

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021122323101966

文章编号:1674-599X(2023)05-0053-11

引用格式:周志刚,王岩,李刚,等. 酸雨对透水沥青路面抗滑耐久性的影响[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(5):53-63.

Citation: ZHOU Zhigang, WANG Yan, LI Gang, et al. Effect of acid rain on anti-sliding durability of porous asphalt pavement[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(5):53-63.

酸雨对透水沥青路面抗滑耐久性的影响

周志刚,王岩,李刚,高琼

(长沙理工大学 道路结构与材料交通行业重点实验室,湖南 长沙 410114)

摘要:为探讨酸雨对透水沥青路面抗滑性能的影响,通过循环浸泡的方式模拟酸雨对OGFC-13和AC-13沥青混合料的腐蚀,借助小型加速加载试验来模拟轮胎的循环荷载作用,采用激光断面仪和摆式摩擦系数仪对试件抗滑性能进行检测,并对比分析酸液浓度和浸泡周期对混合料抗滑性能的影响,以及两种混合料在抗滑耐久性上的差异。研究表明:酸腐蚀会导致沥青膜的剥落,在循环荷载作用下混合料的抗滑性能经历了快速衰减期、缓慢衰减期和稳定期这3个阶段。随着酸浓度和浸泡周期的增加,会加速沥青混合料抗滑性能的衰减,降低混合料的抗滑耐久性能。与AC-13沥青混合料相比,OGFC-13沥青混合料在沥青膜剥落后,纹理构造良好,能提供更强的切削摩擦力,在酸性环境下表现出更好的抗滑耐久性。

关键词:透水沥青路面;抗滑性能;耐久性;酸腐蚀;浸泡周期;酸浓度;加速加载试验

中图分类号:U416

文献标志码:A

Effect of acid rain on anti-sliding durability of porous asphalt pavement

ZHOU Zhigang, WANG Yan, LI Gang, GAO Qiong

(Key Laboratory of Road Structure and Materials Transportation Industry,
Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to investigate the effect of acid rain on the anti-skid performance of permeable asphalt pavement, the corrosion of the OGFC-13 and the AC-13 asphalt mixtures was simulated by cyclic immersion. The cyclic action of tire load was simulated with the help of the small accelerated loading test, and the anti-skid performance of the specimens was detected and evaluated using the laser profiler and the pendulum friction coefficient meter. And the effects of acid concentration and soaking period on the skid resistance of the mixture were compared and analyzed, as well as the skid resistance durability of the two mixtures. The results show that acid corrosion will lead to peeling of asphalt film. And the slip resistance of the mixes under cyclic loading undergoes three phases: rapid decay, slow decay and stabilization. With the increase of acid concentration and soaking period, it accelerates the decay of asphalt mixtures' anti-skid performance, reducing the mixtures' anti-skid durability performance. Compared with the AC-13 asphalt mixture, the OGFC-13 asphalt mixture has good texture structure after the asphalt film is peeled off, which can provide stronger strength in acidic

收稿日期:2021-12-23

基金项目:国家自然科学基金(51878079);湖南省交通科技计划项目“车-路-环境耦合作用下透水沥青路面抗滑安全与耐久性提升技术”(201807)

作者简介:周志刚(1966—),男,长沙理工大学教授,博士生导师。E-mail:zhou_zgcs@sina.com

environment.

Key words: porous asphalt pavement; skid resistance; durability; acid corrosion; soaking period; acid concentration; accelerated loading test

路面的抗滑性能是行车安全的重要保障^[1-2]。轮胎和路面之间的摩擦力受到车辆荷载^[3-4]、环境因素、路面洁净程度的影响^[5]。摆值和平均断面深度是表征路面抗滑性能的主要参数^[6-9]。在行车荷载反复作用下,路面的表面构造发生改变^[10],主要表现在宏观构造和微观纹理,影响了路面的抗滑耐久性能^[11-13]。透水沥青路面的排水沥青混凝土的内部粗骨料相互交错,形成大量连通孔隙网络结构^[14]。雨水透过路面表层进入内部,再以水平方向排出,这显著提高了雨天路面排水效率,解决了传统密集配沥青路面在积水条件下抗滑性能不足的问题^[15-16]。然而,由于透水沥青路面具有高孔隙率的结构特点,使其容易遭受酸雨的长时间、大面积腐蚀,对沥青混合料的结构和路用性能产生不利影响^[17]。关于酸雨对沥青路面的侵蚀影响,国内外已经进行了一些研究。张倩等^[18]采用周期浸泡的方式,研究了4种不同级配混合料在3种pH值的酸溶液中的腐蚀。化学侵蚀导致沥青混合料的空隙率增加,结构疏松,强度下降,其中,AC-16沥青混合料耐酸溶液腐蚀较好。冯新军等^[19]对酸溶液浸泡腐蚀后的沥青混合料进行了路用性能测试,指出沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性的下降幅度随着酸溶液浓度和浸泡周期的增大而增大。周兴林等^[20]采用平板磨光法对经过酸溶液喷淋后的试件进行磨光试验,得到试件加载初期、前期、后期的摆值衰减趋势,指出SMA-13沥青混合料的抗滑性能要优于AC-13沥青混合料的。

综上所述,目前国内外主要针对酸溶液对沥青混合料的腐蚀机理和力学性能的影响进行研究,而关于循环荷载作用下酸腐蚀对沥青混合料抗滑性能影响的研究并不多见。考虑到透水沥青混合料在抗滑性能上优于其他类型的沥青混合料,但是关于透水沥青混合料在酸雨环境下的抗滑性能,以及与其他类型混合料进行对比和定量评价的资料很匮乏。因此,本研究通过湿干循环浸泡处理沥青混合料试件,模拟酸雨环境,利用小型加速加载设备进行加速加载试验,采用激光断面仪和摆式仪测

试、评价混合料表面的抗滑性能,并对透水沥青混合料OGFC-13和密集配沥青混合料AC-13在不同酸浓度和浸泡周期的影响下的抗滑耐久性能进行对比分析。

1 试验材料

1.1 沥青及改性剂

AC-13所用沥青为SBS改性沥青,OGFC-13所用沥青为高黏沥青,即在SBS改性沥青中投入HVA高黏剂,掺量比例为SBS改性沥青:HVA高黏剂=92:8。SBS改性沥青按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)的方法和《公路沥青路面施工技术规范》中的技术要求进行检测,SBS改性沥青的技术指标见表1。

表1 SBS改性沥青改性前后技术指标

Table 1 Technical indexes of the SBS modified asphalt before and after modification

试验项目	SBS改性沥青	高黏沥青
针入度(25℃)/(0.1mm)	52	41
软化点/℃	86	98
延度(5℃)/cm	28	36
闪点/℃	300	310
黏度(60℃)/(Pa·s)	21 428	601 493
密度(25℃)/(g·cm ⁻³)	1.047	1.042
薄膜加热质量损失/%	0.03	0.02
残留针入度比/%	82	83
残留延度(5℃)/cm	19	23

1.2 沥青混合料集料与级配设计

OGFC-13沥青混合料和AC-13沥青混合料的粗集料均为辉绿岩,细集料均为石灰岩,矿粉均为石灰岩矿粉。根据《公路工程集料试验规程》(JTG

E42—2005)中的试验方法和《公路沥青路面施工技术规范》(JTG E40—2004)中的技术要求对集料和矿粉进行检测,OGFC-13沥青混合料和AC-13沥青混合料的最佳油石比分别为4.2%、4.7%,空隙率分别为20.15%、3.11%,各筛孔的通过率见表2。

表2 OGFC-13和AC-13沥青混合料集料级配

Table 2 Aggregate gradation of the OGFC-13 and the AC-13 asphalt mixture %

级配类型	通过下列筛孔(mm)的百分率									
	16.000	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
OGFC-13	100.0	90.1	61.1	17.1	9.5	8.6	7.6	6.1	5.3	4.5
AC-13	100.0	95.0	76.5	53.0	37.0	26.5	19.0	13.5	10.0	6.0

1.3 酸溶液制备

酸雨中的酸性物质主要来自人为排放的SO₂、NO_x等气体,这些气体经过氧化和水解作用,形成H₂SO₄、HNO₃、HNO₂。本试验采用0.05 mol/L的H₂SO₄、0.1 mol/L的HNO₃以及蒸馏水在常温下配制了酸溶液。蒸馏水是用蒸馏水发生器自行制备的。按照c(SO₄²⁻):c(NO₃⁻)=9:1的比例,配置了pH值为2、4的酸溶液^[21]。这些酸溶液与蒸馏水溶液(pH值为7)进行了对比。

2 试验方法

2.1 酸环境腐蚀模拟试验

采用周期循环湿干浸泡对OGFC-13沥青混合料和AC-13沥青混合料进行处理,每个浸泡周期为7 d,其中,前6 d对试件进行浸泡处理,第7 d将试件放置在室内环境晾干。为保证溶液酸性的稳定,在浸泡过程中每天定时测量溶液的pH值,若发现pH值发生了变化,及时更换溶液。同时,为避免室内环境温度的变化对酸溶液的腐蚀速度造成影响,本试验采用恒温棒将溶液的温度维持在30℃。

2.2 加速加载试验

采用MMLS3加速加载仪对沥青混合料试件进行加速磨损试验。该加速加载仪有4个充气橡胶加载轮胎,轮胎宽度80 mm。试验中,设置的轮载

为2 700 N,胎压为0.7 MPa,加载速度为每小时6 000次,试验加载次数达到80万次时结束。

2.3 路表纹理构造检测

采用加速加载仪配套的MMLS PM900路面激光断面仪检测路表的纹理构造。在扫描过程中,激光扫描范围为100 mm,扫描频带为1 mm/次,扫描精度为0.01 mm。使用激光断面仪测量与行车方向垂直的横断面,并在2万次、40万次和70万次对试件进行测量。通过扫描图像求平均断面深度D_{MP},并以D_{MP}来表征路表宏观构造的变化趋势。D_{MP}的测量原理如图1所示。

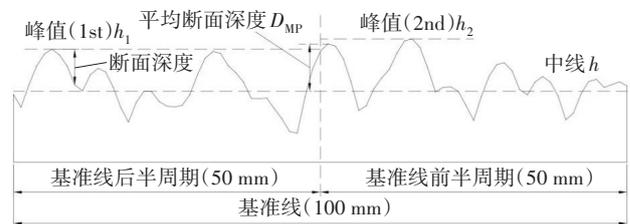


图1 平均断面深度

Fig. 1 Average section depth

其计算公式如下:

$$D_{MP} = \frac{h_1 + h_2}{2} - h \quad (1)$$

式中:

D_{MP}为平均断面深度,mm;

h₁、h₂分别为断面前、后半周期最高波峰的高程,mm;

h为断面的平均高程,mm。

2.4 抗滑性能摆值检测

采用BM-III型摆式摩擦系数测定仪,检测加速加载试验后试件的摩擦摆值。在加速加载试验的前期[0~10]万次,每隔2万次测量一次试件的摆值。在(10,20)万次,每隔5万次测量一次试件的摆值。在大于等于20万次,每隔10万次测量一次试件的摆值。

3 腐蚀现象分析

1) 试件表面出现气泡现象。

如图2所示,经过酸溶液浸泡后,试件表面产生了大量气泡。在pH值为2的溶液中,试件表面的气泡数量明显多于pH值为4溶液中的试件表面气泡,

而在pH值为7的溶液中,试件表面几乎没有气泡产生。这是因为沥青混合料的细集料是石灰岩,其主要成分是 CaCO_3 ,可与硝酸、硫酸发生化学反应生成 CO_2 气体。酸性越强,该反应越剧烈,导致试件表面气泡数量增加。



图2 试件表面气泡

Fig. 2 Bubbles on specimen surface

2) 试件表面沥青膜出现剥落现象。

经过酸溶液浸泡后,试件表面沥青膜的面积减小,露出了白色集料。在pH值为2的溶液中,试件表面露出集料的面积较大。而在pH值为7的溶液中,试件表面集料不外露,沥青膜保持完整。这是由于酸性物质与沥青膜发生了氧化腐蚀,使得沥青中的胶质含量下降,同时沥青膜产生了微裂缝。酸雨可以从沥青膜的微裂缝中进入沥青膜内部,与沥青膜包裹的集料发生化学反应,造成集料钠、镁、钙等粒子的流失,降低了集料和沥青的黏附性,导致沥青膜脱落。酸雨透过集料空隙,渗透至内部,加剧了腐蚀。相较于AC-13沥青混合料,OGFC-13沥青混合料剥落的沥青膜较少,这是因为前者的

沥青膜较厚、黏性较强,水分难以侵蚀并剥落沥青膜。浸泡2个周期和4个周期的试件表面裸露的集料面积无明显变化,表明在前2个周期沥青膜已经基本剥落完毕。浸泡2个周期后的试件如图3所示。

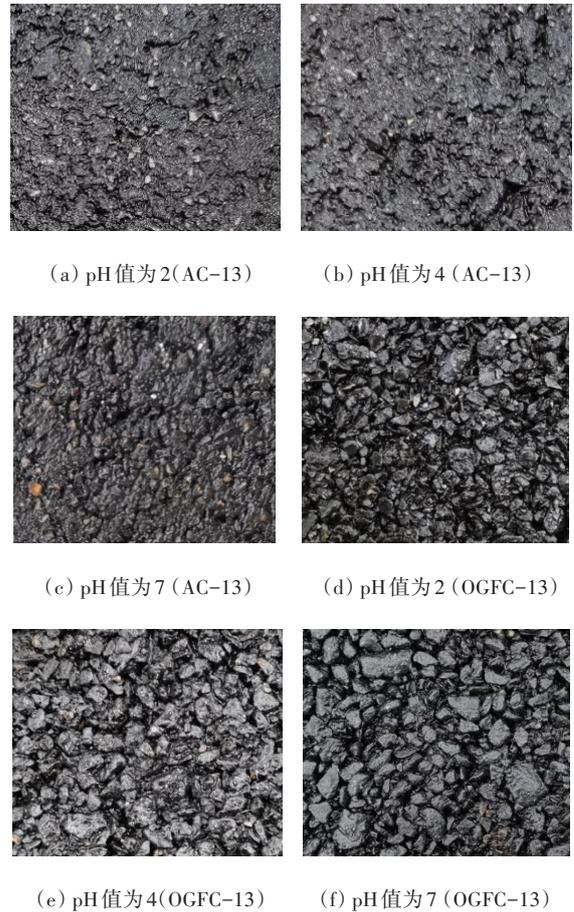
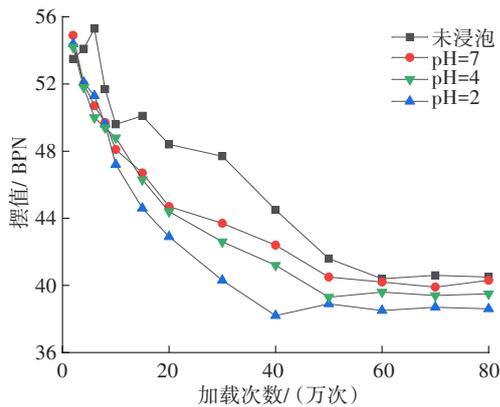


图3 试件表面沥青膜剥落

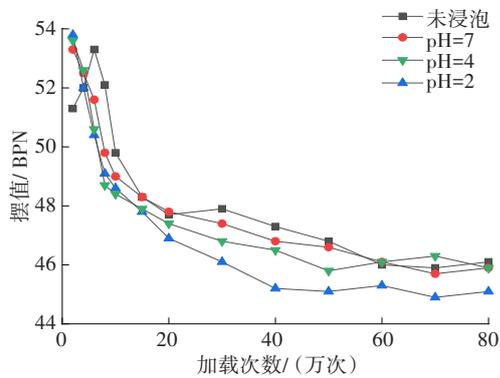
Fig. 3 Asphalt film spalling on specimen surface

4 摆值测试结果与分析

经过pH值为2、4、7的溶液浸泡4个周期后的试件和未浸泡的试件,在加速加载设备中进行加载后测得的摆值结果如图4所示。利用该图对比分析溶液酸浓度对抗滑性能的影响。未经过任何处理的试件,在pH值为2时,浸泡2个周期和4个周期的试件进行加速加载试验后测摆值,结果如图5所示。利用该图对比分析浸泡周期对抗滑性能的影响。



(a) AC-13 沥青混合料



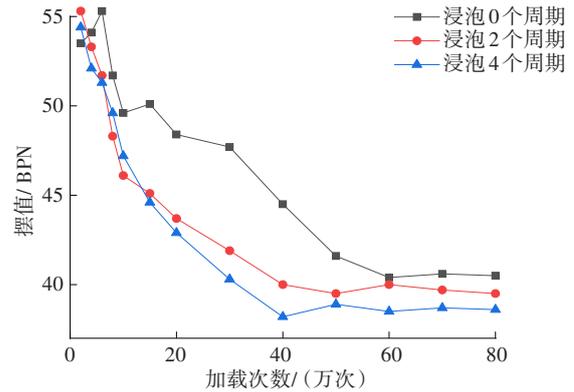
(b) OGFC-13 沥青混合料

图4 不同pH值条件下试件摆值衰变曲线

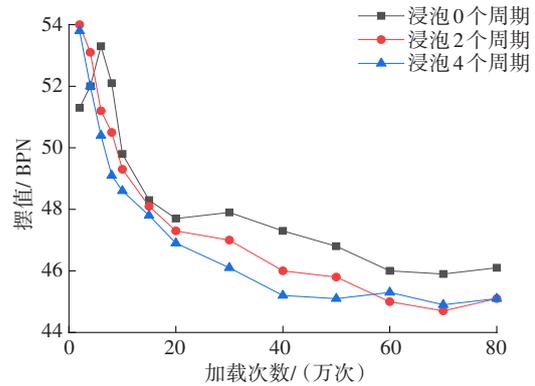
Fig. 4 Pendulum decay curves of specimens under different pH values

为了使试件的摆值准确反映路面的常态抗滑能力,将加载2万次后测得的摆值作为曲线起点。在初始加载阶段(前6万次),未浸泡试件的摆值呈上升趋势,这是因为沥青膜在加载过程中被去除;而浸泡过的试件由于沥青膜在浸泡过程中就已经被腐蚀破坏,故其摆值随加载次数呈下降趋势。整体上,AC-13沥青混合料和OGFC-13沥青混合料在前20万次加载中,摆值的衰减速率较快。当加载次数达到50万次后,试件的摆值变化不大。根据KANE^[22]提出的路面全寿命周期内抗滑性能随磨损次数变化的模型,可以将加载前20万次划分为快速衰减阶段,将加载20~50万次划分为缓慢衰减阶段,将加载50~80万次划分为稳定阶段。

对于未浸泡试件,在循环加载前期(约6~8万次),AC-13沥青混合料的摆值高于OGFC-13沥青混合料的。然而,在沥青膜逐渐剥落的过程中,AC-13沥青混合料的摆值逐渐降低,而OGFC-13沥青混合料的摆值逐渐升高。在加载30万次之后,这种差距变得更加明显。这是因为在前期沥青膜剥落前,



(a) AC-13 沥青混合料



(b) OGFC-13 沥青混合料

图5 不同浸泡周期处理后试件摆值衰变曲线

Fig. 5 Pendulum decay curves of specimens after different immersion cycles

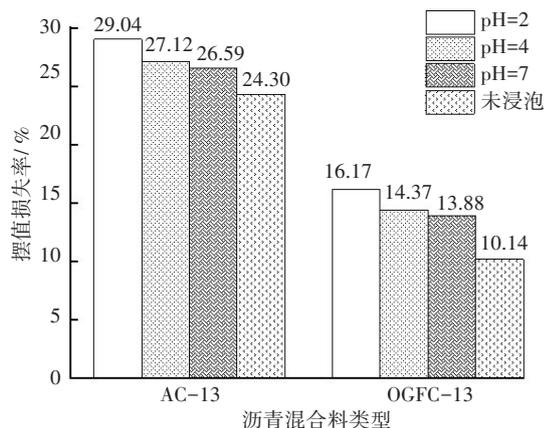
虽然OGFC-13沥青混合料的纹理构造深度($D_{MP}=0.77$)大于AC-13沥青混合料的纹理构造深度($D_{MP}=0.31$),但轮胎橡胶与沥青膜之间的黏性摩擦力占主导地位,轮胎橡胶直接接触沥青膜,集料宏观构造的切削摩擦力尚未体现出来。由于AC-13沥青混合料的表面接触面积大于OGFC-13沥青混合料的,因此AC-13沥青混合料的抗滑性能强于OGFC-13沥青混合料的。随着循环加载次数增加,试件表面的沥青膜逐渐剥落,集料宏观构造的切削摩擦力增强,逐渐占据主导地位。因此,后期OGFC-13沥青混合料的抗滑性能强于AC-13沥青混合料的。

对于经过浸泡处理的试件,由于沥青膜在加载过程中剥落,经历了前期(加载前2万次)短暂的循环作用后(进一步促使沥青膜剥落),AC-13沥青混合料的摆值逐渐低于OGFC-13沥青混合料的。这一变化规律及其原因与未浸泡试件的抗滑性能的分析相同。

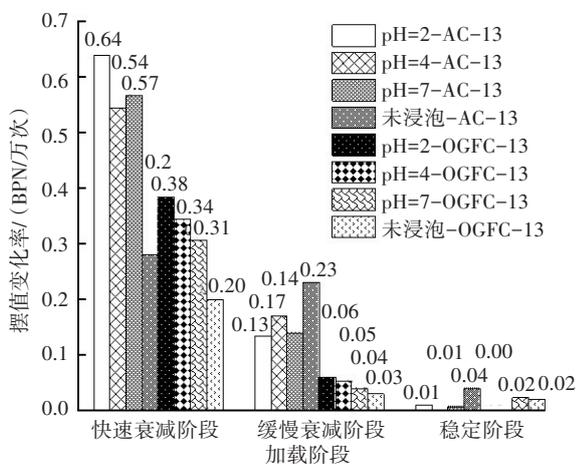
5 酸腐蚀对沥青混合料抗滑性能的衰变效应

5.1 酸浓度的影响

引入摆值损失率和变化率作为沥青混合料抗滑性能阶段性衰减评价指标^[22-24],分别计算试件在各阶段的摆值损失率和变化率,结果如图6所示。从图6(a)可以看出,随着酸浓度增加,摆值损失率呈增大趋势,路面抗滑性能下降更为明显。其中,OGFC-13沥青混合料的摆值损失率远小于AC-13沥青混合料的。从图6(b)可以看出,摆值的衰减主要集中在快速衰减阶段,在稳定期变化很小。随着酸浓度增加,混合料摆值在前期衰减速率加快。整体上,OGFC-13沥青混合料的摆值衰减速率低于AC-13沥青混合料的。因此,与AC-13沥青混合料相比,OGFC-13沥青混合料具有更好的抗滑耐久性性能,酸腐蚀对其抗滑性能的衰变效应相对较弱。



(a) 不同pH值下摆值损失率



(b) 不同加载阶段摆值变化率

图6 不同酸浓度下摆值损失率及变化率

Fig. 6 Loss rate and change rate of swing value at different acid concentrations

采用指数模型 $Y = Ae^{Bx} + C$ 来分析抗滑指标与荷载作用次数之间的关系^[25-28]。Y为抗滑指标(摆值或构造深度);x为荷载作用次数。当加载次数趋近于0时,A+C可以代表混合料的抗滑初始值,而当加载次数趋近于无穷大时,C表示混合料在稳定阶段的抗滑性能指标,B表示混合料抗滑性能的衰减速率,A表示混合料抗滑性能的衰减幅度。摆值拟合结果见表3。

表3 不同酸浓度下摆值指数模型拟合结果

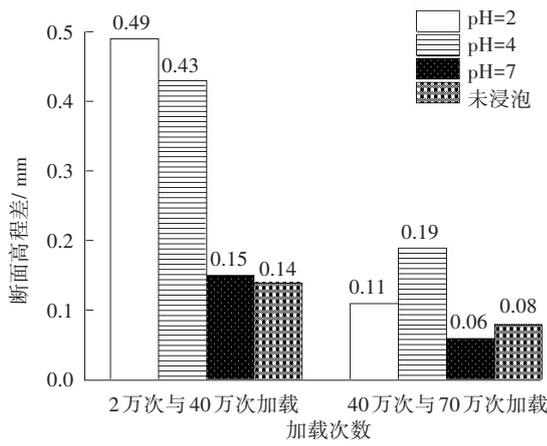
Table 3 Fitting results of pendulum index model under different acid concentrations

pH值		指数模型 $Y = Ae^{Bx} + C$				
		初值 A+C	减幅A	衰减率 B	稳定值 C	相关系数 R^2
AC-13	pH值为2	57.3	19.1	-0.072	38.2	0.992
	pH值为4	56.2	16.8	-0.062	39.4	0.991
	pH值为7	56.7	16.6	-0.059	40.1	0.985
	未浸泡	55.9	18.4	-0.026	37.5	0.931
OGFC-13	pH值为2	55.4	10.2	-0.103	45.2	0.985
	pH值为4	56.2	9.9	-0.139	46.3	0.972
	pH值为7	54.8	8.6	-0.093	46.2	0.968
	未浸泡	54.6	9.0	-0.085	45.6	0.932

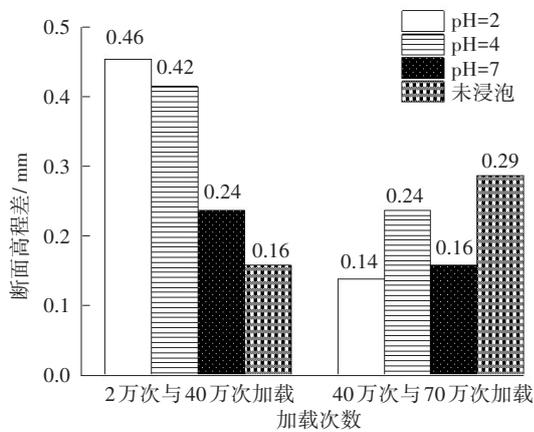
根据表6中C与沥青混合料实测摆值的对比,可以得出以下结论:在pH值为2、4、7和未浸泡条件下,AC-13沥青混合料进入稳定阶段所需的荷载作用次数,分别为30、40、50、50万次。而对于OGFC-13沥青混合料,在相同的pH值和未浸泡条件下,进入稳定阶段所需的荷载作用次数,分别为40、50、60、60万次。随着酸浓度的增加,混合料进入稳定阶段的加载次数有所减少,这对路面的抗滑耐久性是不利的。值得注意的是,OGFC-13沥青混合料在腐蚀后,其抗滑耐久性优于AC-13沥青混合料的。

使用激光断面仪对试件进行测量,得到与行车方向垂直的横断面,并计算加载2万次与40万次的断面高程差以及加载40万次与70万次的断面高程差,如图7所示。试件在加载2万次与40万次之间

的断面高程差较大,40万次与70万次之间的断面高程差较小。这表明试件在40万次加载之前,混合料的宏观构造已经被压密实。随着酸浓度的增加,加载2万次和40万次之间的断面高程差增大,而40万次和70万次之间的断面高程差减小。这表明40万次加载之前,酸浓度的增加会加速沥青膜剥落,促使表面集料的进一步挤密平整,导致断面高程差衰减增大,而在前期稳定后,酸浓度的增加反而导致后期难以继续挤密,因此后期断面高程差随着酸浓度的增加会减小。通常情形下,OGFC-13沥青混合料的 D_{MP} 值衰减率大于AC-13沥青混合料的,这与其空隙率较大有关。尽管如此,OGFC-13沥青混合料经酸腐蚀后,加载前、后的 D_{MP} 值均远大于AC-13沥青混合料的,因此可以提供更好的抗滑耐久性能。



(a) AC-13



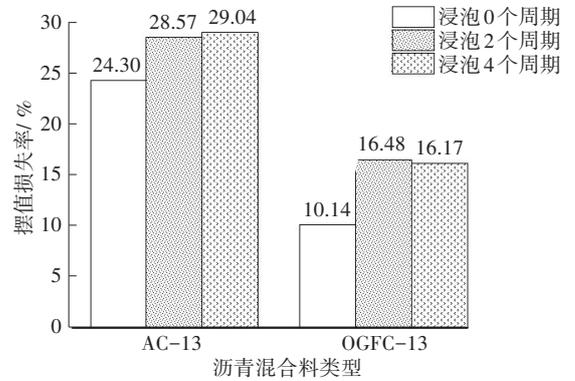
(b) OGFC-13

图7 不同酸浓度下激光断面高程差

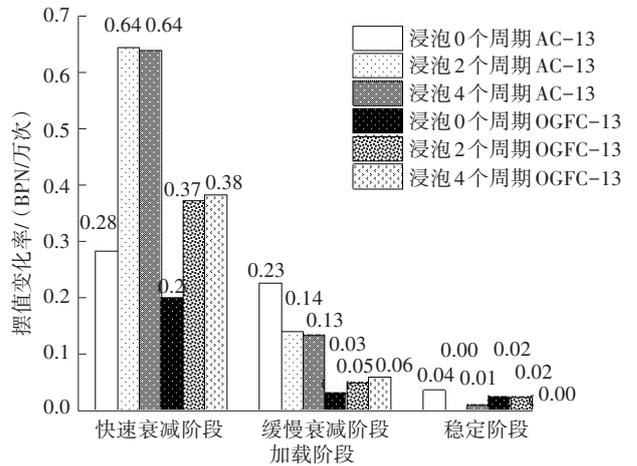
Fig. 7 Elevation difference of laser section under different acid concentration

5.2 酸浸泡周期的影响

不同浸泡周期下摆值损失率及变化率的结果如图8所示。



(a) 不同浸泡周期摆值损失率



(b) 不同加载阶段摆值变化率

图8 不同浸泡周期下摆值损失率及变化率

Fig. 8 Loss rate and change rate of pendulum value under different soaking cycles periods

从图8可以看出,随着浸泡周期的增加,摆值损失率呈明显上升趋势。与AC-13沥青混合料相比,OGFC-13沥青混合料的摆值损失率较低,表明酸环境对OGFC-13沥青混合料抗滑性能的影响相对较弱,OGFC-13沥青混合料具有更好的抗滑耐久性能。比较这两种类型混合料在酸溶液中分别浸泡2个周期和4个周期后的摆值损失率及摆值变化率时,它们之间的差异并不显著。这表明在2个周期的酸环境下,试件已经被腐蚀。因此,增加浸泡时间,并不会显著改变抗滑性能的衰变速率和衰变程度。

根据表4摆值指数模型的拟合结果,两种混合

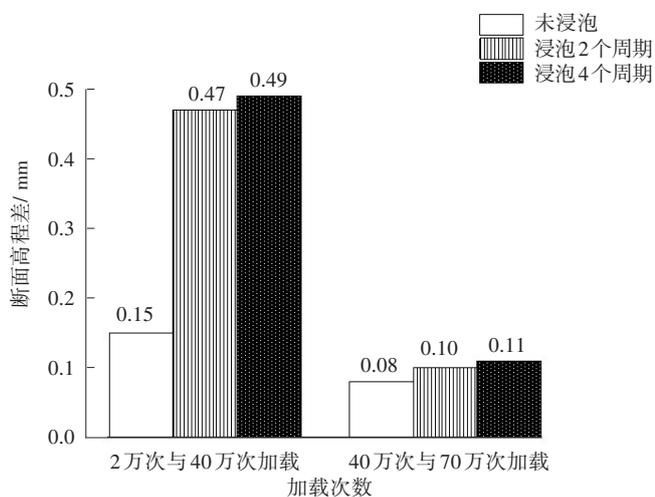
料在不浸泡、浸泡2个周期、浸泡4个周期条件下进入稳定阶段的荷载作用次数如下:对于AC-13混合料,为50、40、40万次;对于OGFC-13混合料,为60、60、40万次。随着浸泡周期的增加,混合料进入抗滑稳定阶段所需要的加载次数减少,这表明浸泡周期的增加会降低混合料的抗滑耐久性。

表4 不同浸泡周期下摆值指数模型拟合结果汇总

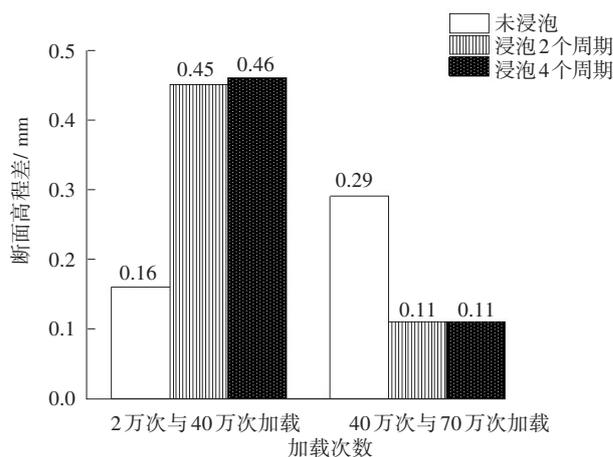
Table 4 Summary of fitting results of pendulum index model under different soaking cycles periods

浸泡周期		指数模型 $Y = Ae^{Bx} + C$				
		初值 $A+C$	减幅 A	衰减率 B	稳定值 C	相关系数 R^2
AC-13	0个周期	55.9	18.4	-0.026	37.5	0.931
	2个周期	58.4	18.7	-0.087	39.7	0.984
	4个周期	57.3	19.1	-0.072	38.2	0.992
OGFC-13	0个周期	54.6	9.0	-0.085	45.6	0.932
	2个周期	55.5	10.2	-0.081	45.3	0.979
	4个周期	55.4	10.2	-0.103	45.2	0.985

不同浸泡周期下的断面高程差结果如图9所示。从图9可以看出,浸泡2个周期的试件加载2万次和40万次之间的断面高程差是未浸泡的2倍以上,浸泡2个周期和4个周期的断面高程差并没有明显差别。在加载后期,断面高程差变化不大。这是因为试件在浸泡2个周期后已经被腐蚀,浸泡2个周期之后再增加浸泡时间对试件的腐蚀程度影响不大。



(a) AC-13



(b) OGFC-13

图9 不同浸泡周期下激光断面高程差

Fig. 9 Elevation difference of laser section under different immersion periods

6 结论

1) 酸环境会对沥青混合料产生腐蚀作用,导致沥青膜脱落,从而进一步加剧酸雨对内部集料的腐蚀。

2) 在循环加载前期,未浸泡的沥青混合料试件会存在沥青膜去除、摆值上升的过程,然后与浸泡过的沥青混合料试件一样,抗滑性能会经历快速衰减期、缓慢衰减期和稳定期这三个阶段,其中抗滑性能的衰减主要集中在快速衰减阶段。

3) 随着酸浓度和浸泡周期的延长,会加速沥青混合料抗滑性能的衰减,使其更早进入稳定阶段,从而降低混合料的抗滑耐久性能。

4) 与AC-13沥青混合料相比,OGFC-13沥青混合料在沥青膜剥落后具有良好的纹理构造,因而能提供更强的切削摩擦力,从而在酸环境下保证更好的抗滑耐久性能。

参考文献(References):

[1] CHEN X B, WANG J T, LIU H, et al. Influence of rainfall on skid resistance performance and driving safety conditions of asphalt pavements[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2019, 35(4): 482-490.

[2] 谭忆秋, 肖神清, 熊学堂. 路面抗滑性能检测与预估方法综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(4): 32-47. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.04.002.

- TAN Yiqiu, XIAO Shenqing, XIONG Xuetao. Review on detection and prediction methods for pavement skid resistance [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21 (4) : 32-47. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.04.002.
- [3] 丛林, 谭乐, 吴敏, 等. 基于集料特性的沥青混合料长期抗滑性能衰减模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 668-672. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2019.05.011.
- CONG Lin, TAN Le, WU Min, et al. Long-term anti-sliding performance attenuation model of asphalt mixture based on aggregate characteristics [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47 (5) : 668-672. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2019.05.011.
- [4] 肖鑫, 张起森, 关宏信. 交通荷载对沥青路面抗滑性能衰减规律的影响[J]. 交通科学与工程, 2011, 27(3): 6-10. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2011.03.005.
- XIAO Xin, ZHANG Qisen, GUAN Hongxin. The effect of traffic load on the attenuation of antiskid performance of asphalt pavement [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2011, 27(3) : 6-10. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2011.03.005.
- [5] 黄晓明, 郑彬双. 沥青路面抗滑性能研究现状与展望 [J]. 中国公路学报, 2019, 32 (4) : 32-49. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.04.003.
- HUANG Xiaoming, ZHENG Binshuang. Research status and progress for skid resistance performance of asphalt pavements [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32 (4) : 32-49. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.04.003.
- [6] 马旭, 李植淮, 杨涛, 等. ASPs对AC-13沥青混合料抗滑性能的影响[J]. 交通科学与工程, 2015, 31(4): 26-30. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2015.04.005.
- MA Xu, LI Zhihuai, YANG Tao, et al. The impact research of ASPs to AC-13 asphalt mixture antiskid performance [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2015, 31 (4) : 26-30. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2015.04.005.
- [7] 冯兴乐, 张海鸥, 李伟, 等. 基于静态抗滑特性的路面构造深度测量算法[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55 (3) : 620-627. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.20180282.
- FENG Xingle, ZHANG Haiou, LI Wei, et al. Texture depth measured method of pavement based on static and dynamic anti-sliding characteristics [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55 (3) : 620-627. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.20180282.
- [8] 黄志勇, 陈搏, 李伟雄, 等. 沥青路面的线激光测量方法及构造深度[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(23): 252-258.
- HUANG Zhiyong, CHEN Bo, LI Weixiong, et al. Line laser measurement method and texture depth of asphalt pavement [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(23): 252-258.
- [9] 郑木莲, 陈拴发, 王选仓, 等. 纵向摩擦系数在路面抗滑性能评价中的应用[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005, 25 (4) : 9-12. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2005.04.003.
- ZHENG Mulian, CHEN Shuanfa, WANG Xuancang, et al. Application of profile frictional coefficient in evaluation of pavement skid-resistant performance [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2005, 25 (4) : 9-12. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2005.04.003.
- [10] 陈先华, 马耀鲁, 耿艳芬, 等. 路面工程中的车-路相互作用研究进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(12): 18-30.
- CHEN Xianhua, MA Yaolu, GENG Yanfen, et al. Research progress of vehicle-road interaction in pavement engineering [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(12): 18-30.
- [11] 《中国公路学报》编辑部. 中国路基工程学术研究综述·2021 [J]. 中国公路学报, 2021, 34 (3) : 1-49. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.03.001.
- Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's subgrade engineering Research, 2021 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34 (3) : 1-49. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.03.001.
- [12] 孙洪利. 沥青路面抗滑性能衰减特性研究[J]. 公路, 2011, 56(7): 73-78.
- SUN Hongli. Study on attenuation characteristics of anti-skid performance of asphalt pavement [J]. Highway, 2011, 56(7): 73-78.
- [13] 刘力侨, 徐龙, 谢涛, 等. 砾石棱角性对沥青混合料路

- 用性能的影响[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(4): 85-92. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.011.
- LIU Liqiao, XU Long, XIE Tao, et al. The influence of gravel angular property on the road performance of asphalt mixture [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(4): 85-92. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.011.
- [14] 祁妍娟, 康爱红, 卢志萍, 等. 两种模拟条件下透水沥青混合料的渗透特性与净化能力[J]. 材料科学与工程学报, 2021, 39(1): 124-129. DOI: 10.14136/j.cnki.issn1673-2812.2021.01.021.
- QI Yanjuan, KANG Aihong, LU Zhiping, et al. Permeability and purification ability of permeable asphalt mixture under two simulated conditions [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2021, 39(1): 124-129. DOI: 10.14136/j.cnki.issn1673-2812.2021.01.021.
- [15] 梅晨悦, 刘子铭, 祁静, 等. 小粒径排水型超薄罩面路用性能研究[J]. 公路与汽运, 2019(2): 84-87, 92. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2019.02.023.
- MEI Chenyue, LIU Ziming, QI Jing, et al. Study on road performance of small particle size drainage ultra-thin overlay [J]. Highways & Automotive Applications, 2019(2): 84-87, 92. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2019.02.023.
- [16] CHEN S A, LIN X C, ZHENG C F, et al. Evaluation of siltation degree of permeable asphalt pavement and detection of noise reduction degree [J]. Applied Sciences, 2020, 11(1): 349. DOI: 10.3390/app11010349.
- [17] 杨秋侠, 严苗瑜. 透水沥青路面的湿物理性能研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(11): 10-18. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.11.002.
- YANG Qiuxia, YAN Miaoyu. Study on wet physical properties of permeable asphalt pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(11): 10-18. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.11.002.
- [18] 张倩, 彭余华, 尤晓. 酸雨腐蚀沥青混合料中集料的热力学分析[J]. 中外公路, 2004, 24(2): 71-73. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2579.2004.02.021.
- ZHANG Qian, PENG Yuhua, YOU Xiao. Thermodynamic analysis of aggregate in asphalt mixture corroded by acid rain [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2004, 24(2): 71-73. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2579.2004.02.021.
- [19] 冯新军, 唐雄, 熊旭. 酸雨对沥青混合料路用性能的影响研究[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(6): 39-43.
- FENG Xinjun, TANG Xiong, XIONG Xu. Study on influence of acid rain on pavement performances of asphalt mixtures [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 37(6): 39-43.
- [20] 周兴林, 刘万康, 冉茂平, 等. 酸雨对石灰岩沥青混合料抗滑性的影响[J]. 公路, 2016, 61(8): 26-31.
- ZHOU Xinglin, LIU Wankang, RAN Maoping, et al. Effect of acid rain on skid resistance of limestone asphalt mixture [J]. Highway, 2016, 61(8): 26-31.
- [21] 徐佳翔. 模拟酸雨环境应力及应变率对混凝土抗压性能影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2018.001417.
- XU Jiexiang. Effects of simulated acid rain environment stress and strain rate on compressive performance of concrete [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [22] KANE M, ZHAO D, DO M T, et al. Exploring the ageing effect of binder on skid resistance evolution of asphalt pavement [J]. Road Materials and Pavement Design, 2010, 11(sup 1): 543-557. DOI: 10.1080/14680629.2010.9690346.
- [23] 李菁若, 吴卓科, 陈小莉, 等. 沥青混合料抗滑性能评价指标与抗滑寿命预估方法研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(12): 69-75. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2019.12.10.
- LI Jingruo, WU Zhuoke, CHEN Xiaoli, et al. Evaluation indexes for anti-sliding performance and evaluation method of anti-sliding life of asphalt pavement [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2019, 38(12): 69-75. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2019.12.10.
- [24] 王元元, 何亮, 孙璐. 矿料分异处理对沥青混合料抗滑性能的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(6): 1216-1220. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2017.06.021.

- WANG Yuanyuan, HE Liang, SUN Lu. Effect of differentiation processing of mineral aggregate on asphalt pavement sliding resistance [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(6): 1216-1220. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2017.06.021.
- [25] 黄宝涛, 田伟平, 李家春, 等. 沥青路面抗滑性能定量评价的分形方法[J]. 中国公路学报, 2008, 21(4): 12-17. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2008.04.003.
- HUANG Baotao, TIAN Weiping, LI Jiachun, et al. Fractal method based on quantitative evaluation of asphalt pavement anti-slide performance [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4): 12-17. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2008.04.003.
- [26] 王辉. SMA-13 沥青路面抗滑表层抗滑性能分形评价方法研究[J]. 公路交通技术, 2018, 34(1): 28-31. DOI: 10.13607/j.cnki.gljt.2018.01.007.
- WANG Hui. Fractal evaluation of anti-skid effect of anti-skid surface on SMA-13 asphalt pavement [J]. Technology of Highway and Transport, 2018, 34(1): 28-31. DOI: 10.13607/j.cnki.gljt.2018.01.007.
- [27] 马健萍, 许新权, 范倩, 等. 基于加速加载试验的 SMA-13 沥青混合料抗滑性能研究[J]. 公路, 2022, 67(7): 388-394.
- MA Jianping, XU Xinquan, FAN Qian, et al. Study on anti-sliding performance of SMA-13 asphalt mixture based on accelerated loading test[J]. Highway, 2022, 67(7): 388-394.
- [28] 罗楚凡, 康爱红, 吴帮伟, 等. 外掺剂对 SMA-13 沥青混合料高温性能影响试验研究[J]. 吉林建筑大学学报, 2021, 38(5): 72-77. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0185.2021.05.013.
- LUO Chufan, KANG Aihong, WU Bangwei, et al. Experimental study on the effect of external dopant on the high-temperature performance of SMA-13 asphalt mixture[J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2021, 38(5): 72-77. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0185.2021.05.013.
- (责任编辑: 罗容; 校对: 欧兆虎; 英文编辑: 杜雪明)

(上接第52页)

- FU Zhengdao, JIANG Guanlu, LIU Qi, et al. Experiment and numerical simulation on interaction between piled bridge foundation and stabilizing piles in the slope with intercalated layer [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(9): 2152-2161. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0389.
- [20] 江苏省水利勘测设计研究院有限公司. 水闸设计规范: SL 265—2016[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code for design of sluice: SL 265—2016 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2017.
- [21] 中华人民共和国水利部. 水工建筑物抗震设计标准: GB 51247—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- Ministry of Water Resources of The People's Republic of China. Standard for seismic design of hydraulic structures: GB 51247—2018 [S]. China Planning Press, 2018.
- [22] 宋国良, 张艳红, 吕玮, 等. 三种水闸—地基模型在某泄水闸动力反应分析中的应用与比较[J]. 水电能源科学, 2015, 33(1): 87-90.
- SONG Guoliang, ZHANG Yanhong, LYU Wei, et al. Application and comparison of dynamic response on discharge sluice using three sluice-foundation models [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(1): 87-90.
- [23] 段元振, 黄圣平, 刘领, 等. 湘祁二线船闸深基坑控制爆破开挖效果与边坡防护措施探讨[J]. 湖南交通科技, 2021, 47(4): 170-173. DOI: 10.3969/j.issn.1008-844X.2021.04.037.
- DUAN Yuanzhen, HUANG Shengping, LIU Ling, et al. Discussion on controlled blasting excavation effect and slope protection measures of deep foundation pit of Xiangqi second line shiplock [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2021, 47(4): 170-173. DOI: 10.3969/j.issn.1008-844X.2021.04.037.
- [24] 徐晓. 地震区桩基式水闸结构计算分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2016. XU Xiao.
- XU Xiao. Analysis on the sluice on the foundation of piles under the condition of the earthquake [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016.
- (责任编辑: 罗容; 校对: 欧兆虎; 英文编辑: 郭一鹏)