

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.202101009



本刊网刊

水工钢筋混凝土柱塑性铰区抗剪承载力计算

马颖^{1,2}, 李梦蝶³, 孙治国², 吴泽斌¹

(1.华北水利水电大学 水利学院, 河南 郑州 450046; 2.防灾科技学院 中国地震局建筑物破坏机理与防御重点实验室, 河北 三河 065201;
3.河南省水利勘测设计研究有限公司许昌分公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对地震作用下水工钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)柱塑性铰区发生弯剪破坏的问题, 研究水工RC柱塑性铰区抗剪承载力计算问题。借助美国PEER结构抗震性能试验数据库, 整理了19根矩形截面和19根圆形截面弯剪破坏RC柱拟静力试验数据, 通过统计分析, 评价了中国水利行业《水工混凝土结构设计规范》(SL 191—2008)(简称水利“08规范”)与电力行业《水工混凝土结构设计规范》(DL/T 5057—2009)(简称电力“09规范”)中抗剪承载力计算公式的可靠性; 考虑RC柱塑性铰区纵筋屈服后抗剪承载力随变形能力的增加而降低, 引入以柱顶极限位移角为参数的修正系数对抗剪承载力公式进行修正, 并验证了修正后公式的可靠性。计算结果表明: 满足中国现行水工混凝土结构设计规范抗剪承载力要求的RC柱仍有很大可能发生塑性铰区的弯剪破坏, 宜引起足够重视。对于弯剪破坏RC柱, 水利“08规范”和电力“09规范”的抗剪承载力计算公式的保证率均不足60%; 与水利“08规范”相比, 电力“09规范”的抗剪承载力计算公式的偏差较小, 但偏差的离散程度较大; 相比矩形截面, 两个水工规范中RC柱抗剪承载力计算结果对于圆形截面RC柱偏差都较小。考虑抗剪承载力随着柱顶位移角增加而降低的影响, 修正后的计算公式对弯剪破坏RC柱的抗剪承载力具有85%保证率, 从而为水工RC柱塑性铰区抗剪承载力计算提供参考。

关键词: 水工RC柱; 弯剪破坏; 抗剪承载力; 极限位移角; 设计规范

中图分类号: U443.22; U442.5⁺¹

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2022)06-0204-08

Calculation of Shear Capacity of Plastic Hinge Zone of Hydraulic Reinforced Concrete Column

MA Ying^{1,2}, LI Mengdie³, SUN Zhiguo², WU Zebin¹

(1.School of Water Conservancy, North China Univ. of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

2.Key Lab. of Building Collapse Mechanism and Disaster Prevention, Inst. of Disaster Prevention, China Earthquake Administration, Sanhe 065201, China;

3.Xuchang Branch of Henan Water Conservancy Survey, Design and Research Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: In view of the flexural-shear failure of the plastic hinge zone of hydraulic reinforced concrete (RC) columns during earthquake, the shear capacity of the plastic hinge zone of hydraulic RC columns was studied. And, the quasi-static test data of 19 rectangular sections and 19 circular sections of RC columns failed in flexural-shear were collected from PEER-Structural Performance Database in the United States. Through statistical analysis, the reliability of the shear capacity formula in China's water conservancy industry "Design code for hydraulic concrete structures" (SL 191—2008) and the power industry "Design specification for hydraulic concrete structures" (DL/T 5057—2009) was evaluated. Then, because the shear capacity of the plastic hinge zone of RC columns decreases with the increase of deformation capacity after longitudinal reinforcement yielding, the correction coefficient with the ultimate drift ratio of column top as the parameter was introduced to modify the formula of shear capacity, and the reliability of the modified formula was verified. The results show that the hydraulic RC columns satisfied with shear capacity of current hydraulic concrete structures design code in china may suffer flexural-shear failure in plastic hinge zone which should pay more attention in the design. For RC columns failing in flexural-shear, the assurance rates of the shear capacity formulas for RC columns in "SL 191—2008 code" and "DL/T 5057—2009 code" are all less than 60%; compared with "SL 191—2008 code", the deviation of the shear capacity

收稿日期:2021-10-08

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51408223); 中国地震局建筑物破坏机理与防御重点实验室开放基金项目(FZ211102); 河南省高等学校重点科研项目计划(22A560003); 河南省重点研发与推广专项(212102310935)

作者简介:马颖(1982—),女,副教授,博士。研究方向:工程结构抗震。E-mail: maying123@ncwu.edu.cn

网络出版时间:2022-04-15 20:53:00

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20221108.1712.008.html

formula for RC columns in “DL/T 5057—2009 code” is small, but its dispersion of the deviation is large; compared with rectangular section, the shear capacity formulas of RC column in the two hydraulic codes have less deviation for circular section RC column. Considering the effect that the shear capacity decreases with the increase of column top drift ratio, the modified formulas of the shear capacity have 85% assurance rate for the RC columns failing in flexural-shear, which provide reference for the shear capacity calculation of plastic hinge zone of hydraulic RC columns.

Key words: hydraulic RC column; flexural-shear failure; shear capacity; ultimate drift ratio; design specification

钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)柱作为水电站厂房、渡槽等水工建筑物的主要竖向承重构件,承载着整个结构的竖向荷载和由地震引起的水平荷载。因此,地震作用下RC柱极易受到损伤^[1]。在地震作用下,RC柱受剪跨比、轴压比及钢筋配置等因素的影响,其破坏模式通常包括:弯曲破坏(flexure)、弯剪破坏(flexural-shear)和剪切破坏(shear)。RC柱地震破坏模式的判别可参考文献^[2-4]。其中,弯曲破坏过程中抗剪需求始终小于抗剪承载力,RC柱具有较好的转动能力和延性;剪切破坏主要是剪力起控制作用,抗剪需求高于抗剪承载力时发生脆性剪切破坏,在水工结构的抗震设计中应该予以避免;弯剪破坏介于弯曲破坏和剪切破坏之间,RC柱的纵向钢筋首先屈服形成塑性铰,随后抗剪承载力随着变形的增大逐渐下降,当抗剪需求大于剩余抗剪承载力时,发生弯剪破坏,设计中也要尽量避免^[5-6]。由此可见,RC柱抗剪承载力的计算对于其抗震设计及安全评估具有重要意义^[7-8]。目前,中国水利行业《水工混凝土结构设计规范》(SL 191—2008)^[9](简称水利“08规范”)与中国电力行业《水工混凝土结构设计规范》(DL/T 5057—2009)^[10](简称电力“09规范”)关于RC柱抗剪承载力的计算是基于剪切破坏柱试验数据建立的半经验公式。为验证规范中的公式是否适用于弯剪破坏柱塑性铰区的抗剪承载力计算,以弯剪破坏柱为研究对象,研究水工规范中抗剪承载力计算公式是否符合弯剪破坏RC柱塑性铰区抗剪承载力的保证率要求。

近年来,很多学者对RC柱抗剪承载力计算模型进行了研究^[11-12],但部分研究者仅对国内外设计规范RC柱抗剪承载力计算公式的可靠性进行了对比;一些研究者对规范中公式的计算结果与试验结果进行了比较,并在此基础上建立了修正模型或计算模型。孙治国等^[13]将高强箍筋高强混凝土柱抗剪承载力试验结果与美国《混凝土结构设计规范》(ACI 318—05)^[14]和中国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[15]的抗剪承载力计算值进行了对比,认为两种规范在计算高强箍筋高强混凝土柱抗剪承载力时均存在不安全。余波等^[16]针对剪切破坏的RC柱,将国内外规范(美国《结构混凝土建筑规范要求》(ACI 318—11)^[17]、中国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[15]、水利“08规范”^[9]和电

力“09规范”^[10]等)中抗剪承载力模型的计算结果与其改进的抗剪承载力分析模型的计算结果进行对比发现:改进的模型有效克服了传统模型无法考虑轴压比影响和需要引入经验位移延性修正系数等缺陷;中国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[15]、水利“08规范”^[9]和电力“09规范”^[10]抗剪承载力公式计算值较试验值都偏低,离散性大。仇建磊^[18]结合了截面受力平衡及变形协调等因素建立了钢筋混凝土柱抗剪承载力计算式,并将其建立的计算式与美国《加州桥梁抗震设计规范》(简称Caltrans规范2013)^[19]及已有研究中的抗剪承载力公式进行了对比表明:其建立的计算式适用于柱构件抗剪承载力计算分析;而Caltrans规范2013^[19]形式较复杂,限制条件较多,计算准确性较差。甘丹等^[20]收集试验数据,基于美国《混凝土结构设计规范》(ACI 318—14)^[21]和中国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[15],验证现有的将钢管完全等效为箍筋的抗剪承载力计算方法的适用性,结果表明,该计算方法在方钢管壁厚比小于80或其截面边长较大时会过高估计构件的抗剪承载力;因此,针对构件受力特点,建立了基于该方法的抗剪承载力简化力学模型,且其建立的模型与《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[15]中的计算公式在形式上统一。综上可知,多数RC柱抗剪承载力修正或计算模型是基于国外规范(美国规范、加拿大规范、日本规范、欧洲规范等)抗剪承载力计算公式或国内建筑行业混凝土设计规范抗剪承载力计算公式进行的,没有基于水工设计规范中的计算公式建立修正模型,且较少关注RC柱塑性铰区的抗剪承载力计算情况,而RC柱的抗剪承载力对水工建筑物的整体安全非常重要,故有必要基于水利“08规范”和电力“09规范”研究RC柱塑性铰区抗剪承载力计算。

本文以弯剪破坏RC柱为研究对象,借助美国太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)结构抗震性能试验数据库中弯剪破坏RC柱的拟静力试验数据(矩形截面19根,圆形截面19根),采用水利“08规范”和电力“09规范”计算RC柱塑性铰区的抗剪承载力,评价水利“08规范”和电力“09规范”抗剪承载力计算公式的保证率,并对计算公式进行修正,建立RC柱塑性铰区抗剪承载力计算式,同时验证修正后计算式的保证率。

1 RC柱抗剪承载力公式

当前,RC柱的抗剪承载力 V_u 通常采用式(1)进行计算:

$$V_u = V_c + V_{sv} + V_p \quad (1)$$

式中, V_c 为混凝土的抗剪承载力, V_{sv} 为横向钢筋(箍筋)的抗剪承载力, V_p 为轴向压力产生的抗剪承载力。

水利“08规范”^[9]中RC柱抗剪承载力 V_u 计算公式为:

$$V_u = 0.7f_tbh_0 + 1.25f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.07N \quad (2)$$

式中: f_t 为混凝土轴心抗拉强度,可根据混凝土轴心抗压强度(即棱柱体抗压强度) f_c 进行换算,即 $f_t = 0.23(f_c/0.76)^{2/3}$; b 为截面宽度; h_0 为截面有效高度, $h_0 = h - a$, h 为截面高度, a 为纵向钢筋合力点至截面边缘的距离; f_{yv} 为箍筋屈服强度; A_{sv} 为同一截面内箍筋各肢全部截面面积; s 为箍筋间距; N 为轴向压力,当 N 大于 $0.3f_cA$ 时, N 取 $0.3f_cA$, A 为柱的全截面面积。

电力“09规范”^[10]中RC柱抗剪承载力计算公式为:

$$V_u = 0.5f_tbh_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.07\gamma_d N \quad (3)$$

式中: γ_d 为结构系数,材料为钢筋混凝土受压构件时,取值为1.2;箍筋屈服强度 f_{yv} 取值不应大于 360 N/mm^2 ;当 N 大于 $\frac{1}{\gamma_d}(0.3f_cA)$ 时, N 取 $\frac{1}{\gamma_d}(0.3f_cA)$;其他参数含义与式(2)相同。式(2)和(3)均未考虑配置弯起钢筋的情况。

由于水利“08规范”^[9]和电力“09规范”^[10]的RC

表 1 矩形试件的基本参数及抗剪承载力试验值

Tab. 1 Basic parameters and shear capacity test values of rectangular specimens

| 矩形试件编号 | 柱截面($b \times h$)/ (mm×mm) | 柱高 L /mm | 轴力 P /kN | 混凝土圆柱体抗压强度 f'_c /MPa | 纵筋屈服强度 f_{yt} /MPa | 箍筋屈服强度 f_{yv} /MPa | 纵筋配筋率 ρ_l /% | 体积配筋率 ρ_s /% | 抗剪承载力 V_u /kN |
|--------|---------------------------------|------------|------------|------------------------|----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 1 | 200.0×200.0 | 300.0 | 294.0 | 21.0 | 371.00 | 344.00 | 1.27 | 1.39 | 107.12 |
| 2 | 200.0×200.0 | 400.0 | 183.0 | 32.0 | 369.00 | 316.00 | 2.01 | 0.57 | 83.49 |
| 3 | 160.0×160.0 | 320.0 | 486.0 | 21.1 | 341.00 | 559.00 | 2.22 | 1.75 | 59.75 |
| 4 | 160.0×160.0 | 480.0 | 517.0 | 28.8 | 341.00 | 559.00 | 2.22 | 0.73 | 47.02 |
| 5 | 160.0×160.0 | 480.0 | 517.0 | 28.8 | 341.00 | 559.00 | 2.22 | 0.73 | 51.58 |
| 6 | 200.0×200.0 | 300.0 | 265.0 | 25.8 | 361.00 | 426.00 | 2.13 | 0.91 | 113.49 |
| 7 | 200.0×200.0 | 300.0 | 636.0 | 25.8 | 361.00 | 426.00 | 2.13 | 0.91 | 125.52 |
| 8 | 152.4×304.8 | 876.3 | 178.0 | 26.1 | 496.00 | 345.00 | 2.45 | 0.48 | 104.19 |
| 9 | 152.4×304.8 | 876.3 | 178.0 | 26.1 | 496.00 | 345.00 | 2.45 | 0.48 | 98.48 |
| 10 | 152.4×304.8 | 876.3 | 111.0 | 33.6 | 496.00 | 345.00 | 2.45 | 0.33 | 93.27 |
| 11 | 457.2×457.2 | 1 473.2 | 502.6 | 33.1 | 330.96 | 399.91 | 19.4 | 01.0 | 237.35 |
| 12 | 457.2×457.2 | 1 473.2 | 503.0 | 33.1 | 330.96 | 399.91 | 1.94 | 0.10 | 220.00 |
| 13 | 457.2×457.2 | 1 473.2 | 1 512.0 | 25.5 | 330.96 | 399.91 | 3.03 | 0.20 | 367.00 |
| 14 | 254.0×254.0 | 508.0 | 534.0 | 86.0 | 510.00 | 449.00 | 2.46 | 1.63 | 243.11 |
| 15 | 254.0×254.0 | 508.0 | 1 068.0 | 86.0 | 510.00 | 449.00 | 2.46 | 1.63 | 287.83 |
| 16 | 457.2×457.2 | 1 473.2 | 667.2 | 21.1 | 434.37 | 476.00 | 2.47 | 0.25 | 270.21 |
| 17 | 160.0×160.0 | 320.0 | 432.0 | 21.1 | 341.00 | 559.00 | 2.22 | 0.70 | 50.22 |
| 18 | 152.0×305.0 | 876.0 | 189.0 | 34.7 | 496.00 | 345.00 | 2.45 | 0.30 | 98.76 |
| 19 | 152.0×305.0 | 876.0 | 189.0 | 34.7 | 496.00 | 345.00 | 2.45 | 0.30 | 101.31 |

柱抗剪承载力计算公式都只考虑矩形截面、“T”形截面及“I”形截面,并未考虑圆形截面,计算圆形截面RC柱抗剪承载力时需要进行换算($b=1.76r$, $h_0=1.6r$,其中, r 为圆形截面半径)^[9-10]。

由式(2)和(3)可知,水利“08规范”^[9]和电力“09规范”^[10]的抗剪承载力计算公式有共同点和不同点。共同点是,两者都考虑到轴向压力、截面尺寸、箍筋面积和间距、箍筋屈服强度及混凝土轴心抗压、抗拉强度的影响。不同点是:水利“08规范”^[9]和电力“09规范”^[10]柱相比,1)混凝土项前的系数从0.7变为0.5;2)箍筋项前的系数从1.25变为1.00;3)轴力项前的系数从0.07 N 变为0.07 $\gamma_d N$ 。

2 弯剪破坏RC柱的试验数据

PEER结构抗震性能试验数据库是美国太平洋地震工程研究中心收集整理的试验数据,截至2004年已收录了274根矩形箍筋RC柱和160根螺旋箍筋RC柱的低周反复试验数据,由美国国家科学基金会资助,为研究人员评估研究钢筋混凝土柱的抗震性能提供了数据。

为评价水利“08规范”^[9]和电力“09规范”^[10]的抗剪承载力公式对RC柱塑性铰区抗剪承载力的保证率,从美国PEER结构抗震性能试验数据库中收集发生弯剪破坏的矩形截面RC柱19根和圆形截面RC柱(螺旋配箍)19根,各试件基本参数及抗剪承载力试验值见表1和2,其中,混凝土圆柱体抗压强度 f'_c 可根据 $f_c = 0.76f'_c/0.8$ (f_c 为混凝土轴心抗压强度)进行换算。

表2 圆形试件的基本参数及抗剪承载力试验值

Tab. 2 Basic parameters and shear capacity test values of circular specimens

| 圆形试件编号 | 柱截面直径 r/mm | 柱高 L/mm | 轴力 P/kN | 混凝土圆柱体抗压强度 f_c'/MPa | 纵筋屈服强度 f_{yt}/MPa | 箍筋屈服强度 f_{yv}/MPa | 纵筋配筋率 $\rho_l/\%$ | 体积配筋率 $\rho_v/\%$ | 抗剪承载力 V_u/kN |
|--------|------------------------|------------------|------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| 1 | 400.0 | 800.00 | 0 | 37.5 | 436.0 | 328.0 | 3.20 | 0.51 | 291.49 |
| 2 | 400.0 | 800.00 | 0 | 37.2 | 296.0 | 328.0 | 3.20 | 0.51 | 216.34 |
| 3 | 400.0 | 800.00 | 721 | 28.7 | 448.0 | 372.0 | 3.20 | 1.02 | 427.25 |
| 4 | 400.0 | 800.00 | 784 | 31.2 | 448.0 | 332.0 | 3.20 | 1.02 | 428.59 |
| 5 | 400.0 | 800.00 | 455 | 36.2 | 436.0 | 326.0 | 3.20 | 1.02 | 436.30 |
| 6 | 400.0 | 800.00 | 0 | 33.7 | 424.0 | 326.0 | 3.24 | 0.51 | 306.12 |
| 7 | 400.0 | 800.00 | 0 | 34.8 | 436.0 | 326.0 | 1.92 | 0.51 | 230.34 |
| 8 | 400.0 | 1 000.00 | 431 | 34.3 | 436.0 | 326.0 | 3.20 | 0.51 | 286.58 |
| 9 | 400.0 | 800.00 | 0 | 32.3 | 436.0 | 332.0 | 3.20 | 0.76 | 326.17 |
| 10 | 400.0 | 800.00 | 0 | 33.1 | 436.0 | 310.0 | 3.20 | 0.77 | 340.48 |
| 11 | 400.0 | 800.00 | 1 813 | 37.0 | 475.0 | 340.0 | 3.20 | 0.47 | 489.30 |
| 12 | 307.0 | 900.00 | 145 | 35.9 | 240.0 | 240.0 | 1.83 | 0.63 | 68.67 |
| 13 | 307.0 | 895.00 | 254 | 34.4 | 240.0 | 240.0 | 1.83 | 0.63 | 65.82 |
| 14 | 250.0 | 250.00 | 322 | 26.5 | 375.0 | 334.5 | 0.91 | 4.27 | 174.82 |
| 15 | 250.0 | 500.00 | 161 | 31.6 | 382.0 | 386.5 | 1.62 | 0.75 | 181.65 |
| 16 | 610.0 | 914.50 | 503 | 30.0 | 462.0 | 361.0 | 0.52 | 0.28 | 394.76 |
| 17 | 610.0 | 914.50 | 503 | 30.0 | 462.0 | 361.0 | 1.04 | 0.17 | 587.36 |
| 18 | 457.0 | 910.00 | 850 | 35.0 | 468.2 | 434.4 | 5.21 | 2.70 | 985.10 |
| 19 | 406.4 | 1 047.75 | 0 | 35.4 | 458.5 | 691.5 | 1.17 | 0.26 | 163.44 |

3 RC柱抗剪承载力公式的分析

针对矩形截面和圆形截面,分别采用式(2)和(3)计算弯剪破坏RC柱塑性铰区的抗剪承载力,计算值和试验值,对比如图1所示。将计算值等于试验值(1:1)作为分界线,当规范抗剪承载力公式计

算值小于抗剪承载力试验值时(分界线以下,视为安全范围),表示该规范的RC柱抗剪承载力计算公式具有一定的可靠性;当规范抗剪承载力公式计算值大于试验值时(分界线以上,视为危险范围),表示在未达到抗剪承载力时柱试件就已经发生弯剪破坏。

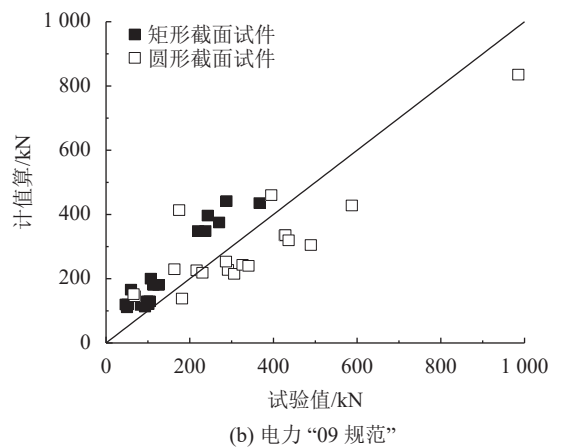
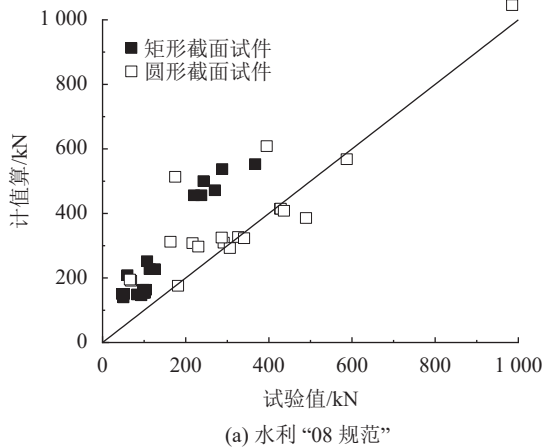


图1 弯剪破坏柱抗剪承载力试验值与各规范公式计算值比较

Fig. 1 Comparison of shear capacity test values of columns failed in flexural-shear and calculation value of each code formula

如图1所示,对于矩形截面的弯剪破坏RC柱,水利“08规范”^[9]和电力“09规范”^[10]的抗剪承载力计算值都高于试验值,表明这两个规范的抗剪承载力计算公式都存在较大危险性,对矩形截面RC柱塑性

铰区抗剪承载力无保证;对于圆形截面的弯剪破坏RC柱,水利“08规范”^[9]和电力“09规范”^[10]的抗剪承载力计算值部分低于试验值,说明两规范对圆形截面的RC柱塑性铰区抗剪承载力具有一定的保证率。

为进一步说明水利“08规范”^[9]和电力“09规范”^[10]抗剪承载力公式的可靠性,对图1中安全范围和危险范围内的RC柱试件个数进行统计分析,计算对于两种截面,抗剪承载力满足要求的试件个数占总试件个数的比例,即保证率。对于矩形截面RC柱,水利“08规范”^[9]和电力“09规范”^[10]抗剪承载力公式的保证率都为0;对于圆形截面RC柱,水利“08规范”^[9]和电力“09规范”^[10]抗剪承载力公式的保证率分别为42.11%和63.16%。可以看出:当弯剪破坏RC柱截面为矩形时,采用水利“08规范”^[9]和电力“09规范”^[10]的抗剪承载力计算公式都非常危险;当弯剪破坏RC柱截面为圆形时,采用水利“08规范”^[9]和电力“09规范”^[10]的抗剪承载力计算公式也略危险。

另外,统计分析式(2)和(3)抗剪承载力计算值与试验比值的均值和变异系数,见表3。

表3 各规范抗剪承载力计算值/试验值的统计分析

Tab. 3 Statistic analysis of calculated/experimental values of shear capacity of each code

| 规范 | 矩形截面 | | 圆形截面 | |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | 均值 | 变异系数 | 均值 | 变异系数 |
| 水利“08规范” ^[9] | 2.0733 | 0.2901 | 1.4007 | 0.5108 |
| 电力“09规范” ^[10] | 1.6401 | 0.2936 | 1.0756 | 0.5222 |

表4 15根弯剪破坏RC柱的基本参数及抗剪承载力试验值

Tab. 4 Basic parameters and shear capacity test values of 15 RC columns failed in flexural-shear

| 试件编号 | 柱截面(b×h)/ (mm×mm) | 柱高H/mm | 轴力N/kN | 混凝土立方体 抗压强度 f_{cu} /MPa | 纵筋屈服 强度 f_{yt} /MPa | 箍筋屈服 强度 f_{yv} /MPa | 纵筋配 筋率 ρ_l % | 体积配 箍率 ρ_v % | 抗剪承载力 V_u /kN |
|---------------|----------------------|--------|--------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| R6.16-0.5-50 | 200×200 | 1 150 | 829 | 54.5 | 365.2 | 346.9 | 2.34 | 0.77 | 45.68 |
| R6.16-0.5-100 | 200×200 | 1 150 | 829 | 54.5 | 365.2 | 346.9 | 2.34 | 1.54 | 45.13 |
| R5.35-0.5-50 | 200×200 | 1 000 | 829 | 54.5 | 365.2 | 346.9 | 2.34 | 0.77 | 62.14 |
| R5.35-0.5-100 | 200×200 | 1 000 | 829 | 54.5 | 365.2 | 346.9 | 2.34 | 1.54 | 61.76 |
| R4.33-0.2-100 | 200×200 | 850 | 332 | 54.5 | 365.2 | 346.9 | 2.34 | 1.54 | 39.78 |
| R4.33-0.5-50 | 200×200 | 850 | 829 | 54.5 | 365.2 | 346.9 | 2.34 | 0.77 | 73.05 |
| R4.33-0.5-100 | 200×200 | 850 | 829 | 54.5 | 365.2 | 346.9 | 2.34 | 1.54 | 66.53 |
| R3.46-0.2-100 | 200×200 | 700 | 332 | 54.5 | 365.2 | 346.9 | 2.34 | 1.54 | 51.24 |
| R3.46-0.5-50 | 200×200 | 700 | 829 | 54.5 | 365.2 | 346.9 | 2.34 | 0.77 | 92.38 |
| R3.46-0.5-100 | 200×200 | 700 | 829 | 54.5 | 365.2 | 346.9 | 2.34 | 1.54 | 83.61 |
| R2.50-0.2-100 | 200×200 | 550 | 332 | 54.5 | 365.2 | 346.9 | 2.34 | 1.54 | 70.13 |
| R2.50-0.5-50 | 200×200 | 550 | 829 | 54.5 | 365.2 | 346.9 | 2.34 | 0.77 | 157.41 |
| R2.50-0.5-100 | 200×200 | 550 | 829 | 54.5 | 365.2 | 346.9 | 2.34 | 1.54 | 155.97 |
| R1.63-0.2-50 | 200×200 | 400 | 332 | 54.5 | 365.2 | 346.9 | 2.34 | 0.77 | 161.17 |
| R1.63-0.2-50 | 200×200 | 400 | 332 | 54.5 | 365.2 | 346.9 | 2.34 | 1.54 | 160.94 |

注:1)混凝土轴心抗压强度 f_c 可根据 $f_c=0.76f_{cu}$ (f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度)进行换算。2)纵筋钢筋类别均为HRB335,纵筋直径为16 mm;箍筋钢筋类别均为HPB235,箍筋直径为6.5 mm。

4.1 建立计算式

柱顶极限位移角是度量RC柱变形能力的主要参数之一,为无量纲参数,可排除柱高因素的影响,并且不同剪跨比的RC柱的极限位移角具有较好的一致性^[23]。本文选用柱顶极限位移角表示修正系数,以表示RC柱塑性较区的抗剪承载力随着延性变形的增加

由表3可知,各规范抗剪承载力计算结果的偏差大小及其离散程度情况如下:

1)不论矩形截面RC柱还是圆形截面RC柱,电力“09规范”^[10]抗剪承载力公式偏差的均值比水利“08规范”^[9]的小,但电力“09规范”^[10]抗剪承载力公式偏差的变异系数比水利“08规范”^[9]的大,说明电力“09规范”^[10]抗剪承载力计算公式的偏差较小,但偏差的离散程度较大。

2)对于同一规范,圆形截面RC柱的抗剪承载力计算值的偏差较小,而矩形截面RC柱的抗剪承载力计算值的偏差的变异系数较小,这说明,矩形截面RC柱的抗剪承载力计算值的偏差分布离散程度较小。

4 建立RC柱塑性较区抗剪承载力计算式

由以上分析可知,采用水利“08规范”^[9]和电力“09规范”^[10]RC柱抗剪承载力计算公式对于弯剪破坏的情况偏危险,因此,引入修正系数 k 对两个规范的抗剪承载力计算公式进行修正,并采用文献[5]和[22]中的15根弯剪破坏矩形截面RC柱试验数据对修正后的抗剪承载力计算式进行验证。15根弯剪破坏RC柱的基本参数及其抗剪承载力试验值见表4。

而降低。以柱顶极限位移角 $\delta_{d, Ma}$ 为变量建立修正系数 k 的线性回归方程,极限位移角按文献[24]计算,如式(4)所示:

$$\delta_{d, Ma} = 4.11\rho_{sv} \frac{f_{yt}}{f'_c} \frac{(\lambda - 0.8)}{\left(1.97 - \frac{\rho_l f_{yt}}{0.85 f'_c}\right)} \left(\frac{P}{A_g f'_c}\right) \frac{A_c}{A_g} + 1.6 \quad (4)$$

式中, ρ_{sv} 为配箍率, f_{yt} 为箍筋屈服强度, f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度, λ 为剪跨比, ρ_l 为纵筋配筋率, f_{yl} 为纵筋屈服强度, P 为轴向荷载, A_g 为柱的全截面面积, A_c 为混凝土核心区面积, $\delta_{d, Ma}$ 为柱顶极限位移角。

建立修正系数 k 关于位移角 $\delta_{d, Ma}$ 的线性关系后, 需要保证修正后的抗剪承载力计算值不为负值, 且抗剪承载力计算值要低于试验值。修正系数 k 可表示为:

$$k = \frac{V_{cs, 试验值}}{V_{cs, 计算值}} \quad (5)$$

式中, V_{cs} 为混凝土抗剪承载力 V_c 与箍筋抗剪承载力 V_{sv} 之和。

为保证修正后的抗剪承载力计算值低于试验值, 选择修正系数 k 的下限值与极限位移角 $\delta_{d, Ma}$ 进行拟合, 如图2所示。

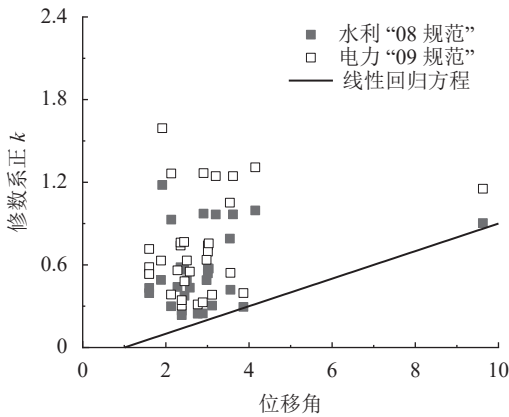


图2 修正系数的线性回归方程

Fig. 2 Linear regression equation of the modified coefficient

得到线性回归方程为:

$$k = 0.1\delta_{d, Ma} - 0.1 \quad (6)$$

引入修正系数 k 后的水利“08规范”^[9]和电力“09规范”^[10]抗剪承载力计算公式如式(7)和(8)所示, 参数含义与式(2)和(3)一致。

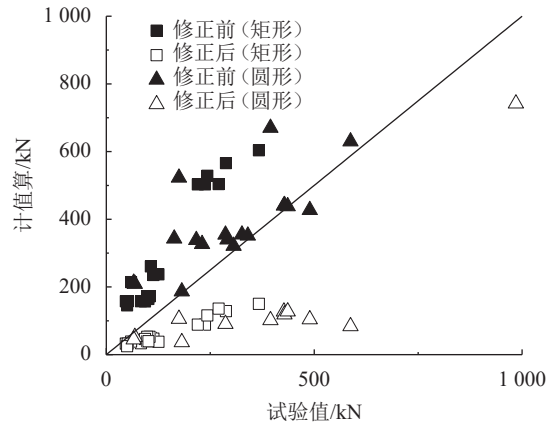
基于水利“08规范”^[9]修正后的RC柱塑性铰区抗剪承载力计算公式为:

$$V_u = k \left(0.7f_t b h_0 + 1.25f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \right) + 0.07N \quad (7)$$

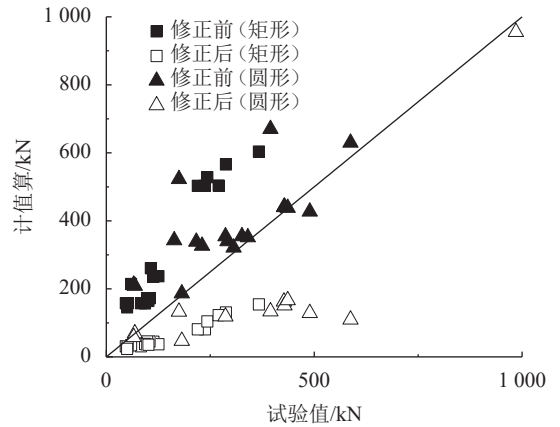
基于电力“09规范”^[10]修正后的RC柱塑性铰区抗剪承载力计算公式如下:

$$V_u = k \left(0.5f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \right) + 0.07\gamma_d N \quad (8)$$

两个水工规范抗剪承载力公式修正前后计算值与试验值的比较如图3所示, 可以看出修正后的计算式对弯剪破坏矩形和圆形截面RC柱抗剪承载力的保证率达到100%, 满足要求。



(a) 水利“08规范”



(b) 电力“09规范”

图3 弯剪破坏RC柱抗剪承载力公式修正前后计算结果对比

Fig. 3 Comparison of calculation results before and after correction of shear capacity formula for RC columns failed in flexural-shear

4.2 验证计算式

为验证修正后计算式对RC柱塑性铰区抗剪承载力的保证率, 比较文献[5]和[23]中的15根弯剪破坏矩形截面RC柱修正前后抗剪承载力计算值与试验值, 如图4所示。由图4可知, 水利“08规范”^[9]和电力“09规范”^[10]修正前的RC柱抗剪承载力公式的保证率分别为6.67%和20.00%, 修正后的比例皆为86.67%, 这表明, 修正后的计算式对RC柱塑性铰区的抗剪承载力保证率可达到85%。

本文建立的RC柱塑性铰区抗剪承载力计算式(7)和(8)存在两方面不足: 一是, 选取的试件数量仍显少; 二是, 两公式仅适用于预测弯剪破坏RC柱塑性铰区的抗剪承载力, 计算前需要判别RC柱的破坏模式。

根据修正式建立时采用的数据范围, 对水工RC柱塑性铰区抗剪承载力计算式(7)和(8)适用范围做如下限制: $21 \text{ MPa} \leq \text{混凝土圆柱体抗压强度 } f'_c \leq 86 \text{ MPa}$; $240 \text{ MPa} \leq \text{纵筋屈服强度 } f_{yl} \leq 510 \text{ MPa}$; $240 \text{ MPa} \leq \text{箍筋}$

屈服强度 $f_{yt} \leq 690$ MPa; $0.005 \leq$ 纵筋配筋率 $\rho_1 \leq 0.050$; $0.002 \leq$ 体积配箍率 $\rho_s \leq 0.040$; $1.0 \leq$ 剪跨比 $\lambda \leq 3.2$; $0.05 \leq$ 轴压比 $n \leq 0.90$ 。

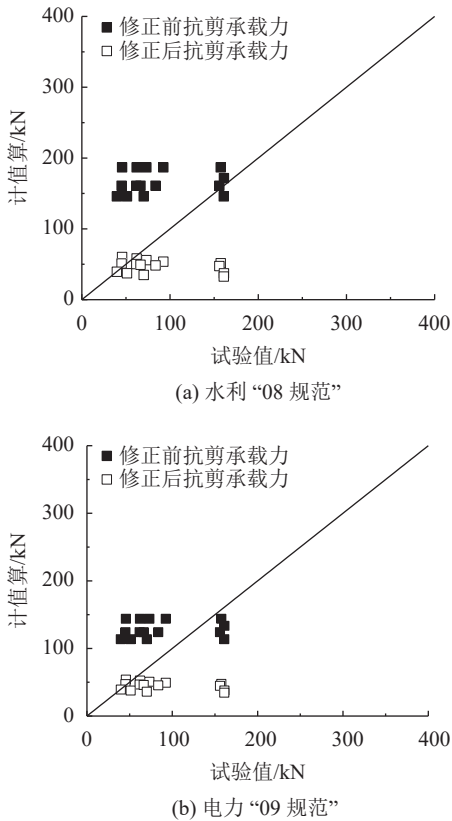


图 4 弯剪破坏矩形截面 RC 柱抗剪承载力修正公式验证

Fig. 4 Verification of the modified formula for shear capacity of RC columns failed in flexural-shear with rectangular section

5 结论

本文以弯剪破坏 RC 柱为研究对象,借助美国 PEER 结构抗震性能试验数据库中发生弯剪破坏的 19 根矩形截面柱和 19 根圆形截面柱数据,评价采用中国水利“08 规范”^[9]和电力“09 规范”^[10]保证 RC 柱塑性铰区抗剪承载力的可靠性,并对计算公式进行修正。得到结论如下:

1) 对于矩形截面 RC 柱,水利“08 规范”^[9]和电力“09 规范”^[10]的抗剪承载力计算公式的保证率为 0;对于圆形截面 RC 柱,水利“08 规范”和电力“09 规范”的抗剪承载力计算公式均具有 50% 的保证率。

2) 与水利“08 规范”^[9]相比,电力“09 规范”^[10] RC 柱抗剪承载力计算公式的偏差较小,但偏差的离散程度较大;相比矩形截面,两个水工规范中 RC 柱抗剪承载力计算结果与圆形截面 RC 柱的偏差都较小。

3) 考虑抗剪承载力随着柱顶位移角增加而降低的影响,以极限位移角为变量建立修正系数 k 的线性

回归方程,修正后的水利“08 规范”^[9]和电力“09 规范”^[10] RC 柱抗剪承载力计算式对弯剪破坏 RC 柱塑性铰区抗剪承载力的保证率可达 85%。

参考文献:

- [1] Liu Chengqing, Fang Dengjia, Zhao Lijie. Reflection on earthquake damage of buildings in 2015 Nepal earthquake and seismic measures for post-earthquake reconstruction[J]. *Structures*, 2021, 30: 647–658.
- [2] Ma Ying, Wang Dongsheng, Cheng Hu, et al. Bayesian theory-based seismic failure modes identification of reinforced concrete columns[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2022, 26(13): 6703–6723.
- [3] Ma Ying, Gong Jinxin. Probability identification of seismic failure modes of reinforced concrete columns based on experimental observations[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2018, 22(10): 1881–1899.
- [4] Ma Hui, Xi Jiacheng, Zhao Yaoli, et al. Mechanical behaviour of composite columns composed of RAC-filled square steel tube and profile steel under eccentric compression loads[J]. *Steel and Composite Structures*, 2021, 38(1): 103–120.
- [5] 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. [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.]
- [6] Ma Ying, Gong Jinxin. Seismic failure modes and deformation capacity of reinforced concrete columns under cyclic loads[J]. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2017, 62(1): 80–91.
- [7] Shi Yun, Li Songhui. Reliability of bridge shear members based on overload of dead load nature[J]. *Bridge Construction*, 2010, 40(2): 29–31. [石云, 李松辉. 基于恒载性超载的桥梁受剪构件可靠性[J]. *桥梁建设*, 2010, 40(2): 29–31.]
- [8] Guan Pinwu, Wang Jianqiang, Liu Lixin. Research on mechanism of seismic shear capacity of reinforced concrete frame columns within yield hinge regions under cyclic shear[J]. *World Earthquake Engineering*, 2005, 21(3): 75–81. [管品武, 王建强, 刘立新. 反复荷载下混凝土框架柱塑性铰区基于延性的抗剪承载力机理分析[J]. *世界地震工程*, 2005, 21(3): 75–81.]
- [9] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土结构设计规范: SL 191—2008[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [10] 中华人民共和国国家能源局. 水工混凝土结构设计规范: DL/T 5057—2009[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [11] Ma Ying, Wang Dongsheng, Xie Hehai, et al. Probabilistic deformation capacity models of reinforced concrete columns failed in flexural-shear based on Bayesian theory[J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(7): 216–226. [马颖, 王东升, 解河海, 等. 基于 Bayesian 理论的弯剪破坏钢筋混凝土柱变

- 形能力概率模型[J].工程力学,2019,36(7):216–226.]
- [12] Shi Chengcheng, Ma Ying, Luo Guojie, et al. Comparison of domestic and overseas code regards to shear capacity of reinforced concrete columns with flexural-shear failure[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2016, 14(5):20–25. [石程程, 马颖, 罗国杰, 等. 国内外不同规范对弯剪破坏钢筋混凝土墩柱的受剪承载力计算比较[J]. *水利与建筑工程学报*, 2016, 14(5):20–25.]
- [13] Sun Zhiguo, Si Bingjun, Wang Dongsheng, et al. Research on the seismic performance of high-strength concrete columns with high-strength stirrups[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(5):128–136. [孙治国, 司炳君, 王东升, 等. 高强箍筋高强混凝土柱抗震性能研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(5):128–136.]
- [14] ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete and commentary: ACI 318–05[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2005.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [16] Yu Bo, Wu Ranli, Chen Bing, et al. Shear strength model of shear-critical reinforced concrete columns[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(8):180–189. [余波, 吴然立, 陈冰, 等. 剪切破坏型钢筋混凝土柱的抗剪承载力分析模型[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(8):180–189.]
- [17] ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete and commentary: ACI 318–11[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2011.
- [18] Qiu Jianlei. Study on longitudinal bar buckling and shear behavior of reinforced concrete columns[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. [仇建磊. 钢筋混凝土柱纵筋屈曲及受剪性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.]
- [19] Caltrans S D C. Caltrans seismic design criteria, version 1.7 [S]. Sacramento: California Department of Transportation, 2013.
- [20] Gan Dan, Zhou Xuhong, Liu Jiepeng, et al. Calculation for shear strength of reinforced-concrete columns constrained by steel tubes[J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(9):96–103. [甘丹, 周绪红, 刘界鹏, 等. 钢管约束钢筋混凝土柱受剪承载力计算[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(9):96–103.]
- [21] ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete and commentary: ACI 318–14[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2014.
- [22] Zhang Qin, Gong Jinxin, Ma Ying. Seismic shear strength and deformation of RC columns failed in flexural shear[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2014, 66(5):234–248.
- [23] Sun Zhiguo, Wang Dongsheng, Du Xiuli, et al. Research on amount of confining reinforcement in potential plastic hinge regions of RC bridge columns[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2010, 23(3):48–57. [孙治国, 王东升, 杜修力, 等. 钢筋混凝土桥墩塑性铰区约束箍筋用量研究[J]. *中国公路学报*, 2010, 23(3):48–57.]
- [24] Ma Ying, Sun Zhiguo, Wang Dongsheng, et al. Evaluation of amounts of confining stirrups used for RC bridge columns based on deformation capacity[J]. *Bridge Construction*, 2014, 44(6):57–62. [马颖, 孙治国, 王东升, 等. 基于变形能力的钢筋混凝土桥墩约束箍筋用量评价[J]. *桥梁建设*, 2014, 44(6):57–62.]

(编辑 吴芝明)

引用格式: Ma Ying, Li Mengdie, Sun Zhiguo, et al. Calculation of shear capacity of plastic hinge zone of hydraulic reinforced concrete column[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022, 54(6):204–211. [马颖, 李梦蝶, 孙治国, 等. 水工钢筋混凝土柱塑性铰区抗剪承载力计算[J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(6):204–211.]