

# 刚构体系叠合梁斜拉桥塔梁固结构造设计研究

孟杰<sup>1,2</sup>, 马振栋<sup>2</sup>, 李岳<sup>2</sup>, 陈家勇<sup>2</sup>

(1.东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096; 2.林同棧国际工程咨询(中国)有限公司)

**摘要:**刚构体系叠合梁斜拉桥能较好地适应桥下净空大,运输及吊装受地形限制多的桥位。塔梁固结段是该类型桥梁的关键传力节点,该节点力流复杂,又存在叠合梁与桥塔间不同材料的结合问题,使得区域构造复杂化。鉴于刚构体系叠合梁斜拉桥在国内外建成案例不多,该文以重庆水土嘉陵江大桥为例,详细论述了该桥塔梁固结段的构造细节比选及施工关键点,采用数值模型验证了该构造的安全性。

**关键词:**斜拉桥;刚构体系;塔梁固结;重庆水土嘉陵江大桥;叠合梁

斜拉桥根据塔梁墩连接情况的不同,可从结构体系上分为4大类:漂浮体系、支承体系、固结体系和刚构体系。刚构体系由于索、梁共同受力提高了结构刚度,减少了塔梁交接处的转角。该体系多用于山地城市等具有较大桥下净空的桥位,高墩提供的纵横向柔度,能够适应结构的位移需求,省去了支座或限位阻尼器等细部构造,结构更加耐久,后期维护工作量小。

斜拉桥主梁截面从材料方面可分为钢主梁、混凝土主梁以及钢-混叠合梁;各种截面形式适用于不同的桥位条件,从跨越能力来讲,钢主梁>钢-混叠合梁>混凝土梁,通常认为400~1 000 m等中大跨径是叠合梁斜拉桥的适用范围。钢-混叠合梁将两种材料通过剪力键组合在一起,具有工厂预制,质量可靠,施工速度快,造价合理,无钢桥面铺装耐久性问题等优点;在山地城市等运输及吊装能力受限的区域,钢-混叠合梁可采用散件拼装工法,相比钢箱梁更为便捷。

## 1 工程概况

重庆水土嘉陵江大桥桥位是典型的山区河谷地貌,桥下净空高达70 m,设计采用了刚构体系方案。根据地形特点,主桥采用(260+388+128) m高低塔双索面叠合梁斜拉桥,蔡家侧边跨61 m的位置设有辅助墩。为了便于主梁运输和吊装,设计采用了双工形钢主梁与混凝土桥面板结合的叠合梁构造,中心梁高3.5 m,斜拉索在梁上为12 m等索距布置;主桥高

塔塔高201 m,矮塔塔高154 m,如图1所示。主桥桥面宽31.8 m,横向布置如图2所示。

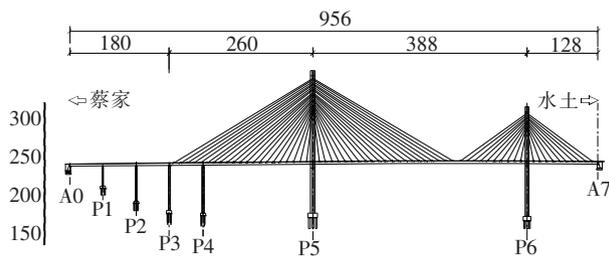


图1 水土嘉陵江大桥立面及桥塔横断面布置(单位:m)

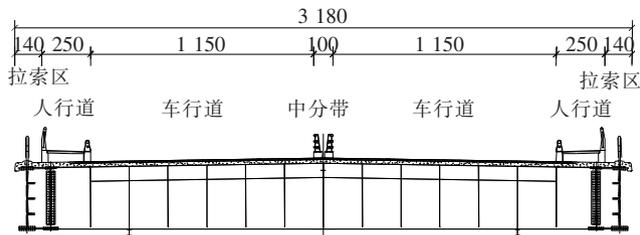


图2 主桥横向布置(单位:cm)

## 2 塔梁固结段设计构造研究

### 2.1 塔梁固结段传力构造设计

塔梁固结段是刚构体系斜拉桥的关键传力节点,该节点承受了巨大的轴向力、双向弯矩及剪力,局部区域力流紊乱;同时,叠合梁与混凝土塔柱间又涉及到不同材料间的连接,使得该区域的构造复杂化。

合理的塔梁固结构造在于是否能保证叠合梁与混

收稿日期:2021-04-15(修改稿)

基金项目:重庆市院士牵头科技创新引导专项(编号:cstc2017zdcy-yszxX0003)

作者简介:孟杰,男,教授级高工。E-mail: mengjie@tylin.com.cn

凝土塔柱间可靠的力流传递。在水土嘉陵江大桥设计过程中,考虑了两种构造方式。

### (1) 承压式塔梁固结构造

承压式塔梁固结段主要由叠合梁混凝土桥面、钢纵梁预埋段、端部承压钢板、对拉预应力钢束等主要部分组成,三维示意图如图 3 所示。端部承压板与桥塔相接面上需设置剪力键使两者融为一体,常用的剪力键构造有圆柱头焊钉及 PBL 剪力键等,由于桥塔内部纵、横向钢筋布置复杂,若采用 PBL 剪力键,将截断桥塔大量受力主筋,故设计选择了圆柱头焊钉与塔柱连接,既可保证主梁抗剪需求,又与塔柱纵横向钢筋冲突小,构造简单,施工便捷。

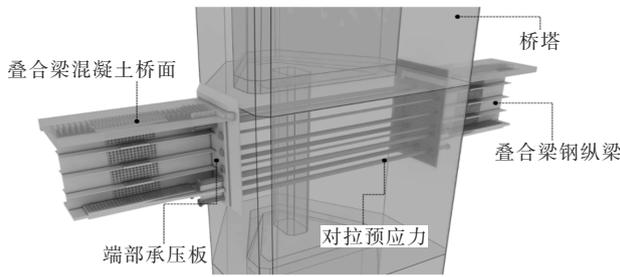


图 3 端承板式塔梁固结段局部三维示意图

斜拉桥塔梁固结区承受了巨大的轴向力、双向弯矩及剪力,针对不同的受力特征,采用了不同的设计应对措施:端承板构造在轴向力作用下,钢主梁与混凝土塔柱间的局部承压问题是需解决的重点。设计上采用如下几种方式增大应力扩散面积,降低局部承压应力:① 在满足板件局部稳定的前提下,尽可能增大钢主梁顶底板及腹板的厚度及宽度;② 在腹板上两侧各设置 3 道纵向加劲肋;顶、底板区域结合对拉预应力钢束采用套管与加劲肋组合锚固的形式,该形式既可满足预应力钢束的锚固又可起到加劲及应力扩散的作用;③ 加厚端部承压钢板厚度。

刚构体系塔梁固结区域需承担较大的纵、横向弯矩,为避免可能出现的拉力引起局部脱空的现象,桥塔两侧设置了对拉预应力钢束,钢束采用  $12\phi^s15.2\text{ mm}$  (Y1)、 $5\phi^s15.2\text{ mm}$  (Y2) 两种规格, $12\phi^s15.2\text{ mm}$  规格预应力通过套管与加劲肋组合构造将应力传递到整个截面,起主要锚固作用; $5\phi^s15.2\text{ mm}$  规格预应力布置于端承板四周,并直接锚固于其上,用于克服承压板局部翘曲变形引起的脱空,确保其与塔柱的紧密贴合。

在运营阶段,在全桥轴向力作用下,端承板与桥塔间摩阻力便足以抵抗塔梁固结区的双向剪力需求;在施工期间,由于主梁的轴向力相对较小,端承板桥塔侧

布置的圆柱头焊钉可满足对应阶段的抗剪需求。

### (2) 混凝土悬臂梁式塔梁固结构造

该方式与端承板式构造相比,区别在于桥塔侧伸出一段混凝土主梁与叠合梁工字形钢纵梁连接,三维示意图如图 4 所示。端部承压板与悬臂混凝土梁连接,由于悬臂混凝土主梁内的钢筋构造相对简单,端承压板可采用 PBL 剪力键与之连接。

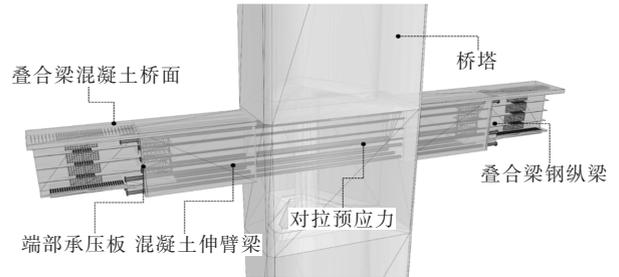


图 4 混凝土悬臂梁式塔梁固结段局部三维示意图

混凝土悬臂梁式构造的受力特点与端部承压式基本一致。由于钢纵梁通过 PBL 剪力键与混凝土梁连接,在轴力作用下,力流可通过 PBL 剪力键逐步传递到混凝土主梁截面,相比端部承压式,这种构造形式混凝土局部承压问题不突出。但伸出的混凝土主梁与桥塔刚结,该区域仍然要承担全桥的轴向力、双向弯矩及剪力,混凝土主梁抗裂问题更严峻。

## 2.2 塔梁固结施工工法特点

### (1) 承压式塔梁固结构造

针对承压式塔梁固结构造,在桥塔施工时,首先起吊钢纵梁预埋段至桥塔旁托架处,将钢梁预埋段与预先设置的劲性骨架焊接定位,与桥塔混凝土共同浇注成型,完成对拉钢束张拉,如图 5 所示。之后便可直接进行下一个节段主梁的平衡悬臂施工,无需再设置桥塔侧主梁 0# 块支架,施工难度低,降低了施工成本。



图 5 塔梁固结段及预埋段定位劲性骨架

在这一过程中,预埋段的安装精度至关重要,否则将直接影响后期平衡悬臂主梁线形。为了保证预埋段的安装精度,定位劲性骨架除了可以固定预埋段外,还

需设置三维可调平装置,在浇筑混凝土之前可重新复核并调平钢梁预埋段。

## (2) 混凝土悬臂梁式塔梁固结构造

针对混凝土悬臂梁式塔梁固结构造,施工总体流程上与承压式塔梁固结构造基本一致。但由于桥塔旁伸出了一段混凝土悬臂梁,鉴于混凝土梁段自重较大,简易的三角托架无法满足支撑要求;需从桥塔承台顶

面开始搭设塔侧主梁浇筑支架,供混凝土梁段施工,这使得施工工艺更加复杂,成本更高。

## 2.3 塔梁固结构造形式比选

鉴于上述受力及施工工法分析,将上述两种固结构造形式的优、缺点汇总于表1,经比较,端承板式结合段构造简单,受力直接,为最终的实施方案。

表1 钢纵梁与塔柱连接形式比较

项目	结构布置	受力方面	施工方面
端承板式 (实施方案)	钢纵梁端部设置承压板与桥塔塔壁直接连接	通过合理配置钢束,在各运营工况下可保证承压板式钢-混连接的受力需求与传递;该方式构造简单,受力直接,但由于钢主梁未伸入塔柱,通过承压板及约束混凝土传递力流,存在局部承压问题	通过在塔柱内,预埋钢梁段,施工时可取消桥塔侧主梁支架,施工便捷,降低了施工成本
混凝土悬臂梁式 (比较方案)	该方式与端承板式结合段相比,区别在于桥塔侧伸出一段混凝土主梁,并在混凝土主梁端部设置钢-混结合段	受力特点与承压板式基本一致,钢主梁可伸入混凝土主梁内部,通过PBL剪力键传递力流,混凝土局部承压问题不突出,但伸出悬臂的混凝土主梁与桥塔刚接,该区域受力复杂,混凝土主梁抗裂问题严峻	与承压板式相比,需搭设混凝土主梁的现浇支架,施工成本更高

## 3 承压式塔梁固结构造受力分析

针对端承板式塔梁固结构造,建立三维实体有限元模型进行局部分析,模型采用三维八节点实体单元模拟,共有单元22 177个。有限元模型如图6所示。

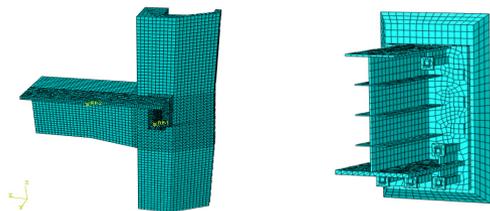


图6 塔梁固结构造局部有限元模型

整个模型主塔分别向上及向下延伸10 m,以减少模型边界条件模拟对结构受力的影响,在主塔和横梁的两个方向施加对称约束。提取总体梁单元模型中钢纵梁和混凝土桥面板的内力并施加给三维实体模型。

经计算,钢主梁预埋段及相接塔柱应力结果如图7、8所示。由图7、8可知:钢主梁应力除局部交点出现应力集中现象外,大部分区域应力均小于采用钢材的屈服强度标准值,塔柱主压应力最大为29.7 MPa,小于塔柱混凝土(C55)的抗压强度;设计还同时采用

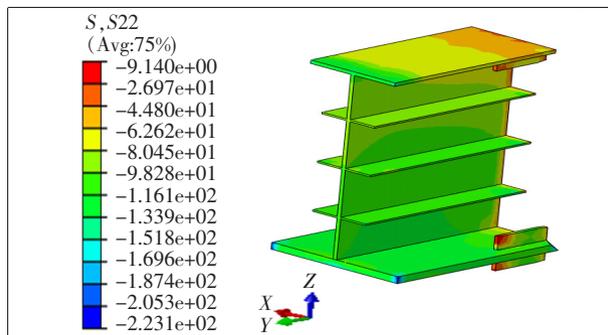


图7 钢主梁预埋段纵向桥向应力云图(单位:MPa)

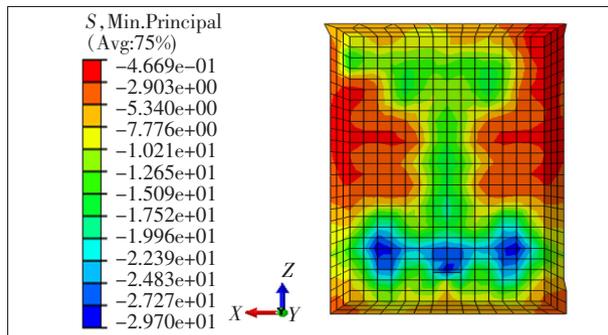


图8 塔柱承压突块主压应力云图(单位:MPa)

了规范方法验算该区域的局部承压承载能力,计算表明结构受力安全可靠。