

文章编号:1673-2049(2016)03-0042-08

四肢圆钢管混凝土格构柱恢复力模型研究

陈伯望¹, 邹艳花¹, 唐 楚¹, 罗 瑶², 李 频¹, 党晓冰¹

(1. 中南林业科技大学 土木工程与力学学院, 湖南 长沙 410004;

2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要:为了探究钢管混凝土格构柱的弹塑性地震反应以便进行构件非线性理论分析,对2根四肢圆钢管混凝土格构柱进行了低周反复加载试验,并收集了12根四肢圆钢管混凝土格构柱低周反复荷载作用下的试验资料。通过理论分析及试验结果回归分析,提出了钢管混凝土格构柱的退化三折线恢复力模型,确立了构件轴压比、等效长细比及材料比例系数等主要参数与模型之间的关系,并将模型计算结果与试验结果进行了对比分析。结果表明:计算结果和试验结果吻合较好,且该恢复力模型计算方法简单,便于进行结构地震反应分析及工程应用。

关键词:钢管混凝土格构柱;恢复力模型;轴压比;等效长细比;材料比例系数;骨架曲线;滞回规则
中图分类号:TU312 **文献标志码:**A

Study on Resilience Models of Circular Four-tube Concrete-filled Steel Tubular Laced Columns

CHEN Bo-wang¹, ZOU Yan-hua¹, TANG Chu¹, LUO Yao², LI Pin¹, DANG Xiao-bing¹

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Central South University of Forestry and Technology,

Changsha 410004, Hunan, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University,

Changsha 410075, Hunan, China)

Abstract: In order to explore elastic-plastic seismic response with the aim of component nonlinear theoretical analysis of concrete-filled steel tubular laced column, two circular four-tube concrete-filled steel tubular laced columns were tested under low cyclic load, and the experimental results of twelve circular four-tube concrete-filled steel tubular laced columns under low cyclic load were collected. The degeneration three-line resilience models of concrete-filled steel tubular laced column was proposed through theory analysis and regression analysis of test results. The relationships between the model and the main parameters, such as axial compression ratio, equivalent slenderness ratio, material proportion coefficient, were established. Comparative analysis of the calculation results of model and the experimental curves was carried out. The result show that calculation results agree well with experimental results, and the calculation method of resilience model is simple. The resilience model proposed can be conveniently applied in structure seismic response analysis and engineering application.

Key words: concrete-filled steel tubular laced column; resilience model; axial compression ratio; equivalent slenderness ratio; material proportion coefficient; skeleton curve; hysteretic rule

收稿日期:2015-11-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51308556)

作者简介:陈伯望(1965-),男,湖南常德人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:cbwyt@foxmail.com。

0 引 言

结构在承受外力产生变形后企图恢复到原来状态的抗力称为恢复力^[1-5],恢复力与结构变形的关系曲线为恢复力特性曲线^[6]。实际的恢复力特性曲线是很复杂的,需要简化成一定的恢复力模型才能用于结构动力分析和计算。恢复力模型是包含骨架曲线和各变形阶段滞回环的数学模型。骨架曲线为结构所受作用和作用效应的包络图,滞回规则体现了结构的非线性程度。确定恢复力模型的方法有试验拟合法、有限元分析法和理论计算法等,一个合理的恢复力模型能充分反映结构的强度、刚度、延性以及耗能等力学特征,是进行结构弹塑性分析的基础。在过去的大半个世纪内,各国学者对钢筋混凝土构件^[7-9]、钢管混凝土构件^[10-11]滞回特性进行了大量研究,并提出了多种恢复力模型。钢管混凝土格构柱是一种应用前景广阔的新型截面柱,但对钢管混凝土格构柱的研究处于起步阶段,对其恢复力模型的研究也鲜有报道。

本文针对现有研究状况,完成了 4 根(2 根圆形截面、2 根方形截面)四肢钢管混凝土格构柱拟静力试验,并收集了 12 根四肢圆钢管混凝土格构柱拟静力试验资料,用于重点研究构件轴压比、等效长细比、缀管壁厚度及材料比例系数等参数对其滞回曲线的影响,并确立了主要参数与钢管混凝土格构柱恢复力模型之间的关系。通过理论分析与试验结果回归分析,提出了四肢圆钢管混凝土格构柱退化三折线恢复力模型,并将该模型计算结果与试验结果进行了对比分析。

1 试验概况

1.1 收集的试验资料

为了研究钢管混凝土格构柱的恢复力模型,收集了 12 根四肢圆钢管混凝土格构柱(K 型节点)的试验资料(试验均在湖南城市学院结构实验室进行)^[12-13],试验重点研究了往复水平荷载作用下轴压比、等效长细比、缀管厚度及材料比例系数等参数对其滞回性能的影响。以文献[12]中 6 根四肢圆钢管混凝土格构柱拟静力试验为例,格构柱的钢管都采用 Q235 无缝钢管,柱肢钢管外径为 86 mm,壁厚为 1.5 mm,缀管外径为 48 mm,混凝土强度为 C40,格构柱的柱肢轴线间距及轴线节点距均为 300 mm。试件设计尺寸如图 1 所示(其中, N 为竖向荷载, P 为水平荷载),参数如表 1 所示。

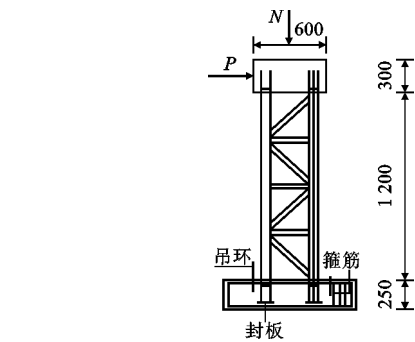


图 1 文献[12]试件设计尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Design Dimension of Specimen in Literature[12] (Unit:mm)

表 1 文献[12]试件参数

Tab. 1 Parameters of Specimens in Literature[12]

试件编号	柱高/mm	缀管壁厚/mm	轴压比	等效长细比
SCC1	1 200	2. 5	0. 2	10. 8
SCC2	1 200	2. 0	0. 2	10. 8
SCC3	1 200	3. 0	0. 2	10. 8
SCC4	1 200	2. 5	0. 3	10. 8
SCC5	2 100	2. 5	0. 2	18. 4
SCC6	3 000	2. 5	0. 2	27. 9

文献[12]试验所得部分四肢圆钢管混凝土格构柱的荷载-位移滞回曲线如图 2 所示。由图 2 可知,各试件滞回曲线基本饱满,无明显的捏缩现象,具有良好的稳定性。位移加载初期,滞回曲线基本呈线性,试件处于近似弹性阶段;随着位移幅值增大,滞回曲线位移增长速率加快,试件刚度明显降低;进入破坏阶段时,刚度进一步退化,试件荷载-位移曲线出现下降段。

图 3 为荷载-位移骨架曲线。由图 3(a)可知,等效长细比对四肢圆钢管混凝土格构柱滞回性能影响很大,在一定范围内,试件等效长细比越大,弹性刚度越小,水平承载力越低,破坏位移越大,延性越好。由图 3(b)可知,轴压比对四肢圆钢管混凝土格构柱的影响集中在构件弹塑性阶段和破坏阶段,在一定范围内,轴压比增大,试件水平承载力略有提高,但试件破坏阶段的刚度退化也有所增大。同时,试验结果显示试件 SCC1,SCC2,SCC3 的荷载-位移滞回曲线相差不大,骨架曲线大致重合,这表明在一定范围内,缀管壁厚的变化对钢管混凝土格构柱的滞回性能影响很小,主要原因在于整个加载过程中缀管始终处于弹性受力状态。

1.2 本文试验

为了研究所建格构柱恢复力模型的正确性及适用性,完成了 2 根四肢圆钢管混凝土格构柱(N 型节

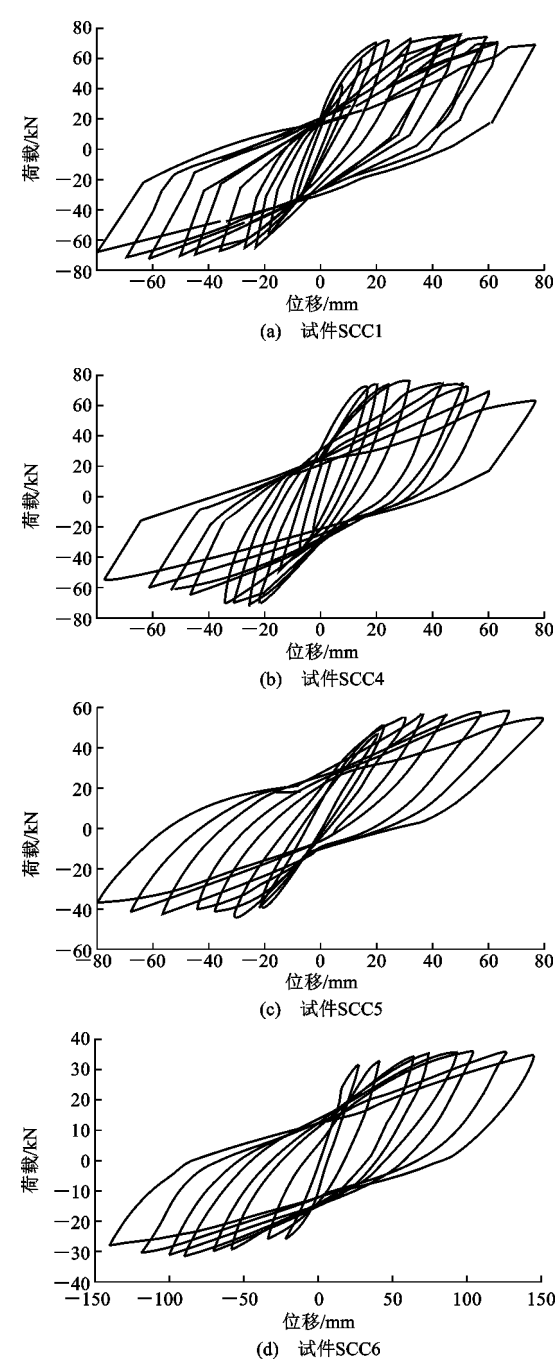


图 2 文献[7]荷载-位移滞回曲线

Fig. 2 Load-displacement Hysteresis Curves in Literature[7]点)的低周反复加载试验^[14-15]。试验在湖南城市学院结构实验室进行,2 根格构柱试件钢管均采用 Q235 无缝钢管,柱肢钢管外径为 90 mm,壁厚为 3.0 mm,缀管外径为 42 mm,壁厚为 3.0 mm,柱肢轴线间距及轴线节点距均为 400 mm,柱肢灌注采用自密实混凝土。试件设计尺寸如图 4 所示,参数如表 2 所示。试验采用荷载、位移混合控制加载,屈服前采用荷载控制加载,屈服后采用位移控制加载,以荷载-位移曲线出现明显拐点来判断试件达到屈

服。试验加载装置如图 5 所示。

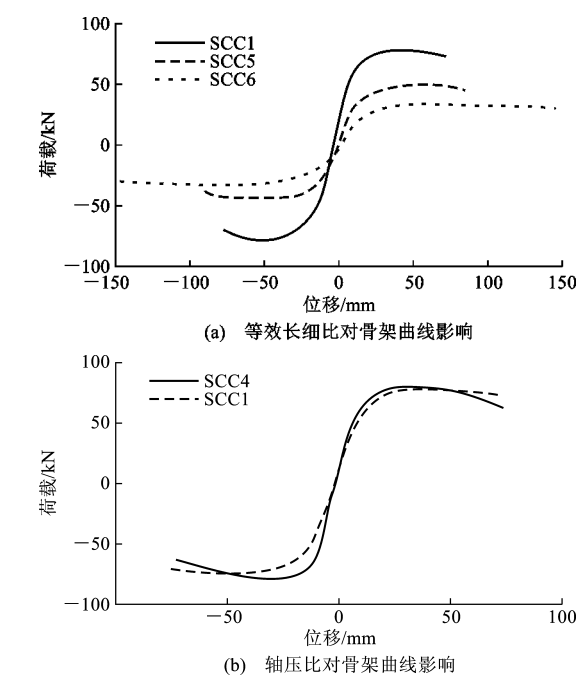


图 3 荷载-位移骨架曲线

Fig. 3 Load-displacement Skeleton Curves

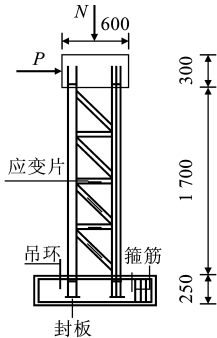


图 4 试件设计尺寸(单位:mm)

Fig. 4 Design Dimension of Specimen (Unit:mm)

表 2 试件参数

Tab. 2 Parameters of Specimens

试件编号	YGGZ1	YGGZ2
柱高/mm	1 700	1 700
轴压比	0. 2	0. 2
等效长细比	15. 0	15. 0
混凝土立方体抗压强度/MPa	71. 7	71. 7

荷载-位移滞回曲线如图 6 所示。由图 6 可知:格构柱荷载-位移滞回曲线丰满且稳定,呈现了良好的抗震性能;试件基本经历了近似弹性阶段、弹塑性阶段及破坏阶段。

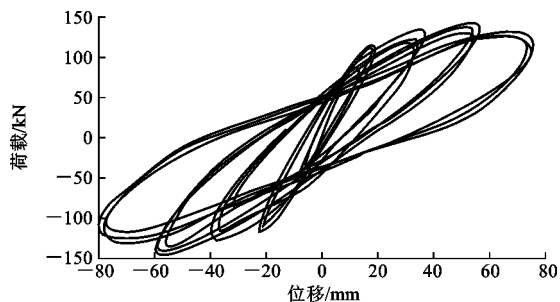
2 恢复力模型

影响钢管混凝土格构柱滞回性能的因素有很

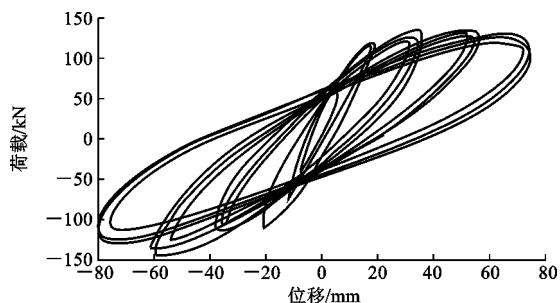


图 5 加载装置

Fig. 5 Loading Setup



(a) 试件YGGZ1



(b) 试件YGGZ2

图 6 荷载-位移滞回曲线

Fig. 6 Load-displacement Hysteresis Curves

多,合理选择各因素才能简单又真实地反映实际情况。在分析各试验结果的基础上,本文抓住几个主要因素,略去其他次要因素的影响,重点研究钢管混凝土格构柱的轴压比 n 、等效长细比 $\bar{\lambda}$ (按文献[16]中的方法计算)及材料比例系数 ζ 对其荷载-位移恢复力模型的影响。

2.1 基本假定

基本假定包括:

(1)构件在变形过程中始终保持为平截面。

(2)忽略剪力对构件变形的影响。

(3)模拟实际试验情况,计算长度按悬臂构件确定,构件受力形式如图 7 所示,其中, L 为格构柱的计算高度, Δ 为位移。

(4)骨架曲线采用对称模型。

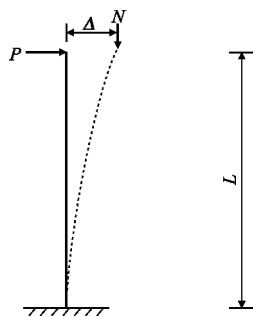


图 7 构件受力形式

Fig. 7 Force Form of Specimen

2.2 骨架曲线

构件恢复力模型分为曲线型和折线型,折线型又可分为双线型、退化双线型、三线型、退化三线型及退化四线型等。根据试验所得荷载-位移滞回曲线可知,四肢圆钢管混凝土格构柱荷载-位移骨架曲线可简化为如图 8 所示的退化三线型模型,因而需确定弹性刚度 K_1 、屈服荷载 P_y 和屈服位移 Δ_y 、强化刚度 K_2 、极限荷载 P_m 和极限位移 Δ_m 、下降段刚度 K_3 、破坏荷载 P_u 及破坏位移 Δ_u 。

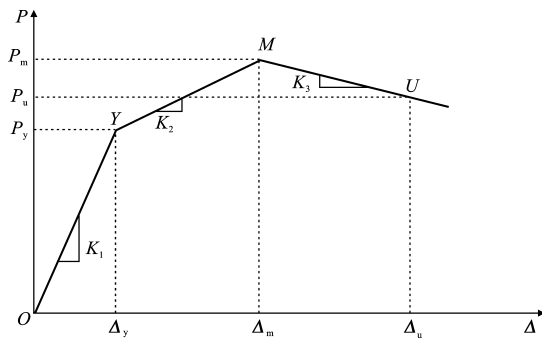


图 8 骨架曲线

Fig. 8 Skeleton Curve

(1)弹性刚度

根据材料力学原理^[17],悬臂结构钢管混凝土格构柱弹性刚度 K_1 为

$$K_1 = 3EI/L^3 \quad (1)$$

式中: EI 为格构柱截面抗弯刚度。

钢管混凝土格构柱在弹性阶段受力有 2 种情况:①钢管与核心混凝土各自单独工作,界面间无相互作用,此时钢管为弹性工作,核心混凝土为单向受力状态;②当核心混凝土横向变形系数超过钢管泊松比时,钢管与核心混凝土之间将产生相互作用力,此时核心混凝土为三向受力,钢管为双向受力但仍保持弹性工作。根据现有研究,单肢钢管混凝土柱的截面抗弯刚度为^[18]

$$EI = E_s I_s + 0.6 E_c I_c \quad (2)$$

式中: $E_s I_s$, $E_c I_c$ 分别为钢管和混凝土的组合形心截面抗弯刚度; I_s , I_c 分别为钢管和混凝土的组合截面惯性矩。

为了考虑缀管的紧箍效应, 本文引入缀管约束影响系数 α , 可得四肢圆钢管混凝土格构柱的截面抗弯刚度为

$$EI = \alpha(E_s I_s + 0.6E_c I_c) \quad (3)$$

试验表明构件在弹性受力阶段缀管受力很小, 因此式(3)中取 $\alpha=1$ 。组合截面抗弯刚度可按材料力学方法^[17]计算, 即

$$\left. \begin{aligned} I_c &= I_{cc} + a^2 A_c \\ I_s &= I_{sc} + a^2 A_s \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: I_{cc} , I_{sc} 分别为混凝土和钢管的截面抗弯刚度; A_c , A_s 分别为柱肢混凝土和钢管截面面积; a 为 1/2 柱肢轴线间距。

(2) 屈服荷载

根据对试验结果的统计回归, 四肢圆钢管混凝土格构柱的屈服荷载可按式(5)计算, 即

$$P_y = 0.65P_m \quad (5)$$

(3) 屈服位移

屈服位移可根据屈服荷载和弹性刚度确定, 即

$$\Delta_y = P_y / K_1 \quad (6)$$

(4) 极限荷载

钢管混凝土格构柱的极限荷载可按文献[19]提供的方法计算, 即

$$\frac{M_m}{N_{tu} a'} - \frac{P_m}{2N_{tu}} = 1 \quad \epsilon > \epsilon_b \quad (7)$$

$$\frac{M_m}{N_{cu} a'} - \frac{P_m}{2N_{cu}} = 1 \quad \epsilon \leq \epsilon_b \quad (8)$$

$$\epsilon_b = \frac{N_{cu} + N_{tu}}{2(N_{cu} - N_{tu})} \quad (9)$$

式中: N_{cu} , N_{tu} 分别为单肢圆钢管混凝土格构柱的抗压承载力和抗拉承载力, 可按相关规范^[20]计算; a' 为柱肢轴线间距; ϵ 为偏心率; ϵ_b 为界限偏心率; M_m 为钢管混凝土格构柱的极限弯矩。

根据各试验结果可知, 试件的破坏始于 1/2 柱高处柱肢与缀管的撕裂, 终于 1/2 柱高处柱肢与缀管的脱落, 因此格构柱的极限弯矩为^[21]

$$M_m = \frac{P_m L}{2} + \frac{N \Delta_m}{2} \quad (10)$$

(5) 极限位移

试验结果表明格构柱的极限位移与构件的材料比例系数、轴压比及等效长细比有很大关系, 通过 ORIGIN 软件多元参数回归分析建立了如下关系式

$$\left. \begin{aligned} \Delta_m &= (3.0 - 0.25n + 1.2\zeta + 0.18\bar{\lambda}) \frac{P_m}{K_1} \\ \zeta &= \frac{A_s f_s}{A_c f_c} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

(6) 强化刚度

强化刚度 K_2 可表示为

$$K_2 = \frac{P_m - P_y}{\Delta_m - \Delta_y} \quad (12)$$

(7) 下降段刚度

由于强度、刚度退化等的影响, 峰值荷载后, 随构件水平位移不断增加, 钢管混凝土格构柱的水平承载力有所下降。试验结果表明, 轴压比和等效长细比越大, 刚度退化越明显, 而材料比例系数越大, 构件刚度退化越小, 通过多元线性回归得

$$K_3 = \gamma K_1 \quad (13)$$

$$\gamma = 0.09 - 0.18n + 0.02\zeta + 0.01\alpha \quad (14)$$

式中: γ 为下降段刚度折减系数。

(8) 破坏荷载

一般定义破坏荷载为极限荷载的 85%, 即

$$P_u = 0.85P_m \quad (15)$$

(9) 破坏位移

破坏位移和极限位移有如下关系

$$\frac{P_u - P_m}{\Delta_u - \Delta_m} = K_3 = \gamma K_1 \quad (16)$$

$$\Delta_u = \frac{P_u - P_m}{\gamma K_1} + \Delta_m \quad (17)$$

2.3 滞回规则

图 9 为四肢圆钢管混凝土格构柱的恢复力模型, 其中, K_u 为卸载刚度, 其滞回规则如下:

(1) 当 $P < P_y$ 时, 构件基本处于弹性阶段, 不考虑刚度退化及微小变形的影响, 按线弹性加卸载。

(2) 当 $P_y \leq P \leq P_m$ 时, 从弹塑性阶段点 1 按弹性刚度 K_1 开始卸载至软化点 2 产生刚度退化, 由于四肢圆钢管混凝土格构柱抗震性能良好, 低周反

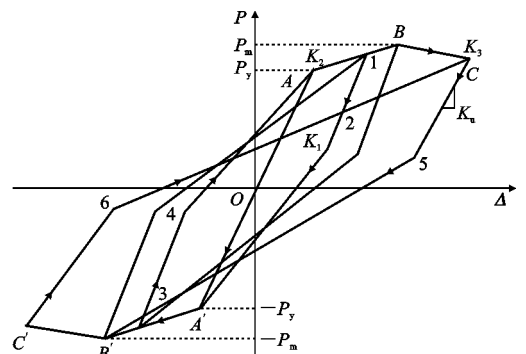


图 9 恢复力模型

Fig. 9 Resilience Model

复加载次数明显增加,构件出现了软化现象,试验滞回曲线也明显出现了软化点,并由点 2 指向反向屈服点 A' 。软化点 2 的荷载 P_s 取值直接影响滞回环所围成的面积,即影响构件的耗能计算,经回归分析可得

$$\frac{P_s}{P_{un}} = 1 - 0.42e^{2.0\zeta - 1.1\bar{\lambda} + 0.55n} \quad (18)$$

式中: P_{un} 为卸载开始点的荷载。

负向加载曲线为骨架曲线,负向弹塑性阶段卸载规则与正向相同。

(3) 当 $P > P_m$ 时,从下降段开始卸载,卸载刚度 K_u 受构件初始刚度的影响并随位移的增大而增大。利用文献[22]提供的卸载刚度计算方法可得构件下降段刚度比-位移比关系曲线(图 10),计算式为

$$K_u = 0.89 \left(\frac{\Delta_{un}}{\Delta_y} \right)^{-0.38} K_1 \quad (19)$$

式中: Δ_{un} 为卸载点位移。

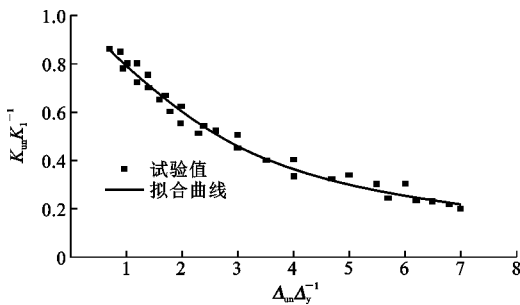


图 10 刚度比-位移比曲线

Fig. 10 Curve of Rigidity Ratio-displacement Ratio

当卸载至点 5 时,构件出现明显的软化现象,软化点的荷载按式(18)计算。软化点 5 为滞回曲线指向方向经历过的位移最大点,负向加载曲线为骨架曲线,负向下降阶段卸载规则与正向相同。

3 计算恢复力模型与试验曲线对比

3.1 骨架曲线对比分析

图 11 为计算骨架曲线与试验骨架曲线对比。试件 SCC5, SCC1 的计算荷载-位移骨架曲线与试验曲线吻合良好。试件 YGGZ1, YGGZ2 的计算值与试验值虽有一定偏差,但都在允许误差范围内,且相对于试验值该骨架曲线更偏于安全,主要是由于 K 型节点钢管混凝土格构柱比 N 型节点格构柱受应力集中影响更大,因此对试件的承载力有一定影响。

3.2 滞回曲线对比分析

图 12 为计算滞回曲线与试验滞回曲线对比。从图 12 可以看出:试件 SCC5, SCC1 的峰值荷载前后钢管混凝土格构柱计算荷载-位移滞回曲线的加

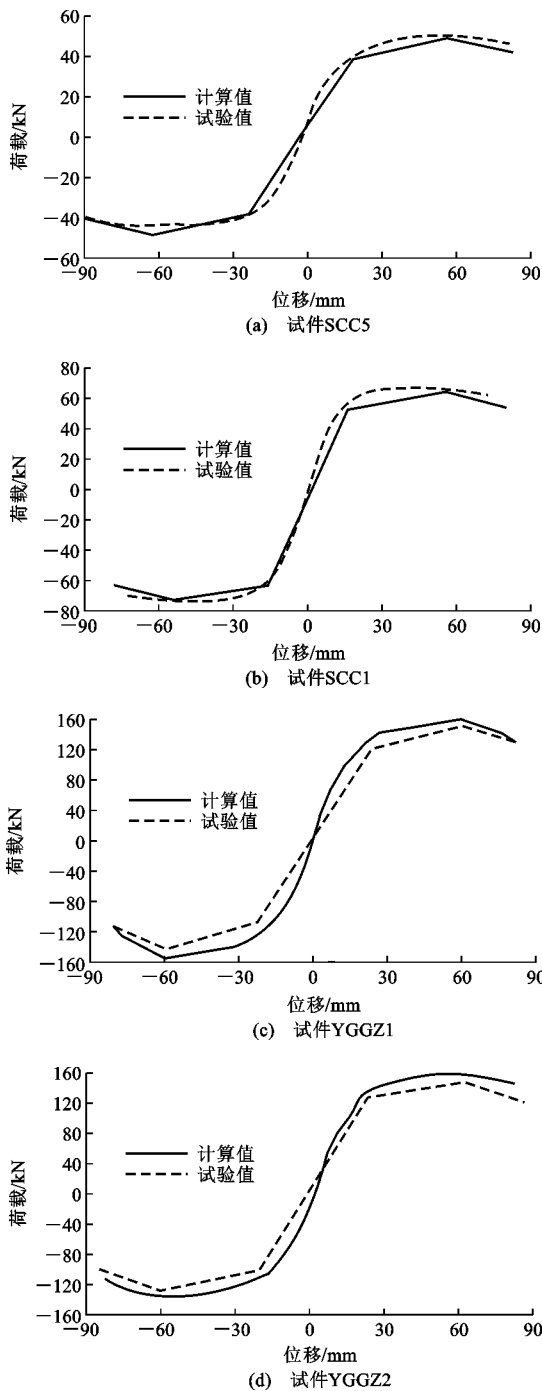


图 11 骨架曲线对比

Fig. 11 Comparisons of Skeleton Curves

卸载刚度与试验滞回曲线的加卸载刚度在各个位移时段都吻合较好;试件 YGGZ1, YGGZ2 的加载前期计算滞回曲线与试验滞回曲线吻合良好,加载后期虽存在一定偏差,但相对误差在 5% 以内,仍吻合较好。

4 结 语

(1) 通过参数分析,确定了四肢圆钢管混凝土格

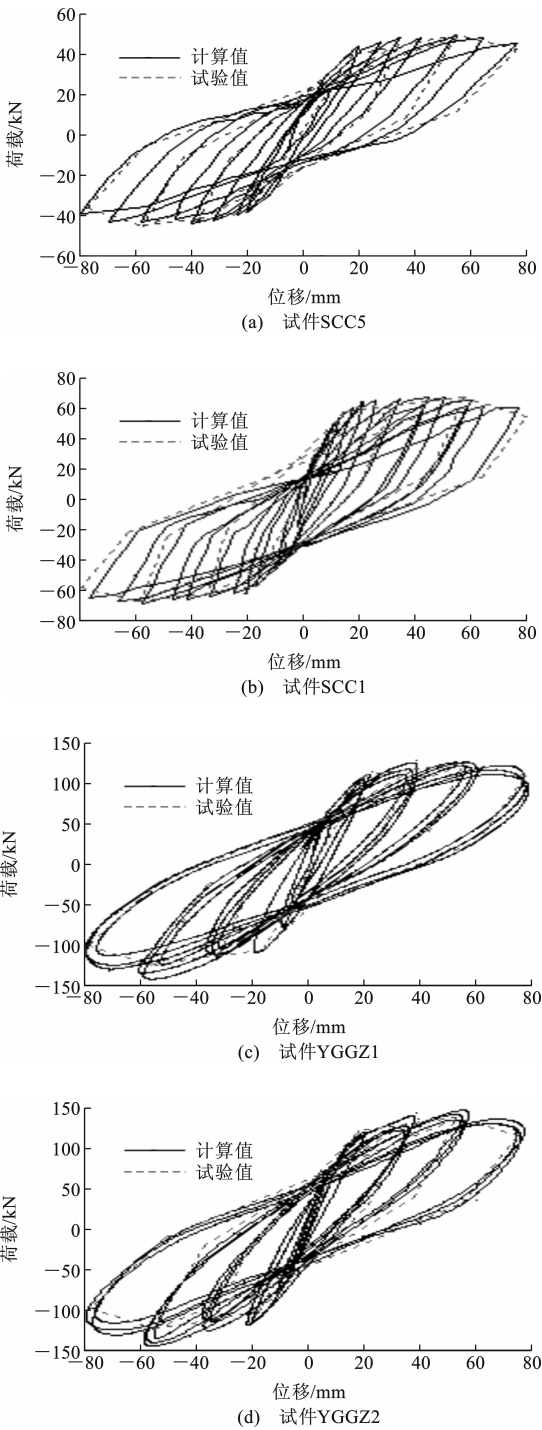


图 12 滞回曲线对比

Fig. 12 Comparisons of Hysteresis Curves

构柱骨架曲线与轴压比、等效长细比及材料比例系数之间的关系。

(2)提出了四肢圆钢管混凝土格构柱的荷载-位移恢复力模型,计算曲线与试验曲线吻合良好,该模型计算简单,便于地震反应分析使用。

(3)计算恢复力模型不仅适用于 K 型节点的四肢圆钢管混凝土格构柱,还适用于 N 型节点的四肢

圆钢管混凝土格构柱。

参考文献:

References:

[1] 于 峰,徐国土,程安春. PVC-CFRP 圆管钢筋混凝土柱恢复力模型研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(9): 66-72.
YU Feng, XU Guo-shi, CHENG An-chun. Study on Restoring Force Model of PVC-CFRP Tube Confined Reinforced Concrete Column[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(9): 66-72.

[2] 李升才. 焊接环式箍筋约束高强混凝土柱恢复力模型试验研究[J]. 建筑结构学报,2016,37(1): 41-47.
LI Sheng-cai. Experimental Study on Restoring Force Model of High Strength Concrete Columns Confined by Butt-welded Closed Composite Stirrups[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(1): 41-47.

[3] 杨 勇,闫长旺,贾金青,等. 钢骨超高强混凝土柱-混凝土梁节点恢复力模型[J]. 土木工程学报,2014, 47(增 2): 193-197.
YANG Yong, YAN Chang-wang, JIA Jin-qing, et al. Study on Restoring Force Model of Steel Reinforced Ultra High Strength Concrete Column and Concrete Beam Joints [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(S2): 193-197.

[4] 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 Xiao-wei, LU Xi-lin, LU Wen-sheng. Resilience Model of SRC Columns with Cross-shaped Encase Steel[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(1): 97-103.

[5] 韦翠梅,徐礼华,黄 乐,等. 钢-聚丙烯混杂纤维混凝土柱恢复力模型试验研究[J]. 土木工程学报,2014, 47(增 2): 227-234.
WEI Cui-mei, XU Li-hua, HUANG Le, et al. Experimental Study on Restoring Force Models for Steel-polypropylene Hybrid Fiber Reinforced Concrete Columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(S2): 227-234.

[6] 李爱群,高振世. 工程结构抗震与防灾[M]. 南京:东南大学出版社,2003.
LI Ai-qun, GAO Zhen-shi. Earthquake Resistance and Disaster Prevention of Engineering Structure [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2003.

[7] CHEN W F, LUI E M. Stability Design of Steel Frames [M]. Boca Raton: CRC Press, 1991.

[8] 朱伯龙,董振祥. 钢筋混凝土结构非线性分析[M]. 上海:同济大学出版社,1985.
ZHU Bo-long, DONG Zhen-xiang. Nonlinear Analysis

- on Reinforced Concrete Structure [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1985.
- [9] American Institute of Steel Construction. Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design [M]. 2nd ed. Chicago: American Institute of Steel Construction, 1994.
- [10] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2007.
- HAN Lin-hai. Theory and Practice of Concrete-filled Steel Tube Structure [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007.
- [11] 周绪红, 刘界鹏. 钢管约束混凝土柱的性能与设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- ZHOU Xu-hong, LIU Jie-peng. Performance and Design of Steel Tube Confined Concrete Column [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [12] 罗 瑶. 四肢钢管混凝土格构柱抗震性能研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- LUO Yao. Studies on the Seismic Performance of Four-tube Concrete Filled Steel Tubular Laced Columns [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [13] 邓萱奕. 钢管混凝土格构柱抗震性能研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- DENG Xuan-yi. Study on the Seismic Performance of Concrete Filled Steel Tubular Lattice Column [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [14] 陈伯望, 邹艳花, 唐 楚, 等. 四肢方圆钢管混凝土格构柱低周反复加载试验研究 [J]. 土木工程学报, 2014, 47(增 2): 108-112.
- CHEN Bo-wang, ZOU Yan-hua, TANG Chu, et al. Contrast Research on Square and Circular CFST Laced Columns Pseudo-static Test [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(S2): 108-112.
- [15] 曹 艳, 陈伯望, 贺 冉, 等. 自密实方圆钢管混凝土四肢格构柱拟静力试验对比研究 [J]. 湖南工程学院学报: 自然科学版, 2014, 24(1): 77-81.
- CAO Yan, CHEN Bo-wang, HE Ran, et al. Self-compacting Concrete Filled Square Steel Tubes Limb Lattice Column Quasi Static Test Research [J]. Journal of Hunan Institute of Engineering: Natural Science Edition, 2014, 24(1): 77-81.
- [16] 周旺保, 蒋丽忠. 钢管混凝土格构柱极限承载力实用计算公式 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(11): 3486-3493.
- ZHOU Wang-bao, JIANG Li-zhong. Practical Calculation Formula of Ultimate Load Carrying Capacity About Concrete Filled Steel Tubular Laced Columns [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(11): 3486-3493.
- [17] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学 [M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- SUN Xun-fang, FANG Xiao-shu, GUAN Lai-tai. Strength of Materials [M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [18] EN 1994-1-1: 2004, Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures. Part 1. 1: General Rules and Rules for Buildings [S].
- [19] 孙 潮, 陈宝春. 钢管混凝土格构短柱轴力弯矩相关曲线的试验研究 [J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2008, 36(5): 729-734.
- SUN Chao, CHEN Bao-chun. Experimental Research on Interaction Curves of Concrete Filled Steel Tubular Laced Short Columns [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 2008, 36(5): 729-734.
- [20] DL/T 5085—1999, 钢-混凝土组合结构设计规程 [S].
- DL/T 5085—1999, Code for Design of Steel-concrete Composite Structure [S].
- [21] ACI 318-08, Building Code Requirements for Structural Concrete [S].
- [22] WATSON S, PARK R. Simulated Seismic Load Tests on Reinforced Concrete Columns [J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(6): 1825-1849.