

文章编号:1006-2106(2015)07-0029-05

循环荷载历史下 CA 砂浆的动态受压试验研究*

王平^{1**} 王彪¹ 徐浩²

(1. 西南交通大学 高速铁路线路工程教育部重点实验室, 成都 610031; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:研究目的:为研究历经不同循环荷载历史和不同应变速率对铁路轨道系统 CRTS I 型板式无砟轨道水泥乳化沥青砂浆(CA 砂浆)的抗压强度、弹性模量和峰值应变的影响规律,进行 CA 砂浆圆柱体试件历经循环加载历史后,在应变速率为 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时的单轴受压特性试验。

研究结论:(1)应变速率和循环荷载历史对 CA 砂浆的力学性能影响显著;(2)CA 砂浆的抗压强度、弹性模量和峰值应变均随应变速率的增大而提高;(3)在相同的应变速率下,CA 砂浆的抗压强度随循环荷载次数和循环荷载幅值的增加而降低,最大降低幅度为 8.34%;(4)当循环荷载幅值较小时,CA 砂浆的弹性模量随循环荷载次数的增加而增大,最大增加幅度为 59.17%;(5)在相同的应变速率下,CA 砂浆的峰值应变随循环荷载次数及循环荷载幅值的增大呈降低趋势,且应变速率对峰值应变的影响小于循环荷载历史的影响;(6)该研究成果为进一步了解历经循环加载历史后板式无砟轨道的力学性能提供必要的试验依据,进而应用于指导 CA 砂浆材料优化设计中。

关键词:CA 砂浆;应变速率;循环荷载历史;动态特性;受压试验

中图分类号:TU520 文献标识码:A

Experimental Research on the Dynamic Compressive Behaviors of CA Mortar Due to Cyclic Loading History

WANG Ping¹, WANG Biao¹, XU Hao²

(1. Key Laboratory of High-speed Railway Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Research purposes: In order to analyze the influence on the change rule of compressive strength, elastic modulus and peak strain of China railway track system (CRTS) I slab track cement asphalt mortar (CA mortar) by different cyclic loading histories and strain rates. The uniaxial compression characteristic test of CA mortar cylinder specimens due to cyclic loading histories with the strain rates ranging from $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ to $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ was carried out.

Research conclusions: (1) The mechanical property of CA mortar is affected obviously by strain rates and cyclic loading histories. (2) The compressive strength, elastic modulus and peak strain of CA mortar are increase with the strain rate. (3) The compressive strength of CA mortar decreased with the increase of cyclic loading number and cyclic loading amplitude under the same strain rates, the largest reduction of average compressive strength is 8.34%. (4) The elastic modulus of CA mortar increased with the cyclic loading number when the cyclic loading amplitude is small, the largest increase of average elasticity modulus is 59.17%. (5) The peak strain of CA mortar decreased with the increase of cyclic loading number and cyclic loading amplitude under the same strain rates, and the influence of the strain rate on the peak strain of CA mortar is lower than that of the load history. (6) The research results could provide the necessary

* 收稿日期:2015-04-15

基金项目:国家自然科学基金委高铁联合基金重点项目(U1234201)

** 作者简介:王平,1969年出生,男,教授。

experimental basis to learn more about the mechanical properties of slab track after different cyclic loading histories, and be applied to the optimal design of CA mortar.

Key words: CA mortar; strain rates; cyclic loading history; dynamic property; compressive experiment

水泥乳化沥青砂浆(CA砂浆)是由水泥、沥青乳液等多种材料组成的一种有机无机复合材料,在高速铁路板式无砟轨道结构中作为弹性垫层,起着填充、支撑、承力、传力的作用,并为轨道提供适当的刚度和弹性,是高速铁路建造的关键工程材料之一^[1-3]。CA砂浆充填层在其服役过程中承受列车荷载的循环往复作用,处于动态加载过程,因此研究CA砂浆材料在循环荷载与不同应变速率下的动态特性对了解其力学性能,指导其优化设计具有重要意义。

目前国内外学者对CA砂浆在不同应变速率下的力学行为进行了较多的研究,其中王发洲等^[4]采用养护28 d的立方体CA砂浆试块进行不同加载速率下的抗压试验,结果表明CA砂浆的抗压强度随加载速率增大而增大,两者基本呈线性关系,且沥青含量越低,增加趋势越明显;谢友均、曾晓辉等^[5]通过增加加载速率工况,提出CA砂浆的抗压强度、弹性模量、峰值应力应变均与加载速率成幂指数变化;徐浩等^[6]针对现场取样CA砂浆试件,研究了其在反复荷载下的力学性能,并拟合了相应的曲线方程。

虽然关于CA砂浆的强度特性以及其影响因素得到了广泛研究,但CA砂浆的动态特性受循环荷载历史的影响研究尚属空白。本文参照文献[7]的方法,对CA砂浆试件进行不同应变速率和不同循环荷载历史下的力学性能试验,着重分析了CA砂浆的应力应变全曲线、抗压强度、弹性模量和峰值应变受循环荷载历史的影响规律,为进一步了解历经循环加载历史后

板式无砟轨道的力学性能提供必要的试验依据。

1 试验过程

1.1 试验设备

加载设备采用上海华龙测试仪器有限公司WDW系列电子万能试验机,位移精度为0.001 mm,能满足试验的精度要求。该系统在试验过程中全程采用计算机控制,伺服电机驱动,精密滚珠丝杠机械加载,传感器测量信号,能自动采集荷载和位移数据。

1.2 原材料制备

水泥乳化沥青砂浆专用干料:由水泥、细砂和其他添加剂等主要成分混合而成,其基本配合比为水泥:细砂:膨胀剂=1:2:0.1,其中水泥的标号为P·II 42.5R硅酸盐水泥,相关技术指标符合GB 175—2007的规定。该水泥乳化沥青砂浆专用干料24 h体积膨胀率为2.1%,7 d线膨胀率为0.1%,1 d抗压强度为6.89 MPa。

乳化沥青:CRTS I型板式无砟轨道CA砂浆专用乳化沥青,其固含量的质量分数为62.1%,黏度、针入度、延度等均满足《客运专线铁路CRTS I型板式无砟轨道水泥乳化沥青砂浆暂行技术条件(铁道部科技基2008[74])》规定的要求,相关主要技术性能指标如表1所示。新拌CA砂浆性能:J型漏斗流下时间为24 s,分离度为0.2%;拌和水为自来水。CA砂浆所用配合比为 $m(\text{干料}):m(\text{乳化沥青}):m(\text{水})=1\ 100:515:50$ 。

表1 乳化沥青的主要性能指标

项目	恩氏黏度 (25℃)	筛余物 (1.18 mm) /%	储存稳定性(25℃)/%		水泥混 合性/%	蒸发物残留			
			1 d	5 d		针入度(25℃, 100 g,0.1 mm)	溶解度(三氯 乙烯)/%	延度(5℃) /cm	延度(15℃) /cm
指标要求	5~15	<0.1	<1.0	<5.0	<1.0	60~120	>97	≥20	≥50
测试结果	8.0	0	0.3	3.2	0.3	78.5	98.0	26.5	61.2

1.3 试件制备

按给定的CA砂浆配合比,参照《CRTS I型板式无砟轨道水泥乳化沥青砂浆暂行技术条件》[铁道部科技基2008(74)]规定的方法制作试件,并测量新拌CA砂浆的流动度、表观密度和含气量等性能,其中CA砂浆的流动度为24 s,表观密度为 $1\ 610\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$,含气量为8.2%。将新拌的CA砂浆注入尺寸为 $\phi 50\ \text{mm}\times 50\ \text{mm}$ 的塑料模具中,成型100个试件,并将其置于温度为 $(23\pm 2)\ ^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $(65\pm 5)\%$ 的环境中养护24 h左右后拆模,然后在标准养护室中养护至

28 d后进行不同循环荷载历史下的力学性能测试。

1.4 试验方案及试验过程

试验方案包括三种:一是研究不同应变速率对CA砂浆单轴抗压性能的影响,综合考虑设备条件,应变速率分别为 $1\times 10^{-5}\ \text{s}^{-1}$ 、 $1\times 10^{-4}\ \text{s}^{-1}$ 、 $1\times 10^{-3}\ \text{s}^{-1}$ 、 $1\times 10^{-2}\ \text{s}^{-1}$,取 $1\times 10^{-5}\ \text{s}^{-1}$ 作为准静态荷载;二是研究不同循环荷载次数对CA砂浆动态抗压性能的影响,设定循环荷载幅值为准静态荷载的30%,循环荷载次数分别为0次、3次、50次和100次;三是在相同的循环荷载次数下,研究不同循环荷载幅值对CA砂浆动态

抗压性能的影响,循环荷载幅值分别为准静态荷载强度的0、30%和60%。实测得到 CA 砂浆在准静态荷载下的平均强度为 2.278 MPa,相应 30%、60% 极限强度分别为 0.683 MPa 和 1.367 MPa。试验时保持环境温度为 20 ℃。

试验方法参照文献[5]进行,测试时试件与加载板之间采用滑石粉进行减摩处理。在测试过程中发现,试件经历一定的循环荷载历史后,CA 砂浆的累积塑性变形均小于 0.1 mm,所以应变计算时未考虑荷载历史下试件的累积塑性变形的影响。每组试验取 3 个试件进行加载试验,若测试时的试验结果离散性较大,则增加试件数量以保证试验数据的有效性。

2 试验结果分析

2.1 CA 砂浆应力应变全曲线

CA 砂浆的应力应变全曲线反映了 CA 砂浆各个受力阶段的变形特点和破坏全过程,包含了重要的力学性能指标。应变速率为 $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,循环荷载幅值为 30% 极限抗压强度,不同循环荷载次数下的典型应力应变全曲线如图 1 所示。应变速率为 $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,循环荷载次数为 50 次,不同循环荷载幅值下的典型应力应变全曲线如图 2 所示。

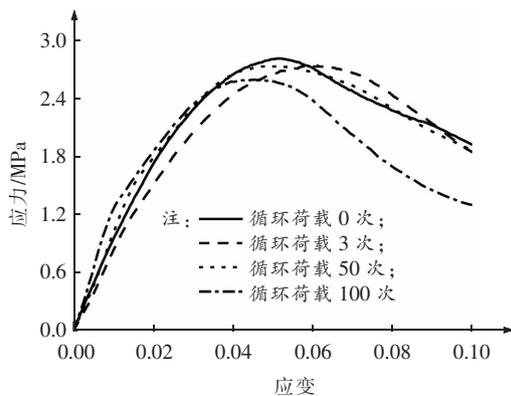


图 1 不同循环荷载次数下 CA 砂浆应力应变全曲线

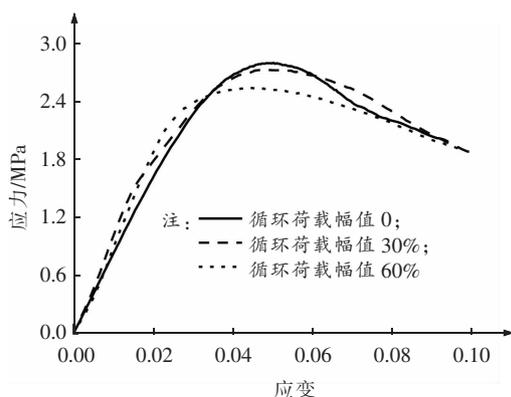


图 2 不同循环荷载幅值下 CA 砂浆应力应变全曲线

从图 1、图 2 可以看出,受压初始阶段 CA 砂浆处于弹性变形阶段,随应力的逐渐增加,CA 砂浆的内部产生微裂缝,并经历稳定扩展和快速扩展阶段。达到峰值应力后,CA 砂浆的应力应变曲线没有发生陡降,而是缓慢下降,这反映了 CA 砂浆试件良好的黏弹性特征。另外,在相同的应变速率下,随着循环荷载次数、循环荷载幅值的增大,CA 砂浆的全应力应变曲线形状发生显著变化。

2.2 CA 砂浆抗压强度

历经循环荷载历史后 CA 砂浆在不同应变速率下的动态抗压强度如表 2 所示。

表 2 CA 砂浆经历循环荷载历史后的动态抗压强度

(单位:MPa)

循环荷载幅值	循环荷载次数	试验	应变速率/ s^{-1}			
			1×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-2}
$0.3 f_c$	0	1	2.312	2.802	3.416	4.449
		2	2.324	2.794	3.478	4.492
		3	2.20	2.787	3.370	4.433
		平均	2.278	2.794	3.421	4.458
	3	1	2.259	2.729	3.285	4.413
		2	2.273	2.705	3.470	4.416
		3	2.250	2.721	3.469	4.433
		平均	2.261	2.718	3.408	4.420
	50	1	2.189	2.650	3.367	4.330
		2	2.197	2.726	3.425	4.351
		3	2.192	2.645	3.394	4.368
		平均	2.193	2.673	3.395	4.349
100	1	2.160	2.591	3.354	4.338	
	2	2.142	2.600	3.311	4.341	
	3	2.201	2.630	3.356	4.285	
	平均	2.167	2.607	3.340	4.321	
$0.6 f_c$	50	1	2.167	2.586	3.291	4.296
		2	2.136	2.537	3.282	4.307
		3	2.157	2.562	3.314	4.264
		平均	2.153	2.561	3.295	4.289

注: f_c 为极限抗压强度。下同。

2.2.1 循环荷载次数的影响

从表 2 可以看出,在相同的循环荷载次数下,CA 砂浆的极限抗压强度随应变速率的增加而增大;在相同的应变速率下,CA 砂浆的极限抗压强度随循环荷载次数的增加而降低。应变速率为 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时,历经 3 次、50 次和 100 次循环荷载历史后,CA 砂浆比未受循环荷载作用的平均抗压强度分别降低了 0.74%、2.72%、0.38% 和 0.85%、3.73%、4.33%、0.76% 和 2.44%、4.87%、6.69%、2.36% 和 3.07%。可以看出,历经 3 次循环荷载作用后,CA 砂浆的抗压强度降低很少,历经 50 次和 100 次

循环荷载作用后,CA 砂浆抗压强度降低明显。

2.2.2 循环荷载幅值的影响

从表2可以看出,在相同的荷载幅值条件下,CA 砂浆的极限抗压强度随应变速率的增加而增大;而在相同的应变速率情况下,CA 砂浆的极限抗压强度随循环荷载幅值的增加而降低。在应变速率为 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时,历经30%和60%的极限抗压强度的荷载历史后,CA 砂浆比未受循环荷载作用的平均抗压强度分别降低了3.73%、4.33%、0.76%和2.44%,5.48%、8.34%、3.68%和3.79%。

2.3 CA 砂浆弹性模量

CA 砂浆的弹性模量是表征 CA 砂浆受力后应力应变关系的重要参数,为了定量地描述弹性模量的变化情况,本文定义 $0 \sim 1/3$ 抗压强度处的割线模量作为 CA 砂浆的弹性模量。通过 CA 砂浆的应力应变曲线分析,得到不同应变速率和循环荷载历史下 CA 砂浆的弹性模量如表3所示。

表3 CA 砂浆经历循环荷载历史后的弹性模量(单位:MPa)

循环荷载幅值	循环荷载次数	试验	应变速率/ s^{-1}			
			1×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-2}
$0.3 f_c$	0	1	88.841	94.418	109.150	110.936
		2	75.006	82.192	95.212	102.175
		3	68.523	96.892	85.078	127.738
		平均	77.456	91.167	96.480	113.616
	3	1	87.820	82.750	120.839	176.352
		2	76.029	95.515	119.727	158.038
		3	75.273	98.678	100.585	171.218
		平均	79.707	92.314	113.720	168.536
	50	1	87.052	88.438	129.524	174.291
		2	83.168	99.662	130.181	178.514
		3	79.086	101.79	122.953	179.232
		平均	83.102	96.63	127.552	177.345
	100	1	95.762	131.188	129.711	181.549
		2	85.335	119.411	130.366	183.501
		3	87.848	118.260	132.277	177.488
		平均	89.648	122.953	130.784	180.846
$0.6 f_c$	50	1	79.524	76.421	92.961	123.419
		2	71.526	87.568	118.107	129.559
		3	77.652	88.455	108.108	128.286
		平均	76.234	84.148	106.392	127.088

2.3.1 循环荷载次数的影响

从表3可以看出,在相同的循环荷载次数下,CA 砂浆的弹性模量随着应变速率的增大而提高;在相同的应变速率下,CA 砂浆的弹性模量随循环荷载次数的增大而增大。在应变速率为 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时,历经3次、50次

和100次循环荷载历史后,CA 砂浆比未受荷载历史的弹性模量分别增大了2.91%、1.26%、17.87%和48.33%、7.29%、5.99%、32.30%和56.09%、15.74%、34.86%、35.56%和59.17%。当循环荷载幅值较小时,循环荷载对 CA 砂浆造成的损伤很小,反而经过循环荷载的挤压作用而变得更加密实,从而使得 CA 砂浆的弹性模量随着循环荷载次数的增加呈增大趋势。

2.3.2 循环荷载幅值的影响

从表3可以看出,在相同的荷载幅值条件下,CA 砂浆的弹性模量随应变速率的增加而增大;而在相同的应变速率情况下,CA 砂浆的弹性模量随循环荷载幅值的增加先增大后减小。当作用于 CA 砂浆的循环荷载幅值较小时,循环荷载对 CA 砂浆的挤压作用使其密实度增加,进而 CA 砂浆弹性模量将会增大,而当初始荷载幅值较大时,循环荷载对 CA 砂浆造成损伤,使 CA 砂浆的弹性模量降低。

2.4 CA 砂浆峰值应变

峰值应变是指 CA 砂浆峰值应力处对应的应变。CA 砂浆在不同应变速率和循环荷载历史下的临界应变如表4所示。

表4 CA 砂浆经历循环荷载历史后的峰值应变 ϵ_c

循环荷载幅值	循环荷载次数	试验	应变速率/ s^{-1}			
			1×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-2}
$0.3 f_c$	0	1	4.825	5.157	5.513	6.019
		2	4.493	5.024	6.110	6.072
		3	3.951	4.767	5.307	6.102
		平均	4.423	4.982	5.643	6.064
	3	1	4.621	6.137	5.208	5.495
		2	4.886	5.810	6.389	5.843
		3	4.885	5.009	5.314	5.636
		平均	4.797	5.652	5.637	5.658
	50	1	4.559	4.754	5.235	5.142
		2	4.787	4.760	5.287	5.041
		3	5.015	5.090	5.116	5.287
		平均	4.787	4.868	5.212	5.156
	100	1	4.077	4.554	4.752	4.942
		2	4.530	4.783	4.361	5.067
		3	4.485	4.879	4.796	4.991
		平均	4.364	4.738	4.636	5.00
$0.6 f_c$	50	1	4.10	4.161	4.232	4.337
		2	4.186	4.219	4.386	4.408
		3	4.014	4.119	4.285	4.325
		平均	4.10	4.166	4.301	4.356

2.4.1 循环荷载次数的影响

从表4可以看出,在相同的循环荷载次数下,CA 砂浆的峰值应变随着应变速率的增大而增大。历经0次、3次、50次和100次的循环荷载次数后,相对于

应变速率为 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时的峰值应变,当应变速率为 $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时,CA 砂浆的峰值应变分别增加了 12.64%、17.82%、1.69% 和 8.57%、27.58%、17.51%、8.87% 和 6.23%、37.10%、17.94%、7.71% 和 14.57%。材料的峰值应变一般包括弹性应变和黏性应变,由于 CA 砂浆峰值应变是由 CA 砂浆的弹性应变和黏性应变共同引起的,随着应变速率的增加,沥青的掺入使得 CA 砂浆的黏性表现的越明显,其黏性应变效应增加,因而导致 CA 砂浆在峰值应力处的应变增加。同时从表 4 还可以看出,在相同的应变速率条件下,CA 砂浆的峰值应变随循环荷载次数的增大先增大后降低。

2.4.2 循环荷载幅值的影响

从表 4 可以看出,在相同的荷载幅值条件下,CA 砂浆的峰值应变随应变速率的增加而增大。当循环荷载次数为 50 次时,历经 30% 和 60% 极限抗压强度荷载历史后,相对于应变速率为 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时的峰值应变,当应变速率为 $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时,CA 砂浆的峰值应变分别增加了 1.69% 和 1.61%、8.88% 和 4.9%、7.71% 和 6.24%。在相同的应变速率情况下,CA 砂浆的峰值应变随循环荷载幅值的增加而降低。与未受循环荷载工况相比,CA 砂浆历经 30% 和 60% 的极限抗压强度的循环荷载历史后平均临界应变分别降低了 8.23%、2.29%、7.64% 和 14.97%、7.30%、16.38%、23.78% 和 28.17%。同时从表 4 还可以看出,相对于不同的应变速率,历经循环荷载历史后峰值应变的降低程度大于应变速率对峰值应变的影响。循环荷载历史的影响是由 CA 砂浆内部的微缺陷的发生发展引起的,而应变速率对临界应变的影响主要是由 CA 砂浆内部的黏性引起的。从以上分析可知,CA 砂浆内部黏性对临界应变的影响小于 CA 砂浆内部微缺陷的影响。

3 结论

本文研究了循环荷载历史与应变速率对 CA 砂浆抗压强度、弹性模量、峰值应变以及应力应变全曲线的影响,得到如下结论:

(1) 应变速率和循环荷载历史对 CA 砂浆的力学性能影响显著。

(2) 在相同的循环荷载历史条件下,CA 砂浆的平均抗压强度随应变速率的增大而增大;CA 砂浆的抗压强度随循环荷载幅值与循环荷载次数的增大而降低。

(3) CA 砂浆的弹性模量随应变速率的增大而提高;当应变速率相同、荷载幅值较小时,CA 砂浆的弹性模量随循环荷载次数的增大而增大;CA 砂浆弹性模量

随循环荷载幅值的增大先增大后减小,说明 CA 砂浆的弹性模量受循环荷载幅值的影响存在阈值。

(4) CA 砂浆的峰值应变随应变速率的增大而增大,当应变速率相同时,CA 砂浆的峰值应变随循环荷载次数及循环荷载幅值的增大呈降低的趋势,且应变速率对峰值应变的影响小于循环荷载历史的影响。

参考文献:

- [1] Coenraad E. Recent Development in Slab Track [J]. *European Railway Review*, 2003(2):81-85.
- [2] Shigeru M, Hideyuki T, Massao U, etc. The Mechanism of Railway Tracks [J]. *Japan Railway and Transportation Review*, 1998(3):38-45.
- [3] 王平,徐浩,谢铠泽,曾晓辉. CRTS I 型 CA 砂浆动态压缩试验及本构关系研究 [J]. *铁道工程学报*, 2014(5):35-40,58.
Wang Ping, Xu Hao, Xie Kaize, Zeng Xiaohui. Research on the Dynamic Compressive Test of China Railway Track System (CRTS) I Type CA Mortar and Its Constitutive Relationship [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2014(5):35-40,58.
- [4] 王发洲,刘志超,胡曙光. 加载速率对 CA 砂浆抗压强度的影响 [J]. *北京工业大学学报*, 2008(10):1059-1065.
Wang Fazhou, Liu Zhichao, Hu Shuguang. Influence of Loading Rate on Compressive Strength of CA mortar [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2008(10):1059-1065.
- [5] 谢友均,曾晓辉,邓德华,等. 铁路无砟轨道水泥乳化沥青砂浆力学性能 [J]. *建筑材料学报*, 2010(4):483-487.
Xie Youjun, Zeng Xiaohui, Deng Dehua, etc. Mechanical Characteristics of China Railway Track System (CRTS) I Type Slab Tracks CA Mortar under Different Strain Rates [J]. *Journal of Building Materials*, 2010(4):483-487.
- [6] 徐浩,王平,徐井芒,等. 反复荷载下水泥乳化沥青砂浆力学性能试验 [J]. *建筑材料学报*, 2014(4):715-720.
Xu Hao, Wang Ping, Xu Jingmang, etc. Experimental Study on Mechanical Properties of Cement Asphalt Mortar under Cyclic Loading [J]. *Journal of Building Materials*, 2014(4):715-720.
- [7] 胡海蛟,彭刚,谢玖杨,等. 历经循环荷载历史混凝土动态受压试验研究 [J]. *混凝土*, 2013(1):51-54.
Hu Haijiao, Peng Gang, Xie Jiuyang, etc. Experimental Study on Dynamic Compressive Behaviors of Concrete Due to Circular Loading History [J]. *Concrete*, 2013(1):51-54.