

# 450 级大 U 肋正交异性组合桥面板静力力学性能

武 彧, 曾明根, 苏庆田

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 为了研究大 U 肋正交异性组合桥面板的静力力学性能,以 U 肋开口宽为 450mm 的正交异性钢桥面作为研究对象,引入超高性能混凝土,设计制作了两个足尺的大 U 肋正交异性超高性能混凝土组合桥面板,通过静力加载试验测试了大 U 肋正交异性组合桥面板的承载能力、破坏形态及主要截面上的应变;在此基础上,建立基于 UHPC 塑性损伤的有限元模型展开参数化分析。试验结果表明:大 U 肋正交异性组合桥面板的 U 肋厚度由 8mm 提升到 10mm,屈服荷载与极限承载力提升了 24.86% 与 47.48%,纯弯段混凝土裂缝数量减少,裂缝间距增大,加劲肋厚度的改变对于结构静力性能的影响主要体现在结构的非线性阶段。参数化分析结果表明:改变 450 级大 U 肋截面构造尺寸对结构屈曲变形能力有不同程度的影响,顶板厚度的改变对结构极限状态时的安全系数影响较小,提高 U 肋厚度可以大幅提高结构安全储备。依据试验结果与有限元分析提出了 450 级大 U 肋钢-UHPC 组合桥面板的屈曲折减系数经验公式,该系数同 U 肋高厚比与 U 肋底板宽厚比更为相关。

**关键词:** 正交异性组合桥面板;试验研究;大 U 肋;超高性能混凝土;有限元模拟

中图分类号: TU398

文献标志码: A

## Experimental Study on Mechanical Properties of 450-level Big U-rib Orthotropic Composite Bridge Deck

WU Yu, ZENG Minggen, SU Qingtian

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To study the mechanical properties of orthotropic steel-concrete composite bridge deck with big U-ribs. The orthotropic steel bridge deck with a U-rib opening width of 450mm was chosen as the research object in which ultra-high performance concrete was introduced. Two full-scale big U-rib steel-concrete composite bridge decks are tested to evaluate the static

bearing capacity including the strain of concrete and steel bars, the deformation of the structure and the development of cracks. And parametric analysis is carried out based on the finite element model of UHPC plastic damage. The results showed that the thickness of the big U-rib in the bridge deck was increased from 8mm to 10mm, the yield load and ultimate bearing capacity were arisen by 24.86% and 47.48%, the number of concrete cracks in the pure bending section was reduced, and the crack spacing increased. The effect of the thickness of the troughs on the static performance of the structure is mainly reflected in the nonlinear stage. The parametric analysis results showed that when the cross-sectional configuration of the 450-level big U-rib structure were changed, the buckling deformation capacity of the structure were influenced differently. Changing the thickness of the top plate of the structure has less influence on the safety factor in ultimate state, while increasing the thickness of the U-rib could significantly increase the safety factor of the structure. Based on the experimental results and FEA, an empirical formula for the buckling reduction coefficient of 450-level big U-rib steel-UHPC composite bridge deck is proposed, which is more related to the height-thickness ration of U-rib and width-thickness ratio of U-rib bottom plate.

**Keywords:** composite bridge deck; ultra-high performance concrete; experimental study; big U-rib; finite element simulation

正交异性钢桥面板因其自重轻、强度大、运输方便等特点成为长大跨桥梁中主要的桥面形式<sup>[1]</sup>。然而,正交异性钢桥面板由于面板下焊接大量的纵向加劲肋并支承在横梁(或横隔板)上,导致焊缝数量多,难以避免产生焊接残余应力及焊接缺陷等问题,从而影响正交异性桥面板的疲劳性能。研究和实践表明正交异性

收稿日期: 2023-05-16

基金项目: 江苏省交通运输厅科技项目(2019Y08)

第一作者: 武彧, 博士生, 主要研究方向为钢桥与组合结构桥梁。E-mail: NX\_wuyu@outlook.com

通信作者: 苏庆田, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为钢桥与组合结构桥梁。E-mail: sqt@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

桥面板极易在往复轮载作用下发生疲劳开裂<sup>[2-6]</sup>。对此,国内外学者提出了大纵肋的概念,即通过加大纵肋尺度,增加纵肋及横隔板间距,减少正交异性钢桥面板焊缝数量,进而减少桥面板中出现疲劳开裂的裂缝数量。目前国内外正交异性桥面板U肋常用的尺寸为高度为280mm、上口宽为300mm、底部宽为180mm,厚度为8(或10)mm,横隔板间距为2.5~3.5m。日本桥梁建设协会<sup>[7]</sup>于2004年首先提出大U肋的构造细节,建议U肋高度330mm、上口宽440mm、底部宽293mm,厚度8mm,横隔板间距5m。之后,Tang<sup>[8]</sup>也提出相关大U肋的设计,建议U肋高度380mm、上口宽400mm、U肋腹板及底板采用大于8mm变厚度的设计,横隔板间距为8m。相关研究发现,大纵肋正交异性钢桥面板由于自身结构体系的因素,仍旧存在桥面板局部刚度不足与纵肋腹板局部区域疲劳强度不足的问题<sup>[9-10]</sup>。同时,因桥面板局部变形过大,铺装层常出现较高的局部应力,导致大纵肋正交异性钢桥面板铺装层易出现开裂、车辙、脱层及拥包等病害<sup>[11]</sup>。

针对正交异性钢桥面板出现的疲劳和铺装易损难题,部分学者提出了以配筋混凝土层与钢桥面板结合形成组合桥面板的方式,如可以采用5~8cm厚度的高性能混凝土<sup>[12]</sup>、8~12cm纤维混凝土<sup>[13]</sup>和15cm的普通混凝土<sup>[14]</sup>等。相关研究表明采用组合桥面板能够增加桥面刚度并改善与铺装层的粘结效果,因此,近几年在工程中组合桥面板得到大量应用。

正交异性组合桥面板应用之初是为了解决钢桥面板存在的问题,故大部分的组合桥面板中U肋的尺寸仍然延续了正交异性桥面板中U肋的尺寸。然而,对于新建桥梁的正交异性组后桥面板仍采用传统的U肋尺寸及布置方式,会导致桥梁经济性能的降低,不利于组合桥面板的推广使用,为此,工程师与学者提出了大U肋正交异性组合桥面板<sup>[15-17]</sup>的形式。

目前对于常规U肋尺寸的正交异性组合桥面板开展了比较广泛深入的研究,对其静力性能、疲劳性能、极限承载力及破坏形态等都有相关的研究成果。但是带大U肋的正交异性组合桥面板是一种相对新颖的结构形式,目前对其研究较少,特别是对在静力荷载下的受力性能、U肋的破坏形态及混凝土的开裂性能方面还未见文献报道。因此本文对带大U肋的正交异性组合桥面板静力性能开展研究,采用高度为400mm、上口宽为450mm的U肋形式的组合桥面板进行试验测试,测试其在不同荷载等级下桥面板试件的应变、挠度、裂缝发展,得到大U肋正交异性组合桥面板的极限承载力,评价大U肋正交异性组合桥面板的静力性能,分

析大U肋截面构造尺寸对结构屈曲变形能力的影响,为推广使用大U肋正交异性组合桥面板提供基础资料。

## 1 试验设计

### 1.1 新型450级大U肋正交异性组合桥面板

参考《公路钢结构桥梁设计规范》<sup>[18]</sup>(JTGD64-2015)中闭口加劲肋尺寸的规定,初步确定了结构的设计参数,如图1所示,U肋的高度 $h=400$ mm、上口宽 $B_0=450$ mm、底部宽 $B_1=250$ mm。相比于常用U肋尺寸( $h=280$ mm、 $B_0=300$ mm、 $B_1=180$ mm)的组合桥面板,本文所提的组合桥面板中单位面积下同厚度U肋重量减少了7%,U肋与桥面板的焊缝数量减少了33%,同时随着横隔板间距的增大,桥梁中横隔板的数量也将减少,从而进一步节省钢结构的用量及减少工厂的焊接工作量。而本文所提的组合桥面板中单位宽度下的截面换算惯性矩和截面抵抗矩分别是常用U形肋组合桥面板的2.23倍和2.65倍。同时,为减少混凝土收缩时组合桥面板受力不利的影响,本文采用粗骨料UHPC。

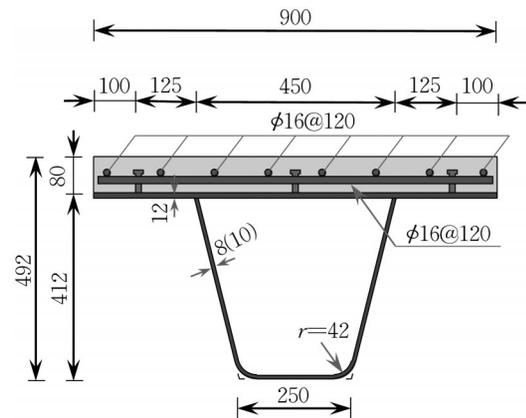


图1 大U肋正交异性组合桥面板(单位:mm)

Fig.1 Design parameters of big u-rib (Unit: mm)

### 1.2 试件设计

组合桥面板在桥梁结构中承受第一结构体系和第二结构体系的力,其中第二结构体系受力仅与车轮荷载和横隔板支承距离有关。以往的研究表明组合桥面板在第二结构体系受力中,其在横隔板支承处截面的负弯矩受力是控制组合桥面板的关键。因此,为研究450级大U肋正交异性组合桥面板的抗弯性能,根据结构在第二体系中受力主要沿纵桥向传递的特点,设计制作了两个不同厚度U肋的钢-UHPC组合桥面板试件,分别命名为BUD-8与BUD-10,U肋厚度分别为8mm和10mm。试件长为4800mm、宽900mm、高662mm;粗骨料UHPC层厚与钢顶板厚分别为80mm与12mm;UHPC层内纵横向钢筋直径16mm,间距120mm,保护

层厚度为20mm。试件中焊钉直径和高度分别为13mm与50mm;焊钉间距为350mm×450mm。试件具体尺寸如图2所示。

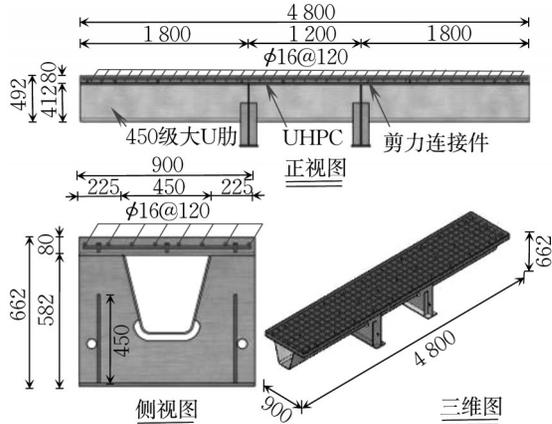


图2 试件设计参数(单位:mm)

Fig.2 Design parameters of specimens (Unit: mm)

### 1.3 加载方案及测点布置

试验加载采用双点对称加载方式,通过两个1000kN电液伺服作动器在试件两侧施加竖向单调荷载,受荷面积为沿试件纵向为200mm,横向为900mm。加载方式如图3所示。

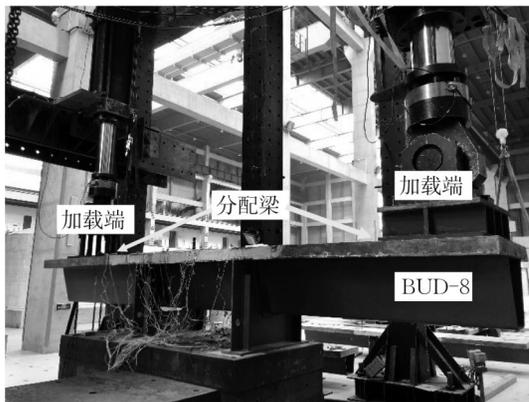


图3 试件加载装置

Fig.3 Test setup of specimen

试验过程中测试了试件的竖向位移、钢-UHPC界面滑移、纵向钢筋应变和截面应变等力学指标随荷载增加的变化规律,测点布置如图4~6所示。

### 1.4 材性性能

测试了与试验试件相关的主要受力材料的力学性能。其中厚度为8mm、10mm及12mm厚钢板的屈服强度分别为411MPa、413MPa和370MPa,抗拉强度分别为554MPa、550MPa和511MPa;直径16mm的钢筋屈服强度为549MPa,抗拉强度为664MPa。粗骨料

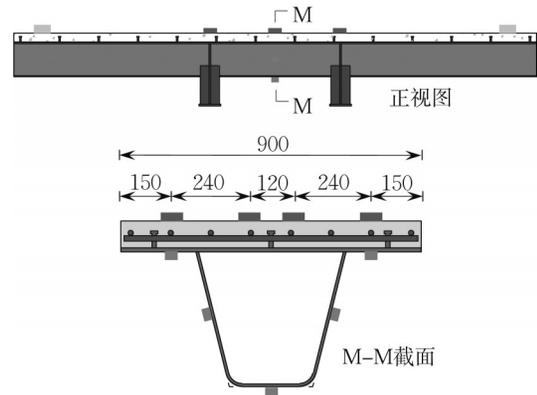


图4 截面应变测点布置(单位:mm)

Fig.4 Measurement points of specimen (Unit: mm)

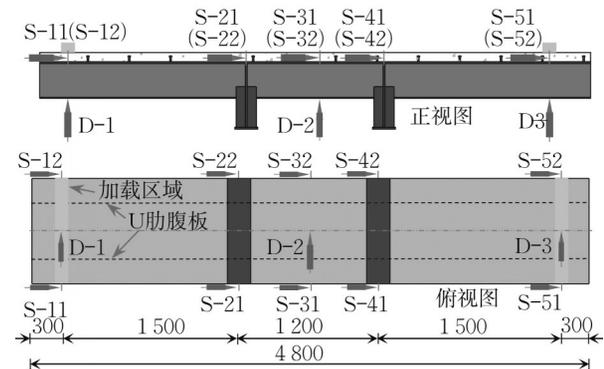


图5 位移和滑移测点布置(单位:mm)

Fig.5 Measurement points of specimen (Unit: mm)

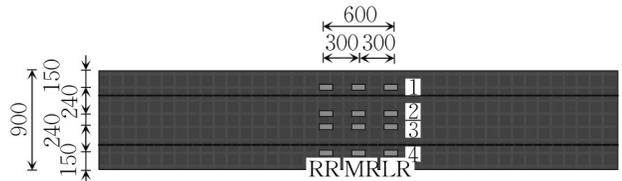


图6 纵向钢筋应变测点布置(单位:mm)

Fig.6 Measurement points of specimen (Unit: mm)

UHPC材料采用20×0.25mm、13×0.2mm两种带端勾镀铜混杂钢纤维,钢纤维体积率为2.5%。采用标准材性试验<sup>[19]</sup>测得其28d抗压强度、轴拉强度、抗折强度与弹性模量分别为108MPa、7.77MPa、23MPa和48733MPa。

## 2 试验结果

### 2.1 破坏形态

两试件的破坏过程基本一致,试验试件的破坏过程主要包括以下4个阶段:①弹性阶段,钢和混凝土两部分协同受力,试件混凝土层上表面并未出现明显裂缝,加载点位移与荷载基本呈线性发展关系。②裂缝

扩展阶段,继续增加荷载,两试件横隔板上方UHPC层首先出现微细裂缝,随着荷载等级的持续提高,裂缝沿横桥向延伸并最终贯通板宽,之后UHPC层裂缝数量逐渐增多,裂缝间距减小,此过程伴随钢纤维拔出的“吡吡”声。③屈服阶段,随着支点处钢截面下缘逐渐屈服,试件挠度逐渐增大,承载力增长缓慢,此时裂缝数量不再增加,仅裂缝宽度与沿板厚深度在既有裂缝的

基础上继续发展。主裂缝处钢纤维从混凝土中大量拔出,并伴随强烈的“吡吡”声,该阶段末试件纯弯段U肋屈曲变形严重,结构到达承载力峰值。④破坏阶段,试件挠度继续增大,但结构承载能力逐渐降低,当达到极限挠度时,两试件纯弯段混凝土开裂明显,试件发生受弯破坏无法继续承载。试件BUD-8(BUD-10)破坏形态如图7所示。

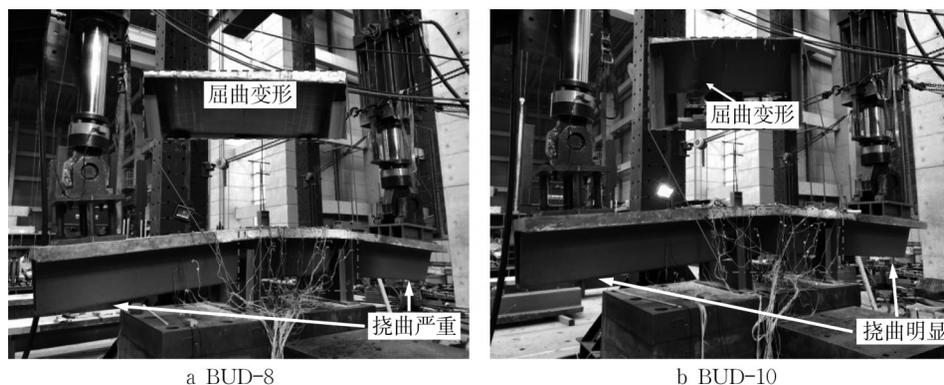


图7 试件破坏形态

Fig.7 Failure modes of specimen

本试验中,试件BUD-10较试件BUD-8提高了U肋厚度,进而增大了桥面板局部刚度,导致上部混凝土在破坏阶段的裂缝分布发生改变,结构主裂缝数量减少;在纯弯段,主裂缝所在截面为薄弱截面,钢梁底部应变发展迅速并率先进入屈服状态,结构发生屈曲破坏的截面同上部混凝土结构层主裂缝所在截面相对应,试件BUD-10出现U肋屈曲变形的的位置由靠近横隔板截面变为靠近两横隔板中间M-M截面,相应的U肋出现屈曲变形的半波数量由两个变为一个。但两试件整体破坏模式相近:上部纯弯段混凝土结构层开裂严重并出现一条或多条贯穿板宽的主裂缝,在主裂缝所在截面U肋底板受压屈曲变形严重,结构发生受弯破坏。

## 2.2 荷载-挠度曲线

试件BUD-8(BUD-10)的竖向位移绝对值 $d_1$ 、 $d_2$ 与 $d_3$ 分别由测点D-1、D-2与D-3处的位移计测得,试件竖向挠度 $\delta=(d_1+d_3)/2+d_2$ ;左、右加载点处荷载分别为 $F_1$ 与 $F_2$ ,试件竖向荷载 $P=(F_1+F_2)/2$ 。

两试件荷载-挠度曲线对比如图8所示,由图8可得:尽管试件BUD-10较试件BUD-8提高了加劲肋厚度,但两试件弹性阶段与裂缝扩展阶段的抗弯刚度及部分主要力学指标均相近;进入屈服阶段后,两试件间的各主要力学指标差异开始逐渐显现,试件BUD-10相比BUD-8的屈服荷载与极限承载力分别提高了24.86%与47.48%。其原因主要

为:①试件弹性阶段的刚度与截面尺寸及弹性模量有关,鉴于两试件混凝土一致,而加劲肋厚度由8mm提高到10mm时相应的钢截面面积仅提高9.1%,故弹性阶段的抗弯刚度及主要力学指标并没有显著提高。②对于结构屈服荷载而言,由于加劲肋厚度的增加,组合截面等效中性轴高度下降,结构到达钢结构边缘屈服所需的荷载更大,结构屈服荷载提高。③结构进入屈服阶段后的极限承载力主要与钢结构的屈曲稳定能力有关,此时由于加劲肋厚度的提高,截面抵抗屈曲变形能力提高,结构承载力上升。

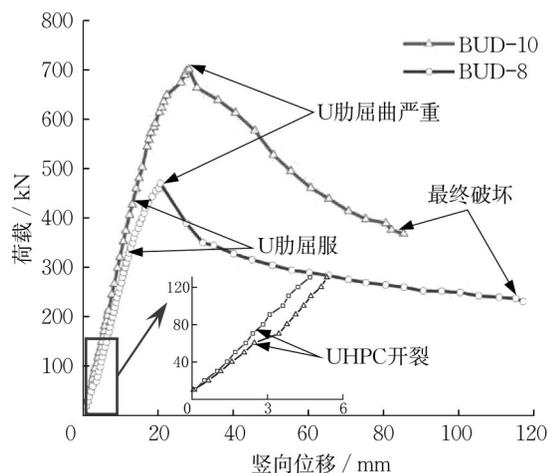


图8 荷载-挠度曲线

Fig.8 Load-deflection curves at load point

汇总两试件主要的试验结果如表1所示,其中 $F_e$ 、 $\delta_e$ 、 $F_y$ 、 $\delta_y$ 、 $F_u$ 、 $\delta_u$ 和 $F_{re}$ 、 $\delta_{re}$ 分别为两试件处于弹性极限状态、屈服状态、极限承载能力状态及最终破坏状态时的竖向荷载与挠度。由表可得,两试件在破坏后均有较好的延性,试件BUD-10的最终破坏时竖向挠度明显小于BUD-8,主要原因是试验过程中试件BUD-10纯弯段UHPC开裂严重,荷载下降明显,故提前终止试验,实际结构尚能发生一定程度的变形。

表1 主要试验结果

Tab. 1 Bridge deck test results

试件	$F_e$ /kN	$\delta_e$ /mm	$F_y$ /kN	$\delta_y$ /mm	$F_u$ /kN	$\delta_u$ /mm	$F_{re}$ /kN	$\delta_{re}$ /mm
BUD-8	60	2.1	350	13.1	476	20.5	250	117.3
BUD-10	70	2.5	437	14.2	702	28.2	369	85.3

### 2.3 UHPC 裂缝

随着荷载等级的逐步提高,试件纯弯段UHPC将

产生裂缝,且随着荷载的增加而不断发展。试件开裂后,每隔一定的荷载等级进行一次裂缝观测,记录荷载的分布并测量裂缝的最大宽度。

当竖向荷载达到80kN时,试件BUD-8靠近支点处裂缝贯穿板宽并达到0.05mm的宽度,参考相关文献<sup>[20]</sup>,定义此荷载为结构开裂荷载,对应试件BUD-10的开裂荷载为110kN。之后,随着荷载的逐渐增大,纯弯段裂缝发展迅速,当荷载达到300kN时,两试验试件均无新生裂缝,仅在既有裂缝的基础上进一步发展,此时两试件最大裂缝宽度均为0.18mm。当荷载达到400kN时,两试验试件最大裂缝宽度为0.02mm。两试件纯弯段裂缝分布如图9所示,由图可得,450级大U肋正交异性组合桥面板受弯试验的裂缝主要分布于支点截面及主裂缝所在截面附近。

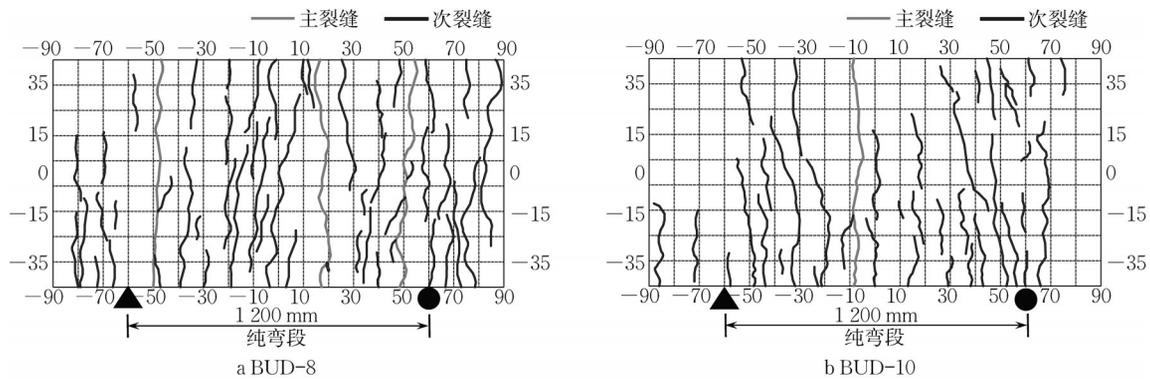


图9 试件UHPC裂缝分布(单位:cm)

Fig.9 The distribution of cracks(Unit:cm)

## 3 有限元模拟

采用有限元软件ABAQUS建立考虑材料弹塑性损伤的实体板壳有限元模型对两试件试验过程进行模拟。UHPC桥面板、钢筋、正交异性钢桥面板与焊钉分别采用C3D8R单元、T3D2单元、S4R单元与Connector单元模拟。模型编号为BUDS-8与BUDS-10,分别对应试件BUD-8与BUD-10。

UHPC受拉本构以文献<sup>[20]</sup>中提出的双线性模型进行计算,平均拉伸应力及极限应变按28d龄期的材料试验结果设置。受压本构关系以文献<sup>[21]</sup>中提出的拟合公式计算,相应的棱柱体抗压强度按2.4节实际材料试验结果设置,受压峰值点应变取0.25%,试验拟合参数根据文献<sup>[22]</sup>中研究结果取3.0。模型中按文献<sup>[23]</sup>中的研究结果引入混凝土塑性损伤模型以模拟粗骨料UHPC受拉开裂特征。钢材应力-应变关系依据前述

材料试验结果取双折线模型,泊松比与弹性模量分别设置为0.3与210GPa。焊钉剪切刚度采用基于同型号焊钉推出试验结果的非线性模型定义<sup>[24]</sup>。此外,模型的支承条件与加载条件同试验条件一致,在混凝土桥面板顶部选取分配梁作用区域施加位移荷载以模拟试验的加载情况。

两试件有限元计算(FEA)与试验实测所得荷载—竖向挠度曲线对比如图10所示,可以看到FEA模拟同试验实测结果吻合程度良好。由图可得,除两试件的屈服荷载外,两试件特征荷载试验实测值与有限元计算值相差均不超过10%,对于屈服荷载而言,考虑到材料受力不均匀性,如果以构件纯弯段所有测点均进入屈服阶段记为屈服荷载,则两试件试验实测值同有限元计算值误差分别为0.7%与11.6%,可以认为有限元模型能够有效反映试件实际受力情况。

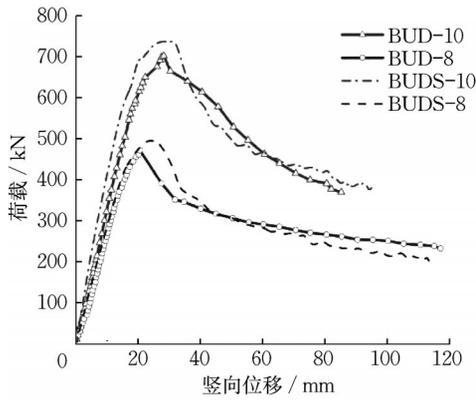


图 10 有限元同试验结果对比

Fig.10 Comparison of finite element analysis and test results

### 4 450 级大 U 肋组合桥面板参数化分析

基于前述试验现象与有限元模型计算结果可得,对于 450 级大 U 肋钢-UHPC 组合桥面板而言,其破坏模态均为负弯矩区纵向加劲肋受弯屈曲变形,结构无法达到全截面屈服的理想状态,因此有必要对 U 肋屈曲变形能力展开参数化分析。

#### 4.1 U 肋屈曲折减系数分析

依据参考文献<sup>[25]</sup>中的研究成果,带闭口加劲肋的顶板受弯屈曲主要受到顶板厚度、U 肋间距与 U 肋截面尺寸影响,结合《公路钢结构桥梁设计规范》(JTGD64-2015)<sup>[18]</sup>对受压板件闭口加劲肋几何尺寸设计的要求,综合考虑钢顶板相对 U 肋厚度( $t_r/t_w$ )、U 肋高厚比( $h/t_w$ )以及 U 肋底板宽厚比( $b_s/t_w$ )三个变量对结构屈曲变形能力的影响,相关符号几何意义如图 11 所示。

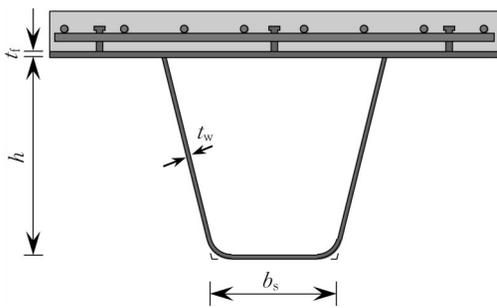


图 11 U 肋屈曲变形能力主要变化参数

Fig. 11 Main variation parameters of U-rib flexural deformation capacity

总计进行 20 组 ABAQUS 有限元模型分析,算例采用与试验试件相同的悬臂加载桥面板,除变化参数外其他几何尺寸与试验试件相同,特别地,为了减少非变化参数对计算结果的影响,模型材料参数同 BUDS-10 完全一致。

定义大 U 肋钢-UHPC 组合桥面板的 U 肋屈曲折减系数  $\varphi_r = M_s/M_u$ ,其中  $M_s$  为通过有限元分析得到的屈曲承载力,  $M_u$  为通过塑性分析方法计算得到的全截面屈服抗弯承载力。大 U 肋钢-UHPC 组合桥面板抗弯承载力的塑性计算方法可依据《钢-混凝土组合桥梁设计规范》(GB 50917-2013)<sup>[26]</sup>的规定进行计算,具体计算如下:

$$M_u = f_d A_{sc} y_1 + f_d (A_d - A_{sc}) y_2 + A_r f_{sd} y_3 + A_c f_{ct, re} y_4 \quad (1)$$

式中:  $f_{sd}$  为普通钢筋屈服强度值;  $f_d$  为钢梁屈服强度值;  $f_{ct, re}$  为 UHPC 开裂后残余抗拉强度,依据文献<sup>[27]</sup>中的研究取  $f_{ct, re} = 0.7f_{ct}$ ,  $f_{ct}$  按材性试验结果取值,本文取 7.77MPa;  $A_r$  为桥面板内纵向受拉钢筋面积;  $A_{sc}$  为钢梁受压区面积;  $A_d$  为钢梁全截面面积;  $A_c$  为混凝土全截面面积;  $y_1$  为塑性中和轴以下钢梁合力距塑性中和轴位置;  $y_2$  为塑性中和轴以上钢梁合力距塑性中和轴位置;  $y_3$  为受拉钢筋合力距塑性中和轴位置;  $y_4$  为混凝土合力距塑性中和轴位置。

对于钢混组合结构,钢梁受压区截面面积可由截面拉压平衡条件得

$$A_{sc} f_d = (A_d - A_{sc}) f_d + A_r f_{sd} + A_c f_{ct, re} \quad (2)$$

$$A_{sc} = \frac{A_d f_d + A_r f_{sd} + A_c f_{ct, re}}{2f_d}$$

由计算结果可得,当 U 肋厚度较薄时,折减系数  $\varphi_r$  的取值明显较低,而当 U 肋厚度超过 8mm 时,折减系数  $\varphi_r$  一般为 0.8 以上,因此在工程上需对 450 级大 U 肋钢-UHPC 组合桥面板的厚度设置限值。将 U 肋屈曲折减系数与三个变化参数绘制成如图 12~14 所示的散点图,可见折减系数对 U 肋高厚比与 U 肋底板宽厚比更为敏感,这也与《公路钢结构桥梁设计规范》中的传统闭口加劲肋稳定性理论一致,而顶板厚度的增加也会带来屈曲承载力的下降,但下降幅度较其余两个参数较小,系数同三个变量均呈现出了一定的负相关性。

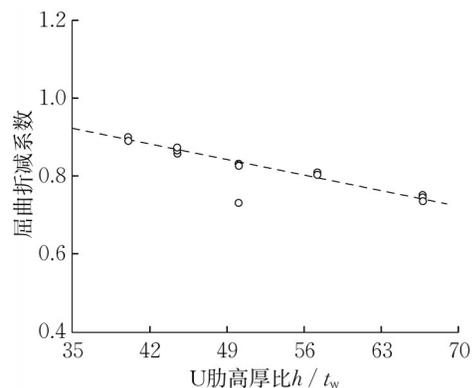


图 12 U 肋高厚比  $h/t_w$

Fig. 12 U-rib height-to-thickness ratio

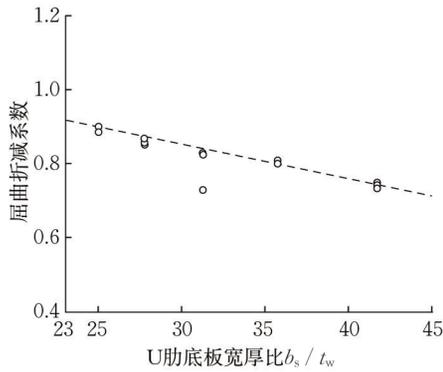


图13 U肋宽厚比  $b_s/t_w$

Fig. 13 U-rib width-to-thickness ratio

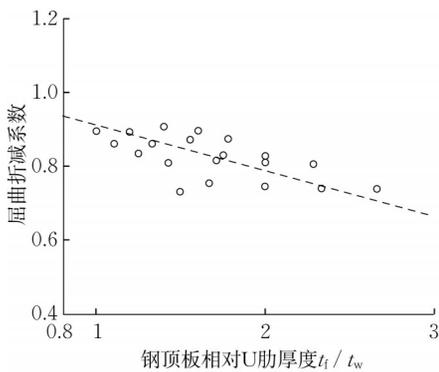


图14 U肋相对厚度比  $t_f/t_w$

Fig. 14 U-rib relative thickness ratio

对20组有限元模拟结果采用最小二乘法进行线性回归,得到450级大U肋钢-UHPC组合桥面板屈曲折减系数与三个主要变化参量之间的拟合公式:

$$\varphi_r = 1.0978 + 0.0088 \frac{t_f}{t_w} + 0.5948 \frac{h}{t_w} - 0.9606 \frac{b_s}{t_w} \leq 1.0 \quad (3)$$

该公式的  $R^2$  为0.99,计算结果与有限元计算结果对比如图15所示,19组计算结果误差均小于3%,证明拟合公式具有一定的有效性。在实际工程应用中,为实现保守设计,可令该折减系数  $\varphi_r \leq 1.0$ 。

#### 4.2 结构设计安全系数

基于结构力学最不利内力计算方法,考虑车轮的冲击效应,按照《公路桥涵设计通用规范》<sup>[28]</sup>(JTG D60-2015)计算得到在组合桥面板节段上布置单车道的车辆荷载作用下,支点截面所产生的最大截面负弯矩值,并以此计算考虑桥面板自重与单车道车辆荷载作用情况下的结构安全储备。组合桥面板计算节段包含4个横隔板,横隔板间距取为4.0m,横向宽度3.6m(包含4个U肋)。根据JTG D60-2015的规定对大U肋组合桥面板进行承载能力极限状态设计,计算作用效应的基本组合如下:

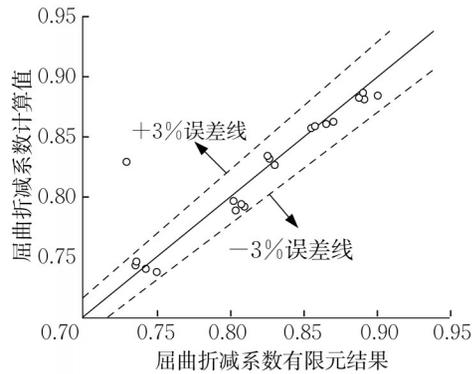


图15 拟合公式折减系数有效性验证

Fig. 15 Validation of the factor of the formula

$$\gamma_0 M_{ud,1} = \gamma_0 (\gamma_{G1} M_{sg} + \gamma_{Q1} M_{sp}) \quad (4)$$

式中:  $M_{ud,1}$  为计算所得450级大U肋组合桥面板基本组合作用的效应值;  $M_{sg}$  为450级大U肋桥面板恒载作用弯矩值;  $M_{sp}$  为450级大U肋桥面板车辆荷载作用弯矩值; 结构重要度系数  $\gamma_0$  取1.0,永久作用效应分项系数  $\gamma_{G1}$  取1.2,车辆荷载分项系数  $\gamma_{Q1}$  取1.8。理论计算得到的450级大U肋桥面板基本组合效应值均小于上述有限元计算(见表3)所得结构发生屈曲变形时的峰值极限承载力。

按上述基本组合计算所得单位宽度大U肋正交异性组合桥面板支点负弯矩值,并与表2中所列20组有限元计算结果得到的桥面板单位宽度极限弯矩进行比较,得到按结构承载能力极限状态设计的安全系数  $\gamma_s$ , 计算结果如表2所示。

表2 按结构承载能力极限状态设计的安全系数

Tab. 2 Design safety factor under bearing-capacity limit state

序号	$t_f/mm$	$t_w/mm$	$b_s/mm$	$h/mm$	$\gamma_s$
1	10	6	250	400	8.56
2	10	7	250	400	10.53
3	10	8	250	400	12.29
4	10	9	250	400	14.10
5	10	10	250	400	16.19
6	12	6	250	400	8.52
7	12	7	250	400	10.67
8	12	8	250	400	10.86
9	12	9	250	400	14.22
10	12	10	250	400	16.21
11	14	6	250	400	8.48
12	14	7	250	400	10.70
13	14	8	250	400	12.36
14	14	9	250	400	14.41
15	14	10	250	400	16.53
16	16	6	250	400	8.54
17	16	7	250	400	10.69
18	16	8	250	400	12.42
19	16	9	250	400	14.58
20	16	10	250	400	16.43

由表2可得,当横隔板间距取为4.0m时,仅改变顶板厚度对结构安全系数 $\gamma_s$ 的影响较小,以U肋厚度为10mm为例,当顶板厚度由10mm提升到16mm,结构安全系数 $\gamma_s$ 仅提高了1.5%;结合前述试验研究,控制结构峰值承载力的始终是结构局部屈曲变形能力,所以当顶板厚度不变时,U肋厚度由6mm变为10mm,结构安全系数 $\gamma_s$ 提高了约90%。因而,依据现行《公路钢结构设计规范》<sup>[26]</sup>(JTGD64-2015)中针对正交异性钢桥面板的设计思路,采用10mmU肋厚度的450级大U肋正交异性组合桥面板在设计时可以扩大横隔板间距(不小于4.0m)以满足结构整体经济性的目的。

限于本文是采用粗骨料UHPC同大U肋正交异性钢桥面板结合进行大U肋正交异性组合桥面板静力性能的研究,试验试件较少,没有拓展到其他影响因素,更加详细的结构受力性能、破坏机理及最优截面设计还有待进一步研究。

## 5 结论

本文为探究新型450级大U肋正交异性组合桥面板的静力力学性能,依据其在第二体系中负弯矩作用区的受力特点,设计了两个U肋厚度分别为8mm与10mm的足尺节段模型,对其关键力学指标进行了试验研究,并建立考虑材料弹塑性损伤的有限元模型开展参数化分析,具体研究结论如下:

(1)试件BUD-8与BUD-10的负弯矩静力破坏形态相似,均为受弯破坏,当达到极限承载力时,试件纯弯段U肋屈曲变形严重,纯弯段混凝土开裂明显,两侧加载点处下挠明显,整体结构出现塑性变形;U肋厚度的增加改变了纯弯段混凝土主裂缝数量进而影响了结构屈曲变形截面位置。

(2)本文试验结果表明,试件BUD-10较试件BUD-8的开裂荷载提高了约37.5%,两试件在进入屈服阶段之前各主要力学指标相近;在结构钢结构部分进入屈服阶段后,两试件开始表现出明显的静力性能差异,U肋厚度提高能够充分发挥材料的受力性能,试件BUD-10的屈服荷载与抗弯极限承载力较试件BUD-8分别提高了24.86%与47.48%。

(3)利用ABAQUS分析了特定U肋构造参数下450级大U肋钢-UHPC组合桥面板的屈曲变形能力,不同U肋截面尺寸组合的结构屈曲折减系数不同,依据20组有限元模型结果提出了450级大U肋钢-UHPC组合桥面板的屈曲折减系数经验公式,该系数同U肋高厚比与U肋底板宽厚比更为相关。

(4)依据《公路桥涵设计通用规范》计算结构不同作用组合下的荷载效应,并将之与有限元计算值进行比较得到结构极限状态时的安全储备,以横隔板间距4m计,450级大U肋正交异性组合桥面板的结构安全储备大于8.0,且当U肋厚度取为10mm时,无论顶板厚度多少,结构均有超过16.0的安全储备,设计时可适当选取大于4m的桥面系横隔板间距以实现经济设计的目的。

### 作者贡献声明:

武彧:试验设计、数据分析及论文写作与修改;  
曾明根:论文选题、指导论文修改;  
苏庆田:论文选题、指导试验设计及论文修改。

### 参考文献:

- [1] HE X, SU Q, JIANG X, *et al.* Experimental study on mechanical behavior of orthotropic steel deck with adhesively bonded rigid pavement[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2022, 25(5): 1091.
- [2] 张清华,卜一之,李乔.正交异性钢桥面板疲劳问题的研究进展[J].*中国公路学报*,2017,30(3):14.  
ZHANG Qinghua, BU Yizhi, LI Qiao. Review on fatigue problems of orthotropic steel bridge deck[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(3): 14.
- [3] HENG J, ZHOU Z, ZOU Y, *et al.* GPR-assisted evaluation of probabilistic fatigue crack growth in Rib-To-Deck Joints in orthotropic steel decks considering mixed failure models[J]. *Engineering Structures*, 2022, 252: 113688.
- [4] 张清华,笄乐天,李明哲,等.基于多失效模式损伤度相容的钢桥面板抗疲劳设计方法[J].*土木工程学报*,2022,55(12):80.  
ZHANG Qinghua, DA Letian, LI Mingzhe, *et al.* Fatigue-resistant design method of steel bridge deck based on multi-failure mode and damage degree compatibility[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022, 55(12): 80.
- [5] 邓扬,刘涛磊,曹宝雅,等.钢桥面顶板-U肋焊缝表贴增强板材疲劳加固方法研究[J].*中国公路学报*,2022,35(2):201.  
DENG Yang, LIU Taolei, CAO Baoya, *et al.* Fatigue strengthening for deck-to-rib welds in orthotropic steel bridge deck by bonding reinforced plate on deck surface[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(2): 201.
- [6] LIU Yingkai, DENG Lu, ZHONG Wenjie, *et al.* A new fatigue reliability analysis method for steel bridges based on peridynamic theory[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 236: 107214.
- [7] Japan Bridge Association. The birth of new steel bridge II (Revised Edition)[M]. Tokyo: Japan Bridge Association, 2004.
- [8] TANG Manchung. A new concept of orthotropic steel bridge deck[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2011, 7(7): 587.
- [9] 罗如登,屈植锋,王正阳,等.大纵肋正交异性-PBL剪力键桥面板疲劳性能分析[J].*铁道科学与工程学报*,2020,17(11): 2849.  
LUO Rudeng, QU Zhifeng, WANG Zhengyang, *et al.* Research

- on mechanical performance of a new type of large longitudinal rib orthotropic-PBL shear connectors composite bridge deck [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2020, 17(11): 2849.
- [10] 邵旭东,曲宛桐,曹君辉,等.带大U肋的轻型组合桥面板基本力学性能[J].*中国公路学报*, 2018, 31(8):94.  
SHAO Xudong, QU Wantong, CAO Junhui, *et al.* Fundamental mechanical performance of lightweight composite bridge deck with large U-ribs[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(8):94.
- [11] 张清华,刘益铭,卜一之,等.大纵肋正交异性组合桥面板疲劳性能研究[J].*中国公路学报*, 2017, 30(3):226.  
ZHANG Qinghua, LIU Yiming, BU Yizhi, *et al.* Study on fatigue performance of orthotropic composite bridge deck with large longitudinal ribs[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(3):226.
- [12] 邵旭东,罗军,曹君辉,等.钢-UHPC轻型组合桥面结构试验及裂缝宽度计算研究[J].*土木工程学报*, 2019, 52(3):61.  
SHAO Xudong, LUO Jun, CAO Junhui, *et al.* Experimental study and crack width calculation of steel-uhpc lightweight composite deck structure[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(3):61.
- [13] 胡苏,苏庆田,吴冲.正交异性钢-混凝土组合桥面板截面优化研究[J].*结构工程师*, 2015, 31(2):131.  
HU Su, SU Qingtian, WU Chong. Study on the section optimization of the orthotropic steel-concrete composite bridge deck[J]. *Structural Engineers*, 2015, 31(2):131.
- [14] 叶华文,王应良,张清华,等.新型正交异性钢-混组合桥面板足尺模型疲劳试验[J].*哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(9):25.  
YE Huawen, WANG Yingliang, ZHANG Qinghua, *et al.* Full-scale fatigue test of new steel-concrete composite orthotropic bridge deck[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(9):25.
- [15] 郭伟峰.新型大纵肋正交异性钢板-混凝土组合桥面板优化设计及适用性研究[D].成都:西南交通大学, 2016.  
GUO Wei-feng. Research on optimization design and applicability of new large longitudinal rib orthotropic steel-concrete composite bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [16] SU Q, DAI C, XU C. Full-scale experimental study on the negative flexural behavior of orthotropic steel - concrete composite bridge deck[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23(12): 04018097.
- [17] 张清华,张鹏,刘益铭,等.新型大纵肋正交异性组合桥面板力学性能研究[J].*桥梁建设*, 2017, 47(3):30.  
ZHANG Qinghua, ZHANG Peng, LIU Yiming, *et al.* Study of mechanical behavior of new type of orthotropic composite bridge deck with large longitudinal U-ribs[J]. *Bridge Construction*, 2017, 47(3):30.
- [18] 公路钢结构桥梁设计规范: JTG D64-2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司, 2015.  
Specifications for design of highway steel bridge: JTG D64-2015 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部.普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002[S].北京:中国建筑工业出版社, 2003.  
Ministry of housing and urban-rural development of the people's republic of china: standard test method for mechanical properties of ordinary concrete: GB/T 50081—2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [20] 张哲.钢-配筋UHPC组合桥面结构弯曲受拉性能研究[D].长沙:湖南大学, 2016.  
ZHANG Zhe. Bending behaviors of composite bridge deck system composed of osd and reinforced uhpc layer[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [21] 单波.活性粉末混凝土基本力学性能的试验与研究[D].长沙:湖南大学, 2002.  
SHAN Bo. Experiment and research on basic mechanical properties of reactive powder concrete [D]. Changsha: Hunan University, 2002.
- [22] 管品武,涂雅箏,张普,等.超高性能混凝土单轴拉压本构关系研究[J].*复合材料学报*, 2019, 36(5):1295.  
GUAN Pinwu, XU Yazheng, ZHANG Pu, *et al.* A review on constitutive relationship of ultra-high-performance concrete under uniaxial compression and tension[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(5):1295.
- [23] 张劲,王庆扬,胡守营,等.ABAQUS混凝土损伤塑性模型参数验证[J].*建筑结构*, 2008(8):127.  
ZHANG Jin, WANG Qinyang, HU Shouying, *et al.* Parameters verification of concrete damaged plastic model of ABAQUS[J]. *Building Structure*, 2008(8):127.
- [24] SHI Z, SU Q, KAVOURA F, *et al.* Behavior of short-headed stud connectors in orthotropic steel-UHPC composite bridge deck under fatigue loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 160:106845.
- [25] 李立峰.正交异性钢箱梁局部稳定分析理论及模型试验研究[D].长沙:湖南大学, 2005.  
Li Lifeng. The analytical theory and model test research on local stability of orthotropic steel box girder [D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [26] 钢-混凝土组合桥梁设计规范:GB 50917-2013[S].北京:中国计划出版社, 2013.  
Code for design of steel and concrete composite bridges: GB 50917-2013[S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2013.
- [27] 史占崇,苏庆田,邵晓东等.钢-UHPC组合桥面板分段浇筑矩形接缝的轴拉性能[J].*土木工程学报*, 2022, 55(2):50.  
SHI Zhanchong, SU Qingtian, SHAO Xiaodong, *et al.* Axial tension behavior of segmented-casting rectangular joint of steel-UHPC composite bridge deck[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022, 55(2):50.
- [28] 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 Co., Ltd., 2015.