

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220928003

藏东南冰碛体剪切特性受冻融循环的影响及改良*

陈志敏¹, 刘宝莉¹, 李 宁², 李江鹏¹

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 藏东南地区广泛分布着冰碛体堆积体, 此土体严重影响工程安全。为了研究冰碛体的剪切性能并对其进行改良, 运用相似原理配制出级配良好的冰碛体相似材料, 分别在不同冻融循环次数和不同含水率的条件下, 对冰碛体相似材料开展了直剪试验, 同时掺入机油和粉煤灰外加剂进行三轴试验, 研究其对冰碛体相似材料抗剪强度参数的影响。结果表明: (1) 直剪试验过程中, 随着垂直压力的增大, 冰碛体的位移-剪应力曲线由弱应变软化型转变为弱应变硬化型。(2) 含水率变化对冰碛体抗剪强度的升降受到冻融循环次数的影响。(3) 冻融循环为5次是冰碛体材料抗剪强度的分界线。(4) 机油和粉煤灰对冰碛体抗剪强度指标(咬合力和内摩擦角)的影响相反。

关键词: 冰碛体; 相似材料; 冻融循环; 剪切特性; 改良

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)02-0467-11

Influence of Freeze-Thaw Cycles on Shear Characteristics of Moraines in Southeastern Tibet and Their Improvement

CHEN Zhimin¹, LIU Baoli¹, LI Ning², LI Jiangpeng¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: Moraine deposits, which are widely distributed in southeastern Tibet, pose significant risks to engineering projects. In order to study and improve their shear performance, well-graded similar materials replicating moraines were prepared using the principle of similarity. Under different freeze-thaw cycles and moisture content conditions, direct shear tests were conducted on these similar materials. Triaxial tests were conducted with the addition of engine oil and fly ash admixtures to study their impact on the shear strength parameters of the moraine-like materials. The results showed that: (1) In direct shear tests, with the increase of vertical pressure, the displacement-shear stress curve of moraines changed from a weak strain softening type to a weak strain hardening type. (2) The influence of moisture content on moraines' shear strength was affected by the number of freeze-thaw cycles. (3) After five freeze-thaw cycles, the material reached a threshold in shear strength. (4) Engine oil and fly ash had opposite effects on the shear strength indices (cohesion and internal friction angle) of the moraines.

Keywords: moraine; similar materials; freeze-thaw cycles; shear performance; improvement

* 收稿日期: 2022-09-28; 修回日期: 2023-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(12262018)资助

作者简介: 陈志敏(1979—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事岩土与地下工程方面的研究。E-mail: czm@mail.lzjtu.cn

通讯作者: 刘宝莉(1997—), 男, 硕士研究生。主要从事桥梁隧道工程领域的研究。E-mail: 2142732545@qq.com

0 引言

冰碛体作为一种特殊的岩土材料,其最大特征是宽级配,成因是冰川消融的堆积体,力学性质受到地下水、温度的循环变化、粒径组成等各种因素的影响,表现出稳定性差的工程特征^[1-3]。西藏东南部丁青、嘉黎、工布江达至措美一线以东,分布有冰碛体地层,某隧道处于此地层中。

由于冰碛体多处于高寒高海拔地区,所以含水率变化和冻融循环现象对这些地区的建设工程活动影响密切。因此,国内外学者针对冰碛体在工程应用方面做了很多研究,武安斌^[4]、屈智炯等^[5]研究了冰碛体成因及其物理性质,杨东旭等^[2-3]、付宴菊等^[6]、袁广祥等^[7]研究了西藏地区帕隆藏布流域冰碛体的物理特征及工程效应,表明物理力学性质与含水率、孔隙比、黏粒含量等参数密切相关,B.Nils-son等^[8]研究了冰碛体堆积后,风化、烘干、冻融循环、重塑、细颗粒的渗透作用等对冰碛体的工程地质性质产生的影响。高寒高海拔地区,含水率和冻融循环对土体特性影响较大,李骅锦等^[9]、S.K. Vanapalli等^[10]、陈天明^[11]研究表明抗剪强度随含水率的增加而减小,水对冰碛地层围岩有较强的浸泡软化破坏作用,张彦锋^[12]研究了循环冻融作用下冰碛土碎化机制及其致灾效应,邱恩喜等^[13]对藏东南地区冰碛土研究,认为冻融循环作用严重影响冰碛土堆积体的稳定性。随着研究的深入,专家学者开始尝试用相似理论对冰碛体进行研究,张振等^[14]采用相似级配法和等量替代法,研究了含水率对冰碛体黏聚力、内摩擦角的影响,总结出相似级配与等量替代法求强度指标的差异。由于冰碛体的不稳定性,严重影响其工程活动的安全性,需要对其进行改良,在受冻融循环影响的工程中,常采用粉煤灰改良土的特性,S. Bin-Shafique等^[15]、K. Z. Chen等^[16]认为冻融循环导致盐渍土的抗剪强度降低,但经历相同冻融循环次数掺入粉煤灰的盐渍土较同条件下未掺入粉煤灰的盐渍土抗剪强度大,李学德^[17]发现粉煤灰的掺入通过改变土体的微观结构,可以在一定程度上提升土体的抗冻性,有助于提升道路的耐久性。机油因其具有类似沥青的分子结构和含有大量轻质组分而普遍应用于工程实践领域^[18-19],机油易获取、易操作,具有较低的冻结点和一定的黏度,而冰碛体呈泥质半胶结或无胶结状

态^[20],可以尝试将其掺入冰碛体中,研究对冰碛体材料特性的影响。但机油一定程度上会造成环境污染,若机油对冰碛体改良有效后可以采用沥青或其他类似物代替机油。

目前,冻融循环下冰碛体剪切特性的研究仅是基于某一特定地点取土研究,而没有对某一地区冰碛体综合整体研究,又由于进行长期大量实验时藏东南冰碛体现场难以获取,为了更快的开展研究,根据工程现场资料调研,运用相似原理配制冰碛体相似材料,研究藏东南地区冰碛体的力学性能。已有大量使用粉煤灰改善土性质的研究,但没有同时使用粉煤灰和机油改良冰碛体的研究,本实验通过在冰碛体相似材料中掺入粉煤灰和机油来改善冰碛体的性质,以探索可以改善工程活动条件的因素。

1 研制冰碛体相似材料

1.1 相似理论

冰碛体属于一种宽级配的岩土材料,在进行室内试验时,难免会出现超粒径处理的情况,目前《土工试验规程》^[21]中关于超粒径缩尺处理的方法主要有:剔除法、等量替代法、相似级配法、结合法。结合法是上述几个方法的组合处理,它集中了上述方法的优点,为了使得试验结果与原材料更加相近,采用结合法进行相似材料的研究。冰碛体作为一种岩土颗粒材料,其力学强度是由颗粒间相互作用决定的,不同的级配条件必然会产生不同的强度效应,结合相似第一定理和相似第二定理,可以使用河砂作为基本材料调解比例配置出冰碛体的相似材料,在此基础上通过改变含水率和冻融循环次数,对冰碛体的剪切行为进行研究。

对于颗粒材料,颗粒的尺寸可以不同,但其线性尺寸必须成相应的比例,这就是颗粒材料的几何相似,这里的线性关系是粒径。如图1^[13]所示,藏东南地区冰碛体的粒径主要集中在0.075~100 mm之间,粒径颗粒较为集中,这使得利用常规材料去制备它的相似材料较为简便。只有做到几何相似,才能保证后面的物理相似。就冰碛体而言,最重要影响其性能的因素包括内部因素和外因因素,内部因素主要是级配的组成,对应的物理量是不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c ,外部因素包括温度、降水和地形等因素,对应的物理量是温度和含水率。而对于冰碛体的力学宏观参数

包括最大剪应力、最大偏差应力等。

由于影响冰碛体力学性能的因素有很多,所以相似试验着重研究影响冰碛体稳定性的主要因素,

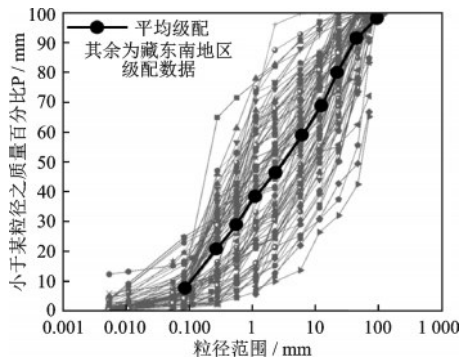


图1 藏东南地区冰碛体粒径级配

Fig.1 Particle size gradation of moraines in southeastern Tibet

表1 稻城冰碛体级配比例

Table 1 Gradation ratios of moraines in Daocheng

粒径范围/mm	<0.075	0.075~0.1	0.1~0.2	0.2~0.5	0.5~2	2~5	5~10	10~20
质量占比	0	5%	15%	20%	30%	10%	15%	5%

陈中学等^[23]、周小军等^[24]以2 mm作为粗细颗粒的分界粒径进行相应研究,苟万春等^[25]发现2 mm以下颗粒在泥石流的粒度中是一个分界线。由此可见,2 mm是粗细颗粒的重要分界线,结合规范中结合法的定义,最终将冰碛体相似材料级配比例见表2。

表2 冰碛体相似材料级配比例

Table 2 Gradation ratios of moraine-like materials

粒径范围/mm	<0.075	0.075~0.5	0.5~2	2~5	5~10
质量占比	0	40%	30%	10%	20%

1.3 冰碛体相似材料原材料基本参数

相似材料在选择时需要满足均匀性、各向同性和连续性,材料之间不能发生化学反应,本实验原材料为各级配的河砂和纯净水。其中2 mm以上河砂作为粗骨料,0.075~0.5 mm为细骨料。

采用相似级配法配置试验土样,颗粒级配曲线如图2所示,由图可知 $d_{60}=5$ mm, $d_{30}=2$ mm, $d_{10}=0.5$ mm,计算得到其不均匀系数 $C_u=10$,曲率系数 $C_c=1.6$,前文中提到的青藏高原稻城典型冰碛体的不均匀系数为 $C_u=8.05$,曲率系数 $C_c=1.09$,两者相差不大,且都为级配良好土。

采用烘干法测得河砂的天然含水率为3%,鉴

在满足其物理相似的基础上,开展了其力学性质受外界环境变化规律的研究。如沈翔等^[22]为了研究深海环境下砂土地层的相似材料,基于正交试验法,对不同配比相似材料的物理力学参数的变化规律进行分析。

1.2 冰碛体相似材料级配确定

根据调研得到的结果:冰碛体粒径大于0.075 mm的颗粒超过50%,藏东南地区冰碛体颗粒曲线主要分为3种:①级配良好,属于典型的粗粘土。②土颗粒不均匀,粗颗粒多,细颗粒少。③颗粒不均匀,粗颗粒少,细颗粒多。如表1以青藏高原稻城冰貌^[1]消融形成的冰碛体(级配良好)为例,制备冰碛体相似材料,研究藏东南地区级配良好的冰碛体剪切行为。

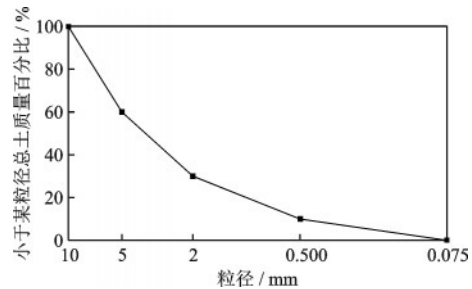


图2 冰碛体相似材料颗粒级配

Fig.2 Grain gradation of moraine-like materials

于此,利用排水法最终测得该河砂的密度为 2.55 g/cm³,利用击实仪测得河砂的最大宏观密度为 1.56 g/cm³,在不击实的状态下,其最小宏观密度为 1.34 g/cm³,与藏东南地区冰碛体的天然密度相似。

2 冰碛体相似材料的剪切性能

2.1 试验方案设计

为探究该地区的冰碛体在不同环境下的强度特性,设置试验以冻融循环次数和初始含水率为变量。试验中的具体操作过程见《土工试验方法标准》^[26],实验仪器采用ZJ型调速应变控制四联直剪仪。

冻融循环次数为1、2、5、10次,同时综合考虑季节和昼夜变化带来的温度差异,将制备好的环刀试样放入-10℃低温环境中冷冻12h后取出,再放入20℃常温环境下12h,此过程重复进行,用以模拟冻融循环过程;初始含水率设置为4%、8%、12%、16%(冰碛体天然含水率5%~19%)。

将法向应力设置为100、200、300、400 kPa,装样时在试样上下均放滤纸。考虑到剪切时周边环境温度的影响,不宜使剪切时间过长,将剪切速率设置为0.4 mm/min,最大剪切位移设置为6 mm,剪切类型为固结排水剪切,实验设计见表3,整理所得试验数据。试样剪应力按照式(1)计算:

$$\tau = \frac{CR}{A_0} \times 10 \quad (1)$$

式中, τ 为剪应力(kPa); C 为测力计率定系数(N/0.1mm); R 为测力计读数(0.1 mm);剪应力(kPa); A_0 为试样初始面积,由于是标准环刀试样,取29.98 mm²。

表3 直剪试验设计

冻融循环次数/次	含水率/%	垂直压力/kPa
1	4	100,200,300,400
	8	100,200,300,400
	12	100,200,300,400
2	4	100,200,300,400
	8	100,200,300,400
	12	100,200,300,400
5	4	100,200,300,400
	8	100,200,300,400
	12	100,200,300,400
10	4	100,200,300,400
	8	100,200,300,400
	12	100,200,300,400

2.2 垂直压力对剪应力-剪切位移的影响

由图3可知,位移-剪应力关系曲线均呈无明显屈服点的非线性曲线。在较小垂直压力作用下(100 kPa),曲线均有峰值点,呈现为弱应变软化型,较大垂直压力作用下(200~400 kPa),曲线均无峰值点,呈现为弱应变硬化型,随着垂直压力的增大,弱应变硬化趋势加强,该现象与冯俊德等^[27]研究得到的原状冰碛体在较低垂直压力下为应变软化特性,但在较高垂直压力下为弱应变硬化特性相似,

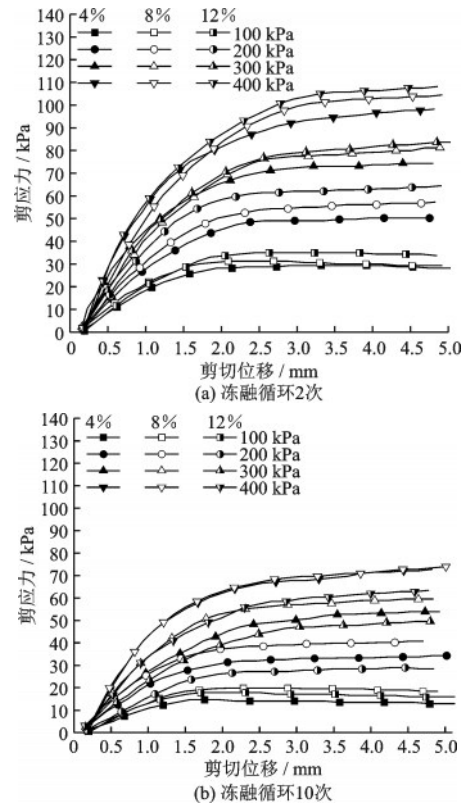


图3 冰碛体相似材料

Fig.3 Displacement-shear stress curves of direct shear tests with moraine-like materials

注:■表示试样含水率为4%、垂直压力为100 kPa时试样的剪切位移-剪应力曲线;□表示试样含水率为8%、垂直压力为100 kPa时试样的剪切位移-剪应力曲线;▲表示试样含水率为12%、垂直压力为100 kPa时试样的剪切位移-剪应力曲线

与黄家华^[28]研究的冰水堆积物粉质粘土直剪试验,应力-应变曲线随着垂向压力的增加,逐渐呈现出弱应变硬化型-应变硬化型-强应变硬化型过程相似。是由于试样颗粒间存在空隙,在剪切的过程中颗粒间的空间位置发生了变化,垂直压力越大最终形成新的平衡效果越强,硬化现象越显著,但这种硬化现象并不是很明显。这是由于试样颗粒间冰与水共存,随着垂直压力的增加,“冰”出现压融现象,造成试样强度的损失,抑制了硬化现象的产生。试样破坏都经历了三个阶段:线弹性变形阶段、非线性弹性变形阶段和破坏阶段,在线弹性阶段,垂直压力越大,剪应力也越大,且剪应力的增长速率较快;在非线性弹性阶段,随着变形的增加,剪应力的增长速率逐渐降低;在破坏阶段,随着剪切位移的增加,剪应力达到峰值,几乎不再增加,这就说明试样发生了大变形而破坏。

2.3 含水率对抗剪强度的影响

图4(a)可知,在一定范围内,随着含水率的增加,抗剪强度也相应呈线性增加。当垂直压力为200~400 kPa时,冻融循环次数(1、2次)对材料的抗剪强度几乎没有影响。当垂直压力为100 kPa时,冻融循环2次相比1次材料抗剪强度明显下降,由此可见,在低垂直压力下(垂直压力小于100 kPa),每一次冻融循环都会对冰碛体材料的抗剪强度产生明显影响。由图4(b)可知,当冻融循环为5、10次时,曲线呈开口向下的抛物线,且含水率在8%左右对应最大抗剪强度,该现象与G.G.D. Zhou等^[29]所研究的西藏天磨沟含水率对冰碛体剪切行为和临界状态的影响中,含水率8%为临界状态相同,在实际施工中,要注重岩体含水率对隧道后期运营中的影响,将含水率控制在8%范围内。当垂直压力为200 kPa时,在4~12%含水率下,冻融循环5次与冻融循环1次相比,对应的抗剪强度分别减小了4.50%、7.08%、27.03%;冻融循环10次与冻融循环5次相比,对应的抗剪强度分别减小了37.64%、36.55%、40.75%。由此可见,含水率变化

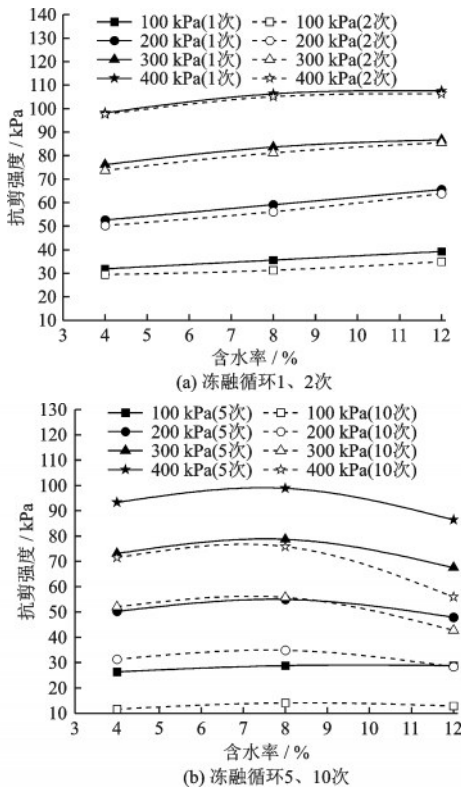


图4 含水率与抗剪强度关系曲线

Fig.4 Relationship curves between moisture content and shear strength

对冰碛体抗剪强度的影响受到冻融循环次数的影响作用很大,冻融循环次数越多,影响越强。

2.4 冻融循环对抗剪强度的影响

图5是在冻融循环次数为1、2、5、10时所对应的抗剪强度关系曲线,随着冻融循环次数的增加,抗剪强度持续减小,这是因为随着温度的降低,材料内部的水开始发生冻结,导致体积产生膨胀,同时产生较大的冻胀力,冻胀力对材料内部的颗粒具有较强的破坏作用,从而造成材料内部局部损伤;随着温度的升高,材料内部的水发生融解,导致冻结应力释放和水分迁移,从而加速材料的损伤;随着冻融循环次数的增加,局部损伤区域扩展连通形成裂缝,导致材料力学性能不断降低,最终导致材料破坏。当含水率为4%和8%时,冻融循环次数为1、2、5次时,抗剪强度变化不大,冻融循环次数增加为10次时,抗剪强度大幅度减小,冻融循环次数越多对材料的抗剪强度影响愈加强烈,由此推测冻胀融沉引起的强度损失与冻融循环次数呈正指数增长关系,这与邱恩喜等^[13]研究得到的冰碛体经历冻融循环作用后,黏聚力呈负指数型函数降低类似。当含水率为12%时,与前5次冻融循环产生的强度损失相比,后5至10次冻融循环产生的强度损失更小,这是因为在冻融循环的过程中,材料的强度包括冰的强度、冰与颗粒材料联结强度、材料间联结强度,而高含水率的材料中孔隙水的含量较高,在前5次冻融循环中冻结时冰的强度及冰与材料间联结的强度较高,这种联结并没有遭到破坏,在5至10次的冻融循环过程中,这种联结结构遭到破坏,形成较弱的联结方式,导致抗剪强度急剧下降,这与邱恩喜等^[13]研究得到的冻融循环6次后,试

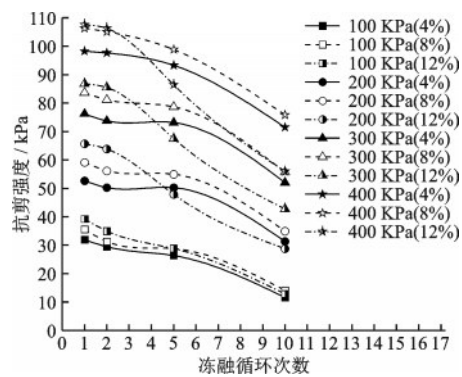


图5 冻融循环次数与抗剪强度关系曲线

Fig.5 Relationship curves between number of freeze-thaw cycles and shear strength

样体积增大,结构松散,以致黏聚力劣化相似。当含水率为12%时,由于冻融作用造成的土体强度损失高达45.59 kPa,占初次冻融后土体强度的40%以上。由此可见冻融循环作用对冰碛体强度会产生很大影响。

2.5 对抗剪强度指标的影响

黏聚力 c 和内摩擦角 φ 是衡量土样抗剪强度的基本指标。根据试验数据,计算得出抗剪强度指标,见表4。

表4 抗剪强度指标
Table 4 Shear strength indices

含水率/%	冻融循环1次		冻融循环2次		冻融循环5次		冻融循环10次	
	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
4	9.10	12.55	6.03	12.68	3.12	12.95	1.93	10.77
8	12.99	12.99	8.01	13.33	4.96	13.42	2.47	10.75
12	18.31	12.73	13.25	13.12	7.12	11.49	3.80	8.00

由表4可知,内摩擦角随着含水率和冻融循环次数的变化并无规律,但随着含水率的增加,黏聚力 c 逐步增大,随着冻融循环次数的增加,黏聚力 c 逐步减小,这是由于在冻融循环次数一定的情况下,随着含水率的增大,冰碛体中冰的含量越来越多,冰与土的联结强度以及冰本身的强度大于土体本身的强度,从而提高了冰碛体材料的强度;而在含水率一定的情况下,在不断的冻融循环过程中对材料造成劣化损伤,土样的联合结构被破坏,而形成的新的联结方式更加的简单,抗剪能力下降,具体表现在黏聚力明显减小,而内摩擦角只是稍微减小。冰碛体相似材料经过1~10次冻融循环后,黏聚力在1.93~18.32 kPa,内摩擦角在8.00°~13.42°之间,而调研得到的藏东南冰碛体黏聚力在15~65 kPa之间,内摩擦角在22°~40°之间。冰碛体相似材料的力学参数均小于调研得到的藏东南冰碛体力学参数,这是由于本次试验是在满足其物理相似的基础上,开展力学性质的研究,虽然力学参数有所差距,但是在外界影响下所反映出冰碛体的变化规律是相似的。如朱金才等^[30]根据相似理论,配制砂土相似材料,研究砂土地层中隧道失稳机理,虽材料黏聚力的差距很大,但其得到的失稳机理与实际符合。

3 冰碛体相似材料的改良

3.1 试验方案设计

冰碛体作为一种分选性差、粒径分布广泛、层理性差的颗粒材料,在外界环境的影响下极易诱发滑坡、泥石流、坍塌等灾害。为此通过在冰碛体相似材料中添加其它胶结材料来模拟外界条件(如降雨)对冰碛体相似材料力学行为的影响。此三轴试验以冰碛体相似材料为基础,在材料中掺入粉煤灰和机油,机油作为黏结剂,粉煤灰为辅助材料以减小机油的挥发。

表5 三轴试验设计
Table 5 Design parameters for triaxial tests

冻融循环次数/次	含水率/%	垂直压力/kPa
1	4	100,200,300,400
	8	100,200,300,400
	12	100,200,300,400
2	4	100,200,300,400
	8	100,200,300,400
	12	100,200,300,400
5	4	100,200,300,400
	8	100,200,300,400
	12	100,200,300,400
10	4	100,200,300,400
	8	100,200,300,400
	12	100,200,300,400

本次三轴试验采取常规的应力路径方式,围压按照50、75、100、125 kPa设置,试验仪器选用英国GDS动静三轴仪。试验原材料包括冰碛体相似材料、机油、纯净水、粉煤灰四种。用三轴制样器进行制样,按照比例称取四种材料所需的质量,试验方案设计见表5。混合后装入击实筒,在松散状态下称取土样的质量,然后标准击实后获得密实状态下的质量,最终换算出压实度在0.8时的质量,本次三轴试验模具的尺寸为 $\Phi=39.1\text{ mm}$, $h=80\text{ mm}$ 的标准试样。

3.2 冰碛体相似材料的应力应变关系

图6是在冰碛体相似材料围压分别为50、75、100、125 kPa时偏差应力与轴向应变的关系曲线图。从图中可以看出:冰碛体相似材料的主应力差

曲线总体呈现出应变硬化型,围压越高,试样的强度峰值越大,该现象与蒋德旺等^[31]研究得到的相同细粒含量的冰碛体的应力—应变曲线随着围压的增大而不断升高相同,这是由于围压对冰碛体试样的“围箍”效应所致,在轴向应变达到10%时到达强度峰值。围压为50 kPa时,试样峰值强度为696 kPa,围压为125 kPa时,试样峰值强度为1 194 kPa,峰值强度增加了72%。所以在冰碛体地层施工时,要重视围岩压力的影响。曲线可以分为三段,在轴向应变为1%之前,主应力差与轴向应变呈线性关系,这是由于当应变变形较小时,试样内部颗粒间的摩擦力足以“抵抗”外部的应力,试样只产生了弹性变形,随着应变的增加主应力差增长迅速,这是由于材料颗粒间的摩擦作用,所以冰碛体的力学机制更加类似于砂性土,其依赖于颗粒间的摩擦;随着轴向应变达到4%~5%时,试样内部颗粒间产生了不可恢复的塑性变形,这时颗粒间“抵抗”外力的能力略显消减,材料颗粒间沿着滑移面产生了位移,颗粒内部进行了重组;轴向应变大于5%后,试样达到了极限强度,应变增加时主应力差几乎不变,试样完全失去“抵抗”外力的能力,这时可以观察到试样发生了大面积的“鼓状”破坏。

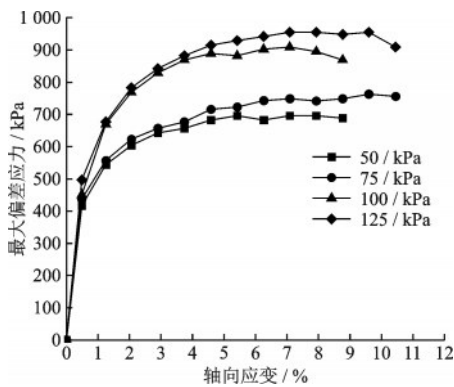


图6 最大偏差应力($\sigma_1-\sigma_3$)-轴向应变关系曲线

Fig.6 Relationship curves between maximum deviation stress ($\sigma_1-\sigma_3$) and axial strain

3.3 冰碛体三轴试验强度特性

三轴试验中,发现冰碛体相似材料加入粉煤灰和机油后,其强度主要依赖于材料颗粒间的摩擦作用,冰碛体的力学机制更加类似于无黏性粗粒土。无黏性粗粒土剪切过程中外荷载需要克服颗粒间相互摩擦、嵌固的力,这种力与黏性粗粒土中的黏聚力不同,在剪切破坏过程中称为咬合力,颗粒间

的咬合力影响抗剪强度的大小,咬合力越大则抗剪强度越大^[32]。

冰碛体之间的咬合强度主要是颗粒材料之间的特殊摩擦机制,假设每个颗粒块体为刚体,在试样受到三轴应力的作用后,颗粒间的作用主要是在破裂面产生了平动和转动,这种平动和转动使得破裂面为锯齿状,形成了滑移面和锯齿面,基于此建立冰碛体材料三轴试验颗粒间破坏时的平面模型,如图7所示冰碛体宏观试样剪切破坏模型,直观凸显出剪切过程中外荷载克服颗粒间相互摩擦、嵌固的力,即咬合力。

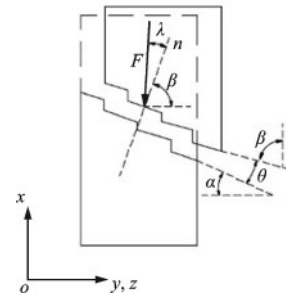


图7 冰碛体宏观试样剪切破坏模型

Fig.7 Shear damage model for macroscopic moraine specimens

3.4 粉煤灰和机油含量对材料参数的影响

在冰碛体相似材料中掺入一定量的粉煤灰和机油后,依据规范《土工试验方法标准》^[21]对计算结果进行整理,得到了各工况下冰碛体相似材料的咬合力和内摩擦角见表6。

表6 三轴试验设计

Table 6 Design parameters for triaxial tests

试验 编号	机油含 量/%	粉煤灰含 量/%	咬合力 c /kPa	内摩擦角 φ / (°)
1	0	0	40.2	39
2	6	14	38.2	35.3
3	5	15	36.3	36.4
4	4	16	34.8	37.2
5	3	17	32.7	38.8

如图8所示,随着机油掺入量的提高,冰碛体材料的内摩擦角降低,随着粉煤灰含量的提高,冰碛体材料的内摩擦角升高,该现象与韩兵^[33]研究粉煤灰改良粉砂土得到的随粉煤灰掺量的增加,内摩擦角的变化范围先增大后减小,且变化幅度并不大不

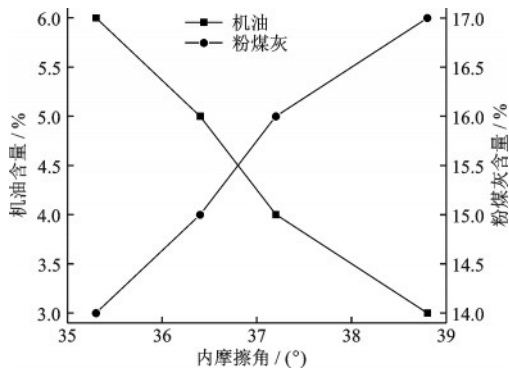


图8 粉煤灰与机油对冰碛体内摩擦角的影响

Fig.8 Effects of fly ash and engine oil on friction angle in moraines

同,这是因为机油具有润滑减小摩擦阻力的功效,加入机油使得冰碛体材料颗粒间的摩擦力减小,而粉煤灰的加入可以填充骨料颗粒的空隙,包裹机油与骨料颗粒间所形成的润滑层,使得材料的摩擦阻力增大,进而增加冰碛体材料的内摩擦角,由此可见机油和粉煤灰对冰碛体材料内摩擦角的作用是相反的,即降低机油的含量或提高粉煤灰的含量都会提高冰碛体材料的内摩擦角。

由图9可知,机油含量提高,冰碛体材料的咬合力增加,粉煤灰含量增加,冰碛体材料咬合力降低,这主要是因为机油也是一种特殊的胶结材料,它可以增加冰碛体材料颗粒间的联结,使得材料颗粒内部进行重组,材料内部的黏结更加紧密。粉煤灰是一种碱性材料,而冰碛体材料并不是酸性材料,二者不发生化学反应,相反它的加入更是一种“黏聚”作用,而冰碛体材料是颗粒间的“咬合”作用,这种黏聚作用的强度小于咬合作用,拉低了咬合力的水平。由此可见机油和粉煤灰对冰碛体材料咬合力的影响是相反的,即减少粉煤灰含量或增加机油含

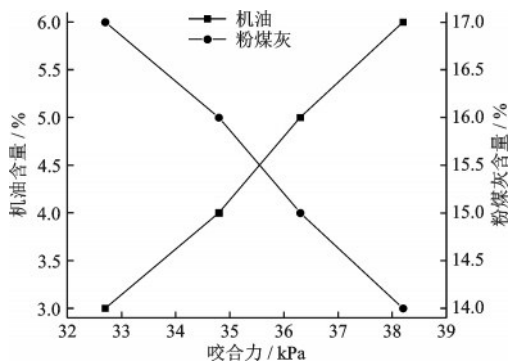


图9 粉煤灰与机油对冰碛体咬合力的影响

Fig.9 Effects of fly ash and engine oil on the cohesion of moraines

量都可以提高冰碛体的咬合力。

由表6可知,虽然粉煤灰和机油对冰碛体材料的影响各不相同,但总体来看加入粉煤灰和机油都会使得冰碛体材料的咬合力和内摩擦角降低,由此可见在对冰碛体材料进行改良时是否可以加入粉煤灰和机油还有待研究。

4 结 论

根据青藏高原稻城冰碛体,制备出藏东南地区级配良好的冰碛体相似材料,对其进行直剪试验,分析了在不同含水率和冻融循环次数下冰碛体相似材料的剪切特性,又通过三轴实验,分析了冰碛体相似材料中加入粉煤灰和机油改良剂后对其剪切特性的影响,以期对藏东南地区冰碛体堆积体稳定性分析及滑移变形预测提供理论参考。所得结论如下:

(1)直剪试验过程中冰碛体的破坏经历线弹性变形、非线性弹性变形和破坏三个阶段。随着垂直压力的增大,曲线由弱应变软化型转变为弱应变硬化型,垂直压力越大,材料在剪切破坏过程中形成的新平衡越强,硬化现象越显著,但这种硬化现象并不是很明显,这是由于试样颗粒间冰与水共存,随着垂直压力的增加,“冰”出现压融现象,造成试样强度的损失,抑制了硬化现象的产生。

(2)含水率变化对冰碛体抗剪强度的影响受到冻融循环次数的影响。冻融循环次数越多,影响越强。当冻融循环为5、10次时,含水率在8%左右对应最大抗剪强度,在实际施工中,要注重岩体含水率对隧道后期运营中的影响,将含水率控制在8%范围内。

(3)冻融循环次数会持续影响冰碛体材料的抗剪强度,当冻融循环次数未超过5次时,对冰碛体材料的抗剪强度影响甚微,当冻融循环次数超过5次时,冰碛体的抗剪强度大大减小。冻融循环次数越多对冰碛体材料的抗剪强度影响越加强烈,由此推测冻胀融沉引起的强度损失与冻融循环次数呈指数增长关系。

(4)机油和粉煤灰对冰碛体抗剪强度指标(咬合力和内摩擦角)的影响相反。机油含量升高会降低冰碛体内摩擦角,增加粉煤灰含量会提高冰碛体的内摩擦角;机油含量提高会增加冰碛体材料的咬合力,增加粉煤灰含量会降低冰碛体材料的咬合

力,依据此规律可以模拟不同的冰碛体材料。

参考文献:

- [1] 方学东,黄润秋.青藏高原典型冰碛土的物理力学特性研究[J].工程地质学报,2013,21(1):123-128.
Fang X D, Huang R Q. Physical and mechanical properties of typical moraine soil on the Qinghai-tibet plateau [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21 (1) : 123-128. (in Chinese)
- [2] 杨东旭,游勇,王军朝,等.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. Characteristics of typical glacial tills in Parlung Zangbo basin in southeastern tibet and its engineering effect [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40 (6) : 841-851. (in Chinese)
- [3] 杨东旭,王军朝,杨栋.川藏交通干线帕隆藏布段冰碛物特性研究进展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(8):51-57.
Yang D X, Wang J C, Yang D. Research advance on characteristics of glacial tills in parlung river along Sichuan-tibet highway [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(8) : 51-57. (in Chinese)
- [4] 武安斌.冰碛物的粒度参数特征及其与沉积环境的关系[J].冰川冻土,1983,5(2):47-53.
Wu A B. The characteristics of grain-size parameters of till and their relation to sedimentary environments [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1983, 5(2) : 47-53. (in Chinese)
- [5] 屈智炯,刘开明,肖晓军,等.冰碛土微观结构、应力应变特性及其模型研究[J].岩土工程学报,1992,14(6):19-28.
Qu Z J, Liu K M, Xiao X J, et al. Study of microstructure, stress-strain behavior and model of till the state of land subsidence research abroad [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14 (6) : 19-28. (in Chinese)
- [6] 付宴菊,江耀,王姣.冰川泥石流源区冰碛土剪切力学特性研究[J].兰州大学学报(自然科学版),2021,57(2):200-206.
Fu Y J, Jiang Y, Wang J. Experimental study on the undrained shear behavior of glacial till in larger-scale triaxial testing [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2021, 57(2) : 200-206. (in Chinese)
- [7] 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,2007,21(4):47-51.
Yuan G X, Zen Q L, Shang Y J, et al. Stability analysis of high moraine slopes in ranwu to lulang section of sichuan-tibet highway [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2007, 21 (4) : 47-51. (in Chinese)
- [8] Nilsson B, Sidle R C, Klint K E, et al. Mass transport and scale-dependent hydraulic tests in a heterogeneous glacial till-sandy aquifer system [J]. Journal of Hydrology, 2001, 243(3-4):162-179.
- [9] 李骅锦,冯文凯,许强,等.四川理县小歧村冰碛物角砾土抗剪强度特性研究[J].人民长江,2015,46(12):37-41.
Li H J, Feng W K, Xu Q, et al. Research on the shear strength characteristics of moraine breccia in Xiaoqi Village, Li County, Sichuan [J]. Yangtze River, 2015, 46 (12) : 37-41. (in Chinese)
- [10] Vanapalli S K, Fredlund D G, Pufahl D E. The relationship between the soil-water characteristic curve and the unsaturated shear strength of a compacted glacial till [J]. Geotechnical Testing Journal, 1996, 19 (3) : 259-268.
- [11] 陈天明.高原富水冰碛隧道洞内坍塌成因与处置技术研究:以拉林铁路米林隧道为例[J].隧道建设(中英文),2021,41(2):274.
Chen T M. Causes and countermeasures for collapse in a water-rich moraine tunnel in a plateau area: a case study on Milin tunnel of Lhasa-Nyingchi railway [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(2) : 274. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 邱恩喜,何巧玲,孙希望,等.冻融循环作用下西藏东南冰碛土剪切力学特性试验研究[J].防灾减灾工程学报,2022,42(6):1267-1279.
Qiu E X, He Q L, Sun X W, et al. Experimental study on shear mechanical properties of moraine soil in southeastern tibet under freeze-thaw cycle the state of land subsidence research abroad [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42 (6) : 1267-1279. (in Chinese)

- [14] 张振, 王敬勇, 吉锋, 等. 冰碛体力学性质的研究及探讨[J]. 人民黄河, 2017, 39(1): 106-109.
Zhang Z, Wang J Y, Ji F, et al. Research and investigate the physical properties of the moraine[J]. Yellow Ellow River, 2017, 39(1): 106-109. (in Chinese)
- [15] Bin-Shafique S, Rahman K, Yaykiran M, et al. The long-term performance of two fly ash stabilized fine-grained soil subbases[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54(10): 666-672.
- [16] Chen K Z, Huang S, Liu Y J, et al. Improving carbonate saline soil in a seasonally frozen region using lime and fly ash[J]. Geofluids, 2022, 2022(1): 1-15.
- [17] 李学德. 双灰固化土本构关系及冻融损伤模型研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2013.
Li X D. Exploration on the constitutive relation and freeze-thaw damage model of fly ash-silicon fume atabilized soil[D]. Xi'an: Northwestern Agriculture and Forestry University, 2013. (in Chinese)
- [18] 胡琦, 陈宇亮, 李婷玉, 等. 基于流变分析的废机油再生沥青粘弹性评价[J]. 公路工程, 2021, 46(3): 165-170, 207.
Hu Q, Chen Y L, Li T Y, et al. Viscoelasticity evaluation of recycled asphalt from waste engine oil based on rheological analysis[J]. Highway Engineering, 2021, 46(3): 165-170, 207. (in Chinese)
- [19] 刘洋. 应用废机油的沥青再生剂开发及再生沥青性能研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2018.
Liu Y. Development of asphalt recycling agent using waste oil and research on performance of recycled asphalt [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [20] Berglund A M M, Nyholm N E I. Slow improvements of metal exposure, health and breeding conditions of pined flycatchers (*Ficedula hypoleuca*) after decreased industrial heavy metal emissions[J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(20): 4326-4334.
- [21] 南京水利科学研究院. 土工试验规程: SL237—1999[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [22] 沈翔, 袁大军, 曹宇陶, 等. 模拟深海环境砂土地层材料配比试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(3): 628-634.
Shen X, Yuan D J, Cao Y T, et al. Research on the ratio of similar materials test in sand stratum in the deep sea [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(3): 628-634. (in Chinese)
- [23] 陈中学, 汪稔, 胡明鉴, 等. 黏土颗粒含量对蒋家沟泥石流启动影响分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2197-2201.
Chen Z X, Wang R, Hu M J, et al. Study of content of clay particles for debris flow occurrence in Jiangjia Ravine [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2197-2201. (in Chinese)
- [24] 周小军, 崔鹏, 贾世涛, 等. 基于正交设计的土体细颗粒迁移积聚水槽实验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(增1): 83-88, 103.
Zhou X J, Cui P, Jia S T, et al. Flume test study on the movement of fine grains based on orthogonal design[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(Sup1): 83-88, 103. (in Chinese)
- [25] 苟万春, 李泳, 王保亮, 等. 佳禾沟泥石流堆积物的粒度与强度关系分析[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(35): 120-123, 144.
Gou W C, Li Y, Wang B L, et al. Analysis on Grain-size characteristics and shear strength of the deposit in Jiahe gully[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(35): 120-123, 144. (in Chinese)
- [26] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [27] 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. Large scale direct shear test on strength behavior of railway moraine soils in Yunnan [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3205-3210. (in Chinese)
- [28] 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)
- [29] Zhou G G D, Chen L L, Mu Q Y, et al. Effects of water content on the shear behavior and critical state of glacial till in Tianmo Gully of Tibet, China[J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(8): 1743-1759.
- [30] 朱金才, 卢珂, 杨进超, 等. 砂土地层中隧道失稳机理验证[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(5): 1175-1179.
Zhu J C, Lu K, Yang J C, et al. Verification of the failure mechanism of tunnel in sandy soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(5): 1175-1179. (in Chinese)
- [31] 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.

