

文章编号 :1007 - 649X(2001)04 - 0063 - 04

探地雷达(GPR)在路面工程质量检测中的应用

陶向华¹,袁丽颖²,王复明¹,乐金朝¹

(1. 郑州大学环境与水利学院,河南 郑州 450002 ; 2. 郑州市市政工程总公司,河南 郑州 450024)

摘 要 :探地雷达(GPR)是一种新型的无损检测工具,在全球公路领域应用越来越广泛,主要用于路面厚度检测、材料评价和路面病害调查.通过实例着重说明探地雷达(GPR)在厚度检测、脱空识别中的应用,并可得到连续、快速、精度高的检测数据,值得在全国范围内推广.

关键词 :无损检测 ;探地雷达(GPR);厚度 ;脱空 ;路面

中图分类号 :U 412.2 文献标识码 :A

0 引言

探地雷达(Ground Penetrating Radar,简称 GPR)是一种用于确定地下介质分布的广谱电磁技术.其基本原理是向地下发送脉冲形式的高频电磁波,电磁波在地下介质传播的过程中,遇到存在电性差异的地下目标体,如空洞、分界面等时,便会发生反射,返回到地面时由天线接收,在对接接收天线接收到的雷达波进行处理和分析的基础上,根据接收到的雷达波形、强度和双程走时等,参数便可推断地下目标体的空间位置、结构、电性及几何形态,从而达到对地下隐蔽目标物的探测^[1].探地雷达采用非接地性测量技术,可作快速连续检测,对检测对象无损,能比较直观地表现检测目标物,因此,探地雷达技术成为工程地球物理勘察的重要方法之一,广泛用于地下管线探测、结构物无损检测、岩土勘察、地下洞穴等工程勘察领域.

近年来,探地雷达在全球公路领域得到了广泛的应用,主要应用于路面厚度检测、材料评估和路面病害调查.我国作为公路大国,目前高速公路正在蓬勃发展,将 GPR 完美地用于路况评价非常必要.因为一旦路面潜伏病害显现化以后,其维修的有效性、经济性均会受到限制,所以利用雷达探测技术及时发现路面潜在问题,尽早维护,做到防患杜渐,防患于未然,对提高路面使用寿命,改善行车质量,节省维护费用具有重要意义.

1 GPR 检测的基本原理

GPR 系统常由三个部件组成:发射机,产生正弦型脉冲、高频电磁波;天线,将电磁波定向辐射入所测路面;接收机,捕捉并贮存介面反射信号.

GPR 工作时,雷达发射机产生高频电磁脉冲的发射信号,发射信号经由空气到达路表面时,一部分信号会透射路表继续向下传播,另一部分信号会被路面反射回来.这样,透射的电磁波在路面结构中继续传播,每遇到不同的结构层,就会在层间界面发生透射和反射.各层间界面的反射波即可合成为回波信号.反射回波由雷达接收天线接收,并采用采样技术将其化为数字信号进行处理.图 1 即为路用探地雷达的工作原理^[2].图中, A_0 为电磁波于空气 - 路表面产生的反射波幅; V ; A_1 为面层 - 基层界面产生的反射波幅; A_2 为基层 - 土基界面产生的反射波幅; Δt_1 为电磁波在面层中的往返时间; Δt_2 为电磁波在基层中的往返时间,ns. $A_0, A_1, A_2, \Delta t_1, \Delta t_2$ 可由计算机自动搜寻得到.

雷达波的反射发生在不同介电常数物质的界面,介电常数与物质的导电性有关.通常情况下,某类物质的介电常数是固定的,但当它与其它物质混合时,表现出来的复合介电常数会改变,常见材料的介电常数见表 1^[3].

GPR 并不是直接利用上述介电常数进行工作的,因为实际路面中情况是千差万别,介电常数不

收稿日期:2001 - 06 - 11;修订日期:2001 - 08 - 24

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(19625205)

作者简介:陶向华(1976 -),女,湖南省安化县人,郑州大学硕士研究生.

万方数据

是一个定值. GPR 利用反射波波幅来推求各结构层的介电常数, 根据介电常数即可推求结构层厚度.

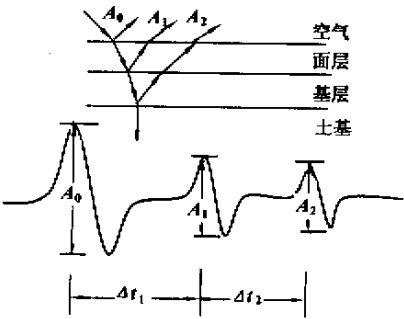


图 1 GPR 工作原理

Fig.1 The theory of GPR

表 1 常见材料的介电常数

Table 1 The dielectrics of common materials

材料	介电常数
空气	1
水	81
沥青	3~5
混凝土	4~6
土壤(干)	4(3~5)
土壤(含水 20%)	10(4~40)
冰	3.2
金属	无限大

首先, 反射界面上下层材料的介电常数与界面的反射系数 R 之间存在一定关系

$$\sqrt{\epsilon_{r2}} = \sqrt{\epsilon_{r1}} \frac{1 + R}{1 - R} \quad (1)$$

式中: ϵ_{r1} 为上层材料的介电常数; ϵ_{r2} 为下层材料的介电常数; R 为反射系数, 它是反射波幅 A 与全反射波幅 A_m 的比, 即

$$\frac{A}{A_m} = R \quad (2)$$

第一次反射时, 上层空气介电常数为 1, 则

$$R_0 = \frac{A}{A_m} \quad (3)$$

故

$$\sqrt{\epsilon_{r2}} = \frac{1 + R_0}{1 - R_0} = \left(1 + \frac{A_0}{A_m}\right) / \left(1 - \frac{A_0}{A_m}\right) \quad (4)$$

第二次反射时, 由于上层材料的介电常数已求得, 同样可求出下一层的介电常数.

此时, 式(1)右边应乘以反射层的能量损失系数 $(1 - R_0^2)$, 化简可得

$$\frac{A_1}{A_m} = R_1(1 - R_0^2) \quad (5)$$

则 万方数据

$$\sqrt{\epsilon_{r3}} = \sqrt{\epsilon_{r2}} \frac{1 + R_1}{1 - R_1} = \sqrt{\epsilon_{r2}} \left[1 - \left(\frac{A_0}{A_m}\right)^2 + \left(\frac{A_1}{A_m}\right)\right] / \left[1 - \left(\frac{A_0}{A_m}\right)^2 - \left(\frac{A_1}{A_m}\right)\right] \quad (6)$$

可以依次类推, 求出不同层的介电常数.

1.1 厚度计算

一旦各结构层介电常数已知, 则厚度就很容易计算出来, 电磁波在介质中的传播速度

$$v = c / \sqrt{\epsilon_r} \quad (7)$$

式中: c 为光速(理论值为 30 cm/ns).

速度 v 乘以电磁波于结构层的往返时间的一半, 即得各结构层厚度.

第一层(面层):

$$h_1 = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{r1}}} \cdot \frac{\Delta t_1}{2} \quad (8)$$

第二层(基层):

$$h_2 = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{r2}}} \cdot \frac{\Delta t_2}{2} \quad (9)$$

1.2 脱空识别

GPR 进行脱空识别主要利用空洞对其反射信号的影响. 如图 2 所示, 空洞上下两个表面就构成了两个反射界面: 砼 - 空气、空气 - 基层. 由 A 、 B 两反射波可以看出, 由于 A 、 B 两点的反射系数是一正一负, 因此导致 A 点反射反相. C 是 A 和 B 的叠加结果, GPR 最终得到的是 C . 确定出两条反射波的时间差即可得到空洞深度.

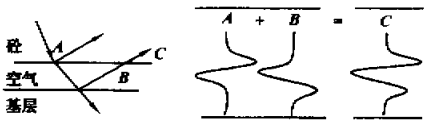


图 2 GPR 脱空识别

Fig.2 Void recognition of GPR

2 GPR 检测及数据处理

路用雷达(GPR)检测速度可达 80 km/h, 取样点数按每 0.2 m 取一点, 一般对路面的车道的行车左右轮迹分别进行检测. 在检测过程中, 雷达天线不断发射信号并接受反射信号, DMI 自动记录测点桩号位置, 这些信息均立刻存储在计算机中.

GPR 检测结果数据记录的雷达天线发射信号与接受信号的信息需经过专门的雷达软件进行处理, 才能得到路面结构层厚度及脱空结果.

3 GPR 应用实例

2001 年 3 月, 河南省道路检测中心利用探地

雷达(GPR)对郑汴(郑州—开封)高速公路进行了路面检测.检测采用天线为喇叭型空气耦合式单基天线,天线频率为 1 GHz.检测目的在于确定路面各结构层的厚度与板下脱空情况.检测结果用于指导该高速公路的修补方案的制定.路用探地雷达检测的车道为双向 4 车道,测线位置为检测

车道的左轮迹和右轮迹,测点报告间距为 10 m.
(1)厚度检测结果.为了对比 GPR 检测结果,在进行 GPR 厚度检测的同时,也随机选取了几个测点进行钻孔取芯,二者检测结果比较如表 2 所示.从表 2 数据可以看出,GPR 厚度检测的精确度比较高,厚度误差小于 1% ,满足工程要求.

表 2 郑汴高速公路基层厚度雷达检测结果与钻孔取芯结果的比较
Table 2 ' Thickness ' comparison between measuring data of GPR and coring data in situ

点号	1	2	3	4	5	6
桩号	K19 + 655	K29 + 708	K40 + 200	K51 + 006	K60 + 093	K69 + 895
钻芯深度/cm	19.20	28.23	23.29	25.48	27.28	27.55
探测深度/cm	20.00	27.50	23.20	25.20	27.70	27.00
误差/cm	0.80	- 0.73	- 0.09	- 0.28	0.42	- 0.55

(2)脱空检测.利用 GPR 数据后处理软件可计算脱空.脱空结果以某测点的桩号、脱空起始位置、脱空终止位置和脱空厚度来表示,例如 K10 + 209 ~ K10 + 261 路段右幅行车道右轮迹脱空检测结果如表 3 所示.另外,还对整段路面的脱空率

(表示 100 m 内测点数中的脱空个数)作了统计,便于路面的维修和管理.选出其中某个测线的脱空统计率结果如表 4 所示.可以看出,桩号 K0 + 000 ~ K30 + 000 路段的脱空比桩号 K30 + 000 ~ K60 + 000 路段稍严重.

表 3 郑汴高速公路某测线砼板下脱空 GPR 检测结果
Table 3 Voids measuring data under concrete slabs in Zhengzhou—Kaifeng Highway

桩号	起始位置/cm	终止位置/cm	脱空厚度/cm	桩号	起始位置/cm	终止位置/cm	脱空厚度/cm
K10 + 209	29.5	30.0	0.5	K10 + 238	29.0	29.8	0.8
K10 + 219	29.7	30.0	0.3	K10 + 242	29.0	31.0	2.0
K10 + 228	30.3	29.6	0.7	K10 + 256	30.5	29.9	0.6
K10 + 232	29.6	29.5	0.1	K10 + 259	29.4	30.3	0.9
K10 + 234	29.1	31.2	2.1	K10 + 261	29.2	30.5	1.3

表 4 郑汴高速公路某测线脱空率平均值统计结果
Table 4 Average void contents in Zhengzhou—Kaifeng Highway

桩号范围	K0 + 000 ~ K10 + 000	K10 + 000 ~ K20 + 000	K20 + 000 ~ K30 + 000	K30 + 000 ~ K40 + 000	K40 + 000 ~ K50 + 000	K50 + 000 ~ K60 + 000
脱空率/%	20.1	20.4	13.8	9.0	4.5	5.6

4 结束语

利用探地雷达检测路面结构层厚度是一种快速、无损、连续、高精度的检测技术,与钻孔取芯法相比,具有明显的优越性.同时,GPR 对混凝土板下脱空的识别也具有良好的能力.因而可以大大提高监理的检测效率和对施工工程质量的及时监督.

探地雷达无损检测在公路建设中的使用还刚刚起步,作为一代新兴的技术,某些地方还需进一步改善与研究.

(1)开发更强有力的雷达系统,充分利用微波和超高频电子技术,使 GPR 在砼层、薄层探测能力及精度方面进一步提高.

万方数据

(2)对脱空识别,应该进一步定义出脱空边界,使用户能直接得到需处理基层的面积大小.

(3)不断完善其它的使用方法(如识别含水量和压实度、裂缝的检测等)和各种应用软件,共同提高我国的公路检测技术.

参考文献:

- [1] 戴前伟.地质雷达的应用条件探讨[J].物探与化探, 2000(4):157 - 160.
- [2] 李大心.探地雷达方法与应用[M].北京:地质出版社,1994.
- [3] 徐升才,刘峰.探地雷达在城市道路厚度检测中的研究和应用[J].华东交通大学学报,2000,17(4): 24 - 28.

Application of Ground Penetrating Radar in Pavement Quality Testing

TAO Xiang - hua¹ , YUAN Li - ying² , WANG Fu - ming¹ , YUE Jin - chao¹

(1. College of Environmental & Hydraulic , Zhengzhou University , Zhengzhou 450002 , China ; 2. Zhengzhou Municipal Administration Engineering Corporation , Zhengzhou 450024 , China)

Abstract :Ground Penetrating Radar(GPR) is a new - type nondestructive tool. More and more GPR equipment is used in highways and roads around the world in recent years , applications have focused on measuring pavement thickness , material evaluations and pavement deterioration investigations in pavement quality evaluations. A case is used to illustrate the applications of GPR that include pavement thickness measurements and voids detection under concrete slabs. It has been proved that a continuous ,fast and precise measuring data may be obtained by applying GPR. GPR is suitable for spreading around all the country.

Key words :nondestructive testing ; GPR ; thickness ; voids ; pavement

(上接 55 页)

[8] 李明水 ,贺德馨 ,李会知. 桥梁节段模型颤振导数的确定 [J]. 工程力学 ,1995 (1) :120 - 125.

[9] 顾 明 ,张若雪 ,项海帆. 桥梁气动导数的识别及模型参数对气动导数的影响 [M]. 振动工程学报 ,1997 (4) :420 - 426.

[10] 李会知 ,陈 忻 ,李明水 ,等. 西陵长江大桥全桥气动弹性模型风洞试验研究 [J]. 空气动力学学报 ,1997 (4) :513 - 518.

[11] 李会知 ,陈 忻 ,李明水 ,等. 大跨度悬索桥施工状态气动弹性模型风洞试验研究 [J]. 实验力学 ,1997 (3) :383 - 388.

Application of Wind Tunnel to Study of Wind Effect on Bridge

LI Hui - zhi , LI Si - tang , WU Yi - zhang

(College of Civil Engineering , Zhengzhou University ,Zhengzhou 450002 ,China)

Abstract :Bridges should be capable of withstanding wind effect. The flutter ,buffeting and vortex - induced vibration may occur in the case of large - span suspension bridge. Wind effect on bridge can be predicted by wind tunnel modeling test. This paper introduces static force test with section model and vibration test with aeroelastic model.

Key words :bridge ; wind load ; flutter ; segment model ; wind tunnel test