

超高阻尼隔震橡胶支座力学性能温度 相关性影响因素分析*

沈朝勇, 黄襄云, 陈洋洋, 毛景远[♣], 陈建秋, 林 佳

(广州大学 工程抗震研究中心, 广东 广州 510405)

摘要: 采用拟静力试验, 分析不同水平应变、竖向压力、频率、内部橡胶 G 值以及不同温度加载顺序情况下 SHDR 支座水平性能的温度相关性, 给出 SHDR 支座的各项水平力学性能指标 (如屈服后刚度、屈服强度、单圈滞回面积、等效刚度及等效阻尼比等) 温度相关性的影响程度, 给出了除应变因素外相应拟合经验公式。研究表明: 竖向压力、加载频率、支座内部橡胶 G 值和温度加载顺序对其影响较小, 而应变影响较大; 支座在常温下屈服后刚度及屈服强度随温度的增加而呈指数规律减少。

关键词: SHDR; 温度相关性; 屈服后刚度; 屈服强度

中图分类号: TU352

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)03-0471-07

0 引言

在上部结构与基础之间设置隔震装置, 在延长结构周期的同时增加结构的整体阻尼, 在地震发生时, 结构遭受的地震作用会大大减小 (周福霖, 1997)。目前应用到隔震结构中比较成熟的水平隔震装置主要有铅芯隔震橡胶支座和高阻尼或超高阻尼隔震橡胶支座。前者因内部铅芯具有一定的毒性, 使用范围受到了一定的限制, 近年来, 高阻尼 (HDR) 和超高阻尼隔震橡胶支座 (SHDR) 已引起研究人员的重视。高阻尼支座按阻尼大小进行分类: 阻尼比 12% ~ 15% 为 HDR, 阻尼比超过 18% 则被称为 SHDR。

不同学者对铅芯隔震橡胶支座和 HDR/SHDR 进行了相关研究, 如叶明坤等 (2012) 计算分析了一多跨设置超高阻尼支座桥梁, 分析表明, 采用隔震后, 在顺桥向和横桥向, 桥梁墩底弯矩和剪力的减震系数大部分在 50% 以上, 桩顶内力的减震系数也可达到 30% 以上。资道铭等 (2013)

对比研究了天然隔震橡胶支座、铅芯隔震橡胶支座、HDR/SHDR 不同相关性及其基本力学性能的变化差异, 指出 HDR/SHDR 力学性能的温度变化性较大, 在超低温地区时应用时要慎重。袁涌等 (2008, 2011) 采用实时子结构试验方法研究了不同隔震支座类型的隔震桥梁减震效果, 试验表明, 采用 SHDR 具有较好的隔震效果。庄学真等 (2006) 对 HDR 支座开展了水平应变相关性试验和大变形试验, 得出 HDR 的等效刚度随应变的增加而减小, 但其阻尼比变化不大。资道铭等 (2016) 对低模量 SHDR 进行了基本性能和极限变形试验研究, 并对一典型建筑物采用低模量 SHDR 隔震技术方案进行了计算分析, 分析表明, 采用低模量 SHDR 可以取得较好的隔震效果, 完全可以取代铅芯隔震橡胶支座。张文俊和郑宗平 (2017) 采用有限元程序对 SHDR 和铅芯支座的隔震桥梁进行对比分析, 分析结果表明, 在地震能量集中时间段内, SHDR 的减震控制效果则明显优于铅芯支座。Akira 等 (2013) 通过试验和理论对比分析研究了 SHDR 在水平双向的力学性能, 研究表明, 在

* 收稿日期: 2020-05-08.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51991393)、广东省自然科学基金项目 (2016A030313544)、广东省教育厅创新团队项目 (2016KCXTD016) 和国家自然科学基金项目 (51578168) 联合资助。

♣通讯作者: 毛景远 (1993-), 硕士研究生. 主要从事工程抗震和抗震研究. E-mail: 798639947@qq.com.

地震双向输入时,理论分析低估了其地震时的位移反应。

上述对 SHDR 的研究中,理论分析较多,而试验研究相对较少,特别是对其温度相关性的试验研究,仅有资道铭等(2013)论述了在单一应变、压力、加载频率和固定加载顺序下 SHDR 的温度相关性及其低温敏感性,但其研究尚不够全面,其温度相关性可能受应变大小、竖向压力大小、加载频率的大小及不同温度施加顺序的影响,同时不同 G 值超高阻尼温度相关性是否一致,也有待研究。本文将采用反复加载的试验方法,详细研究应变、压力、加载频率、 G 值、温度加载顺序等因素对 SHDR 温度相关性能的影响,找出其共有的特性,归纳出可供参考使用的 SHDR 温度相关性近似经验公式。

1 试验概况

本试验用的橡胶支座内部构造见表 1。依据《橡胶支座 第 2 部分:桥梁隔震橡胶支座》(GB 20688.2—2006),支座为 I 类。参考《公路桥梁高阻尼隔震橡胶支座》(JT/T 842—2012)和《公路桥梁铅芯隔震橡胶支座》(JT/T 822—2011),竖向压力及水平应变取 6 MPa 和 100%,基准频率为 0.25 Hz。试验过程为研究不同应变、竖向压力、加载频率、 G 值、温度加载顺序对 SHDR 水平力学性能温度相关性的影响。试验方法及试验加载温度参考《橡胶支座 第 1 部分:隔震橡胶支座试验方法》(GB/T 20688.1—2007),支座力学性能取第 3 圈的结果作为测试值,试验温度取 -20 , -10 , 0 , 10 , 23 及 40 $^{\circ}\text{C}$ 。在广州大学工程抗震研究中心竖向 1 000 ton、水平 50 ton 试验机上进行试验。图 1 为正在试验的支座。图 2 为竖向 1 000 ton、水平 50 ton 试验装置。

表 1 SHDR 支座内部构造

Tab. 1 The detailed components of SHDR

支座有效边长(方形)/ mm	内部橡胶 剪切模量/ MP	内部 橡胶 层数	单层内部 橡胶厚度/ mm	单层内部 钢板厚度/ mm	保护层 厚度/ mm	封板 厚度/ mm
300	0.8/1.0/1.2	7	6	3.8	10	20

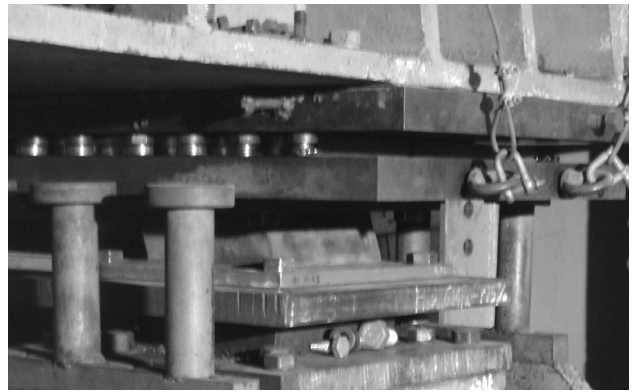


图 1 试验进行中的支座

Fig. 1 Specimen in test

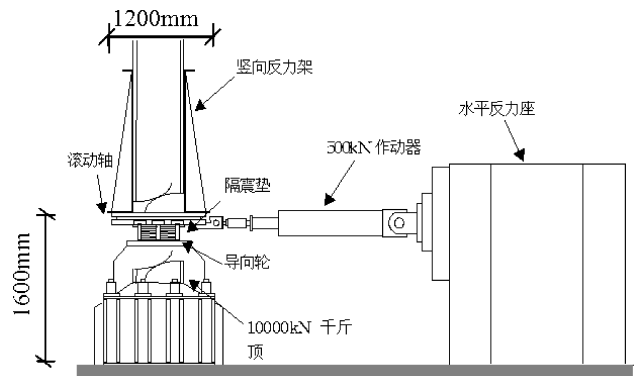


图 2 测试试验装置

Fig. 2 Test equipment

2 温度相关性的影响因素研究

2.1 应变

支座基准应变选取 100% 或 175% (橡胶支座 第 2 部分:桥梁隔震橡胶支座, GB 20688.2—2006)。G1.0-SHDR300300 被选取。

图 3 给出了 SHDR 支座屈服后刚度 K_d 、屈服强度 Q_d 、单圈滞回环面积 W 、水平等效刚度 K_h 、等效阻尼比 H_{eq} 在 2 种不同应变下的温度相关性变化规律曲线。图中竖坐标轴为不同温度下基本性能值与 23 $^{\circ}\text{C}$ 下性能值的比值,横坐标轴为试验温度与 23 $^{\circ}\text{C}$ 的相对差值。图 4a 给出了一典型温度 40 $^{\circ}\text{C}$ 时不同应变第 3 圈滞回曲线。

从图 3a, b 来看,在 2 种应变下的 K_d , Q_d 在高于 0 $^{\circ}\text{C}$ 时,应变对支座的这 2 个参数的影响程度基本相同,即影响有限,但在低于 0 $^{\circ}\text{C}$ 时,应变对其的影响呈现相反的规律:对于 K_d ,应变为 175% 时,其性能相对基准温度时性能变化小,而 100%

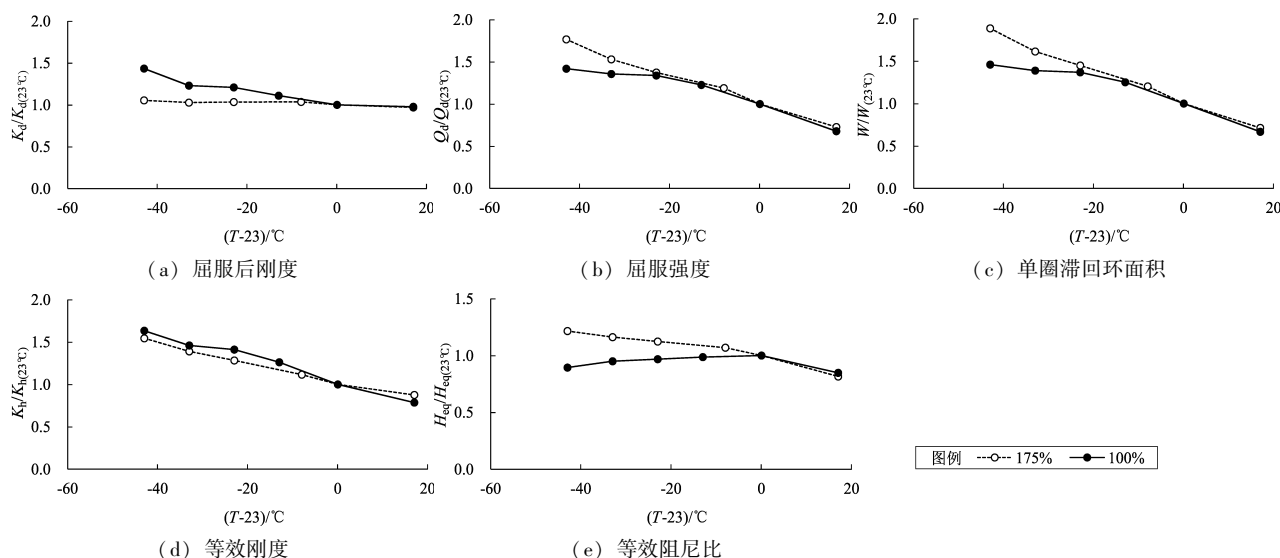


图3 SHDR 支座水平力学性能在不同应变时的温度相关性

Fig. 3 The temperature dependency of shear property of SHDR with different shear strain

应变时，其性能相对基准温度时性能变化较大，且随温度的降低呈增大的趋势；但对于 Q_d 而言，应变在低温时却正好呈现相反的影响变化规律趋势。对比分析图 3b, c 发现，其呈现相同的变化规律，其原因在于这两个参数都主要反映 SHDR 的耗能大小。从图 3d 来看，应变对 SHDR 的 K_h 的影响在整个温度变化区间有限，在 2 种应变状态下显示

出非常相近的变化规律，可以认为应变对 K_h 的温度影响的变化规律基本无影响。但从 3e 来看，应变对 SHDR 的 H_{eq} 比温度相关性除了在高温状态下影响较小外，在其他大部分温度区间的影响相对较大；如应变为 100% 时，随温度的降低，力学性能基本变化不大，而 175% 应变时，随温度的降低，支座 H_{eq} 比呈现线性逐渐增加的变化趋势。

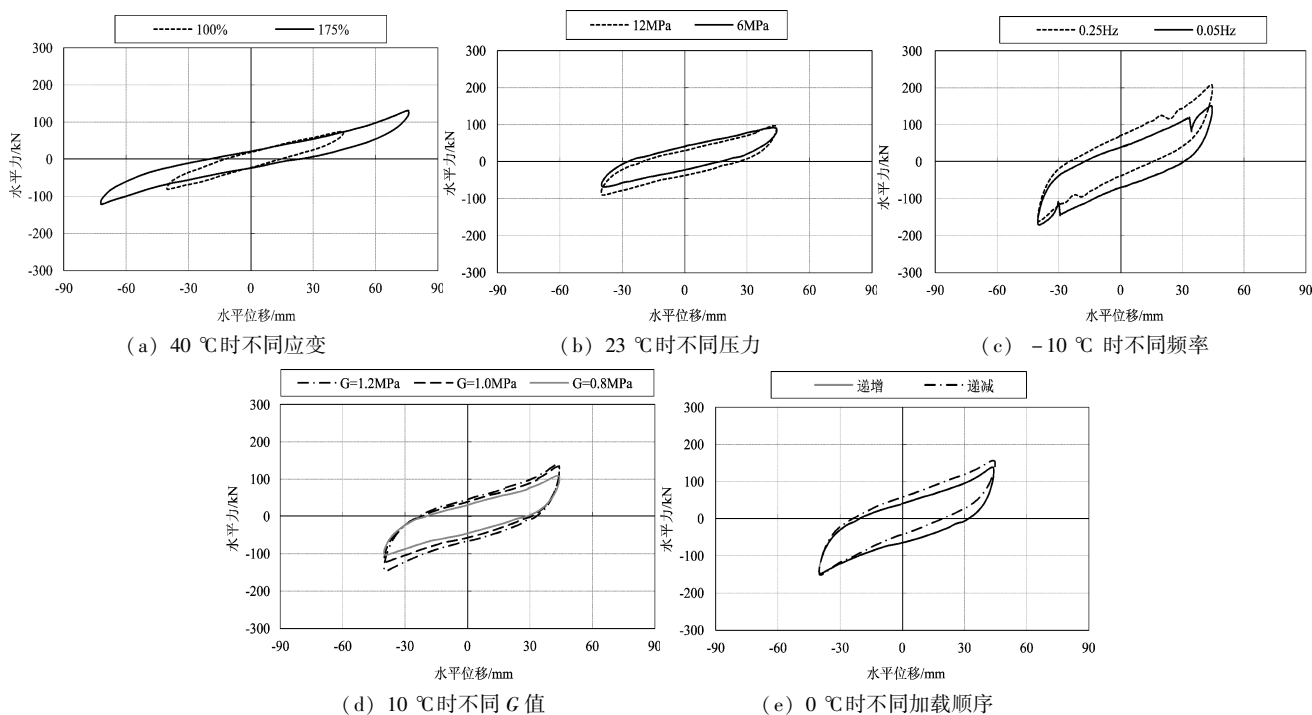


图4 不同典型温度不同影响因素下第3圈滞回曲线

Fig. 4 The 3rd hysteresis loop at different temperature with different influence factor

2.2 压应力

在水平和竖向地震作用下, 支座会产生附加压力或拉力, 施加在支座上的竖向应力将发生变化, 在不同竖向压应力时, 支座的温度相关性可能有所不同。G0.8-SHDR300300 被选取, 试验压

应力分别采用 6 MPa 和 12 MPa。

图 5 给出了 SHDR 支座 K_d , Q_d , W , K_h , H_{eq} 在 2 种不同竖向压应力下的温度相关性变化规律曲线。图 4b 给出了一典型温度 23 °C 时不同压力下第 3 圈滞回曲线。

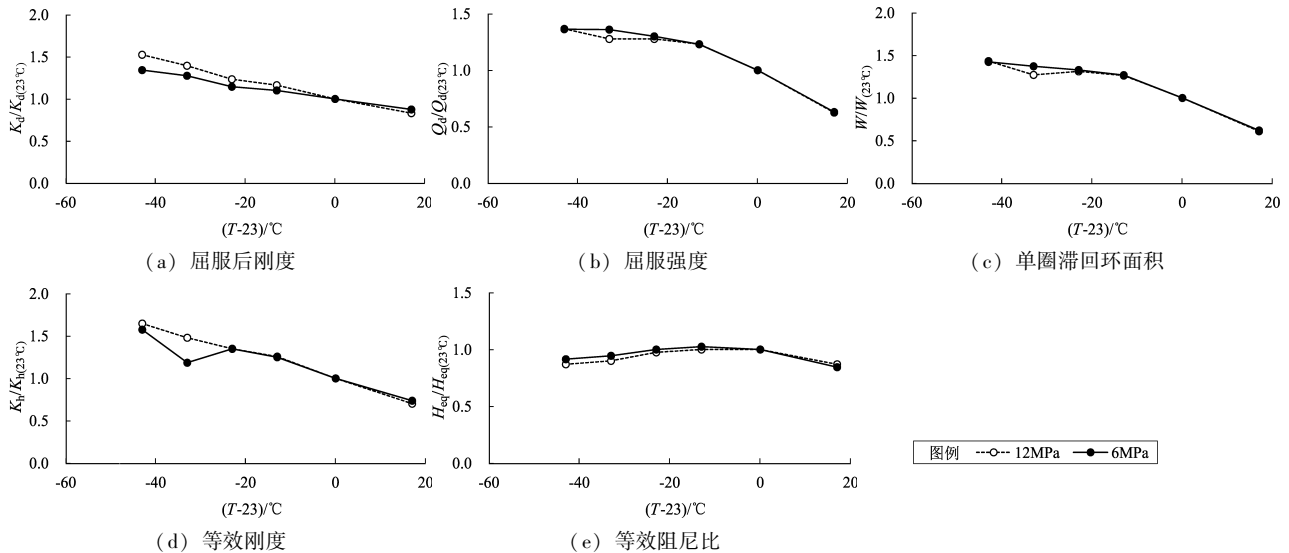


图 5 SHDR 在不同竖向压力下的温度相关性

Fig. 5 The temperature dependency of shear property of SHDR under different vertical pressure

从图 5 可以看出, 除个别温度点 (如 $K_d = -20$ °C, $K_h = -10$ °C) 的两种竖向压应力下温度相关性相对基准温度下的比值有所差别外 (前者误差约 20% 左右, 后者约 25% 左右), 其它测试点, 两种竖向压力下的 SHDR 各水平性能温度相关性整体上差别很小, 呈现近似相同的情况。整体试验结果表明, 竖向压力的不同对 SHDR 支座水平性能温度相关性影响有限。

2.3 频率

原型隔震桥梁频率为 0.25 ~ 0.33 Hz (即隔震周期约 3 ~ 4 s), 但原型隔震支座一般尺寸比较大, 在试验时实现上述频率的试验具有一定的困难, 一般会采用稍低的频率进行试验, 如 0.05 ~ 0.01 Hz 等, 本节选取 2 个典型频率 0.25 Hz 和 0.05 Hz 作为研究加载频率对 SHDR 温度相关性的影响因子。G1.0-SHDR300300 被选取。

图 6 给出了 SHDR 支座 K_d , Q_d , W , K_h , H_{eq} 在不同加载频率情况下的温度相关性变化规律。图 4c 给出了一典型温度即 -10 °C 时不同频率时第 3 圈滞回曲线。

从图 6 来看, 2 个加载频率下的 SHDR 各水平

性能温度相关性部分指标在 -20 °C 和 -10 °C 时略有差异, K_d 在这 2 个温度值时各自相对误差约为 12% 左右; Q_d 在 -10 °C 时约为 20%, 在 -20 °C 时约为 13%, W 与 Q_d 相近; 而 K_h 在 -10 °C 时约为 20%; H_{eq} 在 -10 °C 约 20%, 在 -20 °C 时约为 10%。整体上讲, 各个参数在 -10 °C 时差异稍大, 忽略个别点的影响, 可以基本认为加载频率对 SHDR 的温度相关变化规律影响不大。

2.4 内部橡胶 G 值

在桥梁隔震项目中, 为防止变形过大, 一般采用支座剪切模量比较大的隔震橡胶支座, 从目前桥梁隔震使用支座来看, 大部分支座内部橡胶 G 值均大于 0.8 MPa, 部分支座甚至达到 2 MPa。本文选取 3 种不同的 G 值, 即 0.8, 1.0 及 1.2 MPa, 作为 G 值对 SHDR 温度相关性的影响因子。各支座内部构造完全相同。试验时压力均为 6 MPa, 水平剪应变均为 100%, 水平加载频率均为 0.25 Hz。

图 7 给出了 SHDR 支座 K_d , Q_d , W , K_h , H_{eq} 在 3 种不同橡胶 G 值下的温度相关性变化规律。图 4c 给出了一典型温度 10 °C 时不同 G 值第 3 圈滞回曲线。

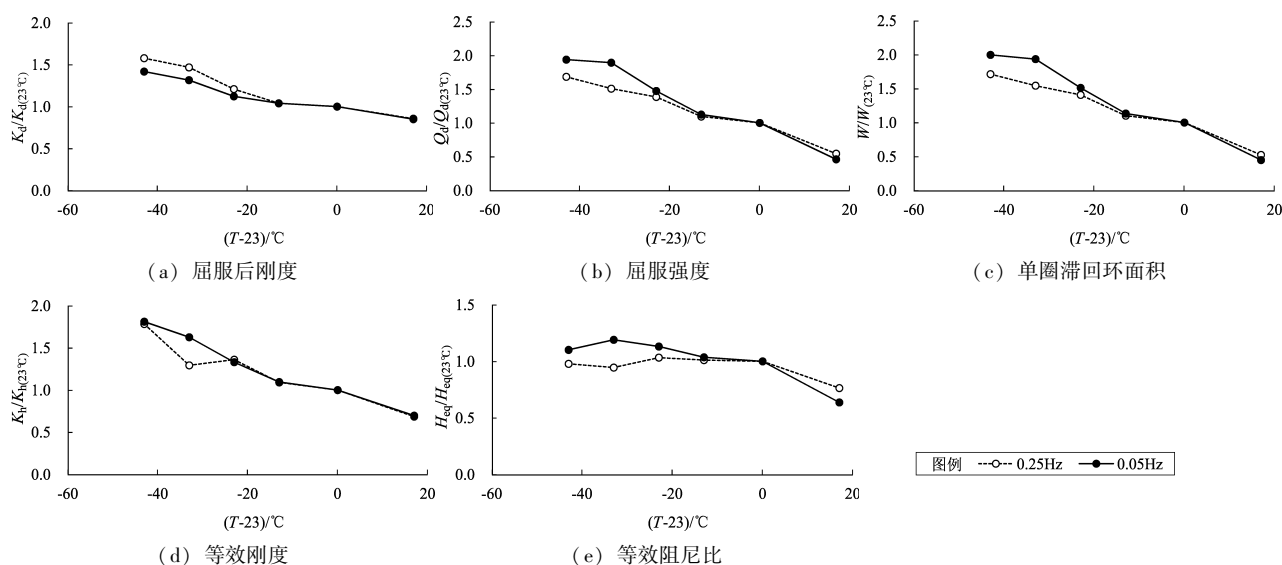


图6 SHDR在不同加载频率下的温度相关性

Fig. 6 The temperature dependency of shear property of SHDR with different frequency of work

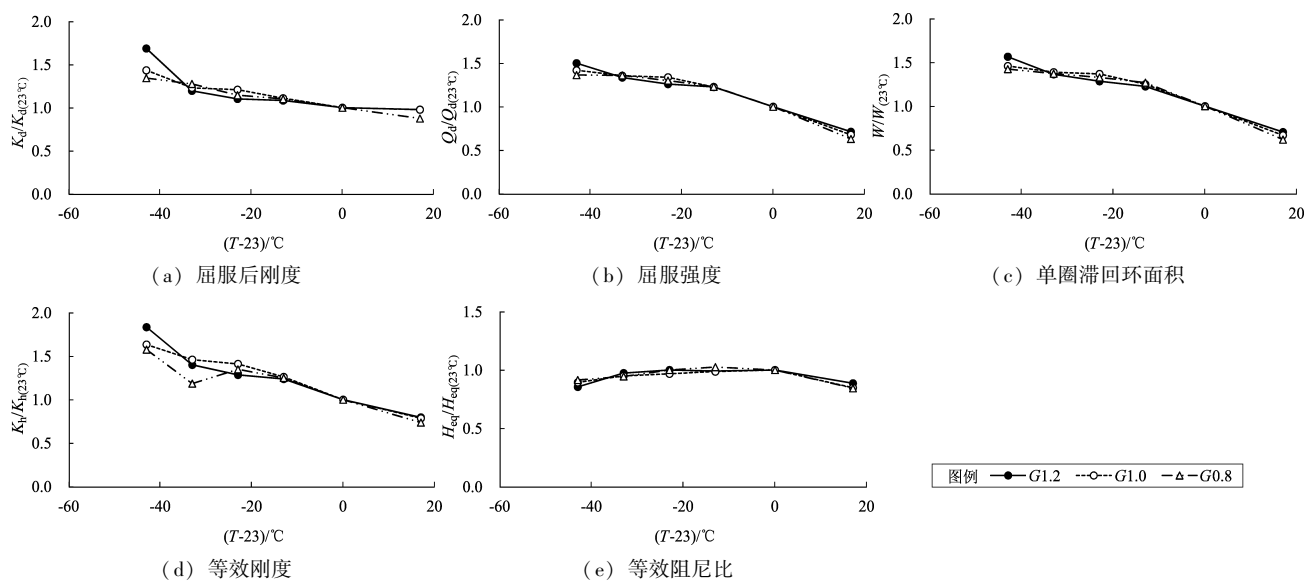


图7 不同内部橡胶G值时SHDR温度相关性

Fig. 7 The temperature dependency of shear property of SHDR with different G value

从图7可以看出, 3种G值的SHDR各水平性能温度相关性在极个别测试点有少量的差异外, 如 K_d 在G1.2, -20°C , K_h 在G0.8, -10°C , G1.2, -20°C 时, 其最大误差约为15%, 如忽略上述个别差异, 可以认为内部橡胶G值对SHDR的温度相关性影响很小。

2.5 加载顺序

《橡胶支座 第1部分: 隔震橡胶支座试验方法》(GB/T 20688.1—2007)中, 支座温度相关性

的试验加载顺序推荐为从低温到高温逐渐增加, 如采用温度逐渐减少的加载顺序, 对支座的温度相关性的规律影响如何? 为研究其影响, 试验时加载顺序分别采用了温度递增和递减的顺序。G1.0-SHDR300300被选取。

图8给出了SHDR支座 K_d , Q_d , W , K_h , H_{eq} 在不同温度加载顺序时的温度相关性变化规律。图4e给出了一典型温度 0°C 时不同加载顺序支座第3圈滞回曲线。

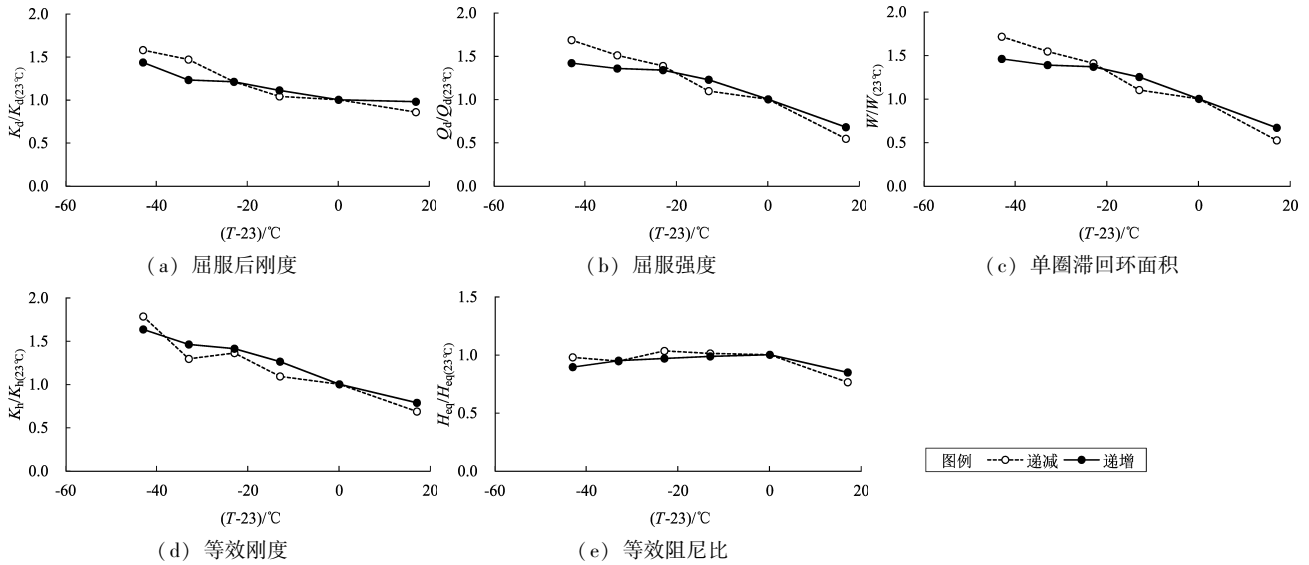


图 8 不同加载顺序下 SHDR 温度相关性

Fig. 8 The temperature dependency of shear property of SHDR with different sequence of loading

由图 8 可以看出, 除个别低温点 (如 -20°C 和 -10°C) 对支座 K_d , Q_d 及 W 略有影响外, 不同温度加载顺序对支座水平性能 K_h 和 H_{eq} 的温度相关性影响较小。

3 试验数据归纳

在对桥梁进行隔震设计时, 如采用非线性分析 SHDR 支座时, 力学性能参数 K_d , Q_d 将会被采用。从各影响参数对上述两个水平性能影响来看, 除水平剪应变影响较大外, 其它参数除极个别测试点略有影响外, 可以认为整体影响不大, 而水平剪应变一般以 100% 为基准应变较为多见。现将第 2 节中所有数据中各因素下 SHDR 支座的 K_d ,

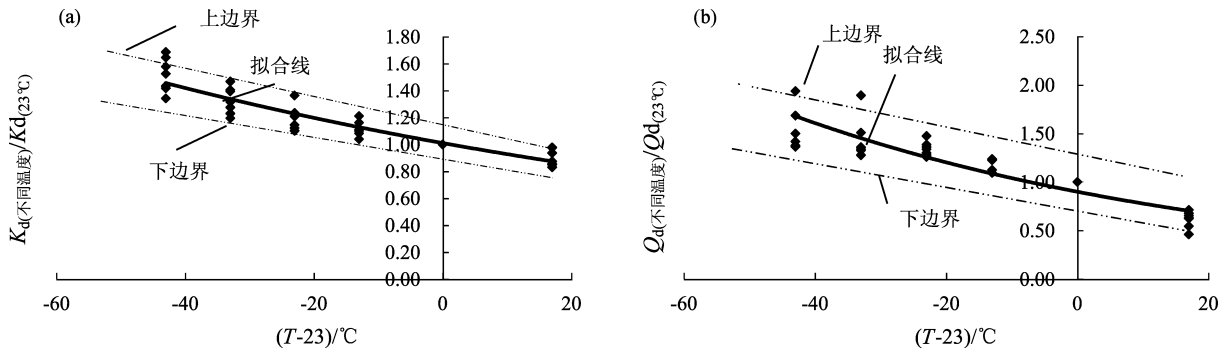
Q_d 各自汇合在一起, 分别拟合出一条具有最小误差的经验公式为:

$$K_d(T)/K_d(23^\circ\text{C}) = e^{-0.0085(T-23)} \quad (1)$$

$$Q_d(T)/Q_d(23^\circ\text{C}) = e^{-0.0145(T-23)} \quad (2)$$

式中: T 的单位为 $^\circ\text{C}$ 。

图 9 给出了高 G 值 SHDR 支座的 K_d 和 Q_d 所有试验数据及相应的拟合曲线。从 2 个参数的拟合曲线来看, 二者整体均呈非线性关系, 且均随温度的增加非线性减少, 但后者相对前者变化斜率更大。从拟合曲线与试验数据的上下边界来看, K_d 和 Q_d 的拟合曲线与试验结果最大误差约为 12.5%。式 (1) 和 (2) 分别给出了高 G 值 SHDR 支座的 K_d 和 Q_d 拟合经验公式,

图 9 高 G 值 SHDR 支座的 K_d (a) 及 Q_d (b) 温度相关性汇总数据及拟合曲线Fig. 9 Total test data and the fitted curves of the temperature dependency of K_d (a) and Q_d (b) of SHDR with high G value

可供设计人员在进行隔震设计参考。具体应用时,可根据实际工程的具体温度,进行温度相关性换算出实际工程所在温度时的隔震支座参数值进行隔震计算。

4 结论

通过对超高阻尼 SHDR 支座水平力学性能温度相关性各种影响因素的试验研究,可以得出如下结论:

(1) 压力、频率、 G 值和加载顺序对 SHDR 支座各种力学性能参数,如屈服后刚度、屈服强度、单圈滞回面积、等效刚度、等效阻尼、温度相关性影响较小。

(2) 应变对 SHDR 支座各种力学性能参数,如屈服后刚度、屈服强度、单圈滞回面积、等效刚度、等效阻尼、温度相关性影响较大。

(3) SHDR 支座力学性能参数屈服后刚度及屈服强度随温度的增加而均呈指数规律减少,且后者随温度增加减小速率更快

(4) 给出了 100% 应变时 SHDR 支座力学性能参数屈服后刚度及屈服力考虑竖向压力、加载频率、橡胶内部 G 值及加载顺序的适量影响的温度相关性拟合经验公式。

参考文献:

- 叶明坤,资道铭,梁莹莹等. 2012. 超高阻尼隔震橡胶支座在桥梁中的运用[J]. 中国建筑金属结构, (2): 112-114.
- 袁涌,熊世树,朱宏平. 2008. 隔震桥梁地震反应速度控制型实时子结构试验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 36(8): 117-120.
- 袁涌,朱宏平,资道铭. 2011. 高阻尼橡胶隔震支座的力学性能及隔震效果分析研究[J]. 预应力技术, 84(1): 20-23.
- 张文俊,郑宗平. 2017. SHDR 与 LRB 隔震连续梁桥的地震响应对比研究[J]. 工程与建设, 31(6): 796-800.
- 周福霖. 1997. 工程结构减震控制[M]. 北京:地震出版社.
- 庄学真,沈朝勇,金建敏. 2006. 桥梁高阻尼橡胶支座力学性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 26(5): 208-212.
- 资道铭,新建楠,莫曲浪. 2016. 新型低模量超高阻尼橡胶支座在建筑结构中的应用研究[J]. 城市与减灾, 5: 48-55.
- 资道铭,梁莹莹,袁涌等. 2013. 几种隔震橡胶支座性能研究及隔震效果探讨[J]. 预应力技术, 99(4): 18-26.
- Akira I, Ji D, Yuta M, et al. 2013. Loading test and investigation of analytical models for bi-dimensional restoring force response of elastomeric bearings[C]//Proceedings of the Civil Society A1 (Construction, Earthquake Engineering) 69(4) (Proceedings of Earthquake Engineering, Vol. 32), I_311-I_325.
- GB 20688.2—2006, 橡胶支座 第2部分:桥梁隔震橡胶支座[S].
- GB/T 20688.1—2007, 橡胶支座 第1部分:隔震橡胶支座试验方法[S].
- JT/T 822—2011, 公路桥梁铅芯隔震橡胶支座[S].
- JT/T 842—2012, 公路桥梁高阻尼隔震橡胶支座[S].

Analysis of the Factors on Temperature Dependence of Behavior of SHDR

SHEN Chaoyong, HUANG Xiangyun, CHEN Yangyang, MAO Jingyuan, CHEN Jianqiu, LIN Jia
(Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, Guangdong, China)

Abstract

The method of repeated loading test was employed, some factors effect on the temperature dependency of SHDR, such as horizontal strain, vertical pressure, frequency, G value and sequence of temperature loading, were analyzed, the influence of the above factors on the post-yield stiffness, yield strength, hysteretic area of single loop, equivalent stiffness and equivalent damping ratio of SHDR was given, the corresponding formula except horizontal strain were given. The results show that, there is little effect for some factors, such as vertical pressure, loading frequency, G value and the sequence of temperature loading on the bearing, while the strain has a great influence. As a whole, the post-yield stiffness and yield strength of the bearing decrease exponentially with the increase of temperature at room temperature.

Keywords: SHDR; temperature dependency; post-yield stiffness; yield strength