

探地雷达在土地整治道路工程 验收中的应用研究

宋文文, 李新举

(山东农业大学资源环境学院, 山东 泰安 2710000)

摘要:道路验收工作中,厚度、压实度等工程参数常常是验收工作中的重要指标,基于探地雷达的道路工程质量检测技术在土地整治项目区的道路验收中可以达到无损、快速和准确。研究采用 pulse EKKO PRO 1000 型探地雷达,使用剖面法对道路工程混凝土路面进行雷达探测,结合现场钻孔取心进行电磁波速度修正,经过校正、增益、背景去噪、反褶积等多项预处理,有效抑制噪声,提高分辨率,最后根据相应的电磁波传播速度值完成厚度分析工作,获得不同设计标准的道路工程面层与基层的厚度结构与路面的均匀度情况。结果表明,探地雷达对道路厚度结构探测最大相对误差不超过 1.43%,标准差介于 0.08~0.66 之间,可见其准确度超越了传统方法,精度可靠;经处理后雷达图像清晰,可同步了解道路面层与基层的介质均匀度情况,其中面层厚度起伏不大,个别路段基层压实不充分,厚度不均。符合设计标准与验收要求,为土地整治道路工程的验收与质量评价工作提供有效的帮助。

关键词:探地雷达;无损探测;混凝土;误差分析

中图分类号:U416.216

文献标识码:B

引文格式:宋文文,李新举.探地雷达在土地整治道路工程验收中的应用研究[J].山东国土资源,2018,34(3):50-55.SONG Wenwen, LI Xinju. Study on Application of Ground-penetrating Radar in the Acceptance of Land Consolidation Road Engineering[J]. Shandong Land and Resources, 2018,34(3):50-55.

0 引言

目前,我国的道路工程质量验收传统检测方法(灌砂法,钻孔取心法等)常因各种因素的影响导致道路工程验收程序比较复杂,一般以设计质量要求标准为指标,在不同道路进行随机选点,钻孔取样,进行后期分析处理,得到厚度、深度、强度、压实度等工程参数。这种方法直观、可靠,能够直接反映地下物质的某些特性,但也存在着局限性。首先由于随机取样,会导致检测结果的随机性较大,难以全面系统的反映道路工程的实际质量情况,还会导致道路质量的总体分布不均;其次,由于检测深度有限,难以发现道路基础内部的隐患;最后,由于钻心效率低,需要耗费大量的人力物力以及时间成本,其精度与安全性较差^[1]。这些方法对道路有一定程度的破坏作用,影响道路的正常使用寿命,已经越来越无法适应

道路建设高速发展的要求。因此,道路质量的无损检测技术逐渐成为关注的热点问题。

探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)是利用高频脉冲电磁波的反射回波快速、无损的探测介质表面下目标体的特征并生成波形图像的电磁波技术^[2]。雷达波在介质中传播时,其路径、波场强度、波形将随所通过的介质的电磁特性和几何形态而发生变化,根据收到的电磁波特征,可推断目标体的空间位置和结构特征^[3-4]。

杨天春^[5-6]等采用各种反射波识别方法和振幅补偿法,实现了对混凝土路面面层厚度的反演,并表明采用路面雷达能满足目前道路无损检测的高精度需要。中国电波传播研究所的 LTD 系列探路雷达系统能够应用于高等级公路的检测,而且 LTD-2000 型探地雷达的某些技术性能指标已达到或者超过了国外同类仪器水平,研究所也配备了专门应

收稿日期:2017-09-22;修订日期:2017-10-09;编辑:曹丽丽

基金项目:山东省重点研发计划(2016ZDJS11A02)

作者简介:宋文文(1993-),女,山东泰安人,硕士,从事探地雷达的土地整治工程质量检测研究;E-mail:1055238412@qq.com

用于公路的数据自动化分析处理软件^[7-8]。

当前,探地雷达主要应用在结构层厚度、道路缺陷与结构层病害检测之中^[9-10],例如在建设期,可实现对结构层的厚度以及密实性等的检测,来及时掌握施工质量,提高施工期的质量;在道路运行期间,利用探地雷达可以定期对路面与路基进行检查,帮助管理部门掌握路面或路基松散或者脱空等病害以及病害的发展趋势,从而制定针对性的方案,采取有效补救措施;在维修期,可以用来检测裂缝、脱空、松散等病害,为维修提供准确的数据参考^[11-14]。但是应用范围主要涉及城市道路与高级公路等设施,近年伴随政府对农村基础设施的重视,新农村建设的快速发展^[15],为了满足生产与生活的需要,农村公路越来越多,与此同时农村公路质量问题也暴露出来,农村道路施工质量优劣影响着道路使用寿命,更会影响村民生产与出行,制约农村经济发展。而农村道路的验收工作与质量评价还在受传统方法的制约,仅仅依靠道路边缘心样来进行质量评价,低效、局限,无法全面掌握施工质量。因此,开展探地雷达对农村道路的质量检测也十分必要。

该文结合具体土地治理工程实例,通过探地雷达对项目区混凝土路面道路工程验收进行厚度结构探测,结合不同设计标准要求,经过图像解译后利用探测数据对其道路工程进行质量评价,为道路工程验收工作提供帮助。

1 雷达探测道路结构的原理与方法

1.1 探测道路厚度原理

在均匀的介质中,电磁波以一定速度传播,当遇到有电性差异的地层时,如不同材料的交界面、断层、破碎带、溶洞和含水层等,电磁波便会发生反射,返回到地面或探测点,被接收天线 R 接收并记录,得到从发射经地下界面反射回接收天线的双程走时 t 。当介质的波速已知时,可根据测到 t 值,并结合对反射电磁波的频率和振幅等进行处理和分析,便可得到目标的位置、深度和几何形态^[16]。工作原理如图 1 所示。

完整的电磁波传播过程如图 2 所示。厚度检测的关键是检测电磁波在地下介质中的传播时间,通过发射天线向地面发射脉冲信号,脉冲在地下介质的传播过程中遇到具备不同介电特性的界面时会产

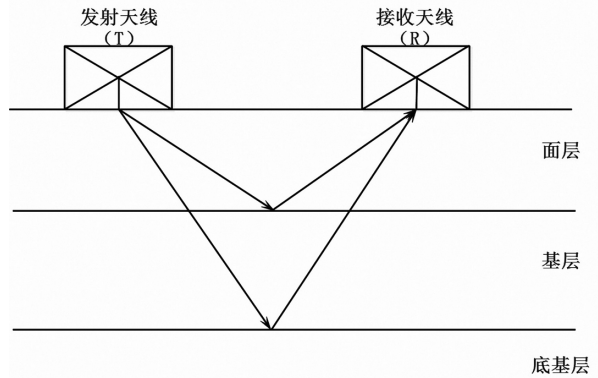


图 1 探地雷达检测道路工程时的工作原理

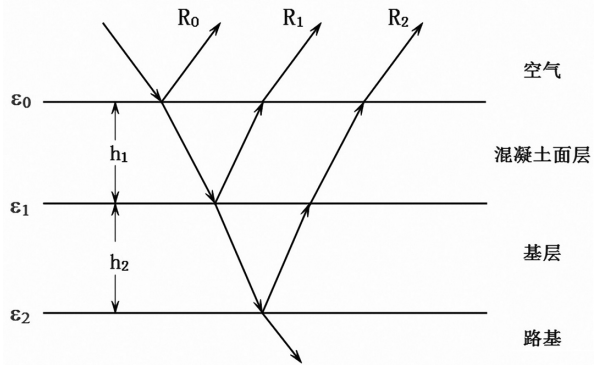


图 2 探地雷达反射波示意图

生反射和折射^[17-18]。首先波的一部分在空气与路面界面产生反射,另一部分向下穿透,由于空气与路面材料介电常数的差异,波在穿过程中产生折射,当折射波碰到第二界面(面层与基层界面)时,一部分波在界面处反射,并穿过面层由接收天线接收反射回来的信号;另一部分波则继续向下,穿透基层并在与底基层的界面处发生反射和折射。有地质雷达记录的地面反射波与地下反射波的时间差 ΔT ,和电磁波在介质中的传播速度 V ,便可计算出不同结构层的厚度 H :

$$H = V \cdot \frac{\Delta T}{2} \quad (1)$$

式中: V —电磁波在介质中的传播速度。

1.2 电磁波速度求取方法

1.2.1 介电常数法

若介质为非磁性、非导电介质时,可以用(2)式求取:

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

式中: C —电磁波在大气中的传播速度,理论值为 30 cm/ns; ϵ_r —面层介质的相对介电常数,取决于构成

面层的所有介质的介电常数。

求出不同结构层的介电常数,可得到电磁波在各结构层中的传播速度。速度 V 乘以电磁波在结构层的往返时间的一半即得到各结构层厚度^[19]。但介电常数法应用范围具有局限性,常受到多种因素的影响,因此计算出的波速可作为参考。

1.2.2 已知目标深度法

已知目标深度法^[20]是在道路工程测量中常用的一种方法,当天线固定于地表不动时,探地雷达发射天线和接收天线之间的距离很小可以忽略不计,此时:

$$\nu_c = \frac{2h}{t} \quad (3)$$

利用剖面法使用探地雷达记录电磁波的双程走时 t ,只要目标埋深 h 已知,就可以计算波速。

实际工作中,可以采用预先设置埋设物或钻孔取心来获取地层或目标体的深度。

2 工程应用实例研究

2.1 项目区简介

研究区位于泰安市岱岳区祝阳镇土地治理项目区与泰安市新泰市谷里镇土地治理项目区,以项目区道路为研究对象,依据在泰安市土地治理项目的道路验收标准,使用了探地雷达技术对项目区的道路工程质量进行了检测,运用 pulse EKKO PRO 1000 型探地雷达采用剖面法对道路工程混凝土路面进行雷达探测,结合现场钻孔取心进行电磁波速度修正,获得不同设计标准的道路工程面层的厚度结构与路面的均匀度情况。

2.2 探测参数选择

室外数据采集时的参数设置关系到道路工程质量的探测效果。使用加拿大 pulse EKKO PRO 1000 型探地雷达,时窗设置为 36 ns,雷达天线为 250 MHz,初始电磁波速度设置为 $v_1=0.1$ m/ns。

2.3 仪器设备

该次道路探测工作主要使用到的雷达设备为加拿大 Sensors&Software 公司的首发分离式雷达: pulse EKKO PRO 1000 型探地雷达,及配备 250 MHz 空气耦合天线。

2.4 工程实地探测

2.4.1 现场探测

分别对泰安市岱岳区祝阳镇土地治理项目区与泰安市新泰市谷里镇土地治理项目区的道路工程进行质量检测,主要测试道路面层、基层的厚度等技术参数,以及均匀度,检验其是否达到原设计要求。

2.4.2 介电常数标定

影响探地雷达探测混凝土面层结构厚度的因素主要在波速的标定上,但由于两个不同乡镇项目区的施工单位采取的施工材料的差异以及混凝土面层道路的含水量、孔隙率等因素的存在,使得混凝土材料的介电常数存在一定程度上的不确定性。

现场分别取得了祝阳镇 18 cm 设计标准的混凝土路面道路的 8 个心样,与谷里镇 15 cm 设计标准的混凝土路面道路的 3 个心样和 12 cm 设计标准混凝土路面道路的 3 个心样,共计 14 个混凝土路面道路的心样。结合雷达探测的双程走时,通过公式(2)和(3),分别对道路面层的电磁波速度进行标定,计算出 14 个混凝土面层的介电常数,取有效介电常数的平均值作为该面层的介电常数值,计算结果见表 1、表 2。

表 1 介电常数标定(祝阳项目区)

心样号	心样厚度/cm	双程走时/ns	介电常数
1	20.6	3.4	5.9
2	21.2	3.8	7.36
3	21	3.6	6.61
4	20.6	3.4	5.9
5	22.6	3.6	6.61
6	21.1	3.4	5.9
7	20.3	3.5	6.25
8	20.8	3.6	6.61
均值	—	—	6.39

表 2 介电常数标定(谷里项目区)

心样号	心样厚度/cm	双程走时/ns	介电常数
1	15.4	2.7	6.91
2	14.6	2.5	6.464
3	16.2	3.0	8.76
均值	—	—	7.38
4	12.1	2.5	9.57
5	12.2	2.3	7.99
6	12.3	2.2	7.08
均值	—	—	8.21

由(2)式计算可得,标定祝阳镇项目区设计标准为 18 cm 混凝土路面道路介电常数为 6.39。根据实测心样的厚度,通过(3)式,计算得各面层介质的电

磁波传播速度,将均值作为速度标定值,标定为 11.89cm/ns。同理,由表 2 可得,谷里镇项目区混凝土设计标准面层为 15 cm 道路的介电常数标定为 7.38,面层为 12 cm 设计标准的混凝土路面道路的介电常数标定为 8.21,进而面层介质的电磁波速度分别标定为 11.12 cm/ns 与 10.53 cm/ns。

3 探测结果处理

3.1 雷达探测混凝土路面道路厚度结构

由于研究项目性质为治理项目,旨在建设乡村的道路以及基础设施,改善村民的交通条件,提升村落之间的道路通达度,不涉及道路垫层的设计,基层材料就地取材,为整平后的碎石与素土,因此基层为素土路基。面层根据不同项目区,介质材料设计为不同配比的混凝土。其中,岱岳区祝阳镇土地治理项目区的道路工程的设计标准为面层至少为 18 cm,新泰市谷里镇土地治理项目区的道路工程根据主干道与所走车辆的不同,设计标准分别为混凝土面层达到 15 cm 与 12 cm。

现场探测雷达数据进行校正、增益、背景去噪、反褶积等多项预处理,有效抑制图像噪声,提高图像分辨力,最后根据相应的电磁波传播速度修正值完成厚度分析工作。两个项目区道路实测厚度结构图像如图 3、图 4、图 5 所示。

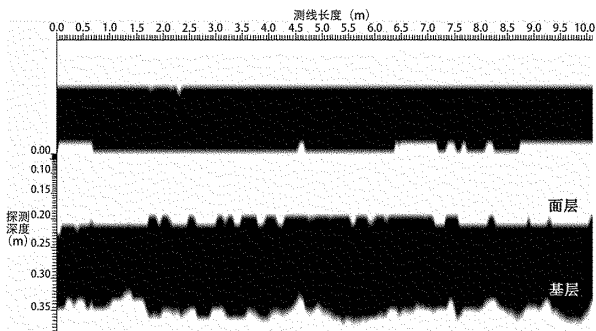


图 3 设计标准 18cm 混凝土路面道路厚度结构

以上检测结果以 m 为单位,横向为测线长,纵向为厚度值,综合图 3、图 4、图 5,对面层与基层厚度数据进行综合分析,可以看出设计标准为 18 cm 项目区道路面层厚度总体分布在 20~21 cm 之间,面层厚度起伏不大,基层厚度变化幅度也不大;设计标准 15 cm 项目区道路面层厚度总体分布在 14~16 cm 之间,面层厚度分布总体较为均匀,起伏不大,基层厚度分布相对均匀,局部变化幅度较大,可

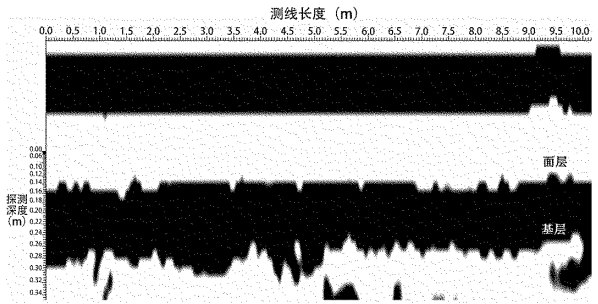


图 4 设计标准 15cm 混凝土路面道路厚度结构

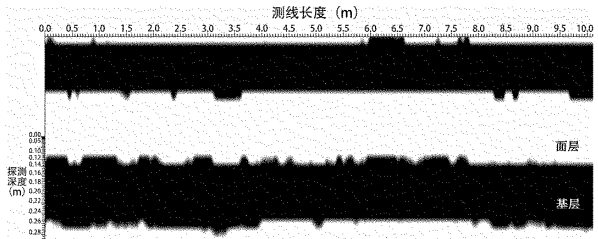


图 5 设计标准 12cm 混凝土路面道路厚度结构

见,施工过程中可能存在素土基层压实不充分出现不均匀沉降,基层未达到平整要求;设计保准 12 cm 项目区道路面层厚度总体分布在 12~14 cm 之间,面层厚度分布较为均匀,起伏不大,基层厚度变化幅度也不大,较为平整。所以,除个别基层压实不到位以外,项目区道路工程总体达到质量验收标准。

3.2 探测道路厚度结果

通过对厚度检测结果进行计算与综合分析,进行道路厚度综合评定,由表 3 与表 4 可以看出,探地雷达对祝阳项目区道路混凝土面层厚度相对误差为 1.39%,均值为 21.025 cm,标准差为 0.66;对谷里镇项目区设计标准为 15 cm 的混凝土面层厚度相对误差达 -1.43%,均值为 15.4 cm,标准差为 0.65;设计标准为 12 cm 的混凝土面层厚度相对误差为 0.34%,均值为 12.07 cm,标准差为 0.082。由此可见,钻心法对于测定道路厚度的误差相对较小,准确性是相对较高的。3 种设计标准的厚度均值都大于其设计厚度标准,说明除了个别情况下基层夯实不到位,导致分布不均,祝阳项目区与谷里项目区的道路施工总体达到验收要求。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1)结合两个实际土地治理工程项目对项目区的道路进行了质量探测,使用 GPR 技术在道路验收

上进行了实际应用,并通过解译与数据处理验证了其可行性。在现场钻心测定电磁波速度,使得农村道路质量验收工作更为科学。由于探地雷达具有无损性与高效性,对道路厚度结构质量探测准确性超越了传统方法,根据该文实验数据来看,其在厚度检测上误差较小,相对误差最大不超过1.43%,标准差位于0.08~0.66之间,可见其精度可靠。

表3 祝阳项目区道路面层厚度检测结果表(钻孔取心法)

测线号	电磁波速度 /cm·ns ⁻¹	设计厚度 /cm	实测厚度 /cm	检测厚度 /cm	绝对误差 /cm	相对误差 /%
测线1	12.35	18	20.6	20.21	-0.39	-1.89
测线2	11.05	18	21.2	20.69	-0.51	-2.41
测线3	11.67	18	21	21.402	0.402	1.91
测线4	12.35	18	20.6	20.213	-0.387	-1.88
测线5	11.67	18	22.6	24.402	1.802	7.97
测线6	12.35	18	21.1	20.22	0.42	1.99
测线7	12	18	20.3	20.81	0.51	2.51
测线8	11.67	18	20.8	21.41	0.61	2.93
均值	11.89	18	21.025	—	—	1.39

表4 谷里项目区道路面层厚度检测结果表(钻孔取心法)

测线号	电磁波速度 /cm·ns ⁻¹	设计厚度 /cm	实测厚度 /cm	检测厚度 /cm	绝对误差 /cm	相对误差 /%
测线1	11.41	15	15.4	15.01	-0.39	-2.53
测线2	11.8	15	14.6	13.91	-0.69	-4.73
测线3	10.14	15	16.2	16.68	0.48	2.96
均值	11.12	15	15.4	—	—	-1.43
测线1	9.70	12	12.1	13.11	1.01	8.35
测线2	10.61	12	12.2	12.06	-0.14	-1.15
测线3	11.27	12	12.3	11.54	-0.76	-6.17
均值	10.53	12	12.2	—	—	0.34

(2)相比钻孔取心法的随机性与不连续性,探地雷达可以做到对道路层次结构进行总体掌握,测量结果也更为客观。结合图像解译,使用探地雷达对施工均匀性的探测也更为全面,这也便于后续施工全过程质量控制和道路的维修与养护相关情况的研究,应当发挥其积极作用。

(3)GPR技术的在道路工程质量检测开展有利于质量的整体评价,探地雷达对一定深度范围内目标物的存在控制可满足要求,但对其细微的识别需要较高质量的采集信号和后处理软件,现在已有的国产探地雷达的后处理软件功能较强,可以弥补一定的仪器性能缺陷,因此可利用后处理软件,减少信号采集及传输过程中的抗干扰带来的影响,但采集的信号质量是成功解译的根本,也启发我们国产探地雷达应当提升信号采集与传输过程中的抗干扰能力,减少后期处理的工作。

4.2 讨论

(1)现场人工操作与双程走时的测定都会存在

一定程度上的误差,也会影响波速验证的精度,因此需要积累实践经验,规范操作的同时减小误差的产生。

(2)利用探地雷达图像厚度检测,地下介质的不均匀性导致反射波能量弱,加上仪器内部水平干扰、反射信号的多次叠加使得反射相位的识别变得较为困难,从而影响图像解译效果。因此要进行滤波处理,通过 Hilbert 变换将信息转化为时间域上的瞬时振幅,瞬时相位和瞬时频率,可以较好地解决反射相位识别困难的问题,提升图像分辨率。

(3)由于不同项目区施工单位的差异,对混凝土材料的选择与配比不尽相同,会影响介电常数的标定与电磁波速度的确定,对检测的厚度的准确性也会存在一定程度的影响。因此,需要实时布点进行心样样品多次采集,利用钻心取样结果完成介电常数与电磁波速度的标定,最大程度提升道路厚度分析的准确性。

参考文献:

- [1] 陈义群,肖柏勋.论探路雷达现状与发展[J].工程地球物理学报,2005,2(2):149-155.
- [2] Harry M.Jol.探地雷达理论与应用[M].北京:电子工业出版社,2011:11-15.
- [3] 曾昭发,王者江等.探地雷达方法原理与应用[M].北京:科学出版社,2006:1-15.
- [4] Gamil Alsharahi, Abdellah Driouach, Ahmed Faize. Performance of GPR influenced by electrical conductivity and dielectric constant[J].Procedia Technology, 2016, 22(19): 570-575.
- [5] 杨天春,吕绍林,伍永贵.地质雷达检测道路结构的理论及应用分析[J].中南工业大学学报(自然科学版),2001,32(2):118-121.
- [6] 王春晖.探地雷达技术的发展及其在公路工程中的应用概述[J].中外公路,2007,27(4):211-213.
- [7] 江凯.探路雷达在路基检测中的应用研究[D].成都:西南交通大学,2011,25(6):18-22.
- [8] 陈理庆.雷达探测技术在结构无损检测中的应用研究[D].长沙:湖南大学,2008:1-15.
- [9] 黄成,王正,俞先江.路用探地雷达在公路病害探测中的应用[J].研究成果,2017(2):32-33.
- [10] 魏超,肖国强,王法刚.地质雷达在混凝土质量检测中的应用研究[J].工程地球物理学报,2006,1(5):447-451.
- [11] 黄琪,闫光辉.路用探地雷达检测信号的缺陷识别试验[J].公路交通科技,2011,28(10):40-69.
- [12] 姜洪,王选仓.探地雷达对路面板脱空现象检测时的信号分析与处理[J].公路交通科技,2010,27(1):21-27.

- [13] 吴丰收.混凝土探测中探地雷达方法技术应用研究[D].吉林: 吉林大学,2009:1-15.
- [14] 贾学明,杨建国,赖思静.探地雷达在道路工程检测中的应用[J].公路交通技术,2005(5):54-56.
- [15] 王娟.探地雷达在公路质量检测中的应用与发展[J].交通世界,2013(3):158-159.
- [16] 刘四新.探地雷达原理与应用[M].北京:电子工业出版社,2010:1-15.
- [17] 席红媛.探路雷达检测系统在路面厚度检测中的应用[J].公路交通科技(应用技术版),2006(8):85-88.
- [18] 唐甫.地质雷达探测的波场分析[J].技术与市场,2012(12):71-72.
- [19] 孙军,王国群.探地雷达在公路检测中的应用[J].公路,2001(3):59-61.
- [20] 杨天春,吕绍林,王齐仁.探地雷达检测道路厚度结构的应用现状及进展[J].物探与化探,2003(1):79-82.

Study on Application of Ground – penetrating Radar in the Acceptance of Land Consolidation Road Engineering

SONG Wenwen, LI Xinju

(Shandong Agricultural University, Shandong Tai'an 271000, China)

Abstract: In the process of checking and accepting a road project, the engineering parameters, such as thickness and compaction are often the critical deciding factors. The road engineering quality inspection technology which is based on the ground penetrating radar can be lossless, rapid and accurate in the land remediation project area. With the help of pulse EKKO PRO 1000 ground – penetrating radar, the section method can be used to carry out radar detection on concrete pavement of a road project. After correction, path gain, background de – noising, deconvolution and other pre – steps, image noise can be effectively get rid of and image resolution can be improved. At length, the thickness can be analyzed according to the electromagnetic wave propagation speed, so as to know about the thickness of road surface and base, as well as the uniformity of the road. It is showed ground – penetrating radar has a maximum relative error of below 1.43% when detecting the thickness and the standard deviation is 0.08~0.66. Accordingly, it is more accurate than traditional method and its accuracy is authentic. The refined picture of the radar is clear, and the uniformity of road surface and base can be known. The surface thickness is stable and the base of some roads is not so well compacted has uneven thickness. When the road project can meet the design standards and acceptance requirements. It can provide some references for the acceptance and the quality evaluation of road projects.

Key words: Ground penetrating radar; nondestructive testing; concrete; error analysis