

文章编号:1673-2049(2010)03-0024-05

## 矢跨比对悬索桥受力的影响分析

唐茂林<sup>1</sup>, 宋 晖<sup>2</sup>, 林 恰<sup>1</sup>, 沈锐利<sup>1</sup>, 王晓东<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 桥梁工程系, 四川 成都 610031; 2. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088)

**摘要:**为了研究不同矢跨比对悬索桥结构受力的影响,以西堠门大桥为原型,利用西南交通大学开发的桥梁非线性计算软件 BNLAS,建立了主缆跨度为 485 m+1 650 m+485 m、加劲梁为单跨简支结构体系的双塔单跨悬索桥有限元模型;比较了不同矢跨比(1/8、1/9、1/10、1/11、1/12、1/13、1/14、1/15)下悬索桥结构受力的变化。分析结果表明:矢跨比的改变将对结构整体刚度产生影响,从而对结构不同荷载作用效应产生不同程度的影响。

**关键词:**悬索桥;BNLAS;单跨简支结构;活载;矢跨比

**中图分类号:**U448.25

**文献标志码:**A

## Influence Analysis of Rise-span Ratio on Force of Suspension Bridge

TANG Mao-lin<sup>1</sup>, SONG Hui<sup>2</sup>, LIN Qia<sup>1</sup>, SHEN Rui-li<sup>1</sup>, WANG Xiao-dong<sup>2</sup>

(1. Department of Bridge Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China)

**Abstract:** In order to study the influences of different rise-span ratios on structural force of suspension bridge, taking Xihoumen bridge as prototype, authors established the finite element model by using bridge nonlinear calculation software BNLAS, which was developed by Southwest Jiaotong University. This model was a twin towers single-span suspension bridge and its main cable span was 485 m+1 650 m+485 m, it had single-span simply supported girder. The structural forces of suspension bridge with different rise-span ratios (1/8,1/9,1/10,1/11,1/12,1/13,1/14 and 1/15) were compared. The analysis results show that different rise-span ratios change the stiffness of structure, and lead different load effects.

**Key words:** suspension bridge; BNLAS; single-span simply supported structure; live load; rise-span ratio

## 0 引言

中跨主缆的矢跨比是一个对结构刚度及经济性<sup>[1]</sup>有较大影响的因素,一般大跨度悬索桥的矢跨比在 1/12~1/9 之间<sup>[2-3]</sup>。小的矢跨比有利于增大结构刚度、减小桥塔的高度,但将增大主缆索力、增加索的用量;大的矢跨比将降低结构刚度<sup>[4]</sup>、增加塔的高度从而加大桥塔工程量<sup>[5-6]</sup>,但主缆索力会相对

小一些<sup>[7-8]</sup>。

## 1 研究概述

表 1 中给出了国外具有代表性的悬索桥,其矢跨比在 1/11~1/8.9 之间<sup>[9]</sup>。

为了研究矢跨比对悬索桥结构受力的影响,参照西堠门大桥设计结构建立双塔单跨悬吊悬索桥计算模型,该模型的桥跨布置为:主缆跨度 485 m+

表 1 国外悬索桥的矢跨比

Tab. 1 Rise-span Ratios of Foreign Suspension Bridges				
大桥名称	国家	主跨跨度/m	矢高/m	矢跨比
明石海峡大桥	日本	1 991	197	1/10
金门大桥	美国	1 280	143	1/8. 9
福斯大桥	英国	1 006	91	1/11
大鸣门大桥	日本	876	82	1/10. 7
维拉扎诺大桥	美国	1 298	117	1/11
南备赞濑户大桥	日本	1 100	100	1/11
北备赞濑户大桥	日本	990	94	1/10
因岛大桥	日本	770	76	1/10

1 650 m+485 m,加劲梁为单跨简支结构,荷载等级为公路Ⅰ级。利用西南交通大学开发的桥梁结构非线性计算软件BNLAS<sup>[10-11]</sup>,建立了双塔单跨悬吊悬索桥的空间有限元模型。该计算模型中主缆采用空间索单元;吊索采用空间杆单元,主塔和加劲梁采用空间梁单元。结构的约束条件是:主缆锚固处和主塔塔底为固结,主缆在塔顶主鞍座中心处按永不脱离点考虑,加劲梁梁端竖向约束、横向设置抗风支座、纵向放松约束。通过改变模型的矢跨比来研究其对结构受力的影响,模型中的矢跨比分别为1/8、1/9、1/10、1/11、1/12、1/13、1/14、1/15。

2 矢跨比对汽车活载作用效应的影响

图1、2分别为不同矢跨比λ时,悬索桥加劲梁

表 2 不同矢跨比下悬索桥活载的计算结果

Tab. 2 Calculated Results of Live Loads of Suspension Bridges Under Different Rise-span Ratios							
矢跨比	桥塔弯矩/(10 <sup>5</sup> kN·m)	主缆索力/10 <sup>4</sup> kN	桥塔纵向位移/m	梁端纵向位移/m		梁端转角/rad	
				最大值	最小值	最大值	最小值
1/8	1. 17	2. 87	0. 225	1. 103	−1. 125	0. 018	−0. 017
1/9	1. 56	3. 10	0. 226	0. 908	−0. 915	0. 017	−0. 016
1/10	1. 98	3. 32	0. 228	0. 764	−0. 757	0. 016	−0. 015
1/11	2. 45	3. 51	0. 230	0. 654	−0. 636	0. 016	−0. 015
1/12	2. 94	3. 68	0. 232	0. 570	−0. 540	0. 015	−0. 014
1/13	3. 46	3. 82	0. 233	0. 503	−0. 464	0. 015	−0. 014
1/14	3. 98	3. 93	0. 233	0. 449	−0. 401	0. 014	−0. 013
1/15	4. 57	4. 03	0. 232	0. 401	−0. 346	0. 014	−0. 013

的减小,加劲梁活载的最大正、负挠度变化趋势有差异。从图 1、2 可以看出,加劲梁正挠度(上缘受拉)变化随着矢跨比的减小而减小。矢跨比从 1/14 变化至 1/8 时,正挠度值相对增量也由 27%变化至 298%。由此可以得出结论:随着矢跨比的增大,加劲梁在汽车活载作用下正挠度增大趋势明显。而对于加劲梁负挠度(下缘受拉),在矢跨比取 1/15~1/8 时,加劲梁挠度呈非线性变化趋势,并且挠度最大值

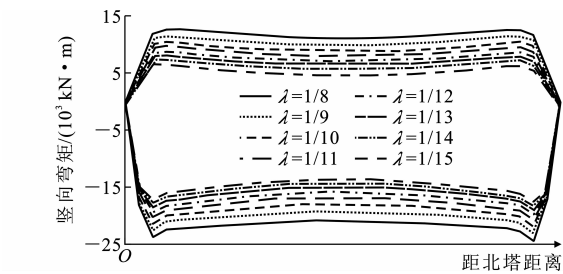


图 1 加劲梁活载的竖向弯矩

Fig. 1 Live Load Vertical Moments of Stiffening Girder

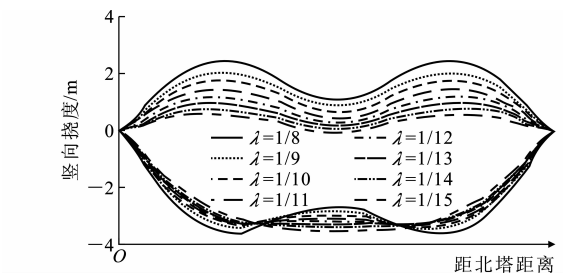


图 2 加劲梁活载的竖向挠度

Fig. 2 Live Load Vertical Deflections of Stiffening Girder

在汽车活载作用下的竖向弯矩及竖向挠度的变化。表 2 为不同矢跨比时悬索桥活载的计算结果。

随着矢跨比的增大,加劲梁活载的最大正、负弯矩都增大,加劲梁正弯矩(上缘受拉)变化速度快于加劲梁负弯矩。随着矢跨比的增大,加劲梁在汽车活载作用下,内力将得到相应的增大。随着矢跨比

所在位置也发生明显变化。在主缆矢跨比从 1/8 变化至 1/12 时加劲梁挠度逐渐减小,最大挠度相对位置也由主跨 1/4 位置移动至主跨 1/3 位置,当主缆矢跨比从 1/12 变化至 1/15 时,加劲梁最大负挠度又逐渐增大,相对挠度位置也从主跨1/3 位置开始移动。

由以上分析可以得出:随着矢跨比的减小,加劲梁活载最大挠度呈非线性变化趋势,即挠度减小后

增大,而控制位置也发生明显的变化,即由 1/4 跨中位置逐渐向跨中方向移动。随着矢跨比的减小,结构桥塔塔底弯矩、主缆索力、桥塔、加劲梁的纵向位移及加劲梁梁端的转角都出现一定规律的变化。从结果来看,结构体系随着矢跨比的减小,结构桥塔弯矩和主缆索力基本上呈线性增大,桥塔的纵向位移也是呈线性增大,对于加劲梁,随着矢跨比的减小,

在活载作用下,加劲梁的梁端纵向位移也逐渐减小,梁端转角也逐渐减小,但减少量不大。因此,随着悬索桥主缆矢跨比的增大,其竖向刚度减小。

### 3 矢跨比对横向风载作用效应的影响

表 3 为不同矢跨比时,悬索桥在横向风载作用下的计算结果。

表 3 不同矢跨比下悬索桥横向风载的计算结果

Tab. 3 Calculated Results of Transverse Wind Loads of Suspension Bridges Under Different Rise-span Ratios

矢跨比		1/8	1/9	1/10	1/11	1/12	1/13	1/14	1/15
有车横风载	弯矩最大值/(kN·m)	2 461	2 332	2 231	2 148	2 076	2 014	1 961	1 911
	弯矩最小值/(kN·m)	−17 939	−16 444	−15 268	−14 321	−13 521	−12 848	−12 268	−11 744
	挠度最大值/m	2.591 30	2.332 67	2.126 12	1.957 22	1.813 53	1.691 05	1.585 58	1.489 82
	挠度最小值/m	0.000 07	0.000 06	0.000 05	0.000 05	0.000 04	0.000 04	0.000 04	0.000 03
	桥塔弯矩/(kN·m)	265 062	249 860	238 663	229 182	219 139	210 313	203 957	199 182
	梁端纵向位移/m	0.058 43	0.052 67	0.048 14	0.044 49	0.041 40	0.038 79	0.036 55	0.034 53
	梁端转角/rad	0.000 04	0.000 03	0.000 03	0.000 03	0.000 03	0.000 03	0.000 02	0.000 02
极限风载	弯矩最大值/(kN·m)	11 340	10 812	10 380	10 024	9 711	9 441	9 205	8 980
	弯矩最小值/(kN·m)	−85 731	−78 750	−73 207	−68 745	−64 937	−61 737	−58 970	−56 466
	挠度最大值/m	12.309 9	11.113 9	10.145 6	9.351 2	8.671 6	8.091 1	7.589 6	7.134 6
	挠度最小值/m	0.001 1	0.001 0	0.000 8	0.000 7	0.000 6	0.000 6	0.000 5	0.000 5
	桥塔弯矩/(kN·m)	545 316	555 199	560 693	570 393	570 290	569 312	569 368	573 747
	梁端纵向位移/m	0.376 3	0.332 7	0.298 7	0.271 9	0.249 5	0.230 9	0.215 2	0.201 2
	梁端转角/rad	0.000 6	0.000 6	0.000 5	0.000 5	0.000 5	0.000 4	0.000 4	0.000 4

随着矢跨比的增大,不论是有车横风载还是极限风载,加劲梁的横向弯矩都逐渐增大(负弯矩的绝对值增大),加劲梁横向挠度、梁端纵向位移及梁端转角均与弯矩有类似的变化规律。桥塔弯矩与其不同,在有车横风载的作用下,桥塔塔底弯矩随着矢跨比的增大而变大;但在极限风载的作用下,桥塔塔底弯矩随着矢跨比的变化发生的改变较小,相对而言,矢跨比 1/8、1/9、1/10 较 1/11、1/12、1/13、1/14 的改变稍微大些,因此,随着悬索桥主缆矢跨比的增大,其横向刚度减小。

### 4 矢跨比对温度荷载作用效应的影响

表 4 为不同矢跨比时,温度荷载作用下悬索桥的计算结果。

随着矢跨比的增大,不论是体系升温还是体系降温,加劲梁的竖向弯矩都逐渐减小(负弯矩的绝对值减小),加劲梁纵向挠度、梁端纵向位移、桥塔塔底弯矩及梁端转角均与弯矩有类似的变化规律,其中对纵向挠度、桥塔弯矩及梁端纵向位移的影响较小。温度荷载作用下,加劲梁竖向弯矩及梁端转角随着矢跨比改变而减小的速率较大。

### 5 矢跨比对自振频率的影响

图 3 为单跨简支悬索桥的典型振型,表 5 为不同矢跨比时的部分自振频率。

一阶正对称侧弯、一阶反对称竖弯及一阶反对称侧弯的频率随着结构矢跨比的减小而逐渐增大;当矢跨比从 1/15 变化至 1/10 过程中,一阶正对称竖弯频率逐渐变大,当矢跨比继续增大,竖弯频率将逐渐减小;当矢跨比从 1/15 变化至 1/9 过程中,一阶对称扭转频率逐渐变大,当矢跨比继续增大,扭转频率将逐渐减小。

### 6 结 语

(1)汽车活载作用下,随着矢跨比的增大,加劲梁活载最大正、负弯矩都增大,加劲梁正弯矩变化速度快于加劲梁负弯矩,加劲梁活载最大正、负挠度变化趋势有差异,正挠度变化随着矢跨比的增大而增大,且增大趋势明显。对于加劲梁负挠度,在矢跨比取 1/15~1/8 时,加劲梁挠度呈非线性变化趋势,并且最大挠度所在位置也发生明显变化,即由 1/4 跨中位置逐渐向跨中方向移动。随着矢跨比的减小,

表 4 不同矢跨比下悬索桥温度荷载作用的计算结果

Tab. 4 Calculated Results of Temperature Loads of Suspension Bridges Under Different Rise-span Ratios

矢跨比		1/8	1/9	1/10	1/11	1/12	1/13	1/14	1/15
升温 20 ℃	弯矩最大值/(kN·m)	0.141	0.162	0.180	0.201	0.222	0.241	0.256	0.268
	弯矩最小值/(kN·m)	−860	−960	−1 031	−1 098	−1 185	−1 265	−1 315	−1 106
	挠度最大值/m	0.211 48	0.212 81	0.214 02	0.215 04	0.215 95	0.216 70	0.217 28	0.217 39
	挠度最小值/m	−0.212 5	−0.213 9	−0.215 0	−0.216 1	−0.217 0	−0.217 7	−0.218 3	−0.218 1
	桥塔弯矩/(kN·m)	14 181	14 309	14 446	14 570	14 725	14 886	15 030	19 462
	梁端纵向位移/m	−0.212 5	−0.213 9	−0.215 0	−0.216 1	−0.217 0	−0.217 7	−0.218 3	−0.218 1
	梁端转角/rad	−0.002 1	−0.002 3	−0.002 5	−0.002 6	−0.002 8	−0.002 9	−0.003 0	−0.003 1
降温 20 ℃	弯矩最大值/(kN·m)	876	976	1 049	1 117	1 198	1 271	1 315	1 357
	弯矩最小值/(kN·m)	−0.144	−0.166	−0.185	−0.206	−0.227	−0.246	−0.261	−0.273
	挠度最大值/m	0.213 9	0.215 6	0.217 0	0.218 3	0.219 5	0.220 4	0.221 1	0.221 1
	挠度最小值/m	−0.212 9	−0.214 5	−0.216 0	−0.217 3	−0.218 4	−0.219 4	−0.220 1	−0.220 4
	桥塔弯矩/(kN·m)	−14 200	−14 328	−14 466	−14 592	−14 749	−14 912	−15 058	−15 238
	梁端纵向位移/m	0.213 9	0.215 6	0.217 0	0.218 3	0.219 5	0.220 4	0.221 1	0.221 1
	梁端转角/rad	0.002 1	0.002 3	0.002 5	0.002 6	0.002 8	0.002 9	0.003 0	0.003 1

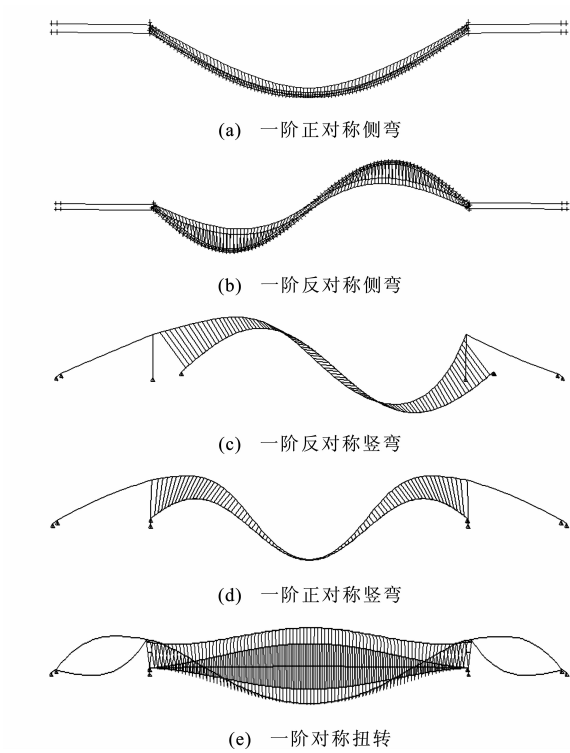


图 3 典型振型

Fig. 3 Typical Vibration Modes

结构桥塔弯矩和主缆拉力基本上呈线性增大,桥塔的纵向位移也是呈线性增大,对于加劲梁,随着矢跨比的减小,在活载作用下,加劲梁的梁端纵向位移也逐渐减小,梁端转角也是逐渐减小,但减少量不大。

(2)横向风载作用下,随着矢跨比的增大,不论是有车横风载还是极限风载,加劲梁的横向弯矩都逐渐增大(负弯矩的绝对值增大),加劲梁横向挠度、梁端纵向位移及梁端转角均与弯矩有类似的变化规律。桥塔弯矩与其不同,在有车横风载的作用下,桥塔塔底弯矩随着矢跨比的增大而变大;但在极限风载的作用下,桥塔塔底弯矩随着矢跨比的变化发生的改变较小,相对而言,矢跨比 1/8、1/9、1/10 较 1/11、1/12、1/13、1/14 的改变稍微大些。

(3)温度荷载作用下,随着矢跨比的增大,不论是体系升温还是体系降温,加劲梁的竖向弯矩都逐渐减小(负弯矩的绝对值减小),加劲梁纵向挠度、梁端纵向位移、桥塔塔底弯矩及梁端转角均与弯矩有类似的变化规律,其中对纵向挠度、桥塔弯矩及梁端纵向位移的影响较小。竖向弯矩及梁端转角随着矢

表 5 不同矢跨比下的自振频率

Tab. 5 Self-vibration Frequencies Under Different Rise-span Ratios

矢跨比		1/8	1/9	1/10	1/11	1/12	1/13	1/14	1/15
自振频率/ Hz	一阶正对称侧弯	0.041 23	0.043 24	0.045 14	0.046 93	0.486 44	0.050 28	0.051 85	0.053 36
	一阶反对称竖弯	0.069 78	0.074 89	0.079 65	0.084 11	0.088 32	0.092 30	0.096 08	0.099 67
	一阶反对称侧弯	0.098 07	0.100 15	0.102 08	0.103 90	0.105 63	0.107 27	0.108 84	0.110 35
	一阶正对称竖弯	0.110 28	0.113 99	0.115 99	0.115 95	0.114 12	0.111 29	0.108 13	0.105 03
	一阶对称扭转	0.234 03	0.239 65	0.234 39	0.227 23	0.217 84	0.211 10	0.205 26	0.200 70

跨比改变而减小的速率较大。

(4)对于悬索桥而言,主缆矢跨比直接影响悬索桥的整体刚度。选择较小的矢跨比有利于提高全桥的整体刚度,但相应会增大主缆的索力。

(5)在结构的前 25 阶振型中,绝大多数振型的自振频率都是伴随着矢跨比的增大而逐渐减小。一阶正对称侧弯、一阶反对称竖弯及一阶反对称侧弯的频率随着结构矢跨比的减小而逐渐增大;当矢跨比从 1/15 变化至 1/10 过程中,一阶正对称竖弯频率逐渐变大,当矢跨比继续增大,竖弯频率将逐渐减小;当矢跨比从 1/15 变化至 1/9 过程中,一阶对称扭转频率逐渐变大,当矢跨比继续增大,扭转频率将逐渐减小。

## 参考文献:

## References:

- [1] 黄光清. 主缆矢跨比对大跨悬索桥经济技术指标的影响[J]. 山西建筑, 2008, 34(16): 300-301.  
HUANG Guang-qing. The Effect of Vector-span Ratio of Main Cable on Economic and Technical Index of Long Span Suspension Bridges[J]. Shanxi Architecture, 2008, 34(16): 300-301.
- [2] 赵伟封, 梁智涛. 跨径 1 400 m 悬索桥方案设计及关键技术问题研究[J]. 中国公路学报, 1999, 12(增): 62-65.  
ZHAO Wei-feng, LIANG Zhi-tao. Scheme Design of the Suspension Bridge with a Span of 1 400 Meters and Research on the Key Technology[J]. China Journal of Highway and Transport, 1999, 12(S): 62-65.
- [3] 吴坤平. 大跨度悬索桥动力特性计算及参数分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007.  
WU Kun-ping. Study on Dynamic Characteristics of Long-span Suspension Bridge and Its Parametric Analysis[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2007.
- [4] 沈 慧. 悬索桥施工仿真计算及设计参数分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2006.  
SHEN Hui. Construction Simulation Computation and Analysis of Design Parameters for Suspension Bridge [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2006.
- [5] 严国敏, 周世忠. 现代悬索桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.

- YAN Guo-min, ZHOU Shi-zhong. Modern Suspension Bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [6] 陈 策, 钟建驰. 三塔悬索桥关键设计参数对其结构行为的影响[J]. 世界桥梁, 2008(2): 10-12, 22.  
CHEN Ce, ZHONG Jian-chi. Impact of Key Design Parameters of Three-tower Suspension Bridge on Structural Behavior of the Bridge[J]. World Bridges, 2008(2): 10-12, 22.
- [7] 刘来君, 吴士义. 悬索桥张拉锚跨索股施工控制技术[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(6): 36-40.  
LIU Lai-jun, WU Shi-yi. Construction Control Technique for Suspension Bridge Built by Drawing Anchorage Cable[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(6): 36-40.
- [8] 李枝军, 韩晓林, 李爱群, 等. 悬索桥桥塔挂缆前后动态特性分析与测试[J]. 中国公路学报, 2007, 20(5): 54-58.  
LI Zhi-jun, HAN Xiao-lin, LI Ai-qun, et al. Dynamic Analysis and Test of Bridge Tower of Suspension Bridge Before and After Cable Installed [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(5): 54-58.
- [9] 杨 进, 黄铁生. 汕头海湾悬索桥主缆设计[J]. 桥梁建设, 1993(2): 2-9.  
YANG Jin, HUANG Tie-sheng. Main Cable Design of Shantou Bay Suspension Bridge[J]. Bridge Construction, 1993(2): 2-9.
- [10] 唐茂林. 大跨度悬索桥空间几何非线性分析与软件开发[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.  
TANG Mao-lin. 3D Geometric Nonlinear Analysis of Long-span Suspension Bridge and Its Software Development[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003.
- [11] 唐茂林, 沈锐利, 强士中. 大跨度悬索桥非线性静动力分析与软件开发[J]. 桥梁建设, 2000(1): 9-12.  
TANG Mao-lin, SHEN Rui-li, QIANG Shi-zhong. Analytic Theories and Software Development of Spatial Non-linearity Static and Dynamic of Long-span Suspension Bridge[J]. Bridge Construction, 2000(1): 9-12.