

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.05.10

湖北武汉岩溶塌陷成因机理与致塌模式

郑晓明¹, 金小刚², 陈标典¹, 刘鹏瑞¹, 杨戈欣¹, 李海涛³, 杨涛¹

(1. 湖北省地质环境总站, 湖北 武汉 430051; 2. 北京数码视讯科技股份有限公司, 北京 100085;
3. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 岩溶塌陷是制约岩溶地区社会经济发展的主要地质环境问题之一。武汉市岩溶地质条件十分复杂, 隐伏岩溶区分布范围较广, 在自然和人为两方面诱发因素作用下, 近年来发生了多起岩溶塌陷。本文在全面梳理武汉市已发生的岩溶塌陷基础上, 从可溶岩岩溶发育程度、地下水水位与基岩面关系、第四系厚度和结构特征三个方面, 概括了区内岩溶塌陷区的八类地质模式; 结合塌陷产生过程和主控机理, 将武汉市岩溶塌陷初步概括为九种致塌模式。

关键词: 岩溶塌陷; 地质模式; 成因机理; 致塌模式

中图分类号: P642.252; TU434

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)05-0075-08

Mechanism and modes of karst collapse in Wuhan City, Hubei Province

ZHENG Xiaoming¹, JIN Xiaogang², CHEN Biaodian¹, LIU Pengrui¹, YANG Gexin¹, LI Haitao³, YANG Tao¹

(1. Geological Environment Center of Hubei Province, Wuhan, Hubei 430051, China; 2. Beijing Sumavision Inc., Beijing 100085, China; 3. China Institute for Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: Karst collapse is one of the main geological environmental problems, and restricts social and economic development. The karst geological conditions are very complex in Wuhan City. A number of karst collapse happened in recent years due to natural and human factors. This paper analyzes and classifies the karst collapse in Wuhan City according to the development characteristics of karst collapse in Wuhan city. The geological conditions can be sorted into eight kinds taking consideration of the corrosion degree of carbonate, the relationship between groundwater level and the bedrock surface as well as different thickness and structure of the quaternary. According to the collapse mechanism and its predominant factors the karst collapse in Wuhan is preliminary summarized as nine collapse modes.

Keywords: karst collapse; geology model; mechanism; collapse mode

0 引言

武汉市是我国隐伏岩溶分布最广的地区之一。近年来, 随着武汉市城市化进程的不断加快和深入发展, 市区内岩溶塌陷事件频发, 有记录的岩溶塌陷共发生33处(38次)(图1), 给人民的生命财产造成了一定的损失, 严重制约了武汉市城市建设和社会经济的发展。

武汉市内的岩溶地质条件十分复杂, 导致岩溶塌陷的成因和致塌模式也相对比较复杂。此前, 吴永华等^[1]、余泰敏等^[2]、贾淑霞等^[3]对武汉市典型岩溶塌陷事件的成因及致塌模式进行了初步研究, 但未涵盖近几年工程施工诱发的部分塌陷。本文在收集以往有关岩溶塌陷调查(勘察)及实施的1:50000武汉市岩溶调查项目成果的基础上, 系统总结了武汉市岩溶塌陷的主要地质模式、成因机理和致塌模式, 为制定科学

收稿日期: 2019-01-31; 修订日期: 2019-03-11

基金项目: 中国地质调查局矿评项目(1212011220189)

第一作者: 郑晓明(1988-), 女, 湖北宜昌人, 硕士, 工程师, 主要从事水工环方面的研究工作。E-mail: zxm1988@163.com

通讯作者: 李海涛(1979-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水工环方面的研究工作。E-mail: liht@cigem.cn

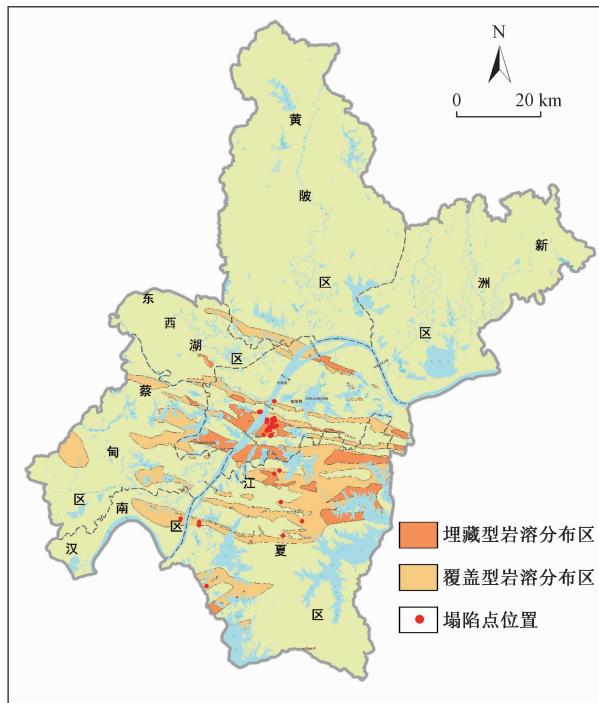


图1 武汉市岩溶塌陷分布图

Fig.1 Distribution of karst collapse in Wuhan City

合理的武汉市岩溶塌陷地质灾害防治规划、实现武汉市岩溶塌陷地质灾害有效监控与科学管理提供了理论支撑,具有重要的指导意义。

1 岩溶塌陷产生的地质模式

武汉市岩溶塌陷的发生与地质条件有着必然联系,包括岩溶发育程度、上覆土层结构特征、地下水位等^[4-6]。根据《岩溶塌陷调查规范(1:50 000)》中主要影响因素对岩溶塌陷影响程度的划分及实践,可溶岩埋藏条件(覆盖型或埋藏型)、第四系土层结构(单层结构、“上黏下砂”二元结构、“黏砂互层”下部为砂的多元结构)和土层厚度(≥ 30 m 或 < 30 m)、地下水水位及波动情况对岩溶塌陷的发生影响较大。结合武汉市已发生岩溶塌陷事件的调查、勘察成果资料统计,武汉市岩溶塌陷发生的地质模式(可溶岩、地下水及上覆土层的组合关系)主要为以下5种类型(图2)。

地质模式类型 a: 下伏碳酸盐岩(覆盖型)岩溶强发育,上覆第四系土层结构为单层黏土,地下水位在基岩面以上波动(图2(a))。根据第四系土层厚度的大

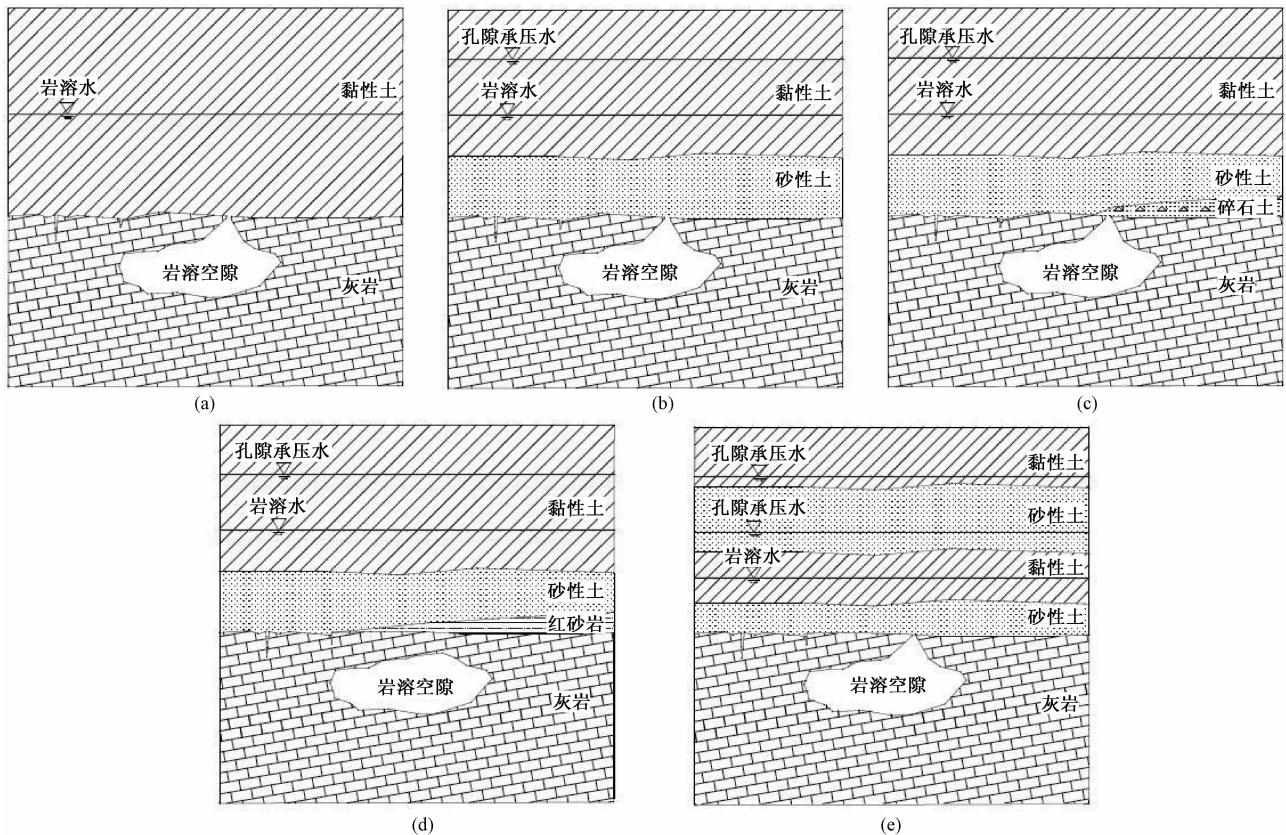


图2 岩溶塌陷地质模式示意图

Fig.2 Geological model for Karst collapse

小,可为两种亚类类型,即 a_1 (第四系上覆土层厚度 $< 30\text{ m}$)、 a_2 (第四系土层厚度 $\geq 30\text{ m}$)。

地质模式类型 b:下伏碳酸盐岩(覆盖型)岩溶强发育,上覆土层结构为“上黏下砂”二元结构(图 2(b)),地下水位在基岩面以上波动。根据第四系土层厚度的大小,可为两种亚类类型,即 b_1 (第四系上覆土层厚度 $< 30\text{ m}$)、 b_2 (第四系土层厚度 $\geq 30\text{ m}$)。

地质模式类型 c:下伏碳酸盐岩(覆盖型)岩溶强发育,上覆第四系结构由上至下为“黏性土—砂性土—碎石土或黏性土”的三层结构(图 2(c)),地下水位在基岩面以上波动。根据第四系厚度的大小,可为两种亚类类型,即 c_1 (第四系上覆厚度 $< 30\text{ m}$)、 c_2 (第

四系厚度 $\geq 30\text{ m}$)。

地质模式类型 d:下伏碳酸盐岩(覆盖型岩溶到埋藏型岩溶过渡带)岩溶强发育,上覆结构由上至下为“黏性土—砂土—基岩”的三层结构(图 2(d)),第四系厚度 $< 30\text{ m}$,地下水位在基岩面以上波动。

地质模式类型 e:下伏碳酸盐岩(覆盖型)岩溶强发育,第四系土层结构为黏性土、砂性土互层的多层结构(图 2(e)),第四系厚度 $< 30\text{ m}$,地下水位在基岩面以上波动。

武汉市多年来岩溶塌陷事件(次)的地质模式统计见表 1。

表 1 武汉市岩溶塌陷地质模式和致塌模式分类一览表
Table 1 Geological model and collapse mode of karst collapse in Wuhan City

地质模式 分类		发生塌陷时间地点(每次)	第四系土层 厚度/m	塌陷规模				诱发 因素	致塌模式
				陷坑 个数	陷坑 面积/m ²	陷坑直径 尺寸/m	可见 深度/m		
地质 模式 类型 a	a ₁	2001 年 5 月 30 日江夏区乌龙泉京广线 1241 +070 岩溶地面塌陷	< 30	2	84	5.5 × 5、 1.6 × 1.6	0.3、 1.1	人为	吸蚀
		2014 年 5 月 2 日江夏区大桥新区鹏湖湾二期工地岩溶塌陷		1	近 200	15 × 10	近 20 m	人为	崩解—土洞顶部破坏—加载
		2018 年 3 月 16 日江夏区实验高级中学校园内岩溶塌陷		1	15	3 × 5	6 ~ 10	人为	崩解—土洞顶部破坏—重力
		2018 年 11 月 13 日江夏区纸坊街人行道路岩溶塌陷		1	9.86	4	5	自然	潜蚀—重力（自重）
	a ₂	2016 年 2 月 25 日武汉东方明泔混凝土有限公司厂区岩溶塌陷	≥30	1	近 5	3 × 2	1.5 ~ 2	人为	潜蚀—振动—加载
地质 模式 类型 b	b ₁	1977 年 9 月汉阳中南轧钢厂岩溶塌陷	< 30	5	717	14	8 ~ 10	人为	吸蚀
		1983 年 7 月武昌区阮家巷岩溶塌陷		3	552	24 × 23	3 ~ 6	自然	潜蚀—重力(自重)
		2005 年 8 月 22 日武昌区阮家巷岩溶塌陷		1	80	10 × 8	2.4	人为	垂直渗压—重力(自重)
		1988 年 5 月武昌区陆家街岩溶塌陷		1	415.5	23	9.9	自然	潜蚀—重力（自重）
		1997 年洪山区青菱乡烽火村乔木湾岩溶塌陷		1	—	—	—	人为	吸蚀
		2000 年 3 月洪山区青菱乡烽火村乔木湾岩溶塌陷		1	—	—	—	人为	吸蚀
		2000 年 4 月 6 日洪山区青菱乡烽火村乔木湾岩溶塌陷		19	3 468	67	7.8	人为	吸蚀
		1999 年 4 月 22 日毛坦港小学岩溶塌陷		1	250	16.5 × 17	1 ~ 5	自然	潜蚀—重力（自重）
		2009 年 12 月 16 日武昌区白沙洲大道武泰闸岩溶塌陷		1	150	13.1 × 11.8	13	人为	岩层顶板破坏—渗流液化
		2009 年 11 月 24 日白沙洲大道张家湾段岩溶塌陷		1	480	24 × 20	2	人为	岩层顶板破坏—渗流液化
		2009 年 12 月 22 日洪山区烽火村钢材市场白沙洲大道 Z118#墩（烽火村钢材市场）岩溶塌陷		1	238	17 × 14	5	人为	岩层顶板破坏—渗流液化

续表

地质模式 分类	发生塌陷时间地点(每次)	第四系土层 厚度/m	塌陷规模				诱发 因素	致塌模式
			陷坑 个数	陷坑 面积/m ²	陷坑直径 尺寸/m	可见 深度/m		
地质 模式 类型 b	2010 年 1 月 28 日洪山区青菱乡光霞村五组岩溶塌陷	<30	1	160	12.4×13.1	6	人为	岩层顶板破坏—垂直渗压
	2010 年 4 月 18 日洪山区青菱乡烽火村白沙洲大道岩溶塌陷		1	40.5	9×4.5	0.5	人为	振动—重力(自重和加载)
	2011 年 5 月洪山区红旗欣居 B 区岩溶塌陷		1	696	29×24	10	人为	岩层顶板破坏—渗流液化
	2013 年 12 月 26 日汉阳拦江路锦绣长江三期工地岩溶塌陷		1	—	—	—	人为	岩层顶板破坏—垂直渗压
	2015 年 8 月 10 日汉阳区鹦鹉大道乐福园酒楼锦绣长江店北岩溶塌陷		1	78.54	5	大于 6	人为	岩层顶板破坏—垂直渗压
	2015 年 8 月 7 日汉阳区鹦鹉大道地铁 6 号线 K12+583 岩溶塌陷		1	15	5×3	大于 10	人为	岩层顶板破坏—垂直渗压
	1994 年 6 月 3 日江夏区金口街金水一村地面塌陷		1	514	26.8×24.4	6.1	自然	潜蚀—重力(自重)
	2008 年 2 月 29 日汉南区陡埠村岩溶地面塌陷		6	17 560	26~140	0.3~6.9	人为	岩层顶板破坏—垂直渗压
	2012 年 11 月 2 日江夏区金水办事处菜地岩溶地面塌陷局部		1	1 170	42.5×28.5	2.6~5	人为	岩层顶板破坏—垂直渗压
	2014 年 9 月 5 日江夏区法泗街金水河两岸岩溶地面塌陷局部		19	15 410	5.2~108	0.7~12.9	人为	岩层顶板破坏—渗流液化、水击—渗流液化
	2017 年 5 月 23 日洪山区烽胜路保利·新武昌段岩溶地面塌陷		1	近 700	30×25	超过 3	人为	岩层顶板破坏—垂直渗压
	2000 年 2 月 22 日武昌区涂家沟市司法学校岩溶塌陷	≥30	2	350	15.5×22.3	6	自然	垂直渗压—重力(自重)
	2006 年 4 月武昌区阮家巷长江紫都花园岩溶塌陷		2	130	8~10	3~7	人为	岩层顶板破坏—垂直渗压
	2011 年 12 月 12 日武昌区积玉桥市民政学校岩溶塌陷		1	100	12×12	1	人为	岩层顶板破坏—渗流液化
地质 模式 类型 c	2005 年 8 月 10 日洪山区青菱乡烽火村乔木湾(江南竹木大市场)岩溶塌陷	<30	1	18	4.5×4	1.07	自然	潜蚀—重力(自重)
	2009 年 6 月 10 号武昌区武泰闸路面岩溶塌陷		1	45	9×5	3.1	人为	岩层顶板破坏—垂直渗压
	1931 年 8 月武昌区丁公庙岩溶塌陷	≥30	—	—	—	—	自然	潜蚀—重力(自重)
	2010 年 7 月 19 日南湖变电站岩溶塌陷		1	60	10	0.4	人为	岩层顶板破坏—渗流液化
地质 模式 类型 d	2014 年 6 月 4 日~2014 年 6 月 26 日洪山区张家湾街烽火村在建项目 H10、H11 地块岩溶塌陷	<30	8	80、50、12、15、6、90	圆形	4.5、2.0、1.0、3.0、4.0、1.0、4.0	人为	岩层顶板破坏—渗流液化
	2009 年 6 月 17 日洪山区烽火村岩溶塌陷		1	94	10.1×9.3	2.4	人为	岩层顶板破坏—渗流液化
	2009 年 6 月 27 日洪山区烽火村岩溶塌陷		1	160	10.7×18.6	1.6	人为	岩层顶板破坏—垂直渗压
地质 模式 类型 e	2013 年 4 月 14 日毛坦港佳兆业·金城天下三期岩溶塌陷	<30	3	148.43、194.2、268.6	14.4×12.2、0.5~0.8、12.6×13.6、0.5~0.7、23.6×17.3	0.2~0.3	人为	岩层顶板破坏—垂直渗压
	2012 年 11 月 2 日武汉市江夏区金水办事处岩溶地面塌陷局部		1	1 200	42.5×28.5	0.8	人为	岩层顶板破坏—垂直渗压
	2014 年 9 月 5 日武汉市江夏区法泗街金水河两岸岩溶地面塌陷局部		19	15 410	5.2~108	0.7~12.9	人为	岩层顶板破坏—渗流液化、水击—渗流液化

备注:“—”为具体资料不详

据统计,自然条件下发生的岩溶塌陷8处(共8次),土层厚度 $<30\text{ m}$ 的塌陷占75%(6次);总共25处(30次)人为因素诱发的塌陷中,除有9处(11次)第四系土层厚度略 $>30\text{ m}$,其余均 $<30\text{ m}$ 。其中,单层黏土分布区的塌陷一共发生4次;第四系为“上黏下砂”二元结构的分布区,根据黏性土跟砂性土的厚度比分为三类,分别是大于2:1,1:4~2:1,小于1:4;并且比例越小,就越容易发生塌陷;根据钻孔资料显示,在已发生的塌陷中有4处位于多元结构分布区。

另外已发生岩溶塌陷的埋藏型岩溶分布区多位于覆盖型和埋藏型岩溶交界处,第四系厚度小于 30 m ,结构为上黏下砂二元结构。

2 岩溶塌陷成因机理

岩溶塌陷是在多种因素共同影响下形成的^[7]。总结武汉市内近年来由人类工程活动诱发的岩溶塌陷形成机理时,除了广泛认可的潜蚀、吸蚀、重力、振动等效应,还认为存在砂性土渗流液化效应、黏性土土体崩解效应和水击作用。根据不同因素所产生的不同作用,武汉市岩溶塌陷的成因机理可总结为以下8种。

潜蚀效应:地表水、上部孔隙潜水和下部岩溶水之间水力联系密切,且存在水头差,地下水径流时产生动水压力,动水压力的大小与水力梯度成正比。长江水位变化、人工开采地下水均会使水力梯度加大,水力梯度达到一定值时,动水压力则大于土体内聚力与颗粒间摩擦力,土颗粒开始被渗流带动迁移,从而在上部盖层中形成土洞,土洞发展到一定阶段,即产生地面塌陷。

吸蚀效应:下部岩溶水水位在基岩面附近波动,当水位下降时,在下降的水面与盖层之间形成低压空间,对盖层内部产生吸蚀作用。吸蚀力致使覆盖层底部土体疏松,剥蚀加快形成空洞。当空洞逐渐扩大、洞顶板发生变形,达到一定程度后,盖层失去平衡,形成塌陷。

垂直渗压效应:当地表水体、雨水等入渗时,水在孔隙中运移,对土颗粒施加一种垂向渗透压力,从而改变了土体的力学性质。当渗透压力达到一定值时,使土体结构破坏,土颗粒随水流产生运移,进而形成土洞,土洞不断发展,即产生地面变形或塌陷。

重力(自重和加载)效应:降雨入渗后,上覆盖层饱和容重比干容重一般增加30%~40%。盖层厚度大,面积宽,自重也大,使土拱承受更大的重量。当上覆土体的重量大于土体的内聚力与颗粒间摩擦力时,即导致塌陷。土拱承受外部荷载时,也会产生同样的

效果。

振动效应:机械振动使得土体解体,结构变得松散,颗粒之间黏聚力降低,物理力学性质降低,在地下水渗流时更容易流失、垮塌。在饱和粉细砂层中,振动作用还会导致砂土液化,极大降低了土体强度。振动效应主要来源于施工机械振动、来往车辆行驶产生的震动。

渗流液化效应:第四系下部砂层处于饱水状态,渗流作用的加剧,局部水力坡度加大,加上砂土振动液化作用,砂层呈液化状态流入岩溶空隙,从而在砂层上部形成“空洞”,在“空洞”发展到一定阶段,在内外应力作用下,上部黏性土盖层的致塌力超过抗塌力,即产生塌陷。

土体崩解:土体崩解主要是指黏性土遇水后,受水的影响,土颗粒间的联结方式和强度削弱或丧失,使得土体崩散解体,结构遭到破坏,黏聚力降低,变得易于从土体临空面上剥离和垮落。

水击作用:岩溶管道中的地下水流经常处于不稳定状态,管道中因塌落物的堵塞或充填物的冲击,使水流速度突然变化,水流的动能将转化为压力,形成一种向来水方向传播的弹性波即水击波,从而产生水击作用,冲击岩溶洞隙管道系统,引起与之相通的上方覆盖岩土体被击穿,导致塌陷。

3 岩溶塌陷致塌模式

岩溶塌陷是一个复杂过程,往往是多种影响因素共同作用导致的结果。根据有关武汉市岩溶塌陷调查、勘察等成果资料统计分析,武汉市岩溶塌陷的致塌模式可分为九种,分别描述如下:

3.1 潜蚀—重力(自重)致塌模式

主要为在自然条件下,地下水渗流对土体颗粒产生影响,使细小颗粒随地下水向岩溶裂隙中运移。土体变得疏松,逐步形成土洞,而且土洞不断发展扩大。最终在重力作用下导致塌陷。此类塌陷模式多为自然塌陷,而且主要在2000年以前发生,如1983年武昌区阮家巷岩溶塌陷等。

3.2 垂直渗压—重力(自重)致塌模式

当降雨补给地下水时,引发地下水位上升,导致地下水垂向上水头差发生变化,垂向渗透压力增大。当渗透压力达到一定值时,土体结构被破坏。土颗粒随地下水水流产生运移,形成土洞。另外,在降雨条件下,上覆土体接受降雨补给,自重加大,土体物理力学性质及强度降低,抗塌力减小,当致塌力大于土拱的抗

塌力时,即产生岩溶塌陷。此类塌陷模式也多为自然塌陷,如2000年,在武昌区涂家沟市司法学校,连续强降雨导致的自然塌陷,即为此种岩溶塌陷模式。

3.3 吸蚀致塌模式

因开采岩溶地下水,导致岩溶地下水水位下降,产生真空吸蚀作用。伴随上覆土层中的地下水潜蚀作

用,形成土洞,并发展扩大。在重力和吸蚀力的作用下,土洞附近土体失稳垮塌,从而导致岩溶塌陷(图3)。如1997年汉阳中南轧钢厂岩溶塌陷(第四系为上黏下砂二元结构)和2001年5月30日武汉市江夏区乌龙泉京广线1241+070岩溶塌陷(第四系为单层黏土)即为此种塌陷模式。

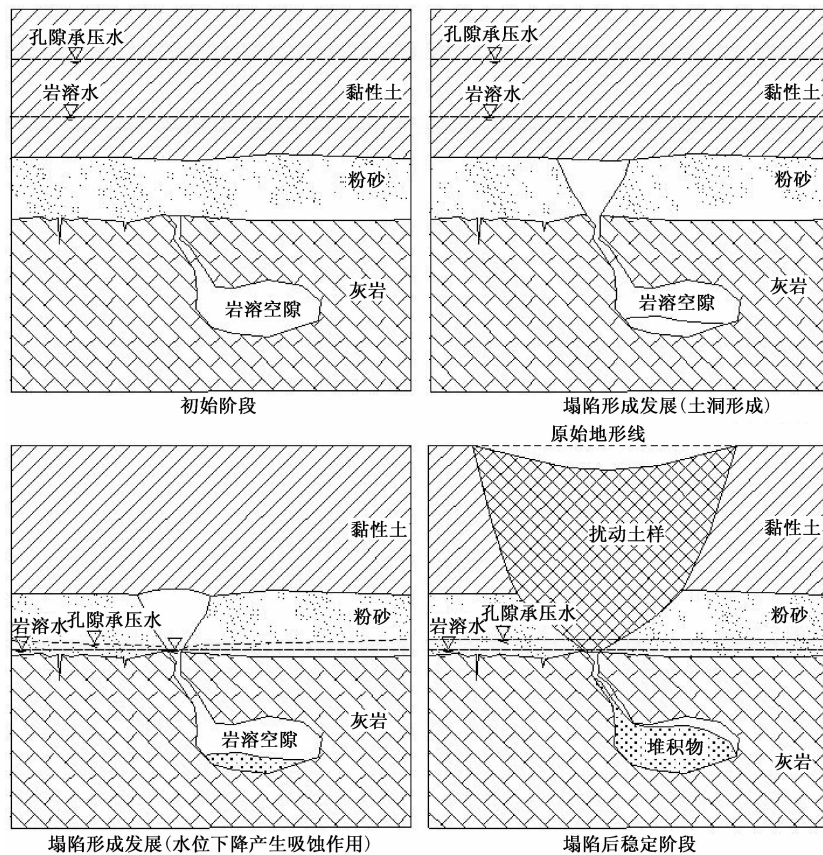


图3 吸蚀致塌模式的1997年汉阳中南轧钢厂岩溶塌陷形成过程示意图

Fig.3 Karst collapse due to suck erosion

3.4 振动—重力(自重和加载)致塌模式

在自然条件下,上覆土层因地表附加荷载和外力振动,致使土体结构破坏、黏聚力降低,在重力(土体自重和外加荷载重力)作用下土洞上部土体垮塌,形成岩溶塌陷。如2010年4月18日洪山区青菱乡烽火村白沙洲大道佳韵小区岩溶塌陷,即因载重车辆驶过,在振动及重力作用下发生了岩溶塌陷。

3.5 岩层顶板破坏—垂直渗压致塌模式

主要是人为钻探施工过程中带水钻进,钻探揭露土洞(溶洞)顶板处相对阻水的泥质粉砂岩等瞬间,钻进的循环水大量涌入,具有较大水头差和渗透压力,甚至有水流裹挟大量上覆第四系砂性土向下运移。在重力和振动作用下,导致上覆土体失稳破坏,形成岩溶塌陷。此类塌陷模式一般表现在塌陷发生快、塌陷坑发

展迅速、塌陷形成至基本稳定时间短,往往土体塌陷的同时还伴随有岩体塌陷,如2013毛坦港佳兆业·金域天下3期岩溶塌陷即为此种塌陷模式。

3.6 岩层顶板破坏—渗流液化致塌模式

主要是桩基施工及有其它振动发生时,如桩基施工等采用重锤冲击振动作用下,在饱和砂性土中,地下水往复波动,短时间内发生潜蚀、渗流液化,大量砂土溃入下部岩溶空隙,在第四系中快速形成土洞。土洞上部土体或岩体在自重或外部荷载、振动作用下塌陷,从而形成岩溶塌陷(图4)。如2011武昌区积玉桥市民政学校岩溶塌陷即为此种塌陷模式。

3.7 崩解—土洞顶部破坏—加载(重力)致塌模式

可溶岩岩溶发育区上覆单层黏土时,岩溶空隙上方第四系黏土因潜蚀形成土洞,土洞处黏土遇地下水

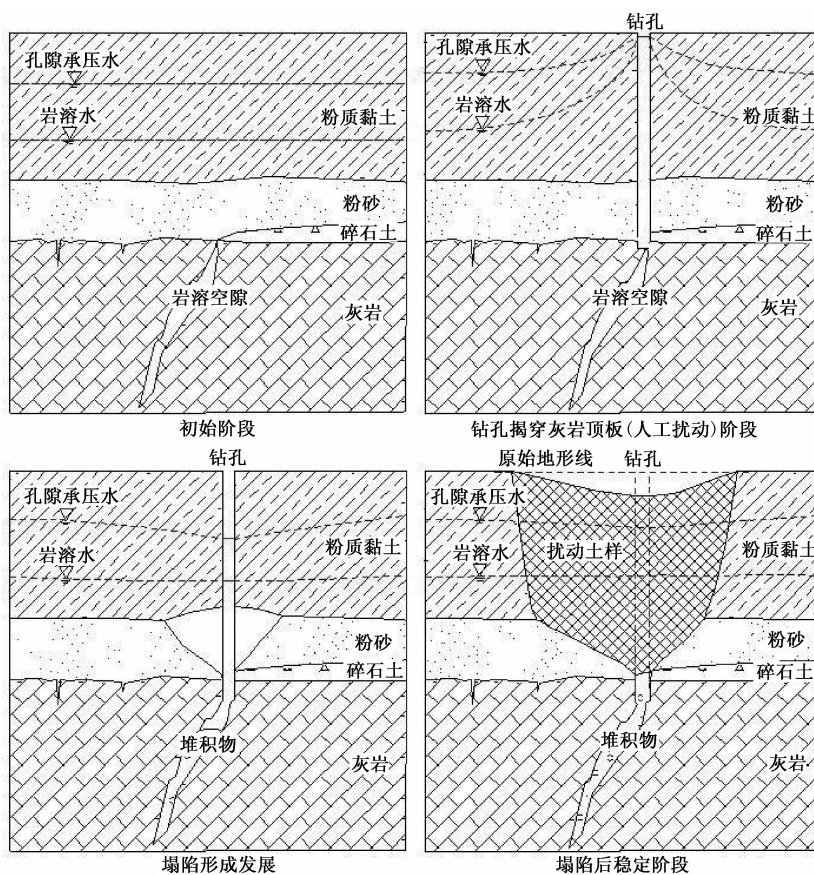


图4 岩层顶板破坏—渗流液化致塌模式岩溶塌陷形成过程示意图

Fig. 4 Karst collapse due to destruction of rock roof—the seepage liquefaction mode

及钻探循环水时发生崩解,土体结构遭到破坏,黏聚力降低,土洞顶部因开挖等导致土拱结构和应力破坏,在土体自身重力和附加荷载作用下发生塌陷,如2014江夏区大桥新区鹏湖湾二期工地岩溶塌陷即为此种塌陷模式。

3.8 潜蚀—振动—加载致塌模式

可溶岩岩溶发育区上覆单层黏土时,因第四系下伏可溶岩中存在空隙,在地下水潜蚀作用下形成土洞,土洞临空面土体不断剥离垮落。此外,外部振动作用导致土体结构发生破坏,土洞抗塌力减弱,而外部加载导致土体致塌力增大,在多重机制作用下岩溶塌陷发生,如2016年武汉东方明混凝土有限公司厂区岩溶塌陷即为此种塌陷模式。

3.9 水击—渗流液化致塌模式

岩溶塌陷的产生,使地下水位发生波动,地下水(气)压力发生波动且向塌陷区周边传导,形成水击效应。在地下水位的不断升降变化过程中,尤其是岩溶地下水位或承压水头低于孔隙水位时,发生垂直渗流,先在砂层中发生潜蚀作用,形成“漏斗状疏松体”;进而因垂直渗流作用的加剧,局部水力坡度加大,砂层呈

液化状态流入岩溶空洞,从而在砂层上部形成“空洞”;在“空洞”发展到一定阶段,在自重或外部荷载作用下,上部黏性土盖层崩落即产生连锁反应方式的塌陷。如2014年,江夏区法泗街金水河两岸岩溶地面塌陷,在2天时间内,15 410 m²范围,连续发生岩溶塌陷,形成的除施工处外的另18个塌陷坑。

4 结论

岩溶塌陷是一个复杂的过程,是很多影响因素共同作用的结果。本文通过整理和分析历年来关于武汉市岩溶塌陷事件的调查、勘察成果资料,从武汉市岩溶塌陷的地质模式、成因机理、致塌模式等方面进行了系统总结。根据武汉市岩溶发育程度、上覆第四系结构特征、地下水位等,武汉市岩溶塌陷地质模式可概化为5种类型。武汉市岩溶塌陷的发生大致可归纳为潜蚀效应、吸蚀效应等8种成因机理;根据武汉市岩溶塌陷的成因机理,可将武汉市岩溶塌陷分为潜蚀—重力(自重)致塌模式、垂直渗压—重力(自重)致塌模式等9种岩溶塌陷致塌模式。

本文结论可为岩溶塌陷进一步研究评价提供参考,为制定岩溶塌陷地质灾害防治对策提供依据。本文主要针对武汉市已发生的岩溶塌陷事件进行总结分析,由于岩溶地质条件的复杂性和岩溶塌陷地质灾害发生的随机性以及人类工程活动作用方式的多样性等因素,在以后的实际工作中仍需要在对武汉市岩溶塌陷进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] 吴永华,谢春波,朱洵. 陆家街地区岩溶塌陷形成机制及预测评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994,5(增刊1):118-123.
WU Yonghua, XIE Chunbo, ZHU Xun. Formation mechanism and prediction and evaluation of karst collapse in Lujia Street Region[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1994,5(S1):118-123.
- [2] 余泰敏,喻理传. 武汉地区砂土渗流—漏失型岩溶地面塌陷致塌模式分析[J]. 资源环境与工程, 2015,29(6):887-891.
YU Taimin, YU Lichuan. Analysis of collapse causing model of karst collapse in Wuhan[J]. Resources Environment & Engineering, 2015,29(6):887-891.
- [3] 贾淑霞,马霄汉. 武汉市区岩溶地面塌陷成因机理与预测研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994,5(增刊1):103-108.
JIA Shuxia, MA Xiaohan. Genetic mechanism and forecast of karst surface collapse in Wuhan Urban Area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1994,5(S1):103-108.
- [4] 中国地质环境监测院,湖北省地质环境总站. 武汉市岩溶塌陷调查子项目成果报告[R]. 2016.
China Geological Environmental Monitoring Institute, Hubei Geological Survey. Report on the results of the karst collapse investigation in Wuhan[R]. 2016.
- [5] 中国地质调查局武汉地调中心,湖北省地质环境总站. 武汉市岩溶塌陷调查(H50E011001, H50E012001)子项目成果报告[R]. 2016.
China Geological Survey Wuhan Geological Survey Center, Geological Environmental Center of Hubei Province. Report on the karst collapse investigation project in Wuhan (H50E011001, H50E012001)[R]. 2016.
- [6] 罗小杰. 武汉地区碳酸盐岩“六带五型”划分与岩溶地质灾害防治[J]. 水利学报, 2014,45(2):171-178.
LUO Xiaojie. Division of “Six Belts and Five Types” of carbonate region and control of karst geological disaster in Wuhan[J]. Shuili Xuebao, 2014,45(2):171-178.
- [7] 康彦仁,项式均,陈健,等. 中国南方岩溶[M]. 南宁:广西科学技术出版社,1990.
KANG Yanren, XIANG Shijun, CHEN Jian, et al. Karst collapse of South China[M]. Nanning: Guangxi Science and Technology Press, 1990.

《中国地质灾害与防治学报》第七届编委会

主 任:	郝爱兵	主 编:	殷跃平			
副 主 任:	张作辰					
副 主 编:	刘传正	唐辉明	李铁锋	文宝萍	许 强	李 晓
委 员:	马凤山	王立朝	王来贵	王贤能	王树仁	王 清
	牛瑞卿	文宝萍	乔建平	向喜琼	刘东升	刘传正
	祁生文	许 强	李 忠	李 晓	李铁锋	李善峰
	杨湘奎	何发亮	余志山	宋 军	张永波	张进德
	张茂省	陈 平	陈红旗	陈昌彦	陈昌富	范 文
	周平根	赵松江	胡凯衡	胡卸文	郝爱兵	胡新丽
	聂洪峰	贾永刚	夏元友	钱江澎	徐则民	殷跃平
	黄波林	曹修定	龚士良	温铭生	雷明堂	路新景
	薛翊国	魏云杰	(以姓氏笔画为序)			
						李善峰
						王雁林
						刘新荣
						李 滨
						张作辰
						范宏喜
						姜月华
						唐辉明
						裴向军