

# 工程建筑安全与地质灾害的机理与防治

卢耀如

(上海同济大学,上海 200092)

[摘要] 叙述了对科学发展观的基本认识,介绍了地质灾害概况,对常见的急变性地质灾害进行了说明,对地质灾害的监测与预警系统的建立进行了阐述。

[关键词] 地质灾害;科学发展;工程安全

[中图分类号] P694 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)08-0022-08

## 1 科学发展观的基本认识

人类在地球上生活,对地球的开发与发展,必须认识自然演化过程中的的科学性和规律性。因此,应用科学发展观来掌握自然界的规律,进而考虑对工程的相互效应,是非常必要的。

工程安全与经济是传统性的问题,在经济取得快速发展的中国,这个问题显得更加重要。工程安全与经济,与地质条件具有密切关系,特别是能否有效防治地质灾害,密切涉及到工程的成败,下面就此问题予以探讨。

### 1.1 地球圈层结构

地球上存在着的圈层结构主要有:a. 岩石圈;b. 水圈;c. 大气圈;d. 生物圈<sup>[1]</sup>。

地球结构,有地壳、地幔和地核,而地壳及上地幔之间又有地震波速比上下层低的软流圈,软流圈中有气、固、液三相流,火山喷发的气、固、液体就是来自软流圈,岩石圈上板块就是在软流圈上漂移,软流圈也是很多地质灾害的渊源。

岩石圈中地层有火山岩(玄武岩等)、火成岩(花岗岩与侵入岩)和沉积岩。沉积岩中有碎屑沉积岩,如砂岩、页岩、泥岩等;化学沉积岩可分碳酸盐岩(石灰岩  $\text{CaCO}_3$ ,白云岩  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  等)和硫酸盐岩(石膏  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,硬石膏  $\text{CaSO}_4$  等)及卤化

物岩(盐岩  $\text{NaCl}$  等)等。在地质构造变动影响下,这些岩石圈中地层可发生上升与沉降、褶皱、断裂等现象。

水圈主要是水的赋存;大气圈是大气运动的场所;生物圈则是各种生物生存的空间。

实际上,在地球上这四个圈层不是截然分开的,而是相互交错依存,例如,岩石圈中裂隙、孔隙、洞穴就是水圈的构成部分。

### 1.2 地球对人类生存的资源性条件

地球上对人类生存的资源性条件,主要是水资源、土地资源、矿产资源、能源和生物资源<sup>[2]</sup>。

1)水资源:可分为地表水(河水、湖水等)、地下水(孔隙水、裂隙水、岩溶水等)及冰川(融雪水等)。

2)矿产资源:主要有黑色金属矿产——铁矿等;有色金属矿——铜、铅、锌等;非金属矿——石膏、岩盐等。我国已探明矿产资源有100多种。

3)能源:主要有煤炭、水能、核能、太阳能、风能、生物能源、地热能源。其中水能、太阳能、风能、地热能以及生物能源易于循环产生,或有很大的源泉,因而又称为可再生的能源。

### 1.3 地球对人类的灾害性条件

地球自然演化过程中,对人类生存与发展存在着的灾害性条件主要有地质灾害、气候灾害及生物灾害<sup>[3]</sup>。

[收稿日期] 2009-03-30

[作者简介] 卢耀如(1931-),男,福建福州市人,中国工程院院士,中国地质科学院研究员,同济大学教授,长期从事岩溶地质的科研和工程实践;E-mail:ylu@tongji.edu.cn

1) 地质灾害:主要有滑坡、崩塌、泥石流、地震裂缝、地膨胀、地面沉降、岩溶塌陷、地震、沙暴、荒漠化、石漠化等。

2) 气候灾害:主要有风灾、冰雹、台风、洪灾、旱灾、冰崩、霜冻、雪灾等。

3) 生物灾害:主要有霍乱、鼠疫、各种寄生虫病、病毒性感冒、SARS(非典型性肺炎)、肝炎、肺病等。

因此,人类在地球自然演化基础上进行建设,要合理利用资源,防止工程建设及各种开发中诱发不良的地质灾害。

例如修建大坝涉及到:a. 坝基及坝底稳定性;b. 是否会发生渗漏,能否把水蓄住;c. 需要根据地形、地质条件选择坝型,根据水能及开发目的,根据流域规划而定坝高。

对于水库库区涉及到:a. 库岸稳定性,由于库水涨落产生动水压力,诱发滑坡等地质灾害问题;b. 库内泥沙淤积,向库外下游排沙问题;c. 库内水质变迁问题。

水库蓄水后,也常诱发地震,基本上有3种类型:a. 库水及泥沙淤积破坏地壳稳定,发生断裂地震;b. 地下深处水汽化,积聚成高压气团,冲爆岩石发生地震;c. 浅层洞穴塌陷发生地震。

此外,铁路及公路建设(涉及线路、隧道、桥梁等)、城市建设(要注意地基基础的性质及力学强度、建筑物荷载产生的不良效应以及产生的不均匀沉降等)、矿山开采及地下空间开拓(要注意引起地面沉降、产生涌水涌沙,发生地下建筑物的断裂、滑动,高地应力产生岩爆、有害气体入侵、放射性超标影响人身健康)、机场、港口等各种建设,都需要考虑诱发地质灾害以及工程建设自身的工程安全问题。

#### 1.4 宇宙因素对地质灾害产生的影响

地球是太阳系的一个行星,必然会受太阳系的影响,也会受到宇宙上其他因素的影响。目前宇宙因素影响主要有4个方面:a. 太阳系方面;b. 小行星陨石;c. 银河系方面;d. 超新星爆炸,但是这几方面对地球的影响还研究不多<sup>[1]</sup>。

#### 1.5 地质生态环境

四个圈层的综合作用,及受地球内外因素复合影响结果,对人类生存最直接的因素,概括在地质—生态环境方面:土壤质量、大气质量、气候变化、水质变化、光合作用、食物链状况等方面。

总之,应用科学发展观,就是要认识自然界对人类生存与发展的两重性,一是有利的资源性条件;二是不利的灾害性条件。只有合理地开发利用资源性条件,有效地防治与减轻灾害性条件,才能取得可持续发展。可持续发展是人与自然的和谐共处的效应,要依靠建立在循环经济的基础上。人类发展过程中,首先是自然资源的循环利用,也就是有了循环经济的粗放行为。随着生产力的发展及科技的进步,当代循环经济是科学交叉与尖端科学的综合产物,今天的循环经济,是要建立在科学技术不断创新发展的基础上。只有应用科学发展观,才能使各项建设顺利进展,也才能保证工程安全。

## 2 地质灾害概况

### 2.1 不同地质环境的地质灾害分析

中国面积广阔,受地质构造的演化影响,有高山、高高原、中高山峡谷、低山丘陵、沙漠戈壁、内陆草原、黄土高原、岩溶高原山地、平原—大盆地、海岸带、岛屿等不同的地质环境,因而具有不同生态系统,也具有不同的地质灾害情况,有关情况综合于表1。

表1 中国不同地质—生态环境地区的主要地质灾害简表

Table 1 Main geohazards in different geo-ecological regions of China

地质—生态环境类型	总面积 ( $\times 10^4 \text{ km}^2$ )	主要灾害性环境问题
岩溶山地	>110	旱、涝灾害、塌陷、岩漠化、地震、滑坡、泥石流
黄土高原	40	边坡稳定、湿陷性、土壤侵蚀、干旱
平原地区	100	地下水位下降、洪涝、干旱、淤积、盐碱化
沿海与岛屿	>100	海水入侵、淤积、地面沉降
草原地区	100	干旱、地下水下降、草原退化、荒漠化
沙漠戈壁	90	干旱、水资源匮乏、沙漠化扩展
高山地区	100	冰融灾害、滑坡、泥石流
内陆盆地	>100	土壤侵蚀、洪涝、地下水位下降
高高原	>100	冰融灾害、泥石流、边坡稳定、土壤侵蚀

### 2.2 地质灾害与其他自然灾害的关系链分析

自然界中,存在的自然灾害是很多的,各种灾害

与地质环境密切相关,各种灾害之间也存在着密切的联系,特别是气候灾害与地质灾害关系密切。各种灾害之间,存在着复杂的灾害链。

由于西部高山的阻隔,所以来自东南部和南部输入中国大陆的水汽,明显受制横断山脉及喜马拉雅山强烈隆起的影响,使水汽多数仍折向中国东部

一带输出。出现水汽等值线的凹槽,反映天空水汽折而东移的情况。根据近 500 年来有关历史记载<sup>[4]</sup>,历史上水灾、旱灾分级及有关地质灾害情况列于表 2,中国西南地区 500 年来水、旱灾频率列于表 3。

表 2 中国水旱灾害及有关地质灾害分级表

Table 2 Classification of flood - drought and related geohazards

水灾旱灾分级	历史记载	近代降水与旱涝记述	诱发地质灾害情况
重水灾级	“大雨决旬”、“江水溢”、“大水溺死人亩无数”	日降雨量在 100 mm 以上,或连日暴雨,数万平方千米以上受灾	出现大型滑坡或滑坡群,大型塌陷或塌陷群,泥石流严重
轻水灾级	“春霖雨伤禾”、“秋雨害稼”、“大水”	日降雨量 50 mm 以上,或连日大雨,数千平方千米以上受灾	出现小型滑坡、塌陷或少量滑坡塌陷,少量泥石流发生
常年级	“有秋”、“大有年”、“风调雨顺”	降雨情况如常年日月雨量	无自然旱涝引起的滑坡与塌陷
轻旱灾级	“月旱”、“春旱”、“秋旱”	一月以上无雨或雨量极少,数千平方千米以上受影响	小型滑坡、塌陷,由地下水水位下降引起
重旱灾级	“春夏旱”、“赤地千里”、“河涸”、“塘干”、“井泉竭”	一季以上无雨,或雨量极少,数万平方千米以上受灾	地下水急剧下降引起重力塌陷群

表 3 中国西南地区水、旱灾频率统计简表

Table 3 Simple statistics of frequency related to flood - drought in southwest China

地区	水灾/%			旱灾/%			水旱灾害比	水旱灾害总频率/%
	重水灾	轻水灾	合计	轻旱灾	重旱灾	合计		
江汉平原	10.49	18.87	29.36	11.95	6.08	18.03	1.62	39.44
洞庭湖湖盆区	11.17	23.03	34.20	18.94	2.25	21.19	1.61	55.39
鄂西—湘西山地	7.82	22.08	29.90	14.30	5.54	19.87	1.50	49.77
广西盆地	5.05	21.38	26.43	19.95	3.53	23.48	1.12	49.91
滇东高原	10.02	27.62	37.64	11.99	3.96	15.95	2.35	53.59
滇西高原	10.38	29.19	39.57	11.22	4.65	15.87	2.49	55.44
贵州高原	4.20	15.75	19.95	13.53	6.66	20.19	0.98	40.14
渝东山地	10.14	31.02	41.16	21.81	13.54	35.35	1.16	76.51

### 2.3 地质灾害之间的关系分析

地震是地质灾害中危害性最大的灾害,也最难于进行预测预报,地震的发生是地壳运动的结果,也是地壳中相对稳定—不稳定—再相对稳定的不断往复过程中而发生的,地震的发生也是地应力的释放过程,不同震级的地震释放能量列于表 4<sup>[5]</sup>。

地震的发生常诱发滑坡、泥石流、岩溶塌陷等地质灾害。受印度洋板块每年以 4.8~6.4 cm/a 的速度向北挤压及太平洋板块碰撞影响,我国西南地区地震灾害是严重的,台湾及岛弧地带地震也频繁发生。

表 4 地震震级与能量释放对照表

Table 4 Contrast between earthquake magnitude and released energy

地震震级	地震释放能量 E/J	地震震级	地震释放能量 E/J
1	$2 \times 10^6$	5	$2 \times 10^{12}$
2	$6.3 \times 10^7$	6	$6.3 \times 10^{13}$
3	$2 \times 10^9$	7	$2 \times 10^{15}$
4	$6.3 \times 10^{10}$	7.75	$2.7 \times 10^{16}$
4.75	$8.4 \times 10^{11}$	8	$6.3 \times 10^{16}$

前已谈及,水库修建也会诱发地震,这里再作分析,我国一些大型水库诱发地震情况(根据夏其发的统计做些补充)<sup>[6,7]</sup>列于表 5。

表5 我国水库诱发地震情况略表

Table 5 Simple table related to earthquake to be caused in reservoirs

诱发地震的水库数/座	地震震级	震中地带岩性	震源深度/km	占诱发地震水库数的百分比/%
3	2.3~6.1	花岗岩	<2.5~5	15
2	3.7~4.8	混合岩	2.5~7.4	10
1	2.8	火山岩	0.27	5
14	1~4.7	碳酸盐岩	<0.5~6	70
20	1~6.1		<0.6~7.4	100

我国已修建大、中、小型水库近9万多座,总库容 $5\,548 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,一万九千多座大、中型水库中,明显诱发地震有20座,震源深0.5~6 km,其中14座在岩溶地区。水库诱发地震可分3种类型:荷载断裂型、气化爆裂型、洞穴坍塌型<sup>[8]</sup>。

**荷载断裂型:**由于几亿立方米至数百亿立方米的水库积蓄的水体及泥沙堆积,产生巨大的荷载,而且由于库水位的变化,这些荷载会产生动态的变化,因而影响到地下岩体的应力状态。原先平衡的状态产生地下应力的不平衡,原先不平衡的状态就变得更不平衡,其结果就使地下岩体产生破坏,断裂,挤压等现象而诱发地震。

**气化爆裂型:**由于库水的高水头作用,有条件的厚层含水层及相对弱透水层地带产生渗流场的变化,促使水流向深部渗透运动,至一定深度又可产生气化现象,向上运移的水汽可积聚于适宜的地下缝隙地带(或深部不大的热液洞穴通道中)。当压力不断增加至临界值时,可破坏周围岩体而诱发地震。

**洞穴坍塌型:**在岩溶地区,由于水库蓄水,使两岸及河床不深处的洞穴,在一定状态下受库水影响而壅高地下水位,并使洞内气体被压缩。当压力达到临界值时,就可使洞穴顶部(或洞壁)岩体遭受破坏产生塌陷;或者由于地下水的抬高降低浅部洞穴顶底板与洞壁的力学强度。导致产生岩溶塌陷而诱发地震。

水库诱发地震在国外也有不少例子:据1988年数据,在总数22 770座的世界大水库中,诱发地震的水库有116座,占0.34%。在诱发地震中属于洞穴塌陷型的震级一般不高,属于气化爆裂型的从理论上分析和一些例子上看震级也不太高。主要危险的是荷载断裂型(或构造应力断裂型)。

### 3 常见的急变性地质灾害

地质灾害有突发性的地质灾害,如地震、火山喷

发、滑坡、泥石流、岩溶塌陷等,突然性地质灾害,实际上也有缓变的过程<sup>[1,2]</sup>。

#### 3.1 滑坡和泥石流

滑坡和泥石流在全国各地都有发生,是比较常见的。历史上大滑坡早在两千多年前就有记载,如公元前186年武都山崩死760人,公元前100年秭归山崩死百余人。1933年四川松潘叠溪地震(7.5级)后产生约 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 大滑坡崩塌群,阻断岷江使蓄水 $4.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,溃决形成40多米水头的大水流体下泄。席卷岷江两岸11个村寨,死亡9 300人。

1965年云南禄劝在金沙江支沟产生约 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 滑坡,掩埋5个村寨,死亡443人。1967年四川雅砻江上唐古栋滑坡,体积 $6\,800 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,也造成重大损失。1982年7月四川万县地区暴雨,产生数万处滑坡与崩塌。1983年贵州盘县滑坡,体积达 $3\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

在长江黄金航道上,三斗坪至江津间690 km的干流两岸,即长江三峡水利枢纽的主干库区(库岸线长达1 380 km),已发现有不同规模的自然滑坡和危险变形体共1 500多处(不包括人工开挖等因素造成的危险边坡),据早期调查总体积估计在数十亿以上。

##### 3.1.1 滑坡及崩塌类型

滑坡类型有多种划分,按地层岩性可分:a. 土层滑坡;b. 沙砾石层滑坡;c. 基岩滑坡;d. 混合岩(土)滑坡等。

按滑动面性质可分:a. 陡顺层滑坡类型;b. 缓顺层滑坡类型;c. 陡向反裂隙滑坡类型;d. 缓反向裂隙滑动类型;e. 多种面组合滑动类型;f. 陡顺坡裂隙与缓层面滑动类型;g. 陡缓裂隙组合滑动类型;h. 陡层面与缓裂隙组合滑动类型。

滑坡产生,是有很多因素构成的,涉及岩体结构、水文因素、岩溶作用影响、力学性质变化、人类活动及工程因素等影响。

滑坡的发生有自然因素产生的,不少是人工因素而诱发的。工程施工的不当开挖,常是诱发滑坡发生的最主要的因素,具体地讲,人工诱发的滑动主要由以下因素产生:形成不稳定岩(土)体结构、增加不稳定岩(土)体滑力、降低不稳定岩(土)体的力学强度。

##### 3.1.2 滑坡的防治

首先应研究滑坡可能发生地带的有关地质条件及可发生滑坡的机理。主要研究内容:a. 岩(土)体

结构面变化;b. 可滑动岩(土)体的变形;c. 结构面物理力学性质的变化;d. 岩(土)体的化学组分与特征;e. 岩土体内外水流性质的变化;f. 水动力条件与水动态变化。

滑坡(崩塌)处理方法较多,可概括为下列几方面:

1)减少主滑力量——砍头:通过爆破等方法,减少滑动岩体主滑力( $F_{\sin}$ )。

2)增加抗滑力量——压脚:用石头压坡脚,设挡土墙、灌浆、抗滑桩等方法增加抗滑力( $F_{\cos}$ )。

3)提高滑动面力学强度——捆腰:用灌浆、切断滑动面、改变滑动带的力学性质等方法。使滑动体提高整体性和力学强度。

4)减少动水压力——排水:动水压力是诱发滑坡的重要动力,所以减少动水压力是非常重要的。笔者曾计算国外一水库工程,不同动力压力情况下边坡稳定系数值可相差0.3~0.5,所以适时降低动水压力是非常重要的措施。此外,地震附加动力也是千万滑坡发生的重要因素。

5)加强危岩体的稳定性:通过工程措施增加岩体完整性,特别是与稳定山体相联结,以避免岩体滑动与崩塌。主要用锚杆、锚索等。

### 3.2 泥石流灾害

泥石流发生地带多是岩石破碎、松散不稳定土、砾石分布地带,而且多数是在暴雨中发生大规模滑坡、崩塌后产生的。因此,对于松散地层或堆积体,需要做好护坡及有关加固处理,对破碎岩体,需要采取相应措施以防治。

#### 3.2.1 泥石流类型

可有多种划分,如按岩性可分为:基岩泥石流、土层泥石流、砂砾石泥石流和混合流泥石流。根据

流动物质组分可分为:黏性(泥质、泥石质)泥石流和稀性(泥石质、水石质)泥石流。根据泥石流爆发原因可分为:暴雨泥石流、绵雨泥石流、融雪泥石流、滑坡泥石流、地震泥石流和溃决泥石流(水库、尾矿坝等溃决造成)。

#### 3.2.2 泥石流的研究

最主要研究基本的地质结构、岩(土)体特性、地貌地形、水文过程、水动力条件、工程作用的效应等,具体研究泥石流发生的机理,涉及到岩土体力学特性、河床纵坡降、泥石流发生的过程、泥石流流速的变化、河床粗糙率、地形的变异等诸多因素。

#### 3.2.3 泥石流防治

泥石流防治的基本原则是:a. 控制地表水的汇聚;b. 控制地表松散固体流失;c. 分离水流与固体径流。

具体的工程措施可归纳为下列方面:构筑梯田、发展植被、拦流挡坝、挡土墙、谷坊烂泥坝、丁字坝、砌石鱼鳞坑、沉沙池、拦石场、泥石流排泄道、河流治理改道(小河)、人工淤积、潜坝、河道渡槽等。

但是,对泥石流的防治,从对可能发生泥石流的源头岩(土)体上着手是最重要的,例如,乌江渡水库小黄崖地带,乌江渡水库是我国岩溶地区目前最高的大坝(165 m),相隔一沟谷的小黄崖有很多垂直裂隙,与早期挖煤造成沉降有关。根据观测,库水变化与裂隙形变、沉陷密切相关,后采取人工爆破减压,以避免自身突然发生滑坡—泥石流,影响大坝的安全。

加固岩体也常用预应力锚杆。锚杆的抗滑锚固力一般可达190~498 kN,大的锚索可达2 000 kN,抗滑定系数为:

$$K_s = \frac{\sum_{i=1}^n (F_i \cos \theta_i + \sum_{j=1}^m R_{ij} \cos \alpha_{ij}) \tan \varphi_i - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{ij} \sin \alpha_{ij}}{\sum_{i=1}^n F_i \sin \theta_i} \quad (1)$$

式(1)中: $K_s$ 为抗滑安全系数; $F_i$ 为*i*条块岩体重力,N; $\theta_i$ 为*i*条块重力方向与垂直滑动面的法线之间的夹角; $R_{ij}$ 为*i*条块上*j*条锚杆锚固力,N; $\varphi_i$ 为*i*条块内摩擦角(滑面上); $\alpha_{ij}$ 为*i*条块*j*条锚杆轴线与滑面法线之间的夹角。

中国泥石流灾害是很多的,大的如四川会东县内金沙江上老君滩就是1932年泥石流造成的,洪水期为4个滩,枯水期连成一个滩,长4.35 km,落差

41.39 m,使江水的流速达6.3 m/s,浪高可达8.5 m。云南大盈江40多条支沟的泥石流,每年输入大盈江泥沙达 $360 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。梁河泥石流在1974年一次就冲毁盈江新城和旧城46.6  $\text{hm}^2$ 水田,受灾200  $\text{hm}^2$ 。

目前云南东川蒋家沟泥石流是很典型的,有大小冲沟198条,每年有10~20次泥石流,搬运量 $300 \times 10^4 \sim 500 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,流速达13~15 m/s。

### 3.3 岩溶坍塌

岩溶发育过程中会发生岩溶塌陷,这是地下发育洞穴过程中必然发生的现象<sup>[2]</sup>。

#### 3.3.1 天然岩溶坍塌类型

1)碳酸盐岩自身重力塌陷。可分为:a.梁状洞顶塌陷;b.穹状洞顶塌陷;c.多层洞顶塌陷。

2)土洞塌陷。碳酸盐岩层上覆土层由于下伏碳酸盐岩中洞穴通道的存在,在碳酸盐岩和上覆土层中发生地下水的侵蚀,以及气团压缩与膨胀和三相流的作用结果,也常发育有土洞。在天然土体自身荷重与水流潜蚀作用影响下,或工程荷载、震动作用影响下,也常发生塌陷,这也是岩溶塌陷的一种类型。

#### 3.3.2 天然岩溶塌陷成因类型

碳酸盐岩中洞穴或土洞,在天然状态下由多种因素诱发产生的,因此天然岩溶塌陷成因类型可分为:a.天然重力岩溶塌陷类型;b.天然潜蚀岩溶塌陷类型;c.天然旱涝岩溶塌陷类型;d.天然地震岩溶塌陷类型。

#### 3.3.3 人工诱发岩溶塌陷类型

人类工程建筑荷载、震动、蓄水、抽水、矿产开采、污染、地下空间开拓等,都可诱发岩溶塌陷。

#### 3.3.4 岩溶塌陷防渗措施

主要有以下几方面:a.提高塌陷岩(土)体力学强度;b.改善岩(土)体的原有结构;c.减少岩(土)体的水动力作用;d.控制岩(土)体的应力与荷载。

例如:官厅水库岩溶塌陷的处理<sup>[9]</sup>。

我国20世纪50年代中建成的当时库容最大的水库——官厅水库,库容 $20 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,1955年建成蓄水后,即发生渗漏,诱发对基础及坝体的潜蚀而发生塌陷,后来通过研究,查明渗漏途径,进行了治理。当时采取防治措施是:水泥喷涂与库水接触的岩面,加强灌浆防渗帷幕,库内抛土形成铺盖,坝后排水减压。

岩溶地区防塌陷的方法,需结合当地情况而酌情采用,例如在水利水电建设中,防治岩溶塌陷就有铺盖、封闭、填塞、围隔、通气、灌浆、截流、引泉、排水等10种途径和46种方法。

地质灾害中还有缓变性地质灾害,如地面沉降等,缓变性灾害也可演变为突变性灾害,工程建设中,对缓变性灾害常常认识不足,造成危害时就难以挽救了。有的大都市下为多层软土层,中夹沙层,在抽取地下水、高层建筑群荷载及地下空间网状开拓

情况下,加剧产生地面沉降,特别是诱发不均匀地面沉降,对工程自身及整个城市安全都是非常重要的不容忽视的问题。

## 4 地质灾害的监测与预警系统的建立

自然界中地质灾害是客观的现象,也是地球演化过程中难以避免的自然现象,因此,在工程建设中,必须充分认识地质灾害的发生机理及其危害性,才能正确针对当地自然情况,而合理规划与设计工程建设,并认真分析工程建筑将会产生的环境效应,以及对相应的地质灾害可能诱发与激化的情况。因此,在工程建设之前,应当有对地质灾害与环境效应方面的认真评估,应当建立防治地质灾害的风险意识,进行有关风险的评价和风险的工程管理,也必须有一定资金投入,进行相关的防治工程,进行正确的地质灾害的防治是保障工程安全的最基本的前提,不论是在施工期间还是工程完工长期运行中,地质灾害防治及相应减灾措施都是安全的需要。

### 4.1 从灾害链上考虑工程安全<sup>[10-12]</sup>

自然灾害链是客观的现象;气候灾害和地质灾害之间存在着灾害链;地质灾害之间也存在着灾害链。前已论述,不从灾害链上考虑地质灾害的防治,就难以达到真正防治地质灾害的功效。此外,还要考虑以下几点:

#### 4.1.1 区域灾害链的关系

例如大江河上游的灾害,对下游灾害的影响。1998年长江洞庭湖一带最大洪水只有 $5 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ ,而1931年长江三峡一带洪峰流量达 $10.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ ,而1998年的灾情对洞庭湖及下游城市危害却不比以前小,这与上游土壤加剧侵蚀造成上下游灾害链有关。

洞庭湖形成机理:断陷盆地。

湖面积变化:17 875  $\text{km}^2$  (距今 $1.6 \times 10^6 \sim 0.4 \times 10^6$ 年);6 000  $\text{km}^2$  (公元1825年);4 350  $\text{km}^2$  (公元1949年);2 700  $\text{km}^2$  (近代)。目前沉降速度:6.4~12 mm/a。

由于人工围湖造田,使湖面积减少,加上泥沙淤积,所以在大量减少湖水容积情况下,不能承受上面较大洪峰,而造成淹没湖外地区的灾害。

#### 4.1.2 地质灾害之间的灾害链

地质灾害的发生与发展,首先是由地球自身某地带圈层运动不平衡的结果所造成的。发生较大规模灾害的部位,多是脆弱的地带。如前已论及,四川

松潘叠溪地震,诱发大滑坡群;1970年,云南通海的地震,也诱发大量滑坡、泥石流、地裂隙以及岩溶塌陷等。2008年四川汶川8.0级大地震,诱发了数万个滑坡与泥石流灾害<sup>[13]</sup>。

大滑坡、岩溶塌陷等地质灾害,也可诱发地震。岩溶洞穴塌陷诱发地震的情况,可概略分析于表6。

表6 岩溶地带洞穴塌陷诱发地震能量分析

Table 6 Analyses of released energy of earthquake caused by karst collapses

诱发地震震级	相应能量/J	岩体高压破坏情况	洞穴破坏情况
1	$2 \times 10^5$	爆裂岩体体积 $0.0184 \text{ m}^3$ (110 MPa 气团压力)	相当 $100 \text{ m}^3$ 岩体破坏,平均位移 1 m
2	$6.3 \times 10^7$	爆裂岩体体积 $0.58 \text{ m}^3$ (110 MPa 气团压力)	相当 $2700 \text{ m}^3$ 岩体破坏,平均位移 1 m
3	$2 \times 10^9$	爆裂岩体体积 $1.84 \text{ m}^3$ (110 MPa 气团压力)	相当 $8000 \text{ m}^3$ 岩体破坏,平均位移 1 m

#### 4.2 地质灾害监测与预警系统建立

要做好地质灾害预警系统的建立,必须:

- 1) 应对地质载体有全面调查研究;
- 2) 应有适时的监测数据;
- 3) 应适时抓住灾情的前兆;
- 4) 建立相应的信息系统及判断决策系统。

地质灾害发生于地质载体上,因而首先对其结构应有系统的了解,这方面涉及岩(土)体形成过程的特性。在自然状态下,地质载体遭受各种地质作用的过程,可引起软弱结构面、载体中水动力条件,以及水—岩、水—土作用的特征变化而诱发灾害。不同地质灾害所应调查的内容是有差异的。

对于滑坡地质灾害,调查研究的主要内容是:

- a. 岩(土)体结构面的变化;
- b. 结构面物理力学性质的变化;
- c. 可滑动岩(土)体的形变;
- d. 岩(土)体化学溶解情况;
- e. 岩(土)体内水流的水质变化;
- f. 水动力条件与水动态变化;
- g. 气候要素的观测;
- h. 地质构造活动性。

对于岩溶塌陷灾害,调查研究的主要内容是:

- a. 地面形变的情况;
- b. 岩(土)体结构面的物理力学性质;
- c. 水流的动态变化;
- d. 地下洞穴空间的发展变化;
- e. 水—土潜蚀作用情况;
- f. 附加应力的状态;
- g. 气象要素的观测;
- h. 地质构造活动性。

对于泥石流灾害,调查研究的主要内容是:

- a. 破碎岩体的结构状况;
- b. 植被变化的情况;
- c. 地表坡度的变化;
- d. 岩(土)体的物理力学性质;
- e. 水

流动能的变化;f. 土壤侵蚀作用变化情况;g. 气候的观测;h. 地质构造活动性。

#### 4.3 地质灾害适当监测手段

通常使用方法涉及:

- 1) 利用遥感技术的宏观监测;
- 2) 实地形变监测;
- 3) 危险地质体的力学特性监测;
- 4) 危险地质体内的水动力与水特性监测;
- 5) 三相物质的综合特性监测。

在进行这两项工作之前,建立相应数据库,才能适时进行信息的捕捉与深入的分析,才能作出预警的正确判断。这样,才能建立重大地质灾害及地带性地质灾害预警系统,并结合工程地带的地质情况,进一步作出与工程安全密切相关的决策,以发挥预警系统的真正功效。

最好需要强调的是:a. 工程建设的成功与安全,必须在调查地质条件的基础上,予以正确的设计,才能达到防灾减灾与保障安全的目的;b. 工程手段不是万能的。

#### 参考文献

- [1] 卢耀如,等. 岩溶水文地质环境演化与工程效应研究[M]. 北京:科学出版社,1999
- [2] 卢耀如. 地质—生态环境与可持续发展—中国西南及邻近岩溶地区发展途径[M]. 南京:河海大学出版社,2003
- [3] 卢耀如. 地质灾害的检测与防治.(见:宋健 1999/2000,中国科学技术前沿(中国工程院版))[M]. 北京:高等教育出版社,2000
- [4] 中央气象局气象科学研究所. 中国近五百年旱涝分布图集[M]. 北京:地图出版社,1981
- [5] 李兴唐,冀鼎成,许学汗,等. 地壳稳定性研究基础与方法. 中国科学院地质研究所编. 工程力学研究[M]. 北京:地质出版社,1985
- [6] 夏其发. 《世界水库诱发地震震例基本参数汇总表》暨水库诱发地震评述(一)[J]. 中国地质灾害与防治学报,1992,3(4): 95-100
- [7] 夏其发. 《世界水库诱发地震震例基本参数汇总表》暨水库诱发地震评述(二)[J]. 中国地质灾害与防治学报,1993,4(1): 87-96
- [8] Lu yaoru, Duan Guanjie. Artificially induced hydrogeological effects and their impact of environments on Karst of North and South China[A]. Fei jin, Krothe N. C. Hydrogeology; Proceedings of the 30th International Geological Congress [C]. VSP, U-TRECHT, NETHERLANDS, 1997, Vol. I2
- [9] 卢耀如. 官厅水库砂质石灰岩喀斯特发育的规律及其工程地质特征[A]. 中华人民共和国地质部水文地质工程地质研究所论文集(1)[C]. 北京:地质出版社,1959:132-153
- [10] 卢耀如. 对四川汶川大地震的思考与认识[J]. 环境保护,

[11] 卢耀如. 地质灾害防治与城市安全——卢耀如院士在上海社  
会科学院的演讲[N]. 解放日报, 2008-06-29(8)

[12] 卢耀如. 自然灾害与城市安全[[J]. 上海科普教育, 2008,

[13] 殷跃平, 等. 汶川地震与滑坡灾害概论[M]. 北京: 地质出版  
社, 2009

## The mechanism and prevention of geohazards and safety of engineering construction

Lu Yaoru

(Tongji University, Shanghai 200092, China)

[Abstract] In first, this paper is described the basic viewpoint of scientific development, then the general situation of geohazards is introduced, while the usual. The geohazards been happened frequently and suddenly are illustrated. At last, the monitoring and establishment of warning system of geohazards are discussed.

[Key words] geohazard; scientific development; engineering safety

(上接 7 页)

## Strategic thinking for developing low-carbon economy in “Three Gorges Area”

Wang Yingluo<sup>1</sup>, Zhang Guoxing<sup>2</sup>, Guo Ju'e<sup>1</sup>

(1. Management School of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Management School of Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

[Abstract] The richness and stable condition of migrants, the construction of ecological environment and the harmonious development of socio-economy in Three Gorges is an important problem in post Three Gorges. It's regretful that there are some contradictions exist in the man-land relations, employment and ecological problems in the reservoir area now, which leads to the necessity to protect the ecological environment following a low-carbon development. Firstly, we suggest develop low-carbon tourism industry which means to plan the tourism resources effectively, cultivate low-carbon tourism industry groups, create low-carbon transport corridors, and market special products in the reservoir area. Secondly, we suggest develop low-carbon farm aptly and set up a domestic carbon trading market. Finally, it's necessary to build a low carbon living system in the reservoir area, and make the Three Gorges area to an exemplary low-carbon area in China.

[Key words] ecological environment; low carbon economy; low carbon tourism; low carbon living