

# 混合梁斜拉桥钢-混结合段设计关键技术

田波,宋路兵

(四川省公路规划勘察设计院有限公司,四川 成都 610041)

**摘要:**宜宾南溪(仙源)长江大桥主桥采用主跨572 m非对称混合梁斜拉桥。主跨及北岸边跨采用混合梁,南岸边跨采用混凝土主梁,南岸边跨与主跨间设置钢混结合段。该文针对钢-混结合段的位置、关键构造开展多方案研究,优先采用梁肋全截面连接承压传剪式过渡构造。并通过钢-混结合段现场静力模型试验、破坏模型试验及浇筑试验验证结构合理性和施工的可实施性。现场模型试验及结构分析的对比研究表明:宜宾南溪(仙源)长江大桥钢-混过渡段的结构构造设计合理,刚度平顺、受力安全可靠、施工可行,可为同类桥梁建设提供有益借鉴与指导。

**关键词:**非对称混合梁;钢-混结合段;模型试验;设计

**中图分类号:**U442.5

**文献标志码:**A

## 1 桥梁概况

宜宾南溪(仙源)长江大桥跨越长江,按双向四车道公路桥设计,预留六车道通车能力,两侧设置人行道,设计荷载为公路-I级、人群荷载 $2.5\text{ kN/m}^2$ 。<sup>[1]</sup>

主桥采用五跨 $280\text{ m}+572\text{ m}+(72.5+63+$

$53.5)\text{ m}$ 双塔双索面非对称混合梁斜拉桥。主跨及北岸边跨主梁采用混合梁,南岸边跨主梁采用混凝土主梁,北岸边中跨比为0.49,南岸边中跨比为0.33。组合梁主梁段斜拉索间距为13.5 m,混凝土主梁斜拉索间距为9.0 m,钢-混过渡段设置于南岸主塔中跨侧。桥面全宽30.5 m(含拉索空间),主梁中心高度3.5 m。大桥桥孔布置图见图1。

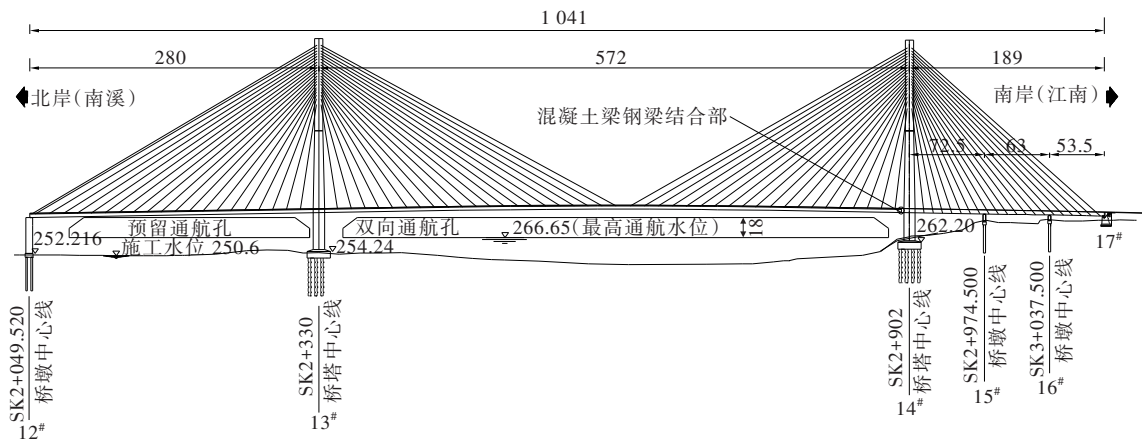


图1 大桥桥孔布置图(单位:m)

## 2 钢-混结合段位置选择

钢-混结合段与全桥合理边中跨比密不可分,

两者相互关联<sup>[2-3]</sup>。而混合梁斜拉桥跨径布置首先需要考虑建设条件限制,钢-混结合段位置应从结构受力性能、施工和经济性3个方面进行考虑。针对大桥 $(280+572+189)\text{ m}$ 的孔跨布置,南岸主梁结合

收稿日期:2022-10-11(修改稿)

基金项目:四川省交通运输科技项目(编号:2020-A-04)

作者简介:田波,男,硕士,教授级高工.E-mail:908585640@qq.com

段设置的选择,对比研究设置在边跨侧距索塔 20 m 处(方案 1)、设置在中跨侧距索塔 20 m 处(方案 2)两个方案。针对两个方案进行结构计算对比分析(表 1)。

由表 1 可知:两种方案钢梁及混凝土梁应力幅值

基本相当;钢梁正、负弯矩基本相当,方案 2 正弯矩略小。方案 1 混凝土主梁最大负弯矩明显大于方案 2,且方案 2 正、负弯矩值基本相当,结构受力均衡性较好。为防止结合部混凝土开裂,其位置应选在混凝土主梁弯矩小及应力幅较小的位置。

表 1 两种方案计算结果对比

方案	混凝土梁弯矩/(kN·m)		钢梁弯矩/(kN·m)		混凝土梁应力幅/MPa		钢梁应力幅/MPa	
	最大正弯矩	最大负弯矩	最大正弯矩	最大负弯矩	顶板	底板	顶板	底板
1	54 587	-78 698	17 132	-120 532	4.14	8.44	58.5	147.9
2	63 763	-68 984	12 354	-126 803	4.23	8.23	58.9	150.0

从施工条件分析,混凝土梁伸入边跨,还应考虑边跨钢梁的吊装架设条件及可实施性;伸入中跨,则应考虑伸入的混凝土梁段应仍可沿用边跨的施工架设方法。对该项目,根据水文建设条件,若结合面设在边跨,则南岸边跨钢箱梁吊装困难;设在中跨,若位置相对合适,方便结合段钢梁吊装。结合段位置混凝土可利用承台搭设膺架进行浇筑。

从经济性分析,混凝土梁伸入中跨,中跨钢梁长度可相应减少,有利于降低造价,从经济性考虑的最优位置为膺架覆盖范围(南岸主塔中心线 20 m 范围以内)。

综合以上分析,钢-混结合部位置选定采用方案 2,即设置在中跨侧距索塔 20 m 处作为设计采用方案。

### 3 钢-混结合段构造设计

主梁纵向主受力结构为组合梁(工字形钢梁+混凝土桥面板)和混凝土主梁(双纵肋主梁),该类组合梁结合处除承担较大的轴力外,还承担主梁弯矩<sup>[4]</sup>。钢-混结合段构造应充分考虑 4 个方面的设计因素:结构构造的合理性(部分截面结合→全截面结合);力学的合理性(刚性突变→刚性渐变);应力传递(集中应力→分散应力);制造及施工的方便性(复杂构造→简单构造)。

综合上述因素,设计采用梁肋全截面连接承压传剪式过渡构造<sup>[5]</sup>。连接过渡接头具体构造为:钢梁过渡段、钢-混结合段和混凝土梁过渡段构成的连续构造;钢梁过渡段与工字钢主梁焊接,钢-混结合段与钢梁过渡段焊接的钢箱,钢箱内部设置焊钉连接件使钢箱与混凝土形成联合受力,钢箱尾端设置承压钢板;钢-混结合段与混凝土梁过渡段通过设置在承压钢板上的开孔板连接件形成连接,混凝土梁过渡段与矩形混凝土主梁通过设置在矩形混凝土主梁

顶、底面及侧面的焊钉连接件形成连接,矩形混凝土主梁的纵向预应力钢束穿过混凝土梁过渡段锚固在承压钢板上(图 2)。

通过钢梁过渡段、钢-混结合段和混凝土梁过渡段形成的连接过渡接头,实现了工字钢主梁、矩形混凝土主梁两种主梁形式刚度的平顺过渡;除工字钢主梁顶、底板及腹板通过封头端板直接以承压方式传递荷载至矩形混凝土主梁结构外,还通过焊钉连接件、开孔板连接件及孔内钢筋以传剪方式来传递钢与混凝土之间的荷载,使连接构造应力分布更加均匀;加上预应力钢束的预压作用,始终保证钢结构与混凝土结构的结合面处于受压状态,增加了钢与混凝土连接构造的安全性及可靠性。

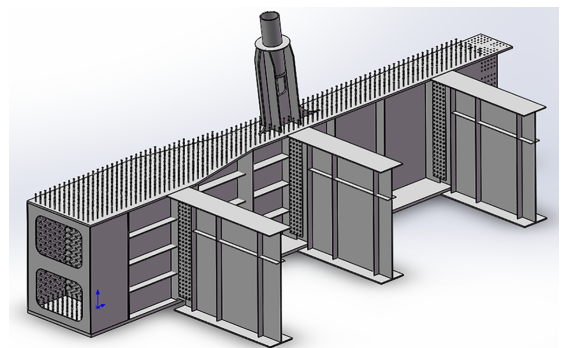


图 2 钢-混结合段三维构造图

### 4 钢-混结合段试验验证

传统的主梁工字钢-混过渡连接,通常采用工字钢主梁端直接设置端承压钢板与混凝土主梁连接。主梁钢-混结合段采用了新型的连接过渡接头结构形式,将工字主梁过渡成箱形主梁后,实现双纵肋钢主梁与双纵肋混凝土主梁全截面承压传剪式过渡构造。为了验证其结构受力的合理性,采用 1:4 的大比

例缩尺模型开展了静力试验,与数值分析模型进行对比研究,掌握其结构受力机理和结构受力的可靠性。为了保证结构施工的可行性,采用1:1的模型开展了足尺浇筑试验,确保施工便捷、质量更容易保证。

#### 4.1 静力试验

模型的设计主要根据加载能力和钢-混结合段构造特点,按照相似理论,在弹性范围内,使模型的弹性模量和应变与实桥相等进行确定。采用相似比为1:4模型,模型采用与实桥相同的材料进行制造。模型的加载方案依据圣维南原理,为消除局部加载对试验测点部位应力的影响,加载点离测试部位的距离为1~2倍模型宽度和高度中的较大值。根据钢-混结合段的受力特点,拟定了负弯矩承载能力加载、弯剪承载能力加载、正弯矩承载能力加载三大类工况开展模型试验,试验结果如图3、4所示。

由图3可得:钢梁顶板、底板、腹板以及混凝土桥面板的应力状况较为吻合,应力校检系数为0.85~1.15。相对来说,钢梁顶板应力出现一定偏移,主要原因是测点受后浇筑混凝土的影响和加载误差影响,但趋势分布是吻合的。模型试验可以较为准确地反映钢-混过渡段结构的受力状态,钢-混过渡段

各部位的结构受力安全可控<sup>[6]</sup>。

由图4可得:整体模型变形曲线均较为光滑平顺,不存在突变现象,且变形均在合理范围内。证明钢-混结合段设计科学合理,能够保证刚度平稳过渡,变形较为平顺,可以保证行车安全性及舒适性。

通过模型的破坏试验得到以下结论:

(1) 负弯矩荷载加载工况,加载至2.72倍设计荷载时,钢梁段底板出现屈服。

(2) 弯剪组合荷载加载工况,弯矩加载至1.22倍,所受剪力加载至1.29倍设计荷载时,钢梁段混凝土桥面板出现开裂,裂缝向标准钢梁段发展,钢-混结合段未出现开裂。

(3) 正弯矩荷载加载工况,加载至15.9倍设计荷载时,混凝土桥面板测点最大压应力为50.69 MPa,未出现桥面板压溃。

钢-混结合段上述破坏模型试验表明:钢-混结合段不会先于标准钢梁段发生破坏。设计采用的钢-混结合段具有承载能力高、刚度大、安全可靠性的受力特点。

#### 4.2 足尺浇筑试验

新型钢-混过渡段,钢格室为封闭的箱形结构,

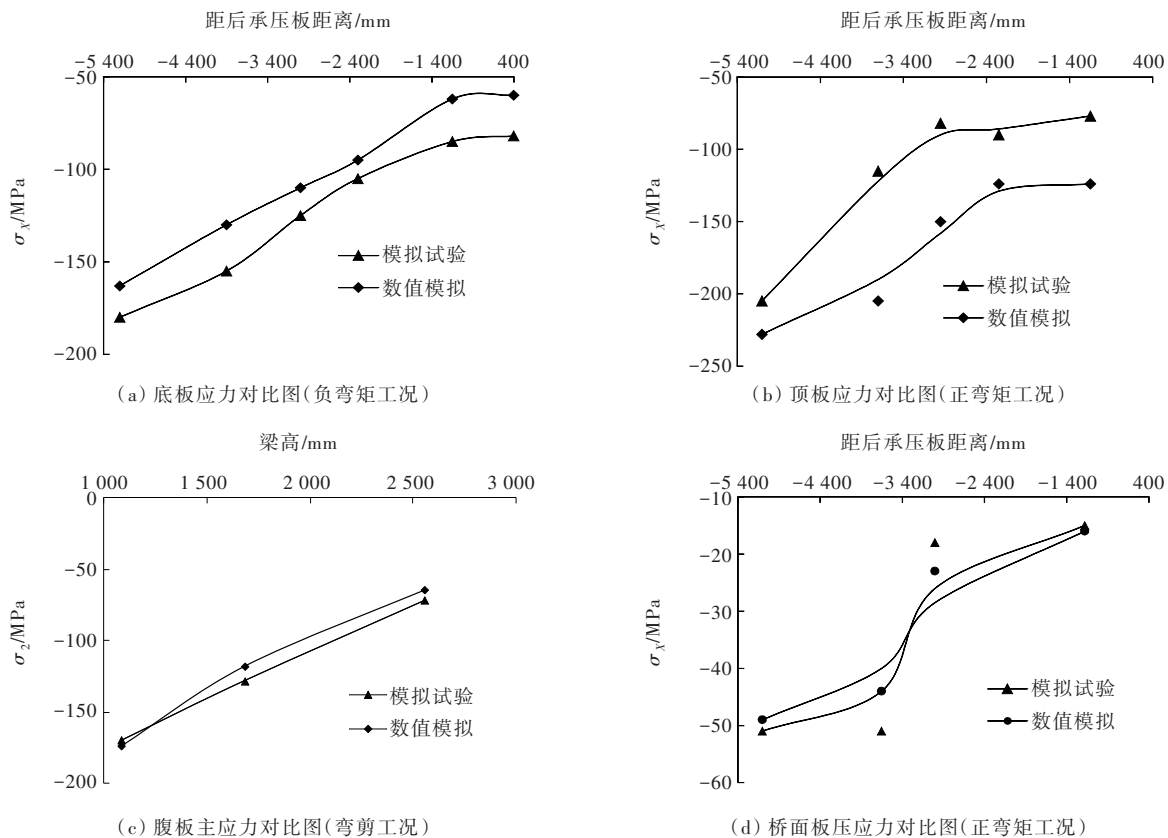


图3 模型试验与数值分析对比图

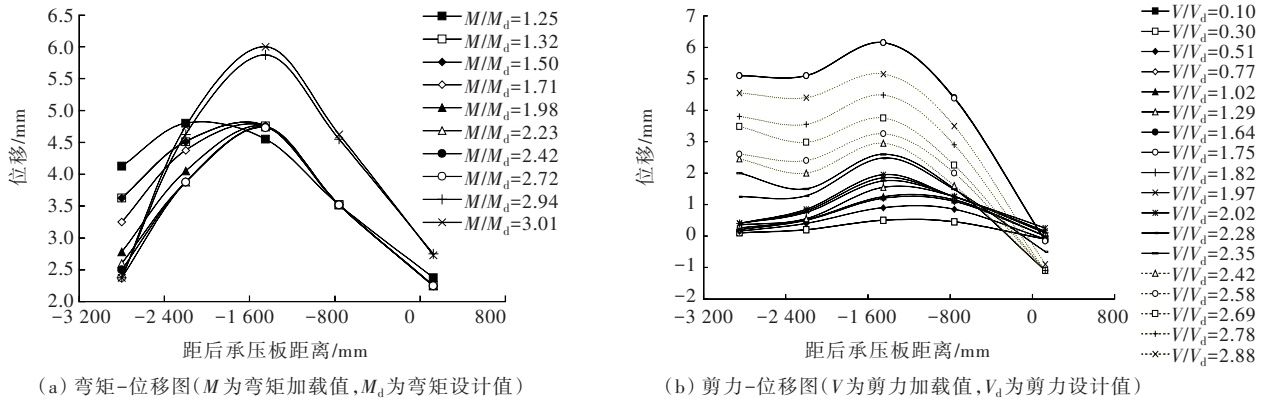


图4 模型梁荷载变形图

浇筑空间相对狭小,格室内有开孔板、剪力钉等连接件会导致混凝土浇筑和振捣困难,容易产生脱空现象;同时格室内混凝土养生不到位,容易产生收缩徐变现象,从而导致混凝土与格室之间不密贴。该浇筑试验为工艺试验,主要研究钢-混结合段施工工艺的合理性和科学性,从而指导钢-混结合段的施工。

试验模型选取实桥总长 4.285 m 的梁段作为研

究对象,按照 1:1 比例进行加工。模型各尺寸根据实际结构尺寸,钢板厚度进行适当折减取用,钢材由 Q370qD 调整为 Q235 钢材。

现场浇筑混凝土之前在试验室进行混凝土性能试验,具体包括坍落度桶试验和倒坍落度桶试验。当拌和站混凝土搅拌完成后,在现场再进行上述试验,从而确保混凝土性能,试验结果见表 2。

表2 格室自密实混凝土试验室与工地试验结果对比

项目		坍落度试验			坍落扩展度试验			
		坍落度/mm	黏聚性	保水性	最大直径/mm	最小直径/mm	代表值/mm	抗离析性
坍落度桶	试验室	265	良好	良好	670.2	650.1	660.0	良好
	工地现场	235	良好	良好	640.4	610.5	625.0	良好
倒坍落度桶	试验室	270	良好	良好	650.5	610.5	630.0	良好
	工地现场	240	良好	良好	600.5	590.4	595.0	良好

为提高混凝土的浇筑质量,主要采用以下技术手段。开发了适用于深窄结构内部混凝土浇注装置。装置依托结构的侧板和横向加劲板设置折叠式混凝土导流板组。该装置通过导引混凝土流动,避免混凝土直接垂直浇注时的激溅导致混凝土性能受到影响,以改善混凝土浇注的密实均匀性,同时有利于导出混凝土气泡,提高混凝土浇注质量和后期性能。通过浇筑完成的模型切割来看,浇筑质量良好,能够有效地保证钢-混结合段的整体性;同时试验也验证了钢-混结合段设计便于施工,有利于控制施工质量。

## 5 结论

(1) 宜宾南溪(仙源)长江大桥钢-混过渡结合段,充分考虑结构受力特点、施工可实施性和安全经济性进行合理位置选择,合理科学。

(2) 通过数值模拟分析和模型试验对比,对钢-

混过渡段的结构构造细节进行了充分验证,指导了过渡段的构造设计。

(3) 通过破坏性试验和浇筑工艺试验验证,钢-混过渡段具有刚度平顺、受力安全可靠、施工可行的特点。

## 参考文献:

- [1] 四川省交通厅公路规划勘察设计院.宜宾南溪长江公路大桥施工图设计文件[Z].2015.
- [2] 重庆交通科研设计院.公路斜拉桥设计细则:JTG/T D65-01—2007[S].北京:人民交通出版社,2007.
- [3] 徐国平,张喜刚,刘玉擎.混合梁斜拉桥[M].北京:人民交通出版社,2013.
- [4] 刘玉擎.混合梁接合部设计技术的发展[J].世界桥梁,2005,33(4):9-12.
- [5] 刘明虎,徐国平,刘峰.鄂东大桥混合梁钢-混凝土结合部研究与设计[J].公路交通科技,2010,27(12):78-85.
- [6] 金龙,杨永伟,邓露,等.混合梁斜拉桥钢-混结合段受力性能的有限元分析[J].中外公路,2019,39(2):70-75.