

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0315

粗粒料接触面模型及其在土石坝工程中的应用

李文轩^{1,2}, 卞士海³, 李国英^{1,2}, 吴俊杰^{1,2,4}

(1. 南京水利科学研究院 岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 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 210024; 3. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 4. 新疆水利水电勘测设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘 要: 在土石坝工程中越来越重视岸坡与坝料之间的接触特性, 将土体本构模型中使用较多的双曲线型硬化规律运用至接触面模型, 提出了一个简洁的接触面本构模型, 推导了接触面模型刚度矩阵表达式。通过对 4 组试验的预测结果与试验结果的对比, 表明该模型可以较好地预测粗粒料的界面剪切试验。将提出的接触面模型嵌入有限元程序, 应用于如美心墙坝河谷与坝料的接触分析。三维有限元计算结果表明: 坝体两侧岸坡的剪切位移变化规律都是中间部分剪切滑移量较大, 岸坡边缘部分相对较小, 陡坡一侧最大滑移量大于较缓一侧。这些均符合粗粒料滑移的基本规律, 可为岸坡-坝料接触特性研究以及土石坝工程计算提供参考。

关 键 词: 双曲线型硬化规律; 接触面模型; 直剪试验; 模型验证; 剪切滑移特性

中图分类号: TV641

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2019)06-2379-10

Interface model of coarse-grained soils and its application in earth rock dam

LI Wen-Xuan^{1,2}, BIAN Shi-hai³, LI Guo-ying^{1,2}, WU Jun-jie^{1,2,4}

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 2. Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-Rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; 4. Xinjiang Survey and Design Institute for Water Resources and Hydropower, Urumqi, Xinjiang 830000, China)

Abstract: More and more attention was paid to the behavior of bedrock-dam materials interface in earth rockfill dams. The hyperbolic hardening rule for constitutive model of coarse grained soil is introduced into the model for soil-structure interface and thus a simple elasto-plastic interface model is suggested. The expression of stiffness matrix of interface model is derived. The performance of proposed model is demonstrated by comparing its predictions with direct shear test results for different types of granular soils, including sand and rockfill materials, during shearing. Within the framework of thin layer element finite element scheme, the interface model is applied in numerical finite element program. Combining Rumei high core-wall dam example, shear sliding property of shear band between dam materials and valley is analyzed. Simulation results show that tangential displacements of middle zone of slope is relatively large while the edge zone is relatively small. These are in accordance with the sliding law of coarse-grained soils, which provide a favorable reference to research on shear sliding property of bedrock-dam materials interface and deformations calculation of earth-rock dam.

Keywords: hyperbolic hardening rule; interface model; direct shear test; model validation; shear sliding property

1 引 言

堆石坝由于材料分区, 不同材料之间存在接触界面, 例如面板与垫层、心墙与反滤料、坝料与基岩, 由于接触面两侧材料特性的差异, 在界面两侧常存在较大的剪应力并发生位移不连续现象。因此,

对于土石坝工程, 除了关注坝体竖向沉降和水平位移等整体宏观变形以外, 局部的接触滑移变形特性也值得重视和关注。对于土石坝工程, 常常在数值计算中设置 Goodman 单元^[1]和 Desai 单元^[2], 以模拟面板与垫层的受力及变形特性, 以此反映一定荷载条件下接触界面上产生的错动滑移或开裂。在此

收稿日期: 2018-06-29

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (No.51509163); 水利部公益性行业科研专项经费项目 (No.201501035)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (51509163) and the Special Funds Projects of Ministry of Water Resources (201501035).

第一作者简介: 李文轩, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事土工数值分析、土与结构相互作用研究。E-mail: liwenxuan203@163.com

基础上, 各类反映接触界面变形特性的模型相继被提出。这其中有非线性模型^[3-4]、经典的弹塑性模型^[5-8]、损伤本构模型^[9-10]、扰动本构模型^[11]、状态相关模型^[12-15]、静动力统一接触面模型^[16], 目前粗粒土接触界面模型的研究相对较多, 可以描述三维条件下接触界面的单调、循环剪切特性。

粗粒料加载过程中存在双曲线型硬化规律^[17], 这种硬化规律对于粗粒料具有很强的适用性, 但是在接触界面模型研究中却没有学者关注此类硬化规律。因此, 本文首先探讨此类硬化规律在界面剪切试验中的适用性, 然后将其引入构建的接触面模型中, 在此基础上提出一类新的接触面模型, 作为粗粒料接触面模型扩展和尝试。

在接触面模型土石坝工程应用方面, 清华大学相关课题组进行了卓有成效的研究, 胡黎明等^[9, 18]根据土与结构物接触面直剪试验成果, 建立了粗糙接触面损伤力学本构模型, 并将模型应用于某围堰工程三维有限元分析, 探讨了防渗墙两侧与风化砂接触部位设置接触面单元对围堰应力变形特性的影响; 张嘎等^[16, 19]提出了弹塑性损伤模型 (elasto-plasticity damage model for soil-structure Interface), 预测了多种法向边界条件下粗粒土与结构接触面单调和往返剪切试验。此后模型被运用于某高面板堆石坝三维有限元分析, 并与薄层单元、Clough-Duncan 接触面模型在大坝以及面板受力变形计算结果方面进行了对比。大连理工大学的刘京茂等^[15, 20]在文献^[14]基础上, 提出了一个三维广义塑性接触模型, 对某在建面板堆石坝进行了三维有限元静、动弹塑性计算, 分析了接触面模型对面板与垫层间接触面变形及面板应力的影响。

土石坝工程中有关接触特性方面的研究仍然集中在面板与垫层之间的接触特性, 但是工程实践以及相关研究^[21]表明, 面板堆石坝坝体和基岩的接触效应也需要进一步关注, 尤其是陡峻河谷高面板坝, 需要进一步加强坝料与岸坡之间的接触特性研究。

因此, 本文在双曲线硬化规律基础上提出一类简洁的接触面模型, 并通过砂土以及堆石料界面剪切试验进行验证。将提出的接触界面模型应用于某高心墙坝填筑过程数值计算, 作为接触面模型的验证实例, 为坝料-基岩接触特性研究以及工程计算提供参考。

2 接触面模型简介

本节验证了砂土和堆石料界面剪切试验中双

曲线型硬化规律的适用性, 在此基础上, 借鉴相关研究构造接触面模型中的屈服面、塑性势和剪胀方程, 这些与双曲线型硬化规律构成新的接触面模型要素, 并进一步推导新的接触面模型弹塑性刚度矩阵。

2.1 双曲线型硬化规律及验证

对于粗粒土三轴试验剪切过程, Jan^[17]曾提出一个临界状态塑性模型, 在模型中定义了应力比与塑性剪应变的双曲线型硬化规律。这一类双曲线型的硬化规律在粗粒土模型中具有很强的适用性^[22-24], 双曲线型硬化规律表达式为

$$\eta_0 = \frac{q}{p} = \frac{\varepsilon_s^p}{\frac{1}{A} + \frac{\varepsilon_s^p}{M + F(\psi)}} \quad (1)$$

式中: η_0 为加载应力比; p 、 q 分别表示平均应力和偏应力; ε_s^p 为广义剪应变; A 为材料参数; M 为残余应力比; $M + F(\psi)$ 为双曲线的渐进线。

根据文献^[24]对粗粒料抗剪强度机制的研究, $F(\psi)$ 可认为是状态参数变化引起的土体潜在强度变化, $F(\psi)$ 需要满足 $F(0) = 0$, 表示当土体达到临界状态时, 与孔隙比相关的咬合强度消失, $F(\psi)$ 同样采用线性表达式:

$$F(\psi) = B(e_{cs} - e) \quad (2)$$

式中: B 为模型参数; e_{cs} 和 e 分别为临界状态孔隙比和当前孔隙比。

土体本构模型主要研究其应力-应变关系和强度特性, 而界面模型则是研究界面切向位移与界面剪应力关系和界面强度特性, 两者有所不同。根据 Liu 等^[14]的研究, 在接触面模型中, 应力比 η 可以定义为 $\eta = \tau / \sigma_n$, 这个类似于三轴剪切试验中偏应力与平均应力定义应力比。在有厚度接触面模型^[14-16, 20]中剪应变增量 $d\varepsilon_s$ 和体应变增量 $d\varepsilon_v$ 通常可以表示为剪切位移 u 和法向位移 v 的增量与接触界面厚度 t 的比值, 即 $d\varepsilon_s = du/t$, $d\varepsilon_v = dv/t$ 。这样接触界面模型中的位移与应变可以关联起来, 本构中应力位移关系转化为应力-应变关系, 与一般的土体本构模型是相通的。从试验方面来看, 通过分析多组粗粒土界面剪切试验的 τ - u 曲线, 界面剪切试验中的 τ - u 关系也是类似于三轴加载过程中的 q - ε_s 关系。这样双曲线型硬化规律应该也是适用于粗粒料界面剪切试验。

这里首先以 Shahrou 等^[25]开展的不同法向应力界面直剪试验为例, 验证双曲线型硬化规律在砂

土界面直剪试验中的适用性。将式(1)中双曲线型硬化规律表达式进行变换,可得

$$\frac{\varepsilon_s^p}{\eta} = \frac{1}{A} + \frac{\varepsilon_s^p}{M + F(\psi)} \quad (3)$$

根据文献[14],对于有厚度接触面单元,可定义如下形式的剪应变剪切位移、体应变法向位移关系:

$$d\varepsilon_s = \frac{du}{t}, d\varepsilon_v = \frac{dv}{t} \quad (4)$$

$$\varepsilon_s^p = \varepsilon_s - \varepsilon_s^e \quad (5)$$

$$d\varepsilon_s^e = \frac{d\tau}{tD_s} \quad (6)$$

式中: u 和 v 分别为接触界面剪切位移和法向位移; D_s 为切向弹性模量; t 为接触面厚度; $d\varepsilon_s^e$ 为弹性剪应变增量。

根据切向弹性刚度和切应力增量即可确定弹性剪应变,试验中具体的剪应变减去弹性剪应变即为塑性剪应变,整理和绘制的 $\varepsilon_s^p / \eta - \varepsilon_s^p$ 曲线关系如图1所示。由图可见,各个法向应力条件下的试验数据近似直线分布,表明在砂土类材料接触界面试验中双曲线型硬化规律适用。

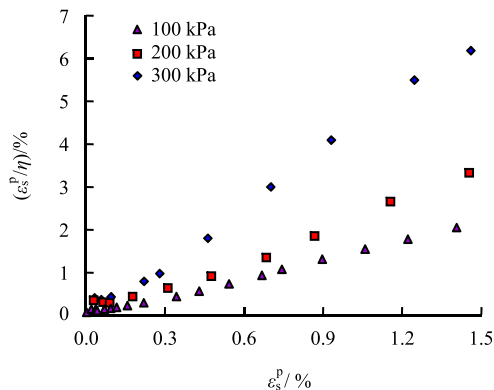


图1 砂土材料双曲线型硬化规律的验证

Fig.1 Verification of hyperbolic hardening rules for sand materials

对于粒径较大的堆石料颗粒,本文采用文献[26]中的紫坪铺堆石料界面剪切试验资料,以此试验资料验证双曲线型硬化规律对于堆石料界面直剪试验的适用性。弹性剪应变和剪应变方法计算根据文献确定,整理的 $\varepsilon_s^p / \eta - \varepsilon_s^p$ 曲线如图2所示,试验的数据点同样呈直线分布。双曲线型硬化规律对于大粒径堆石料界面直剪试验同样适用,这样双曲线

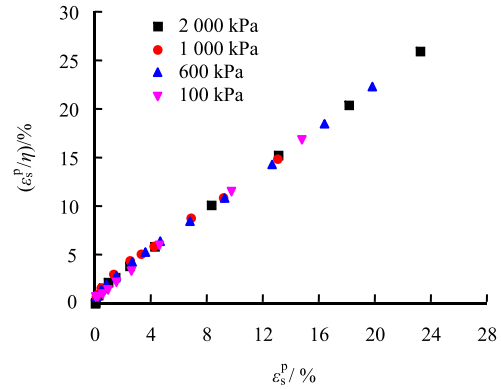


图2 堆石料双曲线型硬化规律的验证
Fig.2 Verification of hyperbolic hardening rules for rockfill materials

型硬化规律适用于粗粒土界面直剪试验。

2.2 粗粒料接触面模型及刚度矩阵

2.2.1 屈服面与塑性势

屈服面和塑性势是弹塑性接触面模型中的重要因素,因此,在构建界面模型前同样需要给出屈服面和塑性势函数。

对于屈服面函数,为了方便应用双曲线型硬化规律,这里采用 Li 等^[27]建议的直线型屈服面来反映剪切应力增量引起的塑性变形,由于涉及的是接触面模型,采用下式:

$$f = \tau - \sigma_n \eta_0 = 0 \quad (7)$$

式中: σ_n 为直剪试验法向应力; τ 为剪切应力; η_0 为硬化参数。与 f 相对应的塑性势面采用如下形式:

$$g = \tau - \eta_\psi \sigma_n = 0 \quad (8)$$

式中: η_ψ 为剪胀方程的相反数。

在粗粒土本构模型中, Li 等^[27]指出,采用形如式(7)的屈服面,能够预测以剪切为主的塑性变形。虽然在接触面模型中做了相似的处理,由于界面直剪试验正好也是以剪切为主,因此,上述屈服面仍然可以在接触面模型中应用。

2.2.2 剪胀方程和硬化规律

假定屈服面 f 服从相关联的流动法则,屈服面 f 对应的塑性势面为 g , 根据正交流动法则有

$$\frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_s^p} = \frac{\partial g}{\partial \sigma_n} \bigg/ \frac{\partial g}{\partial \tau} = -\eta_\psi \quad (9)$$

参考文献[14],接触面剪胀方程可表示为

$$\frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_s^p} = \alpha_g (M_c + k_m \psi - \eta) \quad (10)$$

式中: α_g 、 M_c 、 k_m 均为模型参数; ψ 为状态参数, 具体定义为

$$\psi = e - e_{cs} \quad (11)$$

$$e_{cs} = e_0 - \lambda \ln(\sigma_n / p_a) \quad (12)$$

式中: e_{cs} 为临界状态孔隙比; e 为接触材料的孔隙比; e_0 和 λ 为临界状态孔隙比参数; p_a 为大气压力即 100 kPa。接触面模型的硬化规律采用式 (1)。

2.2.3 本构方程的推导

对于有厚度接触面模型, 应力-位移增量关系可表达为

$$\{d\sigma\} = \begin{Bmatrix} d\sigma_n \\ d\tau \end{Bmatrix} = [K] \begin{Bmatrix} du \\ dv \end{Bmatrix} \quad (13)$$

式中: σ 为应力; $[K]$ 为接触面模型刚度矩阵。

结合式 (4), 可得接触面模型弹塑性矩阵为

$$\{d\sigma\} = [K] \begin{Bmatrix} du \\ dv \end{Bmatrix} = [D_{ep}] \{d\varepsilon\} \quad (14)$$

式中: ε 为应变; $[D_{ep}]$ 为应力-应变关系中的弹塑性矩阵。

切向弹性模量与文献[14]相同, 具体表达式为

$$D_s = D_{s0} \frac{1+e}{e} \left[\left(\frac{\sigma_n}{p_a} \right)^2 + R \left(\frac{\tau}{p_a} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (15)$$

同时, 假定法向弹性模量 D_n 为切向弹性模量 D_s 的 R 倍, 即

$$R = \frac{D_n}{D_s} = \frac{D_{n0}}{D_{s0}} \quad (16)$$

式中: D_{s0} 和 D_{n0} 分别为切向弹性模量参数和法向弹性模量参数。

屈服面 f 产生的塑性应变需要根据一致性条件确定, 对 f 全微分有:

$$df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_n} d\sigma_n + \frac{\partial f}{\partial \tau} d\tau + \frac{\partial f}{\partial \eta_0} d\eta_0 \quad (17)$$

对 η_0 全微分有:

$$d\eta_0 = \frac{\partial \eta_0}{\partial \varepsilon_v^p} d\varepsilon_v^p + \frac{\partial \eta_0}{\partial \varepsilon_s^p} d\varepsilon_s^p + \frac{\partial \eta_0}{\partial \sigma_n} d\sigma_n \quad (18)$$

根据正交流动法则, 可知 $d\varepsilon_v^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_n}$ 以及

$d\varepsilon_s^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \tau}$, 并由式 (18) 可以得到, 塑性乘子 $d\lambda$ 为

$$d\lambda = - \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_n} d\sigma_n + \frac{\partial f}{\partial \tau} d\tau}{\frac{\partial f}{\partial \eta_0} \left(\frac{\partial \eta_0}{\partial \varepsilon_v^p} \frac{\partial g}{\partial \sigma_n} + \frac{\partial \eta_0}{\partial \varepsilon_s^p} \frac{\partial g}{\partial \tau} \right)} - \frac{\frac{\partial \eta_0}{\partial \sigma_n} d\sigma_n}{\frac{\partial \eta_0}{\partial \varepsilon_v^p} \frac{\partial g}{\partial \sigma_n} + \frac{\partial \eta_0}{\partial \varepsilon_s^p} \frac{\partial g}{\partial \tau}} \quad (19)$$

则 f 产生的塑性应变可表示为

$$\begin{Bmatrix} d\varepsilon_v^p \\ d\varepsilon_s^p \end{Bmatrix} = - \frac{1}{\frac{\partial f}{\partial \eta_0} \left(\frac{\partial \eta_0}{\partial \varepsilon_v^p} \frac{\partial g}{\partial \sigma_n} + \frac{\partial \eta_0}{\partial \varepsilon_s^p} \frac{\partial g}{\partial \tau} \right)} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial g}{\partial \sigma_n} \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_n} + \frac{\partial f}{\partial \eta_0} \frac{\partial \eta_0}{\partial \sigma_n} \right), \frac{\partial g}{\partial \sigma_n} \frac{\partial f}{\partial \tau} \\ \frac{\partial g}{\partial \tau} \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_n} + \frac{\partial f}{\partial \eta_0} \frac{\partial \eta_0}{\partial \sigma_n} \right), \frac{\partial g}{\partial \tau} \frac{\partial f}{\partial \tau} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\sigma_n \\ d\tau \end{Bmatrix} \quad (20)$$

根据屈服面以及塑性势函数表达式, 进一步得到:

$$\begin{Bmatrix} d\varepsilon_v^p \\ d\varepsilon_s^p \end{Bmatrix} = \frac{1}{\sigma_n \left(-\eta_\psi \frac{\partial \eta_0}{\partial \varepsilon_v^p} + \frac{\partial \eta_0}{\partial \varepsilon_s^p} \right)} \cdot \begin{bmatrix} \eta_\psi \left(\eta_0 + \sigma_n \frac{\partial \eta_0}{\partial \sigma_n} \right) & -\eta_\psi \\ -\left(\eta_0 + \sigma_n \frac{\partial \eta_0}{\partial \sigma_n} \right) & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\sigma_n \\ d\tau \end{Bmatrix} \quad (21)$$

由于 η_0 中含有当前孔隙比与临界孔隙比, 而临界孔隙比又是法向应力的函数, 根据复合函数求导法则对 η_0 进行相应的微分运算, 容易得到如下各式:

$$\frac{\partial \eta_0}{\partial \varepsilon_v^p} = B(1+e) \left(\frac{\eta_0}{M+F} \right)^2 \quad (22)$$

$$\frac{\partial \eta_0}{\partial \varepsilon_s^p} = A \left(1 - \frac{\eta_0}{M+F} \right)^2 \quad (23)$$

$$\frac{\partial \eta_0}{\partial \sigma_n} = B \left(-\frac{\lambda}{\sigma_n} + \frac{1+e}{D_n t} \right) \left(\frac{\eta_0}{M+F} \right)^2 \quad (24)$$

结合式 (21) 以及弹性应变增量部分, 得到该接触面模型完整的应力-应变关系如下:

$$\begin{bmatrix} d\varepsilon_v \\ d\varepsilon_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{D_n t} + \frac{\eta_\psi \left(\eta_0 + \sigma_n \frac{\partial \eta_0}{\partial \sigma_n} \right)}{\sigma_n \left(-\eta_\psi \frac{\partial \eta_0}{\partial \varepsilon_v^p} + \frac{\partial \eta_0}{\partial \varepsilon_s^p} \right)} & \frac{-\eta_\psi}{\sigma_n \left(-\eta_\psi \frac{\partial \eta_0}{\partial \varepsilon_v^p} + \frac{\partial \eta_0}{\partial \varepsilon_s^p} \right)} \\ \frac{-\left(\eta_0 + \sigma_n \frac{\partial \eta_0}{\partial \sigma_n} \right)}{\sigma_n \left(-\eta_\psi \frac{\partial \eta_0}{\partial \varepsilon_v^p} + \frac{\partial \eta_0}{\partial \varepsilon_s^p} \right)} & \frac{1}{\sigma_n \left(-\eta_\psi \frac{\partial \eta_0}{\partial \varepsilon_v^p} + \frac{\partial \eta_0}{\partial \varepsilon_s^p} \right)} + \frac{1}{D_s t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\sigma_n \\ d\tau \end{bmatrix} \quad (25)$$

3 模型验证

为了验证模型的可靠性,本文选用4组典型的直剪试验进行验证。对于有厚度的接触面模型,首先需要确定接触面厚度,根据 Uesugi 等^[28]的研究,砂土接触面剪切试验的剪切滑移主要发生在接触界面附近 $d = (5 \sim 10)D_{50}$ 范围,建议砂土剪切带的厚度设置为 $(5 \sim 10)D_{50}$ 。张嘎^[29]、冯大阔^[30]、胡黎明^[31]等进行了大量的粗粒土接触面试验,对于堆石料,发现土颗粒错动变位的范围大概局限于接触界面 $(5 \sim 7)D_{50}$ 范围,超出此范围的土颗粒位移和转角已很小,建议堆石料接触面厚度取为 $(5 \sim 7)D_{50}$,约为 40~50 mm。根据文献[14]以及如美心墙坝坝料直剪试验成果,最终确定的模型参数如表 1 所示。

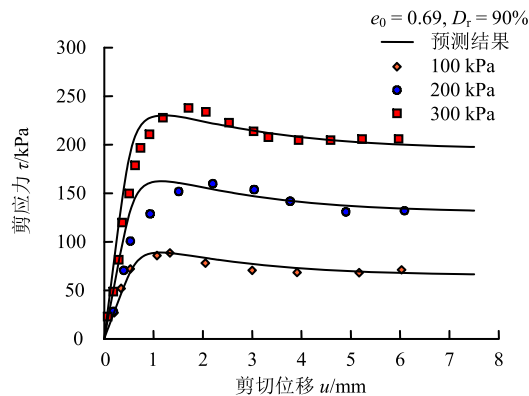
表1 接触面模型参数

Table 1 Parameters of constitutive models for soil-structure interface

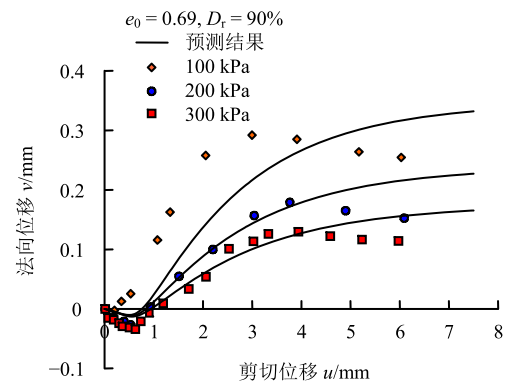
数据来源试验	e_r	λ	D_{50}/kPa	R	M_c	k_m	α	A	B	t/mm
Shahrour等 ^[25]	0.800	0.055	300	1.667	0.65	0.5	0.5	100	2.80	4
Zeghal等 ^[8]	0.765	0.300	800	0.625	0.70	0.9	0.9	7	0.58	2
如美堆石料-混凝土界面直剪试验	0.520	0.040	600	3.000	0.80	0.5	1.5	6	1.00	50
心墙掺砾土料-混凝土界面直剪试验	0.280	0.060	200	2.000	0.84	0.4	1.6	3	0.40	40

Shahrour等^[25]进行了不同法向应力以及300 kPa法向应力下不同孔隙比的界面直剪试验,使用表1

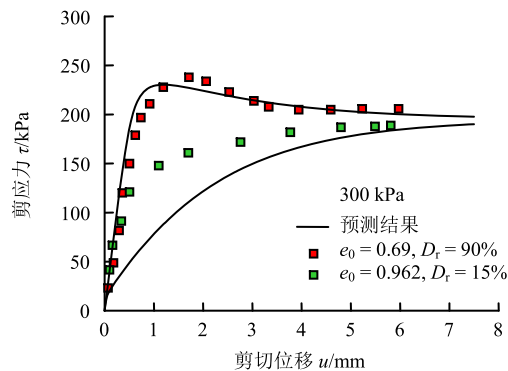
中的参数对这两类界面直剪试验进行预测,预测结果如图3所示。由图可以看出,该模型对不同法向应



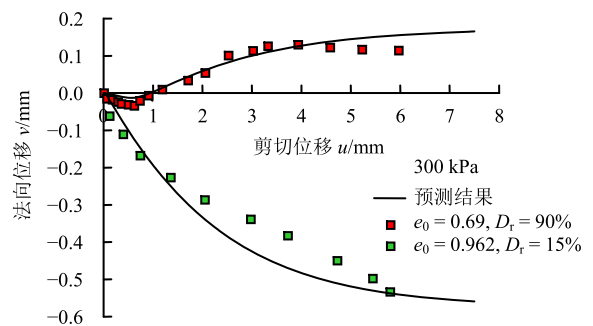
(a) 不同法向应力剪切位移-剪应力曲线



(b) 不同法向应力剪切位移-法向位移曲线



(c) 不同孔隙比剪切位移-剪应力曲线



(d) 不同孔隙比剪切位移-法向位移曲线

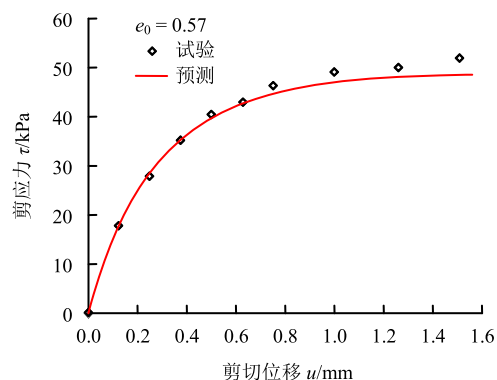
图3 预测结果与试验结果对比

Fig.3 Comparison of model prediction and experimental results

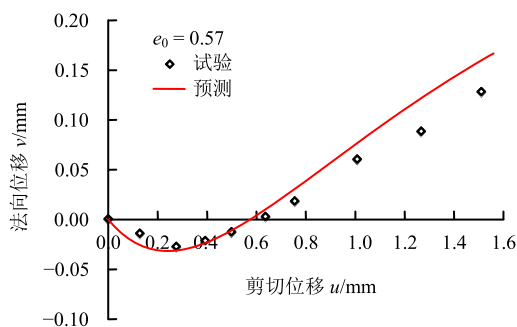
力以及不同孔隙比剪切位移-剪应力关系曲线预测较好,对于剪切位移-法向位移的预测略有偏差,符合基本规律。

采用提出的接触面模型对Zeghal等^[8]开展的67 kPa法向应力条件下直剪试验预测结果如图4所示,模型很好地预测了试验中剪切位移-剪应力和剪切位移-法向位移变化规律。

接触面模型对如美水电站筑坝堆石料以及心墙土料与凿毛混凝土的界面直剪试验预测结果如图5、6所示,对比可见,模型也可以较好地预测颗粒



(a) 剪切位移-剪应力曲线



(b) 剪切位移-法向位移曲线

图4 Zeghal等^[8]试验结果与预测对比

Fig.4 Comparison of model prediction with observation by Zeghal et al^[8]

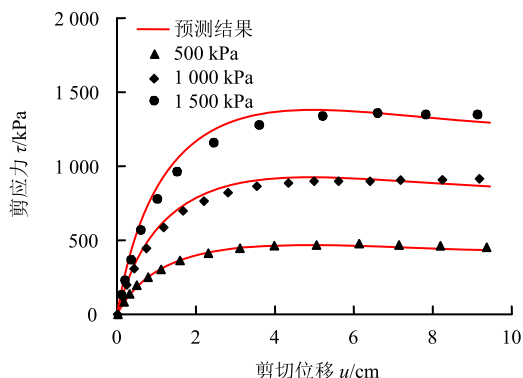


图5 堆石料剪切位移-剪应力曲线

Fig.5 Curves of shear displacement vs. shear stress of rockfill

粒径较大的坝料剪切滑移特性。

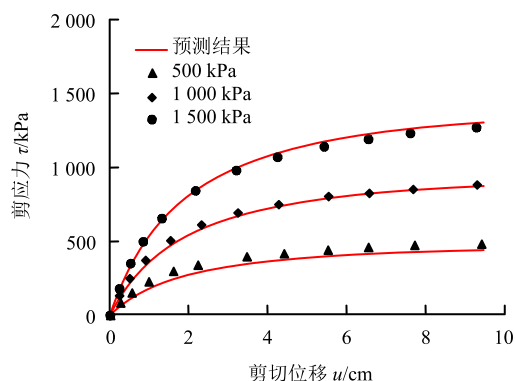


图6 心墙土料剪切位移-剪应力曲线

Fig.6 Curves of shear displacement vs. shear stress of core wall materials

4 模型应用

4.1 如美高心墙坝简介

如美水电站地处澜沧江河段属西藏昌都地区芒康县,电站控制流域面积7.94万km²,多年平均流量为648 m³/s,多年平均径流量为206亿m³,采用堤坝式开发,初拟坝型为心墙堆石坝,坝高为315 m。考虑地形影响的坝体三维网格图如图7所示,如美心墙坝共有5个分区,中间为砾石土心墙料,在心墙与堆石料之间设置一层接触黏土,用于吸收心墙与反滤料错动引起的变形。

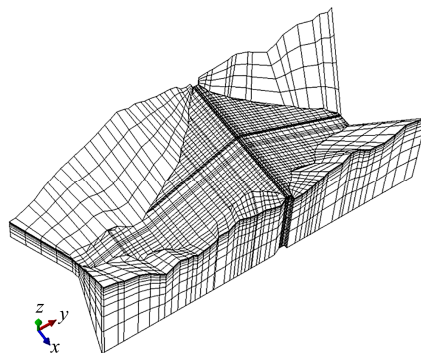
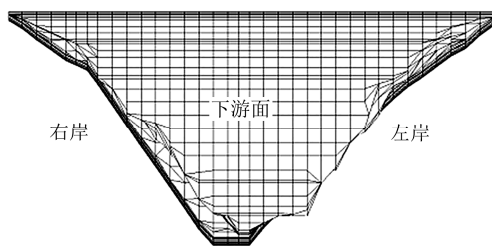


图7 坝体三维网格示意图

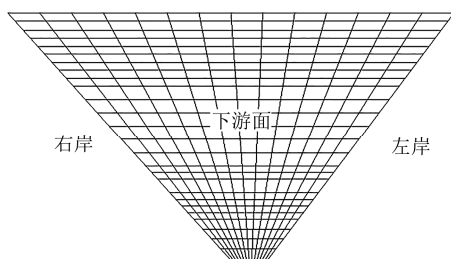
Fig.7 3D mesh of Rumei rockfill dam

4.2 岸坡-坝料接触界面处理

考虑到按实际岸坡地形处理岸坡与坝料的接触,由于岸坡表面坑洼不平,高低起伏,在一定程度上会阻碍或者加剧坝料沿基岩面的滑移错动,这样很难定性地反映坝料与岸坡的接触特性,也与具体的施工要求不符,因此,在有限元建模的时候需要对岸坡进行简化处理,在基本反映坝料与岸坡接触特性条件下,处理过程如图8所示。图9为处理



(a) 如美心墙坝全地形坝体断面示意图



(b) 简化处理的坝体断面示意图

图8 如美心墙坝岸坡的处理
Fig.8 Simplification of slope of Rumei dam

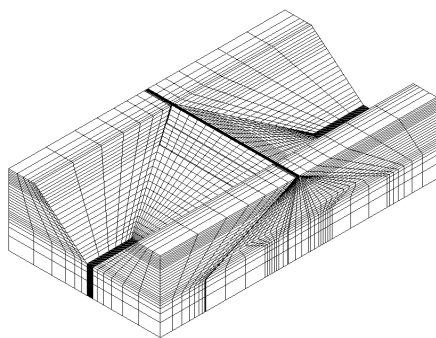


图9 处理后的三维模型
Fig.9 3D model after treatment

后的模型三维视图,在进行三维计算时在坝料与基岩之间设置接触面,考虑岸坡-坝料界面颗粒剪切滑移影响。

4.3 模型参数及计算工况说明

由于在接触面模型中考虑孔隙水压力消散影响,会使接触面模型变得复杂,在程序中难以实现,这里不考虑蓄水情况,仅分析填筑过程中心墙坝变形规律。在进行堆石坝三维计算时,各分区坝料采用广义塑性模型^[32]计算变形,填筑过程共分 35 级。在坝体建模时在岸坡与坝料之间(即坝体底部)预留一层接触面单元,接触面模型参数为第 3 节堆石料和心墙土料接触面参数,三维计算时设置的接触面厚度为 1 m。

对如美堆石料试验结果分析发现,采用如下形式的剪胀方程^[33]较为适合:

$$d_g = \left[1 - \left(\frac{\eta}{M_d} \right)^\alpha \right] \exp \left(\frac{c_0}{\eta} \right) \quad (26)$$

式中: $M_d = \frac{6 \sin \psi}{3 - \sin \psi}$, $\psi = \psi_0 - \Delta \psi \lg \left(\frac{p}{p_a} \right)$, ψ_0 和 $\Delta \psi$ 为模型参数; d_g 为剪胀比; c_0 一般取很小的值,可取为 0.001。

相应的加载方向采用如下表达式:

$$d_f = \left[1 - \left(\frac{\eta}{M_f} \right)^\alpha \right] \exp \left(\frac{c_0}{\eta} \right) \quad (27)$$

式中: $M_f = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$, $\varphi = \varphi_0 - \Delta \varphi \lg \left(\frac{p}{p_a} \right)$, φ_0 和 $\Delta \varphi$ 为模型参数; d_f 为加载方向参数。

对于各分区堆石料以及高塑性黏土和心墙土料,根据 400、800、1 200、2 000、3 200 kPa 围压下三轴试验的峰值强度和体变曲线,并采用 IGA 免疫算法^[34],最终确定的坝料广义塑性模型参数见表 2。这里给出一个分区堆石料和心墙土料三轴试验预测与试验对比结果,如图 10、11 所示。

4.4 计算结果

图 12 给出了采用接触面模型以后的坝体沉降以及水平位移云图,符合坝体一般的变形规律。图

表2 广义塑性模型参数

Table 2 Parameters of generalized plasticity model

材料	G_0	ν	α	ψ_0	$\Delta \psi$	φ_0	$\Delta \varphi$	β	γ	H_0	m
堆石 I	531	0.2	3.2	52.6	7.2	61.0	11.1	0.84	1.01	1 423	0.365
堆石 II	503	0.2	3.2	52.1	6.8	60.6	11.4	0.84	1.18	843	0.409
过渡料	566	0.2	3.2	50.2	5.5	59.5	10.5	0.36	1.61	1 462	0.365
反滤 I 料	501	0.2	3.6	53.4	7.3	57.3	9.3	0.85	1.14	1 189	0.321
反滤 II 料	520	0.2	3.2	53.2	7.3	57.6	9.5	0.89	1.12	1 238	0.325
砾质心墙	516	0.2	1.2	43.9	5.9	43.9	5.9	0.29	1.09	1 023	0.383

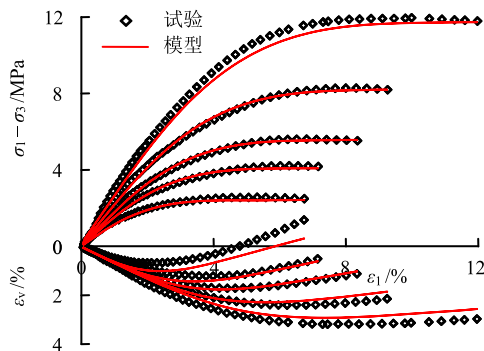


图10 堆石I区坝料试验与预测结果对比

Fig.10 Comparison of dam material test and prediction results in rockfill area I

- structure[J]. **Computers and Geotechnics**, 2002, 29(7): 547—572.
- [7] GHIONNA V, MORTARA G. An elastoplastic model for sand-structure interface behavior[J]. **Geotechnique**, 2002, 52(1): 41—50.
- [8] ZEGHAL M, EDIL T. Soil structure interaction analysis: modeling the interface[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2002, 39(3): 620—628.
- [9] HU L, PU J L. Application of damage model for soil-structure interface[J]. **Computers and Geotechnics**, 2003, 30(2): 165—183.
- [10] HU L, PU J. Testing and modeling of soil-structure interface[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2004, 130(8): 851—860.
- [11] DESAI C S, MA Y. Modelling of joints and interfaces using the disturbed-state concept[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1992, 16(9): 623—653.
- [12] LASHKARI A. A plasticity model for sand-structure interfaces[J]. **Journal of Central South University**, 2012, 19(4): 1098—1108.
- [13] LASHKARI A. A critical state model for saturated and unsaturated interfaces[J]. **Scientia Iranica**, 2012, 19(5): 1147—1156.
- [14] LIU H, SONG E, LING H I. Constitutive modeling of soil-structure interface through the concept of critical state soil mechanics[J]. **Mechanics Research Communications**, 2006, 33(4): 515—531.
- [15] LIU J, ZOU D, KONG X. A three-dimensional state-dependent model of soil-structure interface for monotonic and cyclic loadings[J]. **Computers and Geotechnics**, 2014, 61: 166—177.
- [16] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面统一本构模型及试验验证[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1175—1179.
- ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Unified modeling of soil-structure interface and its test confirmation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(10): 1175—1179.
- [17] JAN Y Y. A critical state plasticity model for granular soils[D]. West Lafayette: Purdue University, 1997.
- [18] 胡黎明, 濮家骝, 王刚. 接触面损伤模型应用于三维有限元分析[J]. 水利学报, 2002, 47(3): 44—49.
- HU Li-ming, PU Jia-liu, WANG Gang. Application of damage interface model for 3-D FEM analysis[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2002, 47(3): 44—49.
- [19] 张嘎, 张建民. 接触面弹塑性损伤模型在面板堆石坝应力变形分析中的应用[J]. 水力发电学报, 2005, 24(4): 5—10.
- ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Application of elastoplasticity damage interface model in stress-strain analysis of CFRD[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2005, 24(4): 5—10.
- [20] 刘京茂, 孔宪京, 邹德高. 接触面模型对面板与垫层间接触变形及面板应力的影响[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 700—710.
- LIU Jing-mao, KONG Xian-jing, ZOU De-gao. Effects of interface models on deformation of interface between slab and cushion layer and slab stress of concrete faced rock fill dam[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(4): 700—710.
- [21] 魏匡民, 陈生水, 李国英, 等. 陡峻河谷高面板坝坝体与坝基接触效应研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 1001—1010.
- WEI Kuang-min, CHEN Sheng-shui, LI Guo-ying, et al. Influence of contact effect between dam body and dam foundation on behaviors of high CFRDs built in steep valleys[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(9): 1001—1010.
- [22] 孙海忠, 黄茂松. 考虑颗粒破碎的粗粒土临界状态弹塑性本构模型[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1284—1290.
- SUN Hai-zhong, HUANG Mao-song. Critical state elasto-plastic model for coarse granular aggregates incorporating particle breakage[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(8): 1284—1290.
- [23] PIETRUSZCZAK S. Modeling of sand behavior under earthquake excitation[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics**, 1987, 11(2): 221—240.
- [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.
- [25] SHAHROUR I, REZAIE F. An elastoplastic constitutive relation for the soil-structure interface under cyclic loading[J]. **Computers and Geotechnics**, 1997, 21(1): 21—39.

- [26] ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Unified modeling of monotonic and cyclic behavior of interface between structure and gravelly soil[J]. **Soils and Foundations**, 2008, 48(2): 231—245.
- [27] LI X S, DAFALIAS Y F. Dilatancy for cohesionless soils[J]. **Geotechnique**, 2000, 50(4): 449—460.
- [28] UESUGI M, KISHIDA H. Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel[J]. **Soils and Foundations**, 1986, 26(4): 139—149.
- [29] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面单调力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 21—25.
ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Experimental study on monotonic behavior of interface between soil and structure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(1): 21—25.
- [30] 冯大阔. 粗粒土与结构接触面三维本构规律、机理与模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
FENG Da-kuo. Three-dimensional constitutive laws, mechanism and model of gravel-structure interfaces[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [31] 胡黎明, 濮家骝. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 431—435.
HU Li-ming, PU Jia-liu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(4): 431—435.
- [32] 卞士海, 李国英, 魏匡民, 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.
- [33] 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.
- [34] 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.

上接第 2378 页

- [14] 高大水, 郭春茂. 地质力学模型试验在高边坡研究中的应用[J]. 长江科学院院报, 1992, 9(3): 65—71.
GAO Da-shui, GUO Chun-mao. Application of geo-mechanical model tests to the study of high slopes[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 1992, 9(3): 65—71.
- [15] 杨金旺, 陈媛, 张林, 等. 基于地质力学模型试验综合法的顺层岩质高边坡稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 131—140.
YANG Jin-wang, CHEN Yuan, ZHANG Lin, et al. Stability of high bedding slope of rock based on comprehensive geo-mechanical model test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(1): 131—140.
- [16] 郑惠峰, 吴关叶, 徐建荣. 基于块体单元法的白鹤滩左岸边坡稳定性分析[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(11): 71—75.
ZHENG Hui-feng, WU Guan-ye, XU Jian-rong. Stability analysis of the left slope of Baihetan hydropower station based on block element method[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2014, 31(11): 71—75.