

粘结对钢管约束混凝土短柱轴压力学性能影响

刘景云¹, 孙建波¹, 张小冬¹, 刘界鹏¹, 张素梅²

(1. 哈尔滨工业大学 建筑设计研究院, 哈尔滨 150090, liujp@hit.edu.cn;
哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要: 为研究粘结应力对钢管约束高强混凝土短柱轴压力学性能的影响, 进行了2组共8个试件的试验研究, 包括一组圆钢管约束高强混凝土短柱试件和一组方钢管约束高强混凝土短柱试件. 每组试件中包括2个消除钢管与混凝土粘结的试件和2个有粘结试件. 采用弹塑性应力分析方法对钢管进行了应力分析. 试验结果与钢管应力分析结果表明, 消除钢管与混凝土之间的粘结作用可有效降低钢管中的纵向应力, 但消除粘结作用对钢管约束高强混凝土短柱的轴压承载力和延性无显著影响, 在工程实践中可不必采取措施消除钢管与核心混凝土之间的粘结作用.

关键词: 粘结应力; 钢管约束高强混凝土; 短柱; 轴压承载力; 延性

中图分类号: TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2010)08-1211-05

Effect of bond on the axial loaded behavior of tubed concrete stub columns

LIU Jing-yun¹, SUN Jian-bo¹, ZHANG Xiao-dong¹, LIU Jie-peng¹, ZHANG Su-mei²

(1. Architectural Design and Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, liujp@hit.edu.cn;
2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Two groups of specimens including 8 stub columns were tested to study the effect of bond stress between steel tube and core concrete on the axial loaded behavior of tubed high-strength stub columns (HSC). Each group included two columns without bond stress and two columns with bond stress. Elastic-plastic analysis on the steel tube during the loading procedure was carried out. The results from test and analysis indicate that the longitudinal stress of the steel tube is evidently decreased in respect that the bond effect is eliminated, while the bond stress has little effect on the axial load strength and ductility of tubed HSC. Therefore it is not necessary to eliminate the bond effect between the steel tube and the core concrete in structural engineering.

Key words: bond stress; steel tubed high-strength concrete; stub column; axial load strength; ductility

随着现代民用建筑向超高层和大跨度方向发展, 建筑结构中的框架柱承担的竖向荷载越来越大, 柱子截面随之增大, 因此在高层或超高层建筑的底部容易形成钢筋混凝土短柱(剪跨比小于2)甚至超短柱(剪跨比小于1.5). 采用高强混凝土可有效降低柱子截面尺寸, 提高柱子的剪跨比; 但大量的研究表明, 相对于普通强度混凝土, 高强混凝土的延性较差^[1-2]. 在高轴压比条件下, 高

强混凝土需要配置大量的箍筋; 而过高的体积配箍率在工程实践中非常困难^[3], 因此我国现行《混凝土结构设计规范》^[4]对高强混凝土柱的轴压比限值做出了更严格的规定. 根据我国现行《混凝土结构设计规范》的规定, 对于一级框架中剪跨比小于2的C80混凝土柱, 设计轴压比限值仅为0.55; 而超高层结构中的底层柱多为剪跨比小于2的短柱, 因此严格的轴压比限值使得高强混凝土抗压强度高特点不能得以充分利用, 限制了高强混凝土柱在地震区超高层结构中的应用. 研究表明, 钢管约束钢筋混凝土柱具有优越的抗震性能, 在抗震工程中应用时可不限制高强混凝土柱的轴压比^[5-6], 是一种很有推广意义

收稿日期: 2009-05-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50708027); 黑龙江省自然科学基金资助项目(E2007-24).

作者简介: 刘景云(1959—), 男, 教授级高工;
张素梅(1963—), 女, 教授, 博士生导师.

的新型框架柱形式^[7].

目前国内外对钢管约束混凝土柱的抗震性能进行了相关试验研究^[8-9],对钢管约束混凝土短柱的轴压力学性能也进行了系统的试验研究^[10-13],研究表明,由于摩擦的和粘结的作用,钢管跨中将产生较大的纵向应力,从而减小了钢管对核心混凝土的约束作用,降低了柱子的轴压承载力.目前国内外对粘结应力对钢管约束混凝土短柱轴压力学性能影响的研究还未见报道;本文针对这一研究现状对粘结应力对钢管约束高强混凝土短柱轴压力学性能进行了试验研究和理论分析,提出了设计建议,可为工程实践提供参考.

1 试验

1.1 试件参数和试验装置

本文进行了两组钢管约束高强混凝土短柱的轴压性能试验研究,其中一组为圆形截面试件,另一组为方形截面试件;每组试件中包括4个参数完全相同的试件,但其中2个试件为普通钢管约束混凝土短柱,而另外两个钢管约束混凝土试件

在钢管内壁涂抹了润滑剂,消除了钢管与核心混凝土之间的粘结作用.图1为试验加载装置与试件示意图;由图1可见,为保证钢管不直接承担纵向荷载,在钢管的两端开缝,形成钢管约束混凝土短柱.试验取试件的长径比 $L/D = 3$.表1中为各试件的详细参数.试验在500 t压力机上进行,试验加载过程为一次性压溃试验,在试件的弹性阶段,混凝土的加载速率为0.8 MPa/s.试验中在每个试件的钢管跨中四面分别布置了1片纵向应变片和1片环向应变片,见图1.

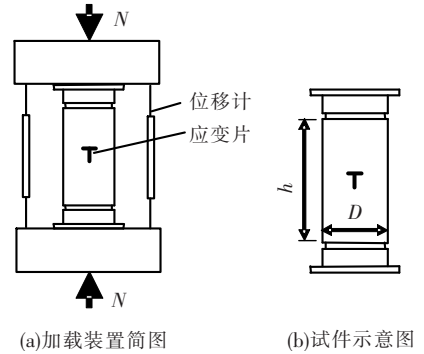


图1 加载装置与试件示意图

表1 钢管约束高强混凝土短柱试件参数和试验结果

组别	试件编号	D/mm	t/mm	N_{ue}/kN	N_a/kN	N_{ue}/N_a
圆形	c-180-3-80-1	180	3	2 790	1 843	1.51
	c-180-3-80-2			2 740		1.49
	c-180-3-80-1-none			2 760		1.50
	c-180-3-80-2-none			2 930		1.59
方形	s-180-3-80-1	180	3	2 700	2 348	1.15
	s-180-3-80-2			2 920		1.24
	s-180-3-80-1-none			2 830		1.21
	s-180-3-80-2-none			2 630		1.12

注:①对试件的命名方法以c-180-3-80-1-none为例,c表示圆形试件(circular),180表示直径为180 mm,3表示钢管厚度为3 mm,80表示混凝土的强度等级为C80,none表示钢管与混凝土之间无粘结(有粘结试件名称中无此项).另外,s表示方形试件.

②表中 D 为试件直径或边长,mm; t 为钢管厚度,mm; D/t 为钢管径厚比或宽厚比.

③各试件的混凝土强度等级为C80, $f_{cu}^{10} = 76.9$ MPa;混凝土轴心抗压强度为 $f_{co} = 59.4$ MPa;钢管屈服强度为 $f_y = 254$ MPa; N_{ue} 为试验测得的轴压承载力,kN; N_a 为截面钢管和混凝土承载力的简单叠加,kN.

1.2 破坏模式

图2为圆钢管约束高强混凝土轴压短柱的破坏模式;由图中可见,消除粘结试件和有粘结试件的破坏模式都为混凝土剪切破坏.图2中白线为核心混凝土剪切破坏的滑移面,由图中可见,两种试件的核心混凝土的剪切滑移面角度基本相同,消除粘结对构件的破坏模式无明显影响.

图3为方钢管约束高强混凝土轴压短柱的破坏模式;由图中可见,消除粘结试件和有粘结试件的破坏模式都为混凝土剪切破坏.由试验后对核心混凝土的剪切破坏面的对比可知,剪切破

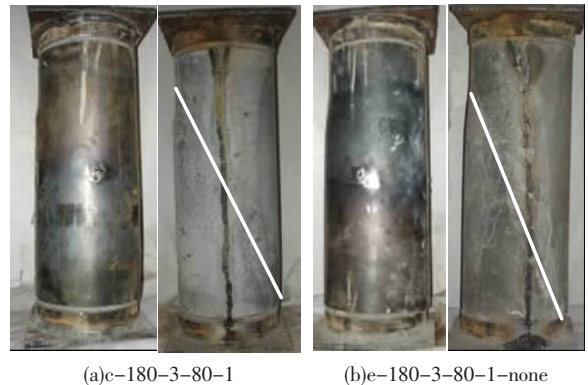


图2 圆钢管约束高强混凝土短柱的破坏模式

坏的角度基本相同,粘结应力对方钢管约束高强混凝土短柱的破坏模式无明显影响。

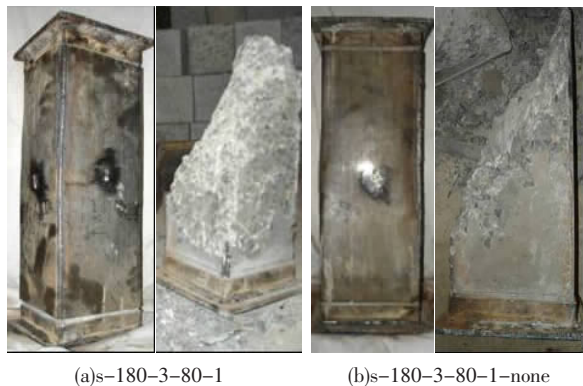


图 3 方钢管约束高强混凝土短柱的破坏模式

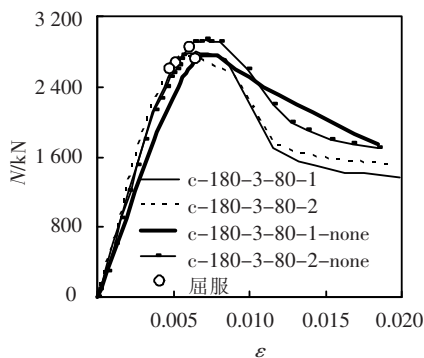
1.3 试验结果分析

图 4 为两组试件的荷载 - 应变曲线及归一化的荷载 - 应变曲线对比。其中试件的应变是指试件的轴向压缩变形与试件长度的比值;图 4 中“屈服”点是指钢管的屈服点; N_u 为构件轴压承载力, ε_u 为对应于 N_u 的构件峰值点应变。

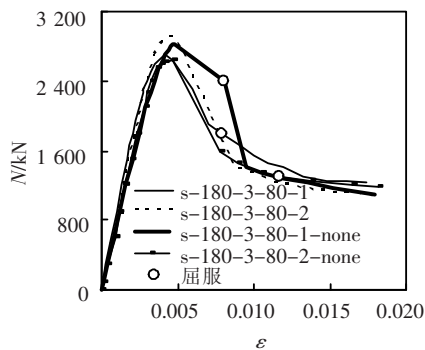
图 4(a) 为圆钢管约束高强混凝土短柱的荷载 - 变形曲线;由图中可见,对于圆钢管约束高强混凝土轴压短柱,钢管的屈服点基本对应于峰值荷载点,而钢管屈服后,不能继续有效地约束核心混凝土,从而导致混凝土受压破坏。四个圆形试件的轴压承载力相差不大,粘结应力对构件的轴压承载力无明显影响。

图 4(b) 为方钢管约束高强混凝土短柱的荷载 - 变形曲线;由图中可见,对于方钢管约束高强混凝土轴压短柱,峰值荷载点处钢管并不屈服,钢管在荷载 - 变形曲线的下降段屈服。两个消除粘结试件的轴压承载力稍低于两个有粘结试件,但两种试件的轴压承载力平均值相差不足 5%,即粘结应力对方钢管约束高强混凝土短柱的轴压承载力影响不大。

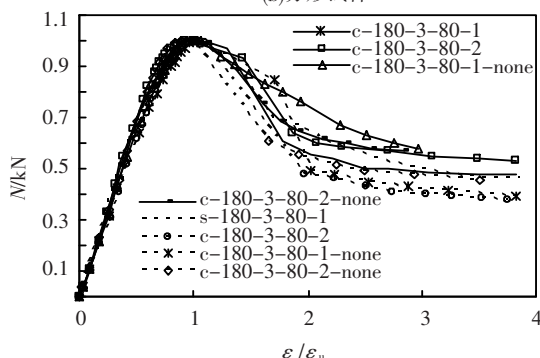
图 4(c) 为两组试件的归一化荷载 - 变形曲线对比。由图中可见,消除粘结对圆形和方形截面构件的下降段都无显著影响,但圆钢管约束高强混凝土短柱的下降段更加平缓,延性更好。由表 1 中的轴压承载力试验结果可见,虽然圆形截面的截面积小,但圆形截面的轴压承载力并不低于方形截面构件。圆形截面试件的平均轴压承载力是简单叠加承载力的 1.5 倍以上,而方形截面试件的平均轴压承载力与简单叠加承载力的比值不足 1.2;因此圆钢管对核心高强混凝土的约束作用远高于方钢管。



(a) 圆形试件



(b) 方形试件



(c) 归一化的荷载 - 变形曲线对比

图 4 荷载 - 变形曲线

2 应力分析

根据试验中测得的钢管纵向应变和环向应变,采用弹塑性应力 - 应变分析方法,对轴压荷载施加全过程中的钢管应力状态进行了分析,分析中忽略核心混凝土对钢管的径向压应力,利用平面应力状态时的应力 - 应变关系,求出各级荷载下钢管中截面的纵向平均应力 σ_v 、环向平均应力 σ_h 和折算应力 σ_z 。

图 5 为圆钢管约束混凝土试件的荷载 - 钢管应力关系曲线。由图中可见,对于有粘结的试件,钢管屈服前,纵向应力大于环向应力,说明在峰值荷载前由摩擦和粘结在钢管中部产生的纵向应力很大;而当峰值荷载后,由于混凝土横向膨胀增加显著,钢管的横向应力增加,由于此时钢管已经屈服,因此纵向应力逐渐降低。对于无粘结的试件,

在加载初始阶段,钢管的纵向应力大于环向应力,但随荷载的逐渐增加,环向应力逐渐大于纵向应力;峰值荷载点处,环向应力明显大于纵向应力;峰值荷载后,混凝土迅速横向膨胀,环向应力迅速增加,纵向应力降低.由两试件的荷载-钢管纵向应力曲线可见,轴压荷载施加过程中,达到相同轴压荷载时,无粘结试件的钢管纵向应力一直小于有粘结试件的钢管纵向应力,说明对于消除粘结试件,钢管中的纵向应力只由摩擦力产生,而无粘结作用产生的纵向应力,因此使得消除粘结试件的钢管纵向应力明显低于有粘结试件.

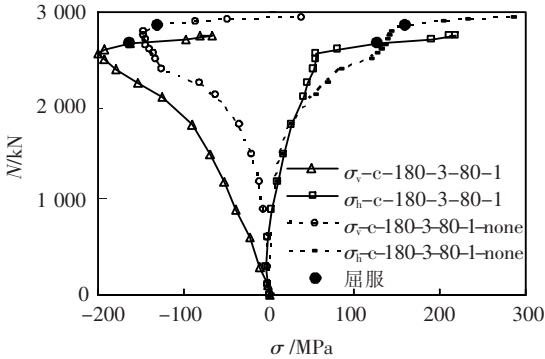


图 5 圆钢管约束混凝土试件的荷载-钢管应力关系

图 6 为方钢管约束混凝土试件的荷载-钢管应力关系曲线.由图 6 可见,有粘结试件和无粘结试件的钢管应力发展过程基本相同,在峰值荷载前,钢管中的纵向应力一直大于横向应力,但在接近峰值荷载点时,混凝土进入弹塑性状态,横向变形增大,导致钢管的横向应力较快增长并超过纵向应力;峰值荷载点后,横向应力迅速增大,而纵向应力降低.由图 6 可见,轴压荷载施加过程中,相同荷载水平下,消除粘结试件的钢管纵向应力一直小于有粘结试件的钢管纵向应力,说明对于消除粘结试件,钢管中的纵向应力只由摩擦力产生,而无粘结作用产生的纵向应力,因此使得消除粘结试件的钢管纵向应力明显低于有粘结试件.

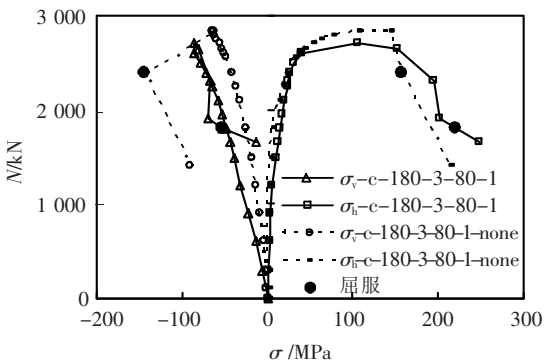


图 6 方钢管约束混凝土试件的荷载-钢管应力关系

3 轴压承载力分析

文献[14]中分别建议了圆钢管约束混凝土

和方钢管约束混凝土短柱的轴压承载力公式,公式中考虑了钢管中纵向应力对轴压承载力的影响.由本文的试验结果和应力分析结果可见,虽然消除钢管与混凝土之间的粘结作用降低了峰值荷载点处钢管中的纵向应力,但消除粘结作用对钢管约束混凝土短柱的轴压承载力并无明显影响,因此本文建议仍采用文献[13]中的轴压承载力公式计算钢管约束混凝土短柱的轴压承载力.图 7 为采用文献[13]中轴压承载力公式的计算结果与试验结果的对比,其中横坐标为试验结果 N_{uc} ,纵坐标为公式计算结果 N_{uc} ;由图中可见,计算结果与试验结果吻合较好,且计算结果整体偏于保守.

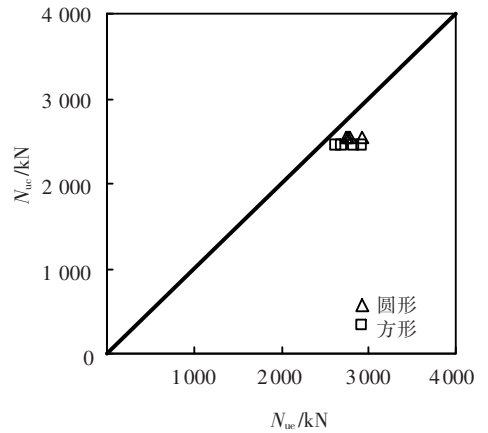


图 7 计算结果与试验结果的对比

4 结 论

1)在径厚比或宽厚比为 60 的条件下,圆钢管与方钢管约束高强混凝土轴压短柱的破坏模式为剪切破坏,外包钢管的约束不能抑制高强混凝土剪切破坏的发生.

2)对于圆钢管约束高强混凝土轴压短柱,钢管在峰值荷载点处屈服,不能继续约束核心混凝土,导致核心混凝土受压破坏.对于方钢管约束高强混凝土轴压短柱,试件达到峰值承载力点时,钢管并不屈服,钢管在荷载-变形曲线的下降段屈服;由于方钢管对核心混凝土的约束不均匀,导致非约束区混凝土首先受压破坏,从而不能充分利用钢管的受拉强度.

3)消除钢管与核心混凝土之间的粘结作用可有效降低钢管约束混凝土柱中的钢管纵向应力,但消除粘结作用对钢管约束混凝土柱的轴压承载力和延性无显著影响;因此在工程实践中可不必在钢管内壁涂润滑剂以消除粘结应力的影响.

参考文献:

[1] 陈肇元,朱金铨,吴佩刚. 高强混凝土及其应用[M].

北京:清华大学出版社,1992.

- [2] ACI Committee 363. State-of-the-art report on high-strength concrete [J]. ACI Journal, 1984, 81(4): 364 - 411.
- [3] LEGERON F, PAULTRE P. Behavior of high-strength concrete columns under cyclic flexure and constant axial load [J]. ACI Structural Journal, 2000, 97(4): 591 - 601.
- [4] GB 50010—2002. 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [5] ABOUTAHA R, MACHADO R. Seismic resistance of steel-tubed high-strength reinforced-concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(5): 485 - 494.
- [6] ZHANG Sumei, LIU Jiepeng. Seismic behavior and strength of square tube confined reinforced-concrete (STRC) columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(9): 1194 - 1207.
- [7] 肖岩. 套管钢筋混凝土结构的发展与展望[J]. 土木工程学报, 2004, 37(4): 8 - 12.
- [8] TOMII M, SAKINO K, XIAO Y, *et al.* Earthquake resisting hysteretic behavior of reinforced concrete short columns confined by steel tube [R]//Proceeding of the International Speciality Conference on Concrete Filled Steel Tubular Structures. Harbin; Harbin Institute of Civil Engineering, 1985: 119 - 125.

- [9] XIAO Y, TOMII M, SAKION K. Experimental study on design method to prevent shear failure of reinforced concrete short circular columns by confining in steel tube [J]. Transactions of Japan Concrete Institute, 1986, 8: 535 - 542.
- [10] 张素梅,刘界鹏,马乐,等. 圆钢管约束高强混凝土轴压短柱的试验研究与承载力分析[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 24 - 31.
- [11] MEI H, KIIIOUSIS P D, EHSANI M R, *et al.* Confinement effects on high-strength concrete [J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(4): 548 - 553.
- [12] FAM A, QIE F S, RIZKALLA S. Concrete-filled steel tubes subjected to axial compression and lateral cyclic loads [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(4): 631 - 640.
- [13] ZHANG Sumei, LIU Jiepeng. Seismic behavior and strength of square tube confined reinforced-concrete (STRC) columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(9): 1194 - 1207.
- [14] 刘界鹏. 钢管约束钢筋混凝土与型钢混凝土构件静动力性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2006.

(编辑 魏希柱)

(上接第 1205 页)

当预应力混凝土梁控制截面有效压应力不大于式(8)计算值时,基本可满足表 2 反向变形限值的要求,无需进行详细验算。

5 结 论

1) 为保证预应力混凝土受弯构件在满足总挠度限值要求时,具有良好的使用性能,在结构自重和预应力等效荷载共同作用下,预应力混凝土受弯构件的反向变形应不超过表 2 规定的限值。

2) 对混凝土强度等级为 C40 至 C60 的预应力混凝土板,当其控制截面有效压应力不大于 4.5N/mm^2 时,可满足表 2 反向变形限值的要求。

3) 对于预应力混凝土梁,当其控制截面有效压应力不大于式(8)计算值时,基本可满足表 2 反向变形限值的要求。

参考文献:

- [1] ACI 318 - 02 Building Code Requirements for Structural Concrete [S]. Farmington Hills, Michigan; American Concrete Institute, 2002.
- [2] CEB - FIP Model Code 1990; design code/Comite Euro

- International du Beton [M]. London: T. Telford, 1993.

- [3] BS EN 1990:2002 British Standard; Eurocode - Basis of structural design [S]. rue de Stassart, 36 B - 1050 Brussels; European Committee for Standardization, 2002.
- [4] BS8110 Structural use of concrete [S]. London; British Standards Institution, 1985.
- [5] WILLIAMS A. Design of reinforced concrete structures [M]. 北京:中国水利水电出版社,2002.
- [6] 部分预应力混凝土结构设计建议编写组. 部分预应力混凝土结构设计建议 [M]. 北京:中国铁道出版社,1985.
- [7] JTG D62 - 2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [8] GB 50010 - 2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [9] 郑文忠,解恒燕. 预应力混凝土结构设计中应注意的若干问题[J]. 建筑结构,2007, 37(6): 97 - 98, 107.
- [10] JGJ 92 - 2004 无粘结预应力混凝土结构技术规程 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.

(编辑 赵丽莹)