

临塘段软土下卧层圆弧滑移对路面结构稳定性的影响

朱进

江苏兆信工程项目管理有限公司

摘要: 存有软土下卧层的临塘段道路常常在运营期间,甚至基层养护期间出现不同程度的路面裂缝,严重降低了道路使用寿命、路用功能。为探索临塘段路基在软土下卧层影响下的稳定性和裂缝产生机理,本文采用PLAXIS有限元模拟分析某公路临塘段路基软土下卧层的应力应变状态,经沉降监测数据验证符合实际情况。模拟结果表明:位移-时间曲线可分成加速、增长、稳定三阶段,裂缝多产生于增长阶段末期;竖向变形上车道中间点与路边缘点的差值远大于其与路中间点,竖向位移差是裂缝产生的主要控制因素,水平位移差控制裂缝的宽度。研究了硬壳层厚度、上部荷载以及软土层性质等因素对软土下卧层应力-应变状态的影响,并量化了临塘段软土下卧层对路面稳定性的影响程度,为软土下卧层的临塘段路基处理提供理论依据。

关键词: 临塘段路基; 软土下卧层; PLAXIS有限元

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2024.18.025

一、研究背景

针对软土路基工后沉降和路基边坡整体稳定性的研究已较为成熟。然而,存有软土下卧层的临塘段路基具有硬壳层工程性质远优于软土层的特点,其工后沉降、边坡稳定性均满足规范设计要求,运营几年后却出现不同程度的路面裂缝,甚至于水泥稳定碎石基层养护期间也会产生裂缝。因此研究分析临塘段路基存在软土下卧层情况下裂缝的产生原因,以及探索估算软土下卧层的影响程度是非常有必要的。目前,软土下卧层、软土蠕变、沿河路基稳定性分析等方面有着详细的研究,对于临塘段软土下卧层的探索较少,其对路面结构稳定性的影响则是一片空白。

本文根据某公路临塘段软土下卧层的监测沉降数据,结合PLAXIS有限元软土模型分析计算结果,分析临塘段软土下卧层的变形状态,及其对上部路基、路面产生的影响。研究了硬壳层厚度、上部荷载以及软土层性质等因素对软土下卧层应力-应变状态的影响,并量化了临塘段软土下卧层对路面稳定性的影响程度,为软土下卧层的临塘段路基处理提供理论依据。

二、有限元计算模型

(一) 工程地质概况

某公路存有软土下卧层的临塘段地基土层自上而下分布有:①填土层,灰色,松散-稍密,主要为近期筑路人工填筑,层厚约为2.9m。②粉土层,浅灰色,饱和,稍密,级配差,层厚约为4.8m。③淤泥质粉质黏土层,灰黑色,流塑,层厚约为10.3m。④粉质黏土层,灰青色,可塑,局部为软塑,钻孔未钻穿。地基土层的物理参数如表1所示。

表1 地基土的物性指标统计表

土层编号	①	②	③	④
含水量 %	24.9	32.1	42.9	26.8
天然重度 KN/m ³	19.5	18.8	17.7	19.4
孔隙比	0.752	0.901	1.201	0.776
压缩系数 MPa ⁻¹	0.262	0.194	0.906	0.427
压缩模量 MPa	8.4	11.1	2.7	4.2
内聚力 kPa	35.0	11.0	9.0	23.0
摩擦角°	10.1	27.1	1.4	3.0

可知,采用PLAXIS有限元分析时,填土、粉土、粉质黏土符合HS-Small模型,淤泥质粉质黏土较符合软土模型。

(二) 模型计算参数

1. HS-Small模型

按照王卫东^[1]提出了软土HS-Small模型参数与岩土物理参数间关系,本文填土、粉土、粉质黏土的HS-Small模型参数如表2所示。

表2 地基土的物性指标统计表

土层编号	E_{oed}^{ref} /MPa	E_{50}^{ref} /MPa	E_{ur}^{ref} /MPa	G_0^{ref} /MPa	$\gamma_{0.7}$ /10 ⁻⁴
①	7.56	10.08	52.92	211.68	2.0
②	11.1	11.1	44.4	222.0	1.8
④	3.78	5.04	26.43	105.72	1.8

2. 软土模型

根据PLAXIS材料模型手册,结合王笑^[2]、谭儒蛟^[3]对于软土蠕变模型参数的选取可知,软土模型区分了主荷载低于先期固结应力的卸载或重载过程,使用各向同性压缩指数和膨胀指数作为模型参数,本文根据淤泥质粉质黏土固结试验的 $e-\log p$ 曲线计算,压缩指数为0.330、回弹指数为0.1267,即修正的压缩指标为0.06511,修正的膨胀指标为0.05,卸载与重载比为0.15。

(三) 有限元计算模型与模拟结果验证

1. 有限元模型创建

本文根据某公路临塘段软土下卧层路基分布特点,将路基变形作为平面应变问题处理。构建的有限元分析模型由地基土、上部填筑路基、附加荷载三部分组成,通过停用土体多边形实现拟合复杂地面线(如图1两侧未填充的多边形)。按照路基施工、水稳层施工20天,工程车临时通行一段时间后水稳层逐渐出现裂缝,于60天后趋于稳定的实际施工情况分阶段模拟。布设路中间点、路边缘点(临塘侧)、车道中间点(临塘侧1/4路宽位置)三个监测点以验证模型合理性、分析水稳裂缝

成因。

2. 模拟结果验证

为确保模型参数选取合理, 计算结果可靠, 将数值模拟结果与沉降板监测结果对比验证可知: 工程车作用60d情况后, 路中间点、路边缘点(临塘侧)、车道中间点(临塘侧1/4路宽位置)监测沉降为146mm、150mm、89mm, 与数值模拟结果142.69mm、155.92mm、84.009mm, 对应偏差为-2.27%、3.95%、-5.61%, 并且现状水稳裂缝产生于车道中间点, 裂缝宽度稳定在9.9mm, 数值模拟车道中间点与路边缘点水平位移差为10.71mm, 偏差为8.18%, 说明计算结果较可靠。

三、模拟结果分析

(一) 裂缝成因分析

按规范计算, 路面竣工时, 地基沉降8.2cm, 路面竣工后, 基准期内的残余沉降18.8cm<30cm, 路基边坡稳定性安全系数为1.935>1.3, 满足规范要求。根据80d时变形矢量云图, 可以看出:

(1) 临塘侧土体呈现弧状变形, 在路基处以竖向变形为主, 在软土下卧层处以水平变形为主。路边缘点的弧状变形基本分布在硬壳层, 弧长短; 车道中间点的弧状变形基本分布在软土层中部, 弧长中等; 路中间点的弧状变形基本位于软土层底面, 弧长最长。

(2) 路边缘与塘顶间软土下卧层的水平位移较大, 最大值约为16.10cm, 方向自道路向水塘。

(3) 临塘侧水稳层的竖向位移较大, 最大值约为16.14cm, 方向向下。

可知: 临塘段软土下卧层路基边坡稳定, 未发生破坏时, 临塘侧土体在上部荷载作用下产生不同程度的“弧状”变形, 在水稳基层底面呈现对应不同程度的竖向位移。最大值位于车道中间点附近, 与路边缘的竖向变形相差7.194cm, 引起的横坡变化0.799%>0.5%。不均匀变形作用在刚度较大的水稳层将导致水稳产生裂缝, 裂缝多产生于竖向变形变化较大、车辆荷载作用较多的车道中间附近。

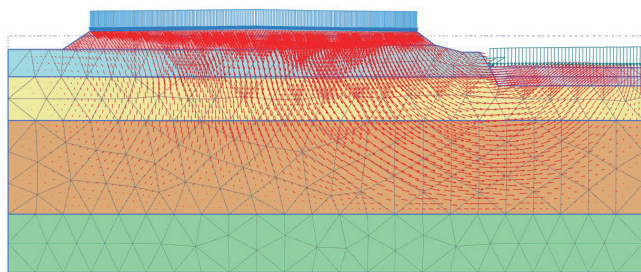


图1 变形矢量图(80d)

(二) 裂缝发展演变

从路中间点、路边缘点及车道中间点等监测点随时间变化的竖向位移、水平位移数据, 可以看出:

(1) 位移大致分为三个阶段:

①加速阶段(0~20d): 位移随时间变化增长, 且增长速率逐渐变大, 是因为路基施工逐渐加载。

②增长阶段(20~40d): 由于上部荷载固定, 位移随时间呈线性变化。

③稳定阶段(>40d): 裂缝逐渐产生并稳定, 位移随时间变化增加速率减缓并稳定。

(2) 竖向位移上, 车道中间点>路中间点>路边缘点, 车道中间点与路边缘点的位移差远大于其与路中间点的位移差, 约为7.194cm, 引起的横坡变化0.799%>0.5%(拼宽道路规范要求)。作用在刚性较大的水稳层将产生裂缝。

(3) 水平位移上, 路中间点>车道中间点>路边缘点, 裂缝产生于车道中间附近, 裂缝宽度很大程度上取决于车道中间点与路边缘点的水平位移差, 约为10.71mm, 与现场实际裂缝宽度9.9mm较符合。

可知: 车道中间点与路边缘点的竖向位移差是裂缝成因的控制因素, 其水平位移差很大程度上控制裂缝的宽度。

四、主要控制因素及处治措施

按成因水稳基层底面竖向变形由各土层竖向压缩变形和弧状滑动变形组成。由布辛涅斯克理论可知, 上部荷载分布形状不变时, 附加应力系数分布亦不变, 路面各点由各土层竖向压缩变形产生的竖向位移之间的比值亦随之不变, 变动部分由弧状滑动变形产生。

因而本文以竖向位移上车道中间点/路中间点(S_2/S_1)、路边缘点/路中间点(S_3/S_1)的比值为控制指标, 以5m硬壳层、36kPa上部荷载、塘顶距坡脚5m以及软土下卧层粘聚力9kPa、摩擦角1.5m为基准, 分析硬壳层厚度、上部荷载、塘顶距坡脚距离、软土下卧层粘聚力和摩擦系数对路面稳定性的影响程度。

(一) 硬壳层厚度

由图2可以看出, 由于埋深浅的软土下卧层受到的附加应力较大, 引起的弧状变形对路表面的竖向变形分布影响增大, 所以随着硬壳层厚度增加, S_3/S_1 基本不变, S_2/S_1 呈减少趋势, 车道中间点与路边缘点的竖向位移差呈现减少趋势。

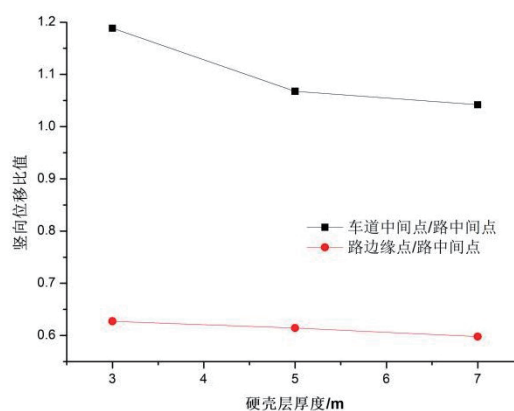


图2 竖向位移比值—硬壳层厚度曲线图

(二) 上部荷载

由图3可以看出, 上部荷载越大, S_3/S_1 近似呈线性减少趋势, S_2/S_1 基本不变, 车道中间点与路边缘点的竖向位移差越来越大。是因为上部荷载增加引起软土下卧层附加应力近似同比例增加, 但路边缘点的弧状变形多位于硬壳层。

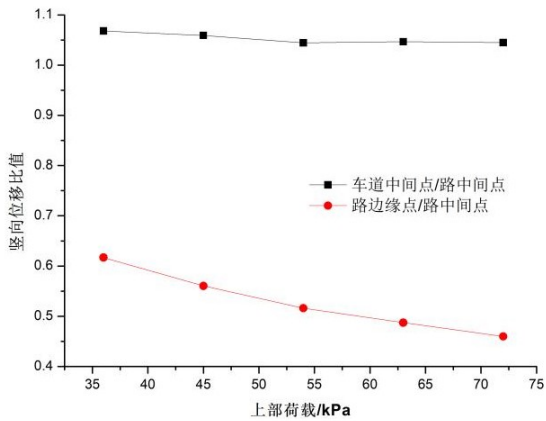


图3 竖向位移比值—上部荷载曲线图

(三) 塘顶距坡脚距离

从图4可以看出，随着塘顶距坡脚距离的增加，车道中间点弧状变形弧长路径延长，故 S_2/S_1 越来越小；路边缘点弧状变形弧长延长的同时，也逐渐偏向软土下卧层，故 S_3/S_1 先变大后边小。

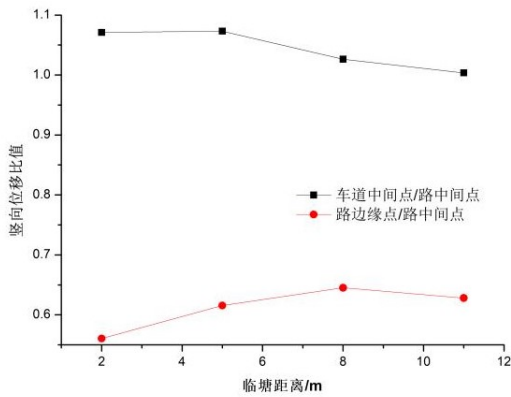


图4 竖向位移比值—临塘距离曲线图

(四) 软土下卧层粘聚力、摩擦角

由图5~6可以看出，随着软土下卧层工程性质提高（粘聚力、摩擦角），位于软土下卧层的弧状变形呈现降低的趋势，与位于硬壳层部分差距减小，故 S_2/S_1 越来越小； S_3/S_1 越来越大。

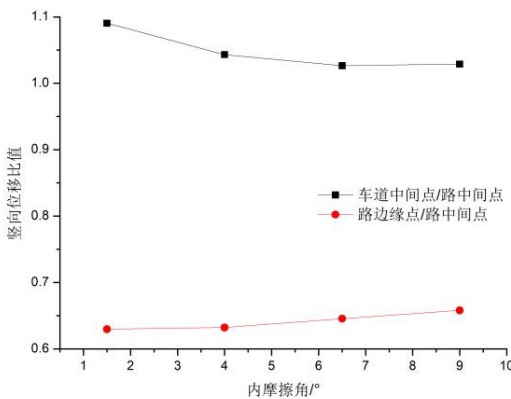


图5 竖向位移比值—摩擦角曲线图

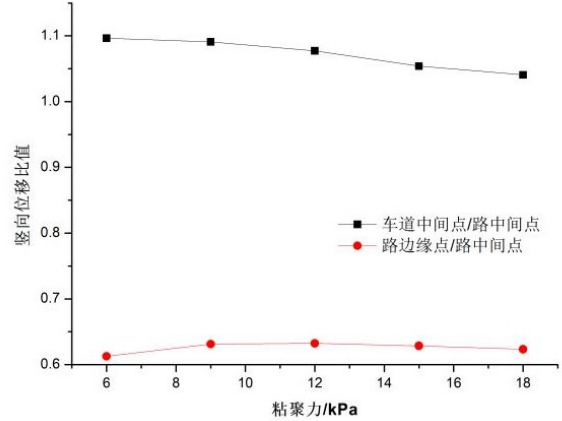


图6 竖向位移比值—粘聚力曲线图

(五) 处治措施

硬壳层厚度 $\leq 5m$ 、塘顶距坡脚距离 $\leq 5m$ 、软土下卧层粘聚力 $\leq 12kPa$ 和摩擦角 $\leq 4^\circ$ ，外部荷载作用下路中间点总沉降 $\geq 15cm$ 时，应考虑不均匀沉降的防治措施。由控制因素的影响效果可知，采用弃土反压护道、减少上部荷载、坡脚与塘梗间布设桩、延长路基路面施工间隔等均为有效处治措施。

五、结论与总结

本文采用PLAXIS有限元模拟分析某公路存有软土下卧层的临塘段路基，经路中间点、车道中间点、路边缘点沉降监测数据验证符合实际情况，模拟结果表明：

(1) 位移—时间曲线可分成加速、增长、稳定三阶段，裂缝多产生于增长阶段末期。

(2) 临塘段软土下卧层路基边坡稳定性好时，沿软土下卧层仍产生不同程度的弧状变形，与各土层竖向位移组成路面竖向位移。

(3) 车道中间点与路边缘点的竖向位移差是裂缝成因的控制因素，其水平位移差很大程度上控制裂缝的宽度。

(4) 硬壳层厚度越大、上部荷载越小、塘顶距坡脚距离越大、软土下卧层工程性质越好，路面竖向位移差越小。

(5) 根据控制因素提出弃土反压护道、减少上部荷载、坡脚与塘梗间布设桩、延长路基路面施工间隔等处治措施。

参考文献

[1] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 上海地区基坑开挖数值分析中土体HS-Small模型参数的研究[J]. 岩土力学, 2013, (06): 1766-1774.
 [2] 王笑, 陈辉, 王赵明等. 考虑软土蠕变效应的路基沉降有限元反演分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, (03): 460-466.
 [3] 谭儒蛟, 焦宇杰, 徐文杰. 天津滨海软土蠕变参数及路基沉降效应分析[J]. 水文地质工程地质, 2015, (04): 67-73.