

气泡轻质土高铁拓宽路基性能离心模型试验研究

张振*, 刘洪伟, 叶观宝, 饶烽瑞, 戚得健

(同济大学 土木工程学院 地下建筑与工程系 / 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 路堤拓宽工程中新旧路基结合部差异沉降控制一直是人们关注的核心问题。路基拓宽工程可采用换填、轻质材料回填、桩承路堤、土工合成材料、排水固结等技术控制新旧路基的差异沉降。但轻质材料应用于高铁拓宽路堤的研究尚处于起步阶段。本文开展了 50 g 加速度下的离心模型试验, 模拟原路堤阶段、拓宽路堤阶段 (包括运营阶段), 研究了常规填料和气泡轻质土用于高铁拓宽路堤的变形特性与应力分布。测得并分析了试验过程中新老路堤沉降、地基土中孔隙水压力和土压力的发展规律。结果表明, 路基拓宽引起的附加应力主要集中在新老路基交界处靠近拓宽路堤一侧, 同时, 仍会引起原路堤下土中附加应力的增加, 但对原路堤地基土的附加应力影响较小。相较于常规填料, 采用气泡轻质土进行路堤拓宽可以有效减小地基土中最大超孔隙水压力增量和附加应力, 同时还可以减小拓宽路基与原路基之间的差异沉降。

关键词: 路堤拓宽; 气泡轻质土; 孔隙水压力; 差异变形; 离心模型试验; 高速铁路

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)03-0220-06

Centrifugal model test research on the performance of high-speed rail widening subgrade with bubble light soil

ZHANG Zhen*, LIU Hong-wei, YE Guan-bao, RAO Feng-ru, QI De-qian

(Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University/

Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In the embankment widening project, the control of differential settlement at the junction of new and old embankment has always been the core issue. Various techniques have been used to mitigate the uneven settlement between existing and widened embankments in embankment widening, e.g., over-excavation and replacement, lightweight backfill, piled embankment, geosynthetic reinforcement and preloading etc. However, research on the lightweight material in the widening of high-speed railway embankment is still at the initial stage. This study conducted a centrifugal test at 50 g acceleration field, modeling the existing embankment stage and widening of embankment, investigating the deformation and stress of widened embankment constructed by conventional backfill and the foamed light soil. During the test, the settlement between existing embankment and widened portion, pore water pressure and earth pressure in soil were monitored and analyzed. The settlement of new and old embankments, pore water pressure and earth pressure in foundation soil after widening with conventional filler and foamed light soil filler were compared. The results show that the additional stress caused by embankment widening is mainly concentrated on the side near the junction of new and old embankment. At the same time, the additional stress in the soil under the original embankment will still increase, but the effect on the additional stress of the original embankment base is small. Compared with the conventional filler, the use of foamed light soil for embankment widening can effectively reduce the maximum excess pore water pressure increment and additional stress in the foundation soil, and reduce the differential settlement between the widened embankment and the original embankment.

Key words: embankment widening; foamed light soil; pore water pressure; differential deformation; centrifugal model test; high-speed railway

收稿日期: 2022-01-27

基金项目: 上海市科技计划项目 (22ZR1466600); 国家自然科学基金项目资助 (41772281; 41972272)。

作者简介: 张振(1984—), 男, 江苏丹阳人, 博士, 副教授, 主要从事地基处理与路基动力响应的科研与教学工作。E-mail: zhenzhang@tongji.edu.cn。

0 引言

随着我国经济和社会的高速发展, 现有的交通基础设施已然不能满足日益增长的交通流量需求。为了解决这一问题, 最常用的办法是对既有线路(公路、铁路)进行路基拓宽以增设复线^[1-5]。然而, 新旧路基结合部差异沉降控制一直是路基拓宽工程中关注的核心问题。

目前, 主要采取两种方式来解决新旧路基之间的不均匀沉降: 采用地基处理方法加固拓宽路堤下地基, 以减小新建路基的变形^[6-11]; 采用轻质填料减少新建路堤自重, 以减小地基的附加应力^[12-13]。气泡轻质土是将预制泡沫与水泥浆均匀混合, 亦可掺入其他骨料(如黏土和砂), 后经浇筑养护形成的一种含有大量封闭气孔的轻质土工材料。因其自身具有轻质性、强度可调节、自立性好等优点, 在路基拓宽工程中具有广阔的应用前景^[14-17]。然而, 将气泡轻质土应用于高铁拓宽路基的研究较少, 采用轻质土拓宽能否满足高铁运行对轨道的平顺性和路基差异沉降控制要求有待进一步研究。

本文开展了气泡轻质土高铁拓宽路基的离心模型试验。对比分析了采用常规填料和气泡轻质土填料拓宽后的新老路堤沉降、地基土中孔隙水压力和土压力的变化规律。本文的研究成果对指导气泡轻质土在高速铁路路基拓宽工程中的应用具有指导价值。

1 离心机模型试验

1.1 试验设备与模型材料

本次离心试验采用同济大学 TLJ-150 型土工离心机, 最大离心加速度为 50 g。模型试验相似比为 1 : 50。模型箱内部尺寸为 900 mm×500 mm×700 mm (长×宽×高), 模型箱一侧为透明有机玻璃板, 以便于在试验过程中观察路基变形情况。

试验材料主要包括砂土、软土和气泡轻质土三部分。砂土层采用细砂。软土采用高岭土、重晶石粉和水按 1 : 1 : 1 配置而成。常规路堤填料采用细砂和上述人工软土按质量比 10 : 1 配置而成。气泡轻质土由水泥、空气泡沫和水组成。表 1 列出了模型试验中材料的基本物理力学参数。

1.2 试验方案

本次离心模型试验共设置两组: CMT-1 为常规填料拓宽, CMT-2 为气泡轻质土拓宽。图 1 为模型试验示意图。在每组试验中都布置了激光位移计、

微型孔压计和微型土压力计(如图 1 所示), 用来监测路基拓宽过程中地基土(软土)的沉降, 孔压消散情况和土压力的变化。

表 1 离心模型试验材料参数

材料名称	材料参数
软土	$w=34.5\%$, $\gamma=18.0 \text{ kN/m}^3$, $\phi=5.5^\circ$, $c=9.6 \text{ kPa}$, $c_v=0.0328 \text{ cm}^2/\text{s}$
常规填土	$\gamma=16.0 \text{ kN/m}^3$, $\phi=33^\circ$, $c=8.7 \text{ kPa}$
气泡轻质土	$\gamma=6.5 \text{ kN/m}^3$, $E=54.3 \text{ MPa}$, $f_{cu28}=1.05 \text{ MPa}$

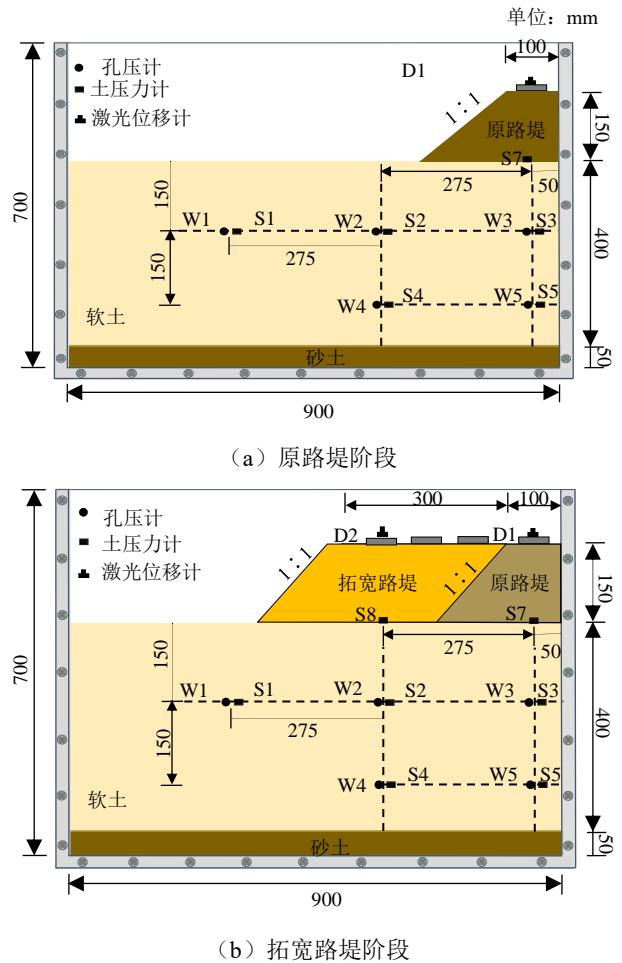


图 1 离心模型试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of centrifugal model test

每一组离心模型试验分 3 个阶段: (1)地基自重固结阶段: 将填筑好的软土模型箱在 50 g 的离心加速度下运行 16 h, 完成自重固结, 50 g 条件下, 相当于原型地基土经过约 4.6 年的自重固结; (2)原线路运营阶段: 暂停离心机, 在模型箱一侧填筑原路基, 在路基顶面放置荷载铁块, 启动离心机, 在 50 g 条件下运行 11 h, 相当于原路基成型后经过约 3.2 年的固结以模拟高速铁路路基实际运行工况; (3)拓宽路基运营阶段: 暂停离心机, 在模型箱原路基坡

面一侧继续填筑拓宽路基,在拓宽路基顶面放置荷载铁块,启动离心机,在50 g条件下运行6.5 h,相当于拓宽路基成型后经过约1.9年的固结以模拟高铁路基拓宽后的运行工况。

1.3 模型制作

模型制作前,在模型箱内壁四周涂一层凡士林,而后铺设一层塑料薄膜以减小侧壁摩阻力。同时在模型箱的4个角插入PVC管,用来收集地基土在固结过程中排出的水。针对本次离心试验的软土,含水量选择33%时,泥浆流动性较好,且自重固结过程中排出的水量也较少。模型箱底部铺设一层50 mm厚的细砂模拟硬土层。将配置好的软土泥浆倒入模型箱中,填筑厚度为450 mm,静止24 h。地基土完成50 g下的自重固结后,清除积水,将地基土修平至400 mm厚。

模型地基准备完成后,填筑模型原路堤。原路堤高150 mm,底部宽250 mm,坡度为1:1。根据《高速铁路设计规范》设计规定,无砟轨道的高铁列车分布宽度为3 m,包括高铁轨道结构和高铁荷载产生的总荷载为67.5 kN/m²。因此本次试验在路堤顶面放置高度20 mm、宽度30 mm、密度为7.6 g/cm³的铁块,以模拟路堤上方的总荷载^[18]。完成原路堤阶段运营模拟后,暂停离心机,在原路基坡面一侧填筑拓宽路基。拓宽路堤顶部与原路堤齐平,底部宽300 mm,坡度为1:1。

2 试验结果与分析

2.1 孔隙水压力

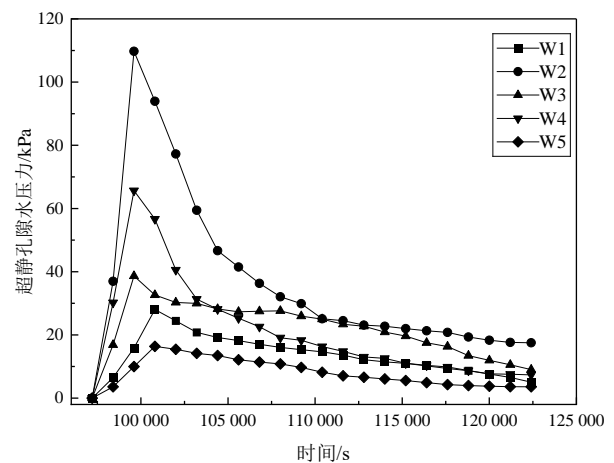
表2总结了各阶段结束时各点的超孔隙水压力。在地基土自重固结阶段,地基土中超孔隙水压力已趋近于0,地基土已基本完成自重固结。在原路堤运营阶段,地基土中超孔隙水压力亦趋近于0,说明在既有路堤及高铁荷载作用下地基土已基本完成固结变形。

图2为拓宽路基运营阶段地基土中超孔隙水压力随时间变化曲线。随着离心机加速至50 g,地基土中超静孔隙水压力逐渐升高,且拓宽路堤正下方地基土中超孔压升高较高(W2和W4),随后逐渐消散。采用常规填料拓宽,W2和W4测点的超静孔压增量为110 kPa和65 kPa;而采用气泡轻质土拓宽,W2和W4测点的超静孔压增量为60 kPa和30 kPa,减小了约50%。试验结束时,CMT-1中各测点的残余超静孔压为5~17 kPa,CMT-2中各测点的残余超静孔压仅为1~7 kPa,可以认为地基已

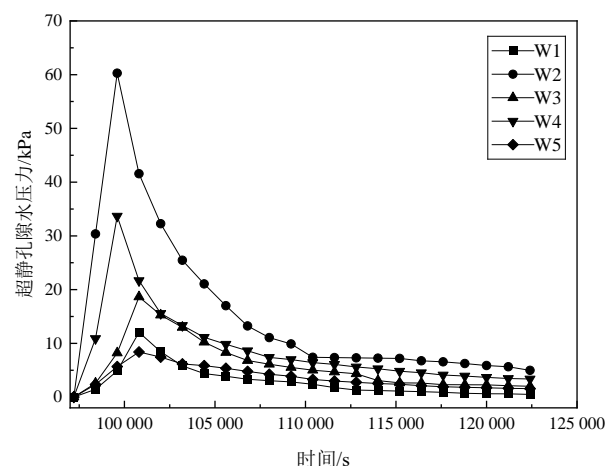
基本完成固结。采用气泡轻质土进行路堤拓宽,由于其轻质性,显著减小了由于路基拓宽在地基土中产生的超静孔隙水压力,同时相同运营时间后,地基土中的残余超静孔隙水压力也更小。

表2 各阶段最终超孔压监测值
Table 2 Final values of excess pore pressure in each stage kPa

孔压计	地基土自重固结	原路堤阶段	拓宽路堤阶段 (砂土/轻质土)
W1	1.18	0.55	5.05 / 0.50
W2	1.32	1.93	17.52 / 4.98
W3	0.41	0.96	9.02 / 2.02
W4	0.52	1.76	7.34 / 3.37
W5	4.45	2.32	3.58 / 1.58



(a) CMT-1



(b) CMT-2

图2 拓宽路基阶段超孔压消散

Fig. 2 Dissipation of excess pore pressure during embankment widening

2.2 沉降与差异沉降

图3为原路堤运营和拓宽路基运营阶段路堤顶

面沉降随时间发展曲线。由于在既有路堤和拓宽路堤填筑时控制相对密度为 70%，常规填料路堤本身的压缩量已很小，而对于轻质土填料路堤，其总荷载为气泡轻质土材料无侧限抗压强度的 6%，其对应的无侧限抗压试验下的材料应变约为 0.1%，因此，可以认为在拓宽路堤运营阶段，路堤产生的沉降和差异沉降主要是由于软土路基变形引起的。CMT-1 和 CMT-2 在原路堤运营阶段的最终沉降基本一致，分别为 27.58 mm 和 30.28 mm(激光位移计实测值)，说明试验操作和模型制作具有较好的可重复性。拓宽路堤运营阶段不仅会造成拓宽路堤的沉降，而且会引起既有路堤的附加沉降，且采用气泡轻质土引起的新老路堤沉降约为采用常规填料的 50%。拓宽路堤运营阶段，CMT-1 和 CMT-2 中原路堤和拓宽路堤产生的差异沉降分别为 1.86%和 0.87%(见表 3)。

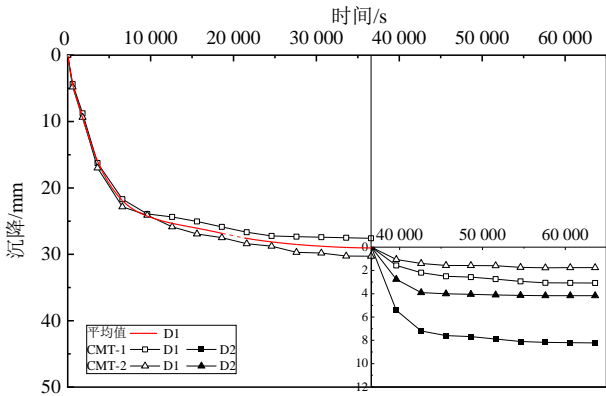


图 3 路基沉降图

Fig. 3 Settlement of embankment

表 3 路堤沉降与差异沉降

Table 3 Settlement and differential settlement of embankment

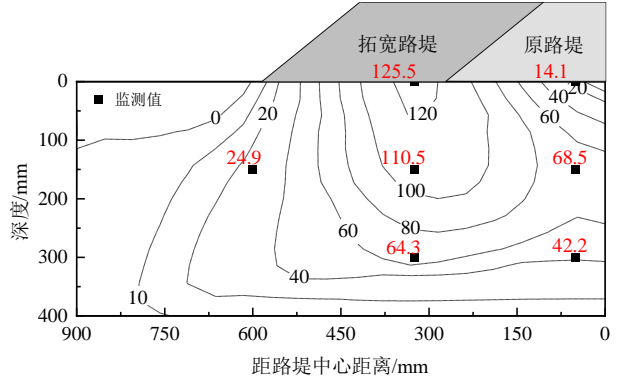
试验编号	S_{e0}/mm	S_e/mm	S_w/mm	$S_d/\%$
CMT-1	27.58	3.07	8.20	1.86
CMT-2	30.28	1.76	4.16	0.87

注： S_{e0} 表示原路基的沉降； S_e 为拓宽后原路基附加沉降； S_w 为拓宽路基的沉降； S_d 表示差异沉降，为新老路堤沉降差与位移测点距离的比值，测点距离为 275 mm。

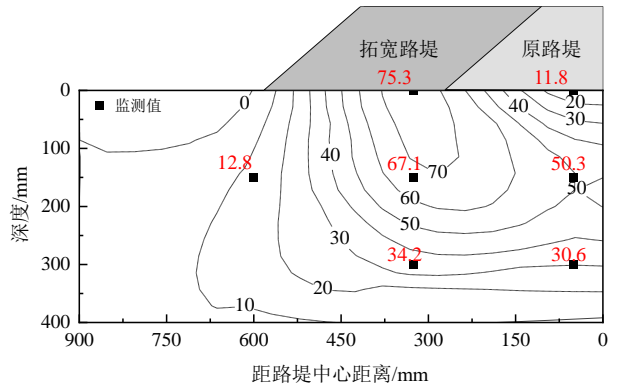
3 土压力分布

图 4 为拓宽路堤引起的地基土总应力增量分布云图。地基土总应力增量云图采用随机网格法将各土压力监测点测得的数据离散成数据矩阵。由图可知，云图分布与监测值基本一致。路基拓宽引起的附加应力主要集中在新老路基交界处靠近拓宽路堤一侧，同时，仍会引起原路堤下土中附加应力的增加，但对原路堤地基土的附加应力影响较小。采用

气泡轻质土拓宽后，地基中的附加应力增量约为常规填料的 50%，高于气泡轻质土与常规填料的密度比 0.41。这主要是因为路堤顶面铁块的影响。采用气泡轻质土作为拓宽路基填筑材料，可以有效地减少拓宽路堤对地基土造成的附加应力。



(a) CMT-1



(b) CMT-2

图 4 路堤拓宽引起地基土压力增量分布图

Fig. 4 Distribution of earth pressure increment caused by embankment widening

4 结论

(1) 路堤拓宽时会造成拓宽路堤正下方地基土中超孔隙显著升高。采用气泡轻质土进行路堤拓宽，地基土中产生的超静孔隙水压力约为常规填料的 50%，同时相同运营时间后，地基土中的残余超静孔隙水压力也更小。

(2) 拓宽路堤运营阶段不仅会造成拓宽路堤的沉降，而且会引起既有路堤的附加沉降，采用常规填料和气泡轻质土填料引起的新老路堤差异沉降分别为 1.86%和 0.87%。

(3) 路基拓宽引起的附加应力主要集中在新老路基交界处靠近拓宽路堤一侧，仍会引起原路堤下土中附加应力的增加，但对原路堤地基土的附加应力影响较小。采用气泡轻质土拓宽后，地基中的

附加应力增量约为常规填料的50%。

参考文献

- [1] MIAO L, WANG F, HAN G, et al. Benefits of geosynthetic reinforcement in widening of embankments subjected to foundation differential settlement[J]. *Geosynthetics International*, 2014, 21(5): 321-332.
- [2] SERRIDGE C J, SYNAC O. Ground improvement solutions for motorway widening schemes and new highway embankment construction over soft ground[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2007, 11(4): 219-228.
- [3] ÖZER A T. Laboratory study on the use of EPS-block geofoam for embankment widening[J]. *Geosynthetics International*, 2016, 23(2): 71-85.
- [4] TILLARD D N, VENMANS A, SLOB E, et al. Total engineering geology approach applied to motorway construction and widening in the Netherlands[J]. *Engineering Geology*, 2010, 114(3): 164-170.
- [5] KIM T H, KIM T H, KANG G C. Performance evaluation of road embankment constructed using lightweight soils on an unimproved soft soil layer[J]. *Engineering Geology*, 2013, 160: 34-43.
- [6] 屈耀辉, 苗学云. 3种常用地基处理方法在黄土区高铁地基中的适用性研究[J]. *中国铁道科学*, 2015, 36(4): 8-12.
- QU Yao-hui, MIAO Xue-yun. Applicability of three common ground treatment methods for high speed railway subgrade in loess areas[J]. *China Railway Science*, 2015, 36(4): 8-12.
- [7] 赵新益, 李时亮, 汪莹鹤. 铁路软土地基路基沉降控制技术[J]. *铁道工程学报*, 2015, 32(5): 18-22.
- ZHAO Xin-yi, LI Shi-liang, WANG Ying-he. Settlement control technology of railway subgrade on soft soil foundation[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2015, 32(5): 18-22.
- [8] 凌建明, 钱劲松, 黄琴龙, 等. 路基拓宽工程处治技术及其效果[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(1): 45-49.
- LING Jian-ming, QIAN Jin-song, HUANG Qin-long, et al. Subgrade treatment techniques and effects for highway widening[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2007, 35(1): 45-49.
- [9] 陈磊, 刘汉龙, 陈永辉. 高速公路拓宽工程地基处理效果的数值分析[J]. *岩土力学*, 2006, 27(11): 2066-2070.
- CHEN Lei, LIU Han-long, CHEN Yong-hui. Numerical analysis of foundation improvement effect for expressway widening engineering[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(11): 2066-2070.
- [10] 张军辉. 不同软基处理方式下高速公路加宽工程变形特性分析[J]. *岩土力学*, 2011, 32(4): 1216-1222.
- ZHANG Jun-hui. Analysis of deformation behavior of expressway widening engineering under different foundation treatments[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(4): 1216-1222.
- [11] 刘汉龙, 赵明华. 地基处理研究进展[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(1): 96-115.
- LIU Han-long, ZHAO Ming-hua. Review of ground improvement technical and its application in China[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(1): 96-115.
- [12] 杨春风, 庄灿, 李洪亮, 等. 泡沫轻质土用于软基路基拓宽时应力应变分析[J]. *广西大学学报: 自然科学版*, 2016, 41(1): 234-245.
- YANG Chun-feng, ZHUANG Can, LI Hong-liang, et al. Analysis on stress-strain relationship of foamed lightweight soil in widening of freeway on soft soil foundation[J]. *Journal of Guangxi University: Natural Science Edition*, 2016, 41(1): 234-245.
- [13] 吴海刚, 王宝军, 郑永红, 等. 大规模采用泡沫轻质土处理软基设计方法探讨[J]. *铁道工程学报*, 2016, 33(2): 28-33.
- WU Hai-gang, WANG Bao-jun, ZHENG Yong-hong, et al. Research on the design method of the large-scale foam light soil for soft ground treatments[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2016, 33(2): 28-33.
- [14] DEIJK S V. A review of the netherlands approach to the use of the foam concrete in holland and at canary wharf[J]. *Concrete*, 1991, 25(5): 49-54.
- [15] 赵文辉, 苏谦, 李婷, 等. 高速铁路基床底层泡沫轻质土填料试验研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(6): 179-186.
- ZHAO Wen-hui, SU Qian, LI Ting, et al. Experimental study on foamed concrete as a filler of the bottom layer of high speed railway subgrade[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(6): 179-186.
- [16] 陈永辉, 石刚传, 曹德洪, 等. 气泡混合轻质土置换路基控制工后沉降研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(12): 1854-1862.
- CHEN Yong-hui, SHI Gang-chuan, CAO Deng-hong, et al. Control of post-construction settlement by replacing subgrade with foamed cement banking[J]. *Chinese Journal*

