

坝基粉煤灰透水层的动力试验及分析

段瑞明

(华东电力设计院,上海 200063)

摘要 结合洛河电厂二期灰坝工程设计,对利用粉煤灰作为灰坝与复合地基之间的透水层材料进行动力试验及分析.在前期所做的透水层粉煤灰静力试验基础上,对动力试验方案进行优化,筛选出透水层粉煤灰满足液化强度要求的级配、相对密度,建立了透水层粉煤灰不同围压时的统一液化公式.利用最大孔隙水压力对孔隙水压力进行归一化,提出粉煤灰振动孔隙水压力公式和动力残余应变公式.在试验基础上,提出了粉煤灰坝的动力有限元计算方法,在粉煤灰的非线性应力应变关系中引入了振动应变项,从而可计算出地震期间和地震后透水层粉煤灰孔隙水压力的增长、扩散和消散及土的残余变形发展的全过程.调试了适合粉煤灰与黏土共同作用在灰坝内的二维、三维动力协同分析方程,对灰坝的两种工况进行二维有效应力动力反应计算分析,证明了粉煤灰取代砂子作为透水层材料是完全可行的.

关键词 粉煤灰 坝基透水层 动力试验

中图分类号:TV42+3;TU411.8 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2005)S2-0018-03

在洛河二期灰坝设计中,根据地基条件,需要在均质土坝和复合地基之间铺设一层透水垫层,考虑到当地砂料造价远高于粉煤灰,二期灰场又紧邻一期灰场,以一期灰场粉煤灰作为透水层取代砂,既可大大降低工程造价,变废为宝,又能扩大一期灰场的库容量.由于粉煤灰颗粒细、密度小、孔隙比大、不具塑性,在静力和地震作用下极易产生流动性的液化破坏,作为筑坝材料其稳定性究竟如何,需作系统的试验研究.

同济大学和华东电力设计院受淮南洛河电厂委托,对用粉煤灰代替砂子作为坝体透水材料这一课题进行了系统研究,首先对粉煤灰进行室内静动力试验,建立了数学模型,然后对灰坝进行静动力分析和渗流、稳定分析,为优化坝型和施工图设计提供了依据.

具体工作内容如下:①通过大量试验,首先确定粉煤灰的静态应力应变模型、静态孔压模型;其次,在动力作用下,通过优化试验方案,寻找满足抗液化强度要求的粉煤灰级配、相对密度,建立粉煤灰抗液化强度公式,研究粉煤灰孔压发展规律,确定孔压模型及其参数,确定粉煤灰的动模量、阻尼比参数;研究粉煤灰的动残余变形规律,确定动残余变形公式及参数.②在初步确定的坝型结构基础上,通过上述试验以及初

步计算,逐步优化坝型结构,最后确定出在复合地基基础上的土-灰混合坝型结构.③利用渗流计算程序,分别计算灰坝在施工和运行情况下的渗流浸润面,为下一步的坝坡稳定计算以及有效应力静动力分析服务.④利用坝坡稳定分析计算程序,分别对灰坝在施工和运行两种情况下进行稳定分析计算.⑤在满足坝坡稳定前提下,利用二维、三维有效应力静动力稳定分析程序,在地震作用下,对灰坝在施工和运行两种情况下进行液化分析.⑥通过试验和计算分析,为优化灰坝提供了施工图设计依据,并作了经济分析比较.

1 粉煤灰动力性质试验

1.1 试验方案的确定

粉煤灰颗粒级配离散性很大,中、粗、细分别依排灰口从近到远分布.首先必须明确用什么样的灰筑坝才能满足抗液化要求.为此,参照其他工程中粉煤灰动力指标,通过总应力法计算初选满足筑坝要求的粉煤灰.通过初步计算,7度地震烈度下液化时最大动剪应力比不超过0.2,而要保证所选粉煤灰满足抗液化要求,其抗液化强度应力比与总应力法计算得到的最大动剪应力比值必须大于1.0,故所选粉煤灰抗液化强度应力比 $\sigma_d/(2\sigma_3)$ 大于0.2.

作者简介:段瑞明(1950—),男,上海人,高级工程师,硕士,从事水工结构设计研究.

为了选取抗液化强度应力比 $\sigma_d/(2\sigma_3)$ 大于 0.2 的粉煤灰, 选料试验首先在粗、中、细灰料中进行, 在 $\sigma_d/(2\sigma_3)-N$ 曲线中看出, 相对密度在 0.65、固结比 $K_c = 1.0$ 时细灰抗液化强度比明显低于 0.2, 因此完全用细灰作透水材料是不可行的。接下来对中灰及粗灰进行配比, 考虑实际工程中掺入细灰的不可避免性, 因此透水材料暂按粗: 中: 细分别为 3:4:3 及 2:3:5 两种配制, 分别称为 343 号灰和 235 号灰。从 $\sigma_d/(2\sigma_3)-N$ 曲线图中看出, 相对密度 0.5~0.65 的 235 号灰曲线在 $\sigma_d/(2\sigma_3) = 0.2$ 以上。试验表明 343 号灰抗液化强度明显高于 235 号灰, 而 235 号灰在 $D_r = 0.5$ 时已经能够满足抗液化强度要求。

透水垫层材料选用 235 号灰, 相对密度控制在 0.5 时, 分别用 3 种不同固结比进行试验, 建立起统一的抗液化强度判别公式及相应的参数。

第二阶段主要围绕 235 号灰做动力强度试验、孔压试验、动残余变形试验, 分别建立起动孔压模型、动残余应变模型, 并确定动剪模量及阻尼比。

1.2 试验内容

a. 共振柱试验。测定灰的动剪切模量 G 、阻尼比 D 及孔压比随剪应变变化曲线。

b. C, K, C 循环三轴试验。测定灰在不同固结比 ($K_c = 1, 1.5, 2.0$) 时的抗液化强度和孔隙水压力上升曲线。

c. HX-100 型电液伺服循环三轴试验。测定灰料在不同固结比 ($K_c = 1, 1.5, 2.0$) 时的振动残余变形。

1.3 试验结果

a. 动剪应力比 $\sigma_d/(2\sigma_3)$ 与液化破坏振次 N_f 关系。动强度通常以动剪应力 ($\sigma_d/2$) 与有效平均固结应力 σ_3 之比表示, 先建立起 $\sigma_d/(2\sigma_3)-N_f$ 关系曲线。

b. 动剪切模量与剪应变 γ 可以由共振柱实验测得 $G_d-\gamma_d$ 关系曲线。

c. 孔压比与剪应变变化曲线由共振柱实验测得 $D_r-\gamma_d$ 关系曲线。

d. 孔隙水压力比与循环振动次数比关系曲线。孔隙水压力比定义为 U/U_f (当 $K_c = 1.0, U_f = \sigma_3$)。循环振次比定义为 N/N_f , 可得出 $U/U_f-N/N_f$ 曲线。

e. 轴向应变与循环振次比的关系。试验获得了 $K_c > 1.0$ 时轴向应变与循环振次比的关系。本试验中轴向应变主要由残余应变与弹性应变之和组成, 其中残余应变为主。

2 设计方案优化

2.1 优化内容

设计方案优化包括材料优化、数学模型、计算程

序优化, 以及坝的结构优化。

透水材料优化是通过室内土工试验寻找大于某一不液化的粉煤灰级配相对密度、施工速率及方法实现。数学模型优化是建立在不液化的粉煤灰的动力试验基础上, 寻找出更接近于材料性能的数学力学模型。主要建立起合适的抗液化强度公式、动残余强度公式以及动剪切模量、阻尼比系数等。

计算程序是以著名的皮奥 (Biot) 波动方程为基础, 同时考虑粉煤灰的非线性性质, 用空间等参有限元法求解位移和残余孔隙水压力, 提出一种适用于土与粉煤灰共同作用于坝内的非线性二维有效应力方法。该法不仅可以计算粉煤灰与黏土混合坝型的地震动应力、动应变、加速度, 而且还可以计算地震期和地震后孔隙水压力增长、扩散、消散、液化的发生发展过程。粉煤灰的残余体积变形及其随时间的变化规律。

透水层采用一期灰场内的粉煤灰, 其透水系数一般在 10^{-4} cm/s 左右, 与砂性土相接近。垫层铺垫宽度为坝横断面长度的 4/5, 近上游库内 1/5 区域内仍用黏土作为隔水体, 以防止上游水位浸入, 形成透水坝。垫层下面铺 1 层土工布, 以增强水平抗剪能力以及整体抗液化能力。

2.2 动力分析研究工作顺序

动力分析研究工作顺序见图 1。

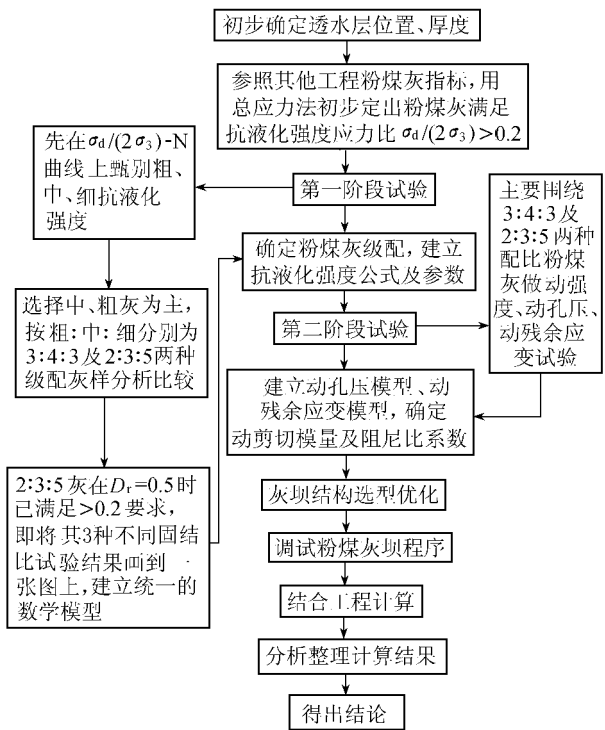


图 1 动力分析研究工作顺序框图

3 计算参数的确定

3.1 静力计算参数

灰坝的抗液化强度和孔隙水压力的发展都与震

前的初始应力有关,为了进行动力分析和液化判别,首先必须进行静力分析.采用邓肯-张双曲线模型进行震前静力有限元分析.该模型的割线模量为

$$E_s = KP_a \left(\frac{\sigma_a}{P_a} \right) \left[1 - \frac{R(1 - \sin \varphi')}{2C' \cos \varphi' + 2\sigma_3 \sin \varphi'} \right] \quad (1)$$

3.2 动力计算参数

室内共振柱试验资料表明,坝体材料的动剪模量 G 与有效应力有关,并与动剪应变有着非线性关系,阻尼系数 D 与动剪应变也有着非线性关系.因此,在计算中确定采用哈定等的计算模型:

$$G = \frac{G_{\max}}{1 + \gamma_h} \quad (2)$$

$$D = D_{\max} \frac{\gamma}{1 + \gamma_h} \quad (3)$$

$$G_{\max} = 218.8 K_{2, \max} (\sigma_m)^{0.5} \quad (\text{kPa}) \quad (4)$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma}{\gamma_r} \quad (5)$$

根据共振柱试验确定 $K_{2, \max}$ 与 $D_{\max}$.

3.3 振动孔隙水压力计算参数

坝体、坝基材料在初始剪应力情况下以及在动荷载作用下发生的孔隙水压力变化实际上反映了材料内强度的变化.根据孔压试验,可知孔隙水压力的增长规律不仅与循环振次比有关,而且还与动应力比的大小密切相关,由试验得孔隙水压力模式:

$$\frac{U}{U_f} = \frac{N/N_f}{a + b(N/N_f)} \quad (6)$$

增量形式为

$$\Delta U = \frac{aU_f}{N_f[a + b(N/N_f)]^2} \Delta N \quad (7)$$

3.4 动残余应变计算参数

由于坝体内初始剪应力大于零,因此必须建立动残余应变公式:

$$\epsilon_p = m \frac{20}{\pi} \arcsin \left(\frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{2am}} \quad (\%) \quad (8)$$

将上述公式对时间 t 求导,写成增量形式

$$\Delta \epsilon_p = \frac{m \epsilon_p}{\frac{\pi}{10} m a N_f \sqrt{1 - \left(\frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{a}}}} \left(\frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{2am} - 1} \Delta N \quad (9)$$

4 静动力分析计算步骤

在有限元差分方程式中,右端荷载项内包括了地震引起的孔隙水压力增量 Δp_g ,通过动力分析加以求得.

当考虑孔隙水压力的产生、扩散及消散作用进行动力分析时,由于需要计算在地震过程中孔隙水压力的增量 Δp_g ,所以整个地震过程必须分段进行.

具体计算步骤如下:①首先进行静力计算,用静力有限单元法和邓肯-张割线模量公式,求出每一单元的非线性静应力和每一单元的应力水平.一般需迭代 2~3 次.②考虑土和粉煤灰的动力非线性性质有区别,用哈定和达尼维奇公式计算各自的动剪切模量 G 和阻尼系数 D .③用逐步积分法求解动力方程 $M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + K\delta = F(t)$.④计算这一时段的平均动剪应力 $\tau_{av} = 0.65 \tau_{\max}$.⑤计算这一时段每一单元的应力比 τ_{av}/σ'_0 ,根据 $\sigma_d(2\sigma_3)-N_f$ 曲线并考虑室内三轴试验与现场液化应力比之间的修正关系求出液化周数 N_l .⑥计算这一时段的等效周数 N_{eq} .⑦计算这一时段每一单元的孔压增量 Δp_g 和残余应变增量 $\Delta \epsilon_p$,并计算由此引起的右荷载项.⑧求解联立方程组,解出每一结点的残余位移和残余孔隙水压力.⑨计算平均有效应力 $\sigma'_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 - P$,计算新的考虑到孔压增加坝材软化的剪切模量 G ,作为下一时段第一次迭代用的模量,并用这一时段的平均剪应变计算新的阻尼系数,作为下一时段第一次迭代用的阻尼系数 D .⑩重新进行静力计算.⑪对于下一时段,重复步骤③~⑩,直至地震结束.⑫地震结束后,继续分段进行消散计算,直至残余孔隙水压力完全消散或甚小,残余位移不再增长或增长甚微为止.

5 工程算例

5.1 计算简图与单元划分

a. 确定计算简图.按施工及运行两种工况确定计算简图.

b. 有限单元划分.按施工及运行两种工况划分有限单元.施工工况共分 267 个单元,295 个结点;运行工况共分 288 个单元,316 个结点.一次单元划分后,可以做静力稳定分析、动力稳定分析之用.

5.2 地震曲线

电厂工程处委托安徽省地震局作了二期工程地震工作,提供了超越概率地震动参数及地震时地面加速度曲线.最大加速度为 0.1 g,发生在 2.1 s 及 5.4 s 处.见表 1.

表 1 地震动参数

地震动 概率	地震加速度/(m·s ⁻²)		地表 裂度
	基岩	地表	
50 年 3%	1.6340	1.8443	7.2
100 年 3%	2.3012	2.2437	7.4

5.3 计算结果

a. 有限元计算结果图形包括:应力 σ_x 等值线,应力 σ_y 等值线,应力 τ_{xy} 等值线,应力水平等值线,沉降等值线(自重),结点加速度反应(下转第 76 页)

已建的公共建筑、集中住宅区可通过逐步改造来实现中水回用,有条件的地区可以结合城市污水处理厂的建设,将污水厂二级出水处理回用,实现区域性的中水回用。中水回用减少了污水排放量,符合减量化原则和水资源循环使用原则,符合可持续发展思想^[6],必将在我国拥有广阔的发展前景。

参考文献：

[1] 吴松平, 古国榜, 胡有勇. 中水回用[J]. 水处理技术, 2002, 28(6): 370-372.

[2] 姜建军. 节约水资源与中水回用系统[J]. 云南环境科学 2001, 20(4): 15-16.
[3] 汪良珠. 大型公共建筑中水回用[J]. 中国资源综合利用 2002(12): 14-16.
[4] 北京市城市节约用水办公室. 中水工程实例及评析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
[5] 张雅君, 冯萃敏, 孟光辉. 北京中水设施运行中存在的问题及解决措施[J]. 给水排水, 2003, 29(11): 63-66.
[6] 赵新华, 李长洪, 肖迪. 高校校园中水回用的研究与规划[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(3): 63-65.
(收稿日期: 2005-09-18 编辑: 高建群)

(上接第 20 页)

过程曲线, 单元动剪应力反应过程曲线, α 向加速度等值线, 最大动剪应力比等值线, 孔压比等值线, 残余沉降等值线(动)。

b. 7 度地震烈度时算得洛河配比为 2:3:5、 $D_r = 0.5$ 的粉煤灰垫层孔隙水压力甚小, 不会液化。

c. 洛河配比为 2:3:5、 $D_r = 0.5$ 的粉煤灰填筑在坝内其他部位, 7 度地震烈度时也不会发生液化。

6 结 语

a. 本文在对粉煤灰试验方案优化的基础上, 建立了透水层粉煤灰在不同围压时的统一液化公式。利用最大孔隙水压力对孔隙水压力进行归一化, 提出了透水层粉煤灰振动孔隙水压力公式, 并建立了动力残余应变公式。

b. 计算结果说明 7 度地震烈度时计算得到的粉煤灰垫层孔隙水压力甚小, 表明灰坝透水垫层采用粉煤灰取代砂子的方案即使在 7 度地震烈度时也是可行的。

c. 试验及计算表明, 洛河配比 2:3:5、 $D_r = 0.5$ 的粉煤灰不仅可作为坝内透水层材料, 在有护坡及有效措施下也可填筑在坝内其他部位。7 度地震烈度时不会发生液化。

d. 以粉煤灰作为透水层取代砂, 既可大幅度降低工程造价, 变废为宝, 又能扩大挖取粉煤灰灰场的库容量。经分析比较, 可节约工程造价超千万元。

e. 洛河二期灰坝安全运行 10 多年, 实践证明以粉煤灰作为透水层取代砂的工程实例是值得推广应用的。

参考文献：

[1] SDS01—79, 土工试验规程[S].
[2] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.

[3] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
[4] 华东水利学院土力学教研室. 土工原理与计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1980.
[5] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科技出版社, 1990.
[6] 张德兴. 有限元素法新编教程[M]. 上海: 同济大学出版社, 1989.
[7] 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[J]. 地震工程与工程振动, 1985, 5(4): 57-72.
[8] 汪闻韶, 秦蔚琴. 电厂粉煤灰的强度和液化特性以及对贮灰场设计的看法[C]//全国土工建筑物及地基抗震学术讨论会论文集, 1986: 156-161.
[9] 郭佩玖, 胡成. 粉煤灰的动力特性及动力分析[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(5): 83-85.
[10] 曾国熙, 顾尧章, 吴建平. 粉煤灰的动剪切模量[J]. 岩土工程学报, 1985, 7(2): 1-9.
[11] SEED H B, IDRISES I M. Analysis of soil liquefaction Niigate earthquake[C]//J. SMFD, Proc. ASCE, 1967, 93(SM3): 83-108.
(收稿日期: 2005-09-18 编辑: 高建群)

