

潮湿多雨地区高速公路路基湿度的实测特征

钱劲松, 王 朋, 凌建明, 王海林

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 为获取潮湿多雨地区路基的湿度分布特征及其影响因素, 采用现场钻芯取样和预埋湿度传感器的方法, 对 4 条高速公路进行了现场测试. 结果表明, 黏土路基显著受地下水毛细作用的影响, 路床内平衡含水率较最佳含水率提高 5% 左右, 土路肩和边坡的入渗将直接影响外侧行车道以下路基湿度、提升含水率并造成一定程度的干湿循环, 中央分隔带防排水措施的失效也可导致内侧行车道下含水率大幅提升; 而砂土路基受地下水的影响较小, 湿度波动与气候因素变化之间的滞后性也较小. 因此, 设计时宜充分重视防排水措施的长效性, 并以受地下水位控制的路基长期湿度分布作为设计状态; 若考虑到入渗产生的湿度提升与波动, 以及高速公路行车道的荷载分布特征, 以外侧车道的实际湿度作为设计状态则更为合适.

关键词: 公路; 路基; 湿度; 现场测试; 地下水; 降雨入渗; 排水

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

In-situ Investigation of Subgrade Moisture of Expressway in Humid Zone

QIAN Jinsong, WANG Peng, LING Jianming, WANG Hailin

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to obtain the distribution characterization and influence factors of subgrade moisture in humid zone, four expressways were investigated by coring method or time domain reflectometry (TDR) probes. The results indicate that, the groundwater table is a main factor affecting moisture distribution in clayey subgrade beneath pavement, the equilibrium gravimetric water content is about 5% higher than optimum water content; the infiltration through the uncovered shoulder and slope can increase the subgrade moisture under the outer lane, and result in the wetting and drying cycles; the poor drainability of unpaved median also leads to the water accumulation under the inner lane; the

sandy subgrade is less influenced by groundwater, and the lag between rainfall and subgrade moisture variation is shorter. So, the durability of drainage facilities should be taken into consideration in highway design, and the material parameters should be selected based on equilibrium moisture content determined by underground water, especially on the actual moisture content beneath the outer lane.

Key words: highway; subgrade; moisture; in-situ investigation; groundwater; infiltration; drainage

路基土为典型的非饱和土, 直接暴露于自然环境的影响下. 受大气降雨入渗、地下水位变化以及温度迁移的作用, 在最佳含水率附近压实的路基土, 湿度将发生改变并逐渐达到平衡湿度状态^[1]. 潮湿多雨地区, 降雨充沛, 地下水位高, 则将导致路基土发生一定程度的湿化. 诸多试验研究和理论分析已表明, 随着含水率的增大, 路基土回弹模量显著降低^[2-3], 并易导致较大的永久变形^[4-5], 从而影响路面结构的长期性能和使用寿命. 因此, 掌握路基在实际运营过程中的湿度状态, 是公路结构设计和运营维护的基础任务之一.

影响路基湿度的因素纷繁复杂, 多数情况下难以建立综合考虑入渗、排水、蒸腾和热交换过程的理论分析模型, 若能进行湿度的现场调查, 则可采用数理统计的方法建立路基土湿度和环境因素之间的关系^[6]. 高速公路路幅宽、边坡范围广, 且设计时多进行相关防排水设计, 这一问题更显复杂. 但囿于既有公路的使用运营和路面结构的覆盖, 含水率的现场实测较难展开, 自上世纪 90 年代我国高速公路大规模建设以来, 路基平衡湿度的现场实测特征一直鲜有报道; 结合工程建设的短期湿度监测, 难以反映路基尤其是黏土路基在较长时间内的波动直至平衡状

收稿日期: 2012-11-27

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2012AA112505); 国家自然科学基金(50908176); 西部交通建设科技项目(2010318822003)

第一作者: 钱劲松(1980—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为道路与机场工程. E-mail: qjs1001@126.com

态. 因此,本文重点对潮湿多雨地区的高速公路进行现场测试,分析路基湿度的空间分布特征和内在原因,以期为路基长期性能及其保障技术的研究提供基础,并为既有高速公路的养护和维修决策提供依据.

1 测试路段与方法

调研选择上海和广州两地进行,测试路段基本情况及填料性质见表 1 和图 1. 其中,沪宁高速(G2)和上海郊环(G1501)路基土为典型低液限黏土(CL);广肇高速(G80)为含细粒土粗砂(SF),不均匀系数 $C_u > 10$,级配良好;崇启高速(G40)为长江口细砂(SF),不均匀系数 $C_u < 5$,粒径较为单一. 测试方法如图 2 所示:G2 测试路段正在进行拓宽改造,路面结构已被铣刨,直接在路基顶面进行钻孔,钻孔深

度为 3.2 m;G1501 测试路段为正常运营状态,在路基边坡进行钻孔,钻孔水平深度为 3 m;G80 测试路段正在实施路基拓宽,钻孔在已形成台阶状的边坡上进行,钻孔水平深度为 3 m;G40 测试路段实施前,已于路基内部预埋时域反射(TDR)湿度传感器.

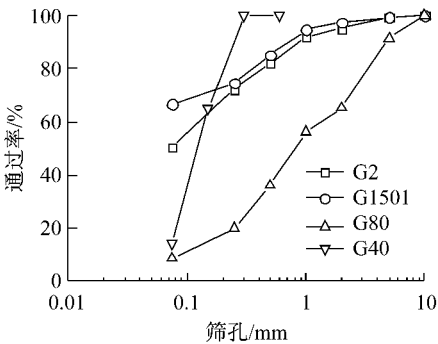


图 1 试验土样筛分曲线
Fig.1 Grain size distribution

表 1 测试路段概况

Tab.1 Test sections in field

所在公路	竣工时间/年	测试时间/(年-月)	路基相对高度/m	测试天气	路基填料					土组
					塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	塑性指数 I_P	最大干重度 $\gamma_{d,max}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	最佳含水率 $w_{opt}/\%$	
沪宁高速(G2)	1998	2007-08	3.1	晴天	19.2	31.1	11.9	18.1	16.1	CL
上海郊环(G1501)	2004	2011-06	4.0	晴、雨	21.5	33.7	12.2	17.8	14.5	CL
广肇高速(G80)	2002	2010-11	3.0	晴天	/	/	/	21.1	7.8	SF
崇启高速(G40)	2012	2011-03	3.5	全程	/	/	/	16.2	16.4	SF

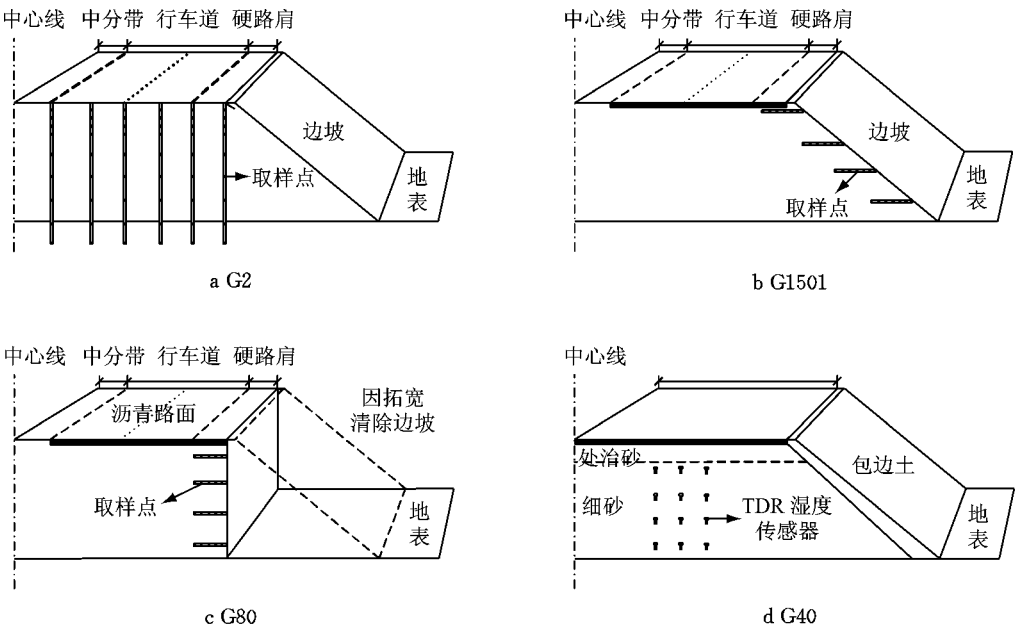


图 2 测试方法示意图

Fig.2 Investigation method

2 测试结果与分析

沪宁高速公路(G2)的测试结果汇总于图3。根据非饱和土土力学理论,含水率与基质吸力密切相关,可用土水特征曲线(SWCC)表征,含水率越高,基质吸力越小。由图3b可见,含水率整体呈现出随深度增加而提高的趋势,亦表明基质吸力随深度增大而逐渐减小,这也符合基质吸力和地下水位距离之间的关系,进而说明在潮湿多雨地区,存在铺面结构覆盖效应的黏土路基内部,其湿度状况主要受高地下水(较小的路基相对高度)控制。Drumm和

Meier^[6]认为,黏土、砂质黏土和砂土受地下水位影响的范围分别为6,3,1 m,从测试路段的相对高度来看,也可认为路基受毛下水影响强烈。因此,对于显著受地下水影响的黏土路基湿度,可由路基相对高度确定的基质吸力,通过SWCC进行预估^[7]。从含水率大小来看,受铺面结构覆盖的路床部分,含水率已达到21%,较最佳含水率提升5%,湿化现象极为严重,并处于潮湿状态^[8]。对高地下水位地区而言,在路基设计时为减少毛细水对路基湿度的影响,一般会在基底设置砂砾隔水层。但现场开挖后发现,隔水层基本已浸泡在地下水中(图4a),疑是软基发生显著沉降所致。

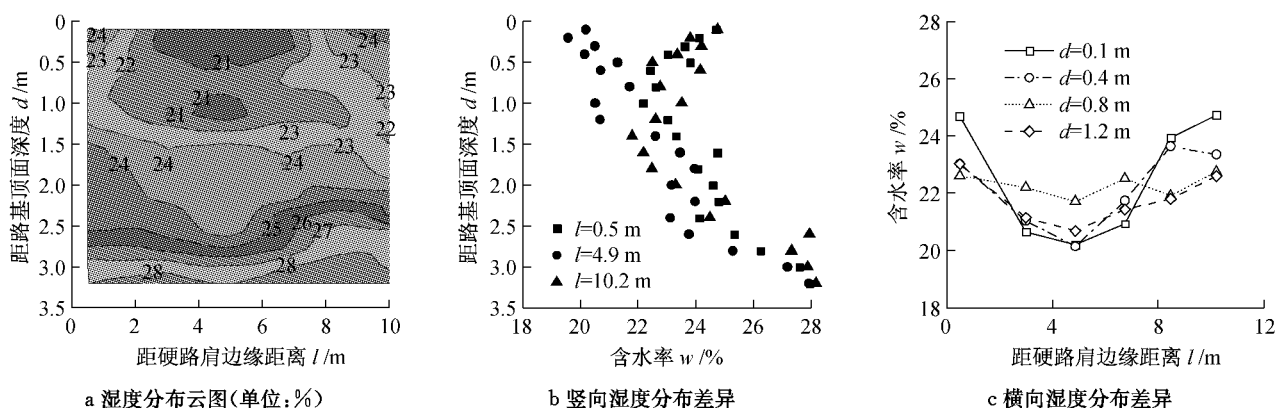


图3 沪宁高速(G2)测试路段湿度分布

Fig.3 Subgrade moisture content distribution in G2

另外,在半幅路基的两侧,即靠近硬路肩和中央分隔带处,路基湿度则呈现出先减小后增大的趋势。比较不同层位的含水率横向分布,如图3c。可以看出,无论是路床还是路堤部分,湿度在横断面分布上均具有明显的不均匀性。就不均匀性程度而言,上路床最为显著,含水率差值可达到4.5%;其次为下路床,差值为3.2%;即使上路堤也可达到2.3%。这可归结为大气降雨的影响,雨水首先浸湿无硬化处理的中央分隔带和路肩边缘,并通过渗流作用向路基内部扩散,造成路面结构边缘以下一定范围内的湿度相应增大。Roberson等^[9]应用TDR对基层和路基的湿度测试表明,路面中部以下的体积含水率比边缘小10%~15%。本文中,由于有硬路肩覆盖,外侧行车道下湿度受入渗影响相对较小,但比较外侧车道与硬路肩交界处和外侧车道中部,其含水率差值在路床范围也达到0.5%~0.9%。

但必须注意到,在下路床底部、即距路基顶面深度0.8 m处,含水率横向分布不均匀性大为降低,结合图3a可以看出,主要是中央分隔带的湿度横向迁移所致。现场调查也发现,原用于排除中央分隔带积

水的横向盲沟受细粒土堵塞较为严重(图4b),难以

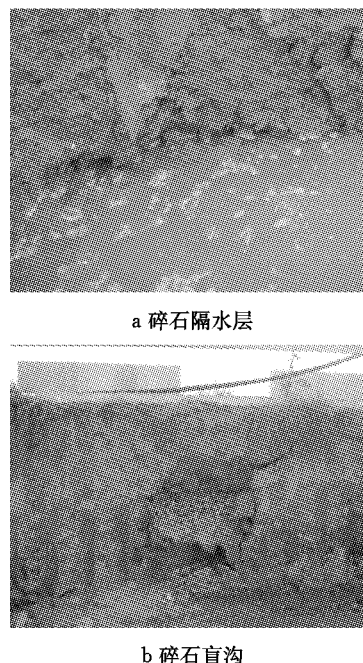


图4 沪宁高速(G2)测试路段防排水设施

Fig.4 Drainage facilities of G2

发挥快速排水的功效.从图 3a 来看,靠近中央分隔带 1.5 m 深、3.0 m 宽的范围,含水率均略高于路面正下方.笔者认为,对于分层压实的路基土而言,雨水在渗透表层绿化土后,更宜发生横向迁移.与边坡入渗首先影响硬路肩以下路基湿度所不同,中央分隔带雨水的横向迁移将直接影响内侧行车道.故在路基建设和养护过程中,必须重视中央分隔带排水措施的长效性,阻断雨水的横向迁移尤为重要.

上海郊环(G1501)的测试结果汇总于图 5. 可以看到,由于边坡直接暴露于自然环境中,受大气蒸腾和降雨入渗的影响强烈,晴天时呈现出距坡面越近湿度越小的特征,雨后坡面表层土的含水率则更高.进一步得到降雨入渗对边坡含水率的影响,如图 6. 表明,由于降雨入渗的影响,黏土路基边坡内的含水率急剧增大,增幅最大值可达到 12%;水平入渗影响深度在路床位置超过 3 m,在上路堤部分也达到 2.5 ~3.0 m;依据影响深度及含水率增量等值线的走向也可判断,该增量不仅来自于边坡降雨的横向入渗,土路肩积水的竖向入渗也是主因之一.已有诸多研究欲得到降雨和路基湿度变迁的关系,结论基本上

均为相关性不大^[6],也有研究发现在降雨量和湿度值间存在着滞后性,其时间大概为 3 周~2 个月^[10]. 图 5 显示,降雨结束约 3 h 后,湿度最大值位于距坡表 50 cm 处,可以预计的是,雨后水分一方面将受蒸腾影响向外迁移,另一方面仍将缓慢向内迁移,从而继续影响路基内部的湿度状态.

受钻孔深度的影响,难以直接判断行车道以下路基湿度状况.但就路床部分的入渗影响而言,在距坡面 3 m 处,其含水率增量仍达到 1.7%~4.8%,说明降雨入渗仍将继续横向迁移,深入至外行车道下方路基.沪宁高速(G2)的测试结果已经表明,外行车道以下路基湿度易受边缘雨水入渗的影响,而图 6 所表现出的另一信息是,黏土路基竣工 6 年后,降雨入渗仍将导致外行车道以下路基在高含水率的条件下继续湿化,晴天又势必由于蒸腾发生含水率的降低,从而形成一定湿度幅度内的干湿循环,造成路基性能衰减^[11].

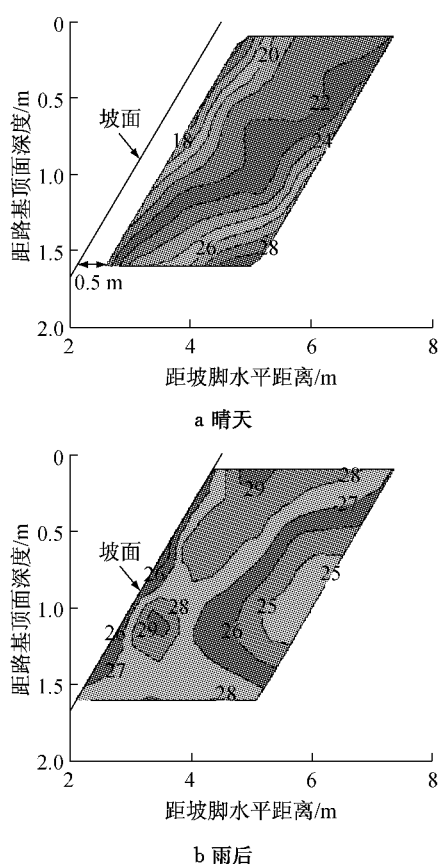


图 5 上海郊环(G1501)测试路段湿度分布(单位:%)

Fig.5 Subgrade moisture content distribution in G1501 (unit: %)

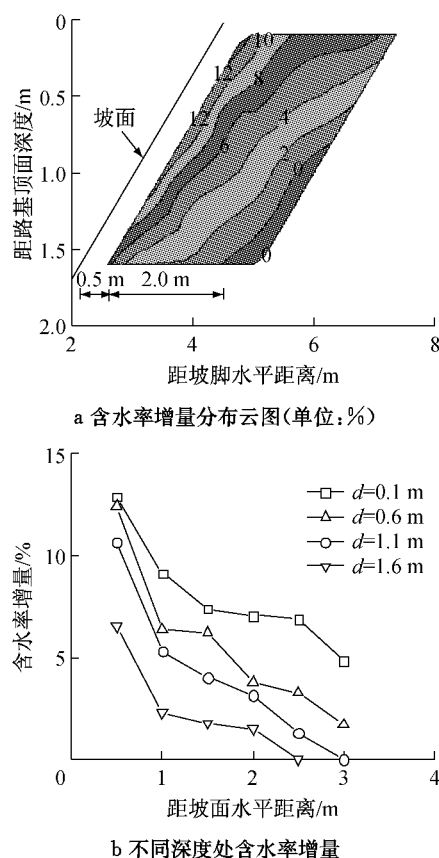


图 6 降雨入渗对边坡湿度的影响

Fig.6 The effect of infiltration on moisture in slope

广肇高速(G80)的测试结果汇总于图 7. 湿度竖向分布特征方面,含水率呈现出随深度增加而提高的趋势,与 G2(图 3b)相似,但 1.2 m 深度范围内含

水率差值高达 4.3%~5.5%, 明显大于后者 2%~3% 的竖向差异. 湿度横向分布特征方面, 距坡面越近湿度越小, 与 G1501(图 5a) 相似, 但含水率差值在深度 0.2 m 处仅为 2.1%, 在深度 1.4 m 处仅为 1.1%, 明显小于后者近 6% 的横向差异.

与上述两处黏土路基比较, 横向湿度差异小、竖向湿度差异大, 其主要原因可归结为砂类土的粒径组成. 湿度受地下水位控制时, 基质吸力沿路基深度方向基本呈线性分布, 而砂土的土水曲线特征与黏土显著不同, 较小的基质吸力变化即可产生较大的含水率差异, 故形成路基湿度随高度的上升而显著

下降的趋势. 湿度受降雨和蒸腾作用的动态控制时, 砂土的渗透系数显著大于黏土, 故晴天时路基内部更快受到蒸腾作用的影响, 导致内、外侧含水率差异较小, 同样可推测雨天后内侧湿度应更快得到提升. Bayomy^[12] 分析了 Pennsylvania 地区 8 处路基湿度的季节性波动, 同样表明渗透性更强的砂土湿度波动范围为 3%~4%, 而黏土仅为 1% 左右. 此外, 图 3a 中, 晴天时沪宁高速 G2 路基外侧湿度明显比行车道下高, 可以理解为黏土路基中入渗的水分难以在两次降雨之间蒸腾完毕, 从而形成一定程度的积聚.

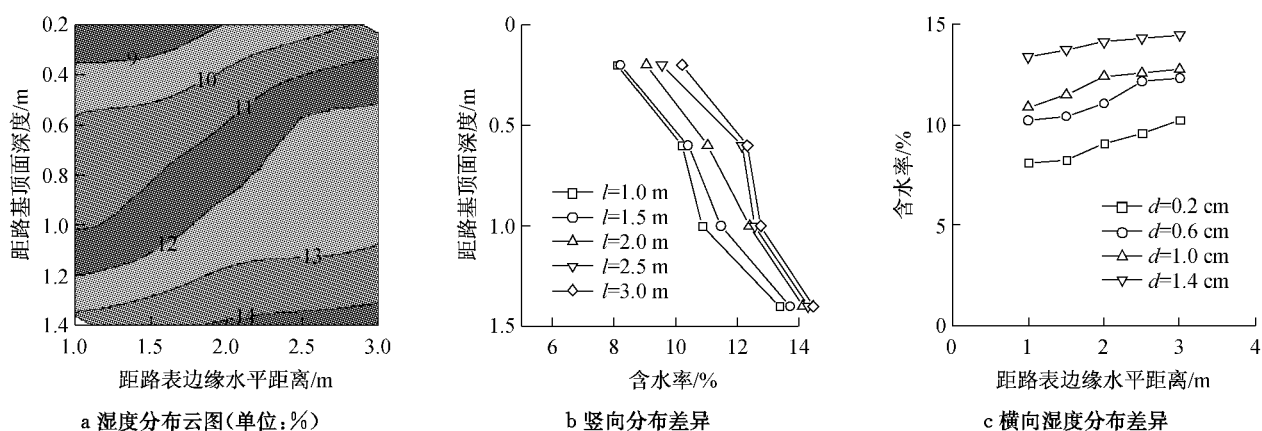


图 7 广肇高速(G80)测试路段湿度分布

Fig. 7 Subgrade moisture content distribution in G80

崇启高速(G40)的测试结果汇总于图 8. 可见, 细砂路基受地下毛细水的作用较小, 随着路基高度 h 的增加, 细砂含水率急剧减小, 在距路基顶面 80~120 cm 内, 含水率小于 10%, 顶层细砂含水率甚至

小于 5%. 同时, 由于强烈的渗透性, 施工含水率较高的上层细砂, 其含水率会随着时间的推移快速下降并趋于平衡. 上述两个特征也再次验证了砂土路基的颗粒特性对于路基含水率分布的影响.

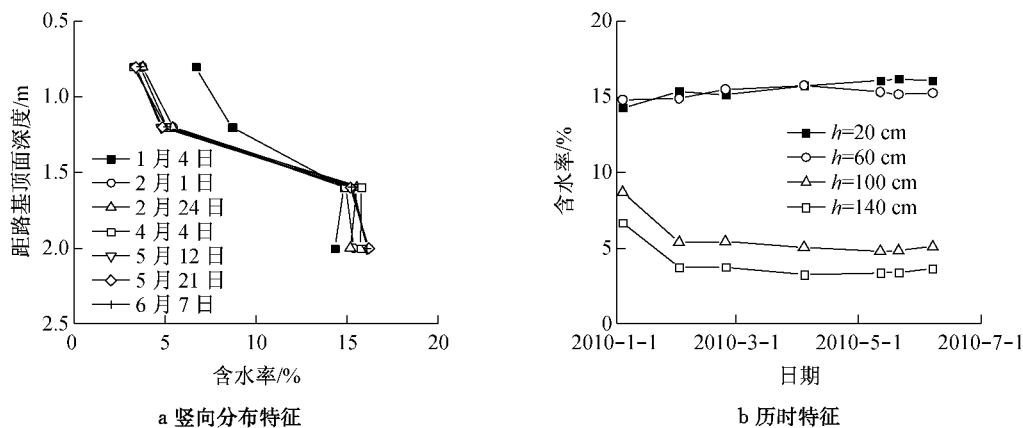


图 8 崇启高速(G40)测试路段湿度分布

Fig. 8 Subgrade moisture content distribution in G40

3 结语

(1)潮湿多雨地区,受高地下水位和大气降水的双重影响,黏土路基湿度明显偏高;由于地下水毛细作用,铺面结构正下方的湿度可比最佳含水率提升5%;边坡和土路肩处降雨入渗的横向迁移在路床部分可达到3m以上,导致外侧路基含水率增量达1.7%~4.8%,两次降雨之间又难以蒸腾完毕,易造成路面结构边缘甚至外侧行车道下路基湿度的再次提高。

(2)与黏土路基相比,砂土路基受地下水的影响较小,且路基内部横向的湿度差异也较小。

(3)由于受地下水显著影响,用于路基设计的平衡湿度可通过路基相对高度确定的基质吸力进行预估,但不可忽视由于边坡入渗和蒸腾所产生的一定幅度内的湿度变化;考虑现行交通规则下重车多在外侧行车道行驶,宜选用受降雨入渗影响较为严重的外侧行车道以下的路基湿度为设计状态,并考虑湿度的波动对长期回弹模量的影响,湿度波动范围可取2%~4%。

(4)路基防排水措施的设计和应充分考虑技术措施的长效性及其对路基性能的影响;同时,对失效的排水设施进行整治,如对早期高速公路的中央分隔带的隔水措施进行修复,以防止雨水横向迁移,也不失为一种有效的养护维修技术途径。

参考文献:

- [1] Perera Y Y, Zapata C E. Moisture equilibria beneath highway pavements[C/CD]// Proceedings of the 83rd Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington D C: Transport Research Board, 2004.
- [2] 林小平, 李兴华, 凌建明, 等. 路基土回弹模量湿度调整系数预估研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(10): 1490.
LIN Xiaoping, LI Xinghua, LING Jianming, et al. Study on moisture adjustment factor for resilient modulus of subgrade[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(10): 1490.
- [3] Kim D, Kim J R. Resilient behavior of compacted subgrade soils under the repeated triaxial test[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(7): 1470.
- [4] Li D, Selig E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(12): 1006.
- [5] 高启聚, 郭忠印, 丛林, 等. 重复荷载作用下黏性路基土的永久变形预估[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(11): 1521.
GAO Qiju, GUO Zhongyin, CONG Lin, et al. Evaluation of permanent deformation of clayed subgrade soils under cyclic loading[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(11): 1521.
- [6] Drumm E C, Meier R. LTPP data analysis: daily and seasonal variations in insitu material properties[R]. Washington D C: Transport Research Board, 2003.
- [7] 凌建明, 谢经保, 郑悦锋, 等. 基于地下水变位的路基顶面当量回弹模量预估[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(2): 162.
LING Jianming, XIE Jinbao, ZHENG Yuefeng, et al. Prediction method of equivalent resilient modulus on top of pavement subgrade with underground water table[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005, 33(2): 162.
- [8] 中交第二公路勘察设计研究院. JTG D50—2006 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
Second Highway Investigation and Design Institute of Ministry of Transport of China. JTG D50—2006, Specifications for design of asphalt pavement[S]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [9] Roberson R, Siekmeier J. Determining material moisture characteristics for pavement drainage and mechanistic empirical design [R]. Saint Paul: Minnesota Department of Transportation, 2002.
- [10] Hall D K, Rao S. Predicting subgrade moisture content for low-volume pavement design using in situ moisture content data [J]. Transportation Research Record, 1999, 1652: 98.
- [11] 李冬雪, 凌建明, 钱劲松, 等. 湿度循环下黏质路基土回弹模量演化规律[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(7): 1051.
LI Dongxue, LING Jianming, QIAN Jinsong, et al. Influence of moisture content change cyclicity on modulus evolution law of cohesive subgrade soil[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(7): 1051.
- [12] Bayomy F, Salem H. Monitoring and modeling subgrade soil moisture for pavement design and rehabilitation in idaho, Phase III: data collection and analysis [R]. Boise: Idaho Transportation Department, 2004.