

拱坝地震响应的动力控制研究

杜成斌, 赵光恒

(淮海大学土木工程学院, 江苏南京 210098)

摘要:首次运用脉冲控制原理对一混凝土典型拱坝的地震响应进行了分析.建立和推导了有关数学模型,讨论并给出了基于位移控制、速度控制和加速度控制时,脉冲控制力的表达形式,设计了相应的控制算法.在时域内根据位移控制准则对典型拱坝在松潘地震波作用下的地震响应进行了分析,给出了拱坝关键部位的计算结果,并与未加控制的情况相比较,通过综合分析,对拱坝的动力控制进行探讨,得到了一些有益的看法.

关键词:拱坝;脉冲控制;地震响应;时域分析

中图分类号:TV642.4;TU311.3

文献标识码:A

文章编号:1000-1980(2000)01-0109-04

对强震区混凝土拱坝和高拱坝的抗震分析和抗震控制研究越来越显得非常重要,对混凝土拱坝的抗震控制研究报告作者至今还未见到有关报道.笔者曾在频域内对拱型结构的振动主动控制进行过研究^[1].脉冲控制最早由 F. E. Vdwadia 和 S. Tabaie^[2]提出,以后 A. M. Reinhorn^[3]和 Chris P. Pantelides^[4]对其进一步发展和完善.脉冲控制算法相对于其它控制算法可以具有较大的时间步长,而且短历时的脉冲力也易于在工程实际中实现.但至今为止,这些研究还只限于单自由度和简单的几个自由度系统上.本文首次将脉冲控制方法应用到拱坝这种复杂结构中,系统地建立和推导了有关数学模型,推导并给出了基于位移控制、速度控制和加速度控制时脉冲力的表达式,设计了相应的控制算法.在时域内根据位移控制准则对典型拱坝在松潘地震波作用下的地震响应进行了分析,给出了拱坝关键部位的分析结果,并与未加控制的情况相比较,通过综合分析,对拱坝的动力控制提出了一些有益的看法.

1 数学模型的建立

1.1 脉冲控制力的表达式

结构在地震作用下的地面运动方程为

$$M\ddot{y}(t) + C\dot{y}(t) + Ky(t) = -MrW(t) \quad (1)$$

式中: M 、 C 、 K ——结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $W(t)$ ——地面运动加速度; r ——位置指示矩阵; $y(t)$ 、 $\dot{y}(t)$ 、 $\ddot{y}(t)$ ——结构的位移、速度和加速度矢量.

利用 Newmark 法对式(1)进行直接积分,有

$$\tilde{K}(t + \Delta t)y(t + \Delta t) = \tilde{P}(t + \Delta t) \quad (2)$$

若考虑的材料为线弹性,则 $\tilde{K}(t + \Delta t)$ 为常量,

$$\tilde{K}(t + \Delta t) = K + a_0M + a_1C \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \tilde{P}(t + \Delta t) = & -MrW(t + \Delta t) + M[a_0y(t) + a_2\dot{y}(t) + a_3\ddot{y}(t)] + \\ & C[a_1y(t) + a_4\dot{y}(t) + a_5\ddot{y}(t)] \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\beta\Delta t^2} & a_1 &= \frac{\alpha}{\beta\Delta t} & a_2 &= \frac{1}{\beta\Delta t^2} \\ a_3 &= \frac{1}{2\beta} - 1 & a_4 &= \frac{\alpha}{\beta} - 1 & a_5 &= \frac{\Delta t}{2}(\frac{\alpha}{\beta} - 2) \end{aligned}$$

式中: α 、 β ——积分常数; Δt ——积分步长.

若控制目标为结构的位移响应,则 $|y(t + \Delta t)| \leq |y_{\text{lim}}|$. 一旦结构的位移响应超过限值 y_{lim} , 则需施加脉

冲控制力 f . 设脉冲力作用时间为 Δt_p , 其值一般为 $(10\% \sim 20\%) \Delta t^{[3]}$. 根据冲量定理, 此时初速度需修正为

$$\dot{y}(t) = \dot{y}(t) + \frac{f \Delta t_p}{M} \tag{5}$$

将式 (5) 代入式 (4) 中, 此时方程式 (2) 左边位移为 y_{lim} (指超过限值的部分, 未超过部分仍为原值),

$$\tilde{K}y_{lim} = \tilde{K}y(t + \Delta t) + (a_2M + a_4C)f \frac{\Delta t_p}{M} \tag{6}$$

由式 (6) 可得脉冲控制力 f_d 形式为

$$f_d = \frac{M[y_{lim} - y(t + \Delta t)]}{\Delta t_p(a_2M + a_4C)\tilde{K}^{-1}} \tag{7}$$

其中向量 y_{lim} 中的每一项符号同 $y(t + \Delta t)$ 的对应项.

类似地, 我们可推导出以速度响应、加速度响应为控制标准时, 脉冲力表达式

$$f_v = \frac{M[\dot{y}_{lim} - \dot{y}(t + \Delta t)]}{\Delta t_p(a_1a_2\tilde{K}^{-1}M + a_1a_4\tilde{K}^{-1}C - a_4I)} \quad f_a = \frac{M[\ddot{y}_{lim} - \ddot{y}(t + \Delta t)]}{\Delta t_p(a_0a_2\tilde{K}^{-1}M + a_0a_4\tilde{K}^{-1}C - a_2I)} \tag{8}$$

1.2 脉冲力的物理意义

从式 (7)、式 (8) 和式 (9) 可以看出, 脉冲控制力与质量和限值与响应最大值的差的乘积成正比, 其分母的因次分别为时间的平方、时间和无因次. f_d , f_v 和 f_a 的因次为力.

可通过下式来设计和调整实际加在拱坝上的脉冲控制力 f 的大小及位置. 以 f_d 为例:

$$Lf' = f_d = \frac{M[y_{lim} - y(t + \Delta t)]}{\Delta t_p(a_2M + a_4C)\tilde{K}^{-1}} \tag{9}$$

从平衡方程角度出发, 相当于式 (1) 左边添加一控制力 Lf' 来平衡地震力

$$M\ddot{y}(t) + C\dot{y}(t) + Ky(t) + Lf' = -MrW(t) \tag{10}$$

式中 L 为位置指示矩阵. 经过推导得

$$Lf' = -\tilde{K}[y_{lim} - y(t)] \tag{11}$$

2 控制算法程序设计

首先计算出每一时步末的位移、速度和加速度向量. 根据选取的控制准则, 判别响应是否超过限值. 若未超过, 则进入下一时步; 否则, 根据有关公式计算需加的脉冲控制力, 返回此步, 重新计算.

3 算例及分析

本文选取文献 [5] 建议的典型拱坝作为分析对象, 为了研究方便, 将坝厚减半. 拱坝为单曲率溢流拱坝, 外半径为 57.5 m. 拱顶圆心夹角为 120° , 坝厚为 1.5 m, 坝底厚度为 3 m, 坝高为 40 m. 坝体材料弹性模量 $E = 20\,000\text{ MPa}$, 泊松比 $\mu = 0.167$, 容重为 $2.45 \times 10^4\text{ N/m}^3$, 刚性基础. 图 1 为其计算简图.

计算的荷载包括自重、满库水荷载、动水压力和地震荷载. 计算所选用的地震波为经修正后的 1976 年我国四川省松潘地震波. 根据《水工建筑物抗震设计规范》^[6], 8° 地震时, 最大水平地震加速度峰值为 $0.2g$, 激励方向为顺河向. 动水压力按规范用附加质量法取用. 数值积分采用 Newmark 法, 积分常数 $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.25$. 积分步长为 0.01 s. 共计算了 1000 个时段, 即 10 s. 拱坝阻尼按 Rayleigh 假定, 振型阻尼比取 5%. 动位移控制限值取线弹性最大动位移的 70% 左右, 即 0.00833 m.

图 2 为拱冠断面上游面 A 点顺河向动

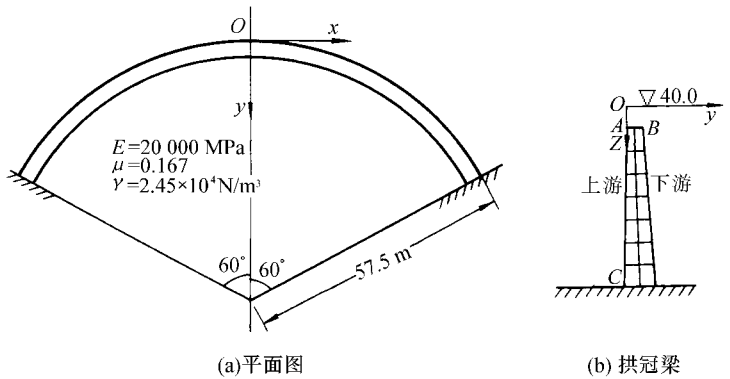


图 1 典型拱坝计算简图

Fig.1 Computing model of a typical arch dam

位移响应时程曲线. 图 3 为上游面 A 点所需施加的脉冲力, 图 4 为上游 A 点的环向应力 σ_θ 时程曲线. 图中实线、虚线分别为有、无控制力的情况.

从图 2 和图 3 可清楚地看出脉冲控制的工作原理, 即当动位移响应小于限值时, 它不起作用, 一旦其响应超过限值, 即施加脉冲力. 图 2 中前后大部分实线和虚线重合, 即表明无脉冲力作用, 当 $t = 3.27\text{ s}$ 时, 开始有脉冲控制力, 整个响应过程共有 12 次动位移超过限值, 经加脉冲控制力之后, 最大响应动位移均被控制在限值 $8.33 \times 10^{-3}\text{ m}$ 之内. A 点所需的最大脉冲力为 $1.117 \times 10^4\text{ kN}$ 左右. 另外, 从位移响应或应力响应来看, 加上控制力之后, 对结构的后继响应是局部的, 几乎没有影响.

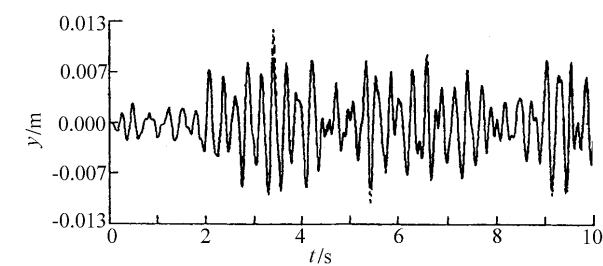


图 2 A 点 y 向位移响应

Fig.2 y-displacement response for point A

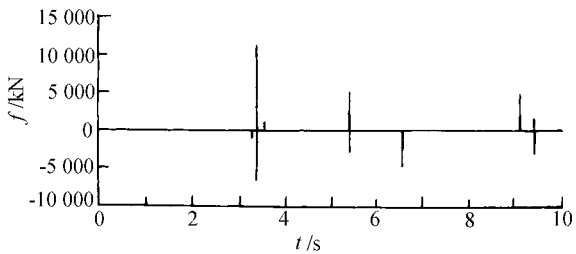


图 3 A 点脉冲力时程曲线

Fig.3 Pulse force f versus time t for point A

从应力时程曲线(图 4)可看出, 有控制时, 上游面 A 点的拱向应力响应基本上呈减小趋势, 拱向最大压应力由 2.39 MPa 减小到 2.04 MPa , 降低大约 14.6% , 最大拉应力由 2.24 MPa 减小到 2.16 MPa , 降低大约 3.57% . 而坝踵附近的 σ_z , 最大拉应力呈增加趋势, 由 1.8 MPa 增加到 1.83 MPa , 增加约 7.2% , 最大压应力呈减少趋势, 由 1.94 MPa 减少到 1.87 MPa . 从图 4 还可再一次发现, 脉冲力的影响是局部的、很短暂的.

图 5(a)(b)分别为拱冠梁处上、下游面的最大拱向拉应力和最大梁向拉应力分布. 由于这些最大拉应力一般不是在同一时刻达到, 为了对地震过程中某些危险时刻的应力情况有所了解, 我们还求出了拱冠梁坝顶和坝踵两处发生最大拉应力的时刻, 以及上述各时刻的应力分布(见图 6).

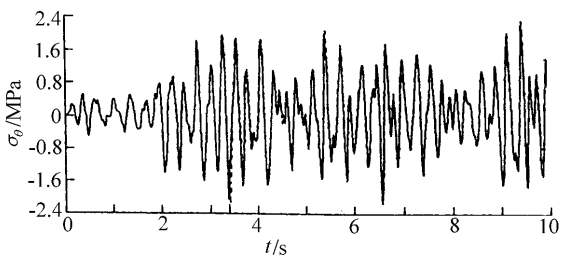


图 4 A 点拱向应力 σ_θ 时程曲线

Fig.4 Arch stress σ_θ versus time t for point A

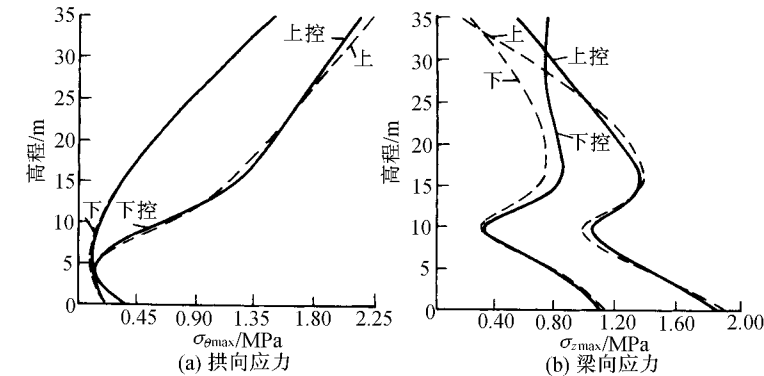


图 5 拱冠断面最大应力

Fig.5 Maximum stress at the crest

图 5(a)(b)表示加了控制力之后, 无论上游面还是下游面的 $\sigma_{\theta\max}$ 变化均很小, 而 $\sigma_{z\max}$ 却在中上部有所增加. 可认为是由于在顶部施加脉冲力, 类似于在这些部位附加了约束, 从而导致了图 5(b)的结果.

图 6(a)表示 $t = 9.43\text{ s}$ 时(此时 $\sigma_{\theta\max}$ 最大)拱冠断面的 σ_θ , 总体看来, 有无控制力时二者变化并不大. 当 $t = 3.43\text{ s}$ 时(此时 $\sigma_{z\max}$ 最大), 加了控制力之后, 在中上部上游面 σ_z 变大, 下游面 σ_θ 变小. 而在下部, 加了控制力之后, $|\sigma_z|$ 均变大.

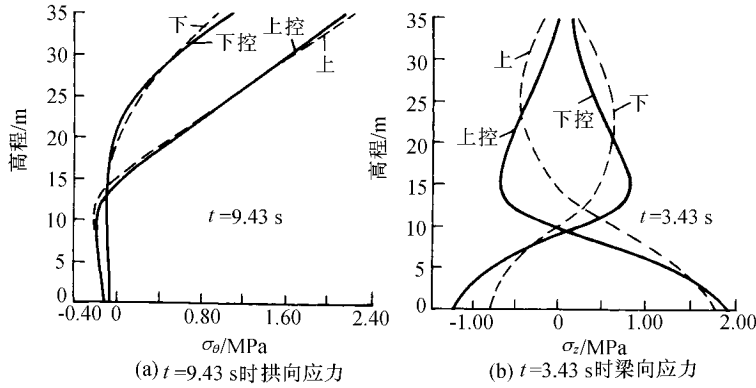


图6 拱冠断面拱向和梁向应力
Fig.6 Arch stress and cantilever stress at the crest

4 几点看法

- a. 脉冲控制可以达到降低结构地震响应的目的,以本文算例为例,可降低最大响应位移的30%.
- b. 脉冲力对结构的响应是局部的、短暂的.
- c. 对于拱坝结构,利用结构的位移控制,可改变拱坝中上部梁向应力分布,而对拱的应力影响不大.
- d. 拱坝结构相对于其它土木工程如桥梁、高耸结构,刚度较大.要达到一定的控制要求,所需的脉冲控制力很大,相应要求外界提供的能量也就越大.如本文算例中A点 f_{dmax} 为 $1.117 \times 10^4\text{ kN}$,而该点最大惯性力 f_A 则为272.7 kN左右,脉冲力大约为其43倍.必须想办法结合其它方法,如设周边缝和底缝等被动控制手段,或者利用原有横缝的张开闭合消耗一部分能量,然后再利用主动控制,方可降低控制力.

参考文献:

[1] 杜成斌,赵光恒.拱型结构振动控制研究[J].河海大学学报,1999,27(3):49~51.
[2] Vdwadia F E,Tabaie S.Pulse control of single degree-of-freedom system[J].J E M,1981,107(EM6):997~1009.
[3] Reinhorn A M,Manolis G D,Wen C Y.Active control of inelastic structures[J].J E M,1987,113(3):315~333.
[4] Chris P Pantelides,Nelson P A.Continuous pulse control of structures with material non-linearity[J].E E S D,1995,21(2):263~282.
[5] 傅作新,陈和群,叶万灵.拱坝的抗震分析[J].华东水利学院学报,1980,8(2):15~28.
[6] 中华人民共和国水利电力部.水工建筑物抗震设计规范[S].北京:水利电力出版社,1983.30~32.

Dynamic Control of Seismic Responses of Arch Dams

DU Cheng-bin , ZHAO Guang-heng

(College of Civil Engineering ,Hohai Univ . ,Nanjing 210098 ,China)

Abstract Seismic responses of a typical arch dam are studied by use of the principle of pulse control for the first time. A mathematical model is established. Expressions of three pulse control schemes based on the criteria of displacement control, velocity control and acceleration control are given. A corresponding algorithm is designed. The earthquake responses of the arch dam excited by Song Pan waves in the time domain are studied based on the criterion of displacement control. Dynamic stresses and displacements at the key location of the dam are given. For comparison, the results in the absence of control are also calculated. After synthetical analysis, some conclusions about dynamic control of arch dams are drawn.

Key words arch dam; pulse control; seismic responses; time domain analyses