

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2021.01.003

基于力学机制的钢筋混凝土柱抗剪承载力模型*

余波¹, 刘圣宾^{1,2}, 丁自豪^{1,3}

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004; 2. 南京市市政设计研究院有限责任公司, 江苏南京 210008;
3. 西南交通大学土木工程学院, 四川成都 610031)

摘要: 为了兼顾钢筋混凝土(RC)柱抗剪承载力分析的计算精度和简便性, 研究建立了一种基于力学机制的RC柱抗剪承载力简化模型。首先基于变角桁架-拱模型理论, 结合变角桁架模型的力平衡条件以及变角桁架模型和拱模型之间的变形协调条件, 建立了RC柱抗剪承载力分析的理论模型; 然后利用38组试验数据进行统计分析, 分别确定了混凝土、箍筋和拱模型的抗剪承载力贡献系数近似取值, 在此基础上建立了RC柱抗剪承载力分析的简化模型; 最后通过与试验数据进行对比分析, 验证了该模型的计算精度和适用性。分析结果表明, 该模型不仅可以合理分析混凝土、箍筋和拱作用的抗剪承载力贡献, 具有较高的计算精度, 而且计算公式较为简洁。

关键词: 钢筋混凝土柱; 抗剪承载力; 变角桁架-拱模型; 变形协调; 简化模型

中图分类号: TU375.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)01-0021-11

Shear Strength Model of Reinforced Concrete Columns based on Mechanical Mechanism

YU Bo¹, LIU Shengbin^{1,2}, DING Zihao^{1,3}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;
2. Nanjing Municipal Design and Research Institute Co., Ltd. Jiangsu, Nanjing 210008, China;
3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to balance the accuracy and convenience of shear strength analysis of reinforced concrete (RC) columns, a simplified model for shear strength of RC columns was established based on mechanical mechanism. A theoretical shear strength model for RC columns was established first based on the theory of variable angle truss-arch model, by taking into account the equilibrium condition for forces of the variable angle truss model as well as the deformation compatibility condition between the variable angle truss model and the arch model. Then a simplified model for shear strength of RC columns was developed by simplifying the shear strength contribution coefficients of concrete, transverse reinforcement and arch action based on statistical analysis of 38 sets of experimental data. Finally, the accuracy and applicability of the simplified model were validated by comparing with 58 sets of experimental data. The analysis results show that the simplified model not only can rationally describe the

* 收稿日期:2019-01-12;修回日期:2019-02-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51668008,51738004)、广西杰出青年科学基金项目(2019GXNSFFA245004)、广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA281344)资助

作者简介:余波(1982—),男,教授,博导,博士。主要从事钢筋混凝土结构全寿命性能研究。E-mail: gxuyubo@gxu.edu.cn

通讯作者:刘圣宾(1993—),男,硕士。主要从事钢筋混凝土柱承载力分析与校准研究。E-mail: liushengbin@st.gxu.edu.cn

shear strength contributions of concrete, transverse reinforcement and arch action, but also has high accuracy and convenience.

Keywords: reinforced concrete column; shear strength; variable angle truss-arch model; deformation compatibility; simplified model

引言

钢筋混凝土(RC)柱是建筑、桥梁等工程结构的重要受力构件。由于配箍率不足、轴压比过大等因素的影响,RC柱在地震作用下往往发生脆性的剪切破坏^[1-3]。因此,准确分析RC柱的抗剪承载力对工程结构的安全性具有重要意义。

目前,国内外设计规范中RC柱抗剪承载力模型众多,根据所依据的理论基础的不同可以分为桁架理论模型^[4]、修正压力场理论模型^[5-6]和强度退化理论模型^[7]等。例如,美国规范FEMA 273^[8]和ACI 318^[9]以及我国规范GB 50010—2010^[10]和SL 191—2008^[11]均是基于桁架理论建立的,其中FEMA 273^[8]和ACI 318^[9]假定RC柱的抗剪承载力由混凝土和箍筋两部分的贡献组成,而GB 50010—2010^[10]和SL 191—2008^[11]进一步考虑了轴压力对RC柱抗剪承载力的影响;加拿大规范CSA A23.3—04^[12]假定RC柱的抗剪承载力由混凝土和箍筋两部分贡献组成,基于修正压力场理论建立了RC柱的抗剪承载力计算模型;欧洲规范CEN—2005^[13]基于239组试验数据的拟合分析,建立了RC柱抗剪承载力分析的经验强度退化模型。需要说明的是,除CSA A23.3—04模型^[12]外,上述其他模型本质上均属于半经验模型,而CSA A23.3—04模型^[12]虽然具有一定的理论基础,但是忽略了轴压力、剪跨比以及位移延性等重要因素的影响。因此,目前国内外设计规范中仍然缺乏一种考虑因素全面、理论推导过程严密的RC柱抗剪承载力分析模型。近年来,文献[2,14]基于变角桁架-拱模型理论,综合考虑力平衡条件和变形协调条件的影响,建立了具有相对严密理论推导过程的RC柱抗剪承载力分析模型,在一定程度上克服了上述模型存在的缺陷,但是该模型需要分别计算混凝土和拱作用的抗剪承载力贡献系数以及临界斜裂缝倾角,而上述参数的计算过程复杂,从而导致该模型的计算繁琐,不便于工程应用。

鉴于此,本文在文献[2,14]的研究基础上,首先建立了考虑力学机制的RC柱抗剪承载力分析的

理论模型,然后通过试验数据分析分别确定了混凝土、箍筋和拱模型的抗剪承载力贡献系数近似取值,进而建立了RC柱抗剪承载力分析的简化模型。

1 基于力学机制的抗剪承载力分析理论模型

根据桁架-拱模型理论^[2,14-16],RC柱的抗剪承载力 V_n 由桁架模型和拱模型的抗剪承载力贡献组成:

$$V_n = V_t + V_a \quad (1)$$

式中, V_a 为拱模型的抗剪承载力贡献; $V_t = V_c + V_s$ 为桁架模型的抗剪承载力贡献,其中 V_c 为桁架模型中混凝土压杆的抗剪承载力贡献, V_s 为桁架模型中横向钢筋(箍筋)的抗剪承载力贡献。

根据文献[2,14]可知,桁架模型中混凝土压杆的抗剪承载力贡献 V_c 为:

$$V_c = \beta b h_0 \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

式中, b 和 h_0 分别为柱截面宽度和有效高度; f'_c 为混凝土抗压强度; β 为混凝土的抗剪承载力贡献系数^[17-18]:

$$\beta = \frac{0.40}{1 + 1500\epsilon_x} \times \frac{1300}{1000 + s_{ze}} \quad (3)$$

式中, s_{ze} 为尺寸效应因子,定义为RC构件的有效裂缝间距,文献[12]建议取 $s_{ze} = 300$ mm; ϵ_x 为应变效应因子,定义为RC柱截面中点处的纵向应变计算公式为^[12]:

$$\epsilon_x = \begin{cases} \epsilon_x = 0.003, & \epsilon_x > 0.003 \\ \frac{M_u/d_v - 0.5P + 0.5V_t \cot\theta}{2E_s A_s}, & 0 < \epsilon_x \leq 0.003 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $M_u = V_t L / \zeta_1$, L 为柱高, ζ_1 为约束条件系数,一端固定一端铰接时取 $\zeta_1 = 1$,两端固定时取 $\zeta_1 = 2$; d_v 为在柱截面受剪方向两侧纵筋截面形心之间的距离; P 为轴压力; E_s 为纵筋的弹性模量; A_s 为纵筋的截面积; θ 为临界斜裂缝倾角^[19]:

$$\theta = k_n \tan^{-1} \left[\frac{1}{1 + 4\rho_v \gamma_E} \left(0.608\rho_v \gamma_E + \zeta \frac{\rho_v A_v}{\rho_{st} A_g} \right) \right]^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

式中, ρ_v 为配箍率; ρ_{st} 为配筋率; $A_g = bh$ 为 RC 柱的毛截面面积, 其中 h 为柱截面高度; $A_v = bh_0$ 为 RC 柱的有效抗剪截面积; $k_n = 1.80n^2 - 2.25n + 1.54$ 为轴压比 n 的修正系数^[19]; γ_E 为钢筋与混凝土之间的弹性模量比; ζ 为 RC 柱的边界条件系数, 两端固定时取 $\zeta = 0.57$, 一端固定一端铰接时取 $\zeta = 1.57$ 。

基于修正压力场理论^[6]和变角桁架-拱模型理论^[2,14], 结合摩尔应力圆理论, 根据横向钢筋与水平剪力之间的力平衡条件可以确定桁架模型中横向钢筋的抗剪承载力贡献 V_s ^[2,14]:

$$V_s = \frac{A_{sv} f_{yv} h_0}{s} \cot \theta \quad (6)$$

式中, A_{sv} 和 f_{yv} 分别为横向钢筋的截面积和屈服强度; s 为箍筋的间距。

根据文献[2, 14]可知, 式(1)中拱模型的抗剪承载力贡献 V_a 为:

$$V_a = \eta V_t = \frac{K_a}{K_t} V_t = D_a \frac{[1 + 4\gamma_E \rho_v (1 + 0.39 \cot^2 \theta)^2]}{4\gamma_E \rho_v d_v \cot^2 \theta} V_t \quad (7)$$

式中, $\eta = K_a/K_t$ 为拱模型的抗剪承载力贡献系数; K_a 为拱模型的抗剪刚度; K_t 为变角桁架模型的抗剪刚度; D_a 的计算公式为:

$$D_a = (x - c) \left(\frac{2(h - x)L'}{L'^2 + (h - x)^2} \right)^2 \quad (8)$$

式中, c 为保护层厚度; L' 为 RC 柱的有效计算长度; x 为柱截面的中性轴高度^[20]:

$$x = \left(\beta_1 + \beta_2 \frac{P}{f_c' A_g} \right) h \quad (9)$$

式中, β_1 和 β_2 为中性轴高度的影响参数, 可以分别近似取 0.25 和 0.85^[20]。

进而结合式(2)、式(6)和式(7), 可以建立基于力学机制的 RC 柱抗剪承载力分析理论模型:

$$V_n = V_c + V_s + V_a = V_t (1 + \eta) = \left(\beta b h_0 \sqrt{f_c'} + \frac{A_{sv} f_{yv} h_0}{s} \cot \theta \right) (1 + \eta) \quad (10)$$

根据式(2)~式(10)可知, RC 柱的抗剪承载力分析理论模型涉及迭代计算, 本文采取以下计算步骤: (1) 根据式(5)和式(6)计算 V_s ; (2) 假定纵向应变 ϵ_x 满足 $0 < \epsilon_x \leq 0.003$, 联立式(2)~式(6)建立关于 V_c 的一元二次方程, 求解方程计算 V_c ; (3) 利用步骤(2)计算的 V_c , 通过式(2)和式(3)反算 ϵ_x , 并判

别 ϵ_x 是否满足 $0 < \epsilon_x \leq 0.003$ 。若不满足, 则令 $\epsilon_x = 0.003$, 通过式(2)和式(3)重新计算 V_c ; 若满足, 则采用步骤(2)计算的 V_c ; (4) 由 $V_t = V_c + V_s$ 计算 V_t ; (5) 根据式(10)计算 V_n 。计算流程如图 1 所示。

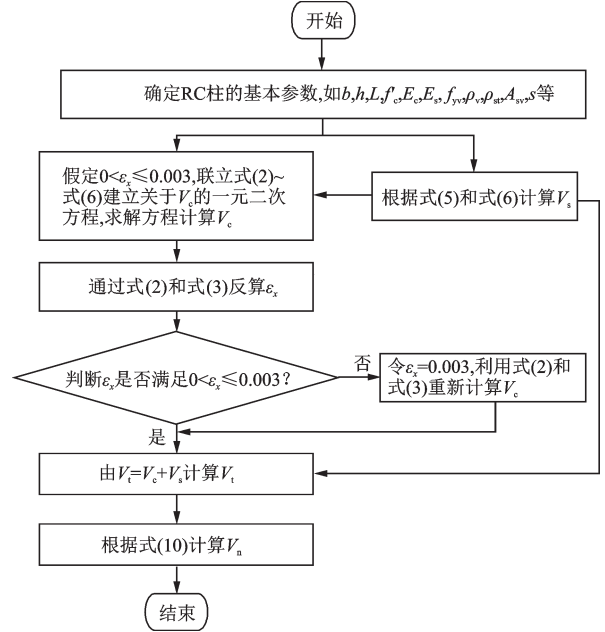


图 1 RC 柱抗剪承载力分析理论模型的计算流程

Fig.1 Flowchart of theoretical model for shear strength analysis of RC column

根据美国太平洋地震工程研究中心结构性能数据库^[21]所提出的 RC 柱破坏模式判别准则, 从文献[2, 22-34]中收集了 58 组剪切破坏型 RC 柱的试验数据, 见表 1。

首先选取表 1 中前 38 组有临界斜裂缝倾角实测值的试验数据来验证式(10)的有效性, 如图 2 所示。

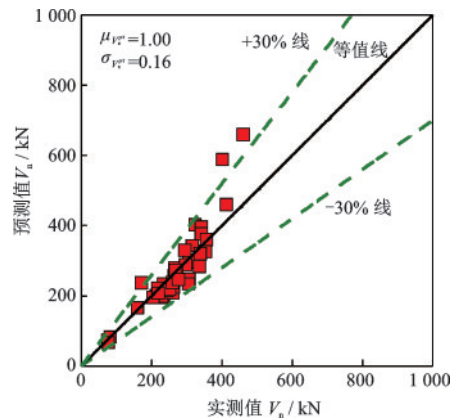


图 2 理论模型预测值与实测值对比

Fig.2 Comparison between measured and predicted shear strengths using theoretical model

表 1 RC 柱的基本参数和抗剪承载力试验数据

Table 1 Basic parameters and experimental data for shear strength of RC columns

编号	$V_{\text{test}}/$ kN	L/m	b/m	h/m	$c/$ mm	$\theta/$ 弧度	$f_{yv}/$ MPa	$\rho_v/$ %	$s/$ mm	$f'_c/$ MPa	μ	约束 条件	$\rho_{st}/\%$	$f_{yt}/$ MPa	P/kN
1	324.00	0.91	0.23	0.41	25	0.49	413.70	0.28	89	34.90	1.13	FF	3.01	441.28	533.76
2	353.30	1.20	0.35	0.35	25	0.35	500.00	0.13	125	29.20	2.92	FF	2.05	320.00	1 251.95
3	265.00	0.91	0.41	0.23	25	0.44	413.70	0.31	89	34.90	1.94	FF	3.01	441.28	533.76
4	314.92	2.95	0.46	0.46	27	0.61	468.86	0.17	305	21.10	2.88	FF	2.53	441.30	667.20
5	214.00	0.91	0.31	0.31	25	0.36	414.00	0.09	210	29.90	1.41	FF	2.44	462.00	288.00
6	234.00	1.20	0.30	0.30	31	0.48	392.00	0.19	100	30.70	2.62	FF	2.65	402.00	552.60
7	242.80	0.90	0.30	0.30	30	0.42	398.00	0.14	150	28.15	4.25	FF	2.26	447.00	540.27
8	230.00	1.20	0.30	0.30	31	0.57	392.00	0.09	200	30.70	2.55	FF	2.65	402.00	552.60
9	412.00	0.91	0.23	0.41	25	0.43	413.70	0.28	89	42.00	1.06	FF	3.01	441.28	1 067.52
10	171.10	0.90	0.30	0.30	30	0.38	384.00	0.28	75	13.50	4.54	FF	1.69	340.00	364.50
11	261.00	1.20	0.30	0.30	31	0.46	392.00	0.19	100	30.70	2.55	FF	2.65	402.00	828.90
12	160.40	0.90	0.30	0.30	30	0.38	587.00	0.08	160	13.50	3.66	FF	1.69	340.00	364.50
13	259.64	0.80	0.27	0.27	8	0.38	270.00	0.16	100	35.72	4.30	FF	3.03	433.00	1 018.58
14	203.90	0.90	0.30	0.30	30	0.83	384.00	0.28	75	13.50	6.42	FF	1.69	340.00	243.00
15	294.20	1.20	0.35	0.35	25	0.65	392.60	0.13	125	27.50	1.66	FF	2.05	408.00	673.75
16	262.10	0.90	0.30	0.30	30	0.87	384.00	0.28	75	18.00	4.54	FF	1.69	340.00	243.00
17	305.50	1.70	0.25	0.49	25	0.46	392.60	0.18	125	24.50	1.60	FF	2.05	408.00	600.25
18	250.40	0.90	0.30	0.30	30	0.32	398.00	0.14	150	28.15	4.00	FF	2.26	447.00	540.27
19	341.60	0.60	0.30	0.30	30	0.66	398.00	0.43	50	26.10	3.51	FF	1.69	447.00	540.27
20	296.10	0.90	0.30	0.30	30	0.58	398.00	0.43	50	26.10	4.63	FF	2.26	447.00	540.27
21	341.10	0.60	0.30	0.30	30	0.71	398.00	0.43	50	27.70	3.27	FF	1.69	447.00	540.27
22	266.10	0.90	0.30	0.30	30	0.68	398.00	0.43	50	26.10	4.33	FF	2.26	447.00	540.27
23	402.00	1.00	0.30	0.50	30	0.51	458.00	0.24	200	23.40	2.22	FF	3.10	438.00	365.00
24	305.60	0.80	0.27	0.27	8	0.35	273.00	0.28	55	31.92	3.29	FF	3.03	370.00	910.22
25	217.10	0.90	0.30	0.30	30	0.82	384.00	0.28	75	18.00	4.94	FF	1.69	340.00	324.00
26	305.12	0.80	0.27	0.27	8	0.35	270.00	0.16	100	35.72	1.95	FF	3.03	433.00	1 018.58
27	82.50	1.20	0.27	0.30	20	0.64	362.00	0.07	300	18.40	1.50	FP	0.99	536.00	596.16
28	460.00	1.00	0.30	0.50	30	0.40	458.00	0.24	200	25.50	2.50	FF	3.10	438.00	1 094.00
29	356.00	2.95	0.46	0.46	38	0.52	399.91	0.17	305	27.60	2.33	FF	3.03	330.96	1 512.00
30	218.90	1.70	0.35	0.35	25	0.42	392.60	0.13	125	22.60	1.57	FF	2.05	408.00	553.70
31	77.18	0.96	0.16	0.16	8	0.35	273.00	0.29	88	31.92	3.11	FF	3.53	370.00	367.72
32	338.20	2.95	0.46	0.46	38	0.26	399.91	0.07	457	27.60	1.34	FF	3.03	330.96	1 512.00
33	276.40	1.20	0.35	0.35	25	0.38	392.60	0.13	125	29.80	1.44	FF	2.05	408.00	182.53
34	271.50	2.95	0.46	0.46	38	0.52	399.91	0.07	457	26.90	1.60	FF	3.03	330.96	503.00
35	335.50	1.20	0.35	0.35	25	0.43	392.60	0.13	125	25.50	1.14	FF	2.05	408.00	1 093.31
36	233.00	0.90	0.30	0.30	30	0.42	384.00	0.28	75	18.00	3.90	FF	1.69	340.00	486.00
37	75.10	1.20	0.27	0.30	20	0.50	362.00	0.07	300	21.00	3.33	FP	0.99	536.00	340.20
38	267.00	2.95	0.46	0.46	38	0.52	399.91	0.07	457	26.90	1.94	FF	3.03	330.96	503.00
39	130.60	0.45	0.18	0.18	10	—	249.00	0.22	64	31.80	2.54	FF	3.13	340.00	190.00
40	85.00	0.88	0.15	0.31	35	—	345.00	0.33	127	33.60	2.49	FP	2.44	496.00	111.20
41	378.00	1.47	0.46	0.46	38	—	400.00	0.17	305	25.70	2.73	FF	3.00	335.00	1 512.00

续表

编号	$V_{test}/$ kN	L/m	b/m	h/m	$c/$ mm	$\theta/$ 弧度	$f_{yv}/$ MPa	$\rho_v/$ %	$s/$ mm	$f_c'/$ MPa	μ	约束 条件	$\rho_{sl}/$ %	$f_{yv}/$ MPa	P/kN
42	263.00	0.90	0.30	0.30	31	—	375.00	0.19	100	26.50	2.38	FF	2.68	380.00	645.00
43	316.00	1.47	0.46	0.46	38	—	400.00	0.10	457	25.70	1.94	FF	2.00	335.00	1 512.00
44	134.00	0.45	0.18	0.18	10	—	249.00	0.22	64	33.00	3.47	FF	3.13	340.00	476.00
45	471.30	1.65	0.40	0.50	37	—	336.00	0.36	100	27.10	3.35	FF	2.66	318.00	392.00
46	578.00	1.49	0.55	0.55	50	—	425.00	0.10	300	44.80	2.88	FP	1.95	434.00	2 086.00
47	95.00	0.88	0.15	0.31	35	—	345.00	0.46	89	26.10	4.35	FP	2.44	496.00	178.00
48	57.80	0.50	0.20	0.20	27	—	475.70	0.28	100	19.60	5.96	FP	2.00	345.00	78.40
49	222.00	0.60	0.30	0.30	31	—	392.00	0.19	100	25.20	6.23	FF	2.68	396.00	430.00
50	58.30	0.40	0.20	0.20	20	—	524.00	0.13	100	13.10	6.40	FP	1.00	324.00	120.50
51	96.00	0.88	0.15	0.31	35	—	345.00	0.33	127	34.70	3.05	FP	2.44	496.00	189.00
52	264.00	0.90	0.30	0.30	31	—	375.00	0.19	100	26.50	4.06	FF	2.68	380.00	429.00
53	97.00	0.88	0.15	0.31	35	—	345.00	0.33	127	33.60	2.87	FP	2.44	496.00	178.00
54	260.00	0.60	0.30	0.30	32	—	392.00	0.19	100	25.20	4.77	FF	1.77	350.00	430.00
55	68.90	0.40	0.20	0.20	20	—	524.00	0.13	100	13.90	4.50	FP	1.00	372.00	133.40
56	68.50	0.50	0.20	0.20	27	—	475.70	0.28	100	19.60	4.82	FP	2.00	345.00	156.80
57	264.00	0.60	0.30	0.30	31	—	392.00	0.19	100	25.20	5.41	FF	2.68	396.00	657.00
58	67.20	0.40	0.20	0.20	20	—	524.00	0.13	100	13.10	5.33	FP	1.00	372.00	125.80

注： V_{test} 为RC柱抗剪承载力的实测值， μ 为位移延性系数，FF表示两端约束，FP表示一端约束一端简支，“—”表示无临界斜裂缝倾角实测值

由图2可知，RC柱抗剪承载力的理论模型预测值和试验测试值的散点大部分落在等值线附近，且绝大部分散点分布在 $\pm 30\%$ 线以内。同时，通过统计分析发现，式(10)的模型预测值与试验测试值比值的均值 $\mu_{V_n^{p/t}}$ 为1.00，标准差 $\sigma_{V_n^{p/t}}$ 为0.16。由此可见，基于变角桁架-拱模型所推导建立的RC柱抗剪承载力分析理论模型的预测精度较高，且离散性较小，表明该理论模型可以合理描述RC柱抗剪承载力。

2 RC柱抗剪承载力分析的简化模型

由于式(2)中的混凝土抗剪承载力贡献系数 β 、式(7)中的拱模型抗剪承载力贡献系数 η 以及式(5) (或式(6))中的临界斜裂缝倾角 θ (或 $\cot\theta$)的计算过程较为复杂，导致式(10)定义的RC柱抗剪承载力分析理论模型的计算繁琐，不便于工程应用。因此，有必要基于试验数据分析，分别确定上述三个参数的近似取值，进而对式(10)进行简化，从而建立RC柱的抗剪承载力分析简化模型。

2.1 混凝土抗剪承载力贡献系数的简化

通过分析可知，基于式(2)~(6)可以建立关于 V_c 的一元二次方程，通过求解可以得到 V_c ，进而通过式(2)可以反求 β 的取值，但是计算过程较为复杂，所以有必要对 β 的取值进行简化。基于表1中前38组试验数据可以分别计算 β 的取值，进而可以分析混凝土抗压强度 f_c' 、轴压比 n 、配箍率 ρ_v 、位移延性系数 μ 和剪跨比 λ 对 β 取值的影响规律，如图3所示。由图3可知，当 f_c' 、 n 、 ρ_v 、 μ 和 λ 取不同值时， β 的取值比较均匀地分布在其均值 $\mu_\beta=0.20$ 的两侧且离散性较小(标准差 $\sigma_\beta=0.05$)，说明 f_c' 、 n 、 ρ_v 、 μ 和 λ 的取值对 β 影响不明显，所以可以将 β 近似取为 $\beta \approx \mu_\beta = 0.20$ 。

2.2 临界斜裂缝倾角正切值的简化

类似地，基于表1中前38组数据，可以分析 f_c' 、 n 、 ρ_v 、 μ 和 λ 的不同取值对 $\cot\theta$ 取值的影响规律，如图4所示。由图4可知，对于 f_c' 、 n 、 ρ_v 、 μ 和 λ 的不同取值， $\cot\theta$ 的均值 $\mu_{\cot\theta}$ 和标准差 $\sigma_{\cot\theta}$ 分别为2.01和

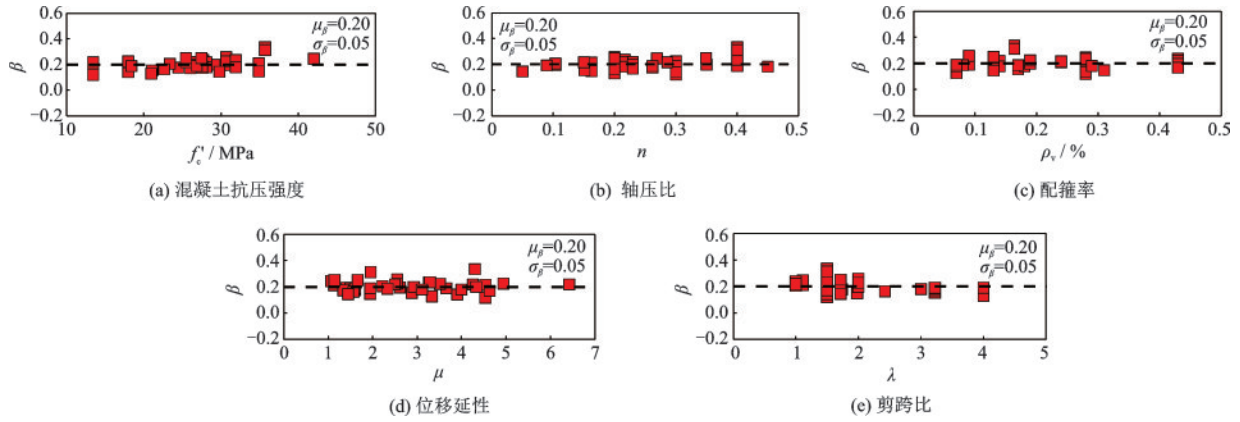


图3 不同因素对 β 取值的影响

Fig.3 Influence of different factors on β values

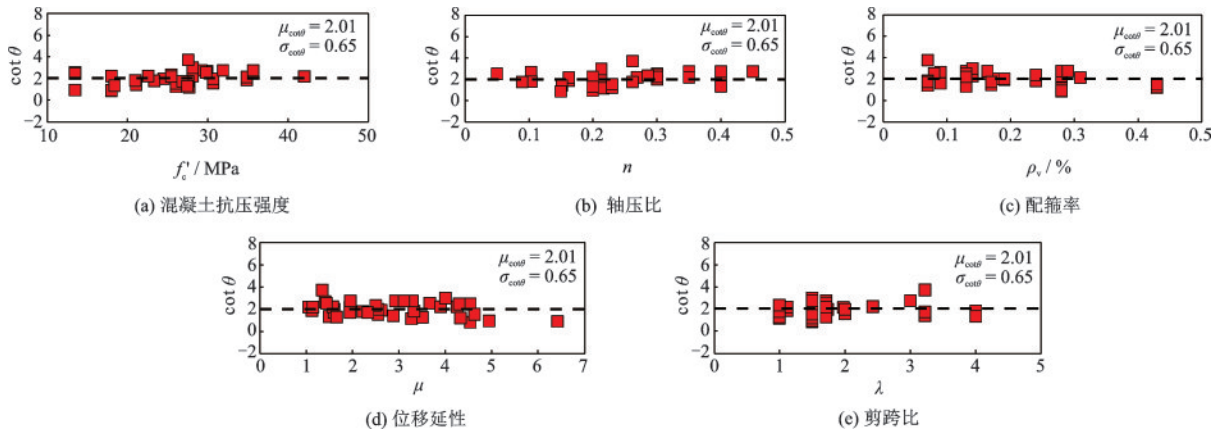


图4 不同因素对 $\cot\theta$ 取值的影响

Fig.4 Influence of different factors on $\cot\theta$ values

0.65; 总体而言,随着 f'_c 、 n 、 ρ_v 、 μ 和 λ 的变化, $\cot\theta$ 的取值没有明显的变化规律,所以可以将 $\cot\theta$ 近似取为 $\cot\theta \approx \mu_{\cot\theta} = 2.01$ 。

2.3 拱模型抗剪承载力贡献系数的简化

此外,基于表1中前38组数据,可以分析 f'_c 、 n 、 ρ_v 、 μ 和 λ 的不同取值对 η 取值的影响规律,如图5所示。由图5可知, η 的取值随着轴压比 n 和剪跨比 λ 的增大呈明显减小趋势,而基本不受 f'_c 、 ρ_v 和 μ 的影响。所以有必要考虑轴压比 n 和剪跨比 λ 对 η 取值的影响。首先分析轴压比 n 对 η 取值的影响,根据38组 η 取值随着轴压比 n 的分布规律,本文分别选取了线性函数、指数函数和幂函数等函数形式来描述 n 对 η 的影响规律。通过分析发现,线性函数不仅可以合理描述 n 对 η 的影响规律,而且具有形式简单的优势,故本文采用线性函数来描述 n 对 η 的影响规律,即:

$$\eta_1 = -0.84n + 0.56 \quad (11)$$

式中, η_1 为考虑轴压比 n 影响的拱作用抗剪承载力贡献系数。

在分析轴压比 n 对 η 取值影响的基础上,需要进一步分析剪跨比 λ 对 η 取值的影响。基于表1中前38组试验数据,可以分析 f'_c 、 ρ_v 、 μ 和 λ 的不同取值对比值 $\eta_2 = \eta/\eta_1$ 的影响规律,如图6所示。由图6可知, η_2 的取值随着剪跨比 λ 的增加呈减小趋势,而基本不受 f'_c 、 ρ_v 和 μ 的影响且均匀的分布在均值0.99两侧,所以需要考虑剪跨比 λ 对 η_2 取值的影响。类似地,根据38组 η_2 取值随着剪跨比 λ 的分布规律,本文分别选取了线性函数、指数函数和幂函数等函数形式来描述 λ 对 η_2 的影响规律。通过分析发现,幂函数可以更为合理地描述 λ 对 η_2 的影响规律,故本文采用幂函数来描述 λ 对 η_2 的影响规律,即:

$$\eta_2 = 1.71\lambda^{-1.27} \quad (12)$$

在分析轴压比 n 和剪跨比 λ 对 η 取值影响的基

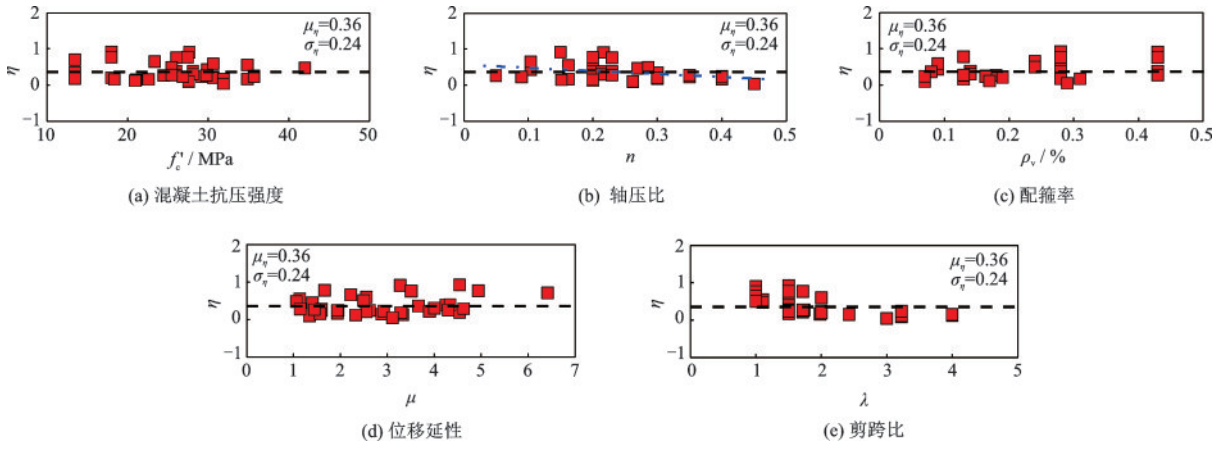


图5 不同因素对 η 取值的影响

Fig.5 Influence of different factors on η values

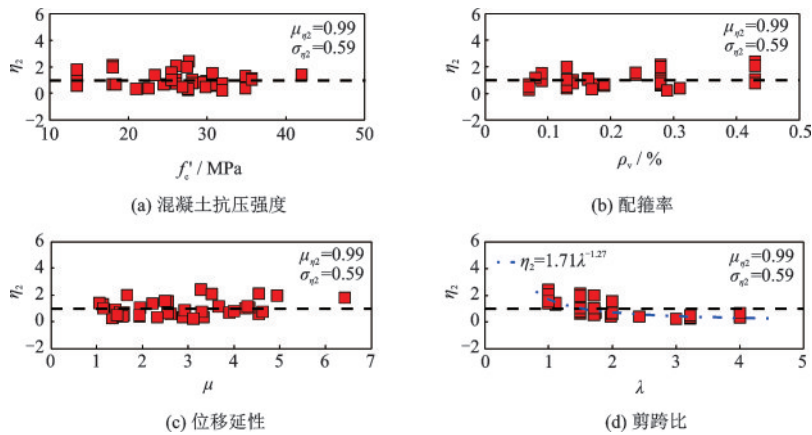


图6 不同因素对 η_2 取值的影响

Fig.6 Influence of different factors on η_2 values

基础上,需要进一步分析 f'_c 、 ρ_v 和 μ 的不同取值对比值 $\eta_3 = \eta/\eta_1\eta_2$ 的影响规律,如图7所示。由图7可知,在考虑轴压比 n 和剪跨比 λ 的影响之后, η_3 的取值基本不受 f'_c 、 ρ_v 和 μ 取值的影响,且其均值均匀地分布在1.08两侧。因此,可以将拱模型的抗剪承载力贡献系数 η 近似取为 $\eta \approx \eta_1\eta_2$:

$$\eta \approx \eta_1\eta_2 = 1.71(-0.84n + 0.56)\lambda^{-1.27} \quad (13)$$

根据上述分析及式(11)~式(13)可以分别确

定 β 、 $\cot\theta$ 和 η 的近似取值,进而可以对式(10)进行简化,从而建立RC柱的抗剪承载力分析简化模型:

$$V_n^s = V_c^s + V_s^s + V_a^s = \left(0.20bh_0\sqrt{f'_c} + 2.01\frac{A_{sv}f_{yv}h_0}{s}\right)(1 + \eta_1\eta_2) \quad (14)$$

式中, V_n^s 为由简化模型计算的RC柱抗剪承载力; V_c^s 、 V_s^s 和 V_a^s 分别为由简化模型确定的混凝土、箍筋和拱作用的抗剪承载力贡献。

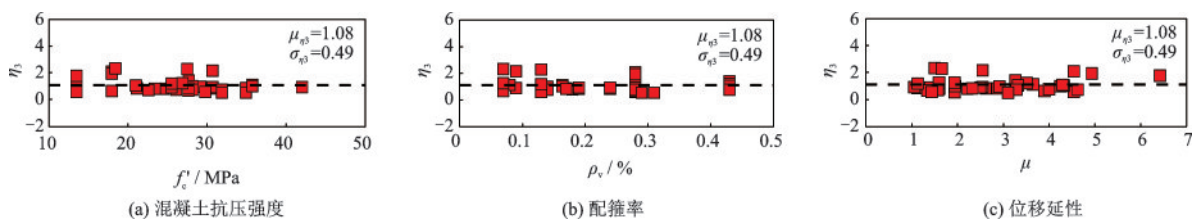


图7 不同因素对 η_3 取值的影响

Fig.7 Influence of different factors on η_3 values

3 对比分析与验证

首先基于表1中58组试验数据,对比验证简化模型的有效性,如图8所示。由图8可知,简化模型的预测值和试验测试值的散点大部分落在等值线附近,且绝大部分散点分布在 $\pm 30\%$ 线以内,二者

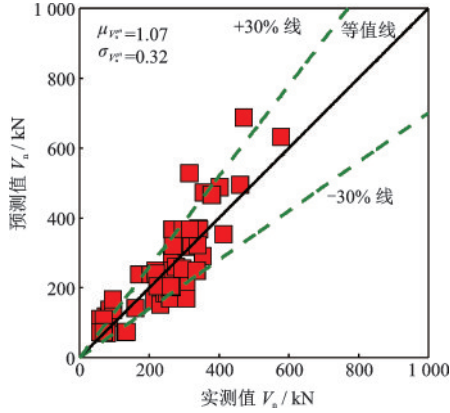


图8 简化模型预测值与实测值的对比

Fig.8 Comparison between measured and predicted shear strengths using simplified model

比值的均值 $\mu_{V_n^{p/t}}$ 为1.07,标准差 $\sigma_{V_n^{p/t}}$ 为0.32,说明基于力学机制的RC柱抗剪承载力简化模型具有良好的计算精度。

为了进一步验证简化模型的有效性和适用性,基于表1中58组试验数据,对比分析了国内外规范^[8-13]中RC柱抗剪承载力模型,如图9所示。

由图9可知,SL 191—2008模型、CSA A23.3—04模型、ACI 318模型和FEMA 273模型的预测值与试验测试值的散点大部分落在等值线下侧,且模型预测值与试验测试值的比值的均值 $\mu_{V_n^{p/t}}$ 为0.63~0.78,说明上述模型的预测值明显偏于保守;CEN 2005模型和GB 50010—2010模型的预测值与试验测试值的散点大部分落在 $\pm 30\%$ 线之间,说明上述两个模型的预测精度相对较好,但是上述两个模型的预测值大部分落在等值线和 -30% 线之间,说明预测值略有保守。结合图8和图9可知,从模型预测值与试验测试值的比值的均值水平上看,本文简化模型和GB 50010—2010模型的预测精度明显高于其他模型。

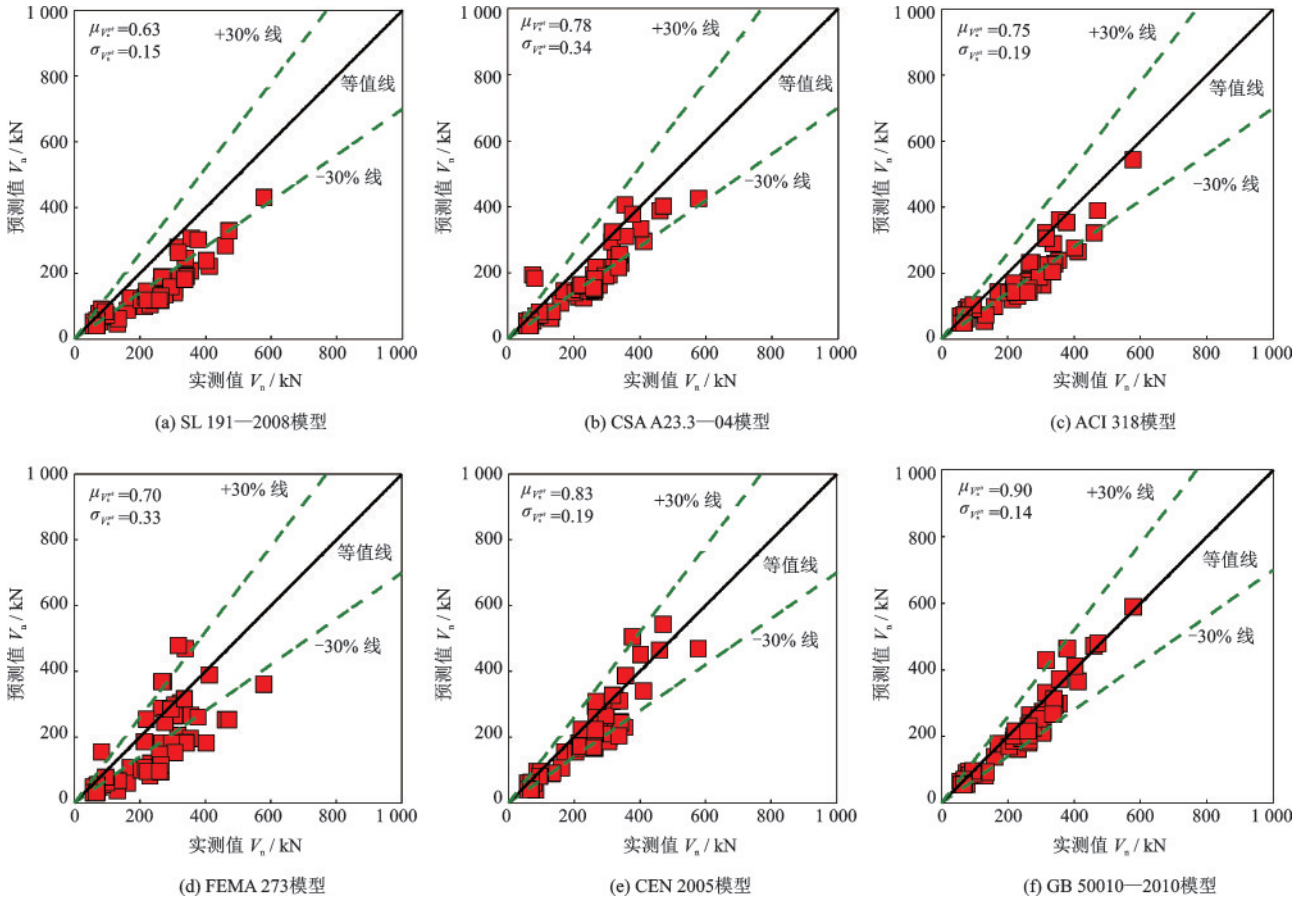


图9 抗剪承载力的预测值与实测值的对比

Fig.9 Comparison between predicted and measured shear strengths

为了进一步对比分析本文简化模型和 GB 50010—2010 模型的合理性,基于 RC 柱抗剪承载力分析的理论模型,结合表 1 中前 38 组试验数据,可以进一步对比验证简化模型和 GB 50010—2010 模型对各部分抗剪承载力贡献的预测精度。其中,GB 50010—2010 模型的计算公式为:

$$V_n^{GB} = V_c^{GB} + V_s^{GB} + V_a^{GB} = \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.07N \quad (15)$$

式中, V_n^{GB} 为该模型计算的 RC 柱抗剪承载力; V_c^{GB} 、 V_s^{GB} 和 V_a^{GB} 分别为该模型确定的混凝土、箍筋和拱作用的抗剪承载力贡献; f_t 为混凝土抗拉强度,其值按 $f_t = 0.5\sqrt{f_c'}$ 选取; N 为轴压力形成的拱作用,其值按 $N = \min(P, 0.3A_g f_c')$ 选取。

简化模型和 GB 50010—2010 模型对各部分抗剪承载力贡献的预测精度,如图 10 和图 11 所示。图中, V_c^T 、 V_s^T 和 V_a^T 分别表示由式(10)定义的理论

模型计算的混凝土、箍筋和拱作用的抗剪承载力贡献; V_c^P 、 V_s^P 和 V_a^P 分别表示由上述模型预测的混凝土、箍筋和拱作用的抗剪承载力贡献。

由图 10~图 11 可知,简化模型计算的混凝土抗剪承载力贡献值均匀地分布在等值线两侧,且大部分落在 $\pm 30\%$ 线以内,说明简化模型可以合理地计算混凝土的抗剪承载力贡献,而 GB 50010—2010 模型明显高估混凝土的抗剪承载力贡献,主要原因是 GB 50010—2010 模型计算的混凝土抗剪承载力贡献系数明显偏高;简化模型计算的箍筋抗剪承载力贡献值均匀地分布在等值线两侧,且绝大部分落在 $\pm 30\%$ 线以内,说明简化模型可以合理地计算箍筋的抗剪承载力贡献,而 GB 50010—2010 模型明显低估混凝土的抗剪承载力贡献,主要原因是 GB 50010—2010 模型将 RC 柱的临界斜裂缝倾角简单的选取为 45° ; 相比而言,简化模型对拱部分的计算结果更为均匀地分布在等值线附近,且大部分落在 $\pm 30\%$

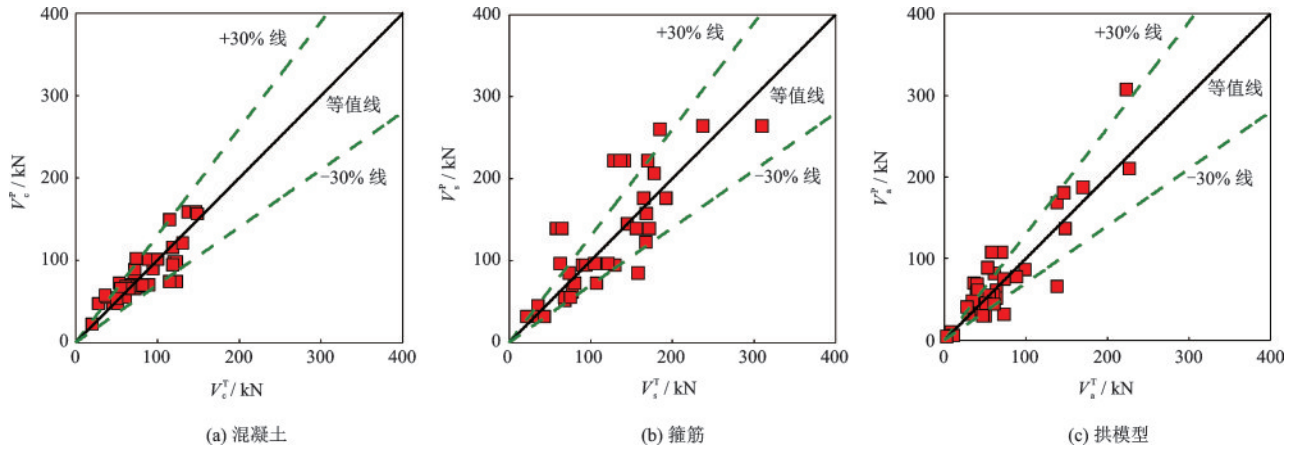


图 10 简化模型各部分的抗剪承载力贡献

Fig.10 Shear strength contributions from different parts of simplified model

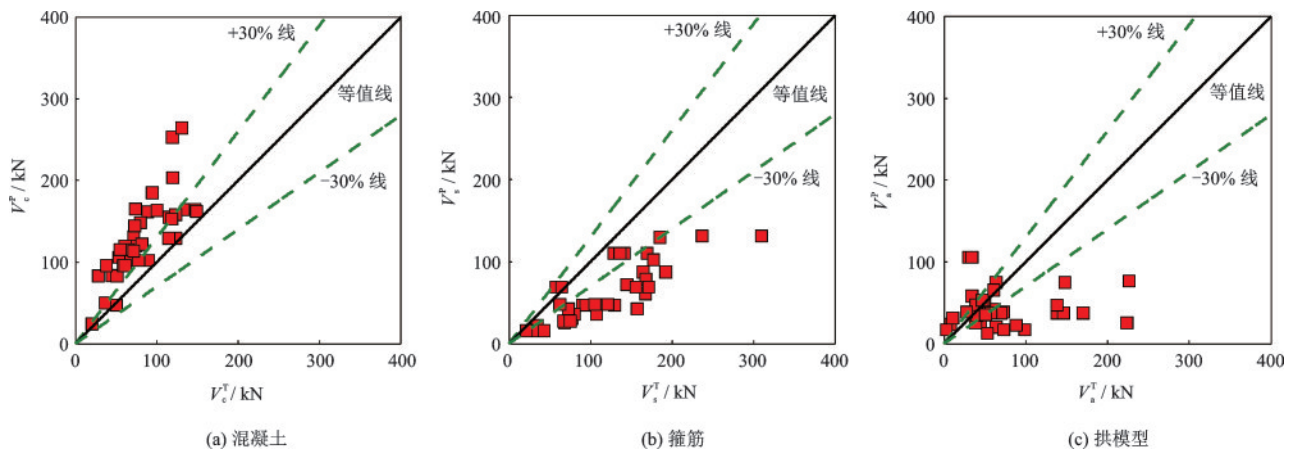


图 11 GB 50010—2010 模型各部分的抗剪承载力贡献

Fig.11 Shear strength contributions from different parts of GB 50010—2010 model

线以内,而GB 50010—2010模型明显低估混凝土的抗剪承载力贡献,主要原因是GB 50010—2010模型对拱部分的贡献是基于试验数据拟合分析以0.07倍的轴压力近似计算的,缺乏合理的理论分析。

4 结 论

(1)基于变角桁架-拱模型建立的RC柱抗剪承载力分析理论模型,克服了传统经验模型存在的缺陷,具有较高的计算精度,但是计算公式较为复杂,不便于工程应用。

(2)建立的RC柱抗剪承载力分析简化模型,不仅可以合理分析混凝土、箍筋和拱作用的抗剪承载力贡献,具有较好的计算精度,而且计算公式较为简洁,从而可以有效兼顾RC柱抗剪承载力分析的计算精度和简便性。

参考文献:

- [1] Elwood K J. Modelling failures in existing reinforced concrete columns [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2004, 31(5): 846-859.
- [2] Pan Z, Li B. Truss-arch model for shear strength of shear-critical reinforced concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(4): 548-560.
- [3] 仇建磊, 贡金鑫. 基于简化修正压力场理论的钢筋混凝土柱荷载-变形分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(4): 51-59.
Qiu J L, Gong J X. Analysis of load deformation of reinforced concrete columns based on simplified modified compression field theory [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(4): 51-59. (in Chinese)
- [4] Ritter W. Die bauweise hennebique [J]. Schweizerische Bauzeitung, 1899, 33(7): 59-61.
- [5] Mitchell D, Collins M P. Diagonal compression field theory—a rational model for structural concrete in pure torsion[J]. Journal Proceedings, 1974, 71(8): 396-408.
- [6] Vecchio F J, Collins M P. The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear [J]. ACI Structural Journal, 1986, 83(2): 219-231.
- [7] Biskinis D E, Roupakias G K, Fardis M N. Degradation of shear strength of reinforced concrete members with inelastic cyclic displacements [J]. ACI Structural Journal, 2004, 101(6): 773-783.
- [8] NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings FEMA 273 [S]. Washington, D C: Federal Emergency Management Agency, 1997.
- [9] Building code requirements for structural concrete and commentary. ACI 318-11 [S]. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute, 2011.
- [10] 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 (in Chinese)
- [11] 水工混凝土结构设计规范: SL191—2008 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
Design code for hydraulic structures: SL191—2008 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008. (in Chinese)
- [12] Design of concrete structures CSA A23.3—04. [S]. Canada, Ontario, Mississauga: Canadian Standards Association, 2004.
- [13] CEN. Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and refitting of buildings EN—1998-3 [S]. Eurocode 8. Brussel: European Committee for Standardization, 2005.
- [14] 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.
Yu B, Wu R L, Chen B, et al. Shear strength model of shear-critical reinforced concrete columns [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(8): 180-189. (in Chinese)
- [15] 张勤, 仇建磊. 基于桁架-拱模型的钢筋混凝土柱受剪承载力计算[J]. 工业建筑, 2017, 47(12): 77-81.
Zhang Q, Qiu J L. Calculation methods for Shear strength of reinforced concrete columns based on truss-arch model [J]. Industrial Construction, 2017, 47(12): 77-81. (in Chinese)
- [16] 解咏平, 李振宝, 杜修力, 等. 基于桁架-拱模型的钢筋混凝土短柱抗剪承载力尺寸效应分析[J]. 北京工业大学学报, 2014, 40(5): 701-706.
Xie Y P, Li Zh B, Du X L, et al. Size effect analysis on shear behavior of reinforced concrete short columns based on truss-arch model [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2014, 40(5): 701-706. (in Chinese)
- [17] Collins M P, Bentz E C, Vecchio F J. Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements [J]. ACI Structural Journal, 2007, 103(4): 614-624.

- [18] 魏巍巍. 基于修正压力场理论的钢筋混凝土结构受剪承载力及变形研究[D]. 大连:大连理工大学, 2011.
Wei W W. Study on shear capacity and deformation for reinforced concrete structure based on modified compression field theory [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.(in Chinese)
- [19] 余波, 吴然立, 陈冰. 剪切型钢筋混凝土柱临界斜裂缝倾角的概率模型[J]. 计算力学学报, 2017, 34(5): 547-554.
Yu B, Wu R L, Chen B. Probabilistic model for critical diagonal crack angle of shear-critical reinforced concrete columns [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2017, 34(5): 547-554.(in Chinese)
- [20] Paulay T, Priestly M J N. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings [M]. New York: Wiley, 1992: 49-56.
- [21] Berry M, Parrish M, Eberhard M. PEER structural performance database, user's manual (Version 1.0) [R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center University of California, 2004.
- [22] Umehara H, Jirsa J O. Shear strength and deterioration of short reinforced concrete columns under cyclic deformations [R]. Washington, D C.: National Science Foundation, 1982.
- [23] Bett B J, Klingner R E, Jirsa J O. Behavior of strengthened and repaired reinforced concrete columns under cyclic deformations [R]. Washington, D C.: National Science Foundation, 1985.
- [24] Yalçın C. Seismic evaluation and retrofit of existing reinforced concrete bridge columns [D]. Ottawa Canada: University of Ottawa, 1998.
- [25] Xiao Y, Martirosyan A. Seismic performance of high-strength concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(3): 241-251.
- [26] Lynn A C. Seismic evaluation of existing reinforced concrete building columns [D]. Berkeley: University of California, 2001.
- [27] Nakamura T, Yoshimura M. Gravity load collapse of reinforced concrete columns with brittle failure modes [J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2002, 1(1): 21-27.
- [28] Lam S S E, Wang Z Y, Liu Z Q, et al. Drift capacity of rectangular reinforced concrete columns with low lateral confinement and high-axial load [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(6): 733-742.
- [29] Yoshimura M, Takaine Y, Nakamura T. Axial collapse of reinforced concrete columns [C]// 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B C., Canada; [s.n.], 2004: No.1699: 1-11.
- [30] Ousalem H, Kabeyasawa T, Tasai A. Evaluation of ultimate deformation capacity at axial load collapse of reinforced concrete columns [C]// 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B C., Canada, [s.n.], 2004: No.370: 1-11.
- [31] Tran C T N. Experimental and analytical studies on the Seismic behavior of reinforced concrete columns with light transverse reinforcement [D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2010.
- [32] Wibowo A, Wilson J L, Lam N T K, et al. Drift capacity of lightly reinforced concrete columns [J]. Australian Journal of Structural Engineering, 2011, 15(2): 131-150.
- [33] Pham T P, Li B. Seismic performance of reinforced concrete columns with plain longitudinal reinforcing bars [J]. ACI Structural Journal, 2014, 111(3): 561-572.
- [34] Li Y A, Huang Y T, Hwang S J. Seismic response of reinforced concrete short columns failed in shear [J]. ACI Structural Journal, 2014, 111(4): 945-954.

(本文责编:池营营)