

程 高,李梦飞,王鹏琪,等. 设剪力连接件的钢板混凝土节点受拉等效宽度计算理论[J]. 长安大学学报(自然科学版),2022,42(6):12-22.  
CHENG Gao,LI Meng-fei,WANG Peng-qi,et al. Calculation theory of tensile equivalent width in steel plate-concrete joints with shear connectors[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition),2022,42(6):12-22.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2022.06.002

## 设剪力连接件的钢板混凝土节点受拉 等效宽度计算理论

程 高<sup>1,2</sup>,李梦飞<sup>1</sup>,王鹏琪<sup>1</sup>,谢 亮<sup>3</sup>,韩 帅<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 西藏天路股份有限公司,西藏 拉萨 850000;  
3. 湖南省建筑设计院集团股份有限公司,湖南 长沙 410208)

**摘 要:**为研究钢板混凝土节点剪力连接件的合理布置及其节点受拉计算理论,基于 Winkler 弹性地基梁理论,建立了设剪力连接件的钢板混凝土节点受拉理论分析模型。将钢板等效为弹性地基梁,剪力连接件等效为弹性地基,基于平截面假定和微元体内力平衡条件建立了受拉荷载与节点变形的微分方程组,求解得到节点受拉有效工作宽度及变形特性。基于应力等效原则提出节点受拉等效宽度,并进行解析求解。通过受拉节点的梁单元有限元模型计算,验证基于 Winkler 弹性地基梁理论进行节点受拉理论分析假定的合理性。通过板壳-实体单元有限元计算,验证理论推导的工作宽度、等效宽度以及节点刚度计算方法的准确性。研究表明:设剪力连接件钢板混凝土受拉节点钢板的竖向位移沿纵向呈抛物线分布,符合经典弹性地基梁基本假定;节点工作宽度、等效宽度、抗拉刚度取决于节点处钢板的抗弯刚度、剪力连接件抗剪刚度和密度;节点工作宽度和等效宽度均随钢板截面抗弯惯性矩的增加而增大,随剪力连接件抗剪刚度增加而减小;节点受拉刚度随钢板截面抗弯惯性矩和剪力连接件抗剪刚度的增加而增大;并给出节点受拉工作宽度、等效宽度和抗拉刚度解析计算公式。

**关键词:**桥梁工程;钢板混凝土;Winkler 弹性地基梁;等效宽度;受拉节点;节点刚度;有限元验证  
**中图分类号:**U441 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-8879(2022)06-0012-11

### Calculation theory of tensile equivalent width in steel plate-concrete joints with shear connectors

CHENG Gao<sup>1,2</sup>, LI Meng-fei<sup>1</sup>, WANG Peng-qi<sup>1</sup>, XIE Liang<sup>3</sup>, HAN Shuai<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Xizang Tianlu Co, Ltd, Lasa 850000, Xizang, China; 3. Hunan Architectural Design Institute Group Co, Ltd, Changsha 410208, Hunan, China)

**Abstract:** In order to study the reasonable arrangement of shear connectors and tensile theory of steel plate and concrete joints, a theoretical analysis model of steel plate-concrete joints with shear connectors based on Winkler elastic foundation beam theory was established. The steel

收稿日期:2022-04-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51978061);中国博士后科学基金项目(2020M673601XB);

陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2022KXJ-036);陕西省交通运输科技项目(21-45K、19-14K)

作者简介:程 高(1988-),男,河南泌阳人,高级工程师,博士研究生导师,E-mail:chengg@chd.edu.cn。

plate was equivalent to the elastic foundation beam, and the shear connector was equivalent to the elastic foundation. Based on the plane section assumption and the internal force balance condition of the microelement, the differential equations of tensile load and joint deformation were established, and the effective working width and deformation characteristics of the joint under tension were obtained. Based on the principle of stress equivalence, the equivalent width of joints under tension was proposed and solved analytically. Through the calculation of the beam element finite element model of the tension joint, the rationality of the joint tension theory analysis assumption based on the Winkler elastic foundation beam theory was verified. Through the finite element calculation of plate-shell-solid element, the accuracy of the calculation method of working width, equivalent width and joint stiffness deduced by theory was verified. The results show that the vertical displacement of the steel plate with shear connectors shows a parabola distribution along the transverse direction, which accords with the basic assumption of the classical elastic foundation beam. The working width, equivalent width and tensile stiffness of the joint depend on the bending stiffness of the steel plate at the joint, the shear stiffness and density of the shear connector. The working width and equivalent width of the joint increase with the increase of the bending inertia moment of the steel plate section, and decrease with the increase of the shear stiffness of the shear connector. The tensile stiffness of the joint increases with the increase of the bending inertia moment of the steel plate section and the shear stiffness of the shear connector. The analytical formulas for calculating the tensile working width, equivalent width and tensile stiffness of joints are given. 16 figs, 33 refs.

**Key words:** bridge engineering; steel plate-concrete; Winkler elastic foundation beam; equivalent width; tension joint; joint stiffness; finite element verification

## 0 引言

钢板-混凝土组合结构通过抗剪连接件使二者协同受力,逐渐应用于钢-混凝土组合桥塔、桁腹式组合梁桥、钢板混凝土剪力墙等结构<sup>[1-5]</sup>。节点受拉是钢混组合结构中一种常见的受力状态,如钢横梁与组合索塔连接节点<sup>[6]</sup>、锚拉板与混凝土主梁组合锚固区<sup>[7]</sup>、桁腹式组合梁桥节点<sup>[8]</sup>、钢牛腿-钢锚梁索塔锚固区<sup>[9]</sup>以及螺栓连接钢梁-内置型钢混凝土柱连接节点<sup>[5]</sup>。

钢-混凝土节点区域受力较为复杂,是钢混组合结构中的薄弱部位,围绕钢板(壳)混凝土节点、钢管混凝土节点受拉性能的研究一直是钢混组合结构领域的研究热点。文献[10]提出钢锚板式钢-混组合新型索塔锚固体系,并应用于青岛海湾大桥红岛航道桥<sup>[11]</sup>,通过试验与有限元数值分析,揭示了钢锚板式钢-混组合索塔锚固体系在对称索力作用下力的传递机理,给出了弹性阶段和塑性阶段钢锚板和混凝土塔柱承担的水平力比例。文献[12]开展了港珠澳大桥青州航道桥索塔与结形撑节段精细化数值分析,分析了节点区域应力分布特征。文献[13]进

行了钢牛腿-钢锚梁组合索塔锚固区空间实体-壳单元有限元分析以及足尺模型试验,探究了锚固区应力分布模式以及水平力分配比例。文献[14]对钢牛腿-钢锚梁组合索塔锚固区进行精细化有限元分析,研究了其传力机理,得到了不平衡分力导致的剪力钉拉拔力分布。文献[15]进一步对内置连接型钢锚箱进行足尺模型试验以及有限元分析,研究了剪力连接件荷载分布规律、界面相对滑移量以及荷载传递机理,探讨了不同参数对应力分布水平的影响程度。文献[16]进行了混凝土主梁斜拉桥锚拉板式索梁锚固区实桥试验与有限元分析,探究了组合锚拉板的工作性能及应力扩散情况。文献[7]对混凝土主梁斜拉桥锚拉板式索梁锚固区进行有限元分析,考虑了剪力连接件的作用,探究了钢混锚固区域的受力性能,得到了剪力连接件竖向分力的分布。文献[17]进一步考虑摩擦效应对锚拉板式索梁锚固区界面传力性能的影响。文献[18]对桁腹式组合桁梁桥进行静载试验与有限元分析,得到了节点破坏模式、应力分布以及承载能力,探究节点区域 PBL 剪力连接件的传力性能。文献[3]对桁腹式组合桁梁桥 PBL 型节点进行静载试验,探究了埋深对节点刚

度以及应力分布的影响。

现有研究不仅通过依托工程模型试验与有限元分析系统阐述了钢板混凝土节点的破坏模式、传力比例、应力分布、节点刚度等性能,而且在节点受拉机理和计算理论方面也进行了一些探索。文献[19]在对钢-混凝土混合索塔钢混结合段荷载传递机理进行理论研究时,认为栓钉的抗剪(抗拔)作用可以使用弹簧来模拟。文献[20]等给出了钢-混凝土 T 形节点固端梁模型,考虑了支管对主管顶板局部刚度的加强,基于结构力学力法推导了节点受拉刚度,给出了节点受拉有效长度半经验半理论公式。文献[21]在固端梁模型的基础上,基于构件法推导出钢-混凝土 T 形节点受拉刚度半经验半理论公式,并进一步考虑了支-主夹角,给出了 Y 形节点受拉刚度。文献[22]等认为 PBL 剪力连接件与混凝土之间的抗剪作用可以等效为弹簧连接,建议将设 PBL 剪力连接件的矩形钢管混凝土 T 形受拉节点等效为带弹簧固支梁模型,其中 PBL 剪力连接件等效弹簧刚度可以使用文献[23]提出的公式进行计算。文献[24]对设 PBL 剪力连接件矩形钢管混凝土板-管 T 形节点受拉性能进行理论研究,基于力法推导出节点刚度计算式,计算值与有限元数值解吻合程度较高。文献[25]等基于板壳实体有限元建模分析,采用最小二乘法拟合得到设剪力连接件的钢-混凝土节点等效分布宽度计算公式。文献[26]基于 Winkler 弹性地基梁理论,推导出设 PBL 剪力连接件钢-混凝土 T 形受拉节点工作宽度计算式,给出了 PBL 剪力连接件的设置范围。文献[27]基于弹性地基梁理论,推导出设 PBL 剪力连接件的钢-混凝土榀节点受拉刚度。文献[28]将矩形钢管混凝土节点变形归结为支板的轴向变形和主板的弯曲变形,通过对有限元结果数据拟合得到钢管混凝土节点的等效宽度计算公式。

综上,现有研究通过大量工程实践、模型试验与理论分析揭示了钢板-混凝土节点受拉性能,并在节点模型建立、理论假设、工作宽度、等效宽度、节点刚度等方面取得重要的理论成果,给出了节点工作宽度、等效宽度的计算公式。然而,所提出的节点等效宽度是通过有限元计算结果数据拟合得到的经验公式,且未考虑离散剪力连接件与连续界面传力行为的转换关系,尚未形成系统完善的分析理论。为此,在以上研究基础上,本文基于 Winkler 弹性地基梁理论建立节点受拉模型和微元体平衡方程,根据挠度方程给出设置剪力连接

件的钢板混凝土受拉节点工作宽度以及节点刚度,基于应力等效原则提出节点等效宽度并推导出其解析式,为剪力连接件布置、节点刚度以及承载能力计算提供理论依据。

## 1 节点受拉理论模型建立

以钢板混凝土受拉节点为隔离体进行内外力分析,钢板混凝土受拉节点的设计构造如图 1 所示。将作用于钢板混凝土节点的拉力视为集中力  $P$ ,拉力作用下钢板需要克服自身弯曲和剪力连接件的双重抵抗作用发生沿拉力作用方向形变。基于小变形假设,钢板和剪力连接件可视为处于弹性工作阶段;将离散的剪力连接件等效为连续弹簧,假定钢板任一点的拉力与该点的位移成正比,即符合 Winkler 地基梁基本假定。由此,建立了钢板混凝土节点受力学模型。

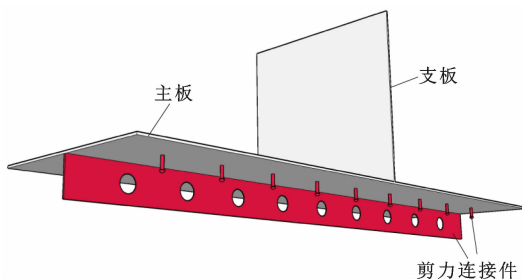


图1 钢板混凝土受拉节点的设计构造

Fig. 1 Design structure of steel plate-concrete tension joint

基于上述力学模型和 Winkler 地基梁理论,将钢板比拟为弹性地基梁,剪力连接件比拟为弹性地基,如图 2 所示。拉力主要由钢主板承担,随着离受拉力作用支板距离的增大而逐渐减小,可近似为无限长梁。以支板与主板的相交点为坐标原点,沿主板为  $x$  轴、沿支板为  $y$  轴,建立直角坐标系,并建立节点微段分析模型。沿  $x$  轴截取地基梁微段长度  $dx$ ,进行微元体平衡受力分析,如图 3 所示。等效弹簧的刚度设为  $k$ ;  $Q$ 、 $M$  分别为主板截面上的剪力和弯矩;  $y_0$  为初始挠度。则该处主板位移  $y$  与主板任一截面所受的拉力  $p$  的关系为

$$p = ky \quad (1)$$

Winkler 弹性地基梁假定单个弹簧只影响作用位置处主板的位移<sup>[29]</sup>。由平衡关系可得

$$\begin{cases} \frac{dQ}{dx} = p \\ \frac{dM}{dx} = Q \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)联立求解得钢主板拉力  $p$  与弹性地基

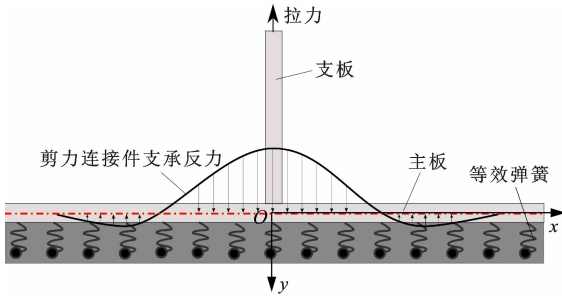


图 2 钢板混凝土节点等效分布宽度分析模型

Fig. 2 Analysis model of equivalent distribution width of steel plate-concrete joint

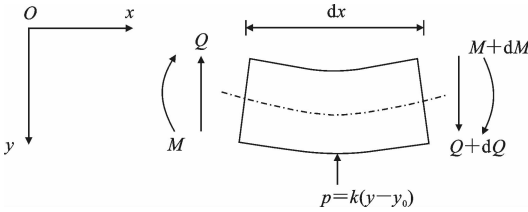


图 3 地基梁微段计算模型

Fig. 3 Calculation model of foundation beam micro-segment

梁截面弯矩  $M$  的关系为

$$\frac{d^2 M}{dx^2} = p \quad (3)$$

考虑主板处于弹性工作阶段,且截面应变符合平截面假定,因此

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -M \quad (4)$$

式中: $E$ 、 $I$  分别为主板的弹性模量和截面惯性矩。

将式(4)代入式(3)得到

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -p \quad (5)$$

又由式(1)主板拉力与位移的关系,代入式(5)可以得到

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + ky = 0 \quad (6)$$

令特征长度系数  $\gamma = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$ ,代入式(6)可得

$$y^{(4)} + 4\gamma^4 y = 0 \quad (7)$$

在集中荷载作用下, $y$  作为地基梁的挠度,满足  $y^{(4)} = 0$ 。由此,可得到微分方程(7)的通解为

$$y = e^{-\gamma x} (C_1 \sin(\gamma x) + C_2 \cos(\gamma x)) + e^{\gamma x} (C_3 \sin(\gamma x) + C_4 \cos(\gamma x)) \quad (8)$$

式中: $C_1 \sim C_4$  为待定系数。

基于 Winkler 弹性地基梁的特性,当  $x$  趋于无穷大时,主板的挠度应趋向于零,由此可以得到待定系数  $C_3 = C_4 = 0$ ,式(8)可以简化为

$$y = e^{-\gamma x} (C_1 \sin(\gamma x) + C_2 \cos(\gamma x)) \quad (9)$$

集中荷载作用于梁对称轴处,因此原点处截面转角等于零。基于力的边界条件,集中力右侧梁上的合力大小为  $P/2$ ,即

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx} \big|_{x=0} = 0 \\ \int_0^{+\infty} ky dx = \frac{P}{2} \end{cases} \quad (10)$$

根据以上边界条件,且利用其对称性,得到  $x \geq 0$  时梁的弯曲挠度方程如下

$$y = \frac{P\gamma}{2k} e^{-\gamma x} (\sin(\gamma x) + \cos(\gamma x)) \quad (11)$$

## 2 节点受拉力学指标分析

### 2.1 工作宽度

节点受拉工作宽度主要用于确定剪力连接件的设置范围。节点在拉力作用下产生变形长度可视为工作宽度,该范围内剪力连接件承受了所有拉力,工作宽度示意图如图 4 所示。

令式(11)左边等于零,即

$$0 = \frac{P\gamma}{2k} e^{-\gamma x} (\sin(\gamma x) + \cos(\gamma x)) \quad (12)$$

求得  $x = \frac{3\pi}{4\gamma}$ ,此时仅为受拉半工作宽度,则受拉工作宽度  $l_x$  可表示为

$$l_x = \frac{3\pi}{2\gamma} = \frac{3\pi}{2} \sqrt[4]{\frac{4EI}{k}} \quad (13)$$

### 2.2 等效宽度

节点受拉等效宽度是进行钢板混凝土节点受拉承载力和刚度简化计算的关键参数。拉力荷载作用下竖向拉应力沿主板长度方向呈抛物线分布,支板与主板的相交点处拉应力最大。假定主板最大拉应力在一定长度范围均匀分布<sup>[21]</sup>,拉应力在工作宽度范围积分等于拉力  $P$ ,如图 4 所示。基于以上原则,可得到等效宽度  $l_{\text{eff}}$  的表达式如下

$$l_{\text{eff}} = \frac{P}{\sigma_{\max} b} \quad (14)$$

式中: $b$  为主板宽度; $\sigma_{\max}$  为最大拉应力。

由式(11)可得,拉应力  $\sigma_x$  沿  $x$  轴分布为

$$\sigma_x = \frac{ky}{b} = \frac{P\gamma}{2b} e^{-\gamma x} (\sin(\gamma x) + \cos(\gamma x)) \quad (15)$$

当  $x=0$  时, $\sigma_x$  取最大值

$$\sigma_{\max} = \frac{P\gamma}{2b} \quad (16)$$

将式(16)代入(14),等效宽度计算式可以进一步推导为

$$l_{\text{eff}} = \frac{P}{\sigma_{\max} b} = \frac{2}{\gamma} = \frac{2}{\sqrt[4]{k/(4EI)}} \quad (17)$$

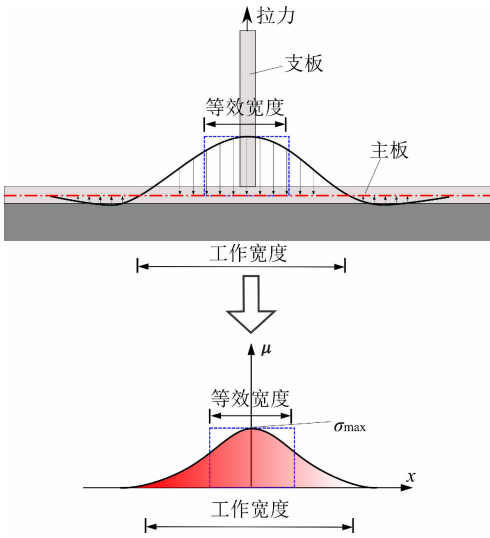


图4 工作宽度与等效宽度的关系

Fig. 4 Relationship between working width and equivalent width

钢板混凝土节点剪力连接件按照一定间距布置,将剪力连接件抗剪刚度等效为连续地基刚度,其换算关系为

$$k = k_e n / l \quad (18)$$

式中: $k_e$ 为单个剪力连接件的抗剪或抗拔刚度; $n$ 为剪力连接件的个数; $l$ 为剪边连接件设置长度。

因此,式(17)可以进一步推导为

$$l_{\text{eff}} = \frac{2}{\sqrt[4]{nk_e / (4EI)}} \quad (19)$$

取剪力连接件在单位长度范围布置密度  $\mu = n/l$ , 则式(19)可进一步变为

$$l_{\text{eff}} = \frac{2}{\sqrt[4]{\mu k_e / (4EI)}} \quad (20)$$

### 2.3 节点刚度

节点刚度是力与竖向位移的关系,即节点产生单位竖向位移所需要的力<sup>[30]</sup>,由式(11)、式(17)可得节点刚度  $K$  解析式为

$$K = \frac{P}{P\gamma/2k} = \frac{2k}{\gamma} = \sqrt[4]{64k^3 EI} = \mu k_e l_{\text{eff}} \quad (21)$$

## 3 节点受拉模型验证

为验证上述理论假定及推导过程的准确性,分别建立了钢板混凝土节点受拉梁单元有限元模型和板壳-实体有限元模型。基于上述理论模型,梁单元模型中平截面假定、地基刚度、地基梁抗弯刚度及求解方法与上述节点受拉模型一致,可认为梁单元模型得到的地基反力及主梁竖向位移均为真值,能够用于验证板壳-实体有限元建模方法的可靠性。基于板壳-实体有限元模型计算结果,

验证本文理论模型中剪力连接件刚度等效验算,节点受拉工作宽度、等效宽度及节点抗拉刚度计算的准确性。

为提高计算效率且便于进行对比分析,选取双钢板混凝土节点作为算例。其中,钢板混凝土长度取为 2 000 mm,混凝土截面长宽均为 200 mm,混凝土弹性模量为 25 GPa,泊松比为 0.2。钢板截面宽、厚为 200、10 mm,弹性模量为 206 GPa。钢板与混凝土之间设剪力连接件,根据单孔剪力连接件抗剪刚度和孔距确定弹性地基刚度<sup>[31-32]</sup>。基于有限元分析软件 ABAQUS 建立实体-壳单元模型,不考虑材料非线性和几何非线性。混凝土采用 C3D8R 单元,钢板采用 S4R 单元,两者采用结构网格划分的方式来划分单元。钢板与混凝土之间的接触使用黏性行为定义,模拟地基梁连续弹簧<sup>[33]</sup>。约束混凝土底面的平动自由度,拉力作用于钢板中截面顶点处,拉力值为 10 t。有限元模型如图 5 所示。

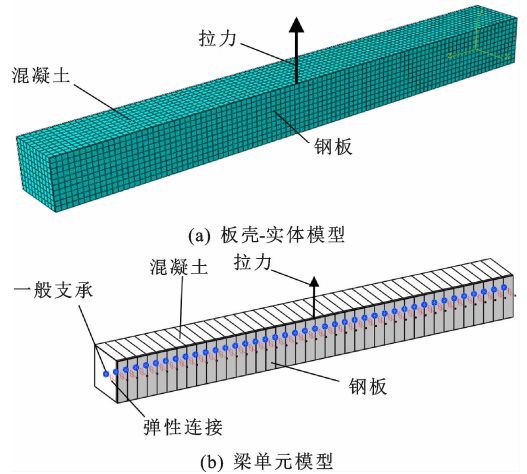


图5 实体-壳单元模型

Fig. 5 Solid-shell element model

改变剪力连接件的抗剪刚度,可获得不同的弹性地基刚度,从而得到对应的钢板竖向变形规律,如图 6 所示。基于梁单元得到钢板竖向位移量与板壳-实体单元模型中钢板中性轴位置竖向位移量基本一致,在此仅给出板壳-实体模型中钢板中性轴处竖向变形。由图 6 可知:拉力作用位置竖向变形最大,由该处向两侧逐渐减小,远端甚至出现微小的负位移;竖向变形曲线整体呈现抛物线形状,这与地基梁理论位移分布规律一致。工作宽度以及最大形变量随着地基刚度的增大呈现减小的趋势。



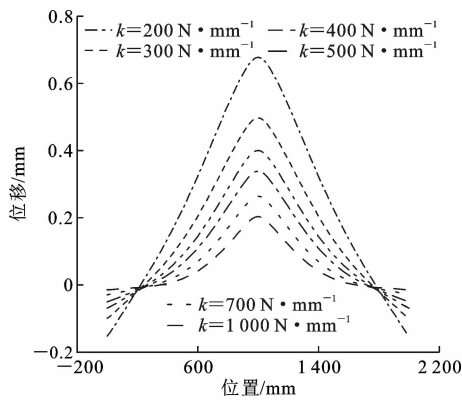


图 6 竖向位移分布

Fig. 6 Vertical displacement distributions

### 3.1 等效地基刚度

剪力连接件抗剪刚度等效均匀的地基刚度是本文理论模型的一项重要假定。为验证式(18)的准确性,改变本文中算例的荷载,沿钢板施加长度为梁长的 1 N/mm 均布荷载,并改变剪力连接件的间距,受力模型如图 7 所示。

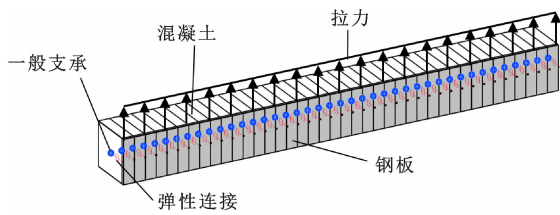


图 7 地基刚度验算模型

Fig. 7 Foundation stiffness check model

图 8 给出了剪力连接件间距分别为 5、50、100 mm 时对应的等效地基刚度理论值与计算值对比。由图 8 可知,不同剪力连接件间距下,本文等效地基刚度理论值与有限元模型计算值较为接近,最大相对偏差不超过 4%。由此,可以认为等效地基刚度计算式(18)是可靠的。

### 3.2 工作宽度

图 9 给出了不同剪力连接件抗剪刚度和钢板梁抗弯惯性矩下,式(13)得到的理论节点受拉工作宽度与板壳-实体有限元计算结果对比。由图 9(a)可知:改变剪力连接件抗剪刚度,本文节点受拉工作宽度值理论与有限元计算值仍较为接近;且剪力连接件抗剪刚度越大,二者的偏差越小。由图 9(b)可知:改变钢板梁抗弯惯性矩,本文理论值与有限元值偏差均处于可接受范围内;钢板梁抗弯惯性矩越小,二者的相对偏差越小。可见,本文所提出的钢板混凝土节点受拉工作宽度公式是可靠的。

### 3.3 等效宽度

图 10 给出了不同剪力连接件抗剪刚度和钢板

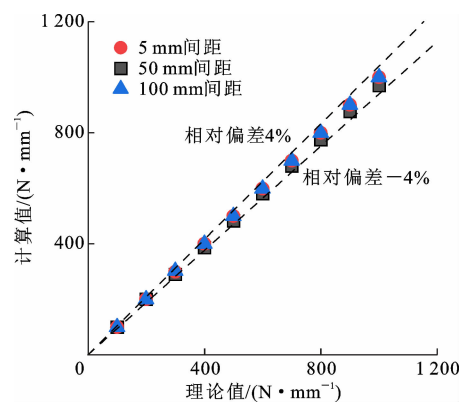
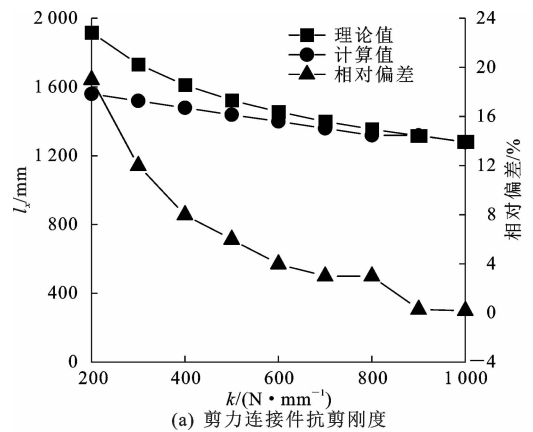
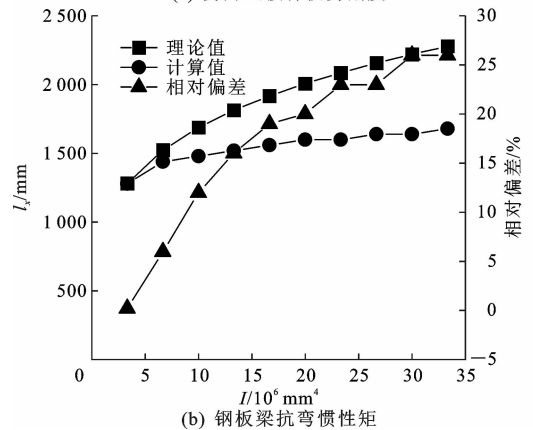


图 8 等效地基刚度计算值与理论值对比

Fig. 8 Comparisons of equivalent foundation stiffness of calculated and theoretical values



(a) 剪力连接件抗剪刚度



(b) 钢板梁抗弯惯性矩

图 9 节点受拉工作宽度对比

Fig. 9 Comparisons of working width of tension joint

梁抗弯惯性矩下,采用式(17)得到的理论节点受拉等效宽度与板壳-实体有限元模型计算宽度的对比。由图 10 可知,改变剪力连接件抗剪刚度和钢板梁抗弯惯性矩,本文节点受拉等效宽度理论值与有限元计算值基本一致。本文等效宽度是基于应力等效原则得到的近似值,理论计算值与有限元计算值相对偏差未超过 6%,说明本文所提出的钢板混凝土节点受拉等效宽度公式是可靠的。

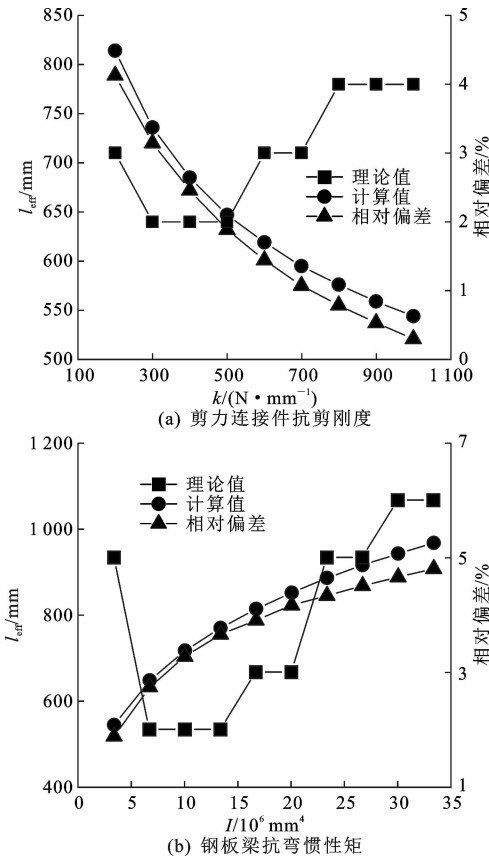


图 10 节点受拉等效宽度对比

Fig. 10 Comparisons of equivalent widths of tension joint

3.4 节点刚度

图 11 给出了不同剪力连接件抗剪刚度和钢板梁抗弯惯性矩下,采用式(22)得到的理论节点抗拉刚度与板壳-实体有限元模型计算刚度的对比。结合图 11(a)和图 11(b)可知,改变剪力连接件抗剪刚度和钢板梁抗弯惯性矩,本文理论节点受拉抗拉刚度值与有限元计算值基本一致。节点受拉抗拉刚度计算时,将离散的剪力连接件多点弹簧作用转化为连续弹簧作用,由此得到本文钢板混凝土节点抗拉刚度理论值与有限元计算值最大相对偏差不超过 10%,说明本文假定和抗拉刚度计算基本合理。

4 参数敏感性分析

设剪力连接件钢板混凝土节点力学性能指标的影响参数有  $k$ 、 $EI$ ,为探究不同参数变化对工作宽度、节点刚度以及等效宽度的影响程度,本文进行了参数敏感性分析。

4.1 工作宽度

基于节点受拉工作宽度理论计算式得到参数  $k$ 、 $EI$  对其影响,三者函数关系如图 12 所示。由图 12 可知,工作宽度  $l_x$  与地基梁抗弯刚度  $EI$  呈正

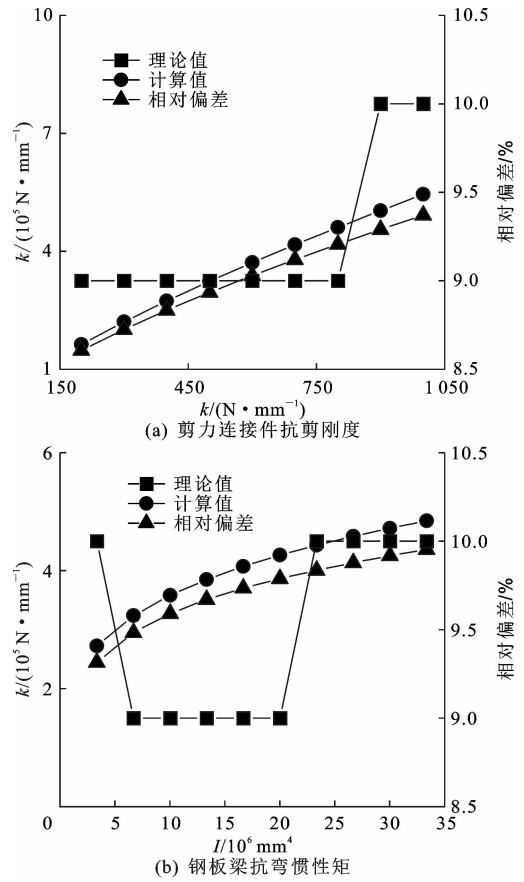


图 11 节点刚度对比

Fig. 11 Comparison of joint stiffness

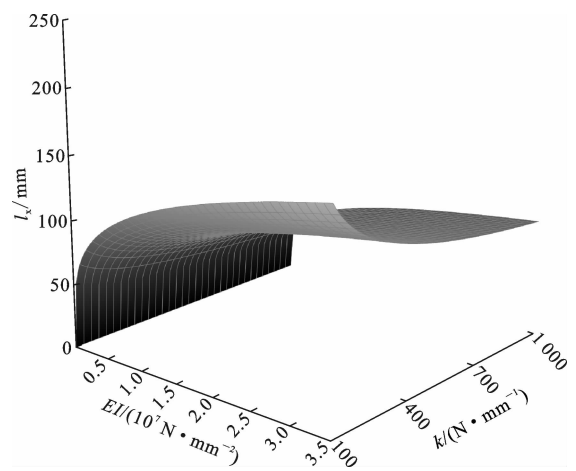


图 12 工作宽度参数敏感性分析

Fig. 12 Sensitivity analysis of working width parameters

比,与地基刚度  $k$  呈反比。增加剪力连接件抗剪刚度和密度或降低主板截面抗弯惯性矩均可缩小节点受拉宽度,减小剪力连接件的布置长度。

4.2 等效宽度

结合剪力连接件受拉节点的等效宽度计算式可知,剪力连接件的布置密度  $\mu$  及抗剪刚度  $k$ 。决定等效地基刚度  $k$ ,由此给出了参数  $k$  及  $EI$  对等效宽度

$l_{\text{eff}}$  的影响,如图 13 所示。由图 13 可知,等效宽度随剪力连接件所提供地基刚度的增大而减小,随钢板梁抗弯惯性矩的增大而增大。

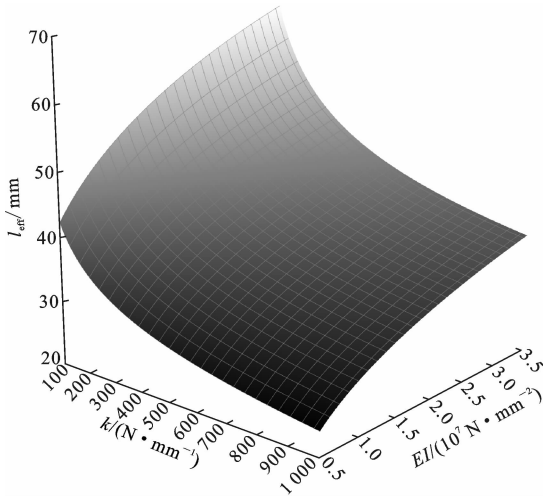


图 13 等效宽度参数敏感性分析

Fig. 13 Sensitivity analysis of equivalent width parameters

### 4.3 节点刚度

结合剪力连接件受拉节点的等效宽度计算式,得到节点抗拉刚度  $K$  受剪力连接件抗剪刚度和等效宽度影响情况,如图 14 所示。由图 14 可知,节点抗拉刚度随着剪力连接件抗剪刚度和等效宽度的增加而增加。

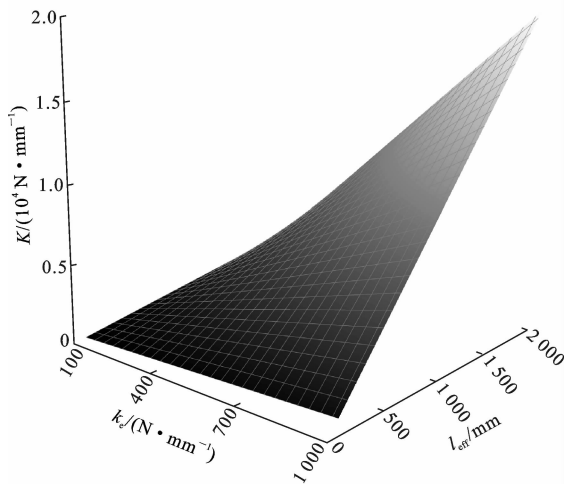


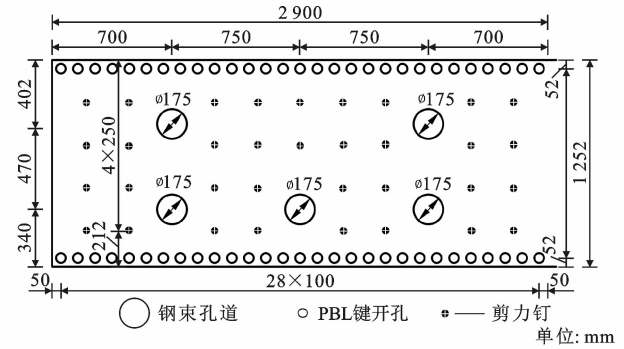
图 14 节点刚度参数敏感性分析

Fig. 14 Sensitivity analysis of nodal stiffness parameters

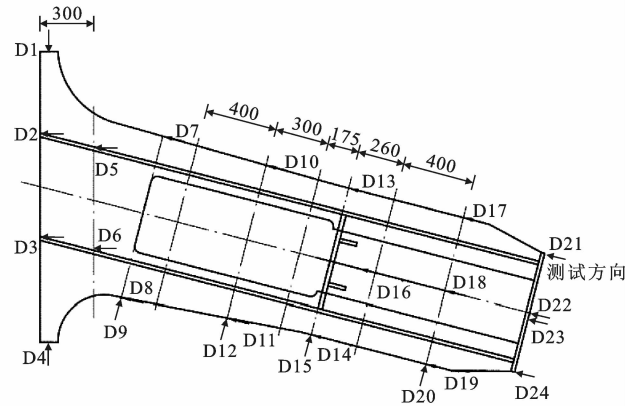
## 5 工程实例验证

文献[16]对组合锚拉板进行实桥试验,测试了锚拉板的竖向位移,测点编号 D1~D24,本文取 D3 测点作为验证值,锚拉板尺寸以及位移测点布置如图 15 所示。锚拉板主要依靠 PBL 连接件、栓钉、界

面摩阻力、预应力管道混凝土棒抵抗竖向滑移,PBL 以及栓钉剪切刚度分别为 915 和 407 kN/mm,预应力管道的剪切刚度基于文献[23]给出的公式进行计算,界面摩阻力系数取 0.1。依据本文公式计算的位移为 0.088 mm,试验测得 D3 位移为 0.089 mm,两者之间相对误差为 1%,说明本文公式对实际工程具有较好的适用性。



(a) 试件尺寸



(b) 位移测点布置

图 15 组合锚拉板实桥试验试件及测点布置

Fig. 15 Test specimen and measuring points arrangement on composite anchor-tension plate real bridge

文献[17]中对图 15 所示的组合锚拉板进行有限元分析,研究不同摩阻系数下剪力连接件剪力分布,本文公式计算值与其对比如图 16 所示。可见,文献[17]中锚拉板存在偏心受拉导致剪力曲线呈不对称布置,但本文计算剪力分布曲线与文献[17]中有限元计算的剪力曲线总体趋势以及数值上较为接近。

## 6 结 语

(1)本文建立了设剪力连接件的钢板混凝土受拉节点理论模型,给出了钢板混凝土受拉节点工作宽度计算式,并建立钢板混凝土节点受拉板壳-实体有限元模型和梁单元模型,验证了本文理论假定和推导过程的可靠性。



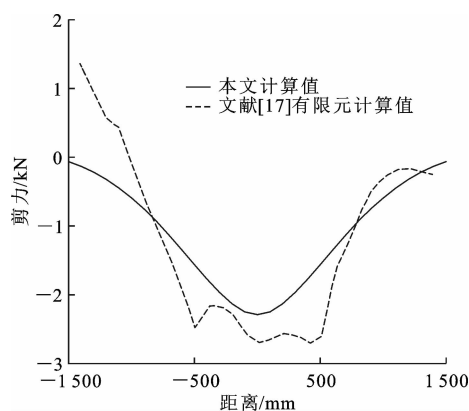


图 16 组合锚拉板剪力分布理论计算与有限元结果对比

Fig. 16 Comparisons of theoretical calculation and finite element results of shear force distribution between composite anchor-tension slab

(2) 基于 Winkler 弹性地基梁和应力等效原则, 推导求解出等效宽度解析式, 提出了节点受拉刚度计算方法, 为钢板混凝土节点刚度和承载力计算提供了理论支撑, 并基于混凝土主梁斜拉桥锚拉板式索梁锚固区工程实例验证了本文方法的可靠性。

(3) 增大剪力连接件抗剪刚度和密度或减小节点主板截面抗弯惯性矩均可降低节点受拉工作宽度, 减小剪力连接件的布置长度。节点等效宽度随剪力连接件抗剪刚度增大而减小, 随节点主板抗弯惯性矩的增加而增大。节点抗拉刚度随剪力连接件抗剪刚度和主板截面抗弯惯性矩的增加而增大。

(4) 本文所给出的节点工作宽度用于指导剪力连接件设置范围, 节点等效宽度用于计算节点受拉等效宽度和节点受拉承载力。

(5) 本文仅给出了节点受拉刚度计算公式, 而节点受拉承载力判定较为复杂。节点承载能力判断存在极限强度、极限变形和断裂等 3 类准则, 3 类准则取节点变形达到某一临界值为标准来判断节点极限强度, 但变形临界值取值方法不一致。本文所给出的节点受拉刚度计算为节点承载力计算奠定基础, 但暂不能直接给出节点承载力计算方法, 这也是下一步的研究重点。

## 参考文献:

## References:

[1] 彭 强. 南京长江五桥钢壳混凝土桥塔足尺模型工艺试验 [J]. 桥梁建设, 2019, 49(3): 46-50.  
PENG Qiang. Full-scale model test of construction process for steel shell-concrete composite pylon of Fifth Changjiang River Bridge in Nanjing [J]. Bridge

Construction, 2019, 49(3): 46-50.

- [2] 张喜刚, 刘 高, 高 原, 等. 中空型外壁钢板-混凝土组合桥塔塔柱承载力研究 [J]. 土木工程学报, 2018, 51(3): 90-98.  
ZHANG Xi-gang, LIU Gao, GAO Yuan, et al. Research on the bearing capacity of hollow concrete-filled steel exterior wall composite bridge tower column [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(3): 90-98.
- [3] TAN Y L, ZHU B, YAN T Y, et al. Experimental study of the mechanical behavior of the steel-concrete joints in a composite truss bridge [J]. Applied Sciences, 2019, 9(5): 854.
- [4] 万 馨, 高铃钰, 陈 明, 等. 基于装配式交叉 U 型连接件的钢板混凝土组合剪力墙-钢梁节点性能有限元分析 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(1): 113-122, 132.  
WAN Xin, GAO Ling-yu, CHEN Ming, et al. Finite element analysis of performance of steel plate concrete composite shear wall-steel beam joint based on prefabricated cross U-shaped connector [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(1): 113-122, 132.
- [5] GUO L, WANG J F, WANG W Q, et al. Seismic evaluation and calculation models of CFDST column blind bolted to composite beam joints with partial shear interaction [J]. Engineering Structures, 2019, 196: 109269.
- [6] 刘明虎, 孙 鹏, 胡广瑞, 等. 港珠澳大桥青州航道桥“中国结”形钢剪刀撑设计与施工 [J]. 桥梁建设, 2016, 46(1): 81-87.  
LIU Ming-hu, SUN Peng, HU Guang-rui, et al. Design and construction of “Chinese knot” style steel cross bracing for pylon of Qingzhou Ship Channel Bridge of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. Bridge Construction, 2016, 46(1): 81-87.
- [7] 梅应华, 朱大勇, 严 瑾. 混凝土主梁斜拉桥锚拉板式索梁锚固区受力性能研究 [J]. 世界桥梁, 2019, 47(1): 26-31.  
MEI Ying-hua, ZHU Da-yong, YAN Jin. Study of load bearing behavior of cable-girder anchorage zone of anchor tensile plate type for concrete main girder cable-stayed bridge [J]. World Bridges, 2019, 47(1): 26-31.
- [8] 伍子鸿. 桁腹式组合桥梁桥的关键节点及其剪力滞效应研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
WU Zi-hong. Study on key joint and shear lag effect of steel-concrete composite truss bridge [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [9] PU Q H, BAI G L. Internal force distribution in steel-

- concrete composite structure for pylon of cable-stayed bridge [J]. Journal of Southwest Jiaotong University (English Edition), 2009, 17(2): 95-101.
- [10] 周绪红, 张茜, 狄谨, 等. 对称荷载作用钢锚板式钢-混组合索塔锚固体系传力机理 [J]. 中国公路学报, 2012, 25(6): 60-67.
- ZHOU Xu-hong, ZHANG Qian, DI Jin, et al. Load-transfer mechanism of steel-concrete composite cable-tylon anchorage system with steel anchor slab under symmetrical load [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(6): 60-67.
- [11] 狄谨, 周绪红, 游金兰, 等. 钢箱梁斜拉桥索塔锚固区的受力性能 [J]. 中国公路学报, 2007, 20(4): 48-52.
- DI Jin, ZHOU Xu-hong, YOU Jin-lan, et al. Mechanical property of cable-tylon anchorage zone of cable-stayed bridge with steel box girder [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(4): 48-52.
- [12] 李源, 王凌波, 刘鹏, 等. 港珠澳大桥青州航道桥索塔结形撑安装精细化分析 [J]. 中国公路学报, 2016, 29(12): 93-101.
- LI Yuan, WANG Ling-bo, LIU Peng, et al. Delicate installation analysis of cross bracing of Qingzhou Channel Bridge in Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(12): 93-101.
- [13] SU Q T, YANG G T, QIN F, et al. Investigation on the horizontal mechanical behavior of steel-concrete composite cable-tylon anchorage [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 72: 267-275.
- [14] 刘建军, 王学敏. 红水河特大桥钢牛腿-钢锚梁组合锚固结构设计研究 [J]. 中外公路, 2016, 36(6): 127-133.
- LIU Jian-jun, WANG Xue-min. Study on the design of combined anchorage structure of steel corbel and steel anchor beam of Hongshuihe Bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(6): 127-133.
- [15] 肖林, 刘丽芳, 卫星, 等. 钢-混组合索塔锚固结构的力学行为及结构优化 [J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(5): 923-930, 944.
- XIAO Lin, LIU Li-fang, WEI Xing, et al. Mechanical behavior and structural optimization of steel-concrete composite cable-tylon anchor [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(5): 923-930, 944.
- [16] 石雪飞, 周军勇, 胡可, 等. 锚拉板式混凝土索梁锚固体系实桥试验研究 [J]. 桥梁建设, 2016, 46(3): 11-16.
- SHI Xue-fei, ZHOU Jun-yong, HU Ke, et al. Experimental study of anchor tensile plate cable anchorage system in concrete girder of actual bridge [J]. Bridge Construction, 2016, 46(3): 11-16.
- [17] 张煜, 阮欣, 石雪飞, 等. 斜拉桥钢-混锚板式索梁锚固区摩擦效应分析 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(7): 2982-2988.
- ZHANG Yu, RUAN Xin, SHI Xue-fei, et al. Friction effects analysis of steel-concrete anchor plate in cable-beam anchorage zones of cable-stayed bridges [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(7): 2982-2988.
- [18] YIN G A, DING F X, WANG H B, et al. Connection performance in steel-concrete composite truss bridge structures [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(3): 4016126.
- [19] LI Y J, LIU Y Q, WANG F H, et al. Load transfer mechanism of hybrid pylon joint with cells and bearing plates [J]. Advances in Civil Engineering, 2018: 1-12.
- [20] 刘永健, 王文帅, 马印平, 等. 矩形钢管和矩形钢管混凝土 T 形不等宽受拉节点轴向刚度 [J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(1): 1-13.
- LIU Yong-jian, WANG Wen-shuai, MA Yin-ping, et al. Axial stiffness of RHS and CFRHS T-joints with unequal width subjected to tension [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(1): 1-13.
- [21] MA Y P, LIU Y J, WANG K, et al. Axial stiffness of concrete filled rectangular steel tubular (CFRST) truss joints [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 184: 106820.
- [22] 程高, 刘永健, 田智娟, 等. PBL 加劲型矩形钢管混凝土不等宽 T 型节点受拉性能 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(3): 83-90.
- CHENG Gao, LIU Yong-jian, TIAN Zhi-juan, et al. Tensile behavior of PBL stiffened concrete-filled rectangular steel tubular unequal T-connections [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2015, 35(3): 83-90.
- [23] 郑双杰, 刘玉擎. 开孔板连接件初期抗剪刚度试验 [J]. 中国公路学报, 2014, 27(11): 69-75.
- ZHENG Shuang-jie, LIU Yu-qing. Experiment of initial shear stiffness of perfobond connector [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(11): 69-75.
- [24] 莫志鹏. PBL 加劲型矩形钢管混凝土节点受拉性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2021.
- MO Zhi-peng. Research on tensile properties of con-

- crete-filled rectangular steel tubular joints stiffened with PBL [D]. Xi'an:Chang'an University,2021.
- [25] 侯蓓蓓,刘永健,姜磊,等. PBL 加劲型矩形钢管混凝土支管受拉节点有效分布宽度 [J]. 建筑科学与工程学报,2017,34(6):116-126.
- HOU Bei-bei,LIU Yong-jian,JIANG Lei,et al. Effective distribution width of tension joints in brace of rectangular concrete-filled steel tube stiffened with PBL [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2017,34(6):116-126.
- [26] 田智娟. PBL 加劲型矩形钢管混凝土 T 型受拉节点力学性能研究[D]. 西安:长安大学,2014.
- TIAN Zhi-juan. Research on mechanical properties of tension T-joints of rectangular concrete-filled steel tube stiffened with PBL[D]. Xi'an:Chang'an University,2014.
- [27] YANG Y,CHEN Y. Experimental study on mechanical behavior of PBL shear connectors [J]. Journal of Bridge Engineering,2018,23(9):4018062.
- [28] MA Y P,LIU Y J,MA T Y,et al. Flexural stiffness of rectangular hollow section (RHS) trusses [J]. Engineering Structures,2021,239:112336.
- [29] 龙驭球. 弹性地基梁的计算 [M]. 北京:人民教育出版社,1981.
- LONG Yu-qiu. Calculation of elastic foundation beam [M]. Beijing:People's Education Press,1981.
- [30] GARIFULLIN M, BRONZOVA M, PAJUNEN S, et al. Initial axial stiffness of welded RHS T-joints [J]. Journal of Constructional Steel Research,2019,153:459-472.
- [31] 刘永健,刘君平,池建军. 钢管混凝土界面抗剪粘结滑移力学性能试验 [J]. 广西大学学报(自然科学版),2010,35(1):17-23,29.
- LIU Yong-jian,LIU Jun-ping,CHI Jian-jun. Shear bond behaviors at interface of concrete-filled steel tube [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition),2010,35(1):17-23,29.
- [32] 刘永健,李慧,张宁,等. PBL 加劲型矩形钢管混凝土界面粘结-滑移性能 [J]. 建筑科学与工程学报,2015,32(5):1-7.
- LIU Yong-jian,LI Hui,ZHANG Ning,et al. Interface bond-slip performance of rectangular concrete-filled steel tube stiffened by PBL [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2015,32(5):1-7.
- [33] 程高. PBL 加劲型矩形钢管混凝土结构工作机理研究[D]. 西安:长安大学,2015.
- CHENG Gao. Research on the mechanism of rectangular concrete-filled steel tube structure stiffened with PBL[D]. Xi'an:Chang'an University,2015.