

# 混合梁斜拉桥钢-混结合段静力行为

李小珍<sup>1</sup>, 肖林<sup>1</sup>, 黄玲<sup>2</sup>, 卫星<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 610031 成都; 2. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 430050 武汉)

**摘要:** 为了解混合梁斜拉桥中主梁钢-混结合段的力学行为,按照相似原则设计了厦门马新大桥主梁钢-混凝土结合段的缩尺试验模型,对试验模型分别按照设计荷载和1.7倍设计荷载进行加载,测试试验模型的控制断面和主要构件的应力、变形随加载历程的变化,并结合数值分析对钢-混结合段的传力机理进行研究. 研究表明:结合段钢结构、混凝土结构及PBL键贯穿钢筋的应力水平较低,结合段具有较强的安全储备;钢箱与混凝土之间相对滑移量较小,钢箱与混凝土之间共同受力工作性能良好,钢结构荷载被比较顺畅地传递到混凝土结构;钢-混结合段传力构件荷载分配合理,设置PBL剪力键的有格室后承压板构造是一种合理的钢-混结合段结构形式.

**关键词:** 混合梁斜拉桥;钢-混结合段;PBL剪力键;受力行为;模型试验;有限元分析

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)06-0075-08

## Static mechanical behavior of steel-concrete joint section of hybrid beam cable-stayed bridges

LI Xiaozhen<sup>1</sup>, XIAO Lin<sup>1</sup>, HUANG Ling<sup>2</sup>, WEI Xing<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031 Chengdu, China;

2. China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., 430050 Wuhan, China)

**Abstract:** Based on the similarity principle, a reduced scale test model of steel-concrete joint section of The Xiamen Maxin Bridge is designed to investigate the mechanical behavior of steel-concrete joint section of hybrid beam cable-stayed bridges. The test model is loaded with design load and 1.7 times design load, and the variations of stress and deformation of control sections and main members with loading history are obtained. Combining test results with numerical simulation results, the load transfer mechanism of steel-concrete composite joint section is researched. As shown in the results, the stress of steel, concrete and PBL connector of the joint section is small, and there is enough safety capacity in the joint section. The relative slip between steel box and concrete is small, the steel box and concrete work together well, and the load from steel is smoothly delivered to concrete. The load distribution of load-transmission members is proper. It is proved by the test that the lattice with post-bearing plate and PBL shear connectors is reasonable for steel-concrete composite joint section.

**Key words:** hybrid girder cable-stayed bridges; steel-concrete joint section; PBL shear connector; mechanical behavior; model test; finite element analysis

混合梁是将混凝土梁和钢梁在纵向通过钢-混结合段结合在一起而形成的结构. 通过对钢与混凝土

两种材料合理利用,混合梁具有良好的受力性能、跨越能力和经济性<sup>[1-3]</sup>. 混合梁在斜拉桥中应用较多,自20世纪70年代 Kurt-Schumacher 桥在原西德问世后,先后受到欧洲、日本等国家的青睐<sup>[4-5]</sup>,我国也修建了大量混合梁斜拉桥,如汕头礮石大桥、武汉白沙洲长江大桥、舟山桃夭门大桥、湛江海湾大桥、鄂东长江公路大桥、香港昂船

收稿日期: 2012-10-22.

基金项目: 国家自然科学基金(50808150);清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室开放基金;西南交通大学优秀博士论文培育项目.

作者简介: 李小珍(1970—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 肖林, xiaolingly@163.com.

洲大桥等。

我国学者针对钢 - 混结合段开展了大量模型试验研究<sup>[6-13]</sup>,但由于实际结构结合段构造形式差异较大,这些研究结果对后续桥梁结构钢 - 混结合段的指导作用有限。

厦门马新大桥主桥桥型为斜独塔单索面斜拉桥,采用塔、梁、墩固结体系。边跨为 135.65 m 的预应力混凝土箱梁,主跨为 209.15 m 的钢箱梁,混凝土箱梁伸过桥塔 9.75 m,通过 2.0 m 的结合段与钢箱梁连接。该桥钢 - 混结合段采用有格室后承压板形式,在钢箱梁端部设置多格室结构,在格室内灌注混凝土,格室腹板上设置 PBL 剪力键,承压板上设置栓钉,为了使钢箱梁与混凝土箱梁结合紧密,将两者用预应力钢绞线进行连接,见图 1。钢梁传来的轴力、弯矩、剪力和扭矩通过后承压板和钢格室内的 PBL 剪力键向混凝土传递。

结合段钢格室由内外壁板与腹板构成,考虑

填充混凝土应力分散所必要的面积、格室内焊接空间、构件加工制作可行性等因素,钢格室高度取 800 mm。在格室腹板上设置 PBL 剪力键,其开孔直径 60 mm,贯穿钢筋直径 20 mm,开孔钢板厚度 20 mm。钢梁段与结合段之间设置 3 500 mm 长的过渡段,过渡段钢梁顶板、底板 U 型加劲肋增设 T 型加劲肋进行过渡。

混合梁斜拉桥主梁钢 - 混结合段几何构造复杂、形式多样,是主梁结构特性和材料特性的突变点,容易产生应力集中、变形折角等,是混合梁的关键构造。为验证设计计算理论,检验结合段构造的可靠性,设计制作了厦门马新大桥主梁钢 - 混结合段大比例试验模型,研究结合段各部分受力特点、变形性能、应力分布规律、传力机理及结构安全性,也为同类型桥梁结构的设计、施工积累技术资料。

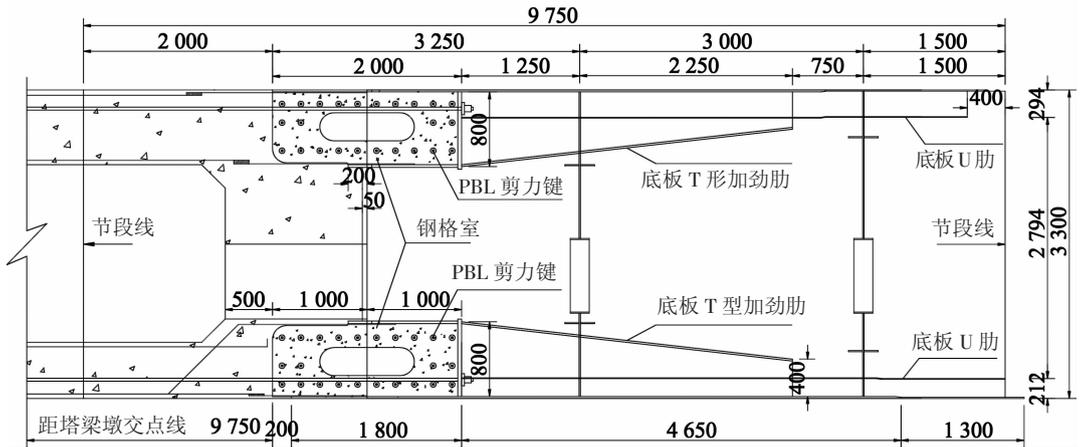


图 1 实桥钢 - 混结合段设计图 (mm)

## 1 试验方案

### 1.1 试验模型设计

马新大桥主梁钢 - 混结合段及相邻混凝土梁、钢梁过渡段长 9.75 m,桥面宽 34 m,主梁宽度 27.5 m。空间有限元计算得到钢 - 混结合段的内力见表 1。

该桥钢 - 混结合段构造尺寸及传递的内力巨大,难以进行足尺模型试验,可以根据研究的重

点,按照应力等效原则进行缩尺模型试验。综合考虑试验加载设备、模型制作等因素,确定缩尺模型在高度及长度方向选取 1:2 的比例尺,宽度方向选取 1:10 的比例尺。缩尺后的试验模型高 1.65 m,宽 2.75 m,钢混接头长 1.0 m。由于弯矩加载需要足够的力臂长度,同时按照圣维南原理,加载边界与研究节段应具有足够长的间距,将模型钢梁过渡段加长为 4.85 m,混凝土过渡段加长为 4.65 m,模型总长 10.5 m。试验模型构造见图 2。

表 1 钢 - 混结合段内力

工况	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)	扭矩/(kN·m)
最大轴力组合	127 949	5 193	-41 747	43 117
最大负弯矩组合	122 193	6 822	-84 152	43 117

试验模型采用与实际结构相同的材料,钢箱梁采用 Q370qC 级钢材,混凝土箱梁采用 C55 级

碎石混凝土,钢筋规格为 HRB335。试验模型各物理量的相似比见表 2。

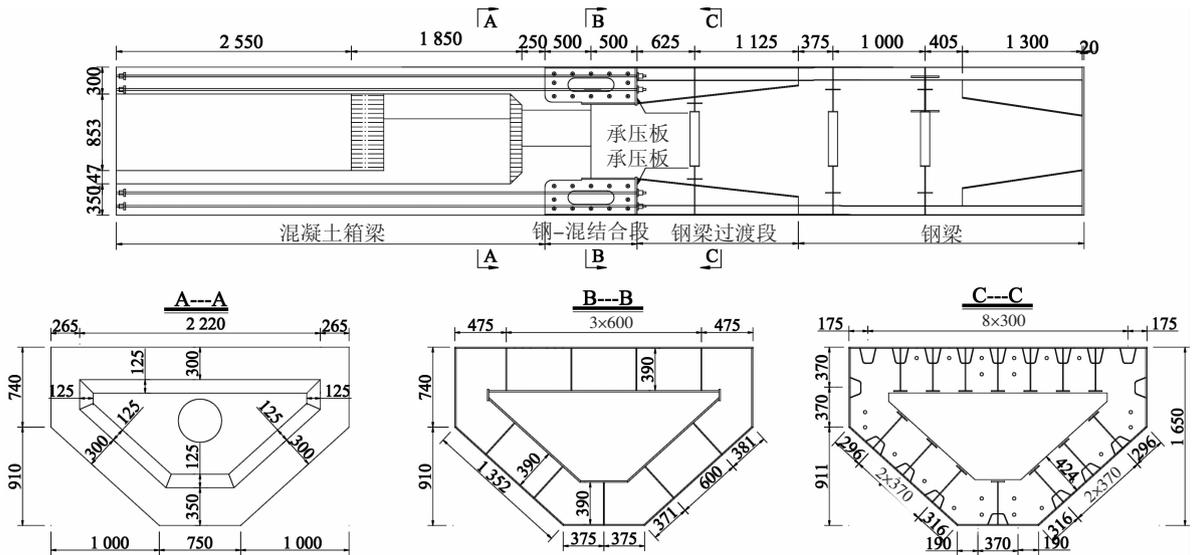


图 2 试验模型结构 (mm)

表 2 模型与实桥各参数相似比

截面横向宽度	截面竖向高度	模型长度	截面面积	截面惯性矩
1:10	1:2	1:2	1:20	1:80

### 1.2 加载方案

共进行 5 荷载工况的加载. 考虑钢-混结合段承受设计最大轴力、最大负弯矩组合加载, 对其力学行为进行研究; 为验证结构安全性, 分别进行 1.7 倍最大轴力、最大弯矩组合下的加载试验; 此外还进行最大设计轴力的加载试验对结合段的荷

载传递机理进行研究.

在模型试验中根据应力等效原则, 通过调整试验模型的弯矩和扭矩, 保证钢-混结合段上、下缘的弯曲应力以及扭转剪切应力与实际结构一致. 按相似准则换算出各试验工况的内力值, 见表 3.

表 3 试验模型内力

工况	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)	扭矩/(kN·m)
1.0 倍最大轴力组合	6 770	275	-994	987
1.0 倍最大负弯矩组合	6 466	361	-2 004	987
1.7 倍最大轴力组合	11 510	467	-1 690	1 678
1.7 倍最大负弯矩组合	10 992	614	-3 408	1 678
1.0 倍最大轴力	6 770	0	0	0

模型加载方案见图 3. 轴力通过模型两端的两台 650 t 千斤顶施加, 两千斤顶的合力作用在模型的形心; 弯矩和剪力通过在混凝土梁悬臂端施加竖向力实现; 扭矩通过钢梁两侧施加一对等值反向竖向力实现.

### 1.3 测试方案

为了解钢-混结合段在荷载作用下的受力行为, 选择包括结合段、钢梁过渡段及混凝土梁过渡段在内的 12 个具有代表性的截面作为测试断面, 钢梁段、钢-混结合段和混凝土梁段各布置 4 个测试断面见图 4; 每个测试断面上布置 11 个测点, 见图 5.

钢与混凝土的应变采用高精度电阻应变片测量. 由于模型同时承受轴力、弯矩和扭矩, 模型表面应变测点均布置 45° 应变花; 钢箱梁箱体内应变测点主要布置在具有代表性的 U 肋和 T 肋过

渡板上, 用以分析 U 肋共同受力情况和 T 肋过渡传力情况; 钢-混结合段内 PBL 剪力键开孔钢板上沿桥纵向布置单向应变片, 观测剪力键的传力情况; 混凝土箱梁应变测点布在箱体表面. 为精确测量混凝土内部应变, 在结合段相应的表面应变测点位, 沿混凝土板高度方向布置两排振弦式应变传感器, 同时在相同点位的纵向钢筋上布置电阻应变片, 由于钢筋与混凝土协同变形, 可以由钢筋应变计算混凝土应力.

在 PBL 剪力键贯穿钢筋上布置单向应变测点, 通过测试贯穿钢筋弯曲应力, 推算 PBL 剪力键的受力状态. 在 C1、C2、H1 ~ H4、S2、S4 截面设置位移计测量梁体挠度. 另外, 在结合段 H4 截面采用千分表测量钢板与混凝土的相对滑移量, 考察钢板与混凝土间协同工作性能.

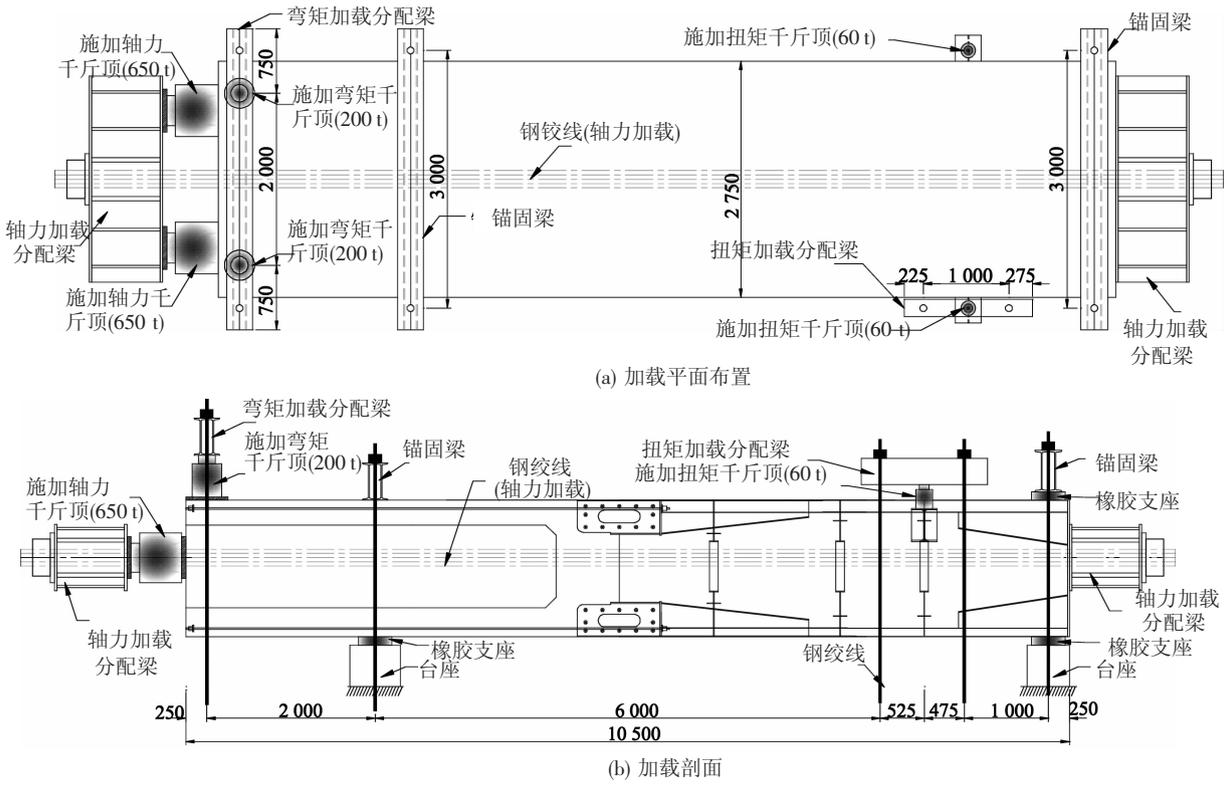


图3 加载示意 (mm)

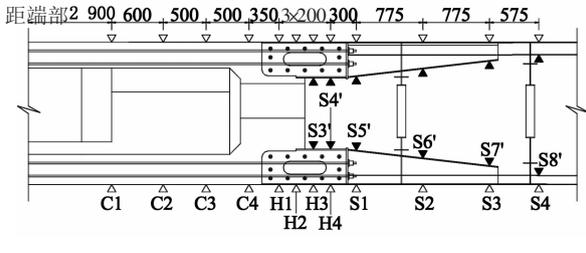


图4 模型测试断面位置 (mm)

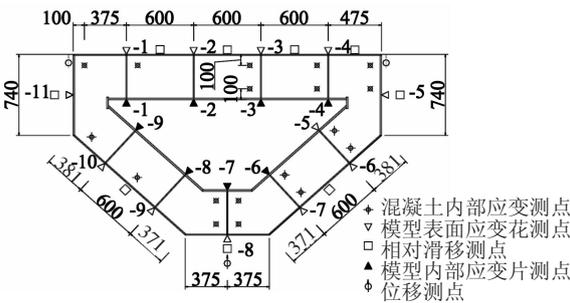


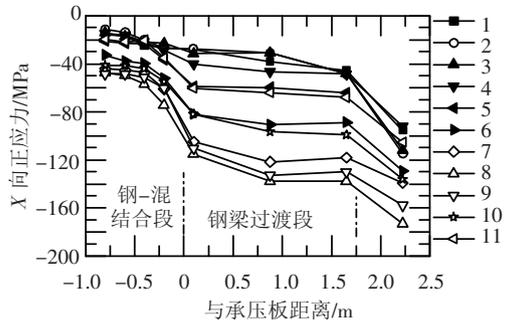
图5 测点断面布置 (mm)

## 2 模型试验结果

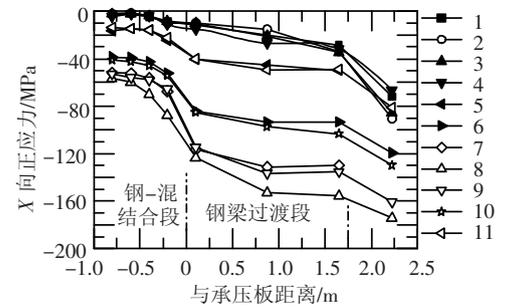
在描述测点位置及试验结果时,以模型顺桥向作为  $X$  轴,横桥向为  $Y$  轴,竖向为  $Z$  轴.以承压板中心为坐标原点,向钢梁侧为  $X$  轴正向.

### 2.1 钢箱应力分布

1.7 倍最大轴力、1.7 倍最大弯矩组合荷载作用下,模型表面各列测点沿  $X$  轴向正应力分布见图6,图中各列测点位置见图5.



(a) 1.7 倍最大轴力组合

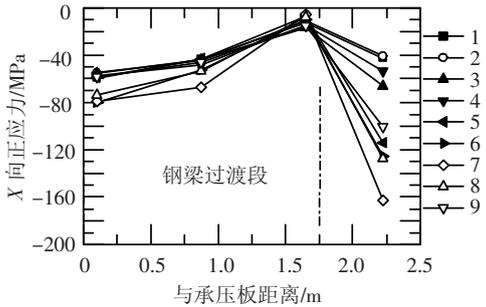


(b) 1.7 倍最大弯矩组合

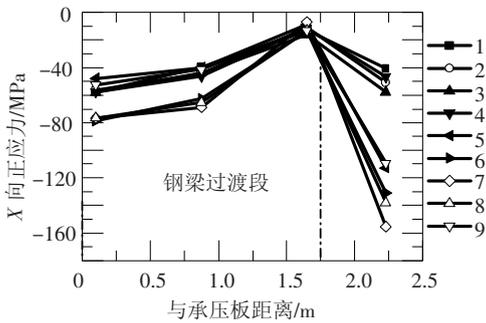
图6 模型钢箱表面正应力分布

钢梁表面应力呈阶梯状分布:在同样的断面测点位置,钢梁标准段应力水平较高,而在钢梁过渡段的应力水平有一定程度的降低,到达钢-混结合段后应力水平显著下降.以模型底板为例,1.7 倍最大轴力组合工况下,钢梁底板标准段 S4 断面处压应力约为 173.0 MPa,承压板附近断面

S1 处应力约为 115.3 MPa,钢混结合面附近断面 H1 处应力约为 47.0 MPa,钢梁应力沿顺桥向逐步减小. 模型钢梁标准段的荷载经钢梁过渡段、钢-混结合段,逐步顺畅地传递给混凝土梁. 1.7 倍设计荷载作用下钢梁加劲肋的纵桥向正应力分布见图 7.



(a) 1.7 倍最大轴力组合



(b) 1.7 倍最大弯矩组合

图 7 钢梁加劲肋正应力分布

钢梁标准段采用 U 型加劲肋,而在钢梁过渡段增加了 T 肋,钢箱梁截面面积增大因此应力水平降低;离承压板 0.875 m 处的断面,位于钢梁横隔板处,经过此断面后钢梁应力变化渐趋缓和,表明 T 肋对整个截面的加劲作用已经体现,截面刚度渐趋平稳;在离承压板 0.1 m 处的断面 T 肋高度达到最大,钢梁截面积也最大,应力最小. 相比钢箱梁标准段,承压板附近钢板应力下降了 30% 左右,在钢梁过渡段增加 T 肋能有效分散钢梁段的应力水平.

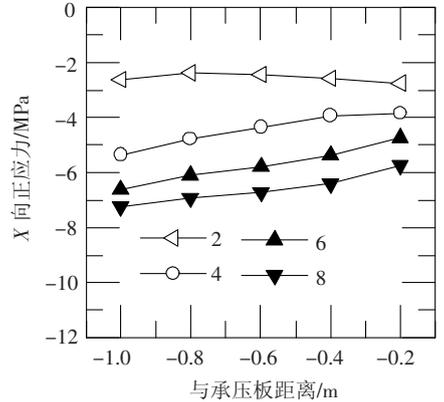
### 2.2 混凝土应力分布

采用振弦传感器和混凝土内纵筋应变片测量钢-混结合段内混凝土应力. 试验得到 1.7 倍设计荷载作用下结合段部分混凝土测点纵向正应力分布见图 8.

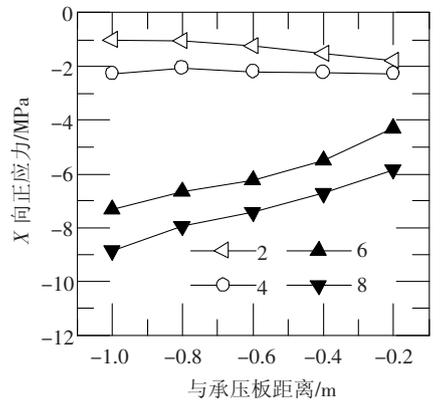
采用表面应变片测试混凝土过渡段的应力,试验得到 1.7 倍设计荷载作用下过渡段混凝土纵向正应力分布见图 9.

1.7 倍设计荷载作用下,钢-混结合段与过渡段混凝土的应力水平较低,应力沿梁轴线分布较为平顺. 受弯矩影响,梁体上缘应力水平低于下

缘应力水平,对于最大弯矩组合,上下缘应力水平的差异更明显.

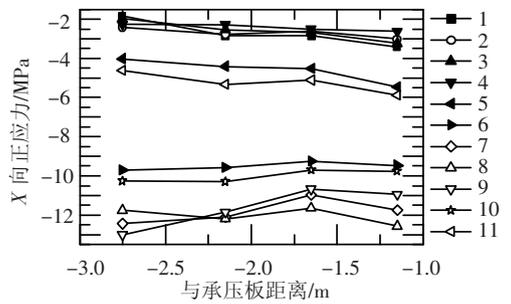


(a) 1.7 倍最大轴力组合

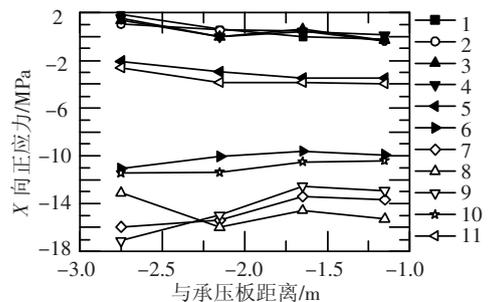


(b) 1.7 倍最大弯矩组合

图 8 结合段混凝土正应力分布



(a) 1.7 倍最大轴力组合



(b) 1.7 倍最大弯矩组合

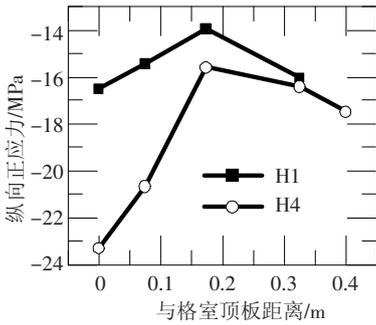
图 9 过渡段混凝土正应力分布

### 2.3 PBL 剪力键应力分布

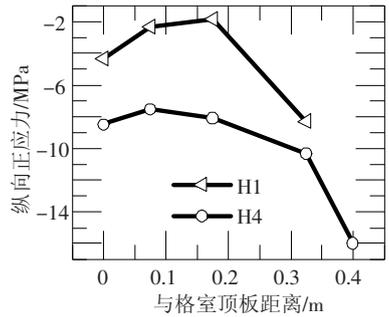
图 10 示出了部分格室开孔钢板测点的应力

分布. 靠近顶板与底板的区域开孔钢板纵向正应力大, 远离顶、底板区域开孔钢板纵向应力小, 表明荷载是从顶、底板逐渐向格室内腹板传递; 随着距承压板距离的逐渐增大 (H1 测点距离承压板

0.2 m, H4 测点距离承压板 0.8 m), 开孔腹板纵向正应力逐渐减小, 表明临近承压板的 PBL 剪力键传递的荷载大于远离承压板的 PBL 剪力键.



(a) 1.7 倍最大轴力组合

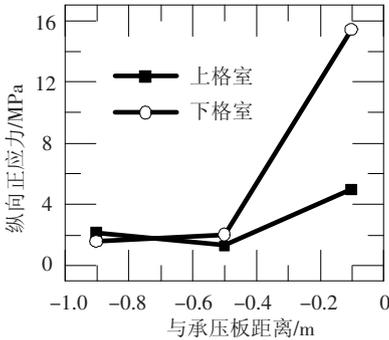


(b) 1.7 倍最大弯矩组合

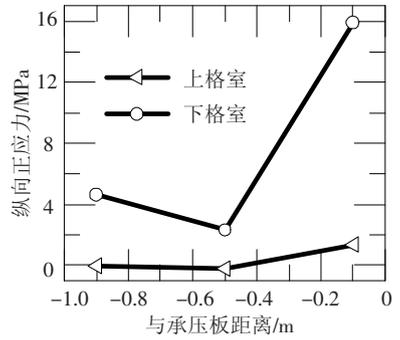
图 10 PBL 剪力键开孔板应力分布

图 11 示出了部分 PBL 剪力键贯穿钢筋测点的弯曲应力, 其应力分布规律与开孔钢板一致, 即靠近承压板的贯穿钢筋应力大, 远离承压板的贯穿钢筋应力较小. 1.7 倍设计荷载作用下贯穿钢

筋应力水平较低, 未超过 25 MPa, 根据推出试验的结果<sup>[14]</sup>, 可知此时 PBL 剪力键承受的荷载远小于其极限承载力.



(a) 1.7 倍最大轴力组合



(b) 1.7 倍最大弯矩组合

图 11 贯穿钢筋应力分布

### 2.4 钢与混凝土相对滑移

试验中结合段钢板与混凝土的相对滑移采用位移传感器测量. 通过在钢面板上开孔, 设置外伸钢筋, 浇注混凝土后, 外伸钢筋与周围混凝土一起运动, 通过测量外伸钢筋与钢板的相对变形, 即可得到结合段钢板与混凝土的相对滑移. 测得钢与混凝土之间相对滑移值见表 4.

表 4 钢与混凝土相对滑移值 mm

荷载工况	顶板	边腹板	斜腹板
1.7 倍最大轴力	0.006 2	0.006 0	0.061 4
1.7 倍最大负弯矩	0.006 8	0.002 0	0.064 6

在 1.7 倍最大轴力和最大负弯矩组合荷载作用下结合段钢与混凝土结合面相对滑移量微小, 说明二者变形协调, 协同作用良好, 钢-混结合段连接安全、可靠.

### 2.5 模型安全性分析

在试验模型表面测点都布置了应变花以测量荷载作用下测点的应力状态. 根据测试结果计算得到 1.7 倍设计荷载作用下钢梁段面板的 Von. Mises 应力值以及混凝土段面板的主应力值见表 5. 在 1.7 倍最大负弯矩组合作用下, 钢梁底板出现最大 Von. Mises 应力为 172.40 MPa; 混凝土最大主拉应力为 1.87 MPa, 最大主压应力为 -19.06 MPa.

试验模型在 1.7 倍设计荷载作用下, 未发现结合段混凝土表面开裂以及钢板件屈曲现象. 1.7 倍最大负弯矩工况下顶板、底板和腹板中代表性测点的实测荷载-应力曲线以及荷载-相对滑移曲线见图 12、13. 各测点的应力以及相对滑移随着荷载的增加线性递增, 可见在 1.7 倍荷载作用下, 试验模型各测试构件均处于弹性工作状态.

表5 试验模型最大组合应力值

MPa

荷载工况	Von. Mises 应力				混凝土第一主应力	混凝土第三主应力
	顶板	边腹板	斜腹板	底板		
1.7 倍最大轴力	112.85	103.37	170.00	170.93	1.68	-13.00
1.7 倍最大负弯矩	90.43	96.48	169.97	172.40	1.87	-19.06

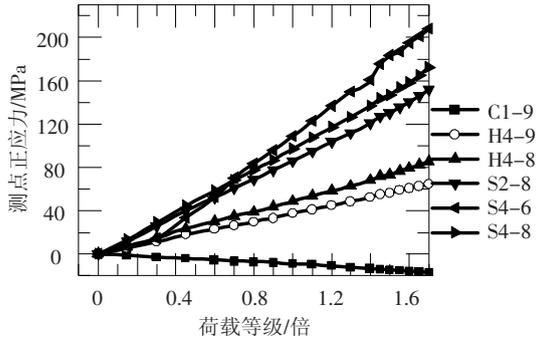


图12 最大负弯矩工况下部分测点荷载-应力关系

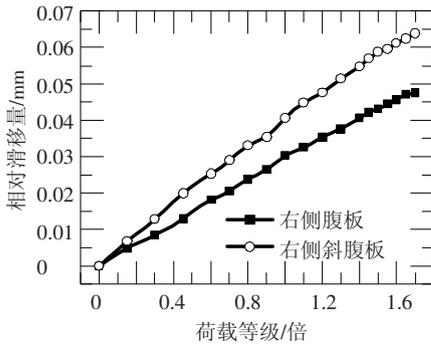


图13 最大负弯矩工况下部分测点荷载-相对滑移关系

### 3 数值分析

受测试技术限制,模型试验不能得到结合段全部的变形、应变情况,故而对试验模型进行非线性有限元分析,作为模型试验的补充。

采用 ANSYS 建立有限元模型. 模型中钢板、混凝土和钢筋分别采用板单元 SHELL181、实体单元 SOLID65 和梁单元 BEAM188 模拟,预应力钢筋采用杆单元 LINK10 模拟. PBL 剪力键采用非线性弹簧单元模拟,弹簧单元的抗剪刚度根据推出试验结果<sup>[15]</sup>确定为 928 kN/mm. 建立模型时,根据结构实际情况做三点假定:(1)由于有限元模型单元数量大,为提高求解效率,同时避免分析不收敛的情况,将钢板与混凝土之间的接触关系采用约束钢板和混凝土法向自由度替代;(2)忽略钢壁板与混凝土之间的摩擦传力,将其作为结构的安全储备;(3)贯穿钢筋被混凝土握裹,很难发生相对滑动,因此将贯穿钢筋与混凝土按完全粘结考虑. 有限元分析模型见图 14.

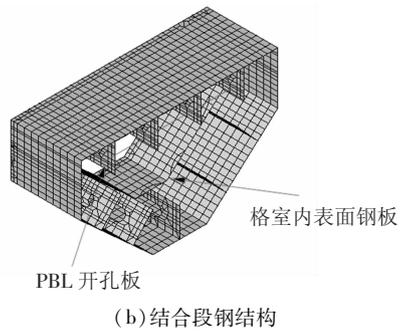
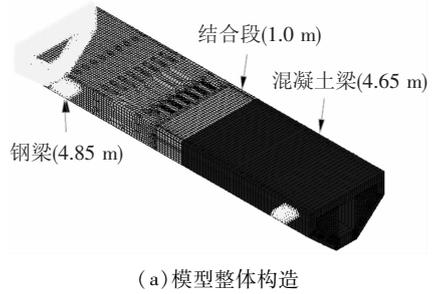
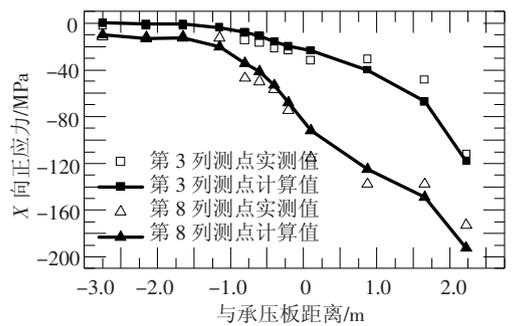
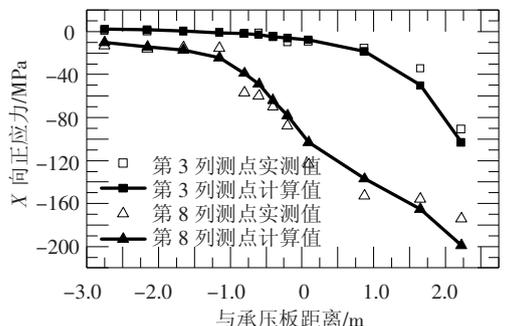


图14 有限元模型

图 15 示出了部分测点的试验结果与有限元计算结果的对比. 各测点的应力测试值与计算值的大小相当,分布规律基本吻合,采用的有限元分析模型能较好反映实际试验模型结构的受力状态。



(a) 1.7 倍最大轴力荷载组合



(b) 1.7 倍最大弯矩荷载组合

图15 试验结果与有限元分析结果的应力对比

## 4 钢-混结合段传力机理

根据测点布置,将试验模型沿纵向划分为12个节段,每个节段包含一个应力测试断面;按照应力测试断面的测点布置,将每个节段在横截面内划分为 $n$ 个区域 $A_1, A_2 \cdots A_i \cdots A_n$ ,假定在该区域应力平均分布,测得每个区域的纵向应力 $\sigma_i$ 后,可以近似求得该截面的轴力 $N_j = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \sigma_i$ ;若横截面上包含 $k$ 个不同的构件,对不同的构件分别求和,可以得到各构件分担的荷载 $N_{j,k}$ ;对不同的节段 $N_{j,k} - N_{j+i,k}$ 即为 $i$ 个阶段内 $k$ 构件传递的荷载。

由于横截面上应力分布复杂,上述方法得到的计算结果近似,测点布置得越细密则越接近真实值。受模型空间尺寸限制,测点布置数量有限,本文采用有限元分析结果作为试验结果的补充。采用有限元结果时,横截面的轴力可以积分求得

$$N_j = \int_A \sigma dA \quad (1)$$

采用上述两种方法求得试验模型各构件分担荷载的比例见表6。可以看出,在钢梁过渡段荷载从模型壁板逐步传递至加劲肋,在钢-混结合段通过壁板和加劲肋传递至承压板;模型试验结果及有限元分析结果表明,承压板承担了50%左右的荷载,剩余部分荷载由格室内PBL剪力键以及钢板与混凝土的界面粘结逐步传递给混凝土。

表6 试验模型各构件分担荷载比例 %

断面位置	板件构成	上格室		下格室		边格室	
		测试值	计算值	测试值	计算值	测试值	计算值
S3	顶板	56.05	60.34	65.87	81.80	54.73	72.17
	加劲肋	33.95	39.66	34.13	18.20	45.27	27.83
S1	顶板	29.35	42.03	58.94	63.83	50.43	51.33
	加劲肋	70.65	57.97	41.06	36.17	49.57	48.67
H4	格室顶板	33.38	33.93	35.61	38.51	34.47	36.17
	开孔腹板	8.26	6.84	5.11	0.90	6.72	3.52
	格室底板	15.79	7.80	11.46	5.20	13.67	7.15
	承压板	42.57	51.43	47.81	54.99	45.14	53.16

## 5 结论

1) 试验荷载作用下,模型钢梁过渡段、结合段和混凝土过渡段传力顺畅,沿纵桥向结构各部位应力变化匀顺;1.7倍设计荷载作用下模型钢结构、混凝土结构及剪力键应力水平较低。

2) 结合段钢与混凝土相对滑移量较小,二者协同作用良好,采用的设置PBL剪力键的有格室后承压板结合部构造能保证荷载的有效传递。

3) 1.7倍设计荷载作用下模型测点组合应力水平较低,荷载-应力曲线基本呈线性关系,试验模型在在承载能力极限状态荷载组合仍处于弹性阶段,钢-混结合段具有足够的安全储备。

4) 数值分析结果与模型试验结果基本吻合,采用非线性有限元分析与模型试验相结合是一种经济、有效的研究手段。

5) 结合段中后承压板传递50%左右的荷载,其他荷载通过PBL剪力键及钢与混凝土的界面粘结传递给混凝土,结合段传力构件的荷载分配较合理。

## 参考文献

- [1] 严国敏. 现代斜拉桥[M]. 成都:西南交通大学出版社,1996.
- [2] 刘士林,梁智涛,侯金龙,等. 斜拉桥[M]. 北京:人民交通出版社,2002.
- [3] 刘玉擎. 组合结构桥梁[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [4] MICHEL V. Normandie bridge [C]//Proceedings of the Structures Congress '94. Atlanta:ASCE, 1994:660-665.
- [5] MANABU I, TAKEO E. Tataru bridge-world's longest cable-stayed span [C]//Proceedings of the Structures Congress '94. Atlanta:ASCE, 1994:677-682.
- [6] 铁道部大桥局桥梁科学研究院. 汕头礮石大桥钢箱梁和混凝土箱梁连接部位模型试验报告[R]. 武汉:铁道部大桥局桥梁科学研究院,1996.
- [7] 陈开利,王戒躁,安群慧. 舟山桃夭门大桥钢与混凝土结合段模型试验研究[J]. 土木工程学报,2006(3):86-90.
- [8] 王军文,倪章军,李建中. 石板坡长江大桥钢混结合段局部应力分析[J]. 公路交通科技,2007,24(8):99-102.
- [9] 胡建华,侯文崎,黄琼. 混合梁自锚式悬索桥钢混结合段结构形式的对比试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2007,4(5):28-33.
- [10] 梁会东. 钢-混凝土接头试验研究与受力性能分析[D]. 成都:西南交通大学,2006.
- [11] 刘安双,任国雷,马振栋. 重庆菜园坝长江大桥主拱钢-混凝土接头设计[J]. 世界桥梁,2006(4):27-30.
- [12] 刘琼,黄彩萍,党志杰,等. 斜拉桥箱梁钢-混结合段受力的试验研究[J]. 铁道工程学报,2009(9):46-49.
- [13] 樊健生,聂建国,吕坚锋,等. 斜拉桥钢箱梁-混凝土索塔结合段的试验研究[J]. 土木工程学报,2008,41(7):61-66.
- [14] 肖林,李小珍,卫星. PBL剪力键静载力学性能推出试验研究[J]. 中国铁道科学,2010,31(3):15-21.
- [15] 李小珍,肖林,张迅,等. 钢混结合段PBL键承载力试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(sup2):181-186. (编辑 赵丽莹)