

文章编号: 1000-7598 (2010) 12-3901-06

基于小波包的地下洞室群地震 响应及其频谱特性研究

崔 臻¹, 盛 谦¹, 刘加进², 冷先伦¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;

2. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 杭州 310014)

摘 要: 基于有限差分数值模拟, 在合理选择地震动力分析阻尼参数的条件下, 开展白鹤滩水电工程 13[#]机组剖面地下洞群围岩地震响应研究, 并结合小波包变换方法从加速度峰值及振动能量角度评价了地震波在岩体中的传播规律及洞室群不同区域地震响应的频谱特征。结果表明: 地震波传播过程中强度随高程增加而增加, 层间错动带有一定减震作用; 小波包分解可以较全面地给出地震响应成分的频率分布; 地震波的高频分量在岩体传播过程中逐渐衰减; 在地下洞室群附近, 岩体地震响应的加速度峰值和振动能量频谱特征以 1~3 Hz 频段为主, 其他频段对岩体地震响应影响较小。

关 键 词: 地下洞室群; 小波包; 地震响应; 频谱特性; 瑞利阻尼

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Spectrum characteristics analysis of seismic response for underground caverns via wavelet packet

CUI Zhen¹, SHENG Qian¹, LIU Jia-jin², LENG Xian-lun¹(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. HydroChina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Based on proper damping parameters, a finite difference numerical simulation is conducted for the seismic analysis of the Baihetan underground caverns. Wavelet packet analysis is made for the evaluation of wave propagation and spectrum characteristics of seismic response from the point of view of peak acceleration and vibration energy. Results indicate that seismic intensity increases with the elevation and fault zones possess vibration-suppressing effect. Spectrum characteristics of seismic response can be clearly revealed by wavelet packet. High-frequency components of seismic wave are gradually absorbed during propagation. A major influential frequency band of peak acceleration and vibration energy spectrum characteristics is obtained as 1-3Hz for wall rock, and other bands have minor effects.

Key words: underground caverns; wavelet packet; seismic response; spectrum characteristics; Rayleigh damping

1 引 言

我国西部地区水电工程地下厂房多为由若干大跨度洞室组成的地下洞室群, 其建设场地多属高山峡谷地区, 地震基本烈度较高。如遇强震, 此类大跨度地下洞群有发生灾变的可能, 如在 1999 年台湾集集地震中, 石冈坝的地下引水涵洞垂直错动达 4 m, 涵洞全毁^[1]。如何保障这些大型地下洞室群结构在强震作用下的安全成为工程建设的关键问题。

针对该关键问题, 目前许多学者采用选取地下洞室断面, 利用数值模拟方法研究洞室群围岩的动力时程响应^[2-4]以及衬砌、锚杆等支护措施的抗震性能^[5]。对于围岩地震响应与输入地震波频谱特性的关系, 也有学者开展了一些研究工作, 说明实测地震波时程的频谱特征较为复杂, 针对不同频率的输入波, 地下洞室群围岩的响应特征亦不相同^[6-7]。

为更加细致地研究地下洞室群的地震响应及其频谱特征, 本文引入小波包变换这一具备同时表征

收稿日期: 2010-09-03

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点项目 (No.90715042); 国家自然科学基金项目 (No.51009131)。

作者简介: 崔臻, 男, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程动力稳定性评价方面的研究工作。E-mail: cuidazhen@yahoo.com.cn

地震波在时频两域的局部特征能力的数学工具^[8], 针对金沙江白鹤滩水电站右岸地下厂房 13[#]机组剖面, 在研究合理阻尼参数的基础上, 进行地下洞室群地震响应的数值分析, 研究洞群工程区域地震波传播规律及其响应特征, 并结合小波包频域多层次分解技术从加速度峰值、振动能量的角度综合研究地下洞室群地震响应的频谱特性。

2 地震波的小波包分析

2.1 小波包分析^[9]

小波分析是一种信号的时间-尺度(时间-频率)分析方法, 具有多分辨率分析的特点。小波包是在小波理论上发展而来的, 解决了分析信号高频部分频率分辨率差而低频部分时间分辨率差的问题, 提高了信号的时频分辨率。

在小波分析中, 按照不同的尺度因子 j 把 Hilbert 空间 $L^2(R)$ 分解为所有子空间 $W_j (j \in Z)$ 的正交和, 其中 W_j 为小波函数 $\psi(t)$ 的闭包, 表示分解中的高频部分。为提高频率分辨率进一步对 W_j 按二进制划分, 将尺度子空间 V_j 和 W_j 用一个新子空间 U_j^n 统一表征为

$$U_j^0 = V_j, U_j^1 = W_j, j \in Z \quad (1)$$

则 Hilbert 空间的正交分解 $V_{j+1} = V_j \oplus W_j$ 可以用 U_j^n 的分解统一为 $U_{j+1}^0 = U_j^0 \oplus U_j^1$ 。

定义子空间 U_j^n 是函数 $u_n(t)$ 的闭包空间, 而 U_j^{2n} 是函数 $u_{2n}(t)$ 的闭包空间, 并令 $u_n(t)$ 满足下面的双尺度方程:

$$\left. \begin{aligned} u_{2n}(t) &= \sqrt{2} \sum_{k \in Z} h(k) u_n(2t - k) \\ u_{2n+1}(t) &= \sqrt{2} \sum_{k \in Z} g(k) u_n(2t - k) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $g(k) = (-1)^k h(1-k)$, 则由式(2)构造的序列 $\{u_n(t)\}$ 为由基函数 $u_0(t) = \psi(t)$ 确定的正交小波包。对 U_j^n 进行迭代分解可得到小波子空间的各种分解, 如下式:

$$W_j = U_{j-k}^{2^k} \oplus U_{j-k}^{2^{k+1}} \oplus \dots \oplus U_{j-k}^{2^{k+1}-1} \oplus U_{j-k}^{2^{k+1}-1} \quad (3)$$

可见, 小波包变换具有可将随尺度 j 增大而变宽的频谱窗口进一步分割辨析的优点。

2.2 地震波的小波包分解

为研究地震波中不同频率成分的特征, 需用小波包变换将地震波在不同频率范围内的信号特征表现出来, 选用的小波基函数须与地震动力响应信号具有较强的相似性^[10], 在此选用 Meyer 函数作为小波基函数。

选取日本阪神地震实测地震波(Kobe波)作为地下洞室群地震响应分析的输入地震波。为研究该地震波各频段的特征, 对 Kobe 地震波进行取样频率 32 Hz 下的 4 层 16 频段小波包分解, 如图 1 所示。由于已对 Kobe 波进行了 5 Hz 的高频滤波, 高频分量已基本消除, 在此研究的重点频段为 0~5 Hz。

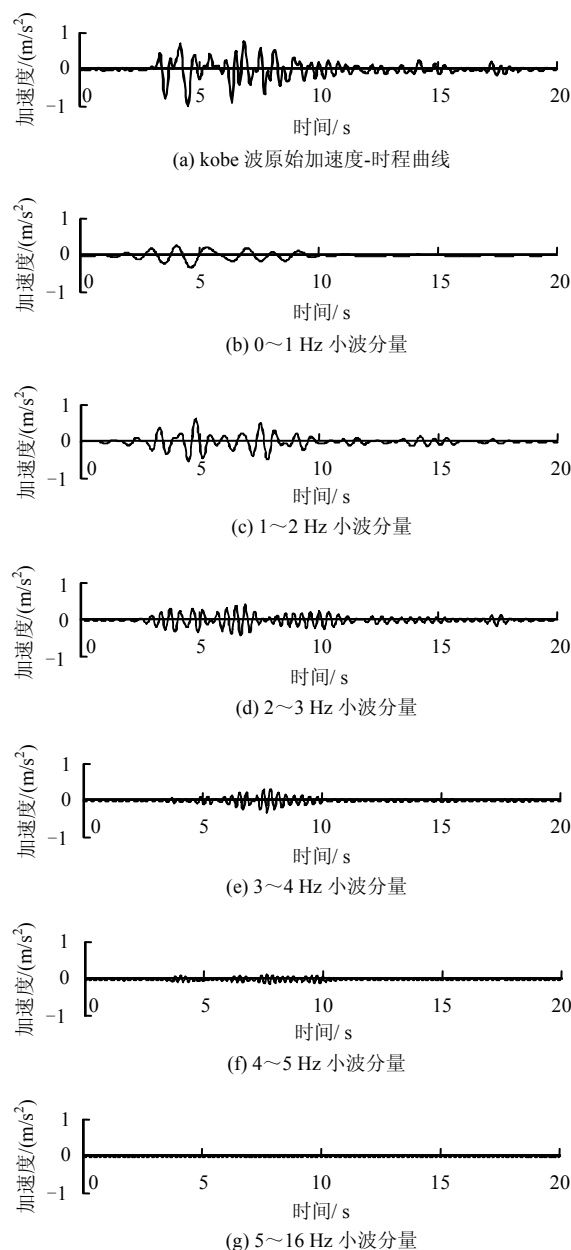


图 1 Kobe 地震波加速度-时程及其各频段小波包分量(归一化后)

Fig.1 Kobe acceleration time histories & wavelet package components of distinct frequency band (normalized)

3 地下洞室群地震动力响应

以白鹤滩水电站右岸地下洞室群 13[#]机组剖面作为数值模拟研究对象, 数值模型见图 2, 图中 X 轴以垂直机组轴线指向下游为正, 范围为 -1 100~

500 m; Z 轴以竖直向上为正, 0 海拔为原点, 范围为 $\nabla 300$ m 至地表。研究中考虑高山峡谷地形、层间错动带、岩性和洞室群开挖等因素的影响。

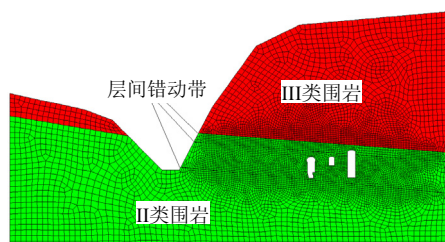


图 2 13#机组剖面地质概化模型及网格划分
Fig.2 Geometry of cross-section No.13 and FE mesh

3.1 合理阻尼参数的选取

对于动力分析中常用的瑞利阻尼, 其阻尼系数 α 、 β 由振型频率 ω_i 及其对应的振型阻尼比 ξ_i 决定。当采用常阻尼比 ($\xi_i = \text{Const.}$) 假定^[11-12]时, 瑞利阻尼系数由振型频率决定。

由于在有限离散域模型中频率分布在从 0 到折叠频率的宽频带中, 瑞利阻尼对应的阻尼参数变化范围较大。在系统无阻尼时, 输入地震荷载并得到傅立叶速度谱, 选取 f_{\min} 使得 $f_{\min} \sim 3f_{\min}$ 包含动力能量的主要部分, 则得到所需的瑞利振型频率参数 f_{\min} ^[13]。

本文取地质材料阻尼比为 0.05, 输入 Kobe 地震波对图 2 中模型进行无阻尼振动, 选取主厂房底板中点为控制点, 绘制岩体地震响应时程的傅立叶速度谱, 选取 0.6~1.8 Hz 作为主频区域, 得到 $f_{\min} = 0.6$ Hz, 如图 3 所示。

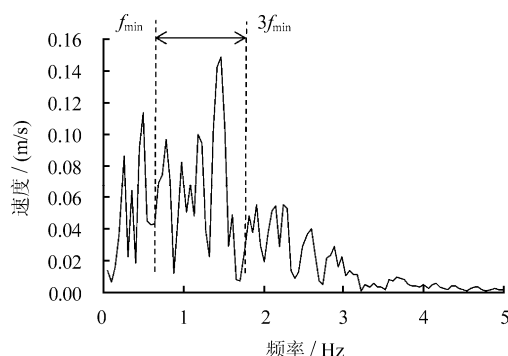


图 3 按照傅立叶速度谱选取瑞利阻尼振型频率
Fig.3 Determination of Rayleigh damping frequency via velocity spectrum

3.2 数值模拟条件

本文研究中采用线弹性本构模型, 岩体力学参数按表 1 选取, 地应力按实测拟合应力场施加, 网

格的最大尺寸为 10 m, 满足暂态波波形保真要求, 选用自由场边界条件; 考虑地下洞室受地震影响以低频为主^[6-7], 采用低频成分丰富的神户大地震中神户海洋气象台实测 Kobe 地震波, 如图 1 所示, Kobe 地震波台站烈度为 X 度, 峰值为 8.17 m/s^2 , 由于考虑的岩体为弹性介质, 且本文主要关注地震波在传播中的变化规律, 故将峰值归一化为 1 m/s^2 , 以便于对峰值变化进行对比, 经过 5 Hz 高频滤波后, 在模型底部按 S 波输入。

表 1 围岩岩体力学参数
Table 1 Properties of rock masses

围岩类别	变形模量 / GPa	泊松比	重度 / (kN/m ³)	S 波波速 / (m/s)
II	15.00	0.23	28	1 476
III	10.00	0.25	27	1 217
层间错动带	0.25	0.27	25	198

3.3 时程响应研究结果分析

受 S 波入射下的水平剪切作用影响, 岩体中地震波传播除受介质、不连续面的影响外, 还受山体表面、洞室临空面等岩体自由面的影响。靠近地震波入射方向的自由面附近, 如洞室底部、地表, 由于弹性波的反射作用, 反射波与入射波发生叠加, 地震波强度提升, 表现为加速度峰值及振动能量 (Arias intensity^[14]) 增加。相反在与地震波入射方向反向的自由面, 如洞室顶部, 由于地震波的衍射绕行作用, 地震波强度减弱, 表现为加速度峰值及振动能量减小。

图 4 给出了主厂房机组轴线岩体地震响应加速度峰值随高程变化曲线, 图 5 给出了主厂房机组轴线岩体地震响应的振动能量随高程变化曲线。由图 4 可知, 由于主厂房底部自由面存在, 在主厂房底板部位岩体响应加速度峰值达到 1.22 m/s^2 ; 而由于地震波在经过洞室空腔后的衍射绕行作用, 主厂房顶拱处岩体响应加速度峰值较底板处有明显的降低, 峰值约为 0.97 m/s^2 ; 地震波在传播过程中遇到层间错动带, 由于层间错动带阻抗较低, 致使岩体响应加速度峰值亦有 0.1 m/s^2 左右的降低; 在其他区域, 岩体响应加速度峰值总体上随高程增加而增大, 地震传播过程中岩体响应的振动能量规律与加速度峰值规律大致相同。

图 6~8 给出了主厂房机组轴线上 3 个典型部位岩体地震响应的加速度-时程曲线。由图可知, 这些部位加速度峰值及能量的变化较为复杂, 并非输入地震波时程曲线的简单缩放, 因而可通过小波包工

具对其频谱特征变化进行深入研究分析。

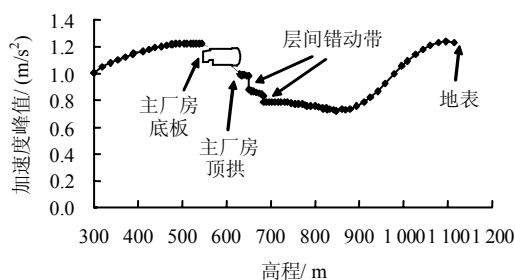


图4 主厂房轴线岩体响应加速度峰值随高程变化曲线

Fig.4 Elevation vs. peak acceleration value of main-house-axis

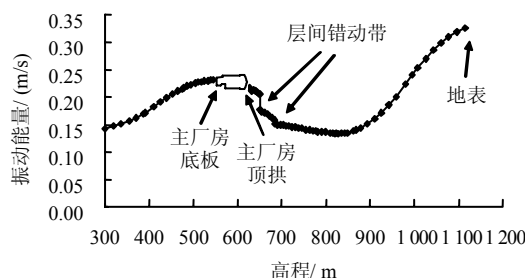


图5 主厂房轴线岩体响应振动能量随高程变化曲线
Fig.5 Elevation vs. Arias intensity of main-house-axis

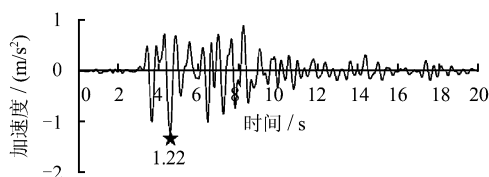


图6 主厂房轴线底板处加速度-时程响应曲线
Fig.6 Acceleration response of main house floor

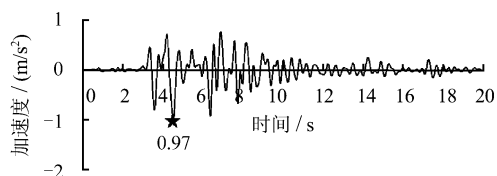


图7 主厂房机组轴线顶拱处加速度-时程响应曲线
Fig.7 Acceleration response of main house vault

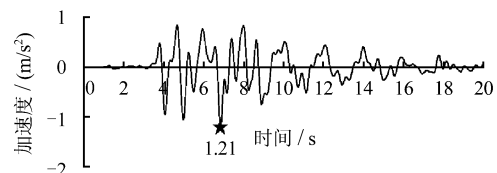


图8 主厂房机组轴线地表处加速度-时程响应
Fig.8 Ground surface acceleration response of main-house-axis

4 地下洞室群地震响应的频谱分析

通过小波包工具对岩体地震响应时程进行4层

16频段的分解,得到典型结果如图9所示。对得到的小波分量进行了加速度峰值及振动能量两种指标处理,以期从幅值和能量两个角度综合评价地下洞室群地震响应的频谱特性。

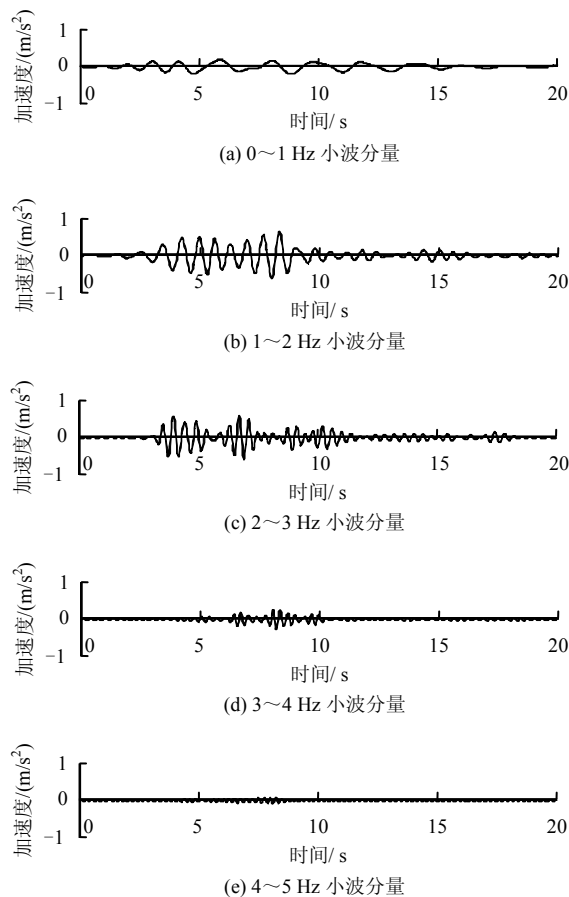


图9 主厂房底板中点加速度-时程小波分量
Fig.9 Wavelet package components of acceleration response of main house floor

4.1 地震响应加速度峰值的频谱分析

(1) 图10给出了主厂房轴线岩体响应分频段加速度峰值随高程变化曲线。由于输入地震波在介质内部的自由面、材料交界面等处存在复杂的反射、折射和衍射现象,不同频段的地震波分量在岩体中的传播规律有较大区别,具体表现为:高频地震波分量峰值随高程增加逐渐衰减,与地震波高频分量逐渐为岩土体所吸收的观测事实相符^[15];在地下洞室群附近,对岩体地震响应加速度峰值的主要影响频段为1~3 Hz,其中以1~2 Hz为主,而在地表附近的主要影响频段为0~2 Hz。这说明在地下洞室群区域与地表附近的岩体地震动频谱特性有所差异,因而在采用地表台站测得的地震加速度记录对地下洞室群进行模拟时,对地震动记录的峰值和频谱均应进行调整。

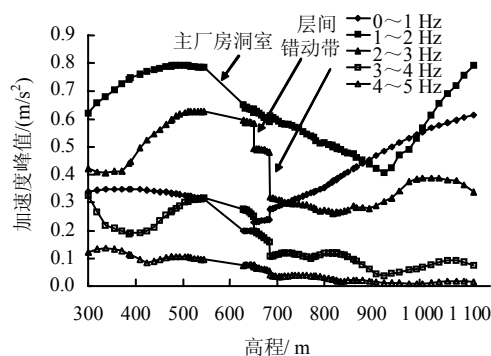


图 10 主厂房机组轴线岩体响应分频段
加速度峰值随高程变化曲线

Fig.10 Curves of elevation vs. distinct frequency band
peak acceleration value of main-house-axis

(2) 图 11 给出了输入地震波和主厂房机组轴线底板、顶拱部位岩体地震响应各频段加速度峰值分布柱状图, 表 2 给出了相对于输入地震波, 主厂房机组轴线底板和顶拱处岩体地震响应加速度峰值变化程度。由图表可知, 在主厂房机组轴线的底板和顶拱处岩体响应加速度各频段峰值在 1~3 Hz 频段相对于输入地震波增加较为明显, 而在其他频段有一定的减小, 在变化最为剧烈的 2~3 Hz 频段, 岩体加速度响应峰值相对于输入地震波增加了 40%~50%。

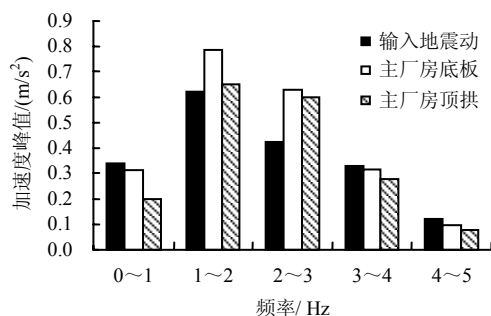


图 11 主厂房加速度响应分频段峰值分布图

Fig.11 Distribution of peak acceleration value of distinct
frequency band on main-house-axis

表 2 主厂房部位地震响应强度放大程度

Table 2 Seismic response amplification of main house

频率	加速度峰值/(m/s ²)		频率	振动能量/(m/s)	
/ Hz	底板	顶拱	/ Hz	底板	顶拱
0~1	-6.96	-41.34	0~1	-7.13	-8.90
1~2	26.55	5.18	1~2	109.66	79.06
2~3	48.72	41.40	2~3	66.52	77.84
3~4	-2.96	-15.27	3~4	-31.60	-32.38
4~5	-20.51	-37.56	4~5	-38.13	-66.77

4.2 地震振动能量的频谱分析

(1) 图 12 给出了主厂房机组轴线岩体地震响应

各频段振动能量随高程变化曲线。高频振动能量分量在传播过程随高程增加逐渐减小, 在地下洞室群附近对岩体振动能量影响的主要频段为 1~3 Hz, 其中以 1~2 Hz 为主, 在地表附近的主要影响频段为 0~2 Hz, 其中以 0~1 Hz 频段为主。

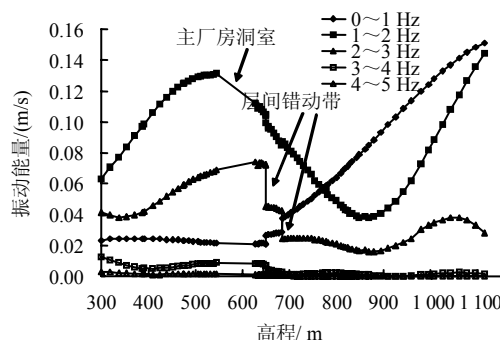


图 12 主厂房轴线岩体响应分频段
振动能量随高程变化曲线

Fig.12 Curves of elevation vs. distinct frequency band
Arias intensity of main-house-axis

(2) 图 13 给出了输入地震波和主厂房机组轴线底板、顶拱部位岩体地震响应各频段振动能量分布柱状图。由图可知, 对地下洞室群岩体地震响应振动能量影响较大的频段为 1~3 Hz, 其中以 1~2 Hz 尤为剧烈, 在底板和顶拱处岩体地震响应的振动能量相对于输入地震波在该频段约增加了 80%~110%, 如表 2 所示。

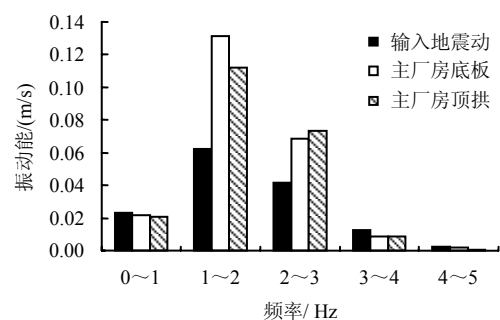


图 13 主厂房分频振动能量分布图

Fig.13 Distribution of Arias intensity of distinct
frequency band on main-house-axis

5 结 论

通过数值模拟方法, 研究了白鹤滩水电站 13[#] 机组剖面在 Kobe 地震波作用下的地震响应特征及其对应的不同频段的频谱特性, 得到以下结论:

(1) 地震作用下, 地下洞室群围岩响应加速度峰值及振动能量整体上随高程增加而增加, 而当地震波在传播过程中遇到洞室群的自由面、层间错动带等岩层分界面时, 将会发生反射、折射和衍射等

波幅变化现象, 岩体响应加速度的峰值及振动能量会有一定程度的降低。

(2) 地震波在地下洞室群区域传播过程中, 由于岩体的吸收作用, 岩体响应的加速度峰值和振动能量的高频分量均随高程增加逐渐衰减。

(3) 在地下洞室群附近, 岩体地震响应的加速度峰值和振动能量频谱特征相对于输入地震波的频谱特性以 1~3 Hz 频段为主, 其他频段对岩体地震响应影响较小。

(4) 地下洞室群附近岩体地震响应加速度峰值的显著变化频段为 2~3 Hz, 而振动能量的显著变化频段为 1~2 Hz, 如何使两个评价指标协调地反映岩体地震响应的频谱特征, 尚待进一步研究。

参考文献

- [1] 朱伯芳. 1999 年台湾 921 集集大地震中的水利水电工程[J]. 水力发电学报, 2003, (1): 21—33.
ZHU Bo-fang. Damages to hydraulic structures caused by 921 earthquake of Taiwan in 1999[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2001, (1): 21—23.
- [2] 吕涛, 李海波, 杨建宏, 等. 溪洛渡地下洞室群地震响应的二维及三维数值模型比较分析研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 721—728.
LÜ Tao, LI Hai-bo, YANG Jian-hong, et al. Comparison between 2D and 3D numerical analysis for seismic response of Xiluodu underground caverns[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 721—728.
- [3] CHEN J C, CHANG Y L, LEE H C. Seismic safety analysis of Kukuan underground power cavern[J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 2004, (19): 516—527.
- [4] 李小军, 卢滔. 水电站地下厂房洞室群地震反应显式有限元分析[J]. 水力发电学报, 2009, 28(5): 41—46.
LI Xiao-jun, LU Tao. Explicit finite element analysis of earthquake response for underground caverns of hydropower stations[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2009, 28(5): 41—46.
- [5] 黄胜, 陈卫忠, 杨建平, 等. 地下工程地震动力响应及抗震研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 483—490.
HUANG Sheng, CHEN Wei-zhong, YANG Jian-ping, et al. Research on earthquake-induced dynamic responses and seismic measures for underground engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(3): 483—490.
- [6] 李海波, 马行东, 邵蔚, 等. 地震波参数对地下岩体洞室位移特性的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 1): 4627—4634.
LI Hai-bo, MA Xing-dong, SHAO Wei, et al. Influence of the earthquake parameters on the displacement of rock cavern[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Supp.1): 4627—4634.
- [7] 郭青春. 水工地下厂房岩体隧洞地震反映的初步分析[硕士学位论文 D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [8] KURTIS GURLEY, AHSAN KAREEM. Applications of wavelet transforms in earthquake, wind and ocean engineering[J]. **Engineering Structures**, 1999(21): 149—167.
- [9] 胡昌华, 张军波, 夏军, 等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计(第三版)[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
- [10] 肖梅玲, 高春涛, 叶燎原. 不同小波基下的结构位移反映动力可靠性分析[J]. 世界地震工程, 2002, 18(2): 163—166.
XIAO Mei-ling, GAO Chun-tao, YE Liao-yuan. Dynamic reliability analysis for structural displacement response based on different wavelets[J]. **World Earthquake Engineering**, 2002, 18(2): 163—166.
- [11] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 2006.
- [12] 王进廷, 杜修力, 张楚汉. 瑞利阻尼介质有限元离散模型动力分析的数值稳定性[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(6): 18—24.
WANG Jin-ting, DU Xiu-li, ZHANG Chu-han. Numerical stability of explicit finite element schemes for dynamic system with Rayleigh damping[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2002, 22(6): 18—24.
- [13] Itasca Consulting Group Inc.. FLAC^{3D}(fast Lagrangian analysis of continua in 3D) optional features(version 3.0)[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc., 2005.
- [14] ARIAS A. A measure of earthquake intensity[C]//Seismic Design for Nuclear Power Plants. Cambridge: MIT Press, 1970: 438—483.
- [15] 傅承义. 地表的本质对于地震勘测的几种影响[J]. 中国科学, 1951, 2(3): 271—281.
FU Cheng-yi. Effects of the earth's surface essence on seismic exploration[J]. **Science in China**, 1951, 2(3): 271—281.