文章编号：1000-4750(2013)01-0255-06

斜拉桥桥塔钢-混凝土结合段传力机理试验研究

卫　星，强士中

(西南交通大学土木工程学院，四川，成都 610031)

摘　要：绵阳城南新区一号桥斜拉桥采用钢-混凝土组合索塔，上钢塔与下混凝土塔之间的内力传递主要是通过承压板、PBL 剪力键实现。介绍了钢-混凝土组合索塔在斜拉桥中的应用，分析主塔钢混结合段的受力及构造特点的基础上，采用 1∶3 缩尺比例，按照几何条件、物理条件以及边界条件相似原则对结合段进行了模型试验。考虑承载能力极限状态荷载组合对试验模型进行加载，测试了试验模型的控制断面和控制构件的应力、变形随加载历程的变化形态，得到了结合段的应力状态、钢与混凝土的相对滑移等性能参数；将模型试验与有限元分析相结合，分析了结合段的传力机理及传力性能，得到结合段 PBL 剪力键及承压板荷载分配关系。

关键词：斜拉桥；索塔；钢-混凝土组合结构；模型试验；传力机理

中图分类号：U441.4　　**文献标志码：**A　　doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.06.0351

SPECIMEN TEST FOR MECHANICS BEHAVIOR OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE JOINT IN PYLON OF CABLE-STAYED BRIDGE

WEI Xing , QIANG Shi-zhong

(College of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: With a steel-concrete composite joint in pylon, No.1 Bridge is located at the new district south of Mianyang City. Load is transferred between steel and concrete pylon by bearing plate and PBL shear connector. The application of steel-concrete composite pylon in cable-stayed bridge was introduced. The structure characteristics and mechanics behavior of steel-concrete composite pylon were investigated. Based on analogical principle in geometry physics and restriction condition, specimen test of steel-concrete composite joint of the pylon was carried out. With loads exerted according to the ultimate limit state, the stress and deformation of some members of the steel-concrete composite joint were tested. The stress state of steel-concrete composite joint and the slippage between steel and concrete member were obtained. Combining theoretical analysis with the result obtained from the model test, the mechanics behavior of the steel-concrete composite joint was analyzed and the load distribution between PBL shear connector and bearing plate were obtained.

Key words: cable-stayed bridge; pylon; steel-concrete composite structure; specimen test; mechanics behavior

斜拉桥索塔按材料可分为钢筋混凝土索塔、钢索塔、钢-混凝土混合索塔和钢管混凝土索塔等，已建的绝大多数斜拉桥均采用混凝土索塔[1]。近年来，钢-混凝土组合结构索塔在斜拉桥中得到应用，苏通长江大桥及杭州湾大桥主航道桥的桥塔结构为钢锚箱外包混凝土的组合形式[2−3]；南京长江三桥的桥塔结构为上塔柱采用钢塔，而下塔柱采用混凝土塔的组合形式[4]。前一种形式钢混结合为连续传力，传力范围大，而后一种形式需要在很短的钢混结合段内，将钢塔上巨大的轴力与弯矩传递给下混凝土塔柱，因此对结合段的构造形式及剪力键的选用有严格的要求。由于国内对钢-混凝土组合结构及剪力键的研究不够系统，此类结构设计时往往参考国外设计规范，且通过模型试验进行设计验证。南京长

收稿日期：2011-06-09；修改日期：2011-12-14

基金项目：国家自然科学基金项目(50808150)；西南交通大学竣实之星项目(swjtu-sszx2008)

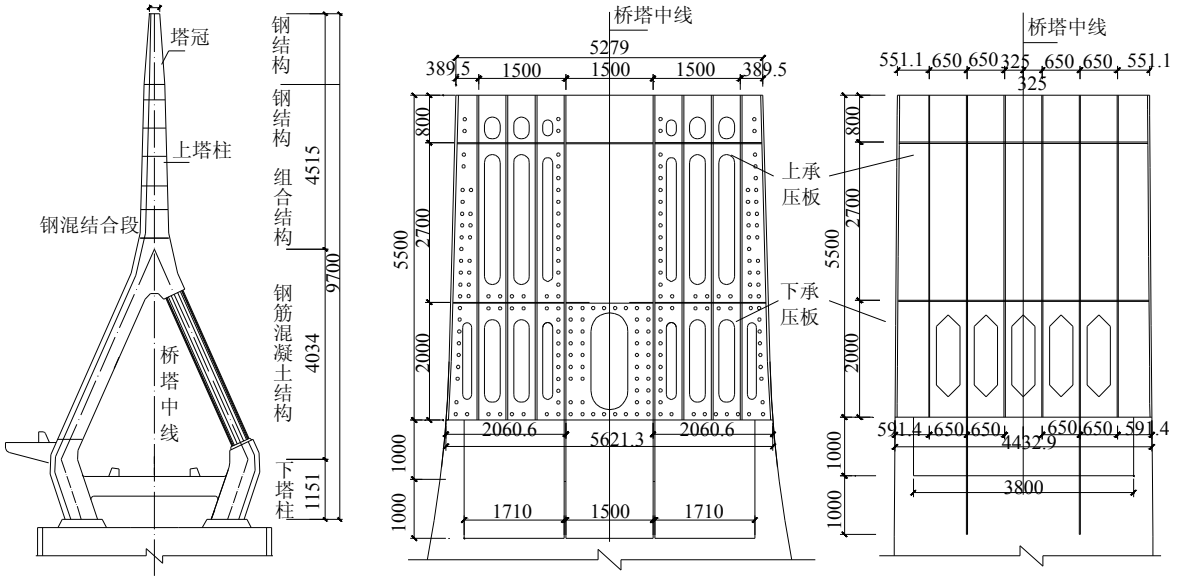
通讯作者：卫　星(1976−)，男，山西沁源人，副教授，博士，从事桥梁结构稳定、桥梁结构疲劳等方面研究(E-mail: we_star@swjtu.cn).

作者简介：强士中(1941−)，男，陕西礼泉人，教授，博士，从事桥梁结构行为、桥梁结构动力学等方面的研究(E-mail: qiangshizhong@163.com).

江第三大桥设计时对钢-混凝土结合段开展了剪力连接件选型、结合段局部验证试验研究[4]。

1 钢-混凝土结合段结构及受力特点

绵阳城南新区一号桥主桥为三跨双层斜拉桥，上层为 S 形人行天桥，下层为双向六车道车行桥。主桥跨径组合为 100m+200m+100m，全长 400m。倒 Y 型桥塔塔高 97m，主体结构高 83.5m，顶部装饰高 13.5m。桥塔上部为钢塔柱，高 24m，下部混凝土塔柱高 54m，钢塔柱与混凝土塔柱之间设置 5.5m 高的结合段。桥塔钢-混凝土结合段厚 4.43m，最大宽度 5.65m。在结合段中，上部钢塔的内力通过 PBL 剪力键、承压板及钢与混凝土界面粘结力传递给下塔柱。PBL 剪力键的开孔直径 60mm，贯穿钢筋直径 25mm。桥塔钢混结合段采用有格室的前后承压板构造，如图 1 所示。钢塔与混凝土塔之间的内力传递主要是通过承压板、PBL 剪力键以及钢壁面与混凝土之间粘结摩阻三种途径来进行。这三种途径对压应力、拉应力以及剪应力等的传力机理各不相同，承压板及 PBL 剪力键的传力作用是主要的，而钢壁面与混凝土之间的粘结摩阻有较大的不确定性，钢壁面与混凝土之间的粘结摩阻只当安全余量来看待。在轴力、弯矩和剪力的作用下，钢混结合段处将产生轴向压应力、轴向拉应力和剪应力，由于结合段设有索塔锚固区，锚下结构承受巨大索力，局部应力较大。此外，作为主要传力构件的 PBL 剪力键，其承载能力受材料、构件尺寸、布置形式的影响非常大；PBL 剪力键的推出试验结果表明，PBL 剪力键的剪切刚度、滑移量、承载能力存在离散性[5−10]。为验证结合段在设计荷载下的传力性能，对钢-混结合段的进行模型试验研究。



(a) 桥塔分段 (b) 结合段构造(横桥向) (c) 结合段构造(纵桥向)

图 1 钢-混凝土结合段构造 /mm

Fig.1 Steel-concrete composite section

2 钢-混凝土结合段试验研究

2.1 试验模型设计

桥塔钢-混凝土结合段试验模型采用 1∶3 缩尺比例。结构中人行桥锚固结构由于受荷载较小，且人行桥荷载主要由索塔锚固结构焊缝承担，对钢混结合段的影响有限，因此试验模型中没有包括人行桥索塔锚固结构[11]。试验模型中的 PBL 剪力键，采用保持孔径不变，减少孔洞数量的方式来实现应力等效。考虑到将孔洞数目减少到实际模型的 1/9 后，PBL 键数量过少，将会引起传力不均匀，模型中孔洞数量为实际结构的 1/4，将贯通钢筋直径减少到 16mm，这样参考 Eurocode 4 规范计算得到试验模型剪力键的设计承载力为实际结构的 1/9。

试验模型加载时，结合段底部与地面固接，由结合段顶部及塔内钢锚箱施加荷载。结合段顶部截面内力采用 10 台千斤顶实现加载，荷载通过千斤顶张拉钢绞线经过分配梁传至试验模型。结合段内拉索通过钢绞线模拟，索力用 4 台千斤顶施加，试验加载布置如图 2 所示。

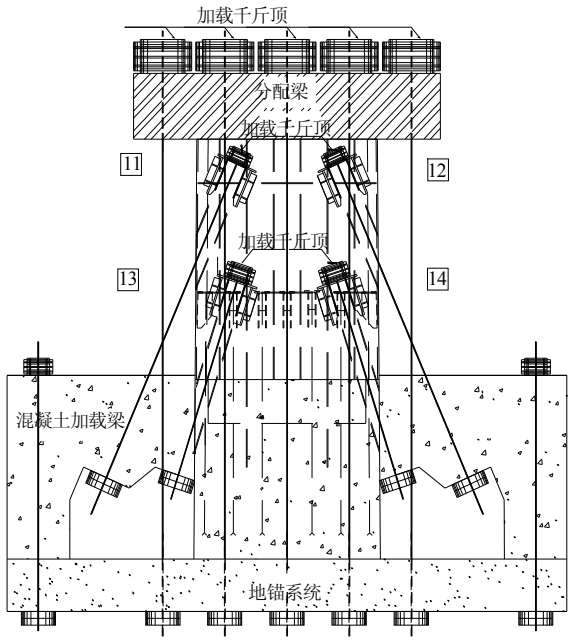


图 2　试验模型加载示意图

Fig.2　Loading jack arrangement

2.2　试验模型加载及测试

利用全桥有限元模型计算得到结合段顶部最不利荷载组合内力。采用承载能力极限状最大弯矩组合内力作为试验模型加载工况。轴向压力 15012kN，横桥向剪力 376kN，纵桥向剪力 70kN，纵桥向弯矩 738kN·m，横桥向弯矩 1433kN·m。由于剪力值很小，加载时忽略其影响，弯矩通过模型顶部千斤顶的偏心加载实现。除结构内力外，钢-混结合段受 1#及 2#斜拉索索力作用。边跨 1#斜拉索索力 800kN，边跨 2#斜拉索索力 421kN，中跨 1#斜拉索索力 789kN，中跨 2#斜拉索索力 417kN。根据钢-混凝土结合段试验模型内力及索力值，可计算得到 14 个千斤顶的加载吨位，见表 1。

表 1　千斤顶施加荷载

Table 1　Maximum load of jack

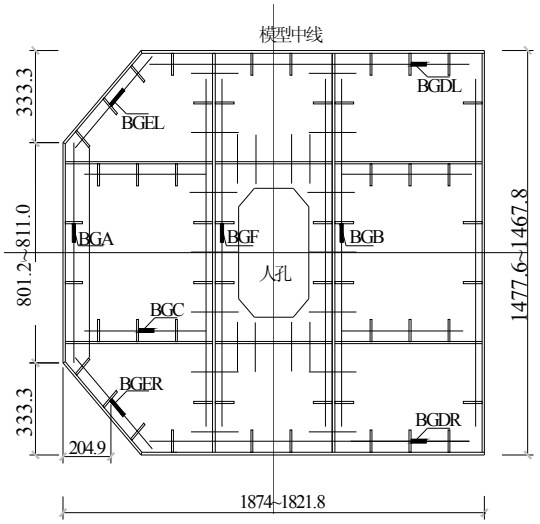
功能	编号	荷载/kN	编号	荷载/kN
模拟内力	1	1820	6	1380
	2	1820	7	1380
	3	1820	8	1380
	4	1820	9	885
	5	1820	10	885
模拟索力	11	420	13	800
	12	420	14	800

试验加载历程如下：

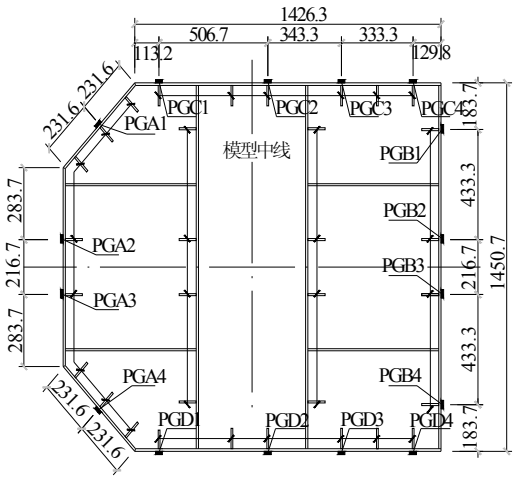
1) 预加载：采用试验荷载的 30%预加载及卸载 3 次，以消除非弹性变形。

2) 正式加载：用试验荷载的 15%为增量级，加载到试验荷载的 60%后，以试验荷载的 10%作为增量级加载到试验荷载，然后卸载。在各级荷载作用下，持荷 5min，进行应变、变形测量。

PBL 剪力键中贯通钢筋的应力是反映 PBL 剪力键受力状态的重要参数。采用电阻应变计法测量贯穿钢筋的应力，共 40 个测点，每个测点位于钢板开孔外侧 10mm 的贯通钢筋上。钢结构的应力也采用电阻应变计法测量，钢箱表面共设有应变测点 208 个。混凝土的应力采用振弦传感器测量，共有混凝土应力测点 12 个，埋设于结合段混凝土中。通过钢结构及混凝土结构的应力测试，可得到荷载在钢与混凝土结构之间的分配关系，确定结构的安全性是否满足要求。图 3 给出了试验模型测点布置。



(a) PBL 贯穿钢筋应变测点



(b) 钢结构应变测点

图 3　应变测点布置

Fig.3　Test point of strain

为测试试验模型的变形、钢结构与混凝土之间的相对滑移量，分别在模型顶面、沿模型高度方向布置一定数量位移传感器。通过位移传感器的读数可以得到结构在荷载作用下的变形。在试验荷载作

用下，混凝土的变形微小，且材料处于弹性范围内，可假定混凝土的变形沿模型高度方向线性分布。这样，通过模型顶部混凝土的变形可以得到沿高度分布的混凝土变形量，而通过模型外表面沿高度布置的位移传感器可以得到钢结构的变形量，二者之差即为在测点处的钢与混凝土相对滑移量。试验模型共设置位移测点 8 个，位于模型顶面及钢箱表面。

2.3 钢-混凝土结合段有限元分析

采用通用有限元软件 ANSYS 进行试验模型的三维非线性有限元仿真分析，如图 4 所示。模型中混凝土结构采用实体单元 SOLID65 模拟。混凝土内的钢筋通过梁单元 BEAM188 模拟，钢箱采用壳单元 SHELL63 模拟。由于模型复杂，单元数量庞大，如果针对单个 PBL 键详细建模就必须考虑贯穿钢筋、孔洞混凝土、开孔钢板间的接触关系，模型将极难收敛。因此在模拟 PBL 键时，采取将贯穿钢筋与开孔肋板在 PBL 键中心位置用弹簧连接的方法。弹簧采用 COMBIN14 单元模拟，弹簧刚度采用推出试验研究中得到的 PBL 键抗剪刚度 940kN/mm。在有限元模型底部混凝土施加 3 个方向的平动约束，以模拟实际结构底部固结的状态；钢箱与混凝土之间的接触关系通过在钢箱表面施加法向约束来模拟。

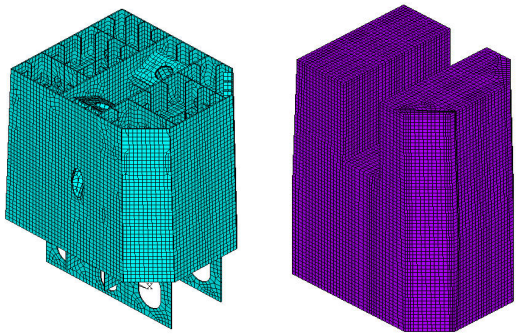


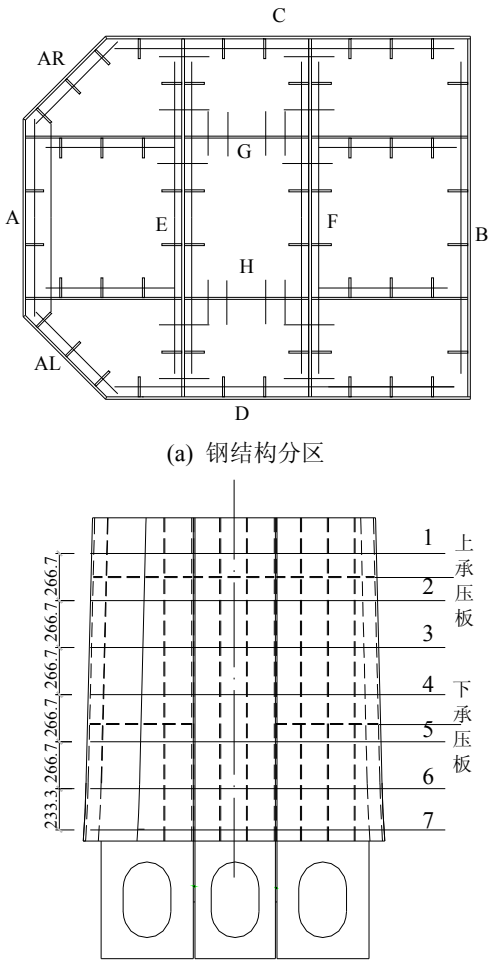
图 4 钢-混凝土结合段有限元模型

Fig.4 FEM model of steel-concrete composite joint

3 结合段传力机理分析

3.1 结构分区

为更好地对试验数据进行描述，将钢-混凝土结合段钢箱结构的壁板及纵隔板、横隔板按照位置分别定义为 A、B、C、D、E、F、G、H、AL 及 AR，如图 5(a)所示。竖向划分 7 个断面，如图 5(b)所示。钢箱表面位移传感器分别布置于 A 面和 B 面的 1 号、4 号、7 号位置，编号为 A1(B1)、A2(B2)、A3(B3)。位移结果以向下为正，相对滑移结果以钢箱相对混凝土向下滑移为正。



(a) 钢结构分区

(b) 竖向截面定位编号

图 5 模型钢结构分区及定位编号

Fig.5 Location of steel-concrete composite joint

3.2 结构变形分析

测得钢结构 A 面的竖向变形的荷载-位移曲线如图 6 所示。可以看出，钢结构变形随着荷载近乎线性增加。越接近顶面，钢箱变形量越大。顶部 PBL 键处 A 面钢箱最大竖向位移为 0.69mm；中部 PBL 键处钢箱最大竖向位移为 0.47mm；底部 PBL 键处钢箱最大竖向位移为 0.38mm。

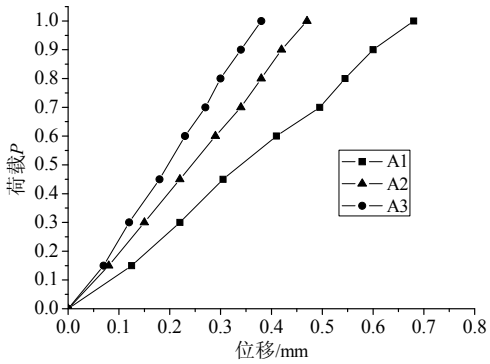


图 6 钢结构 A 面测点竖向变形变化曲线

Fig.6 Vertical deformation vs. loading of test point in A plate

图 7 给出了位移测点处钢箱与混凝土间的相对滑移的荷载-滑移曲线。模型顶部钢箱与混凝土的相对滑移量最大，底部次之，中部最小。顶部 PBL 键处 A 面钢箱最大相对滑移量为 0.119mm；中部 PBL 键处钢箱最大相对滑移量为 0.023mm；底部 PBL 键处钢箱最大相对滑移量为 0.078mm。

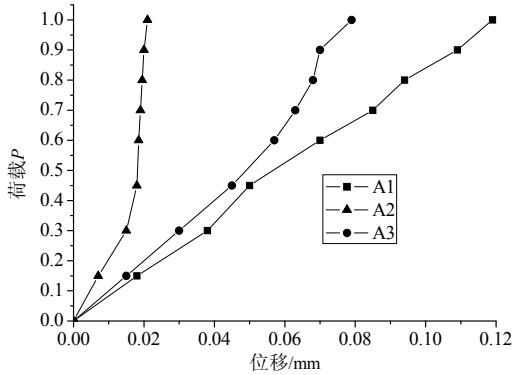


图 7　钢箱与混凝土相对滑移

Fig.7　Slippage vs. loading between steel and concrete box

由于斜拉索索力作用在 A2 测点下方，在 A2 下方的钢箱与混凝土相对滑移量会突然增大，因此造成了 A3 的相对滑移量大于 A2。试验测得的钢与混凝土滑移量最大值为 0.12mm，由于测点距离 PBL 键 40mm，因此 PBL 键处钢与混凝土的相对滑移量将更小。由此可以看出，在设计荷载作用下，钢与混凝土相对滑移量很小，PBL 键具有足够的抗剪刚度将荷载传递至混凝土。对比 A1、A2 的相对滑移量可以看出，在模型顶部的相对滑移量是中部的 6 倍左右，由此可以判断从顶部传来的荷载通过模型顶部的剪力键得到了有效传递；模型底部的相对滑移量很小，说明钢板与混凝土变形协调，钢板作用力被充分传递至混凝土。

钢结构的竖向变形分布有限元分析结果与试验结果的对比如图 8 所示。

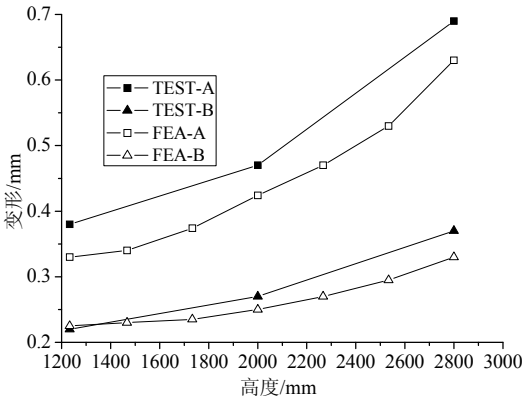


图 8　沿高度方向的位移分布

Fig.8　Deformation vs. height of steel box

有限元分析结果与试验结果较为接近，有限元分析得到 A1 钢板的最大竖向位移为 0.63mm，略小于试验结果 0.69mm，B2 钢板最大计算竖向位移结果为 0.33mm，略小于试验结果 0.37mm。试验模型中 PBL 键不可能完全对中，造成同一排上的 PBL 键不能同时发挥抗剪能力，结合段中 PBL 键的整体抗剪刚度小于所有 PBL 键抗剪刚度之和，而有限元分析中每排 PBL 键都能同时发挥作用，因此有限元分析得到的变形结果小。

3.3　结构传力分析

图 9 给出钢箱 A 区测点竖向正应力的有限元分析结果与试验结果的比较。

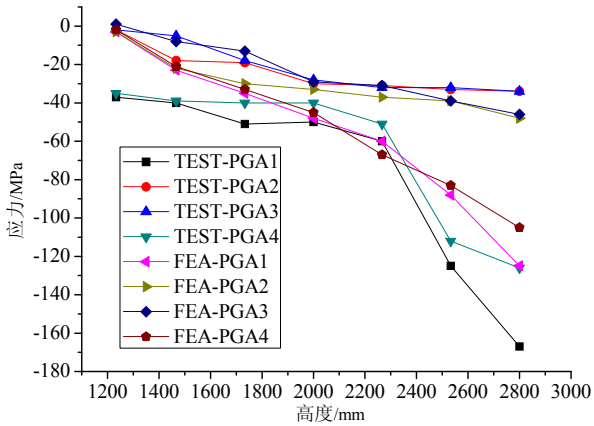


图 9　钢箱竖向正应力分布

Fig.9　Stress distribution of steel box

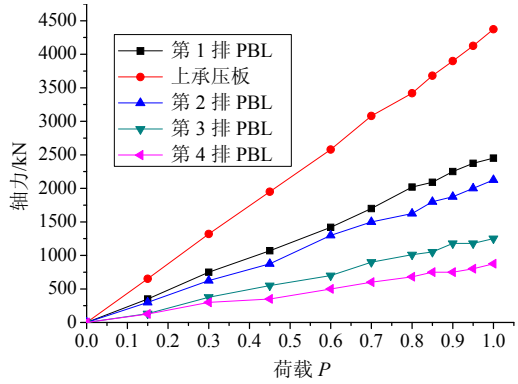
可以看出有限元分析结果与试验结果基本一致，除在试验模型分配梁作用点处的应力值差异较大外，其他部位的应力差值未超过 10MPa。有限元分析模型较好的模拟了实验模型的受力状态。由于有限元分析模型中 PBL 键的抗剪作用采用理想化的弹簧模拟，因此得到的应力分布也更为流畅。

通过钢箱构件的竖向应力测试，可以推算出桥塔钢箱传递的轴力；通过承压板前后轴力的变化，可以计算出承压板传递的轴力；在得到承压板传递轴力比例的基础上，可以计算出 PBL 键传递的轴向力。

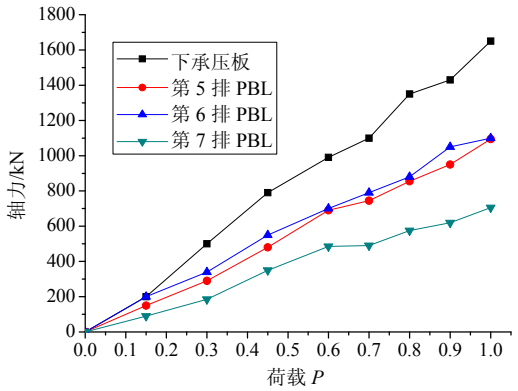
图 10 给出了结合段竖向力的分担情况。在提取结果时，在模型竖直方向上每间隔一排 PBL 键取一次结果，因此图 10 中的第 1 排 PBL 键对应模型的第 1 排，第 2 排剪力键对应模型的第 3 排，第 3 排剪力键对应模型的第 5 排，以此类推。

荷载作用下，上承压板承担了上部格室传递荷载的 40.2%；第 1 排 PBL 键承担了上部格室荷载的 21.7%；第 2 排 PBL 键传递了上部格室荷载的

18.0%；第 3 排 PBL 键传递了上部格室荷载的 12.2%；第 4 排 PBL 键传递了上部格室荷载的 7.8%。下承压板承担了下部格室传递荷载的 36.2%；第 5 排 PBL 键承担了下部格室荷载的 23.9%；第 6 排 PBL 键传递了下部格室荷载的 24.3%；第 7 排 PBL 键传递了下部格室荷载的 15.6%。



(a) 上格室



(b) 下格室

图 10 结合段轴力分布

Fig.10 Axial force of steel-concrete composite joint

表 2 给出了 PBL 键及承压板分担全部荷载的比例及试验结果与有限元分析结果的对比。

表 2 传力构件分担荷载比例

Table 2 Load proportion of steel member

传力构件		试验结果		计算结果	
		轴力/kN	分担比例/(%)	轴力/kN	分担比例/(%)
上格室	承压板	3846	27.3	3711	26.3
	PBL 键	5710	40.5	5330	37.8
下格室	承压板	1647	11.7	1058	7.5
	PBL 键	2906	20.6	4010	28.4
承压板合计		5493	38.9	4769	33.8
PBL 键合计		8616	61.1	9340	66.2

试验结果表明，结合段荷载的 38.9%由承压板传递，61.1%由 PBL 键传递。有限元分析中 PBL 键处于理想的同时受力状态，因此得到的 PBL 键分担荷载比例大于试验得到的结果，这是符合实际情况的。

4 结论

通过对斜拉桥索塔钢-混凝土结合段传力机理的试验研究及有限元分析，可以得出以下几点结论：

(1) 钢箱变形沿结合段高度方向线性分布，钢与混凝土相对滑移量很小，表明钢箱与混凝土之间共同受力工作性能良好。

(2) 索力及结合段顶面内力作用下，结合段顶部及底部钢箱与混凝土相对滑移量大，中间相对滑移量小，表明结合段顶部及底部 PBL 键传力大，中部 PBL 键传力小，与结合段荷载分配的分析结果吻合。

(3) 模型试验和有限元仿真分析表明，钢箱顶端应力大于钢箱底部应力，竖向应力沿高度方向的分布较为接近线性分布，钢箱所受作用力经 PBL 键和承压板顺畅地传递混凝土。

(4) 结合段中钢板和贯穿钢筋的应力，随着远离承压板方向逐渐降低，表明开孔钢板传递竖向荷载的作用明显。设计荷载作用下，PBL 键传力构造安全性满足要求。

(5) 索塔钢-混凝土结合段采用设有 PBL 剪力键的有格室承压板连接方式，承压板传递 40%左右的荷载，PBL 键及界面粘结力传递 60%左右的荷载，两者分担作用力的比例合理，在设计荷载作用下显示了较好的结构性能及可靠性。

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, 1995: 32－52.
Yan Guomin. Modern cable-stayed bridge [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1995: 32－52. (in Chinese)

[2] 苏庆田, 刘玉擎, 曾明根. 苏通大桥索塔栓钉剪力连接件的力学性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(7): 916－920.
Su Qingtian, Liu Yuqing, Zeng Minggen. Experiments on stud shear connectors in cable-pylon of Sutong Bridge [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2008, 36(7): 916－920. (in Chinese)

[3] 王勇. 杭州湾跨海大桥工程总结[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008: 600－640.
Wang Yong. Summarization of Hangzhou Bay Cross-sea Bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2008: 600－640. (in Chinese)

(参考文献[4]－[11]转第 313 页)