

地震动反应谱对土石坝二维地震反应的影响

徐精明¹, 张 麟²

(1. 安徽科技学院理学院, 安徽 蚌埠 233100; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对目前土石坝抗震计算中对频谱特性考虑的不足, 分析了输入地震动加速度反应谱、速度反应谱、位移反应谱对土石坝地震反应的影响. 研究表明, 如果加速度反应谱卓越周期与土石坝的自振周期相近, 土石坝地震反应则相应出现最大值, 但不能从结果中简单得出周期的长短对坝体反应的影响, 仅靠加速度谱的卓越周期不能完全反应地震动的频域特性.

关键词: 土石坝 地震反应 加速度反应谱 位移反应谱

中图分类号: TV312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2007)03-0305-04

地震动是振幅和频率都在复杂变化着的振动, 但是对于给定的地震动过程 $a(t)$ 而言, 均可将其看作是由许多不同频率的简谐波组合而成. 凡是表示一次地震动中振幅和频率关系的曲线, 统称为频谱. 在抗震工程中常用的频谱有傅立叶谱、反应谱和功率谱.

傅立叶谱是数学上用来表示复杂函数的一种经典方法, 即把复杂的地震过程 $a(t)$ 展开为 N 个不同频率的组合. 反应谱是 1940 年前后提出来的, 它是通过理想简化的单质点体系的反应来描述地震动特性^[1]. 功率谱是随机过程在频域中描述过程特性的物理量, 定义为地震动过程 $a(t)$ 傅立叶谱的平方平均值, 具有明确的统计意义. 傅立叶谱是相对速度反应在地震动终止时的值, 无阻尼相对速度反应谱为整个反应过程中相对速度反应的最大值. 从上述定义可知, 这 3 种谱之间存在换算关系, 都反映了地震动输入特性.

在工程界最容易被接受、使用最多的就是加速度反应谱及其抗震计算理论. 但是随着一些高耸结构、大型桥梁、核电站等工程的兴建, 简单依赖加速度反应谱的抗震设计已经明显不能满足诸如位移、精度的要求了. 地震时地面振动非常复杂, 有大量的参数, 不同的结构有不同的动力特性, 不同的动力特性对不同的地震动参数敏感, 因此, 针对具体工程的地震动参数, 不能千篇一律, 否则是做不好抗震设计的. 自 20 世纪 90 年代以来, 建筑结构基于位移的抗震设计受到地震工程界的广泛关注, 并提出一些具体的设计理论和方法^[2-6]. 本文在上述研究的基础上, 结合我国土石坝抗震设计实际, 初步探讨加速度反应谱、速度反应谱、位移反应谱对土石坝地震反应的影响.

1 地震反应计算方法和计算模型

1.1 计算方法

由于土体材料具有物理非线性, 以及强地震作用下大位移引起几何非线性, 因此土石坝地震反应分析宜采用时域有限元解法, 也只有有限元法可以计算二维问题和三维问题, 并可以按坝体分区考虑不同的材料密度、动剪切模量和阻尼比.

地震荷载作用前, 土体中的原始应力状态对坝体在地震作用下的性状有很大影响, 尤其是破坏面上的初始法向应力以及相应的初始应力比对土体的动力性状影响更大. 在综合分析上述土石坝地震反应计算具体特点的基础上, 河海大学岩土工程研究所采用 FORTRAN 语言编制了相应的计算程序^[7-8].

1.2 计算模型

以狮子坪水电站为例, 其大坝二维有限元计算模型如图 1 所示. 狮子坪水电站位于四川省理县沙坝乡一带, 岷江一级支流杂谷脑河上游河段上, 为一装机容量 19.5 万 kW 的大 II 型混合式电站. 大坝拟采用砾石土质心墙堆石坝, 坝顶高程 2544 m, 最大坝高 136 m, 坝顶宽度为 25.8 m, 上游坝坡坡度 1:2.0, 下游坝坡坡度

1:1.8.覆盖层厚达 90 m,系第四纪冲积层.坝基采用一道厚 12 m、长 91.3 m 的混凝土防渗墙防渗.防渗墙自心墙底部穿过覆盖层,进入基岩 1.3 m.图 1 为大坝二维有限元计算网格图,共计划分为 701 个节点、692 个单元.

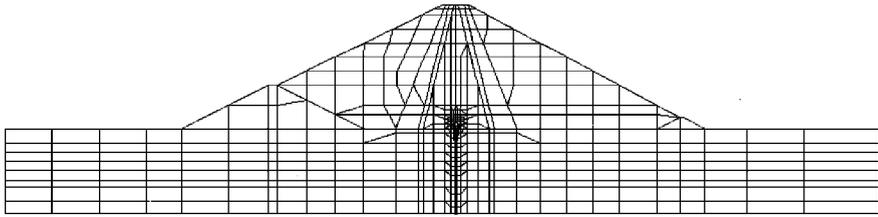


图 1 二维有限元网格剖分
Fig.1 Mesh generation for 2D FEM

2 加速度反应谱的影响

2.1 计算工况

选择输入地震动时,加速度峰值均为 $220g$,卓越周期分别是 0.04 s, 0.1 s, 0.12 s, 0.2 s, 0.24 s, 0.34 s, 0.38 s, 0.42 s, 0.44 s, 0.52 s, 0.56 s, 0.62 s, 共计 12 种工况.

2.2 计算结果及分析

坝体材料的动剪切模量是变化的,但仍然可以得到一个坝体自振周期的范围.参考日本和美国几座土石坝实测的自振周期^[9],笔者确定了本算例的土石坝水平向自振周期范围在 0.25 ~ 0.45 s 之间,竖向向的范围在 0.2 ~ 0.35 s 之间.

从图 2 坝顶绝对加速度、坝顶相对位移随输入地震动卓越周期的变化可以看出,卓越周期在 0.2 ~ 0.4 s 之间时,水平向、竖向向的反应均较大.这与本算例中土石坝的自振周期范围是一样的,此规律与振动理论的“共振现象”吻合.

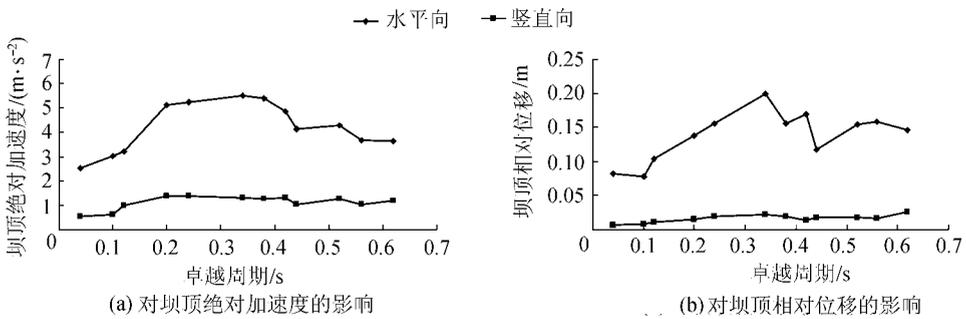


图 2 输入地震动的卓越周期对土石坝地震反应的影响

Fig.2 Influence of input seismic load predominant period on seismic response of earth-rock dam

另外,组成本次工况下地震动没有考虑其他影响,诸如地震动峰值速度、峰值位移等.图 2 的整体规律走势较为凌乱,所以不能从结果中简单地得出周期长短对坝体反应的影响.

3 速度反应谱、位移反应谱的影响

3.1 计算工况

输入地震动的峰值加速度均为 $220g$,卓越周期(加速度反应谱)为 0.18 s 的地震动有 13 条,卓越周期为 0.4 s 的地震动有 8 条,共计 21 种工况.

3.2 计算结果及分析

所设计的计算工况主要是为了讨论在加速度谱参数卓越周期相同的情况下,地震动的速度反应谱、位移反应谱对土石坝地震反应的影响.由于要观察谱形状的特点,所以只是选取 0.18 s, 0.4 s 各 3 组典型地震记录,绘出它们的加速度反应谱、速

表 1 地震反应计算结果

Table 1 Calculation result of seismic response

工况编号	坝顶绝对加速度/($m \cdot s^{-2}$)		坝顶相对位移/m	
	水平向	竖向向	水平向	竖向向
8	3.2057	0.9249	0.0701	0.0095
11	7.8551	1.2205	0.1950	0.0159
13	5.1381	1.7339	0.1298	0.0148
15	3.9495	0.896	0.0898	0.0094
16	4.9661	1.4431	0.1225	0.0140
17	6.6452	1.2523	0.2153	0.0194

度反应谱、位移反应谱.表 1 为输入地震动具体的计算结果.

表 1 中工况 8,11,13 所对应的计算结果为卓越周期 0.18 s 时的坝体地震反应计算结果,工况 15,16,17 所对应的计算结果为卓越周期 0.4 s 时的坝体地震反应计算结果,其中坝顶的最大加速度、相对位移反应最大相差达 65%~145%.根据前人对加速度反应谱的研究成果,很难解释在同样峰值加速度和卓越周期输入地震动下,土石坝的地震反应为何相差这么大.

图 3、图 4 分别为加速度反应谱和速度反应谱,速度反应谱值最大点对应的时间点没有规律,在谱形上也没有什么共同的规律.图 5 为位移反应谱,谱值最大点对应的时间点基本在 11~12 s 之间,所有的谱形都相似而且简单.位移谱的谱值最大点固定,可以说是加速度谱卓越周期的一个体现,谱形相似但数值不同正是土石坝地震反应有差别的根源所在.

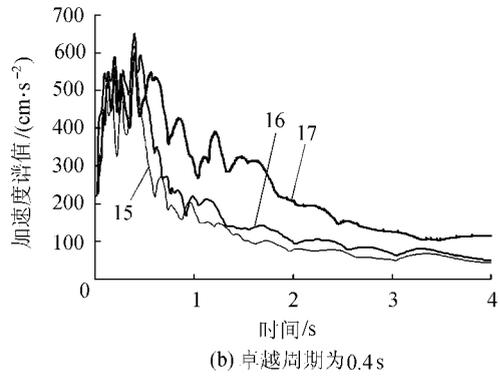
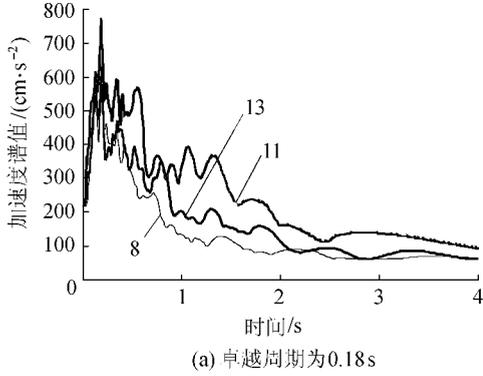


图 3 输入地震动不同卓越周期的加速度反应谱

Fig.3 Acceleration response spectrum of input earthquakes with different predominant periods

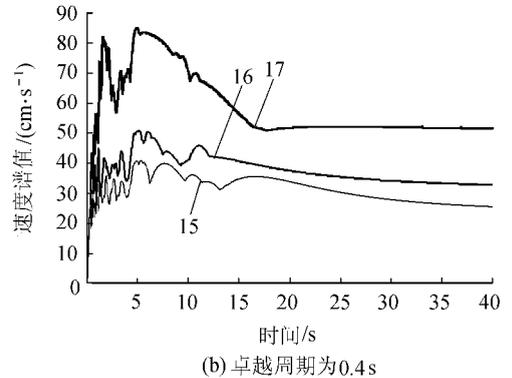
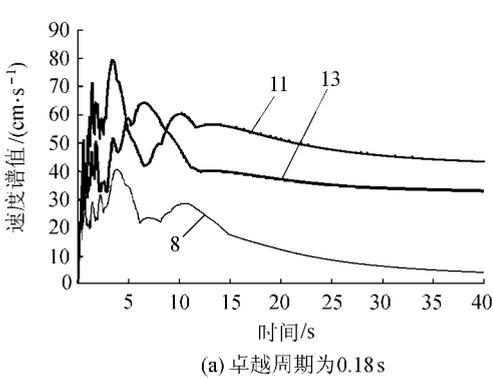


图 4 输入地震动不同卓越周期的速度反应谱

Fig.4 Velocity response spectrum of input earthquakes with different predominant periods

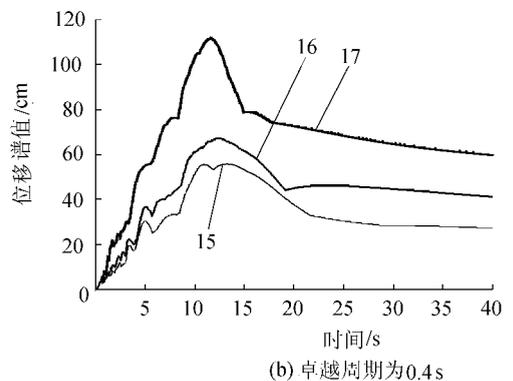
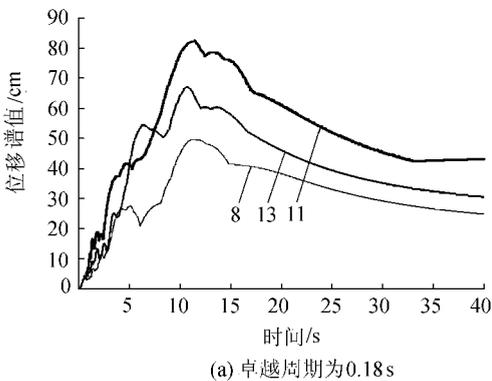


图 5 输入地震动不同卓越周期的位移反应谱

Fig.5 Displacement response spectrum of input earthquakes with different predominant periods

以上分析结果表明,如果单从频域角度讲,影响土石坝地震反应的因素除了加速度反应谱的卓越周期

外,速度反应谱和位移反应谱的某些特点对土石坝的地震影响也很大.位移反应谱以其谱形简单,并且可以体现加速度反应谱卓越周期,将受到土石坝抗震研究的关注.

4 结 论

a. 在相同加速度峰值地震动输入时,如果加速度反应谱卓越周期与土石坝的自振周期相近,土石坝地震反应则相应出现最大值.但是坝体反应随卓越周期的整体变化规律很凌乱,不能从结果中简单地得出周期长短对坝体反应的影响.

b. 从相同的卓越周期不同地震动输入的计算结果对比可以看出,仅靠加速度谱的特性参数卓越周期是不能完全反映地震动的频域特性,坝顶的最大加速度、相对位移反应最大相差达 65% ~ 145%.

c. 地震动位移反应谱以其谱形简单,可以兼顾体现加速度反应谱的卓越周期,将受到土石坝抗震研究的关注.

参考文献:

- [1] 沈聚敏,周锡元,高小旺,等.抗震工程学[M].北京:中国建筑工业出版社,2000:58-60.
- [2] 胡聿贤.地震工程学[M].北京:地震出版社,1988:133-211.
- [3] KOWALSKY M J, PRIESTLEY M J N, MACRAE G A. Displacement-based design of RC Bridge columns in seismic region[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1995, 24: 1623-1643.
- [4] MEDHEKAR M S, KENNEDY D T L. Displacement-based seismic design of buildings-theory[J]. Engineering Structures, 2000, 22: 201-209.
- [5] 钱稼茹,罗文斌.建筑结构基于位移的抗震设计[J].建筑结构,2001,31(4):3-6.
- [6] 罗文斌,钱稼茹.钢筋混凝土框架结构基于位移的抗震设计[J].土木工程学报,2003,36(5):22-29.
- [7] 姜弘道.水工结构工程与岩土工程的现代计算方法及程序[M].南京:河海大学出版社,1992:34-56.
- [8] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].2版.北京:中国水利水电出版社,1996:537-558.
- [9] MIRANDA E, GARCIA J G. Evaluation of approximate methods to estimate maximum inelastic displacement demands[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31: 539-560.

Influence of input seismic load response spectrum on 2D seismic response of earth-rock dams

XU Jing-ming¹, ZHANG Lin²

(1. College of Sciences, Anhui Science and Technology University, Bengbu 233100, China ;

2. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract :Due to insufficient consideration of influence of input seismic load response spectrum on aseismic calculation of earth-rock dams, the influences of acceleration response spectrum, velocity response spectrum, and displacement response spectrum of input earthquakes on seismic response of earth-rock dams were analyzed. The result showed that, if the predominant period of acceleration response spectrum approached the natural vibration period of earth-rock dams, the maximum seismic response occurred. However, the seismic frequency characteristics of earth-rock dams could not be reflected only by the predominant period of acceleration response spectrum.

Key words :earth-rock dam ; seismic response ; acceleration response spectrum ; displacement response spectrum