

## 高密度电法及瑞雷波法在现役高速公路路基检测中的应用

王愉龙

陕西交通职业技术学院 公路工程系, 陕西 西安 710018

**摘要:** 公路路基是路面的基础, 它不仅承受着自重及路面结构重力, 同时也承受着由路面传递的行车荷载。坚固的路基是提高公路路面性能, 保障行车安全的重要条件。对此, 本文在分析了在役高速公路路基病害现状及评价指标的基础上, 对当前高密度电法及瑞雷波法两种路基病害无损检测技术进行改造, 并以未宜高速为例, 研究了该技术在在役高速公路路基检测中的具体应用。

**关键词:** 高密度电法; 瑞雷波法; 在役高速公路; 路基检测

**中图分类号:** U 216.42+1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2324(2016)04-0553-04

## The Application of the High Density Electrical Method and Rayleigh Method in the Subgrade Detection of In-service Highway

WANG Yu-long

Department of Highway Engineering/Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710018, China

**Abstract:** Highway subgrade is a foundation of pavement, it not only bears the weight and the pavement structure of gravity but also undergoes the vehicle load, meanwhile, the solid foundation is an important condition to improve the performance of highway pavement and ensure the driving safety. Therefor this paper analyzed the disease status and evaluation index of highway subgrade in service and then reformed the High Density Electrical Method and the Rayleigh Method which used in the subgrade diseases detection and took the Leiyi expressway as the example to discuss the application of this technology in highway subgrade detection.

**Keywords:** High Density Electrical Method; Rayleigh Method; in-service highway; subgrade detection

当今新形势下, 高速公路在推动各地区经济往来中发挥着越来越重要的作用, 加强在役高速公路路基性能检测对于延迟公路寿命等多方面具有重要意义<sup>[1]</sup>。但路基作为高速公路路面的基础, 它属于隐蔽工程, 表现出较大的探测难度, 加之传统有损检测方法效率低, 对路面结构影响大等因素的局限, 导致当前在役高速公路路基检测与评价技术相对落后<sup>[2]</sup>。因此, 为满足对在役高速公路路基性能的检测要求, 本文通过对部分典型在役高速公路路基病害进行实际调查, 得到当前在役高速公路路基病害现状及评价指标, 并针对原有高密度电法及瑞雷波法两种路基病害无损检测技术存在的不足进行了适当改造, 将改造后的高密度电法及瑞雷波法应用于未宜高速实现了路基性能检测的快速化, 提高了检测精度。

### 1 在役高速公路路基病害现状

通过对部分典型在役高速公路路基病害进行实际调查<sup>[3]</sup>, 本文将目前在役高速公路路基主要病害总结为如下几点。

#### 1.1 路基沉陷

路基沉陷一般分布在填方、软土地基、半填半挖及岩溶地基等路段, 沉陷面积多为 0.5 m<sup>2</sup>~150 m<sup>2</sup>, 主要表现为路面下沉, 并常伴有其他结构性病害。

#### 1.2 路基开裂

路基开裂一般分布在填方、半填半挖路段, 主要表现为纵向裂缝形式, 裂缝长度通常在 5 m~50 m。

#### 1.3 唧泥

唧泥一般分布在填方、低填浅挖、半填半挖路段, 在路基沉陷和开裂严重处唧泥情况出现较多。

收稿日期: 2016-05-11

修回日期: 2016-05-28

基金项目: 交通运输部科技计划项目(2015319G02190)

作者简介: 王愉龙(1976-),男,陕西西安人,本科,讲师,主要从事公路工程研究. E-mail:390601842@qq.com

数字优先出版:2016-07-25 <http://www.cnki.net>

### 1.4 桥头跳车

桥头跳车在在役高速公路路基病害中较为常见，我国多数桥梁都存在着不同程度的桥头跳车情况。桥头跳车处路基出现不均匀下沉，进而造成桥面搭板开裂，严重情况下回导致错台等，该病害一般分布在沿行车方向从桥到路基一端的行车道上。

## 2 在役高速公路路基性能评价指标

### 2.1 指标选择

一般情况下，公路路基性能指标都表现为压实度、回弹模量降低及含水率升高，进而影响公路路基强度、刚度、耐久性与稳定性，并最终路基病害的形式显现出来<sup>[4]</sup>。所以，在役高速公路路基性能评价指标应包括压实度、回弹模量及含水率三项，通过这三项指标反应高速公路在行车荷载、本身自重与路面结构重力等因素影响作用下的变化情况。为进一步保障评价结果的客观、可靠，避免指标的相互重复，本文对路基压实度、含水率及回弹模量三项指标进行了独立性分析。

经大量研究发现，路基回弹模量与压实度及填土稠度之间存在着良好相关性，若用  $E$  表示路基回弹模量，用  $K$  表示压实度，用  $\omega_c$  表示填土稠度，则可得到三者的关系表达式为： $E=AK^M\omega_c^N$ ，其中， $A$ 、 $M$ 、 $N$  表示与填土性质相关的标定参数。根据该式可知，路基回弹模量是一定压实度及含水率状态下路基土在刚度方面的反映，路基回弹模量与路基压实度及含水率三项指标存在重复情况，不具备相互独立性，所以，本文认为对在役高速公路路基性能评价中，不应将这三项内容都作为评价指标，再考虑到路基回弹模量影响着路面结构受力状态，是计算路面结构设计参数的重要指标，又是路基压实度与含水率状态的综合体现，最终决定路基性能评价指标定为路基回弹模量  $K$ ，而  $K$  值的计算则通过压实度及含水率指标实现。

### 2.2 路基回弹模量计算

根据室内获得的路基回弹模量的计算公式<sup>[5]</sup>，经过最不利季节、保证率、试筒尺寸及路基干湿类型修正，得到路基现场代表回弹模量计算公式： $E=\lambda ZAK^M\omega_c^N/B$ ，其中， $\lambda$  表示试筒尺寸修正系数，采用直径为 5 cm 与 10 cm 承载板时分别取值 0.78 与 0.59； $Z$  表示考虑保证率的折减系数，高速公路与一级公路都取值 0.66； $B$  表示综合影响系数，其取值与  $\omega_c$  有关，当  $\omega_c \geq \omega_{c1}$  时， $B$  取 1.3，当  $\omega_{c1} > \omega_c \geq \omega_{c2}$  时， $B$  取 1.6，当  $\omega_c < \omega_{c2}$  时， $B$  取 1.9。

路基压实度与含水率之间存在显著关系，通常，路基主干密度会随含水率的变大而表现出先升后降的规律，如图 1 所示。

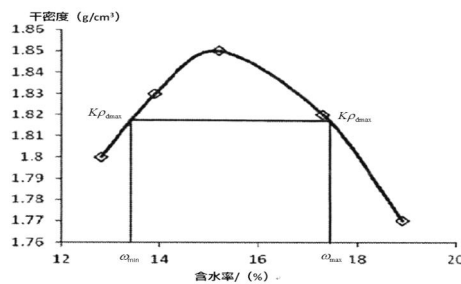


图 1 路基土干密度与含水率变化规律图

Fig.1 Changed law of the dry density and moisture content in subgrade

由图 1 可知，路基土为最佳含水率时，干密度最大，路基土高于或低于最佳含水率时，干密度都会有所下降。路基施工过程中，路基应高于或等于规定压实度  $K$ ，即路基干密度大于或等于  $K\rho_{dmax}$ ，为达到这一目标，路基含水率就要在下限含水率  $\omega_{min}$  与上限含水率  $\omega_{max}$  之间。那么， $\omega_{max}$  对应的路基回弹模量就是符合路基规定的最小回弹模量，即，将  $\omega_{max}$  带入公式  $E=\lambda ZAK^M\omega_c^N/B$  就可得到路基竣工回弹模量。

## 3 高密度电法与瑞雷波法

路基属于隐蔽工程，由于传统有损检测方法效率低下，且容易损坏路面结构等局限，一般不应

用于当今的在役高速公路路基性能检测中,而是多采用无损检测方法。高密度电法与瑞雷波法是两种典型无损检测方法,但在在役高速公路检测中也存在着检测精度低、自动化程度低、智能化程度低等问题<sup>[6]</sup>,因此,本文通过对两种检测方法原理的分析,提出了具体的改造方案,并将改造后的高密度电法与瑞雷波法应用于未宜高速路基性能检测中,以验证其合理性。

### 3.1 高密度电法及改造分析

高密度电阻率法是日本地质株式会社提出并发展起来的一种新型的电阻率方法,该方法以地下介质间的导电性差异为探测基础,同于常规电法,其原理如图2所示。

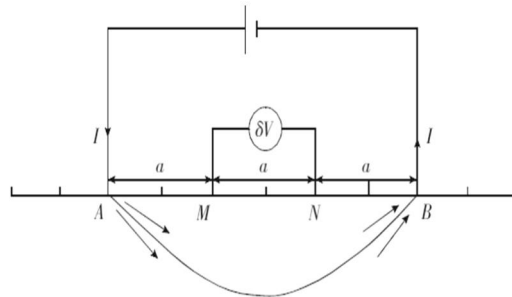


图2 高密度电法实现原理

Fig.2 The principle of High Density Electric Method

由图2可知,该方法首先通过A、B电极向地下供电,再测量M、N极电位差 $\Delta U$ ,继而得到该记录点的视电阻 $\rho_s = K \cdot \Delta U / I$ ,最终利用实际测得的视电阻率剖面进行计算分析得到地层中的电阻率分布情况,以此来了解工程地质情况。

根据在役高速公路路基性能检测要求,高密度电法电极形式及接地方式是影响该方法实现快速检测的关键,应对此进行适当改造。这种检测方法需要在检测时将超过2/3的铜棒电极插入待检目标中,而在役高速公路不能将电极透过路面插入基层中。因此,本文提出以下两点改造方法:一是电极采用导电泡沫材料,并合理的增加电极接地面积,可以在检测过程中直接将电极置于路面上;二是改变现有地表接触方式,而选择采用电容耦合接触方式获得电极所在位置的电压值,从而达到电极无需接地就能完成快速检测的目的。

### 3.2 瑞雷波法及改造分析

瑞雷波法是近些年逐渐发展起来的一项新的工程物探技术,它以锤击作为震源,锤击时激发一瞬时冲击力,产生一定频率范围的瑞雷波,不同频率瑞雷波叠加后,通过脉冲形式向前传播,而这些面波信号会同时被地震仪所记录,借助于频谱与相位谱分析实现不同频率瑞雷波的分离,进而得到VR-f(或VR- $\lambda R$ )曲线,根据该曲线最终得到测试点下方的工程地质情况。

该方法也不能满足对在役高速公路路基的检测,需要对其接地方式进行适当改造。本文提出了三点改造方案:一是将检波器固定在长10 cm,厚0.8 cm的正方形铁板上,再将铁板置于高速公路路面,以此完成对在役高速公路路基性能的检测;二是不再使用传统的检波器,转而使用检波器串,将检波器制作成饼状,再用电缆将其进行连接成串,以此完成对在役高速公路路基性能的检测;三是采用夯击编码震源系统代替传统人工锤击作为震源的方式,并在夯机上安置特殊装置,解码处理检波器接收到的地震记录以获取良好的瑞雷波数据。

### 3.3 检测设备的自动化改造

为达到对在役高速公路路基性能快速检测的目的,本文认为还应对高密度电法电极布设和瑞雷波法检波器布设进行自动化改造,将二者固定在一根特制的金属杆上,并通过液压装置实现对该金属杆的动作控制,检测过程中依据具体的检测深度调节金属杆,使电极及检波器与路面紧密接触。待完成最终检测后,再次通过液压装置调节金属杆置于另一检测点,最终实现了整个检测过程的自动化。

## 4 工程实例分析

为了检验本文中在役高速公路路基性能评价指标及改造后的高密度电法与瑞雷波法的合理性,以湖南省耒宜高速公路为例,选择典型路段进行了现场测试,并对其路基性能进行了评价。

耒宜高速公路是国家高速公路 G4 重要组成部分,是贯通我国南北的交通大动脉,于 2001 年正式通车。近些年来,随着耒宜高速交通量的累加,路面出现严重损坏情况,亟待大修改造。因此,本文以耒宜高速公路典型路段对其水泥路面路段进行了路基检测与评价。

#### 4.1 路基填料特性

通过现场取土进行击实试验及界限含水率试验,得到路基填料的最佳含水率、上限含水率、最大干密度分别为 15.2%、18.7%、1.85 g/cm<sup>3</sup>。

#### 4.2 路基回弹模量

采用 5 cm 承载板进行了室内回弹模量测试,并测定试件的压实度与含水率,得到路基回弹模量的计算公式为:  $E=93.1K^{0.615}\omega_c^{3.875}$ ,取路基竣工时压实度为 96%,含水率为 18.7%, $\lambda$ 为 0.78, $B$ 为 1.3, $Z$ 为 0.66,则得到路基竣工回弹模量  $E$  为 94.2 MPa。

#### 4.3 路基状况检测结果

采用改造后的高密度电法、瑞雷波法及自动化检测设备对耒宜高速 K1710+000~200 行车道进行详查,并利用无损检测数据的融合联合解译算法反演检测路段的路基含水率及压实度,再结合上述获得的路基回弹模量,得到检测结果如表 1 所示。

表 1 检测结果

Table 1 The results of detection

桩号 NO.	K1710+000	K1710+040	K1710+080	K1710+120	K1710+160	K1710+200
E/MPa	38.6	48.7	40.8	54.3	42.1	50.7
性能	不合格	合格	不合格	合格	不合格	合格

由表 1 可知, K1710+000~200 路基回弹模量较低,无优良状态结果,这说明耒宜高速公路路在长达 10 几年的使用中,其路基强度已经出现严重降低,甚至有一半路段处于不合格状态,已无法满足路面结构需要,急需进行加固处理。

由现场路面病害实际调查可知, K1710+000~200 段路面严重损坏,存在多处路基沉陷、唧水、唧泥等病害,这与本研究的实验结果一致,说明了本文对高密度电法、瑞雷波法的改造具有合理性,可以应用于在役高速路基检测。

## 5 结论

文章分析了在役高速公路路基病害现状,以及在役高速公路路基性能评价指标,并对高密度法及瑞雷波法进行了改造,最后以耒宜高速为例证明了改造后的高密度电法、瑞雷波法可以应用于在役高速路基检测,实现对高速公路路基性能的无损检测。但是,本文的调查及案例选择主要以南方湿热地区路基为主,而我国地域辽阔,不同地区的工程地质条件存在较大差异,所以,在下一步的研究中还应继续扩大高密度电法与瑞雷波法在不同地质环境高速公路路基性能检测中的应用,以便在全国范围内推广应用。

## 参考文献

- [1] Kim J, Jeong S, Park S, *et al.* Influence of rainfall-induced wetting on stability of slopes in weathered soils[J]. *Engineering Geology*, 2004,75(4):251-262
- [2] 孙祺华.路基病害无损检测技术应用研究[D].重庆:重庆交通大学,2010
- [3] 张 华.路基工作状况快速检测指标研究[D].重庆:重庆交通大学,2013
- [4] 王 震.耒宜高速公路路基状况及其对基层疲劳寿命的影响研究[D].长沙:长沙理工大学,2014
- [5] 陈 梦.高速铁路多层线下结构病害弹性波场无损检测方法研究[D].上海:上海交通大学,2014
- [6] 张清明,周 杨,冷元宝.探地雷达在公路路基路面检测中的应用[J].*无损检测*,2011,33(10):77-78