

黄河黑山峡大柳树坝址区最大潜在地震变形 及地震应力模拟预测

王爱国^{1,2}, 石玉成^{1,2}, 柳煜²

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省地震局, 兰州 730000)

摘要:在分析黄河黑山峡大柳树坝址处的中卫活动断裂带潜在地震危险性及其地质、地球物理条件基础上,采用三维有限元方法模拟计算了该断裂带内 F_{201} 断层发生6.5级、7.0级和7.5级地震时大柳树坝址区的潜在地震变形及地震应力。结果表明, F_{201} 断层发生中强以上地震($M_s \geq 6.5$)时,其南侧至少3 km范围内的地震变形及地震应力将超出地壳岩石的破裂变形极限,大柳树坝址的地震应变值更是大于 10^{-4} ,地震应力也将达到几兆帕,存在工程上尚难以处理的地震抗断问题。

关键词:黑山峡; 大柳树坝址; 地震变形; 地震应力; 三维有限元; 数值模拟

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2007)04-0314-05

Potential Earthquake Deformation and Stress Simulation of Daliushu Dam-site in Heishan Gorge of Yellow River

WANG Ai-guo^{1,2}, SHI Yu-cheng^{1,2}, LIU Yu²

(1. Lanzhou Base of Earthquake Prediction Institute, CEA, Lanzhou 730000, China;

2. Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: On the base of analysing earthquake risk, geological and geophysical conditions for Zhongwei active fault zone where Daliushu dam-site located, the potential earthquake deformation and stress near the dam in the condition of earthquake with $M_s 6.5$, $M_s 7.0$ and $M_s 7.5$ on the fault F_{201} in the fault zone are simulated using 3D finite element method. The calculation results shows that if an earthquake of $M_s \geq 6.5$ occurs on the fault F_{201} , the ground earthquake deformation and stress would exceed the cracking limit of crust rock at least in the range of 3 km at south of the fault, the earthquake strain of Daliushu dam-site would be over 10^{-4} and the stress would be several megapascal (MPa), which will lead to the anti-rupture problem hard to solve in engineering project yet.

Key words: Heishan gorge; Daliushu dam-site; Earthquake deformation; Earthquake stress; 3D finite element; Numerical simulation

0 引言

地震的发生一方面产生地振动,另一方面会使地壳介质产生永久的相对位移,即地震变形^[1],这种变形是地震后断层周围产生一定规模裂缝的主要原因。位于发震断层附近,其潜在地震变形可能很大

的水库大坝,除了要考虑地震动的影响外,还必须考虑地震变形可能造成的大坝设施的破坏及库区岩体破坏造成的渗漏性。

黄河黑山峡大柳树坝址位于青藏高原东北缘弧形断裂系中卫一同心活动断裂带内,沿该断裂带多

收稿日期: 2007-04-25

基金项目: 甘肃省地震局青年基金(2007250), 科技部社会公益研究专项资金项目(2002DIB20062); 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC20070067

作者简介: 王爱国(1972-),男(汉族),湖北洪湖人,副研究员,主要从事地震地质、工程地震方向的研究。

次发生7.5级以上古地震^[2-3]。最新活动为1709年中卫南7.5级地震,对大柳树坝址产生地震烈度影响为Ⅸ~Ⅹ度^[4]。坝址位于发震断层上盘,坝轴线距主干发震断层F₂₀₁仅1.5 km^[5],该地震断层在大柳树坝址底下深3.6~5 km左右处通过。由于大柳树坝址地处黄河出峡口,其下为中卫~银川平原,之间没有好的阻隔屏障;坝址区存在大量的松动岩体,岩体质量较差,渗透性强^[6-7];且位于未来百年内6.5级地震危险区之内。该处修筑堆石高坝一旦发生溃坝,将对下游产生不可预估的灾难。因此对大柳树坝址区附近的地震变形问题进行详细的研究具有重要的现实意义。本文基于地震的断层弹性位错理论及地震位移水平分布的抛物线模型,采用三维有限元方法^[1]对该坝址未来可能产生的最大地震变形及地震应力进行了计算,分析了这种变形对坝址可能产生的危害,以期为规划及建设单位提供一定的参考。

1 计算原理与方法^[1]

基于地震的断层弹性位错理论,可以应用“叠加原理”,将震源地方因断层错动释放的那部分应力用地震位移场单独的表示出来,而不受未释放的那部分应力的干扰。因此在地震变形计算中临震前的状态可视为“基准状态”,地震断层错动在周围介质中引起的位移场和应变场可认为是在上述基准状态上形成的。

静力弹性理论中,弹性材料的变形是可恢复的,弹性介质对外部作用的反应与变形或应力的历史无关,也不随时间延长而变化,其本构关系为

$$\sigma = D\varepsilon \quad \text{或} \quad \varepsilon = C\sigma, C = D^{-1} \quad (1)$$

其中D叫做弹性矩阵,对各向同性的弹性介质,D矩阵的具体形式为

$$D = \frac{E}{1+\nu} \begin{bmatrix} \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中E为杨氏模量,ν为泊松比。

应用虚功原理,可得到如下有限元方程:

$$K\alpha = P + Q + R_0 + R_e \quad (3)$$

其中 $K = \sum c_e^T K_e c_e$, $P = \sum c_e^T P_e$, $Q = \sum c_e^T Q_e$, $R_0 = \sum c_e^T R_{0,e}$, $R_e = \sum c_e^T R_{e,e}$; α为总位移矢量,K称为系统的刚度矩阵,P和Q分别为体力 and 面力载荷的系统的等效节点载荷矢量;R₀和R_e分别为初应力场和初应变场的等效节点载荷矢量;C_e为单元选择矩阵,下标e表示该矢量是属于单元的量,C_e为C_e的转置。

由于断层发震错动所产生的形变影响范围有限,可以假定与断层一定距离之外的边界变形为零。计算中只要输入地震在断层面上产生的位移分布,即可求出断层以外区域的地震位移、地震应力及应变。对于地震在断层面上产生的位移分布,水平方向上可以忽略位移分布的不对称性,采用位移分布的抛物线模型,即以震中为中心点,取水平方向为x轴,则有 $U_x = px^2 + U_d$,当 $x = L/2$ 时, $U_x = 0$,因此

$$p = -\frac{4U_d}{L^2}$$

其中L为地震地表破裂带长度,可根据其与震级的关系式 $M = 3.3 + 2.1 \lg L$ 确定^[8];地表最大错动幅度U_d与震级存在如下统计关系: $\lg U_d = 0.52M - 1.25$ ^[8]。而纵深方向上取一定断错面宽度,位移值简化为在纵深方向上不变。由于只有浅源地震才容易在地表产生破裂带,才会在地表一定范围产生大的地震变形,对设施造成破坏,计算中断错面的宽度可依据区域浅源地震震源深度来确定。这种确定断错面宽度的方法对于地表地震变形的影响并不明显^[1,9]。

2 大柳树坝址区地震地质特征与计算模型

在大柳树坝址区,中卫—同心活动断裂带表现为6条近东西走向的逆冲断层,从南至北依次为F₁、F₂、F₃、F₇₍₈₎、F₂₀₁和F₂₀₂断层(图1)。这6条断层相邻者在走向上多相交或重合。大柳树坝址位于F₃与F₇所夹的朵状块体上,坝轴线距北侧的F₂₀₁、F₇最近距离分别为1.5 km及0.8 km,距南侧的F₃、F₁最近距离分别为0.7 km和3.2 km。这些断层除F₃向北倾斜外,其余均向南倾斜,剖面上呈叠瓦状逆冲的挤压推覆带^[10]。

主干断层F₂₀₁是一条晚更新世及全新世以来强

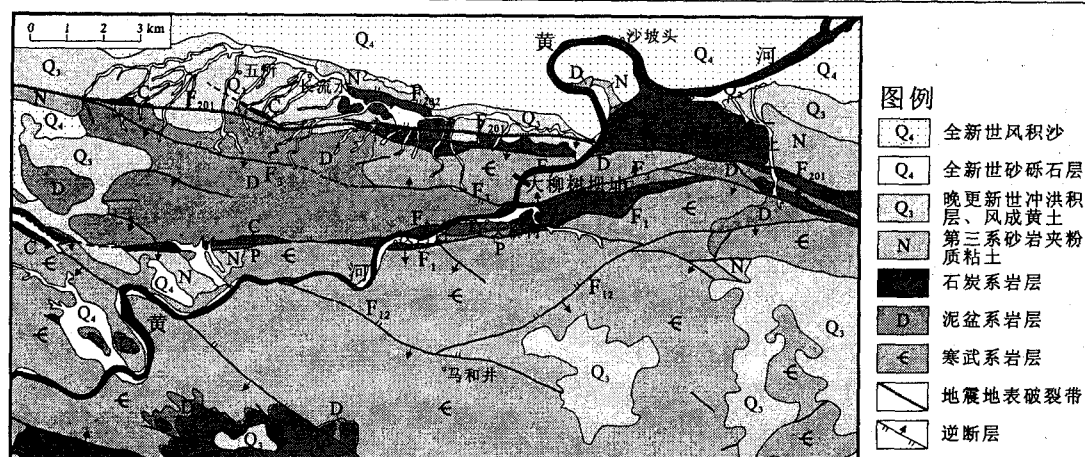


图 1 大柳树坝址区地质构造图

Fig. 1 Map of regional geologic tectonics around Daliushu dam-site.

烈左旋逆走滑活动的区域性深大发震断层,倾向南,倾角 $60\sim 80^\circ$,控制了多次古地震发生。沿该断层发生的 1709 年中卫南 7.5 级地震,地表形成长约 110 km 的破裂带,最大水平位错 5.6 m,最大垂直位错 1.19 m^[11-12]。考虑到坝址区几条断层中两条以上的断层同时发生地震错动的可能性非常小,我们以最新活动断层 F_{201} 发生地震来计算坝址区的地震应变和地震应力分布。

由于地震变形随断层距增大呈指数规律衰减,

我们根据上述地质特征建立了包括断层 F_{201} 、 F_7 和 F_3 在内的计算模型(图 2),模型以大柳树坝址为水平中心,长 150 km,宽 50 km,深 40 km。模型北界为 F_{201} 断层,倾角以浅地表 75° 计。由于该区寒武系变质岩大量出露,模型在纵深方向上以 5 km 为界,分为寒武纪变质岩与前寒武纪结晶基底。模型内断层破碎带宽度均按 100 m 计。各类型介质参数见表 1。

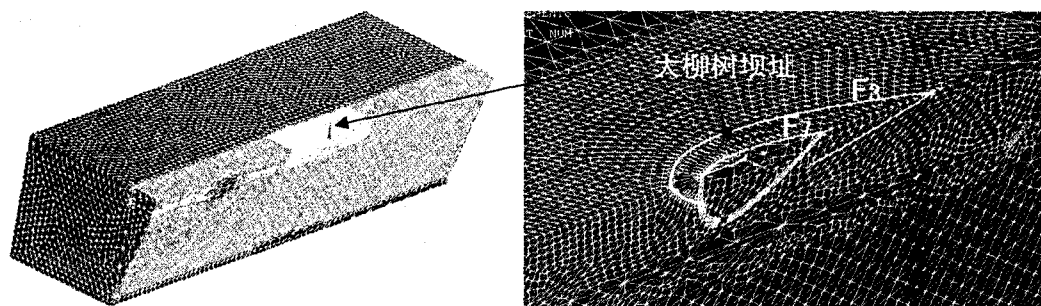


图 2 有限元模型及网格划分与局部放大图

Fig. 2 FEM model and grid for calculation with partially zoom-out figure.

表 1 岩性介质参数

介质类型	弹性模量 E/Pa	泊松比 μ
断层	$1.5\text{E}10$	0.28
寒武纪变质岩	$5\text{E}10$	0.26
前寒武纪结晶基底	$8\text{E}10$	0.23

虽然 F_{201} 断层古地震震级在 7.5 级以上,但古地震复发间隔较长,而未来百年该区为 6.5 级地震危险区,因此,我们分别了计算 F_{201} 断层发生 6.5 级、7.0 级和 7.5 级地震三种情况。由于大柳树坝址位于断层 F_{201} 上盘,为主动活动盘,而南侧阿拉善地台为稳定地块,在此三种情况下,保守的地震断层

位移分布参数如表 2,其中 7.5 级地震参数按 1709 年地震实际取值。根据地震活动性统计结果,祁连山东段微震震源深度集中于 25 km 以浅,大柳树坝址附近的震源深度为 12~22 km,因此计算中的断错面宽度均按 20 km 取值。计算中模型底面、东侧面、西侧面和南侧面为位移固定边界,北侧面为 F_{201} 断层面,按表 2 确定参数将位移分布施加于断层面上,计算地表及坝址的位移、地形变和应力变化。

3 计算结果分析

表2 断层参数与震级的关系

震级/M	地表破裂带长度 L/km	地表最大错动幅度 U_d/m		ρ
		水平	垂直	
6.5	33.4	1.35	0.3	-4.8E-3
7.0	57.8	2.45	0.53	-2.9E-3
7.5	100	5.6	1.2	-2.24E-3

应力与应变的表述形式有多种方式,由于篇幅所限,这里图示均以地表变形多组分综合判定指标应变强度 ϵ_{int} 、应力强度 σ_{int} 及总位移 U_s 的形式给出,而在列表时给出各种形式的量值以便对比分析。其中应变强度 ϵ_{int} 为三个主应变差值的绝对值之最大值,应力强度 σ_{int} 为三个主应力差值的绝对值之最大值,总位移 U_s 为三个方向位移值的矢量和。即

$$\epsilon_{int} = \max(|\epsilon_1 - \epsilon_2|, |\epsilon_2 - \epsilon_3|, |\epsilon_1 - \epsilon_3|) \quad (4)$$

$$\sigma_{int} = \max(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_1 - \sigma_3|) \quad (5)$$

$$U_s = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (6)$$

图3典型给出 F_{201} 断层发生7.0级地震时断层上盘及大柳树坝址区地表的总位移、应变强度与应力强度分布平面图。可以看出,总位移 U_s 在断层破裂带中心最大,向断层两侧及远离断层方向逐渐

衰减。由于断层 F_7 与 F_3 的影响,衰减呈不对称态。应力强度 σ_{int} 与应变强度 ϵ_{int} 分布规律则不同,远离断层方向逐渐衰减,但沿断层方向最大值则位于破裂带两端。本计算模型中坝址对应破裂带中段,因此应力与应变计算结果相对偏于保守。从坝址附近区局部放大图看,断层的作用是明显的,对应变起到释放的作用。

图4为坝址区垂直断层方向地表总位移、应力强度与应变强度随断层距的衰减关系,其中1.5 km处对应为大柳树坝址。可以看出,在断裂带 F_7 与 F_3 上位移有明显的突降,相应的,在断裂带上的应变较大而应力相对要小。大柳树坝址位于两断层所夹块体上,块体形成总体滑移,块体内应变相对较小,但应力却有明显抬升。

为使结果一目了然和易于对比,我们将大柳树坝址计算结果综合列入表3、表4和表5。

表3 大柳树坝址地震位移计算结果(单位:m)

发震震级/M	U_x	U_y	U_z	U_s
6.5	1.181 2	-0.174 51	0.284 33	1.227 4
7.0	2.2718	-0.318 34	0.512 33	2.350 5
7.5	5.34 26	-0.737 92	1.168 6	5.518 5

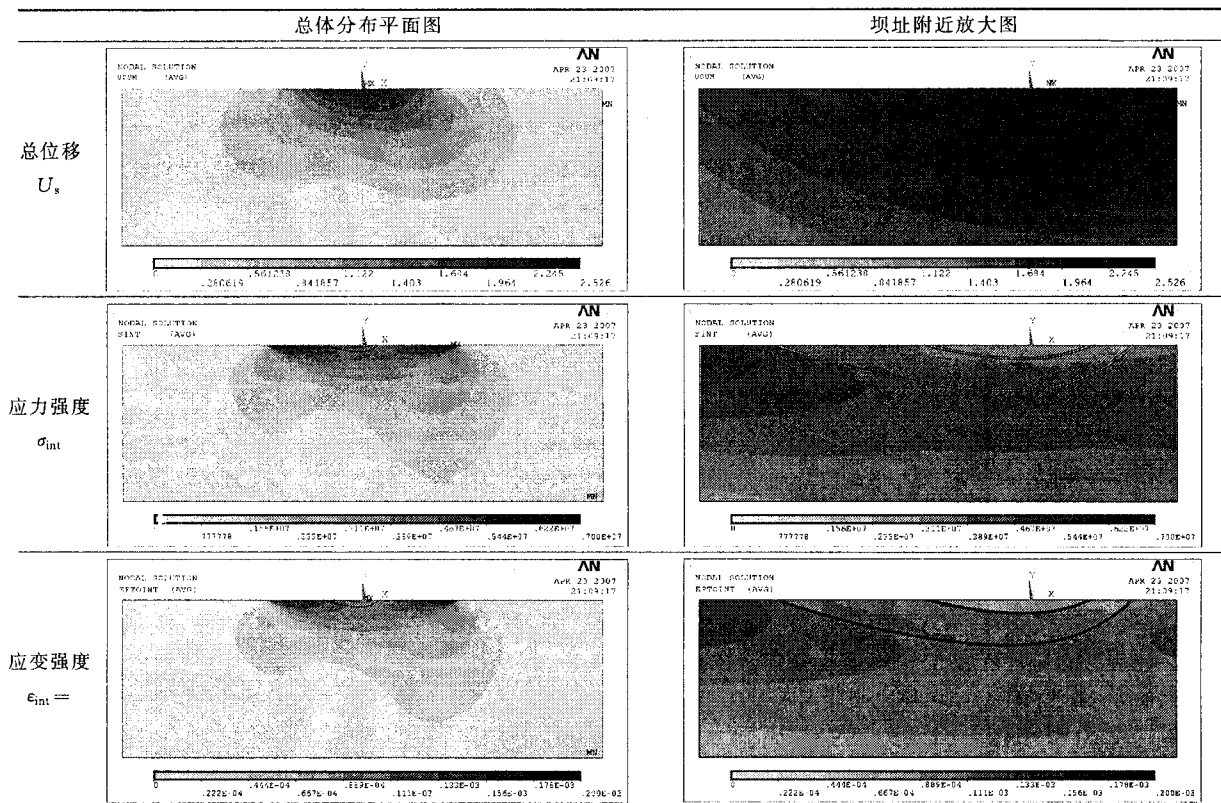


图3 F_{201} 发生7.0级地震时断层上盘及大柳树坝址区地表地震变形与应力分布平面图
Fig. 3 Deformation and stress distribution in the upper wall and Daliushu dam-site area during M_s 7.0 earthquake generated by F_{201} .

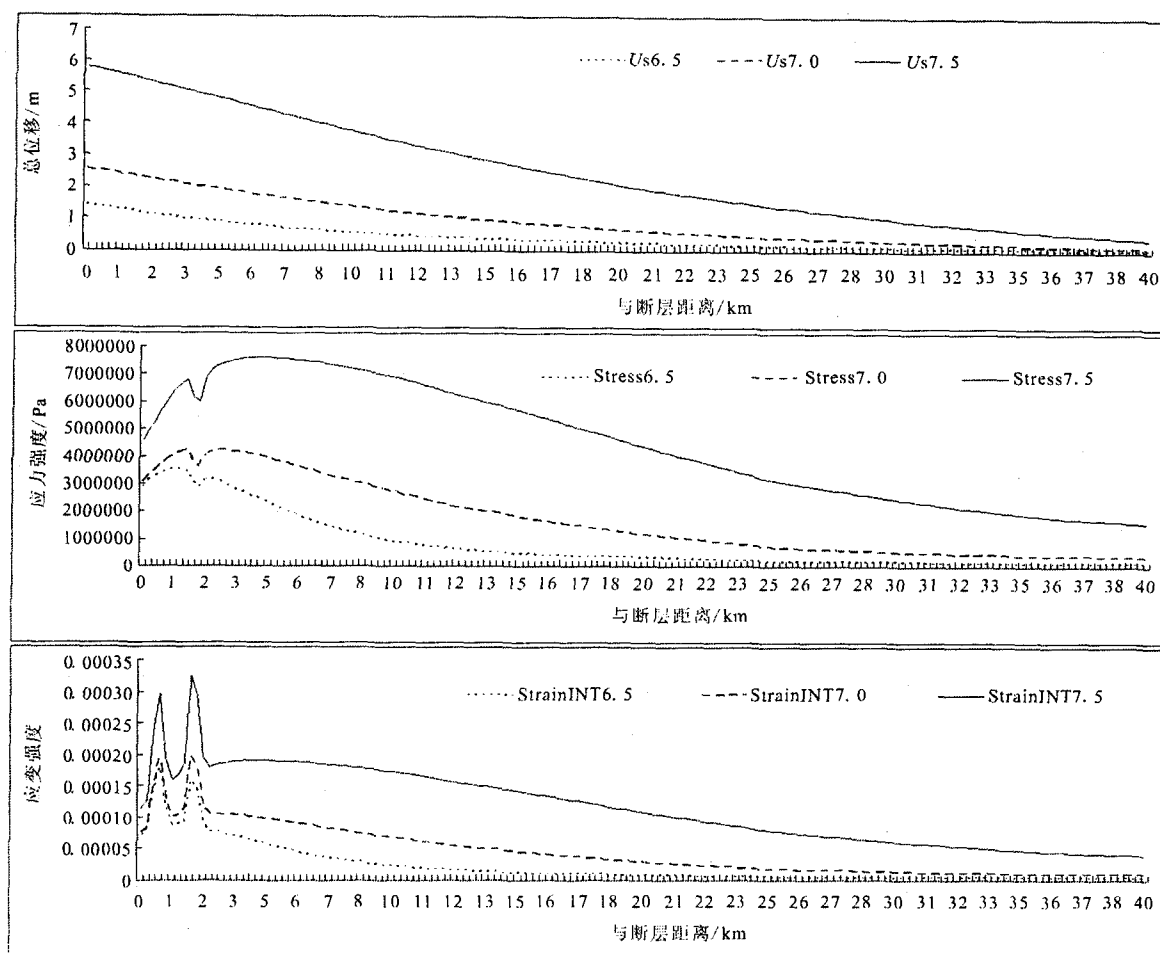


图 4 F_{201} 发生 7.0 级地震时坝址区垂直断层方向地表地震变形与应力分布曲线

Fig. 4 Ground deformation and stress distribution curves in the vertical direction to fault strike during $M_s7.0$ earthquake generated by F_{201} .

表 4 大柳树坝址地震应变计算结果(单位: 10^{-4})

发震震级/ M	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z	ϵ_{xy}	ϵ_{yz}	ϵ_{zx}	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_{int}
6.5	0.048 3	-0.004 2	-0.016 4	0.887 6	0.002 3	-0.034 2	0.466 9	-0.016 3	-0.422 9	0.889 8
7.0	0.035 2	0.013 5	-0.018 2	1.043 7	-0.000 4	-0.043 3	0.567 1	-0.018 1	-0.498 1	1.044 8
7.5	0.034 1	0.046 77	-0.030 4	1.670 8	-0.003 3	-0.069 9	0.876 6	-0.030 4	-0.795 7	1.672 3

表 5 大柳树坝址地震应力计算结果(单位: MPa)

发震震级/ M	σ_x	σ_y	σ_z	σ_{xy}	σ_{yz}	σ_{zx}	σ_1	σ_2	σ_3	σ_{int}
6.5	0.25	0.043	-0.005 3	1.76	0.004 5	-0.068	1.912	-0.004 9	-1.619	3.531
7.0	0.205	0.119	-0.006 5	2.071	-0.000 9	-0.086	2.235	-0.006 3	-1.911	4.146
7.5	0.244	0.294	-0.012 0	3.315	-0.006 6	-0.138 6	3.587	-0.012 0	-3.049	6.636

根据如上计算结果, F_{201} 断层发生 6.5 级以上地震时, 大柳树坝址区总体位移在 1 米至几米, 无论正应变、剪应变还是应变强度, 其量值均在 10^{-4} 以上, 地震应力也都在几兆帕以上。

4 结论

研究资料^[13]表明, 通常地壳岩石的应变达到 10^{-4} 左右的量级就可以导致岩石的破坏而在岩石中

产生大量的裂隙。从模拟计算结果可以看到, 当大柳树坝址附近的 F_{201} 断层在未来发生 6.5 级以上地震时, 在断层的南盘包括坝址在内至少宽约 3 km 范围内, 地震引起的应变都在 10^{-4} 的量级以上, 超出了岩石的破裂应变极限。震级愈高, 坝址区的地震变形及应力值更是非线性增长。

(下转 329 页)

4 结论

通过新疆专用地震台网的定点阈值监测技术的应用,可以得到以下结论:

(1) 根据新疆及边境区域的 30 个左右的历史地震事件采用最小二乘法拟合得到地震台网各台的震级修正项系数,以此来计算的地震事件震级与新疆地震目录震级的误差不大。标定后的台网震级与新疆地震目录震级的误差值为;

(2) 根据巴基斯坦地震事件的分析,可以看出定点阈值监测方法在估计台网震级阈值的应用上取得了客观、实际的结果:由于巴基斯坦 4.8 级地震事件的爆发使得此时阈值曲线达到 4.55 级。台网此时间段内对于该定点区域基本能够控制 3.5 级以上

的地震。

[参考文献]

- [1] 周明辉,许延军,赵成文. 金昌无线遥测地震台网监测能力的初步评定[J]. 高原地震,2004,16(2):1-3.
- [2] 单新建,韩京,许静. 新疆测震台网历史监测能力及现状[J]. 内陆地震,1996,10(1):2-3.
- [3] 吴开统,焦远碧. 论中国地震台网的监测效能[J]. 地震研究,1981,4(1):2-5.
- [4] Ringdal F, T Kværna. Seismic Threshold Monitoring for Continuous Assessment of Global Detection Capability[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1999,89(4):946-959.
- [5] Tormod Kværna. Advanced Regional Array Studies. Section 2. Optimized Threshold Monitoring of the Novaya Zemlya Test Site[R]. Kjeller, NORWAY;NORSAR,2001.

(上接 318 页)

尽管大柳树大坝工程建设按照基本烈度Ⅷ度、甚至Ⅸ度设计,但如果地震一旦发生,大柳树高坝大库存在的抗地裂缝破坏和库区严重渗漏的问题解决起来都是十分困难的。大柳树高坝身系中卫——银川盆地千万民众的安危,笔者认为如果该坝建在距离可能发生 6.5~7.5 级地震的长度大于 110 km 的区域性发震断裂 F_{201} 约 1.5 km 的地方是不适宜的,谨望规划部门与设计单位慎之再慎。

[参考文献]

- [1] 王爱国,石玉成,马巍. 地震地表变形三维有限元数值分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(24):4124-4130.
- [2] 闵伟,张培震,邓起东. 中卫—同心断裂带全新世古地震研究[J]. 地震地质,2001,23(3):82-85.
- [3] 梁收运,韩文峰,谌文武,等. 大柳树坝址区断层测年研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(增2):2559-2663.
- [4] 李雪峰,韩文峰,谌文武,等. 黄河黑山峡大柳树坝址与小观音坝址岩体质量差异的原因探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(增2):2551-2554.

- [5] 马润勇,彭建兵,门玉明,等. 黑山峡大柳树坝址区断裂构造格局与工程抗断问题研究[J]. 地质灾害与环境保护,2002,13(4):46-50.
- [6] 柴寿喜,王银梅,王君国. 大柳树坝址灌浆试验与岩体质量[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(增2):2555-2558.
- [7] 谌文武,孙冠平,宋畅,等. 大柳树坝址松动岩体的渗透特性[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(增2):2564-2567.
- [8] 郭增建,秦保燕. 震源物理[M]. 北京:地震出版社,1979.
- [9] 陈运泰,林邦慧,林中洋,等. 根据地面形变的观测研究 1966 年邢台地震的震源过程[J]. 地球物理学报,1975,18(3):164-182.
- [10] 李天斌,孟方,王美芳,等. 宁夏中西部香山—天景山地区逆冲推覆构造的特征及演化[J]. 地质通报,2005,24(4):309-315.
- [11] 郭进京,杜东菊,韩文峰,等. 黄河黑山峡大柳树坝址区 F_{201} 和 $F_{7(8)}$ 断层的活动性[J]. 地质通报,2005,23(12):1259-1264.
- [12] 张维岐,焦德成,柴积章. 宁夏香山—天景山弧形断裂带新活动特征及 1709 年中卫南 7.5 级地震形变带[J]. 地震地质,1988,10(3):12-20.
- [13] 陈颢. 地壳岩石的力学性能. 北京:地震出版社,1988.