

·土木工程·

DOI:10.12454/j.jsuese.202300599



本刊网刊

偏心荷载作用下斜拉桥混合塔结合段受力性能及传力机理研究

孙颖¹, 郑佳龙¹, 卓卫东^{1*}, 林道锦², 苏绍铃³

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088;
3. 福安市城市建设管理有限公司, 福建 宁德 355099)

摘要:为探究斜拉桥混合塔结合段在偏心荷载作用下的受力特点及传力机理,以福安市栖云大桥混合塔的钢-钢壳混凝土结合段为研究对象,借助试验与数值分析手段,明确结合段在偏心荷载作用下的受力性能与传力机理,并对结合段传力效率的影响因素进行参数分析。研究表明:后承压板式的斜拉桥混合塔结合段安全系数高,工作性能可靠,应力水平较低;竖向偏心荷载作用下,结合段受力性能符合偏心受压构件的受力特点,应变在截面上呈对称分布;结合段构件传力顺畅,荷载传递效率受承压板厚度及剪力连接件抗剪刚度的影响较大,传递效率随着承压板厚度或剪力连接件抗剪刚度的增大呈现先增大后趋于稳定的规律,当剪力键刚度增大至原设计抗剪刚度10倍以上或承压板厚度 ≥ 16 mm时,荷载传递效率基本保持不变;竖向偏心荷载在结合段内的传递存在明显的传力长度,超过该传力长度后,钢壳与填芯混凝土的承载比与结合段的截面刚度比基本接近,传力结束后钢壳与混凝土各自承担约50%左右的竖向荷载。

关键词:斜拉桥混合塔;结合段;受力性能;传力机理;模型试验;有限元分析

中图分类号:U443.22

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2025)03-0171-13

斜拉桥混合塔因其充分发挥了钢材与混凝土的受力性能,同时兼具施工方面的优势,已经得到认可。其早期以下部钢筋混凝土配上部不锈钢壳混凝土的形式出现^[1-2],近期应用较多的是钢壳与填充混凝土结合形式的钢-混结合过渡段的形式^[3-8]。钢-混结合段在桥塔中的应用主要有承台顶部处、主梁桥面附近和桥塔锚固区附近^[9]。作为桥塔主要的传力部位,钢-混结合段在竖向荷载作用下的受力性能、各组成部件(承压板、剪力连接件、加劲肋、混凝土等)间的相互作用及传力机理成为其推广应用过程中需要明确并解决的问题^[10]。对此,众多学者根据已有的工程实例,借助试验与数值分析方法,针对大部分为轴压受力状态下的钢-混结合段及剪力连接件的受力性能与传力机理开展了初步探讨^[11-12]。文献[13-17]表明该组合结构钢和混凝土之间协同作用较好,且具有较高的承载能力和传力流畅性;在最不利荷载及超载工况作用下,结合段仍具有良好的协同受力性能,且最不利位

置为混凝土及钢梁过渡段^[9,18-20];同时,针对轴压状态下混合塔面外弯矩耦合作用下的力学行为也给予了初步讨论^[17]。剪力连接件是结合段内主要的传力构件,具有良好的静力及疲劳性能,可加强组合结构中钢板对混凝土的约束,并提高部分结构的承载力和局部稳定性^[21-24]。作为混合塔的重要组成部分,承压板位置对混合塔的节点受力性能及传力机理的影响也同样通过试验方式予以讨论^[25]。

现有研究表明,桥塔钢-混结合段在不同结构及剪力连接构造下受力存在差异。鉴于结合段构造形式的复杂性兼具突出的个性,目前针对承压式结合段的应用和研究相对较少,尚无法形成成熟、系统的计算理论或者方法。本文基于福安市栖云大桥,就偏心荷载作用下斜拉桥混合塔的结合段开展模型试验,分析各部件在设计加载工况下的受力特点、应力分布规律,同时结合有限元模型,研究主要构造参数对结合段传力机理的影响,为结合段设计提供参考。

收稿日期:2023-08-04 修回日期:2023-12-29 网络出版日期:2024-05-22

基金项目:福建省建设科技研究开发项目(2020-K-114)

作者简介:孙颖(1981—),女,助理研究员,研究方向:新型桥梁结构体系结构性能;桥梁耐久性;桥梁抗震性能. E-mail:sunying@fzu.edu.cn

*通信作者:卓卫东,教授, E-mail:zhuowd@fzu.edu.cn

1 混合塔结合段构造特点

福安市栖云桥为双塔 3 跨斜拉桥。主桥桥塔沿横桥向朝外倾斜,斜度为 1:8。桥塔采用混合塔结构形式,即由钢壳混凝土结构的下、中塔柱搭配钢结构的上塔柱组合成倾斜桥塔。结合段采用有格室承压板式结构形式中的后承压板式,位置设在上塔柱与中塔柱的过渡处,是桥塔受力的关键。

栖云桥桥塔结合段构造如图 1 所示。上塔柱结合段(简称结合段,下同)采用后承压板式的钢-中空钢壳

混凝土结构。其中,中空钢壳混凝土结构由隔板形成 $2.2\text{ m}\times 2.2\text{ m}$ 的方形空腔(图 1 中 C-C 截面),并在内隔板与钢壳间填充 C50 自密实混凝土,同时在钢壳内部焊接剪力钉及布设钢筋网,以提高传力能力。以 2[#]桥塔为例,结合段具体结构参数为:上塔柱结合段高为 8.0 m, C50 填芯混凝土高为 3 023 mm, Q355D 钢壳厚为 48 mm, 承压板厚度为 16 mm; 纵向加劲肋尺寸为 $260\text{ mm}\times 20\text{ mm}$; PBL 剪力键开孔直径为 60 mm, HRB400 横向贯穿钢筋直径为 22 mm, 焊钉直径为 22 mm、长为 120 mm。

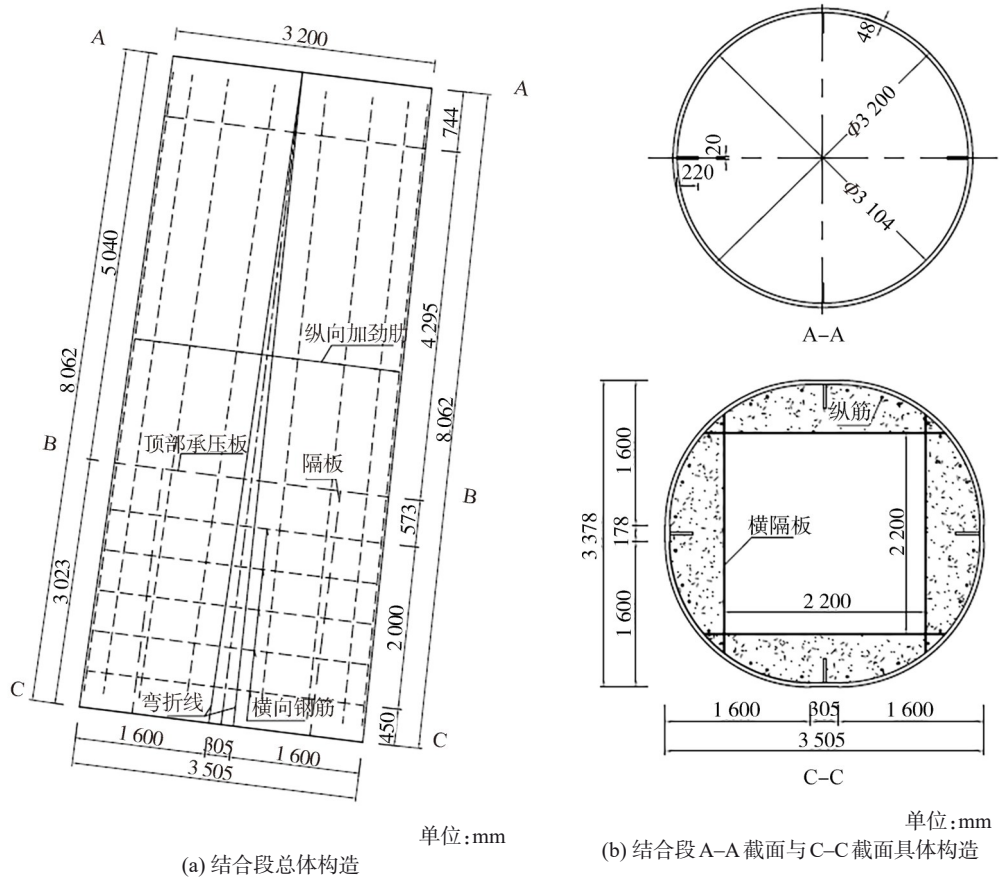


图 1 栖云大桥结合段构造

Fig. 1 Structure of Qiyun Bridge joint section

2 试验

由于桥塔存在一定的斜度,因此结合段的受力并非处于完全的轴压状态,而是存在一定的偏心,即结构的受力为偏心受压构件,其力学模型可简化为单向偏压模型。据此受力特点,本文设计并制作试验模型,对结合段的受力性能及传力机理开展试验研究。

2.1 试验模型设计

受限于试验条件,本文设计的试验模型缩尺比例为 1:5,因此结合段模型试件高度为 1 640 mm,其中,

钢塔柱高为 1 000 mm,结合段高为 600 mm,结合段试件顶、底部分别焊接 20 mm 的钢板作为端板。缩尺模型各部件尺寸及 3 维图如图 2 所示。图 2 中,钢壳厚为 10 mm,承压板厚为 4 mm。开孔板剪力键刚度根据文献[26]的规定确定,试验模型加劲肋孔中贯穿钢筋的直径为 6 mm,开孔直径为 20 mm;根据应力等效原则及配筋率保持不变的要求,PBL 剪力键在横截面及高度方向上的数量分别为原型的 5/7 和 3/5,纵向钢筋选用 $8\Phi 14\text{ mm}$;结合段混凝土采用 C50 自密实补偿收缩混凝土填充。相关材料的性能参数如表 1 所示。

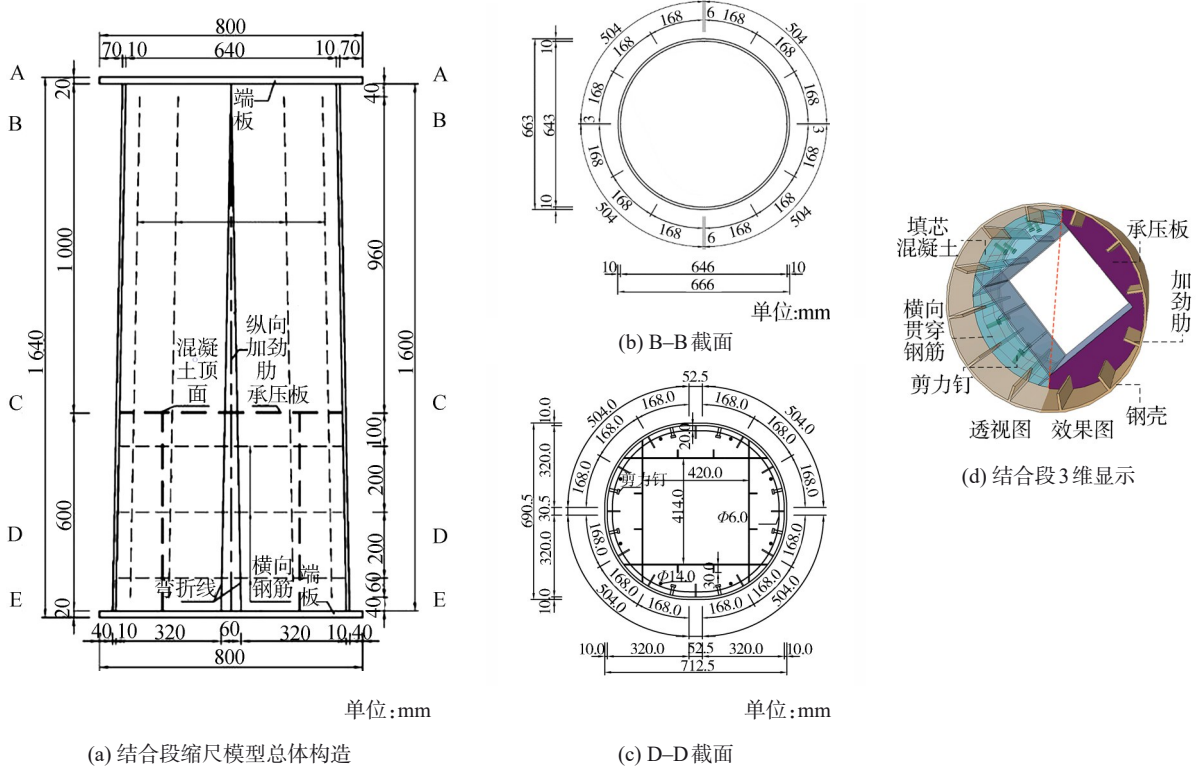


图2 试验模型构造及3维图

Fig. 2 Test model construction and 3D diagram

表1 试验材料性能参数

Tab. 1 Performance parameters of test material

材料	弹性模量/MPa	立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
C50混凝土	3.56×10^4	65.6	57.1		
Q355D钢板	厚度4 mm	2.07×10^5		386	527
	厚度10 mm	2.10×10^5		396	536
HRB400钢筋	直径14 mm	2.02×10^5		427	616
	直径6 mm	2.01×10^5		424	611

2.2 试验加载及量测方案

1) 加载方案

为模拟构件的偏心受压受力状态,试验中试件的偏压加载采用刀铰加载予以实现,偏压加载装置如图3所示。竖向荷载通过设置于试件上部的刀口铰传递,试件下端放置在压力机小车上,压力机底部可自平衡,形成近似于固定的边界条件。为保证加载过程中试件能够准确对中并在加载端具有足够的刚度,试件在刀铰与压力机顶部、加载板与上端板各采用4个高强螺栓连接,以保证加载板与端板形成整体,具有足够的刚度。

根据应力等效换算确定试验模型顶部所需加载的轴力 $P=1\ 220\text{ kN}$,弯矩 $M=48.9\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。加载过程分为预加载与正式加载两步完成。

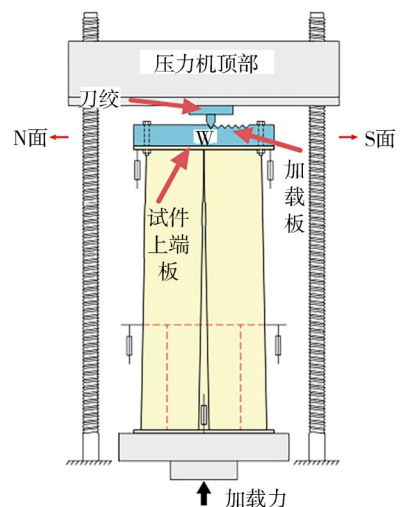


图3 偏压加载装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of bias loading device

正式加载采用力-位移混合加载方式进行。在正式试验前完成预加载工作,以确保仪器设备正常工作。正式试验之初采用力控制、分级加载方式(每级加载量约为预估峰值荷载 P_u 的1/20)施加竖向偏心荷载,当荷载增加至 P_u 的70%时采用位移控制,直至荷载下降到实测极限荷载的85%或试件发生过大变形或试验设备无法继续加载时停止试验。加载制度示意图如图4所示。

2)量测内容

试验模型测点布置如图5所示。试验测试内容包含应变与位移两部分。其中:应变测量包含沿结合段高度方向上的钢壳应变测点A1-*~A8-*(*为截面位置,下同)、填芯混凝土内的纵向钢筋应变测点Z1-

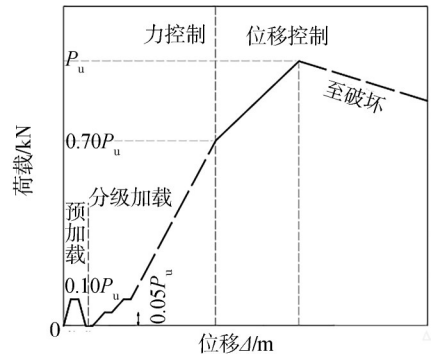


图4 试验加载制度示意图

Fig. 4 Schematic diagram of test loading system

~Z4、横向贯穿钢筋测点H1-*~H4*及填芯混凝土应变测点C1-*~C2-*;位移量测主要涉及钢节段的位移(V1~V2)与结合段的位移(V3~V4)两部分。

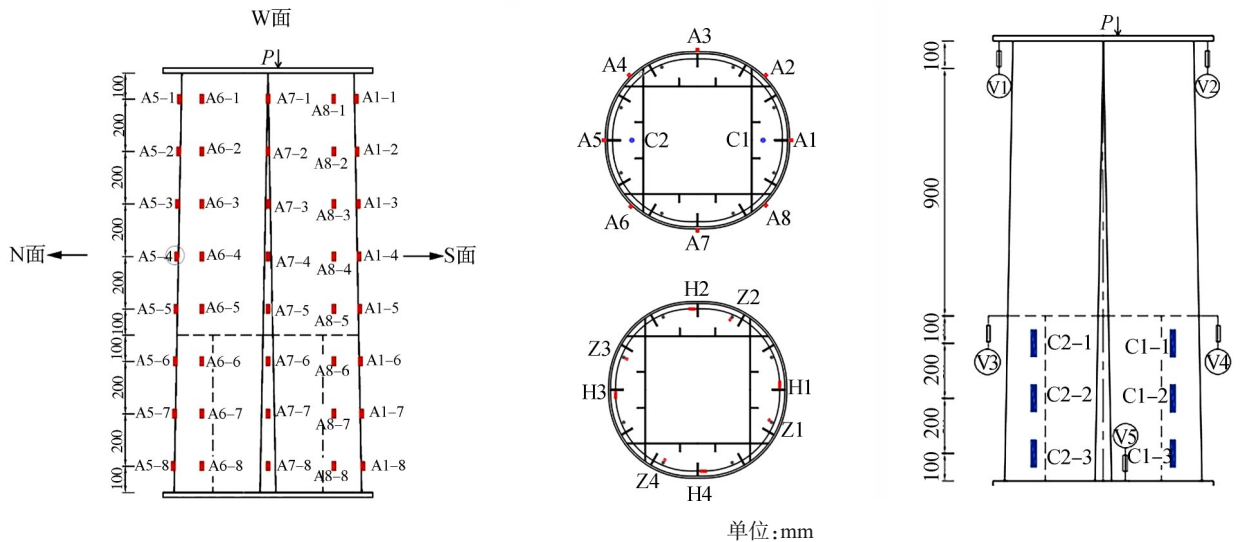


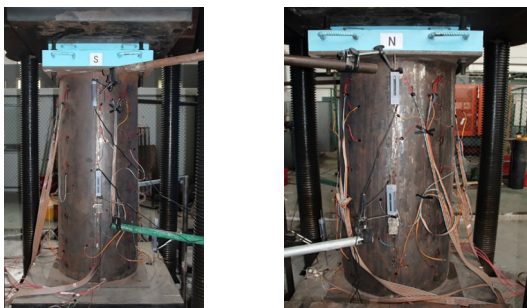
图5 应变及位移测点布置图

Fig. 5 Strain and displacement measuring points layout

2.3 试验现象与结果分析

2.3.1 试验现象

图6为试件受压侧与受拉侧在竖向偏心荷载作用下的试验现象。



(a) S面偏心受压侧 (b) N面偏心受拉侧

图6 S面受压侧与N面受拉侧试验现象

Fig. 6 Compression S-side and tension N-side test observations

当竖向偏心荷载由 $P(1\ 220\text{ kN})$ 增至 $3.5P(4\ 270\text{ kN})$ 时,偏心受压侧S面及结构其他区域均未出现明显的破坏现象。当荷载为 $3.5P$ 时,钢结构段最大竖向压应变出现在试件的顶端(测点A2-1),压应变值为 $1\ 423\times 10^{-6}$,钢板尚未屈服;与此同时,结合段钢壳与混凝土最大竖向压应变均出现在构件底端的A2-8与C1-3测点,压应变值约为 733.0×10^{-6} 与 305.4×10^{-6} ,从数值上看,结合段同样处在弹性工作阶段。故在最不利荷载作用下,结合段始终处于弹性受力阶段,实际桥塔结构的结合段具有较高的安全储备。

2.3.2 试验结果分析

1)钢板(壳)应变

从横截面方向看,竖向偏心荷载作用下钢结构段钢板纵向压应变在截面上的分布规律如图7所示。由图7可知:总体来说,在 $3.5P$ 作用下,截面上压应力呈现对称分布规律,偏心受压侧应变大于受拉侧,这说

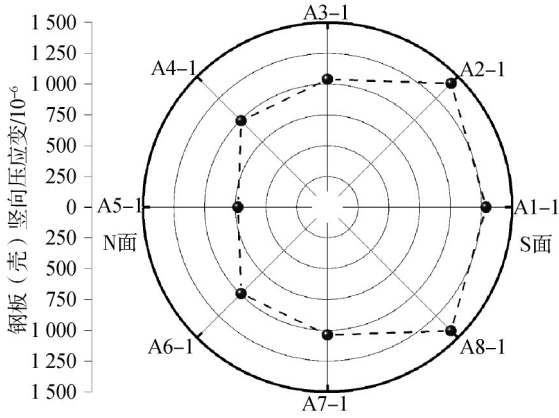


图7 钢结构段钢板竖向应变截面分布

Fig. 7 Vertical strain section distribution of steel plate in steel structure section

明处于截面受压区的圆弧段钢板应力较大;而N面的钢板压应变较小,与偏压受力特征相符;从数值上看,截面内钢板最大竖向压应变出现在钢结构段顶部的A2测点,其值为 $1\ 432.0 \times 10^{-6}$,但仍处于弹性工作状态。

沿高度方向上看,竖向偏心荷载作用下钢壳纵向压应变曲线如图8所示。

由图8可知:从总体变化趋势来看,沿高度方向钢板(壳)各测点应变基本均随着荷载增加而线性增大;钢结构段钢板各测点的竖向压应变明显大于结合段钢壳竖向测点的压应变;钢板的竖向压应力呈现从上至下逐渐减小的趋势,并在承压板附近明显减小,说明在竖向偏心荷载向下传递时,变截面位置处的荷载被分散,从而导致钢壳压应变突然变小;结合段底部应力值(截面位置7、8)相差不大,钢壳应力逐渐趋于稳定状态。

2)结合段填芯混凝土应变

结合段填芯混凝土的荷载-应变曲线如图9所示。

由图9可知:沿高度方向上看,越接近结合段的底部,填芯混凝土的竖向压应变越大。结合前述钢壳所受压应力的变化规律可以看出,在竖向偏心荷载作用下,钢结构段传递下来的压力由钢壳及钢壳内混凝土共同承担,钢壳所受荷载有效传递至结合段的填芯混凝土内部。特别是承压板附近处钢壳应力出现明显减小,也与填芯混凝土共同参与受力有密不可分的关系,由此也可以说明,上部传来的竖向偏心荷载通过相关连接件很好地传递给填芯混凝土,从而达到钢壳

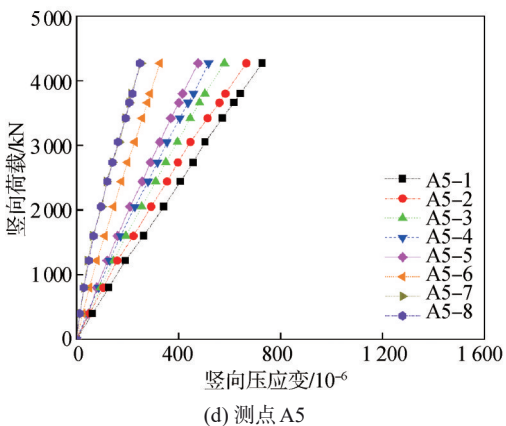
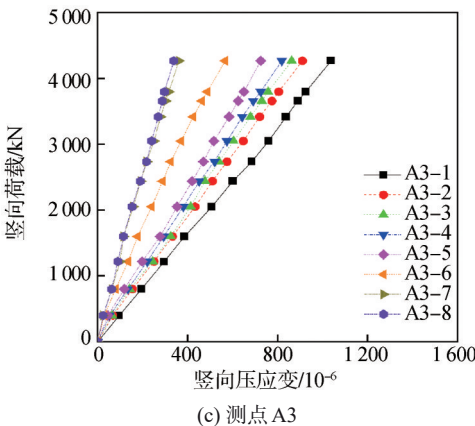
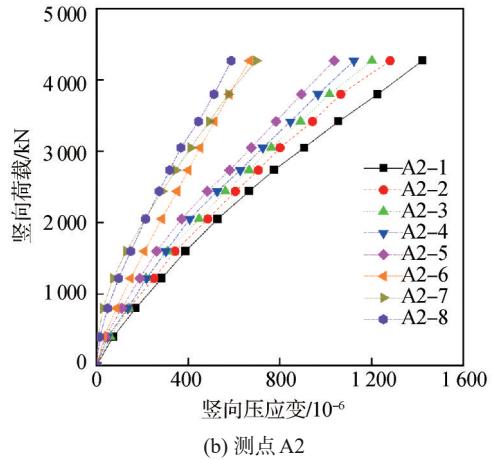
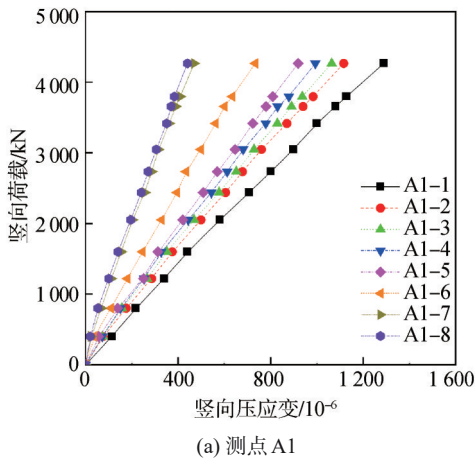


图8 钢板(壳)荷载-应变曲线

Fig. 8 Load-strain curves of steel plate (shell)

与混凝土共同受力的目的。

3) 开孔板贯穿钢筋、纵筋应变

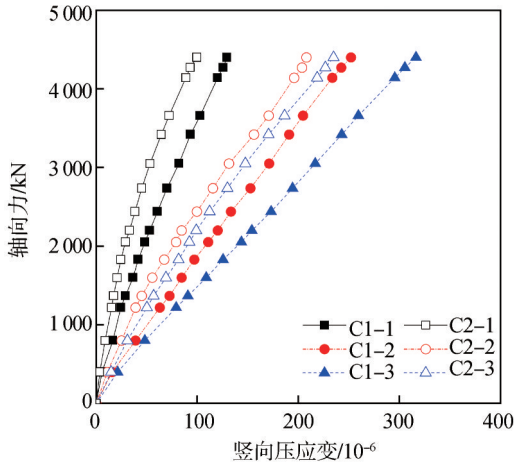
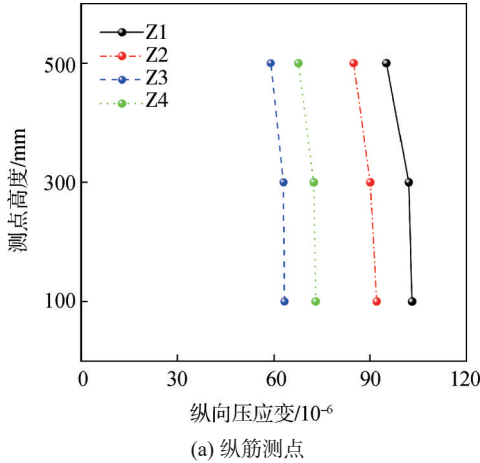
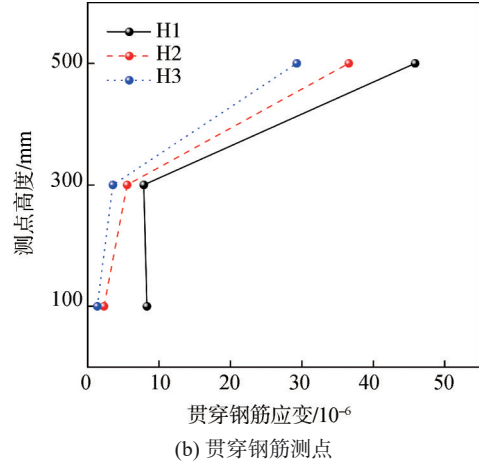


图9 结合段混凝土荷载-应变曲线

Fig. 9 Concrete load-strain curves of joint section



(a) 纵筋测点



(b) 贯穿钢筋测点

图10 钢筋应变分布规律

Fig. 10 Distribution law of reinforcement strain

3 结合段受力性能数值分析

采用通用有限元软件ABAQUS建立结合段试验构件的数值分析模型。通过与试验结果对比,在达到校核模拟效果的同时,也从数值分析角度对结合段的受力做进一步的分析与探讨。

3.1 数值分析模型

1) 单元类型

模型中依据不同构件的受力特点分别采用不同单元形式予以模拟。钢板(壳)结构采用壳单元(S4R)模拟,C50填芯混凝土采用实体单元(C3D8R)模拟,HRB400钢筋采用桁架单元(T3D2)模拟,剪力连接件采用弹簧单元(SPRING)模拟,其中采用两点弹簧(SPRING2)分别模拟开孔板连接件在每个横向贯穿

图10(a)为结合段纵向钢筋应变分布规律。由图10可知,纵向钢筋的应变大致呈现上部小、下部大的趋势,与填芯混凝土的应变变化趋势相同,证明部分荷载逐渐由钢板传递至填芯混凝土。

图10(b)为横向贯穿钢筋在最不利设计荷载 P 作用下沿测点高度的变化规律。横向贯穿钢筋测点位置位于开孔板加劲肋孔洞处,其应变能够反映PBL剪力键的受力情况。由图10(b)可知,受压区截面横向钢筋H1测点沿高度方向的应变均较大,而H2、H3较小,与偏心受压的受力特征相符合。横向贯穿钢筋顶层各测点的应变明显大于中、下两层;同时,应变在向下传递的过程中,顶层与中层间应变的变化幅度明显大于中层与底层,这表明顶层PBL剪力键传递了较多的剪力,中、下两层传递的剪力则迅速降低,并趋于平缓。

钢筋与开孔板孔洞中心处的连接,以及栓钉在根部处钢壳与混凝土界面的连接。开孔板连接件与栓钉的抗剪强度依据文献[26]计算方法,由表1的材性实测结果计算得到开孔板与栓钉的抗剪刚度分别为226.7与43.5 kN/mm²。

2) 边界条件

图11为结合段有限元分析模型。模型的约束条件分为外部约束与内部约束。图11中, $k_{剪}$ 为抗剪刚度。内部约束主要指钢板与混凝土间的相互作用,二者的连接除了设置弹簧单元连接外,在界面处还设置了不考虑钢板和混凝土的摩擦力对剪力传递贡献的面-面接触(surface-to-surface contact),如图11(a)所示;钢筋则采用内置区域(embedded region)方法形成与混凝土的相互作用。外部边界条件取为分析模型底部固结。

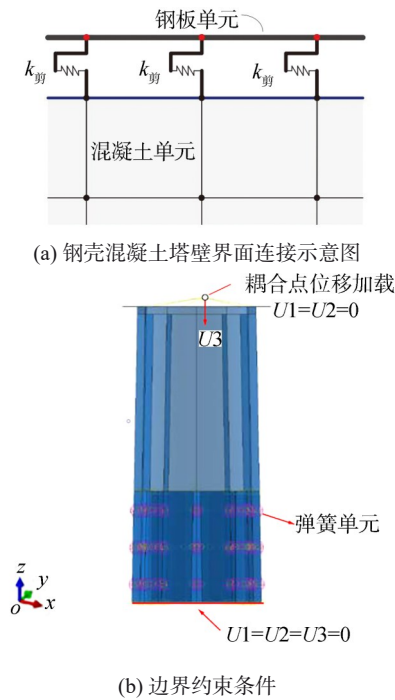


图11 结合段有限元分析模型

Fig. 11 Combined section FE analysis model

3)本构关系

数值分析模型中混凝土选用塑性损伤本构模型,考虑混凝土在加载过程中的损伤累积效应。混凝土本构模型参数取值见表2。

表2 混凝土本构模型参数取值

Tab. 2 Parameter values for the concrete constitutive model

参数	$\Psi/(\circ)$	c	f_{b0}/f_{c0}^{-1}	K_c	μ
取值	30	0.1	1.16	0.666 7	5×10^{-4}

注: Ψ 为膨胀角, c 为流动势偏移度, f_{b0}/f_{c0} 为初始等效双轴抗压屈服应力与初始单轴抗压屈服应力的比值, K_c 为受拉、压子午线偏移第二应力不变量的比值, μ 为黏性系数。

钢筋本构采用理想弹塑性的双折线模型,其本构模型中的材料参数取值均来源于表1。

由于篇幅所限,试验构件数值模型详细建立过程参见文献[27],该模型共计14 739个单元、16 215个节点(图11(b))。图11(b)中, U 为平动自由度,数字1、2、3分别代表 x 、 y 、 z 坐标轴。

3.2 计算结果分析

1)钢板(壳)、加劲肋应力

结合段有限元模型应力分析结果如图12所示。由图12可知,在加载工况下,钢结构应力水平较低,竖向应力沿高度方向的变化较为连续,结构安全储备较高。由于弯矩的作用,受压区(S面)的钢板竖向压应力值较另一侧(N面)大,模型顶部钢板受压区部分区域出现了应力集中现象。

由图12(a)和(c)可知,结合段的钢板竖向压应力明

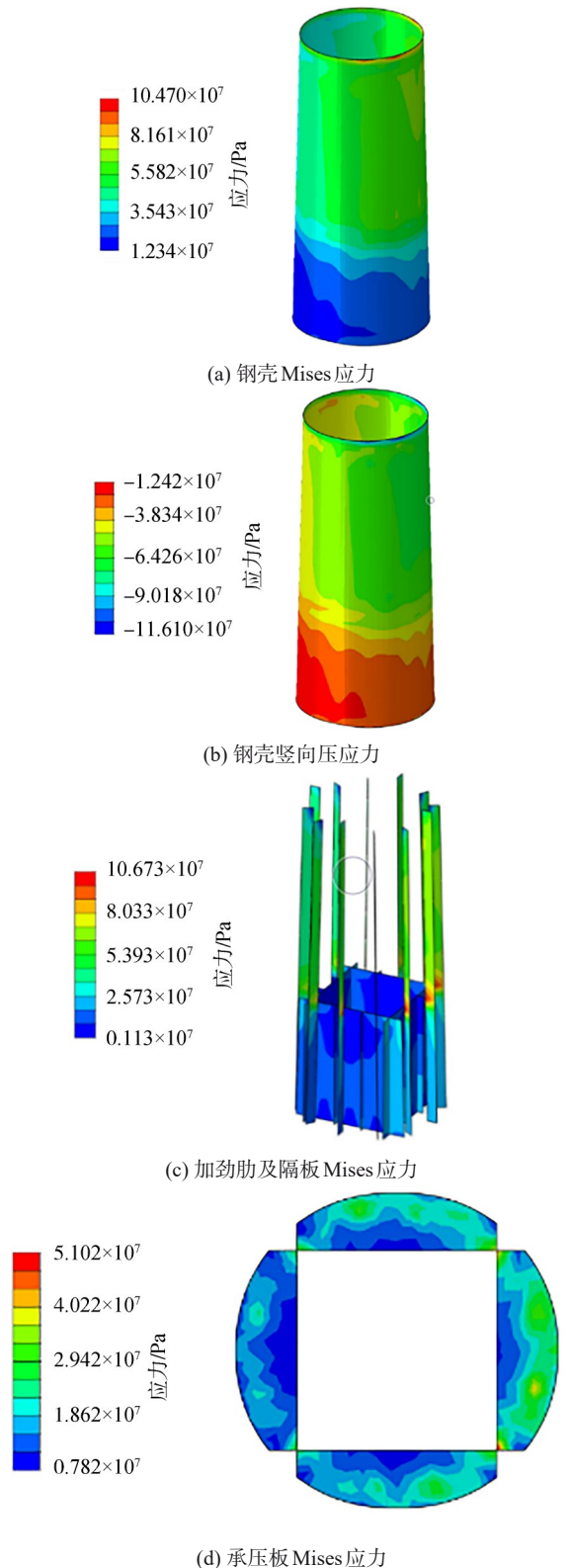


图12 结合段有限元模型应力分析结果

Fig. 12 Stress analysis results of FEM

显低于钢结构段,加劲肋在承压板以下区域的应力反应远小于承压板以上部分,这说明钢板通过承压板传递了部分荷载至填芯混凝土与井字隔板,承压板是扩散钢结构应力的主要因素之一。承压板在加劲肋焊接部位处

的应力较高,而隔板应力在边角区域较高,两者平均应力值均为20~30 MPa,但远小于钢材屈服强度。

有限元计算的钢板表面竖向应力与试验测试结果的对比如图 13 所示(应力以拉为正)。由图 13 可知:有限元与实测的钢板应力变化趋势基本吻合;在 1.0P、3.0P 设计荷载下,承压板处钢板的竖向应力相较钢结构顶部处增加约 100% 左右,结合段钢钢板仍处于弹性工作状态,结构具有较高的安全储备。

此外,沿高度方向,结合段钢板的竖向应变表现出以下几点规律:

a. 钢结构段钢板应力大于结合段钢壳的应力,最大值位于整个结合段顶部,钢板竖向应力沿高度向下总体呈现逐渐减小的趋势;

b. 在承压板附近,钢结构段钢板的应力开始减小,应力衰减迅速且变化流畅,表明承压板和剪力连接件较好地传递了部分钢结构的应力;

c. 结合段底部钢板的竖向压应力减小缓慢,应力值基本保持稳定,传力基本结束,此时剪力键传递荷载的作用不明显。

上述结论均与实测结果一致。

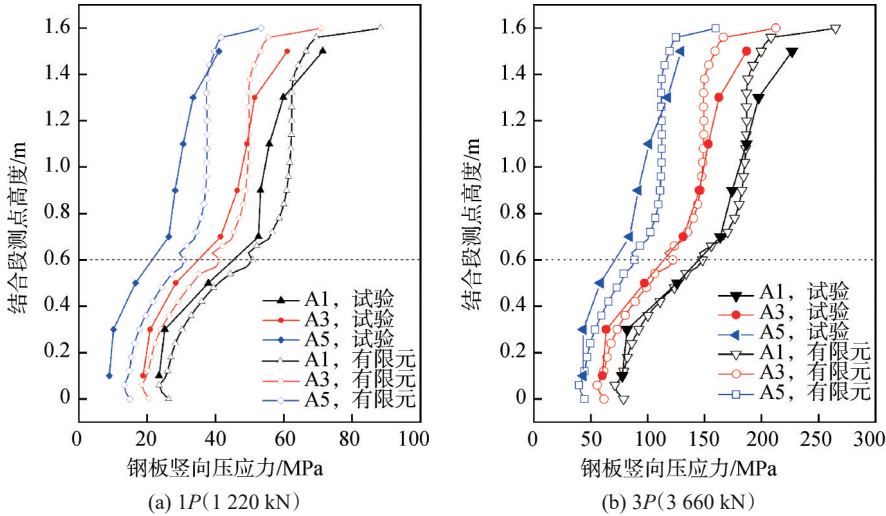


图 13 钢板有限元与试验应力结果对比

Fig. 13 Comparison of stress results between FE and test steel plate

2) 填芯混凝土应力

图 14~15 分别为填芯混凝土的应力云图及分析结果与试验结果的对比情况。

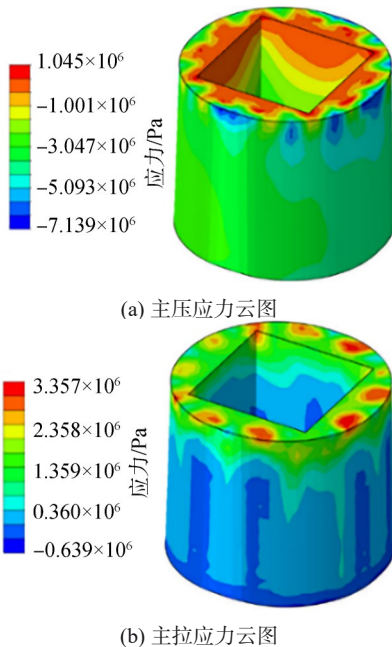


图 14 填芯混凝土应力分布

Fig. 14 Stress displacement of core filling concrete

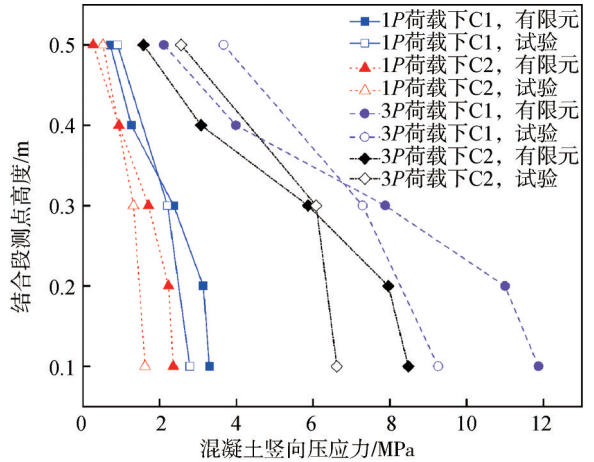


图 15 填芯混凝土压应力对比

Fig. 15 Compressive stress comparison of core filling concrete

由图 15 可知,数值分析结果与试验结果变化规律总体趋势基本一致;同时,结合应力云图与变化规律可知:

a. 从主压应力云图来看,混凝土外侧压应力较大;靠近开孔板剪力键部位处混凝土存在较大应力,而顶部内侧混凝土压应力较小。结合混凝土压应力的变化规

律可知,钢结构的应力能够有效地通过剪力键和承压板逐渐传递至外侧混凝土结构,并扩散至内侧混凝土。

b.从主拉应力云图来看,混凝土顶部拉应力较大、变化明显,说明顶层剪力键较好地起到了传力作用;自承压板位置处向下,腔室内混凝土的外侧竖向应力呈逐渐减小的趋势,而内侧混凝土的应力变化则呈逐渐增大的趋势,结合段底部的混凝土受力较为均匀,所受剪力较小。

3)钢板与混凝土分担的荷载比例

图16为不同轴力作用下结合段钢板与混凝土承载的轴力沿桥塔高度方向分布情况。

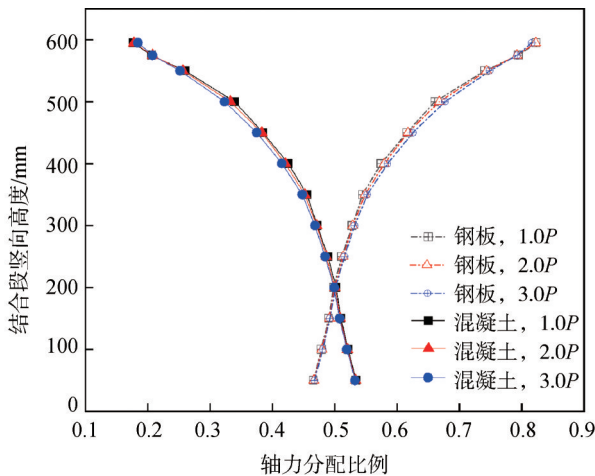


图16 钢壳及混凝土承担轴力比例沿竖向分布情况

Fig. 16 Proportion of axial force borne by steel plate and concrete distributed along the vertical direction

由图16可知,填芯混凝土承担的轴力由上至下逐渐变大,而钢板承担的轴力逐渐减小,钢板内力逐渐传递至混凝土结构。结合段顶部的钢板和混凝土所承担的轴力变化较为迅速,而底部的轴力变化较为缓慢。在1.0P、2.0P及3.0P设计荷载作用下,承压板均传递了21%左右的荷载至填芯混凝土,传力效果不受竖向荷载大小的影响。

此外,从1.0P荷载作用下提取到的结合段底部混凝土与钢板所承担的轴向荷载分别占比约0.462与0.530,两者承担的荷载比为1.147;结合段底面钢壳结构的轴向刚度 $E_s A_s$ 和钢筋混凝土结构轴向刚度 $E_c A_c$ 分别为 7.270×10^{15} 、 $6.325 \times 10^{15} \text{ mm}^4$,二者轴向刚度之比约等于1.149;底部截面的荷载比与截面刚度比基本相近,由此可知,底部组合截面的受力基本由钢板和混凝土各自承担约一半左右的荷载,界面传力和接触作用力较小。这说明结合段内存在传力长度,使上部传来的荷载由钢板受力逐渐过渡为组合截面受力,该合理长度以下的组合截面就可以采用较薄的钢板厚度,从而达到兼具受力安全性和经济性的要求。

4 结合段传力机理分析

由第3.2节有限元计算结果和试验结果对比可知,有限元计算精度满足分析要求。据此,建立结合段原尺模型,进一步开展传力机理与影响参数分析。建模过程及相关参数设定同前,不再赘述。

4.1 结合段传力长度

结合段混凝土承载比例随高度的变化曲线如图17所示。结合图16、17可知:承压板传递了21%左右的荷载;承压板深度小于1.5m时,填芯混凝土承担荷载的比例增加迅速,约从21%增加到43%;承压板深度范围为1.5~3.0m(不含)的承载比例变化变缓,承载比例增加至46%左右;承压板深度 ≥ 3.0 m时,填芯混凝土承担荷载比例变化率保持稳定,至结合段底部处,混凝土荷载承担比例约为50%。

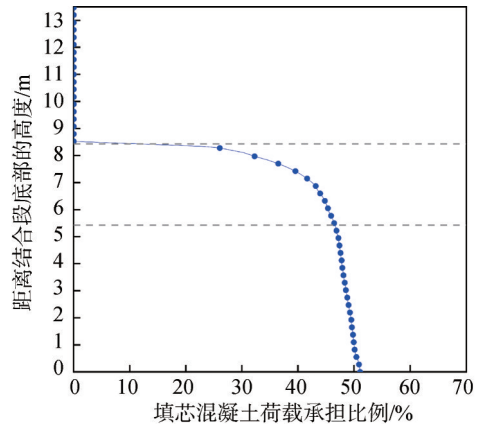


图17 填芯混凝土承载比例沿深度分布规律

Fig. 17 Distribution law of concrete bearing ratios along depth

填芯混凝土承载比例 η 与截面刚度比 $E_c A_c / (E_s A_s + E_c A_c)$ 沿深度分布规律如图18所示。

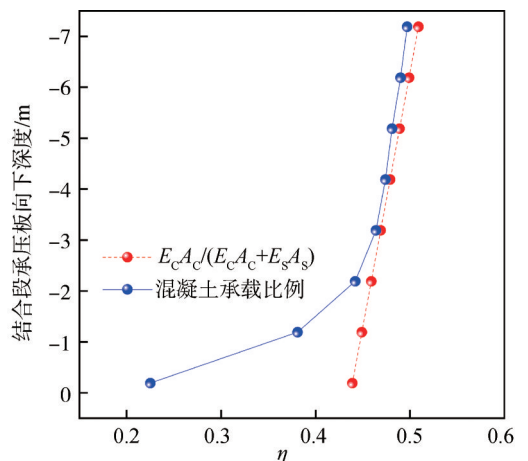


图18 混凝土承载比例与截面刚度比沿深度分布规律

Fig. 18 Variation trend of concrete load-bearing ratio and cross-sectional stiffness ratio along depth

由图 18 可知,承压板附近的钢板仍承载大部分荷载比例,此时钢板应力较高,剪力键起到传递剪力作用。当钢板的插入深度在 3.0 m 时,填芯混凝土承载比例 η 和钢壳混凝土截面钢板与混凝土的刚度比基本相近。3.0 m 深度以下,各截面的承载比例 η 与 $E_s A_s / (E_s A_s + E_c A_c)$ 保持一致,认为组合截面中的钢板和填芯混凝土独立承载,此时剪力键剪力较低,内力传递已经基本完成。故而可以确定,钢壳混凝土节段的传力深度 L 在 3.0 m 左右。

4.2 剪力键对结合段传力的影响

剪力键是结合段传力的重要构造。为探讨剪力键参数对结合段传力规律的影响,结合段内连接件竖向剪力沿高度的分布规律及剪力键抗剪刚度对传力效率的影响展开讨论。

1) 剪力连接件受力分布特点

图 19 为原结构开孔板连接件及栓钉剪力键竖向剪力的变化趋势。图 19 中, A、B、C 分别为截面上受压区、中性轴、受拉区截面测点。由图 19 可知:开孔板连接件及栓钉剪力键的竖向剪力沿结合段高度的分布均呈现上部大、下部小的趋势;开孔板连接件竖向剪力最大值位于结合段顶部;相比开孔板连接件,栓钉剪力键所受剪力略小。

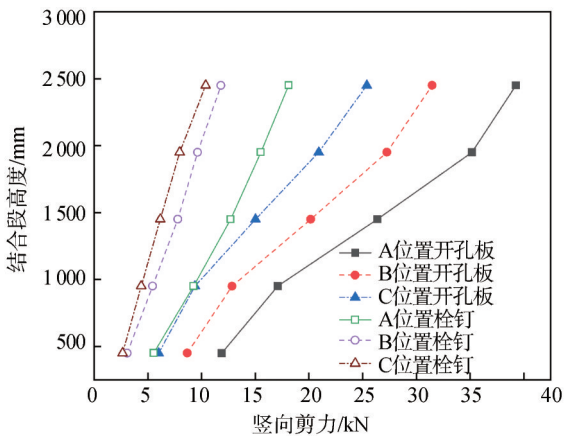


图 19 剪力连接件竖向剪力变化趋势

Fig. 19 Variation trend of vertical shear force of shear connectors

结合段中两种剪力键在受压区剪力较大,随着力的传递,钢板的应力逐渐减小,填芯混凝土的应力逐渐增加,连接件作用力逐渐减小。

2) 抗剪刚度对结合段传力的影响

图 20 为剪力连接件抗剪刚度对填芯混凝土承载比例的影响规律。图 20 中, K_{stud} 为原设计剪力键的抗剪刚度。

由图 20 可知,剪力连接件抗剪刚度对钢结构传递至混凝土的荷载比例影响较大。当抗剪刚度增加时,钢

壳混凝土节段的传力比例随之增大,填芯混凝土的承载比例变大,同时承压板的传力比例相应减小。增大剪力键刚度能够提升钢塔节段至钢壳混凝土节段的传力效率,使之更快地由钢塔受力转变为组合塔受力。但当剪力键刚度增大至一定倍数时 ($10.0K_{stud}$),特别是截面的受力已经转变为组合截面受力后,填芯混凝土和钢壳的承载比例基本保持稳定,此时应力传递结束,剪力连接件的传力效果极其微弱,剪力键作用不明显。

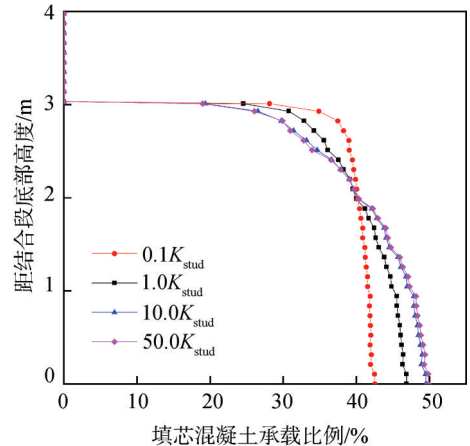


图 20 剪力连接件抗剪刚度对填充混凝土承载比例的影响
Fig. 20 Influence of the shear stiffness of shear connectors on the load-bearing proportion of filled-core concrete

4.3 承压板对结合段传力的影响

作为主要的传力构件,图 21 为不同承压板厚度对填芯混凝土承载比例的影响规律。

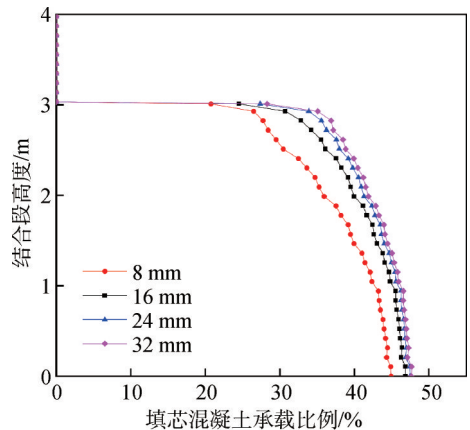


图 21 承压板厚度对填充混凝土承载比例的影响
Fig. 21 Influence of bearing plate thickness on the load-bearing proportion of filled-core concrete

由图 21 可知:荷载传递比例随承压板厚度的增大有所提高;相同深度下填芯混凝土结构的承载比例也更高。但其中存在着递减效应,当承压板厚度 ≥ 16 mm 时,填芯混凝土的承载比例最终趋近相同。从实际角度来说,考虑施工、焊接等因素,承压板厚度宜采用 [16, 24] mm 为宜,此时承压板应力值处在较低水平

(10~20 MPa),兼具结构安全性和经济性。

5 结 论

针对斜拉桥混合塔中结合段的受力性能与传力机理开展了相关的试验研究与理论分析。得到以下几点结论。

1)由于桥塔斜度的存在,结合段整体受力符合偏心受压构件的受力特点,且构件在最不利偏心荷载作用下仍处于弹性工作状态,安全储备较高。

2)竖向偏心荷载作用下,承压板处各主要构件的应变变化说明承压板传力作用明显,是主要的传力构件。其厚度的增加有利于提升填芯混凝土的承载比例。就分析对象而言,承压板厚度为16 mm时提升效果最佳。

3)从传力机理来看,桥塔竖向荷载经由承压板及剪力连接件将其分散传递至结合段的钢壳与填芯混凝土。在钢壳混凝土节段的一定深度范围(传力长度)内,钢壳与填芯混凝土的承载比例趋于稳定且与截面的刚度比 $E_c A_c / (E_s A_s + E_c A_c)$ 基本接近;以实际结构为例,该传力长度约为3 m。

4)剪力连接件受力最大处位于结合段顶部;同一位置处,栓钉剪力键受力略小于开孔板连接件;提升剪力连接件的抗剪刚度可一定程度上提升结合段顶部的传力效率。

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.

[2] Morgenthal G,Sham R,West B.Engineering the tower and main span construction of stonecutters bridge[J].Journal of Bridge Engineering,2010,15(2):14-152.

[3] Li Qiao,Wu Huanling,Tang Liang,et al.Research on internal force distribution law of steel-concrete joint section of the 3rd Nanjing Yangtze River Bridge Tower[C]//Proceedings of the 2005 National Bridge Academic Conference of the Bridge and Structural Engineering Branch of China Highway Society. Beijing: China Communications Press, 2005: 818-823.[李乔,武焕陵,唐亮,等.南京长江三桥桥塔钢混结合段内力分布规律研究[C]//中国公路学会桥梁和结构工程分会2005年全国桥梁学术会议论文集.北京:人民交通出版社,2005:818-823.]

[4] Zhang Yong.The study on the static characteristics of steel-concrete joint section of the 3rd Nanjing Yangtze River Bridge Tower[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.[张勇.南京长江第三大桥桥塔钢混结合段结构特性研究[D].成都:西南交通大学,2005.]

[5] Zhou Hao.Experimental study on shear key selection of

steel-concrete composite section of Nanjing Third Yangtze River Bridge tower[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2005.[周浩.南京长江三桥桥塔钢-混结合段剪力键选型试验研究[D].成都:西南交通大学,2005.]

[6] Zhang Li,Zhang Yan,Tang Boxue,et al.The key construction technologies for steel-concrete composite sections of daxie second bridge's main tower[J].Highway,2013,58(9): 317-320.[张利,张彦,唐博学,等.大榭第二大桥主桥主塔钢混结合段施工关键技术[J].公路,2013,58(9):317-320.]

[7] 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.[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.]

[8] Cui B,Wu H L,Zhao C H,et al.Steel-concrete composite cable-stayed bridge-main bridge of the Jiangxinzhou Yangtze River Bridge at Nanjing[J].Structural Engineering International,2023,33(1):107-114.

[9] Du Cheng.Transfer mechanism of steel-concrete composite segment of single-plane cable-stayed bridge tower by research[D].Xi'an:Chang'an University,2014.[杜程.单索面斜拉桥索塔钢-混结合段传力机理研究[D].西安:长安大学,2014.]

[10] Xu Guoping,Liu Gao,Wu Wenming,et al.New progress in application of steel-concrete joint in bridge structure[J]. Highway,2010,55(2):18-23.[徐国平,刘高,吴文明,等.钢-混凝土结合部在桥梁结构中应用新进展[J].公路,2010, 55(2):18-23.]

[11] Wang Ge,Liu Yuqing,Gu Minjie,et al.Stress analysis of hybrid tower joint of cable-stayed bridge[C]//2010 Composite structure bridges and incremental launching technology application conference. Hangzhou: The Bridge Magazine, 2010:48-51.[王戈,刘玉擎,顾民杰,等.斜拉桥混合塔结合部受力分析[C]//2010组合结构桥梁和顶推技术应用学术会议,杭州:桥梁杂志社,2010:48-51.]

[12] 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.

[13] Okamoto Y,Nakamura S.Static and seismic studies on steel/concrete hybrid towers for multi-span cable-stayed bridges [J]. Journal of Constructional Steel Research,2011, 67(2): 203-210.

[14] 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): 255–260. [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.]
- [15] Zhang Guanghui, Zhang Qiwei, Liu Yuqing, et al. Model test of composite joint for tower of cable-stayed bridge[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(3): 106–112. [张光辉, 张启伟, 刘玉擎, 等. 斜拉桥混合塔结合部受力机理模型试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(3): 106–112.]
- [16] Gao Xiaopei, Liu Yuqing, Liu Yangqing, et al. Experimental and analytical study on compressive bearing capacity of steel shell-concrete composite bridge tower[J]. *Engineering Structures*, 2023, 278.
- [17] Zhao Haoyang, Chen Weile, Liu Shuang, et al. Research on the compression-bending behavior of concrete-filled double-steel-plate composite bridge towers[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2024, 221: 108871.
- [18] Shi Zhou, Gu Jiachang, Yu Wanqing, et al. Study on the mechanical behavior of bi-directionally curved composite pylon steel-concrete joints for a long-span cable-stayed bridge[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(6): 73–85. [施洲, 顾家昌, 余万庆, 等. 大跨度斜拉桥双向曲面混合桥塔钢-混结合段受力性能研究[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(6): 73–85.]
- [19] Li Junfang. Study on the static performance of long-span steel cable-stayed bridge and confined steel-concrete joint section of the steel tower[D]. Nanjing: Southeast University, 2019. [李俊方. 大跨径钢斜拉桥及其钢塔承压式钢-混结合段的静力学性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.]
- [20] 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. [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.]
- [21] Takai S, Inoue M. Design and construction of the Tsurumi Tsubasa Bridge[J]. *NKK Technical Review*, 1996(74): 46–52.
- [22] Abe Y, Morimoto A. Study on connecting structure of main tower for the Tsurumi Fairway Bridge[J]. *Sumitomo Metals*, 1996.
- [23] Wang Xuefeng, Guan Dayong, Feng Yulong. Experimental study on bearing capacity of joint segment of steel-concrete hybrid pylon[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2022, 39(4): 93–100. [王雪峰, 关大勇, 冯玉龙. 钢-混组合桥塔结合段承载性能模型试验研究[J]. *公路交通科技*, 2022, 39(4): 9–100.]
- [24] Gu Yunwei, Wang Ronghui, Zhen Xiaoxia, et al. Calculation of elastic stiffness of shear connector in steel concrete bridge tower joint section[J]. *Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)*, 2023, 51(2): 76–87. [杜云威, 王荣辉, 甄晓霞, 等. 钢混桥塔结合段内剪力连接件的弹性刚度计算[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(2): 76–87.]
- [25] Wang Xizhi, Zhang Guanghui, Liu Yuqing, et al. Influence of bearing plate position on carrying properties of connection in hybrid tower[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2018, 46(3): 305–311. [王习之, 张光辉, 刘玉擎, 等. 承压板位置对混合塔结合部承载性能影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(3): 305–311.]
- [26] 中交公路规划设计院有限公司. 公路钢混组合桥梁设计与施工规范: JTG/T D64-01-2015[S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2016.
- [27] Zheng Jialong. Research on mechanical performance of hybrid tower of cable-stayed bridge[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2022. [郑佳龙. 斜拉桥混合塔结构受力性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2022.]

Research on the Mechanical Performance and Force Transmission Mechanism of the Hybrid Tower Joint Section in Cable-stayed Bridges Under Eccentric Loading

SUN Ying¹, ZHENG Jialong¹, ZHUO Weidong^{1*}, LIN Daojin², SU Shaoling³

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. China Communications Highway Planning and Design Institute Company Limited, Beijing 100088, China;

3. Fu'an City Construction Management Company Limited, Ningde 355099, China)

Abstract: This study considers the joint segment of the hybrid tower of Qiyun Bridge in Fu'an City as the research object to explore the mechanical characteristics of the hybrid tower joint segment of a cable-stayed bridge under eccentric load. It clarifies the mechanical performance and force transmission mechanism of the joint segment under eccentric load and the reasonable range of parameters affecting the force transmission efficiency using test and numerical analysis. The results indicated that the high safety coefficient, reliable working performance, and low stress

level are the main characteristics of the bearing capacity of the hybrid tower joint segment with the rear bearing plate. The stress performance of the joint segment under the action of vertical eccentric load conforms to the force characteristics of eccentric compression components, and the strain is symmetrically distributed in the section. The bearing plate and the shear connector play a vital role in the load transfer, as demonstrated by the strain change of the steel plate (shell) near the bearing plate, and the shear force borne by the shear key near the bearing plate is greater than that of the stud shear key. In addition, the vertical load is effectively transmitted in the joint segment. The transfer efficiency of the load in the joint segment is greatly affected by the thickness of the bearing plate and the shear stiffness of the shear connector. The transfer efficiency increases initially and then tends to stabilize with the increase in the thickness of the bearing plate or the shear stiffness of the shear connector. When the shear key stiffness increases to more than 10 times the original design shear stiffness or the thickness of the bearing plate exceeds 16 mm, the load transfer efficiency remains basically unchanged. In addition, there is an apparent transmission length within the joint segment, which is about 3 m. Beyond this length, the bearing ratio of the steel shell and the filled concrete is basically close to the section stiffness ratio of the joint segment. The steel shell and the concrete, respectively, bear about 50% of the vertical load after the force transfer. The research results provide guidance and reference for the design of similar projects.

Key words: hybrid tower of cable-stayed bridge; joint segment; force performance; load transfer mechanism; model test; FE analysis

(编辑 周璇)

引用格式:Sun Ying,Zheng Jialong,Zhuo Weidong,et al.Research on the mechanical performance and force transmission mechanism of the hybrid tower joint section in cable-stayed bridges under eccentric loading[J]. Advanced Engineering Sciences,2025,57(3):171-183.[孙颖,郑佳龙,卓卫东,等.偏心荷载作用下斜拉桥混合塔结合段受力性能及传力机理研究[J].工程科学与技术,2025,57(3):171-183.]