

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.05.006

低温条件下心墙沥青混凝土蠕变特性试验

王柳江¹,薛晨阳¹,扎西顿珠²,刘斯宏¹,黄鹏华¹

(1.河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2.西藏自治区水利电力规划勘测设计研究院,西藏 拉萨 850000)

摘要: 依托西部某沥青混凝土心墙坝工程,分别开展了 5℃、10℃、15℃ 低温条件下的沥青混凝土心墙材料三轴蠕变特性试验。试验结果表明:在双对数坐标系下,剪切蠕变与时间满足较好的线性关系,且其斜率受偏应力影响较小,但随着温度的升高斜率呈指数减小;剪切蠕变随着偏应力增大而增大,两者之间呈非线性关系,温度越高,非线性越明显;随着温度的升高,蠕变量增大,蠕变速率加快,且偏应力越大,产生的蠕变增量越大;体积蠕变取决于偏应力的 大小,偏应力较小时,表现为压缩,偏应力较大时,表现为膨胀,且膨胀量明显大于压缩量;围压对蠕变的影响同样与偏应力有关,当偏应力较小时,围压对蠕变的影响较小,随着偏应力的增大,围压增大对蠕变有较为明显的抑制作用。

关键词: 蠕变特性;温度;偏应力;围压;心墙沥青混凝土

中图分类号: TU455 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2021)05-0419-06

Experimental study on characteristics of creep deformation of asphalt concrete used in core dam under low temperature

WANG Liujiang¹, XUE Chenyang¹, TASHI Dunzhu², LIU Sihong¹, HUANG Penghua¹
(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Tibet Hydraulic Waterpower Planning and Designing Institution, Lhasa 850000, China)

Abstract: In this study, a series of triaxial creep tests of core asphalt concrete were conducted with the temperature controlled as 5℃, 10℃, and 15℃, respectively, relying on an embankment dam with asphalt concrete core (ACED) located in the west of China. The test result indicates that a linear relationship is satisfied between the shear creep strain and time in the double logarithmic coordinates. The slope for the lines corresponding to the different deviator stress changes slightly, while exponentially decreases with the increase of the temperature. The shear creep strain at different time increases nonlinearly with the increase of the deviator stress, and this nonlinear behavior becomes more obvious with the increase of temperature. Moreover, with the increase of the temperature, the creep rate is accelerated, and the creep deformation is also increased. Larger creep deformation is observed under the action of larger deviator stress. The volumetric creep strain is greatly influenced by the value of deviator stress, which shows the compression in the low deviator stresses and the dilatancy in the large deviator stresses. Furthermore, the dilatancy is remarkably larger than the compression deformation. Besides, the influence of the confining stress on the creep of asphalt concrete core is also dependent on the value of deviator stress. The creep under different confining stress changes slightly in the low deviator stresses, while decreases with the increase of confining stress in the high deviator stresses.

Key words: creep characteristics; temperature; deviator stress; confining stress; core asphalt concrete

沥青混凝土是由矿料、沥青等按一定比例组合的复合材料,具有防渗性能好、适应变形能力强等优点,非常适宜作为大坝的防渗体材料^[1]。自 20 世纪 20 年代以来,世界上已建 300 多座沥青混凝土面板坝、130 多座沥青混凝土心墙坝^[2]。由于沥青混凝土由胶凝材料(沥青) 与骨料胶结而成,属于典型的黏弹塑性材料,具有较强的蠕变性,因此对心墙的长期防渗性能有一定的影响^[3-4]。近年来,随着水利工程往新疆、西藏等高寒地区的推进,沥青混凝土心墙坝的建设进入一个高速发展的时期^[5]。考虑到西部地区环境温度较低且变化较大,同时沥青混凝土心墙埋在坝体内,长期处于三向应力状态,因此有必要开展低温条件下沥青混凝土心墙材料的三轴蠕变特性研究。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFE0128900);国家自然科学基金雅砻江重点项目(U1765205)
作者简介: 王柳江(1985—),男,副教授,博士,主要从事土石坝工程材料特性及数值模拟研究。E-mail:15850514642@163.com
引用本文: 王柳江,薛晨阳,扎西顿珠,等. 低温条件下心墙沥青混凝土蠕变特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):419-424.
WANG Liujiang, XUE Chenyang, TASHI Dunzhu, et al. Experimental study on characteristics of creep deformation of asphalt concrete used in core dam under low temperature[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(5):419-424.

目前,国内外关于水工沥青混凝土的三轴蠕变特性的研究相对较少。在 20 世纪 70 年代,国外学者针对 Eberlaste、Finsteral 等沥青混凝土心墙坝^[6-8]的长期变形开展了相关三轴蠕变特性试验,侧重于考虑侧向压力减小对沥青混凝土开裂的影响。在试验中设置轴向压力不变,围压随时间分级减小。国内,西安理工大学对水工沥青混凝土三轴蠕变特性开展了相关研究,其中初伟^[9]进行了 20℃ 不同围压下的三轴蠕变特性试验,并采用 Burgers 模型进行拟合;朱悦^[10]进行了 10℃ 条件下的三轴应力松弛试验,分析了松弛模量与应变的关系;Wang 等^[4,11]对 10℃ 和 20℃ 下的三轴蠕变特性试验结果进行了总结,并基于 $E-B$ 模型提出一个能够反映稳定蠕变量和应力关系的本构模型。另外,一些学者针对三峡茅坪溪沥青混凝土心墙坝也开展了沥青混凝土的三轴蠕变特性研究,长江科学院^[12]进行了 16.4℃ 不同围压下的三轴蠕变分级加载试验;朱晟等^[13]基于长江科学院试验的剪切蠕变结果,提出一个能够考虑应力状态变化的增量蠕变模型;李志强等^[14]在 16.4℃ 的温度条件下,研究了沥青含量对三轴蠕变特性的影响。近年来,李玫等^[15]通过室内三轴蠕变特性试验,研究了水泥替代矿粉对水工沥青混凝土长期性能的影响;邹玉强^[16]对比了分别加载和分级加载两种三轴蠕变特性试验方式,并采用长江科学院提出的六参数蠕变模型对沥青混凝土的剪切蠕变试验结果进行拟合。然而,沥青混凝土具有温度敏感性,温度的差别导致其长期变形性能相差很大,尤其是西部寒冷地区的沥青混凝土防渗体,会遭受低温和较大的温度变化;此外沥青混凝土的长期体积变形会导致其孔隙率的变化,进而影响其防渗性能。而上述研究中极少考虑低温条件及其变化对水工沥青混凝土蠕变特性的影响,对体积蠕变的分析也鲜有报道。

本文以西部某沥青混凝土心墙坝工程为例,选取 5℃、10℃、15℃ 3 个试验温度,进行沥青混凝土心墙材料的三轴蠕变特性试验,研究温度、偏应力、围压对沥青混凝土三轴蠕变特性的影响,并讨论应力状态对体积蠕变的影响机制,为考虑温度和应力状态变化的心墙沥青混凝土蠕变模型的建立提供参考。

1 原材料与试样制备

三轴蠕变特性试验中沥青采用克拉玛依 70 号石油沥青,骨料由工程采用的灰岩破碎而成,矿粉由灰岩经球磨机碾磨而成。骨料级配如下:19~13.2 mm、13.2~4.75 mm、4.75~2.36 mm 粒径的粗骨料占比分别为 13.4%、28.6% 和 13.8%,2.36~0.6 mm、0.6~0.15 mm、0.15~0.075 mm 粒径的细骨料占比分别为 18.1%、10.6% 和 3.5%,填料(<0.075 mm)占比 12.0%;骨料压碎率为 18.5%,坚固性为 3.6%,黏结力为 5 级。设计沥青混凝土的级配指数为 0.4,沥青质量分数为 7.0%,矿粉质量分数为 12%。其基本性能($T=10^{\circ}\text{C}$)为:最大密度 2.417 g/cm^3 ,密度 2.381 g/cm^3 ,孔隙率 1.5%,劈裂强度 0.65 MPa,抗压强度 3.57 MPa,水稳定性 1.07,拉伸强度 0.55,弯曲强度 1.35 MPa。试样直径 100 mm,高 200 mm,依据 DL/T 5362—2006《水工沥青混凝土试验规程》制备。为防止室温变化对试样变形的影响,试样自然冷却脱模后,将其放入-30℃ 的恒温室中养护。

2 试验方法

2.1 试验方案

为研究温度和应力状态对蠕变特性的影响,以温度(T)、围压(σ_3)、偏应力(q)为变量设计如表 1 所示的试验方案。由于试验依托的工程所在地多年平均气温为 10℃,最高月平均气温 20℃,最低月平均气温-5℃,因此,选取试验温度为 5℃、10℃、15℃。受限于试验仪器的控温范围,无法开展负温条件下的三轴蠕变特性试验。S1~S3 为第 1 组试验,分析 5℃、围压 0.4 MPa、不同偏应力下的蠕变规律;S4~S7 为第 2 组试验,与第 1 组相比,试验温度为 10℃;S8~S11 为第 3 组试验,试验温度为 15℃;S11~S15 为第 4 组试验,相对于第 2 组,其围压为 0.6 MPa。通过 1~3 组试验,得到不同温度下的蠕变-时间曲线和应力-应变等时曲线,可对比温度对应力-蠕变曲线的影响;通过 2、4 组试验的对比,可分析围压对应力-蠕变曲线的影响。蠕变特性试验之前,需要开展 5℃、10℃、

表 1 试验方案设计

Table 1 Design of test schemes

试样编号	$T/^{\circ}\text{C}$	σ_3/MPa	q/MPa	D
S1	5	0.4	0.585	0.2
S2	5	0.4	1.155	0.4
S3	5	0.4	1.691	0.6
S4	10	0.4	0.405	0.2
S5	10	0.4	0.801	0.4
S6	10	0.4	1.255	0.6
S7	10	0.4	1.667	0.8
S8	15	0.4	0.281	0.2
S9	15	0.4	0.565	0.4
S10	15	0.4	0.880	0.6
S11	15	0.4	1.190	0.8
S12	10	0.6	0.474	0.2
S13	10	0.6	0.925	0.4
S14	10	0.6	1.236	0.525
S15	10	0.6	1.880	0.8

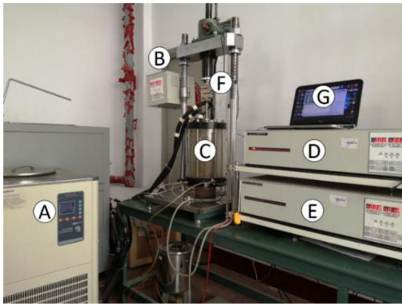
15℃下的静力三轴剪切试验以确定不同温度和围压下的破坏应力 q_f ,由此可以确定表 1 中的应力水平 D :

$$D = q/q_f \tag{1}$$

2.2 试验仪器

试验在温度-湿度联合控制三轴仪^[17]上进行,如图 1 所示。该仪器主要技术参数为:最大轴向荷载 100 kN,最大围压 1.5 MPa,温控范围 0~50℃,控温精度为±0.1℃。此外,利用该三轴仪还能进行温度循环、干湿循环以及温度-湿度联合控制下土石材料的变形特性研究。

试验过程中,首先将试样放入对应试验温度的恒温箱内至少 24 h,确保试样温度均匀;然后装样,控制压力室温度为试验温度,恒温 2 h 以上,当试样温度达到目标值后,施加围压。在围压作用下体积应变速率小于 0.02 mL/min 时,先采用应变控制式加载施加轴压,加载速率为 0.2 mm/min;当应力水平达到设计值时,采用应力式加载控制,以保证轴压在蠕变过程中保持不变。蠕变特性试验时间通过前期试验确定。试验时间大于 8 350 min 后剪切蠕变速率明显减小,设为蠕变稳定状态。此外,当温度较高或偏应力较大时,沥青混凝土轴向蠕变量可能大于活塞导杆最大行程,对应 35% 的应变,此时试验结束。



A—温度控制系统;B—轴压加载系统;C—双层三轴压力室;D—反压加载及量测系统;E—围压加载及量测系统;F—温度测量电路;G—自动控制中心。

图 1 温度-湿度联合控制三轴仪
Fig. 1 Temperature-humidity controlled triaxial test device

3 试验结果分析

3.1 剪切蠕变及应力-应变等时曲线

以第 3 组试验为例对沥青混凝土心墙材料的三轴蠕变特性进行分析。该试验共包括 4 个应力水平,对应的偏应力为 0.281 MPa、0.565 MPa、0.88 MPa 和 1.19 MPa。图 2(a) 为温度 15℃、 $\sigma_3=0.4$ MPa 时,不同偏应力下的剪切蠕变曲线。由图 2(a) 可以看到,当偏应力为 0.281 MPa 时,沥青混凝土的蠕变在早期增加很快,随后较缓慢增加,140 h 之后趋于稳定,对应的蠕变应变为 5.8%。李志强等^[14,18]同样采用克拉玛依 70 号石油沥青制备了沥青混凝土试样,并在 16.4℃ 环境温度下开展了蠕变特性试验,当 $\sigma_3=0.5$ MPa、 $q=0.25$ MPa 时,140 h 之后的蠕变量为 5.6%。可见,在试验材料及试验条件接近的条件下,两者试验结果基本一致,说明本文试验结果是合理的。

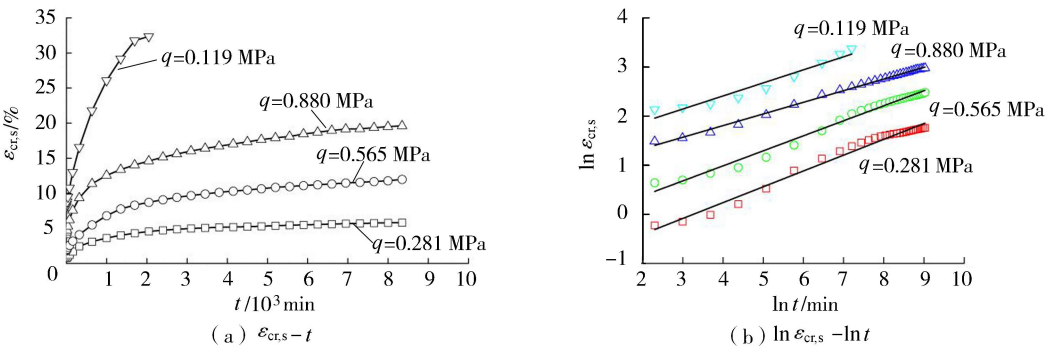


图 2 剪切-蠕变曲线 ($T=15^{\circ}\text{C}, \sigma_3=0.4$ MPa)
Fig. 2 Shear-creep curves ($T=15^{\circ}\text{C}, \sigma_3=0.4$ MPa)

值得关注的是,不同偏应力下的蠕变曲线具有明显的阶段性,大致可分为 3 个阶段。第 1 阶段,在加载完成 1 200 min 内,蠕变快速增长,这是因为沥青混凝土为悬浮密实结构,孔隙由沥青填充,在加载初始阶段骨架作用力较小,如图 3 所示;第 2 阶段,随着轴向压缩变形的发展,孔隙中的沥青受挤压往侧向移动,骨料间接触点数开始增加,骨架作用增强,蠕变率逐渐减小;第 3 阶段,蠕变趋于稳定,应变率趋向于 0。对于不同偏应力下的心墙沥青混凝土,其蠕变曲线具有如下特点:偏应力越大,初始阶段的瞬时变形越大,蠕变速率越快,最终蠕变越大,当偏应力为 1.19 MPa 时,其蠕变量在 1 200 min 后超过了活塞导杆的最大行程。此外,如图 2(b) 所示,在双对数坐标系下,各偏应力下的蠕变曲线满足较好的线性关系:

$$\ln \varepsilon_{cr,s} = A \ln t + B \tag{2}$$

式中： $\varepsilon_{cr,s}$ ——剪切蠕变； A ——拟合参数，反映达到稳定蠕变所需要的时间， A 越大，达到稳定蠕变的时间越长。可以发现，在相同温度和围压下，对应不同偏应力的直线基本平行，说明偏应力对沥青混凝土达到稳定蠕变所需时间的影响较小。取不同偏应力下 A 的平均值，为 0.283。

图 4 为三轴蠕变特性试验中不同时刻的应力-应变等时曲线。由图 4 可以看到，不同时刻下的剪切蠕变随着偏应力的增大而增大，且两者之间呈非线性关系。当偏应力较小时，应力-应变等时曲线基本呈线性关系，随着偏应力的增大，曲线斜率逐渐减小，非线性更为明显。在偏应力为 0.565 MPa 时，应力-应变等时曲线出现较为明显的拐点，可将该应力视为屈服应力^[11]，即当施加的偏应力小于该屈服应力时，沥青混凝土发生黏弹性变形，当施加的偏应力超过该屈服应力时，则发生黏塑性变形。

图 5 为不同偏应力下的体积蠕变-时间关系曲线，规定体积蠕变压缩为正，膨胀为负。由图 5 可以看到，当偏应力小于 0.565 MPa 时，体积蠕变表现为压缩变形，但体积压缩量远小于轴向压缩量；当偏应力大于 0.88 MPa 时，体积蠕变表现为膨胀变形，体积膨胀量随着偏应力的增大而增大，且量值大于偏应力较低时的压缩量；此外，体积膨胀曲线同样具有阶段性，在蠕变初始阶段呈快速增长趋势，之后趋于稳定。由此可知，当偏应力较大时，沥青混凝土的孔隙率随时间增大，使其渗透性增大，从而对沥青混凝土长期防渗效果有一定的影响。值得关注的是，该现象与沥青混凝土静力三轴剪切试验中的体应变曲线相对应。



图 3 蠕变初始阶段沥青混凝土试样纵剖面
Fig.3 Longitudinal section of asphalt concrete at initial stage of creep

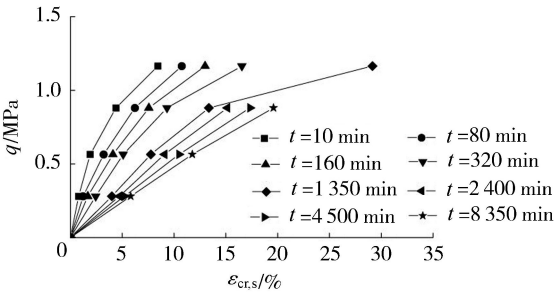


图 4 不同时刻应力-应变等时曲线 ($T = 15^{\circ}\text{C}$, $\sigma_3 = 0.4 \text{ MPa}$)
Fig.4 Stress-strain curves at different time for triaxial creep test ($T = 15^{\circ}\text{C}$, $\sigma_3 = 0.4 \text{ MPa}$)

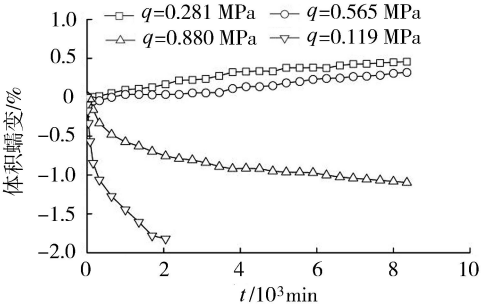


图 5 体积蠕变-时间关系曲线 ($T = 15^{\circ}\text{C}$, $\sigma_3 = 0.4 \text{ MPa}$)
Fig.5 Relationship curves of volumetric creep strain with time ($T = 15^{\circ}\text{C}$, $\sigma_3 = 0.4 \text{ MPa}$)

3.2 温度对蠕变的影响

图 6 为围压 0.4 MPa 不同温度下的应力-应变等时曲线。由图 6 可以发现，在相同偏应力条件下，温度越高，蠕变越明显；偏应力越大，不同温度下的蠕变差越大，因此，温度升高会增加沥青混凝土心墙材料的蠕变量。同时，随着温度升高，应力-应变等时曲线的非线性更为明显，对应的屈服应力随之减小。究其原因，随着温度升高，沥青的润滑作用增强，骨料颗粒之间产生错动、重组，削弱了骨架的作用力，导致蠕变速率加快，变形增加。此外，当温度从 5℃ 升高到 10℃ 时，蠕变增量明显大于温度从 10℃ 升高到 15℃ 的情况，这主

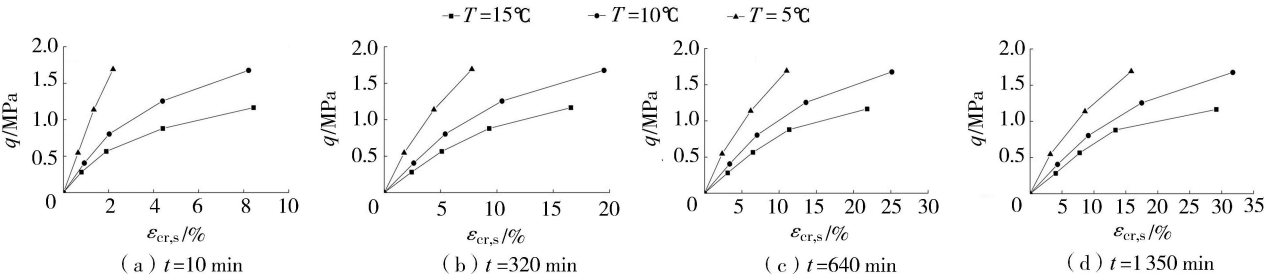


图 6 不同温度下的应力-应变等时曲线 ($\sigma_3 = 0.4 \text{ MPa}$)

Fig.6 Stress-strain curves at different time for triaxial creep tests under different temperature ($\sigma_3 = 0.4 \text{ MPa}$)

要是因为沥青在不同温度区间的温度敏感性不同。

采用式(1)对不同温度下的蠕变曲线进行拟合,给出参数 A 随温度的变化曲线。如图 7 所示, A 随温度的升高而减小,说明温度越高,沥青混凝土达到蠕变稳定所需的时间越短。究其原因,沥青混凝土的瞬时加载变形和初始阶段的蠕变随温度的升高而增大,缩短了其内部骨料颗粒的接触时间,加快了骨架结构的形成,从而较快地进入稳定蠕变阶段。此外,受沥青温度敏感性影响,当温度从 5℃ 升高到 10℃ 时,斜率减小的程度大于温度从 10℃ 升高到 15℃ 的情况,说明温度大于 10℃ 后,该工程所采用的沥青混凝土达到稳定蠕变所需的时间受温度影响较小。其中, A 与温度的关系可用指数函数拟合:

$$A = Me^{-\alpha T} + N$$

(2)

式中: α 、 M 、 N ——拟合参数, α 控制 A 随温度的变化速率, N 为 A 随温度升高而趋于稳定的最终值。

3.3 围压对蠕变的影响

图 8 为 10℃ 时围压分别为 0.4 MPa 和 0.6 MPa 对应的应力-应变等时曲线。由图 8 可以看到,当偏应力小于 0.8 MPa 时,不同围压对应的应力-应变等时曲线基本重合,说明围压对蠕变的影响在偏应力较小时可以忽略。当偏应力大于 0.8 MPa 后,蠕变随围压的增大而减小,且随着偏应力的增大,不同围压下的蠕变变形差随之增大。值得注意的是,该现象与不同围压下沥青混凝土的静力三轴压缩试验结果相似。

图 9(a) 为 10℃ 下沥青混凝土心墙材料的应力-应变等时曲线。可以看到,在偏应力小于 0.8 MPa 时,不同围压下的应力-应变等时曲线基本重合;随着偏应力的增大,应力-应变等时曲线开始出现分叉,且在相同偏应力的条件下,围压越大,轴向变形越小。对应于体积变形,当偏应力小于 0.8 MPa 时,体应变表现为剪缩,且不同围压下的剪缩变形基本相等;当偏应力增大后,体应变由剪缩过渡到剪胀,且剪胀量随着围压的增大而减小。可见与常规堆石料相比,围压对沥青混凝土三轴压缩和蠕变特性的影响与偏应力的大小有关。

3.4 结果与讨论

沥青混凝土心墙主要用于防渗,其设计孔隙率通常小于 3%,骨料之间的孔隙由沥青和矿粉填充,沥其内部结构有两个特点:一是骨料呈悬浮状态(见图 3);二是高度密实,等向压缩条件下的变形十分有限。因此,当沥青混凝土心墙承受较小的偏应力时,其产生的体积变形以等向压缩为主,考虑其密实性,围压对其体积压缩量的影响有限,不同围压下的孔隙率变化较小,从而解释了不同围压下的应力-应变等时曲线在低偏应力时基本重合的现象。

此外,类比岩石等密实材料,随着偏应力的增大,沥青混凝土内部出现微裂隙,导致其孔隙率增大,产生了如图 9(b) 所示的剪胀变形,且围压越小,剪胀越明显。根据亚临界扩展理论^[19],当偏应力较大时,微裂隙在应力腐蚀下随时间逐级扩展,解释了在偏应力较大时体积蠕变呈膨胀变形现象,如图 5 所示;当沥青混凝土内部产生裂隙后,其孔隙率增大,此时围压可有效抑制裂隙的扩展,围压

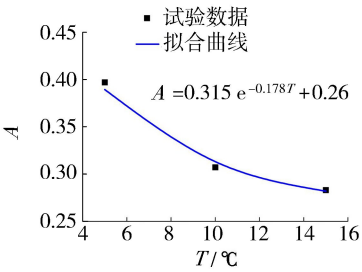


图 7 A 随温度变化曲线($\sigma_3 = 0.4$ MPa)
Fig.7 Vary of slope A with temperature ($\sigma_3 = 0.4$ MPa)

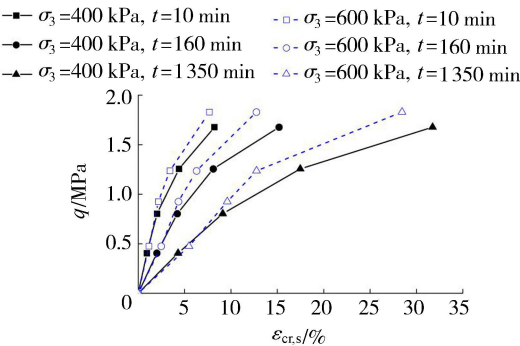


图 8 不同围压下的应力-应变等时曲线 ($T = 10^\circ\text{C}$)
Fig.8 Stress-strain curves at different time for triaxial creep tests under different confining pressure ($T = 10^\circ\text{C}$)

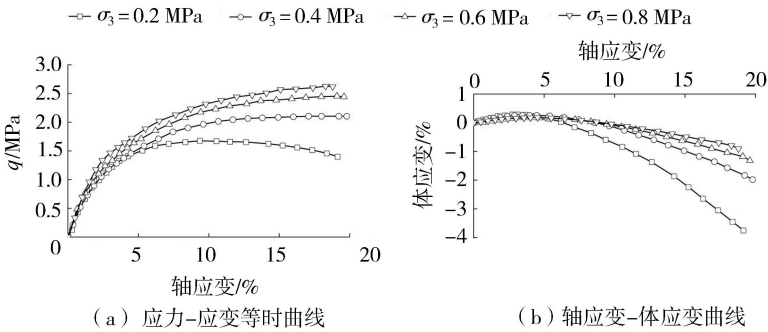


图 9 静力三轴剪切试验结果 ($T = 10^\circ\text{C}$)
Fig.9 Results for triaxial compression test under static load ($T = 10^\circ\text{C}$)

越大,抑制效果越明显,所产生的剪切蠕变变形越小。

4 结 论

- a. 在试验条件下(试验温度 0 ~ 15℃,偏应力水平 0.2 ~ 0.8 MPa),心墙沥青混凝土剪切蠕变曲线在双对数坐标下均满足较好的线性关系,不同时刻的剪切蠕变量随着偏应力的增大而增大,且两者之间呈非线性关系。
- b. 随着温度的升高,沥青混凝土的蠕变量增大,蠕变速率明显加快,且达到稳定蠕变所需要的时间缩短,同时偏应力越大,温度升高产生的蠕变增量越明显。从抑制沥青混凝土心墙长期变形的角度来说,相对稳定的低温条件对工程是有利的。
- c. 沥青混凝土体积蠕变与偏应力大小相关,当偏应力较小时,体积蠕变表现为压缩变形,当偏应力较大时,体积蠕变表现为膨胀变形,且膨胀量明显大于压缩量。
- d. 围压对沥青混凝土三轴蠕变特性的影响同样与偏应力有关,偏应力较小时,围压对蠕变影响较小,当偏应力较大时,围压增大对蠕变有抑制作用。

参考文献:

[1] 王为标. 土石坝沥青防渗技术的应用和发展[J]. 水力发电学报,2004,23(6):70-74. (WANG Weibiao. Develepment and applications of impervious asphalt concrete for embankment dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2004,23(6):70-74. (in Chinese))

[2] Embankment damed with bituminous concrete facing;Bulletin 114[R]. Paris;International Commission on Large Dams,1999.

[3] 饶锡保,程展林,谭凡,等. 碾压式沥青混凝土心墙工程特性研究现状与对策[J]. 长江科学院院报,2014,31(10):51-57. (RAO Xibao,CHENG Zhanlin,TAN Fan,et al. Status and methods of rolled asphaltic concrete corewall project features study [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2014,31(10):51-57. (in Chinese))

[4] WANG Weibiao. Research on the suitability of asphalt concrete as water barrier in dams and dikes[D]. Blindern;University of Oslo, 2008.

[5] 张伟,黄斌,张本蛟. 水工室温沥青混凝土工程特性试验研究[J]. 水利学报,2015,46(增刊1):27-33. (ZHANG Wei, HUANG Bin,ZHANG Benjiao. Experimental research on engineering properties of hydraulic asphalt concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2015,46(Sup1):27-33. (in Chinese))

[6] RIENOSSE K. Embankment dams with asphaltic concrete cores experience and recent test results. Transactions [C]//11th International Congress on Large Dams. Madrid; International Congress on Large Dams, 1973;801-816.

[7] PIRCHER W, SCHWAB H. Design, construction and behaviour of the asphaltic concrete core wall of the Finstertal Dam, Transactions[C]// 16th International Congress on Large Dams. San Francisco; International Congress on Large Dams, 1988; 901-924.

[8] FEINER A, LEHNERT J, LOHR A. Asphaltic concrete core problems and their solutions, transactions [C]//12th International Congress on Large Dams. Mexico; International Congress on Large Dams, 1976;33-47.

[9] 初伟. 土石坝沥青混凝土心墙材料基本性能研究:蠕变和动力特性研究[D]. 西安:西安理工大学,2004.

[10] 朱悦. 沥青混凝土心墙基本性能研究:静三轴试验与应力松弛试验研究[D]. 西安:西安理工大学,2004.

[11] WANG Weibiao, HÖEG K. Simplified material model for analysis of asphalt core in embankment dams[J]. Construction Building Material,2016,124:199-207.

[12] 三峡工程茅坪溪防护大坝心墙沥青混凝土力学特性试验研究[R]. 武汉:长江科学院,2004.

[13] 朱晟,徐蓐,王登银. 沥青混凝土的增量蠕变模型研究[J]. 水利学报,2011,32(2):192-197. (ZHU Sheng,XU Jian,WANG Dengyin. Research on incremental creep model of asphalt concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2011,32(2):192-197. (in Chinese))

[14] 李志强,张鸿儒,安明喆,等. 土石坝心墙沥青混凝土三轴蠕变试验研究[J]. 北京交通大学学报,2007,31(1):77-80. (LI Zhiqiang,ZHANG Hongru,AN Mingzhe,et al. Triaxial creep test study on asphalt concrete in the core-wall of earth rock dam [J]. Journal of Beijing Jiaotong University,2007,31(1):77-80. (in Chinese))

[15] 李玫,赵娜,左永振,等. 水泥替代矿粉对水工沥青混凝土长期性能影响研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(增1):74-78. (LI Mei,ZHAO Na,ZUO Yongzhen,et al. Influence of cement instead of mineral powder on long-term deformation characteristics of asphalt concrete[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(Sup1):74-78. (in Chinese))