

文章编号:1671-8879(2015)03-0083-08

# PBL 加劲型矩形钢管混凝土不等宽 T 型节点受拉性能

程 高,刘永健,田智娟,邱洁霖,熊治华

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

**摘 要:** PBL 加劲肋兼有加劲肋和剪力连接件的双重优势, T 型节点主管采用 PBL 加劲型矩形钢管混凝土是一种新型钢-混组合结构, 探明其破坏模式和承载力水平具有重要意义。基于矩形钢管混凝土 T 型节点受拉试验, 设计了主管为 PBL 加劲型矩形钢管混凝土, 支管为方钢管的不等宽 T 型节点受拉试件, 其中, 主管钢管宽厚比为 27、支主管宽度比为 0.4; 通过非线性有限元数值模拟, 从破坏模式、节点承载力、抗拉刚度及应力分布等方面分析 PBL 加劲肋对矩形钢管混凝土不等宽 T 型节点受拉力学性能的影响。研究表明: PBL 加劲肋兼有加劲肋和剪力连接件的双重作用, 可有效限制顶板被掀起, 提高节点顶板面外抗弯承载力和抵抗局部变形的能力; 能够明显改善不等宽 T 型节点的抗拉性能和抗疲劳性能, 显著提高节点的抗拉刚度和节点承载力。

**关键词:** 桥梁工程; 矩形钢管混凝土; T 型节点; PBL; 破坏模式; 节点承载力; 应力分布

**中图分类号:** U411 **文献标志码:** A

## Tensile behavior of PBL stiffened concrete-filled rectangular steel tubular unequal T-connections

CHENG Gao, LIU Yong-jian, TIAN Zhi-juan, QIU Jie-lin, XIONG Zhi-hua

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** PBL stiffener had the dual advantages of stiffening rib and shear connector. T type joint using PBL stiffened rectangular concrete-filled steel tube was a new type of composite structure. It had important significance to research its failure modes and bearing capacity. Based on concrete-filled T-connections tensile test results, it designed PBL stiffened concrete-filled unequal width T-joint which chord slenderness ratio was 27 and branch-to-chord width ratio was 0.4. In contrast, it included the empty T-joint and concrete-filled T-joint. According to nonlinear finite element numerical simulation, it analyzed failure mode, bearing capacity, tensile rigidity and stress distribution of unequal width T-joint influenced by PBL stiffener. The results show that PBL stiffener could sharply improve tensile and fatigue performance and greatly improve tensile stiffness and bearing capacity of unequal width T-joint. 3 tabs, 14 figs, 15 refs.

**Key words:** bridge engineering; concrete-filled rectangular steel tube; T-connections; PBL; failure mode; joint bearing capacity; stress distribution

收稿日期:2014-07-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51178051,5178068);交通运输部建设科技项目(2013318812410);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G3212001)

作者简介:程 高(1988-),男,河南泌阳人,工学博士研究生,E-mail:1255726999@qq.com.

## 0 引言

PBL加劲型矩形钢管混凝土是刘永健教授提出的一种新型结构,指在钢管内壁纵向设置开孔钢板即PBL加劲肋,并内填混凝土形成<sup>[1]</sup>。PBL加劲肋兼有加劲肋和剪力连接件的双重优势,主管采用PBL加劲型矩形钢管混凝土,可增强钢混界面粘结强度,有效防止节点区域界面脱空和减小相对滑移,改善节点性能,是对钢管混凝土节点的进一步改进。

目前国内外对矩形钢管节点的研究较多<sup>[2]</sup>,但对矩形钢管混凝土节点研究相对较少,而对PBL加劲型矩形钢管混凝土节点尚未见相关的研究报告。刘永健教授在文献<sup>[3]</sup>中进行了4个X型节点受拉试验研究,发现主管内填混凝土改变了节点区域应力分布,对节点抗拉承载力提高不显著;又在文献<sup>[4]</sup>中对T、X、Y型节点受拉模型进行了力学简化分析,将矩形钢管节点简化为框架模型,矩形钢管混凝土节点简化为固支梁模型,并指出主管内填混凝土节点刚度增强;Packer教授曾在研究矩形钢管桁架节点加强方法时,进行了3个矩形钢管混凝土和3个矩形钢管T型节点受拉试验研究,提出钢管混凝土节点承载力计算时可不考虑混凝土的作用<sup>[5-6]</sup>。可见,矩形钢管内填混凝土可改善T型节点受拉破坏模式,但对承载力的提高并不显著<sup>[7]</sup>。万明亮采用有限元分析方法研究了内置PBL加劲肋的哑铃型钢管混凝土拱肋节点受压力学性能,指出PBL加劲肋可减少钢管承担的轴力,使核心混凝土承担更多的轴力,并降低受压节点的应力集中<sup>[8]</sup>。在钢管混凝土桁架结构中,受拉节点也较为普遍,而主管内设置PBL加劲肋对节点受拉力学性能的影响有待于深入研究。

基于此,本文以Packer设计的矩形钢管混凝土T型节点受拉试验为研究原型<sup>[5]</sup>,在主管钢管内壁增设PBL加劲肋,进行不等宽T型节点受拉力学性能的非线性有限元分析,以期揭示其破坏模式和承载力水平,为其在钢管混凝土拱桥和桁架结构中的推广应用提供技术支撑。

## 1 试件设计

影响钢管T型节点力学性能的因素较多,主要有支主管宽度比、主管钢管宽厚比、支管长细比、管内是否填混凝土和设PBL加劲肋<sup>[9]</sup>等。为考查PBL加劲肋对不等宽T型节点的破坏模式、节点承

载力、抗拉刚度和应力分布的影响,在Packer设计的T型节点受拉试验的基础上,设计了PBL加劲型矩形钢管混凝土节点受拉试验。其中,主管的构造尺寸及材料参数,支管的宽度和壁厚与文献<sup>[5]</sup>保持一致,支主管宽度比 $\beta$ 为0.4,混凝土圆柱体抗压强度标准值 $f_c$ 为30.0 MPa,主、支管钢材屈服强度 $f_y$ 分别为400 MPa、443 MPa,极限抗拉强度 $f_u$ 分别取为544 MPa、602 MPa。试件构造形式如图1所示,具体设计参数见下页表1。其中,试件T1表示不等宽T型节点主管为矩形钢管,试件T1C表示不等宽T型节点主管为矩形钢管混凝土,试件T1PBL表示不等宽T型节点主管为PBL加劲型矩形钢管混凝土,试件T2PBL是在试件T1PBL的基础上,取消主管顶板,支管直接连接在PBL加劲肋上,以剥离分析PBL加劲肋在节点中的工作性能。

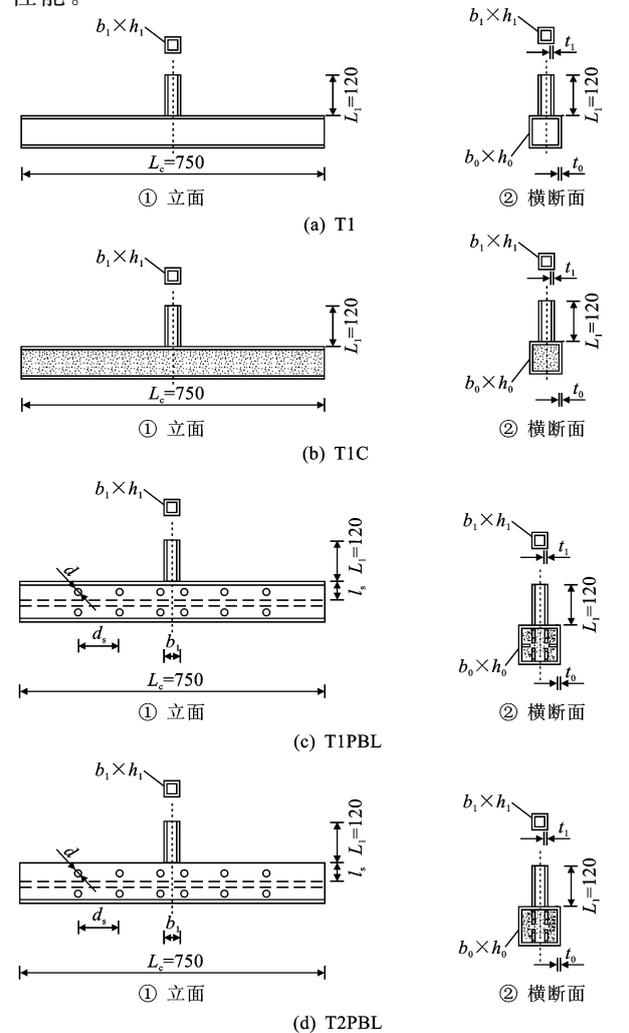


图1 试件构造形式

Fig. 1 Specimen structure

表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of specimen

分组	试件编号	$b_0/\text{mm}$	$h_0/\text{mm}$	$t_0/\text{mm}$	$b_1/\text{mm}$	$h_1/\text{mm}$	$t_1/\text{mm}$	$d_s(d)/\text{mm}$	$l_s/\text{mm}$	$\beta(b_1/b_0)$	$\gamma(b_0/t_0)$
文献[10]	T1	127.2	178.1	4.74	50.9	51.1	6.32			0.4	27
	T2										
本文	T1PBL							100(25)	51		
	T2PBL										

节点受拉加载模式如图 2 所示。图 2(a)为试件 T1、T1C、T1PBL 的加载模式,主管两端不设端板,以观察管内混凝土是否被挤出;主管的边界条件为两端铰接,对支管施加轴向拉力荷载。图 2(b)为试件 T2PBL 的加载模式,为保证节点不发生构件弯曲破坏,沿主管轴向设置两块钢垫板作为连续刚性支承,对支管施加轴向拉力荷载。

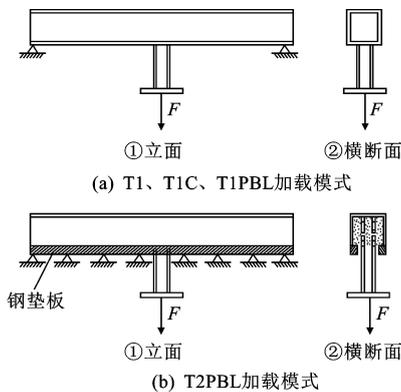


图 2 节点受拉加载模式

Fig. 2 Tensile loading modes of joint

## 2 数值模拟方法

模型考虑了材料非线性、几何非线性和接触非线性,不考虑焊缝的影响。

### 2.1 钢材和混凝土本构关系

钢材的应力-应变关系曲线采用二折线的弹塑性曲线,钢材弹性阶段的弹性模量  $E_s$  和泊松比  $\nu_s$  分别取为  $2.06 \times 10^5$  MPa 和 0.283<sup>[11]</sup>。混凝土本构关系采用 ABAQUS 软件中的混凝土损伤模型<sup>[12]</sup>,混凝土单轴受压模型采用文献[8]中的矩形钢管核心混凝土的应力-应变关系。混凝土弹性模量按  $E_c = 4\ 730 \sqrt{f_c}$  (MPa) 计算<sup>[9]</sup>,其中  $f_c$  为混凝土圆柱体抗压强度标准值,泊松比  $\nu_c$  取 0.16。混凝土单轴受拉模型采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中的应力-应变关系<sup>[13]</sup>。

### 2.2 单元类型选取与模型网格划分

基于 ABAQUS 软件,钢管采用 S4 四节点完全积分的壳单元,混凝土、PBL 加劲肋、支座垫板均采

用 C3D8 八结点线性六面体单元模拟,加载板采用刚性体单元模拟。模型网格划分采用最小化网格过渡的扫掠技术,如图 3 所示。

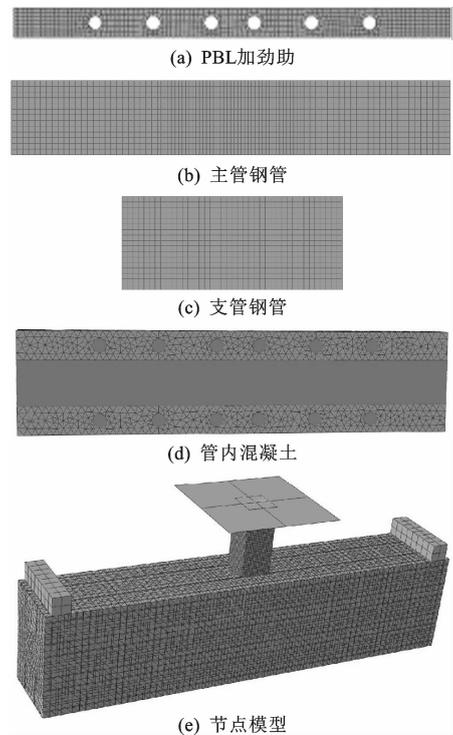


图 3 有限元模型及网格划分

Fig. 3 Finite element model and meshing

### 2.3 钢-混界面接触模型

钢-混界面接触模型由钢与混凝土界面的法向接触和切向粘结滑移构成,刚度较大的混凝土作为主面,钢管和 PBL 加劲肋作为从面。钢管与混凝土界面法向接触采用“硬”接触,接触面传递界面压力  $p$ ,界面切向接触采用“库仑摩擦”模型,即在  $\tau \leq \tau_c$  时界面不发生相对滑动;在  $\tau > \tau_c$  时界面发生相对滑动,且剪应力保持为  $\tau_c$ ,其中,  $\tau_c$  为剪应力临界值,  $\tau_c = \mu p > \tau_u$ ,  $\tau_u$  为界面平均粘结强度取为  $0.462 \text{ MPa}$ <sup>[14]</sup>,  $\mu$  为界面摩擦因数,取为  $0.6$ <sup>[15]</sup>,如下页图 4 所示。

### 2.4 边界条件

支管与主管、支管与加载板均采用绑定约束,在加载板中心设置参考点  $RP$ ,参考点与加载板耦

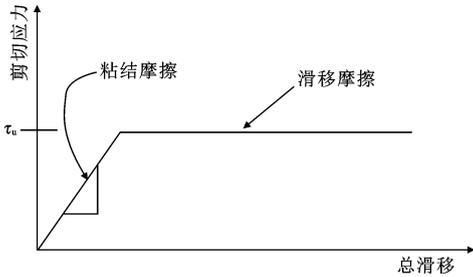


图4 接触模型

Fig. 4 Contact model

合连接,主管与支座下表面采用接触单元模拟,两端分别表现为有摩擦无相对滑移和接触光滑有相对滑移,以模拟铰接,如图5所示。约束参考点 $RP$ 的 $X$ 方向转动自由度,并施加参考点 $RP$ 的 $X$ 正方向的位移;约束支座垫板上表面节点 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 方向的平动自由度和 $X$ 、 $Z$ 方向的转动自由度。

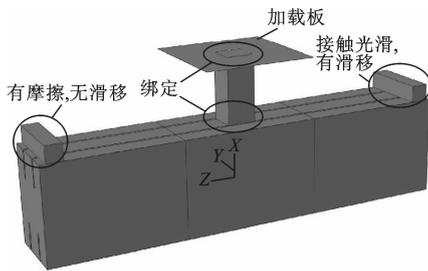


图5 边界条件

Fig. 5 Boundary conditions

## 2.5 计算工况选取与模拟方法验证

为分析各试件的破坏模式、极限承载力、抗拉刚度和应力分布,选取3种计算工况进行数值模拟分析,如表2所示。工况1采用位移加载,轴向位移为40 mm加至试件破坏,以分析节点的破坏形式、抗拉刚度、极限承载力及破坏阶段的应力分布;工况2采用位移加载,轴向位移为10 mm,以分析节点中PBL加劲肋的极限承载力;工况3采用力加载,取支管截面轴向拉应力为1 MPa,以分析节点弹性阶段的应力分布。文献[5]仅给出了T1、T1C试件的屈服承载力和极限承载力,与本文计算工况1的数值模拟计算值接近,验证了数值模拟方法的可靠性。

表2 计算工况

Tab. 2 Calculation conditions

计算工况	数值模型	加载方法	备注
工况1	T1、T1C、T1PBL	位移加载	40 mm
工况2	T2PBL	位移加载	10 mm
工况3	T1、T1C、T1PBL	力加载	1 MPa

## 3 不等宽T型节点受拉性能分析

### 3.1 破坏模式分析

为分析不等宽T型节点受拉破坏模式,对试件支管轴向施加位移至试件破坏,即表2中工况1,由此可得到不等宽T型节点达到极限承载力时主管钢管顶板、腹板、底板以及PBL加劲肋的纵、横向破坏形式,如图6所示。

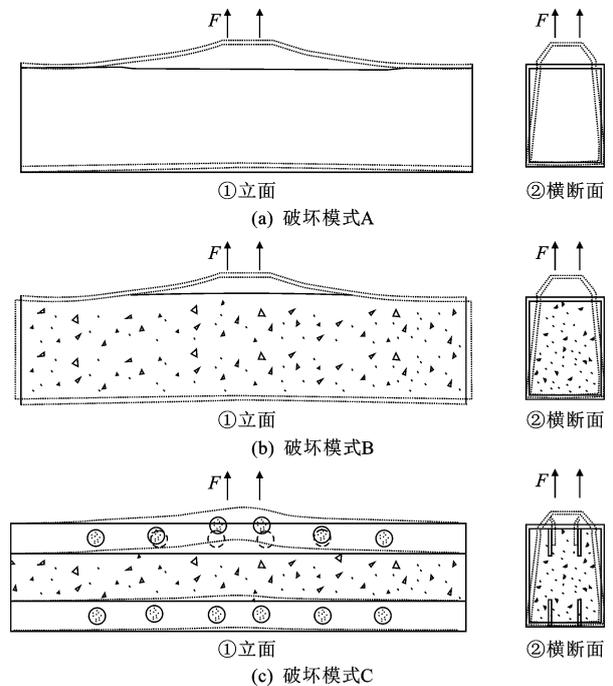


图6 不等宽T型节点受拉破坏模式

Fig. 6 Tensile failure mode of T type joints with unequal width

由图6可看出,在支管受轴拉荷载作用下,矩形钢管节点主管顶板和底板向外凸出,顶板凸出变形较大,腹板向内凹入变形,发生破坏模式A;而矩形钢管混凝土节点顶板和混凝土脱开,顶板向外凸出变形破坏,底板无明显变形,腹板向内挤压混凝土,管内混凝土被挤出,发生破坏模式B;PBL加劲型矩形钢管混凝土节点由于PBL混凝土榫的限制作用使两排加劲肋内侧混凝土与顶板共同被掀起,加劲肋底部及两排加劲肋外侧与混凝土脱开,PBL加劲肋弯曲变形,管内混凝土未被挤出,发生破坏模式C。可见,PBL加劲肋可有效限制顶板被掀起和管内混凝土沿轴向的滑移,改善不等宽T型节点受拉破坏模式。

### 3.2 承载力分析

为得到不等宽T型节点极限承载力,对试件支管轴向施加位移,加载至荷载出现下降段,即表2中工况1,节点受拉过程中,支管轴向伸长,主管弯曲

变形,主管顶板发生局部变形,加载板处支管轴向位移  $\Delta_1$  由支管轴向伸长  $\Delta_1$ 、主管局部变形  $\Delta_2$  和主管弯曲变形  $\Delta_3$  构成,如图 7 所示。对于矩形钢管节点和矩形钢管混凝土节点,支管端板处极限荷载取决于支管轴拉极限承载力、主管抗弯承载力和主管顶板面外抗弯承载力三者中的最小值;对于 PBL 加劲型矩形钢管混凝土节点,支管端板处极限荷载取决于支管轴拉极限承载力、主管抗弯承载力和主管顶板面外抗弯承载力与 PBL 加劲肋抗剪力承载力之和三者中的最小值;由支管轴向伸长、主管弯曲变形及顶板局部变形随荷载的变化关系,可判定极限荷载由哪一项控制,相应的荷载-变形关系曲线如图 8 所示。

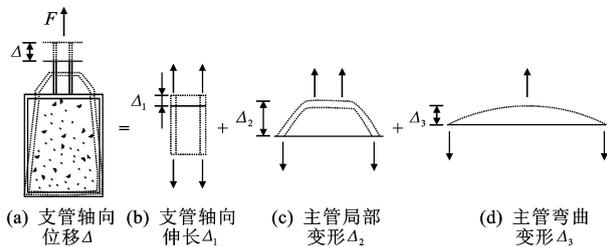
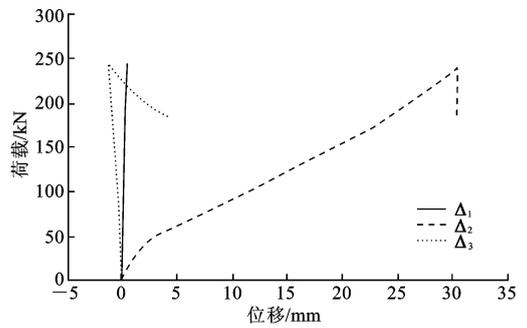


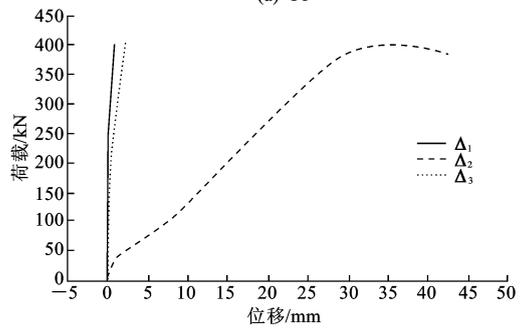
图 7 支管轴向位移构成

Fig. 7 Composition of branch tube axial displacement

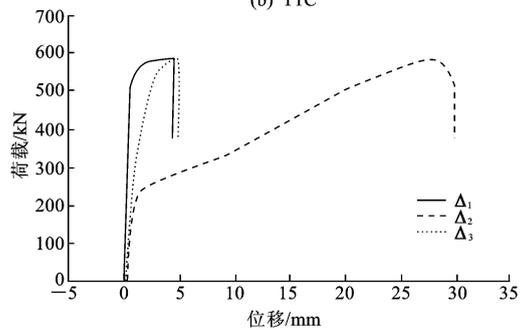
由图 8(a)可知,支管轴向伸长随荷载的增大成比例增加,当荷载减小时变形恢复,可见,支管处于弹性工作状态,未出现承载力破坏;由荷载-主管顶板的局部变形关系可知,局部变形随荷载的增大先线性增加,后表现为非线性增加,即表现为塑性工作阶段,当节点达到极限荷载后出现下降时,变形有一定程度的恢复,说明顶板也未达到极限承载力破坏;由荷载-主管弯曲变形曲线可知,在加载初期,位移表现为负值,是由于底板以局部外凸变形为主,未出现明显的弯曲变形,随着荷载的增加,构件弯曲变形明显,达到极限荷载后,弯曲变形仍然继续增加,可见,主管达到弯曲极限承载力,试件 T1 节点受拉极限承载力由主管抗弯极限承载力控制。由图 8(b)可知,试件 T1C 支管伸长量和主管弯曲变形量随荷载的增大而呈线性增加,未发生支管和主管的承载力破坏;节点顶板局部变形经历了弹性、塑性和破坏阶段,节点极限承载力由顶板面外抗弯承载力控制。由图 8(c)可知,试件 T1PBL 达到极限荷载时,支管、主管及顶板均进入塑性工作阶段,随后荷载出现下降段,支管伸长变形和主管弯曲变形有一定恢复,而主管顶板局部变形继续增加,可见,主管顶板出现极限承载力破坏,节点极限承载力由主管顶板面外抗



(a) T1



(b) T1C



(c) T1PBL

图 8 荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curve

弯承载力和 PBL 孔内混凝土榫抗剪承载力控制。

通过对工况 2 进行数值模拟,得到了不等宽 T 型节点中 PBL 加劲肋的抗剪承载力。为对比 PBL 加劲肋对节点承载力的影响,统计了各类试件荷载-顶板局部变形关系,如下页图 9 所示。根据文献 [11]规定钢管混凝土 T 型节点的承载力  $N_s$  取为节点处局部变形达 3% 主管宽度时的支管内力;极限承载力  $N_u$  取为节点轴拉作用下的极限承载力。以钢管节点承载力  $N_{uT_1}$ 、 $N_{sT_1}$  为基准,对各试件承载力进行无量纲化,结果如表 3 所示。

结合图 9 和表 3 可知,试件 T1、T1C、T1PBL

表 3 承载力和抗拉刚度

Tab. 3 Bearing capacity and tensile stiffness

类型	T1	T1C	T1PBL	T2PBL
$N_u/N_{uT_1}$	1.0	1.6	2.4	0.5
$N_s/N_{sT_1}$	1.0	1.2	5.9	2.4
$K/K_{T_1}$	1.0	1.9	23.2	17.5

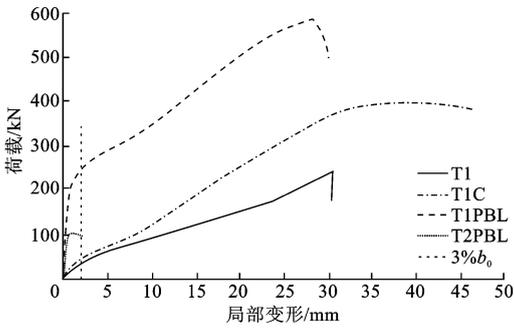


图9 荷载-局部变形曲线

Fig.9 Load-local deformation curve

局部变形接近3%主管宽度时,进入屈服阶段,只有局部变形较大时,才能达到极限承载力,变形能力较强;试件T2PBL局部变形小于3%主管宽度时,已达到极限承载力,变形能力较弱,但PBL孔内混凝土榫的抗剪承载力明显大于矩形钢管和钢管混凝土节点的承载力。钢管混凝土节点设置PBL加劲肋后继继承了钢管混凝土节点变形能力强的优点,承载力也有明显提高,且大于PBL孔内混凝土榫的抗剪承载力和钢管混凝土节点承载力二者之和,极大地提高了节点的受力性能。

### 3.3 抗拉刚度分析

为分析节点的抗拉刚度,文献[4]将矩形钢管和矩形钢管混凝土X、T、Y型节点受拉模型分别简化为框架、固支梁模型,在此基础上,PBL加劲型矩形钢管混凝土T型节点由于PBL孔内混凝土榫具有剪力连接件的作用,其受拉模型可简化为固支梁+弹簧模型,力学图式如图10所示。

由图10可知,矩形钢管T型节点的抗拉刚度等效为框架的竖向抗弯刚度,矩形钢管混凝土T型节点的抗拉刚度等效为固支梁的抗弯刚度,PBL加劲型矩形钢管混凝土T型节点的抗拉刚度等效为有弹簧约束的固支梁的抗弯刚度,弹簧的刚度由PBL孔内混凝土榫的抗剪刚度决定。根据结构力学分析,跨径相同的固支梁抗弯刚度大于框架的竖向抗弯刚度,带弹簧约束的固支梁的抗弯刚度大于固支梁的抗弯刚度,可见,矩形钢管混凝土主管内壁设PBL加劲肋可极大地提高T型节点的抗拉刚度。

荷载-局部变形曲线弹性工作阶段的斜率反映了节点的抗拉刚度,表3给出了节点的相对抗拉刚度。由表3可知,矩形钢管混凝土T型节点的抗拉刚度约为矩形钢管的1.9倍,与文献[4]计算值接近;由于PBL孔内混凝土榫抗剪刚度较大,PBL加劲型矩形钢管混凝土节点的抗拉刚度显著大于钢管和钢管混凝土节点的抗拉刚度。

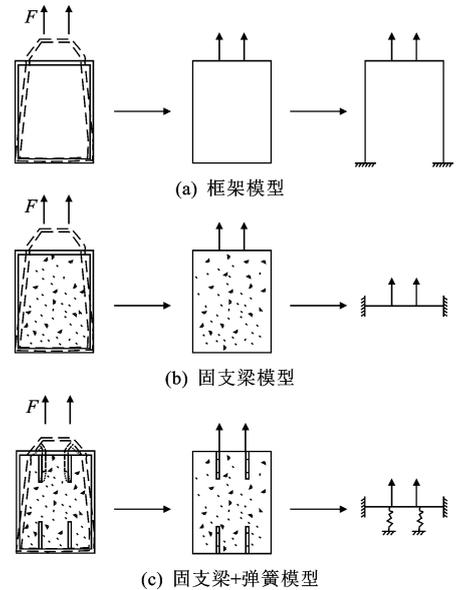


图10 不等宽T型节点受拉简化模型

Fig.10 Simplified tensile model of T type joints with unequal width

### 3.4 应力分布

由于支、主管几何尺寸及支、主管刚度不同等影响,T型受拉节点应力在支、主管截面分布不均匀,节点的应力集中程度反映了节点的抗疲劳性能。为分析PBL加劲肋对节点在弹性工作阶段和破坏阶段应力分布规律的影响,分2种情况讨论:①对支管截面施加1 MPa的拉应力;②极限荷载。

#### 3.4.1 弹性阶段应力分布

通过工况2,即对支管截面施加1 MPa的拉应力的数值模拟,得到弹性阶段支、主管的应力分布。下页图11给出了支管各壁板的轴向拉应力分布,其中,A、C板与主管轴向平行,B、D板与主管轴向垂直,等值线上标注的数字为应力。下页图12给出了连接区域主管的主应力分布。

由图11可知,在支管轴向荷载作用下,各节点支管A、C板应力水平平均比B、D板高,应力峰值均出现在A、C板的下部角隅处;对比试件T1、T1C、T1PBL应力分布情况,试件T1C的应力水平较试件T1有一定降低,试件T1PBL由于主管内壁设PBL加劲肋支管应力水平大幅降低,应力分布最均匀。由图12可知,各节点A、C板投影区域较B、D板投影区域主管的应力水平高,应力峰值出现在支管A、C板在主管投影位置附近;对比3类试件可发现,T1PBL节点主管应力显著小于试件T1、T1C,且应力集中现象最不明显。可见,设置PBL加劲肋可以显著改善不等宽T型节点弹性工作阶段支、主

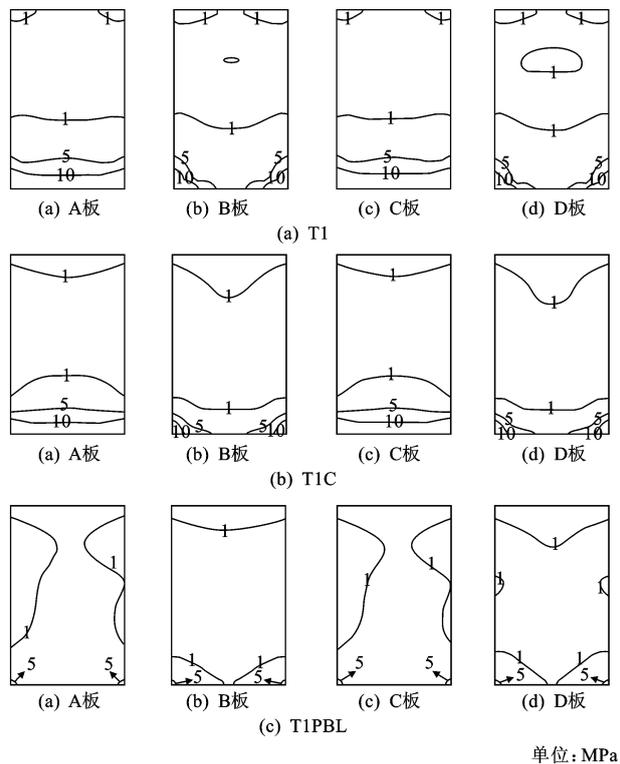


图 11 支管应力分布

Fig. 11 Stress distribution of branch tube

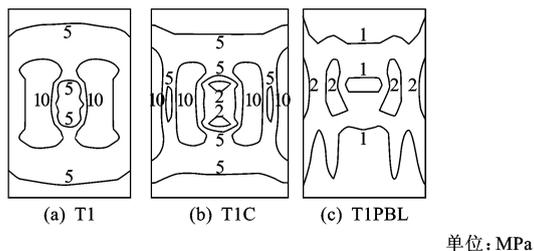


图 12 连接区域主管应力分布

Fig. 12 Stress distribution of connection area of main tube

管应力集中现象,极大地提高节点抗疲劳性能。

### 3.4.2 破坏阶段应力分布

通过工况 1 对支管施加位移加载的数值模拟,得到极限荷载作用下支、主管的应力分布。图 13 为支管屈服即轴向拉应力大于屈服强度 443 MPa 的区域,图 14 为主管屈服即主应力大于 400 MPa 的区域。

由图 13 可知,在极限荷载作用下,试件 T1、T1C 的屈服位置仅发生在支管的根部,试件 T1PBL 的屈服位置几乎遍布整个支管,说明 PBL 加劲肋可以改善支管的应力分布。由图 14 可知,尽管试件 T1C 极限荷载大于试件 T1,但主管屈服区域较小,说明管内填混凝土并未改善主管应力分布;与试件 T1、T1C 相比,试件 T1PBL 顶板屈服区域最小,且底板由弯曲应力引起屈服,说明 PBL 加劲肋可极大

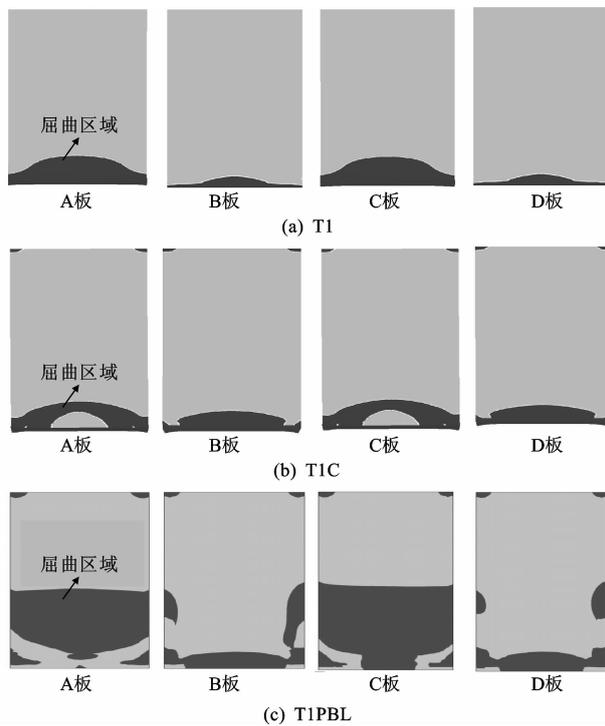


图 13 支管屈服区域

Fig. 13 Yield area of branch tube

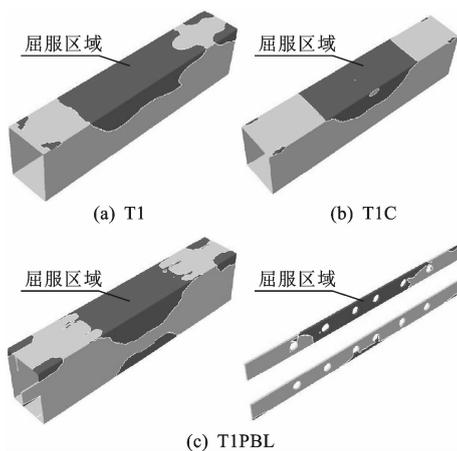


图 14 主管屈服区域

Fig. 14 Yield area of main tube

地改善主管应力分布,从而可显著改善节点破坏阶段的应力分布。

## 4 结 语

(1) PBL 加劲型矩形钢管混凝土不等宽 T 型节点受拉时加劲肋内侧混凝土与顶板共同被掀起,顶板变形程度低于钢管混凝土节点,管内混凝土未被挤出;PBL 加劲肋可有效限制顶板的被掀起和纵向混凝土的滑移,改善不等宽 T 型节点受拉破坏模式。

(2) PBL 加劲型矩形钢管混凝土不等宽 T 型受拉节点由于 PBL 加劲肋的存在,顶板被加劲后抗

弯承载力提高,且PBL内混凝土榫的抗剪承载力较大,可有效限制顶板被掀起,从而极大地提高了节点的极限承载力;PBL孔内混凝土榫的抗剪刚度较大,节点的抗拉刚度提高明显,设置PBL加劲肋可显著改善不等宽T型节点的抗拉性能。

(3) PBL加劲型矩形钢管混凝土不等宽T型受拉节点在弹性阶段和破坏阶段支、主管应力集中现象明显小于矩形钢管节点和矩形钢管混凝土节点。设置PBL加劲肋可以显著改善不等宽T型节点受拉时支、主管的应力分布,极大地提高节点的抗疲劳性能。

(4) 本文进行了细致的有限元分析,探讨了PBL加劲肋对节点受拉力学性能的影响。后期将开展受拉节点试验研究以进一步揭示PBL加劲型矩形钢管混凝土节点的传力机理。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 刘永健,张宁,张俊光. PBL加劲型矩形钢管混凝土的力学性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(4):13-17.  
LIU Yong-jian, ZHANG Ning, ZHANG Jun-guang. Mechanical behavior of concrete-filled square steel tube stiffened with PBL[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(4): 13-17. (in Chinese)
- [2] 程高,刘永健,邱洁霖,等. PBL加劲型矩形钢管混凝土不等宽T型节点应力集中系数分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(4):74-79. (in Chinese)  
CHENG Gao, LIU Yong-jian, QIU Jie-lin, et al. Analysis of stress concentration factor on concrete-filled rectangular steel tube T-joints stiffened with PBL[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(4):74-79.
- [3] 刘永健,周绪红,刘君平. 主管内填混凝土的矩形钢管X型节点受拉和受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(1):82-86.  
LIU Yong-jian, ZHOU Xu-hong, LIU Jun-ping. Experimental research on rectangular steel tube X-joints with chord concrete-inside subjected to tension and bending[J]. Journal of Building Structure, 2009(1): 82-86. (in Chinese)
- [4] 刘永健. 矩形钢管混凝土桁架节点极限承载力试验与设计方法研究[D]. 湖南大学, 2003.  
LIU Yong-jian. Experiments on ultimate bearing capacity and research on design method of joints of concrete-filled rectangular steel tube truss[D]. Hunan University, 2003. (in Chinese)
- [5] Packer J A. Concrete-filled HSS connections[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(3):458-467.
- [6] Kenedi W W. Concrete-filled HSS joints[D]. Toronto; University of Toronto, 1991.
- [7] 程高,刘永健,俞文龙,等. 方钢管混凝土X型节点受拉力学性能的非线性有限元分析[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2015, 38(3):358-362.  
CHENG Gao, LIU Yong-jian, YU Wen-long, et al. Nonlinear finite element analysis on concrete-filled square steel tube X-connections subjected to tension[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2015, 38(3): 358-362. (in Chinese)
- [8] 万明亮. 内置PBL哑铃型钢管混凝土拱肋节点力学性能研究[D]. 长安大学, 2012.  
WAN Ming-liang. Research on mechanical behaviors of joints for dumbbell-shaped CFST arch ribs with Inner PBL[D]. Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [9] CECS 159:2004. 矩形钢管混凝土结构技术规程[S]. CECS 159:2004 Technical specification for structures with concrete-filled rectangular steel tubular members [S]. (in Chinese)
- [10] 刘永健,周绪红,刘君平. 矩形钢管混凝土T、Y型节点受压性能试验[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2008, 28(5):48-52.  
LIU Yong-jian, ZHOU Xu-hong, LIU Jun-ping. Behavior of concrete filled rectangular steel tube T-joints and Y-joints under compression [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(5):48-52. (in Chinese)
- [11] GB 50017—2003, 钢结构设计规范[S]. 2003.  
GB 50017—2003, Code for design of steel structures [S]. (in Chinese)
- [12] 聂建国,王宇航. ABAQUS中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. 工程力学, 2013, 30(4):59-67.  
NIE Jian-guo, WANG Yu-hang. Comparison study of constitutive model of concrete in ABAQUS for static analysis of structures [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4):59-67. (in Chinese)
- [13] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].  
GB 50010—2010, Code of design of concrete structures[S]. (in Chinese)
- [14] 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.  
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. (in Chinese)
- [15] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州大学, 2005.  
LIU Wei. Research on mechanism of concrete-filled steel tubes subjected to local compression[D]. Fuzhou University, 2005. (in Chinese)