

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.07.015

# 钢管混凝土桁架弦杆界面传力特性分析

赵宝俊<sup>1,2</sup>, 张之恒<sup>3</sup>, 程高<sup>2,4</sup>, 王鹏琪<sup>2</sup>

(1. 陕西交通控股集团有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 3. 江阴市长泾镇人民政府, 江苏 江阴 214411; 4. 西藏天路股份有限公司, 西藏 拉萨 850000)

**摘要:**文章采用有限元建模方法分析钢管与混凝土的界面传力特性,以揭示钢管混凝土桁架弦杆工作机理;将钢管与混凝土界面状态分为绑定(即界面抗剪刚度无穷大)、光滑(即界面抗剪刚度无穷小)和黏性接触(即界面抗剪刚度有限),分析钢管混凝土桁架节间内受压上弦杆、受拉下弦杆钢管与混凝土的轴向应力、界面剪切应力及剪力传递长度。结果表明:不同界面状态下钢管轴向应力、界面剪切应力差异较大;黏性接触最接近钢管与混凝土界面真实工作状态,弹性工作状态下,剪力传递长度保持为常数,与轴力无关;剪力传递长度范围内钢管和混凝土轴向应力、界面剪切应力沿桁架节间长度方向呈指数函数分布,剪力传递长度范围外钢管、混凝土轴向应力保持不变。研究结果可为钢管混凝土桁架桥强度、刚度计算及节点构造设计提供依据。

**关键词:**桁架桥;钢管混凝土;组合作用;界面传力特性;剪力传递长度

**中图分类号:**U441.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)07-0957-06

## Analysis on interfacial force transfer characteristics of concrete-filled steel tubular truss chord

ZHAO Baojun<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhiheng<sup>3</sup>, CHENG Gao<sup>2,4</sup>, WANG Pengqi<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Transportation Holding Group Co., Ltd., Xi'an 710065, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. People's Government of Changjing Town, Jiangyin City, Jiangyin 214411, China; 4. Tibet Tianlu Co., Ltd., Lhasa 850000, China)

**Abstract:** The finite element analysis was used to analyze the interfacial force transfer characteristics of concrete and steel tube to reveal the working mechanism of concrete-filled steel tubular truss chord. The interface states between steel tube and concrete were simulated as tie behavior which means that the interfacial shear stiffness is infinite, smooth behavior which means that the interfacial shear stiffness is infinitesimal, and cohesive behavior which is related to the bond and slip. The axial stress, interfacial shear stress and shear transfer length of concrete and steel tube in compression chord and tension chord were analyzed. The results show that the axial stress and interfacial shear stress of steel tube are different under different interface states. The cohesive behavior is closest to the real working state of the interface between steel tube and concrete. In the elastic working state, the shear transfer length remains constant and is independent of the axial force. The axial stress and interfacial shear stress are exponentially distributed along the length direction of the chord within the range of shear transfer length, while the axial stress of steel tube and concrete remains unchanged outside the range of shear transfer length. The results of the study can provide a basis for strength and stiffness calcula-

**收稿日期:**2021-03-31; **修回日期:**2021-12-31

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51778058;51978061);中国博士后科学基金第67批面上资助项目(2020M673601XB)和陕西省交通运输科技资助项目(17-30T;19-14K)

**作者简介:**赵宝俊(1980—),男,陕西榆林人,博士,陕西交通控股集团有限公司正高级工程师,硕士生导师;

程高(1988—),男,河南泌阳人,博士,长安大学高级工程师,博士生导师,通信作者, E-mail:chengg@chd.edu.cn.

tions and node configuration design of concrete-filled steel tubular truss bridges.

**Key words:** truss bridge; concrete-filled steel tube; composite action; interfacial force transfer characteristic; shear transfer length

## 0 引 言

钢管混凝土桁架桥是一种新型桥梁结构形式,具有自重轻、承载力高、经济性好等优点,已在四川雅安干海子大桥、湖北秭归向家坝大桥、陕西黄陵至延安(黄延)高速 K15+644 天桥、G211 线甘肃甜水桥等工程取得应用<sup>[1-2]</sup>。钢管混凝土桁架一般是由钢管混凝土弦杆和空钢管斜腹杆组成。由于钢管与混凝土界面黏结强度和刚度有限,弦杆内钢管与混凝土的组合作用大小一直困扰着结构设计人员,也限制了该结构的推广应用<sup>[3]</sup>。

钢管与混凝土的界面传力机理决定着钢管混凝土桁架弦杆的受力特性。桁架斜腹杆轴力的水平分力传递给钢管混凝土弦杆,节点处弦杆轴力由外钢管承担,在钢管与混凝土的黏结作用下,经过一定长度后钢管、混凝土共同分担弦杆轴力<sup>[4]</sup>。此传力过程中钢管和混凝土不可避免会产生相对滑移和界面剪力,界面剪切应力和剪力传递长度是反映界面传力特性的关键指标。文献[5]考虑抗滑移刚度并进行理论推导,在纵向均布荷载和集中荷载作用下,分别给出钢管混凝土柱的轴力、界面剪切应力、界面相对滑移等解析解,通过试验数据拟合,给出界面抗滑移刚度的合理取值范围;文献[6]通过试验测试得到钢管再生混凝土的荷载-滑移曲线、黏结应变和黏结力分布特征,指出钢管纵向应变在加载初期和末期分别呈负指数函数分布和线性分布;文献[7-9]通过研究大量方、圆钢管混凝土试件的推出试验,并对界面黏结性

能进行比较分析,指出黏结应力沿钢管-混凝土界面均匀分布,方、圆钢管-混凝土界面黏结-滑移曲线具有相似变化规律,界面黏结-滑移剪切模量接近,提出方、圆钢管-混凝土界面黏结-相对滑移本构关系。上述研究成果基于推出试验给出钢管混凝土柱界面传力特性,提出钢管与混凝土界面接触本构关系,但是桁架弦杆内轴力的传递路径为“钢管—钢管和混凝土—钢管”,推出试验中轴力的传递路径为“钢管—钢管和混凝土—混凝土”,两者的传力路径不尽相同,且推出试验中轴力为压力,而桁架弦杆轴力有压力和拉力。为此,本文以钢管混凝土桁架为研究对象,基于 ABAQUS 软件建立有限元模型,通过分析钢管-混凝土界面传力特性,揭示钢管混凝土桁架弦杆的工作机理,为桁架桥强度、刚度计算及节点构造设计提供依据。

## 1 钢管混凝土桁架桥桁架结构参数

本文以 71 m 主跨的 G211 线半穿式钢管混凝土桁架桥为例,建立单榀钢管混凝土桁架板壳-实体有限元模型,桥梁立面如图 1 所示。该桁架桥上弦杆仅受压,为圆钢管混凝土结构,其构造尺寸为  $\phi 1\ 000\ \text{mm} \times 54\ \text{mm}$ ,节间长度为 8 m;下弦杆仅受拉,为方钢管混凝土结构,其构造尺寸为  $900\ \text{mm} \times 900\ \text{mm} \times 30\ \text{mm}$ ,2 个端部节间长度为 7 m,中部节间长度为 8 m;腹杆为受压、受拉 2 种受力模式,为圆形空钢管结构,其构造尺寸为  $\phi 700\ \text{mm} \times 26\ \text{mm}$ 。钢管混凝土主桁采用 Q390E 钢材,弦杆管内混凝土采用 C50 自密实混凝土。



图 1 71 m 主跨钢管混凝土桁架桥实例立面图

## 2 有限元模型建立

### 2.1 有限元建模方法

钢管混凝土桁架处于弹性工作状态,本文有限元模型不需考虑材料非线性,仅考虑几何非线

性和接触非线性。基于 ABAQUS 6.14 软件,建立单榀钢管混凝土桁架板壳-实体有限元模型,如图 2 所示。钢管采用 Q390E 钢材,钢材弹性模量  $E_s$ 、泊松比  $\nu_s$  取值<sup>[10]</sup>分别为 206 GPa、0.283;管内混凝土为 C50 自密实混凝土,混凝土弹性模量

$E_c$ 、泊松比  $\nu_c$  取值<sup>[11]</sup> 分别为 27.24 GPa、0.200。模型中管内混凝土网格划分采用缩减积分六面体结构单元 C3D8R, 网格尺寸约为 140 mm × 140 mm × 140 mm; 钢管网格划分采用四边形自由单元 S4R, 网格尺寸约为 140 mm × 140 mm。

经单元网格验证, 该模型中单元选取和网格划分能够满足收敛性和精度要求。简支桁架桥的边界条件模拟, 通过约束一端支座位置 X、Y、Z 方向的平动自由度, 约束另一端支座位置 Y 方向的平动自由度实现。荷载为结构自重。

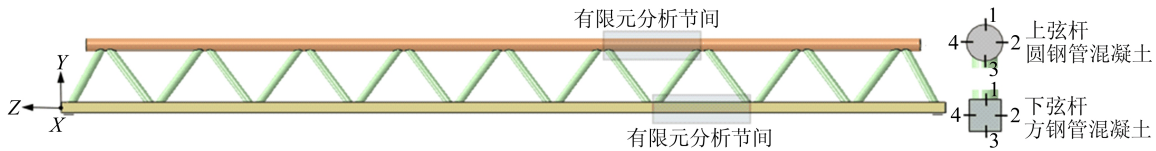


图 2 单榀钢管混凝土桁架板壳-实体有限元模型

钢管和混凝土界面状态采用黏性接触模拟, ABAQUS 软件中黏性接触是假定初始阶段摩擦力与滑移量成线性关系, 允许互相黏结的界面出现分离, 通过定义黏结刚度可建立法向应力和切向应力的弹性矩阵, 本模型将钢管和混凝土间的界面黏结-滑移剪切模量  $G_s$  取值<sup>[12]</sup> 为 165 MPa; 该软件还可以通过定义黏性损伤行为实现接触面间的黏性损伤或失效, 本模型将钢管与混凝土的界面接触定义为带损伤的黏性行为, 如图 3 所示<sup>[12]</sup>。

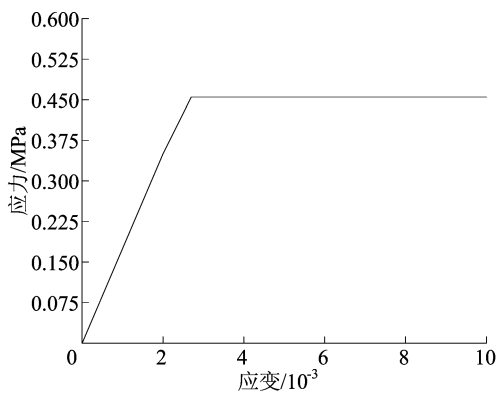


图 3 钢管与混凝土界面黏性接触本构关系

为了分析界面状态对桁架弦杆内钢管混凝土传力特性的影响, 本文引入绑定(即界面抗剪刚度无穷大)、光滑(即界面抗剪刚度无穷小)这 2 种极端情况。工程中常采用绑定或共节点方法简化模拟钢管与混凝土的接触关系。ABAQUS 软件中, 绑定采用主从节点的距离容许范围来判定节点是否被约束, 容许范围内的从节点被删除自由度而具有与主节点相同的自由度, 该模拟方法是将钢管和混凝土间的界面黏结-滑移剪切模量  $G_s$  模拟为无穷大。界面光滑是钢管和混凝土界面的最不利工作状态, 反映因混凝土收缩徐变、温度等作用引起的界面脱粘状况。ABAQUS 软件中,

光滑接触是将法向行为定义为硬接触, 将切向行为定义为无摩擦。硬接触是当接触面之间的接触压力值变为 0 或负值时, 两个接触面分离, 同时解除相应节点上的接触约束; 无摩擦表示两个接触面的摩擦系数为 0, 该模拟方法是将钢管和混凝土的界面黏结-滑移剪切模量  $G_s$  模拟为无穷小。

### 2.2 数据提取位置及轴力传力模型

对于简支桁架桥, 均布荷载作用下主跨 1/4 点的弯矩和剪力均较大, 选取主跨 1/4 点对应节间作为有限元结果数据提取位置, 具体如图 2 所示。受腹管与弦杆节点构造影响, 弦杆截面将出现应力不均匀分布, 本文选取截面四分点作为数据提取位置, 得到节间范围内截面不同位置的钢管与混凝土的轴向应力、界面剪切应力。其中, 编号 1 位于弦杆顶板中点, 编号 2、4 位于弦杆腹板中点, 编号 3 位于弦杆底板中点。

钢管混凝土桁架弦杆轴力  $P$  的传递方式为“钢管—钢管和混凝土—钢管”, 根据对称性可选取“钢管—钢管和混凝土”传递路径进行传力简化分析, 如图 4 所示。

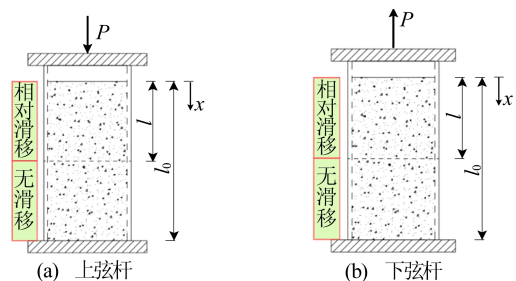


图 4 桁架弦杆轴力传力模型

对于简支桁架桥, 上弦杆  $P$  为轴压力, 下弦杆  $P$  为轴拉力。桁架弦杆沿长度方向可分为相对滑移区和无滑移区, 在相对滑移区, 钢管和混凝土之间通过界面黏结进行传力, 而在无滑移区, 钢

管和混凝土变形协调并共同受力;钢管和混凝土所受荷载按各自轴压刚度分配而保持不变,将相对滑移区长度定义为剪力传递长度。

### 3 受压、受拉弦杆界面传力特性分析

基于有限元计算结果,分别提取主跨 1/4 点对应节间的上、下弦杆钢管和混凝土轴向应力、界面剪切应力等数据,分析绑定、光滑及黏性接触 3 种情况下的界面传力特性。为便于比较受压弦杆与受拉弦杆的应力水平,文中图示受压弦杆钢管、混凝土轴向应力均取绝对值。

#### 3.1 受压弦杆界面传力特性分析

##### 3.1.1 钢管与混凝土轴向应力

绑定、光滑及黏性接触 3 种界面状态下,受压弦杆钢管、混凝土的轴向应力变化曲线如图 5

所示。由图 5a~图 5c 可知,不同界面状态下,弦杆不同截面位置的钢管轴向应力呈不均匀分布,顶、底板应力最大相差 25 MPa,腹板轴向应力约为顶、底板应力的平均值;沿节间长度方向,顶、底板钢管轴向应力变化较大,腹板钢管轴向应力在节点区域外基本不变,最接近弦杆的名义轴向应力。在节点区域外,绑定与黏性接触界面状态下钢管的轴向应力基本相等,比光滑界面状态下钢管轴向应力小 10 MPa。结合图 5d 可知,在节点区域外,黏性接触状态下混凝土平均轴向应力保持不变,而光滑界面状态下混凝土轴向应力值为 0。分析黏性接触下数据,腹板截面和混凝土的轴向应力变化均呈指数函数分布,变化范围集中在节点区域,即距 K 型节点中心 1 000 mm 内,说明受压弦杆钢管与混凝土界面传力在该范围内。

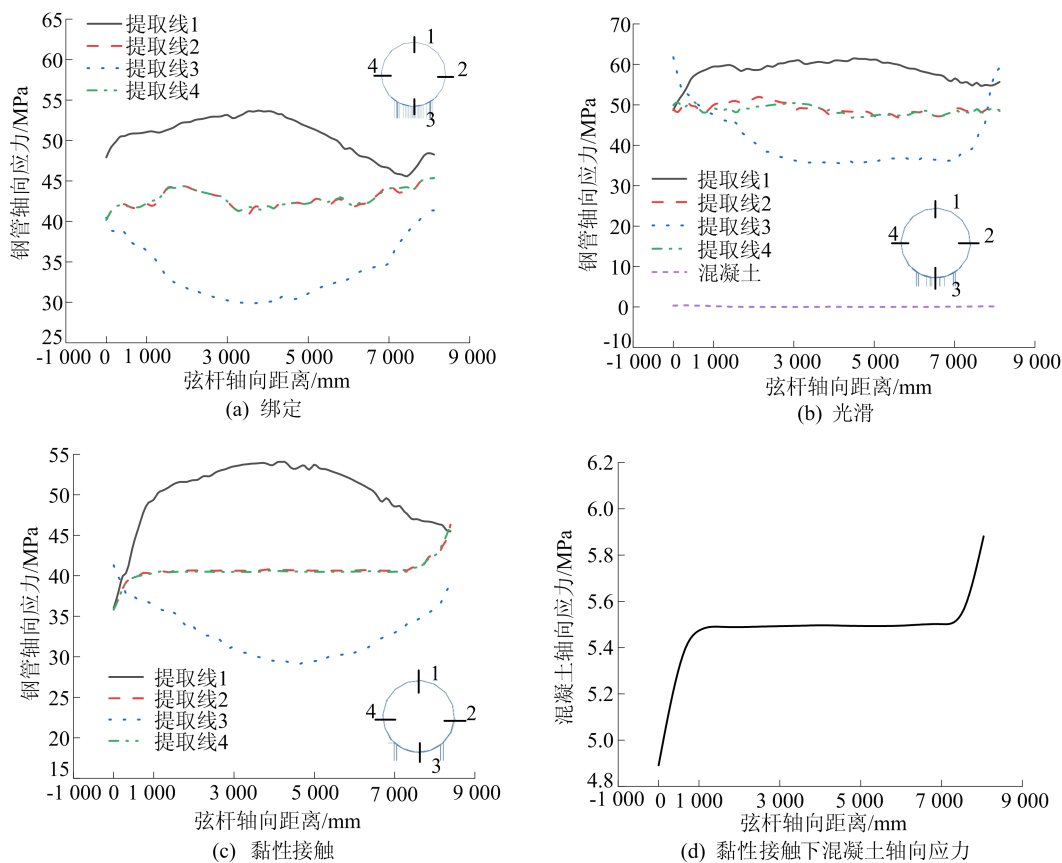


图 5 受压弦杆钢管与混凝土的轴向应力变化曲线

##### 3.1.2 界面剪切应力

绑定时无界面相对滑移,不产生界面剪切应力;光滑时界面发生刚体位移,剪应力值为 0;黏性接触状态下,界面剪切应力沿节间长度方向的分布情况如图 6 所示。由图 6 可知,距 K 型节点中心 1 000 mm 范围外,界面剪切应力值为 0,说

明该范围外钢管与混凝土变形协调,不再产生相对滑移;距 K 型节点中心 1 000 mm 范围内,弦杆截面内界面剪切应力呈不均匀分布,沿节间长度方向基本呈指数函数分布,说明该范围内钢管与混凝土相互作用。由此可知,受压弦杆钢管混凝土的剪力传递长度约为 1 000 mm。

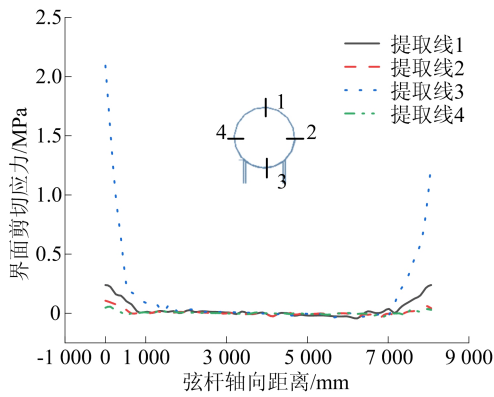


图 6 受压弦杆黏性接触状态下不同提取线的界面剪切应力曲线

3.1.3 剪力传递长度

黏性接触界面状态下,荷载步 1~荷载步 4 分别选取 0.25 倍、0.50 倍、0.75 倍、1.00 倍的自重荷载,界面剪切应力的变化情况如图 7 所示。由于底板处界面剪切应力变化最明显,图 7 中仅给出该位置界面剪切应力变化趋势。由图 7 可知,不同荷载下界面剪切应力幅值有所变化,但剪力传递长度均为 1 000 mm,说明受压弦杆圆形钢管混凝土的剪力传递长度与轴力无关。

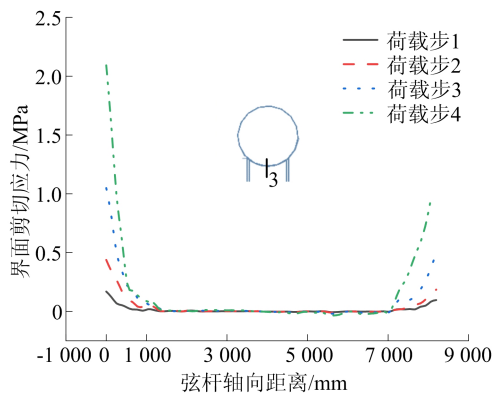


图 7 受压弦杆黏性接触状态下不同荷载下界面剪切应力曲线

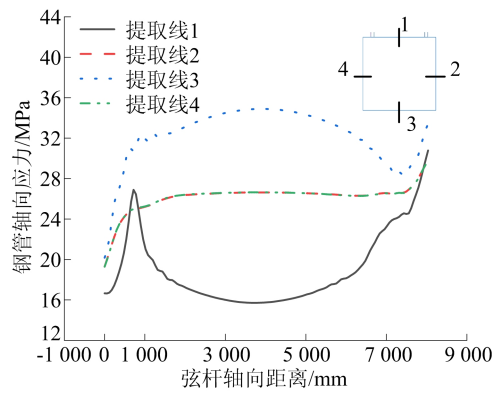
3.2 受拉弦杆界面传力特性分析

3.2.1 钢管与混凝土轴向应力

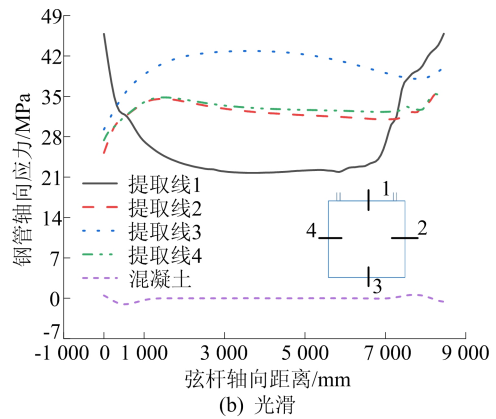
绑定、光滑及黏性接触 3 种界面状态下,受拉弦杆钢管、混凝土的轴向应力变化曲线如图 8 所示。由图 8a~图 8d 可知,受拉弦杆截面内钢管、混凝土轴向应力的变化特征几乎与受压弦杆的情况一致;仅因弦杆轴力、截面类型及尺寸差异,应力值不相同;受拉弦杆顶、底板钢管应力最大相差 20 MPa。

在节点区域外,绑定与黏性接触界面状态下钢管的轴向应力基本相等,比光滑界面状态下钢管轴向应力小 6 MPa。在黏性接触下,腹板截面

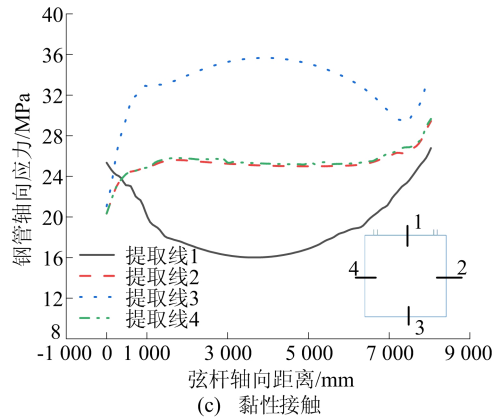
和混凝土的轴向应力变化范围集中在节点区域,即距 K 型节点中心 1 500 mm 内,说明受拉弦杆钢管与混凝土界面相互作用在该范围内。



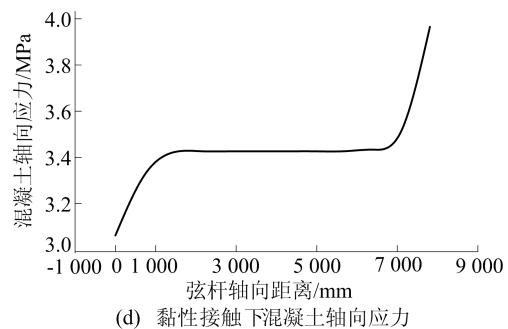
(a) 绑定



(b) 光滑



(c) 黏性接触



(d) 黏性接触下混凝土轴向应力

图 8 受拉弦杆钢管与混凝土的轴向应力变化曲线

### 3.2.2 界面剪切应力

黏性接触状态下,界面剪切应力沿节间长度方向的分布情况如图 9 所示。结合图 6、图 9 分析可知,受拉弦杆钢管与混凝土界面剪切应力变化特征与受压弦杆的情况基本一致,两者区别在于界面剪切应力幅值及剪力传递长度有所不同。受拉弦杆钢管混凝土剪力传递长度约为 1 500 mm。

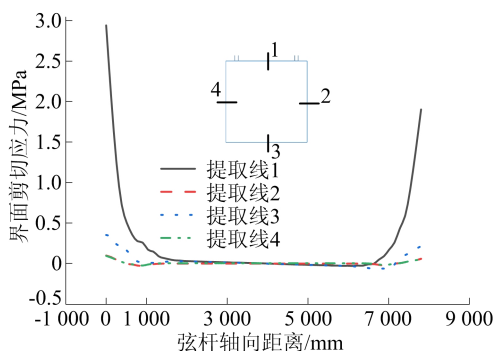


图 9 受拉弦杆黏性接触状态下不同提取线的界面剪切应力曲线

### 3.2.3 剪力传递长度

不同荷载步下,受拉弦杆钢管与混凝土界面剪切应力的变化情况如图 10 所示。由图 10 可知,不同荷载下界面剪切应力幅值有所变化,但剪力传递长度均为 1 500 mm,说明受拉弦杆方钢管混凝土的剪力传递长度与轴力无关。

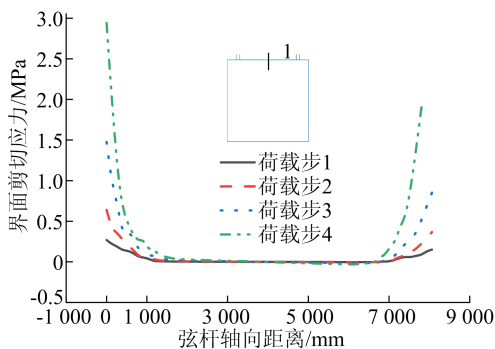


图 10 受拉弦杆黏性接触状态下不同荷载下界面剪切应力曲线

## 4 结 论

本文采用弹性数值模拟方法,分析绑定、光滑和黏性接触 3 种典型界面状态下,桁架弦杆内钢管与混凝土的界面传力特性,得到以下结论:

1) 钢管与混凝土的界面传力特性主要取决于界面接触状态。绑定即界面抗剪刚度无穷大时,钢管与混凝土之间无相对滑移,不产生界面剪切应力。光滑即界面抗剪刚度无穷小时,钢管与

混凝土之间仅发生刚体位移。黏性接触最接近钢管混凝土的真实工作状态,在弦杆一定长度范围内会产生界面相对滑移,影响钢管和混凝土的轴向应力分布。

2) 剪力传递长度是反映界面传力特性的关键指标。在弹性工作状态,桁架弦杆钢管混凝土的剪力传递长度与轴力无关,当截面构造形式、尺寸及材料性质确定时,剪力传递长度为定值。剪力传递长度范围内,钢管与混凝土的轴向应力、界面剪切应力沿轴向均呈指数函数变化,节点处应力最大,远离节点处应力变小。

3) 剪力传递长度范围以外,绑定与黏性接触界面状态下,钢管的轴向应力基本相等,比光滑界面状态下钢管轴向应力小约 20%。圆钢管混凝土与方钢管混凝土弦杆截面内应力均呈不均匀分布,顶板、底板轴向应力显著不同;腹板轴向应力约为顶板、底板轴向应力的平均值,可反映弦杆名义轴向应力。

## [参 考 文 献]

- [1] 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桥梁设计[J]. 交通运输工程学报,2017,17(4):20-31.
- [2] 刘彬,刘永健,杨岳华,等. PBL 加劲型矩形钢管混凝土组合桁架桥设计[J]. 桥梁建设,2019,49(5):97-102.
- [3] LIU Y J, XIONG Z H, FENG Y C, et al. Concrete-filled rectangular hollow section X joint with perfbond leister rib structural performance study: ultimate and fatigue experimental investigation[J]. Steel and Composite Structures, 2017, 24(4): 455-465.
- [4] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京:人民交通出版社,2003:35-40.
- [5] 康希良,程耀芳,张丽,等. 钢管混凝土粘结-滑移本构关系理论分析[J]. 工程力学,2009,26(10):74-78.
- [6] 陈宗平,徐金俊,薛建阳,等. 钢管再生混凝土黏结滑移推出试验及黏结强度计算[J]. 土木工程学报,2013,46(3):49-58.
- [7] 周绪红,刘永健,姜磊,等. PBL 加劲型矩形钢管混凝土结构力学性能研究综述[J]. 中国公路学报,2017,30(11):45-62.
- [8] 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.
- [9] 张清华,李乔,卜一之. PBL 剪力连接件群传力机理研究(I):理论模型[J]. 土木工程学报,2011,44(4):71-77.
- [10] 中冶京诚工程技术有限公司. 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017:60-78.
- [11] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010:35-40.
- [12] 刘永健,池建军. 钢管混凝土界面抗剪粘结强度的推出试验[J]. 工业建筑,2006(4):78-80.

(责任编辑 张淑艳)