

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.04.008

考虑非线性因素的斜拉桥弹性索减震效应研究

许莉,徐杨,黄群君,张超

(福州大学 土木工程学院,福建 福州 350116)

摘要: 弹性索作为中等跨径斜拉桥常用的减震装置,但其在大跨斜拉桥中减震效果及机理并不明确。为此,以一座双塔斜拉桥为工程背景,建立精细有限元模型,考虑大位移、垂度效应、支座非线性等因素,运用非线性时程分析方法研究地震作用下弹性索对大跨度斜拉桥减震效应。研究表明:弹性索减震装置加大斜拉桥的整体刚度,能减小塔顶位移、主梁梁端位移以及塔梁之间相对的纵向位移,又能减小主塔塔底弯矩的响应。从主塔塔身上各节点纵向位移包络图、主塔塔身弯矩和剪力包络图可得,安装弹性索的弹性约束体系的减震效果较为明显。

关键词: 大跨斜拉桥;减震;弹性索;时程分析法

中图分类号: U448.21

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)04-0036-06

Seismic Mitigation for Elastic Cable of Cable-Stayed Bridge Considering Nonlinear Factor

XU Li, XU Yang, HUANG Qunjun, ZHANG Chao

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

Abstract: Elastic cable, a commonly used damping device for middle span cable-stayed bridge, is inexpensive and simple in structure. However, its effects and mechanism in long-span cable-stayed bridge are not clear. Thus based on the engineering background of double tower cable-stayed bridge, the fine finite element model was established with nonlinear factors such as large displacement, sag effect, and bearing nonlinearity considered. Nonlinear Time-history analysis method was used to analyze the mitigation effect of elastic cable to long-span cable-stayed bridge under earthquake. The result demonstrates that the elastic cable can increase the overall stiffness of cable-stayed bridge, reduce the displacement of the tower top, and that of the girder end and the relative longitudinal displacement between towers and girders. Furthermore, it can reduce the base moment response of the main tower. It can be seen from the longitudinal displacement envelope, the shearing envelope and the moment envelope of main tower body that the elastic restraint system with elastic cable has more obvious seismic mitigation effects.

Keywords: long-span cable-stayed bridge; seismic mitigation; elastic cable; time-history analysis method

斜拉桥是一种用拉索连接主梁与桥塔的桥梁,是由承压的塔、受拉的索和承弯的梁体组成的一种结构体系。斜拉桥具有很大的跨越能力,我国斜拉桥数量多且跨度大。因此,地震区建造的斜拉桥其抗震问题更显得突出。

已有大量学者对斜拉桥的抗震性能进行了相关研究。Nazmy A S^[1]对斜拉桥的非线性动力分析进行了相关研究,研究表明在地震作用下,斜拉桥的动力分析需要考虑非线性因素对结构受力及位移的影响。Ren W X等^[2]对斜拉桥进行了相关的动力分

析,指出对于大跨度斜拉桥的减震机理目前尚未研究透彻。雷庆关等^[3]研究了几何非线性对斜拉桥时程动力分析的影响程度,研究表明几何非线性对混凝土斜拉桥位移和内力响应影响显著。从以上研究可以看出,大跨度斜拉桥动力分析需要考虑非线性因素的影响。且减震机理还需进一步研究。

斜拉桥宜优先选择漂浮体系,但是该体系梁端产生的纵向位移较大,较大的梁端位移可能引起梁端相互碰撞,伸缩缝破坏,甚至产生落梁等震害^[4]。因此,应使用阻尼约束或塔梁弹性约束体系替换梁

端位移过大的漂浮体系。但是,阻尼器由于造价较高不易更换,采用阻尼器用来减震的经济性较低。弹性约束体系是指在塔梁间装有纵向弹性约束装置或构件,该装置的主要作用不是耗能,而是提供弹性刚度,因此在地震作用下,通过调整弹性索刚度参数,使结构的内力和位移响应二者兼顾。

有关学者对弹性约束减震的有限元分析研究做了一定的研究。陈策等^[5]运用有限元法分析了三塔悬索桥塔纵向弹性约束的合理刚度,结果表明设置弹性索后三塔悬索桥的受力性能得到了明显改善。王杰等^[6]使用 SPA2000 建立某三塔悬索桥有限元模型并分析了非线性动力特征,研究结果表明合理的弹性索刚度能够有效控制主梁位移,同时使中塔和边塔的受力趋于合理。闫聚考等^[7]使用有限元方法研究了三塔悬索桥主梁与中塔间设置弹性索对该桥抗震性能的影响,结果表明,合理的弹性索刚度能够有效减小关键断面的位移和内力。方圆等^[8]对独塔斜拉桥纵桥向和横桥向约束体系的传力机理进行了研究,结果表明,塔梁之间设置纵向弹性索后,

在控制主梁位移的同时可以减小桥塔的地震弯矩。

从以上研究分析表明,关于大跨双塔斜拉桥采用弹性约束体系减震的研究还未见报道,而大跨度斜拉桥动力分析减震机理还需进一步研究。为此,本文将通过有限元法建立背景工程的数值模型,并分析不同体系斜拉桥的动力特性。同时对考虑非线性因素影响下的弹性索展开了进一步研究。

1 背景斜拉桥简介

选取一座位于福建东部的七跨连续双塔斜拉桥进行研究,该斜拉桥主桥全长 1 280 m,桥跨布置为 (60+90+150+680+150+90+60)m,全宽 30.6 m,桥面宽 28.7 m,梁高 3.50 m,其桥型布置如图 1 所示。主桥的钢箱梁采用 Q370 钢,扁平整体单箱三室结构。主塔为采用 C50 混凝土的钢筋混凝土结构,分别由上、中、下塔柱及上、下横梁等 5 部分组成,主塔结构如图 2 所示。地表多为第四系冲海积淤泥、黏性土和淤泥质土覆盖,场地两岸地段出露的基岩主要为燕山晚期侵入的花岗岩。

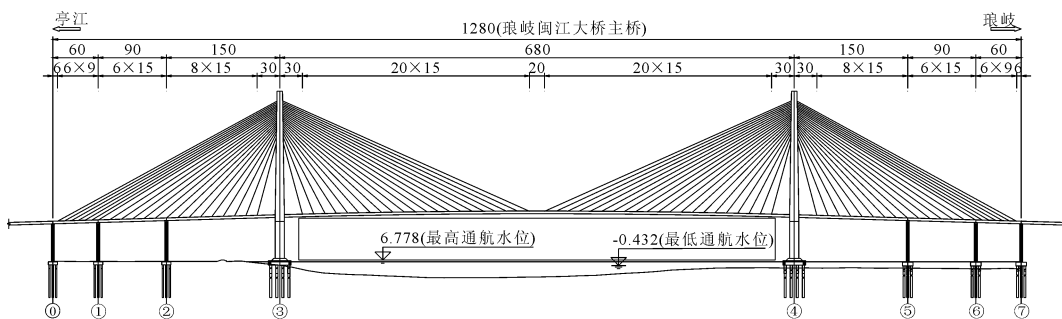


图1 桥型总体布置图(单位:m)

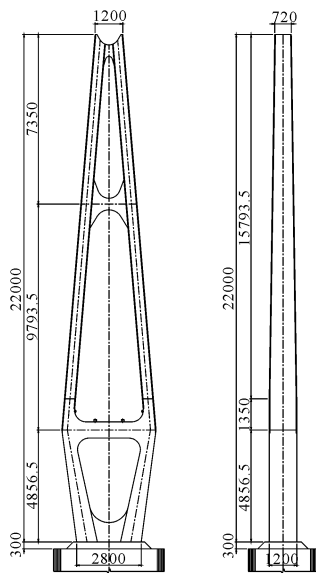


图2 双塔斜拉桥主塔结构布置图(单位:cm)

2 有限元模型的建立

采用成熟通用的非线性时程分析软件 SAP2000 建立背景桥梁的全桥数值模型,单元模拟如下。

(1) 桥面系模拟。使用梁脊模型^[8],并选用空间梁单元模拟主梁,主梁质量应计算桥面系所有的质量,同时考虑扭转质量惯性矩的影响。根据背景桥梁的设计数据,有限元模型中桥面系的材料为 Q370 钢,弹性模量为 2.1×10^6 MPa,泊松比为 0.3,材料的重量密度为 $12\ 871\ \text{kg}/\text{m}^3$,桥面横截面面积为 $1.457\ \text{m}^2$,同时根据桥面截面位置的不同,在桥面与主塔、辅助墩连接处的杆件长度为 9 m,其余部位的杆件长度为 15 m。

(2) 斜拉索的模拟。斜拉索的模拟方式主要采用等效弹性模量法,等效后的弹性模量可采用 Ernst 公式计算

$$E_{eq} = \frac{E}{1 + \frac{(wl)^2}{12T^3} AE} \quad (1)$$

式中: E 为斜拉索的有效弹性模量; l 为斜拉索的水平投影长度; w 为单位长度上斜拉索的重量; A 为斜拉索的截面积; T 为斜拉索的初始拉力。通过以上方法的计算, 有限元模型中斜拉索材料的弹性模量为 1.95×10^6 MPa, 泊松比为 0.3, 质量密度为 $8\ 395$ kg/m³。斜拉索采用梁单元模拟, 只考虑受拉不受压的特性不考虑其弯曲刚度, 同时考虑垂度及几何非线性的影响。

(3) 主塔、支座和弹性索模拟。根据背景工程主塔截面特性, 斜拉桥主塔采用三维梁单元模拟, 主塔采用的混凝土强度等级为 C50, 设置的主塔截面高度均控制在 8 m 以内, 截面形心的连接线作为单元节点取。

主梁和墩塔采用对应节点自由度间的主从关系模拟支承支座。在六个自由度中, 只约束主梁的竖向位移来对双向活动支座进行模拟, 而采用约束主梁的竖向位移和横桥向位移的方法来模拟单向活动支座。

弹性约束体系中采用的弹性索主要提供一个线性的刚度, 可以使用指定刚度进行模拟, 同时不限定刚度矩阵必须是解耦的。以单元坐标系为坐标参数输入弹性连接单元具有 6 个参数, 即 3 个轴向位移刚度与 3 个沿轴转动的转动刚度值^[9]。

本文主要是研究纵桥向的弹性连接结构的影响, 在有限元模拟中, 控制好纵桥向方向的刚度值。采用了 HOOK 连接单元, 只提供沿着主桥顺桥向的刚度, 不提供竖向与横桥向以及三个转角方向的刚度, 顺桥向弹性索提供的刚度值初定为 16 000 kN/m。

(4) 桩土效应模拟。对于大跨度斜拉桥而言, 不同的嵌固模型对于结构的自振频率以及振型影响较大, 同时桩土互相作用效应会使得结构刚度降低, 延长自振周期^[10]。考虑背景工程桥梁基础的嵌固土层的实际特点, 在有限元模拟中, 采用了 m 法嵌固模型进行分析^[11]。

(5) 全桥数值模型。SAP2000 建立起背景桥梁的全桥数值模型, 模型由 1 879 个节点与 2 043 个框架单元构成。全桥数值模型如图 3 所示。

3 结构动力特性分析

采用分块兰索斯法^[12](LANB 法) 进行自振频率

和振型的求解。首先对模型进行模态分析, 经过计算, 在 94 阶时, X 向的振型参与质量系数达到 90%。在第 112 阶时, Y 向的振型参与质量系数达到 90%, 为了保证有限元模型计算结果的准确性以及减少有限元模型计算量, 因此背景桥梁只计算前 200 阶振动频率和振型。

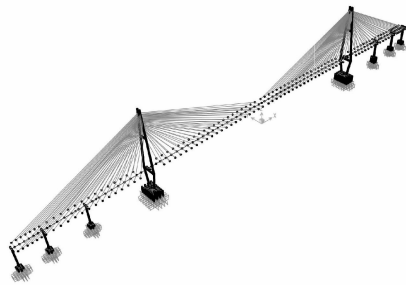


图 3 有限元模型

4 斜拉桥地震响应分析中的非线性因素

弹性约束体系通过改变传力途径, 能有效地减小了塔底弯矩; 但是, 其结构刚度增加也引起地震影响系数的增大。因此, 弹性限位体系进行斜拉桥纵桥向减震: 即弹性约束装置在初始状态为松弛状态, 有初始间隙。当塔-梁间隙小于 0.2 m 时, 斜拉桥为漂浮受力状态; 当塔-梁间隙大于 0.2 m 时, 则弹性索提供纵向约束, 改变传力途径。因此, 弹性限位体系并不显著改变桥梁结构的自振周期, 只改变了桥面系在纵向地震作用下的传力途径。纵向弹性索只提供拉力, 不提供压力, 因此地震作用下桥面系的惯性力 F 与弹性索刚度 K 以及梁端位移 X 之间的关系如图 4 所示, 三者之间呈线性关系。而装有限位装置的纵向弹性索的受力图示则有所不同。当塔梁之间的变形小于限位距离时, 此时桥梁结构仍属于漂浮体系, 当塔梁之间变形超过限位的距离时, 桥梁结构则处于弹性约束体系。

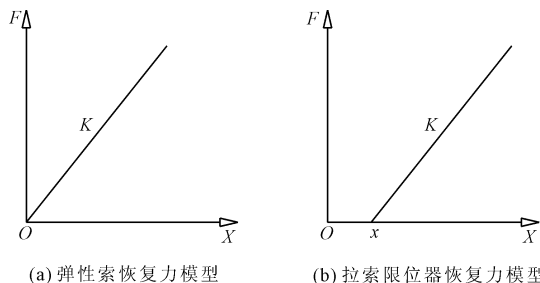


图 4 连接装置恢复力模型

在 SAP2000 中, 采用 HOOK 单元模拟弹性限位体系中的限位装置。HOOK 单元的力学行为特性如

下:

$$f = \begin{cases} k(d - \text{open}) & d > \text{open} \\ 0 & d < \text{open} \end{cases} \quad (2)$$

其中: k 为表示弹性索刚度值; open 即为限位装置的初始值。

HOOK单元的示意图如图5所示。

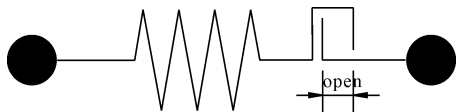


图5 限位单元力学模型

除此之外,随着斜拉桥的跨度的增大,斜拉索的长度与自重也随着增大。斜索的自重产生的垂度也逐渐增大,斜拉桥的整体刚度也随着垂度的改变也变化,结构的几何变形也会增大,在弯矩与轴力的共同作用下,斜拉桥的非线性问题会变得十分复杂。

(1) 垂度效应。斜拉索产生的非线性将随着斜拉索长度的增加而增长,随着斜拉索倾角与斜拉索预拉力的减小而增大。对于大跨度斜拉桥而言,斜拉索的非线性效应对于桥梁整体结构的非线性效应起到重要作用。

(2) 大位移效应。对于具有大位移的结构而言,有限元分析中的小变形叠加原来就不再适用。因此在有限元分析的平衡方程均应以结构自重作用变形后的形状建立。

(3) 轴力和弯矩的组合效应。斜拉索索内的拉力使得斜拉桥的其他等构件处于轴力和弯矩的共同作用下,即使这些构件满足胡克定律,它也会呈现非线性特征^[13]。本文通过引入稳定函数对轴力和弯矩的组合效应进行处理。刚度矩阵通过稳定函数的处理后,再进行线性计算。

(4) 支座的受力非线性。考虑到支座的摩擦力对于结构刚度与耗能的影响,因此在有限元数值分析中考虑了活动支座摩擦力对于结构地震响应的影响分析。

5 弹性索对斜拉桥地震响应的影响规律

在时程分析中采用抗震规则中设计反应谱拟合得到的人工地震波,根据背景桥梁安评报告提供的3条超越概率为100年4%(相当于E2水准的人工波进行时程分析)的地震动,地震动输入的加速度峰值为152 gal,持续时间为40 s。三条人工波加速度时程曲线如图6所示。地震动输入方向为纵桥向+

0.5倍竖向,地震反应结果取3组地震响应的最大值。

由于加装了纵向弹性索后,相对于漂浮体系的斜拉桥而言,结构的自振周期发生了改变,弹性约束体系斜拉桥的整体刚度大于漂浮体系斜拉桥,在图7中可以看出,弹性约束体系斜拉桥的结构周期与漂浮体系的结构周期不同。在左侧主塔与右侧主塔塔顶的纵向位移中,弹性约束体系斜拉桥的结构响应均小于漂浮体系体系的结构响应。主塔塔顶的纵向位移峰值在漂浮体系下为1.292 9 m,弹性约束体系下峰值为0.857 3 m,减小了约33.7%、弹性限位体系的主塔塔顶纵向位移响应峰值是0.966 1 m,减幅为25.3%。

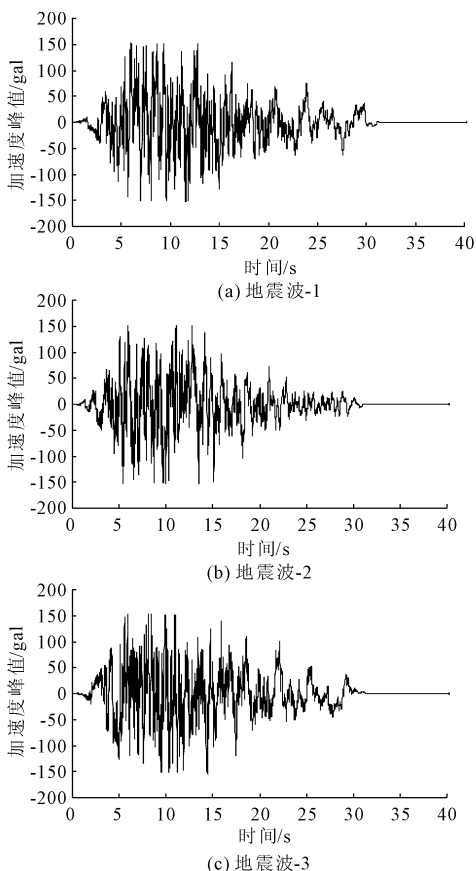


图6 地震波输入

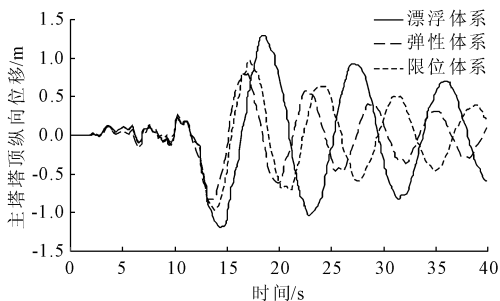


图7 主塔塔顶纵向位移

由于纵向弹性索的存在,使得结构塔梁之间相对的纵向位移以及塔顶的纵向位移得到了约束。塔梁之间相对变形的时程曲线对比见图 8。漂浮体系的塔梁之间纵向相对位移峰值为 1.170 0 m,弹性体系下峰值为 0.729 3 m,减幅约 37.7%,弹性限位体系的塔梁之间相对位移响应峰值为 0.808 0 m,减幅为 30.9%。在塔梁之间相对位移响应的时程曲线中可以看出,弹性限位体系的周期处于漂浮体系与弹性约束体系之间,这是因为当塔梁相对位移小于 0.2 m 时,弹性限位体系的结构体系实际上是漂浮体系,当塔梁之间相对位移大于 0.2 m 后,结构体系转变为弹性约束体系。处于两种体系之间的限位弹性约束体系在地震作用下,结构的自振周期等自身属性是在不断转变的。

漂浮体系斜拉桥主梁梁端位移在地震作用下响应较大,弹性约束体系正是由于在有效限制住主梁梁端位移的同时,对于主塔塔内的内力影响较小,而成为一种有效的减震体系。在图 9 主梁纵向位移响应的时程曲线对比图中可以看出,漂浮体系斜拉桥的主梁梁端位移峰值为 1.229 7 m,弹性约束体系的主梁梁端位移峰值 0.780 3 m,限位弹性约束体系的位移响应峰值为 0.874 9 m。从以上数据中可以看出,弹性约束体系对于减小主梁梁端位移的效果最为明显,优于弹性限位体系。

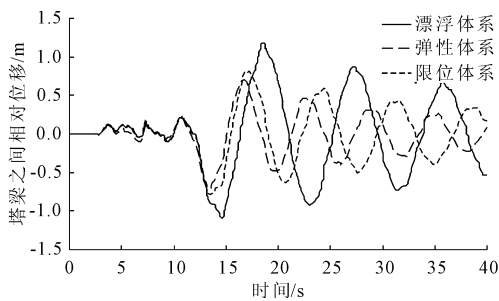


图 8 塔梁之间相对位移

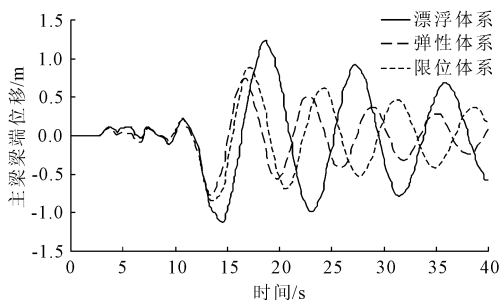


图 9 主梁梁端顺桥向的位移响应

对于大跨度斜拉桥而言,斜拉桥主塔的设计中主要由弯矩起控制作用,因此在有限元分析中对于

主塔塔底的弯矩时程曲线有必要进行相关的分析。由于漂浮体系、弹性约束体系以及弹性限位体系的主塔塔底弯矩的时程曲线图数据量较大,因此先对漂浮体系与弹性体系进行分析,而后对弹性体系与限位弹性体系进行分析。三种体系主塔塔底弯矩响应时程曲线见图 10、图 11。

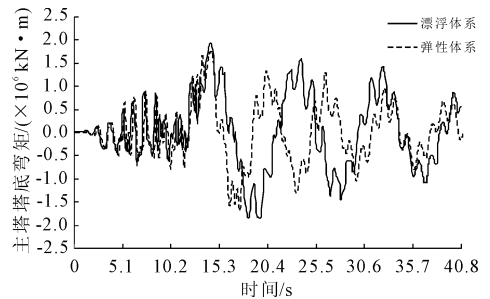


图 10 漂浮体系与弹性约束体系的主塔塔底弯矩时程曲线图

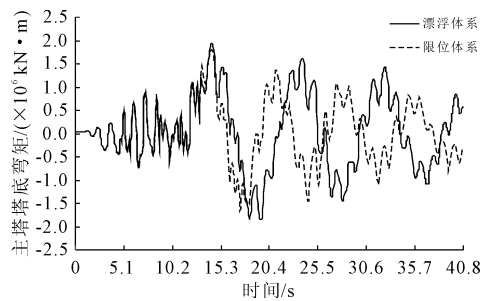


图 11 弹性约束体系与限位弹性约束体系的主塔塔底弯矩时程曲线图

在图 8 塔梁之间相对位移响应图中可以看出,在时间 0~10 s 这个范围内,漂浮体系的位移响应小于 0.2 m,因此在主塔塔底弯矩响应图中表现为漂浮体系与弹性限位体系在该时间范围内响应时程曲线高度重合。弹性约束体系与漂浮体系响应的时程曲线则有所不同。在时间 15 s 前后,此时塔梁之间相对位移已经超过 0.2 m,弹性限位体系与漂浮体系的响应时程曲线则不再重合,而是与弹性约束体系的响应时程曲线相近。在漂浮体系与弹性约束体系的时程曲线对比图中也可以看出,两种体系响应周期的不同。漂浮体系、弹性约束体系、弹性限位体系的主塔塔底弯矩响应的峰值分别为 1.95×10^6 kN·m、 1.78×10^6 kN·m、 1.80×10^6 kN·m,漂浮体系的弯矩响应峰值最大,其余两种体系的位移响应更小些,因此对于主塔塔内内力而言,弹性约束体系与弹性限位体系更具有优势。表 1 为三种体系斜拉桥斜拉桥关键节点的位移响应与截面内力响应峰值对比。

表 1 位移响应与截面内力响应峰值

地震响应	漂浮体系	弹性约束体系	限位弹性约束体系
塔顶纵向位移/m	1.2929	0.8573	0.9661
塔梁间相对位移/m	1.1700	0.7293	0.8080
主塔塔底弯矩/(kN·m)	1.95×10^6	1.78×10^6	1.80×10^6
主梁梁端位移/m	1.2297	0.7803	0.8749

图 12 为主塔塔身上各个节点在地震作用下纵向位移的最大值包络图,在图中可以明显看到,漂浮体系斜拉桥的主塔纵向位移最大,即在地震作用下主塔摆动的幅度最为明显。弹性约束体系的主塔塔身位移响应最小,弹性限位体系响应略大于弹性约束体系。由主塔塔身纵向位移也可以看出,纵向弹性索不仅约束了主梁在顺桥向上运动也约束了主塔塔身在顺桥向上的摆动。

图 13 为主塔塔身剪力包络图,可以看出,漂浮体系斜拉桥桥面系惯性力的传递途径主要通过斜拉索传递至主塔塔顶,之后传递至主塔桩基础,弹性约

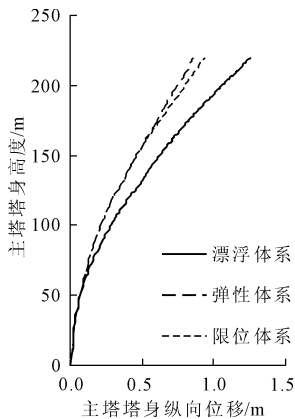


图 12 主塔纵向位移包络图

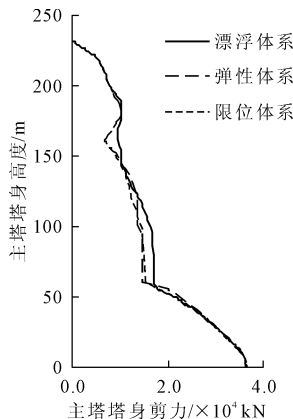


图 13 主塔塔身剪力包络图

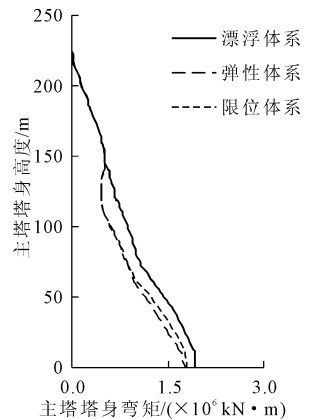


图 14 主塔塔身弯矩包络图

束体系除了通过塔顶传递以外还可以通过弹性索直接传递至主塔下部分。因此在剪力包络图图 13 中表现为漂浮体系斜拉桥在下横梁以上部位的剪力大于弹性约束体系的剪力响应。但不论是弹性约束体系还是漂浮体系,两种体系桥面系惯性力之和是近似的,在主塔剪力包络图中则表现为主塔塔底剪力值相近。

从图 14 主塔塔身弯矩包络图中可以看出,在主塔上横梁以上部分,三种体系的剪力相差不大,相同力臂的情况下,三种体系的弯矩响应较为接近。但是在上横梁处,弹性约束体系与弹性限位体系的剪力改变,以及漂浮体系在主塔上的剪力逐渐增大,因此漂浮体系的主塔弯矩响应越来越大。在主塔塔身弯矩包络图中可以看出,漂浮体系斜拉桥在上横梁以下部分的弯矩响应大于弹性约束体系与弹性限位体系。由以上三个包络图中可以看出,弹性约束体系与弹性限位体系相对于漂浮体系而言具有一定减震效果。

6 结 语

运用非线性时程分析方法考虑大位移、垂度效应、支座非线性等非线性因素,对漂浮体系、弹性约束体系、弹性限位体系进行分析得出以下结论。

(1) 根据背景桥梁安评报告提供的地震动激励,弹性约束体系与弹性限位体系均能减小塔梁相对位移及主梁梁端位移,且弹性约束体系效果相对更优。

(2) 弹性约束体系与弹性限位体系的主塔塔底弯矩响应优于漂浮体系,且前两种体系响应峰值相近。建议在类似背景下采用弹性约束体系或弹性纤维体系。

(3) 当地震动激励较小时,弹性限位体系相当

于漂浮体系,此时整体结构的受力跟漂浮体系相同。当地震动激励产生的塔梁之间相对位移超过限位装置的限位间距时,弹性限位体系斜拉桥的受力则与弹性约束体系斜拉桥类似,因此限位装置的设置对于弹性限位体系的受力有一定影响。

参考文献:

- [1] Nazmy A S, Abdel-ghaffar A M. Non-linear earthquake response analysis of long-span cable-stayed bridges: applications[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2010, 19(1):45-62.
- [2] Ren W X, Peng X L, Lin Y Q. Experimental and analytical studies on dynamic characteristics of a large span cable-stayed bridge[J]. Engineering Structures, 2005, 27(4):535-548.

(下转第 67 页)

(上接第 41 页)

- [3] 雷庆关,朱玉林.几何非线性对某大跨度斜拉桥动力响应影响分析[J].安徽建筑工业学院学报(自然科学版),2013,21(2):4-7.
- [4] 重庆交通科研设计院.公路桥梁抗震设计细则[M].北京:人民交通出版社,2008.
- [5] 陈策,钟建驰.三塔悬索桥中塔弹性纵向约束对结构设计的影响[J].公路,2012(6):1-4.
- [6] 王杰,李建中.不同纵向约束体系对三塔悬索桥地震反应影响研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2016,29(2):1-5.
- [7] 闫聚考,李建中,彭天波.弹性索参数对三塔悬索桥抗震性能影响研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2014,31(1):9-12.
- [8] 亢兴军,李小军.大跨飘浮体系斜拉桥减震控制研究[J].振动与冲击,2007,21(3):79-82.
- [9] 方圆,席进.地震作用下独塔斜拉桥抗震体系优化[J].公路,2015,33(5):56-60.
- [10] 何邵华.局域大空间复杂高层结构抗震失效机理分析[D].上海:同济大学,2008.
- [11] 陈永健,张超,许莉,等.考虑桩土效应的大跨度斜拉桥动力特性分析[C]//全国结构工程学术会议.福州,2012.
- [12] 许莉,郑旭霞.非一致地震激励下大跨斜拉桥的地震反应[J].福州大学学报(自然科学版),2013,41(4):528-533.
- [13] 汪里杰.基于有限元分析的砌体房屋加固整体性能的研究[D].武汉:武汉理工大学,2011.
- [14] Siringoringo D M, Fujino Y. Dynamic characteristics of a curved cable-stayed bridge identified from strong motion records[J]. Engineering Structures, 2007,29(8):2001-2017.