

既有公路路基工程检测方法与工程实例分析

王成青^{1,2}, 孔纲强^{1,2}, 吴跃东^{1,2}, 高磊^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 简要总结国内外既有公路路基的主要工程病害及类型, 着重归纳总结目前国内外常用的既有公路路基工程检测方法, 并分析各类方法的技术原理、适用范围以及优缺点等技术特点。结合江苏沿海高速公路既有路基处治工程实例, 详细分析了钻探取芯有损检测方法和地质雷达无损检测方法的应用及其对工程处治效果评价的作用, 结果表明: 地质雷达法应用于垂直注浆检测, 对成桩边界可以清晰判别; 路基钻探取芯检测可以直观定量地反映路基液塑限、密度、干密度、含水量等指标, 在局部勘察方面具有明显的优势。

关键词: 既有路基; 路基病害; 地质雷达; 钻探取芯; 检测方法; 现场试验

中图分类号: TU41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2016)02-0069-05

Detection methods for existing road subgrade engineering and project analysis/WANG Chengqing^{1,2}, KONG Gangqiang^{1,2}, WU Yuedong^{1,2}, GAO Lei^{1,2} (1. *Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: The main engineering diseases and types of damage to road subgrade in China and abroad are briefly introduced, and the most commonly used detection methods are summarized. The principles, ranges of application, and advantages and disadvantages of these detection methods are comparatively analyzed. In combination with subgrade treatment of the Jiangsu coastal highway, applications of the core drilling detection method, which may cause damage, and the geological radar detection method, which does not cause damage, are analyzed in detail, and the effects of the two methods for subgrade treatments are also evaluated. The results show that the geological radar method can be used in grouting tests in the vertical direction, and the pile boundary can be clearly distinguished. They also show that the core drilling method can reflect indices of the plastic-liquid limit, density, dry density, and water content of road subgrade quantitatively and intuitively, and has obvious advantages in local surveying.

Key words: existing road subgrade; subgrade disease; geological radar; core drilling; detection method; field test

随着高速公路的运营和交通量的快速发展,既有公路路基病害逐渐凸显^[1]。路基病害类型多种多样,针对既有公路路基开展相关检测工作,高效、快速且准确地对既有公路路基的工程质量进行有效评价,是摆在广大工程技术人员面前的重要课题^[2-3]。针对既有公路路基检测评价,最早美国学者提出采用路基设计及施工控制的压实度指标,后来提出采用强度及变形指标作为路基填土质量的控制参数^[4-5]。近年来,我国先后引入德国、日本、法国等国家先进的路基质量评估和检测方法,并研究了新的适应不同等级道路的规范、规定^[4-5]。但是,国内

外在针对既有公路路基的检测评价上尚缺乏成熟的先进技术,且现行规范中有关路基现场检测的方法和评价指标仅限于新建路基表面,而不能进行深层检测。因此,总结既有公路路基状况的检测评价技术是当前急需解决的技术问题^[6-7]。

本文在简要介绍国内外公路路基的主要工程病害及类型的基础上,归纳总结目前国内外常用的既有公路路基工程检测方法,并分析各类方法的技术原理、适用范围以及优缺点等;结合江苏沿海高速公路既有公路路基沉降病害处治工程实例,详细分析钻探取芯有损检测方法和地质雷达无损检测方法的

1 主要工程病害

不同年代、不同地区,由于降雨量不均、车辆速度和运量不一、基床土质存在差异,使得既有公路路基状态十分复杂,病害类型、分布形式、发育程度等呈复杂多样性和随机性,加大了既有公路路基检测的难度。路基病害调查的主要目的是对旧路基状况及病害程度进行普查;调查的主要任务是查明路基裂缝和沉陷的数量、长度、宽度、分布位置以及路基周围的地形地质情况,旧路基填料的岩性、土石含量和表观密实程度以及路基整体稳定性状况等,为路基检测及路基病害处治设计与施工提供参考依据。既有公路路基的主要工程病害如表 1 所示。

表 1 既有公路路基工程病害分类

病害类型	发生路段	主要特点
路基裂缝	高填方路段、路基设有高挡墙的路段、桥头路段	路基裂缝常伴随局部沉陷,路面板块出现裂缝、破碎等
路基沉陷	路基跨越深沟路段、半填半挖路基的高填深挖段、路基经过湿软土路段等	左右幅路基沉降幅度不一致,路面不平整,甚至出现裂缝、凹陷等
路基填料	旧路沿线地表岩石体及边坡上路基填料外露处	属隐蔽性灾害,不易发现,需要通过对比路基填料的岩性等进行分析
高填方路段路基稳定性	旧路高填方路段	需要进行路堤基本稳定状况、防护状况、边坡抗冲刷能力等全方位的调查

2 国内外常用检测方法

检测方法的分类多种多样,不同的分类方法可以达到不同的目的,下面分有损检测和无损检测两大类对常用检测方法进行汇总与分析。

2.1 有损检测方法

目前国内外常用的有损检测方法包括现场 CBR 检测和回弹模量检测、深层核子密度湿度仪检测、动力触探测试与标贯试验检测、现场 DCP 检测、平板载荷试验、钻探取芯检测等。

路基 CBR 检测和回弹模量检测可获得判定路基强度的回弹模量、压缩模量等指标,检测结果准确,但测试过程复杂,费用相对较高,一般不建议大规模采用^[8]。一些经过改良的 CBR 检测方法(可检测到的指标可参考现行规范),通常较为便捷可靠,但大多效率较低,对行车有干扰,且检测标准很难统一。深层核子密度湿度仪检测法主要用于检测路基的密实度和含水量^[9],需要对既有公路路基开孔以检测深层路基,可解决现行规范仅适用于路基路面表层检测的问题。该检测方法可以参考现行规范分析评价检测指标,较为方便,但需要局部开挖,干扰

行车。动力触探测试可以测定路基强度并对其稳定性作出评价,还可以记录到土层在深度上变化的信息。标贯试验检测法多用于砂性土承载力的测试,设备简单,操作方便,但只能用于表层检测,且干扰行车^[9]。其中有一种小型贯入试验法可以检验基床、封闭层及换土的强度。现场 DCP 检测法是目前国际上普遍采用的既有公路路基检测方法,在检测路基结构层强度和分层情况方面优势明显^[8]。平板载荷试验法可检测地基系数 K_{30} 、变形模量 E_{v1} 和 E_{v2} 、动态变形模量 E_{vd} 及落锤式路基动刚度等,其检测值可依据现行规范同新线进行对比,其中 K_{30} 值能更加直观有效地表征路基承载能力及刚度,但耗时较多,检测值离散性大^[10]。落锤式路基动刚度检测可以解决既有公路地基系数 K_{30} 不易检测的困难,但对行车有一定影响。路基钻探取芯检测通过钻取路基不同层位的土样检测其液塑限、密度、干密度、含水量等指标,了解路基的土性、密实状况,继而判断路基强度^[11],同时直观定量地反映路基其他特性。这种检测方法准确、直观,但由于取样及后期试验过程中诸多因素对土样的影响,容易导致试验数据受到一定干扰。

2.2 无损检测方法

目前国内外常用无损检测方法包括波速法、电测法、瞬态瑞利波法、贝克曼梁式弯沉仪法、自动弯沉仪及落锤式弯沉仪法、地质雷达法等。

波速法分为跨孔波速法和面波法,可用于确定地层及其物理力学指标,测试速度快,不影响行车,但分辨率低,易受频率、含水量等因素影响^[12]。电测法通过分析电场分布规律来认识地质构造,分析地层电性差异来反映地层变化,可用于大范围路基病害寻找和大致分布范围调查,但精度不高、检测速度慢而且难以与地层物理力学指标建立有效联系。瑞利波速度与横波速度具有很好的相关性,可以用来评价岩土工程特性,瞬态瑞利波法通过检测瑞利波速来评价既有公路路基质量及工作状态^[13],其仪器便于携带、操作简单、速度极快、分辨率高,不影响行车,在实际工程中得到了越来越广泛的应用,是一种值得推广的既有公路路基检测方法。路基检测中运用较多的弯沉仪有贝克曼梁式弯沉仪、自动弯沉仪、落锤式弯沉仪及便携式落锤弯沉仪等。贝克曼梁式弯沉仪操作简单、方便,但对行车的负荷特征以及弯沉形状描述相对较少,而且它依靠手工操作,速度较慢,还容易造成主观误差,不宜用于大规模检测。自动弯沉仪可进行高密集点的路面强度检测,更为高效。落锤式弯沉仪(FWD)是目前国际上最先进的路面强度无损检测设备之一^[14]。该设备重

量轻,便于操作,可以实现多点检测,特别适用于高等级公路路面和机场的弯沉检测和承载能力评定。便携式落锤弯沉仪(PFWD)是继常规落锤弯沉仪后的又一种新的动力模量快速无损检测设备^[15]。该仪器具备便于携带、操作简单、精度高等优势,是一种值得推广的新型仪器。地质雷达法可用于探明路基结构的分层,其原理是由天线定向向路基发射电磁波,在介质介电常数改变的地方会发生折射与反射,通过记录反射波便能确定各个结构层的交界位置^[16]。运用该方法可以探测路基病害的位置及其发育程度,继而分析路基的地质情况^[17]。地质雷达技术具有高精度、无损、方便快捷等诸多优点,但只能对路基压实的疏密程度进行描述,而不能联系土的物理力学性质来预测路基病害的发展。

3 工程实例应用与分析

各种检测方法各有优缺点,对于不同的检测工程,要根据其检测目的,选择不同的方法进行综合检测。下面以地质雷达无损检测以及钻探取芯有损检测方法在既有公路路基检测评估中的应用为例,介绍两者的优缺点。

3.1 地质雷达法

对江苏沿海高速(盐连 K854、K865、K866 段)进行地质雷达检测,在保证安全的前提下,沿着紧急停车道靠近车道 3 布设一条纵向测线,测线长度约为 40 m。测试使用意大利 IDS 公司 RIS 系列地质雷达,整套雷达系统由主机、天线、软件三部分组成。该套设备采用最新一代雷达技术,实现了高度智能化和一体化,大大提高了雷达探测的准确度和成图的清晰程度。使用 80 MHz 的低频天线,测量深度为 20 m,精度为 5 cm。

a. K854 段。K854 段为竖向钻孔旋喷桩,地质雷达检测结果如图 1 所示。由图 1 可见,处理区域与正常路段区别明显。5 m 以内界面分层清晰。竖向旋喷注浆浆液在土质较弱处黏结在一处,在图像中形成较大的桩体图像,桩头约在路面下 3 m 处。未处理路基疏松区也存在浆液,猜测是从土质强度

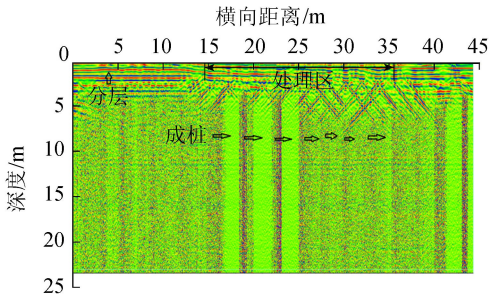


图 1 K854 段检测结果

较小或空隙较大处渗透形成。深度 10 m 处存在土层分层,测线方向 0 ~ 5 m、深度 4 ~ 7.5 m 处存在一处裂隙。路面下无明显的强反射波,反射波波形分布均匀,反射能量无大的变化,说明在整个探测深度内路基层密实度较高,道路健康状况良好。

b. K865 段。K865 段采用路面外斜向注浆方式处理地基,地质雷达检测结果如图 2 所示,异常体均在图中标注。由图 2 可见,地质雷达图像显示无明显桩体存在。9.5 m 以下土层分层明显,原有土层厚度较大,受到注浆浆液的影响。测线末端路面凸起(桥头搭接处),沉降差异最大达 20 cm。整个测线区域内,路基层密实度较好,在深度 2.5 m、长度 5 m 处存在同向轴错断现象,存在脱空异常。整个表层(1 ~ 3 m)范围内土层波形混乱,健康状况不良。

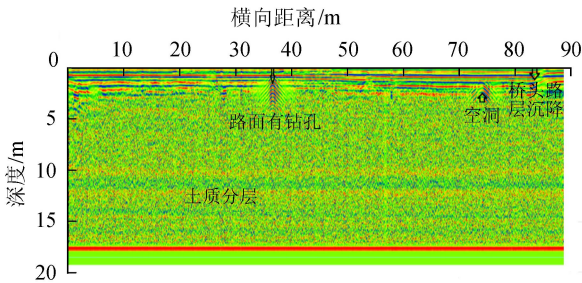


图 2 K865 段检测结果

c. K866 段。K866 段采用路面外斜向引孔注浆方式处理路基,地质雷达检测结果如图 3 所示。由图 3 可见,深度 11 m 以下土层分层明显,原有土层厚度内无浆液侵入现象。深度 1 ~ 3.5 m 路基病害较严重,深度 3.5 m 以下土层较均匀。路基表层健康状况不良。图像中黑色线以右土层与左侧有差异,右侧图形波形幅值较大,推测为富水砂土层。

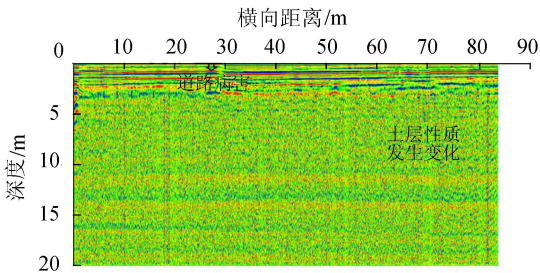


图 3 K866 段检测结果

3.2 钻探取芯检测法

由于江苏沿海高速公路连盐段前期软基处理的原理不同,部分软基路段采用不处理的方式,因此自建成并投入运营以来工后沉降较大,使局部路段路面表现出不同程度的差异沉降变形病害。通过路基钻探取芯法来确定采用高压旋喷桩加固和注浆加固后的强度指标。

a. 高压旋喷桩加固段。高压旋喷桩凝固达到

一定强度后,对 K853+990 ~ K854+020 施工路段进行钻孔取芯。该路段每半幅路面选取 3 个孔位检验点,钻孔深度 20 m,从 3 m 处开始取芯,每 1 m 取 1 个芯样,每个钻孔取 18 个芯样。桩体芯样送至河海大学岩土工程实验室进行物理力学性能试验(主要是无侧限抗压强度试验)。左半幅(盐城至连云港方向)路面 3 根取样桩的桩芯土无侧限抗压强度试验结果如图 4 所示。

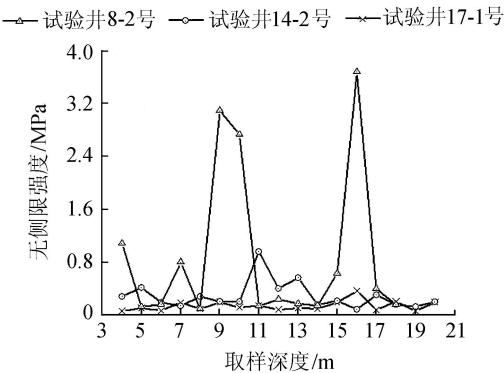


图 4 路面桩芯土无侧限抗压强度

根据试验结果统计,桩身芯土土样的 28 d 无侧限抗压强度低于 0.1 MPa 的试样仅占 14.29%,占比最高的部分为无侧限抗压强度 0.1 ~ 0.3 MPa 的试样,占 59.18%,其余试样无侧限抗压强度值均在 0.3 MPa 以上,占 26.53%。所有试样 28 d 的无侧限抗压强度平均值为 0.434 MPa,满足工程设计要求以及 GB 50202—2002《建筑地基基础工程施工质量验收规范》要求。

b. 注浆加固段。待地基中水泥浆液固化具有一定强度后,即对 K865+220 ~ K865+280 施工路段进行钻孔取芯以检验注浆效果。该路段共选取 3 个孔位检测点(分别住于 K865+230、K865+250 和 K865+270 处),钻孔深度 13 m,从 3 m 处开始取芯,每 1 m 取 1 个芯样,每个钻孔取 11 个芯样。芯样在

实验室进行物理力学性能试验,试验所得参数如表 2 所示。由表 2 可知,与原勘察报告相比(加固前),注浆加固后土体的孔隙比减小,渗透系数降低,压缩模量和抗剪强度均得到提高,注浆加固后土体的主要性能指标变化量如表 3 所示。这说明注浆加固后土体的物理力学性能得到一定的改善,工后沉降显著减少。

通过对以上两种检测方法在实际工程的应用与分析,两种检测方法均能达到其检测的目的。但是每种检测方法均有其局限性,应该综合运用当前的各种技术手段,扬长避短才能更好地检测出既有公路路基存在的工程隐患,如建立以地质雷达普查为主,结合地面局部勘察和路基信息系统的路基管理和评估模式。

4 结 论

a. 地质雷达法应用于江苏沿海高速盐连段,检测效果较为明显,对成桩边界可以清晰判别;K865、K866 段采用路面外斜向引体注浆方式,测线区域未检测到注浆桩体的存在,原有地层界面明显,推测该范围内未受到浆液扰动,可以判断路基处理未对紧急停车道的加固起到作用。这说明地质雷达法检测既有公路路基病害是切实可行的。

b. 钻探取芯法应用于江苏沿海高速连盐段高压旋喷桩加固段,钻探取芯结果显示,所有试样的 28 d 无侧限抗压强度满足本次工程设计要求以及 GB 50202—2002《建筑地基基础工程施工质量验收规范》要求;对注浆加固段,与原勘察报告相比(加固前),注浆加固后土体的孔隙比减小,渗透系数降低,压缩模量和抗剪强度均得到提高。这说明注浆加固后土体的物理力学性能得到一定的改善,工后沉降显著减小。路基钻探取芯检测可以直观定量地反映路基塑液限、密度、干密度、含水量等指标,它在

表 2 K865+220 ~ K865+280 路段试样试验结果

土样编号	取样深度/m	物理特性参数					固结试验参数			垂直渗透系数/ ($10^{-8}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	CD 三轴试验 摩擦角/ ($^{\circ}$)
		含水率/ %	湿密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	相对密度	孔隙比	压缩模量/ MPa	不同围压下固结系数/ ($10^{-4}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)			
								$P=100\text{ kPa}$	$P=200\text{ kPa}$		
K865-1-1	4	60.6	1.65	1.03	2.74	1.67	1.93	1.10	1.26	3.96	20.5
K865-1-5	8	61.0	1.64	1.02	2.74	1.69	1.87	2.80	2.76	8.88	16.2
K865-1-10	13	54.1	1.70	1.10	2.74	1.48	2.10	1.48	1.48	1.90	12.6

表 3 注浆加固后土体主要性能指标平均变化量

土样编号	取样深度/m	平均变化量/%					
		含水率	孔隙比	压缩模量	固结系数	渗透系数	摩擦角
K865-1-1	4	-7.2	-7.0	18.0	-52.0	-43.3	754.2
K865-1-5	8	-16.1	-15.3	42.9	-33.3	-12.9	15.0
K865-1-10	13	-23.7	-23.9	83.9	-33.6	-34.2	29.9

局部勘察方面具有明显的优势。

参考文献:

- [1] 杨新安,高艳灵,刘征. 论铁路既有线路基检测[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (增刊1): 2363-2366. (YANG Xinan, GAO Yanling, LIU Zheng. Inspection on the railway track substructure [J]. Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (Supl): 2363-2366. (in Chinese))
- [2] 铁道部运输局. 铁路十五提速计划[J]. 中国铁路, 2001 (9): 1-9. (Bureau of Transportation. Speed rail plan of fifteen [J]. China Railway, 2001 (9): 1-9. (in Chinese))
- [3] 铁道部运输指挥中心. 工务部门“九五”工作回顾和“十五”工作意见[J]. 铁道工务, 2001 (1): 2-11. (Railways Transportation Command Center. Works departments “ninth five” review and “fifth” work comments [J]. Railway Works, 2001 (1): 2-11. (in Chinese))
- [4] 张明鸣,冯玉勇,周家文. 基于反演参数的多年冻土路基长期温度场预测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35 (4): 425-429. (ZHANG Mingming, FENG Yuyong, ZHOU Jiawen. Long-term temperature field prediction for railway subgrade in permafrost soil zone based on parameter back analysis [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35 (4): 425-429. (in Chinese))
- [5] 杨新安,孟凡江,孙经川. 路基检测技术综述[J]. 铁道建筑技术, 2006 (4): 56-60. (YANG Xinan, MENG Fanjiang, SUN Jingwei. Summary of methods for subgrade detecting [J]. Railway Construction Technology, 2006 (4): 56-60. (in Chinese))
- [6] 谈云志,郑爱,吴翩,等. 大气作用下红黏土路基的湿热耦合数值分析[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32 (5): 32-37. (TAN Yunzhi, ZHENG Ai, WU Pian, et al. Numerical simulation of moisture-heat coupling of laterite soil subgrade under atmospheric effect [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32 (5): 32-37. (in Chinese))
- [7] 谭华,王浩,李秀梅. 桂柳高速公路路面改造工程中的路基检测评价[J]. 西部交通科技, 2007 (6): 16-21. (TAN Hua, WANG Hao, LI Xiumei. Subgrade inspection and assessment for pavement improvement works in Guilin to Liuzhou Expressway [J]. Western Transportation Technology, 2007 (6): 16-21. (in Chinese))
- [8] 晋枫春,蒋宗岑,台电仓. 清连一级公路旧路路基检测与评价[J]. 公路, 2008 (7): 80-82. (JIN Fengchun, JIANG Zongcen, TAI Diancang. Qing-Lian the first important old highway embankment testing and evaluation [J]. Highway, 2008 (7): 80-82. (in Chinese))
- [9] 张千里,韩自力. 既有提速路基检测评估技术[J]. 中国铁路, 2002 (8): 32-33. (ZHANG Qianli, HAN Zili. Existing roadbed of speed road test and evaluation techniques [J]. Chinese Railways, 2002 (8): 32-33. (in Chinese))
- [10] 缪志辉. 高速公路既有路基检测技术[J]. 交通世界, 2010 (6): 245-246. (MIAO Zhihui. Existing highway roadbed detection technology [J]. Transpoworld, 2010 (6): 245-246. (in Chinese))
- [11] 史敏. 公路旧路路基检测探讨[J]. 黑龙江交通科技, 2012 (5): 1-10. (SHI Min. Existing roadbed detection of highway [J]. Heilongjiang Transportation Technology, 2012 (5): 1-10. (in Chinese))
- [12] 程远水,朱忠林,张千里,等. 提速线路路基检测评估方法及适用条件分析[J]. 铁道建筑, 2007 (1): 74-76. (CHENG Yuanshui, ZHU Zhonglin, ZHANG Qianli, et al. Speed line roadbed detection and assessment methods applicable conditions [J]. Railway Engineering, 2007 (1): 74-76. (in Chinese))
- [13] 别大华. 几种路基检测方法在兰武二线中的应用分析[J]. 四川建筑, 2006, 26 (2): 72-73. (BIE Dahua. Application analysis of several roadbed detection methods applies in Lan-Wu Second Line [J]. Sichuan Building, 2006, 26 (2): 72-73. (in Chinese))
- [14] 曹雪山,蔡亮. 探地雷达在高等级公路质量检测和管理中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30 (3): 68-71. (CAO Xueshan, CAI Liang. Application of ground Penetrating radar to quality inspection and management of high-grade roads [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2002, 30 (3): 68-71. (in Chinese))
- [15] 刘建新. 瞬态瑞利波技术检测铁路既有线路基基床质量[J]. 铁道勘察, 2010, 36 (1): 46-48. (LIU Jianxin. To check subgrade bed quality of existing railway lines with transient rayleigh wave technique [J]. Railway Survey, 2010, 36 (1): 46-48. (in Chinese))
- [16] 于秋莉,于纪森. 浅谈路基检测新技术的两点应用[J]. 交通科技与经济, 2003, 5 (4): 1-17. (YU Qiuli, YU Jimiao. On two new techniques applied in subgrade test [J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2003, 5 (4): 1-17. (in Chinese))
- [17] 彭韦. 便携式落锤弯沉仪在砂砾卵石土路基检测中的应用[J]. 现代交通技术, 2012, 9 (5): 8-11. (PENG Wei. Application of PFWD in subgrade detection with sand gravel soil [J]. Modern Transportation Technology, 2012, 9 (5): 8-11. (in Chinese))

(收稿日期:2014-12-29 编辑:郑孝宇)