

文章编号: 0451-0712(2006)06-0054-06

中图分类号: P642

文献标识码: B

# 黄土公路地质缺陷的地球物理探测现状与对策

李庆春, 张保卫, 刘华锋

(长安大学地质工程与测绘工程学院 西安市 710054)

**摘 要:** 总结了我国西部黄土地区地下主要地质缺陷及其特点, 强调了黄土地区地质缺陷对公路交通建设及运输的危害性。通过分析运用地球物理方法探测地下地质灾害的技术现状, 表明目前急需针对公路工程中黄土地区地下地质缺陷, 开展专门的系统研究, 提出了精细探测黄土地区地质缺陷的对策及预期目标。

**关键词:** 黄土公路; 地质缺陷; 地球物理探测; 现状与对策

黄土广泛分布于我国西北地区, 以山西省西部、陕西省、甘肃省大部发育最多, 地层最全, 厚度大, 分布连续。由于黄土具有特殊的工程特性, 常使修筑在其上的公路路基沉陷、路基路面变形或开裂、公路边坡坍塌, 严重影响公路的正常运营。因此, 在黄土地区公路交通建设中, 对地下地质缺陷的精细勘察显得尤为重要。

地球物理探测是以介质物理性质差异为基础,

通过观测地下物理场的分布及其变化规律来研究地下是否存在地质异常体等问题的科学技术, 在地质灾害调查中发挥着重要作用。其特点是快速、全面、准确、省时、经济, 尤其是在一些较敏感地区, 可以做到无损检测。在黄土地区开展精细地球物理调查有许多困难<sup>[1]</sup>, 沿用或照搬传统物探方法都难以达到工程要求, 现有应用尚未形成系统性和针对性。因此, 很有必要针对黄土公路地质缺陷, 开展专门研

基金项目: 交通部西部交通科技项目(2001 318 812 13); 交通部行业联合攻关课题(2003 353 361 520)

收稿日期: 2005-11-21

可见, 对于相同半径的曲线, 当曲线长度增加时, 其绝对信息变化率也会增加, 但是超过一定长度后其值保持不变。而且, 在透视图上前者表现的曲率半径要大一些。因此, 驾驶员在曲线长度较大的曲线

上行驶时采用的车速往往相对较低, 这结果与 William H. Levison 等人的结果相一致<sup>[2]</sup>。图 9 是 William H. Levison 在研究曲线转角与车速关系时的实验值和仿真值。

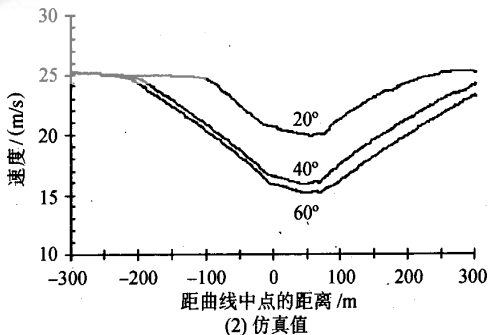
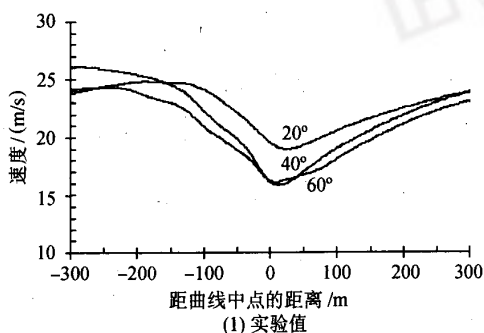


图 9 William H. Levison 关于曲线转角与车速关系

## 参考文献:

- [1] 杨轶. 行车动力学仿真模型研究[D]. 同济大学, 2004.
- [2] W H Levison, A C Bittner Jr, S J Hunn.

Computational techniques used in the driver performance model of the interactive highway safety design model[Z].

究。将新的地球物理方法应用于黄土地区公路建设中地下地质缺陷的探测,除对已发生问题地段进行调查外,还可以起到事前预测的作用,并根据探测结果,对一些存在隐患的地段采取相应措施,使灾害发生的可能性降低到最低,从而保证公路投入运营后的正常使用,同时也减少了日后公路养护的费用。

## 1 中国西部黄土地区地下地质缺陷及其特点

中国西部黄土地区地下地质缺陷主要包括泥石流、滑坡、地面塌陷、地面沉降、地裂缝、黄土洞穴等,特殊地段也会发生土体崩塌。现将这些主要缺陷(灾害)的成因及特点归纳如下。

(1)泥石流。泥石流是山区沟谷中,由暴雨、冰雪融水等水源激发的、含有大量泥砂石块的特殊洪流,是水土流失过程中介于挟砂水流与滑坡之间的泥砂失稳集中搬运的一种突发性极强、破坏性极大的地质灾害现象<sup>[5]</sup>。

泥石流的形成主要受地形、地质和气象水文等3个条件的制约,它是一种高浓度水、砂砾复合异相混合流,是颗粒大小差异很大的固体(岩土体)和液体(水)的联合运动,是一种突发性的快速地质灾害过程。降雨及冰雪融水是其形成的动力机制。

(2)滑坡。滑坡是由依附于其内在软弱结构面(带)的地表斜坡岩土体,在自然地质作用和人类活动作用下,失去原有平衡条件而产生以水平位移为主的整体移动事件<sup>[5]</sup>。它是在一定的地质环境中发生的,其起始必要条件与滑坡工程地质条件密切相关,一定的机理受制于一定的岩土组合类型、结构类型、斜坡形态以及结构面组合与临空面的关系。

(3)地面塌陷。地面塌陷是地表岩土体及赋存其中的水、气所组成的综合体系,在自然或人为因素作用下,产生各种破坏其平衡状态的力学效应,导致岩土体覆盖层向下陷落,并在地表形成塌陷坑(洞)的一种地质现象。有的塌陷作用隐蔽于地下,尚未达到地表,称为地下塌陷。地下塌陷若为柱状岩(土)体向下陷落,称为陷落柱。在土层中发育的空洞称为土洞<sup>[5]</sup>。

地面塌陷可根据其成因、规模等特征指标分为不同的种类,按其形成机理可分为岩溶塌陷、采空塌陷、黄土塌陷等,按其成因可分为自然塌陷和人为塌陷。黄土地区由于黄土本身的结构及水理特性,在自然和人为作用下会发展成为地面塌陷。这是一种动力地质灾害现象,具有突发、隐蔽的特点,其发展趋

势主要取决于人为因素的变化。

(4)地面沉降。地面沉降是地表在自然营力作用下或人类工程—经济活动影响下,一种大面积以至区域性的连续缓慢的总体下降运动。目前,国内外所研究的地面沉降主要着重于因抽取地下流体引起的区域性地面沉降问题<sup>[5]</sup>。它以向下垂直运动为主体,只有少量或基本上没有水平位移。其沉降速度、沉降量、持续时间以及范围,均因地质环境或诱发因素的不同而异。

(5)地裂缝。地裂缝是一种岩体或土体中直达地表的线状开裂。岩、土体在内、外营力作用下,发生变形,当力的作用与积累超过岩土层内部的结合力时,岩土层发生破裂,其连续性遭到破坏,形成裂隙;当裂隙延续到地表后其围压作用力减小,形成较宽的裂缝,即地裂缝<sup>[5]</sup>。

地裂缝的形成有多种因素,目前危害较大的地裂缝以过量抽取地下流体造成的地面不均匀沉降地裂缝、采空区塌陷地裂缝、新构造活动地裂缝为主。其展布受构造活动控制,成因机理呈多样性和复杂性,属表生的、区域性地质灾害,具有突发、隐蔽的特点。

(6)黄土洞穴。湿陷性黄土地区,由于地表水(雨水或农灌水)的汇集,水流沿着黄土的垂直节理和大孔隙向内部渗透、潜流,溶解黄土中易溶盐,破坏黄土天然结构,土体不断崩解,水流带走土粒,形成大小不等的暗沟、暗穴。这些暗沟、暗穴进一步在水的浸泡和冲刷作用下,洞壁坍塌,逐步扩大成更大的陷穴。黄土洞穴就是这些暗沟、暗穴、陷穴之统称<sup>[8]</sup>。黄土洞穴具有分布无规律、形态不规则、类型多样、潜伏性强和填充物复杂等特点,加之受原始地形及介质的地球物理参数差异等限制,精细探测的难度很大<sup>[1]</sup>。

## 2 地下地质缺陷对公路交通建设的危害

在西部公路工程中,地下地质缺陷是大量存在的,工程地质上常见的诸如岩土体滑坡、地面塌陷、地裂缝、地面沉降、崩塌和泥石流等地质灾害,几乎在西部公路建设中全部出现,给拟建公路的选线和已建公路的安全运营构成了威胁,带来了危害,常使路基切割错断、路面塌陷、公路结构物和路面竖向位移,导致桥头跳车,影响行车速度,乃至发生交通中断(见表1)。对这些缺陷的精细探测与成像,可以给灾害的防治与治理提供基础地质数据,降低公路工

程成本,是当前公路建设中需要进一步重视并尽早解决的重大问题。

表1 黄土公路地质缺陷对公路交通建设的危害

地质缺陷名称	对公路交通建设的危害
泥石流	由于泥石流的大量淤积,致使交通阻塞,影响交通运输。泥石流冲下来的大量大石块对公路及桥梁造成严重破坏,对山区居民的生命财产安全造成很大威胁。
滑坡	是山区公路的主要病害之一,常使交通中断,影响公路的正常运营。而大规模的滑坡可堵塞河道、摧毁公路、破坏厂矿、淹没村庄,对山区建设的交通设施危害极大。
地面塌陷	对道路交通、工矿企业、公共设施、居民住宅、农业耕地已构成了严重的威胁。
地面沉降	使公路交通工程结构物出现持续沉降、公路路线竖向发生变化、公路结构物和路面间出现明显竖向位移差异,进而导致桥梁桥头跳车等危害,影响行车的舒适性。
地裂缝	切割错断路基,产生路面塌陷,诱发不均匀冻胀变形,影响工程质量和行车速度,对车站、房屋、管道也将产生不同程度的破坏作用。
黄土洞穴	黄土洞穴对公路不同部位都有危害,包括对路基、路面的破坏,对路堑边坡的破坏,对路堤边坡的破坏,对公路桥梁的破坏,对隧道的危害和对排水设施及其他附属设施的破坏等。黄土洞穴灾害不但是公路建设与运营过程中的一个典型的工程地质问题,而且常常会引发路基溃爬、边坡崩塌和滑坡等严重的重力侵蚀,从而导致严重的水土流失。

### 3 地球物理探测黄土地质缺陷的技术现状

地球物理方法对黄土地区地下地质灾害体的勘察可以提供3个方面的信息:(1)提供灾害体的空间分布、几何形态、边界位置等,如地裂缝的展布、隐伏地面塌陷的位置等;(2)提供控制灾害体的关键地质要素的特征,如断裂构造、洞穴、地下水活动、裂缝发育等;(3)提供灾害体的一些活动特征,如温度、重力场的前兆性变化等。目前,用于黄土地区地下地质缺陷探测的地球物理方法,除常规的方法以外,一些新技术新方法也在不断被引用<sup>[1,7]</sup>。

(1)高密度电阻率法。高密度电阻率法(HD)兼具测深与剖面2种特点,装置系统灵活多样,可以针对不同的地质问题选择不同的装置形式,并具有数据量大、携带地质信息丰富和易计算处理等优点。目前采用的分布式并行多道瞬间三维观测系统,突破了传统HD方法的限制,数据信息量大,增强了弱信号提取的能力。

该方法可应用于对滑坡、泥石流、地面塌陷、地面沉降、地裂缝的勘察,可以解读诸如滑坡体、泥石流体的分布范围、厚度;地面塌陷中的岩溶、洞穴的分布、埋藏特征以及充填物性质;半定量描述地裂缝、地面沉降、滑坡、塌陷等的裂缝发育特征等。

(2)探地雷达。探地雷达(GPR)是探测浅部土壤和岩石地质特性的一种新技术,其观测方式包括反射剖面模式、透视模式以及共中心点、广角反射和折射模式,最常用的是反射剖面模式。探地雷达方法是通过测定高频电磁波信号在地下的传播和衰减情况来确定具有电性差异特征体的边界及圈定导电异常体,具有分辨率高、高效、直观、连续无破坏性等优点,但对于低电阻率、电磁波衰减系数大的黄土地区,其穿透深度是一大难题。

探地雷达可应用于滑坡、泥石流、地面塌陷、地裂缝等的勘察,可以探测滑坡体、泥石流的形态、厚度特征;探测地裂缝的位置、产状;探测塌陷区的底层结构、岩性接触关系;测定塌陷堆积体厚度,堆积床形态等。

(3)瞬变电磁法。瞬变电磁法(TEM)是通过观测人工电磁激发的二次场时间特征来研究地下电性分布的一种方法。它具有抗干扰能力强、受地形影响小、不受近地表电性不均匀干扰、工作效率高、对低阻体反应灵敏等特点。根据所解决的问题,TEM可以选择不同的观测方式。

该方法可应用于地面塌陷、地裂缝、地面沉降及黄土洞穴的勘察,可以用于查明与地面塌陷相关的地下岩溶、洞穴的分布及埋深;探测地裂缝的地层结构、岩性特征及基底构造特征;探测与地面塌陷相关的第四系厚度、岩性结构及含水层特征。近年来,用TEM进行公路隧道超前地质预测成为一个研究热点。

(4)浅层多分量反射地震。浅层多分量反射地震是借助人工爆炸(或锤击)震源激发,用三分量检波器接收纵波和转换横波的一种新方法。从接收信息来讲,可以观测出反射地震波的垂直分量、水平分量和总矢量(通过合成)。由于横波传播特性(速度、振幅吸收系数、偏振等)与地层岩性、孔隙度、裂缝、流体饱和度的相关关系比纵波更为紧密,因此多分量地震可以更充分地利用多种波型和地震波的动力学特征,实现岩性勘探、流体识别、裂缝探测等目标,是一种探测深度在50 m以浅的高分辨率多波反射地震法。该技术在解决西部黄土地区公路工程中的有

关浅层地质缺陷探测问题,例如路基隐伏断层、裂缝、湿陷性黄土暗穴等等,具有广阔的发展空间。

图1、图2是作者在陕西省某高速公路路基沉降调查中,使用双分量浅层反射地震技术得到的部分结果。路面沉降带存在下伏断层,在隐伏断层牵引下,上覆黄土层底部被拉裂,地表出现沉降带,是地裂缝的早期表现。随着时间的推移,隐伏断层的持续拉力使土层内拉裂带逐渐变宽并向上扩展,最后

上下贯通,在地表出现沉降带和地裂缝,尤其在集中降雨时期,隐伏裂缝顶部会出现局部沉降漏斗,殃及高速公路路基。多波地震资料揭示了沉降漏斗的范围和规模,如图1。综合P-P波和P-SV波剖面信息,可得到有关地震波动力学特征信息,如图2所示,纵横波频率比剖面也揭示沉降漏斗的存在,深度约50 m。

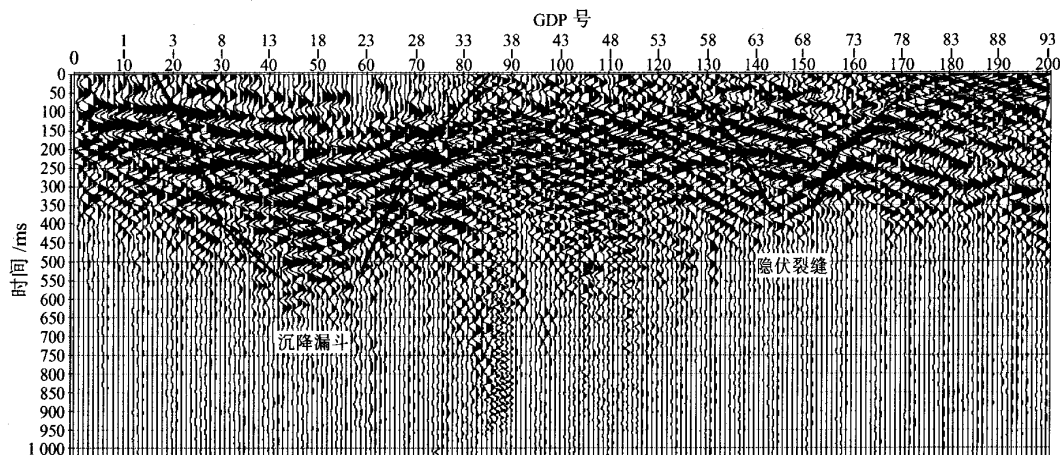


图1 SY300线P-SV波水平叠加剖面

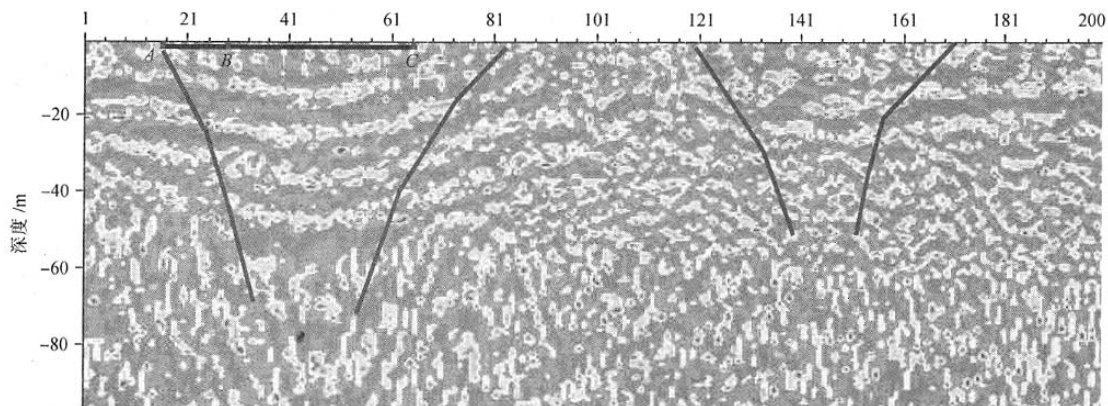


图2 SY300线纵横波频率比剖面

浅层多分量反射地震法可应用于滑坡、泥石流、地面塌陷、地裂缝等灾害的勘查,可以用于确定滑坡的结构特征,如滑坡体厚度、滑坡面位置;确定地面塌陷中的岩溶、洞穴分布特征、空间形态;查明地裂缝的分布及错动特征等。目前把三分量地震用于隧道(井巷)掘进面前方不良地质体超前探测,已成为倍受重视的技术。

(5)多道瞬态面波法(瑞雷波法)。多道瞬态面波法(MASW)是一种利用瑞雷波的频散特性进行工程地质勘探的新方法。它借助多道工程地震仪及方便的炸药(或锤击)震源,通过布置合理的观测系统及相应的检波器,采用一发多收的采集方式,可实现面波、反射波等一体化采集,研究面波的频散,进而可判别地下不同岩层的弹性特征。



面波勘探可应用于滑坡、泥石流、地面塌陷和地裂缝等灾害体的勘查,可以确定滑坡体、泥石流堆积物的厚度及分布范围;确定地面塌陷和各类洞穴的分布及空间形态、地裂缝的位置及分布特征等。

(6) 声波检测。声波检测也属弹性波“动测”技术。其测试原理与浅层地震相同,但其使用频率及测试精度均高于浅层地震。通过3个声学参数即声速(俗称波速)、声波波幅及频率对介质的物性做出评价。声波检测技术可应用于路面裂缝检测,在工程构件无损检测中已广泛应用。

(7) 地球物理层析成像。利用人工场源激发地震波、电磁波透射地下介质或根据人工电场空间分布而重建地下介质物理参数图像的井间(或井地间、坑道间)地球物理层析成像(CT)技术,获得的信息对地下构造及物质分布成像具有很高的分辨率。该方法可应用于地面塌陷、地面沉降、地裂缝等灾害勘查,主要针对一些关键部位以及防治措施的设计进行,用来确定地面沉降、塌陷、地裂缝中的不良地质体现象,如裂缝、岩溶、洞穴的空间形态或连通性特征等。

地质灾害种类较多,性质各不相同,涉及到的范围和领域也比较广泛。因此,地质灾害勘查中单靠某一种方法往往难以奏效,必须采用综合地球物理方法才能解决地质问题。综合地球物理方法的应用效果在很大程度上也取决于方法技术的合理选择和有效的组合。因此,应科学地选择地球物理组合方法,以改善地质灾害的勘查效果。

#### 4 精细探测黄土地区地质缺陷的对策

在公路工程中,地球物理探测已显示并发挥了重要作用,在路面、路基、桥隧等探测检测方面都做过了相应工作,使用了包括瑞雷面波、声波无损检测、浅层反射地震、隧道地震预测、探地雷达、直流电法、自然电场法等诸多技术。但是,就公路交通建设,尤其是针对西部公路工程中暴露的地质问题开展有效的综合地球物理探测,目前尚未形成实用成熟的整套技术;已有工作经验是零星的、相对独立的,缺乏系统性和整体性;更主要的是直接把资源勘查或一般工程上常用的物探工作方法(参数)照搬套用,缺乏针对西部公路的特殊地貌、水文及地下介质情况而开展的精细研究。因此,很有必要开展有针对性的系统研究,如研究高频电磁波技术解决裂缝探测问题、研究多通道阵列电法勘探技术解决地下水

环境问题、研究多分量地震技术解决岩性勘探问题、研究井(孔)—地面联合成像技术解决立体探测问题等等。研究西部特殊地形地貌、特殊近地表黄土层条件、特殊复杂目标体的综合探测成像方法和成套技术,形成规范化的技术体系,实现公路工程物探技术的产业化和精细化,是下一步应深入开展工作的方向。

针对西部公路建设中常见的地质病害或地下缺陷,其主要对策是开展综合地球物理探测方法技术研究,通过有针对性地引入、研究和改造最新地球物理技术,研制专用地球物理传感装置并部分改造现有探测仪器,重点探测0~50 m范围内地下断层、裂缝、滑坡、暗穴、塌陷、地下水环境变化等不均匀地质体,实现三维立体成像和探测,形成自主知识产权的硬软件和公路工程物探方法技术系列,积累勘探经验和详细资料,为今后进一步建立公路工程地球物理探测与检测标准奠定基础。实施过程中应针对西部特殊浅表条件(如黄土层对波的“屏蔽吸收”效应)和不均匀体浅而复杂(50 m以浅,目标体多样化)等具体难题,依据不同地球物理方法的应用前提和条件,有针对性地开发特殊方法技术,并进行综合信息研究,以最大限度地排除结果的多解性,提取有效信息。主要研究内容应包括以下7个方面:(1)浅层多波多分量地震勘探技术;(2)面波地震勘探与参数提取方法;(3)高频电磁波理论与高精度成像方法;(4)阵列并行地电场观测与解释;(5)井(孔)—地面联合成像方法技术;(6)专用地球物理传感装置的研制;(7)公路工程超浅层综合地球物理信息处理系统。拟解决的关键技术问题包括:多波参数提取方法和岩石弹性参数的关系;复杂模型体(软弱带、裂缝、孔洞)高频电磁波图像数值模拟和识别研究,多孔阵列TEM场的联合反演及拟地震成像方法;多道并行地电场观测采集系统、三维空间成像和裂缝及断层等空间赋存位置问题研究;弹性波、电磁波探孔—地面联合立体成像方法研究。

#### 5 结语

黄土介质的复杂性给浅层地质缺陷的探测带来了困难,必须有针对性地结合公路工程问题开展专门研究。

通过上述研究,预期在我国西部公路工程中将实现下列目标:(1)将地球物理勘探领域中的最新技术和方法,通过有针对性地引入、研究和改造,以适

用西部公路建设的专门问题,开发出包括地震、电法、电磁法等为主的公路工程物探资料处理与参数提取软件,实现自主知识产权,形成公路工程物探方法技术系列;(2)研制专用地球物理传感装置并部分改造现有探测仪器,形成一套方便、快捷、实用的公路工程物探配套装置;(3)依托相应工程试验场地,通过探测地下断层、裂缝、滑坡、暗穴、地下水环境变化等工程实践,解决实际工程问题,在 50 m 深度范围内探测不均匀地质缺陷,重点目标是实现三维成像及岩土性质勘探,探测到的缺陷规模在 1~3 m 内,相对误差小于 10%,有效率达 90%;(4)通过公路工程的试验积累,积累勘探经验和详细资料,为今后建立公路工程地球物理探测与检测标准奠定技术基础。

由此,可为公路工程建设提供技术支持,节约成本,减少由灾害带来的各种损失。

#### 参考文献:

- [1] 李庆春,等. 湿陷性黄土暗穴的综合地球物理探测试验研究[J]. 公路交通科技,2005,22(6).
- [2] 李喜安,等. 公路黄土洞穴灾害与水土流失研究[J]. 公路,2004,(12).
- [3] 苏生瑞,彭建兵,宋彦辉. 黄土洞穴对公路的危害研究[J]. 公路,2004,(11).
- [4] 主齐仁. 地下地质灾害地球物理探测研究进展[J]. 地球物理学进展,2004,19(3).
- [5] 郭建强. 地质灾害勘查地球物理技术手册[M]. 地质出版社,2003.
- [6] 杨进,武炜. 地球物理方法在地质灾害勘查中的应用[J]. 物探与化探,2003,27(5).
- [7] 郭建强,朱庆俊. 地质灾害勘查的地球物理方法及其发展趋势[J]. 地球学报,2003,24(5).
- [8] 赵永国,谈应鹏,穆国兵. 黄土地区公路路基下伏洞穴的探查技术[J]. 西部探矿工程,2002,(增刊).

## Present Situation and Countermeasures of Geophysical Detection over Geological Defects in Loess Highway

LI Qing-chun, ZHANG Bao-wei, LIU Hua-feng

(College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The major loess geological defects and their characters in the western of China are summarized and the harm of the loess defects to highway construction and transportation is emphasized. By analyzing the technical situation of geophysical detection to geological disasters, it is indicated that the immediate systematic researches on loess defects in highway engineering are needed. Last, the countermeasures and expected objective are presented for fine geophysical detection of the loess geological defects.

**Key words:** loess highway; geological defects; geophysical detection; present situation and countermeasure

### 敦煌公路段制定灾害应急预案

为确保公路安全畅通,甘肃敦煌公路管理段结合实际制定了《2006 年公路灾害应急预案》。

预案在确定了重点防灾路段及构造物的同时,成立了应急抢险小组,将 70 名业务强、素质好的青年职工投入到应急分队中,并明确了各自职责。该段对运力保险和物资储备也做了具体的安排,以确保发生灾情后,能够快速集结到位,及时处理公路灾情。