

超期服役桥梁板式橡胶支座性能研究

文水兵^{1,2}, 林锐杰^{1,2}, 史志想^{1,2}, 李德存^{1,2}

(1. 上海市建筑科学研究院有限公司, 上海市 200032; 2. 上海市工程结构安全重点实验室, 上海市 200032)

摘要: 以某大桥引桥及匝道超期服役的板式橡胶支座为研究对象, 通过外观质量检查、内部质量检测、材料性能测试和力学性能检测, 全面评估了服役30年的桥梁支座性能退化情况。研究结果表明, 超期服役的桥梁板式橡胶支座普遍存在保护层厚度不足、材料性能下降和力学性能显著降低等问题。尽管部分支座外观基本完好, 但其内部质量和力学性能已无法满足现行规范要求。基于研究结果, 提出了支座更换建议和后续研究方向, 为超期服役桥梁支座的维护和更换决策提供了科学依据。

关键词: 桥梁工程; 板式橡胶支座; 超期服役; 性能退化; 检测评估; 维护决策

中图分类号: U443; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)04-0107-06

Performance Study of Plate Rubber Bearings for Bridges under Extended Service

WEN Shuibing^{1,2}, LIN Ruijie^{1,2}, SHI Zhixiang^{1,2}, LI Decun^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Building Research Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Engineering Structure Safety, Shanghai 200032, China)

Abstract: Taking the plate-type rubber bearings of an over-serviced bridge approach and ramp as the research object, this study comprehensively evaluated the performance degradation of bridge bearings after 30 years of service through visual inspection, internal quality inspection, material performance testing, and mechanical performance testing. The research results showed that the over-serviced bridge plate-type rubber bearings generally suffered from problems such as insufficient thickness of protective layer, deteriorated material properties, and significantly reduced mechanical properties. Although some bearings appeared to be basically intact, their internal quality and mechanical properties could no longer meet the current specification requirements. Based on the research results, suggestions for bearing replacement and directions for future research were proposed, providing a scientific basis for the maintenance and replacement decisions of over-serviced bridge bearings.

Keywords: bridge engineering; plate rubber bearing; extended service; performance degradation; inspection and evaluation; maintenance decision-making

0 引言

桥梁作为重要的交通基础设施, 其安全性和耐久性直接关系到公共安全和社会经济发展。板式橡胶支座作为桥梁结构中的关键部件, 承担着传递桥梁上部结构荷载、适应桥梁变形的重要功能。然而随着使用年限的增加, 橡胶材料的老化和支座性能的退化不可避免, 特别是在超期服役的情况下, 支座的性能退化可能对桥梁结构安全造成严重影响^[1-3]。

因此, 对超期服役的桥梁板式橡胶支座进行性能检测与评估具有重要的现实意义。

桥梁支座作为工程应用的重要产品之一, 服役中的支座性能得到了国内外学者的重视, 从不同角度对服役状态的桥梁支座性能进行了广泛研究。吴宜峰等^[4]总结了桥梁板式橡胶支座的主要运营病害及其影响, 从支座老化、脱空、剪切超限等多个方面分类阐述了上述病害的成因及后果, 并提出了存在病害的板式橡胶支座力学性能研究发展方向。齐宏学等^[5]抽选旧板式橡胶支座进行了弹性模量测试, 同时建立理论模型分析了支座老化对结构静力以及动力性能的影响, 研究表明支座老化对桥梁结构动力特性影响明显。高小妮等^[6]针对板式橡胶支座最常见的脱空与剪切变形病害, 开展了数值模拟分析

收稿日期: 2025-11-18

基金项目: 上海市数据局项目(202401069); 上海市住建委科研项目(沪建科2024-Z02-003)

作者简介: 文水兵(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁工程检测评估、科技研发工作。

研究,建立了支座性能随着支座病害变化的曲线,研究表明支座局部脱空对支座性能影响大,若支座剪切变形大于0.7,支座内加劲钢板最大应力大于钢材屈服强度且可产生剪切塑性变形。

贾俊峰等^[7]对服役约10年的板式橡胶支座进行摩擦滑移测试,研究表明旧板式橡胶支座表面摩擦系数相较于未老化支座的表面摩擦系数减小,支座水平弹性刚度明显增大,累积的摩擦滑移会导致支座的耗能能力降低。管学文等^[8]以典型退役盆式支座为对象,开展支座外观检查与力学性能试验,研究发现旧支座的耐磨板严重磨损导致摩擦系数增大,改变了支座的约束条件,增加锚棒被剪断风险,提出了更换耐磨板再利用的方案,为旧支座的二次利用提供了参考。邬晓光等^[9]通过试验得出服役支座的特性参数,建立板式橡胶支座的理论模型,拟合了支座在局部脱空和剪切变形同时存在的失效判别公式和失效曲线。梁栋等^[10]针对梁桥板式橡胶支座背景复杂、位置深入、难以识别和测量的问题,提出了一种基于两次语义分割的自动检测支座裂缝并进行参数计算的方法,经验证满足工程要求,为实际工程应用提供了参考。

综上所述,当前国内对桥梁旧板式橡胶支座的研究方法主要集中于基于理论分析,研究内容支座劣化对结构受力影响;而基于统计分析大量超期服役板式橡胶支座实际外观质量、内部质量、橡胶材料性能、支座主要受力性能的劣化状态及相关性的研究甚少,本文以某大桥大量超期服役后的板式橡胶支座为研究对象,通过对更换后的旧支座外观和内部质量检查、橡胶材料拉伸和支座力学指标测试,评估服役30年的桥梁支座性能退化情况,为城市更新过程中桥梁支座更换决策提供参考。

1 研究背景与方法

1.1 概况

某大桥作为城市高架的重要组成部分,自1993年建成通车以来,已服役约30年。其引桥及匝道共使用了7 266块板式橡胶支座,包括150 mm×200 mm矩形支座、 ϕ 200 mm圆形支座和 ϕ 450 mm圆形支座3种类型。这些支座已远超15年设计使用寿命,存在橡胶老化和性能退化风险。本次依托该大桥支座更换对超期服役的板式支座进行了性能研究。

1.2 研究方法

本研究依据《公路桥梁板式橡胶支座》(JT/T 4—2019)^[11]、《城市桥梁检测与评定技术规范》(CJJ/T

233—2015)^[12]等标准,采用多种检测方法对超期服役的板式橡胶支座进行全面检测评估。主要研究内容及方法包括:a.外观质量:统计支座的开裂、剪切变形等病害情况;b.内部质量:对旧支座进行断面解剖,通过测量支座表层橡胶保护层厚度和加劲钢板间橡胶层厚度;c.材料性能:对解剖旧支座按测试标准要求制取橡胶试样,测试橡胶试样的拉伸强度和拉断伸长率;d.力学性能:测试抗压弹性模量、抗剪弹性模量和极限抗压强度。

2 检测结果与分析

2.1 外观质量

该大桥引桥及匝道加固维修工程共更换支座共7 266个,支座更换前对现场有条件检测的4 130个支座进行外观质量检查。支座更换后,对全部的7 266个旧支座进行的整体外观质量检查。

根据统计结果,支座外观质量检查及分类统计如表1所示,支座开裂破损及支座轻微剪切变形如图1和图2所示。更换后存在塑性剪切变形的支座剪切角度均未超过30°,剪切变形缺损程度未出现支座评定标准^[12]中“严重”或“危险”标度,这可能与支座更换后的状态相较于工作状态相比存在一定的弹性回缩有关。

表1 支座外观质量数量统计结果

支座类型	基本完好	开裂破损	剪切变形
150 mm×200 mm×(60~70 mm)方形支座	518 (78.5%)	12(1.8%)	130 (19.7%)
150 mm×200 mm×50 mm方形支座	417 (63.2%)	12(1.8%)	231 (35.0%)
200 mm×(55~60 mm)圆形支座	1 678 (79.4%)	58(2.7%)	378 (17.9%)
200 mm×30 mm圆形支座	1 225 (58.0%)	51(2.4%)	838 (39.6%)
450 mm×80 mm圆形支座	1 274 (74.0%)	46(2.7%)	401 (23.3%)
合计	5 112 (70.3%)	179(2.5%)	1 978 (27.2%)

注:1.表中括号内表示该类支座占比。
2.表中支座剪切变形为支座的塑性剪切变形。

外观质量检查结果如下。

(1)两种规格的方形支座中,开裂破损支座约为1.8%,存在剪切变形支座约为27.3%;3种规格的圆形支座中,开裂破损支座约为2.6%,存在剪切变形支座约为27.2%;表明圆形支座的开裂破损率略高于方形支座,但剪切变形现象在各类支座中普遍存在。

(2)形状及平面尺寸相同的支座,厚50 mm方形



图 1 支座破损典型照片



图 2 支座开裂与剪切变形典型照片

支座剪切变形发生率较厚 60~70 mm 支座高出 15.3%,厚 30 mm 圆形支座剪切变形发生率较厚 55~60 mm 支座高出 21.7%,表明支座高度越大,发生剪切变形发生率越小。

2.2 内部质量

从 7 266 个支座中抽取了 45 个支座,并进行切割,对支座内部状态进行检测,检测参数为支座侧面、顶面、底面橡胶层厚度及内部钢板间橡胶层厚度,检测结果见表 2,内部质量如图 3 所示。《公路桥梁板式橡胶支座》(JT/T 4—2019)^[11]中关于板式橡胶支座的内部质量要求:支座橡胶侧面保护层厚度不应小于 5 mm,顶、底面保护层厚度不应小于 2.5 mm;加劲钢板之间橡胶层厚度不应小于 5 mm。

内部质量检测结果如下。

(1)内部橡胶层厚度不满足规范要求的支座占比 88.9%,其中方形支座占比 100%,圆形支座占比 81.5%,表明服役近 30 年后,支座橡胶层厚度存在明显变化,局部厚度明显不足,方形支座不合格率高于圆形支座。

(2)外观基本完好、开裂破损、剪切变形 3 类支座的背部质量不合格率分别为 86.7%、93%、86.7%,表明即使外观基本完好的支座,其内部质量也普遍较差,支座内部质量与表观质量相关性不明显。

(3)支座顶底面橡胶层厚度不满足要求的占比 17.8%,加劲钢板间橡胶层厚度不满足要求的占比

86.7%,表明支座内部橡胶层变化较外部橡胶层明显。

(4)同种规格的支座保护层厚度存在明显的离散性,表明支座在超期服役过程中,橡胶层发生了明显的老化塑性变形。

2.3 材料性能检测结果

从 45 个切割的支座中根据规范要求制备橡胶试样,对内部橡胶层材料性能进行检测。每个支座制备 1 组试样,测定橡胶试样的拉伸强度及拉断伸长率,实测结果如表 3 所示。依据《公路桥梁板式橡胶支座》(JT/T 4—2019)^[11]中关于板式橡胶支座的橡胶性能的要求:拉伸强度不应小于 14.45 MPa,拉断伸长率不应小于 320%。

材料性能检测结果如下。

(1)42.2%的支座橡胶试样拉伸强度不满足规范要求,26.7%的支座橡胶试样拉断伸长率不满足规范要求,55.6%的支座两项指标均满足规范要求,表明超期服役的支座橡胶性能存在明显退化,拉伸强度不合格率高于拉断伸长率不合格率。

(2)基本完好、开裂破损、剪切变形的 15 个支座中,不满足规范要求的支座分别占比 13.3%、86.7%、33.3%,表明支座橡胶性能与外观质量存在明显相关性,开裂破损的支座橡胶性能退化最明显。

2.4 力学性能检测结果

从更换下来的 7 266 个支座中,除抽取了 45 个支座,除通过切割后进行内部质量和材料性能试验外,另外在其余支座中抽取了 45 个支座进行力学性能检测,其中外观为“基本完好”、“开裂破损”、“剪切变形”的支座各 15 个,检测结果如表 4 所示。依据《公路桥梁板式橡胶支座》(JT/T 4—2019)^[11]中关于板式橡胶支座的力学性能的要求:“极限抗压强度不应小于 70 MPa”,方形支座实测抗压弹性模量应满足 110~164 MPa,直径 200 mm 支座抗压弹性模量应满足 212~318 MPa,直径 500 mm 支座抗压弹性模量应满足 432~648 MPa,实测抗剪弹性模量应满足 0.85~1.15 MPa。

力学性能检测结果如下。

(1)抽检全部支座极限抗压强度均小于 70 MPa,不满足规范要求,表明超期服役的板式橡胶支座极限抗压承载能力已降低。

(2)150 mm×200 mm 规格方形支座和直径 200 mm 的圆形支座抗压弹性模量均大于规范规定的上限值,直径 450 mm 的圆形支座抗压弹性模量均小于规范下限值,抽检全部支座的抗压弹性模量均不满足规范要求,表明小尺寸的板式橡胶支座抗压弹性模

表2 支座内部质量汇总

支座类型	外观类型	支座编号	保护层厚度/mm				
			左侧	右侧	底面	顶面	加劲钢板之间橡胶层厚度
150 mm×200 mm× (60~70 mm)方形支座	基本完好	1	6.0	6.0	2.0	2.0	4.5、4.0、4.0
		2	13.0	13.0	2.5	2.1	3.5、4.0、5.0、4.5
		3	5.0	5.0	3.0	3.0	4.0、5.0、4.0、4.0
	开裂破损	4	4.0	4.0	3.0	3.0	4.0、4.0、4.0、5.0
		5	5.0	5.0	3.0	3.0	4.0、5.0、5.0、5.0
		6	5.0	5.0	3.0	3.0	4.0、5.0、6.0、5.0
	剪切变形	7	6.0	6.0	2.5	2.5	4.0、6.0、3.0、4.0、3.0
		8	7.0	7.0	2.5	2.5	4.0、4.0、4.0、4.0、5.0
		9	7.0	7.0	2.5	2.5	4.0、6.0、4.0、5.0、4.0
150 mm×200 mm×50 mm 方形支座	基本完好	10	7.0	7.0	3.5	3.5	4.0、6.0、5.0、4.0、4.0
		11	7.0	7.0	2.5	2.5	10.0、10.5、3.5、3.0
		12	6.0	6.0	3.0	3.0	10.0、9.0、3.5、4.5
	开裂破损	13	12.0	12.0	3.0	2.0	5.0、3.5、11.0、10.0
		14	6.0	6.0	3.0	3.0	4.0、4.0、4.0、5.0、4.0、3.0
		15	14.0	14.0	5.0	5.0	6.0、10.0、2.0、7.0
	剪切变形	16	6.0	6.0	1.4	1.2	2.0、5.0、5.0、5.0、5.0、4.0、3.0
		17	5.0	5.0	3.0	3.0	4.0、4.0、6.0、4.0、5.0、4.0
		18	7.0	7.0	2.8	2.0	7.0、5.0、5.0、11.0
200 mm×(55~60 mm) 圆形支座	基本完好	19	7.0	7.0	2.0	2.5	4.0、4.0、5.0、5.0、4.0、4.0、4.0
		20	6.0	6.0	2.5	2.5	6.0、6.0、5.0、3.5、4.0、3.0、3.0
		21	7.0	8.0	4.0	6.0	4.0、4.0、4.0、4.0、5.0、6.0
	开裂破损	22	6.0	6.0	3.0	3.0	4.0、4.0、4.0、7.0、3.5、4.0、3.0、3.0
		23	6.0	6.0	1.8	4.0	5.0、4.0、5.0、5.0、4.0、3.0、3.0、4.0
		24	6.0	6.0	3.0	3.0	2.0、5.0、6.0、5.0、6.0、6.0、4.0
	剪切变形	25	4.0	4.0	9.0	9.0	4.0、4.0、6.0、5.0、9.0
		26	7.0	7.0	5.0	5.0	10.0、10.0、2.0、10.0、5.5
		27	7.0	7.0	5.0	5.0	4.0、5.0、6.0、4.0、5.0、5.0、4.0
200 mm×30 mm 圆形支座	基本完好	28	8.0	8.0	3.0	3.0	7.5、5.0、5.0、5.0、6.5、10.0
		29	10.0	10.0	3.0	3.0	4.0、3.0、5.0、5.0、6.0、5.0、5.0、4.0
		30	7.0	7.0	4.0	4.0	3.0、5.0、4.0、4.0、4.0、4.0、7.0、5.0
	开裂破损	31	2.0	2.0	3.0	13.0	8.0、5.0、5.0、5.0、4.0、5.0
		32	4.0	4.0	7.0	7.0	5.5、4.0、5.0、4.5、6.0、4.0、7.0、4.0
		33	5.0	5.0	3.0	3.0	4.0、5.0、5.0、4.0、6.5、9.0
	剪切变形	34	6.0	5.0	5.0	5.0	6.0、5.0、5.0、6.0、6.0、5.0、4.0
		35	5.0	5.0	3.0	3.0	4.0、7.0、5.0、5.0、4.0、5.0、7.0、4.0
		36	7.0	7.0	5.0	5.0	6.0、5.0、5.0、5.0、6.0、5.0
450 mm×80 mm 圆形支座	基本完好	37	6.0	5.0	3.0	3.0	10.0、5.0、8.0、10.0、8.0、7.0、8.0
		38	5.0	5.0	4.0	4.0	8.0、8.0、4.0、6.0、8.0、7.0、9.0、5.0
		39	5.0	5.0	3.0	3.0	5.0、5.0、6.0、7.0、8.0、7.0、4.0、8.0
	开裂破损	40	7.0	7.0	5.0	5.0	6.0、5.0、4.0、4.0、8.0、6.0、5.0、6.0
		41	5.0	5.0	3.0	3.0	5.0、5.0、6.0、7.0、8.0、5.0、5.0
		42	7.0	7.0	4.0	4.0	8.0、5.0、7.0、7.0、6.0、6.0、4.0
	剪切变形	43	6.0	6.0	3.0	3.0	6.0、7.0、6.0、8.0、8.0、5.0、8.0
		44	7.0	5.0	4.0	6.0	4.0、5.0、4.0、7.0、4.0、6.0、5.0、4.0
		45	7.0	7.0	2.0	2.0	3.0、4.0、6.0、4.0、8.0、4.0、4.0、8.0

量在长期服役过程中发生较大变化,小尺寸支座抗压弹性模量呈现增大的趋势,大尺寸支座的抗压弹性模量呈现降低的趋势。

(3)46.7%的支座抗剪弹性模量不满足规范要求,其中直径200 mm的圆形支座抗剪弹性模量均远超规范限值,表明长期服役状态下小尺寸方形支座



图3 支座内部质量

的抗剪弹性模量较圆形支座稳定性更好。

(4)同种规格、不同外观质量支座的力学性能存在明显的一致性,表明超期服役支座的力学性能与外观质量无明显的相关性。

(5)抽检的全部支座的抗压弹性模量和极限抗压强度均不满足规范要求,仅有 46.7% 的支座抗剪弹性模量满足要求,这表明超期服役支座的承载能力和变形性能已明显退化。

3 结 论

本研究通过对某大桥超期服役板式橡胶支座的外观质量、内部质量、橡胶性能、力学性能检测与分析,得出以下主要结论。

(1)超期服役圆形支座的开裂破损率略高于方形支座,但塑性剪切变形现象在各类型支座中普遍存在,支座高度越大,剪切变形的发生率越小。

(2)超期服役支座橡胶保护层厚度不合格率达 88.9%,支座内部橡胶层厚度不合格率高于外层橡胶,方形支座的不合格率高于圆形支座,即使支座外观基本完好,其内部质量也普遍较差。

(3)同种规格的支座橡胶层厚度存在明显的离散性,在超期服役过程中,支座橡胶层发生了明显的老化塑性变形。

(4)超期服役的支座橡胶性能明显退化,拉伸强度不合格率高于拉断伸长率不合格率。

(5)超期服役支座的承载能力和变形性能已明显退化。

(6)小尺寸的板式橡胶支座抗压弹性模量在长期服役过程中发生较大变化,小尺寸支座抗压弹性模量呈现增大的趋势,大尺寸支座的抗压弹性模量呈现降低的趋势。

(7)长期服役状态下小尺寸方形支座的抗剪弹性模量较圆形支座稳定性更好。

(8)超期服役支座的表观质量与内部质量、力学

表3 支座橡胶材料性能检测结果汇总

支座类型	外观类型	样品编号	拉伸强度/MPa	拉断伸长率/%
150 mm×200 mm×(60 ~70 mm)方形支座	基本完好	1	18	415
		2	20	397
		3	17	359
	开裂破损	4	18	378
		5	19	383
		6	19	389
	剪切变形	7	17	339
		8	14	281
		9	20	412
150 mm×200 mm×50 mm 方形支座	基本完好	10	18	382
		11	19	361
		12	20	360
	开裂破损	13	19	316
		14	17	335
		15	17	373
	剪切变形	16	19	373
		17	16	339
		18	17	365
200 mm×(55 ~60 mm)圆形支座	基本完好	19	19	376
		20	10	320
		21	5	252
	开裂破损	22	6	283
		23	20	378
		24	13	348
	剪切变形	25	20	367
		26	10	331
		27	13	332
200 mm×30 mm 圆形支座	基本完好	28	18	426
		29	11	351
		30	11	224
	开裂破损	31	13	333
		32	14	332
		33	10	314
	剪切变形	34	16	448
		35	8	255
		36	17	402
450 mm×80 mm 圆形支座	基本完好	37	8	225
		38	16	397
		39	12	332
	开裂破损	40	5	285
		41	12	356
		42	13	300
	剪切变形	43	17	405
		44	10	277
		45	18	419

性能无明显相关性,即使支座外观基本完好,其内部质量和力学性能已无法满足规范要求,但与支座橡胶性能明显相关。

表4 支座力学性能检测结果汇总					单位:MPa
支座类型	外观类型	样品编号	实测极限抗压强度	实测抗压弹性模量	实测抗剪弹性模量
150 mm×200 mm×(60~70 mm) 方形支座	基本完好	1	62	220	1.16
		2	62	208	1.12
		3	62	210	1.11
	开裂破损	4	62	208	1.15
		5	62	193	1.18
		6	62	200	1.17
	剪切变形	7	62	213	1.1
		8	62	225	1.11
		9	62	216	1.12
150 mm×200 mm×50 mm 方形支座	基本完好	10	62	241	1.35
		11	62	227	1.23
		12	62	237	1.31
	开裂破损	13	62	242	1.10
		14	62	242	1.13
		15	62	226	1.12
	剪切变形	16	62	222	1.07
		17	62	231	1.13
		18	62	236	1.12
200 mm×(55~60 mm) 圆形支座	基本完好	19	61	566	2.24
		20	61	607	2.26
		21	61	531	2.30
	开裂破损	22	61	510	2.26
		23	61	482	2.3
		24	61	502	2.39
	剪切变形	25	61	562	2.41
		26	61	588	2.36
		27	61	611	2.49
200 mm×30 mm 圆形支座	基本完好	28	61	399	2.21
		29	61	367	2.21
		30	61	384	2.28
	开裂破损	31	61	363	2.08
		32	61	357	2.00
		33	61	369	2.01
	剪切变形	34	61	349	1.77
		35	61	366	1.81
		36	61	359	1.74
450 mm×80 mm 圆形支座	基本完好	37	67	254	0.99
		38	67	240	1.01
		39	67	263	1.01
	开裂破损	40	67	396	0.95
		41	67	379	0.93
		42	67	383	0.94
	剪切变形	43	67	329	0.97
		44	67	342	0.96
		45	67	318	0.98

4 支座维护及更换建议

基于以上研究结果,本文提出了支座更换建议

和后续研究方向,为超期服役桥梁支座的维护和更换决策提供了科学依据。

(1)超期服役的桥梁橡胶支座内部质量与力学性能均明显劣化,当具备条件时宜全部更换超期服役支座。

(2)方形支座在破损率、抗剪弹性模量稳定性方面均优于圆形支座,项目设计中在板式橡胶支座选型时优先考虑方形支座。

(3)在同类型支座更换项目中,可深入考究以下两点:一是现行桥梁规范^[13]支座设计使用年限不应低于15年,本桥支座服役约30年,后续可通过其同类型项目研究15、20、25年后的支座退化、老化情况,建立支座性能衰减模型和曲线,便于有关单位对板式橡胶支座更换时机有更科学的依据;二是由于抗压弹性模量、抗剪弹性模量显著超出现有规范限值,建议在后续研究中结合具体桥梁结构和温度条件,分析支座弹性模量的变化对桥梁受力与结构安全的影响。

(4)对于更换下来的老旧支座,可拆解支座的零部件,推进资源无害化回收利用:一是加劲钢板作为废钢熔炼、重新加工成新的钢材制品;二是橡胶质量检测结果若尚可,经过适当处理后,可用于生产一些对橡胶性能要求较低的产品。

参考文献:

[1] 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(增刊1):208-216.

[2] 黄俊,周凡博.在役桥梁橡胶支座的病害分析研究[J].工程质量,2025,43(2):14-17;25.

[3] 刘渊,朱建明,张占超.板式橡胶支座检查、评定和养护对策研究[J].交通世界,2017(17):100-102;104.

[4] 吴宜峰,徐泓,李爱群,等.桥梁板式橡胶支座运营病害及影响研究综述[J].工程抗震与加固改造,2021,43(5):104-113.

[5] 齐宏学,廉福绵.板式橡胶支座老化对空心板梁桥受力性能影响分析[J].公路,2021,66(8):197-201.

[6] 高小妮,沈理斌,沈健聪.桥梁板式橡胶支座典型病害下的力学性能研究[J].公路交通科技,2022,39(10):59-63;74.

[7] 贾俊峰,顾冉星,程寿山,等.自然老化服役后板式橡胶支座摩擦滑移性能试验研究[J].桥梁建设,2024,54(3):31-38.

[8] 管学文,张鹏飞,李捷,等.润扬大桥退役支座性能检测评估与提升技术研究[J].公路,2022,67(8):177-182.

[9] 邹晓光,贺书磊,郑鹏,等.公路桥梁板式橡胶支座失效标准研究[J].郑州大学学报(工学版),2019,40(1):67-71.

[10] 梁栋,呼耀宗,黄海宾,等.基于改进Yolov8算法的桥梁橡胶支座开裂病害检测方法[J].北京交通大学学报,2025,49(4):142-153.

[11] JT/T 4—2019 公路桥梁板式橡胶支座[S].

[12] CJJ/T 233—2015 城市桥梁检测与评定技术规范[S].

[13] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S].