

岩溶路基病害与处置技术国内外研究现状^①

母进伟¹, 雷明堂², 梁军林³, 石连富¹

(1. 贵州省公路工程总公司, 贵州 贵阳 550008; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004;
3. 广西交通科学研究所, 广西 南宁 530001)

摘要 随着我国西部大开发战略的实施, 岩溶问题已成为南方岩溶地区突飞猛进的公路建设, 特别是高速公路建设面临的主要地质问题。本文以近年来国内外与岩溶有关的公开出版的最新研究成果为基础, 针对目前与岩溶路基病害处置密切相关的隐伏岩溶的探测技术、岩溶洞穴稳定性与风险评估、岩溶塌陷的试验测试、岩溶塌陷监测预报以及岩溶病害的防治方法等方面, 系统总结了国内外学者的最新研究现状。最后, 在分析国内外差距的基础上, 提出我国岩溶路基病害防治技术的研究应包括岩溶路基病害的分类和处置方法体系研究、路基病害发育过程的大型模型试验研究、隐伏岩溶地球物理探测方法的有效性研究、高新技术在高风险区岩溶路基变形破坏监测中的应用研究等方面。

关键词 岩溶路基, 岩溶塌陷, 高速公路

中图分类号: U416.1; P642.5 文献标识码: A

1 国外研究现状

岩溶地区面积辽阔, 主要分布在地中海沿岸、东欧、中东、中国南部、东南亚、美国东南部和中美洲等人口稠密的地区, 这些地区人类工程活动强烈, 面临的岩溶灾害问题也非常突出, 并已引起国际社会的普遍关注, 特别是进入20世纪70年代以来, 召开了多次与岩溶有关的国际会议, 使世界各国的研究者有机会交流和商讨解决岩溶地质灾害问题的经验与方法。例如, 1973年, 国际工程地质协会在西德汉诺威首次举行了“岩溶塌陷与沉陷: 与可溶岩有关的工程地质问题”国际讨论会, 重点讨论了欧洲地区特别是在蒸发岩地区的地面塌陷、分布规律、勘测技术和防治措施; 1978年, 美国在宾夕法尼亚州的赫尔锡市召开了岩溶地区工程地质讨论会, 重点讨论了岩溶地面塌陷发育规律问题; 1984-2003年先后在美国佛罗里达州、密苏里州、肯塔基州和阿拉巴马州举行了9届“Multidisciplinary

Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst (岩溶塌陷和岩溶工程与环境影响多学科国际讨论会)”, 这也是目前国际上举办历史最长、影响最大的岩溶塌陷与岩溶问题的国际会议。1996年, 美国学者 George Sowers 编写了《Building on Sinkholes: Design and Construction of Foundations in Karst Terrain (塌陷上的建筑物-岩溶区的基础设计与施工)》, 全面介绍了岩溶塌陷的机理和防治问题; 2004年, 英国学者 Tony Waltham 等组织来自各国的20多位专家编写了《SINKHOLES and SUBSIDENCE: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction (塌陷与沉陷-工程与建设中的岩溶与洞穴岩体问题)》, 系统介绍了工程活动中岩溶隐患的处置问题。

国外的岩溶与工程问题研究主要注重如下几个方面:

① 资助项目: 国土资源部百人计划项目“岩溶塌陷临界条件试验研究”和交通部西部交通建设科技项目“岩溶地区公路基础设计与施工技术研究”(编号: 2002-318-000-19)

第一作者简介: 母进伟(1969-), 男, 高级工程师, 贵州省公路工程总公司副总经理。

收稿日期: 2005-02-25

1.1 岩溶路基隐伏岩溶的勘测技术

岩溶路基病害发育的基础条件是隐伏岩溶的存在,具有高度不均一性的隐伏岩溶发育带的探测一直被认为是极具挑战性的问题,发达国家由于仪器设备方面的优势,各种地球物理方法都曾运用到这一领域,目前使用较多的是地质雷达、高密度电法、浅层地震、以及声波电磁波孔间透视、CT层析法等。近年来,随着计算机技术的发展,也在往集成化、多功能化方向发展,也不断推出新的物探仪器,例如,美国 Zonge 公司生产的第四代人工场源及天然场源的电法和电磁法勘探系统(GDP-32II 多功能电测系统),该系统几乎具备了全部中频段到低频段的电测功能,其中主要方法包括:直流电阻率法(Res)、直流激发极化电法(TDIP)、交流激发极化电法(FDIP)、复电阻率法(CR)、可控源音频大地电磁法(CSAMT)、谐波分析可控源音频大地电磁法(HACSAMT)、音频大地电磁法(AMT)、大地电磁法(MT)、瞬变电磁法(TEM)和超浅层瞬变电磁法(Nano TEM)等等。这些设备已被广泛用于固体矿产勘探、工程物探和油气勘探、环境地质调查和环境监控等方面。

国外在隐伏岩溶的探测技术上的另一个特点就是极为重视标准(指南)的制定,以便非专业人员在制定工作方案过程中也能作出正确的选择。如:经过十多年的努力,1999年,美国测试与材料协会(The American Society of Testing and Materials(ASTM))颁布了《D6429-99 Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods(地面地球物理方法选择标准指南(D6429-99))》^[1]。该指南在系统描述了目前工程地质、水文地质和环境地质调查中常用的12种不同的物探方法,包括浅层地震折射法、浅层地震反射法、直流电阻率法、激发极化电阻率法、天然电场法、频率域电磁法、时间域电磁法、甚低频电磁法、金属管线探测器、地质雷达、磁法和重力法的基础上,提供了每一种方法的用途、探测深度、易用性、分辨率和局限性等。针对隐伏岩溶的探测问题,一致推荐了3种首选方法:频域电磁法(Frequency Domain Electromagnetic)、地质雷达(Ground Penetrating Radar)、微重力法(Gravity);两种次选方法:浅层地震折射波法(Seismic Refraction)、直流电阻率法(Electrical(DC) Resistivity)。

1999年,英国大不列颠标准局(British Standards

Institute)颁布了《BS5930 British standard code of practice for site investigations(地面调查标准)》^[2],提出在岩溶区探测中最有效的地球物理方法包括:跨孔地震(Cross-hole seismic)、微重力(Microgravity)、电阻率或电导剖面法(resistivity or conductivity profiling)以及地质雷达(Ground Penetrating Radar),而其它的方法虽然可用,但有很大的局限性。标准中所列出的方法除了地质雷达以外,大多数早在1983年就被建议采用。

2004年,美国 Technos 地质与地球物理咨询公司总结了1971年以来从事地球物理勘探的经验,出版了《Surface Geophysical Methods(地面地球物理方法)》^[3]一书,系统分析了14种探测方法,就隐伏岩溶问题,他们认为首选方法是地震面波、地质雷达和微重力法,其次是地震折射波、地震反射波法、电阻率成像、天然电场、频率域电磁法等。

从上述三个不同机构推荐的方法可以看出,虽然首推的方法有所出入,但是,地质雷达、微重力法以及浅层地震是比较得到认可的。

1.2 岩溶路基溶洞稳定性研究

岩溶洞穴顶板安全厚度以及失稳机理是目前岩溶路基稳定性评价面临的重大课题,由于岩溶洞穴失稳过程的特殊性,使得模型试验成为重要研究手段。如:1984年,南非 Stellenbosch 大学 J. Marius Louw^[4]采用1:10比例尺,模拟混凝土路面在基岩岩溶塌陷影响下的变形、破坏特征;1970年日本学者 Nogushi^[5]、1986年前苏联学者 B. П. XOMEHKO^[5]、1984年美国学者 RALPH J. HODEK^[6]、1995年美国学者 Thomas M. Tharp^[7]、俄罗斯学者 A. V. Anikeev(1999)^[8]、英国 Nottingham 大学 Lu Zhengxin^[9](2004),先后采用物理模型试验、有限单元法和二维拉格朗日快速变换(2D-FLAC)等数值分析的方法,系统研究了荷载、洞穴宽度以及洞穴高度与顶板安全厚度问题。一般认为,在大多数岩溶地区,溶洞顶板安全厚度值应超过溶洞宽度的70%,但这个值在一般的工程荷载下偏于保守,而对于高速公路的荷载来说则更为保守。

岩土工程离心机(Geotechnical Centrifuge Facility)是利用于机体转动时产生的离心力去加强模拟物的实际重力,通过它,很多现场的试验都可在室内进行了。离心机可用于模拟多种工程问题,例如暴雨产生的滑

坡、填海地盘的固结沉降,地面的地震反应,地震液化及地基变形,污染物在孔隙介质中的传播,以及许多在动静荷载下土与结构的相互作用问题等。因此,国外一些学者也采用岩土工程离心机进行地面塌陷试验工作,如 Sterling 和 Ronayne(1984)^[10]试验研究了洞穴上覆粘土层的塌陷问题,但没有考虑粘土强度的影响,也没有把结果推广到其它土层条件;在 Sterling 的基础上,Craig(1990)^[11]用离心模型研究了粘土直接覆盖洞穴或粘土-砂层-洞穴的条件,建立起无量纲的安全系数(VS)的极限值,塌陷与土层强度、土层厚度、其它上覆荷载以及洞穴开口直径有关,然后,运用他的无量纲比率,可以推广到其它没有专门模拟的土层条件;以 Craig 的试验为基础,Maryland 大学的 Abdulla 和 Goodings(1996)^[11]运用离心机塌陷破坏机理和导致塌陷的临界组合条件,重点研究了上覆在洞穴上方的弱固结砂层的塌陷破坏与洞穴开口大小、洞穴自身强度、弱固结砂层强度和厚度、上覆砂层的厚度,以及地表荷载的关系。由于离心机在模拟岩溶系统中地下水动态变化对上覆岩土的作用方面存在局限性,因此,上述研究均未考虑地下水的作用问题,然而对岩溶塌陷的形成又是至关重要的。

1.3 岩溶塌陷危险性预测与风险评估

运用以 GIS 为代表的计算机技术,结合灾害发生的危险性与社会经济易损性,评估灾害风险,已成为近年来国外地质灾害研究工作的重要内容。如 1986 年,美国 Crawford^[12]对 Barren 河岩溶塌陷进行危险性评价,采用 1.25 X 1.25 的网格,如果网格内塌陷个数占总数的 10% 以上,划为高危险区,1% ~ 10% 为中等危险区,小于 1% 为低危险区,下伏地层为非碳酸盐岩的非塌陷危险区。1996 年,美国克罗拉多大学 Mario Mejia-Navarro^[13]研制开发了基于 GIS 技术的计算机决策支持系统(DSS),专门用于地质灾害的风险评价工作。美国的 D. Raghu(1984)^[14]采用泊松方程来模拟新泽西州 Warren 县在给定时间内、给定面积区域发生塌陷的概率。南非的 Frederk Calitz(2001)^[15]运用 GIS 对南非 Lebowakgomo 白云岩地区潜在地面塌陷风险进行了评估;意大利的 Roberto Salvati 和美国的 Thomas M. Tharp(2001)^[16]提出了根据岩溶水压力对塌陷影响的概念模型,并据此开展意大利中部 Latium 地区的岩溶塌陷评估工作;英国国家地调局的 A. H.

Cooper(2001)^[17]用 ArcView 对英国岩溶地质灾害进行了评估。Yongli Gao(2003)^[18]运用 Arcview 对美国明尼苏达东南部岩溶塌陷的空间分布规律和潜在风险进行了系统分析。1984 年,美国田纳西州交通局 Harry L. Moore^[19]对在田纳西州 Knox-Blount 县岩溶区高速公路建设中面临的沉陷、塌陷、隐伏溶洞、洪水以及落水洞淤积进行了危险性评价。

1.4 岩溶塌陷监测预报

美国学者 Bensor(1987)^[20]提出利用地质雷达进行监测预报的方法,并在北卡罗来那州 Wilmington 西南部的一条军用铁路进行了试验,监测周期为半年,取得了良好的效果。近年来,以 FBG(光纤光栅)、BOTDR(布里渊光时域反射)与 TDR(时域反射法)为代表的光纤传感技术正在逐渐走向成熟,当光纤因受应力或温度改变而产生应变时对于通过之光束的特性产生影响,光纤传感就是利用此特性之改变来做监测的。光纤传感容易实现自动化与远程实时监测。而更重要的是,其具备多种监测功能,可使用同样之电子仪器及多任务器同时进行多点、分布式监测,可有效地建立高效率且经济之监测系统。目前,该技术在航空、航天领域中已显示了其有效性,在土木、交通、地质工程及地质灾害防治等领域的应用也已开始。可以预见,对于高速公路岩溶病害这种呈线状分布、位置又不确定的岩土变形,光纤传感技术将具有广阔的应用前景。

1.5 岩溶路基病害的防治

控制排水^[9,21]:由于覆盖型岩溶区新塌陷的形成和土层不均匀沉降的产生大多与人类活动、特别是破坏天然条件的地面排水系统有关,因此,每一个在岩溶区工作的工程师第一个概念就是控制好场地的排水。控制排水的常用方法是通过专门的排水渠道将暴雨雨水直接引到下伏岩溶系统中,使建筑物基础免受破坏。在高速公路中,路面所汇集的大量雨水的处理方法包括设计专门水渠直接排到地下,在基础和底基层间铺设不透水的土工膜、在底基层加设排水系统等。国外的工程师极为注意将原有的塌陷坑、落水洞作为处理暴雨的排泄通道,例如,美国肯塔基 Bowling Green 市为了防止地表水的入渗造成道路路肩土层塌陷,设置了专门的引水渠道,将暴雨形成的地表径流引到落水洞中。

特殊基础^[9,21]:为了防治覆盖型岩溶区地面塌陷

和不均匀沉降对建筑物造成危害,片筏基础和条形基础被普遍认为是最经济的基础类型而被普遍采用,而片筏基础则被认为是最有效的基础类型而被采用,桩基、灌浆加固等也是国外较为常用的处理岩溶病害的方法。

土工格栅^[9]:在公路建设中,用土工合成材料防治沉陷或塌陷比混凝土盖板的优势已被认识,土工合成材料又以重型土工格栅最为有效,它的纵向抗张强度可达400kN/m(标准的仅为40kN/m)。英国1998年在白垩地层分布区修筑公路时,发现白垩地层发育有直径达20m、深7m、被粘土砂砾石充填的管道。施工时,主要采用几种方案进行处理:①对于直径小于1m、发育在桥基下的管道,其充填物被彻底清除,换填混凝土;②对于直径8m以下的管道则采用钢筋混凝土盖板跨越,盖板跨度为两倍管道直径;③直径超过8m时,则用桥跨,桥采用桩基础,桩基到管道的间距不小于2倍桩径;④在有中密度砂砾石充填的小型管道上方的路基,铺设了加强型土工格栅,以支持上面的路堤;⑤粘土充填的小型管道采用混凝土塞,大型管道则先采用振动法换填石头加强然后用土工格栅。

2 国内研究现状

在我国,岩溶给包括高速公路在内的各类工程建设造成危害最突出的问题就是在地下水作用下产生岩溶塌陷或不均匀沉陷,岩溶路基的病害可分为两大类:一类是变形问题,另一类是水害问题。

目前,公路工程中岩溶分类主要按岩层出露情况和岩溶形态进行分类。裸露型岩溶区的岩溶形态主要是石牙、石林、溶沟等,地表坎坷不平;半覆盖型岩溶区岩溶形态主要有残丘洼地、峰丛洼地、峰林洼地,存在路基的基底沉降、塌陷和路基水害问题;覆盖裸露型岩溶区主要有峰林坡立谷、溶蚀平原,路基水害和不均匀变形问题突出。

为评价岩溶化地基的岩体质量,水电部门采用两种方法分级方法进行评价^[22]:一是以地基溶蚀程度为主的分级方法,按地基的完整性、线溶蚀率和地基岩体的渗透性,以溶蚀程度为主分为I~V级,溶蚀性由微弱、弱、中等、强烈至极强。另一种方法是以岩石力学性质为主的分级方法,首先根据岩石饱和抗压强度、变

形模量、完整性系数和纯摩擦系数计算分级的定量指标,然后根据地质因素的影响(包括软弱夹层、风化程度和溶蚀程度),对指标进行折减,每一因素最大折减不超过20%,最后,按分级指标分为I~VI类,依次为优、良、中、差、坏和极坏的岩体质量。

对岩溶地区公路工程水害问题的研究,这方面的研究资料不多。

岩溶塌陷(沉陷)是岩溶区公路路基面临的首要问题,作为我国六大类型地质灾害之一,岩溶塌陷一直受到国家有关部门和学者的高度重视,特别是近20年来,投入了大量人力物力,开展岩溶塌陷防治研究工作,取得了大量成果。1997、1998年先后在桂林市和牡丹江市举办了“地面塌陷及其对工程建设的影响与防治”学术讨论会。我国岩溶塌陷研究的主要成果包括:

2.1 我国岩溶塌陷的宏观分布规律

1985-1989年,中国地质科学院岩溶研究所先后开展了“中国南方岩溶塌陷研究”、“长江流域岩溶塌陷研究”和“中国北方岩溶塌陷研究”等项目^[23]。1988年,铁道部第二勘测设计院还开展了“铁路沿线岩溶塌陷及防治”工作^[24],基本摸清了我国岩溶塌陷发育的现状和宏观分布规律,确定我国岩溶塌陷基本类型。

2.2 岩溶塌陷的机理研究

1988年,铁道部第二勘察设计院在实施贵昆铁路岩溶塌陷防治项目中,开展了小型物理模型试验^[24],定性研究了砂性土岩溶塌陷发育的机理,提出了压强差效应,项目完成后,试验工作也随之停止。1993年,岩溶研究所建立起大型物理模型试验和渗透变形试验为代表的岩溶塌陷试验室,对武汉、唐山、湘潭、玉林、桂林、铜陵等城市不同类型岩溶塌陷发育的机理进行试验研究,取得了很好的效果,提出了在自然或人类活动影响下,岩溶管道系统中水(气)压力的变化是引发塌陷的根本原因^[25-27]。2004年,试验室进行了彻底改造,引进了美国 Geomation 2380 数据自动采集系统,对试验过程进行全自动监测,使试验研究工作上升到新的高度。

2.3 岩溶塌陷的勘查评价技术

2001年,刘传正等编辑出版了《地质灾害勘察指南》一书^[28],针对不同的灾害类型,系统地提出了勘察

技术与方法。包括地质雷达、浅层地震和电磁波、声波透视(CT)、GDP-32II 多功能电测系统的 CSAMT 方法在内的综合物探方法,在地矿部门组织实施的武汉、唐山、湘潭、玉林、桂林、深圳等城市岩溶塌陷勘察,以及公路铁路岩溶勘察中得到了很好的应用^[29-32]。

2.4 岩溶塌陷灾害管理与风险评估

地理信息系统(GIS)技术已得到广泛应用,岩溶研究所从 1997 年起,结合岩溶塌陷灾害防治工作的特殊性,先后运用 GIS 技术,开发了桂林、玉林和六盘水三个城市的岩溶塌陷地理信息系统,并对岩溶塌陷灾害风险进行评估^[33-36]。2002 年,岩溶所完成了“1/400 万全国地面塌陷风险区划”工作,以县为单位,对地面塌陷的危险性以及可能造成的经济损失进行评价^[37,38]。

2.5 岩溶塌陷预测

研究表明,岩溶水(气)压力的变化在岩溶塌陷发育过程中具有重要意义,雷明堂等(1993)^[25]通过对武汉市岩溶塌陷模型试验,提出岩溶水位下降速率、幅度对塌陷发育有重要影响,何宇彬(1993)^[39]认为岩溶水动力是产生塌陷的根本原因,陈国亮等(1994)^[24]通过对铁路沿线岩溶塌陷研究,提出诱发塌陷的压强差效应,蒋小珍(1998)^[40,41]通过湘潭、铜陵等市岩溶塌陷的模型试验研究,指出岩溶水压力变化对塌陷具有重要的触发作用,可以以此作为衡量塌陷发育的临界条件。1999 年,在地质行业基金支持下,岩溶所开展了岩溶塌陷时空预报方法研究,提出了基于岩溶塌陷发育机理的系统压力监测方法,并成功地在桂林进行了试验。2000 年开始,在新一轮地质大调查项目的支持下,岩溶研究所在广西桂林柘木镇建立了我国第一个岩溶塌陷灾害监测站,为深入系统地研究岩溶塌陷预测预报方法提供了良好的条件^[42]。

2.6 岩溶病害的处置^[23,24,43-45]

岩溶地区公路路基设计,主要是对影响路基稳定的岩溶和岩溶水进行预防和处理。主要采取的方法是疏导、跨越、加固、堵塞和某些岩溶形态的利用。疏导措施主要用于对岩溶水的处理,采用明沟、泄水洞等处理方法。跨越处理有桥跨越、涵跨越和填石路堤跨越,其中桥跨越用于流量大的暗河、大型冒水洞、消水洞和塌陷坑,以及岩溶极为复杂的路段,涵洞跨越用于

一般岩溶泉,填石路堤跨越用于季节性或经常性内涝的岩溶洼地。加固方法主要有洞内支撑加固、盖板加固、爆破顶板后用片石回填或跨越加固、换填加固和打桩加固等。堵塞方法主要是采用片石充填,用于路堑边坡上的溶洞、溶沟、溶槽等。岩溶形态的利用主要有利用天生桥跨越溶洞、暗河等。

对岩溶地面塌陷的防治,坚持以防为主的方针,主要措施有将公路建筑物和线路选在稳定的地区,作好抽排地下水井管的反滤层,防止泥砂流失,维持地下水动水位平衡,防止动水位低于可溶岩的岩面,对可能塌陷的地段采取帷幕灌浆处理等。

对岩溶地面塌陷的处治,主要有防渗措施、加固措施和跨越措施。防渗措施包括:回填、夯实、水泥抹面、隔水土工布封闭、氯丁橡胶板防水、建拦水坝隔离、改河工程等,地下加固措施包括强夯法、填碎石法、固结灌浆法、帷幕灌浆法、桩基、锚杆加固等,结构物跨越措施包括桥跨越、梁跨越、板跨越、拱跨越等。

对岩溶水的防治,主要有堵、截、铺、灌、隔离和导(排)的处治方法。堵的方法是采用不同材料对竖井、落水洞等进行堵塞,但位于暗河附近,雨季时又排泄暗河洪水的天窗、溶洞、落水洞、反复泉等不宜堵死。截的方法是用截水墙,截断渗水通道,铺主要是防止水渗漏,用水泥砂浆抹面,灌主要是灌浆帷幕防渗漏,隔离是修筑隔水堤,防止水渗透破坏,导主要是设排水钻孔、减压井、导管及排水沟等,将承压地下水引导排泄至建筑物外,防止其对建筑物的破坏作用。

3 结论与展望

从国内外的研究现状可以看出,目前,在岩溶探测技术上,国内水平与国外相比有一定的差距,主要是因为目前国内使用的仪器设备一是进口,二是仿制,缺少原创性的研究工作,在相关标准(指南)制定上,国内只重视各种勘探方法的操作规范的编写,缺乏综合的、针对不同岩溶问题的探测方法比较和推荐。在评价方法和处置技术上,国内外采用的技术基本相似。在岩溶塌陷方面,受项目支持与来源的影响,国外以结合工程的研究、处置为主,国内则开展了大量的区域研究和试验研究工作,但结合工程的专门研究上存在局限性。

随着国民经济的快速发展,特别是西部大开发战

略的实施,岩溶区高速公路、高速铁路的建设必将面临日趋突出的岩溶路基病害问题,在目前研究基础上,重点应开展以下领域的研究:

(1) 岩溶路基病害的分类和处置方法体系研究,通过对岩溶病害的系统分类,建立相应的处置技术标准 and 施工指南。

(2) 路基病害发育过程、形成机理与临界条件试验研究,通过室内外大型模型试验方法,对路基病害发育全过程进行定量研究,分析病害的形成机理与临界条件,评价不同处置方法的效果,为处置方案的设计、施工工艺的确定提供支持。

(3) 隐伏岩溶探测方法有效性研究,针对我国岩溶发育特点,通过不同地球物理方法的试验,提出不同隐伏岩溶类型有效探测方法,建立相应的技术标准。

(4) 高风险区岩溶路基变形破坏的分布式监测技术的开发,当前,高速公路建设过程中进行的沉降监测只开展点状或横断面监测,而且仅限于施工阶段,缺乏能开展纵断面的、分布式的监测技术方法,近年来逐渐成熟的 BOTDR 光纤传感技术有可能成为解决这一问题的有效途径,因此,应加强这一方面的技术研究与开发工作。

参考文献

- [1] American Society for Testing and Materials. Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods, ASTM D6429 - 99[S]. West Conshohocken, Pennsylvania, 1999.
- [2] British Standards BS5930, British standard code of practice for site investigations [M]. British Standards Institution, 1999.
- [3] Technos, Inc., Surface Geophysical Methods[M]. Volume 1, Fall 2004.
- [4] J. Marius Louw and Paul H. Goedhart, A model study of a proposed concrete road pavement over a potential sinkhole area[A]. Proceedings of The first Multidisciplinary conference on sinkholes and the Environmental Impacts of Karst[C]. Orlando, Florida, 1984.
- [5] В. П. Хоменко, Карстово-суффозионные процессы и их прогно[M]. 1986, pp12 - 90.
- [6] Ralph J. Hodek, Allan M. Johnson, Dean B. Sandri Soil cavities formed by piping[A]. Proceedings of The first Multidisciplinary conference on sinkholes and the Environmental Impacts of Karst[C]. Orlando, Florida, 1984.
- [7] T. M. Tharp, Mechanics of formation of cover-collapse sinkholes [A]. Proceedings of the Sixth Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst[C]. Springfield, Missouri, 1997.
- [8] A. V. Anikeev, Casual hydrofracturing theory and its application for sinkhole development prediction in the area of Novovoronezh Nuclear Power House 2 (NV NPH - 2) [A]. Proceedings of the Seventh Mul-

tidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst[C]. Harrisburg, Hershey, Pennsylvania, 1999.

- [9] Tony Waltham, Fred Bell and Martin Culshaw (Eds), Sinkholes and Subsidence : Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction[M]. Springer, Berlin, 2004.
- [10] Sterling, HJ, and Ronayne, MC. Simulating landfill cover subsidence[A]. Proceedings of the 11th Annual Research Symposium on Land Disposal of Hazardous[C]. 1985.
- [11] Abdulla, W. and D. J. Goodings, Modeling Sinkholes in Weakly Cemented Sand[J]. ASCE Geotechnical Engineering Journal, December, Vol. 122, No. 12, pp. 998 - 1005.
- [12] N. Crawford, Risk associated with development of sinkholes in the Barren River Area[M]. Center for Cave and Karst Studies, Western Kentucky University, 1986.
- [13] Mario Mejia-Navarro and Luis A. Garcia, 1996, Natural Hazard and Risk Assessment Using Decision Support Systems[J]. Environmental & Engineering Geoscience, Vol. II.
- [14] D. Raghu, Sinkhole risk analysis for a selected area in Warren County, New Jersey [A]. Proceedings of The first Multidisciplinary conference on sinkholes and the Environmental Impacts of Karst [C]. Orlando, Florida, 1984.
- [15] Calitz, Frederik, Evaluation of the risk of the formation of karst-related surface instability features in dolomite strata occurring in the Lebowakgomo area, Republic of South Africa[A]. Proceedings of 8th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst[C]. Louisville, Kentucky, 2001.
- [16] Salvati Roberto, Tharp Thomas M, Conceptual model for geotechnical evaluation of sinkhole risk in the Latium Region[A]. Proceedings of 8th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst[C]. Louisville, Kentucky, 2001.
- [17] Cooper, Anthony H. The development of a national Geographic Information System (GIS) for British karst geohazards and risk assessment[A]. Proceedings of 8th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst[C]. Louisville, Kentucky, 2001.
- [18] Gao, Y., and Alexander, E. C., Jr., A Mathematical Model for a Sinkhole Probability Map in Fillmore County, Minnesota[A]. Proceedings of the Ninth Multidisciplinary Conference[C]. 2003.
- [19] Harry L. Moore, Geotechnical considerations in the location, design, and construction of highways in karst terrain, The Pellissippi Parkway extension, Knox-Blount Counties, Tennessee [A]. Proceedings of The first Multidisciplinary conference on sinkholes and the Environmental Impacts of Karst[C]. Orlando, Florida, 1984.
- [20] Richard C. Benson, Assessment and long term monitoring of localized subsidence using ground penetrating radar[A]. Proceedings of The Second Multidisciplinary conference on sinkholes and the Environmental Impacts of Karst[C]. Orlando, Florida, 1987.
- [21] George Sowers, Building on Sinkholes : Design and Construction of Foundations in Karst Terrain[M]. ASCE, 1996.
- [22] 邹成杰. 水利水电岩溶工程地质 [M]. 水利电力出版社, 1994.
- [23] 康彦仁, 等. 中国南方岩溶塌陷 [M]. 重庆出版社, 1990.
- [24] 陈国亮. 岩溶地面塌陷的成因与防治 [M]. 中国铁道出版社, 1994.
- [25] 雷明堂, 蒋小珍, 李瑜. 武汉市岩溶塌陷模型试验研究 [J]. 地质

- 灾害与环境保护,1993,2.
- [26] 雷明堂,蒋小珍,李瑜.唐山市岩溶塌陷模型试验研究[J].中国地质灾害与防治学报,1997,增刊.
- [27] 中国地质学会工程地质专业委员会.中国工程地质世纪成就[M].地质出版社,2004.
- [28] 刘传正.地质灾害勘察指南[M].地质出版社,2001.
- [29] 赵国梁.贵昆线岩溶路基病害勘察与设计[J].路基工程,1995,(3).
- [30] 陈灿华,陈绍求.电测深法在岩溶探测中的应用[J].中南工业大学学报,2000,(1).
- [31] 邓居智,莫撼.探地雷达在岩溶探测中的应用[J].物探与化探,2001,(6).
- [32] 鄢宏庆.高速公路岩溶地段路基的地球物理勘探及处理探讨[J].路基工程,2002,(2).
- [33] 雷明堂,蒋小珍,李瑜.中国岩溶塌陷地理信息系统概况[J].中国地质灾害与防治学报,1998,9(增刊).
- [34] 蒋小珍.基于GIS技术的城市岩溶塌陷灾害信息管理系统[J].西南师范大学学报,2001,26(专辑).
- [35] 蒋小珍.玉林市岩溶塌陷地理信息系统[J].中国地质灾害与防治学报,2001,12(1).
- [36] 蒋小珍,雷明堂,周立新,等.基于GIS技术的城市地质灾害信息管理系统[A].中国地理信息系统协会2001年年会论文集[C].2001.
- [37] 蒋小珍.岩溶塌陷灾害数据库的建设[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(增刊).
- [38] 蒋小珍.基于GIS技术的全国地面塌陷灾害危险性评价[J].地球学报,2003,24(5).
- [39] 何宇彬.论喀斯特塌陷的水动力因素[J].水文地质工程地质,1993(5).
- [40] 蒋小珍.岩溶塌陷中水压力的触发作用[J].中国地质灾害与防治学报,1998,9(3).
- [41] 蒋小珍.岩溶塌陷发育条件的试验研究[J].中国地质灾害与防治学报,1998,9(增刊).
- [42] Mingtang Lei, Xiaozhen Jiang & Li Yu. New advances in karst collapse research in China[J]. Environmental Geology, 2002, 42(5).
- [43] 陈忠平.岩溶区路基塌陷防治的灌浆技术[J].冶金矿山设计与建设,2001,(3).
- [44] 文沛溪.岩溶路基塌陷与压浆加固处理[J].铁道建筑,1993,(2).
- [45] 王革立.宁横公路岩溶塌陷区路基处理的措施与对策[J].地质与勘探,2001,(3).

STATUS QUO OF THE STUDY ON SUBGRADE DISEASES AND THE TREATMENT TECHNIQUES IN KARST AREA

MU Jin-wei¹, LEI Ming-tang², LIANG Jun-lin³, SHI Lian-fu¹

(1. Guizhou Highway Company, Guiyang, Guizhou 550008, China;

2. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China;

3. Guangxi Communication Scientific Research Institute, Nanning Guangxi 530001, China)

Abstract : Covering 3.63 million km² of soluble rocks, China is one of the countries with most extensive distribution of karst. With the development of national economics, karst features have become a serious problem to the traffic constructions such as highway and railway. During the last decades, scientists and engineers have got great progresses in the treatment of karst features in construction. In this paper, based on the new publication, the authors try to summarize the new achievements in karst investigation, stabilities and risk assessment of caves, experiment and prediction of karst collapse, and the treatment of karst features in highway construction.

Key words : Karst subgrade; Karst collapse; Highway