

板式橡胶支座梁式桥准隔震体系参数组合研究

田石柱,韩 铄,刘晨光

(苏州科技大学土木工程学院,江苏 苏州 215009)

摘要 目的 提出纵横桥向分别设置 X 型弹塑性钢挡块、黏滞阻尼器与板式橡胶支座进行组合的方法,形成板式橡胶支座梁式桥准隔震体系来提高桥梁的抗震性能,克服采用板式橡胶支座的梁式桥限位能力、自复位能力不足等缺陷。方法 应用 OpenSees 有限元软件建立一座四跨连续梁桥全桥精细化模型,通过主梁位移、桥墩内力、支座剪力与位移等地震响应对 X 型弹塑性钢挡块和黏滞阻尼器进行了力学性能参数分析。结果 横桥向 X 型弹塑性钢挡块与板式橡胶支座的组合可以有效控制梁体在地震作用下的位移,基本消除震后残余位移,且在合理选择挡块力学性能参数的情况下,能够有效降低支座承受的剪力与位移,同时减小传递到桥梁下部结构的惯性力以起到保护作用;纵桥向黏滞阻尼器和板式橡胶支座的组合,采用较为合理的参数选择可以一定程度上减小梁端的最大位移和残余位移,且大大降低了墩柱所承受的内力,确保桥梁下部结构免受严重损伤。结论 板式橡胶支座与 X 型弹塑性钢挡块、黏滞阻尼器组合形成的板式橡胶支座梁式桥准隔震体系能够有效提高桥梁的抗震性能,解决强震作用下梁体位移过大的问题。

关键词 板式橡胶支座;准隔震体系;X 型弹塑性钢挡块;黏滞阻尼器

中图分类号 TU997;U442.55

文献标志码 A

引用格式:田石柱,韩铄,刘晨光. 板式橡胶支座梁式桥准隔震体系参数组合研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(6):1001-1011. (TIAN Shizhu, HAN Tang, LIU Chenguang. Study on parameter combination of quasi-isolation system of beam bridge with laminated rubber bearing[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(6): 1001-1011.)

Study on Parameter Combination of Quasi-Isolation System of Beam Bridge with Laminated Rubber Bearing

TIAN Shizhu, HAN Tang, LIU Chenguang

(College of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, China, 215009)

Abstract: In order to overcome the defects of beam bridge with laminated rubber bearing, such as

收稿日期:2024-05-03

基金项目:国家自然科学基金项目(52208189);江苏省高等学校基础科学(自然科学)面上项目(21KJB580006)

作者简介:田石柱(1962—),男,教授,博士研究生导师,主要从事桥梁健康监测、工程结构抗震等方面研究。

insufficient limit capacity and self-reset capacity, a method of combining X-shaped elastic-plastic steel retainer, viscous damper and laminated rubber bearing in longitudinal and transverse bridge directions is proposed to form quasi-isolation system of laminated rubber bearing beam bridge to improve the seismic performance of the bridge. A refined finite element model of a four-span continuous beam bridge is established by using OpenSees. The mechanical performance parameters of X-shaped elastic-plastic steel retainer and viscous damper are analyzed by the seismic response of main beam displacement, column internal force, bearing shear force and displacement. The results show that the combination of X-shaped elastic-plastic steel retainer and laminated rubber bearing can effectively control the displacement of the beam under earthquake, and basically eliminate the residual displacement after earthquake. In addition, under the condition of reasonable selection of mechanical properties of retainer, the shear force and displacement of the bearing can be effectively reduced, and the inertia force transmitted to the substructure of the bridge can be reduced to play a protective role. The combination of longitudinal bridge viscous damper and laminated rubber bearing can reduce the maximum displacement and residual displacement of beam end to a certain extent by adopting reasonable parameter selection, and greatly reduce the internal force of column, so as to ensure that the substructure of bridge is protected from serious damage. The conclusion is that the quasi-isolation system of laminated rubber bearing beam bridge can effectively improve the seismic performance of the bridge and solve the problem of excessive displacement of beam under strong earthquake.

Key words: laminated rubber bearing; quasi-isolated system; X-shaped elastic-plastic steel retainer; viscous damper.

板式橡胶支座因制作工艺简单、安装方便、成本相对较低、承载能力大等特点,在我国中小跨径公路桥梁中得到了广泛的应用^[1]。其中,汶川地区的中小跨径公路桥梁普遍采用了板式橡胶支座,根据地震后的震害调查可知:桥梁上部结构出现了较大的梁体纵横向位移,由此引发了支座破坏、横向挡块破坏等震害^[2],可见,有效控制梁体纵横向位移是中小跨径公路桥梁抗震性能中至关重要的环节。根据美国减隔震规范规定,减隔震装置要求有一个恢复力来减小或消除地震作用之后的永久侧向位移^[3],然而板式橡胶支座由于阻尼比较小(仅为5%左右),且在发生摩擦滑移之后缺乏自复位能力和最小恢复力等缺陷,无法有效地控制桥梁上部结构在强震作用下的位移。为了区别于传统的延性抗震体系和减隔震体系,2010年美国伊利诺伊州交通厅将采用板式橡胶支座的梁式桥抗震体系定义为“Quasi-Isolated System”^[4],我国则将其定义为“准隔震体系”。针对桥

梁准隔震体系,王克海提出了“多道设防,分级耗能”的设计原则^[5],需要在纵、横桥向设置减震耗能装置来帮助支座分担地震能量。

我国常用钢筋混凝土挡块作为梁式桥横桥向的限位装置,为了改变国内缺乏挡块具体设计、构造规范的现状,徐略勤等^[6]明确了挡块的配筋计算方法和构造设计要求,并提出了一种基于“保险丝”思想的可牺牲抗震挡块及其两水准性能目标。然而钢筋混凝土挡块无法给桥梁体系提供自复位能力,且无法有效减小桥梁下部结构所受内力。因此,黄小国^[7]以X型加劲阻尼耗能装置为原型,开发出了一种新型的X型弹塑性钢挡块。刘显笑等^[8]以简支梁桥为研究对象建立有限元模型,分析了X型弹塑性钢挡块对桥梁横向地震响应的影响,结果表明,与横桥向不采用任何约束相比,X型弹塑性钢挡块可有效减小墩梁间相对位移;与横桥向采用刚度及强度较大的钢筋混凝土挡块相比,X型弹塑性钢挡块可有效减小桥墩内力。李建

中等^[9-10]将板式橡胶支座和 X 型弹塑性钢挡块进行组合,提出了一种中小跨径板式橡胶支座梁桥横桥向新型隔震系统,探讨了挡块力学性能对桥梁结构的地震响应及其参数的合理取值,结果表明,这种组合可以有效控制墩梁相对位移和消除梁体震后残余位移,同时不显著增加桥墩内力。

在横桥向设置 X 型弹塑性钢挡块作为限位装置的同时,常用黏滞阻尼器作为桥梁结构纵桥向的减震耗能装置,来控制梁体纵向位移。燕斌^[11]以一座连续梁桥为研究对象,将铅芯橡胶支座与黏滞阻尼器相组合,结果表明,二者的合理组合方式可较大幅度地提高桥梁的抗震性能。汤虎、彭伟等^[12-13]将板式橡胶支座与黏滞阻尼器相结合,且均以一座连续梁桥为研究对象,结果表明,这种组合能一定程度上控制梁体最大位移及残余位移。

综上所述,笔者将板式橡胶支座与横桥向 X 型弹塑性钢挡块、纵桥向黏滞阻尼器进行组合,优化板式橡胶支座梁式桥准隔震体系,以一座四跨连续梁桥为研究对象建立有限元模型,通过敏感性参数分析方法设计出板式橡胶支座与 X 型弹塑性钢挡块、黏滞阻尼器的最佳参数组合,为板式橡胶支座梁式桥准隔震体系的参数组合研究作为理论指导。

1 计算模型

1.1 桥梁概况

笔者以某 4 × 25 m 连续梁桥为例,桥梁结构如图 1 所示。主梁采用等截面小箱梁,梁高 1.2 m,顶板宽 10 m,顶、底板厚 0.18 m,腹板厚 0.18 m;桥墩采用圆形双柱式墩,墩高 8 m,墩柱中心距为 6 m,墩柱直径为 1.5 m,保护层厚度为 50 mm,纵筋采用 30 根 Φ36 的 HRB335 钢筋,箍筋采用 Φ18 的光圆箍筋,墩柱两端的箍筋间距为 100 mm,墩顶设盖梁,尺寸为 9 m × 1.5 m × 1.5 m。主梁采用 C50 混凝土,桥墩和盖梁采用 C30 混凝土。1#和 5#墩墩顶盖梁处设置规格为

GJZ300 × 300 × 85 的板式橡胶支座,2#、3#、4#墩墩顶盖梁处设置规格为 GJZ400 × 400 × 99 的板式橡胶支座;横桥向在盖梁两端设置 X 型弹塑性钢挡块,通过地脚螺栓将其固定在盖梁的两端,纵桥向分别在 1#和 5#墩处设置液体黏滞阻尼器,并将阻尼器一端与梁底连接,另一端与墩顶盖梁连接。

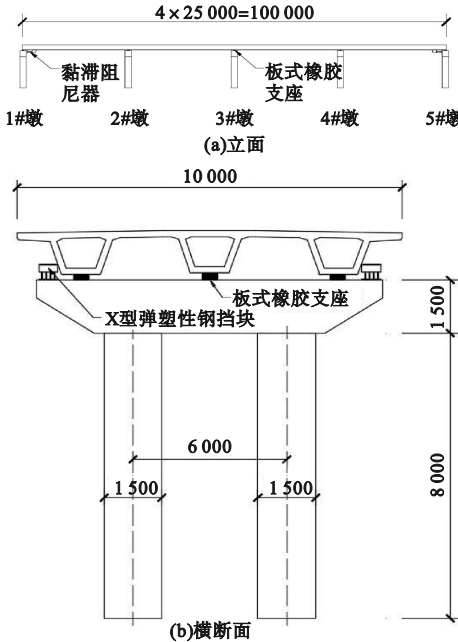


图 1 桥梁结构布置图

Fig. 1 The layout diagram of bridge structure

1.2 OpenSees 有限元模型

笔者使用加州大学伯克利分校开发的结构分析程序 OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation)^[14]建立全桥三维空间精细化有限元模型,如图 2 所示。

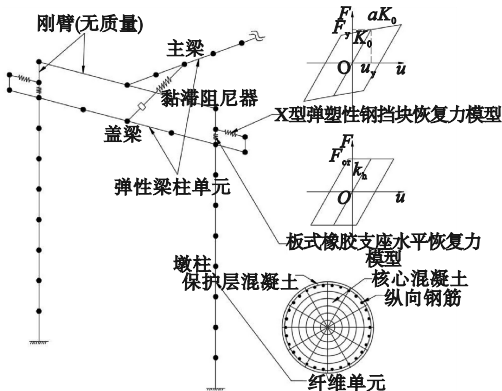


图 2 有限元模型示意图

Fig. 2 The diagram of finite element model

主梁、盖梁等能力保护构件采用弹性梁柱单元模拟,其质量和重力均加在节点上;墩柱采用非线性梁柱单元和纤维截面组合而成,将墩柱截面离散为纤维截面,每根纵向纤维单元被赋予核心混凝土、保护层混凝土和钢筋的材料本构关系;基础部分不考虑桩-土效应,采用固定约束假定。板式橡胶支座采用零长度单元模拟,其中纵、横向考虑支座的滑动效应,支座水平恢复力模型可由图2中双线性模型近似表征^[15],且采用 Steel01 材料模拟。图中临界滑动摩擦力 $F_{cr} = \mu N$, 摩擦系数 μ 根据 Coulomb 摩擦假定取值 0.15, N 为支座承受的竖向反力^[16]。X 型弹塑性钢挡块采用零长度单元模拟,其恢复力模型可近似等效为图2中的双线性模型^[7],因此采用 Steel01 材料来模拟挡块的本构关系。图2中, K_0 为初始刚度, F_y 为屈服强度, u_y 为屈服位移, α 为屈服后刚度比。黏滞阻尼器采用双节点连接单元模拟,并采用黏滞阻尼器材料。黏滞阻尼器提供的阻尼力 $F = C\dot{v}^\alpha$, 其中, C 为阻尼系数, α 为阻尼指数,

v 为阻尼器两端的相对速度。力学模型采用 Maxwell 模型,弹簧等效刚度取较大值,一般取阻尼系数的 100 ~ 1 000 倍^[17]。

1.3 地震动输入

以上海地区的抗震设防要求为例,场地抗震设防烈度为 7 度,场地类别为 IV 类,特征周期为 0.75 s,结构阻尼比为 0.05,动力放大系数最大值为 2.25,从太平洋地震研究中心 (Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER) 选取三条地震波,对准隔震体系桥梁进行非线性时程分析,其基本信息如表 1 所示,加速度时程曲线如图 3 所示。为了使得板式橡胶支座在地震作用下滑动,对这三条地震波进行统一调幅,地震加速度峰值都调成 1.0 g。

表 1 地震波基本信息

Table 1 The basic information of seismic wave				
编号	地震波名称	时间步长/s	持时/s	PGA/g
NO. 1	El Centro	0.02	53.74	0.342
NO. 2	Kern County	0.01	54.34	0.159
NO. 3	Parkfield	0.01	44.01	0.444

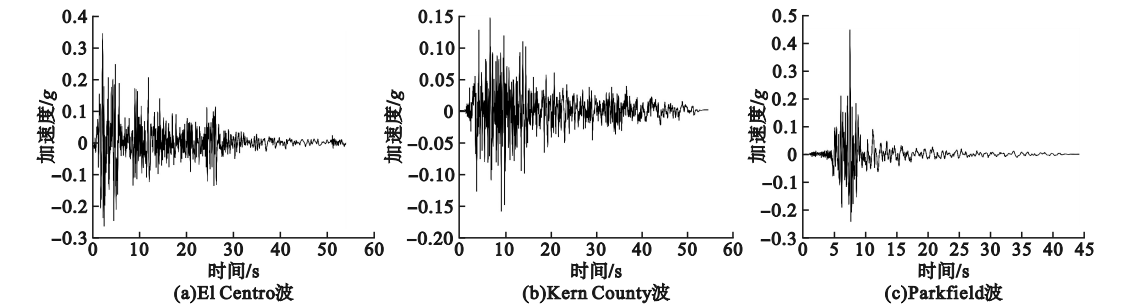


图 3 地震波加速度时程曲线

Fig. 3 The acceleration time history curve of seismic wave

2 X 型弹塑性钢挡块参数分析

研究横桥向 X 型弹塑性钢挡块的力学性能参数对准隔震体系桥梁在地震作用下的响应,笔者采用 1.2 节有限元模型,由图 2 中 X 型弹塑性钢挡块的本构关系可知,在保持屈服位移 u_y 不变的情况下,屈服强度 F_y 和屈服后刚度比 α_1 即为影响挡块力学性能的重要参数,需对其进行参数分析。分别采用

El Centro 波、Kern County 波和 Parkfield 波三条地震波对全桥模型进行地震响应分析,通过模拟分析得出:在这三种地震波作用下桥梁地震响应大致呈现相同趋势,笔者通过提取 El Centro 波作用下的分析结果,绘制位移时程曲线和滞回曲线,对主梁位移、支座最大剪力 V_{max} 和最大位移 μ_{max} 、墩柱最大弯矩 M_{max} 等地震响应进行分析,得出最佳的参数取值。

2.1 屈服强度

在保持挡块屈服位移 $u_y = 0.01\text{ m}$ 、屈服后刚度比 $\alpha_1 = 0.02$ 不变的情况下,改变挡块屈服强度 F_y 为 $0.05 F_N$ 、 $0.1 F_N$ 、 $0.15 F_N$ 、 $0.2 F_N$ 、 $0.3 F_N$ (F_N 表示支座处的恒载竖向反力)和无挡块等 6 个工况,计算桥梁结构横向地震动响应。

2.1.1 主梁位移

图 4、图 5 分别给出了主梁梁端和跨中的位移时程曲线。当横桥向未设置挡块时,连续梁梁端的最大位移可高达 365 mm,然而在加设 X 型弹塑性钢挡块之后,此处的位移随挡块屈服强度的增大分别下降为 180 mm、106 mm、58 mm、49 mm、8 mm,且位移时程曲线总体上呈现下降的趋势;当横桥向未设置挡块时,连续梁跨中还会产生较大的残余位移,高达 270 mm;然而在加设 X 型弹塑性钢挡块之后,主梁跨中的残余位移随挡块屈服强度的增大持续减小(见表 2)。当屈服强

度为 $0.2 F_N$ 与 $0.3 F_N$ 时,其残余位移均可控制在 10 mm 以内。

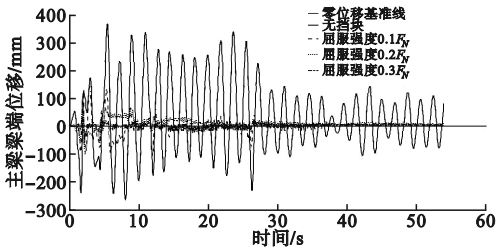


图 4 主梁梁端位移时程曲线

Fig. 4 The time history curve of end displacement at main beam

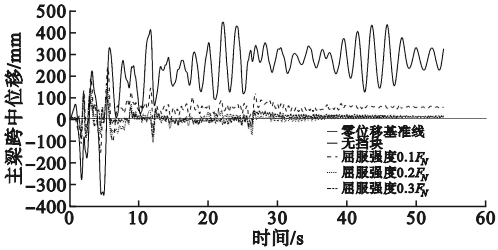


图 5 主梁跨中位移时程曲线

Fig. 5 The time history curve of mid-span displacement at main beam

表 2 不同屈服强度工况下地震响应

Table 2 The seismic response under different yield strength conditions							
屈服强度/ kN	主梁跨中 $u_{\text{残余}}/\text{mm}$	1#墩处支座 V_{max}/kN	1#墩处支座 u_{max}/mm	3#墩处支座 V_{max}/kN	3#墩处支座 u_{max}/mm	1#墩墩底 $M_{\text{max}}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	3#墩墩底 $M_{\text{max}}/(\text{kN}\cdot\text{m})$
无挡块	270	432.6	361	433.1	438	2 359.4	3 067.3
$0.05 F_N$	135	362.4	205	432.9	347	1 910.6	2 516.6
$0.10 F_N$	53	249.2	141	432.5	230	1561.9	2 555.1
$0.15 F_N$	24	217.8	123	432.4	192	1581.0	2 447.4
$0.20 F_N$	9	186.4	105	389.7	144	1724.0	2 076.5
$0.30 F_N$	7	110.3	62	320.1	118	2151.2	1 852.7

由表 2 可见,通过设置 X 型弹塑性钢挡块可以有效地减小主梁位移和控制残余位移,且随挡块屈服强度的增大,其滞回耗能能力越强,位移控制效果则越好,并从主梁残余位移这一重要抗震性能指标的控制效果来看,选择挡块屈服强度为 $0.2 F_N$ 或 $0.3 F_N$ 的效果最佳。

2.1.2 支座剪力、位移

图 6、图 7 分别给出了 1#墩和 3#墩处支座的滞回曲线。

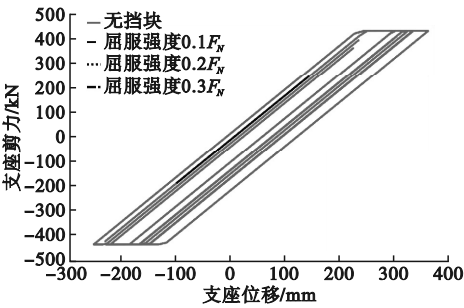


图 6 1#墩处支座滞回曲线

Fig. 6 The hysteretic curve of bearing at 1# column

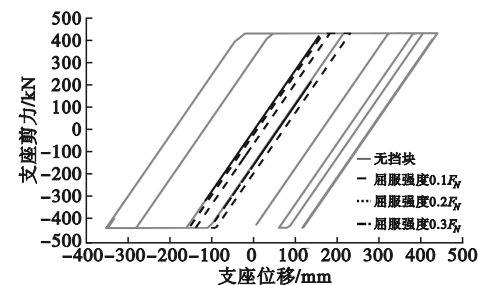


图7 3#墩处支座滞回曲线

Fig. 7 The hysteretic curve of bearing at 3# column

当横桥向未设置挡块时,1#墩和3#墩处支座通过剪切变形和摩擦滑移来耗散主梁在地震作用下产生的惯性力,因此会产生较大的支座位移。然而在加设X型弹塑性钢挡块之后,由于其对梁体的限位作用和稳定的滞回耗能能力,1#墩处支座不再发生摩擦滑移,3#墩处支座的滞回曲线面积随着挡块屈服强度的增大而不断减小,且在屈服强度达到 $0.2 F_N$ 之后不再发生摩擦滑移。如表2所示,1#墩处支座的最大剪力与位移随挡块屈服强度的增大而持续下降,3#墩处支座的最大剪力在屈服强度为 $0.2 F_N$ 时开始减小,最大位移随挡块屈服强度的增大而持续下降。

由此可见,设置X型弹塑性钢挡块可以有效帮助板式橡胶支座分担主梁因地震作用产生的惯性力,同时可以保护支座免受过大大位移而产生滑移。因此,考虑到保护1#墩和3#墩处支座不发生滑移的情况,可选择挡块屈服强度为 $0.2 F_N$ 或 $0.3 F_N$ 。

2.1.3 桥墩内力

图8、图9分别给出了1#墩和3#墩墩底截面的滞回曲线。

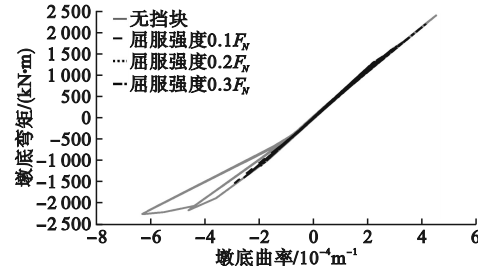


图8 1#墩墩底截面滞回曲线

Fig. 8 The hysteretic curve of bottom section at 1# column

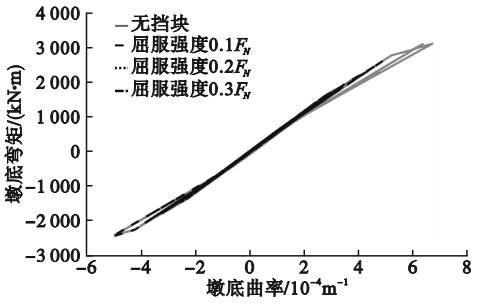


图9 3#墩墩底截面滞回曲线

Fig. 9 The hysteresis curve of bottom section at 3# column

当横桥向未设置挡块时,墩底截面的弯矩-曲率曲线均进入塑性阶段,无法始终保持线弹性,且1#墩塑性铰区域滞回曲线所围成的面积较大,桥梁结构通过墩底屈服并形成塑性铰来提供滞回耗能能力,说明仅仅利用板式橡胶支座摩擦滑移效应无法满足桥墩在横桥向始终保持线弹性阶段的要求。当加设X型弹塑性钢挡块之后,1#墩和3#墩墩底截面的弯矩-曲率曲线几乎都处于线弹性阶段,这说明横桥向板式橡胶支座和X型弹塑性钢挡块的组合能够有效地减小桥墩的内力。如表2所示,设置挡块后,1#墩的最大弯矩随挡块屈服强度的增大呈现先减小后增大的现象,其中,当挡块屈服强度为 $0.1 F_N$ 、 $0.15 F_N$ 和 $0.2 F_N$ 时相较于无挡块工况均减小了30%左右,而挡块屈服强度为 $0.3 F_N$ 时,最大弯矩有明显的回升,这是由于此时1#墩处设置的X型弹塑性钢挡块滞回耗能能力有所下降(见图10),其滞回曲线面积减小了许多;3#墩的最大弯矩呈现出随挡块屈服强度增大而持续

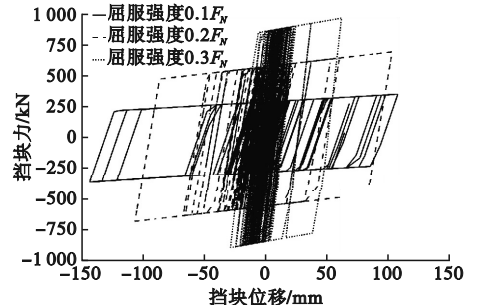


图10 1#墩处挡块滞回曲线

Fig. 10 The hysteretic curve of retainer at 1# column

下降的趋势,这是由于挡块滞回曲线面积随屈服强度的增大而增大(见图 11),表明挡块滞回耗能能力越来越强。

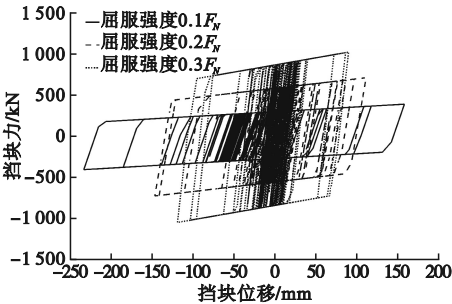


图 11 3#墩处挡块滞回曲线

Fig. 11 The hysteretic curve of retainer at 3# column

由此可见,X 型弹塑性钢挡块作为一种减震耗能装置,可以有效地降低桥墩在地震作用下所受内力,且能够保证桥墩处于线弹性阶段。为了使得 1#墩和 3#墩墩底截面的最大弯矩同时降低到一个较小值,可选择挡块屈服强度为 $0.1 F_N \sim 0.2 F_N$ 。

通过对设置 X 型弹塑性钢挡块后桥梁结构中主梁最大位移和残余位移、支座最大位移、桥墩墩底最大弯矩等地震响应的综合分析考虑,选择采用挡块屈服强度为 $0.2 F_N$ 作为最佳的参数取值。

2.2 屈服后刚度比

在保持挡块屈服位移 $u_y=0.01\text{ m}$ 、屈服强度 $F_y=0.1 F_N$ 不变的情况下,改变挡块屈服后刚度比 α_1 为 0.02、0.04、0.06、0.08、0.12 和无挡块六个工况,计算桥梁结构横向地震响应。

2.2.1 主梁位移

图 12、图 13 分别给出了主梁梁端和跨

中的位移时程曲线。

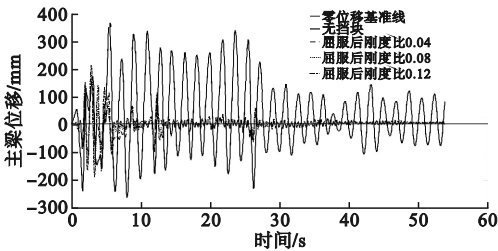


图 12 主梁梁端位移时程曲线

Fig. 12 The time history curve of end displacement at main beam

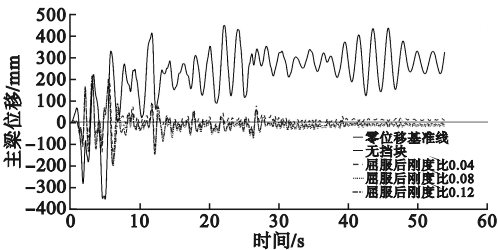


图 13 主梁跨中位移时程曲线

Fig. 13 The time history curve of mid-span displacement at main beam

在设置屈服强度为 $0.1 F_N$ 的 X 型弹塑性钢挡块基础上改变挡块屈服后刚度比。其中,主梁梁端在无挡块工况时最大位移为 365 mm,这一点的位移随挡块屈服后刚度比的增大分别下降为 133 mm、114 mm、104 mm、94 mm、66 mm,且时程曲线总体上均有明显的下降;由主梁跨中的时程曲线可以看出,改变挡块屈服后刚度比能够有效减小跨中残余位移,其残余位移随挡块屈服后刚度比的增大有明显的减小(见表 3)。

表 3 不同屈服后刚度比工况下地震响应

F_y/F_N	主梁跨中	1#墩处支座	1#墩处支座	3#墩处支座	3#墩处支座	1#墩墩底	3#墩墩底
	$u_{\text{残余}}/\text{mm}$	V_{max}/kN	u_{max}/mm	V_{max}/kN	u_{max}/mm	$M_{\text{max}}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{\text{max}}/(\text{kN}\cdot\text{m})$
无挡块	270	432.6	361	433.1	438	2 359.4	3 067.3
0.02	53	249.2	141	432.5	230	1 561.9	2 555.1
0.04	11	267.4	151	432.5	210	1 610.4	2 458.3
0.06	-8	294.4	166	432.4	197	1 737.3	2 436.9
0.08	-16	319.3	180	432.4	198	1 840.1	2 333.9
0.12	-9	369.3	209	432.5	210	2 202.1	2 207.4

由表3可见,在改变挡块屈服强度的同时,改变屈服后刚度比同样有减小主梁最大位移和控制残余位移的作用,且随着挡块屈服后刚度比的增大,位移控制效果越来越好,且从主梁跨中残余位移的控制效果来看,在挡块屈服后刚度比增大到0.04之后,残余位移均可被控制在10 mm左右,则选择挡块屈服后刚度比为0.04~0.12均可有效控制主梁最大位移和残余位移。

2.2.2 支座剪力、位移

图14、图15分别给出了1#墩和3#墩处支座的滞回曲线。

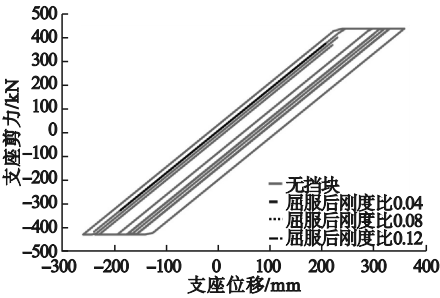


图14 1#墩处支座滞回曲线

Fig. 14 The hysteretic curve of bearing at 1# column

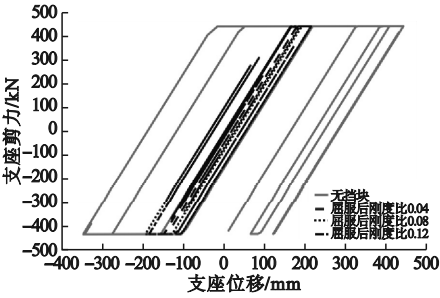


图15 3#墩处支座滞回曲线

Fig. 15 The hysteretic curve of bearing at 3# column

在设置屈服强度为 $0.1 F_N$ 的X型弹塑性钢挡块之后,改变挡块屈服后刚度比对1#墩和3#墩处支座的力-位移曲线影响不大。1#墩处支座的最大剪力随挡块屈服后刚度比的增大而增大,且取值为0.12时相比于0.02时增大了48.2%,而3#墩处支座由于摩擦滑移,其最大剪力始终为支座所能承受的极限剪切力;1#墩处支座的最大位移随挡块屈服后刚度比的增大而持续增大,即当挡

块屈服后刚度比为0.02时支座位移最小,且取值为0.12时相比于0.02时增大了48.2%,而3#墩处支座的最大位移随挡块屈服后刚度比增大呈现先下降后上升的规律,且取值为0.04~0.12时最大位移均比较相近。

由此可见,在X型弹塑性钢挡块屈服强度为 $0.1 F_N$ 的基础上,改变挡块屈服后刚度比对1#墩处支座的影响较大,而对3#墩处支座的影响相对较小,因此建议挡块屈服后刚度比越小越好,且屈服后刚度比为0.04~0.12时,对3#墩处支座最大剪力与位移的改变非常接近,即选择挡块屈服后刚度比为0.04为最佳。

2.2.3 桥墩内力

图16、图17分别给出了1#墩和3#墩墩底截面的滞回曲线,在设置屈服强度为 $0.1 F_N$ 的X型弹塑性钢挡块之后,1#墩和3#墩墩底截面的弯矩-曲率曲线在挡块屈服后刚度比变化时基本都保持线弹性,桥墩为弹性受力构件,其最大弯矩如表3所示。墩底截面的最大弯矩在设置X型弹塑性钢挡块之后,相较于无挡块工况已经有了明显的下降,1#墩的最大弯矩随挡块屈服后刚度比的增大呈现持续上升的趋势,而3#墩的最大弯矩变化规律却恰好相反,相较于屈服后刚度比为0.02时,1#墩处分别上升了3.1%、11.2%、17.8%、41.0%,而3#墩处分别下降了3.8%、4.6%、8.7%、13.6%。

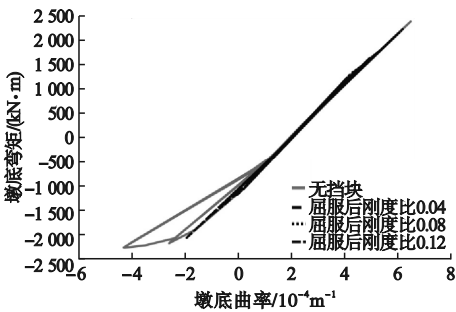


图16 1#墩墩底截面滞回曲线

Fig. 16 The hysteresis curve of bottom section at 1# column

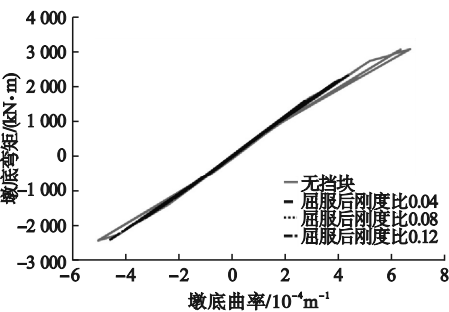


图 17 3#墩墩底截面滞回曲线

Fig. 17 The hysteresis curve of bottom section at 3# column

由此可见,为了保护桥墩不受到过大的弯矩,1#墩所受弯矩的增长幅度明显比3#墩的下降幅度要大得多,因此选择屈服后刚度比为0.04,其1#墩弯矩上升的幅值与3#墩弯矩下降的幅值最为接近。

在设置屈服强度为 $0.1 F_N$ 的X型弹塑性钢挡块的基础上,通过对桥梁结构中主梁最大位移和残余位移、支座最大位移、桥墩墩底最大弯矩等地震响应的综合分析考虑,选择采用挡块屈服后刚度比为0.04作为最佳参数取值。

3 黏滞阻尼器参数分析

为了探究纵桥向黏滞阻尼器的力学性能参数对准隔震体系桥梁在地震作用下的响应,笔者采用了上文建立的有限元模型,通过对阻尼器的阻尼力公式可知,阻尼指数 α_2 是影响阻尼器阻尼力大小和滞回曲线饱满程度的重要参数,需对其进行参数分析。分别采用El Centro波、Kern County波和Parkfield波三条地震波对全桥模型进行地震响应分析,通过模拟分析得出:在这三种地震波作用下桥梁地震响应大致呈现相同趋势,笔者通过提取El Centro波作用下的分析结果,绘制位移时程曲线和滞回曲线,对主梁位移、支座最大剪力和位移、墩柱最大弯矩等地震响应进行分析,比较得出最佳参数取值。

3.1 阻尼指数

黏滞阻尼器的滞回耗能能力与阻尼指数

息息相关,阻尼指数越小,其滞回环越饱满,因此改变阻尼器阻尼指数 α_2 为1.0、0.8、0.6、0.4、0.2和无阻尼器六个工况,计算桥梁结构纵向地震响应。

3.1.1 主梁位移

图18给出了主梁梁端的位移时程曲线。当仅设置板式橡胶支座时,连续梁梁端最大位移可达407 mm,且会产生68 mm的残余位移。而在梁端各设置一个黏滞阻尼器之后,最大位移有所下降,且残余位移也随着阻尼指数的变化而改变。随着阻尼指数从1.0变化到0.2,梁端的最大位移分别下降至378 mm、376 mm、373 mm、370 mm、365 mm,下降幅值最多可达10.3%;残余位移分别为81 mm、74 mm、64 mm、47 mm、28 mm,从阻尼系数为0.6开始出现下降趋势。这是由于在地震作用下墩梁之间产生了相对速度和相对位移,在纵桥向设置黏滞阻尼器后,其利用滞回耗能能力抵消了一部分地震动能量,因此减小了梁体的位移。

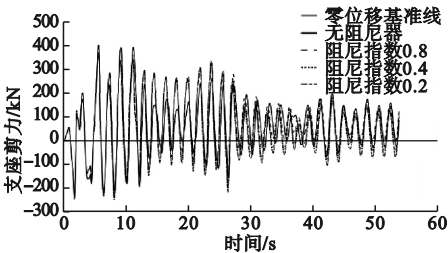


图 18 主梁梁端位移时程曲线

Fig. 18 The time history curve of end displacement at main beam

3.1.2 支座剪力、位移

图19给出了1#墩处支座的滞回曲线,不同阻尼指数工况下地震响应如表4所示。当梁端设置黏滞阻尼器之后,其对板式橡胶支座的影响并不大,支座依旧会发生摩擦滑移且滑移的位移没有明显的下降。由表4可知,支座最大位移随阻尼系数从1.0改变到0.2时相对于无阻尼器仅仅下降了6.0%、6.3%、6.6%、7.3%、8.2%。由此可见,由于在强震

作用下梁体仍会产生较大位移,与梁体直接接触的支座也会受到主梁传递来的惯性力而产生摩擦滑移,因此桥梁结构仍需通过板式橡胶支座的摩擦滑移效应来耗散地震动能量。

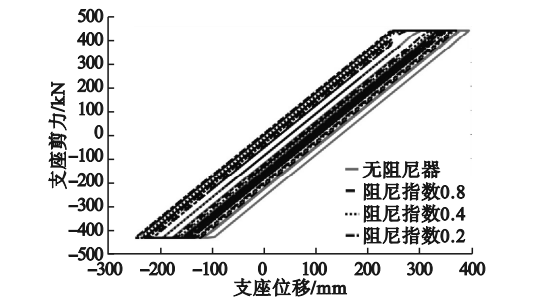


图 19 1#墩处支座滞回曲线

Fig. 19 The hysteretic curve of bearing at 1# column

表 4 不同阻尼指数工况下地震响应

Table 4 The seismic response under different damping index conditions			
阻尼指数	1#墩处支座 V_{max}/kN	1#墩处支座 u_{max}/mm	1#墩墩底 $M_{max}/(kN \cdot m)$
无阻尼器	432.6	390.1	4 808.3
1.0	432.6	366.8	2 386.2
0.8	432.6	365.7	2 287.0
0.6	432.6	364.2	2 135.3
0.4	432.6	361.5	1 934.8
0.2	432.5	358.1	1 745.8

3.1.3 桥墩内力

图 20 给出了 1#墩墩底截面的滞回曲线。当纵桥向没有设置阻尼器时,墩底截面的弯矩-曲率曲线会进入塑性阶段,无法保持线弹性,且最大弯矩非常大,而在加设黏滞阻尼器之后,弯矩-曲率曲线能够始终保持线弹性,且最大弯矩相较于无阻尼器时大大下降,阻尼指数从 1.0 变化到 0.2,最大弯矩分别下降了 50.4%、52.4%、55.6%、59.8%、63.7%。这是由于在设置黏滞阻尼器之后,梁体在地震作用下产生的惯性力通过阻尼器的耗能能力消散了一部分,因此传递到桥墩的内力便大大减小。

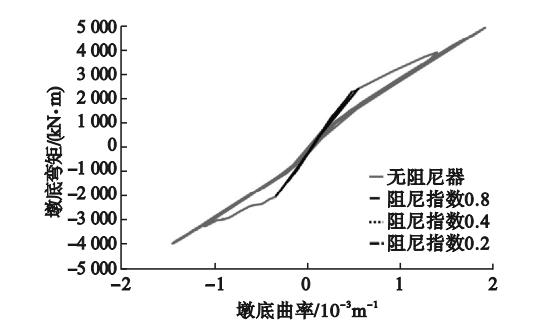


图 20 1#墩墩底截面滞回曲线

Fig. 20 The hysteresis curve of bottom section at 1# column

通过对设置黏滞阻尼器后桥梁结构中主梁最大位移和残余位移、桥墩墩底最大弯矩等地震响应的综合分析考虑,选择阻尼器的阻尼指数越小越好。随着阻尼指数的减小,活塞及阻尼孔的加工难度也将加大;当 $\alpha \leq 0.2$ 时,加工难度大幅提升以至于难以实现。因此,可以选择采用阻尼指数为 0.4 作为最佳参数取值即可满足要求。

4 结 论

- (1) 板式橡胶支座与 X 型弹塑性钢挡块、黏滞阻尼器的组合能够有效限制桥梁上部结构的纵横向位移,并且利用其滞回耗能能力能够为桥梁结构提供一定的自复位能力。
- (2) 横桥向设置 X 弹塑性钢挡块屈服强度为支座反力的 20%,初始刚度为屈服位移 0.01 m 时的刚度,屈服后刚度比为 0.04 时可以有效控制梁体的横向位移,基本消除震后产生的残余位移,且在保护支座不发生过大位移的同时,一定程度上减小了传递到桥墩墩底的内力,使得墩柱能够保持线弹性,有效地提高了桥梁横向抗震性能。
- (3) 纵桥向在连续梁桥两端设置阻尼指数为 0.4 的黏滞阻尼器可以明显减小梁体所受到的最大位移和残余位移,并且利用其滞回耗能能力大大降低了传递到墩柱的内力,使得墩柱始终能够处于线弹性阶段,一定程度上提高了桥梁纵向抗震性能。

参考文献

- [1] 项乃亮,崔侠侠,李建中. 板式橡胶支座滑动摩擦性能试验及其力学模型[J]. 同济大学学报(自然科学版),2016,44(12):1828-1834.
(XIANG Nailiang, CUI Xiaxia, LI Jianzhong. Experimental study on sliding friction behavior of laminated rubber bearing and its mechanical model [J]. Journal of tongji university (natural science), 2016, 44(12): 1828-1834.)
- [2] 庄卫林,刘振宇,蒋劲松. 汶川大地震公路桥梁震害分析及对策[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(7):1377-1387.
(ZHUANG Weilin, LIU Zhenyu, JIANG Jinsong. Earthquake-induced damage analysis of highway bridges in Wenchuan earthquake and countermeasures [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2009, 28(7): 1377-1387.)
- [3] AASHTO. Guide specifications for LRFD seismic bridge design [S]. Washington, DC, USA: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007.
- [4] STEELMAN S J, FAHNESTOCK A L, FILIPOV T E, et al. Shear and friction response of nonseismic laminated elastomeric bridge bearings subject to seismic demands [J]. Journal of bridge engineering, 2013, 18(7): 612-623.
- [5] 王克海,李冲,李茜,等. 考虑支座摩擦滑移的中小跨径桥梁抗震设计方法[J]. 工程力学,2014,31(6):85-92.
(WANG Kehai, LI Chong, LI Qian, et al. Seismic design method of small and medium span bridge considering bearing friction slipping [J]. Engineering mechanics, 2014, 31(6): 85-92.)
- [6] 徐略勤,李建中. 可牺牲抗震挡块的两水准设计方法[J]. 中国公路学报,2015,28(10):59-66.
(XU Lueqin, LI Jianzhong. Dual-level design method of sacrificial aseismic retainers [J]. China journal of highway and transport, 2015, 28(10): 59-66.)
- [7] 黄小国. 连续梁桥防落梁装置试验和理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
(HUANG Xiaoguo. Experimental and theoretical research on unseating prevention device for continuous bridge [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.)
- [8] 刘笑显,李建中,陈旭. X形弹塑性钢挡块对简支梁桥横向地震反应影响[J]. 振动与冲击,2015,34(2):143-149.
(LIU Xiaoxian, LI Jianzhong, CHEN Xu. Effects of X-shaped elastic-plastic steel shear keys on transverse seismic responses of a simply-supported girder bridge [J]. Journal of vibration and shock, 2015, 34(2): 143-149.)
- [9] 李建中,汤虎,管仲国. 中小跨径板式橡胶支座梁桥新型隔震系统[J]. 中国公路学报,2015,28(3):35-43.
(LI Jianzhong, TANG Hu, GUAN Zhongguo. A new isolation system for small and medium span bridges on laminated rubber bearings [J]. China journal of highway and transport, 2015, 28(3): 35-43.)
- [10] 李建中,汤虎. 中小跨径板式橡胶支座梁桥横向抗震设计研究[J]. 土木工程学报,2016,49(11):69-78.
(LI Jianzhong, TANG Hu. Study on transverse seismic design of small and medium span bridges with elastomeric bearing pads [J]. China civil engineering journal, 2016, 49(11): 69-78.)
- [11] 燕斌. 铅芯橡胶支座与液体粘滞阻尼器耦合分析[J]. 工程抗震与加固改造,2012,34(6):69-73.
(YAN Bin. Coupling analysis of lead rubber bearing and liquid viscous damper [J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2012, 34(6): 69-73.)
- [12] 汤虎,张洁,李建中. 近断层区桥梁组合使用板式橡胶支座和黏滞阻尼器方法探讨[J]. 结构工程师,2012,28(5):89-95.
(TANG Hu, ZHANG Jie, LI Jianzhong. Study on application of viscous dampers installed in continuous bridges on elastomeric pad bearings in near-fault regions [J]. Structural engineers, 2012, 28(5): 89-95.)
- [13] 彭伟,李建中. 使用板式橡胶支座连续梁桥主梁位移控制[J]. 噪声与振动控制,2016,36(2):172-175.
(PENG Wei, LI Jianzhong. Beam displacement control of continuous girder bridge installed with rubber bearings [J]. Noise and vibration control, 2016, 36(2): 172-175.)
- [14] MAZZONI S, MCKENNA F, SCOTT M H, et al. Open system for earthquake engineering simulation: OpenSEES command language manual [M]. California: University of California, Berkeley, 2007.
- [15] XIANG N L, LI J Z. Experimental and numerical study on seismic sliding mechanism of laminated rubber bearing [J]. Engineering structures, 2017, 141(6): 159-174.
- [16] 李枝军,葛飞,徐秀丽,等. 板式橡胶支座性能有限元模拟与试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2013,43(06):1299-1304.
(LI Zhijun, GE Fei, XU Xiuli, et al. Finite element simulation and experimental study of property for elastomeric pad bearing [J]. Journal of southeast university (natural science), 2013, 43(6): 1299-1304.)
- [17] 赵国辉. 公路桥梁减隔震装置力学参数研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
(ZHAO Guohui. Study on mechanical parameters of anti-seismic devices for highway bridge [D]. Xian: Chang'an University, 2013.)
- (责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)