

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1782

UH 模型对粗颗粒土适用性验证及土石坝工程应用

朱俊高¹, 赵晓龙¹, 何顺宾², 田 雨³

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072;
3. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 对 3 种粗颗粒土进行了常规三轴 CD 试验、 K_0 压缩试验和等应力比路径试验, 根据三轴试验数据标定 UH (unified hardening, 统一硬化) 模型的参数, 然后模拟另外两种路径下的应力-应变关系, 并与邓肯 E-B 模型进行比较。结果表明: UH 模型能合理地描述不同应力路径下粗颗粒土的力学特性, 而邓肯 E-B 模型的预测结果则较差, 验证了 UH 模型对粗颗粒土的适用性。最后利用 UH 模型对某心墙堆石坝进行了应力变形三维有限元分析, 并将计算结果与邓肯 E-B 模型及现场监测值进行比较。对比显示: 在坝体变形和应力的定性分布规律上, UH 模型的计算结果与邓肯 E-B 模型基本一致; 而在定量上, UH 模型得到的坝体变形总体上更接近现场监测值, 验证了 UH 模型在土石坝工程中的适用性和合理性。

关 键 词: 粗颗粒土; UH 模型; 邓肯 E-B 模型; K_0 压缩试验; 等应力比路径试验; 土石坝

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2020)12-3873-09

Applicability verification of UH model on coarse-grained soil and its application in earth rockfill dam

ZHU Jun-gao¹, ZHAO Xiao-long¹, HE Shun-bin², TIAN Yu³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;
2. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu, Sichuan 610072, China; 3. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: K_0 compression tests and constant stress ratio path tests were performed on three kinds of coarse-grained soils in conventional consolidated-drained (CD) triaxial tests. Parameters of unified hardening (UH) model were calibrated according to the triaxial test data, and then stress-strain relationships under the other two paths were simulated. The simulation results were compared with those obtained from Duncan's E-B model. It is shown that UH model can reasonably describe the mechanical behaviors of coarse-grained soil under different stress paths, while Duncan's E-B model behaves poorly in predicting the results. The applicability of UH model to coarse-grained soil has been verified. Finally, three-dimensional finite element analysis of stress and deformation for a core rockfill dam was performed by using UH model. The calculation results were compared with those of Duncan's E-B model and the field monitoring data. It is shown that from a qualitative perspective of the distribution of dam deformation and stress, the results obtained from UH model are similar to those from Duncan's E-B model. However, from a quantitative perspective, the deformation calculated from UH model is overall closer to the field monitoring data. The applicability and rationality of UH model in the field of earth rockfill dam have also been verified.

Keywords: coarse-grained soil; UH model; Duncan's E-B model; K_0 compression test; constant stress ratio path test; earth rockfill dam

1 引 言

自 20 世纪 50 年代起, 学者们对土体本构关系展开了大量研究, 提出了各种非线性弹性模型^[1-3]

和弹塑性模型^[4-8], 能够较为合理地描述黏土或砂土的应力-应变关系, 但针对粗颗粒土的本构模型相对较少。近年来, 随着国内高土石坝发展迅速, 需要准确把握及合理模拟堆石料等粗颗粒土的力学性

收稿日期: 2020-11-30

修回日期: 2020-12-05

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2018YFC1508505); 国家自然科学基金 (No.U1865104, No.51479052)。

This work was supported by the National Key R&D Program of China(2018YFC1508505) and the National Natural Science Foundation of China(U1865104, 51479052).

第一作者简介: 朱俊高, 男, 1964 年生, 博士, 教授, 主要从事土体基本性质与本构关系、土石坝工程等方面的研究工作。E-mail: zhujungao@hhu.edu.cn

通讯作者: 赵晓龙, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事土体基本性质及土石坝工程等方面研究。E-mail: longxingtianxiale@126.com

质,以便准确分析土工结构的受力变形性状。因此,必须研究适用于粗颗粒土的本构模型,或验证现有针对黏土或砂土提出的模型对粗颗粒土的适用性。

国内土石坝计算常用的模型有邓肯 E-B 模型^[9]、K-G 模型^[10-11]、南水模型^[12]、椭圆-抛物双屈服面模型^[13]等。邓肯模型因公式简单、参数易于确定等优点而得到广泛应用^[14],积累了许多实践经验。但邓肯模型存在不能反映各向异性及剪胀性等缺陷,其计算准确性有待改进。刘开明^[10]、高莲士^[11]等修正了 K-G 模型,使其能够考虑土的剪胀性,计算高土石坝和面板堆石坝的变形。以沈珠江的南水模型^[12]和殷宗泽的椭圆-抛物双屈服面模型^[13]为代表的弹塑性模型也常被用于大坝分析,得到较为合理的结果。但它们对粗颗粒土的适用性,尤其是在等应力比路径和 K_0 压缩路径(即筑坝过程中大部分土单元的应力路径)下的适用性,尚未得到全面验证。

姚仰平等^[15-16]基于修正剑桥模型,引入统一硬化参数,建立了 UH (unified hardening, 统一硬化)模型,能合理地反映超固结黏土的剪缩剪胀、硬化软化、应力路径相关性及其临界状态等复杂应力-应变特性。该模型在国内有广泛的影响。在此基础上,姚仰平等^[17]通过分析砂土特性,建立了砂土 UH 模型。该模型可描述 $e-\ln p$ (e 为孔隙比, p 为平均正应力) 空间内砂土等向压缩线为曲线的特性,并考虑了砂土剪胀程度与当前密度状态的相关性,进一步提升了 UH 模型的应用前景。但目前该模型对粗颗粒土的适用性没有得到验证,且在土石坝工程中的应用也不多。

本文对 3 种粗颗粒土进行了常规三轴试验、 K_0 压缩试验和等应力比路径试验,利用试验结果验证了砂土 UH 模型(以下简称 UH 模型)对粗颗粒土的适用性,并与邓肯 E-B 模型(以下简称 E-B 模型)进行对比,论证 UH 模型的合理性。最后将 UH 模型应用到某心墙堆石坝的三维有限元分析,并同 E-B 模型及实测值进行比较。

2 UH 模型对粗颗粒土的适用性验证

2.1 粗颗粒土试验方法及参数确定

本构模型反映的是土体在一般应力条件下的应力-应变关系,因此,模型的好坏应通过多种应力路径的试验结果来验证。为此,本节对 3 种粗颗粒土进行了常规三轴固结排水(CD)试验、 K_0 压缩试验及等应力比路径试验。

试验土料包括一种卵石料和两种碎石料。卵石

料(编号 LS)取自大石峡混凝土面板砂砾石坝的筑坝料,碎石料 1(编号 SS1)为如美堆石坝筑坝料,碎石料 2(编号 SS2)为两河口堆石坝筑坝料,颗粒级配见表 1。

表 1 试验土料颗粒级配
Table 1 Particle size distribution of soil samples

材料	编号	不同粒组(mm)质量百分比/%				
		60~40	40~20	20~10	10~5	<5
卵石料	LS	17.6	23.8	18.4	11.7	28.5
碎石料	SS1	—	—	26.3	19.4	54.3
碎石料	SS2	9.9	20.5	20.1	16.4	33.1

对卵石料 LS(制样密度为 2.04 g/cm^3 , 孔隙比为 0.34)和碎石料 SS2(密度为 2.11 g/cm^3 , 孔隙比为 0.28)进行了大型三轴 CD 试验,试样直径为 300 mm,高度为 600 mm,围压为 600、1 200、1 800、2 400 kPa。对碎石料 SS1(密度 2.17 g/cm^3 , 孔隙比 0.35)进行了中型三轴 CD 试验,试样直径为 101 mm,高度为 200 mm,采用围压为 200、400、800、1 200 kPa。

土石坝施工时,大坝及其地基内大部分区域处于或近似于等应力比路径,有的接近 K_0 压缩路径。因此,同时进行了 LS 料的 K_0 压缩试验和 SS2 料的等应力比路径试验。 K_0 试验采用河海大学自主研制的静止侧压力系数测定仪^[18],试样直径为 400 mm,高度为 300 mm;等应力比路径试验在大型三轴仪上进行,加载过程中控制应力比 $\sigma_1/\sigma_3 = 2.0$ 。

2.1~2.4 节的研究思路是利用常规三轴 CD 试验确定 UH 模型及 E-B 模型参数,再用该参数计算 K_0 路径及等应力比路径的应力-应变关系,将 UH 模型的预测结果与试验数据及 E-B 模型进行对比,论证 UH 模型对粗颗粒土的适用性。

对 E-B 模型,其参数的确定方法不再赘述。该模型中, R_f 为破坏比, K 和 n 为切线变形模量有关的试验参数, K_b 和 m 为切线体积模量有关的试验参数, φ_0 和 $\Delta\varphi$ 为非线性强度参数。对 UH 模型,共包括 10 个参数: M 为临界状态应力比, ν 为泊松比, κ 为 $e-\ln p$ 平面内弹性回弹线斜率, λ 为 $e-\ln p$ 平面内正常压缩线(NCL)渐近线斜率, e_0 为初始孔隙比, N 为 NCL 渐近线上 p 为 1 kPa 时对应的孔隙比, c 为黏聚力, Z 为 NCL 上 p 为 1 kPa 时对应的孔隙比, χ 为临界状态参数, m 为土的剪胀性参数。模型中除 e_0 为材料初始状态参数外,其余 9 个参数待确定。本文采用最优化方法确定,其思路是利用假定的模型参数预测三轴 CD 试验的应力-应变关系,

计算试验曲线与预测曲线的误差,不断优化调整模型参数,使得这种误差“最小”,所确定的最优参数即认为是该土料的模型参数。最终确定的模型参数见表 2 及表 3。

表 2 试验土料邓肯 E-B 模型参数

材料	R_f	K	n	K_b	m	$\phi_b/(^\circ)$	$\Delta\phi/(^\circ)$
LS	0.77	530	0.56	364	0.16	52.27	6.77
SS1	0.74	485	0.70	659	0.31	55.03	7.26
SS2	0.81	831	0.41	450	0.16	59.20	12.60

表 3 试验土料 UH 模型参数

材料	M	ν	κ	λ	e_0	N	c/kPa	Z	χ	m
LS	1.92	0.21	0.070	0.150	0.34	1.86	0	0.57	0.87	0.1
SS1	1.55	0.27	0.020	0.050	0.35	0.80	0	0.48	0.47	0.5
SS2	1.73	0.17	0.049	0.098	0.28	0.95	0	0.39	0.72	0.1

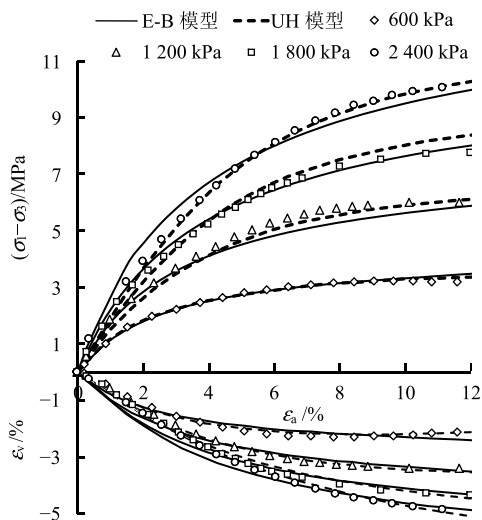
2.2 粗颗粒土常规三轴试验初步验证

图 1 中的离散点显示了 3 种土料 CD 试验轴向应变 ε_a 与偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 、体应变 ε_v 的关系曲线,实线和虚线分别为 E-B 模型和 UH 模型的预测结果。从图 1(a)可以看出,LS 料 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 曲线呈硬化型, $\varepsilon_v - \varepsilon_a$ 曲线也没有显著剪胀。两种模型的模拟结果与试验数据都吻合得较好,能在一定程度上反映粗颗粒土在三轴剪切过程中的应力-应变特性。但从两个模型对初始变形模量和破坏应力的预测结果来看,UH 模型略优。从图 1(b)和图 1(c)可以看出,与卵石料不同,碎石料的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 曲线呈软化型, $\varepsilon_v - \varepsilon_a$ 曲线有显著剪胀。E-B 模型仅能模拟好加载初期的硬化段和剪缩段,而无法反映应力水平较高时的软化和剪胀;UH 模型的模拟结果明显优于 E-B 模型,与试验曲线吻合较好。综上所述,UH 模型可较好地反映粗颗粒土的硬化软化和剪缩剪胀,而 E-B 模型的预测结果较差。

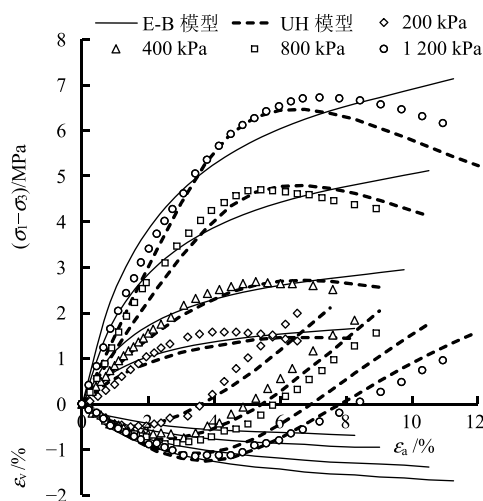
从理论上分析,E-B 模型为双曲线模型,由于双曲线单调递增,决定了其不能反映土的软化和剪胀。而 UH 模型引入硬化参量 H ,替代修正剑桥模型的硬化参量(即塑性体积应变 ε_v^p):

$$H = \int dH = \int \frac{M_f^4 - \eta^4}{M_c^4 - \eta^4} d\varepsilon_v^p \quad (1)$$

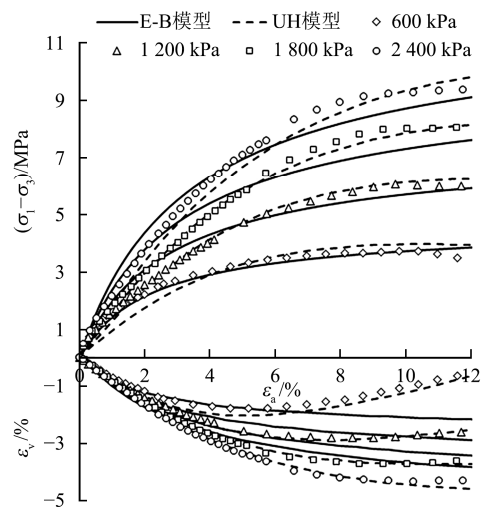
式中: M_f 为土的潜在峰值应力比,是硬化与软化的分界线; M_c 为土的特征状态应力比(详见式(3)),是剪缩与剪胀的分界线; η 为应力比, $\eta = q/p$ 。加载过程中, η 与 M_f 、 M_c 的相对大小关系逐



(a) LS 试样



(b) SS1 试样



(c) SS2 试样

图 1 三轴 CD 试验结果与预测结果比较

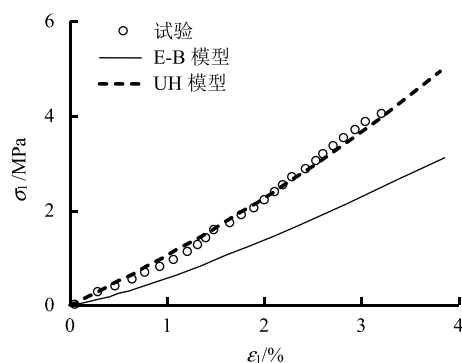
Fig.1 Comparison between triaxial CD test results and model predictions

渐演化,使得 $d\varepsilon_v^p$ 和 dH 的正负号发生改变,从而使UH模型能够统一地描述土的剪缩剪胀和硬化软化。

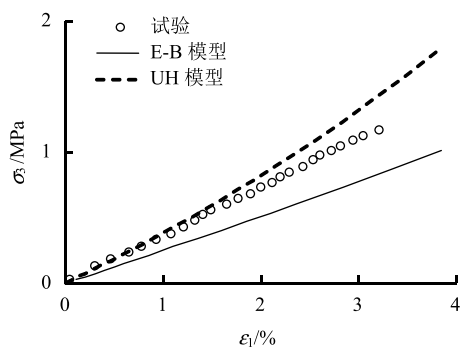
上述结果初步验证了UH模型对粗颗粒土的适用性,在2.3节和2.4节将利用三轴CD试验确定的模型参数预测特殊应力路径下的应力-应变关系。

2.3 K_0 压缩试验验证

沿用表2和表3中的参数,根据两种模型预测LS料 K_0 压缩的试验结果,如图2所示。可以看出,达到相同的竖向应变 ε_1 时,E-B模型计算出的大主应力 σ_1 和小主应力 σ_3 明显偏低,而UH模型的预测结果与试验值吻合较好,从而验证了UH模型对描述侧限条件下粗颗粒土应力-应变关系的适用性。



(a) σ_1 - ε_1 关系曲线



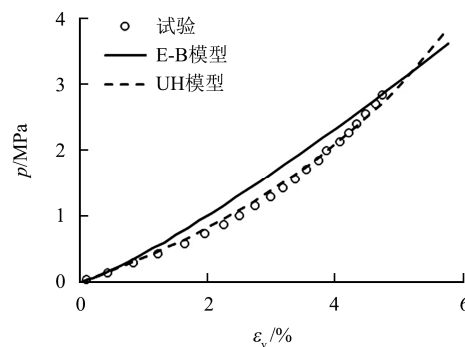
(b) σ_3 - ε_1 关系曲线

图2 LS试样 K_0 压缩试验结果与预测结果比较

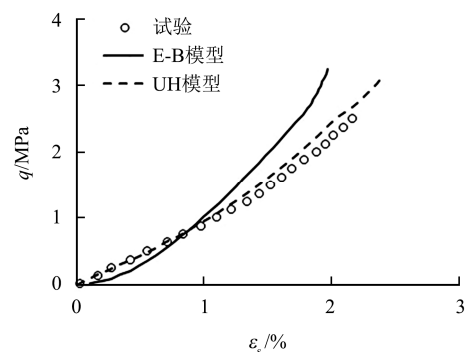
Fig.2 Comparison between K_0 compression test results and model predictions on LS sample

2.4 等应力比路径试验验证

已有研究表明,土石坝填筑过程中内部的应力比 σ_1/σ_3 大多保持在2.0及以上^[19]。因此,对SS2料进行了 $\sigma_1/\sigma_3 = 2.0$ 的等应力比路径试验。图3是试验结果与模型预测的比较,模型参数同样取自表2和表3。可以看出,对于图3(a)的 p - ε_v 关系,UH模型预测结果与试验数据吻合很好,而E-B模型的预测曲线曲率偏小。与之相反,对于图3(b)的广义剪



(a) p - ε_v 关系曲线



(b) q - ε_s 关系曲线

图3 SS2试样等应力比路径试验结果与预测结果比较

Fig.3 Comparison between tests results of constant stress ratio path and model predictions on SS2 sample

应力 q -剪应变 ε_s 关系,E-B模型得到的曲线曲率很大,高估了 q 较小时的 ε_s ,低估了 q 较大时的 ε_s ,而UH模型则能够合理描述剪应力与剪应变的关系。

2.5 UH模型适用性的理论分析

在预测 K_0 压缩路径和等应力比路径时,关键是要准确把握体应变 ε_v 和剪应变 ε_s 的大小。UH模型的以下两个特征,保证了其对这两种特殊路径的适用性:

(1) 在 e - $\ln p$ 平面内,UH模型采用一条曲线作为NCL,如图4所示。根据NCL方程和屈服函数,可以计算出等应力比压缩线和临界状态线的方程(推导过程见参考文献[17]),二者也为曲线。当 p 较小时,等应力比压缩线的斜率很小,表明土体难以被压缩;当 p 足够大时,等应力比压缩线趋于一条斜率为 λ 的直线,对应的 ε_v 相对较大。因此,UH模型能够反映 p - ε_v 的非线性关系,为解决土石坝沉降计算中“低坝算不小,高坝算不大”的难题提供一种潜在方法。

(2) 在修正剑桥模型剪胀方程的基础上,UH模型引入状态参量,调节体应变和剪应变的相对大小

$$\frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_s^p} = \frac{M_c^2 - \eta^2}{2\eta} \quad (2)$$

式中： $d\epsilon_s^p$ 为剪应变增量； M_c 的公式为

$$M_c = M \exp(-m \cdot \xi) \tag{3}$$

式中： ξ 为状态参量，反映当前密实度和受力状态，等于 $e-\ln p$ 平面内当前应力点到等应力比压缩线的垂直距离（见图 4）。当土样较松时， ξ 为负， $M_c > M$ ，表明土样在达到临界状态前一直发生剪缩；反之，当土样较密时， ξ 为正， $M_c < M$ ，土样先剪缩后剪胀，直至临界状态。通过调整参数 m 的取值，可以控制体应变与剪应变的相对大小，从而合理预测等应力比路径下的剪切变形。

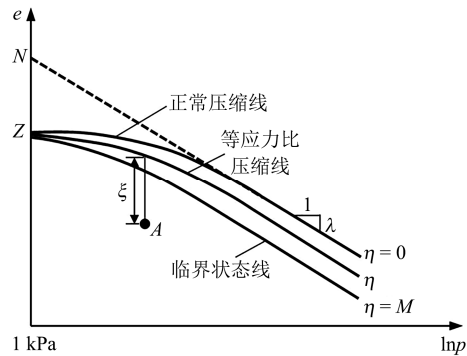


图 4 UH 模型的等应力比压缩线

Fig.4 Constant stress ratio compression line of UH model

3 UH 模型在土石坝工程中的应用

从上节可看出，UH 模型能够合理地描述粗颗粒土在多种室内单元体试验中的应力-应变关系，在理论上具有显著优势。为了进一步验证其应用价值，本节以某水电站心墙堆石坝为例，对比分析了 UH 模型和 E-B 模型对坝体应力变形的计算结果，并与大坝实测数据进行比较。

3.1 工程概况和有限元模型

某水电站大坝为砾石土心墙堆石坝，最大坝高 240 m，上下游坝坡坡度均为 1:2。坝基覆盖层较厚且不均匀，平均厚度约 50 m。坝基覆盖层防渗采用两道全封闭混凝土墙，厚度分别为 1.4 m 和 1.2 m。大坝主要材料分区为：堆石体、过渡层、反滤层、掺砾心墙和覆盖层，具体分布见图 5。

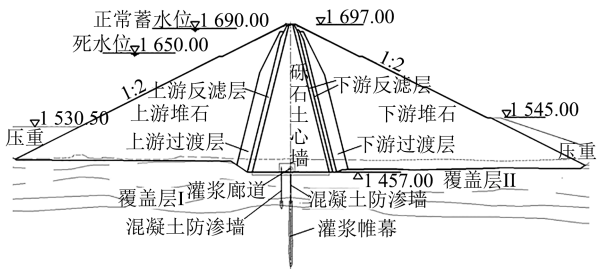


图 5 心墙坝典型断面图

Fig.5 Typical cross section of core dam

表 4 为坝体主要材料的邓肯 E-B 模型参数，参数由室内三轴试验确定。表 5 为对应的 UH 模型参数，由同一组三轴试验曲线，通过优化方法获得，参数确定方法同 2.1 节。防渗墙等混凝土按线弹性材料考虑，弹性模量 $E = 30 \text{ GPa}$ ，泊松比 $\nu = 0.17$ 。堆石料、过渡层、反滤料和心墙料的孔隙比分别为 0.236、0.231、0.236 和 0.240。

表 4 坝体材料邓肯 E-B 模型参数
Table 4 Duncan's E-B model parameters of dam materials

材料	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\phi_0/(\text{^\circ})$	$\Delta\phi/(\text{^\circ})$	c/kPa	R_f	K	n	K_b	m
堆石料	2.18	52.9	8.6	0	0.83	1 155	0.49	456	0.25
过渡层	2.25	52.2	7.3	0	0.81	1 017	0.32	353	0.21
反滤层	2.17	51.2	7.8	0	0.74	1 363	0.27	460	0.19
砾石土心墙料	2.21	30.4	0	96	0.79	402	0.44	204	0.42
覆盖层 I	1.45	48.0	7.0	0	0.80	1 100	0.34	360	0.32
覆盖层 II	1.31	46.9	6.5	0	0.77	1 075	0.33	343	0.27

表 5 坝体材料 UH 模型参数
Table 5 UH model parameters of dam materials

材料	M	ν	κ	λ	e_0	N	c/kPa	Z	χ	m
堆石料	1.700	0.11	0.05	0.169	0.236	1.887	269.2	0.567	0.28	0.25
过渡层	1.699	0.20	0.05	0.192	0.231	1.900	84.0	0.272	0.43	1.37
反滤层	1.700	0.19	0.02	0.100	0.236	1.155	113.3	0.462	0.23	0.11
砾石土心墙料	1.487	0.40	0.01	0.100	0.240	1.170	72.1	0.593	0.44	0.55

大坝划分为 19 363 个单元，共 17 780 个节点。大部分为 8 节点 6 面体单元，少数用 6 节点 5 面体、4 节点 4 面体等单元过渡。坝体三维有限元网格见图 6。计算模拟大坝填筑过程，分 14 级加载。

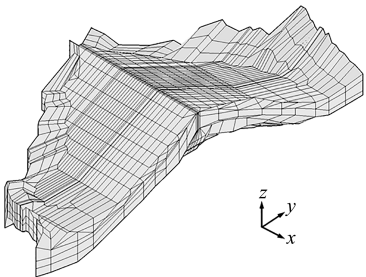


图 6 坝体三维有限元网格

Fig.6 Three-dimensional finite element mesh of dam body

3.2 UH 和 E-B 模型坝体计算结果比较

采用河海大学岩土所 TDAD 三维有限元软件对大坝进行计算。计算包括两种情况：①坝体材料采用 UH 模型而覆盖层用 E-B 模型；②坝体材料和覆盖层均用 E-B 模型。两种模型计算的竣工期最大沉降和水平位移见表 6。可以看出，UH 模型计算的

变形均比 E-B 模型小, 其中沉降约为 E-B 模型的 73.7%。

根据经验, 大坝沉降约为坝高的 1%~2%, 而位移比 (坝体顺河向水平位移与竖向沉降的比值) 在 0.25 以下^[20]。本文中, E-B 模型沉降占坝高 (含覆盖层 50 m) 的 1.3%, 位移比为 0.18, 而 UH 模型沉降比为 0.9%, 位移比为 0.19, 均在合理范围。

表 6 竣工期坝体沉降位移结果

Table 6 Settlement and displacement of dam at completion

模型	最大沉降量/cm	坝体上、下游 水平位移/cm	坝轴向位移/cm
E-B	365.0	64.3/-58.1	49.1/-71.1
UH	269.1	51.5/-52.1	27.2/-44.8

注: 表中“-”表示上下游水平位移指向上游或坝轴向指向左岸。

图 7 和图 8 分别为两种模型计算的最大横断面沉降及顺河向水平位移等值线图。从图 7 可以看出, 沉降等值线基本对称, 沉降量最大值位于 1/3 坝高处心墙区域。

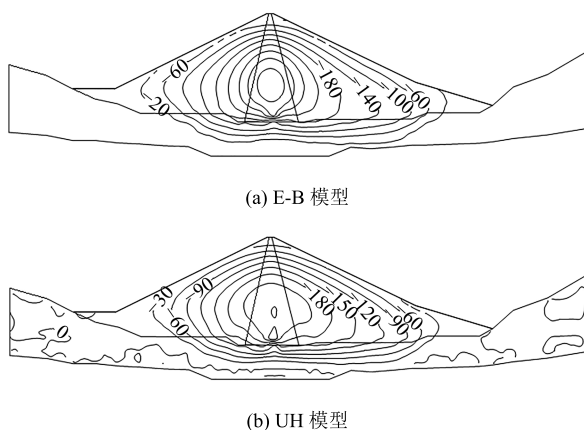


图 7 竣工期沉降等值线图 (单位: cm)

Fig.7 Contour lines of settlement at completion(unit: cm)

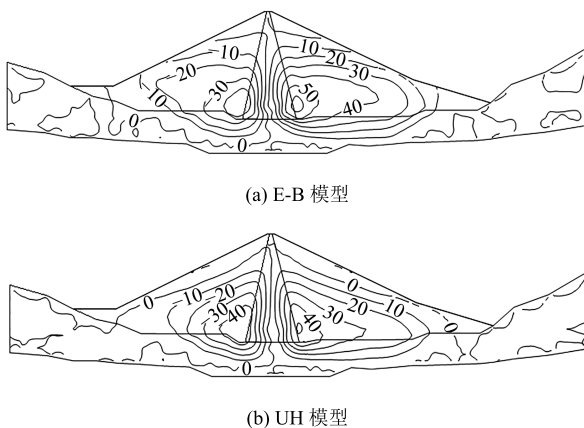


图 8 竣工期顺河向水平位移等值线图 (单位: cm)

Fig.8 Contour lines of horizontal displacement at completion(unit: cm)

从图 8 可以看出, 两模型计算的向上游及向下游最大水平位移分别位于上下游过渡层底部靠近心墙处。与 E-B 模型相比, UH 模型计算的上下游水平位移差较小。

图 9~11 分别为最大横断面大主应力、小主应力和应力水平等值线图。从图 9 可以看出, 心墙大主应力受拱效应的影响, 其应力比同高程过渡层小。E-B 模型计算的拱效应比 UH 模型要更强烈。

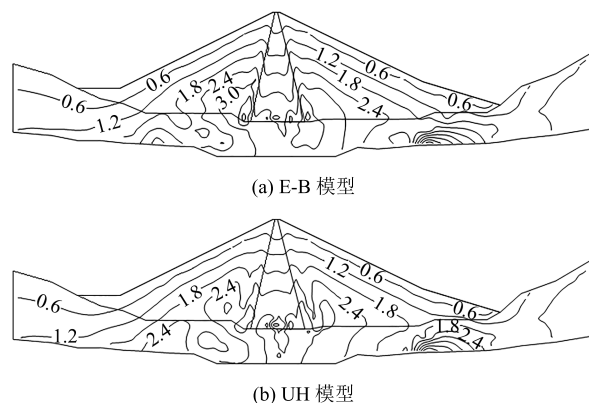


图 9 竣工期大主应力等值线图 (单位: MPa)

Fig.9 Contour lines of major principal stress at completion(unit: MPa)

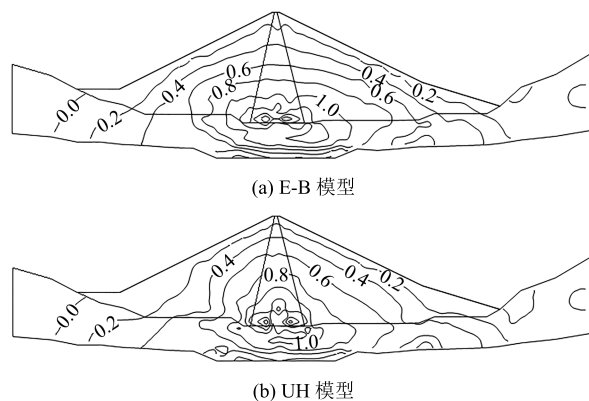


图 10 竣工期小主应力等值线图 (单位: MPa)

Fig.10 Contour lines of minor principal stress at completion(unit: MPa)

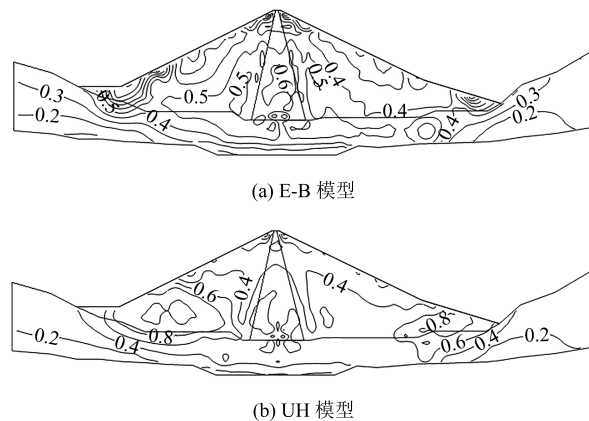


图 11 竣工期应力水平等值线图 (单位: MPa)

Fig.11 Contour lines of stress level at completion(unit: MPa)

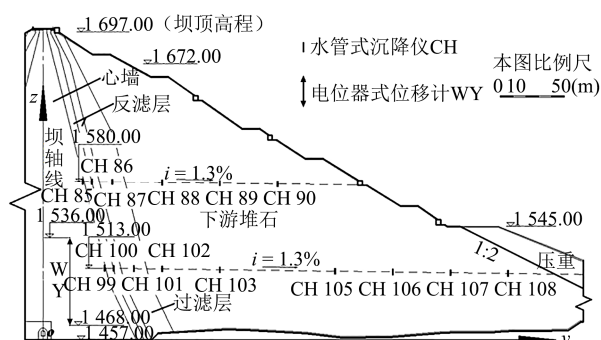
图 10 显示, 心墙小主应力受拱效应的影响较小, 其应力与同高程过渡层接近, 其分布总体沿坝轴线呈对称分布, 两种模型计算结果接近。

图 11 显示, 竣工期上下游坝壳应力水平基本对称, 心墙应力水平最大约为 0.6。与 E-B 模型相比, UH 模型在上游坝壳 1/2 坝高下部及下游坝脚处应力水平偏高。

3.3 计算结果与坝体监测数据比较

为进一步验证模型计算的可靠性, 将计算结果与坝体变形监测数据^[21-22]进行比较。

图 12 为坝体监测布置图^[21-22]。心墙区采用电位器式位移计 (代号 WY), 位移计可测量下端基点板和上端锚固板之间土体的压缩量。下游堆石区采用水管式沉降仪 (代号 CH), 可测量堆石体的绝对沉降。



注: 本图为桩号 0+330.00 断面, 本文中 CH 沉降仪均位于此断面, 而 WY 位移计实际布置于 0+253.72 断面, 但位置与图中一致, i 为坡比。

图 12 坝体监测布置图
Fig.12 Plan of monitoring dam

图 13 中, 离散点给出了心墙区 WY 位移计测得的高程 1468~1536 m 范围土体压缩量时程曲线 (时间 0 点对应大坝填筑至 1536 m 高程, 此时位移计安装并开始测读)。图中同时给出了两种模型的计算结果。可以看出, 随着坝体填筑, 实测压缩量平稳增加, 填筑到 498 d (高程 1636 m) 时, 压缩量达到 1192 mm。UH 模型预测结果与实测值较为接近, 且变化趋势一致, 498 d 时压缩量 1159 mm, 为实测值的 97.2%。而 E-B 模型预测结果则比实测值偏大, 498 d 时压缩量 1884 mm, 为实测值的 1.58 倍。

图 14 为下游堆石体沉降监测值与计算值对比图, 横坐标 y 为距坝轴线 (图 12 中 z 轴) 的水平距离。图 14(a)中离散点为 CH85~CH90 测点实测沉降量, 虚线和实线分别为 UH 模型和 E-B 模型的预测值。可以看出, 在堆石体中间位置 (CH88~CH90)

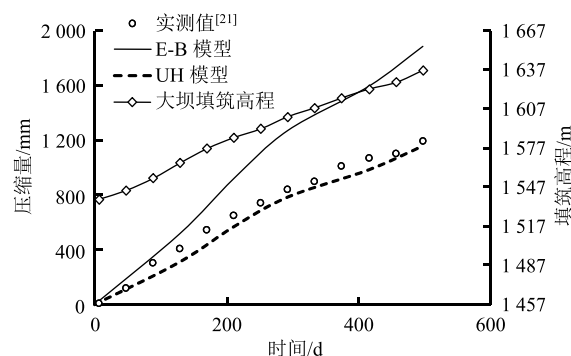
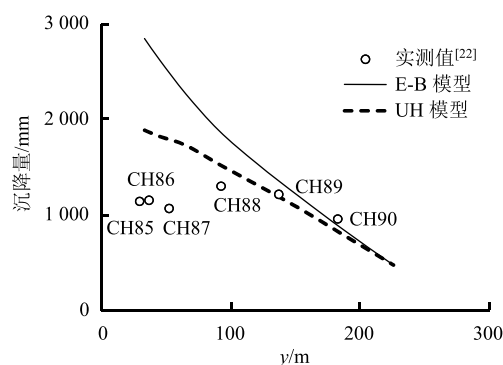
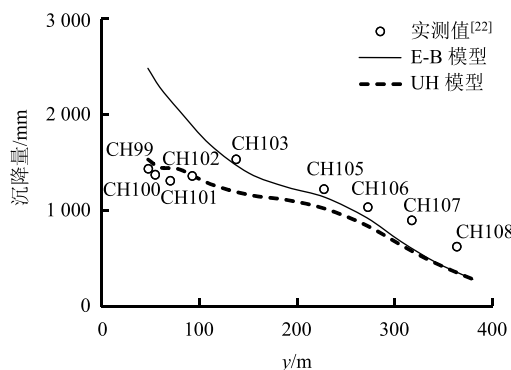


图 13 心墙区土体压缩量时程曲线
Fig.13 Time-history curves of compressive deformation of the core



(a) CH85~CH90



(b) CH99~CH108

注: 图中实测值引自文献^[22], 为坝体填筑到约 1678 m 时监测成果。

图 14 下游堆石体沉降监测值与计算值比较
Fig.14 Comparison between monitored settlement and predictions

实测值与计算值接近, 且随着 y 值增大, 沉降量减小, 符合一般规律。但对靠近坝轴线的 CH85~CH87, 实测值与计算值差异较大, 实测值偏小。总体上, UH 模型预测结果与实测值较为接近, E-B 模型在 $y < 100$ m 时沉降量较大。

图 14(b)中离散点为 CH99~CH108 测点实测沉降量, 虚线和实线分别为 UH 模型和 E-B 模型的预测值。与图 14(a)类似, 在 CH103~108 测点位置,

实测值基本随 y 值增大而减小, 且大小与两种模型的计算值接近。靠近心墙的 CH99~CH102 测点处, 沉降量变化不大。总体上, 两种模型都可以较好地预测该高程处堆石体的沉降, 但 E-B 模型预测值在靠近坝体心墙的位置处偏大。

为更直观地评判模型预测结果的好坏, 引入相对误差 δ 及平均相对误差 $\bar{\delta}$, 分别定义为

$$\delta = |(s_{\text{pred}} - s_{\text{real}}) / s_{\text{real}}| \times 100\% \quad (4)$$

$$\bar{\delta} = \sum_i^n \delta_i / n \quad (5)$$

式中: s_{pred} 和 s_{real} 分别为对应测点沉降的预测值和监测值; n 为该区域内的测点数目。

按式 (4)、(5) 计算 CH85~CH90 和 CH99~CH108 测点处两模型的平均相对误差 $\bar{\delta}$, UH 模型的误差 (17.4% 和 39.9%) 均小于 E-B 模型 (39.8% 和 82.4%), 这表明 UH 模型在土石坝堆石体变形预测上更接近实际情况。

综上所述, 通过与坝体心墙及堆石体监测数据的对比, 进一步验证了 UH 模型在土石坝工程应用中的适用性和合理性。

4 结 论

本文对 3 种粗颗粒土开展了多条应力路径的室内试验, 分别利用 UH 模型和 E-B 模型进行预测。然后将 UH 模型应用到某心墙堆石坝的有限元分析中, 并与 E-B 模型的计算结果以及现场监测值进行比较。主要结论如下:

(1) UH 模型从土的压硬性、摩擦性和剪胀性出发, 抓住了土体变形的力学本质, 通过简洁的公式和少量的参数, 合理描述了粗颗粒土在三轴 CD 路径下的硬化软化和剪缩剪胀, 同时能够灵活地模拟 K_0 压缩路径和等应力比路径, 其结果均优于 E-B 模型, 验证了该模型对粗颗粒土的适用性。

(2) UH 模型已被嵌入到三维有限元软件中, 用于计算和分析某心墙堆石坝的受力及变形, 其计算结果比 E-B 模型更接近实测值, 验证了该模型在土石坝工程中的适用性和合理性。

(3) 以上与室内试验和现场监测数据的对比分析表明, UH 模型具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

[1] 程展林, 姜景山, 丁红顺, 等. 粗粒土非线性剪胀模型研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 460-467.

CHENG Zhan-lin, JIANG Jing-shan, DING Hong-shun, et al. Nonlinear dilatancy model for coarse-grained soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(3): 460-467.

[2] KONDER T L. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundation**, 1963, 89(1): 115-143.

[3] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear Analysis of stress and strain in soils[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, 1970, 96(5): 1629-1653.

[4] 魏国民, 陈生水, 李国英, 等. 基于状态参数的筑坝粗粒土本构模型[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 654-661.

WEI Kuang-min, CHEN Sheng-shui, LI Guo-ying, et al. Constitutive model for coarse-grained dam materials considering state parameter[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(4): 654-661.

[5] LADE P V, DUNCAN J M. Elastoplastic stress-strain theory for cohesionless soil[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, 1975, 101(10): 1037-1053.

[6] ROSCOE K H, SCHOFIELD A N, THURAIRAJAH A. Yielding of clays in states wetter than critical[J]. **Géotechnique**, 1963, 8(2): 22-53.

[7] ROSCOE K H, BURLAND J B. On the generalized stress-strain behaviour of wet clay[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1968: 535-609.

[8] 卞士海, 李国英, 魏国民, 等. 一个改进的堆石料广义塑性模型[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(10): 1936-1942.

BIAN Shi-hai, LI Guo-ying, WEI Kuang-min, et al. Modified generalized plasticity model for rockfill materials[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(10): 1936-1942.

[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] 刘开明, 屈智炯, 肖晓军. 粗粒土的工程特性及本构模型研究[J]. 成都科技大学学报, 1993, 6: 93-102, 92.

LIU Kai-ming, QU Zhi-jiong, XIAO Xiao-jun. The engineering properties and constitutive model of coarse

- granular soils[J]. **Journal of Chengdu University of Science and Technology**, 1993, 6: 93-102, 92.
- [11] 高莲士, 汪召华, 宋文晶. 非线性解耦 $K-G$ 模型在高面板堆石坝应力变形分析中的应用[J]. 水利学报, 2001(10): 1-7.
- GAO Lian-shi, WANG Zhao-hua, SONG Wen-jing. The application of nonlinear uncoupled $K-G$ model to deformation analysis of high concrete face rockfill dam[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2001(10): 1-7.
- [12] 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.
- SHEN Zhu-jiang. Nanshui double yield surface model and its application[C]//Proceedings of the Symposium on Cross-strait Soil Mechanics, Foundation Engineering and Geotechnical technology. Xi'an: China Civil Engineering Society, 1994: 152-159.
- [13] 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 Zong-ze. A double yield surface constitutive model for soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1988, 10(4): 64-71.
- [14] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- YIN Zong-ze. Geotechnical principle[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.
- [15] 姚仰平, 侯伟, 罗汀. 土的统一硬化模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2135-2151.
- YAO Yang-ping, HOU Wei, LUO Ting. Unified hardening model for soils[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(10): 2135-2151.
- [16] 姚仰平. UH 模型系列研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2): 193-217.
- YAO Yang-ping. Advanced UH models for soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(2): 193-217.
- [17] 姚仰平, 刘林, 罗汀. 砂土的 UH 模型[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(12): 2147-2153.
- YAO Yang-ping, LIU Lin, LUO Ting. UH model for sands[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(12): 2147-2153.
- [18] 朱俊高, 陆阳洋, 蒋明杰, 等. 新型静止侧压力系数试验仪的研制与应用[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 3071-3076.
- ZHU Jun-gao, LU Yang-yang, JIANG Ming-jie, et al. Development and application of new-type apparatus for K_0 test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(8): 3071-3076.
- [19] 陈志波, 朱俊高, 刘汉龙. 土石坝应力路径三维有限元数值分析[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(12): 59-63.
- CHEN Zhi-bo, ZHU Jun-gao, LIU Han-long. Three-dimensional finite element numerical analysis on stress path for earth-rockfill dam[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2010, 27(12): 59-63.
- [20] 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.
- ZHAO Xiao-long, ZHU Jun-gao, WANG Ping. A comparison of two constitutive models in stress and deformation analysis of earth rockfill dams[J]. **China Rural Water and Hydropower**, 2018(1): 165-169, 173.
- [21] 李大宏, 李菁, 王颖. 电位器式位移计在长河坝心墙沉降监测中的应用研究[J]. 四川水利, 2016, 37(5): 52-54.
- LI Da-hong, LI Jing, WANG Ying. Application study on potentiometer type displacement meter in core settlement monitoring of Changheba Dam[J]. **Sichuan Water Resources**, 2016, 37(5): 52-54.
- [22] 刘建坤, 由广昊, 马林艳. 长河坝大坝施工期安全监测成果分析[J]. 水力发电, 2016, 42(10): 57-61.
- LIU Jian-kun, YOU Guang-hao, MA Lin-yan. Analysis of safety monitoring results in construction period of Changheba Dam[J]. **Water Power**, 2016, 42(10): 57-61.