

文章编号: 1004-4353(2014)04-0352-05

# 外套钢管加固受损钢管混凝土短柱 轴压试验研究

吴阳峰<sup>1</sup>, 刘俊<sup>2</sup>, 张鸿梅<sup>1\*</sup>

(1. 延边大学工学院 土木工程系; 2. 延边建设工程质量检测鉴定有限公司: 吉林 延吉 133002)

**摘要:** 为了研究受损钢管混凝土短柱加固前后的力学性能,对 13 根采用外套钢管加固的受损钢管混凝土短柱进行试验研究. 试验通过改变试件损伤率、外套钢管壁厚等变化参数,考察试件破坏形态以及变形情况,进而分析这些参数对加固前后受损钢管混凝土试件的影响. 结果表明:当损伤率小于 10% 时,外套钢管对试件承载力的影响不大,只是在后期延性方面影响较大;随着外套钢管壁厚的增大,加固试件承载力是受损试件承载力的 1.9~2.5 倍.

**关键词:** 钢管混凝土短柱; 损伤; 外套钢管; 加固; 轴压承载力

中图分类号: TU398<sup>+.9</sup>

文献标识码: A

## Experimental study of axial compression on the damaged concrete filled steel tubular short column strengthened by outerwear steel pipe

WU Yangfeng<sup>1</sup>, LIU Jun<sup>2</sup>, ZHANG Hongmei<sup>1\*</sup>

(1. Department of Civil Engineering, College of Engineering, Yanbian University, Yanji 133002, China;

2. Yanbian Construction Engineering Quality Detection Appraisal Co. Ltd., Yanji 133002, China)

**Abstract:** In order to study the mechanics performance of the damaged concrete filled steel tubular short column before and after the reinforcement, thirteen damaged concrete filled steel tubular short column strengthened by outerwear steel pipe were designed for the axial compressive experiment research. During the test we changed the damaged rate, outer pipe wall thickness to observe the failure modes and deformation to analyze the impact of these factors on the damaged specimens before and after reinforcement. The results show that: when the damage rate is less than 10%, there has little effect on the carrying capacity of the specimens. Only affect large areas in the late ductility. With the increase of the wall thickness of the outerwear steel pipe, the bearing capacity of reinforced specimen is about 1.9~2.5 times of the damaged specimens.

**Key words:** CFST short column; damage; outerwear steel pipe; strengthened; axial compression bearing capacity

随着建筑业的高速发展,加固行业也得到了迅速发展. 资料<sup>[1]</sup>统计,自 1997 年以来,我国加固工程量的年平均递增量达到 30% 以上,2000 年全国年加固修复工程量已突破 100 万 m<sup>2</sup>. 钢管混凝土作为一种承压构件广泛应用于高层、超高层、地

铁、车站、桥梁等结构,当钢管受到化学腐蚀、外力破坏等因素影响时,其结构承载能力会大大降低,对建筑的整体性能产生较大影响. 目前,针对钢管混凝土结构加固的研究主要集中于通过外包 CFRP 的方式进行加固<sup>[2-5]</sup>. 林晓康等<sup>[6]</sup>采用外包

钢管混凝土加固法对火灾作用后的钢管混凝土柱进行研究,发现,加固后试件的极限承载力和抗弯刚度得到显著提高,均可以恢复到未受火时的状态.于洋<sup>[7]</sup>采用外套钢管混凝土的加固方法对在初应力作用下的钢管混凝土试件进行了研究,并推导出加固后试件的承载力计算公式.本文在上述研究基础上,采用外套钢管法加固受损钢管混凝土短柱,并研究受损钢管混凝土加固前后的承载力变化情况.

## 1 试验研究

### 1.1 试件设计及制作

对 13 根试件进行轴压试验,其中 4 根为单钢管混凝土试件,9 根为加固试件.通过在钢管表面开口的形式来模拟钢管混凝土短柱受到损伤的情况,试件开口均为矩形口,开口位置如图 1 所示.

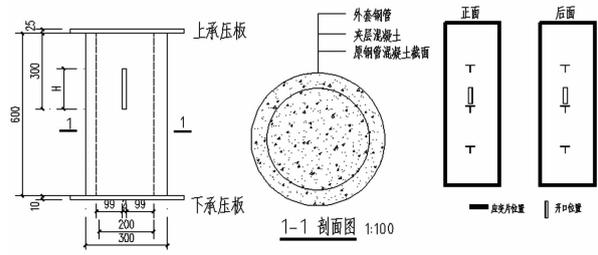


图 1 试件开口及应变片位置示意图

### 1.2 试件参数

试验的各试件参数如表 1 所示.损伤钢管混凝土柱的钢管壁厚为 4.0 mm,外径为 200 mm,长径比为 3.0.外套钢管壁厚分别为 2、3、4 mm,外径为 300 mm.为了便于内钢管应变片出线,在上承压板上留出 400 mm×20 mm×15 mm 的凹槽,具体作法如图 2 所示,损伤的钢管模型如图 3 所示.

表 1 试件的基本参数

试件编号	$d \times t_i \times L$ /mm	$D \times t_o \times L$ /mm	径厚比( $D/t$ )	开口尺寸 ( $H \times b$ )/mm	损伤率/%	试验值 /kN
C-Y-0	200×4×600	—	—	0	0	1 960
C-IA-O0	—	—	—	60×2	10	1 900
C-IA-O2	200×4×600	300×2×600	150	60×2	10	3 842
C-IA-O3		300×3×600	100	60×2	10	4 023
C-IA-O4		300×4×600	75	60×2	10	4 485
C-IB-O0	—	—	—	100×2	16.7	1 768
C-IB-O2	200×4×600	300×2×600	150	100×2	16.7	3 400
C-IB-O3		300×3×600	100	100×2	16.7	3 800
C-IB-O4		300×4×600	75	100×2	16.7	4 163
C-IC-O0		—	—	—	150×2	25
C-IC-O2	200×4×600	300×2×600	150	150×2	25	3 000
C-IC-O3		300×3×600	100	150×2	25	3 576
C-IC-O4		300×4×600	75	150×2	25	3 858

注:C表示圆形截面,Y表示原对比柱,IA表示内钢管开口长度是 60 mm,IB表示内钢管开口长度是 100 mm,IC表示内钢管开口长度是 150 mm,O0表示单钢管,O2、O3和O4依次表示外套钢管壁厚是 2、3、4 mm,损伤率为开口长度  $H$  与试件长度  $L$  的比值.



图 2 上承压板构造示意图



图 3 损伤钢管模型

### 1.3 材料特征

试验采用强度等级为 C30 的现浇混凝土,水泥为吉林亚泰生产的鼎鹿牌普通硅酸盐水泥(P.O42.5),细骨料采用细砂,粗骨料采用最大粒径为 15 mm 的碎石.为了改善钢管对混凝土的约束作用,在混凝土中掺入质量分数为 7%的大川牌 UEA 型膨胀剂.混凝土配合比如表 2 所示.

表 2 现浇混凝土配合比

强度等级	水泥	水	沙	石	膨胀剂
C30	440	220	609	1131	31

在试件混凝土浇筑过程中,同时制作一组边长为 150 mm 的混凝土立方体试块.试块在同条件下养护 28 d,经实测其 28 d 的强度为 33.8 MPa.本文的试验钢管分别采用 2、3、4 mm 厚的 Q235 级钢板,钢板按设计尺寸加工冷弯成型,经拉伸试验得出钢管屈服强度为 253.5 MPa,极限强度为 320.8 MPa.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 加载制度

试验的加载方式为分级加载制.在预估极限荷载弹性范围内,每级施加荷载为预估极限荷载的 1/10;在每级加载持荷 2.5 min 后再进行下一级的加载,持荷前后均需记录时间、荷载值和变形值等相关数据.当荷载约达到预估极限荷载的 75%以后,每级施加荷载为预估极限荷载的 1/20~1/15.当荷载达到最大值,试验机压力表指针开始回转时,仍继续送油,并不断记录仪表读数和相应的荷载值.当试件变形较大,荷载-变形曲线呈明显的下降时停止试验.当试件接近破坏时慢速连续加载,直至试件破坏.应变数据通过 CM-2B 数据采集仪采集和分析,人工读取荷载值<sup>[8]</sup>.加载与采集装置和应变采集装置见图 4 和图 5.

### 2.2 试验现象分析

1) 损伤单钢管混凝土试件的破坏形态同普通钢管混凝土短柱的破坏形态相近,本文以试件 C-IC-00 为例进行分析.加载初期,试件表面无明显变化;当荷载达到其极限荷载的 70%(1 000 kN)时,试件表面发出轻微的“吱吱”声,试件开口处有

轻微的张开;当试验荷载达到其极限荷载的 90%(1 400 kN)时,靠近加载端的钢管表面有局部外凸现象,开口处有明显的撕拉破坏,并伴随有声响;当试验荷载达到其极限荷载的 100%(1 550 kN)时,钢管开口处严重撕裂,靠近端部处呈现“腰鼓形”破坏,试件屈服.

2) 对加固后的钢管混凝土短柱,本文以试件 C-IC-03 为例进行分析.当荷载达到其极限荷载的 75%(2 500 kN)时,在试件表面出现 45°的剪切滑移线,并伴随有声响,但无较大变形;当荷载超过 2 500 kN 时,变形有明显增大,这可能是内部混凝土压碎而导致内力重新分布所引起;当荷载达到其极限荷载的 95%(3 400 kN)时,靠近试件端部的表面出现斜向的鼓曲,且向下拓展,靠近试件中部附近,出现大面积的凹陷,这可能是内钢管开口处撕裂,混凝土被严重压碎而引起的;当荷载达到其极限荷载的 100%(3 576 kN)时,虽然对试件无法继续加荷,但是荷载并未马上降低,下降速率较慢,可见加固后试件无论在承载能力方面,还是在延性方面都有较大的提高.试件典型破坏形态如图 6 所示.



图 4 加载与采集装置

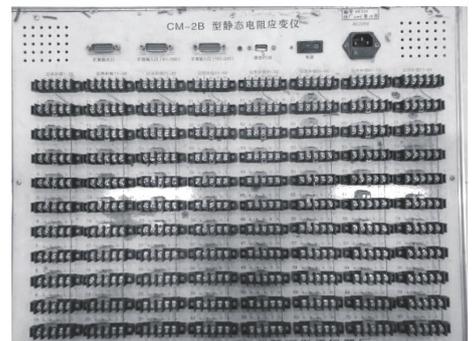


图 5 应变采集装置

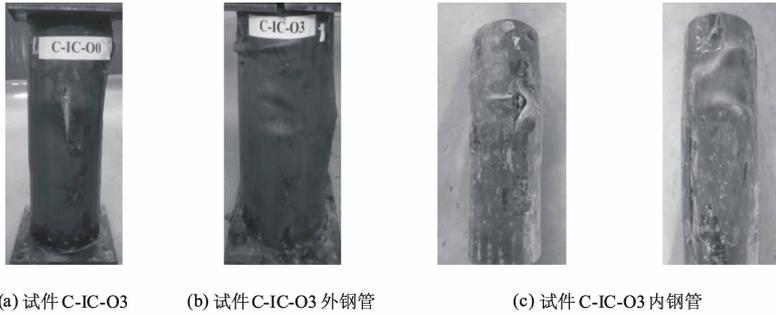


图 6 试件典型破坏形态

### 2.3 轴压试件的荷载变形曲线分析

从图 7(a)的单钢管混凝土柱的荷载-变形曲线可以看出:加载初期,曲线基本呈线性增长,各试件变形曲线接近;当荷载加载到一定数值时,各曲线开始出现逐步分离的趋势,但是对于损伤率小于 10%的试件,其变形程度与完整的单钢管混凝土试件接近;而损伤率为 16.7%和 25%的试件,当其荷载达到极限值时,其变形较大,钢管套箍作用减弱,变形曲线下落速率较快。

不同损伤率的加固试件其荷载变形曲线如图 7(b-e)所示。由图可知,尽管加固试件的损伤率以及外套钢管壁厚不同,但受损单钢管混凝土试件与加固后试件的受力过程相似,均可以分为以下 3 个阶段:

第 1 阶段:弹性阶段。此时  $OA$  段与  $OA'$  段基本呈线性关系,但  $K_{OA} > K_{OA'}$ ,且  $P_A > P_{A'}$ ,这说

明加固后试件的初始刚度以及承载力都比损伤试件高。不同壁厚的加固试件斜率接近,说明在弹性阶段外套钢管壁厚对试件变形影响不大。而相同外套壁厚的不同损伤试件,  $K_{10\%} > K_{16.7\%} > K_{25\%}$ ,说明损伤率较大的试件先进入下一段弹塑性阶段。

第 2 阶段:弹塑性阶段。随着荷载的增加,曲线开始偏转,如图 7(e)中  $AB$  段与  $A'B'$  段。此时受损钢管的刚度压缩,对于不用损伤程度的钢管混凝土短柱,随着损伤率的增大,其变形也相应的增大,相同外套壁厚的加固试件,其变形量  $\delta_{25\%} > \delta_{16.7\%} > \delta_{10\%}$ 。而单钢管损伤试件,在开口处钢管撕裂,同时混凝土被压碎,钢管提前屈服,变形增大。由此可知:对于开口程度较大的试件,其整体变形较大。对于加固后的试件,轴向变形受到限制,未出现明显变形,随着外套钢管壁厚的增大,试件整体变形变小。

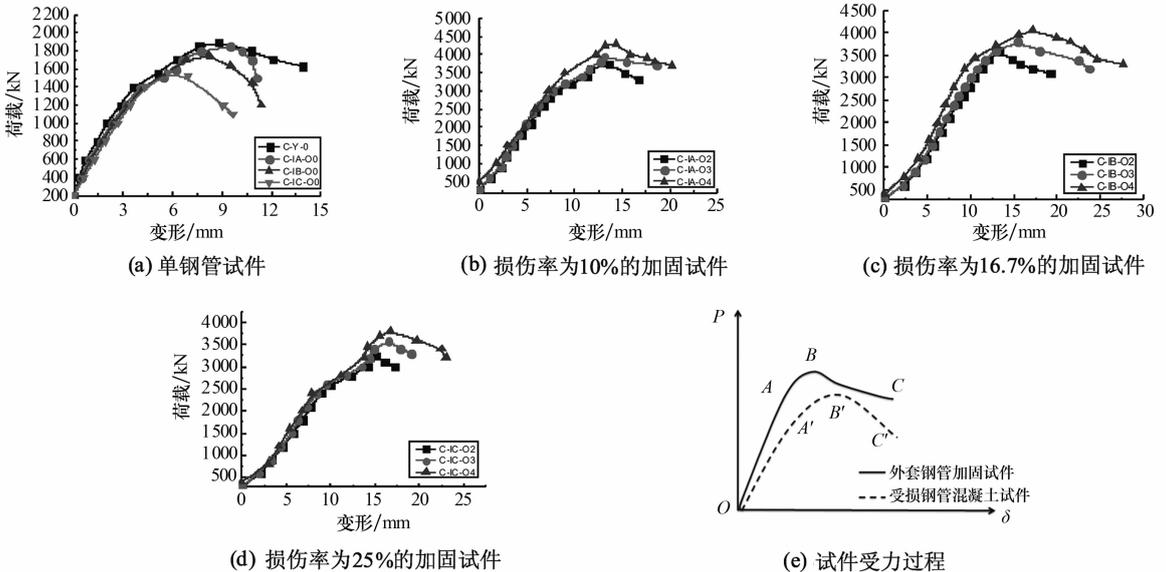


图 7 试件荷载-变形曲线

第 3 阶段:破坏阶段.当荷载超过极限值时,单钢管试件的钢管迅速软化,曲线呈下降的趋势,如图 7(e)中  $B'C'$  段;而加固试件的变形缓慢增长( $BC$  段),荷载并没有马上下降,说明外套钢管与外层混凝土的双重约束延缓了试件荷载下降速率,提高了试件的承载力和延性.对于不同损伤率的加固试件,随着外套钢管壁厚的增大,试件变形下降速度减慢,其中损伤率较大的试件,荷载下降较快.

## 2.4 试件的承载能力分析

如图 8(a)所示:对于单钢管混凝土试件,当损伤率小于 10% 时,其对试件承载力影响不大.随着损伤率增大,试件极限承载力明显降低,这是由于试件开口降低了钢管对混凝土的环向约束,

套箍系数变小而造成的.试件 C-IA-O0、C-IB-O0、C-IC-O0 的极限承载力分别为原钢管混凝土试件 C-Y-0(极限承载力为 1960 kN)的 96.7%、90.2%、79%.如图 8(b)所示:对于开口长度为 60 mm 的损伤单钢管试件,分别采用壁厚为 2、3、4 mm 的外套钢管进行加固后,试件承载力分别提高到原来的 2.02、2.12、2.36 倍.对于开口长度为 100 mm 的损伤单钢管试件,分别采用上述壁厚的外套钢管进行加固,试件承载力分别提高到原来的 1.92、2.15、2.35 倍.对于开口长度为 150 mm 的损伤单钢管试件,分别采用上述壁厚的外套钢管进行加固,试件承载力分别提高到原来的 1.94、2.31、2.49 倍.

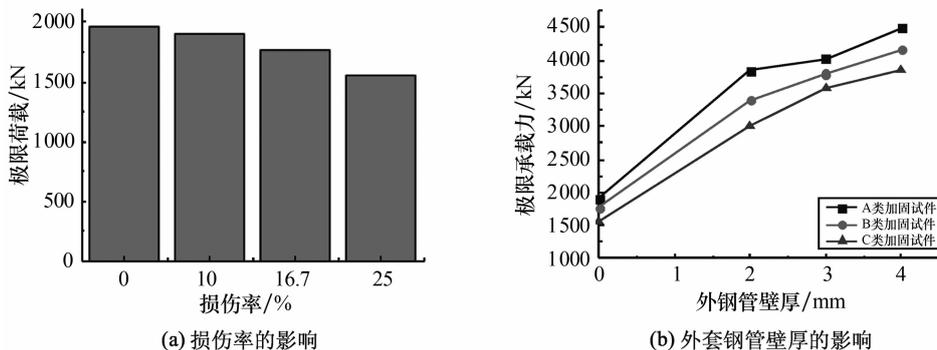


图 8 试件承载力的影响因素

## 3 结论

本文通过对 13 根损伤钢管混凝土试件进行轴压试验,讨论了试件损伤率、外套钢管壁厚对加固前后试件承载力的影响,并得出以下结论:①对于损伤单钢管混凝土试件,其极限承载力随着损伤率的增大而降低,但对于损伤率小于 10% 的试件,其承载力变化不明显,只是在后期延性方面影响较大.②在试件开口长度一定时,采用壁厚分别为 2、3、4 mm 的外套钢管进行加固,加固后试件的承载力为加固前的 1.9~2.5 倍.③加固试件的受力过程与单钢管混凝土短柱受力过程相似,同样可以分为弹性阶段、弹塑性阶段、破坏阶段.④外套钢管的壁厚与提高受损钢管混凝土短柱的极限承载力呈正比关系.以上结果表明,外套钢管法可作为加固受损钢管混凝土短柱的一种加固方法.

## 参考文献:

- [1] 宋中南.我国混凝土结构加固修复业技术现状与发展对策[J].混凝土,2002,10(156):10-11.
- [2] 韦江萍.CFRP 加固钢管混凝土轴心受压短柱承载力分析[J].工程抗震与加固改造,2009,31(4):66-70.
- [3] 董江峰,侯敏,王清远.何东碳纤维布加固薄壁钢管再生混凝土短柱的力学性能[J].四川大学学报:工程科学版,2012,44(1):255-260.
- [4] 顾威,李宏男,孙国帅.CFRP 加固受损钢管混凝土轴压柱试验研究[J].建筑材料学报,2013(1):138-142.
- [5] 李辉.FRP 加固钢管混凝土圆柱轴压性能研究[D].广州:广东工业大学,2013:6-7.
- [6] 林晓康,韩林海.火灾后方钢管混凝土柱抗震加固方法初探[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(增刊):434-437.
- [7] 于洋.钢管混凝土结构外包加固承载力实验及分析研究[D].重庆:重庆交通大学,2010:71-72.
- [8] 李冉.CFRP-超薄壁圆钢管混凝土短柱轴压试验研究[D].延吉:延边大学,2014:18.