

近断层水库大坝的震后变形问题分析

李亚荣, 荣代潞, 韩晓明

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:本文以拟建水库大坝为例计算了位于断层附近的坝址区在发生6~7级地震时的位移、应变和应力。结果表明这种位移、应变和应力都达到很大的值,对于近断层的重大工程设施必须考虑断层发震产生的震后变形引起的“抗断问题”。

关键词:震后变形; 近断层; 大坝

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2006)02-0123-06

Analyses on the Post-earthquake Deformation on Reservoir Dam near Active Fault

LI Ya-rong, RONG Dai-lu, Han Xiao-ming

(Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Taking a planned reservoir dam as the example, the displacement, strain and stress in the dam area which is located near active fault in $M 6 \sim 7$ earthquake are calculated in this paper. The results show that the deformation can reach a higher values and cause serious damage to structure. So the 'anti-rupture problem' must be considered for the important and great engineering near active fault.

Key words: Post-earthquake deformation; Near fault; Dam

0 引言

目前对于重大水利水电设施在设计阶段的地震安全性通常使用烈度和加速度来评价,这基本上是对设施在地震中的抗振动性能要求的量度。这在一般情况下是合理的,即设施距震源有一定的距离,地震波传到设施的地方产生一定振幅的振动,设施抗震只考虑抗拒地震波产生的振动。

但断层发震时的错动使断层两盘发生相对位移,因而震后在断层周围产生一个位移场分布。这种位移场分布以及位移分布在空间的不均匀性(应变)会使介质质点之间产生永久性的相对位移和破坏。所以如果设施位于断层附近地震变形很大的区域,那末就必须考虑在地震产生的变形中经受住考验。因为在地表产生较大的裂缝和破坏时,地面上的大型设施也会同样产生破坏,这就提出了近断层巨大工程设施的震后变形问题,即所谓“抗断裂问题”。若设施距发震断层较近,地震震后变形大到

一定程度,设施的抗断问题显得更加突出。

本文拟对地震发生后发震断层附近的地震变形进行一些理论分析,以国内某个拟建的水库大坝为例对地震震后变形问题进行具体的计算。

1 地震断层错动产生的形变场的基本理论

根据弹性位错理论的观点,地震断层破裂错动可以看作是弹性介质内的一种位移突变。因此如果不考虑破裂现象的时间进程,就可以用静力弹性理论来研究这种位移突变造成的永久形变场。

按照弹性位错理论,在均匀、各向同性和完全弹性的半无限介质中,任意形状的位错面在介质中某一点 Q (坐标 $x_m, m=1, 2, 3$) 引起的位移是^[1-2]

$$\vec{u}(Q) = u_m(Q) \vec{e}_m$$

$$u_m(Q) = \iint_{\Sigma} \Delta U_k(P) W_{ki}^m(P, Q) n_l(P) d\Sigma \quad (1)$$

收稿日期:2005-08-29

中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC20060023

作者简介:李亚荣(1954-)女(汉族),甘肃天水人,高级工程师,主要从事地震学研究。

这里采用哑指标下的求和约定。 $\vec{e}_m (m = 1, 2, 3)$ 表示 x_m 方向的单位向量; $W_{kl}^m(P, Q)$ 是弹性半无限介质中由 kl 定义的、作用于某一点 P (坐标 $\xi_m, m = 1, 2, 3$) 的力系在 Q 点引起的沿 x_m 方向的位移; $\Delta U_k (P) (k = 1, 2, 3)$ 是在 P 点的位错向量 ΔU 的三个分量; $n_l(P) (l = 1, 2, 3)$ 是在 P 点的面积元 $d\Sigma$ 的法向 n 的方向余弦。 $W_{kl}^m(P, Q)$ 由下式表示:

$$W_{kl}^m(P, Q) = \lambda \delta_{kl} \frac{\partial u_m^n}{\partial \xi_n} + \mu \left(\frac{\partial u_m^k}{\partial \xi_l} + \frac{\partial u_m^l}{\partial \xi_k} \right) \quad (2)$$

式中 λ, μ 是拉梅常数; u_m^k 是弹性半无限介质中作用于 P 点的 x_k 方向的单位集中力在 Q 点引起的沿 x_m

方向的位移。

取如图 1 的坐标系: 设断层是一个矩形位错面, 长为 $2L$, 宽为 ΔD 。将直角坐标系 (x_1, x_2, x_3) 的原点取在地面上; 取和断层走向一致的方向为 x_1 方向; x_3 垂直于地面, 向下为正。以 θ 代表断层和地面的夹角 (倾角)。略去繁琐的计算细节, 并设 $\mu = \lambda$ (泊松比的变化对断层附近的位移场影响不大, 因而在计算中常常采用 $\lambda = \mu$ 的介质, 即泊松体)。下面给出以不定积分表示的结果^[3]。

(1) 对于走向滑动断层, 设 ΔU_s 表示错距:

$$12\pi \frac{u_1}{\Delta U_s} = (x_1 - \xi_1) \left[\frac{2r_2}{R + r_3 - \xi} - \frac{4q_2 - 2x_3 \cos \theta}{Q(q + q_3 + \xi)} - \frac{3 \tan \theta}{Q + x_3 + \xi_3} + \frac{4q_2 x_3 \sin \theta}{Q^3} - \frac{4q_2 q_3 x_3 \sin \theta}{Q^3 (Q + q_3 + \xi)^2} \right] - 6 \tan^2 \theta \arctan \left[\frac{(k - q_2 \cos \theta)(Q - k) + (q_3 + \xi)k \sin \theta}{(x_1 - \xi_1)(q_3 + \xi) \cos \theta} \right] + 3 \arctan \frac{(x_1 - \xi_1)(r_3 - \xi)}{r_2 R} - 3 \arctan \frac{(x_1 - \xi_1)(q_3 + \xi)}{q_2 Q}$$

$$12\pi \frac{u_2}{\Delta U_s} = \sin \theta [3 \tan \theta \sec \theta \ln(Q + x_2 + \xi_3) - \ln(R + r_3 - \xi) - (1 + 3 \tan^2 \theta) \ln(Q + q_3 + \xi)] + \frac{2r_2^2 \sin \theta}{R(R + r_3 - \xi)} + \frac{2r_2 \cos \theta}{R} - 2 \sin \theta \frac{[2x_3(q_2 \cos \theta - q_3 \sin \theta) + q_2(q_2 + x_2 \sin \theta)]}{Q(Q + q_3 + \xi)} - 3 \tan \theta \frac{(x_2 - \xi_2)}{Q + x_3 + \xi_3} + 2 \frac{(q_2 \cos \theta - q_3 \sin \theta - x_3 \sin^2 \theta)}{Q} + 4q_2 x_3 \sin \theta \frac{[(x_2 - \xi_2) + q_3 \cos \theta]}{Q^3} - 4q_2^2 q_3 x_3 \sin^2 \theta \frac{2Q + q_3 + \xi}{Q^3 (Q + q_3 + \xi)^2}$$

$$12\pi \frac{u_3}{\Delta U_s} = \cos \theta [\ln(R + r_3 - \xi) + (1 - 3 \tan^2 \theta) \ln(Q + q_3 + \xi) - 3 \tan \theta \sec \theta \ln(Q + x_3 + \xi_3)] + \frac{2r_2 \sin \theta}{R} + 2 \sin \theta \frac{(q_2 + x_2 \sin \theta)}{Q} - \frac{2r_2^2 \cos \theta}{R(R + r_3 - \xi)} + \frac{4q_2 x_3 \sin^2 \theta - 2(q_2 + x_2 \sin \theta)(x_3 + q_3 \sin \theta)}{Q(Q + q_3 + \xi)} + 4q_2 x_3 \sin \theta \frac{[(x_3 + \xi_3) - q_3 \sin \theta]}{Q^3} - 4q_2^2 q_3 x_3 \cos \theta \sin \theta \frac{(2Q + q_3 + \xi)}{Q^3 (Q + q_3 + \xi)^2} \quad (3)$$

(2) 对于倾向滑动断层, 设 ΔU_d 表示错距:

$$12\pi \frac{u_1}{\Delta U_d} = (x_2 - \xi_2) \sin \theta \left[\frac{2}{R} + \frac{4}{Q} - 4 \frac{\xi_3 x_3}{Q} - \frac{3}{Q + x_3 + \xi_3} \right] - \cos \theta [3 \ln(Q + x_3 + \xi_3) + 2 \frac{(x_3 - \xi_3)}{R} + 4 \frac{(x_3 - \xi_3)}{Q} + 4 \frac{\xi_3 x_3 (x_3 + \xi_3)}{Q^3}] + \cos \theta [\ln(Q + x_3 + \xi_3) - \sin \theta \ln(Q + q_3 + \xi)] + 6x_3 \left[\frac{\cos \theta}{Q} - \frac{q_2 \sin \theta}{Q(Q + q_3 + \xi)} \right]$$

$$12\pi \frac{u_2}{\Delta U_d} = \sin \theta \left[-\ln(R + x_1 - \xi_1) + \ln(Q + x_1 - \xi_1) + \frac{4\xi_3 x_3}{Q(Q + x_1 - \xi_1)} + \frac{3(x_1 - \xi_1)}{Q + x_3 + \xi_3} + (x_2 - \xi_2)^2 \left\{ \frac{2}{R(R + x_1 - \xi_1)} + \frac{4}{Q(Q + x_1 - \xi_1)} - 4\xi_3 x_3 \left(\frac{2Q + x_1 - \xi_1}{Q^3 (Q + x_1 - \xi_1)^2} \right) \right\} \right] -$$

$$\begin{aligned}
 & \cos \theta \left[(x_2 - \xi_2) \left\{ \frac{2(x_3 - \xi_3)}{R(R + x_1 - \xi_1)} + \frac{4(x_3 - \xi_3)}{Q(Q + x_1 - \xi_1)} + 4\xi_3 x_3 (x_3 + \xi_3) \left(\frac{2Q + x_1 - \xi_1}{Q^3(Q + x_1 - \xi_1)^2} \right) \right\} + \right. \\
 & 6\arctan \left\{ \frac{(x_1 - \xi_1)(x_2 - \xi_2)}{(h + x_3 \xi_3)(Q + h)} \right\} - 3\arctan \left\{ \frac{(x_1 - \xi_1)(r_3 - \xi)}{r_2 R} \right\} + 6\arctan \left\{ \frac{(x_1 - \xi_1)(q_3 + \xi)}{q_2 Q} \right\} + \\
 & 6 \left[\frac{1}{\cos \theta} \arctan \left\{ \frac{(k - q_2 \cos \theta)(Q - k) + (q_3 + \xi)k \sin \theta}{(x_1 - \xi_1)(q_3 + \xi) \cos \theta} \right\} + \right. \\
 & \left. x_3 \left\{ \frac{(\sin^2 \theta - \cos^2 \theta)(q_3 + \xi) + 2q_2 \cos \theta \sin \theta}{Q(Q + x_1 - \xi_1)} + \frac{(x_1 - \xi_1) \sin^2 \theta}{Q(Q + q_3 + \xi)} \right\} \right] \\
 12\pi \frac{u_3}{\Delta U_d} = & \sin \theta \left[(x_2 - \xi_2) \left\{ \frac{2(x_3 - \xi_3)}{R(R + x_1 - \xi_1)} + 4 \frac{(x_3 - \xi_3)}{Q(Q + x_1 - \xi_1)} - 4\xi_3 x_3 (x_3 + \xi_3) \left(\frac{2Q + x_1 - \xi_1}{Q^3(Q + x_1 - \xi_1)^2} \right) \right\} - \right. \\
 & 6\arctan \left\{ \frac{(x_1 - \xi_1)(x_2 - \xi_2)}{(h + x_3 + \xi_3)(Q + h)} \right\} + 3\arctan \left\{ \frac{(x_1 - \xi_1)(r_3 - \xi)}{r_2 R} \right\} - 6\arctan \left\{ \frac{(x_1 - \xi_1)(q_3 + \xi)}{q_2 Q} \right\} \left. \right] \\
 & + \cos \theta \left[\ln(R + x_1 - \xi_1) - \ln(Q + x_1 - \xi_1) - 2 \frac{(x_3 - \xi_3)^2}{R(R + x_1 - \xi_1)} - 4 \frac{\{(x_3 - \xi_3)^3 - \xi_3 x_3\}}{Q(Q + x_1 - \xi_1)} - \right. \\
 & \left. 4\xi_3 x_3 (x_3 + \xi_3)^2 \left(\frac{2Q + x_1 - \xi_1}{Q^3(Q + x_1 - \xi_1)^2} \right) \right] + 6x_3 \left[\cos \theta \sin \theta \left\{ \frac{2(q_3 + \xi)}{Q(Q + x_1 - \xi_1)} + \frac{x_1 - \xi_1}{Q(Q + q_3 + \xi)} \right\} - \right. \\
 & \left. q_2 \frac{(\sin^2 \theta - \cos^2 \theta)}{Q(Q + x_1 - \xi_1)} \right]
 \end{aligned} \tag{4}$$

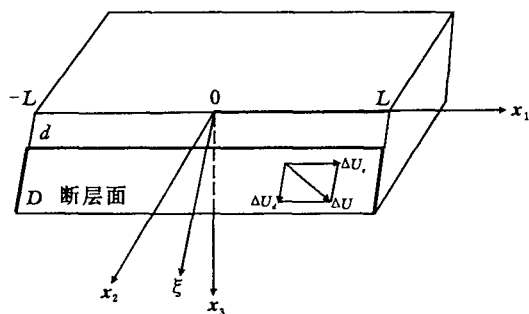
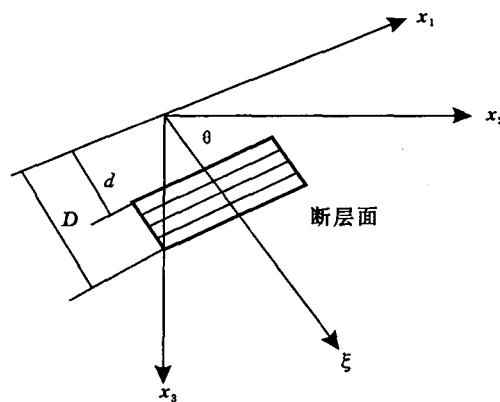


图1 任意倾角矩形断层面错动的坐标系

Fig.1 Coordinates for dislocating of rectangle fault plane with free dip angle.

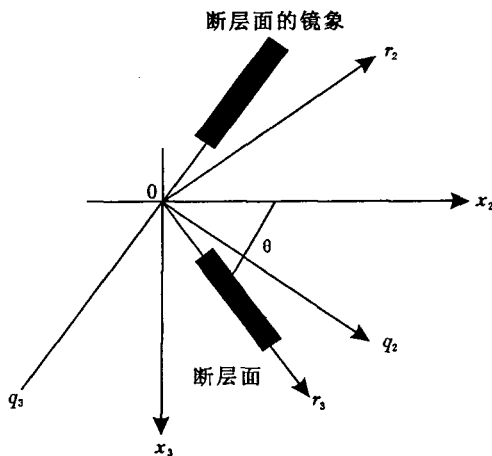


上面各式中的右边诸项均要代入二重积分的上、下限,即得矩形面上的积分值:

$$[f(\xi_1, \xi)] \parallel = f(L, D) - f(L, d) - f(-L, D) + f(-L, d) \tag{5}$$

其中 d, D 为断层的上下界埋深。

上面式中各参数的意义如下: (x_1, x_2, x_3) 为场点; (ξ_1, ξ_2, ξ_3) 为源点; $(\xi_1, \xi_2, -\xi_3)$ 为镜像源点; R 为场点到源点的距离; Q 为场点到镜像源点的距离; r_2, r_3 与 q_2, q_3 分别为断层面法线和沿倾向向下计算的场坐标及镜像的坐标,如图2所示。因而有



$$r_2 = x_2 \sin \theta - x_3 \cos \theta, q_2 = x_2 \sin \theta + x_3 \cos \theta$$

$$r_3 = x_2 \cos \theta + x_3 \sin \theta, q_3 = -x_2 \cos \theta + x_3 \sin \theta$$

$$R^2 = (x_1 - \xi_1)^2 + r_2^2 + (r_3 - \xi)^2$$

图2 断层、坐标及各参数的意义

Fig.2 Meaning of fault, coordinates and parameters.

$$Q^2 = (x_1 - \xi_1)^2 + q_2^2 + (q_3 + \xi)^2 = (x_1 - \xi_1)^2 + h^2 = k^2 + (q_3 + \xi)^2 \quad (6)$$

式中 h 为 Q 在 $x_1 = 0$ 平面上的投影; k 为其在 $q_3 = 0$ 平面上的投影。

当断层参数已知, 根据上面各式就可以计算出当断层错动时介质中的位移场分布。再由应变与位移的关系式

$$e_{ij} = e_{ji} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

即可求得应变场分布。

进而, 在各向同性介质中应力和应变的关系为

$$\tau_{ij} = \lambda \delta_{ij} e_{kk} + 2\mu e_{ij} \quad (8)$$

式中 δ_{ij} 为 Kronecker 符号, 当 $i = j$ 时, 则 $\delta_{ij} = 1$; 当 $i \neq j$ 时, $\delta_{ij} = 0$ 。于是上式可写为

$$\begin{aligned} \tau_{11} &= \lambda(e_{11} + e_{22} + e_{33}) + 2\mu e_{11} \\ \tau_{22} &= \lambda(e_{11} + e_{22} + e_{33}) + 2\mu e_{22} \\ \tau_{33} &= \lambda(e_{11} + e_{22} + e_{33}) + 2\mu e_{33} \\ \tau_{12} &= \tau_{21} = \mu e_{12} \\ \tau_{23} &= \tau_{32} = \mu e_{23} \\ \tau_{13} &= \tau_{31} = \mu e_{13} \end{aligned} \quad (9)$$

由此可求得应力场分布。

2 计算实例及参数的选择

下面以国内某拟建水库大坝为例, 根据上面的分析进行地震断层附近地面变形的模拟计算。

根据野外调查和历史地震活动, 在拟建大坝附近存在一条断层, 断层长度大于 80 km, 倾角 75° 。该断层在 18 世纪初曾发生 $7\frac{1}{2}$ 级地震。拟建大坝距此断层的最近距离为 1 500 m。考虑最不利的情况, 我们计算此断层在坝址附近发生 6 级和 7 级地震的情况下坝址区的地震变形。

以表示地震强度的震级 M 为基础, 通过一些关系式计算发震断层的基本参数。

(1) 断层长度 $L^{[4]}$:

$$M = 3.3 + 2.1 \lg L(\text{km}) \quad (10)$$

(2) 断层宽度 ΔD : 首先根据地震矩与震级的关系^[5]

$$M_s = 0.79 \lg M_0 - 13.84 \quad (11)$$

(M_0 为地震矩, 以达因 - 厘米计), 计算出对应震级的地震矩; 然后根据地震矩与断层面积的关系

$$M_0 = A\mu \Delta U = L \Delta D \mu \Delta U \quad (12)$$

(μ 为地壳岩石的刚度, 取 10^{11} Pa), 计算出断层宽度。

(3) 错动幅度 $\Delta U^{[4]}$:

$$\Delta U = 10^{0.52M-1.25} \quad (13)$$

由以上诸关系求得不同震级的发震断层的错动参数见表 2。

表 2 不同震级的断层参数

震级/ M	震中烈度/ I_0	断层半长/km	断层宽度/km	错动幅度/m
6.0	VIII	19.3/2	9.1	0.74
7.0	IX	57.8/2	16.9	2.45

震中烈度 I_0 与震级 M 的关系由 $M \approx 1 + \frac{2}{3} I_0$ 确

定。

考虑到近地表岩石的风化和破碎, 在计算中取断层上界距地表 100 m, 断层迹线与 x_1 轴一致。断层和大坝的相对位置及坐标如图 3 所示。

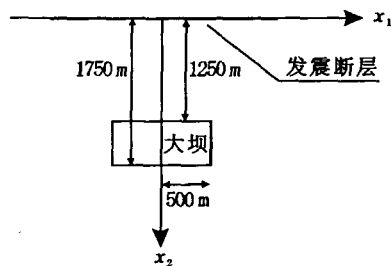


图 3 坝址地区的计算范围

Fig. 3 Calculating range of the dam area.

根据上面位移、应变和应力的表达式, 代入相应的断层参数, 计算 $x_2 = 1\ 500$ m 附近几百米范围地表 ($x_3 = 0$) 的位移、应变和应力分布。由于地表是应力自由面, 因此有 $\sigma_{31} = \sigma_{32} = \sigma_{33} = 0, e_{31} = e_{32} = 0$; 由对称性又有 $\sigma_{13} = \sigma_{23} = 0, e_{13} = e_{23} = 0$ 。另外我们只计算了 $x_1 \geq 0$ 和 $x_2 \geq 0$ 象限的值 (计算时 x_2 坐标的零点取在坝址区靠近断层一侧的边缘, 即 1 250 m 处); 对于 $x_1 \leq 0$ 和 $x_2 \geq 0$ (即断层的另一半) 所在的象限和第一象限是对称的。

将计算结果画成三维分布图。限于篇幅只列出 $M = 7.0$ 的部分结果 (图 4)。图中曲面相对于 $x_1 - x_2$ 平面 (即地表面) 的高度代表相应的值的大小。坝址区的最大位移、应变和应力见表 3。

3 讨论和结论

(1) 应当指出, 本文使用的是位错面上均匀滑动的地震断层位错模型, 这种模型在位错面 (断层面) 处是奇点, 在位错面附近的应变和应力的计算值与实际值有较大的出入。由于我们计算的是距离断层 1 250 ~ 1 750 m 范围, 距断层面不是太近, 因此计算得出的结果应当可以作为分析大坝震后变形

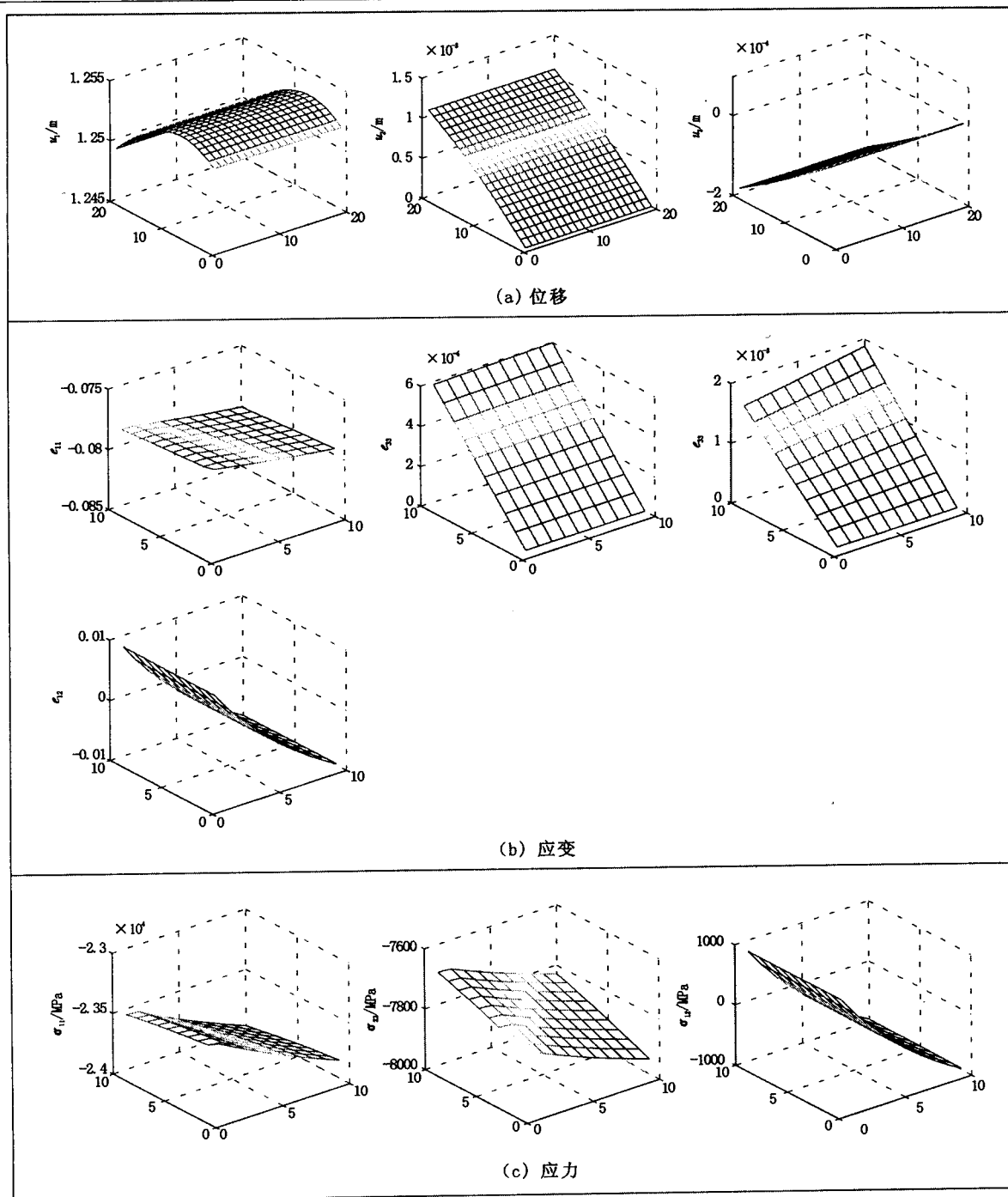


图4 坝址区的位移、应变和应力(M=7.0)

Fig.4 The displacement, strain and stress of the dam area (M=7.0).

表3 坝址区的最大位移、应变和应力

震级和 烈度/M, I ₀	断层性质	最大位移 (绝对值)/m	最大应变(绝对值)		最大应力(绝对值)/MPa	
			正应变	剪应变	正应力	剪应力
6.0	走滑断层	0.34	5.7(×10 ⁻²)	1.6(×10 ⁻²)	1.6×10 ⁴	1.6×10 ³
VIII	倾滑断层	0.30	2.0(×10 ¹)	6.0(×10 ⁻¹)	6.0×10 ⁶	6.0×10 ⁴
7.0	走滑断层	1.25	8.0(×10 ⁻²)	1.0(×10 ⁻²)	2.4×10 ⁴	1.0×10 ³
IX	倾滑断层	1.2	2.0(×10 ²)	6.0(×10 ⁰)	6.0×10 ⁷	6.0×10 ⁵

问题的参考;

(2) 使用这种模型计算得出的是地震后断层附

近产生的永久变形,而不是地震发生时地震波在岩石中传播产生的变形。地震后断层附近产生的永久

变形在断层附近应当具有较大的值,足以在断层附近产生岩石破碎和大量裂隙,这也是在大地震的断层附近经常观察到的现象。

(3) 对于倾滑断层,其上下盘的位移、变形和应力值是不同的,本文只计算了坝址位于下盘时的结果。

(4) 资料和研究表明^[6],地壳中岩石的各种变形的应变值的范围如图5所示。看出,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,在岩石中产生大量的裂隙。从我们的计算结果可以看到,在发生 $M=6.0\sim 7.0$ 地震的断层附近,其引起的应变都在 10^{-4} 的量级以上,有的达到 10^{-2} 的量级;倾滑断层在坝址区产生的应变已经达到有限应变的范围($10^{-1}\sim 10^2$ 的量级)。

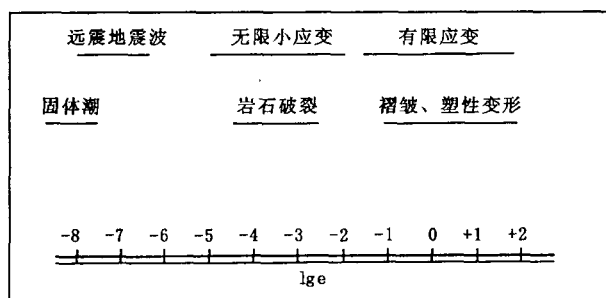


图5 地壳中岩石的各种变形的应变值的范围

Fig. 5 Range of strain values for different deformations in the crust rocks.

对于走滑断层,正应力达到 10^4 MPa 的量级,剪应力在 10^3 MPa 的量级;对于倾滑断层,正应力达到 $10^6\sim 10^7$ MPa 的量级,剪应力在 $10^4\sim 10^5$ MPa 的量级。这些数值都远远超过了地壳岩石的抗压、抗拉和抗剪切的强度。由于本模型假设地壳介质是完全弹性的,所以计算出来的应变值可以达到有限应变的范围。实际上由于地壳的非完全弹性,由断层错动在附近产生的变形在远远没有达到较大变形前就已经产生裂隙或破碎了。

这里需要说明,实际地震发生时,既有走滑断层分量,也有倾滑断层分量,它可以分解为纯粹走滑和倾滑分量的叠加。在计算时可以分别进行计算,然后将其进行叠加即可。计算的原则和方法与上面是一样的。

(5) 综上所述,当发生大地震($M=6.0\sim 7.0$,震中烈度Ⅷ~Ⅸ)时,地震断层附近地区所产生的地震变形有下面几个后果:①使断层附近地区产生整体移动,包括平移和倾斜。②巨大量值的应变和应力使地壳岩石产生破坏,使岩体产生大小不等的

裂隙和裂缝,包括拉张和剪切裂缝。③因此建在这样位置的建筑物会发生整体位移和倾斜,更为严重的是建筑物会随着岩体的破坏而一起破坏。这种破坏不仅包括剪切断裂、拉张断裂,而且还包括压性破坏。④对于水库大坝,在地震断层附近较大范围的地壳岩石中产生的裂隙和裂缝使其渗透性大大增加。

(6) 本文分析了地震断层附近的震后变形问题,并以拟建水库大坝为例进行了具体的计算分析,分析方法和结果都是初步的。鉴于断层位错引起的位移、形变和应力场在地球物理、地震学和工程抗震等问题中的重要性,近年来有一些研究者对这一问题进行了深入研究并推导了更为精确的计算公式^[7]。本文采用的是文献[3]的基本公式,主要目的是通过这一初步计算和分析,引起对断层附近的重大工程设施的“抗断问题”的重视。

(7) 大地震后在断层附近产生的变形与地表破裂密切相关,因此,对于近断层的重大工程设施必须考虑断层发震后引起的地震变形问题。至于“近断层”的具体范围以及实际产生的变形大小,需要从模型的改进和计算时参数的选取等多方面进一步深入研究,例如要考虑断层破裂面上错动的不均匀性,破裂上缘位移的不连续(间断)引起的上覆岩(土)层的应变局部化及剪切带的形成与发展等。

致谢:本文是在兰州地震工程研究院的资助下完成的,周俊喜研究员提供了供计算的断层参数,特表感谢。

[参考文献]

- [1] T Maruyama. On the force equivalents of dynamical elastic dislocation with reference to the earthquake mechanism [J]. Bull. Earthq. Res., 1963, 41(3): 467-486.
- [2] F. Press, Displacements, strain, and tilts at teleseismic distances [J]. J. G. R., 1965, 70(10): 2395-2412.
- [3] L Mansinha, D E Smylie. The displacement fields of inclined faults [J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 1971, 61(5): 1433-1440.
- [4] 郭增建,秦保燕. 震源物理[M]. 北京:地震出版社,1979.
- [5] 李善邦. 中国地震[M]. 北京:地震出版社,1981. 422.
- [6] 陈颀. 地壳岩石的力学性能[M]. 北京:地震出版社,1988. 24.
- [8] 姚兰予,聂永安,赵根模. 半无限空间中剪切断层错动产生的应力场(一)走向滑动断层[J]. 西北地震学报,2000,22(1): 16-23.