

高温气候下沥青混凝土心墙连续碾压施工 结合面温控试验研究

开鑫, 刘亮, 杨海华

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 在夏季高温气候沥青混凝土心墙连续多层施工时,为减少等待结合面温度降至规范要求上限值 90℃ 的时间,通过室内试验模拟结合面温度提高后心墙连续两层铺筑的情况,分别研究了结合面温度在 90℃、100℃、110℃ 情况下沥青混凝土的压实性和变形情况,并进行了现场试验论证。室内试验结果表明:心墙沥青混凝土结合面温度降至 100℃ 时,上层沥青混凝土的孔隙率为 2.88%,下层沥青混凝土的最大侧向应变值为 2.78%;结合面温度为 110℃ 时,上层沥青混凝土的孔隙率为 3.85%,下层沥青混凝土的最大侧向应变值为 4.00%。现场试验结果表明:结合面温度为 100℃ 时的上层沥青混凝土孔隙率和渗透系数均满足规范要求。因此,沥青混凝土心墙连续多层碾压时,结合面温度提高至 100℃ 的施工质量可以得到保证。

关键词: 碾压式沥青混凝土心墙;施工层间结合面;高温;侧向变形;压实性能;孔隙率;应力应变

中图分类号:TV431.5

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)01-0194-06

Temperature control of joint surface of asphalt concrete core wall under the condition of continuous construction at high temperature climate

KAI Xin, LIU Liang, YANG Haihua

(College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: In situations of continuous multi-layer construction of the asphalt concrete core wall at high temperature climate of summer, it is required to wait for the joint surface temperature to reduce to the upper limit of 90℃ according to the specification. In order to shorten the waiting time, indoor tests were conducted to simulate the scenario of paving two consecutive layers of the core wall with increased joint surface temperature. we studied the compaction and deformation of asphalt concrete with the joint surface temperature of 90℃, 100℃ and 110℃ and verified the results with in-situ tests. The results showed that when the binding surface temperature of the core wall asphalt concrete reduced to 100℃, the porosity rate of the upper asphalt concrete was 2.88%, and the maximum lateral strain of the lower asphalt concrete was 2.78%. Whereas the porosity rate of the upper asphalt concrete was 3.85% and the maximum lateral strain of the lower asphalt concrete was 4.0% when the joint surface temperature was 110℃. The in-situ field results indicate that the porosity rate and permeability coefficient of the upper asphalt concrete at the joint surface temperature of 100℃ can meet the specification requirements. Therefore, when multi-layers of the asphalt concrete core wall are being compacted continuously with increased joint surface temperature of 100℃, the construction quality can be guaranteed.

Key words: roller compacted asphalt concrete core wall; joint surface between construction layers; high temperature; lateral deformation; compaction performance; porosity rate; stress – strain

收稿日期:2019-04-07; 修回日期:2019-09-29

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2017D01A42)

作者简介:开鑫(1994-),男,新疆五家渠人,在读硕士研究生,研究方向为水利水电工程。

通讯作者:刘亮(1978-),男,河南遂平人,在读博士研究生,讲师,硕士生导师,研究方向为水利水电工程。

1 研究背景

碾压式沥青混凝土心墙是沿坝轴线不分段分层摊铺碾压,在心墙中会形成较多不连续的结合层面^[1-2]。在新疆石门水电站、大河沿水库、阿拉沟水库等工程中,面临结合面温度较高时连续施工的难题。心墙沥青混凝土连续两层碾压时,下层沥青混凝土降温缓慢,达到规范规定的结合面温度上限值 90℃ 需较长时间(4~6 h)^[3];并且在坝轴线短的情况下^[3],每日施工层数受到限制。在不影响施工质量的前提下,适当将下层沥青混凝土结合面温度的上限值提高,加快施工进度显得尤为重要。

近年,针对心墙沥青混凝土施工结合面温度的研究主要关注于温度下限值,如:对于沥青混凝土心墙冬季温控的研究^[5-8];万连宾^[9]和何建新等^[10]均采用降低温度下限值的方法。结合面温度上限的研究仅限于早期四川冶勒水电站沥青混凝土心墙连续施工工艺^[11-12],试验采取不同的施工工艺在结合面温度为 90℃ 进行碾压。结果表明:过渡料的约束对心墙沥青混凝土的压实性能有明显影响,采取先对过渡料进行初碾压后进行沥青混合料碾压的施工工艺,心墙沥青混凝土的压实性得到保证;并在大坝上进行结合面温度不大于 90℃ 每日连续铺筑 2 至 3 层获得成功,但对结合面温度高于 90℃ 后心墙连续碾压未进行深入探索。

由于沥青混凝土在不同温度下表现出不同的力学特性,0℃ 以下时为弹脆性,高于 0℃ 时为黏弹性^[13],随着温度的升高沥青的粘性降低,沥青混凝土的承载能力也随之降低^[14]。故连续两层铺筑沥青混凝土心墙时,提高结合面温度后,下层沥青混凝土会出现较大的变形,上层沥青混合料碾压过程中机振力被消耗导致碾压不密实。为此本文基于结合面初始温度高于 90℃ 时,研究上层沥青混合料的压实性能和下层沥青混凝土的侧胀变形,为解决结合面温度提高后造成工程质量下降的问题。根据一些研究人员关于粗颗粒室内模型试验的研究^[15-16],通过室内和现场相结合的方法,室内模拟心墙碾压过程中过渡料和沥青混凝土的相互关系,研究了结合面温度对心墙沥青混凝土孔隙率和侧胀变形的影响,现场试验验证室内试验的可靠性。研究可为同类工程中沥青混凝土心墙施工结合面温控提供参考,同时可以降低能耗,增加有效施工天数,使工程提前完工并发挥经济和社会效益。

2 试验材料与方法

2.1 沥青混凝土材料的确定

沥青采用中国石油克拉玛依石化生产的 70 号(A)道路石油沥青。沥青是一种温度敏感性材料,不同的温度下沥青的状态差异较大。沥青的软化点实测结果为 49.5℃,随着温度的升高,沥青开始由固态变为流态。当温度高于 90℃ 时,沥青的黏性逐渐降低,随之沥青混凝土的稳定性减小。

沥青混凝土的骨料及填料均是由工程现场机械破碎、磨粉后制得,实验室对矿料采取二次人工筛分的方法,剔除超径减少试验误差。最终通过对材料的各项指标进行检测,均满足规范要求。

2.2 过渡料的确定

过渡料作为坝壳料与心墙之间的连接,起到保护心墙的作用。根据《土工试验规程 SL237-1999》^[17]骨料最大粒径应为试样直径的 1/3~1/5。本文模型试验中,过渡料试模的最小直径为 75 mm,因而最大粒径定为 20 mm。砂砾料级配曲线如图 1 所示。本试验采用的骨料级配偏细,10~20 mm 粒组占 11.86%,5~10 mm 粒组占 19.81%,5 mm 以下的粒组占 68.33%。

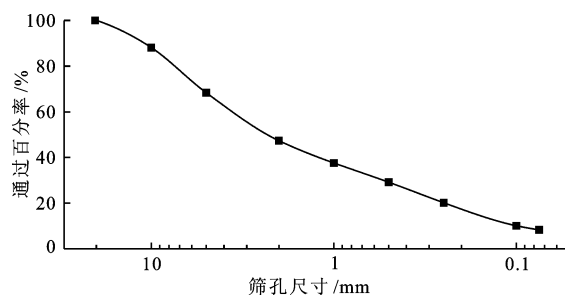


图 1 试验砂砾料级配曲线

为确定过渡料的压实标准,根据《土工试验规程 SL237-1999》^[17]粗颗粒相对密度试验,采用上述级配,得到骨料的相对密度如表 1。过渡料填筑的设计标准为相对密度 $D_r \geq 0.85$,本试验填筑指标以相对密度的下限值 0.85 控制。

表 1 试验过渡料砂砾骨料相对密度

最小干密度 $\rho_{d \min}$ /(g·cm ⁻³)	最大干密度 $\rho_{d \max}$ /(g·cm ⁻³)	天然干密度 ρ_{d0} /(g·cm ⁻³)	相对密度 D_r
1.76	2.25	2.16	0.85

2.3 设计配合比

试验配合比是通过正交试验优选得到。影响沥青混凝土配合比的因素包括:矿料级配指数、填料用量和油石比(即沥青用量),每个因素取3个水平。以密度、孔隙率、劈裂抗拉强度、稳定性和流值等为考核指标,最终通过极差方差分析优选出沥青混凝土配合比,如表2。

表2 试验沥青混凝土质量配合比

材料种类	粒径/mm	质量百分比/%
砂砾骨料	9.5~19.0	27
	4.75~9.50	16
	2.36~4.75	10
	0.075~2.36	34
	<0.075	13
沥青		6.5

2.4 试验方案设计

本文为研究心墙沥青混凝土结合面温度在高温情况下连续碾压,室内模拟心墙连续碾压的过程。上层以刚性约束成型,下层采用成型的沥青混凝土试件,试验模型如图2所示。最外层方形模具为250 mm×250 mm×250 mm的钢膜,内部钢膜采用标准沥青混凝土压缩试验圆柱形模具101 mm×101 mm。

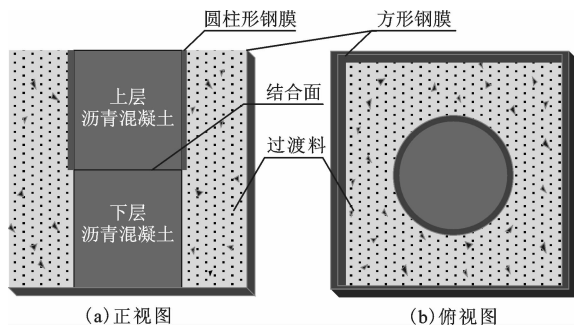


图2 试验模型图

根据试验规程^[18],采用表2配合比制备沥青混凝土压缩试验试件。并对成型试件的尺寸、密度和孔隙率进行测量。下层试件放入方形模具的中心,周围填入过渡料击实,压实标准由密度控制。再将钢膜放入试件上部,过渡料采用同一压实标准填入钢膜周围压实。本试验设置3组温度90℃、100℃、110℃,每组温度下做2个平行试验。为了保证下层沥青混凝土达到设计温度,将模具放入电热恒温鼓风干燥箱内恒温12 h。采用同种配比制备沥青混合料,将模具取出后测量下层沥青混凝土的实测温度,

混合料放入试模击实成型试件。上层沥青混凝土试件成型后置于常温下恒温24 h,待降至室温脱模测定其密度、孔隙率。试件置于环境温度为5℃的条件下不少于4 h,根据试验规程在自动控温万能试验机(UTM-5105型)上进行单轴压缩试验。下层沥青混凝土试件清除表面过渡料量测其上、下两部分的尺寸。

3 试验结果分析

3.1 下层沥青混凝土的侧胀变形

根据所设计的试验方案,测定出在不同结合面温度下击实前后下层沥青混凝土侧胀的情况,试验结果见表3。

表3 不同结合面温度下层沥青混凝土轴向应变及上、下层沥青混凝土侧胀情况

结合面温度/℃	项目	高度/cm	轴向应变/%	直径(下)/cm	侧向应变/%	直径(上)/cm	侧向应变/%
90	击实前	9.947	0.281	10.113	1.434	10.139	2.535
	击实后	9.919		10.258		10.396	
100	击实前	9.918	0.555	10.107	1.465	10.140	2.781
	击实后	9.863		10.245		10.422	
110	击实前	9.950	1.508	10.163	1.860	10.123	3.996
	击实后	9.800		10.352		10.528	

由表3可知。试件温度为90℃时,下层沥青混凝土的轴向应变为0.281%,与100℃相近;当温度到达110℃时,试件的轴向应变增大到1.508%,大于前两种温度的变化梯度。从试件直径的侧胀情况也可看出,上层试件温度为90℃和100℃的侧向应变基本相同,应变值均小于3%,110℃的侧向应变到达4%。击实后,试件的高度减小,直径增大,随着温度的升高其轴向应变也在不断增大。试件的上部直径侧向应变比下部直径侧向应变略大,说明下层沥青混凝土的形状呈现出倒梯形(下小上大),这种现象称之为“松塔效应”^[19]。最小侧向应变出现在试件下部,最大侧向应变为试件上部。并且从侧向应变的变化梯度来看,试件的上部直径明显高于下部直径。

沥青作为粘结骨料之间的一种介质,其状态影响着沥青混凝土的力学性能。温度高于沥青的软化点时,沥青的黏聚性下降,沥青混凝土由黏弹性向弹塑性转变,变形能力逐渐增强。并且过渡料对下层沥青混凝土的约束能力有限,沥青混凝土在受到竖向荷载时,会产生一定的侧胀变形。

3.2 上层沥青混凝土的压实性能

试验针对结合面温度在高于规范中规定的 90℃ 时成型试件,进行单轴压缩试验,为得到沥青混

凝土的孔隙率和抗压强度。试件制备过程中,结合面温度设置为 90℃、100℃、110℃。击实成型的上层沥青混凝土单轴压缩试验试件见图 3。

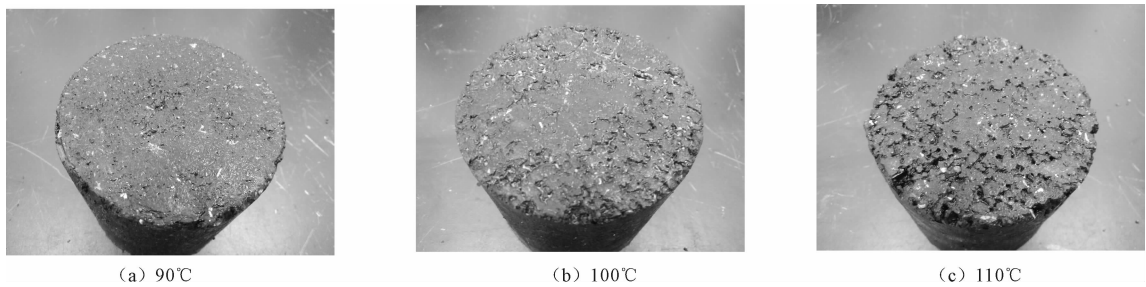


图 3 不同结合面温度下上层沥青混凝土试件

由图 3 可看出,在击实功相同的条件下,结合面温度 90℃ 的试件开口空隙较少,100℃ 和 110℃ 则较多。结合面温度高于 90℃ 的上层沥青混凝土试件,随着温度的升高,试件的孔隙率在不断增大,击实效果在逐渐降低。

孔隙率为评价沥青混凝土压实性能的重要指标之一。试验规程中规定孔隙率小于 3% 的试件适用排水置换法,大于 3% 的试件采用蜡封排水置换法。为准确测定沥青混凝土的孔隙率,本试验结合面温度 90℃ 的试件采用排水置换法,结合面温度 100℃ 采用蜡封排水置换法和排水置换法,结合面温度 110℃ 采用蜡封排水置换法。沥青混凝土孔隙率和单轴压缩试验结果见表 4。

表 4 上层沥青混凝土单轴压缩试验结果

试件 编号	结合 面温 度/℃	密度/ (g · cm ⁻³)	孔隙 率/%	最大抗 压强 度 $\sigma_{\max}$ /MPa	受压变 形模量 E /MPa
YS-11	89.8	2.416	1.15	2.21	58.94
YS-12	90.5	2.421	0.94	2.25	59.76
均值	90.1	2.419	1.04	2.23	59.35
YS-21	101.2	2.372	2.95	2.09	55.29
YS-22	100.5	2.375	2.82	2.16	56.37
均值	100.8	2.379	2.88	2.13	55.83
YS-31	109.5	2.352	3.76	1.85	45.58
YS-32	110.2	2.348	3.93	1.95	47.31
均值	109.8	2.350	3.85	1.90	46.45

由表 4 知,结合面温度 90℃ 时,试件的孔隙率均值为 1.04%,其满足施工规范要求的小于 3%;当温度为 100℃,孔隙率增加明显,但仍满足规范要求;110℃ 试件的孔隙率为 3.85%,偏出规范要求值

较多。造成这样的结果是由于击实上层沥青混凝土时,下层沥青混凝土的温度高、承载能力低,在外力作用下展现出一定的流动性。上层料如在软基础下进行碾压,一部分的击实功被下层沥青混凝土吸收,击实效果减弱。因上层沥青混凝土未被压实,随着温度的升高,其最大抗压强度逐渐减小。因此,当连续两层摊铺心墙沥青混凝土时,结合面温度可控制在 100℃ 以下,压实性能可以得到保证。

3.3 压缩应力应变特征

试验中结合面温度分别以 90℃、100℃、110℃ 为基础击实上层沥青混合料。为评价上层沥青混凝土压实性能,对其进行单轴压缩试验,测定试件的抗压强度及变形模量。计算方法参考《水工沥青混凝土试验规程 DL/T5362-2006》:

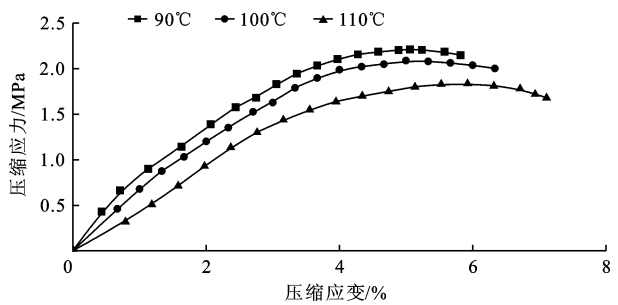


图 4 不同结合面温度下击实上层沥青混凝土试件的单轴压缩试验应力-应变曲线

根据单轴压缩试验结果得到上层沥青混凝土试件的应力-应变曲线如图 4 所示。由图 4 可看出,上层沥青混凝土的压缩应力-应变曲线基本呈两种趋势,前期为线性增长趋势,后逐渐向抛物线趋势转变。随着应变的增大,应力增长梯度逐渐变小。并且随着结合面温度的升高,沥青混凝土应力-应变曲线的峰值降低,应变增大。说明孔隙大的沥青混

凝土承载力低,故应力-应变曲线的峰值较小。结合面温度为 90℃ 和 100℃ 的沥青混凝土应力-应变曲线前期线性增长为直线,结合面温度为 110℃ 的沥青混凝土应力-应变曲线前期直线段斜率在逐渐变化,随着应变的增大,斜率逐渐由小变大。这是由于不同结合面温度的沥青混凝土孔隙率不同,应力施加后,孔隙大的试件内部首先孔隙被压缩,故其应力-应变曲线前期斜率在不断变化。

4 现场试验验证

4.1 现场试验结果

现场试验场地位于阿拉沟水库枢纽工程,阿拉沟水库位于新疆维吾尔自治区托克逊县,大坝为碾压式沥青混凝土心墙坝,坝高为 105.3 m。此工程地理位置特殊,夏季高温炎热、冬季寒冷干燥。在施工当中遇到冬季施工和夏季施工的问题,工程现已竣工,运行良好。

本试验为解决夏季高温气候下心墙沥青混凝土结合面温度较高时连续施工的问题,减少施工等待时间。根据室内试验结果,当下层沥青混凝土温度为 100℃ 时碾压上层沥青混合料,上层沥青混凝土的压实性能可以得到保证,结合面温度基于 100℃ 进行现场试验。现场碾压试验中,下层沥青混凝土的初碾温度定为施工规范规定的下限值 130℃。下层沥青混凝土碾压完成后,在结合面下 5 cm 处埋设电阻式温度计,待到结合面温度为 100℃,环境温度为 40℃ 左右,摊铺上层沥青混合料进行碾压。碾压结束后钻心取样测定其密度、孔隙率、渗透系数。试验结果见表 5。

表 5 结合面温度 100℃ 的现场试验结果

试验区	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙 率/%	稳定 度/kN	流值/ 0.1mm	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
G-1	2.387	1.9	8.66	65.3	3.6×10^{-9}
G-2	2.385	2.0	7.34	77.9	6.2×10^{-9}
G-3	2.393	1.7	9.32	53.7	2.8×10^{-9}

经现场碾压试验验证,碾压式沥青混凝土心墙结合面温度 100℃ 时,连续碾压两层心墙沥青混凝土,现场检测满足设计指标要求,沥青混凝土的孔隙率小于 3%,渗透系数满足小于 $1 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ 的要求。

4.2 讨论

由现场试验结果可看出,结合面温度从 90℃ 提升到 100℃ 后,心墙沥青混凝土的各项指标均满足

规范要求,试验结果的孔隙率小于 2%,距规范要求的阈值差距较远,其安全可靠度高、风险低。并且在沥青混凝土心墙施工过程中合理的施工管控也起到了关键作用。

在施工工艺上经过现场试验得出以下几点要求:(1)由于沥青混凝土温度较高时碾压上层沥青混凝土,重碾碾压时会出现陷碾的情况。为此可提高铺筑层厚度,选取上限值每层摊铺 30cm,并增加碾压遍数。(2)环境温度较高时,沥青混凝土散热慢,第 1 层碾压完成后还需等待较长时间结合面温度才能降至 100℃。为减少等待时间,现场初碾温度可选取规范下限值 130℃,在终碾完成后结合面温度基本为 110℃。(3)在碾压工艺上借鉴冷勒心墙沥青混凝土的方法,根据现场碾压机械的不同,本试验采取过渡料静碾 2 遍→沥青混合料静碾 2 遍+动碾 8 遍→过渡料动碾 8 遍的方法。

本试验结果解决了心墙沥青混凝土结合面温度较高情况下连续两层碾压,加快了施工进度。据现场施工结果可知,在温度提高后无需等待心墙沥青混凝土降温 4~6 h。在昼夜施工的前提下,沥青混凝土心墙铺筑可达到每天 2 层至 3 层铺筑。有效减少了施工过程中的空档期,大大提高了施工速率,为工程提前竣工提供了有效的帮助。

5 结论

(1)结合面温度为心墙沥青混凝土碾压过程中的重要影响因素,随着结合面温度的升高,上层沥青混凝土的压实性降低。

(2)心墙沥青混凝土进行连续两层碾压,结合面温度为 100℃ 时,上层沥青混凝土的孔隙率均值为 2.88%,满足规范要求的不大于 3%。

(3)结合面温度控制在 100℃ 以下,碾压上层沥青混凝土时,下层沥青混凝土的最大侧向应变为 2.78%,其变形后出现“松塔效应”。

(4)通过现场试验验证,在夏季高温气候下结合面温度为 100℃ 时,连续碾压两层心墙沥青混凝土,沥青混凝土的密度、孔隙率、渗透系数均满足规范要求,沥青混凝土的压实性能可以得到保证。

参考文献:

- [1] 何建新,杨武,柴龙胜,等. 沥青心墙与混凝土基座连接材料研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(5):219-222+231.
- [2] 李江,柳莹,何建新. 新疆碾压式沥青混凝土心墙坝筑坝

- 技术进展[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(1): 82-89.
- [3] 中华人民共和国水利部. 水工沥青混凝土施工规范: SL514-2013[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [4] 熊焰, 刘永红, 鄢双红. 沥青混凝土心墙土石坝工程[J]. 岩土力学与工程学报, 2001(S1): 1917-1919.
- [5] 朱西超, 何建新, 杨海华. 心墙结合面温度对碾压式沥青混凝土强度影响[J]. 中国农村水利水电, 2014(8): 138-141.
- [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+20.
- [7] 朱西超, 何建新, 凤炜, 等. 上层恒温下层变温浇筑时碾压沥青混凝土心墙结合面劈裂抗拉试验研究[J]. 水电能源科学, 2014, 32(6): 77-80.
- [8] 王怀义, 万连宾, 杨桂权, 等. 碾压沥青混凝土结合面剪切性能试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(2): 57-60.
- [9] 万连宾, 裴成元, 杨合刚. 常规温度条件下沥青混凝土心墙层间结合质量研究[J]. 水利水电技术, 2011, 42(11): 62-64+68.
- [10] 何建新, 伦聚斌, 杨武. 碾压式沥青混凝土心墙越冬层面结合工艺研究[J]. 水利水电技术, 2016, 47(11): 48-51.
- [11] 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): 2192-2196.
- [12] 何仲辉, 张应波, 王成祥, 等. 冶勒水电站沥青混凝土心墙施工新工艺研究[J]. 水力发电, 2004, 30(11): 27-29.
- [13] 张应波, 何仲辉. 冶勒水电站大坝沥青混凝土心墙质量控制与管理[J]. 水力发电, 2004, 30(11): 32-34.
- [14] 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.
- [15] 左永振, 张伟, 潘家军, 等. 粗粒料级配缩尺方法对其最大干密度的影响研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S1): 417-422.
- [16] 傅华, 韩华强, 凌华. 堆石料级配缩尺方法对其室内试验结果的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2645-2649.
- [17] 中华人民共和国水利部. 土工试验规程: SL237-1999[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [18] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水工沥青混凝土试验规程: DL/T5362-2006[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [19] 邓建伟, 凤炜, 何建新. 沥青混凝土心墙坝水力劈裂发生机理及分析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(5): 46-50.

