

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.02.009

改进 hhu-SH 模型及其在面板堆石坝工程中的应用

王柳江^{1,2},刘啸宇¹,刘斯宏^{1,2},扎西顿珠³,沈超敏^{1,2}

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 大坝长效特性及环保修复技术中西联合实验室,江苏 南京 210098;
3. 西藏自治区水利电力规划勘测设计研究院,西藏 拉萨 850004)

摘要: 针对粗粒料的剪胀特性,引入 4 次幂函数剪胀方程对基于细观结构的粗粒料弹塑性本构模型(hhu-SH 基本模型)进行改进,并给出了改进 hhu-SH 模型屈服函数、硬化参量、初始弹性模量的推导过程以及参数确定方法。基于某抽水蓄能电站下水库面板堆石坝工程,利用其筑坝粗粒料的三轴 CD 试验和等向压缩试验结果,整理出改进 hhu-SH 模型的参数,模拟大坝填筑和蓄水过程,并将计算结果与邓肯 E-B 和南水模型的计算结果进行对比。结果表明:在坝体位移的定性分布规律上,改进 hhu-SH 模型、邓肯 E-B 模型以及南水模型的计算结果基本一致,验证了该模型的工程适用性;基于改进 hhu-SH 模型计算的坝体变形、面板变形和应力以及接缝位移预测值均小于 E-B 模型,但与南水模型较为接近;基于改进 hhu-SH 模型计算得到的面板顺坡向应力整体受压,结果更符合实际。

关键词: 粗粒料;改进 hhu-SH 模型;剪胀方程;数值模拟;面板堆石坝

中图分类号: TV641.43;TV31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)02-0064-09

Modified hhu-SH model and its application in the concrete-faced rockfill dam

WANG Liujiang^{1,2}, LIU Xiaoyu¹, LIU Sihong^{1,2}, TASHI Dunzhu³, SHEN Chaomin^{1,2}

(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. International Joint Laboratory of Long-term Behaviour & Environmentally Friendly Rehabilitation Technologies on Dams, Nanjing 210098, China;
3. Tibet Hydraulic Waterpower Planning and Designing Institution, Lasha 850004, China)

Abstract: To reflect the dilatancy behavior of the coarse-grained materials, the dilatancy equation in the form of the fourth power function was introduced to modify the basic hhu-SH model that is an elastoplastic constitutive model of coarse grains based on the mesoscopic structure. In addition, the yield function, hardening parameter, derivation process of initial elastic modulus, and parameter determination method in the modified hhu-SH model were given. Relying on the concrete-faced rockfill dam (CRFD) in a pumped storage power station, the parameters of the modified hhu-SH model for different coarse-grained materials were determined by using the results of CD triaxial tests and isotropic compression tests. Then, the numerical simulation was conducted to study the stress and deformation of CRFD under the action of filling and impounding. Meanwhile, the calculated results were compared with those by using Duncan E-B model and Shen's elastoplastic model. It shows that the results obtained from modified hhu-SH model are similar to those of Duncan's E-B model and Shen's elastoplastic model in the respect of the distribution of dam deformation, which validates the applicability of the modified hhu-SH model. However, from a quantitative perspective, the deformation of dam, deformation and stress of the concrete-slab, and displacement of the joints calculated by the modified hhu-SH model were smaller than that by Duncan's E-B model generally, while closer to that of Shen's elastoplastic model. Furthermore, the stress of the concrete-slab along the slope is the compression stress generally, which is consistent with the monitoring.

Key words: coarse-grained materials; modified hhu-SH model; dilatancy equation; numerical simulation; CRFD

随着面板堆石坝的迅速发展,经典弹塑性、非线性弹性本构模型在水利工程中发挥了重要作用。为了进

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFE0105000,2021YFC3090101);国家自然科学基金(52222906,U21A20158,51979091,52009036)
作者简介: 王柳江(1985—),男,副教授,博士,主要从事土石坝与地基加固技术研究。E-mail:15850514642@163.com
引用本文: 王柳江,刘啸宇,刘斯宏,等. 改进 hhu-SH 模型及其在面板堆石坝工程中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):64-72.
WANG Liujiang,LIU Xiaoyu,LIU Sihong, et al. Modified hhu-SH model and its application in the concrete-faced rockfill dam[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(2):64-72.

一步提高面板堆石坝应力变形预测精度,构建能够精确反映筑坝材料力学特性的本构模型是数值模拟的关键。关于筑坝粗粒料的应力变形特性,国内外已开展了大量研究,并取得了丰硕的成果。研究^[1-8]表明,碾压密实的粗粒料在低围压下具有明显的剪胀性,在高围压条件下剪胀性逐渐减弱并消失。因此,在构建粗粒料本构模型时,考虑其剪胀特性能有效提高面板堆石坝应力变形特性的预测精度。

目前,国内土石坝计算中常用邓肯 E-B 模型^[9],但该模型无法反映筑坝粗粒料的剪胀特性,使得其计算得到的坝体变形与实测值之间有时存在较大差异,尤其是水平向位移明显大于实测值。为考虑粗粒料剪胀特性的影响,以沈珠江南水模型^[10]和殷宗泽椭圆-抛物双屈服面模型^[11]为代表的弹塑性模型相继被应用于土石坝应力变形分析,并得到较为合理的结果。此外,陈生水等^[12]提出了一个能够统一考虑加载变形与流变的粗粒土弹塑性本构模型,并将其应用于某特高心墙堆石坝填筑施工过程的模拟;朱俊高等^[13]将砂土 UH 模型应用于某心墙堆石坝的三维有限元分析,并同 E-B 模型和监测资料进行比较,验证了该模型在土石坝工程中的适用性和合理性;Zou 等^[14]采用广义塑性模型分析了汶川地震对紫坪铺面板堆石坝应力变形特性的影响。上述研究表明,由于弹塑性本构模型能够考虑粗粒料的剪胀、剪缩特性,对应的坝体沉降和顺河向位移预测结果较 E-B 模型有所减小,更接近实测值。近年来,刘斯宏等^[15]在经典弹塑性理论框架内,建立了一个基于细观结构的粗粒料弹塑性本构模型(hhu-SH 基本模型),该模型能够考虑粗粒料的剪胀特性和强度非线性,但其剪胀方程为修正剑桥模型剪胀方程的改进形式,对黏土和砂土具有较好的适用性,却无法很好地模拟粗粒料的剪胀关系,因此有必要对该模型进行改进。

本文基于某抽水蓄能电站筑坝粗粒料的三轴 CD 试验结果,采用陈生水等^[12]提出的 4 次幂函数形式剪胀方程对 hhu-SH 基本模型进行改进,并给出了改进 hhu-SH 模型的推导过程及参数确定方法;在此基础上,将改进 hhu-SH 模型应用于某抽水蓄能电站下水库面板堆石坝的应力变形分析,研究竣工期和蓄水期的坝体位移、面板变形及应力、接缝位移的分布规律,并同 E-B 模型和南水模型的计算结果进行对比,以验证该模型的工程适用性。

1 hhu-SH 基本模型及其改进

1.1 屈服函数

刘斯宏等^[16]通过等向压缩、等平均正应力(p)剪切、侧限压缩和等围压(σ_3)剪切 4 种不同应力路径下的双轴压缩试验 DEM 数值模拟,整理得到细观结构参量 S 与宏观应力的关系曲线,并基于屈服面上细观结构参量 S 相等的假设,推导了一个基于细观结构的颗粒材料屈服函数:

$$f = \frac{q}{p} - k \left(\frac{p_x}{p} - 1 \right)^n = 0 \tag{1}$$

式中: q 为广义偏应力; p 为平均正应力; p_x 为屈服面与 p 轴的交点, p_x 的变化表征了屈服面的硬化; k 、 n 为屈服函数的参数,两者存在内在关系,与堆石料的峰值强度有关。

设 $m=1/n-1$,根据应力比达到峰值 M_f 时 $dq=0$,可得到参数 $k = \sqrt[m+1]{m} M_f$ 。当 k 等于临界状态应力比 M 、 $n=0.5$ 时,屈服面可退化为修正剑桥模型。

1.2 剪胀方程

hhu-SH 基本模型采用了修正剑桥模型剪胀方程的改进形式,表达式如下:

$$\frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_d^p} = \frac{mM_d^{m+1} - m\eta^{m+1}}{(m+1)\eta^m} \tag{2}$$

式中: $d\varepsilon_v^p$ 、 $d\varepsilon_d^p$ 为塑性体应变和广义剪应变; η 为应力比, $\eta=q/p$; M_d 为加载临胀应力比。

图 1 为某抽水蓄能电站下库面板堆石坝主堆石料在三轴剪切过程中剪胀比与应力比的关系。当应力比小于 1.0 时,剪胀比变化较小;当应力比大于 1.0 后,剪胀比随应力比的增大快速减小并变为负值(即剪胀)。可以看到,初始剪胀方程(式(2))对粗粒料剪胀关系的拟合效果较差,而陈生水等^[12]提出的剪胀方程可较好地拟合粗粒料的剪胀关系。因而本文采用陈生水等^[12]提出的剪胀方程对 hhu-SH 基本模型进行改进,其表达式如下:

$$\frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_d^p} = d_0 \left[1 - \left(\frac{\eta}{M_d} \right)^4 \right] \tag{3}$$

式中 d_0 为初始剪胀比。

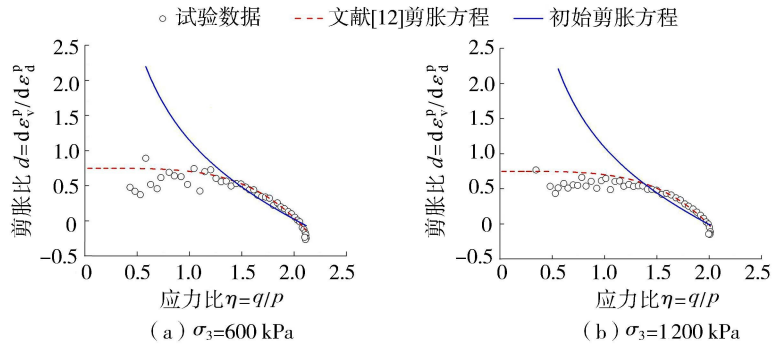


图1 粗粒料剪胀比与应力比的关系

Fig.1 Relationship between dilatancy ratio and stress ratio for coarse-grained materials

1.3 硬化参数

类比剑桥模型,令 $p_x = p_0 \exp(H)$, 式中 H 为硬化参数, p_0 为初始平均应力, 则式(1)可改写为

$$f = \ln \frac{p}{p_0} + \ln \left[1 + \left(\frac{q}{kp} \right)^{1/n} \right] - H = 0 \tag{4}$$

将塑性功作为硬化参数, 得到:

$$H = \int \phi(p, \eta) d\varepsilon_v^p \tag{5}$$

将式(5)代入式(4), 通过全微分可得到塑性体积应变增量:

$$d\varepsilon_v^p = \frac{1}{\phi(p, \eta)} \left(\frac{\partial f}{\partial p} dp + \frac{\partial f}{\partial q} dq \right) \tag{6}$$

基于等向压缩条件, $dq=0, \eta=0$, 式(6)可以表示为

$$d\varepsilon_v^p = \frac{1}{\phi(p, \eta)} \frac{dp}{p} \Big|_{\eta=0} \tag{7}$$

对于粗粒料, 其等向压缩条件下的体积应变 ε_v 与 p 在双对数坐标系下近似为线性关系, 考虑到弹性变形较小, 认为 $\varepsilon_v = \varepsilon_v^p$, 即:

$$\varepsilon_v^p = t \left(\frac{p}{p_a} \right)^\lambda \tag{8}$$

式中: p_a 为大气压; t 和 λ 为拟合参数。

对式(8)进行求导, 并联立式(7), 可得:

$$\phi(p, \eta) \Big|_{\eta=0} = \frac{1}{\lambda t \left(\frac{p}{p_a} \right)^\lambda} \tag{9}$$

当应力比等于加载临胀应力比时 ($\eta = M_d$), $d\varepsilon_v^p = 0$, 将其代入式(7), 可得:

$$\frac{1}{\phi(p, \eta)} \Big|_{\eta=M_d} = 0 \tag{10}$$

为同时满足使式(9)和(10), 可得到 $\phi(p, \eta)$ 的表达式如下:

$$\phi(p, \eta) = \frac{M_d^{m+1}}{M_f^{m+1}} \frac{M_f^{m+1} - \eta^{m+1}}{M_d^{m+1} - \eta^{m+1}} \frac{1}{\lambda t \left(\frac{p}{p_a} \right)^\lambda} \tag{11}$$

将式(11)代入式(5), 则硬化参数 H 的表达式为

$$H = \frac{1}{\lambda t \left(\frac{p}{p_a} \right)^\lambda} \int \frac{M_d^{m+1}}{M_f^{m+1}} \frac{M_f^{m+1} - \eta^{m+1}}{M_d^{m+1} - \eta^{m+1}} d\varepsilon_v^p \tag{12}$$

1.4 弹性模量

粗粒料的弹性体积应变可以通过 $e-\ln p$ 的回弹段计算, 其弹性体积模量 K_e 为

$$K_e = \frac{1 + e_0}{\kappa} p$$

(13)

式中： κ 为 e - $\ln p$ 曲线的回弹指数； e_0 为初始孔隙比。

设泊松比为 ν ，则弹性剪切模量 G_e 为

$$G_e = \frac{3(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)} K_e$$

(14)

1.5 模型参数确定

改进 hhu-SH 模型共有 10 个参数,分别为初始内摩擦角 φ_0 、内摩擦角相关参数 $\Delta\varphi$ 、初始剪胀角 ψ_0 、剪胀角相关参数 $\Delta\psi$ 、 m 、 d_0 、 λ 、 t 、 κ 、 ν 。

1.5.1 剪切特性参数 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 、 ψ_0 、 $\Delta\psi$ 、 d_0

模型中的 M_f 、 M_d 可根据粗粒料的峰值内摩擦角 φ 、临胀内摩擦角 ψ (排水剪切试验中剪缩与剪胀的转换点对应的摩擦角)确定,计算公式为

$$M_f = \frac{6\sin\varphi}{3 - \sin\varphi} \quad M_d = \frac{6\sin\psi}{3 - \sin\psi}$$

(15)

对于筑坝粗粒料,通常黏聚力 $c = 0$,峰值摩擦角是围压 σ_3 的函数^[12],即:

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg \frac{\sigma_3}{p_a}$$

(16)

筑坝粗粒料的临胀摩擦角与围压的对数同样呈良好的线性关系,即:

$$\psi = \psi_0 - \Delta\psi \lg \frac{\sigma_3}{p_a}$$

(17)

对于参数 d_0 ,可根据三轴压缩试验结果,分别以 $d\varepsilon_v^p/d\varepsilon_d^p$ 和 η 为纵、横坐标整理得到一系列试验点,按式(3)进行拟合即可确定。

1.5.2 压缩特性参数 λ 、 t

参数 λ 和 t 可根据粗粒料的等向压缩试验结果整理 $\varepsilon_v \sim p/p_a$ 的关系,采用式(8)拟合得到。

1.5.3 弹性变形参数 κ 、 ν

κ 为 e - $\ln p$ 曲线中回弹-再压缩段的斜率； ν 为泊松比,粗粒料一般取 0.22。

1.5.4 参数 m

参数 m 决定了屈服面的形状,在上述参数确定后,参数 m 可采用三轴试验结果和优化算法确定。对于粗粒料, m 通常取 0.8。

1.6 模型适应性

为验证该模型的工程适用性,本文采用某面板堆石坝主堆石料、次堆石料、过渡料和垫层料的三轴试验结果进行对比验证,4 种筑坝料的制样孔隙比分别为 0.250、0.266、0.235 和 0.220。根据第 1.5 节介绍的参数确定方法,整理得到改进 hhu-SH 模型的参数,如表 1 所示。由图 2 可知(图中 ε_a 为轴向应变)改进 hhu-SH 模型能够较好地模拟 4 种坝料在各级围压下的三轴 CD 试验结果,能够较好模拟筑坝料应力应变曲线的非线性以及剪胀、剪缩特性。

表 1 坝体填筑料改进 hhu-SH 模型参数

Table 1 Parameters of the modified hhu-SH model for the filling materials of dam body

材 料	λ	$t/10^{-3}$	κ	m	ν	d_0	$\varphi_0/(^{\circ})$	$\Delta\varphi/(^{\circ})$	$\psi_0/(^{\circ})$	$\Delta\psi/(^{\circ})$
垫 层	0.98	0.32	0.003	0.8	0.22	1.0	54.7	9.49	48.8	4.42
过渡层	0.99	0.43	0.003	0.8	0.22	1.0	57.0	12.10	49.4	5.58
主堆石	1.00	0.62	0.003	0.8	0.22	1.0	53.5	10.87	47.4	5.61
次堆石	1.01	0.60	0.003	0.8	0.22	0.95	50.5	9.18	46.6	5.28

2 工程实例验证

2.1 工程概况

某抽水蓄能电站下库大坝为面板堆石坝,最大坝高 84.8 m,大坝上、下游坝坡坡比分别为 1 : 1.4 和 1 : 1.8。

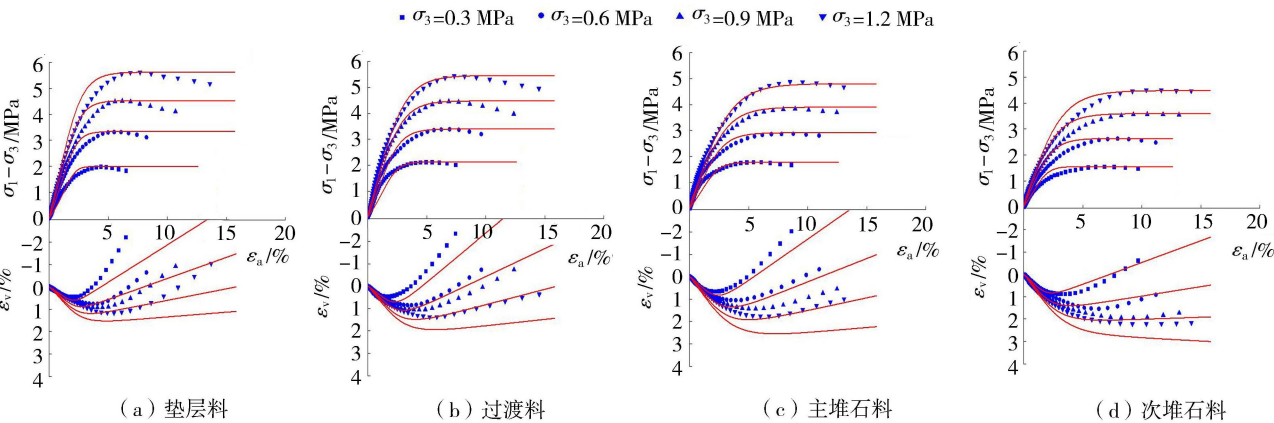


图 2 坝料三轴试验与数值模拟结果

Fig. 2 Experimental and simulation results of triaxial tests for filling materials
坝体填筑材料包括垫层料、过渡料、主堆石料和次堆石料。混凝土面板厚度为 0.4 m+0.002H, 面板间距为 12 m, 两岸局部间距 6 m, 面板之间设垂直缝, 面板与趾板连接处设周边缝。图 3 为下库大坝典型剖面图。

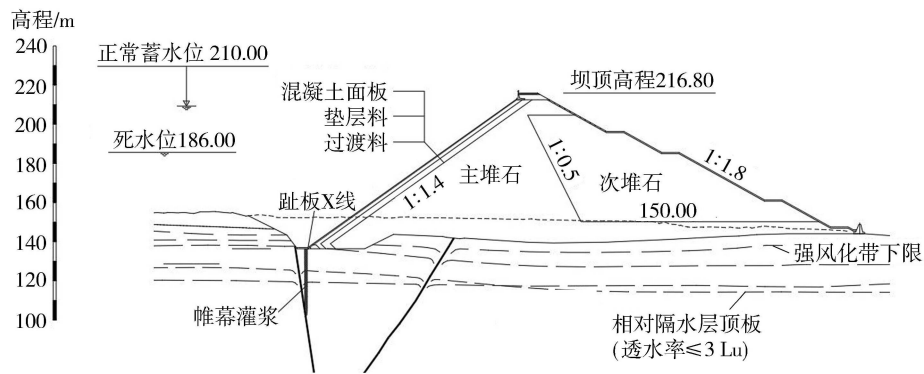


图 3 面板堆石坝典型剖面

Fig. 3 Typical cross section of the concrete-faced rockfill dam

2.2 计算参数

4 种筑坝料的改进 hhu-SH 模型参数如表 1 所示。为了进一步验证本文模型在坝体变形预测方面的合理性,基于相同的坝料三轴 CD 试验结果,本文整理了邓肯 E-B 模型和南水模型参数(表 2)。其中,E-B 模型和南水模型中 R_f 、 K 、 n 、 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 5 个参数是相同的, K_b 、 m 为 E-B 模型参数, c_d 、 n_d 和 R_d 为南水模型参数。面板和趾板混凝土按线弹性材料考虑,弹性模量 $E=28\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.17$ 。面板和垫层、趾板和垫层之间设置接触 Goodman 接触单元,模型参照天生桥一级面板坝接触面试验结果^[17],接触面参数如下: $R_f=0.74$, $K_1=4800$, $n=0.56$, $\varphi=36.6^\circ$;面板垂直缝和周边缝采用河海大学“七五”攻关建立的接缝模型^[17]。

表 2 坝体填筑料邓肯 E-B 和南水模型参数

Table 2 Parameters of Duncan E-B model and Shen's elastoplastic model for the filling materials of dam body										
材 料	R_f	K	n	K_b	m	$c_d/\%$	n_d	R_d	$\varphi_0/(^\circ)$	$\Delta\varphi/(^\circ)$
垫 层	0.65	1104.9	0.330	798.4	0.28	0.21	0.69	0.59	54.7	9.5
过渡层	0.65	1360.5	0.240	966.6	0.09	0.20	0.78	0.56	57.0	12.1
主堆石	0.70	1139.0	0.230	586.0	0.14	0.30	0.72	0.62	53.5	10.9
次堆石	0.69	812.9	0.260	379.1	0.21	0.43	0.68	0.65	50.5	9.2

2.3 有限元模型

大坝划分为 16073 个单元,共 17637 个节点,大部分为 8 节点 6 面体单元,少数用 6 节点 5 面体和 4 节点 4 面体等单元过渡。图 4 为坝体三维有限元网格。计算模拟大坝填筑和蓄水过程,1~18 级为坝体填筑,19 级为面板浇筑,20 级为蓄水。

2.4 计算结果对比分析

2.4.1 坝体位移

本文计算采用河海大学刘斯宏课题组自主开发的土石坝静动力有限元分析软件“SDAS”^[18]。表3中数值正负号定义如下:顺河向位移“+”代表往下游方向,“-”代表往上游方向;坝轴向位移“+”表示往右岸,“-”表示往左岸。由表3可知,由本文模型计算得到的沉降、顺河向和坝轴向位移均比E-B模型的计算结果小,但与南水模型的较为接近,其计算得到的沉降约为E-B模型的67.5%,顺河向与坝轴向位移约为E-B模型的50%~60%。由图5和图6可知,除量值存在一定差异外,3个模型计算得到的沉降和顺河向位移在坝体内的分布规律基本一致,最大沉降发生在靠近坝体主次堆分界线1/2坝高位置,上下游侧坝体分别往各自方向移动,符合土石坝的一般变形规律。

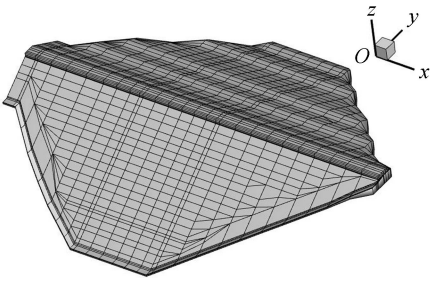


图4 坝体三维有限元模型

Fig.4 Three-dimensional finite element model for CRFD

表3 竣工期坝体位移计算结果

Table 3 Calculation results of dam displacement after the completion of construction

模型	最大沉降/cm	顺河向位移/cm	坝轴向位移/cm
E-B 模型	25.17	-4.14/3.93	-3.20/3.30
南水模型	16.71	-4.29/3.15	-2.34/2.42
本文模型	17.00	-2.36/1.55	-2.23/2.29

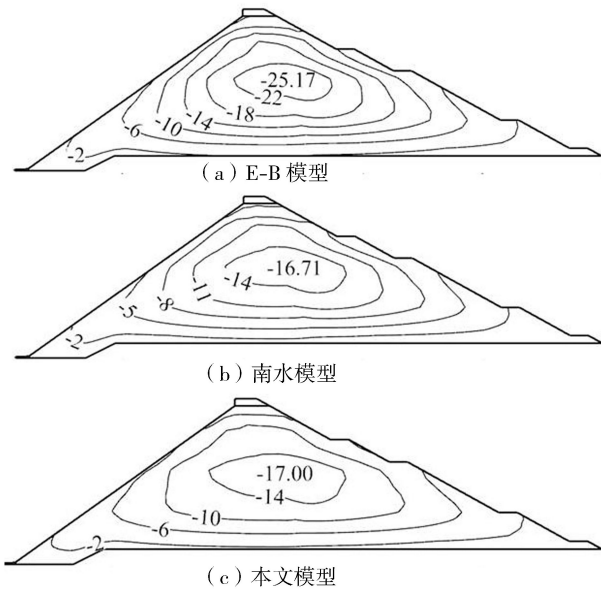


图5 竣工期沉降等值线(单位:cm)

Fig.5 Contours of settlement of dam after the completion of construction (unit: cm)

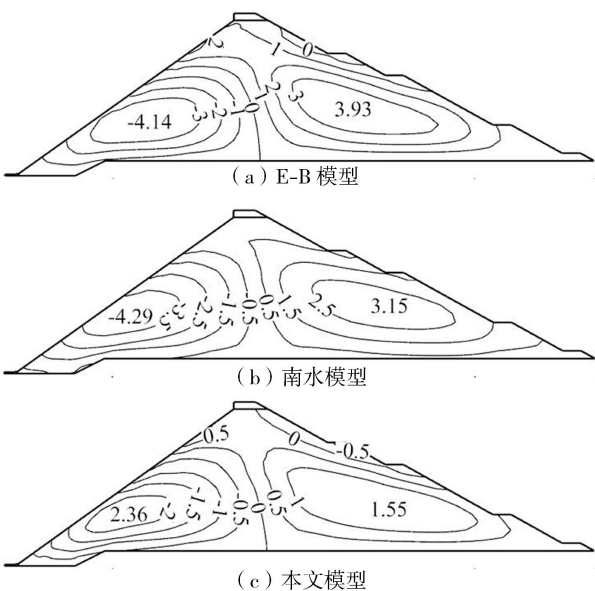


图6 竣工期水平位移等值线(单位:cm)

Fig.6 Contours of horizontal displacement of dam after the completion of construction (unit: cm)

由表4可知,本文模型计算得到的蓄水位移增量与南水模型的计算结果较为接近,且小于E-B模型计算结果,尤其是顺河向位移增量;此外,由本文模型和南水模型计算得到的坝体最大沉降增量明显大于顺河向位移增量,而由E-B模型计算得到的最大沉降增量略小于顺河向位移增量。这是由于本文模型和南水模型均能够考虑剪胀性,而E-B模型无法考虑剪胀性,使得计算得到的顺河向水平位移相对较小。由图7可知,3个模型计算得到的蓄水位移增量分布规律基本一致,坝体整体朝向下游移动,最大值在上游面板部位。值得注意的是,采用E-B模型时,坝体下游坝坡仍有明显往下游侧位移,而本文模型和南水模型对应的坝体次堆石区顺河向位移明显减小,且在下游坝坡处趋于0,与大部分面板堆石坝的位移监测规律一致^[10]。

表4 蓄水后坝体位移增量最大值

Table 4 Maximum displacement increment of dam after the impounding

模型	沉降增量/cm	顺河向位移增量/cm	坝轴向位移增量/cm
E-B 模型	6.52	6.90	-0.72/0.77
南水模型	4.86	2.80	-0.55/0.57
本文模型	4.60	2.54	-0.40/0.42

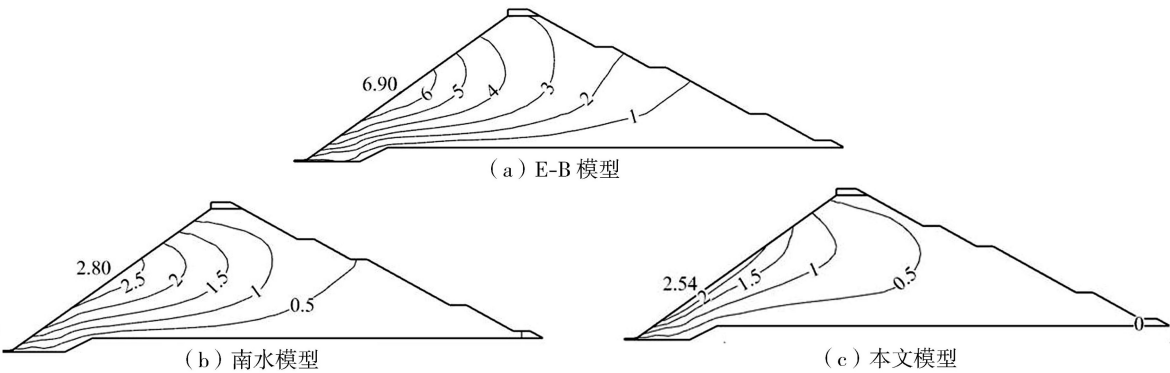


图7 蓄水后水平位移增量等值线(单位:cm)

Fig.7 Contours of horizontal displacement increment of dam after the impounding (unit: cm)

2.4.2 面板变形及应力

由图8可知,在水压力作用下,面板挠度指向坡内法向,最大值位于面板中部偏下约1/3坝高处,呈现由中心往四周递减的趋势;对应由E-B模型、南水模型和本文模型的最大面板挠度分别为9.60 cm、5.63 cm和5.27 cm。可以看到,由于E-B模型计算得到的坝体顺河向位移偏大,其对应的面板挠度也最大,而采用本文模型计算得到的面板挠度明显小于E-B模型,且与南水模型十分接近。

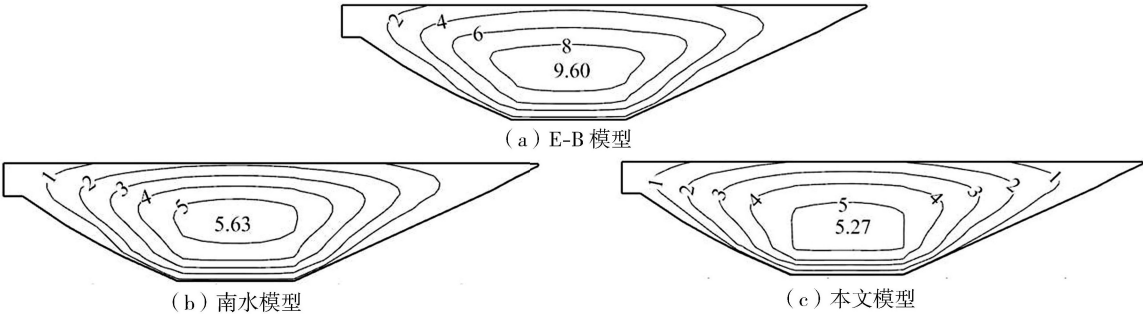


图8 面板挠度等值线(单位:cm)

Fig.8 Contours of the deflection of concrete face (unit: cm)

图9为面板坝轴向应力等值线图。可以看到,3个模型对应的面板坝轴向应力分布规律基本一致,面板中部承受压应力,左、右坝肩处的面板承受局部拉应力。由本文模型计算得到的面板最大拉、压应力为-0.36 MPa和2.23 MPa,而E-B模型计算得到的面板最大拉、压应力分别为-1.03 MPa和3.74 MPa,南水模型的为-0.52 MPa和3.27 MPa,本文模型计算结果与南水模型更为接近。图10为面板顺坡向应力分布等值线图。根据水布垭面板堆石坝的监测资料分析^[19],蓄水后面板顺坡向主要承受压应力,较大的压应力分布在面板中下部。当采用E-B模型计算时,可以发现面板底部出现较大面积的拉应力区,这与面板顺坡向应力的实测结果存在较大差异。相反,当采用本文模型和南水模型时,面板顺坡向主要承受压应力,底部亦未出现大范围拉应力区,最大顺坡向压应力位于面板1/4~1/3高度位置,与实测面板顺坡向应力分布规律较为接近。

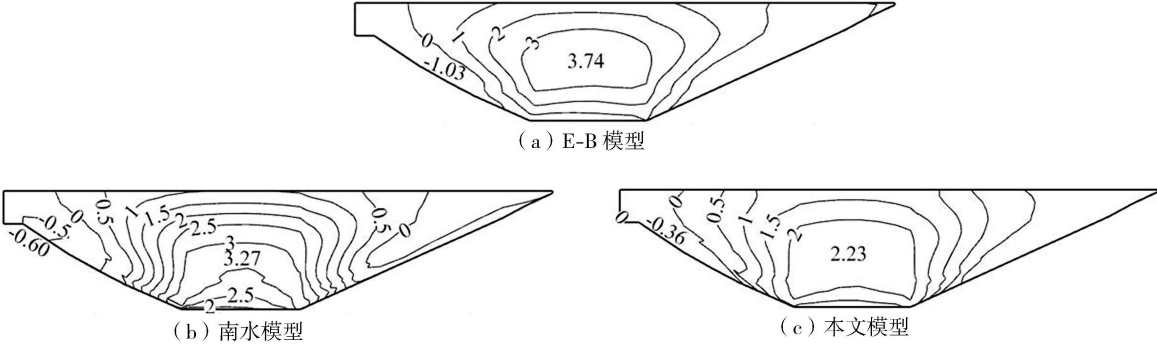


图9 面板坝轴向应力等值线(单位:MPa)

Fig.9 Contours of stress of concrete face along the axial direction of dam (unit: MPa)

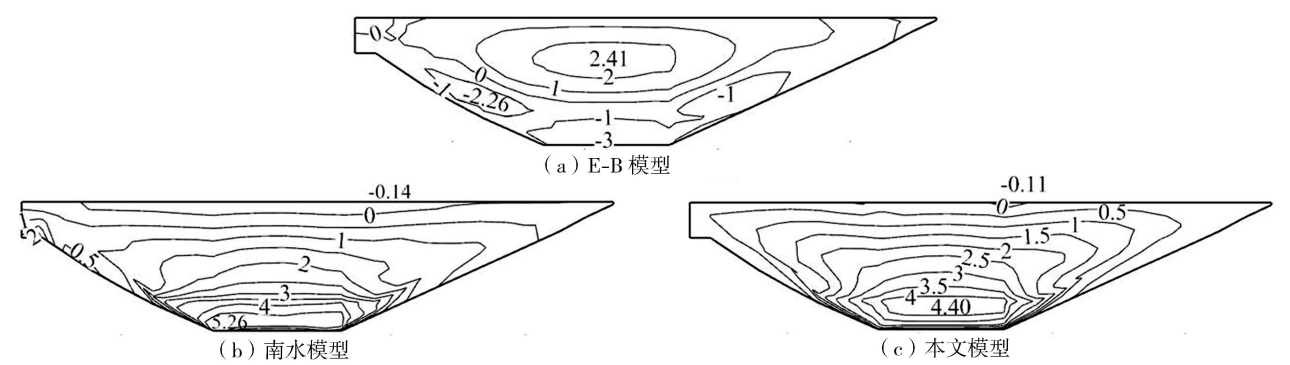


图 10 面板顺坡向应力等值线(单位:MPa)

Fig. 10 Contours of stress of concrete face along the slope (unit: MPa)

2.4.3 接缝变形

表 5 为对应 3 个模型的面板周边缝和垂直缝最大变形统计值。需要说明的是,由 3 个模型计算得到的接缝位移模式基本一致,即周边缝的张拉和面板法向剪切以河谷稍大,由岸坡向上逐渐减小,并近似对称;沿趾板走向剪切沿岸坡向河谷逐渐发展;面板垂直缝在靠坝肩部位呈张拉状态,而河床部位呈压缩状态。由表 5 可以看到,对应 3 个模型的接缝最大变形有所差异,但本文模型与南水模型的计算结果较为接近,两者计算得到的周边缝最大张拉量均较 E-B 模型明显减小。基于上述坝体变形分析,这主要与本文模型与南水模型计算得到的坝体顺河向蓄水位移增量较小有关,其在量值上明显小于 E-B 模型的计算结果;此外,2 个模型计算得到的坝体顺河向蓄水位移增量小于竖向位移增量,这也一定程度上抑制了周边缝的张开变形。

表 5 3 个模型对应的面板接缝变形最大值

Table 5 Corresponding maximum displacements of slab joints under three constitutive models

接缝类型	周边缝位移/mm			垂直缝位移/mm
	张拉	面板法向 剪切	沿趾板走向 剪切	张拉
E-B 模型	14.5	7.2	7.1	2.7
南水模型	5.8	5.9	5.5	2.1
本文模型	5.1	6.8	2.8	1.5

3 结 论

- a. 改进 hhu-SH 模型能够更好地反映粗粒料的剪胀性,且模型参数较少,均可通过常规三轴 CD 试验和等向压缩试验获得。
- b. 由改进 hhu-SH 模型计算得到的坝体位移、面板挠度及应力、接缝位移量值均比 E-B 模型小,与南水模型较为接近。
- c. 由改进 hhu-SH 模型计算得到的面板顺坡向应力以压应力为主,面板底部未出现拉应力区,结果更符合实际。

参考文献:

[1] 褚福永,朱俊高,翁厚洋,等. 堆石料强度及变形特性缩尺效应试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(4):381-386. (CHU Fuyong, ZHU Jungao, WENG Houyang, et al. Experimental study of scale effect on strength and deformation characteristics of rock-fill materials[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019,47(4):381-386. (in Chinese))

[2] 何亮,李国英,李雄威. 带肋钢筋与堆石料接触面剪切特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(2):138-143. (HE Liang, LI Guoying, LI Xiongwei. Shear characteristics of the contact surface between ribbed bars and rockfill materials[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019,47(2):138-143. (in Chinese))

[3] 牛奕然,周健,赵程,等. 砂岩球形颗粒多点接触破碎试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(2):92-97. (NIU Yiran, ZHOU Jian, ZHAO Cheng, et al. Experimental study on multi-point contact crushing of spherical sandstone particles [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022,50(2):92-97. (in Chinese))

[4] 郭万里,朱俊高,王青龙,等. 基于级配方程的粗粒料级配演化预测模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49 (8): 2076-2082. (GUO Wanli, ZHU Jungao, WANG Qinglong, et al. Mathematical model based on the gradation equation for predicting gradation evolution of coarse-grained soils[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018,

49(8): 2076-2082. (in Chinese))

- [5] 徐靖,叶华洋,朱晟.粗粒料颗粒破碎三维离散元模型及其在密度桶试验中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):127-134. (XU Jing, YE Huayang, ZHU Sheng. Three-dimensional discrete element model of coarse particle breakage and engineering application in density barrel test[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4): 127-134. (in Chinese))
- [6] 魏浩,沈超敏,刘斯宏,等.考虑级配影响的粗粒料压缩破碎特性试验[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):182-188. (WEI Hao, SHEN Chaomin, LIU Sihong, et al. Experimental study on compression and crushing characteristics of coarse granular materials considering influence of gradations[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(2):182-188. (in Chinese))
- [7] 郭万里,蔡正银,武颖利,等.粗粒土的颗粒破碎耗能及剪胀方程研究[J].岩土力学,2019,40(12):4703-4710. (GUO Wanli, CAI Zhengyin, WU Yingli, et al. Study on the particle breakage energy and dilatancy of coarse-grained soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(12): 4703-4710. (in Chinese))
- [8] 吴二鲁,朱俊高,陆阳洋,等.基于颗粒破碎耗能的粗粒料剪胀方程研究[J].岩土工程学报,2022,44(5):898-906. (WU Erlu, ZHU Jungao, LU Yangyang, et al. Dilatancy equation for coarse-grained soils incorporating particle breakage energy [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(5): 898-906. (in Chinese))
- [9] DUNCAN J M, BYRNE P, WONG K, et al. Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analysis of stress and movement in soil masses[R]. Berkeley: University of California, 1980.
- [10] 沈珠江.南水双屈服面模型及其应用[C]//海峡两岸土力学及基础工程、土工技术学术研讨会论文集.西安:中国土木工程学会,1994:152-159.
- [11] 殷宗泽.一个土体的双屈服面应力—应变模型[J].岩土工程学报,1988,10(4):64-71. (YIN Zongze. A double yield surface constitutive model for soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 10(4): 64-71. (in Chinese))
- [12] 陈生水,傅中志,石北啸,等.统一考虑加载变形与流变的粗粒土弹塑性本构模型及应用[J].岩土工程学报,2019,41(4):601-609. (CHEN Shengshui, FU Zhongzhi, SHI Beixiao, et al. Elastoplasticity constitutive model considering loading-induced deformation and creep behavior of coarse granular soils and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(4): 601-609. (in Chinese))
- [13] 朱俊高,赵晓龙,何顺宾,等.UH模型对粗颗粒土适用性验证及土石坝工程应用[J].岩土力学,2020,41(12):3873-3881. (ZHU Jungao, ZHAO Xiaolong, HE Shunbin, et al. Applicability verification of UH model on coarse-grained soil and its application in earth rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics,2020,41(12):3873-3881. (in Chinese))
- [14] ZOU D G, XU B, KONG X J, et al. Numerical simulation of the seismic response of the Zipingpu concrete face rockfill dam during the Wenchuan earthquake based on a generalized plasticity model[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 49: 111-122.
- [15] 刘斯宏,邵东琛,沈超敏,等.一个基于细观结构的粗粒料弹塑性本构模型[J].岩土工程学报,2017,39(5):777-783. (LIU Sihong, SHAO Dongchen, SHEN Chaomin, et al. Microstructure-based elastoplastic constitutive model for coarse-grained materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(5):777-783. (in Chinese))
- [16] 刘斯宏,姚仰平,孙其诚,等.基于细观结构的颗粒介质应力应变关系研究[J].科学通报,2009,54(11):1496-1503. (LIU Sihong, YAO Yangping, SUN Qicheng, et al. Microscopic study on stress-strain relation of granular materials[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(11): 1496-1503. (in Chinese))
- [17] 殷宗泽.土工原理[M].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [18] LIU S H, WANG L J, WANG Z J, et al. Numerical stress-deformation analysis of cut-offwall in clay-core rockfill damon thick overburden[J]. Water Science and Engineering, 2016, 9(3): 219-226.
- [19] 程展林,潘家军.水布垭面板堆石坝应力变形监测资料分析[J].岩土工程学报,2012,34(12):2299-2306. (CHENG Zhanlin, PAN Jiajun. Analysis of monitoring data of stress and deformation for Shuibuya concrete face rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2299-2306. (in Chinese))

(收稿日期:2022-08-12 编辑:刘晓艳)