

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.04.010

钢-聚氨酯复合管柱轴压性能试验

米旭峰¹,朱海玲²,杭振园²

(1. 厦门理工学院土木工程与建筑学院,福建 厦门 361024; 2. 江苏科技大学土木与建筑工程学院,江苏 镇江 212003)

摘要: 基于 13 个钢-聚氨酯复合管试件的轴压试验,研究聚氨酯在钢复合管中的应用。结果表明,在承受轴向压力下,钢-聚氨酯复合管轴压试件破坏时呈多折腰鼓形;钢管发生局部屈曲后,受到聚氨酯材料的约束可以有效延缓试件屈曲发生时间与变形程度;整个加载过程,聚氨酯与钢材的黏结性能良好,两者未发生剥离现象。从试件荷载-位移曲线以及试验过程可得:荷载-位移曲线一般由弹性、弹塑性、下降和强化阶段组成,表明复合管具有很好的延性与强度储备,能有效抵抗地震等动力荷载的作用。随着 L/D 的减小,试件的极限荷载有增大的趋势,但是其增幅不明显。套箍系数 ξ 是影响试件性能的重要因素,当 ξ 值提高时试件承载力会明显提高;反之亦然。

关键词: 钢-聚氨酯复合管;轴压性能;钢管长径比;套箍系数

中图分类号: TU398⁺.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2014)04-0337-05

Experimental research on axial compression behavior of steel-polyurethane composite tube

MI Xufeng¹, ZHU Hailing², HANG Zhenyuan²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Experiments on axial compression behaviors of 13 steel-polyurethane composite tube (SPCT) specimens were conducted to study the application of polyurethane to steel composite tubes. The results show that, under the axial compression, the SPCT was shaped like a bow drum. When local buckling occurred in the steel tube, polyurethane could effectively delay the buckling and deformation. Over the whole loading process, the bonding performance between polyurethane and steel was so good that peeling did not occur. It can be seen from the load-displacement curve and test process that the load-displacement curve is generally composed of elastic, elastic-plastic, descending, and strengthening phases, indicating that the SPCT has sound ductility and a reserve of strength to resist dynamic loads such as earthquakes. With the decrease of L/D , the limiting load of the specimen had an increasing trend, but the trend was not significant. The confining parameter ξ is an important factor influencing the specimen. When ξ increased, the specimen's carrying capacity increased significantly, and vice versa.

Key words: steel-polyurethane composite tube; axial compression behavior; length-diameter ratio of steel tube; confining parameter

各类新型功能材料的不断涌现为新结构发展奠定了良好基础。其中,在 20 世纪 90 年代中,Intelligent Engineering 公司(简称 IE 公司)研制成功高性能聚氨酯材料,该材料具有良好的黏结性能,并与混凝土材料有类似的施工方式,但其硬化时间不超过 7 min;同时,对于与其组合的钢板只需进行简单的除锈处理便可应用于实际工程中。基于这些独特优势,该材料被迅速引入船舶、海洋、土木等工程。目前,劳氏船级社与中国

收稿日期: 2013-05-24
基金项目: 国家自然科学基金(51108212); 福建省自然科学基金(2012J01240)
作者简介: 米旭峰(1977—),男,河北平山人,副教授,博士,主要从事新型组合结构研究。E-mail: mixf@xmut.edu.cn

船级社已先后推出相关的船舶结构建造指南^[1-2],从而实现了该材料在船舶工程中的应用。

钢-聚氨酯复合构件,是通过将钢材与聚氨酯弹性芯材浇注黏结而形成^[3-8],其各项力学性能要优于钢材或聚氨酯,其常见的结构形式如图 1 所示。在过去的 20 年中,IE 公司^[9]进行了大量的聚氨酯材性试验,掌握了这种新型聚氨酯材料的本构与黏结力模型。试验结果显示,聚氨酯材料具备基本相同的抗拉与抗压性能,其屈服强度一般在 20 MPa 左右(随着配方调整,强度会有一定范围的变化);其剪切强度达到25 MPa以上,与钢材的黏结剪切强度在 14 MPa 以上,表明该材料具备良好的力学性能。同时,聚氨酯材料具有自重轻(密度不到钢材的 1/7)、受拉延伸率可达 50% 以上、能有效抵抗强酸与强碱腐蚀、抗冲击性能优越等特点。

目前,这种高性能聚氨酯材料仅在船舶、海洋平台、桥梁等结构修复维护中使用,在传统土木结构的应用研究尚未全面开展。因此笔者通过 13 个试件研究钢管聚氨酯柱轴压性能,研究聚氨酯材料与钢管在轴力作用下的共同工作机理、变形方式以及破坏模式,为该结构在土木工程中的应用提供试验基础。

1 试验方案

1.1 试件设计

根据现有钢管混凝土柱研究成果可知,通常建议采用的钢管长径比(L/D)为 3.0~3.5,而其轴压性能的主要影响因素为套箍系数 ξ 与含钢率 θ ^[10-15]。因此,本次试验的钢管聚氨酯柱的 L/D 取为 3.0~3.5,试件的基本数据见表 1,其中 t 为管壁厚度。

试件采用 2 种型号的无缝钢管,直径分别为 45 mm(7 个)、48 mm(6 个);聚氨酯为高性能结构用聚氨酯(密度为1 200 kg/m³)。管内聚氨酯采用机械搅拌灌注同时进行,在灌注聚氨酯之前对钢管内壁采取喷砂处理,使管壁表面达到 Sat2.5 级,以达到聚氨酯灌注的钢板处理工艺要求。

1.2 材料性能试验

a. 钢材。根据 GB/T 228—2002,对于钢管采取全壁厚纵向弧形试样,试件长 3 mm、宽 10 mm,采用 CMT5105 微机控制电子万能试验机加载,见表 2。

b. 聚氨酯。根据 GB/T 1453—2005,聚氨酯材料压缩性能试验采用高 30 mm、直径 20 mm 的圆柱体聚氨酯试件 7 个,并进行打磨处理,保证表面光滑。采用 CMT5105 微机控制电子万能试验机进行轴向压缩试验。试验结果表明聚氨酯的平均拉伸弹性模量为 849.36 MPa,屈服强度为 29.07 MPa,见表 3。

聚氨酯材料拉伸性能试验采用直径 3 mm、高度为 6 mm 的聚氨酯试件 4 个,在 CMT5105 微机控制电子万能试验机上完成。试验在试件两端施加拉力,聚氨酯的平均拉伸屈服强度为 30.09 MPa(表 4)。

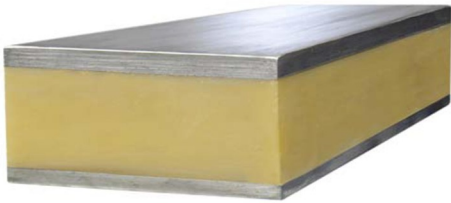


图 1 钢-聚氨酯夹层板
Fig. 1 Steel-polyurethane sandwich plate

表 1 试件尺寸

Table 1 Sizes of specimens							
试件编号	试件尺寸/mm			L/D	D/t	θ	ξ
	直径	管壁厚	长度				
SP1-1	45	3	135	3.0	15	0.249	4.85
SP1-2	45	3	135	3.0	15	0.249	4.85
SP2-1	45	3	144	3.2	15	0.249	4.85
SP2-2	45	3	144	3.2	15	0.249	4.85
SP3-1	45	3	160	3.6	15	0.249	4.85
SP3-2	45	3	160	3.6	15	0.249	4.85
SP6-2	45	3	160	3.6	15	0.249	4.85
SL1-1	48	3	144	3.0	16	0.234	3.12
SL1-2	48	3	144	3.0	16	0.234	3.12
SL2-1	48	3	154	3.2	16	0.234	3.12
SL2-2	48	3	154	3.2	16	0.234	3.12
SL3-1	48	3	170	3.5	16	0.234	3.12
SL3-2	48	3	170	3.5	16	0.234	3.12

表 2 钢材拉伸试验结果

Table 2 Tensile test results			
试件编号	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ GPa	弹性模量/ MPa
SP	395	505	2 080
SL	275	405	2 170

表 3 聚氨酯压缩材料性能试验结果

Table 3 Compression test results of polyurethane		
试件编号	屈服强度/MPa	弹性模量/MPa
1	34.96	1 046.58
2	27.81	808.51
3	33.63	1 025.63
4	27.67	806.28
5	25.11	698.79
6	26.76	779.49
7	27.56	780.26

由表 3 和表 4 可以看出,聚氨酯的压缩与拉伸平均屈服强度分别为 29.07 MPa 与 30.09 MPa, 可视为各向同性材料;同时,聚氨酯的拉伸率平均为 89%, 表明这种材料具备很好的延性。

1.3 钢-聚氨酯复合管试验加载方式

钢管聚氨酯柱试验采用微机控制电液伺服万能试验机 YNS-1000, 最大加载值 1 000 kN。为满足试件两端铰接, 在加载端与底部设置球铰(图 2)。试验中采用位移计测量试件的轴向变形, 并在试件中部设置应变片测量轴向应变。为保证构件处于轴压状态, 通过预加载检查应变片读数, 如发生偏心则调整构件位置直到预加载时应变片读数基本一致, 确保构件为轴压状态。试验采用力控制与位移控制 2 种方式组合, 在构件屈服之前采用分级荷载控制, 而到构件屈服时改为位移加载控制。

2 试验结果与分析

2.1 试验过程

以试件 SP1 为例, 主要试验过程分为 4 个阶段。

a. 弹性阶段: 试件在此阶段。轴向荷载-变形基本呈线性变化, 其应力-应变曲线亦为线性关系, 构件此时没有看出明显的变化, 但应变片显示应力不断增加。

b. 弹塑性阶段: 此阶段钢管的部分材料应力进入弹塑性阶段, 因此构件的轴压弹性模量不断减小, 而由于聚氨酯的弹性模量小, 在与钢管相同的变形下仍处于弹性阶段, 导致钢管与聚氨酯之间内力重分布, 钢管受力减小, 聚氨酯受力增加; 随着聚氨酯变形增加, 钢管对聚氨酯的约束力(即套箍作用力)增加; 钢与聚氨酯良好的黏结能力可保证两者共同工作。此时, 钢管外表面开始有铁锈皮剥落, 试件整体外形呈鼓形, 中部钢管截面明显增加; 同时, 应变片显示钢材开始进入屈服阶段, 试件的荷载变形曲线斜率下降, 整体呈现明显的非线性。

c. 下降段: 当试件达到极限荷载后, 其中钢管的应力不再增加, 而塑性变形快速发展; 随着试件变形的增加, 聚氨酯材料承担的外荷载增加, 表现为试件中部聚氨酯材料的横向变形迅速增大, 因而钢管中的环向应力逐渐增大, 其套箍作用明显; 当试件荷载达到极限荷载后, 钢管承受轴向荷载逐渐减小, 轴向应力进行塑性重分布, 聚氨酯材料承受的竖向荷载增加。由于聚氨酯与钢材表面黏结性能很好, 两者在加载的整个过程不发生剥离, 所以聚氨酯材料很好地发挥了其性能。在外钢管的约束下, 聚氨酯呈现三向受压状态, 其承载能力进一步提高, 因此复合管试件的承载力下降段曲线平缓, 承载能力下降幅度低, 近似一个屈服平台。此时, 复合管试件外形逐渐鼓曲, 钢管壁出现褶皱, 表现为钢管的局部屈曲。

d. 强化阶段: 随着钢管屈曲变形的增加, 钢管管壁发生屈曲, 此时聚氨酯开始抑制钢管的平面外变形, 聚氨酯与钢管开始共同工作; 由于聚氨酯材料与钢管具备极强的黏结能力, 聚氨酯的延性得以发挥, 并在整个过程中 2 种材料的变形保持一致。因此, 试件的截面积在压力作用下变大, 钢管的套箍作用进一步发挥, 试件的承载能力有一定幅度提高。以 SL 系列为例, 当其纵向变形达到 20% 时, 荷载-位移曲线会继续上升, 在达到新的峰值点时才再次下降。在此阶段各类复合管外形已经严重皱曲(图 3), 但钢管与聚氨酯并没有明显的分离, 表明该构件具备很好的延性与强度储备, 能有效抵抗外荷载作用。

2.2 现象分析

试验结果表明, 钢-聚氨酯复合管轴压试件具有良好的承载能力和变形能力, 破坏前可以有很大的压缩量, 能够通过塑性变形吸收大量能量, 从而保障结构的安全性, 即具有良好的抗震能力。试验中, 试件没有脆性破坏的特征, 也没有发生由于钢管局部失稳而引起的破坏, 钢管和聚氨酯之间没有出现瞬间滑移、脱离剥落的现象。对于长径比在 3.0 ~ 3.5 范围内的短柱试件, 其破坏是由于钢材达到屈服后试件变形过大所致。

表 4 聚氨酯拉伸试验结果

Table 4 Tensile test results of polyurethane

试件编号	拉伸屈服强度/MPa	拉伸率/%
1	32.07	98
2	28.42	86
3	30.18	86
4	29.70	85

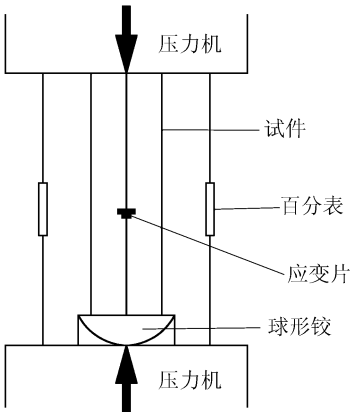


图 2 试验加载示意图

Fig. 2 Sketch map of experimental device

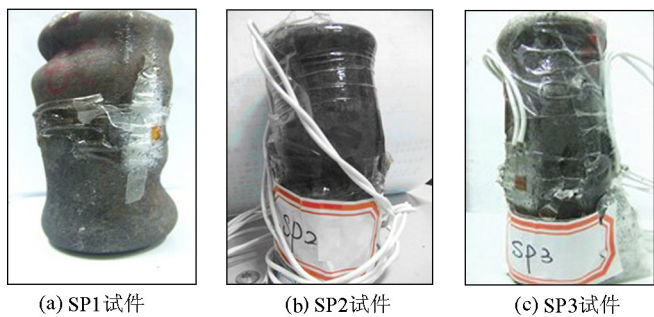


图3 钢-聚氨酯复合管试件破坏模式

Fig. 3 Failure modes of steel-polyurethane composite tubes

2.3 荷载-变形曲线

图4为试件试验实测的荷载-变形曲线(图中 N 为轴向力, ε_c 为钢管应变),从图中可以看出,钢-聚氨酯复合管相对空钢管不但承载力有较大提高,对钢管局部屈曲也有很大改善,与钢管混凝土相比,自重轻、延性好,具体表现为:极限变形能力增大,达到极限荷载后承载力开始下降,但是下降幅度相当小。可以看出,整个钢-聚氨酯复合管试件的工作过程可分为4个阶段,这与前文中的试验描述一致。

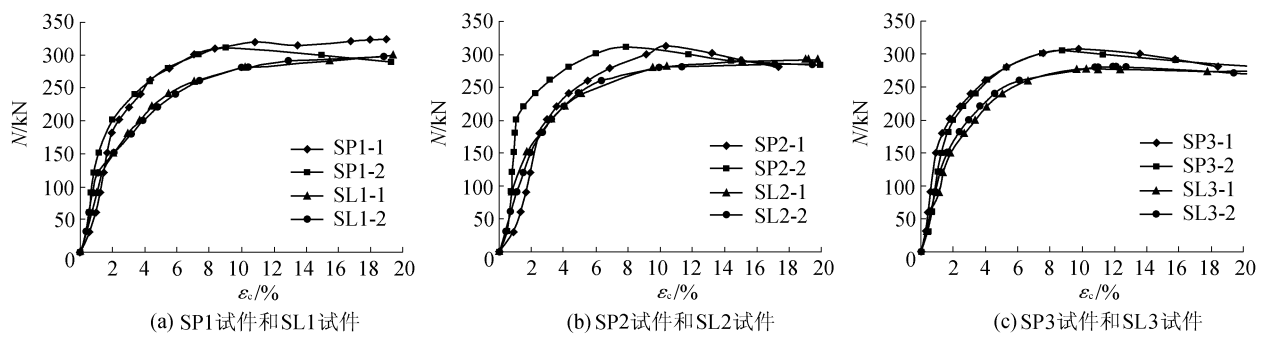


图4 钢-聚氨酯复合管试件荷载-变形试验曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of steel-polyurethane composite tubes

2.4 套箍系数 ξ 的影响

套箍系数主要是复合管中钢材与聚氨酯组成材料之间面积强度的比值, ξ 表达式为

$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_p f_p} \tag{1}$$

式中: A_s 、 f_y ——钢管的截面积与钢材屈服强度; A_p 、 f_p ——聚氨酯的截面积与屈服强度。

由于试件在受力过程中钢管对聚氨酯具有套箍作用,其套箍作用主要体现为:当钢管进入屈服阶段,聚氨酯的横向变形迅速增大,超过钢管的横向变形,而钢管能有效地约束这种膨胀,从而使聚氨酯处于三向受力状态,强度得以大幅度提高。相同强度的聚氨酯,随着 ξ 的不同,钢-聚氨酯复合管的荷载-变形曲线也不同, ξ 值越大,试件承载力提高越多;反之则较小(图4)。

对于相同形状截面的钢-聚氨酯复合管, ξ 可以反映组成钢-聚氨酯复合管截面的钢材及其聚氨酯的几何特性和物理特性参数的影响, ξ 越大,表明钢材所占比重较大,聚氨酯的比重相对较小;反之, ξ 越小,表明钢材所占比重小,聚氨酯的比重相对较大。 ξ 对钢-聚氨酯复合管性能的影响主要表现在: ξ 越大,在受力过程中钢管对聚氨酯提供足够的约束作用,聚氨酯强度和延性的增加相对较大。因此,增大 ξ 可以提高钢-聚氨酯复合管构件的承载力。

3 结 语

通过研究,可知聚氨酯作为一种高性能材料具备良好的力学性能。而采用聚氨酯材料的钢-聚氨酯复合管是一种新型的组合结构构件,它利用钢管和聚氨酯2种材料在受力过程中的相互作用,即钢管对聚氨酯的套箍作用,使聚氨酯处于三向受压应力状态之下,从而使聚氨酯的强度得以大幅度提高;同时,聚氨酯的存在可有效延缓钢管过早地发生局部屈曲。2种材料组合在一起,不仅使各自的特性达到充分发挥,同时组成的

新结构体系也具有优越的力学性能。

在试验研究结果基础上,得出如下结论:

- a. 本文采用的钢-聚氨酯复合管柱压试件,在承受轴向压力下,其破坏时呈多折腰鼓形;试件在钢管发生局部屈曲后,受到聚氨酯材料的约束可以有效延缓屈曲发生时间、减小变形程度。在整个过程中,聚氨酯与钢材的黏结性能良好,两者未发生剥离现象,达到了共同工作的目标。
- b. 试件荷载位移曲线以及试验过程表明,试件曲线一般由弹性、弹塑性、下降段和强化阶段组成,表明复合管有着很好的延性与强度储备。
- c. 在 $L/D < 4$ 的范围内,随着 L/D 的减小,试件的极限荷载有增大的趋势,但是其增幅不明显。
- d. ξ 是影响试件性能的重要因素,当 ξ 值提高时试件承载力会明显提高;反之亦然。

参考文献:

[1] LR STRUCTURE RULES 3—2006 Provisional rules for the application of sandwich panel construction to ship structure[S].

[2] GD 08—2007 钢夹层板材料船舶结构建造指南[S].

[3] 易玉华,石朝锋. SPS 夹层用高硬度聚氨酯弹性体的研制[J]. 聚氨酯工业,2008,23(1): 53-55. (YI Yuhua, SHI Chaofeng. Study on the high hardness polyurethane elastomer used for the steel-polyurethane-steel plate composite[J]. Polyurethane Industry, 2008, 23(1): 53-55. (in Chinese))

[4] 杜彬,任宗社,周炳良. 混凝土大坝表面喷涂聚氨酯保温保湿试验[J]. 水利水电科技进展,2007,27(2):63-65. (DU Bin, REN Zongshe, ZHOU Bingliang. Experimental study on thermal insulation and moisture holding of concrete dams by spraying polyurethane on surface[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2007, 27(2): 63-65. (in Chinese))

[5] HIROAKI K, DAISUKE N, WORRAYUT P, et al. Impact fragmentation of polyurethane and polypropylene cylinder[J]. Physica A:Statistical Mechanics and Its Applications, 2013,392(22): 5574-5580.

[6] TOLDY A, HAKALY G, SZOLNOKI B, et al. Flame retardancy of thermoplastics polyurethanes[J]. Polymer Degradation and Stability, 2012, 97(12): 2524-2530.

[7] FRANCOLINI I, CRISANTE F, MARTINELLI A, et al. Synthesis of biomimetic segmented polyurethanes as antifouling biomaterials[J]. Acta Biomaterialia, 2012, 8(2): 549-558.

[8] MILEO P C, MULINARI D R, BAPTISTA C A R P, et al. Mechanical behaviour of polyurethane from castor oil reinforced sugarcane straw cellulose composites[J]. Procedia Engineering, 2011, 10: 2068-2073.

[9] Intelligent Engineering Holdings Ltd. Intelligent engineering company profile-sandwich plate system[R]. London: Intelligent Engineering Holdings Ltd,2009.

[10] 尧国皇,李永进,廖飞宇. 钢管混凝土叠合柱轴压性能研究[J]. 建筑结构学报,2013,34(5):114-121. (YAO Guohuang, LI Yongjin, LIAO Feiyu. Behavior of concrete-filled steel tube reinforced concrete columns subjected to axial compression[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(5): 114-121. (in Chinese))

[11] 万城勇,查晓雄. 配筋钢管混凝土轴压短柱受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2013,34(增刊1):259-266. (WAN Chengyong, ZHA Xiaoxiong. Experiment study of reinforced concrete filled steel tubular columns subjected to axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(Sup1): 259-266. (in Chinese))

[12] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 北京: 科学出版社,2007.

[13] JIHO M, CHARLES W R, DAWN E. Analytical modeling of bending of circular concrete-filled steel tubes[J]. Engineering Structures, 2012, 42: 349-361.

[14] CHANG Xu, FU Lei, ZHAO Hongbo, et al. Behaviors of axially loaded circular concrete-filled steel tube (CFT) stub columns with notch in steel tubes[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 73: 273-280.

[15] CHITAWADAGI M V, NARASIMHAN M C, KULKARNI S M. Axial strength of circular concrete-filled steel tube columns-DOE approach[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(10):1248-1260.