

小浪底土石坝纵向振动简化动力分析

沈振中 徐志英

宗志坚

(淮海大学水利水电工程学院 南京 210098) (黄河水利委员会勘测规划设计院 郑州 450003)

摘 要 采用三维剪切楔理论和 Bubnov-Galerkin 方法 ,对小浪底土石坝的纵向地震反应进行简化分析 ,得到了该坝的最大位移、最大速度、最大加速度、最大应力等动力特性 .分析成果表明 ,小浪底大坝的基本自振周期约为 1.319 s ,坝顶的最大绝对加速度约为 1.036 g .

关键词 土石坝 纵向振动 地震反应 反应谱

中图号 TV641

正在建设的小浪底水利枢纽位于黄河中游最后一个峡谷的出口 ,上距三门峡水库 130 km ,下游是黄淮海平原 .它控制黄河花园口流域面积的 95% ,径流量和输沙量分别占全河总量的 91.2% 和近 100% ,处于承上启下控制黄河水沙的关键部位 .水库正常蓄水位 275.0 m ,总库容 126.5 亿 m^3 .拦河大坝为粘土斜心墙堆石坝 ,最大坝高 154 m ,坝轴线长约 1500 m .坝体断面上游平均坡度 1:2.64 ,下游平均坡度 1:2.10 ,如图 1(a)所示 .坝址河谷为 V 形峡谷 ,两岸平均坡度约为 1:3.31 ,如图 1(b)所示 .坝基覆盖层为砂砾石 ,平均厚度约为 36 m .黄河水利委员会水利科学研究院已对该大坝的横向振动作了较详尽的二维和三维地震反应分析 ,并研究了可能液化区及其地震反应特性^[1,2] .上述分析研究都是以有限元数值方法为基础的 ,工作量大 ,分析周期长 .另外 ,该坝的纵向地震反应分析迄今未见报道 .笔者曾经提出了 V 形峡谷中非均质土坝三维动力分析的简化解析法 ,本文采用该法对小浪底土石坝的纵向振动特性进行初步研究 ,并给出一些对设计施工和安全运行具有参考价值的成果 .分析时将坝体和坝基一起考虑 ,即计算模型的坝高是坝体高度和坝基覆盖层深度的总和 .

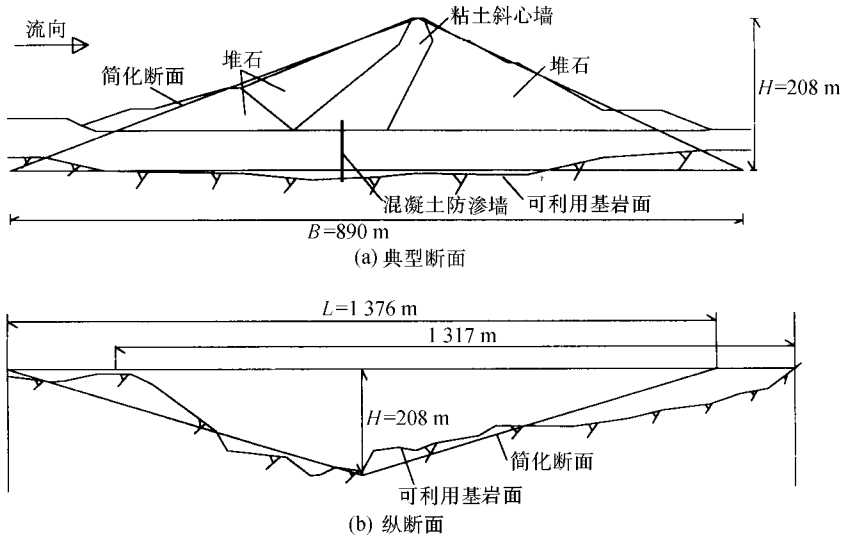


图 1 小浪底土石坝示意图

Fig.1 Schematic diagram of Xiaolangdi earth-rock dam

收稿日期 :1998-09-16

第一作者简介 :沈振中 ,男 ,博士 ,副教授 ,水工结构工程专业 ,主要从事水工建筑物安全监控、水工渗流控制、岩石力学、土石坝地震工程等方面的研究 .

1 基本假设和计算公式

1.1 基本假设

土坝的最大纵剖面 and 最大横断面及其坐标系如图 2 所示. 采用如下常用假设 (a) 河谷是绝对刚性的; (b) 地基运动方向为水平, 且平行于坝轴线方向, 其它方向无位移; (c) 坝体和库水之间的相互作用忽略不计; (d) 坝体材料是均一的、线弹性的, 其剪切模量随深度按下式变化^[3]:

$$G(y) = G_0 \left(\frac{y}{H} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (1)$$

式中: G_0 ——坝底的剪切模量, MPa; H ——坝高, m; l/m ——常数, 可取 0, 1/3, 2/5, 1/2, 1 等.

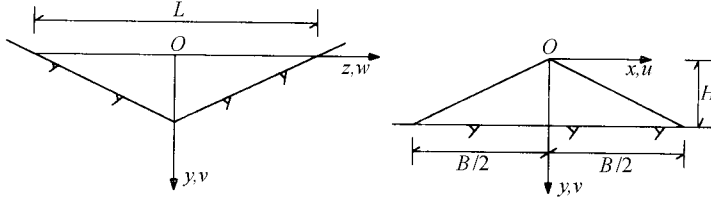


图 2 最大断面和计算坐标系示意图

Fig.2 Schematic diagram of maximum section and coordinate system

1.2 有关计算公式*

a. 纵向振动微分方程式

采用如图 2 所示的坐标系, 土坝的纵向振动微分方程为

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{c}{\rho} \frac{\partial w}{\partial t} - \frac{G_0}{\rho H^{\frac{1}{m}}} \left[\left(1 + \frac{l}{m} \right) y^{\frac{1}{m}-1} \frac{\partial w}{\partial y} + y^{\frac{1}{m}} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \xi y^{\frac{1}{m}} \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] = -\ddot{w}_g(t) \quad (2)$$

式中: w —— z 向相对于基岩的位移, m; c ——阻尼系数; ρ ——坝料的密度, kg/m³; ξ ——系数, $\xi = \alpha(1 + \mu)$, 其中 μ 为泊松比; $\ddot{w}_g$ ——基岩 z 向的地震运动加速度, m/s²; t ——时间, s.

b. 边界条件

$$\begin{cases} G \frac{\partial w}{\partial y} = 0 & \text{当 } y = 0 \\ w = 0 & \text{当 } y = H \pm Kz \end{cases} \quad (3)$$

式中 $K = 2H/L$, L 是坝顶长度, m.

c. 第一振型函数

$$\varphi(y, z) = \frac{1}{H^4} (y + H + Kz) \{ y - H - Kz \} \{ y + H - Kz \} \{ y - H + Kz \} \quad (4)$$

d. 第一自然频率

$$\omega_1 = \frac{15\sqrt{m}}{H} \sqrt{\frac{G_0}{\rho}} \left[\frac{4}{105} \frac{2 + \xi K^2}{l + m} + \frac{2}{15} \frac{3 + \xi K^2}{l + 3m} - \frac{2}{3} \frac{2 + \xi K^2}{l + 4m} + \frac{2}{3} \frac{1 + \xi K^2}{l + 5m} + \frac{2}{15} \frac{3 - \xi K^2}{l + 6m} - \frac{2}{105} \frac{11 + 2\xi K^2}{l + 8m} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

e. 第一振型参与系数

$$\eta_1 = \frac{\int_0^H \int_{-(H-y)/K}^{(H-y)/K} \varphi_1 y dy dz}{\int_0^H \int_{-(H-y)/K}^{(H-y)/K} \varphi_1^2 y dy dz} \quad (6)$$

f. 位移反应

* 沈振中, 徐志英. 三维非均质土坝纵向振动的近似解析. 见: 钱七虎主编. 第三届华东地区岩石力学与工程学术年会论文集. 杭州: 1995. 126

$$w \approx \varphi_1(y,z) \frac{-\eta_1}{\omega_1'} \int_0^t \ddot{w}_g(\tau) e^{-\lambda_1 \omega_1' (t-\tau)} \sin[\omega_1' (t-\tau)] d\tau$$

(7)

g. 速度反应

$$\dot{w} \approx \varphi_1(y,z) \left\{ -\eta_1 \int_0^t \ddot{w}_g(\tau) e^{-\lambda_1 \omega_1' (t-\tau)} \cos[\omega_1' (t-\tau)] d\tau - \lambda_1 \omega_1 T \right\}$$

(8)

h. 加速度反应

$$\ddot{w} \approx -\ddot{w}_g(t) + \varphi_1(y,z) \eta_1 \left\{ \frac{(1-2\lambda_1^2)\omega_1}{\sqrt{1-\lambda_1^2}} \int_0^t \ddot{w}_g(\tau) e^{-\lambda_1 \omega_1' (t-\tau)} \sin[\omega_1' (t-\tau)] d\tau + \right.$$

$$\left. 2\lambda_1 \omega_1 \int_0^t \ddot{w}_g(\tau) e^{-\lambda_1 \omega_1' (t-\tau)} \cos[\omega_1' (t-\tau)] d\tau \right\}$$

(9)

i. 剪应力反应

$$\tau_{yz} \approx G\varphi'_{1y} \frac{-\eta_1}{\omega_1'} \int_0^t \ddot{w}_g(\tau) e^{-\lambda_1 \omega_1' (t-\tau)} \sin[\omega_1' (t-\tau)] d\tau$$

(10)

j. 正应力反应

$$\sigma_z \approx \chi(1+\mu)G\varphi'_{1z} \frac{-\eta_1}{\omega_1'} \int_0^t \ddot{w}_g(\tau) e^{-\lambda_1 \omega_1' (t-\tau)} \sin[\omega_1' (t-\tau)] d\tau$$

(11)

上述各式中 :将式(4)代入式(6),可得 $\eta_1 = 1.856$; φ'_{1y} , φ'_{1z} —— $\varphi_1(y,z)$ 关于 y 和 z 的一阶偏导数 ;
 λ_1 ——阻尼比 $\lambda_1 = c/(2\rho\omega_1)$; $\omega_1' = \omega_1 \sqrt{1-\lambda_1^2}$; T 由下式计算 :

$$T \approx \frac{-\eta_1}{\omega_1'} \int_0^t \ddot{w}_g(\tau) e^{-\lambda_1 \omega_1' (t-\tau)} \sin[\omega_1' (t-\tau)] d\tau$$

(12)

根据工程经验 ,高次振型对大坝的地震反应影响较小 ,一般可只考虑 1~3 个低次振型 ,即可满足工程应用需要 .由于第一振型在地震反应中起着最主要的作用 ,因此 ,这里所谓的简化动力分析就在于土坝的地震反应只考虑第一振型 .公式(7)~(12)可以计算出土坝在地震作用下任意时刻的各种反应量及其时程曲线 .但在工程上最感兴趣的是各反应量的最大值 .此值可利用地震反应谱计算得到 .其计算公式如下 :

$$w_{\max} \approx |\eta_1 \varphi_1| S_d$$

(13)

$$\dot{w}_{\max} \approx |\eta_1 \dot{\varphi}_1| S_v$$

(14)

$$\ddot{w}_{\max} \approx |\eta_1 \ddot{\varphi}_1| S_a$$

(15)

$$\tau_{yz, \max} \approx G |\eta_1 \varphi'_{1y}| S_d$$

(16)

$$\sigma_{z, \max} \approx \chi(1+\mu)G |\eta_1 \varphi'_{1z}| S_d$$

(17)

其中 S_d , S_v 和 S_a 分别是地震反应的位移反应谱、速度反应谱和加速度反应谱.

2 小浪底土石坝纵向地震反应

2.1 计算参数

小浪底土石坝主要包括坝壳堆石料和斜心墙粘土料两种材料 ,另外 ,坝基覆盖层为砂砾石 .为了进行简化动力分析 ,本文采用加权平均原则估计整个坝体的平均动力参数.

a. 密度和泊松比

如表 1 所示 ,根据各种土料的体积百分比 ,容易求得坝体的平均密度和平均泊松比为 $\rho = 2\,192\text{ kg/m}^3$, $\mu = 0.43$.

表 1 小浪底土石坝土料的动力性质

Table 1 Dynamic properties of the soils for Xiaolangdi earth-rock dam

土料名称	体积百分比 /%	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	K'	n	$G_{\max}/\text{MPa}$	阻尼比
堆石体	58.3	2 160	0.42	2 000	0.5	785	随剪应变大小而变
粘土斜心墙	12.9	2 070	0.48	470	0.5	184	随剪应变大小而变
坝基砂砾石	28.8	2 313	0.42	1 400	0.5	549	随剪应变大小而变

b. 剪切模量

根据试验资料,最大剪切模量由下式计算:

$$G_{\max} = K' P_a \left(\frac{\sigma'_{\max}}{P_a} \right)^n \tag{18}$$

式中: P_a ——大气压力,取 100 kPa; $\sigma'_{\max}$ ——平均有效固结应力, kPa; K' , n ——试验参数,小浪底土石坝各种土料的 K' 和 n 试验值见表 1.坝底处的平均有效固结应力按下式估计:

$$\sigma'_{\max} = \gamma' H (1 + 2\zeta) / 3 \tag{19}$$

式中: γ' ——有效重度, kN/m³; ζ ——固结比,可取 0.45.将坝底处的有关参数代入式(19),可得 $\sigma'_{\max} = 1.54$ MPa,从而可得坝底处的最大剪切模量(表 1).由于剪切模量还随剪应变的增大而减小,因此,计算时取最大剪切模量的 50% 作为整个振动过程中的平均剪切模量,即坝底处的平均剪切模量为

$$G_0 = (785 \times 0.583 + 184 \times 0.129 + 549 \times 0.288) \times 50\% = 320 \text{ (MPa)}$$

2.2 地震资料

基岩地震采用世界银行咨询专家于 1990 年和 1991 年为小浪底水利枢纽提出的远场、近场和坝址区三类地震,其震级、峰值加速度和地震历时如表 2 所示.相应的基岩地震加速度时程曲线采用非平稳随机过程的数学模型由人工合成,其地震加速度反应谱如表 3 所示.

表 2 远震、近震和坝址区地震的特性参数

Table 2 Parameters of distant shock near shock and shock in dam site area

地震类型	里氏震级	震源距/km	峰值加速度/g	地震历时/s
远震	8.00	90	0.16	30.0
近震	7.50	29	0.25	19.0
坝址区地震	6.25	10	0.50	15.7

表 3 远震、近震和坝址区地震的加速度反应谱(阻尼比 = 5%)

Table 3 Acceration response spectra of distant shock near shock and shock in dam site area(λ = 5%)

周期/s	远震/g	近震/g	坝址区地震/g	周期/s	远震/g	近震/g	坝址区地震/g
0.010	0.160	0.250	0.500	0.600	0.448	0.566	0.744
0.030	0.160	0.250	0.500	0.650	0.450	0.540	
0.050	0.208	0.355	0.661	0.700	0.448	0.515	0.623
0.075	0.251	0.458	0.830	0.800	0.439	0.460	0.526
0.100	0.291	0.528	0.960	0.900	0.426	0.414	0.452
0.150	0.342	0.610	1.127	1.000	0.411	0.375	0.396
0.200	0.376	0.650	1.194	1.500	0.320	0.247	0.229
0.250	0.400	0.675	1.209	2.000	0.254	0.173	0.154
0.300	0.414	0.688	1.186	3.000	0.170	0.106	0.086
0.350	0.424	0.685	1.145	4.000	0.128	0.069	0.056
0.400	0.434	0.670	1.058	5.000	0.103	0.049	0.040
0.500	0.442	0.619	0.882				

2.3 计算分析

2.3.1 基本自振频率

取 $l/m = 1/2$,并将有关参数代入式(5),可得到坝体的基本自振频率 $\omega_1 = 4.765$ rad/s,并可由 $T_1 = 2\pi/\omega_1$ 计算其基本自振周期,即 $T_1 = 1.319$ s.按平均阻尼比 $\lambda_1 = 5\%$,由反应谱序列查得小浪底土石坝的加速度反应谱 S_a ,如表 4 所示.

表 4 小浪底土石坝的地震反应

Table 4 Earthquake responses of Xiaolangdi earth-rock dam

地震类型	加速度 反应谱 S_a/g	速度 反应谱 $S_v/(m \cdot s^{-1})$	位移 反应谱 S_d/m	最大位移 反应 $w_{\max}/m$	最大速度 反应 $\dot{w}_{\max}/(m \cdot s^{-1})$	最大绝对 加速度 $a_{\max}/g$	最大剪应 力反应 $\tau_{yz \max}/kPa$	最大正应 力反应 $\sigma_z \max/kPa$
远震	0.353	0.726	0.152	0.282	1.347	0.815	645.1	557.7
近震	0.293	0.603	0.126	0.234	1.119	0.794	534.7	462.3
坝址区地震	0.289	0.594	0.125	0.232	1.102	1.036	530.5	458.6

2.3.2 地震反应

按式 (13)~(17) 计算各反应量的最大值,如表 4 所示.其中,位移反应谱和速度反应谱近似由加速度反应谱得到,即

$$S_d = S_a/\omega_1^2, \quad S_v = S_a/\omega_1$$

(20)

另外,最大绝对加速度包括基岩运动加速度,即

$$a_{\max} = |\eta_1 \varphi_1| S_a + |\ddot{w}_g|_{\max}$$

(21)

上述地震反应中,最大位移反应、最大速度反应和最大加速度反应均出现在坝顶河谷中央部位,最大剪力反应和最大正应力反应则出现在坝体的约 0.4 倍坝高处,且靠近两岸基岩.

3 结 语

a. 本文采用三维简化动力分析法,对小浪底土石坝的纵向振动作了初步分析,得到了大坝的基本自振周期约为 1.319 s,坝顶的最大绝对加速度约为 1.036 g. 由于该坝的纵向振动尚未见其它的分析资料,因此,本计算成果有待于今后其它分析资料或坝体原型观测的验证.

b. 土石坝的地震反应直接关系到大坝的动力稳定性和安全. 迄今为止,尚缺乏可供 V 形河谷中土石坝抗震分析的解析解. 利用本文给出的三维简化动力分析法和相应的解析公式,可迅速计算各种地震反应量. 这些公式形式简单,便于手算,特别是利用地震反应谱,可迅速求得最大反应量,具有推广应用价值.

参 考 文 献

1 潘恕,沈凤生,杨宗茂等.小浪底斜心墙堆石坝的地震反应分析.人民黄河,1994(8):36~39

2 林秀山.黄河小浪底水利枢纽文集.郑州:黄河水利出版社,1997.167~174

3 Abdel-Ghaffar A M, Aik-Siong Koh. Longitudinal vibration of non-homogeneous earth dams. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 1981, 9: 279~305

Simplified Dynamic Analysis of Longitudinal Vibration for
Xiaolangdi Earth-Rock Dam

Shen Zhenzhong Xu Zhiying

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai Univ. ,Nanjing 210098)

Zong Zhijian

(Reconnaissance Planning and Design Institute of YRCC ,Zhenzhou 450003)

Abstract By use of the 3-dimensional shear wedge theory and the Bubnov-Galerkin method ,a simplified dynamic analysis of longitudinal earthquake responses of the Xiaolangdi earth-rock dam is made. Some dynamic characteristics , such as the maximum displacement ,speed ,acceleration and stress ,are obtained. The analysis result shows that the fundamental frequency of the Xiaolangdi earth-rock dam is about 1.319 s. Its maximum absolute acceleration at the dam crest is about 1.036 g during earthquakes.

Key words earth-rock dam ;longitudinal vibration ;earthquake response ;response spectrum