

DOI: 10.11779/CJGE201512023

反应谱衰减系数变化对高土石坝地震响应的影响

李宗坤, 赵梦蝶, 徐建国, 葛巍

(郑州大学水利与环境学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 标准反应谱曲线下降段系数 γ 是水工建筑物地震响应至关重要的参数。针对高土石坝的标准反应谱衰减系数 γ 的取值问题, 采用三维有限元分析方法, 以美国开展的“下一代的地震衰减关系(NGA)”研究中Abrahamson-Silva 2007衰减关系为参考依据, 定量分析标准反应谱下降段衰减系数变化对高土石坝地震响应的影响, 并探讨适合高土石坝的衰减系数取值。结果表明: 对于高度超过200 m土石坝, 其规范化的标准反应谱下降段的衰减系数 γ 取0.7比0.9更为合适。

关键词: 土石坝; 反应谱; 衰减系数; 动力特性; 地震响应

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)12-2315-05

作者简介: 李宗坤(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土石坝抗震安全研究与评价等方面的研究。E-mail: lizongkun@zzu.edu.cn。

Impact of varying attenuation coefficient of response spectra on dynamic analysis of high earth-rock dams

LI Zong-kun, ZHAO Meng-die, XU Jian-guo, GE Wei

(School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The declining attenuation coefficients of the standard response spectrum index γ is analyzed using the three-dimensional finite element method. The impact of index γ on high earth-rock dams is analyzed based on the results proposed by Abrahamson and Silva (2007) whose research is funded by the American project “Next Generation Attenuation” (NGA). The suitable value for the index γ is then discussed. The results show that the declining attenuation coefficient γ of the standard response spectrum taking 0.7 is more suitable than 0.9 for the earth-rock dam which is higher than 200 m.

Key words: earth-rock dam; response spectrum; attenuation coefficient; dynamic characteristic; earthquake response

0 引言

设计反应谱反映的是不同震级和距离地震动加速度反应谱的统计规律, 实质上是体现反应谱的衰减关系, 其峰值周期后下降段的形态, 对水工建筑物地震响应至关重要^[1]。目前中国缺乏支持设计反应谱下降段衰减系数 γ 研究的强震记录, 马宗晋等^[2]认为基于中国大陆跟北美大陆地质构造的相似性, 可以借鉴美国丰富强震记录的加速度反应谱统计平均衰减关系, 作为中国高坝抗震设计中确定设计反应谱系数的参考依据。陈厚群^[3]也提出依据美国开展的“下一代的地震衰减关系(NGA)”中Boore等^[4]和Abrahamson等^[5]的研究结果, 建议周期1 s内混凝土坝规范化的标准反应谱下降段的衰减系数 γ 取0.6比0.9更宜^[6]。李德玉^[7-8]研究了反应谱衰减系数变化对拱坝和重力坝动力反应的影响, 结果表明衰减系数变化对重力坝抗震的抗压强度影响不大, 但对坝踵附近拉应力的增幅明显; 衰减系数的减小对拱坝的静动综合主拉应力影响较显

著, 总体上来说衰减系数变化对混凝土坝的动力响应影响不大。但是土石坝坝料偏软, 自振周期偏长, 长周期段的反应谱值对其动力反应的影响较大, 因此论证衰减系数的变化对高土石坝动力特性及地震反应的影响, 探讨适合的设计反应谱衰减系数的取值具有一定的理论与现实意义。

1 标准反应谱与AS07谱

美国正在开展的“下一代的地震动衰减关系研究^[4] (NGA)”, 包括全球173次地震的3551个强震记录, 其中Abrahamson等^[5] (AS07)衰减关系所依据的强震记录取自与中国大陆构造、地壳组成、现代应力状态及地震成因、地震活动性等方面具有相似性和可比性的美国西部强震资料^[2, 9]。张翠然等^[10]比较了AS07衰减关系与中国水利水电工程中地震安评工作常用衰减

关系的相关度, 结论表明 AS07 衰减关系应用于中国水电工程抗震设计是可行的。陈厚群^[11]在水工建筑物场址反应谱中论证了 AS07 衰减关系用于中国抗震设计的可靠性。因而在我国缺乏足够的强震实测记录的情况下, 采用 Abrahamson-Silva 2007 (简称 AS07) 衰减关系作为中国高坝抗震设计中确定设计反应谱的参考依据具有一定的合理性^[6]。

中国一般水工建筑物都采用规范化的标准反应谱, 其形状由平台最大值 β_{\max} , 下降点的周期值 T_g , 下降段函数表达式 $\beta = \beta_{\max} (T_g/T)^{\gamma}$ 决定。其峰值周期后下降段的形态, 对水工建筑物地震响应至关重要^[11], 根据 SDJ 10—78 规范讨论意见: 对于基岩上的土坝和堆石坝 β_{\max} 取 1.6^[12]。图 1 为大震、近场和基岩条件下按 AS07 衰减关系拟合的反应谱与 $\beta_{\max}=1.6$, $T_g=0.2$, $\gamma=0.6/0.7$ 拟合的标准谱及 $\beta_{\max}=1.6$, $T_g=0.2$, $\gamma=0.9$ 的现行规范标准谱的比较。可以看出, 周期 1 s 内 γ 取值 0.6 拟合的标准谱与 AS07 谱拟合较好, 大于 1 s 的长周期段 γ 取 0.6 拟合的标准谱略大于 AS07 谱, 在周期 1~2 s 内 γ 取 0.7 拟合的标准谱与 AS07 谱比较接近。

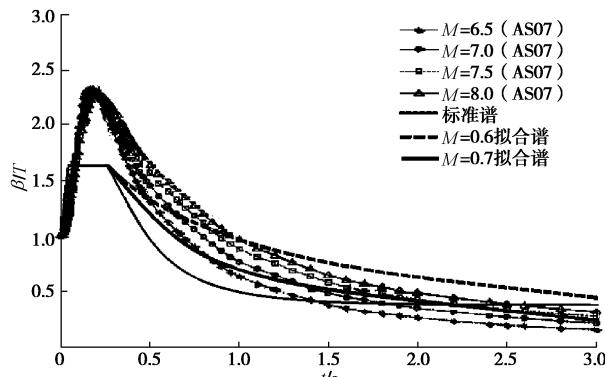


图 1 AS07 谱与按($\beta_{\max}=1.6$, $T_g=0.2$, $\gamma=0.6/0.7$)拟合谱及规范建议的标准化设计反应谱($\beta_{\max}=1.6$, $T_g=0.2$, $\gamma=0.9$)的比较

Fig. 1 Comparison among AS07 response spectrum, fitting response spectrum ($\beta_{\max}=2.0$, $T_g=0.2$, $\gamma=0.6$) and standard spectrum ($\beta_{\max}=2.0$, $T_g=0.2$, $\gamma=0.9$)

由 OKamoto 经验公式得到不同高度土石坝的自振周期如表 1 所示。土石坝由于其结构的特殊性, 相同坝高时其自振周期比混凝土坝大得多, 200 m 以上高坝的自振周期大部分大于 1 s, 且随着坝高的增加长周期段反应谱值的影响也越大^[13], 因此对于 200 m 级以上高土石坝 γ 取值 0.6 可能会造成 1 s 后长周期段的值被过多加大, 所以对于高土石坝的 γ 的取值还需要进一步探讨。本文拟通过对不同高度土石坝动力响应分析, 定量的评判衰减系数的变化对土石坝动力反应的影响, 并探讨适合的衰减系数的取值。

表 1 土石坝自振周期

Table 1 Natural vibration periods of earth-rock dam

坝高/m	100	150	200	250	300
周期/s	0.4~0.7	0.5~0.97	0.7~1.3	0.9~1.63	1.1~2

2 土石坝动力计算

采用大型商用软件 Abaqus 对大坝进行三维有限元数值分析, 并基于 Abaqus 二次开发平台^[14]实现邓肯 $E-B$ 模型、等效线性模型的开发应用, 计算并输出动力响应结果。

2.1 计算方法

静力计算采用邓肯张 $E-B$ 非线性弹性模型^[15], 模型中的切线弹性模量 E_t 、卸荷及在加载时的弹性模量 E_{ur} 和切线体积模量 B_t 的计算公式分别如下所述:

$$E_t = K_p a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2, \quad (1)$$

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{n_{ur}}, \quad (2)$$

$$B_t = K_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m. \quad (3)$$

式中 K , K_b , m , K_{ur} , n_{ur} 为试验常数; R_f 为破坏比; c 和 φ 为材料的黏聚力与内摩擦角。

动力计算采用时程分析法, 并用逐步积分法进行数值积分求解动力方程。即把地震过程分成若干时段, 在各个时段内假定动剪模量和阻尼比不变, 用 Wilson-θ 法依时间步长进行积分得到有效动剪应变, 按照沈珠江的概化等价黏弹性模型^[16]确定新的动剪模量和阻尼比, 迭代至动剪模量和阻尼比达到精度要求。由沈珠江等价黏弹性模型知, 动剪模量 G 、阻尼比 λ 与动剪应变 $\bar{\gamma}_d$ 的关系如下:

$$G = \frac{k_2}{1 + k_1 \bar{\gamma}_d} p_a \left(\frac{\sigma'_0}{p_a} \right)^n, \quad (4)$$

$$\lambda = \lambda_{\max} \frac{k_1 \bar{\gamma}_d}{1 + k_1 \bar{\gamma}_d}, \quad (5)$$

式中, σ'_0 为围压, $\sigma'_0 = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$, k_1 , k_2 , n 为材料参数, 可以通过试验确定, $\bar{\gamma}_d$ 为归一化的剪应变, $\bar{\gamma}_d$ 的表达式为 $\bar{\gamma}_d = 0.65 \gamma_{d\max} \left(\frac{\sigma'_0}{p_a} \right)^{n-1}$ 。

2.2 几何模型

选用标准形状堆石坝, 河谷底宽为 36 m, 河谷边坡为 1:1, 坝坡为 1:1.4, 不考虑地基对坝体的相互作用, 坝高分别取 120, 200, 280 m, 计算模型网格如图 2 所示。

2.3 材料参数

坝料静力邓肯模型参数为 $\gamma_d=21.5$, $K=1100$, $K_b=600$, $n=0.35$, $R_f=0.82$, $\Delta\varphi=8.5$, $m=0.1$, $\varphi_0=52$ 。坝料动力等价黏弹性模型参数为 $k_1=9.5$, $k_2=2399$, $n=0.5$, $D=0.25$ 。

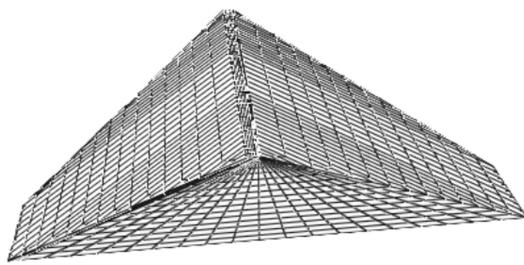


图 2 计算模型网格图

Fig. 2 Standard mesh of computational model

2.4 地震输入与计算工况

以 AS07 衰减关系合成的地震波为参照组, 以 ($\beta_{\max} = 1.6$, $T_g = 0.2$, $\gamma = 0.9$) 拟合的规范标准谱合成地震波为基准组 A9, 以 ($\beta_{\max} = 1.6$, $T_g = 0.2$, $\gamma = 0.6/0.7$) 拟合的标准谱合成地震波为对比组 A6、A7, 最大输入加速度取震级为 6.5, 7.0, 8.0, 9.0 时的 0.075g, 0.1g, 0.2g, 0.4g, 各输入工况如表 2 所示。采用三角级数法编制程序合成人工地震波^[18]。

表 2 输入地震波工况

Table 2 Input seismic wave conditions

工况	$M=6.5$ ($a=0.075g$)	$M=7.0$ ($a=0.1g$)	$M=8.0$ ($a=0.2g$)	$M=9.0$ ($a=0.4g$)
AS07 谱 (参照组 AS07)	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
r 取 0.9 (基准组 A9)	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8
r 取 0.6 (对比组 A6)	工况 9	工况 10	工况 11	工况 12
r 取 0.7 (对比组 A7)	工况 13	工况 14	工况 15	工况 16

3 计算结果分析

3.1 模型验证

通过计算输出各工况下河谷中央断面中轴线上的加速度 (输出位置如图 3 所示) 并绘制 280 m 坎地震动输入 AS07 谱 0.075g, 0.1g, 0.2g 和 0.4g 工况下加速度放大倍数随坝高的分布关系图 (如图 4 所示), 与文献[16]的计算结果 (如图 5 所示) 进行对比分析。

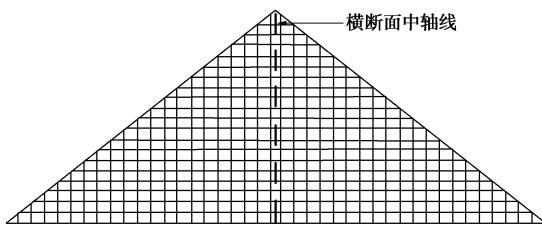


图 3 输出加速度位置图

Fig. 3 Location of output acceleration

从图 4, 5 加速度沿竖向分布规律可以看出, 随着坝高 h 的增加加速度放大倍数增大, 都在 4/5 坎高处加速度放大倍数突然增大; 且随着加速度峰值的增加,

大坎加速度放大倍数逐渐减小; 其加速度放大倍数变化规律基本相同, 且符合规范^[1]规定的加速度放大倍数, 因此可认为本文的计算结果可靠。

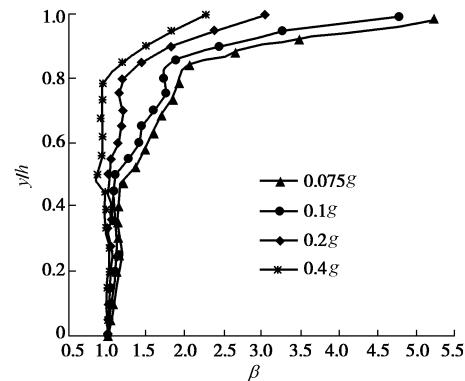


图 4 本文加速度放大倍数图

Fig. 4 Acceleration magnification of this paper

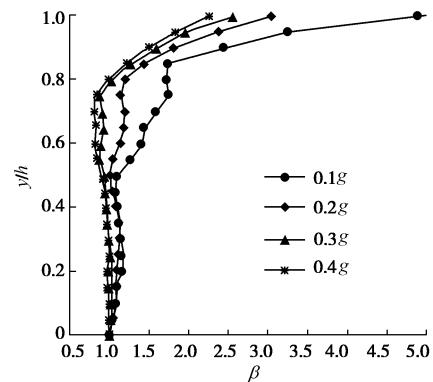


图 5 文献[17]加速度放大倍数图

Fig. 5 Acceleration magnification of Reference [17]

3.2 坎顶最大加速度

输出各工况下河谷中央断面中轴线上的最大加速度列于表 3。

表 3 坎体最大加速度

工况	组别	Table 3 Maximum accelerations of dam (g)			
		0.075	0.100	0.200	0.400
120 m	对比组 A6	0.304	0.357	0.583	0.884
	对比组 A7	0.298	0.351	0.564	0.839
	参照组 AS07	0.311	0.368	0.603	0.908
	基准组 A9	0.290	0.334	0.528	0.756
200 m	对比组 A6	0.337	0.429	0.705	0.959
	对比组 A7	0.327	0.421	0.680	0.927
	参照组 AS07	0.351	0.427	0.699	0.968
	基准组 A9	0.315	0.395	0.624	0.813
280 m	对比组 A6	0.462	0.534	0.74	1.222
	对比组 A7	0.430	0.521	0.708	1.146
	参照组 AS07	0.431	0.526	0.716	1.166
	基准组 A9	0.429	0.482	0.633	0.955

由表 3 看出, 随着衰减系数的减小, 坎体最大加速度呈增大的趋势; 随着输入加速度和坎高的增加, 加速度呈增大的趋势; 输入 AS07 谱计算的加速度最

大值大多介于输入衰减系数 0.6 和 0.7 的加速度最大值之间。为了更清晰地判断各工况之间的联系, 分别计算 120, 200, 280 m 坝高对比组、参照组最大加速度与基准组的最大加速度的增值 (例如 A6-A9/A9), 如图 6~8 所示。

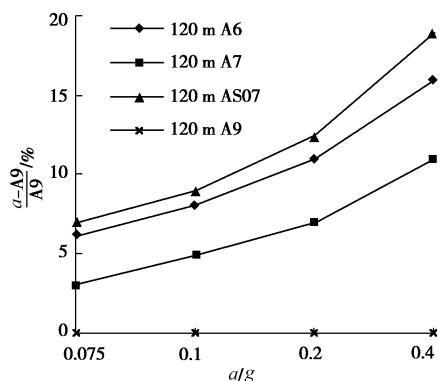


图 6 120 m 坝最大加速度增幅

Fig. 6 Increment of maximum acceleration of 120 m-high dam

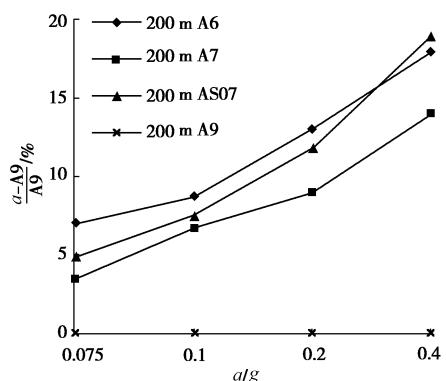


图 7 200 m 坝最大加速度增幅

Fig. 7 Increment of maximum acceleration of 200 m-high dam

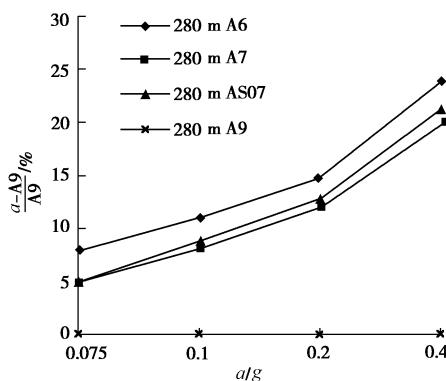


图 8 280 m 坝最大加速度增幅

Fig. 8 Increment of maximum acceleration of 280 m-high dam

由图6~8看出, 最大加速度增幅随坝高和地震烈度的增加而增加。

由图6看出, 120 m高的坝在震级为6.5, 7.0, 8.0, 9.0的工况下, 对比组A6的加速度增幅在6.5%~16%之

间接近参照组AS07的加速度增幅7.5%~19%。说明120 m高的土石坝, 输入衰减系数为0.6的规范标准谱计算结果更接近输入AS07谱的计算结果。

由图7, 8看出, 坝高为200, 280 m的坝, 除了200 m坝在输入震级为8的工况下对比组A6的加速度增幅接近参照组AS07的增幅外, 其它工况对比组A7的加速度增幅在4%~20%之间接近参照组AS07的增幅5%~22%, 而对比组A6的加速度增幅在7%~28%之间较AS07组加速度增幅的差值较大。200 m坝在震级为8时出现规律不同点是因为AS07衰减关系以震级为参数, 而中国现行的规范谱是取各个震级的统计规律。总体来说在坝高200~300 m范围内, 输入衰减系数取0.7规范谱的计算结果更接近输入AS07谱的计算结果, 且坝高越高拟合效果越好。

4 结 论

本文针对反应谱衰减系数的不同取值, 结合 120, 200, 280 m 高度的堆石坝进行三维有限元动力计算分析, 对大坝加速度等地震反应进行了比较分析, 可得以下结论。

(1) 对于周期小于 1 s 的水工建筑物, 建议规范化的标准反应谱下降段的衰减系数 γ 取 0.6; 对于周期在 1s-2s 之间的水工建筑物, 建议规范化的标准反应谱下降段的衰减系数 γ 取 0.7。

(2) 对于土石坝, 在坝高 120 m 左右时, 建议规范化的标准反应谱下降段的衰减系数 γ 取 0.6; 在坝高 200~300 m 之间时, 建议规范化的标准反应谱下降段的衰减系数 γ 取 0.7。另外本文研究采用的模型均是两岸对称理想的堆石坝, 针对实际工程的应用还有待于进一步研究, 本文的计算结果还需要地震实测记录以及大型离心机振动台模型试验等手段进一步验证。

参考文献:

- [1] 《水工建筑物抗震设计规范》编制组. 《水工建筑物抗震设计规范》及条文说明 (征求意见稿) [R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2011. (Revised Group of Seismic Design Cord of Hydraulic Structures. Seismic Design Cord of Hydraulic Structures and explanatory document (draft) [R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2011. (in Chinese))
- [2] 马宗晋, 张德成. 板块构造基本问题[M]. 北京: 地震出版社, 1986. (MA Zong-jin, ZHANG De-cheng. Basic problem of plate tectonics[M]. Beijing: Earthquake Press, 1986. (in Chinese))

- [3] 陈厚群. 水工建筑物抗震设计规范修编的若干问题研究[J]. 水力发电学报, 2012, 30(6): 4 - 10. (CHEN Hou-qun. Study on some revision issues of Aseismatic Design Codes of Hydraulic Structures in China[J]. Journal of Hydrotectonic Engineering, 2012, 30(6): 4 - 10. (in Chinese))
- [4] ATKINSON G M, BOORE D M. Boore-Atkinson NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters[R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2007.
- [5] ABRAHAMSON N A, ABRAHAMSON S W J, SILVA N G A. ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters[R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2007.
- [6] 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, 36(12): 1399 - 1404. (CHEN Hou-qun, LI men, SHI Yu-cheng. Determination of design response spectrum for important structures based on scenario earthquake[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(12): 1399 - 1404. (in Chinese))
- [7] 李德玉. 反应谱衰减系数变化对拱坝动力反应的影响[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2010. (LI De-yu. Response spectrum attenuation coefficient of variation of dynamic response of arch dams[R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2010. (in China))
- [8] 李德玉. 反应谱衰减系数变化对重力坝动力反应的影响[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2010. (LI De-yu. Response spectrum attenuation coefficient of variation of dynamic response of arch dams[R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2010. (in China))
- [9] 马宗晋, 杜品仁. 现今地壳运动问题[M]. 北京: 地震出版社, 1995. (MA Zong-jin, DU Pin-ren. Recent crustal movement problems[M]. Beijing: Earthquake Press, 1995. (in Chinese))
- [10] 张翠然, 陈厚群. NGA 衰减关系应用于重大水电工程抗震设计的可行性探讨[J]. 水利水电技术, 2010, 41(3): 41 - 45. (ZHANG Cui-ran, CHEN Hou-qun. On feasibility of applying next generation attenuation (NGA) relations to seismic design of major hydropower project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41(3): 41 - 45. (in Chinese))
- [11] 陈厚群. 水工建筑物的场址设计反应谱[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(增刊 2): 184 - 188. (CHEN Hou-qun. Response spectrum of hydraulic structures site design[J]. Journal of Civil Architecural & Environmental Engineering, 2010, 32(S2): 184 - 188. (in Chinese))
- [12] 顾淦臣, 沈长松, 岑威钧. 土石坝地震工程学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 76 - 78. (GU Xi-chen, SHEN Chang-song, CEN Wei-jun. Earthquake engineering for earthrock dams [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009: 76 - 78. (in Chinese))
- [13] 迟世春. 不同高度面板堆石坝幅频反应的比较研究[J]. 世界地震工程, 2002, 18(3): 6 - 9. (CHI Shi-chun. Comparative research on frequency spectrum of concrete faced rockfill dam of different height[J]. World Earthquake Engineering, 2002, 18(3): 6 - 9. (in Chinese))
- [14] 费 康, 刘汉龙. ABAQUS 的二次开发及在土石坝静动力分析中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 881 - 890. (FEI Kang, LIU Han-long. Secondary development of ABAQUS and its application to static and dynamic analyses of earth-rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 881 - 890. (in Chinese))
- [15] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (LI Guang-xin. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))
- [16] 沈珠江. 岩土本构模型研究的进展(1985-1988)[J]. 岩土力学, 1989, 10(2): 3 - 13. (SHEN Zhu-jiang. Development of constitutive modeling of geological materials (1985-1988) [J]. Rock and Soil Mechanics, 1989, 10(2): 3 - 13. (in Chinese))
- [17] 邹德高, 周 扬, 孔宪京, 等. 高土石坝加速度响应的三维有限元研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 657 - 661. (ZOU De-gao, ZHOU Yang, KONG Xian-jing, et al. 3D FEM study of acceleration response of high earth-rock dams[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 657 - 661. (in Chinese))
- [18] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 2006: 124 - 128. (HU Li-xian. Earthquake engineering[M]. Beijing: Earthquake Press, 2006: 124 - 128. (in Chinese))