

考虑各向异性影响的冻土修正线性黏结接触模型开发及应用

张 革^{1,2}, 曹 玲^{1,2}, 王成汤³

(1. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002;
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 针对冻土的各向异性特性, 基于线性黏结接触模型, 建立了能够反映冻土各向异性特性的修正线性黏结接触模型, 并通过 C++语言生成供颗粒流程序 PFC^{3D} 调用的离散元本构子程序 DLL。首先对单一接触进行了拉伸、直接剪切测试, 通过对比数值与理论结果, 验证了考虑各向异性影响的冻土修正线性黏结接触模型的正确性。此外, 模拟了不同温度条件下的冻土三轴压缩试验, 并与试验得到的应力-应变曲线进行对比, 结果表明, 所提出的修正线性黏结接触模型对冻土具有较好的适用性。基于标定后的模型细观参数, 开展了一系列的三轴压缩离散元数值模拟, 利用模拟结果探讨了虚拟弱面法向倾角对冻土的应力-应变曲线特征、强度及抗剪强度指标的影响, 并分析了有效配位数、细观组构量的演化规律。研究结果可为冻土各向异性宏-细观力学特性提供数值基础。

关 键 词: 冻土; 颗粒离散元; 修正线性黏结模型; 二次开发; 各向异性

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2023) 增刊-0645-10

Development and application of modified linear bond contact model of frozen soil considering anisotropy

ZHANG Ge^{1,2}, CAO Ling^{1,2}, WANG Cheng-tang³

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;
2. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;
3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Aiming at the anisotropic characteristics of frozen soil, this paper established a modified linear bond contact model that can reflect the anisotropic characteristics of frozen soil based on the linear bond contact model, and generated a discrete element constitutive subroutine (DLL) for particle flow program (PFC^{3D}) calls through C++. Firstly, tensile and shear stimulations were carried out on a single contact. By comparing numerical and theoretical results, the calculation accuracy of the modified linear bond contact model for frozen soil considering orthotropic was verified. In addition, the triaxial compression tests of frozen soil at different temperatures were simulated and compared with the stress-strain curves obtained from the tests. The results show that the proposed modified linear bond contact model has good applicability to frozen soil. Based on the calibrated meso-parameters of the model, a series of triaxial compression discrete element numerical simulations was carried out. Using the simulation results, the influences of the inclination of the virtual weak surface on the stress-strain curve characteristics, strength and shear strength indexes of frozen soil were discussed, and the evolution laws of effective coordination number and meso-fabric quantity were analyzed. The research results can provide a basis for using numerical methods to study the orthotropic macro meso-mechanical properties of frozen soil.

Keywords: frozen soil; particle discrete element; modified linear bonding model; secondary development; anisotropy

1 引 言

冻土是由土颗粒、冰包裹体、孔隙未冻水、气

体组成的四相混合体系^[1]。多年冻土在我国分布广泛, 约占全国国土面积的 21.5%。随着西部大开发建设计划、十三五规划及“一带一路”倡议的实施,

收稿日期: 2022-07-13

录用日期: 2022-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 42207222); 国家重点研发计划 (No. 2017YFC1501304)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42207222) and the Key R&D Program of China (2017YFC1501304).

第一作者简介: 张革, 男, 1991 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土本构模型及数值模拟方面的研究。E-mail: zhangge@ctgu.edu.cn

通讯作者: 王成汤, 男, 1992 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事岩土力学与工程方面的研究。E-mail: ctwang@whrsm.ac.cn

越来越多的工程项目,如道路、桥梁、隧道以及矿山等,在多年冻土区开展建设。此外,在采用人工冻结施工法进行地铁建设或深部矿井建设过程中同样也涉及到冻土。为保证工程项目安全、稳定的运营,开展冻土力学性质的研究十分必要。目前,国内外学者利用冻土重塑样开展了大量的室内试验,如直剪、常规三轴压缩、空心扭剪等,对冻土力学性质开展了深入的研究,建立了丰富的冻土强度准则、本构模型等理论^[2-8]。李栋伟等^[9]构建了人工冻土 BP 神经网络本构模型,利用冻土三轴试验数据对神经网络模型进行训练,并且利用构建的本构模型准确预测了人工冻土帷幕应力场和变形场。李鑫等^[10]通过引入硬化因子与损伤因子来考虑温度、应力造成的冻土材料强化与弱化,提出了考虑温度影响的冻土蠕变本构模型。Liu 等^[11]基于多孔介质理论提出了能够考虑冰水相变及固液界面的饱和冻土的弹塑性本构模型。Li 等^[12]开展了冻融循环和冲击荷载作用下冻土力学损伤演化规律,并建立了冻土的黏弹塑性本构模型。室内试验所使用的冻土重塑样认为是均匀各向同性材料,但是实际状况下土体在冻结过程中,垂直于热流方向(温度梯度方向)形成一层层冻结锋面,随着冻结温度的变化,冻结锋面也随之平行发展,从而表现出沿冻结锋面和沿热流方向上的冻土力学特性存在较大差别,使得冻土具有明显的各向异性^[13-15]。材料各向异性可看作土体结构性的一种特例,对土的变形和强度产生较大的影响,即沿着不同的方向加载时,将会产生不同的变形和强度的变化规律。目前,针对冻土各向异性方面的研究还相对较少。王正中等^[16]将冻土视为由冰层与干硬土层黏结组成的横观各向同性固体介质,根据复合材料力学理论推导出冻土各向同性面内及面外的弹性模量和泊松比,并基于 Tsai-Wu 准则,预测了横观各向同性冻土的强度。蔡海兵等^[17]开展了考虑冻土各向异性冻胀变形特征的隧道冻结期地层位移数值分析。孙星亮等^[18]基于不可逆热力学理论,通过引入能考虑冻土体积变形的塑性势函数,构建冻土弹塑性各向异性损伤本构方程,并导出各向异性损伤演化方程。

由于考虑各向异性的冻土试样制作较为复杂,且没有统一的标准可供参考,使得开展冻土各向异性力学性质的相关研究较为困难,并且常规的力学试验手段无法观察到材料内部细观力学响应过程和破坏机制,而离散元数值模拟则是非常经济、有效的辅助手段。目前,国内外学者利用离散元数值方法对岩土材料宏-细观力学特性开展了广泛的研究,

并且针对不同力学特性的岩土材料开发了各种接触模型^[19-24]。在已有的抗转动和抗扭转模型基础上^[20],蒋明镜等^[25]通过引入颗粒间吸引力以考虑范德华力和毛细力作用,建立了可以全面考虑含水率-孔隙比-吸力耦合作用的黄土接触模型。Shen 等^[26]采用离散单元法模拟两球形颗粒间水泥胶结在拉、压、剪、弯、扭和复合作用下的力学响应,建立了三维胶结接触模型的复合强度包面及三维胶结接触模型。何珣等^[22]将黏结裂缝模型的软化关系引入到 Flat-Joint 本构模型中,使颗粒间发生黏结破坏时可考虑软化效应。但目前已有的接触模型均无法考虑试样的各向异性。因此,本文在已有的黏结线性接触模型的基础上,提出了能考虑各向异性影响的修正线性黏结接触模型,并将建立的接触模型采用 C++ 编程生成可供 PFC^{3D} 软件调用的动态链接库文件(.dll),然后利用建立的接触模型开展了冻土三轴压缩离散元数值模拟,对考虑各向异性影响的冻土宏细观力学性质进行了详细分析。

2 考虑各向异性影响的修正线性黏结接触模型

2.1 线性黏结接触模型

线性黏结接触模型是由 Potyondy^[27]基于线性接触模型而提出的一种能够反映颗粒间胶结行为的接触模型,认为颗粒接触在接触的法向上能够抵抗一定的拉张作用,在接触的切向方向能够抵抗一定的剪切作用。若外力达到了接触的抗拉强度或抗剪强度,颗粒之间的接触将发生破坏,从而导致颗粒之间不再有任何接触力。在黏结线性接触模型中,颗粒间的接触力 $\mathbf{F}$ 可分解为法向接触力 F_n 和切向接触力 F_s , 表示为

$$\mathbf{F} = F_n \hat{\mathbf{n}} + F_s \hat{\mathbf{s}} \quad (1)$$

式中: $\hat{\mathbf{n}}$ 和 $\hat{\mathbf{s}}$ 分别为法向力和切向力的单位方向向量。

线性黏结接触模型的法向接触力和切向接触力按照以下公式进行计算:

$$\left. \begin{aligned} F_n(t_0 + \Delta t) &= F_n(t_0) + \Delta \delta_n k_n, F_n \leq t_F \\ F_n(t_0 + \Delta t) &= 0, F_s(t_0 + \Delta t) = 0, F_n > t_F \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} F_s(t_0 + \Delta t) &= F_s(t_0) + \Delta \delta_s k_s, F_s \leq s_F \\ F_n(t_0 + \Delta t) &= 0, F_s(t_0 + \Delta t) = 0, F_s > s_F \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: t_0 为当前时刻, $t_0 + \Delta t$ 为下一时刻; $\Delta \delta_n$ 、 $\Delta \delta_s$ 分别为法向、切向位移增量; k_n 和 k_s 分别为法向刚度、切向刚度; t_F 和 s_F 分别为接触的抗拉强度和抗

剪强度。法向力-位移、切线力-位移之间的关系如图 1 所示。

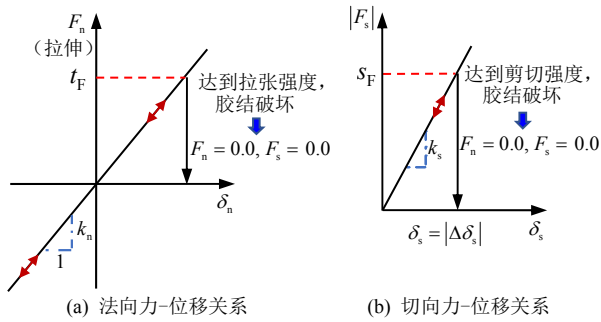


图 1 线性黏结接触模型力-位移关系

Fig.1 Force displacement relationship of linear bonded contact model

2.2 修正线性黏结接触模型

为了反映冻土的各向异性，在线性黏结接触模型的基础上，引入两个模型参数（倾角 dip 、倾向 $ddir$ ），相当于构建一个虚拟弱面。颗粒接触的法向方向会与虚拟弱面法向之间形成一定的夹角 α ，夹角的范围为 $(0^\circ, 90^\circ)$ ，在模型中引入一个临界角度 β ，若 $\alpha > \beta$ ，则认为颗粒接触法向方向平行于虚拟弱面，此时黏结线性接触模型的抗拉强度和抗剪强度会发生相应的折减，其折减系数分别记为 η_t 、 η_s ；若 $\alpha \leq \beta$ ，则认为颗粒接触法向方向近似垂直于弱面，此时黏结线性接触模型的抗拉强度和抗剪强度保持不变。为便于阐述，下面利用二维离散元模型做进一步说明，图 2 中虚拟弱面法向倾角设置为 90° ，临界角度 β 设置为 45° ，折减系数 η_t 、 η_s 均设定为 0.5，可以看出若两个颗粒形成的接触

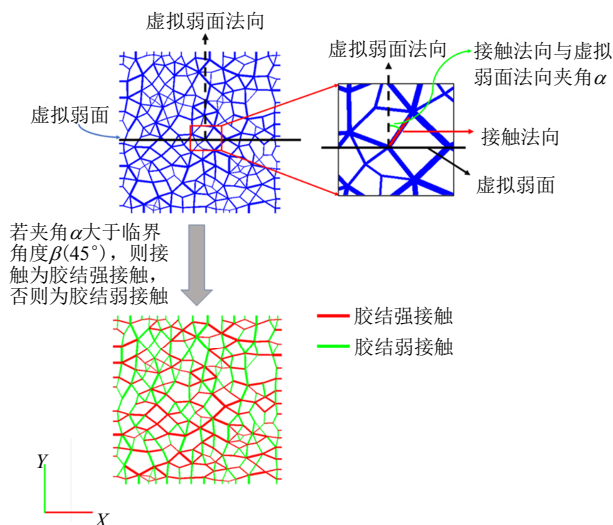


图 2 强弱胶结接触分布示意图

Fig.2 Distribution diagram of strong and weak cementation contacts

法向方向与弱面的法向之间的夹角小于设定的临界角度 β (45°)，则接触的抗剪强度将按照设定的折减系数 (0.5) 发生衰减。利用修正线性黏结接触模型可以反映冻土沿冻结锋面和沿热流方向上的力学性质存在较大差异。但是设置临界角度参数会导致接触模型的抗拉强度和抗剪强度发生突变，在实际情况中的各向异性土体颗粒接触的抗拉强度和抗剪强度是连续变化的，这种简化处理可能会对模拟结果造成一定的影响，后续工作中将完善这一局限性。

2.3 修正线性黏结接触模型开发及验证

基于离散元颗粒程序 PFC^{3D}，在软件自带的线性黏结接触模型基础上，新引入倾角 dip 、倾向 $ddir$ 、临界角度 β 、抗拉强度折减系数 η_t 以及抗剪强度折减系数 η_s 。图 3 为提出的接触模型二次开发的主要算法流程。首先，利用弹性接触模型得到平衡之后的计算模型，对存在的颗粒接触赋予修正线性黏结接触模型，比较颗粒接触的法向方向与虚拟弱面法向方向的夹角 α 与临界角度 β 的大小，赋值不同的抗拉强度、抗剪强度。然后，利用式 (2)、(3) 更新法向接触力及切向接触力，判断法向接触力与抗拉强度的大小和切向接触力与抗剪强度的大小，若法向接触力大于抗拉强度或切向接触力大于抗剪强度，则胶结发生破坏，此时法向、切向接触力均为 0。最后，应用牛顿运动定律计算颗粒在时步完成时的位置和速度，然后依据接触判断准则更

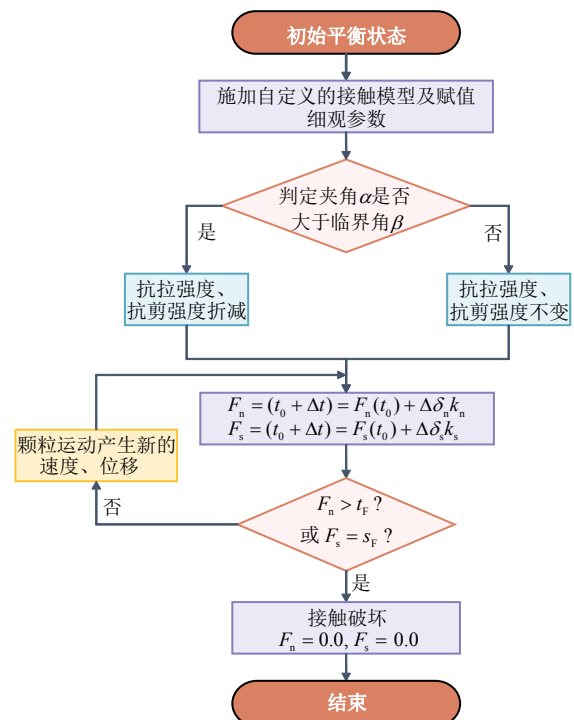


图 3 程序算法流程图

Fig.3 Development flow chart

新接触集,并开始下一步的运算。利用C++语言编程将本文提出的修正线性黏结接触模型进行二次开发,生成可供PFC^{3D}主程序调用的动态链接库文件(.dll)。

为了验证所提出的接触模型是否写入正确,需对单一接触进行拉伸与直接剪切模拟。首先生成具有无重叠量、两个半径 $R=0.05\text{ m}$ 的球形颗粒,颗粒之间产生单个接触,单个接触的接触模型参数赋值如表1所示,模拟时首先将上方颗粒固定,对下方颗粒分别施加竖直向下和沿 X 轴方向的准静态速度进行加载,记录颗粒的力及位移。本文虚拟弱面法向倾角分别设置为 $\text{dip}=0^\circ$ 和 $\text{dip}=90^\circ$ 进行模拟,临界角度设置为 $\beta=45^\circ$,两个颗粒形成的单个接触法向方向与水平面夹角为 90° ,数值模拟得到的法向力-位移曲线、切向力-位移曲线分别如图4、5所示。由图可以,当虚拟弱面法向倾角 $\text{dip}=0^\circ$ 时,此时颗粒接触的法向方向与虚拟弱面法向方向的夹

角 α 比临界角度 β 大,故接触模型的抗拉强度、抗剪强度按照输入的抗拉强度折减系数(0.5)、抗拉强度折减系数(0.5)进行折减,当拉张力为 $-5.0\times 10^3\text{ N}$ 时,达到接触抗拉强度而破坏;当剪切力分别为 $5.0\times 10^3\text{ N}$ 时,达到接触抗剪强度而破坏。当虚拟弱面法向倾角 $\text{dip}=90^\circ$ 时,当拉张力为 $1.0\times 10^4\text{ N}$ 时,达到接触抗拉强度而破坏,此时颗粒接触的法向方向与虚拟弱面法向方向的夹角 α 比临界角度 β 小,接触模型的抗拉强度、抗剪强度保持不变;当剪切力为 $-1.0\times 10^4\text{ N}$ 时,达到接触抗剪强度而破坏。为了进一步说明接触模型是否写入正确,开展了单一离散元颗粒接触的拉伸、直接剪切数值模拟,通过对比数值模拟与理论计算的力-位移关系曲线,结果(图6)表明,数值模拟结果与理论计算结果吻合较好,验证了提出的接触模型计算精度。综上所述,所提出的修正线性黏结接触模型已成功写入PFC^{3D}。

表1 单一接触模型参数
Table 1 Contact parameters of single contact model

法向刚度 k_n /($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	切向刚度 k_s /($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	抗拉强度 s_f /N	拉剪强度 t_f /N	倾向 ddir /($^\circ$)	α /($^\circ$)	倾角 dip /($^\circ$)	抗拉强度折减系数 η_t	抗剪强度折减系数 η_s	摩擦系数 μ
1.0×10^7	1.0×10^7	1.0×10^4	1.0×10^4	0	45	0	0.5	0.5	0.3
1.0×10^7	1.0×10^7	1.0×10^4	1.0×10^4	0	45	0	0.5	0.5	0.3

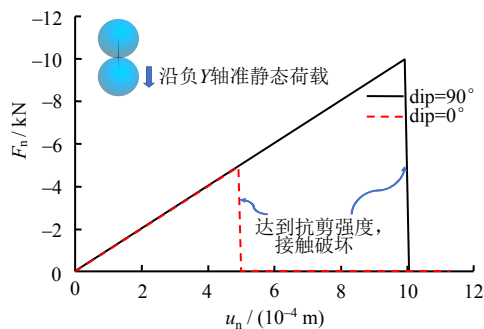


图4 不同虚拟弱面倾角单向拉伸法向力 F_n -法向位移 u_n 关系
Fig.4 Normal force F_n - normal displacement u_n relationship of uniaxial tension with different virtual weak plane dip angles

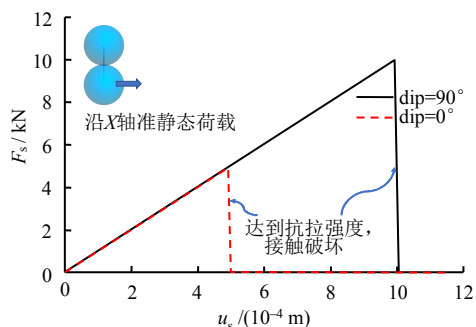
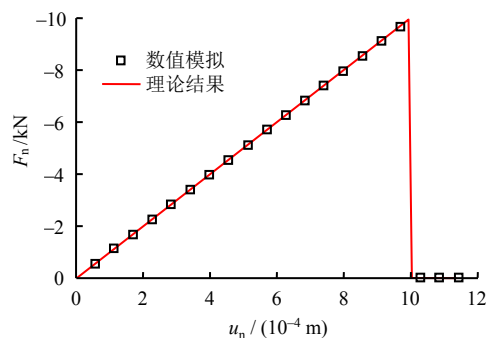
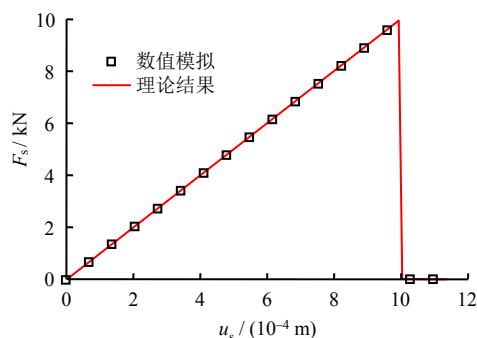


图5 不同虚拟弱面倾角直接剪切切向力 F_s -切向位移 u_s 关系
Fig.5 Direct shear tangential force F_s - tangential displacement u_s relationship of different virtual weak plane dip angles



(a) 单向拉伸力-位移关系



(b) 直接剪切力-位移关系

图6 数值模拟与理论结果对比
Fig.6 Comparison between numerical results and theoretical results

王正中等^[16]开展了不同温度条件下的冻土各向异性力学性质试验研究,研究表明在同一围压条件下,冻土在等温面(各向同性面)的刚度大于温度梯度方向。由此可推断出,冻土在等温面(各向同性面)的黏结强度大于温度梯度方向的黏结强度,即温度梯度方向平行于本文提出的虚拟弱面,等温面(各向同性面)平行于为虚拟弱面法向。若颗粒接触的法向方向与虚拟弱面法向方向的夹角 α 大于临界角度 β ,说明接触的法向方向越接近平行于温度梯度方向,此时黏结线性接触模型的抗拉强度和抗剪强度会发生相应的折减。若颗粒接触的法向方向与虚拟弱面法向方向的夹角 α 小于临界角度 β ,说明接触的法向方向越接近平行于等温面,此时黏结线性接触模型的抗拉强度和抗剪强度保持不变。本文提出的接触模型可以通过设置不同的倾角、倾向,达到反映实际冻土地层的温度梯度方向和等温面力学性质不同的目的。

3 常规三轴压缩离散元数值模拟

在利用提出的修正线性黏结接触模型对冻土各向异性的宏细力学性质分析之前,首先需对离散元接触模型的细观参数进行标定,但是由于目前考虑各向异性影响的冻土试样制作较为复杂,为此首先开展了各向同性的冻土试样常规三轴压缩室内试验,利用试验结果对修正线性黏结接触模型细观参数中的法向刚度 k_n 、切向刚度 k_s 、抗拉强度 t_F 、抗剪强度 s_F 及摩擦系数 μ 进行标定;然后在此基础上,开展不同虚拟弱面倾角的常规三轴压缩离散元数值模拟,探讨考虑各向异性影响的冻土宏细观力学性质。

3.1 各向同性冻土三轴压缩试验及离散元数值模拟

首先利用能配合 CT 动态扫描的冻土三轴仪进行了围压为 0.5 MPa,不同温度(-2、-4、-6、-10 °C)条件下的冻结粉土重塑样的三轴压缩室内试验。然后利用离散元圆柱状试样模型进行了各向同性冻土三轴压缩离散元数值试验,离散元圆柱状试样模型大小为 125.0 mm(高)×61.8 mm(直径),试样总共包含 6 113 个离散元颗粒,颗粒的半径在 1.0~3.0 mm 之间,模型孔隙率设置为 0.3(图 7)。本文提出接触模型需要确定的细观参数包括法向刚度 k_n 、切向刚度 k_s 、倾向 ddir、临界角度 α 、倾角 dip、抗拉强度 t_F 、抗拉强度折减系数 η_t 、抗剪强度 s_F 、抗剪强度折减系数 η_s 以及摩擦系数 μ 。由于冻土试样认为是各向同性,抗拉强度折减系数与抗剪强度折减系数均等于 1.0,并且倾角 dip、倾向 ddir、临

界角度 β 对各向同性试样的三轴压缩模拟结果无影响,故需要标定的参数为法向刚度 k_n 、切向刚度 k_s 、抗拉强度 t_F 、抗剪强度 s_F 及摩擦系数 μ ,本文采用“试错法”^[28]来反复调试细观参数直至模拟曲线接近试验数据,最终确定离散元模拟的细观参数,图 8 为 4 个温度条件下数值试验与室内试验的应力-应变关系。图中 σ_1 为轴向应力, σ_3 为围压。由图可以看出数值模拟结果与室内试验结果吻合较好,可认为提出的修正线性黏结接触模型能很好地描述冻土力学行为,细观参数标定如表 2 所示。从图 8 中可看出,不同温度条件下冻结粉土的应力-应变曲线均为应变硬化,且随着土体温度的降低,曲线的强度逐渐增大。

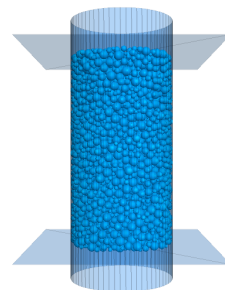


图 7 冻土三维细观离散元模型

Fig.7 Three dimensional micro discrete element model of sand stone

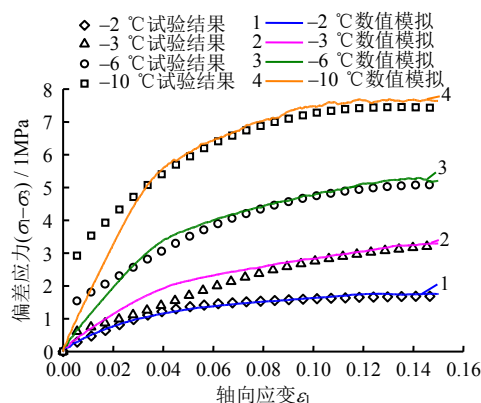


图 8 不同温度下的数值模拟与试验曲线

Fig.8 Numerical simulation and test curves at different temperatures

表 2 离散元模型细观参数的标定

Table 2 Calibration of meso-parameters of discrete element model

温度 / °C	法向刚度 k_n / (N · m ⁻¹)	法向刚度 k_n / (N · m ⁻¹)	抗拉强度 s_F / N	抗剪强度 t_F / N	摩擦系数 μ
-2	2.0×10^6	2.0×10^6	5.0×10^3	1.3×10^3	0.3
-3	3.0×10^6	3.0×10^6	1.1×10^4	3.0×10^3	0.3
-6	6.0×10^6	6.0×10^6	2.0×10^4	5.5×10^3	0.3
-10	1.2×10^7	1.2×10^7	4.0×10^4	9.0×10^3	0.3

3.2 考虑各向异性影响的三轴压缩离散元数值模拟

3.2.1 虚拟弱面倾角对宏观力学特性影响分析

为了探究各向异性对冻土宏观力学性质的影响,结合 3.1 节冻结粉土 -6°C 标定的参数,开展了相同围压(0.5 MPa)、不同虚拟弱面倾角(0° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90°)条件下的三轴压缩离散元数值模拟,临界角度 β 设置为 45° ,抗拉强度折减系数 η_t 与抗剪强度折减系数 η_s 均设置为 0.5,不同虚拟弱面倾角条件下的轴向应力-轴向应变曲线和体应变-轴向应变曲线如图 9 所示。由图 9 所知,当虚拟弱面倾角为 90° 时冻土的强度最小,为 2.5 MPa;当虚拟弱面倾角为 0° 时冻土的强度最大,为 3.3 MPa,相对于虚拟弱面倾角为 0° 冻土强度增加幅度为 32%。随着虚拟弱面倾角的增加而不断增加,即虚拟弱面的法向沿 Z 轴时,冻土三轴压缩强度最大,

应力-应变曲线由应变软化逐渐转化为应变硬化。体应变-轴向应变曲线表现为先体缩后体胀,并且随着虚拟弱面的倾角增加,体缩量峰值不断增加。这是由于在低围压条件下,随着轴向应变的增加,圆柱试样的半径不断变大,导致沿水平方向的颗粒接触处于拉张状态,沿垂直方向的颗粒接触处于压缩状态。当形成的强接触为水平方向时,接触的抗拉强度大,冻土三轴压缩强度随之增大,说明沿水平方向的颗粒接触拉张破坏是应力-应变曲线发生软化的根本原因。由于土样是轴对称体,所以研究倾向 ddir 对土体宏观力学性质的影响,实质上仍是倾角 dip 对土体宏观力学性质的影响。由图 2 可知,临界角度 β 越大,土样中强接触所占的比例也越大,所以土体的强度一定是不断增加,故本文未对倾向 ddir 和临界角度 β 参数的敏感性进行详细分析。

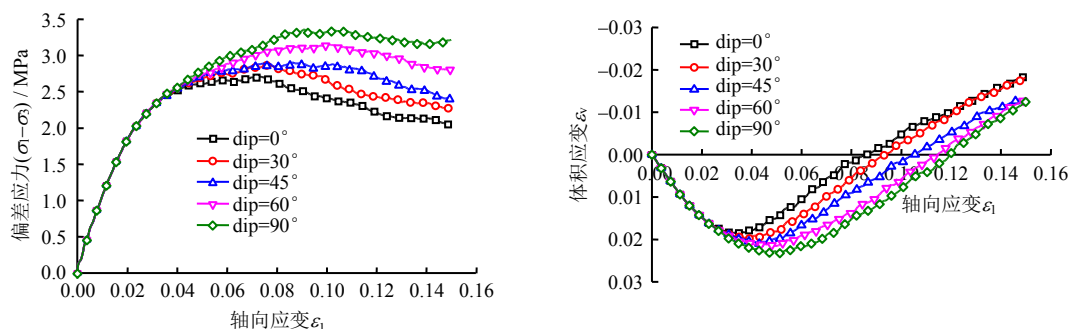


图 9 不同虚拟弱面倾角应力-应变曲线

Fig.9 Stress-strain curves of different virtual weak plane dip angles

3.2.2 抗剪强度指标分析

许多研究表明,在低围压条件下,摩尔-库仑强度准则能很好地描述冻土强度规律,为探究不同虚拟弱面倾角对冻土抗剪强度指标的影响,利用本文提出的接触模型开展不同虚拟弱面倾角(0° 、 30° 、 60° 、 90°)、不同围压(0.5、1.0、2.0、4.0 MPa)条件下的三轴压缩离散元数值模拟,图 10 为模拟得到的应力-应变曲线,可看出随着围压的增加,冻土强度不断增加,而且应力-应变曲线逐渐由应变软化变为应变硬化。这是由于在低围压条件下,荷载对结构的弱化作用起主导作用。随着围压的增加,颗粒接触拉张破坏得到抑制,颗粒之间的结构强度作用起主导作用,所以应力-应变曲线逐渐转变为应变硬化。根据摩尔-库仑理论,绘制出不同弱面倾角的冻土抗剪强度指标如表 3 所示,结果表明冻土的摩擦角随弱面倾角改变不明显,黏聚力随着虚拟弱面倾角增加而减小。当虚拟弱面倾角为 90° 时,黏聚力

最小,为 1.93 MPa;当虚拟弱面倾角为 0° 时,黏聚力最大,为 2.81 MPa,相对于虚拟弱面倾角为 90° 冻土黏聚力增加幅度约为 45%。结合 3.1 节的数值模拟结果可知,随着轴向应变的增加,圆柱试样的半径不断变大,导致沿水平方向的颗粒接触处于拉张状态,随着虚拟弱面倾角增加,水平方向接触的抗拉强度逐渐增加,从而试样的强度得到逐渐提高,说明各向异性冻土黏聚力与颗粒之间的抗拉强度紧密相关。

3.2.3 虚拟弱面倾角对细观特性影响分析

有效配位数描述离散元颗粒的平均接触数,与颗粒材料内部结构的稳定性直接相关,其表达式为

$$C_n = \frac{2N_c - N_{b1}}{N_b - N_{b1} - N_{b0}} \quad (4)$$

式中: C_n 为有效配位数; N_c 、 N_b 分别为模型体系的接触数和颗粒数; N_{b0} 、 N_{b1} 分别为无接触和仅有一个接触的颗粒数。

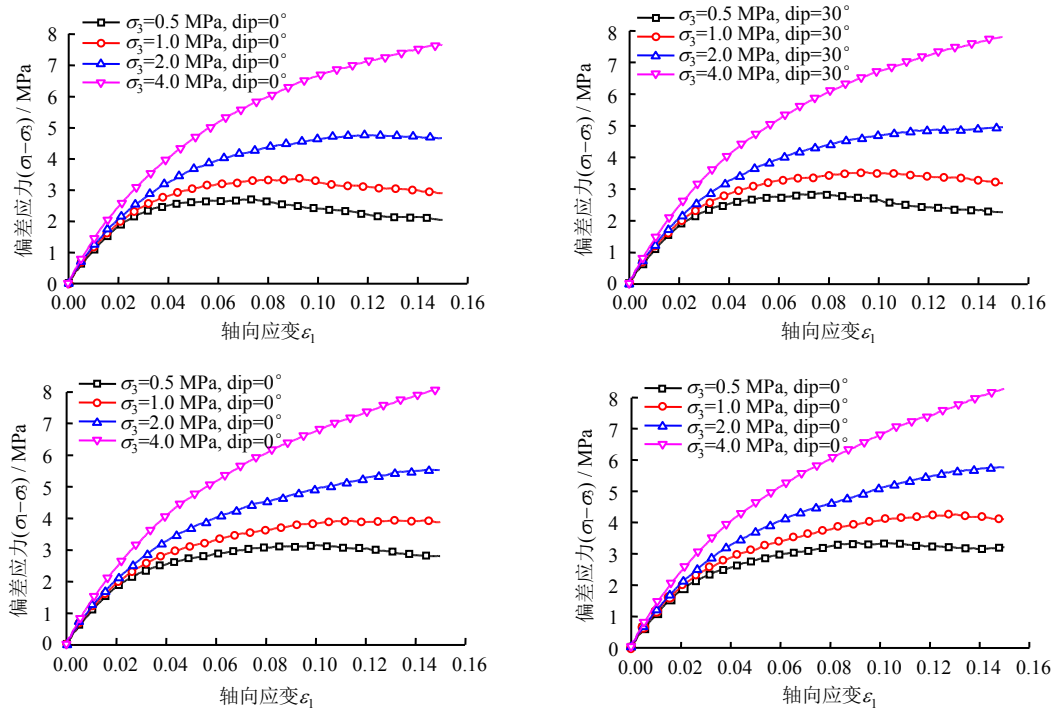


图 10 不同围压、虚拟弱面倾角的应力-应变曲线

Fig.10 Stress-strain curves of different confining pressures and virtual weak surface dip angles

表 3 不同虚拟弱面倾角抗剪强度指标

Table 3 Shear strength indexes of different virtual weak plane dip angles

弱面倾角 /(°)	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /MPa
0	54.69	2.81
30	54.85	2.58
60	54.38	2.11
90	54.21	1.93

图 11 为不同虚拟弱面倾角的有效配位数演化规律。由图 11 可知,有效配位数随轴向应变增加而迅速减小,然后趋于稳定状态;随着弱面倾角的增加,有效配位数的减小的速率更快。可认为在低围压条件下,随着虚拟弱面倾角的增加,颗粒接触拉张破坏越困难,相同轴向位移条件下,颗粒之间的相互作用更加紧密,所以有效配位数越大,孔隙结构变化较缓慢。

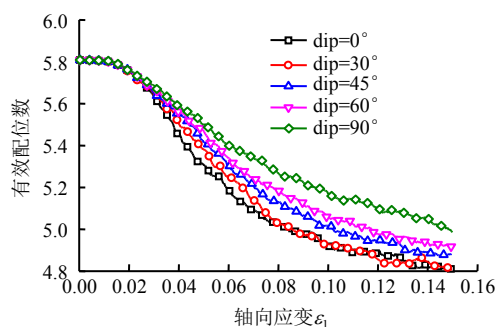


图 11 有效配位数演化曲线

Fig.11 Evolution curves of effective coordination number

为了研究颗粒接触法向的演化规律,利用文献[29]中定义颗粒的接触法向系数 COC (contact orientation coefficient),其表达式为

$$\text{COC} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\sin \theta_i| \quad (5)$$

式中: N 为颗粒接触数; θ_i 为颗粒接触法向与水平向的夹角。图 12 为不同虚拟弱面倾角的试样接触法向系数 COC 在加载过程中的演化过程,随着轴向应变的增加,出现先下降后上升,最后趋于稳定,这是由于虚拟弱面倾角越大,沿水平向颗粒接触抗拉强度越大,导致颗粒接触的法向方向逐渐向加载方向倾斜。

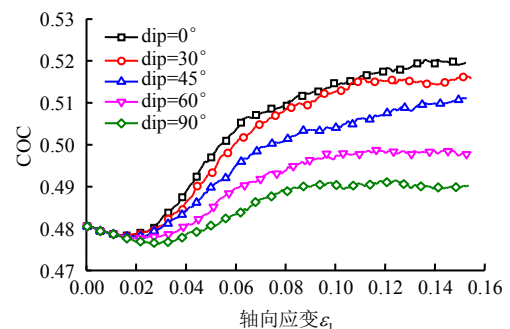


图 12 不同虚拟弱面倾角下的 COC 演化过程

Fig.12 COC evolution process under different virtual weak surface dip angles

组构各向异性 (fabric anisotropy, 简称 FA) 是

分析颗粒材料各向异性力学特性的关注焦点。离散元数值模拟能够实时地获取加载过程中颗粒运动过程,并且提取出试样细观组构参数的演化过程,从而分析组构各向异性的演化规律。本文采用 Satake^[30]和 Oda^[31]提出的组构张量对冻土组构各向异性进行分析,其数学表达式为

$$\Phi_{ij} = \frac{1}{N_c} \sum_{c=1}^{N_c} n_i^c n_j^c \quad (6)$$

式中: Φ_{ij} 为颗粒体系的组构张量; n_i^c 、 n_j^c 分别为第 c 个颗粒接触法线方向的单位矢量 $\mathbf{n}$ 的第 i 、 j 个分量; N_c 为离散元模型体系的接触总数。组构张量偏张量 Φ'_{ij} 的第二不变量可以表征颗粒体系接触法向的各向异性,用等效各向异性系数 A 计算如下^[32]:

$$A = \sqrt{\frac{3}{2} \Phi'_{ij} \Phi'_{ij}} = \sqrt{3J_2^\Phi} \quad (7)$$

式中: Φ'_{ij} 为组构张量 Φ_{ij} 偏张量; J_2^Φ 为偏张量 Φ'_{ij} 的第二不变量。

等效各向异性系数 A 越大,说明材料力学各向异性越强。当颗粒材料为各向同性时,颗粒接触方向在空间上近似于均匀分布,此时等效各向异性系数 $A=0$;当颗粒材料为完全各向异性时,颗粒接触方向近似于集中于某一个方向,此时等效各向异性系数 $A=+\infty$ 。图 13 为不同虚拟弱面倾角的等效各向异性系数在加载过程中的演化过程。由图 13 可看出,不同虚拟弱面倾角的初始等效各向异性系数基本保持一致,说明虚拟弱面倾角对颗粒体系接触法向方向分布不产生影响。不同虚拟弱面倾角的接触法向的等效各向异性系数演化规律大致相当,随着轴向应变的增加,呈现出先减小后增加,然后趋于稳定。这是因为在加载初期,偏应力导致的接触拉张破坏、剪切破坏较少,但是试样的平均主应力增加,所以此阶段相当于固结压力增加,颗粒的法向

接触各向异性减弱。随着加载的进行,轴向荷载不断增加,导致体系出现张拉破坏,竖向的颗粒接触逐渐增加,水平向颗粒接触减少,表现出强烈的接触法向各向异性,待轴向应变进一步增加,试样竖向应力趋于稳定,竖向颗粒接触增加接近饱和,此时接触法向各向异性趋于稳定。随着虚拟弱面倾角的增加,同一轴向位移条件下的接触法向各向异性不断下降,这是因为随着虚拟弱面倾角的增加,颗粒接触拉张破坏越困难,相同轴向位移条件下,水平向接触拉张破坏的数目越少,接触法向各向异性越弱。

4 结 论

研究成果可为实际寒区工程数值离散元模拟、冻土各向异性宏-细观力学性质分析提供数值基础。同时,天然土层在重力沉积作用下通常具有明显的初始各向异性,对土体的力学性质具有较大的影响。当沿冻结锋面和沿热流方向上的冻土力学特性表现出明显差异,或天然土沉积过程中导致的初始各向异性,可利用本文提出的修正黏结接触模型研究其宏细观力学性质。基于颗粒离散元中的线性黏结接触模型,通过引入虚拟弱面的概念,提出了能够反映冻土的各向异性特性的离散元接触模型。利用提出的修正线性黏结接触模型,开展了一系列的冻土三轴压缩离散元数值模拟,探究了三轴应力路径下冻土的宏细观力学特性。主要结论如下:

(1) 通过对单一接触的拉伸、剪切的数值计算与理论分析结果的对比,以及三轴压缩离散元数值计算与试验结果的对比,验证了文中所提出的修正线性黏结接触模型的计算精度与适用性。

(2) 随着虚拟弱面倾角的增加,冻土应力-应变曲线由应变软化型向应变硬化型转化,冻土强度不断增加;冻土的内摩擦角随弱面倾角改变不明显,黏聚力随着弱面倾角增加而增加。

(3) 冻土三轴压缩模拟过程中,有效配位数随轴向应变增加而迅速减小,然后趋于稳定状态;随着弱面倾角的增加,有效配位数的减小速率愈快;随着轴向应变的增加,接触法的向等效各向异性系数表现为先下降后上升,最后趋于稳定的规律。

参 考 文 献

- [1] TSYTOVICH N A. The mechanics of frozen ground[M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [2] 张雅琴, 杨平, 江汪洋, 等. 粉质黏土冻土三轴强度及本构模型研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(增刊 1):

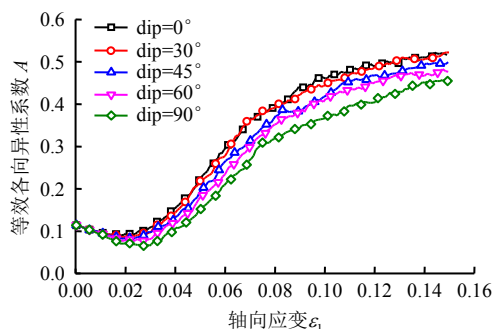


图 13 不同虚拟弱面倾角的等效各向异性系数演化过程
Fig.13 Evolution process of equivalent anisotropy coefficient under different virtual weak surface dip angles

- 8-15.
ZHANG Ya-qin, YANG Ping, JIANG Wang-yang, et al. Study on triaxial strength and constitutive model of frozen silty clay[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2019, 52(Suppl.1): 8-15.
- [3] 孙凯, 陈正林, 陈剑, 等. 基于分数阶导数的冻土蠕变本构模型[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(1): 19-25.
SUN Kai, CHEN Zheng-lin, CHEN Jian, et al. A creep constitutive model for frozen soil based on fractional derivative[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2018, 14(1): 19-25.
- [4] 杨高升, 白冰, 姚晓亮. 高含冰量冻土路基融化固结规律研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 1010-1018.
YANG Gao-sheng, BAI Bing, YAO Xiao-liang. Study of thawing and consolidation law of ice-rich embankment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(3): 1010-1018.
- [5] 陈冠任, 陈军浩, 李栋伟, 等. 地铁长联络通道双侧冻结温度场及地表冻胀变形研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 193-198.
CHEN Guan-ren, CHEN Jun-hao, LI Dong-wei, et al. Study on bilateral freezing temperature field and surface frost heaving deformation of long connected aisle of underground railway[J]. **Coal Science and Technology**, 2021, 49(4): 193-198.
- [6] 于长一, 刘爱民, 郭炳川, 等. 冻土不同拉伸试验强度差异性研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 2): 157-160.
YU Chang-yi, LIU Ai-min, GUO Bing-chuan, et al. Different tensile tests on difference of strength of frozen soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(Suppl.2): 157-160.
- [7] 张向东, 李军, 孙琦, 等. 基于弹性模量退化的冻土动力损伤特性研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 4149-4156.
ZHANG Xiang-dong, LI Jun, SUN Qi, et al. Study on dynamic damage mechanism of frozen soil based on elastic modulus degradation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(11): 4149-4156.
- [8] 申明德, 周志伟, 马巍. 冻土长期强度的衰减特征及屈服准则[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2): 437-447.
SHEN Ming-de, ZHOU Zhi-wei, MA Wei. Long-term strength attenuation characteristics and yield criterion of frozen soil[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2022, 44(2): 437-447.
- [9] 李栋伟, 陈军浩, 周艳. 复杂应力路径人工冻土三轴剪切试验及本构模型[J]. 煤炭学报, 2016, 41(增刊 2): 407-411.
LI Dong-wei, CHEN Jun-hao, ZHOU Yan. Elastic-plastic constitutive model of artificial frozen soil based on cascade-correlation artificial neural network[J]. **Journal of China Coal Society**, 2016, 41(Suppl.2): 407-411.
- [10] 李鑫, 刘恩龙, 侯丰. 考虑温度影响的冻土蠕变本构模型[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 624-631.
LI Xin, LIU En-long, HOU Feng. A creep constitutive model for frozen soils considering the influence of temperature[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(2): 624-631.
- [11] LIU E L, LAI Y M, WONG H, et al. An elastoplastic model for saturated freezing soils based on thermo-poromechanics[J]. **International Journal of Plasticity**, 2018, 107: 246-285.
- [12] LI B, ZHU Z W, NING J G, et al. Viscoelastic-plastic constitutive model with damage of frozen soil under impact loading and freeze-thaw loading[J]. **International Journal of Mechanical Sciences**, 2022, 214: 106890.
- [13] 王正中, 张长庆, 沙际德. 正交各向异性冻土与建筑物相互作用的非线性有限元分析[J]. 土木工程学报, 1999, 32(3): 45-49.
WANG Zheng-zhong, SHA Ji-de, JIANG Yun-jing. Nonlinear finite element analysis of interaction of orthotropic frozen ground and construction[J]. **China Civil Engineering Journal**, 1999, 32(3): 45-49.
- [14] 张长庆, 于志秋, 彭万巍, 等. 应变片用于冻土变形测试初探[J]. 冰川冻土, 1995, 17(增刊): 148-151.
ZHANG Chang-qing, PENG Wan-wei, et al. Primary study of measuring deformation of frozen soil with strain gauge[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 1995, 17(Suppl.): 147-150.
- [15] 王正中, 袁驷, 陈涛. 冻土横观各向同性非线性本构模型的实验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1215-1218.
WANG Zheng-zhong, YUAN Si, CHEN Tao. Study on the constitutive model of transversely isotropic frozen soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(8): 1215-1218.
- [16] 王正中, 牟声远, 牛永红, 等. 横观各向同性冻土弹性常数及强度预测[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊 1): 475-480.
WANG Zheng-zhong, MU Sheng-yuan, NIU Yong-hong, et al. Predictions of elastic constants and strength of transverse isotropic frozen soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(Suppl.1): 475-480.
- [17] 蔡海兵, 程桦, 姚直书, 等. 基于冻土正交各向异性冻

- 胀变形的隧道冻结期地层位移数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1667-1676.
- CAI Hai-bing, CHENG Hua, YAO Zhi-shu, et al. Numerical analysis of ground displacement due to orthotropic frost heave of frozen soil in freezing period of tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(8): 1667-1676.
- [18] 孙星亮, 汪稔, 胡明鉴. 冻土弹塑性各向异性损伤模型及其损伤分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 119-123.
- SUN Xing-liang, WANG Ren, HU Ming-jian. An elastoplastic anisotropic damage model for frozen soil and its damage analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(19): 119-123.
- [19] DOP A, PAC B. A bonded-particle model for rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(8): 1329-1364.
- [20] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. A novel discrete model for granular material incorporating rolling resistance[J]. **Computers & Geotechnics**, 2005, 32(5): 340-357.
- [21] JIANG M J, YU H S. Bond rolling resistance and its effect on yielding of bonded granulates by DEM analyses[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2010, 30(8): 723-761.
- [22] 何珣, 何勇, 潘绪超, 等. 基于 Flat-Joint 接触模型的黏弹性动态本构开发及其参数影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(5): 949-960.
- HE Xun, HE Yong, PAN Xu-chao, et al. Avisco-elastic dynamic constitutive model based on discrete element method and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(5): 949-960.
- [23] 杨振伟, 金爱兵, 王凯, 等. 基于颗粒流程序的黏弹塑性本构模型开发与应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2708-2715.
- YANG Zhen-wei, JIN Ai-bing, WANG Kai, et al. Development and application of a visco-elastoplastic constitutive model in particle flow code[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(9): 2708-2715.
- [24] 王涛, 吕庆, 李杨, 等. 颗粒离散元方法中接触模型的开发[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 2): 4040-4045.
- WANG Tao, LU Qing, LI Yang, et al. Development of contact model in particle discrete element method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Suppl.2): 4040-4045.
- [25] 蒋明镜, 孙若晗, 李涛, 等. 一个非饱和结构性黄土三维胶结接触模型[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 1): 213-216.
- JIANG Ming-jing, SUN Ruo-han, LI Tao, et al. A three-dimensional cementation contact model for unsaturated structural loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(Suppl.1): 213-216.
- [26] SHEN Z F, JIANG M J, WAN R. Numerical study of inter-particle bond failure by 3D discrete element method[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2016, 40(4): 523-545.
- [27] POTYONDY D O. A Flat-jointed bonded-particle material for hard rock[Z]. Chicago: American Rock Mechanics Association, 2012.
- [28] 刘云贺, 王琦, 宁致远, 等. 考虑损伤的平行黏结接触模型开发及其参数影响分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(3): 615-624.
- LIU Yun-he, WANG Qi, NING Zhi-yuan, et al. Development of a linear parallel bond model considering damage and parameter influence analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(3): 615-624.
- [29] 马刚, 井向阳, 胡超, 等. 等应力比加载路径下堆石料力学特性的细观数值分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(3): 209-218.
- MA Gang, JING Xiang-yang, HU Chao, et al. Meso-scale numerical analysis on mechanical properties of rockfill under loading path of constant stress ratio[J]. **Journal of Tianjin University (Science and Technology)**, 2015, 48(3): 209-218.
- [30] SATAKE M. The role of the characteristic line in static soil behavior[C]//IUTAM Symposium on Deformation and Failure of Granular Materials. Delft: A A Balkema, 1982: 63-68.
- [31] ODA M. Fabric tensor for discontinuous geological materials[J]. **Soils and Foundations**, 1982, 22(4): 96-108.
- [32] 杨舒涵, 周伟, 马刚, 等. 粒间摩擦对岩土颗粒材料三维力学行为的影响机制[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1885-1893.
- YANG Shu-han, ZHOU Wei, MA Gang, et al. Mechanism of inter-particle friction effect on 3D mechanical response of granular materials[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(10): 1885-1893.