

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2022.06.017

# 基于单轴静载蠕变试验的 AC-13 高温性能影响研究

黄伟<sup>1</sup>, 郝朝<sup>2</sup>

(1.重庆交通大学 重庆交大建设工程质量检测中心有限公司, 重庆 400074; 2.重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

**摘要:** 采用单轴静载蠕变试验对 AC-13 沥青混合料的高温性能影响因素进行研究, 分析不同级配、温度及荷载对 AC-13 高温性能的影响。结果表明, 沥青混合料在加载过程中会经历瞬时变形、弹性恢复和黏性流动 3 个阶段; 采用级配 1 成型的混合料在同一条件下的劲度模量高于采用级配 2 和级配 3 成型的混合料; 荷载一定时, AC-13 沥青混合料的劲度模量随温度升高而降低, 残余应变比则相反; 温度一定时, AC-13 沥青混合料的劲度模量和残余应变比均呈上升趋势, 但不同级配混合料的增长速度不一致; 级配是显著影响沥青混合料高温稳定性的因素之一。

**关键词:** 公路; AC-13 沥青混合料; 高温性能; 劲度模量; 残余应变比; 单轴静载蠕变试验

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)06-0075-04

车辙病害反映出沥青混合料高温稳定性不足。目前, 测试沥青混合料高温稳定性的方法主要包括车辙试验、单轴静载或动载蠕变试验、径向静载或动载蠕变试验等。魏密等利用单轴静载试验对比分析了 Super-12.5 和 AC-13I 在不同温度和荷载下抵抗永久变形的能力; 王随原等通过单轴静载蠕变试验比较基质沥青混合料和 SBS 改性沥青混合料的高温性能, 利用黏弹性理论解释了 SBS 改性沥青混合料高温性能更优的原理; 祁峰研究了动稳定度及单轴静载蠕变试验的劲度模量、残余应变比等指标的相关性, 认为大多数指标与动稳定度的相关性较好; 朱云升等在高温条件下进行单轴动态重复加载蠕变试验, 得出永久变形与横向流动次数、竖向流动

次数的关系; 张裕卿等对沥青混合料进行三轴重复荷载试验, 认为流变次数和斜率可反映沥青混合料的高温性能。单轴静载蠕变试验是一种操作较简单, 能表征路面在长期荷载作用下累计变形的的方法。本文通过单轴静载蠕变试验分析级配、温度、荷载对 AC-13 沥青混合料高温稳定性的影响, 为抗车辙沥青混合料设计提供参考。

## 1 原材料配合比及试验方案

### 1.1 原材料及配合比

采用 SBS 改性沥青、玄武岩粗集料、石灰岩粗集料、石灰岩矿粉, 设计 3 种不同级配 AC-13 沥青混合料(见表 1), 最佳油石比均为 4.7%。

表 1 试验用 AC-13 混合料级配组成

级配编号	下列筛孔(mm)通过百分率/%								
	0.075	0.150	0.300	0.600	1.180	2.360	4.750	9.500	13.200
级配 1	6.1	9.8	12.9	18.1	24.2	37.6	54.8	76.0	95.2
级配 2	5.2	7.4	10.2	14.9	21.8	32.9	47.1	72.3	92.3
级配 3	7.0	11.2	15.7	22.6	30.7	43.1	59.6	81.7	97.1

### 1.2 试验方案

采用旋转压实方法成型尺寸为  $\phi 150 \text{ mm} \times H 150 \text{ mm}$  的圆柱体试件。试验时在试件两端分别垫 3 mm 厚聚四氟乙烯板, 减小两侧端面约束效应及摩擦对试验的影响。按壳牌单轴静载蠕变试验设置试验条件: 1) 温度为 60 °C, 对 3 种级配混合料分别施加 300 kPa、400 kPa、500 kPa 荷载进行试验;

2) 应力为 500 kPa, 3 种级配混合料分别在 40 °C、50 °C、60 °C 温度条件下进行试验。

## 2 试验结果与分析

3 种级配 AC-13 沥青混合料加载时间与永久应变的关系(即蠕变曲线)见图 1。

沥青是一种典型的黏弹性材料, 其混合料在试

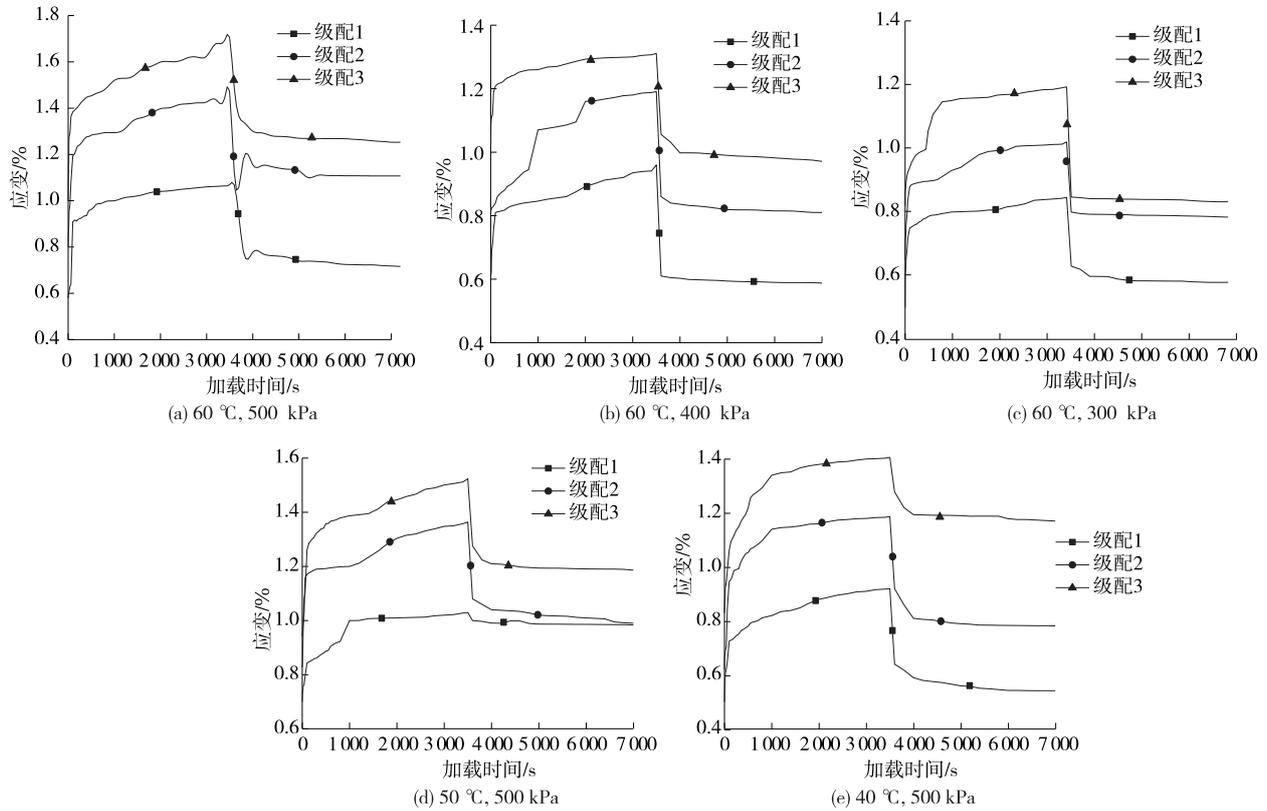


图1 不同条件下各级配 AC-13 沥青混合料应变随时间的变化

验过程中会经历加载时的瞬时变形、荷载持续时的弹性恢复和卸载后的黏性流动变形。所有蠕变曲线几乎在加载 100 s 时产生瞬时弹性变形,且变形速率十分迅速。在持荷阶段的变形幅度较小,但由于混合料的不规则性,试验过程中会出现变形幅度陡变。通常情况下具有弹性的材料变形是可以恢复的,而沥青混合料受力时间超过 1 h 后,其中一部分弹性逐步向黏性转变而变得不可恢复,称为永久变形,它是沥青路面高温失稳的主要原因。除沥青混合料原材料的原因外,矿料组成架构、环境温度、外界应力等都是引起永久变形的主要因素。

### 2.1 级配对沥青混合料高温稳定性的影响

根据图 1,不同级配在一定程度上影响沥青混合料的高温稳定性。3 种级配 AC-13 沥青混合料在 60 °C、0.4 MPa,50 °C、0.5 MPa 试验条件下的劲度模量  $E$  分别见图 2、图 3。

由图 2、图 3 可知:在温度和应力不变的情况下,沥青混合料的劲度模量大小排序为  $E_{\text{级配1}} > E_{\text{级配2}} > E_{\text{级配3}}$ ,说明级配不同会引起沥青混合料高温稳定性差异。级配 1 和级配 2 关键筛孔 2.36 mm 的通过率都小于 40%,属于粗型密级配,而级配 3 属于细型密级配,在高温性能方面不及前两者。从整

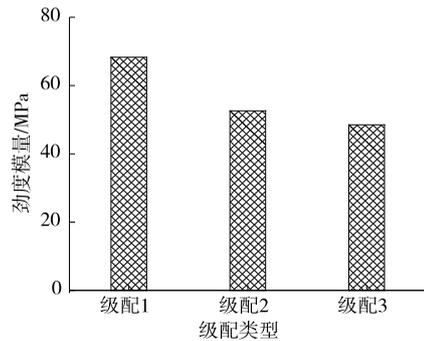


图2 60 °C、0.4 MPa 条件下各级配 AC-13 沥青混合料的劲度模量

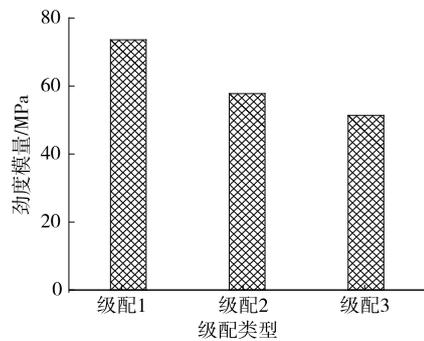


图3 50 °C、0.5 MPa 条件下各级配 AC-13 沥青混合料的劲度模量

个筛孔的通过率来看,级配1形成的骨架较密实,形成较多结构沥青,配合集料颗粒嵌挤能抵抗高温重载条件下的剪应力。

### 2.2 温度对沥青混合料高温稳定性的影响

由于沥青胶结料具有感温性,其混合料性能对温度也较敏感。施加恒定荷载 500 kPa,分别在 40 °C、50 °C、60 °C 条件下进行单轴静载蠕变试验,试验结果见图 4。根据试验结果计算的劲度模量及残余应变比随温度的变化见图 5、图 6。

由图 4 可知:随温度变化,不同级配沥青混合料蠕变曲线的变化规律相近,40 °C 时变形量低于 50 °C、60 °C 时变形量,且其变形速率较平缓。说明温度越高,沥青性质转变越快,出现的黏性流动在外

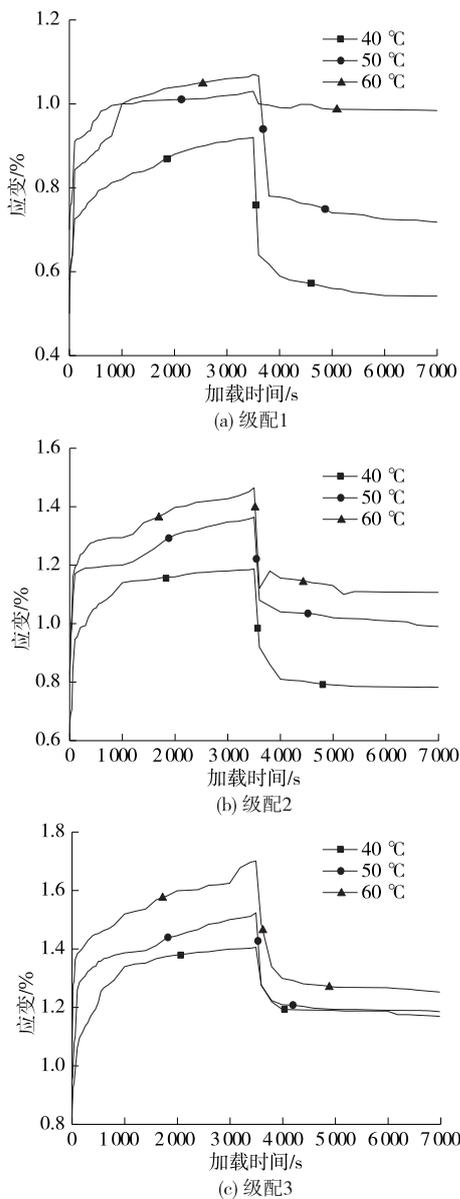


图 4 不同温度下各级配沥青混合料的蠕变曲线

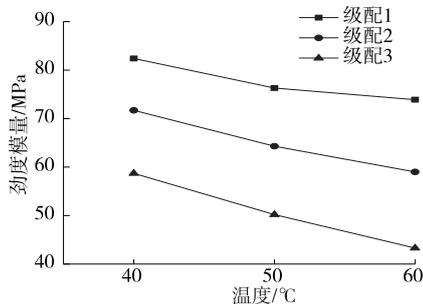


图 5 各级配沥青混合料劲度模量随温度的变化

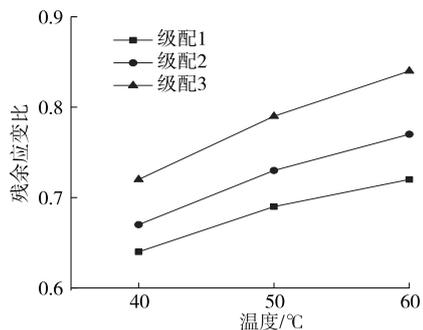


图 6 各级配沥青混合料残余应变比随温度的变化

加荷载作用下更易发生不可恢复的变形,从而导致路面车辙病害。

由图 5 可知:沥青混合料的劲度模量随温度升高而降低。温度从 40 °C 升至 50 °C,级配 1、级配 2、级配 3 的劲度模量分别降低 7.4%、10.32% 和 14.48%;温度从 50 °C 升至 60 °C,级配 1、级配 2、级配 3 的劲度模量分别降低 3.14%、8.25%、13.65%,级配 1 和级配 2 的下降幅度明显减缓,级配 3 因为其颗粒组成的特点,下降趋势仍较大。荷载作用下,沥青混合料在 50 °C 可能出现变形的临界点。

残余应变比为不可恢复的永久变形与加载过程中某一刻变形的比,其值越大,路面抵抗荷载永久变形的能力越弱。由图 6 可知:随着温度升高,沥青混合料的残余应变比增大。温度从 40 °C 升至 50 °C,级配 1、级配 2、级配 3 的残余应变比分别增加 7.81%、8.96%、9.72%;温度从 50 °C 升至 60 °C,级配 1、级配 2、级配 3 的残余应变比分别增加 4.35%、5.48%、6.33%。其原因在于混合料经受高温的同时也在承受荷载,其胶结料逐渐变软,软化沥青在矿料之间起到润滑作用,降低了混合料内部的嵌挤作用。同时胶结料性质由弹性向黏性过渡,黏性流动变形量是永久变形量的一部分,其所占比例越高,沥青路面车辙病害越突出。

### 2.3 荷载对沥青混合料高温稳定性的影响

对于线弹性材料,在外加荷载作用下产生的变化遵循胡克定律。但沥青材料并非完全的胡克弹性体,在受力状态下出现的是蠕变和松弛现象。在60℃时分别对3种级配混合料施加300 kPa、400 kPa、500 kPa荷载进行单轴静载蠕变试验,试验结果见图7~9。

由图7可知:外加荷载由400 kPa升至500 kPa时,沥青混合料产生的变形量显著增加;级配1因颗粒组成特点,其变形量增长幅度低于其他2种级配,提高了抵抗外界剪切变形的能力。

由图8可知:各级配沥青混合料的劲度模量随荷载增加而递增。荷载由300 kPa升至400 kPa时,

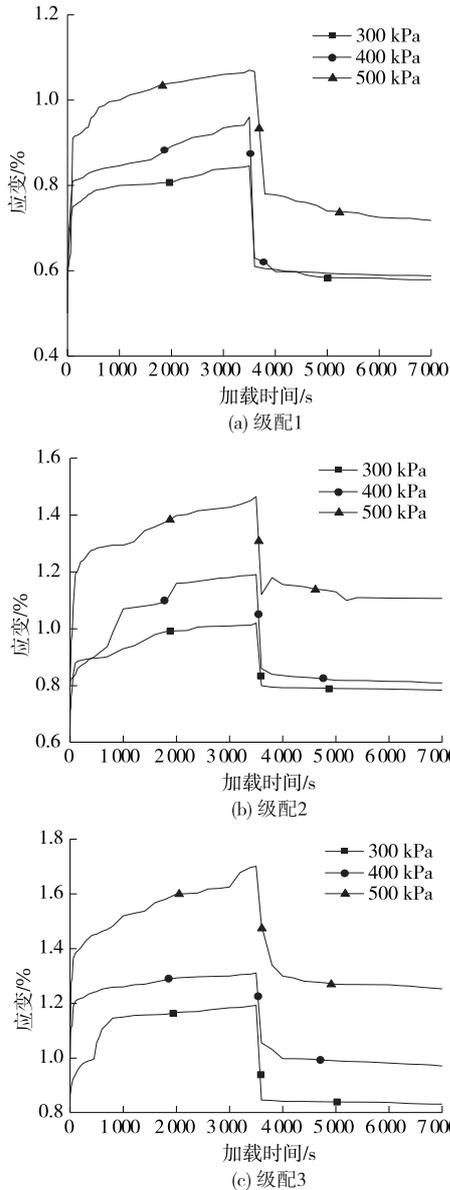


图7 不同荷载下各级配沥青混合料的蠕变曲线

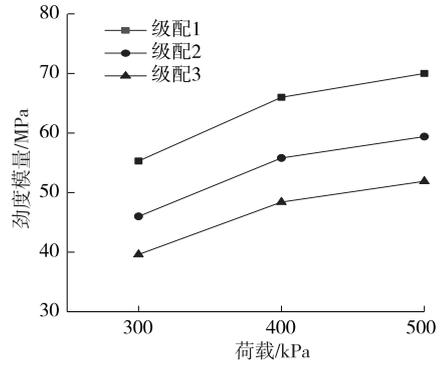


图8 各级配沥青混合料劲度模量随荷载的变化

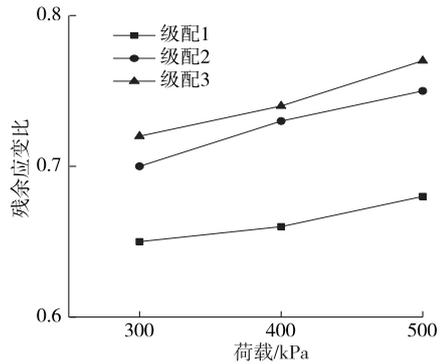


图9 各级配沥青混合料残余应变比随荷载的变化

级配1、级配2和级配3的劲度模量分别增加19.35%、21.30%、22.22%;荷载由400 kPa升至500 kPa时,级配1、级配2、级配3的劲度模量分别增加6.06%、6.45%、7.23%,级配1相对于级配2和级配3对外加荷载的敏感程度更低。

由图9可知:各级配沥青混合料的残余应变比随荷载提高而增加,其中级配1的残余应变比最低,在荷载影响下变形量较少,有足够的抵抗永久变形,减少车辙病害的产生。

### 3 结论

(1) 单轴静载蠕变试验可作为沥青混合料高温稳定性的评价手段。根据蠕变曲线,沥青混合料主要经历加载时的瞬时变形、持荷阶段的延迟弹性变形与卸载后的黏性流动变形3个阶段。

(2) 在同一温度、同一荷载下,级配1的劲度模量优于其他2种级配。外加荷载一定时,混合料的劲度模量、残余应变比随温度升高分别呈降低和上升的趋势,级配1在50℃后的变化较缓和,说明在荷载作用下50℃可能是混合料高温失稳的临界点。温度一定时,混合料的劲度模量、残余应变比都随荷载增加

(下转第94页)

表3 各时刻温度对主梁21#块挠度影响的理论值和实测值

时刻	理论值和实测值			℃	
	大气温度/℃	表面温度/℃	内腔温度/℃	理论挠度/mm	实测挠度/mm
7:00	22.0	25.1	26.2	10.3	12.6
9:00	25.8	26.8	26.0	-3.6	-5.6
14:00	32.6	37.5	26.9	-16.5	-27.2
18:00	29.7	36.1	27.9	-11.2	-26.0
22:00	26.9	33.5	28.2	-5.7	-6.1
2:00	24.0	29.7	28.3	2.8	6.0

由表3可知:1)在大气温度影响下,梁端挠度变化很大,14:00时挠度为-27.2 mm,22:00时挠度为-6.1 mm。若忽略温度影响进行施工控制,会给施工精确性带来很大影响。在斜拉桥主梁悬臂施工过程中要严格控制温度变化对主梁的影响,这对主梁线形控制及合龙时间选择至关重要。2)实测挠度比理论挠度稍大,这是因为在实际测量过程中主梁受到各种因素耦合作用的影响。可通过温控模拟分析方法对实测数据进行校核,从而定性地对实测数据进行分析。

### 6 结论

(1)温度变化对主梁挠度有很大影响,不能忽略不计,且温度变化对主梁的影响存在滞后,在大跨径斜拉桥施工监控中要把温度监控放在重点位置。

(2)挠度变化与温度变化呈相反的趋势,温度上升则挠度向下发展,温度下降则挠度向上发展。主梁挠度的形成与大气温度并无直接的联系,而与梁上下表面温差有关。

(3)单箱多室箱梁在顶板上存在横向温度梯度,且与混凝土深度有关。有腹板的顶板温度上升慢,没有腹板的顶板温度上升快,顶板温度由顶

板中点向腹板方向递减,随着时间的增加这种现象减弱。

(4)单箱多室箱梁由于内腹板的存在温度梯度的温差值减小,靠近边缘腹板的温差分布曲线与《铁路桥涵混凝土结构设计规范》的温差分布曲线更接近。

### 参考文献:

[1] 刘国坤,颜东煌,涂光亚.混凝土斜拉桥施工控制中温度对主梁标高的影响[J].长安大学学报(自然科学版),2017,37(6):63-69+77.

[2] 谢青华.大跨径预应力混凝土连续箱梁桥温度效应分析[D].武汉:武汉理工大学,2008.

[3] 周兴林.大跨度斜拉桥温度场与温度效应分析[D].昆明:昆明理工大学,2020.

[4] 王毅,叶见曙.混凝土箱梁悬臂施工中温度梯度对标高影响的分析与控制[J].公路交通科技,2009,26(8):89-93+98.

[5] 樊健生,刘诚,刘宇飞.钢-混凝土组合梁桥温度场与温度效应研究综述[J].中国公路学报,2020,33(4):1-13.

[6] 顾斌,谢甫哲,雷丽恒,等.大跨桥梁结构三维日照温度场计算方法[J].东南大学学报(自然科学版),2019,49(4):664-671.

[7] 刘诚.钢-混凝土组合桥梁的温度场和温度效应研究[D].北京:清华大学,2018.

[8] CLARK J H.Evaluation of thermal stresses in a concrete box girder bridge[D].Washington:University of Washington,1989.

[9] 王永宝,赵人达,张双洋.桥梁结构温度场测点布置方法[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016,32(2):271-278.

收稿日期:2021-08-31

\*\*\*\*\*  
(上接第78页)

而上升,其中级配2、级配3对荷载的影响较敏感。

(3)推荐使用级配1作为AC-13型沥青混合料的设计级配。

### 参考文献:

[1] 魏密,周进川.旋转压实试件的高温蠕变特性研究[J].重庆交通学院学报,2004,23(5):56-58.

[2] 王随原,周进川.SBS改性沥青混合料蠕变性能试验研究[J].公路交通科技,2006,23(12):10-15.

[3] 祁峰.采用蠕变试验评价沥青混合料的高温稳定性研究[D].西安:长安大学,2009.

[4] 朱云升,郭忠印,王景.高温重载条件下沥青混合料的蠕变试验[J].建筑材料学报,2008,11(5):545-548.

[5] 张裕卿,黄晓明.高温重载下沥青混合料变形特性三轴重复荷载蠕变试验研究[J].公路,2006(12):151-156.

[6] 张争奇,罗要飞,栗培龙,等.基于重复加载蠕变试验的沥青混合料高温性能研究[J].武汉理工大学学报,2014,36(4):58-61.

收稿日期:2021-12-07