

文章编号:1005-0523(2018)04-0015-06

预应力钢绞线网加固 RC 柱抗震性能影响因素研究

曹忠民, 赖恒力, 邱荣文, 黄金龙

(华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要:基于8根试件(其中1根未加固试件,7根为采用预应力钢绞线网加固试件)在低周往复荷载作用下的试验结果,根据对比不同因素下试件的滞回曲线、骨架曲线及延性变化,分析钢绞线间距、预应力水平和轴压比等因素对加固柱抗震性能的影响。试验结果表明:在预应力水平为0~60%的范围内,加固柱的屈服荷载、峰值荷载、延性随预应力水平提高均得到提高,提高幅度分别为4.4%~30.6%,16.4%~60.4%,8.2%~49.8%。钢绞线间距为30 mm的试件较间距为60 mm的加固柱,屈服荷载、峰值荷载、延性提高幅度分别为7.0%~10.9%,17.0%~25.1%,15.1%~35.2%。

关键词:预应力钢绞线网;钢筋混凝土柱;抗震加固;影响因素

中图分类号:U378.3

文献标志码:A

高强钢绞线网-聚合物砂浆加固技术具有耐腐蚀、耐高温、对原结构使用干扰小、适用面广等优点,是近年来不断发展推广的一种新型加固技术^[1-2]。许多学者对此类柱的加固改造进行了大量的研究,研究结果表明横向约束混凝土柱加固技术能够显著地提高柱的抗震性能,但对于非预应力加固,材料应力滞后的现象不可避免。横向预应力高强钢绞线网-聚合物砂浆加固柱技术解决了对钢绞线力学性能滞后的现象,同时闭合自身结构裂缝以及抑制裂缝的开展^[3-4]。

对于加固 RC 柱抗震性能而言,构件的轴压比、剪跨比、配箍率、初始偏心距、钢绞线配置量、截面类型等参数是影响钢筋混凝土柱抗震性能的主要因素。

黄华,等^[5]通过有限元软件研究了轴压比、箍筋配箍率、混凝土强度等因素对加固柱抗震性能的影响。陈亮^[6]主要对轴压比为0.2和0.48的加固柱进行了抗震试验研究,但没有考虑钢绞线预应力水平对加固柱影响。郭俊平,等^[7]对16根采用预应力钢绞线网加固圆柱进行了初步的抗震试验研究。目前对于横向预应力钢绞线网加固方形柱的有关研究较少,因此基于横向钢绞线施加预应力技术的优势,研究该技术对方柱抗震加固性能的影响是必要的。本文参考前期学者的研究,在文献[8]预应力高强钢绞线网加固方形柱试验结果研究的基础上,根据试验结果重点对比分析不同钢绞线间距、预应力水平、轴压比等因素在低周反复荷载下对于试件抗震加固效果的影响,探究加固柱抗震性能在不同因素下的变化规律,从而为实际工程的技术运用提供参考。

1 试验方案

1.1 试件设计

试验共进行了8根方形柱试件的低周反复加载试验,柱净高度为930 mm,加载剪跨比为4.0,水平加载点到混凝土底座上表面距离为800 mm。采用对称配筋,纵筋采用二级热轧带肋钢筋,配筋取 $4\phi 12$,截面对

收稿日期:2017-12-10

基金项目:国家自然科学基金项目(05168019)

作者简介:曹忠民(1972—),男,副教授,研究方向为结构抗震加固。

应配筋率 1.13%;箍筋采用一级热轧光圆钢筋,配筋取 $\phi 8@100$,钢筋弹性模量为 2.1×10^5 MPa。对柱端加载点周围采用箍筋加密配筋,配筋为 $\phi 8@40$ 。考虑实际中加固改造工程的柱类混凝土强度等级较低,因此试件混凝土强度按 C25 配制。柱详细尺寸和配筋见图 1。其中未加固柱 1 根,加固柱 7 根,轴压比 2 类 (0.24,0.38),钢绞线间距 2 种 (30,60 mm),预应力水平 3 种 (0,30%,60%),各试件详细参数见表 1。

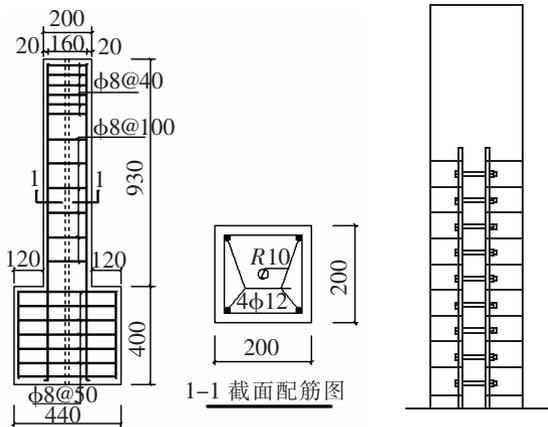


图 1 试件尺寸及配筋 (mm)

Fig.1 Dimension and reinforcement of specimen (mm)

表 1 试件参数设置
Tab.1 Parameters of specimen

| 试件编号 | 预应力水平/% | 钢绞线间距/mm | 轴压比 |
|------|---------|----------|------|
| Z1 | - | - | 0.24 |
| Z2 | 0 | 60 | 0.24 |
| Z3 | 30 | 60 | 0.24 |
| Z4 | 60 | 60 | 0.24 |
| Z5 | 30 | 60 | 0.38 |
| Z6 | 30 | 30 | 0.24 |
| Z7 | 60 | 30 | 0.24 |
| Z8 | 30 | 30 | 0.38 |

1.2 材料性能

试件的材料性能如表 2 所示。 f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度, f_y 为钢筋屈服强度, f_u 为钢筋极限强度, f_w 为钢绞线极限抗拉强度, f_{pmu} 为聚合物抗压强度,取每根试件预留的 3 组立方体抗压强度的算术平均值。钢绞线采用 1×19 型,直径 2.5 mm 的镀锌钢绞线,实测截面面积为 4.5 mm^2 ,弹性模量为 1.05×10^5 MPa,极限拉力为 7.8 kN。

表 2 材料性能
Tab.2 Material performance

| 混凝土 | 直径/mm | 钢筋 f_y | f_u /MPa | 钢绞线 | 聚合物砂浆 |
|---------------|-------|----------|------------|------------|----------------|
| f_{cu} /MPa | | /MPa | | f_w /MPa | f_{pmu} /MPa |
| 29.68 | 8 | 311.8 | 417.4 | 1 733.3 | 58.3 |
| | 12 | 362.5 | 573.1 | | |

1.3 加载方式

各试件轴力的施加通过对 15.2 mm 高强钢绞线进行后张法张拉,根据试验所确定的轴压比对钢绞线进行超张拉,从而达到轴向荷载的施加。试验根据《建筑抗震试验方法规程》^[9]中要求,低周反复加载过程采用荷载和位移双控制的模式进行,将纵筋应变达到屈服应变时,认为试件达到了屈服状态。屈服之前采用荷载控制逐级施加荷载,每级循环 1 次,试件屈服后采用位移控制加载,以纵筋屈服位移的整数倍逐级增加,每级加载循环 2 次。当水平荷载降至最大荷载的 85% 时试验结束。考虑到实验室条件和试验设备的局限性,试验通过油压千斤顶对柱端施加往复荷载,采用两个油压千斤顶对柱端加载的试验方式。

1.4 试验现象和结果

各试件的破坏形态示意图如图 2 所示,试验结果如表 3 所示。从表 3 可知加固试件较未加固试件屈服荷载、峰值荷载、极限荷载均有不同程度提高,表明对柱使用该加固技术可以显著提高柱的抗震性能。

表3 各试件试验结果
Tab.3 Test results of specimens

| 试件编号 | 屈服荷载/kN | 屈服位移/mm | 峰值荷载/kN | 峰值位移/mm | 极限荷载/kN | 极限位移/mm | 位移延性系数 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| Z1 | 28.10 | 5.19 | 37.78 | 9.95 | 32.06 | 16.01 | 3.09 |
| Z2 | 32.29 | 5.47 | 42.23 | 10.55 | 34.55 | 21.21 | 3.88 |
| Z3 | 33.71 | 5.70 | 43.98 | 11.15 | 37.38 | 22.23 | 3.90 |
| Z4 | 33.85 | 5.75 | 44.94 | 11.35 | 36.18 | 22.52 | 3.92 |
| Z5 | 38.26 | 5.62 | 48.43 | 11.06 | 41.05 | 22.05 | 3.92 |
| Z6 | 36.06 | 5.50 | 51.48 | 10.01 | 41.55 | 24.68 | 4.49 |
| Z7 | 37.55 | 5.08 | 51.77 | 10.25 | 41.61 | 26.92 | 5.30 |
| Z8 | 42.14 | 5.80 | 60.60 | 10.61 | 51.77 | 28.12 | 4.85 |

从图2各试件的破坏形态可知:未加固柱Z1破坏时柱根部裂缝开展明显,微裂缝逐渐开展延伸至柱侧面形成交叉斜裂缝,混凝土大块剥落导致纵筋外露,试件压弯完全破坏;Z2,Z3,Z4破坏时砂浆面开裂破坏,在柱侧面形成交叉裂缝,棱角处的混凝土开裂剥落,柱子逐渐破坏,破坏程度较未加固柱Z1相比,加固柱根部保持相对完好;Z5,Z8破坏时裂缝主要集中在柱脚范围内,柱底砂浆开裂,混凝土剥落,Z8较Z5相比,Z8钢绞线间距小,裂缝开展呈现多而密的特点,破坏时由于钢绞线的约束,核心区混凝土完整性相对更好;Z8较Z6相比,由于Z8轴压比更大,柱根部破坏程度严重许多;Z6,Z7破坏形态大致相似,柱底部形成若干条明显的横向及斜向裂缝,相对于钢绞线间距为60mm的Z3,Z4,钢绞线间距更密的试件砂浆面层和混凝土脱落量更少。

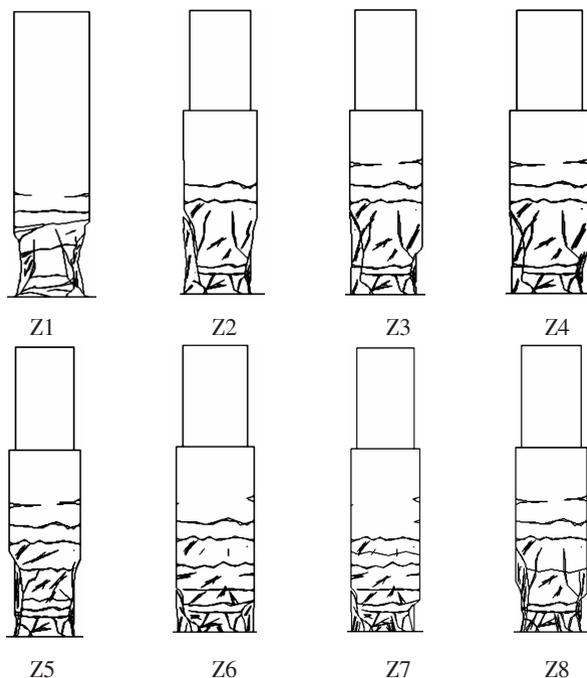


图2 试件破坏形态

Fig.2 Failure modes of the specimens

2 抗震性能参数分析

2.1 钢绞线间距对抗震性能影响

钢绞线间距主要考虑30mm及60mm两种情况,设置3组对比试件分别为加固柱Z3和Z6,Z4和Z7,Z5和Z8。试件滞回曲线、骨架曲线、延性系数分别见图3、表3。

从图3可知,钢绞线间距小的加固试件较间距大的加固试件滞回曲线更加饱满,耗能能力更好,主要原因是随着试验加载的进行,横向钢绞线抑制混凝土的膨胀开裂,将已出现的裂缝闭合并抑制裂缝的开展,在相同的加固间距内,随着钢绞线间距的减少,钢绞线数量的增加,体现出钢绞线用量的增加对混凝土具有更好的约束作用。加固柱Z3较Z6,Z4较Z7,Z5较Z8的屈服荷载、峰值荷载分别提高了7.0%,17.1%,10.9%,15.2%,16.9%,17.7%。表明钢绞线间距小的加固柱抗震性能优于钢绞线间距大的加固柱,随着钢绞线间距的减小,试件的承载能力得到了显著的提高,骨架曲线下降段也更为平缓。从表3可知,在轴压比和预应力水平相同的情况下钢绞线间距为30mm的加固柱Z6,Z7,Z8较钢绞线间距为60mm的加固柱Z3,Z4,Z5位移延性系数分别提高了15.1%,35.2%,23.7%,表明随着钢绞线间距减小,加固柱延性得了明显的提高。

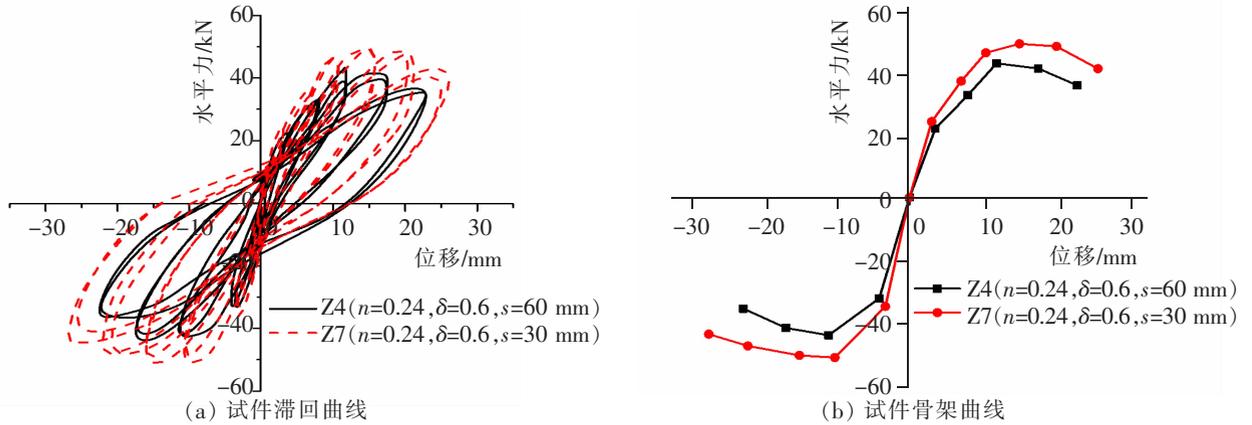


图3 不同钢绞线间距的加固柱曲线

Fig.3 Curves of strengthened columns in different strand spacing

2.2 预应力水平对抗震性能影响

从引言及上文的分析可知,对于高强钢绞线网-聚合物砂浆加固混凝土柱的研究,通常采用普通非预应力钢绞线网加固,该加固方式在一定程度可以改善柱的受力性能,但不能充分利用钢绞线的高强性能,即混凝土受力膨胀之后钢绞线才开始工作,这将使得大多数实际工程构件发生破坏时,钢绞线还未发挥出高强抗拉的特点。因此非预应力钢绞线网对于加固柱可以看做是被动约束,而对钢绞线施加横向预应力,可以从柱加载开始钢绞线就参与工作,并对核心混凝土产生约束效应,同时对纵向钢绞线产生锚固效果,使得钢绞线网由“被动约束”转化为“主动约束”,从而提高柱的抗弯能力和延性,延缓推迟受压主裂缝的出现及开展。基于以上分析,试验主要考虑3种预应力水平分别为0,30%,60%,百分比表示的是钢绞线张拉值与钢绞线极限拉力的比值。试件的滞回曲线、骨架曲线、延性系数分别见图4和表3。

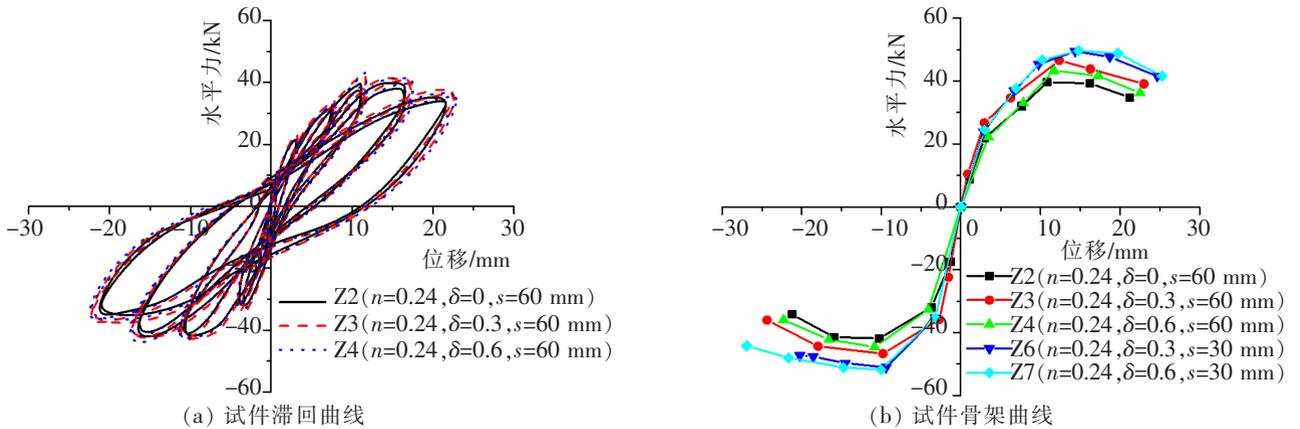


图4 不同预应力水平的加固柱曲线

Fig.4 Curves of strengthened columns at different prestressing levels

从图4可知,随着预应力水平的提高,加固柱滞回曲线逐渐变得饱满,滞回曲线面积变大,耗能能力提高,但相对于钢绞线间距减小对抗震性能的提高幅度更小。表明预应力水平的提高能一定程度提高加固柱抗震性能。加固柱Z2,Z3,Z4的屈服荷载较非加固柱分别提高14.9%,20.0%,20.5%,极限荷载分别提高7.8%,16.6%,12.9%。在其他因素相同条件下,预应力水平对钢绞线加固间距为30mm的试件极限位移提高量比加固间距为60mm的试件更为明显,Z6,Z7较Z3,Z4极限位移提高幅度为15.3%,表明了钢绞线间距对抗震性能的影响比预应力水平更为显著。从表3可知,随着预应力水平的提高,加固柱Z2,Z3,Z4较未加固柱的位移延性系数分别提高了25.6%,26.2%,26.9%,表明预应力的施加可以一定程度改善柱的延性,所以该加固技术在实际工程运用中,在满足抗震延性的要求下,为了提高钢绞线的利用率可以对钢绞线施加一定的预应力来提高结构的抗震性能。

2.3 轴压比对抗震性能影响

试验主要研究对比低轴压比下加固柱的抗震性能,结合工程实际以及在前期研究基础上,考虑轴压比为0.24和0.38两种情况,在其他因素相同的条件下,取试件编号为Z3,Z5以及Z6,Z8的试件进行分析。试件的滞回曲线、骨架曲线、延性系数分别见图5、表3。

从图5可知加固柱Z5较Z3的滞回曲线捏拢现象更为明显,滞回曲线面积增大,耗能能力得到提高。轴压比低的试件,骨架曲线下降段较轴压比高的试件下降更为平缓,主要是轴压比低的试件截面刚度小,轴压比高的试件初始截面刚度大,骨架曲线刚度变化明显。从表3可知随着轴压比的增大,加固柱Z5较Z3,Z8较Z6的屈服荷载、峰值荷载分别提高了13.5%,10.1%和16.9%,17.7%,加固柱Z8位移延性系数较Z7降低了9%,表明试件的承载能力随着轴压比的提高得有一定的提升,加固柱的刚度提高,但位移延性系数增加幅度减少,这是因为随着轴压比的增大,试件自身脆性变大,极限位移角减小,试件更快达到破坏状态。

通过以上分析可知,轴压比对于抗震加固试验研究是一项不可或缺的因素。轴压比对试件的影响主要来自以下两个方面:一是混凝土名义压区的影响,这一因素在弯曲破坏长柱中,是影响延性变化的本质原因;二是由于轴力的存在,当对试件施加水平荷载产生位移之后,水平承载力由于N- Δ 效应而有所降低。基于以上原因可知,相对于低轴压比试件,在高轴压比试件中承载力随位移增长降低的速度更快。所以加固设计考虑柱的承载力及抗震性能时要控制轴压比,防止试件发生脆性破坏。

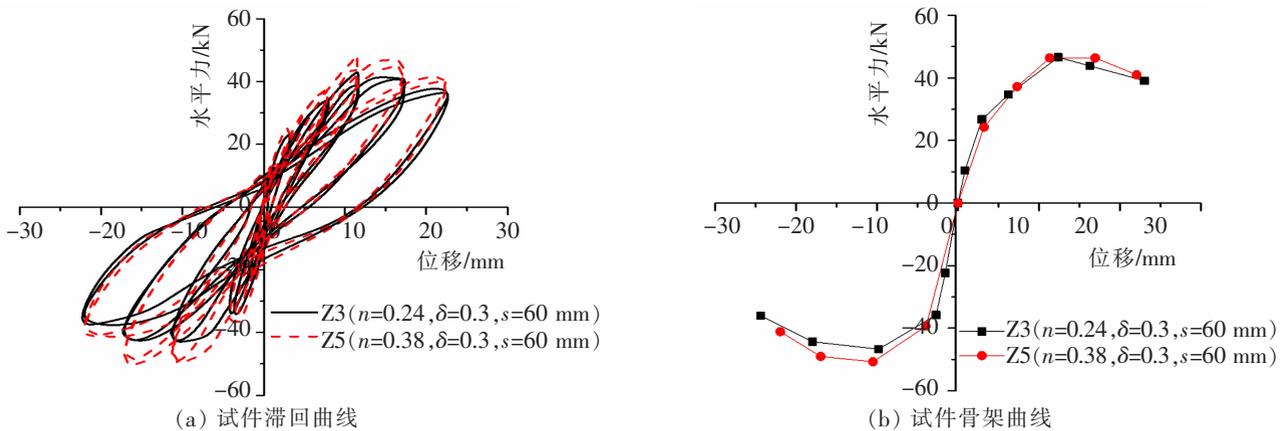


图5 不同轴压比的加固柱曲线

Fig.5 Curves of strengthened columns at different axial compression ratios

3 结论

1) 随着钢绞线间距、预应力水平的提高,加固柱的屈服荷载、极限荷载和延性均有不同程度的提高,其中预应力水平为30%的加固试件分别平均提高16.3%,26.3%,10.6%,预应力水平为60%的加固试件分别平均提高10.9%,12.6%,18.8%,钢绞线间距为30 mm的比间距60 mm的加固效果更为显著。

2) 在预应力水平为0~60%的范围内,加固柱的屈服荷载、峰值荷载及延性均得到提高,但是提升幅度较钢绞线间距减小提升的幅度相比更小,表明钢绞线间距对试件加固效果的影响比预应力水平更为显著。

3) 在轴压比为0.38的范围内,随着轴压比的提高,柱的承载能力提高,但是加固柱延性变差,刚度退化更加严重。

参考文献:

- [1] 尚守平,蒋隆敏,张毛心. 钢筋网高性能复合砂浆加固钢筋混凝土方柱抗震性能的研究[J]. 建筑结构学报,2006,27(4):16-22.
- [2] 郭俊平,邓宗才,林劲松,等. 预应力钢绞线网加固混凝土圆柱的轴压性能[J]. 工程力学,2014,31(3):129-137.

- [3] 聂建国,蔡奇,张天申,等. 高强不锈钢绞线网-渗透性聚合砂浆抗剪加固的试验研究[J]. 建筑结构学报,2005,26(2):10-17.
- [4] 李辉. 预应力钢绞线加固混凝土短柱抗震性能试验研究[D]. 北京:北京工业大学,2012.
- [5] 黄华,田轲,史金辉,等. 钢绞线网加固 RC 柱抗震性能影响因素分析[J]. 公路交通科技,2013,30(9):43-52.
- [6] 陈亮. 高强不锈钢绞线网用于混凝土柱抗震加固的试验研究[D]. 北京:清华大学,2004.
- [7] 郭俊平,邓宗才,林劲松,等. 预应力钢绞线网加固钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(2):128-136.
- [8] 邱荣文. 预应力钢绞线网-高性能砂浆加固 RC 柱抗震实验研究[D]. 南昌:华东交通大学,2017.
- [9] YJGJ/T 101-2015 建筑抗震试验规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.

Study on Influencing Factor of Seismic RC Columns Strengthened with Prestressed Steel Wire Mesh and High Performance Mortar

Cao Zhongmin, Lai Hengli, Qiu Rongwen, Huang Jinlong

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Based on the experimental result of eight concrete columns (including one unreinforced specimen and seven strengthened specimens with prestressed high strength steel wire mesh) under low cyclic loading, this paper, by calculating the hysteretic curve, skeleton curve and ductility change of specimens in terms of different factors, analyzed the effects of such factors as steel strand space, prestressing level and axial compression ratio on the seismic behavior of the strengthened columns. The research results show that within the prestressing level range of 0~60%, with the increase of prestressing level, the yield load, ultimate load, displacement ductility coefficient of the reinforced concrete columns increased by 4.4%~30.6%, 16.4%~60.4% and 8.2%~49.8%. The yield load, ultimate load ductility coefficient and displacement ductility coefficient of the reinforced specimens with strand spacing of 30mm were 7.0%~10.9%, 17.0%~25.1% and 15.1%~35.2% greater than those of the reinforced specimens with strand spacing of 60mm respectively.

Key words: prestressed steel wire mesh; reinforced concrete column; seismic strengthening; influencing factor