

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220125001

冻融循环作用下西藏东南冰碛土剪切力学特性 试验研究*

邱恩喜^{1,2}, 何巧玲¹, 孙希望³, 路建国¹, 张蕊³, 万旭升¹, 渠孟飞¹

(1. 西南石油大学土木工程与测绘学院, 四川成都 610500; 2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川成都 610059; 3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川成都 610031)

摘要: 西藏东南地区冰碛土堆积体广泛分布, 冻融作用严重影响冰碛土堆积体稳定性。对西藏东南及川滇地区200组冰碛土粒径级配进行对比分析, 并通过室内直剪试验研究了不同含水量和冻融循环作用下冰碛土剪切力学特性, 结合试样体积变化及水分迁移规律分析黏聚力劣化机制。结果表明: (1) 冰碛土粒径范围较广, 相比川滇地区, 西藏东南冰碛土细粒含量更多; (2) 冻融循环后, 黏聚力 c 呈负指数型函数降低, 内摩擦角 φ 波动幅度 $-6.47\% \sim +5.46\%$; (3) 含水量越高、冻融循环次数越多、垂直应力越大的试样剪胀性越弱, 剪缩性越强; 冻融循环条件下, 含水量越高的试样剪切带厚度变化范围越大; (4) 冻融6次后, 冰碛土体积无显著增长, 水分迁移呈规律性, 与黏聚力在冻融6次后劣化减缓相一致。

关键词: 冰碛土; 冻融循环; 剪切特性; 剪胀性; 剪切带; 黏聚力劣化

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)06-1267-13

Experimental Study on Shear Mechanical Properties of Moraine Soil in Southeast Tibet Subjected to Freeze-thaw Cycles

QIU Enxi^{1,2}, HE Qiaoling¹, SUN Xiwang³, LU Jianguo¹, ZHANG Rui³,
WAN Xusheng¹, QU mengfei¹

(1. School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;
2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (SKLGP), Chengdu 610059, China;
3. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Moraine soil accumulations are widely distributed in Southeast Tibet, and freeze-thaw cycles seriously affect the stability of moraine soil accumulations. In this research, the particle size distributions of 200 groups of moraine soils in southeast Tibet and Sichuan-Yunnan regions were compared and analyzed. The shear mechanical properties and deformation characteristics of moraine soil with different freeze-thaw cycles and moisture contents were carried out through the indoor direct shear test. The deterioration mechanism of cohesion was analyzed in combination with the change in sample volume and water migration. Results show that: (1) Moraine soil has a wide range of particle sizes. Com-

* 收稿日期: 2022-01-25; 修回日期: 2022-03-30

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金(SKLGP2021K017)、四川省高校工程研究中心开放课题(SC-FBHT2022-07)、四川省科技厅项目(2020YJ0416)、国家自然科学基金(42071087)资助

作者简介: 邱恩喜(1981—), 男, 副教授, 博士后。主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: enxiqiu@163.com

pared with that in Sichuan-Yunnan region, the moraine soil in southeast Tibet has more fine particles. (2) After freeze-thaw cycles, the cohesion decreases as a negative exponential function, and the internal friction angle fluctuates from $-6.47\% \sim +5.46\%$. (3) The specimen with higher moisture content, more freeze-thaw cycles and greater vertical stress has weaker dilatancy and stronger shear shrinkage. Under the condition of freeze-thaw cycles, the variation range of shear band thickness increases with the increase of moisture content. (4) After 6 cycles of freezing and thawing, the volume of moraine soil does not increase significantly, and the water migration shows a regular pattern, which is consistent with the deterioration of cohesion after 6 cycles of freezing and thawing.

Keywords: moraine soil; freeze-thaw cycle; shear characteristics; dilatancy; shear band; cohesion deterioration

引言

冰水堆积体、冰碛物、冰碛土等是由冰川运动引起,经历滑坡、泥石流等再造运动堆积而成的一类特殊地质体^[1],成分多以碎石、块石、砂砾为主。融化后冰碛土由块石、细颗粒土、水及气体组成,是典型的土石混合物,具有各向异性、高度非均质性 & 松散性等特点^[2-3],物理力学性质较为复杂。

专家学者对冰碛土这类松散岩土体进行了大量研究,袁广祥等^[4]、杨东旭等^[5]分析了川藏公路帕隆藏布流域的冰碛物边坡,对其物源、结构等工程地质特征及稳定性进行了评价。其物理力学性质与孔隙比、黏粒含量及含水量等参数密切相关^[5]。冰碛土具有较强结构性,这种结构性由粗颗粒嵌咬和细颗粒弱胶结作用构成^[6]。细颗粒对冰碛土孔隙的改造作用使其结构性出现差异,进而影响其抗剪强度^[7]。此外,屈永平等^[8-9]对藏东南帕隆藏布流域的川藏公路附近冰川泥石流灾害的形成条件进行了分析;颗粒组成是影响泥石流运动及能量传递机制的重要因素^[10],同时对边坡稳定性起控制作用,影响其力学强度和渗透性^[11]。目前,对整个西藏东南地区冰碛土粒径组成特征的认识尚不明晰,且针对不同冻融循环下冰碛土的剪切力学特性相关研究较少。而西藏东南地区季节性冻土分布广泛,冻融循环作用易改变冰川碎屑堆积体稳定性,并引发滑坡、泥石流和崩塌等地质灾害^[12-13],因此进一步研究冻融循环作用下冰碛土剪切力学特性意义非凡。

基于西藏东南及川滇地区 50 处沟谷 200 组级配曲线统计分析结果,对比分析其粒径分布差异,从冰碛土颗粒特征出发,对不同含水量及冻融循环次数下冰碛土试样进行直剪试验。通过对其抗剪

强度指标、剪胀(缩)性、剪切带厚度等因素进行分析,系统研究冻融循环下西藏东南地区冰碛土剪切特性,结合试样体积变化特征及水分迁移分布规律分析抗剪强度指标劣化机制。研究成果可为季节性冻土区冰碛土堆积体稳定性分析、滑移变形预测提供理论支撑和参考。

1 西藏东南地区冰碛土粒径特征分析

冰碛土集中分布在西藏东南、川西及云南等地,涉及的地形包括川西高山峡谷区、川西高原区及藏东南横断高山峡谷区。川滇地区冰碛土分布位置主要在理塘、鲜水河等全新世活动断裂带上,而西藏东南冰碛土分布区则多处于雅鲁藏布江、怒江等构造边界断裂带上,地理位置及地质构造差异必然影响冰碛土粒径分布,因此统计西藏东南及川滇地区冰碛土级配数据并作对比分析,更能深入研究西藏东南冰碛土颗粒分布特征。

统计并对比分析了西藏东南及川滇地区天摩沟、古乡沟、理县、贡嘎山等 50 处共 200 组冰碛物及冰碛土的粒径级配数据,如图 1 所示。其中西藏东南地区涉及沟谷 23 处,集中分布于林芝、波密及米林县附近。川滇地区约有 27 处,主要分布在大渡河流域、理县、贡嘎山等地,少量分布在怒江、金沙江流域。分析结果表明,西藏东南地区冰碛土颗粒级配(91 组)略宽,粒径范围为 0~100 mm,是典型非均质松散岩土体。然而,川滇地区冰碛土(109 组)粒径范围较西藏东南地区更广,细粒含量(<2 mm)普遍较少。根据各地区颗粒级配数据,求出平均级配(见表 1)。冰碛土的黏粒与粉粒含量较低,西藏

东南及川滇地区分别占7.43%和9.33%;西藏东南地区冰碛土砂粒占比最大,约为38.94%;川滇地区则是卵(碎)石含量最大,约为28.79%。导致粒径分布差异的原因一方面是因为西藏东南地处欧亚板块与印度板块间交界处,构造运动强烈,高山峡谷众多,平均海拔较高,寒冻风化更强烈;另一方面,西藏东南地区冰碛土多是通过高位碎屑流、泥石流等剧烈地质灾害堆积而成,冰川及各类再造运动对土石颗粒研磨作用强烈,以致粗颗粒含量远小于川滇地区冰碛土。

对200组级配数据进行颗粒组成分析,得到 d_{10} 、 d_{30} 及 d_{60} 的分布直方图及分布概率曲线图(图2)。西藏东南地区控制粒径 d_{60} 主要分布在0.5~20 mm,其中中砾粒组(5~20 mm)频度最高,占比为40.66%;而川滇地区 d_{60} 主要分布在2~1 000 mm,尽管细砾粒组(2~20 mm)频度最高(27.78%),但 $d_{60}>5$ mm占比高达61.1%。西藏东南地区中间粒径 d_{30} 分布在砂粒组(0.075~2 mm),而川滇地区 d_{30} 分布极广,0.075~200 mm均有,可见粒径范围之大。西藏东南及川滇地区有效粒径 d_{10} 集中在细粒组及细砂粒组(0~0.25 mm)间,占比分别为73.61%、63.55%。此外,冰碛土具有显著不均匀性,不均匀系数多分布在5~125和5~150(图3)。对于曲率系数,西藏东南地区冰碛土主要分布在0~3,但集中于0~1,表明冰碛土颗粒级配连续性差,约有68.13%的冰碛土级配不良;川滇地区曲率

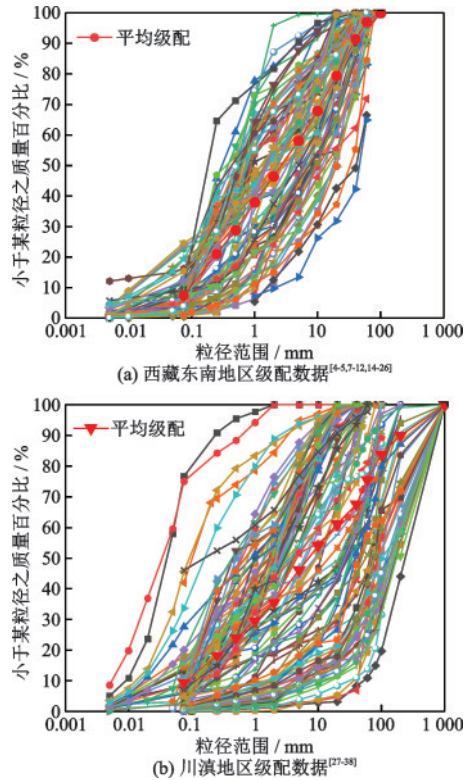


图1 西藏东南及川滇地区冰碛土粒径级配曲线

Fig.1 Grain size grading curve of moraine soil in southeast Tibet and Sichuan-Yunnan regions

系数也主要分布在0~3,约有63.87%的冰碛土级配不良。以上研究表明,地质环境对冰碛土粒径分布影响巨大,以往冰碛土研究少有土/石阈值^[39]概念,从含石量角度探究冰碛土力学性能具有现实意义。

表1 平均级配的各粒组含量

Table 1 Fraction composition of average gradation

颗粒范围	粉粒和黏粒	砂粒	圆粒/角粒	卵(碎)石	漂(块)石
粒径范围/mm	<0.075	0.075~2	2~20	20~200	>200
含量/%					
西藏东南	7.43	38.94	33.07	20.56	/
川滇	9.33	26.14	26.55	28.79	10.08

2 试验材料及方案

2.1 试验仪器

试验采用YZJ-30型岩石直剪仪进行试验,剪切盒尺寸为150 mm×150 mm×160 mm,其中上盒承压不动,下盒移动剪切。垂直和水平加载系统最大荷载为1 000 kN,分辨率0.1 kN,每一组试验法向压

力分别取50、100、200、300 kPa。剪切速率为2 mm/min,当剪应力读数达到稳定或剪切位移达到20 mm时停止剪切。

2.2 试验材料

土/石阈值是研究土石混合体的重要影响因素,徐文杰等^[40]在E.W.Medley^[39]基础上,提出一种确定土/石阈值的经验法。

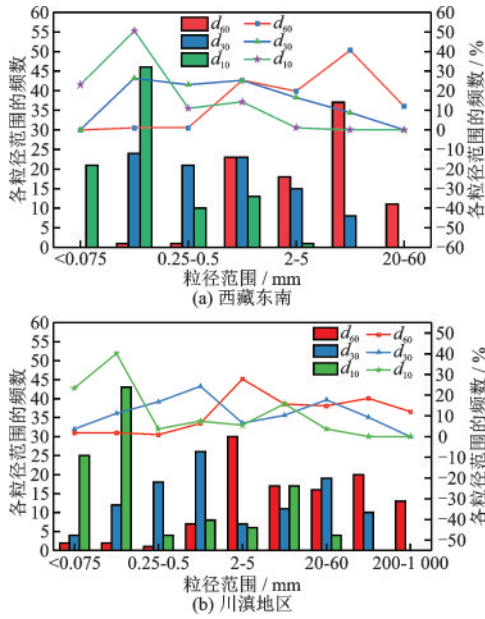


图2 d_{10} 、 d_{30} 及 d_{60} 分布直方图及分布概率曲线

Fig.2 d_{10} , d_{30} and d_{60} distribution histogram and distribution probability curve

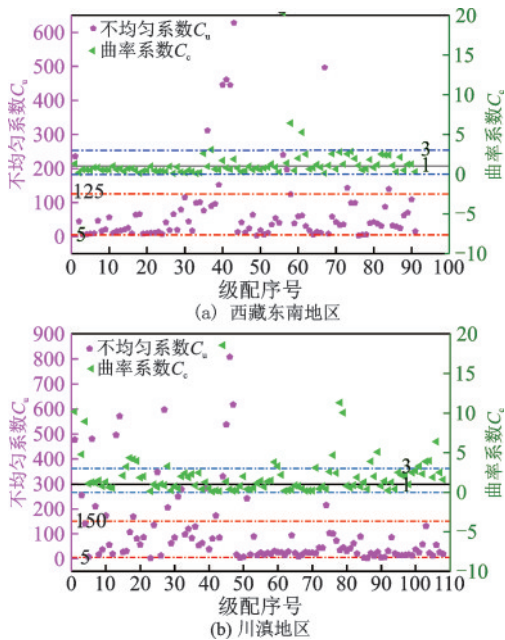


图3 冰碛土不均匀系数 C_u 与曲率系数 C_c 分布

Fig.3 Distribution diagram of uneven coefficient C_u and curvature coefficient C_c of moraine soil

$$d_{s/RT} = (0.05 - 0.07)L_c \quad (1)$$

式中, $d_{s/RT}$ 为土/石阈值; 对于直剪试验, L_c 为单个剪切盒高度, 试验土/石阈值范围为 4~5.6 mm, 为方便筛分土颗粒, 取 5 mm 作为土/石阈值。

将西藏东南冰碛土的平均级配作为试验级配 (含石量为 41.9%)。控制粗颗粒最大粒径不超过

20 mm, 采用等量替代法对级配进行缩制 (图 4)。粗颗粒采用人工碎石, 表面粗糙, 磨圆度差, 细颗粒为筛分后细粒冰碛土, 基本物理性质见表 2。

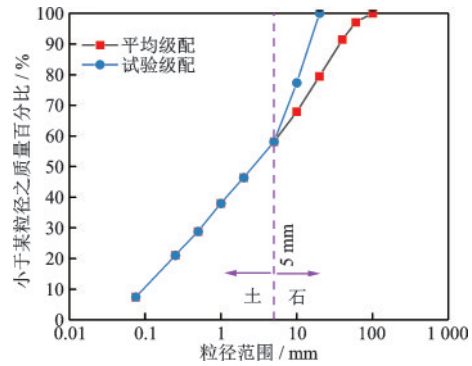


图4 平均级配及试验级配

Fig.4 Average grading and test grading

表2 细颗粒土基本物理性质

Table 2 Basic physical properties of fine-grained soil

天然含水量/%	塑限/%	液限/%	塑性指数
9.5	15.3	26.4	11.1

2.3 试验方案

对松散岩土体而言, 游离水在 0 °C 以下开始冻结, 但在细颗粒土中, 孔隙水在 -5 °C 下才开始冻结^[41]。结合西藏东南地区气温资料^[26], 冻融循环试样冻结温度采用 -15 °C, 试验将样品置于 -15 °C 环境温度下冷冻 12 h, 然后在 25 °C 环境温度下解冻 12 h, 由此作为 1 个冻融循环。有研究表明细粒土力学性能经历 5 个冻融循环后趋于稳定^[42], 故设计冻融循环次数 N 为 0、1、3、6、10 次。此外, 为探究含水量对冰碛土冻融作用的影响, 试样含水量分别设为 9%、12% 及 15%。具体过程 (图 5) 如下:

(1) 采用自制压样设备分 5 层压实, 每层压好后对表面进行刮毛, 试样干密度为 2.0 g/cm³。

(2) 为获得试样剪切过程中剪切带变形规律, 结合文献^[43]中的试验方法, 在压样模具中插入直径 1 mm 麻花钻以预留孔洞, 在试样压制完毕后插入直径 0.5 mm 柔性铝丝, 反复灌入粒径 < 0.075 mm 的干灰并填满孔隙以减小试验误差, 用保鲜膜包裹试样放入低温箱。

(3) 将冻融循环后的试样立即放入直剪仪中进

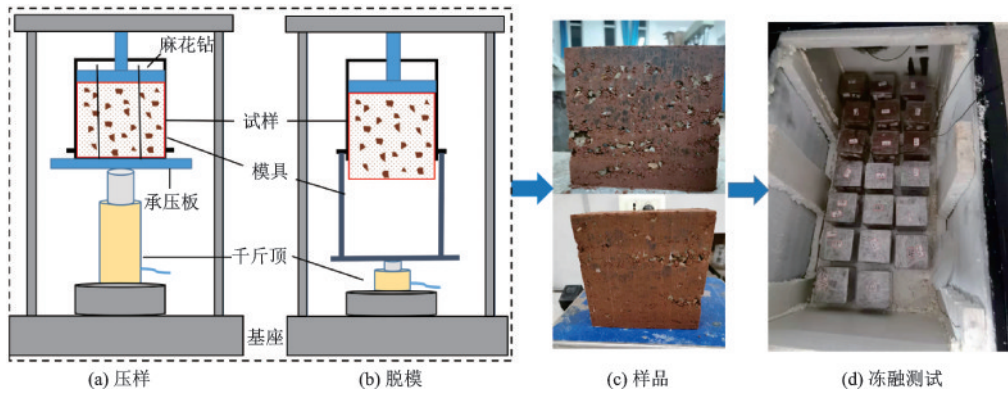


图5 试验流程示意

Fig.5 Test flow chart

行剪切,剪切完毕后,破开试样并用游标卡尺量读铝丝变形数据。

3 试验结果与分析

3.1 冻融循环对冰碛土的抗剪强度指标影响

图6为15%含水量试样在不同冻融循环次数及垂直应力下剪切应力—剪切位移关系曲线。在低垂直应力下,试样快速达到塑性屈服后应力保持不变。随垂直应力增加,剪应力随位移的增大其增幅逐渐增大。15%含水量试样冻融后剪应力—剪切位移曲线形态变化基本一致,均经历线弹性变形、应变硬化和塑性应变3个阶段。线弹性阶段的变形源于土体颗粒间的挤压;然后随着剪切位移增大,曲线斜率逐渐减小,颗粒间咬合、摩擦作用不断增强,形成应变硬化阶段,在这一阶段中,若剪应力增大到超过块石间咬合摩擦强度,会因应力释放而

形成应力跌落现象;当剪应力随剪切位移增大而稳定时,即为塑性应变阶段。

各试样抗剪强度与垂直应力关系曲线如图7所示,垂直应力较小时,抗剪强度随冻融循环次数增加呈下降趋势。当垂直应力达到200 kPa后,冻融次数较多的试样或出现抗剪强度增大现象。主要因为在冻融循环作用下,土骨架趋于疏松,较大垂直应力导致试样土颗粒间出现重新嵌固与咬合,使得抗剪强度略微增大。

抗剪强度指标与冻融循环次数关系曲线表明(图8),内摩擦角主要分布在33.55°~37.83°,冻融循环次数与土体内摩擦角无显著相关性,这是因为在含石量未改变的条件下,垂直应力会使冻融后的冰碛土颗粒位置出现错动、调整,导致内摩擦角在-6.47%~+5.46%波动,可认为冻融循环作用对冰碛土内摩擦角影响较小。但冻融作用对土体黏聚力影响显著。已有研究表明,在冻结过程中,冰晶生长,孔隙体积增大,随冻融循环次数增加,土颗粒间粘结和接触减少,黏聚力相应降低^[42, 44]。

表3为不同含水量冰碛土冻融后黏聚力非线性拟合结果,黏聚力呈负指数型函数($y = a + b \exp(c \cdot x)$)降低。含水量为9%和12%的试样,经历6次冻融循环后,黏聚力趋于稳定。而15%含水量试样经历6次冻融循环后黏聚力仍显著降低,可见初始含水量在很大程度上决定了冻融作用的影响程度^[45]。

将冻融后黏聚力衰减规律与已有文献^[46-49]

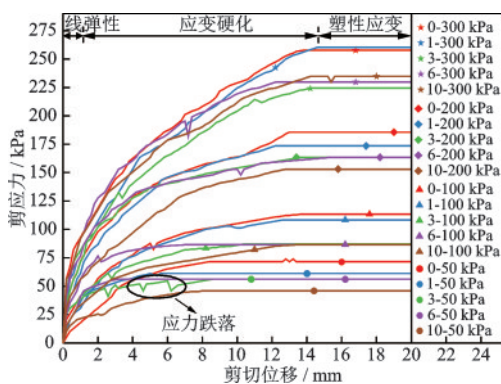


图6 剪应力-剪切位移关系曲线($w=15\%$)

Fig.6 Shear stress-shear displacement curves($w=15\%$)

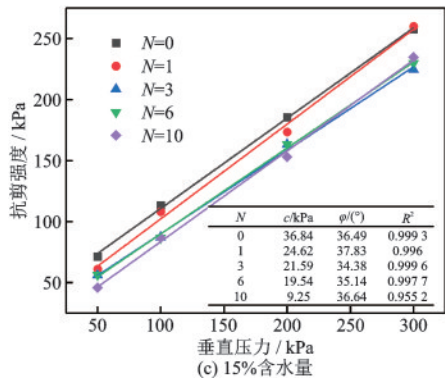
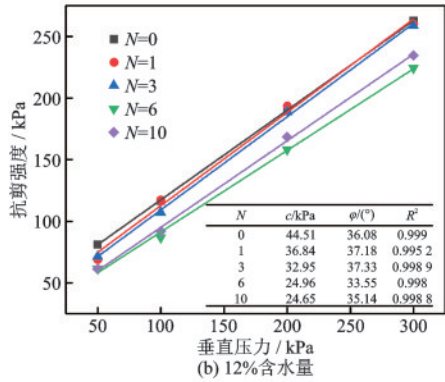
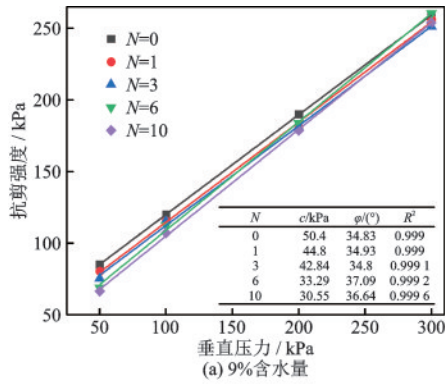


图7 抗剪强度与垂直应力关系曲线

Fig.7 Relationship curve between shear strength and vertical stress

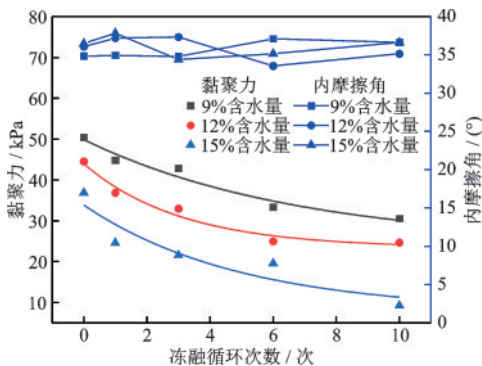


图8 冻融循环与抗剪强度指标关系曲线

Fig.8 Relationship curve between freeze-thaw cycle and shear strength index

数据进行对比分析,如图9所示。对文献中的数据进行非线性拟合,结果表明,除 $P_{2.5}=23\%$ 的粗粒土,土石混合体、盐渍土、 $P_{2.5}=43\%$ 的粗粒土及粉土在冻融后,黏聚力也呈负指数型函数衰减,与本文研究结果一致。

表3 不同含水量冻融后黏聚力非线性拟合公式

Table 3 Nonlinear fitting formula of cohesion after freezing and thawing with different water contents

含水量/%	公式($y = a + b \exp(c \cdot x)$)	R^2
9	$y = 24.18 + 25.70 \exp(-0.147x)$	0.964
12	$y = 23.36 + 20.60 \exp(-0.324x)$	0.973
15	$y = 7.83 + 26.03 \exp(-0.202x)$	0.876

3.2 冻融循环对冰碛土剪胀(缩)性的影响

12%含水量试样在冻融循环次增加时,其剪切位移—垂直位移关系曲线表明(图10曲线中以剪胀为正,剪胀为负),冻融循环对冰碛土剪胀性影响较大,冻融次数越多,土体最大剪胀量越小,剪缩越明显。未进行冻融试验时,试样较为密实,剪切过程中颗粒间相互接触、嵌固及咬合,随着剪应力增长,颗粒滑移、翻滚导致垂直位移持续增大,剪切全过程未出现剪缩现象。然而,冻融后试样形成更为明显的骨架-孔隙结构,剪切时内部颗粒间不断重新排列,直至再次紧密接触,剪缩才变为剪胀。

试样的剪胀(缩)量受含水量、垂直应力及冻融循环次数等因素影响(表4)。初始含水量对冻融循环作用下冰碛土剪胀(缩)性影响显著,含水量越高,颗粒间因水聚集,冻融后孔隙体积越大,在相同垂直应力下,剪胀量更小。以15%含水量试样为例,未冻融已出现剪缩行为,随反复冻融剪缩量不断增加,在冻融10次后,300 kPa垂直应力下最大剪胀量仅有0.094 mm,最大剪缩量则有0.845 mm。表明初始含水量对冰碛土这类松散多孔介质的冻融作用影响程度起决定作用。

3.3 冻融循环对冰碛土剪切带厚度的影响

铝丝位置及试样剪切后铝丝变形特征如图11所示。剪切带是指剪切面附近受剪切运动影响而导致土体颗粒滑动、翻滚的区域^[43],即图中铝丝弯

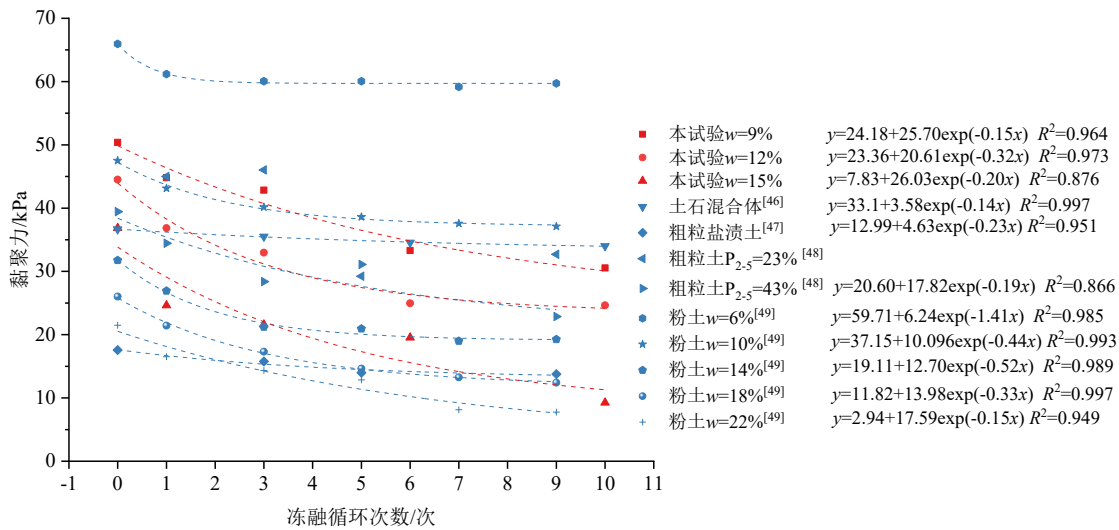


图9 不同类型土冻融循环次数与黏聚力关系曲线

Fig.9 Relationship curve between freeze-thaw cycles and cohesion of different types of soil

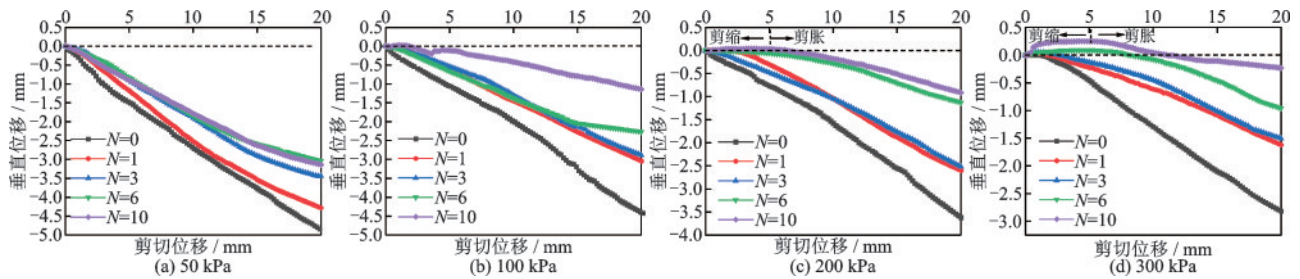


图10 12%含水量试样剪切位移-垂直位移关系曲线

Fig.10 Vertical displacement versus shear displacement for sample of 12% water content

表4 不同冻融循环次数下最大剪胀与剪缩量

Table 4 Maximum shear expansion and shear shrinkage under different freeze-thaw cycles

单位:mm

含水量/ %	垂直应力/ kPa	冻融循环次数 N				
		0	1	3	6	10
9	50	-5.01	-3.868	-3.225	-3.121	-3.288
	100	-3.288	-2.817	-3.027	-2.631	-2.092
	200	-2.267	-2.002/0.029	-2.000	-1.895	-1.363
	300	-1.912	-1.897	-1.739/0.032	-1.35/0.04	-1.051/0.09
12	50	-4.846	-4.281	-3.435	-3.04	-3.139
	100	-4.422	-3.039	-2.885	-2.314	-1.141/0.03
	200	-3.62	-2.6/0.009	-2.519	-1.125	-0.915/0.04
	300	-2.817	-1.618/0.03	-1.505/0.055	-0.96/0.09	-0.232/0.249
15	50	-3.322	-3.098	-2.982	-1.543	-1.411
	100	-2.856	-2.429	-2.697	-1.063	-0.72/0.079
	200	-2.266	-2.145	-1.994/0.04	-1.113/0.092	-0.617/0.177
	300	-1.938/0.025	-1.413/0.069	-0.935/0.093	-0.749/0.115	-0.094/0.845

注:表中正值为最大剪缩量,负值为最大剪胀量

起点 A 、 B 间垂直距离 D 。土石混合体抗剪强度呈现非线性特征,与剪切过程中剪切带形状改变密切相关^[50]。采用铝丝监测冰渍土剪切变形破坏特征,

不仅可以探究冻融作用下冰渍土强度变化机制,试验结果还有利于预判冰渍土堆积而成的滑坡剪切带厚度及其形成演化过程。

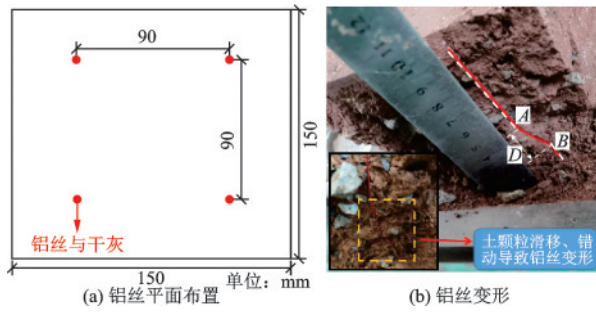


图 11 铝丝位置及剪切变形示意

Fig.11 Location and shear deformation of aluminum wires

图 12 为未冻冰碛土剪切带厚度 D 与垂直应力关系曲线。数据表明,低含水量下剪切带厚度随垂直应力增加略微增大,未冻冰碛土剪切带厚度 D 占试样高度的 $1/4 \sim 1/3$,冻融后剪切带厚度 D 占试样高度的 $1/6 \sim 1/3$ (图 13)。9% 含水量试样在冻融后剪切带厚度随垂直应力变化规律不明显,但当含水量增加到 12% 时, D 值随垂直应力呈先增加后减小趋势。主要原因在于冰晶生长导致土体孔隙体积增加,骨架结构比冻融前更明显,较大垂直应力使试样颗粒间位置得以调整,最终导致剪切带厚度降低。含水量继续增大到 15% 时,冻融后在垂直应力下剪切带厚度持续

减小。究其原因,一方面是因为冻融影响土骨架,另一方面是土颗粒间自由水具有润滑作用,造成剪切面附近颗粒以水平滑移为主,剪切带厚度减小。 D 值变化范围表明,含水量越高,冻融后剪切带厚度变化范围越大,9% 含水量试样最大变化量为 11.73 mm,而 15% 含水量试样则增大至 19.97 mm。以上研究结果表明,冻融循环增加了冰碛土土体性质的复杂性,剪切带厚度受粗颗粒分布、含水量、垂直应力、冻融次数等多方面因素共同影响。

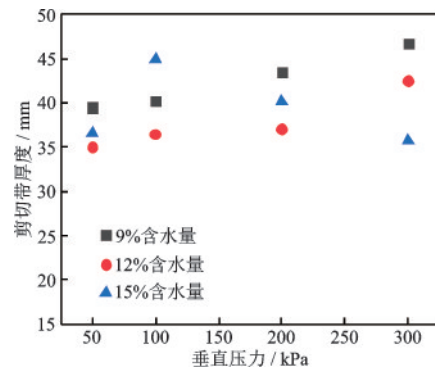


图 12 未冻试样剪切带厚度与垂直应力关系曲线

Fig.12 Relationship curve between shear band thickness and vertical stress of unfrozen samples

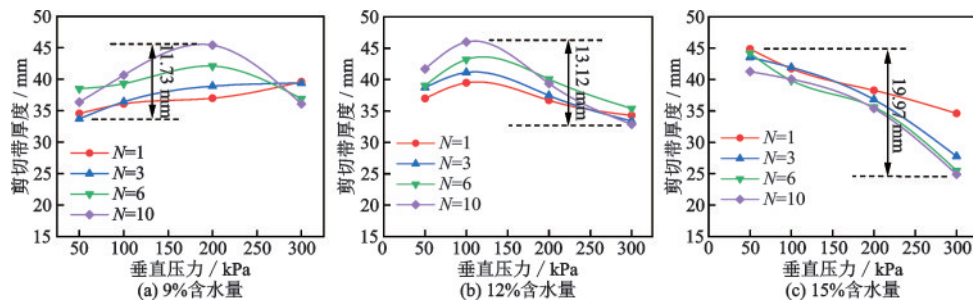


图 13 冻融试样剪切带厚度与垂直应力关系曲线

Fig.13 Relationship curve between shear band thickness and vertical stress of sample after freeze-thaw cycling

4 冰碛土黏聚力劣化机制分析

4.1 冻融循环作用下冰碛土体积变化特征

冻融目标次数后,获取试样体积变化率(图 14),数据表明,随着冻融循环次数增加,冻融循环对试样体积的影响逐渐降低,试样体积变化在冻融 1 次后最为显著,冻融 3 次后试样体积变化率增长趋

势减小,且在冻融 6 次后,试样无较大体积变化。含水量越高,冻融后试样体积变化率越大,黏聚力劣化现象越显著。当含水量达到 15% 时,体积变化率由 1.75% ($N=1$) 增加至 3.03% ($N=10$),而黏聚力从 36.84 kPa 降低到 9.25 kPa。冻结过程中,试样内水相变成冰,试样内部孔隙变化在宏观上表现为体积增大。当温度升高,冰融化成为水,被改变的颗粒排列方式及孔隙难以完全恢复^[2],以致土体结构松散。

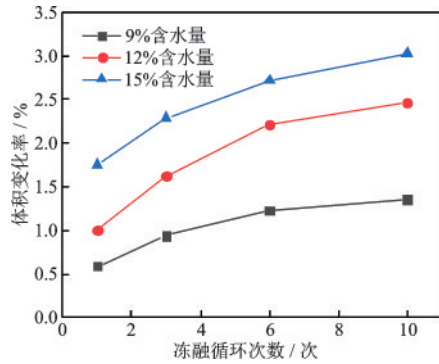


图14 冻融循环次数与体积变化率关系曲线

Fig.14 Relationship curve between freeze-thaw cycles and volume change rate

4.2 冻融循环作用下冰碛土水分迁移规律

为研究冰碛土试样冻融作用下的水分迁移变化规律,将初始含水量为12%试样由内到外划分为4个区域,每层厚17.5 mm,至上而下划分为7层,层厚20 mm(图15)。试样冻融目标次数后,绘制含水量等值线(图16)。

冻融1次和3次后,尽管试样上下两端的含水量略高,中间含水量较低,但等值线分布散乱。冻融6次后,水平方向含水量开始呈现中间低四周高的趋势。当冻融循环达到10次后,水平和垂直两个方向的含水量变化规律明显,垂直方向上向两端迁移,水平方向上由内向外迁移。在冻结初期,试样内部温度高于外界温度,在温度梯度作用下,冻结峰面向内移动,孔隙水迅速冻结。冻结大孔在弯曲冰-水界面处产生的集中吸力促使未冻孔中的毛细水和薄膜水向孔内迁移^[51]。而解冻时,土体表面先融化,在水势梯度和温度梯度作用^[52]下水分迁移至土体表层。

冻融后土体宏观上表现为体积增大及强度衰减,微观上主要体现为颗粒间接触变化及孔隙、裂

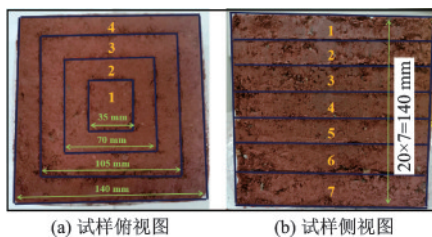


图15 试样分割示意

Fig.15 Schematic diagram of sample segmentation

隙的增加^[2,53-54]。冻结过程中,冰晶迅速生长,不断充填孔隙并挤压土颗粒,以致试样体积增大^[55],同时水势梯度和温度梯度引发试样内部发生水分迁移,土体结构不断松散。随着冻融循环次数增加,冰碛土体积在冻融6次后无显著增长,内部水分迁移在冻融6次后趋于稳定,这与冰碛土在冻融6次后黏聚力衰减速率减缓相一致,以上分析表明,在反复冻融循环作用下,试样内部水分不断迁移及土体结构逐渐松散导致冰碛土黏聚力劣化。

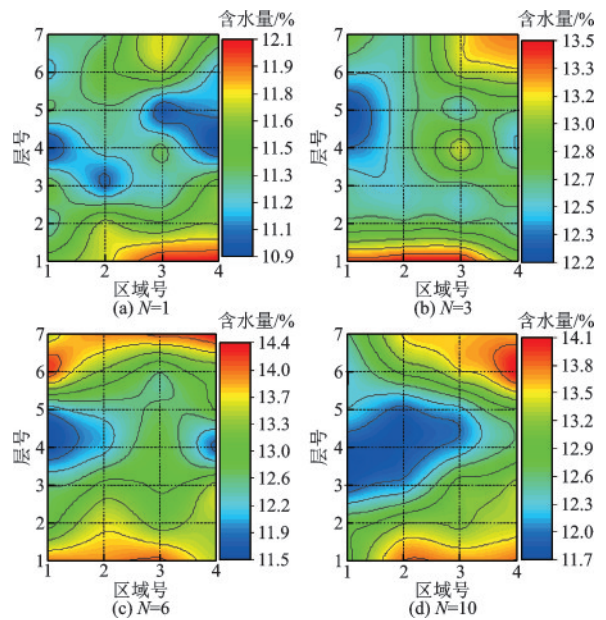


图16 试样冻融后含水量剖面等值线

Fig.16 Water content profile after cycles of freezing and thawing

5 结 论

冻融循环作用下,冰碛土抗剪强度指标衰减是影响堆积体稳定性降低的主要原因。本文基于西藏东南及川滇地区冰碛土粒径分布特征研究,开展了不同水量及冻融循环次数下冰碛土室内直剪试验,探讨了黏聚力与内摩擦角、剪胀(缩)性、剪切带厚度及黏聚力劣化机制,以期西藏东南冰碛土堆积体稳定性分析及滑移变形预测提供理论支撑和参考。主要研究结论如下:

(1)冰碛土粒径分布较广,黏粒及粉粒含量低,不均匀性好,连续性差,相比川滇地区,西藏东南冰碛土含石量略低,但砂砾含量更大。

(2)冰碛土剪应力—剪切位移曲线主要经历线弹性变形、应变硬化和塑性应变3个阶段。经历冻融循环作用后,冰碛土黏聚力呈负指数型函数降低,内摩擦角与冻融循环次数无显著相关性,其值在 $33.55^{\circ}\sim 37.83^{\circ}$ 内波动。

(3)含水量、冻融循环次数及垂直应力等因素均会影响冰碛土剪胀性,表现为含水量越高、冻融循环次数越多、垂直应力越大的试样剪胀性越弱,剪缩行为越明显。

(4)未冻冰碛土剪切带厚度占试样高度的 $1/5\sim 1/3$ 。冻融后冰碛土性质变得复杂,剪切带厚度 D 占试样高度的 $1/6\sim 1/3$,含水量越大,剪切带厚度变化范围越大,但剪切带厚度受含水量、垂直应力、冻融次数等多方面因素影响。

(5)冻融循环6次后,冰碛土体积增长缓慢,水分迁移呈规律性,反复冻融导致水分不断迁移,试样体积增大,结构松散,以致黏聚力劣化。

论文后续拟将结合微观试验及模型试验,系统地研究含石量及冻融循环对西藏东南冰碛土堆积体稳定性的影响规律,以期为西藏东南地区工程建设提供理论参考。

参考文献:

- [1] 石崇,王盛年,刘琳,等.基于数字图像分析的冰水堆积体结构建模与力学参数研究[J].岩土力学,2012,33(11):3393-3399.
Shi C, Wang S N, Liu Lin, et al. Structural modeling and mechanical parameters of ice-water deposits based on digital image analysis[J].Rock and Soil Mechanics, 2012,33(11):3393-3399. (in Chinese)
- [2] Tang L, Li G, Li Z, et al. Shear properties and pore structure characteristics of soil-rock mixture under freeze-thaw cycles[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021,80(4):3233-3249.
- [3] 薛亚东,岳磊,李硕标.含水率对土石混合体力学特性影响的试验研究[J].工程地质学报,2015(1):21-29.
Xue Y D, Yue L, Li S B. Experimental study on the influence of water content on mechanical properties of soil rock mixture [J].Journal of Engineering Geology, 2015 (1): 21-29. (in Chinese)
- [4] 袁广祥,曾庆利,尚彦军,等.川藏公路然乌—鲁朗段

冰碛高边坡稳定性分析[J].地质灾害与环境保护,2007(4):47-51.

Yuan G X, Zeng Q L, Shang Y J, et al. Stability analysis of moraine high slope in Ranwu Lulang section of Sichuan Tibet highway [J].Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2007 (4): 47-51. (in Chinese)

- [5] 杨东旭,游勇,王军朝,等.西藏东南帕隆藏布流域冰碛物典型特征及工程效应[J].防灾减灾工程学报,2020,40(6):841-851.

Yang D X, You Y, Wang J C, et al. Typical characteristics and engineering effects of Moraine in Palong Zangbu basin in Southeast Tibet [J].Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020,40 (6): 841-851. (in Chinese)

- [6] 冯俊德,李建国,汪稔,等.云南某铁路冰碛土大型直剪强度特性试验研究[J].岩土力学,2008,29(12):3205-3210.

Feng J D, Li J G, Wang R, et al. Experimental study on large-scale direct shear strength characteristics of moraine soil in a railway in Yunnan [J].Rock and Soil Mechanics, 2008,29 (12): 3205-3210. (in Chinese)

- [7] 蒋德旺,崔鹏,王姣,等.细粒含量对冰碛土抗剪强度影响的实验研究[J].冰川冻土,2019,41(1):129-139.
Jiang D W, Cui P, Wang J, et al. Experimental study on the effect of shear strength of moraine soil with fine grain content [J].Journal of Glaciology and Geocryology, 2019,41(1):129-139. (in Chinese)

- [8] 屈永平,肖进,潘义为.西藏东南地区冰川泥石流形成条件初步分析——以天摩沟冰川泥石流为例[J].水利水电技术,2018,49(12):177-184.

Qu Y P, Xiao J, Pan Y W. Preliminary analysis on formation conditions of glacier debris flow in Southeast Tibet-Taking Tianmogou glacier debris flow as an example [J]. Water resources and hydropower technology, 2018,49 (12): 177-184. (in Chinese)

- [9] 屈永平,朱静,卜祥航,等.西藏林芝地区冰川降雨型泥石流起动实验初步研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(增1):3256-3266.

Qu Y P, Zhu J, Bu X H, et al. Preliminary experimental study on the initiation of glacier rainfall debris flow in Nyingchi, Tibet [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015,34 (Sup1): 3256-3266. (in Chinese)

- [10] Liu S, Zhang J, Cheng X, et al. Gradation and rheological characteristics of glacial debris flow along the

- kangding-linzi section of Sichuan-Tibet railway [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020 :1-12. .
- [11] Casagli N, Ermini L, Rosati G. Determining grain size distribution of the material composing landslide dams in the Northern Apennines: sampling and processing methods[J]. *Engineering Geology*, 2003,69(1/2): 83-97.
- [12] 高波, 张佳佳, 王军朝, 等. 西藏天摩沟泥石流形成机制与成灾特征[J]. *水文地质工程地质*, 2019,46(5): 144-153.
Gao B, Zhang J J, Wang J C, et al. Formation mechanism and disaster characteristics of debris flow in Tianmo gully, Tibet [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019,46 (5): 144-153. (in Chinese)
- [13] 童立强, 涂杰楠, 裴丽鑫, 等. 雅鲁藏布江加拉白垒峰色东普流域频繁发生碎屑流事件初步探讨[J]. *工程地质学报*, 2018,26(6): 1552-1561.
Tong L Q, Tu J N, Pei L X, et al. Preliminary discussion on frequent debris flow events in Sedongpu basin of Galabailei peak of Yarlung Zangbo River [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26 (6) : 1552-1561. (in Chinese)
- [14] Chen L, Zhou G G D, Mu Q, et al. Compression characteristics of saturated re-compacted glacial tills in Tianmo Gully of Tibet, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2019,16(7): 1661-1674.
- [15] Cheng Z, Geng X, Dang C, et al. Modeling experiment of break of debris-flow dam[J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2007,12(4): 588-594.
- [16] Cui P, Dang C, Cheng Z, et al. Debris flows resulting from glacial-lake outburst floods in Tibet, China [J]. *Physical Geography*, 2010,31(6): 508-527.
- [17] Deng M, Chen N, Liu M. Meteorological factors driving glacial till variation and the associated periglacial debris flows in Tianmo Valley, south-eastern Tibetan Plateau[J]. *Natural Hazards & Earth Systemences*, 2017, 17(3):345-356.
- [18] Ge Y, Cui P, Su F, et al. Case history of the disastrous debris flows of Tianmo Watershed in Bomi County, Tibet, China: Some mitigation suggestions [J]. *Journal of Mountain Science*, 2014,11(5): 1253-1265.
- [19] Zhang J, Shen X. Debris-flow of Zelongnong Ravine in Tibet [J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, 8(4) : 535-543.
- [20] 胡桂胜, 陈宁生, 邓明枫, 等. 西藏林芝地区泥石流类型及形成条件分析[J]. *水土保持通报*, 2011,31(2): 193-197.
Hu G S, Chen N S, Deng M F, et al. Analysis on types and formation conditions of debris flow in Nyingchi area, Tibet [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011,31 (2): 193-197. (in Chinese)
- [21] 黄伟. 西藏东南林芝地区典型冰湖溃决泥石流基本特征和灾害链研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
Huang W. Study on the basic characteristics and disaster chain of typical glacial lake outburst debris flow in Tibetan Southeast of Linzhi prefecture [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [22] 杨彬. 西藏林芝地区冰水堆积物隧道开挖及支护模型试验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
Yang B. Experimental study on tunnel excavation and support model of ice water accumulation in Nyingchi, Tibet [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [23] 杨彬, 王潇弘, 吉锋. 基于数字图像技术的冰水堆积体边坡稳定研究[J]. *人民黄河*, 2017,39(9): 103-107.
Yang B, Wang X H, Ji F. Study on slope stability of ice water accumulation based on digital image technology [J]. *Yellow River*, 2017,39 (9): 103-107. (in Chinese)
- [24] 游勇, 程尊兰. 西藏波密米堆沟泥石流堵河模型试验 [J]. *山地学报*, 2005(3): 288-293.
You Y, Cheng Z L. Model test of river blocking by debris flow in mimidui gully, Bomi, Tibet [J]. *Mountain Research*, 2005 (3): 288-293. (in Chinese)
- [25] 张振. 林芝地区冰水堆积体本构模型及物理力学性能研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
Zhang Z. Research on the constitutive model and physical and mechanical properties of ice-water deposits in Nyingchi area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [26] 周航. 雅鲁藏布江大古河段冰水堆积物特征及本构模型研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
Zhou H. Study on the characteristics and constitutive model of ice-water deposits in the great ancient reach of the Yarlung Zangbo River [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [27] 白永健. 深切河谷土石混合体滑坡微观结构及灾变过程研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
Bai Y J. Research on the mesoscopic structure and catastrophic process of landslides with soil-rock mixture in deep valley [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [28] 曾涛. 高寒地区冰水堆积物颗粒特征分析及物理力学

- 性质研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- Zeng T. Particle characteristics analysis and physical and mechanical properties of ice-water deposits in alpine regions [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [29] 冯俊德, 李建国, 汪稔, 等. 云南某铁路冰碛土大型直剪强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3205-3210.
- Feng J D, Li J G, Wang R, et al. Experimental study on large-scale direct shear strength characteristics of moraine soil on a railway in Yunnan [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3205-3210. (in Chinese)
- [30] 何源远. 九襄冰水堆积体的降雨入渗特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- He Y Y. Research on rainfall infiltration characteristics of Jiuxiang ice-water deposits [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [31] 黄家华. 四川理县桃坪冰水堆积体强度特性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- Huang J H. Research on strength characteristics of Taoping ice-water deposits in Lixian, Sichuan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [32] 黎一禾. 理县西山村滑坡冰水堆积物动强度特性及失稳机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- Li Y H. Dynamic strength characteristics and instability mechanism of ice-water deposits in Xishan Village, Li County [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [33] 刘智. 高陡冰水堆积体岸坡稳定性分析及防治措施研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- Liu Z. Analysis on the stability of the bank slope of the high and steep ice-water deposits and research on the control measures [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [34] 唐永俊. 怒江东月各非冰川型高山远程泥石流的扩散机理[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- Tang Y J. The diffusion mechanism of long-range debris flows in non-glacial alpine mountains in the Eastern Moon of the Nujiang River [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [35] 涂国祥, 黄润秋, 邓辉, 等. 某巨型冰水堆积体强度特性大型常规三轴试验[J]. 山地学报, 2010, 28(2): 147-153.
- Tu G X, Huang R Q, Deng H, et al. Large-scale conventional triaxial test of strength characteristics of a giant ice-water deposit[J]. Mountain Research, 2010, 28(2): 147-153. (in Chinese)
- [36] 张杰. 冰水堆积物填料工程特性室内研究[J]. 铁道建筑, 2010(7): 94-96.
- Zhang J. Indoor study on engineering characteristics of ice-water deposits filling[J]. Railway Engineering, 2010(7): 94-96. (in Chinese)
- [37] 张彦锋. 循环冻融作用下冰碛土碎化机制及其致灾效应研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- Zhang Y F. Research on the mechanism of moraine soil fragmentation and its disaster-causing effect under cyclic freezing and thawing [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020. (in Chinese)
- [38] 赵石力, 何源远. 大渡河中游某古冰水堆积体降雨入渗特征试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(4): 185-191.
- Zhao S L, He Y Y. Experimental study on rainfall infiltration characteristics of an ancient ice-water deposit in the middle reaches of Dadu River [J]. Journal of Water Resources and Architectural, 2020, 18(4): 185-191. (in Chinese)
- [39] Medley E W. The engineering characterization of melanges and similar rock-in-matrix rocks (bimrocks) [D]. Berkeley: University of California at Berkeley, 1994.
- [40] 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.
- Xu W J, Hu R L. Concept, classification and significance of soil-rock mixture [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(4): 50-56. (in Chinese)
- [41] Andersland O B, Ladanyi B. An Introduction to frozen ground engineering[M]. Boston: Springer, 1994.
- [42] Zheng F, Shao S, Wang S. Effect of freeze-thaw cycles on the strength behaviour of recompacted loess in true triaxial tests [J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 181: 103172.
- [43] 胡峰, 李志清, 胡瑞林, 等. 基于大型直剪试验的土石混合体剪切带变形特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 766-778.
- Hu F, Li Z Q, Hu R L, et al. Experimental study on shear zone deformation characteristics of soil-rock mixture based on large-scale direct shear test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 766-778. (in Chinese)
- [44] Cui Z, He P, Yang W. Mechanical properties of a silty clay subjected to freezing-thawing [J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 98: 26-34.
- [45] 冯德成, 林波, 张锋, 等. 冻融作用对土的工程性质影响的研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(2): 111-127.

- Feng D C, Lin B, Zhang F, et al. Research progress on the effects of freezing and thawing on the engineering properties of soil [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2017,47(2): 111-127. (in Chinese)
- [46] Zhou Z, Ding H H, Gao W Y, et al. Study on mechanical properties of soil-rock mixture of various compactness subjected to freeze-thaw cycles [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2021, 13(5): 450-462.
- [47] 张莎莎, 杨晓华. 粗粒盐渍土大型冻融循环剪切试验 [J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2012, 32(3): 11-16. Zhang S S, Yang X H. Large-scale freeze-thaw cycle shear test on coarse-grained saline soil [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2012, 32(3): 11-16. (in Chinese)
- [48] 穆彦虎, 陈涛, 陈国良, 等. 冻融循环对黏质粗粒土抗剪强度影响的试验研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(3): 375-386. Mu Y H, Chen T, Chen G L, et al. Experimental study on the effect of freeze-thaw cycles on the shear strength of clayey coarse-grained soil [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(3): 375-386. (in Chinese)
- [49] 尹松, 李力, 边亚东. 冻融循环作用下压实粉土的剪切强度性能试验研究 [J]. *公路工程*, 2019, 44(5): 42-46, 237. Yin S, Li L, Bian Y D. Experimental study on shear strength properties of compacted silt under freeze-thaw cycles [J]. *Highway Engineering*, 2019, 44(5): 42-46, 237. (in Chinese)
- [50] Xu W J, Hu L M, Gao W. Random generation of the meso-structure of a soil-rock mixture and its application in the study of the mechanical behavior in a landslide dam [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 86: 166-178.
- [51] 程桦, 陈汉青, 曹广勇, 等. 冻土毛细-薄膜水分迁移机制及其试验验证 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(10): 1790-1799. Cheng H, Chen H Q, Cao G Y, et al. The capillary-film moisture migration mechanism in frozen soil and its experimental verification [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(10): 1790-1799. (in Chinese)
- [52] 薛珂, 郑涛, 张明礼, 等. 寒区非饱和土体混合态水分迁移研究进展 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(3): 39-46, 103. Xue K, Zheng T, Zhang M L, et al. Research progress of mixed water transport in unsaturated soils of cold region [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(3): 39-46, 103. (in Chinese)
- [53] 徐文彬, 王家臣, 栾茂旭. 冻融循环下排土场散体物料力学特性及其稳定性分析 [J]. *矿业科学学报*, 2022, 7(2): 154-165. Xu W B, Wang J C, Luan M X. Mechanical properties and stability analysis of bulk materials in dumps under freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 7(2): 154-165. (in Chinese)
- [54] Liu Y, Deng H W, Xu J B, et al. Association study on the pore structure and mechanical characteristics of coarse-grained soil under freeze-thaw cycles [J]. *Minerals*, 2022, 12(3): 314.
- [55] 汪恩良, 许春光, 韩红卫, 等. 黑龙江漠河段粗砂土冻胀性试验研究 [J]. *东北农业大学学报*, 2021, 52(4): 88-96. Wang E L, Xu C G, Han H W, et al. Experimental study on frost heave of coarse sandy soil in Mohe Reach of Heilongjiang River [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2021, 52(4): 88-96. (in Chinese)

(本文责编: 苏泽云)