

文章编号:1673-2049(2018)04-0019-08

基于 ANSYS 的大跨斜拉桥地震响应分析及性能评估

赵人达¹, 许智强¹, 邹建波¹, 贾毅¹, 李福海^{1,2}

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学 陆地交通地质灾害防治技术国家工程实验室, 四川 成都 610031)

摘要:为研究西部高烈度地区大跨度斜拉桥的地震响应特点,以兰州市南绕城高速公路上一座跨径为177 m+360 m+177 m的结合梁斜拉桥为研究对象,利用有限元软件 ANSYS 建立其空间计算模型,分析了该桥的动力特性。运用非线性时程分析法计算桥梁结构在50年超越概率10%和2%两种地震水平作用下的地震响应,并以构件的能力需求比评估了该桥的抗震性能。结果表明:地震作用下主梁纵向振动与横向振动基本不耦合,其竖向位移受纵向地震作用影响较大;由于结构的非对称性,5#塔(南桥塔)的塔顶位移及塔底弯矩均大于4#塔(北桥塔);在E1和E2两种水平地震作用下,各桥墩和桥塔关键截面以及斜拉索最小能力需求比均大于1,满足抗震性能要求;各桥墩纵向能力需求比小于横桥向,而桥塔纵向能力需求比大于横桥向,建议在过渡墩和辅助墩上安装减隔震装置,加强其纵向抗震性能。

关键词:斜拉桥;地震响应分析;非线性时程分析法;动力特性;弯矩曲率;能力需求比

中图分类号:U448.27 **文献标志码:**A

Seismic Response Analysis and Performance Evaluation of Long-span Cable-stayed Bridge Based on ANSYS

ZHAO Ren-da¹, XU Zhi-qiang¹, ZOU Jian-bo³, JIA Yi¹, LI Fu-hai^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. National Engineering Laboratory for Technology of Geological Disaster Prevention in Land Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: In order to study the seismic response characteristics of the long-span cable-stayed bridge in the western high-intensity area, a long-span cable-stayed bridge with span of 177 m+360 m+177 m on Lanzhou south bypass expressway was taken as study object. The spatial dynamic model was established by finite element software ANSYS, the dynamic characteristics of the bridge were analyzed. The nonlinear seismic time-history analysis was used to calculate the seismic response of bridge structure under the 50-year probability of over 10% and over 2%. Besides, the seismic performance of the bridge was evaluated by the capacity demand ratio method. The results show that the longitudinal vibration of the main girder is not coupled with the lateral vibration under the earthquake. The vertical displacement of the main girder is greatly influenced by the longitudinal seismic action. Due to the asymmetry of the structure, the tower top displacement and the bottom bending moment of the tower 5 (south bridge tower) are all

收稿日期:2018-01-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51308471);国家重点研发计划项目(2016YFB1200401,2017YFB1201204);

广东省交通厅科技计划项目(2014-02-015)

作者简介:赵人达(1961-),男,贵州毕节人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:rendazhao@163.com。

通信作者:李福海(1979-),男,河北唐山人,高级工程师,工学博士,E-mail:qixingye2003@163.com。

larger than those of the tower 4 (north bridge tower). Under the two kinds of horizontal earthquakes of E1 and E2, the minimum capacity demand ratios of the key sections of piers and towers and the cables are greater than 1, and the seismic performance requirements are met. The longitudinal capacity demand ratio of piers is smaller than transverse ratio, while the longitudinal capacity demand ratio of bridge tower is larger that transverse ratio. It is recommended to install the anti-seismic device on the transition pier and the auxiliary piers to strengthen the longitudinal bridge seismic performance.

Key words: cable-stayed bridge; seismic response analysis; nonlinear time-history analysis method; dynamic characteristic; moment curvature; capacity demand ratio

0 引言

中国西部山区具有地质环境复杂、地震烈度普遍较高、场地效应突出等特点,对大跨斜拉桥结构地震响应影响较大。对于西部地区建设大跨斜拉桥工程,其抗震设计中仍然存在许多亟待解决的问题^[1-4]。鉴于大型桥梁工程在国民经济发展中的重要地位,以及国内外惨重的地震灾害教训,对重大工程开展地震响应分析及性能评估是十分必要的。

目前,国内外学者针对斜拉桥抗震进行了大量的研究,主要针对抗震体系、随机地震的模拟及减隔震装置等方面,并取得了一定的研究成果^[5-7]。徐凯燕等^[8]对武汉军山长江大桥进行一致激励和非一致激励下的抗震性能分析;夏修身等^[9-10]通过增量动力分析探讨了大跨双塔斜拉桥桥塔的非线性抗震性能;方圆等^[11]运用设计反应谱法研究不同纵向、横向约束体系对独塔斜拉桥抗震性能的影响;阮怀圣等^[12]采用动力时程法研究不同抗震支承体系下黄冈公铁长江大桥的地震响应。以上研究的对象大多数为东部地区桥梁,而关于西部高烈度区大跨径斜

拉桥地震响应及其性能评估的研究较少。
本文以西部山区大跨结合梁斜拉桥西固黄河大桥为实例,基于 ANSYS 软件建立了有限元模型,采用非线性时程分析法研究墩塔和主梁各关键点的内力及位移,并运用构件能力需求比评估了该桥的抗震性能。

1 工程背景及动力分析模型

1.1 工程概况

西固黄河大桥位于兰州市南绕城高速公路上,跨越黄河及兰新铁路,是一座半漂浮双塔工字钢-混凝土结合梁斜拉桥,跨径 177 m+360 m+177 m,左右边跨各设置 1 个辅助墩和 1 个过渡墩,其中 4# 桥塔塔高 147 m,5# 桥塔塔高 151 m,属于非对称结构,是西北地区在黄河上跨度最大、塔身最高的斜拉桥,图 1 给出了西固黄河大桥总体布置图。斜拉索采用镀锌低松弛平行钢丝束,单塔 28 对斜拉索按空间双索面布置。主梁采用 Q370qD 工字钢叠合 C55 混凝土板构成,梁高 2.83 m,桥面宽 24.5 m,主梁断面如图 2 所示。

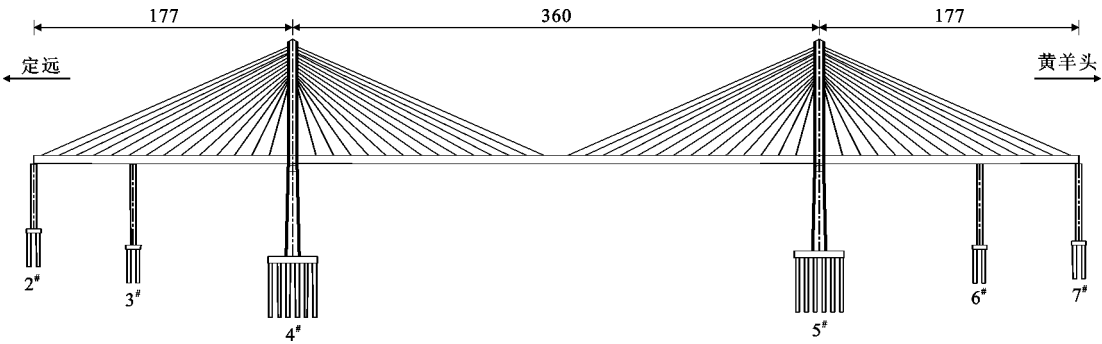


图 1 西固黄河大桥总体布置(单位:m)

Fig.1 General Arrangement of Xigu Yellow River Bridge (Unit:m)

1.2 有限元模型

采用 ANSYS 建立全桥空间有限元模型,如图 3 所示。桥塔、桥墩及主梁采用空间梁单元模拟,斜

拉索采用桁架单元模拟,考虑斜拉索的垂度效应,使用 Ernst 公式^[13]对其弹性模量进行修正。主梁为工字钢-混凝土结合梁,在建模时对主梁截面进行换

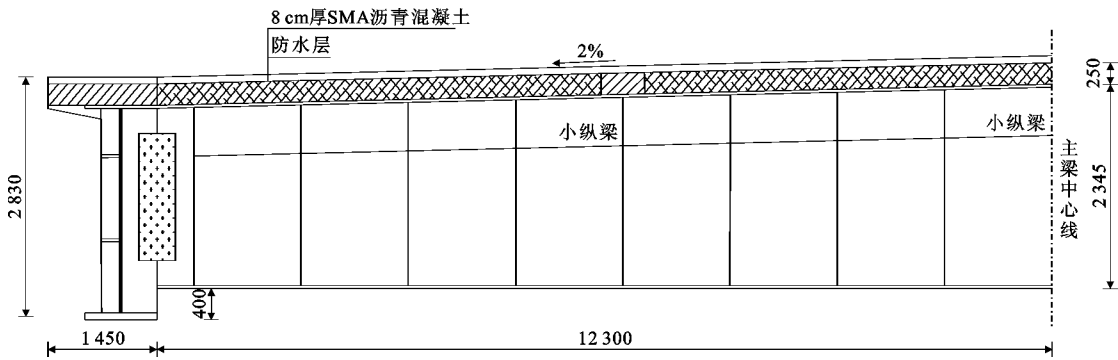


图 2 半主梁断面 (单位: mm)

Fig. 2 Semi-girder Section (Unit: mm)

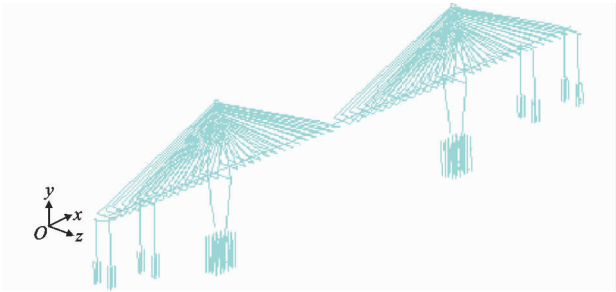


图 3 西固黄河大桥有限元模型

Fig. 3 Finite Element Model for Xigu Yellow River Bridge

算,即将混凝土截面等效为具有相同质量和刚度的钢截面。考虑桩土相互作用对结构的影响,桩土相互作用采用等效土弹簧模拟,等效土弹簧的刚度采用 m 法计算^[14],模型中承台与墩底、承台与桩顶采用刚性连接,支座采用弹簧单元 Combin40 进行模拟,模型边界条件如表 1 所示。

表 1 模型边界条件

Tab. 1 Model Boundary Conditions

位置	x	y	z	R_x	R_y	R_z
过渡墩-梁	0	1	1	1	1	0
辅助墩-梁	0	1	0	1	0	0
塔-梁	0	1	1	1	0	0
桩底	1	1	1	1	1	1

注: x, y, z 分别为纵桥向、竖向、横桥向的平动自由度; R_x, R_y, R_z 分别为纵桥向、竖向、横桥向的转动自由度; 1 表示约束; 0 表示自由。

在桥塔下横梁与主梁间沿纵桥向布置液体黏滞阻尼器,每个桥塔布置 2 个液体黏滞阻尼器,全桥共布置 4 个。液体黏滞阻尼器的控制参数包括阻尼系数和阻尼指数。阻尼器恢复力特性如图 4 所示,当速度指数 $\xi=1$ 时,其恢复力曲线形状近似椭圆,当 $\xi<1$ 时,其恢复力曲线形状趋近于矩形^[15-16]。

液体黏滞阻尼器采用 Combin37 单元进行模拟,Combin37 单元称为控制单元,是一种具有开关

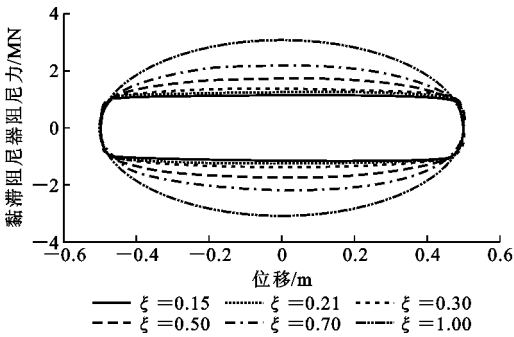


图 4 阻尼器滞回曲线与速度指数关系

Fig. 4 Relationship Between Hysteresis Curves and Velocity Index of Damper

功能的单向单元^[17],可用速度的函数控制阻尼,该单元为非线性一维单元,有 2 个活动节点和 2 个控制节点,整个单元的非线性行为主要由控制节点产生,本文以控制节点的相对位移作为阻尼器的冲程。

1.3 动力特性分析

利用结构动力分析中的多重 Ritz 向量法计算模型的动力特性,表 2 列出了该桥的基本周期及振型特征。由表 2 可知,结构基频为 0.171 3 Hz,基本周期为 5.838 s,属于长周期柔性结构。主桥 1 阶振型为主梁纵飘+反对称竖弯,2,3 阶为主梁侧弯,说明主梁纵桥向刚度较小且低于横桥向刚度。此外,桥墩在 4,5,7 阶中出现振型密集情况,频率非常接近,表现为各墩的纵向弯曲,在桥梁抗震设计中应引起重视。

2 地震动输入及地震响应分析

2.1 地震动输入

根据文献[18]提供的资料,西固黄河大桥桥区普遍经受着不同程度的喜马拉雅后期的差异性升降作用,对大桥区影响较大的主要是庄浪河断裂带和金城关断裂带,其场地基本地震动峰值加速度为

表 2 结构动力特性

Tab. 2 Dynamic Characteristics of Structure

阶次	频率/Hz	振型特征
1	0.171 3	主梁 1 阶纵飘+反对称竖弯
2	0.359 5	主梁 1 阶正对称侧弯
3	0.425 6	主梁 1 阶反对称侧弯
4	0.530 2	7# 墩纵向弯曲
5	0.582 4	6# 墩纵向弯曲
6	0.585 4	主梁 2 阶正对称侧弯
7	0.593 2	3# 墩纵向弯曲
8	0.652 3	主梁 1 阶正对称竖弯
9	0.709 3	2# 墩纵向弯曲
10	0.815 7	主梁 1 阶反对称竖弯

0.2g(g 为重力加速度),场地条件为Ⅱ类,特征周期 $T_g=0.4\text{ s}$ 。E1,E2 地震作用分别取 50 年超越概率 10%、50 年超越概率 2%的地震。对于复杂桥梁,非线性时程分析可以准确地考虑支座的非线性,并且给出了桥梁结构在地震动作用下的实时变化曲线,使结构抗震计算的分析结果更加符合实际情况。本文中采用规范设计水平加速度反应谱为目标拟合的人工地震波进行抗震计算。

利用反应谱转人工波程序将上述不同概率水准下的水平加速度反应谱转化为 3 条人工地震波。在动力分析过程中,时间步长一般应小于模型自振周期的 1/10,当时间步长取为模型自振周期的 1/50 时,计算结果的误差可以忽略^[19]。本文取时间步长为 0.01 s,分 4 000 个荷载步,计算总时长为 40 s。基于人工波时程曲线的反应谱与设计水平加速度反应谱对比如图 5 所示,可见两者吻合度较好,可用于抗震计算^[20]。

2.2 非线性时程分析

计算分析中考虑水平向地震动与竖向地震动共同作用,分 2 种工况进行模拟:工况 1 为纵向+竖向地震动输入;工况 2 为横向+竖向地震动输入,竖向地震动输入取 0.65 倍的水平向地震动。取 3 条波中地震响应的最大值作为桥梁地震反应结果,分析中不考虑行波效应影响。主梁位移响应及塔顶位移如图 6,7 所示,其中 x,y,z 分别为纵桥向、竖向、横桥向地震作用。墩底弯矩响应如图 8 所示,其中,塔顶位移与墩底弯矩取纵桥向与横桥向地震响应的合成值。

由图 6 可知,E1,E2 地震作用下主梁纵向位移峰值较横向和竖向位移峰值大,且 E2 纵向地震波作用的主梁纵向位移峰值增加幅度小于 E1 纵向地震波。造成这一差异主要是由于液体黏滞阻尼器在

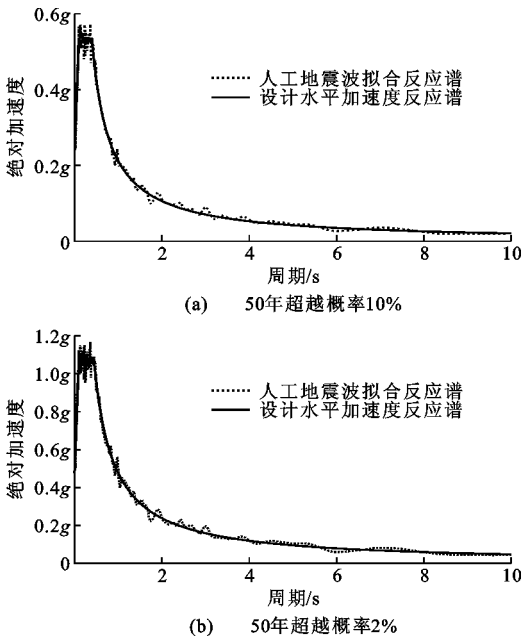


图 5 人工地震波拟合反应谱与设计水平加速度反应谱对比
Fig. 5 Comparison Between Fitting Response Spectra Based on Artificial Seismic Wave and Designed Horizontal Acceleration Response Spectrum

E2 地震波作用下限制了梁端位移。在纵向+竖向地震作用下,主梁纵向位移远大于横向位移,横向位移几乎为 0,而在横向+竖向地震作用下,主梁横向位移远大于纵向位移,横向位移由边跨到跨中逐渐变大,这表明主梁位移在纵向地震和横向地震作用基本不耦合^[21]。此外,桥梁竖向位移响应受纵向地震作用影响更大,其峰值约为横向地震作用下位移响应的 2 倍。

由图 7 可知,两桥塔在纵向+竖向地震作用下的塔顶位移大于横向+竖向地震作用,在 E2 地震作用下差异更加明显,说明桥塔纵向刚度较小。此外,由于结构的非对称性,5# 桥塔略高于 4# 桥塔,在地震响应中 5# 桥塔塔顶位移响应更大。

由图 8 可知,横向+竖向地震作用下的塔底弯矩普遍大于纵向+竖向地震作用下的塔底弯矩,而过渡墩和辅助墩在 2 种工况下的墩底弯矩基本相同,其主要原因是桥塔纵向安装了液体黏滞阻尼器,在地震作用下起到减震耗能作用,因此桥塔在纵向地震动作用下弯矩响应较小,而过渡墩与辅助墩处未安装液体黏滞阻尼器,2 种工况下地震响应基本相同。

3 桥梁抗震性能评估

3.1 能力需求比

能力需求比法最早是由美国联邦公路局针对桥

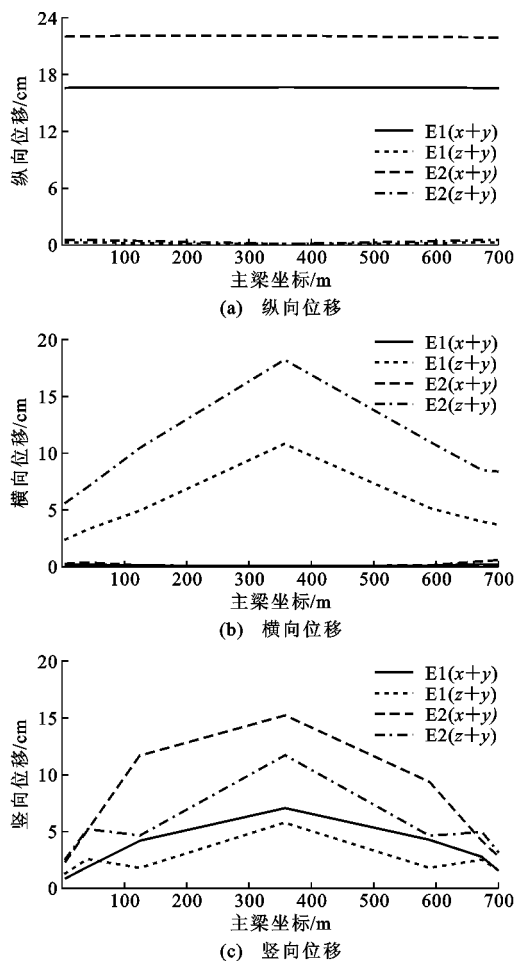


图 6 主梁位移响应

Fig. 6 Displacement Responses of Main Girder

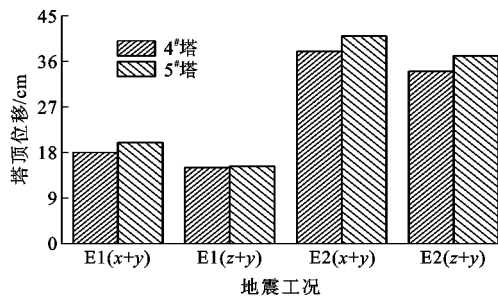


图 7 塔顶位移响应

Fig. 7 Displacement Responses of Pylon Top

梁抗震评估所推荐的方法,该方法通过对桥梁结构体系中关键构件的地震需求与能力进行比较,体现关键构件发生局部破坏时的地震与设计地震的关系,从而评估桥梁的抗震安全性能^[22]。

墩塔能力需求比为

$$R_M = \frac{M_c}{M_{td} + M_{dd}} \quad (1)$$

式中: R_M 为墩塔的能力需求比; M_c 为混凝土构件的抗弯能力值; M_{td} 为构件的最大地震弯矩; M_{dd} 为

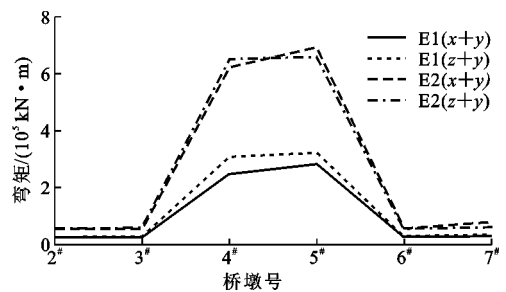


图 8 墩底弯矩响应

Fig. 8 Bending Moment Responses of Pier Bottom

恒载弯矩。

斜拉索能力需求比为

$$R_\sigma = \frac{\sigma_c}{\sigma_{td} + \sigma_{dd}} \quad (2)$$

式中: R_σ 为斜拉索能力需求比; σ_c 为斜拉索极限抗拉强度; σ_{td} 为斜拉索最大地震应力; σ_{dd} 为恒载作用下的斜拉索应力。

3.2 墩塔截面弯矩曲率分析

利用截面分析软件 XTRACT 计算墩塔截面的弯矩曲率曲线。首先,确定墩塔材料的本构关系,如非约束混凝土、约束混凝土和钢筋的应力-应变关系,并对墩塔截面分别划分纤维单元^[23]。墩塔截面的纤维单元划分如图 9 所示。以恒载和地震作用下的最不利轴力组合对主塔和桥墩底截面进行力-弯矩-曲率($P-M-\phi$)分析,并根据 Priestley 等效原则对弯矩-曲率曲线进行双线性处理,得到过渡墩、辅助墩和桥塔底关键截面的弯矩-曲率曲线及等效后的双折线模型,如图 10 所示。

3.3 墩塔抗震性能评估

限于篇幅,本文仅选取桥墩和桥塔底截面为关键截面进行抗震性能评估。由墩塔截面的弯矩曲率分析可以得到各关键截面纵桥向与横桥向的抗弯能力值。对于 50 年超越概率 10%抗弯能力取截面的首次屈服弯矩 M_y ,50 年超越概率 2%抗弯能力取截面的等效抗弯强度 M_{eq} ,再以第 3.1 节中能力需求比进行抗震性能评估。抗震验算结果如表 3,4 所示。

由表 3,4 可知,在 E1 和 E2 两种水平地震作用下,各桥墩和桥塔关键截面在纵向+竖向和横向+竖向 2 种组合下的地震弯矩均小于其抗震能力值,满足抗震性能要求。E1 地震作用下 2#,3#,6#,7# 桥墩纵桥向能力需求比(平均值为 4.57)小于横桥向能力需求比(平均值为 8.18),而 4#,5# 桥塔由于在其纵桥向安装了非线性黏滞阻尼器,在地震作用下消耗了部分能量,其纵桥向能力需求比(平均值为 5.78)大于横桥向能力需求比(平均值为 4.41)。E2

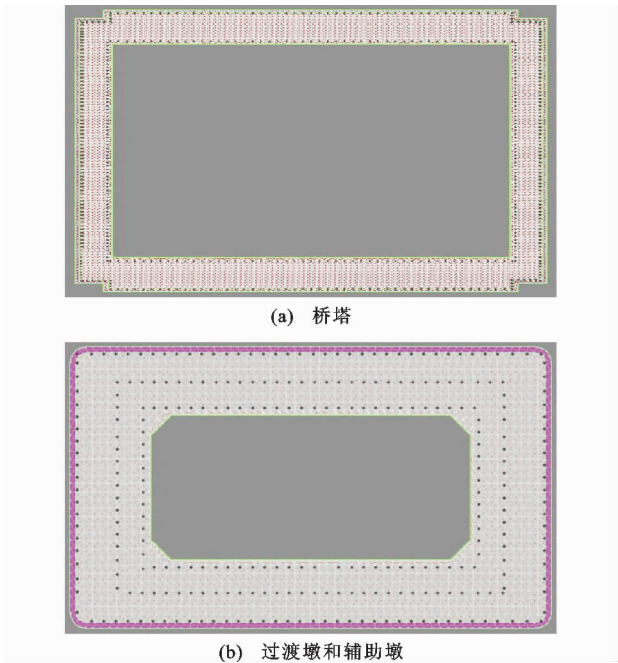


图 9 桥塔和桥墩截面纤维单元划分
Fig. 9 Fiber Unit Divisions of Bridge
Tower and Pier Section

地震作用下,各墩能力需求比分布规律与 E1 类似,但其值均小于 E1 地震作用。建议在过渡墩和辅助墩上安装减隔震装置,加强桥梁抗震性能。

3.4 斜拉索抗震性能评估

西固黄河大桥南塔与北塔各有斜拉索 28 对,其中,1 号斜拉索为南塔南端第 1 对斜拉索,56 号斜拉索为北塔北端第 56 对斜拉索。E2 地震作用下,斜

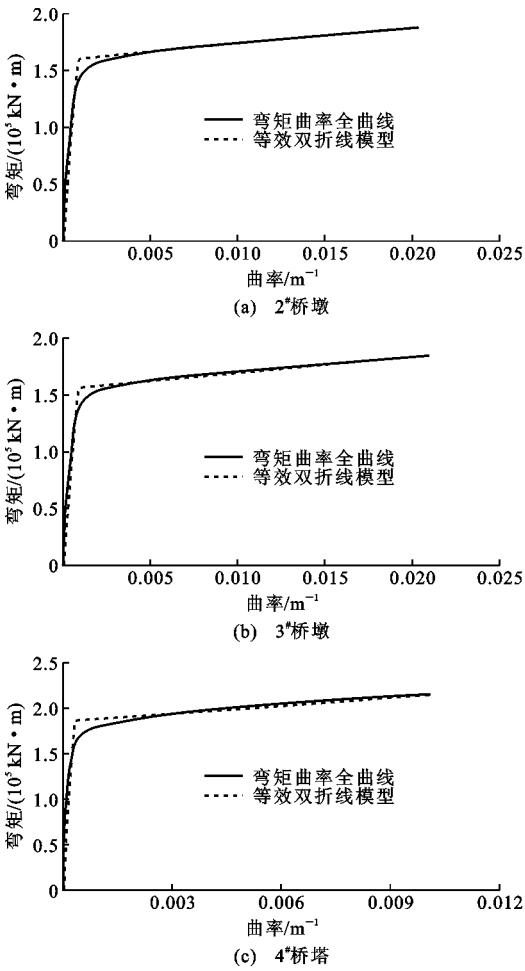


图 10 墩底截面弯矩曲率曲线及等效双折线模型
Fig. 10 Moment Curvature Curves of Pier Bottom
Section and Equivalent Double Fold Line Model

表 3 50 年超越概率 10% 抗震验算

Tab. 3 50 Years Beyond Probability of 10% Seismic Check

桥墩号	工况 1 抗震需求/(kN·m)		工况 2 抗震需求/(kN·m)		抗弯能力/(kN·m)		能力需求比	
	纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向
2#	6.36×10^2	2.23×10^4	2.51×10^4	4.32×10^2	1.28×10^5	2.03×10^5	5.08	9.11
3#	1.13×10^3	2.45×10^4	2.71×10^4	1.61×10^2	1.24×10^5	1.96×10^5	4.56	8.00
4#	2.38×10^5	5.14×10^3	3.07×10^4	2.98×10^5	1.50×10^6	1.33×10^6	6.29	4.45
5#	2.83×10^5	4.97×10^3	3.09×10^4	3.03×10^5	1.49×10^6	1.33×10^6	5.26	4.38
6#	9.62×10^2	2.48×10^4	2.61×10^4	1.84×10^2	1.27×10^5	1.98×10^5	4.85	7.99
7#	7.58×10^2	2.67×10^4	3.37×10^4	4.79×10^2	1.28×10^5	2.03×10^5	3.80	7.60

拉索在纵向+竖向和横向+竖向工况能力需求比如图 11 所示。从图 11 可以看出,斜拉索最小能力需求比为 3,斜拉索在地震作用下不会首先发生破断,满足抗震性能要求。

4 结 语

(1)主梁位移在纵向地震和横向地震作用下基本不耦合;2 种工况下均会产生竖向位移,但其竖向

位移受纵向地震作用影响更大。
(2)两桥塔在纵向+竖向地震作用下的塔顶位移大于横向+竖向地震作用,在 E2 地震作用下差异更加明显。
(3)桥塔上液体黏滞阻尼器起到摩擦耗能作用,纵向地震波作用下塔底弯矩小于横向地震波作用,而过渡墩和辅助墩在 2 种工况下的墩底弯矩基本相同。

表 4 50 年超越概率 2% 抗震验算

Tab. 4 50 Years Beyond Probability of 2% Seismic Check

桥墩号	工况 1 抗震需求/(kN·m)		工况 2 抗震需求/(kN·m)		抗弯能力/(kN·m)		能力需求比	
	纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向
2 [#]	1.58×10 ³	5.26×10 ⁴	5.62×10 ⁴	9.84×10 ²	1.75×10 ⁵	2.97×10 ⁵	3.11	5.64
3 [#]	2.58×10 ³	5.27×10 ⁴	5.76×10 ⁴	3.39×10 ²	1.65×10 ⁵	2.78×10 ⁵	2.87	5.28
4 [#]	5.40×10 ⁵	1.15×10 ⁴	6.61×10 ⁴	6.31×10 ⁵	1.96×10 ⁶	1.71×10 ⁶	3.63	2.71
5 [#]	6.73×10 ⁵	1.02×10 ⁴	6.61×10 ⁴	6.40×10 ⁵	1.95×10 ⁶	1.71×10 ⁶	2.90	2.67
6 [#]	2.18×10 ³	5.34×10 ⁴	5.54×10 ⁴	3.77×10 ²	1.65×10 ⁵	2.77×10 ⁵	2.98	5.19
7 [#]	1.84×10 ³	6.08×10 ⁴	7.61×10 ⁴	9.40×10 ²	1.75×10 ⁵	2.97×10 ⁵	2.30	4.89

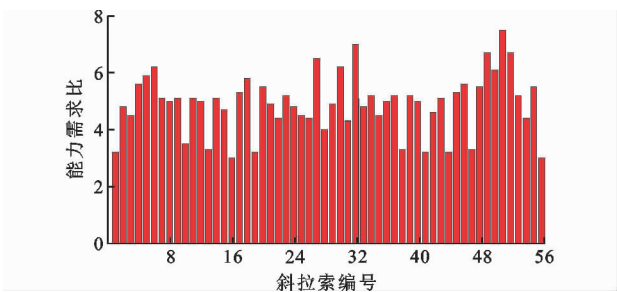


图 11 斜拉索能力需求比

Fig. 11 Capacity Demand Ratio of Stay Cables

参考文献:

References:

[1] 叶爱君,管仲国. 桥梁抗震[M]. 2 版. 北京:人民交通出版社,2011.
YE Ai-jun, GUAN Zhong-guo. Seismic Design of Bridge[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press,2011.

[2] 马长飞,王 波,汪正兴,等. 完全非平稳地震作用下斜拉桥随机响应分析[J]. 桥梁建设,2016,46(1):30-34.
MA Chang-fei,WANG Bo,WANG Zheng-xing,et al. Analysis of Random Seismic Response of Cable-stayed Bridge Under Fully Non-stationary Earthquake Ground Motion[J]. Bridge Construction,2016,46(1):30-34.

[3] VIRLOGEUX M. Recent Evolution of Cable-stayed Bridges[J]. Engineering Structures,1999,21(8):737-755.

[4] 李忠献,黄 健,丁 阳,等. 不同地震激励下大跨度斜拉桥的地震反应分析[J]. 中国公路学报,2005,18(3):48-53.
LI Zhong-xian,HUANG Jian,DING Yang,et al. Seismic Responses of Long-span Cable-stayed Bridges Under Different Patterns of Earthquake Excitations [J]. China Journal of Highway and Transport,2005,18(3):48-53.

[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 Xi-wen,ZHANG Wen-hua,LI Jian-zhong. Seismic Design for Long-span Cable-stayed Bridges in Transverse Direction[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2012,32(1):86-92.

[6] 周大兴,闫维明,陈彦江,等. 千米级斜拉桥的减震控制[J]. 公路交通科技,2011,28(12):71-75,87.
ZHOU Da-xing,YAN Wei-ming,CHEN Yan-jiang,et al. Damping Control of Kilometer-scale Cable-stayed Bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2011,28(12):71-75,87.

[7] ZHANG D Y,LIU W,XIE W C,et al. Modeling of Spatially Correlated,Site-reflected,and Nonstationary Ground Motions Compatible with Response Spectrum [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2013,55(1):21-32.

[8] 徐凯燕,魏德敏. 武汉军山长江大桥非线性地震反应时程分析[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2010,37(5):19-23.
XU Kai-yan,WEI De-min. Nonlinear Earthquake-response Time-history Analysis of Wuhan Junshan Yangtze River Bridge[J]. Journal of Hunan University:Natural Sciences,2010,37(5):19-23.

[9] 夏修身,李建中,管仲国,等. 斜拉桥桥塔非线性抗震性能研究[J]. 中国公路学报,2016,29(3):66-72,81.
XIA Xiu-shen,LI Jian-zhong,GUAN Zhong-guo,et al. Nonlinear Seismic Performance Investigation of Cable-stayed Bridge Towers [J]. China Journal of Highway and Transport,2016,29(3):66-72,81.

[10] GUPTA A,KRAWINKLER H. Estimation of Seismic Drift Demands for Frame Structures[J]. Earthquake Engineering Structural Dynamics,2000,29(9):1287-1305.

[11] 方 圆,李建中,彭天波,等. 行波效应对大跨度多塔斜拉桥地震反应影响[J]. 振动与冲击,2010,29(10):

- 148-152,235.
- FANG Yuan, LI Jian-zhong, PENG Tian-bo, et al. Influence of Travelling Wave Effect on Seismic Response of a Long-span Multi-tower Cable Stayed Bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(10):148-152,235.
- [12] 阮怀圣, 李龙安, 杨光武, 等. 黄冈公铁两用长江大桥抗震技术研究[J]. 桥梁建设, 2013, 43(6):34-39.
- RUAN Huai-sheng, LI Long-an, YANG Guang-wu, et al. Study of Seismic Techniques for Huanggang Changjiang River Rail-cum-road Bridge [J]. Bridge Construction, 2013, 43(6):34-39.
- [13] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- XIANG Hai-fan. Advanced Theory of Bridge Structures[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [14] JTG/T B02-01—2008, 公路桥梁抗震设计细则[S].
- JTG/T B02-01—2008, Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges[S].
- [15] 董胜利, 亓兴军. 大跨斜拉桥减震控制分析[J]. 铁道工程学报, 2007(7):47-51.
- DONG Sheng-li, QI Xing-jun. Seismic Response Control Analysis of Long-span Cable-stayed Bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007(7):47-51.
- [16] 陈永祁, 耿瑞琦, 马良喆. 桥梁用液体黏滞阻尼器的减振设计和类型选择[J]. 土木工程学报, 2007, 40(7):55-61.
- CHEN Yong-qi, GENG Rui-qi, MA Liang-zhe. Design and Selection of Fluid Viscous Devices for Shock Control of Bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(7):55-61.
- [17] 李小珍, 谭清泉, 肖林, 等. 大跨度三塔斜拉桥减震措施研究[J]. 铁道工程学报, 2016(9):70-75.
- LI Xiao-zhen, TAN Qing-quan, XIAO Lin, et al. Research on the Anti-seismic Measures for Long-span Three-pylon Cable-stayed Bridges[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016(9):70-75.
- [18] 甘肃省交通规划勘察设计院有限责任公司. 连霍国道主干线兰州南绕城高速公路两阶段施工图设计桥梁涵洞设计说明[R]. 兰州: 甘肃省交通规划勘察设计院有限责任公司, 2014.
- Gansu Province Transportation Planning Survey and Design Institute Co., Ltd. Even the Main Line of Huoguo Road, Lanzhou South Ring Expressway Two-stage Construction Drawing Design Bridge Culver Design Description[R]. Lanzhou: Gansu Province Transportation Planning Survey and Design Institute Co., Ltd, 2014.
- [19] 陈名欢. 大跨度混合梁斜拉桥地震响应分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- CHEN Ming-huan. Research on Seismic Response of Long Span Hybrid Beam Cable-stayed Bridges[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [20] 贾毅, 赵人达, 廖平, 等. 高烈度地震区大跨长联连续梁桥抗震分析及性能评价[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(4):681-688.
- JIA Yi, ZHAO Ren-da, LIAO Ping, et al. Seismic Resistance Analysis and Performance Evaluation of Large Span Continuous Beam Bridge in High Intensity Seismic Region[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(4):681-688.
- [21] 何旭辉, 盖永斌, 魏标, 等. 平塘特大桥主桥抗震性能研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(1):76-81.
- HE Xu-hui, GAI Yong-bin, WEI Biao, et al. Study of Seismic Performance of Main Bridge of Pingtang Bridge[J]. Bridge Construction, 2017, 47(1):76-81.
- [22] FHWA-RD-94-052, Seismic Retrofitting Manual for Highway Bridges[S].
- [23] 石岩, 王东升, 孙治国. 基于位移的中等跨径减隔震桥梁的抗震设计方法[J]. 中国公路学报, 2016, 29(2):71-81.
- SHI Yan, WANG Dong-sheng, SUN Zhi-guo. Displacement-based Seismic Design Method for Medium Span Bridges with Seismic Isolation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(2):71-81.