

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.06.001

藏东南帕隆藏布流域冰碛物典型特征及工程效应*

杨东旭^{1,2,3}, 游勇¹, 王军朝², 杨栋², 刘建康²

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;

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

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为详细调查拟建川藏铁路沿线帕隆藏布流域冰碛物的物理力学特征, 评估冰碛物作为地质灾害物源和工程地基的稳定性, 选取帕隆藏布流域32处典型冰碛物为研究对象, 通过开展天然密度、含水率、颗分、大型直剪、三轴剪切、膨胀性、渗透性等原位试验和室内测试, 结合现场剖面测绘等调查手段, 总结了冰碛物的分布与沉积特征和物理力学参数特征, 统计了不同参数间的相关性。结果表明:冰碛物物理力学参数与含水率、孔隙比及粘粒含量密切相关, 其中天然密度和压缩模量均与孔隙比呈线性负相关, 而垂直渗透系数和自由膨胀率与粘粒含量呈二次方关系, 抗剪及抗压强度与孔隙比和含水率呈二元函数关系。通过分析冰碛物在三种不同沉积部位(现代冰舌前缘、冰川谷中游、沟口主河岸坡)的起动方式, 初步探讨了冰碛体的稳定性及其在川藏铁路、川藏高速公路等重大工程中的不同应用对策(桥隧绕避、工程边坡、路堑或地基等)。

关键词:藏东南; 海洋性冰川; 冰碛物; 物理力学特征; 地质灾害

中图分类号: P642.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)06-0841-11

Characteristics of Typical Glacial Till in Parlung Zangbo Basin in Southeastern Tibet and Its Engineering Effect

YANG Dongxu^{1,2,3}, YOU Yong¹, WANG Junchao², YANG Dong², LIU Jiankang²

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China;

2. Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu 611734, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The southeast region of Tibet is the largest marine glacier area in China. For investigating the physical and mechanical characteristics of glacial tills along the Sichuan-Tibet railway, and evaluating their stability as a geological hazard source and engineering foundation, 32 points of glacial tills in the Parlung Zangbo basin were taken as cases. A series of in-site and indoor tests on natural density, grain size analysis, large direct shear, triaxial shear, compressive strength, permeability coefficient and so on were carried out. Combining with field investigation methods such as sectional surveying and mapping, the distribution, morphological characteristics, physical and mechanical properties of

* 收稿日期:2019-06-25;修回日期:2019-12-26

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0902)、国家自然科学基金青年基金项目(41807300)、中国地质调查局二级项目(DD20160279; DD20190644)资助

作者简介:杨东旭(1985-),男,工程师,博士研究生。主要从事山地灾害形成机理与防治理论研究。

Email:dxyang85@163.com

glacial till and their correlation were analyzed. The result shows that physical and mechanical properties are closely related to moisture content, void ratio and clay content. The natural density and compression modulus are negatively linear related to the void ratio. The vertical permeability coefficient and the free expansion ratio show a quadratic relationship with clay content. The shear strength and compressive strength are binary relationship with void ratio and moisture content. Start-up patterns in three different deposit sites (modern glacier tongue, middle reaches of the valley, and the main river bank) were summarized, and the stability of the glacial tills was preliminarily discussed. The countermeasures for dealing with the glacial tills in Sichuan-Tibet railway and highway projects were suggested, such as passing by bridges or tunnels, engineering slope, and cutting or foundation, etc.

Keywords: southeast of Tibet; maritime glacier; glacial till; physical and mechanical properties; geological disaster

引言

受印度洋暖湿气流影响,藏东南雅鲁藏布的支流——帕隆藏布流域发育了我国规模最大的海洋性冰川群,活跃的冰川进退造就了数量众多、规模宏大的巨厚冰碛物。作为一种混杂堆积的不连续工程介质,冰碛物不仅是藏东南地区大多数土质滑坡的地质载体,而且是冰川泥石流和冰湖溃决灾害链的主要物质来源。沿线高陡的冰碛体边坡对拟建川藏铁路、川藏高速公路的路基、隧道及桥梁影响甚大,是川藏走廊交通干线建设和运营中难以回避的问题^[1-2]。

前人对该区较著名的冰碛物灾害点(如102冰碛滑坡、古乡沟冰川泥石流等)的发育条件、成因进行了较详细的研究^[3-6],指出降雨入渗和冰川融水是造成冰碛滑坡的重要因素,水动力条件是冰碛物相关灾害失稳的关键性指标。在冰碛土力学稳定性方面,袁广祥等^[7]对帕隆藏布流域高陡冰碛物切坡的坡高与坡度的组合值进行了统计分析,发现其超出了普通坡体组合值的经验范围,但在风化作用及地下水影响下,易发生局部失稳,其破坏模式与均质土坡和有结构面的岩质边坡差别明显;胡明鉴等^[8]通过环剪试验模拟了易贡滑坡的形成原因,认为高速剪切使孔隙水压力不能及时消散,剪切过程引发孔隙水向剪切面运移,剪切面土体含水量和细粒含量明显高于剪切面上下层土体,以致剪切面液化;屈永平等^[9]通过克拉伯龙-克劳修斯方程与热化学方程得到冰川、积雪的融水强度,分析了冰碛物有效粒径 d_{10} 的起动和局部剪切破坏与冰川、积雪融水强度及降雨强度的关系。冰碛土作为一种土石混合体,其宏观变形破坏及力学性质与内部夹杂的

块石的空间定向性密切相关^[10],块石含量和角度对土体中裂纹的萌生位置、粘聚力和内摩擦角的变化趋势、剪切带的破坏形式等具有明显影响。

当前,冰碛物地质灾害的研究尚不充分,如不同沉积部位的冰碛物失稳转化为地质灾害的机制尚不明确,对交通干线等构筑物和保护对象的致灾方式有待进一步梳理^[11]。这些冰碛物灾害点的威胁范围与区内重大交通干线的走向范围重合于河谷区域,因此,对它们的物理力学性质及相关的致灾机理等都需要着重研究。

1 研究方法

以藏东南帕隆藏布流域为研究区,该区既是川藏交通走廊内冰川型地质灾害发育最密集的区域^[12],也是冰碛物分布最集中、规模最宏大的区域。帕隆藏布主河位于东段,由然乌流向通麦;西段为易贡藏布和拉月曲两大支流,于通麦西侧汇合后转为南向,并最终汇入雅鲁藏布江大拐弯处。通过遥感判识、文献分析和现场核查,选择32处拥有典型冰川堆积地貌特征(上游具有活跃性冰川、中游为冰川侵蚀宽谷、沟口具深厚的多期次堆积台地)的冰碛垄,详细调查其物质成因、堆积形貌、分布、沉积、粒组特征及灾害发育程度;同时在每个调查点开展天然密度、颗粒级配筛析、双环渗透、直接剪切等现场测试。选择冰碛物堆积体露头新鲜、沉积结构清晰、沉积物未经后期洪水或人类工程活动改造的12个断面(调查及取样点位置见图1、表1),通过取样铲和取样管采集典型堆积样品,采用自封式塑料袋进行密封并装箱储运,以减少水分蒸发及搬运振动的影响,在室内开展含水率、孔隙比、饱和度、颗粒密度、固结压缩系数、三轴剪切强度、无侧限抗

压强度、自由膨胀率、光释光测年等测试,统计主要物理力学参数的数值范围。通过多因素正交分析探求各参数间的耦合关系,建立起该区典型冰碛物物理力学参数特征。

2 冰碛物物理特征

2.1 冰碛物的年代与堆积特征

通过取样进行光释光测年,获得帕隆藏布流域冰碛物的沉积年代主要为新冰期(MIS 1, 1.5~3.0 ka)和末次冰期(MIS 2~4, 10.4~73 ka),少量属倒二冰期(MIS 6~10, 112~333 ka)^[13]。限于取样点数量和位置,获得的样品沉积年龄测试数据为95~1.6 ka。倒二冰期的冰碛物主要分布于主河谷的高谷肩上或冰川U型谷的侧缘;末次冰期冰碛物由于支谷冰川距离粒雪盆补给区较近,冰川补给物质丰

沛,往往能形成高大而绵长、伸入主谷的侧碛垄或终碛垄,且形态保存完整。

基于详尽的现场调查,本文绘制了帕隆藏布流域第四系堆积体的分布简图(图1)。其中,冰碛物的分布面积约为35.29 km²,主要分布于然乌-东久段主河及其一级支流内,以波堆藏布、曲宗藏布和嘎隆曲等支流最典型(表1、图1)。帕隆藏布北岸为阳坡,冰川易消融,故沟谷上部多发育悬冰川及冰斗冰川,呈冰蚀围谷地貌,沟道下部未经冰川侵蚀,呈狭窄、陡立的“漏斗状”,如古乡沟、比通沟、茶隆隆巴、松隆曲、然阿隆曲等(图2(a));南岸为阴坡,冰川易积累前进,沟道内的山谷冰川甚至曾沿途侵蚀直抵主河,使得沟谷上下均成为宽U型,而后间冰期冰川后退,沿沟道形成规模庞大的侧碛垄,并在主河谷内形成高达数十米甚至百余米高的“弧弯状”终碛堤,如德通沟、曲汝曲、加桑隆巴、错卡弄巴、松茹沟、朗秋冰川等(图2(b))。

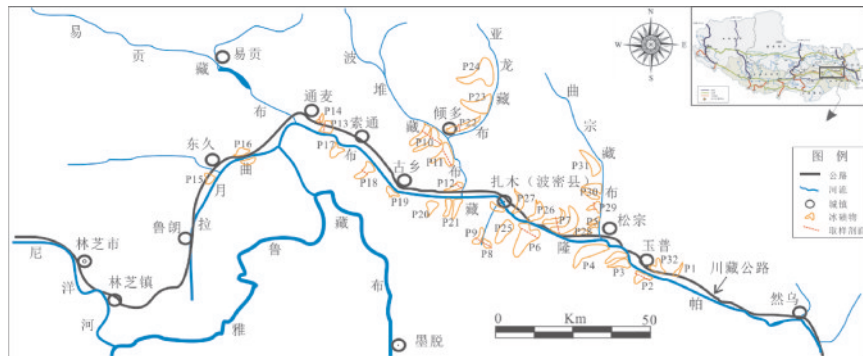


图1 帕隆藏布流域水系及典型冰碛物堆积体分布

Fig.1 Distribution diagram of glacial tills and drainage of Parlung Zangbo basin

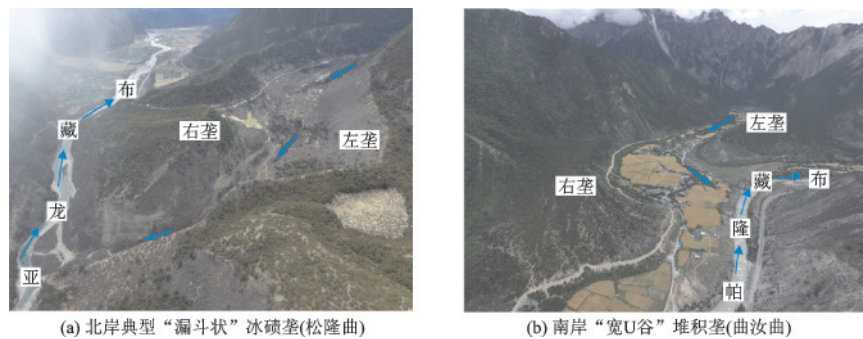


图2 帕隆藏布南北岸冰碛物典型堆积地貌特征

Fig.2 Characteristics of glacial accumulation in the north and south bank of Parlung Zangbo

2.2 冰碛物的天然密度与孔隙比

经现场测试,帕隆藏布流域典型冰碛物天然密度 ρ 取1.9~2.4 g/cm³,大部分样品密度值较集中,

个别比较分散,且密度值大小与天然含水量、孔隙比和块石含量有关,冰碛物堆积体越干燥、孔隙比越小、块石含量越高,则天然密度值越大,反之则越小(图3);而冰碛物的密实度除与沉积年代有关外,

表 1 帕隆藏布流域典型冰碛物调查点情况

Table 1 Suvey cases of typical glacial tills in Parlung Zangbo basin

序号	名称	所在支流及坡向	堆积形态、物质结构与沉积特征	沟口(采样点)坐标	平均高程/m
P1	中坝村	主河(阳坡)	单侧直垄,3期次,砾砂、泥质弱胶结,含漂砾	29°37'03.19"N; 96°20'13.08"E	3 356
P2	格巴村	主河(阴坡)	双侧丘陵状垄,4期次,角砾、中等胶结(采样)	29°37'22.75"N; 96°15'47.17"E	3 262
P3	达巴村	主河(阴坡)	双侧不对称弧形侧碛,3期次,砾砂、中等胶结	29°39'11.51"N; 96°12'04.30"E	3 209
P4	德通沟	主河(阴坡)	双侧不对称弧形侧碛,2期次,碎石土、弱胶结	29°44'30.53"N; 96°06'05.02"E	3 134
P5	加热隆巴	曲宗藏布(阴坡)	双侧直垄、角砾、中胶结,内侧可见陡立露头	29°47'35.78"N; 96°05'48.16"E	3 240
P6	朗秋冰川	主河(阴坡)	平坦终碛台地、砾砂、弱~中胶结(采样)	29°44'08.28"N; 96°01'53.96"E	3 051
P7	尼足电厂	主河(阳坡)	双侧不对称侧碛,3期次,角砾、中等胶结(采样)	29°46'24.21"N; 95°55'18.31"E	2 964
P8	嘎龙寺	嘎隆曲(阴坡)	双侧不对称侧碛,2期次,碎石~角砾、无胶结(采样)	29°46'13.48"N; 95°42'11.56"E	3 827
P9	嘎龙寺北	嘎隆曲(阴坡)	单侧弧形侧碛垄,2期次,碎石~角砾、无胶结	29°47'00.19"N; 95°41'51.36"E	3 785
P10	白玉沟	波堆藏布(阴坡)	双侧高大顺直终侧碛,外侧3期次丘陵,角砾、泥质胶结,局部夹河湖相(采样)	30°06'00.68"N; 95°31'32.45"E	3 015
P11	朱西沟	波堆藏布(阴坡)	双侧巨大弧形终侧碛,碎石土、钙质中等胶结,局部强胶结,开挖后可直立(采样)	30°03'56.58"N; 95°34'14.64"E	2 940
P12	嘎朗村	主河(阳坡)	单侧弧形侧碛垄、砾砂、中胶结,沿主河堆积(采样)	29°54'10.80"N; 95°36'31.26"E	2 840
P13	102滑坡	主河(阳坡)	单侧终碛垄,碎石土,弱胶结,后缘陡立透水(采样)	30°04'19.72"N; 95°08'25.45"E	2 202
P14	加马其美	主河(阳坡)	双侧陡直终碛垄,角砾,弱~中等胶结,含漂砾(采样)	30°04'30.46"N; 95°07'31.52"E	2 110
P15	东久桥南	东久河(阴坡)	单侧扇状终碛,角砾~碎石土,中等胶结,经河流改造	29°56'52.67"N; 94°48'03.90"E	2 553
P16	拉月村	拉月曲(阳坡)	单侧弧形终碛垄,角砾~碎石土,弱胶结,外侧陡立	29°59'19.99"N; 94°52'21.91"E	2 536
P17	乔那村	主河(阴坡)	双侧陡直终侧碛,碎石土,中等胶结,外侧3期沉积	30°02'17.79"N; 95°14'34.07"E	2 343
P18	赤担隆巴	主河(阴坡)	双侧顺直终碛,碎石土,中等胶结,湖相夹层(采样)	29°59'18.48"N; 95°20'37.90"E	2 511
P19	随隆沟	主河(阴坡)	双侧弧形终碛垄,角砾土,弱~中等胶结,夹湖相沙层	29°55'24.43"N; 95°24'47.63"E	2 589
P20	巴卡村	主河(阴坡)	单侧顺直终碛,角砾土,弱胶结,前端伸入主河中部	29°52'45.88"N; 95°33'41.60"E	2 744
P21	错卡弄巴	主河(阴坡)	双侧对称顺直终碛、砾砂、中胶结,前端似“钳”形	29°52'58.20"N; 95°33'39.45"E	2 694
P22	达龙村	波堆藏布(阳坡)	单侧直线形侧碛、砾砂、中胶结,上下两道垄(采样)	30°04'10.16"N; 95°36'46.44"E	2 883

续表

序号	名称	所在支流及坡向	堆积形态、物质结构与沉积特征	沟口(采样点)坐标	平均高程/m
P23	松隆曲	波堆藏布(阳坡)	双侧弧形终碛垄、砾砂、中胶结,溃口陡立,高达150m	30°04'50.39"N; 95°39'37.81"E	2 966
P24	热阿隆巴	波堆藏布(阳坡)	双侧弧形终碛垄、砾砂~沙层、中胶结,围合似湖堤	30°08'09.19"N; 95°44'01.46"E	2 985
P25	卓隆沟	主河(阴坡)	双侧顺直侧碛、砾砂,无胶结,局部块石架空结构	29°50'25.93"N; 95°45'54.88"E	3 025
P26	角落沟	主河(阳坡)	单侧弧形终碛,砾砂,弱~中胶结,局部块石架空结构	29°44'07.22"N; 96°01'56.33"E	3 045
P27	向阳渠	主河(阳坡)	单侧弧形终碛垄,砾砂,弱~中胶结,前端切坡陡立	29°48'26.92"N; 95°52'11.89"E	2 994
P28	栋亚村	主河(阳坡)	扇状终碛斜坡、砾砂、弱~中胶结,无明显垄状	29°43'53.34"N; 96°03'11.93"E	3 192
P29	德普村	曲宗藏布(阴坡)	双侧直垄、角砾、中胶结,局部露头密实坚硬(采样)	29°51'18.95"N; 96°06'10.01"E	3 225
P30	星木村	曲宗藏布(阴坡)	双侧弧形终碛垄、砾砂、中胶结,局部夹湖相沙层	29°53'27.41"N; 96°06'09.84"E	3 244
P31	多吉场镇	曲宗藏布(阴坡)	单侧不规则侧碛,角砾,弱胶结,后期改造严重	29°58'57.47"N; 96°05'28.93"E	3 349
P32	阿西村	主河(阳坡)	单侧丘陵状终碛台地,4期次,角砾、中等胶结	29°37'46.60"N; 96°15'47.68"E	3 270

还与应力历史、沉积厚度、颗粒级配等因素有关,因此从测试数据看,其密度及孔隙比与沉积年代并无明显相关性。

孔隙比 e 取 0.3~1.4, 相比其它第四纪堆积物较低, 显示出其密实度较高, 固结作用较强。孔隙比 e 与天然密度 ρ 关系式为(图4):

$$\rho = -0.6061ne + 1.4202 \quad (1)$$

式中, ρ 的单位为 g/cm^3 ; e 为无量纲数; 统计相关系数 $R^2 = 0.94$ 。

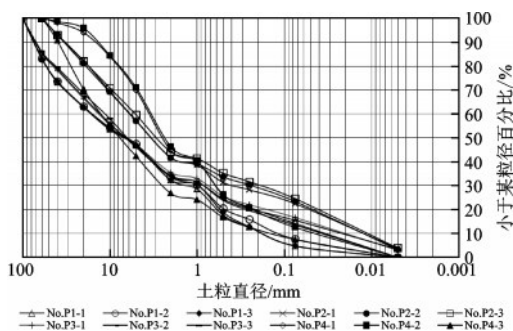


图3 典型冰碛物颗粒级配曲线

Fig.3 Grading curve of typical glacial tills

2.3 冰碛物的颗粒组分

以 P1~P4 为例, 分析颗粒曲线成果分析, 如图

3 所示。大部分样品为宽级配土(不均匀系数 $C_u > 10$), 其中 45% 为级配不良(曲率系数 $C_c < 1.0$, 级配不连续, 粒径 $< 2 \text{ mm}$ 的细颗粒含量 $> 30\%$), 颗粒曲线形态相似, 且都在 1~2 mm 段出现“拐点”, 表明该粒组含量相对其他粒组较少, 砂土粒组相对缺失而粉砂和黏土粒组含量较高, 其原因应与冰川长距离搬运中的强烈研磨作用有关, 土颗粒间磨蚀程度较高; 各特征粒径值为: $d_{10} = (0.01 \sim 0.1) \text{ mm}$, $d_{30} = (0.2 \sim 2) \text{ mm}$, $d_{50} = (2 \sim 8) \text{ mm}$, $d_{60} = (3 \sim 11) \text{ mm}$ 。可见, 本区典型冰碛物不均匀性较好, 但连续性一般。

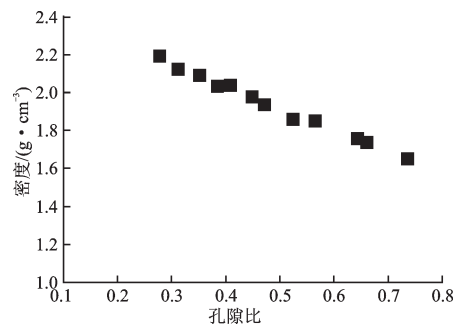


图4 密度与孔隙比统计关系

Fig.4 Relationship between density and void ratio

3 冰碛物工程力学特征

3.1 固结压缩性

土体的固结压缩性一般用压缩系数 a_v 表征,其定义为压缩试验所得 $e-p$ 曲线上某一压力段的割线的斜率,计算公式为:

$$a_v = \tan\alpha = \frac{e_1 - e_2}{p_2 - p_1} \quad (2)$$

工程上还常通过压缩试验求解压缩模量 E_s 作为土的压缩性指标,计算公式为:

$$E_s = \frac{1 + e_0}{a_v} \quad (3)$$

式中, p_1 、 e_1 和 p_2 、 e_2 分别为选取的固结压力段及对应的孔隙比; e_0 为土的天然孔隙比。

固结试验结果显示(图5,图6),压缩系数 a_v 的数值集中于0.15~0.35,为中等压缩性土。 a_v 随含水率 ω 的升高而升高,表达式为:

$$a_v = 0.096e^{0.17\omega} \quad (4)$$

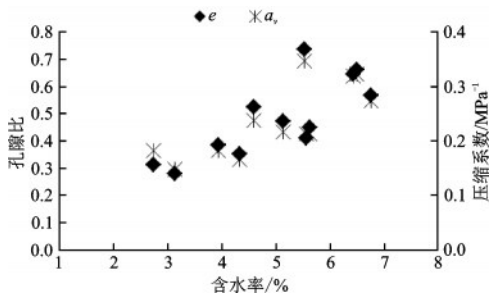


图5 冰碛物含水率与固结试验指标关系

Fig.5 Relationship between moisture content and consolidation indexes of typical glacial tills

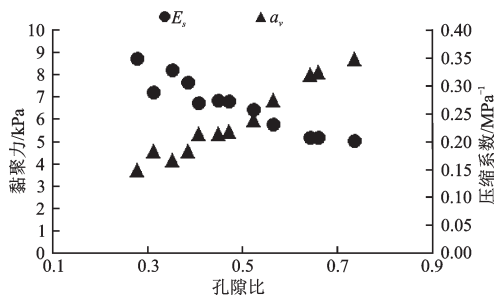


图6 冰碛物孔隙比与固结压缩试验指标关系

Fig.6 Relationship between void ratio and consolidation indexes of typical glacial tills

压缩系数 a_v 随孔隙比 e 升高,压缩模量 E_s 随孔隙比 e 降低,表达式分别为:

$$a_v = 0.447e + 0.0195 \quad (5)$$

$$E_s = -7.758e + 10.375 \quad (6)$$

式中, a_v 单位为 MPa^{-1} ; E_s 单位为 MPa ; e 、 ω 均为无量纲数;统计相关系数 R^2 分别为 0.64、0.967 和 0.893。

对比式(2)、式(3)及本试验统计结果,可见 a_v 、 E_s 与 e 的统计相关性趋势与理论关系相吻合。不同之处在于,统计经验式较理论式简化,可由测得的单一物理指标 e 或 ω 直接估算压缩性指标,从而节省野外调查和取样工作量。

3.2 渗透性、膨胀性和粘粒含量

自由膨胀率表征土粒在无结构力影响下的膨胀性,主要受土中黏粒含量和矿物成分支配^[14]。由渗透性、膨胀性及颗分试验等室内测试的数据,拟合出垂直渗透系数 k_T 、自由膨胀率 δ 与黏粒含量 d_c 的统计关系式分别为:

$$k_T = 0.4138d_c^2 - 2.8799d_c + 8.6479 \quad (7)$$

$$\delta = -0.2906d_c^2 + 2.1319d_c + 0.7884 \quad (8)$$

$$k_T = 0.65 \times 10^3 e^{-0.35\delta} \quad (9)$$

式中, k_T 单位为 cm/s ; δ 和 d_c 的单位均为 %;相关系数 R^2 分别为 0.87、0.76 和 0.734。

从数据相关性看(图7),冰碛物的渗透系数与自由膨胀率呈负相关;而二者分别与黏粒含量呈负相关和正相关;从物理意义上看,粘粒含量越高,颗粒比表面积越大而孔隙率越小,因此膨胀性越强、渗透性越弱。

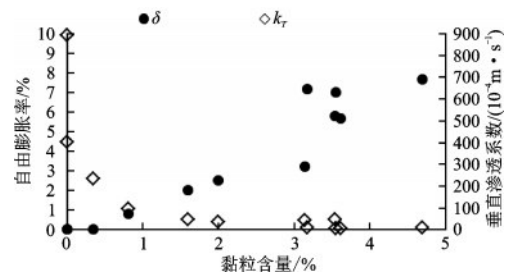


图7 冰碛物自由膨胀率、渗透系数与黏粒含量的关系

Fig.7 Relationship of free expansion rate and vertical permeability with clay content of glacial tills

3.3 抗剪强度

在竖向压力 100、200、300 及 400 kPa 下分别进

行了室内直剪试验和室内三轴剪切试验,通过拟合获取抗剪强度参数值,如图8所示。由于冰碛物中的碎石在剪切面上的翻转和重排列,试验中剪应力偶有出现反复跳跃现象,故直剪试验以位移控制来确定抗剪强度。通过统计孔隙比 e 、含水率 ω 与抗剪强度及无侧限抗压强度指标的试验数据,拟合出剪切强度和抗压强度指标的估算关系式分别为:

$$C = 20.34e - 4.49\omega + 29.97 \quad (10)$$

$$\varphi = 11.40e - 4.32\omega + 50.20 \quad (11)$$

$$q_u = -4.20e + 0.59\omega + 7.71 \quad (12)$$

式中,黏聚力 C 和无侧限抗压强度 q_u 的单位均为kPa;内摩擦角 φ 的单位为度($^\circ$);相关系数 R^2 分别为0.61、0.55和0.63。

由统计看,剪切指标取值与孔隙比和含水率具有一定相关性,但由于剪切试验方法和取样及搬运过程的影响,其规律性不及其他力学指标稳定,且受样品尺寸的影响较明显。为克服试验尺度的影响并保持样品的原状性,下一步将开展不同含水率条件下的现场大型直接剪切系列试验。

综合上述,通过对天然密度、孔隙比、含水率、颗粒组分、固结压缩指标、渗透性和膨胀性指标、剪切强度指标的数值统计分析,帕隆藏布流域典型冰碛物的物理力学参数特性与其含水率、孔隙比及黏粒含量3个基本物理参数的关系较密切,上述统计式的相关系数 R^2 最大值为0.967,最小值为0.55;除强度指标由于试验尺度的影响较特殊外,其他参数的相关系数值多大于0.7。其中,孔隙比与压缩指标的统计相关性最高,说明冰碛土的压缩性主要由土粒中的孔隙率决定,这与土力学中的固结压缩理论相吻合。在工程规划和设计阶段,可首先在现场进行含水率、孔隙比和黏粒含量的简易测试,通过物理力学参数间的统计关系式估算其工程力学指标取值范围,再跟据文献[15-16]中推荐的方法初步进行现场稳定性评价,进而再有针对性地选择稳定性

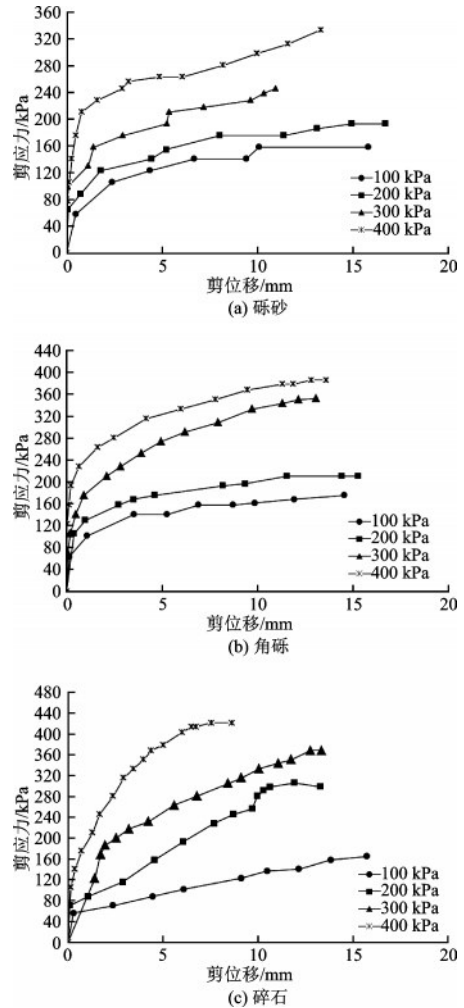


图8 典型冰碛物直剪试验的位移—剪应力曲线
Fig.8 Displacement-shear stress curves of typical glacial tills obtained by direct shear test

较差的重点场地,详细测试其剪切指标、固结压缩指标及承载力等工程力学参数,根据工程的具体需要进行使用。

根据现场和室内测试数据,统计出的主要物理力学指标取值范围见表2。作为一种宽级配混杂堆积,由于冰碛物的非均质性、各向异性、物质来源及沉积环境等因素的不同,其物理力学参数的取值大小天然地应具有一定浮动空间,实际中应根据研究区场地的具体情况选用。

表2 冰碛物基本物理力学参数测试成果

Table 2 Fundamental physical and mechanical parameters of typical glacial tills

指标	天然密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	含水率/ %	孔隙比	固结试验		自由膨胀 率/%	垂直渗透系数/ ($cm \cdot s^{-1}$)	三轴压缩(UU)	
				压缩模量/ MPa	压缩系数/ MPa^{-1}			黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^\circ$)
取值	1.9~2.4	2~17	0.3~1.4	5~8.5	0.1~0.4	0~14	$7 \sim 900 \times 10^{-4}$	37~65	22~34

4 稳定性及起动方式

4.1 冰碛物的稳定性

冰碛物特殊的组分特征决定了其中的黏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,在干燥条件下通常可以形成高陡的边坡。但是,在雨水、冰雪消融等渗透作用下,表层冰碛物结构松散,形成架空结构,入渗率增大,内摩擦力和稳定性降低^[17]。黄金辉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^[18]:黏聚力随着含水率的增加呈一阶指数衰减关系,且在0~10%黏聚力衰减迅速;内摩擦角随含水率的增加亦呈减弱趋势。

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,其破坏机理广受关注。S.Springman等^[19]在阿尔卑斯一处冰碛物坡体上开展的人工降雨实验表明,非饱和状态时负孔隙水压力的提高,可增强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。

通过分析现场调查情况(冰碛物边坡和堆积体的坡长及坡高等形态参数、稳定状况、地质灾害发育情况等),并对比不同稳定状况的坡体的现场颗粒分、动力触探、渗透性、光释光测年等测试数据,可知不同沉积部位处的冰碛物由于搬运距离(影响颗粒级配)、沉积时间、固结程度的差异较大,其稳定状况及地质灾害发育密度也有所不同。根据杨栋等^[16]建立的稳定性评价模型,冰碛物的稳定性与其沉积年代、物质组成和密实度关系密切,基于现场调查及室内外测试数据,获得冰碛物斜坡稳定性评价指标参数,即可建立典型案例点的输入向量,而其输出向量则为冰碛物斜坡的稳定性系数。值得注意的是,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。

4.2 物源起动方式

前述取样及测试工作主要集中在冰川谷的下游堆积区,而冰碛物作为物源的起动部位主要集中

在上、中游沟道内和沟岸两侧,其物质组成、沉积结构和渗透性与下游堆积体有较明显的差异(图9),主要表现为:①颗粒组分方面,上游冰碛物的形成年代新、搬运距离短,因此颗粒研磨程度轻微,以巨块石为主,而下游冰碛物的黏粒、砂粒含量则大幅增加,级配较宽;②沉积结构方面,上游堆积体的固结作用相对较弱,通常呈散体状或架空结构,而下游堆积体则呈“泥裹石”的致密结构,形似搅拌良好的混凝土;③渗透性方面,上游冰碛物渗流路径畅通、渗透性强,而下游堆积体通常密实度高、渗透性微弱。因此,不同沉积部位的冰碛物起动方式也具有各自特点。

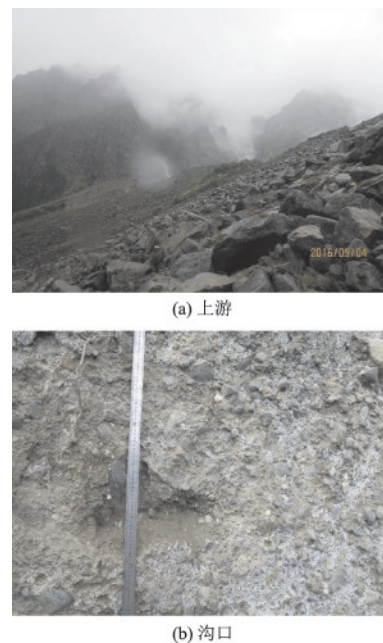


图9 不同沉积部位的冰碛物特征

Fig.9 Difference characteristics of glacial tills in the upstream region and downstream region

对于沉积海拔高、位于现代冰川的冰舌活跃处的冰碛物,在山前强降雨、冰川消融及地震等工况下,易受上游冰崩或雪崩的铲刮作用或融水的侵蚀作用影响,起动形成高位滑坡及冰川泥石流等地质灾害,其参与物源活动的方式为:上游高陡纵坡提供势能→冰雪崩铲刮沟床物质或融水冲刷驱动细颗粒迁移→掏空形成架空层、驱动较大颗粒运动→沿程铲刮更多固体物质→形成更大规模灾害,这是冰川型地质灾害发育的主要物质来源,通常含有大量巨砾,冲击力和破坏性较强,如波密—墨脱公路K18处的现代冰碛群,每逢夏季暴雨时即起动形成

泥石流,并在冰碛堆积体上冲出数个流通沟槽,可直接对扎墨公路造成冲击、淤埋、堵塞涵洞等危害,严重威胁其安全运营(图10)。



图10 嘎隆曲流域上部现代冰碛物起动形成泥石流
Fig.10 Debris flow developed by Glacial tills in Galongqu gully

对于冰川谷中游的沉积物,通常堆积松散,颗粒间胶结程度低,坡度呈自然休止角。其起动参与地质灾害的方式主要为:上游来流或沟底冰河融化贯通→冲刷下切、揭底沟床、侧向掏蚀沟岸→岸基坍塌崩落、局部形成堵塞→级联溃决放大流量→起动更多物源,这部分的冰碛物往往会扩大地质灾害的规模。该类冰碛物参与灾害通常以泥石流流通区的补给物源形式,表现为沟岸局部滑坡或侧蚀垮塌而堵塞沟道,并在上游龙头的侵蚀下起动,如天魔沟“2018.7.11泥石流”的中游起动区(图11),据现场调查共发育4处堵塞体,其溃决后造成多处沟床冲刷和岸坡坍塌,增大了冲出沟口的泥石流方量并造成局部堵河、淤埋公路。



图11 天魔沟中游冰碛物起动参与泥石流
Fig.11 Glacial tills in the middle reach of Tianmo gully involved in debris flow

对于沉积在冰川沟口、接近主河的冰碛物,一般经历较长的搬运距离,粗细颗粒间经充分搅拌和挟裹,沉积时间久远,挤压排水充分,密实度高。其中未经后期流水和风化改造的冰碛物可以形成近

乎直立的边坡,坡高/坡度比大,工程性质相对稳定,一般不易起动。但仍应注意上游来水、渗透的可能性和沉降裂隙的发育情况,如老川藏公路沿线的102滑坡群,即是由于上部渗水而逐层垮塌,多次损毁路基,致使G318国道改以隧道下穿方式穿越该处堆积体(图12)。

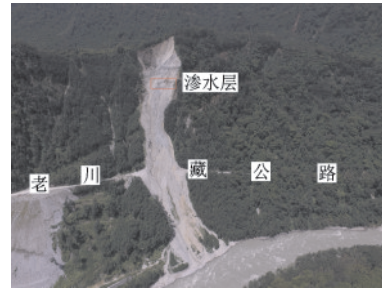


图12 川藏线102滑坡群后缘透土层出露
Fig.12 Permeable layer in the main scarp of 102 landslides along Sichuan-Tibet highway

4.3 工程效应

冰碛土独特的结构特征(如其内部的块石含量、粒径及空间分布特征等)对其强度特征及变形破坏机理有着重要影响^[15]。边坡的形态特征主要体现在坡高与坡角上,调查点坡度都在40°以上,最大可达85°;102滑坡后缘垂直高度达400余米,坡高与坡度均大于其他类型的堆积体边坡。从大尺度上看,冰碛物中的石块和细粒土的分布有很大的随机性,无成层性,也不存在起控制作用的结构面,在工程应用范畴上可看作类均质体。因此,其边坡的变形破坏机制既不同于具有明显结构特征的岩质边坡,也不同于具有均质各向同性的土体边坡。

根据前述冰碛物3种不同沉积部位的工程性质和水动力下的起动失稳方式,工程利用中亦应有所区别对待。当线路采用高线位、需穿越冰川沟谷中上游段时,应高度注意现代冰舌末端的新近冰碛物和中游尚未完成固结作用的活跃堆积体,其稳定性较差、势能高、距离线路近,一旦失稳则冲击力和破坏性强,以上两类冰碛体在交通线路选线中是应当避免直接利用的,一般应采用隧道、大跨度桥梁或明洞渡槽的形式绕避。

当采用低线位时,线路周边为主河谷两侧已完成固结的老冰碛物,一般可作为较好的工程边坡和地基,这种冰碛体也是人类工程活动、特别是川藏

铁路和川藏高速公路规划建设中最常遇到的一种,通常以公路边坡、路堑或路基的形式接触,在进行详细勘察的基础上,可选取适当的坡高与坡度进行稳定性设计与校验。

由于海洋性冰川的活跃特性,该流域的冰碛物在多个间冰期—盛冰期的轮回中常夹杂有静水相沉积物,例如白玉冰川沟口、赤担隆巴侧碛垄中部、松隆曲、热阿隆巴等处的冰碛体中,均发现在上下两层冰碛物中夹杂有一层或多层的间冰期湖相沙层,夹层厚度可达2~7 m。由此引起不同层位间的结构组分、胶结程度、抗剪强度的显著差异,将可能导致堆积体工程力学性质的分层性和差异性,进而影响其整体稳定性,甚至可能由于夹沙层的局部坍塌而出现局部架空层,工程中需引起足够重视。

5 结 论

(1)通过对帕隆藏布流域典型冰碛物进行大量现场试验及室内测试的数据分析表明,其物理力学参数与含水率、孔隙比及黏粒含量密切相关,其中天然密度和压缩模量均与孔隙比呈线性负相关,而压缩系数与含水率呈指数相关,垂直渗透系数和自由膨胀率分别与黏粒含量呈二次方关系,抗剪与抗压强度与孔隙比和含水率呈二元函数关系。

(2)冰碛物野外调查和现场评估工作中,可先进行含水率、天然密度和黏粒含量的简易测试,再根据试验数据统计关系式估算孔隙比、固结压缩指标、抗剪强度、抗压强度、渗透性和膨胀性等其他相对复杂的工程力学指标,从而可快速进行场地稳定性的初步评价,并根据评价结果,有针对性地选取高危险性场址开展所需的详细勘查工作。

(3)由于沉积年代、颗粒组分、固结作用和水动力条件等的差异,冰碛物在三种不同沉积部位(现代冰舌前缘、冰川谷中游、沟口主河岸坡)的起动方式各不相同,进而导致不同部位的冰碛体的稳定性差异明显,在实践中应对其分别研究,尤其需注意不同类型的冰碛体对川藏铁路、川藏高速公路等重大工程的影响。

致谢 本文承蒙中国科学院成都山地所李德基研究员、成都理工大学余斌教授交流启发,谨致谢忱!参加野外考察的同志还有陈龙、张佳佳、李

元灵、高波等,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 梁承洋.川藏交通廊道冰碛物滑坡堵江风险及线路对策研究[D].成都:西南交通大学,2015.
Liang Ch Y. Study on the risks of moraine landslide blocking river along Sichuan-Tibet transportation corridor and disaster reduction strategies in route engineering [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [2] 宋 章,张光泽,蒋良文,等.川藏铁路工程地质特征及地质选线原则[J].铁道建筑,2017(2):142-146.
Song Zh, Zhang G Z, Jiang L W, et al. Engineering geological features and geological route selection principle of Sichuan-Tibet railway[J]. Railway Engineering, 2017(2): 142-146. (in Chinese)
- [3] Yin Y P, Xing A G. Aerodynamic modeling of the Yigong gigantic rock slide-debris avalanche, Tibet, China [J]. Bulletin of Engineering Geology and Environment, 2012, 71(1): 149-160.
- [4] 徐国涛,王培清,何 强,等.降雨入渗对川藏公路102滑坡群2#滑坡体稳定性影响分析[J].土工基础,2013,27(3):16-20.
Xu G T, Wang P Q, He Q, et al. Rainfall infiltration on the stability of the No.2 landslide at Sichuan-Tibet highway [J]. Soil Engineering and Foundation, 2013, 27(3): 16-20. (in Chinese)
- [5] Kang C, Chan D, Su F H, et al. Runout and entrainment analysis of an extremely large rock avalanche—a case study of Yigong, Tibet, China [J]. Landslides, 2016, 14(1): 123-139.
- [6] 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 effect of cyclic freeze-thaw on shear behaviors of clayey coarse-grained soil[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(3): 375-386. (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,2007,18(4):47-51.
Yuan G X, Zeng 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 Haz-

- ards and Environment Preservation, 2007, 18(4): 47-51. (in Chinese)
- [8] 胡明鉴, 程谦恭, 汪发武. 易贡远程高速滑坡形成原因试验探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 138-143.
- Hu M J, Cheng Q G, Wang F W. Experimental study on formation of yigong long-distance high-speed landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 138-143. (in Chinese)
- [9] 屈永平, 唐川, 刘洋, 等. 西藏林芝地区冰川降雨型泥石流调查分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增2): 4 013-4 022.
- Qu Y P, Tang Ch, Liu Y, et al. Investigation and analysis of glacier debris flow in Nyingchi Area, Tibet[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Sup 2): 4 013-4 022. (in Chinese)
- [10] 高文伟, 高玮, 胡瑞林, 等. 块石空间定向性对土石混合体力学性质的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(1): 89-97.
- Gao W W, Gao W, Hu R L, et al. Effects of rock block orientation on the mechanical characteristics of rock and soil aggregate[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(1): 89-97. (in Chinese)
- [11] 许佑顶, 姚令侃. 川藏铁路沿线特殊环境地质问题的认识与思考[J]. 铁道工程学报, 2017(1): 1-5.
- Xu Y D, Yao L K. Some cognitions and thinkings about the specific geo-environmental problems along the Sichuan-Tibet railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017(1): 1-5. (in Chinese)
- [12] 张佳佳, 刘建康, 高波, 等. 藏东南嘎龙曲冰川泥石流的物源特征及其对扎墨公路的影响[J]. 地质力学学报, 2018, 24(1): 106-115.
- Zhang J J, Liu J K, Gao B, et al. Characteristics of material sources of galongqu glacial debris flow and the influence to Zha-mo road [J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24(1): 106-115. (in Chinese)
- [13] 崔之久, 陈艺鑫, 张威, 等. 中国第四纪冰期历史、特征及成因探讨[J]. 第四纪研究, 2011, 31(5): 749-764.
- Cui Zh J, Chen Y X, Zhang W, et al. Research history, glacial chronology and origins of quaternary glacialations in China[J]. Quaternary Sciences, 2011, 31(5): 749-764. (in Chinese)
- [14] 苏振妍. 颗粒膨润土材料持水性能及渗透性能研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019
- Su Zh Y. The water retention and permeability of granular bentonite material for HLW disposal[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019. (in Chinese)
- [15] 袁广祥, 尚彦军, 林达明. 帕隆藏布流域堆积体边坡的工程地质特征及稳定性评价[J]. 工程地质学报, 2009, 17(2): 188-195.
- Yuan G X, Shang Y J, Lin D M. Engineering geological properties and stability analysis of moraine debris slopes in palong river drainage area along Sichuan-Tibet highway[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(2): 188-195. (in Chinese)
- [16] 杨栋, 王军朝, 杨东旭. 帕隆藏布流域冰碛物斜坡结构及稳定性评价方法[J]. 人民长江, 2019, 50(1): 108-112.
- Yang D, Wang J Ch, Yang D X. Moraine slope structure in Parlung Zangbo River Basin and its stability evaluation method [J]. Yangtze River, 2019, 50(1): 108-112. (in Chinese)
- [17] 党超, 褚娜娜, 丁瑜. 冰湖溃决泥石流形成的临界条件[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1 176-1 183.
- Dang Ch, Chu N N, Ding Y. The critical condition for the formation of debris flow induced by glacial lake outburst flood [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1 176-1 183. (in Chinese)
- [18] 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.
- Huang J H. Influence of infiltration on the stability of moraine slopes [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [19] Springman S, Jommi C, Teysseire P. Instabilities on moraine slopes induced by loss of suction: a case history [J]. Géotechnique, 2003, 53(1): 3-10.

(本文责编: 赵霞)