

铁路缆索承重桥梁力学性能分析与对比研究

张鸿¹, 何恺², 彭成明³, 陈少林³

(1.中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430071; 2.西南交通大学 土木工程学院;
3.长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室)

摘要: 铁路修建过程中,在线路需要跨越有通航要求的江海或有地形限制的高深山谷时,不得不选用大跨度桥梁。斜拉桥、悬索桥及斜拉—悬吊协作体系3类桥型具有跨越能力强的优势,通常被优先考虑。铁路车辆因其活载大、运行速度快等特点,对列车的行车安全性和运行平稳性有较高的要求。该文基于主跨900 m的桥型,采用杆系有限元程序分别探讨以上3类桥型在双线铁路荷载及四线公路荷载共同作用下的结构内力及变形情况,得出斜拉—悬吊协作体系在桥塔和主梁截面受力、结构刚度方面都优于悬索桥和部分地锚式斜拉桥的结论。

关键词: 铁路; 缆索承重; 斜拉—悬吊协作体系; 力学性能

悬索桥以高强钢丝构成的缆索系统作为主要的承力构件,跨越能力强,抗震性能好,成为千米级跨度桥梁的首选桥型,并有成功运用于铁路上的先例,但是悬索桥的刚度小,活载作用下变形大,影响列车的行车速度。公铁两用斜拉桥的几何非线性问题较突出,与同等跨度的悬索桥相比,斜拉桥桥塔更高,悬臂施工长度长,施工风险高,斜拉索风雨振动及疲劳问题显著,主梁轴力较大,主梁与斜拉索锚固区局部稳定性问题突出。千米级公铁两用悬索桥已建成运营,千米级的公铁两用斜拉桥也已证明在技术上是可行的。斜拉—悬吊协作体系综合以上两种桥型的各自优势,优化了结构的受力性能,保证结构具有较大跨越能力的同时,在结构刚度、静动力特性和经济性方面具有一定优势,在大跨度铁路桥梁中具备竞争力,但是其结构形式复杂,施工方案需要深入研究,最具代表性的为土耳其的博

斯普鲁斯三桥。

该文针对斜拉桥、悬索桥及斜拉—悬吊协作体系桥型,比较同跨度3种结构在荷载作用下的内力及变形情况,并结合结构各自的特点,从安全经济合理的角度给出选型建议。

1 结构体系设计方案

某条线路设计通行要求为双线铁路与四线公路并行,如图1所示。公路荷载采用“公路—Ⅰ级”荷载,铁路荷载采用中华人民共和国铁路标准活载中的普通活载,列车长度取为480 m,加载图示如图2所示。为研究该通行条件下,主梁跨度布置为(240+900+240) m的桥梁在运营荷载时的受力特点,设计中比较了斜拉—悬吊、斜拉桥、悬索桥3种结构体系方案。

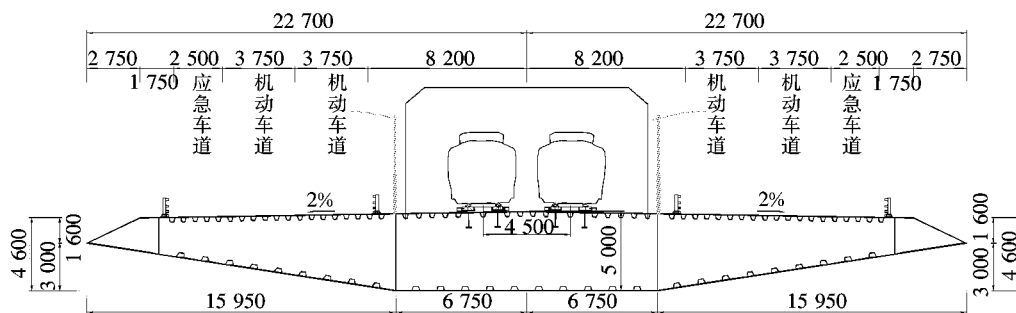


图1 桥梁横断面图(单位:mm)

收稿日期:2018-07-23

作者简介:张鸿,男,博士,教授级高工.E-mail:ming040416@163.com

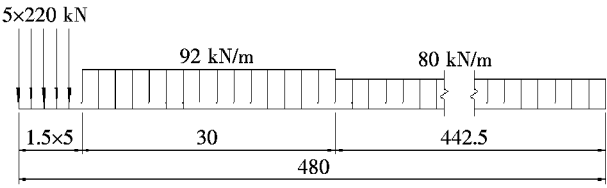


图 2 列车荷载加载图(长度单位:m)

1.1 方案 1:斜拉一悬吊协作体系

主梁跨度布置为(240+900+240) m 的斜拉一悬吊协作体系桥梁,桥型总体布置如图 3 所示。全桥共设置 176 根斜拉索,33 对吊索,斜拉一悬吊重叠区单侧长 135 m,中跨主缆成桥状态矢高 140 m。边跨采用预应力混凝土箱梁并设置 1 个过渡墩和 2 个辅助墩,主跨采用钢箱梁。桥塔高 202.5 m,主缆横向间距 13.5 m,吊索及边跨斜拉索锚固于铁路线两侧,锚固区横向间距 13.5 m,主跨斜拉索锚固于钢箱梁两端,锚固区横向间距 38.9 m。

1.2 方案 2:斜拉桥

主梁跨度布置为(240+900+240) m 的斜拉桥,桥型总体布置如图 4 所示。全桥共设置 224 根斜拉索,主跨为钢箱梁,斜拉索锚固区纵桥向间距 15 m;边跨为预应力混凝土箱梁,设置 1 个过渡墩,2 个辅助墩,斜拉索锚固区纵桥向间距 10 m,一侧边跨有 5 对斜拉索采用地锚锚固。桥塔高 213.5 m,横向为 A 形塔,梁上锚固区位于铁路线两侧,锚固区横向间距为 13.5 m。

1.3 方案 3:悬索桥

主缆跨度布置为(250+900+250) m,主梁跨度布置为(240+900+240) m 的单跨悬吊悬索桥,桥型总体布置如图 5 所示。全桥设置 58 对吊索,吊索间距

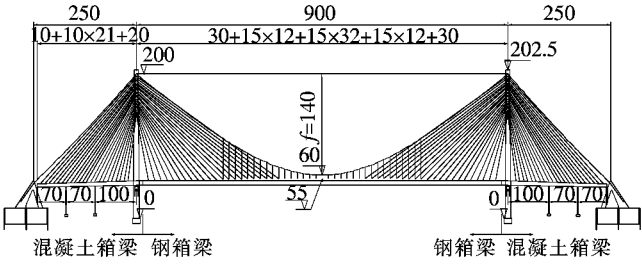


图 3 斜拉一悬吊协作体系桥型布置图(单位:m)

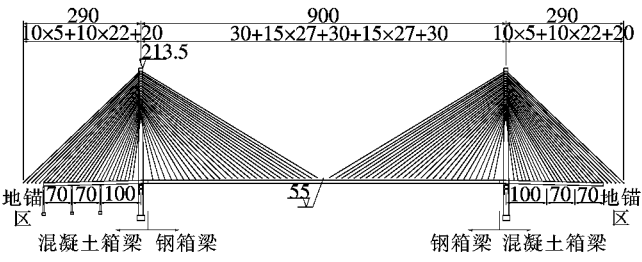


图 4 斜拉桥桥型布置图(单位:m)

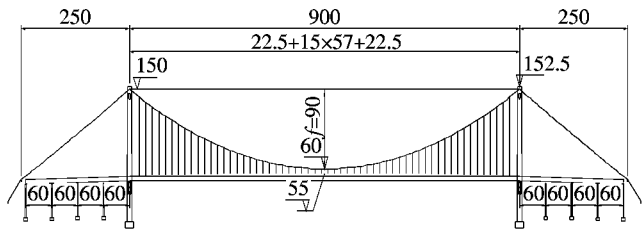


图 5 悬索桥桥型布置图(单位:m)

15 m,成桥状态主缆垂跨比为 1 : 10,全桥均采用钢箱梁,主跨与边跨连续,边跨为 4 跨连续结构。桥塔高 152.5 m,吊索梁上吊点位于钢箱梁两侧,锚固区横向间距 38.9 m。

3 个桥型方案最终的成桥恒载受力状态及主要设计参数对比状况分别如表 1、2 所示。

表 1 成桥恒载受力状态对比

结构体系	主缆力			吊索力/ kN	斜拉索力/ kN	钢梁	
	最大拉力/kN	锚碇水平拉力/kN	锚碇上拔力/kN			轴力/ kN	弯矩/ (kN·m)
协作体系	154 380	129 070	71 540	3 250(悬吊区)/ 1 650(重叠区)	3 100~6 500	158 000/300	65 820/-24 950
斜拉桥	—	—	—	—	2 850~16 000	208 000/ -118 000	106 650/ -56 170
悬索桥	364 020	288 020	110 560	7 820(最大)/ 3 050(普遍)	—	260/-210	72 300/-4 490

注:弯矩以上缘截面受拉为正,下缘截面受拉为负;轴力以受拉为正,受压为负。

表 2 主要结构设计参数对比

结构体系	主缆截	吊索	斜拉索	混凝土梁		钢梁		恒载集度		桥塔高度/ m
	面积/ cm ²	截面 积/cm ²	截面 积/cm ²	(截面积/m ²)/ (长度/m)	竖弯惯性 矩/m ⁴	(截面积/m ²)/ (长度/m)	竖弯惯性 矩/m ⁴	主跨/ (kN·m ⁻¹)	边跨/ (kN·m ⁻¹)	
协作体系	5 965	98	174	46.82/530	113.75	3.91/850	43.04	433	1 318	202.5
斜拉桥	—	—	46~322	46.82/530	113.75	3.91/850	43.04	433	1 318	213.5
悬索桥	6 312	98、196	—	—	—	3.91/1 380	43.04	433	433	152.5

2 计算模型

利用西南交通大学的桥梁结构非线性分析系统 Bnlas 软件,采用几何非线性数值模拟的方式,建立全桥结构空间有限元模型,根据桥塔、主缆、吊索、加劲梁等不同结构的受力特点离散为不同的单元。

模型中采用的单元类型包括:

(1) 空间悬链线单元:为考虑索结构在重力作用下的垂度效应,主缆、斜拉索采用这类单元进行离散。

(2) 空间梁单元:桥塔、加劲梁等采用具有 6 个自由度的空间梁单元进行离散,其中计入了剪切变形对结构内力及位移的影响。

(3) 空间杆单元:模拟吊索这类主要受拉、弯曲刚度小而自身所受张力很大的结构。

(4) 刚臂单元:桥梁结构简化为赋予正确截面特性的鱼骨梁模型,吊索及斜拉索端部锚头中心与加劲梁的连接,采用无质量的刚臂进行模拟。

3 结构力学性能分析及比较

3.1 桥塔受力分析

无论是斜拉桥、悬索桥还是斜拉—悬吊协作体系桥梁,均要求合理成桥状态下桥塔为只受压不受弯结构,这样可以改善桥塔混凝土收缩徐变带来的不利影响。桥塔收缩、徐变将引起桥塔附近斜拉索松弛,并使主梁产生局部负弯矩峰值,形成不对称受力等不利状况。在活载作用下,桥塔将产生沿纵桥向的偏位,并在桥塔底部产生巨大弯矩,塔的轴力和弯矩将作为控制桥塔截面设计的重要参数。3 类桥型在恒载及活载组合作用下的塔底最不利内力如表 3 所示。

由表 3 可知:针对跨度组成同为(250+900+250) m、荷载规模相同的 3 种桥型,在荷载组合作用下,悬索桥塔底弯矩值最大,但轴力最小;斜拉—悬吊协作体系桥塔底轴力最大,但弯矩最小;斜拉桥的塔底弯矩和轴

表 3 塔底最不利内力

桥型	最大弯矩/ (kN·m)	对应轴 力/kN	最大轴 力/kN	对应弯矩/ (kN·m)
协作体系	524 845	788 730	792 170	448 786
斜拉桥	764 348	711 172	715 874	672 825
悬索桥	792 065	541 775	545 248	742 197

力水平都介于两者之间。实际工程中,在这种荷载规模下,若以常规空心矩形截面进行桥塔压弯构件截面设计及应力控制,对混凝土截面面积和抗弯惯性矩的需求基本相同,但考虑到偏心压弯构件应力的不均匀性,协作体系塔底轴力较大而弯矩较小的受力特点,相对会使基础承压更均匀,利于基础的设计和实际受力。但另一方面,悬索桥需要较小的矢跨比来满足结构刚度需求,在桥下通航净空相同的条件下,桥塔高度比另两类桥型显著降低。

3.2 结构刚度分析

在四车道公路—Ⅰ级荷载及双线铁路荷载共同作用下,3 类桥型的梁上位移包络如图 6 所示,设定主跨跨中位置的纵桥向坐标为 0 点。

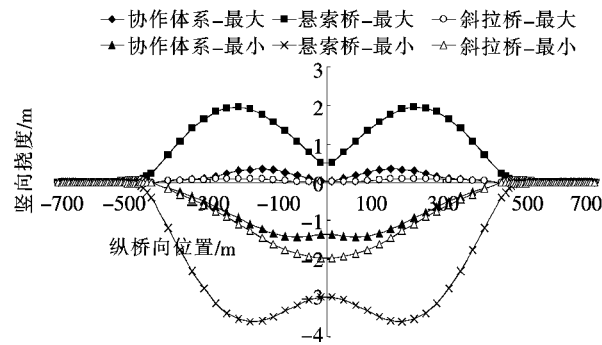


图 6 主梁竖向位移包络图

由图 6 可知:该文分析所采用的结构,均基于规范要求的基本强度及安全系数设计,在该条件下,3 类桥型在活载作用下,主跨均产生较大的竖向位移。其中斜拉桥主梁主要产生下挠变形,最大下挠值为 1.97 m;悬索桥和协作体系桥梁主梁会同时产生下挠和上

拱,悬索桥最大下挠值为 3.62 m,最大上拱值为 1.96 m;协作体系桥梁最大下挠值为 1.41 m,最大上拱值为 0.34 m。若以铁路桥梁主跨 1/600 的挠跨比限值控制设计,悬索桥及斜拉桥还需要加强刚度,协作体系则可以满足要求。

为了更加清晰地反映三类桥型在列车通过时的变形情况,将一列列车的设计活载从桥梁的一端移动到另一端,分别输出列车车头、车中、车尾经过主跨时梁上相应位置的挠度,得到列车行车轨迹线,分别如图 7~9 所示。

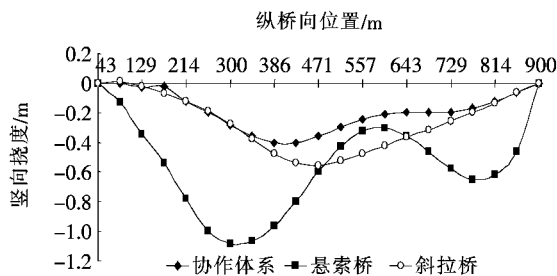


图 7 列车车头行车轨迹线

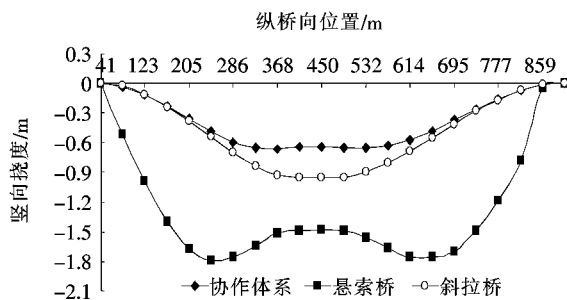


图 8 列车中部行车轨迹线

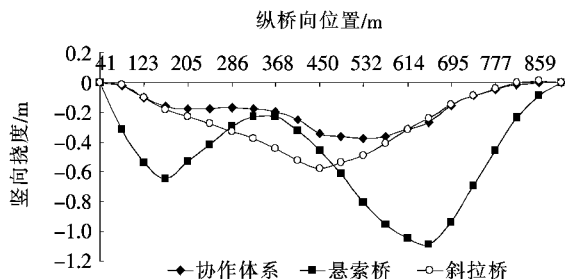


图 9 列车车尾行车轨迹线

由图 7~9 可知:列车通过三类桥型时,无论是车头、车中还是车尾,都是斜拉-悬吊协作体系的行车轨迹线最平缓,斜拉桥次之,悬索桥最陡峭。行车轨迹线越平缓,说明列车通过时钢轨的曲率变化越小,更有利于高速行驶,对钢轨的受力状态也更有利。

在活载作用下的梁端纵向位移、转角及塔顶偏位如表 4 所示。

表 4 结构变形表

结构体系	梁端纵向位移/m		梁端转角/(°)		桥塔最大偏位/m
	极大值	极小值	极大值	极小值	
斜拉桥	0.148	-0.129	0.001 8	-0.001 8	0.302
悬索桥	0.836	0.704	0.056 4	-0.032 6	0.210
协作体系	0.148	-0.135	0.000 6	-0.000 6	0.183

由表 4 可以看出:在活载作用下,悬索桥梁端纵向位移最大,可达到 0.836 m,斜拉桥和斜拉-悬吊协作体系桥梁在活载作用下,梁端纵向位移相当,均为 0.148 m;梁端转角方面,悬索桥最大梁端转角可达到 0.056 4°,斜拉桥和斜拉-悬吊协作体系梁端转角则很小;斜拉桥由于在桥塔上需要锚固斜拉索,桥塔更高,在活载作用下的偏移量最大,相应地,桥塔偏位对主梁跨中挠度的贡献也会占较大比重。

3.3 主梁截面应力

3 类桥型在恒载及活载组合作用下,主梁沿着纵桥向的应力分布情况如图 10 所示,应力正值表示截面受压,负值表示截面受拉。

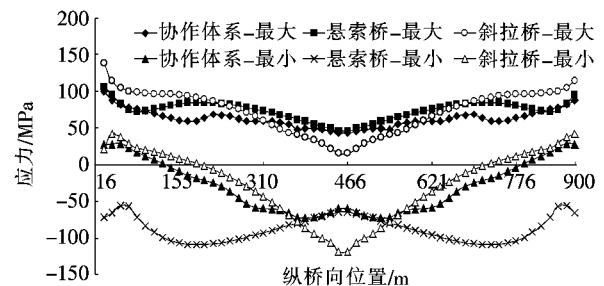


图 10 主梁荷载组合应力包络图

由图 10 可以看出:采用相同的钢箱主梁截面时,在恒载和活载标准组合下,斜拉桥由于自身结构受力特点引起的靠近桥塔处主梁压应力最大值及跨中截面拉应力最大值都高于悬索桥和协作体系桥梁;悬索桥主梁截面应力主要是主梁大挠度引起的弯曲应力;协作体系主梁拉压应力变化趋势最平缓,沿着纵桥向相对更均匀,还具有最大的截面减小空间。

3.4 索结构最不利内力

各桥型的索结构内力中,斜拉桥成桥状态主跨索力通过改进的刚性支承连续梁法获得,即认为斜拉索的竖向分力等于相应连续梁的支点竖向力,在此基础上进行适当的调整使桥塔在恒载作用下处于只受压不受弯的状态,此时,靠近桥塔处斜拉索受力较小,远离桥塔处斜拉索受力较大,应采用不同的斜拉索截面。悬索桥的成桥状态吊索力基于主缆的分段悬链线理

论,结合恒载状态和变形情况,通过数值迭代的方式确定。斜拉—悬吊协作体系在计算成桥状态时,以成桥时桥塔和主梁的位移最小为目标,迭代主缆线形及吊

索内力。索结构内力不同,宜采用不同的截面,在恒载及活载共同作用下索结构应力状态如表 5 所示。

由表 5 可知:

表 5 索结构应力

结构体系	吊索				斜拉索			
	最大应力/MPa	最大应力幅/MPa	安全系数	对应最大应力/最大应力幅	最大应力/MPa	最大应力幅/MPa	安全系数	对应最大应力/最大应力幅
协作体系	481	69	3.6	7.0	512	100	3.4	5.1
斜拉桥	—	—	—	—	575	98	3.1	5.8
悬索桥	534	176	3.3	3.0	—	—	—	—

(1) 若斜拉索及吊索采用材质均为抗拉强度为 1 770 MPa 的高强钢丝,索的最大应力以恒载及活载标准组合作用考虑,疲劳应力幅以一列车通过计算。协作体系斜拉索最大拉应力 512 MPa,最大应力幅 100 MPa,吊索最大拉应力 481 MPa,最大应力幅 69 MPa;斜拉桥斜拉索最大拉应力 575 MPa,最大应力幅 98 MPa;悬索桥吊索最大拉应力 534 MPa,最大应力幅 176 MPa。斜拉索及吊索均至少达到 3.0 的安全系数,若以常规的直径为 7 mm 的高强钢丝,其轴向疲劳应力幅值为 250 MPa,所有索结构均能满足疲劳要求。

(2) 引入索结构对应最大应力与最大应力幅之比来衡量索结构材料利用率,增大截面可以有效减小应力幅,但也会使截面最大应力减小,造成材料浪费。该比值越大,表示材料利用率越高,该参量与截面安全系数和应力幅一起评判索结构的优劣。综上所述,综合评定受力性能和材料利用率上,协作体系吊索最有优势,其次为协作体系斜拉索和斜拉桥斜拉索,悬索桥吊索在该水平上相对较差。

4 结论

在合理成桥状态设计的基础上,比较斜拉桥、悬索桥以及斜拉—悬吊协作体系桥梁在双线铁路与四车道公路荷载作用下的主梁变形、内力以及桥塔与斜拉索、吊索受力情况,得出以下主要结论:

(1) 3 类桥型桥塔截面及基础均为压弯作用结构,应力水平相当,但协作体系桥塔底弯矩最小,弯矩较小时截面上应力分布更均匀,对截面受力更有利。

(2) 在活载作用下,协作体系桥主梁的挠度、梁端转角及纵向位移均最小,悬索桥最大,在列车运行过程中,无论是车头、车中还是车尾均是协作体系桥梁的行车轨迹线最平缓而悬索桥最陡峭,斜拉桥介于两者之

间,说明协作体系桥梁比单纯悬索桥和部分地锚式斜拉桥都具有更大的竖向刚度,特别是列车通过桥梁的变形曲率最小,更适合于公铁两用桥或铁路桥梁结构。

(3) 采用相同的主梁设计截面时,斜拉桥沿着纵桥向截面应力变化较大,且峰值最高;悬索桥主梁截面应力主要是主梁大挠度引起的弯曲应力,其规律与挠度分布规律相同;协作体系主梁拉压应力变化趋势最平缓,沿着纵桥向更均匀,可采用较小的梁截面。

(4) 在满足斜拉索及吊索最小安全系数的条件下,承受活载作用时,各桥型的索结构应力幅能够满足规范要求。综合评定索的受力性能和材料利用率,优劣排序依次为协作体系吊索、斜拉桥斜拉索、协作体系斜拉索、悬索桥吊索。

参考文献:

[1] 谷云秋.铁路悬索桥的刚度问题探讨性研究[J].山西建筑,2014(23).

[2] 张敏,高宗余,陈佳.千米跨度公铁两用钢桁架梁斜拉桥几何非线性研究[J].桥梁建设,2014(5).

[3] 许福友,张哲,黄才良.斜拉—悬吊协作体系桥工程应用及特点分析[J].中外公路,2009(1).

[4] 徐恭义.千米级跨度铁路桥梁的受力性能研究[J].中国铁道科学,2011(2).

[5] 文霁.斜拉—悬索体系桥力学特性研究[D].西南交通大学硕士学位论文,2007.

[6] 邱景.斜拉—悬吊组合体系桥梁的力学行为及施工过程分析[D].西南交通大学硕士学位论文,2011.

[7] Dong Chuanzhou, Huang Hui. Design of Construction Scheme Proposed for the Third Bosphorous Bridge in Turkey[J].World Bridges,2013,41(1):9—12.

[8] 陈亮,邵长宇.结合梁斜拉桥混凝土收缩徐变影响规律[J].桥梁建设,2015(1).

[9] 唐亮,张皓,刘玉擎.协作桥合理成桥状态确定方法研究[J].公路交通科技,2015(8).

[10] JT/T 775—2010 大跨度斜拉桥平行钢丝斜拉索[S].