

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221604

# 基于 ANSYS 的优化邓肯一张模型计算程序 模块开发及面板堆石坝应力变形分析

程 阳, 张慧颖, 王新华, 张智皓, 王 硕

(云南农业大学水利学院, 云南 昆明 650201)

**摘要:** 针对邓肯一张模型在面板堆石坝有限元计算中不能反映中主应力对堆石体强度和变形的影响, 利用 APDL 语言对 ANSYS 进行二次开发, 开发出邓肯一张 E-B 模型及其优化模型的计算程序模块。分别采用邓肯一张 E-B 原始模型及其优化模型对云南省某面板堆石坝进行三维有限元静力计算, 结果显示由优化模型计算得到的坝体沉降减小、水平位移减小, 而应力变化较小; 优化模型的计算结果更接近实际值。可见考虑了中主应力的优化邓肯一张 E-B 模型可更好地反映面板堆石坝的应力变形特性。

**关键词:** ANSYS; 邓肯一张模型; 二次开发; 面板堆石坝; 应力变形

**中图分类号:** TV641

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)06-0091-03

## 1 引言

随着水利工程建设的发展, 面板堆石坝因具有良好的适应性、结构简单、安全性高等优点被广泛应用<sup>[1]</sup>。在计算面板堆石坝的应力变形时, 选择合适的堆石料本构模型十分重要, 自 1963 年提出剑桥模型, 已研发出多种不同的堆石料本构模型<sup>[2]</sup>。迄今为止, 国内堆石坝工程中应用最广泛的岩土本构模型是邓肯一张 E-B 模型, 该模型能反映土体应力—应变关系非线性的主要特点, 且形式简单, 易于理解接受, 同时参数较少且物理意义明确容易获得<sup>[3]</sup>。但该模型是建立在  $\sigma_2 = \sigma_3$  的常规三轴试验的基础上, 并采用摩尔—库伦强度准则, 因此不能考虑中主应力  $\sigma_2$  对强度和变形的影响, 这会降低材料的变形模量, 使预测的变形值较实际值偏大<sup>[4]</sup>。为此, 孔德志等<sup>[5-6]</sup>对比研究了多种优化模型的修正效果, 但缺少实际的堆石坝工程比较。鉴于此, 本文利用 ANSYS 软件对云南省某面板堆石坝进行三维有限元计算, 模拟真实筑坝过程, 对面板堆石坝进行应力变形分析。但由于 ANSYS 软件中缺少邓肯一张 E-B 模型计算程序模块, 本文基于 APDL 语言对 ANSYS 进行二次开发, 编写原始邓肯一张 E-B 模型及优化邓肯一张 E-B 模型的计算程序模块, 对云南省某

面板堆石坝进行三维有限元计算。结果表明, 优化后的邓肯一张 E-B 模型计算值与实际监测结果更为贴近, 可更好地反映堆石体的应力变形特性。

## 2 计算原理

### 2.1 邓肯一张 E-B 模型

邓肯一张 E-B 模型是一种建立在增量广义胡克定律基础上的非线性弹性模型, 可以反映应力—应变关系的非线性。该模型的主要优势是能反映应力路径对变形的影响, 且计算参数较易获取<sup>[7]</sup>。但邓肯一张 E-B 模型未考虑中主应力, 会导致计算结果比实际值偏大。对此, 已提出多种方法对其改进, 主要包括修正弹性模量、泊松比和修正摩尔—库伦准则两大类方法, 具体可分为四种: ①修正弹性模量、泊松比(修正方法 1)。将原邓肯一张 E-B 模型中的侧限压力  $\sigma_3$  用  $(\sigma_2 + \sigma_3)/2$  来代替; 偏应力  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  用  $\sigma_1 - (\sigma_2 + \sigma_3)/2$  来代替, 保持摩尔—库伦准则不变。②修正弹性模量、泊松比(修正方法 2)。保持摩尔—库伦准则不变, 使用三维计算中的一种近似模拟方法, 用平均正应力  $p$  代替二维计算模型中的  $\sigma_3$ , 广义剪应力  $q$  代替  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 。则应力水平  $S$  为:

收稿日期: 2022-08-04, 修回日期: 2022-08-31

作者简介: 程阳(2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向为土木水利, E-mail: 1767250560@qq.com

通讯作者: 张慧颖(1976-), 女, 博士、副教授、硕导, 研究方向为土木水利, E-mail: 360662697@qq.com

$$S = \frac{(\sqrt{3} \cos\theta_\sigma + \sin\theta_\sigma \sin\varphi) q}{3c \cos\varphi + 3p \sin\varphi} \quad (1)$$

式中,  $\theta_\sigma$  为应力洛德角;  $\varphi$  为内摩擦角。切线弹性模量  $E_t$  为:

$$E_t = (1 - R_f S)^2 k P_a (p/P_a)^n \quad (2)$$

式中,  $R_f$  为破坏比;  $k$  为弹性模量;  $P_a$  为大气压力。

③综合修正弹性模量、泊松比和摩尔-库伦准则(修正方法 3)。在原邓肯-张 E-B 模型中, 使用  $\sigma_3 \sqrt{\sigma_2/\sigma_3}$  来代替变量  $\sigma_3$ , 并将摩尔-库伦强度条件更改为:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2}{1 - \sin\varphi} \sigma_3 \sqrt{\frac{\sigma_2}{\sigma_3}} \sin\varphi + c \cos\varphi \quad (3)$$

式中,  $c$  为粘聚力;  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  分别为第一、第二主应力。④修正内摩擦角(修正方法 4)。因为工程实际中是平面应变, 而三轴应变是轴对称应变, 所以根据常规三轴和平面应变试验资料总结出两种应力条件下内摩擦角之间的经验关系为:

$$\sin\varphi_p + 6(1/\sin\varphi_c - 1/\sin\varphi_p) = 1 \quad (4)$$

式中,  $\varphi_p$  为平面应变条件下的内摩擦角;  $\varphi_c$  为轴对称应力条件下的内摩擦角。

这 4 种修正方法都在不同程度上体现了中主应力的影响, 其中修正方法 1、3 的效果更为明显<sup>[8]</sup>。因此, 采用修正方法 1 对原始邓肯-张 E-B 模型进行优化, 并将计算结果与原始邓肯-张 E-B 模型的计算结果进行比较分析。

### 2.2 基于 ANSYS-APDL 语言的二次开发

ANSYS 是一种通用性很强的有限元分析软件, 其二次开发的工具主要有 APDL、UPFS、UIDL 及 Tcl 语言, 目前进行 ANSYS 二次开发多使用 APDL、UIDL, 本文使用 APDL 语言对 ANSYS 进行二次开发<sup>[9]</sup>。

#### 2.2.1 APDL 语言开发邓肯-张 E-B 模型

由于 ANSYS 软件中没有邓肯-张 E-B 模型计算程序模块。为此, 本文通过 APDL 编程语言对 ANSYS 进行二次开发, 编写原始邓肯-张 E-B 模型和优化邓肯-张 E-B 模型的计算程序模块, 并模拟工程实际填筑顺序, 逐步填筑坝体, 分级施加荷载, 通过有限元计算得到面板堆石坝在竣工期和蓄水期的应力变形结果, 并对比分析优化前后邓肯-张 E-B 模型得到的计算结果<sup>[10]</sup>。

#### 2.2.2 ANSYS 模拟面板堆石坝施工分层加载

由于面板堆石坝一次性加载和分层逐级加载所产生的应力变形不同, 在实际工程中面板堆石坝的施工过程是逐层填筑的。所以, 为了模拟面板堆石坝真实的填筑过程, 本文利用 APDL 语言

编写面板堆石坝施工模拟的计算程序, 按照施工顺序逐层加载, 最后填筑到坝顶<sup>[10]</sup>。

## 3 实例计算

### 3.1 工程概况

某水库位于云南省曲靖市沾益县西北部金沙江支流牛栏江上游的德泽乡境内, 大坝布置在牛栏江干流, 为混凝土面板堆石坝, 坝顶高程 1 796.30 m, 正常蓄水位 1 790.00 m 最大坝高 142.4 m, 坝顶长 386.9 m, 宽 12.0 m, 上游坝坡坡比为 1:1.40、下游平均坝坡坡比为 1:1.55。

### 3.2 有限元模型及计算参数

混凝土面板堆石坝材料分区从上游至下游依次为混凝土面板、垫层区、过渡区、主堆石区、次堆石区。坝体概化分区见图 1。

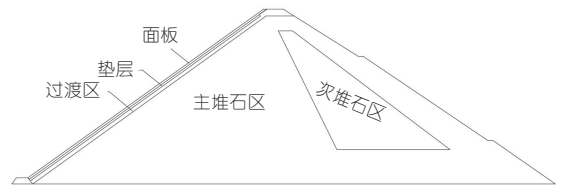


图 1 坝体概化分区图

Fig. 1 Probabilistic zoning of the dam

对云南省某面板堆石坝建立三维有限元模型, 模型  $x$  轴为顺河向方向(向下游为正),  $y$  轴为竖直坝轴线(向上为正),  $z$  轴为左右岸方向(向右岸为正), 网格划分主要采用六面体单元 solid185, 整个模型划分为 29 040 个单元, 31 446 个节点。

为了模拟大坝真实填筑与蓄水情况, 计算中按 22 级分级加载, 1~9、11~15 级为堆石体施工加载, 10、16 级为面板施工加载, 按照水库蓄水过程将蓄水过程分为 6 级加载, 17~22 级为蓄水荷载。面板为混凝土面板, 重度  $\gamma$  为 24.0 kN/m<sup>3</sup>, 弹性模量  $E$  为  $2.8 \times 10^7$  kPa, 泊松比  $\mu$  为 0.167。面板及堆石体材料参数由云南某设计院提供见表 1、2。计算时考虑两种工况: ①工况 1(竣工期)。荷载为坝体自重, 坝体上下游无水, 模拟施工过程分为 16 级, 分层加载, 其中面板荷载为单独两层; ②工况 2(蓄水期)。荷载为坝体自重和大坝在正常蓄水位 1 790 m 作用下的应力变形。

表 1 接触面单元材料参数

Tab. 1 Contact surface unit material parameters

工况	破坏比 $R_f$	劲度系数 $K_1$	弹性模量指数 $n$	法向劲度 $K_{zz}$ / (kN · m <sup>-3</sup> )	摩擦角 $\delta$ / (°)
受拉	0.74	4 800	0.56	$10^8$	36.6
受压	0.74	4 800	0.56	$10^2$	36.6

表 2 邓肯一张 E-B 模型材料参数

Tab. 2 Duncan-zhang E-B model material parameters

材料	密度 $\rho$	弹性模量 $K$	卸荷模量 $K_{ur}$	弹性模量指数 $n$	体积模量 $K_b$	体积模量指数 $m$	破坏比 $R_f$	摩擦角 $\varphi_0$ / $^\circ$	摩擦角 $\Delta\varphi$ / $^\circ$	凝聚力 $C$ /MPa
垫层区	2 200	1 200	2 200	0.45	963	0.29	0.85	41.6	5.1	0.018
过渡区	2 180	1 000	2 100	0.45	450	0.15	0.90	54.0	6.2	0.021
主堆石区	2 150	987	1 400	0.35	389	0.16	0.83	52.0	6.4	0.034
次堆石区	2 030	900	1 300	0.35	271	0.17	0.77	47.2	5.6	0.031

注:密度  $\rho$  单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

## 3.3 邓肯一张 E-B 模型优化前后坝体应力变形分析

## 3.3.1 竣工期模型优化前后坝体应力变形计算结果

竣工期坝体应力变形结果见表 3。由表 3 可知,竣工期使用优化前后的邓肯一张 E-B 模型进行计算,坝体沉降分别为 155.20、134.10 cm,最大沉降位于坝体约 2/5 坝高处。坝体出现了拉应力,但区域很少,仅在 1/2 坝高处极少量出现,最大拉应力分别为 1.17、1.36 MPa。坝体绝大多数区域处于受压状态,最大压应力出现在坝体底部,分别为 2.08、2.45 MPa。竣工期坝体应力变形分布符合面板堆石坝变形的普遍规律。

表 3 竣工期优化前后应力变形结果

Tab. 3 Stress deformation results before and after

## completion period optimization

竣工期应力变形	$x$ 方向	$x$ 方向	$y$ 方向	拉应力 /MPa	压应力 /MPa
	上游位 移/cm	下游位 移/cm	位移 /cm		
原始邓肯张 E-B 模型	62.42	71.21	155.20	1.17	2.08
优化邓肯张 E-B 模型	31.79	51.89	134.10	1.36	2.45
变化量	30.63	19.32	21.10	-0.19	-0.37

## 3.3.2 蓄水期模型优化前后坝体应力变形计算结果

蓄水期坝体应力变形结果见表 4。由表 4 可知,蓄水期使用优化前后的邓肯一张 E-B 模型进行计算,坝体沉降量分别为 155.62、134.83 cm,最大拉应力分别为 1.20、1.22 MPa。最大压应力出现在坝体底部,分别为 2.11、2.47 MPa。表明在蓄水期水平位移向上游方向明显减少,而向下游方向逐渐增大。水库蓄水后,在水压力的作用下,坝体大部分区域水平位移朝向下游,同时坝体的沉降也略微增大。蓄水期坝体应力变形分布符合面板堆石坝的普遍变形规律。

表 4 蓄水期优化前后应力变形结果

Tab. 4 Stress deformation results before and after

## optimization of the water storage period

蓄水期应力变形	$x$ 方向	$x$ 方向	$y$ 方向	拉应力 /MPa	压应力 /MPa
	上游位 移/cm	下游位 移/cm	位移 /cm		
原始邓肯一张 E-B 模型	31.49	71.68	155.62	1.20	2.11
优化邓肯一张 E-B 模型	5.21	52.87	134.83	1.22	2.47
变化量	26.28	18.81	20.79	-0.02	-0.36

综上所述,使用优化邓肯一张 E-B 张模型计

算时,坝体应力变形规律与原始邓肯一张 E-B 模型一致,竣工期和蓄水期的沉降量比原始邓肯一张 E-B 模型分别减少了 15.73%、15.42%,同时水平方向的位移发生了大幅度减少,拉应力与压应力较原始邓肯一张 E-B 模型发生增加,但变化程度较小。

对比优化前后模型计算结果,蓄水期在竖直方向上原始邓肯一张 E-B 模型的沉降量为最大坝高的 1.1%,超过设计规范<sup>[11]</sup> 1%,优化后的邓肯一张 E-B 模型的沉降量为最大坝高的 0.9%,降幅达 20%,满足设计规范<sup>[11]</sup> 的要求,且更接近监测数据 117.6 cm,为最大坝高的 0.8%,在水平方向上,原始邓肯一张 E-B 模型向下游方向位移为 71.68 cm,优化后的邓肯一张 E-B 模型向下游方向位移为 52.87 cm 更贴近监测数据的 38.81 cm,且降幅达 48.47%。可见优化邓肯一张 E-B 模型计算得到的坝体沉降量减小、水平位移减小,而应力略微增大,更接近实际监测数据。

## 4 结论

采用 APDL 语言对 ANSYS 进行二次开发,编写了原始邓肯一张 E-B 模型及优化邓肯一张 E-B 模型计算程序模块,对云南省某面板堆石坝进行三维有限元计算,比较分析其应力变形。结果表明,优化的邓肯一张 E-B 模型考虑了中主应力对强度和变形的影响,计算得到的坝体沉降量减小,水平位移大幅度减小,而应力略微增大,应力变形结果更接近工程实际,表明优化后的邓肯一张 E-B 模型能更好地反映坝体的应力变形性质。

## 参考文献:

- [1] 顾淦臣,黄金明. 混凝土面板堆石坝的堆石本构模型与应力变形分析[J]. 水力发电学报,1991(1):12-24.
- [2] 汪天飞,徐青. 基于邓肯-张模型的堆石坝有限元分析[J]. 中国农村水利水电,2016(10):151-155.
- [3] 李宏恩,李同春,田景元,等. 改进的邓肯一张模型在大坝应力应变分析中的应用[J]. 水电能源科学,2010,28(3):63-65.
- [4] 邵东琛. 一种改进邓肯张模型及其在土石坝数值模拟中的应用[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2015,37(4):21-24.
- [5] 赵晓龙,朱俊高,王平. 两种本构模型的土石坝应力变形分析比较[J]. 中国农村水利水电,2018(1):165-169,173.

(下转第 128 页)

参考文献:

[1] 敖国碧,伍锡举,李峰. 复杂岩溶地层中钻孔灌浆法防渗治理效果研究[J]. 岩土工程界,2008,11(9):77-78.

[2] 曹志宇,吕仕龙,廖洋波. 水布垭水电站高面板坝趾板灌浆试验研究[J]. 水力发电,2002(10):35-37.

[3] 马新江. 某水利枢纽基岩帷幕灌浆试验分析[J]. 陕西水利,2015(增刊1):49-50.

[4] 孙宪国. 白莲河电站上库帷幕灌浆试验工艺及效果

分析[J]. 人民长江,2009,40(6):37-38,47.

[5] 袁歧. 灌浆试验在灌浆工程中指导作用分析[J]. 黑龙江水利科技,2013,41(2):251-252.

[6] 张晓悦,张晓乐,王建新. 二滩高拱坝坝基灌浆帷幕防渗效果研究[J]. 水电能源科学,2012,30(3):121-123,99.

[7] 施华堂,顾功开,乔兴斌,等. 乌东德水电站左岸防渗帷幕布置方案优化研究[J]. 人民长江,2019,50(3):161-165.

[8] 国家能源局. 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范:DL/T 1548-2021[S]. 北京:中国电力出版社,2021.

## Test Study on Curtain Grouting Method of Xiongan Storage Reservoir in the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project

LI Zi-kang<sup>1</sup>, XIAO Bi<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>

(1. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China;

2. South-to-North Water Diversion Middle Route Industrial Development Co., Ltd., Beijing 100038, China)

**Abstract:** The Xiongan storage reservoir is a pumped storage reservoir, an important water source project supporting the construction and development of the Xiongan new area, and a key supporting project to ensure the safety of water supply in the new area, with high requirements for project seepage prevention. The F<sub>173</sub> fault, which is the largest fault in the reservoir basin, runs through the NE-SW direction, and forms low passes on the NE side and the SW side of the reservoir basin, and there is local dissolution along the fault. The lithology and structural sealing conditions of the reservoir are poor. In order to control the seepage of the reservoir, curtain grouting was used to prevent seepage around the reservoir. In order to explore a suitable implementation method for curtain grouting of Xiongan storage reservoir, it is necessary to determine the anti-seepage treatment measures, grouting construction method and construction technology of the F<sub>173</sub> fault through grouting test research. The results indicate that the permeability meets the anti-seepage standards and the fatigue resistance is improved.

**Key words:** Xiongan storage reservoir; grouting test; curtain grouting; anti-seepage treatment

(上接第 93 页)

[6] 孔德志,朱俊高. 邓肯-张模型几种改进方法的比较[J]. 岩土力学,2004(6):971-974.

[7] 黄焜,蔡德所,涂小龙. 猴子岩超高面板堆石坝应力和位移非线性有限元分析[J]. 水电能源科学,2018,36(5):57-60.

[8] 张媛媛. ANSYS 在土坝渗流场和应力场及其耦合分析中的应用研究[D]. 南京:河海大学,2006.

[9] 袁野,费文平. 基于 ANSYS 软件 UPFs 的邓肯-张模型二次开发[J]. 武汉大学学报(工学版),2021,54(7):601-608.

[10] 孙明权,陈姣姣,刘运红. 邓肯-张 E-B 模型的 ANSYS 二次开发及应用[J]. 华北水利水电学院学报,2013,34(2):30-34.

[11] 中华人民共和国水利部. 混凝土面板堆石坝设计规范:SL228-2013[S]. 北京:中国水利水电出版社,2013.

## Development of ANSYS-based Optimized Duncan-Zhang Model Calculation Program Module and Panel Rockfill Dam Stress-Deformation Analysis

CHENG Yang, ZHANG Hui-ying, WANG Xin-hua, ZHANG Zhi-hao, WANG Shuo

(College of Water Resources, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

**Abstract:** The Duncan-Zhang model is not able to reflect the influence of the mid-major stress on the strength and deformation of the rockfill body in the finite element calculations of the panel rockfill dam. The Duncan-Zhang E-B model and its optimization model for the panel rockfill dam has been developed by the secondary development of ANSYS based APDL language. The Duncan-Zhang E-B model and its optimization model were used to calculate the three-dimensional finite element static force of a panel rockfill dam in Yunnan Province. The results show that the settlement of the dam body was reduced, the horizontal displacement was reduced, and the stress change was small. The strain results obtained from the optimization model are closer to the actual data. The optimization Duncan-Zhang E-B model considering the medium principal stress can better reflect the stress-deformation characteristics of the panel rockfill dam.

**Key words:** ANSYS; Duncan-Zhang model; secondary development; panel rockfill dam; stress-strain