

粗粒料广义塑性模型对不同应力路径适应性研究

邹德高^{*1,2}, 付 猛², 刘京茂², 孔宪京^{1,2}

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 结合两种不同岩性的粗粒料在等 σ_1 、等 σ_3 、等 p 以及等应力比应力路径下的大型三轴试验和侧限压缩试验成果,研究了粗粒料广义塑性模型对不同应力路径的适应性.结果表明:广义塑性模型很好地反映了粗粒料变形的应力路径相关性,同时根据 Roadford 坝坝料的三轴试验结果得到的模型参数,对大坝进行了有限元数值模拟,计算得到的大坝填筑后的变形与实际监测结果吻合较好,表明广义塑性模型也能较好地反映土石坝施工期应力路径对坝体变形的影响.

关键词: 粗粒料;应力路径;三轴试验;广义塑性模型;模型验证

中图分类号: TV321 **文献标志码:** A

0 引 言

目前对粗粒料应力-应变关系特性的研究主要基于常规三轴试验,并没有考虑实际施工过程中应力路径的变化.已有的大量试验都表明,堆石料的变形特性在坝体的填筑和蓄水期都具有明显的应力路径相关性^[1-3],且实测表明,大坝填筑过程中坝体大部分单元都接近等应力比的应力路径^[2].因此对大坝进行有限元数值分析时,使用能合理地反映大坝实际应力路径的本构模型是十分有必要的.

国内外众多学者已经在粗粒料本构模型方面做了大量工作^[4-8],国内工程中常用的本构模型有非线性弹性模型——邓肯 EB 模型、清华 KG 模型;弹塑性模型——沈珠江双屈服面模型.邓肯 EB 模型不能反映粗粒料的剪胀和剪缩特性,也不能合理考虑复杂的应力路径.清华 KG 模型和沈珠江双屈服面模型在理论上较为合理和严密,因此对复杂应力路径有一定的适应性.

广义塑性模型是由 Zienkiewicz 和 Pastor 等在广义塑性理论框架上提出的^[9-11].广义塑性模

型具有许多优点:不需要定义塑性势面函数,可直接确定塑性流动方向;不需要定义加载面函数,可直接确定加载方向;不需要依据相容性条件,可直接确定塑性模量;可以考虑剪胀和剪缩以及循环累计残余变形.更为重要的是广义塑性模型框架清晰,便于在有限元程序中实现,用一套参数即可完成土工建筑物的静、动力分析过程.广义塑性模型理论比较完善,且具有许多优点,因此被众多学者从对砂土的分析上引用来进行粗粒料的分析.于玉贞等^[12]、张宏洋等^[13]将该模型用于心墙堆石坝的分析.但由于高土石坝坝体内部平均主应力的变化范围较大(0~3 MPa),Xu 等^[14]对广义塑性模型的压力相关性进行了改进,发展成了粗粒料的广义塑性模型,并成功用于实际工程模拟.考虑到粗粒料的广义塑性模型在复杂应力路径的适应性方面研究还不充分,本文采用粗粒料的广义塑性模型,对不同应力路径下的大型室内三轴试验进行数值模拟,来验证粗粒料广义塑性模型对复杂应力路径的适应性.同时计算一个实际工程来进一步验证模型对土石坝施工填筑变形特性的适应性.

收稿日期: 2012-07-05; 修回日期: 2013-07-22.

基金项目: 地震行业科研专项经费资助项目(201208013);国家自然科学基金资助项目(51138001;51279025;51078061);新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-12-0083).

作者简介: 邹德高^{*}(1973-),男,教授,博士生导师,E-mail: zoudegao@dlut.edu.cn.

1 粗粒料的广义塑性模型^[9-11,14]

在粗粒料广义塑性模型中,应力增量表达式为

$$d\sigma = D^{ep} : d\epsilon \tag{1}$$

$$D^{ep} = D^e - \frac{D^e : n_g : n^T : D^e}{H + n^T : D^e : n_g} \tag{2}$$

式中: n_g 为加载或卸载塑性流动方向; n 为加载方向矢量,相当于屈服面法向矢量; H 为加载或卸载塑性模量; D^e 为弹性矩阵; D^{ep} 为弹塑性矩阵.

加卸载可以通过以下式子来进行判定:

$$n : d\sigma^e > 0; \text{加载} \tag{3a}$$

$$n : d\sigma^e < 0; \text{卸载} \tag{3b}$$

剪胀比

$$d_g = \frac{d\epsilon_v^p}{d\epsilon_s^p} = (1 + \alpha_g)(M_g - \eta) \tag{4}$$

式中: α_g 为材料常数; η 为应力比; M_g 为临界状态线在 p' - q 平面的斜率,可以表达成粗粒料残余内摩擦角和罗德角的函数:

$$M_g = \frac{6 \sin \phi'_g}{3 - \sin \phi'_g \sin 3\theta} \tag{5}$$

塑性流动方向 $n_g^T = (n_{gv} \ n_{gs})$, 其中 $n_{gv} = d_g / \sqrt{1 + d_g^2}$, $n_{gs} = 1 / \sqrt{1 + d_g^2}$.

加载方向矢量 $n^T = (n_v \ n_s)$, 其中 $n_v = \frac{d_f}{\sqrt{1 + d_f^2}}$, $n_s = \frac{1}{\sqrt{1 + d_f^2}}$, $d_f = (1 + \alpha_f)(M_f - \eta)$, M_f 和 α_f 为模型参数.

弹性体积模量和剪切模量可以表示为

$$K = K_0 p' \tag{6}$$

$$G = G_0 p' \tag{7}$$

加载和再加载塑性模量可以被定义为

$$H_l = H_0 p' H_f (H_v + H_s) H_{dm} H_{den} \tag{8}$$

$$H_f = (1 - \eta / \eta_i)^4 \tag{9}$$

$$\eta_i = (1 + 1 / \alpha_f) M_f \tag{10}$$

$$H_v = 1 - \eta / M_g \tag{11}$$

$$H_s = \beta_0 \beta_1 e^{-\beta_0 \xi} \tag{12}$$

$$H_{dm} = \left(\frac{\zeta_{max}}{\zeta} \right)^{\gamma_{dm}} \tag{13}$$

$$\zeta = p' \left[1 - \left(\frac{1 + \alpha_f}{\alpha_f} \right) \frac{\eta}{M_f} \right]^{1/\alpha_f} \tag{14}$$

式中: β_0 、 β_1 和 γ_{dm} 为模型参数, $\xi = \int |d\epsilon_s^p|$, 而 H_{dm} 为应力历史的函数.

卸载时塑性模量可以定义为

$$H_u = H_{u0} (\eta_u / M_g)^{-\gamma_u}; \quad |\eta_u / M_g| < 1 \tag{15}$$

$$H_u = H_{u0}; \quad |\eta_u / M_g| \geq 1 \tag{16}$$

为了更好地考虑堆石料的滞回特性,本文中 $H_{dm} = e^{(1 - \eta / \eta_{max}) \gamma_{dm}}$, 其中 η_{max} 为土体到达的最大应力比.

对弹性模量和塑性模量考虑合理的压力相关性,式(6)、(7) 修改为

$$K = K_0 p_a (p' / p_a)^{m_v} \tag{17}$$

$$G = G_0 p_a (p' / p_a)^{m_s} \tag{18}$$

式中: K_0 、 m_v 为弹性体积模量参数, G_0 、 m_s 为剪切模量参数.

式(8)、(16) 修改为

$$H_l = H_0 p_a (p' / p_a)^{m_l} H_f (H_v + H_s) H_{dm} H_{den} \tag{19}$$

$$H_u = H_{u0} p_a (p' / p_a)^{m_u} (\eta_u / M_g)^{-\gamma_u}; \quad |\eta_u / M_g| < 1 \tag{20}$$

式中 $H_{den} = e^{-\gamma_d \epsilon_v}$, 用来考虑堆石料的循环致密性. 上述各参数的确定方法参照文献[15].

2 模型的试验验证

本文采用一个八节点六面体单元对三轴试验进行三维有限元模拟,单元如图 1 所示,约束和荷载按照不同应力路径的要求施加. 对等 σ_3 的三轴剪切试验来说,固定由①、④、⑧、⑤组成面的 X 方向位移,①、②、⑥、⑤组成面的 Y 方向位移,①、②、③、④组成面的 Z 方向位移. 而在另外 3 个面施加围压和轴向荷载进行模拟计算.

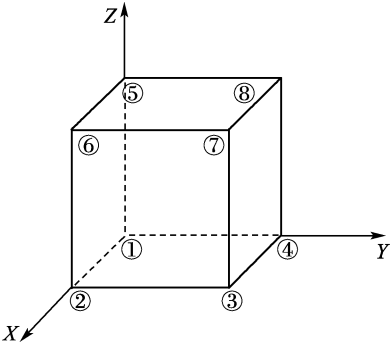


图 1 三维单元
Fig. 1 3D element

2.1 石灰岩碎石粗粒料

根据针对石灰岩碎石粗粒料所做的等 σ_3 大

型三轴剪切试验结果^[16],其中试验是在清华大学土木水利学院的大型微机控制电液伺服静动力三轴试验机上进行的,试件高为 73 cm,直径为 30 cm;试验用料为石灰岩碎石,不均匀系数为 8.17,曲率系数为 1.23,干密度为 2.07 g/cm³. 根据试验结果确定了粗粒料广义塑性模型参数(表 1),利用所得参数对其他不同加载应力路径下的室内试验^[16-17]进行了有限元数值模拟,并将模型的计算结果与试验结果进行了对比. 三轴试验涉及的应力路径包括以下 3 种:(1)等 σ_3 三轴压缩试验,即在三轴试验过程中保持初始固结围压 σ_3 不变而不断增大轴向应力 σ_1 ;(2)等 σ_1 三轴压缩试验,即在三轴试验过程中保持轴向应力 σ_1 不变,而逐渐减小围压 σ_3 ;(3)等 p 三轴压缩试验,即在三轴试验过程中不断增大轴向应力 σ_1 的同时也不断减小围压 σ_3 ,以保持平均主应力 p 不变.

表 1 石灰岩碎石粗粒料广义塑性模型参数

Tab. 1 Parameters of the generalized plastic model for broken limestone coarse grained soil

G_0	K_0	M_g	M_f	α_f	α_g
600	800	1.63	0.82	0.26	0.45
m_v	m_1	H_0	β_0	β_1	m_s
0.5	0.3	613	25	0.026	0.5

图 2 为等 σ_3 的大型三轴试验得到的应力-应变关系曲线、体变-轴变关系曲线与模型预测曲线的对比. 可以看出模型模拟值与试验值基本一致,表明模型能够很好地反映粗粒料在低围压时发生剪胀而高围压时剪缩的特性. 图 3 是模拟初始固结围压均为 1 MPa 的等 σ_3 、等 σ_1 以及等 p 应力路径下三轴试验所得到的计算结果与试验结果的对比. 试验数据表明相同初始围压下,不同应力路径下粗粒料三轴试验表现出不同的剪胀剪缩现象(其中等 σ_1 和等 p 表现为剪胀而等 σ_3 表现出了剪缩),模型很好地模拟出这一现象. 图 4 是模拟侧限压缩试验得到的结果与试验结果^[17]的对比,侧限压缩试验可以认为是等应力比加载过程,在试验过程中大小主应力比保持不变. 从图中可以看出,模型模拟值与试验值基本一致.

2.2 弱风化花岗岩堆石料

基于针对弱风化花岗岩堆石料所做的等 σ_3 的大型三轴试验结果^[18]进行模拟,其中试验是在

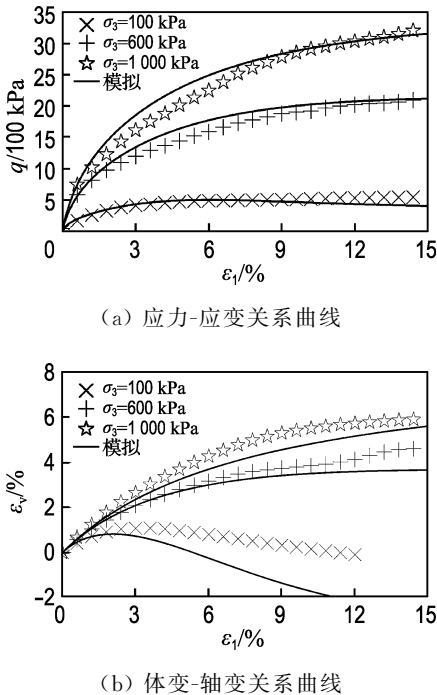


图 2 等 σ_3 的三轴试验值与计算值比较(石灰岩碎石粗粒料)

Fig. 2 Comparison between model predictions and the results of constant σ_3 triaxial test (broken limestone coarse grained soil)

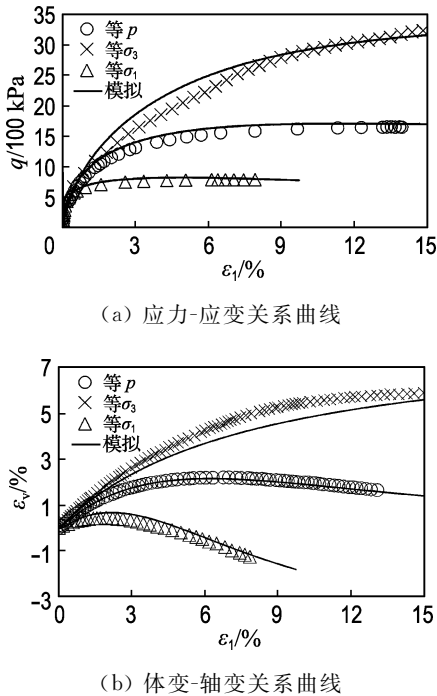


图 3 不同应力路径下试验值与计算值比较(初始固结围压均为 1 MPa)

Fig. 3 Comparison between model predictions and test results in different stress paths (1 MPa initial consolidation confining pressure)

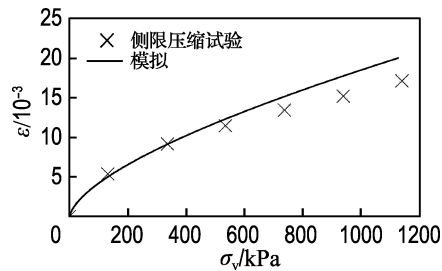


图4 侧限压缩试验对比

Fig. 4 Comparison between model predictions and the test results of confined compression test

清华大学研制的大型高压多功能静动三轴试验机上进行的,试样直径为30 cm,高为73 cm,制样最大粒径为60 mm,干密度为1.98 g/cm³,不均匀系数为5.81,曲率系数为1.57.根据试验得到的结果确定了粗粒料广义塑性模型参数,如表2所示.

表2 弱风化花岗岩粗粒料广义塑性模型参数

Tab. 2 Parameters of the generalized plastic model for weakened weathered granite coarse grained soil

G_0	K_0	M_g	M_f	H_0	r_d	H_{u0}	m_s	β_0
1 000	1 500	1.63	1.23	593	5	3 000	0.5	6
m_v	m_l	α_g	α_f	γ_{dm}	γ_u	β_l	m_u	
0.5	0.1	0.45	0.134	50	4	0.052 4	0.5	

利用已确定的模型参数对其他加卸载应力路径下的大型三轴试验^[18]进行模拟.其中试验所涉及的路径包括以下3种:

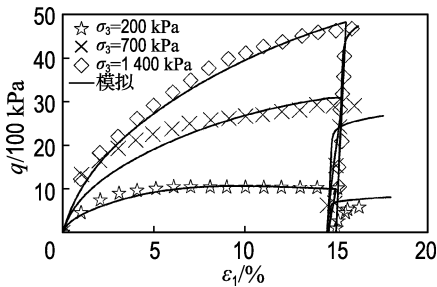
(1)等σ₃的大型三轴加卸载试验

先保持σ₃不变进行压缩,当轴向应变达到15%时进行一次卸载和再加载的循环,结束试验.图5给出了等σ₃的大型三轴加卸载试验曲线与数值模拟曲线的对比,从图中可以看出模型对等σ₃的大型三轴加卸载试验的数值模拟与试验结果基本一致,模型较好地体现出了试验中粗粒料的卸载体缩.

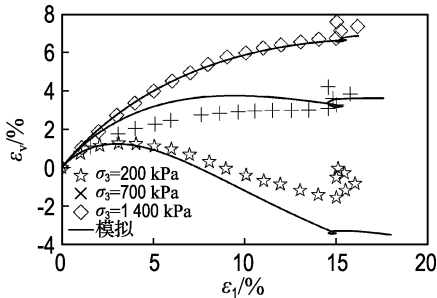
(2)等K_c的大型三轴加卸载试验

K_c为大主应力与小主应力的比值.剪切前先对试样施加0.15 MPa的预固结围压,加载到围压σ₃=1.6 MPa时进行一次卸载和再加载的循环.由图6所示的试验结果及数值模拟结果对比可见,模型对不同等应力比试验(K_c=2.5和K_c=3.5)的模拟程度还是比较好的.实际观测发现在大坝填筑过程中坝体大部分单元都接近K_c=

2.7的等应力比应力路径^[2],这说明广义塑性模型用来模拟大坝填筑过程是可行的.



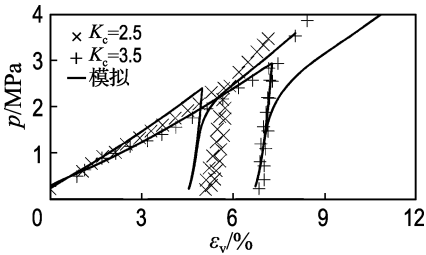
(a) 应力-应变关系曲线



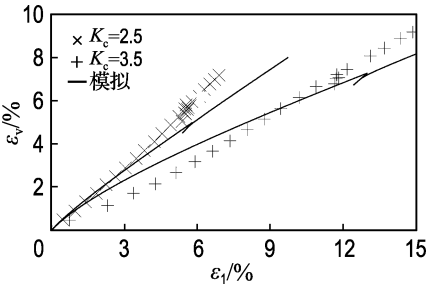
(b) 体变-轴变关系曲线

图5 等σ₃的三轴试验值与计算值比较(弱风化花岗岩堆石料)

Fig. 5 Comparison between model predictions and the results of constant σ₃ tests (weakened weathered granite rockfill)



(a) 应力-应变关系曲线



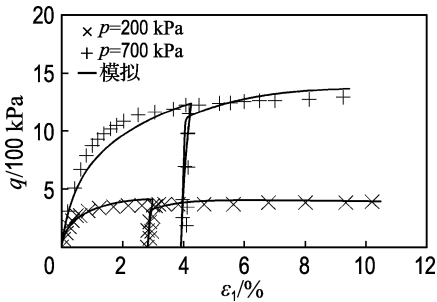
(b) 体变-轴变关系曲线

图6 等K_c的三轴试验值与计算值比较

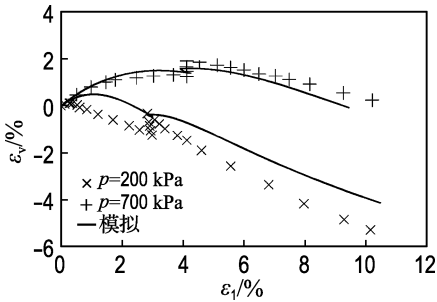
Fig. 6 Comparison between model predictions and the results of constant K_c tests

(3)等 p 的大型三轴加卸载试验

剪切过程中保持 p 不变, q 不断增大; 即将达到破坏强度时, 按原路径卸载至 $q=0$; 保持 p 不变, 增大 q . 由图 7 所示对比结果可见, 模型对等 p 加卸载试验的模拟结果比较理想, 很好地反映了粗粒料卸载体缩和再加载剪胀特性.



(a) 应力-应变关系曲线



(b) 体变-轴变关系曲线

图 7 等 p 的三轴试验值与计算值比较

Fig. 7 Comparison between model predictions and the results of constant p tests

通过对上述 2 种粗粒料在不同应力路径下三轴试验的有限元数值模拟发现, 计算得到的结果与试验结果基本吻合. 表明粗粒料的广义塑性模型能较好地反映粗粒料在不同应力路径下的应力和变形特性.

3 实际工程的验证

3.1 计算模型及参数

Roadford 坝是一座位于英国德文郡的均质面板坝, 坝高 41 m, 于 1990 年建成运行. 因为采用了易风化的石炭纪岩来作为大坝的主堆石料, 故设计时采用了比较保守的坡度, 上游坝坡为 1 : 2.227, 下游坝坡为 1 : 2.25. 大坝在填筑过程中共设了 3 条测线: 1 条水平测线和 2 条竖向测线

(测线 1、测线 2). 大坝网格及测线分布^[19]如图 8 所示. 其中大坝分 9 层填筑, 每层 5 m 左右, 填筑完后再一次性浇筑面板.

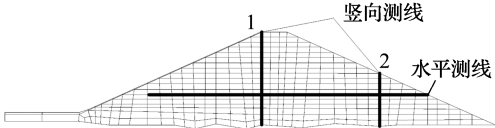


图 8 Roadford 坝二维有限元网格

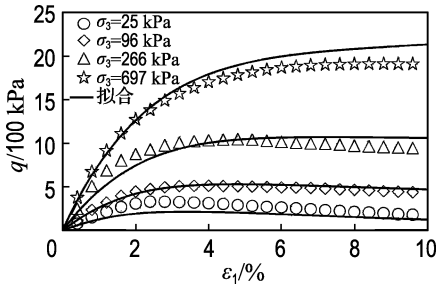
Fig. 8 2-D FE mesh of Roadford dam

根据大坝堆石料的三轴剪切试验结果^[19], 确定了模型参数, 如表 3 所示. 图 9 为固结排水剪切

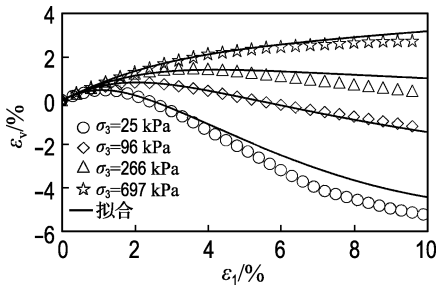
表 3 改进的粗粒料广义塑性模型参数

Tab. 3 Parameters of modified generalized plastic model for coarse grained soil

G_0	K_0	M_g	M_f	α_f	α_g	H_0
147	165	1.64	0.64	0.265	0.01	890
m_v	m_l	m_s	β_0	β_1	γ_{dm}	
0.6	0.157	0.6	68	0.037	50	



(a) 应力-应变关系曲线



(b) 体变-轴变关系曲线

图 9 Roadford 坝堆石料三轴试验值与模型计算值对比

Fig. 9 Comparison between model predictions and triaxial test results of the rockfill materials of Roadford dam

试验得到的应力-应变关系曲线、体变-轴变关系曲线与模型预测曲线的对比.可以看出,模型预测值与试验值基本一致.

3.2 计算结果分析

图 10 为竣工期断面水平位移 u 和竖向沉降 s 等值线图.可以看出,竣工期水平位移基本上以坝轴线对称分布,上下游的最大水平位移分别为 24 mm 和 25 mm,坝体沉降最大值为 299 mm,沉降最大值位于 1/2 坝高附近,最大沉降为坝高的 0.73%.

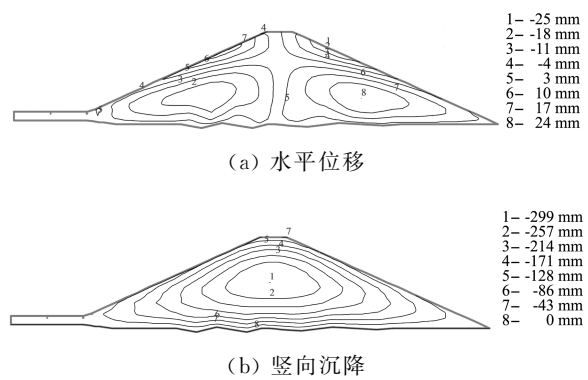


图 10 竣工期断面水平位移和竖向沉降等值线
Fig. 10 Contours of lateral displacements and vartical settlements of cross section after construction

图 11、12 为竣工期有限元计算得到的 3 条测线上的位移结果与实测结果的对比,可以看出,测线上的数值计算结果与实际监测结果趋势基本一致,水平位移计算值比实测值偏小,这可能是因为在模型中没有考虑堆石料的蠕变特性以及三轴试验存在的缩尺效应.但是计算结果还是能够表明基于粗粒料的广义塑性模型的数值计算可以较好地模拟面板堆石坝的施工变形.

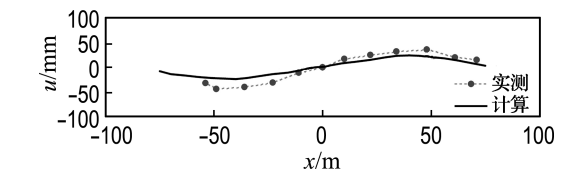


图 11 竣工期水平位移计算值与实测值对比
Fig. 11 Comparison between model predictions and observed lateral displacements after construction

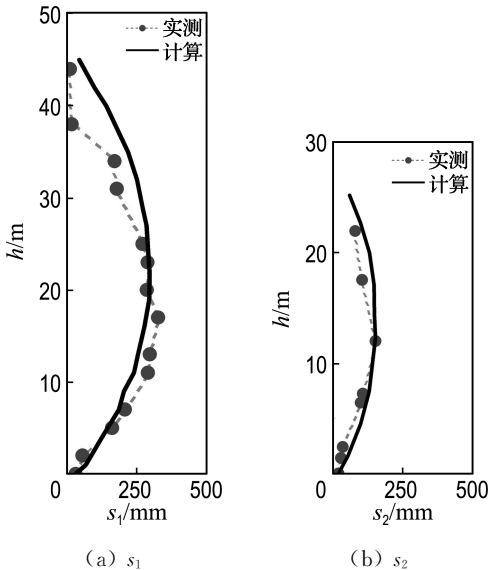


图 12 竣工期沉降计算值与实测值对比

Fig. 12 Comparison between model predictions and observed settlements after construction

4 结 论

(1)采用粗粒料的广义塑性模型,对不同应力路径(等 σ_1 、等 σ_3 、等 p 以及等 K_c)的室内试验进行了有限元数值模拟,拟合结果与试验结果吻合较好,表明模型能比较好地反映复杂应力路径.

(2)采用粗粒料的广义塑性模型,对Roadford坝施工过程进行了有限元数值模拟,并与现场监测结果进行了对比.计算得到的大坝填筑后的沉降与实测结果吻合较好,表明改进的广义塑性模型也能较好地反映土石坝施工时的变形特性.

(3)粗粒料的广义塑性模型是一个静动统一的分析模型,因此进行粗粒料广义塑性对微小应变和大应变时的动力特性的适应性研究将是下一步的工作目标.

参考文献:

[1] 柏树田,周晓光,晁华怡. 应力路径对堆石变形特性的影响[J]. 水力发电学报, 1999(4):76-80.
BAI Shu-tian, ZHOU Xiao-guang, CHAO Hua-yi. Effects of stress path on the deformation of rockfill materials [J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 1999(4):76-80. (in Chinese)
[2] 日本土质工学会. 粗粒料的现场压实[M]. 郭照

- 灵,文 丹,译. 北京:中国水利水电出版社,1999.
- Association of Geotechnique of Japan. **In-situ Compaction of Coarse-grained Materials** [M]. GUO Xi-ling, WEN Dan, trans. Beijing: China Water Power Press, 1999. (in Chinese)
- [3] 张林洪,刘荣佩,谢婉丽. 等应力比路径条件下堆石料的应力应变特性[J]. 大坝观测与土工测试, 2001, **25**(4):46-49.
- ZHANG Lin-hong, LIU Rong-pei, XIE Wan-li. Properties of stress and strain of rockfill under the path of equal stress ratio [J]. **Dam Observation and Geotechnical Tests**, 2001, **25** (4): 46-49. (in Chinese)
- [4] 高正中,胡德金,张青云. 复杂应力路径下土的本构模型研究[J]. 四川联合大学学报:工程科学版, 1997, **1**(5):50-56.
- GAO Zheng-zhong, HU De-jin, ZHANG Qing-yun. Study of constitutive model of soil under complex stress path [J]. **Journal of Sichuan Union University: Engineering Science Edition**, 1997, **1**(5): 50-56. (in Chinese)
- [5] 陈生水,沈珠江,鄞能惠. 复杂应力路径下无粘性土的弹塑性数值模拟[J]. 岩土工程学报, 1995, **17**(2):20-28.
- CHEN Sheng-shui, SHEN Zhu-jiang, LI Neng-hui. An elastoplastic model for cohesionless soils under complex stress paths [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, **17**(2):20-28. (in Chinese)
- [6] 高莲士,赵红庆,张丙印. 堆石料复杂应力路径试验及非线性 K-G 模型研究[C]// 国际高土石坝学术会议论文集. 北京:中国水利水电出版社,1993: 110-117.
- GAO Lian-shi, ZHAO Hong-qing, ZHANG Bing-yin. Study on the nonlinear uncoupled K-G model for rockfill under the complicated stress paths [C] // **Proceedings of International Symposium on High Earth-rockfill Dams**. Beijing: China Water Power Press, 1993:110-117. (in Chinese)
- [7] 卢廷浩,钱玉林,殷宗泽. 宽级配砾石土的应力路径试验及其本构模型验证[J]. 河海大学学报, 1996, **24**(2):74-79.
- LU Ting-hao, QIAN Yu-lin, YIN Zong-ze. Stress-strain behavior and constitutive models for wide grading of gravelly soil [J]. **Journal of Hohai University**, 1996, **24**(2):74-79. (in Chinese)
- [8] 张宗亮,贾延安,张丙印. 复杂应力路径下堆石体本构模型比较验证[J]. 岩土力学, 2008, **29**(5): 1147-1151.
- ZHANG Zong-liang, JIA Yan-an, ZHANG Bing-yin. Comparison and verification of constitutive models for rockfill materials under complex stress path [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, **29**(5): 1147-1151. (in Chinese)
- [9] Zienkiewicz O C, Leung K H, Pastor M. Simple model for transient soil loading in earthquake analysis. I: basic model and its application [J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1985(9):453-476.
- [10] Pastor M, Zienkiewicz O C, Leung K H. Simple model for transient soil loading in earthquake analysis. II: non-associative models for sands [J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1985(9):477-498.
- [11] Sun L X. Centrifugal testing and finite element analysis of pipeline buried in liquefiable soil [D]. New York: Columbia University, 2001.
- [12] 于玉贞,卞 锋. 高土石坝地震动力响应特征弹塑性有限元分析[J]. 世界地震工程, 2010, **26**(S1): 341-345.
- YU Yu-zhen, BIAN Feng. Elasto-plastic FEM analysis of dynamic response of high earth-rockfill dams during earthquake [J]. **World Earthquake Engineering**, 2010, **26**(S1):341-345. (in Chinese)
- [13] 张宏洋,李同春,官必宁,等. 砂土的 P-Z 模型介绍及振动台试验验证[J]. 水力发电学报, 2009, **28**(5):182-186,178.
- ZHANG Hong-yang, LI Tong-chun, GONG Bi-ning, *et al.* Introduction and shaking table test verification of the P-Z model for sand soil [J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2009, **28**(5): 182-186,178. (in Chinese)
- [14] XU Bin, ZOU De-gao, LIU Hua-bei. Three-dimensional simulation of the construction process

of the Zipingpu concrete face rockfill dam based on a generalized plasticity model [J]. **Computers and Geotechnics**, 2012, **43**:143-154.

[15] 周 扬. 汶川地震紫坪铺面板堆石坝震害分析及面板抗震对策研究[D]. 大连:大连理工大学, 2012.
ZHOU Yang. Study on the damages of Zipingpu concrete face rockfill dam during Wenchuan earthquake and aseismic measures for face slabs [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)

[16] XU Ming, SONG Er-xiang, CHEN Jin-feng. A large triaxial investigation of the stress-path-dependent behavior of compacted rockfill [J]. **Acta Geotechnica**, 2012, **7**(3):167-175.

[17] 曹光棚, 徐 明, 宋二祥. 土石混合料的力学特性 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2010, **38**(11):32-39.
CAO Guang-xu, XU Ming, SONG Er-xiang. Mechanical properties of broken rock-soil mixture [J]. **Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition**, 2010, **38**(11): 32-39. (in Chinese)

[18] 杨 光, 孙 逊, 于玉贞, 等. 不同应力路径下粗粒料力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(4): 1118-1122.
YANG Guang, SUN Xun, YU Yu-zhen, *et al.*. Experimental study of mechanical behavior of a coarse-grained material under various stress paths [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, **31**(4):1118-1122. (in Chinese)

[19] Kovacevic N, Potts D M, Vaughan P R. Recent advances in the numerical modelling of embankment dams [C] // **Ensuring Reservoir Safety into the Future: Proceedings of the 15th Conference of the British Dam Society**. London: Thomas Telford Services Ltd., 2008.

Study of adaptability of generalized plastic model
of coarse grained soil under various stress paths

ZOU De-gao^{*1,2}, FU Meng², LIU Jing-mao², KONG Xian-jing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on a series of large-scale triaxial tests and confined compression tests, the stress paths of coarse grained soil with two kinds of rock properties under constant σ_1 , constant σ_3 , constant p and constant stress ratio are simulated by the generalized plastic model to study the adaptability of model for stress paths of coarse grained soil. Through the comparison between numerical simulations and test results, it is testified that the deformation of coarse grained soil under complex stress paths can be well reflected by the generalized plastic model. At the same time, the Roadford dam is simulated by a finite element procedure, and the parameters of the generalized plastic model are calibrated by triaxial experiments of rockfill materials of Roadford dam. The numerical results agree well with in-situ monitoring records of dam deformation. It is concluded that the effects of stress paths on dam deformation during construction can be well reflected by the generalized plastic model.

Key words: coarse grained soil; stress paths; triaxial test; generalized plastic model; model validation