

产品·设计

公路桥梁用三元乙丙橡胶板式支座力学性能研究

李金航¹, 李 仪¹, 吕鹏飞¹, 孙逢缘², 孙恺闻¹, 朱晓伟^{1*}, 陈勇前³, 唐昶宇³, 江 祺⁴

(1. 河南工业大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 厦门理工学院 土木工程与建筑学院, 福建 厦门 361024; 3. 中国工程物理研究院 成都科学技术发展中心, 四川 成都 610200; 4. 四川高地工程设计咨询有限公司, 四川 成都 610200)

摘要:依据现行设计规范JT/T 4—2019《公路桥梁板式橡胶支座》,设计并试制了三元乙丙橡胶(EPDM)板式支座,并结合试验与数值模拟技术,研究该支座的弹性模量和在最不利工况组合下的力学行为特征。结果表明:EPDM板式支座的弹性模量满足规范要求;在最不利工况下板式支座的橡胶层与钢板之间未出现脱开现象,满足工程设计要求。

关键词:公路桥梁;板式支座;三元乙丙橡胶;力学性能;有限元模拟

中图分类号:TQ336.4⁺2

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2021)12-0928-05

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2021.12.0928



板式橡胶支座是公路桥梁领域中常采用的一种支座形式,具有构造简单、成本低廉、安装方便等优点,在中小跨径桥梁工程中得到了广泛应用,其数量约占公路桥梁支座总数量的85%以上^[1]。加劲板式橡胶支座主要由若干橡胶层与薄钢板组合而成,目前常用的橡胶材料为天然橡胶和氯丁橡胶,但都有一定缺陷。三元乙丙橡胶(EPDM)克服了天然橡胶不耐老化、氯丁橡胶不耐低温的不足,是一种理想的公路桥梁支座橡胶材料^[2],尤其在我国部分高寒、高海拔地区,其有望大幅提升公路桥梁用板式橡胶支座的设计使用寿命。

为了抵抗使用过程中可能出现的剪切变形,板式支座对橡胶与钢板的粘合性能有较高要求。但EPDM主链是不含双键的饱和结构,只是在侧链上含有少量的双键,为弱极性的惰性材料,与金属的粘合性能较差,限制了其在板式橡胶支座中的应用^[3]。长久以来,研究人员对EPDM胶料和胶粘剂改性进行了大量的研究工作^[4-5],但目前市售EPDM胶料与钢板的粘合性能依然不能满足相关需求,也缺少板式橡胶支座相关力学行为的研

究,而我国现行设计规范JT/T 4—2019《公路桥梁板式橡胶支座》^[6]也未给出EPDM板式支座的设计参数。

针对上述问题,本工作设计并试制了新型EPDM板式支座,结合试验与数值模拟技术,研究该支座的弹性模量和在最不利工况组合下的力学行为特征,为板式橡胶支座设计规范的修订及其在实际工程中的应用提供参考。

1 EPDM板式支座的制备

1.1 改性EPDM胶料的制备

1.1.1 配方

EPDM 100,炭黑 30~50,活性剂 4~7,软化剂 5~10,防老剂 2~3,加工助剂 1~2,改性剂 2~3,混合硫化剂 1.5~3,促进剂 2.5~3。

1.1.2 胶料混炼

先将EPDM生胶在密炼机中塑炼3 min,转子转速为40~50 r·min⁻¹,温度升至110℃;再依次加入炭黑、加工助剂、防老剂、软化剂,转子转速为

基金项目:河南工业大学校博士基金资助项目(2019BS040)

作者简介:李金航(2001—),男,河南南阳人,河南工业大学在读本科生,主要进行橡胶公路桥梁板式橡胶支座的学习和研究。

***通信联系人:**(zhuxiaowei1989@126.com)

引用本文:李金航,李仪,吕鹏飞,等.公路桥梁用三元乙丙橡胶板式支座力学性能研究[J].橡胶工业,2021,68(12):928-932.

Citation: LI Jinhang, LI Yi, LYU Pengfei, et al. Study on mechanical properties of EPDM laminated bearings for highway bridges[J]. China Rubber Industry, 2021, 68(12): 928-932.

40~50 r·min⁻¹,在110 ℃下混炼3 min;然后加入活性剂、改性剂,转子转速为40~50 r·min⁻¹,升温至120 ℃混炼10 min,排胶;密炼胶在开炼机上下片并冷却至60 ℃,再在开炼机上加入促进剂、硫化剂,混炼均匀,得到改性EPDM混炼胶。

1.2 改性EPDM胶料的性能

改性EPDM胶料的性能见表1。

表1 改性EPDM胶料的性能		
Tab. 1 Properties of modified EPDM compound		
序号	项目	测试结果
1	-60 ℃低温脆性	不断裂
2	40 ℃×96 h臭氧老化性能 ¹⁾	无裂纹
3	45 ℃×15 h盐雾老化性能	拉伸强度不下降
4	100 ℃×70 h热老化性能	拉伸强度不下降
5	与钢板粘合强度(90°剥离)/(kN·m ⁻¹)	25 ²⁾

注:1) 臭氧体积分数为200×10⁻⁸,拉伸率为20%;2) JT/T 4—2019指标为≥10 kN·m⁻¹。

从表1可以得出,与JT/T 4—2019中天然橡胶和氯丁橡胶的胶料性能指标相比,改性EPDM胶料的耐低温、耐老化、与钢板的粘合性能均较好。

1.3 EPDM板式支座设计与制备

本工作基于上述改性EPDM胶料,结合JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[7],根据JT/T 4—2019进行EPDM板式支座的设计。该支座采用圆形结构,规格为GYZ Φ200 mm×42 mm;橡胶层结构为:5层夹层橡胶,每层厚度为5 mm,顶层2层橡胶的层厚度均为2.5 mm;钢板层:6层夹层钢板,圆形钢板(Q235钢)规格为Φ190 mm×2 mm。

EPDM板式支座的制备方法如下。第1步:将改性EPDM混炼胶制成直径为200 mm、厚度为5 mm的圆形胶片;第2步:将加劲钢板裁剪成直径为190 mm、厚度为2 mm的圆形钢片,并进行表面喷砂、脱脂清理;第3步:将胶粘剂均匀辊涂或刷涂到加劲钢板表面,待溶剂挥发完全后使用;第4步:将圆形胶片与处理后的圆形加劲钢板间隔叠放于模具中硫化,硫化条件为145 ℃×50 min;第5步:待支座硫化完成后进行脱模、修边,制得成品支座。

EPDM板式支座的制备过程及样品见图1。

2 EPDM板式支座的弹性模量研究

为明确以上制备的适用于公路桥梁的EPDM



(a) 硫化前



(b) 硫化后



(c) 样品

图1 EPDM板式支座的制备过程及样品
Fig. 1 Preparation processes and sample of EPDM laminated bearing

板式支座的力学性能是否满足JT/T 4—2019要求,本工作对EPDM板式支座的弹性模量进行了试验研究,并与理论计算值和数值模拟结果进行对比研究。相关试验流程按照JT/T 4—2019附录A. 4. 1进行。

依据我国现行规范,板式橡胶支座的实测抗压弹性模量(E_1)按式(1)计算。

$$E_1 = (\sigma_{10} - \sigma_4) / (\epsilon_{10} - \epsilon_4) \tag{1}$$

式中, σ_4 和 ϵ_4 分别为4 MPa级试验载荷下支座的压应力和累计压缩应变, σ_{10} 和 ϵ_{10} 分别为10 MPa级试验载荷下支座的压应力和累计压缩应变。

计算得出,EPDM板式支座的 E_1 为542 MPa。

板式橡胶支座的抗压弹性模量理论计算值(E)按式(2)计算。

$$E = 5.4GS^2 \tag{2}$$

式中: G 为支座的抗剪弹性模量,一般取值为1.0 MPa; S 为支座的形状因子,圆形板式橡胶支座的 S

按式(3)计算。

$$S = d_0 / 4t_1 = 190 / (4 \times 5) = 9.5 \quad (3)$$

式中, d_0 为支座的圆形加劲钢板直径 (mm), t_1 为支座的中间橡胶层厚度 (mm)。

计算得出, EPDM 板式支座的 E 为 487.35 MPa, E_1 与 E 相差 10%, 小于规范要求的 20%, 说明该改性 EPDM 胶料适用于现行板式橡胶支座设计规范。

为了更直观地研究 EPDM 板式支座的力学性能, 本工作基于有限元分析软件 Abaqus 建立其三维有限元模型, 模型尺寸与试验样品一致, 同为 $\Phi 200 \text{ mm} \times 42 \text{ mm}$, 支座的整体模型和横截面模型如图 2 所示。

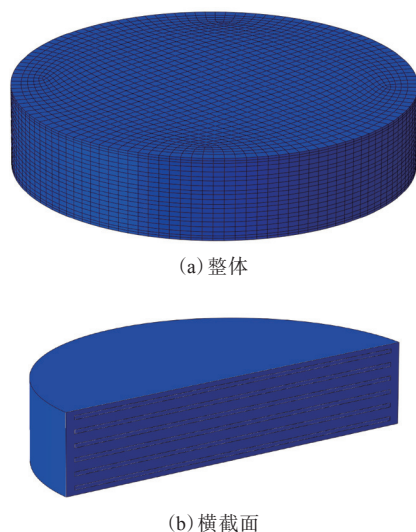


图2 EPDM板式支座的三维有限元模型

Fig. 2 3D finite element models of EPDM laminated bearing

计算模型中橡胶材料的超弹性本构模型采用 Yeoh 模型^[8], 材料参数 $C_{10} = 0.681\ 636\ 981$, $C_{20} = 2.844\ 234\ 152 \times 10^{-2}$, $C_{30} = -2.220\ 741\ 692 \times 10^{-4}$, 泊松比为 0.499 75, 单元类型为 C3D8H。加劲钢板本构模型采用理想的线弹性模量 (200 GPa), 泊松比为 0.3, 单元类型为 C3D8R, 支座上下端接触的混凝土采用解析刚度模拟, 其与支座的接触设置为面面自动接触, 水平摩擦系数为 0.3。

本工作首先分析了在相同载荷作用下, 数值模拟与压缩试验获取的 EPDM 板式支座的压缩应力-应变关系, 如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 支座的应力-应变实测值与

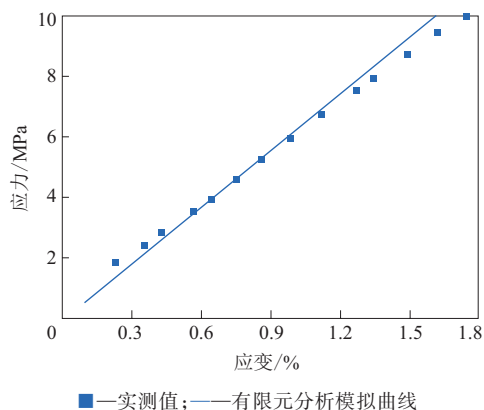


图3 EPDM板式支座的压缩应力-应变关系

Fig. 3 Relationship of compressive stress-strain of EPDM laminated bearing

有限元分析模拟值吻合较好。同时有限元分析计算获取的支座的抗压弹性模量为 610 MPa, 与实测弹性模量较为接近, 可以说明该有限元模型能够较好地分析 EPDM 板式支座的力学性能。

在设计的最大压缩应力 (10 MPa) 下 EPDM 板式支座沿直径方向横截面的压缩应力云图见图 4。

从图 4 可以看出: 支座在设计最大压缩应力 10 MPa 下, 中心受压、边缘受拉; 支座中心橡胶层压应力最大, 随着距中心距离的加大, 压应力不断减小; 支座各层橡胶的应力分布一致, 在钢板边缘应力削减为零。

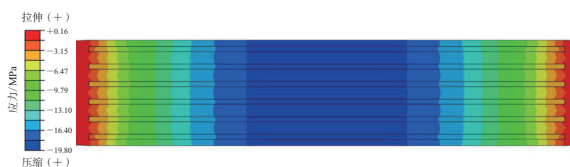


图4 EPDM板式支座沿直径方向横截面的压缩应力云图

Fig. 4 Compression stress nephogram of cross section of EPDM laminated bearing along diameter direction

3 最不利工况下 EPDM 板式支座的力学性能研究

板式橡胶支座在正常使用过程中往往受到压力、剪切和转动等一种或多种组合工况作用。为研究 EPDM 板式支座在极限载荷下的力学响应, 本工作设计了支座的最不利工况组合, 其中平均压应力 (σ_c) = 10 MPa, 剪切角正切值 ($\tan \alpha$) = 0.7, 转角正切值 ($\tan \theta$) = 0.007 5。为方便查看应力分布, 在支座中心横截面上设置了 6 条路径, 如图 5 中虚线所示。其中路径 1、3 和 5 为橡胶层与钢板接触

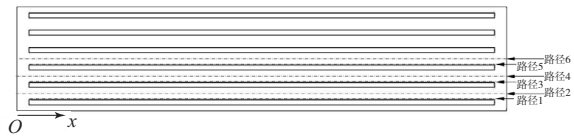
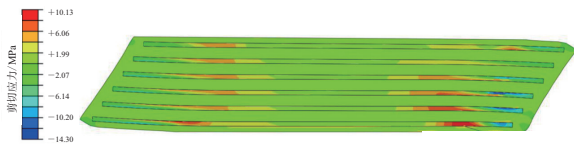


图5 路径位置示意

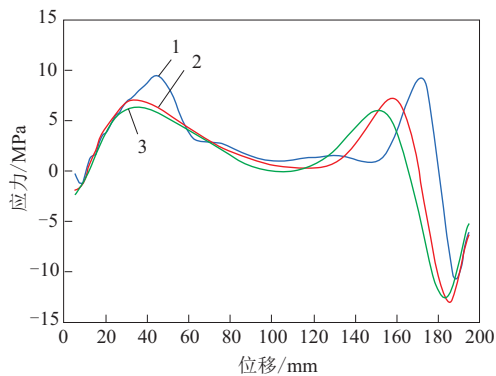
Fig. 5 Diagram of path location

面, 路径2、4和6为各橡胶层中心处, 支座最左侧为坐标原点。

最不利工况下EPDM板式支座的剪切应力云图和分布曲线见图6。



(a) 剪切应力云图



1—路径1; 2—路径2; 3—路径3。

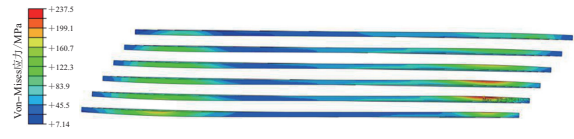
(b) 剪切应力分布曲线

图6 EPDM板式支座的剪切应力云图和分布曲线
Fig. 6 Shear stress nephogram and distribution curves of EPDM laminated bearing

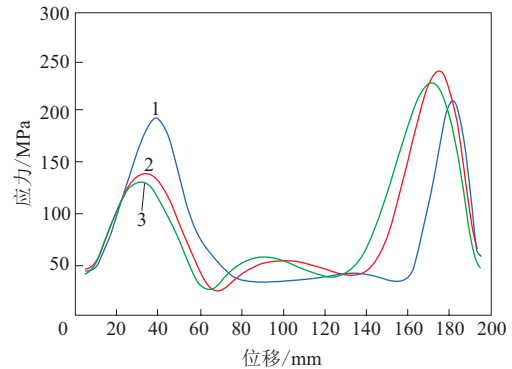
从图6可以看出, 支座橡胶层与钢板接触处面的剪切应力主要在钢板两侧的边缘处出现突变, 其中最大剪切应力为10.13 MPa, 位于支座边缘的橡胶层与钢板交界区域, 但小于EPDM胶料与钢板的粘合强度25 MPa, 这可以说明在最不利条件下, 支座的橡胶层与钢板之间不会出现脱开现象。

最不利工况下EPDM板式支座钢板的Von-Mises应力云图和分布曲线见图7。

从图7可以看出: 钢板的Von-Mises应力最大值主要是在钢板两侧的边缘处, 距离支座中心60~85 mm; 第2层钢板极小部分区域的最大Von-Mises应力值为237.5 MPa, 超过钢板的名义屈服



(a) Von-Mises应力云图



注同图6(b)。

(b) Von-Mises应力分布曲线

图7 EPDM板式支座钢板的Von-Mises应力云图和分布曲线
Fig. 7 Von-Mises stress nephogram and distribution curves of steel plates for EPDM laminated bearing

强度(235 MPa)。

综上所述, 在最不利工况下, 该EPDM板式支座并未出现脱胶现象, 仅有很小部分区域的钢板应力超过了其屈服强度, 但支座的整体力学性能满足工程设计和使用要求^[9-13]。

4 结论

随着我国交通事业发展迅速, 板式橡胶支座对公路桥梁具有越来越重要的意义^[11-13]。本工作对EPDM板式支座的制备、试验和数值模拟研究表明: 采用高粘合性能的EPDM胶料, 按照JT/T 4—2019流程, 完全可以设计和制备EPDM板式支座, 其弹性模量满足规范要求; 而在最不利工况下, EPDM板式支座的橡胶层与钢板之间并未出现脱开现象, 满足工程设计要求。该研究成果对今后板式橡胶支座设计规范的修订以及实际工程化的应用具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 王希慧, 李金红. 桥梁板式橡胶支座力学性能研究[J]. 公路, 2019, 2(2): 133-136.
WANG X H, LI J H. Study on mechanical properties of bridge plate

- rubber bearing[J]. Highway, 2019, 2(2): 133-136.
- [2] 吕鹏飞, 李仪, 冯广庆, 等. 适用于板式支座的三元乙丙橡胶超弹性本构模型研究[J]. 橡胶科技, 2021, 19(5): 219-222.
- LYU P F, LI Y, FENG G Q, et al. Study on hyper-elastic constitutive model of EPDM for laminated bearings[J]. Rubber Science and Technology, 2021, 19(5): 219-222.
- [3] 庄军生, 桥梁支座[M]. 第四版. 北京: 中国铁道出版社, 2015: 90-127.
- [4] 莫纪安, 陈馨, 李斌, 等. 高初粘力EPDM/金属界面胶粘剂的研究[J]. 特种橡胶制品, 2021, 42(1): 55-57.
- MO J A, CHEN X, LI B, et al. Study on EPDM/metal interface adhesive with high initial adhesion[J]. Special Purpose Rubber Products, 2021, 42(1): 55-57.
- [5] 罗顺, 蒋拥华, 任天斌. 金属-EPDM粘接解决方案的研究[J]. 中国胶粘剂, 2016, 25(10): 50-54.
- LUO S, JIANG Y H, REN T B. Study on solution of bonding metal-EPDM[J]. China Adhesives, 2016, 25(10): 50-54.
- [6] 全国交通工程设施(公路)标准化技术委员会. 公路桥梁板式橡胶支座: JT/T 4—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- [7] 中交公路规划设计院有限公司. 公路钢筋混凝土和预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- [8] Yeoh O H. Some forms of the strain energy for rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1993, 65(5): 751-771.
- [9] 袁维娜, 魏德超, 温文露, 等. 大直径高阻尼隔震橡胶支座力学性能的研究[J]. 橡胶工业, 2020, 67(5): 371-375.
- YUAN W N, WEI D C, WEN W L, et al. Study on mechanical properties of large diameter and high damping rubber isolation bearing[J]. China Rubber Industry, 2020, 67(5): 371-375.
- [10] 孙颖, 郑诚斌, 卓卫东, 等. 板式橡胶支座力学模型参数的时变特性研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(2): 91-96.
- SUN Y, ZHENG C B, ZHUO W D, et al. Time-varying properties of the mechanical model parameters of plate rubber bearings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(2): 91-96.
- [11] 董振华, 张劲泉, 韦韩, 等. 老化普通板式橡胶支座的剪切性能研究[J]. 工程力学, 2020, 37(z1): 208-216.
- DONG Z H, ZHANG J Q, WEI H, et al. Study on shear performance of common plate rubber bearing in aged situation[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(z1): 208-216.
- [12] 刘兢兢, 吴憬, 凌程建, 等. 大直径建筑橡胶隔震支座力学性能研究[J]. 四川建筑科学研究, 2021, 47(4): 37-47.
- LIU J J, WU J, LING C J, et al. Study on mechanical properties of large-diameter rubber isolation bearings[J]. Sichuan Building Science, 2021, 47(4): 37-47.
- [13] 李悦, 李冲, 李茜, 等. 桥梁板式橡胶支座剪切破坏及摩擦滑移性能试验研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(8): 130-137.
- LI Y, LI C, LI Q, et al. Experiment of shear failure and friction sliding performance of elastomeric bearings of bridges[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(8): 130-137.

收稿日期: 2021-07-11

Study on Mechanical Properties of EPDM Laminated Bearings for Highway Bridges

LI Jinhang¹, LI Yi¹, LYU Pengfei¹, SUN Fengyuan², SUN Kaiwen¹, ZHU Xiaowei¹, CHEN Yongqian³,
TANG Changyu³, JIANG Qi⁴

(1. Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 3. China Academy of Engineer Physics, Chengdu 610200, China; 4. Sichuan Gaodi Engineering Design Consulting Co., Ltd, Chengdu 610200, China)

Abstract: A new kind of ethylene propylene diene rubber (EPDM) laminated bearing was designed and prepared in according to the standard of laminated bearing for highway bridge (JT/T 4—2019). The elastic modulus and mechanical property of this new bearing under the harshest conditions were studied by experimental and numerical simulation methods. The results showed that the elastic modulus of EPDM laminated bearing met the requirements of the standard. Meanwhile, under the harshest testing conditions, there was no disconnection between the rubber layer and the steel plate layer, which met the engineering design requirements.

Key words: highway bridge; laminated bearing; EPDM; mechanical property; finite element simulation