

新老路基容许差异沉降控制标准研究

卜永胜

(湖南路桥建设集团有限责任公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 为避免高速公路改扩建中由于新旧路基不均匀沉降导致路面病害,文中以某高速公路典型路段新老路基处理为依托,分析新老路基差异沉降与路面应力的关系;引入沥青路面结构服役后的疲劳特性,分析高速公路改扩建工程加宽路基与原旧路基之间容许差异沉降控制标准,得出该高速公路改扩建新老路基容许差异沉降以半幅横坡改变量 2‰为控制标准。

关键词: 公路;改扩建;路基;差异沉降;沉降标准

中图分类号: U418.8

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)03-0097-05

对现有服役达到一定期限的高速公路进行改扩建是目前交通发展的一个重要方向。旧路拓宽与改造会出现新老路基差异沉降现象,差异沉降如果控制不严,超过路面受力临界点,就会造成工程质量问题。某高速公路位于湖南省北部洞庭湖区域,受地理位置影响,地基土含水量高达 30%,施工中极易出现不均匀沉降,施工难度大,新老路基差异沉降控制成为其中的关键环节。

1 计算模型

1.1 计算参数

根据工程实践,造成新旧路基不均匀沉降的主要因素为路基填土高度、旧路基边坡削坡量、旧路基台阶开挖高度和坡度、地基土软弱层厚度。该项目采用半刚性基层沥青路面,各结构层计算参数见表 1,路基及软土地基计算参数见表 2。

表 1 路面结构层计算参数

| 结构层 | 材料 | 厚度/ m | 弹性模 量/MPa | 劈裂强 度/MPa | 泊松 比 |
|-----|--------|----------|--------------|--------------|---------|
| 面层 | 沥青砼 | 0.18 | 1 500 | 1.00 | 0.25 |
| 基层 | 水泥稳定碎石 | 0.20 | 1 000 | 0.50 | 0.25 |
| 底基层 | 二灰土 | 0.20 | 500 | 0.25 | 0.30 |

1.2 数值模型

项目原设计速度 120 km/h,双向四车道,路基顶宽 26 m,路基高度 3~6 m,边坡坡比 1:1.75。

改扩建中在原公路两侧各加宽 4.25 m,设计速度仍为 120 km/h,双向六车道,路基顶宽 34.5 m,代表段路基高度 4 m,边坡坡比 1:1.5;加宽部位高

表 2 土体结构层计算参数

| 结构层 | 弹性模 量/MPa | 天然重度/ (kN·m ⁻³) | 内摩擦 角/(°) | 泊松 比 | 粘聚力/ kPa |
|--------|--------------|--------------------------------|--------------|---------|-------------|
| 粉细砂层 | 20.0 | 20.0 | 30 | 0.30 | 1.0 |
| 黏土层 | 2.6 | 18.3 | 22 | 0.35 | 20.0 |
| 淤泥土层 1 | 4.0 | 18.0 | 20 | 0.35 | 15.0 |
| 淤泥土层 2 | 1.5 | 17.1 | 18 | 0.35 | 11.5 |
| 新路基土 | 35.0 | 18.0 | 22 | 0.35 | 30.0 |
| 老路基土 | 40.0 | 19.0 | 28 | 0.35 | 30.0 |

含水量地基层厚度为 30 m,底层为粉细砂层,中层为黏土层,顶层为淤泥质黏土层,分别按每层厚度 10 m 计算。

旧路基边坡削坡量 1 m;旧路基台阶开挖坡度为 1:1.5,高度为 1 m;路基平均填土厚度约 4 m。

约束条件:1) 原路基及地基已彻底完成固结,在各类重力及行车荷载作用下不会发生沉降;2) 路基荷载只按新填路基自重考虑,重力仅作用在加宽地基上;3) 路面自重荷载按简化线荷载计算,其值为 17.60 kN/m;4) 行车荷载按简化线荷载计算,其值为 10.0 kN/m。

如图 1 所示,按地基在公路路基横断面方向是完全对称的状态考虑,计算模型仅取 1/2 进行受力

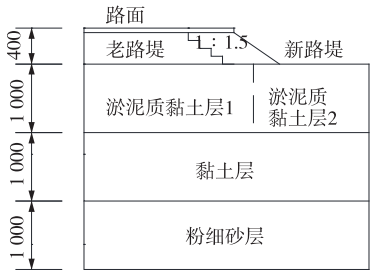


图 1 新老路基计算模型(单位:cm)

分析,计算深度及宽度均按 30 m 考虑。

2 沥青路面结构沉降分析

2.1 不考虑疲劳特性时的沉降分析

2.1.1 沥青路面出现荷载裂缝的准则

(1) 服役公路受交通流荷载反复作用,若其路面结构层承受的弯拉应力超过材料的强度极限,就会产生裂缝。

(2) 沥青路面的基层一般为半刚性结构形式,若结构层承受的应力超过临界值,裂缝将首先出现在基层底部;若裂缝持续发展,基层与面层接触部位的变形将失调,最终形成贯通裂缝,导致整体破坏。

(3) 若沥青路面的基层为柔性结构,沥青路面发生破坏时,首先会在沥青面层以裂纹的形式体现。

(4) 规范以基层、沥青面层的层底拉应力作为沥青路面结构设计控制指标,据此将路面结构底基层、基层、面层所承受的层底拉应力是否超过自身强度极限临界值作为控制标准。

2.1.2 路基沉降与路面应力之间的关系

采用有限元软件分析加宽路基、旧路基之间沉降与路面应力的关系,间隔时间为 15 s,帧选择器输出为 3、6、9、12、15 帧。不同路基差异沉降值及相应路面各层最大拉应力见表 3,路面差异沉降与路面应力的关系见图 2。

表 3 路面差异沉降及路面各层应力

| 不均匀沉降 /cm | 沥青层底面 应力/MPa | 基层底面 应力/MPa | 底基层底面 应力/MPa |
|--------------|-----------------|----------------|-----------------|
| 1.650 | 0.162 2 | 0.082 4 | 0.028 3 |
| 3.310 | 0.324 6 | 0.165 1 | 0.056 6 |
| 4.992 | 0.488 8 | 0.248 3 | 0.085 3 |
| 6.744 | 0.655 5 | 0.333 1 | 0.114 5 |
| 8.582 | 0.816 2 | 0.414 7 | 0.157 7 |

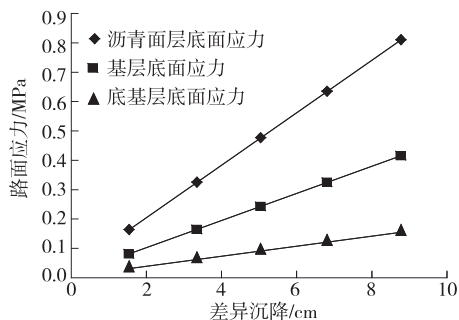


图 2 结构层应力与差异沉降的关系

由图 2 可得出沥青路面各结构层应力和不均匀沉降的回归方程,面层底面应力、基层底面应力、底基层底面应力与差异沉降的关系分别见式(1)、式(2)、式(3)。

$$y = 0.0947x + 0.0112 \quad (1)$$

$$y = 0.0481x + 0.0057 \quad (2)$$

$$y = 0.0183x - 0.004 \quad (3)$$

因不同路面结构层材料的劈裂强度不同,结合式(1)~(3)可得出:拉应力达到最大值时,底基层底面差异沉降(13.88 cm) > 沥青面层底面差异沉降(10.44 cm) > 基层底面差异沉降(10.27 cm)。说明一旦出现相同的不均匀沉降,沥青路面结构各层出现裂缝的先后顺序为基层底面、面层、底基层底面。

2.2 考虑疲劳特性时的沉降分析

2.2.1 沥青路面疲劳弯拉容许应力

随着公路服役时间的延长,路面各层材料的容许极限抗拉强度作为路面开裂破坏临界指标不再适合,应考虑各结构层材料本身的疲劳破坏。大量路面试验结果显示,路面结构各层材料经多次荷载反复作用,与一次荷载作用而发生破坏时的拉应力存在以下数量关系:

$$k_s = \sigma_{sp} / \sigma_R \quad (4)$$

式中: k_s 为计算疲劳特性的抗拉强度系数; σ_{sp} 为劈裂试验测定的路面结构材料极限抗拉强度; σ_R 为设计年限内路面各层材料按标准当量累计轴载计算疲劳特性的弯拉应力。

因路面各层材质不同, k_s 计算方法也不同,沥青路面结构柔性面层按式(5)计算,半刚性基层按式(6)计算,半刚性底基层按式(7)计算。

$$k_s = 0.09N_e^{0.22} / A_c \quad (5)$$

$$k_s = 0.35N_e^{0.11} / A_c \quad (6)$$

$$k_s = 0.45N_e^{0.11} / A_c \quad (7)$$

式中: N_e 为设计年限内一条车道通过的标准当量轴载数; A_c 为等级系数,高速公路、一级公路为 1.0,二级公路为 1.1,其他公路为 1.2。

由式(4)可得路面结构各层材料的疲劳弯拉容许应力计算公式:

$$\sigma_R = \sigma_{sp} / k_s \quad (8)$$

2.2.2 标准轴载换算

由于汽车类型不同,其轴载也不同,需按照一定方法进行标准轴载当量换算。规范以双轮组单轴轴载 100 kN 作为路面设计标准轴载。路面各结构层疲劳特性不同,计算沥青路面结构柔性面层层底

拉应力时按式(9)换算标准轴载,计算半刚性材料结构层层底拉应力时按式(10)换算标准轴载。

$$N = \sum_{i=1}^k C_1 C_2 n_i (p_i / p)^{4.35} \tag{9}$$

式中: N 为车辆标准轴载数(次/d); C_1 为换算需考虑的轴数系数,轴距 $>3\text{ m}$ 时按单个轴取 $C_1=1$,轴距 $<3\text{ m}$ 时按双轴或多轴采用 $C_1=1+1.2(m-1)$ 计算; m 为车辆轴数; C_2 为车辆的轮组系数,单轮组、双轮组、四轮组的取值分别为 6.4、1.0、0.38; n_i 为交通流的累计轴载数(次/d); p_i 为换算轴载值(kN); p 为标准计算轴载, $p=100\text{ kN}$ 。

$$N = \sum_{i=1}^k C'_1 C'_2 n_i (p_i / p)^8 \tag{10}$$

式中: C'_1 为换算需考虑的轴数系数,轴距 $<3\text{ m}$ 时按双轴或多轴,采用 $C'_1=1+2(m-1)$ 计算; C'_2 为换算需考虑的轮组系数,单轮组、双轮组、四轮组的轮组系数分别为 18.5、1.0、0.09。

2.2.3 累计轴载当量计算

设计年限标准内累计轴载当量按下式计算:

$$N_e = 365[(1+r)^t - 1]N_1 \eta / r \tag{11}$$

式中: r 为路面服役期内交通流量增长率(%); t 为沥青路面设计年限标准,通常高速及一级公路设计年限为 15 年; N_1 为路面运营第一年双向日交通流轴载数(次/d); η 为车辆横向分布系数,单车道取 1.0,两车道取 0.6~0.7,四车道取 0.4~0.5,六车道取 0.3~0.4,八车道取 0.25~0.35。

2.2.4 差异沉降标准计算

计算步骤:1)通过标准轴载换算,得出单车道

交通流量累计值。2)依据交通流量累计值计算路面各结构层材料的抗拉强度系数。3)依据各结构层材料的抗拉强度系数计算路面各层材料的容许拉应力。4)将路面各层材料的容许拉应力代入应力—沉降方程,得出路面各层容许沉降。

为简化计算,设定交通量增长率为每年 5%,交通流量组成见表 4。

表 4 交通流量组成

| 车型 | 前轴重量/kN | 后轴重量/kN | 后轴数量 | 后轴轮组数量 | 后轴距/m | 交通流量/(次·d ⁻¹) |
|------------|---------|---------|------|--------|-------|---------------------------|
| 湘江(HQP40) | 23.10 | 73.20 | 2 | 双轮 | >3 | 1 600 |
| 三菱(T653B) | 29.30 | 48.00 | 1 | 双轮 | — | 1 600 |
| 解放(SP9200) | 31.30 | 78.00 | 3 | 双轮 | >3 | 1 200 |
| 江淮(HF150) | 45.10 | 101.50 | 1 | 双轮 | — | 1 200 |
| 东风(EQ155) | 26.49 | 56.69 | 2 | 双轮 | 3 | 1 600 |
| 黄河(JN163) | 58.60 | 114.00 | 1 | 双轮 | — | 800 |

当设计指标采用沥青路面结构面层层底拉应力时,按式(9)换算每日轴载,结果见表 5。随服役时间的延长,国内公路交通流量通常逐年增加。依据式(5)及式(11)可计算得到相对应沥青面层抗拉强度系数(见表 6)。

表 5 以沥青层层底拉应力为设计指标时的轴载换算结果

| 车型 | | p_i/kN | 轴数系数 C_1 | 轮组系数 C_2 | 交通流量/(次·d ⁻¹) | 标准交通流量换算值/(次·d ⁻¹) |
|------------|----|-----------------|------------|------------|---------------------------|--------------------------------|
| 湘江(HQP40) | 后轴 | 73.20 | 2 | 1 | 1 600 | 823.59 |
| 三菱(T653B) | 前轴 | 29.30 | 1 | 1 | 1 600 | 7.60 |
| | 后轴 | 48.00 | 1 | 1 | 1 600 | 65.60 |
| 解放(SP9200) | 前轴 | 31.30 | 1 | 1 | 1 200 | 7.60 |
| | 后轴 | 78.00 | 3 | 1 | 1 200 | 1 221.60 |
| 江淮(HF150) | 前轴 | 45.10 | 1 | 1 | 1 200 | 37.60 |
| | 后轴 | 101.50 | 1 | 1 | 1 200 | 1 280.40 |
| 东风(EQ155) | 前轴 | 26.49 | 1 | 1 | 1 600 | 4.81 |
| | 后轴 | 56.69 | 2 | 1 | 1 600 | 298.40 |
| 黄河(JN163) | 前轴 | 58.60 | 1 | 1 | 800 | 78.40 |
| | 后轴 | 114.00 | 1 | 1 | 800 | 1 414.40 |
| 合计 | | | | | | 5 240.00 |

表 6 沥青面层抗拉强度系数随时间的变化

| 道路服役 时间/年 | 交通流量累 计轴次/万次 | 抗拉强度 结构系数 |
|--------------|-----------------|--------------|
| 3 | 180.88 | 2.14 |
| 5 | 317.04 | 2.42 |
| 7 | 467.16 | 2.64 |
| 9 | 632.68 | 2.82 |
| 13 | 1 016.32 | 3.13 |
| 15 | 1 238.12 | 3.27 |

当设计指标采用沥青路面结构半刚性基层层底拉应力时,按式(10)换算每日轴载,结果见表 7。依据式(6)及式(11)可计算得到相对应水泥碎石基层抗拉强度系数(见表 8),依据式(7)及式(11)可计算得到相对应二灰土底基层抗拉强度系数(见表 8)。

将表 6、表 8 所示路面各层抗拉强度结构系数分别代入式(8),计算得到随服役时间延长路面各结构层的容许拉应力(见表 9)。

将不同服役时间时沥青砼面层、水泥碎石基层、

表 7 以半刚性基层层底拉应力为设计指标时的轴载换算结果

| 车型 | p_i/kN | 轴数系数 C_1 | 轮组系数 C_2 | 交通流量/ (次·d ⁻¹) | 标准交通流量 换算值/(次·d ⁻¹) |
|---------------|-----------------|------------|------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 湘江(HQP40) 后轴 | 73.2 | 2.0 | 1 | 1 600 | 263.6 |
| 东风(EQ155) 后轴 | 56.7 | 2.2 | 1 | 1 600 | 51.2 |
| 解放(SP9200) 后轴 | 78.0 | 3.0 | 1 | 1 200 | 493.2 |
| 江淮(HF150) 后轴 | 101.5 | 1.0 | 1 | 1 200 | 1 351.6 |
| 黄河(JN163) | 前轴 | 58.6 | 1.0 | 800 | 11.2 |
| | 后轴 | 114.0 | 1.0 | 800 | 2 282 |
| 合计 | | | | | 4 452.8 |

表 8 水泥碎石基层和二灰土底基层抗拉强度系数随时间的变化

| 道路服役 时间/年 | 交通流量累计 轴次/万次 | 抗拉强度结构系数 | |
|--------------|-----------------|----------|--------|
| | | 水泥碎石基层 | 二灰土底基层 |
| 3 | 153.72 | 1.68 | 2.16 |
| 5 | 269.40 | 1.78 | 2.29 |
| 7 | 397.00 | 1.86 | 2.39 |
| 9 | 537.64 | 1.92 | 2.47 |
| 13 | 863.64 | 2.03 | 2.61 |
| 15 | 1 052.12 | 2.07 | 2.66 |

二灰土底基层的容许拉应力分别代入式(1)、式(2)、式(3),计算得到路面各结构层的容许差异沉降(见表 10)。图 3 为路面各层容许差异沉降与公路服役时间的拟合曲线。

依据图 3,沥青砼面层容许差异沉降与时间的关系为:

$$y=0.010\ 1x^2-0.317\ 8x+5.637\ 1 \quad (12)$$

基层容许差异沉降与时间的关系为:

$$y=0.005\ 8x^2-0.198\ 5x+6.593\ 6 \quad (13)$$

底基层容许差异沉降与时间的关系为:

$$y=0.005\ 9x^2-0.203\ 4x+7.079\ 2 \quad (14)$$

表 9 路面各层材料容许拉应力随时间的变化

| 道路服役 时间/年 | 各结构层容许应力/MPa | | |
|--------------|--------------|---------|---------|
| | 沥青砼面层 | 水泥碎石基层 | 二灰土底基层 |
| 3 | 0.466 9 | 0.296 8 | 0.114 8 |
| 5 | 0.412 9 | 0.281 1 | 0.108 9 |
| 7 | 0.377 9 | 0.267 9 | 0.103 9 |
| 9 | 0.353 9 | 0.261 1 | 0.100 9 |
| 13 | 0.318 9 | 0.245 9 | 0.094 9 |
| 15 | 0.304 9 | 0.240 9 | 0.095 2 |

表 10 路面各结构层容许差异沉降随时间的变化

| 道路服役 时间/年 | 各结构层容许差异沉降/cm | | |
|--------------|---------------|--------|--------|
| | 沥青砼面层 | 水泥碎石基层 | 二灰土底基层 |
| 3 | 4.82 | 6.07 | 6.54 |
| 5 | 4.24 | 5.72 | 6.19 |
| 7 | 3.88 | 5.47 | 5.93 |
| 9 | 3.63 | 5.30 | 5.75 |
| 13 | 3.26 | 5.00 | 5.45 |
| 15 | 3.11 | 4.90 | 5.36 |

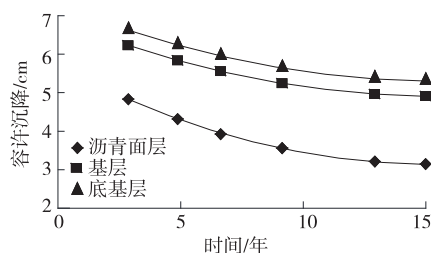


图3 各结构层容许沉降与公路服役时间的关系

由图3可知:路面各结构层中,沥青面层容许差异沉降最小,为控制路面出现病害,应以沥青面层的容许差异沉降值为控制标准。依据式(12)求得公路服役5、10、15年时沥青面层的容许差异沉降值分别为4.30、3.47、3.14 cm。

3 结论

该文基于某高速公路典型路段分析新老路基差异沉降与路面应力的关系,并考虑沥青材料疲劳特性的影响,分析高速公路改扩建工程加宽路基与旧路基之间的容许差异沉降控制标准,结论如下:

(1) 高速公路改扩建工程加宽路基与旧路基之间的容许差异沉降以沥青路面面层容许沉降值为控制标准。

(2) 因高速公路服役一段时间后会进行大修,若将最小的容许差异沉降值作为控制标准,施工成本及难度将大幅增加;若容许差异沉降标准取值太大,则路面易出现裂缝,工程质量得不到保证。以拓宽公路10年内不进行大修为目标,以沥青面层容许沉降4.30 cm为标准,按路基半幅宽度17.25 m计算得出路面面层横坡2‰,该高速公路改扩建工程新老路基容许差异沉降以半幅横坡改变量2‰为控

制标准。

参考文献:

- [1] 黄凯,闫明吉,孙洪军.山区粗粒土路堤流变特性及沉降预测方法研究[J].公路与汽运,2017(5).
- [2] 付秀艳,薛皓辰.基于有限元模拟的抛石挤淤沉降控制对比研究[J].公路与汽运,2018(2).
- [3] 魏建国,李洋,王晶,等.驻信高速改扩建工程土石混填路基施工技术[J].公路与汽运,2016(5).
- [4] 胡其志,黄希程,周红,等.半幅填方路基差异沉降影响因素研究[J].湖南交通科技,2015,41(4).
- [5] 端木瑾,陈锐,戴卓志.水官高速扩建工程边坡设计的综合分析[J].公路工程,2014,39(2).
- [6] 张希然,谢锴,康晓茜.浅谈吉怀高速公路上边坡生态防护[J].公路工程,2011,36(3).
- [7] 叶永城,李思清,马鹏真.佛开高速公路单侧拓宽工程差异沉降控制标准研究[J].中外公路,2013,33(5).
- [8] 宋辞,何平.高速公路拓宽路基差异沉降有限元模拟及控制指标分析[J].中外公路,2012,32(2).
- [9] 杨涛,李磊,李国维.公路双侧拓宽差异沉降控制标准研究[J].公路交通科技,2014,31(5).
- [10] 祁艺彬.基于目标的山区高速公路差异沉降主动控制方法[J].交通世界,2018(26).
- [11] 李红涛,杨彦昌,李良.G240二级公路扩建工程拼接路基差异沉降分析[J].公路与汽运,2018(6).
- [12] 杜艳军.高等级公路路堤加宽理论分析[D].哈尔滨:东北林业大学,2005.
- [13] 徐强.高速公路改扩建工程技术与实践[M].北京:人民交通出版社,2010.
- [14] 陈星光.高速公路扩建工程差异沉降控制技术研究[D].西安:长安大学,2006.

收稿日期:2018-12-18

(上接第90页)

- [J].岩土力学,2004,25(12).
- [3] Yeo S S, Hsuan Y G. Evaluation of creep behavior of high density polyethylene and polyethylene-terephthalate geogrids [J]. Geotextiles & Geomembranes, 2010, 28(5).
 - [4] 张震,魏红卫.确定蠕变折减系数的侧限时温叠加蠕变试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(增刊1).
 - [5] 薛超,袁慧,刘双英,等.双向土工格栅的蠕变与收缩特性研究[J].太原理工大学学报,2015,46(6).
 - [6] 赵鹤晖,袁慧,刘双英,等.土工格栅蠕变后拉伸性能试验研究[J].中外公路,2017,37(1).
 - [7] 丁金华,童军,张静,等.环境因素对土工格栅蠕变特性

的影响[J].岩土力学,2012,33(7).

- [8] 栾茂田,肖成志,杨庆,等.土工格栅蠕变特性的试验研究及粘弹性本构模型[J].岩土力学,2005,26(2).
- [9] 周志刚,李雨舟.土工格栅蠕变特性及其粘弹塑性损伤本构模型研究[J].岩土工程学报,2011,33(12).
- [10] 赵鹤晖.考虑老化作用下土工格栅拉伸、蠕变、筋土界面特性的试验研究[D].太原:太原理工大学,2017.
- [11] 蒋秀亭,杨旭东,童军.高密度聚乙烯土工格栅光氧老化研究进展[J].合成材料老化与应用,2015(1).
- [12] 李雨舟.土工格栅蠕变特性及加筋土本构模型研究[D].长沙:长沙理工大学,2009.

收稿日期:2018-10-19