

某空间螺旋塔斜拉桥合理结构体系研究

孙 龙

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘 要: 某斜拉桥方案采用反对称螺旋形桥塔,空间四索面,造型较为新颖。由于桥梁结构较为复杂,为选用适宜的结构体系,基于桥梁结构的受力形态,在综合比较了漂浮体系、半漂浮体系、半固结体系的优劣后,确定半漂浮体系为最佳方案,并进一步讨论了地震作用下该桥合理的约束体系。这一流程对解决类似复杂结构桥梁合理结构体系的问题有一定参考价值。

关键词: 独塔斜拉桥;空间反对称螺旋塔;结构体系;受力形态;弹性约束

中图分类号: U441

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)02-0057-05

1 概 述

某独塔斜拉桥方案外形新颖,采用反对称螺旋形桥塔,空间四索面。在后续深化设计过程中,需要确定桥梁基本结构体系,采用合理的塔、梁、墩的连接方式来保证桥梁受力合理,同时减缓温度效应,满足抗震性能要求^[1-2]。本文介绍了该桥结构体系的研究内容和结论,可为类似桥梁的设计提供借鉴。

独塔斜拉桥桥梁方案图见图1。



图1 独塔斜拉桥桥梁方案图

桥梁主要技术标准:

双向8车道高速公路,设计速度100 km/h;车辆荷载为公路-I级。

人群荷载、非机动车荷载:4.5 m人非混行道。

风荷载:桥面高度风速25 m/s,极限设计风速36.0 m/s。

通航等级:Ⅶ级航道,双向通航孔净空不小于32 m×4.5 m。

收稿日期:2023-03-07

作者简介:孙龙(1987—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

2 工程概况

该项目为某高速公路的控制性工程,主桥位于0.50%斜率的竖曲线上,平面上基本位于反S曲线的中间段。

独塔斜拉桥桥梁立面布置图见图2。

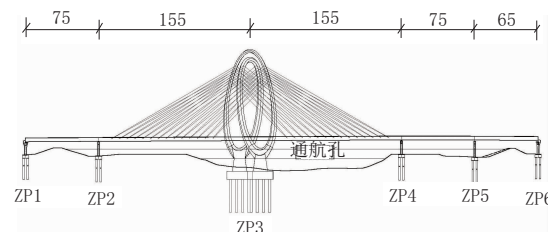


图2 独塔斜拉桥桥梁立面布置图(单位:m)

主桥为75 m+155 m+155 m+75 m+65 m=525 m空间四索面独塔斜拉桥,标准宽度59 m,横断面布置为:59/2 m=1.00 m(外饰板)+1.50 m(拉索区)+0.25 m(栏杆)+4.50 m(人非道)+0.50 m(护栏)+4.50 m(硬路肩)+4×3.75 m(行车道)+0.75 m(左路缘带)+0.50 m(侧向余宽)+0.50 m(护栏)+1.00/2 m(中央分隔带)。

主塔为空间曲线反对称螺旋塔,分内外2组,外塔高度124.3 m,内塔高度116.2 m,桥塔采用六边形钢箱断面;主梁采用双边箱钢结构,中心梁高3.8 m,每隔3 m设置1道横梁;斜拉索按空间四索面布置,每个索面包含7对斜拉索。

桥塔处断面布置图见图3。

3 静力作用下桥梁结构体系

3.1 塔梁约束体系

斜拉桥的基本结构体系按塔、梁、墩的连接方式划分,主要分为漂浮体系、半漂浮体系、塔梁固结体系

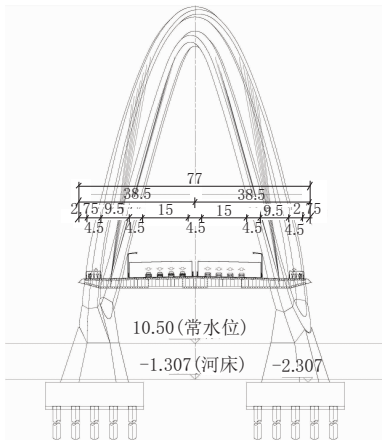


图3 桥塔处断面布置图(单位:m)

和塔梁墩固结体系^[3-6]。塔梁平面相对关系示意图见图4。由于本桥景观方案要求塔墩连续,外塔与主梁分离,因此首先排除塔梁墩固结体系。根据桥塔与主梁的相对空间关系,可供选择的结构体系有以下几种。

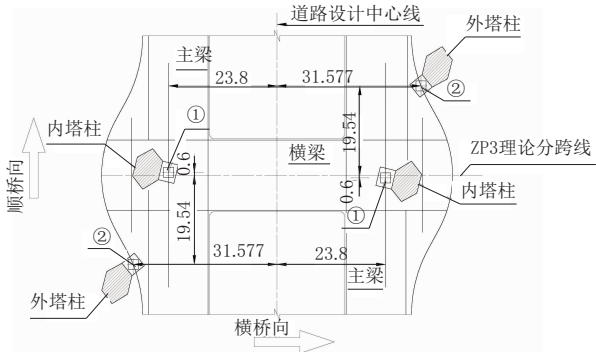


图4 塔梁平面相对关系示意图(单位:m)

3.1.1 漂浮体系

该体系塔墩固结,内塔、外塔与主梁通过斜拉索连接,主梁在索塔处不设支座。

3.1.2 半漂浮体系

该体系塔墩固结,主梁在塔墩上设置竖向支承。由于本桥有2组桥塔,需要考虑的半漂浮体系有如下3种形式:

半漂浮体系1:内外塔与主梁均设置竖向支承。

半漂浮体系2:内塔与主梁设置竖向支承,外塔与主梁分离。

半漂浮体系3:内塔与主梁分离,外塔与主梁设置竖向支承。

对3种半漂浮体系进行试算比较,结果表明半漂浮体系3的外塔柱形心更偏离钢箱梁中心,竖向支承传递上部结构反力的偏心效应更为明显,导致其承载能力显著低于内塔柱,不适合设置竖向支承,故排除半漂浮体系3。

计算半漂浮体系1、2的主梁控制截面弯矩、桥塔处竖向支承反力和单侧塔底弯矩,结果见表1~表3。

表1 主梁控制截面弯矩 单位:MN·m

体系编号	恒载			标准组合		
	辅助墩	主跨跨中	桥塔	辅助墩	主跨跨中	桥塔
1	-311.6	151.7	-365.8	-454.0	273.8	-484.7
2	-329.7	152.7	-412.2	-458.7	279.9	-531.2

表2 桥塔处竖向支承反力 单位:t

体系编号	恒载		基本组合			
	外塔	内塔	外塔		内塔	
			最大	最小	最大	最小
1	537	2 599	1 660	114	4 835	2 884
2		3 130			4 839	1 671

表3 单侧塔底弯矩 单位:MN·m

体系编号	成桥状态		基本组合	
	纵桥向	横桥向	纵桥向	横桥向
1	101.4	91.5	417.6	566.3
2	138.2	107.5	368.0	564.0

比较后可得以下结论:

(1)在辅助墩和主跨跨中处,2种体系主梁弯矩相差不大;桥塔处主梁负弯矩,半漂浮体系2比半漂浮体系1大10%。

(2)对半漂浮体系1,内塔支座反力明显大于外塔。因为内塔支座位于钢箱梁下方,外塔支座偏离钢箱梁范围,结构传力从内塔支座向下的方向更为直接。结合第(1)条结论,反映在漂浮体系1中,在外塔处设置竖向支承效率不高。

(3)成桥状态下,半漂浮体系2的塔底弯矩略大于半漂浮体系1;基本组合下,半漂浮体系2的纵桥向弯矩较半漂浮体系1减少12%,横桥向弯矩相当。

综合来看,3种半漂浮体系中,半漂浮体系2的受力形态更为合理,可与其他体系进行更进一步的比选。

3.1.3 半固结体系

该体系内塔与主梁固结,外塔与主梁分离。

3.1.4 几种结构体系的比较

针对漂浮体系、半漂浮体系和半固结体系进行静力计算,比较这3种体系在成桥状态下的力学性能。

成桥状态塔底反力见图5,基本组合结构应力见图6。

由图5可知:漂浮体系、半漂浮体系的水平力和弯矩均较小;半固结体系的纵桥向反力为683 t,纵桥向弯矩为565.2 MN·m,横桥向弯矩为387.1 MN·m;基本组合下,3种体系的主梁应力相差不大,均满足

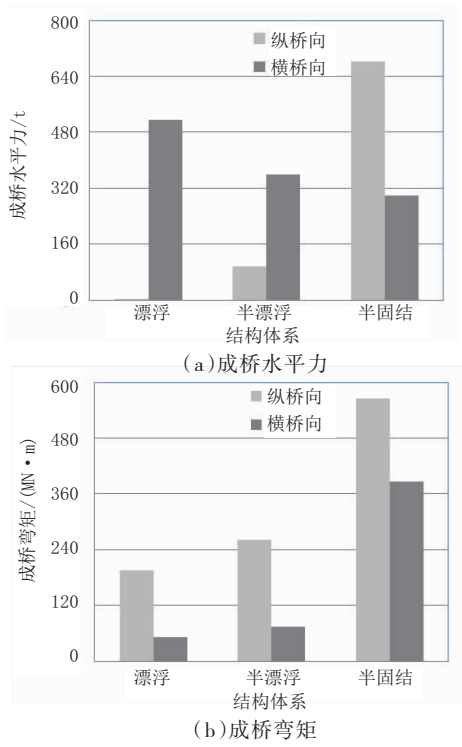


图 5 成桥状态塔底反力

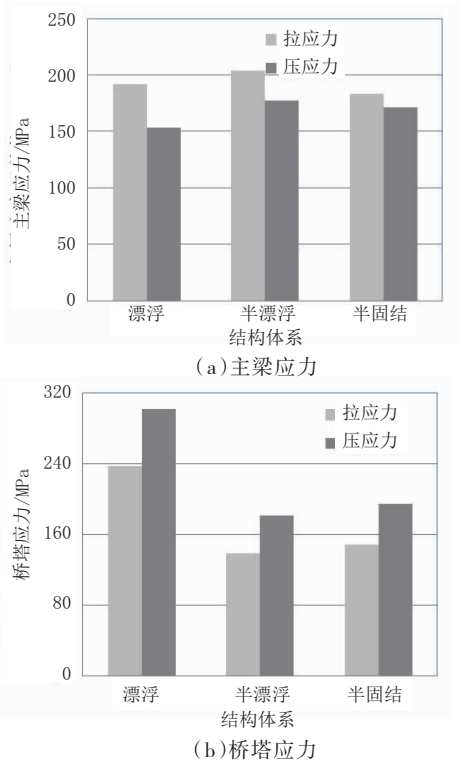


图 6 基本组合结构应力

要求。

由图 6 可知:半漂浮体系的最大压应力为 181 MPa,考虑整体稳定条件下桥塔的许用应力为 190 MPa,因此满足要求;漂浮体系桥塔压应力为 302 MPa,许用应力为 165 MPa,因此需要增大桥塔截面尺寸或者增加板厚;半固结体系桥面以上的桥塔应力与半漂浮体系相仿,对主梁以下塔柱的计算表明,在内塔与主梁

固结处出现了较大应力,固结节点设计比较复杂。

综合反力与应力计算结果,确定内塔与主梁设置竖向支承,外塔与主梁分离的半漂浮体系为推荐方案。

3.2 边墩、辅助墩约束体系

在中塔确定采用半漂浮体系的基础上,研究边墩和辅助墩设置横向约束、不设置横向约束对结构静力响应的影响,结果见图 7、图 8。

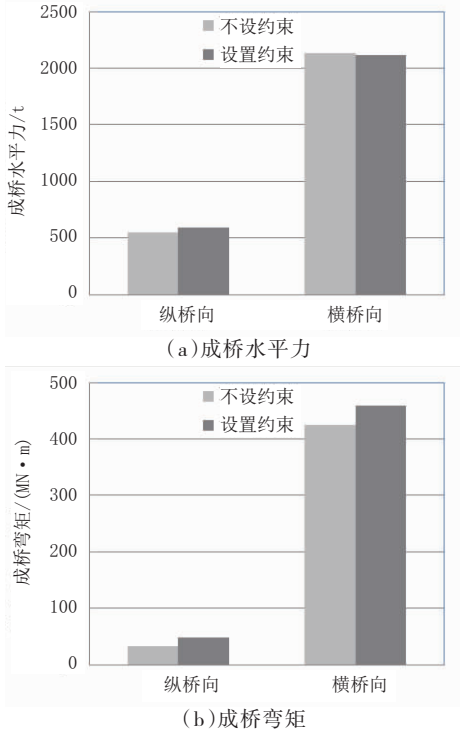


图 7 2 种约束条件下的成桥状态塔底反力

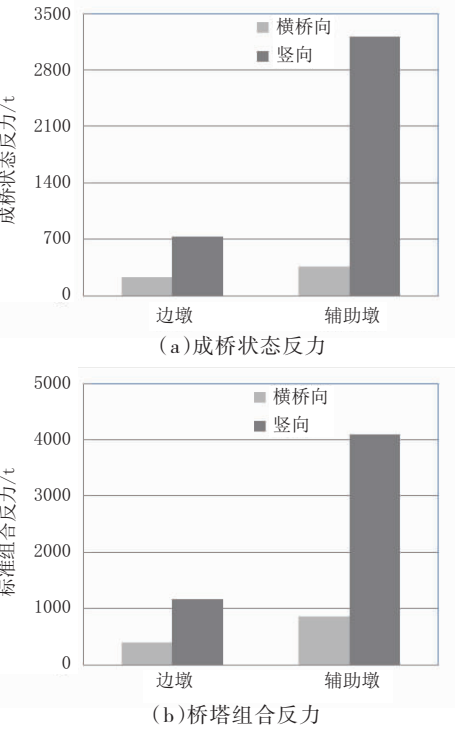


图 8 设置约束条件下的边墩和辅助墩支座反力

由图 7、图 8 可见:不设置横向约束条件下,边墩纵桥向反力和塔底弯矩较小,横桥向反力略大;设置横向约束后,边墩成桥状态和标准组合下的支座水平力达到竖向力的 30%以上,支座受力较为不利;辅助墩成桥状态和标准组合下的支座水平力基本在竖向力的 20%以下,具备设置横向约束的条件。

不同约束条件下主梁横桥向位移见图 9。

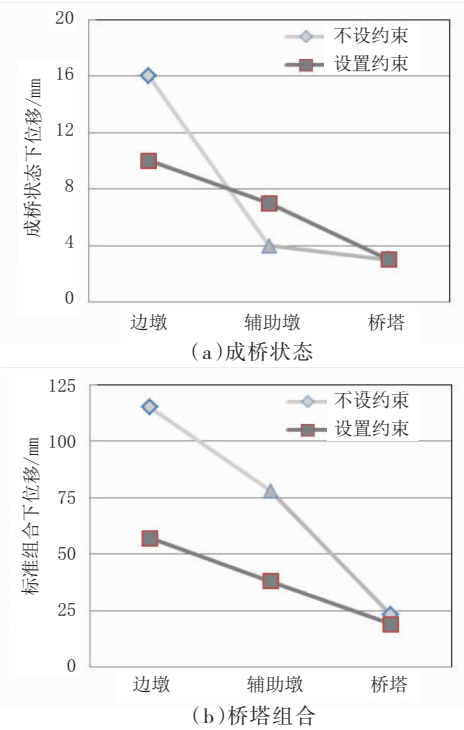


图 9 不同约束条件下主梁横桥向位移

由图 9 可知:成桥状态下,2 种约束条件下的位移均处于较低水平;标准组合下,不设约束时的边墩横桥向位移达到 115 mm,远大于设置约束时的 57 mm,辅助墩横桥向位移达到 78 mm,同样远大于设置约束时的 38 mm。

综合考虑反力和位移计算结果,在辅助墩设置横桥向约束能够在保证全桥下部基础受力差别不大的前提下,显著控制结构的横桥向变形。

4 地震作用下桥梁约束体系

4.1 地震作用

根据本项目《地震安全评价报告》提供的场地水平设计反应谱,综合考虑本项目主桥为 A 类桥梁的设防水准,选用如表 4 所示 2 个重现期的设计反应谱,计算式见式(1)。

$$\alpha(T)=\begin{cases} A_{\max}\left[1+\frac{(\beta_{\max}-1)T}{T_0}\right], & 0\leq T\leq T_0 \\ \alpha_{\max}, & T_0<T\leq T_g \\ \alpha_{\max}(T_g/T)^\gamma, & T_g<T\leq 10\text{ s} \end{cases}\quad (1)$$

式中: $\alpha_{\max}=A_{\max}\beta_{\max}$,其中 $\alpha_{\max}$ 为设计加速度反应谱最大值; $A_{\max}$ 为设计地震动峰值加速度; $\beta_{\max}$ 为设计地震动加速度放大系数; T 为结构自振周期; T_0 为反应谱直线上升段最大周期; T_g 为特征周期; γ 为自特征周期至 10 s 区段曲线衰减指数。

表 4 安评场地水平设计反应谱

项目	E1	E2
超越概率	50 a, 10%	50 a, 2.5%
重现期 /a	475	2 000
$\alpha_{\max}$	0.216 6g	0.331 3g
T_0 /s	0.10	0.10
T_g /s	0.40	0.45
$\beta_{\max}$	2.5	2.5
γ	1	1
$A_{\max}$ /(cm·s ⁻²)	85	130
$S_{\max}$ /(cm·s ⁻²)	0.086 6	0.132 5

4.2 纵桥向合理抗震约束体系分析

采用反应谱分析 5 种纵桥向约束方式对本斜拉桥抗震性能的影响^[7-8]。纵桥向抗震约束体系见表 5。

表 5 纵桥向抗震约束体系

编号	塔梁	主梁与辅助墩
1	自由, K=0	自由, K=0
2	自由, K=0	弹性约束, K=7.0×10 ³ kN/m
3	弹性约束, K=1.0×10 ⁵ kN/m	弹性约束, K=7.0×10 ⁵ kN/m
4	铰接	弹性约束, K=7.0×10 ⁵ kN/m
5	铰接	自由, K=0

E2 地震作用下结构周期和振型、E2 地震作用下纵桥向塔底反力和位移的计算结果见表 6、表 7。

表 6 E2 地震作用下结构周期和振型

编号	周期 /s	振型
1	8.980	主梁纵漂
2	3.980	主梁纵漂
3	2.630	主梁纵漂
4	1.900	主梁 1 阶反对称竖弯
5	1.925	主梁 1 阶反对称竖弯

纵向漂浮时,结构的纵向周期为 8.98 s,主梁和主塔塔顶有很大的纵向位移,塔底弯矩较大。塔梁铰接时,主桥的纵向刚度最大,结构的纵向周期为 1.90 s,主塔与主梁之间的约束支座水平力较大,为支座竖向承载力的 30%,主塔塔底的弯矩较大,主塔塔顶和主梁的纵向位移最小。

考虑抗震体系与桥梁静力体系的一致性和塔梁

表 7 E2 地震作用下纵桥向塔底反力和位移

编号	纵向剪力 /t	纵向弯矩 / (MN·m)	纵向位移 /m	
			外塔顶	内塔顶
1	4 031	500.3	0.200	0.160
2	4 032	491.1	0.129	0.102
3	4 176	517.0	0.083	0.075
4	3 237	505.7	0.028	0.032
5	3 230	526.2	0.023	0.039

间支座的布置条件，确定合理的纵桥向抗震结构体系为体系 2，即塔梁之间纵向漂浮；辅助墩、主引桥过渡墩与主梁之间采用弹性约束，或布置一定数量的带自复位能力的减隔震支座，在降低地震作用下塔底弯矩和剪力响应的同时，也减少主梁和塔顶的位移，进一步提高主桥的纵向体系抗震能力，提高结构的抗震性能。

4.3 横桥向合理抗震约束体系分析

主桥的横向抗震约束体系，需结合静力受力体系的需求，并考虑横桥向动力结构体系的对称性，考虑在主梁与辅助墩之间横桥向 2 个支座上均设置横向弹性约束支座。弹性约束刚度可采用铅芯橡胶支座来提供，同时满足正常使用和地震作用下的受力需求^[9-10]。

横桥向抗震约束体系见表 8。

表 8 横桥向抗震约束体系

边墩	辅助墩	桥塔
自由, $K=0$	弹性约束, $K=1.0 \times 10^5$ kN/m	抗风支座

5 体系比选结果

通过静力和地震作用下约束体系的研究，确定了采用外塔与主梁分离，内塔设置竖向支承的半漂浮体系，边墩和辅助墩设置竖向支承，另在辅助墩处设置横向支承；地震作用下，在边墩与辅助墩纵向设置刚度为 7.0×10^5 kN/m 的弹性约束，在辅助墩处横向设置刚度为 $K=1.0 \times 10^5$ kN/m 的铅芯橡胶支座。

不设置弹性约束和设置弹性约束条件下，结构梁端位移和辅助墩底弯矩见表 9。

由表 9 可见：设置弹性约束能够显著减小辅助墩底横桥向弯矩；虽然成桥 + 温度作用下纵桥向弯矩增加较多，但控制设计的 E2 地震作用下纵桥向弯

表 9 不同约束体系下结构梁端位移和辅助墩底弯矩

体系名称		无弹性约束	有弹性约束
成桥 + 温度作用	梁端位移 /mm	138	138
	纵桥向弯矩 /(kN·m)	6 202	11 872
	横桥向弯矩 /(kN·m)	55 151	14 020
E2 地震作用	梁端位移 /mm	193	123
	纵桥向弯矩 /(kN·m)	18 027	20 437
	横桥向弯矩 /(kN·m)	48 592	32 972

矩较不设置弹性约束体系仅增大 13.4%；设置弹性约束后，E2 地震作用下梁端位移减少 36.3%。

6 结 语

(1)采用外塔与主梁分离，内塔设置竖向支承的半漂浮体系，基底反力、主梁与主塔应力均满足要求，且半漂浮体系相对于半固结体系来说，其构造更加简单，能避免塔梁固结处应力集中的问题。

(2)在辅助墩处设置横向支承，能够有效控制正常使用状态下桥梁的横桥向位移；边墩竖向反力储备较小，承担水平荷载的能力较差，故不宜设置横向支承。

(3)在边墩和辅助墩设置纵向弹性约束能够明显改善地震作用下桥梁结构响应，相较于纵向无约束的结构体系，其塔顶最大位移减小了约 36%；与塔梁纵向铰接的体系相比，塔底弯矩减小了约 7%。

参考文献：

[1] 肖汝诚.桥梁结构体系[M].北京:人民交通出版社,2013.
[2] 肖汝诚,陈红,魏乐永.桥梁结构体系的研究、优化与创新[J].土木工程学报,2008,41(6):69-74.
[3] 梁鹏,肖汝诚,夏旻,等.超大跨度缆索承重桥梁结构体系[J].公路交通科技,2004,21(5):53-56,65.
[4] 苗家武.超大跨度斜拉桥设计理论研究[D].上海:同济大学,2006.
[5] 徐伟,苑仁安,王强,等.常泰长江大桥主航道桥结构体系及钢梁设计[J].桥梁建设,2021,51(8):1-8.
[6] 王照伟,陈占力,刘得运,等.大跨度三塔斜拉桥纵向约束体系设计研究[J].世界桥梁,2021,49(4):42-48.
[7] 周珂,金文刚,李建中.塔梁连接方式对多塔斜拉桥纵向地震反应的影响[J].结构工程师,2018,34(增刊 1):31-36.
[8] 苑仁安,傅战工,郑清刚,等.超高桥塔结构偏心距增大系数计算方法[J].桥梁建设,2021,51(5):37-43.
[9] 叶爱君,胡世德,范立础.大跨度桥梁抗震设计实用方法[J].土木工程学报,2001,34(1):1-6.
[10] 焦驰宇,李建中,彭天博.塔梁连接方式对大跨斜拉桥地震反应的影响[J].振动与冲击,2009,28(10):179,184.