

刘科, 黄娇, 马煜东, 张宁, 苏信智, 2019. 钢筋混凝土柱的破坏形态及变形能力研究. 震灾防御技术, 14 (4): 750—759. doi: 10.11899/zfy20190406

钢筋混凝土柱的破坏形态及变形能力研究¹

刘 科 黄 娇 马煜东 张 宁 苏信智

(长安大学建筑工程学院, 西安 710061)

摘要 对钢筋混凝土 (RC) 柱在地震作用下的变形性能进行量化, 本文从太平洋地震研究中心柱数据库中收集到 123 根 RC 柱抗震性能试验数据, 提出基于参数剪跨比和弯剪比的 RC 柱破坏形态判别标准; 在弯曲破坏、弯剪破坏、剪切破坏三种破坏形态下, 研究了轴压比、剪跨比、配箍特征值等参数对位移角的显著性影响, 通过回归分析归纳出三种破坏形态下屈服位移角和极限位移角的回归方程, 回归系数显著性概率均小于 0.05。结果表明: 本文提出的 RC 柱破坏形态判别标准准确度高, 适应性强; 位移角线性回归方程具有合理性。

关键词: 框架柱 变形限值 破坏形态判别 位移角

引言

基于性能的结构抗震设计克服了目前抗震设计的局限性, 是未来抗震设计的发展方向。保证结构在地震作用下的变形需求不超过其变形性能限值是实现基于性能的抗震设计的重要一环。因此, 能否准确计算变形性能限值对结构的抗震性能评估结果具有重要的影响。地震作用下, 钢筋混凝土 (RC) 柱是框架结构中的重要受力构件, 且容易遭到破坏, 从而引起建筑物的倒塌破坏, 给生命和财产造成巨大损失。

RC 柱构件在地震作用下由于受力特点和变形能力不同会发生不同类型的破坏, 根据构件自身材料特性的不同, 常常表现出弯曲破坏、弯剪破坏和剪切破坏三种形态。研究表明, RC 柱的破坏形态不同, 其变形性能和延性性能存在较大差异。为了实施基于性能的抗震设计, 工程师必须能够根据构件的设计参数或分析参数对构件的破坏形态进行合理的预测。因此, 为分析和研究 RC 柱的变形能力, 首先应对构件的破坏形态进行判别。目前关于 RC 柱破坏形态的判别方法主要包括以下几种: (1) 基于剪跨比的判别方法, 一般认为 $\lambda \leq 2$ 构件发生剪切破坏, $2 < \lambda < 4$ 构件发生弯剪破坏, $\lambda \geq 4$ 构件发生弯曲破坏 (万海涛等, 2010); (2) 基于试验结果的经验判别方法: 主要是根据试验结果中是否出现剪切变形来划分三种破坏形态 (Berry, 2004); (3) 基于抗剪强度的判别方法: 采用 45° 桁架抗剪模型通过对比抗剪需求与构件的抗剪承载力对破坏形态进行划分 (Sezen 等, 2004); 而目前关于变形限值的研究有: Maekawa 等 (2000) 认为影响 RC 柱屈服后变形性能的主

¹ 基金项目 国家自然科学基金项目 (51578077)

[收稿日期] 2019-03-26

[作者简介] 刘科, 女, 生于 1996 年。硕士研究生。主要从事结构工程抗震研究。E-mail: liuke070025@163.com

要因素是剪跨比、轴压比和配箍特征值，并给出考虑这几种因素的位移延性表达式；Elwood 等（2006）提出 RC 柱的理想位移角骨架模型用来描述弯曲屈服、剪切破坏及轴向破坏 3 个关键破坏特征点，并采用该模型计算框架振动台试验 RC 柱特征点的位移角；戚永乐（2012）利用有限元分析，提出基于统一的材料应变限值的 RC 梁、柱及剪力墙构件的位移角限值等。

给出 RC 柱破坏形态的判别条件是得出其变形性能指标的第一步，准确计算 RC 柱的变形性能限值，对实现 RC 结构的抗震性能设计具有重要意义。而目前对于破坏形态的判别条件，方法（1）虽然简单实用，但准确率过低；方法（2）缺乏预判性，不能直接用于性能设计；方法（3）将在文中进行验证。当 RC 柱处于复杂受力状态时，目前已有的位移角计算公式可能产生较大误差，且存在参数较多，计算过于繁琐等缺点。本文将采用性能设计的方法对 RC 柱的变形性能进行研究，首先利用收集的试验数据提出 RC 柱不同破坏形态下的判别条件，选择位移角作为柱构件的变形性能指标，进行了轴压比、剪跨比、配箍特征值等参数对位移角的显著性影响分析，回归分析出屈服位移角和极限位移角的经验公式，对 RC 柱的变形性能进行了量化¹。

1 破坏形态分析

本文从美国太平洋地震研究中心（Pacific Earthquake Engineering，简称 PEER）柱数据库中收集了 81 根弯曲破坏柱、26 根弯剪破坏柱和 16 根剪切破坏柱的抗震性能试验数据，如表 1 所示。所有试验数据均含有完整的滞回曲线和骨架曲线，柱试件的剪跨比、轴压比、纵筋配筋率和体积配箍率的分布结果如图 1 所示。

对收集的试验数据进行筛选和处理，按式（1）将国外试验数据中混凝土强度设计值 f_c 、标准值 f_{ck} （棱柱体轴心抗压强度）和标准立方体抗压强度 f_{cu} 进行换算；按式（2）将混凝土圆柱体抗压强度 f'_c 换算为混凝土轴心受压标准值 f_{ck} 。

$$f_c = f_{ck}/1.4 = 0.76f_{cu}/1.4 \approx 0.55f_{cu} \quad (1)$$

$$f'_c = 0.76f_{cu} \approx 0.76f'_c/0.86 \approx 0.88f'_c \quad (2)$$

利用收集到的数据对基于抗剪强度的判别方法进行验证，在美国的《混凝土抗震规范》（ASCE/SEI 41—06，2007）中，研究者估算构件的抗剪承载力通常采用 Sezen 和 Moehle 提出的 45°桁架抗剪模型，并通过比较抗剪需求 V_p （抗弯强度对应的剪力）和折减后的抗剪承载力 V_n 进行破坏形态的划分，划分标准如表 1 所示。

表 1 ASCE/SEI 41-06 标准中的柱破坏模式划分

Table 1 Column failure mode division in ASCE/SEI 41-06

折减后的弯剪比	柱中箍筋细部构造形式		
	135°弯钩的箍筋	90°弯钩的封闭环形箍	其他构造形式
$V_p/(V_n/k) \leq 0.60$	弯曲破坏	弯剪破坏	弯剪破坏
$0.60 < V_p/(V_n/k) \leq 1$	弯剪破坏	弯剪破坏	剪切破坏
$V_p/(V_n/k) > 1$	剪切破坏	剪切破坏	剪切破坏

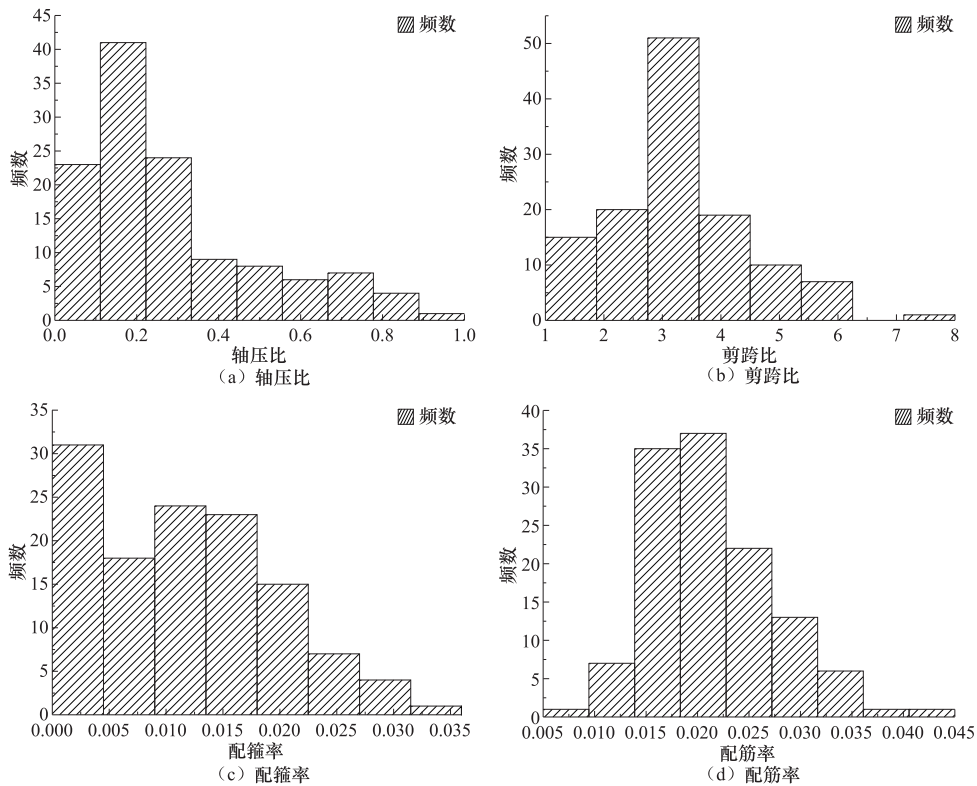


图1 柱试件参数分布直方图

Fig.1 Column test piece parameter distribution histogram

表中, V_p 为抗剪需求; V_n 为折减后的抗剪承载力, V_p 和 V_n 分别按下式 (3) 和 (4) 进行计算:

$$V_p = \frac{M_{\max}}{a} \quad (3)$$

$$V_n = k \frac{A_v f_y d}{s} + \lambda k \left(\frac{6\sqrt{f'_c}}{M/Vd} \sqrt{1 + \frac{N_u}{6\sqrt{f'_c} A_g}} \right) 0.8 A_g \quad (4)$$

$$k = \begin{cases} 1.0 & \mu_\delta \leq 2.0 \\ 1.15 - 0.075\mu_\delta & 2.0 < \mu_\delta < 6.0 \\ 0.7 & \mu_\delta \geq 6.0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, M_{\max} 为最大抗弯承载力; f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度; k 为混凝土抗剪强度折减因子; μ_δ 为移延性; N_u 为压力 (当受压时=0); A_g 为毛截面面积; A_v 为筋总截面面积; f_y 为筋屈服强度; d 为构件有效高度; S 为剪钢筋的垂直间距; $M/Vd > 4$ 时取 4, 小于 2 时取 2。

本文通过收集到的试验数据对上述判别方法的有效性和准确性进行验证, 根据柱构件截面的弯矩-曲率关系计算得到最大抗弯承载力 M_{\max} , 抗剪需求 V_p 和折减后的抗剪承载力 V_n 通过上

述理论公式 (3) 和 (4) 计算得出, 利用 V_p 和 V_n 进一步计算出折减后的弯剪比, 根据 $V_p/(V_n/k)$ 的计算结果和界限值, 可以得出破坏形态与 $V_p/(V_n/k)$ 的关系, 如图 2 所示。

由图 2 可知, 弯曲破坏和弯剪破坏的试验数据基于上述判别标准具有较大的离散性, 判别标准的 3 个区段之间均分布有弯曲破坏和弯剪破坏的 $V_p/(V_n/k)$, 并且有较多重叠的部分, 弯曲破坏发生的概率随着弯剪比 $V_p/(V_n/k)$ 的增大变得越来越小, 而弯剪破坏发生的概率则变得越来越大, 因而以 $V_p/(V_n/k)=1.0$ 和 $V_p/(V_n/k)=0.6$ 为界限也不能够对 RC 柱的破坏形态进行准确区分。

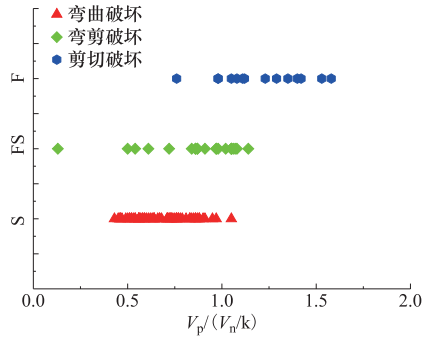


图 2 破坏形态与 $V_p/(V_n/k)$ 的关系

Fig.2 Relationship between failure form and $V_p/(V_n/k)$

2 破坏形态判别

2.1 破坏形态影响因素

框架结构中的 RC 柱受到压力、弯矩和剪力的共同作用, 所以构件的正截面承载力和抗剪承载力影响其最终的破坏形态, 由《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010 可知, 对称配筋的 RC 柱, 其抗压承载力、抗弯承载力和抗剪承载力的计算公式如下。

$$N = \alpha_1 f_c b x \quad (6)$$

$$M = \alpha_1 f_c b x \left(\frac{h-x}{2} \right) + A_s f_y (h_0 - a_s) \quad (7)$$

$$V = 0.7 f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (8)$$

通过分析上述的计算式可知, 纵筋配筋率、纵筋屈服强度、混凝土抗压强度和截面尺寸对 RC 柱的正截面承载力有影响, 而配箍率、箍筋屈服强度、混凝土抗拉强度以及截面

尺寸对 RC 柱的抗剪承载力有影响, 因而设计参数共同影响着构件的最终破坏形态, 同时剪跨比也会对剪切破坏有影响。这些设计参数之间相互影响、相互作用, 当这些参数的组合方式不同时, 构件可能会发生不同形态的破坏。

2.2 基于参数的破坏形态判别

为了对破坏形态进行更加准确的分类, 本文需要根据破坏形态与各影响因素之间的关系提出一种基于参数的破坏形态划分标准。由于柱构件的破坏形态与剪跨比、弯剪比、体积配箍率和纵筋配筋率均有关系, 因此本文结合收集到的试验数据可以得到破坏形态与任意

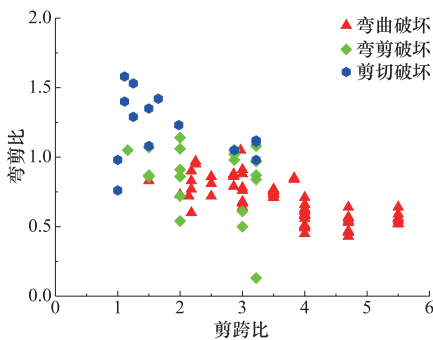


图 3 破坏形态与弯剪比和剪跨比的关系

Fig.3 Relationship between Failure Mode and Bending-shear Ratio and Shear-to-span Ratio

两个参数之间的关系，如图 3 和表 2 所示。

表 2 破坏形态与剪跨比和配箍特征值、体积配箍率、配筋率之间的关系

Table 2 Relationship between failure mode and shear span ratio and hoop characteristic value, volume hoop ratio and reinforcement ratio

破坏状态	剪跨比 λ	配箍特征值 β_v	体积配箍率 ρ_v %	配筋率 ρ %
弯曲破坏	$1.50 \leq \lambda \leq 5.50$	$0.02 \leq \beta_v \leq 0.45$	$0.30 \leq \rho_v \leq 2.80$	$0.70 \leq \rho \leq 3.30$
弯剪破坏	$1.50 \leq \lambda \leq 3.22$	$0.02 \leq \beta_v \leq 0.23$	$0.20 \leq \rho_v \leq 1.60$	$1.30 \leq \rho \leq 3.80$
剪切破坏	$1 \leq \lambda \leq 3.22$	$0.02 \leq \beta_v \leq 0.51$	$0.20 \leq \rho_v \leq 1.80$	$1.30 \leq \rho \leq 4.10$

从图 3 可知，弯剪比 $V_p/(V_n/k)$ 和剪跨比 λ 能够较好的区分 RC 柱的破坏形态。由表 2 可知，按剪跨比 λ 与配箍特征值 β_v 、体积配箍率 ρ_v 、配筋率 ρ 对破坏形态进行划分，重叠的区段较大，分界线模糊，使用这些参数无法较好的区分 RC 柱的破坏形态。以剪跨比和配箍特征值为例，弯曲破坏的判别标准为 $1.50 \leq \lambda \leq 5.50$ 或 $0.02 \leq \beta_v \leq 0.45$ ，弯剪破坏的判别标准为 $1.50 \leq \lambda \leq 3.22$ 或 $0.02 \leq \beta_v \leq 0.23$ ，弯曲破坏的判别标准包含有弯剪破坏的判别标准。因此本文以弯剪比 $V_p/(V_n/k)$ 和剪跨比 λ 为参数，对 RC 柱的破坏形态判别标准进行分析：

(1) 当柱构件满足 $\lambda \leq 2$ 、 $V_p/(V_n/k) \geq 1.0$ 或者满足 $2 \leq \lambda \leq 4$ 、 $V_p/(V_n/k) \geq 1.0$ 时，认为主要发生剪切破坏。

(2) 当柱构件满足 $0.7 < V_p/(V_n/k) < 1.0$ 或者满足 $V_p/(V_n/k) < 1.0$ 时，认为主要发生弯剪破坏。

(3) 当柱构件满足 $\lambda > 2$ 、 $V_p/(V_n/k) \leq 0.8$ 或者满足 $V_p/(V_n/k) \leq 0.7$ 时，认为主要发生弯曲破坏。

(4) 柱构件满足 $\lambda > 4$ 、 $V_p/(V_n/k) > 0.8$ 的情况罕见，在此不做分类说明。

依据上述分析过程，得到 RC 柱基于剪跨比和弯剪比的破坏形态判别标准，如表 3 所示。

表 3 钢筋混凝土柱破坏形态判别标准

Table 3 Discrimination criteria for failure mode of reinforced concrete columns

破坏形态	判断标准
弯曲破坏	$2 < \lambda \leq 4$ 且 $V_p/(V_n/k) \leq 0.7$
	$\lambda > 4$ 且 $V_p/(V_n/k) \leq 0.8$
弯剪破坏	$\lambda \leq 2$ 且 $V_p/(V_n/k) < 1.0$
	$2 < \lambda \leq 4$ 且 $0.7 < V_p/(V_n/k) < 1.0$
剪切破坏	$\lambda \leq 2$ 且 $V_p/(V_n/k) \geq 1.0$
	$2 < \lambda \leq 4$ 且 $V_p/(V_n/k) \geq 1.0$

依据表 3 的分类标准，结合收集的试验数据发现，弯曲破坏柱的试验数据符合上述分类标准占比 76%，剪切破坏柱的试验数据符合上述分类标准占比 95%，而弯剪破坏柱的试验数据符合上述分类标准占比 78%。由图 3 可知，剪跨比为 3，弯剪比为 1 附近的弯曲破坏和弯

剪破坏的数据重合较多，因此，弯曲破坏柱和弯剪破坏柱的误判可能性稍大，分别为 24% 和 22%。由于弯剪破坏兼具弯曲破坏和剪切破坏的某些特征，RC 柱的弯曲破坏与弯剪破坏、弯剪破坏与剪切破坏之间本身存在难以严格区分的特性，要找到一组百分之百准确区分 RC 柱的弯曲、弯剪及剪切破坏形态的参数十分困难。综上，本文所提出基于参数的破坏形态判别标准具有一定的合理性和准确性。

3 变形限值计算分析

国内外对 RC 柱进行了大量研究（刘良林等，2016；苏佶智等，2018；董正方等，2010；Ahani 等，2019），但研究者大多主要关注承载力等因素（杨君，2007；李强等，2015；蒋友宝等，2017），本文采用基于性能设计方法，对柱本身的变形性能进行深入研究。常见的衡量构件变形的指标有位移角、塑性区转角及弦转角等，本文选择位移角作为柱构件的变形性能指标。假设三种破坏状态下的位移角 θ_i 与轴压比 n 、剪跨比 λ 、配箍特征值 β_v 、体积配箍率 ρ_v 和纵筋配筋率 ρ 均存在线性关系，即位移角 θ_i 与各影响因素的线性关系如式（9）所示。

$$\begin{cases} \theta_i = \alpha_0 + \alpha_1 \lambda + \alpha_2 n + \alpha_3 \beta_v + \alpha_4 \rho_v + \alpha_5 \rho + \varepsilon_i \\ \varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2) \end{cases} \quad (9)$$

3.1 线性相关分析

线性相关分析是研究两个变量之间线性关系密切程度的一种常用统计方法（Lee 等，2014），描述这种线性关系和方向的统计量称为相关系数 r 。本文采用 Spearman 相关系数 r ， r 位于 -1 和 1 之间，当 $r > 0$ ，表明两个变量为正相关，当 $r < 0$ ，为负相关。一般情况下， $|r| > 0.8$ 表示两个变量高度相关，当 $|r| < 0.3$ 时，表示两个变量不相关。

为计算简便，本文利用 SPSS 软件对三种破坏形态下的各影响因素与屈服位移角和极限位移角进行 Spearman 相关性分析，相关系数分析结果如表 4 和表 5 所示。

表 4 各影响因素与屈服位移角的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between various influencing factors and yield displacement angle

影响因素	弯曲破坏柱		弯剪破坏柱		剪切破坏柱	
	Spearman 相关系数	Sig. (双侧)	Spearman 相关系数	Sig. (双侧)	Spearman 相关系数	Sig. (双侧)
轴压比	-.822**	.000	-.925**	.000	-.621*	.031
轴压比倒数	.822**	.000	.925**	.000	.621*	.031
剪跨比	.063	.647	.042	.857	.120	.726
配箍特征值	.187	.094	-.279	.167	.320	.227
体积配箍率	-.017	.903	-.270	.034	.381	.247
纵筋配筋率	.360**	.007	.251	.237	-.506	.112

注：**在 0.01 显著性水平（双侧）上显著相关；*在 0.05 显著性水平（双侧）上显著相关

表 5 各影响因素与极限位移角的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between various influencing factors and ultimate displacement angle

影响因素	弯曲破坏柱		弯剪破坏柱		剪切破坏柱	
	Spearman 相关系数	Sig.(双侧)	Spearman 相关系数	Sig.(双侧)	Spearman 相关系数	Sig.(双侧)
轴压比	-.773**	.000	-.798**	.000	-.922**	.000
轴压比倒数	.773**	.000	.798**	.000	.922**	.000
剪跨比	-.269*	.037	.563**	.010	.837**	.000
配箍特征值	.458**	.000	-.588**	.006	.611	.108
体积配箍率	.348**	.006	-.475*	.034	.522	.184
纵筋配筋率	.509**	.000	.181	.445	-.638	.015

注: **在 0.01 显著性水平 (双侧) 上显著相关; *在 0.05 显著性水平 (双侧) 上显著相关

由表 4 和表 5 可知, RC 柱的屈服位移角 θ_y 在弯曲、弯剪、剪切 3 种破坏形态下, 与轴压比 n 、配筋率 ρ 的相关系数较其他因素偏大, 且与 n 为负相关, 与 ρ 为正相关。RC 柱的极限位移角 θ_u 在弯曲破坏状态下, 与轴压比 n 、配箍特征值 β_v 、纵筋配筋率 ρ 相关系数分别为 $r=-.77^{**}$ 、 $\text{Sig.}=0.00$, $r=.46^{**}$ 、 $\text{Sig.}=0.00$, $r=.51^{**}$ 、 $\text{Sig.}=0.00$, 表明 θ_u 与这 3 个变量间呈现出较强的线性关系, 且与 n 为负相关, 与 β_v 、 ρ 均为正相关; 在弯剪破坏状态下, θ_u 与轴压比 n 、剪跨比 λ 、配箍特征值 β_v 相关系数分别为 $r=-.80^{**}$ 、 $\text{Sig.}=0.00$, $r=.56^{**}$ 、 $\text{Sig.}=0.01$, $r=-.59^{**}$ 、 $\text{Sig.}=0.01$, 表明 θ_u 与这 3 个变量间呈现出较强的线性关系, 且与 n 、 β_v 均为负相关, 与 λ 为正相关; 在剪切破坏状态下, θ_u 与轴压比 n 、剪跨比 λ 、纵筋配筋率 ρ 相关系数分别为 $r=-.99^{**}$ 、 $\text{Sig.}=0.00$, $r=.84^{**}$ 、 $\text{Sig.}=0.00$, $r=-.64^{**}$ 、 $\text{Sig.}=0.02$, 表明 θ_u 与这三个变量间呈现出较强的线性关系, 且与 n 、 ρ 均为负相关, 与 λ 为呈正相关。

3.2 位移角回归分析

基于以上显著性分析, 轴压比 n 、剪跨比 λ 、配箍特征值 β_v 、体积配箍率 ρ_v 和纵筋配筋率 ρ 这 5 个参数与 θ_y 、 θ_u 均具有很大相关性, 本文分别建立以下破坏状态下 RC 柱的回归公式: 3 种破坏状态下 θ_y 与 n 和 ρ 为控制参数的公式; 弯曲破坏状态下的 θ_u 与 n 、 β_v 和 ρ 为控制参数的公式; 弯剪破坏状态下的 θ_u 与 n 、 β_v 和 λ 为控制参数的公式; 剪切破坏状态下的 θ_u 与 n 、 λ 和 ρ 为控制参数的公式。利用 SPSS 软件进行线性回归分析最终得到 RC 柱的回归方程, 如表 6 所示。

表 6 不同破坏形态下位移角的回归方程

Table 6 Regression equations of displacement angles under different failure modes

破坏状态	回归方程
弯曲破坏	$\theta_y = 0.011 - 0.015n + 0.136\rho$
	$\theta_u = 0.170 - 0.062n + 0.030\beta_v + 1.744\rho$
弯剪破坏	$\theta_y = 0.011 - 0.015n + 0.155\rho$
	$\theta_u = 0.029 - 0.097n + 0.029\lambda + 0.020\beta_v$
剪切破坏	$\theta_y = 0.032 - 0.012n + 0.745\rho$
	$\theta_u = 0.005 - 0.030n + 0.012\lambda - 0.007\rho$

屈服位移角和极限位移角在三种破坏状态下回归方程的 R 、 R^2 和 Adjusted R^2 ，如表 7 所示。其中， R 是相关系数， R^2 是回归方程拟合优度的度量，取值范围是 $(0, 1)$ ， R^2 越接近 1 表示回归模型拟合效果越好，Adjusted R^2 是消除了变量个数影响的 R^2 修正值。

表 7 不同破坏形态下位移角回归方程中的 R 、 R^2 和 Adjusted R^2

Table 7 Correlation Coefficients R , R^2 and Adjusted R^2 in the Displacement Angle Regression Equation under Different Failure Modes

	屈服位移角			极限位移角		
	弯曲破坏	弯剪破坏	剪切破坏	弯曲破坏	弯剪破坏	剪切破坏
R	0.872	0.876	0.885	0.892	0.894	0.994
R^2	0.761	0.768	0.784	0.795	0.799	0.989
Adjusted R^2	0.752	0.757	0.779	0.782	0.785	0.981

通过表 7 可以看出，屈服位移角和极限位移角在三种破坏状态下回归方程的 R^2 和 Adjusted R^2 的值均在 0.75 以上，说明拟合效果较好，并采用回归系数 T 检验回归方程式的显著性概率，即检验回归系数的显著性。

假设： $H_{0j} : \alpha_j = 0 \leftrightarrow H_{1j} : \alpha_j \neq 0$

则 T 统计量为：

$$T_j = \frac{\hat{\alpha}_j / \sqrt{l^{jj} \sigma}}{\sqrt{\frac{SSE}{\sigma^2} / n - t - 1}} = \frac{\hat{\alpha}_j}{\sqrt{l^{jj} s}} \quad (10)$$

式中： $s = \sqrt{\frac{SSE}{n-t-1}}$ ， $SSE = \sum_{i=1}^n (\theta_i - \hat{\theta}_i)^2$ ，假设回归方程的模型误差具有正态分布特性，即 $\hat{\alpha}_j \sim N(\alpha_j, Var)$ 。当 H_{0j} 为真时， $T_j \sim T(n-t-1)$ ，假设 T 检验的显著性水平为 α ， $P\{\alpha_j \neq 0 | \alpha_j = 0\} = \alpha$ ，则可以认为拒绝域为： $W = \{|T_j| > T_{1-\alpha/2}(n-t-1)\}$ 。

经计算，检验值均 < 0.05 ，认为回归系数具有显著性。因此，本文得到的位移角线性回归方程具有一定的准确性和合理性。

4 结论

(1) 本文利用收集到的 123 根 RC 柱抗震性能试验数据，对现有 RC 柱的破坏形态判别标准进行分析，并根据破坏形态和各影响因素之间的关系提出基于剪跨比和弯剪比的破坏形态判别标准，经验证具有一定的合理性。

(2) 轴压比和配筋率是影响各破坏状态下屈服位移角 θ_y 的主要因素。轴压比、配箍特征值和配筋率是影响弯曲破坏状态下极限位移角 θ_u 的主要因素；轴压比、配箍率和剪跨比是影响弯剪破坏状态下 θ_u 的主要因素；轴压比、剪跨比和配筋率是影响剪切破坏状态下 θ_u 的主要因素。

(3) 利用 SPSS 软件进行了轴压比、剪跨比、配箍特征值等参数对位移角的显著性影响

分析, 通过回归分析归纳出位移角的经验公式, 并对回归系数进行显著性检验, 显著性概率 Sig.均小于 0.05, 表明回归方程具有一定的准确性, 为 RC 结构抗震性能设计和评估提供了理论依据。

参考文献

- 董正方, 王君杰, 韩鹏, 2010. 工程结构柱式构件的抗震性能试验研究进展. 震灾防御技术, **5** (1): 43-52.
- 蒋友宝, 周浩, 曹青等, 2017. 不同设计配筋下大偏压 RC 柱承载力抗震可靠度. 土木建筑与环境工程, **39** (6): 68-77.
- 刘良林, 王全凤, 应建中, 2016. 地震作用下高强混凝土柱延性计算方法研究. 世界地震工程, **32** (1): 261—265.
- 李强, 金贤玉, 2015. 箍筋锈蚀对轴压混凝土短柱承载力的影响. 浙江大学学报(工学版), **49** (10): 1929—1938, 1951.
- 戚永乐, 2012. 基于材料应变的 RC 梁、柱及剪力墙构件抗震性能指标限值研究. 广州: 华南理工大学.
- 苏信智, 邢国华, 马煜东等, 2018. 反复荷载作用下锈蚀钢筋混凝土柱力学性能研究. 震灾防御技术, **13** (03): 512-523.
- 万海涛, 韩小雷, 季静, 2010. 基于性能设计方法的钢筋混凝土柱构件分析. 中南大学学报(自然科学版), **41** (4): 1584-1589.
- 杨君, 2007. 钢筋混凝土框架结构基于位移的抗震设计理论和方法. 西安: 西安建筑科技大学.
- ASCE/SEI 41-06 Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2007.
- Ahani E , Mousavi M N , Ahani A , et al, 2019. The effects of amount and location of openings on lateral behavior of masonry infilled RC frames. KSCE Journal of Civil Engineering:1-13.
- Berry M, Parrish M, Eberhard M. PEER Structural performance database user's manual (version 1.0). University of California: Berkeley, 2004.
- Elwood K J , Moehle J P, 2006 . Idealized backbone model for existing reinforced concrete columns and comparisons with FEMA 356 criteria. Structural Design of Tall and Special Buildings, **15**(5):17.
- Lee K, Yoo J K, 2014. Canonical correlation analysis through linear modeling. Australian & New Zealand Journal of Statistics, **56**(1): 59-72.
- Maekawa K , An X, 2000 . Shear failure and ductility of RC columns after yielding of main reinforcement. Engineering Fracture Mechanics, **65**(2):335-368.
- Sezen H, Moehle J. P, 2004. Shear strength model for lightly reinforced concrete columns. Journal of Structural Engineering, **130**(11): 1692-1703.

Study on Failure Mode and Deformation Capacity of Reinforced Concrete Columns

Liu Ke, Huangjiao, Ma Yudong, Zhangning and Su Jizhi

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract In order to quantify the deformation performance and failure characteristics of RC columns under earthquake action, this paper collected 123 reinforced concrete (RC) column test data from PEER (Pacific Earthquake Research Center) database, and proposed the standard of RC column failure morphology based on parameter shear span ratio and bending-shear ratio. Under the three failure modes of bending failure, bending shear failure and shear failure, the significant effects of parameters such as axial compression ratio, shear span ratio, hoop characteristic value, volume hoop ratio, longitudinal reinforcement ratio on the displacement angle were studied. Through regression analysis, the regression equations of yield displacement angle and ultimate displacement angle under three failure modes were summarized and the significance probability of regression coefficient is less than 0.05. The results show that the criterion of RC column damage morphology proposed in this paper has high accuracy and strong adaptability; the linear regression equation of displacement angle is reasonable.

Key words: RC frame column; Deformation limit; Damage form discrimination; Displacement angle