

独塔斜拉桥钢—混结合段的试验与数值研究

杨永伟¹, 李凯², 邓露^{3*}, 郭金龙¹, 高利乾¹

(1. 中铁九局集团第二工程有限公司, 吉林 吉林 132001; 2. 四平市城市发展投资控股有限公司, 吉林 四平 136000;

3. 湖南大学 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要:为了给独塔混合梁斜拉桥钢—混结合段的设计提供指导,基于四平市东丰路独塔单索面混合梁斜拉桥,制作了桥梁钢—混凝土结合段的1:4缩尺试验模型,研究在轴力和弯矩共同作用下结合段的应力分布及混凝土与钢之间的相对滑移,并结合有限元分析研究了承压板厚度、剪力钉直径、穿孔钢筋直径、剪力钉纵向间距和穿孔钢筋纵向间距5个参数对钢—混结合段传力机理的影响。研究表明:轴力和弯矩主要以轴向力模式以及剪切力模式在结合段内平稳传递;结合段各部位应力水平均处于容许范围内,具有较高的安全储备;钢—混结合段横截面局部刚度的差异导致截面横向应力波动显著;轴力主要通过承压板进行传递,其次是剪力钉及PBL剪力键,分别约占50%、35%和15%。

关键词:混合梁斜拉桥; 试验研究; 钢—混结合段; 缩尺模型; 有限元分析

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

混合梁斜拉桥作为一种钢—混凝土组合型桥梁,其主跨梁体为质地较轻的钢梁,边跨采用具有压重效应的混凝土梁,较常规斜拉桥更易在大跨可行性和经济性之间找到最佳平衡^[1-3]。20世纪60年代Leverkussen桥设计时,德国首次提出了混合梁斜拉桥的概念,自此在世界范围内建立了许多混合梁斜拉桥^[4-5]。近年来,中国先后修建了大量的混合梁斜拉桥,如厦门马新大桥、宁波甬江特大桥、洋浦大桥、江顺大桥、鸭池河大桥等。

钢—混结合段作为钢梁与混凝土梁的连接结构,是确保内力在两种不同材料间平稳传递的关键,其结构设计的合理性将直接影响桥梁的适用性和安全性。国内外学者针对钢—混结合段的结构性能开展了大量模型试验及数值分析。陈开利等^[6]对中国桃夭门大桥钢—混结合段的1:2缩尺模型进行了试验,研究其应力分布和剪力滞效应;He等^[7]通过对混合梁斜拉桥半桥模型的试验研究,分析了钢—混结合段内的应力分布、钢与混凝土之间的相对滑移及抗裂性能;Cheng等^[1]对某斜拉桥钢—混结合段局部的5个足尺试件进行了静力试验,研究了混合梁斜拉桥钢—混结合段过渡区内桥面板的力学性能,并通过数值分析,研究其荷载—滑移曲线、应力分布和失效模式。另外,研究人员

对混合梁斜拉桥钢—混结合段中使用的PBL剪力键也进行了推出试验。如He等^[8]研究了PBL剪力键的失效模式、延性和极限抗剪强度;Xiao等^[9]重点研究了测点布置、钢板厚度和混凝土抗压强度对PBL剪力键力学性能的影响。此外,还有一些学者通过试验和理论研究验证了混合梁设计方法的合理性^[10-15]。

国内外学者针对混合梁斜拉桥钢—混结合段的力学特性已进行了较为集中的研究。然而,已有研究大都基于局部模型试件,获得的结果无法准确反映钢—混结合段整体结构的力学特性。为此,该文基于四平市东丰路独塔单索面混合梁斜拉桥,制作了桥梁钢—混结合段1:4的缩尺模型试件,通过静力试验,研究了结合段混凝土与钢在轴力与弯矩共同作用下的应力分布和相对滑移,并通过数值分析,研究了承压板厚度、穿孔钢筋直径和剪力钉直径等参数对钢—混结合段传力机理的影响。

1 工程背景

东丰路独塔单索面混合梁斜拉桥,位于吉林省四平市。这座跨铁路桥梁主跨和边跨分别为169 m和90 m。主跨采用钢箱梁,边跨为预应力混凝土箱梁,

收稿日期:2021-10-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51778222);中国中铁股份有限公司科技研究开发计划项目(编号:2017-重点-11-01)

作者简介:杨永伟,男,大学本科,高级工程师。E-mail:zzq909@163.com

*通信作者:邓露,男,博士,教授。E-mail:dengl@hnu.edu.cn

梁高均为 3.4 m,如图 1 所示。桥面宽度 36 m,设双向六车道。桥面以上塔高 75 m,塔上共设 12 对斜拉索。桥塔上拉索间距均为 4 m,拉索在主跨上的锚固间距为 8 m,在边跨上的锚固间距为 6 m。钢—混结合段长度为 2.25 m,距离塔底中心的水平距离为 11.5 m。图 2 为桥梁钢—混结合段的剖面图。

2 缩尺试验模型的制作

缩尺试验模型在结构上可大致划分为 3 个部分,

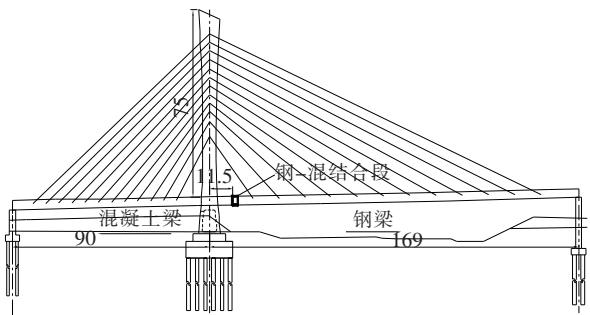
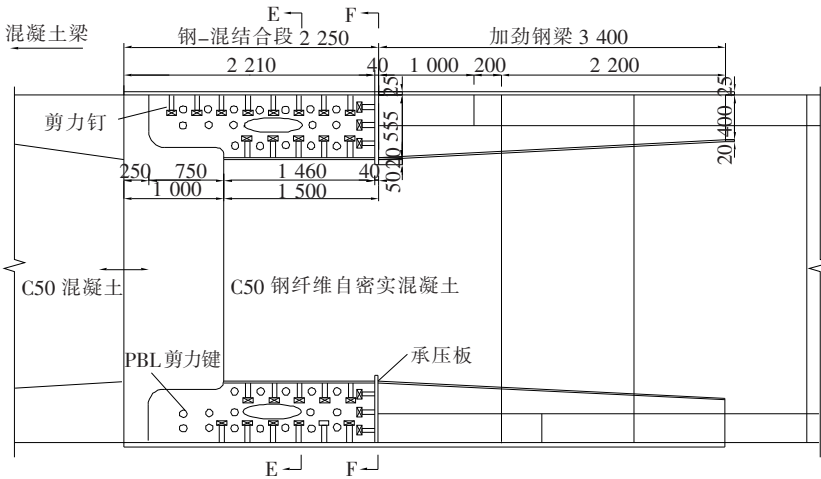
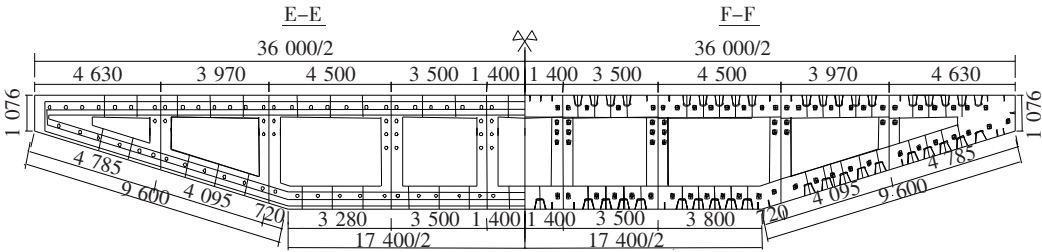


图 1 混合梁斜拉桥正视图(单位:m)



(a) 钢-混结合段纵向剖面图



(b) E-E 和 F-F 的横截面

图 2 钢—混结合段截面示意图(全尺寸)(单位:mm)

即多室钢箱梁、多室混凝土箱梁以及钢—混结合段。根据圣维南原理,为减小端部加载对应力分布的影响,钢梁和混凝土梁的长度分别取 5.4 m 和 4.4 m。钢—混结合段 1 : 4 的缩尺模型尺寸如图 3 所示,模型两端浇筑的厚混凝土板将用以试验加载,如图 3(a) 所示。图 3(b)、(c) 分别为混凝土箱梁和钢箱梁的典型横截面。

缩尺试验模型宽 9 m,高 0.85 m。钢梁的顶、底板厚度均为 6 mm,两侧斜腹板及腹板厚度分别为 4、5 mm。用于加劲顶、底板和腹板的 U 肋和 T 肋的厚度为 3~4 mm,跟其所处位置有关。值得注意的是,3

mm 是确保焊接质量的最小板厚,为此根据横截面面积和惯性矩等效的原则对某些细部构造进行了简化。

模型中钢—混结合段采用的是 C50 钢纤维自密实混凝土。混凝土箱梁的混凝土标号为 C50,其顶板、底板及腹板厚度如图 3(b) 所示。为了确保钢梁和混凝土梁之间良好连接,在钢—混结合段中设有剪力钉、承压板和 PBL 剪力键。剪力钉的直径、高度分别为 13 mm、38 mm,剪力钉的数量根据应力等效原则确定。开孔板的高度为 150 mm,厚度为 5 mm,将直径为 6 mm 的钢筋穿过开孔板上的圆孔,形成 PBL 剪力键,以加强混凝土梁和钢梁之间的联结。预应力钢

绞线布置如图 3(a)所示,缩尺模型和原型中使用的钢绞线直径相同,而模型中钢绞线数量根据应力等效原则减少至原型中钢绞线数量的 1/16。

图 4 展示了缩尺试验模型在试验室中的主要制造过程。待混凝土浇筑完成达到设计强度,用液压千斤顶张拉钢绞线至设计值,如图 5 所示。

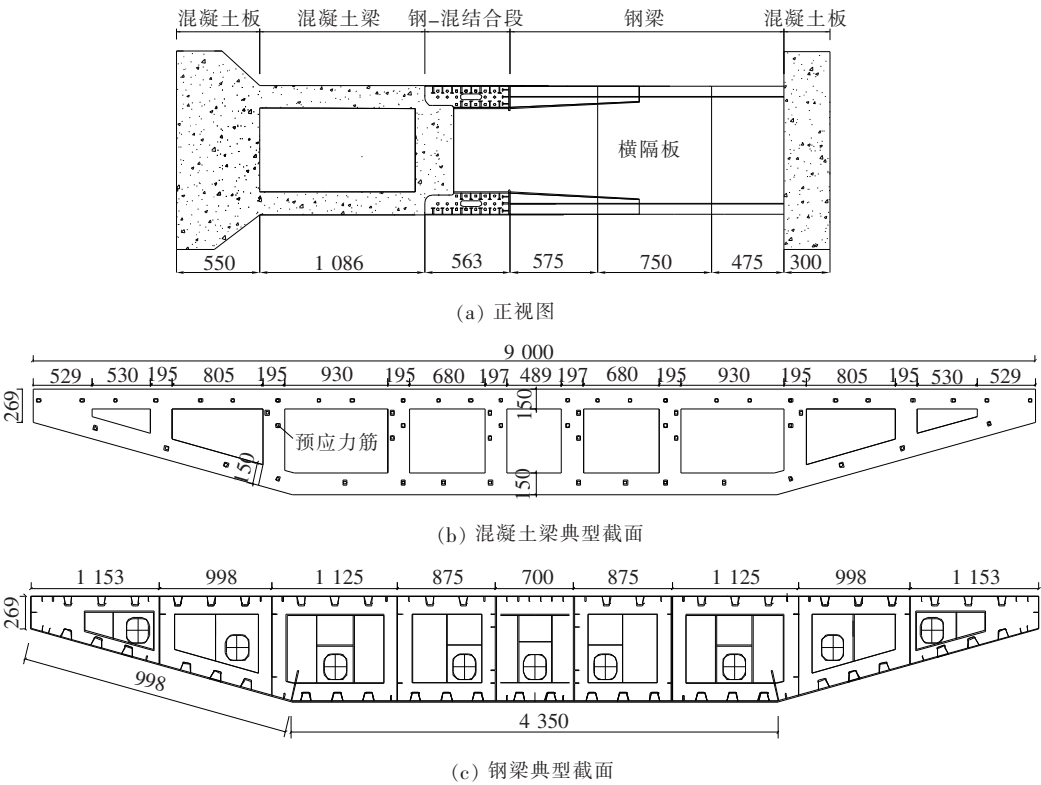
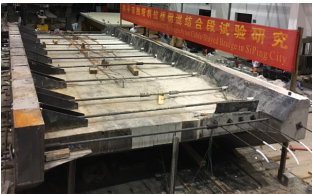


图 3 缩尺结合段模型示意图(单位:mm)



(a) 混凝土梁模板及焊接钢梁



(b) 缩尺模型成品

图 4 试验模型制造过程

试验使用 C50 混凝土的组成成分如表 1 所示,用于钢-混结合段的钢纤维自密实混凝土的成分与用于混凝土梁的普通混凝土的主要区别是前者中添加了 27 kg/m³ 的钢纤维,所用钢纤维长度为 29.9 mm,等效直径为 0.7 mm,拉伸强度为 465 MPa。模型采用

Q345 钢的设计强度为 310 MPa,弹性模量为 2.1×10^5 MPa。



图 5 预应力钢绞线张拉

表 1 混凝土配料 kg/m³

水	砂	石	水泥	掺合料	粉煤灰	硅粉
156	827	829	450	14.4	54.3	63.9

3 模型试验

3.1 加载程序

利用专业桥梁有限元分析软件 Midas/Civil 模拟

桥梁整体受力情况并进行等效分析,得到最不利荷载组合下钢-混凝土结合段的内力,根据应力等效原则,得到施加于缩尺模型上的轴力和弯矩,如表 2 所示。表 2 中列出了设计荷载及 1.7 倍设计荷载作用下结合段原型和缩尺试验模型承受的轴力和弯矩值。

表 2 原桥和缩尺模型结合段应施加的荷载

钢-混凝土结合段	设计荷载/1.7 倍设计荷载	
	轴力/kN	弯矩/(kN·m)
原桥	-1.08×10^5 /	-5.00×10^4 /
	-1.83×10^5	-8.49×10^4
缩尺模型	-6.70×10^3 /	-7.80×10^2 /
	-1.14×10^4	-1.33×10^3

采用逐步加载的方式进行试验,每次增加的荷载为设计荷载的 10%,直至测量设备显示测量数值稳定不变后,对各测点的应变数据进行记录。加载至 1 倍设计荷载后逐级卸载至零,再按相同的加载方式将模型加载至 1.7 倍设计荷载。

施加于模型上的轴力和弯矩通过自平衡体系实现,如图 6 所示。加载端横截面上共设有 29 个加载点,用以穿过精轧螺纹钢实现加载。试验中调整各精轧螺纹钢的张拉力,使得张拉力总和等于梁体承受轴力设计值,而上、下排精轧螺纹钢之间的拉力差间接形成了设计所需的弯矩。

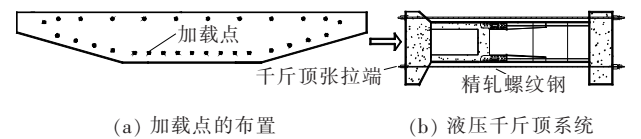


图 6 加载系统

3.2 测点布置

如图 7(a) 所示,沿模型纵向共设有 13 个测量截面,截面上应变片布置如图 7(b) 所示。为了测量混凝土和钢之间的相对滑移,钢-混凝土结合段顶底板表面用于测量钢板和混凝土的应变片成对布置,其中一个应变片附着在钢板的上表面上,另一个应变片嵌入紧贴钢板的混凝土中。两个应变片测得的应变差即为两种材料之间的相对滑移。此外,对结合段一个箱室中的开孔板和穿孔钢筋的应变也进行了监测,如图 7(c) 所示。

4 试验结果

4.1 板表面应力

图 8、9 分别为加载至 1.7 倍设计荷载过程中混凝

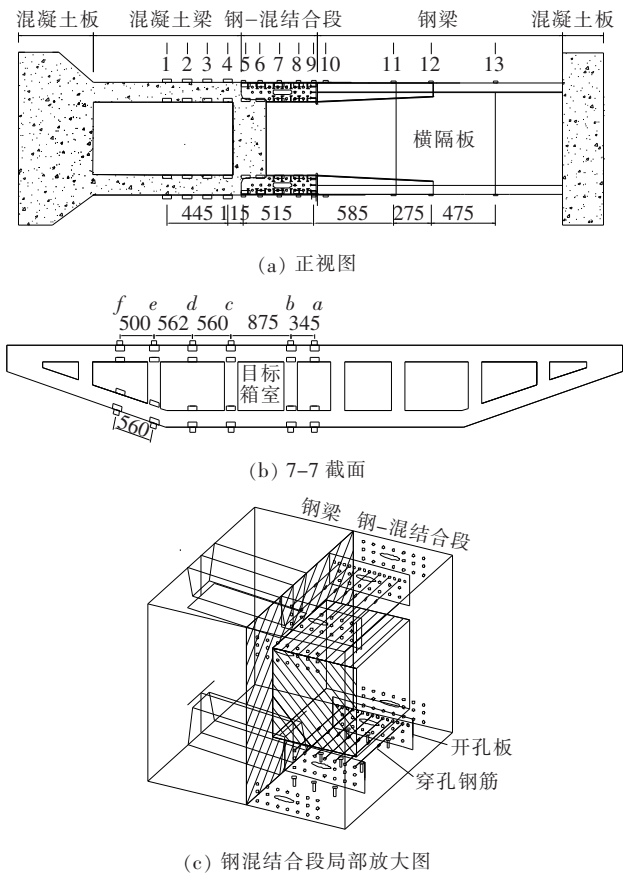


图 7 传感器布置(单位:mm)

土梁和钢梁上监测点的应力与荷载的关系。每个应力为 6 个应变片所测应力平均值,且图中的应力都包含预应力效应。

由图 8、9 可知:在加载过程中,钢梁与混凝土梁截面的应力随荷载的增加呈近似线性增加;在 1.7 倍设计荷载作用下,钢-混凝土结合段模型仍处于线弹性阶段,其中混凝土梁的最大平均压应力为 8.38 MPa,出现在 1-1 截面顶板上表面,而钢梁最大平均压应力为 70.82 MPa,出现在 12-12 截面底板下表面。如图 3(b) 所示,由于混凝土梁顶板处的预应力筋布置量大于底板处,混凝土梁的最大压应力出现在顶板。

图 10 为 1.0 倍和 1.7 倍设计荷载作用下模型顶、底板纵向应力的分布情况。从图 10 可以看出:在 1.7 倍设计荷载作用下,钢梁底板下表面的压应力从 12-12 截面的 70.82 MPa 降至 9-9 截面的 41.97 MPa,在 5-5 截面降至 1.40 MPa;混凝土中的压应力从 9-9 截面到 1-1 截面略有增加。这表明轴力和弯矩通过钢-混凝土结合段在混凝土梁和钢梁之间能较为平稳地传递。如图 7(a) 所示,不同截面之间的刚度差异可能是导致不同截面上应力变化的原因。

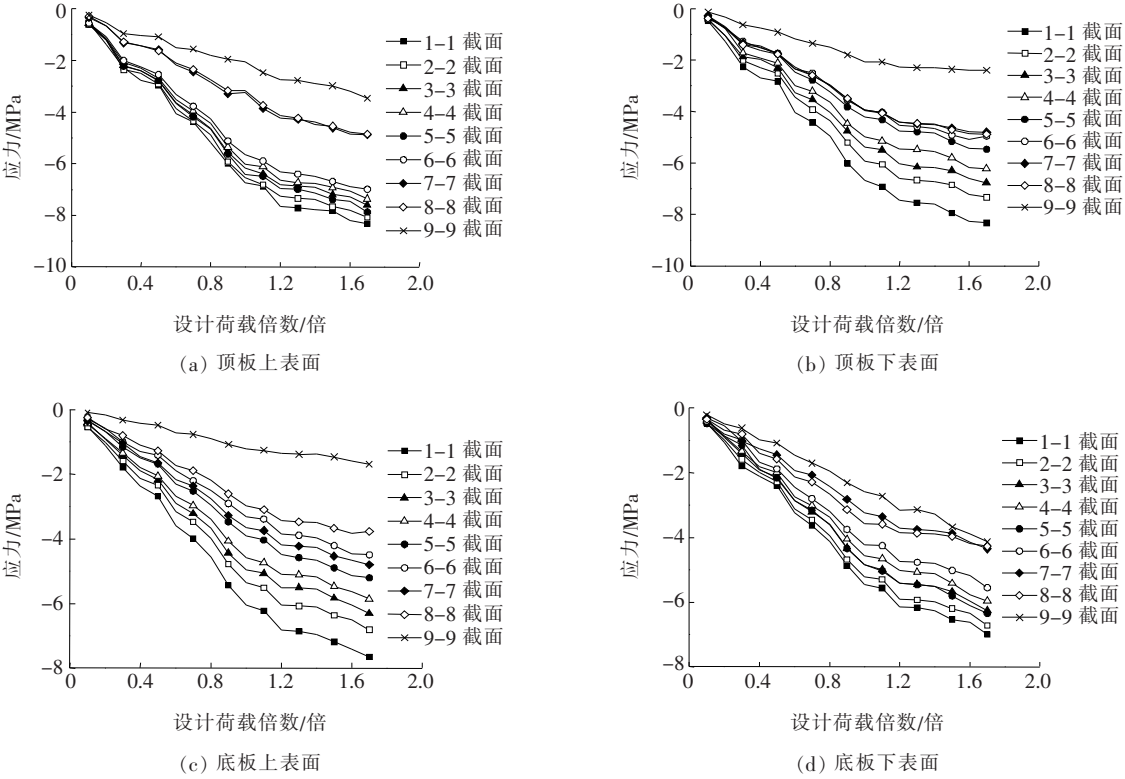


图 8 混凝土梁不同截面的荷载—应力曲线

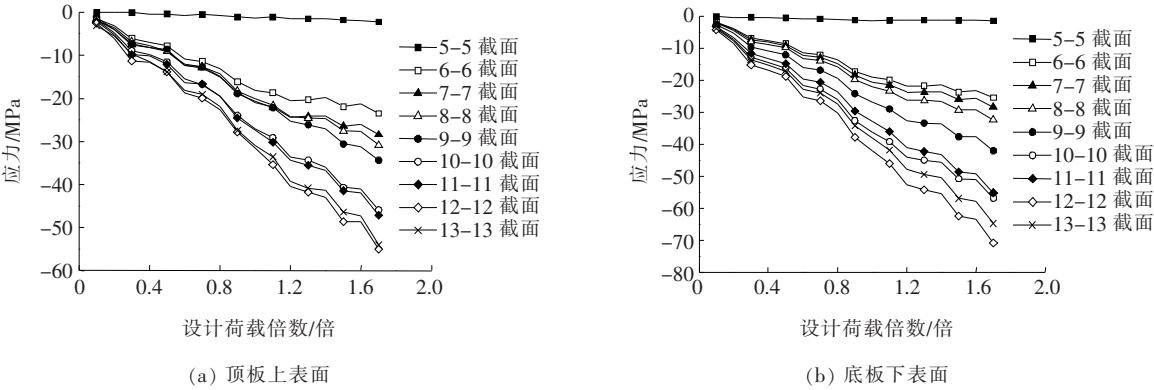


图 9 钢梁不同截面的荷载—应力曲线

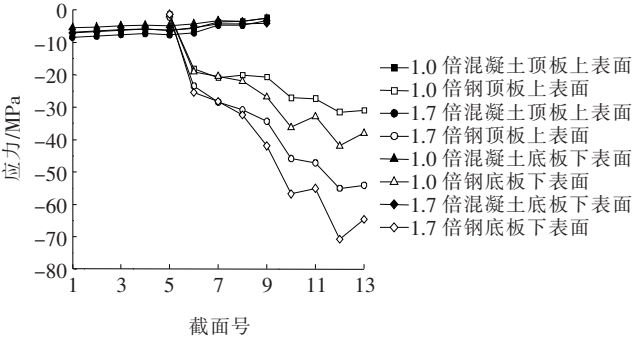


图 10 模型顶板和底板的纵向应力分布

(截面号 1 表示 1—1 截面,其他类似。下同)

在 1.0 倍和 1.7 倍设计荷载作用下,1—1 截面和 12—12 截面上不同测点处的纵向应力如图 11 所示。

由图 11 可知:模型顶板和底板不同表面上测得的纵向应力有所差别,这很大程度上是因为横截面不同位置处局部刚度不同所致。例如,在 12—12 截面中,诸如 U 形肋和 T 形肋之类的加劲肋会显著改变横截面的局部刚度。He 等^[7]在其研究中也发现了类似的趋势。

4.2 穿孔钢筋及开孔板的应力

为了研究 PBL 剪力键的力学性能,如图 7(c)所

示,在目标箱室的穿孔钢筋及相应开孔板表面上安装了应变片。图 12、13 分别为顶板和底板上穿孔钢筋的荷载—应力曲线和应力分布。由图 12(a)和图 13(a)可知:每根穿孔钢筋上的应力随荷载的增加几乎呈线

性增加;在 1.7 倍设计荷载作用下,最大拉应力出现在顶板穿孔钢筋 d_7 处,约为 6.7 MPa;由图 12(b)和图 13(b)可知:沿混凝土梁到钢梁方向,穿孔钢筋上的应力呈现逐渐增加的趋势。

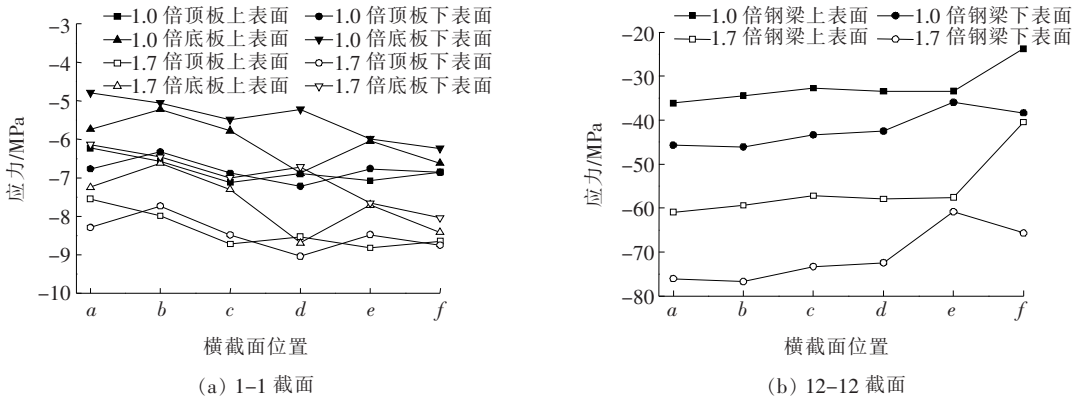


图 11 1—1 截面和 12—12 截面不同位置处的纵向应力分布

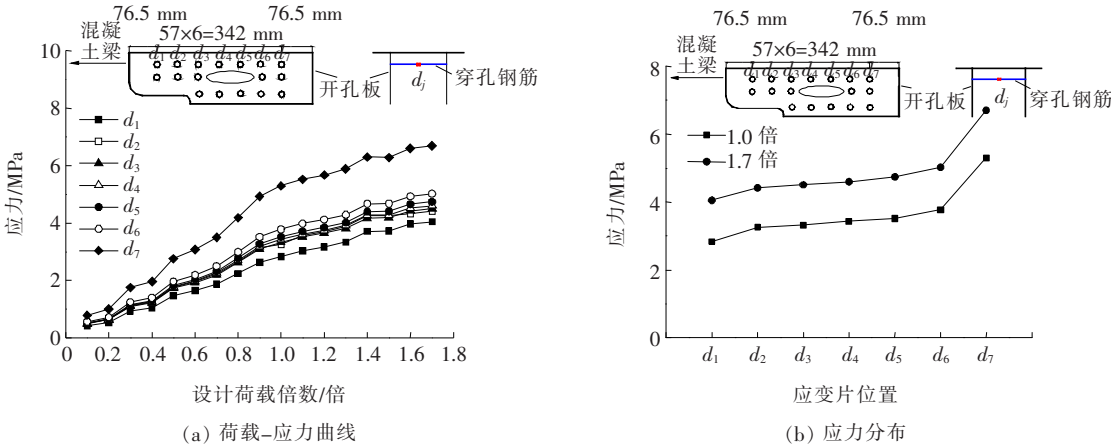


图 12 顶板穿孔钢筋的荷载—应力关系

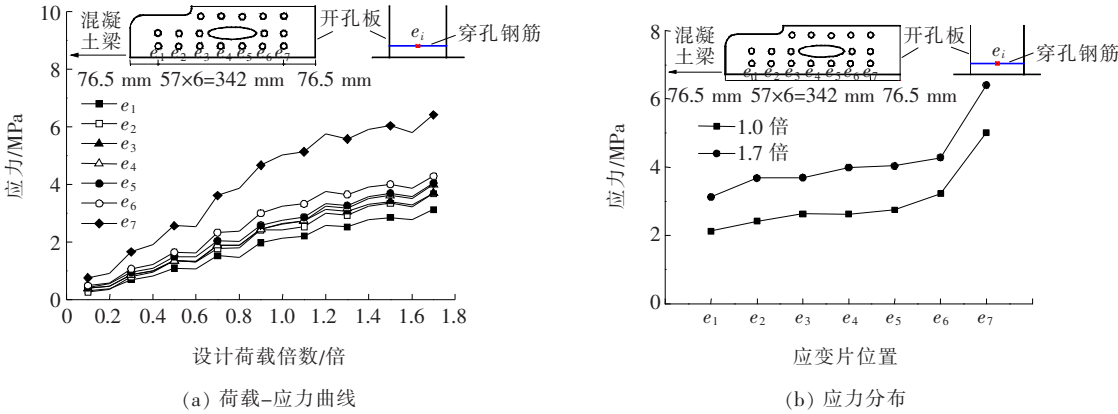


图 13 底板穿孔钢筋的荷载—应力关系

图 14、15 分别为位于顶、底板处开孔板的荷载—应力曲线和应力分布。从图 14(a)和图 15(a)中可以

看出:顶、底板处开孔板相应测点处的压应力基本随荷载线性增加。在 1.7 倍设计荷载作用下,最大压应力

出现在开孔板 a_8 处,约为 35 MPa;由图 14(b)和图 15(b)可得:沿混凝土梁到钢梁方向,开孔板上的压应力

也呈现出增加的趋势。由于 a_6 测点相应应变片失效,因此没有记录开孔板 a_6 处的应力结果。

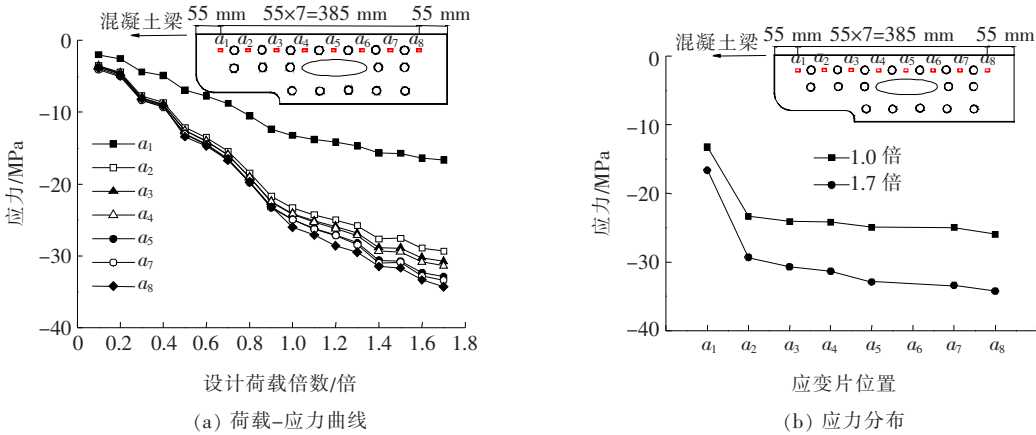


图 14 顶板开孔板荷载-应力关系

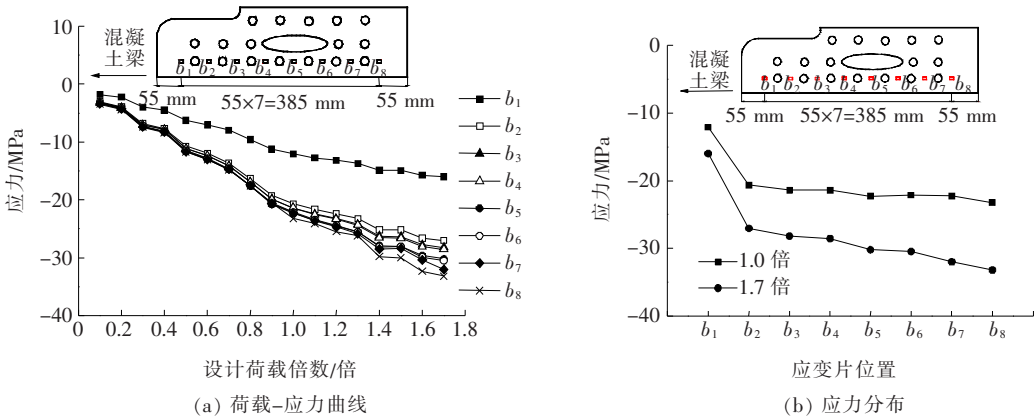


图 15 底板开孔板荷载-应力关系

4.3 钢与混凝土之间的相对滑移

为了研究钢-混结合段中钢和混凝土之间的相对滑移,在结合段的每个测量截面上均安装了 6 组传感器,如图 7(b)所示。相对滑移由钢材表面和与其靠近的混凝土表面上的成对应变片测得。图 16 为在 1.0 倍和 1.7 倍设计荷载作用下,钢-混结合段 5 个测量截面处钢与混凝土之间的相对滑移。由图 16 可知:相对滑移从 5-5 截面到 7-7 截面逐渐减少,在 7-7 截面到 9-9 截面又逐渐增加。在 1.7 倍设计荷载作用下,钢与混凝土之间的最大相对滑移约为 $34\ \mu\epsilon$ 。这表明在试验荷载水平下,钢和混凝土之间存在微小的相对滑移。

5 钢-混结合段内力传递机理

采用 Midas 有限元软件分析表明钢-混结合段

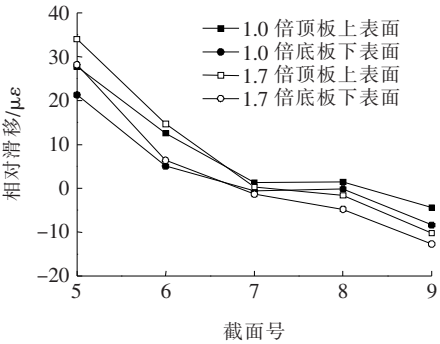


图 16 结合段中钢与混凝土之间的相对滑移

主要承受轴力与弯矩作用。图 17 为钢-混结合段的内力传递模式和内力传递路径。由图 17 可知:结合段中有两种主要的传力模式:① 通过 P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 路径的轴力传递模式;② 通过 P_5 、 P_6 和 P_7 路径的剪力传递模式。实际上,钢-混结合段承受的部分轴力及弯矩以轴力传递模式通过承压板传递,剩余的轴力和

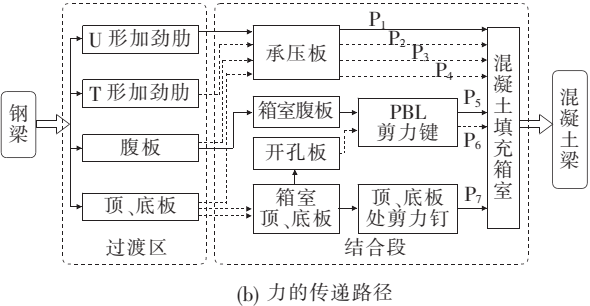
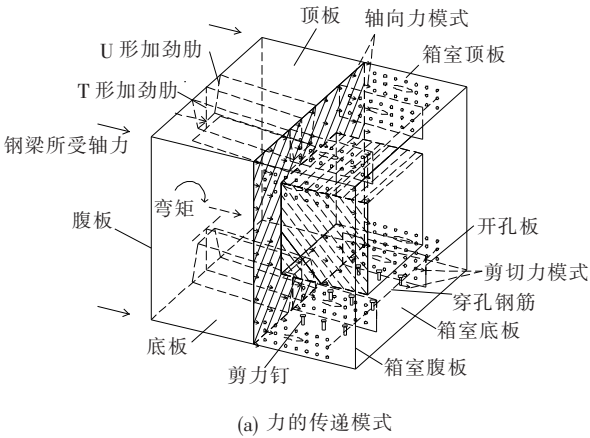


图 17 钢梁与混凝土梁之间传力机理示意图

弯矩以剪力传递模式通过剪力钉和 PBL 剪力键传递。

6 有限元分析

由于承压板、剪力钉和 PBL 剪力键是钢-混结合段中荷载传递的主要媒介,因此通过有限元数值分析,研究包括承压板厚度、剪力钉直径、穿孔钢筋直径、剪力钉间距和穿孔钢筋间距在内的 5 个参数对于轴力传递比率的影响。

首先建立原桥钢-混结合段的有限元模型并根据试验结果对模型进行修正。然后,研究了承压板厚度、剪力钉直径、穿孔钢筋直径、剪力钉纵向间距以及穿孔钢筋纵向间距 5 个参数对钢混结合段轴力传递比例的影响。承压板厚度考虑了 6 种常见的规格,分别为 20 mm、30 mm、40 mm、50 mm、60 mm 和 100 mm;剪力钉直径考虑了典型的 5 种,分别为 13 mm、16 mm、19 mm、22 mm 和 25 mm;穿孔钢筋直径也考虑了典型的 5 种,分别为 16 mm、18 mm、20 mm、22 mm 和 25 mm;剪力钉和穿孔钢筋纵向间距选取了 3 种,都分别为 125 mm、250 mm 和 500 mm。在进行参数分析时,每次只改变一个参数,其他 4 个参数均与实桥一致。在实桥结构中,承压板厚度、剪力钉直径、穿孔钢筋直径分别为 40 mm、22 mm 和 20 mm,剪力钉和穿孔钢

筋的纵向间距都是 250 mm。

6.1 数值模型的建立与验证

使用大型商业有限元软件 Ansys 建立了原桥钢-混结合段的有限元数值模型,如图 18 所示。

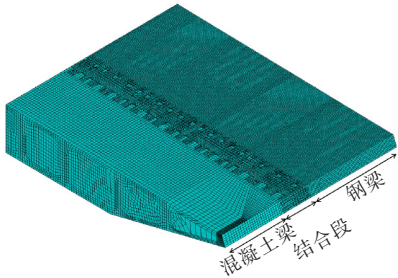


图 18 结合段的足尺数值模型

为了减少计算量,只建立了结合段的半模型。模型中混凝土用 Solid65 单元模拟,钢板用 Shell63 单元模拟,剪力钉和 PBL 剪力键分别用 Combin39 单元和 Beam4 单元模拟。各单元的初始参数值均由结合段的材料和结构特性确定。预应力通过设有初始应变的 Link8 单元施加在模型上^[16]。加载时,将混凝土梁端部所有节点的自由度进行约束,将实桥承受的轴力和弯矩全部施加于钢梁端部,施加的荷载见表 2。为保证收敛性,通过改变模型网格尺寸并结合试验结果进一步对模型进行修正^[17]。图 19 为在 1.0 倍和 1.7 倍设计荷载作用下,不同截面纵向应力的数值模拟结果及对应的试验结果。

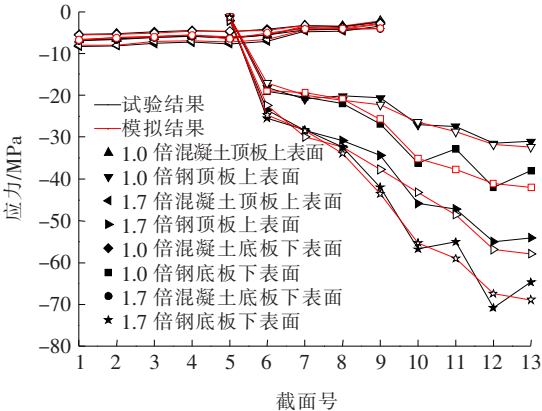


图 19 两个荷载水平下不同截面的数值模拟结果与相应试验结果对比

从图 19 可以看出:数值模拟结果与相应试验结果基本吻合,进一步说明数值模型的有效性。

6.2 参数分析

图 20 分别为承压板厚度、剪力钉直径、穿孔钢筋直径、剪力钉纵向间距和穿孔钢筋纵向间距对轴力在承压板、剪力钉和 PBL 剪力键中传递比例的影响。从

图 20 可以看出:轴力主要由承压板传递,占比约为 50%,而 PBL 剪力键传递的轴力最小,约为 15%;从图 20(a)、(b)、(c)可以看出:改变承压板厚度、剪力钉直径或穿孔钢筋直径不会导致轴力传递比率发生明显变化;从图 20(d)、(e)可以看出:将剪力钉的纵向间距

从 125 mm 增加到 500 mm,会导致剪力钉传递的轴力比例从 36.8%下降到 30.3%;穿孔钢筋纵向间距从 125 mm 增加到 500 mm 时,通过其传递的轴力占比变化较小。需要注意的是,增大剪力钉和穿孔钢筋纵向间距意味着剪力钉和穿孔钢筋的数量将相应减少。

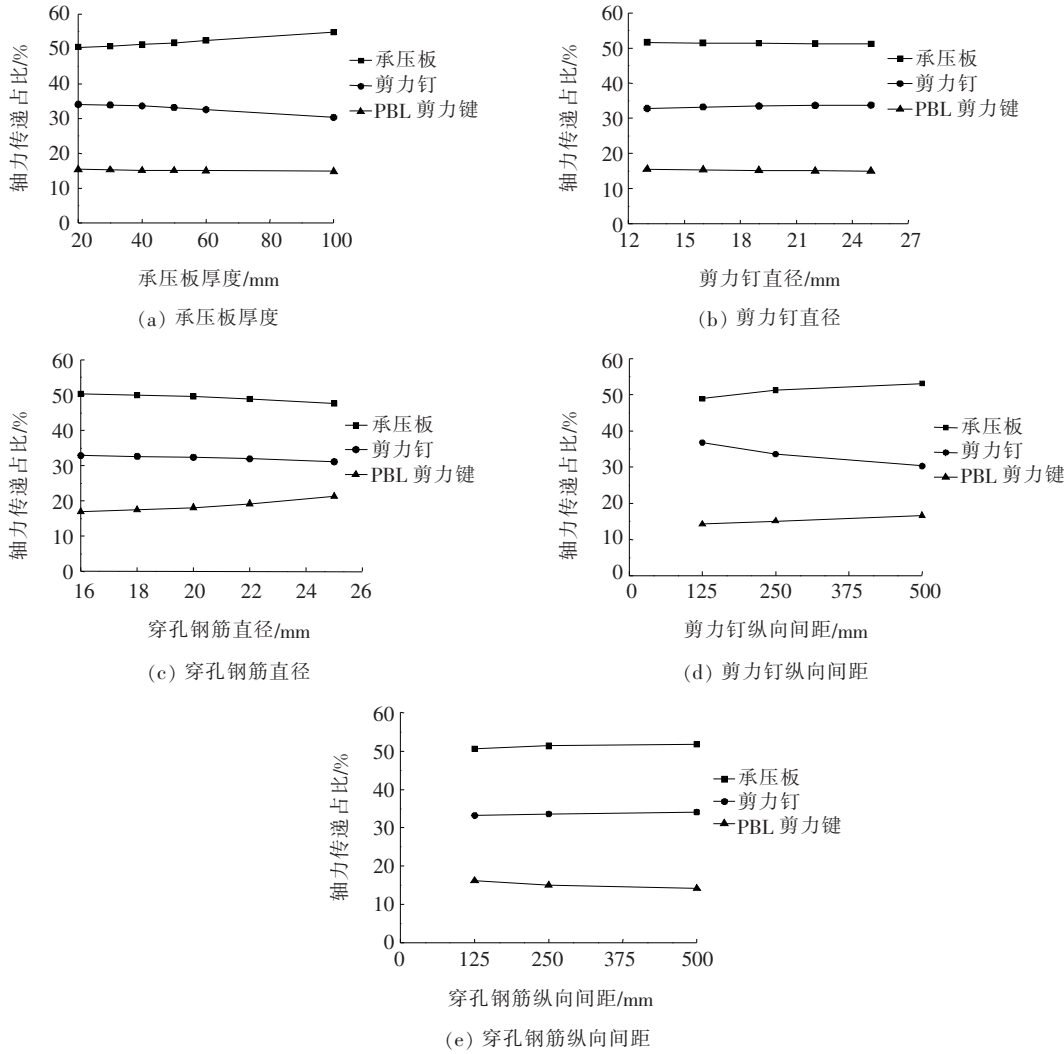


图 20 各参数对轴向力传递比率的影响

7 结论

该文以四平市东丰路独塔混合梁斜拉桥为工程背景,建立了钢-混结合段 1:4 的缩尺模型并进行静力试验,研究了轴力与弯矩共同作用下混凝土梁与钢梁之间的应力分布和相对滑移,并讨论了钢-混结合段的传力机理。通过有限元分析,研究了承压板、PBL 剪力键和剪力钉相关属性对于轴力传递的影响规律。根据研究结果,得出以下结论:

- (1) 钢和混凝土构件中的最大应力均在容许范围内,钢-混结合段具有较高的安全储备。由于结合段部位的横截面积大于钢梁的横截面积,所以最大压应力出现在钢梁段而不是钢-混结合段。
- (2) 钢梁和混凝土梁的纵向应力在同一横截面上有波动,这可能是横截面不同位置的局部刚度差异所致。
- (3) 在钢-混结合段中,轴力和弯矩通过轴向力模式和剪切力模式传递。
- (4) 轴力主要通过承压板传递,其次是剪力钉和

PBL 剪力键,三者占比分别约为 50%、35% 和 15%。确保承压板后混凝土的密实性对保证钢—混结合段能有效平稳地传递混凝土梁与钢梁之间的荷载非常重要。

研究结果表明:通过钢—混结合段,混凝土梁和钢梁之间的轴力和弯矩能较平稳地传递。以上研究结果对混合梁斜拉桥钢—混结合段的设计和试验具有重要参考价值和借鉴意义。

参考文献:

- [1] CHENG X, NIE X, FAN J S. Structural Performance and Strength Prediction of Steel-to-Concrete Box Girder Deck Transition Zone of Hybrid Steel-Concrete Cable-Stayed Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(11): 1—19.
- [2] HE J, LIU Y Q, CHEN A R, et al. Experimental Study on Inelastic Mechanical Behaviour of Composite Girders under Hogging Moment[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(1): 37—52.
- [3] VIRLOGEUX M. Recent Evolution of Cable-Stayed Bridges[J]. Engineering Structures, 1999, 21(8): 737—755.
- [4] 谢鸿. 独塔单索面混合梁斜拉桥钢—混结合段模型试验设计与分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [5] 赵瑞兴. 混合梁斜拉桥钢—混结合段受力特性及试验模型方案研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [6] 陈开利, 王戒躁, 安群慧. 舟山桃夭门大桥钢与混凝土结合段模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 86—90.
- [7] HE J, LIU Y Q, PEI B Z. Experimental Study of the Steel-Concrete Connection in Hybrid Cable-Stayed Bridges[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2014, 28(3): 559—570.
- [8] HE S H, FANG Z, FANG Y W, et al. Experimental Study on Perfobond Strip Connector in Steel-Concrete Joints of Hybrid Bridges[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 118(2): 169—179.
- [9] XIAO L, LI X Z, Ma Z J. Behavior of Perforated Shear Connectors in Steel-Concrete Composite Joints of Hybrid Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(4): 1—15.
- [10] AHN J H, LEE C G, WON J H, et al. Shear Resistance of the Perfobond-Rib Shear Connector Depending on Concrete Strength and Rib Arrangement[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(10): 1 295—1 307.
- [11] COSTA-NEVES L F, FIGUEIREDO J P, VELLASCO P C, et al. Perforated Shear Connectors on Composite Girders under Monotonic Loading: An Experimental Approach[J]. Engineering Structures, 2013, 56(3): 721—737.
- [12] D'ANTIMO M, DEMONCEAU J F, JASPART J P, et al. Experimental and Theoretical Analysis of Shear Bolted Connections for Tubular Structures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 138(6): 264—282.
- [13] KIM S H, LEE C G, KIM S J, et al. Experimental Study on Joint of Spliced Steel-PSC Hybrid Girder, Part II: Full-Scale Test of Spliced Hybrid I-Girder[J]. Engineering Structures, 2011, 33(9): 2 668—2 682.
- [14] KIMS E, NGUYEN H T. Finite Element Modeling and Analysis of a Hybrid Steel-PSC Beam Connection[J]. Engineering Structures, 2010, 32(9): 2 557—2 569.
- [15] SOTY R, SHIMA H. Formulation for Shear Force-Relative Displacement Relationship of L-Shape Shear Connector in Steel-Concrete Composite Structures[J]. Engineering Structures, 2013, 46(3): 581—592.
- [16] SAIBABU S, LAKSHMANAN N, MURTHY A R, et al. External Prestressing Technique for Strengthening of Prestressed Concrete Structural Components[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2009, 14(2): 90—98.
- [17] 马亚飞, 朱智轩, 谭旭, 等. 不对称转体斜拉桥球铰应力分析及不平衡力矩计算[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(2): 88—97.