

定海大桥非线性黏滞阻尼器参数研究

范定强, 柳佳晖, 阮汉林, 王雄江*

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:以一座V形墩连续刚构桥为工程背景,研究非线性黏滞阻尼器的设置对该桥梁抗震性能的影响。建立有限元计算模型,采用非线性动力时程法分析阻尼参数,讨论黏滞阻尼器在桥梁的设置位置,并与未设置阻尼器的桥梁地震响应情况进行对比。结果表明:通过在桥梁上设置非线性黏滞阻尼器后,合理选择黏滞阻尼器的位置和参数,可有效降低桥梁关键结构在地震作用下的位移变形和内力响应,提高桥梁的抗震性能。

关键词:连续刚构桥;非线性黏滞阻尼器;非线性动力时程分析;抗震分析

自步入21世纪以来,世界各国大小型地震频发不断,特别是中国2008年的汶川大地震,造成汶川县几乎所有桥梁倒塌。这些案例,引起了世界各国政府和研究人员的重视。目前,世界各国普遍采用消能减振技术,并在地震中发挥了重要的作用。消能减振技术可通过降低地震时桥梁结构的地震响应或使其在接近弹性变形范围内减少或避免塑性变形。非线性黏滞阻

尼器就是消能减震技术常用的减震元件中的一种,通过将地震、风等输入的动能消散到结构中,达到结构减震的目的。在桥梁中设置黏滞阻尼器,可以充分体现消能减震技术的优势。在国外,该技术常在新桥抗震设计以及旧桥加固中应用,如美国金门大桥、希腊Rion—Antirion大桥等。中国的科研人员也开始研究黏滞阻尼器的使用,将其应用于桥梁,并总结出一些成

的不均匀性分布改善较好。

导致梁体收缩裂缝,因此,对于后浇带浇筑滞后时长应作进一步研究。

4 结论

(1) 相比于实体模型,单梁模型计算的箱梁竖向弯矩基本相同,由于单梁模型未能考虑箱梁的空间效应致使在自重作用下计算的箱梁顶底板最大纵向应力存在10%左右偏差。

(2) 恒载作用下,由于拉索轴力滞的影响,悬臂板后浇施工使得悬臂段后浇带的纵向压应力增大,中间梁体纵向压应力减小,致使截面顶板纵向应力不均匀分布减小。对于纵截面而言,横向正应力不均匀分布较小。随着后浇带宽度的增加,截面纵向应力不均匀分布增加;除中跨1/4点截面外,横向应力不均匀分布减小。

(3) 由于悬臂板后浇施工使得主梁的同一截面出现两种不同龄期的混凝土,由此产生的差异收缩可能

参考文献:

- [1] 雷俊卿.桥梁悬臂施工与设计[M].北京:人民交通出版社,1999.
- [2] 陈开桥,王吉连,毛伟琦.千吨级变宽悬浇挂篮设计[J].世界桥梁,2013(4).
- [3] 刘威.脊骨梁力学性能研究[D].河北工业大学硕士学位论文,2011.
- [4] 蔺鹏臻,孙理想,杨子江,等.单箱双室简支箱梁的剪力滞效应研究[J].铁道工程学报,2014(1).
- [5] 赵志峰.索支撑单箱三室箱梁剪力滞效应的分析理论与试验研究[D].兰州交通大学硕士学位论文,2016.
- [6] 李兴民.施工过程对箱梁剪力滞效应影响分析[J].桥梁建设,2013(1).
- [7] 孙向东.四塔单索面宽幅脊梁矮塔斜拉桥设计关键技术研究[D].武汉理工大学博士学位论文,2010.

收稿日期:2018-06-11

基金项目:湖北省自然科学基金资助项目(编号:2017CFB603);武汉理工大学自主创新研究基金项目(编号:2017TJC119)

作者简介:范定强,男,大学本科在读.E-mail:1285613885@qq.com

*通信作者:王雄江,男,博士,副教授.E-mail:wangxiongjiang@163.com

果与经验。例如厦漳跨海大桥(主跨 290 m 斜拉桥)、郭家沱长江大桥(主跨 720 m 钢桁梁悬索桥)和上海卢浦大桥(主跨 550 m 钢拱桥)等。在中国,虽然开始引入液体黏滞阻尼器作为抗震装置,但对于非线性黏滞阻尼器运用于连续刚构桥的研究还不多。因此该文以定海大桥为实际工程背景,通过在主桥两侧过渡墩处设置非线性黏滞阻尼器,分析阻尼器对该桥梁抗震性能的影响。对阻尼参数进行非线性动力时程分析,从综合减小桥梁的地震响应与工程经济合理性角度,总结阻尼器的参数取值对桥梁地震响应的影响规律,以得出非线性黏滞阻尼器合理的设置方案与最优化参数组合。

1 工程概况及计算模型

定海大桥为一座 V 形墩连续刚构桥,全长 2 207.0 m,主桥跨径布置(55+100+55)m,是预应力混凝土 V 形墩刚构。主桥上部结构:主梁横断面采用单箱、单室、直腹板截面,顺桥向梁底部为二次抛物线形,根部梁高 5.2 m,跨中梁高 2.5 m,箱梁采用直腹板;主桥下部结构:1[#]、4[#] 过渡墩身为圆端形实体花瓶墩,2[#]、3[#] 主墩为 V 形墩斜腿。主桥桥型布置图如图 1 所示。

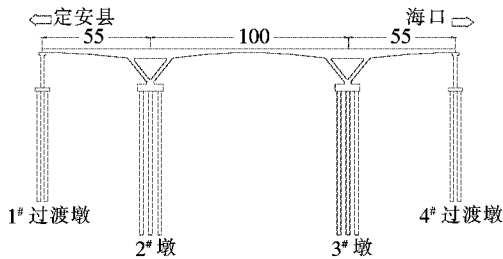


图 1 主桥桥型布置图(单位:m)

在地震作用下,桥梁结构所受到的地震力主要分布于桥梁的上部结构,再通过支座传递给下部结构。因此在定海大桥桥梁抗震设计时,必须尽可能精确模拟桥梁结构刚度和质量分布。由于定海大桥主桥通过过渡墩和中小跨度引桥相连,主桥和引桥会相互作用,建模时需考虑引桥的影响。由此,利用 Midas 有限元程序建立了定海大桥的计算模型。该模型建立的相关条件如下:① 单元类型:主梁、盖梁、承台、墩和桩基础采用梁单元,桩土作用采用等代土弹簧单元;② 材料参数:主梁混凝土重度取 27 kN/m³,下部结构混凝土重度取 26 kN/m³;③ 约束条件:主梁与 V 形墩为刚性连接,群桩基础与承台底为刚性连接;④ 黏滞阻尼器:采用 Maxwell 模型,消能阻尼为 400 000 kN,参考速

度 1 m/s,连接弹簧刚度 1 020 kN/m。

根据有限元计算模型,对该桥进行动力特性分析,以了解结构动力响应特性,计算结果如表 1 所示。从表 1 可知:该桥自振模态较多,主要自振特征为顺桥向偏移和纵桥向弯曲。在第 3 阶与第 4 阶自振周期较长,且主要为纵向响应,若发生地震灾害,可能导致落梁、碰撞等灾害,造成较大危害与损失,因此需要合理引入减震装置。

表 1 结构动力特性

振型	频率/Hz	周期/s	特征描述
1	0.406	2.475	顺桥向
2	0.523	1.912	顺桥向
3	0.802	1.247	反对称横向+竖向
4	0.871	1.148	反对称竖向
5	0.984	1.016	反对称横向+正对称竖向
6	0.989	1.011	反对称竖向+主梁扭转
7	1.150	0.870	正对称竖向+主梁扭转
8	1.324	0.755	反对称竖向
9	1.781	0.561	反对称竖向
10	1.920	0.521	顺桥向

2 液体黏滞阻尼器

液体黏滞阻尼器的基本构造为缸体、活塞及节流孔,其中节流孔是具有比油缸截面积小的流通通路,黏滞阻尼器构造如图 2 所示。基本工作原理为:利用流体通过节流孔时产生的节流阻力,是一种与活塞运动速度相关的阻尼器。当阻尼力与相对变形速度成比例时为线性黏滞阻尼器,不成比例时,为非线性黏滞阻尼器。该文采用非线性黏滞阻尼器,阻尼力可表达为:

$$F = CV^\xi \tag{1}$$

式中: F 为阻尼力(kN); C 为阻尼系数[kN/(m·s⁻¹) ^{ξ}]; V 为速度(m/s); ξ 为阻尼指数(取值范围 0.1~2.0,在抗震设计中,常用值范围一般为 0.2~1.0)。

恢复力特性曲线如图 3 所示。

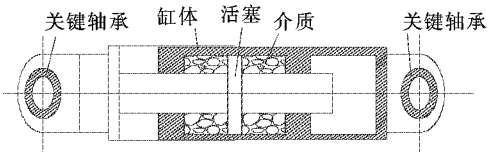


图 2 黏滞阻尼器构造示意图

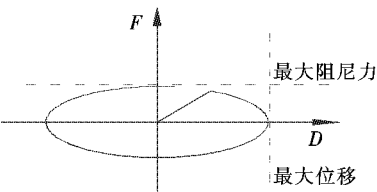


图 3 黏滞阻尼器恢复力曲线

3 黏滞阻尼器参数的选取和分析

3.1 位置与参数的选取

根据定海大桥的自振特性以及建立的有限元计算模型特点,考虑在桥梁纵向设置液体黏滞阻尼器来减小结构变形响应和截面内力响应。通过研究分析定海大桥桥梁结构的特点,阻尼器的设置方案为:在主桥与两侧过渡墩台之间各对称设置 4 个非线性黏滞阻尼器(2 组共 8 个)。

应用非线性动力时程分析法,对主桥设置的非线性黏滞阻尼器进行参数研究,其中阻尼系数 C 取 2 000、3 000、5 000、7 000 $\text{kN}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^\xi$,阻尼指数 ξ 取 0.2、0.3、0.4、0.6、0.8。通过选取不同的阻尼系数 C 和阻尼指数 ξ 组合,对比分析阻尼系数和阻尼指数对桥梁抗震性能的影响,以取得经济合理的参数组合。利用地震波加速度时程作为地震输入,输入 50 年 2% 超越概率(E2,简称 P2 概率)条件下的人工地震波,加速度峰值为 0.367 1g,持续时间为 37.97 s,其地震波时程图如图 4 所示。

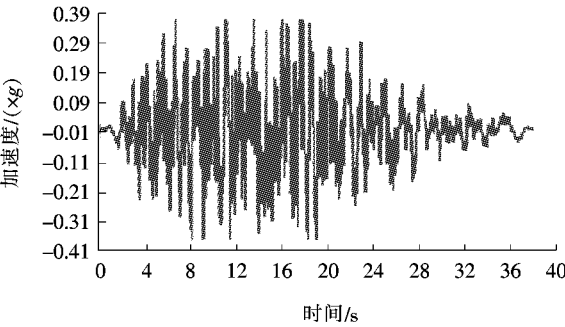


图 4 P2 概率水平下地震波时程图

3.2 黏滞阻尼参数分析

选用非线性黏滞阻尼器的不同参数组合,研究阻尼参数 C 和 ξ 组合对定海大桥主桥纵向位移和内力响应的规律,以得出最优化参数组合。

3.2.1 对主桥变形响应的影响

表 2 为在阻尼器阻尼系数和阻尼指数不同取值时,主梁跨中纵向变形最大响应值。

表 2 阻尼参数 C 和 ξ 不同取值下主梁跨中纵向变形响应峰值

阻尼指数 ξ	不同阻尼系数 $C/[\text{kN} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-\xi}]$ 时的变形/mm	2 000	3 000	5 000	7 000	无阻尼
0.2		77.28	78.09	79.83	81.11	90.38
0.3		78.12	80.69	81.37	82.11	90.38
0.4		80.90	82.13	82.74	84.06	90.38
0.6		78.15	79.44	80.24	81.05	90.38
0.8		78.44	79.59	80.84	82.13	90.38

由表 2 可知:设置非线性黏滞阻尼器,可以有效减小主桥跨中纵向变形响应值,即起到了减小桥梁变形的作用。具体为:① 在 $C=2\,000\text{ kN}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^\xi$, $\xi=0.2$ 时,纵向变形减小量最大,为 13.1 mm;在 $C=7\,000\text{ kN}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^\xi$, $\xi=0.4$ 时,位移变形减少量最小,为 6.32 mm;整体来看加入阻尼器后可减少 10 mm 左右的变形;② 跨中处的纵向位移随阻尼指数 ξ 的增大呈现先增大再减小的趋向,其中在 $\xi=0.4$ 时位移达到最值;同时,纵向变形响应值随阻尼系数 C 的增大而呈现增大的趋向。由此可见,取得合理阻尼系数 C 和阻尼指数 ξ 的组合值,可有效减小地震对桥梁造成的变形响应。

3.2.2 对主桥关键部位内力响应的影响

表 3、4 分别为阻尼系数 C 和阻尼指数 ξ 不同取值时桥墩台处的弯矩和剪力地震响应值。

表 3 阻尼参数 C 和 ξ 不同取值下 V 形墩处弯矩响应峰值

阻尼指数 ξ	不同阻尼系数 $C/[\text{kN} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-\xi}]$ 时的弯矩/($\text{kN} \cdot \text{m}$)	2 000	3 000	5 000	7 000	无阻尼
0.2		246 000	247 400	251 500	255 300	294 600
0.3		246 800	253 600	254 900	258 000	294 600
0.4		254 700	258 200	258 600	264 900	294 600
0.6		245 400	249 800	252 000	261 700	294 600
0.8		243 800	250 500	254 800	255 900	294 600

表 4 阻尼参数 C 和 ξ 不同取值下桥墩台处剪力响应峰值

阻尼指数 ξ	不同阻尼系数 $C/[\text{kN} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-\xi}]$ 时的剪力/kN	2 000	3 000	5 000	7 000	无阻尼
0.2		42 257	42 450	43 300	43 989	47 354
0.3		42 661	44 056	44 156	44 517	47 354
0.4		43 925	44 442	44 932	45 879	47 354
0.6		42 521	43 195	43 585	45 156	47 354
0.8		42 191	43 186	43 933	44 073	47 354

由表 3、表 4 可以得出:在主桥设置了非线性液体黏滞阻尼器之后:① 与不加阻尼器相比,该 V 形墩连

续刚构桥在地震作用下桥台内力均有所减小,其中弯矩减小比较明显。对于不同参数 C 和 ξ ,表现出的减震效果也有所不同,与不加阻尼器相比,当阻尼系数取为 2 000、3 000、5 000、7 000 $\text{kN}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^\xi$ 时,V形墩台弯矩减小的最大幅度依次为:17.24%、16.02%、14.63%、13.34%;主桥墩台处剪力减小的最大幅度依次为:10.9%、10.36%、8.56%、7.11%;② 当阻尼系数 C 一定时,V形墩处弯矩响应峰值随阻尼指数 ξ 的增大呈现先增大后减小的趋向,其中在 $\xi=0.4$ 时呈现最大值;当阻尼系数 ξ 一定时,弯矩响应峰值随阻尼系数 C 的增大表现为增大趋势;③ 主桥墩台处剪力响应随着阻尼指数 ξ 值的增大表现为先增大后减小的变化规律,且在 $\xi=0.4$ 时取得最大值;而剪力随着阻尼系数的增大而增大。

3.3 定海大桥阻尼器的选用

由上述计算分析可以得出,当阻尼指数 ξ 增大时,桥梁的位移变形、弯矩、剪力整体呈现上升趋势,尤其是在 $\xi=0.4$ 时,均表现出最大值,此时阻尼器的减震效果较差,整体来看阻尼指数宜取小一些,而在工程经验中,阻尼指数往往取 0.1~0.5(例如东海大桥取为 0.3,苏通长江大桥取为 0.4,武汉天兴洲长江大桥取为 0.3,希腊 Rion—Antirion 大桥为 0.3,上海卢浦大桥取为 0.21);当阻尼指数 C 增大时,桥梁位移变形、弯矩、剪力呈现上升趋势,在 $C=7\,000\text{ kN}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^\xi$ 时取得最大值,此时减增效果不佳,宜取较小的 C 值。非线性黏滞阻尼器的造价成本主要取决于阻尼力大小,因此选择阻尼器时在保证抗震性能的同时,需考虑经济合理性。综合上述,结合工程经验和造价成本,阻尼器参数经过优化之后确定为:阻尼系数 $C=2\,000\text{ kN}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{0.3}$,阻尼指数 $\xi=0.3$ 。此时,主桥跨中处位移变形响应峰值由原来的 90.38 mm 降至 78.12 mm,V形墩台弯矩响应峰值由 294 600 $\text{kN} \cdot \text{m}$ 降至 246 800 $\text{kN} \cdot \text{m}$,主桥墩台处剪力响应峰值由 47 354 kN 降至 42 661 kN。可见,设置非线性黏滞阻尼器整体达到了桥梁减震的目的。

4 结论

(1) 在主桥墩台处合理引入非线性黏滞阻尼器,

可以有效地减少桥梁关键部位的位移,同时也可以改善桥梁结构的内力分布情况,可减少或避免由于地震、碰撞引起的桥梁结构的损坏。

(2) 该桥的非线性黏滞阻尼器设置方法为在主桥两侧过渡墩台处对称(2组共8个)布置。但在实际工程方案中还需要综合考虑桥梁的实际情况和使用条件等限制因素。

(3) 从分析结果来看:主桥引入阻尼器以后,参数较小时,主桥的变形响应和内力响应均减小,当阻尼器参数增大时,主桥的变形响应和内力响应整体表现为增大趋向,其中在阻尼指数为 0.4 时,此时的减震效果较不理想。

(4) 综合来看,非线性黏滞阻尼器参数取为:阻尼系数 $C=2\,000\text{ kN}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{0.3}$,阻尼指数 $\xi=0.3$ 。

参考文献:

- [1] 杜修力,韩强.桥梁抗震研究若干进展[J].地震工程与工程振动,2014(4).
- [2] Hong-Yu Jia, De-Yi Zhang, Shixiong Zheng, et al. Local Site Effects on a High-Pier Railway Bridge under Tridirectional Spatial Excitations: Nonstationary Stochastic Analysis[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 52: 55-69.
- [3] 姜锋.大跨度斜拉桥阻尼器参数分析[J].世界地震工程, 2015(1).
- [4] 王波,马长飞,刘鹏飞,等.基于随机地震响应的斜拉桥粘滞阻尼器参数优化[J].桥梁建设,2016(3).
- [5] 王志强,胡世德,范立础.东海大桥粘滞阻尼器参数研究[J].中国公路学报,2005(3).
- [6] 严斌.大跨度斜拉桥非线性粘滞阻尼器参数研究[J].铁道标准设计,2013(1).
- [7] 朱金.700 m 主跨混合梁斜拉桥地震响应分析和液体粘滞阻尼器参数优化[D].西南交通大学硕士学位论文,2012.
- [8] 黄康.郭家沱长江大桥非线性粘滞阻尼器参数研究[J].公路交通技术,2016(6).
- [9] 冯云成,燕斌,牟宗军.厦漳跨海大桥南汉主桥方案液体粘滞阻尼器研究[J].公路,2008(11).
- [10] 向凯.定海大桥地震响应及减隔震分析[D].武汉理工大学硕士学位论文,2013.
- [11] JT/T 926-2014 桥梁用黏滞流体阻尼器[S].