

高液限土路基顶面回弹弯沉控制方法研究

李邦武¹, 任天铨², 张锐²

(1. 海南省交通工程建设局, 海南 海口 570204; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院)

摘要:为解决高液限土路基填筑过程中顶面回弹弯沉验收难达标的问题,采用PFWD快速准确测定下路堤回弹模量,基于刚度补偿理论,提出了高液限土路基顶面回弹弯沉控制方法,并根据下路堤回弹模量和路基各层的填筑厚度,确定了各层所需达到的材料回弹模量,据此选择填筑材料。以海南万洋高速公路为依托工程,制定了填筑方案进行现场施工,验证了该方法的控制效果。

关键词:路基;高液限土;回弹弯沉;回弹模量

路基顶面回弹弯沉是中国公路路基在施工完成后质量验收和评定的重要指标。而高液限土在中国分布广泛,其天然含水率高,强度低,水稳性差,填筑的路基顶面回弹弯沉往往很难达到规范要求。为了能满足验收要求,很多工程项目对高液限土进行了改良,如石灰改良、掺砂改良等,取得了一定的效果。以上方法虽然能解决相应的工程问题,但一般采用的都是经验性方法,常常需要铺设试验路,来保证达到预期改良效果。这样耗时耗力,浪费大量资源,经济性低。因此,为了控制高液限土路基顶面回弹弯沉,有必要研究相应的

控制方法,根据此法来合理制定高液限土路基的填筑方案。

许多学者针对路基顶面的弯沉控制与设计展开了不同的研究。卢正等通过分析高速公路路基结构,提出了基于动荷载的路基顶面变形控制方法;王玉等研究了路基各层模量、厚度对其顶面弯沉的影响规律。而路基顶面要达到弯沉控制目标,往往需要控制填筑材料的回弹模量。董城等采用水泥改良高液限土填筑路基,并提出了动态回弹模量预估模型来确定水泥掺量;杨俊等为满足路基填料要求,控制弯沉,通过强度

[3] 杨广庆. 加筋挡土墙合理设计方法的探讨[J]. 长江科学院院报, 2014(3).
[4] 李志勇. 陡坡路堤土工格栅加筋机制与合理铺设参数研究[J]. 岩土力学, 2008(4).
[5] 宋雅坤, 郑颖人, 刘一通, 等. 土工格栅加筋土挡墙稳定性影响因素敏感性分析[J]. 后勤工程学院学报, 2010(3).
[6] 米慧杰, 王玉鹏, 罗烈日. 土工格栅加筋高陡坡路堤稳定性及其影响因素分析[J]. 中外公路, 2014(1).
[7] 崔春义, 梁志孟, 朱江山, 等. 土工格栅加筋路堤时效性及参数敏感性分析[J]. 公路, 2019(1).
[8] El-Naggar M E, Kennedy J B, El-Naggar M E, et al. New Design Method for Reinforced Sloped Embankments [J]. Engineering Structures, 1997, 19(1): 28-36.
[9] 刘杰. 土工格栅加筋砾类土力学特性和加筋机理试验研究[D]. 合肥工业大学博士学位论文, 2018.

[10] JTG/T D32—2012 公路土工合成材料应用技术规范[S].
[11] 杨庆, 季大雪, 栾茂田, 等. 土工格栅加筋路堤边坡结构性能模型试验研究[J]. 岩土力学, 2005(8).
[12] 介玉新, 李广信. 加筋土的计算方法[J]. 水利水电技术, 1999(5).
[13] 李广信, 陈轮, 蔡飞. 加筋土体应力变形计算的新途径[J]. 岩土工程学报, 1994(3).
[14] 胡幼常, 靳少卫, 宋亮, 等. 基于影响带观测的加筋土坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2017(2).
[15] 包承纲, 汪明远, 丁金华. 格栅加筋土工作机理的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2013(1).
[16] 介玉新, 周诗博, 郭政豪, 等. 平台分级对加筋土边坡稳定性的影响研究[J]. 工程地质学报, 2018(5).

收稿日期: 2020-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51708071, 51108049); 交通运输部公路工程行业标准制修订项目(编号: JTG-201507)

作者简介: 李邦武, 男, 大学本科, 高级工程师. E-mail: Libangwu@163.com

试验来确定高液限土掺砂改良的最佳掺量。部分学者还提出了相应的路基设计与施工控制方法。郑健龙等对膨胀土路基的设计与施工进行了研究,提出了相应的刚度补偿设计方法;刘正楠等利用刚度补偿的设计思路,解决了全风化花岗岩路基整体刚度偏低和耐久性下降的问题;黄拓等研究了路基刚度补偿理论,通过试验得到刚度补偿提升规律,将其应用于路基结构设计。

测定下路堤回弹模量和设计上层填筑材料是路基顶面回弹弯沉控制中的两个关键问题。在以往的研究中,往往侧重于上路堤和路床填料的设计,而忽略了下路堤回弹模量的快速准确测定。为此,该文以海南万洋高速公路高液限土为研究对象,采用 PFWD 快速测定下路堤回弹模量,基于刚度补偿理论,提出高液限土路基填筑的顶面回弹弯沉控制方法,并运用该法确定相应的路基填筑方案,现场施工验证其效果。

1 万洋高速公路工程概况

海南省万洋高速公路起于万宁后安镇,沿线经过琼海、琼中、屯昌、儋州 4 个县市,至洋浦,全长约 163.42 km。公路沿线共有高液限土 240 万 m^3 ,开挖量较大,需要合理利用。现场用高液限土填筑下路堤并降低压实度标准,控制相应的填筑高度,用高模量填料来填筑上路堤和路床,达到刚度补偿的目的,使路基顶面回弹弯沉满足设计和验收要求。因此,该文提出了相应的回弹弯沉控制方法。

2 下路堤回弹模量现场快速测试方法

路基顶面回弹弯沉的控制首先要准确测定下路堤的回弹模量。回弹模量现场测定一般采用贝克曼梁法与承载板法。落锤式弯沉仪(FWD)和便携式弯沉仪(PFWD)等快速测定方法也在工程实践中得到普遍应用。贝克曼梁和承载板费时费力,FWD 需专车牵引,这 3 种方法偏僻地方不易使用,且多用于成型路基,难以用于路基施工中的质量控制。PFWD 测试简便,可用于下路堤回弹模量快速检测,但反算模量时误差较大,可基于黏弹性理论,改进反算方法,提高反算精度。

该文基于黏弹性模型,采用准静态动力响应分析的模量反算方法,可结合 PFWD 进行路基回弹模量现场快速测试。

2.1 准静态模量反算方法

准静态法是先对原静力学的显式解作拉普拉斯变换,再用黏弹性算子代替变换后式中的弹性参数,最后做拉普拉斯反变换。

为了便于运算,该文的黏弹性模型选择形式简单的开尔文模型。其表达式为:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (1)$$

式中: σ 为应力; ε 为应变; E 为弹性模量; η 为黏滞系数。

轴对称垂直荷载作用下的弹性半空间体表面竖向位移公式:

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

式中: $w(r)$ 为竖向位移(mm); E 为路基回弹模量值(MPa); μ 为泊松比,取 0.35; $J_0(\xi r)$ 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, $\bar{p}(\xi) = pR \sin(\xi R)/(2\xi)$; r 为距承载板中心的径向距离(m)。

对式(2)进行拉普拉斯变换,用黏弹性算子替换式中的弹性模量,再将相应的荷载函数 $\bar{p}(\xi)$ 代入,最后进行拉普拉斯反变换。在计算过程中,泊松比 μ 对计算结果影响很小且变化不大,在变换前后可认为是常数。得到的竖向位移表达式为:

$$w(r, t) = L^{-1}[\bar{w}(r, s)] = \frac{(1-\mu^2)F}{\pi \cdot E(s) \cdot R} \cdot (1 - e^{-\frac{Et}{\eta}}) \int_0^\infty \frac{J_0(\xi r) \sin(\xi R)}{\xi} d\xi \quad (3)$$

式中: $w(r, t)$ 为考虑黏弹性影响的竖向位移(mm); L^{-1} 为拉普拉斯反变换; $E(s)$ 为黏弹性算子,开尔文模型为 $E(s) = E + \eta s$; E 为路基回弹模量(MPa); η 为黏滞系数; s 为时间 t 的拉普拉斯变换参量; F 为作用在测点表面的集中力,可由 PFWD 的荷载时程曲线获取(kN); R 为承载板半径(m); r 为距承载板中心的径向距离(m)。

式(3)形式复杂,难以直接得到回弹模量的解析解。因此,运用最小二乘法迭代的优化算法进行反算:

$$\min \Delta = k \sum_{i=1}^n [W(t_i) - w(t_i, \beta)]^2 \quad (4)$$

式中: k 为控制精度的参数,一般取 0.5; $W(t_i)$ 为实测的竖向位移(mm); $w(t_i, \beta)$ 为理论计算的竖向位移(mm); $\beta = (E, \eta)$ 为反算参数向量; i 和 n 分别为测试时的数据编号和数据总数。

2.2 下路堤回弹模量现场测试

选取海南万洋高速公路第九标段(WY-9)路基下路堤的10个测点,基于该文提出的考虑黏弹性的准静态模量反算方法(简称新方法),利用PFWD测得的位移时程曲线反算回弹模量,并与常规的线弹性模量反算法(简称常规方法)和承载板的现场测试结果进行了比较,如图1所示。

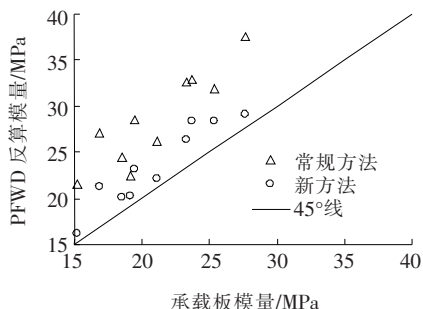


图1 WY-9路段下路堤的反算模量与承载板模量

采用PFWD现场测试时,在冲击荷载作用下,高液限土路基变形响应滞后且荷载位移非线性显著,常规方法和新方法的反算模量均大于承载板实测模量,但新方法考虑了高液限土的黏弹性,更接近于承载板实测模量。结果显示:新方法和常规方法的反算模量平均绝对误差分别为2.5、9.0 MPa;平均相对误差分别为14.8%、53.1%。由此可知,用新方法反算模量,误差更小。因此,可以采用此方法来进行下路堤回弹模量的快速测定。

3 上路堤、路床填筑材料确定方法

该文采用刚度补偿设计理论进行回弹弯沉控制,根据该理论,采用高模量填料在高液限土路基上填筑上路堤和路床。由于使用了高模量填料,在路基填筑完成后,能提高路基整体结构的刚度,使其路基顶面回弹弯沉和综合回弹模量满足设计要求。在已知下层结构模量、上层填筑层厚度参数和整体所需的结构模量时,根据弯沉等效的原则,通过计算结果诺模图,便能求出填筑层填料的回弹模量,以该理论值确定具体的填料。

3.1 回弹弯沉控制方法

如图2所示,将高液限土路基和上层填筑层看作双层弹性体系,假设路基顶面回弹模量为 E_0 ,填筑层的回弹模量为 E_1 ,厚度为 h ,在垂直荷载作用下,利用双层弹性理论计算表面竖向位移 w_1 ,计算公式如下:

$$w_i = -\frac{1+\mu_i}{E_i} q \int_0^\infty \frac{J_0\left(\frac{r}{\delta} x\right) \eta(x)}{x} \{ [A_i - (2-4\mu_i - \frac{z}{\delta} x) B_i] e^{\frac{z}{\delta} x} + [C_i + (2-4\mu_i + \frac{z}{\delta} x) D_i] e^{-\frac{z}{\delta} x} \} dx \quad (5)$$

$$\eta(x) = \frac{2^a \Gamma(m+2)}{x^a} J_{a+1}(x) \quad (6)$$

式中: E_i 为路基回弹模量值(MPa); μ_i 为泊松比; q 为集中力换算的均布荷载; $J_n(x)$ 为 n 阶贝塞尔函数; x 为积分变量; r 为距承载板中心的径向距离(cm); δ 为承载板半径(cm); A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i 为计算参数,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; Γ 为伽马函数; a 为阶数。

同时,将路基与填筑层等效视为一个弹性半空间体,假设其顶面的回弹模量为 E_2 ,根据式(2),可计算其表面竖向位移 w_2 。

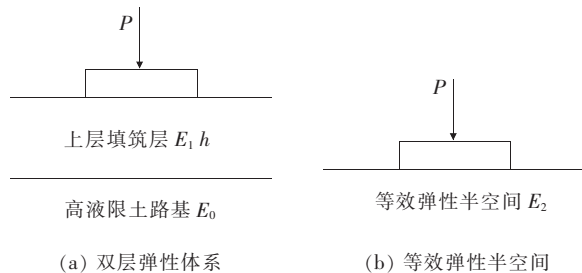


图2 计算模型

根据弯沉等效原则,令 $w_1 = w_2$,当已知填筑层厚度 h 时,可通过理论计算得到填筑层的回弹模量 E_1 ,据此来选择填筑材料。

3.2 上路堤、路床填筑材料的确定

若已知下路堤回弹模量、上路堤填筑高度和上路堤顶面所需的回弹模量,根据上节的回弹弯沉控制方法,可确定上路堤填料所需的回弹模量,由此来选择填筑材料,并以该上路堤顶面回弹模量为已知量,根据下路床顶面所需的回弹模量和填筑厚度,确定下路床填料的回弹模量,选择填筑材料。以此类推,便可确定上路堤和路床填料的回弹模量,据此选择填筑材料。具体实例如下:

已知高液限土下路堤回弹模量为20 MPa,上路堤厚度为0.7 m,通过理论计算,得到计算结果的诺模图[图3(a)]。上路堤填筑完后,使其顶面模量提升至40 MPa,对应顶面回弹弯沉为516(0.01 mm),则填筑材料模量不得低于48.9 MPa。

上路堤回弹模量为40 MPa,下路床填筑厚度为

0.5 m。根据图 3(b)的诺模图,下路床填筑完成后,其顶面回弹模量提升至 60 MPa,对应顶面回弹弯沉为 344(0.01 mm),则填筑材料模量不得低于 69.9 MPa。

下路床回弹模量为 60 MPa,上路床填筑厚度为 0.3 m。根据图 3(c)的诺模图,上路床填筑完成后,路

基顶面回弹模量提升至 154 MPa,对应顶面回弹弯沉为 135(0.01 mm),则填筑材料模量不得低于 391.8 MPa。

因此,在已知高液限土下路堤回弹模量的情况下,根据回弹弯沉控制方法,可依次确定上路堤和路床填料的回弹模量,据此来选择填筑材料。

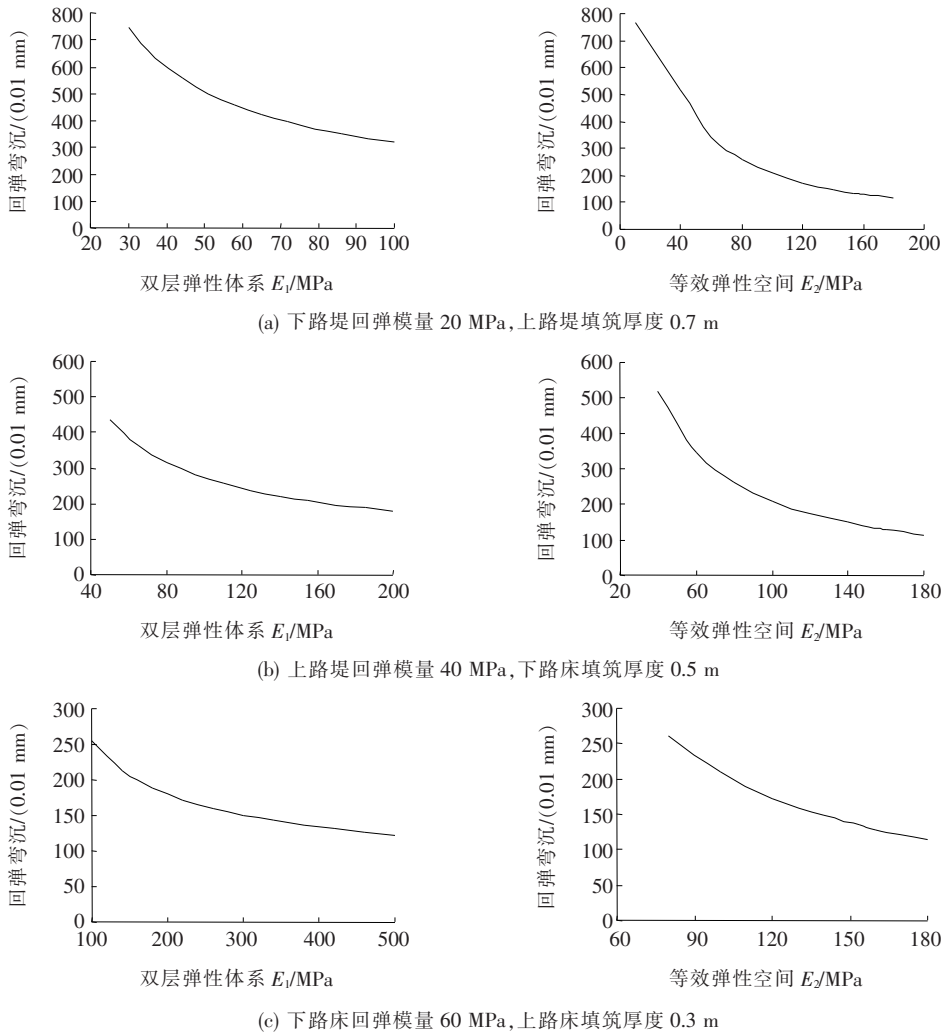


图 3 计算结果诺模图

所示。

4 现场施工及效果

为了验证通过该法设计出来的高液限土路基顶面回弹弯沉控制效果,在海南省万洋高速公路第九标段进行现场施工。

下路堤直接用高液限土填筑,用 PFWD 现场测试其回弹模量为 22 MPa,回弹弯沉为 556(0.01 mm)。上路堤填料采用掺 30%砂砾改良的高液限土,下路床填料采用掺 40%砂砾改良的高液限土,上路床填料采用掺 4%水泥改良的低液限土,具体填筑方案如表 1

表 1 现场施工填筑方案

层位	厚度/ m	填筑材料	材料模 量/MPa	模量要求 值/MPa
上路床	0.3	4%水泥+低液限土	456	≥391.8
下路床	0.5	40%砂砾+高液限土	75	≥69.9
上路堤	0.7	30%砂砾+高液限土	53	≥48.9
下路堤	—	高液限土	22	20.0

在按照表 1 的填筑方案现场施工时,各层位填筑完成后,用 PFWD 检测多个测点的回弹弯沉与回弹模

量,并求平均值,计算结果如表2所示。

表2 不同层位回弹弯沉和回弹模量

层位	回弹弯沉/(0.01 mm)		回弹模量/MPa	
	实测值	理论值	实测值	理论值
上路床	116	135	169.1	154
下路床	299	344	62.5	60
上路堤	481	516	41.9	40
下路堤	556	624	22.0	20

由表2可知:按照表1的填筑方案进行现场施工,各层位实测的回弹弯沉和回弹模量均达到理论计算值,路基顶面弯沉大幅降至116(0.01 m),顶面回弹模量提升至169.1 MPa,说明采用该文的高液限土路基顶面回弹弯沉控制方法来指导路基填筑,效果良好,可推广使用。

5 结论

(1) 基于准静态法的PFWD模量反算新方法能用荷载数据反算静模量,反算模量与承载板实测模量误差较小,可用于快速检测下路堤回弹模量,为回弹弯沉控制提供计算参数。

(2) 在已知下路堤回弹模量和上路堤、路床填筑厚度后,根据路基顶面回弹弯沉控制方法,可确定各层位所需达到的材料回弹模量,并依此来选择填筑材料。

(3) 根据路基顶面回弹弯沉控制方法,可确定填筑层的厚度和各层所需的材料回弹模量,据此制定合理的填筑方案,可使高液限土路基顶面回弹弯沉达到预期控制效果。

参考文献:

[1] 洪宝宁,化君晖,刘鑫,等.高液限土路堤填筑的双指标控制方法研究[J].岩土力学,2016(S1).

[2] 赵英爱,王远明,吴天前,等.复合固化高液限黏土的筑堤性能试验[J].武汉大学学报(工学版),2019(7).

[3] 程涛,洪宝宁,刘鑫,等.高液限土最佳掺砂比的确定[J].

西南交通大学学报,2012(4).

[4] 程涛,洪宝宁,刘顺青,等.高液限土最佳掺水泥比的确定[J].四川大学学报(工程科学版),2012(2).

[5] 卢正,姚海林,吴万平,等.高速公路路基结构分析及动变形设计方法[J].岩土力学,2010(9).

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

[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(1).

[8] 杨俊,黎新春,童磊.风化砂改良高液限红粘土强度特性试验研究[J].南京理工大学学报,2015(2).

[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(3).

[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(1).

[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(10).

[12] 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(1).

[13] 张军辉,刘杰,邓宗煌,等.公路改扩建工程老路基处治深度研究[J].中外公路,2019(5).

[14] 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,2021(2).

[15] 查旭东.PFWD快速检测路基模量研究[J].公路交通科技,2009(1).

[16] 张军辉,邓宗煌,王新宇,等.南方湿热地区既有路基快速检测方法研究[J].中外公路,2019(6).

[17] Zhang Rui, Ren Tianzeng, Khan Md Ashrafuzzaman, et al. Back—Calculation of Soil Modulus from PFWD Based on a Viscoelastic Model[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, Article ID 1316341.

[18] 郑传超,王秉纲.道路结构力学计算[M].北京:人民交通出版社,2003.

[19] 张锐,滕煜晟,刘闯,等.基于FWD的细粒土路基模量反算软件[P].中国.计算机软件著作权.2018SR688718. 2018.8

[20] 杨博.路基刚度补偿计算方法:中国,2015SR195452[P]. 2015.10.12.