

罗小杰 编著

THEORY AND PRACTICE OF
KARST GROUND COLLAPSE (KGC)

岩溶地面塌陷 理论与实践



中国地质大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF GEOSCIENCES PRESS

岩溶地面塌陷理论与实践

THEORY AND PRACTICE OF KARST GROUND COLLAPSE

罗小杰 编著



中国地质大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF GEOSCIENCES PRESS

图书在版编目(CIP)数据

岩溶地面塌陷理论与实践/罗小杰编著. —武汉:中国地质大学出版社,2017.7
ISBN 978-7-5625-4074-8

- I. ①岩…
- II. ①罗…
- III. ①岩溶塌陷-研究
- IV. ①P642.26

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 180356 号

岩溶地面塌陷理论与实践		罗小杰 编著	
责任编辑:胡珞兰		选题策划:张健	
		责任校对:徐蕾蕾	
出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)		邮编:430074	
电 话:(027)67883511		传 真:(027)67883580	E-mail:cbb@cug.edu.cn
经 销:全国新华书店		Http://cugp.cug.edu.cn	
开本:787 毫米×1092 毫米 1/16		字数:370 千字 印张:14.25 插页:4	
版次:2017 年 7 月第 1 版		印次:2017 年 7 月第 1 次印刷	
印刷:武汉市籍缘印刷厂		印数:1—500 册	
ISBN 978-7-5625-4074-8		定价:68 元	

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换



图片一 2008年2月29日,武汉市汉南区陡埠村岩溶地面塌陷:塌陷坑附近的电杆歪斜、变压器垮落、排水系统被破坏(罗小杰 摄)



图片二 2008年2月29日,武汉市汉南区陡埠村岩溶地面塌陷:塌陷坑周围产生地裂缝(罗小杰 摄)



图片三 2011年5月6日,武汉市洪山区红旗村塌陷:钻机陷入塌陷坑中(刘大家 摄)



图片四 2013年12月26日,武汉市汉阳区拦江路岩溶地面塌陷:卡车和钻机陷入塌陷坑中(程思成 摄)



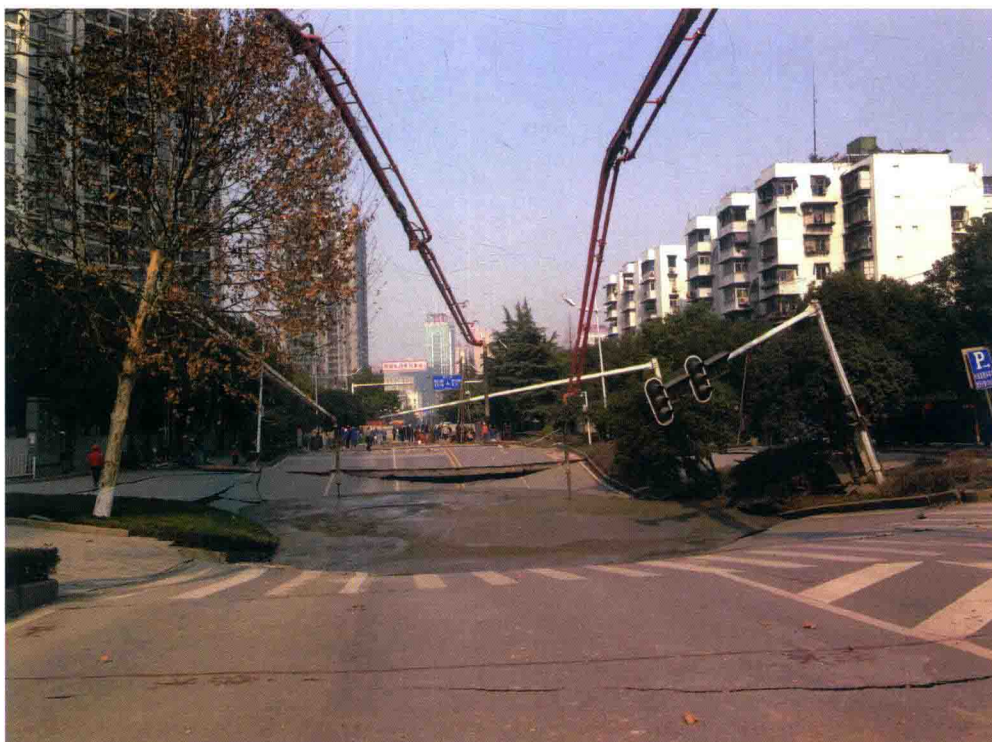
图片五 2014年9月5日,武汉市江夏区法泗街岩溶地面塌陷进程对比。该照片显示:塌陷坑周围居民房屋受损,右边房屋已垮塌(陈艳梅 提供)



图片六 2014年9月5日,武汉市江夏区法泗街岩溶地面塌陷进程对比。该照片显示:照片五中左侧植物显露,右侧破损房屋已消失,塌陷坑中已经积水,显示塌陷正在进一步发展(樊永生 提供)



图片七 2016年2月25日,武汉市江夏区大桥新区红旗村东方明许,发育在混凝土路面下方的岩溶地面塌陷坑(樊永生 提供)



图片八 2015年2月10日,武汉地铁3号线江岸区香港路站—惠济二路站区间非可溶岩区,由盾构施工导致了地面塌陷,说明岩溶是地面塌陷的充分而非必要条件(罗小杰 摄)

前言

自 2006 年起,武汉轨道交通工程开始大规模兴建,由之前每年开通一条线路的建设速度,到 2016 年加快到一年开通两条的规模。10 余年来,因工作关系,笔者有机会长期跟踪和研究武汉地区的岩溶及岩溶地面塌陷问题。

资料表明,武汉地区中部自北而南发育北西西-南东东走向的天兴洲、大桥、白沙洲、沌口、军山和汉南 6 个岩溶条带,南部发育有走向北东的法泗、马鞍山和湖泗 3 个岩溶条带。除局部地点外,这些岩溶条带绝大多数被第四系所覆盖,形成覆盖型岩溶。据记载,自 1931 年以来,武昌倒口湖(1931-7-27)、阮家巷(1983-7-14)、陆家街(1988-5-10、1992-3-18)、青菱乡毛坦村(1999-4-22)、市司法学校(2000-2-22)、武金堤白沙洲段(2006-4-9)、白沙洲大道高架桥(2010 年 8 月),以及汉阳中南轧钢厂(1977-9-20)、汉南陡埠村(2008-2-29)、江夏大桥新区(2014-5-2)和法泗街(2014-9-5)等地曾发生 10 余次较为严重的岩溶地面塌陷灾害,造成了严重的人员伤亡和巨大的经济损失。

我国碳酸盐岩分布面积约 $346 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。据不完全统计,除东部的上海和西部的宁夏、新疆等地外,全国有 24 个省(市、自治区)发生过岩溶地面塌陷灾害,其中尤以广西、贵州、湖南、江西、四川、云南、湖北、河北、山东、辽宁、河南、山西等省(区)最为发育。另外,在北京、江苏、安徽等地也有不同程度的发生。资料表明,全球有 16 个国家存在严重的岩溶地面塌陷问题。

目前,尽管有 10 余种塌陷成因解释,指导着塌陷的预测、监测、预防、治理和应急处置,并取得了一定的成效,但是这些解释均从诱发因素和作用力来探讨塌陷成因,就事论事,数量多,内容杂,众说纷纭,莫衷一是。其根本原因是忽略了土颗粒在外力作用下的运动学响应研究,尚处于对野外观察到的地质现象与经验事实进行总结、将基本现象归纳和演绎并形成唯象理论的阶段,还没有上升到自成体系的、具有普适性和包容性的基础理论与方法论层次。

覆盖型岩溶地面塌陷(下文简称“岩溶地面塌陷”或“地面塌陷”)与工程建设和人类活动关系非常密切。10 余年来,笔者一直致力于岩溶地面塌陷机理、预测、监测、防治和应急措施等方面的思考与探索。经研究发现,可溶岩上覆盖层土体遭受外力作用后发生破坏与塌陷时,土颗粒具有“块体运动”“颗粒运动”和“塑性流动”3 种不同类型的运动学响应特征,据此将塌陷土体区分为黏性土、砂性土和软弱土 3 种类型,进而概括出具有一般意义的 3 个大类、9 个类型(简称“3 类 9 型”)的岩溶地质结构。

在着重研究了各种诱发因素的基本特征及其在塌陷中所起作用后,将诱因区分为水的作用、荷载作用和土体弱化三大类,其作用是为岩溶地面塌陷提供作用力。它们所产生的作用力主要有重力、渗透压力、冲刷力、外加荷载、表面摩擦力和内摩擦力 6 类。

在对岩溶地质结构和塌陷土体受力时土颗粒的行为特征进行深入研究的基础上,从机理层次厘定“覆盖型岩溶地面塌陷”的定义为:在覆盖型岩溶地区,岩溶孔隙、洞穴等提供土颗粒丧失通道和/或储存空间,外部诱发因素直接或间接产生的作用力,导致土体“黏粒团”坍塌、砂颗粒漏失或软弱土流失而引起的地面沉降变形现象。据土颗粒外力作用下的运动学响应

特征,提出了由“土洞型”“沙漏型”和“泥流型”3个塌陷机理构成的岩溶地面塌陷“三机理论”,即:发生在黏性土和密实砂性土层中,由于土洞洞顶拱效应失效而产生的地面塌陷现象称为土洞型塌陷;由砂颗粒漏失而产生的地面塌陷现象称为沙漏型塌陷;由软弱土流失而导致的地面塌陷现象称为泥流型地面塌陷。

以“三机理论”为依据,提出了岩溶地面塌陷的地质预测模型,认为地质模型预测才是塌陷预测的正途。在概括总结了岩溶地面塌陷的确定性模型预测的基本思想和方法后,运用极限平衡理论、水力学理论和牛顿内摩擦定律,分别建立了“土洞型”“沙漏型”和“泥流型”塌陷机理的确定性预测物理力学模型,即极限平衡模型、水力学模型和流体力学模型,推演了各自的一般数学表达式,并据此对各塌陷影响因素进行了讨论,对塌陷中存在的地质现象进行了合理解释。

在“三机理论”指导下,探讨了岩溶地面塌陷监测对象、内容以及工作布置原则;提出岩溶地面塌陷防治“规避为主,防治结合;修正内因,控制诱因”的基本原则;系统地总结了土洞型、沙漏型和泥流型塌陷机理的岩溶地面塌陷防治方法;论述了应急处置时岩溶地面塌陷过程和阶段的划分,指出应急处置应遵循应急自救、外界救援和工程处置的程序与方法。

本书从另一个视角,即从塌陷过程中土颗粒受外力作用后的运动学响应特征出发,对可溶岩上覆土体进行了塌陷行为分类,划分了岩溶地质结构,提出了岩溶地面塌陷的“三机理论”;总结和探讨了岩溶地面塌陷的预测模型、监测内容和技术方法、防治与应急措施,形成了一套完整的、从理论到实践的理论与技术方法体系,具有很强的普适性和包容性,可以很好地解释各类塌陷现象以及对可能发生的塌陷进行预测,指导岩溶地面塌陷的监测、防治和应急处置。

此外,在参阅大量文献资料的基础上,总结了不确定性模型预测的思路和方法,介绍了岩溶地面塌陷不确定性预测模型——概率模型、模糊模型、灰色模型及其他预测模型,收集与整理了较为丰富的塌陷治理工程案例,以便读者对岩溶地面塌陷理论与实践有一个系统而全面的理解和认识。

本书撰写过程中,引用了部分公开发表的成果资料,樊永生高级工程师提供了部分塌陷照片;中国工程勘察大师范士凯先生、长江水利委员会原综合勘测局副总工程师徐福兴先生及长江岩土工程总公司(武汉)副总经理赵旻先生对本书进行了认真审阅,提出了宝贵的意见和建议。在此,对所有为本书的撰写和出版给予过支持与帮助的领导、同事、同仁、亲朋好友及其他相关人士表示衷心的感谢,对各位研究者在岩溶地面塌陷研究工作中所付出的辛勤劳动和所取得的成就致以崇高的敬意!

由于编著者水平有限,难免有疏漏和错误,敬请读者批评指正,并欢迎共同研究与探讨。

编著者:



2017年9月5日(丁酉年七月十五日)

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 岩溶地面塌陷概念	(2)
1.2 地面塌陷研究现状	(4)
1.2.1 关于塌陷机理	(5)
1.2.2 关于塌陷预测	(5)
1.2.3 关于塌陷监测	(6)
1.2.4 关于塌陷防治	(7)
1.3 塌陷研究中存在的问题	(7)
1.3.1 塌陷机理	(7)
1.3.2 塌陷预测	(9)
1.3.3 塌陷监测	(10)
1.3.4 塌陷防治	(10)
1.4 塌陷研究发展方向	(10)
1.5 本书主要内容	(11)
2 岩溶地面塌陷物质条件	(13)
2.1 上覆盖层土体	(13)
2.1.1 塌陷中土颗粒运动学响应类型	(13)
2.1.2 土的运动学响应分类	(14)
2.2 可溶岩与岩溶	(15)
2.2.1 可溶岩	(15)
2.2.2 岩溶	(16)
2.2.3 地面塌陷中岩溶的作用	(19)
2.3 岩溶地质结构	(20)
2.3.1 第Ⅰ类地质结构	(22)
2.3.2 第Ⅱ类地质结构	(22)
2.3.3 第Ⅲ类地质结构	(22)
2.3.4 岩溶地质结构与地貌	(23)

3 岩溶地面塌陷诱因及其作用力	(24)
3.1 塌陷诱发因素	(24)
3.1.1 水的作用	(24)
3.1.2 荷载作用	(33)
3.1.3 土体弱化	(34)
3.2 塌陷作用力	(34)
3.2.1 土体重力	(35)
3.2.2 渗透压力	(35)
3.2.3 冲刷力	(36)
3.2.4 荷载力	(36)
3.2.5 表面摩擦力	(38)
3.2.6 内摩擦力	(38)
3.2.7 关于真空作用力	(39)
4 岩溶地面塌陷成因解释与机理	(41)
4.1 地面塌陷成因解释	(41)
4.1.1 巴普洛夫与潜蚀论	(41)
4.1.2 徐卫国等与真空吸蚀论	(44)
4.1.3 康彦仁与致塌模式	(48)
4.1.4 陈国亮与塌陷效应	(53)
4.1.5 范士凯之塌陷机理	(54)
4.1.6 其他塌陷机理	(58)
4.2 岩溶地面塌陷机理	(59)
4.2.1 土洞型塌陷机理	(60)
4.2.2 沙漏型塌陷机理	(65)
4.2.3 泥流型塌陷机理	(68)
4.2.4 “三机理论”与物质条件及诱因的关系	(69)
4.2.5 “三机理论”与既有成因解释观点的关系	(69)
5 岩溶地面塌陷预测与评估	(71)
5.1 综合地质模型预测	(72)
5.1.1 预测方法	(72)
5.1.2 工程案例	(75)
5.2 确定性模型预测	(85)
5.2.1 基本思路与方法	(85)
5.2.2 土洞型塌陷预测模型	(86)

5.2.3	沙漏型塌陷预测模型	(98)
5.2.4	泥流型塌陷预测模型	(106)
5.3	不确定性模型预测	(110)
5.3.1	基本思路与方法	(110)
5.3.2	概率预测模型	(114)
5.3.3	模糊预测模型	(117)
5.3.4	灰色预测模型	(123)
5.3.5	其他预测模型	(132)
5.4	地理信息系统(GIS)应用	(138)
6	岩溶地面塌陷监测	(142)
6.1	地面塌陷监测对象和内容	(142)
6.1.1	覆盖层监测	(142)
6.1.2	诱发因素监测	(144)
6.2	地面塌陷监测工作布置原则	(150)
6.2.1	土洞型塌陷监测	(150)
6.2.2	沙漏型塌陷监测	(151)
6.2.3	泥流型塌陷监测	(151)
6.3	地面塌陷监测技术方法	(151)
6.3.1	精密水准测量监测技术	(151)
6.3.2	GPS 监测技术	(152)
6.3.3	合成孔径雷达干涉测量技术	(152)
6.3.4	地质雷达监测技术	(153)
6.3.5	光纤监测技术	(155)
6.3.6	时域反射技术	(158)
6.3.7	群测群防	(159)
7	岩溶地面塌陷防治	(161)
7.1	塌陷防治原则	(161)
7.1.1	塌陷防治一般原则	(161)
7.1.2	土洞型塌陷防治原则	(164)
7.1.3	沙漏型塌陷防治原则	(167)
7.1.4	泥流型塌陷防治原则	(168)
7.2	塌陷防治主要技术方法	(169)
7.2.1	消除真空负压技术	(169)
7.2.2	钻孔注浆技术	(171)

7.2.3	单液高压注浆技术	(174)
7.2.4	黏土复合膏浆灌浆技术	(178)
7.3	塌陷防治工程案例	(180)
7.3.1	I ₁ 型地质结构——钻孔注浆处理	(180)
7.3.2	I ₁ 型地质结构——灌浆处理	(183)
7.3.3	I ₁ 型地质结构——地下水处理	(185)
7.3.4	I ₁ 型地质结构——地表水处理	(187)
7.3.5	I ₁ 型地质结构——大体积土洞处理	(189)
7.3.6	I ₂ 型地质结构——溶洞、土洞注浆处理	(192)
7.3.7	I ₃ 型地质结构——注浆加固	(193)
7.3.8	II ₁ 型地质结构——岩溶处理	(196)
7.3.9	II ₂ 型地质结构——黏土复合膏浆灌浆技术处理	(199)
7.3.10	III ₂ 型地质结构——溶洞、土洞注浆处理	(200)
7.3.11	III ₃ 型地质结构——土洞处理	(202)
8	岩溶地面塌陷应急措施	(203)
8.1	塌陷过程与阶段区分	(203)
8.2	应急处置	(203)
8.2.1	应急自救	(203)
8.2.2	外界救援	(204)
8.2.3	工程处置	(204)
8.3	工程案例	(206)
8.3.1	塌陷险情概况	(206)
8.3.2	塌陷区地质结构	(207)
8.3.3	塌陷影响范围确定	(207)
8.3.4	塌陷影响处理措施及效果	(208)
	主要参考文献	(209)

1 绪 论

我国可溶岩面积约 $346.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的 $1/3$ 以上, 岩溶地面塌陷分布十分广泛(图 1-1), 是全球 16 个存在严重岩溶地面塌陷问题的国家之一(李瑞敏等, 2007)。据不完全统计, 除上海、宁夏、新疆等局部地区外, 我国 24 个省(市、自治区)共发生岩溶地面塌陷 2841 处, 塌陷坑 40 119 个; 其中以广西、贵州、湖南、江西、四川、云南、湖北、河北、山东、辽宁、河南、山西等省(区)最为发育; 此外, 北京、江苏、安徽等地也发生过不同程度的岩溶地面塌陷。这些地方都是可溶岩大面积集中分布的地区, 为岩溶地面塌陷的发育提供了必要的物质基础(李海涛等, 2015)。



图 1-1 中国岩溶地面塌陷灾害发育区分布图(李瑞敏等, 2007)
Fig. 1-1 The distribution map of karst ground collapse hazard areas in China

统计表明, 我国共有 30 多个大中城市、420 个县市处于地面塌陷高风险区, 有 40 余座矿山、25 条铁路线和数百座水库长期遭受岩溶地面塌陷的困扰。在我国已有的岩溶地面塌陷灾害中, 约 70% 为人类活动所诱发。过量开采岩溶水和矿山排水是产生岩溶地面塌陷的主要原因。其他如拦蓄地表水、岩土工程施工、铁路与公路施工、工程爆破等人类活动, 也会诱发岩溶地面塌陷。武汉地区中部发育 6 条走向北西西—南南东, 南部发育 3 条走向北东的、各自近于平行的岩溶条带; 自 1931 年以来, 这些岩溶地区发生了 10 余次严重的岩溶地面塌陷; 我国北方岩溶地面塌陷均是由人类工程及经济活动所造成的(田级生, 1992)。因此, 岩溶地面

塌陷灾害往往发生在人口密集的城市、矿山或交通线上,给国民经济建设和人民生命财产带来了严重的影响和威胁(雷明堂等,2004)。

按可溶岩的埋藏条件,一般将岩溶划分为裸露型岩溶、覆盖型岩溶和埋藏型岩溶3种类型。裸露型岩溶是指直接出露于地表的岩溶,覆盖型岩溶是指被第四纪松散堆积层所覆盖的岩溶,埋藏型岩溶是指为基岩所覆盖的岩溶。其中,覆盖型岩溶分布非常广泛,且与许多大中型城市关系密切。由于岩溶地面塌陷具有随机性、隐蔽性和突发性的特点,且诱发因素多而复杂,常常产生严重的地面塌陷灾害,造成重大经济损失,严重危害了人民的生命和财产安全。长期以来,岩溶地面塌陷已受到广泛的关注,国内外许多学者对其形成条件、成因机理、诱发因素、预测预报、防治原则、处理措施等做出了许多积极而有益的探索。

1.1 岩溶地面塌陷概念

在可溶岩地区,由岩、土体塌陷导致的地面变形主要有两种成因:一是裸露型和埋藏型岩溶区由溶洞顶板坍塌而产生类似于天坑等的负地形,习惯上称为“岩溶塌陷”,主要存在于地质历史时期,在工程实际中少见。二是覆盖型岩溶区可溶岩上方土颗粒通过溶洞和/或岩溶孔隙丧失导致土体塌陷而引起的地面变形称为覆盖型岩溶地面塌陷,习惯上称为“岩溶地面塌陷”,在实际工程中极为常见,常常造成较为严重的损失。这是本书的研究内容,如无特别说明,本书中的“岩溶地面塌陷”“地面塌陷”及“塌陷”等简称即是指“覆盖型岩溶地面塌陷”。

目前,岩溶地面塌陷概念的差异,主要是概念的立足点不同,表现在两个方面:一是立足于“地质现象”,强调地质作用及其结果,如康彦仁(1984,1989,1992)认为岩溶地面塌陷是岩溶洞隙上方的岩、土体在自然或人为因素作用下引起变形破坏,并在地面形成塌陷坑(洞)的一种岩溶动力地质作用与现象;另一是立足于“力学效应”,强调成因机制,如《铁路工程地质岩溶勘测规则》(TBJ 28—91)表述为开口岩溶洞隙与上覆土层(少数为松软岩层)中的水、气对盖层发生的力学效应导致的地面塌落。

为了更好地把握岩溶地面塌陷概念的内涵和外延,这里用图1-2示意出了岩溶地面塌陷物质条件、诱发因素、作用力和塌陷机理四者间的相互关系。

对于岩溶地面塌陷而言,发生塌陷的物质条件包括覆盖层、可溶岩及其空间组合关系(即岩溶地质结构)3个方面(一些研究者把水也作为塌陷的物质条件之一,其实这是不合适的,它应属诱发因素的范畴,详见下文论述),覆盖层是塌陷的主体,受外力作用后土颗粒的运动方式决定了塌陷机理。而土颗粒的运动方式又与覆盖层的地层岩性、粒度成分、土体性状及其物理力学性能密切相关。因此,研究岩溶地面塌陷首先必须要对覆盖层进行研究。

岩溶包括岩溶作用和岩溶作用的结果(即岩溶现象)两方面。岩溶作用是水对可溶岩进行以化学溶蚀作用为主,以流水的冲蚀、潜蚀和崩塌等机械作用为辅的地质作用,是一个长期的、缓慢的地质作用过程。在工程寿命期(以100a计,下同)内,它对岩溶地面塌陷基本不起作用,或者说,它产生的后果对岩溶地面塌陷基本没有影响(参见下文)。在岩溶地面塌陷的研究中,我们更关注地质历史时期岩溶作用的结果,即岩溶管道系统和/或溶洞。因为岩溶管道系统为上覆土体中的土颗粒提供了转移通道,为后续土颗粒丧失腾出空间;溶洞直接为土颗粒丧失提供储藏空间。它们一起为岩溶地面塌陷提供了天然条件。因此,本专著的研究成

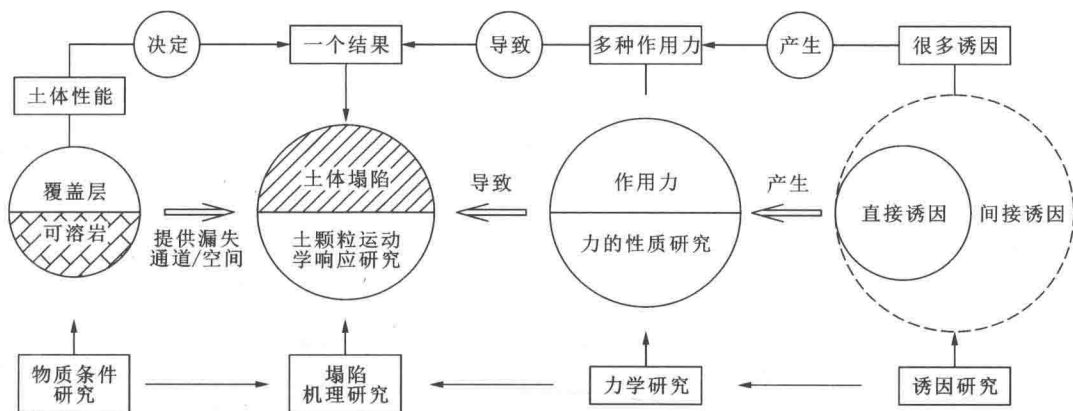


图 1-2 地面塌陷物质条件、诱因、作用力与塌陷机理间关系示意图

Fig. 1-2 Relationship among the material condition, inducement, force and collapse mechanism of Covered Karst Ground Collapse (CKGC)

果也适用于其他类似于岩溶一样提供塌陷空间的土体塌陷,如地下工程施工或使用中导致的地面塌陷等(图片八)。

岩溶地质结构是指不同类型覆盖层和下伏可溶岩之间的上、下叠置关系。不同的岩溶地质结构,具有不同的塌陷机理,相应地具有不完全相同的预测、监测和防治方法(详见后文)。

可溶岩上方土体是经过地质历史时期的沉积与固结作用形成的,经历了地质历史时期长期的地质作用后,下伏可溶通道大多被堵塞。可溶岩与其上方覆盖层已经达到力学平衡状态。没有外力作用来破坏这种平衡,岩溶地面塌陷现象应该不会发生,尤其是在时间极为短暂的工程寿命期(与地质历史相比)内。因此,外部诱发因素产生的作用力是岩溶地面塌陷的动力,是重要的力源。

岩溶地面塌陷的诱因很多,按与土体的作用关系,可分为直接诱因和间接诱因两大类。这里,将直接产生作用力作用于土体之上的诱发因素称为直接诱因。例如,地下水渗流过程中,渗流直接将渗透压力作用在土体颗粒之上,使土体产生运动学响应,称“地下水渗流”是直接诱因;其他如堆荷载、施工荷载、车辆振动荷载、地震荷载等都是直接将作用力作用于土体之上,也都属于直接诱因,不直接对土体产生作用力,而是通过其他方式间接地诱发出外力作用于土体之上的诱发因素称为间接诱因。例如,“大规模岩溶突水”没有将力直接作用于土体,而是由于岩溶水水位急剧下降,在密闭的岩、土空间内产生负压,然后由负压衍生出大气压力作用在土体之上。这里称“大规模岩溶突水”为间接诱因。其他如岩溶矿区大规模排水、大量开采岩溶水、施工降岩溶水等都属于间接诱因。

无论是直接诱因还是间接诱因,它们的作用是直接或间接地产生作用力,并使这些作用力作用于土体之上,使土体受到力的作用。这些作用力可能导致地面塌陷,也可能不导致地面塌陷,因而诱因不直接导致塌陷。诱发因素研究的目的是寻找出作用于土体上的外力来源、作用力的产生过程及其性质、大小、方向、作用位置和作用方式等,为岩溶地面塌陷作用力效果的研究提供依据。

外部诱发因素所产生的作用力的性质有相同之处,也有很多不同点。按作用效果进行等效归类,并分类研究,为建立通用的物理力学模型提供依据。例如,由地下大规模突水诱发的

真空荷载,作用在土洞顶板上表面时,土洞顶板承受向下的面积荷载,其效果与土洞顶板上堆载荷载的作用性质相同,建立物理力学模型时,它可以和堆载荷载一并考虑,进行力的合成。同样是真空荷载,对于砂性土而言,真空荷载的表现形式不再是作用在地面的面积荷载,而是直接作用在流体(地下水)上的渗透压力,为体积力,此时的真空荷载的作用效果与地下水水头的的作用效果相同。在这种情况下,应将真空荷载折算成为水头,与地下水水头叠加而一并考虑,从而建立统一的水力学模型。因此,作用力研究就是将诱因产生的作用力从诱因中分离出来,单纯从力学属性的角度研究各类作用力的共同作用方式。

土体塌陷机理研究就是研究土颗粒受外力作用后的运动学响应,即研究土体破坏过程中土颗粒的行为方式。受外力作用后,不同性质的土体将产生不同的运动学响应。如以老黏土为代表的黏性土,具有较高的凝聚力,土颗粒之间联系密切,往往形成“黏粒团”,在外力作用下,这些“黏粒团”整体运动,或多个“黏粒团”联系在一起发生块体运动,“一块一块”地崩落;以粉细砂为代表的松散土颗粒在重力和地下水的联合作用下“一颗一颗”地漏失;软弱土体则在重力和/或真空吸力等的作用下发生塑性流动,向岩溶孔隙或溶洞中“流失”。黏性土、砂性土和软弱土在塌陷过程中的这种运动学响应特征,决定了土洞型、沙漏型和泥流型3种塌陷机理(罗小杰,2015)。

综上所述,在覆盖型岩溶地区,岩溶孔隙和溶洞为土体中土颗粒的丧失提供了通道或储存空间;各种诱发因素(包括直接诱因和间接诱因)产生一种或多种作用力,单独或共同作用在土体上,最终导致黏性土块体坍塌、砂颗粒漏失或软弱土流失,从而导致地表宏观变形,即发生地面塌陷。因此,在岩溶地面塌陷中,塌陷的主体既不是诱因,也不是岩溶,而是土体本身。诱因和岩溶只是分别提供了土体塌陷的作用力和空间条件。据此,将岩溶地面塌陷定义为:“在覆盖型岩溶地区,岩溶孔隙、溶洞等提供土颗粒运移通道和/或储存空间,外部诱发因素直接或间接地产生的作用力导致土体“黏粒团”坍塌、砂颗粒漏失或软弱土流失而引起的地面沉降变形现象”。这一表述突出了地面塌陷的核心是土体塌陷而非其他,岩溶现象提供了土体塌陷的充分而非必要条件(因为其他地下空间也可导致同样的土体塌陷),诱因提供塌陷所需的动力。这个概念明确了岩溶地面塌陷中塌陷主体、条件和作用力之间的关系,指明了岩溶地面塌陷的研究重点和研究方向。

1.2 地面塌陷研究现状

早在公元1637年,我国明代地理学家徐霞客(1586—1641)最早描述了岩溶地面塌陷现象。直到1973年,广东省地质局编写的《隐伏岩溶类型矿区水文地质特征及勘探方法》才将岩溶地面塌陷作为地质问题来论述(陈国亮,1994)。此后,我国相继召开了多次专门学术讨论会来研讨岩溶地面塌陷,如铁路部门曾为泰安站、分宜站、南京岔路口、南岭隧道、大瑶山隧道等的岩溶地面塌陷问题举行了多次研讨会和年会;全国也多次召开学术会议重点研讨岩溶地面塌陷地质灾害问题。

20世纪80年代以来,特别是20世纪90年代,随着我国工程建设的大规模开展,遭遇的岩溶地面塌陷灾害越来越频繁。很多高等院校、科研部门以及生产单位逐渐对其进行深入研究,并取得了丰硕的成果,在工程实践中积累了较为丰富的塌陷预测、监测、防治和应急措施