

文章编号: 1674-599X(2020)01-0020-06

## 海相区深厚软基轻质路堤变形数值分析

潘易鑫<sup>1</sup>, 罗洁<sup>2</sup>, 龚维亮<sup>1</sup>, 谢文博<sup>1</sup>, 袁平<sup>2</sup>, 王磊<sup>2</sup>

(1. 保利长大海外工程有限公司, 广东 广州 510620;

2. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘 要:**为解决海相深厚软基易发生不均匀沉降、变形大的问题,以马来西亚柔佛海峡碧桂园森林城市中的路桥工程为背景,对发泡聚苯乙烯置换路堤填土方案的可行性进行了探究。建立了置换区发泡聚苯乙烯路堤数值模型,分析了置换前(后)路基的基底应力、侧向土压力及沉降变形,明晰了发泡聚苯乙烯的最佳置换厚度。结合发泡聚苯乙烯路堤现场监测结果,验证了该数值模型的适用性。研究表明:采用发泡聚苯乙烯置换海相深厚软基区路堤可以显著减少路基上覆荷载、改善路基不均匀沉降及保证桥台与路堤的稳定;根据不同厚度发泡聚苯乙烯对海相深厚软基的置换效果和经济适用性,确定了发泡聚苯乙烯的最佳置换厚度。

**关键词:**海相深厚软基;路堤变形;发泡聚苯乙烯;ABAQUS

中图分类号:U448.22

文献标志码:A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.004

### Numerical analysis of the deformation of deep soft foundation light embankment in marine area

PAN Yi-xin<sup>1</sup>, LUO Jie<sup>2</sup>, GONG Wei-liang<sup>1</sup>, XIE Wen-bo<sup>1</sup>, YUAN Ping<sup>2</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>

(1. Baoli Overseas Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510620, China;

2. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of uneven settlement and large deformation of thick marine soft clay foundation, this paper explores the feasibility of replacing the embankment fill of the expanded polystyrene with the background of Country Garden Road and Bridge in Johor Bahru, Malaysia. The numerical model of the expanded polystyrene embankment in the replacement zone is established. The basement stress, lateral soil pressure and settlement deformation of the subgrade before and after the replacement are analyzed. The optimal replacement thickness of the expanded polystyrene material is clarified. The applicability of the numerical model is verified by the results of the on-site monitoring of the expanded polystyrene embankment. The results show that the use of the expanded polystyrene to replace the embankment in the deep soft foundation of the sea can significantly reduce the overlying load on the subgrade, improve the uneven settlement of the subgrade and ensure the stability of the abutment and embankment. The optimal replacement thickness of the expanded polystyrene can be determined by the replacement effect with different thickness of the expanded polystyrene according to the economic applicability.

**Key words:** thick marine soft clay; subgrade deformation; expanded polystyrene; ABAQUS

海相深厚软土具有含水率高、强度低、压缩性高、孔隙比高、密度低及塑性高等特性<sup>[1-3]</sup>。海相

深厚软基的基本物理特性容易导致海相深厚软土地基在施工填土过程中出现路基不均匀沉降、变形

收稿日期: 2019-07-12

基金项目: 广东省交通运输厅科技项目(科技-2017-02-010); 长沙理工大学研究生科研创新项目(CX2018SS03)

作者简介: 潘易鑫(1988-), 男, 保利长大海外工程有限公司工程师。

大等现象。

发泡聚苯乙烯(expanded polystyrene, 简称为 EPS)已被广泛应用于置换普通软基路堤填土, 处治软土地基不均匀沉降。EPS 为一种超轻型高分子聚合物, 具有轻质、高强、耐水、化学稳定性及自立性强等优点, 并且 EPS 施工工艺简单、快速, 在短工期条件下能够达到预期效果<sup>[4-6]</sup>。胡其志<sup>[7]</sup>等人采用 EPS 材料置换了桥台处路基填土, 有效降低了软基的附加压力, 减小了路基沉降, 改善了桥台的受力状态。胡庆国<sup>[8]</sup>等人建立了 EPS 填筑路堤数值模型, 分析了路堤内压力及位移分布状况, 并指出: EPS 填筑路堤可显著减少地基土上覆荷载和路基沉降。

目前, EPS 置换路堤填土的方法大多应用在普通软土地基处治上。然而, 由于海相深厚软基具有更为复杂的力学特性, EPS 在海相深厚软基的应用还有待研究, 也缺乏相应的数值分析模型。

ABAQUS 有限元软件可以分析复杂的非线性问题, 缩短研制周期, 减少试验投入, 可辅助结构设计<sup>[9-10]</sup>。因此, 作者拟采用 ABAQUS 有限元软件, 对马来西亚柔佛海峡碧桂园森林城市中的海相深厚软基处治工程进行三维模型分析, 计算 EPS 置换前、后沿路堤中线的沉降, 探讨采用 EPS 置换海相深厚软基路堤填土方案的可行性和最佳置换厚度, 分析置换前(后)路基的基底应力、侧向土压力及沉降变形等指标。

## 1 工程背景

马来西亚柔佛海峡碧桂园森林城市中的路桥工程地处海湾湿地, 地下水丰富, 场地低洼。地质条件差且复杂, 软土厚且软土基底起伏变化大。本次需要处治设计的 BR06 桥 A2 桥台后的深厚软基段长 122.6 m(其中: 加筋挡土墙段为 50 m, 无挡墙段为 64 m)。原软基处理设计路堤填土高约 8 m, 软土地基厚 12~24 m。在填筑路堤的过程中, 由于软土的流变性, 路堤的侧向变形大而导致桥台灌注桩和承台向桥台台前挤压、女儿墙出现逐渐增大的裂缝及盖梁背墙与梁之间存在挤压情况。随着施工的推进, 女儿墙裂缝有加大的趋势。每填筑一层(30 cm)碎石土, 该裂缝宽度就增加 1~2 mm。路基填土高度从 7 m 增至 8 m 时, 裂缝宽度就增加 6~7 mm。

盖梁背墙与梁挤压也产生了裂缝。由此可判断这种变形是因筏板上的填土荷载过大所致<sup>[11]</sup>。

目前, 虽然路基填土接近完成, 但加上 86 cm 厚的路面结构层, 上覆荷载仍将增加 30 kPa 左右。这将使路基沉降增加, 特别是将增加向 A2 桥台方向的水平变形, 对桥梁的安全有影响。为防止路基进一步被破坏, 该工程采用 EPS 超轻型路堤置换法作为风险控制对策。

## 2 EPS 路堤模型

建立 EPS 路堤模型的步骤为: ①确定材料的本构关系和屈服准则, 结合几何参数, 建立三维模型; ②划分网格, 设立边界条件, 施加荷载, 得到 EPS 路堤模型。

### 2.1 材料属性

在分析过程中, 采用线弹性模型模拟 EPS 和混凝土板材料的力学行为<sup>[8]</sup>。定义砂层、填土以及软土地基的本构模型为理想弹、塑性模型<sup>[12]</sup>, 即弹性特性基于广义胡克定律, 塑性特性选择适用于岩土材料并能考虑静水压力影响的 Drucker-Prager 模型<sup>[13]</sup>。材料的线弹性模型的参数见文献[14]。

#### 1) 屈服准则

海相深厚软土的线性 Drucker-Prager 模型的屈服轨迹如图 1(a)所示。屈服准则的表达式为:

$$F = t - p \tan \beta - d = 0. \quad (1)$$

式中:  $t$  为偏应力参数;  $p$  为等效围压应力;  $\beta$  为线性屈服轨迹在  $p$ - $t$  应力平面上的倾角, 通常指材料的摩擦角;  $d$  为屈服面在  $p$ - $t$  应力空间  $t$  轴上的截距, 通常为材料的黏聚力。

偏应力参数的定义为:

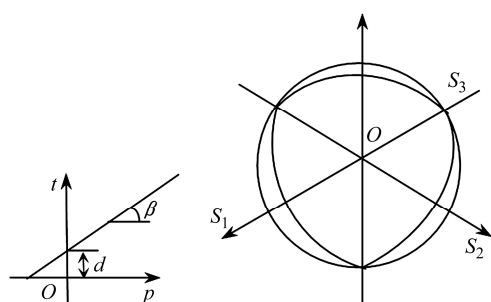
$$t = \frac{q}{2} \left[ 1 + \frac{1}{k} - \left( 1 - \frac{1}{k} \right) \left( \frac{r}{q} \right)^3 \right]. \quad (2)$$

式中:  $q$  为等效应力;  $k$  为三轴拉伸强度与三轴压缩强度之比, 要求  $0.778 \leq k \leq 1.0$ ;  $r$  为第三应力不变量。

不同的  $t$  对应着  $\pi$  平面上拉伸和压缩的不同应力。 $\pi$  平面上线性模型典型的屈服面如图 1(b)所示。 $S_1, S_2$  和  $S_3$  均为主偏量应力。

#### 2) 流动规则

在线性 Drucker-Prager 模型中, 海相深厚软土



(a) 子午面上的屈服轨迹; (b)  $\pi$  平面的屈服面

图 1 线性 Drucker-Prager 模型的屈服面

Fig. 1 Yield surface of a linear Drucker-Prager model

的塑性流动势的表达式为:

$$G = t - p \tan \psi. \quad (3)$$

式中:  $\psi$  为  $p$ - $t$  平面上的剪胀角, 如图 2 所示。

已有学者对比分析了国内、外海相深厚软土材料性质, 并给出了相应的计算参数, 线性 Drucker-Prager 模型相关参数见文献[15]。

假定海相深厚软土的流动规则为非相关联流动法则, 则塑性应变的方向与塑性流动势函数  $G$  正交, 有:

$$d\epsilon^{pl} = \frac{d\bar{\epsilon}^{pl}}{c} \frac{\partial G}{\partial \sigma}. \quad (4)$$

式中:  $c$  为与硬化参数相关的常量;  $\epsilon^{pl}$  为塑性应变;  $\sigma$  为应力;  $\bar{\epsilon}^{pl}$  为等效塑性应变。

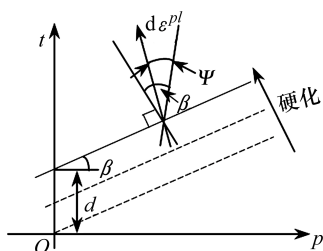


图 2 线性模型在  $p$ - $t$  平面上的强化和流动的几何描述

Fig. 2 Geometrical description of the enhancement and the flow of a linear model on the  $p$ - $t$  plane

## 2.2 网格划分

EPS 路基的数值模型具有对称性, 取路基中心线对称的一半建立了模型。该模型横向宽度为 50 m, 沿桥台纵向路基长为 120 m, 竖向土体深度为 30 m。填土以上的路堤结构分为加筋挡土墙和无挡土墙 2 种模型部件。加筋挡土墙段纵向长 50 m, 无挡土墙段纵向长 70 m, 分别如图 3、4 所示。该模型的路堤结构设计从上至下的顺序为 0.86 m 路面层、0.15 m 现浇钢筋混凝土板、EPS 置换层及 0.1 m 砂

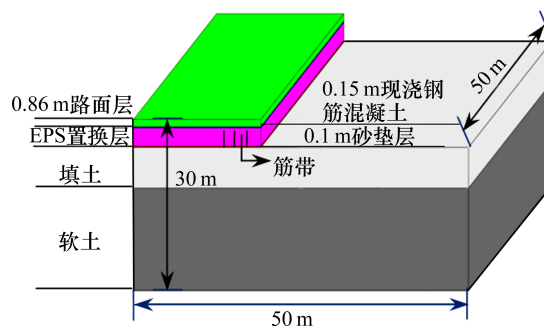


图 3 加筋挡土墙段示意

Fig. 3 Schematic diagram of the reinforced retaining wall segment

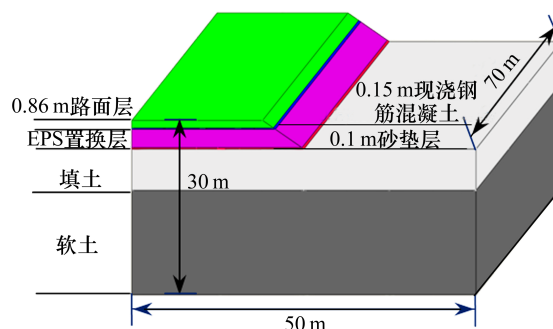


图 4 无挡土墙段示意

Fig. 4 Schematic diagram of no retaining wall section

垫层。

采用 C3D8R 单元, 对模型进行了网格划分。2 种部件间采用节点耦合约束, 被视为一个整体。该模型的网格划分如图 5 所示。

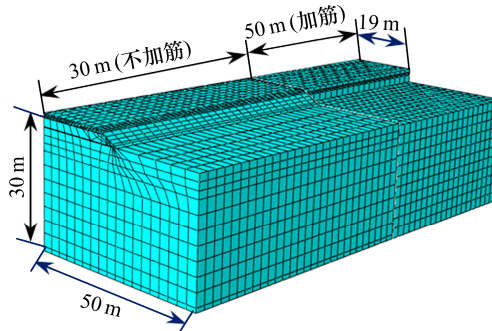


图 5 模型网格划分

Fig. 5 Model meshing diagram

## 2.3 边界条件与施加荷载

该模型取横向 50 m、纵向 120 m 范围内的土体作为研究对象, 假定底面与侧面不发生移动, 设置边界条件为模型底部边界位移全约束、侧面边界为水平方向位移约束来模拟整体地基的受力。路面上部车辆荷载假定为均布荷载施加于路基表面, 并结合软基固结进行分析。

车辆荷载为:

$$P=nW/(BL)。(5)$$

式中:  $n$  为设计车道数;  $W$  为每辆车的重力, 对汽车—超 20 级,  $W=550$  kN;  $L$  为车辆纵向长度;  $B$  为横向分布宽度,  $B=n \cdot e+(n-1) \cdot f+h$  (其中:  $e$  为两车轮中间距,  $f$  为并排的车辆相邻车轮中间距;  $h$  为轮船着地宽度 0.6 m)。

将  $n=4$ ,  $W=550$  kN,  $L=13$  mm,  $e=1.8$  m,  $f=1.3$  m,  $h=0.6$  m 代入式(5)中, 得:  $P=14.64$  kPa。

对于海相深厚软土固结, 通过试验来获得计算参数(初始孔隙比为 1.06、渗透系数为  $2.11 \times 10^{-11}$  m/s、压缩指数为 0.16 和固结系数为  $1.12 \times 10^{-3}$  m/s), 再进行固结分析<sup>[16]</sup>。

### 3 EPS 路堤数值模型结果分析

本研究建立了全填土路基模型(未使用 EPS 置换)和不同厚度  $H$  (1.875, 2.5, 3.125 和 3.75 m) 的 EPS 置换路基模型, 其中: 每层 EPS 材料的厚度为 0.625 m。通过建立不同厚度的路基模型, 探讨 EPS 对软土地基的改善作用, 并确定最佳置换厚度。

#### 3.1 EPS 路堤基底应力

将全填土路基模型和不同厚度的 EPS 置换填土模型的有限元分析结果进行了对比。在不同厚度 EPS 材料置换下, 路基受车荷载(均布荷载为 14.64 kPa)作用时, A2 桥台后路堤的基底应力分布如图 6 所示。

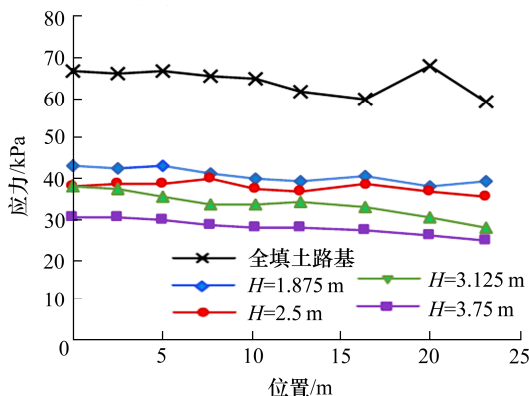
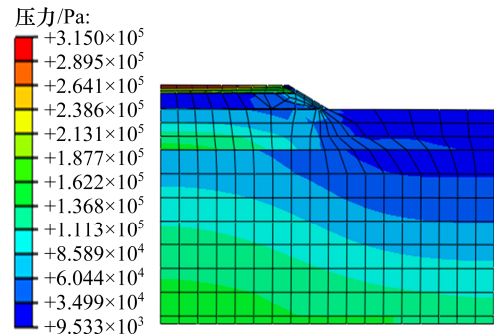


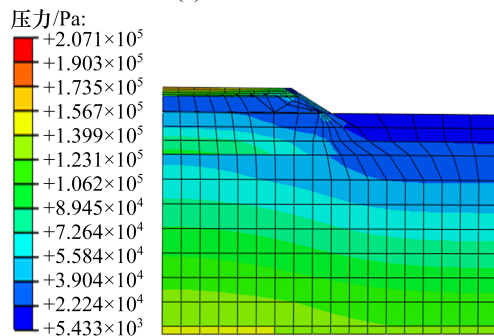
图 6 不同厚度 EPS 路堤的基底应力分布

Fig. 6 Stress distribution on the bottom surface of EPS embankment with different thickness

以 1.875 m EPS 置换填土模型和全填土路基模型的无挡土墙段横断面应力云图为例, 置换 EPS 前、后路堤横断面应力云图如图 7 所示。



(a) 未置换路堤



(b) EPS 置换路堤

图 7 置换 EPS 前、后路堤横断面应力云图(单位: Pa)

Fig. 7 Stress cloud diagram of cross section of embankment before and after EPS replacement (unit: Pa)

从图 7 中可以看出, 不同厚度 EPS 置换路堤基床表面的应力与全填土路基的路堤基床表面的应力相比, 其数值降低得较多, 如: 1.875 m EPS 置换路堤的应力较全填土路基的路堤应力在数值上降低了约 35%。表明: 置换路堤填土可以较大地减小上覆荷载, 改善路基受力情况。

#### 3.2 EPS 路堤桥台台背竖向土压力

不同厚度 EPS 路堤和全填土路基数值模型中 A2 桥台台背处竖向土压力沿深度分布情况如图 8

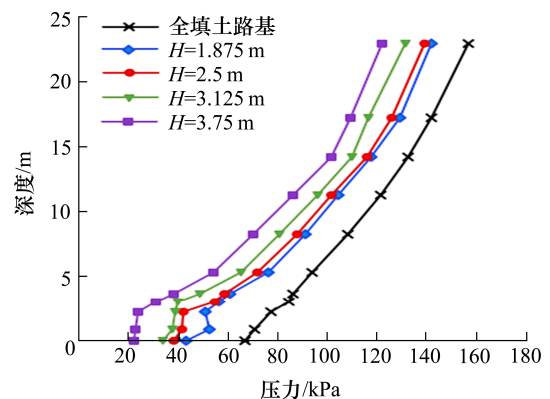


图 8 桥台台背的竖向土压力分布

Fig. 8 Vertical earth pressure distribution map of the abutment back

所示。竖向土压力为 A2 桥台的台背处在不同深度处的上层土体对该深度的土压力,可由模型中该层土体单元各节点应力结果表示。

从图 8 中可以看出,台背 EPS 填筑段对桥台的竖向土压力较小,而填土段对桥台的竖向土压力的增量大、数值大。其原因是:EPS 材料的容重很小,约为路堤填土容重的 1%~2%。因此, EPS 置换路堤可以减少对桥台的竖向土压力,有利于保证桥台与路堤的稳定性。

### 3.3 EPS 路堤沉降变形

运用 ABAQUS 有限元软件,建立了全填土路基与不同厚度 EPS 路基模型,分析了不同置换厚度对海相深厚软基的改善作用。得出车辆荷载作用下各模型的分析结果如图 9 所示。

随着远离 A2 桥台,不同置换厚度的 EPS 路基的沉降逐渐减小。这是由于 A2 桥台所处地基的软土厚度不均所致。其中,全填土路基模型的沉降比 EPS 置换路基模型的更大,并且其变形不均匀。

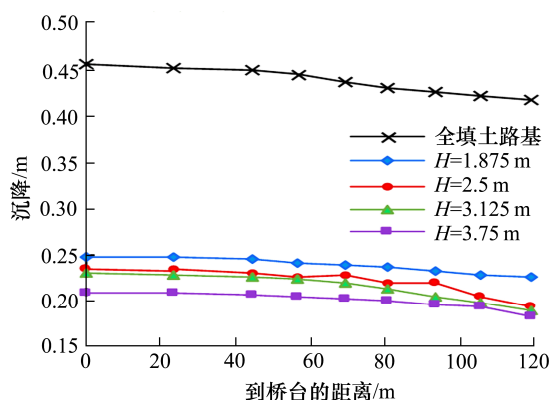


图 9 不同 EPS 置换厚度路堤中心线沉降

Fig. 9 The settlement of the center line of different EPS replacement thickness embankments

从图 9 中可以看出,不同置换厚度的 EPS 对海相深厚软基沉降和变形都有一定程度的改善作用,并且随着 EPS 材料置换厚度的增加,其对路基沉降的改善效果越来越明显。当置换厚度为 3.75 m 时, EPS 对路基沉降的改善效果最为显著,路堤沉降量降低了约 50%。

在桥台 50 m 内的加筋挡土墙段, 2.5 mEPS 与 3.125 mEPS 的置换效果相近。考虑到 EPS 超轻质材料的价格较为昂贵<sup>[4]</sup>,取 2.5 mEPS 置换挡土墙段路基填土为宜。该路堤软土厚度不均匀会导致路基

沉降沿纵向逐渐减小,即无挡土墙段沉降小于加筋挡土墙段沉降。在距桥台 50~120 m 范围内的无挡土墙段,1.875 mEPS 置换效果与挡土墙段 2.5 mEPS 置换效果一致,其沉降约为 0.24 m,且基地应力与竖向土压力相差不大。考虑到整个路堤 EPS 置换后整体沉降变形需保持一致和材料造价,在无挡土墙段采用 1.875 mEPS 置换路堤填土。因此,本研究采用在加筋挡土墙段与无挡土墙段分别设置 2.5 mEPS 与 1.875 mEPS 置换路堤填土,该方案可降低 40%的路堤沉降。

目前,该公路已投入使用。结合 EPS 路堤现场检测结果,以无挡土墙段 EPS 路堤模型为例,将置换 EPS 的路堤横向变形与现场实测数据进行对比<sup>[11]</sup>,如图 10 所示。EPS 路堤模型横向变形与实测变形拟合较好,变形的最大差值不超过 6 mm。因此,所建立的 EPS 路堤数值模型能较好地模拟海相深厚软基变形问题,验证了该置换方案的合理性。

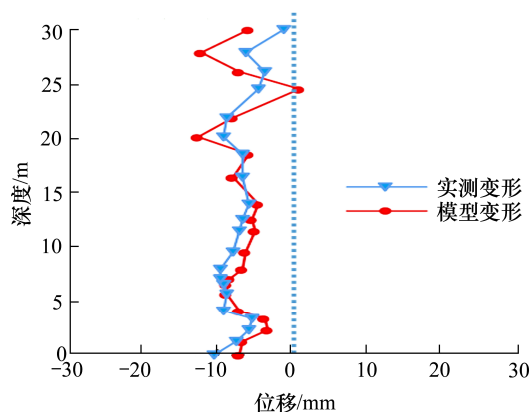


图 10 软基横向变形对比

Fig. 10 Comparison chart for soft base lateral deformation

## 4 结论

以马来西亚柔佛海峡碧桂园森林城市的路桥工程为背景,探究了 EPS 材料置换路堤填土方案的可行性,建立了置换区路基 ABAQUS 数值模型,分析了置换前(后)路基的基底应力、侧向土压力及沉降变形。并结合 EPS 路堤现场监测结果,验证了 EPS 路堤数值模型的适用性。得到的结论为:

1) 对于该工程的海相深厚软基,在挡土墙段与无挡土墙段设置的最优 EPS 置换厚度分别为 2.5 m 与 1.875 m。采用该置换方案能降低 40%的路堤沉降,使置换后路堤的变形保持一致,且工程造价合理。

2) EPS 置换路堤填土可有效缓解桥台台背的土压力。在 EPS 置换层,桥台台背的土压力随深度增加的变化较小,有效地减小了作用在桥台台背的土压力,提高了路基的稳定性。

3) 随着 EPS 置换厚度的增加,路堤沉降逐渐减小。EPS 置换路堤填土可有效地减小原路堤上覆荷载,改善路基受力情况。随着 EPS 厚度的增加,其基底应力持续降低。

4) 结合 EPS 路堤现场监测结果,验证了 EPS 路堤模型的适用性,该方法给出了 EPS 的最佳置换厚度,可为类似工程的施工提供参考。

### 参考文献(References):

- [1] 邓永锋,吴燕开,刘松玉,等.连云港浅层海相软土沉积环境及物理力学性质研究[J].工程地质学报,2005,13(1): 29-33.(DENG Yong-feng,WU Yan-kai,LIU Song-yu,et al. Sediment environment of shallow marine clays deposited in Lianyungang area and their physical and mechanical properties[J].Journal of Engineering Geology,2005,13(1): 29-33. (in Chinese))
- [2] 贺瑞霞,陈健,刘景儒,等.三亚海域全新世海相软土工程地质特性[J].华中科技大学学报:城市科学版,2010, 27(4):42-47.(HE Rui-xia,CHEN Jian,LIU Jing-ru,et al. Engineering and geological characteristics of Sanya holocene soft marine soil[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology:Journal of Civil Engineering and Management, 2010, 27(4): 42-47. (in Chinese))
- [3] 许健.软土地基环境下的公路工程施工处理[J].公路工程,2017,42(5):197-201.(XU Jian.Construction treatment of highway engineering in soft soil foundation[J]. Highway Engineering,2017,42(5):197-201.(in Chinese))
- [4] 杜骋,杨军.聚苯乙烯泡沫(EPS)的特性及应用分析[J].东南大学学报:自然科学版,2001,31(3):138-142.(DU Cheng,YANG Jun.Expanded polystyrene (EPS) geofoam: An analysis to characteristics and applications[J].Journal of Southeast University:Natural Science Edition,2001, 31(3):138-142.(in Chinese))
- [5] 钱茹莹,徐超.EPS 轻质填料路堤设计方法初探[J].中外公路,2008,28(1): 37-40. (QIAN Ru-ying, XU Chao. Preliminary study on design method of EPS lightweight filler embankment[J].Journal of China & Foreign Highway,2008,28(1):37-40.(in Chinese))
- [6] Mohajersni A,Ashdown M.Expanded polystyrene geofoam in pavement construction[J].Construction and Building Materials,2017(157):438-448.
- [7] 胡其志,袁海峰,徐学文.EPS 在桥台台背软土路基处理中的应用研究[J].湖北工业大学学报,2013,28(2): 1-4.(HU Qi-zhi,YUAN Hai-feng,XU Xue-wen.On application of EPS to the treatment of the soft soil foundation at bridge abutment back[J].Journal of Hubei University of Technology,2013,28(2):1-4.(in Chinese))
- [8] 胡庆国,阳军生,黄生文.采用泡沫聚苯乙烯修筑的轻型桥台路堤特性分析[J].中南大学学报:自然科学版,2006(2): 408-413. (HU Qing-guo, YANG Jun-sheng, HUANG Sheng-wen.Analysis of performance of bridge approach embankment constructed by expanded polystyrene[J].Journal of Central South University: Science and Technology,2006(2):408-413.(in Chinese))
- [9] 费康,张建伟.ABAQUS 在岩土工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2009.(FEI Kang,ZHANG Jian-wei. Application of ABAQUS in geotechnical engineering [M]. Beijing:China Water & Power Press,2009.(in Chinese))
- [10] 杜聪.基于 ABAQUS 强度折减法的边坡稳定性分析[J].交通科学与工程,2018, 34(2): 31-34, 90. (DU Cong. Analysis of slope stability by strength reduction FEM based on ABAQUS[J].Journal of Transport Science and Engineering,2018,34(2):31-34,90.(in Chinese))
- [11] 邱伟,易善昌,龚维亮,等.基于 EPS 的海相深厚软基区路基不均匀沉降处治研究[J].中外公路,2018,38(4): 19-23.(QIU Wei,YI Shan-chang,GONG Wei-liang. Research on differential settlement in thick marine soft clay foundation based on expanded polystyrene[J].Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(4): 19-23. (in Chinese))
- [12] 王金昌,陈页开.ABAQUS 在土木工程中的应用[M].杭州:浙江大学出版社,2006.(WANG Jin-chang,CHEN Ye-kai.Application of ABAQUS in geotechnical engineering[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2009.(in Chinese))
- [13] 闫富有,常健,刘忠玉.黏弹-双曲线 Drucker-Prager 塑性模型应力更新隐式算法[J].岩土力学,2017,38(6): 1797-1804. (YAN Fu-you, CHANG Jian, LIU Zhong-yu. A return mapping implicit algorithm for coupled viscoelastic and hyperbolic Drucker-Prager plastic modeling[J].Rock and Soil Mechanics,2017,38(6): 1797-1804.(in Chinese))
- [14] 廖公云,黄晓明.ABAQUS 有限元软件在道路工程中的应用[M].南京:东南大学出版社,2008.(LIAO Gong-yun, HUANG Xiao-ming.Application of ABAQUS finite element software in road engineering[M].Nanjing: Southeast University Press, 2008.(in Chinese))
- [15] 刘用海.宁波软土工程特性及其本构模型应用研究[D].杭州:浙江大学,2008. (LIU Yong-hai. Study on engineering characteristics and constitutive model of Ningbo soft soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.(in Chinese))
- [16] 宋晶,叶冠林,徐永福,等.考虑固结历史的结构性软土路基沉降数值模拟[J].岩土力学,2018,39(3):1037-1046. (SONG Jing,YE Guan-lin,XU Yong-fu,et al.Numerical simulation of long-term settlement of structural soft soil subgrade considering consolidation history[J].Rock and Soil Mechanics,2018,39(3):1037-1046.(in Chinese))