

土石坝三维二相动力分析

周 健

吴世明 曾国熙

(同济大学地下建筑与工程系, 上海) (浙江大学土木系, 杭州)

一、前 言

在土坝的三维动力分析方法中, 目前主要还是采用总应力法^[1-2]。本文第一作者和徐志英以有效应力为基础, 提出了土(尾矿)坝的三维有效应力动力分析法^[3], 但在这个方法中, 还没有考虑到振动孔隙水压力的消散、扩散和重分布, 实际上这是一种不排水有效应力法。后来才考虑了这一个问题^[4]。

本文以 Biot^[5] 波动方程为基础, 采用非线性模式, 提出了考虑两相土共同作用的三维有效应力动力分析法, 用空间等参数有限单元法逐步计算动力反应和孔隙水压力的产生、扩散和消散, 真正把三维土坝的动力反应分析与动力渗流、液化的发生和发展及土骨架变形统一起来分析。

二、基本理论和基本方程式

(一) 运动平衡方程式

1962年, Biot^[5] 建立了弹性波在饱和多孔连续介质中传播的基本运动方程。在这一方程的基础上, 忽略孔隙水的加速度, 且考虑土的非线性性质, 则可分别得到土体和流体的运动平衡方程式如下:

$$[L]^T (\{\sigma\} + \{m\}p) - \rho\{g\} = -\rho(\{\ddot{u}\} + \{\ddot{u}_s\}) \quad (1)$$

$$\{\nabla\}p - \rho g = -[\tilde{k}]^{-1}\{w\} \quad (2)$$

式中 $\{w\}^T = [w_1, w_2, w_3]$, 为孔隙水平均相对位移; $\{\sigma\} = [\sigma'_{11}, \sigma'_{22}, \sigma'_{33}, \sigma'_{12}, \sigma'_{23}, \sigma'_{31}]^T$, $\{\sigma\}$ 为应力列阵; p 为孔隙水压力; $[L]$ 为 6×3 应变矩阵; $\rho = (1-n)\rho_s + n\rho_w$, ρ_s 为土体颗粒密度, ρ_w 为水的密度, n 为孔隙率; $\{g\}$ 为重力加速度列阵; $\{\tilde{k}\} = [k]/(\rho g)$, $[k]$ 为渗透系数矩阵; $\{m\}^T = [1, 1, 1, 0, 0, 0]$; $\{\ddot{u}\}$ 为相对加速度列阵; $\{\ddot{u}_s\}$ 为基岩地震加速度列阵; $\{\nabla\}$ 为 Napier (耐普尔) 算子的列阵表达式。

(二) 本构关系

动态应力应变关系的骨架曲线采用 Hardin^[6] 的双曲线模式, 加卸荷采用 Masing 二倍法

则,同时利用 Hardin 的阻尼比公式修正 Masing 曲线,使按滞迴圈得到的阻尼比与按 Hardin 公式计算的阻尼比相同。当应力点超过历史上最大应力点时,利用 Hardin 的双曲线模式计算切线剪切模量;当应力点转向后不超过最大应力点,且处于自最大应力点出发的 Masing 曲线的加载分枝时,按下式计算切线剪切模量:

$$G = G_{ms} + \kappa(\gamma_m) \left\{ \frac{G_{\max}}{[1 + (\gamma - \gamma_a)/(2\gamma_r)]^2} - G_{ms} \right\} \quad (3)$$

式中 G_{ms} 为当前骨架曲线上与当前时刻以前最大剪应力比相对应的割线模量; $\kappa(\gamma_m)$ 为与当前时刻以前最大剪应力比对应的阻尼比修正系数; γ_a 为应力转向点对应的剪应变; γ_r 为参考剪应变; $G_{\max}$ 为当前骨架曲线上最大剪切模量。

将总应变 $\{\epsilon\}$ 分为两部分:一是由非线性弹性模式计算的由有效应力引起的正常应变 $\{\epsilon^*\}$; 另一是由振动引起的应变 $\{\epsilon^*\} = [D]\{U_s, U_s, U_s, 0, 0, 0\}$ 。这里, $[D]$ 为弹性矩阵, U_s 为振动孔隙水压力,由式(5)求得。则本构关系可写为

$$\{\sigma\} = [D](\{\epsilon\} - \{\epsilon^*\}) = [D]\{\epsilon\} - U_s\{m\} \quad (4)$$

(三) 孔隙水压力增长公式

本文在不同固结应力比的动三轴试验的基础上,对 Seed^[7] 的孔隙水压力模式作了改进,进一步考虑了静剪应力和动剪应力对孔隙水压力增长的影响。提出如下的孔隙水压力公式:

$$\frac{U_s}{\sigma_m} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin \left[\beta \left(\frac{N}{N_m} \right)^{1/\alpha} - 1 \right] \quad (5)$$

式中 σ_m 为平均总应力; N 为振动周数; N_m 为最大孔隙水压力对应的振动周数; α 为与动应力比有关的系数; β 为与固结应力比有关的系数。

(四) 控制运动微分方程组

经推导,用位移和孔隙水压力的运动平衡方程式如下:

$$[L]^T [D][L]\{u\} - [L]^T \{m\} p = -[L]^T U_s \{m\} - \rho\{g\} + \rho(\{\ddot{u}\} + \{\ddot{u}_s\}) \quad (6)$$

$$\{\nabla\}^T [\bar{k}]\{\nabla\} p - \{m\}^T [L]\{u\} = \{\bar{f}\} \quad (7)$$

式中 $\{u\}^T = [u_1, u_2, u_3]$, $\{u\}$ 为位移列阵; $\{\bar{f}\}$ 为静水压力荷载列阵; 其它符号同前。

三、三维动力固结方程的求解

本文用等参数有限单元法求解方程(6)、(7)的近似解。利用 Галёркин, Б. Г. (伽辽金) 加权剩余法对动力微分方程组(6)、(7)进行离散,并且取形函数为权函数,则可以得到下列离散形式的方程组:

$$[K]\{\delta\} + [Q]\{p\} + [M]\{\dot{\delta}\} = \{F\} \quad (8)$$

$$[Q]^T \{\dot{\delta}\} + [H]\{p\} = \{\bar{F}\} \quad (9)$$

式中 $[K]$ 为刚度矩阵; $[Q]$ 为耦合矩阵; $[M]$ 为质量矩阵; $[H]$ 为渗流矩阵; $\{\delta\}$, $\{\dot{\delta}\}$, $\{\ddot{\delta}\}$ 分别为结点位移、速度和加速度列阵; 其它符号同前。

将式(8)对时间求导,并令 Δt 时段内 i 结点的位移 δ_i 和孔隙水压力 p_i 的增量分别为 $\Delta \delta$ 和 Δp , 该时段的平均孔隙水压力数值 p 为 $p_i + \Delta p/2$, 则式(8)和式(9)可以用下列差分方程

式表示:

$$[K]\{\Delta\delta\}+[Q]\{\Delta p\}+[M]\{\Delta\delta\}=\{\Delta F\} \quad (10)$$

$$[Q]^T\{\Delta\delta\}+[H]\Delta t\{\Delta p\}=\{\Delta\bar{F}\} \quad (11)$$

对于方程组(10)、(11)若采用通常的三角分解法求解,则需要很大的计算机内存,只能在大、中型计算机上算题,计算费用较大。为了在微型计算机上进行三维动力分析,本文采用波阵法求解动力方程组。下面介绍这一方法的解题步骤:

1. 预波前,形成波阵解法组装和消元指示信息。
2. 震前静力分析,采用邓肯-张模型^[8]进行静力有限元计算,计算各单元的初始应力。
3. 计算当前单元动力方程的矩阵和动荷载增量列阵,并按指示信息进行叠加和消元,直到所有单元组装,消元完毕。
4. 回代。从最后一个单元开始,采用反推波前法,将已存入缓冲区或外存的回代系数取出,通过逐步积分求得每一时段末各结点的位移、速度和加速度,以及孔隙水压力值。计算中,根据修正后的Masing准则确定切线剪切模量,并由孔隙水压力值修正最大剪切模量,使应力应变点沿着修正后的Masing滞回圈曲线前进。
5. 计算该时段每一个单元的震动孔隙水压力增量,并将它转化为结点荷载。
6. 对于下一时段,重复3—5步骤,直至地震结束。
7. 地震结束后,继续分时段进行消散计算,直至超静孔隙水压力完全消散或甚小为止。

四、算 例

为了验证本文提出的方法和计算程序的可靠性,以铜陵狮子山铜矿尾矿副坝为例,,进行三维两相有效应力动力分析。

该坝的主断面如图1所示。坝体材料有三种,它们是尾矿细砂、矿泥和粉质粘土。其物理指标和计算参数列于表1内,其中 ϕ' , c' , K , n 和 R_f 为静力计算用的邓肯-张模量参数; $k_{2\max}$ 和 $D_{\max}$ 分别为公式(3)中计算最大剪切模量和阻尼修正系数的参数。

75.0m

图1 狮子山铜矿尾矿副坝主断面图

图2上示有计算简图和坝体有限元的划分情况。共分131个单元,190个结点,其中包括47个固定结点。

表 1

参数类型	符 号	尾矿细砂	矿 泥	粉质粘土
浮容重(kN/m ³)	γ'	11.9	11.2	9.0
内摩擦角(°)	ϕ'	30	28	24
凝聚力(kPa)	c'	0	0	9.8
模量系数	K	150	125	63
模量指数	n	0.6	0.65	0.70
破坏比	R_f	0.8	0.85	0.85
泊松比	μ	0.35	0.37	0.40
渗透系数(m/s)	k	5.2×10^{-6}	4.8×10^{-7}	8.7×10^{-10}
最大剪模系数	$k_{2\max}$	47	43	30
最大阻尼比	$D_{\max}$	0.3	0.29	0.28

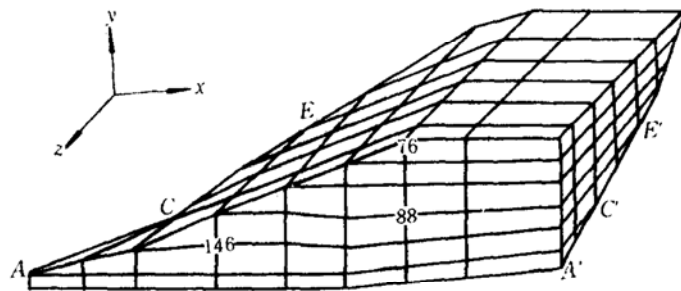


图 2 狮子山铜矿尾矿副坝单元剖分图

采用唐山地震曲线作为输入地震曲线, 如图3所示。但将最大加速度调整到0.29, 卓越

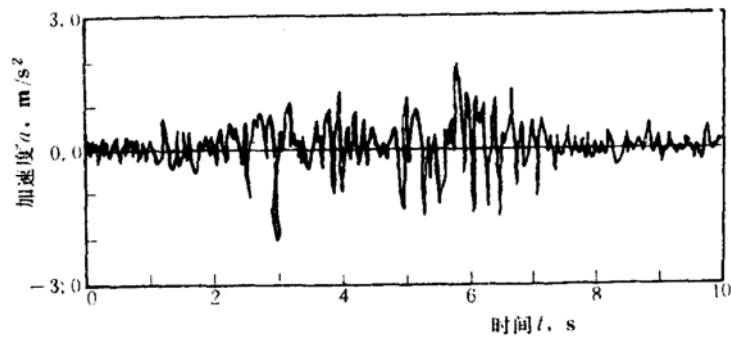


图 3 地震输入曲线

周期调到0.24s, 震动持续时间为10s, 相当于8°地震。假定地震振动方向与坝体上下游方向一致。

图4上示有地震结束时坝体内部分断面的孔隙水压力比(p/σ_m)等值线图。可以看出, 坝体顶部区域的孔隙水压力比数值较大, 靠近坝肩断面E-E'的顶部表面区域已发生液化现象, 主断面A-A'上的孔隙水压力比数值要比断面C-C'和E-E'上的小, 这一情况说明坝体主断面不一定是危险断面。

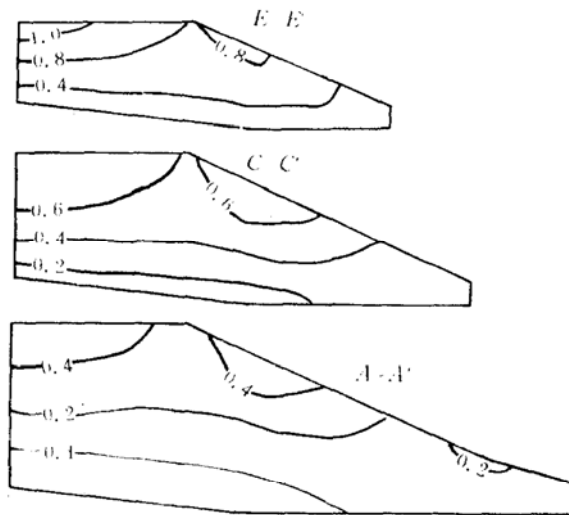


图4 地震结束时孔隙水压力比(p/σ_m)等值线图

图5上示有地震期以及震后某些结点的孔隙水压力上升和消散过程线以及坝顶第76号结点的沉降过程线。可以看出, 这两个结点在地震结束后残余孔隙水压力还是继续上升一段时间, 这主要是坝体内高孔隙水压力区扩散的结果。另外, 坝顶的沉降主要发生在地震后的消散期间。

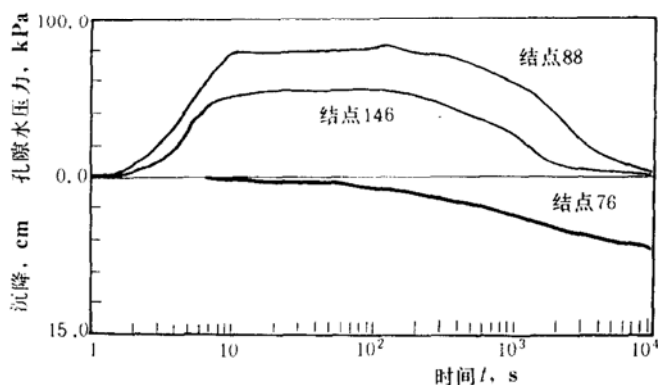


图5 孔隙水压力消长和坝顶沉降曲线

图6上示有按二维问题计算得到的孔隙水压力值与按三维问题计算得到的孔隙压力值之比(p_{2D}/p_{3D})的等值线图。可以看出, 在主断面A-A'的坝坡表面区域, 按二维问题计算得到的孔隙水压力值为按三维问题计算的1.1—1.2倍, 而这一区域特别容易液化。所以, 对于主断面来说, 二维分析要比三维分析偏于安全。

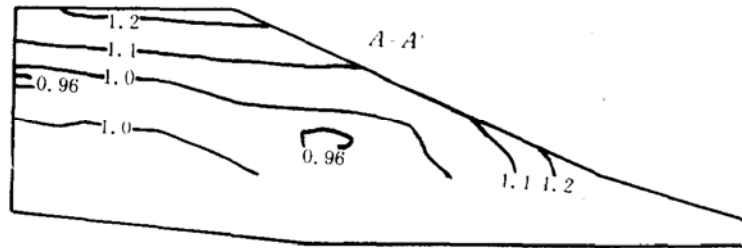


图6 二维和三维分析的孔隙水压力比值(p_{2D}/p_{3D})分布图

五、结 语

本文把饱和砂土看成是二维两相体系, 不仅真实反映了土石坝的形状和边界条件, 可以计算整个坝体的动力反应, 而且考虑了土骨架与孔隙水之间的耦合作用, 使动力分析的结果更接近实际情况, 更加合理。另外, 由于在非线性应力应变关系中引进了振动引起的孔隙水压力, 从而可以计算振动孔隙水压力的增长和坝体沉降的发展过程。

参 考 文 献

- [1] Mejia, L. H. , Seed, H. B. & Lysmer, J. , Dynamic Analysis of Earth Dam in Three Dimensions, J. Geoth. Eng. Div. , ASCE, Vol. 108, GT12, pp. 1586—1604.
- [2] Prevost, J. H. , Abdel-Ghaffar, M. , Lacy, S. J. , Nonlinear Dynamic Analysis of An Earth Dam, J. Geoth. Eng. Div. , ASCE, Vol. 111, No. 7, 1985, pp. 882—897.
- [3] 周 健、徐志英, 土(尾矿)坝的三维有效应力动力反应分析, 地震工程与工程振动, Vol. 4, No. 3, 1984, pp. 60—70.
- [4] 徐志英、周 健, 土坝地震孔隙水压力产生、扩散和消散的三维动力分析, 地震工程与工程振动, Vol. 5, No. 4, 1985, pp. 57—72.
- [5] Biot, M. A. , Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media, J. Appl. Phys. , 1962, pp. 1483—1498.
- [6] Hardin, B. O. , Drnevich, V. P. , Shear Modulus and Damping in Soil: Design Equations and Curves, Proc. ASCE, No. SM7, 1972, pp. 667—692.
- [7] Seed H. B. , Martin, P. P. , Lysmer, J. , Pore-water Pressure Changes during Soil Liquefaction, Proc. ASCE, No. GT4, 1976, pp. 323—346.
- [8] Duncan, J. M. , Chang, C. Y. , Nonlinear of Stress and Strain in Soils, Proc. ASCE, No. SM5, 1970, pp. 1629—1654.