

DOI: 10.11779/CJGE201905017

基于设定地震场地相关反应谱的高土石坝抗震安全评价

李红军, 朱凯斌*, 赵剑明, 刘小生, 杨正权, 杨玉生

(中国水利水电科学研究院岩土工程研究所, 北京 100048)

摘要: 结合最新颁布的《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(NB 35047—2015) 中关于甲类设防重大土石坝工程设计反应谱的规定, 重点研究了基于设定地震的场地相关反应谱和一致概率反应谱确定的动参数下高土石坝的动力反应特征。通过 240 m 高长河坝高心墙堆石坝在两种不同反应谱下设计和校核地震动下的计算分析发现一致概率谱得到的坝顶动力响应加速度、动位移、永久变形、坝坡安全系数和塑性滑移等关键安全评价指标均高于场地相关反应谱的结果, 进而探讨了两种反应谱对长河坝高土石坝工程极限抗震能力的影响, 计算结果表明采用基于设定地震的场地相关反应谱得到的坝体的极限抗震能力明显高于一致概率谱, 采用一致概率谱得到的地震动参数进行长河坝抗震设计和抗震加固措施研究易得到较保守的结果。

关键词: 高土石坝; 设定地震; 场地相关反应谱; 一致概率反应谱; 极限抗震能力

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2019)05-0934-08

作者简介: 李红军(1981—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事水工抗震设计。E-mail:lihj@iwhr.com。

Safety evaluation of high rockfill dams subjected to earthquakes based on site-related response spectra

LI Hong-jun, ZHU Kai-bin, ZHAO Jian-ming, LIU Xiao-sheng, YANG Zheng-quan, YANG Yu-sheng

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: Based on the provisions of “China's code for seismic design of hydraulic structures of hydropower project” (NB 35047-2015), the detailed effects of seismic parameters determined by use of different design response spectra including site-related response spectra based on scenario earthquake and probability-consistent response spectra on the safety evaluation of class A high rockfill dams located in highly seismic regions are studied. Comparisons of the key indexes such as dynamic response acceleration, permanent deformation, safety of impervious body, factor of safety and sliding displacement of the potential failure surfaces of 240 m-high Changhe core rockfill dam under the above-mentioned seismic parameters are provided. It is shown that the results from the probability-consistent response spectra are higher than those from the site-related ones. In addition, its ultimate seismic capabilities based on the above-mentioned two design response spectra are achieved. It is proved that the probability-consistent spectra adopted in the safety evaluation of high rockfill dams may result in conservative results.

Key words: high rockfill dam; scenario earthquake; site-related spectrum; probability-consistent spectrum; ultimate seismic capability

0 引言

对强震区的重大水利工程而言, 科学合理地确定地震动参数直接关系着工程抗震设计和抗震加固措施的成败^[1]。根据最新颁布的《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(NB 35047—2015)的规定:“对进行专门场地地震安全评价的甲类设防高土石坝工程, 其抗震安全评价所需设计反应谱应采用基于设定地震的场地相关设计反应谱”^[2]。鉴于此, 已建及拟建的 262 m 糯扎渡、240 m 长河坝、225 m 乌东德、293 m 两河口和 314 m 双江口等高心墙土石坝工程均需按新规范进

行抗震设计和安全复核。其中部分甲类设防的高土石坝工程已采用一致概率反应谱确定的地震动参数完成了抗震设计和复核。然而, 工程师和学者们关于基于两种不同设计反应谱确定的地震动参数对高土石坝工

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404904); 国家自然科学基金项目(51509272, 51679264); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201501035); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费项目(GE0145B292017)

收稿日期: 2018-05-08

***通讯作者** (E-mail: 250897447@qq.com)

程动力响应特性的影响程度尚不清晰, 且最新颁布的规范中未对高土石坝极限抗震能力应采用的地震动参数确定方式给出明确的规定。因此, 有必要就上述问题进行深入的探讨和研究。

结合 240 m 高长河坝高心墙堆石坝工程 (I 级壅水建筑物和甲类设防), 详细探讨了一致概率反应谱和基于设定地震的场地相关反应谱两种设计反应谱确定的地震动参数下的坝体动力响应加速度、永久变形、坝坡稳定和防渗体的安全性的分布趋势和幅值的差异, 明确其对高心墙堆石坝抗震安全评价指标的影响, 进而探讨高心墙堆石坝极限抗震能力的地震动参数合理确定方式, 为现阶段高土石坝抗震设计和抗震加固措施的研究提供参考依据和技术支撑。

1 坝址基岩地震动参数的确定

目前重大工程坝址地震动参数的确定方法主要分为地震危险性概率分析方法和确定性分析方法。传统的一致概率反应谱法属于地震危险性概率分析方法; 而最新颁布的《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(NB 35047—2015) 中规定的基于设定地震的场地相关反应谱法则结合了确定性分析和概率分析。两种方法的本质区别是: 一致概率反应谱法是在地震安全性评价中用不同周期衰减规律进行概率法地震危险性分析得到的场地基岩面反应谱, 该方法不能反映某一特定地震所产生的地震动特性, 与实际地震灾害的发生存在本质的区别; 基于设定地震的场地相关反应谱法则以一个具有明确物理特性参数的地震事件为基础, 计算大坝设计及校核防设要求对应的加速度反应时程曲线, 与实际震害的本质保持一致, 确定的地震动参数与工程场地实际地震地质条件密切相关。国内学者对两种反应谱的区别进行了深入分析。中国水利水电科学研究院在“九五”国家重点科技攻关项目“地震危险性分析和地震动输入机制”专题研究中, 对一致概率反应谱在理论上和应用中的不足之处进行了探讨^[3-4]。陈厚群等^[3]指出一致概率谱中短周期成分往往由近震小震群控制, 长周期成分由远震大震群控制, 使其具有包络线的功能, 不能反映场地实际可能遭遇的强震本身固有的频谱特性, 往往使中长周期处的反应谱值被显著夸大且未能与震级、震中距等物理概念有机地联系起来, 得到的安全评价结果易偏于保守。

另外, 关于基于不同设计反应谱确定的地震动参数对高土石坝动力反应影响的系统研究仍相对较少。结合长河坝工程地震安评资料, 依据设定地震的确定原则, 选定 57 号 8.0 级潜在震源区作为设定地震的发震构造, 得到 100 a 超越概率 2% 对应的设定地震为

M_{SE} (震级) = 8.0, R_{SE} (震中距) = 36.0 km, 100 年超越概率 1% 对应的设定地震为 M_{SE} = 8.0, R_{SE} = 32.0 km, 将不同超越概率设定地震的震级和距离代入到 AS08 衰减关系, 并对得到的加速度谱按照 PGA 进行归一化处理, 即可得到长河坝坝址不同概率水准的放大系数谱 β (T), 将 β (T) 谱值乘以地震危险性概率分析相应概率水准的地震动峰值加速度 (100 a1% 为 430.0 gal; 100 年 2% 为 359.0 gal), 即得到长河坝坝址基岩的加速度反应谱 Sa (T)^[5-6]。

图 1 比较了长河坝工程坝址基岩处的基于设定地震的场地相关反应谱和一致概率反应谱。如图所示, 在 1.5 s 周期之内, 相同概率水准下基于安评的一致概率反应谱明显高于基于设定地震的场地相关反应谱, 大于 1.5 s 周期后, 则基于设定地震的场地相关反应谱稍高。图 2, 3 分别给出了基于设定地震的场地相关反应谱和一致概率谱得到的坝体 3 个方向基岩输入的人工拟合地震动时程。

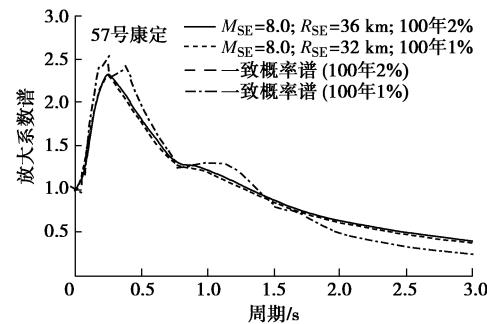


图 1 长河坝坝址设定地震反应谱与一致概率谱比较

Fig. 1 Comparison between site-related and probability-consistent response spectra

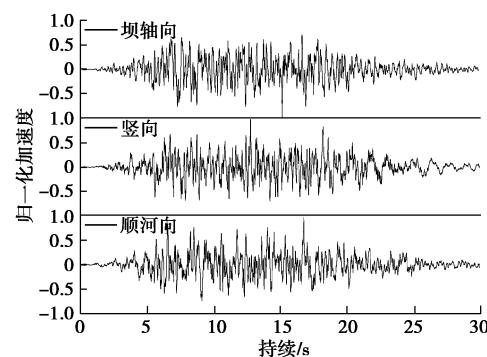


图 2 基于场地相关反应谱的地震动时程

Fig. 2 Time-history accelerations based on site-related response spectra

2 长河坝高心墙堆石坝动力响应分析

长河坝水电站拦河大坝为砾石土心墙堆石坝, 最大坝高 240 m, 河床覆盖层 50 m, 一等大 (I) 型工

表 1 长河坝心墙堆石坝静、动计算参数

Table 1 Static and dynamic parameters of Changhe core rockfill dam

土石料	ρ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	φ ($^{\circ}$)	$\Delta\varphi$ ($^{\circ}$)	c (kPa)	Duncan-Chang E - v 模型						等效黏弹性模型	
					R_f	K	n	G	F	D	k	n
覆盖层①	1.45	48.0	7.0	—	0.8	1100	0.34	0.33	0.01	4.0	4872	0.405
覆盖层②	1.31	46.9	6.5	—	0.77	1075	0.33	0.29	0.024	4.4	4777	0.405
覆盖层③	1.24	47.9	4.1	—	0.79	865	0.29	0.24	0.086	5.9	4626	0.398
上游堆石料	2.32	52.7	9.5	—	0.78	1139	0.32	0.31	0.103	4.5	3106	0.468
心墙料	2.14	29.4	—	89	0.82	418	0.39	0.41	0.085	1.8	1329	0.518
下游堆石料	2.32	51.7	9.6	—	0.78	1117	0.33	0.31	0.11	4.4	3106	0.468

表 2 G/G_{\max} - γ 和 λ - γ 关系曲线Table 2 Curves of G/G_{\max} - γ and λ - γ

填筑料	堆石		心墙		覆盖层①		覆盖层②		覆盖层③	
	γ	$\frac{G}{G_{\max}}/\%$	$\lambda/\%$	$\frac{G}{G_{\max}}/\%$	$\lambda/\%$	$\frac{G}{G_{\max}}/\%$	$\lambda/\%$	$\frac{G}{G_{\max}}/\%$	$\lambda/\%$	$\frac{G}{G_{\max}}/\%$
2.00×10^{-6}	100.00	1.82	99.65	3.38	100.00	1.58	100.00	2.83	100.00	2.81
3.00×10^{-6}	99.98	1.83	99.31	3.41	99.97	1.59	99.99	2.84	99.95	2.82
5.00×10^{-6}	99.49	1.85	98.63	3.47	99.93	1.61	99.97	2.86	99.93	2.84
1.00×10^{-5}	96.74	2.49	96.98	3.62	97.53	2.28	92.61	2.95	94.31	3.16
3.00×10^{-5}	87.33	3.36	90.91	4.21	82.16	2.45	79.82	3.86	78.66	3.92
5.00×10^{-5}	75.21	3.57	85.53	4.81	68.16	2.71	66.03	4.39	64.51	4.46
1.00×10^{-4}	64.68	4.21	74.53	6.32	50.72	3.85	49.31	5.49	43.15	6.92
3.00×10^{-4}	47.65	6.43	49.21	11.84	33.16	4.32	32.51	9.77	31.16	10.03
5.00×10^{-4}	38.12	8.12	36.73	16.14	25.52	5.09	27.51	11.69	26.61	13.77
1.00×10^{-3}	27.48	9.66	22.48	22.99	14.82	6.42	20.22	14.91	19.31	15.42

程, 场址地震基本烈度为Ⅷ度, 按IX度甲类抗震设防, 100年超越概率2%基岩峰值加速度为359 gal; 100年超越概率1%基岩峰值加速度为430 gal。其潜在震源震级上限为8.0级。

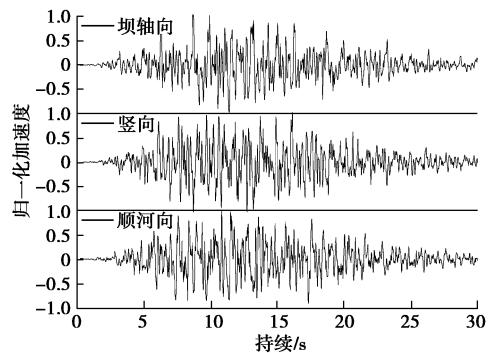


图 3 基于一致概率反应谱的地震动时程

Fig. 3 Time-history accelerations based on probability-consistent response spectra

2.1 计算参数及有限元网格

静动力计算本构模型分别采用 Duncan-Chang E - v 模型和等效黏弹性模型, 主要计算参数、三维坝体有限元网格及材料分区详见表 1 和图 4^[7]。等效黏弹性模型中的 G/G_{\max} - γ 和 λ - γ 曲线直接采用动三轴试验所得曲线, 如表 2 所示; 坝体河谷中央剖面覆盖层较为均匀, 平均深度达 50 m, 覆盖层沿坝轴向

呈“V”型分布, 河谷中央最深, 两侧逐渐变浅, 如图 4 网格所示。

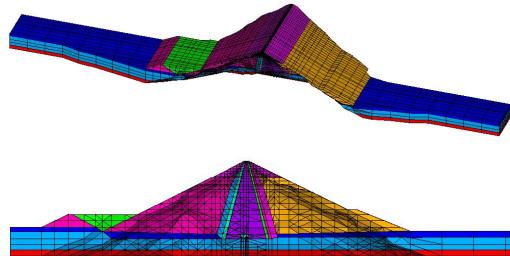


图 4 长河坝高心墙堆石坝坝体材料分区及三维有限元网格

Fig. 4 3D finite element mesh and material zoning of Changhe core rockfill dam

分别采用基于设定地震的场地相关设计反应谱和一致概率反应谱得到的设计和校核基岩地震动时程, 从坝体响应加速度、永久变形、坝坡稳定和防渗体安全性等方面详细阐述两种设计反应谱对高土石坝动力响应特性的影响。

2.2 计算方法

心墙料振动孔压通过动孔压比与动剪应力比关系曲线确定, 如图 5 所示。将地震历时分成若干时段, 各时段等效振动次数依据各时段输入的地震加速度幅值分布进行加权平均, 插值确定各时段孔隙水压力增量, 直至地震结束。

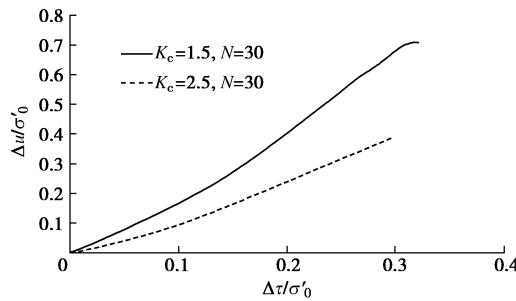


图 5 动孔压比和动剪应力比关系曲线

Fig. 5 Relationship between dynamic pore pressure ratio and cyclic shearing stress ratio

地震残余变形计算采用中国水科院模型, 残余剪应变及残余体应变与动剪应力的关系为

$$\varepsilon_{da} = K_a (\Delta\tau / \sigma'_0)^{n_a}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{dv} = K_v (\Delta\tau / \sigma'_0)^{n_v}. \quad (2)$$

式中 $\Delta\tau / \sigma'_0$ 为动剪应力比; K_a , n_a , K_v 和 n_v 分别为与试验控制参数固结比、围压力、动应力和振动周次相关的系数及指数, 根据场址地震震级确定的等效震次为 30 次。

采用基于动力有限元时程分析坝坡稳定和地震滑移变形分析方法确定强震作用下坝坡的动力安全系数时程和累积滑移变形。

作用于单元滑动面上的法向应力 σ'_n 和切向应力 τ_n 分别为

$$\sigma'_n = \frac{\sigma'_z + \sigma'_y}{2} + \frac{\sigma'_z - \sigma'_y}{2} \cos 2\beta - \tau_{yz} \sin 2\beta, \quad (3)$$

$$\tau_n = \frac{\sigma'_z - \sigma'_y}{2} \sin 2\beta + \tau_{yz} \cos 2\beta. \quad (4)$$

式中 $\sigma'_z = (\sigma'_{zs} + \sigma'_{zd})$, $\sigma'_y = (\sigma'_{ys} + \sigma'_{yd})$, σ'_{zs} 和 σ'_{yd} 以及 σ'_{ys} 和 σ'_{yd} 分别为相应单元的静水平应力和动水平应力以及静竖向应力和动竖向应力; $\tau_{yz} = (\tau_{yzs} + \tau_{ydz})$, τ_{yzs} 和 τ_{ydz} 分别为相应单元的静剪应力和动剪应力, β 为相应单元滑动面切向与水平方向的夹角。

坝坡地震抗滑稳定安全系数按下式计算:

$$F_s = \frac{\sum \sigma'_{ni} \tan \varphi'_i l_i + \sum c'_i l_i}{\sum \tau_{ni} l_i}, \quad (5)$$

式中, σ'_{ni} 和 τ_{ni} 为第 i 单元滑动面上的法向应力和切向应力, φ'_i , c'_i 为滑动面上第 i 单元的动有效应力抗剪强度指标, l_i 是滑动面通过第 i 单元的长度。

计算过程中, 考虑到最小安全系数对应的滑弧位置随时间不断变化, 针对每一个时刻采用枚举法搜索到的最危险滑弧进行滑移变形分析, 最终确定动力时程中对应于最小安全系数滑弧的地震滑移以及对应最大累积滑移变形。

对于任意潜在滑动体, 通过下式确定其滑动角加速度:

$$\ddot{\theta}(t) = \frac{M}{I}, \quad (6)$$

$$M = \left(\sum_{i=1}^n \tau_{ni} l_i - \sum_{i=1}^n (c_i + \sigma_{ni} \tan \varphi_i) l_i \right) R. \quad (7)$$

式中 I 为滑动体的转动惯量; $\ddot{\theta}_i$ 为滑动体瞬时失稳后的滑动角加速度; M 为作用在滑动体上的转动力矩。当某时刻某个滑弧出现瞬时滑动时, 滑弧的滑动量为

$$D_i^k = R^k \theta_i^k = R^k \int \ddot{\theta}_i^k dt. \quad (8)$$

在整个时间段里可能出现多次瞬时滑动, 则累计滑动量为

$$D^k = \sum_{i=1}^n D_i^k. \quad (9)$$

2.3 最大响应加速度

图 6, 7 分别给出基于设定地震的场地相关反应谱和一致概率反应谱设计地震动作用下的坝体河谷中央剖面最大顺河向及竖向加速度分布情况, 如图所示, 两种反应谱下的坝体最大顺河向加速度反应分布规律保持一致, 最大顺河向加速度均发生在河谷中央坝体顶部区域, 场地相关反应谱下坝顶加速度放大倍数约为 2.3, 略低于一致概率反应谱的 2.5 倍, 与图 1 所示两种反应谱放大系数的差异较为一致。另外, 两种设计反应谱得到的竖向最大加速度幅值和分布上均存在一定差异。基于场地相关反应谱的最大竖向加速度位于坝体顶部偏上游坡区域, 放大倍数为 2.0, 而基于一致概率谱的最大竖向加速度则位于上游坝坡中部附近, 放大倍数为 2.6。

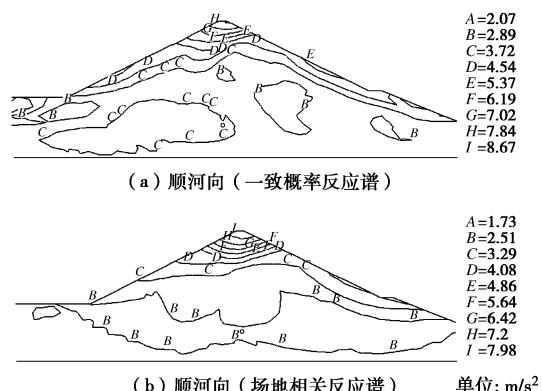


图 6 最大顺河向加速度响应

Fig. 6 Maximum response accelerations in upstream and downstream directions



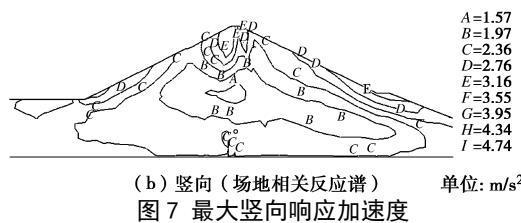


Fig. 7 Maximum response accelerations in vertical direction

2.4 地震永久变形

图 8,9 给出了基于设定地震的场地相关反应谱和一致概率反应谱设计地震动作用下坝体河谷中央剖面和三维坝体最大顺河向及竖向永久变形分布情况。如图所示,两种反应谱作用下的坝体最大顺河向和竖向永久变形分布规律趋于一致,仅在幅值上存在一定差异。两种反应谱下竖向地震变形均在河谷中央坝顶达到最大,最大竖向沉降分别为 0.90 m (SR) 和 1.12 m (PC)。

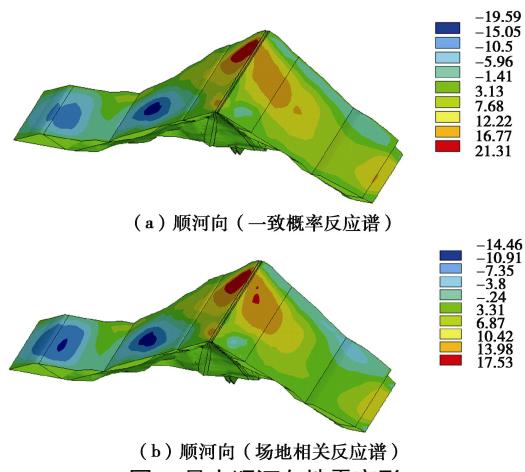


Fig. 8 Permanent deformations in upstream and downstream directions

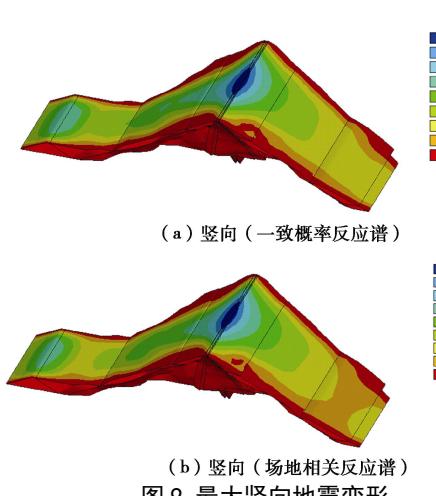


Fig. 9 Permanent deformations in vertical direction

2.5 坝坡抗震稳定性

图 10~14 给出了场地相关反应谱和一致概率反应谱设计地震动作用下的坝体河谷中央剖面上、下游坝坡抗震稳定分析结果。场地相关反应谱设计地震动

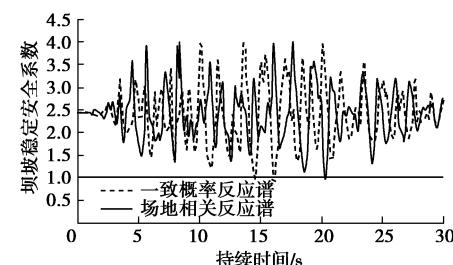


图 10 不同设计反应谱设计地震动上游坝坡最小抗震稳定安全系数时程曲线

Fig. 10 Comparison of minimum factors of safety in upstream slope under different response spectra

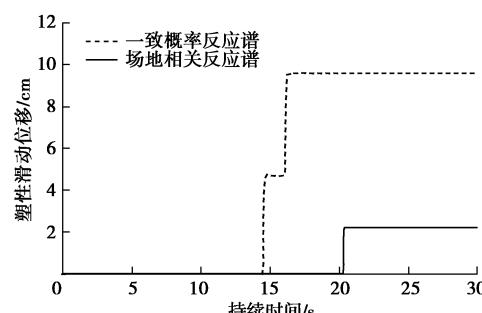


图 11 不同设计反应谱设计地震动上游坡最危险滑弧滑动位移发展时程曲线

Fig. 11 Comparison of time-history sliding displacements in upstream dam slope

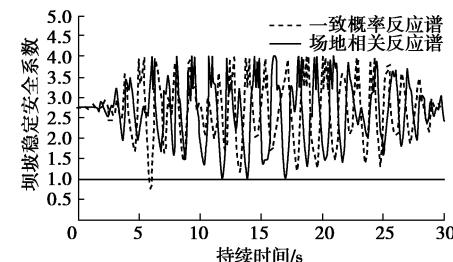


图 12 不同设计反应谱设计地震动下游坝坡最小抗震稳定安全系数时程曲线

Fig. 12 Comparison of minimum factors of safety in downstream slope under different response spectra

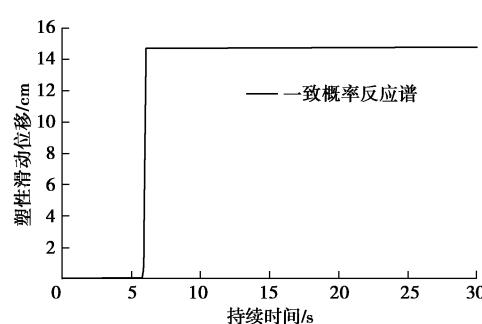


图 13 一致概率谱设计地震动下游坡最危险滑弧滑动位移发展时程曲线

Fig. 13 Time-history sliding displacements in downstream slope based on probability-consistent

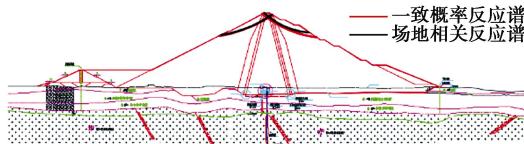


图 14 动力时程法上、下游坝坡最危险滑动面

Fig. 14 Most dangerous sliding surfaces in upstream and downstream dam slopes

作用下, 坝体河谷中央剖面上、下游坝坡的最小安全系数分别为 0.98, 0.82, 安全系数小于 1.0 持时分别为 0.05, 0.21 s, 如图 13 所示最危险滑动面对应的累积滑动位移分别为 9.5, 14.7 cm。由两种反应谱下的坝坡抗震稳定分析结果可知, 基于场地相关反应谱得到的坝坡抗震稳定性明显优于一致概率反应谱。

2.6 防渗体抗震安全性

图 15 给出了场地相关反应谱和一致概率反应谱设计地震动作用下心墙料振动孔压比分布趋势。动孔压比是在循环荷载作用下的动孔隙水压力 u_d 与初始平均有效应力 σ'_0 之比。由单元抗震安全系数分布图可知, 基于场地相关反应谱得到的单元抗震安全系数明显大于一致概率谱计算结果, 尤其是坝体上游坝壳和心墙区域较为明显。而基于两种反应谱得到的心墙区域动孔压比分布趋势则较为一致, 心墙区域的振动孔压比最大值均发生在墙体 2/3 墙高位置, 最大动孔压比均为 0.52, 不同反应谱得到的防渗体安全性结论一致。

为便于比较分析, 表 3 汇总了基于设定地震的场地相关反应谱和一致概率反应谱下设计和校核地震动下坝体的主要动力分析结果。由两种反应谱下的设计和校核地震动坝体动力响应加速度、永久变形、坝坡稳定和防渗体安全性等主要抗震安全评价指标可知, 基于场地相关反应谱得到的设计和校核地震动下的安全评价结果均明显优于一致概率反应谱。其原因在于长河坝高土石坝工程的自振周期在 1~2 s 内, 而由图

1 所示两种反应谱对比结果可知, 当坝体周期位于 1.0~1.5 s 范围内时, 一致概率谱下的加速度放大倍数明显高于场地相关反应谱。针对长河坝工程而言, 基于一致概率反应谱得到的地震动参数进行抗震安全评价易得到较为保守的结果。

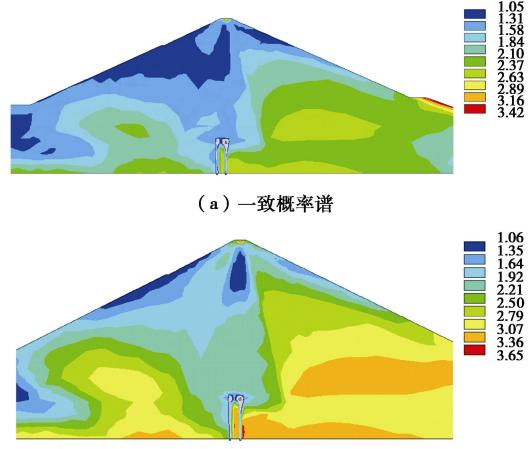


图 15 单元抗震安全系数

Fig. 15 Seismic factors of safety in soil elements

3 极限抗震能力分析

基于上述研究成果, 利用基于设定地震的场地相关反应谱和一致概率反应谱得到的校核地震加速度时程曲线, 将基岩峰值加速度分别调整为 0.50g, 0.55g, 0.60g, 综合坝坡稳定、坝体变形和防渗体安全等核心评价指标研究长河坝高心墙堆石坝的极限抗震能力^[8-10], 进一步明确设计反应谱的选择对坝体极限抗震能力分析的影响, 主要计算成果如表 4 所示。

3.1 坝坡稳定性安全控制

当输入基岩峰值加速度为 0.60g, 在一致概率谱地震动作用下, 坝体上、下游坡最小安全系数分别为 0.63, 0.65, 对应的最危险滑弧的累积滑动位移分别为

表 3 高土石坝动力响应分析

Table 3 Dynamic response analyses of Changhe high core rockfill dam

地震动参数	设计地震		校核地震(最大可信地震)		
	场地相关反应谱	一致概率谱	场地相关反应谱	一致概率谱	
最大加速度反应 $/(m \cdot s^{-2})$	顺河向/放大倍数	8.3/2.3	9.1/2.5	9.2/2.1	10.1/2.35
	坝轴向/放大倍数	5.7/1.6	7.3/2.0	6.5/1.5	8.3/1.93
	竖向/放大倍数	4.9/2.0	6.2/2.6	5.7/2.0	7.2/2.51
最大地震残余变 形/cm	水平向	17.5	21.3	19.6	26.8
	坝轴向	27.9	34.8	29.5	42.2
	竖向(沉降)	94.9	118.4	101.1	143.5
坝坡抗震稳定	上游坡最小安全系数	0.98	0.9	0.9	0.81
	上游坡塑性滑移量/cm $F_s < 1.0$ 历时/s	2.2/0.05	9.5/0.25	27.4/0.22	44.9/0.35
	下游坡最小安全系数	0.82	1.02	0.7	0.9
	下游坡塑性滑移量/cm $F_s < 1.0$ 历时/s	14.7/0.21	0.0/0.0	33.9/0.27	40/0.38
心墙振动孔压	最大振动孔压/kPa	279	292	286.77	329

表 4 高土石坝极限抗震能力

Table 4 Ultimate seismic capabilities of high earth rockfill dams

输入基岩峰值加速度/g	0.50		0.55		0.60	
	场地相关 反应谱	一致概率 反应谱	场地相关 反应谱	一致概率 反应谱	场地相关 反应谱	一致概率 反应谱
坝坡抗震 稳定	上游坡最小安全系数	0.88	0.73	0.86	0.68	0.82
	上游坡塑性滑移量/cm	50.60	87.70	74.50	120.10	104.20
	$F_s < 1.0$ 历时/s	0.33	0.45	0.42	0.55	0.77
	下游坡最小安全系数	0.67	0.79	0.63	0.72	0.59
	下游坡塑性滑移量/cm	37.20	59.5	66.20	105.00	98.70
地震残余 变形	$F_s < 1.0$ 历时/s	0.41	0.63	0.56	0.93	0.83
	最大震陷/cm	156.60	170.00	177.60	190.00	192.20
	最大震陷	0.65	0.71	0.74	0.79	0.80
	占坝高的比例/%	0.63	0.68	0.71	0.80	0.79
	震倾率/%	0.63	0.68	0.71	0.80	0.96

为 1.7, 1.9 m, 此时, 上、下游坝坡最小安全系数远小于 1.0, 且安全系数小于 1.0 累积历时 1.1 s (超出安全控制上限 1.0 s), 累积塑性滑移量大于 1.2 m, 坝坡的整体和局部安全性难以得到保证, 如图 16 所示。从坝坡稳定角度, 基于一致概率谱得到的大坝的极限抗震能力为 $0.50g \sim 0.55g$ 。在场地相关设计反应谱地震动作用下, 坝体上、下游坡最小安全系数分别为 0.82 和 0.59, 对应的最危险滑弧的累积滑移量均为 1.0 m。其上、下游坝坡安全系数小于 1.0 累积历时未超过 1.0 s, 地震滑移量低于 1.2 m。从坝坡稳定角度, 基于场地相关设计反应谱得到的大坝的极限抗震能力在 $0.55g \sim 0.60g$ 。

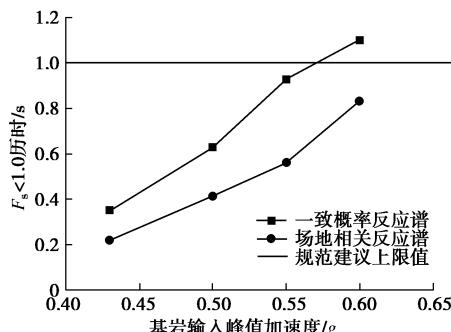


图 16 不同反应谱地震动作用下安全系数小于 1.0 持时

Fig. 16 Comparison of durations of factor of safety below 1.0 under different response spectra

3.2 坝体整体地震变形安全控制

当输入基岩水平峰值加速度为 $0.60g$, 在一致概率谱地震动作用下, 坝体最大竖向残余位移 (震陷) 为 2.2 m, 发生在坝顶处。最大震陷为坝高 (不含覆盖层) 的 0.92%, 震陷率超过规范建议的安全控制范围 0.6%~0.8%, 如图 17 所示, 坝体将产生明显震害。基于一致概率谱得到的大坝极限抗震能力在 $0.50g \sim 0.55g$ 。在场地相关设计反应谱地震动作用下, 大坝的最大震陷为 1.9 m, 为坝高的 0.82%, 震倾率为 0.79。从地震变形安全控制角度来看, 基于场地相关设计反应谱得到的大坝极限抗震能力为 $0.60g$ 。

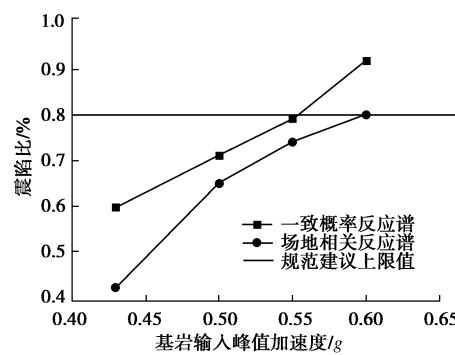


图 17 不同反应谱地震动作用下坝体震陷率

Fig. 17 Comparison of ratios of earthquake-induced settlement under different response spectra

3.3 单元抗震安全性及防渗体安全控制

当输入基岩峰值加速度为 $0.60g$, 在一致概率谱地震动作用下, 上游坝壳料和心墙料发生贯通的动力剪切破坏区域, 如图 18 (b) 中所示的单元抗震安全系数小于 1 的区域, 特别是坝顶附近 $1/4$ 坝高范围内的坝坡和心墙内存在严重的动力剪切破坏区, 与坝坡稳定时程分析较为一致; 大面积贯通的剪切破坏区域可引发坝坡的整体失稳和滑动, 危及大坝整体安全。因此, 从防渗体安全的角度分析, 基于一致概率谱得到的大坝极限抗震能力在 $0.5g \sim 0.55g$ 之间。在场地相

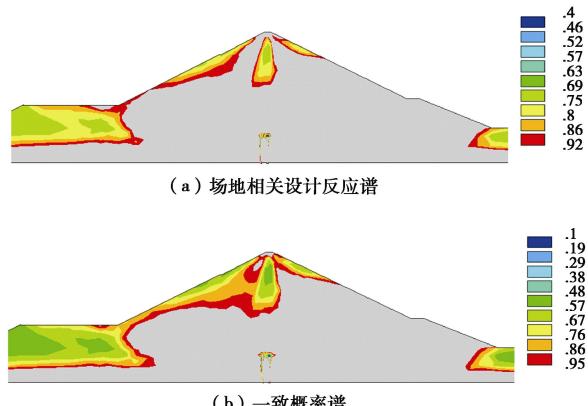


图 18 坝体最大剖面单元抗震安全系数分布图($0.60g$) (单元抗震安全系数小于 1.0 区域)

Fig. 18 Distribution of factors of safety of soil elements below 1.0

关设计反应谱地震动作用下, 上、下游坝壳表层和心墙区域振动孔压较大处出现一些单元抗震安全系数小于1.0的区域, 但未发生贯通性破坏, 可能引起坝坡的局部失稳, 未危及大坝的整体安全性。基于场地相关反应谱得到的大坝极限抗震能力为0.60g。

4 结 论

基于一等大(I)型甲类设防长河坝高心墙堆石坝工程, 深入探讨了基于设定地震的场地相关反应谱和一致概率谱对高土石坝工程抗震安全评价的影响, 重点研究了不同反应谱对坝体动力响应加速度、永久变形、坝坡稳定、防渗体安全性和极限抗震能力的影响, 具体结论如下:

(1) 对于长河坝高心墙堆石坝工程而言, 基于设定地震的场地相关反应谱确定的地震动参数得到的坝体响应加速度、永久变形、坝坡稳定性和防渗体安全性等主要抗震安全评价指标明显优于一致概率谱, 基于一致概率谱进行自振周期在1.0~2.0 s的土石坝工程易造成较保守的评价结果。

(2) 综合坝坡稳定、坝顶沉陷和防渗体安全性等3个核心评价指标, 基于设定地震的场地相关反应谱确定的坝体极限抗震能力为0.60g, 而基于一致概率反应谱确定的坝体极限抗震能力在0.50g~0.55g之间。基于场地相关设计反应谱得到的坝体极限抗震能力明显高于一致概率反应谱。

(3) 针对强震区特别重要的高土石坝工程, 应遵循《水电工程水工建筑物抗震设计规范》, 采用基于设定地震的场地相关反应谱确定的地震动参数进行抗震安全评价和极限抗震能力分析, 进而确定经济合理的抗震设计和抗震加固措施。

参考文献:

- [1] 陈厚群, 李敏, 石玉成. 基于设定地震的重大工程场地设计反应谱的确定方法[J]. 水利学报, 2005(12): 1399-1404. (CHEN Hou-qun, LI Min, SHI Yu-cheng. Determination of design response spectrum for important structures based on scenario earthquake[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005(12): 1399-1404. (in Chinese))
- [2] NB 35047—2015 水电工程水工建筑物抗震设计规范[S]. 2015. (NB 35047—2015 Code for seismic design of hydraulic structures of hydropower project[S]. 2015. (in Chinese))
- [3] 陈厚群, 李敏, 张艳红, 等. 地震危险性分析和地震动输入机制研究[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院. 2001. (CHEN Hou-qun, LI Min, ZHANG Yan-hong, et al. Earthquake-resistant analysis on high arch dam and study on the dynamic stability of dam abutment[R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research. 2001. (in Chinese))
- [4] 兰宏亮, 许丽萍, 崔永高. 一致概率谱衰减指数的取值方法探讨[J]. 震灾防御技术, 2009(3): 335-339. (LAN Hong-liang, XU Li-ping, CUI Yong-gao. Discuss of method to determine consistent spectra decaying constant[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2009(3): 335-339. (in Chinese))
- [5] 中国水利水电科学研究院. 四川省长河坝水电站坝址区场地相关设计反应谱研究[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2016. (China Institute of Water Resources and Hydropower Research. Research on the site-related response spectrum of Changhe dam in Sichuan Province[R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2016. (in Chinese))
- [6] 中国地震局地质研究所. 大渡河流域长河坝水电站工程场地地震安全性评价和水库诱发地震评价报告[R]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2006. (Seismic safety evaluation of changhe dam under site related seismic and reservoir-induced earthquake[R]. Beijing: , 2006. (in Chinese))
- [7] 中国水利水电科学研究院. 四川省长河坝水电站筑坝材料静动力特性试验分析研究[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015. (China Institute of Water Resources and Hydropower Research. Study on the static and dynamic characteristic test of construction material in changhe dam[R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015. (in Chinese))
- [8] 陈生水, 李国英, 傅中志. 高土石坝地震安全控制标准与极限抗震能力研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 59-65. (CHEN Sheng-shui, LI Guo-ying, FU Zhong-zhi. Safety criteria and limit resistance capacity of high earth-rock dams subjected to earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(1): 59-65. (in Chinese))
- [9] 赵剑明, 刘小生, 陈宁, 等. 高心墙堆石坝的极限抗震能力研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(5): 98-102. (ZHAO Jian-ming, LIU Xiao-sheng, CHEN Ning, et al. Research on the maximum anti-seismic capability of high earth core rock-fill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(5): 98-102. (in Chinese))
- [10] LI Hong-jun, ZHONG Hong, CHI Shi-chun. Study on the ultimate aseismic capacity of high core rock-fill dam[C]// Geotechnical Special Publication No. 215, ASCE. 2011: 124-134.