

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.06.012

低围压与不同温度作用下土石坝护坡 土石混合体力学特性

李卓^{1,2}, 孙屹^{1,2}, 姜鑫³, 蒋景东^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所, 江苏 南京 210029;

2. 水利部大坝安全管理中心, 江苏 南京 210029; 3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对寒区土石坝护坡存在的隆起、错位、坍塌等冻胀破坏问题, 以寒区某土石坝护坡工程砾料垫层、坝体填土土石混合体为研究对象, 开展了低围压下不同温度和含石量的土石坝护坡土石混合体三轴试验, 研究了不同围压、温度、含石量对土石混合体力学特性的影响。结果表明: 在较低围压作用下, 含石量较低试样的应力-应变关系曲线为应变软化型, 随着围压增大, 试样的应力-应变关系曲线变为应变硬化型; 在常温条件下, 当围压较低时, 不同含石量的试样呈现先剪缩后剪胀的现象, 当围压较高时, 试样则一直表现为剪缩, 且围压越大, 剪缩量越大; 在不同冻结温度下, 土石混合体的体积应变呈现先剪缩后剪胀的变化规律, 且试验温度越低, 剪胀变形越明显; 随着含石量的增加, 砾石之间的嵌合作用增强, 土石混合体逐渐成为砾石骨架结构, 土石混合体的内摩擦角增大而黏聚力减小; 温度的降低使得土石混合体试样内部的水逐渐相变成冰, 在结冰胶结作用下, 土石混合体的内摩擦角和黏聚力都有所增加。

关键词: 土石坝; 护坡; 土石混合体; 低围压; 冻胀破坏; 力学特性

中图分类号: TV641; TV223

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)06-0090-07

Study on mechanical properties of earth-rock mixture for earth-rock dam slope protection under low confining pressure and different temperatures

LI Zhuo^{1,2}, SUN Yi^{1,2}, JIANG Xin³, JIANG Jingdong^{1,2}

(1. Dam Safety Management Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China;

3. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In view of the frost-heaving damage problems such as uplift, dislocation, and collapse that are common in earth-rock dam slope protection in cold areas, using the gravel cushion and dam fill earth-rock mixture of an earth-rock dam slope protection project in cold areas as the research objects, this study conducted triaxial tests on the soil-rock mixture of earth-rock dam slope protection with different temperature and rock content under low confining pressure, and analyzed effects of different confining pressure, temperature and rock content on the mechanical properties of the soil-rock mixture. The results show that the stress-strain curves of the samples with low stone content are strain softening type under lower confining pressure, and gradually change to strain hardening type with the increase of confining pressure. Under normal temperature conditions, when the confining pressure is low, the volume deformation of the sample with different stone content shows the phenomenon of contraction followed by the dilatancy, but when the confining pressure is high, the volume deformation of the sample shows the phenomenon of contraction, and the greater the confining pressure, the greater contraction. At different freezing temperatures, the volume deformation of soil-rock mixture shows the phenomenon of contraction followed by the dilatancy, and the lower the test temperature, the greater the dilatancy deformation. With the increase of rock content, the chimerism between gravels is strengthened, and the internal friction angle of the soil-rock mixture increases but the cohesion

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979173)

作者简介: 李卓(1979—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水工建筑物防冻胀研究。E-mail: zhuoli@nhri.cn

通信作者: 孙屹(1993—), 男, 工程师, 博士, 主要从事土石坝填筑料力学特性及本构模型研究。E-mail: sunyihu@163.com

引用本文: 李卓, 孙屹, 姜鑫, 等. 低围压与不同温度作用下土石坝护坡土石混合体力学特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 90-96.

LI Zhuo, SUN Yi, JIANG Xin, et al. Study on mechanical properties of earth-rock mixture for earth-rock dam slope protection under low confining pressure and different temperatures[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(6): 90-96.

decreases. With the decrease in temperature, the water inside soil-rock mixtures gradually turns into ice. Under the action of ice cementation, the internal friction angle and cohesion of soil-rock mixtures increase.

Key words: earth-rock dam; slope protection; soil-rock mixture; low confining pressure; frost heaving damage; mechanical properties

土石坝护坡冻胀破坏是寒区土石坝普遍存在的问题^[1-3],护坡在水库水面结冰后产生的冰推、冰拔和护坡下砂砾料垫层、坝体填土自身冻胀共同作用下会发生冻融冻胀破坏,主要表现为护坡隆起、错位、坍塌等冻胀破坏。例如孙江岷等^[4]研究的 11 座水库中,冬季土石坝护坡发生冻胀破坏的占 54.5%;大庆市红旗泡水库受到冰压力影响,发生大规模护坡隆起现象^[5];沈阳市团结水库护坡被冰压力冲断而崩塌,危及了下游灌溉区和居民的生命财产安全^[6]。在坝体填筑过程中,DL/T 5129—2013《碾压式土石坝施工规范》规定砂砾料垫层和坝体填土分层填筑,但施工过程中一般砂砾料垫层与坝体填土混合填筑,因此在土石坝护坡中广泛存在着土石混合体。

目前,学者们通过原位试验、室内试验和数值模拟等手段对土石混合体的力学及工程特性进行了研究:徐文杰等^[7-9]通过剪切试验研究了含石量对土石混合体物理力学性质的影响规律,指出含石量是影响土石混合体物理力学性质的关键因素;李维树等^[10]基于水库水位变化会引起土石混合体内部含水率改变的情况,通过开展直剪试验,发现黏聚力、内摩擦角随着含水率变化而弱化的规律;王江营等^[11]进行了一系列土石混合体室内试验,确定了不同因素对土石混合体抗剪强度的影响程度;胡峰等^[12]基于室内试验,研究了冻土石混合体的物理力学性质;王鑫^[13]通过对土石混合体开展冻融界面强度劣化试验,研究了界面强度劣化与未冻水体积含量的关系;薛珂等^[14]将水汽运移理论用于研究土石混合体冻胀,并以此建立了水-热-力多场耦合模型;程虎等^[15]通过室内巴西劈裂试验,研究了冻结温度与尺寸效应耦合作用下的冻土石混合体巴西劈裂特性;唐丽云等^[16]开展了土石混合体冻融交界面直剪试验,得出含水率与含石量对土石混合体冻融交界面物理力学性质具有重要影响;胡峰等^[17]对不同含水量青藏公路冻结路基砂土石混填物试样进行了单轴压缩下的声发射试验,发现冻结黏质粉土的蠕变性质和含石量的大小对试样内部的变形特征有显著影响;张鸿朋等^[18]利用自主研发的冻土三轴仪进行了广义三轴压缩试验,分析了冻结砂在不同应力状态下的强度演化规律和变形特性。

上述研究大多局限于含石量、岩性及土性对土石混合体力学特性的影响,对于低温土石混合体在冰推和水分迁移作用下的物理力学性质研究较少,而且以往研究中的三轴试验围压取值较高,尤其是冻结温度下的三轴试验围压往往在 1 MPa 以上^[19-20],因此,目前对不同因素下土石混合体在低围压作用下的力学特性的研究还不深入。寒区水库水面在冬季会发生结冰现象,然后冰荷载会从外部对均质土坝护坡结构产生冻胀破坏,影响大坝安全。根据 GB/T 51394—2020《水工建筑物荷载标准》、GB/T 50662—2011《水工建筑物抗冰冻设计规范》、SL 274—2020《碾压式土石坝设计规范》,目前静冰压力的标准值可以根据冰层厚度选取,且冰压力依据静冰压力标准值与冰层厚的关系最大可取 300 kPa。研究^[21-23]表明,我国寒区水库冰厚度一般在 30 ~ 106 mm,大部分水库的静冰压力为 100 ~ 200 kPa,少部分可达 400 kPa 以上,最大静冰压力达到 600 kPa。因此,研究寒区土石坝护坡土石混合体在低围压作用下的力学特性对于寒区土石坝工程具有重要意义。为了符合寒区水库的静冰压力现状,本文开展了围压为 100、200、400、600 kPa 的土石混合体三轴试验,探讨了温度、含石量对土石混合体力学特性的影响,分析了不同温度和含石量情况下的偏应力-轴向应变关系、体积应变、内摩擦角和黏聚力的变化规律,研究了冻土石混合体的力学与变形特性,阐明了影响土石混合体力学特性的主要因素,以期能进一步推动寒区土石坝护坡冻胀破坏的研究。

1 试样制备及试验方案

1.1 试样制备

试验材料取自宁夏某均质土坝的坝体填筑料和砂砾石垫层料,坝体填土为黏土,基本物理性质指标如下:液限为 34.2%,塑限为 18.7%,塑性指数为 15.5,最大干密度为 1.682 g/cm³,最优含水率为 18.9%。 $<0.075\text{ mm}$ 、 $0.075\sim<0.1\text{ mm}$ 、 $0.1\sim<0.25\text{ mm}$ 、 $0.25\sim<0.5\text{ mm}$ 、 $0.5\sim<1.0\text{ mm}$ 、 $1.0\sim2.0\text{ mm}$ 的坝体填土粒径质量分数分别为 36.9%、2.0%、24.7%、12.1%、18.3%、6.0%。

根据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》,直径为 101 mm 的圆柱体试样中土石混合体的最大粒径不超过试样直径的 1/5,因此选取砾石尺寸范围为 2 ~ 10 mm,其粒径质量分数如下:2 ~ <4 mm、4 ~ <6 mm、6 ~ <8 mm、8 ~ 10 mm 分别为 5.0%、31.5%、33.5%、30.0%,颗粒粒径分布曲线如图 1 所示。土石混合体含

石量在 30% ~ 50% 时,抗剪强度增长较快且强度较高^[20],因此试验选取 10%、30%、50% 作为圆柱体试样的含石量。根据宁夏西吉县将台乡张家嘴头水库实测资料,坝体填土含水率为 12.9% ~ 31.4%,且试样土的最优含水率为 18.9%,因此本文选取 18.9% 作为试样土的含水率。

制样过程参照中国科学院重点实验室推荐的制样方法:①将准备好的土体自然风干,筛出大块状土体,保留粒径小于 2 mm 的土体(图 2(a));②配制指定含水率(18.9%)的土体,装入塑封袋中静置 1 d,让土体内部水分均匀分布(图 2(b));③准备好试验所需砾石备用(图 2(c))。控制击实后土石混合体试样密度恒为 2.0 g/cm³,称取一定质量的土样,并将其与砾石混掺均匀,随后分 5 层击实,每层目标高度约 40 mm。击实过程中需将上一层已击实的土石混合体表面充分刨毛,然后再加入下一层土石混合体,如此反复,直至完成直径 101 mm、高度 200 mm 的标准圆柱体试样的制备。

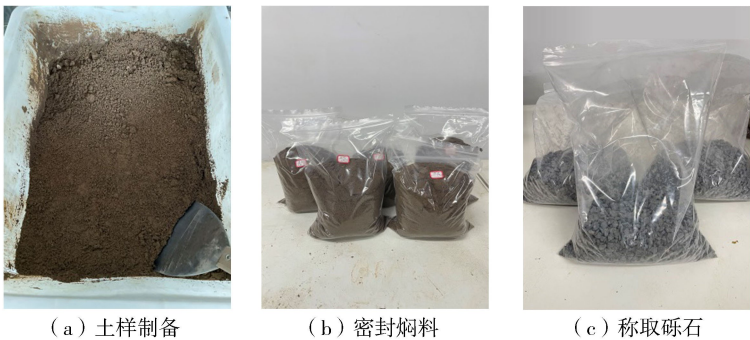


图2 制样过程
Fig.2 Sample preparation process

1.2 试验方案

试验系统主要由三轴试验机、应力路径控制系统、自动采集系统、控温系统组成。轴压可设置上限值为 100 kN,围压上限值为 5 MPa,试验过程中通过计算机控制操作过程中的轴压,围压则通过压力室油量变化来控制。本文试验采用固结排气模式,以确保试验过程中所加应力均为有效应力。

根据 GB/T 51394—2020《水工建筑物荷载标准》、GB/T 50662—2011《水工建筑物抗冰冻设计规范》、SL 274—2020《碾压式土石坝设计规范》中静冰压力的标准值与冰层厚度的关系及现有静冰压力研究成果^[21-23],本文选用的三轴试验围压分别为 100、200、400、600 kPa,其中常温试样的试验围压为 100、200、400 kPa,低温试样的试验围压为 100、200、600 kPa。对于负温试样,为了防止物理力学性质发生变化,试样制备好后放入低温(−5、−10℃)环境下(恒温箱中)冻结 24 h,再进行固结^[24]。以往三轴试验常进行 8 h 固结,研究^[25]表明,在进行固结 2 h 后,竖向位移和侧向位移的波动率均小于 1%,默认为达到稳定,故本文试验固结时间为 2 h 且施加围压要与竖向应力大小相同^[24]。具体试验条件和试样参数见表 1。不同温度试样的试验过程如下:常温试样在不同的围压作用下先进行 2 h 等压固结,然后再进行三轴剪切试验;低温试样在试验前需要将操作室温度降至指定温度后再将冷冻 24 h 的试样放入操作室,为最大程度减小试样受温度影响,试样放置好后要通过控温系统将压力室温度降至试验要求温度,再通过计算机及温度控制器进行温度自整定,在指定温度恒温 4 h 后即可进行 2 h 的等

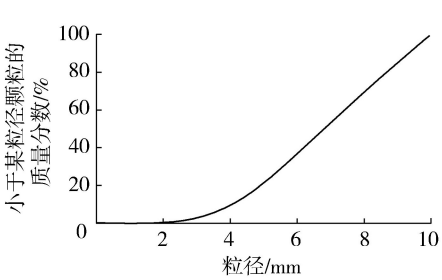


图1 砾石颗粒粒径分布曲线
Fig.1 Gravel particle size distribution curve

表1 试验条件与试样参数			
Table 1 Test conditions and sample parameters			
编号	试验温度/℃	含石量/%	围压/kPa
1	20	10	100
2	20	10	200
3	20	10	400
4	20	30	100
5	20	30	200
6	20	30	400
7	20	50	100
8	20	50	200
9	20	50	400
10	−5	30	100
11	−5	30	200
12	−5	30	600
13	−10	30	100
14	−10	30	200
15	−10	30	600

压固结,然后再进行三轴剪切试验。

2 试验结果与分析

2.1 偏应力与轴向应变关系

由图 3(图中 $\sigma_1-\sigma_3$ 为偏应力, ε_1 为轴向应变)可知,当试样含石量不变时,试样的偏应力在某一轴向应变下随着围压的增大而增大。对于含石量为 10% 的试样,当围压为 100 kPa 时,其偏应力-轴向应变关系曲线为应变软化型,当围压为 200 kPa 和 400 kPa 时,其偏应力-轴向应变关系曲线为应变硬化型。含石量为 30%、50% 的试样在不同围压作用下的偏应力-轴向应变关系曲线皆为应变硬化型。另外,试样的峰值强度随着含石量的增加而增大。

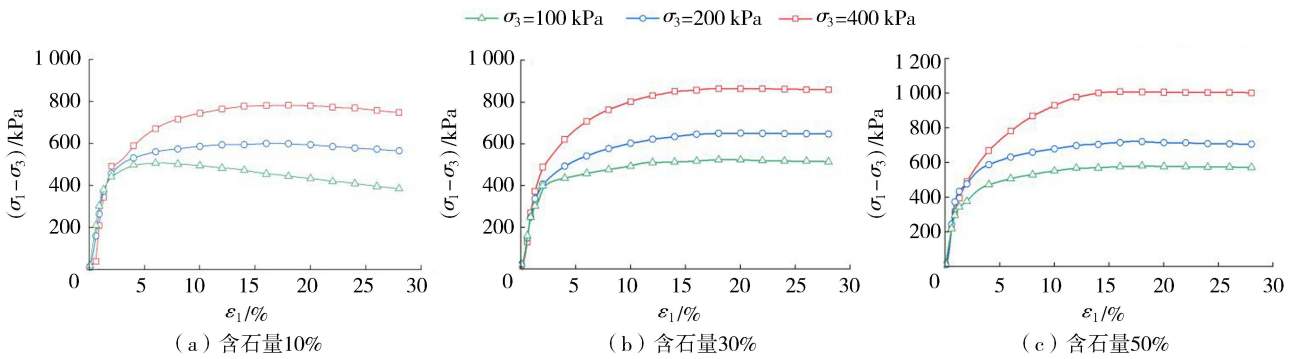


图 3 常温(20℃)下不同含石量试样的偏应力-轴向应变关系曲线

Fig. 3 Deviatoric stress-axial strain curves of specimens with different stone contents at room temperature (20℃)

由图 4 可知,当试样含石量不变时,试样在某一低温下的偏应力亦随着围压的增大而增大。对于试验温度为-5℃的试样,当围压为 100 kPa 和 200 kPa 时,其偏应力-轴向应变关系曲线为强应变软化型;当围压为 600 kPa 时,其偏应力-轴向应变关系曲线为弱应变软化型。试验温度为-10℃试样的偏应力-轴向应变关系曲线同样表现为强应变软化型和弱应变软化型。试样的峰值强度随着试验温度的降低而增大,这是因为随着温度的降低,试样内部未冻水含量显著降低,水相变结冰导致试样胶结作用增强从而引起试样强度增加,并且试样中冰的强度也会随负温的降低而增大。对比图 3 和图 4 可知,随着温度的变化,土石混合体试样的偏应力-轴向应变关系曲线由常温时的应变硬化型变化为负温时的应变软化型。另外,试样在负温状态下的峰值强度比常温状态下的峰值强度有明显的增大。

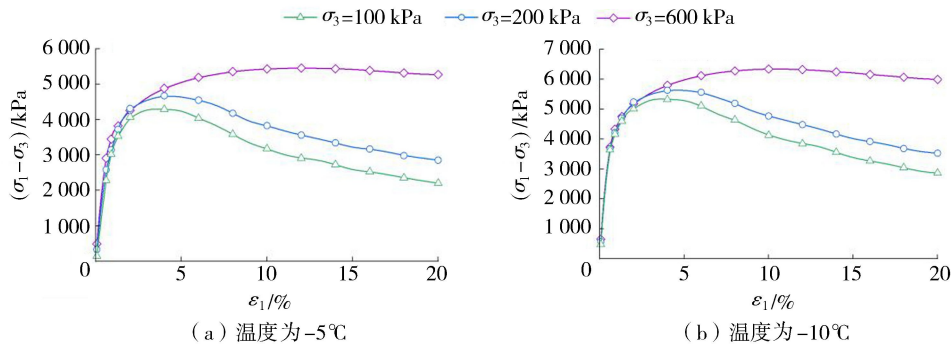


图 4 不同负温下含石量 30% 试样的偏应力-轴向应变关系曲线

Fig. 4 Deviatoric stress-axial strain curves of specimens with 30% stone content at different negative temperatures

通过与高围压、负温作用下的土石混合体(含石量 30%)的偏应力-轴向应变关系曲线^[19]进行对比发现,随着围压的增大,土石混合体的峰值强度逐渐增大,且土石混合体的偏应力-轴向应变关系曲线由低围压下的应变软化型逐渐变化为高围压下的应变硬化型。

2.2 体积应变

由图 5(图中 ε_v 为体积应变)可知,不同含石量试样在某一围压下的体积应变-轴向应变关系曲线变化规律类似。当围压为 100 kPa 时,不同含石量试样的体积应变皆随着轴向应变的增大先增大后减小,表明试

样呈先剪缩后剪胀的体变规律。由于在试验初始加载阶段,土颗粒和砾石对原有的空隙进行了填充,试样被逐渐压实;随着荷载的逐渐施加,试样中的空隙逐渐被填充,当作用的围压较低时,土石混合体试样中的砾石较易发生滑动、错位等现象,导致试样呈现剪胀的体变规律。不同含石量试样在围压为200 kPa与 400 kPa 时的体积应变随着轴向应变的增大而增大,表明当围压较高时,土石混合体试样中的砾石难以发生滑动、错位等现象,试样处于持续的剪缩状态。

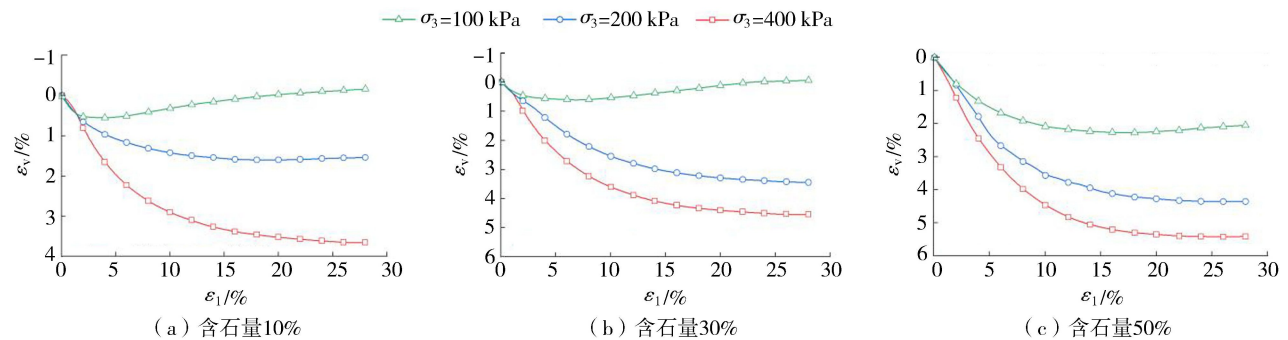


图5 常温(20℃)下不同含石量试样的体积应变曲线

Fig.5 Volumetric strain curves of specimens with different stone content at room temperature (20℃)

由图6可知,在不同冻结温度及围压作用下,试样的体积应变皆先增大后减小,表明试样呈现先剪缩后剪胀的变形规律,且冻结温度越低,试验的剪胀变形越明显。对比图5和图6可知,试样在负温状态下的体积应变规律与常温状态下的体积应变规律有明显区别,试样的体积应变在负温状态下以剪胀为主,其中-10℃下的剪胀体积应变可达-14.7%,而剪缩体积应变不超过2%;试样的体积应变在常温状态下以剪缩为主,含石量30%试样在20℃下的剪胀体积应变不超过-1%,而剪缩体积应变可达4.5%。由图6及鲁洋^[19]的试验结果可知,土石混合体在不同围压下呈现出明显不同的体积应变规律,在低围压下以剪胀为主,在试验结束时体积应变为正值,即土石混合体在试验过程中发生了体积膨胀;在高围压下以剪缩为主,在试验结束时体积应变为正值,即土石混合体在试验过程中发生了体积收缩。

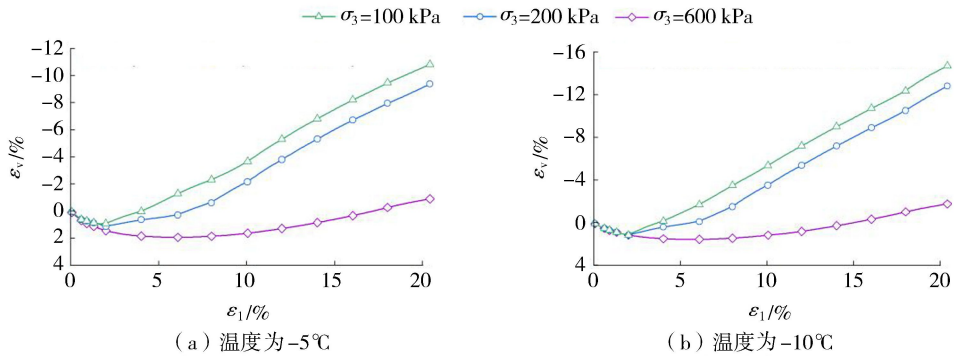


图6 不同负温下含石量30%试样的体变曲线

Fig.6 Volumetric strain curves of specimens with 30% stone content at different negative temperatures

2.3 抗剪强度特性

由表2可知,土石混合体的黏聚力随着含石量的增大而减小,随着温度的降低而显著增大;内摩擦角随着含石量的增大而增大,随着温度的降低而增大。随着含石量的增加,砾石间结构变为骨架结构,本质上是增加的砾石替换了黏土,土石混合体的强度逐渐由砾石骨架结构承担,因此土石混合体的黏聚力逐渐降低。随着温度的降低,土石混合体内部水相变成冰,冻结黏聚力逐渐增大从而使土石混合体的黏聚力大幅度提升。控制土石混合体内摩擦角大小的主要因素为土颗粒的滑移和砾石之间相互嵌合作用产生的摩擦力,随着含石量的增加,砾石之间有了更大的接触面积,使得砾石之间相互嵌

表2 土石混合体的抗剪强度指标			
Table 2 Shear strength parameters of soil-rock mixture			
试验温度/℃	含石量/%	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
20	10	22.0	137.2
20	30	23.0	133.5
20	50	26.0	119.9
-5	30	30.1	1240.0
-10	30	30.6	1337.5

合作用产生的摩擦力变大,进而引起土石混合体的内摩擦角增大。在冻结温度的影响下,土石混合体内部水相变成冰,而结冰胶结作用会增大土颗粒和砾石颗粒间的摩擦作用,进而引起土石混合体内摩擦角的增大。随着冻结温度的降低,土石混合体中的结冰胶结作用越明显,故土石混合体的内摩擦角越大。

3 结 论

- a. 含石量、围压及温度对土石混合体的强度变形特性影响较大。在低围压作用下,含石量较低试样的应力-应变关系曲线表现为应变软化型;随着围压的增大,其应力-应变关系曲线逐渐表现为应变硬化型。随着含石量的增加,试样的峰值强度增大,且试样的应力-应变关系曲线由部分围压下的应变软化型变化为全部围压下的应变硬化型。试验温度越低,试样的峰值强度越大。
- b. 围压与温度对土石混合体剪胀特性的影响较大。在常温条件下,当围压为 100 kPa 时,不同含石量的试样呈现先剪缩后剪胀的体积变化规律;当围压为 200、400 kPa 时,不同含石量的试样一直表现为剪缩,且围压越大,剪缩量越大。
- c. 随着含石量的增加,土石混合体的黏聚力逐渐降低。随着温度的降低,土石混合体试样的冻结黏聚力逐渐增大,使得土石混合体的黏聚力大幅度提升。

参考文献:

[1] 李卓,姜鑫,张继勋,等. 土石坝护坡冻胀破坏水-热-力耦合数值模拟研究[J]. 水利水运工程学报,2024(3):136-145. (LI Zhuo,JIANG Xin, ZHANG Jixun, et al. Numerical simulation of coupled water-heat-stress processes related to frost damage of earth rock dam protective structures[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(3): 136-145. (in Chinese))

[2] 李卓,姜鑫,张继勋,等. 冻结作用下土石坝护坡土石混合体水分迁移试验研究[J]. 岩土工程学报,2024,46(5):959-967. (LI Zhuo,JIANG Xin,ZHANG Jixun,et al. Experimental study on water transfer of soil-rock mixtures under freezing action[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2024,46(5):959-967. (in Chinese))

[3] 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. (in Chinese))

[4] 孙江岷,汪恩良,于雪梅. 寒区水库土石坝护坡防冰冻破坏技术及应用[J]. 冰川冻土,2002(5):642-645. (SUN Jiangmin, WANG Enliang, YU Xuemei. Application of anti-freezing technique on earth dam revetment in plain reservoir to hydraulic engineering[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2002(5):642-645. (in Chinese))

[5] 姜连杰,卢永超,韩红卫,等. 红旗泡水库冰层变形及护坡破坏现象成因分析[J]. 水利水电技术,2011,42(7):85-88. (JIANG Lianjie,LU Yongchao,HAN Hongwei,et al. Casual analysis on ice layer deformation and slope protection damage of Hongqipao Reservoir[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2011,42(7):85-88. (in Chinese))

[6] 杜镇瀚,钟启明,董海洲,等. 堤坝冻胀防护方法研究[J]. 水利科学与寒区工程,2021,4(5):1-7. (DU Zhenhan,ZHONG Qiming,DONG Haizhou,et al. Research on the protection method for dam frost heave[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering,2021,4(5):1-7. (in Chinese))

[7] 徐文杰,胡瑞林,谭儒蛟,等. 虎跳峡龙蟠右岸土石混合体野外试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(6):1270-1277. (XU Wenjie,HU Ruilin,TAN Rujiao,et al. Study on field test of rock-soil aggregate on right bank of Longpan in Tiger-leaping gorge area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(6):1270-1277. (in Chinese))

[8] 董云. 土石混合料强度特性的试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(6):1269-1274. (DONG Yun. Experimental study on intensity character of rock-soil aggregate mixture[J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(6):1269-1274. (in Chinese))

[9] 刘忠强,薛亚东,黄宏伟,等. 崩积体剪切性能试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(8):2349-2358. (LIU Zhongqiang,XUE Yadong,HUANG Hongwei,et al. Experimental research on shear behavior of colluvium[J]. Rock and Soil Mechanics,2012,33(8):2349-2358. (in Chinese))

[10] 李维树,丁秀丽,鄢爱清,等. 蓄水对三峡库区土石混合体直剪强度参数的弱化程度研究[J]. 岩土力学,2007,28(7):1338-1342. (LI Weishu,DING Xiuli,WU Aiqing,et al. Shear strength degeneration of soil and rock mixture in Three Gorges Reservoir bank slopes under influence of impounding[J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(7):1338-1342. (in Chinese))

[11] 王江营,曹文贵,张超,等. 基于正交设计的复杂环境下土石混填体大型直剪试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(10):1849-1856. (WANG Jiangying,CAO Wengui,ZHANG Chao,et al. Large-scale direct shear tests on soil-rock aggregate mixture under complicated environment based on orthogonal design[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(10):

1849-1856. (in Chinese))

[12] 胡峰,李志清,孙凯,等. 冻土石混合体、冰石混合物和冻土在压、拉作用下的破坏特征对比[J]. 岩石力学与工程学报, 2021,40(增刊1):2923-2934. (HU Feng, LI Zhiqing, SUN Kai, et al. Comparison on the compressive and tensile failure properties of frozen soil-rock mixture, ice-rock mixture and frozen soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021,40(Sup1):2923-2934. (in Chinese))

[13] 王鑫. 寒区冻结土石混合体-结构界面力学特性研究[D]. 西安:西安科技大学,2020.

[14] 薛珂,郑涛,张明礼,等. 寒区非饱和土体混合态水分迁移研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):39-46. (XUE Ke,ZHENG Tao,ZHANG Mingli,et al. Research progress of mixed water transport in unsaturated soils of cold region [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(3):39-46. (in Chinese))

[15] 程虎,李重情,穆朝民. 冻结温度对不同粒径冻土石混合体劈裂特性的影响[J]. 煤矿安全,2024,55(1):160-166. (CHENG Hu,LI Zhongqing,MU Chaomin. Effect of freezing temperature on Brazilian splitting characteristics of frozen soil-rock mixture with different particle sizes[J]. Safety in Coal Mines,2024,55(1):160-166. (in Chinese))

[16] 唐丽云,王鑫,邱培勇,等. 冻土区土石混合体冻融交界面剪切性能研究[J]. 岩土力学,2020,41(10):3225-3235. (TANG Liyun,WANG Xin,QIU Peiyong,et al. Study on shear performance of soil-rock mixture at the freezing-thawing interface in permafrost regions[J]. Rock and Soil Mechanics,2020,41(10):3225-3235. (in Chinese))

[17] 胡峰,李志清,朱益军,等. 冻结土石混合体在单轴压缩下的变形和声发射特征研究[J]. 冰川冻土,2023,45(5):1463-1474. (HU Feng, LI Zhiqing, ZHU Yijun, et al. Study on deformation and acoustic emission characteristics of frozen soil-rock mixture in uniaxial compression test[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2023,45(5):1463-1474. (in Chinese))

[18] 张鸿朋,马芹永,黄坤,等. 冻结砂不同应力路径三轴试验强度和变形分析[J]. 岩土力学,2023,44(5):1477-1486. (ZHANG Hongpeng,MA Qinyong,HUANG Kun,et al. Strength and deformation analysis of frozen sand under different stress paths using triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics,2023,44(5):1477-1486. (in Chinese))

[19] 鲁洋. 寒冷条件下掺砾黏土工程特性试验研究与机理分析[D]. 南京:河海大学,2019.

[20] 张勇敢. 土工袋抑制膨胀土渠道冻胀机理及处理层界面特性研究[D]. 南京:河海大学,2024

[21] 贾青. 寒区平原水库护坡工程设计冰参数研究[D]. 大连:大连理工大学,2012.

[22] 马令潇,汪天祥,胡素端,等. 冰封期水库气温及其冰厚、冰冻天数响应特征研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(2):250-255. (MA Lingxiao,WANG Tianxiang,HU Suduan,et al. Response characteristics of temperature, ice thickness and freezing days of reservoir during freezing period[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2020,18(2):250-255. (in Chinese))

[23] 赵海镜,靳亚东,刘书宝. 寒冷地区抽水蓄能电站水库最大冰厚计算方法研究[J]. 水力发电,2021,47(7):30-32. (ZHAO Haijing,JIN Yadong, LIU Shubao. Study on calculation method of maximum ice thickness of pumped-storage power station reservoir in cold region[J]. Water Power,2021,47(7):30-32. (in Chinese))

[24] 张勇敢,鲁洋,刘斯宏,等. 冻融循环对掺砾黏土体积变化和力学特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(增刊2):3323-3333. (ZHANG Yonggan,LU Yang,LIU Sihong,et al. Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and mechanical properties of clay-gravel mixtures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(Sup2):3323-3333. (in Chinese))

[25] 常小晓,马巍,盛煜,等. 试验条件对冻土力学指标的影响[J]. 冰川冻土,1995,17(增刊1):151-155. (CHANG Xiaoxiao, MA Wei,SHENG Yu,et al. Effects of experimental conditions on mechanical index of frozen soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,1995,17(Sup1):151-155. (in Chinese))

(收稿日期:2024-07-19 编辑:刘晓艳)