

文章编号:0559-9350(2020)05-0527-09

不同温度条件下水工沥青混凝土抗压特性 及防渗性能试验研究

宁致远, 刘云贺, 王为标, 张 凯

(西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 为研究水工沥青混凝土在不同温度条件下的力学特性和经荷载作用后的防渗性能, 在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下对其进行了抗压试验研究, 并对荷载和温度作用后的试件进行了渗透试验分析。试验结果表明: 温度对水工沥青混凝土的应力-应变全曲线、抗压强度、弹性模量、峰值应变以及破坏模式等力学特性有显著影响。对比水工沥青混凝土在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下应力-应变全曲线特点, 可推断 $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为其应力-应变特性变化的过渡温度区间。水工沥青混凝土的抗压强度和弹性模量随温度的升高而降低, 峰值应变随温度的升高而增大。基于试验结果, 本文提出的经验公式较好地反映了抗压强度、弹性模量以及峰值应变随温度变化的规律。在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下, 水工沥青混凝土的破坏模式主要为骨料开裂和沥青胶浆与骨料的黏结破坏; 在 $10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下, 破坏模式主要为黏结破坏。此外, 水工沥青混凝土经荷载作用后的防渗性能与温度环境有关。在 $10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度环境中, 水工沥青混凝土承受7%的轴向压应变后, 其渗透系数仍在 $10^{-7} \sim 10^{-6}\text{ cm/s}$ 量级, 防渗性能良好。

关键词: 水工沥青混凝土; 力学性能; 温度作用; 防渗性能; 破坏模式

中图分类号: TV431; TV441

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20200006

1 研究背景

水工沥青混凝土因其优异的变形和防渗性能而广泛应用于土石坝防渗结构中, 沥青混凝土堆石坝“是未来特高坝适宜的坝型”^[1]。王为标等^[2-4]、张伟等^[5]通过单轴和三轴抗压试验得到了水工沥青混凝土在常温条件下的力学特性。陈宇等^[6]对比研究了沥青混凝土在 $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的应力-应变全曲线特点, 结果表明当温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 沥青混凝土应力软化现象明显, 随着温度的升高, 应力软化向应力硬化转变。田小草等^[7]认为, 温度对沥青混凝土的临界应力强度因子和破坏模式有显著影响。Akhtarpour等^[8]、Feizi-Khankandi等^[9]通过试验表明, 随着温度的升高, 沥青混凝土的剪切模量降低, 吸能能力增强。这些研究成果均是结合某一具体工程在常温或某一特定温度区间下进行的, 然而水工沥青混凝土对温度十分敏感, 尤其是在高海拔、高寒地区, 位于坝体防渗面板的水工沥青混凝土将承受更大的温差作用^[10], 故水工沥青混凝土在更广的温度区间的力学特性还需做进一步研究, 保证水工沥青混凝土具有一定的力学强度, 旨在更好地起到防渗作用。余华英等^[11]、Vardanega^[12]认为, 孔隙率、级配指数以及沥青含量是影响水工沥青混凝土防渗性能的主要因素。当孔隙率小于3%时, 沥青混凝土的渗透系数在 $10^{-8} \sim 10^{-9}\text{ cm/s}$ 量级^[4]。实际上, 沥青混凝土防渗体大多是在承受一定的荷载作用或变形后起到防渗作用的。Wang等^[13]通过试验表明, 沥青混凝土经受一定荷载作用后, 孔隙

收稿日期: 2020-01-04; 网络首发时间: 2020-05-21

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200520.1544.003.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779208); 水利部公益性行业科研专项(201501034-03)

作者简介: 宁致远(1989-), 博士生, 主要从事水工沥青混凝土材料力学特性研究。E-mail: ningzhiyuan1108@163.com

通讯作者: 刘云贺(1968-), 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构、沥青混凝土材料动态力学特性研究。

E-mail: liuyunhe1968@163.com

率有所降低、渗透系数并未增加的结论。Zhang等^[14]认为在三轴压缩状态下, 沥青混凝土达到峰值应力时, 防渗性能并未降低。这些研究成果大多是在特定的温度条件下开展的, 而针对防渗体所处的温度环境, 关于水工沥青混凝土在不同温度条件下经荷载作用后的防渗性能研究相对较少。

基于此, 本文在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区间, 对水工沥青混凝土进行单轴抗压试验, 研究不同温度条件下水工沥青混凝土的应力-应变全曲线特征、抗压强度和弹性模量等力学特性, 分析试件在不同温度条件下的破坏特征, 进一步研究在不同温度环境中水工沥青混凝土试件经5.0%、7.0%和10.0%的轴向压应变后的防渗性能, 为以应变作为不同荷载和温度条件下水工沥青混凝土的失效判别标准提供参考。

2 试验方案

2.1 试件制备 考虑到不同成型方法制备的试件, 其力学性能具有差异性^[15]。为了使研究与实际工程具有可比性, 本文试件均取自于某施工现场。水工沥青混凝土设计级配采用下式^[16]计算:

$$P_i = P_{0.074} + (100 - P_{0.074}) \frac{(d_i)^n - (0.074)^n}{(D_{\max})^n - (0.074)^n} \quad (1)$$

式中: d_i 为某一筛孔直径, mm; P_i 为孔径为 d_i 时骨料的通过率, %; $P_{0.074}$ 为筛孔 $d_i=0.074\text{ mm}$ 时骨料的通过率, %; $D_{\max}$ 为骨料最大粒径, mm; n 为级配指数, 本文 $n=0.4$ 。

对现场芯样中的沥青含量和矿料级配组成进行了抽提试验检测^[17], 沥青含量平均值为7.0%, 标准差为8.2%, 矿料设计级配和检测级配如图1所示。此外, 水工沥青混凝土试件孔隙率均小于2.0%, 密度均大于 2.4 g/cm^3 , 满足设计要求。对芯样进行加工处理, 得到高度和直径均为100 mm的圆柱体试件, 尺寸偏差满足规范要求^[17]。

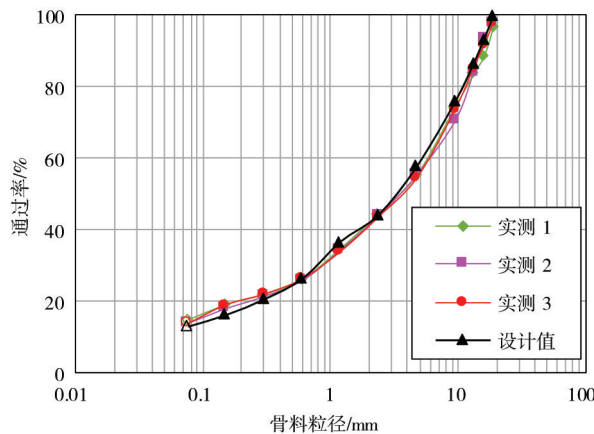


图1 骨料设计级配和检测级配

2.2 力学试验方案 目前我国采用水工沥青混凝土作为防渗体的大坝有100多座, 主要分布于以新疆为主的高寒地区。故本文以新疆全年平均气温变化范围为参考, 温度范围选择为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 每级试验温差为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。考虑到岩石、混凝土类材料在不同的加载速率条件下具有明显的应变率效应^[18-19], 故本文加载速率选择为 10^{-5} s^{-1} 。力学试验装置采用高低温环境箱和MTS万能试验机。为确保各试验温度条件下试件的力学性能稳定, 将每组试件在高低温环境箱中恒温 24 h ^[17], 然后控制MTS万能试验机在高低温环境箱中将试件加载至破坏。

2.3 渗透试验方案 为研究经荷载和温度作用后水工沥青混凝土在不渗漏的情况下可承受的极限应变和应力状态, 在力学试验的基础上, 结合试件的破坏特征, 当试件分别达到 5×10^{-2} 、 7×10^{-2} 和 10×10^{-2} 的轴向压应变时, 进行变水头渗透试验研究, 旨在以应变作为水工沥青混凝土的失效判别标准提供参考。渗透试验在室温条件下进行, 试验水压力为0.5 MPa。对已完成力学加载试验的试件截

取中间变形最大部分,切割成高为60 mm的圆柱体。渗透试验装置采用西安理工大学沥青混凝土防渗研究所自主研制的高压渗透仪。试验过程依据《水工沥青混凝土试验规程》(DL/T 5362-2006)^[17]进行。

3 力学特征

3.1 应力-应变全曲线特征 试验得到了不同温度(-30 ℃、-20 ℃、-10 ℃、0 ℃、10 ℃、20 ℃和30 ℃)条件下水工沥青混凝土的应力-应变全曲线特征,如图2所示。

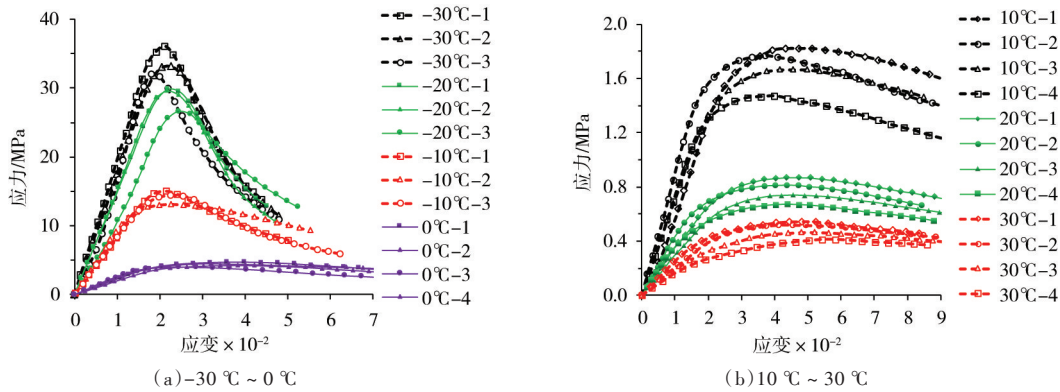


图2 不同温度条件下水工沥青混凝土应力-应变全曲线特征

从图2可知,在不同温度条件下,试件达到峰值应力前应力-应变曲线的变化规律类似,均经历了压密、弹性、屈服等阶段^[3]。从图中可明显观察到,温度对水工沥青混凝土的峰值应力、弹性模量以及峰值应变有显著影响。这是因为沥青混凝土是由粗骨料、细骨料、填料和沥青等材料按一定比例组合而成的复合材料,骨料以及填料作为沥青混合料中的颗粒增强体,其强度、弹性模量在-30 ℃~30 ℃范围内的变化可忽略不计。故水工沥青混凝土受温度影响的实质原因是沥青作为高分子类黏弹性材料受温度影响明显^[20]。

当温度小于-10 ℃时,随着温度的降低,沥青材料的分子间距减小,分子间的结合力增大,沥青主要呈弹脆性^[21-22],故试件的峰值应力和弹性模量增大,峰值应变降低。当温度大于0 ℃时,随着温度的升高,沥青材料的分子间距增大,分子间的结合力减小,沥青主要呈黏弹性^[5,22],故试件的峰值应力和弹性模量降低,峰值应变增大。此外,温度对峰值应力后的应力-应变曲线特征影响显著。

当试验温度为-30 ℃~-10 ℃时(图2(a)),试件达到峰值应力后,应力快速下降,应力-应变曲线呈现应变软化的特点,并且试验温度越低,应变软化现象越明显,这与普通混凝土的应力-应变曲线特点类似。

当温度为0 ℃~30 ℃时(图2(b)),试件达到峰值应力后,进入“蠕变稳定状态”,试件持续变形直至失效,应力-应变曲线呈现应变硬化的特点,并且试验温度越高,应变硬化现象越明显。由图2(a)进一步可知,当应变为5%,试验温度为-10 ℃和0 ℃时,试件的应力与峰值应力之比(平均值)分别为0.595和0.928。当应变为7%,试验温度为-10 ℃时,试件已完全破坏;试验温度为0 ℃时,试件的应力与峰值应力之比(平均值)仍为0.772。

当温度由-10 ℃升高到0 ℃时,作为胶结材料的沥青由弹脆性向黏弹性转换^[22],试件的应力-应变曲线特征由应变软化向应变硬化转换,故-10 ℃~0 ℃为水工沥青混凝土的应力-应变曲线由应变软化向应变硬化变换的过渡温度区间。

3.2 抗压强度 抗压强度为试件应力-应变全曲线的峰值应力,试验得到了不同温度条件下水工沥青混凝土的抗压强度,如图3所示,抗压强度随温度的升高而降低。当温度为-30 ℃时,试件的抗压强度约为32.95 MPa,这与强度等级为C30的普通混凝土抗压强度标准值接近;然而,当温度为30 ℃时,抗压强度约为0.49 MPa。由此可见,温度对水工沥青混凝土的抗压强度有显著影响。

为进一步反映抗压强度在-30 ℃~30 ℃下的变化规律,引入了抗压强度温度影响因子(Tempera-

ture influence factor, TIF)。TIF_f定义为各温度条件下的抗压强度与其在 $T=273.15$ K时的比值，如下式所示：

$$TIF_f = \frac{f}{f_0} \quad (2)$$

式中： f 为任一温度条件下的抗压强度； f_0 为 273.15 K时的抗压强度。

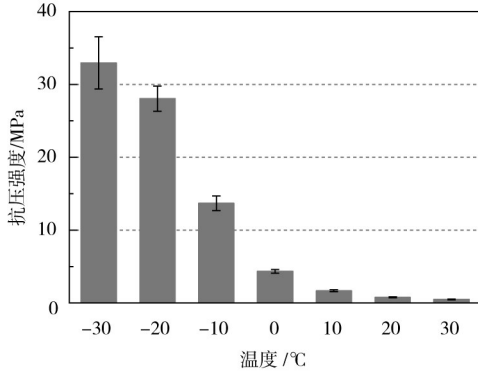


图3 不同温度条件下水工沥青混凝土抗压强度

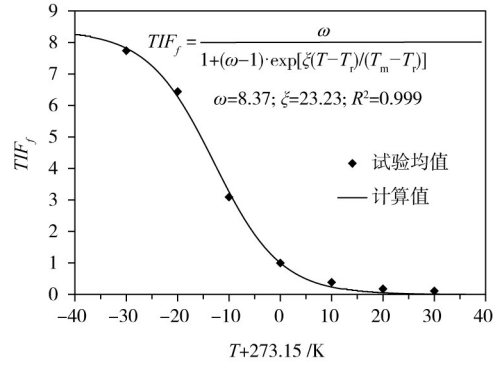


图4 不同温度条件下水工沥青混凝土抗压强度温度影响因子

计算得到-30 °C ~ 30 °C下抗压强度温度影响因子如图4所示。从图4可以看出，抗压强度温度影响因子随温度变换的规律类似于反“S”型，由 Logistic 函数形式^[23]，假设在-30 °C ~ 30 °C区间抗压强度温度影响因子随温度变化的计算公式为：

$$TIF_f = \frac{\omega}{1 + \eta \cdot \exp(\zeta T^*)} \quad (3)$$

式中： ω 、 η 和 ζ 为材料参数； T^* 为等效温度^[24]，计算公式为：

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (4)$$

式中： T_r 为参考温度，本文参考温度取 273.15 K； T_m 为材料熔点温度，本文熔点温度取 423.15 K^[25]。

当试验温度为 $T=273.15$ K时，由式(3)一式(4)可得：

$$\eta = \omega - 1 \quad (5)$$

由式(2)一式(5)可知，水工沥青混凝土的抗压强度温度影响因子在-30 °C ~ 30 °C区间变化的计算公式：

$$TIF_f = \frac{\omega}{1 + (\omega - 1) \cdot \exp\left[\frac{\zeta(T - T_r)}{(T_m - T_r)}\right]} \quad (6)$$

式(6)计算的结果如图4所示，计算结果与试验结果吻合较好，且该曲线是收敛的。当温度增加到一定值时，沥青混合料呈黏稠的流动态，几乎丧失了力学黏结强度，强度趋于 0^[22]；当试验温度降至一定值时，沥青混凝土材料强度趋于最大值。故式(6)计算结果较好地反映了水工沥青混凝土材料的抗压强度在-30 °C ~ 30 °C温度区间的变化规律。

3.3 弹性模量 选取应力-应变曲线原点与 50%峰值应力对应点之间的近似直线段，计算平均切线斜率作为弹性模量^[26]。不同温度条件下水工沥青混凝土的弹性模量如图5所示。由图5可知，弹性模量随着温度的升高而降低。当试验温度大于 10 °C时，弹性模量变化趋于平缓；当试验温度为小于 0 °C时，弹性模量变化明显。为进一步研究弹性模量在-30 °C ~ 30 °C下的变化规律，定义了弹性模量温度影响因子 TIF_E ，即各温度条件下的弹性模量与其在 $T=273.15$ K时的比值，如下式所示：

$$TIF_E = \frac{E}{E_0} \quad (7)$$

式中： E 为任一温度条件下的弹性模量； E_0 为 273.15 K时的弹性模量。

计算得到了-30 °C ~ 30 °C下弹性模量温度影响因子如图6所示。同 3.2 节的分析，弹性模量温度

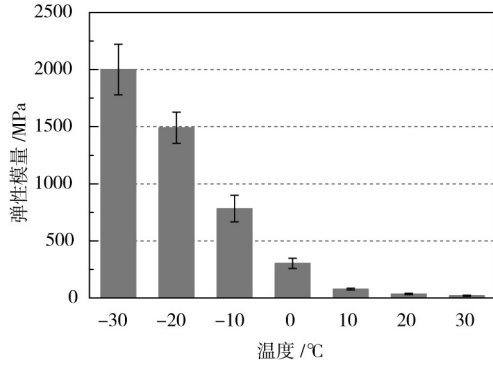


图5 不同温度条件下水工沥青混凝土弹性模量

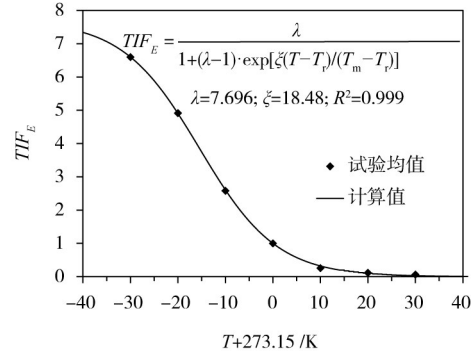


图6 不同温度条件下水工沥青混凝土弹性模量温度影响因子

影响因子在-30 °C ~ 30 °C 区间的变化规律采用下式计算：

$$TIF_E = \frac{\lambda}{1 + (\lambda - 1) \cdot \exp\left[\zeta \frac{(T - T_r)}{(T_m - T_r)}\right]} \quad (8)$$

式中 λ 、 ζ 为材料参数。

由式(8)得到的计算结果如图6所示。由图6可知，由式(8)计算的结果较好地反映了水工沥青混凝土随着温度的降低逐渐硬化或随着温度的升高逐渐软化的特点。

3.4 峰值应变 峰值应变为试件应力-应变全曲线在峰值应力处的应变，不同温度条件下水工沥青混凝土的峰值应变如图7所示。由图7可知，峰值应变有一定的离散性，但总体而言，峰值应变随温度的升高整体上呈增大趋势。试验数据表明，试件在30 °C的平均峰值应变是-30 °C的2.68倍。这是因为随着温度的升高，沥青材料的分子间距增大，导致沥青混凝土的塑性变形增大。结合图2(b)可知，当试验温度为10 °C ~ 30 °C时，试件进入弹塑性阶段后，具有较好的塑性变形能力。观察到当试验温度大于10 °C或小于-10 °C时，峰值应变 ε_f 随温度的变化趋势逐渐变缓，本文采用下式来反映峰值应变随温度变化的整体趋势：

$$\varepsilon_f = \frac{7.714}{1 + \exp\left[-5.724 \frac{(T - T_r)}{(T_m - T_r)}\right]}, \quad R^2 = 0.969 \quad (9)$$

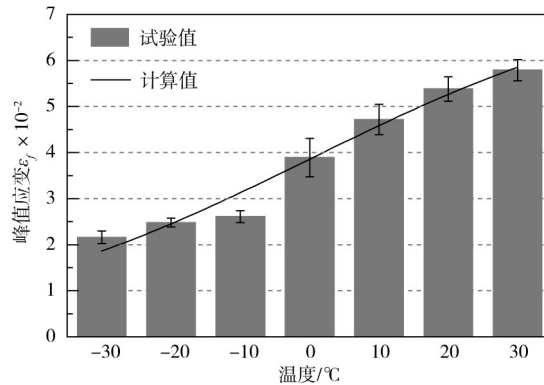


图7 不同温度条件下水工沥青混凝土峰值应变

4 破坏模式

水工沥青混凝土在-30 °C ~ 30 °C下的破坏模式如图8所示。当试验温度为-30 °C ~ 0 °C时(图8(a)~(d))，裂缝在骨料、沥青基体以及骨料和沥青胶浆的界面处扩展。随着温度的降低，试件中骨料开裂的比例逐渐增大。这是因为随着温度的降低，沥青材料的分子间距减小，分子间的结合力增大，导致沥青胶浆的强度以及骨料与沥青胶浆界面的黏附力增加。此外，沥青膜对骨料的约束进一

步增强,故出现了骨料开裂的现象。试件达到峰值应力后,骨料裂缝、界面裂缝以及沥青基体裂缝相互连通,形成了贯穿试件的斜裂缝。结合图2(a)可知,试件呈脆性破坏。当试验温度为10℃~30℃时(图8(e)~(g)),裂缝主要在骨料界面层扩展,破坏模式主要为沥青胶浆与骨料的黏结破坏。这是因为随着温度的升高,沥青材料的分子间距增大,分子间的结合力减弱,导致沥青胶浆的强度降低。此外,由于骨料和沥青胶浆在弹性模量和强度等方面存在巨大差异,沥青胶浆与骨料的界面层成为了沥青混凝土微结构中的薄弱部位。随着轴向应力的增加,观察到试件表面的裂纹线曲折不平。即使当试件承受10%的轴向压应变时,试件中也未形成贯穿裂缝。结合图2(b)和图8(e)~(g)可知,在10℃~30℃条件下,试件达到峰值应力后仍具有一定承载和变形能力,试件呈延性破坏。文献[7]在-15℃~15℃条件下得到的沥青混凝土破坏特征与本文试验结果类似。

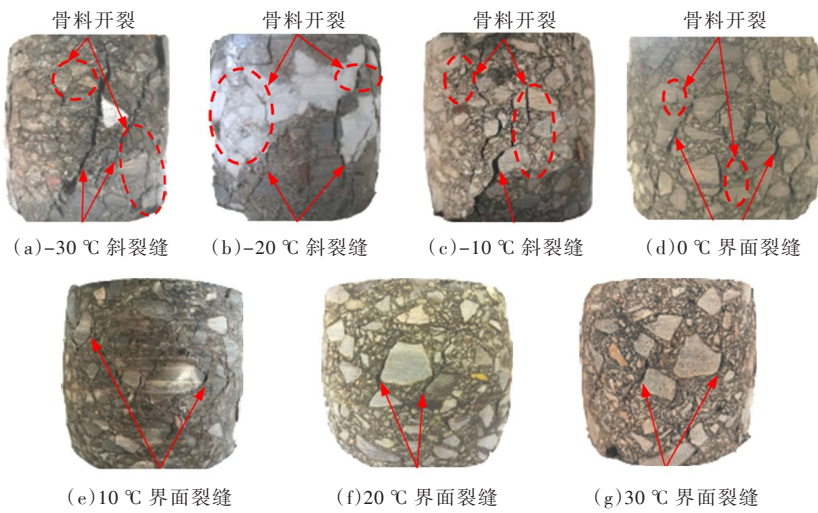


图8 不同温度条件下水工沥青混凝土的破坏模式

5 防渗性能

5.1 渗透试验结果 为研究水工沥青混凝土在不渗漏的情况下可承受的极限变形状态,对经荷载和温度作用后的试件进行变水头渗透试验研究。渗透系数按下式^[17]计算:

$$K_r = \frac{aL}{At} \ln \frac{\Delta h_1}{\Delta h_2} \quad (10)$$

式中: K_r 为温度为 T ℃时的渗透系数, cm/s; t 为渗水时间, s; a 为测压管截面面积, cm^2 ; Δh_1 为试验开始时进出水测压水管的水位差, cm; Δh_2 为试验结束时进出水测压水管的水位差, cm; A 为试件面积, cm^2 ; L 为试件高度, cm。

考虑到不同温度条件下水的动力黏性差异,将其换算为20℃时的渗透系数,计算结果如表1所示。

当试件未受荷载作用时,在0℃~30℃温度环境中,渗透系数均在 10^{-8} cm/s 量级。当试验温度为0℃,应变为 5×10^{-2} 时,渗透系数在 $10^{-7} \sim 10^{-5}$ cm/s 量级,随着变形的增大,防渗性能进一步减弱。在10℃~30℃温度环境中,试件应变为 5×10^{-2} 时,试件变形稳定,渗透系数仍在 10^{-8} cm/s 量级,防渗性能维持不变;当应变为 7×10^{-2} 时,观察到试件表面的部分骨料与沥青基质交界面有裂缝产生,而渗透系数仍在 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ cm/s 量级;当应变为 10×10^{-2} 时,试件发生了显著的膨胀变形,渗透系数在 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ cm/s 量级。

这是因为水工沥青混凝土经荷载和温度作用后的防渗性能与其微裂纹结构特征和裂缝愈合密切相关^[14,27-28]。在10℃~30℃温度环境中,由于沥青胶浆优异的延展性,导致部分裂纹在骨料界面过渡区扩展,作为连续相的沥青胶浆阻碍了裂缝在试件中的连通,进而沥青胶浆继续起到了防渗作用。此外,在荷载作用下沥青胶浆分解成小颗粒,汇集在裂缝处导致堵塞,使得部分裂缝有了一定

表1 工沥青混凝土渗透试验结果

温度/℃	应变 $\times 10^{-2}$	$\varepsilon/\varepsilon_f$	$K_{30}/(\text{cm/s})$
0	0	0	$<4.89 \times 10^{-8}$
	5.0	1.28	$7.21 \times 10^{-7} \sim 4.11 \times 10^{-5}$
	7.0	1.80	$6.54 \times 10^{-6} \sim 8.33 \times 10^{-4}$
10	0	0	$<3.68 \times 10^{-8}$
	5.0	1.06	$<1.62 \times 10^{-8}$
	7.0	1.48	$6.81 \times 10^{-7} \sim 3.76 \times 10^{-6}$
	10.0	2.12	$6.72 \times 10^{-6} \sim 4.62 \times 10^{-5}$
20	0	0	$<8.56 \times 10^{-8}$
	5.0	0.93	$<3.14 \times 10^{-8}$
	7.0	1.30	$1.56 \times 10^{-7} \sim 8.75 \times 10^{-7}$
	10.0	1.86	$2.93 \times 10^{-7} \sim 5.62 \times 10^{-5}$
30	0	0	$<7.67 \times 10^{-8}$
	5.0	0.87	$<3.68 \times 10^{-8}$
	7.0	1.21	$2.14 \times 10^{-8} \sim 6.25 \times 10^{-7}$
	10.0	1.73	$4.71 \times 10^{-7} \sim 1.69 \times 10^{-6}$

注： $\varepsilon/\varepsilon_f$ 为轴向应变分别为0、 5×10^{-2} 、 7×10^{-2} 和 10×10^{-2} 时与0~30℃条件下试件峰值应变的比值。

程度的愈合，起到了一定的防渗作用。故在10℃~30℃温度环境中，水工沥青混凝土试样经历7.0%的轴向压应变后仍具有一定的防渗能力。屈漫利等^[29]通过试验表明，当试验温度为7℃，水工沥青混凝土试件应力下降到峰值应力的75%时，轴向压应变为 $5 \times 10^{-2} \sim 5.2 \times 10^{-2}$ 时，其渗透系数为 10^{-7} cm/s量级，这与本文试验结果接近。

5.2 讨论 由3.1-3.4节分析可知，当试验温度大于10℃时，随着温度的升高，水工沥青混凝土的抗压强度逐渐降低。然而试件达到抗压强度后，仍具有一定的塑性变形能力，故工程中常以应变达到某一量值作为失效判据。然而试件经受一定程度的变形后，试样内部可能由于荷载作用而产生裂缝从而导致防渗失效^[30]，所以，以应变达到某一量值作为沥青混凝土的破坏标准还应同时考虑其防渗性能。文献[31]通过大量的现场监测数据表明，土石坝沥青混凝土防渗体上下游面的垂直压缩应变均小于 4×10^{-2} 。结合本文渗透试验结果可知，在10℃~30℃温度环境中，沥青混凝土试样经受 $5 \times 10^2 \sim 7 \times 10^2$ 的轴向压应变后，其渗透系数在 $10^{-8} \sim 10^{-6}$ cm/s量级。这进一步表明了沥青混凝土材料作为土石坝防渗体的优异性和可靠性。

此外，水工沥青混凝土经荷载和温度作用后的防渗性能还与原材料性能、级配等因素有关。在后续研究中，课题组将对不同变形程度的沥青混凝土试样进行CT扫描和荧光显微结构观测，研究其内部裂隙变化特征，从微观层次上确定孔隙变化以及变形失效标准。

6 结论

本文在-30℃~30℃温度环境中对水工沥青混凝土试件进行了抗压试验，并在力学试验基础之上，进一步研究了经荷载和温度作用后的防渗性能，得到了以下结论：(1)水工沥青混凝土的应力-应变全曲线特征受温度影响显著，当试验温度为-30℃~-10℃时，应力-应变曲线呈现应力软化的特点；当试验温度为0℃~30℃时，应力-应变曲线呈现应变硬化的特点；可推断-10℃~0℃为其应力-应变全曲线特性变化的临界温度区间。(2)水工沥青混凝土的抗压强度和弹性模量随温度的升高而降低，峰值应变随温度的升高而增大。基于试验分析，本文提出的公式较好地反映了其抗压强度、弹性模量及峰值应变随温度变化的规律。(3)温度对水工沥青混凝土的破坏模式有显著影响，当试验温度为-30℃~0℃时，沥青混凝土的破坏模式主要为骨料开裂和沥青胶浆与骨料的黏结破坏，骨料开裂比例随着温度的降低而增加；当试验温度为10℃~30℃时，裂缝在骨料和沥青胶浆界面处

扩展,破坏模式主要为黏结破坏。(4)沥青混凝土经荷载作用后的防渗性能与温度环境有关。在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度环境中,沥青混凝土承受 7×10^{-2} 的轴向应变后,试件骨料与沥青基质界面层有部分裂缝产生,但其渗透系数仍在 $10^{-7}\sim 10^{-6}\text{ cm/s}$ 量级,防渗性能良好。

参 考 文 献:

- [1] 郝巨涛.国内沥青混凝土防渗技术发展中的重要问题[J].水利学报,2008,39(10):1213-1219.
- [2] WANG Weibiao, HÖEG K. Simplified material model for analysis of asphalt core in embankment dams[J]. Construction and Building Materials, 2016, 124: 199-207.
- [3] 王为标,孙振天,吴利言.沥青混凝土应力-应变特性研究[J].水利学报,1996(5):1-8.
- [4] WANG Weibiao. Research on the suitability of asphalt concrete as water barrier in dams and dikes[D]. University of Oslo, Norway, 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(S1):27-33.
- [6] 陈宇,姜彤,黄志全,等.温度对沥青混凝土力学特性的影响[J].岩土力学,2010,31(7):92-96.
- [7] 田小草,韩海峰,李新伟.不同加载模式下沥青混凝土的断裂特性[J].建筑材料学报,2016,19(4):758-761.
- [8] AKHTARPOUR A, KHODAII A. Experimental study of asphaltic concrete dynamic properties as an impervious core in embankment dams[J]. Construction and Building Materials, 2013, 41: 319-334.
- [9] FEIZI-KHANKANDI S, MIRGHASEMI A A, GHALANDARZADEH A, et al. Cyclic triaxial tests on asphalt concrete as a water barrier for embankment dams[J]. Soils and Foundations, 2008, 48(3): 319-332.
- [10] 郝巨涛,刘增宏,汪正兴.我国沥青混凝土防渗工程技术的发展与展望[J].水利学报,2018,49(9):1137-1147.
- [11] 余华英,韩守都.配合比参数对水工沥青混凝土防渗性能影响的试验研究[J].水资源与水工程学报,2010,21(5):145-148.
- [12] VARDANEGA P J. State of the art: permeability of asphalt concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(1): 54-64.
- [13] WANG Weibiao, HÖEG K. Cyclic behavior of asphalt concrete used as impervious core in embankment dams [J]. Journal of Geo-technical and Geo-environmental Engineering, 2011, 137(5): 536-544.
- [14] ZHANG Yingbo, HÖEG K, WANG Weibiao, et al. Watertightness, cracking resistance, and self-healing of asphalt concrete used as a water barrier in dams[J]. Canadian Geo-technical Journal, 2013, 50(3): 275-287.
- [15] WANG Weibiao, HÖEG K. Method of compaction has significant effects on effects on stress-strain behavior of hydraulic asphalt concrete[J]. Journal of Testing and Evaluation (ASTM), 2009, 37(3): 264-274.
- [16] 丁朴荣.水工沥青混凝土材料选择与配合比设计[M].北京:水利电力出版社,1990.
- [17] 水工沥青混凝土试验规程:DL/T 5362-2006[S].北京:中华人民共和国国家发展改革委员会,2006.
- [18] ZHANG Qianbing, ZHAO Jian. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(4): 1411-1478.
- [19] LU Dechun, WANG Guosheng, DU Xiuli, et al. A nonlinear dynamic uniaxial strength criterion that considers the ultimate dynamic strength of concrete[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 103:124-137.
- [20] LIU Yongliang, KONG Xiangming, ZHANG Yanrong, et al. Static and dynamic mechanical properties of cement-asphalt composites[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(10): 1489-1497.
- [21] 张帆,周伟敏.材料性能学[M].上海:上海交通大学出版社,2009.
- [22] 张怀生.水工沥青混凝土[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [23] SCOTT M. Applied Logistic Regression Analysis[M]. London: Sage Publication, Inc, 2001.
- [24] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive mode and data for metals subjected to large strains, high strain rate and high temperature [C]//Proceedings of 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, the Netherlands, 1983.
- [25] WANG Weibiao, FENG Shan, ZHANG Yingbo. Investigation of interface between asphalt core and gravel transition zone in embankment dams[J]. Construction Building Material, 2018, 185: 148-155.

- [26] BRADY B H G, BROWN E T. Rock Mechanics for Underground Mining, Third Edition[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006.
- [27] 钱鹏, 李曙光, 徐千军. 混凝土浇筑层面的渗透特性与微裂纹结构特征[J]. 水利学报, 2018, 49(8): 1007-1016.
- [28] 王立成, 武少赞. 混凝土劈拉开裂和裂缝自愈机理[J]. 水利学报, 2019, 50(7): 787-797.
- [29] 屈漫利, 王为标, 蔡新合. 冶勒水电站沥青混凝土心墙防渗性能的试验研究[J]. 水力发电学报, 2004, 23(6): 80-82.
- [30] 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.
- [31] 冯娜. 高土石坝沥青混凝土心墙接触面变形机理及关键部位抗震性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.

Experimental study on compressive properties and impermeability of hydraulic asphalt concrete under different temperatures

NING Zhiyuan, LIU Yunhe, WANG Weibiao, ZHANG Kai

(State Key Laboratory of Eco-hydraulic in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to study the compressive properties of hydraulic asphalt concrete under different temperatures and the impermeability after loading, the axial compressive test was carried out at $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the permeation test was conducted on the specimens subjected to the combined action of temperature and loading. The test results show that the temperature has significant influence on the stress-strain curve, compressive strength, elastic modulus, critical strain and failure modes. By comparing the stress-strain curve characteristics of hydraulic asphalt concrete at $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, it can be inferred that $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ is the critical transition temperature range. Compressive strength and elastic modulus decrease with the increase of temperature, while the critical strain increases. Based on the test results, the empirical formulas proposed in this paper better reflect the variation trends of compressive strength, elastic modulus and critical strain varying with the temperature. In addition, the failure at a temperature range of $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ is mainly in binder failure and trans-aggregate failure modes, whereas that at a range of $10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ is mainly in binder failure mode. Moreover, the impermeability of hydraulic asphalt concrete after the loading is related to the temperature ambient. When the specimens are subjected to 7% axial compressive strain at a temperature range of $10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, its permeability coefficient is still in the order of $10^{-7}\text{ cm/s} \sim 10^{-6}\text{ cm/s}$, showing its good impermeability.

Keywords: hydraulic asphalt concrete; mechanical properties; temperature effect; impermeability; failure modes

(责任编辑: 王冰伟)