

HRB600 级钢筋预制管高强混凝土柱偏压性能试验研究

张建伟, 刘 娇, 李翔宇, 曹万林, 申朝旭
(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 为了解 HRB600 级钢筋预制管高强混凝土柱的偏心受压力学性能, 进行 3 根截面尺寸为 600 mm × 600 mm 的 HRB600 级钢筋预制管高强混凝土柱大偏压试验. 分析预制管混凝土强度、有无钢纤维等设计变化参数对 HRB600 级钢筋预制管高强混凝土柱大偏压性能的影响规律, 并与 HRB600 级钢筋高强混凝土偏心受压柱进行比较. 研究表明, HRB600 级钢筋预制管高强混凝土柱的破坏特征、荷载-挠度曲线、钢筋应变发展规律与 HRB600 级钢筋高强混凝土柱基本一致; 提高预制管混凝土强度可提高柱的承载力; 加入钢纤维不仅可提高柱的承载力, 还可改善延性; 与现浇混凝土柱相比, 光滑结合面的预制管混凝土柱整体工作性能稍差, 前期刚度退化较快, 承载力较低; 对于 HRB600 级钢筋预制管高强混凝土柱, 可采用叠加的方法计算其偏心受压承载力.

关键词: HRB600 级钢筋; 钢纤维; 高强混凝土预制管柱; 偏压性能; 单调荷载试验

中图分类号: TU 375

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2019)11 - 1041 - 09

doi: 10.11936/bjtxb2019040023

Experiment Study of Eccentric Compressive Property of High-strength Concrete Filled Precast High-strength Concrete Tube Column With HRB600 Steel Bars

ZHANG Jianwei, LIU Jiao, LI Xiangyu, CAO Wanlin, SHEN Zhaoxu
(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of China Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To investigate the eccentric compressive properties of high-strength concrete filled precast high-strength concrete tube column with HRB600 steel bars, three columns with cross-section dimensions of 600 mm × 600 mm were tested. The influence of design parameters such as the concrete strength of precast tube, and the content of steel fiber of the eccentric compression performance of high-strength concrete filled precast high-strength concrete tube column with HRB600 steel bars was discussed, comparing with the high-strength concrete column with HRB600 steel bars under eccentric compression. Results show that the failure characteristics, load-deflection curves, steel strain development law of high-strength concrete filled precast high-strength concrete tube columns with HRB600 steel bars are basically consistent with high-strength concrete column with HRB600 steel bars. With the increase of the concrete strength of the precast tube, the bearing capacity of column increases. Adding steel fiber improves the bearing capacity and ductility of the columns. Compared with the cast-in-place concrete columns, the

收稿日期: 2019-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678009); 北京市教育委员会科技重点资助项目(KZ201710005003)

作者简介: 张建伟(1971—), 男, 教授, 主要从事混凝土及钢-混凝土组合结构方面的研究, E-mail: zhangjw@bjut.edu.cn

precast concrete tube columns with smooth surface is slightly poorer in overall performance, the early stiffness is degraded faster, and the bearing capacity is lower. For high-strength concrete filled precast high-strength concrete tube columns with HRB600 steel bars, it is recommended to calculate the eccentric compression bearing capacity by using the method of superposition method.

Key words: HRB600 steel bars; steel fiber; high-strength concrete filled precast high-strength concrete tube column; eccentric compression performance; monotonic load test

预制装配式建筑具有生产效率高、施工方便和节约材料等优点,是建筑工业化的重要组成部分^[1-3]. 预制管混凝土柱作为装配式建筑的重要组成部分,目前已取得一些研究成果:郭纯等^[4]新型预制管混凝土柱轴压试验结果表明,预制管柱承载力与现浇柱基本相同;张大长等^[5-6]外壳预制核心现浇混凝土柱、梁柱节点抗震性能试验结果表明,外壳预制核心现浇混凝土柱的受力性能、节点破坏与现浇混凝土柱基本一致;和超^[7]对预制管混凝土柱进行了轴压性能试验和抗震性能试验及梁柱节点试验,结果表明预制管柱节点及其自身抗震性能具有可靠性;Ding 等^[8]、郭纯等^[9]对新型预制混凝土管柱的轴压性能运用有限元软件进行模拟,结果表明预制混凝土管柱承载力与现浇柱相同甚至更高. 关

于预制管柱的偏压性能和高强钢筋高强混凝土预制管柱的受力性能研究较少. 高强钢筋具有节省钢材、减少造价、优化设计的优点^[10-14],且 HRB600 级钢筋已被列入国家标准 GB/T1499.2—2018《钢筋混凝土用钢第2部分:热轧带肋钢筋》^[15],因此本文开展大尺寸 HRB600 级钢筋预制管高强混凝土柱偏压性能试验研究,探讨其设计方法,为其工程应用提供科学依据.

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

以预制管混凝土强度、有无钢纤维为变化参数,共设计3根 HRB600 级钢筋预制管高强混凝土柱,具体参数见表1.

表1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of specimens

试件编号	预制管混凝土强度	预制管钢纤维体积率/%	内芯混凝土强度	纵筋等级	纵筋配筋率/%	纵筋根数	箍筋等级	箍筋配筋率/%	偏心距/mm
PFC-1	C60	0	C80	HRB600	1.07	18	HRB600	0.85	300
PFC-2	C60-X	1.5	C80	HRB600	1.07	18	HRB600	0.85	300
PFC-3	C80-X	1.5	C80	HRB600	1.07	18	HRB600	0.85	300

为施工方便,箍筋形式为方形和八边形复合箍,纵筋采用对称配筋. 为防止试件端部局部受压破坏,在试件端部设置8mm厚的钢板,并在牛腿部位加强构造. 试件配筋情况见图1(阴影部分为现浇内芯混凝土).

HRB600 级钢筋预制管高强混凝土柱试件首先浇筑预制部分,待混凝土达到一定强度后,将钢模抽掉形成结合面光滑的预制管,在室外自然养护一周,浇筑内芯混凝土,然后在室外自然养护.

1.2 材料性能

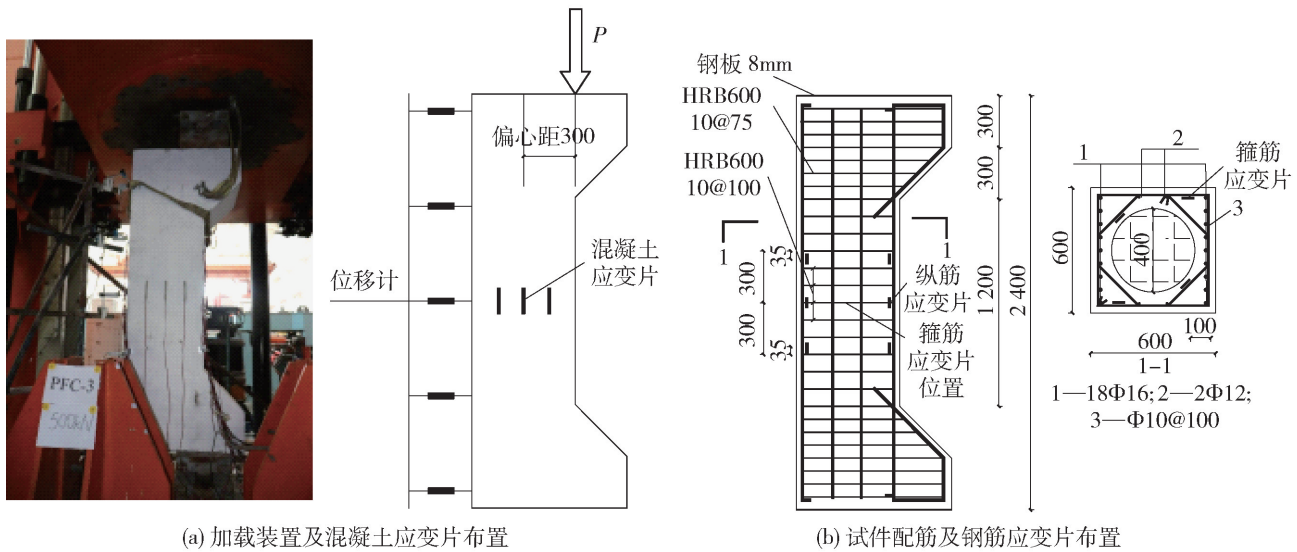
制备高强混凝土所用水泥选用冀东 P. O52.5 水泥;HRB600 级钢筋为承德钢铁集团有限公司生产;钢纤维选用长度为35mm,等效直径为0.55mm,长径比为64的端钩型钢纤维. 浇筑试验柱时,每批

混凝土均制作3组150mm×150mm×150mm的立方体试块和3组150mm×150mm×300mm的棱柱体试块,与试件同条件养护,以便测定混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 、棱柱体抗压强度 f_c 和弹性模量 E_c ,测试结果见表2. HRB600 级钢筋实测力学性能见表3.

1.3 加载制度

试验采用北京工业大学结构试验中心的40000kN多功能电液伺服加载系统进行加载,加载装置及测点布置如图1所示.

试验加载制度为力和位移混合控制. 在正式加载前,进行预加载检查各仪表的工作情况. 试验加载时,每级荷载为计算极限荷载的10%,加载间隔时间为10min,加载至计算极限荷载60%后,每级



(a) 加载装置及混凝土应变片布置

(b) 试件配筋及钢筋应变片布置

图 1 试件配筋、加载装置及测点布置示意图(单位:mm)

Fig. 1 Reinforced details, test setup and measure arrangement of specimens (unit:mm)

表 2 混凝土力学性能

Table 2 Mechanical properties of concrete

混凝土强度等级	钢纤维体积率/%	f_{cu} /MPa	f_c /MPa	E_c /GPa
C60	0.0	62.89	51.19	36.8
C60-X	1.5	69.08	55.23	36.9
C80	0.0	86.57	71.75	38.8
C80-X	1.5	88.18	72.34	38.6

表 3 钢筋的力学性能

Table 3 Mechanical properties of steel bars

钢筋等级	d /mm	f_y /MPa	f_u /MPa	δ /%	E_s /GPa
HRB600	10	615.0	837.0	15.3	212
	16	667.2	855.7	16.1	216

加荷增量调整为计算极限荷载的 5%, 加荷至其 90% 后, 加载由力控改为位移控制, 并加荷直至试件破坏。

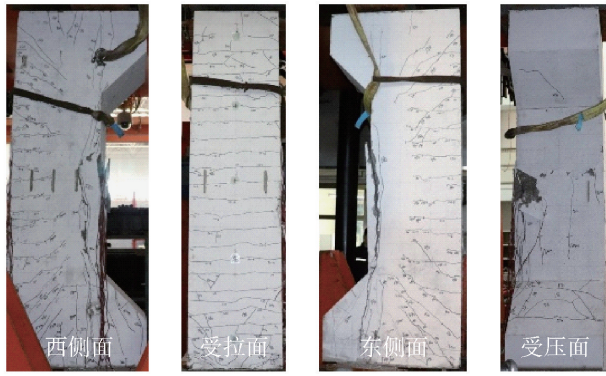
2 试验结果及分析

2.1 破坏特征

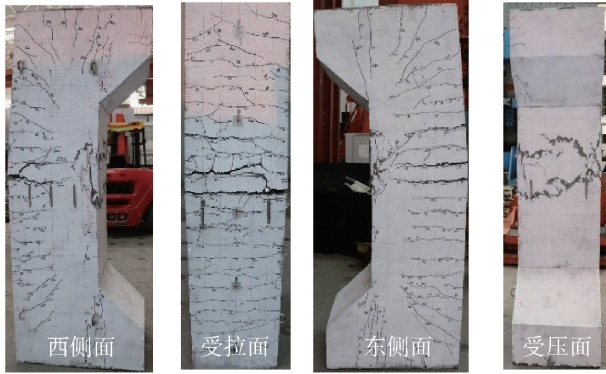
试件卸载状态下破坏形态如图 2 所示。由图 2 可见, HRB600 级钢筋预制管高强混凝土柱的破坏形态与文献 [16] 中的现浇 HRB600 级钢筋高强混凝土柱相同, 均为典型的大偏心受压破坏。

试件加载初期, 荷载较小, 试件未出现裂缝, 挠度、钢筋应变、混凝土应变均随荷载呈线性增长, 试件处于弹性变形阶段; 当荷载达到峰值荷载的 19.1% ~ 22.0% 时, 受拉面出现横向裂缝; 随着荷载

增大, 受拉面不断出现新的横向裂缝, 原有裂缝延伸至东侧面、西侧面, 裂缝宽度不断增大; 当荷载达到峰值荷载的 39.8% ~ 45.5% 时, 受拉面跨中部位横向裂缝宽度增长显著, 与现浇钢筋混凝土柱不同的是, 牛腿上下部出现竖向裂缝且随着荷载的增大不断延伸, 主要是因为预制管混凝土与现浇内芯混凝土之间的结合面为光滑面, 黏结力较低, 在受到较大荷载时, 整体工作性能稍差; 当荷载达到峰值荷载的 45.8% ~ 85.9% 时, 试件两端牛腿部位出现斜裂缝; 当荷载达到峰值荷载的 92.0% 左右时, 受压面中部出现竖向裂缝, 此时受拉面最大裂缝宽度为 0.35 mm; 当荷载达到峰值荷载时, PFC-1 柱受压区混凝土突然压溃成片状, 发出脆响, 承载力陡降, 而 PFC-2、PFC-3 柱承载力下降较为缓慢, 主要是因为 PFC-



(a) PFC-1



(b) PFC-2



(c) PFC-3

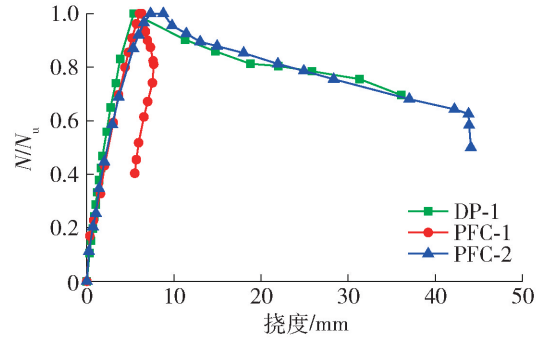
图2 柱的破坏形态

Fig.2 Failure mode of specimens

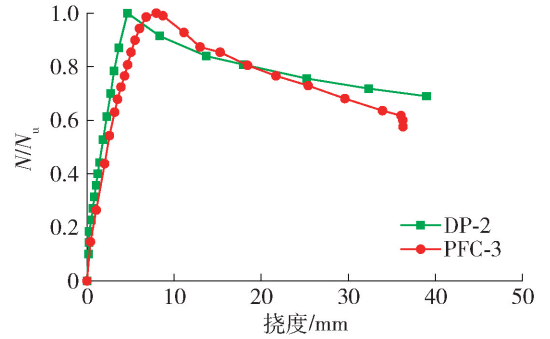
2、PFC-3 柱预制管中掺入钢纤维,对裂缝开展起到了一定的阻裂作用,降低了裂缝向混凝土受压区的延伸速度,从而对高强混凝土的延性起到了一定的改善作用;继续加载,受拉面横向裂缝宽度不断加大,PFC-1 柱受压面不时有混凝土崩出,当试件跨中位移加载到 5.51 mm 时,受压区混凝土压碎,试件破坏,而 PFC-2、PFC-3 柱受压侧混凝土缓慢脱落,并没有混凝土崩出现象,当试件跨中位移分别加载到 44.1、36.3 mm 时,受压区混凝土被压碎,试件破坏。

2.2 荷载-挠度关系曲线

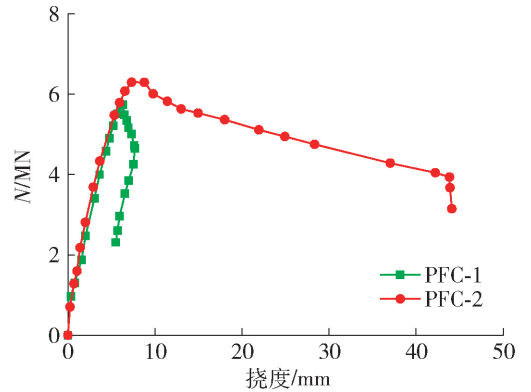
试件实测荷载-跨中挠度曲线见图3。其中DP-



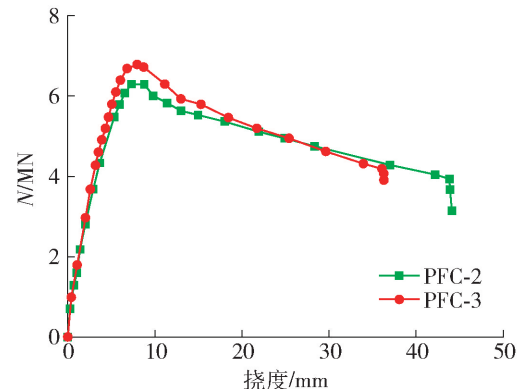
(a) C60现浇柱与预制管柱对比



(b) C80现浇柱与预制管柱对比



(c) 不同钢纤维掺量对比



(d) 不同预制管混凝土强度对比

图3 荷载-跨中挠度曲线

Fig.3 Load-deflection curves of specimens

1、DP-2 为配筋率为 1.27%、配箍率为 1.16%、未掺加钢纤维、其余设计参数均本试验相同的 HRB600 级钢筋高强混凝土现浇柱^[16], 其中 DP-1 轴心抗压强度为 53.0 MPa, DP-2 轴心抗压强度为 69.7 MPa。

由图 3 可见:

1) HRB600 级钢筋钢纤维预制管高强混凝土柱与现浇 HRB600 钢筋高强混凝土柱在偏压荷载下的荷载-挠度曲线表现出相同的发展趋势。荷载较小时, 预制管混凝土柱与现浇高强混凝土柱刚度基本相同; 开裂后, 预制管混凝土柱刚度退化较快, 达到峰值荷载后曲线下降趋势较快, 主要是因为预制管混凝土与现浇内芯混凝土之间的结合面为光滑面, 黏结力较低, 当荷载较大时, 共同工作性能稍差。

2) 预制管中不掺加钢纤维的试件 PFC-1 峰值荷载较小, 达到峰值荷载后曲线出现陡降现象, 挠度迅速增大, 承载力迅速下降, 试件突然破坏, 延性较差, 为脆性破坏; 预制管中掺加钢纤维的试件 PFC-2 峰值荷载较大, 达到峰值荷载后, 曲线下降较为平缓, 延性较好; 主要是因为钢纤维起到了一定的阻裂作用, 从而使承载力下降缓慢, 延性较好, 并且钢纤维混凝土本身表面有些粗糙不平、预制管中部分钢纤维外露对结合面的黏结作用和整体工作性能起到了一定的增强作用, 而试件 PFC-1 结合面之间为完全光滑的面, 界面黏结作用弱导致预制管混凝土与内芯混凝土不能很好地协同受压, 致使预制管混凝土压应力很快达到极限强度, 并突然压溃, 使得构件变形能力较差, 工程中不建议采用 PFC-1 类型的柱。

3) 试件 PFC-2 与试件 PFC-3 的前期刚度基本相同, 试件 PFC-3 刚度退化稍慢、峰值荷载较大、达到峰值后曲线下降趋势稍快, 延性稍差, 主要因为混凝土强度提高从而使承载力提高, 试件 PFC-3 外壳弹性模量稍大, 导致变形稍小, 从而使试件延性稍差。

2.3 特征点位移

各试件以及现浇试件^[16]的特征点位移值如表 4 所示, 表中破坏荷载即荷载下降到峰值荷载的 85%, 破坏位移为破坏荷载对应的位移值。

由表 4 可见:

1) 预制管高强混凝土柱的峰值位移以及破坏位移普遍大于现浇高强钢筋高强混凝土柱, 说明与现浇混凝土柱相比, 预制管混凝土柱前期刚度退化较快。

2) 与试件 PFC-1 相比, 试件 PFC-2 的峰值位移提高 16.3%, 破坏位移提高 148.4%, 峰值荷载提高 9.7%, 说明试件预制管中掺加钢纤维对柱的变形能力提高作用显著。

3) 与试件 PFC-2 相比, 试件 PFC-3 的峰值位移提高 8.4%, 破坏位移降低 13.4%, 峰值荷载提高 7.8%, 说明随着预制管混凝土强度等级的提高, 柱的承载力相应有所提高, 但延性稍有下降。

2.4 纵筋应变分布

各试件的荷载-纵筋应变曲线如图 4 所示, 图例说明中的 Z 代表纵筋, Z 前数字代表试件编号, Z 后数字代表纵筋应变片编号, Z2 指受拉面跨中纵筋应变片, Z5 指受压面跨中纵筋应变片。

由图 4 可见:

1) 预制管混凝土柱受拉面钢筋应变增长速率均大于受压面, 试件 PFC-3 钢筋应变增大速率最慢, 说明随着混凝土强度提高, 柱的纵筋应变发展速度减缓。

2) 试件 PFC-2、PFC-3 的受拉区以及受压区的纵筋峰值应变明显大于 PFC-1; 试件 PFC-1 荷载达到峰值荷载的 95% 时, 受拉纵筋屈服; 柱 PFC-2、PFC-3 荷载达到峰值荷载的 87% 左右时, 受拉纵筋屈服; 达到峰值荷载时, PFC-1 受压区钢筋未屈服, 而 PFC-2、PFC-3 受压区钢筋已屈服, 说明在预制管混凝土中掺加钢纤维, 能够使高强钢筋得到有效利用。

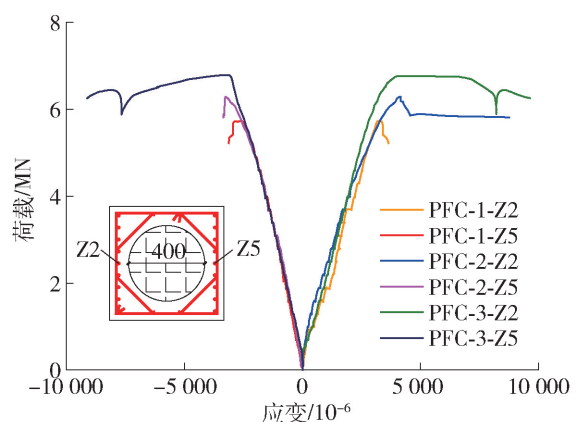


图 4 纵筋应变曲线

Fig. 4 Curves of reinforcement strain

2.5 承载力计算

计算承载力 N 时, 分别计算预制管所承担的荷载 N_0 、内芯混凝土所承担的荷载 N_i , 进行叠加, 如图 5 所示。

$$N = N_0 + N_i \quad (1)$$

表4 荷载和特征点位移

Table 4 Load and displacement of characteristic points for specimens

试件编号	峰值荷载/ kN	峰值位移/ mm	破坏荷载/ kN	破坏位移/ mm
DP-1	6 625.00	5.39	5 631.25	14.75
DP-2	7 010.00	4.66	5 958.50	13.71
PFC-1	5 733.90	6.30	4 873.82	7.46
PFC-2	6 294.60	7.33	5 347.10	18.53
PFC-3	6 785.60	7.95	5 767.76	16.05

为简化计算,将预制管简化为工字型截面,内芯混凝土仍以圆形截面计算,由于圆形内芯与预制管4个角部之间的混凝土截面较小,忽略不计.截面简化及应力、应变分布图如图6、7、8所示.

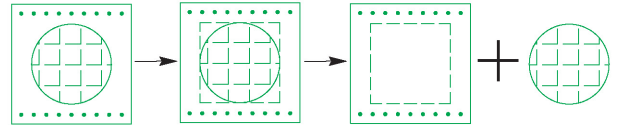


图5 承载力叠加计算示意图

Fig. 5 Carrying capacity superposition calculation diagram

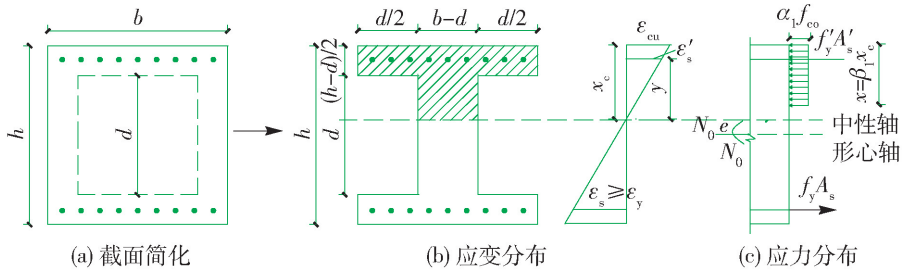


图6 预制管混凝土截面简化及应力、应变分布示意图

Fig. 6 Simplified section and stress and strain distribution diagram of concrete precast tube

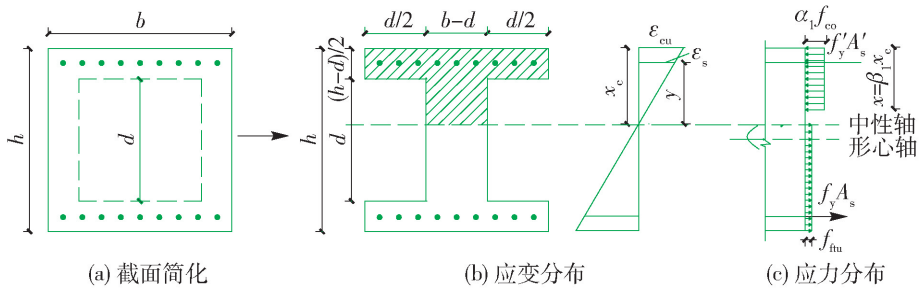


图7 预制管钢纤维混凝土截面简化及应力、应变分布示意图

Fig. 7 Simplified section and stress and strain distribution diagram of steel fiber concrete precast tube

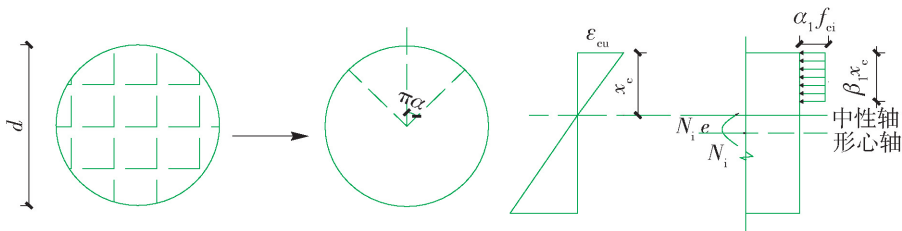


图8 内芯混凝土截面简化及应力、应变分布示意图

Fig. 8 Simplified section and stress and strain distribution diagram of inner core concrete

对于预制管混凝土,未掺加钢纤维时,按照我国现行《混凝土结构设计规范》^[17]规定的方法计算

当 $x < (h - d)/2$ 时:

$$N_0 = \alpha_1 f_{co} b x + f'_y A'_s - f_y A_s \quad (2)$$

$$N_0 e = \alpha_1 f_{co} b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \quad (3)$$

$$e = e_i + \frac{h}{2} - a_s \quad (4)$$

当 $x > (h - d)/2$ 时:

$$N_0 = \alpha_l f_{co} \left[(b-d)x + \frac{(h-d)d}{2} \right] + f'_y A'_s - f_y A_s \quad (5)$$

$$N_0 e = \alpha_l f_{co} \left[(b-d)x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + \frac{(h-d)d}{2} \left(h_0 - \frac{h-d}{4} \right) \right] + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \quad (6)$$

对于掺加钢纤维的预制管混凝土,按照我国《纤维混凝土结构技术规程》^[18]规定的方法计算

$$x_1 = h - \frac{x}{\beta_1} \quad (7)$$

当 $x < (h-d)/2$ 时:

$$N_{f0} = f_{co} b x + f'_y A'_s - f_y A_s - f_{fu} \left[(b-d)x_1 + \frac{(h-d)d}{2} + \left(x_1 - \frac{h+d}{2} \right) d \right] \quad (8)$$

$$N_{f0} e = f_{co} b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) - f_{fu} \left[(b-d)x_1 \left(\frac{x_1}{2} - a_s \right) + \frac{(h-d)d}{2} \left(\frac{h-d}{4} - a_s \right) + \left(x_1 - \frac{h+d}{2} \right) \left(\frac{2x_1 + h+d}{4} - a_s \right) d \right] \quad (9)$$

当 $x > (h-d)/2$ 时:

$$N_{f0} = f_{co} \left[(b-d)x + \frac{(h-d)d}{2} \right] + f'_y A'_s - f_y A_s - f_{fu} \left[(b-d)x_1 + \frac{(h-d)d}{2} \right] \quad (10)$$

$$N_{f0} e = f_{co} \left[(b-d)x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + \frac{(h-d)d}{2} \left(h_0 - \frac{h-d}{4} \right) \right] + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) - f_{fu} \left[(b-d) \left(\frac{x_1}{2} - a_s \right) x_1 + \frac{(h-d)d}{2} \left(\frac{h-d}{4} - a_s \right) \right] \quad (11)$$

对于内芯混凝土,按照我国现行混凝土结构设计规范^[17]规定的方法计算

$$N_i = \alpha \alpha_l f_{ci} A_{ci} \left(1 - \frac{\sin 2\pi\alpha}{2\pi\alpha} \right) \quad (12)$$

$$\eta N_i e_i = \frac{2}{3} \alpha_l f_{ci} A_{ci} r \frac{\sin^2 \pi\alpha}{\pi\alpha} \quad (13)$$

$$\eta = 1 + \frac{1}{e_i} \left(0.003 \frac{0.0033 + \frac{f_y}{E_s}}{h_0} \right) \zeta_1 \zeta_2 \frac{l_0^2}{10} \quad (14)$$

式中: h 、 b 、 d 、 $\pi\alpha$ 如图 7、8 所示; x 为受压区等效应力图高度;图 6、7、8 中 α_1 、 β_1 为混凝土受压区等效矩形应力图系数; f_{co} 、 f_{ci} 分别为预制管混凝土、内芯混凝土轴心抗压强度; f_y 、 f'_y 分别为受拉钢筋、受压钢

筋屈服强度; A_s 、 A'_s 分别为受拉区、受压区纵向钢筋配筋面积; a_s 、 a'_s 分别为受拉区纵向钢筋合力点至受拉边缘的距离、受压区纵向钢筋合力点至受压边缘的距离; e_i 为初始偏心距; e 为轴向压力作用点至受拉区纵向钢筋合力点的距离; f_{fu} 为受拉区钢纤维混凝土等效矩形应力图的抗拉强度; x_1 为受拉区等效应力图高度; α 为对应于受压区混凝土截面面积的圆心角(rad)与 2π 的比值; A_{ci} 为圆形截面面积。

承载力试验值与计算值的比较见表 5,表中 N_m 为实测峰值荷载。

表 5 承载力试验值与计算值比较

Table 5 Comparison of calculated and measured values of bearing capacity

试件 编号	N_m /kN	N_u /kN	N_x /kN	N_m/N_u	N_m/N_x
PFC-1	5 733.90	4 822.07		1.19	
PFC-2	6 294.60	5 202.79	5 493.96	1.21	1.15
PFC-3	6 785.60	5 932.51	6 535.23	1.14	1.04

表中: $N_u = N_0 + N_i$; $N_x = N_{f0} + N_i$ 。

由表 5 可见, N_m/N_u 比值均值为 1.18,变异系数为 0.043; N_m/N_x 比值均值为 1.10,变异系数为 0.071。说明忽略圆形内芯与预制管 4 个角部之间的混凝土计算所得的承载力与承载力试验值比较接近,通过叠加计算的方法能够精确预估 HRB600 级钢筋预制管高强混凝土柱在偏压荷载下的承载力。可见根据《纤维混凝土结构技术规程》^[18]和现行《混凝土结构设计规范》^[17]分别计算预制管混凝土承载力、内芯混凝土承载力,然后进行叠加计算柱的承载力,精度较好。

2.6 裂缝计算

根据准永久组合计算的试验柱正常使用极限弯矩为 $0.66M_u$ 。

我国现行《混凝土结构设计规范》^[17]对平均裂缝间距 l_{mc} 和最大裂缝宽度 w_c^G 的规定为

$$l_{mc} = \beta \left(1.9C_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) \quad (15)$$

$$w_c^G = \tau_s \alpha_c \psi \frac{\sigma_s}{E_s} \left(1.9C_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right) \quad (16)$$

我国《纤维混凝土结构技术规程》^[11]对最大裂缝宽度 w_c^X 的规定为

$$w_c^X = w_c^G (1 - \beta_{cw} \lambda_f) \quad (17)$$

式中: β 为受力形式系数; C_s 为最外层纵向受拉钢筋

外边缘至受拉区底边的距离; d_{eq} 为受拉区纵向钢筋等效直径; ρ_{te} 为按有效受拉区混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率; τ_s 为混凝土短期裂缝宽度扩大系数; α_c 为混凝土应力对裂缝宽度的影响系数; ψ 为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数; σ_s 为按

照在准永久组合计算的钢筋混凝土构件纵向受拉钢筋应力; β_{cw} 为钢纤维对最大裂缝宽度影响系数; λ_f 为钢纤维含量特征值。

裂缝实测值与计算值如表6示,表中 l_m 为实测裂缝间距, w 为实测裂缝宽度。

表6 裂缝计算

Table 6 Calculation of cracks

试件编号	l_m	l_{mc}	w	w_c^G	w_c^X	w_c^G/w	w_c^X/w
PFC-1	102.5	203.3	0.32	0.67		2.10	
PFC-2	96.6	203.3	0.28	0.75	0.50	2.69	1.79
PFC-3	97.2	203.3	0.35	0.81	0.54	2.31	1.54

由表6可见:

1) 加入钢纤维可减小裂缝平均间距,减小裂缝宽度,对裂缝开展起到一定的控制作用。

2) w_c^G/w 、 w_c^X/w 比值均值分别为 2.36、1.66,变异系数分别为 0.074、0.019。因此,HRB600 级钢筋钢纤维预制管高强混凝土柱的裂缝宽度可按《纤维混凝土结构技术规程》^[18]方法计算,计算值与实测值较接近,按《混凝土结构设计规范》^[17]对其裂缝宽度计算偏于保守。

3 结论

1) HRB600 级钢筋预制管高强混凝土柱破坏形态与现浇 HRB600 级钢筋高强混凝土柱相同,均为典型的大偏压破坏。

2) 预制管中掺加钢纤维的混凝土柱延性较好,能满足工程需求;但与同条件的现浇混凝土柱相比,前期刚度退化较快,达到峰值荷载后曲线下降趋势较快,建议工程应用中应加强预制管与现浇内芯混凝土结合面的连接,提高其整体工作性能。

3) 预制管中加入钢纤维,可提高试件承载力,改善试件延性;预制管混凝土强度提高,试件承载力相应提高,峰值前刚度退化稍有减慢,延性略有降低。

4) 对于在预制管中掺加钢纤维的预制管混凝土柱,可根据现行《纤维混凝土结构技术规程》和《混凝土结构设计规范》分别计算预制管混凝土承载力和内芯混凝土承载力,然后按叠加方法计算柱的承载力。

5) 对于在预制管中掺加钢纤维的预制管混凝土柱,可采用现行《纤维混凝土结构技术规程》计算其裂缝宽度。

参考文献:

- [1] 张锡治,章少华,牛四欣. 装配式建筑中预制混凝土管柱的研究与展望[J]. 建筑结构, 2018, 48(7): 79-86. ZHANG X Z, ZHANG S H, NIU S X. Research and prospect of precast concrete tubular column in prefabricated buildings[J]. Journal of Building Structures, 2018, 48(7): 79-86. (in Chinese)
- [2] 刘学春,张爱林,黄欢,等. 模块化装配式斜支撑节点钢框架试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(6): 880-889. LIU X C, ZHANG A L, HUANG H, et al. Model test of modularized prefabricated steel frame with lean-brace joint [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(6): 880-889. (in Chinese)
- [3] 王俊,赵基达,胡宗羽. 我国建筑工业化发展现状与思考[J]. 土木工程学报, 2016, 49(5): 1-8. WANG J, ZHAO J D, HU Z Y. Review and thinking on development of building industrialization in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(5): 1-8. (in Chinese)
- [4] 郭纯,凌国飞. 一种新型预制管混凝土柱的轴压性能研究[J]. 工业建筑, 2008, 38(1): 88-91. GUO C, LING G F. Experiment on a new axially loaded column of concrete filled prefabricated tubular members [J]. Industrial Construction, 2008, 38(1): 88-91. (in Chinese)
- [5] 张大长,支正东,卢中强,等. 外壳预制核心现浇装配式 RC 柱抗震性能的试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(8): 131-137. ZHANG D C, ZHI Z D, LU Z Q, et al. Experimental studies on aseismic performance of assembly rc columns with precast external shell and cast-in-place core concrete [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(8): 131-137. (in Chinese)

- [6] 张大长, 郭雁, 李布辉. 外壳预制核心现浇装配式 T 型钢筋混凝土节点抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 156-162.
ZHANG D C, GUO Y, LI B H, et al. Experimental study on seismic performance of T-Shape fabricated concrete joints with precast external shell and cast-in-place core concrete[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 156-162. (in Chinese)
- [7] 和超. 预制管混凝土柱受压性能及节点试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
HE C. Experimental behavior of concrete-filled prefabricated concrete tube column and column joint[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese)
- [8] DING H Y, HE C, ZHANG P Y. Discuss on precast concrete tube column [J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 204/205/206/207/208: 833-837.
- [9] 郭纯, 顾彦, 凌国飞. 一种新型预制管混凝土柱的非线性有限元分析[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2007, 19(1): 92-95.
GUO C, GU Y, LING G F. Nonlinear finite element analysis of a new precast pipe concrete column [J]. Journal of Hunan University of Arts and Science (Natural Science Edition), 2007, 19(1): 92-95. (in Chinese)
- [10] 张建伟, 姜立伟, 乔崎云, 等. HRB600 级钢筋高强混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(6): 6-12.
ZHANG J W, JIANG L W, QIAO Q Y, et al. Experimental study of flexural performance of high-strength concrete beams with HRB600 steel bars [J]. Industrial Construction, 2017, 47(6): 6-12. (in Chinese)
- [11] WANG D H, JU Y Z, ZHENG W Z. Strength of reactive powder concrete beam-column joints reinforced with high-strength (HRB600) bars under seismic loading [J]. Strength of Materials, 2017, 49(1): 139-151.
- [12] 张建伟, 李晨, 冯曹杰, 等. HRB600 级钢筋与高强混凝土的黏结性能试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2019, 45(6): 566-574.
ZHANG J W, LI C, FENG C J, et al. Experimental study on bond behavior between HRB600 steel bars and high strength concrete [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2019, 45(6): 566-574. (in Chinese)
- [13] 张建伟, 李晨, 李翔宇, 等. HRB600 级钢筋高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(8): 12-17.
ZHANG J W, LI C, LI X Y, et al. Experimental study on seismic behavior of high-strength concrete columns with HRB600 steel bars [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(8): 12-17. (in Chinese)
- [14] 王静, 王命平, 耿树江, 等. 高强钢筋混凝土偏压柱的裂缝宽度试验研究[J]. 青岛理工大学学报, 2011, 32(5): 17-22.
WANG J, WANG M P, GENG S J, et al. The crack width test of reinforced concrete on bias component [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2011, 32(5): 17-22. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢筋混凝土用钢第 2 部分: 热轧带肋钢筋: GB/T1499.2—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [16] 张建伟, 夏冬瑞, 乔崎云, 等. HRB600 级钢筋高强混凝土柱偏心受压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(4): 74-80.
ZHANG J W, XIA D R, QIAO Q Y, et al. Experimental study on eccentric compression performance of high-strength concrete columns with HRB600 steel bars [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(4): 74-80. (in Chinese)
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB-50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 纤维混凝土结构技术规程: CECS38: 2004 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

(责任编辑 郑筱梅)