

引用本文:王 琨,刘永健,马印平. 基于效率系数的组合钢桁梁优化设计方法[J]. 建筑科学与工程学报,2023,40(2):86-96.

WANG Kun, LIU Yongjian, MA Yinping. Optimum design method of composite steel truss girder based on efficiency coefficient[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(2): 86-96.

DOI:10.19815/j.jace.2022.05036

基于效率系数的组合钢桁梁优化设计方法

王 琨¹, 刘永健¹, 马印平²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:组合钢桁梁具有桁架结构的受力特征,同时还受节点性能和板桁组合作用的影响,受力机理复杂。传统有限元优化方法无法兼顾杆件和节点,为对组合钢桁梁设计方案进行快速、准确地优化,提出了一种基于效率系数的优化设计方法。在采用杆系有限元模型进行初步分析基础上,根据结构内力分布相似的假定,以杆件和节点承载力效率系数为优化指标对构件进行优化,再将优化方案代入有限元模型进行验证。以矩形钢管混凝土组合桁梁连续梁桥既有通用图集为依托工程,进行设计方案优化。结果表明:组合钢桁梁空间效应等因素产生的弯曲应力可达组合应力的15%~42%,弯矩产生的影响不可忽略,在计算杆件效率系数时应将弯矩和轴力同时考虑在内;效率系数可直观反映组合钢桁梁构件应力状态,快速定位优化构件,还可依据杆件截面特征将优化方案细分至板件层面;所提优化设计方法可对组合钢桁梁的节点和杆件进行统筹优化,避免反复进行有限元试算,显著提高优化计算效率。

关键词:桥梁工程;组合钢桁梁;优化设计方法;效率系数

中图分类号:U441

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2023)02-0086-11

Optimum design method of composite steel truss girder based on efficiency coefficient

WANG Kun¹, LIU Yongjian¹, MA Yinping²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Composite steel truss girder has the mechanical characteristics of truss structure, but also affected by the joint performance and plate truss combination. Thus, the mechanism of the girder is complicated. The traditional finite element design method cannot optimize members and joints simultaneously. In order to optimize the design scheme of composite steel truss girder quickly and accurately, an optimization calculation method was presented. The method was based on the preliminary analysis of finite element model (FEM). Considering that the force distribution of the structure was similar, the main truss members were optimized by the bearing capacity efficiency coefficient of members and joints. Then, the optimized scheme was substituted into the finite element model for verification. Based on the existing general atlas of rectangular

收稿日期:2022-05-12

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102219310)

作者简介:王 琨(1997-),男,工学硕士研究生,E-mail:785905250@qq.com。

通信作者:刘永健(1966-),男,工学博士,教授,博士生导师,E-mail:liuyongjian@chd.edu.cn。

concrete filled steel tube continuous girder bridge, the design scheme was optimized. The results show that the bending stress caused by the spatial effect of composite steel truss girder can reach 15%-42% of the combined stress, and the influence of the bending moment cannot be ignored. So, the bending moment and axial force should be taken into account when calculating the efficiency coefficient. The efficiency coefficient can directly reflect the stress state of composite steel truss members. The method can quickly locate the optimized members and subdivide the optimization scheme to the plate level according to the section characteristics of the members. The proposed optimization design method can optimize the joints and members of composite steel truss girder, avoid repeated finite element trial calculation, and improve the optimization efficiency significantly.

Key words: bridge engineering; composite steel truss girder; optimization design method; efficient coefficient

0 引言

组合钢桁梁桥主要由钢主桁、连接系以及在其上设置的桥面板组合而成,在此基础上弦杆采用钢管混凝土结构进一步形成了钢管混凝土组合桁梁桥。组合作用包括弦杆与管内混凝土的组合作用以及桥面板与主桁之间的板桁组合作用,因此钢管混凝土组合桁梁桥可以视为具有双重组合作用的钢桁梁桥^[1]。由于可以充分发挥弦杆与管内混凝土之间的组合作用,钢管混凝土组合桁梁桥具有自重轻、力学性能和经济性优越等特点^[2-3]。同时矩形截面桥相较于圆形截面桥还具有便于施工、装配化程度高、节点传力更加可靠等特点,因此矩形钢管混凝土组合桁梁桥在工程实践中具有良好的应用前景^[4-6]。

在组合钢桁梁设计研究方面,李牧远^[7]通过有限元数值模拟的方法探究桁式腹杆组合梁的力学性能和受力规律,分析了结构参数对其受力的影响并对各设计参数进行优化分析。刘亮^[8]研究影响矩形钢管混凝土组合桁梁连续刚构桥受力性能和经济技术性能的主要影响因素,得出主桁、桥面板的优化方法。奉思东^[9]研究矩形钢管混凝土组合桁梁标准化设计,讨论了中等跨径标准化设计思路和结构杆件参数。刘彬等^[10]对中等跨径矩形钢管混凝土连续桁梁桥进行参数分析研究,从结构选型和力学性能等方面对该类型桥梁进行设计,为中国同类桥梁的设计和施工提供参考。现有组合钢桁梁设计方法大多采用有限元数值模拟的方法(后文统称传统有限元优化方法)对设计方案进行验算和优化^[3,10],确定和优化初步设计方案时需要采用有限元进行大量、反复的修改和试算,并且无法同时兼顾杆件和节点。节点设计时多采用局部有限元模型,与全桥设计时

采用的杆系模型不统一,因此优化过程复杂,杆系优化后还需再代入节点优化或验算,过程复杂且节点可能优化不到位。因此传统有限元优化方法计算成本较大,优化效率有待进一步提升。

组合钢桁梁计算方法研究方面,Han^[11]开展了数榀圆形钢管混凝土桁架试验,研究斜腹杆倾角、管内混凝土以及桥面板等参数对桁架受弯性能和破坏模式的影响。根据试验分析结果并结合现有规范,提出了组合钢桁梁抗弯承载力计算公式。该方法仅适用于纯弯的受力状态,不适用于发生节点或腹杆破坏时的抗弯承载能力计算。刘永健等^[12-16]进行了矩形钢管混凝土桁架节段力学性能试验研究和有限元数值模拟分析,提出了矩形钢管混凝土桁架抗弯承载力和变形计算方法。Tousignant等^[17-18]提出了数种计算钢桁架轴力及弯矩分布计算模型,包括铰接桁架模型、刚接桁架模型、考虑节点偏心的弦杆连续腹杆铰接模型以及考虑节点偏心的刚接模型,结果表明4种模型对轴力分布计算结果相近且精度较高,而对于弯矩分布的计算精度较低。

为快速准确地对组合桁梁承载力进行估算,马印平等^[19-22]提出了杆件和节点承载力效率系数的概念,并基于此提出了组合钢桁梁抗弯承载能力简化计算方法。该方法考虑了节点对桁架承载能力的影响,并且提出了“强节点、弱构件”的桁架设计理念。该方法尚未考虑到空间效应等因素在结构中产生的较大弯矩,计算时可能产生误差,同时采用理论方法计算超静定结构内力也较为复杂。因此该计算方法应用至实际工程时的准确性和实用性有待提升。

基于上述分析,为解决前述既有组合桁梁设计过程中尚不完善的问题,本文将效率系数的概念应用于超静定组合钢桁梁,提出了一种组合钢桁梁优

化设计方法(后文称效率系数优化设计方法)。该方法在进行有限元数值模拟的基础上,以效率系数作为指标对组合钢桁梁进行优化。相较于传统有限元优化方法,优化目标从杆件细化至板件,进一步明确优化方向。这种优化方法可以同时兼顾节点和杆件优化,保证二者力学性能和材料利用率均合理,且无需大量有限元试算,设计效率较高。

1 优化设计方法

1.1 效率系数

文献[19]基于铰接桁架模型计算得到的结构内力分布,提出了杆件效率系数的概念,其定义为荷载作用下杆件内力 N_i 与抗力 R_i 的比值,如式(1)所示。可以通过计算效率系数来判断破坏模式以及杆件之间的受力差别。

$$S_i = \frac{N_i}{R_i} \quad (1)$$

式中: S_i 为组合钢桁梁杆件效率系数,下角标 i 可取 t、w 和 b,分别代表上弦杆、腹杆和下弦杆。

文献[19]提出的杆件效率系数以铰接桁架模型结构内力分布为基础,对于静定结构的单主桁组合钢桁梁,杆件以承受轴向应力为主,此时按式(1)计算效率系数可以反映出杆件的实际受力情况。而对于实际工程,尚有较多的超静定结构为多主桁组合钢桁梁,空间效应等因素在结构中产生的弯矩较大,若仍按式(1)计算效率系数则会导致理论计算结果与实际结构受力存在偏差。为解决上述问题,本文拟采用有限元数值模拟与杆件效率系数概念相结合的方法,将弯曲应力产生的影响考虑进计算式中。最终将杆件效率系数定义为通过有限元数值模拟所得到的杆件组合应力与材料强度的比值,如式(2)所示。

$$S_i = \frac{\sigma_i}{k f_i} \quad (2)$$

式中: σ_i 为杆件组合应力; f_i 为材料强度,对于钢管取钢材设计强度; k 为强度折减系数。

节点是桁架结构中比较重要的部位,当节点弱于杆件时,节点会首先发生破坏,相反杆件则会先于节点发生破坏。文献[20]引入腹杆抗力折减系数,将节点承载力效率系数定义为节点承载力与腹杆破坏时组合桁梁承载力的比值,如式(3)所示。根据定义,节点承载力效率系数是反映节点材料利用率的指标。若该值高,则节点承载力接近腹杆破坏时的杆件极限强度,代表此时节点处的材料利用率较高。

$$\varphi_{jc} = \frac{R_j}{A_w f_y} \quad (3)$$

式中: φ_{jc} 为组合钢桁梁节点承载力效率系数; R_j 为节点承载力; A_w 为腹杆截面积。

对于截面采用空钢管的钢桁梁,节点承载力按《钢结构设计标准》进行计算;对于截面采用钢管混凝土的钢桁梁,节点承载力可采用文献[12]中提出的方法计算。

1.2 计算原则与基本假定

本文组合钢桁梁优化计算方法的基本假定为:①改变截面尺寸对桁架结构整体内力分布影响较小,可以忽略;②自重产生的结构内力大小随截面尺寸呈线性变化,其余因素产生的结构内力大小近似保持不变。根据上述两项假定,建立组合桁梁全桥杆系有限元模型并提取结构内力后,便可通过调整截面尺寸参数来近似调整杆件应力,进而调整杆件和节点承载力效率系数,达到结构优化的目的。该调整的过程可直接在 EXCEL 或其他程序中通过简单的公式编辑来实现,因此可避免每次优化方案后均需建立相应的全桥有限元模型进行反复试算,极大地减小设计过程中的计算成本。

1.3 承载力计算与参数优化

取有限元结果计算构件的效率系数,将其作为指标对组合钢桁梁的承载力进行验算。根据杆件效率系数的定义,当该值小于 1 时,杆件应力小于材料强度,此时结构承载力满足规范要求。效率系数可以反映组合钢桁梁各部位材料利用率,若某杆件效率系数显著高于其他杆件时,后者材料利用率可能低于前者,这意味着仅有部分材料可以得到发挥。为同时保证满足承载力需求以及较高的材料利用率,主桁杆件效率系数建议取 0.8~1.0。节点承载力效率系数取值越高,代表节点材料利用率越高,且该值可能大于 1。文献[21]建议节点承载力效率系数取 0.8 以上。结构设计时应同时兼顾两种效率系数,若结构计算得到较高的杆件效率系数,而节点承载力效率系数较低,代表该设计方案的组合钢桁梁可能发生节点首先达到承载能力的脆性破坏,意味着参数组合设计不符合要求。这是因为节点承载力效率系数降低后使得腹杆抗力折减系数也随之降低,反而受拉腹杆的杆件效率系数提高。因此,对组合钢桁梁设计方案进行优化的核心为寻找使两项效率系数均合理的参数组合,即两项效率系数计算结果均处于推荐取值范围内。此时结构材料可以得到充分发挥,该组合钢桁梁拥有较好的力学性能和经

济效益。

影响组合钢桁梁效率系数的因素包括材料标号、主桁高度、杆件长度和截面尺寸等,在进行设计方案优化计算之前,应对主要杆件的尺寸参数进行敏感性分析,研究不同参数对效率系数的影响程度与影响趋势。例如,组合钢桁梁腹杆壁厚可能同时影响腹杆效率系数和与主管相连的节点承载力效率系数。减小腹杆壁厚可以使该部位杆件效率系数提高,但由于腹杆变得较为薄弱致使节点更易发生破坏,节点承载力效率系数反而降低,该设计组合仍然不合理。为解决上述问题,效率系数的优化方法应对各参数进行统筹调整,从而在确保组合钢桁梁承载力满足要求的同时,保证材料利用率和经济效益也较高。以杆件和节点承载力效率系数为基础的组钢桁梁优化设计方法与传统有限元优化方法步骤对比如图 1 所示。

2 组合钢桁梁效率系数计算

2.1 有限元模拟方法

选取一矩形钢管混凝土组合桁梁桥连续刚构桥建立有限元模型,并与该桥荷载试验结果进行对比分析,以验证有限元模拟方法可靠性。该桥具体结构布置与截面尺寸等参考文献[6]。采用 MIDAS/Civil 软件建立全桥杆系有限元模型,其中主桁杆件和桥面板均采用梁单元模拟,并采用共节点的方式模拟实际全焊节点,桥面板与主桁上弦节点同样选择共节点连接。全桥有限元模型如图 2 所示。试验分别选取中跨正弯矩、边跨正弯矩以及墩顶负弯矩等加载工况。各个试验工况均按控制杆件的影响线进行加载,且每种加载工况分为多个加载步。本文选取 3 种加载工况共计 12 个加载步,实测边跨、中跨跨中挠度和控制杆件应变,与杆系有限元模型进行对比,结果如图 3 所示。挠度、应变实测值与有限元模型计算值平均相对误差分别为 17% 和 1.9%。考虑到实桥试验中桥梁震动以及挠度测量设备等因素的影响,挠度误差主要来源于实桥测量而非有限元模拟。应变数据采用误差相对较小的应变片进行测量,上述因素对应变测量的影响较小。综上所述,采用上述有限元模拟方法可以较为准确地模拟钢管混凝土组合桁梁结构受力和变形。

2.2 工程概况

本文以矩形钢管混凝土组合桁梁连续梁桥既有通用图集作为依托工程^[10,23],采用第 1.3 节所给方法计算效率系数,验算极限承载力。该依托工程结

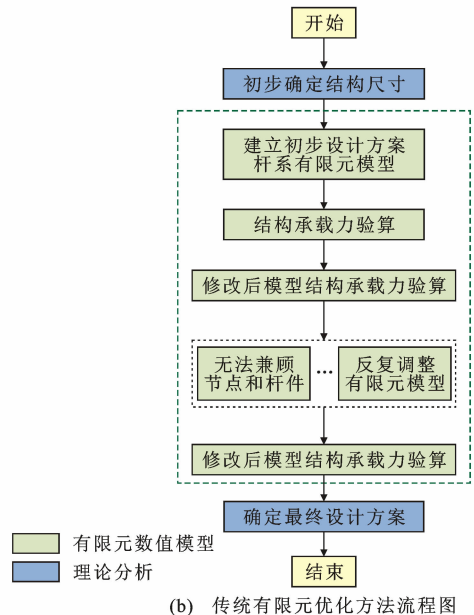
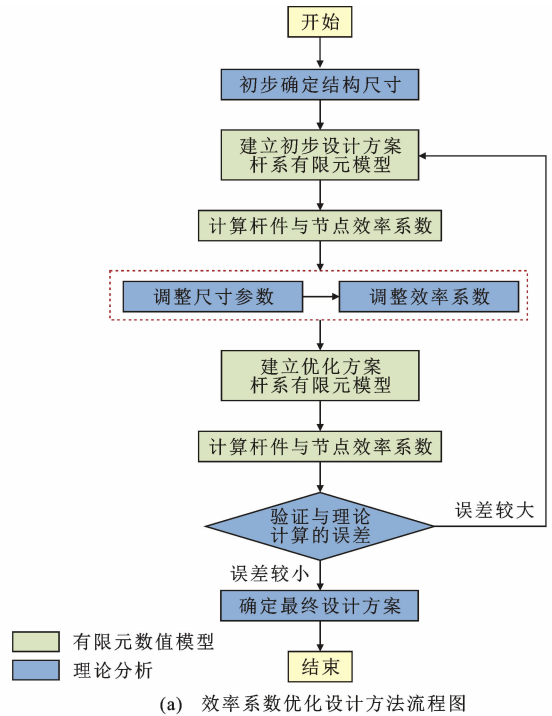


图 1 组合钢桁梁设计方法流程对比
Fig. 1 Comparison of design method flow of composite steel truss girder

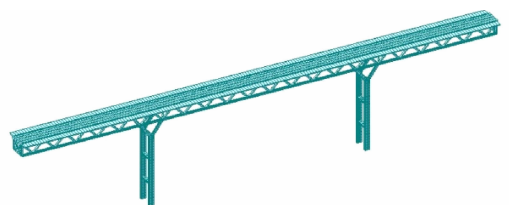


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

构形式为上承式组合钢桁梁桥,主桁采用 4×70 m

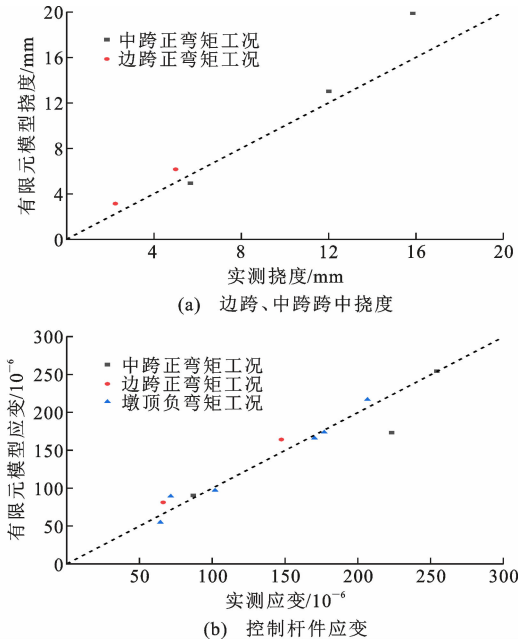


图3 挠度与应变对比

Fig. 3 Comparison of deflection and strain

等跨径设计,且采用边跨和中跨两种类型跨径设计。结构立面布置采用不带竖腹杆的三角形腹杆桁架体系(Warren桁架),主桁桁高4.72 m,高跨比为14.8,各跨主桁含14个节间,每节间长度为5 m,腹杆倾角 56.8° 。组合钢桁梁立面布置如图4所示。

考虑连续梁沿跨径方向内力的变化,组合钢桁梁设计方案采用变截面设计,横截面采用四肢型断面。预制混凝土桥面板采用搁置式,且与主桁之间通过布置于上弦杆顶板的剪力钉相连接,主桁中心距为6.4 m,在每个节点处由上、下平联将两片主桁相连。主桁上弦杆采用 $500\text{ mm}\times 500\text{ mm}\times 20/28/36\text{ mm}$ 的矩形钢管混凝土断面,负弯矩区域截面宽度增加至900 mm;下弦杆采用 $500\text{ mm}\times 600\text{ mm}\times$

$20/28/40\text{ mm}$ 的矩形钢管混凝土断面,负弯矩区域截面尺寸增加至 $900\text{ mm}\times 600\text{ mm}\times 40\text{ mm}$;腹杆采用 $500\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 16/20/22\text{ mm}$ 的矩形空钢管断面,负弯矩区域截面宽度增加至900 mm。结构采用Q420钢材,上下弦杆管内灌注C60钢纤维混凝土。桥面板采用C50混凝土,桥宽12.75 m,采用单向3车道设计。组合钢桁梁横断面布置如图5所示。

2.3 数值模拟及效率系数计算

2.3.1 全桥有限元模型建立

采用第2.1节所述钢管混凝土组合桁梁数值模拟方法建立依托工程有限元模型。结构正弯矩区采用弹性连接来模拟剪力钉;结构负弯矩区采用纵向滑动、竖向和侧向支承刚度为 $1\times 10^8\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 的弹性连接来模拟抗拔不抗剪剪力钉。弦杆内均灌注混凝土,但仅处于正弯矩区的上弦杆和负弯矩区的下弦杆承受压力从而可以发挥管内混凝土的作用,故该区域管内混凝土采用与弦杆重合的双单元建模方式进行模拟分析;负弯矩区上弦杆和正弯矩区下弦杆处于受拉状态,忽略管内混凝土的作用,采用均布荷载的方式进行模拟,仅考虑其自重。有限元模型共计2 514个节点和4 915个梁单元,三维模型如图6所示。

2.3.2 施工工况与荷载组合

为确定组合钢桁梁荷载取值,依据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[24](以下简称《通用规范》)给出的材料容重建议值,取桥面板混凝土以及管内灌注混凝土重度为 $26\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$,钢材重度为 $78.5\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ 。二期荷载包括桥面铺装及护栏等附属设施,取其重度为 $24\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ 。有限元模拟时将二期荷载作为均布荷载施加至桥面板上。组

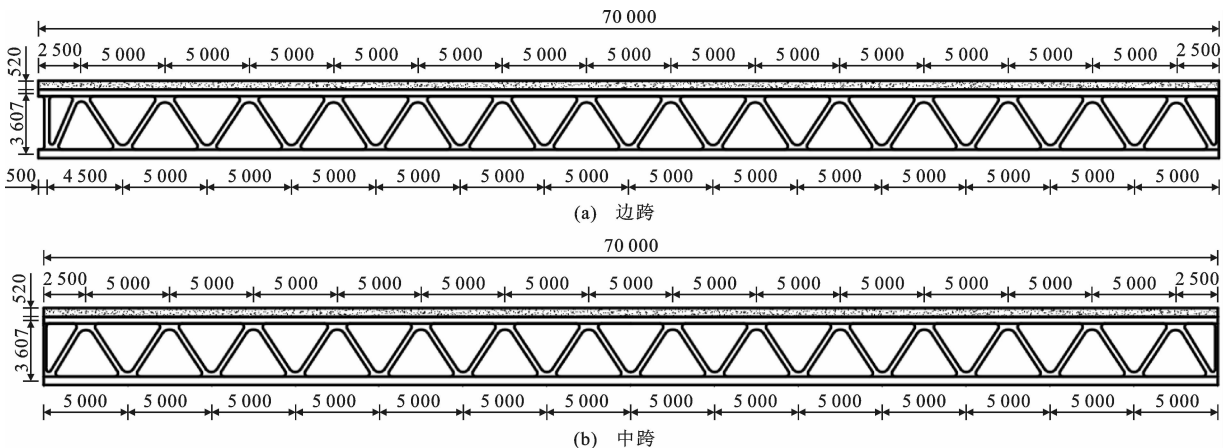


图4 主桁立面(单位:mm)

Fig. 4 Elevation of main truss (unit:mm)

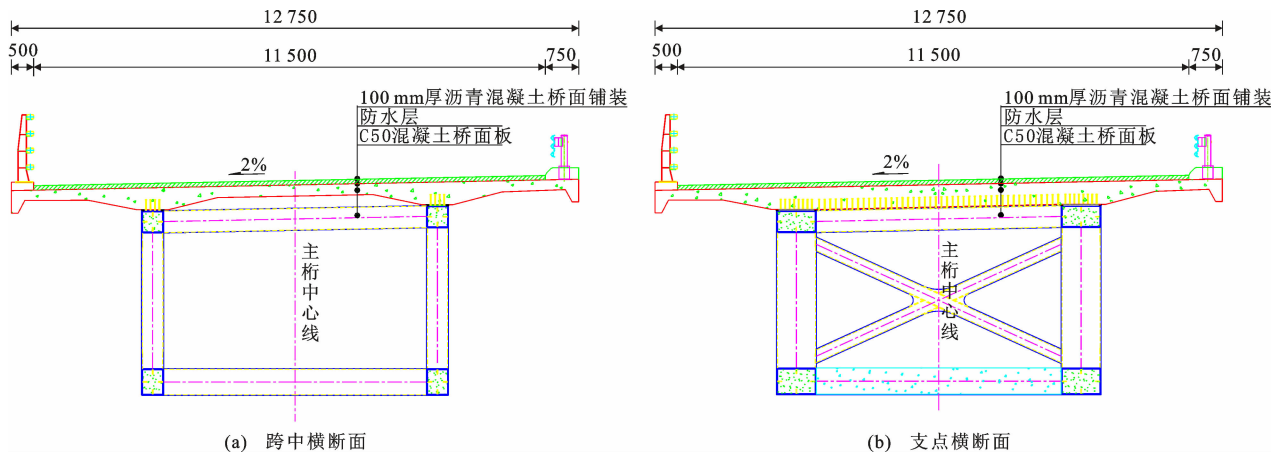


图 5 横断面布置(单位:mm)
Fig. 5 Cross section layout (unit:mm)

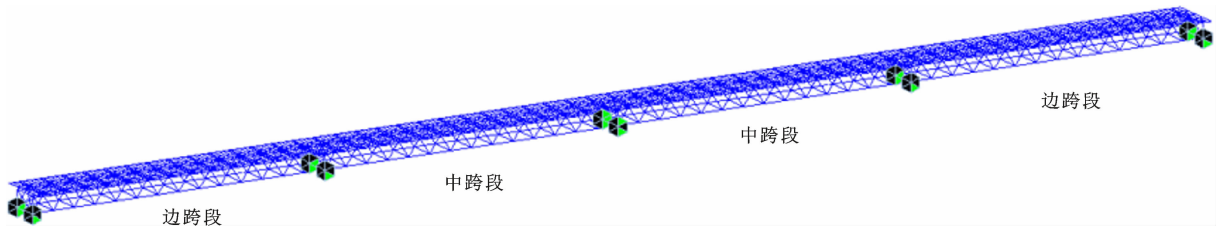


图 6 组合桁梁有限元模型

Fig. 6 Composite truss girder finite element model

合钢桁梁汽车荷载采用公路-I级荷载,桥宽 12.75 m,采用单向 3 车道设计,根据《通用规范》,汽车荷载横向车道折减系数取 0.78。主桁钢管采用 Q420 钢材,按《公路钢结构桥梁设计规范》(JTJ D64—2015)^[25](以下简称《钢桥规范》)规定,钢材设计强度取 355 MPa。《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ 3362—2018)^[26]中建议 C50 桥面板混凝土抗压设计强度取 22.4 MPa,C60 管内灌注混凝土抗压设计强度取 26.5 MPa。依据《通用规范》对组合钢桁梁结构进行荷载组合并计算其结构极限承载能力,结构重要性系数取 1.1。

2.3.3 承载能力极限状态计算

图 7 给出了组合桁梁自重作用下主桁应力。由图 7 以及连续梁正负弯矩区的受力特点可知,正负

弯矩区杆件受力相差较大,故分段计算效率系数。全桥分为承受正弯矩的边跨节段、中跨节段和承受负弯矩的墩顶节段,节段划分如图 8 所示。

组合钢桁梁弦杆内灌注了混凝土,受压弦杆效率系数计算时应考虑混凝土的影响,而受拉弦杆计算时则需忽略此影响。依据《矩形钢管混凝土结构技术规程》(CECS 159:2004)^[27]计算构件长细比,再进一步查表得到组合钢桁梁受压上弦杆、下弦杆和腹杆的稳定折减系数分别为 0.903、0.932 和 0.936。组合钢桁梁节点以 K 型节点为主,根据式(3)计算边跨、中跨和腹杆节点承载力效率系数分别为 1.00、0.643 和 0.781。计算结果表明中跨节点承载力效率系数显著小于节点承载力效率系数建议范围,即该处节点材料利用率较低,且可能发生节点

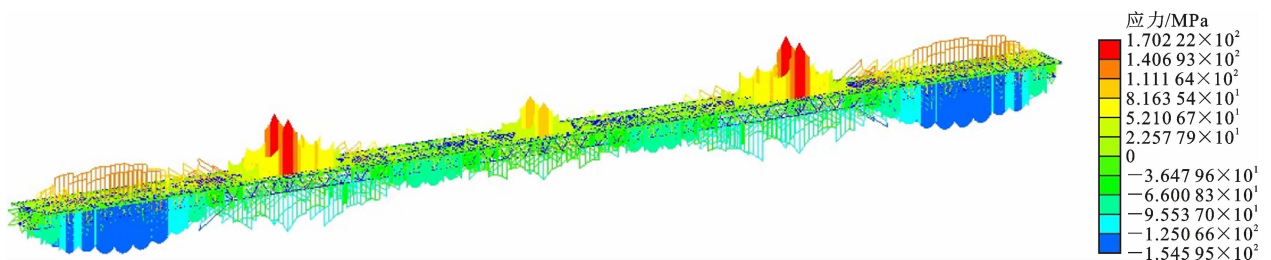


图 7 主桁应力

Fig. 7 Main truss strain

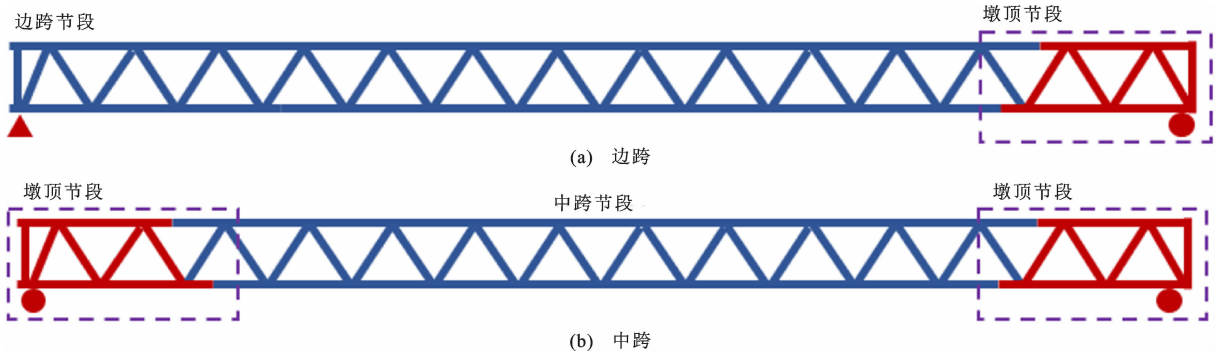


图 8 节段划分

Fig. 8 Section division

首先达到极限状态的脆性破坏。计算依托工程各节段杆件效率系数以验算结构承载力。为计算结构弯曲应力产生的影响程度,分别按杆件轴向应力和考虑弯曲应力后的组合应力计算效率系数,结果如图 9 所示。

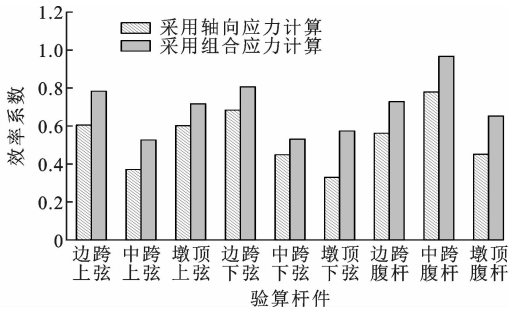


图 9 效率系数计算结果

Fig. 9 Efficiency coefficient calculation result

由图 9 可知,该设计方案主桁杆件效率系数小于 1.0,表明主桁杆件应力小于材料强度,即承载力验算符合规范要求。采用轴向应力计算得到的效率系数结果均小于采用组合应力计算得到的效率系数,其中弯曲应力占组合应力 15%~42%,表明超静定结构多主桁连续梁桥空间效应等因素产生的弯矩影响显著。采用组合应力计算杆件效率系数时,除中跨节点腹杆外其余结果均小于 0.8,且不同杆件间效率系数差别较大,表明主桁杆件材料利用率较低且受力不均匀。由第 1.3 节所述可知,腹杆的材料利用率应将腹杆和节点效率系数同时考虑在内。中跨节点承载力效率系数较低(0.643),导致腹杆抗力折减系数也随之降低,此时该节段腹杆杆件效率系数虽然较高(0.967),但实质上其材料利用率仍然较低。综上所述,该设计方案仍存在较大优化空间。

3 组合钢桁梁设计方案优化

组合钢桁梁车道宽度需满足实际通车等需求,

从而限制桥面板最小宽度,同时钢筋混凝土最小保护层厚度等构造要求限制了桥面板厚度,故桥面板最小尺寸受到限制。由于桥面板满足构造要求时便可满足其承载力要求,安全储备较高,但又因为最小尺寸受到限制,致使其优化空间较小。故本节仅对组合钢桁梁弦杆、腹杆和节点进行优化。

3.1 参数敏感性分析

在进行结构优化之前应根据杆件和节点承载力效率系数对不同节段杆件进行敏感性分析。选取组合钢桁梁负弯矩区以及原方案中应力水平较大的节段杆件尺寸作为分析对象。本文以边跨节段弦杆以及墩顶节段弦杆、腹杆板厚与宽度为例进行分析。图 10 给出了改变边跨节段下弦杆壁厚时组合钢桁梁杆件和节点承载力效率系数变化趋势,其中横坐标杆件宽厚比(2γ)为量纲一的参数。由于弦杆壁厚直接影响弦杆截面面积,故图 10 中弦杆效率系数影响最为显著且与壁厚基本呈线性关系。当下弦杆壁厚较小时,下弦节点承载力效率系数较小,且该节点作为控制节点使得腹杆抗力折减系数随之降低,进而使受拉腹杆效率系数提高。下弦杆壁厚增大至 28 mm 时,下弦节点强于上弦,此时后者作为控制节点,下弦杆壁厚不再影响腹杆效率系数。综上,提高壁厚使下弦杆承载力满足要求时效率系数恰可以维持在较高的水平,此时对于该节段可保证拥有较高的材料利用率。

对于连续梁桥,负弯矩区应力水平相较于正弯矩区更大,因此组合钢桁梁墩顶节段的杆件效率系数显著更大,故对此节段杆件分别从壁厚和宽度两个方向进行分析。图 11 分别给出了改变墩顶节段腹杆壁厚和宽度时组合钢桁梁杆件和节点承载力效率系数变化趋势。腹杆壁厚主要影响腹杆截面抗力而对节点承载力影响较小,故提高壁厚反而降低了节点承载力效率系数。对于墩顶腹杆,提高壁厚增

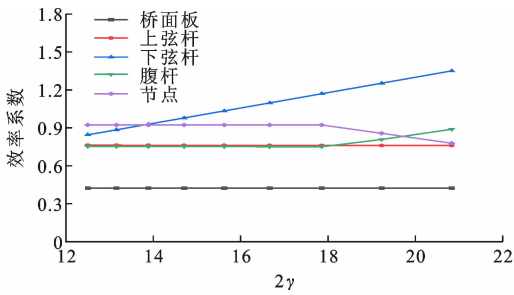
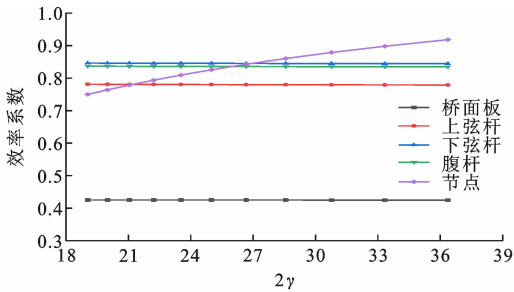
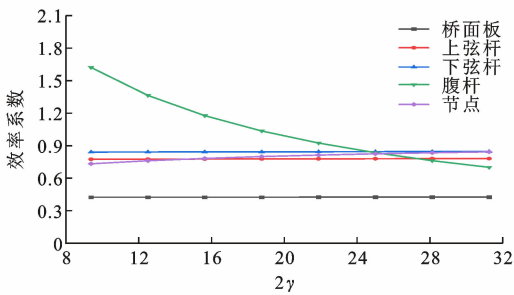


图 10 下弦杆壁厚对效率系数的影响

Fig. 10 Effect of bottom chord thickness on efficiency coefficient



(a) 改变腹杆壁厚



(b) 改变腹杆宽度

图 11 腹杆壁厚和宽度对效率系数的影响

Fig. 11 Effect of brace thickness and width on efficiency coefficient

加了杆件截面面积,但节点承载力效率系数会随之降低,二者相互抵消致使腹杆效率系数基本不发生变化。

3.2 优化方案与承载能力计算

根据参数敏感性的研究,确定组合钢桁梁优化

方案杆件尺寸如表 1 所示,相比原方案各节段尺寸均有一定调整。由上弦杆和桥面板形成的组合上弦杆的内力主要由桥面板承担,因此按照构造和施工需求将上弦杆取为扁平形设计。对于组合桁梁,桥面板分担了上弦杆荷载,故上弦杆宜设置为扁平形截面,故仅需满足构造要求即可。根据连续梁受力特点,中跨节段应力水平较低,仅考虑满足钢材加工时钢板厚度限值以及规范对钢板宽厚比的要求。优化方案为保证较大的节点承载力效率系数,仍采用等宽构造设计(支主管宽度比 $\beta=1.0$)。从经济性角度来看,组合钢桁梁优化方案结构自重为原方案的 81%,材料利用率显著提高,表明对组合钢桁梁的优化在整体材料用量降低的情况下,使其设计更加合理。

建立组合钢桁梁优化方案有限元模型,提取各节段应力水平最大的杆件结果均值计算效率系数,计算结果如图 12 所示。优化方案各节段杆件效率系数均小于 1,表明优化方案承载力计算仍然符合规范对结构承载力的要求。如前文所述,为使杆件材料利用率较高且满足承载力要求,杆件效率系数推荐取值范围为 0.8~1.0。优化方案杆件效率系数除中跨弦杆外均处于该区间内,表明优化方案较原方案设计更为合理。节点承载力效率系数取值越高,代表节点材料利用率越高,且该值可能大于 1,故节点承载力效率系数推荐范围为 0.8 以上。优化方案在保证杆件效率系数保持较高水平的前提下,提高了各节段节点承载力效率系数,不仅提高了节点处材料利用率,同时避免组合桁梁节点处出现脆性破坏。

由于优化方案各节段上下弦杆尺寸不同,将同节段更为薄弱的节点,即节点承载力效率系数更小的节点作为控制节点进行优化。原方案中跨节段未能同时兼顾优化杆件和节点部位,而优化方案在保证杆件效率系数保持较高水平的前提下提高了该部

表 1 优化方案截面参数

Table 1 Sectional parameters of optimized scheme

方案名称	节段	上弦杆尺寸			下弦杆尺寸			腹杆尺寸		
		b_0 /mm	h_0 /mm	t_0 /mm	b_0 /mm	h_0 /mm	t_0 /mm	b_1 /mm	h_1 /mm	t_1 /mm
优化方案	边跨跨中段	500	400	24	500	500	36	500	250	18
	中跨跨中段	500	400	16(22) ^①	500	500	16(22) ^①	500	250	18
	墩顶段	900	400	38	900	500	48	800	250	18
原方案	跨中段	500	500	20/28/36	500	600	20/28/36	500	300	16/20/22
	墩顶段	900	500	44	900	600	40	900	300	30(36) ^②

注:①括号内数值为弦杆截面中与腹杆交汇处钢板厚度;②括号内数值为腹杆截面中垂直与跨径方向的一侧钢板厚度; b_0 、 h_0 、 t_0 分别为弦杆宽度、高度和厚度; b_1 、 h_1 、 t_1 分别为腹杆宽度、高度和厚度。

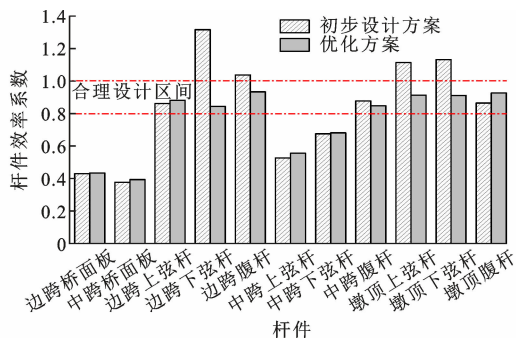


图 12 杆件效率系数计算结果

Fig. 12 Member efficiency coefficient calculation result

位节点承载力效率系数,如图 13 所示。该结果证明了本文优化设计方法可以解决传统有限元优化方法无法同时兼顾杆件和节点的问题。

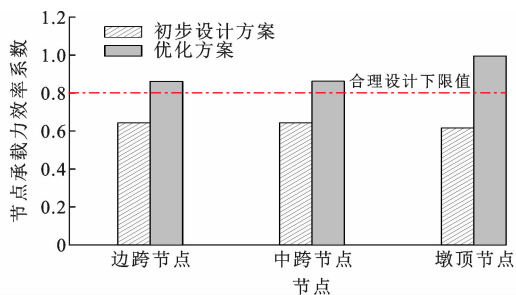


图 13 节点承载力效率系数计算结果

Fig. 13 Joint bearing capacity efficiency coefficient calculation result

理论计算结果与优化方案有限元模型结果相比,相应杆件效率系数平均相对误差为 3.6%,最大相对误差为 15.5%,表明理论计算结果与有限元模拟结果较为吻合。第 2.1 节表明空间有限元模型可以正确反映结构变形和受力状态,故计算结果与实际结构之间的误差较小。提取原方案和优化方案杆件系有限元模型仅均布荷载作用下杆件的轴力进行对比,对比结果如图 14 所示。结果表明,同一均布荷载作用下,改变杆件截面尺寸对杆件内力影响较小,可以忽略。综上所述,本文提出的组合钢桁梁优化计算方法较为合理。

根据连续梁受力分布可知,中跨节段杆件应力水平较低,通过对该节段杆件尺寸参数敏感性分析可知,为提高杆件效率系数而降低截面厚度会导致节点承载力效率系数下降。图 9 中组合钢桁梁原方案中跨节段杆件效率系数为 0.531~0.562,表明材料利用率偏低。为提高该节段杆件效率系数并确保较高的节点承载力效率系数,优化方案采用了一种矩形弦杆单侧不等厚截面设计,如图 15 所示,图 15 中 T_1 为与腹杆相邻弦杆钢板厚度, T_2 、 T_3 、 T_4 为另

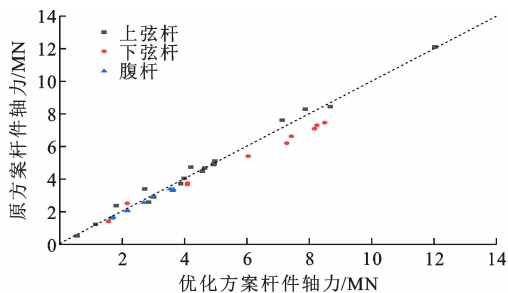


图 14 杆件轴力对比

Fig. 14 Comparison of member axial force

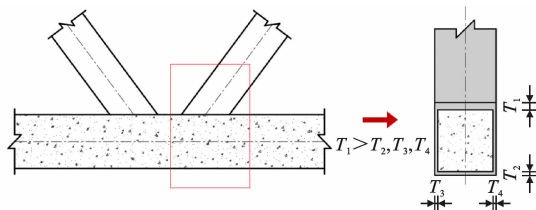


图 15 截面设计

Fig. 15 Design of cross section

外三侧钢板厚度。由于节点承载力效率系数主要影响因素包括主管壁厚,因此为提高节点承载力效率系数可单独提高与腹杆交汇处弦杆的钢板厚度。

4 结语

(1)对于超静定结构的多主桁组合钢桁梁依托工程,空间效应产生的弯曲应力可占组合应力的 15%~42%,对杆件应力状态影响不可忽略。据此本文将效率系数的概念延伸至杆件组合应力与材料强度的比值,并以此为基础对组合钢桁梁进行优化计算。

(2)效率系数优化方法可根据构件截面特征将优化目标细化至板件层面,优化目标明确。对于矩形组合钢桁梁桥,可调整与腹杆交汇的弦杆顶板或底板厚度来优化节点效率系数,调整弦杆截面其余钢板厚度来优化杆件效率系数。

(3)相较于传统有限元优化法,效率系数优化方法可以同时兼顾优化计算杆件和节点,从而保证二者都具有较高的材料利用率;无需大量有限元试算,节省大量计算成本的同时可采用迭代的方法确保计算精度。依托工程优化后的方案相较于原方案,材料用量降低 20%,而杆件效率系数基本均优化至推荐范围 0.8~1.0 之内,控制节点承载力效率系数均优化至 0.8 以上,优化后的方案材料利用率更高,设计更为合理。

参考文献:

References:

- [1] 刘永健,周绪红. 矩形钢管混凝土组合桁梁桥[M]. 北京:人民交通出版社,2021.
LIU Yongjian, ZHOU Xuhong. Composite truss bridge with concrete-filled rectangular steel tube members[M]. Beijing: China Communications Press, 2021.
- [2] 高诣民,刘永健,周绪红,等. 高性能钢管混凝土组合桁梁桥[J]. 中国公路学报,2018,31(12):174-187.
GAO Yimin, LIU Yongjian, ZHOU Xuhong, et al. High-performance CFST composite truss bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(12):174-187.
- [3] 刘彬,刘永健,杨岳华,等. PBL加劲型矩形钢管混凝土组合桁梁桥设计[J]. 桥梁建设,2019,49(5):97-102.
LIU Bin, LIU Yongjian, YANG Yuehua, et al. Design of PBL-stiffened steel truss-concrete composite girder bridge with truss made of rectangular steel tubes[J]. Bridge Construction, 2019, 49(5):97-102.
- [4] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 2版. 北京:人民交通出版社,2007.
CAI Shaohuai. Modern steel tube confined concrete structures[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [5] 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 北京:科学出版社,2000.
HAN Linhai. Concrete filled steel tube structure[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [6] 刘永健,马印平,田智娟,等. 矩形钢管混凝土组合桁梁连续刚构桥实桥试验[J]. 中国公路学报,2018,31(5):53-62.
LIU Yongjian, MA Yinping, TIAN Zhijuan, et al. Field test of rectangular concrete filled steel tubular composite truss bridge with continuous rigid system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(5):53-62.
- [7] 李牧远. 桁式腹杆组合梁桥力学分析与优化设计研究[D]. 西安:长安大学,2018.
LI Muyuan. Study on mechanical analysis and optimum design of flank-rod composite bridges[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [8] 刘亮. 矩形钢管混凝土组合桁架连续梁桥试设计研究[D]. 西安:长安大学,2013.
LIU Liang. Experimentally design and study of composite trussed continuous beam bridge with concrete-filled rectangular steel tube[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [9] 奉思东. 矩形钢管混凝土组合桁梁桥装配化施工方法及计算参数研究[D]. 西安:长安大学,2019.
FENG Sidong. Study on the assembled construction plan and calculation parameters of rectangular concrete-filled steel tubular composite truss bridge[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [10] 刘彬,刘永健,周绪红,等. 中等跨径装配式矩形钢管混凝土组合桁梁桥设计[J]. 交通运输工程学报,2017,17(4):20-31.
LIU Bin, LIU Yongjian, ZHOU Xuhong, et al. Design of mid-span fabricated RCFST composite truss bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(4):20-31.
- [11] HAN L H. Flexural behaviour of concrete filled steel tubular (CFST) chord to hollow tubular brace truss: experiments[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 109:137-151.
- [12] 刘永健. 矩形钢管混凝土桁架节点极限承载力试验与设计方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2003.
LIU Yongjian. Experiments on ultimate bearing capacity and research on design method of joints of concrete-filled rectangular steel tube truss[D]. Changsha: Hunan University, 2003.
- [13] 刘永健,周绪红,肖龙. 矩形钢管混凝土桁架受压节点承载力[J]. 建筑结构,2004,34(1):24-26.
LIU Yongjian, ZHOU Xuhong, XIAO Long. Load bearing capacity of compression joints of trusses with concrete-filled rectangular steel tube members[J]. Building Structure, 2004, 34(1):24-26.
- [14] 刘永健,周绪红,刘君平. 矩形钢管混凝土K型节点受力性能试验[J]. 建筑科学与工程学报,2007,24(2):36-42.
LIU Yongjian, ZHOU Xuhong, LIU Junping. Experiment on force performance of concrete-filled rectangular steel tube K-joints[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(2):36-42.
- [15] 刘永健,周绪红,刘君平. 矩形钢管混凝土T、Y型节点受压性能试验[J]. 长安大学学报(自然科学版),2008,28(5):48-52.
LIU Yongjian, ZHOU Xuhong, LIU Junping. Behavior of concrete filled rectangular steel tube T-joints and Y-joints under compression[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2008, 28(5):48-52.
- [16] 刘永健,周绪红,刘君平. 主管内填混凝土的矩形钢管X型节点受拉和受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2009,30(1):82-86,94.

- LIU Yongjian, ZHOU Xuhong, LIU Junping. Experimental research on rectangular steel tube X-joints with chord concrete-inside subjected to tension and bending[J]. *Journal of Building Structures*, 2009, 30(1):82-86,94.
- [17] TOUSIGNANT K, PACKER J A. Analysis of rectangular hollow section trusses[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2019, 46(3):160-175.
- [18] TOUSIGNANT K, PACKER J A. Analysis of rectangular hollow section trusses with overlapped K-connections[C]//CSCE. Proceedings of 5th International Structural Specialty Conference. London: CSCE, 2016.
- [19] 马印平, 刘永健, 龙辛, 等. 钢管混凝土组合桁梁受弯承载力简化计算方法研究[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(5):76-84.
MA Yinping, LIU Yongjian, LONG Xin, et al. Simplified calculation method for flexural strength of CFST composite truss girder[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(5):76-84.
- [20] 马印平, 刘永健, 王琨, 等. 钢管桁架节点效率系数研究[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(7):205-218.
MA Yinping, LIU Yongjian, WANG Kun, et al. Study on joint efficiency coefficient of steel tubular truss[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(7):205-218.
- [21] 马印平. 钢管混凝土组合桁梁力学性能试验与计算方法研究[D]. 西安:长安大学, 2022.
MA Yinping. Experimental investigation and calculation approaches research on mechanical behavior of concrete filled steel tubular composite truss girder[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.
- [22] MA Y P. Axial stiffness of concrete filled rectangular steel tubular (CFRST) truss joints[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 184:106820.
- [23] 王康宁. 中等跨径矩形钢管混凝土组合桁梁桥设计研究[D]. 西安:长安大学, 2019.
WANG Kangning. Design and study of medium span composite truss bridge with concrete-filled rectangular hollow section[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [24] 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
General specifications for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [25] 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.
Specifications for design of highway steel bridge: JTG D64—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [26] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG 3362—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2018.
- [27] 矩形钢管混凝土结构技术规程: CECS 159:2004[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
Technical specification for structures with concrete-filled rectangular steel tube members: CECS 159:2004[S]. Beijing: China Planning Press, 2004.