

非对称矮塔斜拉桥桥塔抗震性能分析

李自林¹, 马嘉蓬¹, 刘治德²

(1. 天津城市建设学院 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384;

2. 天津市海河建设发展投资有限公司, 天津 300380)

摘要: 为研究高桥墩非对称矮塔斜拉桥桥塔和桥墩的抗震性能, 基于桥梁抗震中反应谱分析理论, 以一座高桥墩铁路矮塔斜拉桥为工程背景, 建立其整桥模型和裸塔模型, 进行模态分析和内力位移分析, 并对桥塔在整桥状态下和裸塔状态下进行对比研究。研究表明, 在相同地震力作用下, 整桥振型周期较大, 顺桥向裸塔与整桥的桥塔有明显的差别。

关键词: 非对称; 高桥墩; 矮塔斜拉桥; 反应谱分析

中图分类号: U24 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2013)04-0015-05

0 引言

对斜拉桥进行地震响应分析是一个规模巨大而且极为复杂的问题。反应谱方法通过反应谱概念巧妙地将动力问题静力化, 概念简单, 计算方便, 可以用较少的计算量获得结构的最大反应值^[1]。因此, 世界各国规范都把它作为一种基本分析手段。从1943年M. Biot提出反应谱概念, 并且给出了第一条弹性反应谱曲线以来, 反应谱理论逐步发展, 并被许多国家采纳到结构设计抗震规范中。

由于矮塔斜拉桥在国内兴起较晚, 到目前为止国内该桥型的桥梁还不是很多。故关于该桥型的抗震研究资料还很匮乏。目前, 随着矮塔斜拉桥这种桥型逐渐被国内桥梁界所接受, 并得到了较多的运用。该桥型已逐渐成为桥梁抗震研究的一个热点^[2], 针对该桥型抗震研究的高校或研究机构也越来越多。

利用反应谱分析方法对一座具有高桥墩的非对称矮塔斜拉桥——津保桥的裸塔和全桥模型桥塔的抗震性能进行了研究。得出两种模型在地震作用下的响应规律。

1 反应谱分析理论

在桥梁抗震分析中反应谱法是应用最广泛的理论方法。比静力法的进步之处就是在于反应谱法同时将地面运动和结构体系的动力特性等因素综合考虑。在运用反应谱法进行抗震分析时, 是以不同自振周期的单自由度质点在一定阻尼条件下, 对结构体系输入不同的地震参数, 得到结构在地震荷载作用下的位移、速度以及加速度最大值的包络曲线。在进行反应谱分析时, 不同的桥梁结构形式考虑其振动方向也不同, 对于直线桥而言, 需要考虑其顺桥向和横桥向的地震动作用; 对于曲线桥而言, 需要考虑沿相邻桥墩的连线方向以及垂直于该连线方向上进行多方向上的地震输入, 以便确定最不利地震的水平输入方向。由于天津津保桥桥址为7度地震区, 按规范进行抗震验算。

2 工程实例

津保桥为新建天津至保定铁路工程, 右线跨津保铁路特大桥, 跨越西外环河及西外环, 主桥上部结构类型为有砟轨道矮塔斜拉桥。孔跨布置采用(84+56+32)m矮塔斜拉桥方案, 结构体系为塔墩梁刚结的结构体系, 膺架现浇施工。主梁全长172.4m, 主墩桥墩高24m, 主墩处梁高6m, 塔高20m, 最小净空22

收稿日期: 2013-04-02

作者简介: 李自林 男 1953年出生 教授

基金项目: 天津市自然科学基金(13JCYBJC19600)

m 跨外环桥处最大净空 12.9 m。

2.1 模型的建立

针对津保桥的实际情况,经过认真研究,用 MIDAS/Civil 有限元分析软件建立该桥有限元模型,墩底边界条件用墩底固结模拟^[3]。墩底固结的桥梁模型不考虑墩与基础的变形^[4]。主梁端部为竖向弹性约束。在进行反应谱分析时,第一步输入合适的反应谱参数,使其自动生成对应的反应谱曲线。曲线生成后,有限元软件自动建立地震响应运动方程,然后进行求解。全桥及裸塔模型如图 1、图 2 所示。

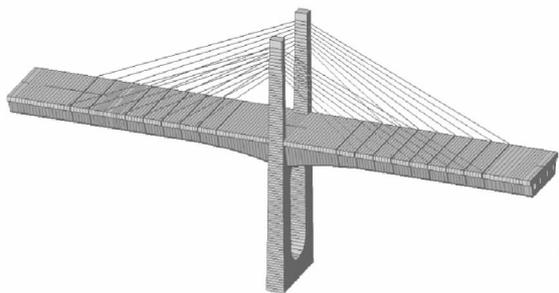


图 1 整桥模型

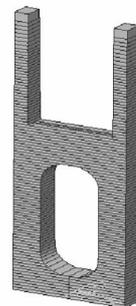


图 2 裸塔模型

2.2 反应谱参数和曲线的选择

津保桥所处场地地震动峰值加速度为 $0.15g$,地震动反应谱特征周期为 0.55 s ,抗震设防烈度为 7 度,设计地震分组为第二组,按 VII 度设防,场地类型为 III 类^[5]。根据该桥实际场地特征与抗震设计资料,参考我国相关规范对设计反应谱曲线的相关规定,在 Midas/civil 中确定的相关参数为: Ch2001: 分组 = 2, 烈度 = 7, 场地 = III, 频遇地震, $T_g = 0.55\text{ s}$, 阻尼 = 0.05, 选取的罕遇地震 E1 和频遇地震 E2 反应谱曲线如图 3、图 4 所示。

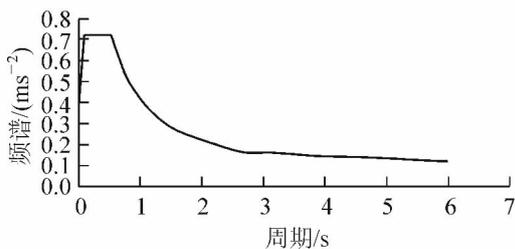


图 3 E1 反应谱曲线

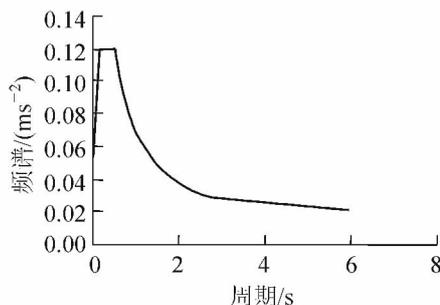


图 4 E2 反应谱曲线

2.3 模态分析

采用多振型反应谱法对桥梁结构进行抗震分析时,在同时考虑纵向、横向和竖向震动方向的情况下,在计算方向上所要考虑的振型阶数应获得 90% 以上的有效质量。如果计算后各方向振型参与质量达不到 90%, 则应适当增加阶数重新计算^[6-7]。裸塔的特征值分析中 48 阶频率数量能够满足要求。其中 X 方向上的主振型为第五阶振型, Z 方向的主振型为第九阶振型, Y 方向的主振型为第一阶振型如图 5 所示。

前 10 阶振动模态的特征值分析表和振型参与质量表如表 1、表 2 所示。

整桥的特征值分析中 73 阶频率数量能够满足要求,其中 X 方向上的主振型为第三阶振型, Z 方向的主振型为第九阶振型, Y 方向的主振型为第一阶振型(如图 6 所示)。前 10 阶振动模态的特征值分析表和振型参与质量表如表 3 和表 4 所示。

对比裸塔的分析结果,全桥模型的自振周期明显增加。虽然斜拉索张拉和主梁的施工增加了整个体系的刚度,但同时也增加了整个体系的质量。若整个斜拉桥体系或裸塔等效为一单自由度结构,则根据自振周期同质量、刚度之间的关系,可知,当质量与刚度之间的比例增加时,体系的自振周期增大。由于全桥模型的自振周期比裸塔自振周期大,可以看出质量与刚度之比在加大。



图 5 裸塔振型图

表 1 整桥特征值分析表

模态号	角频率/(rad · s ⁻¹)	线频率/(cyc · s ⁻¹)	周期/s
1	12.138 84	1.931 956	0.517 61
2	25.453 963	4.051 124	0.246 845
3	28.822 711	4.587 277	0.217 994
4	31.518 449	5.016 317	0.199 349
5	45.905 734	7.306 125	0.136 871
6	46.929 077	7.468 995	0.133 887
7	59.459 038	9.463 2	0.105 673
8	110.753 668	17.626 994	0.056 731
9	123.310 532	19.625 481	0.050 954
10	136.809 205	21.773 861	0.045 927

表 2 整桥振型参与质量表

模态号	TRAN-X		TRAN-Y		TRAN-Z	
	质量/%	合计/%	质量/%	合计/%	质量/%	合计/%
1	0	0	50.29	50.29	0	0
2	28.04	28.04	0	50.29	0	0
3	0	28.04	0	50.29	0.39	0.39
4	0	28.04	0	50.29	0	0.39
5	38.02	66.06	0	50.29	0	0.39
6	0	66.06	17.06	67.35	0	0.39
7	0	66.06	0	67.35	0	0.39
8	0	66.06	13.48	80.83	0	0.39
9	0	66.06	0	80.83	71.67	72.06
10	0	66.06	0	80.83	0	72.06

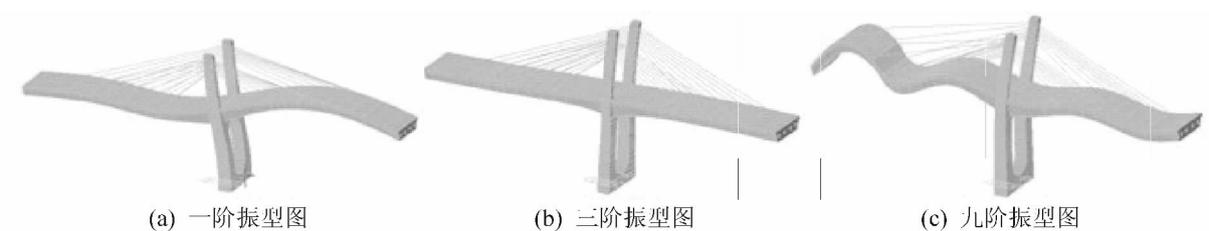


图 6 整桥振型图

2.4 内力和位移分析

对津保桥的地震响应分别进行了整桥和裸塔的结果进行对比分析。从计算结果可以看出,塔顶各自自由度的位移最大。由表 5 数据可知,顺桥向,裸塔的位移小于全桥模型的位移,但相差不大;横桥向,两模型的位移结果相差很大。

表 3 裸塔特征值分析表

模态号	角频率/($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	线频率/($\text{cyc} \cdot \text{s}^{-1}$)	周期/s
1	7.439 223	1.183 989	0.844 602
2	11.730 62	1.866 987	0.535 622
3	21.211 43	3.375 903	0.296 217
4	25.091 49	3.993 434	0.250 411
5	27.567 92	4.387 571	0.227 917
6	28.371 17	4.515 412	0.221 464
7	32.363 02	5.150 735	0.194 147
8	40.282 52	6.411 162	0.155 978
9	42.474 96	6.760 1	0.147 927
10	50.87974	8.097761	0.123491

表 4 裸塔振型参与质量表

模态号	TRAN-X		TRAN-Y		TRAN-Z	
	质量/%	合计/%	质量/%	合计/%	质量/%	合计/%
1	0	0	63.09	63.09	3.82	3.82
2	0	0	24.43	87.52	15.64	19.46
3	51.22	51.22	0	87.52	0	19.46
4	0	51.22	2.78	90.3	6.6	26.07
5	0	51.22	0	90.3	0.11	26.18
6	4.94	56.16	0	90.3	0	26.18
7	0	56.16	0.22	90.52	1.73	27.91
8	5.6	61.76	0	90.52	0	27.91
9	0	61.76	0.11	90.63	22.87	50.78
10	0	61.76	0.14	90.76	2.77	53.55

表 5 整桥与裸塔反应谱法计算结果比较

方向	项目	计算项目	整桥计算值		裸塔计算值	
			E1 地震波	E2 地震波	E1 地震波	E2 地震波
顺桥向	塔顶	位移/mm	17.13	102.81	16.226	97.24
		塔底	剪力/kN	724.68	4 348.1	1 151.64
	塔底	弯矩/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	15 242.17	91 453.01	13 605.09	81 630.56
		墩底	剪力/kN	9 376.31	56 257.89	2 709.02
横向	塔顶	位移/mm	8.64	51.82	4.39	26.38
		塔底	剪力/kN	1 477.24	8 863.45	244.81
	塔底	弯矩/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	19 319.18	115 915.05	11 948.54	71 691.27
		墩底	剪力/kN	6 562.09	39 372.56	3 915.20
墩底	弯矩/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	133 828.07	802 968.39	133 504.97	361 168.11	

整桥模型中横桥向地震力引起塔柱剪力远比竖向同等地震烈度地震引起的剪力大,顺桥向的剪力是由纵向作用地震引起的,横向地震的影响及其微小,可以忽略不计。横桥向全桥模型计算的弯矩均大于裸塔模型计算的弯矩。

3 结语

运用反应谱分析方法研究了津保桥整桥和裸塔在 E1、E2 地震响应荷载下的动态响应,得出的结论进行对比分析得出主要结论。

(1) 对比裸塔模型与全桥模型动力特性可知,全桥的振动周期比裸塔自振周期大,是由于等效单自由度体系质量与刚度之比 m/k 增大的结果。同时有结果可知,裸塔模型和全桥模型的前几阶主振型基本一致。

(2) 顺桥向的地震主要影响桥塔纵桥向的反应,横桥向地震主要影响桥塔横桥向的反应。地震引起桥塔的轴力相对于桥塔自重较小,因此可以忽略不计。

(3) 非对称的矮塔斜拉桥在相同地震波作用下,横桥向裸塔的剪力、弯矩与整桥模型中桥塔的剪力、弯矩无明显差别,并且分布近似。但顺桥向由于主梁的作用两者有明显差别。

参 考 文 献

- [1]王克海. 桥梁抗震研究[M]. 北京: 中国铁道出版社 2007.
- [2]陈兴冲 虞庐松 吴高峰 等. 兰州市小西湖部分斜拉桥抗震分析[J]. 兰州交通大学学报 2003 3(6): 42-44.
- [3]晓春. 桩-土-结构动力相互作用的分析模型与方法[J]. 世界地震工程 2002 18(4): 123-130.
- [4]Novak M. Sharnouby E. Stiffness constant of single piles[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1983, 109(7): 961-974.
- [5]中国地震局. GB18306—2001 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 中国标准出版社 2001.
- [6]中国建筑科学研究院. GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社 2010.
- [7]重庆交通科研设计院. 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.

Research on Tower Seismic Behavior of Cable-stayed Bridge with Asymmetric Dwarf Towers

Li Zilin¹, Ma Jiapeng¹, Liu Zhide²

(1. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Haihe Construction Developing Investment Co., Ltd., Tianjin 300380, China)

Abstract: In order to study the high piers non-symmetric the dwarf tower cable-stayed bridge towers seismic performance-based bridge seismic reaction spectrum analysis theory, low tower cable-stayed bridge, a high pier railway engineering background, and the establishment of the entire bridge model and bare tower model, modal analysis and force and displacement analysis, and comparative study of the state of bare tower and bridge towers in the state of the entire bridge. The study shows that the entire bridge modes cycle, and in the same seismic force under longitudinal bridge a significant difference.

Key words: asymmetric; pier; dwarf tower cable-stayed bridge; response spectrum analysis

(责任编辑 刘宪福)

(上接第 10 页)

The Research on Cable Force Testing Method of Cable-stayed Bridge Model Test

Li Yanqiang, Zhao Shiyong

(Mechanics Engineering Department, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Taking a single-tower cable-stayed bridge test model as an object, the method of cable force testing is researched. A cable tension test system based on pressure ring sensor is developed. The simulation of the system is done in ANSYS according to contact theory. On this basis, cable tensions of model bridge are measured by using this system and by frequency testing method. The result shows that the operation of this system is simple and the performance is stable and measuring results are reliable. Cable tension can be tested quickly and in real-time by using this method without changing the stiffness of stay cables.

Key words: pressure ring sensor; cable tension; frequency measured method; model test

(责任编辑 刘宪福)