

剪压破坏型扁柱恢复力模型

马泽峰^{1*}, 卢 旦²

¹华东建筑集团上海房科建筑设计有限公司, 上海

²华东建筑集团上海科技发展分公司, 上海

收稿日期: 2025年4月29日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月31日

摘 要

本文研究了剪压破坏型钢筋混凝土扁柱的受力性能及恢复力模型。扁柱作为一种过渡截面构件, 在不同受力工况下表现出类似柱或墙的受力特征。针对此类构件的研究尚不充分, 现行标准对其定义亦不明确。通过6根变轴压比、变截面高宽比、变水平分布筋配筋率的1:3缩尺钢筋混凝土扁柱低周反复拟静力试验, 定量总结了此类构件的受力性能。试验结果显示, 剪压破坏型扁柱裂缝数量少, 只有一条斜向主裂缝, 屈强比高, 安全储备小, 延性差, 耗能能力弱, 滞回曲线呈弓形且狭长。基于试验结果, 提出了适用于剪压破坏的恢复力曲线模型, 该模型采用三折线拟合骨架曲线, 结合归一化耗能指数的滞回规律, 具有参数少、应用简单的优点。研究结果为剪压破坏型扁柱的设计提供了理论参考, 对工程应用具有一定的现实意义和价值。

关键词

扁柱, 拟静力试验, 恢复力模型, 剪压破坏

Restoring Force Model of Shear-Compression Damaged Flat Columns

Zefeng Ma^{1*}, Dan Lu²

¹Arcplus Group PLC Shanghai Fangke Architectural Design Co., Ltd., Shanghai

²Arcplus Group PLC Shanghai Science and Technology Development Branch, Shanghai

Received: Apr. 29th, 2025; accepted: May 21st, 2025; published: May 31st, 2025

Abstract

This paper investigates the force properties and restoring force model of shear-compression damaged reinforced concrete flat columns. Flat columns, as a kind of transitional cross-section members,

*通讯作者。

文章引用: 马泽峰, 卢旦. 剪压破坏型扁柱恢复力模型[J]. 土木工程, 2025, 14(5): 1285-1296.

DOI: 10.12677/hjce.2025.145138

show similar force characteristics of columns or walls under different force conditions. The research on this type of member is not sufficient and its definition is not clear in the current standards. The force performance of this type of members is quantitatively summarized through the low circumferential repeated static tests on six 1:3 scaled-down reinforced concrete flat columns with variable axial compression ratio, variable cross-sectional aspect ratio, and variable horizontal distributed reinforcement ratio. The test results show that the shear-compression-damaged flat columns have a small number of cracks, only one diagonal main crack, a high flexural strength ratio, a small safety reserve, a poor ductility, a weak energy dissipation capacity, and a bow-shaped and narrow hysteretic curve. Based on the experimental results, a restoring force curve model applicable to shear-compression damage is proposed, which adopts a triple-fold line to fit the skeleton curve and combines the hysteresis law with the normalized energy dissipation index, which has the advantages of fewer parameters and simpler application. The research results provide theoretical references for the design of shear-compression damaged flat columns, and have certain practical significance and value for engineering applications.

Keywords

Flat Column, Quasi-Static Experiment, Restoring Force Model, Shear-Compression Damage

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

一般定义截面高宽比在 3~5 之间的柱为扁柱。因其截面形式特点, 在不同受力工况下会表现出类似柱或墙的受力特征。当结构层高较高, 柱截面相对较小时, 构件剪跨比大, 偏向压弯破坏的形式, 扁柱体现延性破坏的特点; 当结构层高较低, 柱层间出现反弯点, 且截面尺寸较大、剪跨比偏小时, 扁柱类似矮墙, 表现出剪压破坏的形式, 延性、耗能能力较差。目前, 针对此类柱到墙过渡截面构件的研究工作尚不充分, 体现在现行标准对扁柱的定义仍不十分明确。《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2010) 中的表述如下: “柱截面高宽比不宜大于 3” 以及 “短肢剪力墙是指截面厚度不大于 300 mm、各肢截面高度与厚度之比的最大值大于 4 但不大于 8 的剪力墙”。本条在 JGJ3-2002 版中的表述为: “短肢剪力墙是指墙肢截面高度与厚度之比为 5~8 的剪力墙”, 并强调: “当墙肢的截面高度与厚度之比不大于 4 时, 宜按柱进行截面设计”。《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010) 中相关表述为: “竖向构件截面长边、短边(厚度)比值大于 4 时, 宜按墙的要求进行设计。” 针对剪压破坏的扁柱构件, 准确把握其承载力水平, 明确其破坏过程、变形及耗能能力等抗震性能, 对此类构件的工程应用具有一定的现实意义和价值, 研究工作可作为扁柱构件设计的理论参考。

恢复力曲线是指结构或构件在外荷载去除后恢复原来形状的能力。恢复力曲线模型一般包括骨架曲线、滞回特征和刚度退化规律三个组成部分。确定恢复力曲线的方法有试验拟合法、系统识别法和理论计算法等[1]。针对各自研究对象, 目的的不同, 学者们各自提出了有一定适用范围和局限性的恢复力曲线模型。马颖[2]通过 10 根钢筋混凝土柱的水平单调加载试验和 24 根钢筋混凝土柱的低周反复试验, 并结合美国太平洋地震研究中心钢筋混凝土柱抗震性能试验数据库低周反复荷载下钢筋混凝土柱的试验资料分析了剪跨比、轴压比、配箍率对钢筋混凝土柱弯剪破坏时抗剪承载力和位移延性的影响, 提出钢筋混凝土柱弯剪破坏时抗剪承载力和位移延性系数的计算公式。给出了发生弯剪破坏的钢筋混凝土柱开裂荷载、屈服荷载、弯剪破坏荷载及其相应变形的计算方法, 提出了地震作用下钢筋混凝土柱弯剪破坏时

恢复力模型骨架曲线的简化方法。李兵、李宏男和曹敬党进行了钢筋混凝土高[3]、低[4]墙各 3 片试件的低周反复拟静力试验[5]，在试验结果的基础上，提出了建议采用平顶刚度退化二线型模型或平顶刚度退化三线型模型来拟合的恢复力曲线模型。吕西林、董宇光和丁子文[6] [7]进行了 16 片型钢混凝土剪力墙的低周反复拟静力试验，并在此基础上提出采用四折线骨架曲线和三参数滞回曲线模型拟合试验试件的恢复力曲线，所提模型与试验结果吻合程度较好。另外，李宏男等[8]在进行钢筋混凝土框架柱多维恢复力特性的试验研究时，刘义等[9]在进行型钢混凝土异形柱恢复力特性研究时，郭子雄等[10]在进行型钢混凝土柱恢复力模型试验研究时，李正良等[11]在进行 HSRC 框架柱的恢复力特性研究时，邓宗才等[12]在进行层内混杂 FRP 加固混凝土柱恢复力模型研究时，马恺泽等[13]在进行方钢管高强混凝土柱恢复力模型研究时，均提出过与研究对象较吻合的恢复力曲线模型。同时我们也应看到，研究者提出的恢复力模型均有一定的适用范围，目前还没有一种恢复力模型能全面、准确地反应不同材料组成，不同截面形式，不同作用情况等多参量条件下任意构件的受力性能。

2. 试验概况

2.1. 试件设计及制作

试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室进行，共 6 根钢筋混凝土扁柱，综合考虑实验室设备技术条件，设计模型与实际构件相似比取 1:3，混凝土强度均取 C30，构件高度取截面高度的 2 倍，即剪跨比 $\lambda=2$ 。其中试件 BZ7~BZ9 完全相同，截面高宽比为 3；BZ10 和 BZ11 完全相同，BZ12 仅水平分布筋较少，试件 BZ10~BZ12 截面高宽比均为 5。试验扁柱立面尺寸如图 1 和图 2，试件细部构造如图 3，试件的成型及安装如图 4 和图 5。截面尺寸及配筋构造如表 1。BZ1~BZ6 为压弯破坏型试件，本文不涉及。

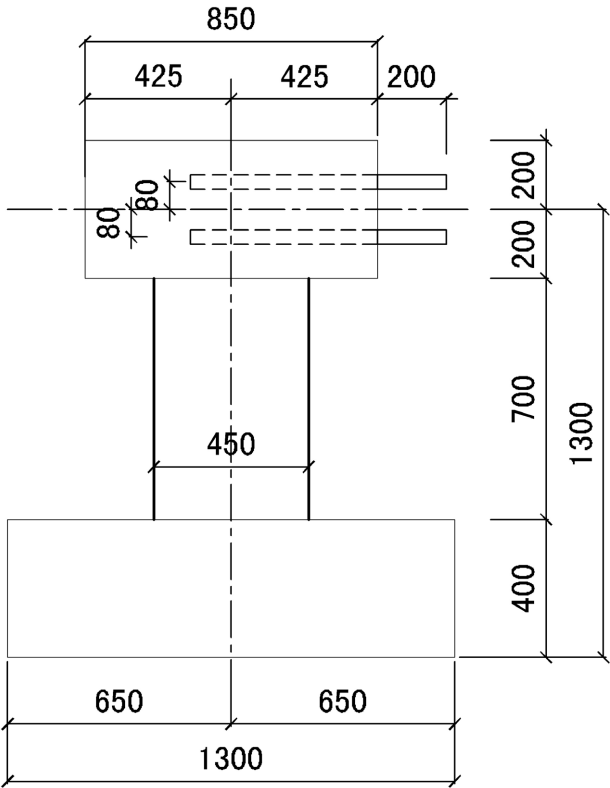


Figure 1. Elevation of flat column BZ7~BZ9 specimens
图 1. 扁柱 BZ7~BZ9 试件立面图

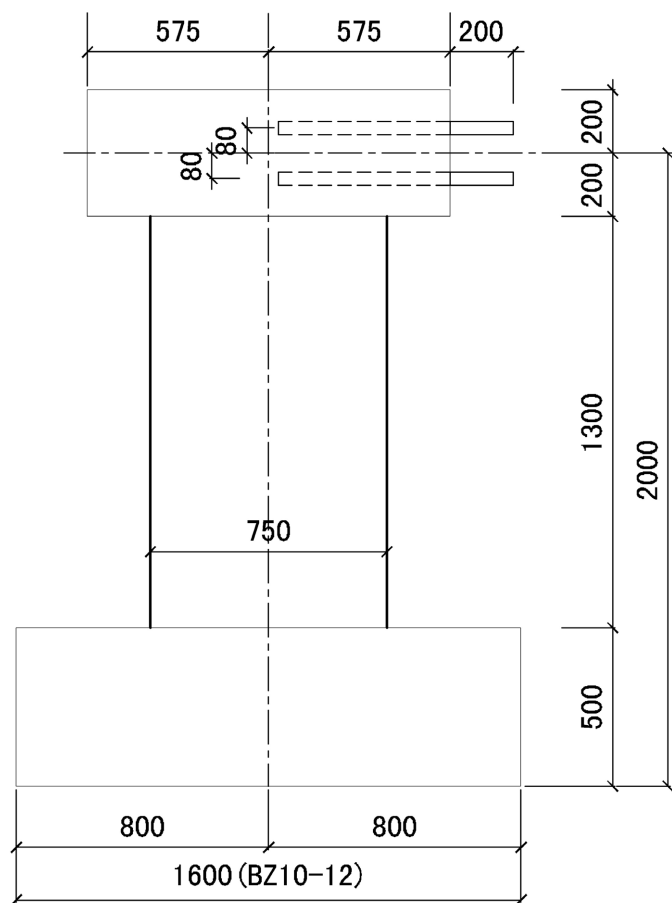


Figure 2. Elevation of flat column BZ10~BZ12 specimens

图 2. 扁柱 BZ10~BZ12 试件立面图

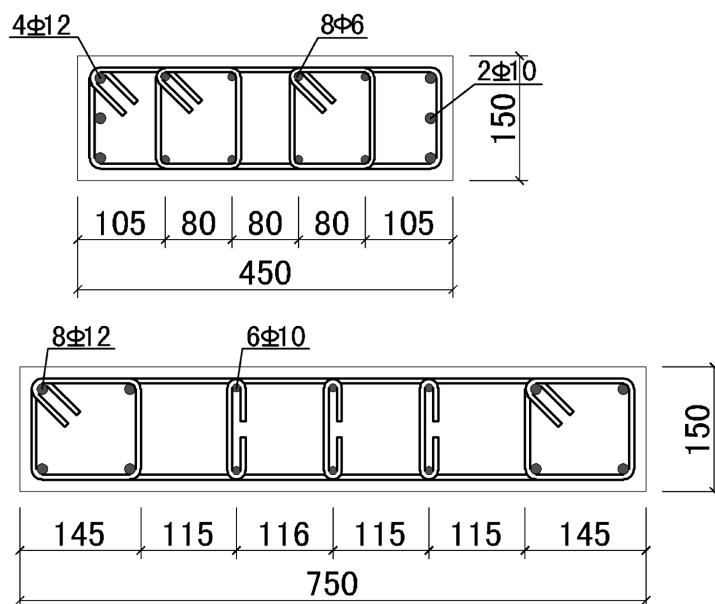


Figure 3. Schematic diagram of cross-section dimensions and reinforcement of flat columns

图 3. 扁柱截面尺寸及配筋示意



Figure 4. Photograph of test piece molding
图 4. 试件成型照片



Figure 5. Installation of test pieces
图 5. 试件安装情况图

Table 1. Specimen information sheet
表 1. 试件信息表

构件	柱纵筋/暗柱纵筋		柱中纵筋		暗柱箍筋		水平分布筋	
	纵筋	配筋率	纵筋	配筋率	箍筋	配箍率	分布筋	配筋率
BZ7	4Φ12 + 2Φ10	2.38	8Φ6	1.23	Φ6@100	0.75	-	-
BZ8	4Φ12 + 2Φ10	2.38	8Φ6	1.23	Φ6@100	0.75	-	-
BZ9	4Φ12 + 2Φ10	2.38	8Φ6	1.23	Φ6@100	0.75	-	-
BZ10	8Φ12	2.08	6Φ10	1.22	Φ6@100	0.77	Φ6@100	0.38
BZ11	8Φ12	2.08	6Φ10	1.22	Φ6@100	0.77	Φ6@100	0.38
BZ12	8Φ12	2.08	6Φ10	1.22	Φ6@150	0.77	Φ6@150	0.25

2.2. 材料属性

对本试验主要采用的钢筋，各取 3 组试样，通过电子万能试验机测试相关材性，测得钢筋材性数据

详见表 2，表中数值为相同材料试验平均值。试件采用 C30 商品混凝土，采用 42.5 号普通硅酸盐水泥，混凝土的配合比为，水泥:砂:石子:水 = 1.0:2.5:4.8:0.7。取不同强度等级混凝土棱柱体试块各 6 组，经过 28 天标准养护，得到的混凝土材性数据如图 6。

Table 2. Indicators of mechanical properties of reinforcing steel
表 2. 钢筋力学性能指标

钢筋直径/mm	弹性模量/MPa	屈服强度/Mpa	抗拉强度/MPa
Φ6	2.02×10^5	354	456
Φ10	2.01×10^5	420	546
Φ12	2.01×10^5	419	596

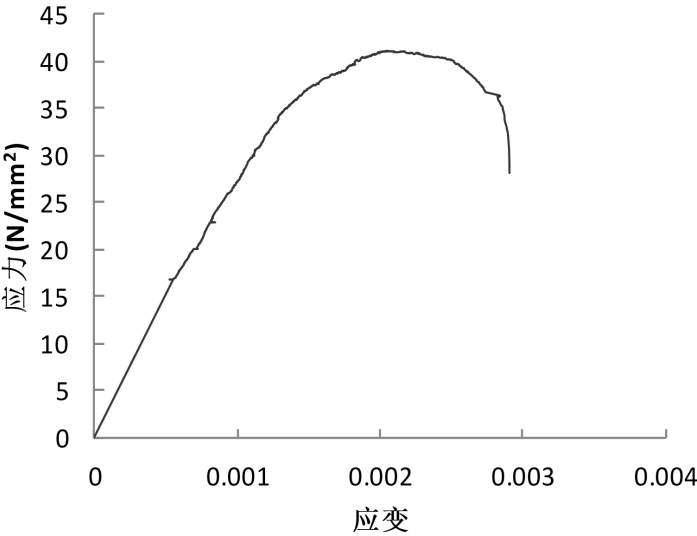


Figure 6. Concrete stress-strain test curve
图 6. 混凝土应力应变试验曲线

2.3. 加载制度

试验时首先由油压千斤顶施加预压力的 80%，重复两次，用以消除试件内部组织不均匀性，随后加至轴压比要求的竖向荷载，并记录稳定后节点中心的下降值，整个试验过程中竖向轴压力保持恒定，如表 3。然后由申科(SCHENCK)加载机施加水平荷载，采用周期为 100 s 的正弦波，加载初期控制加载力，以较小的加载级数逐级加载，每级循环一次，并观察应变片读数，当某一应变片读数达到接近屈服的应变读数时改用位移控制，采用屈服时的位移为加载级数逐级加载，每级循环三次。采用加载力和破坏现象双控确定试验终止条件，当构件承载能力下降到极限承载力的 80%左右时或产生明显破坏现象时(受拉侧混凝土裂缝明显展开、受压侧混凝土大面积压碎或钢筋拉断)停止试验。

Table 3. Loading table of specimen axial
表 3. 试件轴向加载表

试件	BZ7	BZ8	BZ9	BZ10	BZ11	BZ12
轴力/KN	300	450	600	480	960	960
轴压比	0.30	0.45	0.60	0.30	0.60	0.60

3. 试验结果分析

3.1. 试验现象

从试验现象上看, 初始裂缝均出现在试件受拉一侧底部, 距离地梁约 20 cm 高度的区域, 且均为水平拉裂缝。初始裂缝的位置及开裂现象并不受轴压力或截面高宽比的影响。在由开裂到屈服的过程中, 随加载的往复进行, 试件呈现出大致相同的开裂规律。初始出现于柱脚的水平裂缝均无法继续开展, 后续出现的斜向裂缝发展明显, 主斜裂缝角度大致在 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$, 均指向对侧柱脚。能够发展的主裂缝较少, 截面高厚比较大的(BZ10~BZ12)试件裂缝数量多于截面宽厚比较小的(BZ7~BZ9)。每级初始加载方向受拉侧的裂缝发育较快, 而对方向裂缝发展慢。试件受拉产生裂缝后, 反向加载受压时, 裂缝闭合完整, 加载初期混凝土无明显压碎现象时, 裂缝闭合后甚至较难发现。从裂缝开展的大趋势看, 受剪开裂是主要的破坏趋势。各试件均为剪压破坏, 轴力大的试件柱脚破坏程度略大于轴力小的试件。限于试件的加载过程及制作差异, BZ7 和 BZ8 仅在一个方向出现斜裂缝开展。BZ7~BZ9 尺寸相对较小, 加载时更易受到加载端轴力附加弯矩的影响, 则实际剪跨比应小于 2, 剪切破坏的现象更加明显。BZ10 和 BZ11 的破坏形式更接近于剪力墙, 裂缝的开展更细、更密。BZ12 的水平分布筋配筋率取规范要求的下限值, 从破坏现象上看, 破坏程度更严重, 且更突然。

3.2. 滞回曲线

剪压破坏扁柱滞回环成弓形, 形状较扁, 说明其耗能能力偏弱。初始卸载时, 滞回环会经历较陡的竖向卸载过程, 即位移不变加载力迅速下降, 这点明显不同于发生剪压破坏试件的滞回环形状。轴压力越大, 滞回环形状越扁, 耗能越差。按墙配筋扁柱的耗能能力随暗柱内箍筋及水平分布筋间距的增大而减小。试验试件滞回曲线如图 7。

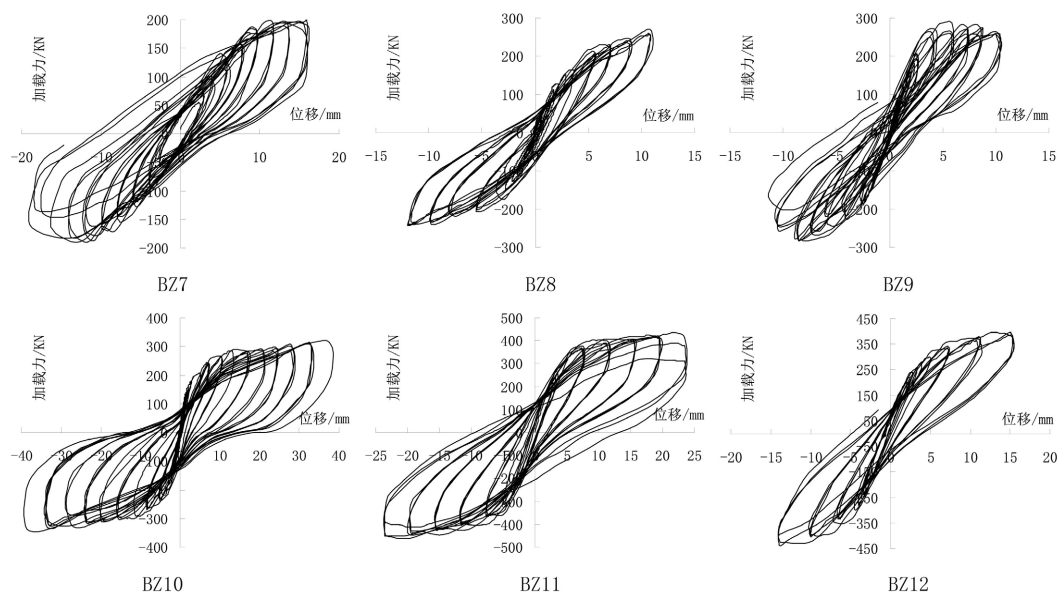


Figure 7. Specimen hysteresis curve

图 7. 试件滞回曲线

3.3. 骨架曲线

轴压比由 0.3 (BZ7, BZ10)提高到 0.6 (BZ9, BZ11)后, 试件的极限承载能力分别提高了 48% (BZ9 较

BZ7)和 34% (BZ11 较 BZ10), 说明轴压力对试件的承载力有一定影响, 且随轴压力的提高, 截面高宽比越小的试件其承载力的提高越多。试件的屈强比($F_y/F_{\max}$)普遍偏高在 0.75~0.8 之间, 说明此类构件安全储备较小, 试件屈服后会较快丧失承载力, 且从试验数据看, 截面高宽比较小的扁柱屈强比也相应较小。水平分布筋的配筋率由 BZ11 的 0.37% ($\Phi 6@100$)减少到 BZ12 的 0.25% ($\Phi 6@150$), 试件的屈服承载力和极限承载力仅略有减少(5.5%), 说明在一定轴力下, 扁柱构件抗剪压破坏的承载力受水平分布筋影响不大。按柱配筋的 BZ7~BZ9, 在同一加载级数内, 第二次加载较第一次加载强度退化较明显, 且轴压比越大强度退化越多, 而按墙配筋的 BZ10~BZ12, 因端部暗柱内箍筋的约束作用, 强度差别不大。与压弯破坏扁柱相比, 加载超过极限荷载时, 发生剪压破坏的扁柱迅速丧失承载能力, 几乎没有稳定的下降过程。试验试件骨架曲线结果如图 8。

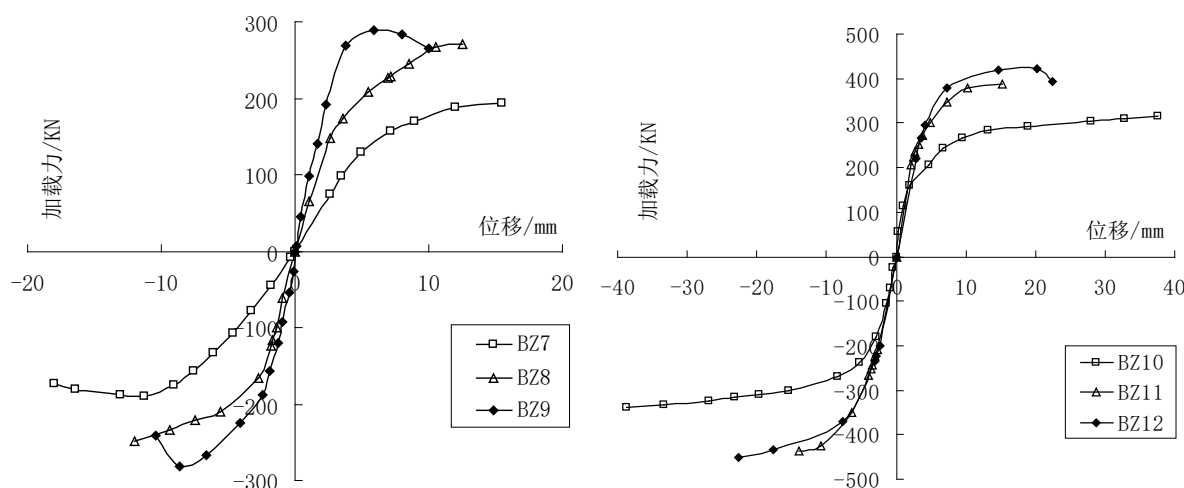


Figure 8. Skeleton curve
图 8. 骨架曲线

4. 恢复力模型研究

4.1. 恢复力曲线的试验拟合方法

骨架曲线拟合思路如下: 采用三折线拟合剪压破坏扁柱的骨架曲线, 详见图 9, 根据剪压破坏扁柱的受力特点, 按《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)中抗剪承载力计算公式 6.3.12, 即

$$F_{\max} = V \leq \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.07 N \quad (1)$$

按式 1 计算试件极限抗剪承载力, 材料强度取试验极限值。然后, 归纳屈服承载力与极限承载力的关系, 假定试件破坏时的承载力 F_u 等于极限抗剪承载力 $F_{\max}$, 即图 9 中点 M→U 线段水平; 回归极限承载力时位移角 θ_m 的函数关系, 由试验数据归纳屈服位移角 θ_y 、破坏状态位移角 θ_u 与 θ_m 的关系。

基于归一化耗能指数的滞回规律模型的拟合思路如下: 首先, 同样对滞回曲线的各滞回环按式 2 进行标准化处理, 第 i 步加载时滞回环的最大加载位移为 $\Delta_{i,\max}$, 最大加载力为 $F_{i,\max}$ 。

$$\begin{aligned} f_i &= F_i / F_{i,\max} \quad (\text{第 } i \text{ 个滞回环}) \\ \delta_i &= \Delta_i / \Delta_{i,\max} \end{aligned} \quad (2)$$

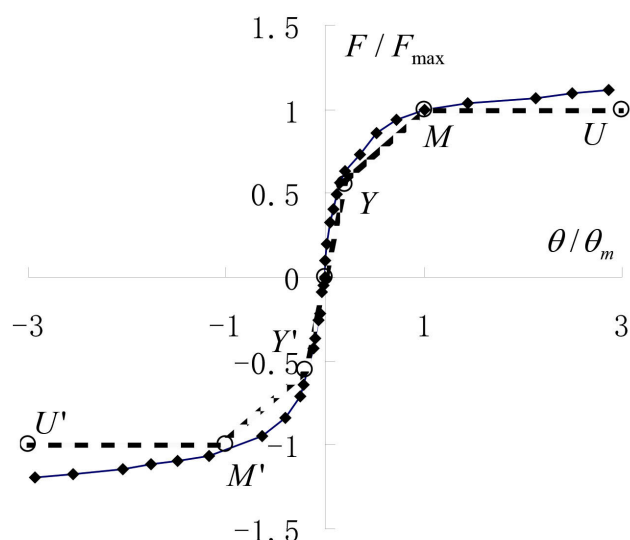


Figure 9. Schematic diagram of triple folded skeleton curve fitting

图 9. 三折线骨架曲线拟合示意图

归一化的滞回环形状如图 10 所示, 滞回环形式采用二折线平行四边形的形式, 假定滞回曲线的卸载刚度, 即线段 AB 的斜率等于扁柱初始弹性刚度。根据试验数据统计关键性能点处(屈服及破坏)归一化滞回环的面积 S_{ABCD} , 要求拟合滞回环面积, 即归一化能量耗散指数 E' 与试验曲线面积相同, 如下式 3。

$$E' = S_{ABCD} \quad (3)$$

统计 E' 随试验加载过程的变化规律, 由此得到滞回关系。基于归一化耗能指数的滞回规律模型能准确模拟试验耗能效果, 只需确定参数 E' 的统计公式即可得到标准滞回环中各点的坐标参数, 根据式 2 可反推得到关键性能点的滞回曲线。此方法应用相对简单, 有利于大样本的外推统计。

根据上述拟合方法和回归公式, 结合已知骨架曲线, 即可得到完整的恢复力曲线模型。

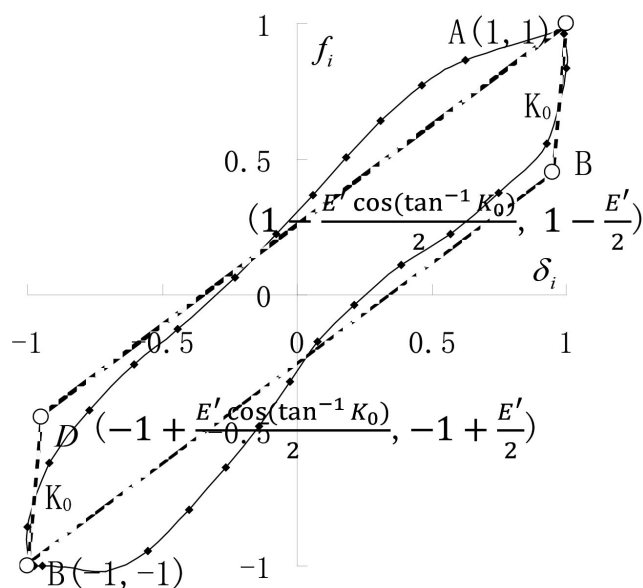


Figure 10. Schematic diagram of standard hysteresis loop

图 10. 标准滞回环示意图

4.2. 骨架曲线的关键性能点拟合

根据 1.2 节材料试验成果, 按式 1 计算得到的承载力极限值 $F_{m,p}$ 与试验值 $F_{m,t}$ 的对比情况如表 4。由表中数据可以看到, 按规范公式计算的构件极限承载力与试验结果对比良好。小轴压比时计算值略高于试验值, 考虑规范公式是在大样本数据基础上取一定保证率的下限回归公式, 计算结果合理。

Table 4. Indicators of mechanical properties of reinforcing steel

表 4. 钢筋力学性能指标

构件编号	剪跨比 λ	截面宽 b/mm	截面高 h_0/mm	箍筋/水平筋强度 $f_{yv}/\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	Asv/s	轴压力 N/kN	承载力公式值 $F_{m,p}/\text{kN}$	承载力试验值 $F_{m,t}/\text{kN}$
BZ7	2	150	450	456	0.5652	300	215.729	192
BZ8	2	150	450	456	0.5652	450	241.979	259
BZ9	2	150	450	456	0.5652	600	260.354	285
BZ10	2	150	750	456	0.5652	480	358.1484	326
BZ11	2	150	750	456	0.5652	960	417.9984	436
BZ12	2	150	750	456	0.3768	960	366.6906	402

试验主要变化参数为试件的轴压比, 这里仅回归试件在极限承载力时的位移角 θ_m 与轴压比 n 之间的函数关系, 详见式 4 和表 5。

$$\theta_m = h_1 + h_2 \cdot n \quad (4)$$

Table 5. Parameter values of fitted equations

表 5. 拟合公式参数值

参数	h_1		h_2	
适用试件	BZ7~9	BZ10~12	BZ7~9	BZ10~12
取值	1.444	1.067	-3.108	-1.865

根据试验数据可假定, 试件屈服承载力 F_y 为极限承载力 $F_{\max}$ 的 0.77 倍, 屈服位移角 θ_y 为极限承载力时位移角 θ_m 的 0.25 倍, 即:

$$\begin{aligned} F_y &= 0.77F_{\max} \\ \theta_y &= 0.25\theta_m \end{aligned} \quad (5)$$

仍取试验极限位移角为恢复力模型的极限位移角 θ_u 。

4.3. 归一化耗能指数的拟合

按前述方法对各试件滞回曲线归一化处理后得到归一化耗能指数与相对位移角的关系见图 11, 线性回归关系式为(θ_i 为第 i 个滞回环对应加载位移角):

$$E' = 0.409 + 0.406 \frac{\theta_i}{\theta_m} \quad (6)$$

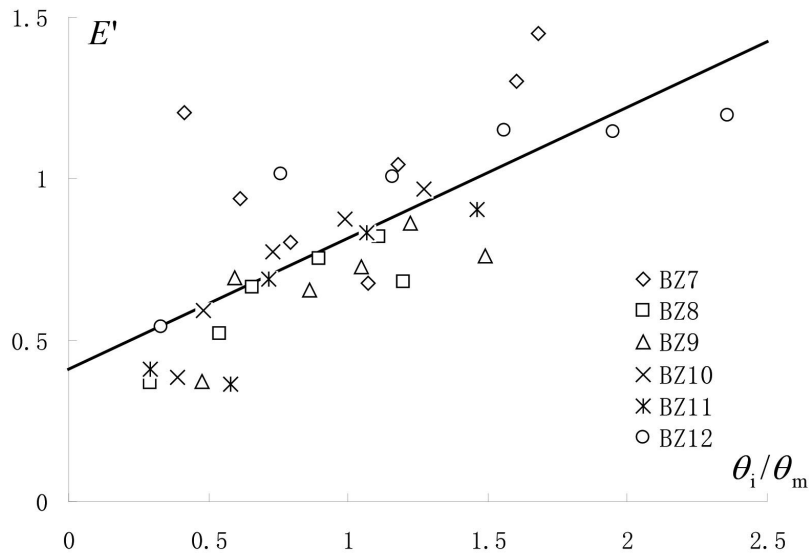


Figure 11. Linear regression of normalized energy consumption index against relative displacement angle
图 11. 归一化耗能指数与相对位移角关系的线性回归

4.4. 恢复力模型的试验验证

按上述公式可定量得到任意加载位移时两折线滞回环的刚度量值, 同时结合骨架曲线的求解, 可以得到各试件加载全过程的加载力 - 位移演化曲线, 详见图 12 (粗红线为拟合结果)。由图可知, 按基于归一化耗能指数的两折线刚度滞回规律得到的恢复力曲线与试验结果吻合度较高, 各加载阶段的刚度、强度变化规律拟合结果与试验相比具有较高的可靠度。

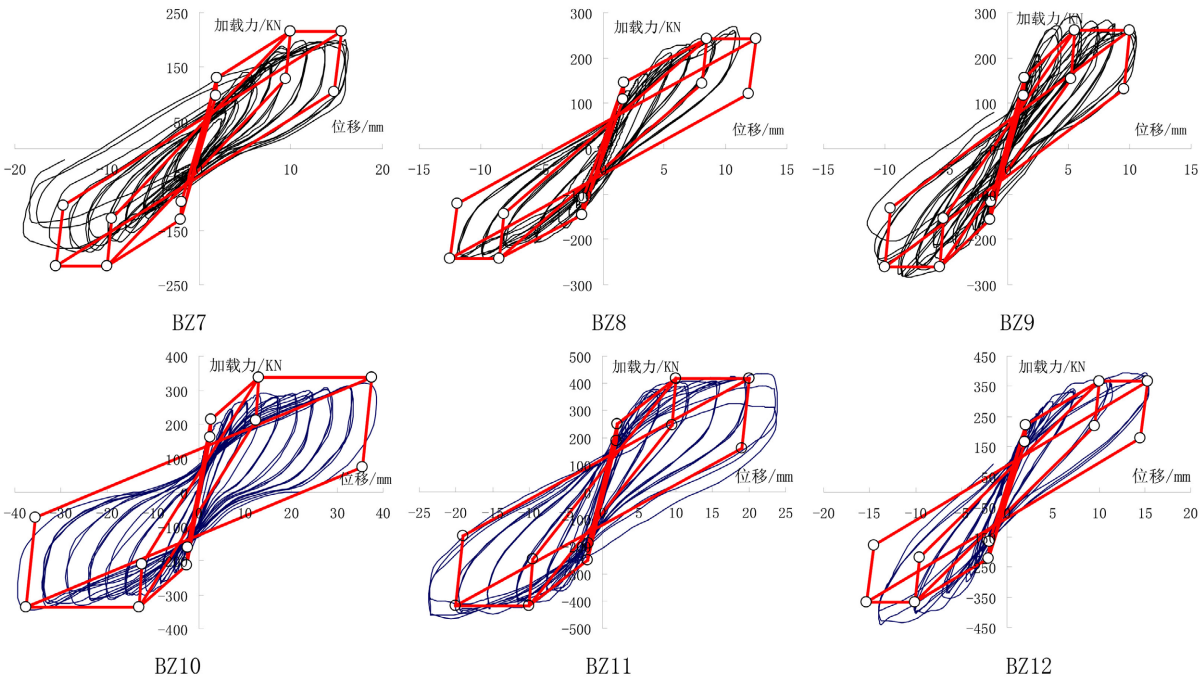


Figure 12. Comparison of fitted restoring force curves with test results
图 12. 拟合恢复力曲线与试验结果对比图

5. 结论

本文在 6 根发生剪压破坏的, 变轴压比、变截面高厚比、变水平分布筋配筋率的, 1:3 的缩尺钢筋混凝土扁柱低周反复拟静力试验的基础上, 定量总结此类构件的受力性能; 据此提出适用于剪压破坏的、基于归一化耗能指数的两参数滞回规律模型。试验结果揭示了剪压破坏型扁柱在受力过程中的破坏模式、耗能能力和刚度退化规律, 为恢复力模型的构建奠定了基础。

综合前述研究内容, 可得以下主要结论:

1) 发生剪压破坏的扁柱在变形过程中出现的裂缝数量较少, 只有一条斜向主裂缝发展为控制裂缝。此类构件的屈强比普遍较高, 构件屈服后强度不会再有较大提高, 安全储备小。

2) 骨架曲线上升段曲线较陡, 屈服后坡度变缓; 由于强轴方向纵筋或竖向分布筋的相继屈服, 由屈服到极限强度段距离较长; 达到极限强度后曲线平段维持长度短, 随后构件迅速破坏, 强度急剧下降, 几乎不存在稳定的下降段, 这点与压弯破坏试件的骨架曲线有明显不同。由于缺少暗柱的加强作用, 按柱配筋扁柱在同级内多次加载时强度退化程度比按墙配筋的构件更严重。

3) 发生剪压破坏扁柱构件的延性较差, 轴压比的增加虽会提高构件的承载能力, 但同时也会降低其延性水平。较小的剪跨比是造成非延性破坏的主要因素, 要想获得一定的延性水平, 必须严格控制其轴压比和剪跨比, 同时应加强水平分布筋的配筋率, 提高扁柱抗剪承载力。构件耗能能力差, 滞回曲线呈弓形, 较狭长, 中间有一定捏拢现象, 轴压比越大曲线越狭长, 主要的耗能机制是斜裂缝面上的钢筋与受压区混凝土的塑性变形。

4) 在试验数据基础上提出的采用预定形状的三折线骨架曲线结合归一化耗能指数的滞回规律模型的恢复力曲线, 具有参数少, 应用简单的优点, 值得推广。

参考文献

- [1] 李杰, 李国强. 地震工程学导论[M]. 北京: 地震出版社, 1992.
- [2] 马颖. 钢筋混凝土柱地震破坏方式及性能研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [3] 李兵, 李宏男, 曹敬党. 钢筋混凝土高剪力墙拟静力试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(2): 230-234.
- [4] 李兵, 李宏男. 钢筋混凝土低剪力墙拟静力试验及滞回模型[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(5): 869-874.
- [5] 李宏男, 王强, 李兵. 钢筋混凝土框架柱多维恢复力特性的试验研究[J]. 东南大学学报, 2002, 32(5): 728-732.
- [6] 董宇光. 型钢与混凝土粘结——滑移关系及型钢混凝土剪力墙抗震性能研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2006.
- [7] 吕西林, 董宇光, 丁子文. 截面中部配置型钢的混凝土剪力墙抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(6): 101-107.
- [8] 马泽峰. 压弯破坏高强混凝土扁柱恢复力模型试验[J]. 水利与建筑工程学报, 2025, 23(2): 32-39.
- [9] 刘义, 赵鸿铁, 薛建阳, 陈宗平. 型钢混凝土异形柱恢复力特性的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(2): 86-91.
- [10] 郭子雄, 张志伟, 黄群贤, 刘阳. 型钢混凝土柱恢复力模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(5): 79-85.
- [11] 李正良, 冯宏, 陈永庆. HSRC 框架柱的恢复力特性[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(6): 888-892.
- [12] 邓宗才, 曾洪超, 徐海滨. 层内混杂 FRP 加固混凝土柱恢复力模型研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2012, 33(6): 69-72.
- [13] 马恺泽, 梁兴文, 李斌. 方钢管高强混凝土柱恢复力模型研究[J]. 世界地震工程, 2011, 27(1): 54-59.