

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.06.001

H型斜拉桥桥塔横桥向结构抗震设计与分析

徐艳¹, 嵇冬冰², 王瑞龙¹

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092;

2. 江苏省交通规划设计院股份有限公司, 南京 210014)

摘要:在工程实际中,通常需要在满足静力需求的基础上大幅提高塔底和横梁截面的配筋率来满足斜拉桥桥塔在罕遇地震作用下既定的性能目标,这种做法不仅不够经济,同时也增加了下部桩基础的抗震需求。通过对H型桥塔斜拉桥桥塔结构设计参数进行研究,探讨了斜拉桥桥塔上横梁位置、塔柱-横梁刚度比、上横梁与塔柱的约束条件以及桥塔上横梁进入塑性的程度对斜拉桥桥塔横桥向地震响应的影响。结果表明:斜拉桥桥塔上横梁位置变化、横梁刚度变化以及考虑上横梁的屈服耗能均能改变桥塔横桥向的地震响应,但结果并不显著,而改变上横梁与塔柱的约束条件能显著降低桥塔的横桥向地震需求。

关键词:斜拉桥;桥塔;横桥向;抗震分析;抗震设计

中图分类号:TU352.1;U442.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)06-0001-07

Transverse Seismic Design and Analysis of an H Type Bridge Tower Cable Stayed Bridge

Xu Yan¹, Ji Dongbing², Wang Ruilong¹

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China;

2. Jiangsu Province Communications Planning and Design Institute Limited Company, Nanjing 210014, P. R. China)

Abstract: According to our current bridge seismic design codes, the bridge tower is explicitly required to remain almost elastic even under the excitation of occasionally happened earthquake. To achieve this seismic performance objective, usually the steel ratios of tower base and strut are required to satisfy the static loading demand and increase by a large margin as well in most engineering practices which leads to engineering inefficiency as well as a rising seismic demand for the substructure. Therefore, the structural design parameters including the location, the stiffness and the constrain condition of the strut with respect to the tower column of H shape tower were studied to explore their effect on the transverse seismic responses of cable-stayed bridge tower. Moreover, the effect of yield intensity of the strut on the seismic responses of the tower column is also studied. The results show that the location and the stiffness of the strut have a slight effect on the seismic responses while the transverse seismic demands of the bridge tower decrease drastically when the constrain condition between the cross beam and the tower column changes.

Key words: cable stayed bridges, bridge tower, transverse, seismic analysis, seismic design

作为最为广泛使用的大跨度桥型之一,斜拉桥的建设一般周期较长,工程投资也较大。其主要承

重结构的主塔一旦出现较为严重的损伤,震后修复比较困难,因而目前大部分已建斜拉桥即使在罕遇

收稿日期:2014-07-23

基金项目:973计划项目(2013CB036302);国家自然科学基金(51478338)

作者简介:徐艳(1976-),女,博士,副研究员,主要从事桥梁抗震研究,(E-mail)yanxu@tongji.edu.cn。

地震作用下也要求基本保持弹性^[1]。基于安全考虑,欧洲规范^[2]要求,在设计地震作用下,斜拉桥桥塔保持弹性工作状态。中国《城市桥梁抗震设计规范》^[3]也规定在 E2 地震作用下,主塔等重要结构受力构件可发生局部轻微的损伤,震后不需修复或简单修复可继续使用。中国已建和在建的绝大部分大跨度斜拉桥在进行抗震设计时均满足这一抗震性能目标要求,在罕遇地震作用下桥塔基本保持弹性,如有塑性发生,也通常认为是在边墩或者辅助墩处^[4-5],其实在强震作用下,桥塔也有可能先于边墩和辅助墩屈服^[6]。但更重要的是,在斜拉桥抗震设计的工程实践中发现,为满足桥塔结构保持基本弹性的性能目标,通常满足静力需求的塔底截面需要大幅度增设纵向主筋来满足罕遇地震需求,而在横桥向由于框架效应,除此之外横梁的配筋率也要从满足构造要求的 0.8% 提高到 1.5% 左右;同时,该塔底截面弯矩及水平地震力将传递到下部基础,使得对下部基础的抗震要求也相应提高了,显然仅仅为满足罕遇地震需求而几乎翻倍地增加钢筋用量对于桥塔和群桩基础而言都相当不经济。另一方面,已有学者对斜拉桥、悬索桥的桥塔进行了大量的弹塑性理论分析^[7-12],在近年来新建的一些大跨度桥

梁中有的通过塔身设置耗能构件保证桥塔在强震下仍处于弹性状态,如新奥克兰海湾大桥^[13];有的在强震下允许桥塔进入塑性,在一定程度上利用桥塔的塑性能力,如 Tacoma 桥^[14]和 Rion-antirion 桥^[15],这些都是对大跨度斜拉桥抗震设计的有益促进和尝试。

笔者通过对某中等跨度斜拉桥的 H 型混凝土桥塔设计参数进行研究,探讨了斜拉桥桥塔上横梁位置、塔柱-横梁刚度比以及上横梁与塔柱的约束条件对斜拉桥桥塔横桥向地震响应的影响,并分析桥塔上横梁进入塑性的程度对桥塔其他主要构件地震反应的影响,提出通过桥塔结构参数的设计降低桥塔的横桥向地震需求的新思路。

1 工程背景及计算模型

选用的工程背景是一座三跨钢-混凝土混合梁连续梁斜拉桥,主桥跨径 640 m,跨径布置为 130 m+380 m+130 m,桥面宽 38.7 m。主梁采用流线型扁平封闭箱梁,主塔为“H”型混凝土塔,辅助墩、过渡墩均采用 C40 混凝土墩柱。其中,主塔墩号为 M3 和 M4,辅助墩墩号为 M2 和 M5,过渡墩墩号为 M1 和 M6,总体布置及桥塔结构如图 1、2 所示。

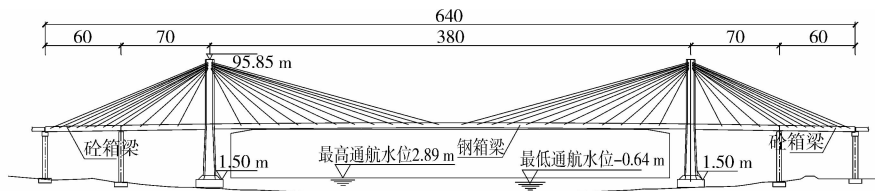


图 1 总体布置图

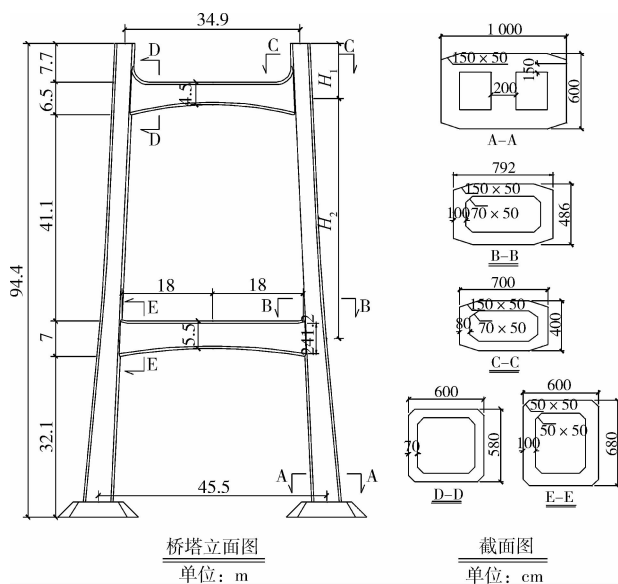


图 2 桥塔结构图

图 2 中 H_2 表示中塔柱的高度, H_1 为上塔柱高度。

建立空间动力分析有限元模型(图 3)时,主梁、主塔、辅助墩、边墩采用梁单元模拟,斜拉索采用桁架单元模拟,为简化分析,将各承台模拟为带质量的质点,并在其底部固结,即不考虑基础的影响;塔梁、辅助墩-梁和边墩-梁之间的约束条件在竖向均约束,纵桥向均自由,在横桥向仅塔梁之间约束。

2 地震动参数的选取

针对研究的具体内容,分别进行结构的反应谱和时程地震反应分析。考虑到计算结果与该桥的实际工程抗震设计相结合,首先选定一条由场地安评报告提供的罕遇地震作用下的场地人工波作为分析的时程输入,同时为使分析具有普遍性,另选一条抗震研究常用的实际地震纪录 El-centro 波作为时程

输入,如图4所示。图5给出了罕遇地震作用下的场地设计加速度反应谱曲线及场地人工波和 El-centro 波对应的反应谱曲线。

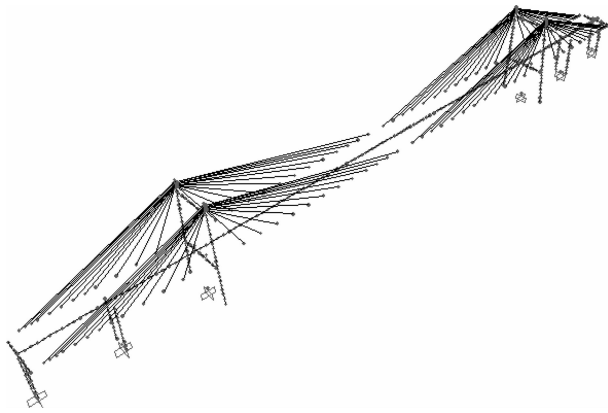


图3 动力分析模型

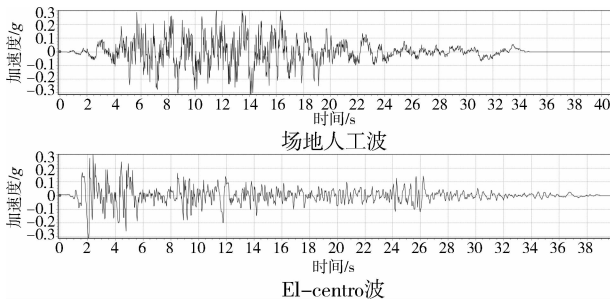
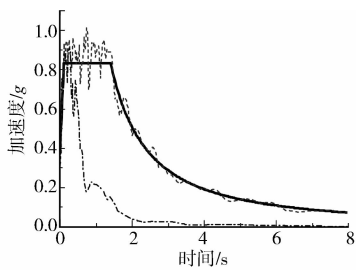


图4 地震波时程曲线



注: —设计加速度反应谱 ---现场波 ---El-Centro

图5 反应谱曲线

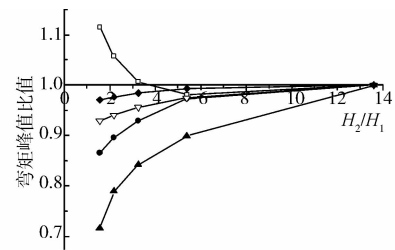
3 桥塔设计参数的影响

选取的桥塔设计参数包括梁柱相对位置、上下横梁的刚度以及横梁与塔柱的约束条件,考虑前两个参数的变化范围大、计算量大,且从工程初步抗震设计的角度出发,通常这个阶段仅需对结构进行反应谱分析,因此主要采用弹性反应谱进行计算分析,但为进一步说明塔柱约束条件的变化对地震响应的影响,对此参数的影响同时也进行了弹性时程计算分析。

3.1 梁柱相对位置变化

所选斜拉桥拉索的布置集中于塔柱顶部较小的

范围内,上横梁的布置偏上。斜拉桥横桥向的分析结果表明:相对下横梁,上横梁的地震响应相对较小。拟通过将上横梁下移的方式改变桥塔结构的地震响应分配。应用设计反应谱计算横桥向的地震响应,以中塔柱和上塔柱高度比值 H_2/H_1 为参变量,探讨桥塔关键截面弯矩峰值的变化,如图6所示,图中 SHL 为图2桥塔结构图中的 D-D 截面,XHL 为 E-E 截面,TZ-1 为 A-A 截面,TZ-2 为 B-B 截面,TZ-3 为 C-C 截面。



注: —□—SHL —●—XHL —▽—TZ-1 —▲—TZ-2 —◆—TZ-3

图6 桥塔关键部位弯矩变化

由图6可知,随着上塔柱的下移,塔柱和下横梁的弯矩峰值均降低了,而上横梁的弯矩有所增加。当 H_2/H_1 达到 1.6 时,塔底弯矩减少 7%,下横梁端部弯矩减少 13.4%,上横梁端部弯矩增加 11.5%。

另一方面,通过桥塔的静力稳定分析可知:随着上横梁位置的向下移动,对控制索塔稳定的一阶屈曲因子影响较小,主要原因为桥塔上横梁位置偏上,适当的下移对桥塔稳定影响并不大。当上横梁端部的竖向约束解除,桥塔的一阶屈曲因子显著降低,但仍然满足静力稳定的要求。

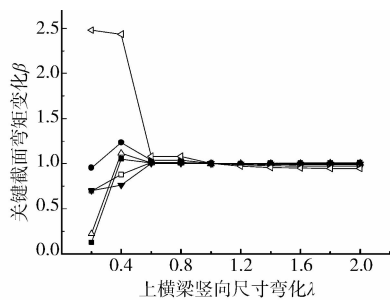
对工程实践而言,桥塔上横梁的位置受到斜拉索锚固区的限制,能够上下移动的空间有限,因而在不影响拉索锚固的情况下,选择适当的上横梁位置可以一定程度改善斜拉桥横桥向的抗震性能。在满足静力设计要求又不影响桥塔外观的情况下,该桥可将中塔柱和上塔柱高度比 (H_2/H_1) 控制在 2.0 左右。

3.2 上、下横梁的刚度变化

斜拉桥的横桥向类似一个门式框架,受到框架效应的影响,在横桥向地震作用下,横梁也是一个易损部位,横梁和塔柱之间的刚度比将会影响地震引起的横向弯矩在塔-梁之间的分配。因此拟通过调整桥塔与横梁各单元的相对刚度的方式探讨其对桥塔的地震响应的影响。一方面,改变桥塔上、下横梁的刚度将影响桥塔的横桥向抗推刚度,从而影响斜拉桥横桥向的动力特性;另一方面,根据结构力学基

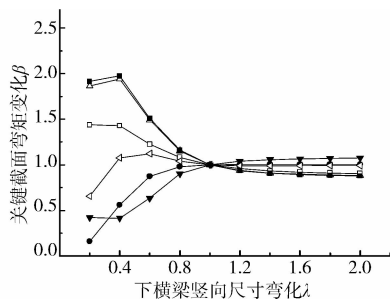
本原理,某构件刚度变大其分配的弯矩也较大,相应的其他部位分配的弯矩变小,在进行抗震设计时可以借鉴这种内力分配原则。

基于以上两方面,考虑到塔柱作为桥塔的主要受力结构,在保证桥塔塔柱不变的情况下,通过调整上下横梁刚度的方式,利用设计反应谱加速度对全桥横桥向进行反应谱分析,以调整后的截面竖向高度与原桥截面竖向高度的比值 λ 为变量,得出地震作用下截面尺寸变化后与变化前桥塔关键截面弯矩比值 β (其中正值表示调整后的地震反应增加了,反之为负),如图 7、图 8 所示,其中关键截面位置如图 2 所示。



注: \triangle -SHL \bullet -XHL \square -TZ-1 \blacktriangledown -TZ-2 \diamond -TZ-3 \blacksquare -TZ-4

图 7 度变化对弯矩影响



注: \triangle -SHL \bullet -XHL \square -TZ-1 \blacktriangledown -TZ-2 \diamond -TZ-3 \blacksquare -TZ-4

图 8 下横梁刚度变化对弯矩影响

由图 7 可知,当上横梁竖向高度参数值 λ 在 0.6~2.0 范围内,桥塔上横梁刚度对斜拉桥横向动力特性的影响可以忽略,桥塔关键截面的弯矩值变化很小;当上横梁竖向高度参数值 λ 达到 0.2 时,塔柱和下横梁关键截面弯矩均降低,其中塔底弯矩降幅达 31%。但是过大的改变上横梁尺寸将导致上横梁很难满足静力设计要求,所以上横梁尺寸在合理范围变化时,对桥塔其他部位地震响应的影响不大。

由图 8 可知,当下横梁竖向高度参数值 λ 增加时,截面 TZ-1 和 SHL 弯矩降低,而与下横梁连接的 TZ-2 和 TZ-3 弯矩均增加,当 λ 值取 2 时塔底弯矩降低了 9.5%;当下横梁竖向高度参数值 λ 降低时,塔底和上横梁截面弯矩均增加,所以降低下横梁的

刚度不能改善桥塔横桥向抗震性能。

通过对上、下横梁刚度变化对桥塔地震响应影响的分析可知,上横梁对桥塔横向地震响应的影响较小,而下横梁的影响相对较大。计算结果表明,本桥的桥塔横梁尺寸设计是比较合理的,但考虑到上横梁的抗震需求较小而下横梁的抗震需求较大,适当降低上横梁的竖向高度和增加下横梁的竖向高度对本桥横桥向抗震更有利。

3.3 梁柱约束条件变化

如前所述,考虑到桥塔横向的框架效应,横梁端部与塔柱相接部分一般箍筋会局部加密形成结点,而在横桥向地震输入下成为易损部位,拟通过解除上横梁与塔柱的竖向转动约束(考虑到约束条件的改变会引起比较大的地震响应的改变,除了由反应谱计算得到的最大值响应外,尚需地震响应随时间历程的变化量,因此在反应谱计算结果的基础上,还输入了加速度幅值均为 0.3g 的场地人工波和 Elcentro 进行线性时程计算分析),研究上横梁端部约束连接方式的改变对斜拉桥横桥向地震反应的影响。

图 9 为沿塔柱高度方向的轴力和弯矩分布图,由图可见,将上横梁与塔柱的约束由固结变为铰接后,实际上相当于释放了上横梁与上塔柱的转动约束,使桥塔的框架效应如图 2 所示从上横梁-中塔柱-下横梁区域移到下横梁-下塔柱-塔底区域,因此在横桥向地震波输入下,截面弯矩峰值从中塔柱顶至中塔柱底逐渐增加,在中塔柱底部(TZ-3)达到最大值,与原桥塔的弯矩峰值分布曲线相差比较大,而下塔柱弯矩峰值分布曲线与原桥塔基本保持一致。

由于约束条件的改变,桥塔整体框架效应的削弱,弯矩峰值均有不同程度降低。在场地人工波横桥向输入下,相比原桥结构中塔柱的弯矩值增大, TZ-3 截面弯矩峰值增幅为 155.2%,对于下塔柱,下塔顶截面(TZ-2)和塔底截面(TZ-1)弯矩峰值分别降低了 45.6% 和 38.6%,塔底轴力幅值下降 36.3%;在 El-centro 波横桥向输入下, TZ-3 截面弯矩峰值增幅为 34.9%,对于下塔柱,下塔顶截面(TZ-2)和塔底截面(TZ-1)弯矩峰值分别降低了 39.7% 和 12.7%,塔底轴力幅值降幅超过 50%。

以塔底截面为例,图 10 和图 11 为在场地人工波和 El-centro 波作用下,上横梁端部不同约束条件对应的塔底结构响应时程曲线的比较,可以明显看出约束条件对地震响应时程的影响。

综上所述,通过改变桥塔上横梁与塔柱的约束条件能够显著降低桥塔横桥向的地震需求,但塔柱和横梁梁端铰接的方式在工程中是否可行,还有待

继续研究。

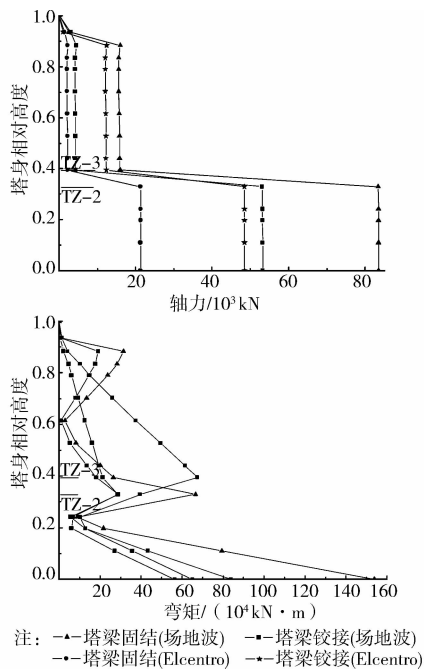


图 9 塔柱内力分布

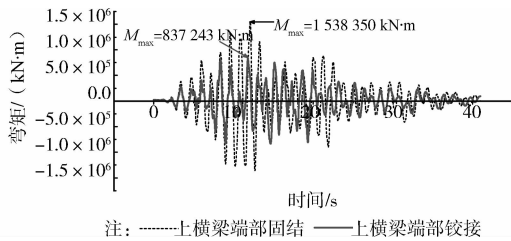


图 10 场地人工波作用下塔底弯矩时程曲线比较

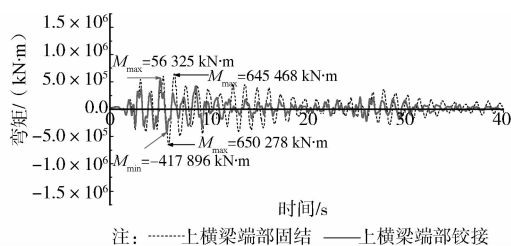


图 11 El-centro 波作用下塔底弯矩时程曲线比较

4 上横梁屈服程度的影响

由于缺乏对斜拉桥在地震作用下的损伤和破坏过程的基础研究,目前对斜拉桥的主塔结构依然按照弹性理论计算,其塑性耗能机制并不明确。针对斜拉桥 H 型桥塔横桥向的地震响应,考虑到上横梁(HL-1)本身并不是能力保护构件,其发生损伤后对结构的整体影响相对较小,因此在条件许可的情况下,应尽量使桥塔结构的塑性铰发生在上横梁的两端,并研究其屈服的程度对桥塔横桥向地震响应的影响。

采用 IDA 方法分别对斜拉桥进行线性和非线性时程分析,首先进行线性时程分析,保证斜拉桥全桥始终保持在弹性范围,计算桥塔关键截面的地震响应;然后,在上横梁端部增设 PMM 铰,桥塔其他部位始终保持弹性,进行非线性时程计算,观察上横梁进入塑性的程度对桥塔其他关键部位地震响应的影响。对于构件塑性行为的模拟,文献[6]中作了详细的对比,笔者选用 SAP2000 中的纤维 PMM 铰来模拟构件的非线性行为,纤维 PMM 铰单元通过纤维的应力-应变关系建立截面的弯矩-曲率关系。钢筋材料模型基于考虑应变硬化的多线性模型,其骨架曲线如图 12 所示,主要包括线弹性阶段、屈服平台段和应变强化段 3 部分。混凝土材料均采用非约束混凝土,其骨架曲线如图 13 所示。

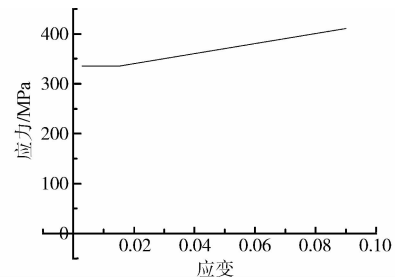


图 12 钢筋骨架曲线

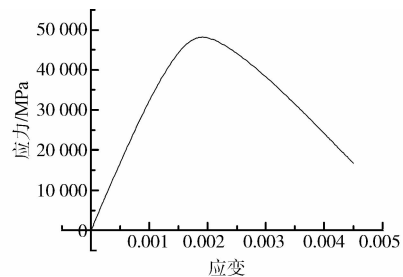


图 13 混凝土骨架曲线

计算得到在场地人工波 (PGA = 0.3g) 作用下上横梁梁端弯矩-转角关系曲线,如图 14 所示。

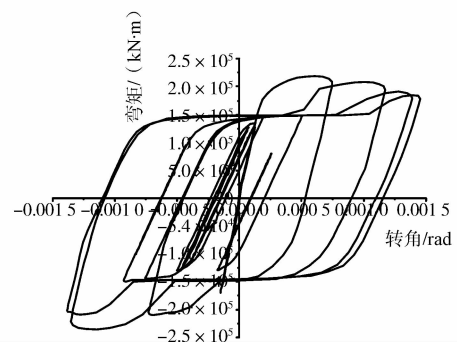


图 14 上横梁梁端截面弯矩-转角曲线

计算结果表明,在场地人工波作用下,当 PGA 为 $0.1g$ 和 $0.2g$ 时,上横梁保持弹性,桥塔其他关键部位的反应与线性时程分析结果一致;当 PGA 达到 $0.3g$ 时,上横梁进入塑性,随着 PGA 的增加,上横梁进入塑性的程度不断加大,桥塔的其他关键部位(TZ-1、TZ-1、TZ-3)的弯矩峰值相对同等级 PGA 的线性时程计算的弯矩峰值不断减小,见图 15(a)。当 PGA 达到 $1.0g$ 时,相对于线性分析结果,上横梁和塔底弯矩分别减少约 25% 和 30%;在 El-centro 波作用下,当 PGA 保持在 $0.3g$ 以内时,上横梁保持弹性,桥塔其他关键部位的反应与线性时程分析结果一致;当 PGA 达到 $0.4g$ 时,上横梁进入塑性,随着 PGA 的增加,上横梁进入塑性的程度不断加大,桥塔的其他关键部位(TZ-1、TZ-1、TZ-3)的弯矩峰值相对同等级 PGA 的线性时程计算的弯矩峰值不断减小,见图 15(b)。当 PGA 达到 $1.0g$ 时,相对于线性分析结果,上横梁和塔底弯矩分别减少了约 20% 和 15%。

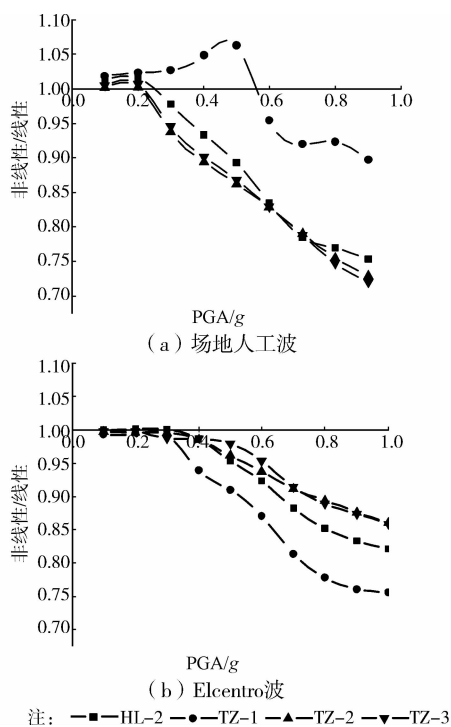


图 15 地震波作用下线性结果与非线性结果比较

上述分析表明,当上横梁进入塑性的程度较小时,其对下横梁和塔底的弯矩影响较小;随着 PGA 的提高,当上横梁进入塑性的程度不断增大时,其对下横梁和塔底的弯矩影响越来越大,但同时当 PGA 很大时,下横梁和塔底弯矩的绝对值也将达到一个很大的值,在实际工程中很难满足基本弹性的性能目标,也即意味着仅通过上横梁的屈服耗能改善斜

拉桥的横桥向抗震性能效果并不明显。

5 结论

通过对某中等跨度的 H 型混凝土斜拉桥的桥塔设计参数的研究,探讨了斜拉桥桥塔上横梁位置、塔柱-横梁刚度比、上横梁与塔柱的约束条件以及上横梁屈服程度对斜拉桥桥塔横桥向地震响应的影响,并提出通过桥塔结构参数的设计降低桥塔的横桥向地震需求的新思路,研究结果表明:

1) 在满足静力设计的基础上,选择适当的上横梁位置可以一定程度的降低桥塔横桥向地震需求,相比下横梁,上横梁的抗震需求较小,适当降低上横梁的竖向高度和增加下横梁的竖向高度对 H 型混凝土桥塔的抗震更有利。

2) 通过改变桥塔上横梁与塔柱的约束条件能够显著降低由地震引起的桥塔塔柱的横桥向地震响应。

3) 上横梁的屈服程度对下横梁和塔底的弯矩有一定的影响,且随着屈服程度的增大影响也越大,但仅通过上横梁的屈服耗能降低斜拉桥桥塔的横桥向地震弯矩的效果并不明显。

参考文献:

- [1] JTG/T B02-01-2008 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京:人民交通出版社,2008.
- [2] Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance of structures(draft for development), part 2. Bridges [S]. 1998
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ 166-2011 城市桥梁抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [4] 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. Lateral constraint systems for super-long-span cable-stayed bridge [J]. China Journal of Highway and Transport,2007,20(2):63-67.
- [5] 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]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2012, 32(1):86-92.
- [6] 徐艳,段昕智,李建中. 强震作用下斜拉桥纵桥向非线性地震反应分析[J]. 华南理工大学学报,2012, 40(6):

- 132-138.
- Xu Y, Duan X Z, Li J Z. Analysis of nonlinear seismic response of cable-stayed bridge subjected to longitudinal strong ground motions [J]. Journal of South China University of Technology, 2012, 40(6):132-138.
- [7] Okamoto Y, Nakamura S. Static and seismic studies on steel/concrete hybrid towers for multi-span cable-stayed bridges [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(2):203-210.
- [8] Camara A, Astiz M A. Pushover analysis for the seismic response prediction of cable-stayed bridges under multi-directional excitation [J]. Engineering Structures, 2012, 41:444-455.
- [9] Endo K, Kawatoh C, Unjoh S. Analytical study on seismic performance evaluation of long-span suspension bridge steel tower [C]//13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, BC, Canada, 2004, No. 944.
- [10] Goel R K, Chopra A K. Nonlinear analysis of ordinary bridges crossing fault-rupture zones [J]. Journal of Bridge Engineering, 2009, 14(3):216-224.
- [11] Son J, Lee H J. Performance of cable-stayed bridge pylons subjected to blast loading [J]. Engineering Structures, 2011, 33(4):1133-1148.
- [12] Thai H T, Kim S E. Second-order inelastic analysis of cable-stayed bridges [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2012, 53:48-55.
- [13] Mcdaniel C C, Seible F. Influence of inelastic tower links on cable-supported bridge response [J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(3):272-280.
- [14] Arzoumanidis S, Shama A A, Marlow S J, et al. The new Tacoma Narrows Suspension Bridge: critical issues in seismic analysis and design [C]//Proceedings of the 2005 Structures Congress and the 2005 Forensic Engineering Symposium, 2005:21-31.
- [15] Combault J, Teyssandier J P. The Rion-Antirion bridge: concept, design and construction [C]//Proceedings of the 2005 Structures Congress and the 2005 Forensic Engineering Symposium, 2005:149-158.

(编辑 胡英奎)