

殷琳,楼梦麟,康帅.比例阻尼矩阵构建方法对高重力坝地震反应的影响[J].地震工程学报,2020,42(6):1409-1416.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1409
YIN Lin, LOU Menglin, KANG Shuai. Influence of Construction Method with Proportional Damping Matrix on Seismic Response of High-gravity Dams[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6): 1409-1416. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1409

比例阻尼矩阵构建方法对高重力坝地震反应的影响

殷琳^{1,4}, 楼梦麟^{2,3}, 康帅⁵

- (1. 宁波工程学院建筑与交通工程学院, 浙江 宁波 315000;
2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 3. 同济大学浙江学院, 浙江 嘉兴 314051;
4. 宁波工程学院, 浙江省土木工程工业化建造工程技术研究中心, 浙江 宁波 315000;
5. 河南大学土木工程学院, 河南 开封 475001)

摘要: 通过二维数值计算, 讨论合理建立阻尼矩阵对高重力坝时域内进行地震反应计算的重要性。首先, 以4个不同坝高的混凝土重力坝为计算对象, 将三种地震波作为水平输入, 解得6种不同的阻尼矩阵形式下坝体的地震反应。然后以频域内解为标准, 研究各种阻尼矩阵的合理性。研究结果表明: 坝高超过250 m高的重力坝在时域内进行的地震反应计算是长周期系统的动力分析问题, 应重视阻尼矩阵的建模方式, 不宜采用单频率参数的质量比例阻尼矩阵和刚度比例阻尼矩阵, 应采用双频率参数的Rayleigh阻尼矩阵, 在确定2个频率参数时除采用坝体基频外还应考虑激励地震波的频谱特性以获得合理的坝体地震反应计算结果。

关键词: 重力坝; 地震反应; 阻尼矩阵; 长周期动力效应; 地震波卓越频率

中图分类号: TU91

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)06-1409-09

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1409

Influence of Construction Method with Proportional Damping Matrix on Seismic Response of High-gravity Dams

YIN Lin^{1,4}, LOU Menglin^{2,3}, KANG Shuai⁵

- (1. School of Civil and transportation Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315000, Zhejiang, China;
2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Tongji Zhejiang College, Jiaxing 314051, Zhejiang, China;
4. Zhejiang Research Center of Civil Engineering Industrialized Building Construction Technology, Ningbo University of Technology, Ningbo 315000, Zhejiang, China;
5. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475001, Henan, China)

Abstract: In this paper, we use two-dimensional numerical analysis to study the importance of establishing a reasonable damping matrix in the seismic response analysis of high-gravity dams in the time domain. First, we selected four high-gravity dams of different heights as examples and

收稿日期: 2019-09-18

基金项目: 浙江省教育厅科研资助项目(Y201533463); 王宽诚教育基金资助; 广东省滨海土木工程耐久性重点实验室开放基金资助(GDDCE16-03)

第一作者简介: 殷琳(1982-), 男, 博士, 主要从事地震工程与工程振动方面的研究工作。E-mail: 315989441@qq.com。

determined their seismic responses under horizontal excitation by three seismic waves using six different damping matrices. Then, the reasonability of the different damping matrices was assessed by comparing their solutions in the frequency domain. The results indicate that the seismic response in the time domain of a gravity dam with a height greater than 250 m is a dynamic analysis problem of a long-period system, and attention should be paid to the approach used to model the damping matrix. In this case, we suggest using a Rayleigh damping matrix with two frequency parameters rather than a mass-proportional damping matrix or a stiffness-proportional damping matrix with one frequency parameter. To accurately analyze the seismic responses of a dam, both the fundamental frequency of the dam and the frequency characteristics of the input seismic wave should be considered.

Keywords: gravity dam; seismic response; damping matrix; long-period dynamic effect; predominant frequency of seismic wave

0 引言

我国已建和正在新建大量的水利水电高坝枢纽工程^[1],其中高坝的建设以混凝土坝为主^[2],一批 200~300 m 级高的碾压混凝土重力坝正在建设和设计中^[3]。这些混凝土重力坝多位于我国的西南地区,其地形复杂且地震活动强烈,因此准确地对混凝土重力坝进行地震反应计算,对于科学合理地进行坝体抗震设计、保障大坝具有足够的抗震能力、防范强震作用下发生溃坝事故是十分必要的。

重力坝特别是高重力坝一般需修建在良好的基岩地基上。众所周知,基岩场地地震波的主要分量的激振频率一般在 2~5 Hz 范围内,一般坝高的重力坝基频往往高于地震波主要分量的激振频率。但是随着坝高不断增大,大坝的自振频率就随之降低,出现高重力坝基频低于输入地震波主要激振频率的情况,由此会产生长周期振动系统动力计算中正确建立阻尼矩阵的问题^[4]。近年来,不同作者针对不同长周期振动系统的比例阻尼矩阵合理建模方式进行了深入研究,相关研究成果表明:基于振动系统基频的质量比例阻尼矩阵会高估长周期振动系统的动力反应^[5],而基于振动系统基频的刚度比例阻尼矩阵会低估长周期振动系统的动力反应^[6],应采用双频率参数的 Rayleigh 阻尼矩阵建模方式,而且在确定频率参数时,除考虑激励方向的振动系统基频外,还应考虑外部动力激励的频谱特性^[7]。作者针对高土石坝的研究^[8-9]表明:在时域内进行高土石坝地震反应分析时,若阻尼矩阵选择不当,会低估或高估高土石坝的地震反应,坝体越高,坝体地震反应的计算误差越大。

本文将通过数值分析进一步讨论高混凝土重力坝地震反应计算中不同的阻尼矩阵建模方式的合

理性。

1 基本运动方程

目前计算混凝土重力坝的地震反应多采用有限单元法。黏滞阻尼假定下,在时域内的运动方程表示为:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = -[M]\{I\}\ddot{u}_g(t) = \{p_{eff}(t)\} \quad (1)$$

式中:[M]、[K] 和 [C] 分别为坝体质量、刚度和阻尼矩阵; $\{u(t)\}$ 、 $\{\dot{u}(t)\}$ 和 $\{\ddot{u}(t)\}$ 分别为坝体各自由度的相对于坝基的位移、速度和加速度反应列向量, $\ddot{u}_g(t)$ 为坝基处的加速度向量; $\{p_{eff}(t)\}$ 为等效地震荷载向量。阻尼矩阵通常采用比例阻尼形式:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2)$$

式中:系数 α 、 β 可通过指定两个特定的频率 ω_1 、 ω_n 和对应的振型阻尼比 ξ_1 、 ξ_n 后,利用振型正交性求得。若假定各阶振型频率的阻尼比均为 ξ ,则 α 和 β 可表示为:

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = 2 \frac{\xi}{\omega_1 + \omega_n} \begin{Bmatrix} \omega_1 \omega_n \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中: ω_1 为地震激励方向上的坝体第 1 阶自振频率,一般 ω_n 取为坝体的低阶自振频率,如 ω_2 或 ω_3 。文中把确定重力坝比例阻尼矩阵所需的两个频率 ω_1 和 ω_n 称为参数频率。

若采用滞后阻尼模型(也称结构阻尼),此时

$$[C] = \frac{2\eta}{\omega} [K] = \frac{\eta}{\pi f} [K] \quad (4)$$

式(4)是在滞后阻尼假定下在频域内建立的阻尼矩阵计算公式。式中 η 为滞后阻尼系数,在数值不大的情况下, η 和 ξ 是相等的。 f 为谐波激振频率,而

不是坝体的自振频率。在时域内对坝体进行地震反应计算时,式(4)必须是确定数值的阻尼矩阵,因此分母中的 f 已不是频域计算时可变的迫振频率,应是一个确定的数值,称之为阻尼系数转换频率 f_c ^[6]。在实际应用时,通常认为坝体第 1 阶振型对体系地震反应的贡献最大,一般取 $f_c = f_1$,此时式(4)所表示的阻尼矩阵被称为刚度比例阻尼矩阵:

$$[C] = \beta [K] = 2\xi/\omega_1 [K]$$

(5)

在求解式(1)的直接积分显式算法中,往往采用质量比例阻尼矩阵的形式,以满足代数方程组解耦的前提条件:

$$[C] = \alpha [M] = 2\omega_1 \xi [M]$$

(6)

式中:比例系数中出现的频率参数为 ω_1 ,这依然是基于坝体第 1 阶振型对体系地震反应贡献最大的认识。

2 不同阻尼矩阵的数值建模方式

为了探讨不同阻尼矩阵数值建模方式对高重力坝地震反应计算结果准确度的影响,除了采用式(5)和式(6)两种方式外,还选用了如下 4 种 *Rayleigh* 阻尼矩阵的数值建模方式。

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] = 2\xi\omega_1\omega_2/(\omega_1 + \omega_2) [M] + 2\xi/(\omega_1 + \omega_2) [K]$$

(7)

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] = 2\xi\omega_1\omega_3/(\omega_1 + \omega_3) [M] + 2\xi/(\omega_1 + \omega_3) [K]$$

(8)

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] = 2\xi\omega_1\omega_p/(\omega_1 + \omega_p) [M] + 2\xi/(\omega_1 + \omega_p) [K]$$

(9)

$$[C] = \alpha_y [M] + \beta_y [K]$$

(10)

$$\beta_y = \frac{\{\Omega\}^T [P] \{Y\}}{\{\Omega\}^T [P] \{\Omega\}}; \quad \alpha_y = (2\omega_1 \xi_1 - \beta \omega_1^2)$$

式(9)中的 ω_p 为地震波反应谱峰值频率。式(10)是比例阻尼约束优化问题^[10-11]中的一种,其中 α_y 和 β_y 为单参数优化方法得到的阻尼系数^[12],参数 $[P]$ 、 $\{\Omega\}$ 和 $\{Y\}$ 三个符号的含义见参考文献^[12]。本文将式(5)~(10)分别记为阻尼矩阵数值建模方式 M1~M6。

3 算例

3.1 坝体参数与自振频率

本文选取了 4 种高度不同但断面类似的混凝土重力坝作为计算对象,坝体高度分别为 100 m、200 m、250 m 和 300 m,坝体上游坝坡坡度为 1:0.1,下游坝坡坡度为 1:0.7。筑坝材料混凝土的弹性模量为 3.45×10^{10} Pa,密度为 2 500 kg/m³,泊松比为

0.20,阻尼比为 0.05,最大剪切模量为 1.44×10^{10} Pa,剪切波波速为 2 398 m/s。

坝体横断面采用四边形四节点等参元进行离散,单元尺寸的大小按下式所示的要求确定:

$$d \leq \lambda_{\min}/16, \quad \lambda_{\min} = \nu_s T_{\min}$$

(11)

式中: ν_s 为坝体介质的剪切波速, $T_{\min}$ 取为截断高阶频率对应的周期,为考虑地震波 25 Hz 以内频率分量的激振效应,取 $T_{\min} = 0.04$ s。因此可得单元的竖向尺寸控制在 3 m 以内。

限于篇幅仅给出 100 m 高坝的有限元网格。该模型有 865 个结点、811 个单元,单元网格如图 1 所示。不同坝高的 4 种重力坝前 10 阶自振频率如表 1 所列。

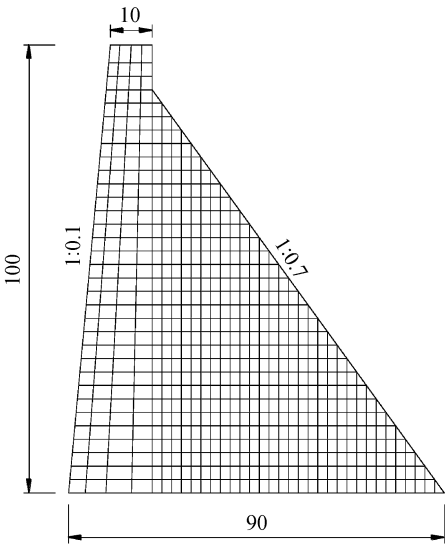


图 1 100 m 高混凝土重力坝有限元网格(单位:m)

Fig.1 Finite element mesh of 100-meter high concrete gravity dam (Unit:m)

3.2 输入地震波及其频谱特性

重力坝一般修建于基岩场地,文中选择了 3 条有代表性的基岩波作为坝体的激振地震波,它们分别是某一大型工程场地安全性评价得出的基岩人工波、Imperial Valley 波和汶川波,本文分别称之为 JY 波、IV 波和 WC 波,计算时将各地震波的加速度峰值调幅至 0.10g。各地震波时程及其 Fourier 幅值谱和反应谱如图 2~4 所示。从中可以看出 WC 波高频分量最为丰富,IV 波次之,JY 波高频分量相对较少,3 条地震波的反应谱峰值频率分别为 8.33 Hz、7.14 Hz 和 2.94 Hz。表 1 中所示 4 座重力坝的基频与地震波反应谱峰值频率相比,显然 250 m 高的重力坝,特别是 300 m 高的重力坝在这些输入地震波的激励下,具有长周期动力问题的特征。

表 1 不同高度混凝土重力坝前 10 阶自振频率 f_i (单位:Hz)

坝高/m	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}
100	5.225	11.36	12.79	19.07	27.42	28.37	32.62	35.00	36.98	40.52
200	2.499	5.767	6.310	10.05	14.06	14.75	16.55	17.71	19.20	20.71
250	2.129	4.717	5.302	7.892	11.39	11.67	13.70	14.37	15.36	16.71
300	1.776	3.947	4.434	6.617	9.556	9.767	11.48	12.03	12.87	13.99

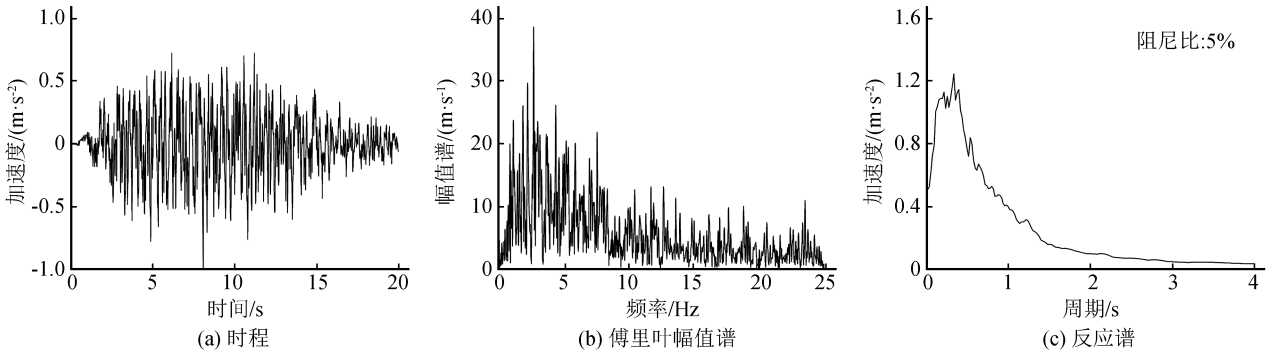


图 2 基岩人工波
Fig.2 Artificial wave

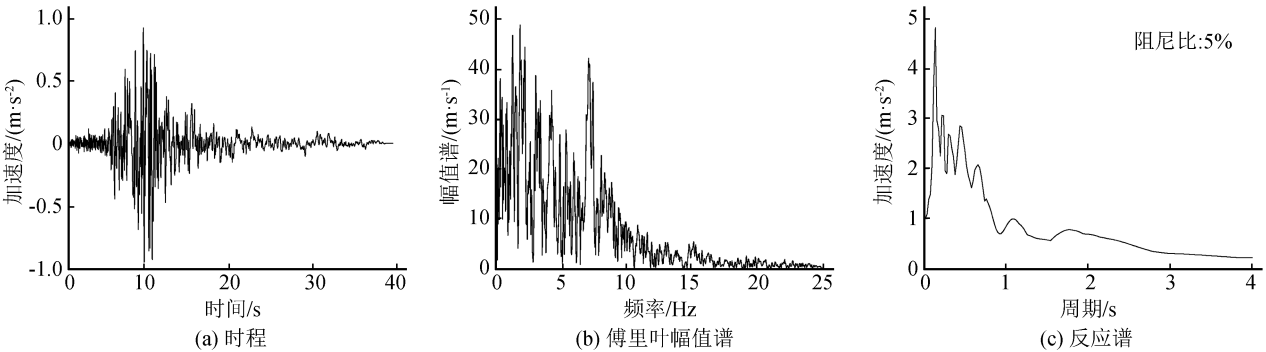


图 3 Imperial Valley 波
Fig.3 Imperial Valley wave

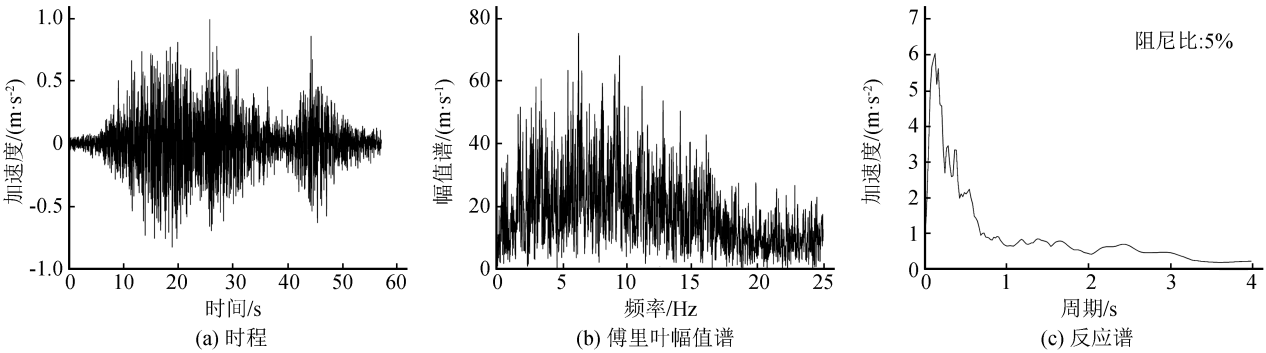


图 4 汶川波
Fig.4 Wenchuan wave

针对 3 条地震波,由式(10)单参数优化方法得到的 4 种坝高的重力坝 Rayleigh 阻尼矩阵的第 2 个参数频率 f_y 如表 2 所列。

3.3 数值结果

为与频域内的准确解进行比较,在时域内计算

重力坝地震反应时在线性条件下进行计算。分析中筑坝材料的滞后阻尼系数取为 0.05,也即坝体的各阶振型阻尼比取 0.05。将式(5)~(10)所定义的阻尼矩阵下时域计算的结果与滞后阻尼频域解结果相比较,从而讨论不同阻尼矩阵数值建模方法的合理

表 2 单参数优化方法得到的第 2 个参数频率 f_y (单位:Hz)

地震波	坝高/m			
	100	200	250	300
JY 波	12.82	5.99	5.07	6.44
IV 波	11.90	5.88	5.13	6.46
WC 波	12.53	6.21	5.80	7.21

性。为了考虑地震波 25 Hz($f_{\max}$)以内频率分量的激振效应,计算中时间步长按 $\leqslant \frac{1}{16f_{\max}}$ 控制,本文采

用 0.002 s。

表 3~6 中列出了 4 种坝高的混凝土重力坝在 3 条地震波作用下坝体地震反应峰值及相对于频域基于滞后阻尼假定的准确解的误差,其中: D 表示坝顶相对坝基的位移, A 表示坝顶绝对加速度, CS 和 SS 分别表示坝踵处的压应力(压应力为负)和拉应力,表中括号内数值为相对误差(单位:%)。由于地震动力作用往复性,坝踵处的压应力和拉应力也可以互换。

表 3 100 m 高重力坝地震反应峰值

Table 3 Seismic peak response of gravity dam with 100-meter height								
地震波	反应量	$[C]=\alpha[M]$	$[C]=\beta[K]$	$[C]=\alpha[M]+\beta[K]$				滞后 阻尼
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	
JY	D/mm	4.51 (4.35)	4.23 (-2.10)	4.31 (-0.12)	4.32 (0.06)	4.28 (-0.84)	4.32 (0.07)	4.32
	$A/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	8.03 (30.89)	4.90 (-20.12)	5.96 (-2.97)	6.04 (-1.67)	5.32 (-13.31)	6.04 (-1.63)	6.14
	CS/MPa	-1.00 (4.53)	-0.94 (-2.51)	-0.96 (-0.68)	-0.96 (-0.51)	-0.95 (-1.39)	-0.96 (-0.50)	-0.96
	SS/MPa	1.00 (0.38)	1.03 (3.61)	1.00 (0.71)	1.00 (0.48)	0.91 (-8.78)	1.00 (0.48)	0.99
IV	D/mm	5.31 (1.13)	5.09 (-2.96)	5.19 (-1.22)	5.19 (-1.10)	5.15 (-1.83)	5.19 (-1.17)	5.25
	$A/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	7.18 (12.66)	5.81 (-8.92)	6.28 (-1.53)	6.32 (-0.93)	6.14 (-3.76)	6.29 (-1.30)	6.38
	CS/MPa	-0.85 (2.44)	-0.82 (-1.39)	-0.83 (-0.50)	-0.83 (-0.41)	-0.82 (-1.10)	-0.83 (-0.47)	-0.83
	SS/MPa	1.02 (-1.65)	1.06 (2.38)	1.02 (-1.91)	1.02 (-2.11)	1.02 (-1.11)	1.02 (-1.99)	1.04
WC	D/mm	4.98 (2.79)	4.90 (1.26)	4.90 (1.14)	4.90 (1.15)	4.88 (0.80)	4.90 (1.15)	4.84
	$A/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	11.02 (53.92)	6.33 (-11.54)	7.03 (-1.85)	7.14 (-0.31)	6.88 (-3.95)	7.11 (-0.66)	7.16
	CS/MPa	-1.05 (8.66)	-1.00 (3.78)	-0.98 (1.50)	-0.98 (1.42)	-0.98 (1.29)	-0.98 (1.44)	-0.96
	SS/MPa	0.94 (0.84)	0.92 (-1.26)	0.92 (-0.36)	0.92 (-0.31)	0.92 (-0.92)	0.92 (-0.32)	0.93

从表 3~6 的数据可以看出:(1)对于不同阻尼矩阵给坝体地震反应带来计算误差的敏感性来说,坝顶相对位移最小,坝踵竖向应力次之,坝顶绝对加速度最大;(2)采用质量比例阻尼矩阵会高估坝体的地震位移和加速度反应,而采用刚度比例阻尼矩阵(通常也称为滞后阻尼矩阵和结构阻尼矩阵)会低估坝体的地震位移和加速度反应,随着坝高的增加,这种高估效应或低估效应越明显;(3)采用双频率参数的 Rayleigh 阻尼矩阵的计算误差明显小于采用单频率参数的质量比例阻尼矩阵和刚度比例阻尼矩阵的计算误差,这一结论与其他类型动力系统的计算成果相同^[4];(4)在高重力坝地震反应计算中,不宜

采用单频率参数的比例阻尼矩阵。为此下文重点讨论 Rayleigh 阻尼矩阵中频率参数的选择对坝体地震反应的影响。

从表 3 中的数据可以看出:若 Rayleigh 阻尼矩阵的频率系数采用坝体第 1、2 或第 1、3 两阶自振频率计算时(即 $M3$ 和 $M4$),能得到较好的地震反应结果,其加速度、位移和应力的误差均不超过 3%,若采用第 1 阶和地震波反应谱峰值频率计算阻尼系数($M5$),得到的地震反应结果的误差反而会增大,采用单参数优化方法计算阻尼系数($M6$),其地震反应结果的误差与 $M3$ 和 $M4$ 相当。

表 4 200 m 高重力坝地震反应峰值

Table 4 Seismic peak response of gravity dam with 200-meter height								
地震波	反应量	$[C]=\alpha[M]$	$[C]=\beta[K]$	$[C]=\alpha[M]+\beta[K]$				滞后 阻尼
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	
JY	D/mm	20.95 (8.49)	18.64 (-3.48)	19.40 (0.48)	19.41 (0.55)	19.09 (-1.13)	19.37 (0.34)	19.31
	A/(m·s ⁻²)	9.76 (47.28)	4.98 (-24.75)	6.36 (-4.01)	6.42 (-3.14)	5.88 (-11.24)	6.37 (-3.89)	6.63
	CS/MPa	-2.70 (14.92)	-2.20 (-6.28)	-2.34 (-0.22)	-2.35 (0.14)	-2.26 (-3.80)	-2.34 (-0.23)	-2.35
	SS/MPa	2.59 (12.86)	2.20 (-4.12)	2.28 (-0.79)	2.28 (-0.66)	2.24 (-2.38)	2.27 (-0.90)	2.29
IV	D/mm	17.15 (3.28)	16.93 (1.95)	16.96 (2.15)	16.95 (2.09)	16.97 (2.22)	16.95 (2.10)	16.60
	A/(m·s ⁻²)	7.47 (4.99)	4.99 (-28.80)	6.77 (-3.44)	6.82 (-2.77)	6.92 (-1.35)	6.77 (-3.42)	7.01
	CS/MPa	-2.06 (-3.06)	-2.24 (5.82)	-2.16 (2.06)	-2.16 (1.72)	-2.15 (1.27)	-2.16 (1.99)	-2.12
	SS/MPa	2.44 (6.75)	2.14 (-6.61)	2.29 (0.30)	2.30 (0.54)	2.32 (1.30)	2.29 (0.26)	2.29
WC	D/mm	11.88 (3.35)	10.78 (-6.16)	11.27 (-1.93)	11.27 (-1.94)	11.29 (-1.77)	11.26 (-2.02)	11.49
	A/(m·s ⁻²)	11.96 (86.15)	3.96 (-38.42)	6.02 (-6.26)	6.15 (-4.33)	6.52 (1.54)	6.11 (-4.92)	6.43
	CS/MPa	-1.58 (15.46)	-1.36 (-0.86)	-1.34 (-1.93)	-1.34 (-2.06)	-1.34 (-2.16)	-1.34 (-2.12)	-1.37
	SS/MPa	1.52 (2.68)	1.33 (-10.09)	1.44 (-2.41)	1.44 (-2.23)	1.45 (-1.51)	1.44 (-2.34)	1.48

表 5 250 m 高重力坝地震反应峰值

Table 5 Seismic peak response of gravity dam with 250-meter height								
地震波	反应量	$[C]=\alpha[M]$	$[C]=\beta[K]$	$[C]=\alpha[M]+\beta[K]$				滞后 阻尼
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	
JY	D/mm	24.53 (10.97)	21.88 (-0.99)	22.09 (-0.45)	22.16 (0.26)	22.05 (-0.23)	22.12 (0.09)	22.10
	A/(m·s ⁻²)	19.49 (87.49)	6.08 (-41.51)	9.78 (-5.94)	10.12 (-2.60)	8.69 (-16.36)	9.95 (-4.31)	10.39
	CS/MPa	-2.43 (21.65)	-1.89 (-5.35)	-1.96 (-1.62)	-1.99 (-0.31)	-1.89 (-5.31)	-1.98 (-0.98)	-2.00
	SS/MPa	2.32 (14.88)	1.76 (-12.82)	1.98 (-1.76)	2.00 (-0.84)	1.93 (-4.60)	1.99 (-1.31)	2.02
IV	D/mm	36.60 (-0.40)	35.51 (-3.37)	36.62 (-0.37)	36.69 (-0.17)	36.68 (-0.19)	36.55 (-0.56)	36.75
	A/(m·s ⁻²)	14.44 (22.70)	8.60 (-26.92)	10.82 (-8.09)	11.07 (-5.98)	11.58 (-1.66)	10.93 (-7.14)	11.77
	CS/MPa	-3.31 (6.70)	-3.10 (0.18)	-3.07 (-1.06)	-3.07 (-0.80)	-3.08 (-0.48)	-3.06 (-1.24)	-3.10
	SS/MPa	2.96 (2.77)	2.96 (3.01)	2.89 (0.48)	2.89 (0.44)	2.88 (0.22)	2.88 (0.25)	2.89
WC	D/mm	16.18 (15.25)	13.99 (-0.32)	14.36 (2.29)	14.39 (2.48)	14.45 (2.92)	14.38 (2.48)	14.03
	A/(m·s ⁻²)	23.98 (138.88)	4.30 (-57.20)	8.59 (-14.45)	8.99 (-10.45)	10.46 (4.18)	9.20 (-8.40)	10.04
	CS/MPa	-1.32 (19.39)	-1.11 (0.62)	-1.13 (1.82)	-1.13 (1.96)	-1.14 (3.46)	-1.13 (1.91)	-1.11
	SS/MPa	1.58 (23.97)	1.22 (-4.36)	1.24 (-2.82)	1.24 (-2.43)	1.26 (-1.20)	1.24 (-2.33)	1.27

表 6 300 m 高重力坝地震反应峰值

Table 6 Seismic peak response of gravity dam with 300-meter height

地震波	反应量	$[C]=\alpha[M]$	$[C]=\beta[K]$	$[C]=\alpha[M]+\beta[K]$				滞后 阻尼
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	
JY	D/mm	34.40 (2.73)	32.46 (-3.06)	33.40 (-0.26)	33.36 (-0.38)	33.38 (-0.31)	33.31 (-0.52)	33.49
	A/(m·s ⁻²)	17.65 (87.51)	6.96 (-26.03)	8.81 (-6.41)	8.90 (-5.46)	8.62 (-8.40)	9.52 (1.18)	9.41
	CS/MPa	-2.48 (0.79)	-2.35 (-4.68)	-2.44 (-1.05)	-2.44 (-0.96)	-2.43 (-1.54)	-2.46 (-0.34)	-2.46
	SS/MPa	2.62 (6.90)	2.28 (-6.79)	2.44 (-0.28)	2.45 (-0.06)	2.42 (-1.22)	2.48 (1.28)	2.45
IV	D/mm	40.08 (16.67)	31.66 (-7.83)	33.86 (-1.42)	34.05 (-0.88)	35.15 (2.34)	34.99 (1.86)	34.35
	A/(m·s ⁻²)	17.84 (28.34)	7.01 (-49.55)	12.22 (-12.06)	12.50 (-10.04)	13.81 (-0.61)	13.58 (-2.26)	13.90
	CS/MPa	-3.07 (4.28)	-2.72 (-7.52)	-2.90 (-1.43)	-2.91 (-1.12)	-2.96 (0.57)	-2.95 (0.37)	-2.94
	SS/MPa	2.42 (1.06)	2.34 (-2.04)	2.36 (-1.41)	2.36 (-1.25)	2.38 (-0.53)	2.38 (-0.60)	2.39
WC	D/mm	24.50 (7.19)	20.65 (-9.67)	22.78 (-0.34)	22.85 (-0.02)	23.31 (1.96)	23.28 (1.85)	22.86
	A/(m·s ⁻²)	26.31 (135.37)	4.36 (-61.03)	7.51 (-32.79)	7.89 (-29.45)	10.40 (-6.98)	9.89 (-11.53)	11.18
	CS/MPa	-1.94 (20.21)	-1.55 (-3.84)	-1.66 (3.04)	-1.66 (2.97)	-1.69 (4.60)	-1.66 (3.03)	-1.61
	SS/MPa	1.72 (14.24)	1.32 (-11.86)	1.46 (-2.48)	1.48 (-1.74)	1.54 (2.91)	1.53 (2.14)	1.50

从表 1 中的数值可以看出,100 m 高的坝体第 5 阶自振频率已远高于输入地震波的主要分量的激励频率,坝体高阶振型对坝体地震反应的贡献很小,因此采用 M3 和 M4 形成 Rayleigh 阻尼矩阵后,能够较好地描述坝体前 4 阶振型的阻尼比值,从而获得具有很好计算精度的坝体地震反应。采用 M5 形成 Rayleigh 阻尼矩阵时,由于 3 条输入地震波反应谱峰值频率都低于坝体第 2 阶自振频率,因而除第 1 阶振型外,其他高阶振型的计算阻尼比都要高于 0.05,阶序越高计算振型阻尼比值越大,因此对阻尼矩阵最为敏感的坝顶加速度的计算值被低估,特别是 JY 波反应谱的峰值频率为 2.94 Hz,显然由 2.94 Hz 和 5.22 Hz 两个参数频率形成的 Rayleigh 阻尼矩阵将明显地使坝体第 2 阶振型以及其他高阶振型的实际计算阻尼比远高于 0.05,从而造成坝顶加速度的计算值减小 13.3%,坝踵竖向地震应力的计算值也减小 8.78%。而采用 M6 形成 Rayleigh 阻尼矩阵时,第 2 个参数频率接近坝体的第 2 阶和第 3 阶振型频率,所以 M6 形成的阻尼矩阵除能保证第 1 阶振型阻尼比为 0.05 外还能保证第 2、3 两阶振型阻尼比接近 0.05,从而控制了前 3 阶计算阻尼比的

准确性,且前 3 阶自振频率覆盖了地震波主要频谱范围,所以其计算结果精度较好。另外,因 M6 的第二个频率参数接近 M3 和 M4 的第二个频率参数,所以 M6 的计算精度与 M3 和 M4 的相当。

从表 4 中数据可以看出:当重力坝坝高 200 m 时,除输入 JY 波时存在类似坝高 100 m 时的坝顶加速度有较大幅度减小的情况外,采用 M3~M6 形成的 Rayleigh 阻尼矩阵对计算结果的精度基本相当,影响有限。这是因为在 M5 和 M6 两个方法中所确定的第 2 个参数频率的数值与坝体第 2 阶和第 3 阶振型频率相近,从而保证了主要振型的计算阻尼比值的准确性。

当坝高 250 m 时,重力坝的基频已低于 3 条地震波反应谱峰值频率,特别是坝体的第 2 和第 3 阶自振频率也低于 IV 和 WC 两条输入地震波反应谱的峰值频率,存在时域长周期系统动力分析中要关注的阻尼矩阵第 2 个参数频率的确定的问题。从表 5 中数据可以看出:对于输入地震波为 IV 和 WC 波时,采用 M5 方法形成的 Rayleigh 阻尼矩阵所得到的计算精度得到了明显改进,但 JY 地震波激励除外,其反应谱峰值频率仍然低于坝体第 2 阶自振频率。而采用 M6

方法,由于第 2 个频率参数值与第 3 阶自振频率相近,计算精度总体上基本相当,略有改善。

当坝高 300 m 时,重力坝的基频已远低于 3 条地震波反应谱峰值频率,而且第 2~第 4 阶自振频率也低于 IV 和 WC 两条输入地震波反应谱的峰值频率,但 JY 波的反应谱峰值频率依然低于坝体第 2 阶自振频率。从表 6 中数据可以看出:在输入 JY 波时,采用 M5 方法的精度仍然不及其他 3 种方法,但 IV 和 WC 两条高频分量丰富的地震波激励时,采用 M3 和 M4 两种常规方法形成 Rayleigh 阻尼矩阵时,时域计算所得到的坝顶加速度被较大程度地低估,最大达 32.79%。而采用 M5 方法形成的 Rayleigh 阻尼矩阵时计算精度总体上要好于其他 3 种方法,特别是坝顶加速度计算精度明显得到提高,效果要好于 M6 方法。

4 结论

在时域内对混凝土重力坝进行地震反应分析时,选择合理的阻尼矩阵建立运动方程十分重要,特别是输入地震波中高频分量丰富时,合理地选择阻尼矩阵是准确计算混凝土重力坝地震反应应关注的问题。基于本文算例的分析结果有以下几点认识:

(1) 在时域内进行高混凝土重力坝地震反应分析时,不宜采用单频率参数的质量比例阻尼矩阵或刚度比例阻尼矩阵。

(2) 坝高低于 200 m 时,可采用常规的以坝体第 1 振型和第 3 阶振型为基础建立重力坝 Rayleigh 阻尼矩阵,能够保证坝体地震反应计算结果具有良好的计算精度。

(3) 当坝高 250 m 以上特别是 300 m 级高重力坝的第 2~第 4 阶振型频率低于激励地震波反应谱峰值频率时,不宜采用常规的以坝体 2 个低阶振型来建立高重力坝的 Rayleigh 阻尼矩阵。建议以坝体基频和激励地震波反应谱峰值频率为双参数频率来建立重力坝 Rayleigh 阻尼矩阵,以保证坝体地震反应计算结果具有良好的计算精度。采用基于坝体基频的 Rayleigh 阻尼矩阵比例系数优化方法也能保证坝体地震反应计算结果具有良好的计算精度,但应用过程不及前一方法简单。

参考文献(References)

[1] 张楚汉,金峰,王进廷,等.高混凝土坝抗震安全评价的关键问

题与研究进展[J].水利学报,2016,47(3):253-264.

ZHANG Chuhan, JIN Feng, WANG Jinting, et al. Key Issues and Developments on Seismic Safety Evaluation of High Concrete Dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 253-264.

[2] 陈厚群,郭胜山.混凝土高坝-地基体系的地震损伤分析[J].水利学报,2012,43(S1):2-7.

CHEN Houqun, GUO Shengshan. Seismic Damage Analysis of High Concrete Dam-foundation System[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(S1): 2-7.

[3] 贾金生,李新宇,郑瑞莹.特高重力坝考虑高压水劈裂影响的初步研究[J].水利学报,2006,37(12):1509-1515.

JIA Jinsheng, LI Xinyu, ZHENG Cuiying. Studies on Safety Problem of High Gravity Dams Higher than 200m with Consideration of Hydraulic Fracturing under Water Pressure[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1509-1515.

[4] 楼梦麟.长周期动力系统时域分析中的阻尼矩阵.力学与工程[M].郑州:郑州大学出版社,2016,111-117

LOU Menglin. Damping Matrix in Time Domain Analysis of Long-Periodic Dynamic Systems. Mechanics and Engineering [M]. Zhengzhou: Zhengzhou University Press, 2016, 111-117.

[5] 楼梦麟,邵新刚.土层地震反应显式计算中阻尼矩阵系数的选取[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(8):1126-1132.

LOU Menglin, SHAO Xingang. Coefficient Selection of Damping Matrix in Explicit Calculation of Soil Layer Seismic Response[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(8): 1126-1132.

[6] 楼梦麟,潘旦光.滞后阻尼在土层时域分析中的应用[J].同济大学学报(自然科学版),2004,32(3):281-285.

LOU Menglin, PAN Danguang. Hysteretic Damping Application in Time Domain Analysis of Soil Layer[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(3): 281-285.

[7] 楼梦麟,邵新刚.深覆盖土层 Rayleigh 阻尼矩阵建模问题的讨论[J].岩土工程学报,2013,35(7):1272-1279.

LOU Menglin, SHAO Xingang. Discussion on Modeling Issues of Rayleigh Damping Matrix in Soil Layers with Deep Deposit [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1272-1279.

[8] 楼梦麟,殷琳.关于高土坝地震反应分析中阻尼模型的讨论[J].水力发电学报,2009,28(5):103-107.

LOU Menglin, YIN Lin. Discussion on Damping Models for Seismic Response Analysis of High Earth Dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(5): 103-107.

[9] 楼梦麟,殷琳,邵新刚.高土石坝地震反应时域分析中阻尼矩阵数值建模问题的讨论[J].地震工程与工程振动,2018,38(6):33-42.

LOU Menglin, YIN Lin, SHAO Xingang. Discussions on Numerical Simulation Problem of Damping Matrix of High-rise Earth-rock Filled Dam Seismic Response Analysis in Time Domain[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(6): 33-42.

(下转第 1453 页)

on the Geomagnetic Low-point Displacement Method with the Magnetic Storm Nine Days Multiplication Method as a Supplementary Prediction[J].China Earthquake Engineering Journal, 2018,40(5):1131-1132.

[4] 郭增建,郭安宁,赵乘程.四种方法对四川九寨沟 7 级地震的初步回顾预测[J].地震工程学报,2017,39(增刊 1):43-45.

GUO Zengjian, GUO Anning, ZHAO Chengcheng. Reviewing Prediction for Jiuzhaigou, Sichuan $M_s7.0$ Earthquake Using Four Methods [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017,39(Suppl):43-45.

[5] 郭增建,郭安宁,钟心.用异年倍九律讨论汶川大地震的发生日期[C]//中国地球物理学会第二十七届年会论文集.长沙:中国地球物理学会,2011.

GUO Zengjian, GUO Anning, ZHONG Xin. Discussion on the Occurrence Date of the Wenchuan Great Earthquake by the Rhythm of Nine Multiplied Days in Different Years[C]// The 27th Symposium of Chinese Geophysical Society. Changsha: Chinese Geophysical Society, 2011.

[6] 郭安宁,陈家超,郭增建.近年来我国和邻区特大地震前的热红外倍九律[J].西北地震学报,2007,29(3):245-247.

GUO Anning, CHEN Jiachao, GUO Zengjian. Multiplied Nine Days Regularity of Infrared Anomaly before Great Earthquakes in China and Adjacent Regions in Recent Years[J]. Northwestern Seismological Journal, 2007,29(3):245-247.

(上接第 1416 页)

[10] 潘旦光.直接确定 Rayleigh 阻尼系数的一种优化方法[J].工程力学,2013,30(9):16-21.

PAN Danguang. An Optimization Method for the Direct Determination of Rayleigh Damping Coefficients[J].Engineering Mechanics, 2013,30(9):16-21.

[11] 潘旦光,靳国豪,高莉莉.大跨斜拉桥 Rayleigh 阻尼系数约束优化解[J].振动与冲击,2014,33(16):34-41.

PAN Danguang, JIN Guohao, GAO Lili. Constraint Optimal Solution of Rayleigh Damping Coefficients for Long-span Cable-stayed Bridges[J].Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(16):34-41.

[12] 董云,楼梦麟.基于结构基频确定 Rayleigh 阻尼系数的优化方法及其讨论[J].湖南大学学报(自然科学版),2014,41(2):8-13.

DONG Yun, LOU Menglin. An Optimization Solution for Rayleigh Damping Coefficients Based on the Fundamental Frequency of Structure [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014,41(2):8-13.