

地震烈度对面板坝地震反应的影响

李文斌

(福建省水利规划院, 福建 福州 350001)

摘要: 运用有限元分析方法, 对一建立在刚性地基上的高 100 m 的面板坝进行动力分析, 研究不同地震烈度对其动力反应的影响, 揭示地震烈度对其动力反应大小的规律。研究表明: 地震烈度越大, 坝体的位移反应越强烈, 而对于坝体的加速度放大倍数而言, 在一定范围内, 地震烈度的增大引起了加速度放大倍数的减小, 而且当地震烈度超过某一特定限度后, 加速度放大倍数不再随地震烈度的增大而减小; 对于不同坝高下的面板坝而言, 引起加速度放大倍数不再减小趋势“拐点”的地震烈度也不相同。

关键词: 地震烈度; 动力反应; 放大倍数; 面板坝

中图分类号: TV641.4+3

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2002)04-0017-04

1 平衡方程及其解法

1.1 静力模型公式

堆石体的静力模型采用的是邓肯等人提出的双曲线模型, 为弹性非线性模型, 能模拟土体屈服后的变形形状, 忽略了土的剪胀性和应力路径的影响。

土体的切线弹性模量为

$$E_t = KP_a \left(\frac{P}{P_a} \right)^n \left(1 - R_f \cdot \frac{q}{q_f} \right)^2 \quad (1)$$

式中: K, n, R_f 为试验参数; P_a 为大气压; P, q 为广义应力, 其中:

$$P = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

切线体积模量 B_t 为

$$B_t = K_b P_a \left(\frac{P}{P_a} \right)^m \quad (2)$$

式中: $B_t \in \left(\frac{E_t}{3}, 17E_t \right)$; K_b, m 为试验参数; 其余符号同前。

对于破坏剪应力, 考虑主应力影响及罗德应力角影响的三维分析得:

$$q_f = \frac{3P \sin \varphi + 3c \cos \varphi}{\sqrt{3} \cos \theta_\sigma + \sin \varphi \sin \theta_\sigma} \quad (3)$$

式中: c 为凝聚力; $\theta_\sigma = \tan^{-1} \left(-\frac{1}{3} u_\sigma \right)$, $u_\sigma = 1 -$

$$\frac{2(\sigma_2 - \sigma_3)}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

堆石体抗剪强度和法向应力的非线性可用其内摩擦角表示为

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta \varphi \lg \frac{\sigma_n}{P_a} \quad (4)$$

式中: φ_0 及 $\Delta \varphi$ 为试验参数, 它们与堆石体来源、孔隙率、级配等因素有关, σ_n 为破坏面上的法向应力。

当土体处于卸荷与再加荷阶段时有:

$$E_w = K_w P_a \left(\frac{P}{P_a} \right)^n \quad (5)$$

式中: K_w, n 为试验参数。

1.2 动力模型公式

当土体受到循环荷载的作用, 其应力-应变关系见图 1^[2]。图 1 中骨干线反映动应力-动应变的非线性, 滞回曲线反映应变对应力的滞后性。反映土石料的这种应力-应变关系的数学模型主要有双曲线模型、粘弹性模型和理想弹塑性模型。其中等效线性模型较多地被使用, 其将土石料视为粘弹性体, 采用等效弹性模量 G_{eq} 和等效阻尼比 λ_{eq} 这两个参数反映土体的非线性和滞后性两个动力基本特征, 并将 G_{eq} 和 λ_{eq} 表示为动应变幅值的函数。同时, 在确定上述关系时考虑了静力固结平均主应力的影响。

本文堆石体动力模型采用的是哈定-德涅维契模型, 其假定骨干线为一条双曲线, 当动剪应变 $\gamma \rightarrow \infty$ 时, 曲线以静力极限剪应力 τ_{max} 为渐近线; 当 $\gamma \rightarrow$

0 时,曲线切线坡度为最大剪切模量 $G_{\max}$,可推得等效线性剪切模量(即割线模量)为

$$G_{eq} = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{1}{\frac{1}{G_{\max}} + \frac{\gamma}{\tau_{\max}}} = \frac{G_{\max}}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \tag{6}$$

式中: $\gamma_r = \frac{\tau_{\max}}{G_{\max}}$ 为参考剪应变.

$$\lambda_{eq} = \lambda_{\max} \left(1 - \frac{G_{eq}}{G_{\max}}\right) \tag{7}$$

式中: $\lambda_{\max} = \frac{2K_1}{\pi}$,根据试验结果确定.

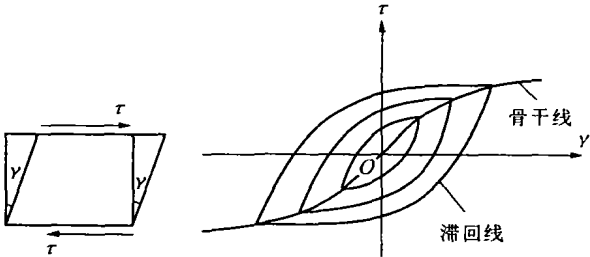


图 1 土体在循环荷载作用下应力-应变关系

1.3 静、动力平衡方程

由于能量原理的应用并不受材料形状的影响,对离散化的坝体结构,利用最小势能原理,可推得静力平衡方程为

$$K\{\delta\} = \{R\} \tag{8}$$

对建在地震区的面板坝进行动力分析是必要的.通过分析计算,了解坝体地震时的动应力及动变形,为土石坝的抗震设计提供依据,式(9)为动力平衡方程式.

$$K\{\delta\} + C\{\dot{\delta}\} + M\{\ddot{\delta}\} = M\{\ddot{u}_g\} \tag{9}$$

式中: K 为整体劲度矩阵; R 为荷载矩阵; C 为整体阻尼矩阵; M 为整体质量矩阵,本文采用集中质量矩阵; $\ddot{u}_g$ 为地震加速度; $\{\delta\}, \{\dot{\delta}\}, \{\ddot{\delta}\}$ 分别为各结点动力位移、速度和加速度.

该二阶动力平衡方程式采用 Wilson- θ 法进行逐步数值积分求解.首先根据地震过程幅值大小来划分若干时段,并认为在每一时段中各单元的剪切模量和阻尼比不变,在时段内取时间步长 $\Delta t = 0.01 \sim 0.04$ s,用 Wilson- θ 法逐步数值积分得到各单元的剪应变过程,将本时段地震作用下最大剪应变的 0.65 倍作为该单元在该时段的平均剪应变;然后据此剪

应变由 $G/G_{\max} \sim \gamma$ 及 $\lambda/\lambda_{\max} \sim \gamma$ 确定各单元在该时段中的剪切模量和阻尼比,在该时段中迭代几次直到各单元的剪切模量和阻尼比达到精度要求.将此剪切模量和阻尼比作为下一时段的起始模量和阻尼比,并求出坝的基频进行下一时段的迭代,这样依次进行直到地震过程終了.

2 地震烈度对面板坝的影响

一建筑在刚性岩基上高 100 m,上下游坝坡坡度为 1:1.4 的均质面板坝,坝顶宽为 6 m,坝体单元剖分见图 2,共计有堆石体单元 60 个,接触面单元 10 个,面板单元 11 个,荷载分级见图 3.

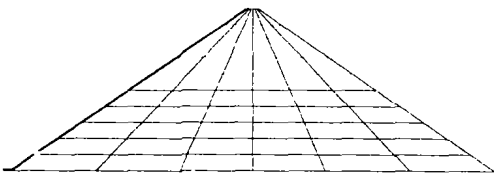


图 2 坝体单元剖分

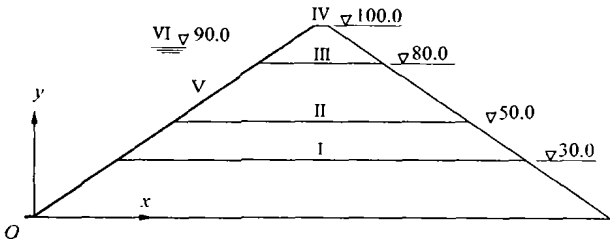


图 3 坝体荷载分级

坝体材料采用的静、动力学参数分别见表 1 和表 2.静力模型采用邓肯 E-B 模型,动力模型采用哈定-德涅维契模型,同时输入 X (顺河向,图 4(a)), Y (坝高向,图 4(b))两方向地震动,做动力反应分析(输入的地震加速度曲线为 1988 年 11 月 30 日云南澜沧—耿马地震,选用 Cv2a124, Cv2a125 号时程线作为 X, Y 向地震动输入),峰值分别为 430.0 cm/s^2 , 358.9 cm/s^2 .

表 1 坝料的动力模型参数^①

坝 料	$K_{2\max}$	γ_r	$\lambda_{\max}$	c/kPa	δ/rad
堆石体	100.0	0.0004	0.20		
接触面			0.20	22.0	0.58
面 板			0.10		

表 2 坝料的静力模型参数^②

坝 料	$\rho/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	φ_0/rad	K	n	R_f	K_b	m	$\Delta\varphi/\text{rad}$	K_w	E/MPa	ν
堆石体	2.1	0.0	0.837	780.0	0.42	0.64	400.0	0.18	0.105	1500		
接触面			0.64	4800	0.56	0.74						
面 板	2.0										317.0	0.33

①汪闻韶,吴仲谋.鲁布革堆石坝三维动力反应分析.北京:水利水电科学研究院,1985.
②顾淦臣,等.钢筋混凝土面板堆石坝三维非线性地震反应分析和研究,“七五”国家科技攻关项目总报告,1990.

对上述高 100 m 的面板坝,考察不同的水平向最大地震输入 $|\ddot{u}_g|_{\max}$ 分别为 $0.1g, 0.2g, 0.3g, 0.4g, 0.5g$, 各时程线的形状与图 4 相似, 仅各点的幅值为图 4 的某一比例, 计算获得 74 号典型结点的 x 向加速度 $\ddot{u}$ 与 x 向位移 u , 见图 5~7.

各加速度下 74 号典型结点的加速度放大系数 $\beta = \frac{|\ddot{u}_a|_{\max}}{|\ddot{u}_g|_{\max}}$ 及最大位移 $u_{\max}$ 与输入最大加速度 $|\ddot{u}_g|_{\max}$ 关系分别见图 8 和图 9.

加速度反应是与 G 成正比的, 而位移反应是与 γ 成正比的. 由图 8 可见, 在一定范围内, 输入加速度 $|\ddot{u}_g|_{\max}$ 越大, 剪应变 γ 越大, 则最大位移 $u_{\max}$ 越大. 由于剪应变越大则剪切模量 G 越小, 故加速度反应越小, 亦即放大系数 β 越小. 当加速度超过一定限度后, 本例中当输入 $|\ddot{u}_g|_{\max}$ 约大于 $0.4g$ 时, 放大系数 β 不再降低, 这是由于剪应变增大到一定数值后, 剪切模量不再随剪应变增大而降低.

采用拟静力法计算地震惯性力时, 土体的水平

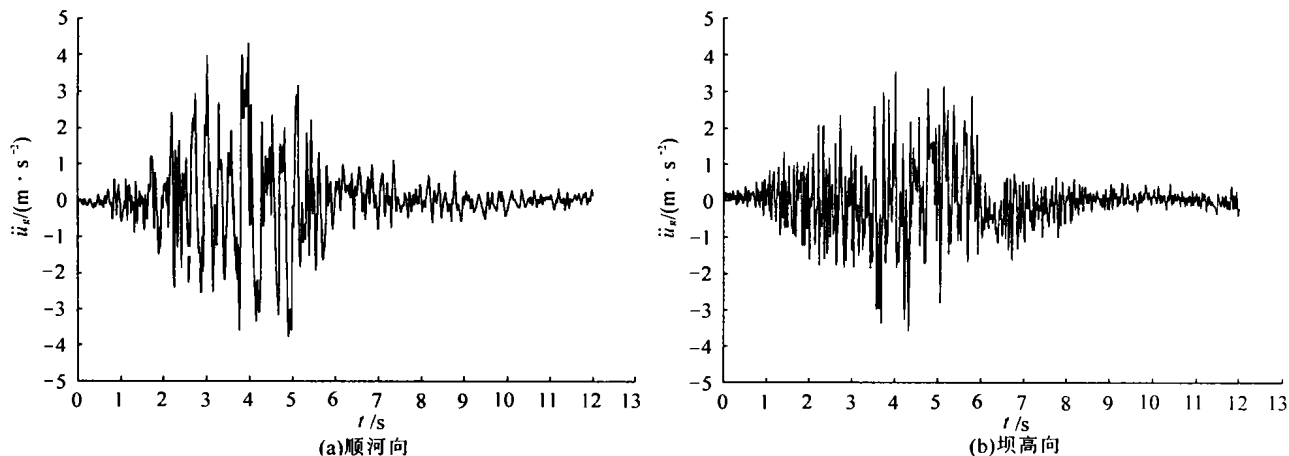


图 4 地震输入过程线

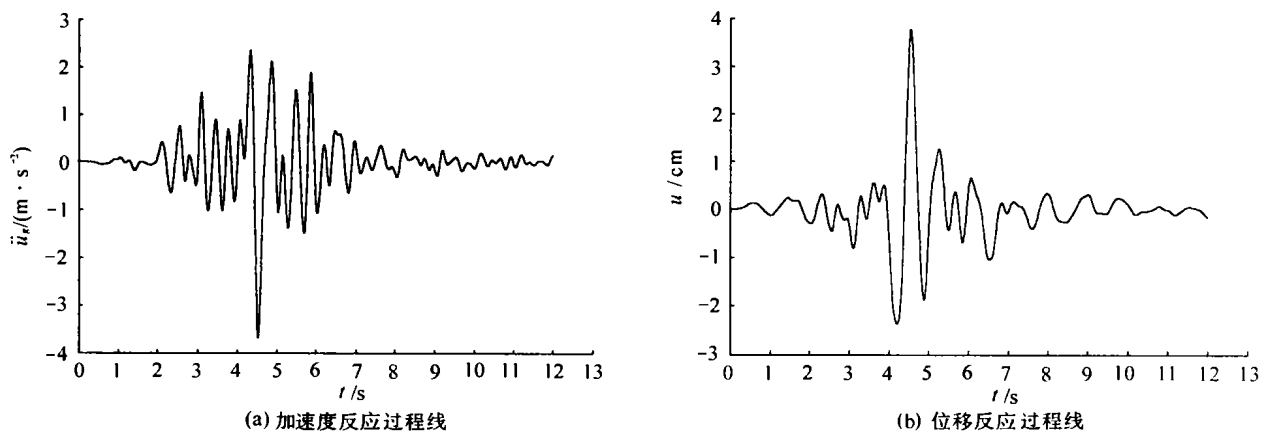


图 5 $|\ddot{u}_g|_{\max} = 0.1g$ 下 74 号结点 x 向加速度、位移反应过程线

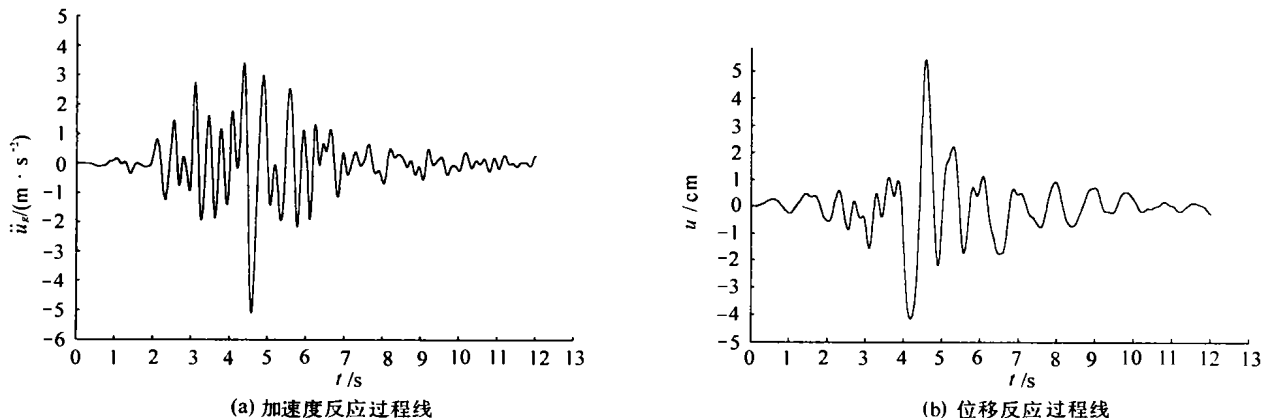
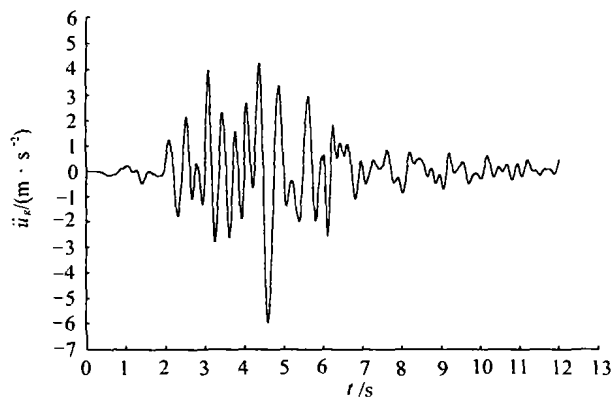
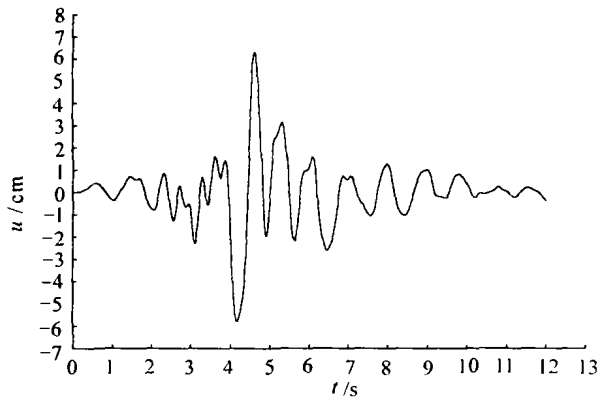


图 6 $|\ddot{u}_g|_{\max} = 0.2g$ 下 74 号结点 x 向加速度、位移反应过程线



(a) 加速度反应过程线



(b) 位移反应过程线

图7 $|\ddot{u}_g|_{\max} = 0.3g$ 下74号结点 x 向加速度、位移反应过程线

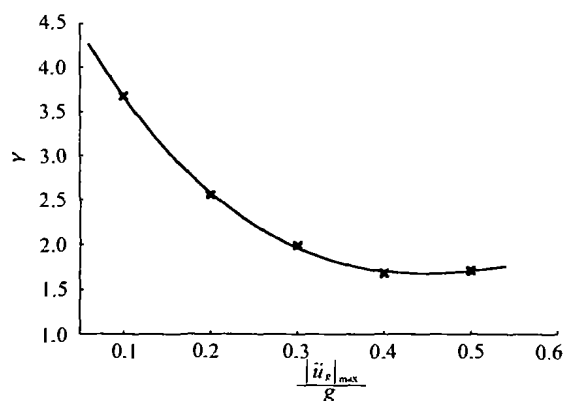


图8 加速度放大系数与输入最大加速度的关系

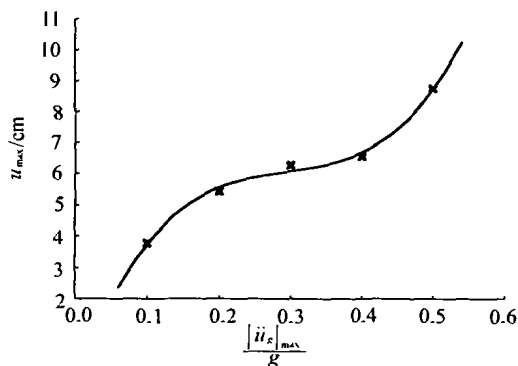


图9 最大位移与输入最大加速度的关系

向惯性力为 $a_h \xi \alpha_i \frac{W}{g}$, 竖向惯性力为 $a_h \xi \alpha_i \frac{W}{3g}$, 式中 a_h 为水平向设计地震系数; 地震烈度为 7 度、8 度、9 度时, 相应的系数为 $0.1g, 0.2g, 0.3g$; ξ 为综合折减系数, 取 0.25; α_i 为随不同坝高部位而变化的动态分布系数(放大倍数分布系数); W 为土体重量; g 为重力加速度. α_i 的取值见文献[3].

本文对 100 m 高的混凝土面板堆石坝得到以下结果: 烈度 7 度($0.1g$), $\beta = 3.7$; 烈度 8 度($0.2g$), $\beta = 2.6$; 烈度 9 度($0.3g$), $\beta = 2.0$.

3 结论

a. 现行规范中没有区分不同坝型的放大倍数

α_m 看来, 混凝土面板堆石坝的低烈度的 α_m 还可以增大一些. 心墙坝或均质坝的 α_m 是否有所不同, 应再进一步研究. 深厚覆盖层上的土石坝的 α_m 规范没有涉及, 应作专门研究.

b. 输入的地震动越大, 其位移反应越强烈, 加速度放大倍数则随着输入的地震动增大而减小, 超过某个地震动强度后, 加速度反应不再减小. 过大的地震输入引起加速度减小的原因是输入地震加速度越大, 则坝体的单元的动应力增大, 相应动应变增大, 使坝体材料变软, 从而使该方向的最大绝对加速度反应减小.

c. 对于不同高度的面板坝而言, 也具有文中所归纳的特点. 但不同高度的面板坝, 由于它们的初始的应力应变状态不同, 坝体的自振周期也不同, 在某一地震输入下, 材料的“软化”程度也有不同, 所以引起加速度放大倍数不再减小趋势的“拐”点也有不同.

参考文献:

- [1] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利水电出版社, 1983.
- [2] 顾淦臣. 土石坝地震工程[M]. 南京: 河海大学出版社, 1988.
- [3] SL203-97, 水工建筑物抗震设计规范[S].

(收稿日期: 2001-04-13 编辑: 张志琴)

