

# 连云港软土地区路面分期建设中二次路面铺设时间研究

赵俊明<sup>1</sup>, 陈琦<sup>2</sup>, 刘垚<sup>2</sup>, 邓永锋<sup>2</sup>

(1. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210017; 2. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 针对连云港深厚滨海相软土地区的路面分期工程, 为确定合理的二次路面铺筑时间, 设置时间跨度为 15 年, 考虑不同路堤高度, 采用 GeoStudio 有限元软件模拟路基荷载与交通荷载作用下地基沉降变形特性, 分析路基高度对沉降历时的影响。结果表明, 路基荷载引起的沉降随路基高度的增加而增加, 交通荷载引起的沉降随路基高度的增加而减小; 对于低路堤, 开放交通后交通荷载引起的沉降在总沉降中始终占主导地位; 考虑路基和交通荷载综合作用的沉降历时, 连云港地区二期路面实施的控制标准, 对于一般路段, 二次路面铺筑的合适时间在开放交通后第 3 年。

**关键词:** 公路; 二次路面; 铺设时间; 软土地区; 路基荷载; 交通荷载; 地基沉降

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)01-0072-04

江苏连云港滨海相黏土发育范围面积广、深度大, 在该地区修筑道路和桥梁往往会因沉降过大而导致桥头跳车、路面开裂等。从节约公路建设成本的角度出发, 采取路面分期建设的措施, 前期只铺筑沥青砼过渡性路面, 待沉降变化稳定在容许范围后再加铺二期路面, 适当延长公路修建周期以稳定沉降。其中准确预测过渡期路基沉降特征以确定合理的二期路面铺筑时间是亟待解决的问题。

现行标准和规范对路面分期修建未作专门规定, 仅有一些原则性的意见。JTG B01-2003《公路工程技术标准》总则 1.0.8 规定, 公路分期修建必须遵照统筹规划、总体设计、分期实施的原则, 使前期工程在后期仍能充分利用。JTJ D50-2006《公路沥青路面设计规范》总则 1.0.4 规定, 高速公路、一级公路的沥青路面不宜采用分期修建, 软土地区或高填方路基、黄土湿陷地区等可能产生较大沉降的路段, 一级初期交通量较小的公路可一次设计、分期修建; 条文说明 1.0.4 规定, 分期修的方案, 由设计单位根据实际情况决定。该文以临海高等级公路分期路面工程为背景, 通过数值仿真研究不同填筑高度时一期路面铺筑后静荷载、交通荷载共同作用下总沉降的变化情况, 研究合理的二期路面铺筑时间。

## 1 数值模拟模型

采用 GeoStudio 软件进行数值模拟。模型尺寸见图 1, 宽度 100 m, 路基下部土层深度 20 m, 路基

高度 1~2 m。路基下部土层分为上部黏土层、下部黏土层和砂砾层, 厚度分别为 4、12 和 4 m。路基下部为 1 m 厚块石抛填层。路基坡脚距离左侧计算边界 42.5 m, 距离右侧计算边界 43 m。计算模型的边界条件为: 左侧边界、右侧边界和底部边界  $X$ 、 $Y$  方向的位移为零, 路基范围为动荷载边界。路基表面设置为动荷载边界, 模拟大型货车经过时路基的动力响应, 轴载为 150 kN(大型货车), 加载频率为 1 Hz, 加载模式为半正弦波, 动荷载  $F_y$  与时间  $t$  的关系为  $F_y(t) = -75\sin(2\pi t - \pi/2) - 75$  kN。

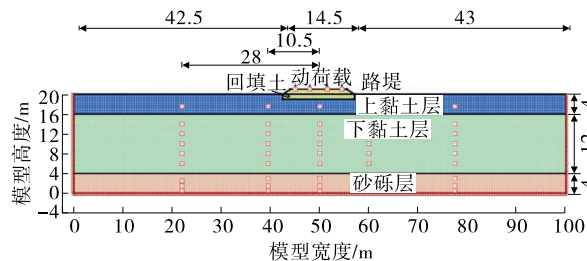


图 1 路基计算模型示意图(单位: m)

计算步骤如下: 1) 计算路堤荷载作用下应力和变形特征; 2) 计算动荷载引起的附加应力分布; 3) 根据附加应力的变化计算交通荷载引起的沉降。

表 1 为各层位材料参数, 其中土层参数由室内动静三轴等室内试验测定。路堤与块石抛填层采用弹性模型, 上部黏土、下部黏土和粉砂层采用弹塑性模型。地下水位线在地基表面。

如图 2 所示, 行车荷载作用下, 路基中心线左、

表 1 初始状态计算参数

土层	厚度/m	模型	弹性模量/ MPa	泊松比	容重/ (kN·m <sup>-3</sup> )	有效摩擦 角/(°)	有效粘聚 力/kPa	渗透系数/ (m·d <sup>-1</sup> )	阻尼比	动剪切模 量/MPa
路堤	1	线弹性	10.0	0.350	20.0	30.0	40		0.30	80
换填层	1	线弹性	10.0	0.350	18.0	30.0	0		0.30	80
上部黏土	4	弹塑性	4.0	0.334	18.5	13.3	23	8.64×10 <sup>-6</sup>	0.19	60
下部黏土	12	弹塑性	1.5	0.334	17.9	7.9	5	1.80×10 <sup>-6</sup>	0.19	58
粉砂层	4	弹塑性	5.0	0.340	20.0	30.0	0	1.28×10 <sup>-3</sup>	0.29	70

右侧共 21 m 范围内车辆动荷载引起路基下土体总应力增加。将路堤荷载作用的 Boussinesq 解与 1980 年 Doyle 提出的动应力传播经验公式相结合计算得到附加应力分布与数值分析计算结果进行对比,二者的计算结果较为接近。这为后续动静荷载共同作用下地基变形分析提供了基础。

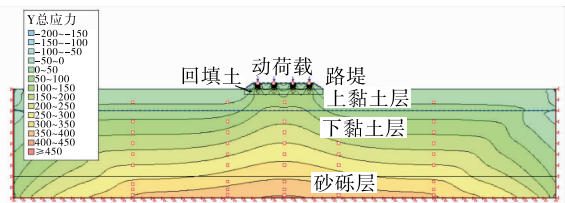


图 2 动荷载作用下路基下土体的应力分布(单位:kPa)

2 过渡期地基沉降计算与模拟

2.1 静荷载作用下路基沉降

将路基高度定为 1.5、2.0、2.5 m 进行静荷载下路基沉降计算,路堤结构见图 3。

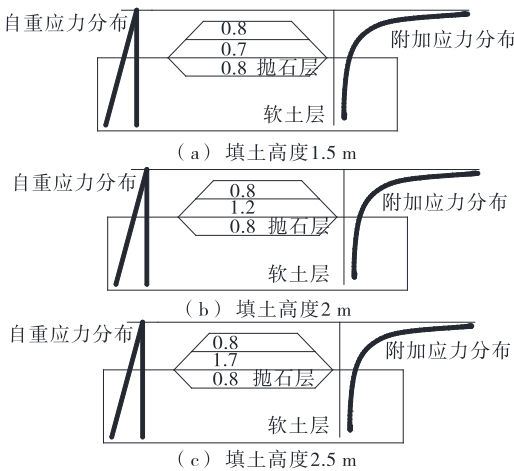


图 3 路堤结构示意图(单位:m)

将软土层进行分层,每层厚度取 1 m,计算基底中心轴线下各分层面(包括地下水位面)地基竖向自重应力  $\sigma_c$ 、基底中心轴线下各分层界面各点的附加

应力  $\sigma_z$  及地基各分层土的自重应力平均值和附加应力平均值。按  $\sigma_z=0.2\sigma_c$  确定计算深度,得到填土高度为 1.5、2、2.5 m 时压缩层路基中心最终沉降量分别为 172、265、322 mm。

路基中心地基沉降随时间的变化用等速加载的一维固结理论计算。2 m 路基填筑时间为 60 d,地基平均固结度按下式计算:

$$\overline{U}_t = \sum_{i=1}^n \frac{q}{\sum \Delta p} \left[ (T_i - T_{i-1}) - \frac{\alpha}{\beta} (e^{\beta T_i} - e^{\beta T_{i-1}}) e^{-\beta t} \right] \quad (1)$$

式中:  $\overline{U}_t$  为  $t$  时间地基平均固结度;  $q$  为荷载的加载速率 (kPa/d);  $\sum \Delta p$  为等速加载对应的累加荷载;  $T_i$ 、 $T_{i-1}$  为荷载加载的起始和终止时间;  $\alpha$ 、 $\beta$  根据地基土的排水条件确定。

根据《建筑地基处理技术规范》对于天然地基的竖向排水固结条件,  $\alpha=8/\pi^2=0.816$ ,  $\beta=\pi^2 \times C_v/4H^2=0.000\ 454(C_v=3 \times 0.003\ 6=0.010\ 8\text{ cm}^2/\text{s}; H\text{ 为单面排水高度})$ ,  $\alpha/\beta=1\ 786.81$ 。代入式(1),计算得到固结沉降随时间的变化见图 4。

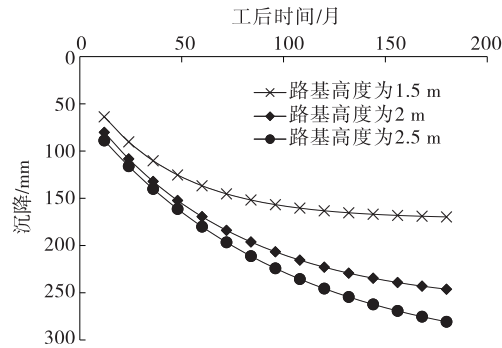


图 4 不同路基高度的沉降历时曲线

由图 4 可知:路基荷载引起的沉降分为快速增长、缓慢增长和趋于稳定 3 个阶段。路基高度为 1.5 m 时,前 48 个月静载作用下的沉降明显上升,但上升幅度越来越小;48 个月,路基本身静载引起

的沉降涨幅越来越小;120 个月后趋于稳定。路基高度为 2 m 时,各阶段转换节点分别为 60 和 132 个月;路基高度为 2.5 m 时,各阶段转换节点分别为 96 和 168 个月。

## 2.2 交通荷载作用下地基沉降

### 2.2.1 累计动变形

根据连云港临海路赣榆段(和 S204 共线)九里卡口 2015 年的交通量记录得到各类型车辆的月平均流量,流量最大的是中小客车,为 6 534 辆/月,其次分别为特大型货车、大客车、中型货车、小型货车及大型货车,进而得到一年的平均车流量,然后转化为车在地基土体同一位置上振动的次数。交通流监测结果表明,该路段行车速度为 65~120 km/h。不同速度对应不同的行车振动频率,假定特大型货车对应的振动频率为 0.1 Hz、大型货车与中型货车对应的振动频率为 0.3 Hz、小型货车与大客车对应的振动频率为 0.5 Hz、中小客车对应的振动频率为 1 Hz。

通过第一节有限元计算可得到不同类型车辆在抛石层以下(路面以下 4 m)动应力比  $CSR$  [ $CSR = \sigma_d / (2\sigma'_c)$ ,  $\sigma_d$  为动力条件下附加应力,  $\sigma'_c$  为有效自重应力],得出动应力比随深度的变化关系。根据车辆振动次数及  $CSR$ ,基于 Monismith 的指数型动应变增长模型计算各深度的动应变[见式(2)],以分层总和法计算交通荷载累计路基变形沉降。

$$\epsilon_p = a(CSR)^m \cdot N^b \quad (2)$$

式中:  $a$ 、 $m$ 、 $b$  为模型参数,由室内试验获得;  $N$  为振动次数。

### 2.2.2 累积孔压消散引起的固结沉降

交通荷载作用下,软土产生超静孔隙水压力,消散过程中再次引起软土固结沉降。采用经典的幂数型孔压模型计算各土层的超静孔压:

$$u/\sigma'_c = a(CSR)^m \cdot N^b \quad (3)$$

式中:  $u/\sigma'_c$  为超静孔压与有效围压之比,即超静孔压归一化。

基于太沙基固结理论计算各土层由动荷载产生的固结沉降量:

$$S_v = \sum_{i=1}^n m_{vi} h_i U_i u_i \quad (4)$$

式中:  $m_{vi}$  为第  $i$  层土体的体积压缩系数;  $h_i$  为第  $i$  层土体的厚度;  $U_i$  为第  $i$  层土体的固结度;  $u_i$  为第  $i$  层土体的孔隙水压力。

### 2.2.3 计算结果

根据行车动荷载累积变形和累积孔压消散的沉降得出不同填土高度下开放交通 15 年内交通荷载引起的路基沉降见图 5。

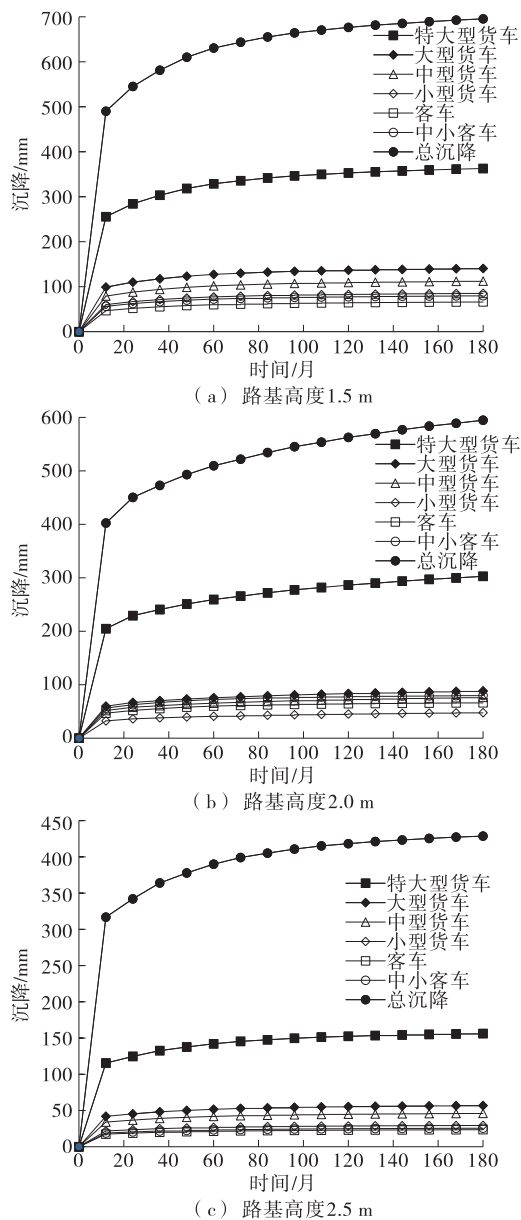


图 5 3 种填土高度下开放交通 15 年内交通动荷载引起的沉降

由图 5 可知:3 种填土高度下,开放交通 15 年内交通动荷载引起的路基沉降在第一年快速增加,地基沉降明显;2~3 年增加速率放缓,地基沉降增长缓慢;随后土体沉降随时间缓慢增长,趋于稳定。填土高度并未对沉降趋势产生影响,但同一开放交通时长,行车荷载产生的沉降随着填土高度的增加而减小。

3 动静荷载相互作用下地基总沉降

地基总沉降是路基重量与交通荷载共同作用下

引起的变形之和。不同填土高度下动静荷载引起的路基中心地基变形见表 2。

由表 2 可知:交通荷载产生的路基沉降在总沉降

表 2 不同填土高度下动静荷载引起的路基中心地基变形

通车时 间/年	不同填土高度(m)下路基中心地基变形								
	1.5			2.0			2.5		
	X/%	Y/%	总沉降/mm	X/%	Y/%	总沉降/mm	X/%	Y/%	总沉降/mm
1	11.51	88.49	553.8	16.61	83.39	482.6	21.90	78.10	405.6
5	17.82	82.18	767.2	24.95	75.05	679.0	31.59	68.41	570.0
15	19.62	80.38	865.1	29.28	70.72	841.0	39.57	60.43	709.4

注:X 为路基静载引起的沉降比例;Y 为交通荷载引起的沉降比例。

中始终占据主导地位,静荷载引发的沉降占总沉降的比例随着时间而增加;在同一时间,静荷载引起的路基沉降随着填土高度的增加而增加,交通荷载引起的路基沉降随着填土高度的增加而减少。地基及路基静荷载的应力分布随着深度而增大,填土高度增加使压缩层范围增加,静荷载引起沉降增加;交通荷载引起的附加动应力随着深度而减小,有效围压增大。

地基总沉降同样分为 3 个阶段,即前 20 个月的迅速增长阶段、20~72 个月的缓慢增长阶段、72~180 个月的趋于稳定阶段。根据该沉降变化特征和连云港地区二次路面施工沉降要求(一般路段 10 cm),一般路段适宜的二次路面铺设时间为过渡路面铺设后 3 年。

4 结论

针对连云港深厚滨海相软土地区路面分期工程分期时间确定不明晰这一现状,通过数值计算和理论分析,对交通荷载和路基荷载作用下地基沉降变形进行分析,主要结论如下:

(1) 连云港地区低路堤公路未深层处理的地基总沉降中,交通荷载引起的沉降在 15 年内始终占主导地位,但所占比例随着时间和路基填土高度的增加而减小。

(2) 路堤荷载产生的沉降、交通荷载引起的沉降及总沉降的变化均分为快速增长、缓慢增长和趋于稳定 3 个阶段,其中路堤荷载引起的沉降随路基填土高度的减小而减小,而交通荷载引起的沉降随着路基高度的增加而减小。

(3) 根据不同路基高度下沉降发展趋势和连云港当地二次路面施工要求,一般路段二次路面铺筑时间为过渡路面工后 3 年。

参考文献:

[1] 胡伟.高速公路路面分期修建关键技术研究[D].长沙:湖南大学,2005.

[2] 魏星,黄茂松.交通荷载作用下公路软土地基长期沉降的计算[J].岩土力学,2009,30(11).

[3] 廖化荣.交通荷载下路基软土动应力累积及塑性应变累积特性研究[D].广州:中山大学,2008.

[4] JTG B01—2003,公路工程技术标准[S].

[5] JTJ D50—2006,公路沥青路面设计规范[S].

[6] 殷宗泽.土工原理[M].北京:中国水利水电出版社,2012.

[7] 杨锡武,角述兵,唐军,等.硫磺改性沥青混合料性能及其应用研究[J].公路交通科技,2009,26(6).

[8] 黄国进.泰国巴帕南水闸工程截流坝软土地基坝体下沉及断桩原因分析与补救措施[D].广州:中山大学,2010.

[9] 王士革,张宗领,袁一力.联合明德林解和布辛奈斯克解计算复合地基沉降方法的推导[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2018,50(6).

[10] N F Doyle.Railway track design: A review of current practice[M].Australian Government Publishing Service,1980.

[11] 蒋涛.隧道塌方特征分析和预报预警监测系统的研究[D].北京:北京交通大学,2016.

[12] Monismith C L, Ogawa N, Freeme C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[J]. Transport Research Record, 1975, 53 (7).

[13] 骆俊晖.地铁移动荷载作用下深厚软土本构模型及沉降预测研究[D].南京:东南大学,2016.

[14] 田攀.高压旋喷桩技术处治现役高速公路沉降分析[D].重庆:重庆大学,2017.