

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201903038

型钢混凝土受拉柱恢复力计算模型试验研究*

张 鹏, 孙仁中, 邓 宇, 李真真

(广西科技大学土木建筑工程学院, 广西 柳州 545006)

摘要:为研究型钢混凝土构件在偏心受拉作用下的抗震性能,以剪跨比、轴拉比以及偏心距为主要设计参数,对7根型钢混凝土受拉柱进行了低周反复试验中观察了试件的受力过程和破坏形态,得到滞回曲线以及骨架曲线等。通过理论推导和回归分析,提出了各特征点的计算公式。在此基础上,结合受拉柱的滞回特性,给出卸载刚度计算公式以及相应的滞回规则,并建立了型钢混凝土受拉柱四折线恢复力模型。结果表明:通过试验骨架曲线和计算骨架曲线的对比,二者结果吻合较好,能够较为全面地反映构件的受力性能,建议的四折线恢复力模型较为合理,可用于型钢混凝土受拉柱抗震性能的评估。

关键词: 型钢混凝土; 骨架曲线; 恢复力模型

中图分类号: TU398.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0549-09

Resilience Models of Steel-reinforced Concrete Tension Columns

ZHANG Peng, SUN Renzhong, DENG Yu, LI Zhenzhen

(Guangxi University of Science and Technology School of Civil Engineering and Architecture, Liuzhou 545006, China)

Abstract: To study the seismic performance of steel-reinforced concrete tension columns, low reversed cyclic loading tests were carried out on 7 specimens. The shear-span ratio, axial load ratio, and eccentricity were set as design parameters. The failure process and pattern were observed during the tests. The load-displacement curve and the skeleton curves were obtained. The equations to calculate these characteristic points were proposed through theoretical derivation and data regression analyses. On this basis, combined with the hysteretic characteristics of tension columns, the calculation formula of the unloading stiffness and the corresponding hysteretic rules are given, and the four-fold restoring force model of the steel-reinforced concrete tension column is established. The results show that, through the comparison between experimental and calculated results of skeleton curves, the two results are in good agreement, which can comprehensively reflect the mechanical performance of members. The proposed four-fold restoring force model is reasonable and can be used to evaluate the seismic performance of steel-reinforced concrete tension columns.

Keywords: steel-reinforced concrete; skeleton curves; restoring force model

* 收稿日期:2019-03-19;修回日期:2019-08-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51768008)、中国博士后科学基金项目(2017M613273XB)、广西自然科学基金项目(2015GXNSFAA139263)、柳州市科学研究与技术开发计划(2017BC40202)资助

作者简介:张鹏(1967—),男,教授,博导,博士。主要从事结构工程方面的研究。E-mail:gxutzp@126.com

引言

恢复力是指在外荷载作用下结构或构件产生变形,在除去外荷载后其恢复原来受力状态的能力,而恢复力与变形之间的数学模型称之为恢复力模型^[1-3]。从目前国内外研究现状来看,恢复力模型的研究主要集中在受压构件的研究,对于偏心受拉作用下型钢混凝土柱的恢复力模型,国内外文献中很少涉及。

在实际工程中,受拉构件不可避免,比如在地震作用下,型钢混凝土桁架转换层斜腹杆即为偏拉构件等。然而,恢复力模型作为结构弹塑性时程分析的基础,其合理的选取对认清其破坏过程显得尤为必要。因此,型钢混凝土受拉柱的动力灾变机制是一项亟待解决的基础性问题。

对于国外恢复力模型的研究而言,文献[1]对国外早期研究做了详细综述。而最近几年,Z.Jun等^[4]通过对5个以混凝土强度为试验参数的钢纤维混凝土剪力墙的低周反复试验,研究了该类墙体的三折线模型;Y.Fang等^[5]以混凝土受酸雨的影响程度以及钢材屈服强度为研究参数,设计并制作了12根受酸雨腐蚀程度不同的钢管混凝土柱,通过低周反复试验提出了其恢复力模型。

对于国内而言,张向冈等^[6-8]主要集中于研究再生混凝土受压柱、墙体以及框架的恢复力模型。张猛等^[9]分别以轴压比以及钢筋锈蚀率为试验研究参数,对试件进行了低周反复试验,通过试验数据拟合以及理论推导的方法提出了锈蚀钢筋混凝土框架柱的三折线恢复力模型。

在地震作用下,受拉构件比起受压构件更容易发生破坏,但国内外对其研究较少^[10-17]。因此,本文设计了7根型钢混凝土受拉柱,分别以剪跨比、轴拉比和偏心距为研究参数进行低周反复试验,以试验数据拟合以及理论推导的方式提出其四折线恢复力模型,为其弹塑性地震反应分析提供参考。

1 试验概况

1.1 尺寸设计

试验共设计制作了7个型钢混凝土受拉柱试件,以剪跨比、轴拉比、偏心距为设计参数,以公式 $h/2 - a_s = e_0$ 来判定试件偏心(h 为截面高度, a_s 为

纵向受拉钢筋与型钢翼缘的合力点距混凝土受拉边缘的距离, e_0 为轴向力对截面重心的偏心距),具体设计参数见表1。试验采用10号热轧工字钢,钢材型号为Q235,翼缘外侧单排布置直径为10 mm的栓钉,间距为100 mm;试件具体截面尺寸及配筋如图1所示。轴心受拉试件的加载端钢板尺寸为150 mm×200 mm×20 mm,偏心受拉试件的加载端头钢板尺寸为150 mm×280 mm×20 mm。钢筋及混凝土受力性能见表2、表3。

表1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of the specimens

编号	计算高度 l_0 / mm	截面尺寸 $(b \times h)$ / mm	剪跨比 λ	轴拉比 n	偏心距 e_0 / mm	受拉类型
SCRTM1	360	150×200	1.80	0	0	轴拉构件
SCRTM2	360	150×200	1.80	0.2	0	轴拉构件
SCRTM3	360	150×200	1.80	0.6	0	轴拉构件
SCRTM4	360	150×200	1.80	0.2	20	偏拉构件
SCRTM5	360	150×200	1.80	0.2	80	偏拉构件
SCRTM6	470	150×200	2.35	0.2	0	轴拉构件
SCRTM7	640	150×200	3.20	0.2	0	轴拉构件

注: l_0 为水平加载点到柱根部距离, $n = N_d / (f_t A_c + f_a A_a)$, N_d 为轴向拉力设计值, f_t 为混凝土轴心抗拉强度, A_c 为混凝土截面面积, f_a 为型钢屈服强度设计值, A_a 为型钢截面面积

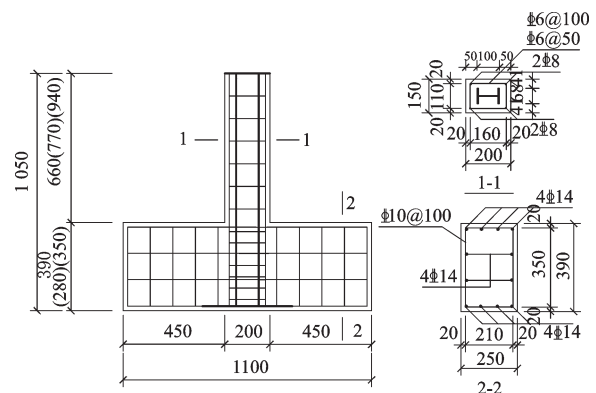


图1 试件几何尺寸及配筋示意

Fig.1 Geometric size and layout of reinforcing bars of the specimens

表2 混凝土力学性能指标

Table 2 Mechanical properties of concrete

单位:MPa

混凝土型号	抗压强度 f_c	抗拉强度 f_t	弹性模量 E_c
C40	41.7	3.58	3.52×10^4

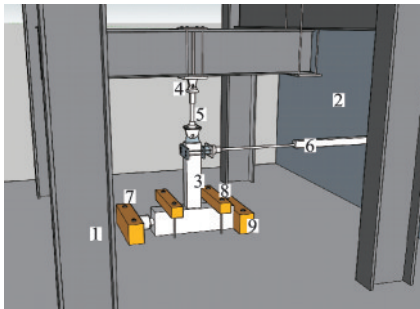
表3 钢材力学性能指标

Table 3 Mechanical properties of steel

钢筋直径/mm	弹性模量 E_s /MPa	屈服强度 f_y /MPa	极限强度 f_u /MPa	伸长率/%
6	2×10^5	407	577	32.10
8	2×10^5	406	575	32.14
10	2×10^5	409	578	31.65
14	2×10^5	415	592	32.00

1.2 加载方式

试验采用2个MTS作动器施加作用力。竖向MTS作动器根据制作的上下两块钢板固定在反力架上。钢板采用Q345级钢材,尺寸为800 mm×800 mm×50 mm,通过4根直径为36 mm的8.8级螺栓连接。试验前,试件顶部加载端与竖向MTS作动器连接,以实现竖向拉力的施加。水平MTS作动器与柱侧边加载点对齐,以实现水平反复力的施加。试验装置如图2所示。



1. 反力架;2. 反力墙;3. 型钢混凝土受拉柱;4. 固定竖向MTS的钢板;5. 竖向加载MTS;6. 横向加载MTS;7. 横向千斤顶;8. 底部压梁;9. 底部挡板

图2 试验加载装置

Fig.2 Test set-up

试验选用悬臂柱式加载装置。先通过竖向MTS作动器在柱顶施加恒定竖向拉力。水平加载采用荷载与位移联合控制的方式,试件屈服前,采用荷载控制,以5 kN为一级,每级循环1次进行反复加载。试验构件屈服后,以屈服位移大小为级差进行加载,每级位移循环3次,直到荷载下降到最大承载力的85%时停止试验。

1.3 试验数据修正

根据图3所示,在低周反复荷载过程中,试件顶端产生水平位移,对试验数据需要一定的修正。试件受力后试件轴线与力轴线之间的几何关系得:

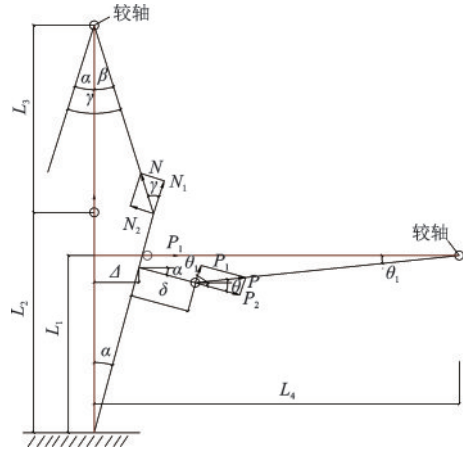


图3 构件变形下受力示意

Fig.3 Schematic diagram of the forces on the deformed specimens

$$\sin\alpha = \Delta/L_1 \quad (1)$$

$$\sin\beta = \Delta L_2/L_1 L_3 \quad (2)$$

$$\gamma = \alpha + \beta \quad (3)$$

$$\tan\theta_1 = \frac{[L_1(1 - \cos\alpha) + \delta \sin\alpha]}{(L_4 - \Delta - \delta \cos\alpha)} \quad (4)$$

$$\theta = \alpha + \theta_1 \quad (5)$$

式中, α 为轴线与竖直方向存在的转角; β 为竖向拉力作用方向与竖直方向的偏角; L_1 为水平力作用点到试件底部距离; L_2 为竖向力作用点到试件底部距离; L_3 为竖向力作用点到竖向作动器较轴的距离; L_4 为试件轴线到水平作动器较轴的距离; N 为试件顶面的轴拉力; N_1 为平行于试件方向的分力; N_2 为垂直于试件方向的分力。

根据不同加载阶段得出试件实际受力情况:

$$N' = N_1 + P_1 \quad (6)$$

$$M = P_2 L_2 - P_1 \delta - N_2 L_2 \quad (7)$$

$$P' = (P_2 L_1 - P_1 \delta - N_2 L_2)/L_1 \quad (8)$$

式中, N' 为实际竖向拉力; M 为实际试件顶端弯矩; P' 为实际上端水平拉力; δ 为水平力作用点到试件轴线的距离。

2 主要试验结果分析

2.1 试件破坏特征及破坏过程

7组试件的破坏形态如图4所示。

对于剪跨比不同的试件 SCRTM2、SCRTM6、SCRTM7破坏形态均为拉弯破坏,加载初期均为弹性阶段,无残余应变产生。当试件处于弹塑性阶段

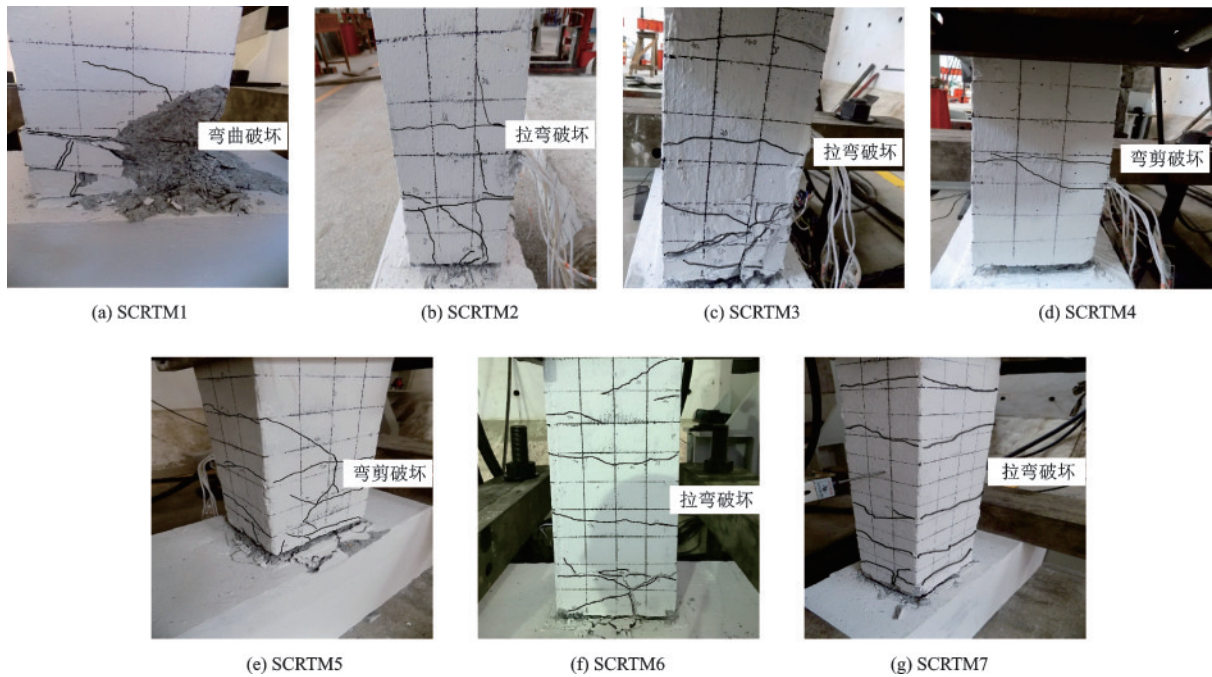


图4 试件破坏形态

Fig.4 Failure patterns of the specimens

时,试件正面产生大量横向贯通裂缝,左侧与右侧横向裂缝产生数量以及高度大致相等,随着剪跨比的增加,正面横向裂缝逐渐增多。当荷载达到峰值荷载的81%~87%时,试件屈服,正面产生斜裂缝且随剪跨比的增大,斜裂缝逐渐增多。峰值荷载过后,承载力逐渐下降,剪跨比越大的试件承载力下降越缓慢,直到试件破坏停止试验。

对于轴拉比不同的试件,试件SCR TM1破坏形态为弯曲破坏,试件SCR TM2与SCR TM3破坏形态为拉弯破坏。弹性阶段试件无明显现象产生。当试件处于弹塑性阶段时,试件SCR TM1正面产生大量斜向裂缝且几乎无横向裂缝产生,试件SCR TM2与SCR TM3正面产生横向裂缝且几乎无斜向裂缝产生,随轴拉比的增大正面横向裂缝数量逐渐增多。当试件处于弹塑性阶段时,各试件两侧均产生数量以及高度大致相等的横向裂缝,随着剪跨比的增加,横向裂缝逐渐增多。当荷载达到峰值荷载的67%~83%时,试件屈服,裂缝宽度逐渐增大。峰值荷载过后,轴拉比越大的试件承载力下降越快,直到试件破坏停止试验。

对于偏心距不同的试件SCR TM4与SCR TM5破坏形态为弯剪破坏。弹性阶段试件无明显现象产生。当试件处于弹塑性阶段时,试件正面横向裂缝较少,斜裂缝较多且斜裂缝由偏拉侧向另一侧斜向延伸。当荷载达到峰值荷载的90%左右时,试件

屈服,试件偏心侧横向裂缝明显多于另一侧且两侧横向裂缝出现高度不同。随着偏心距的增大,正面斜向裂缝越多且两侧横向裂缝数量相差越大。峰值荷载过后,偏心距较大的试件承载力下降越快,直到试件破坏停止试验。

总的来说,试件开裂前,试件形变均较小。试件开裂后,轴拉试件两侧横向裂缝成对出现,偏拉试件偏心侧裂缝较多,而另一侧较少。随着荷载增大,由于型钢翼缘的约束作用,部分横向裂缝斜向发展。随着水平反复荷载逐渐增加,裂缝不断增大,进一步斜向延伸,直到水平荷载开始出现迅速下降,试件发生破坏。

2.2 滞回曲线特征

试验所得滞回曲线如图5所示。

试验加载初期,试件顶端位移变化小,曲线重叠成一条直线,其包围面积小,无残余应变产生,为弹性工作阶段。

随着荷载增加,顶部位移逐渐加大,滞回曲线出现一定曲率,滞回环所包围面积逐渐增大,残余变形产生,刚度有一定的退化趋势,构件进入弹塑性工作阶段。

屈服阶段之后,滞回环包围面积不断扩大,位移级数增加,这种趋势愈加明显。极限荷载值后,构件顶端位移变化较大,试件内部损伤不断叠

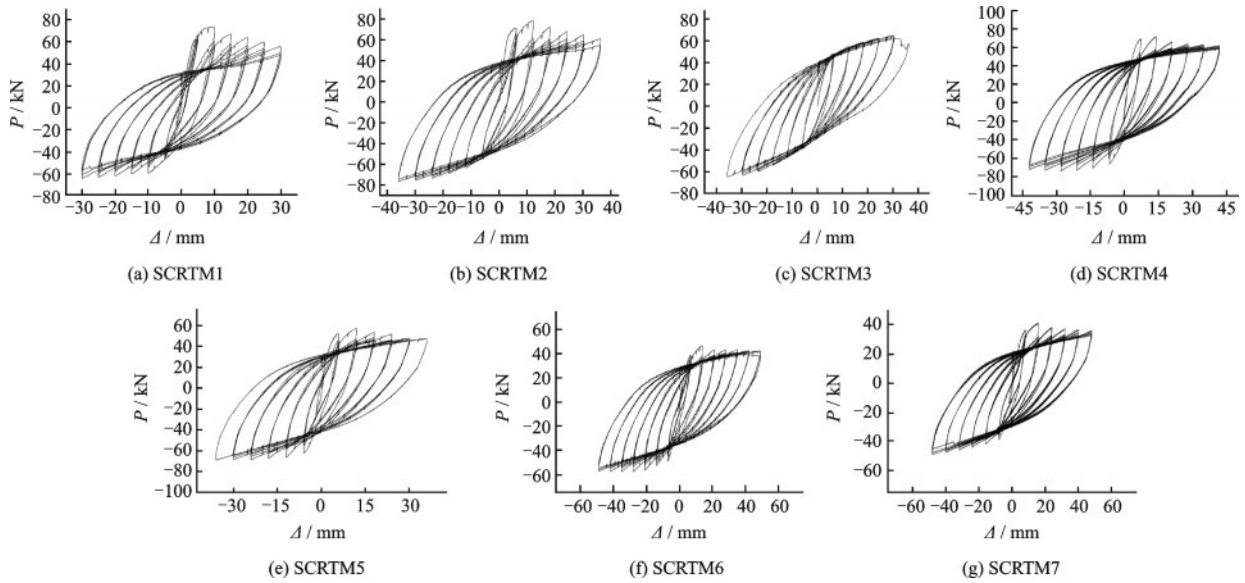


图5 试件滞回特性曲线

Fig.5 Hysteretic characteristic curves of the specimens

加积累,致使试件抗震性能减弱。

试件的滞回曲线随位移级数的增加,各位移级数中荷载值减幅降低,并随试件轴拉比的增大,这种趋势尤为明显,表明竖向拉力的存在对试件的强度衰减和刚度退化产生一定的影响。

总的来说,通过对各试件滞回曲线形状的对

比,滞回曲线均呈梭形形状,表明型钢混凝土受拉试件具有良好的抗震性能。

2.3 刚度曲线特征

试验骨架曲线如图6所示,主要试验结果见表4。

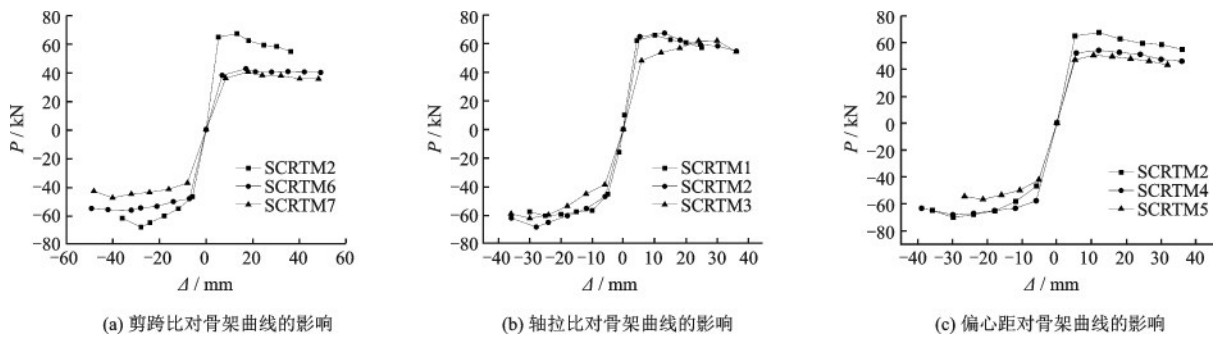


图6 试件的骨架曲线

Fig.6 Skeleton curves of the specimens

骨架曲线大致具有相同的发展形态,可分为弹性阶段、弹塑性阶段、强化阶段及破坏阶段。对比所有试验试件,试件在循环加载后期,承载能力缓慢下降,骨架曲线发展态势平稳,表明型钢混凝土受拉柱具有良好的抗震性能。

图6所示,随剪跨比的增大,试件抗震性能逐渐增加。随轴拉比以及偏心距的增加,试件抗震性能逐渐减弱。因此,实际工程中应注意轴拉比以及偏心距对试件抗震性能的影响。

总的来说,由于试件受拉混凝土开裂较早,在

开裂点后骨架曲线出现拐点,并呈现出斜向上发展趋势,到达破坏阶段后承载力开始下降,骨架曲线呈下降态势,其刚度也不断减小。

3 型钢混凝土受拉柱的恢复力模型

3.1 骨架曲线特征点的确定

型钢混凝土受拉柱骨架曲线采用四折线,如图7所示,其每段分别表示弹性阶段、屈服阶段、强化

表 4 主要试验结果

Table 4 Main experimental results

编号	加载方向	开裂点		屈服点		峰值点		极限点	
		开裂荷载/ kN	开裂位移/ mm	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
SCRTM1	正向	12.00	0.50	62.00	4.51	66.20	9.89	52.46	29.70
	反向	-15.00	-1.30	-44.00	-4.70	-61.50	-24.10	-56.61	-29.21
SCRTM2	正向	—	—	64.76	5.46	67.24	12.18	54.62	35.76
	反向	—	—	-47.04	-5.83	-68.38	-29.83	-62.08	-35.85
SCRTM3	正向	—	—	48.00	5.84	62.00	30.00	54.21	36.10
	反向	—	—	-34.75	-5.92	-62.25	-29.94	-58.99	-35.92
SCRTM4	正向	—	—	68.02	6.98	70.35	13.92	61.21	41.98
	反向	—	—	-62.28	-6.84	-72.95	-28.05	-71.84	-42.06
SCRTM5	正向	—	—	52.01	5.60	54.00	12.06	45.85	36.04
	反向	—	—	-58.00	-5.98	-68.35	-29.99	-63.54	-35.99
SCRTM6	正向	—	—	38.00	7.40	42.00	14.02	40.08	47.02
	反向	—	—	-48.39	-7.30	-56.44	-35.02	-55.30	-47.03
SCRTM7	正向	—	—	35.99	7.37	40.46	15.99	35.59	48.03
	反向	—	—	-37.31	-7.41	-47.72	-40.00	-43.11	-48.02

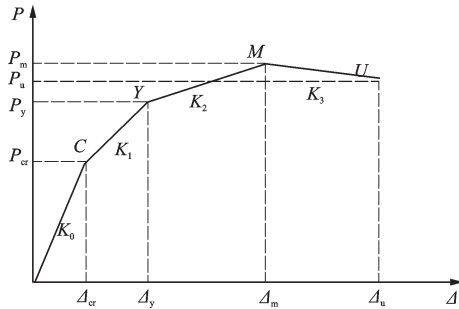


图 7 骨架曲线模型

Fig.7 Model of the skeleton curve

注: C 为开裂点, Y 为屈服点, M 为峰值点, U 为破坏点

阶段以及破坏阶段。

弹性刚度 K_0 。此阶段为弹性阶段, 试件近似为等截面悬臂杆件, 根据弹性理论中悬臂杆抗刚度可知, 弹性刚度 K_0 可表示为:

$$K_0 = \frac{3EI}{L^3} \quad (9)$$

式中, L 为试件计算长度; EI 为截面抗弯刚度, 按《组合结构设计规范》^[18] 中 4.3.4 可知型钢混凝土截面抗弯刚度由下式进行计算:

$$EI = E_c I_c + E_a I_a \quad (10)$$

式中, $E_c I_c$ 为钢筋混凝土部分截面抗弯刚度; $E_a I_a$ 为型钢部分截面抗弯刚度。

开裂荷载 P_{cr} 和开裂位移 Δ_{cr} 。根据受力平衡可知, 柱底部弯矩为:

$$M = VL \quad (11)$$

式中, M 为柱底最大弯矩; V 为水平荷载。

柱底拉应力为:

$$\sigma_o = \frac{M}{W} + \frac{N}{A} \quad (12)$$

式中, W 为换算截面抵抗距; N 为竖向荷载; A 为换算截面面积。

当拉应力达到混凝土抗拉强度 f_{tk} 时, 底面出现水平裂缝即:

$$P_{cr} = \frac{W}{L} (f_{tk} - \frac{N}{A_0}) \quad (13)$$

$$\Delta_{cr} = \frac{P_{cr}}{K_0} \quad (14)$$

屈服前刚度 K_1 。根据试验数据拟合得:

$$K_1 = 0.81K_0^{0.462} \quad (15)$$

通过表 4 可得, 屈服荷载与极限荷载的比值接近于 0.86, 因此屈服荷载 P_y 表达式为:

$$P_y = 0.86P_m \quad (16)$$

屈服位移 Δ_y 表达式为:

$$\Delta_y = \frac{P_y}{K_1} \quad (17)$$

峰值荷载 P_m , 试验结果分析可知, 剪跨比、轴拉比以及偏心距对峰值荷载有一定影响, 因此, 通过这三个参数对极限荷载进行拟合。经回归分析得极限荷载表达式为:

$$P_m = (0.155\lambda - 0.05n + 0.007e + 0.584) \frac{M_u}{L} \quad (18)$$

式中, M_u 为极限弯矩, 根据试件偏心距的不同分别按《组合结构设计规范》式(5.2.1-1)、式(6.7.2-2)、式(6.7.2-13)进行计算。

峰值位移 Δ_m , 理论上, 峰值位移可通过屈服点以及峰值点这两个特征点来确定, 但由于其求解需要考虑弯曲变形、剪切变形、滑移变形以及二阶效应等诸多因素的影响, 计算结果离散程度较大。因此, 本文通过回归拟合, 得到 $(\Delta_m - \Delta_y)/\Delta_y$ 与轴拉比 n 之间的关系, 其表达式为:

$$\frac{(\Delta_m - \Delta_y)}{\Delta_y} = -2.85n^2 - 0.36n + 2.69 \quad (19)$$

式中, $0 \leq n \leq 0.6$ 。

强化阶段刚度表达式为:

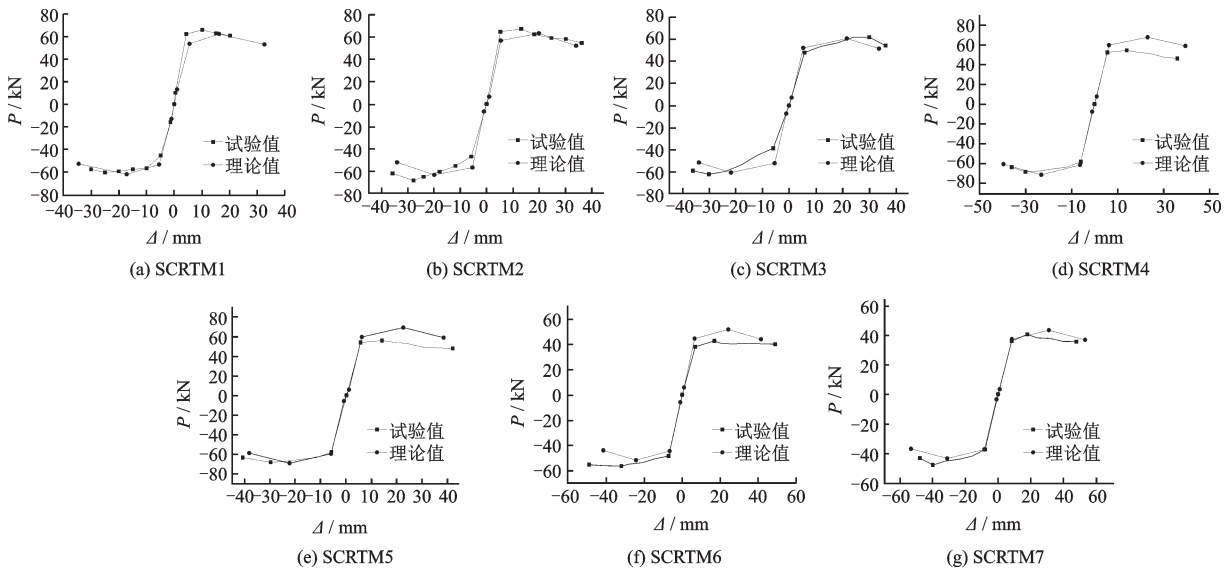


图8 试验骨架曲线和计算骨架曲线对比

Fig.8 Comparison between experimental and calculated results of the skeleton curves

3.2 卸载刚度确定

结构或试件不断承受外荷载重复持续作用会使试件内部出现损伤并叠加积累, 在此过程中会出现刚度退化现象。假定型钢混凝土受拉柱骨架曲线具有正反向对称的性质, 因此正反向的卸载刚度相等。

试件开裂前处于弹性阶段, 卸载刚度取弹性刚度 K_0 。试件开裂后到屈服前阶段, 卸载刚度取弹性刚度 K_1 。试件屈服后的卸载刚度, 通过试验所得数据进行拟合得:

$$K_2 = \frac{P_m - P_y}{\Delta_m - \Delta_y} \quad (20)$$

极限荷载 P_u 取 0.85 倍的峰值荷载, 表达式为:

$$P_u = 0.85P_m \quad (21)$$

根据试验所得数据进行比较, 极限位移 Δ_u 表达式为:

$$\Delta_u = 1.83\Delta_m \quad (22)$$

下降段刚度 K_3 表达式为:

$$K_3 = \frac{P_u - P_m}{\Delta_u - \Delta_m} \quad (23)$$

如图 8 所示, 试验所得骨架曲线与上式计算所得骨架曲线相对比, 两者吻合情况较好。试件开裂点较小的原因主要是由于试件受拉, 混凝土抗拉强度低导致。

$$K_r = 0.11 K_{01} \left(\frac{\Delta_y}{\Delta_i} \right)^{-0.22} \quad (24)$$

式中, K_r 为试件屈服后的卸载刚度; K_{01} 为屈服点与原点之间的连线斜率; Δ_i 为卸载前所经历的最大位移值。

3.3 恢复力模型

对 7 个试件的滞回曲线数据进行统计分析, 发现正向和反向加载路径大致通过一个“定点”, 该定点在 $0.72P_y$ 附近小幅度波动, 因此可以将该定点认为是 $0.72P_y$ 。

型钢混凝土受拉柱恢复力模型如图 9 所示, 滞

回规则如下:

开裂点前:试件处于弹性状态不考虑退化现象,即正向加载沿OA段加载至正向开裂点A,卸载后沿OA段返回,反向加载沿OA'段至反向开裂点A',卸载时沿OA'段原路径返回。此阶段内无论含有多少次加载循环,其加载路径以线弹性的方式考虑。

开裂点后至屈服点前:正向加载路径沿着AB段加载,从正向开裂点A指向正向屈服点B,若在此段内卸载,则卸载路径指向反向开裂点。反向加载

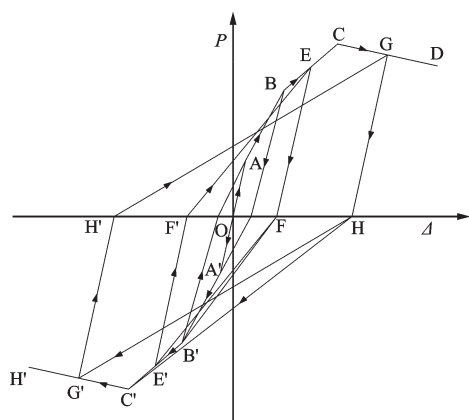


图9 建议的恢复力模型

Fig.9 Proposed restoring force model

路径沿着A'B'段加载,从反向开裂点A'指向反向屈服点B',若在此段卸载,则卸载路径指向正向开裂点。

屈服点后峰值点前:试件屈服后,加载路径沿BC段发展,若在达峰值点之前卸载,则沿EF段进行卸载,卸载至点F再反向加载,若试件负向未屈服卸载路径指向点B',若试件负向屈服卸载路径指向点E'。若在未达负向峰值B'C'段卸载,则卸载路径为E'F',卸载至F'再正向加载,卸载路径指向E。

峰值点后:试件达到峰值点后,加载路径沿CD段发展,若在此段卸载,则沿GH段进行卸载,卸载至点H再反向加载,若试件负向未达到峰值点卸载路径指向点C',若试件负向达到峰值点卸载路径指向点G'。若在C'D'段卸载,则卸载路径为G'H',卸载至H'再正向加载,卸载路径指向G,其余情况以此类推。

4 结论

(1)试件破坏形态大致可以分为三类:弯曲破

坏、拉弯破坏以及弯剪破坏。

(2)型钢混凝土受拉柱滞回曲线饱满,大致呈梭形,具有良好的耗能能力,且同一位移量级的三次循环中,滞回环依次减小,耗能能力依次减弱。

(3)所有试件的骨架曲线可大致分为弹性阶段、屈服阶段、强化阶段以及破坏阶段。通过对骨架曲线的比较得出:随剪跨比的增大,试件抗震性能逐渐增加。随轴拉比以及偏心距的增加,试件抗震性能逐渐减弱。

(4)基于理论推导以及试验数据,建立了型钢混凝土受拉柱的四折线骨架曲线模型,并给出了模型中各参数的计算方法。

(5)根据骨架曲线模型、刚度退化规律,建立了型钢混凝土受拉柱的恢复力模型并给出了滞回规则。

参考文献:

- [1] 徐龙河,孙雨生,要世乾,等.装配式自复位耗能支撑恢复力模型与试验验证[J].工程力学,2019,36(6):119-127,146.
Xu L H, Sun Y Sh, Yao Sh Q, et al. Restoring force model and experimental verification of an assembled self-centering energy dissipation brace [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(6): 119-127, 146. (in Chinese)
- [2] 唐昀超.基于视觉测量方法的钢管再生混凝土柱的抗震性能研究[D].广州:广东工业大学,2018.
Tang Y Ch. Seismic performance of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns based on visual measurement methods [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [3] 王志远.碳纤维高强混凝土中高剪力墙恢复力性能分析[D].郑州:郑州大学,2019.
Wang Zh Y. Restoring force behavior analysis of steel fiber reinforced high-strength concrete mid-rise shear wall [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019. (in Chinese)
- [4] Jun Z, Hua H D. A restoring force model for steel fiber reinforced concrete shear walls [J]. Engineering Structures, 2014, 75(15): 469-476.
- [5] Fang Y, Meng C C, Hong H, et al. Circular concrete filled steel tubular (CFST) columns under cyclic load and acid rain attack: Test simulation [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 122(6): 90-101.
- [6] 张向冈,陈宗平,薛建阳,等.方钢管再生混凝土柱恢复力模型试验与分析[J].防灾减灾工程学报,2016,36

- (5):744-750.
- Zhang X G, Chen Z P, Xue J Y, et al. Test and analysis of restoring force model of recycled aggregate concrete filled square steel tube column[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(5):744-750. (in Chinese)
- [7] 薛建阳,刘菲,高亮.型钢再生混凝土框架-再生混凝土空心砌块填充墙恢复力特性的试验研究[J].工业建筑,2015,45(6):160-164.
- Xue J Y, Liu F, Gao L. Experimental study of restoring force characteristics of steel reinforced recycled concrete frame infilled with recycled concrete hollow blocks [J]. Industrial Construction, 2015, 45(6):160-164. (in Chinese)
- [8] 薛建阳,戚亮杰.传统风格建筑钢框架结构恢复力模型试验研究[J].振动与冲击,2018,37(20):148-153,158.
- Xue J Y, Qi L J. An experimental study on the restoring force model of steel frame structures of traditional style buildings [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(20):148-153, 158. (in Chinese)
- [9] 张猛,李瑶亮,王卫仑,等.锈蚀钢筋混凝土框架柱恢复力模型研究[J].防灾减灾工程学报,2015,35(4):471-476.
- Zhang M, Li Y L, Wang W L, et al. Study on restoring force model of corroded reinforced concrete frame column[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(4):471-476. (in Chinese)
- [10] 薛建阳,崔卫光,陈宗平,等.型钢再生混凝土组合柱轴压性能试验研究[J].建筑结构,2013,43(7):73-76.
- Xue J Y, Cui W G, Chen Z P, et al. Experimental study on axial compressive behaviors of steel reinforced recycled aggregate concrete composite columns [J]. Building Structure, 2013, 43(7):73-76. (in Chinese)
- [11] 刘锦禄.型钢再生混凝土长柱抗震性能及其恢复力模型的试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013.
- Liu J L. Experimental study on seismic performance and restoring force model of steel reinforced recycled aggregate concrete columns [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013. (in Chinese)
- [12] 曹琛,郑山锁,胡卫兵,等.近海大气环境下锈蚀RC框架梁恢复力模型研究[J].工程力学,2019,36(4):125-134.
- Cao Ch, Zheng Sh S, Hu W B, et al. A restoring force model of corroded reinforced concrete frame beams in offshore atmospheric environment[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(4):125-134. (in Chinese)
- [13] 殷小波,吕西林,卢文胜.配置十字型钢的型钢混凝土柱恢复力模型[J].工程力学,2014,31(1):97-103.
- Yin X W, Lyu X L, Lu W Sh. Resilience model of SRC columns with cross-shaped encase steel [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(1):97-103. (in Chinese)
- [14] Pablo T, Farzin Z, Amit K. A hysteretic model for the rotational response of embedded column base connections [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 115:55-65.
- [15] Konstantions A, George H, Dimitri B. Parameter identification of three hysteretic models for the simulation of the response of CFT columns to cyclic loading [J]. Engineering Structures, 2014, 61:44-60.
- [16] 薛建阳,刘锦禄,马辉,等.型钢再生混凝土长柱恢复力模型的试验研究[J].工业建筑,2013,43(9):35-39.
- Xue J Y, Liu J L, M H, et al. Experimental study on restoring force model of steel reinforced recycled aggregate concrete columns [J]. Industrial Construction, 2013, 43(9):35-39. (in Chinese)
- [17] 张向冈,陈宗平,薛建阳,等.钢管再生混凝土框架的恢复力模型研究[J].世界地震工程,2016,32(1):277-283.
- Zhang X G, Chen Z P, Xue J Y, et al. Study on restoring force model of recycled aggregate concrete filled steel tube frame [J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(1):277-283. (in Chinese)
- [18] 组合结构设计规范:JGJ138—2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- Code for design of composite structures: JGJ138—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016 (in Chinese)

(本文责编:池营营)