

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.04.005



高烈度区斜拉桥横向约束方案优化分析

童申家¹, 谢祥兵¹, 袁世营¹, 姜浩²

(1. 西安建筑科技大学 结构工程与抗震教育部重点实验室, 西安 710055;

2. 交通部公路科学研究院, 北京, 100088)

摘要:为了确定强震作用下斜拉桥合理的横向抗震约束体系,以可克达拉大桥为工程背景,采用非线性时程分析法,分析了4种横向约束体系即横向滑动体系、全限位体系、位移相关型减震体系和速度相关型减震体系对强震区大跨度桥梁地震响应的影响,重点对钢阻尼器的屈服荷载和黏滞阻尼器的位置及相关参数进行优化分析,并与其他体系的地震响应进行了对比。结果表明:在强震作用下,对于大跨度桥梁横向滑动体系和全限位体系均不是理想的抗震体系;而在墩梁、塔梁之间设置减隔震装置可以有效减少横桥向的墩梁、塔梁的相对位移及地震剪力和弯矩;然而,从桥梁正常使用的角度来看,塔梁之间布设横向钢阻尼器装置优于黏滞阻尼器装置。

关键词:斜拉桥;非线性时程分析方法;横向约束体系;钢阻尼器;黏滞流体阻尼器

中图分类号:U441.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)04-0036-09

Optimal analysis of the lateral constraint systems for cable-stayed bridge in high intensity region

Tong Shenjia¹, Xie Xiangbing¹, Yuan Shiyong¹, Jiang Hao²

(1. Key Laboratory of Structural Engineering and Earthquake Resistance of Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China; 2. The Highway Science Research Institute,

Ministry of Communications, Beijing 100088, P. R. China)

Abstract: In order to determine the reasonable lateral seismic constraint system of cable-stayed bridge under strong earthquake, the nonlinear time history analysis method was used to analyze the seismic responses of long-span bridge with four lateral connection systems based on the Ke-Ke-da-la bridge. The impact of four constraint systems including transverse sliding system, fixed system, and seismic isolation system adding displacement dependent and velocity-related type on the yield load of steel dampers and the viscous damper position and relevant parameters were investigated and the seismic responses were compared with other systems. The results indicated that, for large span bridge, the transverse sliding system and whole limit system were not ideal seismic system under the action of earthquake; seismic isolation device could

收稿日期:2015-03-21

基金项目:国家自然科学基金(51408480);交通运输部西部交通建设科技项目(20113187721260);可克达拉大桥抗震性能研究(2013378)

作者简介:童申家(1952-),男,教授,博导,主要从事道路桥梁工程研究,(E-mail)xiexiangbing_good@163.com.

Received:2015-03-21

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51408480); Western Transportation and Technology Projects of the Ministry of Transport(No. 20113187721260); Research on Seismic Performance for Ke-Ke-da-la Bridge(No. 2013378)

Author brief: Tong Shenjia(1953-), professor, doctoral supervisor, main research interest: road and bridge engineering, (E-mail)xiexiangbing_good@163.com.

significantly reduce the bottom of the pier and the tower seismic shear force and bending moment. However, in typical circumstance, transverse steel damping device was superior to the viscous dampers between tower and beam.

Key words: cable-stayed bridge; nonlinear time history method; lateral constraint system; steel damper; fluid viscous damper

大跨度斜拉桥通常都是交通运输的枢纽工程,投资大,对社会经济发展有着重大影响,一旦在地震中遭到破坏,将会造成巨大的经济损失;因此,《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02—01—2008)要求在罕遇地震作用下斜拉桥的索塔和基础整体上保持弹性,而边墩可以按延性构件设计,然而,有些学者^[1-3]认为:“在恒载作用下,斜拉桥锚固墩及辅助墩所受的压力较小,在恒载和地震作用下,边墩可能会受拉,因此,边墩的延性并不可靠”。多座斜拉桥的地震反应分析表明:在高烈度区,由于锚固墩、辅助墩、主梁之间一般设置纵向滑动盆式支座,因此上部结构传递到墩柱的惯性力很小,主梁纵向位移偏大,墩柱安全储备较高,因此很多学者针对减少主梁纵向位移提出很多措施,其中以被动耗能减震装置中非线性黏滞阻尼器的研究最多,如王志强等^[4]、巫生平等^[5]、ALI等^[6-7]、邱文亮等^[8]、方志等^[9]、Mahendra等^[10]、Vader等^[11]、Lin等^[12]对黏滞阻尼器在地震作用下的相关力学模型或者结合某实际工程对减震性能参数进行敏感性分析,其计算工作量特别大,而且计算结果不具有广泛性,也有学者^[12]采用弹性索进行中等跨径的斜拉桥减震效应研究;在横桥向,由于锚固墩和辅助墩的墩顶往往设置横向限位装置,导致传到墩柱的惯性力过大,造成抗震能力往往不足。因此,杨喜文等^[13]针对某塔梁固结体系斜拉桥进行减震研究,得出在墩梁处布置减震装置后可以明显改善边墩的受力;叶爱君等^[14]针对全漂浮体系超大跨度斜拉桥横向结构体系进行研究,得出黏滞阻尼器分散布置在边墩上时,可以显著减少墩底内力及梁端位移;岳城东等^[15]运用黏滞阻尼器对某半漂浮体系铁路斜拉桥在横桥向进行了减震研究。然而,对于高烈度区半漂浮体系斜拉桥横桥向合理抗震结构体系及有效减震措施研究较少,因此确保其在强震中的安全性及可靠性,探讨斜拉桥横向合理的抗震体系和减震措施具有十分重要的社会和经济意义。

针对上述斜拉桥横向地震反应特点,以位于高烈度区的可克达拉大桥(37+103+320+103+

37)为工程背景,首先对大跨度斜拉桥在横向不同约束体系下的地震反应进行对比研究,然后重点探讨了横向钢阻尼装置减震性能参数(屈服荷载)和黏滞流体阻尼器的布置位置、减震性能参数,通过对两者减震效果进行对比研究,寻求最佳的减震方案。

1 工程背景及动力计算模型

以可克达拉特大桥主桥(37+103+320+103+37)m为工程背景进行分析。该桥为双塔双索面预应力混凝土半漂浮结构体系,主梁采用预应力混凝土分离式边箱断面,箱梁全宽32.9 m,主梁中心梁高3.0 m,顶板厚0.28 m。索塔采用双柱式变截面“H”形索塔,由上塔柱、中塔柱、下塔柱及横梁组成,塔高为107.5 m。每边跨设2个边墩,墩顶设纵向球型支座。索塔和边墩采用钻孔灌注桩基础。在纵桥向和横桥向为对称结构,其桥跨、索塔布置和主梁截面见图1。

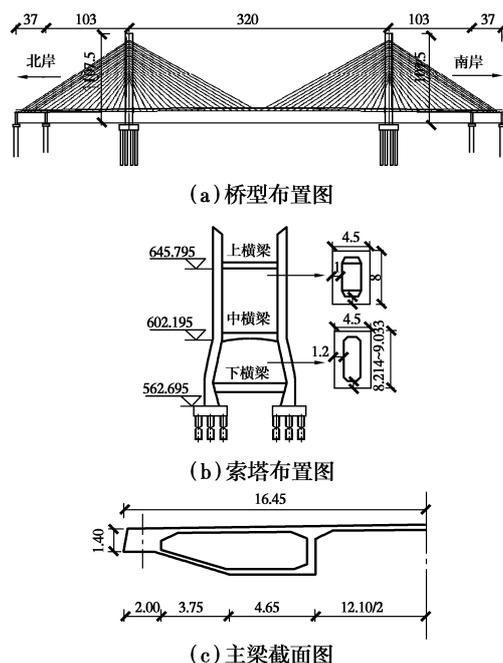


图1 结构构造图

Fig1 The construction map of structural engineering

采用有限元软件 Midas Civil/2012 建立可克拉桥大桥有限元模型(图 2)进行地震响应分析,为了近似考虑相邻联引桥对过渡墩的影响,本文在横桥向,忽略相邻联引桥的约束作用(分析表明影响很小),在过渡墩墩顶加上相邻跨半跨质量,其中有限元模型中主梁、桥塔、桥墩均采用三维梁单元模拟,考虑恒载轴力引起几何刚度的影响,斜拉索采用桁架单元,利用等效弹性模量方法考虑斜拉索的垂度效应,主梁节点和斜拉索吊点主从相连。

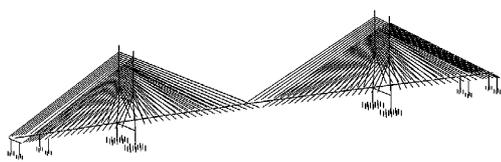


图 2 斜拉桥有限元模型

Fig2 Finite element model of cable-stayed bridge

结构的边界条件为:桩身节点施加土弹簧模拟场地土的三向约束效应,利用“m”法计算土弹簧刚度。主梁与主塔、主梁与边墩之间设置纵向滑动球型支座,横向考虑多种连接方式,即横向滑动体系(塔、墩与梁之间设滑动支座)、全限位体系(塔、墩与梁之间设固定支座)、减震体系(塔、墩与梁之间设位移相关型装置或速度相关型装置)。其中,位移相关型装置主要通过接触面间的摩擦滑动改变结构的刚度和阻尼,其滞回模型由屈服荷载确定,因此,在时程分析中采用滞后系统来模拟;速度相关型装置主要通过迫使黏滞材料流过节流孔产生阻尼,其滞回模型与黏滞系数及速度指数有关,采用粘滞消能器单元模拟。

2 地震动输入

根据相关单位提供的地震安全性评价报告,拟

建工程场地地震基本烈度为Ⅷ度,属于高烈度区,时程分析采用该桥址处的地震安全性评价报告中给出的 50 a 超越概率为 2%~3% (强震重现期约为 2 475 a) 的 3 条罕遇地震波,加速度峰值 $PGA = 0.363 g$,图 3 为一典型早遇地震的地震动时程。由于频谱特性不同导致结构产生的地震响应也不同,为了更全面评价减隔震装置对斜拉桥横桥向的减震效果,本文地震输入采取横桥向+竖桥向,其中竖桥向采用横桥向的 2/3。采用 3 条地震波作用下的结构地震响应的均值作为对比量值。

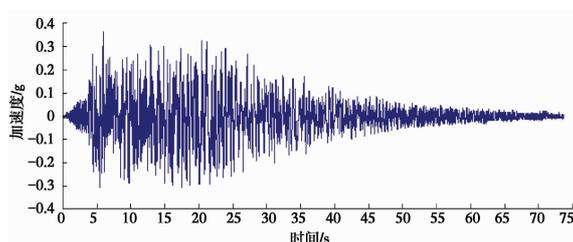


图 3 地震波时程曲线图

Fig3 The map of seismic time history curve

3 横向滑动体系与全限位体系地震响应分析

采用时程分析对塔、墩与梁之间的横向滑动体系和全限位体系进行地震反应分析比较,其分析结果如表 1 所示。

由表 1 可见:采用墩梁横向滑动体系后,各墩墩底弯矩和剪力显著减少,如过渡墩墩底弯矩减少为横向固结体系的 43.30%,但墩梁相对位移相当大;墩梁横桥向固结体系将会导致墩底产生相当大的弯矩和剪力,而且要求限位支座要承受相当大的横向地震力,会给支座的设计带来较大的困难。因此,有必要寻求一种较为合理的墩梁连接方式。

表 1 3 种不同约束方式地震反应最大值

Table 1 The seismic response maximum of three different constraint way

位置	横向钢阻尼减震方案			黏滞阻尼器减震方案			横桥向滑动体系		
	墩-梁相对位移/m	顺桥向弯矩/(kN·m)	横桥向剪力/kN	墩-梁相对位移/m	顺桥向弯矩/(kN·m)	横桥向剪力/kN	墩-梁相对位移/m	顺桥向弯矩/(kN·m)	横桥向剪力/kN
过渡墩	0.101	26 630.0	6 118.3	0.127	24 257.1	5 958.4	0.458	107 378.1	12 578.4
辅助墩	0.096	27 933.2	2 570.2	0.092	25 325.9	2 614.3	0.423	169 193.0	15 938.2
桥塔	0.083	524 400.9	63 925.5	0.287	772 255.9	63 255.9	0.164	782 369.3	66 368.2

4 减震方案及参数优化分析

4.1 横向钢阻尼减震参数优化

方案 1 在过渡墩、辅助墩及塔梁处的横桥向设置横向钢阻尼装置,其装置如图 4 所示,其中过渡墩、辅助墩处布置 4 个和塔梁处布置 4 个,全桥共计 16 个,该装置元件由高延性弹塑性材料制成,是综合研究了多种软钢阻尼器而开发的一种减震装置,该装置的槽型纵向导轨与横向钢阻尼元件上部在横向设置一定距离的间隙,因此,在非地震情况下不会承担向下的竖向力,不影响装置和梁体因温度变化等原因产生的较小位移和转动。横向钢阻尼装置的滞回模型由屈服荷载确定。为研究屈服荷载变化对半漂浮体系斜拉桥地震响应值的影响,找出最优的阻尼参数,其屈服荷载的参数取值为:(1 000~2 200) kN,按 200 kN 递增。分析结果见图 5~7,为便于分析,横向滑动体系的地震响应同时标示于图上。

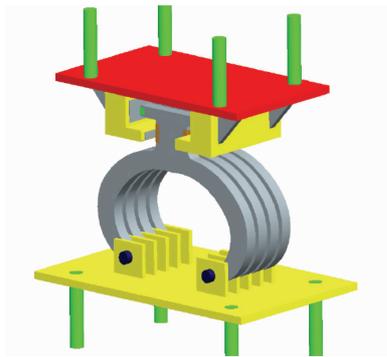


图 4 横向钢阻尼装置

Fig4 The device of horizontal steel damping

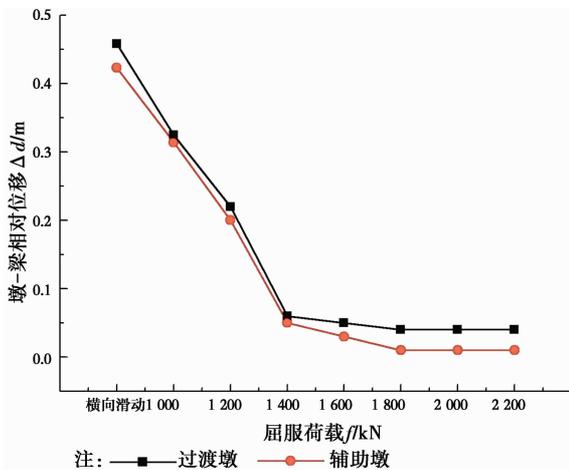


图 5 墩-梁相对位移

Fig5 The relative displacement of pier-beam

由图 5~8 可知,与横向滑动体系相比,墩-梁相对位移随屈服荷载的增加而逐渐递减,墩底内力随

着屈服荷载的增加而逐渐减少,而塔底内力对屈服

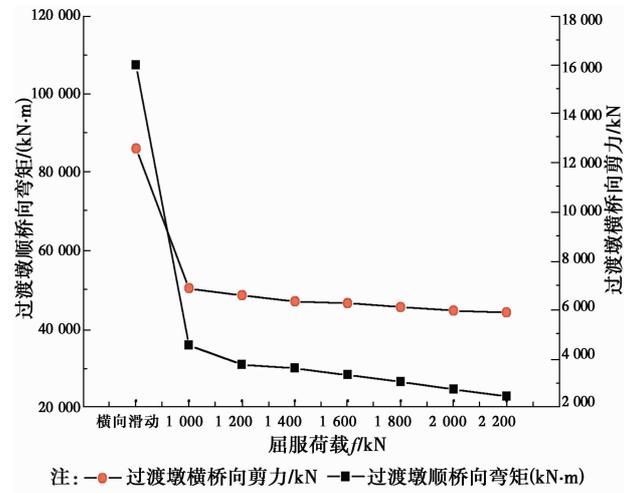


图 6 过渡墩横桥向地震响应

Fig6 The transverse main response of transition pier

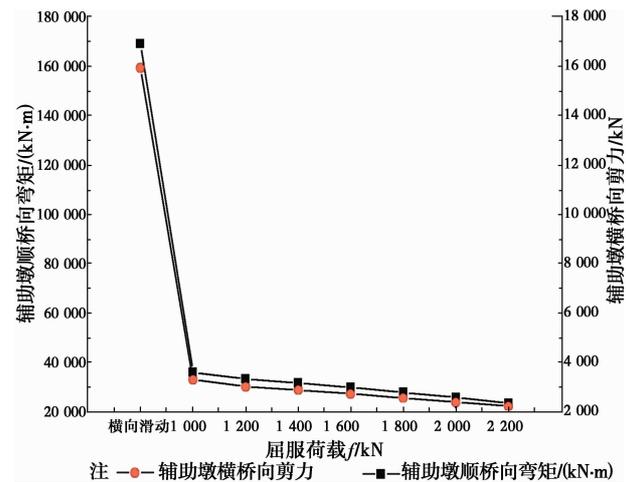


图 7 辅助墩横桥向地震响应

Fig7 The transverse main response of auxiliary pier

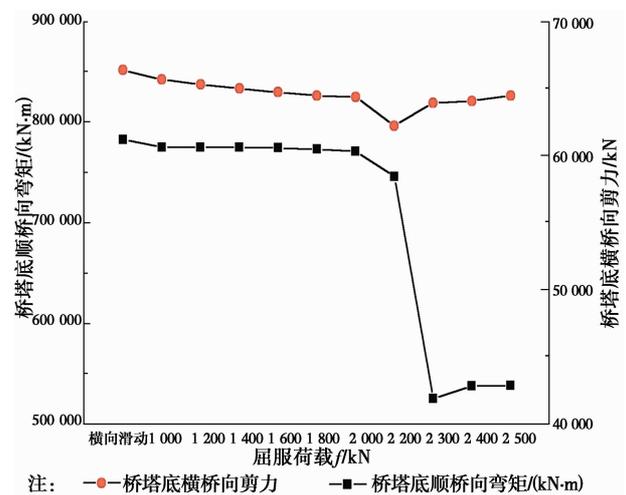


图 8 桥塔底横桥向地震响应

Fig8 The transverse main response of bridge bottom

荷载的变化不太敏感。当屈服荷载取 1 800 kN 时, 相比横向滑动体系, 过渡墩地震内力最大减幅 75.2%, 辅助墩地震内力最大减幅 83.9%, 且过渡墩与辅助墩内力分配更加均匀; 过渡墩-梁间相对位移最大为 0.35 m, 辅助墩-梁间相对位移均小于 0.10 m, 故可取屈服荷载 1 800 kN, 其滞回曲线如图 5(a) 所示。

根据上述分析, 在墩-梁之间布置横向钢阻尼的屈服荷载达到 1 800 kN 时, 桥墩达到良好减震效果, 然而在桥塔处的减震效果不是很明显。因此, 为了获得桥塔处良好的减震效果, 在保持桥墩处最优屈服荷载的条件下, 继续对桥塔处的横向钢阻尼装置的屈服荷载进行优化, 参数选择范围为 (2 200~2 500) kN, 按 100 kN 递增, 提取地震响应的最大

值。根据图 8 可以得到, 桥塔处的横向钢阻尼装置最优屈服荷载为 2 300 kN, 塔-梁相对位移小于 0.15 m, 其滞回曲线如图 5(c) 所示。

4.2 黏滞阻尼器减震布置方案及参数优化分析

对两种黏滞阻尼器布置方式进行了比较: 方式 A, 每个过渡墩及辅助墩上均设 1 个黏滞阻尼器, 每座桥塔处布置 4 个, 全桥共计 16 个; 方式 B, 仅在过渡墩上设黏滞阻尼器, 每座桥塔处布置 4 个, 全桥共计 12 个。为了研究黏滞阻尼器布置位置的优越性, 暂取速度指数为 0.4、1.0 时, 阻尼系数不断变化。研究过渡墩-梁相对位移、过渡墩底顺桥向弯矩、横桥向剪力和塔底顺桥向弯矩、横桥向剪力随黏滞阻尼器减震性能参数的变化, 如表 2 所示。

表 2 黏滞阻尼器布置位置优化分析

Table 2 the optimization analysis of Viscous damper layout position

速度指数 α	阻尼系数 C	方案	过渡墩-梁 相对位移/m	过渡墩顺桥 向弯矩/(kN·m)	过渡墩横桥 向剪力/kN	塔底顺桥向 弯矩/(kN·m)	塔底横桥 向剪力/kN
0.4	1 000	基本方案	0.458	107 378.1	12 578.4	782 369.3	66 368.2
		方案 A	0.302	16 786.5	4 902.9	762 430.2	67 401.3
		方案 B	0.178	16 708.8	5 117.9	766 050.1	66 131.2
	3 000	基本方案	0.458	107 378.1	12 578.4	782 369.3	66 368.2
		方案 A	0.127	24 257.1	5 989.4	781 340.2	69 461.0
		方案 B	0.065	26 196.7	6 259.5	786 230.7	68 014.5
12 000	基本方案	基本方案	0.458	107 378.1	12 578.4	782 369.3	66 368.2
		方案 A	0.033	70 146.2	9 809.9	831 972.7	79 792.3
		方案 B	0.022	76 098.8	10 929.6	847 673.5	80 732.4
	1 000	基本方案	0.458	107 378.1	12 578.4	782 369.3	66 368.2
		方案 A	0.306	15 329.4	4 633.8	755 732.5	66 825.3
		方案 B	0.226	15 612.8	4 956.3	763 894.4	65 930.4
1.0	3 000	基本方案	0.458	107 378.1	12 578.4	782 369.3	66 368.2
		方案 A	0.217	18 950.4	5 125.2	762 772.0	67 612.1
		方案 B	0.132	22 128.8	5 739.0	773 559.3	66 639.2
	12 000	基本方案	0.458	107 378.1	12 578.4	782 369.3	66 368.2
		方案 A	0.077	34 226.3	6 871.0	788 905.4	71 064.0
		方案 B	0.054	45 065.8	7 390.3	801 913.4	75 609.4

由表 2 可知: 1) 阻尼器的速度指数 α 对最大反应结果的影响很小, 主要是因为地震激起的阻尼器最大变形速度大于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 而黏滞阻尼器的相对参考速度为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 2) 与阻尼器设置方式 A 相比, 方式 B 除对控制梁端位移较为有效外, 方式 A 要比方式 B 好很多。3) 塔底顺桥向弯矩对阻尼器的相关减震性能的参数较为敏感, 塔底横桥向剪力的

变化不敏感, 这主要是因为索塔的横向刚度通常远远大于过渡墩及辅助墩。

在确定出黏滞阻尼器的最优布置位置后, 设定阻尼指数 α 为 0.3、0.4、1.0; 阻尼系数 C 设定 1 000、2 000、3 000、4 000、5 000、8 000、12 000; 通过参数敏感性分析选择合理减震性能参数。其参数分析结果见图 9~18。

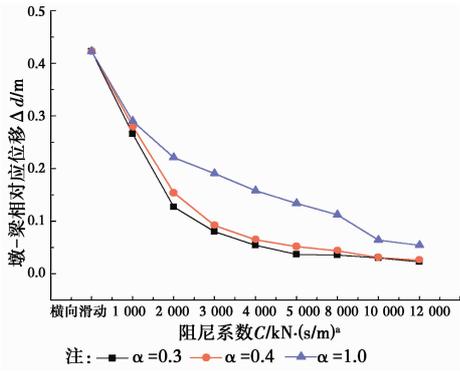


图 9 过渡墩-梁相对位移

Fig9 The relative displacement of transition pier-beam

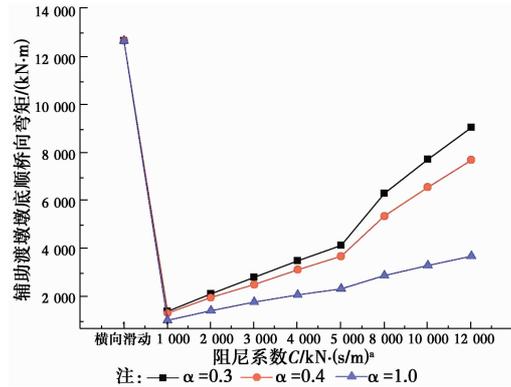


图 13 辅助墩墩底顺桥向弯矩

Fig13 The bending moment of auxillary pier

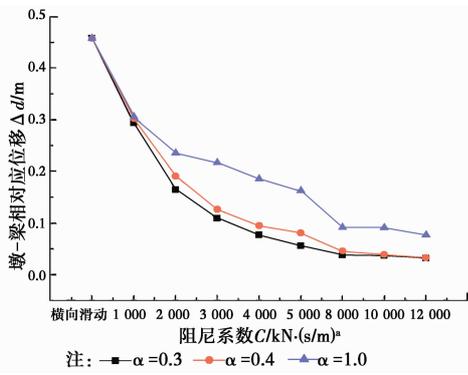


图 10 辅助墩-梁相对位移

Fig10 The relative displacement of auxillary pier-beam

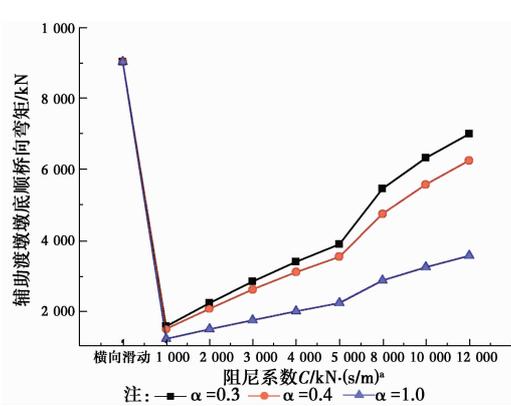


图 14 辅助墩墩底横桥向剪力

Fig14 The cross shear of auxillary pier

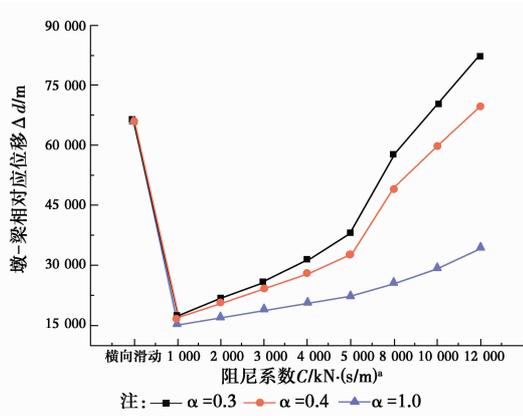


图 11 过渡墩墩底顺桥向弯矩

Fig11 The bending moment of transition pier

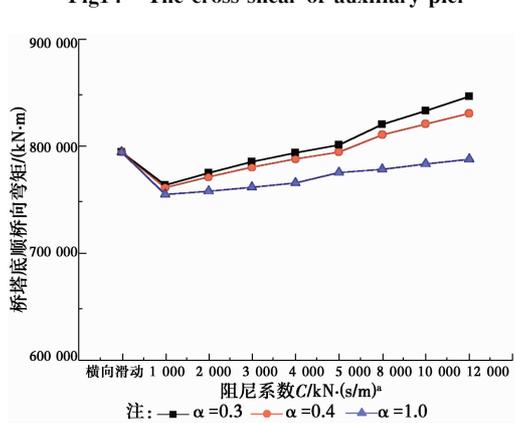


图 15 桥塔底顺桥向弯矩

Fig15 The bending moment of bridge bottom

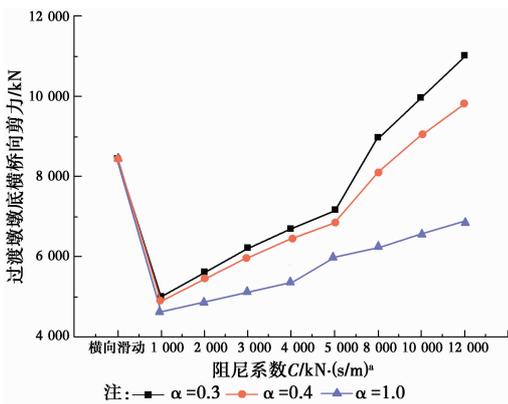


图 12 过渡墩墩底横桥向剪力

Fig12 The cross shear of transition pier

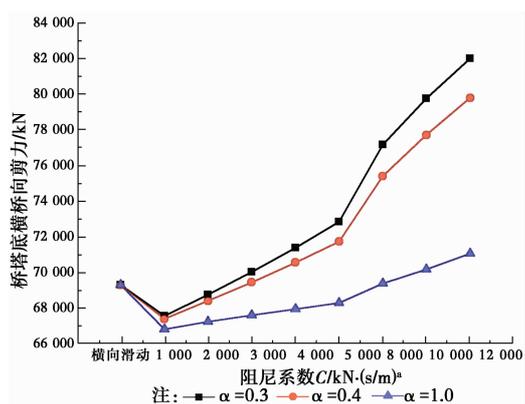


图 16 桥塔底横桥向剪力

Fig16 The cross shear of bridge bottom

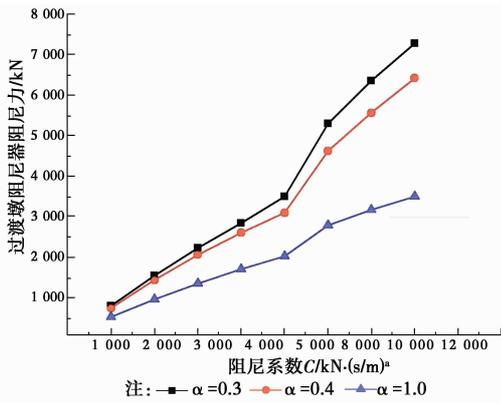


图 17 过渡墩处阻尼器阻尼力

Fig17 The damping forct of transition pier

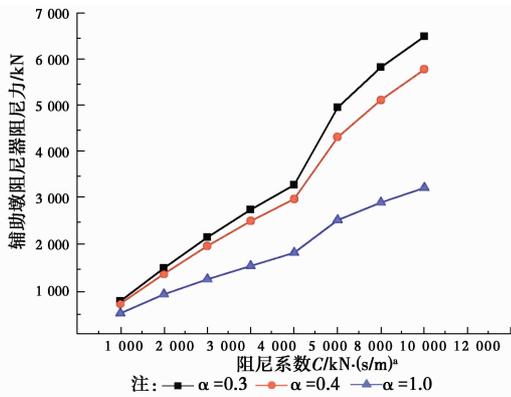
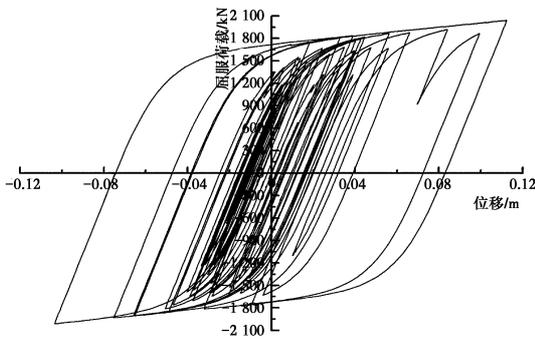


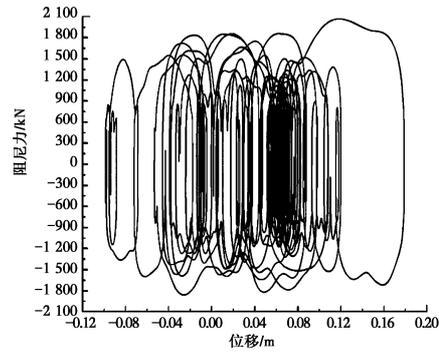
图 18 辅助墩处阻尼器阻尼力

Fig18 The damping forct of auxiliary pier

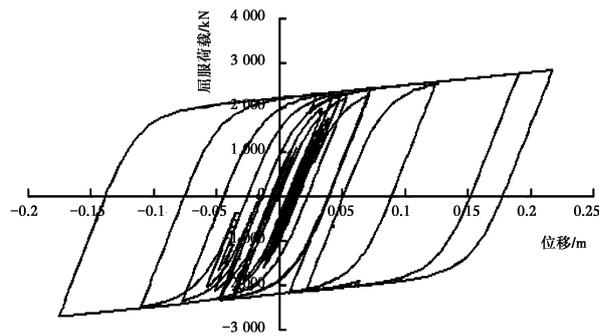
结论:1) 随着阻尼系数的增加,墩-梁相对位移逐渐减少,不同位置处的阻尼器阻尼力逐渐增加,墩底的弯矩和剪力逐渐增大;2)随着阻尼指数的逐渐增加,墩梁相对位移逐渐增大,不同位置处的阻尼力逐渐减少,墩底弯矩和剪力逐渐减少;3)随着阻尼指数的逐渐增加,桥塔底顺桥向弯矩和横桥向剪力逐渐降低,在阻尼指数不变的情况下,随着阻尼系数的增加,桥塔底地震响应逐渐增大。考虑到在塔-梁之间布设黏滞流体阻尼器限制了桥梁结构在正常使用时梁体纵向位移,同时,由于抗风支座的布置,黏滞阻尼器在横桥向的抗震性能得不到充分发挥。因此,综合考虑墩-梁相对位移变化趋势及塔、墩底内力变化趋势,桥墩处阻尼系数 C 取 3 000,桥塔处阻尼系数取 2 000 时比较合理。通过阻尼器阻尼力变化趋势,为便于阻尼器的安装,其速度指数 α 取 0.4 较为合理,在保证抗风支座不被地震作用破坏的情况下,其速度指数取 1.0 较为合理,此时塔-梁相对位移为 0.286 7 m,不同位置处黏滞流体阻尼器滞回曲线见图 19(b)和(d)所示。



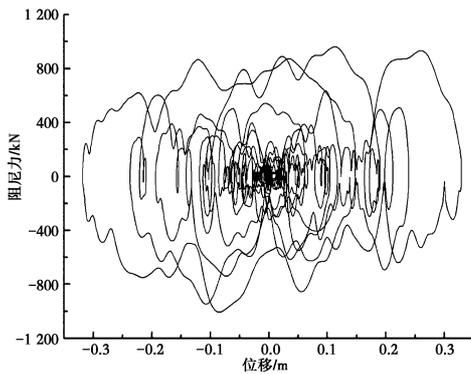
(a) 桥墩处横向钢阻尼滞回曲线



(b) 桥墩处黏滞流体阻尼器滞回曲线



(c) 桥塔处横向钢阻尼滞回曲线



(d) 桥塔处黏滞流体阻尼器滞回曲线

图 19 两类减震装置滞回曲线

Fig19 The hysteresis curve of seismic isolation system

5 减震效果

横桥向固结和减震体系的主要地震反应对比情况见表3。

由表3可知:与滑动体系相比,横向钢阻尼减震方案中过渡墩弯矩减幅75.2%,剪力减幅51.4%,辅助墩弯矩减幅83.5%,剪力减幅83.9%,而且两者弯矩分配比较均匀,塔底弯矩减幅32.97%,剪力减幅3.68%;黏滞流体阻尼器减震方案中过渡墩弯矩减幅77.4%,剪力减幅51.4%,辅助墩弯矩减幅83.5%,剪力减幅83.6%,塔底地震响应分别减幅2.99%、2.96%;因此,在墩-梁之间布置两类减震装置均可以达到良好的减震效果,然而,塔底减震效果却没有桥墩处变化明显,最大减震效果为32.97%,

其原因可以归结为2个方面:1)索塔的横向刚度通常大于过渡墩、辅助墩;2)黏滞阻尼器在数值模拟过程中的参考速度小于地震波的波速。2种减震方案中过渡墩-梁相对位移分别为0.101和0.127,塔-梁相对位移分别为0.086和0.087,容易得到满足。由两类减震装置在不同位置处的滞回曲线可以得出,滞回曲线饱和,两类减震装置起到了良好的耗能能力,通过横向钢阻尼和黏滞流体阻尼器对地震能量的减耗,有效地减少了桥墩底部的内力,同时也减少了支座的变形,防止桥梁的碰撞;因此,两种方案均可有效减少过渡墩在横桥向的地震内力,从便于安装和造价的角度考虑,本文推荐横向钢阻尼减震方案。

表3 横桥向滑动体系与减隔震体系的主要地震反应的对比

Table 3 Comparisons of seismic responses between transverse sliding system and damping system

位置	横向钢阻尼减震方案			黏滞阻尼器减震方案			横桥向滑动体系		
	墩-梁相对位移/m	顺桥向弯矩/(kN·m)	横桥向剪力/kN	墩-梁相对位移/m	顺桥向弯矩/(kN·m)	横桥向剪力/kN	墩-梁相对位移/m	顺桥向弯矩/(kN·m)	横桥向剪力/kN
过渡墩	0.101	26 630.0	6 118.3	0.127	24 257.1	5 958.4	0.458	107 378.1	12 578.4
辅助墩	0.096	27 933.2	2 570.2	0.092	25 325.9	2 614.3	0.423	169 193.0	15 938.2
桥塔	0.083	524 400.9	63 925.5	0.287	772 255.9	63 255.9	0.164	782 369.3	66 368.2

6 结论

以高烈度区可克达拉大桥为工程背景,采用非线性时程分析法,对斜拉桥的横向约束方案进行了研究,主要得到以下结论:

1)对于高烈度区,大跨度桥梁采取墩梁、塔梁的横向滑动体系和全限位体系均不是理想的抗震体系。前者在地震作用下,过渡墩、辅助墩处主梁的相对横向位移偏大,墩的内力较小,但由于主梁在伸缩缝处会产生较大的侧向位移,使伸缩缝长期承受较大的剪切变形,缩短其使用寿命;后者会导致墩底产生较大内力,支座抗力需求较高。

2)过渡墩、辅助墩设置横向黏滞流体阻尼器和钢阻尼器可以显著改善桥梁结构的横桥向抗震性能。与墩、梁横向滑动体系相比,两种减震方案的墩、梁相对位移明显减小,边墩内力分配均匀,内力最大减少83.9%;两种减震装置的滞回曲线饱满,有效地减少了桥墩底部内力,同时,减少支座的变形,防止桥梁碰撞。

3)在塔梁之间布置两类减震方案,都可以达到

一定的减震效果。但是,考虑到黏滞流体阻尼器影响到桥梁正常使用时的纵向位移及布置抗风支座会限制其耗能能力的发挥,故推荐在桥塔处布置横向钢阻尼减震方案。

4)2种减震方案均可以达到横桥向减震的目的,考虑到横向钢阻尼支座安装方便,在非地震情况下梁体因温度变形等原因产生的较小位移和转动,且造价较低,故推荐采用横向钢阻尼方案。

参考文献:

- [1] 范立础,胡世德,叶爱君.大跨度桥梁抗震设计[M].北京:人民交通出版社,2001:168-176.
Fan L C, Hu S D, Ye A J. Seismic design for long span bridges [M]. Beijing: China Communication Press, 2001:168-176. (in Chinese)
- [2] Song T T, Dargush G F. Passive energy dissipation system in structure engineering[M]. State University of New York, Buffalo, 1997.
- [3] 范立础,王志强.桥梁减隔震设计[M].北京:人民交通出版社,2001:88-91.
Fan L C, Wang Z Q. Seismic isolation design for bridges

- [M]. Beijing:China Communication Press,2001;88-91. (in Chinese)
- [4] 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,2005,18(3):37-42.
Wang Z Q, Hu S D, Fan L C. Rsearch on viscous damper parameters of Donghai bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18 (3): 37-42. (in Chinese)
- [5] 巫生平,张超,房贞政. 斜拉桥粘滞阻尼器设计方案及参数回归分析[J]. 桥梁建设,2014,44(5):21-26.
Wu S P, Zhang C, Fang Z Z. Design schemes and parameter regression analysis of visous dampers for cable-stayed bridge[J]. Bridge Construction, 2014, 44 (5):21-26. (in Chinese)
- [6] Ali H M, Abdel-Ghaffar A M. Seismic energy-dissipation for cable-stayed bridges using passive devices [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,1994,23(8):877-893.
- [7] Ali H M, Abdel-Ghaffar A M . Seismic energy dissipation for cable-stayed bridges using passive devices [J]. Earthquake Engineering & Struc-ture Dynamic,2002,31(9):1623-1642.
- [8] 邱文亮,余报楚,方国强. 斜拉桥的弹性约束减震研究 [J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2012,36(1):146-152.
Qiu W L, Yu B C, Fang G Q. Study on shock absorption of elastic restraint of cable stayed bridge[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 212,36(6):891-894. (in Chinese)
- [9] 方志,王飞,张志田,等. 粘滞阻尼器参数对大跨度桥梁抗震性能影响研究[J]. 公路交通科技,2009,26(2):73-78.
Fang Z, Wang F, Zhang Z T, et al. Effects of viscous damper parameters on anti-seismic performance of long-span bidge[J]. Journal of Highway and Transporation Research and Development, 2009, 26 (2): 73-78. (in Chinese)
- [10] Mahendra P, Singh F, Navin P, et al. Seismic analysis and design with maxwell bampers [J]. Journal of Engineering Mechanics,2003,129(3):273-282
- [11] Vader T, Mcdaniel C C. Influence of dampers on seismic response of cable supported bridge towers[J]. Journal of Bridge Enginering, ASCE,2007,12(3):373-379.
- [12] Lin W, Anik K. C. Earthquake response of elastic SDF systems with non-linear fluid viscous dampers [J]. Earthquake Engineering & Structure Dynamics ,2002,31(9):1623-1642.
- [13] 杨喜文,张文华,李建中. 大跨度斜拉桥横桥向减震研究[J]. 地震工程与工程振动,2012,32(1):86-92.
Yang X W, Zhang W H, Li J Z. Seismic design for long-span cable-stayed bridges in transverse direction[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2012,32(1):86-92. (in Chinese)
- [14] 叶爱君,范立础. 超大跨度斜拉桥的横向约束体系[J]. 中国公路学报,2007,20(2):63-67.
Ye A J, Fan L C, Latreal constraint systems for super-long-span cable -stayed bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20 (2): 63-67. (in Chinese)
- [15] 岳诚东. 基于粘滞阻尼器的大跨铁路斜拉桥横向减震研究[J]. 兰州交通大学学报,2013,32(1):10-14.
Yue C D. Research on seismic response reduction of cable-stayed bridge on based on visous damper long-span railway [J]. Journal of Lan Zhou Jiaotong University,2003,32(1):10-14. (in Chinese)

(编辑 胡玲)