

某低重心独塔斜拉桥抗震性能研究

张文学¹, 李程华², 杨金保²

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100022; 2. 江西省交通设计院, 江西 南昌 330002)

摘要:某黄河独塔斜拉桥初步设计方案有半漂浮结构体系和固定铰支承结构体系。对其两种不同结构体系进行了抗震性能分析,通过对两种不同结构体系地震荷载作用下主塔控制截面内力响应对比可知,该桥为典型低重心独塔斜拉桥,该桥固定铰支承结构体系主塔控制截面的弯矩响应明显低于半漂浮结构体系主塔相应截面的弯矩响应。为进一步提高该桥的抗震性能,分别对不同塔梁之间纵向特殊连接装置对抗震性能的影响进行了优化对比分析,得到了一些有意义的结论。

关键词:低重心;斜拉桥;结构体系;粘滞阻尼器;摩擦支座

中图分类号:U442.55 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-0373(2010)02-0088-06

0 引言

斜拉桥由主塔、边墩、斜拉索、桥面系及连接装置等组成。斜拉桥的大部分质量集中在桥面系上,因此在地震荷载作用下的惯性力也主要集中在桥面系,并通过斜拉索和塔梁间纵向连接装置传递至主塔。一般根据塔、梁和索的结合方式划分斜拉桥的结构体系,不同的斜拉桥结构体系桥面系地震惯性力传递路径不同,地震响应也不同^[1-3]。大跨度斜拉桥的结构体系直接关系到桥梁抗震性能,因此确定合理的斜拉桥结构体系至关重要。已建大跨度斜拉桥多为双塔连续结构,通过大量的实践,目前已对双塔斜拉桥不同结构体系的动力特性有了较为全面的了解,但是对于重心较低的独塔斜拉桥不同结构体系动力特性的认识还不够深入和全面。纵向约束方式对低重心独塔斜拉桥抗震性能的影响有其自身的特点^[4],因此有必要对其进行深入全面的研究。以某在建低重心独塔斜拉桥为例分析了不同纵向连接方式对低重心独塔斜拉桥抗震性能的影响,得出了一些有意义的结论,可为同类工程提供参考。

1 工程概况

某黄河桥主桥跨径组合为60 m+60 m+160 m+386 m;如图1所示,采用独塔斜拉桥方案,倒Y形主塔,塔高197.00 m,其中上塔柱174.956 m,下塔柱16.044 m;扁平流线型全钢箱形主梁,中心线梁高3.5 m,顶宽40.80 m(不含风嘴宽度)。为避免边跨共用墩和辅助墩在荷载作用下出现上拔力,通过计算在边跨范围内配压重,压重长度为139 m,全桥共压重63 880 kN,最大压重荷载630 kN/m,桥址场地50 a超越概率2%的反应谱特征周期为0.55 s,加速度峰值为149 cm/s²。该桥初步设计方案中有在塔梁间设置竖向支座的半漂浮结构体系和在塔梁间设置固定铰支承的固定铰结构体系两种塔梁连接方式可供选择。

2 不同结构体系动力特性及地震响应分析

桥梁结构动力特性分析是研究桥梁抗震性能的基础,为分析在地震荷载作用下结构地震响应,必须先对桥梁结构的动力特性进行研究。在进行该桥结构动力特性分析时采用离散结构有限单元方法。主

收稿日期:2010-03-30

作者简介:张文学,男,1975年出生,博士,高级工程师。研究方向:桥梁抗震及施工关键技术。发表论文30余篇,被EI收录5篇。

基金项目:江西省交通厅重点科技项目(2000808)

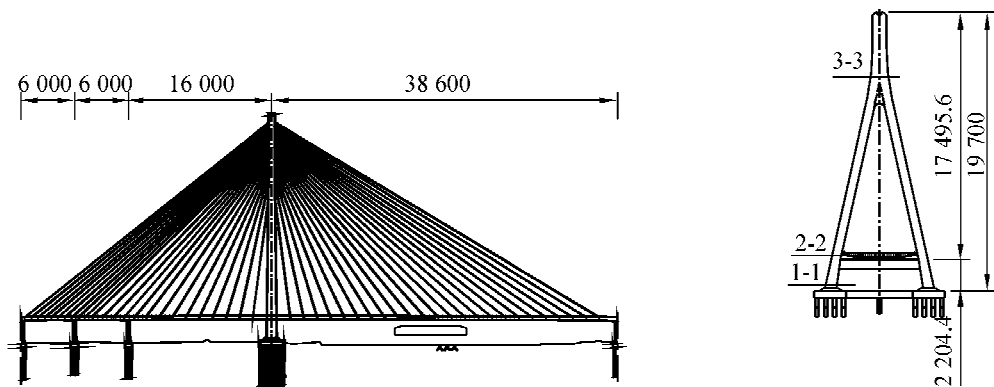


图1 桥跨布置示意图(单位:mm)

塔、主梁、共用墩和辅助墩均离散为空间梁单元,其中主梁采用单梁式力学模型,并通过主从约束同双索面相连,形成“鱼骨式”模型,如图2所示。不同结构体系动力特性分析结果如表1所示。通过对表1的分析可知:该桥半漂浮结构体系第一阶振型为主梁纵向漂移,周期为9.17 s,属长周期结构。固定铰支承结构体系与半漂浮结构体系相比,除固定铰支承结构体系消除了主梁纵向漂移振型和主塔一阶纵弯周期比半漂浮结构体系稍长些外,其他的主要振型和相应的周期均基本相似。

表1 不同体系动力特性分析结果

半漂浮体系			固定铰体系		
振型	周期/s	振型特征	振型	周期/s	振型特征
1	9.17	主梁纵飘	1	3.10	主梁一阶竖弯
2	3.10	主梁一阶竖弯	3	1.59	主梁一阶侧弯
4	1.65	主梁一阶侧弯	5	1.26	主塔一阶侧弯
6	1.26	主塔一阶侧弯	7	1.07	主塔一阶纵弯
8	0.97	主梁一阶扭转	8	0.97	主梁一阶扭转
10	0.89	主塔一阶纵弯	10	0.83	主塔二阶侧弯
11	0.83	主塔二阶侧弯	12	0.69	主塔二阶纵弯

斜拉桥的整体抗震性能一般从结构控制截面的内力和控制点的位移两方面进行评价,抗震优化的目标是在给定的地震荷载作用下使结构控制截面的内力和控制点的位移均越小越好。对于常见斜拉桥,一般认为内力和位移是相互矛盾的两个变量,即要得到较小的内力就应以较大的位移为代价,反之亦然,但对于低重心斜拉桥则可以通过优化得到内力和位移均较小的结构体系。

为对比该桥初步设计方案两种不同结构体系纵向地震响应的区别,以图3所示反应谱为地震激励,对该桥两种不同结构体系进行了纵向地震响应反应谱分析。该反应谱特征周期为0.55 s,加速度峰值为 149 cm/s^2 ,在分析中取竖向地震加速度峰值为纵向加速度峰值的2/3,分析结果如表2所示,表2中截面位置见图1。

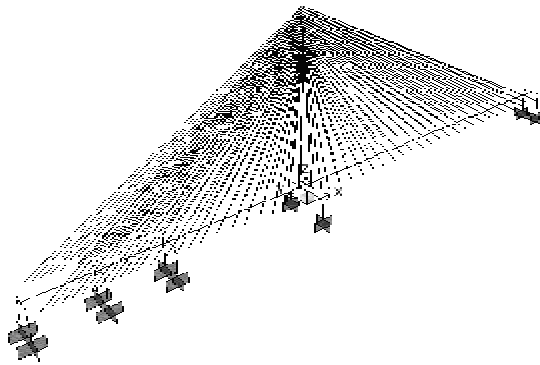


图2 结构分析有限元模型

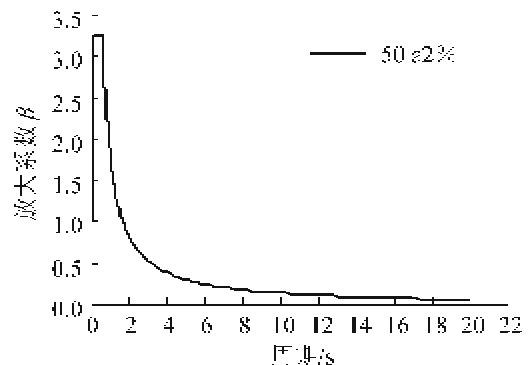


图3 反应谱曲线

表 2 对比分析结果

结构体系	剪力/($\times 10^3$ kN)					弯矩/($\times 10^3$ kN·m)					位移/m	
	1-1	2-2	3-3	4-4	5-5	1-1	2-2	3-3	4-4	5-5	塔顶	梁端
半漂浮	14.0	13.6	10.7	7.2	14.3	1 223.2	1058	1 019	226	382	0.92	0.84
固定铰	33.9	33.7	10.0	4.0	10.4	923.3	388	294	178	304	0.08	0.04

通过表 2 可知:①对于该桥虽然固定铰结构体系下塔柱截面 1-1 和 2-2 的剪力是半漂浮体系的 2.4 和 2.5 倍,但其他截面的剪力固定铰结构体系均小于半漂浮结构体系;②固定铰体系控制截面弯矩均明显小于半漂浮结构体系对应截面弯矩;③固定铰体系控制点位移均明显小于半漂浮结构体系对应控制点位移。由此可知该黄河桥采用塔梁固定铰支承结构体系对控制该桥控制截面的弯矩和控制点的纵向位移均有利,即该桥为低重心斜拉桥^[4]。

3 塔梁连接装置优化分析

大量理论分析和工程实践表明:塔梁之间合理增设特殊连接装置可以在不明显增加工程造价的前提下,起到提高结构抗震性能的效果^[5-8]。塔梁间设置特殊连接装置包括纵向粘滞阻尼器、纵向滑动摩擦支座和塔梁间弹性连接装置等。下面根据图 3 所示反应谱,利用人工地震动合成技术生成三条地震波样本,以此为激励采用非线性时程法分析了以上三种常用塔梁间特殊连接装置对该桥梁抗震性能的影响。

3.1 弹性连接

塔梁间弹性连接是在塔梁间设置一定刚度的弹性连接装置,其恢复力是塔梁间相对位移的线性函数,是半漂浮体系和塔、梁固定铰支承体系的一个折中方案,试图在桥梁的位移和内力之间进行协调。通过优化弹性连接刚度使得在地震作用下塔、梁弹性约束体系能够兼顾结构的变形和内力,应该说是一种比较理想的抗震结构体系。通过改变弹性连接刚度的方法分析了塔梁间不同连接刚度对抗震性能的影响,其影响规律如图 4~图 6 所示,由此可知:

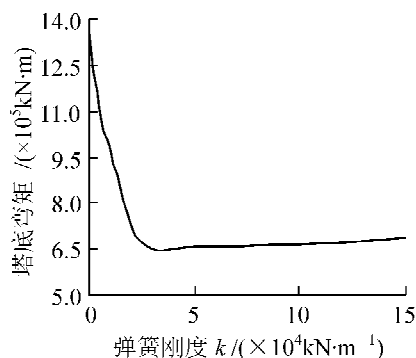


图 4 塔底弯矩与弹性连接刚度的关系

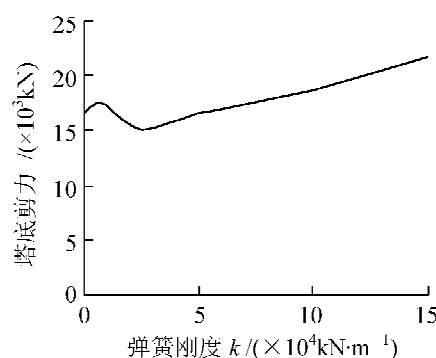


图 5 塔底剪力与弹性连接刚度的关系

(1) 在一定范围内塔底弯矩、塔顶纵向位移和梁端纵向位移均随弹性连接刚度的增大而迅速减小,塔底的剪力在一定范围内出现微小波动。

(2) 当弹性连接刚度增大到某一特定值后塔底弯矩开始有所增加,塔顶和梁端的纵向位移的变化趋于平稳,而此时的塔底剪力却增大较快,当弹性连接刚度增大到一定值时和塔梁间固定铰支承体系相似。

(3) 对以位移控制设计的斜拉桥,可以在塔梁间设置弹性连接装置在对主塔控制截面内力影响很小的前提下减小控制点的位移,获得结构内力和位移响应的最佳结合点。

3.2 滑动摩擦支座

大量的理论分析和试验结果表明:支座的动力特性对桥梁结构地震反应有较大影响,塔梁间设置纵向滑动摩擦支座的力学本质是当支座滑动面间发生相对位移时,上下滑动面间产生一定的摩擦力,其大小是支座反力和支座滑动摩擦系数的函数;通过摩擦耗能机制消耗部分地震动输入给结构的能量,减小结构的地震响应。对于支座反力给定的桥梁结构其支座间滑动摩擦力只是摩擦系数 μ 的函数。设该桥主塔支座、共用墩和辅助墩支座摩擦系数均相同,通过改变摩擦系数的方法,分析了支座摩擦系数对该桥

梁抗震性能的影响,分析结果如图7~图9所示。由此可知:与半漂浮结构体系相比,设置摩擦支座可以有效地减小塔底弯矩、剪力和控制点纵向位移等结构地震响应,当支座摩擦系数较小时减小的幅度非常明显;随着摩擦系数的增大,结构地震响应对摩擦系数的敏感度开始下降。由于摩擦支座可以通过摩擦耗能机制消耗部分地震动输入给结构的能量,所有在减小塔底弯矩和控制点位移的同时也使得塔底的剪力有所减小,这与弹性连接具有本质上的区别。

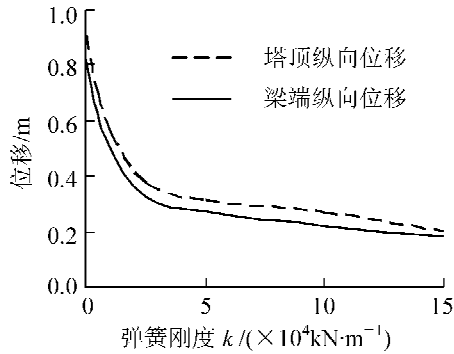


图6 塔顶、梁端位移与弹性连接刚度的关系

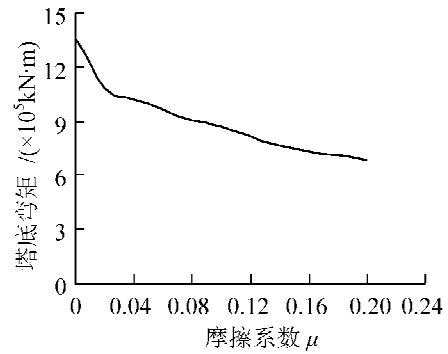


图7 塔底弯矩与摩擦系数的关系

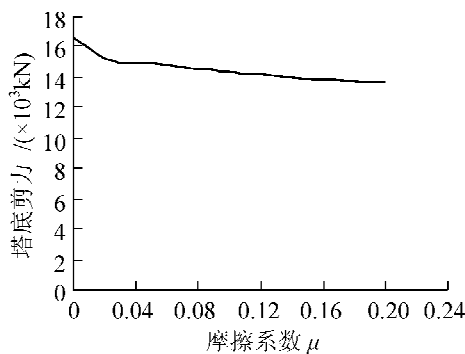


图8 塔底剪力与摩擦系数的关系

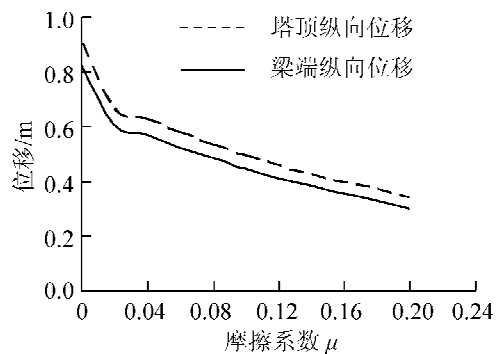


图9 塔顶、梁端位移与摩擦系数的关系

3.3 粘滞阻尼器

塔梁间设置纵向阻尼器的力学本质是在主梁发生纵飘时,在塔梁之间提供一个强大的阻尼力限制结构的纵向位移响应,其阻尼力是塔梁相对速度的函数;同时通过阻尼耗能迅速消耗地震动输入给结构的能量,减小结构的地震响应。而对于塔梁间因温度、收缩徐变等荷载引起的缓慢相对位移变化却不引起结构的内力变化。阻尼器的阻尼力与相对速度之间的关系可表达为

$$F = CV^\zeta \quad (1)$$

式中, F 为阻尼力; V 为相对速度; C 是阻尼系数; ζ 是阻尼指数。

由式(1)可以看出,阻尼器的阻尼力与阻尼系数和阻尼指数有关,因此应进行结构地震荷载作用下阻尼系数 C 和阻尼指数 ζ 的敏感性分析。在进行粘滞阻尼器优化分析时,只在塔梁之间设一个纵向阻尼器,阻尼器参数对该桥减震效果的影响规律如图10~图15所示。由图10~图15可知:

(1) 塔梁间设置纵向粘滞阻尼器可以有效地减小塔底的弯矩(半漂浮体系为 1 358 560 kN·m,见图4)和剪力(半漂浮体系为 16 670 kN,见图5),控制梁端纵向位移(半漂浮体系为 0.825 m)。

(2) 在阻尼指数较大情况下,当阻尼系数较小时,塔底弯矩随阻尼系数的增加而迅速降低,且阻尼指数越大越明显;当阻尼系数较大时,塔底弯矩随阻尼系数的增加而降低的降低速度开始趋于平缓,此后再增加阻尼系数对控制塔底弯矩的作用开始减小。在阻尼系数很小时,塔底弯矩随阻尼指数的增大而增大。阻尼指数越大阻尼系数对塔底弯矩的影响越敏感,阻尼系数越小阻尼指数对塔底弯矩的影响越敏感。

(3) 当阻尼指数较小时,塔底剪力随阻尼系数的增大而迅速增大,当阻尼指数较大时,塔底剪力随阻

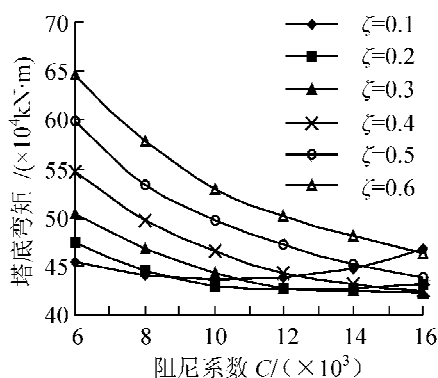


图 10 塔底弯矩与阻尼系数的关系

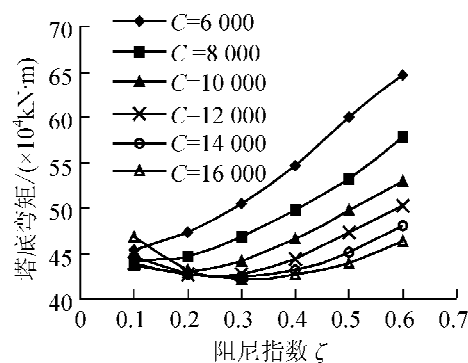


图 11 塔底弯矩与阻尼指数的关系

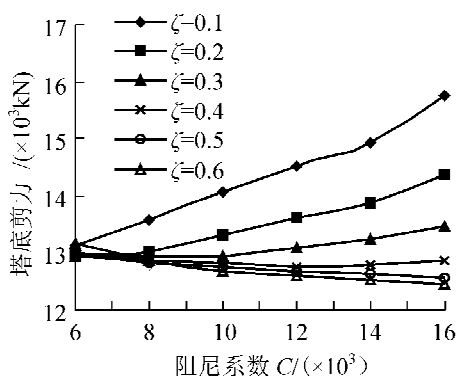


图 12 塔底剪力与阻尼系数的关系

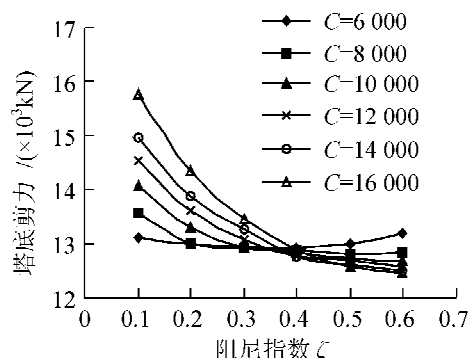


图 13 塔底剪力与阻尼指数的关系

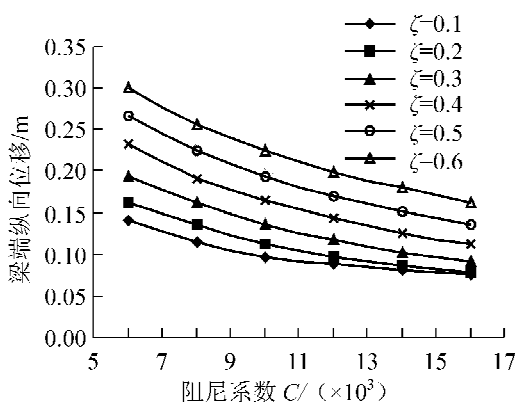


图 14 梁端纵向位移与阻尼器参数的关系

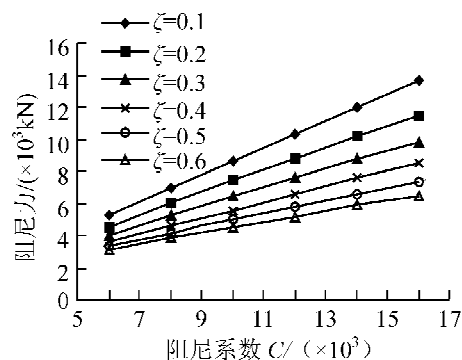


图 15 阻尼力与阻尼器参数的关系

尼系数的增大而有所减小。塔底剪力随阻尼指数的增大迅速降低,且阻尼系数越大,阻尼指数对塔底剪力的影响越敏感。

(4) 梁端纵向位移随阻尼系数的增加而减小,随阻尼指数的增大而增大。阻尼力随阻尼系数的增大而增大,随阻尼指数的增大而减小。

(5) 梁端位移和塔底弯矩受阻尼参数影响的规律基本相同,塔底弯矩和阻尼力受阻尼参数影响的规律基本相反。实际工程中阻尼力也是一个非常重要的指标,过大的阻尼力将导致设计上的困难而无法实现。为了更好地控制梁端位移和塔底弯矩应该选择阻尼系数大、阻尼指数小的阻尼器,但为减小阻尼力则应选择阻尼系数小、阻尼指数大的阻尼器,因此设计时要根据具体情况进行优化。就该桥而言取阻尼系数 $C = 10\,000$, 阻尼指数 $\zeta = 0.3$, 比较合适。

4 结论

通过对某黄河独塔斜拉桥不同结构体系抗震性能及不同塔梁间纵向连接装置的优化分析,可得如下结论:

(1)该黄河独塔斜拉桥属低重心独塔斜拉桥,采用固定铰支承体系主塔各控制截面的弯矩均明显优于半漂浮结构体系。

(2)塔梁间的三种常用的连接装置均能改善结构的抗震性能,通过对三种塔梁间连接装置减震效果比较可知,设置阻尼器的效果明显优于设摩擦支座和弹性连接的效果。

(3)阻尼参数对梁端位移和塔底弯矩的影响规律基本相同;但对塔底弯矩和阻尼力的影响规律基本相反。所以在设计时要根据具体情况进行优化,考虑梁端位移、塔底弯矩和阻尼力等因素确定阻尼器参数。

参 考 文 献

- [1]范立础. 桥梁抗震[M]. 上海:同济大学出版社,1997.
- [2]徐利平. 超大跨斜拉桥的结构体系分析[J]. 同济大学学报,2003,31(4):400-403.
- [3]范立础,王志强,韦晓. 橡胶支座连续梁桥地震力计算方法的探讨[J]. 同济大学学报,2001,29(1):1-5.
- [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.
- [5]叶爱君,胡世德,范立础. 斜拉桥抗震结构体系研究[J]. 桥梁建设,2002,4:1-4.
- [6]范立础,王志强,韦晓. 橡胶支座连续梁桥地震力计算方法的探讨[J]. 同济大学学报,2001,29(1):1-5.
- [7]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.
- [8]倪燕平. 兰州银滩黄河大桥地震反应分析[D]. 兰州:兰州铁道学院,1998.

Earthquake Resistance of Cable-stayed Bridge with One Tower of Low Gravity Center

Zhang Wenxue¹, Li Chenghua², Yang Jinbao²

(1. The College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

2. Jiangxi Communication Design Institution, Nanchang 330002, China)

Abstract: Two conceptual designs are prepared for a one tower cable-stayed bridge over Huanghe river, the fixed hinge structural system and the half-floating system. Earthquake resistances of the two kinds of conceptual design structural systems are studied. Through contrasting the response of control cross-section of two different kinds of structural system under earthquake load, it is indicated that this bridge is a typical low gravity center cable-stayed bridge. The moment response of main tower control cross-section of the fixed hinge structural system is considerably lower than that of half-floating system under earthquake load. In order to improve earthquake resistance of the bridge, optimizing and contrasting of the earthquake resistance influence of special link device between tower and girder is conducted. Several significant conclusions are obtained.

Key words: low gravity center; cable-stayed bridge; viscous damper; friction bearing