

火灾后等肢L形型钢混凝土异形柱双向偏心受压力学性能研究

李晓东, 蔡维沛, 高立堂

(青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要: 为了研究火灾后L形型钢混凝土柱双向偏心受压力学性能, 进行受火1小时后4根等肢L形型钢混凝土柱的常温静力加载试验, 分析双向受压情况下不同加载偏心距对型钢混凝土异形柱受压承载力的影响。记录其破坏过程及破坏形态, 分析其破坏机理。对试验异形柱的极限承载力、混凝土型钢应力应变曲线、柱中侧向位移曲线、混凝土与型钢之间的粘结滑移曲线进行了讨论。试验结果表明: (1) 型钢混凝土异形柱与钢筋混凝土柱受压破坏机理相同, 破坏形态类似。随着偏心距的增大, 试件由受压破坏转变为受拉破坏。承载力也随之降低; (2) 桁架式钢骨架以及腹杆能够使混凝土与型钢较好的协同工作, 保证异形柱整体工作性能。平均应变平截面假定仍适用于火灾后等肢L形型钢混凝土柱的分析中; (3) 异形柱在进行双向受压情况下, 试件发生双向弯曲, 两侧位移基本相同。

关键词: 火灾; L形型钢混凝土柱; 力学性能; 双向偏心受压

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)03-0351-06

Experimental investigation on the mechanical properties of L-special-shaped SRC columns with two-dimensional eccentric compression after fire

LI Xiaodong, CAI Weipei, GAO Litang

(School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

Abstract: Static load tests of 4 equal limbs L-special-shaped SRC columns were done under room temperature to analyze the effect of different eccentricities to compressive carrying capacity of steel reinforced concrete columns under two-dimensional eccentric compression. The failure process and patterns were recorded to analyze the failure mechanism. The ultimate bearing capacity, stress-strain curve of concrete and steel, lateral displacement curve and the bond-slip curve of the concrete and steel were discussed. Test results show that (1) failure mechanism and failure mode of equal limbs L-special-shaped SRC columns are similar to reinforced concrete columns. With the increase of eccentricity, the specimen turned the compression failure to tensile failure, the bearing capacity is also reduced. (2) Steel skeleton of truss type and webs can make the concrete and steel work together better to ensure the overall work of columns. Plane cross-section assumption still applies in equiaxial L-specially-shaped steel reinforced concrete columns. (3) Under bi-direction loading, steel reinforced concrete special-shaped column occurred bi-directional bending, displacement are basically the same on both sides.

Keywords: fire; L-special-shaped steel reinforced concrete column; two-dimensional eccentric compression.

型钢混凝土异形柱是在钢筋混凝土异形柱和型钢混凝土柱的基础上产生的一种异形柱结构形式。具有布置灵活、建筑美观的特点, 并且承载力高、抗震性能好的优点^[1-3], 可成为异形柱结构体系新的发展方向。

异形柱由于柱肢和混凝土保护层厚度较薄弱, 型钢加快热传导速度, 承载力降低较多, 因此, 型钢混凝土异形柱的抗火性能相对较差。国内外对型钢混凝土异形柱抗火性能的研究几乎处于空白阶段, 未形成一套系统的计算理论和设计方法。关于型钢混凝土异形柱的抗

火性能, 杨志新^[4]进行了等肢T形, 高云霏^[5]进行了等肢十字形, 单齐云^[6]进行了等肢L形, 陈锦波^[7]进行了不等肢L形, 闫照健^[8]进行了等肢L形的型钢混凝土柱的抗火性能研究。

本文通过展开4根已受火1 h的等肢L形型钢混凝土柱常温下的静力加载试验, 研究双向偏心受压、加载偏心距、桁架式型钢骨架等对型钢混凝土异形柱的极限承载力、侧向位移、混凝土型钢粘结滑移等方面的影响规律, 为结构设计以及火灾后损伤评估及修复加固工作提供依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

本次试验共制作并完成4根等肢L形型钢混凝土柱,试件总长3 m、肢长360 mm、肢厚120 mm,试件剪跨比 $\lambda=H_n/2h_{c0}=3\,000/660=4.55>3$,取 $\lambda=3$ 。此外在试件两端分别设置高300 mm的扩大头,试件采用桁架式型钢骨架,选用Q235级63×40×4.8号槽钢,63×8和30×3号角钢,腹杆选用直径为12 mm的HRB400级钢筋并采用电弧焊方式焊接,混凝土采用混凝土搅拌站预制的C30早强防冻自密实混凝土。图1为异形柱配钢示意图。

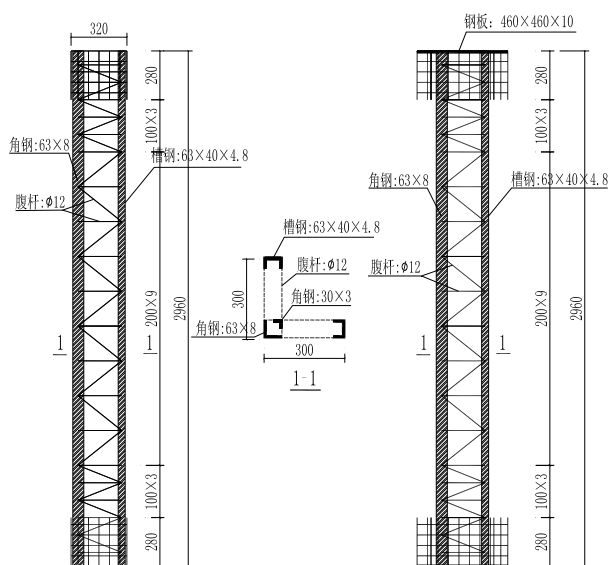


图1 试件的立面及横截面

Fig.1 Elevation and cross section of test columns

依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)、《金属材料室温拉伸试验》(GB/T 228.1—2010)要求,在青岛理工大学力学材料实验中心进行混凝土和钢材试件的力学性能试验。型钢 $f_y=275$ MPa, $f_u=380$ MPa, $E_s=2.11\times 10^5$ N/mm², 混凝土 $f_c=24.1$ MPa, $f_{cu}=35.7$ MPa, $E_c=3.2\times 10^4$ N/mm²。

1.2 试验方案

1.2.1 火灾试验

火灾试验在青岛理工大学结构试验室进行,试验设备主要包括垂直燃烧炉系统、2 000 kN油压千斤顶及油泵、门式反力架及横梁等。

受火方式为L形柱的内折角处两面受火,并对受火试件按照一定轴压比施加竖向荷载。各试件受火时间均为1 h。火灾试验炉温按照ISO834标准升温曲线进行升温控制,通过测得的炉内温度数据手动

调控燃烧炉气阀和油阀来实现。试验过程中要测得横截面内温度场变化和轴向位移。

在燃烧炉内的不同位置布置5个N型热电偶,用于实时控制炉内温度按照ISO834标准升温曲线增长,与此同时,火灾试验中通过Agilent34980数据采集仪测得预先在柱中横截面内埋置的13根K型热电偶温度数据,以分析其截面温度场变化规律。

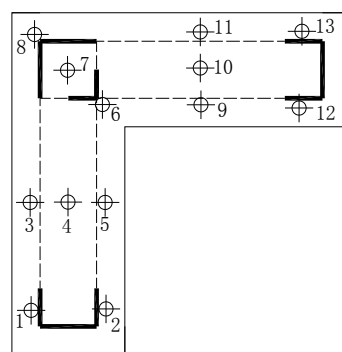


图2 热电偶布置

Fig.2 Positions of thermocouples



(a)



(b)

图3 试验装置全貌

Fig.3 General view of test equipments

竖向荷载的加载速度控制在3 kN/s左右, 达到预定荷载后, 保载10 min, 待试件轴向位移变形稳定后再进行点火. 试验过程中, 由于炉温不断升高, 试件产生受热膨胀, 并导致千斤顶压力有所上升, 因此, 试验中需注意要实时调整油泵, 以确保千斤顶保持恒载.

图4为各试件火灾试验过程中炉内5个热电偶实测平均升温曲线与ISO834升温曲线的对比, 从图中可以看出基本吻合.

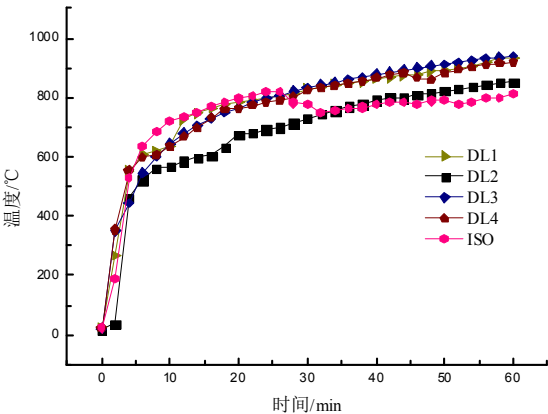


图4 炉内升温曲线与ISO834标准升温曲线对比
Fig.4 Comparison of temperature-time curve in furnace with ISO834 standard temperature-time curves

1.2.2 火灾试验结果

1.2.2.1 温度场曲线

火灾试验测得的温度场曲线如图5所示, 各测点的具体情况如表1所示.

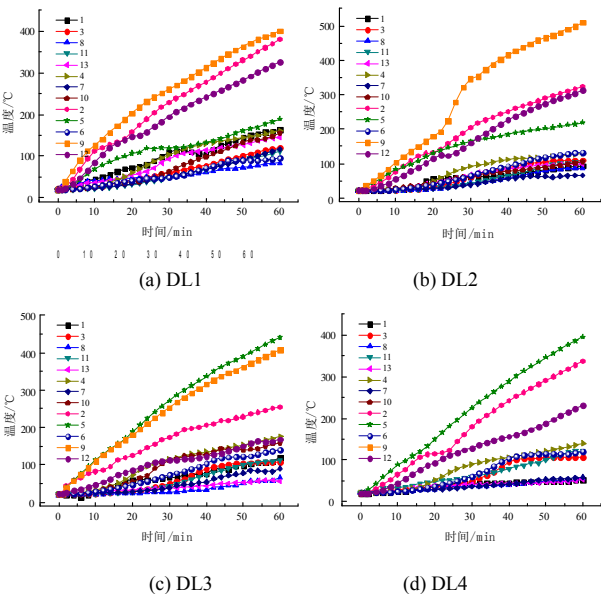


图5 试件实测温度-时间曲线
Fig.5 Measured temperature time curves of specimens

表1 温度测点一览表
Tab.1 General view of thermocouples

测点编号	距受火面距离/mm	最高温度/℃	达到最高温度所需时间/min
1	92	198	60
2	30	464	58
3	92	120	60
4	62	181	60
5	30	441	60
6	30	156	60
7	62	129	60
8	169	87	60
9	30	509	60
10	62	242	58
11	92	120	60
12	30	325	60
13	92	274	60

从曲线看出: (1) 随着受火面距离的增加, 实测温度逐渐降低. (2) 非受火面测点8的温度相对偏低, 集中于60~100 ℃之间, 其它测点多集中于120 ℃附近, 最高温度甚至达到200 ℃. (3) 截面中部测点7的温度最低, 约为100 ℃, 而位于柱肢中部区域的测点4、10温度大体相同, 最高温度可达到140 ℃. (4) 位于内折角的测点6相比受火面其他测点相比温度偏低, 仅为160 ℃, 其余测点最高达到500 ℃. (5) 从升温曲线增长幅度进行分析: 距受火面近的测点, 温度基本保持线性增长, 距受火面较远的升温曲线在100 ℃附近趋于平缓, 距离受火面较近处现象更为明显, 可能是由混凝土内部水分的蒸发移动造成的.

通过测量火灾试验时各试件的竖向位移可知, 轴向位移最大值近6 mm, 最小值仅为1.1 mm, 并且位移与时间呈线性关系, 所以各试件均未达到耐火极限.

1.2.3 火灾后加载方式

加载试验仍在火灾炉内进行. 加载分为前期预载和正式加载两部分, 前期预载共三次, 并采用三级加载方案, 预载最大荷载值不超过极限荷载的70%. 正式加载前期按照每60 kN为一级, 临近破坏时, 改为每30 kN为一级, 每级加载完成后, 保载10 min.

L形柱作为角柱, 与柱子正交的两个方向只有两根框架梁与之连接, 属于双向偏心受力构件, 本次采用45°加载方式进行双向偏心受压试验. 具体加载方式如图6所示.

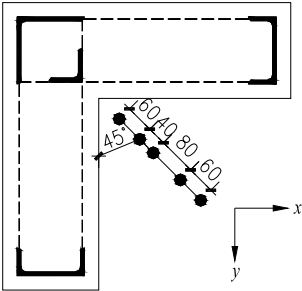


图6 异形柱加载方案
Fig.6 Loading method

试验量测的主要内容有柱中截面型钢与混凝土之间的粘结滑移、侧向位移、跨中截面混凝土应变、型钢应变以及竖向荷载。试验设备主要包括：2 000 kN油压千斤顶及配套油泵、门式反力架及横梁、东华DH3815N分布式静态应变测试系统、DJCK-2裂缝测宽仪等。

2 试验结果

试件的宏观破坏形态如图7所示。各试件破坏时测得的极限承载力以及破坏形态如表2所示。

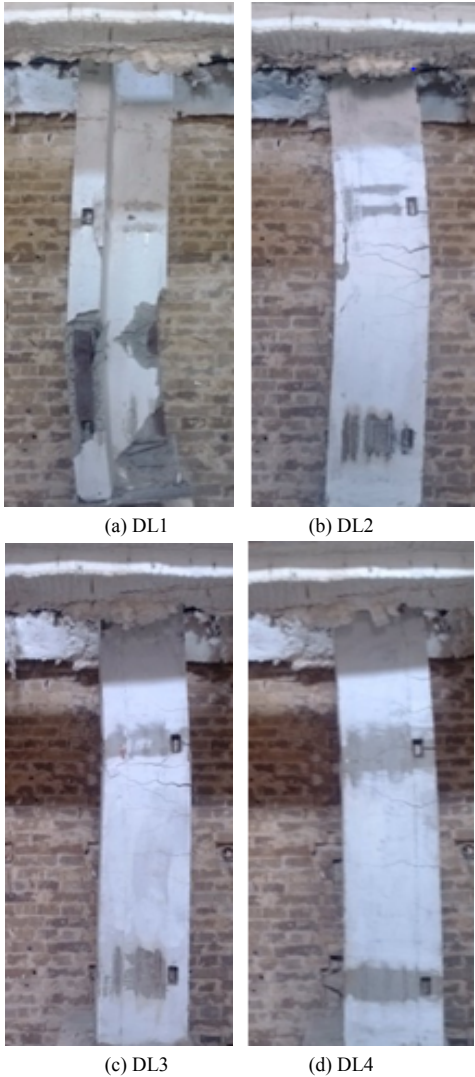


图7 试件宏观破坏形态

Fig.7 Damage conditions of specimens after test

表2 试件一览表
Tab.2 General view of test specimens

试件	受火时间/h	偏心距/mm	破坏形态	极限承载力/kN
DL1	1	60	受压破坏	1155.4
DL2	1	100	受压破坏	892
DL3	1	180	受拉破坏	500
DL4	1	240	受拉破坏	346.8

2.1 破坏特征

DL1荷载加载至破坏荷载的一半时，受拉区柱中区域出现横向裂缝，当加载到60 %时，受压区柱肢出现纵向微裂缝。破坏时，柱肢中部出现一条明显的纵向裂缝，受拉区出现五条间距约100 mm的横向裂缝，受压区柱肢下半段的混凝土压碎并脱落。

DL2荷载加载至破坏荷载的50 %时，受拉区角部柱中区域出现细微横向裂缝，间距约为100 mm，试件发生破坏后，一肢柱身中部出现两条较宽的纵向裂缝，另一肢混凝土被压碎，受拉区最大横向裂缝宽度50 mm。槽钢屈服部位及横向主裂缝均位于柱中。

当加载至破坏荷载的70 %时，DL3在受拉区柱中区域出现横向裂缝，加载至500 kN，混凝土被压碎，受拉区横向裂缝位于柱中。

DL4的破坏荷载为346.8 kN，当荷载加载至破坏荷载的50%时，受拉区出现间距约为200 mm的横向裂缝。随着试件的破坏，受压区柱肢中部出现纵向裂缝，受压区混凝土被压碎但未脱落，受拉区出现间距约为100 mm的横向裂缝，柱肢槽钢屈服部位及横向主裂缝均位于柱中。

2.2 荷载-纵向变形曲线

试验测得的荷载-纵向变形曲线如图8所示。对于试件的轴向位移，可直接在柱顶架设位移计进行测量。

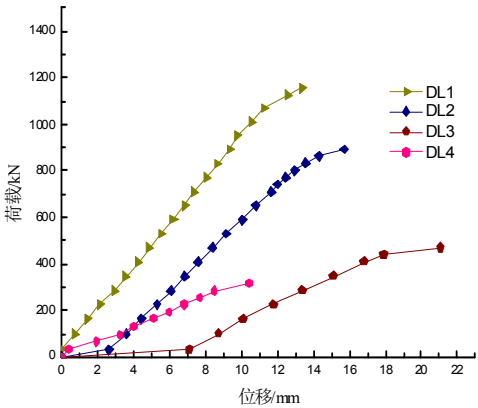


图8 荷载-纵向变形曲线

Fig.8 Load-axial distortion curves

通过曲线可知,火灾后型钢混凝土异形柱纵向变形曲线大致分为三个阶段:在加载初期,异形柱轴向变形较小;随着荷载和轴向位移的增加,异形柱的刚度增大,其主要原因是变形较小时混凝土单独承受轴向荷载,随着荷载的增加,粘结作用使得混凝土与型钢共同受力,刚度增大;当混凝土发生开裂,试件的刚度随之减小,纵向变形增大。

受火后异形柱极限承载力随着偏心距的增大而降低,DL2相比DL1承载力下降了22.7%,发生受拉破坏时,DL3相比DL2承载力下降了43.9%,DL4相对于DL3承载力下降了30.6%。在发生受拉破坏时,由于混凝土受压区面积减小,另外受火灾影响,测点2温度最高达到450℃,混凝土弹性模量损伤较大,所以承载力下降较多。

2.3 荷载-挠度曲线

试件的荷载-挠度曲线如图9所示。

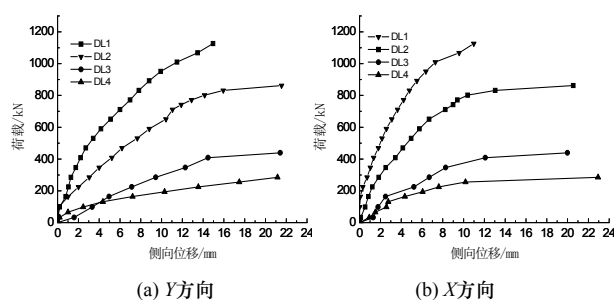


图9 荷载-挠度曲线

Fig.9 Load-deflection curves

试件挠度主要考虑柱中,分为X轴方向的挠度曲线与Y轴方向的挠度曲线两种。试件开裂前的荷载-挠度曲线呈线性关系,开裂以后曲线斜率急剧减小。试件X、Y两方向的挠度几乎相等,试件发生双向弯曲。随着荷载的增加,挠度曲线逐渐趋于水平,表明火灾后型钢混凝土柱仍具有较大的后期变形能力,延性较好。

2.4 粘结滑移曲线

滑移值为火灾后柱中截面混凝土竖向位移与型钢竖向位移的差值。测量装置如图10所示。

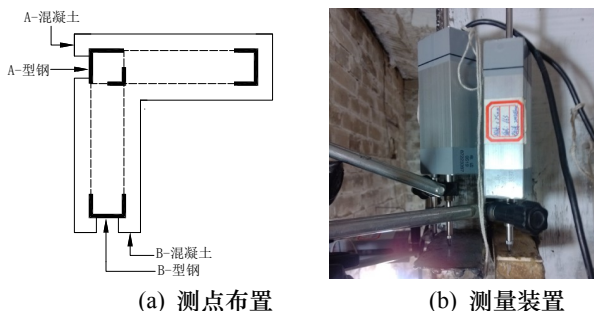


图10 粘结滑移测点布置图

Fig.10 Arrangement of bond-slip measuring point

各试件粘结滑移曲线如图11中所示。

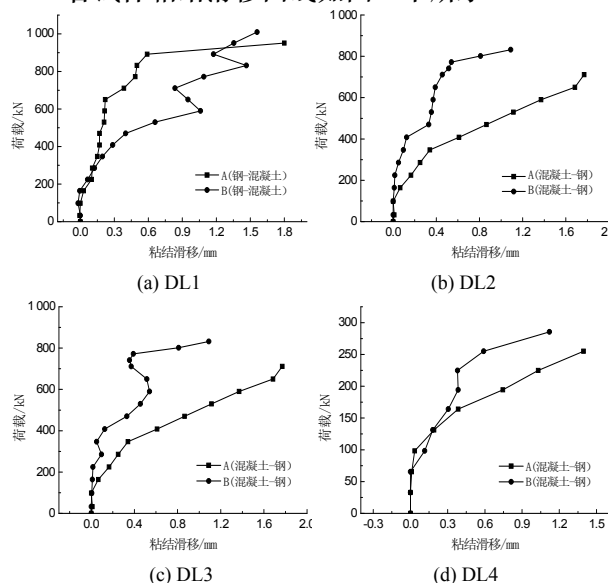


图11 粘结-滑移曲线

Fig.11 Bond-slip curves

由荷载-粘结滑移曲线可以得出粘结滑移分为三个阶段:加载初期,无粘结滑移,混凝土与型钢变形基本一致。随着荷载的增加,混凝土与型钢发生相对位移,此时,粘结力主要由型钢与混凝土之间的摩擦力和机械咬合力组成,在每肢槽钢外侧加设两根短钢筋,作为简易抗剪连接件,与腹杆与槽钢之间的焊接点与抗剪连接件产生类似于带肋钢筋表面突出肋的作用,开始滑移时产生对混凝土的斜向挤压力,使混凝土受弯受剪,当混凝土的应变超过其极限拉应变时,混凝土逐渐被压碎,从而产生新的滑移面,产生更大的相对滑移,所以试件破坏时,产生较大的变形,相对位移也会急速增大。

试件达到峰值荷载后,滑移最大值不超过2 mm。通过温度场曲线可知,测点8温度普遍低于100℃,测点2温度在350℃左右,最高达到450℃,混凝土弹性模量损伤较大,开裂较早,但是由于腹杆的布置,承担了型钢与混凝土之间的横向剪力,有效防止了型钢与混凝土之间的粘结滑移。

2.5 截面应变分布

柱中混凝土应变测点如图12所示,各试件柱中截面应变分布规律如图13所示。

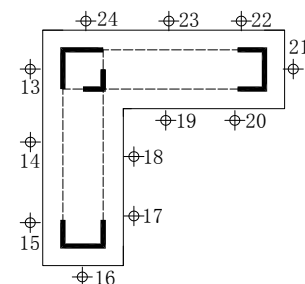


图12 混凝土应变测点布置

Fig.12 Steel strain gauge layout

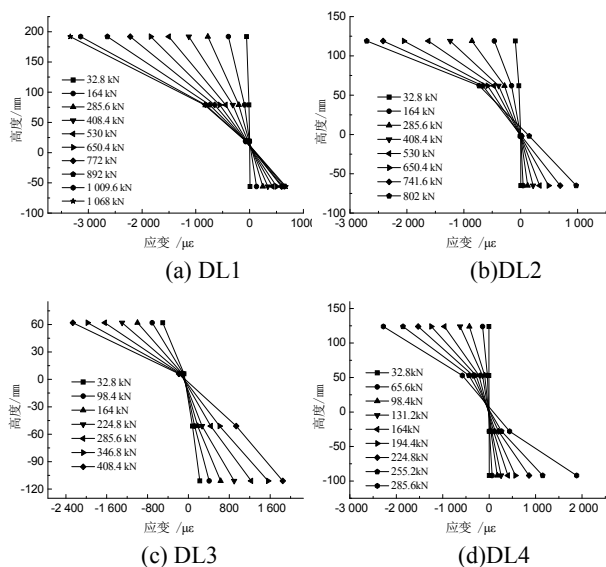


图13 实测截面应变分布

Fig.13 Strain analysis section diagram

由图13可以看出,在加载初期和开裂后截面应变分布基本呈线性变化。其余试件在加载初期截面应变沿截面高度也都基本呈线性变化,受到火灾的影响,混凝土保护层受到损伤,异形柱采用空腹式配钢方式并以200 mm间距在槽钢之间布置腹杆承受型钢与混凝土之间的横向剪力,有效防止型钢与混凝土之间的粘结滑移。通过空腹式配钢形式与合理的腹杆布置能够保证型钢与混凝土的协同工作能力,平均应变平截面假定基本上仍适用于火灾后等肢L形型钢混凝土柱的分析中。

3 结论

(1) 等肢L形型钢混凝土柱与钢筋混凝土构件受压破坏机理相似,且与偏心距有关,当偏心距较小时,试件为受压破坏,随着偏心距的增大,试件发展为受拉破坏,极限承载力也随之降低。

(2) 混凝土与型钢之间的粘结滑移最大值不超过2mm,表明采用桁架式型钢骨架以及腹杆能够承担型钢与混凝土之间横向剪力的作用,提高型钢与混凝土协同工作的能力,使其具有良好的整体工作性能。

(3) 在双向偏心受压的情况下,试件在X、Y轴方向的挠度基本相同,表明在加载时,试件发生双向弯曲。

(4) 平均应变平截面假定基本上仍适用于火灾后等肢L形型钢混凝土柱的分析中。

参考文献 References

- [1] 陈宗平, 张喜德, 苏益声, 等. 一种新型混凝土异形柱-型钢混凝土异形柱的概念体系初探[J]. 四川建筑科学研究, 2006, 32(2): 25-27.
CHEN Zongping, ZHANG Xide, SU Yisheng, et al. A new type of concrete special-shaped columns: study of steel reinforced concrete special-shaped columns concept system[J]. Sichuan Building Science, 2006, 32(2): 25-27.
- [2] CHEN Z P, XUE J Y, ZHAO H T. Research on bearing capacity of steel reinforced concrete special-shaped columns[C]//Fuzhou: Proceeding the 9th International Symposium on Structural Engineering for Young Experts, 2006.
- [3] 陈宗平, 薛建阳, 赵鸿铁, 等. 低周反复荷载作用下型钢混凝土异形柱的抗剪承载力分析[J]. 土木工程学报, 2007, 40(7): 30-36.
CHEN Zongping, XUE Jianyang, ZHAO Hongtie, et al. Analysis on the shear capacity of irregularly-shaped steel reinforced concrete columns under cyclic reversed loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(7): 30-36.
- [4] 杨志新. T形型钢混凝土异形柱抗火性能试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2012.
YANG Zhixin. Experimental investigation on the fire resistance performance of T-special-shaped steel reinforced concrete columns[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2012.
- [5] 高云霏. 十字形型钢混凝土异形柱抗火性能试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2012.
GAO Yunfei. Experimental investigation on the fire resistance performance of cross-special-shaped steel reinforced concrete columns[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2012.
- [6] 单齐云. L形型钢混凝土异形柱抗火性能的试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011.
SHAN Qiyun. Experimental investigation on the fire resistance performance of L-special-shaped steel reinforced concrete columns[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2011.
- [7] 陈锦波. 不等肢L形型钢混凝土异形柱抗火性能试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2013.
CHEN Jinbo. Experimental research on the fire resistance behavior of unequal limbs L-special-shaped steel reinforced concrete columns[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2013.
- [8] 闫照健. L形型钢混凝土异形柱火灾后力学性能的试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2013.
YAN Zhaojian. Experimental investigation on mechanical properties after the fire of L-special-shaped steel reinforced concrete columns[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2013.

(编辑 桂智刚)