

# 本构模型参数对土石坝沥青混凝土心墙位移的影响研究

王建祥

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 沥青混凝土心墙坝是土石坝的主要坝型之一,因其具有多种优点而得到广泛应用。针对新疆某沥青混凝土心墙坝进行了有限元计算,分析了邓肯-张  $E-\mu$  模型参数对沥青混凝土心墙的最大水平和竖向位移的影响,为邓肯-张模型参数取值和计算分析提供参考和依据。

**关键词:** 邓肯-张模型; 沥青混凝土心墙; 位移; 土石坝

中图分类号: TV641

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)06-0094-03

## Influence of parameters of constitutive model on displacement of asphalt concrete core wall for earth-rock dam

WANG Jianxiang

(College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** Asphalt concrete core-wall dam is one of the main earth-rock dams. It has been widely used because of its many advantages. The paper carried out the calculation of asphalt concrete core-wall dam in Xinjiang by finite element method, analyzed influence of parameters of Duncan-Chang  $E-\mu$  model on maximum horizontal and vertical displacement of asphalt concrete core wall, and provided reference and basis for the parameters selection, calculation and analysis of Duncan-Chang model.

**Key words:** Duncan-Chang model; asphalt concrete core wall; displacement; earth-rock dam

沥青混凝土心墙堆石坝是土石坝的主要坝型之一<sup>[1]</sup>。大坝主体由堆石或砾石组成,中间设置沥青混凝土心墙起防渗作用<sup>[2-4]</sup>。将沥青、矿料与掺合料等原材料按适当比例配合,经加热拌和均匀后,再经过压实或浇筑等工艺成型的沥青混凝土具有良好的适应变形能力、抗冲刷能力、抗老化能力、裂缝自愈能力、严寒条件下亦可施工以及整个心墙无须设置结构缝等优点<sup>[5-6]</sup>。因此,沥青混凝土被广泛的应用于水工结构防渗体上,在有限元分析中,邓肯-张模型在国内外得到了广泛的应用。但在沥青混凝土心墙中的应用还相对较少,其模型的参数对计算结果的影响等问题的研究则更少。

本文采用邓肯-张  $E-\mu$  模型,对新疆某沥青混凝土心墙坝进行有限元数值模拟计算,并对计算结果进行了分析,研究了模型的参数对沥青混凝土心墙的最大水平和竖向位移的影响,为同类工程的本构模型参数取值和计算提供依据。

## 1 计算模型

仿真试验模型见图1,拦河坝为沥青混凝土心墙坝。大坝正常蓄水位1474 m,对应库容2100万 $m^3$ ,坝高66 m,上游坝面坡度为1:2.25,下游坝面坡度为1:2.0。沥青混凝土心墙坝以坝料强度、渗透性、压缩性、施工方便和经济合理等为原则进行分区,除沥青混凝土心墙外,大坝其它部位共包括坝壳料区、过渡料区、上游围堰、利用料及排水料区。

## 2 本构模型及材料参数

沥青混凝土心墙、砂砾石坝料是大坝的主体部分,其应力应变关系的合理模拟直接关系到对坝体工作性状的准确性评估<sup>[7]</sup>。大量的研究表明沥青混凝土心墙材料和砂砾石坝料的应力应变关系表现出明显的非线性<sup>[8]</sup>,因此采用邓肯-张  $E-\mu$  模型进行数值模拟计算,该模型以切线变形模量  $E_t$  和切向泊松比  $u_t$  为计算参数,其中切线变形模量的表达式为:

收稿日期:2012-03-27; 修回日期:2012-05-08

基金项目:新疆农业大学前期资助课题(XJAU201007);新疆水利水电工程重点学科基金资助项目(XJZDXK-2002-10-05)

作者简介:王建祥(1979-),男,山东菏泽人,讲师,硕士,主要从事工程材料,结构理论及其应用研究。

$$E_t = KP_a \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[ 1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin\varphi)}{2cc\cos\varphi + 2\sigma_3\sin\varphi} \right]$$

切线变形模量  $E_t$  的公式中共包括 5 个材料常数  $K$ 、 $n$ 、 $\varphi$ 、 $c$ 、 $R_f$ ，它将变形与坝料的强度统一到一起，充分反映了材料的应力应变关系。

邓肯等人根据大量三轴试验中轴应变  $\varepsilon_1$  与侧向应变  $\varepsilon_3$  之间也存在双曲线关系，提出了数学表达式：

$$\mu_t = \frac{G - F \lg(\sigma_3/p_a)}{\left\{ 1 - \frac{D(\sigma_1 - \sigma_3)}{Kp_a \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[ 1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin\varphi)}{2cc\cos\varphi + 2\sigma_3\sin\varphi} \right]} \right\}^2}$$

$\mu_t$  为切向泊松比，它不是常量，而是应力的函数，由三个材料参数  $G$ 、 $F$ 、 $D$  来确定。

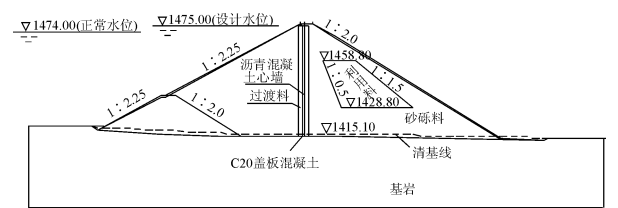


图 1 坝体计算模型

切线变形模量  $E_t$  和切向泊松比  $\mu_t$  就构成邓肯 - 张的  $E - \mu$  模型，其 8 个参数可以通过常规的三轴试验来获取。在有限元分析计算中，对于坝壳料、过渡料、沥青混凝土心墙和利用料采用邓肯 - 张  $E - \mu$  模型，通过三轴试验，得到其材料模型参数（表 1）。其它部分为线弹性材料，其参数分别为：沥青混凝土心墙基座的弹性模量  $E = 25 \text{ GPa}$ ， $\mu = 0.167$ ；基岩的弹性模量  $E = 25 \text{ GPa}$ ， $\mu = 0.21$ 。

|       | 表 1 坝体各部分的材料参数 |           |     |      |       |      |      |      | Pa, (°) |
|-------|----------------|-----------|-----|------|-------|------|------|------|---------|
|       | $c$            | $\varphi$ | $K$ | $n$  | $R_f$ | $G$  | $F$  | $D$  |         |
| 坝壳料   | 125000         | 41.1      | 980 | 0.48 | 0.81  | 0.40 | 0.08 | 1.49 |         |
| 过渡料   | 61000          | 39.1      | 850 | 0.61 | 0.75  | 0.47 | 0.09 | 1.45 |         |
| 沥青混凝土 | 340000         | 25.2      | 750 | 0.25 | 0.80  | 0.47 | 0.05 | 0.15 |         |
| 利用料   | 141000         | 39.5      | 820 | 0.26 | 0.78  | 0.38 | 0.19 | 3.92 |         |

3 网格划分

根据坝体分区特点，利用大型有限元软件，对坝体进行剖分，顺河向为计算的  $Y$  轴方向，沿高程增加的铅直方向为  $Z$  轴方向。对坝体进行有限元网格剖分时，采用八结点四边形单元，在心墙和过渡料界面之间设置了接触，得到有限元网格见图 2。大坝的有限元网格总单元数 6 147 个，总结点数 6 261 个。

4 坝体填筑和蓄水过程模拟

采用大型有限元软件模拟大坝填筑及蓄水过程，

基于坝体施工为分层填筑和堆石体等材料的非线性特性，坝体荷载采用逐级加载的方式，坝基作为已存在的部分（只具有初始应力），沥青混凝土心墙和拦河坝堆石体同步填筑。计算按坝体施工填筑的先后顺序分 9 级来模拟，坝体填筑完成后，分 8 级施加水荷载。蓄水时上游水下部分施加浮力，同时，水压力以面力的形式作用在沥青混凝土心墙上游面上。

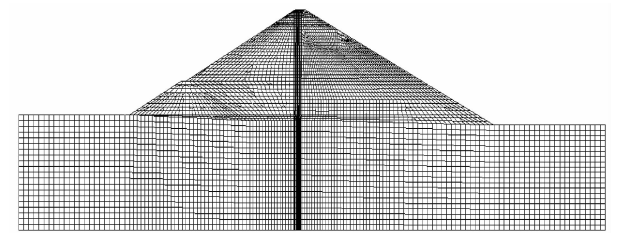


图 2 坝体有限元分析模型

5 本构模型参数影响分析

根据图 2 有限元模型，针对邓肯 - 张  $E - \mu$  模型的 8 个参数，共分为 8 组对沥青混凝土心墙坝进行了数值模拟计算，每一组通过改变其中一个参数，保持其它参数不变，来讨论参数对沥青混凝土心墙水平和竖向位移的影响。

5.1 沥青混凝土心墙位移计算结果

通过有限元仿真计算，得到邓肯 - 张  $E - \mu$  模型的 8 个参数变化对沥青混凝土心墙的最大位移的影响曲线，见图 3。

5.2 位移计算结果分析

(1) 由图 3a 可知：随着黏聚力  $c$  值的增加，沥青混凝土心墙的最大水平和竖向位移均减小，竖向位移要比水平位移的减小幅度大些。

(2) 内摩擦角  $\varphi$  的增减对水平和竖向位移的影响，见图 3b。随着内摩擦角  $\varphi$  值增大，最大水平位移和竖向位移均为减小趋势，当内摩擦角  $\varphi$  值为 25.2° 时，水平最大位移为 5.31 cm，最大竖向位移为 15.31 cm；当内摩擦角  $\varphi$  值增大到 27.7° 时，此时水平最大位移为 5.16 cm，最大竖向位移减小到 14.12 cm。

(3) 由图 3c 可以看到，初始模量基数  $k$  的变化对沥青混凝土心墙的最大水平和竖向位移的影响较为显著。当参数  $k$  值增加时，心墙的最大水平和竖向位移均减小。当参数  $k$  为 825 时，最大水平和竖向位移分别 4.56 cm 和 13.42 cm；当参数  $k$  值达到 900 时，此时最大水平和竖向位移分别减小到 3.43 cm 和 11.22 cm。参数  $k$  受多种试验操作和其它原因的影响，所以三轴试验测得的参数  $k$  的值也相差较大。

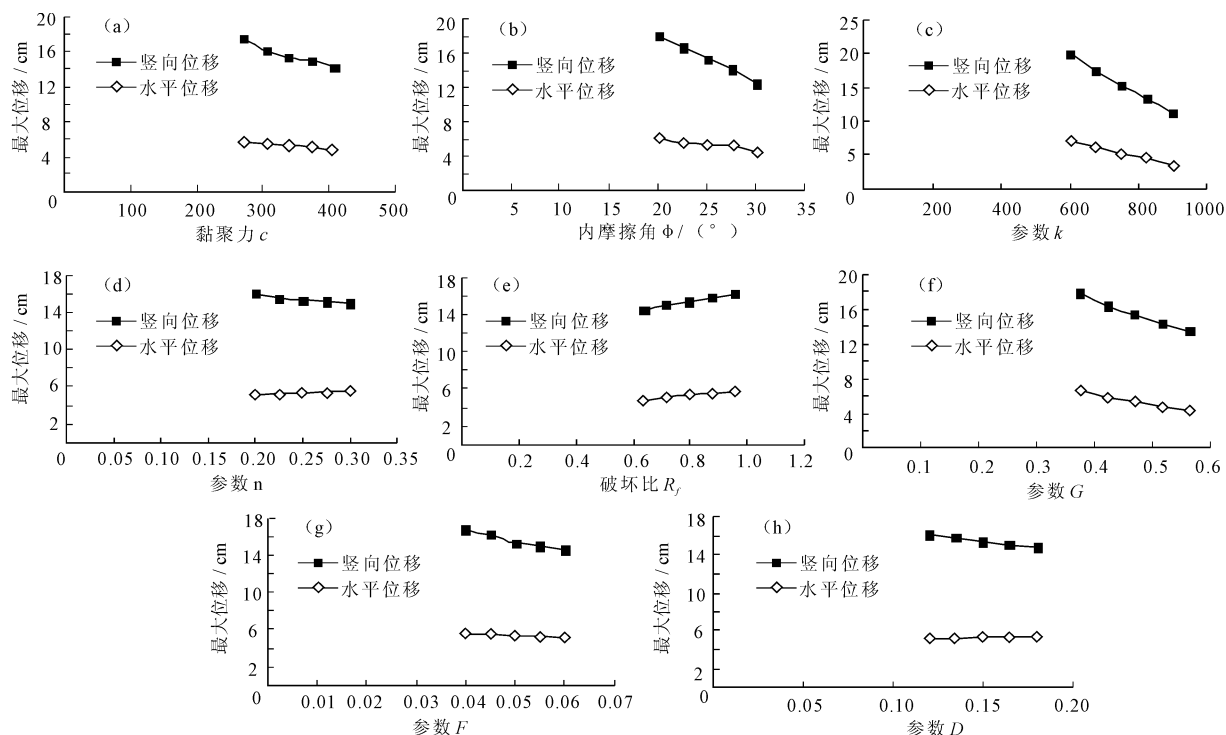


图3 邓肯-张 E- $\mu$  模型参数对沥青混凝土心墙的水平 and 竖向最大位移的影响

(4) 参数  $n$  对心墙的最大位移影响,如图 3d 所示。初始切线变形模量  $E_i$  与围压力  $\sigma_3$  成指数关系,参数  $n$  则为初始模量指数。当参数  $n$  增加时,心墙的最大水平位移在增加,而最大竖向位移在减小。但  $n$  值的变化对水平和竖向位移的影响较小。

(5) 由计算结果图 3e 得出,当破坏比增大时,沥青混凝土心墙的水平位移和竖向位移都相应增大,但竖向位移增加速度较快。由邓肯-张 E- $\mu$  模型可知,破坏比  $R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}$ ,反映了  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  与  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$  之间的关系。破坏比  $R_f$  值增大,达到  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  状态时,已经产生了相对较大的变形,即将破坏。

(6) 参数  $G$  是围压  $\sigma_3$  为 1 个标准大气压时的初始泊松比基数  $\mu_i$ ,图 3f 反映了水平和竖向位移随参数  $G$  值的变化规律,变化幅度较大,从变化趋势得出,参数  $G$  的影响比较大,是该模型的主控参数之一。位移随  $G$  值增大而减小,且参数  $G$  越小,对位移的影响程度越大。

(7) 参数  $F$  和  $D$  值的变化对水平和竖向位移的影响都比较小(图 3g, 3h)。最大竖向位移随参数  $F$  和  $D$  的增大而减小,最大水平位移随参数  $F$  的增大而减小、随参数  $D$  的增大而增大。

## 6 结 语

根据拦河坝筑坝材料的室内三轴试验资料,对资料进行分析整理而得到邓肯-张 E- $\mu$  模型的参

数,对沥青混凝土心墙坝进行了非线性有限元计算,分析了模型参数对心墙的最大水平和竖向位移的影响。结果表明,黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ 、初始模量基数  $K$  和参数  $G$  对心墙的最大位移影响较大,其它参数对最大位移影响则相对较小;参数  $K$  受到多种试验操作和其它原因的影响,三轴试验测得的参数  $k$  的值也相差较大。通过计算分析,为邓肯-张模型参数取值和计算分析提供参考和依据。

## 参考文献:

- [1] 祁世京. 土石坝碾压式沥青混凝土心墙施工技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2000.
- [2] 胡春林,胡安明,李友华. 茅坪溪土石坝沥青混凝土心墙的力学特性与施工控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2001,20(9): 742-746.
- [3] Khaled Anwar Kandil. Analytical and experimental study of field compaction of asphalt mixes[D]. Carleton University, Ottawa, Canada, 2002. 6.
- [4] 丁树云,毕庆涛. 深厚覆盖层上沥青混凝土心墙土石坝的应力变形特征[J]. 水力发电,2011,37(4): 47-49.
- [5] 王为标,申继红. 中国土石坝沥青混凝土心墙简述[J]. 石油沥青,2002,16(4): 27-31.
- [6] 王为标,孙振天,王文进,等. 碾压混凝土坝的沥青混合料防渗结构[J]. 水利水电技术,2000,31(11): 19-22.
- [7] 毕庆涛,王平易. 不同蓄水方案对高土石坝应力变形的影响[J]. 人民黄河,2009,31(7): 43-45.
- [8] 田 帅. 桥面铺装新型混凝土试验研究[J]. 混凝土, 2010,(4): 146-148.