

# 桥梁无缝伸缩缝树脂弹性体路用性能试验研究

周伟<sup>1</sup>, 盛亮<sup>1</sup>, 高琴<sup>1</sup>, 张辉<sup>2\*</sup>, 赵梦龙<sup>2</sup>

(1. 江苏省交通工程建设局, 江苏 南京 211899; 2. 江苏中路工程技术研究院有限公司, 江苏 南京 211899)

**摘要:**无缝伸缩缝是一种新型的桥梁伸缩缝,为研究无缝伸缩缝树脂弹性体路用性能,探究应用于桥梁中小位移伸缩缝的可行性。该文通过60℃车辙试验、-10℃低温小梁弯曲试验、动态模量试验、泊松比试验和Overlay Test (OT)试验对树脂弹性体的高低温稳定性、变形性能和疲劳抗裂性能进行了对比研究。试验结果表明:树脂弹性体60℃动稳度度>31 000次/mm, -10℃低温弯曲应变>43 000×10<sup>-6</sup>,不同温度和荷载条件下动态模量为10~12 MPa,拉伸/压缩泊松比为0.030~0.050,OT试验断裂能相对TST弹塑体提高59%。桥梁无缝伸缩缝树脂弹性体具有优异的高低温性能,对温度和荷载频率不敏感,是一种泊松比低、抗疲劳开裂能力较强的材料,更能满足桥梁中小位移伸缩缝的行车和变形要求。

**关键词:**桥梁工程;无缝伸缩缝;树脂弹性体;路用性能;试验研究

中图分类号:U444

文献标志码:A

## Experimental Study on Road Performance of Resin Elastomer for Seamless Expansion Joints of Bridges

ZHOU Wei<sup>1</sup>, SHENG Liang<sup>1</sup>, GAO Qin<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>2\*</sup>, ZHAO Menglong<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Communications Engineering Construction Bureau, Nanjing, Jiangsu 211899, China; 2. Jiangsu Sinoroad Engineering Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211899, China)

**Abstract:** Seamless expansion joint is a new type of bridge expansion joint. In order to study the road performance of resin elastomer for seamless expansion joints, the feasibility of applying resin elastomer to small and medium displacement expansion joints of bridges was explored. Through the rutting test at 60 °C, low-temperature beam bending test at -10 °C, dynamic modulus test, Poisson's ratio test, and overlay test (OT), the high and low temperature stability, deformation performance, and fatigue crack resistance of the resin elastomer were compared. The test results show that the dynamic stability of the resin elastomer at 60 °C is more than 31 000 times/mm, and the bending strain at low temperature of -10 °C exceeds 43 000 × 10<sup>-6</sup>. Under different temperatures and load conditions, the dynamic modulus is 10–12 MPa, and the Poisson's ratio of tension/compression is 0.03–0.05. The fracture energy of OT is 59% higher than that of the TST elastoplastic body. The resin elastomer for seamless expansion joints of bridges has excellent high and low temperature performance, and it is insensitive to temperature and load frequency. Therefore, it is a material with a low Poisson's ratio and strong fatigue crack resistance and can better meet the driving and deformation requirements of small and medium displacement expansion joints of bridges.

**Keywords:** bridge engineering; seamless expansion joints; resin elastomer; road performance; experimental study

收稿日期:2023-11-23

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2021YFB1600300)

作者简介:周伟,男,正高级工程师.E-mail:137111853@qq.com

\*通信作者:张辉,男,博士,正高级工程师.E-mail:zh@sinoroad.com

## 0 引言

伸缩缝是桥梁连接的重要构件,目前主要采用模数式或梳齿板式等型钢类伸缩缝,该类型伸缩缝种类多,技术成熟,且能满足160 mm以上的大变形伸缩缝需求。但型钢类伸缩缝易在行车荷载作用下发生型钢疲劳断裂、翘起,橡胶条老化渗水,锚固区混凝土破坏等病害,严重的可能危及桥梁主体结构安全<sup>[1-4]</sup>,导致型钢类伸缩缝不仅难以满足设计使用年限,也给行车带来安全隐患。此外,型钢类伸缩缝行车舒适性差,噪声大,人体可接受噪声通常为60~70 dB,而型钢类伸缩缝噪声大于80 dB,给沿线居民带来了极大的噪声污染,影响了人们的身心健康。

在此背景下,无缝伸缩缝逐步成为行业的研究热点,其中,沥青类材料填充应用较为广泛,该材料被国外学者统称为APJ(Asphalt Plug Joints)材料。根据改性材料的种类,沥青材料可分为橡胶改性沥青和SBS、SBR复合改性沥青(如TST材料)<sup>[5]</sup>。Bramel等<sup>[6-7]</sup>对美国50个州伸缩缝进行调查,结果显示无缝伸缩缝使用性能不佳,主要是在寒冷天气下开裂,在炎热天气下出现车辙;Chang等<sup>[8]</sup>对美国印第安纳州7 763个桥梁接缝进行调查,结果显示无缝伸缩缝破坏模式主要是推挤、车辙及开裂,车辙、推移主要是由沥青材料差异所致,开裂主要是由寒冷天气以及大的桥梁运动导致。怀俄明大学对无缝伸缩缝材料进行的实验室测试,也证实了无缝伸缩缝材料在低温下非常硬,几乎没有塑性变形,容易断裂。研究表明:TST伸缩缝能够满足50 mm小位移伸缩缝需求,但由于沥青热塑性本质,易发生开裂、车辙等病害。虽然国内外学者采用如聚合物改性剂、胶粉及抗车辙剂等材料弥补沥青类材料填充性能上的不足,但均未能从根本上解决沥青类材料性能的缺陷<sup>[9-11]</sup>。

树脂类材料是另一类具有代表性的无缝式伸缩缝材料,由于其交联固化反应特性和高低温性能均良好,且具有优异的变形性能与力学性能,相关学者研究了树脂或聚氨酯弹性体无缝伸缩缝。Gallai<sup>[12]</sup>研发了一种基于聚氨酯的无缝式伸缩缝材料,具有更长的使用寿命和更大的位移;刘攀<sup>[13]</sup>系统评价了聚氨酯弹性混凝土的高低温和弹性恢复等性能,结果表明其具有良好的综合性能,提高了无缝伸缩缝

耐久性;张涛<sup>[14]</sup>通过室内配比调整,比例优化,改善聚氨酯胶结料拉伸性能、抗老化性能、高低温性能等,结果表明聚氨酯弹性混凝土性能优异,且行车舒适性高。

树脂或聚氨酯弹性体无缝伸缩缝相对沥青弹塑体TST伸缩缝耐久性更优,但目前的研究主要针对树脂或聚氨酯混凝土,其23℃断裂强度为1 MPa、断裂伸长率为7%左右,较低的变形性能限制了其对变形量的适应性<sup>[15-16]</sup>。因此,本研究基于“无骨料”理念,针对纯树脂弹性体,对其高低温稳定性、动态模量、变形性能和疲劳抗裂性能等进行对比试验研究,探究其应用于桥梁中小位移伸缩缝的可行性,进一步拓宽其应用范围。

## 1 原材料及试验方法

### 1.1 原材料

#### 1.1.1 树脂弹性体

树脂弹性体由A、B组分加橡胶颗粒按比例复配而成,60℃养护4 d形成最终强度。树脂弹性体性能指标如表1所示。

表1 树脂弹性体性能指标及试验结果

Table 1 Performance indexes and test results of resin elastomer

性能指标	单位	试验结果	指标要求
固体含量	%	99.8	≥99.5
硬度(IRHD)		67	65±5
23℃拉伸强度	MPa	12.4	≥10.0
23℃断裂伸长率	%	761	≥650
撕裂强度	N/mm	26	≥15
表干时间	h	1.15	≤2.00
实干时间	h	9	≤12

从表1可以看出:该材料23℃断裂伸长率可达761%,23℃拉伸强度>10.0 MPa,同时,其撕裂强度为26 N/mm,具有十分优异的拉伸性能和抗撕裂损伤能力。

#### 1.1.2 TST 沥青弹塑体

TST 沥青弹塑体由13.2~16.0 mm单一粒径玄武岩集料和改性沥青拌和而成,油石比25%。改性沥青性能指标及试验检测结果如表2所示,集料技术指标符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)相关要求。

表2 改性沥青性能指标及试验结果

Table 2 Performance index and test results of modified asphalt

性能指标	单位	试验结果	指标要求
针入度(25℃, 100 g, 5 s)	0.1 mm	31	10~50
软化点	℃	91	≥80
弹性恢复率(25℃)	%	93	≥85
黏度(190℃)	Pa·s	5.328	≤10.000

由表2可知:TST弹塑体胶结料软化点超过90℃,弹性恢复率达到93%,是一种高温性能优异,且具有良好变形性能的改性沥青胶结料。

1.1.3 改性沥青SMA-13混合料

改性沥青SMA-13混合料由SBS改性沥青、玄武岩粗集料、石灰岩细集料和矿粉拌和而成,技术性能指标符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)中相关规定要求。

1.2 试验方法

本文针对树脂弹性体路用性能展开研究,主要包括高低温性能、动态模量、变形性能及疲劳性能。

针对高低温稳定性,参考《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)进行60℃车辙试验和-10℃低温弯曲试验,其中车辙试验同组平行试件2个,低温弯曲试验同组平行试件6个。

针对动态模量进行单轴压缩动态模量试验,同组平行试件3个。试件直径(100±2)mm、高度(150±2.5)mm,加载频率25.0 Hz、20.0 Hz、10.0 Hz、5.0 Hz、1.0 Hz、0.5 Hz、0.1 Hz,试验温度5℃、20℃、35℃、50℃。对圆柱形试件施加动态正弦波荷载,得到应力幅值、应变幅值以及相位角,然后利用式(1)计算试件的动态模量:

$$|E^*| = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \sin \varphi\right)^2} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (1)$$

式中:|E\*|为动态模量(MPa);σ<sub>0</sub>为应力幅值(kPa);ε<sub>0</sub>为应变幅值;φ为相位角。

针对变形性能,参考《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)进行泊松比试验,采用固定位移控制,速率为2.5 mm/min,测试采用40 mm拉伸和压缩上限制,同组平行试件4个,试件尺寸150 mm×150 mm×300 mm,在试件相对的两个侧面分别从横向和纵向粘贴应变片。循环5次拉

伸和压缩试验,按式(2)计算拉伸和压缩泊松比,并取5次平均值作为最终拉伸和压缩泊松比试验结果。

$$\nu = (\epsilon_{ia} - \epsilon_{i0}) / (\epsilon_a - \epsilon_0) \quad (2)$$

式中:ν为泊松比;ε<sub>ia</sub>为F<sub>a</sub>(应力为轴心抗压强度1/3时的荷载值)时试件两侧横向应变平均值;ε<sub>i0</sub>为F<sub>0</sub>(基准应力为0.5 MPa的初始荷载值)时试件两侧横向应变平均值;ε<sub>a</sub>为F<sub>a</sub>时试件两侧竖向应变平均值;ε<sub>0</sub>为F<sub>0</sub>时试件两侧竖向应变平均值。

针对疲劳抗裂性能,参考TxDOT Designation(得克萨斯州交通运输部标识):Tex-248-F进行Overlay Test(OT)试验,目标位移0.635 mm,循环加载次数1 000次,同组平行试件3个。OT试验结果评价指标包括荷载损失率R、第一个周期拉伸荷载峰值F,同时结合相关学者经验<sup>[17-18]</sup>,引入总断裂能和裂缝扩展速率进一步评价抗疲劳开裂性能,其中总断裂能由每个周期拉伸荷载峰值-周期数关系曲线下所包围的面积表示,裂缝扩展速率以每个周期内的峰值荷载-周期拟合的乘幂函数曲线中的幂次数b表示,b值越大表征曲线下速率越快,抗疲劳开裂性能越差。

$$y = a \cdot x^{-b} \quad (3)$$

式中:x为加载次数;y为荷载峰值(kN);a、b为拟合常数。

2 结果分析

2.1 高温稳定性能

针对高温稳定性,对树脂弹性体、TST沥青弹塑体和改性沥青SMA-13混合料分别进行60℃车辙试验,结果如图1所示。

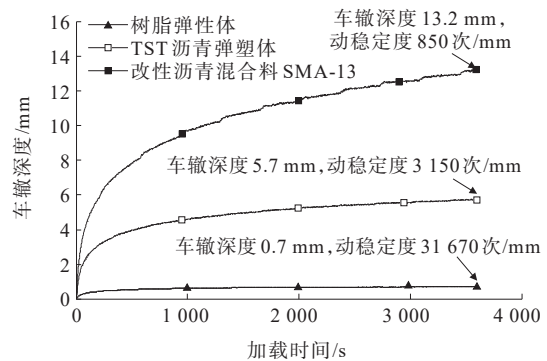


图1 60℃车辙试验结果

Figure 1 Rutting test results at 60℃

由图1可知:树脂弹性体60℃动稳定度达到

31 670 次/mm,分别为 TST 沥青弹塑体和改性沥青 SMA-13 混合料的 10.1 倍和 37.3 倍;此外,树脂弹性体 60 °C 车辙深度 0.7 mm,分别为 TST 沥青弹塑体和改性沥青 SMA-13 混合料的 12.3% 和 5.3%。结果说明,相对 TST 沥青弹塑体和改性沥青 SMA-13 混合料,树脂弹性体具有更优异的高温抗车辙性能。这是因为树脂弹性体是一种热固性材料,分子链是通过化学交联在一起,形成一个刚性的三维网络结构,在聚合过程中这种交联结构不能重复加工成型,具有极其稳定的性能。而 TST 沥青弹塑体和改性沥青 SMA-13 混合料采用沥青类胶结料,仍属于热塑性材料范畴。由于沥青对温度的敏感性,高温条件下混合料强度降低,导致其稳定性下降。尤其对于 TST 沥青弹塑体,具有 25% 高油石比,温度敏感性表现更为显著。

## 2.2 低温抗裂性能

针对低温抗裂性,对树脂弹性体、TST 沥青弹塑体和改性沥青 SMA-13 混合料分别进行 -10 °C 低温弯曲试验,结果如表 3 所示。

表 3 -10 °C 低温小梁弯曲试验结果

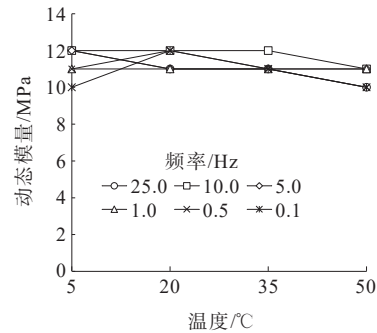
Table 3 Low-temperature beam bending test results at -10 °C

材料类别	挠度/ mm	破坏 荷载/ N	抗弯拉 强度/ MPa	最大弯 拉应 变/ $10^{-6}$	弯曲劲 度模量/ MPa
树脂弹性体	8.20	953	7.8	43 099	181
TST 沥青弹塑体	6.90	815	6.2	36 815	169
改性沥青 SMA-13 混合料	0.55	1 583	12.1	2 935	4 125

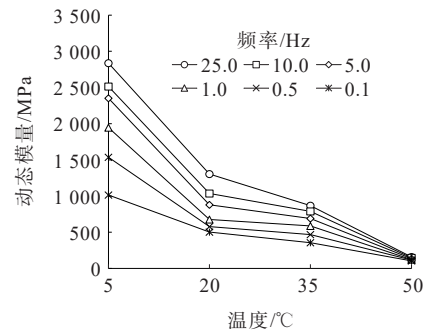
由表 3 可知:树脂弹性体最大弯拉应变达到  $43\ 099 \times 10^{-6}$ ,分别为 TST 沥青弹塑体和改性沥青 SMA-13 混合料的 1.2 倍和 14.7 倍;其弯曲劲度模量与 TST 沥青弹塑体相当,为改性沥青 SMA-13 混合料的 4% 左右;此外,在极限条件下,树脂弹性体挠度 8.20 mm,分别为 TST 沥青弹塑体和改性沥青 SMA-13 混合料的 1.2 倍和 14.9 倍。这说明相对于 TST 沥青弹塑体和改性沥青 SMA-13 混合料,树脂弹性体具有更优异的低温抗裂性能。这是因为树脂弹性体无骨料,其模量更低,在外荷载和低温耦合条件下,变形能力更强。

## 2.3 动态模量

针对树脂弹性体和 TST 沥青弹塑体分别进行了不同温度(5 °C、20 °C、35 °C、50 °C)和不同频率(25.0 Hz、20.0 Hz、10.0 Hz、5.0 Hz、1.0 Hz、0.5 Hz、0.1 Hz)下的单轴压缩动态模量试验,结果如图 2 所示。



(a) 树脂弹性体



(b) TST 沥青弹塑体

图 2 动态模量试验结果

Figure 2 Dynamic modulus test results

由图 2 可知:① 温度从 5 °C 升到 50 °C、频率从 0.1 Hz 提高到 25.0 Hz,树脂弹性体动态模量无明显规律性变化,均保持在 10~12 MPa,表明树脂弹性体由于其热固性材料本质,是一种对温度和荷载频率不敏感性材料,可以更好地适应不同温度和车速条件作用;② 相同频率条件下,TST 沥青弹塑体动态模量随着温度的升高显著降低,降低幅度达 89%~94%,且温度由 5 °C 上升到 20 °C 时,动态模量降低最为显著;相同温度条件下,TST 沥青弹塑体动态模量随着频率的提高,模量逐步变大,提高幅度为 50%~180%。这表明 TST 沥青弹塑体由于其热塑性材料本质,是一种对温度和荷载频率均较为敏感的材料;③ 动态模量试验结果解释了高温条件下 TST 沥青弹塑体模量急剧降低,导致其抗承载能力下降,60 °C 动稳定度较低。



2.4 变形性能

针对树脂弹性体和TST沥青弹塑体分别进行了泊松比试验,结果如图3所示。

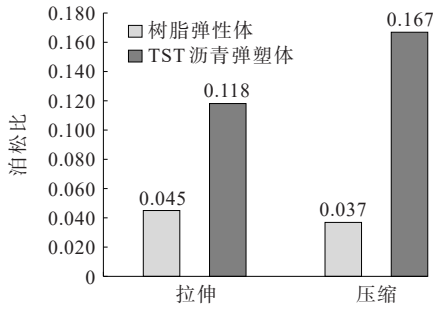


图3 泊松比试验结果

Figure 3 Poisson's ratio test results

由图3可知:树脂弹性体拉伸泊松比为0.045,相对TST沥青弹塑体降低62%;树脂弹性体压缩泊松比为0.037,相对TST沥青弹塑体降低78%。这表明树脂弹性体是一种低泊松比材料。这是因为树脂弹性体无骨料,相对有玄武岩集料的TST沥青弹塑体变形性能更好。应用于无缝伸缩缝时,在相同的水平拉伸或压缩变形量条件下,竖向变形量更小,更能够满足伸缩缝的变形需求。

2.5 疲劳抗裂性能

针对疲劳抗裂性能,分别对树脂弹性体和TST沥青弹塑体进行了OT试验,结果如图4和表4所示。

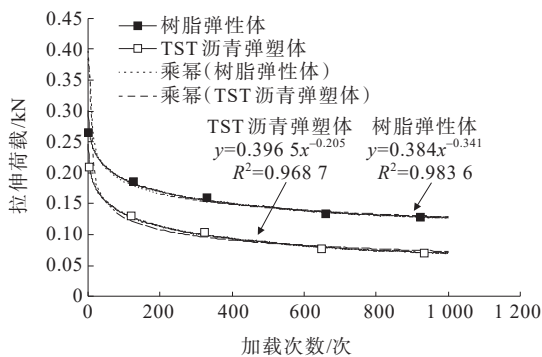


图4 OT疲劳抗裂试验结果

Figure 4 OT fatigue crack resistance test results

表4 OT疲劳抗裂试验结果

Table 4 OT fatigue crack resistance test results

试样类型	荷载损失率/%	第一周期峰值荷载/kN	总断裂能/J	裂缝扩展速率/%
树脂弹性体	54.03	0.327	152.62	0.141
TST沥青弹塑体	71.63	0.246	96.19	0.245

由图4和表4可知:与TST沥青弹塑体相比,树脂弹性体荷载损失率降低25%,总断裂能提高59%,说明在疲劳荷载作用下,树脂弹性体破坏所需能量更多;与TST沥青弹塑体相比,树脂弹性体第一周期荷载提高33%,说明树脂弹性体需要更多的力和能量才能在初期产生裂缝;树脂弹性体和TST沥青弹塑体在加载初始阶段,荷载下降较快,后期下降趋缓,树脂弹性体抗开裂指数相对TST沥青弹塑体降低42%,表明其荷载衰减速率更慢,疲劳抗裂性能更优。

3 结论

通过对桥梁无缝伸缩缝树脂弹性体和沥青弹塑体进行60℃车辙试验、-10℃低温弯曲试验、动态模量、泊松比和OT等试验,对其高低温路用性能、动态模量、变形性能和疲劳抗裂性能进行了对比研究,得到以下主要结论:

(1) 树脂弹性体60℃动稳定度超过30000次/mm, -10℃低温弯曲应变超过 $40000 \times 10^{-6}$ ,相对TST沥青弹塑体和改性沥青SMA-13混合料均有较大程度的提升,作为热固性树脂材料,具有优异的抗车辙和抗低温开裂性能。

(2) 与TST沥青弹塑体相比,树脂弹性体在5~50℃、0.1~25.0 Hz范围内,动态模量均保持为10~12 MPa,是一种温度和荷载频率不敏感性材料。

(3) 树脂弹性体拉伸/压缩泊松比为0.030~0.050,相对TST沥青弹塑体降低62%~78%,是一种低泊松比材料,相同无缝伸缩缝宽度条件下,能够满足更大的变形需求。

(4) 与TST沥青弹塑体相比,树脂弹性体产生初始裂缝需要更大的力,在循环加载过程中,裂缝发展需要更大的能量,裂缝扩展速率更低,具有更为优异的疲劳抗裂性能。

参考文献:

References:

[1] 秦祖品,郑妍,薛凤蕊,等.高速桥梁伸缩缝病害成因分析及快速维修技术探讨[J].中国公路,2022(7):94-95.  
QIN Zupin, ZHENG Yan, XUE Fengrui, et al. Cause analysis of expansion joint disease of high-speed bridge and discussion on rapid maintenance technology[J]. China

- Highway,2022(7):94-95.
- [2] 刘朵,黄青松,江流声,等.异形钢单缝式和模数式伸缩缝损伤等级划分及养护对策[J].中外公路,2020,40(4):115-119.  
LIU Duo, HUANG Qingsong, JIANG Liusheng, et al. Classification of damage grades and maintenance countermeasures for expansion joints with single seam and modulus figured steel[J].Journal of China & Foreign Highway,2020,40(4):115-119.
- [3] 丁楚志,高小华,李纲,等.桥梁伸缩缝高性能混凝土抗冲击性能研究[J].中外公路,2022,42(5):110-114.  
DING Chuzhi, GAO Xiaohua, LI Gang, et al. Study on shock resistance of high performance concrete for bridge expansion joints[J].Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(5):110-114.
- [4] 陈宝春,孙同庆,黄卿维,等.云南八丘田无伸缩缝拱桥设计与受力分析[J].中外公路,2023,43(3):69-75.  
CHEN Baochun, SUN Tongqing, HUANG Qingwei, et al. Design and stress analysis of Baqitian jointless arch bridge in Yunnan[J].Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(3):69-75.
- [5] 陈伟乐,张双娇,金文良,等.无缝式伸缩缝材料研究现状及发展综述[J].交通运输研究,2022,8(5):64-74.  
CHEN Weile, ZHANG Shuangjiao, JIN Wenliang, et al. Review of research status and development of seamless expansion joints materials[J].Transport Research, 2022, 8(5):64-74.
- [6] BRAMEL B K, DOLAN C W, PUCKETT J A, et al. Asphalt plug joints: Refined material tests and design guidelines[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2000, 1740(1):126-134.
- [7] BRAMEL B K, DOLAN C, PUCKETT J, et al. Asphalt plug joints: Characterization and specifications[R]. Department of Civil and Architectural Engineering, University of Wyoming, 1999.
- [8] CHANG L M, LEE Y J. Evaluation of performance of bridge deck expansion joints[J].Journal of Performance of Constructed Facilities, 2002, 16(1):3-9.
- [9] 程林峰,黄挺,燕栋,等.无缝伸缩缝技术在桥梁工程中的应用[J].北方交通,2018(4):6-9.  
CHENG Linfeng, HUANG Ting, YAN Dong, et al. Application of seamless joint technology in bridge engineering[J].Northern Communications, 2018(4):6-9.
- [10] 张洪,魏长城. BJ200 无缝伸缩缝的引入与检测分析[J].公路, 2018, 63(8):120-124.  
ZHANG Hong, WEI Changcheng. Introduction and inspection analysis of BJ200 seamless expansion joint[J]. Highway, 2018, 63(8):120-124.
- [11] PARK P, EL-TAWIL S, PARK S Y, et al. Behavior of bridge asphalt plug joints under thermal and traffic loads[J]. Journal of Bridge Engineering, 2010, 15(3):250-259.
- [12] GALLAI G. The first European approval for an expansion joint flexible plug joint system with new material[C]// Assessment, Upgrading and Refurbishment of Infrastructures. Zurich: International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 2013.
- [13] 刘攀. 桥梁无缝伸缩缝高性能聚氨酯弹性混凝土性能评价[J]. 青海交通科技, 2021, 33(4):118-121, 132.  
LIU Pan. Performance evaluation of high-performance polyurethane elastic-concrete for bridge seamless expansion joint[J]. Qinghai Transportation Science and Technology, 2021, 33(4):118-121, 132.
- [14] 张涛. 新型聚氨酯弹性混凝土伸缩缝的性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2017.  
ZHANG Tao. Study on the properties of new polyurethane elastic concrete expansion joints[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [15] 彭立群,林达文,王进,等. 铁路桥梁弹性体伸缩缝粘接性能试验设计与研究[J]. 轨道交通装备与技术, 2020(1):1-5.  
PENG Liqun, LIN Dawen, WANG Jin, et al. Experiment design and research of the adhesion of expansion joint made of elastomer for railway bridge[J]. Rail Transportation Equipment and Technology, 2020(1):1-5.
- [16] 沈雷. 环氧沥青无缝伸缩缝的材料制备与性能研究[D]. 南京:东南大学, 2020.  
SHEN Lei. Research on preparation and properties of epoxy asphalt plug joint[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [17] 颜可珍,王绍全,田珊,等. 基于 Overlay Test 评价应力吸收层抗反射裂缝性能[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(1):108-115.  
YAN Kezhen, WANG Shaoquan, TIAN Shan, et al. Research on anti-reflective cracking performance of stress-absorption interlayer based on overlay test[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(1):108-115.
- [18] 黄贤顺,冯林. 基于 Overlay Test 沥青混合料抗反射裂缝性能研究[J]. 中外公路, 2020, 40(6):300-304.  
HUANG Xianshun, FENG Lin. Research on anti-reflective cracking performance of asphalt mixture based on overlay test[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(6): 300-304.