

不同支承体系对高低塔斜拉桥汽车荷载响应的影响分析

詹璐, 李渊, 丁望星, 廖原

(湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051)

摘要: 高低塔不对称结构体系斜拉桥由于跨径布置的不对称, 存在结构刚度过渡不顺、内力分布不均等问题。该文针对某高低塔不对称结构体系斜拉桥在不同支承方案汽车荷载作用下的结构响应进行对比分析, 研究不同支承方式对桥梁结构力学行为的影响。结果表明: 对于高低塔不对称斜拉桥结构, 采用高塔侧塔梁固结、低塔侧半漂浮的不对称支承方式, 可以减小两半桥之间的刚度差异, 中跨分界区刚度过渡更平顺, 结构内力分布更均衡, 进而各构件的承载能力得以充分发挥。

关键词: 斜拉桥; 高低塔; 支承体系; 汽车荷载响应; 影响分析

高低塔不对称斜拉桥结构, 因地形、通航条件等限制, 跨径布置不对称, 造成两半桥体系刚度差异较大, 在中跨分界附近区域主梁响应等存在突变、过渡不顺等现象。因此, 有必要采取措施, 减小两侧刚度差异。斜拉桥结构根据索塔与主梁之间的支承方式, 结构支承体系通常分为全漂浮、半漂浮和塔梁固结等。塔梁之间的支承方式, 影响了荷载在塔、梁、索之间的传递。通常, 对称结构多采用半漂浮支承体系, 塔梁之间分别通过斜拉索于塔端及支座在塔梁交界处传递荷载。塔梁固结则增强了塔梁交界处联结刚度, 更多荷载效应在此处直接传递, 塔梁协同受力。

对于高低塔的结构设计优化, 多采用大跨侧设置辅助墩、调节端锚索或增加小跨侧塔高等方式。该文以湖北省丹江口汉江公路大桥为研究对象, 采用数值分析方法, 对比分析高低塔不对称斜拉桥结构在不同

支承方式下的汽车荷载(以下简称汽车荷载)响应, 通过优化支承方式提高结构在荷载传递和结构内力分布方面的合理性和均衡性, 减小高低塔两半桥刚度差异。

1 项目介绍

1.1 工程概况

丹江口汉江公路大桥位于湖北省丹江口市境内。图1为主桥桥型布置示意图。受到两岸地形条件和通航要求限制, 汉江在该河段西岸(土关垭侧)受到冲刷, 地势高陡, 东岸(丹江口侧)淤积则平缓, 深泓和主航道均偏于西岸, 最终主桥采用主跨260 m双塔三跨不对称预应力混凝土斜拉桥方案, 跨度组合为(145+260+85) m; 边、中跨比为0.558、0.327, 两侧边跨受通航限制均未设置辅助墩。

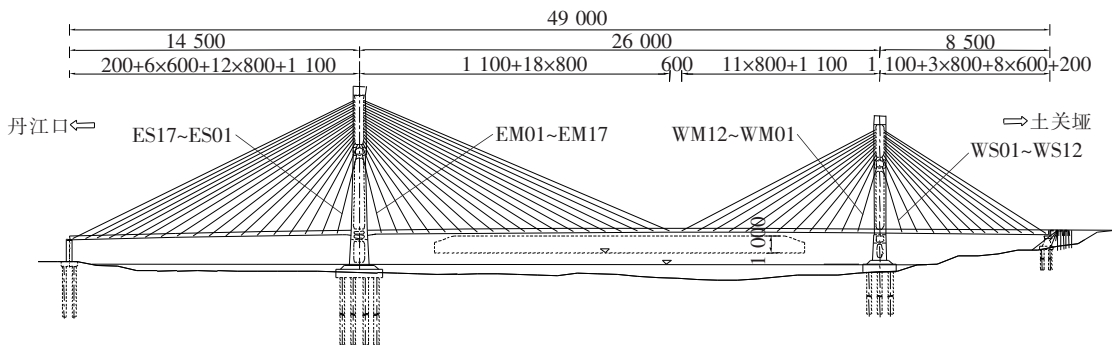


图1 主桥桥型布置示意图(单位:cm)

1.2 支承方案

根据该桥东西侧边跨跨径差异大、东塔高西塔矮、结构不对称、东西半桥刚度差异大等特点,拟通过采用塔梁固结的支承方式提高结构刚度,改善结构力学行为,同时因桥塔塔墩较矮,结构对塔梁固结引起的对主梁及桥塔变形的限制作用适应能力有限,综合以上考虑,提出 3 种支承方案。方案 1:东西双塔半漂浮;方案 2:东西双塔塔梁固结;方案 3:东塔塔梁固结+西塔半漂浮。该文主要对 3 种支承方案下高低塔斜拉桥在汽车荷载作用下的结构变形、内力分配等力学响应进行对比分析。

1.3 计算模型

采用三维梁单元模拟索塔、桥墩、主梁,采用索单元模拟斜拉索。边界条件:过渡墩处为竖向约束;索塔塔柱底和墩底考虑基础出口刚度。全桥计算模型如图 2 所示。

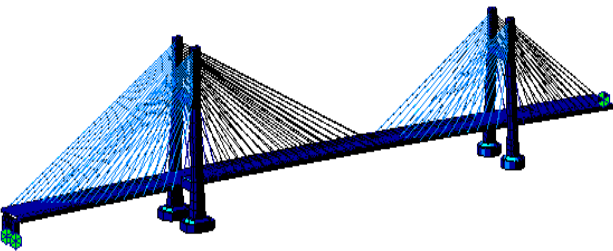


图 2 全桥计算模型示意图

2 结果与讨论

2.1 结构变形

计算汽车荷载作用下的主梁梁端纵向位移和塔顶偏位,其结果如表 1 所示。

表 1 汽车荷载作用下梁端位移与塔顶偏位

方案	位置	梁端位移/m		塔顶偏位/m	
		max	min	max	min
1	东侧	0.066	-0.063	0.052	-0.025
	西侧	0.063	-0.061	0.050	-0.072
2	东侧	0.003	-0.001	0.063	-0.042
	西侧	0.001	-0.002	0.017	-0.043
3	东侧	0.004	-0.001	0.072	-0.047
	西侧	0.006	-0.005	0.021	-0.048

由表 1 可以看出:方案 1 东西半桥梁端位移较大且基本一致,东西塔塔顶偏位最大值接近,西塔塔顶偏位最小值接近东塔的 2.9 倍,说明在半漂浮支承体系下,塔梁分离,主梁刚度较小,东西侧主梁变形连续,主

梁承担的汽车荷载效应主要通过斜拉索在塔顶传递至塔身,西塔因塔柱较矮,西半桥整体刚度相对更大,产生的响应较大;方案 2 主梁梁端位移均显著降低,东侧塔顶偏位最大值增加 21%,西侧塔顶偏位最大值则减小了 66%,东塔偏位是西塔的 3.7 倍,说明双塔塔梁固结,梁端位移受限,对塔顶偏位,尤其是西塔影响显著,西塔受汽车荷载效应影响明显减小;方案 3 东侧梁端位移与方案 2 接近,西侧梁端位移相对方案 2 有大幅增加,但仍远小于方案 1,东西侧塔顶偏位均有小幅增加,东塔偏位是西塔的 3.4 倍,说明方案 3 西半桥塔梁联结刚度降低对东半桥梁端位移、东西桥塔偏位影响有限,相对方案 2,结构整体刚度降低。

主梁在汽车荷载作用下的竖向位移如图 3 所示。

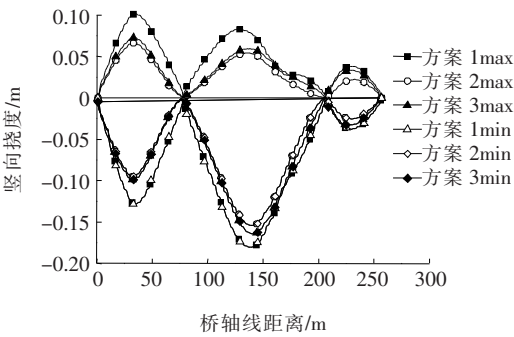


图 3 汽车荷载作用下主梁竖向挠度

由图 3 可知:汽车荷载作用下,方案 1 中跨主梁挠度最大为 0.08 m,最小为-0.18 m,跨中上挠极值点距中跨中心 23.5 m,下挠极值点位置偏离中跨中心点 9.5 m,且中跨上挠挠度曲线在靠近西塔的位置挠度曲线有明显的凹陷,挠度值下降。由此可见,东西半桥主梁刚度差距较大,西边跨的锚固作用明显,使得中跨在靠近西侧的区域刚度过渡不平顺。方案 2 全桥主梁挠度降低,挠曲曲线也更加平滑,东侧边跨挠度最大减少 0.08 m,西侧边跨最大减少 0.04 m,中跨挠度峰值为-0.15 m,与方案 1 相比,减小 17%。同时东、西半桥边跨峰值位置分别向远塔端移动 4.4、3 m,中跨挠度峰值位置向跨中移动 17.8 m。由此可见,东半桥塔梁固结对东半桥的刚度影响明显,使得中跨挠度极值点向跨中点方向移动,使中跨受力特性更接近对称结构,对结构更为有利。方案 3 东半桥主梁挠度与方案 2 挠度曲线基本重合,略有增大。中跨挠度峰值的位置也基本重合。自跨中挠度峰值点处向西,挠度有小幅增加,挠度曲线相对方案 2 更加平顺。西半桥边跨侧,主梁挠度曲线接近方案 1 的挠度曲线,但略小于方案 1,表明方案 3 单独取消西半桥塔梁固结使得东

西半桥刚度差异进一步减小,对中跨在汽车荷载下的挠度变化总体规律影响有限,仅西半桥主梁挠度有小幅增加。

2.2 结构内力

计算得到不同荷载作用下的塔底顺桥向弯矩结果如表 2 所示。

表 2 汽车荷载作用下塔底顺桥向弯矩

方案	位置	顺桥向弯矩/(kN·m)	
		max	min
1	东塔	57 090	−99 695
	西塔	98 097	−68 760
2	东塔	63 501	−82 652
	西塔	48 692	−28 349
3	东塔	96 614	−137 021
	西塔	68 468	−32 958

由表 2 可知:汽车荷载作用下,方案 1 西塔塔底弯矩最大值为东塔的 1.7 倍,东塔最小值为西塔的 1.4 倍;方案 2 东塔塔底弯矩最大值增加 11%,最小值降低 17%,西塔塔底弯矩最大、最小值分别降低 50%、59%,东塔塔底弯矩最大、最小值分别为西塔的 1.3、2.9 倍;方案 3 东塔底弯矩最大值增加幅度较方案 2 更大,相对方案 1 增加了 69%,西塔最大、最小值则分别降低了 30%、52%,东塔塔底弯矩最大、小值分别为西塔的 1.4、4.2 倍。由此可见,方案 2 同时增加了东西半桥的塔梁协同刚度,显著降低了汽车荷载作用下刚度较小的西塔的塔底弯矩,刚度较大的东半桥东塔塔底弯矩小幅增加,内力重分配效果明显,结构受力趋于合理。方案 3 东西塔底弯矩差距进一步增大,其中东塔承担的荷载效应增幅明显,西塔则增幅不大,在进一步发挥东塔刚度优势的同时,对西塔的影响也在可控范围内。

计算得到汽车荷载作用下的塔梁交界处主梁轴力

和顺桥向弯矩,其结果如表 3 所示。

表 3 塔梁交界处主梁轴力和顺桥向弯矩

方案	位置	主梁轴力/kN		顺桥向弯矩(kN·m)	
		max	min	max	min
1	东侧	6 767	−14 285	511	−7 136
	西侧	4 374	−15 568	343	−4 140
2	东侧	8 370	−30 906	2 708	−11 831
	西侧	16 297	−23 876	442	−4 029
3	东侧	7 809	−30 162	799	−7 303
	西侧	4 175	−15 347	623	−4 303

由表 3 可知:汽车荷载作用下,方案 1 的主梁轴力和顺桥向弯矩最小;方案 2 的东侧主梁轴力最小值增加了 1.16 倍,顺桥向弯矩最大值相对方案 1 增加了 4.3 倍,西侧主梁轴力最大值相对方案 1 增加了 2.7 倍,而顺桥向弯矩增幅不大;方案 3 东侧主梁轴力相对方案 2 无明显变化,顺桥向弯矩最大、最小值分别降低 70%、38%,而西侧主梁轴力和顺桥向弯矩与方案 1 相近,相对方案 2,轴力最大、最小值分别降低 74%、36%。计算结果表明,方案 2 主梁在塔梁交界处的内力显著增大,其中东塔侧塔梁交界处主梁轴力、顺向弯矩均增幅明显,对主梁承载能力要求提高,西塔侧主梁内力则主要表现为轴力增幅较大。相对而言,方案 3 东半桥塔梁交界处主梁弯矩、西半桥主梁轴力显著减小,对主梁受力更为有利。

2.3 结构应力

(1) 主梁应力。计算得到汽车荷载作用下的主梁应力如表 4 所示。由表 4 可知:与方案 1 相比,方案 2 因塔梁固结,东半桥主梁边中跨应力分别降低约 20%、27%,西半桥主梁边中跨应力分别降低约 39%、21%;东西半桥塔梁交界处主梁应力幅值相对方案 1 都提高近 1 倍,说明方案 2 双塔塔梁固结对边中跨主梁受力更为有利;方案 3 与方案 2 东西半桥中跨应力

表 4 汽车荷载作用下的主梁应力

MPa

位置	方案 1			方案 2			方案 3		
	σ_{\max}	σ_{\min}	$\Delta\sigma$	σ_{\max}	σ_{\min}	$\Delta\sigma$	σ_{\max}	σ_{\min}	$\Delta\sigma$
边跨	7.9	−5.4	13.3	6.6	−4.0	10.6	6.8	−4.3	11.1
东半桥 塔梁交界处	0	−3.0	3.0	1.8	−4.5	6.3	1.7	−4.4	6.1
中跨	6.4	−3.0	9.4	5.2	−1.7	6.9	5.5	−2.0	7.5
中跨	5.4	−3.8	9.2	4.3	−3.0	7.3	4.5	−2.8	7.3
西半桥 塔梁交界处	0.3	−2.6	2.9	0.9	−5.0	5.9	−0.5	−2.6	2.1
边跨	3.9	−3.1	7.0	2.4	−1.9	4.3	3.4	−2.5	5.9

幅值接近,仅在西半桥边跨小幅增加 37%,但仍小于方案 1 西半桥边跨应力幅,与此同时西半桥主梁塔梁交界处应力幅降低约 64%,且略小于方案 1,说明方案 3 取消西塔塔梁固结,对西半桥塔根部主梁受力有利,且对边中跨主梁应力幅影响有限。

(2) 斜拉索应力。计算汽车荷载作用下斜拉索应力幅,其结果如图 4 所示。

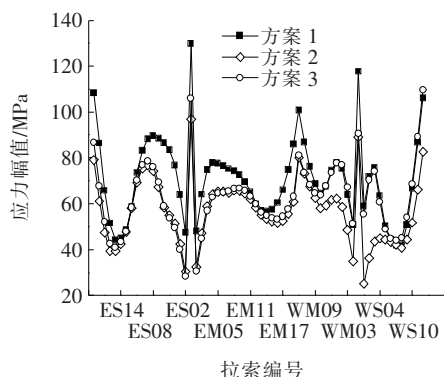


图 4 汽车荷载作用下斜拉索应力幅

由图 4 可知:汽车荷载作用下,方案 1 斜拉索应力幅同比最大;方案 2 因东西塔塔梁固结,斜拉索应力幅下降,其中以边中跨尾索区和近塔区斜拉索应力幅降幅更为明显,均值达到 23%左右,东半桥近塔区最大达到 35%,西半桥近塔区最大达到 57%;方案 3 西半桥中跨斜拉索应力幅降幅较方案 2 有小幅增大,近塔区及边跨尾索区应力幅与方案 1 相近,个别拉索应力幅增加 5%左右。说明方案 3 东塔固结对西半桥中跨区拉索应力幅仍有一定控制作用,对提高整个中跨区刚度有利,其影响随着远离中跨区而逐渐减小。

3 结论

依托丹江口汉江公路大桥实际工程项目,对比分析了高低塔不对称斜拉桥结构在不同支承体系下的汽车荷载响应,主要结论如下:

(1) 方案 1 为常规斜拉桥支承方案。在汽车荷载作用下,主梁中跨挠度不平顺、局部存在突变,且极值点位置偏离中跨中心点最远;西塔塔底顺桥向弯矩是东塔的 1.7 倍,不能很好地发挥高桥塔的承载能力;主梁及斜拉索应力幅同比最大。对于高低塔的不对称结构,采用常规支承方案不利于结构内力的合理分布。

(2) 方案 2 双塔塔梁同时固结,提高了两半桥刚

度,塔梁协同受力,使得桥塔能较好地参与到汽车荷载作用下的内力分配中,相比方案 1,东塔塔底弯矩最大值增加 11%,西塔塔底弯矩最大值减少 50%。主梁挠度中跨峰值降低约 17%且峰值位置向中跨中心点移动。说明中跨主梁受不对称布跨影响减弱,主梁在汽车荷载下的变形更加平顺,接近对称结构。与此同时,主梁边中跨应力幅降低,塔梁交界处主梁应力幅值均提高近一倍,对塔梁交界处主梁承载能力要求相应提高。

(3) 方案 3 仅东塔塔梁固结,东塔塔底弯矩大幅增加,最大、最小值分别为西塔的 1.4、4.2 倍,进一步发挥了东塔的承载能力。同时,东半桥边中跨及西半桥中跨主梁挠度、应力幅值等皆与方案 2 接近,仅在西半桥边跨小幅增加,且塔梁交界处主梁内力显著降低,应力幅降低约 64%,说明相对方案 2,西半桥刚度削弱,东西半桥的刚度差异减小,结构的整体刚度降低,东西半桥塔梁交界处主梁承载力需求降低,且对中跨影响有限,主梁的内力分布更合理。

综上所述,方案 3 采用不对称的支承方式,很好地适应了该桥的高低塔不对称布跨,塔墩较矮的结构特点,减小了主梁在汽车荷载作用下因布跨不对称引起的应力突变等不利效应,高塔的承载能力优势也得以充分发挥。

参考文献:

- [1] 胡斯彦,周安娜.丹江口汉江公路大桥主桥设计方案比选[J].世界桥梁,2016(3).
- [2] 马振标,卢光明,黄刚.高低塔固结体系斜拉桥结构优化设计方法[J].世界桥梁,2015(4).
- [3] 林元培.斜拉桥[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [4] 李江龙.辅助墩对斜拉桥静力和动力响应影响[D].哈尔滨工业大学硕士学位论文,2009.
- [5] 裴炳志,叶见曙,李学文,等.辅助墩对大跨度高低塔 PC 斜拉桥的受力影响分析[J].桥梁建设,2005(6).
- [6] 谷振.高低塔 PC 斜拉桥设计参数分析与优化[D].长安大学硕士学位论文,2013.
- [7] 顾颖,靳帮虎.移动车辆荷载作用下高低塔斜拉桥动力响应时程分析[J].中外公路,2018(3).
- [8] 张振华.高低塔空间索面斜塔斜拉桥设计优化及其结构计算分析[D].北京工业大学硕士学位论文,2008.
- [9] 欧珍华.塔墩梁固结非对称双塔斜拉桥结构合理状态的研究与应用[D].重庆交通大学硕士学位论文,2007.
- [10] 卢绍鸿.甘竹溪大桥高低塔斜拉桥方案设计研究[D].华南理工大学硕士学位论文,2005.