沥青混凝土心墙坝非线性有限元应力变形分析

潘家军[1]，江　凌[2]

（1. 武汉大学土木建筑工程学院，湖北 武汉 430072；2. 武汉大学水资源与水电科学国家重点实验室，湖北 武汉 430072）

摘　要：利用大型通用有限元分析软件 ABAUQS 的用户开发平台，实现了 Duncan-Chang 模型的接口开发，完成了某沥青混凝土堆石坝的填筑与蓄水过程二维非线性有限元仿真模拟，得到了坝体和沥青混凝土心墙的应力与变形等结果，其成果对工程坝体断面优化分区、沥青混凝土心墙防渗设计可提供参考依据。同时表明：充分利用 ABAQUS 已经具备的非线性分析功能，二次开发是完成土石坝非线性应力应变分析的有效解决方案。

关键词：沥青混凝土堆石坝；应力应变分析；非线性有限元；ABAQUS；二次开发

作者简介：潘家军(1980－)，男，博士研究生，主要从事水工结构及岩土工程数值仿真方面的研究。

0　引　　言

近年来在大型水电建设项目中，由于对复杂地质条件的良好适应性以及工程造价方面的优势，土石坝建设的数量和规模都取得了突飞猛进的发展。近期，随着三峡茅坪溪、治勒和尼尔基等大型土石坝沥青混凝土心墙工程的陆续兴建，使人们对土石坝沥青混凝土心墙的优点认识不断加深。沥青混凝土心墙土石坝作为一种经济和非常具有竞争力的坝型越来越受到国内外有关专家和工程界的重视，并有望成为未来高土石坝的主要形式，同时该种坝型也是国际大坝委员会（ICOLD）的推广坝型。

在沥青混凝土心墙堆石坝的设计中，准确估计和分析沥青混凝土心墙堆石坝在施工期和蓄水期的应力应变形态是沥青混凝土心墙堆石坝设计中面临的关键问题之一。在沥青混凝土心墙堆石坝应力与变形的非线性有限元分析中，常采用 Duncan-Chang 本构模型[1-2]模拟堆石体应力与应变关系。

虽然 Duncan-Chang 模型没有反映堆石体的剪胀特性、施工诱发各向异性和应力路径，但基本能够反映土体的压硬性和非线性力学性质，加上数学表达相对直观，便于编程计算，且已积累了相当的实际工程应用经验，因此在国内土石坝有限元分析领域中仍然得到了广泛使用，多数计算结果认为可以反映坝体的应力分布与变形规律，分析结果可为设计提供宏观上的参考和整体判断。目前绝大部分设计单位完成土石坝非线性有限元分析需自主开发程序，除开发周期长、投入大以外，普遍存在的主要弊端是：有限元分析前后处理功能比较薄弱，计算规模往往受程序开发者的编程水平和技术所限，如果引进计算程序，开发者一般不向使用单位提供源代码，导致计算程序的修改、维护、扩充与发展比较困难，在解决大型复杂三维问题时，计算效率也不尽人意。本文旨在介绍基于大型通用有限元分析软件 ABAQUS 二次开发平台，通过增加 Duncan-Chang 本构模型后，利用其先进的非线性分析功能，完成某沥青混凝土心墙堆石坝的应力变形计算分析，计算结果为工程坝体断面优化分区设计可提供重要参考依据，同时表明：开发工作是成功和可行的，是开发土石坝非线性有限元程序的有效途径。

1　ABAQUS 程序二次开发技术

ABAQUS 是由美国 HKS 公司开发的非线性有限元分析软件系统[3-4]。它在材料、几何与接触非线性方面的分析能力居世界领先水平，以高求解效率和高计算精度在工程界和学术界赢得了声誉和信赖，其最新版本将有限元分析与计算机图形学等技术相结合，是一个强大的非线性有限元计算分析工具。

然而，作为一个大型通用商业有限元软件，ABAQUS 不可能包罗万象地向用户提供各类特殊材料本构模型，但提供了灵活强大的二次开发接口，用户可以根据需要增加自己研究去开发感兴趣的单元类型、增加特定的本构关系等，从而在 ABAQUS 所提供的通用平台上有可能实现特定问题的有限元数值仿真计算，以满足用户的个性化分析计算的需求。

ABAQUS 二次开发环境[3]所提供的主要包括用户子程序（User Subroutine）、实用工具（Utilities）和脚本语言（Script）。ABAQUS 提供的用户子程序和实用工具采用标准 FORTRAN 语言接口，用户程序的编写、调试相对容易；而脚本语言是基于面向对象的编程语言 Python，用于特征造型、参数化设计、材料设置、网格剖分和作业控制等。开发用户本构模型主要涉及用户子程序（User Subroutine）和实 用工具（Utilities），与基于面向对象的编程语言 Python 关系不大。

有关在 ABAQUS 中采用户子程序开发 Duncan-Chang 模型的实现过程可参见文献[5]。在沥青混凝土心墙堆石坝的非线性分析中，为了反映堆石体与沥青混凝土心墙之间的不连续变形特性，可以采用其它沥青混凝土心墙堆石坝分析程序[6]中类似的处理方法与技术，如采用薄层单元、节理单元或界面接触模型等技术模拟。由于缺乏节理单元或界面接触模型的计算参数，本次计算采用薄层单元处理堆石体与沥青混凝土心墙非连续变形特性。从计算结果来看，这种处理技术可以反映堆石体与沥青混凝土心墙的不连续位移特性，计算精度可以满足工程设计要求，也易于在 ABAQUS 中实现。至于沥青混凝土心墙堆石坝的施工过程、蓄水过程模拟可利用 ABAQUS 已具备的功能方便地实施，沥青混凝土心墙成果整理可以通过节点位移和应力进行整理。

2　计算条件与计算模型

某沥青混凝土心墙堆石坝工程最大坝高 104 m。大坝轴线基本沿

收稿日期：2006－07－30

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

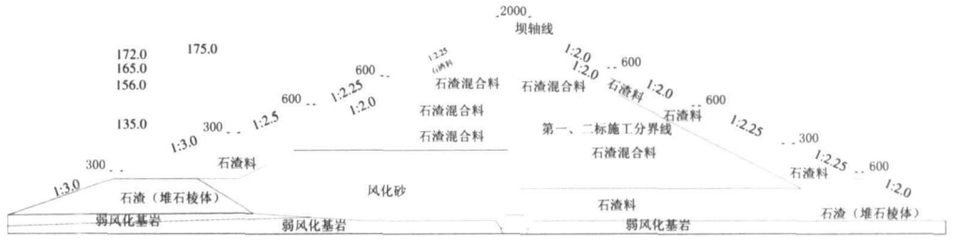

图 1 沥青混凝土堆石坝基本剖面图（单位：m）

表 1 Duncan-Chang $E-\mu$ 模型参数

材料分区	ρ_d	K	K_{ur}	n	R_f	G	F	D	φ/(°)	c/MPa
石渣料	2.22	1188	1782	0.612	0.848	0.295	0.33	0.219	40.0	0.1
石渣混合料 1	2.15	1150	1725	0.55	0.80	0.30	0.330	0.22	39.5	0.100
风化砂	2.10	800	1200	0.500	0.800	0.27	0.282	0.084	39.0	0.045
过渡料	2.25	1678	2517	0.550	0.75	0.472	0.176	5.413	39.0	0.12
石渣混合料 2	2.10	850	1275	0.50	0.70	0.30	0.33	0.22	38.0	0.08
堆石棱体	2.25	1500	2250	0.65	0.85	0.295	0.33	0.219	40.0	0.1
沥青混凝土	2.43	342	513	0.249	0.563	0.387	0.928	29.09	35.9	0.160

山脊分水岭布置。沥青混凝土心墙分别连接岸坡基础混凝土防渗墙、混凝土基座和垫座，连同基础防渗帷幕，组成大坝整体防渗体系。沥青混凝土心墙顶高程 185.0 m，最低墙底高程 91.0 m，心墙最大高度 94 m。沥青混凝土心墙的厚度按照规范 SDJ01-88 要求，设计心墙顶宽 0.6 m，高程 91.0 m 处墙后 1.2 m，两侧坡比 1∶0.004。大坝填料主要来自右岸工程土石方开挖料，部分为料场开挖料。坝体横剖面及材料分区如图 1 所示。坝体填料主要有：风化砂，主要有全、弱风化带开挖料组成，最大颗粒粒径小于 2 cm；石渣混合料，级配范围较广，组成复杂，包括全、强风化带砂及弱微等风化带岩石等；石渣料，主要由弱风化、强风化及新鲜岩石组成，石质坚硬，不易软化破碎。

在有限元计算中，堆石区采用 Duncan-Chang $E-\mu$ 非线性本构模型模拟应力应变关系，计算参数见表 1。设置了薄层单元来反映堆石体与沥青混凝土心墙变形的不连续性。沥青混凝土心墙也采用非线性 Duncan-Chang $E-\mu$ 本构模型模拟，不考虑沥青混凝土的流变效应。计算时，按照实际设计尺寸对大坝堆石体施工过程分 33 级模拟坝体的堆砌过程；大坝蓄水过程分 8 级加荷模拟。坝体二维有限元模型的单元网格见图 2，二维单元剖分单元总数为 1390，节点总数为 1441。

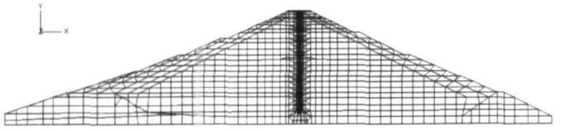

图 2 二维有限元模型单元网格

3 计算结果分析

3.1 坝体应力与变形分析

坝体位移、应力、位移矢量和应力水平等三维计算成果可方便地采用 ABAQUS/Viewer 进行整理。

竣工期，在坝体典型断面上，坝体最大沉降为 0.708 m（图 3），约占坝高的 0.69%，这通常与 100 m 级堆石坝沉降范围一致。值得注意的是计算所得的坝体位移分布与一般堆石体对称分布情况还是有明显差别的，由于沥青混凝土心墙的影响使得垂直位移的不连续，且垂直位移位于坝壳上游偏下部位；在上游堆石体大约 2/5 坝高处，水平位移比一般的堆石坝明显偏小，上游水平位移最大值为 0.120 m（指向上游），位于坝高约 2/5 处，下游水平位移最大值为 0.056 m（指向下游），位于下游坝中间，分布规律基本沿沥青混凝土心墙成对称分布，如图 4 所示。

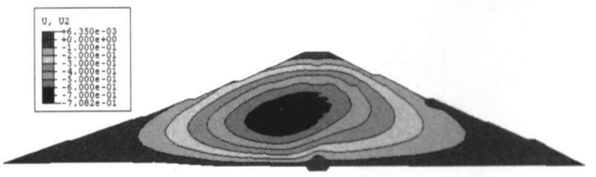

图 3 竣工期坝体沉降等值线（单位：m）

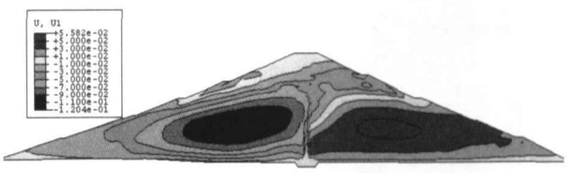

图 4 竣工期坝体水平位移等值线（单位：m）

蓄水后，由于坝体受到水浮力的作用沉降有所减小，但坝体沉降的位置基本没有变化，仍然在坝高 2/5 处（图 5）。与竣工期水平位移相比，蓄水期由于水压力作用使得坝体整体顺河向位移明显向下游移动，上游坡面向上游位移为 0.059 m，比竣工期减少 0.061 m；下游坡面向下游位移为 0.191 m，比施工期增加 0.137 m。蓄水对坝体水平位移有明显影响，水平位移量从上游到下游逐渐增大，变形规律合理。

竣工期堆石体大主应力，最大压应力为 2.358 MPa，发生在坝体底部，越靠近坝底中部，大主应力越大，且沿沥青混凝土心墙在上下游基本成对称分布，如图 7 所示；堆石体小主应力最大值为 0.812 MPa，发生在坝轴线上游侧靠近坝基处，如图 8 所示。坝体应力基本上是按坝高分布，竣工期和蓄水期坝体的最大、最小主应力位于坝中

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

轴线的底部，由于下游坝壳 150 m 高程以下采用了相对比较硬的石渣混合料，大主应力和小主应力均大于上游坝壳。因而能改善心墙混凝土蓄水后的受力条件。由于心墙过渡区采用了相对较硬的过渡料，使得过渡区中应力明显升高。蓄水后，大主应力分布规律没有变化，坝体最大大主应力仍发生在下游坝体底部（图 9），但由于上游坝体受到水浮力的作用，且大主应力主要由自重引起，故上游坝体大主应力有所减小；小主应力分布规律变化较大（图 10），由于心墙受到水压力的作用，使得坝体最大小主应力发生在下游坝体底部。由于混凝土垫座嵌入坝体，使得垫座周围的应力集中状况明显。

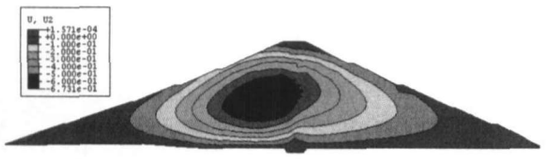

图 5 蓄水期坝体沉降等值线（单位：m）



图 6 蓄水期坝体水平位移等值线（单位：m）

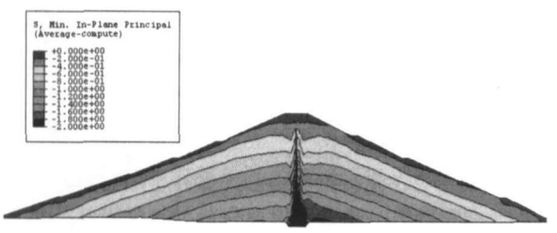

图 7 竣工期坝体大主应力等值线（单位：m）

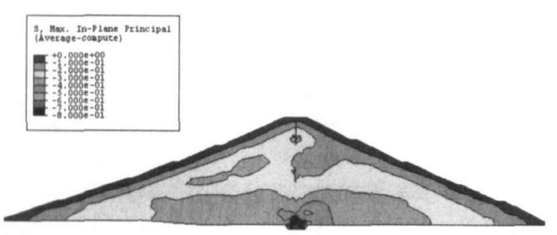

图 8 竣工期坝体小主应力等值线（单位：m）

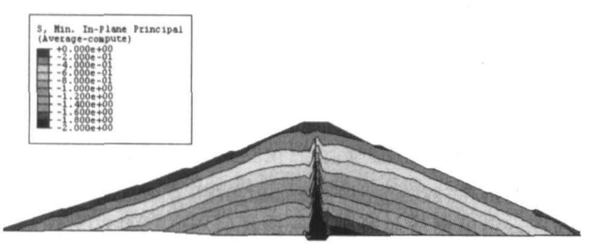

图 9 蓄水期大主应力等值线（单位：m）

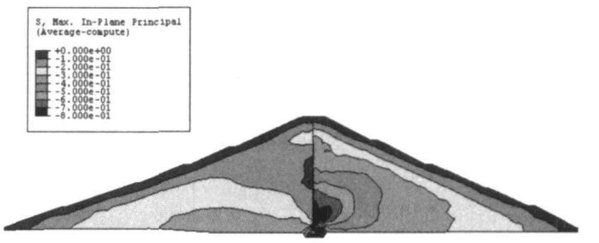

图 10 蓄水期小主应力等值线（单位：m）

3.2 心墙应力与变形分析

竣工期无水压力时沥青混凝土心墙最大向上游水平位移为 6.5 cm，位于高程 135 m 处；垂直位移最大值为 69.2 cm，位于高程 135 m 处。蓄水期沥青混凝土心墙由于受水压力的作用使得心墙有向下游较大的水平位移，水平位移向下游最大值为 18.3cm；垂直位移变化相对较小，由于水压力的作用，使得垂直沉降有所减小，垂直位移最大值为 64.2 cm（图 11）。沥青混凝土心墙与坝壳的变形基本协调，无明显的突变现象，值得注意的是，在 135 m 高程附近坝体上游较软的风化砂填筑区使得竣工期心墙在该处向上游的变形较大。

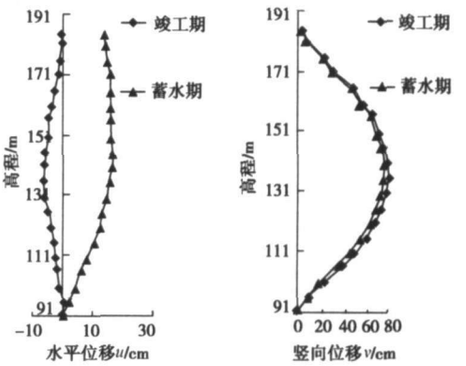

图 11 沥青混凝土心墙位移沿高程分布图

图 12 为沥青混凝土心墙轴线竖向应力和大主应力沿高程分布图。从图可以看出：无论是蓄水期还是竣工期沥青混凝土心墙上都未出现拉应力，应力变化趋势相同，最大值变化较小，且位置都发生在沥青混凝土心墙墙底处。蓄水后心墙的大主应力和垂直方向应力大于竣工期，竖向应力最大值由 1.628 MPa 增加到 1.913 MPa，都比同高程处的静水压力大。大主应力和垂直应力都沿坝体自顶向下增加，且

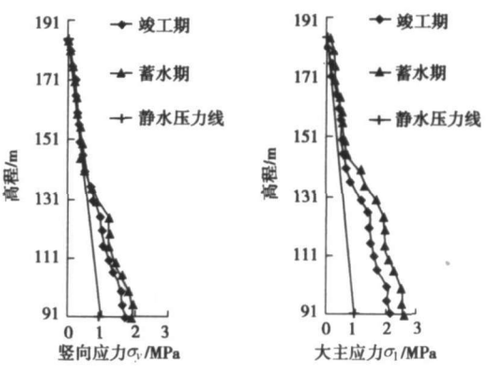

图 12 沥青混凝土心墙应力沿高程分布图

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

越接近坝顶心墙单元应力分布与水压线越接近，而心墙发生水力劈裂的判断方法是，将心墙上游面的垂直正应力与同一点的水压力相比较，若$\sigma_v \le \gamma_w h$，则发生水力劈裂，这说明可能发生水力劈裂的位置在坝体的中上部，而不可能发生在水压力最大的沥青混凝土心墙底部，这符合一般沥青混凝土心墙的应力分布规律。

4 结　语

本文工作表明：利用大型通用非线性有限元分析软件 ABAQUS 的开发平台，增加 Duncan-Chang 模型后，可以完成沥青混凝土堆石坝的非线性有限元应力应变分析。坝体和沥青混凝土心墙的应力变形分布规律和量级在合理范围，工程算例的计算成果合理可信，可以为工程设计提供参考，二次开发是成功的。

由于本文是利用大型通用有限元分析软件 ABAQUS 的二次开发技术完成沥青混凝土堆石坝复杂非线性应力与变形计算，有些方面的工作尚待深入研究，如考虑堆石料、风化砂“浸水软化”特性；堆石体和沥青混凝土的流变特性；用接触模型来描述或模拟沥青混凝土与堆石料之间的非连续变形特性；考虑沥青混凝土开裂特性以及开发其它堆石体材料本构模型[7-9]等，据此可在高起点的平台上形成强有力的土石坝非线性有限元分析工具，进一步提高我国土石坝的分析水平，为科学地设计堆石坝提供合理的定性与定量依据。

参考文献：

[1] DUNCAN J M, ZHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils [J]. J SMFD, ASCE, 1970, **96** (SM5): 1629-1653.

[2] DUNCAN J M,et al. Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analysis of stress and movement in soil masses[R].Report No. UCB/GT/80-01, 1980.

[3] Hibbitte, Karlsson, Sorenson, INC. ABAQUS / Standard User's Manual [M], 2002.

[4] 庄　茁译. ABAQUS/Standard 有限元软件入门指南[M]. 北京：清华大学出版社，1998.

[5] 徐远杰，王观琪. 在 ABAQUS 中开发实现 Duncan –Chang 本构模型 [J]. 岩土力学，2004，**25**(7):1032-1036.

[6] 姜弘道. 水工结构工程与岩土工程的现代计算方法及程序[M]. 南京：河海大学出版社，1992.

[7] 沈珠江. 土体应力应变分析中的一种新模型[C]//第五届土力学及基础工程学术讨论会论文选集. 北京：中国建筑工业出版社，1990: 101-105..

[8] 殷宗泽. 一个土体双屈服面应力—应变模型[J]. 岩土工程学报，1988，**10** (4): 64-71.

[9] NAYLOR D J. Stress-strain laws of soils [C]// Development in Soil Mechanics. 1978.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net