

不同加强措施对N形节点疲劳性能影响研究

李德臣¹, 吴庆雄^{2*}, 管锡琨^{3,4}, 孙晓洲¹, 韩雨晓⁵, 王 帅⁵

(1. 山东高速建设管理集团有限公司, 济南 250031; 2. 福州大学土木工程学院, 福州 350108;
3. 山东省交通规划设计院集团有限公司, 济南 250031; 4. 高性能桥梁结构交通运输行业
重点实验室, 济南 250031; 5. 山东高速高商公路有限公司, 济南 251600)

摘要: 为明确拉杆内“仅填充混凝土”与“管内填充混凝土+布置栓钉”两种加强措施对N形相贯节点疲劳性能的影响,文中以一座四跨下承式钢管混凝土(concrete-filled steel tubular, CFST)桁式拱桥为研究对象,建立了全桥杆系模型,通过疲劳分析识别出受力最不利的N形节点;随后以该最不利N形节点为研究对象,分别建立了钢管、CFST与带栓钉CFST的N形节点的有限元实体分析模型,对比分析了三类节点的受力性能差异,讨论了三类节点疲劳性能差异的机理;并对带栓钉CFST的N形节点其栓钉布置形式进行了优化。结果表明:N形节点的有限元分析模型具有一定参考价值且计算结果偏安全;钢管竖向刚度不是影响热点应力分布的主要因素,内填混凝土是使得钢管N形节点热点应力分布变化的关键因素;内填混凝土有效限制了主管径向的变形,很好地缓解了主管因刚度不足而产生的应力集中现象;内置栓钉能够使混凝土与钢管更好地共同受力,且能降低钢管热点应力值;栓钉布置较为合理的参数方案为:栓钉间距布置率 τ 取0.45,栓钉直径变化率 β 取0.026,栓钉长度变化率 γ 取0.13;不同加强措施下,带栓钉CFST的N形节点的抗疲劳性能最优。

关键词: 钢管混凝土N形节点; 栓钉布置; 疲劳性能; 热点应力; 有限元分析; 应力集中

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)09-0091-10

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240401001

Study on the Effect of Different Reinforcement Measures on the Fatigue Performance of N-Joint

LI Dechen¹, WU Qingxiong^{2*}, GUAN Xikun^{3,4}, SUN Xiaozhou¹,
HAN Yuxiao⁵, WANG Shuai⁵

(1. Shandong Expressway Construction Management Group Co., Ltd., Jinan 250031, China; 2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 3. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250031, China; 4. Key Laboratory of High Performance Bridge Structure Transportation Industry, Jinan 250031, China; 5. Shandong Expressway Gaoshang Highway Co., Ltd., Jinan 251600, China)

*Corresponding author: wuqingx@fzu.edu.cn

Abstract: To clarify the effects of two reinforcement measures—namely, concrete filling in the chord and the arrangement of studs in the chord—on the fatigue performance of N-joints, a four-span through concrete-filled steel tubular (CFST) arch bridge was used as the object of study. A full bridge model was established, and fatigue analyses were conducted

收稿日期: 2024-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(52578183、51678154)

作者简介:

李德臣(1982—),男,硕士,工程师,主要从事交通工程建设管理方面的研究。E-mail: 5381817@qq.com。

通信作者:

吴庆雄(1973—),男,博士,研究员,主要从事桥梁与结构工程方面的研究。E-mail: wuqingx@fzu.edu.cn。

to identify the most unfavorable N-joint under stress. Solid finite element models of circular hollow section, CFST, and CFST with studs N-joints were established to compare the stress performance among the three joint types. The mechanisms underlying the differences in fatigue performance of these joints were discussed. Additionally, the optimization of stud arrangement for N-joints of CFST with studs was carried out. The results show that the N-joint finite element analysis model has significant reference value and the calculation results are conservative. The vertical stiffness of the circular hollow section is not the main factor affecting the hot-spot stress distribution; rather, the in-filled concrete is the key factor that changes the hot-spot stress distribution of the circular hollow section N-joint. The effective restriction of radial deformation of the chord by concrete filling effectively alleviates the stress concentration phenomenon caused by insufficient stiffness of the chord. Built-in studs enhance the interaction between the concrete and chord, reducing the hot-spot stress value of the circular hollow section. The most reasonable parameters for stud arrangement is as follows: the stud spacing arrangement rate (τ) is 0.45, the stud diameter rate (β) is 0.026, and the stud length rate (γ) is 0.13. The CFST N-joint with studs demonstrates optimal fatigue performance under different reinforcement measures.

Keywords: concrete filled steel tubular N-joint; stud arrangement; fatigue performance; hot-spot stress; finite element analysis; stress concentration

钢管相贯节点因力学性能良好、外形美观、施工便捷等优点,被广泛应用于各类拱桥中,各类相贯节点的成熟应用,为当前钢管混凝土(concrete filled steel tubular, CFST)桁式拱桥的稳步推进提供了关键技术支撑,直接推动其形成“不断向大跨径突破”的发展局面^[1-2]。根据相贯节点布置形式的不同,平面相贯节点可以分为K形、T形、N形、X形等^[3-5]。各类型节点的主、支管连接处均因形成空间相贯焊缝而存在应力集中现象,这一特性使其不可避免需要解决车辆荷载作用下的结构疲劳性能问题^[6]。

从现有研究可知:K形、T形及X形节点在疲劳方面的研究已较为成熟^[7-13],而关于N形相贯节点的疲劳性能研究确较少。目前关于N形相贯节点的相关研究主要有:李自林等^[14-15]开展了钢管N形节点静力性能试验,获取了加垫板节点及管内填充混凝土节点的承载极限能力,并系统揭示了各类型节点的破坏模式与荷载-应变演化过程;尹越等^[16]采用有限元和试验相结合的研究方法,讨论了钢管N形节点的滞回性能,还探究了外贴钢板对N形节点承载能力的提升效果;陈誉等^[17]开展了钢管N形节点大偏心受压静力试验,探讨了偏心率对节点承载力、刚度等的影响。FUNG等^[18]、GHO等^[19]系统分析了钢管N形节点与钢管K型节点的承载力差异,揭示了两类节点在静力荷载作用下的破坏模式。

综上所述,现有钢管相贯节点研究已覆盖静力与疲劳两大领域,整体体系较为完善,但针对N形相贯节点的研究存在明显短板,其主要集中在静力性能分析方面,关于疲劳性能方面的研究仍然较少;且对于N形节点加强措施中,当前主要聚焦主管内填混凝土及外加钢板两种形式,对主管内布设栓钉、增设环板或主管外设置加劲肋等其它措施,尚未见系统性研究。在实际桥梁中,虽已有

主管内设置栓钉CFST的N形节点相关研究实例,但加强后CFST的N形节点疲劳性能不明确,导致设计缺乏理论支撑,存在一定盲目性。

为此,本文以一座四跨下承式CFST桁式拱桥为工程背景,开展不同加强措施对于N形相贯节点疲劳性能影响的研究。首先,建立了全桥杆系分析模型,并对其进行了疲劳分析,得到了实桥在疲劳荷载作用下的最不利节点;其次,针对最不利节点开展实体有限元数值仿真,对比分析钢管形节点、CFST的N形节点及带栓钉CFST的N形节点在热点应力分布与竖向变形上的区别与内在联系,揭示了不同加强措施下N形相贯节点疲劳性能的差异机理;最后对带栓钉CFST的N形节点内栓钉的布置形式进行优化分析,得到了栓钉的最优布置形式,为后续N形相贯节点的应用提供理论参考。

1 下承式CFST桁式拱桥疲劳分析

1.1 建立全桥模型

以某四跨连续下承式刚架系杆桁式拱桥为工程背景,采用midas Civil建立空间杆系有限元计算模型。在计算模型中,采用梁单元模拟CFST拱肋、横撑、纵梁、横梁、桥面板及桥墩,同时采用桁架单元模拟吊杆与系杆,全桥共7 677个节点,18 666个单元。支座的模拟结合其真实约束方向,采用弹性连接形式;系杆与桥墩、拱肋与桥墩的连接,则分别采用基于弹性连接的刚接形式进行模拟,以匹配实际受力状态。其中混凝土、钢材与钢绞线的弹性模量、设计抗压(拉)强度等基本参数均按规范取值,全桥有限元分析模型如图1所示。

根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)^[20]第5.5.2条规定,黄河特大桥的疲劳计算采用疲劳荷载计算模型I。在黄河特大桥midas Civil有限元模

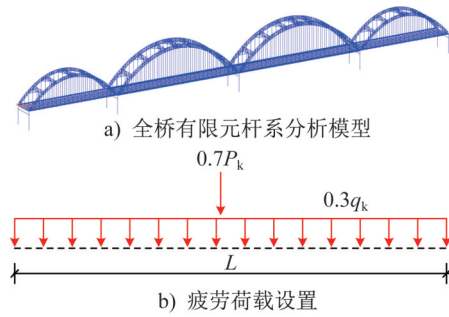


图1 全桥有限元分析模型

Fig. 1 Finite element analysis model of the bridge

型中,设置符合的等效车道荷载:集中荷载为252 kN,均布面荷载为3.15 kN;并且考虑多车道的影响,横向车道布载系数应按现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[21]的相关规定选用,具体设置如图1b)所示。

1.2 最不利节点选取及其参数

对于CFST桁式拱桥拱肋中的节点,不论支管采用何种布置形式,拱肋主管与支管均会形成不同形式的相贯节点。而拱肋节点相贯焊缝的形状为一条曲率连续变化的空间曲线,使得主管与支管相贯区域的应力分布复杂且应力集中现象较为明显,从而容易形成热点应力区域,造成CFST桁式拱桥拱肋节点的疲劳问题突出^[22]。并且对于桁式拱肋,由于每个节点的应力幅值不同,且节点的腹杆和弦杆的交角不同,同时节点的热点应力的分布也不同,因此,为了更好的讨论疲劳荷载作用下拱肋节点的热点应力,本文选取疲劳荷载作用下受力最不利的节点作为分析对象,开展不同加强措施下相贯节点疲劳性能的分析。

疲劳分析的结果如图2所示,由图可知:在疲劳荷载作用下,中跨拱肋靠近跨中的拱脚处K形节点为最不利节点,该节点的最不利应力为114.3 MPa,节点几何参数主管为 $\phi 1\ 000 \times 24$ mm、支管为 $\phi 420 \times 12$ mm、受拉侧支管与主管呈 90° 夹角,受压侧支管与主管夹角为 45° ,形成CFST的N形节点;钢管材料选用Q420钢材,管内混凝土标号为C60。根据圣维南原理^[23]及主、支管长度对有限元分析的影响,选取主管长度为4 460 mm、斜支管长度为2 700 mm、竖向支管长度为1 763 mm,所选取CFST的N形节点几何尺寸及构造参数如图3所示。

2 CFST的N形节点实体有限元分析模型

由N形节点几何尺寸布置图可知,工程背景桥在疲劳荷载作用下的最不利N形节点为带内置栓钉CFST的N形节点。为讨论不同加强形式对N形节点疲劳性能的影响,本文以图3所示CFST的N形节点其几何布置为基础,分别建立钢管N形节点、CFST的N形节点及带内

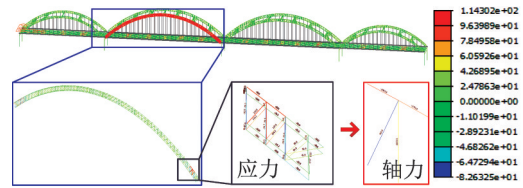


图2 疲劳荷载作用下最不利节点(单位:MPa)
Fig. 2 Most unfavorable joint under fatigue loading (unit: MPa)

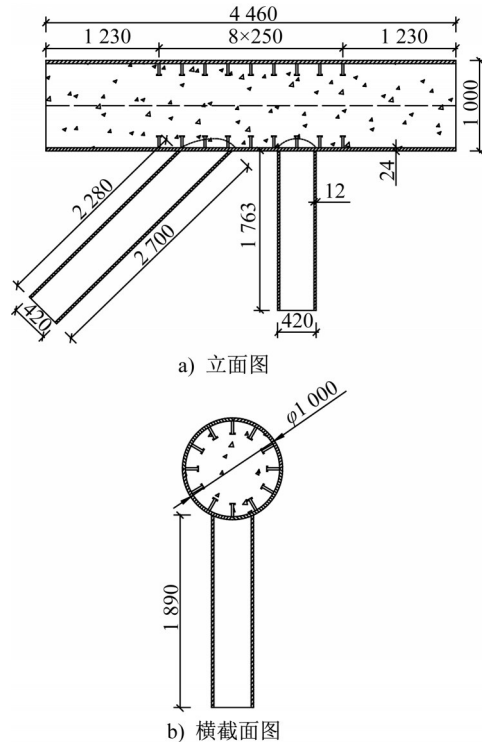


图3 最不利N形节点几何尺寸(单位:mm)
Fig. 3 Geometry of the most unfavourable N-joint (unit: mm)

置栓钉CFST的N形节点,以此分析主管内填充混凝土和管内增加栓钉两种加强措施对N形节点疲劳性能的影响。

2.1 N形节点有限元分析模型

因在建模过程中,带内置栓钉CFST的N形节点为三种节点中最复杂的节点,因此,以带内置栓钉CFST的N形节点为例,进行N形节点建模讨论。

根据1.2节中选取的最不利N形节点,采用MSC.MARC有限元软件建立实体分析模型。对于相贯节点,主、支管连接的相贯焊缝是保证结构传递荷载的关键部位,因此,本文根据美国API规范^[24]对管节点加工、制作、焊接等方面的要求,建立了N形节点相贯焊缝实体分析模型。故带栓钉CFST的K形节点的网格划分主要分为四部分,分别为钢管、焊缝、栓钉以及管内混凝土,其中

钢管、焊缝及栓钉采用一阶完全积分六面体实体单元 HEX8 进行模拟,该实体单元不仅能够模拟出曲率连续变化的相贯焊缝,而且可以保证分析结果的准确性和可靠性;管内混凝土则采用四面体实体单元 tetra4 进行模拟,具体如图 4 所示。

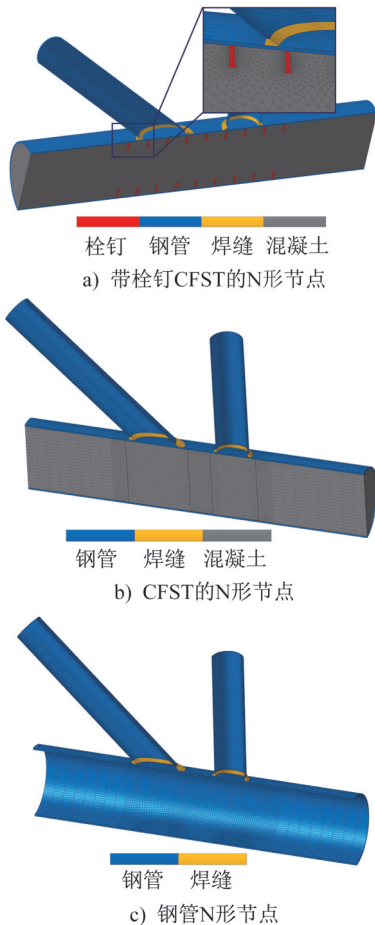


图 4 有限元模型网格划分

Fig. 4 Finite element model mesh generation

因模型的整个加载过程均处于弹性阶段,所以主管和内栓钉采用 Glue 黏结接触设置,即不考虑二者在荷载作用过程中的剥离;钢管与混凝土、内栓钉与混凝土则采用 Touch 接触设置,即基于法向应力和径向应力之间的耦合作用,模拟主管和内栓钉与管内混凝土间的黏结,考虑加载过程中主管与管内混凝土之间的剥离行为。分析模型的边界条件为主管一端固接,其余截面根据全桥杆系模型各截面内力值施加,其中主管轴向压力为 2 210 kN,支管压力为 1 458 kN,支管拉力为 961 kN。模型材料特性根据实桥的材料特性进行设置。N 形节点实体有限元分析模型如图 5 所示。

2.2 N 形节点有限元结果分析

(1) 模拟精度分析

当前国内外关于 CFST 的 N 形节点内置阵列式栓钉

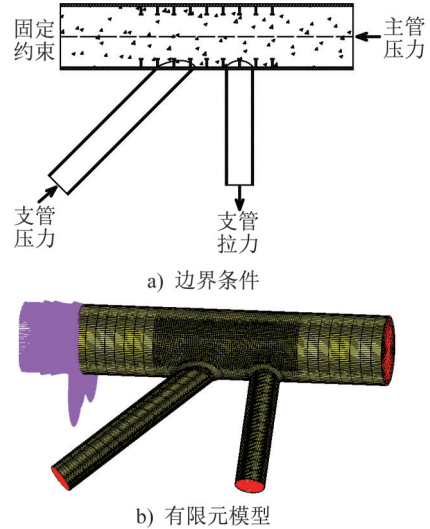


图 5 N 形节点实体有限元分析模型

Fig. 5 Solid FEA model of N-joint

的相关研究仍较为匮乏,未见有相关试验报道,故为验证本文所采用模拟方法的准确性,通过建立与布设阵列式内栓钉 CFST 的 N 形节点结构形式相似的布设阵列式内栓钉 CFST 的 K 形节点,采用相同的加载方式、边界调节和单元接触模式,并引用文献[8]中的试验结果进行对比,提取热点应力的位置为:以冠点为 0° 起点,每间隔 45° 提取一次,有限元模型和分析结果如图 6 和图 7 所示。由图可知:在主管相贯区域,热点应力最大偏差仅为 7.52%,故可以认为本文所采用的模拟方法具有良好的可靠性且精度较高。

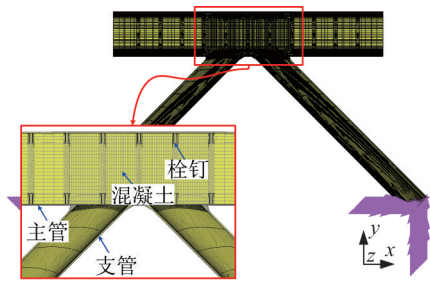


图 6 布设阵列式内栓钉 CFST 的 K 形节点模型

Fig. 6 Model of CSFT K-joints with array-arranged internal studs

(2) 热点应力分布情况

由 2.1 节中所提出的有限元分析模型可知,有限元分析与实际结构受力之间存在一定的区别,主要在于主管端固接。实际桥梁的拱肋为连续结构,主管端沿桥纵向不存在固接的情况,但基于节点分析的需求,将主管一端设置为固接,所以在分析过程中易在固接端形成应力集中现象,但因 N 形节点的疲劳破坏往往发生在相贯焊缝区域中,故本文的分析重点为关注相贯区域的受力性能,

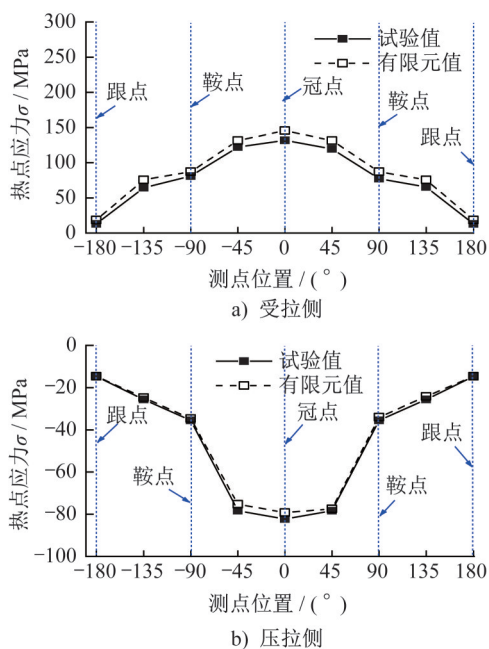


图7 有限元模拟精度分析

Fig. 7 Finite element simulation accuracy analysis

忽略固接端区域的应力分布。

N形节点相贯区域热点应力分布情况如图8所示,由图可知:对于钢管、CFST及带内置栓钉CFST的N形节点,相贯区域最大热点应力分布的位置存在一定的区别。其中钢管N形节点的最大热点应力出现在受拉支管相贯焊缝的两侧鞍点处;而CFST和带栓钉CFST的N形节点其最大热点应力则出现在受压支管的跟点处,三者的最大热点应力分别为440.1 MPa、151.7 MPa和134.8 MPa。可以发现:未填充混凝土的钢管N形节点在实际荷载的作用下,受拉支管、主管侧相贯区域的热点应力已超过钢管的屈服强度,处于不安全状态;填充混凝土后,受拉支管侧相贯区域的刚度明显提高,最大热点应力降幅达到了190%。对于管内设置栓钉后,CFST的N形节点其最大热点应力的出现部位没有发生改变,仍然位于受压支管相贯焊缝主管侧的跟点处,但热点应力值有明显的下降,降幅达到了12.5%。

综上可知,管内填充混凝土对N形节点的径向刚度有明显的提高,使得钢管在同样外荷载的作用下能够满足正常使用需求;管内设置栓钉有利于缓解CFST的N形节点应力集中的情况,降低受压支管、主管侧相贯区域跟点处的热点应力值。

(3) 主管管壁变形情况

为近一步揭示不同加强措施对于N形节点受力性能的影响,本节开展N形节点相贯焊缝区域变形值的分析,提取N形节点主管侧冠点、鞍点及跟点位置的竖向变形值,各变形值关注点的编号如图9所示,N形节点整体坐

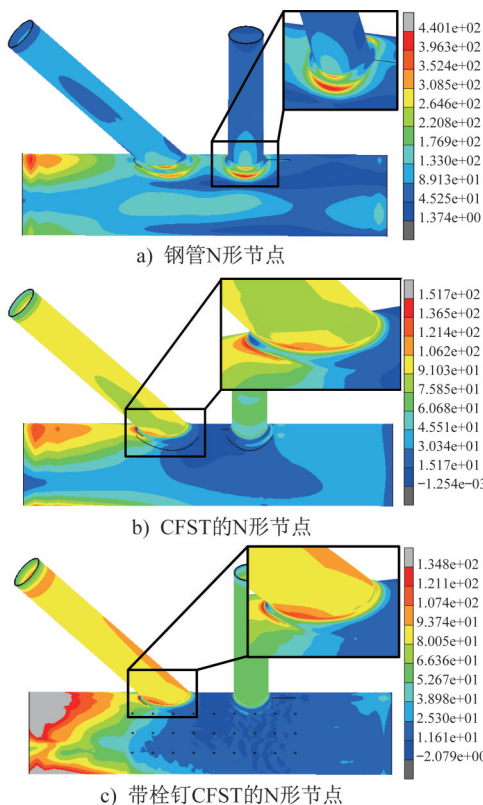


图8 N形节点相贯区域热点应力分布(单位:MPa)

Fig. 8 Hot-spot stress distribution in the intersection region of N-joint (unit: MPa)

标系示意如图10所示,其中竖向变形为整体坐标系下N形节点y轴方向的变形。

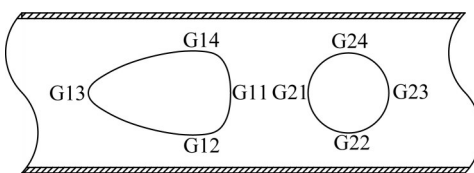


图9 变形值提取位置编号

Fig. 9 Deformation value extraction location numbering

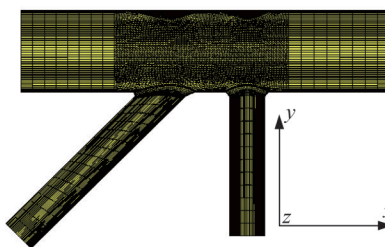


图10 N形节点整体坐标系示意

Fig. 10 Schematic of the overall coordinate system of the N-joint

不同加强措施下N形节点相贯焊缝区域的竖向变形情况如图11所示。由图可知:同侧相贯焊缝区域主管变

形趋势基本一致,且在同一侧、同一荷载工况下,钢管N形节点相贯焊缝区域的竖向变形均明显大于CFST和内置栓钉CFST的N形节点其竖向变形值,而CFST的N形节点变形值又稍大于内置栓钉CFST的N形节点变形值。对于受压支管侧,从冠点G11—鞍点G12—跟点G13的变形值呈逐渐减小的趋势,鞍点G12与G14的变形值相等,变形差值幅度最大点位于冠点G11处,钢管N形节点与CFST和内置栓钉CFST的N形节点其最大差值幅度分别达到172%和272%,CFST的N形节点与内置栓钉CFST的N形节点其变形值最大差值幅度为37%;对于受拉支管侧,从冠点G21—鞍点G22—冠点G23的变形值呈逐渐增大的趋势,鞍点G22与G24的变形值相等,变形差值幅度最大点位于冠点G23处,钢管N形节点与CFST和内置栓钉CFST的N形节点最大差值幅度分别达到114%%和180%,CFST的N形节点与内置栓钉CFST的N形节点变形值最大差值幅度为31%。

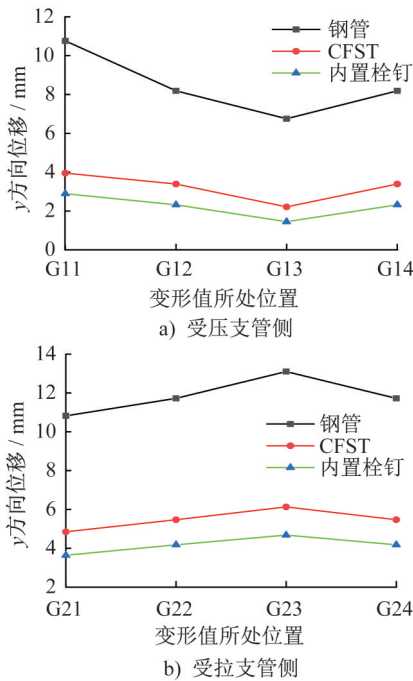


图 11 不同加强措施对N形节点相贯焊缝主管侧竖向变形对比

Fig. 11 Comparison of vertical deformation on the chord of N-joint coherent weld under different reinforcement measures

综上所述,本研究构建的有限元模型在分析过程中沿主管轴线呈现对称受力特征,边界条件布置合理,整体受力状态与工程实际相符。从变形差值幅度可知,内填混凝土对N形节点相贯焊缝区域整体的刚度提升有明显效果;各变形值关注点变形情况基本一致。这与热点应力分布规律并不相同,钢管N形节点热点应力出现在受拉支管的鞍点侧,而内填混凝土后N形节点的热点应力

则出现在了受压支管侧跟点处,由此可以说明:钢管竖向刚度并非影响节点热点应力分布的主要因素,而管内填充混凝土才是引发钢管N形节点热点应力分布产生变化的关键因素。同时,由竖向最大变形的分布位置可以发现,无论是受拉支管侧还是受压支管侧,均以靠近主管轴向压力施加侧的关注点(G11、G23)变形幅值最大,说明本文开展的N形节点疲劳性能分析主要由主管轴向压力主导。

3 不同加强措施对N形节点疲劳性能的影响分析

3.1 疲劳性能差异机理分析

基于N形节点竖向变形,讨论钢管N形节点与CFST的N形节点疲劳性能之间的差异。图12为两种不同N形节点在同一外荷载作用下的变形切片示意图,切片图为MSC.MARC软件自带切片功能获得。由图12a)可知:当主管内未填充混凝土时,主管截面会被挤压成椭圆形截面,且受压支管侧截面变形明显大于受拉支管侧截面变形,受拉支管侧8-8截面(鞍点)位置下方出现了明显的局部凸起,这是因截面刚度不足,在该截面处形成的应力集中无法得到有效的传递和缓解,因此在此处出现了明显的应力屈服现象;而由图12b)可知:当主管内填充混凝土后,CFST的N形节点整体刚度有明显提升,主管各截面切片图未见有明显的挤压变形,且本文讨论的N形节点所受外荷载以受压为主,故各截面也未出现因受拉而凸起的现象,且CFST的N形节点其整体变形更加均匀,所以在主管轴向压力的主导作用下,受压支管跟点处因承受较大压力而出现应力集中现象,故热点应力出现在CFST的N形节点受压支管的跟点处;由图12c)可知:带栓钉CFST的N形节点整体变形与CFST整体变形基本一致,各个切片截面均未发生明显变形,无法通过变形切片对比二者之间受力机理的区别。

主管内填充混凝土后,N形节点钢管与管内混凝土之间的接触状态如图13所示,图中“1”表示钢管与混凝土为接触状态,“0”表示钢管与混凝土为分离状态。由图可知:在相贯焊缝区域中,带栓钉CFST的N形节点因栓钉的存在,其钢管与管内混凝土的接触状态明显优于无螺钉CFST的N形节点的接触状态,使得管内混凝土能够更加充分为钢管提供径向的支撑力,进一步提高N形节点的刚度,缓解受压支管跟点处应力集中的现象,降低跟点处热点应力值。

综上所述,内填混凝土这一加强措施对于N形节点整体刚度的提升具有明显的效果,有效限制了主管的径向变形,使得N形节点整体变形更加协调稳定,较好地缓解了主管因刚度不足而产生的应力集中现象。内置栓钉

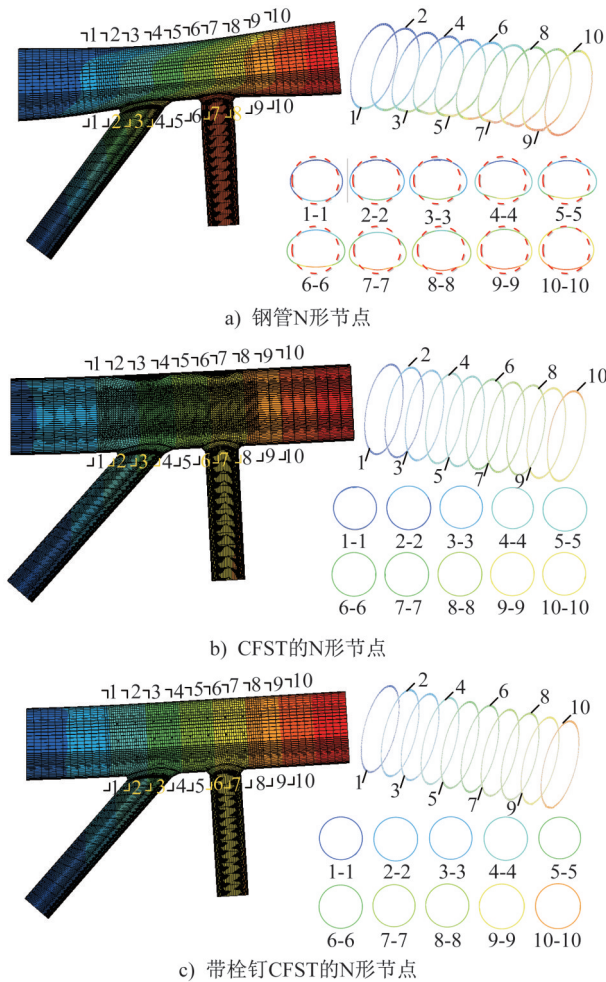


图12 N形节点变形切片示意

Fig. 12 Schematic of N-joint deformation slice

能够使得混凝土与钢管更好的共同受力,从而缓解受压支管侧跟点承受的主管轴向压力,降低钢管的热点应力值。因此,不同加强措施下N形节点疲劳性能优劣排序为:钢管N形节点<CFST的N形节点<带栓钉CFST的N形节点。

3.2 带栓钉CFST的N形节点优化分析

由3.1节分析可知,带栓钉+内填混凝土为N形节点加强措施最优组合,故本节针对带栓钉CFST的N形节点,选取栓钉布置长度、布置间距及直径为关键变量,开展该类节点的构造优化分析,以明确最优参数组合。分析参数为:栓钉布置长度分析参数如图14所示,其中栓钉长度布置率 τ 为栓钉布置长度与主管长度的比值;栓钉间距布置分析参数如图15所示,栓钉间距布置率 ξ 为栓钉间距与主管长度的比值;栓钉直径与主管直径的比值记为直径变化率 β ,则栓钉直径为18、20、...、26 mm所对应 β 值为0.018、0.020、...、0.026;栓钉长度与主管直径的比值记为长度变化率 γ ,则栓钉长度为110、120、...、150 mm所对应 β 值为0.11、0.12、...、0.15。

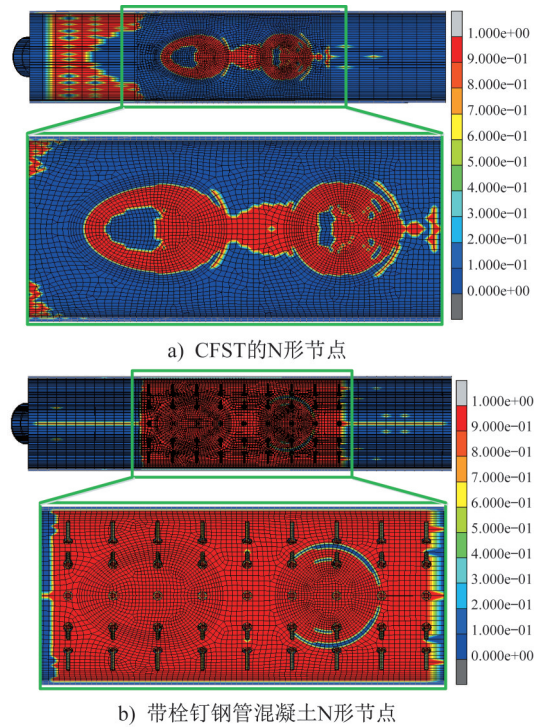


图13 N形节点钢管与管内混凝土接触状态示意(单位:MPa)

Fig. 13 Schematic illustration of the contact state between the chord and the internal concrete of N-joint (unit: MPa)

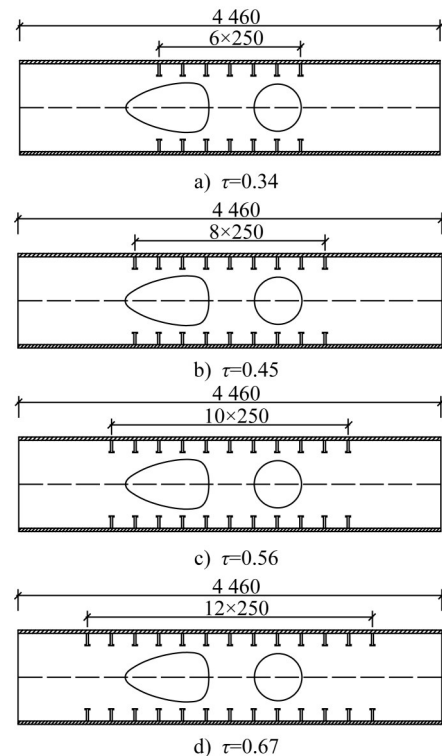


图14 栓钉布置长度参数分析示意(单位:mm)

Fig. 14 Schematic of the analysis parameter for the length of the stud arrangement (unit: mm)

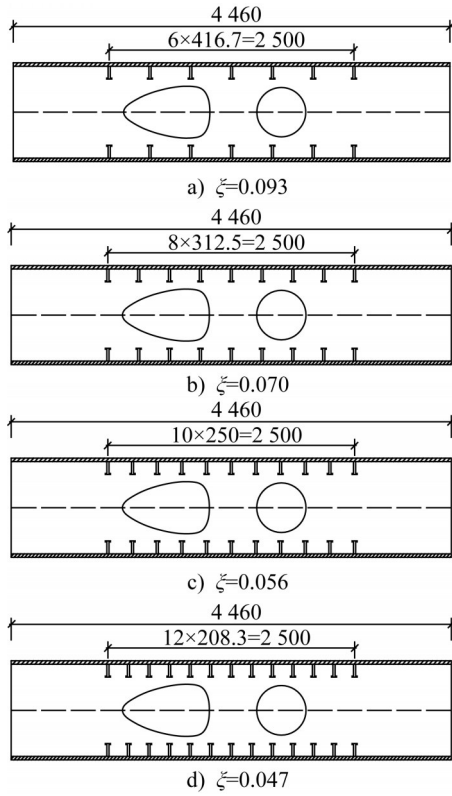


图 15 栓钉布置间距参数分析示意(单位: mm)
 Fig. 15 Schematic of the analysis parameter for the spacing of the stud arrangement (unit: mm)

不同栓钉参数分析结果如图 15 所示, 栓钉长度布置率 τ 和栓钉长度变化率 γ 对 N 形节点热点应力值的影响较小, 而栓钉间距布置率 ξ 和栓钉直径变化率 β 对 N 形节点热点应力值的影响较明显。由图 16a) 可知, 随栓钉长度布置率的增大, N 形节点热点应力值呈逐渐减小的趋势, 但降幅有限, 综合材料用量经济性、施工操作便捷性, 及文献[25]“节点中心截面两侧各约 2.7 倍主管直径范围内布置栓钉”的建议, 最终确定栓钉长度布置率 τ 为 0.56 时方案较合理; 由图 16b) 可知, 随栓钉间距布置率的减小, 其热点应力同步降低; 当间距布置率 $\xi < 0.056$ 时, 热点应力趋于稳定且数值基本一致, 表明栓钉间距加密至该阈值后, 其对热点应力的改善作用已不明显; 由图 16c) 可知, 随栓钉直径的增大, N 形节点热点应力值呈逐渐减小的趋势, 但直径变化率 β 增大至 0.026 后, 栓钉直径对热点应力值几乎没有影响, 故认为栓钉直径变化率取 0.026 较为合理; 由图 16d) 可知, 随栓钉长度的增大, N 形节点的热点应力值呈逐渐减小的趋势, 但栓钉长度变化率增大至 0.13 后, 栓钉长度对热点应力值几乎没有影响, 故认为栓钉长度变化率取 0.13 较为合理。

综上所述, 对于带栓钉 CFST 的 N 形节点, 栓钉布置较为合理的方案为: 栓钉长度布置率 τ 取 0.56, 栓钉间距布置率 ξ 取 0.056, 栓钉直径变化率 β 取 0.026, 栓钉长度变化率 γ 取 0.13。

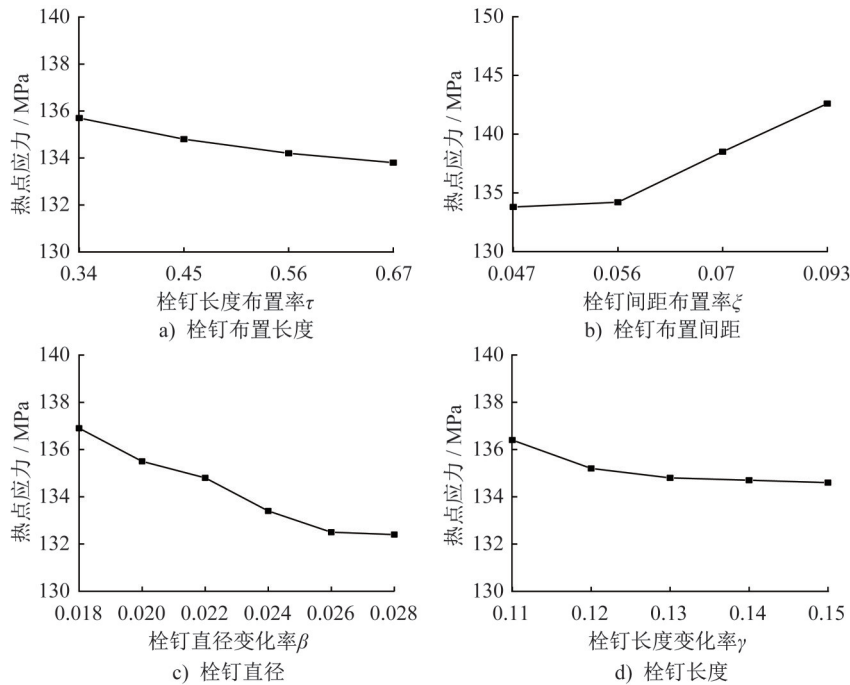


图 16 不同栓钉参数分析结果
 Fig. 16 Analysis results under different stud parameters

4 结论

(1) 在疲劳车辆荷载的作用下, 四跨下承式 CFST

桁式拱桥的最不利节点出现在中跨拱肋靠近跨中拱脚的节点处; 将布设阵列式内栓钉 CFST 的 K 形节点试验和

有限元结果进行对比分析,得到模型最大热点应力的偏差为7.52%,本文采用的有限元分析方法具有良好的可靠性且模拟精度较高。

(2) 内填混凝土加强措施有效限制了主管径向的变形,使得N形节点整体变形更加协调稳定,较好地缓解了主管因刚度不足而产生的应力集中现象。

(3) 内置栓钉能够使混凝土与钢管更好地共同受力,从而缓解受压支管侧跟点承受的主管轴向压力,降低钢管的热点应力值。采用内栓钉加强CFST的N形节点的疲劳性能为最优措施。

(4) 内置栓钉CFST的N形节点其栓钉合理布置方案为:栓钉长度布置率 τ 取0.56,栓钉间距布置率 ξ 取0.056,栓钉直径变化率取 β 取0.026,栓钉长度变化率 γ 取0.13。

参考文献:

- [1] 陈宝春,刘君平.世界拱桥建设与技术发展综述[J].交通运输工程学报,2020,20(1):27-41.DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.01.002.
CHEN Baochun, LIU Junping. Review of construction and technology development of arch bridges in the world[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(1): 27-41. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.01.002. (in Chinese)
- [2] 陈宝春,韦建刚,周俊,等.我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望[J].土木工程学报,2017,50(6):50-61.DOI:10.15951/j.tmgxcb.2017.06.006.
CHEN Baochun, WEI Jiangan, ZHOU Jun, et al. Application of concrete-filled steel tube arch bridges in China: Current status and prospects[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(6): 50-61. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2017.06.006. (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.钢管混凝土拱桥技术规范:GB 50923—2013[S].北京:中国计划出版社,2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Technical Code for Concrete-Filled Steel Tube Arch Bridges: GB 50923—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese)
- [4] 中国工程建设标准化协会.钢管结构技术规程:CECS 280—2010[S].北京:中国计划出版社,2010.
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Specification for Structures with Steel Hollow Sections: CECS 280—2010[S]. Beijing: China Planning Press, 2010. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.钢结构设计标准:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Design of Steel Structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [6] SHAO Y B. Geometrical effect on the stress distribution along weld toe for tubular T- and K-joints under axial loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(10): 1351-1360. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.12.005.
- [7] 陈康明,黄汉辉,吴庆雄,等.钢管混凝土K形节点应力集中系数计算方法[J].土木工程学报,2022,55(12):94-104. DOI:10.15951/j.tmgxcb.21111118.
CHEN Kangming, HUANG Hanhui, WU Qingxiong, et al. Calculation method of stress concentration factor for CFST K-joint[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(12): 94-104. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.21111118. (in Chinese)
- [8] 吴庆雄,郑樵风,陈康明,等.阵列式布设内栓钉的钢管混凝土K型节点足尺模型疲劳性能研究[J].土木工程学报,2022,55(2):31-49,72. DOI:10.15951/j.tmgxcb.2022.02.011.
WU Qingxiong, ZHENG Qiaofeng, CHEN Kangming, et al. Study on fatigue performance of full-scale model of concrete-filled steel tubular K-joints with array-aligned internal studs[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(2): 31-49, 72. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2022.02.011. (in Chinese)
- [9] 陈康明,黄汉辉,吴庆雄,等.基于钢管K型节点刚度的应力集中系数计算方法[J].建筑结构学报,2020,41(4):42-50,118. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.0192.
CHEN Kangming, HUANG Hanhui, WU Qingxiong, et al. Stress concentration factor calculating method based on circular hollow section K-joint stiffness[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(4): 42-50, 118. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0192. (in Chinese)
- [10] 王博,白国良,代慧娟,等.低周反复荷载下强梁弱柱型钢混凝土变柱T型节点力学性能研究[J].土木工程学报,2014,47(3):47-58. DOI:10.15951/j.tmgxcb.2014.03.010.
WANG Bo, BAI Guoliang, DAI Huijuan, et al. Study on mechanic performance of T-type strong-beam weak-column variable-column SRC joints under low-cyclic reversed loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(3): 47-58. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2014.03.010. (in Chinese)
- [11] CARPINTERI A, BRIGHENTI R, HUTH H J, et al. Fatigue growth of a surface crack in a welded T-joint[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(1): 59-69. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2004.05.007.
- [12] 史庆轩,王峰,赵锐锐,等.斜交网格X型节点轴向往复荷载作用下的性能研究[J].工程力学,2017,34(8):60-68. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.01.0036.
SHI Qingxuan, WANG Feng, ZHAO Ruirui, et al. Research on the axial performance of the x-joint in oblique grid structures

- subject to reciprocating loads[J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(8): 60-68. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.01.0036. (in Chinese)
- [13] 冯然, 完海鹰, 宋满荣, 等. 冷弯不锈钢 X 型矩形管节点试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(8): 32-41. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.08.005.
FENG Ran, WAN Haiying, SONG Manrong, et al. Tests of cold-formed stainless steel rectangular hollow section tubular X-joints[J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(8): 32-41. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.08.005. (in Chinese)
- [14] 李自林, 吴亮秦, 朱斌, 等. N 型圆钢管相贯节点力学性能的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(7): 48-54. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2008.07.008.
LI Zilin, WU Liangqin, ZHU Bin, et al. Experimental study of the static behavior of tubular N-joints[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(7): 48-54. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-131X.2008.07.008. (in Chinese)
- [15] 李自林, 吴亮秦, 朱斌, 等. 不同加强措施下 N 型圆钢管相贯节点力学性能的试验比较[J]. *工程力学*, 2008, 25(11): 179-185.
LI Zilin, WU Liangqin, ZHU Bin, et al. Experimental comparison of static behavior of tubular N-joints reinforced in different ways[J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(11): 179-185. (in Chinese)
- [16] 尹越, 白林佳, 韩庆华. N 型圆钢管相贯节点滞回性能有限元数值分析[J]. *天津大学学报*, 2009, 42(5): 413-418. DOI: 10.3969/j.issn.0493-2137.2009.05.007.
YIN Yue, BAI Linjia, HAN Qinghua. Numerical analysis on hysteretic behavior of unstiffened tubular N-joints by finite element method[J]. *Journal of Tianjin University*, 2009, 42(5): 413-418. DOI: 10.3969/j.issn. 0493-2137.2009.05.007. (in Chinese)
- [17] 陈誉, 刘飞飞. 正对称 Pratt 桁架直腹杆受压大偏心 N 型圆钢管节点静力性能实验研究[J]. *工程力学*, 2011, 28(11): 170-177.
CHEN Yu, LIU Feifei. Experimental research on static behavior of big eccentric circular hollow section N-joints with vertical brace under compression in symmetrical Pratt truss [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(11): 170-177. (in Chinese)
- [18] FUNG T C, SOH C K, GHO W M, et al. Ultimate capacity of completely overlapped tubular joints I. An experimental investigation[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2001, 57(8): 855-880. DOI: 10.1016/S0143-974X(01)00013-X.
- [19] GHO W M, YANG Y, GAO F. Failure mechanisms of tubular CHS joints with complete overlap of braces[J]. *Thin-Walled Structures*, 2006, 44(6): 655-666. DOI: 10.1016/j.tws.2006.05.007.
- [20] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢结构桥梁设计规范: JTG D64—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for Design of Highway Steel Bridge: JTG D64—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)
- [21] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. General Specifications for Design of Highway Bridges and Culverts: JTG D60—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)
- [22] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(2): 1-97. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.02.001.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2021 [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(2): 1-97. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.02.001. (in Chinese)
- [23] 谢肖礼, 彭文立, 秦荣. 圣维南原理在钢管混凝土拱桥分析中的应用[J]. *中国公路学报*, 2001, 14(2): 33-35. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2001.02.009.
XIE Xiaoli, PENG Wenli, QIN Rong. Application of SAINT-VENANT principle in analysis of CFST arch bridge [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2001, 14(2): 33-35. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2001.02.009. (in Chinese)
- [24] American Petroleum Institute. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms Nineteenth Edition: API RP 2A [S]. Washington: American Petroleum Institute, 1991.
- [25] 刘君平, 陈津凯, 陈宝春. 钢管混凝土桁肋内栓钉相贯节点受力行为试验研究[J]. *工程力学*, 2017, 34(9): 150-157. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.05.0336.
LIU Junping, CHEN Jinkai, CHEN Baochun. Experimental studies on load-transferring mechanism of cfst directly-welded k-joints with studs [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(9): 150-157. DOI: 10.6052/j.issn. 1000-4750.2016.05.0336. (in Chinese)