

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.11.009

考虑变形影响的钢筋混凝土圆柱受剪承载力计算模型

张勤^{1,2}, 邴鹏², 韦宗延¹, 贡金鑫²

(1.河海大学土木与交通学院,南京 210098;

2.大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室,大连 116024)

摘要:准确计算钢筋混凝土(RC)圆柱的受剪承载力是进行延性抗震设计的关键,可有效防止脆性剪切和弯剪破坏模式发生。基于已有的RC圆柱拟静力试验结果,分析了RC圆柱的地震破坏模式和受剪承载力确定方法,在理论分析的基础上提出了考虑变形(位移延性)影响的RC圆柱受剪承载力计算模型,并与现有模型进行了比较。研究表明,地震作用下RC圆柱的受剪承载力随塑性铰区变形的增加而减小;弯剪破坏模式下,RC圆柱的受剪承载力取决于塑性铰区剪切破坏发生时对应的水平荷载而非骨架曲线上的峰值荷载;所提出的模型能有效反映变形对RC圆柱受剪承载力的影响,计算结果与试验数据吻合较好,可用于不同地震破坏模式RC圆柱受剪承载力计算。

关键词:钢筋混凝土圆柱;弯剪破坏;受剪承载力;位移延性

中图分类号:TU311.3

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2017)11-072-11

Shear strength model including the effects of deformation for the circular reinforced concrete columns

ZHANG Qin^{1,2}, BING Peng², WEI Zongyan¹, GONG Jinxin²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, P.R.China)

Abstract: Accurate calculation of shear strength of reinforced concrete (RC) circular columns plays a key role in the ductile seismic design, which can effectively prevent the occurrence of brittle shear and flexure-shear failure. Based on the existing quasi-static test results of RC circular columns, the seismic failure modes and the method for determining the shear strength capacity of RC circular columns are analyzed. On the basis of theoretical analysis, a shear strength model of RC circular column considering the effects of inelastic deformation (displacement ductility) is proposed and compared with the existing model. The results show that the shear strength capacity of RC circular columns decreases with the increase of deformation in the plastic hinge region under seismic loading. The shear strength capacity of flexural-shear

收稿日期:2017-05-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678104,51508154);江苏省自然科学基金资助项目(BK20150803);中国博士后科学基金面上项目(2015M581711);国家重点实验室开放基金项目(LP1515)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51678104, 51508154), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20150803), the China Postdoctoral Science Foundation (2015M581711), and the State Key Laboratory Open Fund (LP1515).

作者简介:张勤(1983—),男,博士,主要从事钢筋混凝土结构抗震及新材料应用研究,(E-mail)zhangqin8190@163.com。

failure columns depends on the lateral load corresponding to the shear failure point of the plastic hinge region rather than peak lateral load of the skeleton curve. The proposed model is able to effectively reflect the effects of deformation on the shear strength capacity of RC circular columns. And the results are in good agreement with the experimental data and can be used to predict the shear strength capacity of RC circular columns with different failure modes under seismic excitations.

Keywords: reinforced concrete circular column; flexure-shear failure; shear capacity; displacement ductility

钢筋混凝土(RC)柱构件在地震作用下会发生弯曲、剪切和弯剪 3 种主要破坏模式。其中,剪切和弯剪破坏柱的延性和耗能能力较差,破坏呈脆性,破坏后易造成结构局部或整体倒塌,因而,抗震设计中通常进行受剪承载力验算以避免 RC 柱发生剪切或弯剪破坏。但实际震害调查表明,很多 RC 桥墩、框架柱等虽按当时的规范进行了抗剪设计,但在地震中仍发生了弯剪或剪切破坏,未能很好地实现“强剪弱弯”的抗震设计原则。尽管现行的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[1]通过调整轴压比限值、承载力抗震调整系数、柱端弯矩增大系数等保证柱的抗震性能,但对于抗剪承载力计算仍沿用上一版规范给出的公式,未考虑地震作用产生的侧向变形对其抗剪能力的影响。此外,现行规范中针对 RC 圆形截面柱受剪承载力的计算采用与矩形截面柱相同的公式,仅在截面参数取值时考虑了面积等效;由于上述 2 种截面形式柱的钢筋布置和受力特点有所不同,采用相同受剪承载力计算模型不能如实反映不同截面形式柱的抗剪特性。目前,针对矩形截面柱的受剪承载力计算模型研究相对较多,而针对圆形截面柱的受剪承载力计算模型研究还偏少。

对于 RC 圆柱的受剪承载力,中、美混凝土结构设计规范^[1-2]均采用面积等效后的矩形截面柱受剪承载力公式进行估算,且未考虑柱屈服后变形对抗剪能力的影响;研究表明^[3-5],随柱塑性铰区变形的增加,其抗剪能力会不断降低。因此,Priestley 等^[3]、Sezen 等^[4]以及 Cai 等^[5]均针对这一特性提出了相应的考虑位移延性(变形)影响的 RC 圆柱受剪承载力计算模型,但各模型考虑位移延性对剪力影响的程度有很大区别,如 Priestley 等认为仅混凝土承担的剪力部分受位移延性影响,Sezen 等研究认为箍筋和混凝土承担的剪力均随位移延性的增加而减小,而 Cai 等则认为位移延性对柱屈服后受剪承载力的影响主要与箍筋特征值和纵筋配筋系数相关。美国 Caltrans^[6]规范建议的圆柱受剪承载力模型与 Priestley 等的计算模型类似,考虑了位移延性对混凝土承担剪力部分的折减,但位移延性影响系数中也考虑了箍筋参数的影响。我国《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01—2008)^[7]中给出的桥墩受剪承载力计算公式包含混凝土抗剪和箍筋抗剪两部分,其中混凝土抗剪部分是通过将美国 Caltrans 规范的相应公式进行简化得到的,但忽略了位移延性、配箍参数和轴力等的影响,偏于保守;而且该公式需要通过面积等效才能进行圆形截面桥墩受剪承载力计算。此外,已有的 RC 圆柱受剪承载力计算模型建立时,大多回避了弯剪和剪切破坏柱受剪承载力取值不同的问题,认为弯剪破坏柱的受剪承载力为峰值剪力,忽略了弯剪破坏模式下柱的剪切破坏发生在峰值剪力后的事实,这导致大多数模型不能很好地预测弯剪破坏模式下圆柱的受剪承载力。

针对我国现行规范中未直接给出 RC 圆柱受剪承载力计算模型以及现有模型不能准确预测弯剪破坏 RC 圆柱受剪承载力的问题,笔者比较现有 RC 圆柱受剪承载力计算模型,结合 PEER^[8]数据库中的弯剪和剪切破坏 RC 圆柱试验数据的统计分析,提出了考虑位移延性影响的 RC 圆柱受剪承载力计算模型,该模型可用于地震作用下发生不同破坏模式 RC 圆柱的受剪承载力计算,并可用来判断 RC 圆柱的地震破坏模式。

1 RC 圆柱地震破坏模式及受剪承载力定义

RC 圆柱的 3 种典型地震破坏模式可通过抗弯能力和抗剪能力比较进行判别,如图 1 所示。当柱的抗弯能力曲线(即侧向荷载-变形骨架曲线)始终位于受剪承载力包络线之下时,发生弯曲破坏,此时 $V_u(\Delta) \geq V_r > V_p$;当柱的抗弯能力曲线与受剪承载力包络线在屈服前相交,发生剪切破坏,交点即为破坏点,此时 $V_u(\Delta) = V_i = V_p$;当柱的抗弯能力曲线与受剪承载力包络线在屈服后相交,发生弯剪破坏,此时 $V_u(\Delta) = V_u(\Delta_u) < V_p$ 。理论上,只有当 RC 圆柱发生剪切破坏时,其受剪承载力才等于骨架曲线上的峰值荷载;发生弯

剪破坏时,受剪承载力应取为骨架曲线上剪切破坏点对应的荷载,由于剪切破坏点通常位于曲线的下降段且与位移延性相关,因而,剪切破坏点对应的荷载要小于峰值荷载。这一取值原则正是体现了柱受剪承载力随位移延性增加而逐渐减小的特征,在屈服前或位移延性系数较小时,柱的抗剪能力较强,而后随位移延性系数增加,抗剪能力减弱。因此,对于地震作用下 RC 圆柱受剪承载力的计算必须考虑位移延性的影响。

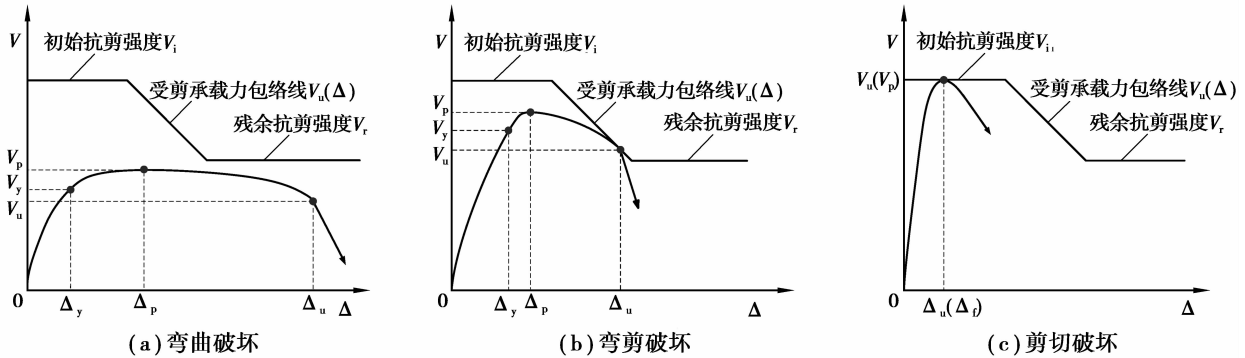


图 1 RC 圆柱地震破坏模式确定

Fig.1 Determination of seismic failure modes of RC circular columns

关于弯剪破坏柱剪切破坏点的确定,目前尚无统一的准则,不同学者对于剪切破坏点的定义不尽相同。如 Sezen 等^[4]取荷载-变形曲线上水平荷载下降至峰值荷载 80% 的点为剪切破坏点,这与弯曲破坏柱极限位移点的确定原则基本一致,但弯剪破坏柱峰值荷载后的承载力下降速度相对较快,降至 80% 峰值荷载时可能尚未发生剪切破坏;马颖等^[9]将弯剪破坏柱箍筋首次屈服时对应的点定义为剪切破坏点,忽略了箍筋屈服到柱破坏这一阶段的变形;王东升等^[10]认为反复荷载作用下的弯剪破坏柱,同级位移幅值下滞回环峰值荷载值下降 15% 的开始下降点为剪切破坏点,该识别方法考虑了剪切破坏发生时承载力迅速下降的特点,但下降的程度主要依据经验设定,而且当剪切破坏发生在相邻两级加载过程中则无法识别。为量化 RC 圆柱剪切破坏发生时承载力下降的程度,对 PEER 数据库中剪切、弯剪破坏 RC 圆柱破坏点处的刚度比(定义为破坏点处的退化刚度与初始刚度之比)绝对值和位移延性关系进行了统计,如图 2 所示。为方便对比,图 2 中也给出了弯曲破坏柱破坏时的刚度比绝对值和位移延性的关系。其中,弯剪、剪切破坏 RC 圆柱试件参数如表 1 所示;由于弯曲破坏 RC 圆柱的试件个数较多,限于篇幅未列入表 1 中,可参见 PEER 数据库。RC 圆柱初始刚度 K 。由滞回曲线骨架曲线上屈服点确定(按 Park 等^[11]的方法确定),破坏点处的退化刚度 K_i 定义为骨架曲线上的破坏点与其后相邻点的割线刚度。圆柱刚度比确定如图 3 所示。需要说明的是,剪切破坏圆柱理论上不存在屈服点,但为了便于与弯剪破坏模式进行对比,统一按 Park 等的方法确定名义屈服点以计算刚度比;弯曲破坏柱骨架曲线的极限位移点取峰值荷载下降至 80% 时对应的点。

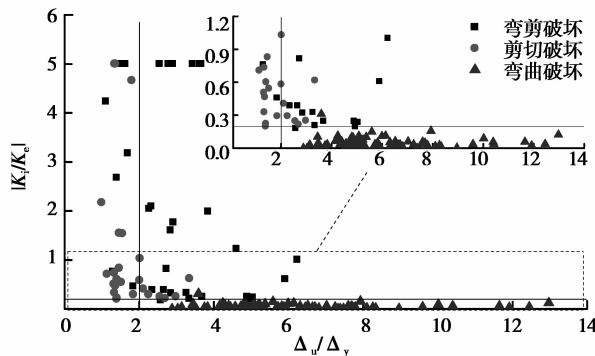


图 2 不同破坏模式 RC 圆柱刚度比和位移延性关系

Fig.2 Relations between stiffness ratios and displacement ductility of RC circular columns with different failure modes

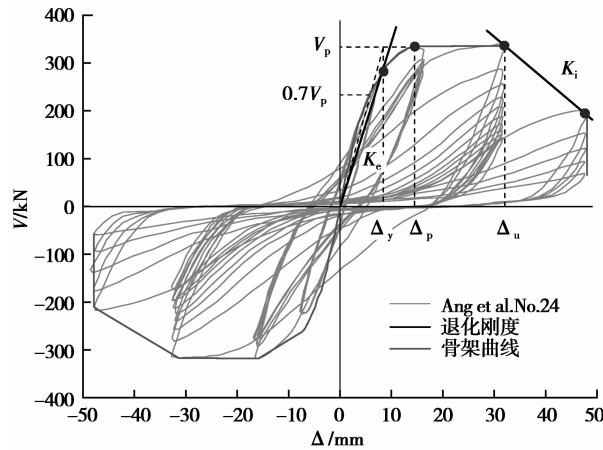


图 3 弯剪破坏 RC 圆柱刚度比确定

Fig.3 Determination of stiffness ratios of flexure-shear failure RC circular columns

由图 2 可知,弯剪和剪切破坏 RC 圆柱的刚度比绝对值 $|K_i/K_c|$ 均在 0.2 以上,而弯曲破坏柱由于水平承载力下降缓慢, $|K_i/K_c|$ 值均小于 0.2。此外,弯曲破坏模式下 RC 圆柱的位移延性较好,而弯剪、剪切破坏时位移延性较差;当 RC 圆柱的名义位移延性系数小于 2.0 时,其破坏模式主要为剪切破坏。由此可知,对于地震作用下的 RC 圆柱的破坏模式和剪切破坏点,可根据骨架曲线计算的刚度比绝对值和位移延性系数进行大致判断。

表 1 RC 圆柱主要参数及破坏模式

Table.1 Main parameters and failure modes of RC circular columns

试件编号	$d/$ mm	$a/$ mm	$f'_c/$ MPa	$\rho_s/$ %	$f_y/$ MPa	$\rho_v/$ %	$f_{yv}/$ MPa	n	$\Delta_u/$ mm	$V_u/$ kN	破坏 模式
Ang et al.No.8	400	800	28.7	3.20	448	1.02	372	0.20	43.80	378.6	弯剪
Ang et al.No.10	400	800	31.2	3.20	448	1.02	332	0.20	41.70	384.1	弯剪
Ang et al.No.12	400	600	28.6	3.20	436	1.02	328	0.10	31.50	319.6	弯剪
Ang et al.No.13	400	800	36.2	3.20	436	1.02	326	0.10	51.70	272.4	弯剪
Ang et al.No.14	400	800	33.7	3.24	424	0.51	326	0.00	34.80	273.7	弯剪
Ang et al.No.15	400	800	34.8	1.92	436	0.51	326	0.00	39.10	204.4	弯剪
Ang et al.No.17	400	1000	34.3	3.20	436	0.51	326	0.10	36.55	170.1	弯剪
Ang et al.No.23	400	800	32.3	3.20	436	0.76	332	0.00	32.60	323.0	弯剪
Ang et al.No.24	400	800	33.1	3.20	436	0.77	310	0.00	32.28	335.1	弯剪
Nelson,Col1	508	1524	56.2	0.99	470	0.13	455	0.13	52.70	256.7	弯剪
Nelson,Col3	508	1524	57.0	0.99	470	0.13	455	0.10	56.90	215.2	弯剪
Benzoni,CS1	460	910	29.3	2.50	462.0	0.32	369.0	0.35	16.88	393.0	弯剪
Benzoni,CS3	460	910	37.0	2.50	462.0	0.32	369.0	0.35	18.60	360.0	弯剪
Verma et al.1	609.6	1219	31.0	2.53	324.1	0.17	358.5	0.06	13.50	540.8	弯剪
Verma et al.3	609.6	1219	34.5	2.53	324.1	0.17	324.1	0.20	16.80	723.6	弯剪
Ang et al.No.4	400	800	30.6	3.20	436	0.51	316	0.00	13.4	289.2	剪切
Ang et al.No.6	400	600	30.1	3.20	436	0.51	328	0.00	10.2	391.7	剪切
Ang et al.No.7	400	800	29.5	3.20	448	0.38	372	0.00	12.0	280.7	剪切

续表 1

试件编号	$d/$ mm	$a/$ mm	$f'_c/$ MPa	$\rho_s/$ %	$f_y/$ MPa	$\rho_v/$ %	$f_{yv}/$ MPa	n	$\Delta_u/$ mm	$V_u/$ kN	破坏 模式
Ang et al.No.16	400	800	33.4	3.20	436	0.51	326	0.10	12.1	352.3	剪切
Ang et al.No.18	400	600	35.0	3.20	436	0.51	326	0.10	14.2	504.8	剪切
Ang et al.No.19	400	600	34.4	3.20	436	0.38	326	0.10	27.0	437.5	剪切
Ang et al.No.20	400	700	36.7	3.20	482	0.38	326	0.17	12.5	486.6	剪切
Ang et al.No.21	400	800	33.20	3.20	436	0.38	326	0.00	10.6	270.5	剪切
Ang et al.No.22	400	800	30.9	3.20	436	0.39	310	0.00	11.5	284.8	剪切
Iwasaki.P-30	564	1000	39.8	2.13	324.5	0.10	259.6	0.00	6.70	387.8	剪切
McDaniel.S1-2	609.6	1219	26.8	1.36	454.0	0.13	200.0	0.00	7.74	331.1	剪切
McDaniel.S2	609.6	1219	31.2	1.36	437.6	0.13	200.0	0.00	8.22	326.3	剪切
Verma et al.5	609.6	1219	35.9	2.53	468.9	0.17	324.1	0.06	8.79	640.0	剪切
Verma et al.7	609.6	914.4	30.7	2.53	468.9	0.17	324.1	0.06	5.86	781.0	剪切

注:柱试件的破坏模式以 PEER 数据库中给定的破坏模式为准; d 为截面直径; a 为柱高; f'_c 为混凝土圆柱体轴心抗压强度; ρ_s 为配筋率; f_y 为纵筋屈服强度; ρ_v 为配箍率; f_{yv} 为箍筋屈服强度; n 为轴压比; λ 为剪跨比。

2 已有 RC 圆柱受剪承载力计算模型比较

地震作用下 RC 圆柱受剪承载力主要由未开裂混凝土、箍筋以及轴向压力 3 部分提供,可写成以下表达式:

$$V_u = V_c + V_s + V_p, \quad (1)$$

式中, V_c 、 V_s 、 V_p 分别为混凝土、箍筋以及轴力贡献的受剪承载力。尽管不同学者对柱受剪承载力的组成部分有较统一的认识,但对于承载力各分量的公式形式和考虑的因素不尽相同。为比较不同模型之间的差异,表 2 汇总了不同规范和部分学者提出的适用于 RC 圆柱受剪承载力计算的模型。

由表 2 中 6 种模型对比可看出,各模型均考虑了混凝土、箍筋及轴力对柱受剪承载力的贡献。其中,箍筋承担的剪力均采用桁架模型进行计算,仅在桁架斜压杆倾角取值上略有不同,如 Priestley 等^[3]取倾角为 30° ,而其余模型均取为 45° ;轴力对抗剪部分的贡献除我国 2010 版混凝土规范^[1]和 Priestley 等的模型单独考虑外,其他模型均将轴力的影响反映在混凝土抗剪部分;对于混凝土抗剪部分,各模型中差异最明显,不仅公式表达形式不同且考虑的因素也存在差别,尤其是塑性变形对混凝土抗剪能力的影响,如 Caltrans 规范^[6]、Priestley 等及 Sezen 等^[4]均认为混凝土抗剪能力随塑性变形增加而减弱,而我国 2010 版混凝土规范和美国 ACI 规范^[2]则忽略了变形对混凝土抗剪能力的影响,而且采用规范模型进行圆柱受剪承载力计算时需将圆形截面等效为矩形截面。当然,不同模型反映变形对柱抗剪能力影响的系数有很大区别,如 Priestley 等模型中的系数主要反映混凝土承担的剪力部分随变形增加逐渐减小,体现了受剪承载力逐渐降低的过程;而 Sezen 等模型中的系数反映柱变形能力对受剪承载力的折减,同时影响混凝土和箍筋承担的剪力部分,体现了变形能力对柱受剪承载力大小的影响而非变化过程;Cai 等认为圆柱受剪承载力随变形增加逐渐减小的影响与箍筋和纵筋的特征值相关,这一影响不是通过对混凝土或箍筋承担的剪力项进行折减体现,而是单独作为受剪承载力的组成项予以反映。此外,部分模型还考虑了剪跨比对受剪承载力的影响,美国 ACI 规范、Caltrans 规范给出的模型中并未反映该参数的影响,事实上剪跨比是影响柱地震破坏模式的关键参数之一,应在模型中予以体现。

表 2 RC 圆柱受剪承载力计算模型比较
Table 2 Comparisons of shear strength models of RC circular columns

模型	计算公式	主要影响因素		
		变形	剪跨比	轴向荷载
混凝土规范 ^[1] (2010)	$\frac{1.05}{\lambda+1}f_t b h_0 + \frac{A_{sv} f_{yv} h_0}{s} + 0.056N$	—	影响混凝土抗剪 $1.0 \leq \lambda \leq 3.0$	$N \leq 0.3 f_c A$
ACI ^[2] (2011)	$0.17 \left[1 + \frac{N}{14 A_g} \right] \sqrt{f'_c} b h_0 + \frac{A_{sv} f_{yv} h_0}{s}$	—	—	影响混凝土抗剪
Caltrans ^[6] (2013)	$F_1 F_2 \sqrt{f'_c} (0.8 A_g) + \frac{\pi A_{sh} f_{yv} D'}{2s}$	$F_1 = 0.08 \rho_h f_{yv} + 0.305 - 0.083 \mu$ $0.025 \leq F_1 \leq 0.25$	—	$F_2 = 1 + \frac{N}{13.8 A_g} < 1.5$
Priestley ^[3] (1994)	$k \sqrt{f'_c} (0.8 A_g) + \frac{\pi A_{sh} f_{yv} D'}{2s} \cot 30^\circ + \frac{D-c}{2a} N$	$k = 0.29 - 0.095 \cdot (\mu - 2)$ $0.10 \leq k \leq 0.29$	影响轴力抗剪	单独抗剪项
Sezen ^[4] (2006)	$k \left(\frac{0.5 \sqrt{f'_c}}{a/d} \sqrt{1 + \frac{N}{0.5 \sqrt{f'_c} A_g}} \right) 0.8 A_g + k \frac{\pi A_{sh} f_{yv} D'}{2s}$	$k = 1.0 - 0.075 \cdot (\mu - 2)$ $0.7 \leq k \leq 1.0$	影响混凝土抗剪 $2.0 \leq a/d \leq 4.0$	影响混凝土抗剪
Cai ^[5] (2015)	$\begin{cases} \left(0.13 + 0.175 \frac{N}{A_g f'_c} \right) A_g v_c f'_c + \frac{\pi A_{sh} f_{yv} D'}{2s} & \mu \leq R_{iu} \\ \left(0.13 + 0.175 \frac{N}{A_g f'_c} \right) A_g v_c f'_c + \frac{\pi A_{sh} f_{yv} D'}{2s} + K_d (\mu - R_{iu}) & \mu > R_{iu} \end{cases}$ $K_d = \left(0.22 \frac{\rho_s f_y}{f'_c} - 0.35 \right) \quad V_c < 0$	$R_{iu} = \left(6.8 \frac{\rho_v f_{yv}}{f'_c} + 0.5 \right)$	$v_c = \left(1 - \frac{a}{4d} \right) e^{\left(\frac{-f'_c}{100} \right)}$ $1.0 \leq a/d \leq 2.5$	影响混凝土抗剪

注: f_t 为混凝土轴心抗拉强度; s 为箍筋间距; N 为轴力; λ 为剪跨比; A_g 为构件全截面面积; D' 为圆柱核心区直径; b 为截面宽度; h_0 为截面有效高度; c 为中性轴高度; A_{sh} 为单根箍筋截面面积; A_{sv} 为与剪力方向平行的横向箍筋总面积。

为比较各模型计算的准确性,图 4 分别给出弯剪和剪切破坏 RC 圆柱(见表 1)受剪承载力计算结果比较。由图 4 可以看出,各模型的计算结果均存在一定的离散性;且弯剪破坏柱受剪承载力计算结果的离散性

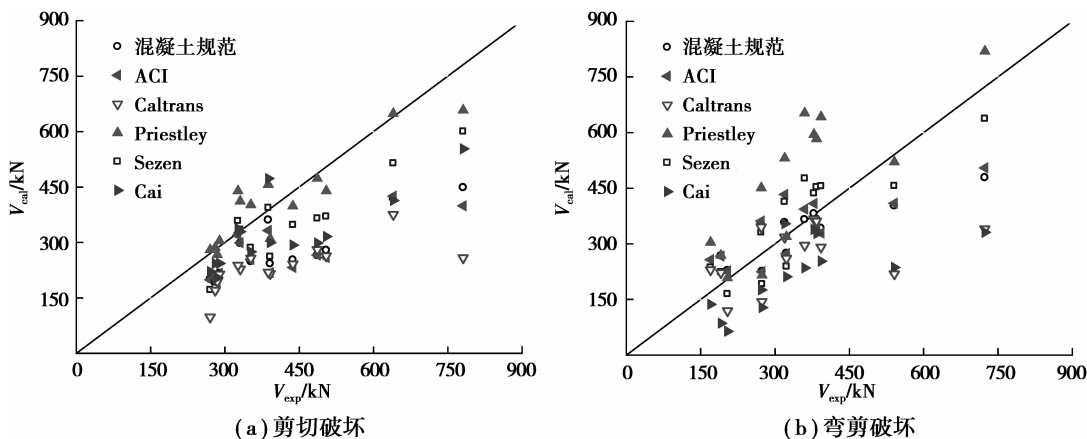


图 4 RC 圆柱受剪承载力试验值和各模型计算值比较

Fig.4 Comparisons between experimental and predicted results for shear strength of RC circular columns

要明显大于剪切破坏柱。对于剪切破坏 RC 圆柱, Priestley 等模型的计算数据点集中分布于对比线两侧, 离散性 ($V_{\text{exp}}/V_{\text{cal}}$ 的变异系数为 0.2) 较小, 该模型计算结果明显优于其他模型; 而对于弯剪破坏 RC 圆柱, 受剪承载力计算值与试验值吻合较好的则为 Sezen 等的模型, 该模型中考虑了变形能力对总受剪承载力大小的影响, 有一定的合理性, 但计算结果的离散性相比剪切破坏柱时偏大, $V_{\text{exp}}/V_{\text{cal}}$ 的变异系数为 0.4。这表明, 针对不同破坏模式 (弯剪、剪切破坏) RC 圆柱受剪承载力计算, 已有模型的适用性仍需进一步完善。

为进一步比较各模型计算结果的合理性, 图 5 给出了按 6 种模型计算得到的受剪承载力包络线与典型弯剪、剪切破坏 RC 圆柱滞回曲线的比较。由图可知, Priestley 等的模型和 Cai 等的模型计算得到的受剪承载力随柱变形增加逐渐减小, 受剪承载力包络线由平台段和下降段组成, 其中 Priestley 等的模型还考虑了下降段后的残余受剪承载力平台段; 而其他模型的受剪承载力包络线仅有平台段, 且计算结果偏保守, 无法准确区分 RC 圆柱的不同地震破坏模式。需要说明的是, 尽管 Caltrans 规范和 Sezen 等的模型也考虑变形能力对柱受剪承载力的影响, 但该影响仅是对初始受剪承载力大小进行折减, 其包络线仍表现为水平直线。由图还可看出, 各模型的计算结果差异较大, 其中 Priestley 等的模型和 Cai 等的模型相对合理, 理论上可明确区分弯剪、剪切破坏模式, 但计算结果与试验结果吻合不是很好, Priestley 等的模型明显高估了弯剪破坏圆柱的受剪承载力, 尤其进入塑性变形阶段后, 其受剪承载力包络线远高于弯剪破坏圆柱的滞回曲线。Cai 等的模型计算的圆柱受剪承载力明显偏小, 导致受剪承载力包络线与滞回曲线在达到峰值荷载前就已相交, 易将 RC 圆柱的弯剪破坏模式误判为剪切破坏; 此外, 该模型的受剪承载力包络线下降段缺少残余承载力平台段, 这会导致变形良好的弯曲破坏柱的滞回曲线与受剪承载力包络线也会相交, 显然不合理。实际上, 柱的受剪承载力包络线在峰值水平荷载前应高于滞回曲线骨架曲线, 其后随变形增大逐渐下降直至残余承载力平台段, 只有当柱发生剪切或弯剪破坏时二者才会相交, 如图 1 所示。

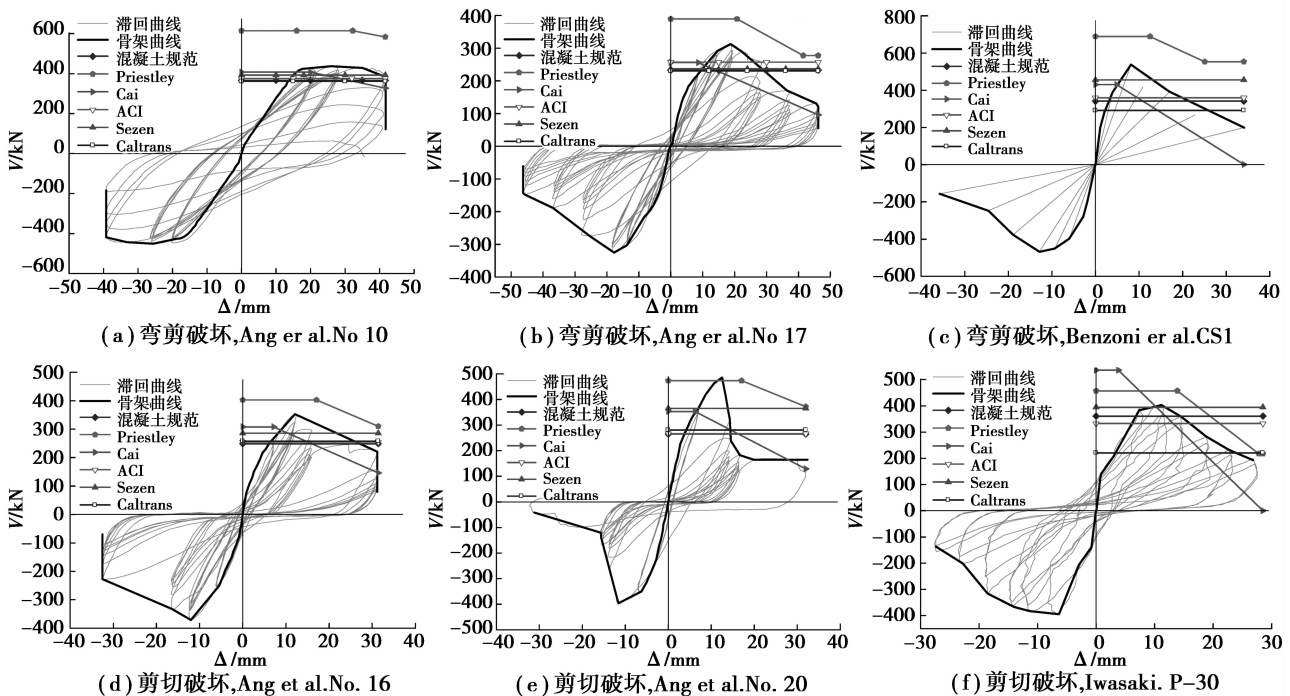


图 5 弯剪、剪切破坏 RC 圆柱滞回曲线与受剪承载力包络线比较

Fig.5 Comparisons between hysteretic curves and shear strength envelopes of flexure-shear and shear critical RC circular columns

3 受剪承载力计算模型

3.1 模型参数确定

为有效预测剪切和弯剪破坏 RC 圆柱的受剪承载力,文中提出了包含初始承载力直线段、下降段及残余段的 RC 圆柱三折线受剪承载力计算模型,如图 6 所示。模型的表达式为

$$V_u = k_\mu V_i = \begin{cases} k_\mu V_i, & \mu \leq \mu_p; \\ k_\mu V_i, & \mu_p < \mu < \mu_u; \\ k_\mu V_i, & \mu \geq \mu_u. \end{cases} \quad (2)$$

式中, V_u 为 RC 圆柱的受剪承载力; V_i 为初始受剪承载力; k_μ 为与位移延性相关的受剪承载力折减系数; μ 为相对位移延性系数,定义为柱屈服后位移与屈服位移之比; μ_p 为初始受剪承载力下降点对应的位移延性系数, $\mu_p = \Delta_p / \Delta_y$; μ_u 为残余受剪承载力起始点对应的位移延性系数, $\mu_u = \Delta_u / \Delta_y$ 。

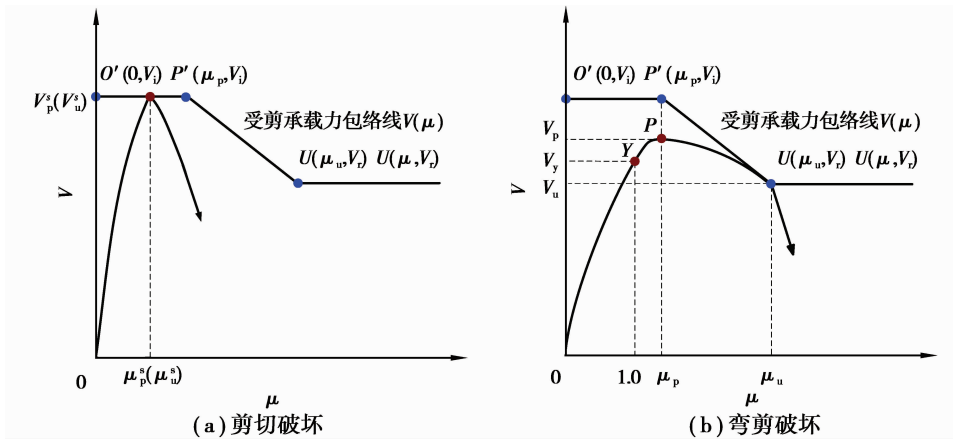


图 6 RC 圆柱受剪承载力模型

Fig.6 Proposed shear strength model of RC circular columns

由图 6 的几何关系可知,RC 圆柱的受剪承载力模型由 $O'P'$ 、 $P'U$ 和 UU' 3 条直线段组成,其中 $O'P'$ 表示初始受剪承载力 V_i ,理论上 V_i 应等于剪切破坏 RC 圆柱的峰值荷载,即 $V_i = V_p^s$ (V_p^s 为剪切破坏 RC 圆柱的峰值荷载); P' 点为初始受剪承载力 V_i 的下降起始点,考虑到柱受剪承载力在峰值点后开始下降,且弯剪破坏柱峰值荷载对应的相对位移延性系数 μ_p 大于剪切破坏柱峰值荷载对应的名义相对位移延性系数 μ_p^s ,因此, P' 点对应的横坐标为 μ_p ; U 点为残余受剪承载力的起始点,由弯剪破坏 RC 圆柱剪切破坏点对应的极限位移延性系数 μ_u 和残余受剪承载力 V_r 确定。

根据图 4 的模型计算结果比较可知, Priestley 等的模型计算的剪切破坏 RC 圆柱的受剪承载力与试验值较接近;同时,考虑桁架模型中采用 45° 倾角比 Priestley 等的模型中采用的 30° 更偏于安全,所提模型中的初始抗剪强度 V_i 按下式计算:

$$V_i = 0.29 \sqrt{f'_c} (0.8 A_g) + \frac{\pi}{2} \frac{A_{sh} f_{yv} D'}{s} + \frac{D-c}{2a} N, \quad (3)$$

式中,各符号含义如表 2 所示。

为确定相对位移延性系数 μ_p 和 μ_u ,分别对表 1 中弯剪破坏 RC 圆柱的拟静力试验数据进行分析,并考虑柱剪跨比、轴压比、配箍特征值、纵筋配筋系数等设计参数的影响,基于拟合分析可得 μ_p 和 μ_u 的计算表达式为

$$\mu_p = \frac{(0.45\lambda + 0.19) [1.32(\rho_v f_{yv} / f'_c) + 0.58]^{0.49}}{(n + 0.55) [0.8(\rho_s f_y / f'_c) + 0.41]^{0.54}}, \quad (4)$$

$$\mu_u = \frac{(0.45\lambda + 0.35) [7.11(\rho_v f_{yv} / f'_c) + 0.76]^{0.71}}{(n + 0.94) [3.46 - 3.60(\rho_s f_y / f'_c)]^{-1.15}}, \quad (5)$$

式中,各符号含义如表 2 所示。图 7 分别给出了 μ_p 、 μ_u 公式计算值和试验值的比较,二者吻合较好。需要说明的是,公式(4)和(5)主要基于表 2 中的试验数据分析得出的,因此,采用该公式进行计算时应注意各设计参数的取值范围,如配筋率 $1.0\% \leq \rho_s \leq 3.24\%$, 配箍率 $0.1\% \leq \rho_v \leq 1.02\%$, 轴压比 $0.0 \leq n \leq 0.35$, 剪跨比 $1.5 \leq \lambda \leq 3.0$ 。

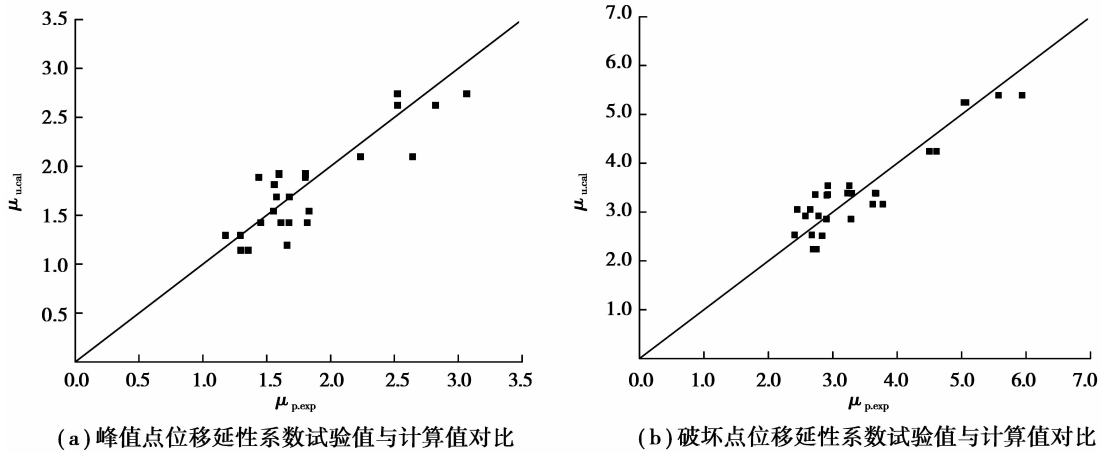


图 7 弯剪破坏 RC 圆柱位移延性系数计算结果比较

Fig.7 Comparisons of predicted displacement ductility of flexure-shear critical RC critical columns

为确定式(2)模型中残余受剪承载力 V_r , 对表 1 中弯剪破坏 RC 圆柱的残余受剪承载力 V_r 和初始受剪承载力 V_i 的比值 β ($\beta = V_r/V_i$) 进行了统计分析。 β 大致服从正态分布,其统计直方图和概率密度函数如图 8 所示。由于 β 的均值和标准差分别为 $\mu_\beta = 0.770 2$ 、 $\sigma_\beta = 0.107 7$, 将其代入标准正态分布函数表达式则可得给定保证率下的 β 值。文中取保证率为 90%, 则承载力比值 β 约等于 0.63, 即 RC 圆柱的初始受剪承载力随变形增加降至 0.63 倍时发生剪切破坏,这与文献[12]的试验结果基本一致。

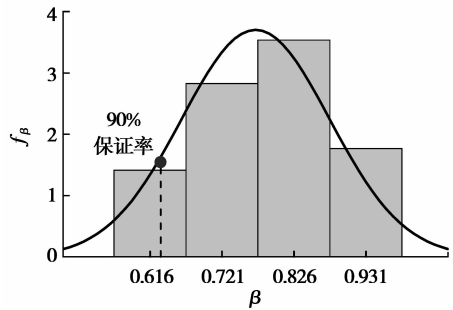


图 8 承载力比 β 的直方图统计和概率密度

Fig.8 Histogram statistics and probability density of shear strength ratio β

根据 V_i 和 V_r 的关系, 则与位移延性系数相关的受剪承载力折减系数 k_μ 表达式为

$$k_\mu = \begin{cases} 1.0, & \mu \leq \mu_p; \\ 0.63 - 0.37 \left(\frac{\mu_u - \mu}{\mu_p - \mu_u} \right), & \mu_p < \mu < \mu_u; \\ 0.63, & \mu \geq \mu_u. \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(2)整理后, 可得 RC 圆柱的受剪承载力计算模型为

$$V_u = k_\mu V_i = \begin{cases} V_i, & \mu \leq \mu_p; \\ \left[0.63 - 0.37 \left(\frac{\mu_u - \mu}{\mu_p - \mu_u} \right) \right] V_i, & \mu_p < \mu < \mu_u; \\ 0.63 V_i, & \mu \geq \mu_u \end{cases} \quad (7)$$

3.2 模型验证

为验证模型的可靠性, 图 9 和图 10 分别给出了文中模型与 Priestley 等的模型、Cai 等的模型对弯剪和剪切破坏 RC 圆柱的受剪承载力计算结果比较。由图 9 可看出, 文中模型对于 RC 圆柱受剪承载力的计算结果精度较好, 尤其是针对发生弯剪破坏 RC 圆柱受剪承载力预测, 明显优于其它 2 种模型。为比较不同模型计算结果的离散性, 统计了 RC 圆柱受剪承载力试验结果与不同模型计算结果比值 (V_{exp}/V_{cal}) 的变异系数, 弯

剪破坏与剪切破坏 RC 圆柱的受剪承载力试验结果与按文中模型计算结果之比的变异系数分别为 0.195、0.143;而按 Priestley 模型和 Cai 模型计算的 2 种破坏模式对应的变异系数分别为 0.285,0.144 和 0.349,0.183。可以看出,文中模型计算结果的离散性要小于另 2 种模型,特别是针对弯剪破坏。图 10 的模型计算结果比较可看出,文中模型对于弯剪和剪切破坏 RC 圆柱受剪承载力的预测与试验结果吻合较好,可用于地震作用下 RC 圆柱受剪承载力预测和破坏模式判别。

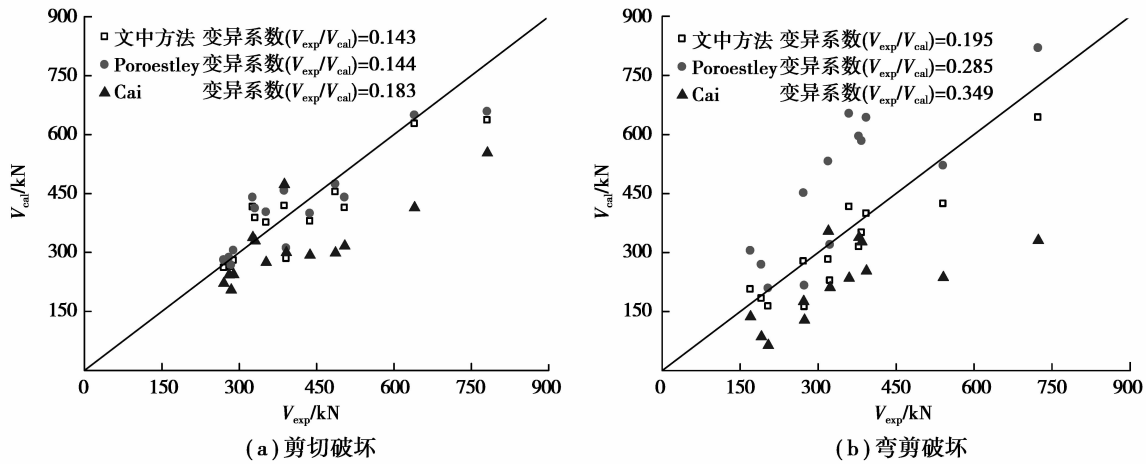


图 9 RC 圆柱受剪承载力模型计算结果比较

Fig.9 Comparisons of shear strength predicted by different models for RC circular columns

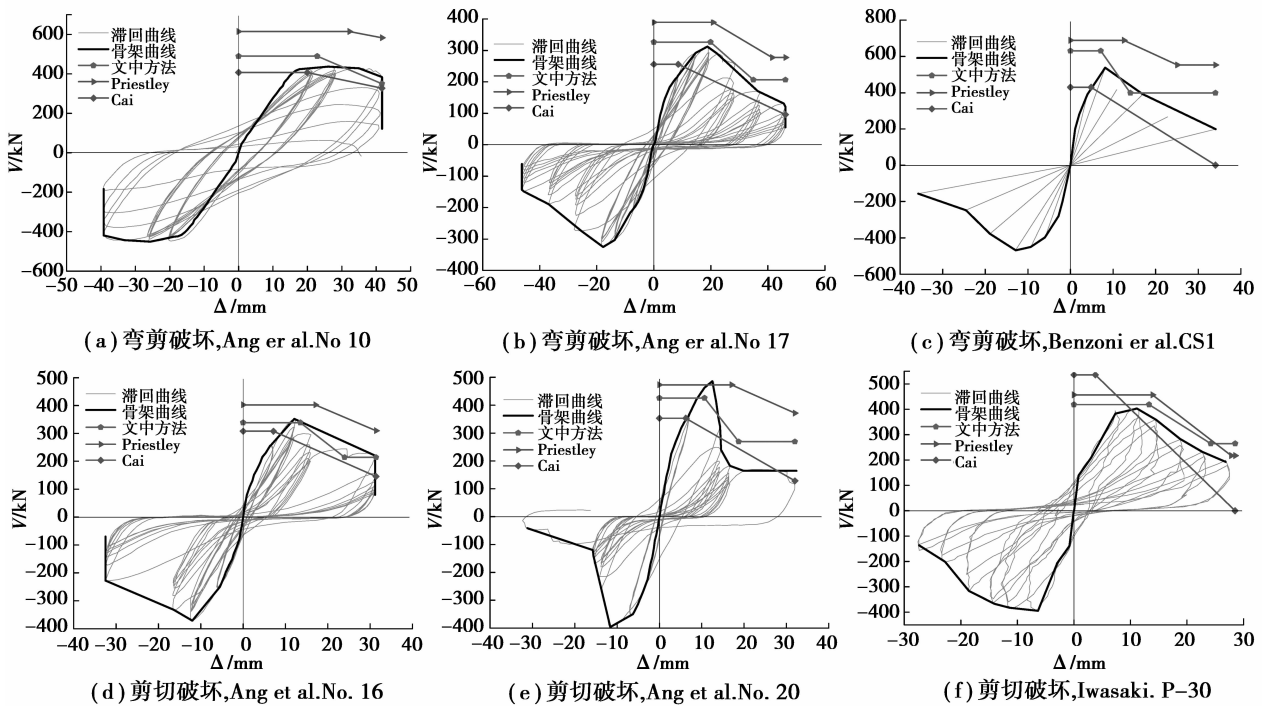


图 10 模型计算结果与 RC 圆柱滞回曲线比较

Fig.10 Comparisons between shear strength envelopes predicted by models and the hysteresis curves of RC circular column

4 结 论

基于地震作用下 RC 圆柱地震破坏模式和抗剪能力的分析,研究了 RC 圆柱受剪承载力计算方法。

1)地震作用下 RC 圆柱可能发生弯曲、剪切和弯剪 3 种破坏模式,不同破坏模式下柱的抗剪能力不同;柱的抗剪能力与塑性铰区变形能力相关,随变形增加逐渐降低。

2)RC 圆柱的受剪承载力计算需考虑变形对抗剪能力的影响,已有的柱受剪承载力计算模型大多未考虑变形的影响,且各计算结果差异较大,不能较好地预测弯剪破坏 RC 圆柱的受剪承载力。

3)基于弯剪、剪切破坏 RC 圆柱受剪承载力分析,并结合已有的 RC 圆柱拟静力试验结果,提出了考虑变形(位移延性)影响的 RC 圆柱受剪承载力计算模型,模型计算结果与试验结果吻合较好,可用于地震作用下 RC 圆柱受剪承载力计算和破坏模式判别。

参考文献:

- [1] GB50010—2010 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
GB50010—2010 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [2] ACI 318-11. Building code requirements for structural concrete and commentary[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2011.
- [3] Priestley M J N, Verma R, Xiao Y. Seismic shear strength of reinforced concrete columns[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(8): 2310-2329.
- [4] Sezen H, Moehle J P. Shear strength model for lightly reinforced concrete columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(11): 1692-1703.
- [5] Cai G, Sun Y, Takeuchi T, et al. Proposal of a complete seismic shear strength model for circular concrete columns[J]. Engineering Structures, 2015, 100: 399-409.
- [6] Caltrans S D C. Caltrans Seismic Design Criteria Version 1.7[S]. Sacramento: California Department of Transportation, 2013.
- [7] JTG/TB02-01-2008 公路桥梁抗震设计细则[S].北京:人民交通出版社,2008.
JTG/TB02-01-2008 Guidelines for seismic design of highway bridges[S]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese)
- [8] Berry M, Parrish M, Eberhard M. PEER structural performance database user's manual (Version 1.0)[R]. Berkeley, California: University of California: Berkeley, 2004.
- [9] 马颖,张勤,贡金鑫.钢筋混凝土柱弯剪破坏恢复力模型骨架曲线[J].建筑结构学报,2012,33(10):116-125.
MA Ying, ZHANG Qin, GONG Jinxin. Skeleton curves of restoring force model of reinforced concrete columns failed in flexure-shear[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(10): 116-125. (in Chinese)
- [10] 王东升,司炳君,孙治国,等.地震作用下钢筋混凝土桥墩塑性铰区抗剪强度试验[J].中国公路学报,2011,24(2):34-41.
WANG Dongsheng, SI Bingjun, SUN Zhiguo, et al. Experiment on shear strength of reinforced concrete bridge column in plastic hinge zone under seismic effect[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(2): 34-41. (in Chinese)
- [11] Park R, Priestley M, Gill W D. Ductility of square-confined concrete columns[J]. Journal of the Structural Division, 1982, 108(4): 929-950.
- [12] 张勤,贡金鑫,马颖.单调和反复荷载作用下弯剪破坏钢筋混凝土柱荷载-变形关系试验研究及简化模型[J].建筑结构学报,2014,35(3):138-148.
ZHANG Qin, GONG Jinxin, MA Ying. Study on lateral load-deformation relations of flexural-shear failure columns under monotonic and cyclic loading[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(3): 138-148. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)