

# 济宁市地质灾害的形成条件及 定量—半定量评价方法

贾德旺<sup>1</sup>, 刘东<sup>2</sup>, 郭泽华<sup>1</sup>, 路小慧<sup>1</sup>, 张文才<sup>1</sup>, 张俊业<sup>1</sup>

(1. 山东省鲁南地质工程勘察院, 山东 兖州 272100; 2. 辽宁工程勘察院, 辽宁 锦州 121000)

**摘要:**济宁市存在的易发地质灾害类型主要为崩塌、岩溶塌陷、采空塌陷及地面沉降等。在分析各类地质灾害的形成机制的基础上,探讨了地质灾害的判别方法,采用数学统计法、层次模糊数学评价、概率积分法及比拟法对地质灾害进行了定量—半定量评价,并提出相应的防治措施。

**关键词:**地质灾害;形成条件;判别方法;危险性评价;防治措施

中图分类号:P694

文献标识码:A

地质灾害是指由自然因素或者人为活动引发的危害人民生命和财产安全的山体崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地裂缝、地面沉降等与地质作用有关的灾害<sup>[1]</sup>,因其具有突发性和不可预见性,往往造成人员伤亡及财产损失,因此在建设项目地质灾害危险性评估工作中,采用何种评价方法及评估结论正确与否是工程建设顺利进行的重要依据。下面以济宁市较为常见且危害性较大的崩塌、岩溶塌陷、采空塌陷、地面沉降等地质灾害为例进行分析和评价。

## 1 崩塌

### 1.1 成因分析

崩塌(又称崩落、垮塌或塌方)是处于较陡斜坡上的岩土体在重力作用下突然脱离山体崩落、滚动、堆积在坡脚(或沟谷)的地质现象,济宁市境内存在的崩塌主要发生在岩体中。崩塌形成的条件有地质条件和外部条件2种。

(1)内部条件。坚硬的碳酸盐岩(如石灰岩、白云岩等)、砂岩、砂砾岩等是产生崩塌的物质条件,通常形成规模较大的岩崩。坡体中发育的节理、裂隙面、构造面、岩层界面、断层等,对坡体的不断切割、分离,为形成崩塌提供了良好的脱离母体的边界条件。坡度大于45°的高陡边坡,孤立山嘴或凹形

陡坡是崩塌形成的有利地形地貌条件。

(2)外部条件。当地震烈度大于7度时,地壳处于较不稳定状态,易诱发山体崩塌。崩塌较易发生在大暴雨、暴雨和长时间的连续降雨时期,受降水入渗产生孔隙水压力而形成。不合理的人工活动,如坡脚的开挖、爆破炸药的超量使用也是形成崩塌的外部条件。

### 1.2 灾害的判别

判定某一地区是否存在崩塌地质灾害隐患,大致可从以下几方面进行识别:①调查:进行实地调查和现场访问工作,调查有无崩塌灾害发生的历史记录。②地形地貌:当山体相对高差大,山体坡体大于45°、坡体成孤立山嘴或凹形陡坡时,可以判定存在崩塌地质灾害隐患。③结构构造:在实地调查时如发现岩体裂隙发育且规模较大,同时裂隙、裂缝多呈贯通切割之势,则具有发生崩塌的倾向。

### 1.3 危险性评价

崩塌地质灾害危险性评价指标可采用崩塌变形量、伤亡人数及直接经济损失来界定(表1)。评价时以3个指标中危害最大的作为评价级别,重点突出以人为本的原则,若灾害有可能造成人身伤亡时则直接判定为危险性大,伤亡人员、经济损失采用统计法计算得出,岩体崩塌量的计算在确定崩塌体边

\* 收稿日期:2008-03-15;修订日期:2008-08-26;编辑:曹丽丽

作者简介:贾德旺(1971-),男,山东临清人,工程师,主要从事水工环地质勘察与研究。

界的基础上采用楔形公式进行估算。岩体中相互交切、组合,可能或已经将坡体切割与其母体分离的构造面,就是崩塌体的边界面。

表 1 崩塌地质灾害危险性评价分级标准<sup>[1]</sup>

指标	危险性大	危险性中等	危险性小
变量量(万 m <sup>3</sup> )	>10	1~10	<1
伤亡人数(人)	≥1	无伤亡人员	
经济损失(万元)	>10	1~10	<1

注:据中国地质环境监测院,县(市)地质灾害调查与区划基本要求,2001 年。

### 1.4 崩塌地质灾害防治措施

崩塌防治以工程措施为主,修建拦截、排水构筑物可拦截降雨、震动后产生的坠石及疏导地表水;对突出或不稳定的大块岩石下面修建支挡工程或采取 SNS 柔性防护工程;对裂隙、溶洞进行水泥封抹并将危岩体进行削坡、平整。改大爆破采用多排孔微差爆破,以减少爆破对边坡的震动。进行植树造林活动,加大植被覆盖率,可有效增强坡体的抗冲刷性和整体性。

## 2 岩溶塌陷

### 2.1 成因分析

岩溶塌陷是指覆盖在溶蚀洞穴之上的松散土体,在外动力或人为因素作用下产生的突发性地面变形破坏。当隐伏于第四系之下的基岩埋藏深度小于 30 m 时,岩溶裂隙发育多为强烈,局部以溶洞为主,裂隙岩溶发育是塌陷形成的基础条件。第四系盖层厚度小于 10 m,且结构不均、土洞发育或较发育时,易产生塌陷,第四系覆盖层是产生塌陷的重要物质条件。当大流量抽水或抽水量不稳定引起地下水位剧烈振荡时、人为或天然作用引起地下水位频繁反复升降时、大雨或暴雨引起地下水位猛烈回升时以及地下水位降至第四系与基岩接触面附近并不断上下波动时,则易形成岩溶塌陷,地下水水位变幅过大是产生塌陷的主要动力来源。

### 2.2 灾害的判别

根据岩溶类型、岩溶发育程度、覆盖层厚度和覆盖层结构,进行岩溶塌陷活动程度判定(表 2)<sup>[2]</sup>。

### 2.3 评价方法

根据岩溶塌陷形成临界条件和影响因素分析,

用“发育度”、“潜势度”、“危险度”及“危害度”来表征岩溶塌陷的发育、发展和危害程度,选取“四度”的 9 个条件 16 种因子,采用层次模糊评价方法进行岩溶塌陷评价,各评价因子等级和赋值见表 3<sup>①</sup>。

表 2 岩溶塌陷发生可能性判定

塌陷的可能性	岩溶类型	岩溶发育程度	覆盖层厚度(m)	覆盖层结构
大	裸露型、覆盖型	发育,岩溶率 > 10%	<10	结构不均,土洞发育
中等		中等较发育,岩溶率 5%~10%	10~30	结构不均,土洞较发育
小		不发育,岩溶率 1%~5%	30~80	结构不太均匀,土洞不发育
无	埋藏型	极不发育,岩溶率 <1%	>80	厚度较大,结构均一

采用层次模糊数学评价模型,将评价目标(A)划定评价集为:

$$A = \{ \text{危害性小}(a_1), \text{危害性中}(a_2), \text{危害性较大}(a_3), \text{危害性大}(a_4) \}$$

相应的条件层(B)各评价指标对(A)的评价模糊子集为:

$$B_i = (b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, b_{i4})$$

相对应的因子层(C)评价指标对(A)评价模糊子集为:

$$C_i = (C_{i1}, C_{i2}, C_{i3}, C_{i4})$$

评价单元 j 所构成的相应模糊子集为:

$$B_j = \{ B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7, B_8, B_9 \} T$$

$$C_j = \{ C_1, C_2, C_3, C_4, \dots, C_{16} \} T$$

各评价因子的权重值见表 4<sup>①</sup>。利用计算机的栅格化功能,将预测区划分成一定数量的评价单元,并通过 GIS 从属性库中读出每个评价单元的所有指标的实际值,确定各评价指标的隶属函数值,然后列出每个评价单元的隶属函数矩阵 C<sub>j</sub>,各预测因子的权重 W<sub>c</sub>,运用层次模糊判别原理建立的计算模型:

$$A_j = WcC_j (j = 1, 2, 3, \dots, n)$$

由此计算出每个单元的模糊评价集:

$$A_j = \{ a_1, a_2, a_3, a_4 \}$$

按照隶属度最大原则,最大值则为该预测单元所对应的级别。最后根据计算结果,把相同隶属度的单元划分为同一级别,从而得出岩溶塌陷评价分区。

① 山东省鲁南地质工程勘察院,山东省枣庄市岩溶塌陷治理示范工程报告,2004 年。

表3 岩溶塌陷各评价因子等级及赋值

因子				分级和取值			
四度	条件层(B)	因子层(C)	代号	危害度小(a <sub>1</sub> )	危害度中(a <sub>2</sub> )	危害度较大(a <sub>3</sub> )	危害度大(a <sub>4</sub> )
发育度	塌陷发育条件(B <sub>1</sub> )	发育度(点/km <sup>2</sup> )	C <sub>1</sub>	0	0~10	10~100	>100
潜势度	岩溶条件(B <sub>2</sub> )	岩溶地层岩性	C <sub>2</sub>	寒武系石灰岩夹页岩	土峪段、五阳山段白云质灰岩、灰岩	北庵庄段白云质灰岩、灰岩	三山子组白云岩、白云质灰岩
		浅部岩溶发育程度	C <sub>3</sub>	较差	中等	较发育	强烈发育
	覆盖层条件(B <sub>3</sub> )	土层厚度(m)	C <sub>4</sub>	>12	12~8	8~4	<4
		土层岩性	C <sub>5</sub>	残积黏土	冲积黏土	含砾粉质黏土	粉土
		土层结构	C <sub>6</sub>	多元	二元	一元	混杂
地形条件(B <sub>4</sub> )	地形变化	C <sub>7</sub>	坡地	平坦地	低洼地	河谷地	
地表水条件(B <sub>5</sub> )	距地表水体距离(m)	C <sub>11</sub>	300~100	100~60	60~30	<30	
危险度	地下水条件(B <sub>6</sub> )	地下水水面与基岩面距离(m)	C <sub>8</sub>	>10	10~5	5~2.5	<2.5
		地下水水位变幅(m/a)	C <sub>9</sub>	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	>2
		地下水径流强度	C <sub>10</sub>	弱	中等	较强	强
	降水条件(B <sub>7</sub> )	降水(mm/a)	C <sub>12</sub>	>800	800~700	700~600	<600
	人为条件(B <sub>8</sub> )	距抽水井距离(m)	C <sub>13</sub>	>300	300~100	100~60	<60
抽水强度(m <sup>3</sup> /d)		C <sub>14</sub>	<500	500~1000	1000~1500	>1500	
危害度	损失程度(B <sub>9</sub> )	死亡人数(人)	C <sub>15</sub>	<3	3~10	10~30	>30
		直接经济损失(万元)	C <sub>16</sub>	<100	100~500	500~1000	>1000

表4 各评价因子权重分配表

目的层	条件层		因子层		
	条件(B)	权重(W <sub>B</sub> )	因子	一级权重	二级权重(W <sub>C</sub> )
岩溶塌陷评价	塌陷发育度(B <sub>1</sub> )	0.10	发育度	1.0000	C <sub>1</sub> 0.10000
	岩溶条件(B <sub>2</sub> )	0.20	岩溶地层	0.1250	C <sub>2</sub> 0.02500
			浅部岩溶发育程度	0.8750	C <sub>3</sub> 0.17500
	覆盖层条件(B <sub>3</sub> )	0.14	土层厚度	0.7270	C <sub>4</sub> 0.10178
			土层岩性	0.1818	C <sub>5</sub> 0.02545
			岩层结构	0.0912	C <sub>6</sub> 0.01277
	地形条件(B <sub>4</sub> )	0.07	地形变化	1.0000	C <sub>7</sub> 0.07000
	地表水条件(B <sub>5</sub> )	0.08	距地表水体距离	1.0000	C <sub>8</sub> 0.08000
	地下水条件(B <sub>6</sub> )	0.15	地下水水面与基岩面距离	0.4384	C <sub>9</sub> 0.06576
地下水水位变幅			0.2428	C <sub>10</sub> 0.03642	
地下水径流强度			0.3188	C <sub>11</sub> 0.04782	
降水条件(B <sub>7</sub> )	0.10	年大气降水量	1.0000	C <sub>12</sub> 0.10000	
人为条件(B <sub>8</sub> )	0.09	距抽水井距离	0.7500	C <sub>13</sub> 0.06750	
		抽水强度	0.2500	C <sub>14</sub> 0.02250	
损失程度(B <sub>9</sub> )	0.07	死亡人数	0.5000	C <sub>15</sub> 0.03500	
		直接经济损失	0.5000	C <sub>16</sub> 0.03500	

## 2.4 岩溶塌陷地质灾害防治措施

(1)控水措施。①地表水防水措施:防地表水进入塌陷区,可以采取清理疏通河道,加速泄流,减少渗漏;对漏水的河、库、塘铺底防漏或人工改道;严重漏水的洞穴用黏土、水泥灌注填实等措施。②地下水控水措施:根据水资源条件,规划地下水开采层位、开采强度、开采时间,合理开采地下水,加强动态监测。危险地段对岩溶通道进行局部注浆或帷幕灌浆处理。

(2)工程加固措施。①清除填堵法:适用于大面积的塌陷治理。②跨越法:用于较深大的塌坑。③夯填法:用于土体厚度较薄、地形平坦地段的塌陷坑。④充填注浆法:用于埋深较深的溶洞。⑤深基础法:用于深度较大,不易跨越的土洞,常用桩基工程。⑥旋喷加固法:浅部用旋喷桩形成“硬壳层”(厚10~20m即可),其上再设筏板基础。

## 3 采空塌陷

### 3.1 形成条件及灾害确定

煤层开采后,由于岩体内部形成一个空洞,使其

天然应力平衡状态受到破坏,引起应力重新分布,产生局部的应力集中。当采空区面积较大,围岩强度不足以抵抗上覆岩土体重力时,顶板岩层内部形成的拉张应力超过岩层抗拉强度极限时产生向下的弯曲和移动,进而发生断裂、破碎并相继冒落。随着采空范围不断扩大,采空区顶板在应力作用下不断发生变形、破裂、位移和冒落,自下而上出现冒落带、裂隙带和下沉带,结果在地表形成采空塌陷。地下煤层开采是造成区内采空塌陷形成的主要根源。当评估区内隐伏有含煤地层并具可采价值时,一般情况下可将采空塌陷作为评估灾种。

### 3.2 评估方法

(1)充分采动时地表任意点塌陷预测采用概率积分法对本矿井采空塌陷和移动变形进行预测。该方法的基本原理为:将整个开采过程划分为无限个微小单元,开采过程中对地面的影响等于各个单元开采后对地面的影响之和。采空塌陷预测采用以下公式计算:

$$W_{(x,y)} = \iint f \frac{qmc\cos\alpha}{\gamma^2} \exp\left\{-\frac{\pi}{\gamma^2}[(X-s)^2 - (Y-t-d)^2]\right\} dF$$

表 5 砖石结构建筑物的破坏(保护)等级和地质灾害危险性预测评估标准<sup>[3]</sup>

破坏(保护)等级	建筑物可能达到的破坏程度	地表变形值			处理方式	地质灾害危险性分区
		倾斜 T (mm/m)	曲率 K (mm/m/m)	水平变形 ε (mm/m)		
I	墙壁上不出现或仅出现少量宽度小于 15mm 的细微裂缝	≤3.0	≤0.2	≤2.0	不修或小修	小
II	墙壁上出现 16~30mm 宽的裂缝等	3.0~10.0	0.2~0.6	2.0~6.0	中修	中
III	墙上严重倾斜、错动、外鼓或内凹等	>10.0	>0.6	>6.0	大修或重建、拆除	大

### 3.3 防治对策

①与矿方协商留设保护煤柱及进行压覆矿产资源调查。②合理布置工作面,使地表移动变形减至最小。如可采取工作面联合开采和协调开采等措施。③对村庄下的地下煤层采取条带开采和离层注浆技术结合,最大限度地减缓地表下沉。④建立完善的地表移动监测系统。

## 4 地面沉降

### 4.1 地面沉降成因分析

当第四系承压水头降低后,使含水层颗粒间的自然相对均衡承受压力状态遭受破坏,为使承受力平衡,地下水所承受的那部分力转嫁于含水层骨架,

式中: $\gamma$ — $H/\text{tg}\beta$ ;  $H$ —地面上任意计算点( $X, Y$ )与煤层上微元点( $s, t$ )标高差(m);  $d$ —开采影响传播方向向下山方向的偏移量。

(2)充分采动时地表最大水平移动和变形值预测。最大下陷值: $W_{\max} = \eta m \cos\alpha$  (mm); 最大倾斜值: $T_{\max} = W_{\max}/\gamma$  (mm/m); 最大曲率值: $K_{\max} \pm 1.52 W_{\max}/\gamma^2$  ( $10^{-3}/\text{m}$ ); 最大水平移动值: $U_{\max} = b \cdot W_{\max}$  (mm); 最大水平变形值: $\varepsilon_{\max} = \pm 1.52b \cdot W_{\max}/\gamma$  (mm/m); 主要影响正切角: $\text{tg}\beta = H/\gamma$

式中: $m$ —平均开采厚度(mm);  $\alpha$ —煤层倾角(度);  $\gamma$ —主要影响半径(m);  $\eta$ —下陷系数(一般取 0.6~0.8);  $b$ —水平移动系数(一般取 0.25~0.35);  $H$ —开采深度(m);  $\beta$ —主要影响角( $70^\circ \sim 85^\circ$ )。

根据上述计算公式,得出可采煤层全部开采后的地表变形特征值(表 5),如果有多层可采煤,则运用分层叠加原理。依据最大下沉值、最大倾斜值及最大水平变形值 3 项指标,分级采取就高不就低的原则,3 项指标中符合 1 项即为相应的危险性分区。

造成孔隙减小,含水层密度变薄,这样就产生了地面沉降,另外黏性土释水后,垂向压缩产生塑性变形,导致永久性地面沉降。

### 4.2 判别方法

根据地面沉降的形成机理,具有较大可压缩性土层是产生地面沉降的物质基础条件,地下水的超量开采造成承压含水层水位大幅下降是引起地面沉降的外部重要因素。评价区内具备上述两种因素时可判定有发生地面沉降的可能。

### 4.3 评价方法

当评价场地具有与济宁城区相似的地层条件时,选取比拟法进行评价,济宁城区松散层厚度 220~300 m,砂层厚度 30~60 m,原始水位 7 m,动水位

60 m,降深53 m,在大量超采地下水的情况下,目前降落漏斗中心最大沉降值为0.335 m,由此可计算出地下水位降深1 m时单位土层压缩变形量为 $2.43 \times 10^{-5}$  m。根据评估区内第四纪地层厚度及拟计算的降深,从而推算出该区域某一水位降深时产生的地面沉降量。即沉降量值等于第四纪地层厚度值、水位拟降深值及单位土层压缩变形量的乘积。

#### 4.4 防治对策

地面沉降的发生与否主要取决于对地下水的开采量,因此遏制地面沉降主要是:控制地下水的开采量,逐步建立和完善沉降监测系统;节约用水,提高

水的重复利用率;调整供水结构,用地表水部分取代地下水。针对已发生的地面沉降可采取开辟新的水源地及调整开采布局,或者对深层地下水进行人工回灌等措施。

#### 参考文献:

- [1] 段永侯,罗元华,柳源,等. 中国地质灾害[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1993.
- [2] 张梁,张业成,罗元华. 地质灾害灾情评估理论与实践[M]. 北京:地质出版社,1998.
- [3] GB50021-2001,岩土工程地质勘察规范[S].

## Forming Condition and Quantitative Evaluation – Semi – Quantitative Methods of Geological Disasters in Jining City

JIA De – wang<sup>1</sup>, LIU Dong<sup>2</sup>, GUO Ze – hua<sup>1</sup>, LU Xiao – hui<sup>1</sup>, ZHANG Wen – cai<sup>1</sup>, ZHANG Jun – ye<sup>1</sup>

(1. Lunan Geo – engineering Exploration Institute, Shandong Yanzhou 272100, China; 2. Liaoning Engineering Exploration Institute, Liaoning Jinzhou 121000, China)

**Abstract:** Geological disasters in Jining city are mainly composed of collapse, karst collapse, the mined – out collapse and land subsidence. The forming mechanism of various geological disasters is analyzed, and the method for recognizing various geological disasters is studied in this paper. By using mathematical statistics, the level of fuzzy math assessment, the probability of integration and analogy law, quantitative – semi – quantitative evaluation of geological disasters is carried out, and relative protection countermeasures are put forward as well, which will provide reference for evaluating the danger of geological disasters in the future.

**Key words:** Geological hazards; forming condition; quantitative evaluation; evaluation method; protection countermeasures