

汶川大地震周年与地质灾害防治再思考

卢耀如

(1. 中国地质科学院,北京 100037;2. 同济大学地下工程系,上海 200092)

[摘要] 汶川大地震已过去一年时间,地震造成巨大灾害至今不能忘记,应当更好地贯彻科学发展观,深入地去思考分析地震灾害的机理,以期能为今后防灾减灾提供有效的科学依据。

[关键词] 汶川地震;川滇地震历史;地质灾害;地震机理

[中图分类号] P694 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)06-0036-08

1 前言

2008年5月12日14时28分,发生于四川汶川的8.0级大地震,已经过去一年多时间了。时至今日,这场地震的惨状仍难以忘却,在人类的历史上记录下这场灾难,使后人永远记住。

在目前形势下,应当更好地贯彻科学发展观,深入地去思考与分析地震灾害的机理,为今后如何更有效地防灾减灾提供科学的依据。

“5·12”汶川地震发生后,面对媒体的采访,笔者曾提出一些认识和呼吁。在此再做些补充,并对人们关心的一些问题发表评论以供参考。

2 西南地区地震的历史概况及基本地质背景条件

2.1 地震历史简述

川西—滇西这一带是地震频发地带,沿四川平武、灌县、雅安、峨眉、宜宾至云南的彝良、宣威、富源、丘北、文山这一线的西部地带,显然受特提斯—喜马拉雅构造域的地壳演化所制约,近几十年来记录到不少大于6级的强地震^[1-7]。此线以东,超脱特提斯—喜马拉雅山的影响,强震几乎没发生过。

20世纪以来,在川西、滇西发生6级以上地震有70多次,7级以上有20多次。公元前26年至目

前,有历史记载的地震以云南和四川居多。云南破坏性地震有近190次,四川有90多次。

1970年1月5日发生在云南通海的7.7级地震,使峨山、通海、建水、石屏、玉溪、华宁等六县(市),房屋遭受不同程度的破坏,也诱发大量滑坡^[8-11]。

根据历史上有关记载^[10,11],笔者曾在20世纪90年代初,概略计算了云南和四川6级以上大地震的发生,具有周期性。如公元1490—1520年、1610—1640年、1730—1760年、1880—1910年这几个时间间隔内,处在高峰活跃期。1988年11月6日21时3分云南澜沧7.6级地震;1988年11月6日21时18分云南耿马7.2级地震;1989年4月16日—5月3日四川马塘6.7级、6.2级和6.4级三次地震,1989年5月7日云南耿马6.2级地震,表明川滇一带地震又进入活跃期。去年滇西仍有地震发生,而这次汶川地震达8.0级是最高的,破坏也最为强烈。

有一现象值得提出,云南和四川地震存在互补现象,即云南发生频率高大地震时,四川发生大地震的频率就低些,反之,四川高则云南低,或者两者叠加后形成高频率(图1)。笔者(卢耀如,段光杰,1997,地质—生态环境与可持续发展,地质矿产部水文地质工程地质研究所)不完全计算(至20世纪90

[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:yrлу@tongji.edu.cn

年代初),在30年间隔内,一般大震释放能量为 $10^{15} \sim 10^{17}$ J,高峰期为 $10^{16} \sim 10^{17}$ J。

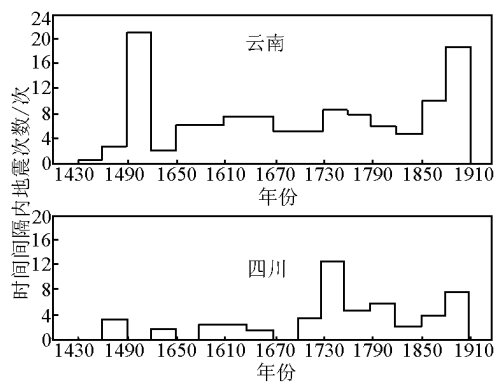


图1 近500年来云南、四川大地震频率对比

Fig.1 Comparison of the big earthquake frequency of Sichuan and Yunnan in recent 500 years

2.2 西南地区地质灾害区划

中国西南及邻近地区主要地质灾害情况,我们早些时候曾进行区划^[11,12],简要表示于图2^[13]。

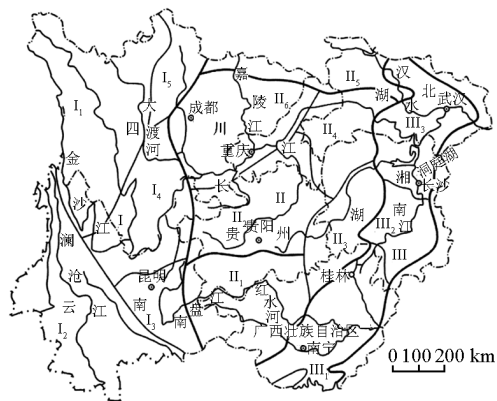


图2 中国西南及邻近地区主要地质灾害分区图

Fig.2 The distribution of main geological disasters in southwest of China and its circumjacent areas

I为川滇西部高山深部—表层地质灾害活跃区; I₁为大雪山—草原强震—冻融—侵蚀灾害亚区; I₂为横断山—三江深谷强震—强侵蚀灾害亚区; I₃为滇东高原强震—岩溶灾害亚区; I₄为金沙江—雅砻江强震—强侵蚀灾害亚区; I₅为岷山—邛崃山地震—侵蚀灾害亚区; II为云贵高原—大巴山山地浅层—表层地质灾害活跃区; II₁为黔南高原—桂西斜坡山地岩溶—侵蚀灾害亚区; II₂为黔中高原—乌江峡谷岩溶为主灾害亚区; II₃为九万大山—雪峰山弱岩溶—侵蚀灾害亚区; II₄为湘鄂西斜坡山地—长江三峡岩溶—强侵蚀灾害亚区; II₅

为秦岭—大巴山山地弱岩溶—强侵蚀灾害亚区; II₆为四川盆地及周边山丘弱岩溶—强侵蚀灾害亚区; III为广西盆地—江汉平原浅层—表层地质灾害活跃区; III₁为广西盆地强岩溶—强洪积灾害亚区; III₂为湘南山丘—平原岩溶—强洪积灾害亚区; III₃为江汉平原弱岩溶—强洪积灾害亚区; IV为东部非岩溶山区浅层—表层地质灾害活跃区(侵蚀灾害包括在侵蚀作用的基础上发生的有关水土流失、滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害)汶川大地震正属于I,为岷山—邛崃山地震—侵蚀灾害亚区。

西藏地区也是地质灾害频发的地区,例如2001年就发生有8.1级地震。

2.3 自然地质背景条件

地球属太阳系,在其形成与发展的过程中,不断产生着动态变化。地球,已知似鸡蛋结构。地壳(似鸡蛋壳),是由上部硅铝层及下部硅镁层组成,连同上地幔上部,通常称之为岩石圈。在岩石圈下60~250 km范围内有比其上下更软的物质的软流圈存在。岩石圈则漂浮在软流圈上,软流圈下还有下地幔(3 510~4 310 km)及地核(半径3 471 km)。

软流圈中有固、液、气三相物质在不断转化^[14,15],它是形成矿产资源的源泉,岩石圈的板块在软流圈中上面漂移,碰撞,引起地壳隆起造山及沉降,以及火山喷发,地震等灾害的产生。除了岩石圈之外,还有水圈、大气圈和生物圈,这四个圈层是相互依存、关联,又相互运动,使地球产生一系列演化。其结果是对人类的生存与发展,存在着两个方面条件:

第一、有利的资源性条件,除了空气、阳光之外,主要有土地资源、水资源、矿产资源、能源和生物资源;第二、不利的灾害性条件,主要是气候灾害、地质灾害(包括地震)和生物灾害。

在圈层运动中,由于印度洋板块向欧亚板块的俯冲,造成喜马拉雅山的抬升与青藏高原的隆起,这个基本地质背景,就是这次汶川地震的地质背景。川西、滇西一带的中高山山地,正处于青藏高原第一台面和云贵高原第二台面的斜坡地带,受板块运动影响频繁而强烈,因而地震频繁发生。

因此,用科学发展观认识客观的地球,就要了解这两方面条件与因素对人类生存与发展的影响。人类在地球上生活,对地球的开发,必须认识地球自然演化过程中的科学认识及其规律性,应当认识对地球上的各种开发、建设,必会影响到地球自身的演

化。科学发展观就是首先应当探讨自然界中的演化规律,掌握有关科学认识,必求做到:第一,合理、有效、节约与循环利用资源;第二,积极有效地防治与减轻自然灾害;第三,人与自然地球和谐及与环境相友好以取得可持续发展。

3 人类活动诱发地震问题探讨

地震,在自然条件下发生,是地球演化过程的一个必然现象。通过地震、火山喷发等,释放了地下积聚的能量。近 500 年来,四川、云南及邻近地区地震释放的能量,据不完全统计表示于图 3。自然地震给人类带来了灾难,另一方面人类活动是否也会诱发地震呢?这个问题的答案也是肯定的。

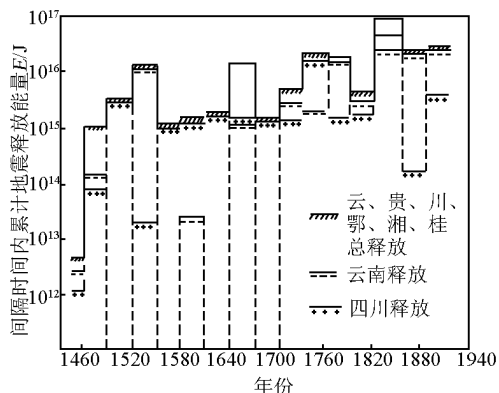


图 3 近 500 年云南及邻近省区地震释放能量概略统计示意图

Fig. 3 Rough statistic of earthquake released energy in Yunnan Province and its circumjacent Provinces in recent 500 years

美国科罗拉多州丹佛一工厂,注水于寒武系结晶岩,诱发地震的孔隙水压力达到 38.9×10^6 Pa,估计初始水压力为 26.9×10^6 Pa,即增加了 12.0×10^6 Pa 水压力^[16]。我国有的矿区,由于长期用冒落式开采地下煤炭资源,结果诱发了地面沉降达 16~18 m,诱发地震每年达 3 000~7 000 多次。震级在 M 3~4 的较多。国外也有不少这种情况发生^[17]。至于国外水库发生诱发地震的概率,达 0.35%^[12]。我国 20 世纪 90 年代初,主要诱发水库有 18 座,其中有 12 座在碳酸盐岩地区^[18],近期又有两座碳酸盐岩地区水库发生诱发地震。

这次的汶川地震,不少人也关心到水库诱发地震的问题。笔者在 20 世纪 90 年代初期就曾对这个问题做了一些探讨^[14,19]

汶川地震灾区,有许多碳酸盐岩发育,有的泉水

流量可达 $10 \text{ m}^3/\text{s}$,在碳酸盐岩岩溶发育地带,水库诱发地震的有 3 种类型,下面做些探讨^[14,20]。

3.1 荷载断裂类型

由于水库蓄集大量库水,必然增加荷载,使原先深部处于平衡状态的应力场产生变化,特别是使处于临界状态的断裂产生应力平衡的破坏,而诱发断裂活动,导致发生地震。地震是地壳构造运动的必然结果,增加库水及泥沙的重力,使人工附加水库应力场和自然状态下应力场产生叠加影响,就会对相应的软弱断裂产生更大的压应力。

此类型的水库诱发地震,实际上是包括三个方面的压力状态的变化,即:a. 水体(及泥沙)集中荷载产生应力场变化;b. 水压力的增加,破坏原先岩体的强度;c. 在库水影响而改变物理化学场情况下,使岩体产生相应物理化学作用,包括激发溶蚀作用、软化软弱岩体(及断层带)的物理力学强度等。所以,此类型水库诱发地震通常应当是相对的静应力场变化—动水压力与岩体强度变化—物理化学激化岩体的稳定性时,就可诱发地震。

K. Terzaghi 在土力学中曾提出孔隙水压效应问题, M. K. Hubert 将其应用于岩体力学,即液体渗透到孔隙裂隙介质后,有效应力为总应力减去孔隙裂隙水压力,即:

$$\tau = \mu(\sigma - p) + C \quad (1)$$

式(1)中, τ 为岩石的抗剪强度; σ 为总应力或界面正应力; p 为孔隙水压力; μ 为摩擦系数; C 为岩石凝聚力。

该公式对原属饱气带,水库蓄水后成为饱水带的岩体是适合的,库岸边坡的稳定与孔隙裂隙水压力有很大关系^[21]。

在库水作用下叠加应力场后的全应力 $\bar{\sigma}$ 用笛卡儿坐标分量表示为:

$$\{\bar{\sigma}\} = \{\sigma_N\} + \{\sigma_\gamma\} = \begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_x \\ - \\ \bar{\sigma}_y \\ - \\ \bar{\sigma}_z \\ - \\ \tau_{xy} \\ - \\ \tau_{yz} \\ - \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中, σ_N 为天然状态下应力; σ_γ 为水库附加应力; $\bar{\sigma}_x, \bar{\sigma}_y, \bar{\sigma}_z$ 为叠加应力场的 x, y, z 轴分力; $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ 为相应 xy, yz 及 zx 方向剪应力。未考虑增加水压力时平衡方程式一般的形式为:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial \bar{\sigma}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\tau}_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\tau}_{xz}}{\partial z} &= 0 \\ -\frac{\partial \bar{\sigma}_y}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\tau}_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\tau}_{yz}}{\partial z} &= 0 \\ -\frac{\partial \bar{\sigma}_z}{\partial z} + \frac{\partial \bar{\tau}_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\tau}_{yz}}{\partial y} &= -r \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)中, r 为饱和的岩体容重。

当库水作用下使岩体受压缩, 相应增加孔隙水(或裂隙水)压力时, 则:

$$\bar{p} = p_N + \Delta p_R \quad (4)$$

式(4)中, \bar{p} 为库水作用下孔隙(小裂隙)水压力; p_N 为天然状态下孔隙(小裂隙)水压力; Δp_R 为库水作用下增加的孔隙(小裂隙)水压力。

当增加库水作用影响下的孔隙(小裂隙)水压力时, 全应力 $\{\bar{\sigma}\}$ 变为 $\{\bar{\sigma}_R\}$, 包含了两个部分, 即:

$$\{\bar{\sigma}_R\} = \begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_x - \bar{p} \\ \bar{\sigma}_y - \bar{p} \\ \bar{\sigma}_z - \bar{p} \\ \bar{\tau}_{xy} \\ \bar{\tau}_{yz} \\ \bar{\tau}_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{p} \\ \bar{p} \\ \bar{p} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \{a\} + \{b\} \quad (5)$$

$\{a\}$ 是孔隙(小裂隙)水压力为零部分应力, $\{b\}$ 为有孔隙(小裂隙)水压力作用下的所有孔隙的应力。在饱水带以下岩溶化地层中, 于天然状态下, 孔隙(小裂隙)水压力不可能为零, 而在水库作用下原先被封存的孔隙(小裂隙), 由于库水压力作用下, 增加机械潜蚀与化学溶蚀作用结果, 可产生新的孔隙(小裂隙)水压力 \bar{p} , 所以应当是:

$$\{\bar{\sigma}_R\} = \begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_x - \bar{p} \\ \bar{\sigma}_y - \bar{p} \\ \bar{\sigma}_z - \bar{p} \\ \bar{\tau}_{xy} \\ \bar{\tau}_{yz} \\ \bar{\tau}_{xz} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \bar{p}' \\ \bar{p}' \\ \bar{p}' \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \{a'\} + \{b'\} \quad (6)$$

$$\text{以} \quad \bar{p} = \bar{p} + \bar{p}' \quad (7)$$

应力和应变关系式(参考 J. L. 塞拉芬, 1978 年资料转引自斯塔格)^[15], 理论上可做下面分析:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= -\frac{1}{E}[(\bar{\sigma}_x - p) - \nu(\bar{\sigma}_y - \bar{\sigma}_z - 2p)] - \frac{p}{3B_c} \\ &= -\frac{1}{E}[\bar{\sigma}_x - \nu(\bar{\sigma}_y + \bar{\sigma}_z)] + p\left[\frac{1-2\nu}{E}\right] - \frac{p}{3B_c} \\ \varepsilon_y &= -\frac{1}{E}[\bar{\sigma}_y - \nu(\bar{\sigma}_x + \bar{\sigma}_z)] + p\left[\frac{1-2\nu}{E}\right] - \frac{p}{3B_c} \\ \varepsilon_z &= -\frac{1}{E}[\bar{\sigma}_z - \nu(\bar{\sigma}_x + \bar{\sigma}_y)] + p\left[\frac{1-2\nu}{E}\right] - \frac{p}{3B_c} \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\nu)}{E} \bar{\tau}_{xy} \\ \gamma_{yz} &= \frac{2(1+\nu)}{E} \bar{\tau}_{yz} \\ \gamma_{xz} &= \frac{2(1+\nu)}{E} \bar{\tau}_{xz} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(8)中, $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 为 x, y, z 方向上的应力; E 及 ν 为岩体无孔隙压力时, 外力作用下弹性模量和泊松比;

$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$ 为相应 $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{xz}$ 剪应力下的应变。

$\{a\}$ 系统引起岩体形变, 以岩体弹性模量 E 和泊松比 ν 表示; $\{b\}$ 系统是孔隙(小裂隙)水压力作用下产生压缩变形 ($-p/3B_c$)。 B_c 是孔隙固相材料的平均体积模量。这两种系统的岩体变形, 也就是使深部(特别是软弱断裂带岩体)由形变量的积聚, 达到临界值时产生的大形变。岩体大形变就可能使岩体产生破坏, 而诱发地震, 产生地震时的临界应力 σ_E 为:

$$\{\sigma_E\} = \begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_x - \eta p \\ \bar{\sigma}_y - \eta p \\ \bar{\sigma}_z - \eta p \\ \bar{\tau}_{xy} \\ \bar{\tau}_{yz} \\ \bar{\tau}_{xz} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

$$\eta = 1 - \frac{B}{B_c} \quad (10)$$

式(10)中, η 为静水位应力下相应体积变化系数; B 为孔隙体积模量; B_c 为孔隙固相材料的平均体积模量。

这时,库水作用下临界全应力的平衡方程为:

$$\frac{\partial \sigma_{Ex}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{Exy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{Exz}}{\partial z} - \frac{\partial(\eta p)}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

相应的应力—应变关系为:

$$\varepsilon_x = -\frac{1}{E}[\sigma_{Ex} - \nu(\sigma_{Ey} + \sigma_{Ez})] + \left[p \left(\frac{(1-2\nu)(1-\eta)}{E} \right) - \frac{1}{3B_c} \right] \quad (12)$$

因为 $\frac{1-2\nu}{E} = \frac{1}{3B_c}$ 时,

理论上如果孔隙减少为零。即 $B \rightarrow B_c$, 孔隙压力影响也就不存在。当然,实际上不可能使之变为零。孔隙压力产生的是压力—热力转换,可得:

$${}_{\alpha}T = -p \left[\frac{1-2\nu}{E} - \frac{1}{3B_c} \right] = 0 \quad (13)$$

式(13)中, T 为温度, α 为膨胀系数。

${}_{\alpha}T$ 为零时,也是孔隙(裂隙)承压水叠加下产生形变的过程。

实际情况应当是岩体不发生膨胀形变时。在库水叠加作用下,相应孔隙(裂隙)压力增加,岩体孔隙(裂隙)体积缩小,只是: $\frac{1-2\nu}{E} \rightarrow \frac{1}{3B_c}$ 时,

岩体产生剧烈急变,这时孔隙(裂隙)水压力也消失, $p \rightarrow 0$, ${}_{\alpha}T$ 也接近于 0, B_c 为岩体产生急变的临界体积模量,也是最危险的产生岩体破坏相应诱发地震时的临界体积模量,对弹性岩体存在着体积力,则:

$$X = -\frac{\partial(\eta p)}{\partial x}, Y = -\frac{\partial(\eta p)}{\partial y}, Z = -\frac{\partial(\eta p)}{\partial z}$$

这时孔隙(裂隙)压力产生的热形变为:

$${}_{\alpha}T = p \left[\frac{(1-2\nu)(1-\eta)}{E} - \frac{1}{3B_c} \right] = 0 \quad (14)$$

即当这种条件下: $\frac{(1-2\nu)(1-\eta)}{E} = \frac{1}{3B_c}$, 使热形变停止。

这种情况下,就使岩体产生急剧形变,结果也使 $p=0$, 而后,又逐渐恢复 p , 又产生新的体积模量,开始产生水库作用下的叠加应力场。由于库水变化周期的影响,使 Δp 有着明显变化,也使 B 值不断变化,而有多频率的地震发生。

再考虑库水作用下,物理化学作用结果,包括深部岩溶作用、动水潜蚀等作用降低岩体物理力学性质与强度,所以也可简单表示为:

$$\tau_r = \mu \sqrt{\sigma_r - [p_N - \Delta p_R]} + [C_N - \Delta C_R]$$

其中, τ_r 为水库作用下的剪应力; σ_r 为库水作

用下岩体全应力; p_N 为天然状态下孔隙裂隙水压力; Δp_R 为库水作用下增加孔隙、裂隙水压力; C_N 为天然状态下岩体的凝聚力; ΔC_R 为库水作用下减少的岩体凝聚力(由于深部物理化学性质的地质作用,包括混合流体的溶蚀作用的加强)。

3.2 气化爆裂类型

在自然状态下,深部软流圈中存在着液、气、固三相物质的三相流,深部的气体常向上运移,地下孔隙、裂隙中常常为气体(而不是液体)所占据。在岩溶地带,深部的岩溶作用不仅有较大空间存在,而且也有多种成因的气体分布,由于气体的可压缩性,可以产生更大的压力。水、气的混合存在,也就具有更大的破坏力。前已述及库水探 130 m 时,地下增加水压后剪应力还是有限,而气体受压缩,产生的应力就可达几十至 100 MPa 以上。

由于水库蓄水,在高库水的水头作用下,促使水流加量、加深与加速向深部渗透运移。由于地温梯度影响或遇有热源岩体时,水温迅速升高,在高压状态下达到沸点时,使渗透水流由液态向气态转化。气态流体可储积于气化带附近,或向上运移至适宜地带,当不断积聚气体并不断升压的状态下,可形成高压的气团。

当水库在库水作用下于某深处 d 产生的全应力为 $\bar{\sigma}_r^d$, 而产生高压气团层的全压力为 $\bar{\sigma}_a$ 时,如果:

$$\{\bar{\sigma}_a\} > \{\bar{\sigma}_r^d\}$$

就可产生体的破裂,而产生此类型的诱发地震。这类气化爆裂类型的水库诱发地震的震级与压缩气团的体积、压强有关。通常直接由压缩水—气团的作用而诱发的地震震级不是很大,但附近有断裂活动地带存在时,由于水—气压缩爆裂作用诱发构造破坏的地震,就可产生较大震级。目前世界上发生 $M > 6$ 级地震的水库区附近都有强烈的地热异常显示,这种耦合现象表明地热异常带更易于在水库地下产生气化作用,并使气化爆裂诱发断裂构造稳定性破坏而产生较大震级的地震。

压缩气团的压力为:

$$p_a = \frac{\rho_a}{\rho_0} \iint_A p_0 \cdot f(R_a, \theta_a) dA \quad (15)$$

式(15)中, $f(R_a, \theta_a) dA$ 为气团体积变化函数; p_0 为原始压强; ρ_0 为原始密度; p_a 为高压气团压强; ρ_a 为高压气团密度。

相应于水库蓄水后的自然状态下全应力 $\bar{\sigma}_r^d$, 相应的压强为 p_0 ; 有了气化作用形成高压气团的全

应力为 $\bar{\sigma}_a$, 相应压强为 Pa。而 $\bar{\sigma}_R^d$ 与库水及上面覆盖的岩体有效重量密切相关, 在产生气化条件下, 孔隙(及小裂隙)中的水压力相应减少可不计, 则:

$$\{\bar{\sigma}_R^d\} \cong \{G_E\} + \{G_R\} \quad (16)$$

式(16)中, G_E 为上面覆盖的可能破坏的岩土体重力; G_R 为库水作用下可增加荷载重力。所以:

$$\bar{\sigma}_R = \frac{P_a}{\rho_0} \iint_A (G_E + G_R) \cdot f(R_a, \theta_a) dA \quad (17)$$

产生气爆地震类型时, 需要使产生的气爆剪切破坏力 τ_a 为:

$$\tau_a = \mu \{ \bar{\sigma}_a \} + F_a \cdot C_R \quad (18)$$

式(18)中, F_a 为产生诱发地震破坏岩体的断面面积; C_R 为破坏岩体的凝聚力。

该类型诱发地震, 由于气化作用的连续发生, 使高压气团的聚集形成一爆裂岩石的过程易于重复产生, 所以诱发地震的频率也多, 但震级不一定高。在长江三峡地区, 有热矿泉及盐泉出露的地带, 紧密褶皱与宽缓褶皱的过渡地带, 都易于产生库水的灌入, 以产生此类型诱发地震。前南斯拉夫 Bileca 水库的诱发地震, 就与库水的气化作用有关^[17]。前面已经论及有关深部地壳的三相流问题, 因此来自深部的气体与库水渗流气化作用相混合, 可使此类地震变得复杂。有的水库地带壳幔过度层变化在 35~45 km 深度, 明显有断裂存在。因此来自深部的三相流分异出气体, 与库水作用下渗流气化的气体相混合, 就有其发生的地质基础。这类气化爆裂也可在浅处诱发洞穴塌陷而产生地震, 可归纳于下一类型中。深部诱发地震的因素, 国外也注意过 (Stojic, 1976)。

3.3 洞穴塌陷类型

水库蓄水后, 岩溶地下水会上升在充气带内早期发育的洞穴通道中, 这类通道有的由于后期钙化及黏土的充填而成半封闭状态。当库水上升时, 由于气团在洞穴通道中被压缩, 以及由于水库蓄水, 而使岩体及洞穴周围岩体物理力学性质降低, 常可导致洞穴塌陷, 而产生诱发地震。或者在河床浅处的高压气团及渗透水流的作用下, 也可使洞穴顶底板岩体遭受破坏而诱发地震。通常此类型诱发地震的震级较小, 震源深度较浅, 多在 1 km 以内的深度, 有的深度只有 100 m。坝高 165 m, 建成后产生诱发地震, 震级 1~2.6 级, 震源深度多在数百米以内, 应是属于此类型诱发地震。这类诱发地震的洞穴破坏情况与诱发的震级, 可作些理论分析, 概略对照见表 1。

表 1 岩溶地区水库岩溶塌陷诱发地震岩体破坏与能量对照表

Table 1 Comparison between rock mass failure and energy of earthquake caused by karst collapses in reservoirs of karst region

诱发地震震级	相应能量/J	高压气团爆裂情况	洞穴岩体破坏情况
1 级	2×10^6	爆裂岩体体积 0.018 4 m ³ (110 MPa 气团压力)	相当 100 m ³ 岩体破坏, 平均位移 1 m
2 级	6.3×10^7	爆裂岩体体积 0.58 m ³ (110 MPa 气团压力)	相当 2 700 m ³ 岩体破坏, 平均位移 1 m
3 级	2×10^9	爆裂岩体体积 1.84 m ³ (110 MPa 气团压力)	相当 80 000 m ³ 岩体破坏, 平均位移 1 m

洞穴破坏类型的地震与水库的坝高、库容、水库长度、水库面积等工程要素, 及碳酸盐岩分布面积、岩溶率、洞穴发育深度、岩体渗透性等岩溶及其水文地质条件有关。

根据已知岩溶地区水库诱发地震的情况, 可利用多因素评判对比法, 以作预测其他水库产生洞穴破坏型地震的参考。多因素评判方程为:

$$C_e = \left[\sum_{i=1}^n R_{1i} \cdot p_{1i} / n + \sum_{j=1}^m R_{Dj} \cdot p_{Dj} / m \right] / 2 \quad (19)$$

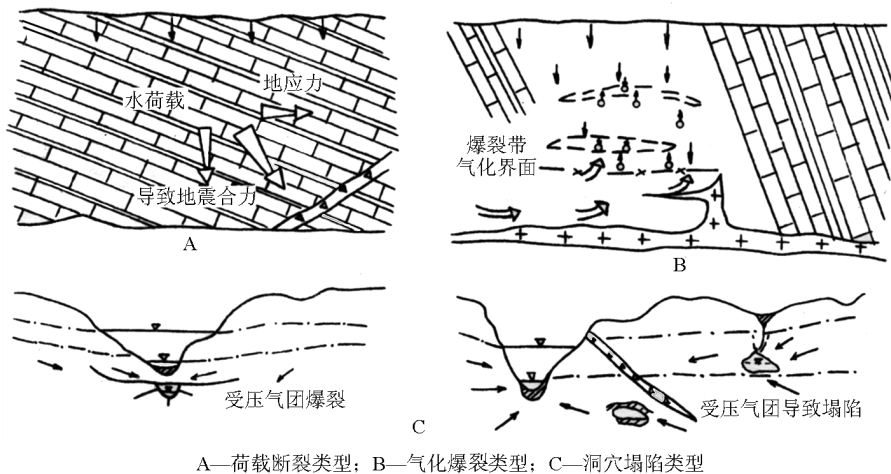
$$E_s = E_w \cdot C_e \cdot K_c \quad (20)$$

式(20)中, C_e 为对比评判系数; R_{1i} 为间接因素 i 项的比值; p_{1i} 为间接因素 i 项的权重; R_{Dj} 为直接因素 j 项的比值; p_{Dj} 为间接因素 j 项的权重; K_c 为岩溶发育中差异系数; E_w 为地震条件方面差异系数; E_s 为预测地震震级。

K_c 和 E_w 可根据已知地区岩溶发育强度及有关差异性, 和地震历史上的震级及有关条件而决定, 其值可大于 1 或小于 1。当然, 这种比较只是供作考虑洞穴塌陷诱发地震的参考。3 种岩溶地区水库诱发地震表示于图 4。

目前碳酸盐岩地区诱发地震的级别不高, 多在 M1~4 级。我国早期在火成岩地区新丰江水库曾诱发地震 M6.1 级。水库诱发地震多是极浅的震源, 而构造因素的震源就较深。

人类许多活动都可诱发地震, 但震级低震源浅。水库诱发地震可能对浅层的地应力释放有所影响。最重要的还是应当综合研究各种人类活动对当地诱发地震的复合效应。特别是浅层诱发地震, 如何通过软弱地带而与深部构造运动相结合的问题, 值得深入探讨。



A—荷载断裂类型；B—气化爆裂类型；C—洞穴塌陷类型

图4 水库诱发地震3种类型示意图

Fig. 4 Three kinds of earthquakes induced by reservoir

4 深入研究灾害机理,完善监测预警系统,提高全民防灾减灾意识

4.1 深入研究灾害机理,注重灾害链的效应

目前,对许多地质灾害,已有相应的防治措施,例如滑坡这一表层地质灾害情况,相对其发生的机理,也有较多研究,因而也具有一套防治措施。但是地震源于深部地球的复杂圈层运动,都是地震发生发展的机理尚了解的很不够。而且,许多人工活动又可诱发浅层地震活动,人类综合活动对浅层地震活动的影响如何能与深部震源产生效用,是需要考虑的一个世界性问题,应当予以重视研究。

自然灾害中存在灾害链,这是不争的事实。主要有:气候灾害和地质灾害间灾害链,例如:a. 台风诱发滑坡、泥石流等灾害;b. 地震和其他地质灾害间的灾害链。在汶川地震中诱发大量几万处滑坡、泥石流,就是一个例证;c. 生物灾害和地质灾害间的灾害链,如大的自然灾害可诱发瘟疫、传染病等。此外,还有上游与下游、海洋与陆地、地壳表层与深层的灾害链等。目前都了解的很不够,或者还不清楚,都应当深入地开展探索。

4.2 建立监测灾害体系,做好预警预报系统

目前,影响范围小的表层地质灾害如滑坡等,已有多种检测手段,通过预报预警系统,临灾时避免了人民生命的损失。有的通过技术施工处理,也避免了灾害的发生。对于地震,涉及到深度地壳活动,要预报精确却是世界难题。但是,在深入研究的基础上,圈定特别危险地带,加强监测力度,是可以力争在临震前能有信息发出,以减少灾害带来的损失,这

是今后努力的方向。日本是地震频发的国家,利用地震时先到达的纵波(p)和晚十多秒到达的最具破坏力的横波(s)之间的时间差,以减少损失,收到了不错的效果。我国地域广阔,但是选择重要的地震灾害危险地带,加强监测,应是努力做到的。

4.3 合理采用防震措施和布置建筑以减少灾害损失

这次汶川地震,大部分伤亡都是没有防震设施的建筑,或者是建筑物处在不稳固的山坡脚,直接为诱发的滑坡、泥石流所摧毁。通过实验及实例,有防震垫层或其他防震结构的建筑,受损程度就大大降低。建筑物避开危险山坡,以及建筑物走向与地应力方向或将来产生地震波方向相平行的,建筑物毁坏的程度就要比建筑物走向与地应力方向垂直的低得多。因此今后建筑在规划中应当首先有地质环境和地质灾害方面的评估调查为重要依据。

4.4 提高全民防灾减灾意识,大力开展防灾减灾宣传

我国是多灾害的国家,但是人民对防灾减灾的意识却很薄弱,很多人临灾时不知所措。这次汶川大地震出现了数以万计的志愿者,体现了民族患难与共的伟大品质,也有不少是从废墟中拯救出来而生还的灾民。即使如此,为了今后能更好的在灾难来临之前做好相应措施,大大减少损失,目前开展减灾防灾的宣传,提高全民抗灾意识,仍是非常重要的长期任务。这方面包括:a. 重要场所建立宣传栏;b. 各种媒体结合当地情况进行防灾减灾宣传;c. 在公共场所及人口密集地区进行疏散、抗灾的演练;d. 开展民间志愿者的培训,提高救灾的技能;e. 提高与扩大专业救灾队伍的设备;f. 结合当地可能发生的灾情,及时修订应急预案,因地制宜地预先宣传,使当地广大人民做到

心中有数,临灾不乱不慌。

中华大地,地域辽阔,地质构造复杂,自然灾害多。我们要永远铭记汶川大地震,祈祝灾难中的逝者安息。从汶川地震灾害惨痛的教训中汲取教训,更好地提高全民防灾减灾意识,“多难凝聚兴邦志,少患源于强国情”。汶川地震已经过去一年的时间了,灾区得以很好的重建,在于国家的强大实力。今后还会有自然灾害给我们带来灾难,我们应当从战胜汶川地震灾害的经验上,更好地进行各方面的努力,真正做到防灾兴利,使中华民族更加强大。

参考文献

- [1] 刘蔚. 系统研究环境减灾(对话人:卢耀如). 中国环境报[N]. 2008-5-14(2)
- [2] 支玲琳. 防疫,一场可能更加艰巨的持久战-访问卢耀如. 解放日报[N]. 2008-5-22(8)
- [3] 程晖. 既然难以预报,不如加强设防-访中国工程院院士,国家减灾委专家委员会委员卢耀如. 中国经济导报[N]. 2008-6-28(1)
- [4] 卢耀如. 地质灾害防治与城市安全-在上海社科学院的演讲. 解放日报[N]. 2008-6-29(8)
- [5] 卢耀如. 对四川汶川大地震灾害的思考与认识[J]. 环境保护, 2008, (6A):42-45
- [6] 卢耀如. 自然灾害链与城市安全[J]. 上海科普教育, 2008, (2):1-4
- [7] 黄汲清,陈炳蔚. 中国及邻近区特提斯特海的演化[M]. 北京:地质出版社,1987
- [8] 段永侯. 中国地质灾害[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1993
- [9] 中国科学院地球物理研究所. 中国强地震震中分布图(震级大于6级)[M]. 北京:中国地图出版社,1976

- [10] 国家地震局地球物理研究所,复旦大学,中国历史地理研究所. 明时期中国历史地震图集[M]. 北京:地图出版社,1993
- [11] 国家地震局地球物理研究所,复旦大学,中国历史地理研究所. 清时期中国历史地震图集[M]. 北京:地图出版社,1990
- [12] 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):85-100
- [13] 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. 南京:河海大学出版社,2003
- [14] 卢耀如. 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
- [15] 卢耀如. 地质灾害的监测防治分析(见:宋健主编,中国科学技术前沿(中国工程院版))[M]. 北京:高等教育出版社, 1999/2000:655-678
- [16] 丁原章. 水库诱发地震[M]. 北京:地震出版社,1989
- [17] Stojie P. Influence of reservoir Bilica in a Karst area. Proceedings of the U. S. - Yugoslavia symposium. Yevjevich (ed): Karst Hydrology and water Resources[C]. 1976:607-626
- [18] 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
- [19] Lu Yaoru. Artificially induced hydrogeological effects and their impact of environments on Karst of North and South China. Fei jin, and N. C. Krothe (eds): Hydrogeology, Proceeding of the 30th International Geological Congress [C]. Beijing China, 1997, 22:113-120
- [20] Lu Yaoru. Rational exploitation of resources and prevention of geohazards in Karst regions[J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(3): 239-248
- [21] 斯塔格 KG, 晋基维茨. 工程应用岩石力学[M]. 北京:地质出版社,1978

Rethinking of geological disaster control at the anniversary of the Wenchuan Earthquake

Lu Yaoru

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

[Abstract] The big Wenchuan Earthquake has passed for a year, but the huge disaster caused by the earthquake cannot be forgotten yet. The scientific development view should be better carried out and the earthquake mechanism should be analyzed thoroughly, so that effective scientific reference can be provided for consideration of the prevention and reduction of future disaster.

[Key words] Wenchuan Earthquake; the earthquake history of Chuan-Dian area; geological disaster; earthquake mechanism