

奥罗维尔土坝三维简化动力分析

徐志英

(河海大学地质与岩土工程系, 南京, 210024)

1 引言

奥罗维尔(Oroville)土坝位于美国旧金山东北约240km处,是美国最大的土坝,加利福尼亚州给水系统的最重要工程。坝型为心墙砂砾石壳坝,含砾石的粘土心墙造在混凝土支墩块上。地基为前侏罗纪坚硬岩石,该坝位于地震区,于1963年开始施工,1967年建成,1975年8月1日坝区发生过一次6.5级地震。坝址为V形峡谷,两岸边坡约为1:3.5。图1表示该坝沿坝轴线的纵剖面图和平面图。可以看出,该坝对主轴几乎是几何对称的,故可看作为对称结构。图1上的虚线表示 Mejia 和 Seed 对该坝分析时所作的几何上的简化。奥罗维尔坝的动力稳定问题,一直受到美国及世界各国地震工程工作者的关注。该坝的动力性质和动力分析已有多人研究过^[1,2],但都以平面应变假定为基础。1981年 Mejia 等用总应力法对该坝首次作了三维动力分析^[3,4]。1991年笔者曾采用有效应力法对该坝作了三维动力计算^[5]。所有上述这些研究都是以有限元数值方法为基础,计算工作量大,计算费用高,有时还受到计算机容量的限制。笔者在1992年提出过三角形河谷内土石坝三维动力分析的简化解析方法^[6]。鉴于奥罗维尔土坝是世界著名的土坝,河谷形态为三角形,且坝长 L 与坝高 H 之比较小,符合三维计算需要,又有现成

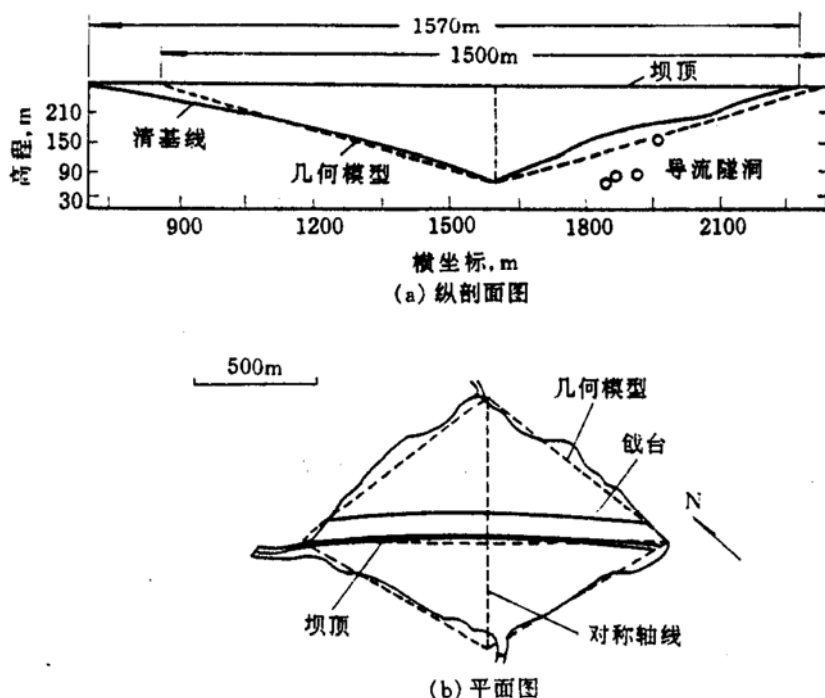


图1 奥罗维尔土坝的纵剖面图和平面图

的三维有限元计算结果和地震实测资料相比较,故本文选择该坝用简化解析法进行三维动力分析的研究。

2 基本假设及计算公式简述

2.1 基本假设

图2表示土坝的平面图及最大的横截面图和纵截面图。分析时采用习用的假设:①河谷是绝对刚性的;②地面运动方向为水平,且垂直于坝轴线方向(即地震为上下游方向),其他方向无位移;③坝是均匀的、线弹性的;④库水与坝之间的相互作用忽略不计;⑤只考虑剪切变形。

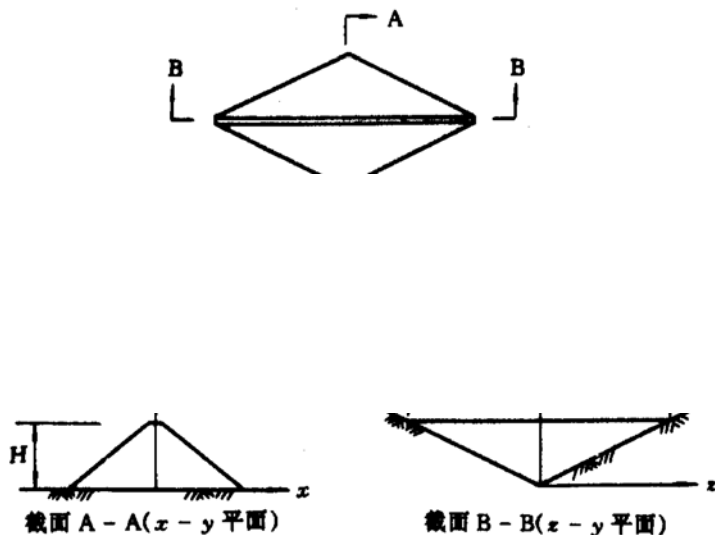


图2 三角形河谷内土坝简图

2.2 有关计算公式

(1) 横向振动微分方程

采用图2上的坐标系及记号,则土坝横向振动方程为^[6]

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{c}{\rho} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{G}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{y-H} \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

式中 u 为 x 向(相对于基岩)位移; G 为坝料动剪切模量; ρ 为坝料密度; H 为坝高; $\ddot{u}_g(t)$ 为 x 向基岩地震加速度; t 为时间。

(2) 边界条件

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } y = H \text{ 时,} & \quad G \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \\ \text{当 } z = 0 \text{ 时,} & \quad G \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \\ \text{当 } y = Kz \text{ 时,} & \quad u = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 $K = 2H/L$, L 是坝顶长度。

(3) 第一(基本)频率^[6]

$$\omega = \frac{1}{H} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \sqrt{\frac{45}{4} + \frac{20H^2}{L^2}} \quad (3)$$

(4) 第一振型函数

$$\varphi(y, z) = \frac{(y + Kz)(y - Kz)(y - 2H + Kz)(y - 2H - Kz)}{H^4} \quad (4)$$

(5) 第一振型参与系数

$$\eta = \frac{\int_0^H \int_0^{y/K} \varphi(y, z)(H - y) dy dz}{\int_0^H \int_0^{y/K} \varphi^2(y, z)(H - y) dy dz} = 1.839 \quad (5)$$

(6) 位移反应

$$u \approx \varphi(y, z) \frac{\eta}{\omega'} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\lambda\omega(t-\tau)} \sin\omega'(t-\tau) d\tau \quad (6)$$

(7) 速度反应

$$\dot{u} \approx \varphi(y, z) [-\eta \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\lambda\omega(t-\tau)} \cos\omega'(t-\tau) d\tau - \lambda\omega T] \quad (7)$$

(8) 加速度反应

$$\begin{aligned} \ddot{u} \approx & -\ddot{u}_g(t) + \varphi(y, z) \eta \left[\frac{(1 - 2\lambda^2)\omega}{\sqrt{1 - \lambda^2}} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\lambda\omega(t-\tau)} \sin\omega'(t-\tau) d\tau \right. \\ & \left. + 2\lambda\omega \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\lambda\omega(t-\tau)} \cos\omega'(t-\tau) d\tau \right] \end{aligned} \quad (8)$$

(9) 剪应力反应

$$\tau_{yx} \approx G\varphi_y' \frac{\eta}{\omega'} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\lambda\omega(t-\tau)} \sin\omega'(t-\tau) d\tau \quad (9)$$

以上诸式中 $\varphi(y, z)$ 用式(4)代入; $\eta = 1.839$; ω 用式(3)计算; φ_y' 为函数 $\varphi(y, z)$ 关于 y 的一阶导数; λ 为阻尼比, $\lambda = c/2\rho\omega$; $\omega' = \omega\sqrt{1 - \lambda^2}$; T 用下式表示:

$$T = \frac{\eta}{\omega'} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\lambda\omega(t-\tau)} \sin\omega'(t-\tau) d\tau$$

简化动力分析主要在于计算中只考虑第一振型, 因为经验证明, 高次振型对坝的地震反应很小, 一般只考虑 1~3 个低次振型就能满足实际需要, 而第一振型在反应中起着最主要的作用。公式(6)~(9)可求出坝在地震作用下任一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反应量的最大值。为此可用地震反应谱, 而无需进行繁重的杜哈美(Duhammel)积分。下面列出各反应量最大值的公式:

$$u_{\max} \approx |\eta\varphi| S_d \quad (\text{最大位移}) \quad (10)$$

$$\dot{u}_{\max} \approx |\eta\varphi| S_v \quad (\text{最大速度}) \quad (11)$$

$$\ddot{u}_{\max} \approx |\eta\varphi| S_a \quad (\text{最大加速度}) \quad (12)$$

$$A_{\max} \approx |\eta\varphi| S_a + |\ddot{u}_{g, \max}| \quad (\text{最大绝对加速度}) \quad (12)$$

$$\tau_{yx, \max} \approx G|\eta\varphi_y'| S_d \quad (\text{最大剪应力}) \quad (13)$$

以上诸式中 S_d 表示位移反应谱; S_v 表示速度反应谱; S_a 表示加速度反应谱。

3 奥罗维尔土坝三维简化动力计算

3.1 计算参数

奥罗维尔土坝主要包括三种材料: 坝壳粗料(砂砾石、块石、卵石); 心墙料(含砾石粘土); 混凝土支墩块体。表 1 列出 Mejia 等三维有限元动力分析采用的参数。为了计算, 本文采用

加权平均的原则估计整个坝体的平均计算参数。动剪切模量 G 估计如下。

(1) 坝壳料

根据表1的最大剪模系数 $k_{2\max}$, 可用下式求得坝壳的最大剪切模量 $G_{\max}$:

$$G_{\max} = 6.92 k_{2\max} (\sigma_m')^{\frac{1}{2}} \quad (\text{MPa}) \quad (14)$$

式中 σ_m' 为平均有效应力(以 MPa 计), 今取该坝中央断面离坝顶 $H/3$ 处的应力作为代表该坝的平均应力。根据美国水资源局静力计算资料^[3], 该处大主应力 $\sigma_1' = 1.8\text{MPa}$, 小主应力 $\sigma_3' = 0.8\text{MPa}$, 故 $\sigma_m' = (\sigma_1' + \sigma_3')/2 = (1.8 + 0.8)/2 = 1.3\text{MPa}$, 代入式(14), 得坝壳的最大剪切模量 $G_{\max} = 6.92 \times 170 \times 1.3^{1/2} = 1340\text{MPa}$ 。由于坝壳料的剪切模量 G 还随剪应变幅度的增大而减小, 故计算中取最大剪切模量 $G_{\max}$ 的 50% 作为整个振动过程中的平均剪切模量, 即 $G = 1340 \times 50\% = 670\text{MPa}$ 。

表1 奥罗维尔坝坝料动力性质

参 数	坝 壳	心 墙	心墙混凝土支墩
$k_{2\max}$	170		$G = 9765\text{MPa}$
$G_{\max}/s_u$		2200	
λ	随剪应变而变	随剪应变而变	0.04
泊松比 μ	上游 0.4 下游 0.3	0.45	0.15
密度 ρ	上游 2.44t/m^3 下游 2.4t/m^3	2.44t/m^3	2.56t/m^3

(2) 心墙粘土料

根据表1资料, 粘土的最大剪切模量 $G_{\max} = 2200s_u$, s_u 为粘土的不排水强度, 根据有关资料为 0.1MPa , 故粘土的 $G_{\max} = 2200 \times 0.1 = 220\text{MPa}$ 。粘土的剪切模量也随剪应变幅度的增大而减小, 今取 $G_{\max}$ 的 50% 作为振动过程中的平均剪切模量 G , 即 $G = 220 \times 50\% = 110\text{MPa}$ 。根据该坝的平面图和各截面图(略), 可算出坝壳、心墙、混凝土支墩的体积分别是坝体总体积的 0.85, 0.145, 0.005。按加权平均原则, 坝体的平均剪切模量为 $G = 670 \times 0.85 + 110 \times 0.145 + 9765 \times 0.005 = 637\text{MPa}$ 。类似地, 对其他参数求平均值, 最终得: 密度 $\rho = 2.46\text{t/m}^3$, 泊松比 $\mu = 0.33$, 阻尼比 $\lambda = 0.05$ 。

3.2 地震资料

图3表示1975年8月1日奥罗维尔地震加速度记录及其相应的反应谱。从图可见, 基岩的最大加速度 $\ddot{u}_{g,\max} = 0.09g$ 。另外, 根据坝的实测资料, 坝的基本自振周期为 0.8s ^[4]。

3.3 计算分析

(1) 基本自振频率

用该坝平均的 $G = 637\text{MPa}$, $\rho = 2.46\text{t/m}^3$ 以及 $H = 229\text{m}$, $L = 1500\text{m}$ 等值代入式(3), 可迅速求出基本自振频率:

$$\omega = \frac{1}{H} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \sqrt{\frac{45}{4} + \frac{20H^2}{L^2}} = \frac{1}{229} \sqrt{\frac{637000}{2.46}} \sqrt{\frac{45}{4} + \frac{20(229)^2}{(1500)^2}} = 7.38\text{rad/s}$$

坝的基本周期 $T = 2\pi/\omega = 2 \times 3.14/7.38 = 0.85\text{s}$ 。

可见计算的基本周期与实测的基本周期 0.8s 比较接近。

(2)最大绝对加速度

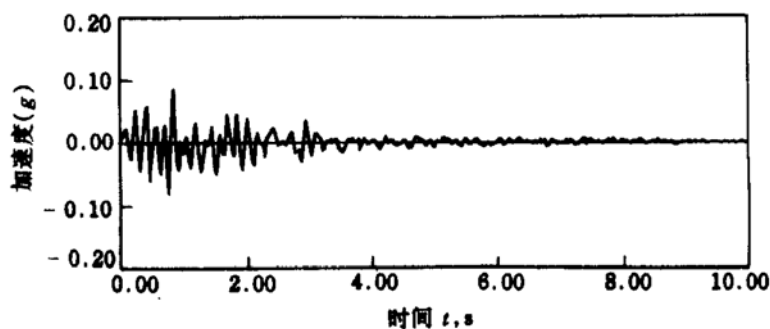
最大绝对加速度按公式(12)计算,即

$$A_{\max} \approx \left| \frac{1.839}{H^4} (y + Kz)(y - Kz)(y - 2H + Kz)(y - 2H - Kz) \right| S_a + |\ddot{u}_{g,\max}| \quad (12)$$

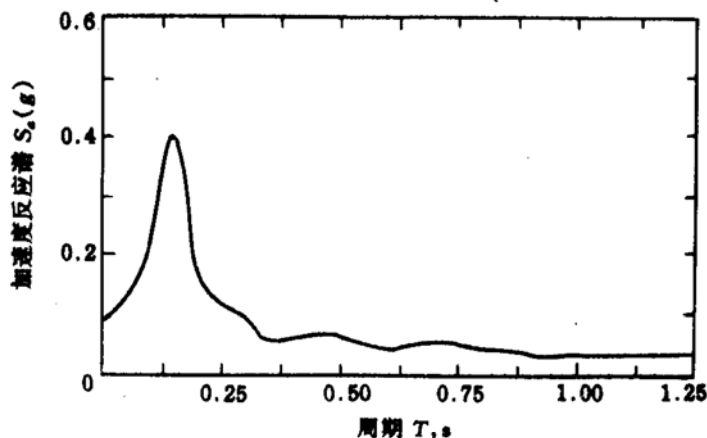
根据自振周期 $T=0.85\text{s}$,从图 3(b)查得加速度反应谱 $S_a=0.05g$ 。对于中央断面坝顶($z=0, y=H$),最大相对加速度为 $1.839 \times 0.05 = 0.092g$,最大绝对加速度为 $0.092g + \ddot{u}_{g,\max} = 0.092g + 0.09g = 0.182g$,这与 Mejia 等三维有限元计算结果(见图 4 曲线峰值)比较接近。

图 5 表示算得的 4 个断面的最大绝对加速度随深度的变化。可以看出,这些断面上的加速度都是随着深度而减小,直至减到基岩加速度。图 5(a)上还示有 Mejia 等三维有限元计算结果,对中央断面而言,笔者的计算结果与他们的计算结果比较接近。

图 6 上绘出了坝顶最大绝对加速度沿着坝轴线方向(纵向)的变化。从图可知,坝顶的绝对加速度以中央断面为最大,随着离中心的距离而逐渐减小,直至两岸为基岩加速度。这一计算结果与 Mejia 等的结果(图中虚线)有较大不同,后者在临近两岸处的最大绝对加速度比中央大得多。笔者认为,这可能是不合理的,因为愈靠近两岸基岩,坝体所受约束愈大,相对加速度应愈小,例如,粘附在两岸的土就显得相对加速度为零,绝对加速度也就是基岩的加速度了。这一问题还有待试验和实测进一步验证。



(a) 加速度时程线



(b) 加速度反应谱

图 3 奥罗维尔地震(1975,8,1)加速度及其反应谱

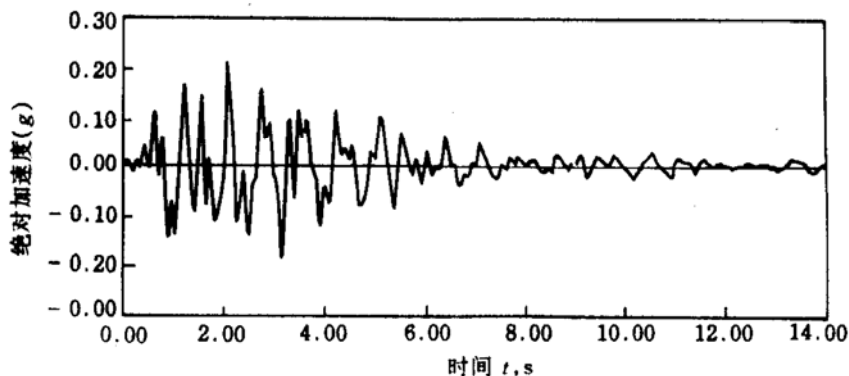


图 4 奥罗维尔土坝中央断面坝顶加速度时程曲线

(按 Mejia 等资料)

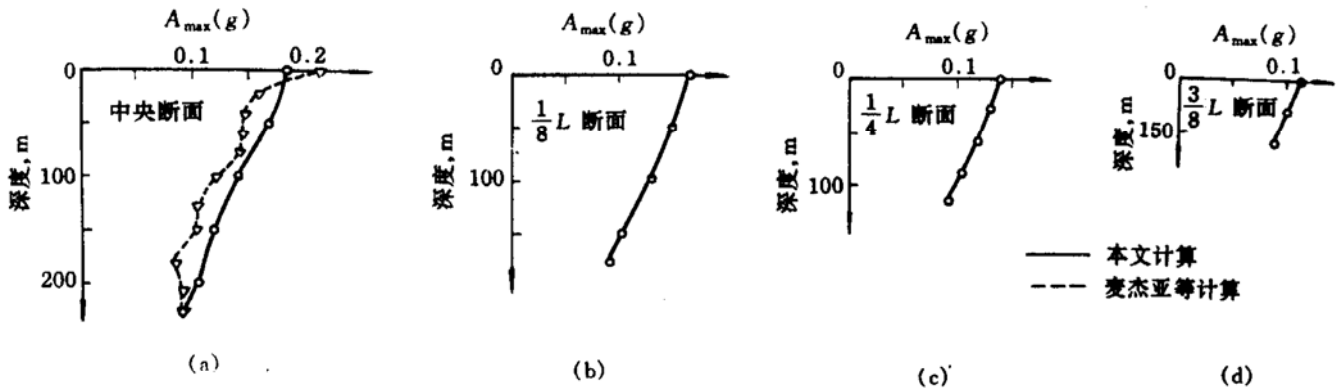


图5 4个横断面上的最大绝对加速度

4 结 论

(1) 本文采用三维简化动力分析法, 对奥罗维尔土坝作了初步计算, 算得的基本自振周期与实测的周期比较接近, 中央断面上的最大绝对加速度与 Meija 等三维有限元计算结果大致接近, 但算得的坝顶最大绝对加速度沿坝轴线方向的变化与 Meija 等的结果相差较大, 这是今后值得研究的问题, 有赖于坝体原型观测来验证。

(2) 土石坝的地震反应状况直接关系到坝的安全与动力稳定性。迄今为止, 可供三角形河谷内土石坝抗震分析的解析解尚缺乏。本文列出的解析公式及三维简化动力分析方法, 可迅速计算各种反应量。公式简单、便于手算, 特别是配合反应谱, 可迅速算出最大反应量。对一般的初步设计可作出有一定精度的简捷估算。

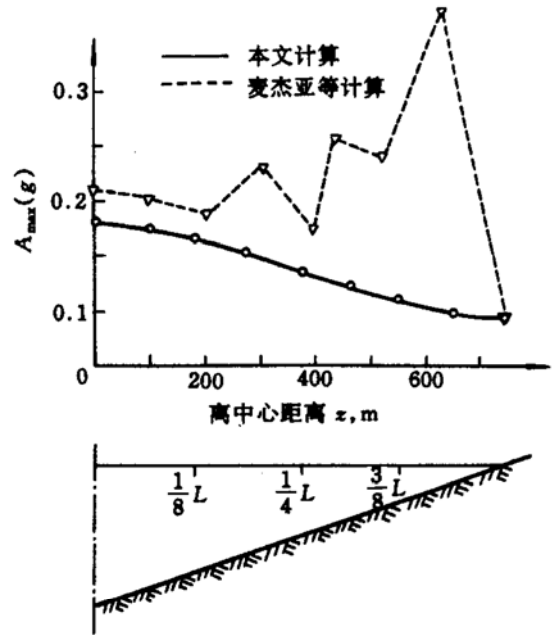


图6 坝顶最大绝对加速度沿坝轴线方向的变化

参 考 文 献

- 1 Wong R T. Deformation Characteristics of Gravels and Gravelly Soils under Cyclic Loading Conditions. Thesis Submitted in Partial Satisfaction of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. University of California, Berkeley, 1971.
- 2 Vrymoed J. Dynamic FEM Model of Oroville Dam. Proc ASCE, 1981, 107(GT8):1057~1077.
- 3 Meija L H, Seed H B. Three Dimensional Dynamic Response Analysis of Earth Dams. Report EERC-81-15, Earthquake Engineering Research Center. University of California, Berkeley, 1981:44~129.
- 4 Meija L H, Seed H B, Lysmer J. Dynamic Analysis of Earth Dam in three Dimensions. Proc ASCE, 1982, 108(GT12):1586~1604.
- 5 徐志英, 周健. 奥罗维尔土坝三维排水有效应力动力分析, 水利学报, 1991(6):19~27.
- 6 Xu Zhi-ying. Approximate Analysis of Transversal Vibration of Rock-fill Dam in 3-D. In: Proc of International Symposium on Application of Computer Methods in Rock Mechanics and Engineering. Xian, China, 1993:561~565.