

文章编号:1003-4722(2019)02-0057-05

# 椭圆形钢-混凝土组合桥塔受力性能试验研究

邓露<sup>1,2</sup>, 张利<sup>1</sup>

(1. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 湖南大学工程结构损伤诊断  
湖南省重点实验室, 湖南长沙 410082)

**摘要:** 为研究钢-混凝土组合桥塔的承载力和应变分布, 以某独塔斜拉桥为背景, 针对其椭圆形钢-混凝土组合桥塔, 设计制作缩尺比 1:8 的桥塔局部模型进行偏心受压试验, 研究设计荷载下钢塔壁和塔内混凝土的应变变化规律及桥塔的承载力, 参考相关规范和文献计算组合桥塔的承载力并与试验结果进行对比。结果表明: 组合桥塔模型的承载力为其等效设计荷载的 2.65 倍, 具有较大的安全储备; 塔梁交接处长轴向壁板产生应力集中现象, 从而产生较大的纵向应变; 壁板环向应变在焊缝处存在应力集中现象, 该处壁板的环向拉应变最大; 壁板对混凝土具有较强的套箍作用, 使混凝土的应力~应变曲线具有强化阶段; 采用规范中的钢管混凝土承载力公式能较准确计算组合桥塔的承载力。

**关键词:** 斜拉桥; 桥塔; 钢-混凝土组合结构; 受力性能; 应变; 承载力; 模型试验

**中图分类号:** U448.27; U443.38 **文献标志码:** A

## Experimental Study on Mechanical Behavior of Steel-Concrete Composite Bridge Pylon with Elliptical Section

DENG Lu<sup>1,2</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory for Damage Diagnosis of Engineering Structures, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** To study the bearing capacity and strain distribution of a steel-concrete composite bridge pylon, a cable-stayed bridge with single pylon was taken as an example. Based on the steel-concrete composite bridge pylon with elliptical section of the bridge, a 1:8 scaled model of the pylon was designed and fabricated, to perform eccentric compression tests. Thereby, the variation patterns of the strain of the inner concrete and steel panel under the design load were investigated, and the bearing capacity of the pylon was also investigated. Moreover, the bearing capacity of the composite pylon was calculated according to the related codes and literature, and the calculated results were compared with test results. The results show that the bearing capacity of the model is 2.65 times the equivalent design load and has a large safety reserve. A larger longitudinal strain of the steel panel occurs at the longer axis of the ellipse at the interface of the pylon and the girder due to stress concentration. The maximum circumferential tensile strain of the steel panel occurs around the weld due to stress concentration. The steel plate has a strong confinement effect on the concrete inside, thus the stress-strain curve of the concrete possesses a strengthening stage. The bearing capacity of the composite pylon can be accurately calculated by the formulas used to calculate the bearing capacity of the concrete-filled steel tube specified in the relevant bridge codes.

收稿日期: 2018-06-29

基金项目: 湖南省重点研发计划项目(2017SK2220)

Project of Key Research and Development Program of Hunan Province (2017SK2220)

作者简介: 邓露, 教授, E-mail: denglu@hnu.edu.cn. 研究方向: 桥梁超载安全及钢桥疲劳。

**Key words:** cable-stayed bridge; bridge pylon; steel-concrete composite structure; mechanical behavior; strain; bearing capacity; model test

## 1 引言

钢—混凝土组合桥塔因施工方便、力学性能好等优点在桥梁结构中得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。针对钢—混凝土组合桥塔的研究也比较多。卫星等<sup>[3]</sup>研究了桥塔钢—混结合段的传力机理。吴斌等<sup>[4]</sup>对格构式桥塔钢—混结合段进行了局部受力分析。刘迎倩<sup>[5]</sup>对桥塔钢—混结合段的受力性能进行了试验研究。王冲等<sup>[6]</sup>研究了桥塔锚固区的受力特性和传力机理。一些学者对钢—混混合结构桥塔的设计和施工关键技术进行了研究<sup>[7-9]</sup>。然而,目前对钢—混组合桥塔的研究主要集中在塔柱不同节段分别为钢结构和混凝土结构的混合桥塔,对于采用钢管壁内部填充混凝土的组合桥塔的研究并不多。该类组合桥塔在结构形式上与钢管混凝土类似,但由于加劲肋和剪力钉等的存在,其受力特性与钢管混凝土结构是否相同尚需进行研究。此外,规范中关于钢—混组合桥塔的承载力计算尚无统一方法。因此,本文以某独塔斜拉桥为背景,针对其变截面椭圆形钢—混组合桥塔进行模型试验,分析设计荷载下塔壁和塔内混凝土的应变变化规律、破坏形态和承载力。

## 2 工程概况

四平市东丰路上某跨铁路立交桥主桥为(90+169)m独塔单索面斜拉桥(图1),采用塔梁墩固结体系。主梁高3.4m,主跨和边跨分别采用钢梁和混凝土梁,钢—混交界面位于主跨侧距桥塔中心11.5m处。斜拉索采用单索面双排布置,锚固于中央隔离带。桥塔高75m,采用变截面椭圆形钢—混凝土组合结构。桥塔外壁采用Q345qE钢板,内部浇筑C50微膨胀混凝土至距塔顶9m处。塔底和塔顶截面尺寸分别为7.976m×3.9m和9.709m×8.0m。塔壁内设置剪力钉(长170mm、直径22mm)和纵向加劲肋(宽500mm、厚20mm),剪力钉间距为300mm×300mm,纵向加劲肋沿塔高通长设置,并布置横向拉杆,拉杆两端分别搭接在截面中心的节点板和内壁处的加劲环上。塔柱下段、中段和上段的壁板厚度分别为25,20,12mm。塔壁伸入主梁3m,塔梁结合段设置孔径60mm的开孔肋板,并贯穿直径32mm的HRB400钢筋,与混凝土一起形成PBL连接件。

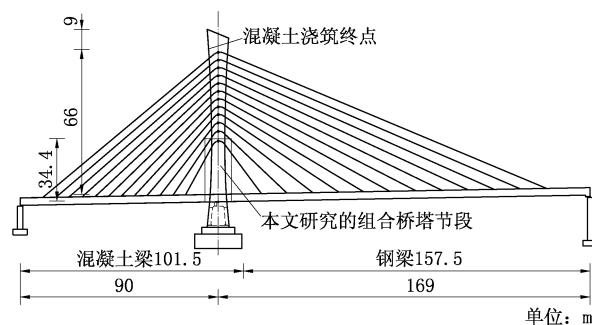


图1 某独塔斜拉桥立面布置

Fig.1 Elevation of a Cable-Stayed Bridge with Single Pylon

## 3 模型试验概况

### 3.1 模型设计制作

采用MIDAS Civil软件对全桥施工过程进行模拟发现,桥塔的最大应力发生在桥塔底部和桥面交界处。因此,选取从梁底起高34.4m的桥塔节段为试验对象。综合考虑试验设备的实际加载能力和模型制作难度等问题,基于应力等效原则,设计制作缩尺比为1:8的试验模型。桥塔模型总高4.3m,包括0.425m高的塔梁结合段和3.875m高的塔柱。模型底部和顶部的椭圆形截面尺寸分别为997mm×488mm和822mm×488mm。考虑到钢板型号和焊接工艺,外壁板厚度取4mm,比按缩尺比得到的尺寸(3.1mm)略大。其余尺寸均基于实桥尺寸按缩尺比1:8设置。模型各部分所用材料均与实桥相同。桥塔模型构造见图2。

### 3.2 试验方案

采用大型地震荷载模拟加载装置进行静力加载和塔柱轴向变形采集。由MIDAS Civil计算结果可知,模型的等效设计轴力约为4000kN,弯矩约为292kN·m。试验中弯矩作用通过偏心加载实现,偏心距为73mm。正式试验前先进行预加载(加载至2000kN),以检验试验设备和测量仪器是否正常工作。正式试验采用分级加载,每级500kN,荷载达到8500kN后每级200kN。每级加载稳定后采集数据,再进行下一级加载。现场试验见图3。

### 3.3 测点布置

为测量桥塔各部位应力,在塔壁和塔内混凝土分别设置应变计和钢弦计。在桥塔椭圆形截面的长轴尖端A、B侧和短轴尖端C、D侧分别设置竖向应变计(A1~A6、B1~B6、C1~C6、D1~D6),共6个

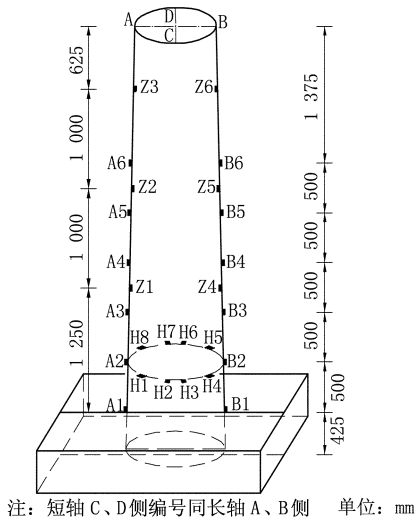


图2 桥塔模型构造及测点布置  
Fig.2 Structure and Measuring Points of Bridge Pylon Model



图3 现场试验  
Fig.3 Field Test

截面 24 个应变计;在距模型底部 925 mm 处沿外壁等间距布置 8 个环向应变计(H1~H8);在长轴尖端 A、B 侧混凝土内分别布置 3 个钢弦计(Z1~Z3、Z4~Z6)。具体测点布置见图 2。

#### 4 试验结果分析

##### 4.1 试验现象

加载至 8 000 kN 时,试验模型向 A 侧发生倾斜,同时发现模型中部附近的壁板开始出现鼓曲;当加载至 10 605 kN 时,模型发出较大的响声,模型中部附近的壁板发生局部鼓曲破坏。此后荷载无法继续增加,但轴向变形仍不断增大,模型达到承载能力极限状态。模型的极限荷载(10 605 kN)达到其等效设计荷载(4 000 kN)的 2.65 倍,说明组合桥塔具

有较大的安全储备。

##### 4.2 壁板纵向应变

壁板的荷载~纵向应变曲线见图 4,图中应变均为压应变。由图 4 可知:① 加载初期,壁板的纵向应变随荷载的增加基本呈线性增加趋势;荷载增加至 8 000 kN 后,应变随荷载的增加速度变快。② 加载过程中,测点 A3 和 A5 的压应变增量逐渐减小,这是由于壁板的鼓曲变形发展较快,应力进行了重分布。但随着荷载继续增加,壁板压应变仍在增大,这是因为壁板鼓曲变形对纵向应变的影响小于荷载的影响。③ 塔梁交接处长轴向测点 A1 和 B1 的纵向应变比短轴向测点 C1 和 D1 的纵向应变大,这是由于在塔梁交接处结构刚度发生突变,曲率较大的长轴尖端产生明显的应力集中现象。因此,在椭圆形组合桥塔设计中应特别注意塔梁交接处刚度突变对长轴向应力集中的影响。

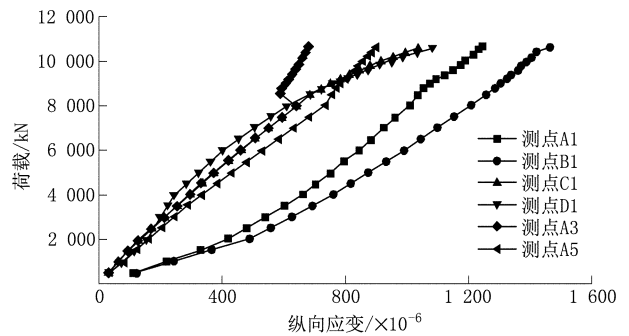


图4 壁板的荷载~纵向应变曲线  
Fig.4 Load-Longitudinal Strain Curves of Panels

##### 4.3 壁板环向应变

壁板的荷载~环向应变曲线见图 5,图中应变均为拉应变。由图 5 可知:① 加载初期,壁板的环向应变随荷载增加线性增大;当荷载超过 8 000 kN 后,环向应变随荷载增加的增速越来越快。② 测点 H2 和 H3 的环向应变比其他测点大,这是因为该测点靠近壁板闭合处的焊缝,存在应力集中。③ 测点 H4 和 H5 的环向应变比测点 H1 和 H8 的环向应变大,这是因为加载过程中试验模型向 A 侧发生倾斜,加快了 B 侧壁板横向变形的发展。

##### 4.4 混凝土竖向应变

塔内混凝土测点的荷载~竖向应变曲线见图 6,图中应变均为压应变。由图 6 可知:① 加载前期,塔内混凝土的竖向应变随荷载增加线性增加;当加载到 8 000 kN 后,应变随荷载增加迅速增加。② 混凝土的荷载~竖向应变曲线具有强化阶段,这是由于壁板对混凝土有较强的套箍作用。③ 同一

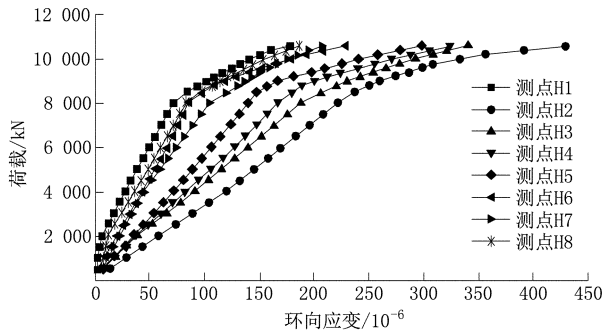


图5 壁板的荷载~环向应变曲线  
Fig. 5 Load-Circumferential Strain Curves of Panels

截面上测点 Z3 和 Z6 的应变差值较大, Z2 和 Z5 的应变差值较小, Z1 和 Z4 的应变差值最小。可见距加载位置越远,同一截面上两侧混凝土的应变值相差越小。④ 加载初期,同一截面上 B 侧混凝土的压应变比 A 侧混凝土的压应变大,这是因为加载位置靠近 B 侧;加载到 8 000 kN 后,同一截面上 A 侧混凝土的压应变开始超过 B 侧混凝土的压应变,这是由于此时模型向 A 侧发生了倾斜。

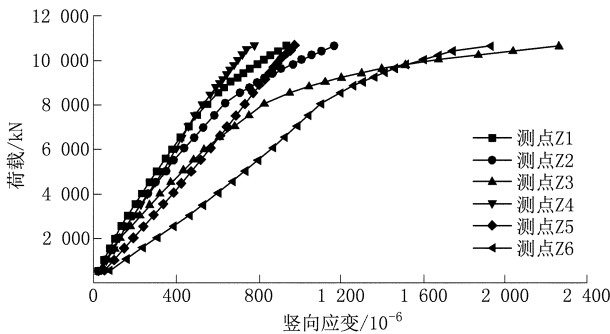


图6 混凝土的荷载~竖向应变曲线  
Fig. 6 Load-Vertical Strain Curves of Concrete

#### 4.5 塔柱轴向变形

桥塔模型顶部的荷载~轴向变形曲线见图 7。由图 7 可知:加载前期,轴向变形随荷载的增加线性增大,加载至 8 000 kN 时,轴向变形为 15.79 mm;荷载超过 8 000 kN 后,轴向变形的增量逐渐增大,当加载至 10 605 kN 时,轴向变形增加至 22.63 mm;荷载达到 10 605 kN 后,荷载无法继续增加,但轴向变形仍在继续增大。

#### 4.6 承载力

试验过程中测得的桥塔模型承载力为 10 605 kN。为寻求桥塔承载力的准确计算方法,分别采用《钢管混凝土结构技术规程》(CECS 28: 2012)和《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936-2014)中

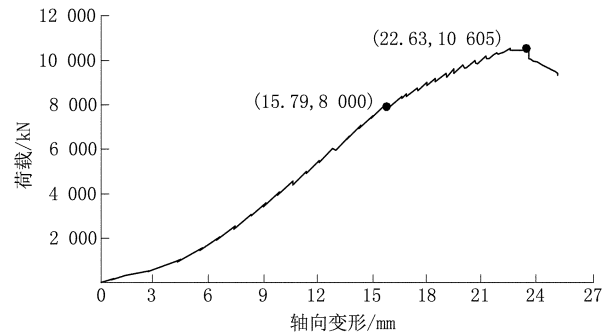


图7 荷载~轴向变形曲线  
Fig. 7 Load-Axial Deformation Curves

关于钢管混凝土结构的相关规定以及间接叠加法、直接叠加法和实测法计算桥塔的承载力。其中,间接叠加法为根据文献[10]提出的系数间接叠加壁板和混凝土的抗压强度;直接叠加法为直接叠加壁板和混凝土的抗压强度;实测法为根据试验中测得的壁板和混凝土纵向应变分别计算其承载力再进行叠加。各方法计算承载力时均按照 CECS 28 规程的规定考虑了长细比和偏心率的影响。不同方法计算的桥塔承载力见表 1。

表 1 不同方法计算的桥塔承载力  
Tab. 1 Bearing Capacity of Bridge Pylon According to Different Calculation Methods

| 计算方法     | 承载力计算值/kN | 与试验值相差/% |
|----------|-----------|----------|
| CECS 28  | 10 329    | -2.6     |
| GB 50936 | 10 804    | 1.9      |
| 间接叠加法    | 10 330    | -2.6     |
| 直接叠加法    | 7 743     | -27.0    |
| 实测法      | 9 767     | -7.9     |

由表 1 可知:由 CECS 28 规程、GB 50936 规范和间接叠加法得到的承载力计算值与试验值基本一致,相对误差均较小;直接叠加法的计算值比试验值小 27.0%,因为直接叠加法未考虑壁板与混凝土的相互作用对组合桥塔承载力的有利影响;实测法的计算值与试验值相差 7.9%,因为实测法反映了组合桥塔模型在极限状态下的应力水平。因此,在进行组合桥塔结构设计时,可参照 CECS 28 规程、GB 50936 规范中规定的钢管混凝土承载力计算方法及间接叠加法和实测法对其承载力进行计算。

#### 5 结论

(1) 桥塔模型的极限荷载为 10 605 kN,为其等效设计荷载的 2.65 倍,组合桥塔具有足够的安全储备。达到极限承载力时,桥塔模型中部附近发生了局部鼓曲破坏。

(2) 壁板的纵向压应变在长轴向塔梁交接处较大,因为该处发生了刚度突变;壁板的环向拉应变在焊缝处最大,因为此处存在应力集中。在组合桥塔的结构设计中应重视塔梁交接处的刚度过渡问题。

(3) 组合桥塔中壁板对混凝土具有较强的套箍作用,使混凝土的应力~应变曲线具有强化阶段,提高了混凝土的延性。

(4) 钢-混组合桥塔的承载力可采用 CECS 28 规程和 GB 50936 规范中规定的钢管混凝土承载力计算方法及间接叠加法和实测法进行估算。

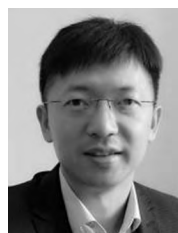
### 参考文献 (References):

- [1] 陈宝春,牟廷敏,陈宜言,等. 我国钢-混凝土组合结构桥梁研究进展及工程应用[J]. 建筑结构学报, 2013,34(S1):1-10.  
(CHEN Bao-chun, MOU Ting-min, CHEN Yi-yan, et al. State-of-the-Art of Research and Engineering Application of Steel-Concrete Composite Bridges in China[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(S1): 1-10. in Chinese)
- [2] 李献光,刘迎倩,徐海鹰. 某轻骨料混凝土试件的栓钉推出试验研究[J]. 世界桥梁, 2014,42(2):62-65.  
(LI Xian-guang, LIU Ying-qian, XU Hai-ying. Study of Push-Out Test for Shear Bolt Studs in Lightweight Aggregate Concrete Samples[J]. World Bridges, 2014, 42(2): 62-65. in Chinese)
- [3] 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):255-260, 313.  
(WEI Xing, QIANG Shi-zhong. Specimen Test for Mechanics Behavior of Steel-Concrete Composite Joint in Pylon of Cable-Stayed Bridge[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 255-260, 313. in Chinese)
- [4] 吴 斌,王亚飞. 自锚式悬索桥桥塔钢-混结合段局部受力分析[J]. 桥梁建设, 2013,43(3):54-59.  
(WU Bin, WANG Ya-fei. Local Stress Analysis of Steel and Concrete Joint Section of Tower of Self-Anchored Suspension Bridge [J]. Bridge Construction, 2013, 43(3): 54-59. in Chinese)
- [5] 刘迎倩. 自锚式悬索桥桥塔钢-混结合段受力的试验研究[J]. 铁道建筑, 2018,58(2):13-17.  
(LIU Ying-qian. Experimental Study on Bridge Tower Steel-Concrete Combined Segment of Self-Anchored Suspension Bridge [J]. Railway Engineering, 2018, 58(2): 13-17. in Chinese)
- [6] 王 冲,周 莉,孙东利,等. 独塔斜拉桥钢桥塔锚固

区钢锚箱应力分析[J]. 桥梁建设, 2015, 45(3): 51-57.

(WANG Chong, ZHOU Li, SUN Dong-li, et al. Stress Analysis of Steel Anchor Box in Anchorage Zone of Steel Pylon of a Single-Pylon Cable-Stayed Bridge[J]. Bridge Construction, 2015, 45(3): 51-57. in Chinese)

- [7] 李翠霞. 武汉鹦鹉洲长江大桥桥塔设计[J]. 桥梁建设, 2014,44(5):94-98.  
(LI Cui-xia. Design of Towers of Yingwuzhou Changjiang River Bridge in Wuhan[J]. Bridge Construction, 2014, 44(5): 94-98. in Chinese)
- [8] 潘 军,徐 瑜. 港珠澳大桥九洲航道桥主梁及桥塔施工关键技术[J]. 桥梁建设, 2016,46(6):1-6.  
(PAN Jun, XU Yu. Key Techniques for Construction of Main Girder and Pylons of Jiuzhou Ship Channel Bridge of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Bridge Construction, 2016, 46(6): 1-6. in Chinese)
- [9] 许颖强. 太原摄乐大桥异型钢-混混合塔柱施工技术[J]. 桥梁建设, 2018,48(2):99-104.  
(XU Ying-qiang. Construction Techniques for Special-Shape Steel and Concrete Hybrid Pylon Columns of Shele Bridge in Taiyuan [J]. Bridge Construction, 2018, 48(2): 99-104. in Chinese)
- [10] 刘永健,姜 磊,张 宁. 钢管混凝土中钢管的纵向容许应力[J]. 建筑科学与工程学报, 2015,32(6): 1-7.  
(LIU Yong-jian, JIANG Lei, ZHANG Ning. Longitudinal Allowable Stress of Steel Tube in Concrete-Filled Steel Tube [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(6): 1-7. in Chinese)



DENG Lu

邓 露

1984- ,男,教授

2005年毕业于华中科技大学土木工程专业,工学学士,2009年毕业于美国路易斯安那州立大学土木(结构)工程专业,工学博士。研究方向:桥梁超载安全及钢桥疲劳  
E-mail:denglu@hnu.edu.cn



ZHANG Li

张 利

1993- ,男,硕士生

2016年毕业于西南大学土木工程专业,工学学士。研究方向:钢-混组合结构  
E-mail:zhangli7@hnu.edu.cn

(编辑:刘迎倩)