

桥塔刚度对悬索桥的影响分析

崔冰¹, 林恰², 于旭东³, 唐茂林², 童育强¹

(1. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088; 2. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031;

3. 浙江省舟山连岛工程建设指挥部, 浙江舟山 316000)

[摘要] 为了研究悬索桥中桥塔刚度对悬索桥整体刚度的影响,以西堠门大桥为原型,采用西南交通大学编制的桥梁非线性计算软件 BNLAS 建立了双塔单跨悬索桥计算模型,该计算模型中跨主缆的跨度为 1 650 m,加劲梁为单跨简支结构体系。通过比较不同桥塔刚度(相对原型的 0.7,0.8,0.9,1.0,1.1,1.2 及 1.3 倍)情况下悬索桥受力的变化,分析桥塔刚度对悬索桥受力的影响。同时,随着越来越多的多塔多跨悬索桥的建造,笔者也研究了中间桥塔刚度变化对多塔多跨悬索桥受力的影响。

[关键词] 桥塔刚度;BNLAS;多塔多跨;中间桥塔

[中图分类号] TU311.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)07-0033-06

1 前言

对于悬索桥而言,桥塔作为主要的传力结构,如何选取合适的桥塔刚度以满足悬索桥整体受力要求,是悬索桥设计过程中的一项重要工作。近年来,越来越多的多塔多跨悬索桥在实际工程中得到了应用,如安徽马鞍山大桥、泰州大桥^[1]等。对于多塔多跨悬索桥而言,中间桥塔刚度的变化将对悬索桥受力产生影响。悬索桥桥塔中混凝土索塔刚度往往大于钢索塔^[2],同时结构的静风稳定性随主塔高度的增加而减小^[3]。为了分析悬索桥桥塔(包括中间桥塔)刚度对悬索桥结构刚度的影响,以西堠门大桥与马鞍山大桥为原型,取实际桥塔刚度为参考值“1”,通过改变桥塔刚度,相对实际模型桥塔刚度按相对比例取值分别为 0.7,0.8,0.9,1.0,1.1,1.2,1.3 共 7 种计算模型,利用西南交通大学编制的桥梁非线性计算软件 BNLAS^[4,5]建立相关空间有限元模型,其他结构参数不变,通过比较分析桥塔刚度对结构刚度的影响。其中西堠门大桥的计算模型主缆跨径为(485+1 650+485) m,马鞍山大桥的主缆跨

径布置与实桥一致,为(360+1 080+1 080+360) m。

2 桥塔刚度对悬索桥受力的影响分析

2.1 对汽车荷载作用效应的影响

图 1 及图 2 为不同桥塔刚度时,悬索桥加劲梁在汽车荷载作用下的最大竖向弯矩及竖向挠度的变化。

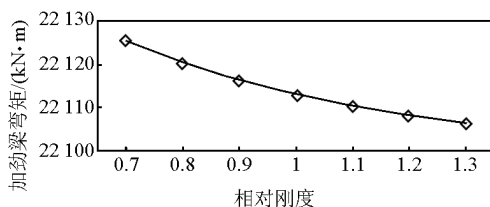


图 1 加劲梁活载最大竖向弯矩变化(单位:kN·m)

Fig. 1 The variation of largest live-load vertical moment of girder(unit:kN·m)

由图 1 和图 2 可以看出,在桥塔不同刚度下,活载弯矩值变化小,增减幅度不足 1%,桥塔刚度相对

[收稿日期] 2010-04-04

[基金项目] 国家科技支撑计划重点项目(2008BAG07B04)

[作者简介] 崔冰(1967-),男,河北枣强县人,教授级高级工程师,主要从事公路勘察设计领域的特大型桥梁的设计、管理与咨询工作;E-mail: NJ3Q@vip.sina.com

值从减少 30 % 变化至增加 30 % 时,加劲梁弯矩从 $-22\ 125.2\ \text{kN}\cdot\text{m}$ 变化至 $-22\ 106.44\ \text{kN}\cdot\text{m}$, 随刚度基本上是线性递减。而加劲梁最大挠度值则由 $-3.302\ \text{m}$ 变化至 $-3.291\ \text{m}$, 变化也很小, 增减幅度也不足 1 %。所以得出结论, 对于悬索桥而言, 桥塔刚度对悬索桥竖向刚度基本没有影响, 对加劲梁内力基本没有影响。

2.2 对横向风载作用效应的影响

表 1 为不同桥塔刚度时, 悬索桥在横向风载作用下的结果比较。由表 1 可知: 随着桥塔刚度的增加, 不论是有车横风还是极限风载, 加劲梁的横向弯矩、加劲梁横向挠度、桥塔弯矩及梁端纵向位移都略微减小, 但是增量很小。梁端转角随着桥塔刚度的增大而略微增大。桥塔刚度变化对悬索桥横向刚度基本没有影响。

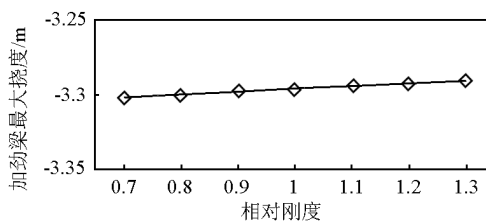


图 2 加劲梁活载最大竖向挠度变化(单位:m)

Fig. 2 The variation of largest live-load vertical deflection of girder (unit: m)

2.3 对温度变化作用效应的影响

表 2 为不同桥塔刚度时, 悬索桥在温度变化作用下的计算结果比较。其结果表明: 随着桥塔刚度的增加, 不论是体系升温还是体系降温, 加劲梁的竖向弯矩、加劲梁纵向位移、梁端纵向位移、加劲梁梁端转角都基本上没有变化, 而桥塔塔根弯矩随着桥塔刚度的增大逐渐增大。

表 1 横向风载计算结果

Table 1 The results of transverse wind-load

荷载类型	相对刚度	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3
有车风载	弯矩最大值/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	2 255.0	2 243.9	2 235.4	2 228.6	2 223.1	2 218.5	2 214.6
	弯矩最小值/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	-15 415.2	-15 342.3	-15 284.8	-15 240.2	-15 203.6	-15 173.4	-15 148.0
	挠度最大值/m	2.148 31	2.137 34	2.128 76	2.12 207	2.116 58	2.112 04	2.108 21
	挠度最小值/m	0.000 05	0.000 05	0.000 05	0.000 05	0.000 05	0.000 05	0.000 05
	桥塔弯矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	244 662.1	243 729.0	242 984.4	242 310.7	241 689.5	241 337.5	241 022.5
	梁端纵向位移/m	0.048 70	0.048 43	0.048 22	0.048 05	0.047 92	0.047 81	0.047 71
	梁端转角/rad	0.000 03	0.000 03	0.000 03	0.000 03	0.000 03	0.000 03	0.000 03
极限风载	弯矩最大值/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	10 434.9	10 405.3	10 382.2	10 364.1	10 349.2	10 336.7	10 326.2
	弯矩最小值/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	-73 748.9	-73 462.9	-73 237.0	-73 062.2	-72 918.4	-72 799.6	-72 699.9
	挠度最大值/m	10.215 04	10.177 95	10.1488 8	10.126 24	10.107 65	10.092 27	10.079 31
	挠度最小值/m	0.000 84	0.000 83	0.000 83	0.000 83	0.000 82	0.000 82	0.000 82
	桥塔弯矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	575 576.9	573 629.2	572 049.4	570 607.1	569 245.5	568 520.6	567 857.6
	梁端纵向位移/m	0.301 01	0.299 76	0.298 79	0.298 04	0.297 42	0.296 91	0.296 47
	梁端转角/rad	0.000 55	0.000 55	0.000 55	0.000 55	0.000 55	0.000 55	0.000 55

表 2 温度变化作用计算结果

Table 2 The results of temperature changes

荷载类型	相对刚度	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3
升温 20 °C	弯矩最大值/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068
	弯矩最小值/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	-3 488.2	-3 489.6	-3 490.5	-3 490.9	-3 490.9	-3 490.8	-3 490.5
	挠度最大值/m	0.215 23	0.215 26	0.215 28	0.215 3	0.215 3	0.215 31	0.215 3
	挠度最小值/m	-0.216 31	-0.216 35	-0.216 37	-0.216 38	-0.216 38	-0.216 38	-0.216 38
	桥塔弯矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	755.3	769.8	784.5	799.2	813.7	828.9	844.1
	梁端纵向位移/m	-0.216 31	-0.216 35	-0.216 37	-0.216 38	-0.216 38	-0.216 38	-0.216 38
	梁端转角/rad	-0.003 33	-0.003 33	-0.003 33	-0.003 32	-0.003 32	-0.003 32	-0.003 32
降温 20 °C	弯矩最大值/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	3 540.4	3 541.8	3 542.6	3 543	3 543	3 542.9	3 542.5

荷载类型	相对刚度	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3
弯矩最小值/(kN·m)		-0.069	-0.069	-0.069	-0.069	-0.069	-0.069	-0.07
挠度最大值/m		0.218 78	0.218 81	0.218 83	0.218 83	0.218 83	0.218 83	0.218 82
挠度最小值/m		-0.217 69	-0.217 72	-0.217 73	-0.217 74	-0.217 74	-0.217 74	-0.217 73
桥塔弯矩/(kN·m)		-352.8	-358.5	-364.6	-370.6	-376.6	-383.2	-389.7
梁端纵向位移/m		0.218 78	0.218 81	0.218 83	0.218 83	0.218 83	0.218 83	0.218 82
梁端转角/rad		0.003 359	0.003 357	0.003 354	0.003 352	0.003 349	0.003 346	0.003 343

2.4 对自振特性的影响

图3为悬索桥主要振型图,表3给出了对应的频率。结果表明: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桥塔刚度的增

大,而略微增大,改变量非常小;其中一阶扭转频率的改变最为明显。也就是说主塔的材料和截面尺寸等参数不影响主缆—桥面体系的振动^[6],但主塔刚度直接影响到以主塔为主的振动^[7]。

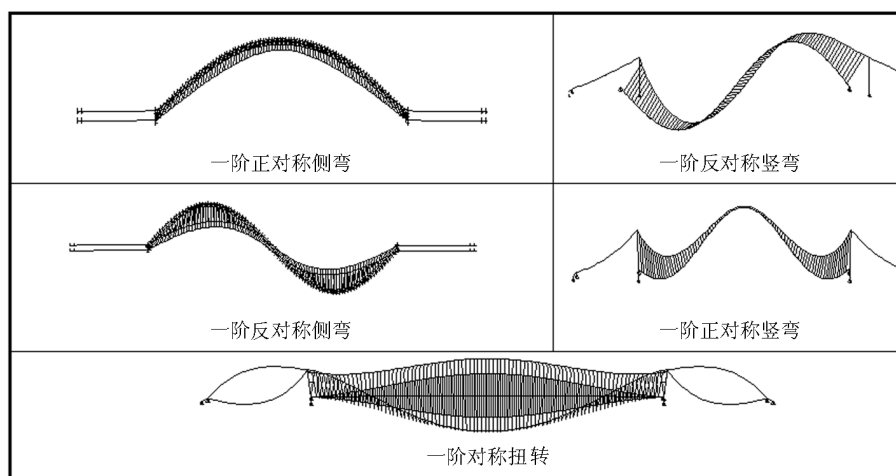


图3 振型图

Fig. 3 Modal graph

表3 振型频率表

Table 3 Modal frequency

相对刚度	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	Hz
一阶正对称侧弯	0.045 02	0.045 07	0.045 11	0.045 14	0.045 16	0.045 18	0.045 20	
一阶反对称竖弯	0.079 64	0.079 64	0.079 65	0.079 65	0.079 65	0.079 66	0.079 66	
一阶反对称侧弯	0.101 99	0.102 03	0.102 06	0.102 08	0.102 10	0.102 11	0.102 13	
一阶正对称竖弯	0.115 85	0.115 90	0.115 93	0.115 99	0.116 00	0.116 04	0.116 07	
一阶扭转	0.226 65	0.231 55	0.233 02	0.234 39	0.235 55	0.236 68	0.237 72	

3 中间桥塔刚度对悬索桥受力的影响分析

对于两塔悬索桥的桥塔和多塔悬索桥的边塔来说,由于塔顶受到来自边缆的有效约束,所以其塔顶纵向位移只与主缆的弹簧刚度有关,而与桥塔自身的刚度无关。但对于多塔悬索桥的中塔来说,由于中塔顶受到的纵向约束不足,所以其塔顶纵向位移除了与主缆的弹簧刚度有关外,还与中塔自身的刚

度有关。也就是说,改变中塔自身刚度将会对多塔悬索桥中塔顶的纵向位移产生影响,从而影响结构的整体刚度^[3,4]。以下以马鞍山大桥为例,研究中塔塔刚度对悬索桥受力的影响。

3.1 对汽车荷载作用效应的影响

图4及图5为不同中塔刚度时,悬索桥加劲梁在汽车荷载作用下的最大竖向弯矩及竖向挠度的变化。由图4和图5可以看出,在中间桥塔不同刚度

下,活载弯矩值变化很小,增减幅度最大只有1.6%,中间桥塔刚度相对值从减少30%变化至增加30%时,加劲梁负弯矩从-242 949 kN·m变化至-236 048 kN·m,加劲梁正弯矩从363 179 kN·m变化至355 759 kN·m,加劲梁汽车荷载竖向弯矩随中间桥塔刚度增大基本上是线性递减。而加劲梁最大挠度值则由-4.056 m变化至-3.377 m,变化较大,随着中间桥塔刚度的增大基本上是线性递减。梁端纵向位移及梁端转角(中塔处)也发生了改变。桥塔弯矩及主缆拉力随着中间桥塔刚度的增大而变大,桥塔弯矩的变化较大,主缆

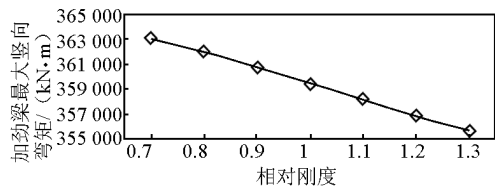


图4 加劲梁活载最大竖向弯矩变化(单位:kN·m)
Fig. 4 The variation of the largest live-load vertical moment of girder(unit:kN·m)

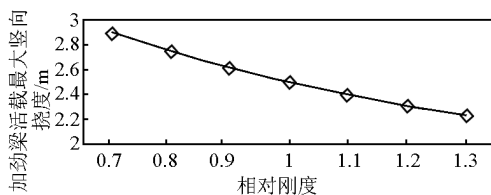


图5 加劲梁活载最大竖向挠度变化(单位:m)
Fig. 5 The variation of the largest live-load vertical deflection of girder(unit:m)

拉力的变化很小。所以得出结论,对于悬索桥而言,中间桥塔刚度对悬索桥竖向刚度有影响。

3.2 对横向风载作用效应的影响

表4为不同中塔刚度下,悬索桥在横向风载作用下的结果比较。结果表明:中塔刚度的增加,不论是有车横风还是极限风载,加劲梁的横向弯矩及横向挠度、桥塔弯矩、边塔梁端纵向位移均有减小,但是变化很小,最大变化率不足2.5%。边塔梁端转角及中塔梁端纵向位移不随中间桥塔刚度的变化而改变。因此认为中间桥塔刚度的改变对结构横向风载作用基本没有影响。

表4 横向风载作用计算结果

Table 4 The results of transverse wind-load of girder

荷载类型	中间桥塔相对刚度	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3
有车风载	弯矩最大值/(kN·m)	317 953	315 484	313 579	312 066	310 834	309 812	308 950
	弯矩最小值/(kN·m)	-163 030	-162 348	-161 822	-161 404	-161 064	-160 781	-160 543
	挠度最大值/m	0.383 52	0.381 05	0.379 13	0.377 61	0.376 36	0.375 34	0.374 47
	挠度最小值/m	0.002 53	0.002 53	0.002 53	0.002 53	0.002 53	0.002 53	0.002 53
	桥塔弯矩/(kN·m)	277 376.6	277 167.6	277 078.4	276 942.1	276 890	276 792.1	276 759.3
	边塔梁端纵向位移/m	0.000 34	0.000 34	0.000 33	0.000 33	0.000 33	0.000 33	0.000 33
	中塔梁端纵向位移/m	-0.000 01	-0.000 01	-0.000 01	-0.000 01	-0.000 01	-0.000 01	-0.000 01
	边塔梁端转角/rad	0	0	0	0	0	0	0
极限风载	弯矩最大值/(kN·m)	756 270	750 391	745 854	742 250	739 316	736 882	734 829
	弯矩最小值/(kN·m)	-387 807	-386 184	-384 931	-383 936	-383 125	-382 453	-381 886
	挠度最大值/m	0.912 31	0.906 41	0.901 84	0.89 822	0.895 26	0.892 81	0.890 74
	挠度最小值/m	0.006 04	0.006 04	0.006 04	0.006 03	0.006 03	0.006 03	0.006 03
	桥塔弯矩/(kN·m)	660 492.4	659 987.2	659 769	659 311.5	659 311.5	659 074.9	658 994.2
	边塔梁端纵向位移/m	0.001 91	0.001 9	0.001 88	0.001 87	0.001 86	0.001 85	0.001 85
	中塔梁端纵向位移/m	0	0	0	0	0	0	0
	边塔梁端转角/rad	-0.000 03	-0.000 03	-0.000 03	-0.000 03	-0.000 03	-0.000 03	-0.000 03

3.3 对温度变化作用效应的影响

表5为不同中塔刚度下,悬索桥在温度变化作用下的计算结果。结果表明:中塔刚度的增加,不论是体系升温还是体系降温,加劲梁竖向弯矩、纵向位

移、梁端纵向位移、梁端转角都基本上没有变化。因此认为,中间桥塔刚度的改变对结构没有影响,仅对桥塔内力产生较大影响。

表 5 温度变化作用计算结果

Table 5 The results of temperature changes

荷载类型	中间桥塔相对刚度	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3
升温 20 ℃	弯矩最大值/(kN·m)	-4 132	-4 133	-4 133	-4 134	-4 134	-4135	-4 135
	弯矩最小值/(kN·m)	-4 209	-4 210	-4 210	-4 211	-4 211	-4211	-4 211
	挠度最大值/m	0	0	0	0	0	0	0
	挠度最小值/m	-0.263 84	-0.263 85	-0.263 85	-0.263 86	-0.263 86	-0.26386	-0.263 87
	桥塔弯矩/(kN·m)	288 039.5	328 209.6	369 322	450 501.7	450 501.7	490570.8	531 579.7
	边塔梁端纵向位移/m	-0.263 84	-0.263 85	-0.263 85	-0.263 86	-0.263 86	-0.26386	-0.263 87
	中塔梁端纵向位移/m	0.000 33	0.000 33	0.000 33	0.000 33	0.000 33	0.000 33	0.000 33
	边塔梁端转角/rad	-0.002 62	-0.002 62	-0.002 62	-0.002 62	-0.002 62	-0.00262	-0.002 62
	弯矩最大值/(kN·m)	4 160	4 161	4 161	4 161	4 162	4162	4 162
	弯矩最小值/(kN·m)	-26 989	-27 006	-27 020	-27 030	-27 039	-27047	-27 053
降温 20 ℃	挠度最大值/m	0.265 65	0.265 66	0.265 67	0.265 67	0.265 67	0.26568	0.265 68
	挠度最小值/m	0	0	0	0	0	0	0
	桥塔弯矩/(kN·m)	288 420.7	328 635.6	369 793.9	409 958	451 064.2	491 178	532 232.6
	边塔梁端纵向位移/m	0.265 65	0.265 66	0.265 67	0.265 67	0.265 67	0.265 68	0.265 68
	中塔梁端纵向位移/m	-0.000 33	-0.000 33	-0.000 33	-0.000 33	-0.000 33	-0.00033	-0.000 33
	边塔梁端转角/rad	0.002 64	0.002 64	0.002 64	0.002 64	0.002 64	0.002 64	0.002 64

3.4 对自振特性的影响

图 6 为不同中塔刚度下,大桥的前 25 阶自振频率。结果表明:在结构的前 25 阶振型中,其对应的频率都是伴随着中间桥塔刚度的增大而略微变大,

有的基本上没有变化,其中第 2,3 及 8 振型的频率随桥塔刚度变化而发生的改变较其他振型的频率大些,而第 17 振型的频率不随着中间桥塔刚度的变化而改变。

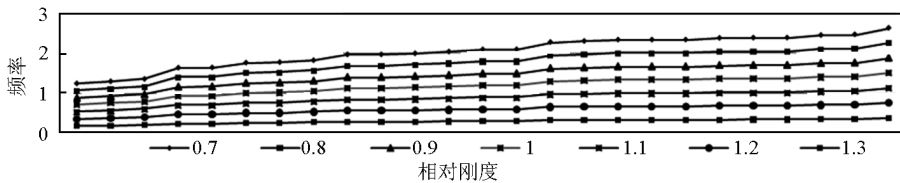


图 6 不同中塔刚度下悬索桥前 25 阶自振频率

Fig. 6 Former 25th natural vibration frequency of suspension bridge with different mid - tower stiffness

4 结语

讨论不同桥塔刚度对特大跨径箱梁悬索桥单跨悬吊结构体系的影响,得出以下结论:

两塔悬索桥:a. 汽车荷载作用下,在桥塔不同刚度下,活载弯矩值变化很小,随刚度基本上是线性递减,而加劲梁最大挠度值变化也很小。横向风荷载作用下,随着桥塔刚度的增加,加劲梁的横向弯矩、加劲梁横向挠度、桥塔弯矩及梁端纵向位移都略微减小,但是增量很小。梁端转角随着桥塔刚度的增大而略微增大。温度变化作用下,随着桥塔刚度的增加,加劲梁的竖向弯矩、纵向位移、梁端纵向位移、加劲梁梁端转角都基本上没有变化,而桥塔塔根弯矩随着桥塔刚度的增大逐渐增大。所以得出结论,

对于悬索桥而言,桥塔刚度对整个结构体系刚度影响很小。b. 在结构的前 25 阶振型中,对于绝大多数振型的频率都是伴随着桥塔刚度的增大而略微变大,有的基本上没有变化。

多塔悬索桥(中塔刚度):a. 汽车荷载作用下,在中间桥塔不同刚度下,活载弯矩值变化很小,加劲梁汽车荷载竖向弯矩随中间桥塔刚度增大,基本上是线性递减。而加劲梁最大挠度值变化较大,随着中间桥塔刚度的增大基本上是线性递减。梁端纵向位移及梁端转角(中塔处)也发生了改变。桥塔弯矩及主缆拉力随着中间桥塔刚度的增大而变大,桥塔弯矩的变化较大,主缆拉力的变化很小。横向风荷载作用下,随着中间桥塔刚度的增加,加劲梁的横向弯矩、横向挠度、桥塔弯矩、边塔梁端纵向位移均

有减小,但是变化很小。边塔梁端转角及中塔梁端纵向位移不随中间桥塔刚度的变化而改变。温度变化作用下,随着中间桥塔刚度的增加,加劲梁的竖向弯矩、纵向位移、梁端纵向位移及加劲梁梁端转角都基本上没有变化。而桥塔塔根弯矩随着中间桥塔刚度的增大明显变大。所以得出结论,对于悬索桥而言,中间桥塔刚度对整个结构体系刚度有影响。b. 在结构的前 25 阶振型中,其对应的频率都是伴随着中间桥塔刚度的增大而略微变大,有的基本上没有变化。

参考文献

[1] 王 勇. 马鞍山长江公路大桥左汉三塔两跨悬索桥中塔形式

及塔梁连接方式的确定[D]. 合肥:合肥工业大学,2009

- [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, (5): 62 - 65
- [3] 唐清华. 大跨径悬索桥空气静力稳定性研究[D]. 成都:西南交通大学,2005
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 朱本瑾. 多塔悬索桥的结构体系研究[D]. 上海:同济大学,2007
- [8] 王 萍. 多塔连续体系悬索桥静动力特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2007

Influence analysis of tower stiffness on suspension bridge

Cui Bing¹, Lin Qia², Yu Xudong³, Tang Maolin², Tong Yuqiang¹

(1. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China;

2. Department of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

3. Zhejiang Provincial Construction Headquarters of Zhoushan Islands Link Project, Zhoushan, Zhejiang 316000, China)

[**Abstract**] In order to study the influence of tower stiffness on suspension bridge, this paper took Xihoumen Suspension Bridge as a prototype, established its finite element model by using BNLAS (Bridge Nonlinear Analysis System), which was developed by Southwest Jiaotong University. This model is a two-tower single-span suspension bridge with the main cable span of 1 650 m, and it has single-span simply supported girder. Then, the influence of suspension bridge structural performance with different tower stiffness was analyzed by changing the model's tower stiffness (0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2 and 1.3 times of original tower stiffness). This paper also discussed the influence of mid-tower stiffness in multi-tower and multi-span suspension bridge.

[**Key words**] tower stiffness; BNLAS; multi-tower and multi-span; mid-tower