

冰冻地区旧路基水温状态和过剩水量计算

程兴新^{1,2}, 王选仓¹, 唐 娴³

1. 长安大学公路学院, 西安 710064
2. 陕西省交通厅交通工程定额站, 西安 710064
3. 陕西交通职业技术学院公路工程系, 西安 710018

摘要 冰冻地区在路基加宽时, 原有路基的水温状态发生较大变化, 如果不改变原有路基的水温状态, 在新旧连接部会出现各种路基路面病害。根据加宽路基过程中出现的不同水温状态, 划分成开始阶段、积水阶段、冰冻阶段、含水量饱和阶段、完全融冻阶段 5 个阶段, 采用土的基本渗流理论, 推导出从旧路基流入加宽路基的过剩水量计算公式, 提出改善加宽路基水温状态的措施, 为加宽路基的设计提供一定的技术指导。

关键词 道路工程; 冰冻地区; 公路改扩建; 加宽路基; 水温; 过剩水量计算

中图分类号 U416.25

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)15-0067-04

Calculation of Water Temperature State and Amount of Surplus Water for Original Subgrade in Frost Regions

CHENG Xingxin^{1,2}, WANG Xuancang¹, TANG Xian³

1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China
2. Traffic Engineering Quota Station, Communication Department of Shaanxi Province, Xi'an 710064, China
3. Department of Highway Engineering, Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710018, China

Abstract Water temperature state of an old subgrade in frost regions might change significantly when it is widened. If old water temperature state is not accurately analyzed and calculated, all kinds of damages of subgrade and pavement in the joints between the old places and new places may become possible. This paper analyzes different water temperature states in widening subgrade, as connection between the original and widening subgrades in the frost regions. One may identify the beginning stage, stagnant stage, freezing stage, saturated moisture stage and complete melting stage

on the basis of previous studies. The calculation formula for the amount of surplus water is derived with the help of the seepage theory of soil, and some technological measures are proposed to improve the water temperature state and to keep the subgrade in a middle-wet state. The results show that these measures and formulas can help to reduce various kinds of damages of subgrade and pavement in the joints..

Keywords road engineering; frost regions; reconstruction highway; widening subgrade; water temperature; amount of surplus water

0 引言

在冰冻地区公路改扩建中, 原有路基因已经使用多年, 在自身重力及汽车荷载的长期作用下, 路基填方土的自身压缩变形及其下地基的沉降变形基本完成^[1-2], 而新修部分的路基填方土的自身压缩变形及其下地基的沉降变形才刚刚开始, 在路基工程完工后的 1~2 年的时间内会发生较大的沉降变形, 容易造成路面损坏, 影响公路的正常使用。在路基加宽时, 原有路基的水温状态发生了较大的变化, 如果对原有路基的水温状态调查和勘探不足, 很可能在新旧连接部出现各种病害的发生, 缩短改建后道路的使用寿命^[3-4]。若设置排水层, 大部分水量从排水层排出, 不至于对路基的干湿程度有较大的影响, 从而预防不良路基路面病害的发生。因此, 研究旧路基的水温状态和过剩渗水量的计算, 确定有效解决新旧连接部的处治方法, 具有一定的现实意义。

收稿日期: 2009-06-25

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室访问学者项目 (09JS024); 陕西省交通科技研究项目 (2008-21k)

作者简介: 程兴新, 博士研究生, 研究方向为公路建设管理与造价管理, 电子信箱: cxx6388@yahoo.com.cn; 唐娴 (通信作者), 副教授, 研究方向为路基路面工程, 电子信箱: tangxian2000@163.com

1 路基的水温状态

在横向上,路基的冻结是不均匀的,水分从路基下部和两侧向土中温度最低的路面方向移动。路面的导热系数比路肩土高,尤其是比有植被的中央分隔带土高出 1.5~2 倍,水分受温差作用向上移动。由于冬季温度较低,在几个月的时间内,冰晶体体积增大,使面层发生冻胀,在行车的反复作用下导致路面发生变形和破坏。它的形成状态可分为 5 个阶段^[5]。

1) 开始阶段。由于游离水的渗透作用,路基上层的含水量(water content) W_c 增大到 $W_c \leq (0.65 \sim 0.7)W_T$, 其中 W_T 为土液限的下限(%),这个阶段持续到空气日平均温度 -5°C 为止。如果路面不透水,路基土的弹性模量比夏天低 10%~15%。

2) 积水阶段。由于降水或灌溉的影响,地面水下渗、地下水位升高,使路基水分增多,为冬季水分积聚提供了必要条件^[6]。

3) 冰冻阶段。进入冬季,气温下降,路基上部的土开始冻结,此时,土孔隙内的自由水在 0°C 时首先冻结,形成冰晶体。当温度继续下降时,与冰晶体接触的土颗粒表面的薄膜水(弱结合水在 $-0.1 \sim -10^\circ\text{C}$ 时冻结)受冰的结晶力的作用,移动到冰晶体上面冻结。因此,该部分土粒表面的水膜变薄,破坏了原来的吸附平衡状态,产生剩余分子引力,将吸取邻近上粒的薄膜水。当水膜变薄时,薄膜水内的离子浓度增加,产生渗透压力差。在土粒分子引力和渗透压力差的共同作用下,薄膜水就从水膜较厚处向水膜较薄处移动,并逐层向下传递。在温度为 $0 \sim -3^\circ\text{C}$ (-5°C) 的条件下,当未冻区有充足的水源供给时,水分发生连续移动,使路基上部大量聚冰。在冻土地区,受填土含水量沿深度的变化、地下水位的高低与变化、外来水补给及排水条件等因素影响。随着填土的含水量深度的增加,冻结深度加深,冻胀也增大,并达到最大值。

尤其在沥青路面的道路上,由于路面材料的导热系数远大于路肩土,路面下的土首先冻结,于是不单是路基下部水分,而且路肩、边坡下尚未冻结的土中的水分都向路面下已冻结区土中聚集。因而路面下聚集水分特别多,加重了聚冰层的形成。

4) 含水量饱和阶段。随着气温的升高,冰冻部分土开始融冻,土中水分急剧增加,冻胀减少,土的弹性模量开始降低。由路基渗出的过剩游离水在重车作用下通过土中裂缝和孔隙被挤向路槽。

5) 完全融冻阶段。春季化冻时,由于路面结构层的吸热和导温性较强,路面下的路基上先于路肩下的融化,于是路基下残余未化的冻土形成凹槽,化冻后的水分难以排出,路基上部处于过湿状态。当融化至聚冰层时,路基湿度更大,有时甚至超过液限。这样,路基在化冻过程中强度显著降低,甚至丧失承载能力,在行车荷载作用下发生弹簧、开裂、鼓包、车辙,严重时泥浆外冒。这个阶段路基土的含水量增加,致使路基土的弹性模量降低,为了减少路基土的含水量和增加路基土的强度,需要提高路基的蒸发能力和降低地下水位。这个区域一般处在行车道以下 $(2.5 \sim 3.0)D$ 深度路基内,车辆的

车轮着地面积直径 D 表示。对于二级以上道路,一般取 $D=21.3\text{ cm}$ 。在 $1.5 \sim 1.8\text{ m}$ 深度以下,土中含水量在全年几乎是不变的,路基下部土中含水量基本稳定^[7]。

2 路基土过剩水计算

路基土过剩水的计算是为了求得排水流量以及确定排水措施,在路基有水渗出时,周围不断有补给水的存在,从冰冻地区改扩建路基的水温状态可知,路基在加宽行车道时,总会有游离水从旧路面的基层流入加宽的路基内,如果不能准确计算过剩水量,使新老路基的结合部土体含水量增大,路基填土的强度不足,新旧路基填筑的路基土顶面的当量回弹模量相差较大,在新旧路基连接部位置产生较大应力,甚至产生局部应力集中,而引起的路基路面开裂。采用土的基本渗流理论,计算老路基流出过剩水的总量,根据过剩水总量的大小确定经济有效排水措施,将过剩的渗水量排出路基外,从而确保路基的干湿程度和路基强度^[3]。在改建路基时,从侧面进入路槽的总水量为

$$Q_1 = 0.01 h_0 (W_{OT} - 0.7 W_T) \gamma K_w \quad (1)$$

式中, Q_1 为从侧面进入路槽的总水量 (L/m^2); W_{OT} 为在冻胀的第 3 阶段末期或第 4 阶段初期土的春季天然含水量(%); W_T 为土的液限(%); h_0 为土层(水由此层挤入加宽路基)的计算厚度(cm),可用 $h_0 = 4D - d$ 计算,其中 D 为双轮着地等效面积圆直径(cm), d 为路面厚度(m); γ 为土容重 (t/m^3); K_w 为年降雨量系数。年降雨量系数取决于年降雨量,年降雨量小,年降雨量系数就偏小,可经试验确定^[8]。

在春季,同样有地表水通过面层的裂缝、路肩和中央分隔带渗透到路基,算式如下:

$$\sum q_{CB} = q_B + q_n + q_0 \quad (2)$$

式中, q_B 为在路基化冻时昼夜通过中央分隔带渗入加宽路基的地表水量 (L/m^2), q_n 为通过面层的裂缝和水泥混凝土面层的接缝渗入的流量 (L/m^2), q_0 为通过路肩渗入的流量 (L/m^2)。

过剩游离水的总流量可表示为

$$q = K_s \left(1000 \frac{Q_1}{T_{OT}} + \sum q_{CB} \right) = 1.5 \left(1000 \frac{Q_1}{T_{OT}} + q_B + q_n + q_0 \right) \quad (3)$$

式中, T_{OT} 为第 4 阶段的持续时间(昼夜)。为确保路基的稳定性,过剩游离水的总流量要提高一定的安全系数, K_s 一般取 1.5。当路基化冻深度到 h_0 时,平均值可由表 1 查出。

路堑土的化冻比路堤的要慢, T_{OT} 值应视其深度增加 15%~25%。对于骤暖的春天以及考虑面层的型式, T_{OT} 值可提高一定的安全系数^[9]。

计算游离水量时^[6],可采用路面的使用期限计算,也可根据公路改建路基积水理论和公路养护经验计算,没有资料的情况时可以采用经验值(表 2)。

由于过剩的游离水进入路槽内,减小了路基上层土壤的弹性模量,降低了路面底基层的承载力,如果采用一定的技术措施,将过剩水引到路基或路面基层外,阻止水分从侧面



表 1 路基化冻深度经验值
Table 1 Empirical value of the melt frost depth
for the embankment

春季的特点	土类型	各气候区内土融冻时间 T_0 (昼夜)		
		II	III	IV
转暖较慢	黏土	30~40	25~30	16~25
	砂土	25~35	16~20	10~15
转暖较快	黏土	21~25	16~20	10~15
	砂土	15~20	10~15	—

表 2 计算游离水量经验数值
Table 2 Empirical value of the calculation
volume of surplus water

土分组	路段的含 水情况	Q 绝对计算值和气候区 内通过完好面层渗透到路 槽内的单位过剩水量 $q/(L \cdot m^{-2})$		
		II	III	IV
细砂和粉砂,细和 重亚砂土	干	15/2.0	10/1.5	0
	潮	25/3.0	20/2.0	7/0.5
	湿	10/3.5	40/2.5	25/2.0
轻和重亚黏土 和黏土	干	20/2.0	15/1.5	0
	潮	50/3.0	30/2.0	15/2.0
	湿	90/4.0	50/2.5	30/2.0
粉和重粉亚砂土, 粉亚黏土	干	35/3.0	20/2.0	0
	潮	80/4.0	40/2.5	20/1.5
	湿	130/5.0	60/3.5	40/2.5

注:分子为整个春季渗入的总水量 $Q(L/m^2)$,分母为每昼夜的渗水量 $q(L/m^2)$ 。
Notes: Numerator is the total water volumes during the whole spring, as $Q, L/m^2$, denominator is the water volumes every day, as $q, L/m^2$.

进入新填路基内,或者通过毛细水的作用而进入路面底基层内,即可确保路基和路面的强度。

3 路基水温状态改善措施

在旧路改建时要改善路基的水温状态。先分析路基不良水温状态的形成原因,能否采用加高路基的方法进行处治,再通过公式(2)、(3)计算路基过剩水量,依据过剩水总量的大小,确定保持路基一定干燥程度的处治措施^[10]。
用渗透系数符合要求的砂砾替换填土层,并设置隔温层或隔水层、隔气层。在公路改建中使用隔离层是有效的,增加的工程数量不大,路面标高不会有较大的变动。为达到隔水、隔气的目的,可在整平和压实的路槽上放置事先用沥青处理过的玻璃纤维、玻璃布和其他合成纤维。这一薄层可以调节路基的水温状态,阻止水分从下面和侧面进入路基上层。当路基土壤含水量超过最佳值时,其使用效果更为显著。

使用时,路基表面应平整、密实,保持一定的横坡,然后摊铺玻璃纤维。

对于旧路基过剩水量较大的路段,冬季产生移动而使路面强度不够,最好设置隔温层。隔温层采用导热系数较低的材料,例如硬泡沫塑料、各种膨胀树脂和掺苯乙烯海绵塑料的土壤混合料。隔温层应伸出行车道外缘并埋进加固路肩内 0.5 m。隔温层的厚度,应根据当地自然条件和路面的结构计算确定。有了隔温层,路基上层土壤就不会结冻,含水量保持在一定的范围内,减缓各种路面病害的发生。利用海绵塑料混凝土做隔温层效果更好,按 $1 m^3$ 混合料掺入 300~500 kg 水泥的比例,拌合细粒膨胀苯乙烯海绵塑料,按行车道全宽摊铺,并振捣压实。海绵塑料混凝土层的厚度根据计算确定。试验资料表明^[7],海绵塑料混凝土隔温层的厚度可控制在 18 cm。

对于旧路基过剩水量较小的路段,路面加宽超过 0.9 m 以上时,设置盲沟;在旧路上铺设隔温层,再铺设新路面。如果路面下垫层的渗透系数大于每昼夜 1 m,最好在路槽以下 $(0.7 \sim 0.8)h_k$ 处设置盲沟。 h_k 为新加宽路面时所用砂内毛细水的最大上升高度。盲沟的底宽为

$$L_1 = D + 2a + 0.2 \tag{4}$$

式中, D 为盲沟管的外径(m), a 为过滤层的厚度(m)。

根据当地自然条件和游离水进入路槽的数量,排水管的内径一般可为 5~10 cm。如果使用滤水管,不必设置过滤板。使用排水管,可大大降低面层的含水量,减少冬季冻胀现象、提高路基上层土壤的弹性模量。

在酸性尤其是碱性土壤中不能使用石棉水泥管或过滤管,因为它们会被损坏而使盲沟失去作用。国外近年多使用聚合材料波纹管,经验表明,由于冻胀和局部沉陷,使用波纹管的盲沟无很大影响,且接头少,不易被土堵塞,使用寿命为 20 年以上^[9]。

如果采用碎石层和沥青混凝土面层对现有路面进行补强,而不设盲沟和隔温层,就需铺设较厚的路面结构层,这种方法适用于在石料便宜的地区^[10]。但用加厚办法补强的路面,其使用寿命要低于规定的维修周期,因为路基的水温状态没有发生改变,其弹性模量没有得到提高。

4 过剩水量计算实例

某山区公路由于交通量的增加,要对原道路进行加宽改造,通过查阅资料,路面面层厚度为 6 cm,基层为 23 cm,底基层为 20 cm,平均年降雨量为 800 mm。经调查,气温升高时,含水量饱和和阶段持续时间为 30 昼夜,设计路段外侧加宽 3 m,且加宽路段长为 100 m,按照整个线型设计要求,加高路基的高度不能超过 30 cm。通过对原路基和路面钻芯和钻探取样,进行室内和现场试验,通过面层的裂缝和水泥混凝土面层的接缝渗入的流量为 $0.8 L/(m^2 \cdot \text{昼夜})$,通过路肩渗入的流量为 $0.7 L/(m^2 \cdot \text{昼夜})$,通过测试和计算得到土层的计算厚度为 0.362 m,取样土液限为 0.30,土容重为 $1.63 t/m^3$,天然含水量为 28.5%,年降雨量系数为 1.1。

计算过剩游离水的总流量为每昼夜 4.68 L/m^2 , 由于过剩渗水总量不大, 结合该路段的实际情况, 先在路基内铺设隔水层, 并填筑 $15\sim 20 \text{ cm}$ 碎(砾)石等粗粒料, 在粗粒料上铺设隔水层, 其上再按路基要求进行填筑。经观测表明, 该项段路基处于良好的水温状态, 在新旧连接部没有出现不均匀沉降。

5 结论

在公路加宽改建过程, 由于没有采取一定的措施改变新旧路基连接部的水温状态, 致使连接部产生各种路基和路面病害, 影响公路的正常使用。通过在原路基和路面钻芯和钻探取样进行室内和现场试验, 根据路线设计加宽的宽度和长度及试验取得的试验结果, 计算出过剩渗水总量的大小, 由于该段的过剩水总量不大, 确定先在路基内铺设隔水层, 填筑 $15\sim 20 \text{ cm}$ 碎石等粗粒料, 再铺设隔水层。经过 2 年的使用, 经处理后的路基处于良好的水温状态, 在新旧连接部没有出现不均匀沉降。实践表明, 这种计算方法可为加宽路基设计提供一定的技术指导作用。

参考文献 (References)

- [1] 刘保健, 支喜兰, 谢永利, 等. 公路工程中黄土湿陷性问题分析 [J]. 中国公路学报, 2005, 18(4): 27-31.
Liu Baojian, Zhi Xilan, Xie Yongli, et al. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18 (4): 27-31.
- [2] 彭建兵, 孙萍, 范文, 等. 随机介质理论确定黄土暗穴引起的地表变形 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(4): 48-51.
Peng Jianbing, Sun Ping, Fan Wen, et al. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(4): 48-51.
- [3] 景宏君, 张斌. 黄土路基强度规律 [J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(2):

21-24.

- Jing Hongjun, Zhang Bin. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(2): 21-24.
- [4] 来弘鹏, 谢永利, 杨晓华. 黄土公路隧道受力特性测试[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(6): 53-56.
Lai Hongpeng, Xie Yongli, Yang Xiaohua. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(6): 53-56.
- [5] 杨永红, 王选仓, 韩国杰, 等. 甘肃黄土地区土基回弹模量 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(3): 7-10.
Yang Yonghong, Wang Xuancang, Han Guojie, et al. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(3): 7-10.
- [6] 冯忠居, 冯瑞玲, 赵占厂, 等. 黄土湿陷性对桥梁桩基承载力的影响[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(3): 60-63.
Feng Zhongju, Feng Ruiling, Zhao Zhanchang, et al. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(3): 60-63.
- [7] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(4): 1-9.
Gao Guorui. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(4): 1-9.
- [8] 张茂花, 谢永利, 刘保健. 湿陷性黄土变形的各向异性及与浸水路径的无关性[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 11-16.
Zhang Maohua, Xie Yongli, Liu Baojian. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 11-16.
- [9] 陈修和, 张胜, 陈为成. 皖中膨胀土的承载比 (CBR) 强度特性研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(3): 386-389.
Chen Xiuhe, Zhang Sheng, Chen Weicheng. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(3): 386-389.
- [10] 蔡奕, 施斌, 刘志彬. 团聚体大小对填筑土强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1482-1486.
Cai Yi, Shi Bin, Liu Zhibin. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(12): 1482-1486.

(责任编辑 王芷)

·学术动态·



“中国化工学会 2009 年年会暨 第 3 届全国石油和化工行业节能节水技术论坛”征文

为了更好地完成“十一五”规划《纲要》提出的目标和要求, 积极推广和提升节能减排关键技术, 实现石油和化工行业的可持续发展, 中国化工学会拟于 2009 年 11 月在广州市召开“中国化工学会 2009 年年会暨第 3 届全国石油和化工行业节能节水技术论坛”。会议主题是: 石油和化工行业节能减排技术。年会将邀请有关专家、学者就国家节能、节水、减排政策、相关技术进展和应用等方面内容进行报告与交流。

会议征文截止时间为: 2009 年 8 月 20 日。会议网站为: www.hgjz.com.cn/meeting2009/index.html。

联系方式: 北京市东城区青年湖南街 13 号《化工进展》编辑部 (100011) 胡晓丹, 黄丽娟, 王辉, 古斌; 电话: 010-64519499, 64519466; 传真: 010-64117524, 80115555-745639; 电子信箱: huagongjz@126.com; hgjz@163.com。