

文章编号: 1004 - 4574(2011)04 - 0119 - 07

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

王 滨^{1,2,3} 李治广¹ 董 昕¹ 陈 立³

(1. 石家庄经济学院 工程学院, 河北 石家庄 050031; 2. 河北省水资源可持续利用与开发重点实验室, 河北 石家庄 050031;
3. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061)

摘 要: 2003 年 5 月泰安市东羊娄村发生大型岩溶塌陷地质灾害, 仅塌陷坑面积就达 750m²。经调查研究, 真空吸蚀致塌和重力致塌是该岩溶塌陷形成的致塌力学机制, 致塌力主要为覆盖层土体自身重力和地下水快速下降过程中形成的真空负压吸蚀力。根据岩溶塌陷形成机理的分析结果, 分 3 部分建立了岩溶塌陷的致塌力学综合模型, 即基于普氏天然平衡拱理论的土洞极限平衡高度公式、基于极限平衡理论的桶状塌陷坑形成判别公式和基于莫尔 - 库伦强度理论的漏斗状塌陷坑形成判别公式。经东羊娄村岩溶塌陷后验分析, 计算结果与岩溶塌陷的实际情况基本吻合。

关键词: 岩溶塌陷; 形成机制; 力学模型; 泰安市; 东羊娄村

中图分类号: P642. 26

文献标志码: A

Study on mechanical model of karst collapse: a case of karst collapse in Dongyanglou Village, Tai'an City

WANG Bin^{1,2,3}, LI Zhi-guang¹, GONG Xin¹, CHEN-Li³

(1. Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China; 2. Key Lab of Water Recourses Sustainable Utilization and Exploitation of Heibei Province, Shijiazhuang 050031, China; 3. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: On May 31, 2003, a very big karst collapse with an area of 750 m² occurred in farmland east of Dongyanglou Village, Tai'an City, Shangdong Province, which damaged the farmland and caused very serious soil loss. According to geological investigation, the deadweight of cover-layer soil and differential atmospheric pressure caused by groundwater level falling were the primary collapse forces. In this paper, based on the equilibrium arch theory, the limiting equilibrium theory and the Mohr - Coulomb strength theory, the collapse mechanical model, which contains the height expressions of soil-hole, the discriminant of column shaped collapse pit and the discriminant of cone shaped collapse pit, was established. Meanwhile, an evaluation of Dongyanglou Village karst collapse was completed using this collapse mechanical model, and the results show that the model is in accord with fact.

Key words: Karst collapse; forming mechanism; mechanical model; Tai'an City; Dongyanglou Village

岩溶塌陷是我国主要的地质灾害之一, 在 20 几个省份均有发生。20 世纪 50 年代起, 我国学者就开始对岩溶塌陷进行了研究, 提出了真空吸蚀致塌理论, 丰富了潜蚀致塌理论, 并对重力致塌、冲爆致塌和振动致

收稿日期: 2010 - 04 - 06; 修回日期: 2011 - 03 - 09

作者简介: 王滨(1974—) 男, 副教授, 博士研究生, 主要从事地质环境及地质灾害研究。E-mail: 2020wb@163.com

通讯作者: 蔺文静, 博士研究生。E-mail: lwenjing1977@gmail.com

塌等进行了深入研究^[1]。由于岩溶塌陷成因复杂,影响因素众多,且具有隐伏性、突发性的特点,使得对致塌模型的研究一直处于探索阶段,缺乏成熟通用符合实际的致塌力学模型。谭鉴益^[2]曾利用土力学和水动力学原理,建立了广西某地坛状圆柱状岩溶塌陷力学预测模型;王建秀^[3]探讨并提出了“导水介质覆盖层的渗流场—应力场耦合的数学模型”和“阻水介质盖层的渗流场—强度弱化—压差场数学模型”的基本设想。王建霞^[4]利用普罗特尼可夫塌落拱理论、坍塌平衡法、顶板坍塌堵塞法、结构力学近似分析法等多种方法对大连金州岩溶塌陷的稳定性进行了分析和验证;王滨、贺可强^[5]根据渗压致塌综合效应利用极限平衡理论和土力学理论建立了岩溶塌陷的临界土洞极限平衡公式和判别模型,并对枣庄市和唐山市岩溶塌陷进行了验证分析。

本文在深入分析了泰安市东羊娄村特大型岩溶塌陷形成机理的基础上,基于真空吸蚀致塌力学机制和重力致塌力学机制,利用浅埋洞室平衡拱理论、极限平衡理论和莫尔-库伦土体强度理论分 3 步建立了岩溶塌陷的致塌综合力学判别模型,经东羊娄村特大岩溶塌陷后验分析,模型与塌陷实际情况基本吻合,为岩溶塌陷的定量化预测提供了理论依据。

1 泰安市东羊娄岩溶塌陷致塌机制

1.1 岩溶塌陷概况

泰安市旧县水源地岩溶塌陷始于 1988 年,塌陷范围涉及南、北许家埠,东西苑庄,圣元官庄及羊娄等 9 个自然村,近 15 km²,塌陷点 40 多处^[6]。2003 年 5 月 31 日凌晨 4 时,省庄镇东羊娄村东 300 m 的麦田里突发一处特大型岩溶地面塌陷坑,塌坑剖面呈漏斗状,平面为椭圆形,东西长 35 m,南北宽 27 m,坑深度 24 m (如图 1) 坑底见岩溶地下水,塌陷坑平面面积 750 m²,造成 1 万 m³ 土体流失^[6-8]。

1.2 岩溶塌陷的致塌机制分析

1.2.1 岩溶塌陷的形成条件

东羊娄村一带为典型的覆盖型岩溶发育区,盖层土体一般在 14 m 左右,主要为抗剪强度较低的粉质粘土,隐伏奥陶系灰岩和白云岩溶蚀强烈,岩溶强烈发育带集中在覆盖层以下 30 m 的范围内^[7]。开口岩溶洞隙和土洞发育,根据山东省第一地质矿产勘查院的物探结果^[6,8],仅在面积约 0.25 km² 的范围内就追索发现岩溶洞 25 个,推测土洞 11 个。强烈发育的覆盖型岩溶和厚度较薄的松散盖层土体为岩溶塌陷的形成准备物质条件。

东羊娄村地处旧县水源地降落漏斗范围内,该降落漏斗范围内第四系潜水基本处于疏干状态,岩溶地下水也由承压水变为无压水^[9]。根据调查^[6-7],2003 年 5 月份东羊娄村岩溶塌陷

之前,岩溶水被大量开采用于灌溉,塌陷区的机井每 km² 近 10 眼,高峰期开采量达 2.5 万 m³/d。由地下水监测资料可知,5 月 25 日至 31 日该区岩溶地下水位快速下降了 8.5 m,5 月 23 日,塌陷坑南约 600 m 处的饮用水供水井涌水量减少,并伴有浑浊现象,5 月 24 日,在岩溶塌陷的西侧即岩溶水运动的下游地区,岩溶水陆续出现浑浊现象,这些现象表明,抽水引起的地下水位快速下降为岩溶塌陷的形成准备了强大的动力条件,覆盖层土体发生破坏,土洞在持续扩展。

1.2.2 岩溶塌陷的致塌力

2003 年 5 月份岩溶塌陷产生之前,该区的第四系潜水处于疏干状态,而且没有发生大雨量降水,因此尽管岩溶地下水位快速下降,但因为雨水和潜水下渗补给岩溶水,所以潜蚀作用基本不对盖层土体产生破坏力。由岩溶塌陷坑侧壁土层剖面可知,东羊娄村岩溶塌陷处覆盖层土体主要为粉质粘土,具有较好的封闭性,在岩溶地下水位快速下降时容易形成真空吸蚀作用。根据陈国亮^[1]关于真空负压与覆盖层土体含水量成线性对应关系的研究成果,由塌陷区盖层粉质粘土的物理力学指标^[6](表 1),天然含水量为 18.3% ~ 30.8%,可知在地下水大幅下降时土洞或岩溶洞穴空腔内可以形成 20 ~ 70 kPa 的真空负压。

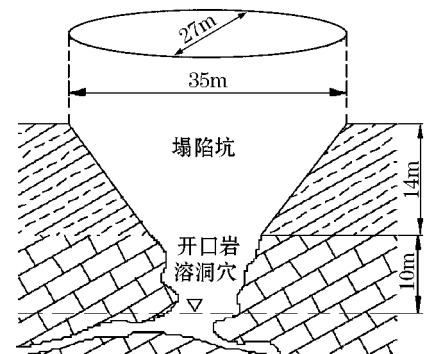


图 1 泰安市东羊娄村岩溶塌陷示意图

Fig. 1 Sketch of karst collapse in Dongyanglou Village, Tai'an City

由以上分析可知,真空吸蚀作用是该岩溶塌陷形成的主要作用模式,真空负压吸蚀力和覆盖层土体的自重是当地岩溶塌陷产生的主要致塌力,其致塌力学机制为真空吸蚀致塌和重力致塌。

2 岩溶塌陷致塌综合力学模型

2.1 塌陷模型概化与假设

对泰安市东羊娄村特大型岩溶塌陷进行概化,作如下假设:

(1) 将椭圆形塌坑假设为等效直径为 D 的圆形塌坑(如图2);

(2) 假设开口岩溶洞穴侧壁直立,洞穴跨度为 D' (如图2);

(3) 覆盖层土体的破坏符合莫尔—库伦强度准则;

(4) 开口岩溶洞穴上方覆盖层土体厚度为 h ,土洞高度为 h_1 ,土洞顶板以上盖层土体的厚度为 h_2 (如图2);

(5) 假设岩溶塌陷发生的整个过程经历了土洞形成、地表桶状塌坑形成和漏斗状塌坑形成3个连续发生的阶段(如图3),土洞形成即开口岩溶洞穴上方盖层土体破坏,在盖层土体内部形成跨度等于开口洞穴直径的以天然平衡拱为顶板的土洞(如图3(a));地表桶状塌坑形成即在外荷载的进一步作用下,土洞顶板土体沿平衡拱两侧至地表发生竖直剪切破坏,形成与开口岩溶洞穴直径相同的竖直桶状塌陷坑(如图3(b));漏斗状塌坑形成即桶状塌坑竖直侧壁发生剪切滑移破坏,形成最终的漏斗状岩溶塌陷坑(如图3(c))。

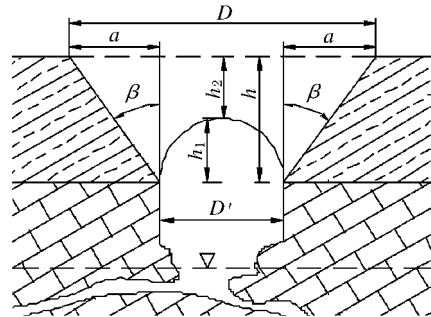


图2 泰安市东羊娄岩溶塌陷概化模型
Fig. 2 Simplified model of karst collapse in Dongyanglou Village, Tai'an City

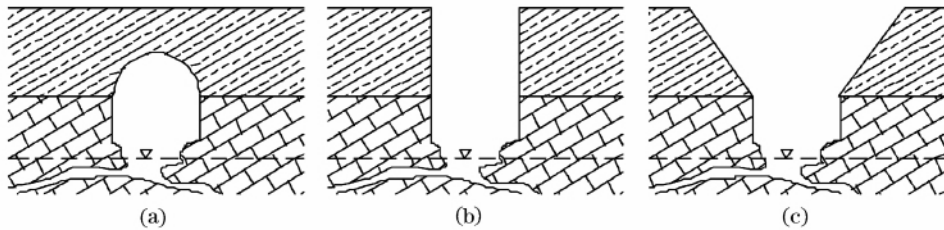


图3 泰安市东羊娄岩溶塌陷形成过程示意图

Fig. 3 Three forming processes of karst collapse in Dongyanglou Village, Tai'an City

2.2 致塌综合力学模型的建立

根据以上假设,分3步建立岩溶塌陷致塌的综合力学模型。第1步利用普氏天然平衡拱理论建立土洞极限平衡高度公式;第2步利用极限平衡理论建立桶状塌陷坑形成的判别公式;第3步利用莫尔—库伦强度理论建立桶状塌陷坑侧壁破坏漏斗状塌陷坑形成的判别公式。

2.2.1 基于普氏天然平衡拱理论的土洞极限平衡高度公式

根据普氏平衡拱理论,计算土洞形成时盖层土体天然平衡拱的高度^[5],即土洞的极限平衡高度,从而推算土洞顶板以上盖层土体的厚度。

因为地表塌陷坑剖面呈漏斗状,根据图2和普氏理论,计算覆盖层底部开口岩溶洞穴的直径如下:

$$D' = D - 2 \times a.$$

如图2 $a = h \cdot \tan \beta$ $\beta = 45^\circ - \frac{\varphi}{2}$ φ 为覆盖层土体的内摩擦角,则

$$D' = D - 2h \cdot \tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2}).$$

在土洞形成时期,盖层土体内部的压力拱仅为开口岩溶洞穴顶板以上盖层土体塌落造成,开口岩溶洞穴侧壁不发生滑动破坏,压力拱的跨度等于开口岩溶洞穴的跨度 D' ,覆盖层土体的坚固性系数为 f_k ,根据普氏

理论 ,得平衡拱的高度为

$$h_1 = \frac{D'}{2f_k} \tag{1}$$

因为岩溶塌陷不是线性的洞室 ,而是平面呈圆形的立体洞室 ,因此采用普氏理论的经验系数 0.828 将公式(1)修正 ,得土洞的极限平衡高度公式为

$$h_1 = 0.828 \cdot \frac{D'}{2f_k} \tag{2}$$

则土洞顶板上部覆盖层土体厚度 ,即土洞顶板至地表的盖层土体的厚度为

$$h_2 = h - 0.828 \cdot \frac{D'}{2f_k} ,$$

即

$$h_2 = h - 0.828 \cdot \frac{D - 2h \cdot \tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2})}{2f_k} \tag{3}$$

2.2.2 基于极限平衡理论的桶状塌坑形成判别式

根据极限平衡理论 ,计算土洞顶板土体破坏并在地表形成桶状塌陷坑的判别式^[10]。由东羊娄村岩溶塌陷的致塌机理分析可知 ,岩溶塌陷形成时 ,致塌力主要是盖层土体自重 G 和真空吸蚀形成的负压差 ΔP ,为均布荷载 ,方向均为铅直向下 ,抗塌力主要为盖层土体抗剪强度沿塌陷土柱周边形成的侧壁摩阻力 f ,方面为铅直向上(如图 4) ,则土洞顶板土体破坏的极限平衡方程为

$$f = G + \Delta P \cdot \frac{\pi D^2}{4} \tag{4}$$

根据图 4 ,计算塌陷土柱自重:

$$G = \gamma \cdot \frac{\pi D^2}{4} h_2 , \tag{5}$$

式中: γ 为覆盖层土体的重度 kN/m^3

在塌陷土柱任一深度 z 部位任取一高为 Δz 微圆柱体 ,由库仑强度理论知该微圆柱体侧面的摩阻力为

$$\Delta f = \pi D \cdot (k_0 \cdot \gamma \cdot z \tan \varphi + c) \Delta z \tag{6}$$

式中: c ——覆盖层土体的凝聚力 kPa ; k_0 ——覆盖层土体的侧压力系数。

沿塌陷土柱深度对 Δf 积分得塌陷体侧摩阻力为

$$f = \pi D \left[\frac{K_0 \cdot \gamma \cdot h_2^2}{2} \tan \varphi + ch_2 \right] \tag{7}$$

将式(5) ,(7)代入式(4)得到土洞顶板破坏的极限平衡公式 ,即地表桶状塌坑形成的极限平衡公式如下:

$$\gamma \cdot h_2 + \Delta P = \frac{4}{D} \left[\frac{K_0 \cdot \gamma \cdot h_2^2}{2} \tan \varphi + ch_2 \right] .$$

上式左侧为桶状塌坑形成的致塌力 $F_{致}$,右侧为抗塌力 $F_{抗}$,如果致塌力大于抗塌力 ,则土洞顶板即平衡拱上部土体发生破坏 ,形成地表桶状塌陷坑 ,所以基于极限平衡理论的桶状塌坑形成的判别式为

$$\gamma \cdot h_2 + \Delta P > \frac{4}{D} \left[\frac{K_0 \cdot \gamma \cdot h_2^2}{2} \tan \varphi + ch_2 \right] \tag{8}$$

2.2.3 基于莫尔 - 库伦强度理论的漏斗状塌坑形成判别式

土洞顶板土体破坏形成地表桶状塌陷坑后 ,侧壁直立 ,任取某一深度为 z 的水平面 ,分析桶状塌坑侧壁的应力状态 ,则可以近把其周围土体应力分布问题近似看作双向受压无限板孔的应力分布问题^[11] ,如图 5。 P 为作用于土体上的水平应力 ,其值为 $k_0 \cdot \gamma \cdot z$ θ 为与水平轴的夹角 b 为桶状塌坑的半径。

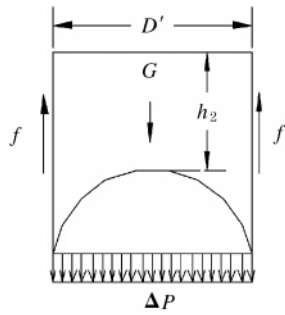


图4 桶状岩溶塌陷受力分析图

Fig.4 Force analysis of barrel-shaped karst collapse

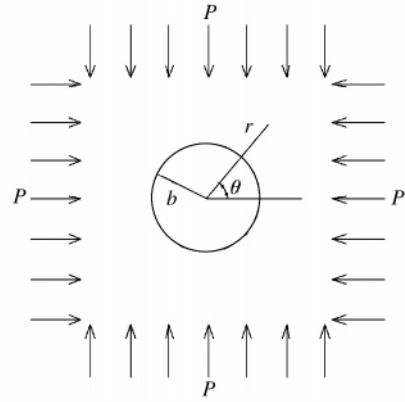


图5 塌陷坑周围土体应力分布示意图

Fig.5 Sketch of stress distribution of soil around

根据弹性力学理论,采用极坐标求解塌陷坑周围土体应力如下式:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= P \left[1 - \frac{b^2}{r^2} \right], \\ \sigma_\theta &= P \left[1 + \frac{b^2}{r^2} \right], \\ \sigma_{r\theta} &= \tau_{r\theta} = 0. \end{aligned} \tag{9}$$

式中: σ_r ——桶状竖直塌坑周围土体中的径向应力;

σ_θ ——桶状竖直塌坑周围土体中的切向应力;

$\sigma_{r\theta}$ ——桶状竖直塌坑周围土体中的剪切应力。

则当 $r = b$ 时,即在桶状竖直塌坑侧壁产生的应力为

$$\begin{aligned} \sigma_r &= 0, \\ \sigma_\theta &= 2P = 2k_0 \cdot \gamma \cdot z, \\ \tau_{r\theta} &= 0. \end{aligned} \tag{10}$$

也就是说,在塌陷坑侧壁处,切向应力 σ_θ 最大,径向应力 σ_r 为 0,剪应力 $\tau_{r\theta}$ 为 0, σ_θ 和 σ_r 为最大和最小主应力,即 $\sigma_1 = \sigma_\theta$, $\sigma_3 = \sigma_r$,将其代入莫尔—库伦理论土体极限平衡公式,得

$$\sigma_\theta = \sigma_r \cdot \tan^2 \left[45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right] + 2c \cdot \left[45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right]. \tag{11}$$

将式(10)代入式(11)得到桶状塌坑竖直侧壁土体破坏的极限平衡公式为

$$k_0 \cdot \gamma \cdot z = c \cdot \tan \left[45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right], \tag{12}$$

从而由式(12)可以计算出桶状塌坑侧壁直立稳定的临界深度为

$$h_{\max} = \frac{c \cdot \tan \left[45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right]}{k_0 \cdot \gamma}. \tag{13}$$

如果覆盖层土体的厚度 h 大于 h_{\max} ,则桶状塌坑侧壁土体将发生剪切破坏,形成漏斗状地表塌坑,因此,桶状塌坑侧壁土体破坏形成漏斗状塌坑的判别式如下:

$$h > \frac{c \cdot \tan \left[45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right]}{k_0 \cdot \gamma}. \tag{14}$$

综合式(3)、(8)、(14)得到岩溶塌陷致塌的综合力学判别模型为

$$\begin{cases} \gamma \cdot h_2 + \Delta P > \frac{4}{D} \left[\frac{K_0 \cdot \gamma \cdot h_2^2}{2} \tan \varphi + ch_2 \right], \\ h > \frac{c \cdot \tan \left[45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right]}{k_0 \cdot \gamma} \end{cases} \quad (15)$$

式中，

$$h_2 = h - 0.828 \cdot \frac{D - 2h \cdot \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}{2f_k}$$

3 东羊娄村岩溶塌陷后验分析

根据现场勘察和工程地质钻探相关资料,东羊娄村岩溶塌陷坑盖层土体主要为粉质粘土,层厚为 14 m,其相应物理力学性质指标^[6]如天然重度 γ ,内摩擦角 ϕ ,凝聚力 C ,侧压力系数 k_0 ,坚固性系数 f_k 如表 1 所示。

表 1 东羊娄村岩溶塌陷区粉质粘土物理力学指标值

Table 1 Physiomechanic indices value of silty clay in karst collapse area, Dongyanglou Village

指标	重度 γ (kN/m ³)	天然含水 量 W/%	天然孔隙 比 e	饱和度 Sr/%	标贯击数 N/击	内摩擦角 φ /(°)	凝聚力 C/KPa	侧压力 系数 k_0	坚固性 系数 f_k
数值	18	24.8	0.768	88	11	23	62	0.5	0.8

利用所建立的岩溶塌陷致塌综合力学判别模型,对该岩溶塌陷验证分析如下:

- (1) 地表塌陷坑平面形状为椭圆形,长轴 35m,短轴 27m,计算其等价圆形的直径 D 为 30.7m。
- (2) 利用表 1 中数据,根据式(15)进行计算如下:

天然平衡拱上部覆盖层土体的厚度为:

$$h_2 = h - 0.828 \cdot \frac{D - 2h \cdot \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}{2f_k} = 7.7.$$

计算土洞顶板土体的抗塌力和致塌力分别为

$$F_{抗} = \frac{4}{D} \left[\frac{K_0 \cdot \gamma \cdot h_2^2}{2} \tan \varphi + ch_2 \right] = 193.7 \text{ kPa},$$

$$F_{致} = \gamma \cdot h_2 + \Delta P = 138.6 \text{ kPa} + \Delta P.$$

对抗塌力和致塌力进行比较可知,如果在地下水位下降的过程中没有形成真空吸蚀力或形成的真空吸蚀力很小,则抗塌力远大于致塌力,土体将在天然平衡拱的状态下保持稳定,不会发生地表桶状塌陷坑。由表 1 可知,覆盖层土体天然含水量为 18.3%~30.8%,平均饱和度为 88%,根据陈国亮^[1]关于真空负压与覆盖层土体含水量成线性对应关系的研究成果,该区地下水位快速下降时土洞空腔内可形成 20~70kPa 的真空负压。由上述计算结果可知,当真空负压差 ΔP 大于 55kPa 时,致塌力将大于抗塌力,天然平衡拱上部土体会发生剪切破坏,并在地表形成桶状塌陷坑。这也再次验证泰安市东羊娄村东特大岩溶塌陷的致塌机理为重力致塌和真空吸蚀致塌。

计算桶状塌坑侧壁直立的稳定临界深度为

$$h_{max} = \frac{c \cdot \tan \left[45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right]}{k_0 \cdot \gamma} = \frac{62 \times \tan \left[45^\circ + \frac{23^\circ}{2} \right]}{0.5 \times 18} = 10.4 \text{ m},$$

则 $h = 14 \text{ m} > 10.4 \text{ m}$

由此判定实际深度为 14m 的桶状塌陷坑不能保持侧壁直立稳定,必然发生剪切破坏,最终形成漏斗状塌陷坑。

4 结论

(1) 泰安市东羊娄村岩溶塌陷位于旧县降落漏斗范围内,岩溶塌陷形成的根本原因是地下水的过量开采。在地下水持续下降过程中,真空吸蚀形成的负压差和覆盖层土体自重力构成岩溶塌陷的主要致塌力。

(2) 利用普氏浅埋洞室的天然平衡拱理论、极限平衡理论和莫尔-库伦土体强度理论建立的岩溶塌陷致塌综合力学模型,经东羊娄村特大型岩溶塌陷后验分析,计算结果与岩溶塌陷致塌机制和实际情况基本吻合,可以为该区岩溶塌陷的防治提供理论参考。

参考文献:

- [1] 陈国亮. 岩溶地面塌陷的成因与防治[M]. 北京:中国铁道出版社,1994:48-51
- [2] 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(4):19-23
- [3] 王建秀,杨立中,刘丹. 覆盖型岩溶区土体塌陷典型数学模型的研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,1998,9(3):54-59
- [4] 王建霞,李志杰,钟雪光. 有关岩溶塌陷稳定性评价的分析[J]. 西部探矿工程,2009(7):28-30
- [5] 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):458-463
- [6] 王明娟. 泰安市岩溶塌陷机理及监测预报研究[D]. 泰安:山东农业大学,2006:26-28
- [7] 高宗军,张富中,鲁峰. 山东泰安岩溶地面塌陷前兆及其预测预报[J]. 中国地质灾害与防治学报,2004,15(3):149-150
- [8] 鲁峰,戴忠全,张少妮. 高密度电阻率法在泰安市东羊娄村岩溶塌陷区的地质应用效果[J]. 山东国土资源,2006,22(8):49-50
- [9] 马振民,段琪庆,刘赠夕. 泰安岩溶水系统地下水动力环境演化规律研究[J]. 济南大学学报(自然科学版),2003,17(1):1-3
- [10] He Keqiang, Wang Bin, Zhou Danyun. Mechanism and mechanical model of karst collapse in an over-pumping area [J]. Environmental Geology, 2004, 46(8):1102-1107
- [11] 刘之葵,梁金城,黄英绶. 人工挖孔灌注桩的孔壁稳定性[J]. 矿产与地质,2003,17(5):648-650