

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201706082

RC 梁的变形性能指标限值研究与试验验证

崔济东¹, 韩小雷^{1,2}, 季 静¹, 龚涣钧¹

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510641; 2. 亚热带建筑科学国家重点实验室(华南理工大学), 广州 510641)

摘要: 为建立钢筋混凝土(RC)梁的变形性能指标限值, 对 RC 梁的分类方法、性能状态划分方法及各性能状态变形限值的确定方法进行了研究. 对于 RC 梁的分类方法, 基于收集的 103 个 RC 梁的低周往复荷载试验结果对 RC 梁破坏形态的影响因素进行研究, 将 RC 梁划分为弯控及剪控两类, 并以剪跨比和弯剪比为参数给出两类构件的划分准则. 对于 RC 梁的性能状态及其变形限值, 根据中国现行规范将 RC 梁的抗震性能状态划分为 7 个等级, 基于构件的力-位移角骨架曲线的 3 个关键性能点(屈服点、承载力退化 20% 点及丧失承载能力点)提出了 RC 梁各性能状态变形限值的确定方法. 在此基础上, 对 103 个 RC 梁试验结果进行多组不同参数的回归分析, 获得弯控及剪控 RC 梁 3 个关键性能点变形限值的控制参数及回归公式, 依此建立了弯控及剪控 RC 梁的变形性能指标限值. 为进一步验证提出的 RC 梁变形性能指标限值合理性, 进行了 9 个 RC 梁的拟静力试验, 将试验位移角限值与提出的变形限值进行了对比, 结果表明, 本文提出的 RC 梁变形性能指标限值的准确性、离散性及超越概率均在合理范围内.

关键词: 变形限值; 破坏形态; 钢筋混凝土梁; 拟静力试验; 易损性评估

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)06-0169-08

Experimental study on deformation limits of RC beams

CUI Jidong¹, HAN Xiaolei^{1,2}, JI Jing¹, GONG Huanjun¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;
2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science (South China University of Technology), Guangzhou 510641, China)

Abstract: To establish deformation limits of reinforced concrete(RC) beams, study on the method for classification of RC beams, definition of performance states and determining the deformation limit of specific performance state was conducted. As for the classification of RC beams, parameters affecting the failure modes of RC beams were investigated using collected test data for 103 RC beams tested under low frequency cyclic loading. A method was proposed to classify the failure modes into flexure-controlled and shear-controlled based on shear span ratio and moment shear ratio of beams. As for the performance states of RC beams and their deformation limits, the performance states of RC beams were divided into seven levels with reference to the current Chinese codes for seismic design, and the method for determining the deformation limits of these levels was put forward, which is based on three key performance points (point of yielding, point of losing 20% load capacity, point of losing bearing capacity) of the force-drift ratio backbone curves. With the test data of 103 RC beams, regression analysis of deformation limits was performed on multiple sets of parameters, key parameters and formula of deformation limits of the three key performance points were found for the flexure-controlled and shear-controlled RC beams. Deformation limits of flexure-controlled and shear-controlled RC beams were then put forward. To further verify the proposed deformation limits, quasi-static test of 9 RC beams was conducted, test deformation limits of three key performance points were obtained and compared to the proposed performance limits. The results show that the accuracy, discreteness and failure probability of the proposed RC beam deformation limits are all within reasonable range.

Keywords: deformation limits; failure modes; reinforced concrete beam; quasi-static test; fragility evaluation

梁作为重要的受力构件,其变形性能对建筑结构的整体抗震性能有重要的影响.中国 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[1]引入了基于性能的抗震设计思想,但在构件抗震性能评估上依然采用以

承载能力验算为主的评估方法,构件在罕遇地震作用下的变形需求主要由相关的构造措施来保证,尚未给出构件的变形性能指标限值,无法进行构件层次损伤的定量评估.虽然国内外很多文献^[2-8]对钢筋混凝土(RC)梁的变形性能指标限值进行了研究,但这些研究成果主要集中在弯控 RC 梁上,对 RC 梁的破坏形态划分方法及非弯控 RC 梁的变形性能指标限值研究比较少,这些问题均不利于建立系统的 RC 梁变形性能指标限值体系.

本文基于收集的 103 个矩形 RC 梁试验数据,

收稿日期: 2017-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(51378221);

亚热带建筑科学国家重点实验室基金(2015ZA05)

作者简介: 崔济东(1988—),男,博士;

韩小雷(1964—),男,教授,博士生导师

通信作者: 韩小雷, xlh@scut.edu.cn

对 RC 梁的破坏形态影响因素进行分析,提出 RC 梁的破坏形态划分方法.根据中国现行规范,对 RC 梁的性能状态进行划分,并基于构件力-位移角骨架曲线的 3 个关键性能点(屈服点、承载力下降 20% 点及丧失承载能力点)提出 RC 梁各性能状态变形指标限值的统一确定方法.在此基础上,结合 103 个 RC 梁试验结果的回归分析,建立 RC 梁的变形性能指标限值,并对其进行易损性评估,检验指标限值的准确性、离散性和超越概率.最后进行 9 个 RC 梁的低周往复荷载试验,利用试验结果进一步对提出的指标限值进行验证.

1 RC 梁试验数据整理

为进行 RC 梁的变形性能指标限值研究,从公开发表的文献收集了 103 个 RC 梁试件低周往复荷载试验数据,提取了各试件的关键参数并汇编成数据库.数据库中所有试件试验过程中位移均为逐级增大直至试验停止,以下给出该数据库的数据来源

表 1 RC 梁的主要试验参数

Tab.1 Main experimental data of RC beams

数量	文献	f_{ck}/MPa	λ	$\rho_l/\%$	λ_v	m	$V/(f_{ck}bh_0)$
3	[10]	22.53~29.36	3.09	0.34~0.87	0.06~0.14	0.41~0.99	0.065~0.095
8	[11]	24.46~29.60	2.75~4.45	0.31~0.62	0.06~0.12	0.20~0.60	0.025~0.085
2	[12]	33.86~35.81	3.28	0.28~0.51	0.05~0.09	0.24~0.34	0.023~0.025
7	[13]	24.96~25.51	2.52~3.53	0.64~1.61	0.08~0.21	0.58~1.43	0.110~0.186
10	[14]	15.18	2.08	0.20	0.04	1.34~2.67	0.091
8	[15]	19.69~29.04	2.00	0.14~0.15	0.02~0.04	1.15~2.39	0.069~0.088
1	[16]	35.03	1.76	0.61	0.13	0.35	0.047
4	[17]	32.09~50.44	3.21	0.61~0.69	0.07~0.13	0.58~0.72	0.053~0.084
9	[18]	14.33~15.69	3.85	0.50	0.11~0.12	0.06~1.03	0.008~0.144
6	[19]	49.90	1.67~2.22	0.7~1.4	0.09~0.17	0.49~0.65	0.051~0.112
2	[20]	15.65~23.02	5.19	0.47	0.05~0.08	0.59~0.74	0.049~0.08
8	[21]	45.64~46.69	3.00	0.43~0.52	0.04~0.06	0.24~0.48	0.019~0.035
2	[22]	28.50	2.64~3.85	0.31	0.04	0.18~0.25	0.013~0.019
8	[23]	19.93~31.81	0.52~1.97	0.39~1.23	0.05~0.24	0.70~1.24	0.087~0.172
2	[24]	27.79~27.91	0.52~0.90	1.03	0.13~0.14	0.65~0.68	0.112~0.116
2	[25]	21.07~22.2	0.37~0.52	1.15~1.51	0.21~0.29	0.47~0.81	0.156~0.207
11	[26]	24.02	2.78~3.85	0.22~0.90	0.03~0.20	0.18~0.84	0.026~0.097

2 RC 梁破坏形态划分

RC 梁的破坏形态通常可分为弯曲破坏、弯剪破坏和剪切破坏^[27],RC 梁的破坏形态不同,其变形能力的影响参数也不一样,为此,在进行 RC 梁的变形性能指标限值研究前,先对 RC 梁的破坏形态划分方法进行研究.分析收集的 103 个 RC 梁试件的破坏形态和剪跨比 λ 、弯剪比 m 、名义剪压比 $V/(f_{ck}bh_0)$ 、配箍特征值 λ_v 、加载方向箍筋配箍率 ρ_l 的关系,最终确定,能够较好区分 RC 梁破坏形态的主要参数有剪跨比 λ 和弯剪比 m .总体上,剪跨比越大,构件越容易发生弯

及主要参数分布,如表 1 所示.表中, f_{ck} 为混凝土的试验轴心抗压强度标准值, λ 为剪跨比, ρ_l 为梁加载方向的面积配箍率, λ_v 为梁的配箍特征值, $V/(f_{ck}bh_0)$ 为名义剪压比, m 为弯剪比.其中,剪跨比 λ 、配箍率 ρ_l 按 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[9](简称“2010《混规》”)的定义计算,弯剪比 m 、名义剪压比 $V/(f_{ck}bh_0)$ 、配箍特征值 λ_v 分别按式(1)~(3)计算:

$$m = M_n/(V_nL_a), \quad (1)$$

$$V/(f_{ck}bh_0) = \min(M_n/L_a, V_n)/(f_{ck}bh_0), \quad (2)$$

$$\lambda_v = \rho_l f_y / f_{ck}. \quad (3)$$

式中: M_n 和 V_n 分别为按 2010《混规》6.2 节及 6.3.12 节计算的加载方向的抗弯和抗剪承载能力,计算时钢筋的强度取试验屈服强度平均值,混凝土强度取标准值; L_a 为试件的剪跨,对于悬臂构件,等于构件的悬臂长度; V 为 M_n/L_a 和 V_n 中的较小值; b 为垂直加载方向梁的截面宽度, h_0 为梁加载方向的有效截面高度; f_y 为箍筋的实测屈服强度平均值; ρ_l 为梁的体积配箍率.

曲破坏,弯剪比越大,构件越容易发生剪切破坏.以剪跨比和弯剪比为参数,提出 RC 梁的破坏形态划分准则,见表 2.表 2 的划分准则与收集的 103 个 RC 梁试件破坏形态的关系如图 1 所示,详细统计结果见表 3.

表 2 RC 梁的破坏形态划分准则

Tab.2 Failure mode classification of RC beams

破坏形态	剪跨比	弯剪比
弯控	$\lambda \geq 2.0$	$m \leq 1.0$
剪控	$\lambda \geq 2.0$	$m > 1.0$
	$\lambda < 2.0$	—

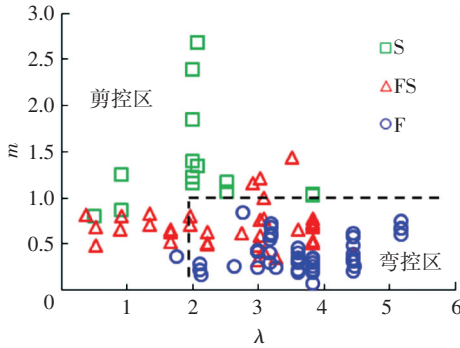


图 1 破坏形态与剪跨比、弯剪比的关系 (F 为弯曲破坏, FS 为弯剪破坏, S 为剪切破坏)

Fig.1 Failure modes influenced by shear span ratio and moment shear ratio (F: flexure failure; FS: flexure-shear failure; S: shear failure)

表 3 RC 梁的破坏形态划分结果

Tab.3 Failure mode classification results of RC beams

试验破坏形态	数量	分类	数量	百分比/%
弯曲	37	弯控	36	97.30
		剪控	1	2.70
弯剪	40	弯控	25	62.50
		剪控	15	37.50
剪切	26	弯控	0	0
		剪控	26	100.00

如表 3 所示,试验发生弯曲破坏的试件 97.30% 被划分为弯控,试验发生剪切破坏的试件 100.00% 被划分为剪控,试验发生弯剪破坏的试件 62.50% 被划分为弯控,37.50% 被划分为剪控.由此可见,表 2 的 RC 梁破坏形态划分方法合理,对弯曲破坏及剪切破坏这两种破坏机制截然不同的破坏形态的判别具有较高的准确率.

3 RC 梁抗震性能状态划分

中国 JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》^[28](简称“2010《高规》”)将构件的损坏状态划分为 5 个等级:无损坏、轻微损坏、轻度损坏、中度损坏、较严重损坏.其中具有较为明确物理意义的是“无损坏”及“较严重损坏”状态.对于“无损坏”状态,可认为在该状态下,构件基本保持弹性,该状态的极限为构件屈服;对于“较严重损坏”状态,2010《高规》附录指出,结构在罕遇地震作用下,满足第 5 性能水准时,有较严重的损坏,但不至于倒塌或发生危及生命的严重损坏.由于构件的倒塌严重危及生命财产安全,因此,可认为“较严重损坏”状态的极限为承载力退化 20%,在该状态下,构件未倒塌,仍能承载,未完全失去抗侧力;为方便结构的抗倒塌能力评估,与文献^[29]的思路类似,在第 5 个构件损

坏状态后增加“严重损坏”和“倒塌”两个状态,其中,构件“严重损坏”状态的极限是构件丧失承载能力,发生倒塌.

课题组前期研究^[30]发现,塑性位移角能较好地反映构件的破坏程度,为此,本文以塑性位移角为变形指标,将 RC 梁的抗震性能状态划分为“无损坏”、“轻微损坏”、“轻度损坏”、“中度损坏”、“较严重损坏”、“严重损坏”及“倒塌”7 个等级,并基于构件的力-位移角骨架曲线确定各性能状态的变形限值,如图 2 所示.其中,前 6 个性能状态的极限对应 6 个性能点,“无损坏”、“较严重损坏”及“严重损坏”是构件的 3 个关键性能状态.图 2 中,横坐标为悬臂构件的位移角,纵坐标为构件的侧向力, V_{max} 为峰值承载力, θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 和 θ_6 分别表示“无损坏”、“轻微损坏”、“轻度损坏”、“中度损坏”、“较严重损坏”、“严重损坏”状态的总位移角限值.“无损坏”状态的位移角限值定义为名义屈服位移角^[31-32].如图 2 所示,经过原点及 $0.7V_{max}$ 点的割线与过峰值承载力 V_{max} 的水平直线相交于一点,从交点处做一竖直线,该竖直线与构件的力-位移角骨架曲线的交点即名义屈服点,名义屈服点的位移角 θ_1 即为性能 1 的位移角限值.在该状态下,构件处于基本弹性,受拉纵筋未屈服,产生细微裂缝,裂缝宽度一般不大于 0.5 mm ^[27].“较严重损坏”状态的位移角限值 θ_{sp} 取为承载力下降 20% 点的塑性位移角,在该状态下,部分构件纵筋压屈或拉断,箍筋脱钩失效,混凝土保护层压碎严重^[27].“严重损坏”状态的位移角限值 θ_{op} 取侧向承载能力下降 50% 点对应的塑性位移角.“轻微损坏”、“轻度损坏”和“中度损坏”的塑性位移角限值分别取为“较严重损坏”塑性位移角限值的 0.25、0.50 和 0.75 倍,相应的破坏现象可参考课题组前期试验研究^[27].

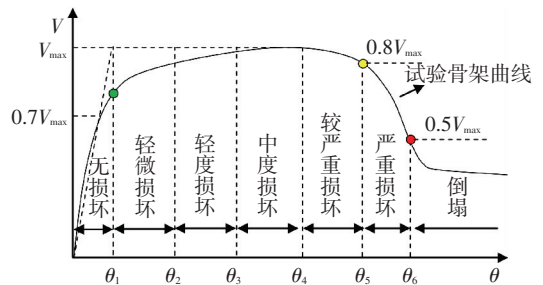


图 2 RC 梁的性能状态及位移角限值

Fig.2 Performance states and drift ratio limits of RC beams

将本文 RC 梁性能状态的划分标准总结如表 4 所示.由表 4 可知,只需根据梁的顶点力-位移角骨架曲线获得“无损坏”、“较严重损坏”及“严重损坏”3 个关键性能状态的总位移角 θ_1 、 θ_5 和 θ_6 ,便可根据表 4 的方法获得 6 个性能状态的位移角限值.

表 4 RC 梁各性能状态的破坏现象及位移角限值

Tab.4 Failure phenomena and drift ratio limits of performance states of RC beams

性能状态	破坏现象	位移角限值
无损坏	构件基本弹性,受拉纵筋未屈服	θ_1
轻微损坏	混凝土保护层未压碎,受拉纵筋屈服,残余裂缝宽度小于 1 mm ^[27]	$\theta_{2p} = 0.25(\theta_5 - \theta_1)$
轻度损坏	混凝土保护层未剥落,核心区混凝土完好,残余裂缝宽度 1~2 mm ^[27]	$\theta_{3p} = 0.50(\theta_5 - \theta_1)$
中度损坏	保护层混凝土剥落,未发生明显压曲,残余裂缝宽度超 2 mm ^[27]	$\theta_{4p} = 0.75(\theta_5 - \theta_1)$
较严重损坏	纵筋压曲,核心区混凝土部分压碎,承载力退化不超过 20%	$\theta_{5p} = \theta_5 - \theta_1$
严重损坏	侧向力严重退化但不倒塌,仍能承重,承载力退化不超过 50%	$\theta_{6p} = \theta_6 - \theta_1$

4 RC 梁的位移角限值

为建立系统的 RC 梁变形性能指标限值体系,本文采用以下具体步骤:(1)选定各性能点位移角限值的目标超越概率;(2)采用多组不同的参数对弯控及剪控 RC 梁“无损坏”、“较严重损坏”及“严重损坏”3 个关键性能状态的位移角限值进行回归分析,选取位移角限值的控制参数及回归公式;(3)采用易损性分析方法,评估第(2)步选定的回归公式的超越概率,并对回归公式进行调整,获得具有目标超越概率的回归公式,以调整后的公式初步建立 RC 梁各性能状态的位移角限值;(4)采用易损性分析方法,对第(3)步确定的位移角限值进行评估,若位移角限值的超越概率不大于第(1)步设定的目标超越概率,则位移角限值满足要求,否则对位移角限值再次进行调整,直到满足要求。

4.1 位移角限值超越概率的选取

美国性能评估规范 ASCE/SEI 41-13^[33] 给出的弯控 RC 梁、柱的变形指标体系中,塑性变形参数 a 的目标超越概率不大于 35%,塑性变形参数 b 的目标超越概率不大于 15%。由于塑性变形参数 a 与本文性能点 5 塑性变形的概念相似,塑性变形参数 b 与本文性能点 6 塑性变形的概念相似,为此,本文位移角限值的超越概率统一按以下原则选取:(1)对于性能 1 (“无损坏”状态)的位移角限值,超越概率不大于 35%,即保证率不小于 65%;(2)对于性能 5 (“较严重损坏”状态)的位移角限值,超越概率不大于 35%,即保证率不小于 65%;(3)对于性能 6 (“严重损坏”状态)的位移角限值,超越概率不大于 15%,即保证率不小于 85%;(4)性能 2、性能 3 及性能 4 的塑性位移角限值按本文第 3 节的原则由性能

5 的塑性位移角限值四等分得到。

4.2 关键性能点位移角限值的回归分析

根据表 4 获得收集的 103 个 RC 梁试件“无损坏”、“较严重损坏”及“严重损坏”3 个关键性能状态的位移角限值 θ_1 、 θ_{5p} 和 θ_{6p} 。将 103 个梁试验数据按表 2 的划分准则分为弯控组及剪控组,以弯剪比 m 、名义剪压比 $V/(f_{ck}bh_0)$ 、配箍特征值 λ_v 、配箍率 ρ_t 这 4 个参数的不同组合,分别建立弯控组及剪控组 RC 梁试件 θ_1 、 θ_{5p} 和 θ_{6p} 的回归公式,并从中选取相关性最强的回归公式,用于初步建立 RC 梁的位移角限值。对于弯控 RC 梁,以 m 、 $V/(f_{ck}bh_0)$ 和 λ_v 为控制参数,对于剪控 RC 梁,以 n 和 ρ_t 为控制参数,最终弯控及剪控 RC 梁 3 个关键性能状态位移角限值的回归公式选取如式(4)~(9)所示。

1) 弯控 RC 梁的位移角限值回归公式

$$\theta_1 = -0.013 + 0.146\lambda_v + 0.047m - 0.295V/(f_{ck}bh_0), \quad (4)$$

$$\theta_{5p} = 0.010 + 0.264\lambda_v + 0.058m - 0.482V/(f_{ck}bh_0), \quad (5)$$

$$\theta_{6p} = 0.0203 + 0.2107\lambda_v + 0.0395m - 0.3434V/(f_{ck}bh_0). \quad (6)$$

2) 剪控 RC 梁的位移角限值回归公式

$$\theta_1 = 0.005, \quad (7)$$

$$\theta_{5p} = 0.029 - 0.0077m + 0.5953\rho_t, \quad (8)$$

$$\theta_{6p} = 0.037 - 0.0102m + 0.5182\rho_t. \quad (9)$$

4.3 回归公式的超越概率

采用 ATC-58^[34] 建议的易损性分析方法,评估回归公式的超越概率,获得具有目标超越概率的回归公式。具体思路是,根据表 4,确定收集的 103 个 RC 梁试件“无损坏”、“较严重损坏”及“严重损坏”性能状态的试验位移角限值(试验值),并与按 4.2 节选取的各组位移角限值回归公式计算的变形限值(计算值)作比,建立位移角限值的试验值与计算值比值的累积概率分布曲线,通过累积概率分布和拟合的对数正态分布曲线,可获得回归公式的超越概率。若超越概率与目标超越概率相差较大,则对回归公式进行调整,对调整后的公式进行同样的评估,获得具有目标超越概率的回归公式。图 3 为弯控 RC 梁“无损坏”状态位移角限值回归公式的易损性曲线,由图可见,按式(4)计算的 θ_1 的超越概率为 47.41%(图 3(a)),调整为 0.88 倍后超越概率接近目标超越概率 35%(图 3(b))。按同样的方法,可获得其余各组回归公式的超越概率及调整后具有目标超越概率的回归公式,见表 5。

4.4 位移角限值的建立

利用表 5 给出的调整后具有目标超越概率的回归公式建立 RC 梁的位移角限值,并进行反复调整,

得到最终 RC 梁的位移角限值,如表 6 和表 7 所示.表中“无损坏”性能状态的位移角限值为总位移角,其余

性能状态的位移角限值为塑性位移角.当参数落在表中参数之间时,通过插值获得相应的变形限值.

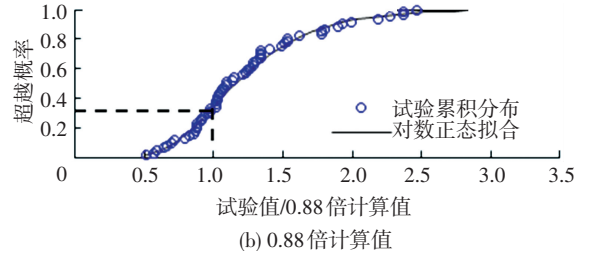
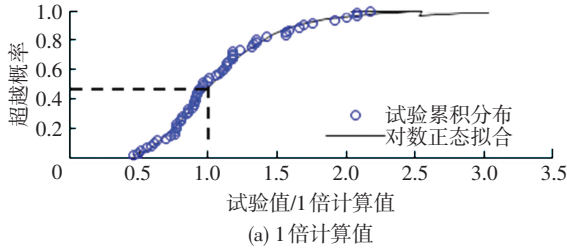


图 3 θ_1 易损性曲线

Fig.3 Fragility curve of θ_1

表 5 关键性能状态下回归公式的超越概率

Tab.5 Failure probability of regression formula of key performance states

分组	无损坏	较严重损坏	严重损坏
弯控组	47.41%(式(4))	35%(0.88 倍式(4))	63.1%(式(5))
剪控组	9.83%(式(7))	35%(1.2 倍式(7))	56.86%(式(8))

表 6 RC 弯控 RC 梁位移角限值

Tab.6 Drift ratio limits of flexure-controlled RC beams

构件参数			不同性能状态下位移角限值					
m	λ_v	$V/(f_{ck}bh_0)$	无损坏	轻微损坏	轻度损坏	中度损坏	较严重损坏	严重损坏
≤ 0.20	≥ 0.20	≤ 0.02	0.004	0.011	0.023	0.034	0.045	0.050
≤ 0.20	≥ 0.20	≥ 0.10	0.004	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025
≥ 0.80	≥ 0.20	≤ 0.02	0.005	0.014	0.028	0.041	0.055	0.060
≥ 0.80	≥ 0.20	≥ 0.10	0.005	0.009	0.018	0.026	0.035	0.040
≤ 0.20	≤ 0.02	≤ 0.02	0.003	0.003	0.007	0.010	0.014	0.015
≤ 0.20	≤ 0.02	≥ 0.10	0.003	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002
≥ 0.80	≤ 0.02	≤ 0.02	0.005	0.007	0.014	0.020	0.027	0.032
≥ 0.80	≤ 0.02	≥ 0.10	0.005	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010

表 7 剪控 RC 梁位移角限值

Tab.7 Drift ratio limits of shear-controlled RC beams

参数		不同性能状态下位移角限值					
m	ρ_1	无损坏	轻微损坏	轻度损坏	中度损坏	较严重损坏	严重损坏
≤ 0.5	$\geq 0.008 0$	0.004	0.005	0.010	0.015	0.020	0.022
≥ 2.5	$\geq 0.008 0$	0.004	0.003	0.005	0.008	0.010	0.012
≤ 0.5	$\leq 0.000 5$	0.004	0.003	0.005	0.008	0.010	0.012
≥ 2.5	$\leq 0.000 5$	0.004	0.001	0.003	0.004	0.005	0.008

4.5 位移角限值的易损性评估

为验证表 6 和表 7 的合理性,进行指标限值的分组易损性评估,将收集的 103 个 RC 梁试验数据按表 2 的破坏形态,考虑表 6 和表 7 中控制参数(配箍特征值 λ_v 、名义剪压比 $V/(f_{ck}bh_0)$ 、加载方向配箍率 ρ_1 和弯剪比 m)的主要划分区,划分为多个小组,见表 8.

由于本文 RC 梁“轻微损坏”、“轻度损坏”和“中度损坏”的位移角限值通过均分法得到,所以本文只对“无损坏”、“较严重损坏”和“严重损坏”3 个关键性能状态的位移角限值进行评估.将收集的 103 个 RC 梁试件 3 个关键性能状态(“无损坏”、“较严重

损坏”及“严重损坏”)的试验位移角限值与按表 6 和表 7 计算的位移角限值相比,比值记作“位移角限值冗余度”.其中,位移角限值的准确性通过冗余度的平均值评估,冗余度的均值越接近 1,指标限值越准确;位移角限值的离散性通过冗余度的标准差评估;位移角限值的超越概率通过易损性分析方法,建立冗余度的累积分布曲线及拟合的对数正太分布曲线进行评估.表 8 各组数据位移角限值的评估结果如表 9 所示.需要注意的是,由于部分分组的试件数量比较小,评估的超越概率可能不够合理,这里为了统一,均一并给出.

由表 9 可见:

1) 弯控组及剪控组性能 1 位移角限值的超越概率不高于 35%,且均低于 20%,满足目标超越概率要求;弯控组及剪控组性能 5 的塑性位移角限值在全局参数范围内的超越概率分别为 6%和 13%,小于 35%,各小组的超越概率均不高于 25%外,满足目标超越概率要求;弯控组及剪控组性能 6 的塑性位移角限值在全局参数范围内的超越概率分别为 12%和 9%,除个别小组的超越概率略大于 15%外,大部分小组的超越概率均低于 15%,总体上满足目标超越概率要求.

2) 弯控组和剪控组性能 1 的位移角限值冗余度平均值总体在分别在 1.8 和 2.3 左右,说明本文给出的 RC 梁的屈服位移角限值偏安全.弯控组和剪控组性能点 5 和 6 位移角限值冗余度平均值总体分别在 1.5 和 1.7 左右,即位移角限值的计算值与试验值的比值分别在 0.67 和 0.59 左右 ($1/1.5 = 0.67$; $1/1.7 = 0.59$),说明本文给出的 RC 梁的塑性位移角限值比较接近试验值,准确性较高.

3) 弯控组和剪控组性能 5 和 6 位移角限值的冗余度标准差在 0.6 左右,较小,表明本文给出的 RC

梁的塑性位移角限值离散性较小;弯控组和剪控组性能 1 位移角限值的冗余度标准差总体分别在 0.8 和 1.2 左右,相对较大,但考虑到 RC 梁性能 1 位移角限值的超越概率均不高于目标超越概率,因此,总体上认为本文提出的 RC 梁位移角限值的离散性在可接受范围内.

表 8 RC 梁试件分组
Tab.8 Bins of RC beams

大组	小组	参数范围	试件数量
	1	所有弯控试件	61
	2	$m \leq 0.5, \lambda_v \geq 0.1, V/(f_{ck}bh_0) \leq 0.06$	15
	3	$m \leq 0.5, \lambda_v \geq 0.1, V/(f_{ck}bh_0) \geq 0.06$	2
	4	$m \geq 0.5, \lambda_v \geq 0.1, V/(f_{ck}bh_0) \leq 0.06$	0
弯控组	5	$m \geq 0.5, \lambda_v \geq 0.1, V/(f_{ck}bh_0) \geq 0.06$	16
	6	$m \leq 0.5, \lambda_v \leq 0.1, V/(f_{ck}bh_0) \leq 0.06$	15
	7	$m \leq 0.5, \lambda_v \leq 0.1, V/(f_{ck}bh_0) \geq 0.06$	0
	8	$m \geq 0.5, \lambda_v \leq 0.1, V/(f_{ck}bh_0) \leq 0.06$	9
	9	$m \geq 0.5, \lambda_v \leq 0.1, V/(f_{ck}bh_0) \geq 0.06$	4
	1	所有剪控试件	42
	2	$m \leq 1.5, \rho_t \geq 0.004$	23
剪控组	3	$m \geq 1.5, \rho_t \geq 0.004$	0
	4	$m \leq 1.5, \rho_t \leq 0.004$	10
	5	$m \geq 1.5, \rho_t \leq 0.004$	9

表 9 RC 梁关键性能点位移角限值评估结果

Tab.9 Evaluation results of drift ratio limits of key performance points

分组信息			超越概率/%			冗余度平均值			冗余度标准差		
大组	小组	试件数量	性能 1	性能 5	性能 6	性能 1	性能 5	性能 6	性能 1	性能 5	性能 6
	1	61	11	6	12	1.88	1.53	1.47	0.86	0.37	0.12
	2	15	17	13	15	1.84	1.47	1.42	0.85	0.37	0.38
	3	2	0	0	0	2.16	1.52	1.34	0.12	0.03	0.02
	4	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
弯控组	5	16	10	1	9	1.75	1.52	1.40	0.71	0.28	0.35
	6	15	16	6	14	1.35	1.49	1.42	0.36	0.43	0.47
	7	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	8	9	1	9	16	2.64	1.68	1.52	0.82	0.50	0.48
	9	4	3	6	16	2.89	1.58	1.35	1.40	0.44	0.37
	1	42	10	13	9	2.34	1.75	1.77	1.28	0.68	0.62
	2	23	11	13	9	2.53	1.80	1.93	1.54	0.68	0.69
剪控组	3	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	4	10	18	21	11	1.80	1.45	1.45	0.79	0.55	0.44
	5	9	0	5	6	2.45	1.98	1.73	0.78	0.73	0.53

4.6 位移角限值试验验证

为进一步验证本文提出的 RC 梁位移角限值的合理性,考虑表 6 和表 7 的主要参数,按不同的剪跨比、配箍率和纵筋配筋率设计了 9 个对称配筋的矩形截面 RC 梁试件,并对其进行低周往复加载试验研究,试件的详细参数详见文献[27, 35].按表 6 和表 7 计算 9 个 RC 梁 3 个关键性能状态(性能 1、性能 5 及性能 6)的位移限值(计算值)并与根据试验结果按表 4 获得的位移角限值(试验值)进行对比,结果如图 4 所示,详细统计结果如表 10 所示.图 4

中,横坐标为试件编号,试件编号包含试件剪跨比、配箍率及单边纵筋配筋率信息,如 B-2-0.28-0.4 表示剪跨比为 2,配箍率为 0.28%,纵筋配筋率为 0.4%.表 10 中下标“test”表示位移角限值的试验值,下标“table”表示位移角限值的计算值.

由图 4 和表 10 可见, $\theta_{1-table}/\theta_{1-test}$ 、 $\theta_{5-table}/\theta_{5-test}$ 及 $\theta_{6-table}/\theta_{6-test}$ 的平均值分别为 0.61、0.81 和 0.73,接近于 1 且小于 1,标准差较小,分别为 0.22、0.19 及 0.20,表明,本文给出的 RC 梁的位移角限值合理,较接近于试验值、离散性较小且偏于安全.

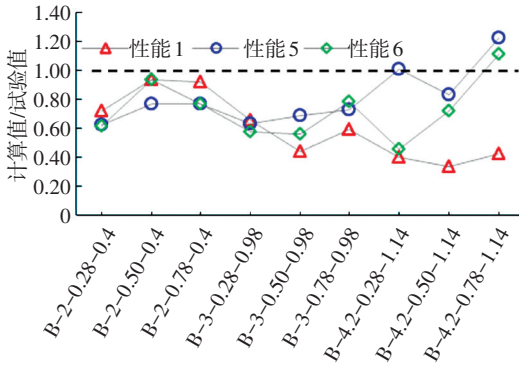


图 4 RC 梁关键性能点位移角限值计算值与试验值的比值

Fig.4 Ratio of calculated value to test value of RC beams drift ratio limits at key performance points

表 10 位移角计算值与试验值比值的统计参数

Tab.10 Statistical parameters of ratio of calculated drift ratio limits to test drift ratio limits

参数统计	$\theta_{1-table}/\theta_{1-test}$	$\theta_{5-table}/\theta_{5-test}$	$\theta_{6-table}/\theta_{6-test}$
最大值	0.94	1.23	1.11
最小值	0.34	0.63	0.46
平均值	0.61	0.81	0.73
标准差	0.22	0.19	0.20

5 结 论

1) 提出以剪跨比和弯剪比为参数的 RC 梁破坏形态划分方法,该方法判别弯曲破坏及剪切破坏的准确率分别为 97.30%和 100.00%。

2) 将 RC 梁的抗震性能划分为“无损坏”、“轻微损坏”、“轻度损坏”、“中度损坏”、“较严重损坏”、“严重损坏”及“倒塌”7 个状态,并基于构件的力-位移角骨架曲线的 3 个关键性能点(屈服点、承载力退化 20%点及丧失承载能力点),提出 RC 梁各性能状态位移角限值的统一确定方法。

3) 以弯剪比、名义剪压比及约束区配箍特征值为控制参数,给出弯控 RC 梁的位移角限值,以弯剪比及加载方向配箍率为控制参数,给出剪控 RC 梁的位移角限值,并采用 ATC 58 建议的易损性分析方法,对给出的位移角限值进行评估,结果显示,“无损坏”、“较严重损坏”及“严重损坏”3 个关键性能状态位移角限值的超越概率总体上分别不大于 20%、25%及 15%,且位移角限值的准确性和离散性均在合理范围内。

4) 通过作者开展的 9 个 RC 梁的拟静力试验结果,对本文提出的 RC 梁位移角限值进行验证,结果显示,本文给出的最重要的“较严重损坏”状态的 RC 梁位移角限值与试验位移角限值的比值平均为 0.81,准确性较高且离散性较小。

参考文献

[1] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

[2] 蒋欢军,王斌,吕西林. 钢筋混凝土梁和柱性能界限状态及其变形限值[J]. 建筑结构,2010,40(1):10-14.
JIANG Huanjun, WANG Bin, LV Xilin. Performance limit states and deformation limits of RC beams and columns [J]. Building Structure, 2010, 40(1): 10-14.

[3] PANAGIOTAKOS T B, FARDIS M N. Deformations of reinforced concrete members at yielding and ultimate [J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(2): 135-148.

[4] BISKINIS D, FARDIS M N. Deformations at flexural yielding of members with continuous or lap-spliced bars [J]. Structural Concrete, 2010, 11(3): 127-138.

[5] BISKINIS D, FARDIS M N. Flexure-controlled ultimate deformations of members with continuous or lap-spliced bars [J]. Structural Concrete, 2010, 11(2): 93-108.

[6] 周定松,吕西林,蒋欢军. 钢筋混凝土框架梁的变形能力及基于性能的抗震设计方法[J]. 地震工程与工程振动,2005,25(4):60-66. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1301.2005.04.010.
ZHOU Dingsong, LV Xilin, JIANG Huanjun. Deformation capacity and performance-based seismic design method for RC frame beams [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(4): 60-66. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1301.2005.04.010.

[7] 蒋欢军,白努特,陈林之. 钢筋混凝土梁柱构件的地震损伤性能试验[J]. 结构工程师,2011,27(2):102-107. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0159.2011.02.018.
JIANG Huanjun, DOUMIA B, CHEN Linzhi. Experiment on seismic damage behavior of reinforced concrete beams and columns [J]. Structural Engineers, 2011, 27(2): 102-107. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0159.2011.02.018.

[8] 钱稼茹,徐福江. 钢筋混凝土梁基于位移的变形能力设计方法[J]. 四川建筑科学研究,2007,33(2):1-3. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1933.2007.02.001.
QIAN Jiaru, XU Fujiang. Displacement-based deformation capacity design method of reinforced concrete beams [J]. Sichuan Building Science, 2007, 33(2): 1-3. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1933.2007.02.001.

[9] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010 [S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

[10] POPOV E P, BERTERO V V, KRAWINKLER H. Cyclic behavior of three R/C flexural members with high shear: EERC Report No. 72-5 [R]. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, 1972.

[11] BERTERO V V, POPOV E P. Hysteretic behavior of ductile moment-resisting reinforced concrete frame components: EERC Report No. 75-16 [R]. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, 1975.

[12] PANAGIOTOU M, VISNJIC T, ANTONELLIS G, et al. Effect of hoop reinforcement spacing on the cyclic response of large reinforced concrete special moment frame beams: PEER Report No. 2013-16 [R]. Berkeley, California: Pacific Earthquake Engineering

- Research Center, 2013.
- [13] 刘志强, 吴波, 林少书. 钢筋混凝土连梁的抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(5): 117-124. DOI: 10.13197/j.eeev.2003.05.019.
- LIU Zhiqiang, WU Bo, LIN Shaoshu. Study on seismic performance of reinforced concrete coupling beams [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2003, 23(5): 117-124. DOI: 10.13197/j.eeev.2003.05.019.
- [14] 冷巧娟, 钱江, 张熠, 等. 既有钢筋混凝土梁抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(8): 26-28.
- LENG Qiaojuan, QIAN Jiang, ZHANG Yi, et al. Experimental study on seismic performance of existing reinforced concrete beams [J]. Building Structure, 2011, 41(8): 26-28.
- [15] 杜修力, 袁健, 周宏宇, 等. 钢筋混凝土梁在低周反复荷载作用下受剪性能的尺寸效应试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(5): 30-38. DOI: 10.13197/j.eeev.2011.05.014.
- DU Xiuli, YUAN Jian, ZHOU Hongyu, et al. The experimental study of size effect on shear capacity of reinforced concrete beam under low cyclic loading [J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2011, 31(5): 30-38. DOI: 10.13197/j.eeev.2011.05.014.
- [16] NAISH D A B. Testing and modeling of reinforced concrete coupling beams [D]. Los Angeles: University of California, Los Angeles, 2010.
- [17] XIAO Y, RUI M. Seismic behavior of high strength concrete beams [J]. Structural Design of Tall Buildings, 1998, 7(1): 73-90.
- [18] 朱志达, 沈参璜. 在低周反复循环荷载作用下钢筋混凝土框架梁端抗震性能的试验研究(1) [J]. 北京工业大学学报, 1985, 11(1): 17-38.
- ZHU Zhida, SHEN Canhuang. An experimental investigation on earthquake-resistant behavior of the beam end of reinforced concrete framed buildings under low repeated and reversed loading(1) [J]. Journal of Beijing University of Technology, 1985, 11(1): 17-38.
- [19] XIAO Y, ESMAEILI G A, WU H. High-strength concrete short beams subjected to cyclic shear [J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(3): 392-400.
- [20] 周卫明. 不同屈服点钢筋混凝土结构耗能铰的试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2008.
- ZHOU Weiming. Experimental study on energy dissipation hinge of different yield reinforcement concrete structure [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2008.
- [21] 车轶, 王金全, 郑新丰, 等. 反复荷载作用下高强混凝土梁受弯性能尺寸效应试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(8): 100-106. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.08.012.
- CHE Yi, WANG Jinjin, ZHENG Xinfeng, et al. Experimental study on size effect of flexural behavior of reinforced high-strength concrete beams subjected to cyclic loading [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(8): 100-106. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.08.012.
- [22] COOPER M, DAVIDSON B, INGHAM J. The influence of axial compression on the elongation of plastic hinges in reinforced concrete beams [C]// The New Zealand Concrete Industry Conference. Auckland: [s.n.], 2005.
- [23] 杨彦芳. 低周反复荷载作用下联肢剪力墙中连梁的强度及抗震性能的试验研究[D]. 重庆: 重庆建筑大学, 1998.
- YANG Yanfang. Test and study of strength and aseismic behavior of reinforced concrete coupling beams between shear wall [D]. Chongqing: Chongqing Jianzhu University, 1998.
- [24] TASSIOS T P, MORETTI M, BEZAS A. On the behavior and ductility of reinforced concrete coupling beams of shear walls [J]. ACI Structural Journal, 1996, 93(6): 711-720.
- [25] 刘光伟. 小跨高比剪力墙洞口连梁抗震性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- LIU Guangwei. Experimental study on seismic behavior of short-span coupling beams of shear walls [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [26] 杨程. CRB550 级箍筋混凝土梁的抗震性能对比试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- YANG Cheng. Comparing experimental research on earthquake-resistant behavior of reinforced concrete beams with CRB550 stirrups [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [27] 龚涣钧. RC 梁、柱构件变形性能指标限值试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- GONG Huanjun. Experimental research on deformation limits of RC beam and column [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [28] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Technical specification for concrete structures of tall building: JGJ 3—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [29] 钱稼茹, 冯宝锐. 钢筋混凝土柱弯矩-转角骨架线特征点及性能点转角研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(11): 10-19. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2014.11.002.
- QIAN Jiaru, FENG Baorui. Study on rotation angles at characteristic point and performance point of $M-\theta$ skeleton curve for RC columns [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(11): 10-19. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2014.11.002.
- [30] 戚永乐. 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[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- QI Yongle. Research on deformation limits of RC beams, columns and shear walls based on material strain [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [31] SEZEN H, MOEHLE J P. Shear strength model for lightly reinforced concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(11): 1692-1703.
- [32] GHANNOUM W M, MATAMOROSA B. Nonlinear modeling parameters and acceptance criteria for concrete columns [J]. ACI Special Publication, 2014, 297(1): 1-24.
- [33] Seismic evaluation and retrofit of existing buildings: ASCE/SEI 41-13 [S]. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2014.
- [34] Applied Technology Council. Seismic performance assessment of buildings, Volume 1—Methodology: FEMA P-58-1 [R]. California: FEMA, 2012.
- [35] 韩小雷, 崔俊东, 龚涣钧, 等. 不同抗震等级 RC 梁抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015(增刊 2): 299-308. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.S2.044.
- HAN Xiaolei, CUI Jidong, GONG Huanjun, et al. Experimental study on seismic behavior of RC beams with different seismic grades [J]. Journal of Building Structures, 2015(s2): 299-308. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.S2.044.