

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.07.013

堆石料的剪胀特性与广义塑性本构模型

王占军^{1,2}, 陈生水², 傅中志²

(1. 长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010; 2. 南京水利科学研究院 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 以三轴试验成果为基础, 考虑颗粒破碎引起堆石料剪胀比与应力比之间的非线性关系, 提出了能够反映堆石料低围压剪胀、高围压剪缩特性的剪胀方程。在广义塑性理论框架内构造堆石料的塑性流动方向向量和加载方向向量, 引入依赖于密实度与平均应力的压缩参数, 构造随平均应力、剪应力比和密实度变化的塑性模量, 建立了一个考虑颗粒破碎的堆石料弹塑性本构模型。阐述了该模型 10 个参数的确定方法, 并通过模拟不同围压和不同应力路径下堆石料的三轴压缩试验资料验证了模型与参数的合理性。

关键词: 堆石料; 颗粒破碎; 剪胀性; 广义塑性理论; 弹塑性本构模型

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 07-1931-08

Dilatancy behaviors and generalized plasticity constitutive model of rockfill materials

WANG Zhan-jun^{1,2}, CHEN Sheng-shui², FU Zhong-zhi²

(1. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan, Hubei 430010, China; 2. Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Ministry of Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China)

Abstract: Based on the results of triaxial experiments on rockfill materials, a dilatancy equation is derived by considering the nonlinear dependence of the dilatancy stress ratio on the stress ratio (i.e. the ratio of the deviatoric stress to the mean stress). This equation reveals the deformation characteristics of rockfill materials induced by dilatancy appearing at low confining pressure and by shear shrinkage appearing at high confining pressure. Within the framework of the generalized plasticity theory, the plastic flow direction vector and the loading direction vector are deduced. A compression index is determined in terms of compactness-dependent and mean stress-dependent effects. Then the plastic modulus is formulated as a function of the mean stress, the shear stress ratio and the compactness. On the basis of above studies, a new elastoplastic constitutive model is derived by considering the particle breakage of rockfill materials. The methods are addressed to determine ten material parameters of this model. Finally, the proposed model is used to simulate the triaxial tests on rockfill materials under different confining pressures and stress-paths, and the simulation results are good agreement with the experimental data.

Keywords: rockfill materials; particle breakage; dilatancy; generalized plasticity theory; elastoplastic constitutive model

1 引言

堆石料由于压实性能好、透水性强、承载力高等工程特性^[1]和分布广泛、节省工程投资等优势, 在土石坝工程建设中得到了广泛应用。随着大坝高度的不断突破, 高堆石坝中堆石颗粒在高接触应力下的破碎现象越来越显著^[2-3], 从而导致堆石料的剪胀性降低, 剪缩性增大^[4], 进而引发堆石体较大变形, 因此, 颗粒破碎对堆石料的工程特性影响不容

忽视。近年来众多学者已开展了相关研究, 陈生水^[4]、郭熙灵^[5]、刘汉龙^[6]、高玉峰^[7]等基于室内试验研究了静、动荷载作用下颗粒破碎规律及其对堆石料强度变形的影响, 发现颗粒破碎与堆石料的围压、级配及母岩性质等因素相关, 堆石料剪胀性降低和剪缩性增大, 峰值强度具有明显非线性。许多学者分别通过修改塑性硬化和剪胀关系, 基于损伤力学引入损伤因子, 构建高低围压下的分段临界状态线和临界状态线漂移的模拟方法建立了考虑颗粒

收稿日期: 2014-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51379130, No. 51209141, No. 91215301)。

第一作者简介: 王占军, 男, 1986 年生, 博士, 主要从事土石坝工程研究。E-mail: nhriwzj@126.com

破碎的堆石等粗粒料本构模型, 这些模型可以较好地模拟材料的应力-应变关系^[8]。

基于广义塑性理论建立的本构模型只需直接确定塑性流动方向、加载方向和塑性模量, 可以考虑材料的剪胀和剪缩特性, 具有更大的灵活性, 便于在有限元程序中实现^[9-10]。Zienkiewicz^[11]、Pastor^[12-13]等最早应用该理论描述单调或循环荷载下砂土的应力-应变关系, 但 Pastor-Zienkiewicz-Chan 模型不能反映围压对材料变形的影响^[14]。基于 Pastor-Zienkiewicz-Chan 模型, 邹德高等^[15-17]考虑压力相关性, 通过修改弹性模量和塑性模量模拟了粗粒料的单调和循环荷载下的应力-应变曲线, 可很好地反映粗粒料变形的应力路径相关性。刘恩龙等^[18]通过引入状态参数, 结合广义塑性理论和考虑颗粒破碎时临界状态建立了考虑颗粒破碎的堆石料本构模型。陈生水等^[10]在单向或等向压缩方程中引入反映堆石料颗粒强度的参变量, 建立依赖于体积应变和平均应力的压缩参数并构建塑性模量, 建立了一个考虑颗粒破碎效应的堆石料弹塑性本构模型, 该模型只有 8 个参数, 简单实用。上述模型可反映堆石料的强度变形特性, 但大多直接运用剑桥模型的剪胀方程, 不能合理反映堆石料剪胀特性。

本文分析了堆石料的剪胀特性, 基于试验成果提出了简单实用的堆石料剪胀方程, 与广义塑性理论相结合, 建立了一个考虑颗粒破碎的弹塑性本构模型, 并利用砂砾石料、弱风化砂岩、强风化砂岩与强风化板岩混合料的试验结果验证了所建立的模型。

2 堆石料的剪胀特性

堆石料具有显著的剪胀性, 在密度较大和围压较小时常出现剪胀, 在密度较小和围压较大时常发生剪缩。构造合理的剪胀方程(即塑性体应变增量与塑性剪应变增量之比与应力状态的关系)是建立堆石料本构模型的核心之一。近年来针对堆石料的剪胀特性已开展了大量研究工作, 但针对堆石料剪胀方程的研究还较少^[19]。目前堆石料的剪胀方程大部分都是应用剑桥模型或 Rowe 剪胀理论的剪胀方程及它们的改进型^[4, 20]。

剑桥模型的剪胀方程^[21]为

$$d_g = M - \eta \quad (1)$$

式中: d_g 为剪胀比, 即塑性体积应变增量 $d\varepsilon_v^p$ 与塑性剪应变增量 $d\varepsilon_s^p$ 的比值; M 为堆石料达到临界状态时的应力比; η 为应力比(剪应力 q 与平均应力 p

之比)。

Rowe 剪胀方程^[22]为

$$\frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_s^p} = 1 - \frac{R}{R_u} \quad (2)$$

式中: $d\varepsilon_s^p$ 为塑性轴向应变增量; R 为堆石料的大小主应力比(大主应力 σ_1 与小主应力 σ_3 之比); R_u 为堆石料达到临界状态时的主应力比。

Rowe 剪胀方程通常会高估堆石料剪胀, 为此, 许多学者进行了改进, 典型的有张丙印等^[22]通过对主应力比与极限应力比的比值增加幂次项以修正 Rowe 剪胀方程, 并用于改进南水模型, 其表达式为

$$\frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_s^p} = 1 - \left(\frac{R}{R_u} \right)^\gamma \quad (3)$$

式中: γ 为材料参数, 可通过拟合式(3)得到。

大量试验表明^[4, 20], 剑桥模型的剪胀方程能较好地反映黏性土的变形特性, 但不能很好地适用于堆石料; Rowe 剪胀方程建立在颗粒滑移变形的基础上, 对于颗粒破碎不明显的砂土适用性较好, 但对于易发生颗粒破碎的堆石料, 在剪胀阶段往往明显高估了其剪胀性。针对上述不足, 许多学者往往引入考虑颗粒破碎的耗能因子, 从而建立的剪胀方程较为复杂, 参数获取困难。鉴此, 在分析堆石料三轴试验成果和已有研究基础^[10, 19-24]上, 引入剪胀应力比 M_d 以考虑颗粒破碎引起堆石料剪胀比与应力比之间的非线性关系, 本文构造了如下的剪胀方程:

$$d_g = \left[1 - \left(\frac{\eta}{M_d} \right)^\alpha \right] \exp\left(\frac{c_0}{\eta} \right) \quad (4)$$

式中: α 为材料常数; c_0 为一个小常数, 常设为 0.001。对于密实和低围压条件下的堆石料, 当 $\eta > M_d$ 时, 剪胀比 d_g 为负, 堆石料发生剪胀; 当 $\eta < M_d$, 剪胀比 d_g 为正, 堆石料表现为剪缩。由式

(4) 可知, $\eta \rightarrow 0$ 时, 剪胀比 d_g 无限大, 以反映堆石料等向压缩变形; $\eta \neq 0$ 时, 即堆石料剪切变形时, 式(4)中 $\exp(c_0/\eta)$ 近似为 1, 式(4)退化

为 $d_g = \left[1 - (\eta/M_d)^\alpha \right]$ 。堆石料从体积剪缩转向体积剪胀的临界点称为临胀特征点, 临胀特征点对应的摩擦角称为剪胀摩擦角 ψ , 临胀特征点对应的应力比称为剪胀应力比 M_d , 其表达式^[10]为

$$M_d = \frac{6 \sin \psi}{3 - \sin \psi} \quad (5)$$

堆石料的剪胀线在 p - q 面上是一条曲线^[4]，本文采用剪胀摩擦角 ψ 描述堆石料的剪胀性与平均应力 p 之间的非线性关系^[10]，即

$$\psi = \psi_0 - \Delta\psi \lg(p/p_a) \quad (6)$$

式中： p_a 为标准大气压， $p_a=101$ kPa； ψ_0 为平均应力 p 为大气压力 p_a 时的剪胀摩擦角； $\Delta\psi$ 为平均应力 p 增加一个数量级时剪胀摩擦角降低的幅度。

采用本文建立的剪胀方程（式（4））、剑桥模型的剪胀方程（式（1））、Rowe 剪胀方程（式（2））

和修正 Rowe 剪胀方程（式（3））分别描述双江口砂卵石料^[20]和宜兴抽水蓄能电站弱风化石英砂岩^[23]常规三轴排水剪切试验资料，其中涉及本文的剪胀方程参数列于表 1，模拟和试验结果见图 1、2。

表 1 本文剪胀方程参数

堆石料	α	ψ_0 /(°)	$\Delta\psi$ /(°)
双江口砂卵石料	2.3	45.44	2.51
宜兴抽水蓄能电站弱风化石英砂岩	3.8	45.38	5.33

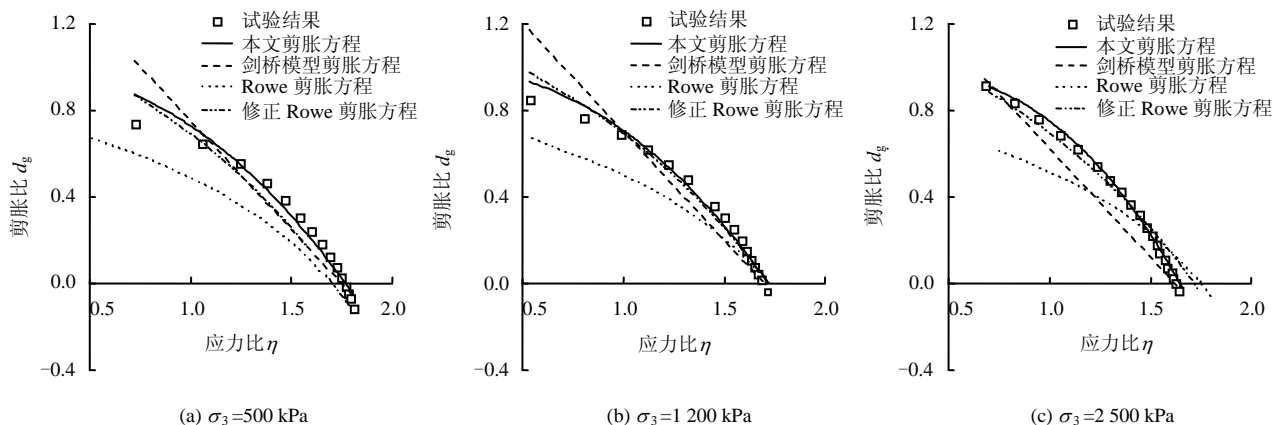


图 1 双江口堆石料的剪胀规律

Fig.1 Dilatancy behaviors of Shuangjiangkou rockfill materials

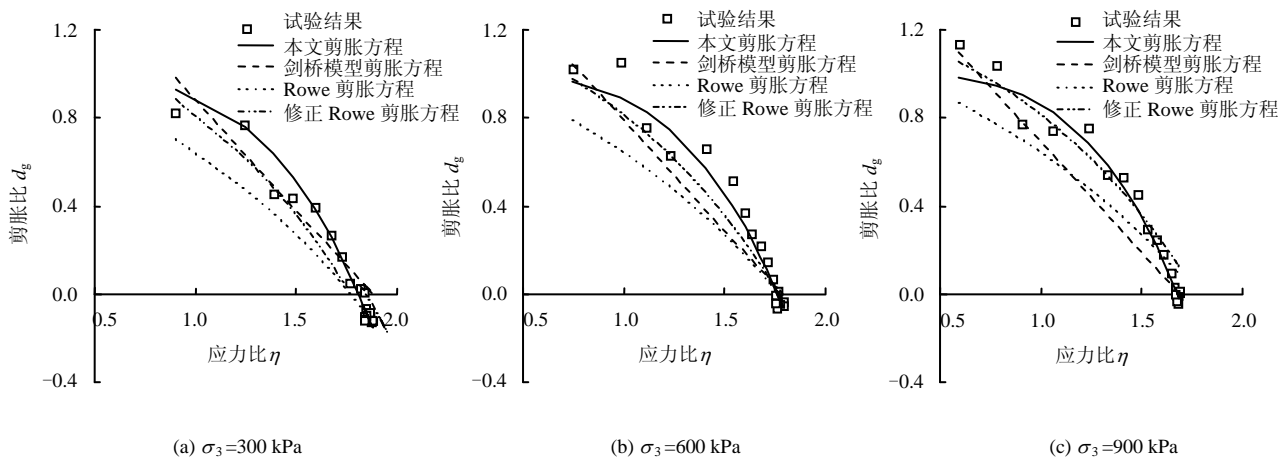


图 2 宜兴抽水蓄能电站堆石料的剪胀规律

Fig.2 Dilatancy behaviors of rockfill materials at Yixing pumped storage power station

从图 1、2 可看出，堆石料的剪胀比与应力比之间呈现较明显的非线性关系，故剑桥模型的线性剪胀方程不能很好地模拟试验结果；Rowe 剪胀方程在低应力水平时低估了堆石料的剪缩性，而在高应力比阶段明显高估了其剪胀性，故基于 Rowe 剪胀方程的本构模型将低估堆石坝的沉降量而高估其水平位移^[4]；修正 Rowe 剪胀方程整体上与试验结果

吻合较好，但由于采用常数 R_0 确定堆石料剪胀和剪缩的分界点，未反映堆石料剪胀比依赖于围压这一重要变形特性，有时并不能很好地模拟试验结果，如图 1(c)、2(c)；相对于其他剪胀方程，本文剪胀方程（式（4））模拟曲线与不同材料和不同围压下的试验结果吻合良好，表明式（4）适用于描述堆石料的剪胀特性，也表明采用式（5）、（6）可描述堆石

料因颗粒破碎引起的剪胀比非线性变化特性，这也是本文引用剪胀应力比 M_d 参数的原因所在。

3 弹塑性本构模型

3.1 弹塑性本构关系表达式

弹塑性本构模型中应力-应变关系可以表示为^[13]

$$d\sigma = D^{ep} : d\varepsilon = \left[D^e - \frac{(D^e : n_g) \otimes (n_f : D^e)}{H + n_f : D^e : n_g} \right] : d\varepsilon \quad (7)$$

式中： D^{ep} 为弹塑性劲度张量； D^e 为弹性劲度张量， H 为塑性模量； n_g 为塑性流动方向向量； n_f 为加载方向向量。

3.2 弹性变形

文献[25]得出堆石料的非线性弹性剪切模量 G^e 为

$$G^e = G_0 p_a \left(\frac{p}{p_a} \right)^m \quad (8)$$

式中： G_0 、 m 为堆石料常数。

堆石料的弹性体积模量 K^e 可按式(9)计算^[10]：

$$K^e = \frac{2(1+\nu)}{3(1-2\nu)} G^e \quad (9)$$

式中： ν 为弹性泊松比，一般取值为 0.3。

3.3 考虑颗粒破碎的堆石料压缩参数

由于堆石料颗粒破碎，堆石料压缩曲线在 $e-\ln p$ 平面上不是直线^[26-27]，本文采用下述表达式^[10, 28]描述堆石料的压缩特性：

$$e = e_0 \exp \left[- \left(\frac{p}{h_s} \right)^n \right] \quad (10)$$

式中： e_0 为堆石料的初始孔隙比； h_s 为固相硬度，是一个参考应力，综合度量堆石料抵抗破碎能力； n 为由材料级配决定的无量纲参数。

由式(8)可推出等向压缩参数 λ ^[10]为

$$\lambda = ne \left(\frac{p}{h_s} \right)^n = n \left[e_0 - (1+e_0) \varepsilon_v \right] \left(\frac{p}{h_s} \right)^n \quad (11)$$

式(11)说明 λ 依赖于密实度和平均压力，当 p 不变时，堆石料趋于密实的过程中， λ 逐渐减小，则堆石料压缩性降低。 λ 也反映了颗粒破碎的显著程度，当 $p < h_s$ 时， $\partial\lambda/\partial p > 0$ ，即随着 p 增加，堆石料压缩性逐渐提高，表明颗粒破碎趋于显著；当 $p = h_s$ 时， $\partial\lambda/\partial p = 0$ ，堆石料压缩参数 λ 达到最大值，表明颗粒破碎速率最大；当 $p > h_s$ 时，

$\partial\lambda/\partial p < 0$ ，即随着 p 增加，堆石料压缩性逐渐降低，表明颗粒破碎使堆石料趋于稳定级配。

3.4 塑性流动方向与加载方向

广义塑性理论框架下塑性流动方向向量^[13]为

$$n_g = \left(\frac{d_g}{\sqrt{1+d_g^2}}, \frac{1}{\sqrt{1+d_g^2}} \right)^T \quad (12)$$

加载方向向量^[13]为

$$n_f = \left(\frac{d_f}{\sqrt{1+d_f^2}}, \frac{1}{\sqrt{1+d_f^2}} \right)^T \quad (13)$$

参照文献[9, 10, 21]， d_f 的表达式采用峰值应力比 M_f 构造，其形式与式(4)相同，即

$$d_f = \left[1 - \left(\frac{\eta}{M_f} \right)^\alpha \right] \exp \left(\frac{c_0}{\eta} \right) \quad (14)$$

式中： M_f 为峰值应力比，即堆石料偏应力达到峰值强度时所对应的应力比，其对应的摩擦角称为峰值摩擦角 φ ， M_f 表达式^[10]为

$$M_f = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (15)$$

堆石料的破坏线在 $p-q$ 面上呈非线性^[4]，本文采用峰值摩擦角 φ 描述堆石料的强度非线性特性，其表达式为^[10]

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg(p/p_a) \quad (16)$$

式中： φ_0 为平均应力 p 为大气压力 p_a 时的峰值摩擦角； $\Delta\varphi$ 为平均应力 p 增加一个数量级时峰值摩擦角降低的幅度。

3.5 塑性模量 H

考虑剪应力水平的影响和压力相关性，参照文献[10]中塑性模量公式，并经大量试算后，本文建议的塑性模量为

$$H = \left[1 - \left(\frac{\eta}{M_f} \right)^\beta \right] \exp \left(\frac{\eta}{M_f} \right) \frac{1+e}{\lambda - \kappa} p \quad (17)$$

堆石料弹性体积模量与卸载曲线斜率 κ 关系式为^[10]

$$K^e = \frac{1+e}{\kappa} p \quad (18)$$

联立式(8)、(9)， κ 可按式(19)计算：

$$\kappa = \frac{3(1-2\nu)(1+e)}{2(1+\nu)} \frac{1}{G_0} \left(\frac{p}{p_a} \right)^{1-m} \quad (19)$$

式中： β 为塑性模量参数，反映剪应力对剪切变形

特性的影响。从式 (17) 可看出，塑性模量 H 是与围压、应力比、孔隙比、考虑颗粒破碎的压缩参数相关的函数。当应力比 $\eta = M_f$ 时，即达到峰值应力时，塑性模量 $H=0$ ；当应力比 $\eta < M_f$ 时，塑性模量 $H>0$ ，剪应力不断增加，表现为硬化。

4 参数确定方法及试验验证

4.1 参数确定方法

本文建立的模型共有 10 个参数，分成 4 组，分别是：①弹性参数： G_0 、 m 可以通过拟合剪应力-剪应变曲线 $q-\varepsilon_s$ 的初始斜率确定；②压缩参数： h_s 和 n 根据式 (10)，由等向或单向压缩试验资料回归分析确定，或通过拟合压缩曲线 $e-\lg p$ 求得；③剪切特性参数：先计算出不同平均应力下堆石料剪胀摩擦角 ψ 和峰值摩擦角 φ ，然后剪胀摩擦角参数 ψ_0 、 $\Delta\psi$ 根据式 (5) 由 $\psi-\lg \frac{P}{p_a}$ 关系曲线的截距和

斜率确定，峰值摩擦角参数 φ_0 、 $\Delta\varphi$ 根据式 (15)

由 $\varphi-\lg \frac{P}{p_a}$ 关系曲线的截距和斜率确定，先计算出

不同平均应力下剪胀应力比 M_d 和剪胀比 d_g ，剪胀方程的参数 α 根据式 (4) 拟合 $d_g-\eta$ 曲线确定；④塑性模量参数： β 通过对三轴剪切试验资料的反演分析确定，常采用复合形法确定该参数。

4.2 不同试样试验验证

某混凝土面板堆石坝高 253 m，选取不同坝区的 3 种典型堆石料：堆石料 A 是主堆石区新鲜砂砾石料，堆石料 B 是主堆石区弱风化砂岩，堆石料 C 是次堆石区强风化砂岩与强风化板岩混合物。根据围压 800、1 200、2 000 kPa 下室内常规三轴排水剪切试验结果确定了 3 种堆石料的本构模型参数，见表 2。从表中可以看出，3 种堆石料的固相硬度 h_s 逐渐减小，表明强风化砂岩与强风化板岩混合物最易发生颗粒破碎，弱风化砂岩次之。

表 2 堆石料的本构模型参数
Table 2 Constitutive model parameters of rockfill materials

材料	e_0	h_s/MPa	n	G_0	m	$\psi_0/(\text{°})$	$\Delta\psi/(\text{°})$	$\varphi_0/(\text{°})$	$\Delta\varphi/(\text{°})$	α	β
堆石料 A	0.20	40.00	0.82	390	0.36	52.54	6.91	59.03	9.67	2.30	1.20
堆石料 B	0.22	11.46	1.13	245	0.73	49.08	4.66	57.12	9.63	2.95	1.25
堆石料 C	0.25	7.75	0.96	210	0.68	54.08	9.72	56.33	10.97	2.75	2.60
宜兴抽水蓄能电站	0.26	19.50	0.85	531	0.34	45.38	5.33	47.35	6.26	3.80	0.43

运用本文模型分别模拟了 3 种不同堆石料的三轴压缩试验，见图 3。对比图中模型预测曲线与试验得到的 $q-\varepsilon_1$ 曲线和 $\varepsilon_v-\varepsilon_1$ 曲线可以看出，模型预测值与试验值吻合较好，说明本文建立的模型可以较好地模拟堆石料不同围压下的应力-应变特性；模型能够反映堆石料在压力作用下因其颗粒破碎所表现出的峰值应力比和剪胀应力比的非线性变化；模型

能够较好地反映堆石料在低围压时发生剪胀而高围压时剪缩的特性，如堆石料 B，围压为 800 kPa 时发生剪胀，围压为 1 200、2 000、3 000 kPa 时一直表现为体积收缩；相同围压下，3 种堆石料表现出不同的剪胀现象，当围压为 1 200、2 000、3 000 kPa 时，较密实的堆石料 A 体积发生剪胀，较疏松的堆石料 B 和 C 体积一直剪缩。

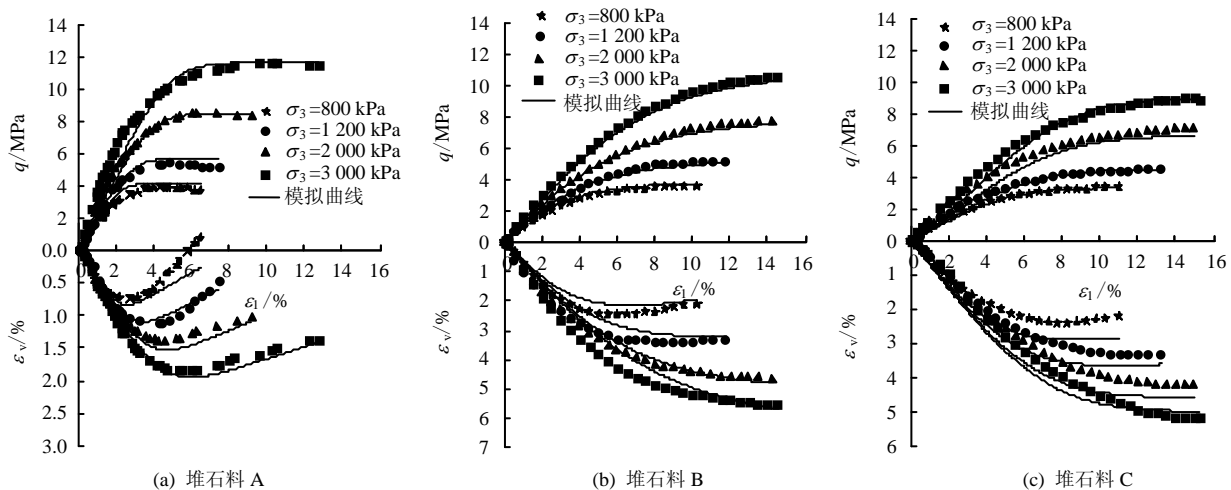


图 3 3 种堆石料的试验结果与模型预测值对比

Fig.3 Comparison between predictions and experimental results of three kinds of rockfill materials

4.3 不同应力路径试验验证

为验证复杂应力路径下本文建立模型的适用性,对宜兴抽水蓄能电站筑坝堆石料(石英砂岩)^[23, 25, 29]常规加载($k = d\sigma_3/d\sigma_1 = 0$)、等 p 加载($k = -0.5$)和等比例加载($k = 0.125$)3种典型应力路径下的试验资料进行模拟。计算参数仍由室内常规三轴排水剪切试验确定,见表2。

图4分别对比了3种应力路径下的数值模拟和试验结果,其中 σ_c 为固结应力。由图中可以看出:
①相同固结应力下,随着 k 增加,峰值强度增加;
② $k \leq 0$ 时,低围压下堆石料产生剪胀变形,随着

围压增大,剪胀程度逐渐减弱直至消失, $k > 0$ 时,体积变形始终表现为收缩;③相同固结应力下,随着 k 增加,堆石料剪缩程度增加,等比例加载的体积剪缩量最大,常规三轴压缩试验次之,等 p 加载最小,这是由于相同轴向应变时,等比例加载的平均应力 p 最大, p 越大,引起堆石料体积压缩变形越大,且越大的 p 导致颗粒破碎程度加剧,进一步增大体积压缩量。从图中可以看出,本文模型较好地预测了不同应力路径下堆石料的主要应力变形特性,说明该模型对于复杂应力路径仍有良好的适用性。

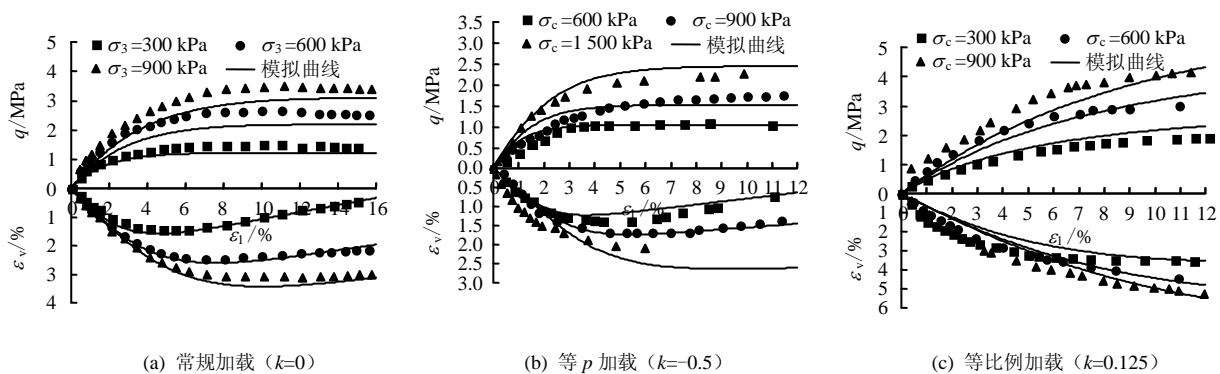
(a) 常规加载 ($k=0$)(b) 等 p 加载 ($k=-0.5$)(c) 等比例加载 ($k=0.125$)

图4 3种应力路径试验结果与模型预测值对比

Fig.4 Comparison between predictions and experimental results under three stress paths

5 结论

(1) 本文在分析堆石料剪胀特性基础上,基于广义塑性理论建立了一个考虑颗粒破碎的堆石料弹塑性本构模型,通过比较堆石料不同围压和不同应力路径下三轴压缩试验结果与模型预测值,验证了该模型可较好预测堆石料的应力-应变关系。

(2) 模型采用的剪胀方程可合理反映堆石料剪胀特性,能够反映颗粒破碎引起的剪胀应力比的非线性变化。

(3) 通过引入一个考虑颗粒破碎的压缩参数,构造的随平均应力、剪应力比和密实度变化的塑性模量,能够反映颗粒破碎对堆石料强度与变形的影响。

(4) 该模型只有10个参数,通过室内常规试验易确定。

参考文献

[1] 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-zheng, 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.

[2] 孔宪京, 刘京茂, 邹德高, 等. 紫坪铺面板坝堆石料颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 35—40.

KONG Xian-jing, LIU Jing-mao, ZOU De-gao, et al. Experimental study of particle breakage of Zipingpu rockfill material[J].

Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 35—40.

[3] 丁树云, 蔡正银, 凌华. 堆石料的强度与变形特性及临界状态研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 248—252.

DING Shu-yun, CAI Zheng-yin, LING Hua. Strength and deformation characteristics and critical state of rockfill[J].

Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(2): 248—252.

[4] 陈生水, 韩华强, 傅华. 循环荷载作用下堆石料应力变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1151—1157.

CHEN Sheng-shui, HAN Hua-qiang, FU Hua. Stress and deformation behaviors of rockfill under cyclic loadings[J].

Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010,

- 32(8): 1151—1157.
- [5] 郭熙灵, 胡辉, 包承纲. 堆石料颗粒破碎对剪胀性及抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 83—88. GUO Xi-ling, HU Hui, BAO Cheng-gang. Experimental studies of the effects of grain breakage on the dilatancy and shear strength of rockfill[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(3): 83—88.
- [6] 刘汉龙, 秦红玉, 高玉峰, 等. 堆石粗粒料颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 562—566. LIU Han-long, QIN Hong-yu, GAO Yu-feng, et al. Experimental study on particle breakage of rockfill and coarse aggregates[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(4): 562—566.
- [7] 高玉峰, 张兵, 刘伟, 等. 堆石料颗粒破碎特征的大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1237—1241. GAO Yu-feng, ZHANG Bing, LIU Wei, et al. Experimental study on particle breakage behavior of rockfills in large-scale triaxial tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1237—1241.
- [8] 尹振宇, 许强, 胡伟. 考虑颗粒破碎效应的粒状材料本构研究: 进展及发展[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2170—2180. YIN Zhen-yu, XU Qiang, HU Wei. Constitutive relations for granular materials considering particle crushing: Review and development[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(12): 2170—2180.
- [9] LING Hoe I, YANG Song-tao. Unified sand model based on the critical state and generalized plasticity[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2006, 132(12): 1380—1391.
- [10] 陈生水, 傅中志, 韩华强, 等. 一个考虑颗粒破碎的堆石料弹塑性本构模型[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1489—1496. CHEN Sheng-shui, FU Zhong-zhi, HAN Hua-qiang, et al. An elastoplastic model for rockfill materials considering particle breakage[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(10): 1489—1496.
- [11] ZIENKIEWICZ O C. Generalized plasticity and some models for geomechanics[J]. **Applied Mathematics and Mechanics**, 1982, 3(3): 303—318.
- [12] PASTOR M. A generalized plasticity model for anisotropic behavior of sand[J]. **Computer Methods and Advances in Geomechanics**, 1991, 1: 661—668.
- [13] PASTOR M, ZIENKIEWICZ O C, CHAN A H C. Generalized plasticity and the modelling of soil behavior[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1990, 14(3): 151—190.
- [14] DONG Wei-xin, HU Li-ming, YU Yu-zhen, et al. Comparison between Duncan and Chang's EB model and the generalized plasticity model in the analysis of a high earth-rockfill dam[J]. **Journal of Applied Mathematics**, 2013: 1—12.
- [15] 邹德高, 徐斌, 孔宪京, 等. 基于广义塑性模型的高面板堆石坝静、动力分析[J]. 水力发电学报, 2011, 30(6): 109—116. ZOU De-gao, XU Bin, KONG Xian-jing, et al. Static and dynamic analysis of high concrete-faced rockfill dam based on generalized plastic model[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2011, 30(6): 109—116.
- [16] 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.
- [17] 邹德高, 付猛, 刘京茂, 等. 粗粒料广义塑性模型对不同应力路径适应性研究[J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(5): 702—709. ZOU De-gao, FU Meng, LIU Jing-mao, et al. Study of adaptability of generalized plastic model of coarse grained soil under various stress paths[J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2013, 53(5): 702—709.
- [18] 刘恩龙, 陈生水, 李国英, 等. 堆石料的临界状态与考虑颗粒破碎的本构模型[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊2): 148—154. LIU En-long, CHEN Sheng-shui, LI Guo-ying, et al. Critical state of rockfill materials and a constitutive model considering grain crushing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.2): 148—154.
- [19] 褚福永, 朱俊高, 殷建华. 基于大三轴试验的粗粒土应力剪胀方程[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(5): 24—28. CHU Fu-yong, ZHU Jun-gao, YIN Jian-hua. Study on stress-dilatancy equation of coarse-grained soils based on large-scale triaxial test[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2013, 45(5): 24—28.
- [20] 褚福永, 朱俊高, 殷建华. 基于大三轴试验的粗粒土剪胀性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2249—2255. CHU Fu-yong, ZHU Jun-gao, YIN Jian-hua. Study of

- dilatancy behaviors of coarse-grained soils in large-scale triaxial test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(8): 2249—2255.
- [21] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [22] 张丙印, 贾延安, 张宗亮. 堆石体修正 Rowe 剪胀方程与南水模型[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1443—1448.
ZHANG Bing-yin, JIA Yan-an, ZHANG Zong-liang. Modified Rowe's dilatancy law of rockfill and Shen Zhujiang's double yield surfaces elastoplastic model[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(10): 1443—1448.
- [23] 秦红玉, 刘汉龙, 高玉峰. 等. 粗粒料强度和变形的大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1575—1580.
QIN Hong-yu, LIU Han-long, GAO Yu-feng, et al. Research on strength and deformation behavior of coarse aggregates based on large-scale triaxial tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(10): 1575—1580.
- [24] LIU Hua-bei. Unified sand modeling using associated or non-associated flow rule[J]. **Mechanics Research Communications**, 2013, 50: 63—70.
- [25] 刘萌成, 高玉峰, 黄晓明. 考虑强度非线性的堆石料弹塑性本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 294—298.
LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, HUANG Xiao-ming. Study on elasto-plastic constitutive model of rockfills with nonlinear strength characteristics[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(3): 294—298.
- [26] 张兵, 高玉峰, 刘伟, 等. 坝体填筑料压缩特性及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 741—746.
ZHANG Bing, GAO Yu-feng, LIU Wei, et al. Research on compressibility of rockfill materials for dams and analysis of influencing factors[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 741—746.
- [27] 孙海忠, 黄茂松. 考虑粗粒土应变软化特性和剪胀性的本构模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(6): 727—733.
SUN Hai-zhong, HUANG Mao-song. A constitutive model for coarse granular material incorporating both strain work-softening and dilatancy[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2009, 37(6): 727—733.
- [28] BAUER E. Hypoplastic modelling of moisture-sensitive weathered rockfill materials[J]. **Acta Geotechnica**, 2009, 4(4): 261—272.
- [29] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙. 应力路径条件下堆石料剪切特性大型三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 176—186.
LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, LIU Han-long. Study on shear behaviors of rockfill in large-scale triaxial tests under different stress paths[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(1): 176—186.

上接第 1930 页

- [28] WATANABE M, IKEYA H. Investigation and analysis of volcanic mud flows on Mount Sakurajima Japan[C]// Erosion sediment transport measurement in rivers: Technological and Methodological Advances. Florence, Italy: International Association of Hydrological Sciences, 1981, 183: 245—256.
- [29] ZHANG S C. A comprehensive approach to the observation and prevention of debris flows in China[J]. **Natural Hazards**, 1993, 7(1): 1—23.
- [30] SCOTTEN P, TRIVELLATO F. Dynamic pressure on check-dam due to debris flow collision[C]//Twelfth Australian Fluid Mechanics Conference. Sydney, Australia: The University of Sydney, 1995: 187—190.
- [31] HÜBL J, HOLZINGER G. Entwicklung von Grundlagen zur Dimensionierung kronenoffener Bauwerke für die Geschiebemanagement in Wildbächen: Kleinmaßstäbliche Modellversuche zur Wirkung von Murbrechern[R]. Vienna: University of Natural Resources and Applied Life Sciences, 2003.
- [32] TIBERGHEN D, LAIGLE D, NAAIM M, et al. Experimental investigations of interaction between mudflow and an obstacle[C]//Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. Chengdu: Mill Press, 2007: 681—687.
- [33] SCHEIDL C, CHIARI M, KAITNA R, et al. Analyzing debris-flow impact models, based on a small scale modelling approach[J]. **Surveys in Geophysics**, 2013, 34(1): 121—140.
- [34] COSTA J E. Physical geomorphology of debris flows[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1984: 268—317.