

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.06.008

冻融循环条件下粗粒料变形特性试验研究

苏安双^{1,2}, 王宇², 石北啸³, 李兆宇², 郑健²

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 黑龙江省水利科学研究院寒区工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080;

3. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210029)

摘要:为揭示粗粒料在冻融环境与复杂应力条件下的变形特性,采用大型三轴压缩试验与蠕变试验研究了粗粒料在不同冻融循环次数、围压与应力水平下的变形特性与蠕变特性。试验结果表明,未冻融粗粒料的应力-应变曲线为应变硬化型曲线,在试验围压 100~600 kPa 范围内粗粒料剪切过程中均表现为剪胀性;冻融循环后初始弹性模量与破坏应力均呈下降趋势,200 kPa 围压时,初始弹性模量降低 20%,破坏应力降低 37%,600 kPa 围压时,初始弹性模量降低 5%,破坏应力降低 25%;冻融循环后粗粒料轴向蠕变应变随时间的发展为衰减型蠕变规律,轴向蠕变应变随冻融循环次数和应力水平的增大而逐渐增大,8 次冻融循环后轴向蠕变应变明显增大;应力水平影响下的粗粒料蠕变时间曲线可采用指数函数形式表达。

关键词:粗粒料;冻融循环;变形特性;蠕变特性

中图分类号:TV41

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2023)06-0061-06

Experimental study on deformation characteristics of coarse aggregates under freeze-thaw cycling conditions

SU Anshuang^{1,2}, WANG Yu², SHI Beixiao³, LI Zhaoyu², ZHENG Jian²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,

Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Cold Region Engineering Research Institute, Heilongjiang Provincial Hydraulic Institute, Harbin 150080, China;

3. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on the large-scale triaxial compression test and creep test of coarse aggregates under freezing and thawing environment, the deformation and creep characteristics of coarse aggregates under different freezing-thawing cycles, confining pressures and stress levels are studied. The test results show that the stress-strain relationship of unfrozen coarse-grained materials is a strain hardening curve, and the coarse-grained materials show dilatancy in the shear process within the confining pressure range of 100-600 kPa. Under the influence of freeze-thaw cycle, the initial elastic modulus and failure stress both show a downward trend. When the confining pressure is 200 kPa, the initial elastic modulus decreases by 20% and the failure stress decreases by 37%. When the confining pressure is 600 kPa, the initial elastic modulus decreases by 5% and the failure stress decreases by 25%. The deformation of coarse-grained materials under freeze-thaw cycles develops into a decay-type creep with time. Meanwhile, the axial creep strain gradually increases with the increase of the number of freeze-thaw cycles and the stress level. The axial creep strain obviously increases after 8 freeze-thaw cycles and the creep time curve of coarse aggregates under the influence of stress level can be expressed in the form of exponential function.

Key words: coarse aggregate; freeze-thaw cycles; deformation properties; creep properties

由于土石坝具有利用当地材料筑坝的突出优势,随着我国西部水电工程建设的发展,高土石坝在高寒、高海拔地区也得到了广泛应用,如长河坝水电站的心墙粗粒坝坝高 240 m,糯扎渡水电站心墙粗粒坝最大坝

基金项目:水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金项目(2020nkms07);冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201920);水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放基金项目(YK319003);国家重点研发计划项目(2017YFC0404801);黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2019E124)

作者简介:苏安双(1980—),男,高级工程师,博士,主要从事工程冻土及寒区水工建筑物抗冻技术研究。E-mail: bridgecrete@163.com

通信作者:王宇(1982—),男,高级工程师,硕士,主要从事工程冻土及寒区水工建筑物抗冻技术研究。E-mail: wangyu19820224@163.com

引用本文:苏安双,王宇,石北啸,等.冻融循环条件下粗粒料变形特性试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):61-66.

SU Anshuang, WANG Yu, SHI Beixiao, et al. Experimental study on deformation characteristics of coarse aggregates under freeze-thaw cycling conditions[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(6): 61-66.

高 261.5 m,两河口水电站心墙粗粒坝高达 300 m 级,双江口水电站心墙粗粒坝最大坝高 315 m^[1-4],而新疆地区的大石峡水利枢纽工程的混凝土面板坝坝高 247 m、玉龙喀什水利枢纽工程混凝土面板坝坝高 235 m,为高寒、高海拔地区修建高土石坝的典型代表工程^[5-6]。由于寒区气候多变、昼夜温差大,特别在大坝施工期,填筑过程中的坝体受冻融环境影响较大,筑坝粗粒料在反复冻融循环后强度及变形特性会产生一定程度的劣化。因此有必要开展冻融循环、应力条件等耦合因素影响下的筑坝粗粒料变形与长期流变特性研究,为寒区高土石坝的建设提供技术支持。

目前,国内对粗粒料的力学性能研究主要通过大型三轴试验和大型直剪试验来完成,从颗粒形状、大小、级配、应力路径等方面研究粗粒料的变形及本构模型、抗剪强度、蠕变特性等^[7-8]。例如:汪丁建等^[9]从形成机制、影响因素和描述方法上对粗粒土的剪胀性、颗粒破碎性和软化性进行了分析和总结,指出了粗粒土力学性质研究方面存在的不足,并从试验、理论和数值仿真试验角度提出了粗粒土力学性质研究的发展方向;石北啸等^[10]通过大型三轴试验研究了不同温度及不同温度循环次数下粗粒料的流变特性,指出温度及温度循环对粗粒料的流变变形影响较大;程展林等^[11]针对水布垭面板坝筑坝粗粒料,利用大型三轴试验进行了粗粒料蠕变性能研究,分析了粗粒料的蠕变与时间、应力状态的关系,并给出了粗粒料蠕变的数学表达式及相应的参数指标;李国英等^[12]通过大型三轴试验对公伯峡水电站面板粗粒坝坝内 3 种主要粗粒料的流变特性进行了研究,分析了粗粒料流变的影响因素和应力状态对流变的影响,探讨了粗粒料的流变规律;梁军等^[13]研究了筑坝粗粒料蠕变与应力水平的关系,认为粗粒料在应力的持续作用下细化破碎的颗粒滑移充填孔隙是发生蠕变的主要原因,粗粒的蠕变规律随时间呈指数规律衰减变化,并与其所处的应力水平有关;陈涛等^[14]对如美水电站筑坝粗粒料进行了不同法向应力条件下的冻融循环试验和直剪试验,研究了冻融循环过程中粗粒料的变形与强度特性;马刚等^[15]将颗粒强度劣化模型引入到考虑颗粒破碎的粗粒体不连续变形分析方法(SGDD)中,应用 SGDD 进行粗粒料三轴流变数值试验研究;姜景山等^[16]通过不同初始密度砂砾石常规大型三轴试验,研究了剪胀性对粗粒土强度和变形特性的影响,结果表明应力-应变曲线的形式与体变和轴向应变之比有关,并给出了剪胀性变化规律与应力-应变性质之间的关系。

国内对粗粒料变形特性研究取得了较为丰硕的成果,但对于粗粒料在冻融循环条件下的变形与蠕变特性研究较少,为进一步揭示粗粒料在冻融环境与复杂应力条件下的变形特性,本文通过开展大型三轴试验,研究冻融循环条件、应力水平等对粗粒料的变形与蠕变影响规律,以期为寒区高土石坝建设和管理提供参考。

1 试验方法

1.1 试验仪器

试验在微机控制电液伺服大型冻土三轴试验机上进行。试验机由轴向加压系统、冻融循环系统、试样模具、周围压力系统、数据采集系统和控制系统 6 个部分组成,如图 1 所示。轴向压力、围压采用伺服阀控制,最大轴向压力 2 000 kN,最大围压 15 MPa。由冻融循环系统向主压力室输送设定温度的循环液,实现试样的冻融循环。试验过程中通过设置在试样底部的温度传感器实时监测试样内部温度的变化,冻融循环系统最低温度为-45℃,最高温度为 40℃。试样最大直径为 300 mm,试样高度为 600 mm,粗粒料最大粒径为 60 mm。

1.2 试验材料

试验用粗粒料取自某工程现场,母岩岩性为弱风化花岗闪长岩,饱和单轴抗压强度为 36.86 MPa。因目前室内试验设备无法满足原型级配试验要求,需对粗粒料原级配缩尺到仪器允许范围内,缩尺按照 GB 50123—2019《土工试验方法标准》中相关要求进行,缩尺后试样的最大粒径为 60 mm。粗粒料缩尺后的试验级配曲线如图 2 所示。试验时控制干密度为 2.08 g/cm³。

1.3 试验设计

将试验用粗粒料按照缩尺后的试验级配进行试样重塑,按照表 1 的试验设计开展了粗粒料在不同冻融

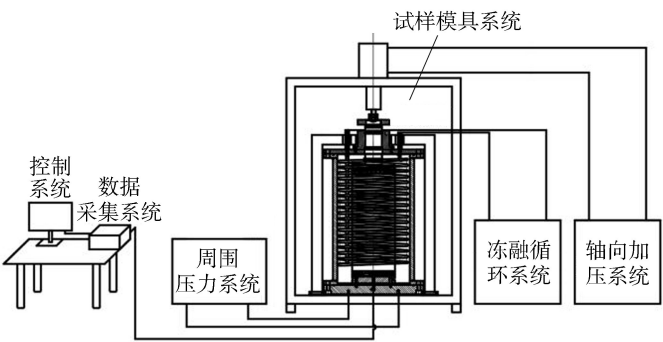


图 1 大型冻土三轴试验机示意图
Fig.1 Schematic diagram of large-scale triaxial test machine for frozen soil

循环次数、围压、应力水平下的固结排水剪大型三轴试验。

1.4 试验步骤

- a. 制样时将各粒组土石料混合拌匀,采用振动击实法分 5 层击实,每层填料的振动时间相同,确保试验要求的干密度。
- b. 制样完成后将其安装到压力室内,用螺栓固定后将压力室连同试样吊至试验机上,然后连接冻融循环系统。
- c. 连接进液管路,打开阀门向压力室内注入冰点为 -45°C 的防冻液,同时开启压力室上部排气阀,待上部排气阀有液体排出后停止注入,关闭进液阀门。
- d. 预加 10 ~ 20 kPa 围压,试样开始饱和,待饱和完成后施加至设计围压,同时测量试样的固结排水量。
- e. 试样固结完成后,保持围压不变,按试验要求进行不同次数的冻融循环试验,试样冻结温度为 -5°C 、融化温度为 20°C ,冻融过程中实时监测试样温度和排水量。
- f. 待冻融循环结束后进行固结排水三轴压缩试验,试样剪切速率为 2 mm/min,出现峰值后再剪切 10 ~ 15 mm或应变达到 15% 即可停止。
- g. 试验完成后,对试样进行风干处理,而后进行颗粒分析。

2 试验结果与分析

2.1 不同围压下粗粒料应力-应变曲线

图 3 为未冻融粗粒料在不同围压下的三轴剪切试验结果,可以看出粗粒料在固结排水条件下剪切,主应力差随着轴向变形的增大而逐渐增大,不同围压下的应力-轴向应变曲线表现为应变硬化型曲线,主应力差随围压的增大而逐渐增大,应变达到 15% 时对应的破坏应力也随之增大。从体应变-轴向应变曲线可以看出,试验围压范围内粗粒料在剪切过程中均表现为剪胀性,这与褚福永等^[17]试验得到的粗粒土剪胀性会随着围压的增大而逐渐向剪缩过渡,随着剪应力的增大在高围压时会表现为剪缩的结论一致。

2.2 冻融循环后粗粒料应力-应变曲线

冻融试验过程中对粗粒料温度进行了实时监测,温度传感器布置在试样中心,以实现对试样的温度监控和保证试样达到试验要求的冻融循环次数。图 4 为粗粒料经历不同次数冻融循环后的温度-时间曲线,图 5 为粗粒料在不同次数冻融循环后的应力-应变曲线。从图 5 可以看出,粗粒料经历不同次数冻融循环后再剪切的应力-应变曲线为应变硬化型曲线,主应力差随冻融循环次数的增大而减小。由此来看,冻融作用可能导致了粗粒料颗粒强度降低、破碎加重,剪切时颗粒重新排列,改变了颗粒间的孔隙,在较小的应力增量下引起较大的应变增量。

根据图 5,取轴向应变达到 15% 时对应的主应力差为试样的破坏应力,破坏应力随冻融循环次数的变化如表 2 所示,可以看出相同围压下粗粒料的破坏应力随着冻融循环次数的增加逐渐减小,与未冻融粗粒料的破坏应力相比,8 次冻融循环后围压为 200 kPa 时的破坏应力降低 37%,围压为 600 kPa 时的破坏应力降低

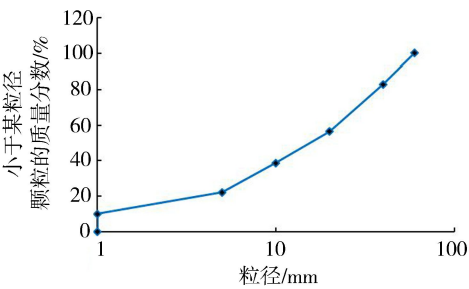


图 2 试验粗粒料级配曲线

Fig. 2 Grading curve of tested coarse aggregates

表 1 粗粒料大型三轴冻融循环试验设计

Table 1 Large-scale triaxial test design of coarse aggregates under freeze-thaw cycles

试验编号	围压/kPa	应力水平	冻融循环次数
1	100、200、400、600		0
2	200、600	$0.2\tau_f$ 、 $0.4\tau_f$ 、 $0.8\tau_f$	3
3	200、600	$0.2\tau_f$ 、 $0.4\tau_f$ 、 $0.8\tau_f$	8

注: τ_f 为试样静力三轴试验的峰值破坏应力。

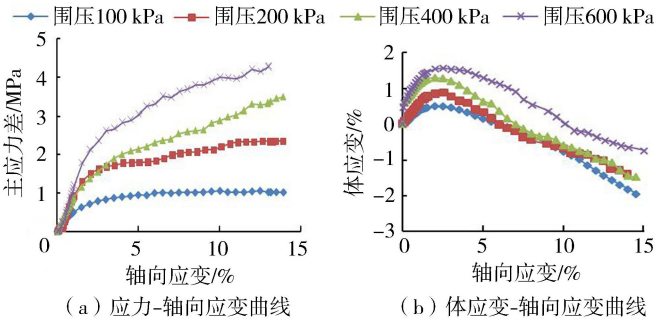


图 3 未冻融粗粒料应力-轴向应变曲线和体应变-轴向应变曲线

Fig. 3 Stress-axial strain curve and volumetric strain-axial strain curve of unfrozen and unthawed coarse aggregates

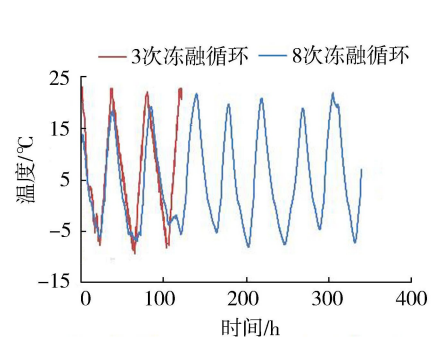


图 4 冻融循环试验粗粒料温度-时间曲线

Fig. 4 Temperature-time curve under freeze-thaw cycle tests

25%。根据试验结果,整理得到不同次数冻融循环后邓肯-张模型初始弹性模量如表 2 所示,可以看出粗粒料初始弹性模量总体上随冻融循环次数的增加而减小,但围压不同,减小程度有差异。围压 200 kPa 时,初始弹性模量减小幅度较大,8 次冻融循环后的初始弹性模量降低 20%,围压 600 kPa 时,8 次冻融循环后的初始弹性模量降低 5%。初始弹性模量的变化规律与破坏应力相似,这是因为试验围压增大使颗粒受约束作用增大,一定程度上抑制了粗粒料因冻融循环对其力学性能的劣化。

粗粒料经历冻融循环后的各粒组质量分数如表 3 所示,可以看出各粒组质量分数随冻融循环次数的增加均发生了变化,粒径 60~40 mm、40~20 mm 颗粒质量分数较试验前减小,粒径 20~10 mm、10~5 mm 颗粒质量分数较试验前有所增大,粒径小于 5 mm 的颗粒质量分数增大较为明显,表明粗粒料在冻融循环影响下的破碎程度增大,进而导致破坏应力与弹性模量降低,变形增大。

表 3 冻融循环后粗粒料各粒组质量分数

Table 3 Mass fraction of each particle group of coarse aggregates under freeze-thaw cycles

试样状态	围压/kPa	冻融循环次数	不同粒径粒组质量分数/%				
			60~40 mm	40~20 mm	20~10 mm	10~5 mm	<5 mm
试验前	200		17.40	26.30	17.80	16.50	22.00
		0	15.66	25.50	18.93	16.70	23.21
		3	14.32	25.54	17.61	17.77	24.76
		8	13.27	24.76	17.93	18.22	25.82
试验后	600	0	15.22	24.09	18.32	17.42	24.95
		3	14.62	23.54	18.99	17.72	25.13
		8	14.33	25.01	18.11	16.95	25.60

2.3 冻融循环后粗粒料蠕变曲线特征

图 6 为粗粒料在不同围压、不同次数冻融循环后的蠕变曲线,可以看出,在 3 种试验应力水平下,粗粒料的轴向蠕变应变随时间发展为衰减型蠕变规律,均没有发生流变破坏。粗粒料轴向蠕变应变随时间的发展可分为快速增大阶段、缓慢增大阶段和准稳定阶段。快速增大阶段发生在蠕变初期至 1 h 左右时间段内,该阶段主要是试样内部颗粒在围压和剪应力作用下的快速调整,轴向蠕变应变量占蠕变总量一般会超过 1/3,具体占比与围压和应力水平有关。缓慢增大阶段发生在快速增大阶段以后的 20~25 h,该阶段主要是试样内部在围压和剪应力作用下表现为高接触应力的颗粒破碎和颗粒重新排列释放应力,随着试验的进行,变形增量逐渐减小,该阶段轴向蠕变应变量占蠕变总量 1/2 以上。准稳定阶段发生在试验中后期,该阶段试样趋于较高的密实度和较小的孔隙比,表现为变形量较小,曲线变化平稳,应变率变化也很小,接近一个常数。

图 7 为粗粒料最终轴向蠕变应变随应力水平变化曲线,可以看出相同围压下,随着冻融循环次数的增加和应力水平的增大,粗粒料的轴向蠕变应变逐渐增大,8 次冻融循环后的轴向蠕变应变明显增大。

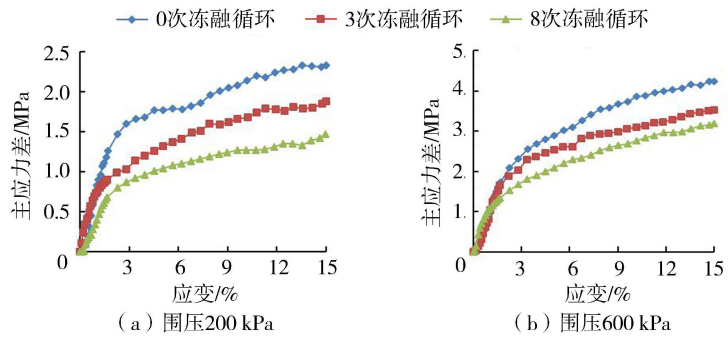


图 5 冻融循环试验粗粒料应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of coarse aggregates under freeze-thaw cycle tests

表 2 粗粒料的破坏应力、初始弹性模量随冻融循环次数变化

Table 2 Changes of failure stress and initial elastic modulus of coarse aggregates with freeze-thaw cycles

冻融循环次数	破坏应力/MPa		初始弹性模量/MPa	
	围压 200 kPa	围压 600 kPa	围压 200 kPa	围压 600 kPa
0	2.33	4.25	1.04	1.27
3	1.88	3.53	0.99	1.23
8	1.47	3.20	0.84	1.21

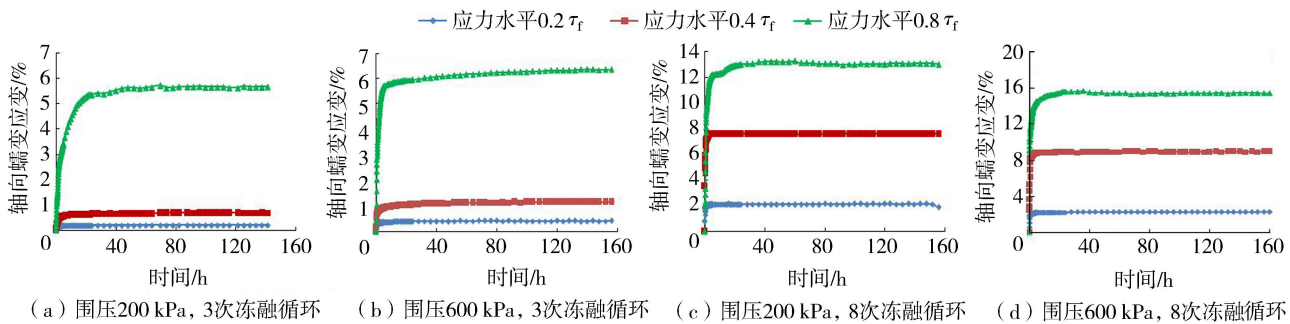


图 6 冻融循环试验粗粒料蠕变曲线

Fig. 6 Creep curve of coarse aggregates under freeze-thaw cycles

2.4 蠕变方程

由图 6 可知,不同应力水平下的粗粒料蠕变均呈衰减变化,蠕变时间曲线可采用指数函数形式表达:

$$\varepsilon_t = a + be^{-t/c} \tag{1}$$

式中: ε_t 为轴向蠕变应变,%; t 为试验时间,min; a 、 b 、 c 为蠕变试验曲线拟合参数。

表 4 为蠕变试验曲线参数拟合结果,可以看出,参数 a 、 b 与应力水平存在一定的相关性,参数 c 与应力水平相关性不大。进一步拟合分析可知,参数 a 、 b 与应力水平之间的关系可用幂函数来表达:

$$\begin{cases} a = m_1 S^{n_1} \\ b = m_2 S^{n_2} \end{cases} \tag{2}$$

式中: S 为应力水平; m_1 、 n_1 、 m_2 、 n_2 为拟合参数。

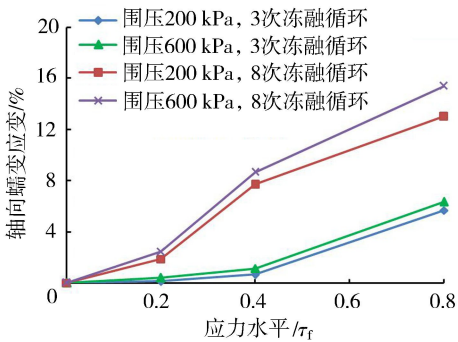


图 7 粗粒料轴向蠕变应变与应力水平的关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between axial creep strain and stress level of coarse aggregates

表 4 粗粒料蠕变试验曲线参数拟合结果

Table 4 Fitting results of creep test curve parameters of coarse aggregates		a		b		c	
围压/kPa	应力水平	3 次冻融循环	8 次冻融循环	3 次冻融循环	8 次冻融循环	3 次冻融循环	8 次冻融循环
200	0. 2 τ_f	0. 19	2. 12	-0. 07	-0. 19	150. 47	161. 06
	0. 4 τ_f	0. 66	7. 58	-0. 42	-1. 19	196. 41	64. 29
	0. 8 τ_f	5. 59	12. 95	-4. 44	-5. 93	402. 58	132. 72
600	0. 2 τ_f	0. 41	2. 25	-0. 12	-0. 43	373. 99	166. 34
	0. 4 τ_f	1. 14	8. 89	-0. 35	-1. 19	817. 15	127. 68
	0. 8 τ_f	6. 08	15. 35	-4. 42	-5. 36	122. 13	147. 04

综上所述,考虑应力水平影响下的粗粒料蠕变时间曲线可采用指数函数形式表达:

$$\varepsilon_t = m_1 S^{n_1} + m_2 S^{n_2} e^{-t/c} \tag{3}$$

3 结 论

- a. 未冻融粗粒料的应力-应变曲线为应变硬化型曲线,破坏应力随围压的增大而增大,试验围压 100 ~ 600 kPa 范围内粗粒料在剪切过程中均表现为剪胀性。
- b. 粗粒料在同一围压下剪切,主应力差随冻融循环次数的增加而减小,冻融循环影响下的初始弹性模量与破坏应力均呈降低趋势,200 kPa 围压时初始弹性模量降低 20%,破坏应力降低 37%;600 kPa 围压时初始弹性模量降低 5%,破坏应力降低 25%。粗粒料经历冻融循环后力学性能产生了劣化,围压的增大一定程度上使这种劣化作用有所缓解。
- c. 粗粒料在不同冻融循环次数、不同应力水平下轴向蠕变应变随时间的发展为衰减型蠕变规律,均没有发生流变破坏,轴向蠕变应变随冻融循环次数和应力水平的增大而逐渐增大,8 次冻融后轴向蠕变应变明

显增大。考虑应力水平影响下的粗粒料蠕变时间曲线可采用指数函数形式表达。

参考文献:

[1] 陈佳伟,邓建辉,魏进兵,等. 长河坝水电站右坝肩边坡裂缝成因分析[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(6):1121-1127. (CHEN Jiawei,DENG Jianhui,WEI Jinbing,et al. Cause analysis of cracking in right abutment slope of Changheba Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(6):1121-1127. (in Chinese))

[2] 张丙印,袁会娜,孙逊. 糯扎渡高心墙堆石坝心墙砾石土料变形参数反演分析[J]. 水力发电学报,2005,24(3):18-23. (ZHANG Bingyin,YUAN Huina,SUN Xun. The back analysis of deformation parameters of core gravelly soil of the Nuozhadu high rock-fill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2005,24(3):18-23. (in Chinese))

[3] 高鹏,吴世勇. 两河口水电站心墙防渗料掺砾试验[J]. 水利水电科技进展,2012,32(5):64-66. (GAO Peng,WU Shiyong. An experimental study of gravelly impervious materials for core wall in Lianghekou Hydropower Station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(5):64-66. (in Chinese))

[4] 王观琪,杨玉娟,索慧敏. 双江口 300 m 级心墙坝心墙掺合料研究与设计[J]. 水电站设计,2011,27(3):22-25. (WANG Guanqi,YANG Yujuan,SUO Huimin. Research and design of admixture for core wall of 300 m core wall dam in Shuangjiangkou [J]. Design of Hydroelectric Power Station,2011,27(3):22-25. (in Chinese))

[5] 陈生水,凌华,米占宽,等. 大石峡砂砾石坝料渗透特性及其影响因素研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(1):26-31. (CHEN Shengshui,LING Hua,MI Zhankuang,et al. Experimental study on permeability and its influencing factors for sandy gravel of Dashixia dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(1):26-31. (in Chinese))

[6] 李江,李湘权. 新疆特殊条件下面板堆石坝和沥青混凝土心墙坝设计施工技术进展[J]. 水利水电技术,2016,47(3):2-8. (LI Jiang,LI Xiangquan. Technical advances in design and construction of concrete face rockfill dam and dam with asphalt concrete core-wall under special condition in Xinjiang[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2016,47(3):2-8. (in Chinese))

[7] 刘萌成,高玉峰,刘汉龙,等. 粗粒料大三轴试验研究进展[J]. 岩土力学,2002,23(2):217-221. (LIU Mengcheng,GAO Yufeng,LIU Hanlong,et al. Development of study on a large scale triaxial test of coarse-grained materials[J]. Rock and Soil Mechanis,2002,23(2):217-221. (in Chinese))

[8] 朱俊高,赵颜辉,李永红,等. 粗粒土静力特性试验研究进展[C]//土工测试新技术:第 25 届全国土工测试学术研讨会论文集. 杭州:浙江大学出版社,2008:79-87.

[9] 汪丁建,唐辉明,张雅慧,等. 粗粒土试验与力学特性研究现状[J]. 冰川冻土,2016,38(4):943-954. (WANG Dingjian,TANG Huiming,ZHANG Yahui,et al. Research progress on mechanical tests and properties of coarse-grained soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2016,38(4):943-954. (in Chinese))

[10] 石北啸,蔡正银,陈生水. 温度变化对堆石料变形影响的试验研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(增刊 2):299-305. (SHI Beixiao,CAI Zhengyin,CHEN Shengshui. Experiments on influence of temperature on deformation of rock fills[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2016,38(Sup2):299-305. (in Chinese))

[11] 程展林,丁红顺. 堆石料蠕变特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2004,26(4):473-476. (CHENG Zhanlin,DING Hongshun. Creep test for rockfill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2004,26(4):473-476. (in Chinese))

[12] 李国英,米占宽,傅华,等. 混凝土面板堆石坝堆石料流变特性试验研究[J]. 岩土力学,2004,25(11):1712-1716. (LI Guoying,MI Zhankuan,FU Hua,et al. Experimental studies on rheological behaviors for rockfill in concrete faced rockfill dam [J]. Rock and Soil Mechanis,2004,25(11):1712-1716. (in Chinese))

[13] 梁军,刘汉龙. 面板坝堆石料的蠕变试验研究[J]. 岩土工程学报,2002,24(2):257-259. (LIANG Jun,LIU Hanlong. Creep test for rockfill of concrete faced rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2002,24(2):257-259. (in Chinese))

[14] 陈涛,保其长,王伟,等. 冻融循环下堆石料变形特性与抗剪强度试验研究[J]. 水力发电学报,2019,38(3):135-141. (CHEN Tao,BAO Qichang,WANG Wei,et al. Experimental study on deformation characteristics and shear strength of rockfill under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2019,38(3):135-141. (in Chinese))

[15] 马刚,周伟,常晓林,等. 颗粒劣化效应的堆石料流变细观数值模拟[J]. 岩土力学,2012,33(增刊 1):257-264. (MA Gang,ZHOU Wei,CHANG Xiaolin,et al. Mesomechanically numerical simulation of rockfill rheology based on particle deterioration [J]. Rock and Soil Mechanis,2012,33(Sup1):257-264. (in Chinese))

[16] 姜景山,程展林,左永振,等. 粗粒土剪胀性大型三轴试验研究[J]. 岩土力学,2014,35(11):3129-3138. (JIANG Jingshan,CHENG Zhanlin,ZUO Yongzhen,et al. Dilatancy of coarse-grained soil in large-scale triaxial tests study[J]. Rock and Soil Mechanis,2014,35(11):3129-3138. (in Chinese))

[17] 褚福永,朱俊高,殷建华. 基于大三轴试验的粗粒土剪胀性研究[J]. 岩土力学,2013,34(8):2249-2254. (CHU Fuyong,ZHU Jungao,YIN Jianhua. Study of dilatancy behaviors of coarse-grained soils in large-scale triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanis,2013,34(8):2249-2254. (in Chinese))