

岩溶塌陷机理 及其预测与评价研究



程 星 著

地 质 出 版 社

贵州省人才基金项目黔人领函(2005)13号资助

岩溶塌陷机理 及其预测与评价研究

程 星 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书通过对不同地下水条件下岩溶塌陷机理分析,提出了岩溶致塌的地质概化模型;在此基础上对岩溶致塌的作用力及其相互叠加耦合方式进行了综合研究,总结出5种致塌机制和机理模型;结合现场测试对“土洞塌陷”、“岩溶气爆塌陷”等专题进行了专门研究,对致塌机理及敏感性因素进行了探讨;结合三维数值模拟方法对几种典型岩溶致塌机制进行了数值模拟试验研究及实例验证,特别是列车振动致塌模拟试验研究,为岩溶塌陷预测及评价提供了新的研究方法,有一定的学术价值。本书可供从事岩溶地质、水文地质、工程地质、环境地质等相关专业科技人员及大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩溶塌陷机理及其预测与评价研究 / 程星著. —北京:
地质出版社, 2006. 10
ISBN 7-116-05016-7

I. 岩... II. 程... III. 地面沉降 - 岩溶 - 研究
IV. P642. 25

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 122054 号

责任编辑: 吴宁魁 孙亚芸
责任校对: 黄苏畔
出版发行: 地质出版社
社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083
电 话: (010)82324508 (邮购部); (010)82324569 (编辑室)
网 址: <http://www.gph.com.cn>
电子邮箱: zbs@gph.com.cn
传 真: (010)82310759
印 刷: 北京印刷学院实习工厂
开 本: 787 mm × 1092 mm 1/16
印 张: 10.25
字 数: 249 千字
印 数: 1—700 册
版 次: 2006 年 10 月北京第一版·第一次印刷
定 价: 26.00 元
ISBN 7-116-05016-7/P·2736

(凡购买地质出版社的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社出版处负责调换)



程星, 1959年4月生。1982年贵州工学院地质系水文地质工程地质专业毕业, 获贵州师范大学岩溶硕士学位, 2003年获成都理工大学环境工程学院地质工程专业博士学位。现受聘于贵州师范大学地理生物学院, 教授职称。贵州省岩石力学学会副理事长, 国际岩石力学学会会员, 美国NSS会员, 贵州环境学会会员。长期以来从事岩溶地质的教学及研究工作, 发表论文40多篇。主持、参加省级及省级以上项目30余项, 曾获省级科技进步奖3次, 撰写的论文曾获省级优秀论文二等奖2次。参加中外联合考察及国际会议若干次。

目 录

1 前言	(1)
1.1 选题依据及研究意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(2)
1.2.1 岩溶塌陷的致塌机理	(3)
1.2.2 岩溶塌陷研究的主要方法及研究状态	(5)
1.2.3 岩溶塌陷研究的发展趋势	(6)
1.3 研究技术路线	(9)
1.4 主要研究内容及取得的主要成果	(11)
2 岩溶塌陷地质概化模型研究	(14)
2.1 概述	(14)
2.2 盖层的地质概化模型	(14)
2.2.1 单一阻水型盖层地质概化模型	(15)
2.2.2 单一透水型盖层地质概化模型	(16)
2.2.3 无盖层地质概化模型	(18)
2.2.4 阻-透型盖层地质概化模型	(18)
2.2.5 透-阻型盖层地质概化模型	(19)
2.2.6 阻-透-阻型盖层地质概化模型与透-阻-透型盖层地质概化 模型	(20)
2.3 岩溶介质的地质概化模型	(20)
2.3.1 概述	(20)
2.3.2 岩溶地下空隙的地质概化模型	(21)
3 岩溶塌陷致塌力的叠加耦合与机理模型	(24)
3.1 概述	(24)
3.2 单一阻水型盖层中水位下降时的应力耦合模式	(24)
3.3 单一透水型盖层渗透力耦合模式	(25)
3.4 岩溶致塌中水位恢复时的叠加耦合模式	(26)
3.5 岩溶致塌中的动荷载叠加耦合模式	(26)
3.6 岩溶塌陷的机理模型讨论	(28)
3.6.1 水位下降致塌机理模型	(28)

3.6.2	水位恢复致塌机理模型	(29)
3.6.3	动荷载致塌机理模型	(29)
3.6.4	静力加载致塌机理	(29)
3.6.5	地表水下渗致塌机理	(30)
4	静荷载条件下的土洞稳定性及其预测评价研究	(31)
4.1	概述	(31)
4.2	土洞稳定致塌机理的讨论	(31)
4.3	典型实例概况	(32)
4.4	塌陷机理的数值模拟研究	(33)
4.4.1	模拟方法简介	(33)
4.4.2	计算模型的建立	(36)
4.4.3	成果分析	(39)
5	地下水位波动致塌的力学效应及其预测与评价分析	(48)
5.1	地下水位受迫下降的力学效应分析	(48)
5.1.1	概述	(48)
5.1.2	岩溶演化与洞穴发育特征	(48)
5.1.3	基岩面以上地下水位受迫下降时的地表失稳效应	(49)
5.1.4	岩溶区地下水位受迫降至基岩面以下时的力学效应	(50)
5.2	地下水位恢复时的力学效应研究	(52)
5.2.1	概述	(52)
5.2.2	气爆效应中的塌陷机制分析	(52)
5.2.3	关于压力释放系数的讨论	(53)
5.2.4	水位恢复时的气压效应描述	(54)
5.2.5	“气爆塌陷”的发育条件及土层最大安全厚度的讨论	(55)
5.3	典型实例的数值模拟研究	(57)
5.3.1	概述	(57)
5.3.2	实例	(57)
5.3.3	计算模型的建立	(59)
5.3.4	阻-透型盖层塌陷的数值模拟过程	(62)
5.3.5	单一阻水型盖层塌陷的数值试验研究	(66)
5.3.6	单一透水型盖层塌陷的数值模拟研究	(71)
5.3.7	多个土洞存在时的数值模拟研究	(75)
5.3.8	岩溶水流的模拟讨论	(76)
6	振动致塌效应及其预测与评价研究	(82)
6.1	概述	(82)

6.2	铁路动荷载的数学力学模型	(83)
6.2.1	岩溶致塌中的动荷载模型	(83)
6.2.2	振波在土介质中的传递规律	(85)
6.3	铁路振动的野外测试	(87)
6.4	土介质中附加应力的衰减与土层安全厚度的讨论	(89)
6.5	铁路振动的附加应力及其致塌机理分析	(90)
6.6	典型实例的数值模拟研究	(91)
6.6.1	计算模型的建立	(92)
6.6.2	动力加载前的静力平衡与变形	(95)
6.6.3	动力加载及塌陷过程模拟	(99)
6.6.4	因素敏感性的数值模拟试验研究	(104)
7	结 论	(113)
	参考文献	(115)
	附录	(122)
1	干洞几何数值模型主要语句	(122)
2	动荷载几何数值模型语句	(132)
3	抽水塌陷几何数值模型主要语句	(144)
4	Fish 函数定义参数	(152)

1 前言

1.1 选题依据及研究意义

岩溶空隙指岩溶地块中发育的溶蚀空间,包括溶蚀裂隙、溶洞、溶蚀管道等。由于岩溶发育的特点,在近地表处常发育了较多的岩溶空隙,这类空隙由于离地表很近,与人类活动关系密切,从矿坑抽水到人类对饮用水的开发、房屋建设、铁路运输、水库的修建等都反映出这种密切性。地下空隙造成的地面失稳事件非常频繁,给社会带来了不可估量的损失。据不完全统计全球已有 16 个国家存在严重的岩溶塌陷问题,我国岩溶分布面积达 $363 \times 10^4 \text{ km}^2$,塌陷坑已超过 3 万多个(陈国亮,1994),每年仍以惊人的速度递增,主要分布在广西、贵州、湖南、云南、湖北、四川及北京、山东、山西、辽宁、河北、陕西等地。

广西的岩溶分布广泛,也是我国岩溶塌陷的主要分布地区。据资料统计,作为重点开发新区的桂林市西城区,截至 1999 年 1 月,该区已发生的塌陷一共有 319 处,在覆盖岩溶区塌陷密度达 7.59 个/km^2 ,其中人为塌陷 86 处,占 27%;1996 年发生于桂林市中心体育场的岩溶塌陷,造成直接、间接经济损失近千万元;1990 年广西玉林柴油机股份有限公司金工车间的塌陷,造成损失 500 多万元(陈国亮,1994);1999 年桂林市临桂县一粮库发生塌陷,40t 粮食陷入地下,同年 1 月该县城大圆盘南侧又发生塌陷,造成一死一伤,并损坏一辆运输车。

南昆线的正线长 863.5km(不含枢纽部分),其中可溶岩地段长 387.6km,约占 $1/2$,以路基形式通过的地段有 300.5km。施工过程中路基因减薄盖层或揭露溶洞后造成的岩溶塌陷,有记录的达 63 处之多(铁道部第二勘察设计院,1984)。

贵州是有名的岩溶区,全省已有塌陷近 100 处,塌陷坑点 2200 余个,80%集中在六盘水市、安顺市、遵义市、贵阳市,造成很大的损失。在六盘水市,房屋倒塌达 80 多座,直接经济损失 260 多万元。在水城盆地毁损农田 100 多亩,铁路中断运行,道路被破坏,地下水遭污染等(刘凯栋,1990)。贵州天生桥引水发电隧道开挖至中部,遇到长 90m、宽 20m、高约 100m 的岩溶大厅,线路悬空,最后迫使线路转弯,损失 60 多万元。

1959 年以来,武汉有记录的塌陷如下:1959~1962 年武昌马鞍山井田发生多次塌陷;1977 年 9 月 20 日汉阳鹦鹉洲轧钢厂货场出现两个大陷坑,直径 20m,深 9~10m,其后 20 天内又陆续出现 5 个陷坑;1983 年武昌江连道口发生塌陷;1988 年 5 月武昌陆家街附近的市司法学校发生塌陷,规模为 $40\text{m} \times 30\text{m}$,两个月后离此 2km 处的青菱乡发生大面积塌陷,陷坑共 13 个,直径 10~60m 不等(陈国亮,1994)。

统计资料表明,山东泰安市共发生过塌陷近 100 处,直接影响了津浦铁路的运输,塌陷曾使路轨架空、行车中断,迫使列车长期慢行达半年之久,为治理该区塌陷,共耗资

2000 余万元；另外，在山东省仅因采煤一项造成的地面塌陷失稳面积达 1.3 万余公顷，引发了诸如土地绝产、建筑物破坏及居民大搬迁等一系列次生灾害（寿冀平，1998）；在岩溶地区各类矿山中，因为水位下降产生的塌坑数量经常都在千个以上，大大地增大了后期环境治理的费用。

从以上这些实例可以看出，岩溶塌陷在我国分布具普遍性，迫切需要解决由其引起的地质问题。这类地质灾害大多数为人类活动而引起，少数为自然塌陷。

在国外，岩溶区的这类灾害同样也给当地居民带来了巨大的损失。国外岩溶塌陷主要分布在美国、法国、南斯拉夫、德国、波兰、南非、原苏联、土耳其等，其中以美国的岩溶塌陷居多。

美国岩溶分布区约占其总面积的 15%。以亚拉巴马、佛罗里达、佐治亚、田纳西、肯塔基等几个州的岩溶塌陷最为严重。美国的北卡罗来纳州 Jamestown 地区有两个塌陷发生在抽水型降落漏斗区内。亚拉巴马州有 1700 个塌坑，宾夕法尼亚州大约有 1000 个塌陷，都是因抽水而引起的；佛罗里达州 Tampa 附近，1964 年在以抽水井为中心、1.6km 为半径的范围内，发生了 64 个塌坑；有名的佛罗里达州 Winter Park 巨型塌陷，损失超过 400 万美元。俄罗斯中、东部石膏层地区的岩溶塌陷也较普遍。在俄罗斯平原内的一些地区，塌陷漏斗较为常见，如莫斯科向斜南翼及西北翼、奥卡—茨那长垣地区、阿拉提尔垣区等等。

另外，国外水库蓄水引发的岩溶塌陷较为突出。在美国密苏里州水库、亚利桑那州的 Lone Pine 水库及加利福尼亚州 Cave city 附近的水库等都曾发生过塌陷；原苏联安拉河上大型水库 May 水坝、加拿大的 Grand Rapids 水电站及捷克的一些水库也都曾发生过塌陷（陈国亮，1994）。

南非 Far West Raod 金矿，自 20 世纪 50 年代排水疏干以来，发生数百个塌陷，死亡 38 人。

岩溶空隙引起的地表失稳主要表现为普遍性、复杂性以及它的难以预测性。作为地质灾害，给社会带来了巨大的损失。西部作为我国岩溶分布的主要地区，在实施西部大开发的背景下，对岩溶地质灾害的研究更体现出其重要性。

对于岩溶致塌的研究，大多集中在塌陷机理及评价预测方面，但由于岩溶致塌的特殊性、复杂性及跨学科性，造成对它的客观评价及预测工作做得远远不够，因而其发展有待于多学科技术在该领域的渗透及交叉。

从上述可见，岩溶塌陷已成为世界上频发的地质灾害之一，其对社会发展和工程建设具有严重的危害，在这一领域还有诸多有待进一步深入研究和探讨的科学问题。因此，加强对这类灾害的研究不仅具有重要的现实意义，而且对充实和完善这一领域的科学理论具有重要的学术价值。

1.2 国内外研究现状

国内外对岩溶塌陷现象的研究，主要集中表现在以下方面。

1.2.1 岩溶塌陷的致塌机理

一般的岩溶塌陷致塌机理主要有真空吸蚀论、潜蚀论、振动论、液化论、气爆论等。而特殊的“水动力机制”观点则强调水动力条件,认为水动力条件为致塌的外因,包括地下水天然流场的变化、水位变幅、水力坡度、水流速度等一系列水力特征,这些特征的改变激化了潜蚀、吸蚀及气爆作用的进行(何宇彬,1993)。大多数研究者都认为地质体结构为内因,是岩溶致塌的必要条件。对岩溶塌陷的统一认识是,它们都由上部覆盖层(可为一元、二元、三元结构)及下部岩溶发育的岩溶块体组成。下面对主要的岩溶塌陷机理进行逐一介绍。

1.2.1.1 潜蚀成因

在覆盖岩溶区,地下水通过潜蚀、冲蚀、掏空等作用,逐渐使土体失去平衡,在水位波动过程中,加大了水力坡度从而加速了上述过程而致塌。多数的研究者持有这种观点。郭强(1989)在对贵州遵义岩溶塌陷的研究中用潜蚀的观点解释了塌陷的成因。田级生(1989,1994)通过对秦皇岛市柳江水源地面塌陷的研究,提出渗透潜蚀-软化增荷模型,认为是潜蚀原因致塌。从建筑物修建中遇到的大量土洞出发,彭涛等(2001)认为土洞的分布主要在水位波动带,由水的下渗潜蚀而引起。根据对安徽铜官山的塌陷研究,丁月金(1997)提出,土洞在潜蚀作用下形成,同时物质被搬运,当潜蚀力大于搬运力时,土洞可处于相对稳定状态。当潜蚀力小于搬运力时,将引起迅速塌陷。另一些研究者也认为塌陷是潜蚀,搬运溶洞充填物,水力坡度的加大加快了潜蚀的速度,致使上部盖层重力大于抗力时致塌(邓学成,1996)。王学聚(1997)用潜蚀观点对山东岩溶塌陷进行了解释。马金荣等(1996)用潜蚀观点对徐州市塌陷区塌陷进行了解释。他们都认为岩溶塌陷时由于渗流、潜流产生的潜蚀淘空,形成土洞,水位的下降增强了潜蚀过程,使土洞加宽致塌。抽水致塌的问题在美国佛罗里达州被称为“塌陷落水洞”(collapse sink-hole),这类塌陷被认为是在构造带交汇处引起的塌陷,因为透过粘土层的渗水量增加,渗透水冲蚀土壤并将其带入地下空洞中,在旱季抽水引起地下水位下降时,使土层中渗透水流速加快造成砂土流失,从而引发塌陷(Ruth, B. E., 伍镇基译,1991)。这实际上也为潜蚀观点。

1.2.1.2 真空吸蚀

在相对密闭承压岩溶网络地下水中,人为抽(排)地下水,水位降低至盖层底面以下,可在岩溶空隙中形成真空吸盘吸蚀、真空腔吸蚀和旋吸漏斗吸蚀三种对盖层的破坏作用。徐卫国等曾用该观点解释了所研究的岩溶致塌现象。陈国亮曾论述过模型试验中真空吸蚀力的大小。近年来有的学者有不同看法,认为盖层下大多数的溶洞是被充填物充填的,不存在足以产生很大压强差的空腔,从而提出“溶洞充填物潜蚀流动一压差场—盖层失托增荷效应”的观点(王建秀等,2000)。刘嘉平等(1994)曾在岩溶塌陷的研究中,列举厚度为70~80m的覆盖层被剪断从而形成塌陷的实例,认为与真空吸蚀有关。

1.2.1.3 潜蚀 - 真空吸蚀

潜蚀 - 真空吸蚀指存在潜蚀、真空吸蚀两种成因的共同作用。持有这种观点的研究者认为,自然界地下水对土层的潜蚀作用十分普遍,且几乎自始至终地存在于岩溶塌陷的整个过程中。同时,真空吸蚀作用在自然界也存在,但要在一定条件下才能致塌(张伟,1996)。武昌陆家街地面塌陷被认为是潜蚀和真空作用形成的塌陷(郭殿权等,1990)。通过对贵州水城塌陷的研究,一些研究者(雷国良等,1996)认为抽水引发的塌陷经历了三个阶段:首先是潜蚀作用在土层中形成土洞(第一阶段);然后,水位下降形成负压,使土洞垮塌,水力坡度的加大使物质被搬运,从而使土洞扩大(第二阶段);最后,当土洞扩大到塌陷力超过极限抗塌力时发生塌陷(第三阶段)。同时认为在第二阶段,由于水位的急剧下降,真空吸蚀可加速土洞向塌陷的演化(邓自民,1991;周济祚,1992)。朱寿增等(2000)通过对桂林西城区岩溶塌陷的研究,也提出潜蚀土洞→真空吸蚀致塌的观点。曾昭华(1998)对江西地面塌陷进行研究后,也认为是潜蚀形成土洞,水位下降形成的负压及列车振动等原因(火车与汽车运行,地震等)诱发了塌陷。另一些研究者(吴春寅等,1998)通过对山东枣庄地区岩溶塌陷的研究提出潜蚀散解—真空吸蚀—失托增荷的观点,认为随地质条件、时间的不同,某种作用会上升为主要作用。王建秀等(1999)通过对铁路岩溶塌陷的研究,提出在导水盖层情况下“渗流场与应力场耦合”机制导致岩溶塌陷。

1.2.1.4 振动论与“液化论”

持有这一观点的研究者认为,对弹性介质的盖层,当地下水或气压波动与盖层固有频率一致时,将出现共振现象,这时可产生很大的破坏力。而对于松散盖层,地下水或气压的波动,可以通过“空隙内压力对盖层产生破坏”,其过程与“液化论”类似(代群力,1994)。在对桂林附近陷落地震的研究中,一些研究者曾提到在地下溶洞(或土洞)分布区发生地震时,地震波经过上覆软、硬不同性质界面多次反射,将产生卓越周期为0.18~0.23s的地震波,岩溶区地层的卓越周期为0.15~0.4s,岩溶区民房多在3层以下,固有周期为0.1~0.3s,这三者接近或相等时,由于共振会造成较高的震害(缪钟灵,1998)。冯佐海等(1999)在对桂林市柘木爆破引发的岩溶塌陷进行研究时提出振动致塌、冲爆致塌等观点。

1.2.1.5 重力成因

指当基岩以上无盖层且地下洞穴顶板很薄时,在重力作用下发生的塌陷。这类似于岩溶陷落柱式的塌陷。

1.2.1.6 其他观点

除上面提到的致塌机制外,还有失托增荷观点、地表水下渗、气爆致塌等观点。

1.2.2 岩溶塌陷研究的主要方法及研究状态

岩溶塌陷发育的广泛性与危害性,已引起国际社会的普遍关注,特别是20世纪70年代以来,召开了多次与塌陷有关的国际会议,使世界各国的研究者有机会交流和商讨解决这一地质灾害问题的经验与方法。我国曾在桂林举办了首届“地面塌陷及其对工程建设的影响与防治”学术讨论会。岩溶灾害问题也随之越来越受到重视。长期以来,许多学者就岩溶塌陷开展了大量工作,取得如下主要成果。

1.2.2.1 项目与专著

20世纪80年代,岩溶地质研究所先后开展了“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(“中国北方岩溶地下水资源及大水矿区岩溶水预测、利用和管理研究”子课题)”等项目。这是我国首次开展岩溶塌陷专门研究。在这些研究中,康彦仁等(1990)所著《中国南方岩溶塌陷》一书较全面地论述了岩溶塌陷的类型及成因机制,作为研究岩溶塌陷的经典,长期被人们引用。但此书在振动波的传播规律及铁路塌陷区土层的安全厚度等方面没有深入地研究,对于人类活动引起的水位受迫下降所产生的力学效应的论述只针对基岩以上进行。80年代后期,铁道部第二勘察设计院开展了“铁路沿线岩溶塌陷及防治”项目的研究工作,对贵昆线小哨—秧田冲段、分宜车站、泰安车站等50余处岩溶塌陷严重发育区进行了全面勘察、治理,取得了良好的效果。铁道部第二勘察设计院(1984)所著的《岩溶工程地质》一书以大量的实际资料,针对铁路遇到的岩溶洞穴的静力稳定问题进行论述,在铁道建设方面做出了贡献。陈国亮(1994)以岩溶塌陷模型试验为基础,在其《岩溶地面塌陷的成因与防治》一书中,对岩溶塌陷成因作了较为全面的阐述。2005年,贺可强等出版了《中国北方岩溶塌陷》,可算是目前较新的岩溶塌陷方面的著作。

通过这些工作,基本摸清了我国岩溶塌陷的现状和宏观分布规律,确定了我国岩溶塌陷基本类型,提出了我国岩溶塌陷的基本分类方案,指出岩溶塌陷发育的多机制特性,并对我国岩溶塌陷危险性进行了宏观区划,编辑出版了1:600万《中国岩溶塌陷分布图》(雷明堂等,1998)。

1.2.2.2 岩溶塌陷试验研究

20世纪90年代初,岩溶地质研究所在地质行业基金的资助下,建成了大型岩溶塌陷物理模型试验室。通过模型试验,可以再现岩溶塌陷发育的全过程,解决不同类型岩溶塌陷发育的机理、塌陷发育与主要影响因素的关系,以及岩溶塌陷发育的临界条件等问题。在1993~1997年间,先后完成了武汉、唐山、湘潭、玉林、铜陵、桂林等6城市的岩溶塌陷试验工作,为这些地区岩溶塌陷综合治理发挥了积极的作用。在此方面,陈国亮、雷明堂等做了大量的研究工作,取得了许多研究成果。

1.2.2.3 岩溶塌陷的探测方法

20世纪90年代,在国家支持下,有关部门先后进行了100多项崩塌、滑坡、泥石

流、地面塌陷与沉降、地裂缝等重大地质灾害的专门勘察工作。在岩溶塌陷的探测方法上,包括电阻率法、地震浅层折射波法、地质雷达(GPR)和电磁波、声波透视(CT)等技术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、深圳等城市的岩溶塌陷防治勘察及铁道部门组织的贵昆、南昆线铁路岩溶段岩溶塌陷试验工作中发挥了重要作用(陈国亮,1994;雷明堂等,1998;罗元华等,1998)。

1.2.2.4 岩溶塌陷预测

地理信息系统(GIS)技术的应用,使得岩溶塌陷危险性预测评价上升到一个新的水平。国内先后有雷明堂、石建省、王洪涛、茹锦文等运用GIS的数据管理、分析处理和建模技术,对潜在塌陷危险性进行预测评价,取得了良好的效果。国外虽未见有直接运用GIS进行岩溶塌陷预测工作的报道,但在其他类型地质灾害的预测方面已有较多研究实例(Tian, K., 1988; Xiang S. et al., 1988)。这些预测方法均局限于对潜在塌陷的危险性分区的研究上,未能令人满意地解决塌陷时间和空间的预测预报问题(雷明堂等,1998)。张发旺等(1996)用灰色统计方法对岩溶塌陷的预测进行了研究。

1.2.2.5 岩溶塌陷地质灾害信息管理

20世纪80年代,美国曾在有岩溶塌陷问题的几个州相继建立了岩溶塌陷数据库,大大提高了岩溶塌陷资料的利用率。国内这方面工作起步较晚,而且主要以Map Info桌面地图信息系统为平台开发进行。如在环境地质所完成的“东南亚地质灾害信息管理系统”中,岩溶塌陷作为一种灾害类型被列入其中;1997年,在桂林市建设规划局资助下,岩溶地质所塌陷组以Map Info为平台开发了“桂林岩溶塌陷信息管理系统”,建立了相应的数据库和图库,为桂林岩溶塌陷防治、塌陷抢险以及城市规划提供了有利的条件(雷明堂等,1997、1998)。

1.2.2.6 岩溶塌陷监测预报

我国基本上没有开展这方面工作。究其原因,主要是岩溶塌陷的产生在时间上具突发性,在空间上具隐蔽性,因此,普遍认为难以采用地面监测手段对塌陷进行监测和时空预测预报。国外早在20世纪80年代就有人尝试过运用地质雷达进行潜在塌陷的监测工作。但由于地质雷达设备昂贵,探测成本较高,在深部岩溶的监测方面有一定局限性。

1.2.2.7 岩溶塌陷的防治

综合防治技术已提到议事日程。人们普遍认为,要从根本上减轻岩溶塌陷灾害的发生,必须采取地下水优化开采与工程处理措施相结合这一“标本兼治”的方法。在工程处理上,钻孔注浆技术是一个行之有效的方法,已被各地普遍采用。

1.2.3 岩溶塌陷研究的发展趋势

从国内外岩溶塌陷研究现状来看,未来岩溶塌陷研究的发展趋势可能并应该侧重在如下几个方面。

1.2.3.1 岩溶塌陷风险评价方法研究

1989年由美国国家科学院的全国研究理事会(NRC)及联邦所属科学和减灾机构召集,由17位成员组成的国家委员会分工协作,制定了减灾十年计划。我国当前岩溶塌陷评价只限于根据其主要影响因素和由模型试验获得的临界条件进行潜在塌陷危险性分区,这对有关部门进行塌陷防治决策而言是远远不够的,因为对塌陷危险区的处理与否以及处理方案的确定往往还取决于它所产生的社会经济影响。因此,在岩溶塌陷评价中,需开展环境地质学、土木工程学、地理学、城市规划与社会经济学等多领域、多学科的协作,对潜在塌陷的危险性、生态系统的敏感性、经济与社会结构的脆弱性进行综合分析,才能达到对岩溶塌陷进行风险评价的目的。这对有关部门进行塌陷防治决策将具有重要意义。“3S”技术(地理信息系统、遥感技术和全球定位系统)将成为这一工作的支撑技术(雷明堂等,1998)。因此,下一阶段岩溶塌陷研究的重要内容之一,是研制开发基于“3S”技术的岩溶塌陷风险评价与防治决策系统(罗元华等,1998)。

1.2.3.2 岩溶塌陷时空预测预报方法研究

由于岩溶致塌评价只局限于根据其主要影响因素和由模型试验获得的临界条件进行潜在塌陷危险性分区,岩溶塌陷在时间上的突发性和空间上的隐蔽性,使得研究较为困难。从实例中发现,一些可引起岩溶水压力发生突发性变化的因素,如振动、气压效应等,有时也可成为直接致塌因素,甚至在常规认为安全的地区也发生了塌陷,而且一旦发生塌陷,还会有很长的后续效应(陈国亮,1994;雷明堂等,1998),这都成为困扰救灾工作的一大难题。对于通过振动、水位恢复等的力学效应研究,提出相应的土层安全厚度方面的研究做得较少,这方面的研究可解决岩溶塌陷与地质条件在空间分布上的内在联系。因此,如何进行岩溶塌陷灾害的时空预测预报已成为岩溶塌陷防治研究中具有国际性的、最突出的前沿课题。

模型试验结果表明,对于人为抽(排)水活动诱(触)发的岩溶塌陷而言,基岩面以下岩溶水压力的变化,特别是有气体或外界压力影响下的突发性变化,与岩溶塌陷的发育有显著的关系。这就使我们可以运用这一关系,达到对岩溶塌陷进行时空预测预报的目的(陈国亮,1994;雷明堂等,1998)。因此,下一阶段塌陷研究的另一项重要工作,应是建立一套以致塌工程地质背景条件为基础、以岩溶水压力监测为主、地质雷达监测为辅的现场监测思路和方法手段,特别应对上面提到的安全厚度方面进行研究,加强对微观塌陷机制的认识,寻找出通过地质模型和开采条件对塌陷进行预测的方法,这对预测方法的推广有着实际的意义。同时应对雷达等技术进行降低成本的研究以使之变得可行。

1.2.3.3 中国岩溶塌陷数据库及信息管理系统

在“国际减灾十年(1990~2000)”呼吁中,联合国秘书长强调“促进自然灾害风险评价和治理能力的—个先决条件是要逐国地获取可靠的资料”。近年来,我国有关部门已在岩溶塌陷普查、勘探、研究与治理等方面投入了大量的人力、物力,积累了丰富的塌陷资料。因此,以计算机数据库和地理信息系统(GIS)技术为基础,建立全国岩溶塌陷信息管理系统,通过出版相应的电子地图和在国际互联网(internet)上发布的形式,达到

数据资料共享的目的。在已作的研究中,目前仍存在一些资料不准确及实用意义不大等问题,所以应加强获取资料的规范性及精确性(雷明堂等,1998)。

1.2.3.4 岩溶塌陷试验与测试

开展室内及室外模型试验,目的是为研究人员提供必要数据,以确认不同条件下岩溶塌陷发育的机理、与各主要影响因素的关系,以及塌陷发育的临界条件。因此,下一阶段工作应是进一步完善已有模型试验的功能,使之能更全面反映岩溶塌陷发育的实际条件。这一工作的支撑技术是卫星高灵敏度传感器(空隙水压力传感器、土压力传感器和位移传感器)及相应的数据自动采集分析系统。另一方面,岩溶塌陷的孕育过程是一个复杂的非线性动力过程,因此,在岩溶塌陷研究中,应开展岩溶塌陷非线性动力学仿真研究,以进一步深入研究岩溶塌陷发育的内在规律,为岩溶塌陷防治提供理论依据。在对铁路沿线岩溶塌陷发育的内在规律及微观测试方面,目前工作做得相对较少,但这方面的工作对预测铁路沿线岩溶塌陷将具有现实的意义。

1.2.3.5 岩溶塌陷发育规律研究

应进一步加强国内、国际交流,从地球这一大系统出发,充分利用计算机等现代分析技术,分析全国乃至全球范围内岩溶塌陷与人类活动、环境变迁(全球变化)以及其他自然灾害的伴生关系。

1.2.3.6 岩溶塌陷的探测方法研究

进一步完善和加强目前已形成的地质雷达、浅层地震和电磁波、声波透视(CT)以及高密度多级电法探测系统等技术方法,形成能对岩溶塌陷进行有效探测、识别的探测技术,特别是对岩溶地下空洞形态的探测。

1.2.3.7 岩溶塌陷防灾减灾体系研究

应从减灾系统工程的角度,建立一整套包括勘察、评价、监测、预报、防灾、抢险、治理、立法和保险等内容的防灾减灾体系。

1.2.3.8 岩溶塌陷的数值模拟研究

目前,在国内外用三维数值模拟方法,对岩溶致塌进行研究的实例显得少之又少,一般只停留在二维研究的水平。虽然国外研究数值模拟的手段较强,如FLAC^{3D}及3D-sigma, Ansys等以其强大的三维模拟功能,被广泛地应用于许多领域,但用于岩溶致塌方面研究的实例并不多见。近年来,这些软件的推广,使得本研究从理论分析到试验、数值模拟验证的研究思路成为可能。这方面研究的进行,无疑将使岩溶塌陷的研究向深度和广度推进,从而为岩溶塌陷的客观评价与预测提供依据。国内在该领域的研究,由于其地域优势,在研究数量上远多于国外,但在深度上显得不够。

在三维数值模拟方面,岩溶塌陷的研究实例十分少见。德国的Heinz Konietzky、Johannes Will及Jens Heinrich在他们的“Coupled Three - Dimensional Analysis of the Slab Foundation for the Magnetic Levitation Transportation System (TRANSRAPID) in Germany”研

究中用 Ansys 成功地对德国的非岩溶地区高速磁浮列车产生的振动进行了三维数值模拟,并考虑了水位因素。国内合肥工业大学的葛小光,利用有限元软件对开矿沉降引起的河堤渗漏稳定性作了二维分析。铁道部第二勘察设计院所编著的《岩溶工程地质》一书曾用有限元的方法对铁路路基下遇到洞穴时的静力稳定问题进行了二维数值模拟与评价。

应用于岩溶塌陷的三维数值模拟研究,在国内外都较为少见,原因主要有两个:①岩溶地质条件复杂,由于岩溶地质体分布的局限性,使得国外数值模拟应用于岩溶塌陷的机会不像国内那样多,因而其重要性自然下降;②受计算机技术发展因素制约,数值模拟的必备条件——软件及其开发是数值模拟的关键,由于岩溶塌陷的复杂性,对软件的要求较高,较好的软件价位高居不下也是国内该方面工作发展较慢的原因。

随着计算机技术的普及,国外类似 FLAC^{3D}, Ansys, 3D-sigma 软件的应用,使得岩溶塌陷的数值模拟成为可能。由于这些软件在三维模拟方面的便捷性,使其在对于岩溶塌陷的预测方面具有很大的潜力。如三维软件的机动性使得对岩溶水的不均匀性的模拟成为可能,特别是 FLAC^{3D}在材料赋值方面的方便性,可实现对岩溶块体中任意部位的渗透系数的定义,使得岩溶不均匀性的可视化研究得以实现,这是其他手段无法实现的。另外,可通过数值试验的手段对塌陷进行试验研究。因此,数值模拟技术在岩溶塌陷的预测预报及可视化研究方面,将有很大的发展前景。

数值模拟在工程运用中,常常被人们所忽视,是因为许多运用中,忽略了数值模拟运用的条件。在许多不适合数值模拟的情况下,强行地采用数值模拟方法进行计算,结果当然是不合理。在理论上,任何工程条件都是可以用数值去模拟的,但由于数学和计算机容量的原因,现在数值模拟的几何模块,都是有限的,且也没有必要考虑任何一种情形下的几何模块。通常使用的有三角形、矩形、圆形、柱形、扇形,等等。因而,数值模拟在工程运用中,应考虑地质条件。介质的均匀性是数值模拟运用的前提,介质越均匀,运用效果越好,这也是 Ansys 被成功地运用于结构计算中的原因。在地质条件中,情况要复杂得多。对于砾岩碎屑堆积、崩石堆积体,因其内部的不均匀性,显然不适合采用数值模拟的方法;对于构造太复杂的地方,特别是节理很发育的岩石,数值模拟也难于进行。

对于粘土介质层,其内部相对均匀得多,虽然层与层之间有较大的变化,但可以采用几个几何模型加起来和单独定义的办法加以解决,关键是单个几何模型内部要求一定的均匀性。

1.3 研究技术路线

本书研究工作遵循了图 1-1 的技术路线,其要点如下:

(1) 首先,在收集前人研究成果的基础上,利用已有的实际资料,对岩溶致塌现象进行科学的抽象,并对其发育的地质条件(包括岩溶盖层及岩溶介质)进行概念化处理,归纳出相应的塌陷类型。

(2) 进一步针对特定的岩溶致塌地质和力学环境条件,归纳和总结了致塌过程中各种力学条件的相互作用和叠加组合机理,提出了相应的力学耦合模式。根据概化模型的研究和力学耦合模式的分析,提出了岩溶致塌机制。

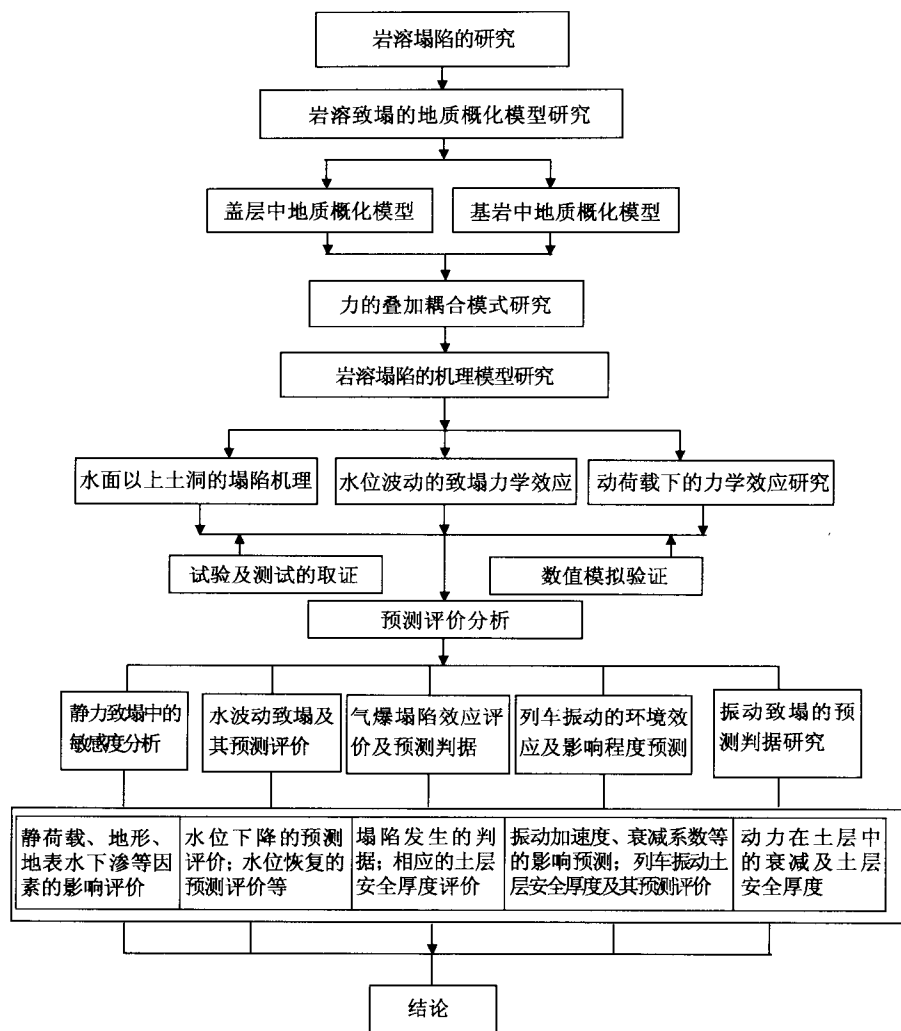


图 1-1 岩溶塌陷机理及其预测评价研究技术路线

(3) 在上述研究基础上, 重点探讨了几种典型地质和环境条件, 岩溶致塌的机理和地质力学过程, 其中包括典型静荷载下土洞的稳定性问题, 水位波动的力学效应及其致塌机理, 铁路列车振动波型特征及其致塌的力学效应等。研究过程中, 开展有关水位波动效应和列车振动效应的室内和现场测试研究; 并引进和采用先进的三维数值模拟技术 (FLAC^{3D}), 对岩溶塌陷环境和发生过程的计算机仿真模拟。通过模拟, 一方面验证了典型环境下的塌陷机理与模式, 另一方面, 计算机模拟获得大量岩溶塌陷过程的内部过程信息, 从而深化了对机理的认识。

(4) 针对目前岩溶塌陷评价预测的困难性, 本研究工作将机理的研究与岩溶塌陷的评价预测紧密结合, 从机理研究的角度探讨岩溶评价和预测的基本途径。重点研究以下几种特定环境和条件下的塌陷评价与预测问题: 土洞塌陷的地下水入渗效应评价; 地下水下降过程中的气压附加力效应及其致塌过程; 地下水位上升过程中的“气爆”效应及安全