

文章编号: 1008 - 2786 - (2014)5 - 579 - 08

高寒山区岩体冻胀冰劈破坏试验

乔国文^{1,2}, 王运生¹, 杨新龙²

(1. 成都理工大学 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;
2. 新疆维吾尔自治区交通规划勘察设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830006)

摘 要: 高寒、高海拔地区岩体物理风化导致的不良地质对工程建设影响明显。为了揭示高寒山区岩体在冻融条件下破坏的机理, 使岩体冻融破坏防治更有针对性及有效, 依托乌鲁木齐 - 尉犁高速公路建设项目, 通过试验手段, 探讨了冻胀条件下岩体破坏的原因。冰劈试验揭示了自由水变成冰过程中膨胀力的变化情况及其特性, 试验显示在围护环境不变的情况下冻胀力或冰劈力可以达 33 MPa 以上, 远大于岩石抗拉强度及裂隙胶结强度, 且温度越低, 冻胀启动越快, 速率越大, 冰劈越明显。通过岩体冻胀应变试验揭示了岩体裂隙中自由水膨胀变形性质。岩体冻胀应变主要由裂隙变化引起, 裂隙性质不同, 冻胀应变特征不同, 冻胀应变的趋势及大小受控于裂隙的贯通性、含水情况及胶结强度。由此, 总结了岩体在冻胀条件下的破坏机理。该成果对高寒山区岩体的破坏机理的认识具有重要的理论和现实意义。

关键词: 高寒山区; 冻胀; 冰劈; 应变

中图分类号: P512. 1, P642. 14

文献标志码: A

近年来随着山区大规模工程建设, 很多工程位于高寒山区, 那里独特气候条件下的岩体风化破坏, 给工程建设及后期运营安全带来极大危害。由此, 人们对高寒山区岩体冻融破坏的研究越来越多。检索资料显示, 目前人们对高寒地区岩体研究的方向主要集中在循环冻融条件下岩石物理、力学试验及细观条件下岩石损伤观测。如吴刚等^[1]对采自焦作市某矿区的大理岩进行 60 次循环冻融试验, 归纳出循环冻融下大理岩的质量、体积、超声波速抗压强度、抗冻系数、风化程度系数、动弹性模量等主要物理力学特性; 张继周等^[2]选取南京地区的粉砂质泥岩、辉绿岩、白云质灰岩进行了两种水环境下 90 次的循环冻融试验, 发现岩石冻融损伤劣化模式受多种因素影响, 不仅与岩石自身特性、冻融温度及循环次数有关, 还与所处环境有关; 母剑桥等^[3]将采自新疆国道 217 天山公路的花岗岩、砂岩和千枚岩 3 组试样进行了 50 次循环冻融试验, 得到了岩石的单

轴抗压强度与冻融循环次数的拟合关系表达式, 初步量化了循环冻融对寒区岩石强度衰减的影响, 并针对不同性质的岩石总结提出了裂隙扩展和颗粒析出 2 种冻融劣化模式; 罗学东等^[4]选取新疆富蕴县山区的变粒岩、角闪变粒岩、层理状变粒岩与黑云角闪斜长片麻岩, 经过 30 次循环冻融试验得到 4 种岩石的外观特征、质量损失率、强度损失率、冻融系数与冻融风化系数的变化情况, 结果表明: 自身强度较高且呈致密状的变粒岩和角闪变粒岩物理力学特性劣化不明显, 层理状变粒岩和角闪片麻岩则变化显著。随着技术发展, 人们把声发射技术、CT 扫描、SEM 微观扫描实验等手段运用到冻融条件下岩石损伤细观研究, 如黄勇^[5]对天山公路的典型岩石开展了 SEM 微观扫描实验分析, 得出了硬质岩代表花岗岩及中硬岩代表砂岩随寒冻风化作用下的微观裂隙 - 宏观物理力学特征演变规律方程。

上述大量的手段和方法都试图揭示岩石冻融条

收稿日期 (Received date): 2013 - 12 - 01; **改回日期** (Accepted): 2014 - 04 - 11。

基金项目 (Foundation item): 交通运输建设科技项目 (201231836520)。[This research is supported by the Ministry of Communications (201231836520).]

作者简介 (Biography): 乔国文 (1979 -), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事公路工程地质勘察研究工作。[Qiao Guowen (1979 -), male, doctor, Senior Engineer, major in Rock&Soil engineering study in highway.]

件下的破坏机理^[6]。然而,笔者通过对乌鲁木齐-尉犁高速公路天山段边坡冻融风化调查发现,岩体中的弱面,即裂隙,对冻融风化破坏的影响更大,而岩块受冻融影响相对较小。作为工程结构体,岩体包括岩块和结构面。结构面是岩体中的弱面,更易受到侵蚀,是岩体破坏的突破口。同时,通过试验发现,冻融破坏起主导作用的是裂隙水累进式的冻胀变形,即裂隙内水冰相变体积膨胀导致裂隙扩展延伸,水则继续深入裂隙并结冰膨胀,如此反复。目前查阅相关规范、检索学术论文都没有关于岩体冰劈失稳方面的详细数据,没有满足天山高寒山区岩体冻融失稳破坏的准确评价。本文试图通过物理模拟试验,研究岩体冻胀条件下的破坏机理,为工程治理提供技术支持。

1 研究区工程地质概况

乌鲁木齐至尉犁高速公路近南北向跨越天山山脉。北端起点永丰乡,海拔约 1 100 m,向南沿大西沟渐次爬升,经前峡中山峡谷区、后峡断陷盆地区及高山峡谷区,到路线最高点胜利达坂(高程 4 238 m)东侧,后顺乌拉斯台沟下行至胜利桥(高程 2 570 m),沿较开阔的乌拉斯台河下行至巴伦台(高程约 1 760 m),沿开阔的哈布其哈河下行至黄水沟一带(高程 1 290 m)出山。区域地层复杂,岩性复杂多变,主要包括凝灰质砂岩、硅质岩、大理岩、片麻岩、片岩、花岗岩、闪长岩等。

研究区气候属典型的中温带大陆干旱性气候,山区气候呈垂直分布。公路纵贯天山,沿线气候差异较大。天山以北昼夜温差大,一般日温差在 11℃~12℃之间,极端最高气温曾达 42.1℃,极端最低气温曾达 -41.5℃。后峡至胜利达坂为山区气候,气温较低,最低 -30℃,昼夜温差大。胜利达坂一带为终年积雪的寒冷气候区。达坂以南至巴仑台为过渡气候区,昼夜温差大。巴伦台及其以南昼夜温差大,冬季寒冷漫长,夏秋天气凉爽,年平均气温 5.7℃,极端最高气温 34.5℃,极端低温 -26.4℃。

2 岩体冻融破坏特征及试验研究

2.1 岩体冻融破坏特征

研究区岩质边坡总体呈中倾状,基岩裸露,岩层陡倾,微风化,岩体呈块状,表层强风化岩体层理显

现,呈中层-厚层状。冻融风化强烈,基岩剥离,碎块石散落边坡表面,形成碎石帷幕铺在山体表层(图 1)。随着冻融风化的继续,堆积的岩块会越来越多,越积越厚,直至出现块、碎石的滑塌。



图 1 冻融风化岩质边坡破坏特征

Fig. 1 Rock slope failure characteristics under the condition of Freeze-thaw

通过对基岩及崩积块石的研究发现,崩积块石表面上看风化并不严重,锈蚀不明显,敲击有明显回弹,敲开后中间较新鲜。力学试验显示其性质与较新鲜基岩块体基本一致。可见,在相同的冻融循环条件下,岩体的裂隙风化要比岩块风化快速得多,岩体裂隙已经贯通直至破坏的时候,岩块还保持较新鲜的程度及较高的力学强度。岩体冻融风化破坏,是以岩体沿结构面劈裂破坏为主。

2.2 岩体抗劈裂力学性质分析

公路工程区边坡岩性、岩体结构均有所不同,冻融风化段有块状大理岩、层状板岩、片岩及块状侵入闪长岩。边坡表层的裂隙较发育。卸荷裂隙多张开,构造裂隙闭合,闭合裂隙以泥质钙质胶结为主。岩块的抗劈裂强度主要通过抗拉强度评价,块状大理岩微风化时为 5.05 MPa,层状板岩微风化垂直层理达 6.49 MPa,平行层理达 2.53 MPa,片岩微风化垂直层理时为 5.00 MPa,平行层理达 2.04 MPa,块状闪长岩微风化时为 5.10 MPa。岩石为变质岩或侵入岩,整体强度较好,抗拉强度总体较高。由于裂隙是岩体弱面,即使是硬性结构面其整体强度也一般 <0.50 MPa,低于岩石的整体强度,其抗劈裂强度应低于岩石抗拉强度,对于软弱结构面或张开的裂隙,其抗劈裂性更差。

2.3 裂隙内自由水冻胀下情况下的应力试验

根据工程现场裂隙岩体冻融破坏特征,认为岩体的冻融破坏主要是沿裂隙面展开的,而裂隙中最活跃的影响因素是表层岩体包气带中的裂隙水。裂隙水的冻融变化加速裂隙的扩展延伸,水在冻结成冰的过程中会产生体积膨胀,如果限制其膨胀会对约束产生膨胀压力。由于受取样、试样制作、实验条件及精度限制,裂隙水膨胀产生的压力及其性质目前还没有系统的实验研究,本次我们转变实验思路,设计一个冰劈效应试验,检测水-冰相变过程中膨胀力变化情况,依此评价裂隙水的冰劈效应。

2.3.1 基本原理

水结冰时产生的膨胀压力具有各向同性性质,根据位移-压力相关理论,通过对水施加各个方向

的刚性约束,使其在结冰过程中只能沿一个方向膨胀,通过活塞将其膨胀压力传递给液压油,进而可以用液压油压力表直接测出水结冰时的膨胀压力。

2.3.2 试验仪器、内容和步骤

试验设备主要有液压缸、低温冰箱、温度计、油压压强表、秒表等。根据当地气象资料,测试不同负温条件下的油压表的压强随时间的变化。首先是调试冰柜温度,当低温稳定到-11℃时,将液压缸放入冰柜中密封,然后,每 2 min 读一次油压表数值,直至达到一定压强后停止读数。同理依次完成-15℃及-31℃环境条件下的油压表压强随时间变化的读数。得到的记录如表 1 所示。

2.3.3 试验数据分析

表 1 不同温度条件下冻胀压力统计值

Table 1 Statistics of expansion pressure under different temperature conditions

时间/min	-31℃	时间/min	-15℃	时间/min	-11℃	时间/min	-15℃	时间/min	-11℃
0-54	0	0-116	0	0-164	0	178	278	226	197
56	22	118	11	166	7	180	287	228	202
58	39	120	21	168	13	182	297	230	208
60	58	122	30	170	19	184	303	232	213
62	78	124	39	172	25	186	311	234	219
64	97	126	48	174	31	188	320	236	222
66	117	128	58	176	38	190	330	238	228
68	134	130	69	178	47	192	349	240	233
70	153	132	79	180	50	194	358	242	241
72	172	134	89	182	60			244	248
74	193	136	96	184	67			246	254
76	212	138	105	186	73			248	260
78	231	140	113	188	81			250	267
80	250	142	121	190	88			252	271
82	273	144	130	192	92			254	278
84	293	146	138	194	98			256	282
86	314	148	146	196	103			258	289
88	335	150	155	198	110			260	293
		152	165	200	115			262	299
		154	176	202	121			264	306
		156	183	204	129			266	310
		158	192	206	134			268	317
		160	200	208	140			270	321
		162	209	210	149			272	328
		164	218	212	155			274	332
		166	223	214	160			276	337
		168	231	216	167			278	342
		170	241	218	171			280	349
		172	250	220	179			282	356
		174	260	222	183			284	362
		176	269	224	190				

分析上述试验观测数据得到:

1. 不同温度下,水结冰出现膨胀压力的启动时间不同, -11°C 时为 164 min, -15°C 时为 114 min, -31°C 时仅需 54 min;冻胀启动时间随着负温的增加时间在变短,即温度越低,冻胀启动的越快。统计数据发现,冻胀起始时间与负温间的关系有呈幂指数降低的趋势(图 2)。

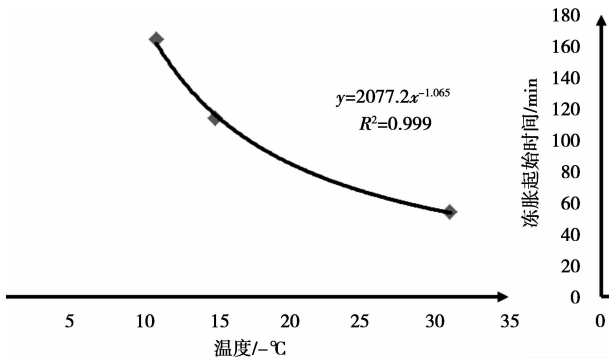


图 2 冻胀起始时间与温度间的关系

Fig. 2 The relationship between frost heave onset time and temperature

2. 水结冰过程中压力变化呈现出线性特点,负温不论高低均有此规律(图 3),水结冰膨胀压力大小与负温大小关系不明显,即在 -31°C 、 -15°C 及 -11°C 时都随着时间的增加而增加,冻胀力均能达到 33 MPa 以上,而且均没有停止的迹象。而现场岩石的抗拉强度一般低于 7 MPa,裂隙胶结强度更低,远小于冻胀力,可见高寒条件下裂隙水产生的冻胀力足以劈开裂隙化岩体;多次冻胀导致岩体劈裂由浅至深。

3. 负温的大小对冻胀力的影响,主要表现在冻胀力的斜率上,即冻结速率不同,不同温度条件下增速明显不同,其中, -11°C 时速率为 2.79 kg/

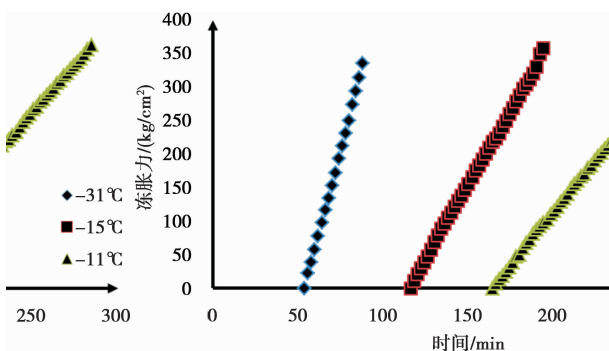


图 3 冻胀力随时间的变化

Fig. 3 The frost heave force changes with time

(cm^2/min), -15°C 时速率为 4.71 $\text{kg}/(\text{cm}^2/\text{min})$, 而 -31°C 时速率达到 10.6 $\text{kg}/(\text{cm}^2/\text{min})$ 。统计冻胀速率与温度间的关系发现,它们之间几乎是线性的关系(图 4)。

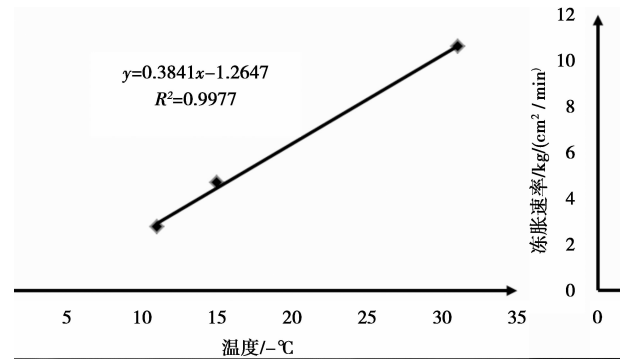


图 4 冻胀速率与温度间的关系

Fig. 4 The relationship between temperature and rate of frost heave

2.4 岩体冻胀应变试验

冻胀冰劈效应试验研究了纯水密封条件下冻胀力的性质,但现场岩体裂隙并不是密封状态,根据裂隙的张开度、贯通性、填充及含水情况等条件不同,岩体随裂隙水冻胀产生的应变应有所不同。因此,我们设计了“裂隙岩体冻胀过程的应变实验”,其目的是观测裂隙受水充填后,冻胀过程中岩体的应变变化情况,以此总结裂隙岩体冻胀情况下变形性质,至于裂隙内冰融化过程的收缩变形,其并不是冻融破坏的主要因素,为简化实验不做考虑。

2.4.1 基本原理

岩体裂隙充水后放入高寒环境中后,岩体中的自由水因冷凝而膨胀,从而导致岩体裂隙发生劈裂扩展现象;将高灵敏度的应变片贴在岩石表面微裂隙处,结合应变仪可测出裂隙岩石冻胀过程的应变。

2.4.2 实验仪器设备、步骤及数据采集

实验设备、仪器主要包括钻石机、切石机、磨石机、测量平台、游标卡尺、放大镜、CM-1L-10 型静态电阻应变仪、低温冰箱等。

取代表性花岗岩、辉绿岩石料在切石机上加工成高度为 10 cm(允许变化范围在 9.5 ~ 10.5 cm),底面直径为 5 cm(允许变化范围在 4.8 ~ 5.4 cm)的圆柱形试样 2 个,如图 5 所示。测量试样裂隙的宽度、延伸长度,2 个试样的裂隙发育情况如表 2。

将饱水的试样擦干去污,用砂纸在试样待测部位打磨,用 502 胶将应变片贴于试样上,尽量照顾裂隙分布情况,一侧纵、横贴 2 个,共 4 个。用烙铁将

铜质塑料导线与应变片焊接起来,焊接好后用医用胶带将导线固定在岩石试样上,最后检查应变片是否粘贴牢固,是否有短路、断路问题,并在应变片上涂凡士林。

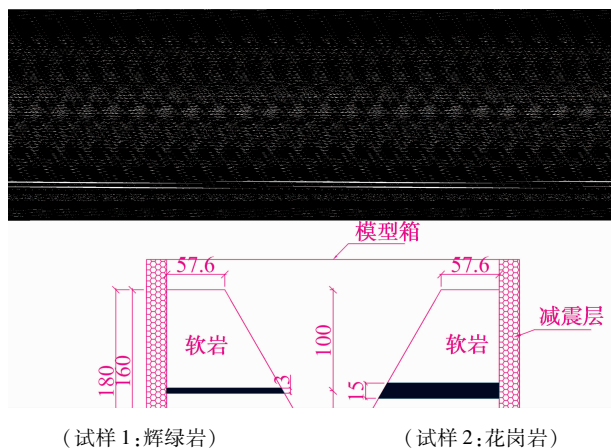


图5 试样制备

Fig.5 The prepared samples

表2 试样初始裂隙发育情况

Table 2 The development of sample fracture

试样编号	裂隙要素		
	宽度/mm	长度/mm	贯穿高度/mm
1(辉绿岩)	0.3	19.5	7.5
2(花岗岩)	0.3	20.5	8.0

根据实验要求,按1/4桥接线方法连接应变片测点。将贴在试样上的应变片通过导线与CM-1L静态电阻应变仪链接起来,每个试样上贴有4个应变片,分别与1、2、3、4测点相连。将冰箱调到 -30°C ,在温度开始变化时把与应变仪连接好的试样放入冰箱中。将所有测点上的应变片灵敏度系数K值修正为2.000,然后检查线路无误后按“总清”组合键巡检清零。开始的3 h内每10 min读1次数,后3 h每30 min读1次数,每次读数要记录4个测点的微应变值,试验记录如表3所示。

2.4.3 试验数据分析

通过试验发现,环境温度初始下降比较快,到 -15°C 以后或时间在100 min之后,下降速率变缓,变化呈指数降低。在温度降低至 -26°C 后,2个岩体试样表观几乎没有变化,宏观上未见劈裂破坏。但见到微裂隙有所延伸、张开度有所增加。

1. 辉绿岩体微应变

①冻胀条件下岩块两边纵向应变一致性较差,

测点1随着时间的增加,应变变化先快后慢,0~100 min纵向微应变增长较快,迅速增加到 $222\ \mu\epsilon$ 左右,其后虽有所增加,但增速下降并趋于平缓,近似呈指数变化。测点2纵向应变随着时间的增加,呈直线上升,达到 $233\ \mu\epsilon$ 之后稍微有所下降。

②冻胀条件下岩块两边横向应变趋势基本一致,只是测点3应变量比测点4普遍偏低,随着温度的降低及时间的增加,0~100 min横向微应变增长较快,其后趋于平缓或不再增加,近似呈指数变化。此一方面可能跟温度变化趋于有关,另一方面可能与 -15°C 以后随这温度降低,横向上微应变增加量变小有关。

③统计显示,不考虑时间因素,随着温度的下降,岩体纵向微应变是近线性增加的,而且速率基本一致。横向微应变在 -17°C 之前随着温度的降低呈线性增加,在 -17°C 之后,随负温增加横向应变趋于平缓(图6)。

2. 花岗岩体微应变

①通过对花岗岩纵向微应变统计发现,测点1、2纵向变形趋势基本一致,但变形量差别较大,测点1几乎是测点2的2倍。在100 min之前,微应变快速增长,其后变化趋缓或停止增长,测点2甚至有少量降低。

②横向应变特性基本一致,数值相差不大,在140 min之前,横向应变快速增加,达到 $370\sim 380\ \mu\epsilon$ 之后,应变趋缓并有下降的趋势。

③不考虑时间因素,4个测点变形随着温度的降低,其变化趋势基本一致,在 -17°C 左右出现拐点, -17°C 之前,随着温度的降低,应变量呈线性增加,而在低于 -17°C 之后,应变区域平缓或变形停滞。应变速率只有测点1变化较快,其他三个测点应变速率基本一致(图7)。

3. 两种代表性岩样微裂隙张开度、连通性、胶结程度及含水情况不同,其冻融应变反应不同。一般裂隙闭合、胶结强度大,冻融影响不明显,应变曲线呈线性变化;而张开度大、连通性好,含水多的裂隙,由于受力较大,引起裂隙破坏延伸,则应变会有变缓的趋势。如果进行多次冻融,则会形成宏观劈裂破坏。这与现场观察基本吻合。

3 结论与讨论

通过上述分析及试验研究得到如下认识:

表 3 试验数据记录表

Table 3 The records of test

温度 /℃	时间 /min	辉绿岩微应变/ $\mu\epsilon$				温度 /℃	时间 /min	花岗岩微应变/ $\mu\epsilon$			
		测点 1(纵)	测点 2(纵)	测点 3(横)	测点 4(横)			测点 1(纵)	测点 2(纵)	测点 3(横)	测点 4(横)
0	10	60	34	79	128	0	10	58	41	40	32
-3	20	106	18	94	151	-3	20	152	99	106	75
-7	30	128	41	127	180	-5	30	238	149	141	155
-9	40	155	51	138	200	-7	40	312	198	162	204
-11	50	176	68	156	210	-9	50	451	212	180	245
-13	60	188	76	164	216	-11	60	445	218	191	269
-13	70	203	74	171	233	-12	70	470	230	199	280
-14	80	208	78	162	273	-13	80	544	227	232	299
-15	90	212	89	178	277	-14	90	523	239	225	312
-16	100	222	96	184	281	-15	100	543	275	272	345
-16	110	230	109	190	286	-16	110	545	291	315	354
-17	120	236	108	188	283	-17	120	538	295	342	358
-17	130	238	118	196	268	-17	130	576	300	363	380
-18	140	242	124	198	273	-17	140	558	302	370	378
-18	150	244	142	188	279	-18	150	521	295	369	380
-19	160	256	149	199	273	-18	160	552	297	374	372
-19	170	253	155	198	272	-19	170	535	301	380	377
-20	180	256	161	181	270	-19	180	534	298	376	369
-20	190	259	168	193	273	-20	190	528	302	380	366
-21	200	261	170	192	268	-20	200	536	300	380	366
-23	230	248	201	190	269	-21	230	561	291	369	356
-23	260	263	210	204	278	-23	260	595	288	368	347
-24	290	272	223	204	304	-24	290	581	285	362	338
-25	320	262	233	203	300	-25	320	557	283	361	333
-25	350	278	222	209	314	-26	350	582	279	356	339

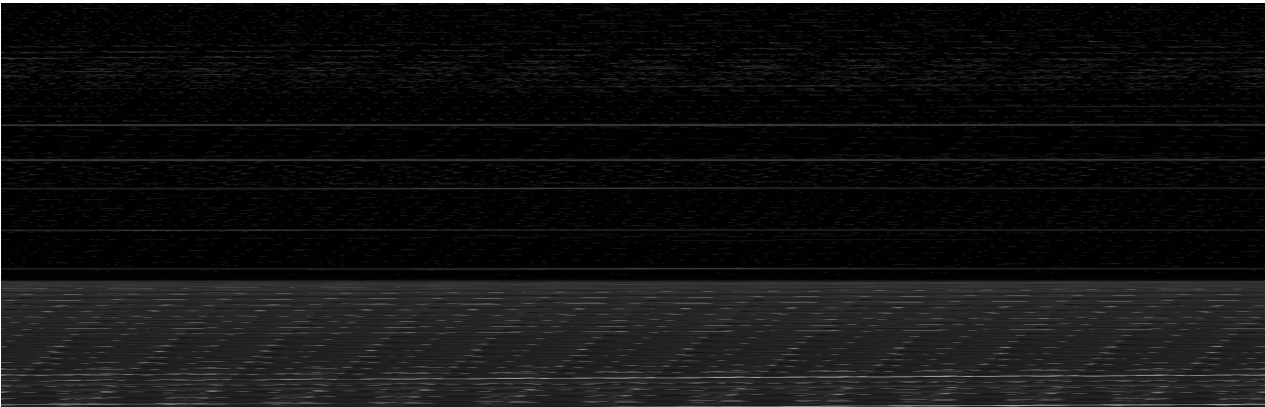


图 6 辉绿岩体应变与负温之间的关系
Fig. 6 The relationship between the dolerite strain and temperature

图 7 花岗岩体应变与负温之间的关系
Fig. 7 The relationship between the granite strain and temperature

1. 通过调查发现,高寒山区岩体的冻融风化破坏,主要为裂隙水累进式冻胀变形导致的劈裂破坏,主要受控于岩体结构面特征,尤其是卸荷裂隙、张开的构造裂隙,因具有通温、储水功能,是冻胀破坏的主要通道。

2. 水的冻胀试验显示,水在封闭区域内冻结成冰的过程中产生冻胀力,随着时间的增加,冻胀力不断增加,冻胀力可以达到 36.2 MPa 以上,其足以劈裂完整硬质岩石及硬性结构面,因为工程区岩石的抗拉强度一般低于 10 MPa,结构面胶结强度一般低于 0.5 MPa。

3. 负温的高低决定了冻胀力起始时间的早晚,一般负温越高,冻胀启动的越快。同时,负温越高,冻胀的速率越高,即负温越高,产生的冻胀破坏越强烈。

4. 岩体冻胀应变试验显示,岩石裂隙饱水情况下冻胀产生应变,裂隙特征不同应变曲线有差异,即裂隙应变的线形趋势、大小均有所不同。其与岩石裂隙的贯通性、充水情况、胶结强度等相关,胶结强度高,则应变呈线性增加趋势,贯通性好或应变过程中裂隙空间增加,应变将趋缓或减小。由于试验所用岩体的裂隙充水有限,冰劈变形量较小。

5. 通过现场研究、资料检索及试验分析,认为冻融循环条件下岩体的破坏机理应包括两个方面:微观-细观方面主要是对岩块强度的劣化,大温差循环条件下组成岩石矿物颗粒的热力学性质差异,使岩石颗粒间连接出现疲劳性损伤;宏观方面主要是岩体中裂隙或结构面中填充自由水,冻结条件下产生冰劈效应,大温差循环条件下裂隙水累进式冻胀使裂隙不断扩展延伸直至宏观破坏。现场调查及试验成果显示冻融风化以宏观破坏更为显著。

7. 通过本次试验及应力、应变变化分析认为,冻融风化边坡岩体破坏的主要作用是裂隙水的冰劈效应。因此在冻融边坡防治过程中,需针对冰劈效应产生的原因,即大温差气候环境和裂隙水,进行有效防治。工程措施中对大温差的预防主要是隔热保温法,阻断或减小温度对边坡的影响;对冰劈破坏主要采取隔、排水或对裂隙岩体注浆处理,目的是减小裂隙水的影响。

参考文献 (References)

[1] Wu Gang, He Guoliang, Zhang Lei, et al. Experimental study on cycles of freeze-thaw of marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (Suppl. 1): 2930 - 2938 [吴刚, 何国梁,

张磊, 等. 大理石循环冻融试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (增 1): 2930 - 2938]

[2] Zhang Jizhou, Miao Linchang, Yang Zhenfeng. Research on rock degradation and deterioration mechanisms and mechanical characteristics under cyclic freezing-thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (8): 688 - 1694 [张继周, 缪林昌, 杨振峰. 冻融条件下岩石损伤劣化机制和力学特性研究[J], 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (8): 1688 - 1694]

[3] Mu Jianqiao, Pei Xiangjun, Huang Yong, et al. Experimental research on mechanical characteristics of rock with cycles of freezing-thawing acting[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21 (1): 103 - 108 [母剑桥, 裴向军, 黄勇, 等. 冻融岩体力学特性实验研究[J], 工程地质学报, 2013, 21 (1): 103 - 108]

[4] Luo Xuedong, Huang Chenglin, Chen Zengxiang, et al. Study of physico-mechanical characteristics of rocks in slope of Mengku iron mine under freezing-thawing cyclic effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (Suppl. 1): 155 - 159 [罗学东, 黄成林, 彭增湘, 等. 冻融循环作用下蒙库铁矿边坡岩体物理力学特性研究[J], 岩土力学, 2011, 32 (增 1): 155 - 159]

[5] Hu Yong. Research on Freeze-thaw mechanical behavior of rockmass and collapse formation mechanism along the highway located in alpine and strong earthquake regions [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. [黄勇. 高寒山区岩体冻融力学行为及崩塌机制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.]

[6] Xu Guangmiao, Liu Quansheng. Analysis of mechanism of rock failure due to freeze-thaw cycling and mechanical testing study on frozen-thawed rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (17): 3076 - 3082 [徐光苗, 刘泉声. 岩石冻融破坏机理分析及冻融力学试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (17): 3076 - 3082]

[7] Yang Gengshe, Zhang Quansheng, Pu Yibin. CT scanning test of meso-damage propagation of rock under different freezing temperatures [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science, 2004, 24 (6): 40 - 42, 46 [杨更社, 张全胜, 蒲毅彬. 冻结温度影响下岩石细观损伤演化 CT 扫描[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24 (6): 40 - 42, 46]

[8] Liu Chengyu, He Manchao, Wang Shuren, et al. Experimental investigation freeze-thawing damage characteristics of granite at low temperature[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology: Natural Science, 2005, 20 (1): 37 - 40 [刘成禹, 何满潮, 王树仁, 等. 花岗岩低温冻融损伤特性的试验研究[J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2005, 20 (1): 37 - 40]

[9] Yang Gengshe, Pu Yibin, Ma Wei. Discussion on the damage propagation for the rock under the frost and thaw condition of frigid zone [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002, 17 (2): 220 - 226 [杨更社, 蒲毅彬, 马巍. 寒区冻融环境条件下岩石损伤扩展研究探讨[J]. 实验力学, 2002, 17 (2): 220 - 226]

[10] Li Shuchun, Xu Jiang, Yang Chunhe, et al. Study of CT meso-experiment of rock damage under cyclic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (8): 1604 - 1609 [李树春, 许江, 杨春和, 等. 循环荷载下岩石损伤的 CT 细观试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (8): 1604 - 1609]

- [11] Xiao Hongtian, Zhou Weiyuan, Yang Ruqiong. Mesoscopic analysis of rheological growth of rock cracks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 623–626 [肖洪天, 周维垣, 杨若琼. 岩石裂纹流变扩展的细观机制分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 623–626]
- [12] Chen Tiancheng, Wei Bingqian. Study on influence of rock slope failures by freezing and thawing action [J]. Journal of Northwest Hydroelectric Power, 2003, 19(3): 18–21 [陈天城, 魏柄乾. 冻结融解作用对岩石边坡稳定的影响 [J]. 西北水利发电, 2003, 19(3): 18–21]
- [13] Ni Zhengqiang, A Fayou, Kong Jiming, et al. Digital simulation of guanling long distance landside clastic flow [J]. Mountain Research, 2011, 29(Suppl. 1): 28–34 [倪振强, 阿发友, 孔纪名, 等. 关岭滑坡—碎屑流形成机理数值模拟 [J]. 山地学报, 2011, 29(增): 28–34]

Experiment on Rock Frost Heaving Damage of Ice Splitting in Alpine Mountain Regions

QIAO Guowen^{1,2}, WANG Yunsheng¹, YANG Xinlong²

(1. State Key Laboratory of Geo-hazards prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Xinjiang Transportation Planning Surveying and Design Institute, Urumqi 830006, China)

Abstract: In the cold and high altitude regions, freeze-thaw damage start from the rock fractures. Relying on the Urumqi – Yuli highway of China construction feasibility study and research projects, through the experimental study, this paper discusses the reason of fracture failure of freezing and thawing conditions. About the factors of stress, We through the ice split test revealed the process of expansion stress caused by the change of water into ice, Results show that the ice split force which can reach 33 MPa or more is much larger than the bond strength of rock fracture. About the factors of strain, We through the rock frost heaving strain tests reveal the fracture rock mass properties of frost heave, results show that rock mass strain is mainly caused by the change of the frost rock fracture. Thus, we summarize the failure mechanism of rock under frost conditions. The results have important theoretical and practical significance for understanding the failure mechanism of rock mass under freezing and thawing.

Key words: alpine mountain regions; Frost heave; Ice split; Strain