

# 某沥青混凝土心墙砂砾石坝动力分析及抗震设计

陈 贺 珏

(浙江省台州市水利水电勘测设计院,浙江台州318000)

**摘要:**新疆某碾压式沥青混凝土心墙砂砾石坝最大坝高106 m。采用等价线性弹性动力本构模型对该坝进行了三维非线性有限元分析,计算出坝体的地震加速度、地震动位移、地震动应力和地震永久变形。计算表明,大坝总体上的地震反应不大,结果符合一般规律,表明该坝设计基本合理,具有较好的抗震性能。最后结合已建工程经验进行大坝抗震设计,从大坝布置优化和断面设计、坝顶区域加固等方面,提出了大坝抗震措施,分析结果可为同类工程提供参考。

**关 键 词:**沥青混凝土心墙;砂砾石坝;三维有限元法;动力反应

中图法分类号:TV431

文献标志码:A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.S1.040

土石坝由于能适应不良地质和高地震烈度,正在而且将要成为高坝建设的主流坝型。沥青混凝土作为土石坝防渗材料始于20世纪30年代,由于沥青混凝土具有相当的延展性、耐久性和良好的防渗性能,因而在土石坝工程中很快得到应用并推广<sup>[1]</sup>。特别是对于缺乏防渗土料、气候恶劣、地质条件较差和交通不变地区的土石坝,沥青混凝土几乎是防渗材料的不二选择。近年来,随着茅坪溪、冶勒、尼尔基等以沥青混凝土为防渗料的大坝修建完工,该技术逐渐走向成熟,沥青混凝土心墙土石坝已成为当前坝工建设的热点坝型<sup>[2]</sup>。我国建设的沥青混凝土心墙土石坝中,多数位于强震区,如已建成的南桎河上的冶勒坝和在建的大渡河上的龙头石大坝。因此,研究沥青混凝土心墙土石坝的抗震特性并进行合理的抗震设计,是确保工程安全的关键。

## 1 工程概况

某沥青心墙砂砾石坝工程位于我国新疆,设计最大坝高为106 m,大坝为2级建筑物,坝顶全长312.51 m,坝顶宽10 m,坝体最大底宽约392 m。坝体上游坡比为1:2.2,下游坡比为1:2.0,坝基座落于冲积砂砾层,沥青混凝土心墙基座座落于弱风化砾岩及泥岩上。

沥青混凝土心墙位于坝轴线上游,心墙轴线距坝轴线3.25 m。心墙顶部厚0.50 m,底部厚1.5 m,与基座连接处加厚至2.5 m。根据规范要求,该工程按乙类工程抗震设防,抗震设计烈度采用场地基本烈度Ⅷ度,水平向设计地震加速度代表值采用危险性分析结果,即库坝区采用0.184 g,特征周期为0.4 s。大坝典型横剖面见图1。

## 2 三维地震反应分析

### 2.1 土石坝地震动力分析基本原理

用来描述土石料特性的动力本构模型有双线性、黏弹性和弹塑性等多种。其中,等效线性模型因其具有概念明确、应用方便的优点,目前在有限元动力计算中得到了广泛的运用,比如Hardin-Drnevich双曲线本构模型<sup>[3]</sup>。

Hardin等人由试验得出,土在周期荷载作用下的应力应变骨干曲线为双曲线型,其表达式可写为

$$\tau_d = \frac{\gamma_d}{\frac{1}{G_0} + \frac{\gamma_d}{\tau_y}} \quad (1)$$

式中, $G_0$ 为起始剪切模量; $\tau_y$ 为最大动剪应力。将 $G_0$ 坡度线与 $\tau_y$ 水平线交点的横坐标称为参考应变 $\gamma_f$ ,则

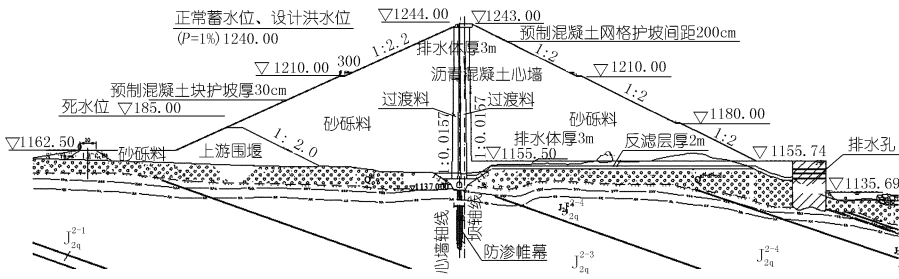


图 1 大坝典型横剖面

$\gamma_f = \tau_y / G_0$ , 可得

$$G_d = \frac{\gamma_d}{1 + \frac{\gamma_d}{\gamma_f}} G_0 \quad (2)$$

可见,只要根据试验曲线确定了  $G_0$  和  $\tau_y$ ,即可求相应于任意动剪应变  $\gamma_d$  的剪切模量  $G_d$ 。 $G_0$  和  $\tau_y$  可由动单剪试验求得,或者利用 Hardin 等人提出的一些经验公式算出。

2.2 动力分析方法

土体在静力状态下的初始应力对土石坝的动力反应有较大影响,在静力计算中,土体的本构关系采用常用的邓肯 E - B 非线性弹性模型。在动力分析中,土石体的动力本构关系采用应用广泛、参数确定有丰富经验的等效线性模型<sup>[4]</sup>。

等价线性法是在土石坝地震反应分析中应用较广的一种简化方法。其本质是一种线性分析方法,但是通过迭代的方法可使计算最终采用的土石料剪切模量和阻尼比值适应于实验室给出的模量和阻尼比随应变幅变化的非线性曲线。第一次动力迭代时,采用静力计算结果,根据各单元的剪应变  $\gamma_1$  由 Hardin 模型计算出相应的模量和阻尼比,按线性分析方法求解运动方程。这样就求解出了这个地震时段中坝体各单元的剪应变时程,由于这个值是不断变化的,无法与  $\gamma_1$  进行比较,为此假定一个等价的不变的剪应变  $\gamma_{eq}$  来代替这一变化的时程,一般取为

$$\gamma_{eq} = 0.65 \gamma_{max} \quad (3)$$

式中,0.65 为转换系数,带有一定的经验性,一般都在 0.55 ~ 0.75 之间<sup>[5]</sup>,  $\gamma_{max}$  为单元剪应变时程中的最大值。

随后将各单元计算的等价剪应变  $\gamma_{eq}$  同原来假定的  $\gamma_1$  的数值相比较,若相差较大,则进行第二次迭代。第二次迭代即是用第一次迭代求得的等价剪应变  $\gamma_{eq}$  按照 Hardin 模型重新求得剪切模量和阻尼比,再进行计算,直至算得的各单元的等价剪应变值与假定剪应变值相差不超过某一百分数(例如 5%),或达到预先规定的迭代次数为止。本文中选择收敛准则为各单元

的等价剪应变值与假定剪应变值相差不超过 5%。

2.3 计算模型和参数

采用三维有限元网格对包括地基在内的大坝整体模型进行剖分,剖分时主要采用 8 节点六面体单元。整体模型单元总数共 26 523 个,节点总数 28 032 个。

在沥青混凝土心墙与过渡层之间、混凝土基座与心墙之间以及坝体相交处设置接触单元,模拟接触关系。有限元模型见图 2 和图 3。

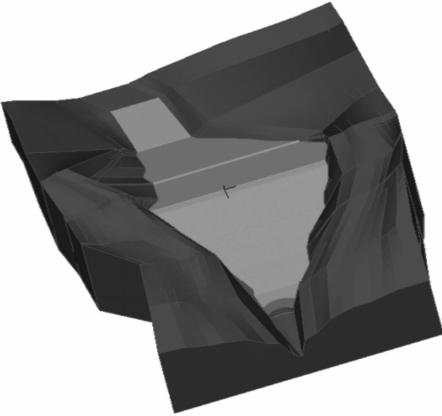


图 2 坝体(包括地基)三维实体模型

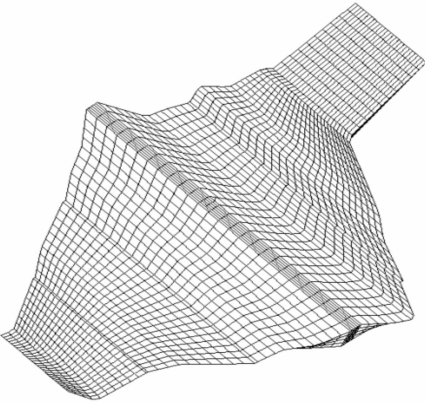


图 3 坝体有限元网格

坝体各分区材料的邓肯 E - B 静力计算参数见表 1,等价线性模型动力参数见表 2。廊道混凝土和基岩视为线弹性材料,根据规范规定,动弹性模量取为静弹性模量的 1.3 倍。

大坝抗震设计烈度采用场地基本烈度Ⅷ度,水平向设计地震加速度代表值采用危险性分析结果,即库坝区采用 0.184 g,特征周期为 0.4 s,其余参数如下。

设计地震动参数                      50 a 超越概率 10%

$A_{\max}(\text{gal})$	184.3gal
$\beta$	2.4
$T_g$	0.40s
$\alpha_h$	0.184g

表1 大坝各分区材料静力计算参数

材料名称	$\gamma_d/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	$K$	$n$	$R_f$	$K_b$	$m$	$\varphi_0/(\text{^\circ})$	$\Delta\varphi/(\text{^\circ})$	$\varphi$	$C/\text{MPa}$
沥青混凝土	2.41	455	0.46	0.78	2171	0.56			27.7	0.54
过渡料	2.15	742	0.63	0.89	620	0.21	45	5		
砂砾石料	2.23	1046.8	0.36	0.70	538.7	0.16	53.1	9.6		
排水料	2.1	643	0.21	0.78	570	0.17	42	4		
河床覆盖层	2.0	1100	0.45	0.68	458	0.23	32.6			
左岸阶地砂砾石层	2.1	800	0.40	0.65	430	0.27	35.4			

表2 大坝各分区材料动力参数

材料名称	$K'$	$n'$	材料名称	$K'$	$n'$
沥青混凝土	6503	0.48	过渡料	1020	0.56
砂砾石料	6224	0.37	排水料	980	0.51

为详细研究大坝的地震动力反应,分别选用《水工建筑物抗震设计规范 DL5073-2000》中的标准反映谱(规范谱)和该大坝所在场地反应谱(场地谱)反演人工地震波作为地震输入,规范谱反演出的人工波时程如图4所示。下文各计算结果未注明的,均表示这两种谱的最大值

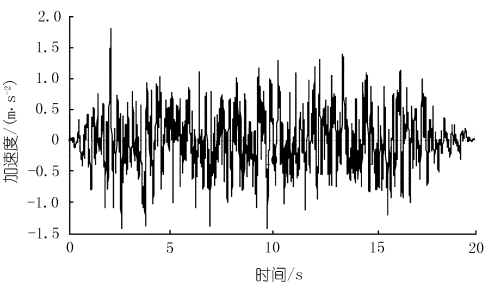


图4 规范谱人工波时程

2.4 计算成果分析

(1) 在两条人工地震波作用下,坝体动力反应的加速度最大值大多发生在坝顶附近(图5),各向加速度最大放大倍数为2.48,最小为1.94,符合百米级土石坝的一般规律。这说明在地震作用下,坝顶是一个容易失稳的部位,应引起注意。

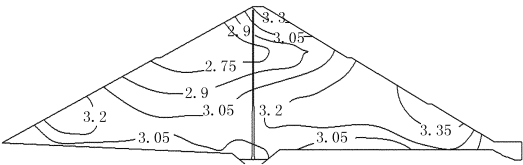


图5 坝体最大剖面顺河向最大绝对加速度(m/s²)

(2) 心墙动力反应的最大加速度也都发生在心墙的顶部位置,各向加速度最大放大倍数为2.46,最小为1.90。

(3) 在地震作用下,沥青混凝土心墙都会产生一定的拉应力,但值不大(图6)。心墙动应力最大值:顺河向动拉应力70.46,79.13 kPa;竖直向拉应力149.98,106.56 kPa;横河向拉应力149.37,211.88,174.1 kPa;考虑动拉应力与静应力叠加后,心墙全部处于受压状态。(前一数值为规范谱结果,后一数值为场地谱结果)

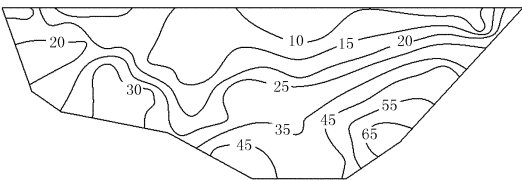


图6 沥青混凝土心墙顺河向最大动拉应力等值线图(规范谱)(kPa)

(4) 坝体永久位移分析。坝体在设计地震作用下的最大震陷位移为31.6 cm。从坝体永久变形判断,大坝的抗震安全性是有保障的(图7)。

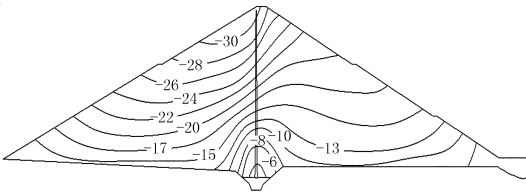


图7 大坝最大横剖面沉陷永久位移等值线图(cm)

(5) 根据计算结果,在地震作用下,坝顶及坝顶附近坝坡区域的加速度反应是比较大的,此区域的砂砾石坝体在地震作用下有可能产生局部的松动、滑落,坝体的地震破坏也多集中在坝顶,所以坝顶1/5或1/4坝高范围内的坝体是抗震的关键部位,建议在该区域采取适当的抗震加固措施。

3 抗震设计

土石坝的地震响应和抗震安全计算等方面已经取得了很大进展,但是对土石坝的一些主要震害如开裂、不均匀沉降以及渗漏等,还难以通过三维动力计算准确地进行预测。根据相关工程经验,大坝的枢纽布置、坝型、筑坝材料和结构型式、坝体剖面等诸多方面都对大坝的抗震能力有一定的影响。所以,沥青混凝土心墙砂砾石坝应在动力分析法的基础上,结合同类型工程经验进行抗震设计。

3.1 坝型及筑坝材料设计

该工程位于新疆地区,通常缺少优质防渗土料,同时气候条件较为恶劣,冬季严寒,冰冻影响严重,而夏季又有强日光辐射,气温年变化和日变化十分悬殊,且坝址区地震烈度较高,使得面板堆石坝、混凝土坝往往处于较为不利的工作状态。新疆有着丰富的石油资源,沥青材料来源便利,考虑到沥青混凝土作为防渗体位于坝体内部,受外界气候的影响小,并具有较强的柔性和变形能力,抗震性能好,经比选,该工程采用沥青混凝土心墙砂砾石坝方案。

对于土石坝而言,提高填筑料的压实标准是保证施工质量的重要措施。该工程在沥青混凝土心墙两侧设过渡层,厚 3~4 m,材料最大粒径不大于 120 mm,填筑施工压实度不小于 1.0。坝壳砂砾石采用振动碾压实施工,要求砂砾石具有满足规范要求的粒径和级配。

3.2 坝体结构的抗震措施

水库正常蓄水位 1 240.0 m,大坝超高按规范的相关规定进行计算。结果表明,正常蓄水位+地震工况为控制情况,计算的坝顶高程为 1 244.2 m。大坝的坝顶宽度、坝坡坡率及马道设置均适应大坝防震的需要。大坝坝顶宽度为 10 m;坝体上游坝坡坡比为 1: 2.2,并于 1 210.00 m 高程处设置 3 m 宽马道;下游坝坡坡比为 1: 2.0,并于 1 210.00,1 180.00 m 高程处设 3 m 宽马道。

根据三维地震动力计算成果,在强震作用下,该沥青混凝土心墙砂砾石现在坝顶位置动力反应强烈。参考同类型工程的经验,需在该区域设置抗震加固措施,即在大坝上下游坝体 1 220.0 m 高程以上设置柔性抗震土工格栅和混凝土网格护坡。根据计算成果,混凝土基座附近出现了较大的动拉应力,该处为不同刚度材料的结合部,容易出现裂缝。为避免因裂缝而产生渗漏,设计了一定的防渗措施:一方面优化基座的结构形式,同时在基座表面涂刷防水堵漏剂,增强开裂后基

座裂缝的自愈能力。

4 结 语

本文采用等价线性弹性本构模型对某沥青混凝土砂砾石坝进行了三维地震动力分析,并将三维地震动力法的计算成果应用于该大坝的抗震能力评价中,并在大坝总体布置、坝型选择、筑坝材料选择、结构设计和抗震加固措施中加以考虑。计算结果显示,坝体的动力反应值符合类似工程经验,表明其设计基本是合理的。坝顶附近区域往往是地震响应较大的区域,地震作用下此处的砂砾石坝体有可能产生局部的滑落、松动破坏,一般而言,坝顶 0.2 或 0.25 倍坝高范围是土石坝抗震的关键部位,故此在该区域采取专门的抗震加固措施。

土石坝的抗震安全研究是一个非常复杂的工程问题,既包括对未来地震活动的预测评价,也包括对坝体、坝基材料在静力动力条件下物理力学性能的确定。虽然目前对于土石坝抗震评价的研究已取得了很大进展,但很多的参数还难以精确获得,使得计算结果只能作为工程设计的参考。在实际工程中,通过数值模拟和模型试验相结合来评估大坝地震响应,并充分利用已有工程经验进行工程抗震设计是十分有必要的。

参考文献:

[1] 张怀生.水工沥青混凝土[M].北京:中国水利水电出版社,2005.  
[2] 汪明元,周欣华,包承纲,等.三峡茅坪溪高沥青混凝土心墙堆石坝运行性状研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(7):1471-1477.  
[3] 倪汉根,金崇馨.大坝抗震特性与抗震设计[M].大连:大连理工大学出版社,1994.  
[4] 顾淦臣.土石坝地震工程[M].南京:河海大学出版社,1989.  
[5] 朱晟.沥青混凝土心墙堆石坝三维地震反应分析[J].岩土力学,2008,29(11):2934-2937.  
[6] 中国水电水利科学研究院.DL5073—2000 水工建筑抗震设计规范[S].北京:中国电力出版社,2001.  
[7] 祁世京.土石坝碾压式沥青混凝土心墙施工技术[M].北京:水利水电出版社,2000.

(编辑:郑毅)