

文章编号: 1001-4888(2023)01-0047-10

含冰率影响下冻结道砟集料的三点弯曲试验研究^{*}

黎旭¹, 严颖², 薛一桢¹, 季顺迎¹

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁大连 116024;

2. 大连交通大学 土木工程学院, 辽宁大连 116028)

摘要: 寒区有砟轨道中碎石道床在低温冰冻条件下的力学性能与常温明显不同, 道砟颗粒间的冻结强度是影响道床动力学特性的一个重要参数。为进一步探究级配碎石在冻结条件下的弯曲力学性能, 设计并制备了不同含冰率的冻结碎石集料试样, 通过开展室内低温三点弯曲试验, 研究了含冰率对冻结试样加载力-挠度曲线及弯曲强度的影响, 并分析了冻结试样的断裂行为及断裂耗能情况。试验结果表明, 试样的弯曲断裂失效过程可以分为脆性断裂和峰后应变软化型断裂两部分, 加载力-挠度全曲线在脆性断裂时出现明显加载力跌落现象, 而在应变软化型断裂过程中曲线下降趋势平缓。含冰率的提高显著增大了试样的弯曲强度, 含冰率与弯曲强度之间的关系可近似线性表示。高含冰率试样弯曲脆性断裂时试样中部下方可观察到明显的受拉裂纹, 并沿着道砟接触面向上不断扩展。含冰率较低时, 试样脆性断裂耗能略高于应变软化型断裂耗能, 其耗能占总消耗能量的 70% 以上, 试样以脆性断裂为主; 随着含冰率增大, 试样脆性断裂能占比急速下降, 应变软化型断裂逐渐占主体且不容忽视。

关键词: 寒区铁路; 冻结道砟; 三点弯曲; 含冰率; 断裂能

中图分类号: U213.7

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-22-082

0 引言

寒区有砟轨道在大面积冰雪覆盖情况下, 环境温度的升高会导致堆积在碎石道床表面的雪部分融化, 从而通过道砟颗粒间的孔隙渗透进入道床。在冰冻条件下, 雪水再次冻结成冰, 不仅会依附在道砟表面降低摩擦系数, 而且还可能会将道砟黏结成块^[1,2]。冰具有复杂的黏弹性和脆性特点, 强度及变形特征受温度、应变率和冰颗粒尺寸等因素影响很大^[3], 道砟孔隙中冰介质的存在会显著影响碎石道床的宏观力学性能。尤其是液相水在转变为固相冰后体积膨胀, 将引发道砟层不均匀抬升, 进而加剧有砟道床的沉降变形^[4], 因此, 探究低温冰冻条件下级配碎石道床的力学性能对寒区铁路建设运营、行车安全及维修养护研究具有重要工程及理论价值。

据统计, 有砟轨道 80% 的养护维修工作是针对道床整治或由道床病害造成的其他轨道结构病害问题开展的, 散粒体道床一直以来都是铁路运营及性能保障的薄弱环节^[5,6]。长期以来, 关于有砟轨道中碎石道床力学性能的试验, 主要包括道砟箱试验^[7]、直剪箱试验^[8-10]及三轴试验^[11]等模型试验, 以及缩尺^[12]及足尺试验^[13,14], 以上试验研究为我们深入了解级配碎石道砟的物理力学性能起到了至关重要的作用。然而上述这些力学试验主要关注于常温环境, 尚未考虑环境的温度和湿度变化带来的影响。

低温及湿润条件下岩石的物理力学性质较常温条件下会发生较大改变。大量试验研究表明, 随着

^{*} 收稿日期: 2022-04-01; 修回日期: 2022-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(11572067, 11872136)

通信作者: 严颖(1973—), 女, 工学博士, 教授。从事颗粒介质力学及其工程应用研究。Email: yyan@djtu.edu.cn

温度的降低,岩石的拉伸强度、压缩强度、断裂韧性及弹性模量均会增大^[15-17],低温干燥条件下岩石的抗压强度、黏聚力、内摩擦角较饱和水条件均略低^[18],并且岩石发生低温冻结时初始含水率直接决定了岩石内部未冻水和冰含量的占比,后者的冻胀损伤效应对冻岩力学性能会产生较大影响^[19]。

低温潮湿条件下当道床中的水分充足时,道床的脏污不洁会造成孔隙冰的残留堆积,此时道床的冻胀敏感性提升,从而引发轨道冻害^[20,21]。赵成江等^[22]对板结道床的研究表明,道床冻胀是道砟含泥量与道床含水率共同作用的结果,道床的弱冻胀性对铁路线路的危害也应引起足够重视。近年来,对铁路道砟在低温冻结条件下力学性能的研究已逐渐引发广大学者关注。Liu 等^[23]开展了低温冻结条件下道砟集料的单轴压缩试验,发现冻结道砟试样抗压强度和弹性模量随着温度的降低而升高。基于搭建的低温冷冻实验室,Liu 等^[24,25]还开展了在干燥、潮湿及冻结条件的道床横向阻力和道砟休止角试验,发现在冻结条件下道床横向和侧向阻力均随着温度的降低而显著升高,水和温度的改变会显著影响道砟堆积的稳定性。黎旭等^[26]开展了不同含冰率下冻结道砟的单轴压缩试验,发现较高含冰率下冻结道砟集料的强度和抗变形能力显著提升,但含冰率的提高也会加剧道砟颗粒的破碎劣化。然而,目前有关寒区铁路道床冻结情况下力学性能的相关试验研究开展仍不够充分,尤其是对级配碎石冻结时的抗弯力学性能的研究暂未看到。

为进一步探究低温冻结条件下级配碎石道砟的物理力学性能,本文设计并制备了不同冰含量的冻结道砟试样,通过开展室内低温三点弯曲试验,研究了含冰率对冻结弯曲试样的加载力-挠度曲线及弯曲强度的影响,并分析了弯曲试样的断裂特性及耗能情况。

1 冻结道砟集料弯曲试样的制备及试验方案

1.1 冻结道砟集料弯曲试样的制备

由于在露天场地冻结试样采样困难且容易造成试样损伤,本文采用了室内低温模型试验,其中,道砟试验材料选用某采石场莫氏硬度 5~7 的玄武岩碎石,密度为 $\rho = 2800 \text{ kg/m}^3$,堆积密度为 1446 kg/m^3 。根据《铁路碎石道砟》规范要求^[27],中国新建铁路一级道砟粒径需满足一定级配分布且尺寸为 $16 \text{ mm} \sim 63 \text{ mm}$ 。由于试验测试条件的限制,冻结试样尺寸过大会导致搬运困难且易造成试样提前损伤,而试样尺寸与道砟平均粒径之比太小又会导致试样存在颗粒尺寸效应,从而影响试验结果,因此,本文采用缩尺方法^[28,29]来对碎石粗颗粒进行重新配比。将铁路道砟级配标准中最大直径的一半作为试验用颗粒最大直径,并使其满足一定级配分布,最终试验用碎石道砟级配曲线如图 1 所示。

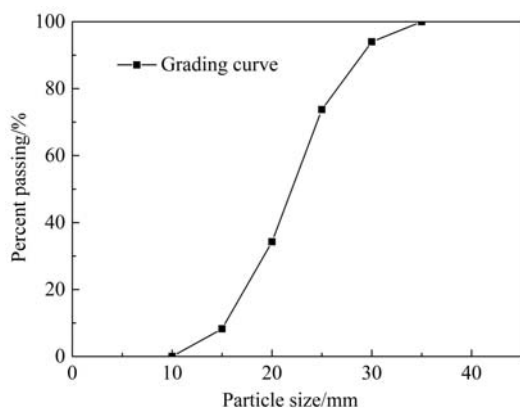


图 1 试验用道砟级配曲线

Fig. 1 Ballast size grading curve in test

值得注意的是,缩尺道砟和真实尺寸道砟在几何形态上具有高度相似性,采用缩尺级配道砟开展其力学性能研究也是可行的。道砟三轴试验^[30]和道床阻力模型试验^[31]均表明缩尺道砟展现出了和全尺度道砟类似的应力-应变行为,在 $15 \text{ kPa} \sim 200 \text{ kPa}$ 围压下,1/3 缩尺道砟的内摩擦角为 $40^\circ \sim 50^\circ$,位于 6 种全尺度道砟材料构成的内摩擦角有效范围内。姚昕恺等^[32]开展的缩尺效应下道砟三轴剪切试验结果也表明,按相似级配法配置的 1/4 缩尺道砟的应力-应变曲线峰值强度略低于全尺度道砟(最大不超过 10%),缩尺效应对道砟颗粒强度指标内聚力 c 及内摩擦角 ϕ 的影响不显著。当道砟颗粒冻结之后,其缩尺效应对试样力学性能的影响程度如何,由于缺乏相应类似文献的参考,本文暂不展开讨论。

受道砟颗粒空间排布影响,冻结道砟试样本身具有一定的非连续且各向异性特性。在低温模型试验中,制备的冻结试样质量好坏直接关系到最终试验结果的数据离散程度。冻结道砟弯曲试样的制备流程如图 2 所示,首先准备好用于装填道砟试样的可拆卸长方体模具,将用于制备冻结试样的级配碎石

装填满模具并充分捣固压实,对碎石料质量进行称重,记为 m_0 ,倒入存储容器备用。之后在模具的内侧及底部铺设一层薄塑料(如聚四氟乙烯薄膜),用于防止试样冻结时与模具产生冰粘连;再在模具底部的薄塑料上方铺设较厚的隔水垫,用于防止下沉的水分过多地聚集于试样底部(如图 2(a)所示)。将存储在容器内的碎石料充分浸水,然后捞起装填到模具内,充分压实并用之前铺设的薄塑料密封防止水分溢出。最后将装填好的模具放入恒温箱进行冷冻 24h~36h,箱内的冷藏温度可自由调节,温度范围为 $0^{\circ}\text{C}\sim-40^{\circ}\text{C}$ (如图 2(b)所示)。当冷冻完成后,开展模具、防冻塑料及隔水垫拆除工作,获得最终冻结道砟试样(如图 2(c)所示);将试样再次称重,并记录此时含冰道砟试样的重量 m_1 ,将试样放入恒温箱备用(如图 2(d)所示)。

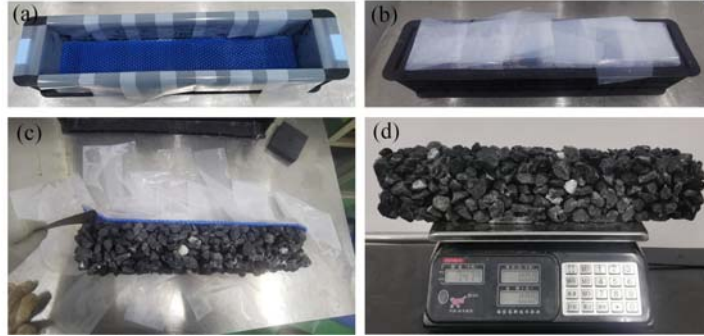


图 2 冻结弯曲试样的制备流程

Fig. 2 Preparation process of frozen specimen

在制备更高含冰率的冻结道砟试样时,需要在已冻结好的试样上表面均匀喷洒一定量的洁净水。水在流经试样孔隙过程中,一部分附着道砟表面发生冻结,另一部分将流入隔水垫内。在加水操作完成后再将试样冻结 24h~36h 即可。考虑该冻结时长下冻结试样内部温度与恒温箱设置的温度达到热平衡后,道砟孔隙内水分基本已完全冻结成冰,因此,本文采用含冰率参数来定义冻结试样内的冰含量,含冰率^[26]可表示为

$$\omega = \frac{V_{\text{ice}}}{V_{\text{pore}}} \quad (1)$$

式中: ω 为含冰率; V_{ice} 为试样内冰的体积,满足 $V_{\text{ice}} = (m_1 - m_0)/\rho_{\text{ice}}$, ρ_{ice} 为冰的密度,其值为 920 kg/m^3 ; V_{pore} 为未浸水干燥试样内的孔隙体积,满足 $V_{\text{pore}} = V - (m_0/\rho)$, V 为试样体积。

1.2 冻结道砟集料三点弯曲试验方法及方案

低温模型试验在经过改造的型号为 WD-200B 的电子万能试验机以及低温恒温试验箱内完成(该低温加载装置如图 3(a)所示)。低温箱安装在试验机的顶部移动横梁及底部平台之间。通过外部冷凝器向箱体内部持续输送冷气来形成低温试验环境。加载过程中,试样下部两支点固定,中部压头由伺服电机驱动产生进给位移(如图 3(b)(c)所示)。通过对试验中道砟试样形变和破坏过程进行图像记录,可分析其开裂破坏演变过程。

目前,道砟冻结条件下的力学性能试验并无相关标准。然而,冻结道砟试样具有明显的硬脆性力学特征,类似的材料还有岩石、混凝土和陶瓷等,因此,本文参考陶瓷等准脆性材料的抗弯强度测试标准《陶瓷材料抗弯强度试验方法》^[33],采用矩形截面梁的三点弯曲强度计算公式即可获得冻结道砟试样的弯曲强度 σ_b :

$$\sigma_b = \frac{3P_{\text{max}}L_0}{2bh^2} \quad (2)$$

式中: P_{max} 为试样断裂时受到的最大荷载,可通过监测加载过程中的力-位移曲线获得; L_0 为试样支撑点的跨度,本文取 $L_0 = 400 \text{ mm}$; b 和 h 为试样的宽度和高度,均为 100 mm 。

在低温三点弯曲试验中,冻结试样采用位移控制加载方式,加载速率 $v = 0.1 \text{ mm/s}$,冻结温度设定为 -20°C 。为降低试样内道砟骨料及冰介质随机排布带来的结果误差,每种条件下至少制备 6 个试样。

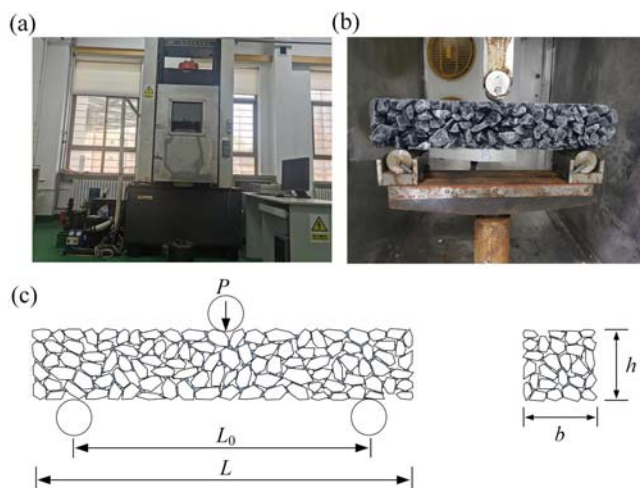


图 3 试验装置及加载示意图

Fig. 3 Experiment equipment and loading diagram

2 弯曲试验结果与分析

2.1 冻结道砟集料的加载力-挠度曲线

为研究不同含冰率条件下冻结道砟试样的弯曲力学性能,可通过试验获得的全加载力-挠度曲线(P - s 曲线)对试样的力学性能进行评估。

图 4 为某个冻结道砟试样弯曲时的典型全加载力-挠度曲线,基于该曲线,可将试样的弯曲破坏过程细分为 4 个不同阶段:(1) 压密阶段 OA :该阶段曲线斜率较低且呈上凹型,主要是由于压头与试样加载端面有接触摩擦且受力不均所致,历时较短;(2) 弹性阶段 AB :该阶段曲线斜率最高,且近似呈直线,试样加载力-挠度关系呈近似线性;(3) 脆性断裂阶段 BC :该阶段曲线出现跌落骤降,内部弹性能转化为断裂能被释放,弯曲试样下端萌生的微裂纹引发宏观开裂现象;(4) 峰后应变软化型断裂阶段 CD :该阶段曲线缓慢下落,且出现毛刺波动,在断裂面道砟的咬合互锁及压头接触区域一部分未破碎冰的黏连作用下,试样并未完全断裂。

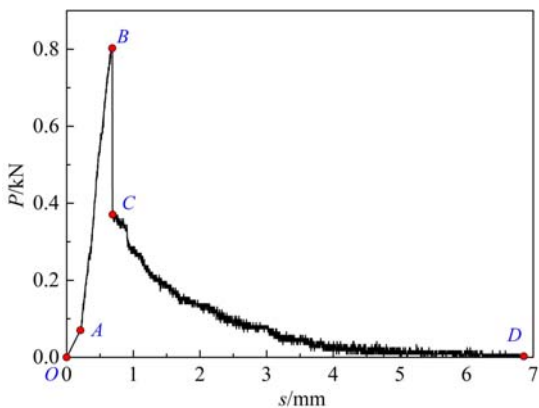


图 4 冻结道砟试样典型加载力-挠度曲线

Fig. 4 Typical load-deflection curve of ice-bonded ballast specimen

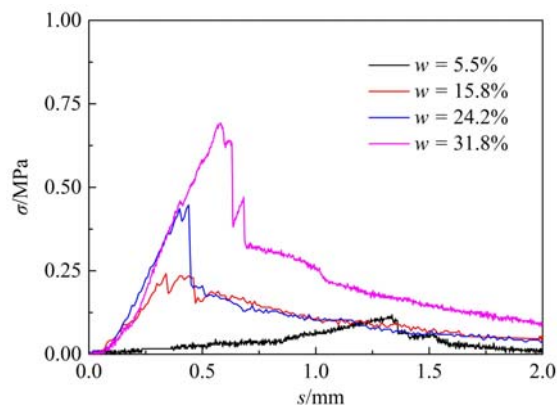


图 5 冻结道砟试样三点弯曲试验中不同含冰率下应力-挠度曲线

Fig. 5 Stress-deflection curves of ice-bonded ballasts specimen under different ice contents in three-point bending test

图 5 给出了不同含冰率弯曲试样的应力-挠度曲线(σ - s 曲线)。从曲线上升阶段可以看出,随着含冰率的增大,试样在弹性阶段曲线斜率增大,说明试样抗变形能力增强。当达到峰值应力后,由于试样发生脆性断裂,峰后曲线均出现瞬时跌落现象,之后试样进入应变软化型断裂阶段,表现为峰后曲线逐渐下降。这进一步说明了冻结道砟试样发生弯曲断裂时会经历脆性断裂和应变软化型断裂 2 个阶段的

破坏特征。

2.2 冻结试样弯曲力学性能的影响

当冰雪完全覆盖散粒体道床时,在冻融循环作用下,道床孔隙内的含冰率会有所提升。冰介质的填充及冻结作用会增大冰-石两相材料界面的黏结强度,造成冻结碎石料宏观力学性能的改变。

图6给出了温度为 -20°C 时不同含冰率下冻结道砟试样的弯曲强度。由图可以看出,当试样内含冰率较低时(w 小于10%),道砟接触区域的冰结面积较小,导致道砟间的冻结强度较低,试样弯曲强度为 $0.07\text{MPa}\sim 0.13\text{MPa}$ 。随着含冰率的增大,道砟颗粒间的冰结面积及强度也随之增大,试样弯曲强度明显增大,在高含冰率(w 为30%~35%)时,弯曲强度为 $0.55\text{MPa}\sim 0.8\text{MPa}$,弯曲强度增长了6~8倍。受道砟集料形态、排布及局部接触位置影响,相近含冰率下,非均质试样弯曲强度具有一定离散性。含冰率与弯曲强度的关系可用线性函数拟合表示:

$$\sigma_b = 1.807w - 0.00165 \quad (3)$$

拟合优度 $R^2 = 0.82$, 一致性较好。

2.3 冻结试样的弯曲破坏过程及耗能分析

在压头向下加载过程中,冻结道砟试样中部的下端受拉应力作用最终会发生弯曲断裂。图7所示为4个不同含冰率冻结试样的最终弯曲破坏图(对应图4中加载力-挠度曲线中试样发生完全断裂的D点)。由图可以看出,受冰结道砟间孔隙缺陷形状及尺寸影响,试样初始开裂点的差异会造成试样最终断口位置有所差异,且端口面较为粗糙;但无论含冰率如何变化,冻结试样的断裂位置始终处于试样中间附近,总体上试样的破碎模式较为统一,均为弯曲断裂。



图7 冻结道砟试样的断裂失效形式 (a) $w=5.5\%$; (b) $w=7.3\%$; (c) $w=23.5\%$; (d) $w=31.8\%$

Fig. 7 Fracture failure mode of ice-bonded ballast specimen under different ice contents:

(a) $w=5.5\%$; (b) $w=7.3\%$; (c) $w=23.5\%$; (d) $w=31.8\%$

为进一步观测冻结试样的弯曲断裂过程,考虑到高含冰率试样裂隙萌生及扩展更加明显的特点,图8展示了高含冰率下冻结试样中部区域在发生弯曲脆性断裂过程中的放大图(对应图4加载力-挠度曲线中试样发生脆性断裂的BC段)。由图可以明显看到,由于试样中部加载面承受压应力而另一面承

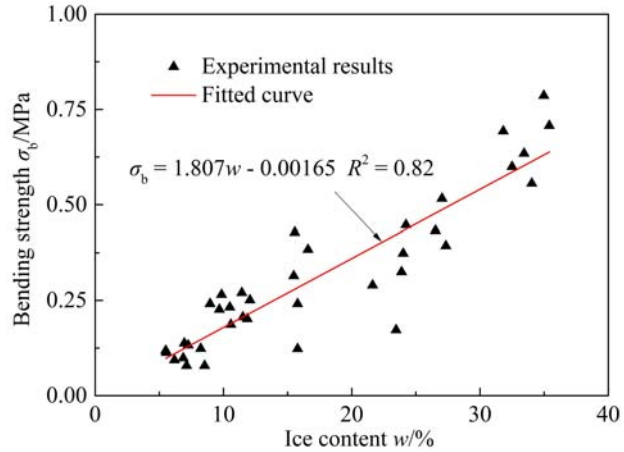


图6 不同含冰率下冻结道砟试样的弯曲强度

Fig. 6 Bending strength of ice-bonded ballast specimen under different ice contents

受拉应力,在加载过程中试样中部最下端最先萌生出受拉裂纹,并沿着道砟接触面向上不断扩展。虽然理论上弯曲试样中部正下方会产生最大拉应力,但受道砟颗粒及表面孔隙排布差异的影响,裂纹萌生的位置并不完全一致,但基本靠近试样中部。

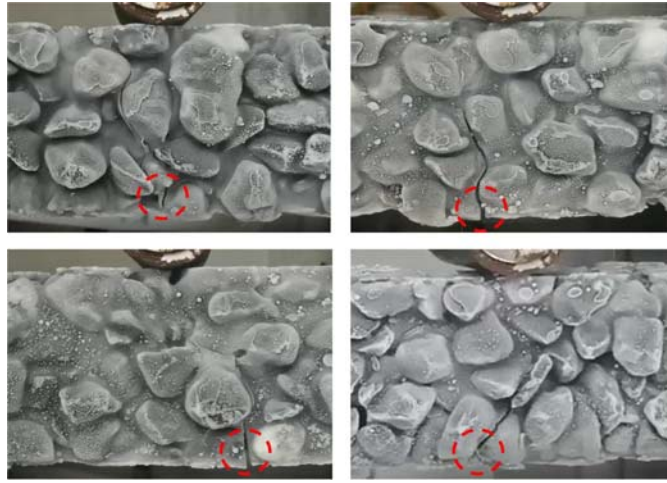


图 8 高含冰率下冻结道砟试样的局部破坏放大图

Fig. 8 Local damage images of ice-bonded ballast specimen with high ice content

冻结试样弯曲受载时的开裂过程也是能量不断耗散的过程,因此本文将从断裂耗能角度深入研究试样在经历弹性阶段、脆性断裂阶段和应变软化型断裂阶段过程中的能量消耗情况。图 9 给出了冻结道砟试样的典型加载力-挠度曲线示意图,其中曲线的 oa 、 ab 和 bd 段分别对应试样在加载过程中经历的弹性变形、脆性断裂和应变软化型断裂阶段过程。图中曲线的 oa 和 ab 段与横坐标围成的面积 S_{oab} 为试样发生脆性断裂时的能量消耗值 W_1 ; 曲线的 bd 段与横坐标围成的面积 S_{bcd} 为发生应变软化型断裂过程中的能量消耗值 W_2 。 δ_b 为脆性断裂与应变软化型断裂的曲线分界点对应的挠度值, δ_f 为试样最终完全断裂时的挠度最大值。

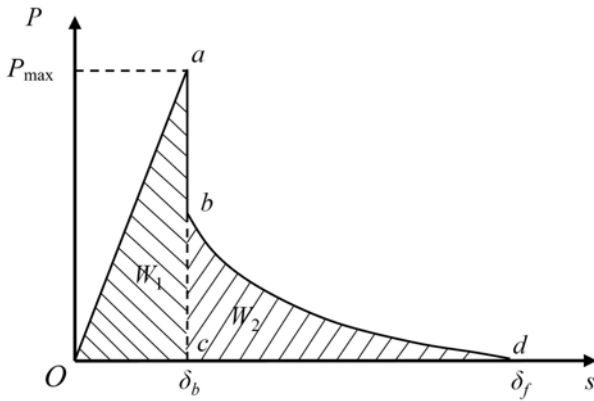


图 9 冻结道砟试样典型加载力-挠度曲线示意图

Fig. 9 Schematic diagram of typical loading-deflection curve of ice-bonded ballast specimen

试样产生挠度 δ_f 的总能量消耗量 W 、脆性断裂耗能量 W_1 和应变软化型断裂的耗能量 W_2 可分别表示为

$$W_1 = \int_0^{\delta_b} P ds \quad (4)$$

$$W_2 = \int_{\delta_b}^{\delta_f} P ds \quad (5)$$

$$W = W_1 + W_2 \quad (6)$$

基于试验中获得的不同含冰率下加载力-挠度曲线,采用式(4)和式(5)可得到对应的脆性断裂耗能 W_1 和应变软化型断裂耗能 W_2 ,为进一步比较冻结试样在不同断裂阶段的耗能,图 10 统计了不同含冰率下试样发生脆性断裂和二次断裂过程中能量的消耗情况。由图可以看出,随着含

冰率的增大,试样发生脆性断裂和应变软化型断裂所作的功均逐渐增大,这是由于较高的冰含量增大了冻结接触面积,接触面损伤及最终脱黏需要消耗更多的能量所致。当含冰率较低时,由于道砟接触面冻结强度较弱,试样发生脆性断裂损伤后容易失稳,导致峰后应变软化型断裂过程较短,脆性断裂消耗的能量略高于应变软化型断裂;而随着含冰率的增大,道砟冻结面强度显著提升,试样发生脆性断裂损伤后,加载面的部分残存冰黏结并与断口道砟的咬合互锁相互作用,导致试样的应变软化型断裂历时较

长,能量消耗也显著提升。

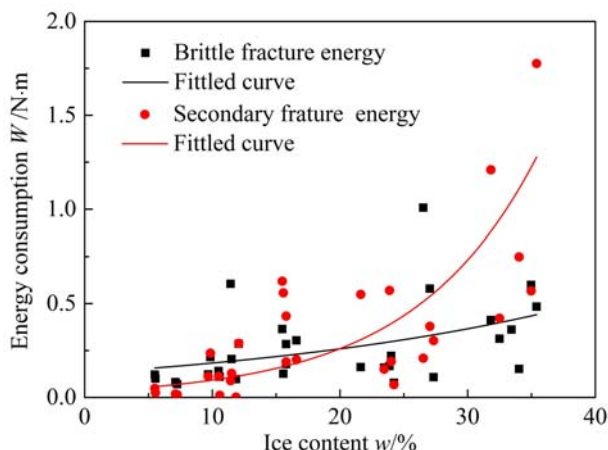


图 10 不同含冰率下冻结道砟试样不同断裂阶段的耗能情况

Fig. 10 Energy dissipation of ice-bonded ballast specimen at different fracture stages under different ice contents

为深入探究冻结试样断裂过程中脆性断裂与应变软化型断裂耗能情况,图 11 给出了不同含冰率下冻结道砟试样脆性断裂耗能量占总能量消耗量的比值,由图可以看出,当含冰率在 10% 以下时,试样脆性断裂耗能基本在 70% 以上,这说明此时试样断裂模式以脆性断裂为主。而随着含冰率的增大,试样脆性断裂能占比急速下降,在含冰率超过 30% 时,脆性断裂能占比在 30% 左右,此时试样断裂失效过程中应变软化型断裂所起到的作用已占主体,且不容忽视。

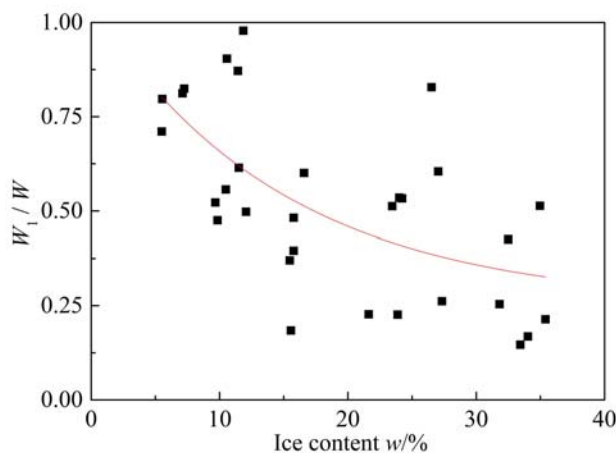


图 11 不同含冰率下冻结道砟试样脆性断裂的耗能量占总能量消耗值的比值

Fig. 11 Ratio of brittle fracture energy to total fracture energy for ice-bonded ballast specimen under different ice contents

3 结论

为探究寒区铁路冻结道砟集料的弯曲力学特性,开展了冻结道砟碎石试样的低温三点弯曲模型试验,分析了含冰率对冻结道砟试样加载力-挠度曲线、弯曲强度及断裂耗能的影响,结论如下:

(1) 由于断裂面接触道砟的咬合互锁及压头接触区域一部分未破碎冰的黏连作用,冻结试样的全加载力-挠度峰后曲线呈现出迅速跌落及缓慢下降 2 个过程,试样断裂失效经历了脆性断裂和峰后应变软化型断裂 2 个阶段。

(2) 冻结试样弯曲强度随着含冰率增大而呈近似线性增大趋势,在含冰率较低时(w 小于 10%),弯曲强度为 0.07MPa~0.13MPa,而在含冰率较高时(w 为 30%~35%),弯曲强度为 0.55MPa~

0.8MPa。

(3) 在含冰率较低时,脆性断裂消耗的能量略高于应变软化型断裂,试样断裂模式以脆性断裂为主;随着含冰率增大,试样的应变软化型断裂历时较长,能量消耗也显著提升,试样断裂失效过程中应变软化型断裂所起到的作用已占主体,且不容忽视。

此外,本文尚未考虑脏污条件对冻结道砟力学性能的影响,该研究将在后续试验中开展。

参考文献:

- [1] 高卫东,刘明哲,魏文寿,等. 铁路沿线风吹雪灾害及其防治研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(5):98—101 (GAO Weidong, LIU Mingzhe, WEI Wenshou, et al. Prevention and disaster research of drifting snow along railway[J]. China Railway Science, 2004, 25(5):98—101 (in Chinese))
- [2] 钱征宇. 寒区铁路雪害特点及防治技术[J]. 中国铁路, 2007(11):33—36 (QIAN Zhengyu. Characteristics and prevention technology of snow disaster in cold region railway[J]. Chinese Railways, 2007(11):33—36 (in Chinese))
- [3] Petrovic J J. Review mechanical properties of ice and snow[J]. Journal of Materials Science, 2003, 38(1):1—6.
- [4] Akagawa S, Hori M, Sugawara J. Frost heaving in ballast railway tracks[J]. Procedia Engineering, 2017, 189: 547—553.
- [5] 曾树谷. 铁路散粒体道床[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1997 (ZENG Shugu. Railway ballast bed[M]. Beijing: China Railway Press, 1997 (in Chinese))
- [6] 中华人民共和国铁道部. 高速铁路有砟轨道线路维修规则: TG/GW 116—2013[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2013 (Ministry of Railway of People's Republic of China. High speed railway ballast track maintenance rule: TG/GW 116—2013[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2013 (in Chinese))
- [7] Al-saoudi N, Hassan K H. Behaviour of track ballast under repeated loading[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2014, 32(1):167—178.
- [8] Akbar D, Massoud P, Ali A, et al. Evaluating the influence of ballast degradation on its shear behaviour[J]. International Journal of Rail Transportation, 2018, 6(3):145—162.
- [9] 严颖, 季顺迎. 碎石料直剪实验的组合颗粒单元数值模拟[J]. 应用力学学报, 2009, 26(1):1—7, 207 (YAN Ying, JI Shunying. Numerical simulation of direct shear test for rubbles with clumped particles[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2009, 26(1):1—7, 207 (in Chinese))
- [10] 李勇俊, 严颖, 赵春发, 等. 细小颗粒对道砟材料剪切性能影响的试验研究[J]. 实验力学, 2020, 35(6):985—993 (LI Yongjun, YAN Ying, ZHAO Chunfa, et al. Experimental investigation on shear mechanical properties of ballast materials under influence of fine particles[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(6):985—993 (in Chinese))
- [11] Suiker A, Selig E T, Frenkel R. Static and cyclic triaxial testing of ballast and subballast[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(6):771—782.
- [12] Shaer A A, Duhamel D, Sab K, et al. Experimental settlement and dynamic behavior of a portion of ballasted railway track under high speed trains[J]. Journal of Sound & Vibration, 2008, 316:211—233.
- [13] Marolt T, Esen A F, Woodward P K, et al. Full scale laboratory testing of ballast and concrete slab tracks under phased cyclic loading[J]. Transportation Geotechnics, 2018, 17:33—40.
- [14] Li W, Bian X C, Duan X, et al. Full-scale model testing on ballasted high-speed railway: dynamic responses and accumulated settlements[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2018 (10):125—135.
- [15] Liu Q S, Xu G M, Hu Y H, et al. Study on basic mechanical behaviors of rocks at low temperatures[J]. Key Engineering Materials, 2006, 306-308:1479—1484.
- [16] Dwivedi R D, Singh P K, Singh T N, et al. Compressive strength and tensile strength of rocks at sub-zero temperature[J]. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, 1998, 5(1):43—48.
- [17] Dwivedi R D, Soni A K, Goel R K, et al. Fracture toughness of rocks under sub-zero temperature conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2000, 37(8):1267—1275.
- [18] 唐明明, 王芝银, 孙毅力, 等. 低温条件下花岗岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4):

- 787—794 (TANG Mingming, WANG Zhiyin, SUN Yili, et al. Experimental study of mechanical properties of granite under low temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4):787—794 (in Chinese))
- [19] Jia H L, Zi F, Yang G S, et al. Influence of pore water (ice) content on the strength and deformability of frozen argillaceous siltstone[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53:967—974.
- [20] Nurmikolu A, Silvast M. Causes, effects and control of seasonal frost action in railways[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2013, 5(4):363—367.
- [21] 王青志, 刘建坤, 田亚护, 等. 寒区级配碎石冻胀正交试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2825—2830, 2836 (WANG Qingzhi, LIU Jiankun, TIAN Yahu, et al. A study of orthogonal design tests on frost-heaving characteristics of graded crashed rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 2825—2830, 2836 (in Chinese))
- [22] 赵成江, 王晓荣, 夏琼, 等. 不同含泥量与含水率下铁路板结道床的冻胀特性[J]. 铁道工程学报, 2011, 28(9):6—39 (ZHAO Chengjiang, WANG Xiaorong, XIA Qiong, et al. Frost heaving behaviors of hardened ballast beds under different content of clay and water[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, 28(9):36—39 (in Chinese))
- [23] Liu J X, Wang P, Liu G Z, et al. Uniaxial compression characteristics of railway ballast combined with ice[J]. Construction and Building Materials, 2020, 263:120554.
- [24] Liu J X, Wang P, Liu G Z, et al. Study of the characteristics of ballast bed resistance for different temperature and humidity conditions[J]. Construction and Building Materials, 2020, 266:121115.
- [25] Liu J X, Wang P, Liu G Z, et al. Numerical and experimental investigations of the effect of temperature and moisture on the repose angle of railway ballast[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2021, 236(6):703—714.
- [26] 黎旭, 严颖, 季顺迎. 寒区铁路含冰率对碎石集料强度及变形特性影响试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(3):697—705 (LI Xu, YAN Ying, JI Shunying. Experimental study on influence of ice content on strength and deformation characteristics of frozen ballast aggregate in cold region railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(3):697—705 (in Chinese))
- [27] 中华人民共和国铁道部. 铁路碎石道砟: TB/T 2140—2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018 (Ministry of Railway of People's Republic of China. Railway ballast: TB/T 2140—2018[S]. Beijing: China railway Publishing House, 2018 (in Chinese))
- [28] 郭万里, 朱俊高, 温彦锋. 对粗粒料4种级配缩尺方法的统一解释[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8):1473—1480 (GUO Wanli, ZHU Jungao, WEN Yanfeng. Unified description for four grading scale methods for coarse aggregate[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8):1473—1480 (in Chinese))
- [29] 张文力, 冯梅梅, 吴疆宇. 循环载荷作用下级配碎石力学特性试验研究[J]. 实验力学, 2020, 35(4):629—638 (ZHANG Wenli, FENG Meimei, WU Jiangyu. Experimental study on mechanical properties of graded aggregate under cyclic loading[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(4):629—638 (in Chinese))
- [30] Aingaran S. Experimental investigation of static and cyclic behaviour of scaled railway ballast and the effect of stress reversal[D]. Southampton: University of Southampton, 2014.
- [31] Pen L L, Bhandari A R, Powrie W. Sleeper end resistance of ballasted railway tracks[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 140(5):04014004.
- [32] 姚昕恺, 边疆, 王旭东. 缩尺效应对铁路道砟力学特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(S2):230—234, 245 (YAO Xinkai, BIAN Jiang, WANG Xudong. Experimental study on influences of scale effect on mechanical properties of railway ballast[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2):230—234, 245 (in Chinese))
- [33] 国家质量技术监督局. 陶瓷材料抗弯强度试验方法: GB/T 4741—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999 (The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Standard test method for bending strength of ceramic materials: GB/T 4741—1999[S]. Beijing: Standards Press of China, 1999 (in Chinese))

Experimental study on three-point bending test of frozen ballast aggregate under different ice contents

LI Xu¹, YAN Ying², XUE Yizhen¹, JI Shunying¹

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; 2. School of Civil Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, China)

Abstract: Compared with normal temperature environment, the mechanical properties of railway ballast bed in cold region are obviously different under freezing condition. The freezing strength between ice-bonded ballast particles is an important parameter affecting the dynamic characteristic of ballasted railway track. To further explore the bending mechanical properties of grading railway ballast under freezing condition, ice-bonded ballast aggregate specimen with different ice content were prepared and indoor three-point bending test was carried out at low-temperature environment. The effects of ice content on loading force-deflection curves and bending strength were studied. Meanwhile, fracture behaviour and the dissipated fracture energy of specimen were analyzed. The experimental results show that the failure process of bending fracture can be divided into brittle fracture and post-peak strain-softening fracture. The loading-deflection curves appear to obvious loading force drop when brittle fracture happens, after that the curve present a gentle downward trend in strain-softening fracture process. With the increasing ice content, the bending strength increases significantly, which can be expressed linearly approximately. In the process of bending fracture, an obvious tensile crack can be observed at the bottom of specimen with high ice content and expand upward along the contact face between ballast particles. When the ice content is low, the energy consumption of brittle fracture is slightly higher than that of strain-softening fracture, accounting for more than 70% of the total energy consumption. The specimen is mainly brittle fracture. With the increasing the ice content, the proportion of brittle fracture energy decreases rapidly, and the strain-softening fracture is the main part of the specimen failure and cannot be ignored.

Keywords: cold region railway; ice-bonded ballast; three-point bending; ice content; fracture energy