

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.081



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



高液限土路基弯沉控制方法及应用

张锐^{1a}, 成先阳^{1a}, 曾重驰^{1b}, 任天铨^{1a}, 刘闯^{1a,2}

(1. 长沙理工大学 a. 交通运输工程学院; b. 国际学院, 长沙 410114; 2. 海南省交通运输厅, 海口 570204)

摘要:为解决高液限土路基填筑中弯沉难控制的问题,根据刚度补偿理论和弯沉等效原则,以弯沉为控制目标,提出高液限土路基弯沉控制方法。该方法以下路堤回弹模量、路基各层顶面回弹模量和填筑厚度为计算参数,通过理论计算得到各层填料所需的材料模量,结合室内试验结果选择合适的填料,确定路基弯沉控制的填筑方案,并可根据路基现场施工效果动态调整。以海南省内国道 G360 公路为依托工程,依据该方法制订方案,铺筑试验路,并进行现场试验验证。结果表明,路基顶面弯沉满足验收要求,且与验收值误差较小。该方法可有效控制路基弯沉,指导高液限土路基施工与质量控制。

关键词:高液限土;路基;弯沉控制;回弹模量

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

文章编号:2096-6717(2023)01-0063-07

Deflection control method and application of high liquid limit soil subgrade

ZHANG Rui^{1a}, CHENG Xianyang^{1a}, ZENG Chongchi^{1b}, REN Tianzeng^{1a},
LIU Chuang^{1a,2}

(1a. School of Traffic and Transport Engineering; 1b. International College, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, P. R. China; 2. Department of Traffic and Transportation of Hainan Province, Haikou 570204, P. R. China)

Abstract: In order to solve the problem that it is difficult to control the deflection in high liquid limit soil subgrade filling, according to the stiffness compensation theory and deflection equivalent principle, taking the deflection as the control objective, the deflection control method is proposed. In this method, the resilient modulus of lower embankment, the resilient modulus of each layer top surface in subgrade and the filling

收稿日期:2020-12-09

基金项目:国家重大科研仪器研制项目(51927814);交通运输部公路工程行业标准制修订项目(JTG-201507);长沙理工大学研究生科研创新项目(CX2020SS15);国家大学生创新创业训练计划(202010536006)

作者简介:张锐(1980-),男,博士,教授,主要从事特殊岩土路基工程研究,E-mail:zr@csust.edu.cn.

Received:2020-12-09

Foundation items: National Major Scientific Research Instrument Development Project (No. 51927814); Highway Engineering Industry Standard Revision Project of the Ministry of Transport (No. JTG-201507); Changsha University of Science and Technology Graduate Research and Innovation Project (No. CX2020SS15); National University Student Innovation and Entrepreneurship Training Program (No. 202010536006)

Author brief: ZHANG Rui (1980-), PhD, professor, main research interest: special geotechnical subgrade engineering, E-mail: zr@csust.edu.cn.

thickness were taken as the calculation parameters. The material modulus required for fillers in each layer was obtained by theoretical calculation, and the appropriate filler was selected according to laboratory test results. The filling scheme of subgrade deflection control can be determined, and it can be dynamically adjusted according to subgrade construction effect. Taking Hainan National Highway G360 as case history, the test road was paved according to the proposed method, and the field test was carried out. The results show that the subgrade top deflection meets the acceptance requirements and the discrepancy is marginal. This method can effectively control the subgrade deflection, and guide the construction and quality control of high liquid limit soil subgrade.

Keywords: high liquid limit soil; subgrade; deflection control; resilient modulus

高液限土在中国南方地区分布广泛,其天然含水率高、水稳性差、承载能力低,如果直接用来填筑路基,顶面弯沉较大,往往很难满足验收要求^[1]。在工程实际中,为提升其路用性能,常采用砂砾改良^[2]、石灰改良^[3]和水泥改良^[4]等方法进行改良,并取得了一定的效果。以上处置方法虽改良效果明显,但多采用工程经验法,易造成路基顶面弯沉过大或过小,无法实现精确控制。为达到预期效果,需要大量铺筑试验路,费时费力,浪费资源,经济性低。因此,有必要研究高液限土路基的弯沉控制方法,指导高液限土路基填筑方案的制定与施工质量控制。

公路路基结构是影响路基弯沉的主要因素,路基各层模量、厚度变化均会引起弯沉值的变化^[5]。而在路基施工中,上路堤和路床填筑厚度多已确定,往往需要通过控制填料的回弹模量来实现弯沉控制的目的。Liu等^[6]确定了高液限土掺砂改良时的模量提升机制,为路基填筑时掺砂量的合理选择提供依据。董城等^[7]提出了水泥改良高液限土的动态模量预估模型,以确定最佳水泥掺量。部分学者分析了高速公路的路基结构,考虑动荷载,提出了路基顶面变形的控制方法^[8]。另一些学者则研究了相应的路基设计与施工控制方法,郑健龙等^[9]分别研究了膨胀土路基的变形计算、压实度标准和刚度补偿设计,提出了预测和控制路基变形的办法。刘正楠等^[10]通过分析花岗岩路基变形特性,利用路基刚度补偿的思路,确定了最大承载力状态下路基的变形控制方法。黄拓等^[11]为降低路基顶面弯沉,研究了路基刚度提升规律,进行了路基结构设计。大

多数研究以贝克曼梁静态弯沉进行路基控制,而目前规范建议采用落锤弯沉作为路基验收弯沉,但现有弹性力学理论无法直接以落锤弯沉作为控制指标进行路基结构设计。落锤弯沉一般大于静态弯沉,可根据路基状况、温度、水文条件等分成各种情况进行相关性试验,以获取两种弯沉的相关关系,实现落锤弯沉与贝克曼梁弯沉的转换^[12]。

针对上述研究的不足,笔者基于路基刚度补偿理论和弯沉等效原则,将下路堤回弹模量、上路堤和路床填筑厚度作为计算参数,提出以路基弯沉为控制目标的路基填筑设计方法,用于指导高液限土路基填筑方案制定与施工控制。依托海南省国道G360公路,运用该方法设计试验路路基的填筑方案,通过现场试验评价弯沉控制效果,验证该方法的有效性。

1 路基刚度补偿理论

1.1 理论基础

高液限土路基顶面弯沉较大、模量较低,一般采用材料模量高且水稳性好的填料在其上部填筑一定厚度的上覆层,使路基刚度逐层得到补偿,最终使路基整体刚度得到提升,以减小路基顶面弯沉。

将高液限土路基和其上部刚度补偿层视为双层弹性层状体系,假设高液限土路基回弹模量为 E_1 ,刚度补偿层回弹模量(材料模量)为 E_2 ,填筑厚度为 h ,如图1(a)所示。设层间结合处 $z=0$,在刚性承载板垂直荷载作用下,根据轴对称双层弹性理论^[13],计算其表面竖向位移 w 。

$$w = -\frac{1 + \mu_2}{E_2} q \int_0^{\infty} \frac{J_0\left(\frac{r}{R}x\right)\eta(x)}{x} \left\{ \left[A_2 - \left(2 - 4\mu_2 - \frac{z}{R}x \right) B_2 \right] e^{\frac{z}{R}x} + \left[C_2 + \left(2 - 4\mu_2 + \frac{z}{R}x \right) D_2 \right] e^{-\frac{z}{R}x} \right\} dx \quad (1)$$

令 $z=0$, $w=w_1$,即

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1+\mu_2}{E_2} \int_0^\infty \frac{J_0\left(\frac{r}{R}x\right)\eta(x)}{x} [A_2 - (2-4\mu_2)B_2 + C_2 + (2-4\mu_2)D_2] dx = \\
 & -\frac{1+\mu_1}{E_1} \int_0^\infty \frac{J_0\left(\frac{r}{R}x\right)\eta(x)}{x} [A_1 - (2-4\mu_1)B_1 + C_1 + (2-4\mu_1)D_1] dx \\
 \eta(x) = & \frac{2^a \Gamma(m+2)}{x^a} J_{a+1}(x) \quad (3)
 \end{aligned}$$

式中: 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 是积分变量; A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i 是计算参数, 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 是伽马函数; a 为阶数; R 为承载板半径, m; r 为距承载板中心的径向距离, m。

由于上述理论求解步骤过于复杂, 因此, 参考文献 [14] 的方法计算双层弹性体系的表面竖向位移。

另一方面, 将高液限土路基和刚度补偿层等效为弹性半空间体, 设其顶面回弹模量为 E' , 如图 1 (b) 所示。在刚性承载板垂直荷载作用下, 根据轴对称弹性半空间理论^[13], 计算等效弹性半空间体表面竖向位移 w' 。

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

式中: w' 为竖向位移, mm; E' 为路基回弹模量值, MPa; μ 为泊松比; $J_0(\xi r)$ 为 0 阶贝塞尔函数; $\bar{p}(\xi)$ 为荷载的汉克尔积分变换式, 采用刚性承载板时, $\bar{p}(\xi) = \rho R \sin(\xi R) / 2\xi$; r 为距承载板中心的径向距离, m。

根据弯沉等效原则, 令 $w = w'$ 。在已知高液限土路基回弹模量、填筑层厚度及等效弹性半空间体

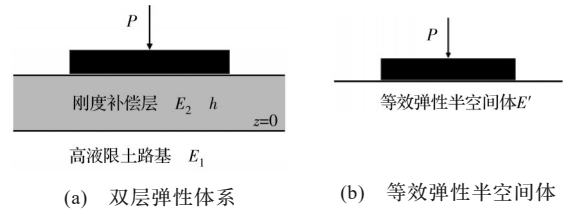


图 1 计算体系

Fig. 1 Calculating system

模量的基础上, 通过计算可得到刚度补偿层材料模量, 据此选择填料。

1.2 路基刚度补偿层设计

根据路基刚度补偿理论, 通过理论计算可以得到高液限土路基刚度补偿设计诺模图, 如图 2 所示。参照图 2 可以快速确定刚度补偿材料模量和补偿厚度。为进一步说明, 现以一简单路基双层结构设计为例。假设高液限土路基回弹模量为 20 MPa, 刚度补偿层厚度为 0.9 m, 补偿后的路基顶面回弹模量目标值为 50 MPa。沿左侧纵坐标 50 MPa 处和底部横坐标 0.9 m 处分别作垂线, 交于从 20 MPa 处 (即弯沉为 516.3 (0.01 mm) 处) 出发的曲线, 沿该曲线在右侧纵坐标找到对应的补偿层材料模量, 为 60 MPa。因此, 要使高液限土路基顶面回弹模量从 20 MPa 提升至 50 MPa, 可在其上方填筑 0.9 m 的刚度补偿层, 补偿层材料模量不小于 60 MPa。

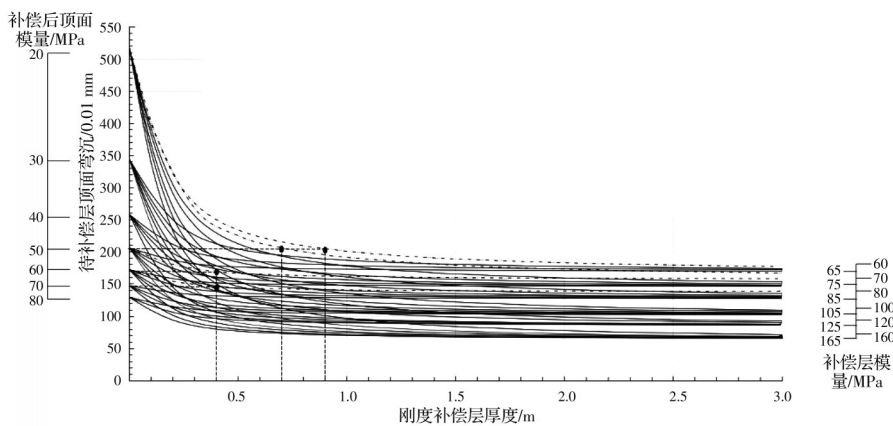


图 2 高液限土路基刚度补偿设计诺模图

Fig. 2 Nomograph of high liquid limit soil subgrade stiffness compensation design

2 路基弯沉控制设计方法

路基弯沉控制方法基于路基刚度补偿理论,围绕路基顶面弯沉这一控制目标,确定路基顶面综合回弹模量,并测定下路堤回弹模量,初步拟定上路堤和路床的顶面目标回弹模量及填筑厚度,以弯沉等效为原则,通过理论计算得到路基各层填料所需的材料模量,结合现场填料供应情况,确定路基填筑方案。该方法采用动态设计,即在路基各层填筑施工时,可根据现场实测的各层顶面回弹模量,实时调整其上部填筑层的设计。

2.1 路基顶面模量的确定

现场路基顶面回弹模量一般采用刚性承载板法确定,测试结果比较准确,利用其进行理论计算时结果可靠度较高。因此,采用圆形垂直刚性分布静荷载作用下的弹性半空间布辛尼斯克解,根据路基顶面弯沉要求值来确定路基顶面综合回弹模量。

$$E_d = \frac{2\rho R(1-\mu^2)}{\omega} \cdot \frac{\pi}{4} \quad (5)$$

式中: E_d 为路基顶面综合回弹模量,MPa; ω 为路基顶面弯沉,m; ρ 为承载板中心接触压力,MPa; R 为承载板半径,m; μ 为泊松比。

2.2 路基填筑方案设计

路基填筑方案设计基于路基刚度补偿理论,以高模量填料填筑上路堤和路床,提升路基整体刚度。以路基顶面综合回弹模量和下路堤回弹模量为参数,初步拟定上路堤和路床顶面目标回弹模量及填筑厚度,通过理论计算,得到路基刚度补偿设计诺模图(图2),在诺模图中确定上路堤和路床填料的材料模量,结合现场供应填料的室内试验结果,选择合适的填筑材料,制定路基填筑方案。每一层施工完成后,可检测该层顶面回弹模量和回弹弯沉,若不满足目标值要求,可动态调整上层填筑方案。具体步骤为:

1)确定高液限土填筑的下路堤顶面回弹模量 E_0 。可结合PFWD并考虑高液限土变形滞后效应快速测定下路堤回弹模量^[15];也可根据高液限土的稠度及当地经验初步预估高液限土填筑的下路堤顶面回弹模量。

2)根据路基顶面设计回弹模量 E_d 与下路堤顶面回弹模量 E_0 ,按路基填筑层顶面的回弹模量从下路堤至路基顶面依次升高的原则,初步拟定上路堤和路床顶面目标回弹模量 E_{i1} 、 E_{i2} 、 E_{i3} 。其中,上路床顶面目标回弹模量即路基顶面设计回弹模量,由

路基顶面弯沉要求值计算确定,如图3所示。

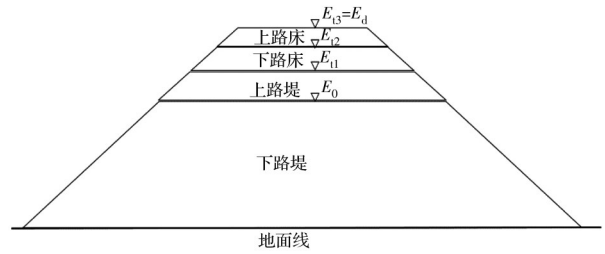


图3 高液限土路基结构图

Fig. 3 Subgrade structure diagram of high liquid limit soil

3)以路基刚度补偿层底面回弹模量和补偿厚度为参数,通过理论计算得到路基刚度补偿设计诺模图,根据设计的路基刚度补偿层顶面目标回弹模量,在诺模图中确定该层填筑材料所需的回弹模量,结合现场供应填料室内试验结果,选择合适的填料。例如,以下路堤顶面回弹模量和上路堤填筑厚度为已知量,根据上路堤顶面回弹模量目标值,在刚度补偿设计诺模图中确定上路堤填料的材料模量,据此来选择填料。以此类推,可确定下路床和上路床的填筑厚度和填筑材料。

4)当刚度补偿顶面回弹模量不能达到设计要求的目标值时,则应调整填料或填筑厚度,直至满足要求为止。

5)确定高液限土路基填筑方案。在已知下路堤回弹模量和路基顶面设计回弹模量时,通过路基弯沉控制方法,可确定上路堤和路床的填筑厚度及填料,制定合理的路基填筑方案。在施工过程中,可根据路基各层位顶面实测回弹模量实时动态调整其上部填筑方案,保证其满足设计要求。

3 路基弯沉控制方法的应用与验证

依托海南省国道G360公路,根据路基顶面弯沉控制要求确定路基顶面综合回弹模量,选取K9+380~K9+580作为试验路段,直接用高液限土填筑下路堤并降低压实度标准^[16],利用PFWD快速测定下路堤模量,根据高液限土路基弯沉控制方法,结合现场填料供应情况,选择合适的上路堤和路床填料,制定相应的路基填筑方案,并可根据路基各层施工效果实时动态调整填筑方案。

3.1 确定路基顶面模量和下路堤回弹模量

海南国道G360公路路基顶面弯沉要求值为150(0.01 mm),根据式(5)计算得到路基顶面综合回弹模量为68.8 MPa,为了便于路基设计,取值为70 MPa。

试验路段直接用高液限土(按压实度 87%,最大干密度 1.42 g/cm³,最佳含水率 21.3%的施工控制指标)铺筑下路堤。选取 10 个测点进行 PFWD 现场测试,结果如图 4 所示,回弹模量平均值为 20.4 MPa,路基设计时取值为 20 MPa。

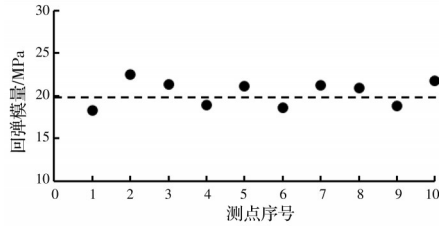


图 4 高液限土下路堤回弹模量测试结果

Fig. 4 Test results of high liquid limit soil lower embankment resilient modulus

3.2 现场填料室内动三轴试验

海南省国道 G360 公路沿线高液限土分布广泛且挖方量较大,为合理利用高液限土,减少弃方,需对其进行改良。而海南当地缺少石灰,砂砾改良经济成本较高,因此,选用水泥进行改良。现场可供应的填料主要有高液限土、水泥改良高液限土(掺量 3%、4%、5%、6%)、粉土质砂。对现场填料进行室内动三轴试验,获取其材料模量,为路基填筑方案设计提供依据。

根据《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)^[17]中的路基土动三轴标准试验法,结合施工现场填料的含水率进行制样,采用重复循环半正弦脉冲荷载进行加载,并确定加载频率为 1 Hz,每次加载 0.1 s,间隔 0.9 s,预载 1 000 次,正式加载时,每一加载序列循环加载 100 次,参考文献[18]的路基土动三轴加载序列,进行室内动三轴试验。根据试验结果,经过分析计算得到相关填料的材料回弹模量,如表 1 所示。

3.3 试验路路基填筑方案设计

按照高液限土路基弯沉控制方法,已确定路基顶面综合回弹模量为 70 MPa,下路堤回弹模量为 20 MPa,分 3 层控制填筑厚度,即上路堤 0.7 m,下路床 0.4 m,上路床 0.4 m,初步拟定各层顶面目标

表 1 现场填料回弹模量

Table 1 Resilient modulus of field filler

填筑材料	试样含水率/%	材料回弹模量/MPa
高液限土	33.6	20.6
粉土质砂	22.3	85.3
3% 水泥+高液限土	32.5	67.3
4% 水泥+高液限土	31.9	78.6
5% 水泥+高液限土	30.4	89.4
6% 水泥+高液限土	29.6	100.8

回弹模量分别为 50、60、70 MPa。路基填筑方案设计如下:

下路堤回弹模量为 20 MPa,上路堤填筑厚度为 0.7 m,目标回弹模量为 50 MPa。从刚度补偿设计诺模图(图 2)可知:为使上路堤顶面目标回弹模量达到 50 MPa,其对应顶面回弹弯沉为 206.6(0.01 mm),上路堤填料的材料模量不得低于 65 MPa。

上路堤回弹模量为 50 MPa,下路床填筑厚度 0.4 m,目标回弹模量为 60 MPa。从刚度补偿设计诺模图(图 2)可知:下路床顶面回弹模量提升至目标值 60 MPa,其顶面回弹弯沉为 172.2(0.01 mm),填料材料模量不得低于 70 MPa。

下路床回弹模量为 60 MPa,上路床填筑厚度为 0.4 m,目标回弹模量为 70 MPa。从刚度补偿设计诺模图(图 2)可知:上路床顶面回弹模量提升至目标值 70 MPa,其顶面回弹弯沉为 147.6(0.01 mm),填料材料模量不得低于 80 MPa。

在充分利用高液限土的基础上,根据路基各层填料所需材料模量,参考室内动三轴试验结果,分别选用 3% 水泥改良高液限土、4% 水泥改良高液限土和粉土质砂填筑上路堤、下路床和上路床。试验路段具体填筑方案见表 2。

3.4 现场试验结果

为验证高液限土路基弯沉控制方法的有效性,按照表 2 的方案填筑试验路段。路基每一层位填筑完成后,分别用承载板和贝克曼梁检测多个测点,统计分析各测点数据后,得到各层位的代表回弹模

表 2 试验路段路基填筑方案

Table 2 Subgrade filling scheme of test road

层位	厚度/m	压实度/%	材料模量要求值/MPa	填料	室内试验材料模量/MPa
上路床	0.4	96	≥80	粉土质砂	85.3
下路床	0.4	96	≥70	4% 水泥+高液限土	78.6
上路堤	0.7	94	≥65	3% 水泥+高液限土	67.3
下路堤		87		高液限土	

量和代表回弹弯沉,并与理论值比较,如表3所示。

表3 路基回弹模量与回弹弯沉测试结果

Table 3 Test results of subgrade resilient modulus and resilient deflection

路基结构	回弹模量/MPa		回弹弯沉/0.01 mm	
	设计值	实测值	设计值	实测值
上路床	70	75	150	143.1
下路床	60	64	172.2	164.4
上路堤	50	53	206.6	198.6
下路堤	20	20	516.3	516.3

由表3可知,试验段路基顶面综合回弹模量提升至75 MPa,顶面弯沉降至143.1(0.01 mm)。路基各层位顶面回弹模量和回弹弯沉的实测值均大于理论设计值,且误差较小,填筑方案无需进行调整,验证了高液限土路基弯沉控制方法的有效性,施工效果良好,可推广使用。

4 结论

1)高液限土路基刚度补偿理论以双层弹性理论和弹性半空间理论为理论基础,以弯沉等效为原则,用于指导路基刚度补偿层的设计,提升路基整体刚度,减小顶面弯沉,实现路基弯沉控制的目的。

2)已知下路堤回弹模量和路基顶面设计回弹模量,根据路基弯沉控制方法,拟定路基各层位填筑厚度和顶面目标回弹模量,通过高液限土路基刚度补偿设计诺模图,可确定填筑材料所需的材料模量,结合室内试验结果选择填料,确定路基填筑方案。现场施工时,可根据路基各层位实测回弹模量实时动态调整上部填筑方案。

3)通过现场试验,参考高液限土路基弯沉控制方法,制定试验路段路基填筑方案,经现场施工与检测,结果显示,高液限土路基顶面弯沉能达到预期控制效果。

参考文献

[1] LEI Z. Experimental study on road properties of high liquid limit soil in Yunfu highway [J]. The Open Construction and Building Technology Journal, 2015, 9(1): 46-51.

[2] CHOO H, LEE W, LEE C. Compressibility and small strain stiffness of Kaolin clay mixed with varying amounts of sand [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21(6): 2152-2161.

[3] 靳奉雨,王叶娇,孙德安,等.不同龄期下石灰改良土

持水特性的温度效应[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(3):24-31.

JIN F Y, WANG Y J, SUN D A, et al. Temperature effect on the water retention curve of lime-treated soil during curing [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020,

[4] 莫秋旭,陈家闯,许会生,等.湛江大道2种高液限土水泥改良试验研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(7):1728-1733.

MO Q X, CHEN J C, XU H S, et al. Experimental study on improvement of two kinds of high liquid limit soil in Zhanjiang avenue using cement [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(7): 1728-1733. (in Chinese)

[5] 王玉,宋金华,陈睿.路基路面各层模量、厚度对路表和土基顶面弯沉影响研究[J].路基工程,2014(4):108-111.

WANG Y, SONG J H, CHEN R. Study on effect of modulus and thickness of each layer of subgrade and pavement on deflection of the top surface thereof [J]. Subgrade Engineering, 2014(4): 108-111. (in Chinese)

[6] 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: 1-13.

[7] 董城,冷伍明,李志勇,等.水泥改良高液限黏土动态回弹模量试验研究[J].岩土力学,2013,34(1):133-138.

DONG C, LENG W M, LI Z Y, et al. Experimental study of dynamic resilient modulus of cement-improved high liquid limit clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 133-138. (in Chinese)

[8] LU Z, FANG R, ZHAN Y X, et al. Study on the dynamic deformation of road high liquid limit subgrade soil [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 1-7.

[9] 郑健龙,张锐.公路膨胀土路基变形预测与控制方法[J].中国公路学报,2015,28(3):1-10.

ZHENG J L, ZHANG R. Prediction and control method for deformation of highway expansive soil subgrade [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(3): 1-10. (in Chinese)

[10] 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.

LIU Z N, YANG B, LIN C K, 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. (in Chinese)

- [11] 黄拓, 昌振东, 漆帅. 路面结构的路基刚度提高方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(10): 2777-2782.
HUANG T, CHANG Z D, QI S. Promotion method of subgrade stiffness for pavement structure [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(10): 2777-2782. (in Chinese)
- [12] 公路路基路面现场测试规程: JTG 3450—2019 [S]. 北京: 人民交通出版社.
Field test methods of highway subgrade and pavement: JTG 3450-2019 [S]. Beijing: China Communications Press. (in Chinese)
- [13] 郑传超. 道路结构力学计算[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
ZHENG C C. Mechanical calculation of road structure [M]. Beijing: China Communications Press. 2003. (in Chinese)
- [14] 杨博. 路基刚度补偿计算方法: 2015SR195452 [P]. 2015-10-12.
YANG B. Calculation method of subgrade stiffness compensation: 2015SR195452 [P]. 2015-10-12. (in Chinese)
- [15] 刘闯, 张锐, 滕煜晟, 等. 考虑变形滞后效应的高液限土路基模量反算方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(2): 68-75.
LIU C, ZHANG R, TENG Y S, et al. Back-calculation method for modulus of high liquid limit soil subgrade considering deformation lag effect [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(2): 68-75. (in Chinese)
- [16] 张锐, 肖宇鹏, 刘闯, 等. 考虑吸附结合水影响的高液限土路基压实度控制标准[J]. 中国公路学报, 2020, 33(1): 32-40, 50.
ZHANG R, XIAO Y P, LIU C, et al. Control standards for degree of compaction of high liquid limit soil subgrade considering effects of adsorbed bound water [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(1): 32-40, 50. (in Chinese)
- [17] 公路路基设计规范: JTG D30—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Specifications for design of highway subgrades: JTG D30-2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)
- [18] 陈声凯, 凌建明, 张世洲. 路基土动态回弹模量室内试验加载序列的确定[J]. 公路, 2006, 51(11): 148-152.
CHEN S K, LING J M, ZHANG S Z. Fixing loading sequence for resilient modulus test of subgrade soil [J]. Highway, 2006, 51(11): 148-152. (in Chinese)

(编辑 黄廷)