

新疆克孜尔坝址设定地震研究

钟菊芳¹, 吴胜兴¹, 胡 晓², 易立新³

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098 2. 中国水利水电科学研究院抗震中心, 北京 100044;
3. 南开大学环境科学和工程学院, 天津 300071)

摘要:以新疆克孜尔坝址为研究对象, 综合确定性和概率地震危险性分析方法的优点, 依据最大贡献和构造一致原则, 提出了基于有效峰值加速度(EPA)的设定地震方法, 给出了新疆克孜尔坝址 100 a 超越概率为 2% 的设定地震参数——震级、震中距和反应谱。该设定地震反应谱介于一致概率反应谱和规范标准反应谱之间, 克服了一致概率反应谱和规范标准反应谱的不足, 证实了设定地震方法的合理性。

关键词:克孜尔坝址; 有效峰值加速度; 地震危险性分析; 设定地震; 反应谱

中图分类号:TV312 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1980(2005)04-0413-05

目前, 工程抗震设计所需地震动参数主要依据有关规范或通过专门的工程地震研究来确定。现行《水工建筑物抗震设计规范》^[1]中的标准反应谱(以下提到的标准反应谱均指该反应谱)是大量强震记录统计结果的均值反应谱, 这类反应谱无法反映实际工程场地的地震地质条件的差异及实际工程场地的危险性。对于重大工程, 因工程本身的重要性及其结构的复杂性, 要求由专门的地震危险性分析来确定地震动参数。地震危险性分析方法主要有确定性方法和概率法 2 种。确定性方法不考虑地震的重现期, 不能提供一定地震动水平的超越概率; 由概率地震危险性分析方法得到的一致概率反应谱综合了震级和距离各不相同的各个潜在震源区的贡献, 是一种包络反应谱, 不能反映场地实际可能发生的强震的频谱特性, 且往往导致对大坝响应至关重要的中长周期处的反应谱值显著偏大, 造成重大工程结构抗震设计上的困难^①。

为了得到与实际工程场地相关的设计反应谱及合成加速度时程所需的持时等参数, McGuire 等^{[2]②}首先提出了基于概率的设定地震方法。通过分解综合概率法结果, 给出与特定年超越概率对应的能在场点产生给定地震动参数值的具体地震的震级、震中距及场地相关反应谱。虽然高孟潭等^[3,4]在 McGuire 等^{[2]②}研究的基础上对设定地震的震级和震中距的确定方法进行了改进, 但在地震动参数的选取、最大贡献潜源及震级、震中距的具体确定方法上仍存在分歧, 国内外还没有统一的设定地震方法。现有设定地震方法是以烈度、峰值加速度(PGA)或某一周期点的反应谱为参数, 由最大概率法或加权平均法来确定震级和震中距的。地震烈度是一定区域范围内的平均量, 烈度并不能反映地震动的频谱特性和强震持时的变化。早在 20 世纪 80 年代初, 胡聿贤院士^[5]就指出了烈度作为地震动指标的不合理性, 建议在结构抗震设计规范中直接采用地震动参数。实际记录的 PGA 值常由脉冲型高频尖峰所控制。研究表明, 高频尖峰对反应谱的影响并不显著, PGA 并不是反映地震作用的理想抗震设计参数。美国早在 1978 年的 ATC-3-06 样板规范^[6]中就采用有效峰值加速度(EPA)和有效峰值速度(EPV)来描述设计反应谱。2001 年颁布的 GB18306—2001《中国地震动参数区划图》也已废除基本烈度, 而改用有效峰值加速度(EPA)和反应谱特征周期来描述区划结果。为了与国际接轨和国内规范配套, 本文提出了基于 EPA 的设定地震方法。

收稿日期: 2004-09-20

基金项目: 科技部基金资助项目(2002DIA10002) 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室开放基金资助项目(GZ2004-09)

作者简介: 钟菊芳(1972—), 女, 江西龙南人, 博士研究生, 主要从事重大工程地震动输入机制研究。

① 陈厚群, 郭明珠. 重大工程场地设计地震动参数选择. 见: 中国水利水电科学研究院会议文集, 北京, 2002. 552—568.

② ISHIKAWA Y, KAMEDA H. Probability based determination of specific scenario earthquake. In: Proc 4th International Conference on Seismic Zonation (Vol. II), 1991. 3—10.

1 基于 EPA 的设定地震方法

设定地震方法以概率地震危险性分析为基础,综合概率法和确定性方法的优点,给出具有概率含义和明确震级及震中距的确定地震。

1.1 EPA 定义

目前,国内外还没有统一的 EPA 定义式。20 世纪 70 年代,文献[6]将 EPA 定义为 0.1~0.5 s 周期内反应谱值(阻尼比为 0.05)的平均值 $\bar{S}_a$ 除以平均动力放大系数 2.5,即 $a_{EP} = \bar{S}_a(0.1 \sim 0.5)/2.5$ (式中 a_{EP} 表示 EPA)。90 年代末,文献[7]又把有效峰值加速度取为 $a_{EP} = \bar{S}_a(0.2/2.5)$ 。陈厚群院士等^①对不同震级和震中距的基岩强震记录进行了统计分析,得出“0.2 s 周期处的加速度放大系数谱值最大,相应的放大系数为 2.5”的结论,并认为基岩的有效峰值加速度定义为 $a_{EP} = \bar{S}_a(0.2/2.5)$ 较为合适。本文设定地震中也采用了该定义式。

1.2 最大贡献潜源区的确定

最大贡献潜源区是指在一定设防水准下,研究区所有潜在震源中对场点地震动参数贡献量最大的潜在震源区。最大贡献潜在震源区随地震动参数的选取、超越概率水平的不同而变化。设防标准和地震动参数确定后,在场点周围潜在震源区数量一定的情况下,年超越概率 $P(Y \geq y)$ 的大小决定了潜源对场点贡献量的大小。这里取年超越概率 $P(Y \geq y)$ 最大对应的潜源为最大贡献潜源。其中潜在震源区 l 对场点的贡献量可由下式求得。

$$P(Y \geq y) = 1 - \exp\left(-\frac{2\nu}{\beta} \iiint \sum_{j=1}^{N_m} P(Y \geq y|E) f_m(m_j) \sinh\left(\frac{1}{2}\beta\Delta m\right) \mathcal{K}(\theta) f_{l,m_j}/S_l dx dy d\theta\right) \quad (1)$$
$$\beta = b \ln 10 \qquad N_m = \frac{M_u - M_0}{\Delta m} \qquad f_m(m_j) = \frac{\beta \exp[-\beta(m_j - M_0)]}{1 - \exp[-\beta(M_{uz} - M_0)]}$$

式中: $P(Y \geq y)$ ——第 l 潜在震源区在场点产生的地震动参数值 $Y \geq y$ (给定值)的年超越概率; ν ——地震带内地震年平均发生率; b ——该地震带震级频度关系式中的系数,反映了大小地震的相对比例; N_m ——潜在震源的震级分档数; M_u ——潜在震源的震级上限; M_0 ——地震带震级下限; Δm ——震级分档值; $P(Y \geq y|E)$ ——第 l 潜在震源区内发生震级为 $m_j \pm \frac{1}{2}\Delta m$ 的特定地震时场点处地震动参数 $Y \geq y$ 的概率; $f_m(m_j)$ ——震级概率密度分布函数; M_{uz} ——地震带的震级上限; $\sinh(\frac{1}{2}\beta\Delta m)$ ——以 $\frac{1}{2}\beta\Delta m$ 为变量的正弦双曲函数; $\mathcal{K}(\theta)$ ——等震线长轴取向的分布函数; f_{l,m_j} ——潜源各震级档的地震空间分布函数; S_l ——第 l 潜在震源区的面积。

1.3 设定地震确定

潜在震源区内地震贡献量的大小与该地震的发生概率和空间位置有关,震级越小的地震,其发生的概率越大,相应地能在场点产生 $Y \geq y$ 的空间位置概率就越小。因当小震级地震发生在离场点较远的微面元时,在场点引起的地震动 Y 可能不满足 $Y \geq y$,而是 $Y < y$,相应地能在场点产生 $Y \geq y$ 的空间位置较小。为了反映实际场地的地震危险性,确定设定地震时需兼顾地震的发生概率和空间位置 2 个方面的影响,采用震级空间联合概率最大法确定设定地震。

1.3.1 潜在震源区震级概率分布函数

潜在震源区震级概率分布函数定义为归一化的年地震发生率

$$P(m_j) = \frac{\nu_l(m_j)}{\sum_{j=1}^{N_m} \nu_l(m_j)} \quad (2)$$
$$\nu_l(m_j) = \nu(m_j) f_{l,m_j}$$

式中: $\nu_l(m_j)$ ——第 l 潜在震源内 m_j 震级档地震的年发生率; $\nu(m_j)$ ——地震带内 m_j 震级档的地震年平均发生率,

^① 陈厚群,郭明珠.重大工程场地设计地震动参数选择.见:中国水利水电科学研究院会议文集.北京:2002.552—568.

$$\nu(m_j) = \frac{2\nu \exp[-\beta(m_j - M_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{uz} - M_0)]} \sin\left(\frac{1}{2}\beta\Delta m\right) \tag{3}$$

1.3.2 空间位置概率分布

假设地震在潜源内均匀分布,将空间位置概率分布定义为:当潜源内发生 m_j 地震时,能使场点产生 $Y \geq y$ 的空间位置占整个潜源空间的比例.此概率分布可按下述方法计算.

a. 当主干断裂明显时,假设地震只发生在主干断裂带上,空间位置概率分布函数为

$$P(R' | m_j, Y \geq y) = \frac{L_i}{L} \tag{4}$$

式中: R' ——空间位置; L ——潜源内主干断裂带的总长度; L_i ——主干断裂带上发生 m_j 地震时,能在场点产生 $Y \geq y$ 的主干断裂带长度,其取值与场点和潜源间的空间相对位置有关.

b. 当主干断裂不明显时,

$$P(R' | m_j, Y \geq y) = \frac{S_{m_i}}{S} \tag{5}$$

式中: S ——潜源的总面积; S_{m_i} ——潜源内发生 m_j 地震时,能在场点产生 $Y \geq y$ 的潜源面积.

1.3.3 震级空间联合概率分布函数

设地震发生的震级和空间位置相互独立,则震级空间联合概率分布函数可由震级概率分布函数和空间位置概率分布函数的乘积归一化后得到,即

$$P(m_j, R' | Y \geq y) = P(m_j)P(R' | m_j, Y \geq y)/Q \tag{6}$$

式中归一化参数

$$Q = \sum_{j=1}^{N_m} P(m_j)P(R' | m_j, Y \geq y) \tag{7}$$

1.3.4 设定地震的震级、震中距和设计反应谱的确定

设定地震的震级取最大贡献潜源区内与震级空间联合概率分布函数 $P(m_j, R' | Y \geq y)$ 最大值对应的震级档的震级中值,震中距可由衰减关系式反算得到.将设定地震的震级、震中距代入反应谱衰减关系式中可以得到与设定地震对应的各周期点设计反应谱值.

2 新疆克孜尔坝址设定地震

2.1 EPA 衰减关系的选取

由于新疆克孜尔坝址研究区内缺乏足够的强震记录,不能通过强震记录直接得到所需的衰减关系.马宗晋院士认为,直接引用有丰富强震记录资料的美国西部地震动参数衰减关系是可行的.据此,本文直接引用文献[8]中的美国西部地震动参数 a_{EP} 的衰减关系式(方差 $\sigma = 0.240$)

$$\begin{cases} \ln S_a(T) = 2.406 + 0.51(M - 6.4) - 0.013(8.5 - M)^2 + [-1.115 + 0.1(M - 6.4)]\ln R & (M \leq 6.4) \\ \ln S_a(T) = 2.406 - 0.14(M - 6.4) - 0.013(8.5 - M)^2 + [-1.115 + 0.1(M - 6.4)]\ln R & (M > 6.4) \end{cases} \tag{8}$$

$$R = \sqrt{r_{rup}^2 + c_4^2}$$

式中: $S_a(T)$ ——周期 T 处的反应谱值; M, R ——震级和震中距; r_{rup} ——最小断层距(单位为 km); $c_4 = 5.1$.

2.2 地震危险性分析

地震危险性分析采用改进的综合概率法.综合概率法假定地震时间过程符合分段的泊松过程,震级分布符合修正的震级频度关系.根据分段泊松分布模型和全概率定理,场点的地震动年超越概率为

$$P(Y \geq y) = 1 - \prod_n [1 - P_n(Y \geq y)] \tag{9}$$

式中: N ——研究区内的地震带总数; $P_n(Y \geq y)$ ——第 n 地震带对场点的年超越概率,

$$P_n(Y \geq y) = 1 - \exp\left[-\frac{2\nu}{\beta} \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_m} \int \int P(Y \geq y | E) f_m(m_j) \sin\left(\frac{1}{2}\beta\Delta m\right) f(\theta) f_{i,m_j}/S_i dx dy d\theta\right] \tag{10}$$

式中 N_s 为第 n 地震带内潜在震源区总数.

计算中使用 Eriskassessment 程序,潜源划分方案采用第4代地震动参数区划中的综合潜源方案.通过地震危险性分析,得到了 $P_{100} = 2\%$ 超越概率下的 $a_{EP} = 266.28 \text{ cm/s}^2$ 、最大贡献潜源(与坝址的位置关系见图1)、最大贡献潜源内的震级概率分布(图2)及一致概率反应谱(图3).

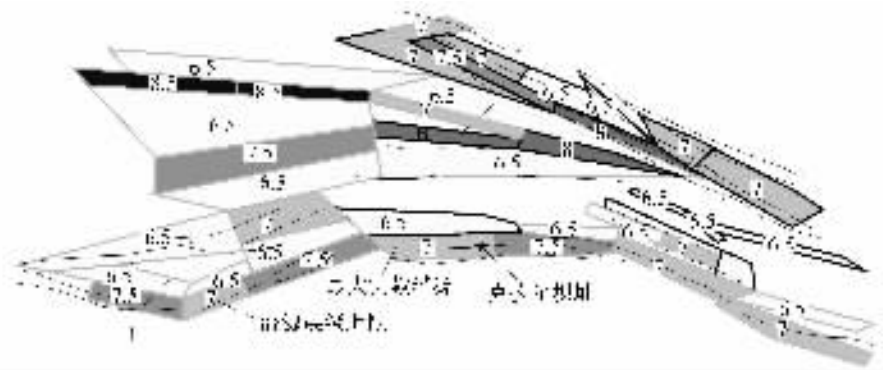


图1 坝址最大贡献潜源与主干断层的位置关系

Fig.1 Locations of dominant potential earthquake sources and faults at Kezier Dam site

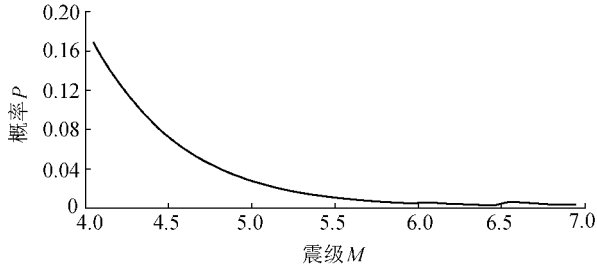


图2 震级概率分布函数

Fig.2 Magnitude probability distribution

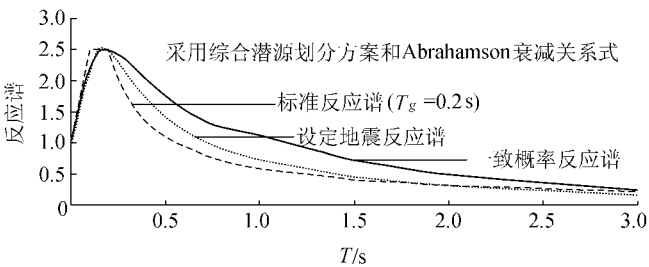


图3 100 a超越概率为2%的反应谱

Fig.3 Response spectrum corresponding to the transcendental probability of 2% for 100 years

2.3 结果分析

设定地震的震级 $M = 6.55$,震中距 $R = 12.20 \text{ km}$,设计反应谱如图3所示.由图3可知,在中长周期处,一致概率反应谱远大于设计反应谱和规范谱,设计反应谱介于一致概率反应谱和规范谱之间.设定地震是基于危险一致(概率最大)和与设防标准一致的原则进行的.在给定的概率下,设定地震发生的可能性以及对场点的破坏程度两者综合概率最大.该地震反映了坝址的实际危险性,与具体地震相联系的设计反应谱克服了一致概率反应谱和规范谱的不足,是较为科学、合理的反应谱.

2.4 设定地震构造位置的确定

胥广银等^[9]对历史地震的统计分析表明,震中集中分布在发震断层附近.这是确定设定地震空间位置的基本依据.新疆克孜尔坝址位于阿克苏地区拜城县境内,地处天山南缘中强震多发区,坝址区地质条件差,地震构造背景复杂.库区方圆 $5 \sim 25 \text{ km}$ 范围近场区内分布的活动断裂有却勒塔格断裂(F1)、克孜尔断裂(F2)、喀桑托开断裂(F6)以及塔里木盆地北缘的却勒塔格南麓断裂(F3)和牙合南隐伏断层.据分析^[10]:F6、F3断裂和牙合南隐伏断层近期地震活动微弱、断层活动不明显,可不作为地震构造来考虑;F1是一条全新世活动断裂,但在水库近场区内没有明显的孕震障碍点;F2活动断层横跨坝体且通过主、副坝断面处,目前仍处于蠕滑(稳滑)状态.综上所述,将设定地震置于F2活动断层上,其具体位置为断层到场点的距离恰好等于震中距处.

3 结 语

以 a_{EP} 为参数、地震危险性分析为基础的设定地震方法,综合考虑了地震的发生概率和空间位置分布的影响,取与震级空间联合分布函数最大值对应的震级档的震级中值为设定地震的震级,依据 a_{EP} 衰减关系式反算得到震中距.新疆克孜尔坝址 100 a 超越概率 2% 的 a_{EP} 为 266.28 cm/s^2 ,设定地震的震级 $M = 6.55$,震中距 $R = 12.20 \text{ km}$.由于在设定地震确定的整个过程中始终遵循危险一致、概率一致、构造一致的原则,因此在

给定的概率水平下,设定地震与其他任何可能的地震相比,其发生的概率和对场点的破坏程度两者乘积的概率最大.由设定地震得到的设计反应谱与具体的地震事件相联系,该反应谱克服了一致概率反应谱中长周期谱值偏大和规范反应谱不与场址具体地震环境相联系的不足,反映了坝址的实际危险程度.

参考文献:

[1] DL 5073—2000 水工建筑物抗震设计规范[S].
[2] MCGUIRE R K. Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquake :closing the loop[J]. Bull Seism Soc Am ,1995 ,85(5) :1275—1284.
[3] 高孟潭.潜在震源区期望震级和期望距离及其计算方法[J].地震学报 ,1994 ,16(3) 346—351.
[4] 罗奇峰.概率一致设定地震及其估计方法[J].地震工程与工程振动 ,1996 ,16(3) 22—28.
[5] 胡聿贤.地震工程[M].石家庄 :河北教育出版社 ,2000.3—14.
[6] ATC-3-06(NBS SP-510) Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings[S].
[7] FRANKEL A D ,MUELLER C S ,BARNHARD T P ,et al. USGS national seismic hazard maps[J]. Earthquake Spectra ,2000 ,16(1) :1—19.
[8] ABRAHAMSON N A ,SILVA W J. Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes[J]. Seismological Research Letters ,1997 ,68(1) 94—127.
[9] 胥广银 ,高孟潭.潜在震源区内非均匀特征研究[J].中国地震 ,1996 ,12(3) 294—299.
[10] 尹力峰 ,唐丽华 ,吴晓莉,等.克孜尔水库大坝的地震安全性评估[J].华南地震 ,2002 ,22(1) 28—40.

Study on scenario earthquake at Kezier Dam site in Xinjiang

ZHONG Ju-fang¹ , WU Sheng-xing¹ , HU Xiao² , YI Li-xin³

(1. College of Civil Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

2. Earthquake Engineering Research Center , China Institute of
Water Resources and Hydropower Research , Beijing 100044 , China ;

3. Institute of Environmental Science and Engineering , Nankai University , Tianjing 300071 , China)

Abstract :A case study was performed on the Kezier Dam site. Based on the principles of maximum contribution and structure consistency , an effective peak acceleration (EPA)-based scenario earthquake method was put forward by combination of the virtues of the probability and determinacy seismic hazard analysis methods. The scenario earthquake parameters of the Kezier Dam site , including the magnitude , epicentral distance and response spectrum , for a transcendental probability of 2% for 100 years were given. The response spectrum of scenario earthquake obtained was compared with the response spectrum prescribed by seismic design codes and the probability-consistent response spectrum , and the rationality of the scenario earthquake method was verified.

Key words :Kezier Dam site ; effective peak acceleration(EPA) ; seismic hazard analysis ; scenario earthquake ; response spectrum