

DOI: 10.11779/CJGE201812002

堆石料状态相关三维多重机制边界面模型

方火浪^{1,2}, 蔡云惠¹, 王文杰¹

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058)

摘要: 堆石料的应力应变特性与材料的密度、压力等状态密切相关。针对堆石料的变形与强度非线性, 在临界状态和边界面弹塑性理论框架内, 建立了一个堆石料状态相关三维多重机制边界面模型。模型将复杂的宏观变形行为分解为一个宏观体应变机制和一系列空间分布的相互独立虚拟微观剪切机制。每个微观剪切机制包含 3 个方向的微观剪应力-应变关系和微观应力-剪胀关系。引入一个与密度、压力相关的状态参数, 用以统一描述不同状态下堆石料的变形和强度特性。模型包含 12 个参数, 多数具有明确的物理意义。对 2 种堆石料三轴压缩试验结果进行模拟计算, 模型模拟值与试验结果吻合良好, 说明模型能够较合理地预测堆石料的应力应变特性。

关键词: 本构模型; 堆石料; 边界面; 状态参数; 多重机制

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2018)12-2164-08

作者简介: 方火浪(1962-), 男, 研究员, 主要从事岩土工程和工程抗震与减震研究工作。E-mail: fanghuolang@zju.edu.cn。

State-dependent 3D multi-mechanism bounding surface model for rockfills

FANG Huo-lang^{1,2}, CAI Yun-hui¹, WANG Wen-jie¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The rockfill materials have been widely used in the construction of rockfill dams due to their high strength, small deformation and strong permeability. The strength and deformation characteristics of the rockfill materials are essential prerequisites to the design of rockfill dams. The existing laboratory tests have shown that the stress-strain relation of the rockfill materials is closely related to their states in density and pressure. Within the framework of the critical state and bounding surface plasticity theories, a state-dependent 3D multi-mechanism bounding surface model is proposed for the rockfill materials by considering their nonlinear characteristics in deformation and strength. The macroscopic deformation behaviors of the rockfill materials in this model are decomposed into a macroscopic volumetric mechanism and a set of independent virtual microscopic shear mechanisms in spatially distributed orientations. Each microscopic shear mechanism is described by the microscopic shear stress-strain relations and microscopic stress-dilatancy relations in three directions. A state parameter is introduced in the strength criterion and stress-dilatancy relation for compatibility with the critical state theory. Some relations are established between the microscopic and macroscopic model parameters. The model has twelve parameters, and most of them are of clear physical meanings. The proposed model is used for simulating the triaxial compression tests on two types of rockfill materials. The results show that the calculated values are in good agreement with the test data, indicating that the proposed model is capable of predicting reasonably the strain-hardening and strain-softening behaviors of the rockfill materials under different densities and confining pressures.

Key words: constitutive model; rockfill material; bounding surface; state parameter; multi-mechanism

0 引言

堆石料具有强度高、变形小、透水性强、可就地取材等优点, 已成为土石坝的主要筑坝材料。堆石料不同于岩石和土壤材料, 在自重与水荷载作用下, 表现出的剪胀剪缩、颗粒破碎等力学行为对其应力应变与强度特性具有较大影响。

为了探讨堆石料的变形和强度特性, 国内外学者

进行了一系列试验研究。刘萌成等^[1]、徐志华等^[2]、Xiao 等^[3]通过大型三轴固结排水剪切试验, 研究了不同围压下堆石料的偏应力-轴应变关系以及体应变-轴应变关系的变化规律。杨光等^[4]对粗粒料进行了常

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878605)

收稿日期: 2017-11-14

规三轴、等平均应力和等应力比条件下的试验, 研究了粗粒料在不同应力路径下的变形与强度特性。施维成等^[5]使用真三轴仪, 对粗粒土进行了不同主应力方向上的单向加荷试验, 研究了粗粒土的应力诱导各向异性特性。潘家军等^[6]采用大型真三轴仪, 对粗粒土进行了一系列不同中主应力系数条件下的真三轴试验和平面应变试验, 研究了中主应力对粗粒土应力与变形特性的影响规律。刘汉龙等^[7]、高玉峰等^[8]、魏松等^[9]、迟世春等^[10]、孔宪京等^[11]采用大型三轴仪对堆石料进行了单调或循环荷载下的固结排水剪切试验, 研究了不同孔隙比情况下颗粒破碎、剪胀以及应力 - 应变关系的变化规律。丁树云等^[12]和蔡正银等^[13]通过一系列大型三轴压缩试验, 研究了不同初始应力状态与试样密度对堆石料强度和变形行为的影响以及堆石料的临界状态。

随着堆石料试验研究成果的不断积累, 国内外学者提出了许多不同形式的堆石料本构模型。岑威钧等^[14]以能够考虑应力水平和土体孔隙比影响的 Gudehus-Bauer 亚塑性理论为基础, 提出了堆石料亚塑性本构模型。程展林等^[15]基于邓肯 - 张模型和 Rowe 剪胀方程, 提出了新的剪胀模型, 改进了邓肯 - 张非线性模型。贾宇峰等^[16]采用初始状态参量描述粗粒土的内部状态, 建立了考虑颗粒破碎耗能的粗粒土剪胀性统一本构模型。米占宽等^[17]基于 Ueng 剪胀方程, 提出了考虑颗粒破碎影响的修正邓肯 - 张非线性模型和沈珠江双曲屈服面弹塑性模型。姚仰平等^[18]基于堆石料的变形和强度特性, 引入新的硬化参数, 提出一个能够考虑堆石料颗粒破碎影响的三维弹塑性本构模型。陈生水等^[19]、刘恩龙等^[20]、朱晟等^[21]、Liu 等^[22]、王占军等^[23]、魏匡民等^[24]、卞士海等^[25]在 Pastor-Zienkiewicz 广义塑性理论框架内, 提出了不同形式的堆石料广义塑性模型。Xiao 等^[26]提出了一个状态相关的堆石料界面本构模型。刘斯宏等^[27]在经典弹塑性理论的框架内, 基于细观结构建立了一个粗粒料弹塑性本构模型。综上所述, 近年来堆石料本构模型取得了很大发展。但是, 从各种模型的模拟值与试验结果的比较看, 其模拟精度还有待进一步提高。

笔者^[28-29]曾经提出基于微观力学的砂土三维多重机制制界面模型, 该模型可以考虑砂土的剪胀与剪缩、应变硬化与软化、应力主轴旋转产生的变形累积、应变增量主轴与应力主轴之间的非共轴等特性。本文在该模型中引入适合于堆石料的状态参数, 建立堆石料三维多重机制制界面模型, 并进行 2 组堆石料在不同初始孔隙比和围压条件下的数值模拟, 与试验结果进行比较, 以验证模型的有效性。

1 本构模型

1.1 多重机制理论框架

堆石料受到外部荷载作用时内部颗粒相互摩擦与挤压, 变形复杂。如图 1 所示, 取一单位球作为代表性堆石料单元, 根据 Fang 等^[29]的研究, 将堆石料的复杂宏观变形行为分解为一个宏观体应变机制和一系列空间分布的相互独立虚拟微观剪切机制。在球体单元中, 微观剪切机制的方向可以由单位法向矢量 \mathbf{n} 表示。每个微观剪切机制包含二个切向分量 (\mathbf{l} 和 \mathbf{m}) 和一个法向分量 (\mathbf{n})。微观剪应变和剪应力分别定义为 $\gamma^{(k)}(\mathbf{n})$ 和 $\tau^{(k)}(\mathbf{n})$, 其中 k 为 1, 2, 3 分别对应于 \mathbf{l} , \mathbf{m} , \mathbf{n} 方向。通过投影关系, 微观剪应变可表示为 $\gamma^{(k)}(\mathbf{n}) = N_{ij}^{(k)} \varepsilon_{ij}$, 其中 ε_{ij} 为应变张量, $N_{ij}^{(1)} = (l_i n_j + l_j n_i) / 2$, $N_{ij}^{(2)} = (m_i n_j + m_j n_i) / 2$, $N_{ij}^{(3)} = n_i n_j - \delta_{ij} / 3$, δ_{ij} 为 Kronecker 符号, l_i , m_i , n_i 分别为 \mathbf{l} , \mathbf{m} , \mathbf{n} 的分量。根据虚功原理, 宏观应力张量在球体单元上做的功等于宏观体应力和微观剪应力所做的功之和, 经过推导, 得到宏观有效应力的表达式为

$$d\sigma_{ij} = dp\delta_{ij} + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^3 2w^{(m)} N_{ij}^{(mk)} d\tau^{(mk)} \quad (1)$$

式中 σ_{ij} 为有效应力张量; p 为平均有效应力; 上标 (m) 代表球面上一系列积分点序号, 本文采用 Bazant 等^[30]提出的积分方法, 半球面上共分布 21 个积分点, 即 $M=21$; $w^{(m)}$ 代表球面积分点的加权系数。

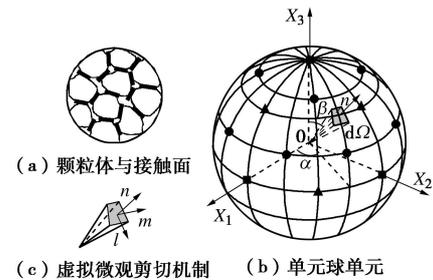


图 1 微观剪切机制模型

Fig. 1 Microscopic shear mechanism model

1.2 微宏观应力 - 应变关系

弹性体应变增量 $d\varepsilon_v^e$ 由平均有效应力变化引起, 可表示为

$$d\varepsilon_v^e = dp / K_e \quad (2)$$

式中, K_e 为弹性体积模量, 一般取

$$K_e = \frac{1+e}{\kappa} p_a \left(\frac{p}{p_a} \right)^{0.5} \quad (3)$$

式中, κ 为与等向膨胀相关的材料参数, e 为孔隙比, p_a 为标准大气压。 κ , K_e , 弹性剪切模量 G_e 和泊松比 ν 的相互关系为

$$K_e = \frac{2G_e(1+\nu)}{3(1-2\nu)}, \quad (4)$$

$$G_e = G_0 \frac{(2.97-e)^2}{1+e} p_a \left(\frac{p}{p_a} \right)^{0.5}, \quad (5)$$

$$\kappa = \frac{3(1-2\nu)}{2G_0(1+\nu)} \left(\frac{1+e}{2.97-e} \right)^2, \quad (6)$$

式中, G_0 为材料参数。

塑性体应变增量 $d\varepsilon_v^p$ 可表示为

$$d\varepsilon_v^p = h(p-p_m) \langle dp \rangle / K_p, \quad (7)$$

式中 p_m 为历史最大平均有效应力; $h(x)$ 为 Heavyside 阶梯函数; $\langle \cdot \rangle$ 为 Macauley 符号。式 (7) 中 K_p 为塑性体积模量, 可定义为^[31]

$$K_p = \frac{1+e}{\lambda-\kappa} p_a \left(\frac{p}{p_a} \right)^{0.5} \left(\frac{M_c g(\theta)}{M_c g(\theta) - R} \right). \quad (8)$$

式中 λ 为与等向压缩相关的材料参数; M_c 为三轴压缩条件下的临界应力比; $R = \sqrt{3r_{ij}r_{ij}}/2$ 为应力比; $r_{ij} = s_{ij}/p$ 为偏应力比张量; $s_{ij} = \sigma_{ij} - p\delta_{ij}$ 为偏应力张量; $g(\theta)$ 表示偏应力比空间中的屈服轨迹函数; θ 为应力洛德角。采用 SMP 准则, $g(\theta)$ 可表示为

$$g(\theta) = \frac{1}{6} R [3\sqrt{(I_1 I_2 - I_3)/(I_1 I_2 - 9I_3)} - 1], \quad (9)$$

式中, I_1 , I_2 和 I_3 分别为第一、第二和第三应力不变量。

剪胀引起的微观体应变增量 $d\varepsilon_{vd}^{(mk)}$ 定义为

$$d\varepsilon_{vd}^{(mk)} = d_1 (\pm r_d^{(mk)} - r^{(mk)}) d\gamma_p^{(mk)}. \quad (10)$$

式中 d_1 为微观剪胀参数; $r^{(mk)} = \tau^{(mk)}/p$ 为微观应力比; $\gamma_p^{(mk)}$ 为微观塑性剪应变; $r_d^{(mk)}$ 为微观剪胀应力比。当 $d\gamma_p^{(mk)} > 0$ 时, $r_d^{(mk)}$ 前取正号; 当 $d\gamma_p^{(mk)} < 0$ 时, $r_d^{(mk)}$ 前取负号。

根据余功原理, 可以得出宏观剪胀体应变增量 $d\varepsilon_{vd}$ 等于微观剪胀体应变增量之和, 即

$$d\varepsilon_{vd} = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^3 2W^{(m)} d_1 (\pm r_d^{(mk)} - r^{(mk)}) d\gamma_p^{(mk)}. \quad (11)$$

根据体应变和体积模量的定义以及式 (2)、(8), 体积模量 K 可表示为

$$K = \left(\frac{1}{K_e} + \frac{1}{K_p} h(p-p_m) \frac{\langle dp \rangle}{|dp|} \right)^{-1}. \quad (12)$$

微观弹性剪应变增量 $d\gamma_e^{(mk)}$ 可表示为

$$d\gamma_e^{(mk)} = d\tau^{(mk)} / G_e^{(mk)}, \quad (13)$$

式中, $G_e^{(mk)}$ 为微观弹性剪切模量。

基于界面弹塑性理论, 微观塑性剪应变增量 $d\gamma_p^{(mk)}$ 可表示为

$$d\gamma_p^{(mk)} = \frac{1}{G_p^{(mk)}} p dr^{(mk)} + \frac{1}{H_p^{(mk)}} h(p-p_m) \frac{\langle dp \rangle}{|dp|} r^{(mk)} dp, \quad (14)$$

式中, $G_p^{(mk)}$ 为微观塑性剪切模量, $H_p^{(mk)}$ 为与平均有效应力变化相关联的微观塑性剪切模量。微观塑性剪切模量定义为

$$G_p^{(mk)} = h_1 G_e^{(mk)} \left(\frac{r_b^{(mk)} \bar{\rho}_1^{(mk)}}{r_m^{(mk)} \rho_1^{(mk)}} - 1 \right). \quad (15)$$

式中 h_1 为材料参数; $r_b^{(mk)}$, $r_m^{(mk)}$ 分别为微观边界应力比和最大微观应力比; $\bar{\rho}_1^{(mk)}$, $\rho_1^{(mk)}$ 为状态变量; $\bar{\rho}_1^{(mk)} = |\pm r_m^{(mk)} - r_r^{(mk)}|$; $r_r^{(mk)}$ 为最近微观应力比转折点; 当 $dr^{(mk)} > 0$ 时, $r_m^{(mk)}$ 前取正号; 当 $dr^{(mk)} < 0$ 时, $r_m^{(mk)}$ 前取负号; $\rho_1^{(mk)} = |r^{(mk)} - r_r^{(mk)}|$ 。

微观塑性剪切模量 $H_p^{(mk)}$ 定义为

$$H_p^{(mk)} = h_2 G_e^{(mk)} \frac{r_c^{(mk)} \bar{\rho}_2}{r^{(mk)} \rho_2}. \quad (16)$$

式中 h_2 为材料参数; $r_c^{(mk)}$ 为微观临界应力比; $\bar{\rho}_2$, ρ_2 为状态变量, $\bar{\rho}_2 = |p_m - p_r|$, $\rho_2 = |p - p_r|$; p_r 为最近平均有效应力转折点。

微观与宏观材料参数之间的关系可表示为

$$r_c^{(mk)} = \frac{2}{3} \frac{M_c g(\theta)}{\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^3 2W^{(m)} |N_{11}^{(mk)}|}, \quad (17)$$

$$r_b^{(mk)} = \frac{2}{3} \frac{M_b g(\theta)}{\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^3 2W^{(m)} |N_{11}^{(mk)}|}, \quad (18)$$

$$r_d^{(mk)} = \frac{2}{3} \frac{M_d g(\theta)}{\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^3 2W^{(m)} |N_{11}^{(mk)}|}, \quad (19)$$

$$G_e^{(mk)} = \frac{4}{3} \frac{G_e}{\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^3 2W^{(m)} |N_{11}^{(mk)}|}. \quad (20)$$

式中 M_b , M_m 和 M_d 分别为三轴压缩条件下的边界应力比、最大应力比和剪胀应力比; $M_d = M_c \exp(n_d \psi)$; $M_b = M_c \exp(-n_b \psi)$; n_d , n_b 为模型参数; ψ 为状态参数, $\psi = e - e_c$; e_c 为临界孔隙比。

1.3 宏观应力 - 应变关系

根据多重机制理论推导, 宏观应力 - 应变增量关系可表示为

$$d\sigma_{ij} = D_{ijst} d\varepsilon_{st}, \quad (21)$$

式中, D_{ijkl} 为弹塑性应力 - 应变刚度矩阵

$$D_{ijst} = K_1 Q_{ij} \delta_{st} + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^3 2W^{(m)} (-Q^{(mk)} Q_{ij} + G^{(mk)} N_{ij}^{(mk)}) N_{st}^{(mk)}, \quad (22)$$

式中,

$$G^{(mk)} = \left(\frac{1}{G_e^{(mk)}} + \frac{1}{G_p^{(mk)}} \right)^{-1}, \quad (23)$$

$$H^{(mk)} = \left(\frac{1}{G_e^{(mk)}} + \frac{1}{H_p^{(mk)}} h(p - p_m) \left| \frac{dp}{|dp|} \right| \right)^{-1}, \quad (24)$$

$$Q_{ij} = \delta_{ij} + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^3 2w^{(m)} r^{(mk)} \left(1 - \frac{G^{(mk)}}{H^{(mk)}} \right) N_{ij}^{(mk)}, \quad (25)$$

$$K_1 = \frac{K}{1 - K \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^3 2w^{(m)} \frac{a^{(mk)}}{G_e^{(mk)}} \left(1 - \frac{G^{(mk)}}{H^{(mk)}} \right)}, \quad (26)$$

$$a^{(mk)} = d_1 (\pm r_d^{(mk)} - r^{(mk)}) r^{(mk)}, \quad (27)$$

$$Q^{(mk)} = K_1 d_1 (\pm r_d^{(mk)} - r^{(mk)}) \left(1 - \frac{G^{(mk)}}{G_e^{(mk)}} \right). \quad (28)$$

1.4 孔隙比与平均有效应力的临界状态关系

砂土临界状态研究表明, 临界状态可为统一描述不同状态下砂土的变形与强度特性提供参考标准, 状态(e, p)与临界状态线的相对位置可以较好地表征砂土的剪胀软化和剪缩硬化现象。由于堆石料颗粒破碎显著、级配较宽和粒径较大等特点, 堆石料的临界状态较砂土复杂。已有的研究表明^[3, 12-13], 堆石料存在临界状态, 但对其唯一性存在较大的争议。

图 2, 3 分别为 TRM 堆石料^[3]和国外某堆石坝 NAN-F4 堆石料的临界状态关系。可以发现, 不同初始级配和密度的试样在 $e - \ln(p/p_a)$ 平面上的临界状态线基本平行, 即临界状态线的斜率基本相等, 而截距不同, 说明截距与试样剪切前的密度和级配有关。

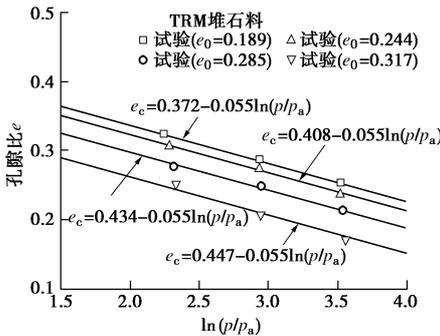


图 2 TRM 在 $e - \ln(p/p_a)$ 平面的临界状态线

Fig. 2 Critical state lines in $e - \ln(p/p_a)$ plane for TRM

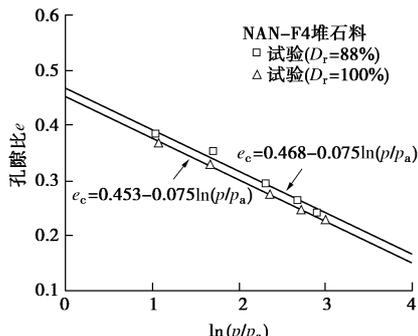


图 3 NAN-F4 在 $e - \ln(p/p_a)$ 平面的临界状态线

Fig. 3 Critical state lines in $e - \ln(p/p_a)$ plane for NAN-F4

由于临界状态是试验的最终状态, 试验过程中颗粒发生了破碎, 颗粒级配发生了变化, 因此截距也与颗粒破碎有关。图 2, 3 的线性回归结果表明截距与试样初始孔隙比具有线性变化趋势。因此, 在不考虑颗粒破碎过程对临界状态线的影响条件下, 临界状态孔隙比可近似地表示为

$$e_c = e_{r0} + k_c e_0 - \lambda_c \ln(p/p_a). \quad (29)$$

式中 e_0 为初始孔隙比; e_{r0} 和 k_c 为临界状态线参数; λ_c 则为临界状态线的斜率。通过对截距与试样固结后剪切前初始孔隙比的线性回归分析, 得出 TRM 堆石料的 e_{r0}, k_c 分别为 0.182, 0.599, NAN-F4 堆石料的 e_{r0}, k_c 分别为 0.377, 0.311。由于这些参数是根据临界状态处的试验值确定的, 因此所得参数值实际上已包含了颗粒破碎的影响。

2 模型参数的确定

本模型共计 12 个参数, 包括模量参数 $G_0, \nu, \lambda, h_1, h_2$; 临界状态参数 $M_c, e_{r0}, k_c, \lambda_c$; 剪胀参数 d_1, n_d ; 边界应力比参数 n_b 。各参数的确定步骤如下: G_0, ν, λ 为常见的土力学参数, 其取值和试验材料性质有关, 由常规试验可以得到; $n_b = \ln(M_c/M_b)/\psi_b$, ψ_b 代表边界应力比时的 ψ 值; $n_d = \ln(M_d/M_c)/\psi_d$, ψ_d 代表剪胀应力比时的 ψ 值; 临界状态参数 M_c, e_{r0}, k_c 和 λ_c 可通过试验数据回归临界状态关系得到; 剪胀参数 d_1 和塑性模量参数 h_1, h_2 可通过试验数据模拟计算确定。

3 模型验证

利用建立的三维多重机制界面模型, 对不同初始孔隙比和围压条件下的 TRM 堆石料^[3]和 NAN-F4 堆石料的排水三轴压缩试验结果进行数值模拟比较。根据三轴试验结果, 对试验数据进行整理, 确定 2 组堆石料试样所对应的模型参数如表 1 所示。

图 4~7 分别为不同初始孔隙比和围压条件下 TRM 堆石料的排水三轴试验结果和模拟计算值。从图中可以看出, 模型可以较好地反映初始密度和围压对堆石料应力应变行为的影响。在相同固结后剪切前初始孔隙比条件下, 随着围压从 0.4~1.6 MPa 的增大, 偏应力 - 轴应变曲线从应变软化向应变硬化变化, 围压越大, 偏应力越大; 体应变从剪胀向剪缩变化。在相同围压条件下, 随着固结后剪切前初始孔隙比从 0.189~0.317 的增大, 偏应力的峰值逐渐减小, 偏应力 - 轴应变曲线从应变软化向应变硬化变化, 不同初始孔隙比的偏应力逐渐趋近于临界状态下的偏应力, 体应变从剪胀向剪缩变化。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

| 参数 | | 取值 | |
|--------|-------------|-------|--------|
| | | TRM | NAN-F4 |
| 弹性模量参数 | G_0 | 130 | 100 |
| | ν | 0.25 | 0.30 |
| | M_c | 1.64 | 1.75 |
| 临界状态参数 | e_{r0} | 0.182 | 0.377 |
| | k_c | 0.599 | 0.311 |
| | λ_c | 0.055 | 0.075 |
| | d_1 | 1.5 | 1.5 |
| 剪胀参数 | n_d | 0.5 | 1.5 |
| | n_b | 3.5 | 5.5 |
| 峰值强度参数 | λ | 0.014 | 0.018 |
| | h_1 | 0.3 | 0.5 |
| 塑性模量参数 | h_2 | 0.5 | 0.5 |

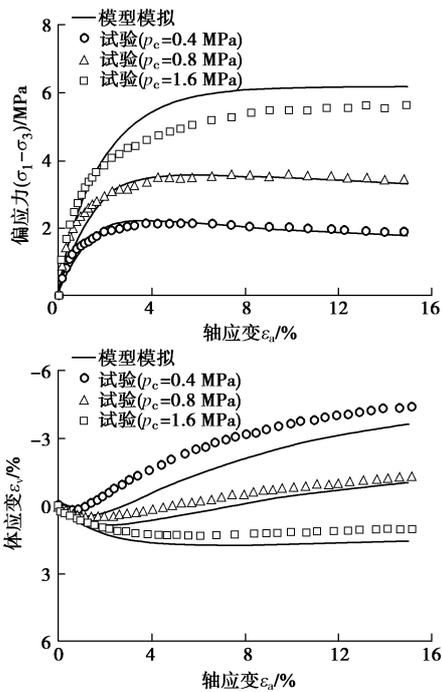


图 4 TRM 的试验和模型模拟结果($e_0=0.189$)

Fig. 4 Test and simulated results for TRM ($e_0=0.189$)

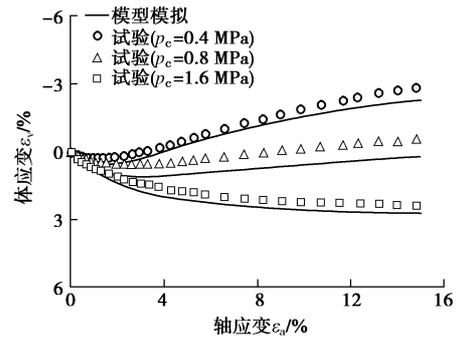
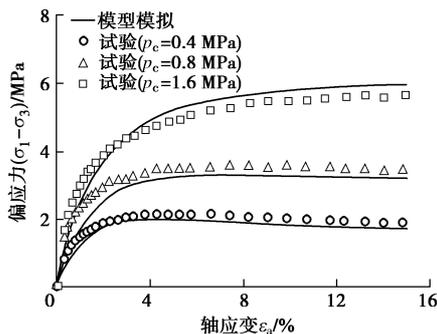


图 5 TRM 的试验和模型模拟结果($e_0=0.244$)

Fig. 5 Test and simulated results for TRM ($e_0=0.244$)

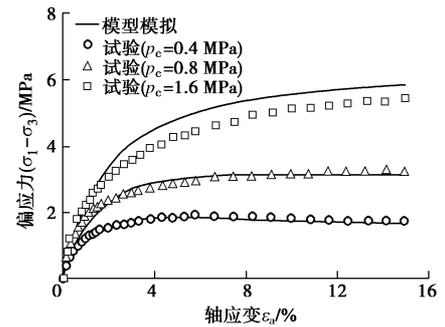


图 6 TRM 的试验和模型模拟结果($e_0=0.285$)

Fig. 6 Test and simulated results for TRM ($e_0=0.285$)

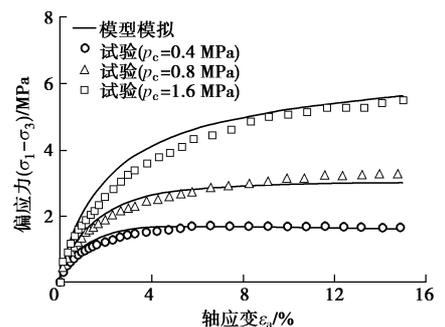


图 7 TRM 的试验和模型模拟结果($e_0=0.317$)

Fig. 7 Test and simulated results for TRM ($e_0=0.317$)

图 8, 9 为在不同初始孔隙比和围压条件下 NAN-F4 堆石料的排水三轴试验结果和模拟计算值。虽然制样时孔隙比相同, 其固结后剪切前初始孔隙比随围压不同而变化。对于制样时相对密度 D_r 为 88% 的试样, 其孔隙比为 0.300, 固结后剪切前初始孔隙比分别为 0.292, 0.284, 0.271, 0.259, 0.254; 对于制

样时相对密度 D_r 为 100% 的试样, 其孔隙比为 0.255, 固结后剪切前初始孔隙比分别为 0.249, 0.243, 0.234, 0.229, 0.225。从图中可以看出, 模拟结果与试验数据较为吻合, 说明本模型不仅能够较好地模拟堆石料的偏应力 - 轴应变关系曲线, 而且也可以较合理地预测堆石料的体应变 - 轴应变关系曲线。

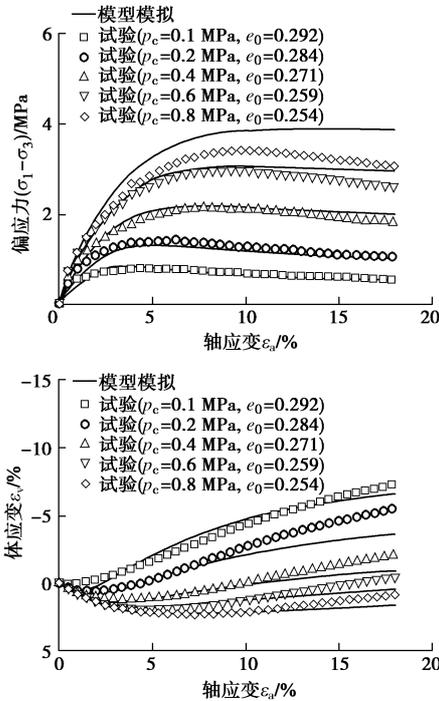


图 8 NAN-F4 的试验和模型模拟结果($D_r=88\%$)

Fig. 8 Test and simulated results for NAN-F4 ($D_r=88\%$)

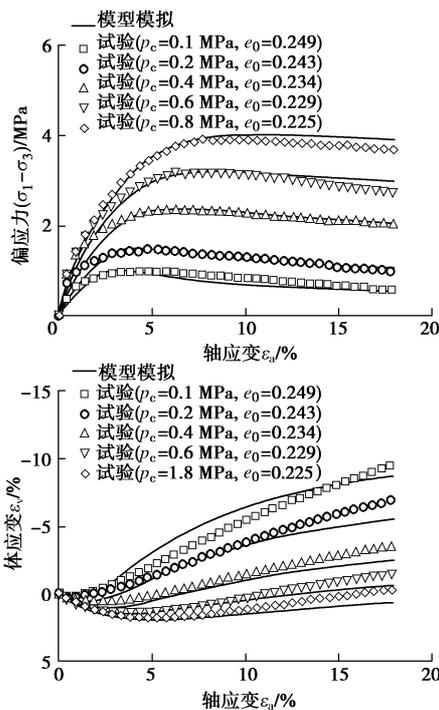


图 9 NAN-F4 的试验和模型模拟结果($D_r=100\%$)

Fig. 9 Test and simulated results for NAN-F4 ($D_r=100\%$)

4 结 论

(1) 提出了一个堆石料状态相关三维多重机制边界模型, 模型把复杂的宏观变形行为分解为一个宏观体应变机制和一系列空间分布的相互独立虚拟微观剪切机制。每个虚拟微观剪切机制包含 3 个方向的微观剪应力-应变关系和微观应力 - 剪胀关系。

(2) 使用本文模型对常规三轴试验结果进行数值模拟。通过对比试验结果和模拟计算值发现, 多重机制边界模型能够较好地体现不同密度和围压条件下堆石料的应变硬化和应变软化特性。

(3) 实际筑坝堆石料所受应力十分复杂, 多重机制边界模型对复杂应力路径的适应性以及高围压下堆石料颗粒破碎过程对变形的影响有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙. 堆石料剪胀特性大型三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2): 205 - 211. (LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, LIU Han-long. Study on shear dilatancy behaviors of rockfills in large-scale triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(2): 205 - 211. (in Chinese))
- [2] 徐志华, 孙大伟, 张国栋. 堆石料应力 - 应变特性大型三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1565 - 1572. (XU Zhi-hua, SUN Da-wei, ZHANG Guo-dong. Study on stress-strain behavior of rockfill using large-scale triaxial tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1565 - 1572. (in Chinese))
- [3] XIAO Y, LIU H, CHEN Y, et al. Strength and deformation of rockfill material based on large-scale triaxial compression tests: I Influences of density and pressure[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140: 04014070.
- [4] 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))

- [5] 施维成, 朱俊高, 代国忠, 等. 球应力和偏应力对粗粒土变形影响的真三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(5): 776 - 783. (SHI Wei-cheng, ZHU Jun-gao, DAI Guo-zhong, et al. True triaxial tests on influence of spherical and deviatoric stresses on deformation of coarse-grained soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(5): 776 - 783. (in Chinese))
- [6] 潘家军, 程展林, 余挺, 等. 不同中主应力条件下粗粒土应力变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(11): 2078 - 2084. (PAN Jia-jun, CHENG Zhan-lin, YU Ting, et al. Experimental study on stress-strain characteristics of coarse-grained soil under different intermediate principal stresses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(11): 2078 - 2084. (in Chinese))
- [7] 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. (in Chinese))
- [8] 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 - 1246. (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 - 1246. (in Chinese))
- [9] 魏松, 朱俊高, 钱七虎, 等. 粗粒料颗粒破碎三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(4): 533 - 538. (WEI Song, ZHU Jun-gao, QIAN Qi-hu, et al. Particle breakage of coarse-grained materials in triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(4): 533 - 538. (in Chinese))
- [10] 迟世春, 王峰, 贾宇峰, 等. 考虑细观单粒强度的堆石料破碎特性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(10): 1780 - 1785. (CHI Shi-chun, WANG Feng, JIA Yu-feng, et al. Modeling particle breakage of rockfill materials based on single particle strength[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(10): 1780 - 1785. (in Chinese))
- [11] 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. (in Chinese))
- [12] 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. (in Chinese))
- [13] 蔡正银, 李小梅, 韩林, 等. 考虑级配和颗粒破碎影响的堆石料临界状态研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(8): 1357 - 1364. (CAI Zheng-yin, LI Xiao-mei, HAN Lin, et al. Critical state of rockfill materials considering particle gradation and breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(8): 1357 - 1364. (in Chinese))
- [14] 岑威钧, 王修信, BAUER Erich, 等. 堆石料的亚塑性本构建模及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(2): 312 - 322. (CEN Wei-jun, WANG Xiu-xin, BAUER Erich, et al. Study on hypoplastic constitutive modeling of rockfill and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(2): 312 - 322. (in Chinese))
- [15] 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): 331 - 337. (CHENG Zhan-lin, JIANG Jing-shan, DING Hong-shun, et al. Nonlinear dilatant model for coarse-grained soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(3): 331 - 337. (in Chinese))
- [16] 贾宇峰, 迟世春, 林皋. 考虑颗粒破碎的粗粒土剪胀性统一本构模型[J]. 岩土力学, 2010, **31**(5): 1381 - 1388. (JIA Yu-feng, CHI Shi-chun, LIN Gao. Dilatancy unified constitutive model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(5): 1381 - 1388. (in Chinese))
- [17] 米占宽, 李国英, 陈生水. 基于破碎能耗的粗粒料本构模型[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(10): 1801 - 1811. (MI Zhan-kuan, LI Guo-ying, CHEN Sheng-shui. Constitutive model for coarse granular materials based on breakage energy[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(10): 1801 - 1811. (in Chinese))
- [18] 姚仰平, 黄冠, 王乃东, 等. 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 - 18. (YAO Yang-ing, HUANG Guan, WANG Nai-dong, et al. Stress-strain characteristic and three-dimensional constitutive model of rockfill considering crushing[J]. Industrial Construction, 2011, **41**(9): 12 - 18. (in Chinese))
- [19] 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 - 1495. (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 - 1495. (in Chinese))
- [20] 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))
- [21] 朱 晟, 魏匡民, 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))
- [22] LIU H, ZOU D. Associated generalized plasticity framework for modeling gravelly soils considering particle breakage[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2013, **139**(5): 606 - 615.
- [23] 王占军, 陈生水, 傅中志. 堆石料的剪胀特性与广义塑性本构模型[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))
- [24] 魏匡民, 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. (in Chinese))
- [25] 卞士海, 李国英, 魏匡民, 等. 堆石料广义塑性模型研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(6): 996 - 1003. (BIAN Shi-hai, LI Guo-ying, WEI Kuang-min, et al. Generalized plasticity model for rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(6): 996 - 1003. (in Chinese))
- [26] XIAO Y, LIU H, CHEN Y, et al. Bounding surface model for rockfill materials dependent on density and pressure under triaxial stress conditions[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2014, **140**(4):04014002.
- [27] 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 Si-hong, SHAO Dong-chen, SHEN Chao-min, et al. Microstructure-based elastoplastic constitutive model for coarse-grained materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(5): 777 - 783. (in Chinese))
- [28] 方火浪, 沈 扬, 郑 浩, 等. 砂土三维多重机构界面模型[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(7): 1189 - 1195. (FANG Huo-lang, SHEN Yang, ZHENG Hao, et al. Three-dimensional multi-mechanism bounding surface model for sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(7): 1189 - 1195. (in Chinese))
- [29] FANG H L, ZHENG H, ZHENG J. Micromechanics-based multi mechanism bounding surface model for sands[J]. International Journal of Plasticity, 2017, **90**: 242 - 266.
- [30] BAZANT Z P, OH B H. Microplane model for progressive fracture of concrete and rock[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1985, **111**(4): 559 - 582.
- [31] LI X S. A sand model with state-dependent dilatancy[J]. Géotechnique, 2002, **52**(3): 173 - 186.