

## 高烈度地震区可克达拉特大桥主桥横向抗震体系研究

陈作银<sup>1</sup>, 陈佳<sup>2</sup>

(1. 北京国道通公路设计研究院有限公司, 北京市 100161; 2. 北京建达道桥咨询有限公司, 北京市 100015)

**摘要:**针对中等跨径斜拉桥横向地震力过大,以可克达拉特大桥主桥为研究对象,研究不同减隔震方式工作机理,探讨该类型斜拉桥采用横向减隔震措施下桥塔、过渡墩、辅助墩横向地震受力状态。分析表明:当桥塔、过渡墩、辅助墩均采用减隔震措施后,横向地震力能得到大幅度降低,同时随着异形钢阻尼器水平屈服刚度的逐渐增大,桥塔、过渡墩、辅助墩横向地震力逐渐增大,主梁横向相对位移逐渐减小;当主梁在桥塔处横向限位,过渡墩、辅助墩采用减隔震措施时,过渡墩、辅助墩处横向地震力大幅度降低,但桥塔处横向地震力有所增加,同时随着异形钢阻尼器水平屈服刚度的逐渐增大,过渡墩、辅助墩处横向地震力逐渐增大,桥塔处横向地震力逐渐减小。

**关键词:** 减隔震; 异形钢阻尼器; 横向地震力; 主梁横向相对位移

**中图分类号:** U441+.3

**文献标志码:** A

## 1 工程概况

可克达拉特大桥位于新疆伊犁州可克达拉市,为拟建的可克达拉市南北运输通道。可克达拉特大桥由北向南上跨伊犁河,主桥为(37+103+320+103+37)m预应力混凝土斜拉桥,北岸引桥为 $2\times(3\times 40)$ m预应力混凝土先简支后连续T梁,南岸引桥为 $5\times(4\times 40)+(3\times 40)$ m预应力混凝土先简支后连续T

梁,桥梁全长1767m。设计标准为公路Ⅰ级,设计速度为80km/h。该项目已于2019年完成主桥合龙并通车运营。

可克达拉特大桥主桥为(37+103+320+103+37)m双塔双索面预应力混凝土斜拉桥,主梁为双边箱混凝土主梁,主桥结构体系为塔梁分离的半漂浮体系,塔梁之间通过支座进行衔接,并且在两个边跨各设置一个辅助墩,以调节主梁和索塔的内力及变形,提高主跨刚度,减小边跨受力,桥型总体布置如图1所示。

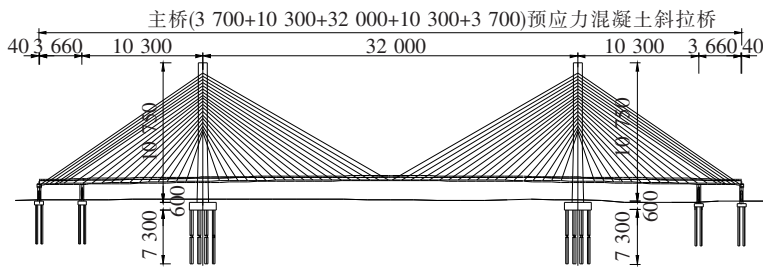


图1 桥型总体布置图(单位:cm)

主梁箱梁全宽3290cm(含每侧20cm风嘴),中心梁高300cm;标准梁段的顶板厚28cm,底板厚35cm,斜腹板厚25cm,竖腹板厚35cm;0#块底板加厚为65cm;边跨现浇段采用单箱三室断面,顶板厚65cm,底板厚70cm,斜腹板厚60cm,竖腹板厚95cm。主梁顶板设置1.5%的双向横坡,底板水平设置。主

梁从索塔处开始分块,0#块长为14m;标准块件长度为8m,标准节段重约538t;每节段在距离施工缝76cm处设置一道厚32cm的横隔板;梁端、辅助墩及索塔处各设一道横隔梁,其厚度分别为576、200、300cm。跨中主梁断面如图2所示。

索塔采用双柱式变截面“H”形索塔,由上塔柱、中

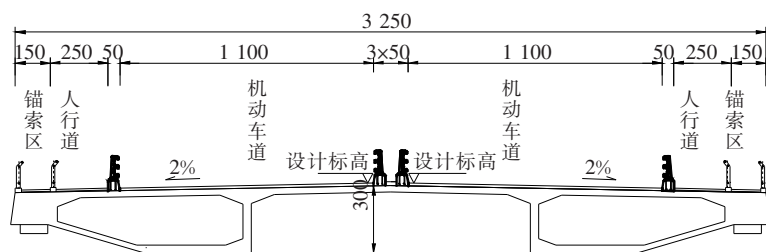


图2 主梁跨中断面图(单位:cm)

塔柱、下塔柱及横梁组成,塔高 107.5 m,其中桥面以上高度为 89.2 m。塔柱及横梁采用空心薄壁截面。上塔柱顺桥向宽度 8.0 m,中塔柱、下塔柱顺桥向宽度由 8.0 m 渐变至塔底的 10.0 m,上塔柱及中塔柱横桥向宽度 4.5 m,下塔柱横桥向宽度由 4.5 m 渐变至塔底的 7.5 m。塔间设上横梁、中横梁及下横梁,上横梁高度为 4.0 m,宽度 8 m,中横梁高度 4~5 m,宽度为 7 m,下横梁高度为 5.0 m,宽度为 7 m,壁厚为 80 cm。

斜拉索采用扇形布置,顺桥向标准间距 8 m,边跨加密段为 3.5 m 及 4 m。塔上间距分别为 2.4、2.6 及 2.8 m。斜拉索采用高强度环氧平行钢丝,其标准强度为 1 670 MPa,弹性模量为  $2.0 \times 10^5$  MPa。该桥设有 19 对拉索。

桥塔承台平面尺寸为  $16.5 \text{ m} \times 22.75 \text{ m}$ ,厚度为 6 m,每个承台下接 12 根直径 2.5 m 的钻孔灌注桩。

过渡墩采用柱式墩,上部采用左右幅整体式盖梁,下部基础采用分离式基础。桥墩采用矩形空心薄壁墩,桥墩截面尺寸为  $3.5 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$ ,壁厚为 70 cm。过渡墩承台平面尺寸为  $7.5 \text{ m} \times 7.5 \text{ m}$ ,厚度为 2.5 m,每个承台下接 4 根直径 1.8 m 的钻孔灌注桩。

辅助墩采用柱式墩、承台、桩基础,桥墩采用矩形空心薄壁墩,桥墩截面尺寸为  $5.7 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$ ,壁厚为 70 cm,承台平面尺寸为  $8.0 \text{ m} \times 7.5 \text{ m}$ ,厚度为 2.5 m,每个承台下接 4 根直径 1.8 m 的钻孔灌注桩。

## 2 工程地质及地震动参数

项目场地土由第四系冲洪积物构成。在勘探深度 100 m 范围内由粉土和卵石构成。

项目所在地沿线无全新活动断裂,无断裂发育。该场地为 II 类建筑场地,中硬场地土,无其他不良地质作用,为抗震有利地段。

伊犁地区地处西天山伊犁地震带,不同构造单元交汇地带。地层褶皱、断裂较为发育,地震频繁。桥位区地震基本烈度为 VII 度,地震动峰值加速度为  $0.15g$ 。

根据现行设计规范,桥梁抗震设防类别为 A 类,在地震动作用下,桥梁主要受力构件均需保持弹性状态。桥梁的地震动时程波采用《新疆兵团第四师可克达拉市特大桥工程场地地震安全性评价报告》提供的采用 50 年超越概率 2% 基岩加速度时程成波,时程波如图 3 所示。

## 3 主梁边界体系分析与研究

斜拉桥是一种由塔、梁、索 3 种基本构件组成的组合结构体系,其塔梁结构体系主要有漂浮体系和半漂浮体系,斜拉桥主梁抗震边界体系的设置既要满足地震作用下主要受力构件能力需求,同时也要使主梁在常态荷载作用下满足正常使用需求。在该桥抗震体系研究时,翻阅众多参考文献,发现斜拉桥纵向抗震体系研究较多,均是采用减隔震装置,在桥塔、过渡墩和主梁间设置纵向黏滞流体阻尼器,增加纵桥向阻尼,减少主梁纵向位移。

横向抗震体系研究相对较少,根据斜拉桥受力特点、以往项目经验及有关厂家建议,主梁边界体系方案设置如下:

(1) 桥塔处桥塔与主梁间设置横向抗风支座,限制桥塔处主梁横向位移,辅助墩、过渡墩处设置横向防落梁刚性挡块,采用硬抗的形式,对桥塔、辅助墩、过渡墩及其基础进行配筋(该挡块均假定为刚性挡块,且不考虑梁体与挡块撞击力)。

(2) 采用减隔震设计,减隔震的设计目标是:能够有效降低下部横向地震力和有效控制主梁横向地震位移,使桥塔、辅助墩、过渡墩及其基础在合理配筋情况下满足地震作用。

减隔震设计概念较为广泛,其基本原理是增加边界阻尼或者边界摆动耗能,使结构周期增加,从而降低地震力。根据相关文献,目前减隔震设计主要有以下几种:

① 摩擦摆式减隔震支座:根据支座特性,该型支

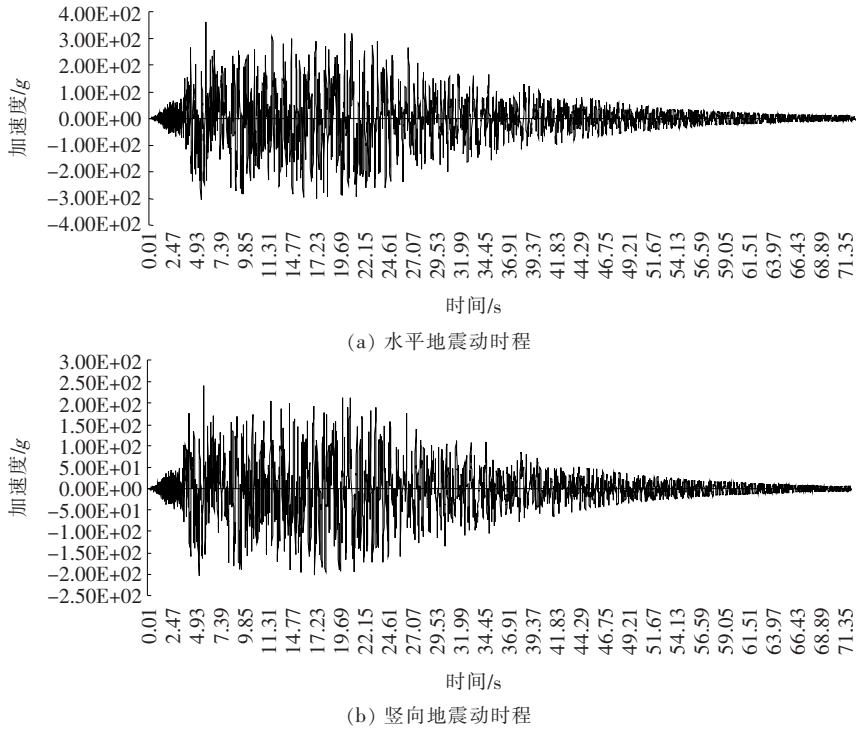


图 3 工程场地 50 年超越概率 2.5%基岩地震动时程

座的主要参数如下:

支座初始刚度:  $K_p = \frac{\mu W}{d_y}$ ; 支座隔震周期:  $T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}}$ ; 支座屈后刚度:  $K_c = \frac{W}{R}$ ; 支座回复力:  $F = \frac{W}{R}D + \mu W(\text{sgn}D)$ 。其中:  $W$  为竖向荷载;  $d_y$  为屈服位移;  $\mu$  为动摩擦系数;  $R$  为曲率半径。

可见,该型支座主要参数均与竖向荷载有关,而斜拉桥主要为索结构,斜拉索为主要竖向受力构件,支座处竖向荷载相对较小,从而造成支座初始刚度、屈后刚度等均较小,进而造成主梁横向位移不可控,同时该型支座初始刚度难以满足主梁在横向风作用下的抗力需求。

② 横向设置黏滞流体阻尼器:黏滞流体阻尼器是一种速度相关型的耗能装置,它是利用液体的黏性提供阻尼来耗散振动能量,以黏滞材料为阻尼介质的被动速度型耗能减震(振)装置。

阻尼器力学公式:  $F = C \cdot V^\alpha$ 。其中:  $C$  为阻尼系数;  $V$  为最大反应速度;  $\alpha$  为速度指数。

在有关文献及国外实施项目中,在桥塔、辅助墩、过渡墩处设置横向黏滞流体阻尼器,经与中国相关生产厂家了解,此种设置方式问题较多,首先横向黏滞流体阻尼器限制主梁正常使用情况下纵向位移。其次是

主梁与桥塔、辅助墩、过渡墩支座设置问题,若采用横向限位支座,地震作用下,支座首先损坏,发生横向滑移,此时阻尼器才能产生作用,且若横向位移过大,可能造成支座滑落风险;若采用横向滑动支座滑板,由于此种设置,桥塔与主梁间间隙较大,在常规横向风作用下,主梁将发生横向移动。横向设置黏滞流体阻尼器较为不可行。

③ 采用异形钢阻尼器作为横向减隔震装置,钢阻尼器的特点及简图如图 4、5 所示。

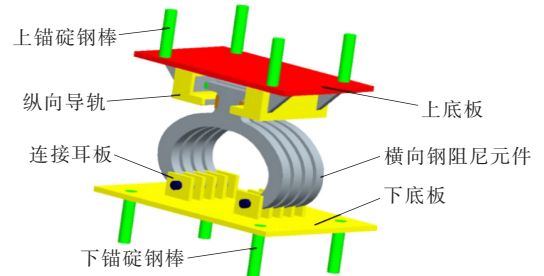


图 4 阻尼器简图

由图 5 可得:

$$K_1 = \frac{F_y}{S_y}; K_2 = \frac{F_d - F_y}{S_d - S_y}; K_h = \frac{F_d}{S_d} \quad (1)$$

式中:  $F$  为阻尼力;  $F_d$  为设计阻尼力;  $F_y$  为屈服时的阻尼力;  $K_h$  为等效刚度;  $K_1$  为初始水平刚度;  $K_2$  为屈服后水平刚度;  $S$  为位移量;  $S_d$  为设计位移;  $S_y$  为

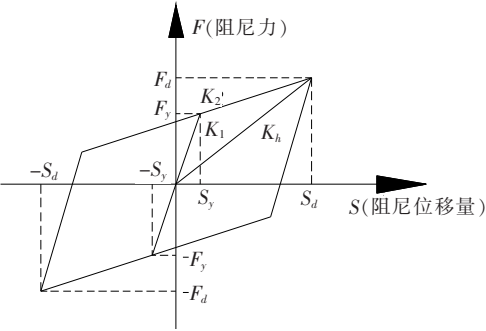


图5 钢阻尼器元件双线性恢复力模型

屈服位移。  
钢阻尼器的屈服后水平刚度与屈服刚度关系为：  
$$K_2=0.04K_1 \tag{2}$$
  
可以看出：钢阻尼器顺桥向可自由滑动，横桥向限位，可有效解决主梁在常态荷载下顺桥向伸缩。横桥

表1 阻尼器计算参数

阻尼器	屈服力 $F/\text{kN}$	弹性位移/ $\text{mm}$	设计地震位移/ $\text{mm}$	屈服前刚度 $K_1/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	屈服后刚度 $K_2/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$
1	1 200	26	260	46 154	1 846
2	1 800	26	260	69 231	2 769
3	2 500	26	260	96 154	3 846

由于桥塔与主梁间间隙为30 cm左右，因此主梁横向位移需小于30 cm，先设定为26 cm。  
方案3：在方案2的基础上，将桥塔处钢阻尼器取消，在桥塔与主梁间设置横向抗风支座，辅助墩、过渡墩阻尼器设置方式和个数均不变。该方案相对方案2，桥塔横桥向采用硬抗形式，辅助墩、过渡墩横向采用减隔震措施。

4 动力分析模型及地震响应分析

采用Midas/Civil有限元程序，建立三维有限元动力计算模型进行抗震性能分析，桥塔、主梁、桥墩均采用空间梁单元模拟，斜拉索采用桁架单元模拟。桥塔、过渡墩、辅助墩与主梁通过支座连接，支座采用弹性支撑模拟，横向钢阻尼器采用滞后系统模拟，纵向黏滞流体阻尼器采用黏弹性消能器。此外，在过渡墩处施加引桥恒载以考虑邻联结构的影响，同时桩土相互作用采用承台底模拟实际桩基，采用等效刚度方法，在桩基位移零点处进行固结。建立的有限元模型见图6。

向初始刚度的选择需考虑主塔、辅助墩、过渡墩等受力构件能力需求，同时为防止地震作用下支座损坏、滑落，支座选择双向大位移量的滑动支座，钢阻尼横桥向初始阻尼力需大于横桥向设计风力。  
通过上述分析，选择以下几种较为可行的方案进行深入研究：  
方案1：桥塔处桥塔与主梁间设置横向抗风支座，限制桥塔处主梁横向位移，辅助墩、过渡墩处设置横向防落梁刚性挡块，主梁与挡块间隙设置防碰撞橡胶垫块，计算时不考虑垫块刚度，挡块也按照刚度无穷大考虑，横向地震力由桥塔、辅助墩、过渡墩及其基础承担。  
方案2：异型钢阻尼器和普通双向滑动支座的组合，桥塔、辅助墩、过渡墩均采用异形钢阻尼器，其中单侧桥塔处设置4个，辅助墩、过渡墩均设置2个。钢阻尼器计算参数如表1所示。

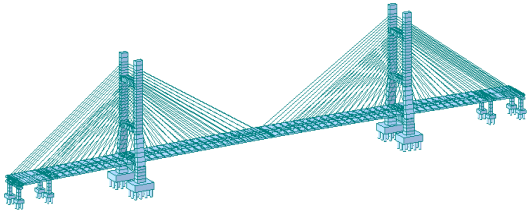


图6 动力计算有限元模型

根据动力分析模型及地震动输入，应用非线性动力时程方法进行横向地震响应分析，研究桥墩、桥塔在各边界条件下的受力状态。  
设置主梁横向刚性约束及方案2异型钢阻尼分析结果如表2及图7~9所示。

表2 横向墩底弯矩 kN·m

结构位置	方案1	方案2		
		钢阻尼1	钢阻尼2	钢阻尼3
0#过渡墩	164 758	20 902	29 879	37 220
1#辅助墩	171 526	21 834	31 865	42 148
2#桥塔	833 871	628 404	642 164	646 803
3#桥塔	820 969	613 861	627 723	631 988
4#辅助墩	171 638	21 839	31 868	42 147
5#过渡墩	164 943	20 944	29 841	37 217



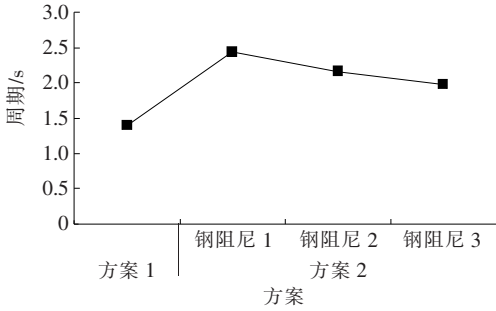


图 7 结构横向周期

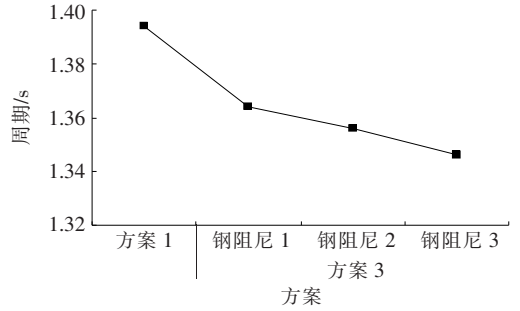


图 10 结构横向周期

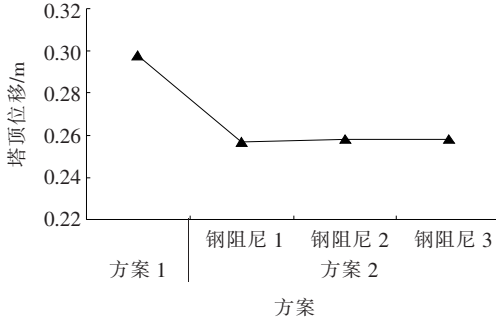


图 8 桥塔顶部位移

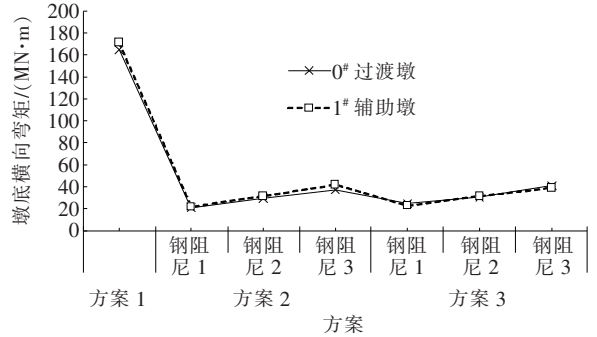


图 11 过渡墩、辅助墩墩底横向弯矩

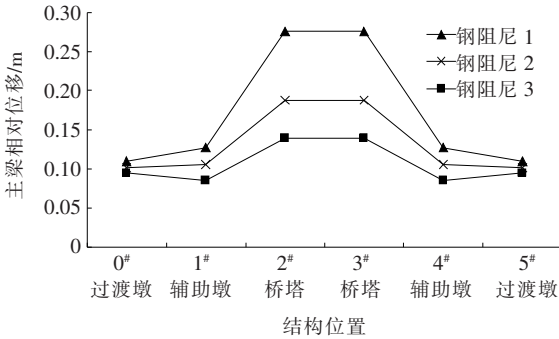


图 9 主梁相对位移

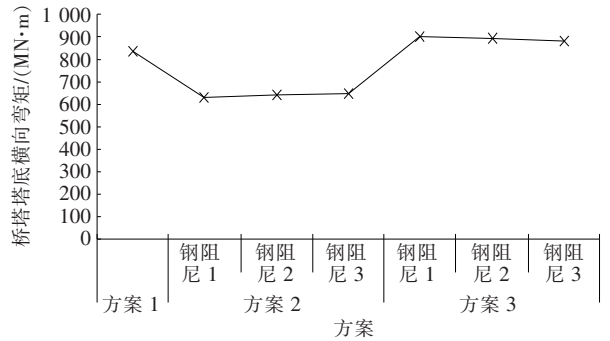


图 12 桥塔塔底横向弯矩

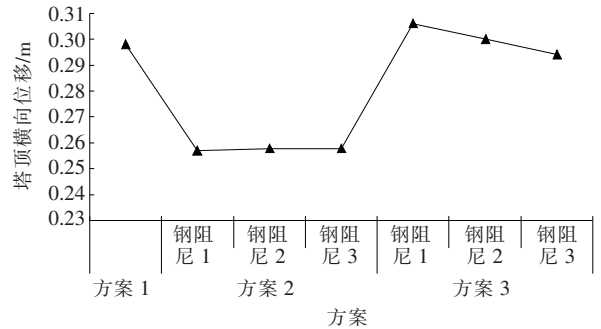


图 13 桥塔顶部横向位移

由图 7 可以看出:方案 2 采用钢阻尼器后,结构横向周期明显增大,但随着钢阻尼水平屈服刚度的增加,结构周期同样逐渐减小。由表 2 看出:采用钢阻尼器后,横向墩底弯矩显著降低,相比刚性挡块,过渡墩、辅助墩墩底横向弯矩大幅度降低,降幅分别达到 87.9% 和 87.3%,桥塔横向降幅相对较小,但也达到 24.7%,同时随着钢阻尼水平屈服刚度的增加,墩底横向弯矩逐渐增大。由图 8 可以看出:塔顶横向位移在采用钢阻尼器后有所减小,减小幅度约为 13.4%,但随着钢阻尼器水平刚度的变化,塔顶横向位移变化不大。由图 9 可以看出:随着钢阻尼水平屈服刚度的增加,主梁横向相对位移减小。

设置刚性挡块及方案 3 异形钢阻尼分析结果如图 10~14 所示。

由图 10 可以看出:采用方案 3,过渡墩、辅助墩设置横向钢阻尼器,桥塔处横向限位后,结构横向周期明显减小,且小于方案 1,同时随着钢阻尼水平屈服刚度的增加,横向结构周期逐渐减小,由图 11、12 可以看

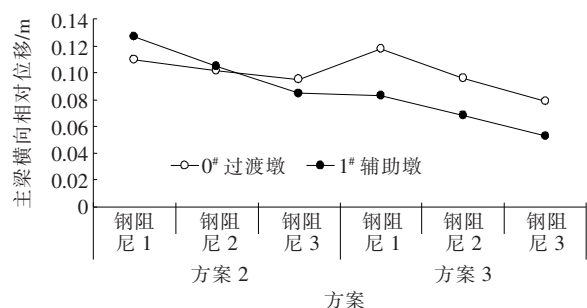


图14 主梁横向相对位移

出,方案3情况下,过渡墩、辅助墩横向弯矩降幅较大,幅度与方案2基本一致,随着钢阻尼水平屈服刚度的增加,墩底横向弯矩也逐渐增大;但桥塔底部横向弯矩较方案1增大,同时随着钢阻尼水平屈服刚度的增加,桥塔底部横向弯矩减小。由图13可以看出:采用方案3时,桥塔顶部横向位移较方案1大,但随着钢阻尼水平屈服刚度的增加,塔顶横向位移逐渐减小。由图14可以看出:主梁横向相对位移在过渡墩处受桥塔限位影响较小,方案3与方案2两种边界条件下,两种结果均相差不大,且随钢阻尼水平刚度的变化,趋势一致;辅助墩处受桥塔限位影响较大,方案3条件下主梁横向相对位移明显小于方案2,但随钢阻尼水平刚度的变化,趋势则较为一致。

通过上述分析可看出:方案3边界条件下,主梁在桥塔处横向限位后,横向地震力主要由桥塔承受,当横向钢阻尼器水平刚度越小时,桥塔承受的横向地震力就越大,当钢阻尼器水平刚度逐渐增大时,过渡墩、辅助墩分担部分横向地震力,桥塔处地震力则逐渐减小。

## 5 结论

以可克达拉特大桥为研究对象,通过研究不同减隔震方式工作机理,探讨了该类型斜拉桥采用横向减隔震措施下桥塔、过渡墩、辅助墩横向地震力受力状态,通过分析,得出以下结论:

(1) 当桥塔、过渡墩、辅助墩均采用减隔震措施以后,桥塔、过渡墩、辅助墩横向地震力均能得到大幅度降低,其中过渡墩、辅助墩降幅分别约为87.9%和87.3%,桥塔降幅约为24.7%,同时随着钢阻尼器水

平屈服刚度的逐渐增大,桥塔、过渡墩、辅助墩横向地震力逐渐增大,主梁横向相对位移逐渐减小。

(2) 当主梁在桥塔处横向限位,过渡墩、辅助墩采用减隔震措施时,过渡墩、辅助墩处横向地震力大幅度降低,降幅分别约为85.1%和86.6%,但桥塔处横向地震力有所增加,同时随着钢阻尼器水平屈服刚度的逐渐增大,过渡墩、辅助墩处横向地震力逐渐增大,桥塔处横向地震力逐渐减小。

(3) 横向异形钢阻尼器水平刚度的选择,需综合考虑主梁横向相对位移需求、墩塔受力性能及常态横向荷载(包括风载)等多种因素综合影响,选择合理水平屈服刚度。

(4) 将方案2、3进行比较,是因为桥塔本身刚度较大,对桥塔截面起控制因素的除了地震力,桥塔纵横向常态荷载下的静力分析及施工阶段不利荷载也是重要控制因素。同时为便于施工,桥塔与主梁间留有一定的间隙,当桥塔截面控制因素为非地震力时,桥塔处采用横向限位,即方案3也是较好选择,以防钢阻尼失效后,主梁与桥塔碰撞,避免发生不可预料风险。

## 参考文献:

- [1] 刘士余,王似舜.斜拉桥设计[M].北京:人民交通出版社,2006.
- [2] 重庆交通科研设计院.公路桥梁抗震设计细则:JTG/T B02-01-2008[S].北京:人民交通出版社,2008.
- [3] 黄方,张威振,杨少红,等.高烈度区刚构桥抗震与减隔震技术研究[J].中外公路,2017,37(6):147-150.
- [4] 柳州东方工程橡胶制品有限公司,华中科技大学,陕西省公路勘察设计院,等.公路桥梁铅芯隔震橡胶支座:JT/T 822-2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [5] 中交第一公路勘察设计院有限公司.公路桥梁弹塑性钢减震支座:JT/T 843-2012[S].北京:人民交通出版社,2012.
- [6] 陈志刚,赵英策.采用拉索减震支座的刚构桥横向抗震性能研究[J].桥梁建设,2014,44(2):38-42.
- [7] 徐艳,曾诗杰.斜拉桥横桥向设置钢阻尼器的减震优化研究[J].桥梁建设,2017,47(3):53-58.
- [8] 秦昌,徐略勤,刘津成,等.高墩大跨连续刚构桥长期地震响应对比研究[J].中外公路,2017,37(1):72-78.