

DOI: 10.11779/CJGE201706004

堆石料广义塑性模型研究

卞士海^{1, 2, 3}, 李国英^{2, 3}, 魏匡民^{2, 3}, 周健¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024;

3. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210024)

摘要:通过分析试验资料和以往研究成果,修正了堆石料不同围压下剪切过程峰值应力比表达式,论述了塑性模量对平均应力的依赖性。基于广义塑性理论框架,借鉴Lade-Duncan单屈服面模型中引入塑性功定义硬化规律的思路,对塑性模量进行了修正,提出了一种改进的广义塑性模型。为了验证改进方法的合理性,塑性模量改进方法被应用于刘恩龙模型,同时使用提出的修正广义塑性模型预测了另外两种堆石料试验。不同围压下模型的预测结果与试验结果吻合较好,表明修正的模型可以较好地预测堆石料的应力-应变特性。

关键词:广义塑性模型;塑性功;塑性模量;三轴试验;模型验证

中图分类号: TV641; TU441

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)06-0996-08

作者简介: 卞士海(1987-),男,博士研究生,主要从事粗粒土本构关系研究。E-mail: bsh2013@tongji.edu.cn。

Generalized plasticity model for rockfill materials

BIAN Shi-hai^{1, 2, 3}, LI Guo-ying^{2, 3}, WEI Kuang-min^{2, 3}, ZHOU Jian¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Geotechnical Engineering Department,

Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 3. Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety

Control Techniques, Ministry of Water Resources, Nanjing 210024, China)

Abstract: Based on the experimental results and previous studies, the stress ratio at the failure (M_f) under different confining pressures is modified, and the pressure dependency of plastic modulus is discussed. Considering the idea that the hardening rule of Lade-Duncan single yield surface model is defined by introducing plastic work to yield surface expression, the plastic modulus is modified using the plastic work within the framework of the generalized plasticity theory, and a modified P-Z model is proposed. To check the validity of the improved method, the modified approach is applied to the constitutive model by Liu et al., and the modified P-Z model is employed to simulate the other two triaxial tests on rockfill materials. Satisfactory agreement between the numerical and experimental results under different confining pressures confirms the capability of the modified model in improving the prediction of stress-strain behaviour of rockfill materials.

Key words: generalized plasticity model; plastic work; plastic modulus; triaxial test; model validation

0 引言

堆石料是高土石坝的主要筑坝材料,深入研究填筑紧密实的筑坝土石料的力学特性,对粗粒料应力-应变关系特性的合理模拟,对准确预测大坝结构行为尤为重要。在用于模拟高土石坝变形的粗粒土本构模型中,广义塑性模型是一类重要的本构模型。广义塑性模型由Zienkiewicz^[1]和Pastor等^[2-3]在广义塑性框架下提出,不需要定义塑性势函数和加载函数,直接确定塑性流动方向和加载方向;不需要依据相容性条件,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。由于广义塑性模型比较完善,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^[4],使其成为预测土工建

筑物变形的重要工具。

自广义塑性模型提出以后,Ling等^[5-6]发展了广义塑性模型,通过重新构造塑性模量,克服了P-Z模型不能反映围压对变形相关性影响的不足,接着引入状态相关参数,研究了砂土的变形;陈生水等^[7]、王占军等^[8]通过引入一个考虑颗粒破碎的压缩参数,构造了一个随平均应力、剪应力比和密实度变化的塑性模量,应用于堆石料模拟;朱晟等^[9]构造了弹性和塑性模量,提出了一个可以考虑土石料复杂加载特性的实用的统

基金项目:水利部公益性行业专项经费项目(201501035);国家自然科学基金青年科学基金项目(51509163)

收稿日期:2016-06-14

*通讯作者(E-mail: gyli@nhri.cn)

一广义塑性本构模型; Wei等^[10]根据Nakai^[11]总结的大量试验结果, 推导了各向同性压缩试验的塑性模量, 并进一步拓展至通用形式, 并运用于堆石料的静动力分析, 模型简洁, 参数物理意义明确; Liu等^[12-13]将临界状态孔隙比表达成塑性功的函数, 以此为基础建立了考虑颗粒破碎的广义塑性模型, 并进行了多组堆石料静动力分析; 刘恩龙等^[14]考虑颗粒破碎, 对堆石料临界状态线进行了修正, 改进了Ling等^[6]提出的塑性模量, 通过广义塑性模型模拟了堆石料三轴压缩的应力应变特性; Xiao等^[15-16]在Li等^[17]对砂土的研究成果上, 建立了一个基于状态参数的粗粒土广义塑性模型。总体来说, 广义塑性模型模拟堆石料这方面的研究工作不多, 主要研究集中在修改和构造塑性模量以及状态相关研究, 以更好地模拟粗粒土应力应变特性。

目前只有陈生水等^[7]、王占军等^[8]、朱晟等^[9]、Wei等^[10]使用广义塑性模型模拟了高围压下堆石料的三轴加载特性。由原始广义塑性模型发展而来的一类模型^[5-6, 12-16], 除了刘恩龙等^[14]研究以外, 基本都是模拟低围压(围压低于1600 kPa)下砂土和堆石料变形特性, 并且刘恩龙等^[14]模拟与试验结果相比有一定偏差。粗粒土广义塑性模型^[3]最初提出主要为了模拟砂土应力应变特性, 试验条件一般在低围压下, 就模拟的砂土试验三轴变形应力应变曲线而言, 在较低轴应变条件下即可达到峰值偏应力, 原始模型模拟主要针对砂土, 而非堆石料。另外堆石料粒径比砂土大很多, 孔隙比小, 高围压下会发生明显的颗粒破碎, 这些原因导致由原始广义塑性模型发展来的一类模型, 在高围压下模拟精度有限。

针对这一类广义塑性模型模拟堆石料高围压下应力应变适应性较差的问题, 本文引入塑性功修正塑性模量, 改进广义塑性模型在高围压下对堆石料应力应变特性的模拟效果。同时本文修正不同围压下堆石料峰值应力比表达式, 并论述塑性模量对平均应力的依赖性。

1 粗粒料广义塑性模型

在原始的砂土广义塑性模型框架^[3]中, 应力增量表达式为

$$d\sigma = D^{\text{ep}} d\varepsilon \quad (1)$$

$$D^{\text{ep}} = D^{\text{e}} - \frac{D^{\text{e}} : n_g : n^{\text{T}} : D^{\text{e}}}{H + n^{\text{T}} : D^{\text{e}} : n_g} \quad (2)$$

式中 n_g 为塑性势流动方向; n 为加载方向矢量; H 为加载卸载塑性模量; D^{e} 为弹性矩阵; D^{ep} 弹塑性矩阵。

剪胀方程为

$$d_g = \frac{d\varepsilon_v^{\text{p}}}{d\varepsilon_s^{\text{p}}} = (1 + \alpha_g)(M_g - \eta) \quad (3)$$

式中, α_g 为剪胀相关的材料参数, η 为应力比, M_g 为临界状态线在 $p' - q$ 平面内的斜率, 可以表达成粗粒料残余内摩擦角 φ'_g 和罗德角 θ 的函数:

$$M_g = \frac{6 \sin \varphi'_g}{3 - \sin \varphi'_g \sin 3\theta} \quad (4)$$

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

$$n_{gs} = \frac{1}{\sqrt{1 + d_g^2}} \quad (5)$$

加载方向矢量 $n^{\text{T}} = (n_v, n_s)$, 其中 $n_v = \frac{d_f}{\sqrt{1 + d_f^2}}$,

$$n_s = \frac{1}{\sqrt{1 + d_f^2}}, \text{ 且}$$

$$d_f = (1 + \alpha_f)(M_f - \eta) \quad (6)$$

式中, 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

$$K = K_0 p \quad (7)$$

$$G = G_0 p \quad (8)$$

塑性加载模量表示为

$$H_L = H_0 p H_f (H_v + H_s) \quad (9)$$

其中,

$$H_f = \left(1 - \frac{\eta}{\eta_f}\right)^4 \quad (10)$$

$$\eta_f = \left(1 + \frac{1}{\alpha_f}\right) M_f \quad (11)$$

$$H_v = 1 - \frac{\eta}{M_g} \quad (12)$$

$$H_s = \beta_0 \beta_1 e^{-\beta_0 \xi} \quad (13)$$

式中, β_0 , β_1 均为模型参数, ξ 为累积塑性剪应变。

由原始广义塑性模型发展来的粗粒土广义塑性模型^[5-6, 12-16], 往往在此基础上, 根据实际情况修改弹性体积模量和剪切模量, 考虑平均压力依赖性, 并舍弃塑性模量中剪应变影响项 H_s , 塑性模量表达式一般为

$$H_L = H_0 p^{0.5} H_f f(\eta) \quad (14)$$

本文后续验证主要在 Ling 等^[6]基础上修改塑性模量, Ling 等^[6]建议的塑性模量表达式为

$$H_L = H_0 H_f p^{0.5} (M_b - \eta) / \eta \quad (15)$$

式中, M_b 为 M_g 和状态参数 ψ 的函数。

2 广义塑性模型的几点修正

2.1 M_f 的修正

本文通过对如美堆石料的试验数据分析发现, M_f 在不同围压条件下是变化的。姚仰平等^[18-19]认为: 高围压下颗粒材料的破碎效应应当被考虑到本构模型中, 并假定颗粒破碎对材料强度的影响表达式为

$$M_f = M \left(\frac{p}{p_c} \right)^{-n}, \quad (15)$$

式中, M , n 为拟合值, p_c 为破碎参考应力。采用姚仰平等^[18-19]方法拟合如美堆石料强度曲线如图 1, 拟合结果反映了高围压下 p 较大, M_f 较小的特性。

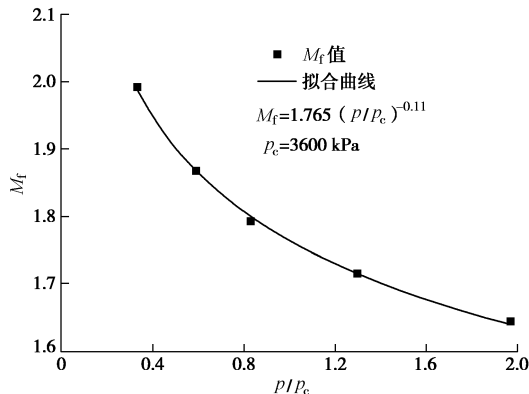


图 1 如美堆石料强度参数拟合

Fig. 1 Fitting curve of M_f

Wei 等^[10]在其提出的广义塑性模型中也做过相同的修正, 其相同点都是认为 M_f 为平均应力 p 的函数, 用式 (15) 来反映不同围压条件下 M_f 的变化。姚仰平等^[18-19]提出的 M_f 表达式通过拟合不同围压下偏应力峰值处的 $M_f - p$ 关系得到, M_f 随着平均应力 p 的增加而减小, 若采用表达式 (15) 来反映 M_f 变化, 考虑同一围压下平均应力 p 由低变高, 则加载过程中峰值强度 M_f 从一个较高值过渡到实际的试验峰值, 峰值强度 M_f 在同一围压是变化的, 而实际峰值强度 M_f 在一定围压下为恒定值。本文考虑堆石料三轴试验每组围压对应一个峰值强度 M_f , 认为围压恒定, M_f 也为一恒定值, 所以 M_f 为围压的函数, 整理发现三轴试验中 $M_f - \sigma_3$ 与 $M_f - p$ 具有相似的关系, 对峰值强度进行修正, 修正公式为

$$M_f = M_0 \left(\frac{\sigma_3}{p_c} \right)^{-n_0}, \quad (16)$$

式中, M_0 , n_0 为拟合参数, p_c 为破碎参考应力。在模型中需要取一个较大值, 再拟合参数 M_0 , n_0 , 参考姚仰平等^[20]的参数范围, 本文后续的如美堆石料验证中 p_c 取为 3600 kPa, σ_3 为试验围压。图 1 反映了三轴加载试验中围压对峰值强度的影响。

2.2 塑性模量压力依赖性的讨论

Wei 等^[10]曾提出一个广义塑性模型, 在 Nakai^[11]

总结的各向同性压缩试验条件下:

$$\varepsilon_v^p = (c_t - c_e) \left[\left(\frac{p}{p_a} \right)^m - \left(\frac{p_0}{p_a} \right)^m \right]. \quad (17)$$

式中 c_t 为等向压缩参数, c_e 为等向回弹参数, m 为材料参数, p_0 为参考压力, 对式 (17) 进行求导, 可得

$$d\varepsilon_v^p = m(c_t - c_e) \frac{1}{p_a} \left(\frac{p}{p_a} \right)^{m-1} dp. \quad (18)$$

由此可得等向压缩条件下, 塑性模量表达式为

$$H_L = \frac{p_a^m}{m(c_t - c_e)p^{m-1}}. \quad (19)$$

接着考虑材料的剪切效应, 进一步构造了如下塑性加载模量:

$$H_L = \left(1 - \frac{\eta}{M_f} \right)^d \frac{p_a^m}{m(c_t - c_e)p^{m-1}} \frac{(1 + \alpha)(M_g - \eta)}{\Omega}. \quad (20)$$

式中, Ω 为 Yao 等^[19, 21]提出的用来修正剑桥模型的统一硬化参数。这个推导思路, 依据 Nakai^[11]总结的大量试验而得到, 参数容易确定, 具有很强的适用性。从推导的塑性模量表达式来看, 在广义塑性模型框架下, 塑性模量 H_L 中应该包含一个 p^n 的表达式, 并且 n 是一个变化的值, 与材料性质相关。而目前的很多研究把 n 取为 0.5, 而忽略材料属性相关性^[12, 15-16]。Liu 等^[13]和邹德高等^[22]在广义塑性模型塑性模量构建中也作了相似的处理, 分别研究了堆石料的单调循环加载特性和广义塑性模型对不同应力路径适应性, 模拟结果较好, 这说明了塑性模量中构造一个与材料属性有关的 p^n 是合理而且必要的。后续的如美堆石料验证考虑这一影响。

2.3 塑性模量的修正

首先采用原始的广义塑性模型^[3]对如美堆石料 3200 kPa 围压下三轴试验进行了模拟, 在同一 M_g 条件下, 分别取不同的 β_0 和 β_1 值, 模拟结果如图 2。可见若设置加载塑性模量表达式为原始广义塑性模量表达式, 模拟过程中无论如何调整 β_0 和 β_1 值, 初始阶段模拟的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 曲线总是与实际偏差较大, 即初始阶段偏应力增速过快, 后期增长过慢或者过度降低。

接着使用 Ling 等^[6]提出的广义塑性模型模拟了如美堆石料 3200 kPa 围压三轴压缩过程, 其与原始的广义塑性模型^[3]及本文改进塑性模量后的修正结果对比如图 3。从图 3 中可以看出, 即使采用 Ling 等^[6]提出的塑性模量模拟仍然出现 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 曲线初始阶段的偏差, 模型仍然很难预测出堆石料三轴试验初始过程偏应力随轴应变近似线性增长的情况。

在广义塑性模型应用于堆石料方面, Liu 等^[12-13]及 Xiao 等^[15-16]进行了较多的研究, 分别模拟了堆石料

考虑颗粒破碎的单调、循环加载过程和状态相关性。两者都是在塑性模量中增加一项状态相关项或者孔隙变化项以修饰塑性模量, 模拟条件均是低围压。尽管 Liu 等^[12-13]已经考虑颗粒破碎修正了临界状态孔隙比, 这种方式构建的广义塑性模型在高围压下适用性缺少论证, 另外高围压和低围压条件下状态相关参数 ψ 变化规律有差异, 引入一个状态相关项修饰塑性模量, 很难统一低高围压下的塑性模量表达式。

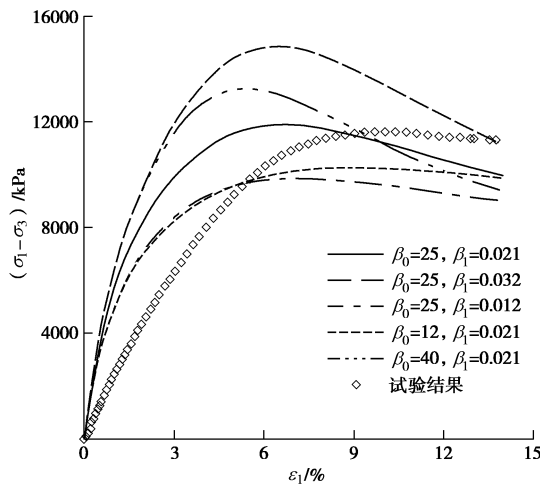


图2 原始广义塑性模型模拟结果

Fig. 2 Test and calculated values of origin P-Z model

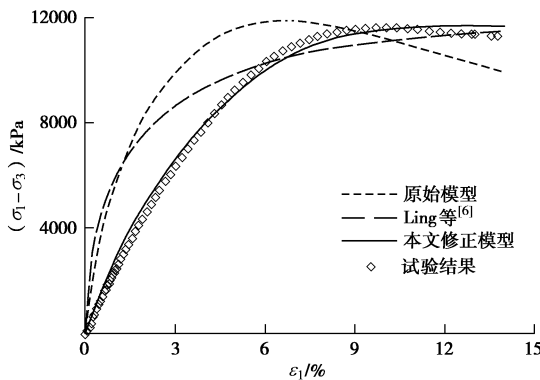


图3 几种模型对比

Fig. 3 Simulated results of three models

综上, 高围压下原始及 Ling 一类^[3, 5-6, 12-16]的广义塑性模型中的塑性模量需要进一步修正。对比预测结果和试验结果, 发现模拟偏差较大的主要原因在于, 加载初始阶段塑性模量偏大而加载后期偏小, 尤其是在高围压条件下, 更为显著。为改善这一问题, 本文参考 Lade-Duncan 单屈服面模型^[23]中引入塑性功定义硬化规律的思路:

$$f = \frac{W_p}{a + dW_p} + f_t \quad (21)$$

其中,

$$a = M \cdot p_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^l \quad (22)$$

$$d = \frac{r_f}{k_f - f_t} \quad (23)$$

式中, M , l , k_f , f_t , r_f 为材料参数, p_a 为大气压力。本文同样引入塑性功对 Ling 等^[6]提出的塑性模量进行修正, 修正后的塑性模量为

$$H = H_0 H_f p^m \frac{\eta_p - \eta}{\eta} \frac{W_p}{W_0} \quad (24)$$

$$W_0 = a \cdot p_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^l \quad (25)$$

$$W_p = \int p d\varepsilon_v^p + \int q d\varepsilon_s^p \quad (26)$$

式中, W_p 为塑性功, a , l 为模型参数, 需根据具体堆石料试验不同围压下的 $q - \varepsilon_a$ 曲线近似线性增长阶段确定, 可以看出塑性模量中包含围压项, 考虑了围压对塑性模量的影响。 W_0 的含义为剪切中间阶段累积塑性功, 随着剪切过程中塑性功 W_p 逐渐增大, 原塑性模量^[6]可采用一个初始阶段小于 1 之后大于 1 系数 δ ($\delta = W_p / W_0$) 进行修正, 引入系数 δ 正好改进了 Ling 一类模型^[3, 5-6, 12-16]中高围压下加载初始阶段塑性模量偏大而加载后期偏小的不足。

3 模型验证

为了验证塑性模量改进方法的合理性, 编写了 Fortran 计算程序, 对 3 组堆石料试验进行了模拟。首先将塑性模量改进方法应用于刘恩龙等^[14]临界状态模型中塑性模量的改进, 与之对比, 接着使用修正的广义塑性模型, 其中塑性模量为本文提出的表达式 (24), 预测了多组围压下如美堆石料试验和某弱风化花岗岩堆石料试验^[24]。

3.1 刘恩龙模型改进

刘恩龙等^[13]修正了堆石料临界状态线, 建立了考虑颗粒破碎的粗粒土本构模型, 对三轴压缩试验 4 种围压条件下堆石料的应力应变特性进行了模拟。

考虑高围压颗粒破碎的影响, 临界状态孔隙比采用

$$e_{cs} = e_{\lambda} - \lambda \ln p' - L \langle p' / p'_{ci} \rangle \xi \ln(p' / p'_{ci}) \quad (27)$$

式中, ξ 为参数, $L \langle p' / p'_{ci} \rangle$ 在 $p' \geq p'_{ci}$ 时等于 1, 即 $p' \geq p'_{ci}$ 时考虑颗粒破碎影响, 否则取为 0。

体变模量与剪切模量分别为

$$K_{ev} = K_0 p_a \left(\frac{p'}{p_a} \right)^{0.75} \quad (28)$$

$$G_{ev} = G_0 p_a \left(\frac{p'}{p_a} \right)^{0.75} \quad (29)$$

表 1 临界状态模型参数

Table 1 Parameters of critical state constitutive model

参数	临界状态方程				弹性参数		加载、流动方向			塑性模量		
	e_{λ}	λ	ξ	p'_{ci}	K_0	G_0	M_g	m_g	α	M_f	H_0	m
闪长岩	0.601	0.0254	0.11	1261.78	370.3	328.8	1.593	-0.3	0.5	1.65	6011	-1.05

流动方向 d_g 中考虑状态相关:

$$d_g = (1 + \alpha)(M_d - \eta) \quad (30)$$

$$M_d = M_g \exp(m_g \psi) \quad (31)$$

塑性模量表达式为

$$H = H_b \left(\frac{p'}{p_a} \right)^{0.72} H_f (M_g - \eta) / \eta \quad (32)$$

式中,

$$H_b = H_0 p_a \left(\frac{p_{cd}}{p_a} \right)^m \quad (33)$$

式中, H_0 和 m 为常数, p_{cd} 为固结完成时的平均有效应力, 对于常规三轴试验即为围压。

该模型总共有 12 个参数, 如表 1。

本文分析了刘恩龙试验^[14]不同围压下的状态参数 ψ 的变化规律, 根据状态转换点 (若体变曲线不出现状态转换点, 则认为剪切结束时对应状态转换点, 以作近似) 处应力比以及状态参数, 确定 m_g , 本文模拟时 m_g 取为 0.2, 其他参数与刘恩龙模型一致。

考虑刘恩龙模型对堆石料三轴试验的模拟并不理想, 本文采用 2.3 节中的方法对刘恩龙模型中塑性模量进行修正, 修正以后的塑性模量表达式为

$$H = H_b \left(\frac{p'}{p_a} \right)^{0.72} H_f \frac{M_g - \eta}{\eta} \frac{W_p}{W_0} \quad (34)$$

式中, $W_0 = ap_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^l$, W_0 中的参数根据试验中不同

围压下的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 曲线确定, $a = 5.18 \times 10^{-3}$, $l = 1.53$ 。这样, 模型参数在原有基础上增加至 14 个。

本文模拟与刘恩龙模拟结果对比如图 4, 可见修正以后的广义塑性模型, 改进了刘恩龙模型计算时偏应力前期增加较快后期增加较慢的情况, 能够更为合理地预测堆石料强度。从本文预测的体变曲线结果来看, 400 kPa 低围压下出现轻微的弯折, 与试验结果有一定偏差, 主要原因在于本文修正的原塑性模量表达式决定了预测所得的最大应力比只能达到 M_g , M_g 值与 M_d 值相比较小, 以致没有达到完全的剪胀过程而出现轻微的弯折。

3.2 如美堆石料试验模拟

本文对初始孔隙率为 22% 的如美堆石料在三轴压缩试验 5 组围压条件下进行了模拟。模型中的塑性模量

采用式 (24)。

(1) 弹性参数

根据邹德高等^[22]的研究, 本文采用的剪切模量 G 和体积模量 K 分别为

$$G = G_0 p_a \left(\frac{p}{p_a} \right)^{0.5} \quad (35)$$

$$K = \frac{2(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)} G \quad (36)$$

式中, G_0 为材料参数, p 为平均压力, ν 为泊松比。

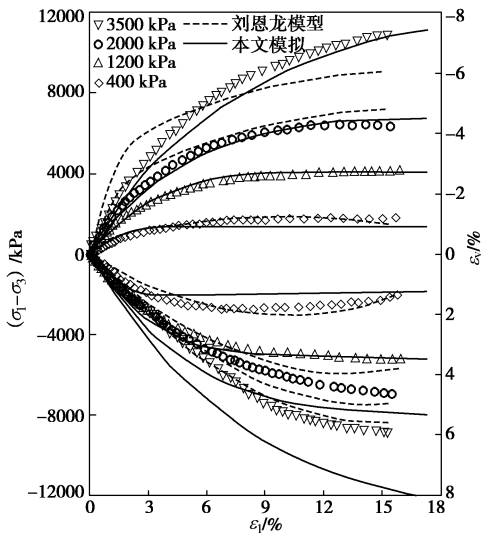


图 4 试验结果与预测结果对比

Fig. 4 Comparison between results and two model predictions

对于弹性参数, 弹性剪切模量为三轴剪切试验曲线初始剪切模量^[16], $G \approx \frac{\Delta q / \Delta \varepsilon_s}{3}$, 根据多组围压下平均压力 p 求得多组 G_0 取平均值, 粗粒料的泊松比取 0.2~0.3。

(2) 剪胀与强度参数

对于如美堆石料, 本文采用经典的直线型剪胀方程

$$d_g = (1 + \alpha)(M_g - \eta) \quad (37)$$

式中, α 和 M_g 均为剪胀参数。根据如美堆石料的试验结果, 假定 $d_g = \frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_s^p} = \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_s}$, 整理不同围压下如美

堆石料 $d_g - \eta$ 关系线, 得到如图 5 所示的剪胀特性曲线, 剪胀特性曲线采用线型函数拟合可得 $\alpha = 0.2$, $M_g = 1.70$ 。峰值强度 M_f 采用公式 (16) 计算。

表 2 如美堆石料的本构模型参数

Table 2 Constitutive parameters of Rumei rockfill materials

M_g	α	M_0	n_0	m	H_0	a	l	p_c/kPa	G_0	ν
1.70	0.2	1.625	0.0926	0.42	2.8×10^4	2.34×10^{-2}	1.227	3600	2230	0.2

表 3 修正的广义塑性模型参数

Table 3 Parameters of modified generalized plasticity model

c_e	m	ν	α	M_g	M	p_c/kPa	n	a	l	H_0
0.001	0.74	0.3	0.4	1.652	1.547	3800	0.11	3.65×10^{-2}	1.356	8.0×10^4

(3) 塑性模量参数

H_0 和 m 的值一般根据各向同性压缩试验确定, 在各向同性压缩试验中:

$$d\varepsilon_v^p = \frac{dp}{H} \text{ 或 } \varepsilon_v^p = \int \frac{1}{H} dp \quad (38)$$

由于在 $\eta = 0$ 时, 塑性模量表达式 (24) 不能退化为等向压缩塑性模量:

$$H = H_0 p^m \quad (39)$$

此处塑性模量参数的确定方法不同于等向压缩条件下的确定方法。本文采用 2.3 节修正方法通过对大量的堆石料三轴加载模拟发现: 对于大部分堆石料参数 a 值一般在 0.001~0.05 之间, 参数 l 一般在 1.0~2.0 之间, 参数 m 一般在 0.2~0.7 之间。根据 Ling 等^[6] 的研究, 形如式 (24) 的塑性模量表达式中 H_0 一般在 10^4 数量级。考虑 400 kPa 和 800 kPa 围压下修正项 δ 的修正作用很小, 可以先不考虑修正项, 在这两个围压下, 结合上述参数取值规律, 根据 $q - \varepsilon_a$ 曲线初始阶段与预测结果匹配即可确定参数 H_0 和 m 。在确定参数 H_0 和 m 以后, 再根据三轴试验 4 组围压下的 $q - \varepsilon_a$ 曲线初始阶段与预测结果匹配即可确定参数 a, l 的值。

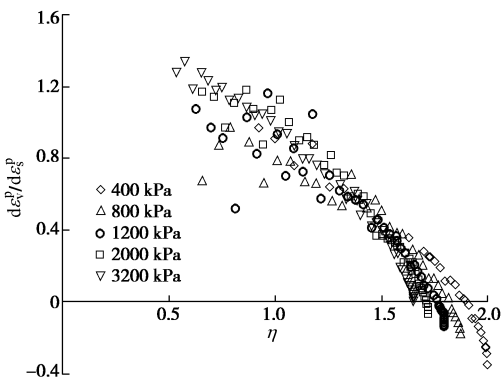


图 5 如美堆石料剪胀特性

Fig. 5 Dilatancy properties of Rumei rockfill material

(4) 模型预测与试验结果

综上所述, 模型所用的参数如表 2, 模型预测结果与试验结果如图 6, 对比可以看出, 改进塑性模量以后,

模型可以较好地预测不同围压下如美堆石料三轴试验强度, 体变曲线虽有偏差, 仍反映出堆石料低围压下强剪胀高压下弱剪胀的特性。

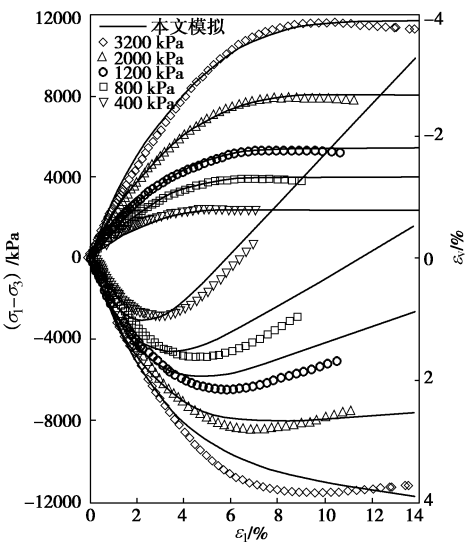


图 6 模型预测与试验结果对比

Fig. 6 Comparison between predictions and test results

3.3 花岗岩堆石料试验模拟

本文同样对杨光等^[24]开展的花岗岩堆石料常规三轴试验在 700, 1400, 2000, 2600 kPa 4 组围压下进行模拟。弹性模量采用 Wei 等^[10]给出的公式:

$$E = \frac{3(1 - 2\nu)p_a^m}{mc_e p^{1-m}} \quad (40)$$

流动方向中的 M_g 和加载方向中的 M_f 也是采用 Wei 等^[10]的表达式及参数值。根据 Wei 等^[10]塑性模量 H_L 的表达式可确定修正以后塑性模量表达式中 p 的幂次为 $1 - m$ 。

本文模型所用的参数如表 3, 本文模拟结果与试验结果对比如图 7, 使用修正后的广义塑性模型很好地模拟了堆石料的强度特性。由于参数来自文献^[10], 并且若干变形相关的参数是根据三轴试验变形曲线, 通过免疫遗传算法 (IGA) 确定^[25], 预测的体变规律也较好。

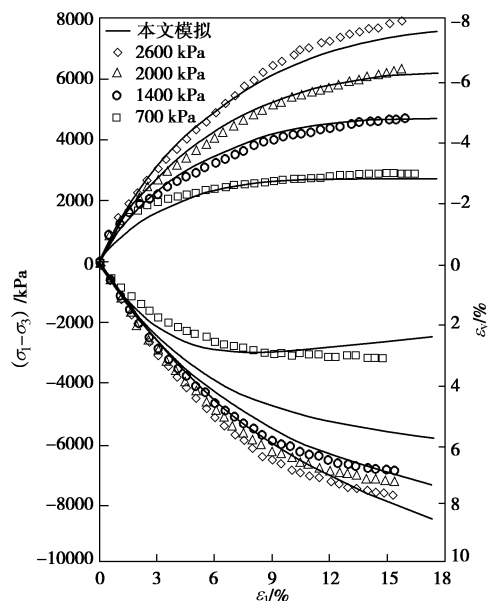


图7 杨光等试验与模型预测结果对比

Fig. 7 Comparison between test results and model predictions by Yang et al

4 结论与讨论

(1) 本文通过分析试验资料和以往研究成果,修正了不同围压下堆石料的峰值应力比表达式,论述了广义塑性模型中塑性模量的平均压力依赖性,指出了塑性模量中 p^n 项中的 n 是一个与材料属性有关的常数,不一定是 0.5。

(2) 针对 Ling 等一类的广义塑性模型在高围压下适应性较差的问题,本文在广义塑性模型框架下,借鉴 Lade-Duncan 单屈服面模型中引入塑性功定义硬化规律的思路,引入塑性功对塑性模量进行了修正。此种改进方法运用于刘恩龙模型可以很好地改进模拟结果。从修正的广义塑性模型对另外两组堆石料试验的模拟结果来看,修正的广义塑性模型可以合理地预测堆石料(尤其是高围压下)三轴加载强度特性。

(3) 广义塑性模型中塑性模量的合理选择影响模型的预测精度,本文主要对三轴加载情况进行了模拟,实际筑坝堆石料所受应力十分复杂,改进的广义塑性模型对复杂应力路径的适应性仍需进一步研究。

参考文献:

- [1] ZIENKIEWICZ O C, MROZ Z. Generalized plasticity formulation and applications to geomechanics[C]// Mechanics of Engineering Materials. New York, 1984: 655 - 679.
- [2] PASTOR M, ZIENKIEWICZ O C. A generalized plasticity, hierarchical model for sand under monotonic and cyclic loading[C]// Numerical Methods in Geomechanics. London,

1986: 131 - 150.

- [3] PASTOR M, ZIENKIEWICZ O C, CHAN A H C. Generalized plasticity and the modeling of soil behavior[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1990, **14**: 151 - 190.
- [4] 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. (in Chinese))
- [5] LING H I, LIU H. Pressure-level dependency and densification behavior of sand through a generalized plasticity model[J]. J Eng Mech, 2003, **129**(8): 851 - 860.
- [6] LING H I, YANG S. Unified sand model based on the critical state and generalized plasticity[J]. J Eng Mech, 2006, **132**(12): 1380 - 1391.
- [7] 陈生水, 傅中志, 韩华强. 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 - 1495. (CHEN Sheng-shui, FU Zhong-zhi, HAN Hua-qiang. An elastoplastic model for rockfill materials considering particle breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(10): 1489 - 1495. (in Chinese))
- [8] 王占军, 陈生水, 傅中志. 堆石料剪胀特性与广义塑性模型[J]. 岩土力学, 2015, **36**(7): 1931 - 1938. (WANG Zhan-jun, CHEN Sheng-shui, FU Zhong-zhi. Dilatancy behaviors and generalized plasticity constitutive model of rockfill materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(7): 1931 - 1938. (in Chinese))
- [9] 朱晟, 魏国民, 林道通. 筑坝土石料的统一广义塑性本构模[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(8): 1394 - 1399. (ZHU Sheng, WEI Kuang-min, LIN Dao-tong. Generalized plasticity model for soil and coarse-grained dam materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(8): 1394 - 1399. (in Chinese))
- [10] WEI K M, ZHU S. A generalized plasticity model to predict behaviors of the concrete-faced rock-fill dam under complex loading conditions[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2013, **17**(7): 579 - 597.
- [11] NAKAI T. An isotropic hardening elastoplastic model considering the stress path dependency in three-dimensional stresses[J]. Soils and Foundations, 1989, **29**: 119 - 139.
- [12] LIU H, ZOU D. An associated generalized plasticity

- framework for modeling gravelly soils considering particle breakage[J]. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 2013, **139**(5): 606 – 615.
- [13] LIU H, ZOU D, LIU J. Constitutive modeling of dense gravelly soils subjected to cyclic loading[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2014, **38**: 1503–1518.
- [14] 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**(S2): 148 – 154. (in Chinese))
- [15] XIAO Y, LIU H, CHEN Y, et al. Testing and modeling of the state-dependent behaviors of rockfill material[J]. *Comput Geotech*, 2014, **61**: 153 – 165.
- [16] XIAO Y, LIU H, CHEN Y, et al. State-dependent constitutive model for rockfill materials[J]. *Int J Geomech*, 2015, 04014075.
- [17] LI X S, DAFALIAS Y F. Dilatancy for cohesionless soils[J]. *Géotechnique*, 2000, **50**(4): 449 – 60.
- [18] 姚仰平, 万 征, 陈生水. 考虑颗粒破碎的动力 UH 模型[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(7): 1036 – 1044. (YAO Yang-ping, WAN Zheng, CHEN Sheng-shui. Dynamic UH model considering particle crushing[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(7): 1036 – 1044. (in Chinese))
- [19] YAO Y P, YAMAMOTO H, WANG N D. Constitutive model considering sand crushing[J]. *Soils and Foundations*, 2008, **48**(4): 603 – 608.
- [20] 姚仰平, 黄 冠, 王乃东. 堆石料的应力 - 应变特性及其三维破碎本构模型[J]. *工业建筑*, 2011, **41**(9): 12 – 17. (YAO Yang-ping, HUANG Guan, WANG Nai-dong. Stress-strain characteristic and three-dimensional constitutive model of rockfill considering crushing[J]. *Industrial Construction*, 2011, **41**(9): 12 – 17. (in Chinese))
- [21] YAO Y P, SUN D A, MATSUOKA H. A unified constitutive model for both clay and sand with hardening parameter independent on stress path[J]. *Computers and Geotechnics*, 2008, **35**: 210 – 222.
- [22] 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. (in Chinese))
- [23] 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.
- [24] 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))
- [25] 朱 晟, 王永明, 胡祥群. 免疫遗传算法在土石坝筑坝粗粒料本构模型参数反演中的应用研究[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(3): 961 – 966. (ZHU Sheng, WANG Yong-ming, HU Xiang-qun. Application of immune genetic algorithm to back analysis for parameters in model of rockfill dam coarse grain materials[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(3): 961 – 966. (in Chinese))