

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20220409007

文章编号:1672-9331(2023)01-0058-07

引用格式:田野.以顶面回弹模量为目标的铁路货场地基换填方法研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(1):58-64.

Citation:TIAN Ye.Study on the method for ground replacement in railway freight yard aiming at resilient modulus of top surface[J].J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci),2023,20(1):58-64.

以顶面回弹模量为目标的铁路货场地基换填方法研究

田野

(中铁十九局集团广州工程有限公司,广东 广州 511466)

摘要:【目的】提升软弱地基刚度,科学确定处置材料和厚度。【方法】依托广西百色东站货场堆场地基处置项目,基于弹性半空间和弹性双层体系理论,提出以顶面当量回弹模量为目标的刚度提升方法,对依托工程原地基处置方案进行评价和优化,并利用现场回弹模量测试结果验证刚度提升方法的有效性和合理性,同时对对比优化方案和原方案的工程经济性。【结果】原地基处置方案地基顶面回弹模量无法满足设计要求,将原方案1.0 m厚的石灰掺量为30%的石灰改良土变更为0.8 m厚,并在其上部加铺0.2 m厚的级配碎石,可使地基顶面当量回弹模量由44.0 MPa提升至78.0 MPa,实测地基顶面回弹模量平均值约为79.0 MPa,优化方案在降低工程造价方面具有显著优势。【结论】研究成果可为地基处置和铺面结构设计提供参考。

关键词:软弱地基;回弹模量;刚度提升;设计理论;地基换填

中图分类号:TU47

文献标志码:A

0 引言

近年来,重大基础设施建设因不可避免地涉及地质结构特征复杂的地区,故对地基抗变形能力的要求越来越高,地基处置往往呈现出深度较大、面积较广等特点^[1]。在雨水入渗作用下,土体发生软化,刚度急剧衰减,地基出现不可恢复的不均匀变形,其上部铺面结构因底部承受较大的弯拉应力继而发生破坏。地基回弹模量用来表征地基在弹性变形阶段抵抗变形的能力,是铺面结构设计中的关键设计指标,提高地基整体回弹模量并保持长期稳定对其上部铺面结构的安全具有积极作用。因此,本研究提出便于工程应用的地基刚度提升方法以保证地基的长期稳定性,该方法对地基处置和铺面结构设计具有非常重要的工程意义。

当前,关于地基处置方法国内外开展了大量的研究,主要包括换填法、地基土改良法、强夯法、排水固结法和复合地基法等。杨和平等^[2]对砂土地基采用无填料振冲与低能级强夯相结合的处置措施,并对地基处置前后的静力触探实测数据进行对比分析,采用Seed简化判别法及按照《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)中的相关要求对地基进行了液化评估,发现原地基受地震作用时必液化,而经处理后的地基抗液化性能大幅提升且能满足工程设计要求。张秀勇等^[3]通过现场监测和数值模拟对碎石桩处理软土地基的效果进行了评价,发现利用碎石桩作为竖向排水通道,碎石垫层作为水平向排水通道可以显著改善深厚软土地基的承载性能。李金奎等^[4]和刘文武^[5]分别通过现场试验和数值模拟对挤密桩处置湿陷性黄土地基的效果进行了评价,发现桩心距为2.5倍桩径时可有效提升地基承载力并消除回填黄土的湿陷

收稿日期:2022-04-09;修回日期:2022-05-16;接受日期:2022-05-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51108049);中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(K2020G036)

通信作者:田野(1985—)(ORCID:0000-0003-3660-1994),男,工程师,主要从事土木工程方面的研究。

E-mail:59826909@qq.com

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

性,且挤密桩直径为0.4 m时地基处置方案较为经济合理。韩文君等^[6]通过自主研发的室内模型试验装置,对比分析了劈裂真空法与常规真空预压法对软土的加固效果,发现经劈裂真空法处置的软土具有较快的超静孔压消散速率和沉降速率,且工后沉降量更小。地基土改良法是通过改善土质的级配和结构来提高其强度和刚度的,因其操作方便得到广泛应用。目前,改良法主要包括以下三类:掺入碎石、纤维等以提高土体强度和抗变形能力的物理处置方法^[7-8];掺入水泥、石灰和粉煤灰等产生离子交换的化学改良方法^[9-11];掺入生物酶以吸收土中水分的生物改良方法^[12-13]。改良法工程造价偏高且对周围环境造成不良影响,同时改性材料的掺量具有经验性,易造成设计的不安全或偏于保守。

本研究依托广西百色站货场堆场地基处置项目,基于弹性半空间和弹性双层体系理论,推导了弹性半空间和弹性双层体系表面位移计算公式,在此基础上根据位移等效原则,提出了以顶面当量回弹模量为目标的刚度提升方法,通过该方法对依托工程地基的处置材料和厚度进行了科学的确定,并对比分析了优化方案和原方案的工程经济性。研究成果可为地基处置和铺面结构设计提供参考。

1 依托工程概况及水文地质条件

1.1 依托工程概况

百色站原名六塘站,位于广西壮族自治区百色市右江区六塘镇,隶属中国铁路南宁局集团有限公司。南昆客运专线引入百色地区后将原百色站货场移至本站,定位为百色地区货运站,为南昆铁路在百色地区的重要货运枢纽。2019年1月—10月,百色站货场内货物到发量为150万t,随着运量的增长,截至2021年8月到发量已增长为220万t,现有的百色站货场集装箱及散堆装

堆场面积不足,已无法满足货物运输的需要。另外,位于H2线两侧的龙门吊走行线发生沉降,严重影响货物装卸作业安全。货场范围内部分道路及散货堆场硬化面破损,既有的排水槽盖板大部分破损,排水槽内淤塞严重。因此,需根据货场实际情况,在原有地基条件下,对货场进行改造。

1.2 水文地质条件

改造前对场地的水文地质条件进行了详细勘察。勘察结果表明:测区范围内地表水主要为鱼塘水和沟水,水量微弱,季节性变化大。地下水以孔隙水及基岩裂隙水为主。孔隙水赋存于第四系土层之中,该土层上部为黏土或粉质黏土,结构密实,透水性弱,地表水入渗条件较差,其含水量处于贫乏至中等范围,具承压性。基岩裂隙水赋存于泥岩、砂岩裂隙之中,泥岩为相对隔水层,砂岩仅以夹层出现,其储水能力很弱,且地下水不发育,水量极为贫乏,一般具承压性。测区范围内岩土层自上而下分别为人工填土层、粉质黏土层和泥岩层,如图1所示。

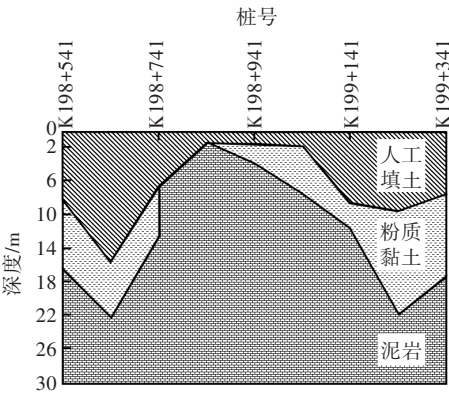


图1 百色站地质剖面图
Fig. 1 Geological section of Baise East Station

经现场勘察,泥岩层有部分膨胀岩分布,其自由膨胀率具有离散和不均质特征,局部具有强膨胀性,膨胀力为181.0~794.0 kPa不等,故本段按中至强膨胀岩考虑。此外,人工填土层也存在部分膨胀性黏土,层厚在1.4~14.0 m范围内,自由膨胀率大于40%,其物理力学指标见表1。

表1 百色站人工填土物理力学指标
Table 1 Physical and mechanical indexes of ground soil in Baise East Station

天然密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	天然含水率 $w/\%$	天然孔隙比 e	液限 $w_L/\%$	塑性指数 I_p	压缩系数 $a_{0.1-0.2}/\text{MPa}^{-1}$	压缩模量 E_s/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	自由膨胀率 $f_s/\%$
1.95	21.67	0.63	38.03	18.82	0.07	6.59	53.39	13.36	46.00

2 地基刚度提升方法

2.1 计算理论

地基回弹模量表征地基在弹性变形阶段抵抗变形的能力,是铺面结构设计中的关键设计指标。由于铁路货场的下卧地基强度、刚度和抗变形能力差,不能满足上部结构的设计要求,因此,在软弱地基顶面进行刚度提升设计以有效提高地基的整体承载能力和改善其长期稳定性就显得尤为重要。为提升原地基的整体刚度,可在原地基顶面填筑一层具有一定厚度的回弹模量较高且水稳性良好的填料(如砾石土、碎石土)并进行压实,使处置后的地基顶面当量回弹模量满足上部结构的设计要求。

工程中常用承载板法测定土基的回弹模量,在刚性承载板作用下,板底位移处处相等,地基表面受到的荷载可视作圆板刚体轴对称垂直荷载,荷载类型可采用杰拉德荷载模型进行描述,如式(1)所示。

$$\sigma_z = -q(r) = \begin{cases} -\frac{1}{2}q\left(1 - \frac{r^2}{\delta^2}\right)^n, & 0 \leq r < \delta \\ 0, & \delta \leq r < \infty \end{cases} \quad (1)$$

式中: q 为集中力换算的顶面均布荷载,MPa; δ 为承载板半径,m; r 为距承载板圆心的径向距离,m; n 为计算参数,根据参考文献[14],取 $n=-0.65$ 。

将加铺了刚度提升层的地基视为弹性双层体系模型,如图2(a)所示。设刚度提升层的回弹模量为 E_1 ,厚度为 h ,原地基顶面回弹模量为 E_2 。

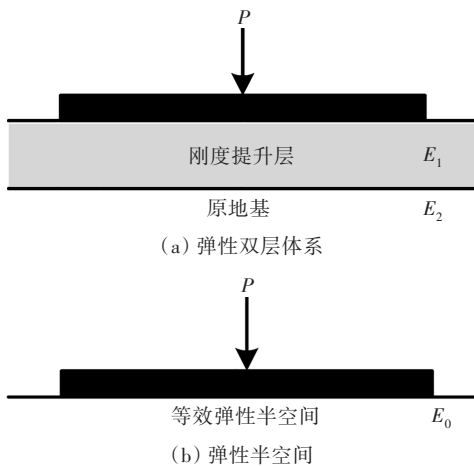


图2 计算模型

Fig. 2 Computing modeling

经压实后,刚度提升层与下卧层紧密连接,层间可假设为完全连续且结合处位移为零,基于弹性双层体系理论,推导出刚性承载板垂直荷载作用下的弹性双层体系表面位移表达式,如式(2)~(3)所示。

$$w_{di} = -\frac{1 + \mu_i}{E_i} q \int_0^\infty J_0\left(\frac{r}{\delta} x\right) \frac{2^m \Gamma(m+2)}{x^{m+1}} J_{m+1}(x) \theta_i dx \quad (2)$$

$$\theta_i = \left[A_i \left(2 - 4\mu_i + \frac{z}{\delta} x \right) B_i \right] e^{-\frac{z}{\delta} x} + \left[C_i - \left(2 - 4\mu_i - \frac{z}{\delta} x \right) D_i \right] e^{\frac{z}{\delta} x} \quad (3)$$

式中: w_{di} 为各层竖向位移,mm; E_i 为各层回弹模量,MPa; μ_i 为各层泊松比; q 为集中力换算的均布荷载,MPa; $J_n(x)$ 为 n 阶贝塞尔函数; x 为积分变量; θ_i 、 A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i 为计算参数,可根据层间结合条件与荷载边界条件确定; z 为距表面的深度,m; Γ 为伽马函数; m 为阶数; i 为层数,本文 $i=1,2$; r 、 δ 符号同式(1)。

另一方面,将加铺了刚度提升层的地基视为弹性半空间模型,如图2(b)所示,并设其顶面当量回弹模量为 E_0 。基于弹性半空间理论并通过贝塞尔函数和汉克积分变换,推导出刚性承载板垂直荷载作用下的弹性半空间体表面位移表达式,如式(4)所示。

$$w_e = \frac{2(1 - \mu^2)}{E} \int_0^\infty J_0(\xi R) \bar{p}(\xi) d\xi \quad (4)$$

式中: w_e 为竖向位移,mm; E 为弹性半空间体回弹模量,MPa; μ 为泊松比; $J_0(\xi R)$ 为0阶贝塞尔函数; ξ 为级数各项; R 为权重因子; $\bar{p}(\xi)$ 为荷载的汉克尔积分变换式,采用刚性承载板时, $\bar{p}(\xi) = pR \sin(\xi R)/(2\xi)$,其中, p 为承载块上的荷载强度,kPa。

基于位移等效原则,令 $w_d = w_e$,其中 $w_d = w_{d1} + w_{d2}$,即可在已知刚度提升层厚度 h 的基础上计算刚度提升层回弹模量 E_1 ,以此为依据选择刚度提升层材料;或在已知刚度提升层回弹模量 E_1 的基础上,确定刚度提升层厚度 h 。通过在原软弱地基顶面进行刚性承载板测试试验获得其顶面当量回弹模量后,根据地基承载能力的设计要求,使用该方法即可快速确定刚度提升层结构材料的回弹模量与相应厚度的量化结果,从而有效指导建设单

位合理选择刚度提升层材料及相应的压实工艺;另一方面,质量监督部门或检测单位可以通过现场刚性承载板进行原位测试,并结合该方法快速确定现场刚度提升层的模量,以此评价刚度提升层的压实施工质量。

为便于该方法的推广应用,本文计算了地基刚度提升设计诺模图,如图3所示。图3为原地基回弹模量分别为20、30和40 MPa时,在其上部铺设一定厚度的刚度提升层后,加铺后的地基顶面当量回弹模量随刚度提升层厚度的变化关系。

该刚度提升设计诺模图的使用说明如下:若已知原地基回弹模量 $E_2=30$ MPa、刚度提升层厚度 $h=0.5$ m、刚度提升层顶面当量回弹模量设计值 $E_0=80$ MPa,现要确定刚度提升层的材料。在图中分别沿横坐标0.5 m处,左侧纵坐标80 MPa处作垂线,与 $E_2=30$ MPa的曲线簇交于一点,该交点处于 $E_1=120$ MPa的曲线之上。因此,在当前工况条件下,刚度提升层材料的回弹模量应不小于120 MPa,据此选择合适的刚度提升层材料。

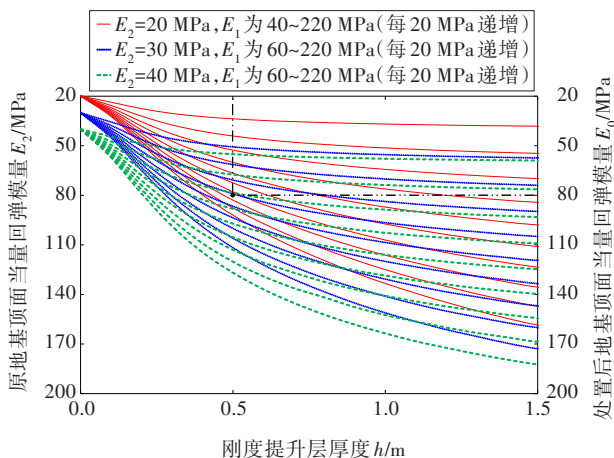


图3 地基刚度提升设计诺模图

Fig. 3 Ground stiffness upgrading design Nomo diagram

2.2 计算参数的确定

由上述可知,原地基回弹模量 E_2 、刚度提升层回弹模量 E_1 和厚度 h 、处置后地基顶面当量回弹模量 E_0 是关键的计算参数。其中, h 和 E_0 是设计参数, E_2 和 E_1 则可参照《铁路工程土工试验规程》(TB10102—2010)中的杠杆压力仪法,通过对试件进行加载、卸载试验进一步测定。

开展试验进行测试时,试件的回弹模量为3次平行测定的回弹模量的平均值,当回弹模量的试

验结果与均值之差大于5%时,则重新进行试验。试件的回弹模量按式(5)计算。

$$E_e = \frac{\pi p D}{4l} (1 - \mu^2) \quad (5)$$

式中: E_e 为回弹模量,kPa; p 为承载块上的荷载强度,kPa; D 为承载块的直径,mm; l 为该级荷载的回弹变形,mm; μ 为细粒土的泊松比,一般取0.35。

3 刚度提升法的应用及效果评价

3.1 依托工程概况

该工程中集装箱正面吊堆场的结构层设计原方案拟采用“三七灰土”换填的方法对地基进行处置,处置深度为1.00 m,该方案结构设计如图4所示。根据《港口道路与堆场设计规范》(JTS 168)中的相关要求,地基顶面回弹模量设计值为60 MPa。

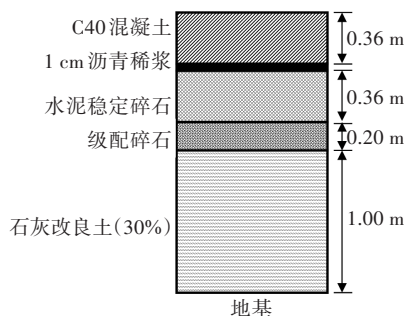


图4 原方案结构设计图

Fig. 4 Original scheme structure design drawing

3.2 原方案评价

按照本文2.2中的计算参数及其测定方法,对百色东站铁路货场堆场地基土及不同掺量的石灰改良土进行回弹模量测定。根据工程实际,选择98击的重型击实方法,分别制备地基土和不同掺量的石灰改良土试件。其中,地基土的最佳含水率通过湿法重型击实试验确定,干密度则为最大干密度的93%;石灰改良土是由消石灰与最佳含水率状态下的地基土拌合而成的,铁路上常用的“三七灰土”掺灰比通常为5%~10%不等,本试验消石灰与地基土质量之比设为5%、10%、20%和30%四种,制备完毕后的改良土试件用塑料袋密封,并放入常温养护室养护7 d。原地基土及石灰改良土回弹模量测试结果见表2。

表2 原地基土及石灰改良土回弹模量
Table 2 Resilient modulus of original foundation soil and lime-improved soil

材料	回弹模量 E_1/MPa
原地基土	10.1
石灰改良土(5%)	22.5
石灰改良土(10%)	40.5
石灰改良土(20%)	52.5
石灰改良土(30%)	60.4

由弹性双层体系理论,可以计算得出在原地基上换填 1.00 m 厚度的石灰改良土后,石灰改良土顶面的位移;根据位移等效原理,由弹性半空间理论可以反算得到双层结构顶面的当量弹性模量 E_0 。图 5 所示为换填石灰改良土后的地基顶面当量回弹模量 E_0 随石灰改良土回弹模量 E_1 的变化关系。

由图 5 可以看出,随石灰改良土回弹模量的增大,换填后的地基顶面当量回弹模量亦在增大。石灰改良土的石灰掺量分别为 5%、10%、20% 和 30% 时,换填后的地基顶面当量回弹模量约为 19.0、32.0、38.0 和 44.0 MPa。

由此可知,即便在原地基换填 1.00 m 厚石灰掺量为 30% 的石灰改良土,其地基顶面当量回弹

模量仍未达到不小于 60 MPa 的设计要求,故需对原结构设计方案进一步优化。

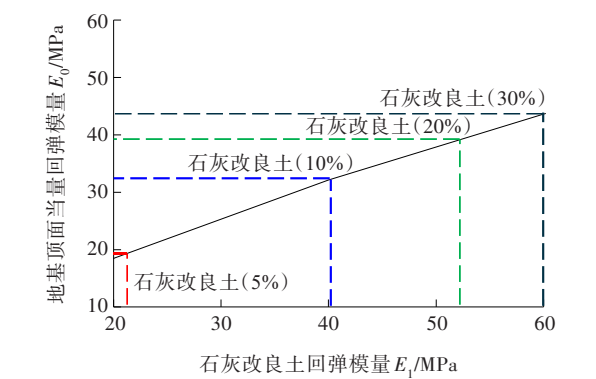


图5 地基顶面当量回弹模量随石灰改良土回弹模量的变化关系
Fig. 5 Variation of the equivalent resilient modulus at the top surface with resilient modulus of lime-improved soil

3.3 应用及效果评价

地基结构优化设计总体思路为:减少石灰掺量为 30% 的石灰改良土的填筑厚度,在其上部加铺一定厚度的级配碎石以提升地基顶面当量回弹模量,使之满足设计要求。按照刚度提升法计算,优化设计方案见表 3。

表3 地基结构优化设计方案
Table 3 The optimization design schemes of ground structure

设计组合	原地基顶面 回弹模量 E_2/MPa	刚度 提升区	刚度提 升材料	材料回弹模量 E_1/MPa	设计厚度 h/m	地基顶面综合回弹 模量 E_0/MPa
1	10.1	第1层	石灰改良土(30%)	60.4	1.00	44.0
2		第1层	石灰改良土(30%)	60.4	0.90	42.1
		第2层	级配碎石	220.0	0.10	60.0
3		第1层	石灰改良土(30%)	60.4	0.80	40.4
		第2层	级配碎石	220.0	0.20	78.0
4		第1层	石灰改良土(30%)	60.4	0.70	38.4
		第2层	级配碎石	220.0	0.30	95.0
5		第1层	石灰改良土(30%)	60.4	0.60	36.1
		第2层	级配碎石	220.0	0.40	107.0

由表 3 可知,当石灰掺量为 30% 的石灰改良土厚度由 1.00 m 减少为 0.60 m 时,地基顶面综合回弹模量由 44.0 MPa 减小至 36.1 MPa,然而加铺 0.40 m 级配碎石后地基顶面综合回弹模量提高至 107.0 MPa。可见,减小石灰改良土填筑深度并加铺级配碎石,将显著提升地基顶面的综合回弹模量。根据现场实际情况和设计要求,选择 0.80 m 厚的石灰掺量为 30% 的石灰改良土+0.20 m 厚的级配碎石作为优化方案。

按照优化后的设计方案,场地地基处置工程于 2021 年 8 月开始,至 2021 年 9 月结束。通过现场承载板试验对处置后的地基顶面回弹模量进行了测试,共计 12 个测点,测试结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出,区域内地基顶面回弹模量平均值约为 79.0 MPa,可满足上部铺面结构对地基顶面回弹模量的要求。这表明本研究提出的地基刚度提升方法是合理有效的。另外,相较于原方案,优化方案将 1.00 m 厚的石灰掺量为 30% 的石

灰改良土变更为0.80 m厚,在其上部加铺0.20 m厚的级配碎石,使改造区域内的消石灰用量减少5 495 t,级配碎石用量增加10 176 m³,若消石灰和级配碎石的单价分别按440元/t和120元/m³计,经计算,该优化方案能为该工程节省资金约120万元,在降低工程造价方面具有显著优势。

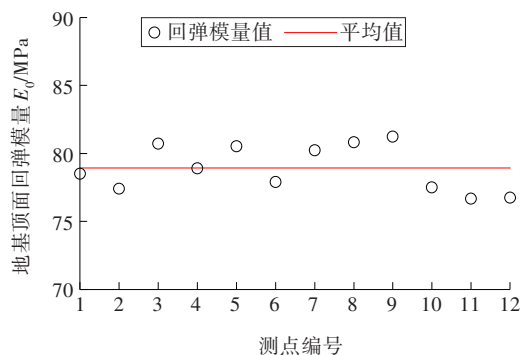


图6 地基顶面回弹模量测试结果

Fig. 6 The test results of equivalent resilient modulus at the top surface

4 结论

1) 基于弹性半空间和弹性双层体系理论,推导了表面位移的计算公式,并基于位移等效原则,提出了以顶面当量回弹模量为目标的刚度提升方法,可为软弱地基处置提供科学的计算依据。

2) 根据刚度提升方法对广西百色东货场堆场地基处置方案进行优化,即将1.00 m厚的石灰掺量为30%的石灰改良土变更为0.80 m厚,并在其上部加铺0.20 m厚的级配碎石。该方案可使地基顶面当量回弹模量由44.0 MPa提升至78.0 MPa。

3) 对处置后的地基开展现场承载板试验,测得区域内地基顶面回弹模量平均值约为79.0 MPa,可满足上部铺面结构对地基顶面回弹模量的要求,同时表明本研究提出的地基刚度提升方法是合理有效的。

4) 相较于原方案,优化方案显著降低了工程造价。采用优化方案对现场进行处置,可为该工程节省资金约120万元。

〔参考文献〕

[1] 《中国公路学报》编辑部.中国路基工程学术研究综述·2021[J].中国公路学报,2021,34(3):1-49.DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.03.001.
Editorial department of china journal of highway and transport. Review on China's subgrade engineering

research: 2021[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(3): 1-49. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.03.001.

[2] 杨和平,朱松悦,贺迎喜,等.沙特Jazan砂土液化地基处理现场试验[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2016,13(4):1-7.DOI:10.3969/j.issn.1672-9331.2016.04.001.
YANG Heping,ZHU Songyue,HE Yingxi,et al.Field test for the improvement of sand liquefied foundation in Jazan,Saudi Arabia[J].Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science),2016,13(4):1-7.DOI:10.3969/j.issn.1672-9331.2016.04.001.

[3] 张秀勇,王海龙,李杰.碎石桩复合地基在大丽高速公路软土地基处理中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):455-459.DOI:10.3876/j.issn.10001980.2021.05.011.
ZHANG Xiuyong,WANG Hailong,LI Jie.Application of gravel pile composite foundation in improving soft subgrade of Da-Li Highway[J].Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(5):455-459.DOI:10.3876/j.issn.10001980.2021.05.011.

[4] 李金奎,吴凯.挤密桩处理高填方湿陷性黄土地基的现场试验分析[J].广西大学学报(自然科学版),2018,43(1):197-204.DOI:10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2018.0197.
LI Jinkui,WU Kai.A field experimental analysis of compaction piles in high embankment collapsible loess foundation[J].Journal of Guangxi University (Natural Science Edition),2018,43(1):197-204.DOI:10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2018.0197.

[5] 刘文武.挤密桩处理湿陷性黄土路基的效果研究[J].铁道建筑技术,2022,(2):24-27,93.DOI:10.3969/j.issn.1009-4539.2022.02.006.
LIU Wenwu.Effect of lime soil compaction pile in treating collapsible loess subgrade[J].Railway Construction Technology,2022,(2):24-27,93.DOI:10.3969/j.issn.1009-4539.2022.02.006.

[6] 韩文君,刘松玉,章定文.劈裂真空法加固软土室内模型试验研究[J].土木工程学报,2013,46(10):108-118.DOI:10.15951/j.tmgcxb.2013.10.001.
HAN Wenjun,LIU Songyu,ZHANG Dingwen.Model test study on reinforcement effect of combined method of vacuum preloading and pneumatic fracturing[J].China Civil Engineering Journal,2013,46(10):108-118.DOI:10.15951/j.tmgcxb.2013.10.001.

[7] LIU C,REN T Z,ZHANG R,et al.Influence of gradation on resilient modulus of high plasticity soil-gravel mixture[J].Advances in Civil Engineering,2020,2020:8887628.1-13.DOI:10.1155/2020/8887628.

[8] CHEN A J,ZHANG J S.Strength and deformation characteristics of silty sand improved by gravel[J].KSCE Journal of Civil Engineering,2019,23(2):525-533.DOI:10.1007/s12205-018-1047-x.

[9] 张锐,滕煜晨,刘闯.路基回弹弯沉控制方法及试验验证[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2019,16(2):8-

- 14.DOI:CNKI:SUN:HNQG.0.2019-02-002.
ZHANG Rui, TENG Yusheng, LIU Chuang. Control method and experimental verification of roadbed rebound deflection[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2019, 16(2): 8–14. DOI:CNKI:SUN:HNQG.0.2019-02-002.
- [10] 徐永丽,董子建,周吉森,等.冻融及不同温度下石灰改良盐渍土动力参数研究[J].岩土工程学报,2022,44(1): 90–97. DOI:10.11779/CJGE202201008.
XU Yongli, DONG Zijian, ZHOU Jisen, et al. Dynamic parameters of lime-improved saline soil under freeze-thaw and different temperatures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(1): 90–97. DOI:10.11779/CJGE202201008.
- [11] 钟秀梅,王谦,刘钊钊,等.干湿循环作用下粉煤灰改良黄土路基的动强度试验研究[J].岩土工程学报,2020, 42(S1):95–99. DOI:10.11779/CJGE2020S1019.
ZHONG Xiumei, WANG Qian, LIU Zhaozhao, et al. Dynamic strength of fly ash-modified loess subgrade under influences of drying-wetting cycle[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S1): 95–99. DOI:10.11779/CJGE2020S1019.
- [12] 董辉,程子华,刘禹岐,等.生物酶改良淤泥质土的时效强度试验研究[J].水文地质工程地质,2020,47(2):84–94. DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201908053.
DONG Hui, CHENG Zihua, LIU Yuqi, et al. Experimental study of aging strength of the mucky soils improved with bio-enzyme[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2): 84–94. DOI: 10.16030/j. cnki. issn. 1000-3665. 201908 053.
- [13] SALOUR F, ERLINGSSON S. Resilient modulus modelling of unsaturated subgrade soils: laboratory investigation of silty sand subgrade[J]. Road Materials and Pavement Design, 2015, 16(3): 553–568. DOI: 10.1080/14680629.2015.1021107.
- [14] 刘正楠,杨博,林才奎,等.最大承载力状态下全风化花岗岩路基变形特性与控制方法[J].土木建筑与环境工程, 2016, 38(1): 109–115. DOI: 10.11835/j. issn. 1674-4764.2016.01.015.
LIU Zhengnan, YANG Bo, LIN Caikui, et al. Deformation characteristics and control method of completely decomposed granite subgrade under maximum bearing capacity[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38(1): 109–115. DOI: 10.11835/j.issn.1674-4764.2016.01.015.

Study on the method for ground replacement in railway freight yard aiming at resilient modulus of top surface

TIAN Ye

(China Railway 19th Bureau Group Guangzhou Engineering Co., Ltd., Guangzhou 511466, China)

Abstract: [Purposes] This work aims to improve the stiffness of soft ground and determine the materials and thickness for treatment scientifically. [Methods] Based on the ground treatment project of the freight yard of Baise East Railway Station in Guangxi, a stiffness enhancement method aiming at the equivalent resilient modulus at the top surface was proposed based on the theory of elastic half-space and elastic double-layer system. The stiffness enhancement method evaluated and optimized the original foundation treatment scheme, whose validity and rationality was verified by the in-situ test results of resilient modulus. Subsequently, the economic efficiency of the optimized and the original scheme was compared and analyzed. [Findings] The results showed that the resilient modulus at the top surface of the foundation in the original scheme could not meet the design requirements. Changing the thickness of 1.0 m lime-improved soil (lime content 30%) to 0.8 m and laying 0.2 m thick graded crushed stone above, the equivalent resilient modulus at the top surface of the foundation can increase from 44.0 MPa to 78.0 MPa. The average value of resilient modulus measured on the top surface of the foundation was about 79.0 MPa. The optimized scheme has significant advantages in terms of reducing engineering costs. [Conclusions] This study can provide foundation treatment and pavement structure design references.

Key words: soft ground; resilient modulus; stiffness enhancement; design theory; foundation replacement

Manuscript received: 2022-04-09; **revised:** 2022-05-16; **accepted:** 2022-05-26

Foundation item: Project (51108049) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (K2020G036) supported by Science and Technology Research and Development Program of China National Railway Group Co., Ltd.

Corresponding author: TIAN Ye (1985—) (ORCID: 0000-0003-3660-1994), male, engineer, research interest: civil engineering. E-mail: 59826909@qq.com

(责任编辑:刘平;校对:赵冰;英文编辑:田湘)