川藏交通干线帕隆藏布段冰碛物特性研究进展

杨东旭[1,2]，王军朝[1,2]，杨　栋[1,2]

(1.中国地质科学院探矿工艺研究所，四川 成都 611734；2.中国地质调查局地质灾害防治技术中心，四川 成都 611734)

摘要：作为冰川运动的遗迹，冰碛物由于其宽级配、大孔隙、非均质、渗透性等特点，成为川藏铁路和高速公路帕隆藏布路段规划选线中的一类特殊岩土体，并与藏东南地区的冰川型地质灾害具有关联，使得帕隆藏布流域地质灾害的成因机理及防治研究愈发复杂。本文通过分析近年来国内外学者围绕冰碛物物性特征取得的研究成果，结合实地调查和室内外测试结果，归纳了冰碛物的分布特征、沉积构造、物理性质和工程力学特性，梳理了冰碛物的物理力学研究进展，凝练了帕隆藏布流域冰碛物研究中的 3 个关键问题，针对性地提出下一步研究思路，旨在为后续的冰碛物研究和川藏交通干线规划与建设管理提供参数依据。

关键词：川藏交通干线；帕隆藏布；冰碛物；物理力学性质；地质灾害调查

中图分类号：P642.23　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1672－7428(2018)08－0051－07

Research Advance on Characteristics of Glacial Tills in Parlung River along Sichuan-Tibet Highway/*YANG Dong-xu*[1,2], *WANG Jun-chao*[1,2], *YANG Dong*[1,2] (1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 2.Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: As glacier relics, glacial tills become special rock body in a planning selected line section of Sichuan－Tibet railway and highway along Parlung River due to its wide gradation, large pore, heterogeneity and permeability, etc, and is associated with glacial geological hazards in the south-east Tibet, which makes the formation mechanism and prevention research on geological hazards in Parlung River basin even more complicated. In this article, based on the analysis on the research results obtained according to the physical property characteristics of glacial tills by scholars in China and abroad in recent years and combing with the field investigation and the results of indoor and outdoor tests, the distribution characteristics, sedimentary structure, physical properties and engineering mechanics properties of glacial tills, as well as the research progress of glacial tills physical mechanics are summed up, 3 key issues in the research on glacial tills in Parlung River basin and the next step of research route are put forward to provide parameter basis for the subsequent glacial tills research and planning and construction management of Sichuan-Tibet highway.

Key words: Sichuan-Tibet main traffic line; Parlung River; glacial tills; physical and mechanical properties; investigation of geological disasters

0　引言

冰碛物(moraine deposit 或 glacial tills)是冰川运动过程中携带的大量岩土碎屑物质，因冰川消融而沉积形成的含漂砾、块石、碎石、砾石、粉土、粘土的宽级配混杂堆积体[1]，是一种特殊的岩土材料。第四纪以来，青藏高原发生了多次冰川作用，冰进冰退过程在平坦低洼处堆积了多期次的冰碛物，形成了冰碛垄、冰碛丘陵等典型的冰碛地貌。在后续的河流侵蚀、冰雪融水等作用下，出露了大量具有侧向临空面的冰碛物坡体，尤其是位于我国最大的海洋性冰川区的川藏交通干线帕隆藏布路段，沿线密集分布了形态各异的冰碛体[2]。作为我国著名的地质灾害频发路段，该区冰碛物的物理力学性质、岩土材料可用性及其与地质灾害发育的关联性，对川藏公路的运营管理和拟建川藏铁路、川藏高速公路的规划选线提出了新的课题。

收稿日期：2018－07－01

基金项目：国家自然科学基金项目“弯道特征对泥石流堵塞系数的影响研究”(编号：41402315)；中国地质调查局地质调查局项目“藏东南重要城镇和交通干线地质灾害调查”(编号：DD20160279)

作者简介：杨东旭，男，汉族，1985 年生，岩土工程专业，博士，主要从事山地灾害发育机制与岩土工程防灾减灾技术研究工作，四川省成都市郫都区现代工业港(北区)港华路 139 号，dxyang85@163.com。

万方数据

冰碛物作为冰川退缩时的遗迹,最先被从事第四纪地质、古气候及古生物方向研究的学者关注并做了较系统的研究。如通过冰碛物分布范围、冰碛物 ESR 测年及冰碛物内的古生物化石等,分析历史上发生的冰进冰退事件,研究冰川作用对古气候、古环境、地貌形态演化及生物进化等的影响。在现代工程建设实践中,由冰碛物这种特殊的岩土体引发的工程地质问题引起了学者的关注并根据工程需要开展了大量研究,探索了不同情况下冰碛物的工程地质特性,其中英国、波兰、丹麦、加拿大等高纬度国家在冰碛物工程性质的研究中处于领先地位[3-5]。相比于西方学者,我国对于冰碛物的研究主要在 20 世纪 80 年代之后,且相对较琐碎[6]。为支撑藏东南重要城镇和交通干线对地质工作的需求,对川藏线帕隆藏布路段的冰碛物进行了系统梳理和实地调查研究。

1 冰碛物的分布与沉积特征

1.1 冰碛物的分布特征

现有研究指出[7],帕隆藏布流域的典型冰碛物主要分布于玉普－鲁朗段主河与两侧一级支沟交汇处、北岸较大的一级支沟内及其与二级支沟交汇处,其中波堆藏布、曲宗藏布等支沟内案例点最密集,形态最为典型。基于高精度遥感解译和野外调查,笔者对川藏公路帕隆藏布段沿线的典型冰碛物案例点进行了详细调查,进一步完善了冰碛物的典型分布位置、物质组构和沉积特征(见图 1)。

1.2 冰碛物的沉积与构造特征

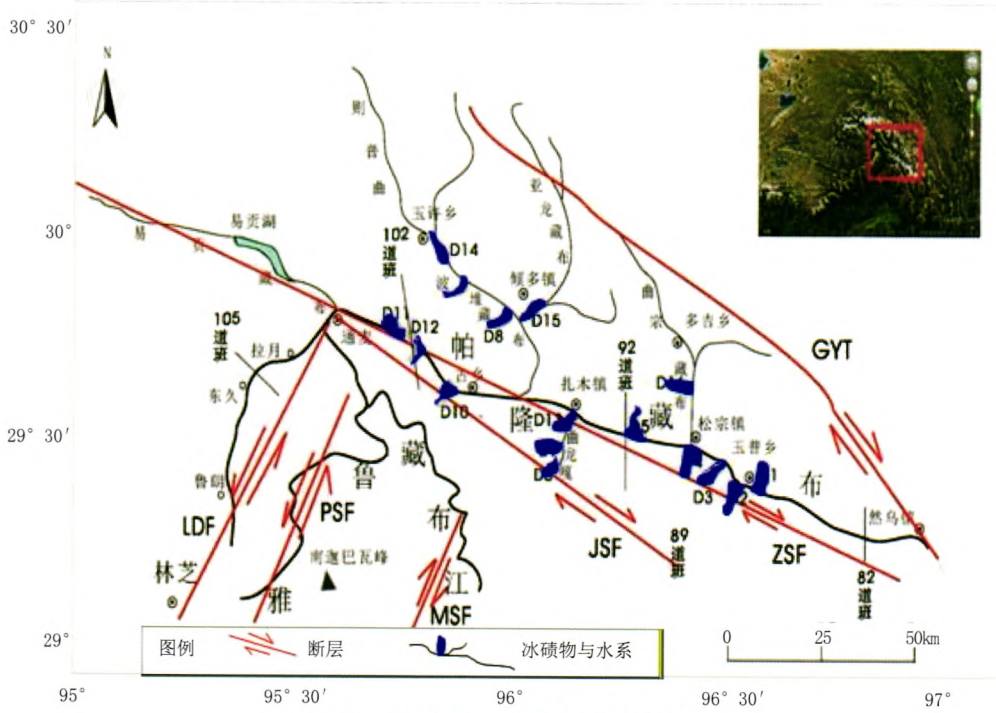


图 1 帕隆藏布流域典型冰碛物分布图

冰碛物的沉积部位按海拔由高到低主要可分为:(1)位于较高海拔的冰舌末端处,为现代活跃冰川的沉积物,尚未经过远距离搬运,通常为棱角状崩解的岩石,粒径巨大,孔隙率高,呈架空结构;(2)位于中等海拔的山谷中,为近代冰川活动的遗迹,一般经过相对短距离的搬运,棱角－次棱角状,颗粒有一定研磨和粉碎,填充了部分孔隙;(3)位于低海拔山谷与主河汇口处或主河两岸,为古冰川活动遗迹,通常经历了远距离搬运,部分已经洪水或泥石流改造,沉积密实,胶结度较高,可形成高陡的临空面,该类冰碛物是人类建设活动接触的主要类型(见图 2)。

冰碛物的沉积构造除常见的斜层理、剪断、团块、块石含量高及磨圆度差等判据外[8-9],尚具有一定的显微结构与孔隙结构。采用扫描电镜方法可实现对样品表面的形貌进行微观表征,用来判断胶结类型、主要生物碎屑、孔隙类型、胶结物等。冰碛物中的石英砂在电子扫描镜下还具有贝壳状断口和深坑等微形态特征。沉积物具有高孔隙比、颗粒易破碎且胶结不均匀等特征,胶结使得土的强度、密度和胶结度在较小的范围内呈现出明显的各向异性,

万方数据

图 2　帕隆藏布流域典型冰碛地貌

常常出现强胶结层中包裹完全松散层的现象。

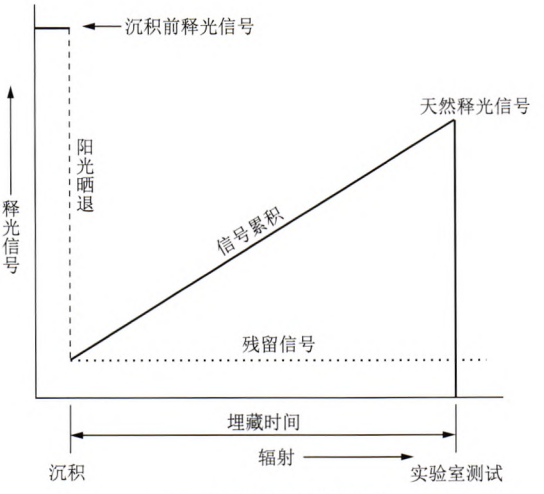
2　冰碛物的物理性质研究

2.1　物质组构与粒度特征

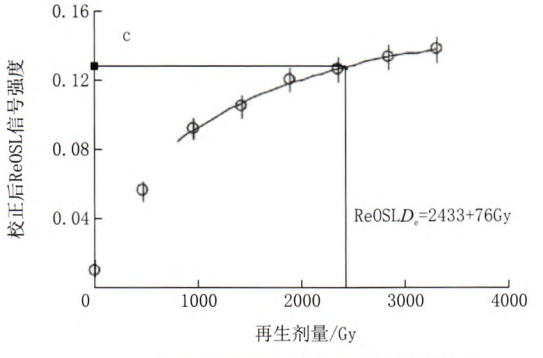
组构和粒度是碎屑沉积物最重要的结构特征[10]。冰碛物的粒级组成因不同的地区和不同岩性及不同的冰川类型而分布范围很大,可以从巨大的漂砾到很细小的粘土。国内外的研究表明[11-12],冰碛物的粒径分布特征对于推测区域内冰碛物的来源、搬运路径、形成过程及沉积环境具有良好的效果,其粒度特征具有明显的成因标志,对于研究沉积物形成时期的沉积环境、介质的流体动力条件有重要的意义。一方面,学者们利用三角图、柱状图、频率曲线图、累积曲线图及粒度参数散点图对冰碛物组成进行初步分类,指出冰碛物的频率曲线具有多峰型的特征,且一般为双峰型[13];另一方面,通过多个地区大量粒度频率分布特征的研究,结合区域沉积环境和数学运算及粒度统计公式,表明冰碛物粒度频率曲线呈多峰式[14]。Haldorsen[15]区分了颗粒形成过程中的压碎与磨碎作用,提出了基质指数和磨蚀指数来评价冰碛物形成过程中的压碎程度和磨蚀程度;张振拴[16]在天山博格达峰地区对 63 个冰碛物样本做了相同研究,优化了基质指数和磨蚀指数的计算方法,同时指出研究不同成因冰碛物用罗辛概率图比正态分布概率图更理想。李昌志和王裕宜[17]对比了冰碛物和冰川泥石流堆积物这 2 种混杂堆积体的异同点,建立起了冰碛物和泥石流堆积物的综合判别标志。通过分析颗粒分析、电镜扫描与区域岩土体宏观力学参数的关系,可有效进一步分析组构和粒级的含量对冰碛物胶结程度、裂隙发育及水敏性等影响。

2.2　冰碛物形成年代测定

在冰碛物释光测年方面,应用最广的是丹麦 Risø 实验室生产的光释光测量仪,也有一些实验室使用美国生产的 Daybreak 2200 型释光测量仪[18]。冰碛物光释光测年试验方法经过不少学者的实践[19],当前主要采用单片再生剂量法(single aliquot regenerative－dose, SAR)与标准生长曲线法(standardisedgrowth curve, SGC)相结合,形成 SAR－SGC 法进行等效剂量(equivalent dose, D_e)的测定(见图 3)。



(a) 光释光测年的计时原理



(b) 校正后回授释光信号强度及D_e值测定

图 3　光释光测年的计时原理与校正后回授释光信号强度及 D_e 值测定[18]

帕隆藏布流域典型冰碛物主要为末次冰期和倒

万方数据

二冰期的冰川沉积物,其中一部分冰碛物在原地释出,另一部分则被搬运至沟道下游的河谷两岸和沟口等部位,由于具有不同成因和不同沉积时代,冰碛物的分布规律和沉积结构也具有不同的特征,且往往在冰川谷两侧及谷口形成高大的堆积垄。

2.3 冰碛物基本物性指标

(1)密度与颗粒级配。该区典型冰碛物天然密度值大致为 1.9～2.2 g/cm^3,其值与天然含水率和块石含量密切相关;从颗分成果看,颗分曲线形态较统一,且均在 1～2 mm 段出现"缓坡拐点",表明该粒组相对含量明显较其他粒组少;不均匀系数 Cu=5～25,曲率系数 Cc=0.4～3.5。

冰碛物中含有的粗颗粒多,级配宽,天然密度的测试可采用现场探坑灌水法测定,由于测试的探坑中不含水,冰碛土中含水量极低(>0.5%),故所测试冰碛土的密度可视作干密度,可作为地基处理时的控制密度。室内测试中也可采用环刀法结合含水率试验进行样品的测试。

(2)含水率。含水率试验的结果是否准确,关键在于取土的代表性,一般从取密度试验环刀两端余土测试,有助于了解土层的真实情况和对试验成果的分析。该区冰碛物的含水率范围 1%～13.7%,总体偏干燥;压缩系数 a_v 与含水率 ω 关系为 $a_v=0.096e^{0.17\omega}$,$R^2=0.64$。

(3)孔隙比与压缩性。孔隙比数值范围为 0.3～0.75,较其他第四系堆积物相对较低,显示其密实度较高,固结作用强。压缩系数 0.15～0.35,为中等压缩性土。

(4)矿物成分。可采用 X 射线衍射仪进行分析。X 射线衍射物相分析是矿物鉴定的最主要方法,也是最具本质性的鉴定方法,它是基于不同矿物具有不同的晶体构造这一基础之上的。通过检测并记录 X 射线的强度,得到 X 射线衍射图谱。通过计算机解析图谱,对组成试样的矿物进行定性或定量分析。

本研究采用的冰碛物物理力学参数指标测试方法见图 4。

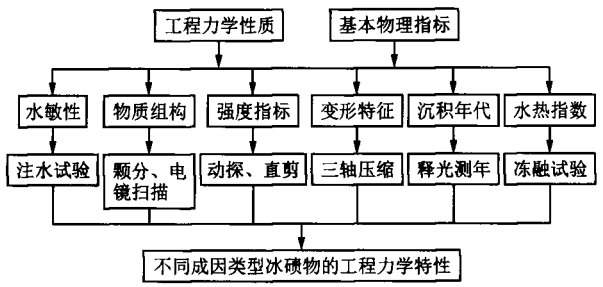


图 4 冰碛物物理力学参数指标试验方法框图

3 工程力学性质研究

3.1 冰碛物的土力学特征

冰碛物的来源对其粒径分布、应力历史、冰碛物的沉积序列及其表面的裂隙都有重要影响,而当冰碛物堆积下来之后,后续的风化作用、烘干作用、冻融作用、重塑作用、细颗粒的渗透作用也会对冰碛物的工程地质性质产生影响[20-22]。冰碛物形成的特殊应力历史、组分特征及结构则决定了其岩土力学特性的复杂性[23]。Atkinson 等[24]用典型冰碛物的原状土和重塑土,在考虑了冰碛物不同应力状态和应力历史的情况下做了不排水三轴实验,发现刚度的大小同初始固结比有关。

Vanapalli 等[25]研究了冰碛物中非饱和抗剪强度和土水特征曲线的关系,同时指出基质吸力与冰碛物的初始含水率有关。Allred[26]分析了美国中西部的冰碛物的裂隙发现,裂隙的尺寸对冰碛物的渗透系数、固结比及抗剪强度的影响极大。冯俊德等[27]对云南某铁路的冰碛物取样做了原状土和相同干密度、不同含水率下的重塑冰碛物大型直剪试验发现,冰碛物具有一定结构性强度,重塑冰碛物强度随着含水率的增加而减少。

3.2 工程力学指标参数

3.2.1 承载力指标

动力触探试验不仅可以获取冰碛土的承载力、变形模量,而且还可以判断地基的均匀性。由于冰碛土动力触探无现成的公式、表格可查,为此需在不同的地貌部位进行静载荷试验,并开展室内固结指数试验,以对比、修正动力触探成果。据谢春庆等[28-30]在康定机场冰碛层开展综合动力触探、载荷试验的成果,碎石土承载力标准值 500～830 kPa,砾砂土承载力标准值 180～250 kPa。笔者在帕隆藏布流域冰碛物中测得的 4 m 内每 10 cm 超重型动力触探平均锤击数为 8～15,相应地基承载力为 320～570 kPa,介于康定机场的两种场地土之间。

3.2.2 抗剪强度及应力应变指标

在冰碛物地基处理中,人们最关注的是其强度及应力－应变特性。屈智炯等[31-32]结合瀑布沟水

万方数据

电站工程的冰碛物，以相似级配材料模拟，对高应力和平面应变以及不同应力路径条件下的应力－应变、强度特性进行了室内试验，结果表明：(1)随着围压的升高，冰碛物的强度指标降低，强度包络线为折线式；(2)冰碛物的应力－应变关系在低压时表现为应变软化，而高围压时则为应变硬化；(3)应力路径、围压大小、土的级配和容重等因素对冰碛物应力－应变及强度特性的影响显著；(4)冰碛物的力学性质与它的微观结构有很大的关系，冰碛物产生区破坏和线破坏的根本原因是由于压力增大造成的破碎、重排以及定向性。Lehane 等[33]把 BRICK 模型用在超固结的都柏林含卵石粘粒冰碛物(DBC)，得到了 DBC 的刚度－应力曲线。Barański[34]在波兰 Pock 地区的正常固结冰碛物研究更进一步发现，冰碛物的力学性质与其结构及其微观结构有关，且提出了其一维固结公式。

3.3　冰碛物的渗透性

工程实践中，出于稳定性分析的需要，冰碛物的渗透特性备受关注。Daniels 等[35]在普渡大学西拉法叶校区研究人员以 H3 作为示踪剂进行实验，得出该冰碛物的地下水补给率为 3.1 cm/a，且与前人的试验结果相符合，证明该方法是测量冰碛物地下水补给率的一种理想方法。Villholth 等[36-37]在丹麦东部一块冰碛物农田上选取了 3 个 1000 m^2 的场地进行了示踪试验，并用 MACRO 模型分析了冰碛物含水层的渗流运动，发现大孔隙流发挥了重要作用。Mohanty 等[11]利用圭尔夫入渗仪、圆盘入渗仪、双环入渗仪、速度入渗仪 4 种不同的仪器开展了原位测定冰碛物的饱和渗透系数 K_s，并对比室内常水头渗透试验，证明样品的大小对于渗透系数的测定具有较大的影响，指出不同风化程度的冰碛物的渗透系数可以差 2～3 个数量级。谢春庆等[38]基于康定机场建设所实施的室内土工试验、原位试验，研究了冰碛物的工程地质特性及水文地质特性，发现在自然条件下，场区地下、地表水可在冰碛物中形成松动的架空层。

在帕隆藏布流域冰碛物测试中，笔者通过双环渗透试验，测得垂直渗透系数 K 平均值约 10^{-3} cm/s，且随自由膨胀率 δ 的增大而减小，其关系式为：$K = 0.83\delta^2 - 14.0\delta + 62.46$，其相关系数 $R^2 = 0.8899$，表明渗透性与其粘粒含量密切相关。

3.4　冰碛物的稳定性

工程建设过程中，冰碛物边坡的开挖形成临空面，在地震、强降雨作用下失稳，其破坏机理是学者们的关注重点。Springman 等[39]在阿尔卑斯一处冰碛物坡体上做了人工降雨试验。研究了基质吸力降低诱发冰碛物坡体失稳的问题。表明相对于饱和状态，非饱和状态时的负孔隙水压力的提高，增强了滑动面的抗剪强度指标，但是降雨入渗可导致基质吸力降低而促使斜坡滑动。袁广祥等[7]在野外对川藏公路鲁朗段冰碛物坡体考察的基础上并根据其物理力学性质，采用圆弧法对边坡进行稳定性分析，取得了与实际相符的结果。徐鼎平等[40-41]用 ANSYS 和 FLAC3D 建立工程地质模型和数值模拟分析；通过细胞自动机模拟冰碛物的沉积动力过程，开发了冰碛物试样程序，用 FLAC3D 进行了三轴仿真试验，求得了冰碛物土体的强度和变形参数。

冰碛物特殊的组分特征决定了其中的粘土矿物包裹聚集大颗粒的砂、砾、石块，使其颗粒间镶嵌完好、结构致密。但是，在雨水、冰雪消融或其它条件下，将导致表层冰碛物土石块结构松散，形成架空结构，入渗率增大。黄金辉[42]的试验结果表明非饱和冰碛物抗剪强度与含水率具有显著相关关系。其中，粘聚力随着含水率的增加呈一阶指数衰减关系，且在 0%～10% 粘聚力衰减迅速。而相比于粘聚力，冰碛物的内摩擦角随着含水率的增加总体趋势是在减弱的。

笔者通过分析调查及测试数据，发现帕隆藏布流域冰碛物的稳定性与其沉积年代、物质组成、密实程度和地下水、地表水关系密切，值得注意的是，冰碛物在干燥状态下可以形成近乎直立的边坡，坡高/坡度比大，稳定性较好，但上游地表汇水或地下渗水形成的冲刷对冰碛物的稳定性影响较大，容易形成坡面冲沟、冰川型泥石流或冰碛滑坡(见图 5)。

4　存在问题与展望

4.1　目前存在的主要问题

(1)帕隆藏布流域的冰碛物整体分布范围和沉积结构特征有待继续深入研究。目前，国内外对于帕隆藏布主谷的冰川活动范围、冰川到达的最低海拔位置等尚有争议，需要进一步通过野外地质环境调查、取样测年等手段寻找出更多证据，以综合分析冰碛物的分布范围与沉积特征。

万方数据

(a) 波密比通沟冰川泥石流 (b) 通麦102冰碛滑坡

(c) 波密米堆冰湖溃决泥石流 (d) 波密松隆曲冰碛高陡切坡

图 5 帕隆藏布流域典型冰碛物地质灾害及堆积体

(2)缺乏冰碛物内部矿物组分对胶结度和裂隙发育程度的影响研究。冰碛物的宽级配特征尤其是其中的矿物组分是其特殊物理力学性质的内因,如何定量分析二者的关系对于冰碛物的研究有重要的意义,也是影响冰碛物胶结度和裂隙发育程度的重要因素,进而影响其稳定性和强度特征,尚需开展进一步深入研究。

(3)基于不同物理力学性质的冰碛物分类及其对工程的影响研究不足。当前的成果均将冰碛物作为局部场址的特殊工程岩土进行简单研究,区域局限性强,缺乏对不同成因类型冰碛物的物理力学性质差异、工程表现等重要内容开展针对性的研究。特别是不同类型冰碛物与其他第四系堆积物(坡积物、残积物等)的工程力学性质异同研究较少,典型冰碛物与泥石流、滑坡等地质灾害发育的相关性及其控制因素尚不清晰,仍需开展进一步研究。

4.2 研究展望与建议

(1)在今后研究中应加强冰碛物现场大剪试验、典型样品的电镜扫描与 X 衍射分析、冻融作用下的力学特性变化等研究,以获取更完整的物理力学指标体系,完善冰川型地质灾害发育的机制研究。

(2)该流域冰碛物的试验成果应与天山博格达峰、康定机场、四川贡嘎山等地的冰碛物和河流阶地、泥石流堆积物、残坡积物等其他第四纪堆积体的研究成果进行对比分析,从而提炼出藏东南高原海洋性冰川区冰碛物物理力学性质的特殊性。

(3)在调查过程中发现近一半的案例点长期受地表水的冲刷或地下水浸泡,并且在堆积体内发现大面积架空块碎石结构。这些架空结构和地下水、地表水是否会对堆积体稳定性产生不利影响及其影响程度,将严重影响其工程利用中的投资、工期等,需展开专门分析研究。

参考文献:

[1] 中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所,等.川藏公路南线(西藏境内)山地灾害及防治对策[M].北京:科学出版社,1994.

[2] 张佳佳,王军朝,陈龙,等.川藏公路扎木到索通段第四纪堆积体的分布及产出特征[J].科学技术与工程,2017,17(32):37-44.

[3] A. McGown, E. Derbyshire. Genetic influences on the properties of tills[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology,1977,10(4):389-410.

[4] Landim P M B, Frakes L A. Distinction between tills and other diamictons based on textural characteristics [J]. Journal of Sedimentary Research,1968,38(4):1213-1223.

[5] Boulton G S. Boulder shapes and grain-size distributions of

万方数据

debris as indicators of transport paths through a glacier and till genesis [J]. Sedimentology,1978,25(6):773－799.

[6] 陈吉阳.中国西部山区全新世冰碛地层的划分及地层年表[J].冰川冻土,1987,(4):319－328.

[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,(4):47－51.

[8] 邓养鑫.冰碛转化为冰川泥石流堆积过程及其沉积特征[J].沉积学报,1995,(4):37－48.

[9] 邓养鑫.冰碛与冰川泥石流堆积研究的若干新成果[J].冰川冻土,1996,(S1):250－256.

[10] 马正海.天山和青藏高原等地冰碛物粒度组成的初步分析[J].冰川冻土,1980,(S1):80－83.

[11] Mohanty B.,R. Kanwar,et al. Comparison of saturated hydraulic conductivity measurement methods for a glacial－till soil[J].Soil Science Society of America Journal,1994,58(3):672－677.

[12] Folk R L,Ward W C. Brazos River bar [Texas]: a study in the significance of grain size parameters [J]. Journal of Sedimentary Research,1957,27(1):3－26.

[13] 陆松年,丁宝兰. 几个地区冰碛及冰碛岩基质的粒度频率分布特征[C]//中国地质科学院天津地质矿产研究所文集(5),1983:11.

[14] 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,(2):47－53.

[15] Haldorsen S. Grain－size distribution of subglacial till and its realtion to glacial scrushing and abrasion[J]. Boreas 1981,10(1):91－104.

[16] 张振拴.天山博格达峰地区冰碛物的粒度特征[J].冰川冻土,1983,(3):191－200.

[17] 李昌志,王裕宜.泥石流、冰碛和河湖沉积物的粒度特征及判别[J].山地学报,1999,(1):51－54.

[18] 张克旗,吴中海,吕同艳,等.光释光测年法——综述及进展[J].地质通报,2015,34(1):183－203.

[19] 赖忠平,欧先交.光释光测年基本流程[J].地理科学进展,2013,32(5):683－693.

[20] Nilsson, B. R. Sidle, et al. Mass transport and scale－dependent hydraulic tests in a heterogeneous glacial till - sandy aquifer system[J]. Journal of Hydrology,2001,243(3):162－179.

[21] Boulton G., M. Paul. The influence of genetic processes on some geotechnical properties of glacial tills[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1976, 9(Analytic).

[22] Haldorsen S., J. Krüger. Till genesis and hydrogeological properties[J]. Nordic hydrology, 1990,21(2):81－93.

[23] Marsland A. The evaluation of the engineering design parameters for glacial clays[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology,1977,10(1):1－26.

[24] Atkinson J., J. Little. Undrained triaxial strength and stress－strain characteristics of a glacial till soil[J]. Canadian Geotechnical Journal,1988,25(3):428－439.

[25] R Chaney, K Demars, S Vanapalli, et al. 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.

[26] Allred B. J. Survey of fractured glacial till geotechnical characteristics: Hydraulic conductivity, consolidation, and shear strength[J]. Ohio Journal of Science,2000,100(3):63－72.

[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实验研究[J].岩土力学,2008,(12):3204－3210.

[28] 谢春庆.冰碛土工程性能的研究[J].山地学报,2002,(S1):129－132.

[29] 谢春庆,邱延峻,王伟.冰碛物工程性质及地基处理方法的研究[J].岩土工程技术,2008,(4):213－217.

[30] 谢春庆,陈涛,邱延峻.冰碛物路用工程性质研究[J].路基工程,2010,(4):78－80.

[31] 张斌,屈智炯.冰碛土的应力－应变－强度特性的研究[J].成都科技大学学报,1991,(3):29－33.

[32] 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,(6):19－28.

[33] Lehane B. M., B. Simpson. Modelling glacial till under triaxial conditions using a BRICK soil model [J]. Canadian Geotechnical Journal,2000,37(5):1078－1088.

[34] Barański M. Engineering－geological properties of normally consolidated tills from Płockarea[J]. Geologija,2008,50(2):40－48.

[35] Daniels D. P., S. J. Fritz, et al. Estimating recharge rates through unsaturated glacial till by tritium tracing[J]. Ground Water,1991,29(1):26－33.

[36] Villholth K. G., K. H. Jensen. Flow and transport processes in a macroporous subsurface－ drained glacial till soil I: Field investigations[J]. Journal of Hydrology, 1998, 207(1): 98－120.

[37] Villholth K. G., K. H. Jensen. Flow and transport processes in a macroporous subsurface － drained glacial till soil II. Model analysis[J]. Journal of Hydrology, 1998, 207 (1): 121－134.

[38] 谢春庆,邱延峻.冰碛物水文地质特征及其对工程影响的研究[J].水文地质工程地质,2006,(5):90－93.

[39] Springman S., C. Jommi, et al. "Instabilities on moraine slopes induced by loss of suction: a case history." Géotechnique,2003,53(1):3－10.

[40] 徐鼎平,汪斌,江龙剑,等. 冰碛土三轴数值模拟实验方法探讨[J].岩土力学,2008,(12):3466－3470.

[41] 徐鼎平,朱大鹏.太和铁矿西端帮冰碛土边坡稳定性分析方法研究[J].岩石力学与工程学报,2008,(S2):3334－3340.

[42] 黄金辉.入渗对冰碛物滑坡的稳定性影响分析[D].北京:中国科学院大学,2014.

万方数据