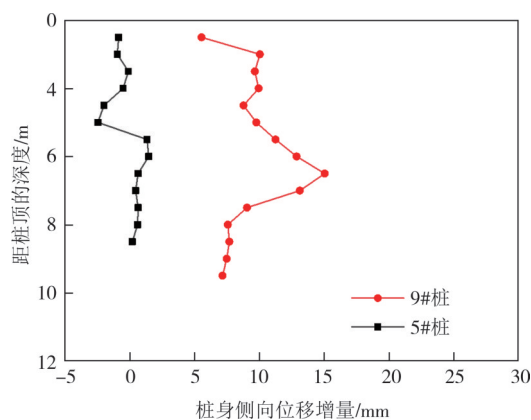


图13 桩身侧向位移增量沿深度的分布

Fig.13 Distribution of lateral displacement increments of piles along depth

桩后填土完成后,桩顶侧向位移随时间的变化见图14.桩顶侧向位移通过全站仪测读.由图14可知,填土完成初期(0~8 d),桩顶侧向位移增长较快,之后其增长较慢.5#桩顶侧向位移在填土完成14 d后趋于稳定,9#桩顶侧向位移在填土完成66 d后趋于稳定.其原因是相比于袋装砂石缓冲层,EPS缓冲层有较小的弹性模量和较大的压缩变形能力,桩板墙-EPS缓冲层-膨胀土的协调变形需较长的时间才能趋于稳定.5#桩和9#桩的桩顶位移最大值分别为17.5 mm和22.1 mm,与悬臂段长度之比分别为0.35%和0.44%,均未超过《铁路路基支挡结构设计规范》(TB 10025—2019)<sup>[26]</sup>中关于桩顶水平位移的限值要求(1%).桩顶位移趋于稳定后,9#桩桩顶位移比5#桩的大,其原因是EPS缓冲层的铺设使得桩后土压力重分布,改变了桩身荷载分布形式,使得9#桩的倾覆力矩大于5#桩,表明EPS缓冲层能延缓桩顶



位移的发展,但并不是影响桩顶位移的主导因素,这与王协群等<sup>[27]</sup>的研究结论一致.可见,膨胀土-EPS缓冲层-桩板墙体系协调作用的稳定是一个多因素影响、长时间的渐变过程.

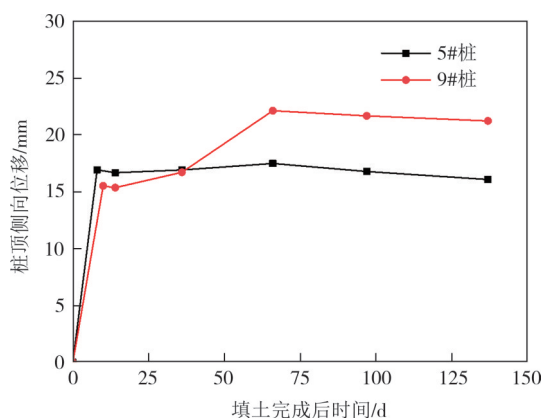


图 14 桩顶侧向位移随时间的变化

Fig.14 Variation of lateral displacement of pile top with time

## 4 结论

以湖北当阳某膨胀土边坡工程为背景,通过开展不同缓冲层-桩板墙组合支护膨胀土边坡的现场试验,探究了聚苯乙烯泡沫(EPS)缓冲层和袋装砂石缓冲层对膨胀土边坡-缓冲层-桩板墙体系的力学与变形行为的影响,主要结论如下:

1)相比于袋装砂石缓冲层而言,EPS缓冲层可更大幅度地消减桩间板上的侧向土压力,本试验中测得最大消减率可达69%.设置EPS缓冲层可更显著降低桩间板弯矩及其横向分布的非均匀性.相比于袋装砂石缓冲层,设置EPS缓冲层后,距桩顶2.5 m、5.0 m处桩间板实测弯矩降幅最高分别为70.1%、75.8%,表明EPS缓冲层具有优异的减胀作用.

2)在气候环境变化引起膨胀土胀缩作用下,EPS缓冲层能够及时响应并动态调整桩间板后侧向土压力,而袋装砂石缓冲层对气候环境变化的响应能力相对较弱.

3)气候环境下膨胀土边坡-袋装砂石或EPS缓冲层-桩板墙结构三者之间形成了协调的相互作用,从而减弱膨胀土胀缩特性对桩间板力学特性影响,但5#和9#桩分别在填土完成14 d、66 d后趋于稳定,表明三者的协调作用是随着服役时间增加而逐渐形

成并趋于稳定的.

## 参考文献

- [1] 朱磊,谢强,赵文,等.膨胀土基坑悬臂桩支护设计中土压力计算方法探讨[J].铁道学报,2018,40(1):111-115.  
ZHU L, XIE Q, ZHAO W, et al. Calculation method of earth pressure of swelling soil in design of cantilever retaining pile of building foundation excavation[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(1): 111-115. (in Chinese)
- [2] 邓波,杨明辉,赵明华.非饱和土刚性挡墙抗滑移稳定性上限分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2023,50(1):171-180.  
DENG B, YANG M H, ZHAO M H. Upper limit analysis of anti-sliding stability of a rigid retaining wall in unsaturated soils[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(1): 171-180. (in Chinese)
- [3] NELSON J D, CHAO K C G, OVERTON D D, et al. Foundation engineering for expansive soils[M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2015: 363-370.
- [4] 林宇亮,张震,罗桂军,等.膨胀土边坡的水平膨胀力及桩板结构内力分析[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(1):140-149.  
LIN Y L, ZHANG Z, LUO G J, et al. Analysis of lateral swelling pressure of expansive soil slope and internal force of pile-sheet structure[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 140-149. (in Chinese)
- [5] 廖进星.浩吉铁路膨胀岩高边坡降雨入渗稳定性分析[J].铁道科学与工程学报,2021,18(4):908-917.  
LIAO J X. Stability analysis of high slope of swelling rock under rainfall infiltration of Haolebaoji-Ji'an Railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(4): 908-917. (in Chinese)
- [6] 吴镇清,葛允雷,杨果林,等.膨胀土路堑边坡支挡结构形式试验研究[J].铁道建筑,2017,57(11):79-81.  
WU Z Q, GE Y L, YANG G L, et al. Experimental study on retaining structure type of expansive soil cutting slope [J]. Railway Engineering, 2017, 57(11): 79-81. (in Chinese)
- [7] DAYIOGLU M, CETIN B, NAM S. Stabilization of expansive Belle Fourche shale clay with different chemical additives [J]. Applied Clay Science, 2017, 146(9): 56-69.
- [8] 巩齐齐,明文静.崩解性砂岩改良膨胀土的裂隙发育规律研究[J].土木工程学报,2022,55(2):73-81.  
GONG Q Q, MING W J. Study on fracture development of expansive soil improved by disintegrated sandstone [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(2): 73-81. (in Chinese)
- [9] PAN Z Y, GARG A, HUANG S, et al. Swelling suppression mechanism of compacted expansive soil amended with animal and plant based biochar[J]. Waste and Biomass Valorization, 2021, 12(5): 2653-2664.
- [10] BEKHITI M, GHRIEB A, SMAIDA A. Influence of worn tire rubber fibres on the swelling potential and pressure of clay

- soils[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 45: 5225–5230.
- [11] WANG L J, LIU S H, ZHOU B. Experimental study on the inclusion of soilbags in retaining walls constructed in expansive soils[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43(1): 89–96.
- [12] 许英姿, 黄政棋, 苏超, 等. 掺碎石改良宽度对膨胀土侧向膨胀力影响研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(6): 1456–1463.
- XU Y Z, HUANG Z Q, SU C, et al. Study on the influence of modified width of gravel on lateral swelling force of expansive soil [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(6): 1456–1463. (in Chinese)
- [13] 杨果林, 胡敏, 申权, 等. 膨胀土高边坡支护结构设计方法与加固技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- YANG G L, HU M, SHEN Q, et al. Design method and strengthening technique for retaining structure of high expansive soil slope[M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)
- [14] 邹维列, 蔺建国, 韩仲, 等. 膨胀土边坡加固技术研究进展[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(1): 126–139.
- ZOU W L, LIN J G, HAN Z, et al. Progress on strengthening techniques for expansive soil slopes[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(1): 126–139. (in Chinese)
- [15] WAN L L, ZOU W L, WANG X Q, et al. Comparison of three inclusions in reducing lateral swelling pressure of expansive soils [J]. *Geosynthetics International*, 2018, 25(5): 481–493.
- [16] 潘诗婷, 兰鹏, 刘小文, 等. 挡土墙填充缓冲层前后土压力变化规律试验研究[J]. *铁道建筑*, 2017, 57(6): 98–100.
- PAN S T, LAN P, LIU X W, et al. Experimental study on earth pressure change laws before and after filling retaining wall with buffer layers [J]. *Railway Engineering*, 2017, 57(6): 98–100. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] 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)
- [19] ERTUGRUL O L, TRANDAFIR A C. Lateral earth pressures on flexible cantilever retaining walls with deformable geofabric inclusions[J]. *Engineering Geology*, 2013, 158: 23–33.
- [20] IBRAHIM Y E H, ABDELSALAM S S A, NABIL M N A, et al. Earth pressure reduction on retaining walls using EPS geofabric[J]. *Magazine of Civil Engineering*, 2020, 99(7): 9904.
- [21] 丁鲁强, 韩仲, 邹维列, 等. 膨胀土-EPS缓冲层-挡墙体系侧压力的模拟和计算[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(8): 1558–1564.
- DING L Q, HAN Z, ZOU W L, et al. Modelling and calculating lateral pressure of expansive soil-EPS inclusion-retaining wall system [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(8): 1558–1564. (in Chinese)
- [22] NI P P, MEI G X, ZHAO Y L. Displacement-dependent earth pressures on rigid retaining walls with compressible geofabric inclusions: physical modeling and analytical solutions [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, 17(6): 04016132.
- [23] XIE M X, ZHENG J J, SHAO A D, et al. Study of lateral earth pressures on nonyielding retaining walls with deformable geofabric inclusions [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2020, 48(5): 684–690.
- [24] 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 geofabric seismic buffers for rigid retaining walls [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(10): 73–80. (in Chinese)
- [25] IKIZLER S B, AYTEKIN M, VEKLI M. Reductions in swelling pressure of expansive soil stabilized using EPS geofabric and sand[J]. *Geosynthetics International*, 2009, 16(3): 216–221.
- [26] 铁路路基支护结构设计规范: TB 10025—2019[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2019: 83–88.
- Code for design of retaining structures of railway earthworks: TB 10025—2019 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019: 83–88. (in Chinese)
- [27] 王协群, 匡文壮, 韩仲, 等. 膨胀土中EPS缓冲层-悬臂式挡墙支护结构的受力变形数值模拟[J]. *长江科学院院报*, 2022, 39(7): 78–86.
- WANG X Q, KUANG W Z, HAN Z, et al. Numerical simulation of the force and deformation characteristics of cantilever retaining structure with EPS buffer in expansive soil [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, 39(7): 78–86. (in Chinese)