

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.03.014

拱形钢桁梁桥结构分析与构造细节设计

杨荣荣

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 钢桁架结构通常节点密集,设计复杂多样。现结合绍兴市某拱形下承式钢桁梁桥,介绍其总体布置、结构设计,并基于有限元分析理论,采用通用有限元软件 ANSYS 对该桥的活荷载计算模式、上下弦杆节点、梁端节点、横肋与下弦杆及小纵梁相交节点的构造细节设计进行计算对比分析。研究表明,整体式节点设计中节点板处竖杆腹板采用渐变断开式设计,可满足应力、屈曲稳定的要求;拱梁结合点处的应力集中范围与大小受圆弧半径、支点相对位置的影响,支点靠近拱梁结合点对结构受力有利;支撑桥面板的横肋下翼缘可与小纵梁、下弦杆采用半刚性节点,虽一定程度上会增大翼缘断开范围腹板应力,但整体应力水平较低。

关键词: 下承式钢桁架梁桥;正交异性桥面板;ANSYS;整体节点板;拱梁结合点

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)03-0053-05

0 引言

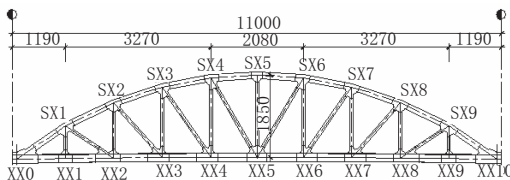
拱形钢桁梁桥将其刚劲骨架与优美的曲线外形相结合,造型上刚柔并济、相得益彰,力学性能上刚度大、稳定性和抗震性能好,因此被广泛应用于桥梁建设方案中。但钢桁结构板件较多,桥面系由横梁、横肋以及下弦杆、小纵梁组成,现场焊接工作量较大、焊接节点复杂,易在初始缺陷、应力集中等部位形成疲劳裂缝,成为影响钢结构耐久性的重要因素,从而对行人及车辆的安全造成威胁。因此对拱形钢桁梁桥的构造细节设计进行精细计算与分析显得尤为重要。

现以绍兴市某简支下承式钢桁梁桥为背景,针对上下弦杆主要节点、拱梁结合节点、横肋与下弦杆及小纵梁相交节点分别进行分析研究,为日后同类桥梁的设计提供参考与依据。

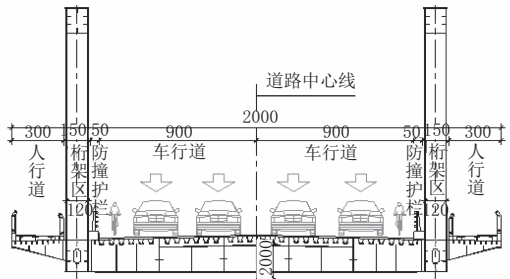
1 背景工程

该背景工程采用下承式钢桁架梁桥,跨径布置为 110 m(见图 1)。桥面系采用正交异性钢桥面板、纵横向体系,由箱型节点横梁、工字型横肋以及小纵梁组成,顶面双向 2% 横坡,底面为平坡,主纵梁梁高 1.8 m,横梁梁高 2.0 m。主桁采用带竖杆的三角形腹杆体系,节间长度 10.9 m,桁高为 7.3~18.5 m,

跨中位置高跨比为 1/5.9。两片主桁主心距为 20.5 m,不设风撑,上下弦杆均采用闭口箱型截面,腹杆均采用工字型截面。



(a)立面图



(b)横断面布置图

图 1 总体布置图(单位:cm)

2 有限元模型

图 2 为 ANSYS 全桥混合有限元模型图。

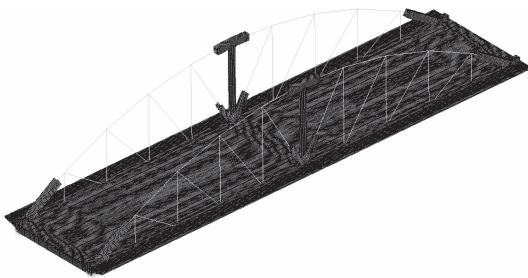


图 2 ANSYS 全桥混合有限元模型图

由于该桥结构体系复杂,为能够详细地分析该桥各部分主要构件的受力,解决杆系模型无法反映的局

收稿日期: 2023-04-07

作者简介: 杨荣荣(1990—),女,硕士,工程师,从事桥梁工程设计工作。

部应力分布状况以及杆系模型无法考虑的畸变效应、剪力滞等问题,同时为提高软件计算效率,建立 ANSYS 混合有限元模型进行分析:桥面系采用 Shell63 板壳单元模拟,腹杆及上下弦杆采用 Beam188 梁单元模拟,梁端节点以及跨中节点为结构关键位置,为精确分析同样采用 Shell63 单元模拟。

梁与板壳单元刚性连接可通过建立约束方程、MPC184 刚性梁单元、设置刚性区等方法实现。其中,刚性梁与刚性区法较为方便,MPC 法的计算精度更高、模拟真实且适用性更强。因此,本文计算模型采用 MPC184 刚性梁单元模拟。

边界条件设置为:整体简支结构体系;采用 Targe170 单元模拟支座点,Conta175 单元模拟支座范围接触面,两者之间通过自动建立约束方程实现梁端垫板范围与支座节点的协调转动变形。

3 不同活载下的总体计算

对于常规桥梁,通常仅采用杆系模型计算,而对于纵横梁式结构,桥面系各个板件的计算结果主要受刚度分配的影响,因此,有必要采用板壳模型根据各部分的真实刚度进行模拟计算。

现行《城市桥梁设计规范》(CJJ 11—2011)的规定:主桁计算采用车道荷载,桥面系横梁计算应采用车辆荷载,现行城规仅规定了单辆重车荷载,对于间距达 10~15 m 的节点横梁来说,纵向单辆重车加载是否安全有待验证,尤其是重车出现概率较大的情况,因此必须合理选择车辆荷载的计算模式。根据孙吉书、陈攀等对车辆荷载的统计数据调查与分析结果表明,一般情况下按照 1989 公路桥涵规范规定的车辆间距取值是安全的,因此本文车辆荷载采用单辆重车、重车-标准车车队以及极端堵塞车队三种方式计算分析,并与城-A 级车道荷载进行对比,其中重车-标准车车队执行 1989 汽车-超 20 级车队标准间距的规定;极端堵塞车队纵向布置 3 辆重车、前后车轴距 3 m 紧密排布(见图 3、图 4)。

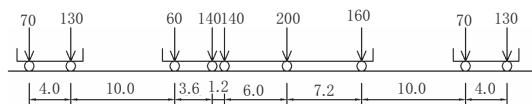


图 3 城市 A 级重车-标准车车队排布图

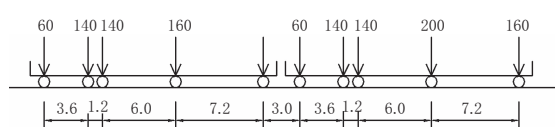


图 4 城市 A 级重车堵塞车队排布图

不同活载加载方式下应力标准值情况对比如图 5 所示。

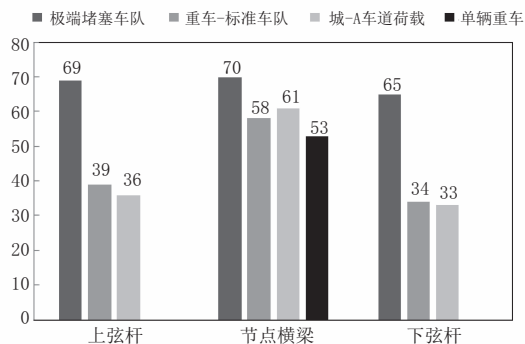


图 5 各板件不同活载下最大 Mises 应力柱状图(单位:MPa) 由此可知:

(1)重车-标准车车队与单辆重车加载工况相比,横梁最大正应力绝对值增加了 5 MPa,相对值约 9%。

(2)城-A 级车道荷载与 1989 汽车-超 20 级车队加载工况相比,各主要板件最大正应力基本持平。

(3)极端堵塞车队与 1989 汽车-超 20 级车队(城-A 级车道)加载工况相比,最大正应力相对值分别增加了 77%(上弦杆)、21%(中横梁)、91%(下弦杆)。

(4)将梁格体系与板壳模型计算结果进行对比发现,板壳模型计算结果约为梁格计算结果的 80%~90%,梁格计算较为保守。

综上所述,对于钢桁架桥梁各主要板件来说,城-A 级车道荷载与 1989 汽车-超 20 级车队标准值效应基本相当;对于节点横梁来说,单辆重车加载与汽车-超 20 车队相比略不安全;在极端堵塞情况下,各板件应力提高幅度较大,尤其上下弦杆,因此,各板件设计应结合实际情况具体分析。

4 节点细部分析

钢桁架节点设计复杂多样,破坏成因通常受多种因素综合作用,因此,必须对各个位置构造进行精细分析。

本文采用 ANSYS 软件对全桥进行精确模拟,对不同节点细部设计下的计算结果进行对比分析。以下节点设计均基于极端堵塞交通状况下的基本组合($1.2 \times$ 恒载+ $1.4 \times$ 活载+ $1.05 \times$ 温度效应+ $1.05 \times$ 风荷载)受力,应力结果均以 MPa 为单位表示。

4.1 跨中 SX5、XX5 节点分析

汽车荷载作用在桥面系上,通过横梁传递给下弦杆,进而使得整个桁架参与受力。在这其中节点板起着关键性的作用。传统意义上,钢桥为保证各个杆件传力连续以及避免钢板承受单侧的面外荷载,通常各个节点位置的板件都以连续通过的形式进行设

计,如图6所示。但随着工程实践的应用,钢结构由于焊缝集中、焊缝质量缺陷、制造误差等因素暴露出各种问题,疲劳破坏甚至成为了主要控制因素。因此钢结构细节设计尤为重要,传统设计中,腹杆腹板与弦杆内隔板一一对应,造成内隔板间距约500~1 000 mm,且均与弦杆顶底板、节点板采用熔透焊接,焊缝较密,施焊空间有限导致焊接质量难以保证,从而不可避免地形成薄弱点。该桥采用整体式节点板,主要通过节点板传力,为避免不必要的焊接造成不利的影响,考虑腹杆腹板在节点板处断开。以跨中节点为例:斜腹杆腹板与下弦杆顶板之间断开100 mm,取消竖杆位置的下弦杆内隔板,采用竖向加劲形式过渡,保留节点横梁位置对应下弦杆内隔板(见图6、图7)。

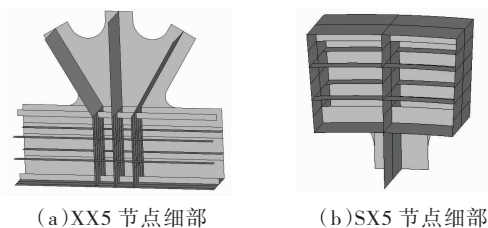


图6 传统节点设计下的ANSYS模型

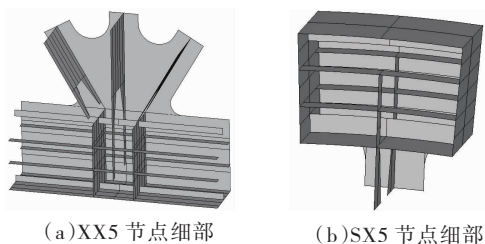


图7 优化后节点设计下的ANSYS模型

4.1.1 静力分析

根据《公路钢结构桥梁设计规范》,钢桁架节点板受力主要关注撕裂应力、水平截面剪应力和竖直截面正应力,主要计算结果如下(见图8、图9),其中剪应力较小不在此列出。

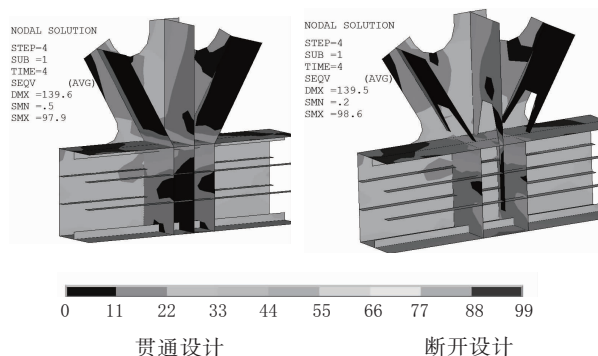


图8 XX5节点整体Mises应力图示(贯通与断开设计)

从图8、图9可以看出,腹杆的腹板断开后,下弦杆顶板应力水平明显降低,节点板主拉应力水平、变

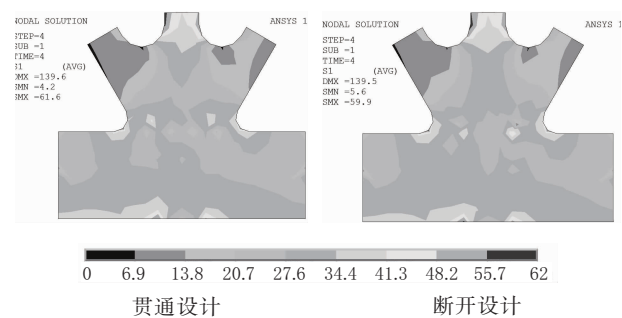


图9 XX5节点板主拉应力图示(贯通与断开设计)

形与原设计方案相比几乎不变,应力最大值均出现在横隔板与节点板底缘交接处、圆弧处以及节点板竖杆顶端,节点板优化后主要应力均满足现钢的要求。节点板与下弦杆交界处的板件内力计算轴力增大20%,横桥向弯矩增大3.5%,可以看出方案改变前后,节点板承担了一部分腹杆的轴力,但对弯矩影响不大(见图10、图11)。

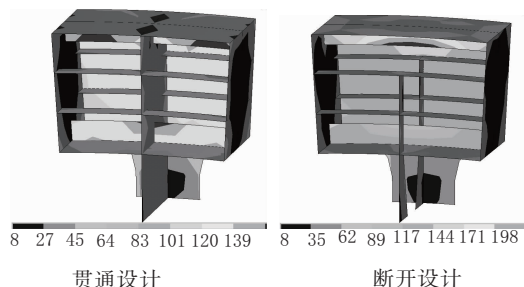


图10 SX5节点整体Mises应力图示(贯通与断开设计)

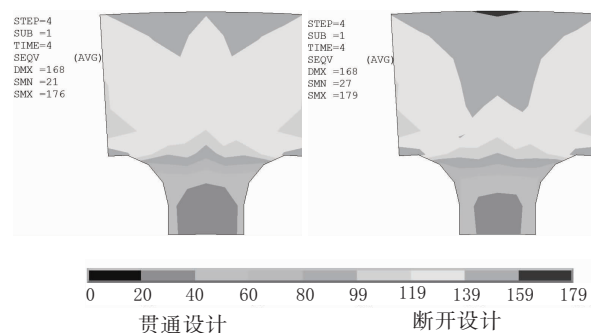


图11 SX5节点板主拉应力图示(贯通与断开设计)

上弦杆以受压为主,节点板处从上往下由压应力向拉应力过渡,优化前后主要板件应力基本持平,节点板受拉范围增大,节点板主要应力均满足设计规范要求,但顶板加劲由于缺少隔板支撑,应力增大较多接近设计强度,导致可能出现加劲肋先于母板达到强度破坏的情况,因而通过将腹板半竖向加劲进一步优化为顶腹板三向加劲加以改善,应力降低64 MPa。图12为SX5节点板Mises应力图。

4.1.2 屈曲分析

上述计算均基于强度原理,钢结构设计中稳定计算也同样重要。因此,对于上述重要节点SX5、

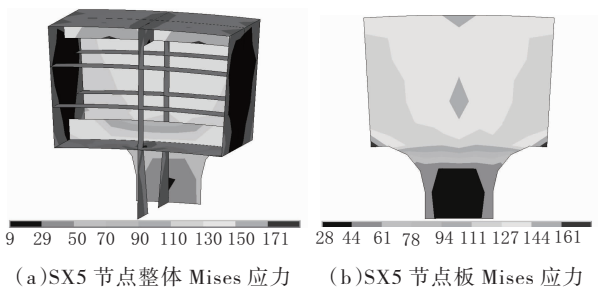


图 12 SX5 节点板 Mises 应力图

XX5 的优化应进行屈曲稳定分析。由于上述有限元模型桥面系均采用板壳单元,设计细节过多,大大地影响了屈曲稳定计算效率,因此对原模型进行优化,除 SX5、XX5 以外,其余位置均采用三维梁单元,如图 13 所示。

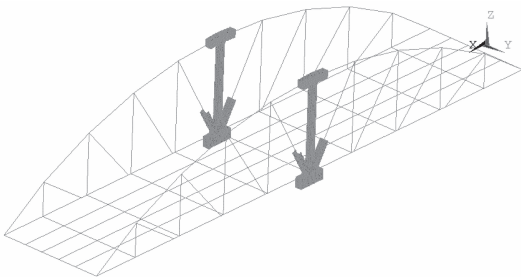


图 13 屈曲稳定有限元模型

基于弹性分析理论,屈曲特征值结果见表 1,稳定系数为恒载 + 百年风荷载下的计算值。

表 1 屈曲特征值一览表

屈曲模式	特征值	
	优化前	优化后
一阶单侧桁片侧弯	20.32	20.19
二阶单侧桁片侧弯	20.98	21
上弦杆顶板局部失稳	34	34

由表 1 计算结果可以看出,腹板断开后一阶屈曲模式仅下降 0.6%,二阶侧弯及上弦杆局部失稳特征值计算结果不变,整体侧弯模式先于板件局部失稳出现,顶板局部失稳变形绝对值仅为 0.1 mm,满足屈曲稳定性的要求。

4.2 拱梁结合节点 XX0 分析

端横梁对于抵抗整个结构不均匀荷载下的扭转效应起着至关重要的作用。因此,在设计中通常采用底部加高端横梁的方式以提高其整体刚度。该项目为简化下部结构以及拱梁结合节点的设计,采用加宽端横梁截面以及板厚的方式,对该节点进行整体模型受力分析。计算结果如图 14 所示。

从图 14 可以看出,拱梁结合处圆弧位置存在应力集中。应力集中数值约为周边应力值的 1.5 倍。主要是由于该处受压上弦杆传递至支座过程中存在圆

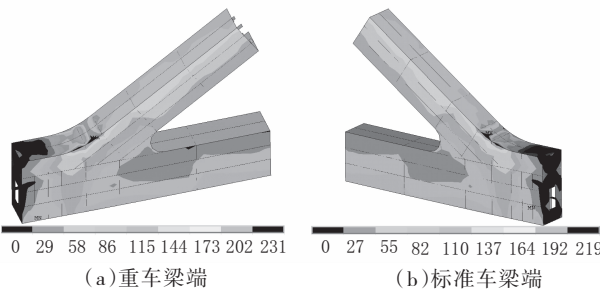


图 14 拱梁结合点 Mises 应力图

弧过渡。

根据上述计算结果对梁端构造设计进行优化,主要采用以下两种方式:改变圆弧半径和支点位置。

第一种优化方式下,圆弧半径分别为 2、3、5、7 m,应力结果分别为 313、259、264、267 MPa,圆弧半径较小时应力最大值增大明显,但半径增大至 5 m 时应力最大值原设计方案并没有明显的减小,仅应力集中区域上移。

第二种优化方式下,由于支点支座位置受到下部结构尺寸以及支座纵向设计尺寸的限制,移动距离分别为 0.2 m、0.35 m。为保持计算结果的可对比性,保持跨径不变,三种工况下支点位置距离梁端分别为 1.0、1.2、1.35 m,另一侧梁端为 1.0、0.8、0.75 m。计算结果如下:内移侧梁端应力分别为:259、244、235 MPa,另外一侧梁端应力分别为:247、268、312 MPa,其中,平移 350 mm 两侧梁端结果如图 15 所示。

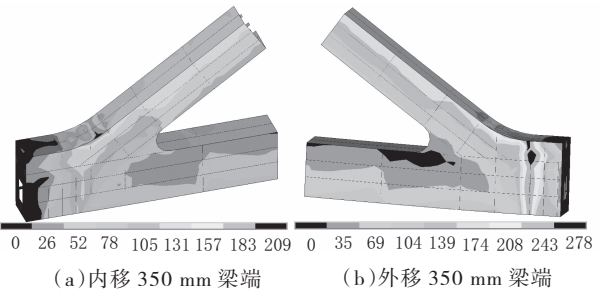


图 15 移动支点后拱梁结合点 Mises 应力图

从图 15 可以看出,在跨径保持不变的情况下,支点靠近拱梁结合点处对结构较为有利,当支点位置平移出拱梁结合点处圆弧以外后,应力最大值由圆弧处转移至梁端腹板。

4.3 横肋与下弦杆相交节点分析

少横梁体系中,节点横肋为梁格体系的次要构件,主要起支撑桥面板及 U 肋的作用。根据以往工程实践经验,以往通常与小纵梁、下弦杆焊接形成刚性节点,腹板与横肋翼缘相交处易因焊接缺陷、扭转变形受到约束等原因形成裂纹,从而对主要构件即下

弦杆的受力产生较为不利的影响。基于以上考虑,拟将横肋翼缘与下弦杆、小纵梁断开处理。其中,小纵梁两侧下翼缘断开 50 mm。下弦杆处由于焊缝设置需要断开 250 mm,形成半刚性节点,从而减小梁端弯矩。对该节点进行分析,计算结果见图 16、图 17 所示。

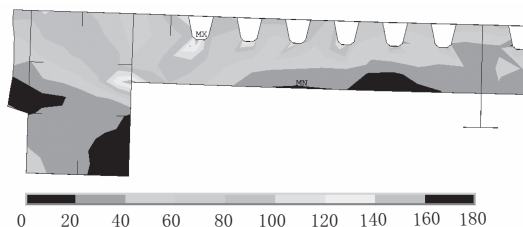


图 16 刚性节点设计横肋 Mises 应力云图(单位:MPa)

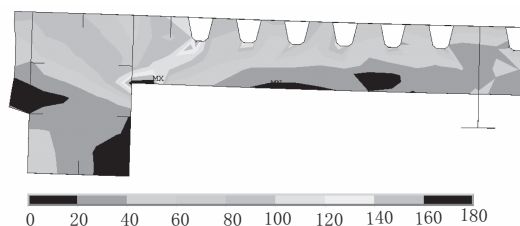


图 17 半刚性节点横肋 Mises 应力云图(单位:MPa)

由以上应力云图结果可以看出,小纵梁两侧由于刚度变化较小且自身应力水平较低,横肋翼缘断开对小纵梁及横肋影响较小,仅翼缘断开附近腹板应力局部增大,整体应力水平在 80 MPa 以内;横肋与下弦杆交接处翼缘断开与否均因刚度突变存在局部应力集中,翼缘断开后,应力集中影响范围扩大,应力集中最大值由 165 MPa 增加至 180 MPa,应力值增大 9%,仍在规范应力允许值 270 MPa 之内。采用该种半刚性连接节点,可在不影响主要板件受力的前提下,转移应力薄弱点,提高钢结构使用寿命。

5 结 论

(1)对于纵横梁体系的桥面结构,板壳模型计算结果约为梁格计算结果的 80%~90%,梁格计算较为保守。

(2)城-A 级车道荷载与 1989 汽车-超 20 级车队加载工况相比,各主要板件最大正应力基本持平;极端堵塞车队与 1989 汽车-超 20 级车队加载工况相比,最大正应力相对值分别增加了 77%(上弦杆)、21%(中横梁)、91%(下弦杆)。

(3)对于整体式焊接节点,相比以往的腹杆腹板与上下弦杆内隔板贯通设计,腹板渐变断开对于节点板处的应力水平、变形、屈曲稳定设计影响不大。对于下弦杆,可局部优化下弦杆顶板处应力,节点板由于承担腹杆竖向力导致底缘轴力增大 20%,弯矩仅增大 3.5%;对于上弦杆,上弦杆节点采用断开设计后,内隔板可采用环向横劲改善弦杆顶板加劲肋的应力。在保证结构整体受力安全的情况下,上述设计方式可减少多道熔透焊缝,有效地降低由于焊接尺寸误差、热影响带来的节点疲劳问题。

(4)拱梁结合位置受力较为复杂,应力集中受到圆弧半径大小、支点位置的影响。其中,圆弧半径不宜过小,但圆弧半径较大并不会改善应力的分布,仅影响应力集中区域;支点相对拱梁结合位置对应力影响较为明显,支点位置应综合考虑下部结构尺寸、美观性需求的情况下靠近拱梁结合处设置。

(5)少横梁体系中,横肋下翼缘与下弦杆、小纵梁断开连接模拟半刚性连接,可有效地改善连接处主要杆件刚性约束下的疲劳破坏,虽导致断开位置腹板应力集中增大,但整体应力水平不高,增大幅度不大。

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smeti.com