

文章编号:1671-8879(2015)02-0052-07

# 广东高速公路路基内部含水率现场监测与分析

钱尼贵<sup>1,2</sup>,王端宜<sup>1</sup>,孙晓立<sup>2</sup>,石立万<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学 土木与交通学院,广东 广州 510641;

2. 广东华路交通科技有限公司,广东 广州 510420)

**摘 要:**针对广东省多雨、潮湿的气候特征,为了掌握路基内部含水率的真实变化情况,首次在 2 条高速公路试验段路基内部埋设水分传感器,进行路基含水率现场长期监测,分析其变化规律与原因。研究表明:路基内部含水率一直处于动态变化状态,主要与气候环境、路面质量状况、路堤结构型式及地下水位变化等诸多因素有关,并在一定条件下,达到相对平衡状态;当路面质量状况良好,路面入渗量很小时,路基内部含水率可一直处于疏干状态;反之当路面状况很差,路面入渗量很大,且排水系统较差时,路基可长时间处于饱和状态,对路面结构受力造成不利影响;路基内部含水率现场监测结果对完善路基路面防排水设计与施工具有重要参考价值。

**关键词:**道路工程;路基;平衡含水率;现场监测;疏干状态;饱和状态

**中图分类号:**U416.1

**文献标志码:**A

## Field experimental study on moisture content in subgrade in Guangdong expressway

QIAN Ni-gui<sup>1,2</sup>, WANG Duan-yi<sup>1</sup>, SUN Xiao-li<sup>2</sup>, SHI Li-wan<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China; 2. Traffic Science and Technology of Guangdong Hualu Limited Company, Guangzhou 510420, Guangdong, China)

**Abstract:** In order to reflect the real situation of moisture content changes in subgrade under the rainy, wet climate in Guangdong Province, humidity sensors were installed in subgrade at two highway test sections firstly. The long-term changes of the subgrade moisture content were monitored, and the change rules and causes of the variation were analyzed. The result shows that moisture content in subgrade is always in the state of dynamic change which is mainly affected by the climate, the quality of pavement, the embankment structure and the ground water level, etc. Under certain conditions moisture content reaches a relative equilibrium. Moisture content in subgrade is in a drainage condition all the time with high quality of pavement and small infiltration, otherwise moisture content is in a saturated condition with bad quality of pavement, high infiltration and bad drainage system which is very harmful to pavement structure. The result shows its important reference value to the design and construction of pavement structure. 3 tabs, 15 figs, 10 refs.

收稿日期:2014-03-20

基金项目:广东省交通运输厅科技项目(2005-38,2009-02-009)

作者简介:钱尼贵(1974-),男,安徽安庆人,广东华路交通科技有限公司工程师,华南理工大学工学博士研究生,

E-mail:361309156@qq.com。

**Key words:** road engineering; subgrade; equilibrium moisture content; in-situ monitoring; drainage condition; saturated condition

# 0 引 言

中国高速公路路面结构设计中,路基土的主要控制参数是回弹模量<sup>[1]</sup>,然而大多数路基土的回弹模量值与其含水率关系很大<sup>[2-4]</sup>。中国现行规范中采用最不利季节测定的土基回弹模量值作为土基强度的设计值,没有考虑一年中含水率变化情况及其对回弹模量的影响。在 AASHTO 2002 路面设计指南中<sup>[5]</sup>,采用了 Fredlund 和 Xing 提出的土-水特性曲线模型,同时路基强度指标采用路基动态回弹模量,并引入相应的季节影响因素,考虑湿度对路基回弹模量的影响,采用路基有效回弹模量作为设计指标。武红娟等在吉林省一段粘性土路基实测一年内土基回弹模量与含水率变化情况,并推导等效回弹模量的计算公式<sup>[6]</sup>。

广东省地处中亚热带季风气候区,常年气温较高,雨量充沛,3 月~9 月为雨季,年平均气温 20.3℃~21.7℃,年平均降雨量约 1 500~2 400 mm,路面水损害现象普遍,路基土遇水软化是其重要原因之一<sup>[7]</sup>。根据工程规范要求,路基先在最佳含水率(optimum moisture content, OMC)附近进行压实,并要求相对压实度达到 90%~96%。但由于降雨入渗的影响,在道路使用后 3~5 年间,粘性路基土含水率会由原先的最佳含水率(OMC)逐渐增加至平衡含水率(equilibrium moisture content, EMC),一般平衡含水率会较塑限增加 20%~30%<sup>[8]</sup>。高志伟等对新疆地区公路路基含水率年变化规律进行了现场监测<sup>[9]</sup>。由于国内外路面结构与气候环境差异,且中国高速公路路基内部含水率现场长期监测资料缺乏,监测难度很大。为了掌握广东省高速公路路基内部含水率真实变化情况,从而了解路基回弹模量长期变化规律及其对路面结构性能的影响,本文选择广佛(广州—佛山)高速公路和茂湛(茂名—湛江)高速公路 2 个典型试验段进行长期现场监测,为完善路基路面防排水设计与施工提供参考依据。

# 1 广佛高速公路试验段现场监测

## 1.1 工程概况

广佛(广州—佛山)高速公路第 2 次扩建始于

2005 年,2009 年 12 月全线建成通车。加筋土试验段位于左幅 BK12+900~BK13+100 公里处,路基填土为含黏砂土,最佳含水率 13.5%,对应的最大干密度为 1.90 g/cm<sup>3</sup>。土体颗粒级配见表 1。

表 1 广佛高速公路试验段土体颗粒级配  
Tab. 1 Gradation of grain of Guangfo expressway

颗粒(mm)组成/%				
>2	0.5~2	0.2~0.5	0.2~0.075	<0.075
10.39	19.58	32.46	22.75	14.82

监测断面布置于 BK12+950(A 断面)和 BK13+050(B 断面),分别为土工格室挡墙路堤与土工格栅加筋土陡路堤。加筋土路堤试验段采用沥青混凝土路面,4cmSMA+6cmGAC20+10cmGAC25+下封层+56 cm 水泥稳定级配碎石等,并与原路面进行搭接,广佛高速公路试验段扩建施工结束全景见图 1。



图 1 广佛高速公路试验段  
Fig. 1 Test section of Guangfo expressway

## 1.2 现场监测方案

### 1.2.1 监测仪器

本试验段采用 14 支 MP406 水分传感器,探针长 60 mm,间距 14 mm,可测量范围 0~100VSW% (volumetric soils water),精度为±1%,反应时间小于 0.5 s,稳定时间为 3 s,输入电压 7~18VDC,输出信号 0~1 200 mV 对应含水率为 0~100VSW%。将水分传感器探针端埋入土中,另一端电缆线部分接入 DT80 远程监测系统,见下页图 2。

### 1.2.2 仪器布置及埋设

本试验段 2 个监测断面仪器埋深布置见下页图 3。

本次水分传感器埋设时间选择在基层施工结束

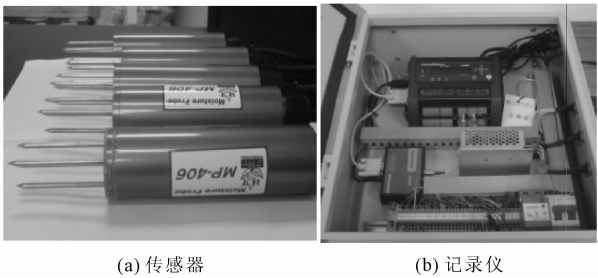


图 2 P406 水分传感器与 DT80 远程监测记录仪

Fig. 2 P406 moisture transducer and DT80 monitoring recorder

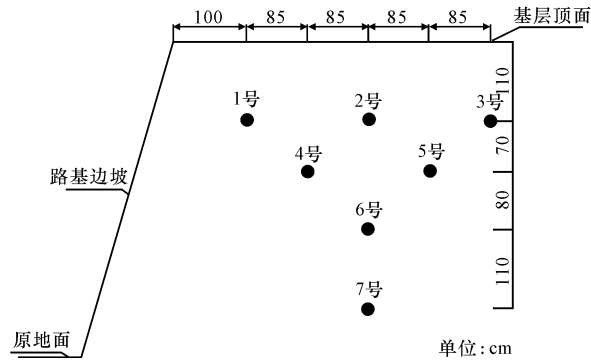


图 3 仪器埋深布置

Fig. 3 Layout of instrument embedded depth

后进行,采用小型回转钻机钻孔,到达设定位置后清孔,彻底清除孔底积水与沉渣,然后将水分传感器插入土体中,保持良好接触,底部回填粘土,上部回填砂浆,上部电缆线通过镀锌钢管引出路面至观测箱,见图 4。由于此传感器重复性、稳定性较好,室内试验时与烘干法比对误差较小<sup>[10]</sup>。



图 4 现场仪器埋设

Fig. 4 Embedment of moisture transducer

1.3 现场监测结果及分析

从 2010 年 3 月~2012 年 12 月对广佛高速公路进行路基含水率监测,2 个监测断面路基体积含水率变化情况见图 5、图 6。

由图 5、图 6 可知,BK12+950 断面位于土工格室挡墙段,外设混凝土面板,路堤高度约 4 m,路基

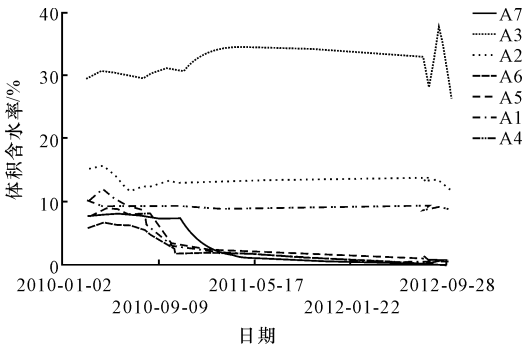


图 5 BK12+950 断面路基含水率变化曲线

Fig. 5 Moisture content curve of BK12+950 section in subgrade

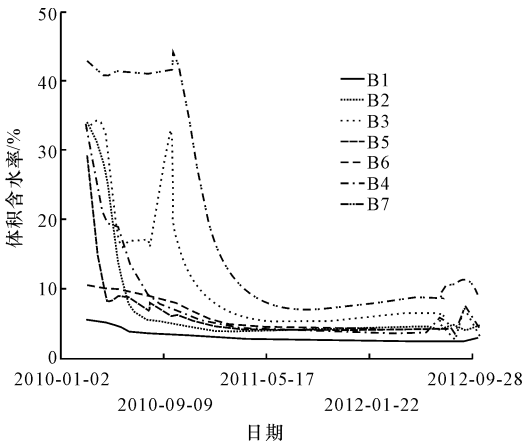


图 6 BK13+050 断面路基含水率变化曲线

Fig. 6 Moisture content curve of BK13+050 section in subgrade

上部水分传感器 A2、A3 点测值较大,A2 点处体积含水率保持在 12% 附近,A3 点处体积含水率在 30% 附近波动(该位置为新老路堤拼接处,可能与路堤拼接施工质量有关),A4 点处体积含水率保持在 8% 附近,其他点处含水率测值逐步变小,维持在疏干状态。底部含水率较小,说明没有受到地下水影响。BK13+050 断面属于土工格栅加筋土陡路堤,路堤高度约 3 m,水分传感器 B1~B7 点处含水率逐步减小,B1~B6 点体积含水率最终维持在 3%~5%,最底部水分传感器 B7 点受地下水位影响,且距地下水位 650 mm 以上<sup>[10]</sup>,体积含水率稳定于 10% 附近。

本试验段属于新拓宽路基,路基堆载预压近 2 年,顶部用塑料薄膜覆盖,卸载后发现路基浸水湿化,出现橡皮土现象,采用贝克曼梁检测弯沉平均值 432(0.01 mm),代表值 615(0.01 mm),后顶部采用水泥固化后满足设计弯沉 250(0.01 mm)的要求;水分传感器在基层施工结束后,钻机带水钻孔进行埋设,路面铺筑前有部分降雨。因此,路基内部含水率自 2010 年 3 月份开始监测,初期测量值较大,至

2011 年 3 月份,两监测断面大部分水分传感器监测趋于稳定且随季度变化较小,含水率变化绝对值为±2%。

广佛高速公路扩建路段的沥青混凝土面层厚度为 20 cm,SMA 罩面段基本不渗水,中央分隔带采用铺面封闭,路面无明显裂缝。因此,拓宽路基降雨入渗量很小,路基含水率在路面施工结束后逐步疏干至平衡含水率(EMC),其值为 3%~12%。

## 2 茂湛高速公路试验段现场监测

### 2.1 工程概况

茂湛(茂名—湛江)高速公路自通车以来,经过近 10 多年的运营,广州方向 BK61+000~BK63+000 试验段路面破损比较严重,路面主要破坏形式为纵斜裂缝、混凝土板面破碎、板角断裂、唧泥脱空、错台,以及填缝料缺损等;同时,主车道与硬路肩之间纵向接缝张开严重,硬路肩严重积水。2009 年 11 月对左幅 BK62+000~BK63+000 进行了路肩改造,采用水泥混凝土路肩结构(与主车道相同路面结构型式),路面未设置拦水带(其余路肩未改造路段均设置拦水带,经急流槽集中排水)。2009 年 12 月试验段现场调查结果:裂缝长度 328 m,填料脱落、张开接缝长度 652 m,板体断裂、破碎面积 22 m<sup>2</sup>。原设计路面结构型式:行车道为 25 cm 水泥混凝土+18cm6%水泥稳定级配碎石+18 cm4%水泥稳定石屑、砂;硬路肩为 5 cm 中粒式沥青混凝土+20 cm 级配碎石+18 cm6%水泥稳定级配碎石+18 cm4%水泥稳定石屑、砂。茂湛高速公路为双向 4 车道,两侧各预留了一个车道,预留填土宽度 1.0~4.5 m,见图 7。



图 7 茂湛高速公路试验段

Fig. 7 Test section of Maozhan Expressway

根据室内试验可知,该路基填土为含砂低液限粘土(CLS),最优含水率 12.3%,对应的最大干密度为 1.93 g/cm<sup>3</sup>。土体颗粒级配见表 2 所示。

表 2 茂湛高速公路试验段土体颗粒级配  
Tab. 2 Gradation of grain of Maozhan Expressway

颗粒(mm)组成/%				
>2	0.5~2	0.2~0.5	0.2~0.075	<0.075
9.90	11.80	11.40	16.40	50.50

### 2.2 现场监测方案

#### 2.2.1 监测仪器

所用仪器为中国产 TDR-3 水分传感器,其形状如图 8 所示。工作原理类似于 MP406 水分传感器,量程体积含水率 0~100%,精度 0~50%范围内为±2%,测量区域 90%的影响在以中央探针为中心直径 3 cm、高 6 cm 的圆柱体内,稳定时间通电后约 1 s,响应时间响应在 1 s 内进入稳态过程;工作电压 12VDC,工作电流 50 mA,输出信号 4~22 mA,其对应体积含水率 0~100%。标准电流环密封材料为 ABS 工程塑料,探针材料为不锈钢,遥测距离小于 200 m;整体尺寸为直径 50 mm,全长 200 mm,探针长度 70 mm。水分传感器使用前采用烘干法标定,水分传感器测量体积含水率  $\theta_v$ 。计算公式由厂家提供,即

$$\theta_v=0.033\ 7\times(0.156\ 3A-0.625)^3-0.042\ 6\times(0.156\ 3A-0.625)^2+0.200\ 8\times(0.156\ 3A-0.625)-0.004\ 1$$

式中: $A$  为传感器输出电流值(mA)。

水分传感器测量体积含水率均值与烘干法结果对比见下页图 9,测量数据较为可靠。

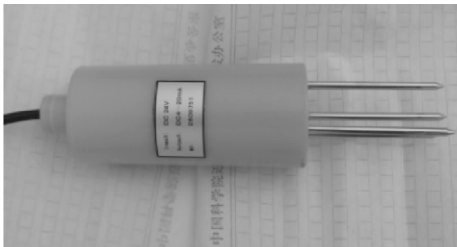


图 8 TDR-3 水分传感器

Fig. 8 TDR-3 moisture transducer

#### 2.2.2 仪器布置及埋设

本试验段传感器布置位置为:挖方路段 BK61+950 和 BK62+050 断面,填方路段 BK62+950 和 BK63+050 断面,路肩与超车道位置沿路面不同深度(1.0~5.0 m)各布置 3 个水分传感器,共 24 只,并在路肩位置各布置 1 个地下水位观测管,在埋设水分传感器同时进行原位取芯,烘干量测原状土体积含水率。挖方路段水分传感器埋设平面布置示意图 10(填方路段相同布置),埋深位置见下页表 3。

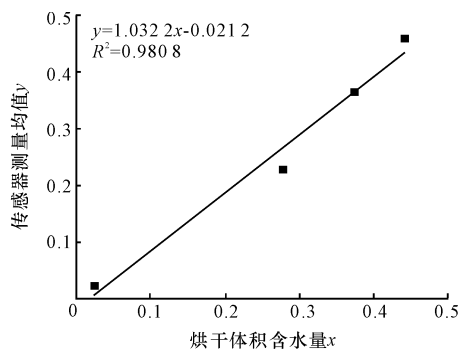


图 9 烘干法和水分传感器测量体积含水率对比

Fig. 9 Volumetric water contents of oven drying method vs. that of moisture analyzer method

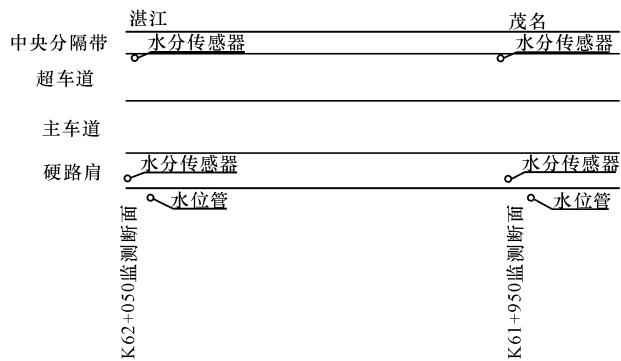


图 10 水分传感器平面布置示意

Fig. 10 Plain layout of moisture transducer

本次水分传感器埋设方法与广佛高速公路试验段基本一致,最重要的改进措施是采用 XY-1 型地质钻机进行钻孔,钻穿混凝土面层及基层后,不带水钻进(干钻),避免后面清孔繁琐,传感器埋设质量较高。

2.3 现场监测结果及分析

2010 年 1 月底,在埋设水分传感器的同时,利用钻机进行现场取芯,并在边坡坡面与中央分隔带埋深 1.0 m 位置进行人工取芯,及时烘干量测原状土样体积含水率。挖方路段路基平均值 45%,最大值为 63%,最小值为 28%,中央分隔带内部体积含水率为 33%~38%;填方路段路基体积含水率平均值为 42%,最大值为 63%,最小值为 19%,中央分隔带内部体积含水率为 38%;边坡坡面(约 0.5 m 深)体积含水率平均值为 28%,最大值 33%,最小值 19%。

2010 年 3 月~2011 年 3 月底,共进行了 18 次路基水分监测。根据本试验段挖填土的基本物理力学指标,按压实度 93% 计,饱和体积含水率约为 33%,对应的水分传感器读数为 14.0 mA,超过此读数,可以认为该测点位置土体基本上处于饱和状

表 3 水分传感器埋深布置

Tab. 3 Layout of instrument embedded depth

断面桩号	位置	埋深/m	传感器编号
BK63+050	路肩	1.2	TS3
		3.0	TS5
		4.5	TS15
	超车道	1.0	TS23
		2.4	TS20
		4.0	TS22
BK62+950	路肩	1.0	TS13
		2.5	TS2
		4.2	TS12
	超车道	1.0	TS6
		2.5	TS9
		4.0	TS14
BK62+050	路肩	1.0	TS11
		2.5	TS19
		4.2	TS16
	超车道	1.0	TS17
		2.5	TS7
		4.0	TS21
BK61+950	路肩	1.0	TS25
		2.0	TS4
		4.0	TS18
	超车道	1.0	TS24
		2.5	TS8
		3.2	TS26

态。读数超过 22.0 mA(对应体积含水率 100%),其已超过水分传感器的有效量测范围。由于本试验段水分传感器(水分计)读数普遍较大,无法全部换算成体积含水率与时间关系曲线,故采用水分传感器读数 mA 与时间关系曲线。现场路基水分监测结果见图 11~下页图 14。

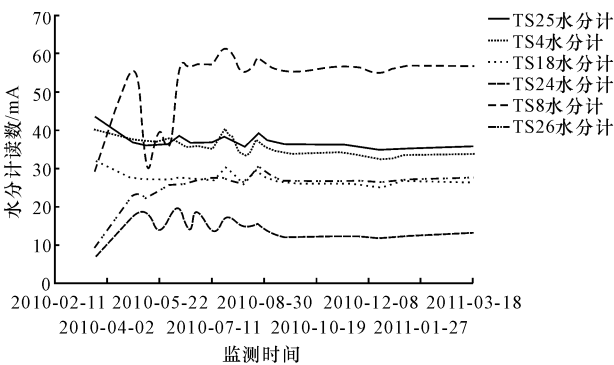


图 11 BK61+950 断面路基含水率变化曲线

Fig. 11 Moisture content curve of BK61+950 section in subgrade

监测结果显示: BK61+950 监测断面超车道 TS24(埋深 1.0 m)水分传感器读数在 20 mA 以内,

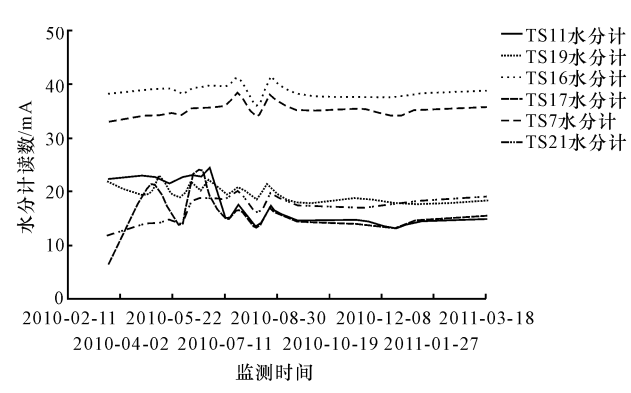


图 12 BK62+050 断面路基含水率变化曲线

Fig. 12 Moisture content curve of BK62+050 section in subgrade

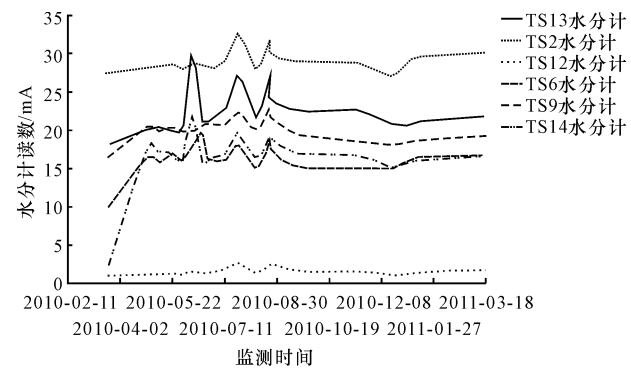


图 13 BK62+950 断面路基含水率变化曲线

Fig. 13 Moisture content curve of BK62+950 section in subgrade

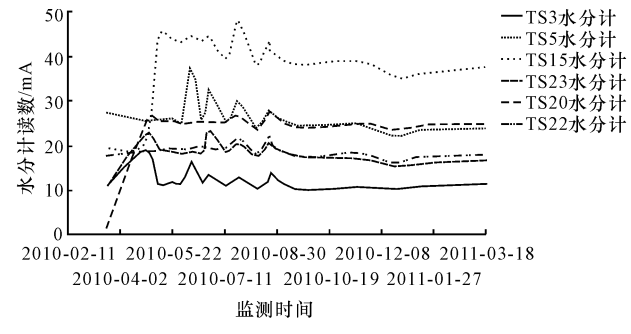


图 14 BK63+050 断面路基含水率变化曲线

Fig. 14 Moisture content curve of BK63+050 section in subgrade

并稳定于 13 mA,对应体积含水率为 28%,其余测点水分传感器都大于 20 mA,土体处于饱和状态;BK62+050 监测断面测点土体基本都处于饱和状态,其中路肩处 TS16(埋深 4.2 m)、超车道 TS7(埋深 2.5 m)2 个水分传感器读数较大为 30~40 mA,其余水分传感器读数稳定于 15~20 mA;BK62+950 监测断面测点土体基本都处于饱和状态,其中超车道水分传感器 TS6、TS9、TS14 读数稳定于 15~20 mA,路肩处水分传感器 TS2、TS13 读数稳定于 20~30 mA,TS12 读数很小,仪器出现异常;BK63+050 监测断面大部分测点土体基本都处于

饱和状态,只有路肩处水分传感器 TS3(埋深 1.2 m)读数稳定于 12 mA(对应体积含水率为 25%)。现场水分传感器监测结果与原位取芯量测结果基本一致,路基土长期处于饱和状态。

地下水位监测使用地下水位管,主要监测地下水位的规律,分别在试验段 4 个断面处埋设地下水沉降管,其观测结果如图 15 所示。结果显示:地下水位上升主要的原因之一是降雨引起的,雨季时地下水位较高,4 个监测断面地下水位变化规律一致,其中挖方路段最高水位距路面 1.5 m,最低水位距路面 3.5 m,水位变化幅度 2 m;填方路段最高水位距路面 4.2 m,最低水位距路面 5.2 m,水位变化幅度 1 m。

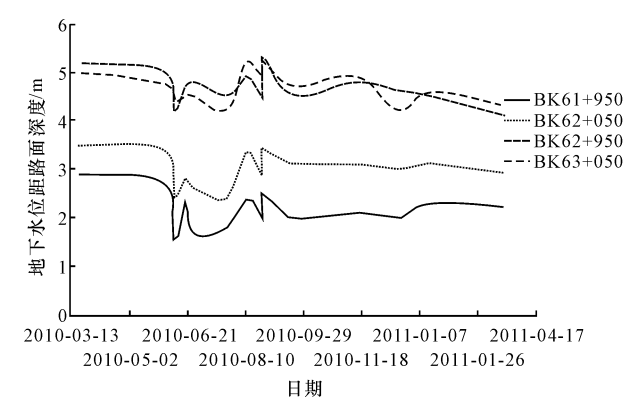


图 15 地下水位变化曲线

Fig. 15 Curve of ground water level

茂湛高速公路试验段 1 年多的监测结果表明:挖方路基地下水位距路面深度比填方路基小,且变化幅度大,其对路基内部含水率影响较大;整个试验段外侧预留一个车道,路面质量状况较差,路基路面防排水系统不良,路基内部含水率雨季(3 月~9 月)受降雨入渗影响波动较大,路基含水率总体上大于 25%,土体基本长期处于饱和状态,对路面结构受力不利。

### 3 结 语

(1)对广佛高速公路扩建工程试验路路基内部含水率进行了长期现场监测工作。该试验段沥青面层厚度较大,SMA 上面层施工质量较好,路面几乎不渗水。中央分隔带采用铺面封闭,降落在分隔带上的表面水排向两侧行车道,避免了降雨对路基含水率的不利影响。建成通车 3 年后,路基内部含水率逐步减小并趋于稳定,其值为 3%~12%。拼接路段局部位路基含水率偏大,说明路基拼接施工质量对扩建路面使用寿命具有重要影响。

(2)对茂湛高速公路试验路路基内部含水率进行了现场长期监测工作。该试验段已通车运行 10 多年,由于采用两黑一白的路面结构,渗入到路面内部的自由水较难排出,因此水泥面板破损严重,路基含水率总体上大于 25%,路基土长期处于饱和状态。路基内部含水率与气候环境、路面质量状况、路堤型式和地下水位等诸多因素有关,呈季节变化比较明显,并在一定条件下达到相对平衡状态。

(3)地下水位变化对路基含水率影响较大,试验路挖方段地下水位距路面深度较填方段小,且变化幅度大,挖方段地下水对路面结构影响更加需要引起重视。

(4)只对广东省 2 条高速公路的典型试验段路基内部含水率进行了长期现场监测,未对基层和面层的含水率进行现场监测。建议在其他高速公路进行路面和路基内部含水率的现场长期监测,从而全面掌握路面结构内部水分迁移的规律,为路基路面防排水设计提供宝贵实测资料。

## 参考文献:

## References:

- [1] TJG D50—2006,公路沥青路面设计规范[S].  
TJG D50—2006,Specifications for design of highway asphalt pavement[S]. (in Chinese)
- [2] Hu L Q, Hao J X, Wang L B. Laboratory evaluation of cement treated aggregate containing crushed clay brick[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering; English Edition, 2014, 1(5): 371-382.
- [3] 张磊,苗强强,陈正汉,等. 含水率变化对路基回弹模量的影响[J]. 后勤工程学院学报, 2010, 26(3): 13-16.  
ZHANG Lei, MIAO Qiang-qiang, CHEN Zheng-han, et al. Water content change on the subgrade resilient modulus on effects[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2010, 26(3): 13-16. (in Chinese)
- [4] 凌建明,苏华才,谢华昌,等. 路基土动态回弹模量的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(5): 919-925.  
LING Jian-ming, SU Hua-cai, XIE Hua-chang, et al. Laboratory research on dynamic resilient modulus of

subgrade soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(5): 919-925. (in Chinese)

- [5] AASHTO, Guide for design of pavement structures 2002[S].
- [6] 武红娟,徐伟,王选仓. 土基模量随季节变化规律及其数值的确定[J]. 工程地质学报, 2008, 16(1): 32-36.  
WU Hong-juan, XU Wei, WANG Xuan-cang. Seasonal variations of subgrade soil resilient moduli and their value determination[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(1): 32-36. (in Chinese)
- [7] 广东华路交通科技有限公司. 沥青路面车辙及坑槽调查与分析报告[R]. 广州:广东华路交通科技有限公司, 2005.  
Traffic Science and Technology of Guangdong Hualu Limited Company. Investigation and analysis report of ruts and pot holes of asphalt pavement[R]. Guangzhou: Traffic Science and Technology of Guangdong Hualu Limited Company, 2005. (in Chinese)
- [8] 谢华昌,吴海平,凌建明. 湿度和吸力对处治土路基回弹模量的影响[J]. 中国公路学报, 2001, 14(增1): 19-21.  
XIE Hua-chang, WU Hai-ping, LIN Jian-ming. Influence of moisture content and suction on modulus of pavement subgrade[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(S1): 19-21.
- [9] 高志伟,王选仓,宋学艺,等. 新疆地区公路路基含水率年变化规律[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2011, 31(3): 27-32.  
GAO Zhi-wei, WANG Xuan-cang, SONG Xue-yi, et al. Annual variation regularity of water content in highway subgrade at Xinjiang[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(3): 27-32. (in Chinese)
- [10] 苗强强,陈正汉,田卿燕,等. 非饱和含黏土砂毛细上升试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增1): 327-333.  
MIAO Qiang-qiang, CHEN Zheng-han, TIAN Qing-yan, et al. Experimental study of capillary rise of unsaturated clayey sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 327-333. (in Chinese)