

文章编号:1673-2049(2012)04-0013-05

PBL 加劲型矩形钢管混凝土的力学性能

刘永健¹, 张 宁^{1,2}, 张俊光¹

(1. 长安大学 旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要:为改善钢管混凝土界面和节点力学性能,加强钢管与混凝土的组合效应,提出在钢管混凝土的钢管内设置开孔钢板纵肋,使其具有 PBL 连接件和加劲肋的双重作用;进行了无肋和设置 PBL 加劲肋 2 种截面形式的矩形钢管混凝土轴压短柱试验;分析了无肋和设置 PBL 加劲肋时,结构中节点剪力在钢管混凝土钢-混界面的传递模式。结果表明:与无肋试件相比,设置 PBL 加劲肋使得矩形钢管对混凝土的套箍作用得到加强,其轴压承载力提高了 14%~28%,试件延性明显改善;PBL 连接件能够有效缩短管壁剪力向核心混凝土的传递线路,改善节点区域的应力分布。PBL 加劲型矩形钢管混凝土具有承载力高、钢-混组合效应明显的优势,并且构造简单、施工方便,对丰富和发展钢管混凝土在桥梁工程中的应用具有重要意义。

关键词:矩形钢管混凝土;PBL 剪力键;粘结强度;承载力;传力机理

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

Mechanical Behavior of Concrete-filled Square Steel Tube Stiffened with PBL

LIU Yong-jian¹, ZHANG Ning^{1,2}, ZHANG Jun-guang¹

(1. Bridge Detection and Strengthening Key Laboratory of Transportation Industry, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd, Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: To improve the interface behavior between the tube and concrete column, a new type of concrete-filled steel tube inside placed by a longitudinal stiffener with PBL holes was proposed. It provided functions of both stiffness enhance and internal shear connection to the concrete-filled steel tube. An axial compression test was employed to investigate the improvement of bearing capacity of concrete-filled square steel tube stiffened with PBL shear connector. The shear bond between steel and concrete was analyzed for the concrete-filled tubes with and without PBL stiffener. The results show that the bearing capacity is enhanced by 14% to 28% compared to that without PBL stiffener, and its ductility is also improved. The transfer distance of shear force from steel tube to concrete column is decreased dramatically with the aid of PBL stiffener. As a result, the PBL stiffener, welded on the tube surface inside, can effectively improve the mechanical property of concrete-filled steel tube, thus can provide a new enhancement measure for bridge construction.

Key words: concrete-filled square steel tube; PBL shear connector; bond strength; bearing capacity; load transmission mechanism

收稿日期:2012-11-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51178051)

作者简介:刘永健(1966-),男,江西婺源人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:steellyj@126.com。

0 引言

钢管混凝土利用钢管对混凝土的约束作用使混凝土的强度得以提高,塑性和韧性大为改善^[1],在桥梁工程中应用发展迅速。中国已建成的钢管混凝土拱桥超过 300 座^[2],它们以钢管拱肋填筑混凝土的骨架作为承载结构。此外,钢管混凝土还多用于桥塔和桥墩中,可以充分发挥轴压承载力高、刚度大、延性好的优势。近年来,钢管混凝土作为弦杆或腹杆构件逐渐应用在大跨径桁架桥梁上,充分降低桁架高度、避免管壁局部失稳、改善节点抗疲劳性能,拓展了钢管混凝土在桥梁建设中的应用前景。

与建筑结构相比,桥梁结构受跨径和荷载因素的影响,采用的钢管混凝土截面尺寸较大,且管壁通常由厚钢板焊接而成,管内混凝土径向收缩量相对明显,钢-混组合效应受到削弱。此外,钢管混凝土拱桥和桁架桥一般先架设钢管作为受力支架,管内混凝土填充质量较难控制,加之收缩徐变、日照温差的影响,钢管混凝土界面粘结应力容易被克服而脱空,即为钢-混界面脱粘和剪切滑移。从实桥调查来看,大量钢管混凝土拱桥出现不同程度的脱空,导致钢管混凝土协同工作的组合效应显著降低^[3]。研究表明,钢管混凝土受压构件核心混凝土截面脱空率大于 2% 时,构件的承载力降低比例在 20% 以上,钢管对核心混凝土的套箍作用失效^[4]。因此,有必要对此类桥梁中的钢管混凝土采取构造措施以增强钢管和混凝土的共同受力和组合效应,避免管内混凝土脱空而产生危害。

1 PBL 加劲型钢管混凝土

为改善钢管混凝土界面和节点的力学性能,加强钢管混凝土组合效应,拓宽钢管混凝土结构应用形式,本文中提出一种新型钢管混凝土结构——开孔钢板加劲型钢管混凝土结构,即在钢管内壁纵向设置开孔钢板 PBL 加劲肋。PBL 指在将构件中嵌入混凝土部分的钢板开孔,后浇筑混凝土使之进入钢板孔洞形成混凝土榫来传递剪力。PBL 剪力连接件在承载力、延性和抗疲劳性能方面优于传统剪力连接件,有利于钢-混组合结构的协同受力。在钢管混凝土内壁设置 PBL 剪力连接件具有以下优势:开孔钢板作为钢与混凝土界面 PBL 连接件可增强钢管混凝土界面粘结强度,防止钢管混凝土界面的脱空并减小相对滑移,将管壁受到的荷载有效传至管内混凝土,有利于改善节点性能;对于矩形钢管混

凝土,开孔钢板纵肋作为钢管截面的组成部分可增强钢管对混凝土的约束,提高套箍效应,改善其组合工作性能;开孔钢板作为纵向加劲肋参与钢管混凝土截面受力,改善钢板的抗局部屈曲性能,提高钢管径厚比的限值,降低用钢量。

从钢管混凝土截面形式看,主要可分为圆形截面和矩形截面钢管混凝土。圆形截面钢管混凝土套箍效应明显,但钢管存放、运输和安装就位相对困难,连接构造复杂,不利于在管内设置和加工 PBL 型加劲肋。与之相比,矩形钢管混凝土具有抗弯刚度大、节点构造简单、方便施工等优点,易于在管壁加设 PBL 肋板后直接焊接拼装。因此,本文中重点研究 PBL 加劲型矩形钢管混凝土的力学性能。

2 轴压极限承载力

为分析钢管内壁设置 PBL 纵向加劲肋对矩形钢管混凝土工作性能的改善效果,探索其力学行为和承载力增强机理,进行了设置 PBL 纵肋钢管混凝土短柱轴压对比试验。试件加工时先将 4 个钢箱壁板分别与 PBL 纵肋板焊接,再拼焊成矩形钢管,其截面形式见图 1。试件采用 Q345 钢材,共制作 3 个设置 PBL 纵肋的矩形钢管混凝土和 1 个不设置加劲肋的钢管混凝土试件,PBL 肋板沿纵向开圆孔,开孔间距为 0.1 m,试件参数见表 1。

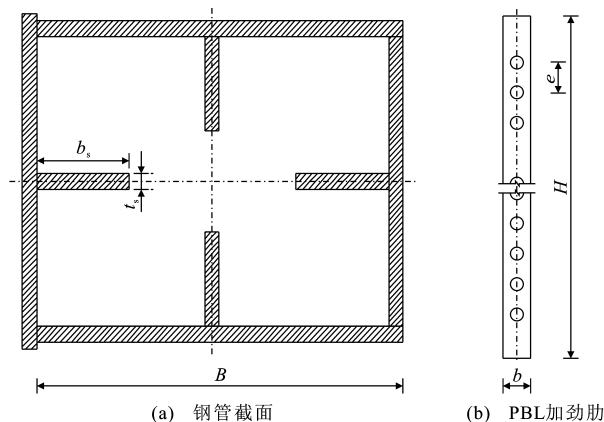


图 1 PBL 加劲型矩形钢管混凝土试件构造

Fig. 1 Schematics of Concrete-filled Square Steel Tube Stiffened with PBL

对 4 个试件进行轴压破坏试验,试件破坏形式见图 2。所有试件在加载初期均具有良好的线弹性,当加载至极限荷载的 70%~80% 时,钢管管壁表面出现斜向的吕德尔斯滑移线。随着荷载不断增加,滑移线由少变多,并且加劲后的试件滑移线要早于未加劲钢管混凝土。试件在进入破坏阶段后,不

表 1 矩形钢管混凝土短柱试件参数

Tab. 1 Parameters of Concrete-filled Square Steel Tube Stub Column Specimens

试件编号	高度 H/mm	宽度 B/mm	壁厚 t/mm	肋板宽度 b_s/mm	肋板厚度 t_s/mm	开孔直径 d/mm	开孔间距 e/mm	含钢率 $\alpha/\%$
SC30-1	900	300	4					5.7
SC30-2	900	300	4	90	4	30	100	6.9
SC30-3	900	300	4	90	4	45	100	6.6
SC30-4	900	300	4	90	4	70	100	6.1



图 2 PBL 加劲型试件破坏形式

Fig. 2 Failure Patterns of Specimen Stiffened with PBL

同部位均出现不同程度的壁板鼓曲破坏,但仍具备较高承载力。

轴压短柱荷载-位移曲线见图 3。由图 3 可知,试件受力过程可分为线弹性阶段、塑性增长阶段和承载力失效阶段。4 个试件在线弹性阶段的切线斜率基本一致,这主要是由于增加 PBL 加劲肋仅使钢管混凝土的含钢率提高了 1% 左右,对试件的轴向线刚度影响较小。而在塑性阶段,设置 PBL 加劲肋使得矩形钢管对混凝土的套箍作用得到加强,塑性区域向上延伸,试件延性明显改善。表 2 为各试件在轴压作用下的极限承载力与相应的位移。可以看出,设置 PBL 加劲肋后试件的轴压承载力提高了 14%~28%,PBL 加劲肋对矩形钢管混凝土的组合作性能提升效果显著。

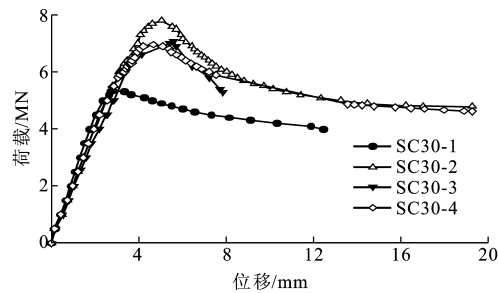


图 3 轴压短柱荷载-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement Relations of Concrete-filled Tube Stub Columns Under Axial Compression

3 节点传力力学性能

对于拱桥或桁架桥,钢管混凝土往往不直接承

表 2 试件极限承载力与相应的位移

Tab. 2 Ultimate Bearing Capacities and Corresponding Axial Displacements of Specimens

试件编号	N_u/kN	U_{cu}/mm	$N_u N_{u0}^{\downarrow}$	$U_{cu} U_{u0}^{\downarrow}$
SC30-1	6 100	2.78	1.00	1.00
SC30-2	7 793	5.05	1.28	1.82
SC30-3	7 088	5.61	1.16	2.02
SC30-4	6 954	4.67	1.14	1.68

注: N_u, U_{cu} 分别为试件破坏时的极限承载力和最大轴向位移;
 N_{u0}, U_{u0} 分别为未设置 PBL 加劲肋的试件破坏时的极限承载力和最大轴向位移。

受纵向压力,其荷载通过焊接在钢管侧面的传力键作用于钢管,然后再经由钢管和混凝土间的粘结摩擦力传给管内混凝土。以钢管混凝土上承式拱桥为例,荷载通过拱上立柱传给钢管混凝土拱肋,如图 4 所示,其中, N 为纵向压力, V 为轴向剪力。拱上立柱与钢管外壁直接焊接,立柱内力沿拱轴方向的分力通过钢-混界面剪应力传递至管内混凝土,经过一段距离后钢管和混凝土共同受力,变形协调。

对于矩形钢管混凝土,假设立柱传递到钢管混凝土的轴向剪力为 V ,沿轴线经过一段距离 l_c 后,钢管和混凝土变形协调,二者应变相等。则剪力传递后混凝土承担的轴向剪力 V_c 为

$$V_c = \frac{A_c E_c}{A_s E_s + A_c E_c} V = \varphi V \tag{1}$$

式中: A_c 为混凝土截面面积; E_c 为混凝土弹性模量; A_s 为钢管截面面积; E_s 为钢管弹性模量; φ 为核心混凝土与整截面轴向线刚度之比。

混凝土承担的轴向剪力应由钢管与核心混凝土的界面粘结力提供,即

$$V_c = 4Dl_c f_{ce} \tag{2}$$

式中: D 为矩形钢管混凝土的截面宽度; f_{ce} 为钢管与混凝土的界面粘结强度。

由式(1),(2)整理可得,界面粘结力最短传递长度 l_c 为

$$l_c = \frac{\varphi V}{4Df_{ce}} \tag{3}$$

在钢管混凝土截面尺寸一定的情况下,剪力最短传递长度与钢管混凝土的界面粘结强度成反比。

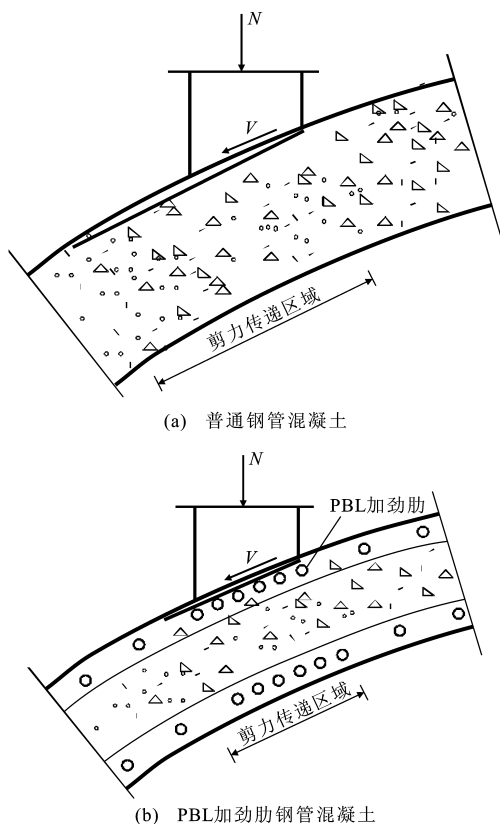


图4 钢管混凝土拱肋节点剪力传递示意

Fig. 4 Schematics of Shear Force Transfer on Joint of Concrete-filled Steel Tubular Arch

从截面形式看,矩形钢管截面对核心混凝土的径向约束作用要明显低于圆形钢管截面,即矩形钢管混凝土的套箍效应相对较弱,其界面粘结强度将会减小。对 32 根矩形、圆钢管混凝土界面力学性能的推出试验发现^[5],2 种截面形式的钢管混凝土界面粘结-滑移曲线基本呈线性关系,矩形截面的粘结强度 0.46 MPa 明显小于圆形截面的粘结强度 1.03 MPa。界面粘结强度减小使矩形钢管混凝土拱肋的节点荷载传力线路加长,钢管管壁在一定范围内承受了较大的轴向应力,局部屈曲破坏概率增加。

与界面粘结效应类似,PBL 剪力连接件同样通过钢管和混凝土之间的相对滑移实现荷载传递。试验结果表明^[6],PBL 剪力连接件的荷载传递包括弹性阶段、塑性阶段和强化阶段。其中,强化阶段保证 PBL 连接件在达到极限强度后仍能提供持续承载力,具有比粘结作用更高的延性。由文献[7]中的荷载-滑移曲线可知,PBL 弹性阶段较短,相对滑移量在 1 mm 以内即到达塑性区,其剪切模量较大。因此,可认为设置 PBL 加劲肋的钢管混凝土在传递剪力时 PBL 连接件先于粘结作用达到极限强度。保守假定管壁上的轴向剪力完全经由 PBL 连接件向

核心混凝土传递,经过一段距离 l_p 后,钢管和混凝土变形协调,二者应变相等。此时向混凝土传递的剪力 V_c 由设置在管壁内侧的 PBL 剪力连接件提供,即

$$V_c = \frac{nl_p}{e} Q_u \quad (4)$$

式中: n 为钢管内壁设置的 PBL 加劲肋数; Q_u 为 PBL 剪力连接件极限承载力。

由式(1),(3)整理可得,PBL 加劲肋提供的剪力最短传递长度 l_p 为

$$l_p = \frac{e\varphi V}{nQ_u} \quad (5)$$

管内 PBL 加劲肋几何参数一定时,剪力最短传递长度 l_p 与 PBL 剪力连接件的极限承载力 Q_u 成反比。目前,各国尚无规范给出 PBL 连接件的承载力计算方法,现有的研究利用 PBL 连接件的推出试验,拟合了多个极限承载力 Q_u 的经验公式^[8]。本文中采用 Leonhardt 等^[9]提出的公式

$$Q_u = 1.79d^2 f_c \quad (6)$$

式中: f_c 为混凝土立方体抗压强度。

以第 2 节中描述的试件为例,取 $\varphi = 0.76$, $D = 0.3$ m, $f_{ce} = 0.46$ MPa,由式(3)可得

$$l_c = \frac{\varphi V}{4Df_{ce}} = \frac{V}{726}$$

试件设置 PBL 加劲肋后,取 $e = 0.1$ m, $n = 4$, $d = 0.03$ m, $f_c = 55$ MPa,由式(5),(6)联立可得

$$l_p = \frac{e\varphi V}{1.79nd^2 f_c} = \frac{V}{4\,663}$$

此时, $l_p/l_c \approx 1/6.4$ 。设置 PBL 加劲肋后,矩形钢管混凝土试件的内部剪力最短传递长度仅为未设置 PBL 加劲肋状态的 1/6。因此,设置 PBL 加劲肋能够增强钢管和混凝土协同工作效率,有效地将管壁节点荷载传至管内混凝土,缩短剪力传递距离,可明显改善节点受力状态。

4 结 语

本文中提出了 PBL 加劲型矩形钢管混凝土这一新型钢管混凝土构件,可有效改善钢管混凝土组合界面的力学性能、提高结构节点传力的可靠性。根据轴压短柱试验,发现 PBL 加劲肋使得矩形钢管对混凝土的套箍作用得到加强,塑性区域向上延伸,试件延性明显增强,设置 PBL 加劲肋后试件的轴压承载力提高了 14%~28%。通过节点传力对比分析发现,PBL 加劲肋对钢管和混凝土界面的连接性能明显优于二者间的粘结摩擦效应,其节点区域的

剪力最短传递长度仅为未设置 PBL 加劲肋状态的 1/6。可见,PBL 加劲肋对矩形钢管混凝土的组合作性能提升效果显著,可改善节点受力状态,缩短剪力传递距离,对丰富和发展钢管混凝土在桥梁工程中的应用具有重要意义。

参考文献:

References:

- [1] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
ZHONG Shan-tong. Structure of Concrete-filled Steel Tube[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [2] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥[M]. 北京:人民交通出版社, 2007.
CHEN Bao-chun. Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [3] 林春皎,郑皆连,秦 荣. 钢管混凝土拱肋混凝土脱空研究综述[J]. 中外公路, 2004, 24(6): 54-58.
LIN Chun-jiao, ZHENG Jie-lian, QIN Rong. Reviews on the Detachment of Concrete Column from Steel Tube in Concrete-filled Steel Tubular Arch Bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2004, 24(6): 54-58.
- [4] 徐亚光,颜东煌,邵旭东. 脱粘对桁架式钢管混凝土拱桥受力性能的影响[J]. 中国公路学报, 2007, 20(6): 61-66.
XU Ya-guang, YAN Dong-huang, SHAO Xu-dong. Influences of Debonding on Mechanical Behavior of Trussed Concrete-filled Steel Tubular Arch Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(6): 61-66.
- [5] 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: Nature Science Edition, 2010, 35(1): 17-23.

- [6] 张清华,李 乔,唐 亮. 桥塔钢-混凝土结合段剪力键破坏机理及极限承载力[J]. 中国公路学报, 2007, 20(1): 85-90.

ZHANG Qing-hua, LI Qiao, TANG Liang. Fracture Mechanism and Ultimate Carrying Capacity of Shear Connectors Applied for Steel-concrete Joint Segment of Bridge Pylon[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(1): 85-90.

- [7] 张清华,李 乔,唐 亮. 剪力连接件的三维非线性仿真分析方法[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(5): 595-599.

ZHANG Qing-hua, LI Qiao, TANG Liang. Research on 3D FEM Nonlinear Simulation Method for Shear Connectors[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(5): 595-599.

- [8] 胡建华,侯文崎,叶梅新. PBL 剪力键承载力影响因素和计算公式研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 4(6): 12-18.

HU Jian-hua, HOU Wen-qi, YE Mei-xin. Study of Influence Factors and Formula for the Bearing Capacity of PBL Shear Connectors[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2007, 4(6): 12-18.

- [9] LEONHARDT E F, ANDRAE W, ANDRAE H P, et al. Novel, Advantageous Shear Connectors for Composite Steel Structures with High Fatigue Strength[J]. Concrete and Reinforced Concrete Construction, 1987, 82(12): 325-331.