

正融碎屑冰冻体剪切强度劣化机理数值模拟研究

孟秋杰¹, 宋宜祥¹, 黄 达^{1,2}, 马文著³, 钟 助⁴

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710064; 3. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 4. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 冰川碎屑冰冻体的冰水赋存状态对温度的变化非常敏感。近年受到气候变暖影响, 由碎屑冰冻升温融化而引发的冰崩灾害被广泛报道。为了研究升温条件下碎屑冰冻体的抗剪强度劣化行为, 提出了正融碎屑冰冻体的有限-离散元数值模型 (F-DEM)。模型将碎屑冰冻体概化为冻土、碎石实体单元以及黏聚力单元, 将根据试验所得的碎屑冰冻体抗剪强度升温劣化描述为黏聚力单元的黏结强度的升温劣化过程。首先, 在冻土内预置使用“牵引-分离”准则的黏聚力单元来代表孔隙冰。然后, 在 Abaqus 软件中使用用户自定义子程序 VUSDFLD, 通过温度场变量对黏聚力单元的黏结强度劣化规律进行控制。将数值结果与试验进行对比, 发现峰值抗剪强度、变形模式、破坏模式等宏观响应特征和强度劣化规律与试验结果吻合较好。对融冰率、碎石率和载荷水平等条件对碎屑冰冻体剪切力学行为的影响进行了研究, 结果表明: 当融冰率 $\leq 2\%$, 剪切破坏模式为粗糙的“锯齿状”; 随着融冰率增加 ($> 2\%$), 剪切破裂面逐渐向较为平滑的“圆弧状”转变。在冻土-碎石界面, 由于强度差异较大容易形成应力集中, 导致裂缝沿该界面形成渐进式贯通。含石率的增加会导致碎屑冰冻体抗剪强度的降低。随融冰率增加, 碎屑冰冻体抗剪强度对含石率的敏感性降低。对于维持着较高剪切负荷的碎屑冰冻体来说, 环境温度的轻微上升可能导致剪切应变的突变。恒载下的变形可分为 3 个阶段: 初始阶段、发育阶段以及快速变形阶段。在初始阶段, 剪切应变先增加后稳定; 在发育阶段, 剪切应变出现拐点; 在快速变形阶段, 剪切应变快速增加。拐点的温度随着初始剪切应力的增加而降低, 两者近似为线性关系。较高的应力水平下, 碎屑冰冻体的剪切应变对温度的改变十分敏感。未来应就模型简化方法、参数取值规律、冰水相变和尺寸效应等问题进行进一步研究, 以适应实际冰川案例中剪切强度劣化行为的模拟。

关键词: 碎屑冰冻体; 融化; 直剪试验; 剪切力学行为; 有限-离散元

中图分类号: P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)04-2051-12

Numerical study on the mechanism of shear performance degradation of thawing glacial debris

MENG Qiujie¹, SONG Yixiang¹, HUANG Da^{1,2}, MA Wenzhu³, ZHONG Zhu⁴

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 4. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

收稿日期: 2023-11-27 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 李雅楠 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1610

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42272331, 41902290, 42277187)

作者简介: 孟秋杰 (1992—), 男, 河北河间人, 博士。E-mail: 201621601006@stu.hebut.edu.cn

通讯作者: 宋宜祥 (1987—), 男, 山东泰安人, 副教授, 博士生导师。E-mail: yixiang-song@hebut.edu.cn

引用格式: 孟秋杰, 宋宜祥, 黄达, 等. 正融碎屑冰冻体剪切强度劣化机理数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2025, 50(4): 2051-2062.

MENG Qiujie, SONG Yixiang, HUANG Da, et al. Numerical study on the mechanism of shear performance degradation of thawing glacial debris[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(4): 2051-2062.



移动阅读

Abstract: The sensitivity of the ice-water transition in glacial debris to temperature rise has become a significant concern. In recent years, there has been an increase in reports of ice avalanches caused by the thawing of glacial debris, which can be attributed to the impact of global warming. To study the temperature-dependent degradation of shear strength in glacial debris, a Finite Discrete Element Model (F-DEM) was developed. This model consists of solid permafrost and gravel elements and cohesive elements, as well as cohesive elements. The strength degradation law of the glacial debris, as observed in tests, is described as a strength degradation process of the cohesive elements. Initially, cohesive elements using the “traction-separation” criterion are set in between solid elements to represent interstitial ice. Subsequently, a strength degradation law governing the degradation law is implemented through the development of the VUSDFLD subroutine in Abaqus. The strength degradation of the cohesive elements is controlled by temperature field variables. The macroscopic numerical results obtained from the simulation were compared to experimental results. The simulated shear characteristics, including peak shear strength, deformation mode, and failure mode closely matched the experimental findings. The influence of three different factors, namely the thawing rate, gravel content, and stress magnitude on shear behavior was investigated. When the thawing rate is less than or equal to 2%, the failure mode exhibits a rough “serrated” pattern; as the thawing rate increases ($> 2\%$), the shear surface gradually transitions to a smoother “circular arc” shape. The significant difference in strength at the permafrost-gravel interface can easily lead to stress concentration, resulting in cracks propagating along the interface. Increasing gravel content leads to a decrease in the shear strength of glacial debris, and the sensitivity of the shear strength to gravel content decreases with increasing thawing ratio. Under high shear loading, even a slight increase in temperature can cause sudden changes in shear strain. The deformation under constant load can be divided into three stages: the initial stage, the developmental stage, and the rapid deformation stage. In the initial stage, shear strain initially increases and then stabilizes; and during the developmental stage, there is a critical point in strain; during the rapid deformation stage, shear strain increases rapidly. The temperature of the critical point decreases with an increase in initial shear stress, and they are approximately linearly related. At higher shear stress levels, the shear strain of glacial debris is highly sensitive to temperature changes. Further studies should be conducted on model simplification, variation laws of parameters, phase transitions, and size effects to better simulate the shear strength degradation behavior under actual glaciers.

Key words: glacial debris; thawing; direct shear test; shear behavior; F-DEM

0 引 言

随着全球变暖的加剧,由碎屑冰冻体升温 and 融化引发的冰-岩崩、冰碛土滑坡等地质灾害逐渐成为影响冰冻圈中的铁路施工和水电设施安全的重要工程地质问题^[1-3]。碎屑冰冻体的介观结构有不均匀、不连续和非线性的特点^[4-5]。如,ARENSON^[5]用显微切片机将冰心样本切成数毫米的薄片并使用带偏振滤光片的透射仪观察,指出碎屑冰冻体混合了冰碛物碎屑、多晶冰、空气和液态水。冻土的定义主要取决于温度,而不考虑质地、硬结程度和含冰量,其主要指一段时间内温度低于冰点的土壤、岩石或其他表层沉积物。虽然冰川和冰盖通常被单独视为冰冻圈内的实体,但因为冰下的碎屑冰冻体符合上述冻土的定义,研究者通常认为它们也属于冻土^[6]。引入“二分性碎屑”概念^[7],可以将碎屑冰冻体中的碎屑按粒径分为细屑和粗屑。前者主要为泥质,以 2016 阿汝错冰崩事件沉积物为例,细屑为粉粒+黏土;粗屑是基岩风

化产物,主要为块石、卵石^[8]。碎屑冰冻体中空气含量相对较低而含冰率较高,力学特性主要由冻结温度决定^[2-3]。当温度较低,由于碎屑颗粒的咬合和固态冰销钉锁固作用,碎屑冰冻体强度比纯冰高,此时土坡相对稳定;当温度临近或达到熔点,碎屑冰冻体的强度劣化比多晶冰更明显^[3,9],其强度决定了冰川的稳定性。根据现有研究成果^[9-10],冻土强度主要由冰强度、冰数量以及冰在矿物颗粒表面的黏聚力三者贡献。结合直剪试验研究,HUANG 等^[9]创新性地引入了融冰率概念,即通过碎屑冰冻体中已融化的冰与初始冰体积的比来标定融化程度,并据此提出了抗剪强度劣化模型。该模型指出导致强度劣化的本质诱因是孔隙冰的融化引起冰-碎屑颗粒接触面上黏聚力的降低。根据相关试验研究成果^[4,11-12],正融冻土的强度劣化的主因是孔隙中冰水赋存状态的改变导致冰与土石颗粒之间的黏聚作用发生改变。然而,孔隙冰的融化演化过程是在微观孔隙尺度上进行的,因此现有试验在于理解这类微观、复杂的问题上面存在局限性,对

内部演化的精确描述常被忽视。

数值模拟是试验研究的有益补充,其中有限元法和有限差分法是岩土工程的常用计算方法^[13-14]。但这些方法由于网格会出现过度变形而对大变形状态下的变形细节考虑不足^[15]。此外,颗粒状的岩土材料与连续材料的物理力学性能大不相同。为了克服这些限制,学者们采用了离散元法 (DEM) 来进行岩土材料模拟,但由于 DEM 采用刚体或球体来近似岩土体微观结构,往往导致结果难以精确。有限-离散元方法 (F-DEM) 采用黏聚力单元的损伤来模拟岩土材料的破坏,兼具有限元和离散元的优点,适用于多种岩土材料的模拟研究。例如,李斌等^[16]基于 F-DEM 和物理试验研究了砂岩试样三点弯试验的断裂韧度及断裂模式,发现模拟所得结果与试验吻合良好。李彦奇等^[17]融合了离心机试验与综合考虑拉、压剪破坏的联合强度准则的 F-DEM 对软硬互层反倾岩质边坡进行试验与数值模拟分析,结果表明黏聚力单元可以较准确地模拟软硬互层反倾边坡的层间错动以及岩层弯折。刘彬玲等^[18]以红石边坡工程为实例,建立 F-DEM 模型并获得边坡失稳破坏的渐进破坏全过程。

笔者基于 HUANG 等^[9]对正融碎屑冰冻体剪切力学行为的研究成果,提出了一种结合有限-离散元法 (F-DEM) 的温度相依性强度劣化数值方法来模拟升温条件下的碎屑冰冻体强度劣化行为。在该模型中,使用 VUSDFLD 代码中的 Fortran 语言开发了自定义子程序,将子程序加入到 Abaqus 的 F-DEM 程序中,在模型中实现了控制黏聚力单元强度的温度定律。通过与 HUANG 等^[9]的试验结果进行比较,确定了微观参数并验证了模型的有效性。最后研究了碎石含量、融化程度和载荷等条件对试样剪切力学行为的影响规律。研究成果可为冰川稳定性评价提供新思路和方法。

1 基于改进 F-DEM 的强度升温劣化行为模拟

1.1 F-DEM 模型说明

有限-离散元方法 (F-DEM) 能够对材料的小变形下的应力分布以及大变形下的破坏形态进行模拟,近年来在工程领域的力学行为模拟中逐渐得到认可^[19]。模型由实体单元和黏聚力单元构成,黏聚力单元插入在实体单元中间,模拟材料基质体间的胶结和嵌裹作用。根据变形大小,计算过程可分为 2 个阶段:①当黏聚力单元未达到初始损伤时,模型处于小变形阶段,此时模型视为连续体,满足变形协调条件;②当黏聚力单元达到失效删除时的相对位移,程序在当前增量步完成后将黏聚力单元删除,并在该位置生成对应的

裂缝。实体单元保留接触本构关系。当产生的裂缝足够多后,模型进入大变形阶段。此时脱胶的实体单元可视为非刚性的“离散元模型”,单元运动由平衡力矩和作用其上的力决定,符合牛顿第二定律描述。考虑 3 个部分进行处理,分别是基体相、界面相 (黏聚力单元)、增强相 (碎石颗粒)。假设孔隙冰随机、均匀地分布在碎屑冰冻体中,在三角形“冻土实体”单元以及冻土-碎石间插入黏聚力单元 (图 1a) 来模拟孔隙冰的黏聚作用。由于碎屑冰冻体或冻土中的孔隙冰膜厚度小于 100 nm^[20-21],故对于试样截面来说可以考虑为 0 厚度。

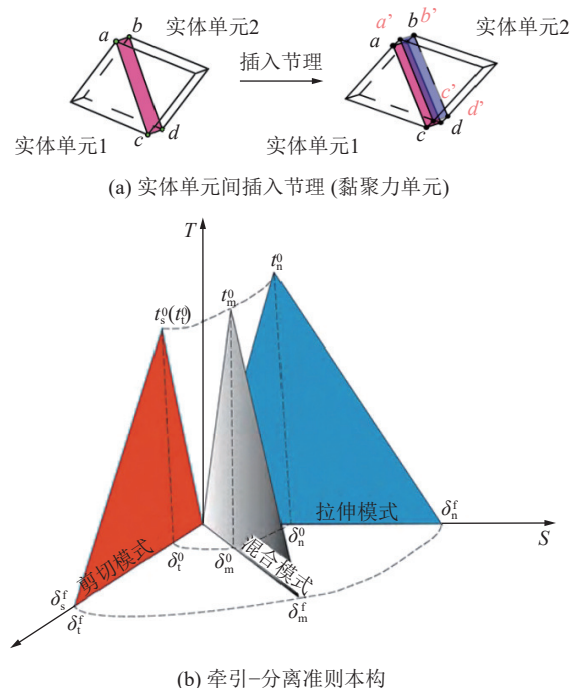


图 1 F-DEM 模型示意

Fig.1 Schematic diagram of F-DEM model

黏聚力单元的分离破坏过程采用图 1b 所示的牵引-分离准则本构,其可以描述黏聚力单元到达强度极限前的线弹性阶段以及到达强度极限后的刚度线性降低软化阶段。图 1b 中线弹性阶段的斜率表示刚度,三角形下的面积表示单元断裂时的能量释放值。该本构假定界面存在 1 个法向和 2 个切向的牵引力^[18,22], t_n^0 、 t_s^0 、 t_t^0 、 t_m^0 分别为黏聚力单元达到初始损伤时的法向、纵切向、横切向以及混合模式的牵引力, δ_n^0 、 δ_s^0 、 δ_t^0 、 δ_m^0 分别为此时各方向的相对位移, δ_n^f 、 δ_s^f 、 δ_t^f 、 δ_m^f 分别为黏聚力单元失效删除时的相对位移。

1.2 强度劣化控制方程

孔隙冰是冻土中最容易受到温度影响的成分。升温容易降低冻土中孔隙冰含量,从而降低黏聚力^[4,11-12]。同理,如图 2a 所示,碎屑冰冻体抗剪强度的升温劣化

效应的本质是碎屑颗粒表层孔隙冰的升温融化,从而引起黏聚力的降低和碎屑颗粒的分离^[9]。为了将真实碎屑冰冻体中孔隙冰的变化与数值模型中的强度参数联系起来,提出了一种基于 F-DEM 的虚拟孔隙冰融化模型(图 2b):假设冰和碎屑均匀地分布在碎屑冰冻体中,一部分冰被碎屑颗粒“占据”形成“冻土实体”单元。实体单元之间通过代表孔隙冰的黏聚力单元黏结在一起,符合双线性牵引-分离准则。在图 2b 中,孔隙冰的体积分数变化用碎屑颗粒之间的键长度较为直观地表达出来。

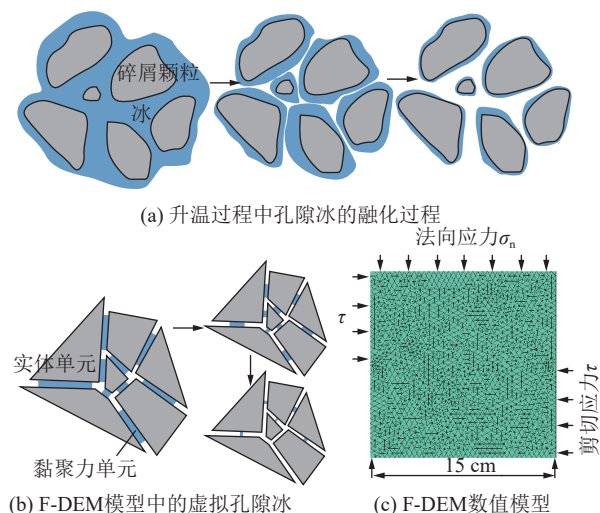


图 2 虚拟孔隙冰方法

Fig.2 Fictitious interstitial ice method

根据大量现场调查,存在于冰川底部的碎屑冰冻体的体积含冰率通常超过液限,且常达到 40%^[2]。例如,位于西格陵兰岛的 Russell 的冰下碎屑冰冻体的体积含冰率达到约 40%^[8]。为了符合现场工况,HUANG 等^[9]制作了体积含冰率为 40%(超过液限),边长 15 cm 的碎屑冰冻体试样并在升温条件下进行了直接剪切试验,其中法向应力 350 kPa 下的试验结果被用作对比校核和确定模型参数。按照该试样尺寸建立 1:1 数值模型(图 2c)。尽管将所有碎屑考虑为“碎石实体”更贴近实际工况,但考虑到本文研究对象的碎屑粒径最低达到 10^{-3} mm^[9],在直剪试验的尺度考虑全部碎屑颗粒会导致计算量过大。基于前文所述“二分化碎屑”概念,将碎屑冰冻体中粒径超过土石阈值的碎屑作为“碎石实体”,即代表冰冻体中的块石、卵石;其余部分以泥质碎屑与冰的混合物为主,将这部分混合物考虑为“冻土实体”。其中,土石阈值定义为^[23]: $D_{SRT}=0.05L_c$ 。 L_c 是土石混合体的工程特征尺度,取为剪切盒高度 ($L_c=15$ cm)。本文数值模型中碎石体积占到总体积的 2%,碎石位置随机布置。模型通过在实体单元之间插入黏聚力单元以及改变“冻土实体”单

元的弹性模量来研究孔隙冰黏聚力的升温劣化行为。编写 Python 程序对有限元模型进行前处理^[17],将 4 608 个 0 厚度四节点黏聚力单元 (COH2D4) 嵌入到 3 208 个实体单元 (CPE3, 三节点耦合平面应变三角形单元) 之间。通过 VUMAT 子程序对黏聚力单元引入摩尔-库仑强度准则^[16]。数值模型与试验的加载方式相同,所有节点厚度方向的位移被约束。

“碎石实体”单元直接采用了单轴压缩试验所得力学参数^[17],弹性模量、泊松比和密度分别为 80 GPa、0.24 和 2.43 kg/m^3 。表 1 中“冻土实体”的弹性模量和泊松比以 HUANG 等^[9]的物理试验结果作为校核指标。经多次试算,当模型所得的应力-应变曲线走势、峰值剪切强度以及破坏模式与物理试验所得结果相近时,确定为最终采用值。根据拟合结果,弹性模量 (E)、泊松比 (μ) 与融冰率 (Δv) 的关系为

$$E = -0.03\Delta v + 0.58 \quad (1)$$

$$\mu = -0.003\Delta v + 0.35 \quad (2)$$

表 1 校核后的冻土实体单元的微观参数

Table 1 Calibrated microscopic parameters of permafrost elements

融冰率/%	0	2	4	6	8	10
弹性模量 E/GPa	0.60	0.54	0.43	0.41	0.37	0.32
泊松比 μ	0.36	0.34	0.34	0.33	0.33	0.32

在定义材料时,通过定义场变量可以实现弹性模量的光滑过渡。黏聚力单元参数同样通过与试验现象的对比校核来确定(表 2)。“冻土实体”的密度取 1.7 kg/m^3 。

表 2 校核后的 F-DEM 黏聚力单元参数

Table 2 Calibrated cohesive element parameters in F-DEM

融冰率/%	0	2	4	6	8	10
抗拉强度 t_n/MPa	23.50	24.70	18.65	17.80	15.46	11.19
抗剪强度 $t_{s(t)}/\text{MPa}$	50.00	40.65	43.49	30.12	33.55	22.72
法向刚度 $E_n/(\text{kPa} \cdot \text{mm}^{-1})$	60.00	38.46	28.57	23.07	16.57	13.04
切向刚度 $E_{s(t)}/(\text{kPa} \cdot \text{mm}^{-1})$	100.00	41.60	35.71	26.32	22.73	18.52

由表 2 可知,黏聚力单元的强度参数随着融冰率 (Δv) 的增加而明显降低。图 3 为 Δv 从 0 增加到 10% 时碎屑冰冻体峰值剪切应力与微观参数的变化。从中可以看出,随 Δv 增加,碎屑冰冻体抗剪强度的演化趋势与数值模型的黏聚力单元强度下降趋势相似,这说明包含损伤系数的黏聚力单元强度劣化模型可定量表征碎屑冰冻体强度的升温劣化这一宏观力学行为:

$$\tau_p(\Delta v=0) = \xi_p \tau_p(\Delta v>0) \rightarrow t_{coh}(\Delta v=0) = \xi t_{coh}(\Delta v>0) \quad (3)$$

式中: τ_p 为碎屑冰冻体的抗剪强度, kPa; t_{coh} 为 0 厚度黏聚力单元的胶合强度, kPa; ξ_p 和 ξ 分别为宏观和微观损伤系数。基于以下假设建立强度劣化控制方程, 将微观结构的演化通过黏聚力单元的强度参数劣化来表达:

1) 强度劣化影响“冻土、碎石实体”单元之间的代表孔隙冰的黏聚力单元强度以及冻土实体单元的

力学参数, 对“碎石实体”单元没有影响。

2) 裂缝仅沿实体单元间隙传播。黏聚力单元强度的损伤因子大小取决于该黏聚力单元处温度和位移大小。

3) 根据 HUANG 等^[9]的试验, 由于碎屑冰冻体的含冰率超过液限, 故其表层融化并呈液态流下, 导致正方体试样的尺寸出现轻微减小 (在融冰率为 10% 时仍小于 2 mm)。本文忽略试样截面形状尺寸的微小变化。

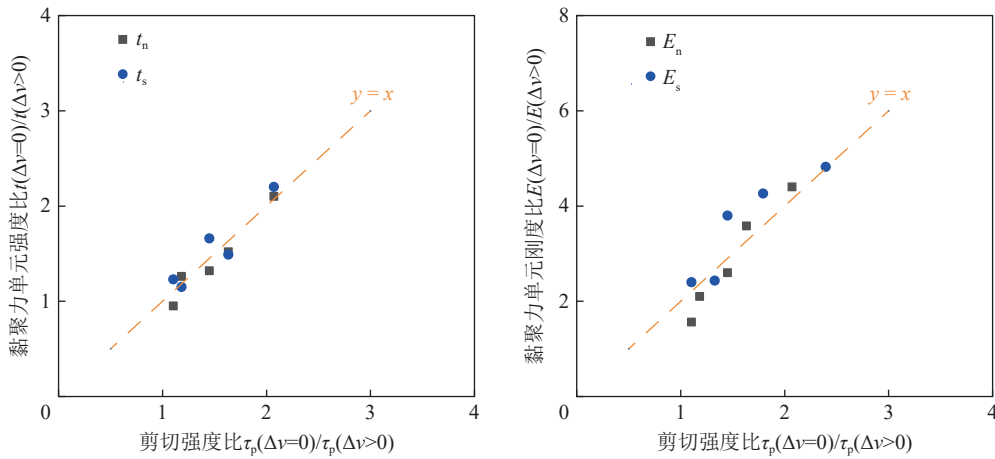


图3 碎屑冰冻体的宏、F-DEM 微观参数的比较

Fig.3 Comparison of macro parameters of subglacial debris with F-DEM micro-properties

根据 HUANG 等^[9]研究, 峰值剪切强度参数与 Δv 近似呈线性关系, 故定义损伤因子 $D_t (0 \leq D_t \leq 1)$ 与 Δv 关系为

$$D_t = a\Delta v + b \quad (4)$$

式中: a 、 b 为拟合参数。冰水动态平衡原理指出未冻水含量与温度具有单一确定性^[24-25]。根据 Anderson^[24], 冻土中液相水含量 θ_u (质量比) 与温度 T 关系符合下式:

$$\theta_u = A(-T)^B \quad (5)$$

式中: A 和 B 分别为与土本身性质有关的材料参数。故由式 (4)~式 (5), 本文将损伤因子 D_t 与温度间的关系表达为

$$D_t = a(1-T)^B + b \quad (6)$$

当 D_t 达到 1 时, 黏聚力单元被删除, 即本文忽略孔隙水的黏聚力。如此, 可以通过温度场影响损伤因子。则黏聚力单元达到初始损伤时的法向、切向胶结强度可定义为

$$\begin{aligned} t_n &= (1 - D_{t1}) t_{n0} \\ t_s &= (1 - D_{t2}) t_{s0} \\ t_t &= (1 - D_{t2}) t_{t0} \end{aligned} \quad (7)$$

对于黏聚力单元刚度:

$$\begin{aligned} E_n &= (1 - D_{t3}) E_{n0} \\ E_s &= (1 - D_{t4}) E_{s0} \\ E_t &= (1 - D_{t4}) E_{t0} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: E_n 、 E_s 、 E_t 为黏聚力单元法向和 2 个切向刚度, N/m; E_{n0} 、 E_{s0} 、 E_{t0} 为黏聚力单元法向和 2 个切向初始损伤刚度, N/m。将 HUANG 等^[9]不同温度下的剪切试验结果经式 (6) 拟合得到:

$$\begin{aligned} D_{t1} &= 0.6(1-T)^{1.4} - 0.07 \\ D_{t2} &= 0.68(1-T)^{1.8} + 0.02 \\ D_{t3} &= 0.83(1-T)^{0.22} \\ D_{t4} &= 0.85(1-T)^{0.2} + 0.01 \end{aligned} \quad (9)$$

黏聚力单元除了受到温度损伤关系式的约束以外, 也受到应力约束, 故应力和刚度同样需要乘以应力损伤因子 $D (0 \leq D \leq 1)$ 来表示黏聚力单元受力损伤过程的发展:

$$D = \frac{\delta_{mf}(\delta_{mm} - \delta_{m0})}{\delta_{mm}(\delta_{mf} - \delta_{m0})} \quad (10)$$

式中: δ_{mm} 、 δ_{m0} 、 δ_{mf} 分别为加载过程中允许的最大位移、初始损伤起始位移、完全失效位移, m。

在数值模拟中,将温度相依性准则(式(6)—式(10))通过 Fortran 语言植入 Abaqus 软件的用户子程序 VUSDFLD 中。植入前在预定义材料属性时选择材料参数与温度变量相关。VUSDFLD 激活后,软件会在每个时间增量步中调用该子程序对所有积分点进行遍历,并通过场变量(温度)更新积分点的材料输入参数。

1.3 数值验证

图 4 给出了碎屑冰冻体温度、融冰率与时间的演化关系^[9]。将模型的温度场设置为与试验条件相同,即 -0.77 、 -0.58 、 -0.47 、 -0.39 、 -0.33 $^{\circ}\text{C}$,来分别代表碎屑冰冻体被融化至不同的融冰率:2%、4%、6%、8%、10%。随后施加匀速剪切位移(应变率为 $1.1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)进行直剪试验。

图 5 为不同融冰率(Δv)下试验与模拟结果对比。模拟和试验所得应力-应变曲线形状总体相似,揭示了连续的变形模式的演化,即在初始冻结状态下(图 5a),孔隙冰黏聚力和脆性较强,模型展现出应变软化模式;随着 Δv 的增加(图 5b、图 5c),模型的变形能

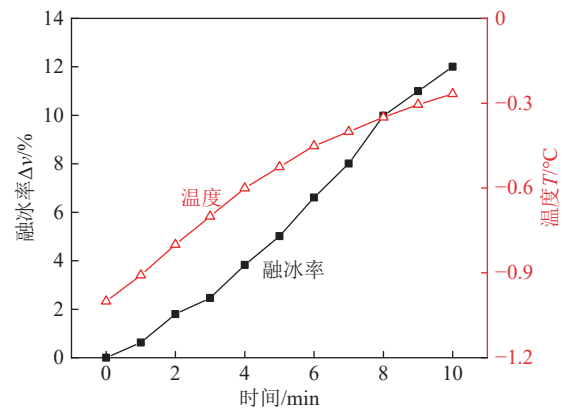


图 4 温度、融冰率与时间的关系

Fig.4 Evolutions of temperature and thawing rate under time

力逐渐增加而抗剪强度逐渐降低,曲线逐渐由应变软化变为应变硬化。如图 5a 所示,加载初期(剪切应变 $<4\%$)数值模拟应力值通常稍高。这是由于此时黏聚力单元强度较高,导致“冻土实体”单元在剪切初期呈咬合和胶合状态,即模型刚度较高。在黏聚力单元开始破坏后,数值应力-应变曲线逐渐贴近试验曲线。另外数值结果应力-应变曲线容易出现跳动,这

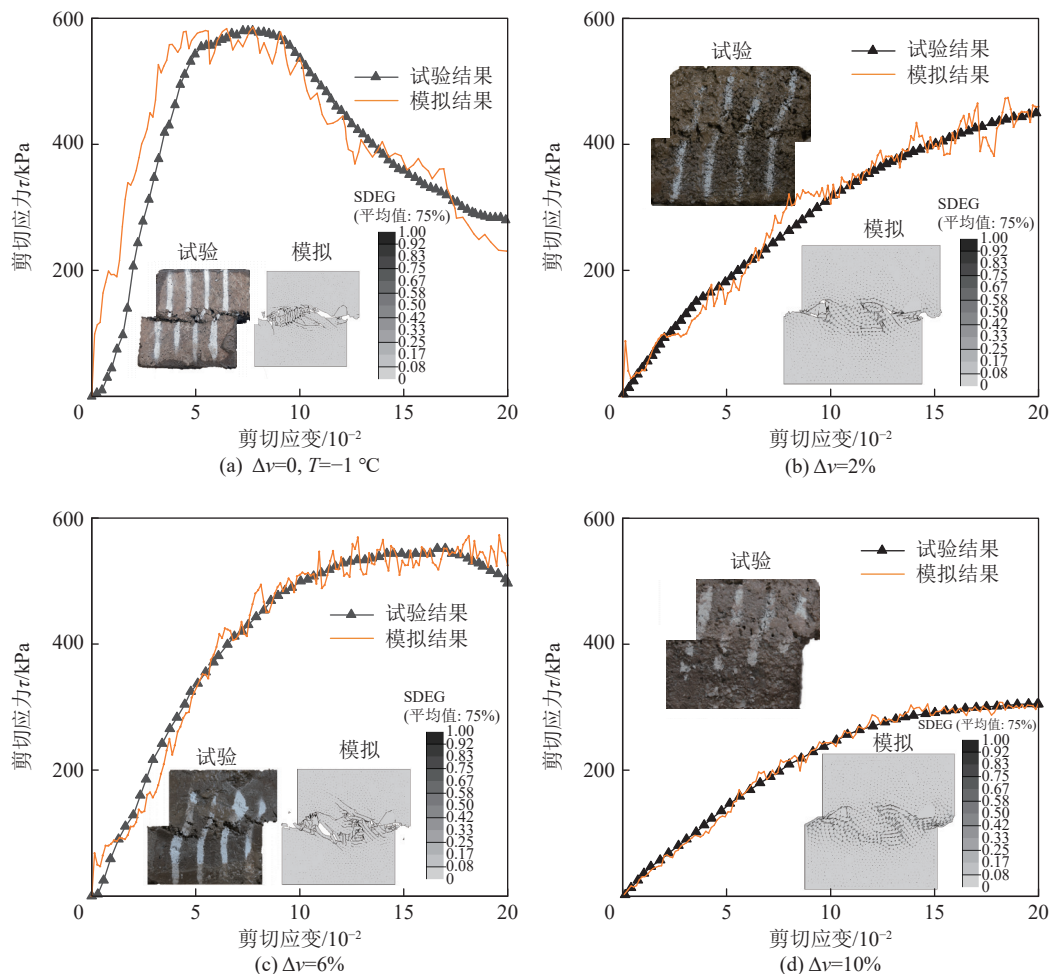


图 5 数值、试验模型的剪切力学行为比较

Fig.5 Comparison between shear behaviors of numerical and experimental specimens

是由于冻土单元使用三角形实体单元来进行模拟, 实体单元在剪切面咬合、摩擦和滚动导致应力不断累积和释放。当融冰率增加至 10%(图 5d), 黏聚力单元刚度降低, 试样能够积累的弹性应变能降低, 故曲线跳动不明显。

图 5 也对比了各融冰率下试验和模型的剪切破坏模式。其中 SDEG 值用于判断黏聚力单元是否破坏, 当数值为 0 逐渐增大到 1 代表黏聚力单元由完整逐渐到完全破坏的过程。对比各融冰率下的破坏模式, 可以发现当 $\Delta v \leq 2\%$ (图 5a、图 5b), 剪切破裂面为粗糙的“锯齿状”, 剪裂纹贯通或接近贯通。此时的剪切面上黏聚力单元大多已开胶或处于临界状态, 说明黏聚力单元上的法、切向应力达到或接近峰值强度。随着融冰率进一步增加(图 5c), 剪切面上压剪裂缝明显减少, 剪切破裂面逐渐向较为平滑的“圆弧状”转变, 说明试样延性增强, 可以通过变形吸收应变能而几乎不发生剪切破裂。此时模型黏聚力单元的黏聚强度较低, 冰晶体的销钉锁固作用丧失, 故模型的刚度较

低, 使黏聚力单元上的应力常低于破坏临界值, 开胶的数量有减少趋势, 模型脆性大大降低。当 Δv 达到 10%(图 5d), 黏聚力单元较少发生开胶破坏, 模型通过黏聚力单元各方向相对位移增加来平衡剪应力。

图 6 对比初始冻结状态和正融状态的破坏过程。当碎屑冰冻体处于初始冻结状态($-1\text{ }^{\circ}\text{C}$), 剪切应变小于 5% 时, 试样剪切破坏损伤较少, 主要吸收弹性能; 当剪切应变大于 5% 时, 试样开始破坏。当试样处于正融状态, 由于黏聚力单元强度较低、弹性储能的能力较弱, 剪切应变小于 5% 时便出现明显的压剪裂纹。另外碎屑冰冻体处于初始冻结状态时, 剪切带相对较窄, 而正融试样($\Delta v = 2\%$)的剪切带较宽。这可能是由于正融试样的黏聚力单元刚度和强度相对较低, 比较容易发生断裂。

综上, 数值模拟的应力-应变曲线、峰值剪切强度及破坏模式等宏观响应特征结果与直剪试验结果吻合较好, 所提出的数值方法可以模拟温度升高引起的强度劣化行为, 建议在层间黏聚力单元使用“牵引-分

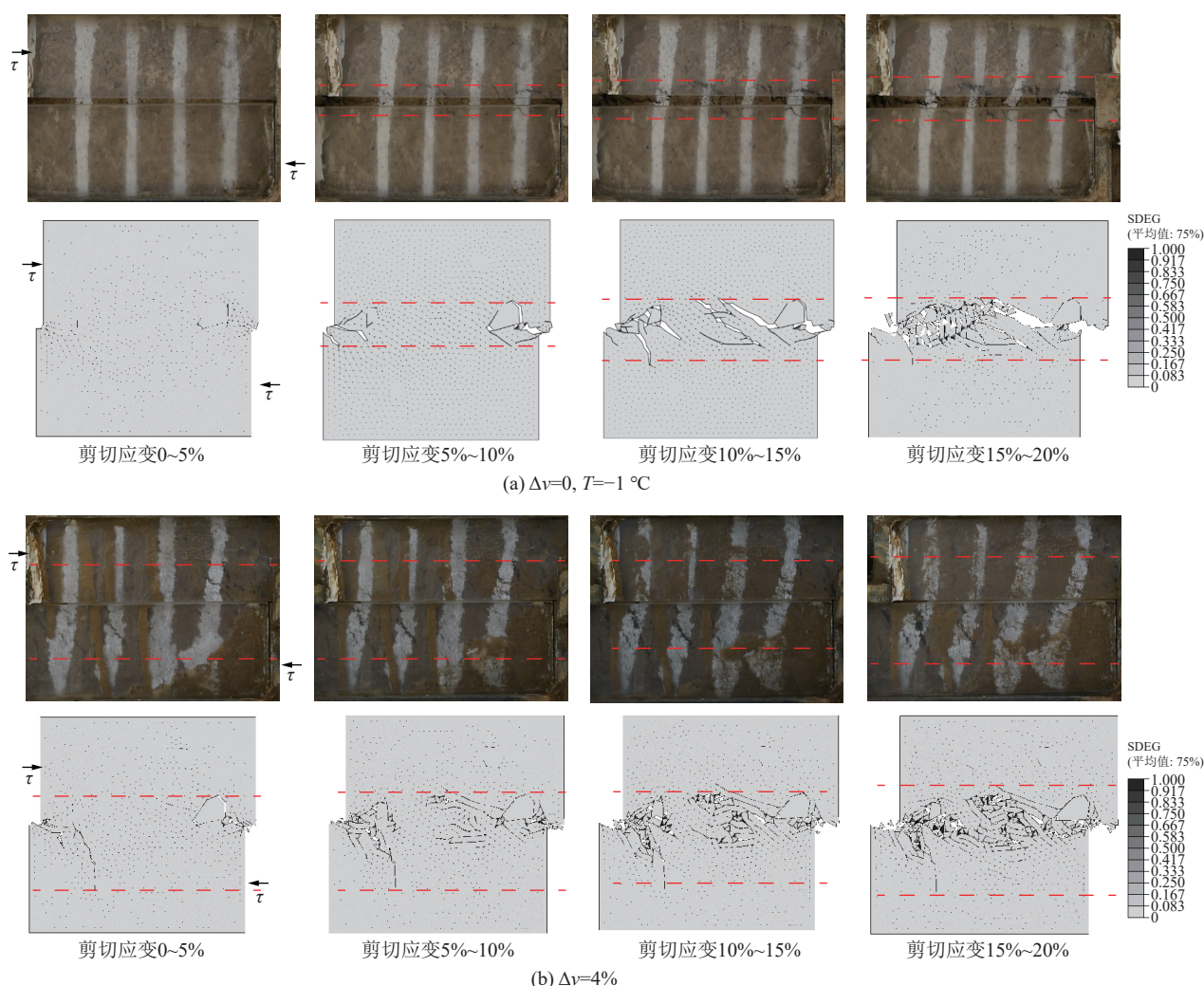


图 6 数值与试验所得破坏模式的比较

Fig.6 Comparison of numerical and experimental fracture patterns

离”准则。

2 数值结果

2.1 常应变率模型

由于冰川底部的构造运动,碎屑冰冻体中往往混合着不同比例的碎石,其含量是影响碎屑冰冻体剪切力学行为的重要因素^[26]。另一方面,以土石阈值确定含石率,该方法为提高计算效率而忽略了粒径低于土石阈值的碎屑颗粒-冰界面黏聚力的影响。实际的碎屑冰冻体可以简化为“碎石实体”+“冰”组合的存在模式,如此,模型中的含石率会大幅提高。考虑到碎石和冰的力学参数差异巨大,冻土-碎石界面有可能因为出现应力集中而发生破坏,本节从工程实际出发,进一步通过模拟来检验含石率对碎屑冰冻体剪切力学行为的影响。保持温度、试样尺寸、应力路径和各粒径的比例不变,将试样中的含石率由试验中的2%分别提高至6%和10%(图7),以对比含石率对正融碎屑冰冻体剪切力学行为的影响。各含石率下的应力-应变曲线如图8a—图8c所示。随着含石率的增加,

变形模式相差不大。然而十分有趣的是,随着含石率的增加,试样峰值剪切强度 τ_p 有着明显的下降,此规律与常温下的土石混合体相反。对于融冰率分别为0、2%和10%的试样,当含石率从2%增加至10%, τ_p 分别下降了41.5%、48.7%和33.6%(图8d),因而碎石含量对剪切强度的影响随融冰率升高而减小。

通过破坏模式分析碎石含量引起峰值剪切强度降低的原因。观察图9a可以发现,当融冰率 $\Delta v = 0$,由于冻土和碎石的材料参数差异较大,在冻土-碎石

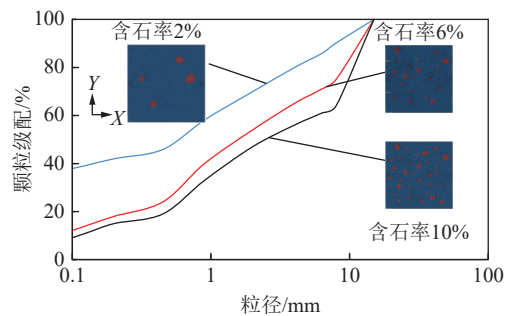


图7 颗粒级配曲线

Fig.7 Grain-size distribution curve

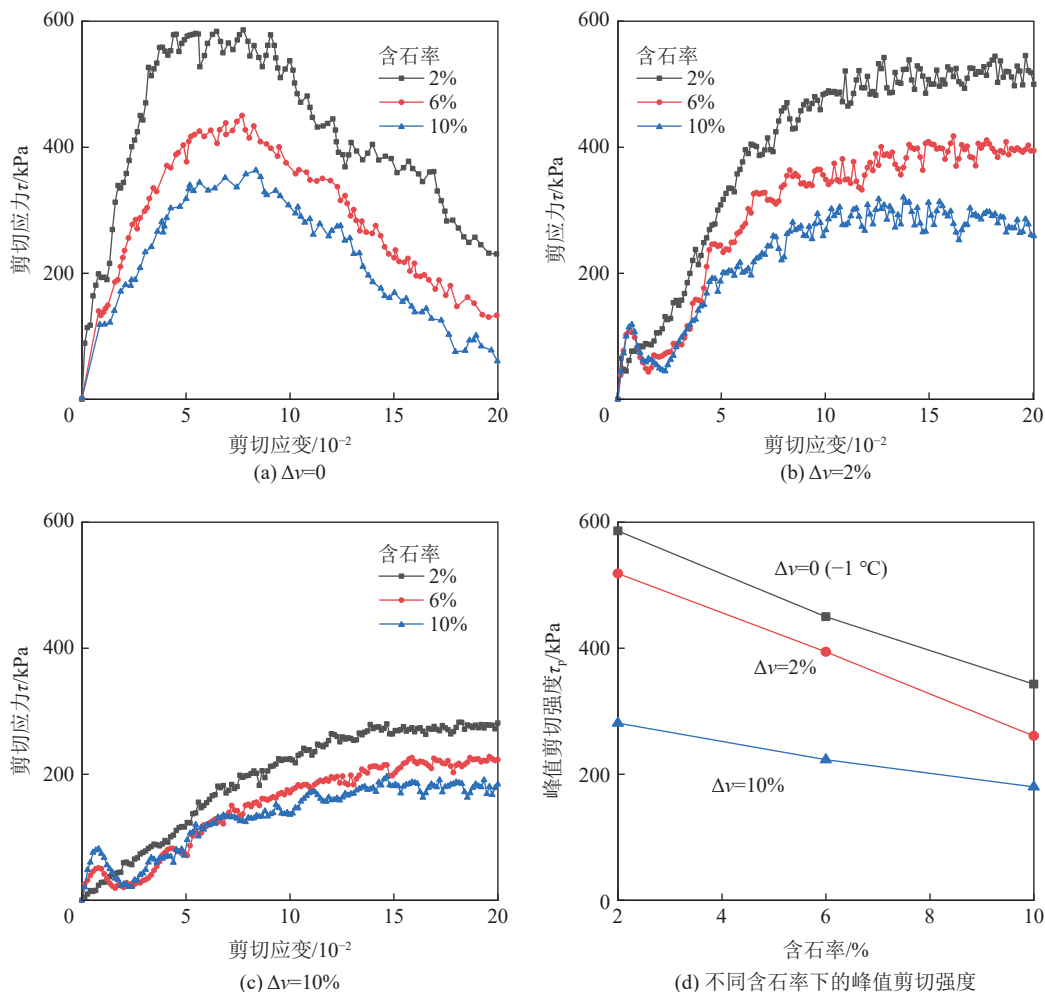


图8 不同含石率下的剪切力学行为

Fig.8 Comparison of shear behavior for specimens under different rock content

界面容易形成应力集中, 导致黏聚力单元沿界面损坏, 将“碎石实体”单元分离出来, 随后剪切破坏面沿碎石-冻土接触面扩展和贯通。如图 9b 所示, 当含石率增加至 10%, 加载初期破裂面形成的位置分布更广, 试样的整体性被破坏。因此, 碎石冰冻体中的冻土-碎石界面可视为剪切过程中的薄弱点, 碎石含量的增加对于碎屑冰冻体抗剪强度有反作用。又由于碎石含量较低, 随机分布的碎石之间无法构成骨架和发生咬合, 故小范围的增加碎石含量并没有提高碎屑冰冻体的抗剪强度。对比图 9c、图 9d, 当融冰率 Δv 增加至 10%, 模型以塑性变形为主, 试样刚度较低且黏聚力单元较少发生开胶破坏, 故此时含石率增加造成的影响较小。

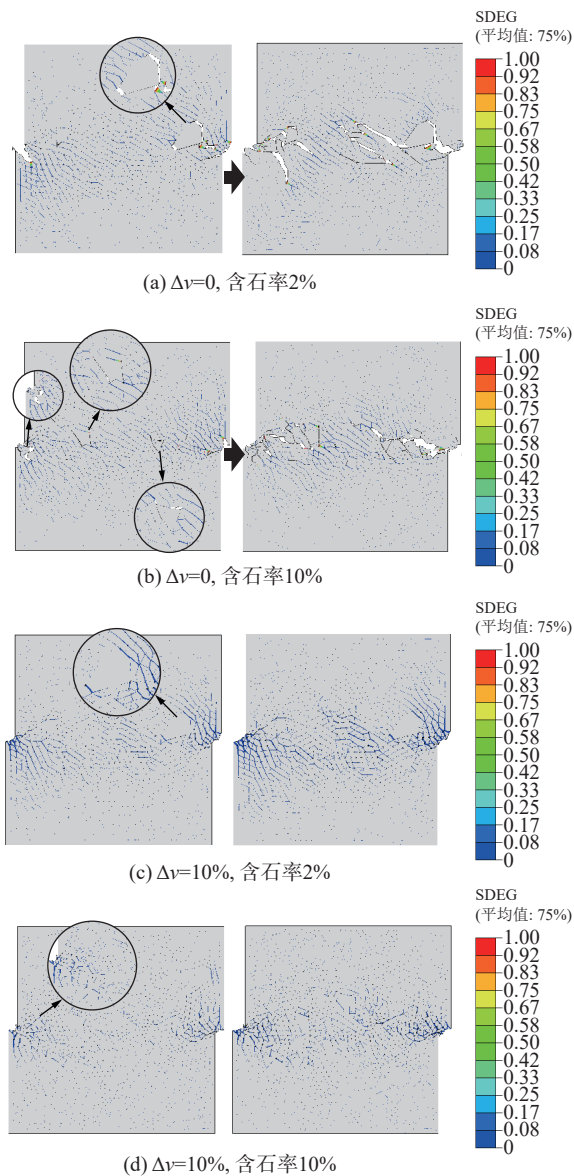


图 9 不同含石率下试样的断裂模式数值模拟结果

Fig.9 Numerical fracture patterns of specimens with different rock contents

2.2 恒定载荷模型

为更加贴近真实冰川条件中升温时滑动剪切带应力状态不变的情况, 建立恒定荷载模型来研究正融碎屑冰冻体的温度解对应力分析解的影响。模型交替进行加载和升温。在加载阶段, 对试样施加法向、切向应力载荷至应变稳定。法向应力与 1.2 节中被用作比较核的试验法向应力^[9]相同 (350 kPa), 切向应力分别加载至初始冻结状态峰值剪切强度 τ_p 的 60%、70%、80% 和 90%。待应变达到稳定状态, 模型进入升温阶段, 即将模型温度调整到不同融冰率对应的温度值。不断重复加载和升温阶段直至试样破坏。共考虑 2 种含石率: 2% 和 10%(表 3)。

表 3 模拟参数

Table 3 Numerical parameters

含石率/%	应力比(τ/τ_p)	应力 τ /kPa	破坏时间/min
2	60%	352.2	13.8
	70%	410.9	9.6
	80%	469.6	7.8
	90%	528.3	6.5
10	60%	220.2	8.8
	70%	256.9	6.2
	80%	293.6	4.8
	90%	330.3	4.4

图 10 为不同切向应力下试样切向应变随时间的演变。当 $\tau=90\%\tau_p$, 含石率为 2%(图 10a), 应变的发展可分为 3 个阶段: 初始阶段 (OA)、发育阶段 (AB) 以及破坏阶段 (BC)。对初始冻结状态的试样进行加载后, 变形立即开始。由于此时剪切应力低于抗剪强度, 故应变逐渐趋于稳定 (OA)。在第 2、4 min 对模型进行 2 次升温操作后, 黏聚力单元强度根据强度劣化控制方程 (式 (6)~式 (8)) 降低, 应变 2 次进入发育阶段 (AB), 并在第 3 次升温阶段后, 变形加速至破坏 (BC)。当剪切应力降低到较低水平 ($\tau \leq 80\%\tau_p$), 模型会更晚进入应变发育阶段, 说明变形速率很大程度上由初始应力水平决定。另外, 当剪切荷载处于较低的应力水平 ($\tau=60\%\tau_p$), 试样的破坏时间最晚, 在 6 轮升温操作后破坏。以上结果说明较高的应力水平下, 升温阶段对冰冻体强度的劣化作用十分显著, 这一临界剪切应力值在峰值剪切应力的 60%~70% 之间。

对比图 10a 和图 10b 可知, 随含石率由 2% 增加至 10%, 应变演化仍然可以分为 3 阶段, 且应变速率同样随应力水平的增加而增加。但含石率 10% 的试样破坏所需时间更短, 即碎石含量的增加导致碎屑冰

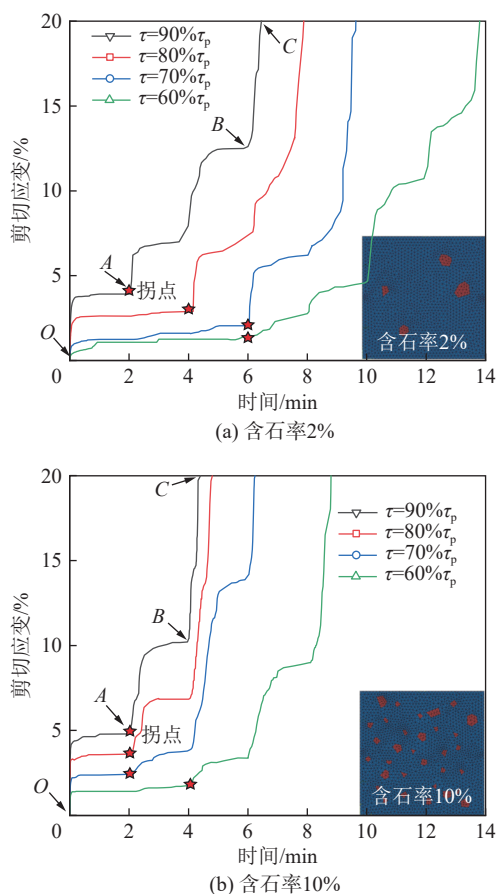


图 10 剪切应变与时间的关系

Fig.10 Relationship between shear strain and time

冻体强度的温度敏感性增加。

图 11 为升温过程中的平均应变速率。对于 2 种含石率,随着剪切力的增加,平均应变速率均呈增加趋势,而这一增加量并不恒定。例如,当剪切应力从 $60\%\tau_p$ 增加到 $80\%\tau_p$ 时,应变率增加了约 80%;而当应力从 $80\%\tau_p$ 增加到 $90\%\tau_p$,应变率增加约 15%。这表明当施加在碎屑冰冻体上的剪切载荷小于 $80\%\tau_p$,应力变化将显著地影响力学行为。

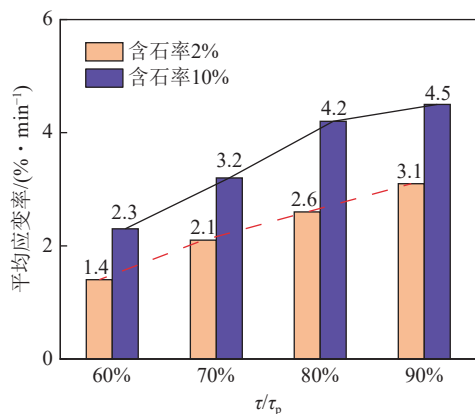


图 11 不同剪切应力和含石率试样的平均应变速率

Fig.11 Average strain rate of samples with different rock content under varying shear stress levels

在升温后模型的剪切应变先出现拐点(图 10),随后变形进入发育阶段。将此时试样的平均温度定义为拐点温度,其与剪切应力水平的关系如图 12 所示。总体而言,拐点温度随着初始剪切应力的增加而降低,两者近似为线性关系。此现象表明,对于维持着高剪切负荷的低温碎屑冰冻体来说,环境温度的轻微上升可能导致切向应变的突变。

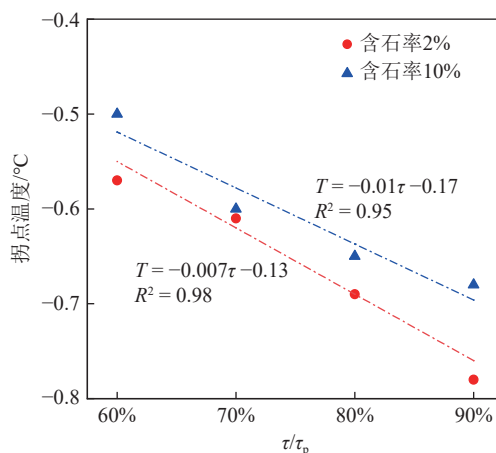


图 12 不同含石率试样在不同应力水平下的拐点温度

Fig.12 Inflection temperatures of samples with different rock contents under varying stress levels

拐点和破坏点的断裂模式如图 13 所示。当剪切荷载处于较高水平 ($\tau=90\%\tau_p$) 且试样达到拐点和破坏点时,裂缝相对独立地出现并扩展、延伸;对于剪切应力较低 ($\tau=60\%\tau_p$) 的情况,黏聚力单元的破裂倾向于成片出现而不以单条裂缝形式出现。这说明应力较低的试样整体性更差,材料强度相对较低。

3 讨 论

基于直剪试验和 F-DEM 探讨了正融条件下碎屑冰冻体的剪切破坏机理。模拟结果指出除温度以外,荷载是碎屑冰冻体的抗剪强度的不利条件。因此削坡减载是防治冰-岩崩滑坡的有效手段。另外,碎石含量的增加同样不利于剪切滑动带的稳定性。因此实际工程中应对碎屑冰冻体中的碎石含量进行测试,对碎石含量较高的冰川区域考虑挡墙或规避。

尽管数值模拟得到的力学行为与物理试验结果吻合较好,但该方法仍存在局限性。例如,所有的模型参数的取值和模型结果的验证均局限于室内试验的尺度,而对于实际工程尺度仍可能面临计算效率、尺寸缩放等问题,而本文也没有涉及相关应用。另外,由于是对正融碎屑冰冻体进行建模,其中孔隙冰没有完全融化而是出于融化的过程中,故在模型中没有对冻土进行进一步细化和建模,而是通过“冻土实体”单

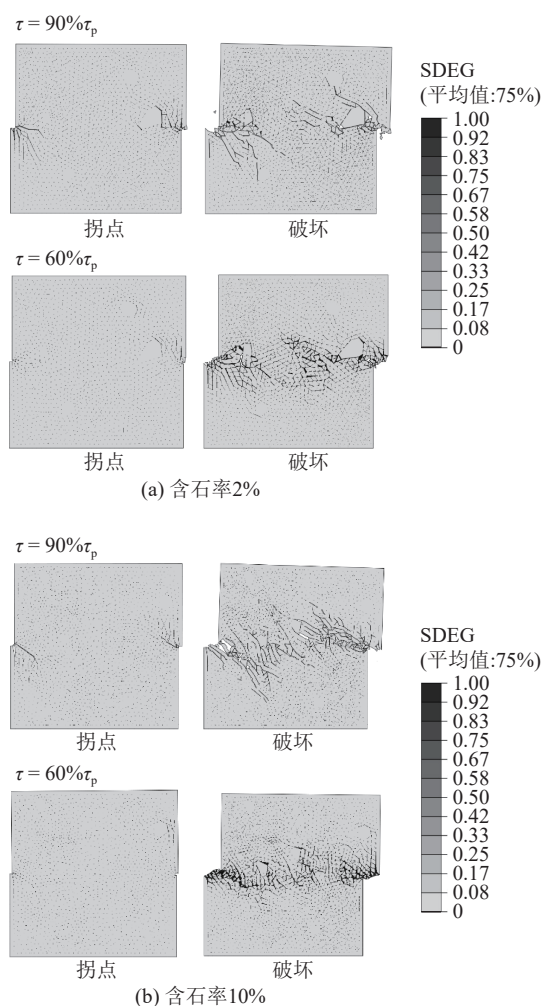


图13 不同含石率、应力条件下试样的破坏演化

Fig.13 Failure evolution of specimens with different rock contents and stresses

元来代表碎屑颗粒和冰的集合,再通过控制黏聚力单元强度考虑孔隙冰对冻土和碎石等实体单元黏聚作用的升温改变量。很显然冻土是比较复杂的四项体,包含了更微小的碎屑颗粒和多晶冰颗粒。然而如果用小于单位毫米的实体单元对碎屑颗粒和冰分别建模,将导致单元数量的急剧增加,随之而来的是高额的计算成本。最后,根据 HUANG 等^[9]的测试结果,由于碎屑冰冻体的含冰率超过液限,故其表层融化并呈液态从表面流下,导致正方体试样尺寸出现轻微减小(<6 mm)。本文没有研究这种尺寸变化对强度的影响。综上,未来应就模型简化方法、计算效率、参数取值、冰水相变和尺寸缩放等问题进行进一步研究,以适应实际工程案例中剪切强度劣化行为的模拟。

由于模拟条件的制约以及地质条件的复杂性,在本文 1.2 节中对强度劣化控制方案进行了一系列假设和理想化。实际的碎屑冰冻体强度劣化过程是一个复杂、长期的温度时效性变形过程,伴随着相变、风化、

渗流、蠕变、卸荷等地质过程,相关作用机制仍有待进一步研究。目前,对冰川的稳定性评价应建立在系统查明剪切滑动面发育情况的基础上,从变形发育程度的角度进行综合判定。

4 结 论

1) 数值模拟的剪切应力-应变曲线、破坏模式等宏观响应特征结果与物理试验结果吻合较好,所提出强度劣化模型可以较好地模拟升温引起的孔隙冰融化和剪切强度劣化行为。建议在层间黏聚力单元使用“牵引-分离”准则以及温度相依性的强度劣化控制方程。

2) 当融冰率小于等于 2%,碎屑冰冻体变形模式为应变软化,表现为脆性破坏。此时剪切破坏模式为粗糙的“锯齿状”。随着融冰率增加,黏聚力单元的强度降低,剪切面裂缝明显减少,剪切破裂面逐渐由“锯齿状”向平滑的“圆弧状”转变,变形模式过渡为应变硬化。

3) 冻土-碎石界面容易形成应力集中,导致剪切裂缝沿该界面形成渐进式贯通,故提高含石率会导致正融碎屑冰冻体抗剪强度降低。随融冰率增加,剪切破裂的现象呈减小趋势,碎石含量对强度造成的影响逐渐降低。

4) 对于高剪切负荷下($\tau=90\%\tau_p$)的碎屑冰冻体来说,环境温度的轻微上升可能导致切向应变的突变。在温度和应力的共同影响下,碎屑冰冻体的剪切变形分为初始、发育以及快速变形 3 个阶段。在初始阶段,剪切应变先增加后稳定;在发育阶段,剪切应变出现拐点;在快速变形阶段,剪切应变快速增加。拐点的温度随着初始剪切应力的增加而降低,两者近似为线性关系。较高的应力水平下,碎屑冰冻体的剪切应变对温度的改变十分敏感。

参考文献(References):

- [1] NICKLING W G, BENNETT L. The shear strength characteristics of frozen coarse granular debris[J]. *Journal of Glaciology*, 1984, 30(106): 348-357.
- [2] ZOET L K, CARPENTER B, SCUDERI M, et al. The effects of entrained debris on the basal sliding stability of a glacier[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2013, 118(2): 656-666.
- [3] LAWSON W. The relative strengths of debris-laden basal ice and clean glacier ice: Some evidence from Taylor Glacier, Antarctica[J]. *Annals of Glaciology*, 1996, 23: 270-276.
- [4] LI C D, WANG R, GU D M, et al. Temperature and ice form effects on mechanical behaviors of ice-rich moraine soil of Tianmo valley nearby the Sichuan-Tibet Railway[J]. *Engineering Geology*, 2022,

- 305; 106713.
- [5] ARENSON L U. Unstable alpine permafrost: A potentially important natural hazard-variations of geotechnical behaviour with time and temperature[D]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2002.
 - [6] WALLER R I, MURTON J B, KRISTENSEN L. Glacier-permafrost interactions: Processes, products and glaciological implications[J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 255: 1–28.
 - [7] 顾东明. 三峡库区软弱基座型碳酸盐岩反倾高边坡变形演化机制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
GU Dongming. Study on deformation evolution mechanism of soft base carbonate high slope in Three Gorges Reservoir area[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
 - [8] BALTRŪNAS V, VSINKŪNAS P, KARMAZA B, et al. The sedimentology of debris within basal ice, the source of material for the formation of lodgement till: An example from the Russell Glacier, West Greenland[J]. *Geologija*, 2009, 51(1-2): 12–22.
 - [9] HUANG D, MENG Q J, SONG Y X, et al. Experimental investigation on shear performance degradation of ice-rich debris under thawing[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2023, 212: 103889.
 - [10] ZHOU G Q, HU K, ZHAO X D, et al. Laboratory investigation on tensile strength characteristics of warm frozen soils[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 113: 81–90.
 - [11] TSARAPOV M N. Strength capacity evolution in thawing soils[J]. *Moscow University Geology Bulletin*, 2007, 62(6): 393–396.
 - [12] TANG L Y, DU Y, LIU L, et al. Experimental study of the frozen soil-structure interface shear strength deterioration mechanism during thawing[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(23): 2704.
 - [13] 周臣鑫. 考虑冻胀-融沉效应的非饱和冻土热-水-力耦合模型及其数值实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
ZHOU Chenxin. Thermal-hydraulic-mechanical coupling model of unsaturated frozen soil considering frost heave-thaw settlement effect and its numerical realization[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
 - [14] 王威娜, 秦煜, 李小飞, 等. 季节冻土地区阴阳坡路基温度场及变形发育数值模拟[J]. *公路交通科技*, 2017, 34(2): 20–28.
WANG Weina, QIN Yu, LI Xiaofei, et al. Numerical simulation of temperature field and deformation development of subgrade with sunny-shady slopes in seasonal frozen region[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2017, 34(2): 20–28.
 - [15] GU D M, LIU H L, HUANG D, et al. Development of a modeling method and parametric study of seepage-induced erosion in clayey gravel[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, 20(12): 04020219.
 - [16] 李斌, 黄达, 马文著. 层理面特性对砂岩断裂力学行为的影响研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(3): 858–868.
LI Bin, HUANG Da, MA Wenzhu. Study on the influence of bedding plane on fracturing behavior of sandstone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(3): 858–868.
 - [17] 李彦奇, 黄达, 孟秋杰. 基于离心机和数值模拟的软硬互层反倾层状岩质边坡变形特征分析[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(4): 141–150.
LI Yanqi, HUANG Da, MENG Qiuji. An analysis of the deformation characteristics of soft-hard interbedded anti-tilting layered rock slope based on centrifuge and numerical simulation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 141–150.
 - [18] 刘彬玲, 常晓林, 唐龙文, 等. 基于重力增加法的边坡失稳破坏全过程模拟[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(9): 133–138.
LIU Chenling, CHANG Xiaolin, TANG Longwen, et al. Simulation of the whole process of slope failure based on gravity increase method[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(9): 133–138.
 - [19] MUNJIZA A, OWEN D R J, BICANIC N. A combined finite-discrete element method in transient dynamics of fracturing solids[J]. *Engineering Computations*, 1995, 12(2): 145–174.
 - [20] ECHELMAYER K, WANG Z X. Direct observation of basal sliding and deformation of basal drift at sub-freezing temperatures[J]. *Journal of Glaciology*, 1987, 33(113): 83–98.
 - [21] 董盛时, 董兰凤, 温智, 等. 青藏冻结粉土与混凝土基础接触面本构关系研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(6): 1629–1633.
DONG Shengshi, DONG Lanfeng, WEN Zhi, et al. Study of constitutive relation of interface between frozen Qinghai-Tibet silt and concrete[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(6): 1629–1633.
 - [22] HUANG D, LI B, MA W Z, et al. Effects of bedding planes on fracture behavior of sandstone under semi-circular bending test[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, 108: 102625.
 - [23] 徐文杰, 胡瑞林. 土石混合体概念、分类及意义[J]. *水文地质工程地质*, 2009, 36(4): 50–56, 70.
XU Wenjie, HU Ruilin. Conception, classification and significations of soil-rock mixture[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009, 36(4): 50–56, 70.
 - [24] ANDERSON M D, TICE A R. Predicting unfrozen water contents in frozen soils from surface area measurements[J]. *Highway Research Record*, 1972, 393: 12–18.
 - [25] 徐学祖. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
 - [26] THOMPSON A C, IVERSON N R, ZOET L K. Controls on subglacial rock friction: Experiments with debris in temperate ice[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2020, 125(10): e2020JF005718.