

连续梁桥钢阻尼滑板支座设计参数优化方法*

夏樟华¹, 林友勤¹, 孔令俊², 刘洋¹

(1. 福州大学土木工程学院 福州, 350108)

(2. 株洲时代新材料科技股份有限公司 株洲, 410007)

摘要 钢阻尼复合滑板支座具有滑动耗能、自复位且经济性好的优点,但对其实际隔震性能还缺乏实桥试验验证,不同设计参数对其隔震率的影响规律也缺乏认识。针对这些问题,以一座两跨连续梁桥为研究对象,进行 1:5 缩尺比模型的振动台试验,分析了墩顶位移、墩底剪力和桥面位移的减震率,比较了不同强度地震作用下高阻尼橡胶支座和钢阻尼滑板支座的隔震效果。结合有限元模型,分析了不同类型地震作用下屈服力、初始刚度、屈服刚度比对墩顶位移、墩底剪力和桥面位移减震率的影响规律,并分析了参数取值范围。结果表明,钢阻尼滑板支座的隔震效率在纵桥向略优于高阻尼橡胶支座,横桥向则接近高阻尼橡胶支座。综合考虑桥面板位移、墩顶位移和墩顶剪力的减震率,可以确定出钢阻尼滑板支座的有效取值范围,对实桥的支座设计有借鉴作用。

关键词 桥梁工程; 振动台试验; 滑板支座; 位移; 剪力; 减震率

中图分类号 U442.5; TH122

引言

桥梁隔震是降低桥梁地震动响应、减少生命和财产损失的重要方法^[1-2]。滑动摩擦隔震支座是桥梁隔震的重要方法之一,但普通滑板支座在地震作用下可能会产生较大的结构位移,甚至会落梁,隔震效果不理想^[2-3]。目前,滑动摩擦支座中主要采用摩擦摆支座,但是其构造复杂,使用范围相对较小。由于普通滑板支座缺乏自复位功能,不能单独使用,而钢阻尼构件具有很好的耗能和自复位作用^[4-5],可以和滑板支座有效结合,形成钢阻尼滑板支座。其中,U型钢阻尼器是常用的钢阻尼器类型之一,具有安装方便、变形和耗能能力好的优点。Suzuki等^[6]介绍了U型钢阻尼器的特性及水平支撑特性、速度和温度依赖性的试验结果。Kwon等^[7]通过非线性有限元分析,证明了超韧钢阻尼器具有良好的变形能力。Ene等^[8]试验验证了双向荷载作用下U型钢阻尼器的变形能力。王雷等^[9]讨论了U型钢阻尼滑板支座在常规桥梁中的可行性。

振动台试验是分析隔震支座实际隔震效果最有效的方法之一。贾俊峰等^[10]开展了振动台试验研究,验证了铅芯橡胶支座在桥梁上具有良好的隔震性能。文献[11-12]进行了采用滑板支座的桥梁振

动台试验研究,但对于桥梁结构中钢阻尼滑板支座的隔震性能还缺乏试验验证。在隔震支座优化设计方面,Fragiacomo等^[13]基于最小化地震动能量理论,对隔震系统进行了参数优化设计。Jangid^[14]以支座滑移为目标,表明摩擦摆支座的摩擦因数在 0.05~0.15 时隔震效果较好。Jangid^[15]基于位移优化理论进一步在铅芯橡胶支座的屈服力上进行了参数设计,支座屈服力为 10%~15% 的上部结构自重时隔震性能最佳。Karalar等^[16]通过参数敏感性分析对铅芯橡胶支座相关参数进行了优化设计。梁瑞军等^[17]通过零阶优化算法对铅芯橡胶支座参数进行优化,使得隔震支座峰值位移得到了有效控制且不显著增大墩底剪力。Chang等^[18]通过主动控制算法,提出了一种同时确定基础隔震系统刚度和阻尼系数的设计方法。这些研究可以为钢阻尼滑板支座的优化分析方法的建立提供参考。

目前,钢阻尼滑板支座的桥梁振动台试验研究相对缺乏,对不同设计参数对隔震率的影响规律理解还不充分。因此,笔者针对一种U型钢阻尼滑板支座的隔震性能进行了全桥振动台试验研究,综合考虑桥面板位移、墩顶位移和墩顶剪力的减震率确定出钢阻尼滑板支座的有效取值范围,研究结果可

* 国家自然科学基金资助项目(51408360);福建省自然科学基金资助项目(2020J01477);厦门市建设局科技资助项目(XJK2021-1-19)

收稿日期:2020-05-18;修回日期:2021-02-24

以为该类型支座的隔震性能分析和参数优化设计提供参考。

1 振动台试验概况

1.1 模型设计与制作

试验模型以2跨25 m的连续梁桥为背景,模型几何相似比为1:5,长度为10.2 m,桥墩采用钢筋混凝土实心双柱墩,墩柱直径为27 cm。模型材料与原型结构一致,主梁、桥墩混凝土强度等级为C30,模型与原型之间各参数的相似比关系如下:尺寸比为0.2;质量密度比为1.05;弹性模量比和应力比均为1.0;位移比为0.2;速度比为0.98;加速度比为4.78;时间比为0.2。模型如图1所示。

U型钢阻尼滑板支座如图2所示,由四氟乙烯滑板橡胶支座和钢阻尼器组合而成,通过钢阻尼器的弯曲变形来提供位移和阻尼,消耗能量。通过板式橡胶支座和高阻尼橡胶支座进行对比,分析钢阻尼橡胶滑板支座的隔震性能。以常见的支座原型为



图1 全桥模型图

Fig.1 Bridge model



图2 钢阻尼滑板支座

Fig.2 Steel damping slide bearing

依据,按照结构几何相似关系,3种支座的设计参数如表1所示,其中钢阻尼橡胶支座滑板初始刚度为780 kN/m。

表1 3种支座参数比较

Tab.1 Comparison of three bearing parameters

支座种类	竖向承载力/ kN	屈服力/ kN	初始刚度/ (kN·m ⁻¹)	设计位移量/ mm	屈服位移/ mm	剪切模量/ MPa	摩擦因数
板式橡胶支座	60	—	1 607	10	—	1.0	—
高阻尼橡胶支座	60	2.36	3 820	30	—	0.8	—
钢阻尼橡胶支座	60	2.00	625	30	3.2	—	0.04

1.2 试验工况

在试验过程中,每个地震波输入工况之前都通过白噪声激励,在正式地震波激励之前还会进行正弦波扫描来对测试仪器进行校订。其中: x 向为模型桥纵向; y 方向为模型桥横向。采用白噪声对全桥模型进行扫频试验,通过加速度响应信号分析桥梁模型的频率和振型。

综合考虑现有各地震记录的持时、加速度幅度和频谱成分,选取了3条天然地震波和1条人工地震波。3条天然地震波分别为Northridge波、TAR-TARZANA波和El-centro波。为满足相似关系,试验采用的地震波需对原始地震时程进行时间压缩,根据相似比关系将时长压缩到原地震记录的20%,人工波时程曲线如图3所示。根据《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)的规定,按照B、C类桥梁小震不坏、中震可修、大震不倒的抗震设防

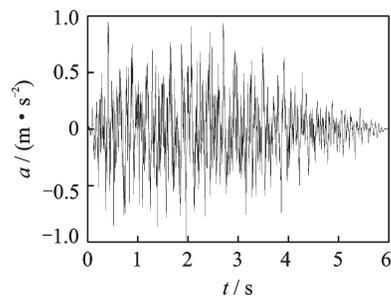


图3 人工波加速度时程曲线

Fig.3 Acceleration time history curve of artificial wave

思想,对应于E1和E2水平地震,将试验地面峰值加速度(peak ground acceleration,简称PGA)调整至0.96 m/s²和3.82 m/s²(即0.096g和0.382g),以探讨不同强度地震动输入下钢阻尼滑板支座的隔震性能。试验输入地震波的加速度反应谱如图4,5所示,其中:El-centro波卓越周期为0.57 s;Northridge波卓越周期为0.36 s;人工波卓越周期为0.52 s;

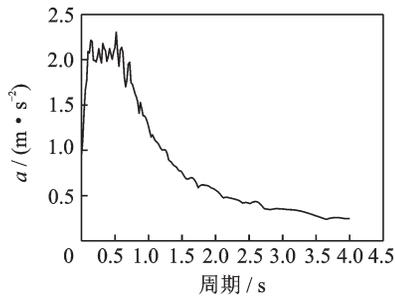


图 4 人工波加速度反应谱

Fig.4 Acceleration response spectrum of artificial wave

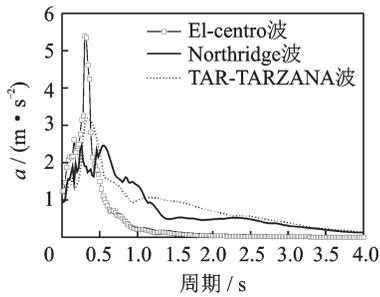


图 5 3种天然波的加速度反应谱

Fig.5 Acceleration response spectrum of three natural waves

TAR-TARZANA 波卓越周期为 0.3 s。

1.3 测试内容与测点布置

测量包括桥面板和桥墩的加速度及位移、支座的位移和受力等。全桥位移测点布置如图 6 所示,拉线式位移计主要测试桥面板和墩顶的纵桥向、横桥向位移。支座和盖梁位移布置力传感器,测试支座纵桥向、横桥向及竖向反力,并根据力的平衡关系,计算得到墩底剪力。

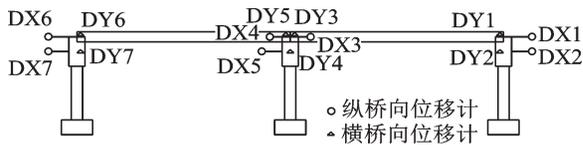


图 6 位移计布置图

Fig.6 Displacement meter layout

2 基于实测结果的隔震率分析

2.1 墩顶位移

由于中墩地震响应最大,列出峰值加速度为 0.096g 和 0.382g 情况下不同地震作用下实测的中墩墩顶位移时程曲线,采用 DX5 和 DY4 的数据,分别代表了中墩的纵桥向和横桥向的位移,如图 7,8 所示。比较发现,在 PGA 为 0.096g 各地震波作用下,最大位移不超过 7.0 mm,钢阻尼滑板支座和高阻尼

橡胶支座墩顶位移均小于板式橡胶支座。在 PGA 为 0.382g 各地震波作用下,最大位移不超过 30.0 mm,钢阻尼滑板支座和高阻尼橡胶支座墩顶位移均小于板式橡胶支座,隔震效果明显。

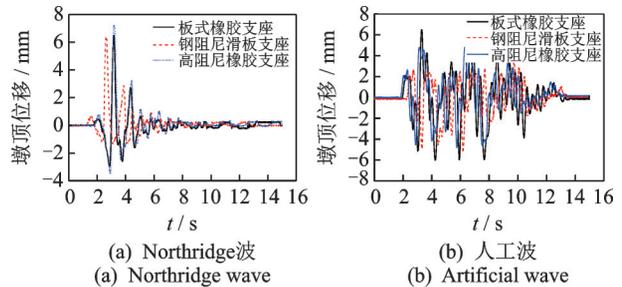


图 7 加速度峰值为 0.096g 时墩顶位移时程曲线

Fig.7 Time history curve of pier top displacement with peak acceleration of 0.096g

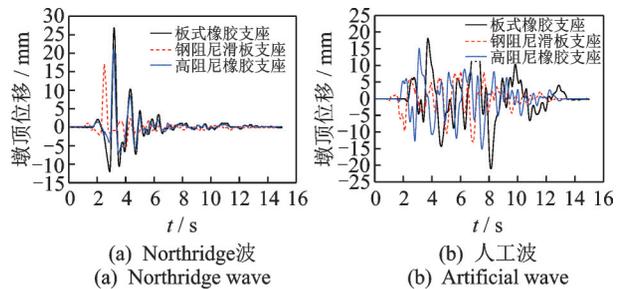


图 8 加速度峰值为 0.382g 时墩顶位移时程曲线

Fig.8 Time history curve of pier top displacement with peak acceleration of 0.382g

为了便于评价减隔震效果,定义隔震率为

$$I = \frac{e_0 - e}{e_0} \quad (1)$$

其中: I 为隔震率; e_0 为采用橡胶支座结构响应量最大值; e 为采用钢阻尼滑板支座或高阻尼橡胶支座的减隔震结构响应量最大值。

隔震率为正数时,结构响应减小;负数时,则响应增加。根据地震波纵桥向墩顶位移响应,计算不同情况下不同类型支座模型桥墩顶纵桥向位移隔震率,如图 9 所示。在 E1 地震 (PGA=0.096g) 作用下,钢阻尼滑板支座隔震率为 14.2%~27.4%,高阻尼橡胶支座隔震率为 9.5%~22.0%;在 E2 地震 (PGA=0.382g) 作用下,钢阻尼滑板支座隔震率为 34.1%~41.0%,高阻尼橡胶支座隔震率为 22.1%~28.8%。可以看出,在小震和大震作用下,两类支座均具有较好的隔震效果,钢阻尼滑板支座隔震效果总体好于高阻尼橡胶支座,特别是大震作用下隔震效果提高更为明显,这主要是因为钢阻尼滑板支座在大震下能产生更大的滑动。

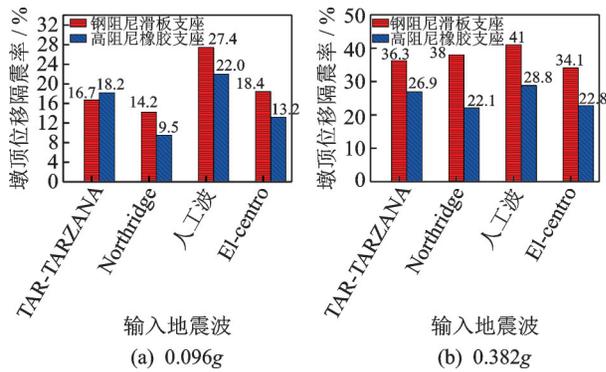


图9 纵桥向墩顶峰值位移隔震率对比

Fig.9 Isolation rate of longitudinal peak displacement response

同样地,根据地震波横桥向墩顶位移响应,计算不同工况下不同类型支座模型桥墩顶纵桥向位移隔震率。在E1地震($PGA=0.096g$)作用下,钢阻尼滑板支座隔震率为 $-12.9\% \sim 5.9\%$,高阻尼橡胶支座隔震率为 $-3.2\% \sim 10.6\%$;在E2地震($PGA=0.382g$)作用下,钢阻尼滑板支座隔震率为 $16.7\% \sim 25.2\%$,高阻尼橡胶支座隔震率为 $20.4\% \sim 33.4\%$ 。可以看出:在小震作用下,两类支座墩顶位移隔震效果都不明显;在大震作用下,隔震效果提高非常明显。这是因为钢阻尼滑板支座在大震下能产生更大的滑动,作用于墩顶的水平惯性力减小,有效地减少墩顶横向位移。

根据墩顶纵横向位移隔震率的分析,两种支座对纵向位移的隔震效果要好于横桥向,同时大震作用下的隔震效果非常明显,达到了隔震目的,说明所采用的钢阻尼滑板橡胶支座具有很好的墩顶位移减震效果。

2.2 墩底剪力

根据峰值加速度为 $0.096g$ 和 $0.382g$ 情况下不同地震波引起的墩底剪力时程曲线,计算不同工况下不同类型支座模型桥墩墩底剪力隔震率,如图10所示。在E1地震($PGA=0.096g$)作用下,钢阻尼滑板支座隔震率为 $25.0\% \sim 40.0\%$,高阻尼橡胶支座隔震率为 $27.3\% \sim 48.0\%$;在E2地震($PGA=0.382g$)作用下,钢阻尼滑板支座隔震率为 $32.6\% \sim 46.3\%$,高阻尼橡胶支座隔震率为 $29.3\% \sim 35.5\%$ 。可以看出,在小震和大震作用下,两类支座均具有较好的隔震效果,总体上钢阻尼滑板支座墩底剪力的隔震效果优于高阻尼橡胶支座,采用的钢阻尼滑板支座可以有效地减少横桥向墩底剪力。同样地,根据地震波横桥向墩底剪力响应,计算不同工况下不

同类型支座模型纵桥向墩底剪力隔震率。在E1地震($PGA=0.096g$)作用下,钢阻尼滑板支座隔震率为 $-6.9\% \sim 14.6\%$,高阻尼橡胶支座隔震率为 $-4.9\% \sim 24.4\%$;在E2地震($PGA=0.382g$)作用下,钢阻尼滑板支座隔震率为 $11.5\% \sim 26.7\%$,高阻尼橡胶支座隔震率为 $15.0\% \sim 30.2\%$ 。可以看出:在小震作用下,两类支座墩底剪力隔震效果都不明显;在大震作用下,隔震效果非常明显,这是因为钢阻尼滑板支座在大震下能产生更大的滑动,作用于墩顶的水平惯性力减小^[19],可以有效地减少墩底剪力。

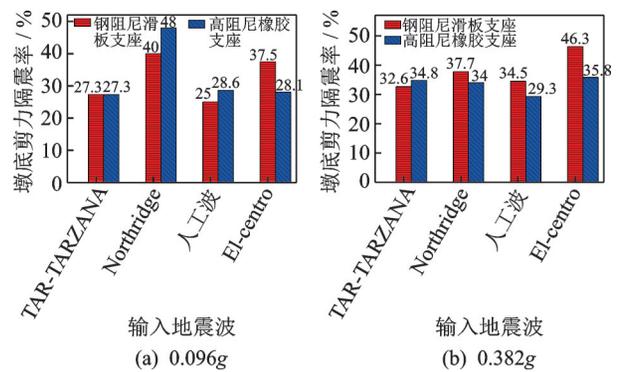


图10 纵桥向墩底剪力隔震率

Fig.10 Isolation rate of longitudinal shear force

根据纵横向墩底剪力隔震率的分析,两种支座对纵桥向的隔震效果要好于横桥向,同时大震作用下的隔震效果非常明显,达到了减震目的,说明所采用的钢阻尼滑板橡胶支座具有很好墩底剪力隔震效果。

2.3 桥面板位移

根据DX4测点的数据得出地震波下纵桥向桥面位移响应,计算得出不同工况下不同类型支座模型纵桥向桥面位移隔震率,如图11所示。在E1地震($PGA=0.096g$)作用下,钢阻尼滑板支座隔震率为 $2.5\% \sim 23.2\%$,高阻尼橡胶支座隔震率为 $4.8\% \sim 26.8\%$;在E2地震($PGA=0.382g$)作用下,钢阻尼滑板支座隔震率为 $44.3\% \sim 49.5\%$,高阻尼橡胶支座隔震率为 $40.1\% \sim 45.5\%$ 。可以看出,在小震和大震作用下,两类支座均具有较好的隔震效果,钢阻尼滑板支座隔震效果总体好于高阻尼橡胶支座,特别是在大震作用下,隔震效果提高更为明显,这主要是因为钢阻尼滑板支座在大震下能产生更大的滑动,说明所采用的钢阻尼滑板支座可以有效地减少桥面位移,减小落梁的风险。

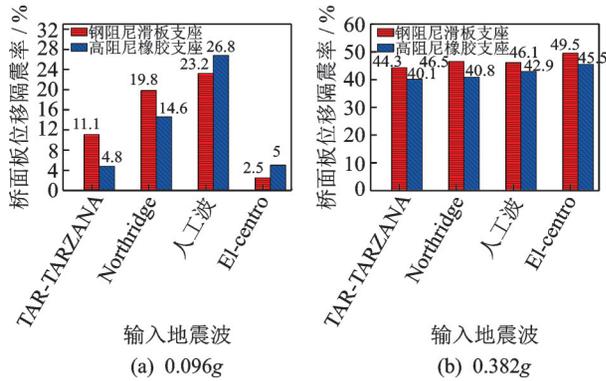


图 11 纵桥向桥面板位移隔震率
Fig.11 Isolation rate of longitudinal deck displacement

同样地,根据DY5测点的数据得出地震波横桥向桥面板位移响应,计算得出不同工况下不同类型支座模型横桥向桥面板位移隔震率。在E1地震(PGA=0.096g)作用下,钢阻尼滑板支座隔震率为-1.9%~14.6%,高阻尼橡胶支座隔震率为-2.0%~9.8%;在E2地震(PGA=0.382g)作用下,钢阻尼滑板支座隔震率为23.6%~28.8%,高阻尼橡胶支座隔震率为17.9%~29.0%。可以看出:在小震作用下,两类支座对横桥向桥面板隔震效果都不明显;在大震作用下,隔震效果非常明显。这是因为钢阻尼滑板支座在大震下能产生更大的滑动,整体水平惯性力减小,说明所采用的钢阻尼滑板支座可以降低桥面位移。

根据纵横向墩桥面位移隔震率的分析,两种支座对纵向桥面位移的隔震效果要好于横桥向,同时大震作用下的隔震效果非常明显,达到了隔震目的,说明所采用的钢阻尼滑板橡胶支座具有很好桥面位移减震效果,纵桥向和横桥向隔震效果总体都优于高阻尼橡胶支座。

3 钢阻尼滑板支座参数优化

3.1 有限元计算模型

数值模拟采用大型通用有限元软件 ANSYS,整体有限元模型如图 12 所示。有限元模型共有

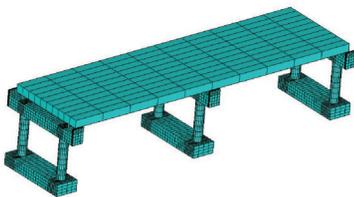


图 12 全桥有限元计算模型
Fig.12 Finite element model of the bridge

14 290 个节点,9 724 个单元。模型桥面板采用 Shell63 单元模拟,桥墩采用 Solid45 单元模拟,各单元的材料力学特性与试验完全相同。弹性模量 $E=3.25 \times 10^4$ MPa,泊松比为 0.2,密度为 2.55×10^3 kg/m³。支座采用三弹簧单元进行模拟,其中 I 节点与桥面板进行连接,其余三节点与盖梁顶部进行连接,转动的自由度不约束。钢阻尼滑板支座的滞回曲线模型通常采用双线性模型^[20],该模型各参数和相对关系如图 13 所示,其中:F 为力; K_1 和 K_2 分别为屈服前和屈服后的刚度; Q_y 和 U_y 分别为支座的屈服强度和屈服位移。钢阻尼滑板支座的竖向和水平连接分别采用 Combin14 单元和 Combin40 单元进行模拟^[21-22]。

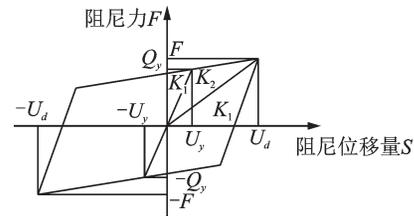


图 13 双线性恢复力模型
Fig.13 Bi-linear restoring force model

3.2 模型验证

对桥梁在安装钢阻尼滑板支座后进行模态分析,将数值计算结果和实际测试结果进行对比,表 2 列出了前 4 阶的计算周期与实测周期的结果对比,计算误差在 5% 以下,验证了计算模型的有效性。

表 2 前 4 阶周期比较

Tab.2 Comparison of the first 4 natural vibration periods

振型	振型特点	计算周期/s	实测周期/s
1	纵向	0.335	0.324
2	横向	0.323	0.310
3	竖向	0.273	0.285
4	竖向+扭转	0.075	0.078

位移时程曲线和频谱曲线的实测与有限元计算值对比如图 14 所示,墩底剪力时程曲线和频谱曲线的实测与有限元计算值对比如图 15 所示。由图可见,实测和计算的时程响应及反应谱均吻合较好,所建立的有限元模型具有较好的精度,可以应用于钢阻尼滑板支座隔震性能分析和参数优化分析。

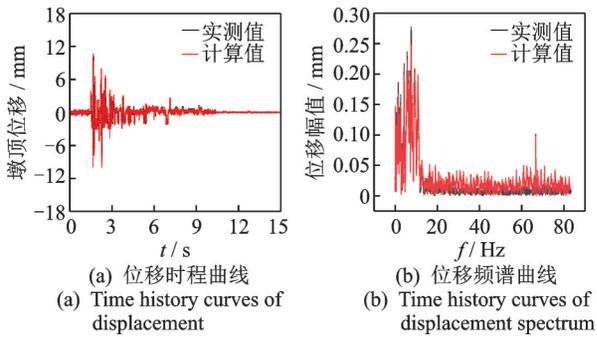


图 14 0.382g TAR-TARZANA 波作用钢阻尼支座模型墩顶纵向计算与实测结果对比

Fig.14 Comparison of longitudinal calculated and measured displacement during 0.382g under TAR-TARZANA wave

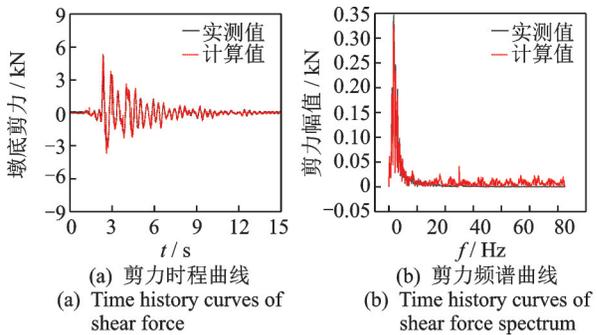


图 15 0.382g Northridge 波时钢阻尼支座模型墩底纵向计算与实测剪力对比

Fig.15 Comparison of longitudinal calculated and measured shear force during 0.382g under Northridge wave

3.3 参数优化分析

3.3.1 屈服力对隔震效果的影响

屈服力 F_y 为弹性阶段的极限值, F_y 太小, 支座容易屈服, 正常使用下桥梁会产生较大的位移; F_y 太大, 地震作用时支座可能无法及时进入塑性阶段而影响隔震效果。其他参数不变, 通过改变 F_y 来研究其对支座隔震效果的影响。计算了 8 种工况, 初始刚度为 1 405 kN/m, 屈服均为 0.015, 屈服力分别为

0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 和 32.0 kN。

在输入地震波加速度峰值 0.382g 的 4 类地震波作用下, 各工况钢阻尼滑板支座模型桥的桥墩响应减震率如图 16 所示。分析可得: 随着 F_y 的增大, 桥面板位移先减小到某一水平后基本保持不变; 墩顶位移隔震率随着 F_y 的增大而减小; F_y 对墩底剪力影响较小。 F_y 越小, 墩顶位移隔震率越高, 但 F_y 过小时, 桥面板会有过大的位移产生, 因此 F_y 即不能太小也不能太大。综合考虑, F_y 取 2.0~8.0 kN 时钢阻尼滑板支座隔震效果较好。

3.3.2 初始刚度对隔震效果的影响

初始刚度 K_1 是支座弹性刚度, 该参数不宜太大也不宜太小。通过改变 K_1 来研究其对支座隔震效果的影响。计算了 8 种工况, 初始刚度分别为 175.625, 351.25, 702.5, 1 405, 2 810, 5 620, 11 240 和 22 480 kN/m, 屈服刚度比为 0.015, 屈服力为 2.0 kN。

在地震波加速度峰值 0.382g 的 4 类地震波作用下, 钢阻尼滑板支座模型桥的桥墩响应减震率如图 17 所示。分析可得: 初始刚度对桥面板位移的影响相对明显, 随着 K_1 的增大, 桥面板位移先减小到某一水平后保持不变; K_1 对墩底剪力和墩顶位移的隔震效果影响都不太明显。初始刚度太大会导致其自振周期变小, 易产生共振。综合考虑, 钢阻尼支座的 K_1 取 1 405~4 215 kN/m 的隔震效果相对较好, 不仅能有效地减小桥面板的位移, 还能使桥墩位移和剪力有较好的隔震效果。

3.3.3 屈服刚度比对隔震效果的影响

屈服刚度比 λ 为屈服后刚度与初始刚度之比, λ 较小时, 支座的耗能和变形能力都较强, 而内力较小。通过改变 λ 来研究其对支座隔震效果的影响。计算了 8 种工况, 初始刚度为 1 405 kN/m, 屈服刚度比分别为 0.005, 0.010, 0.015, 0.020, 0.030, 0.050, 0.070 和 0.100, 屈服力为 2.0 kN。

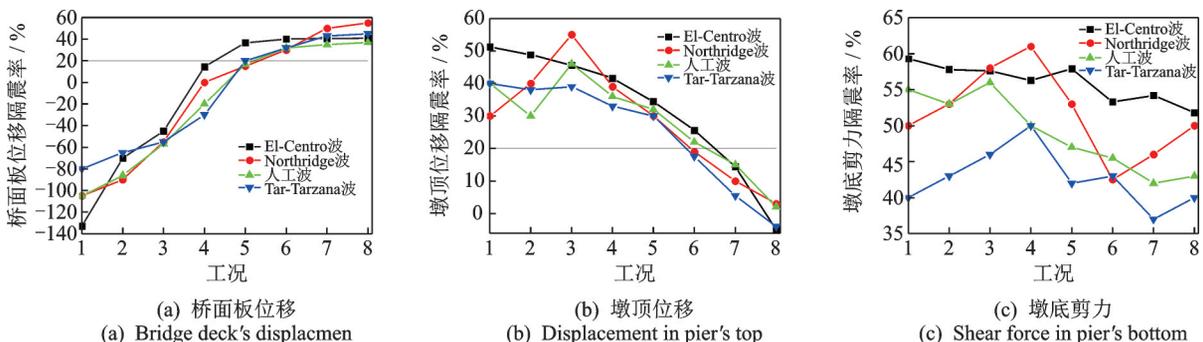


图 16 不同屈服力下桥墩响应的隔震率

Fig.16 Isolation rate of pier response under different yield forces

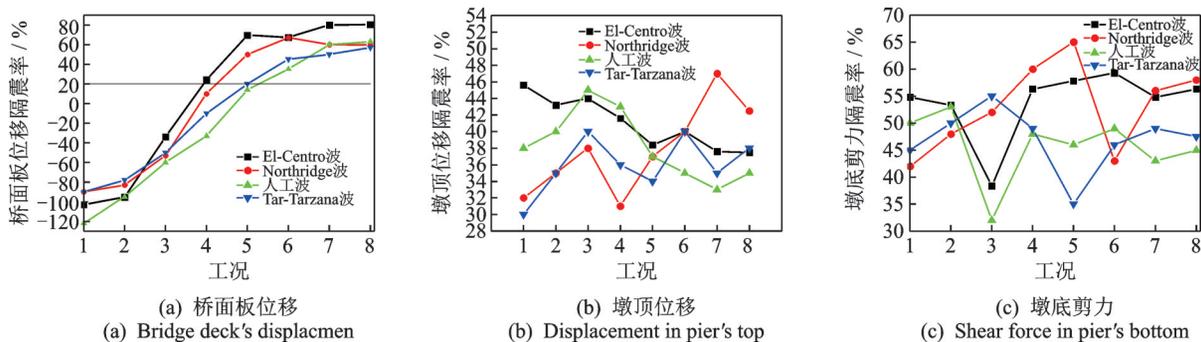


图 17 不同初始刚度桥墩响应的隔震率

Fig.17 Isolation rate of pier response under different initial stiffness

在输入地震波加速度峰值 0.382g 的 4 类地震波作用下,各工况钢阻尼滑板支座模型桥的桥墩响应减震率如图 18 所示。分析可得:随着 λ 的增大,桥面板位移先增大后减小,最后趋于稳定; λ 对墩底剪力和墩顶位移的响应的影响都较大, λ 增大

时,墩底剪力和墩顶位移的隔震率相应会减小。综合考虑,钢阻尼滑板支座的屈服刚度比取 0.020~0.050 时隔震效果较好,桥面板位移隔震率较大,而且墩底剪力和墩顶位移隔震效果没有明显降低。

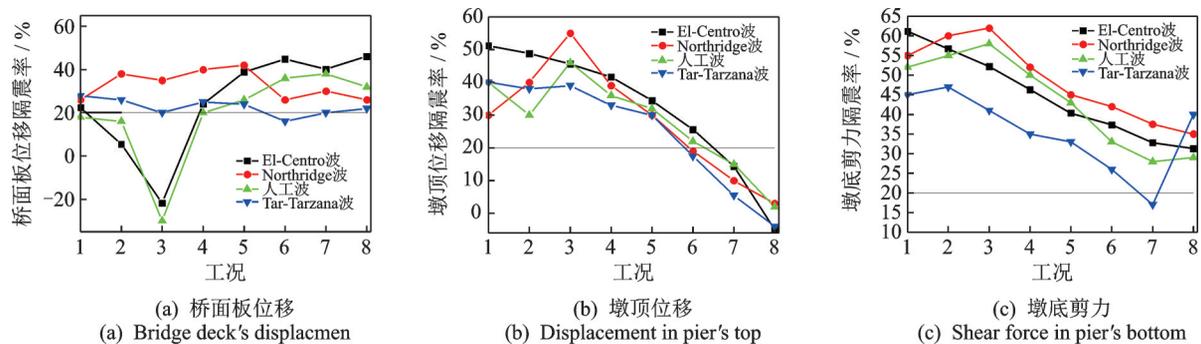


图 18 不同屈服刚度比桥墩响应的隔震率

Fig.18 Isolation rate of pier response under different yield stiffness ratio

4 结 论

- 1) 根据桥墩响应分析,E1地震下,高阻尼橡胶支座与钢阻尼滑板支座的隔震性能比较接近;E2地震下,钢阻尼滑板支座发生明显滑动,减震效果更加明显。
- 2) 采用 ANSYS 建立的钢阻尼滑板支座的连续梁桥有限元模型的计算结果与试验结果较吻合,验证了其准确性,可以用于隔震性能分析。
- 3) 随着屈服力 F_y 的增大,桥面板位移先减小到某一水平后基本保持不变;墩顶位移隔震率随着 F_y 的增大而减小;而 F_y 对墩底剪力影响较小。对于所研究的钢阻尼滑板支座, F_y 取 2~8 kN 时隔震效果较好。
- 4) 初始刚度 K_1 对桥面板位移的影响相对明显,随着 K_1 的增大,桥面板位移先减小到某一水平后保持不变; K_1 对墩底剪力和墩顶位移的隔震效果影响都不太明显。综合考虑,对于所研究的钢阻尼滑板支座, K_1 取 1 405~4 215 kN/m 的隔震效果相对较

好,不仅能有效地减小桥面板的位移,还能对桥墩的位移和剪力有较好的隔震效果。

- 5) 随着屈服刚度 λ 的增大,桥面板位移先增大后减小,最后趋于稳定,墩底剪力和墩顶位移隔震率相应减小。综合考虑,对于所研究的钢阻尼滑板支座,屈服刚度比取 0.020~0.050 时较好。

6) 根据分析,综合考虑桥面板位移、墩顶位移和墩顶剪力的隔震率来确定钢阻尼滑板支座的有效取值范围,该方法对实桥的支座设计有借鉴作用。

参 考 文 献

[1] LI J, PENG T, XU Y. Damage investigation of girder bridges under the Wenchuan earthquake and corresponding seismic design recommendations [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 7(4): 337-344.
 [2] 孙玉华,董大伟,闫兵.高架铁路车站隔振技术研究[J].振动、测试与诊断,2013,33(1):18-22.
 SUN Yuhua, DONG Dawei, YAN Bing. Research on

- vibration isolation technology of elevated railway station [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(1): 18-22. (in Chinese)
- [3] WARN G P, WHITTAKER A S. Performance estimates in seismically isolated bridge structures [J]. Engineering Structures, 2004, 26(9):1261-1278.
- [4] FILIPOV E T, REVELL J R, FAHNSTOCK L A, et al. Seismic performance of highway bridges with fusing bearing components for quasi - isolation [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42(9):1375-1394.
- [5] 刘聪,高日,李承根,等.铁路桥梁新型钢阻尼支座滞回性能研究[J].钢结构,2019,34(2):60-63.
LIU Cong, GAO Ri, LI Chenggen, et al. Research on hysteretic behavior of an innovative steel damping bearing for railway bridges [J]. Steel Construction, 2019, 34(2):60-63. (in Chinese)
- [6] SUZUKI K, WATANABE A, SAEKI E. Development of U-shaped steel damper for seismic isolation system [J]. Nippon Steel Technical Report, 2005 (92): 56-61.
- [7] KWON S I, OH S H, LEE S H. An analytical study on the shape development of U-shaped steel damper for seismic isolation system [J]. Journal of Korean Society of Steel Construction, 2010, 22(1):43-53.
- [8] ENE D, KISHIKI S, YAMADA S, et al. Experimental study on the bidirectional inelastic deformation capacity of U - shaped steel dampers for seismic isolated buildings [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2016, 45(2):173-192.
- [9] 王雷,陈政清,陈彦北,等.钢阻尼滑板支座体系在常规桥梁中应用探索[J].世界地震工程,2014,30(4):147-150.
WANG Lei, CHEN Zhengqing, CHEN Yanbei, et al. Exploration to apply steel damping slide bearing system in the conventional bridge [J]. World Earthquake Engineering, 2014, 30(4): 147-150. (in Chinese)
- [10] 贾俊峰,赵建瑜,郭扬,等.三维隔震连续梁桥模型结构地震模拟振动台试验[J].中国公路学报,2017,30(12):290-298.
JIA Junfeng, ZHAO Jianyu, GUO Yang, et al. Shaking table tests on seismic simulation of three-dimensional isolated continuous girder bridges [J]. China Journal of Highway Transportation, 2017, 30 (12) : 290-298. (in Chinese)
- [11] 张俊平,周福霖,廖蜀樵.桥梁隔震体系振动台试验研究(I)——试验意义与模型设计[J].地震工程与工程振动,2001(4):128-134.
ZHANG Junping, ZHOU Fulin, LIAO Shuqiao. Shaking table test study of bridge isolation system(I): test significance and model design [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001 (4) : 128-134. (in Chinese)
- [12] 张俊平,周福霖,闫维明,等.桥梁隔震体系振动台试验研究(II)——主要测试结果介绍[J].地震工程与工程振动,2002(1):101-108.
ZHANG Junping, ZHOU Fulin, YAN Weiming, et al. Shaking table test study of bridge isolation system(II) : an introduction to main measured results [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002(1):101-108. (in Chinese)
- [13] FRAGIACOMO M, RAJGELJ S, CIMADOM F. Design of bilinear hysteretic isolation systems [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2003, 32(9):1333-1352.
- [14] JANGID R S. Optimum friction pendulum system for near-fault motions [J]. Engineering Structures, 2005, 27(3):349-359.
- [15] JANGID R S. Optimum lead - rubber isolation bearings for near-fault motions [J]. Engineering Structures, 2007, 29(10):2503-2513.
- [16] KARALAR M, PADGETT J E, DICLELI M. Parametric analysis of optimum isolator properties for bridges susceptible to near-fault ground motions [J]. Engineering Structures, 2012, 40(7):276-287.
- [17] 梁瑞军,王浩,郑文智,等.隔震曲线连续梁桥铅芯橡胶支座参数优化[J].工程力学,2019,36(11):83-90.
LIANG Ruijun, WANG Hao, ZHENG Wenzhi, et al. Parameter optimization of lead rubber bearings of an isolated curved girder bridge [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(11):83-90. (in Chinese)
- [18] CHANG C M, SHIA S, YANG C Y. Use of active control algorithm for optimal design of base-isolated buildings against earthquakes [J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2018(1):1-14.
- [19] 夏樟华,吴应雄,张银喜,等.连续梁桥钢阻尼滑板支座隔震性能试验研究[J].桥梁建设,2017,47(6):18-23.
XIA Zhanghua, WU Yingxiong, ZHANG Yinxi, et al. Experimental study of seismic isolation performance of steel damping sliding bearing for continuous girder bridge [J]. Bridge Construction, 2017, 47 (6) : 18-23. (in Chinese)
- [20] 张龙.高阻尼橡胶减震盆式橡胶支座力学行为研究[D].成都:西南交通大学,2016.
- [21] 翟延峰.铅芯橡胶支座在不同墩高铁路桥梁中减隔震研究[D].北京:北京交通大学,2009.
- [22] 夏樟华,林友勤,张景航,等.基于振动台试验的钢阻尼滑板支座地震易损性分析[J].铁道学报,2021,43(2):148-155.
XIA Zhanghua, LIN Youqin, ZHANG Jinghang, et al. Seismic vulnerability analysis of steel damping slide bearing based on shaking table test [J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43 (2) : 148-155. (in Chinese)



第一作者简介:夏樟华,男,1980年9月生,副教授。主要研究方向为预制拼装桥梁及桥梁抗震与加固。曾发表《灌浆波纹管装配式PC双柱墩双向拟静力试验》(《中国公路学报》2021年第34卷第1期)等论文。

E-mail: xiatian@fzu.edu.cn