

DOI: 10.16788/j.hddz.32-1865/P.2021.01.010

引用格式: 车增光, 刘洪, 喻永祥. 苏州市金庭镇蒋东岩溶塌陷地质条件及形成机理研究[J]. 华东地质, 2021, 42(1): 85-92.

苏州市金庭镇蒋东岩溶塌陷地质条件及形成机理研究

车增光^{1,2}, 刘洪^{1,2}, 喻永祥^{1,2}

(1. 国土资源部地裂缝地质灾害重点实验室, 江苏 南京 210018;

2. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018)

摘要: 通过野外地质调查、钻探、岩土样品测试等手段, 研究了苏州市金庭镇蒋东岩溶塌陷的地质条件及形成机理。蒋东碳酸盐岩质纯、层厚、岩溶发育程度高, 第四系覆盖层较薄且遇水后力学强度大幅降低, 这是塌陷形成的内在地质条件, 矿山开采是塌陷形成的外在诱发因素。该塌陷模式可概化为真空吸蚀-重力致塌, 致塌力主要为溶洞管道内重力水流、水位快速下降产生的真空负压吸蚀力和覆盖层土体自重。根据塌陷区地质条件和诱发因素, 建立了基于极限平衡理论的真空吸蚀-重力致塌力学模型。模型计算结果表明, 在真空吸蚀作用形成过程中, 塌陷体的稳定系数 $K > 1.0$, 必然产生剪切变形破坏, 模型计算结果符合岩溶塌陷的实际情况。

关键词: 岩溶塌陷; 形成机理; 真空吸蚀; 力学模型; 稳定系数

中图分类号: P642.26

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2021)01-085-08

岩溶塌陷指岩溶洞隙上方的岩土体在自然或人为作用下引起变形、破坏, 在地面形成塌陷的岩溶地质作用与现象。我国是岩溶塌陷灾害最严重的国家之一。20世纪80年代, 徐卫国等^[1-2]对岩溶塌陷的形成机制进行了研究并提出了真空吸蚀论, 认为地下水水位下降形成的真空吸蚀作用是岩溶塌陷的主要形成机制; 康彦仁^[3]根据岩溶塌陷形成的不同外动力条件, 总结了重力致塌、冲爆致塌、潜蚀致塌、振动致塌、荷载致塌、真空吸蚀致塌、溶蚀致塌以及根蚀致塌等8种致塌模式; 何宇彬等^[4]认为引起塌陷的真空吸蚀作用主要来源于喀斯特管流水动力场的急剧变化; 丁庆忠^[5]对岩溶塌陷的真空吸蚀机理进行了物理模拟试验, 揭示了真空吸蚀致塌的机理。综上可知, 岩溶塌陷的本质是土体力学平衡问题, 土体失衡就会产生变形甚至塌陷, 因此, 基于天然平衡拱理论及极限平衡理论, 一些学者建立了岩溶塌陷不同作用机制、不同盖层条件的

致塌力学模型^[6-8]。目前, 岩溶塌陷真空吸蚀机理研究多集中于理论和定性分析阶段, 对于真空吸蚀的定量计算、力学模型及其在实际中的应用研究方面仍相对薄弱。

本文通过野外地质调查、钻探、样品测试等手段, 分析了苏州市蒋东村岩溶塌陷形成的地质条件和影响因素, 在此基础上, 探讨了真空吸蚀在该塌陷中的形成过程与作用机理, 建立了基于极限平衡理论的真空吸蚀-重力致塌力学模型, 这对岩溶塌陷灾害防治具有重要意义。

1 地质概况

蒋东村岩溶塌陷位于苏州市吴中区西山岛东北部(图1), 发生于2004年7月9日, 塌陷坑平面形态呈近EW向椭圆形, 长15 m, 宽12 m, 深约2 m, 塌陷造成数栋居民房屋倒塌。

* 收稿日期: 2020-04-08 修订日期: 2020-09-23 责任编辑: 谭桂丽

基金项目: 江苏省地质勘查基金“苏南地区岩溶地质生态环境调查评价(编号: 苏财建[2014]278号)”项目资助。

第一作者简介: 车增光, 1985年生, 男, 工程师, 主要从事地质灾害调查评价工作。Email: 549374062@qq.com。

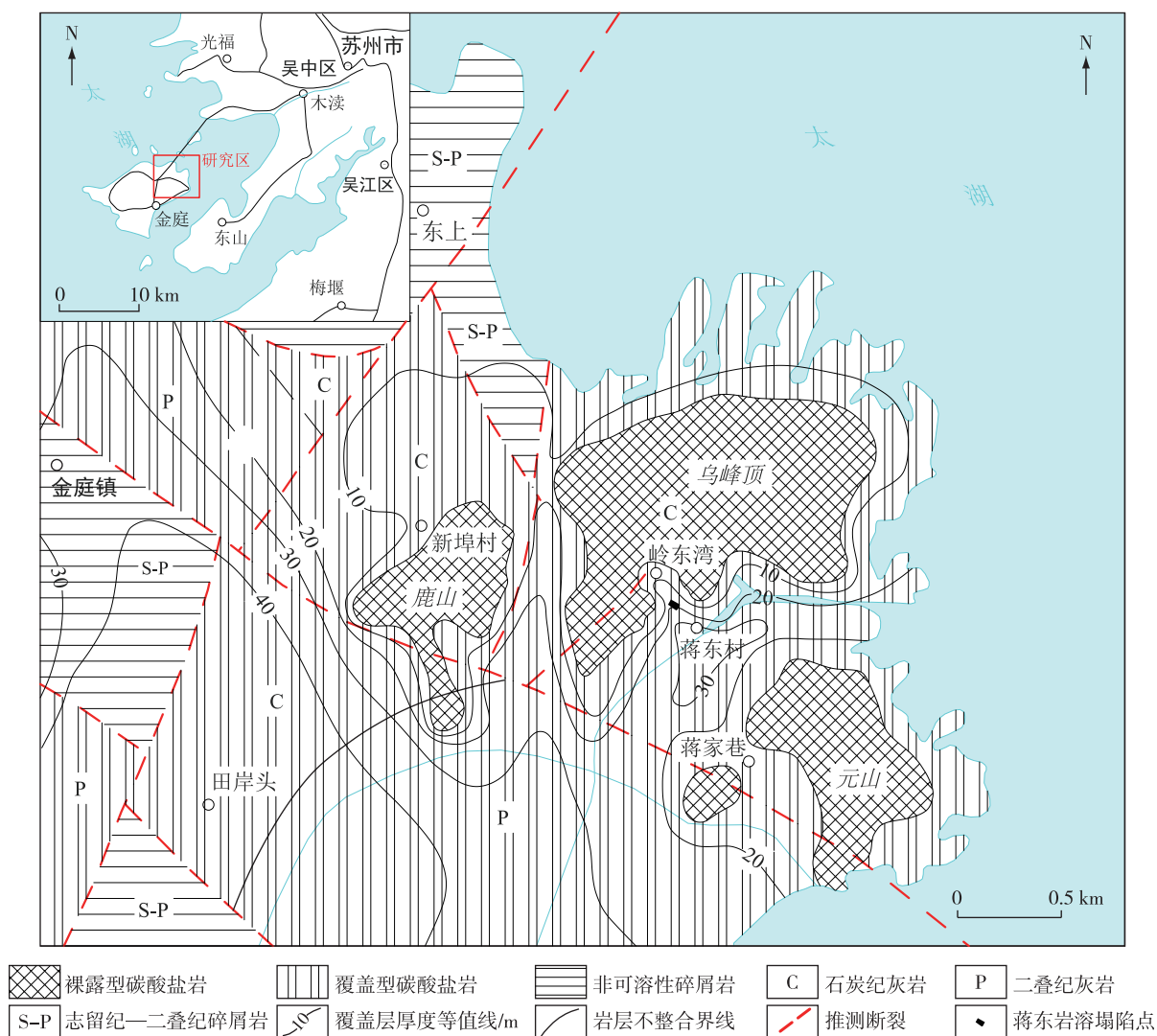


图1 研究区基岩地质图

Fig. 1 Geological map of bedrock in the study area

蒋东岩溶塌陷所在的西山岛中部为岛屿状残丘,山体呈椭圆形,最高点乌峰顶海拔 93.9 m,四周为滨湖平原,标高 3.0~10.0 m,略高于太湖水面标高(2.0~3.0 m)。区内地层单元属于扬子地层区下扬子地层分区,地层发育不全,中志留统一石炭统岩性主要为碎屑岩类,中石炭世黄龙组(C_2h)、晚石炭世船山组(C_3c)及早二叠世栖霞组(P_1q)是研究区可溶性碳酸盐岩分布的主要层位,面积约 10.2 km²。区内碳酸盐岩仅出露在乌峰顶、元山、鹿山等低山丘陵,大部分区域被第四系松散层覆盖,覆盖层岩性主要为黏土,厚度为 0~45 m。构造以断裂为主,发育 NE 向断裂和 NW 向断裂。

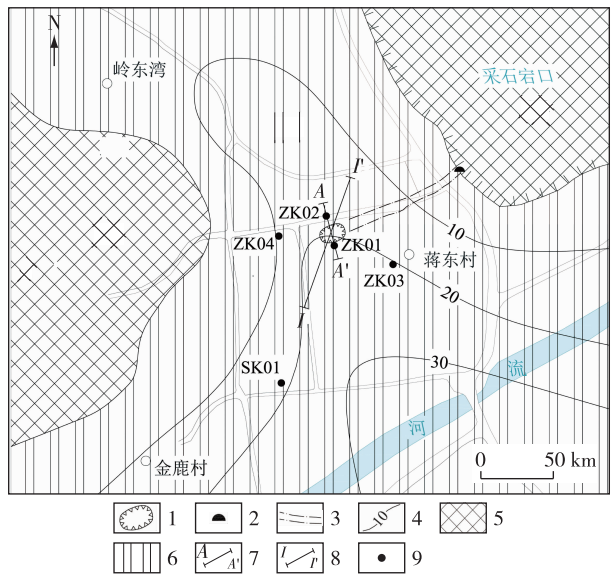
2 岩溶塌陷形成地质条件

可溶岩、岩溶洞隙、一定厚度的盖层及地下水活动是岩溶塌陷形成的基本条件^[9],这些条件相互联系、共同作用,是造成岩溶塌陷的决定性因素。

2.1 碳酸盐岩化学特征

塌陷区位于乌峰顶背斜南翼,地层呈单斜构造,倾向 SE,倾角 7°~17°,岭东湾—蒋东村一线的山间沟谷被第四系覆盖,两侧出露黄龙组灰岩(图 2)。黄龙组为一套灰色、浅灰色、肉红色厚层微晶灰岩、生物碎屑灰岩,底部为粗晶灰岩,岩性较稳

定,厚度 100~130 m,是研究区东部灰岩矿山开采的主要层位。



1.岩溶塌陷坑;2.溶洞洞口;3.管道状溶洞;4.覆盖层厚度等值线,m;5.裸露型碳酸盐岩;6.覆盖型碳酸盐岩;7.工程地质剖面;8.高密度物探剖面;9.工程地质钻孔

图 2 蒋东岩溶塌陷区地质图
Fig. 2 Geological map of the karst collapse area in Jiangdong Village

本次研究分别采集 ZK01 钻孔和 ZK02 钻孔不同深度的样品进行了化学成分测试(表 1)。由表 1 可知,区内黄龙组灰岩质纯致密,CaO 含量>53%,酸不溶碎屑颗粒物含量<5%,CaO/MgO 值均>100。根据易溶性试验结果,碳酸盐岩的相对溶解速度随 CaO/MgO 值增大而加快^[10],在构造、地貌、

气候等条件相近的情况下,灰岩岩溶率普遍较高,野外地质调查结果较好地验证了这一结论。质纯、层厚、结晶颗粒微小的碳酸盐岩最有利于岩溶发育,区内溶洞(如林屋洞、归云洞、玄阳洞等)、落水洞、地表深宽溶沟等规模较大的岩溶形态大多发育于黄龙组、船山组、栖霞组质纯灰岩中^[11]。

2.2 岩溶洞隙发育程度

研究区气候湿热,断裂发育,灰岩质纯、层厚,有利于岩溶发育。由钻探、物探与采石场开采面揭示的溶洞特征统计结果(表 2)可知:垂向上,该区岩溶发育具有明显的分层性,可分为 2 个岩溶发育层。浅层岩溶发育层深度<10 m(距基岩面),对应标高为-2~-16 m,钻孔遇洞率>80.0%,浅层岩溶率达 55.0%,主要岩溶形态包括溶洞、溶沟、溶槽、溶隙、溶孔等,其中溶洞一般高 0.3~2.1 m,洞内充填或半充填粉质黏土或淤泥质黏土,溶隙多为开口型,宽度变化较大,大者宽达 0.5 m。深层岩溶发育层深度为 20~30 m(距基岩面),溶洞发育程度较浅层明显减弱,但在采石岩口及钻孔内可见多个呈水平延伸的管道状溶洞,直径 0.5~4.0 m,这些管道状溶洞构成了该区岩溶管道系统,是岩溶水的重要导水通道和存贮空间。通过钻探、物探等手段,证实在塌陷点盖层下发育开口型溶洞,直径约 6.0 m,深部发育 1 条管道状溶洞,通过岩溶裂隙与上部开口型溶洞连通,并向东延伸至乌峰顶采石岩口(图 2)。由于溶洞充水,在高密度电法物探剖面上呈不规则圆形低阻(图 3)。在该塌陷发生前,开采面上的溶洞口涌出大量泥砂和水(图 4),显示岩溶塌陷与管道状溶洞的充填物流失密切相关。

表 1 研究区碳酸盐岩主要化学成分分析结果
Table 1 Analysis results of main chemical composition of carbonate rocks in the study area

样品编号	含量/%								CaO/MgO
	Al ₂ O ₃	CaO	CO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	SiO ₂	酸不溶物	
ZK01-1	0.72	53.39	40.94	0.37	0.28	0.015	3.11	4.10	190.68
ZK01-2	0.46	54.68	42.21	0.19	0.24	0.003	1.42	1.49	227.83
ZK02-1	0.98	54.91	42.82	0.52	0.40	0.006	2.90	3.90	137.28
ZK02-2	0.80	53.90	42.17	0.24	0.52	0.010	1.99	2.16	103.65

研究区浅层岩溶发育层和深层岩溶发育层并非孤立存在,区内广泛发育 NW 向及 NE 向断裂和岩溶裂隙,使浅层岩溶发育层与下部管道状溶洞连通,而

钻孔或采石场开采面揭露的溶洞、溶隙均为半充填或全充填,反映了该区岩溶洞隙连通性较好,有利于上覆松散沉积物的搬运、迁移,促进隐伏土洞的形成。

表 2 钻孔揭示的溶洞特征统计结果

Table 2 Statistical results of karst cave characteristics revealed by borehole

钻孔编号	孔深/m	孔口标高/m	灰岩埋深/m	溶洞特征			
				埋深/m	洞高/m	洞顶距基岩面深度/m	充填情况
ZK01	26.2	8.9	22.2	23.3~24.5	1.2	1.1	部分充填粉质黏土
ZK02	24.5	8.5	19.4			未见溶洞	
ZK03	24.5	7.3	20.1	20.4~20.7	0.3	0.3	充填淤泥质黏土
ZK04	17.5	10.5	10.2	10.4~12.5	2.1	0.2	充填淤泥质黏土
SK01	30.5	8.0	18.6	20.5~21.1	0.6	1.9	部分充填粉质黏土
				23.3~25.2	1.9	4.7	

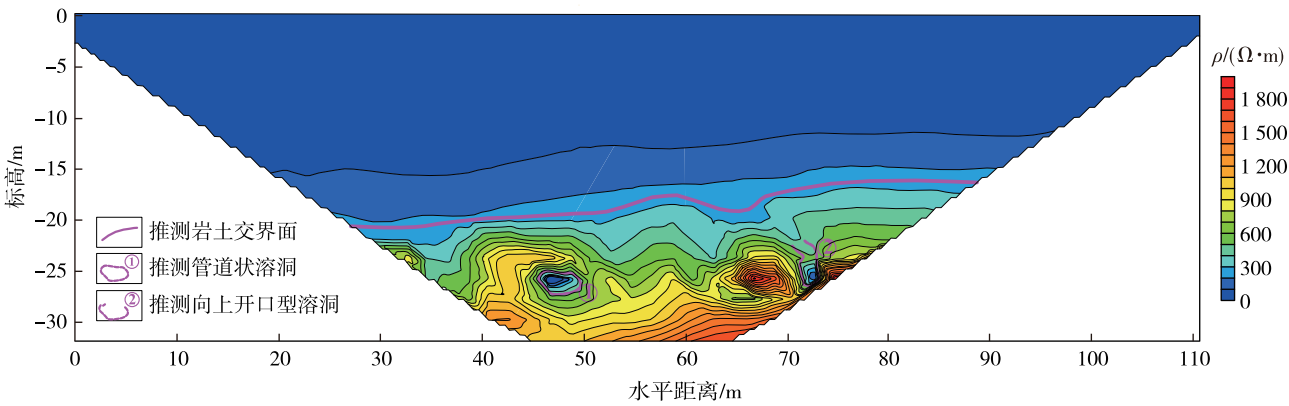


图 3 蒋东村岩溶塌陷区 1 号勘探线高密度电法解译剖面图

Fig. 3 High density electrical interpretation section of No.1 exploration line in karst collapse area of Jiangdong Village



图 4 开采面管道状溶洞

Fig. 4 Pipe-shaped caves exposed at the mining surface

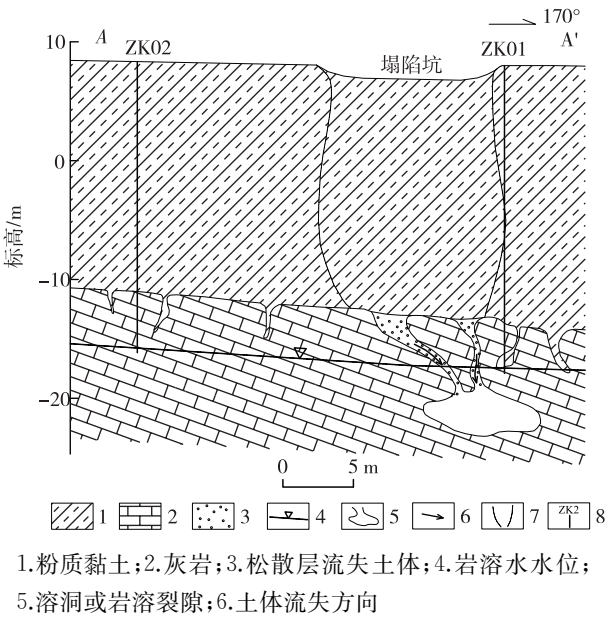


图 5 蒋东村岩溶塌陷区 A-A'地质剖面图

Fig. 5 A-A' geological section of karst collapse area in Jiangdong Village

2.3 覆盖层特征

覆盖层是土洞形成和塌陷发生的物质基础^[12]。蒋东村岩溶塌陷区位于山间沟谷(图 5),第四系厚约 20 m,总体具有东西两侧薄、中间厚的分布特点,岩性为晚更新世下蜀组(Q_{3x})褐黄色、棕红色、灰黄

色粉质黏土,上部为软塑-可塑态,下部为可塑-硬塑态,底部碎石直接覆盖在黄龙组灰岩之上。

下蜀组黏土在江苏南部地区广泛分布,许多岩溶塌陷皆与其相关,如仙林杨石桥岩溶塌陷^[13]、南京栖霞山岩溶塌陷^[14]等,该类黏土具有干缩湿胀、易崩解、多裂隙、易风化等特征,在天然状态下,不具有膨胀性,呈可塑-硬塑态,中等压缩性,强度较高,但随着土体下部含水率增高,膨胀土遇水软化(图 6),强度迅速降低^[15],这种力学性质的变化,不利于底部隐伏土洞顶板的稳定,易造成土洞顶板失稳。

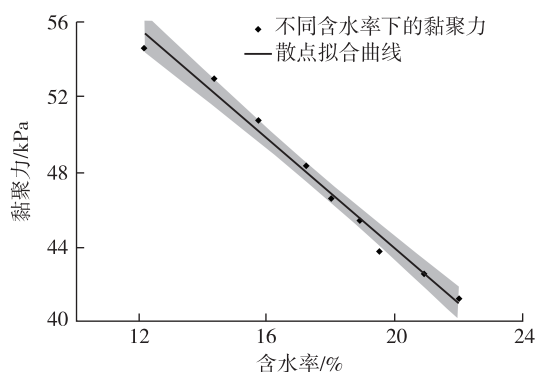


图 6 下蜀土黏聚力变化曲线图^[15]

Fig. 6 Cohesion variation curve of Xiashu soil under different water content^[15]

2.4 地下水活动

地下水活动是岩溶塌陷形成的重要动力因素,岩溶塌陷大多是因为水动力条件变化而形成的^[16-17]。改变水动力条件的作用有自然活动和人为活动,蒋东村岩溶塌陷发生前半个月基本无降雨,说明由降雨引起的水位变化不明显。因此,矿山开采是改变塌陷区水动力条件的主要外在因素。塌陷点东部乌峰顶灰岩矿山采用向地面及地下同时开采的“二元式”开采方式,历经数十年开采后,形成采石宕口,宕口最低标高-40.8 m。矿山开采对塌陷区地下水水动力条件的改变主要体现在两方面:一是开采过程中的爆破,加剧了岩体的裂隙发育程度,破坏了土体原始结构,促进矿坑周边岩溶及隐伏土洞发育;二是矿坑疏干排水降低了地下水水位,使塌陷区岩溶水水位埋深由开采前的一3 m下降至开采后的一20 m,岩溶含水层基本失去承压性,水位大幅下降引起区域地下水流动场的剧烈变化,造成塌陷区水力梯度增大,径流排泄加快,地下水溶蚀、渗透能力增强,有利于地下水对覆盖

层松散层土体颗粒的潜蚀搬运。

3 形成机理

形成岩溶塌陷的诱发因素有两方面^[18]:一是由于岩溶的自然演化,空洞顶部厚度逐渐变薄,通过塌陷完成地下向地表的转化过程;二是人为因素,如抽排水、爆破、加载、振动等。蒋东村岩溶塌陷坑距东部乌峰顶灰岩矿山不足 90 m,受矿山开采影响较大,矿山开采过程中的开挖、抽排水、爆破振动破坏了区域地下水系统和岩溶管道系统的天然稳定性,发生塌陷前,连接塌陷区及采石宕口的管道状溶洞地下水大量、快速流出,是造成岩溶塌陷的根本原因。

研究区矿山开采诱发岩溶塌陷可分为两阶段:第一阶段是灰岩矿山开采深度在 20 m 以上,受矿坑排水影响,矿坑周边水力梯度增大,地下水渗流对岩土体的溶蚀、潜蚀作用增强,加快了对岩溶洞隙充填物掏空、搬运能力,较天然状态,岩土接触面土洞的发展速度加快,但此时岩溶水仍处于承压状态,水位位于基岩面之上,地下水对土体的渗流潜蚀缓慢,土洞规模普遍较小,一般不会造成土体结构破坏。第二阶段是矿山开采至 20 ~ 30 m 深度后,灰岩中多个管道状溶洞被集中揭露,封闭管道与外界通道被打开,但由于管道内充填大量饱水粉质黏土,具有一定的阻塞性,水、土充填物不会立即流出,暂保持初期阶段的“稳定性”。在矿山爆破开采产生的振动作用下,管道内水、土充填物受到扰动,土体的物理力学性质发生变化,阻塞强度逐渐减弱,在已形成的水头差作用下,当稳定相持状态被破坏时,水、土充填物瞬时涌出,管道内重力流水位迅速下降产生瞬时的真空状态,水面对土洞顶板的真空吸蚀作用导致松散土体快速、大量流失,土洞规模迅速扩大,在重力作用下最终发生塌陷。

综上所述,通过分析岩溶塌陷形成条件和诱发因素,从致塌作用角度可将蒋东村岩溶塌陷定义为真空吸蚀-重力致塌模式。

4 岩溶塌陷力学模型

4.1 模型概化与假设

在黏聚力较强的黏土盖层区,岩溶塌陷的本质是土洞顶板土体剪切变形破坏。根据岩溶塌陷形成的地质条件,对蒋东村岩溶塌陷进行力学模型概化(图 7),并作假设:上部为开口型圆柱状溶洞,侧

力学指标如表 3 所示。塌陷点下伏开口型柱状溶洞直径为 6 m,下部管道状溶洞平均直径为 3.8 m,倾角 77°,塌陷点至管道状溶洞出水口水平距离 90 m。塌陷时当地气压为 100.8 kPa,地表建筑物为 2 层或 3 层楼房,荷载约 600 kN。

表 3 塌陷区覆盖层土体物理力学指标统计结果

Table 3 Statistical results of physical and mechanical indexes of overburden soil in karst collapse area

指标	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$W/\%$	$\varphi/^\circ$	c/kPa	K_0	f_K
结果	19.3	25.6	9.0	35.0	0.5	0.75

注: γ 为重度; W 为天然含水率; φ 为内摩擦角; c 为黏聚力; K_0 为侧压力系数; f_K 为坚固性系数。

将以上参数代入公式(1)~(6),计算覆盖层塌陷体的致塌力和抗塌力。

$$F_{\text{致}} = G + U + P_1 + P_2 = 13\,335.4 \text{ kN}$$

$$F_{\text{抗}} = f = 11\,940.7 \text{ kN}$$

经计算, $K = F_{\text{致}}/F_{\text{抗}} = 1.17 > 1$,塌陷体处于不稳定状态,必然发生剪切破坏,形成地表岩溶塌陷坑,说明利用极限平衡理论建立的真空吸蚀-重力致塌力学模型与岩溶塌陷实际情况较吻合,再次验证了蒋东村岩溶塌陷的致塌模式为真空吸蚀-重力致塌。

5 结论

(1)蒋东村岩溶塌陷位于山间洼地,下伏黄龙组质纯灰岩,深层岩溶发育层和浅层岩溶发育层相互连通,有利于浅部松散层土体颗粒向深部管道状溶洞搬运、迁移,促进土洞发育。

(2)蒋东村岩溶塌陷区第四系下蜀组覆盖层干缩湿胀、易崩解,遇水后力学性质弱化,不利于隐伏土洞顶板的稳定性。

(3)矿山开采是蒋东村塌陷形成的主要外在因素,深部管道状溶洞被揭露后,内部重力水流瞬时流出,水位快速下降,产生真空负压吸蚀力,土洞规模迅速扩大,发生塌陷变形破坏。

(4)真空负压吸蚀力和覆盖层土体自重是岩溶塌陷的主要致塌力。通过真空吸蚀-重力致塌力学模型计算的塌陷体稳定系数为 1.17,处于不稳定状态,计算结果基本符合实际情况。

参考文献

[1] 徐卫国,赵桂荣.试论岩溶矿区地面塌陷的真空吸蚀作用[J].地质论评,1981,27(2):174-181.
[2] 徐卫国,赵桂荣.论岩溶塌陷形成机理[J].煤炭学报,

1986(2):1-11.

- [3] 康彦仁.岩溶塌陷的形成机制[J].南方国土资源,1989(2):83-90.
[4] 何宇彬,徐超.论喀斯特塌陷的水动力因素[J].水文地质工程地质,1993,20(5):39-42.
[5] 丁庆忠.弱透水盖层岩溶塌陷的水-气压力致塌机理物理模型研究[D].成都:成都理工大学,2016:32-41.
[6] 谭鉴益.坛状圆柱状岩溶塌陷预测模型与分析[J].水文地质工程地质,2001,28(4):19-22.
[7] 王斌,李治广,董昕,等.岩溶塌陷的致塌力学模型研究——以泰安市东羊娄岩溶塌陷为例[J].自然灾害学报,2011,20(4):119-125.
[8] 武鑫,王艺霖,黄敬军,等.江苏徐州地区岩溶塌陷致塌力学模型及水位控制红线[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(2):67-77.
[9] 康彦仁.岩溶地面塌陷的形成条件[J].中国岩溶,1988,7(2):9-14.
[10] 杨永革,赵毅斌,陈静,等.江西景德镇城区岩溶塌陷地质特征及防治建议[J].华东地质,2017,38(4):306-313.
[11] 车增光,郭慧,王文庆,等.苏南地区岩溶地质生态环境调查评价报告[R].南京:江苏省地质调查研究院,2017:49-50.
[12] 韩淑明,严新添.广西岩溶塌陷类型、影响因素、成因机制及其防治措施[J].资源调查与环境,2012,33(2):130-135.
[13] 刘占东,庞炳乾,杨振务,等.南京东郊仙鹤门地区供水水文地质详勘报告[R].南京:江苏省地质局水文地质队,1978:47-49.
[14] 朱锦旗,朱兴贤.栖霞山岩溶地面塌陷的成因演变及防治措施[J].中国地质灾害与防治学报,1999,10(2):53-57.
[15] 黄丽华.镇江地区下蜀土抗剪强度水敏感性的试验研究[J].山西建筑,2019,45(15):61-62.
[16] 张伟.抽水岩溶地面塌陷的形成与防治[J].河北地质学院学报,1996,19(1):46-51.
[17] 何宇彬.喀斯特塌陷机制研究[J].上海地质,1993(2):54-64.
[18] 谷永磊.新建铁路线路方案岩溶塌陷灰色模糊综合评判分析[D].北京:北京交通大学,2006.
[19] 王滨,贺可强.岩溶塌陷临界土洞的极限平衡高度公式[J].岩土力学,2006,27(3):458-462.
[20] HE K Q, WANG B, ZHOU D Y. Mechanism and mechanical model of karst collapse in an over-pumping area[J]. Environmental Geology, 2004, 46(8):1102-1107.

Study on geological conditions and formation mechanism of karst collapse in Jiangdong Village, Jinting Town, Suzhou City

CHE Zengguang^{1,2}, LIU Hong^{1,2}, YU Yongxiang^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, Ministry of Land and Resources, Nanjing 210018, Jiangsu, China*; 2. *Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, Jiangsu, China*)

Abstract: By means of field geological survey, drilling, rock and soil sample testing, the geological conditions and formation mechanism of karst collapse in Jiangdong Village, Jinting Town, Suzhou City were studied in this paper. The carbonate rock in Jiangdong Village is characterized by pure quality, thick layers and high degree of karst development, with a relatively thin quaternary overburden of which the mechanical strength decreases greatly when it is exposed to water. These are internal geological conditions for the formation of karst collapse, and mining is the external inducing factor for the formation of collapse. The collapse model can be generalized as vacuum erosion-gravity collapse, which is mainly caused by vacuum negative pressure erosion-induced by gravity flow and rapid drop of water level in the cave pipe and the self-weight of overburden soil. According to the geological conditions and the induced factors of the collapsed area, a mechanical model of vacuum erosion-gravity induced collapse based on limit equilibrium theory was established. The calculation result of the model shows that the stability coefficient ($K > 1.0$) of the collapsed body is bound to produce shear deformation and failure during the formation process of vacuum erosion. The model calculation result is in line with the actual situation of karst collapse.

Key words: karst collapse; formation mechanism; vacuum erosion; mechanical model; stability coefficient