DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2017.03.017

斜拉桥混合塔结合部受力机理模型试验

张光辉[1], 张启伟[1], 刘玉擎[1], 李永君[2]

(1. 同济大学 桥梁工程系,上海 200092;2. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海 200092)

摘 要: 为揭示斜拉桥混合塔钢-混凝土结合部传力机理,对某斜拉桥桥塔钢-混凝土结合部进行1∶3缩尺模型试验,测试结合部的应变分布及钢-混凝土间的相对滑移. 结合试验模型建立空间有限元模型,进一步探讨该类型连接件的受力特点及各结构参数对连接件受力的影响. 研究结果表明:各构件应力水平较低,钢与混凝土之间相对滑移较小,二者协同作用较好;承压板和连接件是主要的传力构件,分别承担了约40%和60%的荷载;距承压板0.6倍结合部长度内连接件竖向剪力较小,0.6~1.0倍结合部长度内连接件竖向剪力逐渐增大;结合部长度、连接件间距对连接件剪力影响较大,开孔板孔径和承压板厚度对连接件剪力影响较小.

关键词: 斜拉桥;混合塔;结合部;模型试验;有限元分析

中图分类号: U443.38 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2017)03-0106-07

Model test of composite joint for tower of cable-stayed bridge

ZHANG Guanghui[1], ZHANG Qiwei[1], LIU Yuqing[1], LI Yongjun[2]

(1.Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2.Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to investigate the load transfer mechanism of composite joint for tower of cable-stayed bridge, a segment model test with a scale of 1∶3 was carried out, and the strain distribution of composite joint and the relative slippage between steel and concrete structure were obtained. A three-dimensional finite element model was established based on the test model, the structural performance of shear connectors and the effects of main parameters of composite were further investigated. The analysis results show that the stress components are at a lower level. There is a small relative slippage between steel and concrete, and both of them can bear the force collaboratively. The bearing-plate and shear connectors are main load transfer components, and could share 40% and 60% of the load respectively. Vertical shear force is at a lower level within 0.6 times length of composite joint of bearing-plate, while the vertical shear force increases gradually within 0.6-1.0 times length. The length of composite joint and the distance of shear connector have a great influence on the shear force of connector, while the diameter of the hole and the thickness of bearing-plate display a less effect.

Keywords: cable-stayed bridge; hybrid tower; joint section; model test; finite-element analysis

斜拉桥混合塔上塔柱用钢结构,索塔锚固区结构简单,受力明确,下塔柱用混凝土结构能够承受较大竖向压应力,中间用钢-混凝土结合部将两者连接在一起形成混合结构体系,结构性能得到大幅度的提高.

近年来混合塔在大跨度斜拉桥中逐渐得到推广应用[1-4]. 然而钢-混凝土结合部两侧桥塔刚度相差较大,结合部内部构造复杂,材料特性与结构特性的突变容易导致应力集中的现象发生,容易形成结构的薄弱点[5-9],是混合塔设计最为关键的环节. 目前,国内外关于混合塔结合部的理论研究较少,结合段的受力和传力机理主要通过模型试验和有限元分析来研究,实桥多采用试验来验证结合部的基本力学性能,验证设计的合理性[10-11].

本文结合在建的某混合塔斜拉桥,对有格室后承压板式结合部进行了模型试验,分析结合部各构件的受力特点、应力分布规律,并结合有限元模型,以结合部长度、承压板厚度、连接件间距和开孔板孔径为变化参数对结合部传力机理进行研究,为钢-混凝土结合部的设计提供参考.

1 混合塔结合部构造特点

混合塔结合部由钢塔加劲过渡段和钢-混凝土结合段组成. 结合部将钢塔所受的轴力、剪力、弯矩通过钢塔加劲过渡段加以分散,再通过结合部钢格室的承压板、抗剪连接件的过渡段作用传递给格室填充混凝土,进而传递给混凝土塔.

收稿日期: 2016-06-28
作者简介: 张光辉(1987—),男,博士研究生;
张启伟(1966—),男,教授,博士生导师;
刘玉擎(1962—),男,教授,博士生导师
通信作者: 刘玉擎,yql@tongji.edu.cn

图 1 为某斜拉桥混合塔结合部构造示意. 结合部高 4.7 m，位于索塔锚固区下部，在钢塔加劲过渡段外壁板及两条纵向腹板上设置加劲肋进行刚度过渡. 结合部混凝土顶面设置一块厚为 60 mm 的承压板，两条纵向腹板及加劲板贯穿至结合部中并在加劲肋上开直径 75 mm 圆孔，并贯穿直径 25 mm 的钢筋形成开孔板连接件，在格室内钢板上焊接直径 22 mm、长度为 200 mm 焊钉，连接件沿塔竖向间距为 200 mm. 结合部格室内布置构造钢筋并浇筑混凝土与下部混凝土塔柱结合.

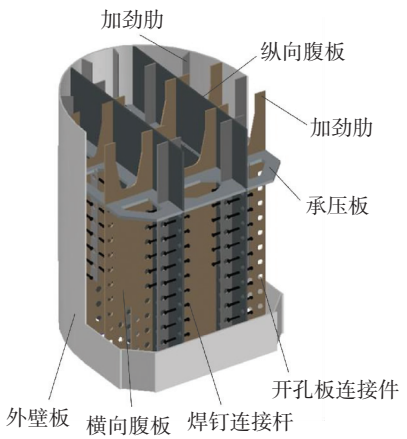


图 1　结合部构造

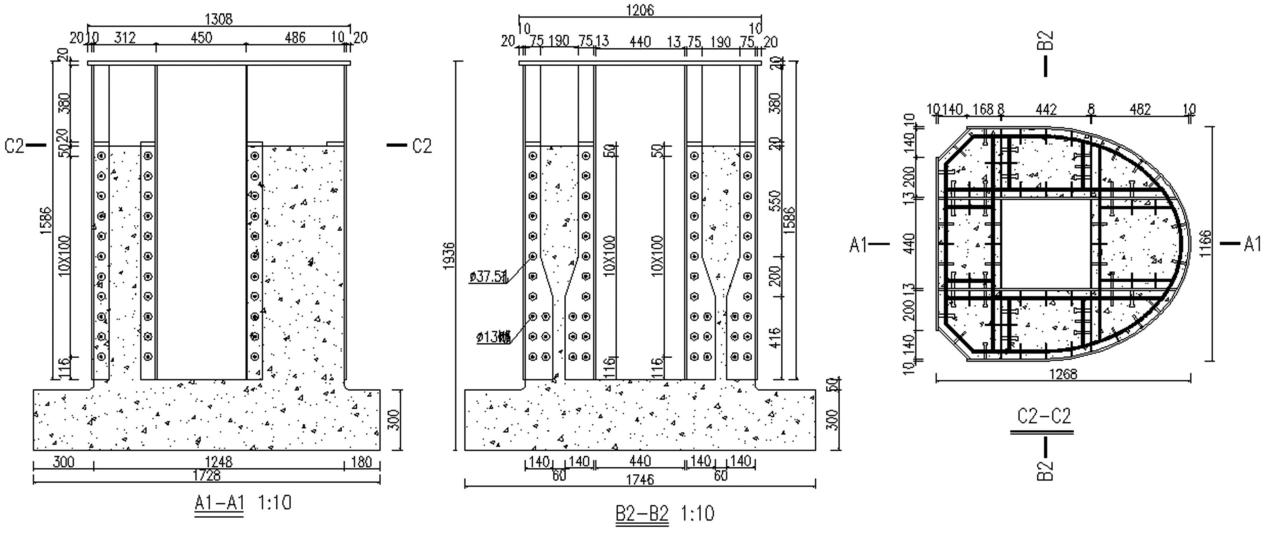
Fig.1　Structure of composite joint

2　模型试验方案

2.1　试验模型构造

综合考虑加载条件和模型制作，对该桥单肢桥塔结合部进行 1∶3 缩尺模型试验. 图 2 为结合部试验模型构造，模型高 1 936 mm，截面尺寸为 1 766 mm×1 728 mm，顶部焊接 20 mm 厚的钢板作为加载端，底部浇注 300 mm 的混凝土底座作为支撑端.

试验模型与实桥模型钢构件板厚和荷载的缩尺比分别为 1∶3 和 1∶9，弹性模量和应力缩尺比为1∶1. 开孔板和焊钉连接件按照塔竖向线刚度相似原则布置，试验模型截面内连接件数量与实桥布置一致. 开孔板孔径为 37.5 mm，孔中贯穿直径为 13 mm 的 HRB335 钢筋，焊钉直径为 13 mm、长度为 80 mm. 连接件沿塔竖向间距为 100 mm. 采用等级为 C55 的混凝土并对其进行材性试验，测得混凝土抗压强度、抗拉强度和弹性模量分别为 67.8、3.2 MPa 和 41.5 GPa. 钢板采用 Q345qd，钢材和钢筋按照规范进行了试件的制作和测试，钢材实测材性试验结果平均值见表 1. 表中板件厚度、屈服强度、抗拉强度和弹性模量分别用 t、f_y、f_t 和 E_c 表示.



(a) 正视图　　(b) 侧视图　　(c) 平面图

图 2　模型构造(mm)

Fig.2　Size of test model (mm)

表 1　钢构件材性试验结果

Tab.1　Material properties of steel components

试件	t/ mm	f_y/ MPa	f_t/ MPa	E_c/ GPa
纵向腹板	13	347	466	213
外壁板	10	350	471	211
加劲板	8	377	512	196
钢筋		480	548	199

2.2　试验加载方案

模型加载如图 3 所示，根据全桥有限元模型计算出单肢桥塔结合部最不利轴力为 57 167.5 kN，剪力和弯矩相对较小，不考虑剪力和弯矩对结合部的影响. 根据相似准则拟定模型设计轴力 P 为 6 500 kN，模型共进行 2 次往复加载，分别加载到 1.0P 和 2.5P 后卸载，加载等级为 0.1P. 加载前先进行 0.3P 预加载.

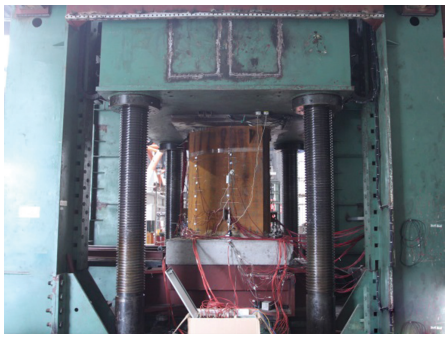


图 3　加载及测试装置

Fig.3　Load and test devices

2.3　试验测试方案

模型测点布置如图 4 所示. 采用应变片测试格室钢板的应变,外壁板应变片测点沿顺时针方向依次是 A_1、A_2、A_3、A_4、A_5、A_6;横向腹板应变片测点依次为 C_1、C_2、C_3、C_4;纵向腹板应变片测点依次为 B_1、B_2、B_3;每列设置 7 排测点,编号顺序按照从上往下依次为 1、2、3、4、5、6、7.

在钢格室内设置埋入式应变计, 对混凝土内部应变进行测试,应变计测点在横截面上依次为 F_1、F_2、F_3、F_4,F_5 从上到下共设置 4 排,编号依次为 1、2、3、4. 钢与混凝土间的相对滑移和整体压缩位移均采用千分表测试. 测量相对滑移的千分表测点分别为 K_1、L_1、M_1、N_1,设置在结合部底部;测量整体压缩位移的千分表测点分别为 K_2、L_2、M_2、N_2,设置在承压板位置处的外壁板上.

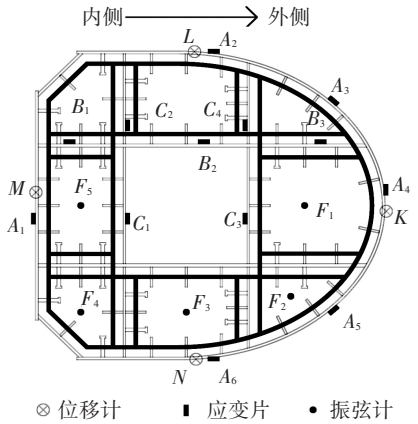


图 4　测点平面布置

Fig.4　Layout of measuring points

3　试验结果及有限元分析

3.1　钢板应力

图 5 为 1.0P 和 2.5P 轴力作用下钢结构部分测点竖向正应力沿塔竖向分布曲线. 随着距承压板距离的增加钢板的竖向应力沿塔竖向呈现出逐渐减小的趋势,在承压板位置区域钢板竖向应力衰减较快,说明承压板承担了部分荷载. 承压板以下钢结构竖向应力减少且趋势较为平缓,说明连接件传力较为平顺,传力效果较好. 2.5P 作用下实测钢板最大应力为 167 MPa,荷载从 1.0P 提高至 2.5P,应力增加值接近 150%,表明绝大部分钢板处于弹性工作阶段,钢结构具有较高的安全储备.

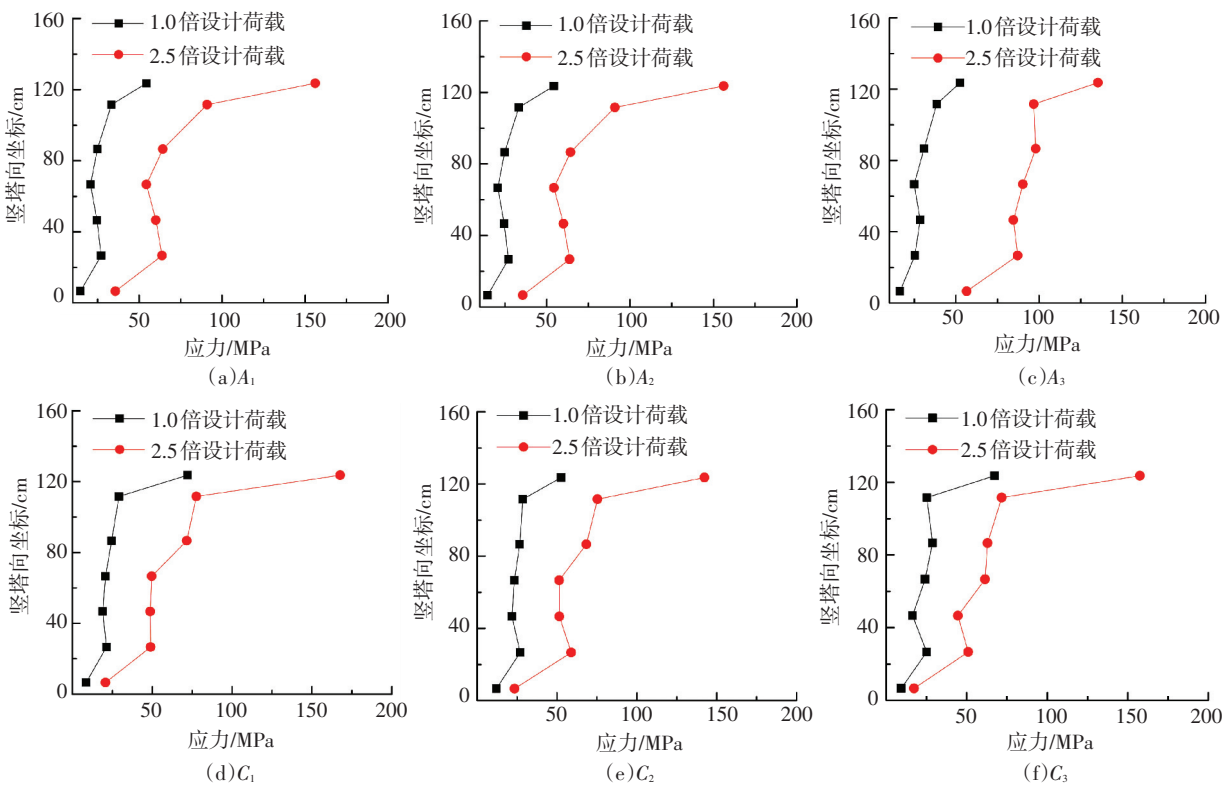


图 5　钢结构应力分布

Fig.5　Stress distribution of steel structure

3.2　混凝土应力

图 6 为 1.0P 和 2.5P 轴力作用下混凝土结构部分测点竖向正应力沿塔竖向分布曲线. 混凝土结构的竖向应力从上往下呈现出逐渐增加的趋势，结合部通过承压板和连接件将钢板上的应力逐步传递给混凝土结构. 靠近承压板位置混凝土应力增加较快，距承压板较远的区域混凝土应力增加的趋势逐渐减小. 2.5P 作用下实测混凝土最大应力为 12.3 MPa，荷载从1.0P 提高到 2.5P，应力增加值接近 150%，表明绝大部分混凝土处于弹性工作阶段.

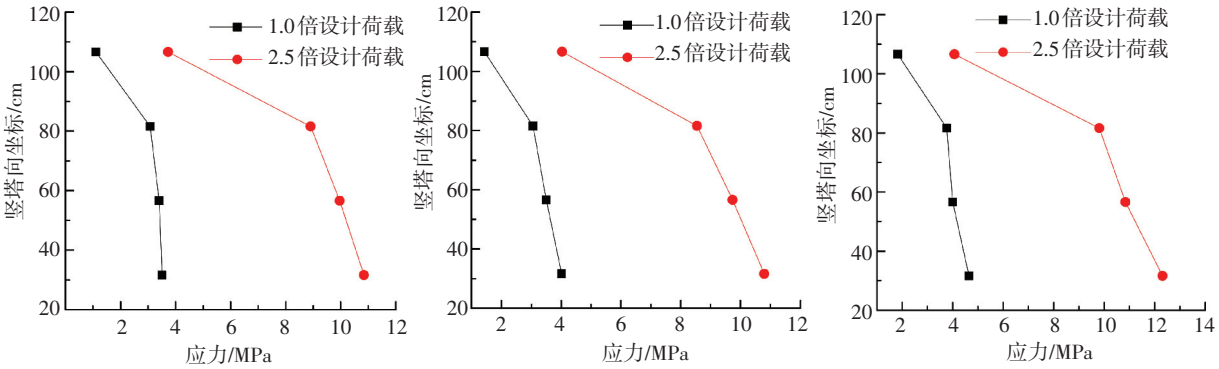


图 6　混凝土结构应力分布

Fig.6　Stress distribution of concrete structure

3.3　荷载–滑移曲线

图 7 给出了结合部端部钢板与混凝土间的荷载–滑移曲线. 1.0P 轴力作用下端部相对滑移数值分别为 0.056、0.039、0.039 mm，相对滑移较小，钢结构与混凝土结构变形协调，连接件具有足够的抗剪刚度将荷载传递给混凝土，钢结构与混凝土结构协作性能较好. 2.5P 轴力作用下最大滑移量 0.196、0.083、0.139 mm，表明连接件具有较高的安全储备.

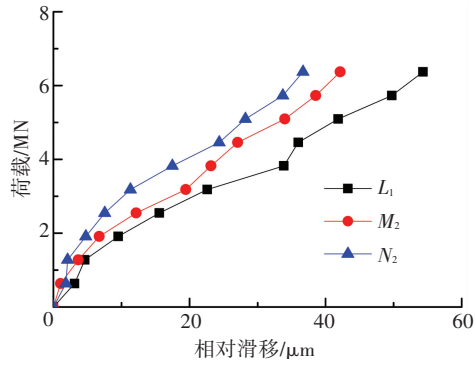


图 7　荷载–滑移曲线

Fig.7　Load-slippage curves

3.4　钢板与混凝土分担的轴力

图 8 给出了钢结构及混凝土结构承担的荷载轴力沿塔竖向分布，其中轴力为测点相邻区域平均值乘以测点区域面积并求和. 由图可知混凝土结构承担的轴力沿塔竖向从上往下逐渐增加，钢板承担的轴力沿塔竖向从上往下逐渐减小，钢板上的力逐渐传递给了混凝土结构. 承压板位于钢板第 1 排测点和第 2 排测点之间，两排测点位置钢结构分担轴力的差即为承压板所传递的轴力，其数值为 2 538 kN，承压板承担了约 40%的荷载.

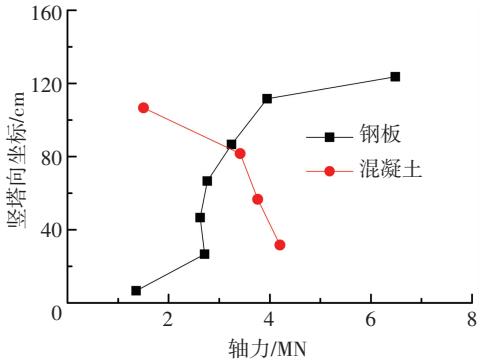


图 8　钢板及混凝土承担轴力沿塔竖向分布

Fig.8　Distribution of axial force along the vertical shared by steel and concrete structure

4　有限元与试验结果的比较

4.1　有限元分析模型

采用通用有限元软件 ANSYS 基于试验模型建立的混合塔钢–混凝土结合部混合有限元模型. 其中钢结构采用板壳单元 SHELL63 来模拟，混凝土结构采用实体单元 SOLID65 来模拟. 钢与混凝土结合面之间的接触承压作用采用接触单元模拟，忽略接触面之间的粘结摩擦作用. 连接件采用非线性弹簧单元模拟，由推出试验得出的开孔板和焊钉连接件的剪力–滑移非线性本构关系[12-15]分别为

$$V/V_{\mathrm{u}} = \frac{15.25(s/s_{\mathrm{p}})}{(s/s_{\mathrm{p}})^2 + 13.32(s/s_{\mathrm{p}}) + 1.03},$$

$$V/V_{\mathrm{u}} = 1.5\,(s/s_{\mathrm{p}})^{1/3} - 0.5(s/s_{\mathrm{p}}).$$

式中 V_{u} 为连接件抗剪承载力，s_{p} 为连接件峰值滑移. 模型的边界条件为底座截面的所有节点固结，对加载板施加轴向面荷载.

4.2 有限元与试验结果对比

图 9 给出了计算结果与试验结果的比较曲线. 数值模型与试验模型得出的应力及相对滑移分布规律及数值吻合度较高. 采用非线性弹簧元对开孔板和焊钉连接件进行数值模拟具有较高的工程精度.

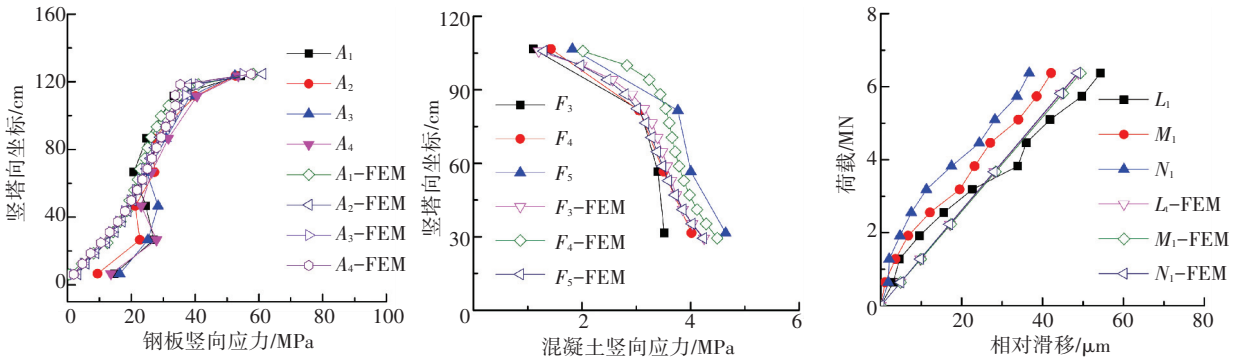


图 9 试验与有限元结果的比较

Fig.9 Comparison between FEM and model test

5 影响因素分析

为研究结合部传力机理,采用非线性弹簧元建立实桥结合部有限元模型. 对结合部连接件竖向剪力沿桥塔竖向分布规律进行分析,并通过变化结合部关键参数研究其对结合部连接件受力的影响.

5.1 接件受力分布

图 10 给出了 1.0P 轴力作用下外壁板、纵向腹板和横向腹板上开孔板连接件最大竖向剪力沿塔竖向分布. 距承压板 0.6L(L 为结合部长度) 范围内的连接件竖向剪力 V_s 较小,受承压板约束作用,在距承压板一定范围内钢与混凝土间相对滑移较小,钢结构与混凝土之间的力主要靠承压板传递. 距承压板 0.6 L ~ 1.0 L 之间几排连接件,竖向剪力值 V_s 逐渐增大,且越靠近结合部底部连接件竖向剪力 V_s 增加的趋势越大. 钢 - 混凝土结合部底部,钢与混凝土结构的荷载主要靠连接件传递. 开孔板连接件最大竖向剪力值为 125 kN.

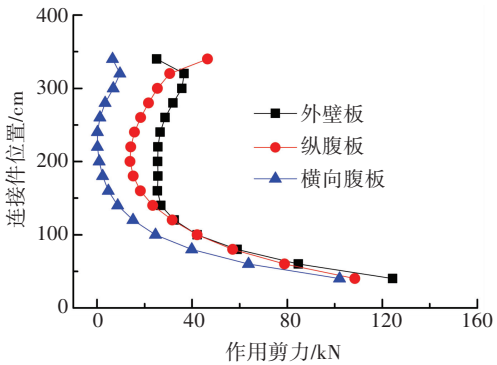


图 10 连接件作用剪力分布

Fig.10 Shear force distribution of connectors

5.2 结合部长度影响分析

图 11 给出了连接件竖向剪力值随结合部长度 L 变化的分布规律,B 为单肢桥塔结合部纵桥向最大宽度. 结合部长度 L 从 0.4B 增加到 0.9B,连接件沿塔竖向间距不变. L 取为 0.4B 时,连接件竖向剪力从顶部到底部近乎线性增加, 数值由 36 kN 增加至 150 kN. L 增加后更多的连接件参与受力,底部连接件竖向剪力逐渐减小. 图 12 给出了顶底排连接件随 L/B 变化的分布规律,当 L/B 超过 0.8 后,顶底排连接件竖向剪力变化较小.

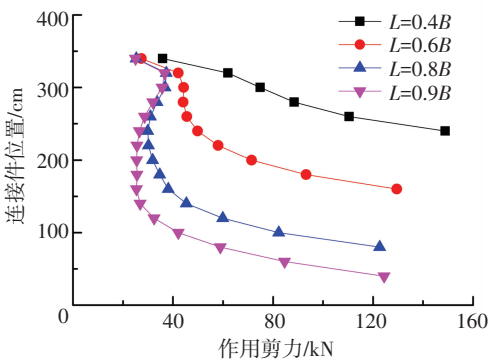


图 11 结合部长度对连接件剪力的影响

Fig.11 Effects of composite joint length on shear force

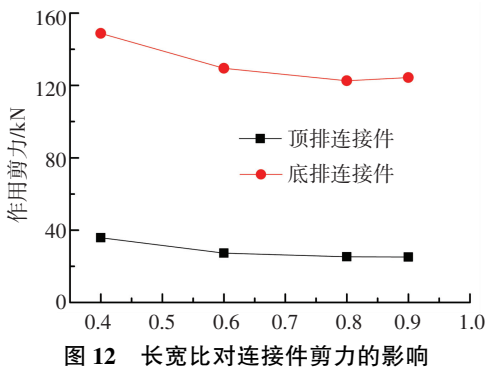


图 12 长宽比对连接件剪力的影响

Fig.12 Effects of length-width ratio on shear force

5.3 承压板厚度影响分析

图 13 给出了连接件竖向剪力值 V_s 随承压板厚度 t 变化的分布规律. 承压板厚度变化对连接件竖向剪力 V_s 影响很小,仅结合部顶部承压板附近的几

排连接件竖向剪力 V_s 有一定差异.

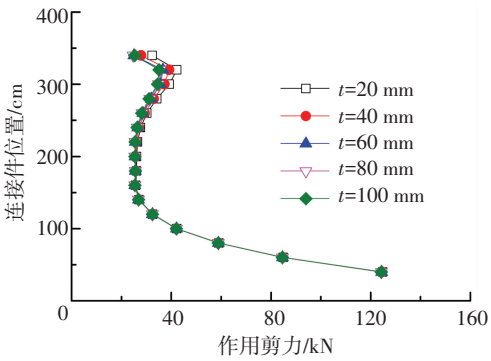


图 13　承压板厚度对连接件剪力的影响

Fig.13　Effects of bearing plate thickness on shear force

图 14 给出了承压板厚度变化对承压板下部混凝土应力的影响. t 由 20 mm 增加至 100 mm，沿图中路径方向混凝土应力 σ_c / 平均应力 σ_e 的值由 7.4 降至 3. 钢塔过渡段的应力经过较厚的承压板扩散后，传力面积增大而压应力减小，混凝土的应力分布更为均匀. 在结合部受力不利时，增加承压板厚度可以进一步改善混凝土受力. 考虑承压板过厚会影响结合部的焊接性能，承压板厚度宜取 60～80 mm.

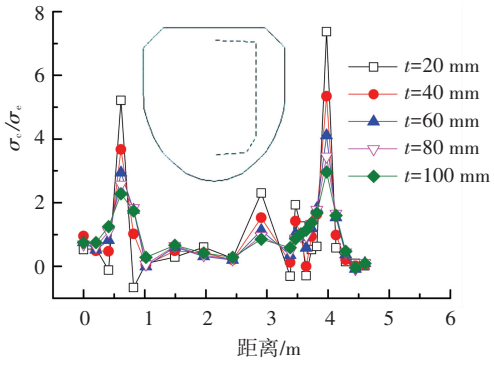


图 14　承压板位置混凝土应力

Fig.14　Stress of concrete near bearing-plate

5.4　连接件间距影响分析

图 15 给出了连接件竖向剪力值 V_s 随连接件间距 e 变化的分布规律. 随着 e 的增加，各排连接件竖向剪力 V_s 逐渐增大，e 由 100 mm 增加到 600 mm 时，底排连接件竖向剪力 V_s 由 94 kN 增加到 190 kN，根据 V_s 分布可得出其间距取值不宜大于 300 mm.

5.5　开孔板孔径影响分析

图 16 给出了连接件竖向剪力值 V_s 随开孔板孔径 d 变化的分布规律. 计算结果表明，d 对连接件剪力 V_s 影响较小，仅对底排连接件 V_s 有一定影响. d 由 40 mm 增加到 100 mm 时，底排连接件剪力 V_s 由 104 kN 增加到 131 kN，而承载力则从 131 kN 增加到 965 kN. 考虑到大孔径对钢板的削弱作用，而传力比例变化并不显著，开孔板连接件孔径 d 宜取 60～80 mm.

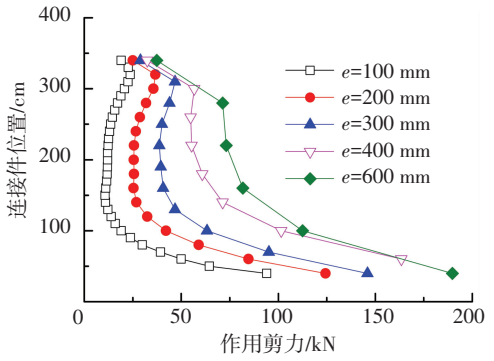


图 15　连接件间距对连接件剪力的影响

Fig.15　Effects of spacing on shear force

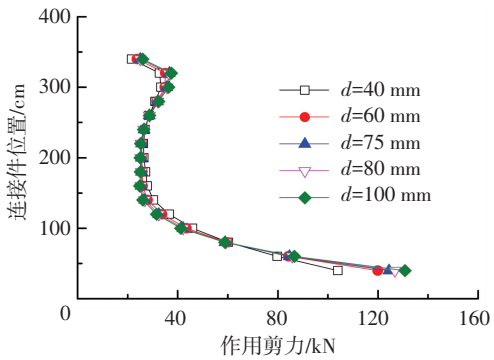


图 16　孔径对连接件剪力的影响

Fig.16　Effects of hole diameter on shear force

6　结　论

1）设计荷载作用下钢结构应力较为顺畅的传递到混凝土结构，相对滑移较小，后承压板式混合塔钢与混凝土结构结合性能较好.

2）钢结构与混凝土结构之间的荷载主要靠承压板和连接件传递，分别分担了约 40%和 60%的荷载. 荷载从 1.0P 提高到 2.5P 钢及混凝土结构应力均提高了约 150%，结构处于弹性工作阶段，有较高的安全储备，钢–混凝土结合段设计较为保守，材料利用率低.

3）距承压板 0.6 倍结合部长度范围内连接件竖向剪力及变化幅度均较小，在距承压板 0.6～1.0 倍结合部长度范围内连接件剪力逐渐增加，最底排连接件数值最大. 结合部长度、连接件间距对连接件剪力影响较大，开孔板孔径、承压板厚度对连接件剪力影响较小.

4）结合部长度宜取为塔肢纵桥向宽度，承压板厚度宜取为 60～70 mm，连接件间距不宜大于 300 mm，开孔板孔径宜取 60～80 mm.

参考文献

[1] 刘玉擎.组合结构桥梁[M].北京：人民交通出版社，2005.
LIU Yuqing. Steel-concrete hybrid bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2005.

[2] 卫星，李小珍，李俊，等.钢–混凝土混合结构在大跨度连续刚构桥中的应用[J].中国铁道科学，2007，28(5)：43–46.
WEI Xing, LI Xiaozhen, LI Jun, et al. Using steel-concrete hybrid

structure in long span continuous rigid frame bridge[J]. China Railway Science, 2007, 28 (5):43-46.

[3] 张清华,李乔,唐亮.桥塔钢-混凝土结合段剪力键破坏机理及极限承载力[J].中国公路学报, 2007, 20(1) :85-90.
ZHANG Qinghua, LI Qiao, TANG Liang. Fracture mechanism and ultimate carrying capacity of shear connectors applied for steel-concrete joint segment of bridge pylon[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007,20(1):85-90.

[4] 司秀勇,肖林,赵建波.斜拉桥桥塔钢-混凝土结合段模型试验研究[J].中国铁道科学, 2011, 32(5):26-31.
SI Xiuyong, XIAO Lin, ZHAO Jianbo. Model test research on the steel-concrete joint section of cable stayed bridge tower[J]. China Railway Science,2011, 32(5):26-31.

[5] HE Jun, LIU Yuqing, PEI Bingzhi. Experimental study of the steel-concrete connection in hybrid cable-stayed bridges[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,2014,28(3):559-570. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000444.

[6] LIU Rong, LIU Yuqing. Analysis of auxiliary ribs in steel-concrete joint of hybrid girder [J].Journal of Constructional Steel Research, 2015,112:363-372. DOI:org/10.1016/j.jcsr.2015.015.

[7] 江祥林,刘玉擎,孙璇.混合梁结合部受力机理模型试验研究[J].土木建筑与环境工程,2014,36(6):48-53.
JIANG Xianglin, LIU Yuqing, SUN Xuan. Modeltest and mechanical behavior analysis of steel-concrete joint of hybrid girder[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2014, 36(6):48-53.

[8] 唐亮,吴文明,刘高,等.有格室-后承压板结合部构造的结构特性[J]. 工程力学,2010,27(11): 234-243.
TANG Liang, WU Wenming, LIU Gao,et al. Structural performance of rear bearing-plate connection with cells in steel-concrete hybrid girder[J]. Engineering Mechanics, 2010,27(11):234-243.

[9] 李小珍,肖林,黄玲,等.混合梁斜拉桥钢-混结合段静力行为[J].哈尔滨工业大学学报,2013,45(6):75-82.
LI Xiaozhen, XIAO Lin, HUANG Ling, et al. Static mechanical behavior of steel-concrete joint section of hybrid beam cable-stayed bridges[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2013,45(6): 75-82.

[10] 卫星,强士中.斜拉桥桥塔钢-混凝土结合段传力机理试验研究[J].工程力学, 2013, 30(1): 255-261. DOI:10.6052/ j.issn.1000-4750.2011.06.0351.
WEI Xing, QIANG Shizhong.Specimen test for mechanics behavior of steel-concrete composite joint in pylon of cable-stayed bridge[J]. Engineering Mechanics, 2013,30(1):255-261. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750. 2011. 06. 0351.

[11] 肖林,叶华文,卫星,等.斜拉桥桥塔钢-混结合段的力学行为和传力机理研究[J].土木工程学报,2014,47(3):88-96.
XIAO Lin, YE Huawen, WEI Xing, et al. Study on mechanical behavior and load transfer mechanism of steel-concrete composite joint of cable-stayed bridge pylon[J]. China Civil Engineering Journal, 2014,47(3): 88-96.

[12] 赵晨,刘玉擎.开孔板连接件抗剪承载力试验研究[J]. 工程力学, 2012,29(12):349-354. DOI:10.6052/j.issn.10 00-4750.2011.09.0604.
ZHAO Chen, LIU Yuqing. Experimentalstudy of shear capacity of perfobond connector[J].2012,29(12):349-354. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2011.09.0604.

[13] 赵晨. 开孔板连接件抗剪承载力及变形性能研究[D]. 上海:同济大学, 2012.
ZHAO Chen. Research on shear capacity and deformation property of perfobond rib shear connector[D]. Shanghai: Tongji University, 2012.

[14] 王倩, 刘玉擎. 焊钉连接件抗剪承载力试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(5):659-663.
WANG Qian, LIU Yuqing. Experimental study of shear capacity of stud connector[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(5):659-663.

[15] 蔺钊飞, 刘玉擎. 焊钉连接件峰值滑移及剪力-滑移本构关系[J]. 同济大学学报(自然科学版),2014, 42(7): 1006-1010.
LIN Zhaofei, LIU Yuqing. Peakslip and load-slip relationship of headed stud connectors[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(7): 1006-1010. (编辑 魏希柱)

(上接第60页)

[7] WANG Yasen, BAO Qinglong, CHEN Zengping. Robust adaptive beamforming using IAA-based interference-plus-noise covariance matrix reconstruction[J]. Electronics Letters,2015,52(13): 1185-1186.DOI:10. 1049/el.2015.4420.

[8] CARLSON B D. Covariance matrix estimation errors and diagonal loading in adaptive arrays[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1988, 24(7): 397-401. DOI: 10.1109/7.7181.

[9] HANG Ruan, LAMARE D, RODRIGO C. Low-complexity robust adaptive beamforming algorithms exploiting shrinkage for mismatch estimation[J]. IET Signal Processing, 2016, 10(5): 429-438. DOI: 10.1049/ iet-spr.2014.0331.

[10] ZHAO Haijun, ZHANG Jing, YIN Zhiping. Adaptive beamforming based on stochastic parallel gradient descent algorithm for single receiver phased array[C]// The 2014 International Conference on Systems and Informatics. Shanghai: IEEE Press, 2015: 849-853. DOI: 10.1109/ICSAI.2014.7009403.

[11] GOU X M, LIU Z W, XU Y G. Fully automatic robust adaptive beamforming using the constant modulus feature[J]. IET Signal Processing, 2014, 8(8): 823-830. DOI: 10.1049/iet-spr.2013.0416.

[12] ZHUANG J, MANIKAS A. Interference cancellation beamforming robust to pointing errors[J]. IET Signal Processing, 2013, 7(2): 120-127. DOI: 10.1049/ iet-spr. 2011.0464.

[13] CHOI Y H. Subspace based adaptive beamforming method with low complexity[J]. Electronics Letters, 2011, 47(9):529-530.DOI: 10.1049/el.2011.0512.

[14] LEE J H, HUANG C C. Blind adaptive beamforming for cyclostationary signals: a subspace projection approach[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8:1406-1409. DOI: 10.1109/ LAWP. 2010. 2040364.

[15] VOROBYOV S A, GERSHMAN A B, LUO Z Q.Robust adaptive beamforming using worst-case performance optimization:a solution to the signal mismatch problem[J].IEEE Transactions on Signal Processing, 2003,51(2):313-324.DOI: 10.1109/tsp.2002.806865.

[16] 焦圣喜,王睿,李婉珍. 自适应波束形成算法[J]. 信息与控制, 2015,44(2):165-170.DOI:10.13976/j.cnki.xk.2015. 0165.
JIAO Shengxi, WANG Rui, LI Wanzhen. Adaptive beamforming algorithms[J].Information and Control, 2015,44(2):165-170.DOI: 10.13976/j.cnki.xk.2015.0165.

[17] ZHANG Yuping, LI Yunjie, GAO Meiguo. Robust adaptive beamforming based on the effectiveness of reconstruction[J].Signal Processing,2016,120:572-579.DOI: 10.1016/j.sigpro.2015.09.039.

(编辑 魏希柱)