

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.06.002

考虑岩土特性的心墙堆石坝坝基廊道断面优选方法

郑顺祥¹, 龚亚琦², 高全义¹, 颀志强²

(1. 华电金沙江上游水电开发有限公司, 四川 成都 610041;

2. 长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉 430010)

摘要: 基于大型有限元软件 ANSYS 平台, 采用 APDL 语言编写参数化控制的邓肯-张 E-B 模型计算程序模块, 制定堆石坝结构计算流程, 并通过具体算例验证程序的正确性, 在此基础上对某在建水电站心墙堆石坝坝基廊道进行三维线性及非线性有限元分析, 优选廊道断面型式。结果表明: 在大型有限元软件平台上进行邓肯-张 E-B 本构模型的二次开发是可行的; 外围岩土的材料特性对廊道受力状态影响很大; 不同底板衬砌厚度对廊道应力的影响较大, 随着底板厚度的增加, 廊道底板表面最大拉应力数值逐渐减小, 而拱顶内侧拉应力则呈现先减小后增大的趋势, 综合廊道变形、应力、破坏区域及经济性来看, 推荐采用城门洞形断面, 同时底板厚度 1.8 m~2.0 m。该方法通用性强, 操作简便。

关键词: 心墙堆石坝; 坝基廊道; 邓肯-张 E-B 模型; 有限元; 数值模拟

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)06-0009-06

Optimal Selection of Dam Foundation Gallery Section for Core Rockfill Dam Considering the Characteristics of the Rock Mass and Soil

ZHENG Shunxiang¹, GONG Yaqi², GAO Quanyi¹, XIE Zhiqiang²

(1. Huadian Jinsha River Upstream Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610041, China;

2. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: A parameterized control Duncan Zhang E-B model calculation program module is developed using APDL language based on the large-scale finite element software ANSYS platform, and calculation process of the rockfill dam also is designed, the reliability of the program is verified by the numerical example. The three-dimensional linear and nonlinear finite element analysis on the foundation gallery of a core rockfill dam under construction are completed to optimize the gallery section type and dimension. The research results show that secondary development of the Duncan Zhang E-B constitutive model on large-scale finite element software platforms is feasible and the material properties of the surrounding rock mass and soil have a significant impact on the stress state of the foundation gallery. The influence of different thicknesses of bottom lining on the stress of the gallery has compared. The results show that the characteristics of the surrounding rock mass and soil have a significant impact on the stress state of the corridor; as the thickness of the bottom plate increased, the maximum tensile stress value on the surface of the gallery bottom plate gradually decreased, while the tensile stress on the inner side of the arch showed a trend of first decreasing and then increasing. Considering the deformation, stress, failure zone and economy of the gallery, it is recommended to use a city gate shaped cross-section with a bottom plate thickness of 1.8 m~2.0 m. This method has strong universality, easy operation, and can provide reference for other similar engineering constructions.

Keywords: core rockfill dam, foundation gallery; Duncan-Zhang E-B model; FEM; numerical simulation

收稿日期: 2024-09-04

修稿日期: 2024-10-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52239009); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF20241023/CL)

作者简介: 郑顺祥(1974—), 男, 正高级工程师, 主要从事水利水电工程设计施工与管理工作。E-mail: 1535868615@qq.com

通讯作者: 龚亚琦(1980—), 男, 正高级工程师, 主要从事水工结构数值分析与安全评价等方面工作。E-mail: gongyq@mail.crsri.cn

心墙堆石坝以其工程造价低、施工简便、对地形地质条件适应性强等优点,在水电建设中应用广泛^[1]。心墙堆石坝的防渗墙与心墙之间往往设置有坝基廊道,廊道不仅可以起到连接防渗墙和心墙的作用,还可以作为灌浆廊道缩短建设工期,更可以为后期监测和检修提供通道,坝基廊道的功能作用明显^[2]。但是,廊道等孔洞一定程度上削弱了结构刚度,同时这些孔洞往往尺寸较大,同时在自重等荷载作用下,廊道周围混凝土的变形和受力也变得非常复杂,混凝土廊道的防裂成了业界关注的问题^[3]。工程实践表明,合理的断面形状能够起到调整应力重分布,降低集中应力,保持结构安全稳定等作用^[4],同时,良好的断面设计可以降低工程造价,缩短施工周期,提升隧道工程安全指标和经济成本。

断面优化的研究成果在隧道工程中较为丰富,主要采用解析公式或者有限元法,李浩等^[5]对比分析了圆形断面、矩形断面、直墙式断面和曲墙式断面等不同断面条件下围岩的位移和应力的分布规律,研究表明,矩形断面应力集中系数最大,圆形断面应力集中系数最小;曾文浩等^[6]采用数值模拟、模型试验和现场监测相结合的方法对比分析了不同变截面段的隧道变形和支护结构受力特性;董书明等^[7]对圆形断面、矩形断面、直墙圆拱形断面、蛋壳形断面形状的水工隧洞开挖开展了有限元分析,并通过位移、应力和塑性区等对四种断面进行了优选。

与隧洞不同,心墙堆石坝往往坐落在深厚覆盖层上,堆石和覆盖层的应力-应变特性呈现非线性,如果不考虑岩土的非线性特性,廊道的优化设计是不可靠的,而实际工程中,基于岩土本构模型的堆石坝坝基廊道断面优化研究工作还相对较少^[8]。

目前,国内岩土工程中应用最广泛的本构模型是邓肯-张 E-B 模型^[9-10],此模型形式简单,参数物理意义明确,且容易获得^[11]。但是,国际著名的大型通用有限元软件,如:ANSYS、ABAQUS、ADINA 等自带的材料库中均没有邓肯-张 E-B 模型,需要用户二次开发才能实现堆石坝的数值模拟,这严重制约了有限元方法在堆石坝工程中的应用。

本文在大型有限元软件 ANSYS 平台上进行二次开发,通过研究堆石坝计算流程,编写参数化控制的邓肯-张 E-B 模型计算程序模块,拟对某在建水电站心墙堆石坝坝基廊道结构进行三维线性和非线性有限元分析,优选廊道断面型式。以期为类似堆石坝工程应力变形分析提供参考。

1 计算理论

1.1 邓肯-张 E-B 模型

邓肯-张 E-B 模型^[12]属于非线性弹性模型,其基本参数为切线弹性模量 E_t 和切线体积模量 B_t 。

切线弹性模量:

$$E_t = E_i (1 - R_f \cdot S_1)^2 \quad (1)$$

切线体积模量:

$$B_t = k_b \cdot P(\sigma_3/P)^m \quad (2)$$

泊松比:

$$\nu = \frac{3B_t - E_t}{6B_t} \quad (3)$$

式中: E_i 为初始切线模量; R_f 为破坏比,定义为极限破坏时主应力差与极限值之比; S_1 为应力水平; P 为大气压强; σ_3 为单元的小主应力; k_b 、 m 分别为体积弹性模量基数和体积模量指数。 S_1 、 E_i 、 R_f 计算表达式分别为:

$$S_1 = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin\varphi)}{2c \cos\varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi} \quad (4)$$

$$E_i = k \cdot P(\sigma_3/P)^n \quad (5)$$

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad (6)$$

式中: σ_1 为单元的大主应力; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; k 、 n 分别为弹性模量基数和弹性模量指数。

对于颗粒体材料,考虑材料抗剪强度随围压增大而降低,内摩擦角改为^[13]:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg\left(\frac{\sigma_3}{P}\right) \quad (7)$$

式中: φ_0 、 $\Delta\varphi$ 由试验确定的材料参数。

对于卸载情况,用下列回弹模量代替切线弹性模量:

$$E_{ur} = k_{ur} P \left(\frac{\sigma_3}{P} \right)^{n_{ur}} \quad (8)$$

式中: E_{ur} 为试验确定的回弹模量基数; n_{ur} 为回弹模量指数。

根据上面的计算公式可知,要采用邓肯-张模型,只需要确定 φ 、 c 、 k 、 n 、 R_f 、 k_b 、 m 、 k_{ur} 及 n_{ur} 等 9 个参数,而这些参数都可以根据常规三轴试验获得。

1.2 邓肯-张 E-B 模型在 ANSYS 中的实现

邓肯-张 E-B 模型本质是一种建立在增量广义胡克定律基础上的非线性弹性,非线性特性是通过不断改变其切线弹性模量来实现的,完全可以通过 ANSYS 软件自带的 APDL 参数化语言进行编程实现^[14-15],同时借助单元生死功能实现施工过程的

模拟,从而在每个施工过程中实现岩土的弹性模量和泊松比的修改更新,因此,邓肯-张 E-B 模型在 ANSYS 中的计算流程主要涉及开发邓肯-张 E-B 模型计算程序和制定堆石坝施工过程。

(1) 邓肯-张 E-B 模型计算程序的开发

邓肯-张 E-B 模型计算程序除了 E-B 模型参数变量的定义外,主要包括如下内容:

① 根据应力分量,计算材料积分点的主应力,同时按照土力学的规定,调整大小主应力的符号,计算主应力差。

② 根据公式(4)计算主应力水平,判断加卸载过程,加载时采用公式(1)—公式(2)计算加载过程对应的弹性模量和泊松比;卸载时采用公式(8)和公式(2)计算卸载过程对应的弹性模量 E 和泊松比 ν ;对泊松比数值进行检查,当 $\nu > 0.49$ 时,取 $\nu = 0.49$ 。

③ 材料参数更新后进行有限元计算求解。

④ 根据当前的应变增量计算应力增量,并与原应力分量合成新的应力分量。

⑤ 由新的应力分量再次计算大小主应力、主应力差以及应力水平,并输出历史最大变量。

(2) 堆石坝施工过程模拟

步骤 1:根据试验数据,确定新浇筑层的材料参数。

对于新生单元,土体的初始应力状态取值^[10]:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \gamma h \\ \sigma_3 = (0.95 - \sin\varphi)\gamma h \end{cases} \quad (9)$$

式中: γ 为重度; h 为新生单元形心距土层表面的深度; φ 为材料的内摩擦角。

根据上述初始应力状态,根据的 E-B 模型公式计算出新浇筑坝体的初始弹性模量和泊松比,并赋值给对应的单元作为初始材料参数。

步骤 2:利用 ANSYS 软件中的单元生死功能激活新浇筑层单元,调用 E-B 参数化计算程序,进行第一次求解计算。

步骤 3:计算完成后,提取计算单元的大主应力和小主应力,更新材料的弹性模量和体积模量,继续调用 E-B 参数化计算程序,进行第二次计算。

为了提高收敛速度,方程求解采用中点增量法求解^[10],该方法可以借助重启分析完成。

步骤 4:利用单元生死功能,依次填筑进行施工过程模拟,重复步骤 1~步骤 3,直至坝体填筑完毕。计算得到坝体在竣工期的应力变形结果。

步骤 5:运营期模拟,将蓄水过程分为若干时间

步,每个蓄水时间步重复竣工期计算类似的步骤。计算得到坝体在运行期的应力变形值。

1.3 邓肯-张 E-B 模型验证

为了验证二次开发程序的可靠性,选用常规三轴压缩试验^[16]的加载过程进行模拟。试验采用圆柱体试件(直径 $D = 39.1$ mm,高度 $H = 80$ mm),E-B 模型参数见表 1 所示^[16]。

考虑模型的对称性,取 1/4 试件建立三维有限元模型,模型的加载方式与三轴压缩试验保持一致。模型底部轴向约束,对称面施加对称约束条件,围压施加 0.3 MPa,顶部按位移分级加载。

图 1 给出了围压为 0.3 MPa 时,ANSYS 计算的偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$)与轴向应变(ε_a)的关系曲线与 Duncan-Change 理论曲线,由图可以看出,ANSYS 计算结果与理论曲线吻合较好,从而验证了二次开发程序的可靠性。

表 1 邓肯-张 E-B 模型参数

黏聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	破坏比 R_f	弹性模量基数 k	弹性模量指数 n	体积模量基数 K_b	体积模量指数 m
0.006	44.421	0.613	215.5	0.92	151.01	0.075

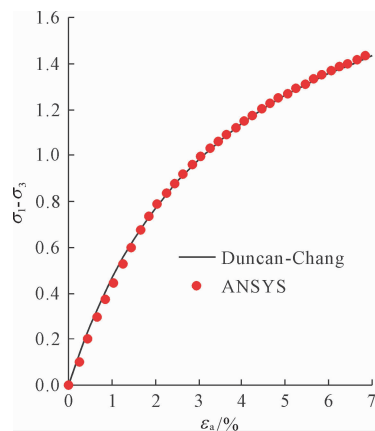


图 1 围压 0.3 MPa 时 ($\sigma_1 - \sigma_3$)- ε_a 曲线

2 计算模型及材料参数

2.1 计算模型

某沥青混凝土心墙堆石坝工程,最大坝高 69 m,河床覆盖层深厚,根据河床勘探钻孔揭露,河床覆盖层厚 17.70 m~58.80 m,河心纵向覆盖层厚 35.35 m~55.55 m,下游侧相对较厚。设置坝基廊道,与心墙和防渗墙直接联接,防渗墙厚度为 1.2 m,廊道长约 215 m(桩号 0+64.47 m—0+279.32 m)。

廊道尺寸 3 m×3.5 m(宽×高),廊道与防渗墙

采用刚性连接。选取了三种断面形状,分别为矩形(断面1)、城门洞形(断面2)和马蹄形(断面3),如图2,浇筑方量见表2。

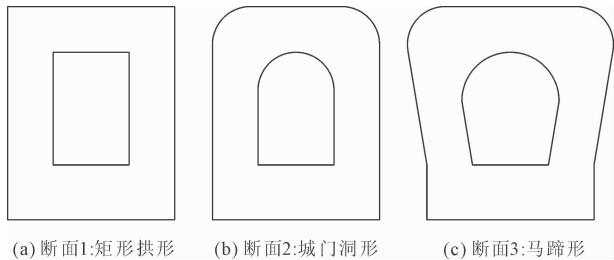


图2 不同断面形状示意图

表2 不同断面廊道填筑量

断面型式	混凝土方量/($t \cdot m^{-1}$)
矩形	7.02
城门洞形	7.01
马蹄形	7.56

建立包含坝体、心墙、廊道、堆石体、坝基覆盖层、防渗墙、基岩在内的最大断面的平面有限元模型,廊道周围关心区域网格采用加密网格,精细模拟防渗墙、基础廊道、基础廊道与两岸端部连接墙的接

头部分、廊道与防渗墙的刚性连接区域,对于远离廊道的区域则采用相对粗的网格,有限元模型如图3所示。模型中, X 轴为顺河向,指向下游为正; Y 轴为横河向,指向左岸为正; Z 轴为竖向,指向上为正。由于本文侧重于研究邓肯-张E-B本构模型在坝基廊道计算中的应用,因此,计算过程中暂时不考虑湿化、蠕变等因素。

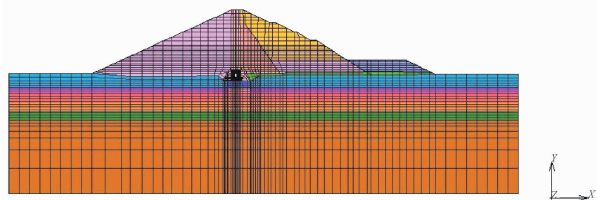


图3 有限元计算模型

2.2 材料参数

堆石体、覆盖层、心墙的本构模型采用邓肯E-B模型^[3],如表3所示。

混凝土防渗墙和基岩采用线弹性本构模型,如表4所示。混凝土廊道采用线弹性和非线性本构模型。

表3 邓肯-张E-B模型材料参数

材料	干密度 /($g \cdot cm^{-3}$)	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	内摩擦角 系数 $\Delta\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/MPa	破坏比 R_f	弹性模量 基数 k	弹性模量 指数 n	回弹模量 基数 K_{ur}	体积模量 基数 K_b	体积模量 指数 m
堆石Ⅰ区	2.32	52.5	10.3	0.00	0.62	919	0.26	1838	545	0.07
堆石Ⅱ区	2.30	50.8	9.6	0.00	0.64	758	0.28	1516	385	0.13
堆石Ⅲ区	2.16	50.4	9.5	0.00	0.60	434	0.40	868	208	0.30
过渡层	2.33	57.5	12.2	0.00	0.61	1418	0.28	2836	1043	0.04
沥青心墙	2.41	26.6	0.0	0.16	0.70	312	0.23	936	2048	0.54
覆盖层①	1.54	46.7	4.4	0.00	0.65	756	0.41	2268	290	0.35
覆盖层②	1.27	37.5	1.5	0.00	0.80	300	0.35	600	150	0.45

表4 线弹性材料参数

名称	弹性模量/GPa	泊松比	密度/($g \cdot cm^{-3}$)
混凝土	28.00	0.167	2.4
基岩	2.75	0.300	2.6

3 成果讨论

3.1 断面型式的优选

正常蓄水工况,廊道水平向位移远大于竖向位移,最大水平位移分别为30.17 cm(矩形断面)、34.41 cm(城门洞形断面)和32.18 cm(马蹄形断面);最大竖向位移分别为-6.9 cm(矩形断面)、-5.6 cm(城门洞形断面)和-7.1 cm(马蹄形断

面),如表5所示。

正常蓄水工况,不同断面的最大拉应力和压应力如图4—图6所示。其中,断面1(矩形),正常蓄水工况下,矩形角点存在较大的应力集中,底板内表面最大拉应力为5.3 MPa,侧墙最大压应力为-17.7 MPa;断面2(城门洞形),除上部拱顶内侧表面存在0.8 MPa左右的拉应力外,上部圆拱基本为压应力,底板中部表面最大拉应力为4.23 MPa,直墙段墙角处附近最大压应力为-14.2 MPa;断面3(马蹄形),除上部拱顶内侧表面存在1.6 MPa左右的拉应力外,上部圆拱其它区域基本为受压状态,底板中部表

面最大拉应力为 5.62 MPa,侧墙中部附近最大压应力为 -14.6 MPa。不同断面型式的最大应力见表 6。从三个断面应力分布来看,断面 2(城门洞形)最大主拉应力和主压应力数值均最小,且应力分布较为均匀。

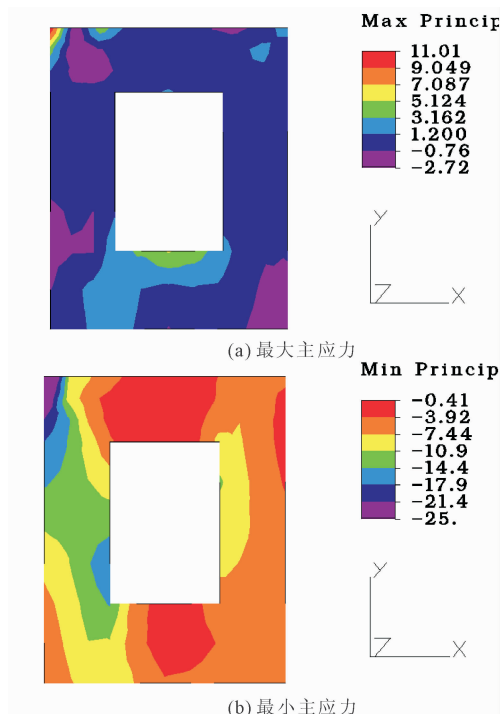


图 4 矩形断面主应力分布(单位:MPa)

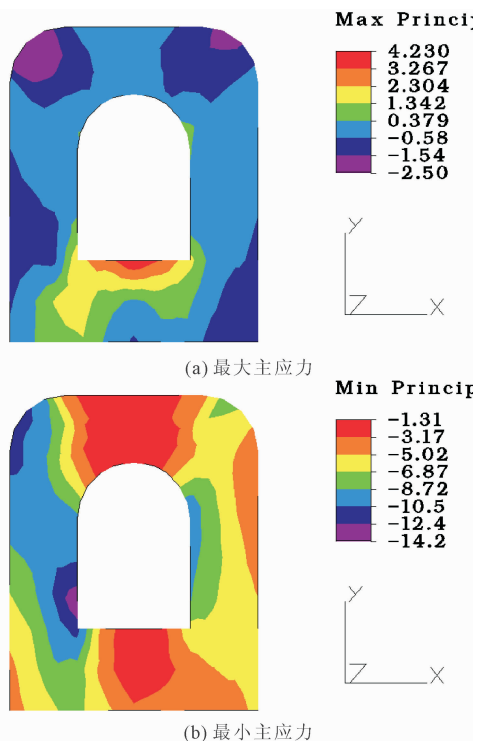


图 5 城门洞形断面主应力分布(单位:MPa)

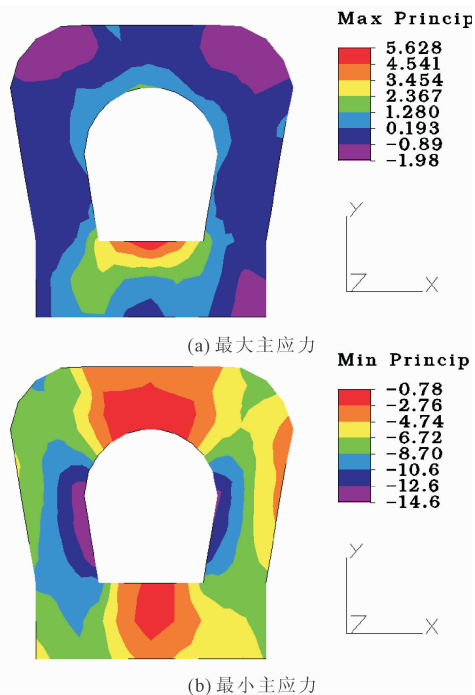


图 6 马蹄形断面主应力分布(单位:MPa)

表 5 不同断面廊道最大位移

断面型式	水平位移/cm	竖向位移/cm
矩形	30.17	-6.9
城门洞形	34.41	-5.6
马蹄形	32.18	-7.1

表 6 不同断面廊道最大应力

断面型式	最大拉应力/MPa	最大压应力/MPa
矩形	5.30	-17.7
城门洞形	4.23	-14.2
马蹄形	5.62	-14.6

非线性分析表明,三种断面条件下,矩形断面混凝土廊道的破坏区域最大,城门洞断面和马蹄形断面相对较小,如图 7 所示。

综合廊道变形、应力、破坏区域及经济性来看,推荐采用城门洞形断面。同时,可以看出,上述对比分析结果与隧道工程中的相关文献^[17-18]计算得出的马蹄形断面在应力水平、围岩位移分布以及塑性区等方面均优于城门洞形断面的结论不同。可见,外围结构采用不同的本构模型对混凝土衬砌断面选型的影响还是很大的,对于堆石坝坝基廊道结构,岩土采用符合自身特性的邓肯-张本构模型是非常有必要的。

3.2 底板衬砌厚度的比较

针对城门洞形断面,分别选取不同的衬砌厚度

(底板衬砌厚度分别为 1.2 m、1.5 m、1.8 m 和 2.0 m),比较廊道应力和变形的变化情况,其中,廊道顶部和侧墙的衬砌厚度保持不变。

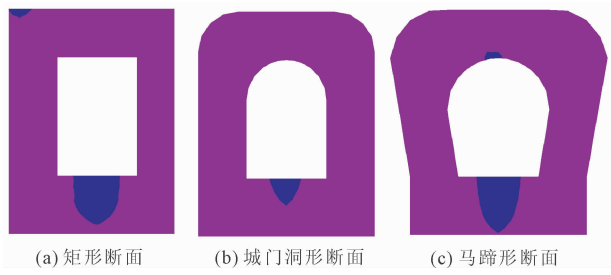


图 7 不同断面混凝土廊道结构破坏区分布(单位:MPa)

底板衬砌取不同厚度条件下,廊道顶、底板拉应力极值如表 7 所示。随着底板厚度的增加,底板表面最大拉应力数值逐渐减小,当厚度增加到 1.8 m 后,拉应力减幅趋缓,而拱顶内侧拉应力则呈现先减小后增大的趋势,当厚度增为 1.8 m 时,顶板拉应力最小,如图 8、图 9 所示。

表 7 不同底板衬砌厚度下廊道应力极值

底板厚度/m	第一主应力/MPa	
	底板	拱顶
1.2	6.67	1.15
1.5	5.29	0.91
1.8	4.23	0.80
2.0	4.15	1.14

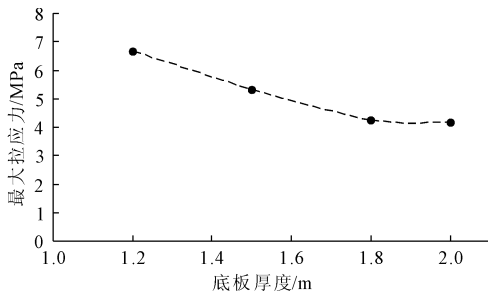


图 8 底板最大拉应力随底板厚度变化曲线(单位:MPa)

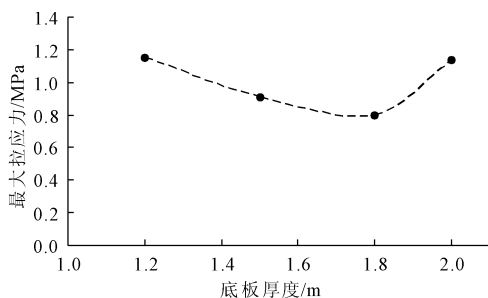


图 9 拱顶最大拉应力随底板厚度变化曲线(单位:MPa)

4 结 论

(1) 通过编写参数化控制的邓肯-张 E-B 模型计算程序模块,在大型有限元软件平台上进行二次开发,同时利用软件自带 APDL 参数化编程语言编写子程序并制定相应的计算流程,可以实现心墙堆石坝坝基廊道的有限元分析,算例验证了程序的可靠性。

(2) 岩土采用符合自身特性的本构模型是非常有必要的。当岩土采用邓肯张模型时,坝基廊道采用不同的断面(矩形、城门洞形和马蹄形)条件下,城门洞形断面最大变形、最大拉应力、破坏区域、开挖量数值均最小,且应力分布相对均匀。随着底板厚度的增加,廊道底板表面最大拉应力数值逐渐减小,当厚度增加到 1.8 m 后,拉应力减幅趋于缓慢;拱顶内侧拉应力则呈现先减小后增大的趋势,厚度为 1.8 m 时拉应力最小。

(3) 推荐廊道采用城门洞形断面,底板厚度 1.8 m~2.0 m。

参考文献:

- [1] ICOLD. Asphalt cores for embankment dams[R]. Paris: International Commission on Large Dams, 2018.
- [2] 姚福海. 深厚覆盖层上土石坝基础廊道的结构形式探讨[J]. 水力发电, 2010, 36(6): 55-56.
- [3] 苗君, 姜彦作, 何福娟, 等. 高心墙堆石坝坝基廊道结构型式深化研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(10): 98-101.
- [4] 李哲. 非线性有限元法在有压输水隧洞断面选型及结构设计中的应用[J]. 陕西水利, 2023(9): 150-153.
- [5] 李浩, 朱向阳, 徐永福, 等. 断面形状对隧洞围岩位移和应力的影响分析[J]. 隧道建设, 2009, 29(1): 38-44.
- [6] 曾文浩, 彭雪峰, 张粒, 等. 特大断面变截面隧道受力特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(6): 2062-2071.
- [7] 董书明, 辛全才, 卢树盛. 断面形状对隧洞围岩稳定性的影响分析[J]. 中国农村水利水电, 2011(1): 102-104.
- [8] 冯蕊, 何蕴龙, 曹学兴, 等. 深厚覆盖层上高土石坝坝基廊道安全性研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2023, 56(5): 513-523.
- [9] Duncan J, Chang C. Nonlinear analysis of stress and strain in soil[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1970, 96(5): 1629-1653.

(下转第 51 页)

参考文献:

- [1] 李利平,成 帅,张延欢,等. 地下工程安全建设面临的机遇与挑战[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020,39(4):1-13.
- [2] 苏 栋,张小妹,张国涛,等. 基坑开挖导致邻近既有隧道变形的主动控制研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2024,41(4):130-138.
- [3] 刘 坤,郑 诺,侯禹辰,等. 钢支撑伺服系统在海城人工岛中明挖基坑施工中的应用[J]. 铁道建筑, 2023,63(12):143-147.
- [4] 黄展军,唐晓林,彭俊仁,等. 钢支撑伺服系统在深基坑中应用及优化研究[J]. 公路,2024,69(4):406-415.
- [5] 孙九春,盛健超,王 哲,等. 主动控制轴力作用下基坑围护结构强度研究[J]. 地基处理,2023,5(2):133-143.
- [6] 张国涛,苏 栋,庞小朝,等. 基坑开挖轴力伺服控制对既有地铁隧道变形的影响[J]. 现代隧道技术, 2020,57(S1):521-527.
- [7] 陈 伟,英 旭,周 游,等. 地铁车站深基坑伺服钢支撑轴力分布数值模拟及实测研究[J]. 市政技术, 2023,41(8):260-267.
- [8] 李恒一,何晟亚,徐海岩. 钢支撑伺服系统数值模拟计算方法研究[J]. 城市轨道交通研究,2023,26(12):127-133.
- [9] 李 满,万展君,郝桂宝. 轴力自动补偿支撑系统在复杂场地基坑中的应用[J]. 市政技术,2016,34(5):187-189.
- [10] Choi Jung Youl, Kim Sun Hee, Lee Ho Hyun, et al. Improvement of automatic measurement evaluation system for subway structures by adjacent excavation[J]. Materials, 2021,14(24):7492.
- [11] 杜凡林. 深基坑钢支撑轴力伺服系统监测[J]. 建筑技术,2023,54(15):1864-1867.
- [12] 郭鹏飞,杨龙才,周顺华,等. 基坑开挖引起下卧隧道隆起变形的实测数据分析[J]. 岩土力学,2016,37(S2):613-621.
- [13] 殷一弘. 深厚软土地层紧邻地铁深大基坑分区设计与实践[J]. 岩土工程学报,2019,41(S1):129-132.
- [14] 魏 纲,冯非凡,朱家烜,等. 应用伺服钢支撑的邻近盾构隧道车站深基坑开挖实测分析[J]. 自然灾害学报,2023,32(1):93-104.
- [15] Di Honggui, Guo Huiji, Zhou Shunhua, et al. Investigation of the axial force compensation and deformation control of servo steel struts in a deep foundation pit excavation in soft clay [J]. Advances in civil engineering, 2019:5476354.
- [16] 张灵熙,张雯超,颜 静,等. 软土地区地铁车站深基坑变形伺服控制分析[J]. 施工技术(中英文),2023,52(17):55-60.
- [17] 胡玉柳. 超长异形深基坑施工对紧邻运营线路水平位移影响分析[J]. 路基工程,2023(5):29-34.
- [18] 福建省地质工程研究院. 福州至长乐机场城际铁路岩土工程勘察报告[R]. 福州:福建省地质工程研究院,2019.
- [19] 北京城建设计发展集团股份有限公司. 福州市轨道交通滨海快线福州火车站施工图[R]. 北京:北京城建设计发展集团股份有限公司,2021.
- [10] Duncan J M, Byrne P M, et al. Strength stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movement in soil masses [R]. Berkeley:University of California, 1980.
- [11] 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.
- [12] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [13] 徐远杰,王观琪,李 健,等. 在 ABAQUS 中开发实现 Duncan-Chang 本构模型[J]. 岩土力学,2004,25(7):1032-1036.
- [14] 李佳敏,马荣峰,年进龙,等. 基于 ANSYS 的二次开发对面板堆石坝应力变形计算[C]//2023 年全国土木工程施工技术交流会论文集(下册),中国北京, 2023.
- [15] 姚晓敏,陈 雷,许学问,等. 基于 ANSYS 二次开发邓肯 E-B 模型的土石坝应力变形分析[J]. 中国水运(下半月),2022,22(7):45-47.
- [16] 冯卫星,常绍东,胡万毅. 北京细砂土邓肯-张模型参数试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(3):327-330.
- [17] 黄康鑫,王 静,杨兴国,等. 高地应力条件下输水隧洞断面选型及支护设计[J]. 水利学报,2015,46(S1):331-337.
- [18] 常建强,张继华,朱鞠兵. 基于 FLAC^{3D} 的隧道断面形状优化与支护技术研究[J]. 西部交通科技,2019(12):76-80.

(上接第 14 页)