第 39 卷 第 4 期
2024 年 12 月:564 - 569

地 质 找 矿 论 丛
Contributions to Geology and Mineral Resources Research

Vol. 39 No. 4
Dec. 2024:564 - 569

doi:10.6053/j.issn.1001 - 1412. 2024. 04. 015

微动和地质雷达法在路基下伏病害体探测中的应用

肖坤林,张健,贾小杰,李绍波,蔡勤波
(中国冶金地质总局地球物理勘查院,河北 保定 071000)

摘要: 某风电母港路面出现不同程度的裂缝和塌陷,为查明公路路基病害体的位置、大小及埋深,特采用地球物理勘探手段进行综合检测。地质雷达法分辨率高,对浅部病害体可进行精准划定,但难以探测较深部位的病害体和较大的含水结构。工作中有针对性地选择地质雷达和微动法进行探测,避开单一物探方法的局限性,成功实现地下病害体的精确定位,补充了地下病害体的深部信息。现场钻探结果验证了综合物探方法的正确性,为后期的处置修复工作提供了可靠而重要的依据。

关键词: 微动法;地质雷达法;公路路基;道路病害体;深部信息探测

中图分类号: P631;U416.1 **文献标识码:** A

0 引言

近年来,有关城市道路塌陷的报告经常见诸于电视、报纸、网络等媒体,因塌陷造成的经济损失严重,其场景让人怵目惊心,道路塌陷给公路交通运输和交通参与者的生命财产安全带来严重威胁,对社会产生了负面影响。如何有效地发现、预防并解决公路塌陷的问题已成为城市建设的一项重要工作,需要了解道路塌陷的成因,及时发现道路塌陷潜在的危险和隐患,做到对城市道路塌陷灾害能够提前预警,防患于未然,使危害减轻、降低甚至杜绝危害的发生。

塌陷是指地表的岩石、土体在自然或人为因素作用下流失、坍塌,并在地面形成塌陷坑(洞)的地质现象,它影响人类的生产、生活,被视作一种地质灾害类型。塌陷的形成原因多种多样,它的发生、发展具有极大的隐蔽性[1-2]。为了解决公路塌陷的地质病害体问题,首先要对塌陷等隐患进行精准探测,及时确定病害体的性状与分布,并选择合理的方式对隐患进行治理和消除。许多学者对城市路面塌陷等地质病害体进行了研究,如郭士礼等[3]研究了正常道路、典型干扰源和典型道路隐性病害的地球物理特征及其对应的探地雷达波组特征;许泽善等[4]以成功案例介绍探地雷达在道路病害检测的方法技术及数据处理分析的经验和难题;王鹏[5]通过人行道病害体的识别验证,认为探地雷达对道路浅层隐秘性病害体识别效果较好;贾辉等[6]对不同种类干扰源在探地雷达图像上的电磁波传播特征进行分析,提出了在检测工作中如何削弱干扰的有效手段。

上述研究和应用证明,地质雷达法对浅部病害的探查效果较为明显,但对于较深的地下病害体的探查效果却不理想。微动勘查技术是通过天然源微动信号提取频散曲线,经反演获取相应深度的视横波速度,进而刻画视横波速度结构图、剖面图,分析病害体与周围岩石(土层)的波速差异,查明工程地质问题的物探技术方法[7-8]。本文根据某风电母港道路的现场地质情况,选择微动法和地质雷达法相结合的方式,提高探测精度,取得了较为理想的应用效果。

收稿日期: 2024 - 06 - 07; **改回日期:** 2024 - 09 - 06; **责任编辑:** 余和勇

作者简介: 肖坤林(1987—),男,高级工程师,长期从事金属矿产物探和工程物理勘查工作。通信地址:河北省保定市阳光北大街 139 号,中国冶金地质总局地球物理勘查院。邮政编码:071000。E-mail:562842892@qq.com

1　应用设备及工作原理

1.1　应用设备

施工现场存在电磁干扰、行驶车辆震动干扰以及障碍物等，针对工作任务要求和现场的地貌、地质情况，选择微动法及地质雷达法相结合的方式对公路地下病害体进行探测。检测工作中采用加拿大研制的 pulse EKKO 型探地雷达（图 1）和北京市水电物探研究所研制的 GS 2000 地质 B 超仪（图 2）对目标路段进行地下病害体探测工作。

1.2　探地雷达工作原理

探地雷达（GPR）是通过发射天线向探测目标体（地下）发射电磁波，利用接收天线接收来自目标体界面的反射波。根据电磁波传播理论，电磁波在穿过不同的介质层时会产生折射与反射，接收天线接收介质反射的回波信息，经计算机对接收的信号及信息进行分析处理，推断出目标体在地下分布的空间位置及形态。电磁波在介质传播过程中的传播速度 v 主要是由介质的介电常数决定的，当遇到与周围介电常数不同的目标体边界时即产生反射波，并由接收天线接收，从而达到探测目的。探地雷达的工作原理见图 3。

图 1　pulse EKKO 型号探地雷达

Fig. 1　Pulse EKKO type ground penetrating radar

图 2　GS2000 地质 B 超仪

Fig. 2　GS2000 geological B-ultrasound instrument

应用探地雷达技术开展道路空洞及雨污水管线上方扰动土等不良隐患检测应具备的物理前提条件是，路面基层与上下介质之间、缺陷异常体与周围介质之间的电性（特别是介电性）存在着一定的差异，而介质的介电常数又决定于材料的成分及结构、孔隙度和含水量等主要因素。

1.3　微动法勘探原理

GS 2000 地质 B 超系统基于微动勘探技术，采集自然界中赋存的天然震源信号和人工震源信号，提取面波速度信息，用以探查道路、堤坝的塌陷、空洞等隐患。

微动法是基于台阵观测的天然场源被动源面波信号，采用数据处理与分析技术提取面波（瑞雷波）频散信息，通过瑞雷波反演技术获得地下介质的反演横波（S 波）速度（v_s）结构的地球物理勘探方法。

通过空间自相关法（SPAC 法）从被动源面波台阵记录数据中提取面波频散曲线，反演横波（S 波）速度 v_s，并获得二维 S 波速度剖面，反演横波速度结构用于精细分层。S 波速度剖面能相对直观地反映地层的岩性变化，是地质解释的基本依据之一。

微动测量的场源为天然存在的微弱振动，该类振动在时间域、空间域都极不规则，高频部分（大于 1Hz）主要源于人类的各种活动，低频部分（小于 1Hz）主要源于气压、风浪和潮汐变化等自然现象。

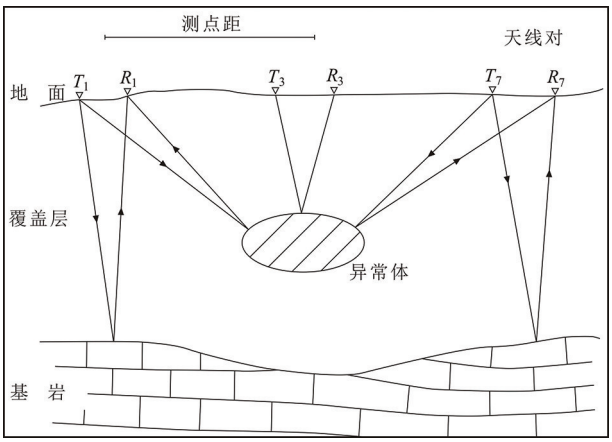

图 3　探地雷达工作原理示意图

Fig. 3　Sketch of ground penetrating radar operation

2 数据采集工作

2.1 探地雷达数据采集

本次检测工作采用 pulse EKKO 型探地雷达系统，因检测现场的障碍物较多，故使用点测的方式进行数据采集。中心频率为 25 MHz，步长为 0.5 m，时间窗口为 1200 ns，天线极化方式是侧面。

2.2 微动法数据采集

微动勘探工作采用北京水电物探研究所的 GS 2000 地质 B 超系统，排列方式为直线型台阵，点距为 1 m，工作方式为在路面以拖曳方式进行数据采集，实现快速、省力效果。

3 异常识别与解释

3.1 现场信号异常识别

3.1.1 探地雷达

针对数据处理和地质解释得到的探地雷达异常数据，组织相关人员进行综合研判和分析，并通过现场复核，最终认定异常体的属性为土体缺陷，地质雷达数据评定标准依据《城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准(JGJ/T437—2018)》[9](表 1)。

3.1.2 微动法

微动法测量的场源为天然存在的微弱振动，采集的是随机信号，现场无法直接识别信号异常，但在施工现场，检测人员可以采取有效措施，确保获取到高质量、高保真的原始数据。具体措施为：①保证检波器与地面密切耦合，提高原始数据的信噪比；②数据采集时，对采集状态实时监控，坏道数不大于 1 道，确保检波器与电缆连接正确，防止接触不良、漏电、短路等故障，确保获取可靠的数据记录，对质量较差的测点及时安排重测。

3.2 资料解释

3.2.1 探地雷达

对地质雷达检测资料进行数据处理可以得到信噪比高的资料，但是要得到检测结果，还需要结合地质资料、道路结构信息、市政工程信息，尽量剔除假异常，得到真正的地下结构信息，使雷达检测信息和道路真实状况相对应，获得真实的道路异常信息，并对该异常信息作合理解释。地质雷达数据解释流程见图 4。

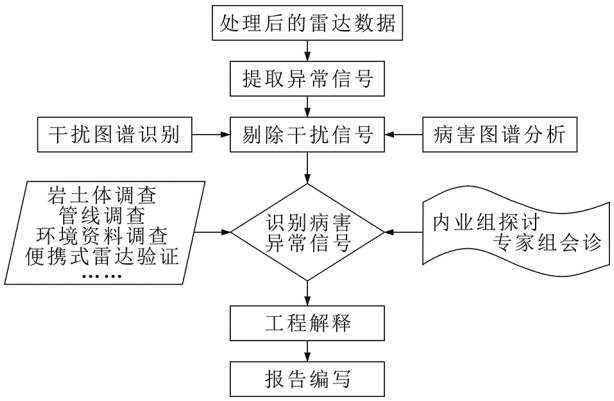

图 4 地质雷达数据解释流程

Fig. 4 Process of geological radar data interpretation

表 1 探地雷达检测结果评定等级[9]

Table 1 Evaluation of the ground penetrating detection

等级	地下病害体		波组特征	振幅	相位与频率
Ⅳ	空洞		近似球形空洞反射波组表现为倒悬双曲线形态；近似方形空洞反射波表现为正向连续平板状形态；多次波、绕射波明显，重复次数较多	整体振幅强，雷达波衰减很慢	顶部反射波与入射波同向，底部反射波与入射波反向，底部反射不易观测；频率高于背景场
Ⅲ	脱空		脱空顶部一般形成连续反射波组，似平板状形态；多次波明显，重复次数较少	整体振幅强，雷达波衰减很慢	顶部反射波与入射波同向，底部反射波与入射波反向，底部反射不易观测；频率高于背景场
Ⅱ	疏松体	严重疏松	顶部形成连续反射波组；多次波、绕射波较明显；内部波形结构杂乱，同相轴很不连续	整体振幅强，衰减很慢	顶部反射波与入射波同向，底部反射波与入射波反向；频率高于背景场
		一般疏松	顶部形成连续反射波组；多次波、绕射波不明显；内部波形结构较杂乱，同相轴较不连续	整体振幅较强，衰减较慢	顶部反射波与入射波同向，底部反射波与入射波反向；频率略高于背景场
Ⅰ	富水体		顶部形成连续反射波组；两侧绕射波、底部反射波、多次波不明显	顶部反射波振幅强，衰减很快	顶部反射波与入射波反向，底部反射波与入射波同向；频率低于背景场

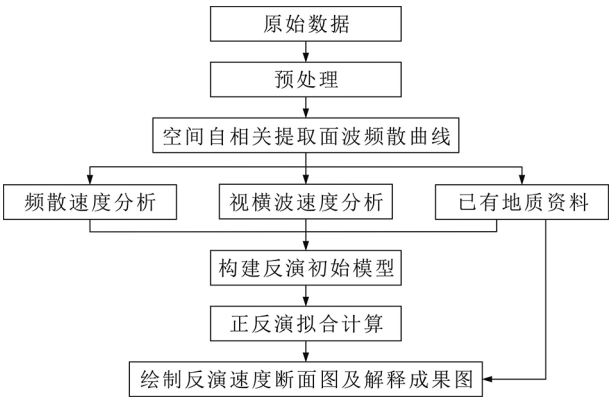

图 5　微动法数据处理流程图

Fig. 5　Flow chart of micro-motion data procession

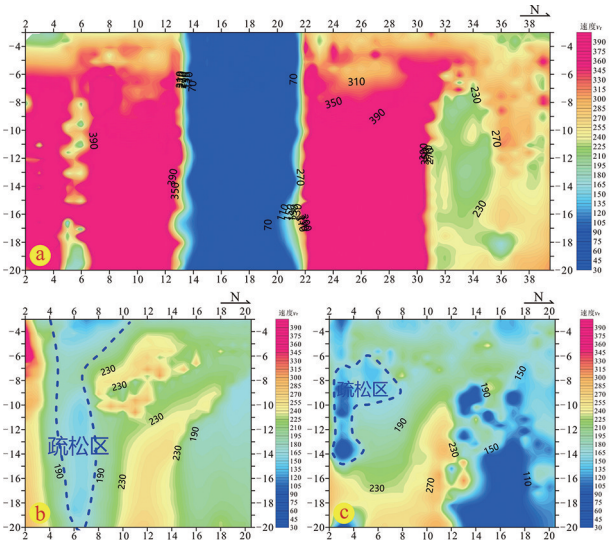

图 6　特殊段微动 v_r 速度剖图

Fig. 6　Micro-motion v_r profile of special section

a. 微动 7 线 v_r 速度剖面图；b. 微动 1 线 v_r 速度剖面图；c. 微动 5 线 v_r 速度剖面图

3.2.2　*微动法*

微动法数据处理采用空间自相关法，反演采用遗传反演算法。微动信号的振幅和形态随时空变化，但在一定时空范围内具有统计稳定性，可用时间和空间上的平稳随机过程描述。数据处理是以平稳随机过程为依据，从微动信号中提取面波（瑞雷波）频散曲线，通过对频散曲线的反演获得地下介质的横波速度结构。微动法数据处理流程见图 5。

4　检测结果

4.1　特殊段微动测线成果分析

资料推断解释遵循“由已知到未知、一二维相结合”的思路进行。通过分析一维速度曲线、二维速度断面图和已有地质、钻探资料，对地层结构及地质构造进行推断解释。

从测线布置及现场施工场地可知，微动 5 测线里程段 14.7～16、微动 7 测线里程段 18.8～19.8 范围内为铁网通道，微动 1 测线里程段 4～6 范围内，地面出现明显塌陷。从微动成果图可以看出，微动 1 线的里程段 4～10，埋深 3～20 m，推测存在疏松区域；微动 5 线里程段 2～8，埋深 6～14 m，v_r 速度相对较低，推测可能存在疏松区或空洞。从微动 v_r 速度剖面图 6 可知，铁网通道及疏松塌陷区域或空洞均表现为低速异常。

4.2　微动测线与地质雷达测线综合成果分析

（1）微动 10 线与 25 MHz 天线地质雷达 8 线相互重合，从微动 v_r 速度剖面图（图 7）可知，该段可能存在 2 个疏松区域，水平分布的范围及深度分别为里程段 5～9，埋深为 3～10 m；里程段 35～39，埋深为 8.4～16 m。这些区域的面波速度明显较低，呈现出低速异常；从地质雷达成果图上可知，该段可能存在 2 个疏松区域，水平分布的范围及深度分别为里程段 8～30，埋深为 3.5～6 m；里程段 36～71，埋深为 3.5～8 m，这些区域的同相轴不连续，呈现出较强的反射信号。

（2）微动 13 线与 25 MHz 天线地质雷达 9 线相互重合（图 8），从微动 v_r 速度剖面图可知，该段可能存在 3 个疏松区域，水平分布的范围及深度分别为里程段 7～10，埋深为 3～4 m；里程段 14～16，埋深为 3～7 m；里程段 34～41，埋深为 9～20 m，这些区域的面波速度明显较低，呈现出低速异常；从地质雷达成果图上可见，该段可能存在 3 个疏松区域和 1 个空洞，疏松区水平分布的范围及深度分别为里程段 7.6～14，埋深为 0.4～4 m；里程段 29.7～41，埋深为 3.1～4.8 m；里程段 75～82，埋深为 2.7～4.6 m。空洞水平分布的范围及深度为里程段 48～58，埋深为 3.9～5.2 m。这些区域的同相轴不连续，呈现出较强的反射信号。

（3）从测线布置及现场施工场地可知，这 4 条测线平行布置，里程段 40～43 m 范围内，地面出现明显的塌陷。综合分析微动和地质雷达成果图可知，微动 10 线和微动 13 线的里程 34～41 段的深部异常范围逐渐增大，推测微动 10 线和 13 线在该范围内存在空洞（图 9）。

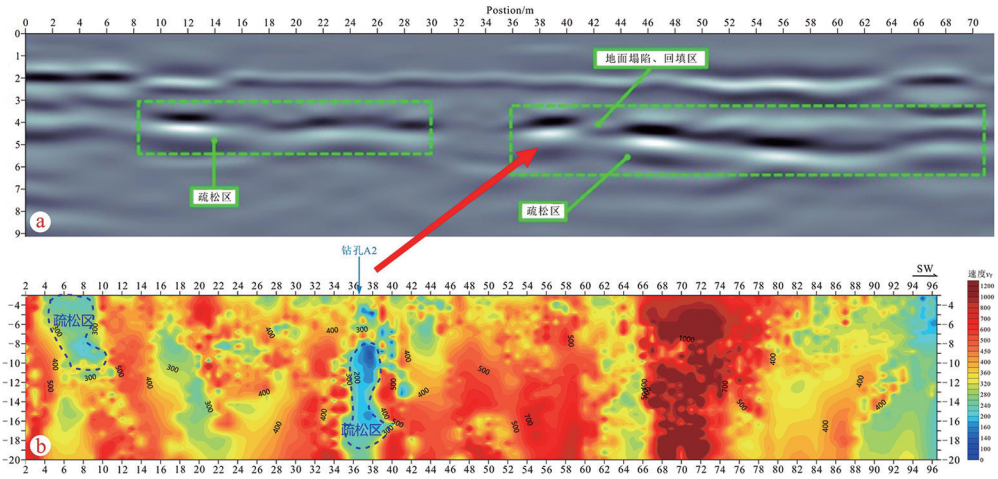

图 7　微动 10 线和地质雷达 8 线综合剖面分析图

Fig. 7　Interpretation map of integrated profile of micro-motion line 10 and geological radar line 8

a. 地质雷达 8 线成果图；b. 微动 10 线 v_r 速度剖面图

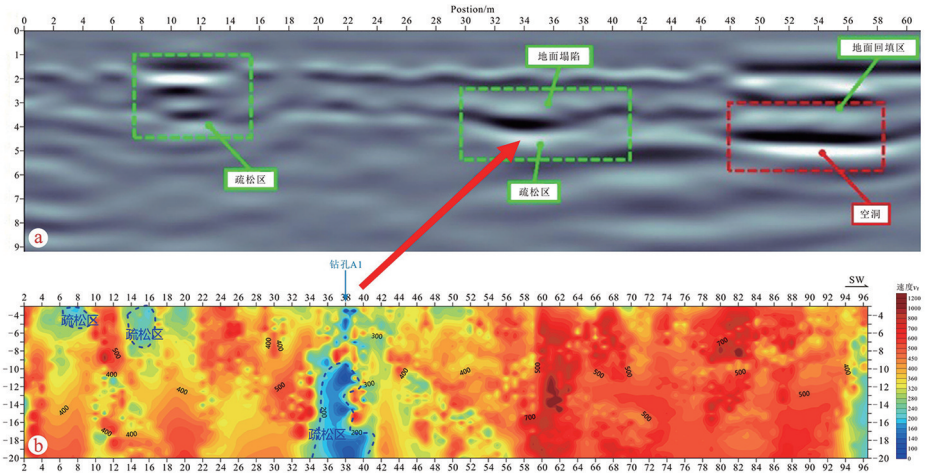

图 8　微动 13 线和地质雷达 9 线综合剖面分析图

Fig. 8　Interpretation map of integrated profile of micro-motion line 13 and geological radar line 9

a. 地质雷达 9 线成果图；b. 微动 13 线 v_r 速度剖面图

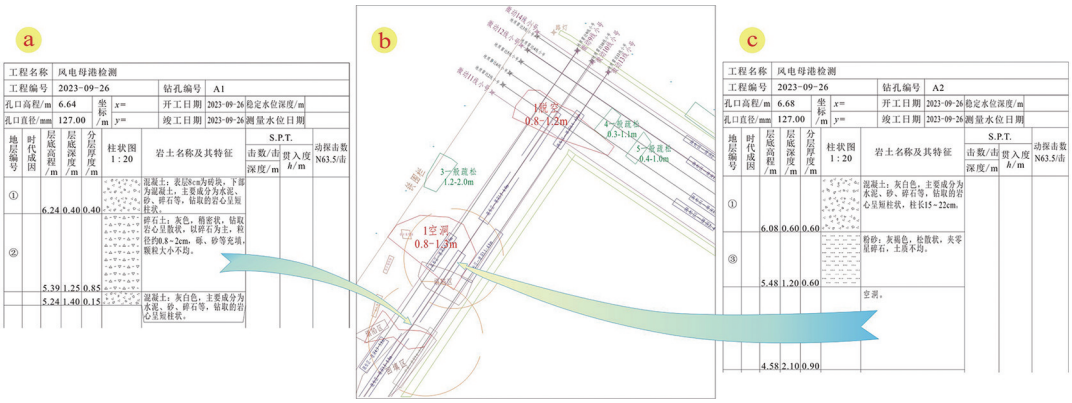

图 9　测线、异常分布及钻孔柱状图

Fig. 9　Map showing measurement lines, anomaly distribution and borehole bar chart

a. A1 钻孔柱状图；b. 测线及异常分布图；c. A2 钻孔柱状图

5　结论

地质雷达法对较浅部的分辨率很高，而微动法能够有效显现较深部的异常信息，2 种方法具有很好的互补性。本次检测工作运用探地雷达和微动 2 种方法联合勘测，在相同的异常区均获得异常的信息，依据电磁波、面波横波速度的分布特征和变化特点，准确地推断路段的疏松区和空洞区范围。钻孔成果与物探推测的异常位置基本吻合，且微动 10 线剖面的低阻异常有向深部延伸趋势，证明物探检测方法的可靠性，也证明了采用综合物探方法勘查是探测路基下伏病害体的有效手段。

参考文献：

[1] 刘西岭，余森林，鞠建荣. 综合物探技术在城市道路塌陷灾害治理中的应用[J]. 城市勘测，2020(3)：188－191.

[2] 刘春明. 城市道路塌陷成因分析与对策[J]. 城市勘测，2018(S1)：184－187.

[3] 郭士礼，段建先，张建锋，等. 探地雷达在城市道路塌陷隐患探测中的应用[J]. 地球物理学进展，2019，34(4)：1609－1613.

[4] 许泽善，简世凯，覃谭，等. 探地雷达在道路脱空空洞病害检测中的应用[J]. 工程地球物理学报，2019，16(1)：116－125.

[5] 王鹏. 探地雷达在人行道地下病害体检测中的应用[J]. 测绘通报，2019(S1)：199－203.

[6] 贾辉，陈昌彦，白朝旭，等. 城市道路病害检测中常见干扰源探地雷达图像特征分析[J]. 工程勘察，2012，4(11)：86－92.

[7] 高艳华，黄溯航，刘丹，等. 微动探测技术及其工程应用进展[J]. 科学技术与工程，2018，18(23)：146－155.

[8] 徐佩芬，李世豪，杜建国，等. 微动探测：地层分层和隐伏断裂构造探测的新方法[J]. 岩石学报，2013，29(5)：1841－1845.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 437—2018 城市地下病害体综合探测与风险评估技术标准[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2018.

Application of integrated micro-motion and ground penetrating geophysical radar method to detection of disastrous bodies underlying roadbed

XIAO Kunlin, ZHANG Jian, JIA Xiaojie, LI Shaobo, CAI Qinbo

(*Geophysical Exploration Academy of China Metallurgical Geology Bureau, Baoding* 071000, *Hebei Province, China*)

Abstract: Fissures and collapse occur at surface of road in a wind power base. Facing the problem integration of micro-motion and geological radar method are applied to detect deep disastrous bodies and large water-bearing structures, complement information of the bodies and avoid limitations of single geophysical method, such as geological radar which can accurately delineate shallow disastrous body with high resolution but can not detect deep disastrous body. Drilling in situ shows that the integrated method can locate the disastrous bodies and measure their sizes and buried depth thus the geophysical method can provide reliable and important basis for later disposal and restoration.

Key Words: Micro-motion method; geological radar method; highway roadbed; road disease body; deep information detection