

非规则梁桥横向 X 形弹塑性阻尼器合理参数分析

项乃亮, 李建中

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 提出采用 X 形弹塑性阻尼器(XSEPD)代替梁桥混凝土挡块,以控制梁体位移,减小下部结构地震反应.对板式橡胶支座(LRB)与 X 形弹塑性阻尼器的力与位移关系进行分析,并以一座典型非规则梁桥为例,通过参数分析探讨 X 形弹塑性阻尼器的不同布置方式对桥梁横向地震反应的影响规律.结果表明,通过适当选取 X 形弹塑性阻尼器的设计参数,可以有效控制墩梁相对位移,并能合理分配高低墩间所承受的地震力.

关键词: 非规则梁桥; 板式橡胶支座(LRB); X 形弹塑性阻尼器(XSEPD); 布置形式; 设计参数

中图分类号: U442.55; U443.36⁺¹

文献标志码: A

Analysis of Transverse X-shaped Elastic-plastic Damper's Proper Parameters on Irregular Girder Bridges

XIANG Nailiang, LI Jianzhong

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: An X-shaped elastic-plastic damper (XSEPD) was used to replace the concrete shear key for girder displacement control and seismic response mitigation of substructures. First, the force-displacement relationship of laminated-rubber bearing (LRB) and XSEPD was analyzed. Then, the effect of different XSEPD layouts on transverse seismic response of the bridge was investigated through parametric study based on a typical irregular girder bridge. Results indicate that XSEPD can effectively control pier-girder relative displacement and reasonably distribute seismic forces among piers if the proper design parameters are selected.

Key words: irregular girder bridge; laminated rubber bearing (LRB); X-shaped elastic-plastic damper (XSEPD); layout; design parameter

我国西部地区多为山岭重丘区,地形、地势条件较为复杂,中小跨度的非规则梁桥往往在线路中占有很大的比例^[1].这类桥梁的构造特点是:一联内的墩柱高度相差较大;一般采用板式橡胶支座(LRB),梁体与支座之间无任何连接构造措施;横向通常设置混凝土抗震挡块.

2008 年汶川大地震造成了大量桥梁的损伤和破坏,其中中小跨度梁桥的典型破坏特征^[2-3]是梁体与支座间滑动(见图 1).滑动导致较大的梁体位移,横向与混凝土抗震挡块碰撞,纵向挤压桥台和伸缩缝,引起混凝土挡块(见图 2)、桥台和伸缩缝等的破坏.但梁底与支座间的滑动实际上起到了隔震作用,汶川地震中该类桥梁桥墩和基础发生破坏的情况很少.对于这种类型桥梁抗震设计的关键在于采用合理的梁体限位装置,控制梁体位移在不发生落梁的范围又不显著增加墩柱地震力.本文提出采用 X 形弹塑性阻尼器(XSEPD)^[4](见图 3)代替混凝土挡块作为横向限位装置,通过阻尼器的塑性变形来达到耗能减震的效果.对于墩高差异的非规则梁桥来说,如果 X 形弹塑性阻尼器布置合理,不仅可以有效地减小墩梁间的位移需求,同时也可以合理分配高低墩所承受的地震力.

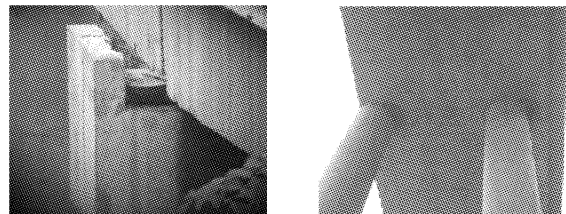


图 1 板式橡胶支座的滑动

Fig.1 Sliding of laminated rubber bearing

弹塑性阻尼器以其稳定的滞回特性及易于更换等优点在建筑结构抗震领域得到广泛应用^[5],但在

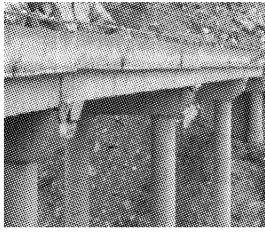


图 2 横向混凝土挡块的破坏

Fig.2 Damage of concrete shear keys

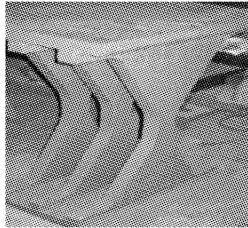


图 3 X 形弹塑性阻尼器

Fig.3 X-shaped elastic-plastic damper

桥梁结构中的应用较少. 黄小国^[6]、方圆^[7]利用软钢的弹塑性特性设计了一种可用于桥梁上的 X 形弹塑性阻尼器,并对其力与位移的关系进行了理论推导和试验研究,结果表明 X 形弹塑性阻尼器的力学计算模型大致呈双线性. Vasseghi^[8]以一座三跨简支梁桥为研究对象,分别采用混凝土挡块和 X 形弹塑性阻尼器对横向工况进行了地震反应对比分析,得出了 X 形弹塑性阻尼器具有显著的滞回耗能能力,并能有效减小下部结构地震力的结论.

本文在对板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器组合后受力性能研究的基础上,以一座典型非规则梁桥为例,探讨了 X 形弹塑性阻尼器的不同布置方式及参数取值对结构横向地震反应的影响规律.

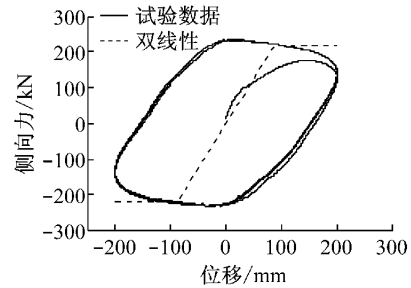
1 板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器组合分析

1.1 考虑橡胶支座与梁体间滑动的恢复力模型

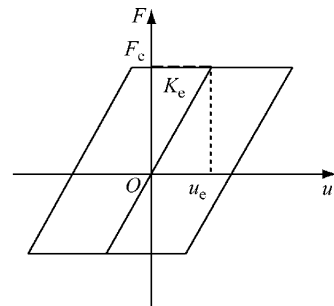
由于我国中小跨度桥梁通常采用板式橡胶支座,梁体直接搁置在支座上,因此地震作用下板式橡胶支座顶面与梁体下钢板之间可能产生相对滑动^[9-10]. 黄小国^[6]对板式橡胶支座与梁底钢板的滑动性能进行了试验研究,结果表明:在滑动之前,力与位移大致呈线弹性关系,此时的线性刚度与支座的水平剪切刚度相近;在滑动之后,力与位移为非线性关系(见图 4a),可以采用如图 4b 所示的双线性模型来模拟. 图 4b 中, F_c 为支座的临界滑动摩擦力, u_c 为支座的临界滑动位移, K_c 为支座的水平剪切刚度,可按式计算:

$$F_c = N\mu, \quad K_c = \frac{GA}{\sum t_e}, \quad u_c = \frac{F_c}{K_c} = \frac{N\mu \sum t_e}{GA} \quad (1)$$

式中: N 为恒载支反力; μ 为支座的滑动摩擦系数; G 为支座的动剪切模量; A 为支座的剪切面积; $\sum t_e$ 为支座橡胶层的总厚度.



a 滞回曲线



b 简化计算模型

图 4 板式橡胶支座滞回曲线与简化计算模型

Fig.4 Hysteretic curve and simplified model for laminated-rubber bearing

1.2 X 形弹塑性阻尼器恢复力模型

为了研究 X 形弹塑性阻尼器在地震作用下的滞回性能特点,进行了八组不同尺寸的 X 形弹塑性阻尼器拟静力试验^[6],得到 X 形弹塑性阻尼器力与位移的滞回关系曲线,如图 5a 所示. 可以看出, X 形弹塑性阻尼器的恢复力模型可以近似等效为如图 5b 所示的双线性模型. 其中, K_r 为 X 形弹塑性阻尼器的初始刚度, α 为屈后刚度比, F_r 为屈服强度, u_r 为屈服位移. K_r 和 F_r 的计算公式如下所示:

$$K_r = \frac{Enb_1 t^3}{4(h_1 + h_2)(2h_2^2 + 6h_1 h_2 + 3h_1^2)}, \quad F_r = \frac{Enb_1 t^3 \phi_y}{12(h_1 + h_2)} \quad (2)$$

式中: E 为钢材的弹性模量; t 为 X 形钢板的厚度; n 为钢板的片数; ϕ_y 为钢板截面的屈服曲率; h_1, h_2, b_1 的几何参数详见图 6.

1.3 板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器组合后的力与位移关系

对于采用板式橡胶支座和 X 形弹塑性阻尼器的

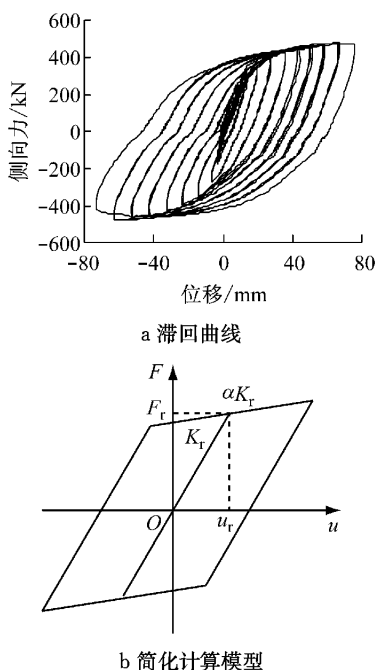


图 5 X 形弹塑性阻尼器滞回曲线与简化计算模型
Fig.5 Hysteretic curve and simplified model for X-shaped elastic-plastic damper

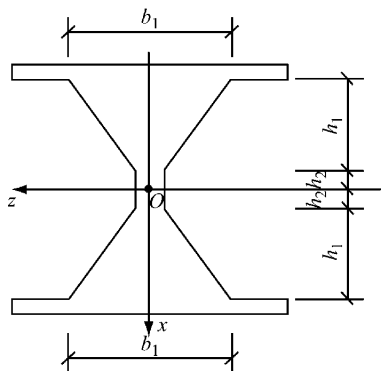


图 6 X 形弹塑性阻尼器钢板几何设计参数
Fig.6 Geometric design parameters for X-shaped elastic-plastic damper steel plates

梁桥,在地震作用下,板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器作为并联体系共同承受横向地震力(见图 7)。当支座的临界滑动位移 u_e 与 X 形弹塑性阻尼器的屈服位移 u_r 不相等时,两者并联组合后的力与位移关系呈三段线性,可近似等效为具有初始刚度和屈后刚度的双线性力学模式(见图 8),等效后体系的初始刚度 K_{eff1} 、屈后刚度 K_{eff2} 、屈服强度 F_{eff} 、屈服位移 u_{eff} 如下所示:

$$\begin{aligned} K_{eff1} &= K_e + K_r, & K_{eff2} &= \alpha K_r, \\ F_{eff} &= K_{eff1} \frac{K_e u_e + (1-\alpha) K_r u_r}{K_e + (1-\alpha) K_r}, \\ u_{eff} &= \frac{K_e u_e + (1-\alpha) K_r u_r}{K_e + (1-\alpha) K_r} \end{aligned} \quad (3)$$

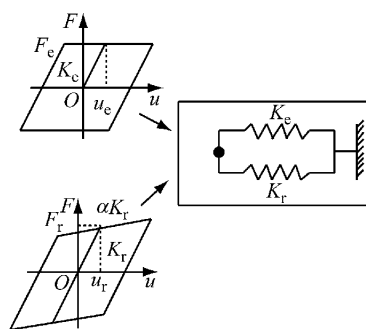


图 7 板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器组合体系
Fig.7 Combination of LRB and XSEPD

板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器组合后的力与位移关系可以近似地采用双线性模型模拟,在给定的组合体系的参数取值下,可以通过式(3)计算出所需的 X 形弹塑性阻尼器的设计参数。

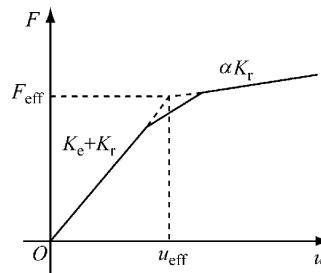


图 8 等效双线性力与位移关系
Fig.8 Equivalent bilinear force-displacement relationship

1.4 单个桥墩横向力与位移关系

地震作用下,单个桥墩横向(以下简称单墩)受力特性可以表示为板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器组合后再与墩柱串联,假设桥墩在弹性范围内工作,单墩的力与位移关系如图 9 所示,其初始刚度 K_{h1} 、屈后刚度 K_{h2} 、屈服强度 F_h 以及屈服位移 u_h 的计算如下所示:

$$\begin{aligned} K_{h1} &= \frac{K_{eff1} K_c}{K_{eff1} + K_c}, & K_{h2} &= \frac{K_{eff2} K_c}{K_{eff2} + K_c}, \\ F_h &= F_{eff}, & u_h &= u_{eff} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: K_c 表示桥墩横向弹性抗推刚度。

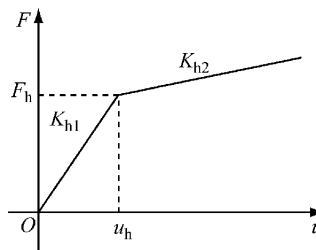


图 9 单墩的力与位移关系
Fig.9 Force-displacement relationship of single pier

2 背景桥梁简介与建模

选取我国云南山区某四跨非规则连续梁桥,桥梁的立面布置如图 10 所示. 桥梁的上部结构为跨度 40 m 的预应力混凝土 T 梁,梁高 2.5 m,桥宽 12 m;下部桥墩为 3.5 m×1.5 m 的钢筋混凝土墙式墩,1~3号桥墩墩高分别为 10,15,20 m,按照截面配筋率计算得到墩底截面屈服弯矩分别为 63 580,62 710,65 050 kN·m;每个桥墩上设置五个 GYZ650×170型板式橡胶支座,支座的力学参数可以根据《公路桥梁板式橡胶支座规格系列》^[11]计算得到,本例中单个 GYZ650×170 型板式橡胶支座的初始剪切刚度 K_e 为 3 186 kN·m⁻¹.

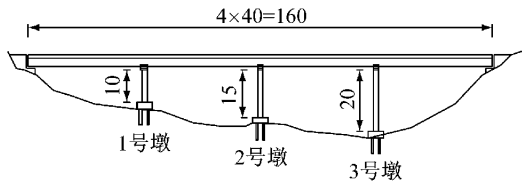


图 10 某四跨非规则连续梁桥(单位:m)

Fig. 10 Four-span irregular continuous girder bridge (unit:m)

采用 Sap2000 程序建立桥梁的三维动力有限元计算模型. 主梁、盖梁以及下部桥墩采用弹性梁单元进行模拟,板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器组合后的力学特性采用双线性力学模型进行模拟,桥墩上板式橡胶支座与梁底钢板的滑动摩擦系数 μ 取为 0.2,X 形弹塑性阻尼器的屈后刚度比 α 取为 0.03,通过在墩底设置土弹簧来近似考虑桩土相互作用效应,假设桥台不承受横向地震力.

3 地震动输入

本文选用的七条地表加速度时程波(见表 1)均取自太平洋地震工程中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)地震波数据库,每条地震波的峰值加速度均调整为 0.68g,进行结构非线性时程分析时,计算结果取七条地震波输入下结构响应的平均值.图 11 显示了经过调幅后七条地震波所对应的加速度反应谱.

4 X 形弹塑性阻尼器合理参数设计

墩高差异的非规则梁桥在地震作用下各墩受力

表 1 实际加速度时程记录

序号	地震动记录	测站	震级	峰值加速度/g
1	Imperial Valley	EL Centro Array	6.95	0.313
2	Kobe	KAK090	6.90	0.345
3	Kobe	OSA090	6.90	0.064
4	Kobe	SHI090	6.90	0.212
5	Northridge	ELIZL090	6.69	0.022
6	Northridge	ANAVE090	6.69	0.044
7	Northridge	ORR360	6.69	0.514

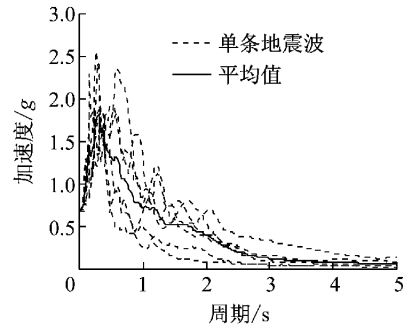


图 11 调幅后的加速度反应谱

Fig. 11 Scaled acceleration response spectrum

不均匀,如各个桥墩的截面尺寸和配筋保持一致会导致矮墩在地震作用下承受较大的地震水平力. Guirguis^[12]针对一座采用延性设计的非规则梁桥,提出了“在地震作用下各个桥墩关键截面的最大曲率延性需求保持一致”的抗震设计目标,并在此基础上对桥墩的配筋进行了优化设计.对于横向采用 X 形弹塑性阻尼器的中小跨径非规则梁桥,强震作用下通过板式橡胶支座滑动效应和 X 形弹塑性阻尼器屈服减小地震能量输入,同时利用 X 形弹塑性阻尼器滞回耗能能力控制墩梁相对位移,其抗震设计类似于减隔震设计.抗震设计目标为:在满足墩梁相对位移和桥墩保持弹性的前提下,各个桥墩的墩底弯矩需求较为均衡.

4.1 分析工况

为了研究 X 形弹塑性阻尼器的布置形式和参数取值对桥梁横向地震反应的影响,对以下四种工况进行了参数对比分析:

工况 1 各墩上板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器组合后的初始刚度和屈服强度保持一致,板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器组合后的屈服强度取为 $0.3N$,研究组合后的初始刚度取值对结构地震反应的影响.五组初始刚度(刚度 1~5)取值分别为 $2K_E, 6K_E, 18K_E, 54K_E, 162K_E$.其中, $K_E = \sum K_e$ 表示各墩所有橡胶支座的初始剪切刚度之和.

工况 2 在工况 1 的基础上,假设板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器组合后的初始刚度设为 $18K_E$,

研究组合后的屈服强度取值对结构地震反应影响. 五组屈服强度(强度 1~5)的取值分别为 0.3N, 0.6N, 1.2N, 2.4N, 4.8N.

工况 3 各墩的单墩初始刚度和屈服强度保持一致, 板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器组合后的屈服强度取为 0.3N. 3 号桥墩上板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器组合后的初始刚度取值分别为 $6K_E, 18K_E, 54K_E, 162K_E, 486K_E$.

工况 4 在工况 3 的基础上, 其中 3 号桥墩上板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器组合后的初始刚度取为 $18K_E$, 屈服强度的取值分别为 0.3N, 0.6N, 1.2N, 2.4N, 4.8N.

表 2 以工况 2 为例, 给出了满足参数取值条件的 X 形弹塑性阻尼器钢板的几何设计参数, 其余各工况的钢板几何参数同样可以根据式(1)~(4)计算得到.

表 2 工况 2 X 形弹塑性阻尼器的设计参数

Tab.2 Design parameters of X-shaped elastic-plastic damper in case 2

设计参数	$F_{eff}=0.3N$		$F_{eff}=0.6N$		$F_{eff}=1.2N$		$F_{eff}=2.4N$		$F_{eff}=4.8N$	
	1 和 3 号墩	2 号墩	1 和 3 号墩	2 号墩	1 和 3 号墩	2 号墩	1 和 3 号墩	2 号墩	1 和 3 号墩	2 号墩
h_1/m	0.17	0.15	0.35	0.30	0.70	0.65	1.10	1.10	1.25	1.25
h_2/m	0.010	0.008	0.035	0.039	0.015	0.015	0.080	0.040	0.050	0.040
b_1/m	0.147	0.100	0.580	0.410	1.180	0.740	1.650	1.380	2.750	2.550
t/m	0.040	0.040	0.040	0.040	0.050	0.060	0.080	0.080	0.062	0.065
n	10	10	25	24	40	30	35	34	60	50
E/MPa	2.0×10^5	2.0×10^5	2.0×10^5	2.0×10^5	2.0×10^5	2.0×10^5	2.0×10^5	2.0×10^5	2.0×10^5	2.0×10^5
$K_r/(kN \cdot m)$	269 138	270 663	271 778	270 611	269 058	271 809	270 354	270 359	268 618	271 937
F_r/kN	642	582	2 963	2 670	8 114	6 910	18 010	15 146	37 405	32 015

4.2 结果分析

图 12 和表 3 给出了工况 1 下的参数分析结果. 随着板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器组合后初始刚度的增加, 各个桥墩的墩底弯矩需求会不断增加, 在超过第 3 组刚度值时各墩发生屈服, 同时墩梁相对位移不断减小. 这是由于支座与弹塑性阻尼器组合后初始刚度的增加导致单墩整体刚度的增加, 桥墩的内力随刚度增加而增加, 而墩梁相对位移随刚度增加而减小. 从图 12c 可以看出, 各墩的墩底最大弯矩的差值随着组合体系初始刚度的增加先减小后增大, 表明了各个桥墩分配的横向地震内力的变化趋势. 对于本例中桥梁, 选择板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器组合后的初始刚度为 $18K_E$ 左右, 此时各墩处的墩梁相对位移都小于 10 cm, 桥墩不会屈服, 同时桥墩的墩底弯矩需求相差最小(6.0%).

工况 2 的分析结果如图 13 和表 3 所示. 随着板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器组合后屈服强度的增加, 各个桥墩的墩底弯矩不断增大, 墩梁相对位移不断减小, 但当屈服强度超过某一值后, 两者的变化趋于稳定. 同时, 在组合体系的屈服强度较小时, 各墩墩底弯矩需求较为均衡, 随着屈服强度的增大, 各墩墩底弯矩的不均衡性凸显. 本例中, 取板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器组合体系的屈服强度为 0.3N~0.6N, 此时墩梁相对位移都控制在 10 cm 以内, 各墩的墩底弯矩需求不超过其屈服弯矩, 同时弯矩需求相差也较小(3%~6%).

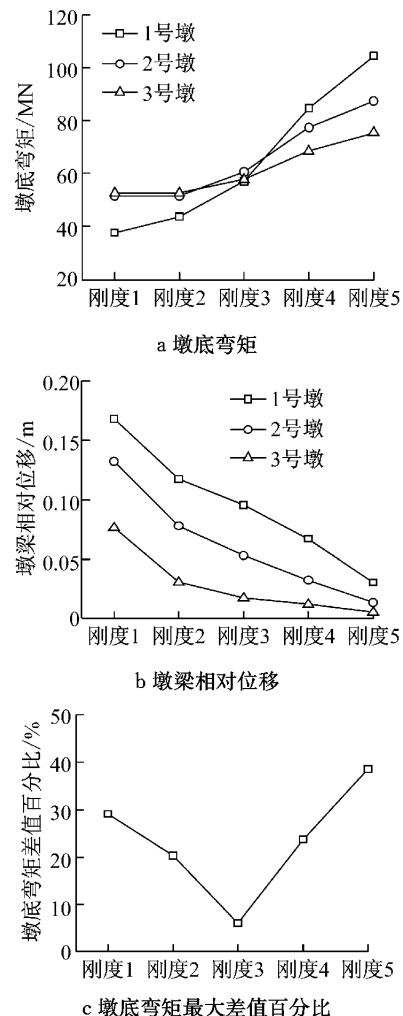
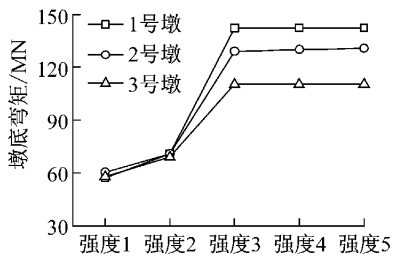


图 12 工况 1 条件下参数分析结果

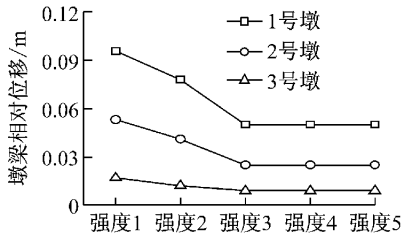
Fig.12 Parametric analysis results of case 1

表 3 工况 1 和工况 2 各墩墩底弯矩需求与屈服弯矩比值
Tab.3 Ratio of moment demand to yield moment of piers in case 1 and case 2

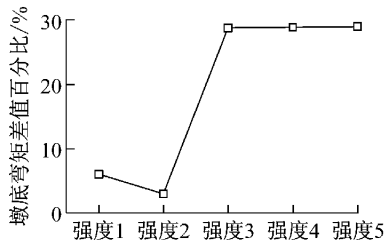
墩号	工况 1				
	刚度 1	刚度 2	刚度 3	刚度 4	刚度 5
1	0.59	0.69	0.90	1.33	1.64
2	0.82	0.82	0.96	1.23	1.39
3	0.81	0.81	0.89	1.05	1.16
墩号	工况 2				
	强度 1	强度 2	强度 3	强度 4	强度 5
1	0.90	1.12	2.23	2.23	2.24
2	0.96	1.13	2.06	2.07	2.08
3	0.89	1.06	1.70	1.70	1.70



a 墩底弯矩



b 墩梁相对位移



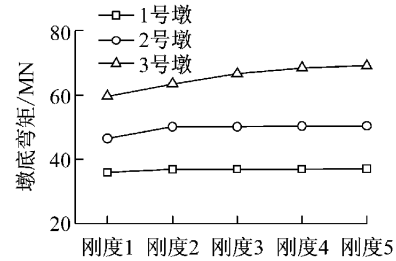
c 墩底弯矩最大差值百分比

图 13 工况 2 条件下参数分析结果

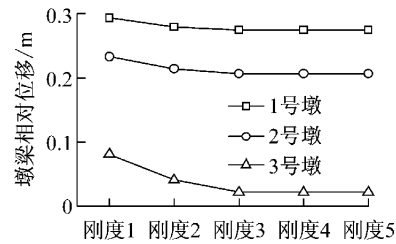
Fig.13 Parametric analysis results of case 2

工况 3 的参数分析结果如图 14 和表 4 所示. 随着板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器组合后初始刚度的增大,除 3 号墩的墩底弯矩和墩梁相对位移有小幅度的变化外,其余各墩的地震反应变化都不大. 这是由于在保证各单墩参数取值相同的情况下,矮墩(1 和 2 号墩)上支座与弹塑性阻尼器组合后初始刚度的变化幅度要远远小于高墩(3 号墩),因此矮墩(1 和 2 号墩)的地震反应相对变化不大. 参数分析的结果还表明,在保证各墩的单墩初始刚度和屈服强度一致的前提下,虽然各墩在地震作用下都不会发

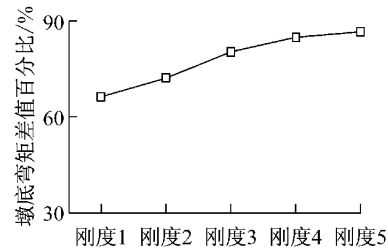
生屈服,但矮墩处会产生较大的墩梁相对位移,如 1 号墩处的墩梁相对位移超过了 27 cm,同时各墩的墩底弯矩相差也较大,最大差值超过了 60%.



a 墩底弯矩



b 墩梁相对位移



c 墩底弯矩最大差值百分比

图 14 工况 3 条件下参数分析结果

Fig.14 Parametric analysis results of case 3

表 4 工况 3 和工况 4 各墩墩底弯矩需求与屈服弯矩比值
Tab.4 Ratio of moment demand to yield moment of piers in case 3 and case 4

墩号	工况 3				
	刚度 1	刚度 2	刚度 3	刚度 4	刚度 5
1	0.56	0.58	0.58	0.58	0.58
2	0.74	0.80	0.80	0.80	0.80
3	0.92	0.98	1.02	1.05	1.06
墩号	工况 4				
	强度 1	强度 2	强度 3	强度 4	强度 5
1	0.56	0.82	0.87	0.87	0.87
2	0.74	1.04	1.08	1.08	1.08
3	0.92	1.17	1.20	1.20	1.20

工况 4 的参数分析结果见图 15 和表 4. 从图中可以看出,随着板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器组合后屈服强度的不断增大,各墩的墩底弯矩需求会先增大后趋于稳定,而墩梁相对位移和墩底弯矩的最大差值则先减小后趋于稳定,但在稳定后矮墩处的墩梁相对位移也较大,如 1 号墩的墩梁相对位

移达到了 23 cm,同时各墩的墩底弯矩需求相差也在 40%左右。

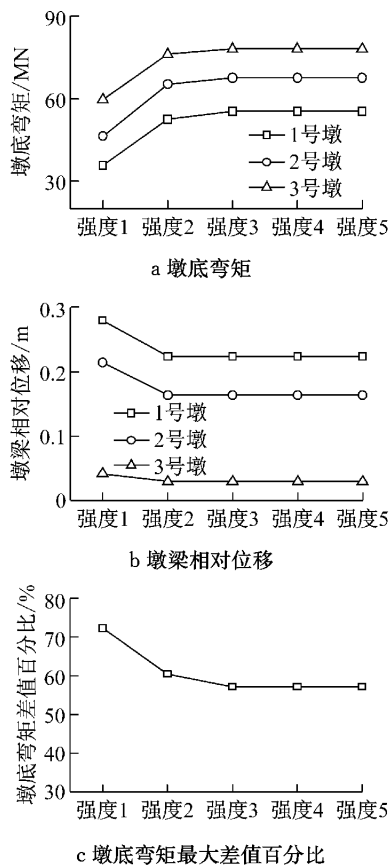


图 15 工况 4 条件下参数分析结果

Fig. 15 Parametric analysis results of case 3

综合以上分析结果可以看出,如果按照工况 1 和工况 2 的方式进行 X 形弹塑性阻尼器的布置时,通过合理选取阻尼器的设计参数,可以保证各墩处的墩梁相对位移控制在容许范围内,桥墩不会发生屈服,而且各墩的墩底内力分配较为均衡,同时这种布置方式在实际工程应用中也较为方便可行。但如果按照工况 3 和工况 4 的方式进行布置时,虽然各桥墩的地震内力较小,但矮墩处可能会产生较大的墩梁相对位移,横向落梁风险较大,同时各个桥墩的墩底弯矩需求也相差较大,在设计时会造成很大的难度。

5 结论

(1) 考虑滑动的板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器组合后的力与位移关系可以近似采用双线性力学模型来模拟。

(2) 当各墩上板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器组合后的初始刚度和屈服强度保持一致时,通过

合理地选取 X 形弹塑性阻尼器的设计参数可以把墩梁相对位移控制在容许范围内,同时各墩的墩底弯矩需求相差不大,且桥墩保持在弹性状态。如本例中,板式橡胶支座与 X 形弹塑性阻尼器组合后的合理参数为:初始刚度为 $18K_E$,屈服强度为 $0.3N \sim 0.6N$ 。

(3) 当各墩的单墩初始刚度和屈服强度保持一致时,矮墩处会产生较大的墩梁相对位移,同时各个桥墩墩底的弯矩需求相差也较大,如本例中 1 号矮墩处的墩梁相对位移超过了 23 cm,各墩的墩底弯矩相差在 40%以上。

参考文献:

- [1] 魏标. 典型不规则桥梁抗震设计理论[D]. 上海: 同济大学, 2010.
WEI Biao. Seismic design theory of irregular continuous bridges [D]. Shanghai: Tongji University, 2010.
- [2] LI Jianzhong, PENG Tianbo, XU Yan. Damage investigation of girder bridges under the Wenchuan earthquake and corresponding seismic design recommendations [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 7 (4): 337.
- [3] 范立础, 李建中. 汶川桥梁震害分析与抗震设计对策[J]. 公路, 2009(5): 122.
FAN Lichu, LI Jianzhong. Earthquake induced damage analysis of bridge in Wenchuan earthquake and designing countermeasures [J]. Highway, 2009(5): 122.
- [4] 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.
LIU Xiaoxian, LI Jianzhong, CHEN Xu. Effect 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.
- [5] 徐艳红. 新型软钢阻尼器及其结构理论和试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2013.
XU Yanhong. Theoretical and experimental research on the new mild steel dampers used in the structure [D]. Nanjing: Southeast University, 2013.
- [6] 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 bridges [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [7] 方圆. 汶川地震典型简支梁桥震害分析及横向限位装置研究[D]. 上海: 同济大学, 2012.
FANG Yuan. Research on typical damage of simple supported beam bridge during Wenchuan earthquake and transverse restraint device [D]. Shanghai: Tongji University, 2012.
- [8] Vasseghi A. Energy dissipating shear key for precast concrete girder bridges [J]. Scientia Iranica-Transactions A: Civil Engineering, 2011, 18(3): 296.