

文章编号: 2097-096X(2026)03-0285-08

碾压式沥青混凝土心墙动力特性试验研究

高磊¹, 张延亿², 李泽发¹, 邓刚², 陈含², 李增军¹

(1. 新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环与水安全全国重点实验室, 北京 100038)

摘要: 为掌握依托工程沥青混凝土心墙动力特性指标, 开展了设定温度、以固结比及围压为应力组合条件下的沥青混凝土动三轴试验, 采用等效线性模型整理了沥青混凝土最大动模量、阻尼比和模量系数, 分析了各指标的变化规律和影响因素。试验结果表明: 最大动模量随着围压及固结比的增大而增大, 阻尼比随着围压及固结比的增大而减小, 模量系数 K 随着固结比的增大而增大, 指数 n 随着固结比的增大而减小。此外建立了 G_d/G_{dmax} 与 γ_d/γ_r 的归一经验公式, 可为类似工程的应用提供参考。

关键词: 沥青混凝土; 动力特性; 动三轴试验; 动模量; 阻尼比

中图分类号: TV431⁺.5

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20240253

1 研究背景

碾压式沥青混凝土心墙坝以其卓越的防渗性能和对基础变形的强适应能力而著称^[1]。多年来, 新疆地区沥青心墙土石坝的建设已取得显著成就^[2], 构建数量高达百余座, 其中众多建筑物位于强震区^[3], 如已建成的大石门水库、石门水电站、五一水库、吉尔格勒德水库等, 因此, 为了进一步掌握碾压式沥青混凝土心墙的抗震性能, 研究其动力特性是十分必要的。

根据目前已有的研究成果, 沥青混凝土心墙动力特性研究取得了一定进展, 如韩小柠等^[4-5]、孙龙^[6]及初伟^[7]采用克拉玛依70号沥青, 谭凡等^[8-9]采用室温对沥青混凝土开展了不同试验温度(4℃~25.4℃)条件下动三轴试验, 试验结果表明, 沥青混凝土动模量随温度降低而增大, 阻尼比随温度降低而减小; 晋晓海^[10]、余梁蜀等^[11]采用克拉玛依70号沥青开展了不同油石比(6.3%~7.2%)条件下沥青混凝土的动三轴试验研究, 研究结果表明, 油石比的增大对沥青混凝土抵抗动荷载的能力有所提高; 许光远等^[12]通过不同试验条件下的沥青混凝土动三轴试验, 探讨了沥青混凝土的动强度特性; 钟林^[13]针对动扭剪试验研究, 探讨了不同条件下沥青混凝土动力性能的变化规律; 龚涛^[14]通过开展大量残余变形试验, 提出了适用于水工沥青混凝土的残余变形模型; 李炎隆等^[15]构建了一种沥青混凝土心墙堆石坝地震可靠性分析模型, 并证实了该模型的实用性。

已有研究从多种角度对沥青混凝土动力特性展开研究, 但对于新疆地区特殊的气候和地质条件下, 碾压式沥青混凝土心墙坝的动力特性研究尚不够深入且对于影响沥青混凝土动力特性的关键因素缺乏全面深入的理解。本文依托新疆某水利工程, 选用克拉玛依90号沥青进行沥青混凝土配比设计, 以工程区平均温度(4.8℃)作为试验温度, 采用围压力和固结比试验应力工况组合, 开展沥青混凝土动三轴试验, 研究沥青混凝土心墙材料的动力特性指标。本项工作可为该工程的大坝地震易损性分析^[16]、抗震安全评价^[17]、地震动力响应分析^[18]及抗震设计^[19]等动力学计算提供参数支撑, 研究获得的沥青混凝土参数指标变化规律和影响因素分析也可为水工沥青混凝土材料的类似研究提供借鉴。

收稿日期: 2024-12-16; 网络首发时间: 2025-04-24

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/10.1788.TV.20250424.1130.001>

作者简介: 高磊(1989—), 高级工程师, 主要从事岩土混凝土类试验研究。E-mail: 576498443@qq.com

通信作者: 张延亿(1979—), 博士, 正高级工程师, 主要从事岩土工程试验研究。E-mail: zhangyanyi@iwhr.com

2 试验简介

2.1 工程概况 新疆某水利工程为Ⅱ等大(2)型工程。工程由碾压式沥青混凝土心墙土石坝、表孔溢洪洞、深孔泄洪洞、发电引水系统、厂房等建筑物组成。永久性主要建筑物大坝为沥青混凝土心墙坝，坝高 94 m。年平均气温为 4.8℃。坝址区左岸基岩为强蚀变闪长玢岩，呈块状~次块状结构，为坚硬岩，岩体透水率 $q \leq 3$ Lu 埋深约 105 m。右岸基岩主要为绢云千枚岩，呈中厚层~薄层状结构，产状为 NW65°∠70°，为中硬岩。透水率 $q \leq 3$ Lu 埋深约 160 m。坝址区基岩 50 年超越概率 10% 的地震动峰值加速度为 177.7 gal；场地地表 50 年超越概率 10% 的地震动峰值加速度为 250 gal，100 年超越概率 5% 的地震动峰值加速度为 420 gal；场地的基本烈度为Ⅷ度。

2.2 配合比及试件制备 本次试验中沥青混凝土配合比采用工程设计配合比，配比用骨料为该工程区灰岩料场原岩经破碎加工并筛分后的人工骨料，填料为新疆万凯矿业开发有限公司生产的矿粉，沥青选用克拉玛依 90 号沥青。具体配比参数见表 1。

沥青混凝土静三轴试验选用标准尺寸(Φ100 mm*200 mm)的试样进行，按照表 1 的配比参数通过称料、烘料、搅拌、击实、脱模等步骤进行样品制备，具体样品的制备过程遵循《水工沥青混凝土试验规程》(DL/T 5362—2018)^[20]的相关规定进行。

表 1 配合比参数
Table 1 Mix ratio parameter

沥青含量/%	最大粒径/mm	级配指数	粗骨料/%			细骨料/%	填料/%
			9.5~19 mm	4.75~9.5 mm	2.36~4.75 mm		
6.7	19	0.35	22.4	17.6	13.9	35.1	11

2.3 试验仪器 沥青混凝土动三轴试验采用可控温多功能三轴试验仪进行，该设备能够满足 Φ100 mm*200 mm 及 Φ200 mm*400 mm 两种尺寸样品的试验需求，自身具备温度控制功能(控温范围：-30℃~+80℃)，能够满足本次试验研究需要。

2.4 试验方案 结合依托工程特点和本次试验目标选定了试验条件：试验温度取工程区当地年平均气温，即为 4.8℃；根据依托工程坝体高度，周围压力为 600、900 及 1200 kPa，固结比为 1.2、1.5 及 1.8，动荷载按照不同围压力下轴向应力的比例分七级加载，试验选用动应力比(每级动应力与轴向应力的比值)为：0.02、0.03、0.06、0.12、0.24、0.48 和 0.96；依据已有研究成果^[6]及《水工沥青混凝土试验规程》(DL/T 5362—2018)的要求，试验动荷载波形选择为正弦波，频率为 1 Hz；工程区震中烈度大致对应地震的震级为 6 级，根据已有研究^[21-22]地震震级和等效循环数的对应关系(6.5、7.0、7.5 和 8.0 级时分别对应 8、12、20 和 30 次)及《水工沥青混凝土试验规程》(DL/T 5362—2018)的要求，选定本次试验循环次数为 8 次。

3 试验结果整理及分析

3.1 试验结果整理 根据已有研究成果^[4, 8]，沥青混凝土的动应力应变特征可以基于土体的动本构模型来研究，而目前已提出的动力本构模型主要分为三类，即黏弹性动力本构模型(双直线模型、等效线性模型(Hardin-Drnevich 模型)、Ramberg-Osgood 模型)、弹塑性动力本构模型和内时动力本构模型，因沥青混凝土是黏弹性材料，基本符合等效线性模型，类似试验研究及《水工沥青混凝土试验规程》(DL/T 5362—2018)中动弹模量与阻尼比试验成果均采用等效线性模型来整理。故本文采用等效线性模型来整理分析试验数据，计算出了沥青混凝土的最大动弹模量、最大动应力以及平均阻尼比等动力学参数，

见表2。

表2 沥青混凝土动三轴试验结果
Table2 Dynamic triaxial test results of asphalt concrete

固结比 K_c	围压 σ_3/MPa	最大动模量 $E_{d\max}/\text{MPa}$	最大动应力 $\sigma_{d\max}/\text{MPa}$	平均阻尼比 λ	最大动剪切模量 $G_{d\max}/\text{MPa}$	参考应变 γ_r	K	n
1.2	0.6	443.82	0.58	0.083	160.80	0.0018	2185.5633	0.3800
	0.9	512.54	0.77	0.080	185.70	0.0021		
	1.2	578.26	0.89	0.078	209.51	0.0021		
1.5	0.6	492.00	0.90	0.082	178.26	0.0025	2356.1558	0.3779
	0.9	571.53	1.34	0.076	207.08	0.0032		
	1.2	639.57	1.63	0.073	231.73	0.0035		
1.8	0.6	545.14	1.34	0.081	197.52	0.0034	2611.3419	0.3628
	0.9	631.28	2.22	0.067	228.72	0.0049		
	1.2	701.07	2.52	0.065	254.01	0.0050		

3.2 试验结果分析

3.2.1 动弹模量分析 绘制不同固结比 K_c 下,不同围压 σ_3 下的动模量(E_d)—动应变(ε_d)的试验点及趋势关系曲线,见图1及图2。图示表明,随着动应变的逐步增加,动模量呈现出逐渐下降的趋势。以图1(a)为例,在固结比 $K_c=1.2$,围压为0.6 MPa条件下,小动应变区间($1\times 10^{-4}\sim 1.7\times 10^{-4}$)内,随着动应变的增加,动模量的减小幅度约为55 MPa/ 10^{-4} ,大动应变区间($1.7\times 10^{-4}\sim 4\times 10^{-4}$)内,动模量减小幅度降低为约24 MPa/ 10^{-4} ;当围压为1.2 MPa时,小动应变区间($2\times 10^{-4}\sim 6\times 10^{-4}$)动模量的减小幅度约为25.0 MPa/ 10^{-4} ,大动应变区间($6\times 10^{-4}\sim 24\times 10^{-4}$)动模量的减小幅度降低为约4.6 MPa/ 10^{-4} 。其余试验条件下也反映出了类似的变化规律。这一现象不仅揭示了沥青混凝土在动态荷载作用下的力学响应特性,也反映出动应变的增加会导致材料内部结构的损伤累积,进而减弱其对动态荷载的抵抗能力。同时,研究还发现,当围压和固结比增加时,相同动应变条件下的动模量也随之增加。这一结果表明,通过提高围压和固结比,可以有效增强沥青混凝土对动态荷载的抵抗能力。

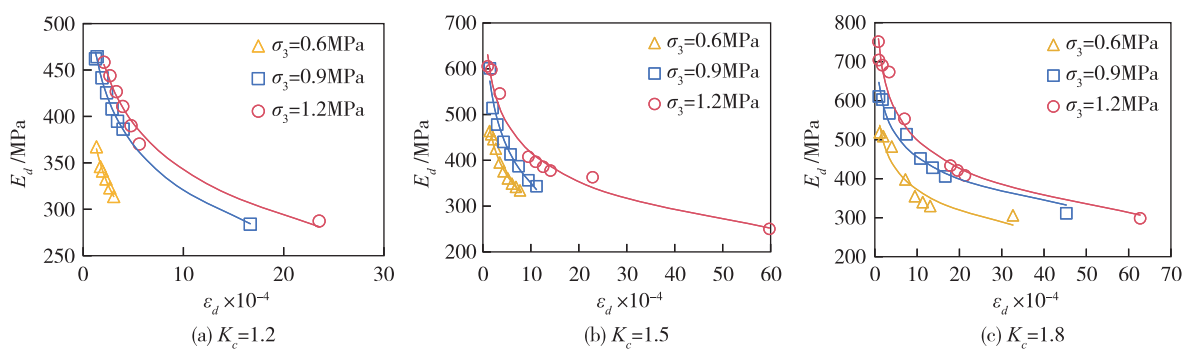


图1 不同围压的动模量与动应变关系曲线

Fig. 1 Relations of dynamic modulus and dynamic strain under different confining stresses

3.2.2 阻尼比分析 绘制不同固结比 K_c 下,不同围压 σ_3 的阻尼比(λ_d)—动应变(ε_d)的试验点及趋势关系曲线,见图3及图4。可以看出,随着动应变的逐步增加,试样的阻尼比呈现出明显的上升趋势。以图3(a)为例,在固结比 $K_c=1.2$,围压0.6 MPa条件下,小动应变区间($1\times 10^{-4}\sim 2\times 10^{-4}$)内,随着动应变的增加,阻尼比的增长幅度为0.002/ $10^{-4}\sim 0.007/10^{-4}$,中动应变区间($2\times 10^{-4}\sim 3\times 10^{-4}$)内,阻尼比增长幅度增大为约0.029/ 10^{-4} ,大动应变区间($3\times 10^{-4}\sim 3.1\times 10^{-4}$)阻尼比的增长幅度减小为约0.012/ 10^{-4} ;当围压为1.2 MPa时,小动应变区间($2\times 10^{-4}\sim 4\times 10^{-4}$)内,阻尼比的增长幅度为0.004/ $10^{-4}\sim 0.006/10^{-4}$,中动应变

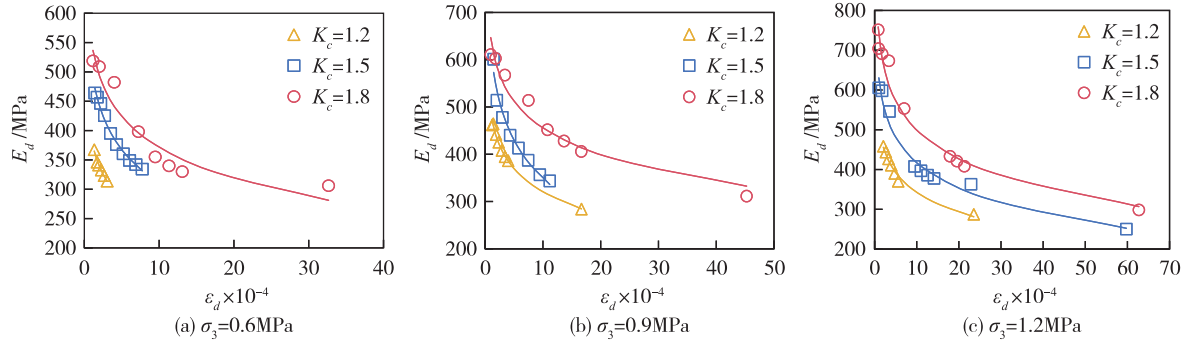


图2 不同固结比的动模量与动应变关系曲线

Fig. 2 Relations of dynamic modulus and dynamic strain at different consolidation ratios

区间($4 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4}$)阻尼比的增长幅度增大为约 $0.016/10^{-4}$ ，大动应变区间($5 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$)阻尼比的增长幅度减小为约 $0.002/10^{-4}$ 。其余试验条件下也反映出了类似的变化规律。这表明动应变的增大，会导致试样对动态荷载的响应速度减缓，从而影响材料的动态稳定性。

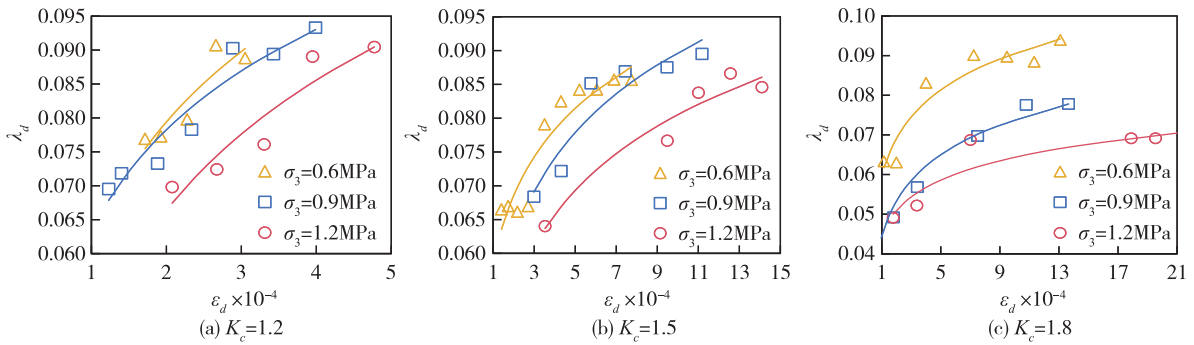


图3 不同围压的阻尼比与动应变关系曲线

Fig. 3 Relations of damping ratio and dynamic strain under different confining stresses

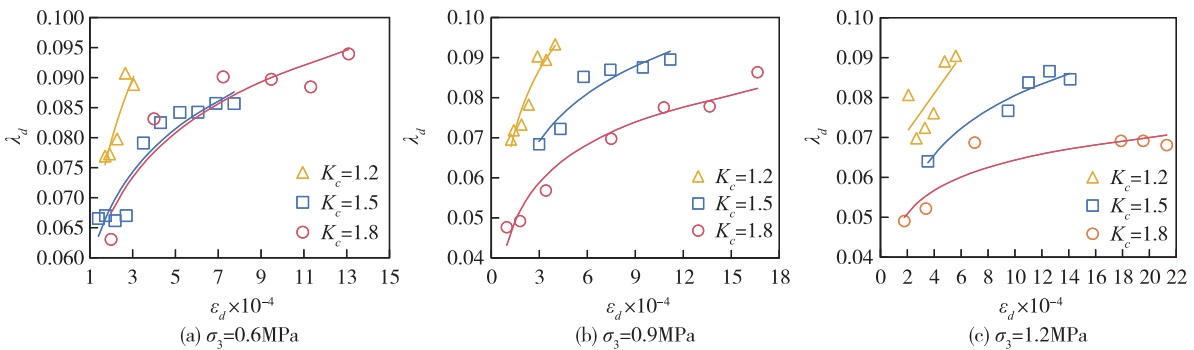


图4 不同固结比的阻尼比与动应变关系曲线

Fig. 4 Relations of damping ratio and dynamic strain at different consolidation ratios

3.2.3 围压对沥青混凝土动力特性的影响 分别绘制最大动弹模量 E_{dmax} 、平均阻尼比 λ 与围压 σ_3 的趋势关系曲线，并分别对最大动弹模量随围压的增长梯度及平均阻尼比随围压的减小梯度进行了标记，见图5。

图5(a)表明，相同的固结比条件下，沥青混凝土的最大动模量与围压之间呈线性正相关关系，但随着围压的增大，最大动弹模量的增长速度有所减缓。由图5(b)可知，相同的固结比条件下，沥青混凝土的阻尼比随围压的增加而逐渐降低，且减幅亦有所降低。分析认为是由于在较低围压(0.6 MPa~0.9 MPa)下，沥青混凝土内部的孔隙和微裂缝较多，这些孔隙和微裂缝在受到动荷载作用时容易发生变形和摩擦，从而消耗更多的能量，表现出较高的阻尼比，随着围压的增加，这些孔隙和缺陷逐渐被

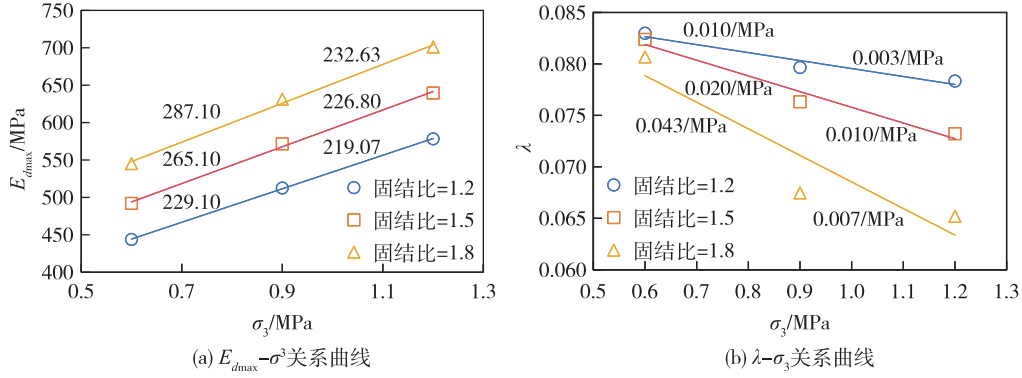


图5 最大动弹模量及平均阻尼比随围压变化关系曲线

压缩，使得沥青混凝土的结构更加紧密，从而提高了其动弹模量。在较高的围压区间(0.9 MPa~1.2 MPa)，由于孔隙和微裂缝的进一步压缩和闭合，沥青混凝土的内部结构变得更加紧密，围压的增加对其动弹模量的影响逐渐减小，因此动弹模量的增长幅度相对较小。同样沥青混凝土内部结构的进一步紧密也使得受到动荷载作用时能量消耗减少，阻尼比因此减小，且减小幅度相较于低围压区间有所降低。

3.2.4 固结比对沥青混凝土动力特性的影响 分别绘制最大动弹模量 E_{dmax} 、平均阻尼比 λ 与固结比 K_c 的趋势关系曲线，并对最大动弹模量随固结比的增长梯度及平均阻尼比随固结比的减小梯度进行了标记，见图6。从图6(a)可以看出，在相同围压条件下，沥青混凝土的最大动弹模量与固结比之间呈现出显著的线性增长关系，且增长幅度较为相近。分析认为这不仅揭示了固结比提高对沥青混凝土微观结构的影响，而且反映了材料在宏观层面上的力学性能变化。固结比的增加意味着沥青混凝土在受力过程中受到的轴向和侧向压力增大，这导致材料内部的孔隙被有效压缩，从而使得材料变得更加致密。这种微观结构的改变，直接增强了沥青混凝土试样对动态荷载的抵抗能力，进而导致其最大动模量的显著提升。

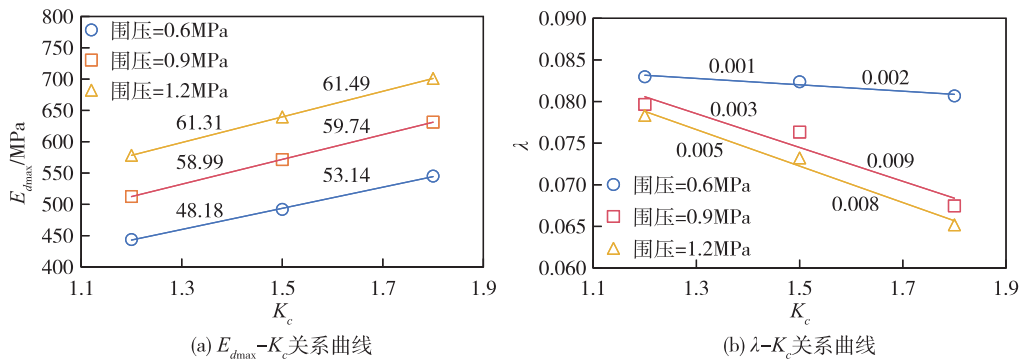


图6 最大动弹模量及平均阻尼比随固结比变化关系曲线

图6(b)表明，在相同围压条件下，沥青混凝土的平均阻尼比随固结比的增大呈现出显著的线性递减趋势，且减小幅度有所增大。这是因为在低固结比条件下，沥青混凝土试样的密实度相对较低，存在较多的孔隙，这种较低的密实度使得在循环荷载作用下，材料内部的沥青混合料更易于发生错动，沥青混合料的错动会阻碍振动波的有效传播，导致阻尼比相对较大。随着固结比的提升，沥青混凝土试样的结构变得更加紧密，孔隙率显著降低。在这种紧密状态下，循环荷载作用下沥青混合物间的错动变得更为困难，因为材料内部的颗粒之间有了更紧密的接触，振动波在更紧密的材料中传播更为顺畅，能量耗散减少，从而导致阻尼比相应降低。这一复杂的动态响应过程，不仅反映了沥青混凝土在不同固结比下的力学行为，而且对于评估其在实际工程应用中的性能表现具有重要的参考价值。

3.2.5 固结比对 K 值、 n 值的影响 通过回归分析不同围压条件下的最大动模量 E_{dmax} 与平均固结应力 σ_m 之间的关系，计算得出模量系数 K 值与指数 n 值(详见表2)。由于 K 值与 n 值作为关键的试验参数的重要性，因此有必要对其变化规律进行研究，根据表2分别绘制试验参数 K 、 n 随固结比的趋势变化关系曲线，见图7。可以看出， K 值与固结比呈现较为一致的线性正相关关系， n 值与固结比呈现出线性负相关关系，但相关性较弱。

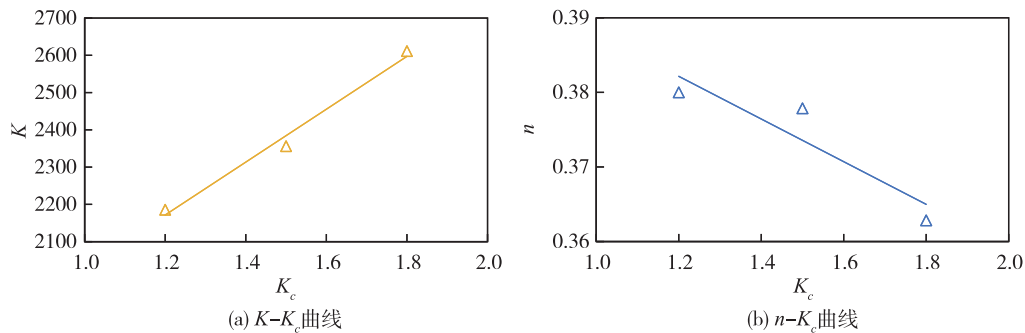


图7 试验参数 K 、 n 随固结比变化关系曲线
Fig. 7 The relationship curves of test parameters k and n with consolidation ratio

3.2.6 G_d/G_{dmax} 与 γ_d/γ_r 关系曲线 在沥青混凝土心墙堆石坝的地震反应特性分析过程中，动剪切模量比 G_d/G_{dmax} 及动剪切应变比 γ_d/γ_r 是沥青混凝土心墙动力计算所需的必要参数^[23]。因此建立动剪切模量比 G_d/G_{dmax} 与动剪切应变比 γ_d/γ_r 的归一经验公式(拟合曲线及公式见图8及表3)可为类似工程的应用提供参考。

表3 $G_d/G_{dmax}-\gamma_d/\gamma_r$ 拟合曲线公式
Table 3 Fitting formulae of $G_d/G_{dmax}-\gamma_d/\gamma_r$ curve

固结比 K_c	$y(G_d/G_{dmax})-x(\gamma_d/\gamma_r)$ 拟合曲线	$y(G_d/G_{dmax})-x(\gamma_d/\gamma_r)$ 总拟合曲线
1.2	$y=-0.134\ln(x)+0.5422$	$y=-0.147\ln(x)+0.5327$
1.5	$y=-0.163\ln(x)+0.5146$	
1.8	$y=-0.141\ln(x)+0.5433$	

4 结论

选用克拉玛依90号沥青进行沥青混凝土配比设计，并针对所依托工程区特有的温度条件，采用3种固结比及3种围压条件，对沥青混凝土进行动三轴试验，求解各项动力学试验参数，并分析其随固结比及围压的变化规律，主要结论如下：

- (1)沥青混凝土动模量受固结比及围压影响显著。试验过程中产生相同动应变时的动模量会随着围压及固结比的增大而增大，并且试样最大动弹模量随着围压及固结比的增大呈线性增长趋势，说明围压及固结比越大越有利于沥青混凝土抵抗动荷载能力的提高。
- (2)固结比及围压的变化对沥青混凝土的阻尼比影响较大。在试验过程中随着围压及固结比的增大沥青混凝土阻尼比有减小的趋势，而试样的平均阻尼比随着围压及固结比的增大也基本呈现出线性的减小趋势，说明试样在高围压及高固结比条件下对动荷载反应会更加及时。
- (3)固结比的大小对试验参数 K 、 n 有很大影响。 K 值会随着固结比的增加而上升，而 n 值则是随着固结比的增加而下降。
- (4)建立了 G_d/G_{dmax} 与 γ_d/γ_r 的归一经验公式，可为类似工程的应用提供参考。

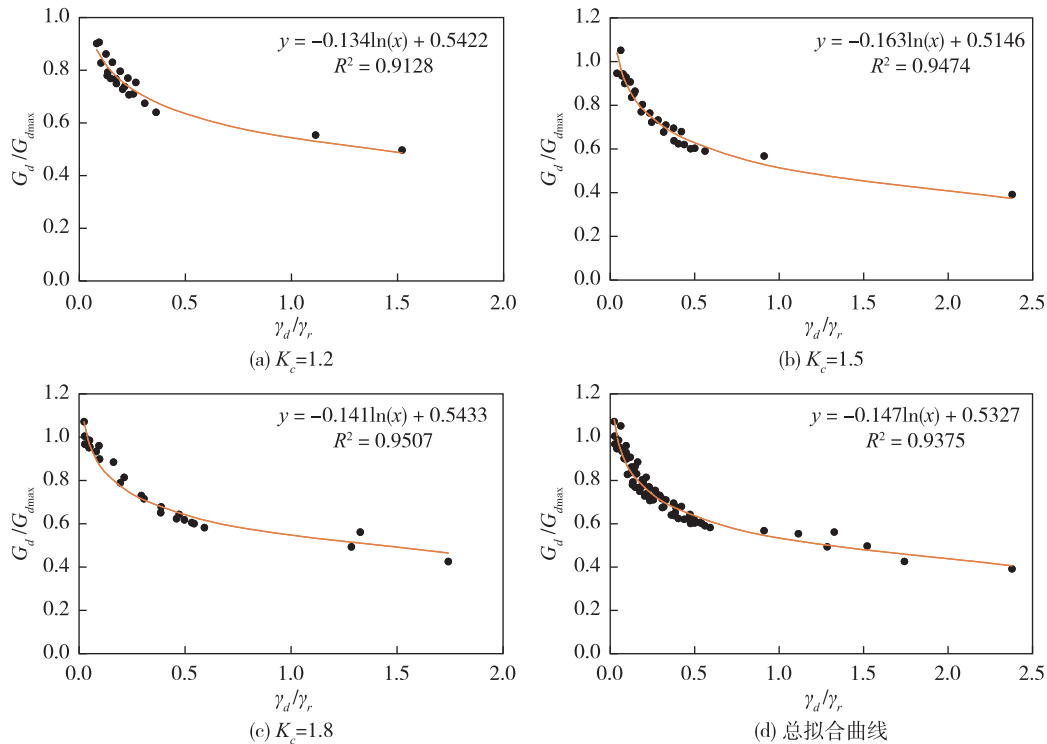


图8 $G_d/G_{dmax}-\gamma_d/\gamma_r$ 关系曲线

Fig. 8 $G_d/G_{dmax}-\gamma_d/\gamma_r$ curve

参 考 文 献:

- [1] 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. (HAO Jutao, LIU Zenghong, WANG Zhengxing. Development and prospect of hydropower project with asphalt concrete impervious elements in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 9(9): 1137-1147. (in Chinese))
- [2] 李江, 柳莹, 吴涛, 等. 新疆水库大坝70年建设成就[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(5): 322-330. (LI Jiang, LIU Ying, WU Tao, et al. 70 years of dam construction in Xinjiang[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020, 18(5): 322-330. (in Chinese))
- [3] 李江, 柳莹, 何健新. 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. (LI Jiang, LIU Ying, HE Jianxin. Advances in construction technologies of roller compacted asphalt concrete core wall dams in Xinjiang[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(1): 82-89. (in Chinese))
- [4] 韩小柠. 温度对心墙沥青混凝土动力学特性影响试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2022. (HAN Xiaoning. Experimental Study on the Influence of Temperature on the Dynamic Characteristics of Asphalt Concrete Core Wall [D]. Xi' an: Xi' an University of Technology, 2022. (in Chinese))
- [5] 韩小柠, 余梁蜀, 庞渊. 温度对沥青混凝土动力特性影响试验研究[J]. 人民长江, 2023, 54(4): 224-228. (HAN Xiaoning, YU Liangshu, PANG Yuan. Experimental Study on Influence of Temperature on Dynamic Characteristics of Asphalt Concrete[J]. Yangtze River, 2023, 54(4): 224-228. (in Chinese))
- [6] 孙龙. 不同频率及波形对土石坝沥青混凝土心墙动力特性的影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2014. (SUN Long. At Different Temperatures of Different Rate Effect on the Mechanical Parameters of Asphalt Concrete Material[D]. Xi' an: Xi' an University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [7] 初伟. 土石坝沥青混凝土心墙材料基本性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2004. (CHU Wei. Study on the Fundamental Properties of Asphalt Concrete Cores for Embankment Dams[D]. Xi' an: Xi' an University of Technology, 2004. (in Chinese))
- [8] 谭凡. 沥青混凝土心墙材料力学性能研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2012. (TAN Fan. Research on Mechanical Properties of Asphaltic Concrete Core Material[D]. Wuhan: Changjiang River Scientific Research Institute, 2012. (in Chinese))

- [9] 谭凡, 黄斌, 饶锡保. 沥青混凝土心墙材料动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S1): 383–387. (TAN Fan, HUANG Bin, RAO Xibao. Experimental study on dynamic properties of asphalt concrete core material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 383–387. (in Chinese))
- [10] 晋晓海. 心墙沥青混凝土动力特性影响因素试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2012. (JIN Xiaohai. Experimental Research on Influencing Factors of Dynamic Characteristics of Core Wall Asphalt Concrete[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [11] 余梁蜀, 晋晓海, 丁治平. 心墙沥青混凝土动力特性影响因素的试验研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32, (3): 194–197. (YU Liangshu, JIN Xiaohai, DING Zhiping. Experimental study on factors of dynamic properties of core wall asphalt concrete[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(3): 194–197. (in Chinese))
- [12] 许光远, 穆万鹏, 侯福江, 等. 面板堆石坝沥青混凝土心墙动力特性研究[J]. 东北水利水电, 2016(7): 50–51. (XU Guangyuan, MU Wanpeng, HOU Fujiang, et al. Study on dynamic characteristics of asphalt concrete core wall of face rockfill dam[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast, 2016(7): 50–51. (in Chinese))
- [13] 钟林. 高土石坝沥青混凝土心墙材料动力性能试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017. (ZHONG Lin. Experimental study on Dynamic Performance of Asphalt Concrete Core Wall Material of High Earth Rock Dam[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017. (in Chinese))
- [14] 龚涛. 水工沥青混凝土残余变形试验研究及沥青心墙堆石坝三维数值分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2012. (GONG Tao. Experiment Study on the Residual Deformation of Hydraulic Asphalt Concrete and Asphalt Concrete Core Rockfill Dam Three Dimensional Numerical Analysis[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [15] 李炎隆, 唐旺, 温立峰, 等. 沥青混凝土心墙堆石坝地震变形评价方法及其可靠度分析[J]. 水利学报, 2020, 51(5): 580–588. (LI Yanlong, TANG Wang, WEN Lifeng, et al. Dam seismic deformation evaluation method of asphalt concrete core rockfill dam and its reliability analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(5): 580–588. (in Chinese))
- [16] 王晓玲, 李清梦, 刘宗显, 等. 融合时频空间特征的土石坝地震易损性分析改进 MLP 模型研究[J]. 水利学报, 2024, 55(1): 13–23. (WANG Xiaoling, LI Qingmeng, LIU Zongxian, et al. Research on improved MLP model for seismic fragility analysis of rockfill dam by embedding spatial features of time-frequency[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(1): 13–23. (in Chinese))
- [17] 张宏洋, 李桐, 杨益格, 等. 基于模态分解和云粒子网络的大坝基岩地震动输入研究[J]. 水利学报, 2023, 54(6): 749–761. (ZHANG Hongyang, LI Tong, YANG Yige, et al. Study of seismic wave input of dam bedrock based on modal decomposition and cloud particle network[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(6): 749–761. (in Chinese))
- [18] 童广勤, 梁辉, 耿峻, 等. 三峡大坝巴东地震动力响应分析与强震监测比对研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2024, 22(1): 73–83. (TONG Guangqin, LIANG Hui, GENG Jun, et al. Comparative study on seismic response and strong earthquake monitoring of the Three Gorges Dam during the Badong earthquake[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2024, 22(1): 73–83. (in Chinese))
- [19] 郎子樊, 李红军, 严祖文, 等. 深厚覆盖层上高心墙坝地震惯性力动态分布系数研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2023, 21(3): 254–265, 276. (LANG Zifan, LI Hongjun, YAN Zuwen, et al. Study on the distribution of coefficient of seismic inertia force of high core rockfill dam located on the deep overburden[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2023, 21(3): 254–265, 276. (in Chinese))
- [20] 国家能源局. 水工沥青混凝土试验规程: DL/T 5362—2018 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2018. (National Energy Administration. Test code for hydraulic asphalt concrete: DL/T 5362—2018 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2018. (in Chinese))
- [21] SEED H B, IDRISS I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations division, 1971, 97(9): 1249–1273.
- [22] 吴旭东. 震级与地震烈度[J]. 建筑工人, 2008(6): 14–15. (WU Xudong. Magnitude and seismic intensity[J]. Builder, 2008(6): 14–15. (in Chinese))
- [23] 李守义, 马成成, 李炎隆, 等. 沥青混凝土心墙堆石坝的地震反应特性分析[J]. 水力发电学报, 2013, 32 (6): 198–202. (LI Shouyi, MA Chengcheng, LI Yanlong, et al. Seismic response analysis of rockfill dam with asphaltic concrete core wall[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6): 198–202. (in Chinese))

(下转第 305 页)

Electrochemical experimental study on corrosion protection of PCCP prestressed steel wire coating

YANG Sen, SUN Zhiheng, LI Meng, DONG Xiaonong

(State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Corrosion-induced fracture of prestressed steel wires is one of the primary failure mechanisms in PCCP, with preventive measures and effectiveness evaluation being key focuses in durability research. To investigate the corrosion damage patterns of prestressed steel wires under stress-chloride coupling environments and identify effective anti-corrosion materials meeting durability requirements, this study examined the effects of applied stress on the corrosion behavior of bare wires in NaCl solutions at concentrations of 1%, 3.5%, 10%, and 20%, as well as single-component polyurea-coated wires in 3.5% NaCl solution, through open-circuit potential measurements, corrosion current density analysis, and electrochemical impedance spectroscopy, using stress-free conditions as the control group. For bare wires, chloride concentration predominantly governed corrosion progression, exhibiting the order: 3.5% NaCl > 1% NaCl > 10% NaCl > 20% NaCl. Stress only accelerated corrosion in low-concentration solutions. Regarding coated wires, applied stress accelerated coating resistance degradation, yet their corrosion current density remained five orders of magnitude lower than bare counterparts. After 25 days immersion under sustained load, the impedance modulus maintained $2.07 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$, demonstrating that single-component polyurea coating significantly enhances corrosion resistance of prestressed wires in stress-chloride coupling environments.

Keywords: PCCP; prestressed steel wire; polyurea coating; durability; electrochemistry

(责任编辑: 李 娜)

(上接第 292 页)

Experimental study on dynamic properties of roller compacted asphalt concrete core wall

GAO Lei¹, ZHANG Yanyi², LI Zefa¹, DENG Gang², CHEN Han², LI Zengjun¹

(1. Xinjiang Water Conservancy and Hydropower Survey Design Institute Limited Liability Company, Urumqi 830000, China;

2. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to master the dynamic characteristic index of asphalt concrete core wall, the dynamic characteristics of asphalt concrete core wall were taken as the research object. The dynamic triaxle test of asphalt concrete under the condition of setting temperature, consolidation ratio and confining pressure was carried out. The maximum dynamic modulus, damping ratio and modulus coefficient of asphalt concrete were sorted out by equivalent linear model, and the variation law and influencing factors of each index were analyzed. The test results show that the maximum dynamic modulus increases with the increase of confining pressure and consolidation ratio, the damping ratio decreases with the increase of confining pressure and consolidation ratio, the modulus coefficient K increases with the increase of consolidation ratio, and the exponent n decreases with the increase of consolidation ratio. In addition, the normalized empirical formulas of G_d/G_{dmax} and γ_d/γ_r were established, which can provide reference for the application of similar projects.

Keywords: asphalt concrete; dynamic properties; dynamic triaxial test; dynamic modulus; damping ratio

(责任编辑: 祁 伟)