

DOI:10.11918/202108062

高强混凝土方柱不同强度网格箍筋约束效果

郑文忠^{1,2}, 王雅玲^{1,2}, 王刚^{1,2}, 王英^{1,2}

(1. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090;

2. 土木工程智能防灾减灾工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090)

摘要: GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》中给出了螺旋箍筋和焊接环式箍筋作约束箍筋的约束混凝土圆柱轴心受压承载力计算公式,认为柱达到受压承载力时约束箍筋一定屈服,而事实上只有体积配箍率超过某个限值时箍筋才能屈服,同时规范未涉及网格箍筋约束混凝土方柱。为考察网格箍筋约束混凝土方柱达到轴心受压承载力时箍筋的拉应力水平,完成了混凝土轴心抗压强度为 50.0~68.0 MPa,箍筋分别采用 HRB400、HRB500、HRB600、PC800、PC1 270、抗拉强度标准值为 1 570 MPa 钢丝的 42 根网格箍筋约束高强混凝土方柱的轴心受压试验。试验结果表明:在约束混凝土柱达到轴心受压承载力时,存在箍筋不屈服的现象,混凝土轴心抗压强度、体积配箍率和箍筋间距对箍筋应力水平的发挥有较大影响。基于峰值受压荷载下箍筋未屈服的试验数据,建立了峰值受压荷载下箍筋实际拉应变计算公式,提出了峰值受压荷载下箍筋能够屈服的体积配箍率下限值计算方法。通过考虑箍筋实际拉应力对约束混凝土峰值压应力和压应变的影响,建立了网格箍筋约束高强混凝土受压应力-应变关系全曲线方程,为网格箍筋约束混凝土方柱的工程应用及计算方法的完善提供了参考。

关键词: 约束高强混凝土;网格箍筋;方柱;箍筋拉应变;受压应力-应变关系

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)10-0008-12

Behavior of high-strength concrete square columns confined by grid stirrups with different strengths

ZHENG Wenzhong^{1,2}, WANG Yaling^{1,2}, WANG Gang^{1,2}, WANG Ying^{1,2}

(1. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China;

2. Key Lab of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters (Harbin Institute of Technology), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The Chinese code GB 50010—2010 *Code for Design of Concrete Structures* gives a formula to calculate the axial compression capacity of confined concrete columns by using the yield strength of spiral and welded ring stirrups, and it assumes that the stirrups have yielded under the peak compressive stress of confined concrete. In fact, the stirrups can yield only when the volume stirrup ratio exceeds a certain limit. Meanwhile, the code has not codified the case for square concrete columns confined by grid stirrups. To explore the tensile stress level in grid stirrups under peak loading, we conducted axial compression tests on 42 high-strength concrete square columns confined by grid stirrups. The axial compressive strength of the unconfined concrete ranged between 50.0 MPa and 68.0 MPa, and the stirrups were made of HRB400, HRB500, HRB600, PC800, PC1 270, and steel wire with standard tensile strength of 1 570 MPa. Results show that majority of the stirrups did not yield under the peak compressive stress of the confined concrete. The axial compressive strength of concrete, volume stirrup ratio, and hoop spacing had great impact on the stress level of stirrups. On the basis of the test data of unyielding stirrups under peak compressive load, a formula for calculating the actual tensile strain of stirrups under peak compressive load was established, and a method of calculating the lower limit value of volume stirrup ratio for stirrups capable of yielding under peak compressive load was proposed. By considering the effect of the actual tensile stress of stirrups on peak compressive stress and strain of the confined concrete, the full curve equation for the compressive stress-strain relationship of grid stirrups confined high-strength concrete was established, which provided reference for the engineering application and calculation of square concrete columns confined by grid stirrups.

Keywords: confined high-strength concrete; grid stirrup; square column; stirrup tensile strain; compressive stress-strain relationship

收稿日期: 2021-08-14

基金项目: 国家自然科学基金(51678190)

作者简介: 郑文忠(1965—),男,教授,博士生导师

通信作者: 郑文忠, hitwzheng@163.com

网格箍筋约束混凝土方柱在实际工程中大量存在,合理配置网格箍筋约束高强混凝土可明显提高柱的承载能力和变形能力^[1],然而 GB 50010—2010

《混凝土结构设计规范》^[2]中没有给出其轴心受压承载力计算公式。约束高强混凝土方柱达到轴压承载力时,网格箍筋不一定屈服^[3-6]。若按网格箍筋屈服计算其提供的侧向约束,网格箍筋的约束作用和网格箍筋约束混凝土柱的受压承载力可能会被高估。规范^[2]中一、二、三级框架柱的箍筋配置一般为中、低约束水平,为判断约束混凝土峰值压应力下网格箍筋屈服与否,需研究确定不同强度的网格箍筋能够屈服的体积配箍率下限值。国内外学者对约束混凝土峰值压应力下箍筋拉应力的计算方法有回归分析法^[3-4,7-8]和迭代法^[9],迭代法步骤繁琐,不利于实际工程应用。文献[3-4,7-8]均提出了峰值荷载下的箍筋拉应变预测公式,但文献[3-4,7]提出的公式在不配置箍筋时所算得的箍筋拉应变为正值,不够准确;文献[8]提出的公式将箍筋屈服强度作为影响因素,不够准确。本文基于峰值荷载下箍筋未屈服的试验数据,得到了约束混凝土柱峰值受压荷载下的箍筋拉应变计算公式,该公式考虑了体积配箍率、有效约束系数、箍筋弹性模量和混凝土轴心抗压强度的影响。已有的约束混凝土受压应力-

应变关系曲线大多是用箍筋屈服强度代替箍筋的真实拉应力来考虑箍筋的约束效果^[10-11],不够准确。因此,基于峰值压应力下箍筋的实际拉应力,提出网格箍筋约束高强混凝土峰值压应力、峰值压应变的计算公式,建立其轴心受压应力-应变关系模型,具有重要意义。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

42 根网格箍筋约束高强混凝土方柱的试件设计见图 1 和表 1。试件截面为 400 mm×400 mm,高度为 1 300 mm。非约束混凝土轴心抗压强度为 50.0、57.2、63.6、68.0 MPa。箍筋采用 HRB400、HRB500、HRB600、PC800、PC1 270 和 1 570 MPa 钢丝,体积配箍率为 1.0%~1.6%,试验段箍筋间距 s 为 40~100 mm,加密区箍筋间距为 40 mm。采用了 A、B 两种形式的箍筋,见图 1(a)和 1(b),箍筋保护层厚度为 10 mm。纵筋采用直径为 10 mm 的 HRB400 钢筋。混凝土的基本力学性能指标见表 2,钢筋的基本力学性能指标见表 3、4。

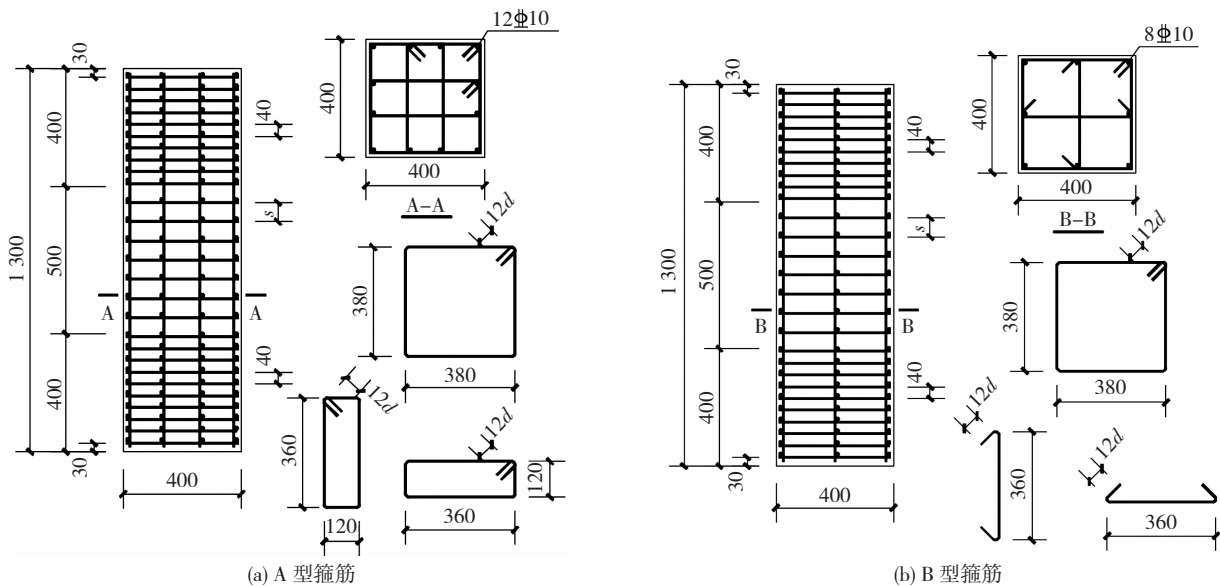


图 1 试件设计(mm)
Fig. 1 Specimen design(mm)

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Specimen design parameters

试件编号	混凝土强度等级	箍筋牌号	箍筋形式	$\rho_v/\%$	s/mm	d/mm	$\rho_s/\%$
C-1	C60	HRB400	B	1.10	75	8	0.39
C-2	C60	HRB400	B	1.35	60	8	0.39
C-3	C60	HRB400	B	1.60	50	8	0.39
C-4	C60	HRB500	B	1.00	80	8	0.39
C-5	C60	HRB500	B	1.25	65	8	0.39
C-6	C60	HRB500	B	1.50	55	8	0.39

续表 1

试件编号	混凝土强度等级	箍筋牌号	箍筋形式	$\rho_v/\%$	s/mm	d/mm	$\rho_s/\%$
C-7	C60	HRB600	A	1.00	65	6	0.59
C-8	C60	HRB600	A	1.20	50	6	0.59
C-9	C60	HRB600	A	1.40	40	6	0.59
C-10	C70	HRB500	B	1.00	80	8	0.39
C-11	C70	HRB500	B	1.25	65	8	0.39
C-12	C70	HRB500	B	1.50	55	8	0.39
C-13	C70	HRB600	A	1.00	100	8	0.59
C-14	C70	HRB600	A	1.20	85	8	0.59
C-15	C70	HRB600	A	1.40	75	8	0.59
C-16	C70	1 570 MPa 钢丝	A	1.00	65	6	0.59
C-17	C70	1 570 MPa 钢丝	A	1.20	50	6	0.59
C-18	C70	1 570 MPa 钢丝	A	1.40	40	6	0.59
C-19	C75	HRB500	B	1.00	80	8	0.39
C-20	C75	HRB500	B	1.25	65	8	0.39
C-21	C75	HRB500	B	1.50	55	8	0.39
C-22	C75	HRB600	A	1.00	100	8	0.59
C-23	C75	HRB600	A	1.20	85	8	0.59
C-24	C75	HRB600	A	1.40	75	8	0.59
C-25	C75	1 570 MPa 钢丝	A	1.00	65	6	0.59
C-26	C75	1 570 MPa 钢丝	A	1.20	50	6	0.59
C-27	C75	1 570 MPa 钢丝	A	1.40	40	6	0.59
C-28	C80	HRB500	B	1.00	80	8	0.39
C-29	C80	HRB500	B	1.25	65	8	0.39
C-30	C80	HRB500	B	1.50	55	8	0.39
C-31	C80	HRB600	A	1.00	65	6	0.59
C-32	C80	HRB600	A	1.20	50	6	0.59
C-33	C80	HRB600	A	1.40	40	6	0.59
C-34	C80	PC800	A	1.00	85	7	0.59
C-35	C80	PC800	A	1.20	70	7	0.59
C-36	C80	PC800	A	1.40	60	7	0.59
C-37	C80	PC1 270	A	1.00	85	7	0.59
C-38	C80	PC1 270	A	1.20	70	7	0.59
C-39	C80	PC1 270	A	1.40	60	7	0.59
C-40	C80	1 570 MPa 钢丝	A	1.00	65	6	0.59
C-41	C80	1 570 MPa 钢丝	A	1.20	50	6	0.59
C-42	C80	1 570 MPa 钢丝	A	1.40	40	6	0.59

注: ρ_v 为体积配箍率, s 为试件中部 500 mm 区段箍筋间距, d 为箍筋直径, ρ_s 为纵筋总配筋率。

表 2 混凝土基本力学性能指标

Tab. 2 Basic mechanical properties of concrete

混凝土 设计强度 等级	边长为 150 mm 标准立方体 抗压强度 f_{cu}/MPa	轴心抗 压强度 f_{c0}/MPa	弹性模量 E_{c0}/MPa	峰值压应变 $\varepsilon_{c0}/10^{-6}$
C60	63.5	50.0	36 411	1 920
C70	71.3	57.2	37 220	2 002
C75	78.0	63.6	37 809	2 066
C80	82.5	68.0	38 159	2 110

表 3 热轧钢筋基本力学性能指标

Tab. 3 Basic mechanical properties of hot rolled steel bars

钢筋 牌号	屈服 强度 f_y/MPa	抗拉 强度 f_u/MPa	屈服 应变 $\varepsilon_y/10^{-6}$	最大力 下拉应变 $\varepsilon_{su}/\%$	弹性 模量 $E_s/10^5 \text{ MPa}$
HRB400	480	640	2 432	15.8	2.00
HRB500	576	721	2 920	11.7	2.00
HRB600	657	873	3 310	10.7	2.00

表 4 高强预应力筋基本力学性能指标					
Tab. 4 Basic mechanical properties of high-strength prestressed reinforcement					
钢筋牌号	比例极限 σ_p /MPa	条件屈服强度 $f_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	最大力下拉应变 $\epsilon_{su}/\%$	弹性模量 $E_s/10^5$ MPa
PC800	673	873	962	4.1	2.05
PC1 270	1 194	1 215	1 400	5.4	2.05
1 570 MPa 钢丝	1 334	1 413	1 771	4.7	2.05

1.2 试验方案

用自制的应变引伸计测量约束混凝土的纵向应变,自制应变引伸计由电阻式位移计、固定板、承托板和金属接长杆组成,在柱每个侧面中部各布置一个标距为 250 mm 的应变引伸计,金属接长杆插入柱子内部 50 mm,应变引伸计布置见图 2。

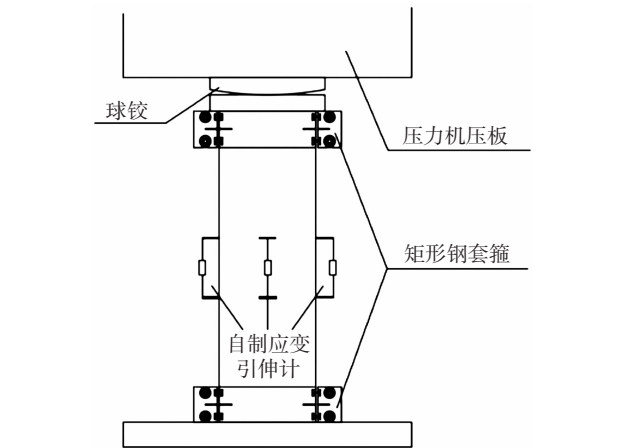


图 2 应变引伸计布置和加载装置
Fig. 2 Strain extensometer layout and loading device

加载前,在试件中部相对的两个侧面分别粘贴 1 个混凝土应变片,在外圈箍筋角部粘贴 4 圈共 8 个应变片,在内圈箍筋端部粘贴 4 圈共 8 个应变片,任选 2 根纵筋在其中部粘贴应变片。试验在 3 000 t 压力试验机上完成,加载装置见图 2、3。



图 3 3 000 t 试验机加载装置
Fig. 3 Loading device of 3 000 t testing machine

为防止加载时试件端部先于试件中部区段发生破坏,在方柱上下端各放置高度为 125 mm 的方形钢板套箍进行局部加固,钢套箍设计见图 4。试验采用力-位移双控制度,在 70% 预估峰值荷载前用力控制加载,之后用位移控制加载。

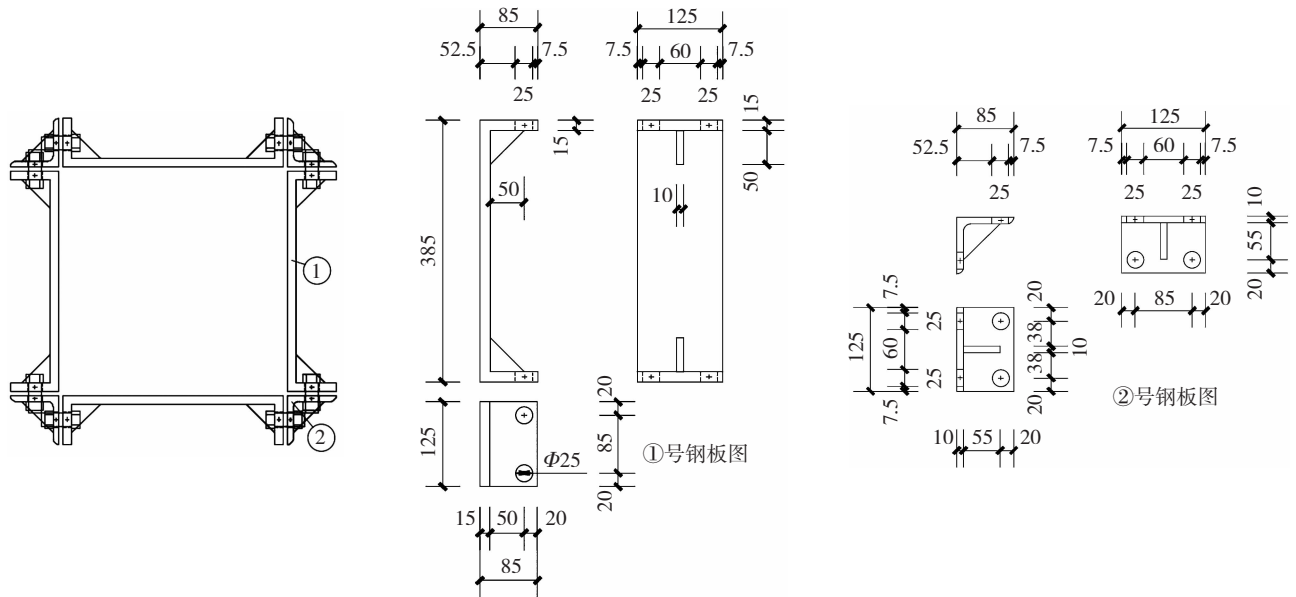


图 4 套箍设计(mm)
Fig. 4 Hoop design(mm)

2 试验现象及结果

2.1 试验现象

加载初期,试件处于弹性阶段,表面未出现明显

现象,箍筋拉应变增长缓慢。荷载达到峰值荷载的 65% ~ 85% 时,柱中出现第一条竖向裂缝。此时外围混凝土压应变为 $1.7 \times 10^{-3} \sim 2.3 \times 10^{-3}$,约为非约束混凝土峰值压应变的 0.6 ~ 0.8 倍。随着荷载

的继续增加,伴随着噼里啪啦的开裂声,竖向裂缝不断增多、扩展和延伸,混凝土保护层开始剥落。裂缝出现后,箍筋拉应变增长加快,约束混凝土压应力的提高主要依靠箍筋提供的侧向约束应力,约束混凝土的受压应力-应变曲线上升段开始变缓。

峰值荷载时刻,混凝土保护层已开始成块大面积脱落。此时用高强预应力筋制作的约束箍筋均未

屈服,热轧钢筋制作的约束箍筋部分屈服,具体的箍筋屈服与否情况见表 5。峰值荷载后,约束混凝土横向膨胀加快,箍筋拉应变继续增大,未屈服的箍筋可以为核心区混凝土提供更大的侧向约束应力,试件表现出较好的变形性能。试验发现,用高强预应力筋制作的箍筋在荷载降至峰值荷载的 75% ~ 90% 左右时才屈服,峰值荷载时的试件损伤情况见图 5。

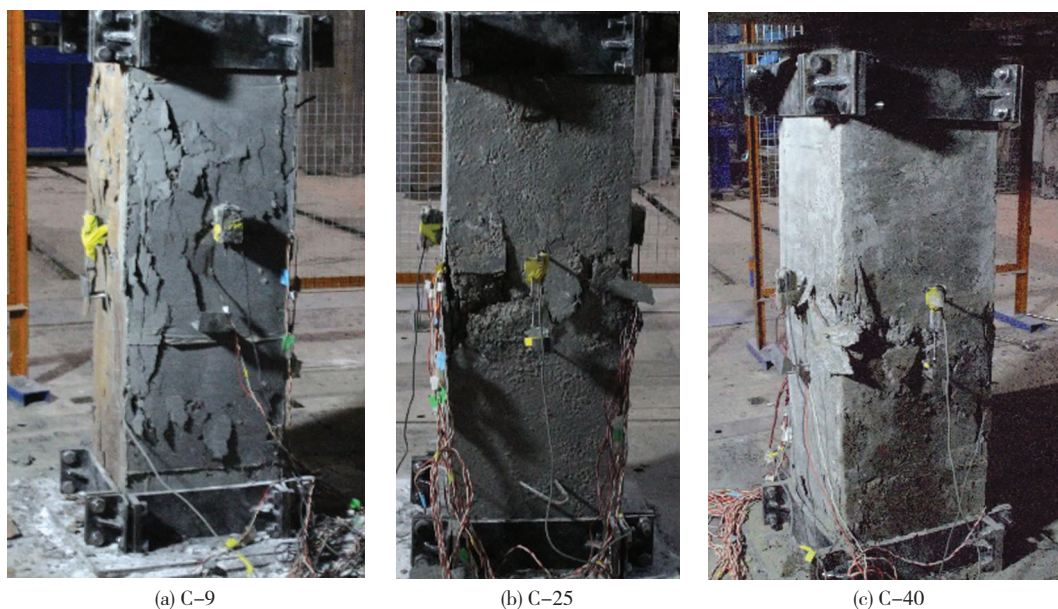


图 5 峰值荷载时的损伤状况

Fig. 5 Damage condition under peak load

荷载降至峰值荷载的 40% ~ 45% 时, C-17、C-18、C-27、C-42 的箍筋破断,破断位置仅有一处且位于试件中部,箍筋破断形态见图 6。荷载降至峰值荷载的 40% 以下时停止加载,此时纵筋屈曲。试件最终破损形态见图 7。

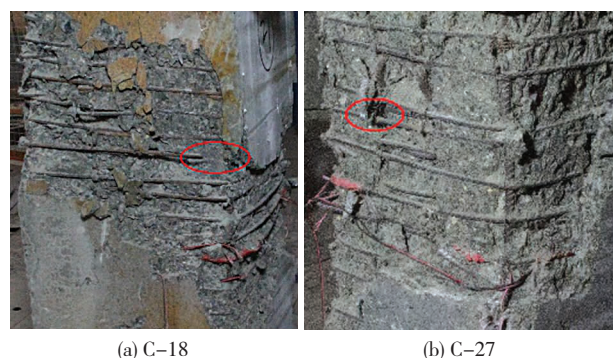


图 6 箍筋破断状态

Fig. 6 State of stirrup breaking

2.2 试验结果

试验测得的荷载由试件的 3 部分来承担:核心区外非约束混凝土、纵筋和箍筋所约束的核心区混凝土。核心区混凝土承担的荷载为实测荷载减去纵筋和保护层承担的荷载。试验数据结果见表 5。

C-1 ~ C-42 的约束混凝土轴压应力-应变关系实测曲线见图 8,其中 σ_c 为约束混凝土压应力,

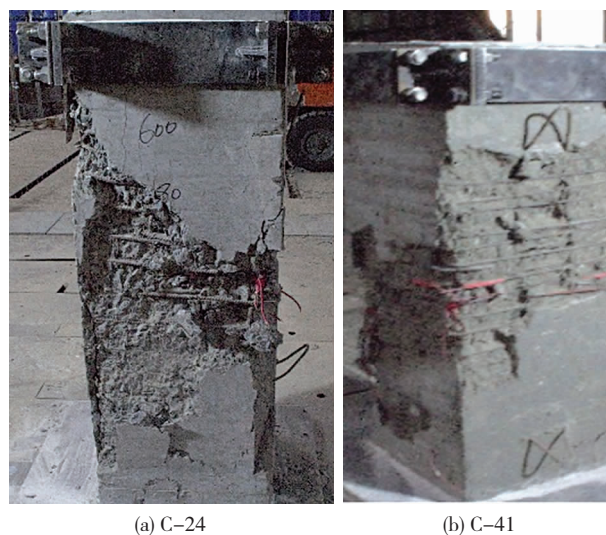


图 7 试验结束后试件破损状态

Fig. 7 Damaged state of specimen after test

ε_c 为约束混凝土压应变,黑色圆点为箍筋破断时约束混凝土的应力-应变点。体积配箍率相同,且约束混凝土峰值压应力下箍筋未屈服时,箍筋的强度等级对约束混凝土峰值压应力的影响不大,但其变形性能影响较大。箍筋屈服强度越高,体积配箍率越大,下降段越缓,网格箍筋约束高强混凝土的变形能力越好。

表 5 试验结果
Tab. 5 Test results

试件 编号	$f_{c0}/$ MPa	s/mm	$f_{yv}(f_{0.2})/$ MPa	$\rho_v/\%$	f_{cc}/MPa	$\varepsilon_{cc}/10^{-6}$	$\varepsilon_{cc85}/10^{-6}$	$\varepsilon_{cc50}/10^{-6}$	$\varepsilon_{sv}/10^{-6}$	σ_{sv}/MPa	是否 屈服
C-1	50.0	75	480	1.10	58.33	2 178	2 830	4 250	2 517	480.0	是
C-2	50.0	60	480	1.35	64.25	2 320	3 680	5 000	2 438	480.0	是
C-3	50.0	50	480	1.60	69.08	2 526	3 450	5 500	2 761	480.0	是
C-4	50.0	80	576	1.00	59.30	2 030	2 700	4 150	1 904	380.8	否
C-5	50.0	65	576	1.25	63.66	2 350	3 450	5 535	2 850	570.0	否
C-6	50.0	55	576	1.50	66.62	2 870	3 990	5 900	3 568	576.0	是
C-7	50.0	65	657	1.00	64.05	2 851	3 900	6 200	4 702	657.0	是
C-8	50.0	50	657	1.20	75.58	2 691	4 050	6 570	4 971	657.0	是
C-9	50.0	40	657	1.40	77.13	2 941	4 320	6 800	4 600	657.0	是
C-10	57.2	80	576	1.00	63.23	2 362	3 000	3 830	1 753	350.6	否
C-11	57.2	65	576	1.25	65.67	2 486	3 080	4 380	2 576	515.2	否
C-12	57.2	55	576	1.50	67.14	2 997	3 570	5 500	3 148	576.0	是
C-13	57.2	100	657	1.00	63.02	2 092	3 000	4 550	1 468	293.6	否
C-14	57.2	85	657	1.20	63.40	2 365	3 270	4 800	2 237	447.4	否
C-15	57.2	75	657	1.40	64.01	2 220	3 600	6 500	2 866	573.2	否
C-16	57.2	65	1 413	1.00	67.50	2 566	4 300	6 900	2 976	610.1	否
C-17	57.2	50	1 413	1.20	73.00	3 015	4 600	7 900	4 750	973.8	否
C-18	57.2	40	1 413	1.40	78.68	3 416	5 400	10 100	4 724	968.4	否
C-19	63.6	80	576	1.00	68.36	2 343	3 100	4 560	1 011	202.2	否
C-20	63.6	65	576	1.25	73.53	3 022	4 000	6 000	2 530	506.0	否
C-21	63.6	55	576	1.50	75.76	2 713	4 250	7 000	2 956	576.0	是
C-22	63.6	100	657	1.00	65.03	2 568	3 350	5 200	1 178	235.6	否
C-23	63.6	85	657	1.20	70.00	2 132	3 700	6 900	1 604	320.8	否
C-24	63.6	75	657	1.40	76.60	3 060	4 850	8 900	2 302	460.4	否
C-25	63.6	65	1 413	1.00	71.64	2 536	5 200	7 200	2 844	583.0	否
C-26	63.6	50	1 413	1.20	74.84	2 965	5 200	7 650	3 451	707.5	否
C-27	63.6	40	1 413	1.40	85.30	3 240	6 000	8 250	4 519	926.4	否
C-28	68.0	80	576	1.00	70.37	2 310	2 950	4 480	1 058	211.6	否
C-29	68.0	65	576	1.25	75.65	2 503	3 700	5 900	2 061	412.2	否
C-30	68.0	55	576	1.50	79.64	2 659	4 500	6 800	2 550	510.0	否
C-31	68.0	65	657	1.00	71.22	2 464	2 800	3 900	1 524	304.8	否
C-32	68.0	50	657	1.20	78.27	2 726	3 500	4 750	2 523	504.6	否
C-33	68.0	40	657	1.40	85.26	2 953	4 400	6 900	1 738	347.6	否
C-34	68.0	85	873	1.00	70.88	2 516	3 250	4 750	1 863	381.9	否
C-35	68.0	70	873	1.20	75.98	2 766	3 780	4 350	2 158	442.4	否
C-36	68.0	60	873	1.40	78.51	2 831	4 030	5 000	2 387	489.3	否
C-37	68.0	85	1 215	1.00	71.16	2 521	3 300	6 000	1 352	277.2	否
C-38	68.0	70	1 215	1.20	75.59	2 651	3 780	6 750	2 695	552.5	否
C-39	68.0	60	1 215	1.40	80.57	3 520	4 970	7 800	3 348	686.3	否
C-40	68.0	65	1 413	1.00	81.91	3 114	4 450	6 750	2 248	460.8	否
C-41	68.0	50	1 413	1.20	87.16	3 242	4 700	7 100	3 380	692.9	否
C-42	68.0	40	1 413	1.40	90.68	3 895	7 250	9 900	5 556	1 139.0	否

注: f_{c0} 为非约束混凝土轴心抗压强度, $f_{yv}(f_{0.2})$ 为箍筋屈服强度(条件屈服强度), f_{cc} 和 ε_{cc} 分别为约束混凝土峰值压应力和峰值压应变, ε_{cc85} 和 ε_{cc50} 分别为约束混凝土压应力降至峰值压应力的 85% 和 50% 时的应变, ε_{sv} 和 σ_{sv} 分别为约束混凝土峰值压应力下箍筋拉应变和拉应力。

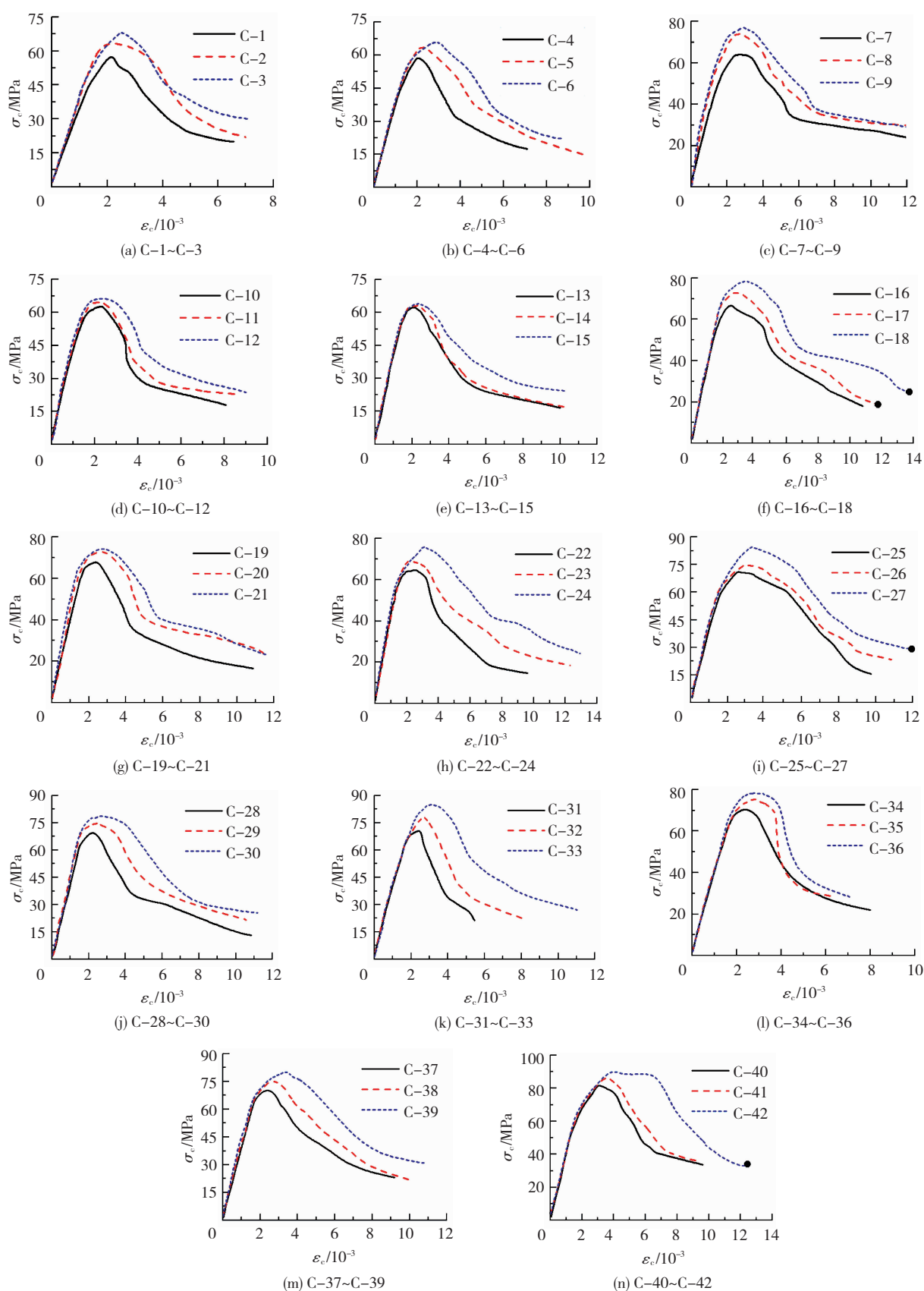


图 8 约束混凝土轴压应力 - 应变关系实测曲线

Fig. 8 Measured curves of compressive stress and strain of confined concrete

C-1 ~ C-42 的约束混凝土轴压应力与箍筋拉应变关系实测曲线见图 9, 其中 σ_c 为约束混凝土压

应力, ε_s 为箍筋拉应变, 黑色圆点表示箍筋拉应变达到屈服应变。

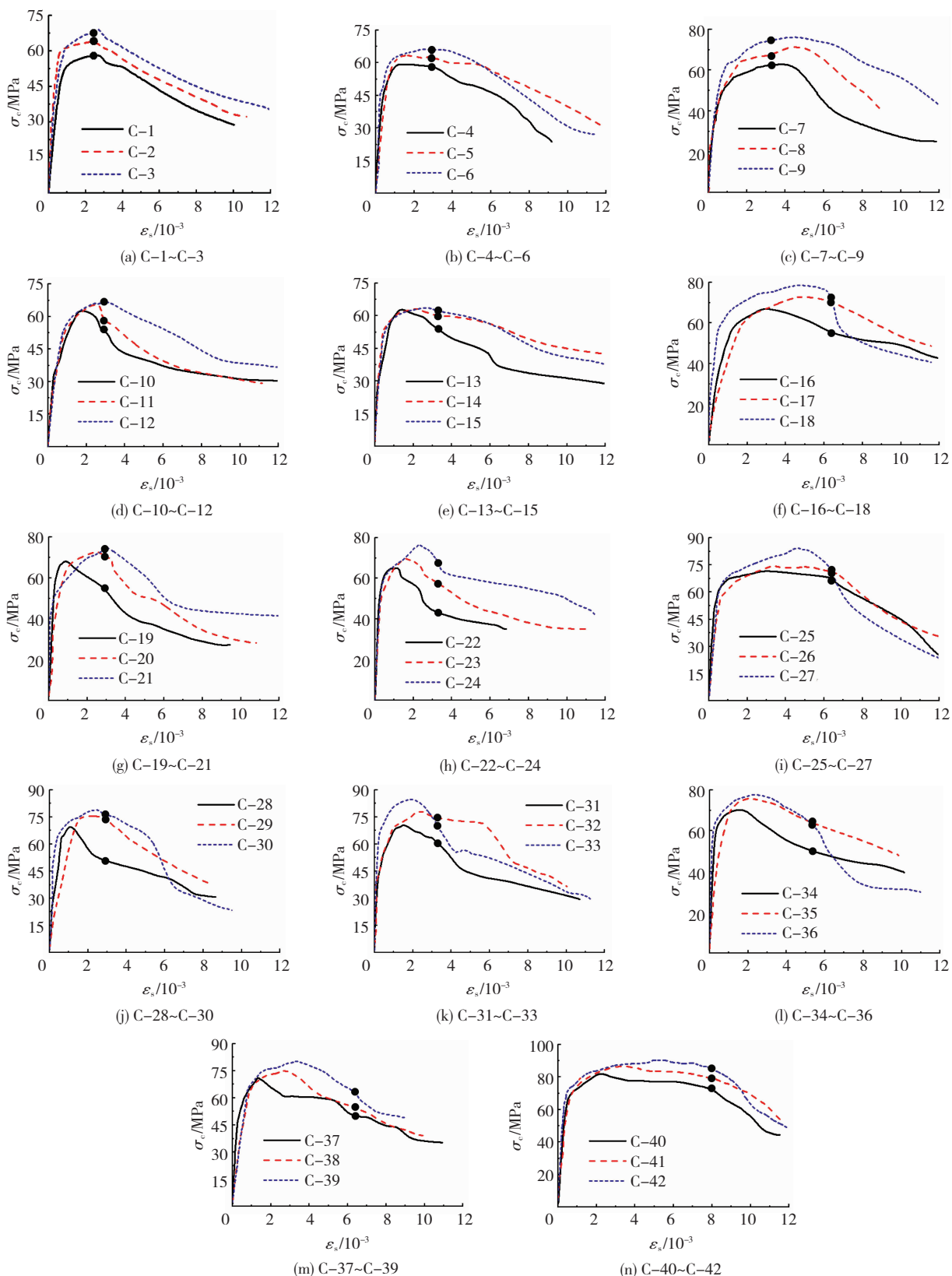


图 9 约束混凝土压应力与箍筋拉应变关系实测曲线

Fig. 9 Measured curves of confined concrete compressive stress and stirrup tensile strain

3 约束混凝土峰值压应力下箍筋拉应变预测公式

基于试验结果,约束混凝土峰值压应力下,

33 个试件的箍筋未屈服,峰值压应力下箍筋的拉应变与混凝土轴心抗压强度、体积配箍率和箍筋间距有关。

3.1 非约束混凝土轴心抗压强度对箍筋应力水平发挥的影响

约束混凝土峰值压应力下的箍筋拉应变与非约束混凝土轴心抗压强度的关系见图 10。可以看出两者呈负相关,这是因为箍筋对混凝土的约束为被动约束,箍筋拉应力水平的发挥依赖于混凝土的侧向膨胀,非约束混凝土轴心抗压强度越高,其脆性越大,变形能力越差,不利于箍筋拉应力的发挥。

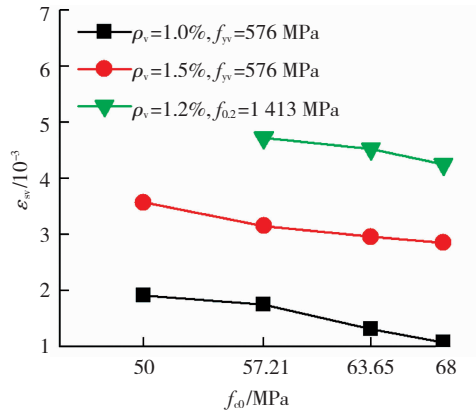


图 10 混凝土轴心抗压强度的影响

Fig. 10 Influence of axial compressive strength of concrete

3.2 体积配箍率对箍筋应力水平发挥的影响

约束混凝土峰值压应力下的箍筋拉应变与体积配箍率的关系见图 11。约束箍筋抗拉强度相同时,体积配箍率越高,峰值荷载下箍筋拉应变越大。

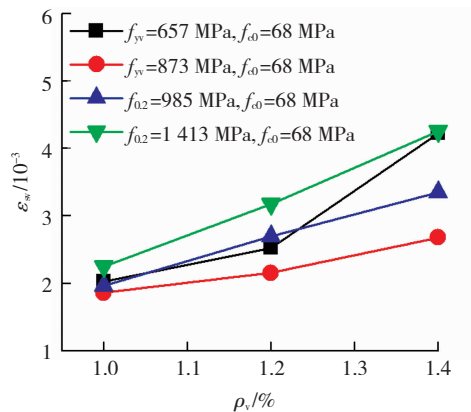


图 11 体积配箍率的影响

Fig. 11 Influence of volume stirrup ratio

3.3 箍筋屈服强度对箍筋应力水平发挥的影响

约束混凝土峰值荷载下的箍筋拉应变与箍筋屈服强度的关系见图 12。箍筋未屈服时,箍筋的屈服强度对于箍筋拉应力水平的发挥影响不大。原因是箍筋弹性模量相同,屈服前箍筋始终处于弹性变形阶段。

3.4 箍筋间距对箍筋应力水平发挥的影响

约束混凝土峰值荷载下的箍筋拉应变与箍筋间距的关系见图 13。体积配箍率和箍筋屈服强度相同时,峰值荷载下约束箍筋的拉应变随约束箍筋间

距的减小而增大。

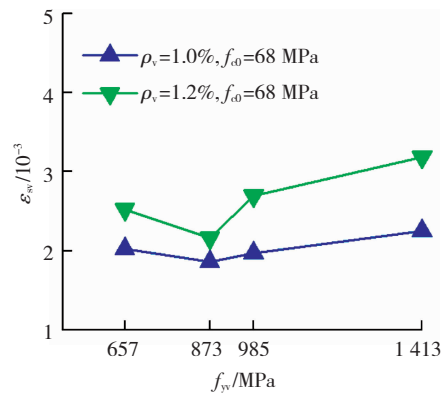


图 12 约束箍筋屈服强度的影响

Fig. 12 Influence of yield strength of stirrups

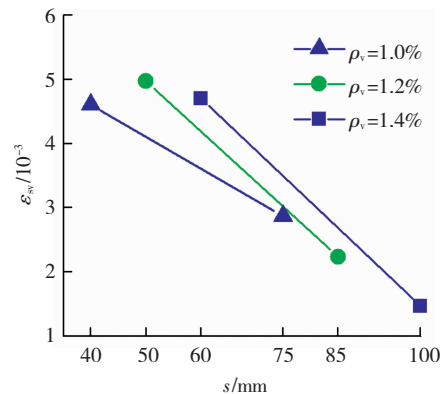


图 13 约束箍筋间距的影响

Fig. 13 Influence of stirrup spacing

3.5 箍筋拉应变预测公式

为考虑箍筋间距、形式以及纵筋布置对箍筋拉应力水平的影响,引入有效约束系数 k_e 。约束混凝土峰值压应力下的箍筋应变与体积配箍率和有效约束系数呈正相关,与非约束混凝土轴心抗压强度呈负相关。将约束混凝土峰值压应力下箍筋的实际拉应变与 $\rho_v \sqrt{k_e E_s / f_{c0}}$ 的关系绘于图 14,拟合出箍筋拉应变预测公式,见式(1),具有 95% 保证率的箍筋拉应变计算公式见式(2)。

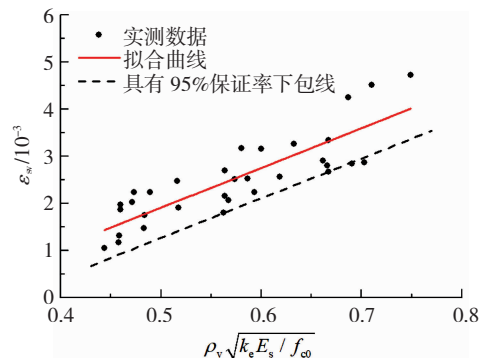


图 14 箍筋拉应变拟合曲线和具有 95% 保证率下包线

Fig. 14 Stirrup tensile strain fitting curve and envelope with 95% guarantee rate

$$\varepsilon_{sv,f} = 0.008\,4\rho_v\sqrt{k_eE_s/f_{c0}} - 0.002\,3 \quad (1)$$

$$\varepsilon_{sv,n} = 0.008\,4\rho_v\sqrt{k_eE_s/f_{c0}} - 0.002\,95 \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_{sv,f}$ 表示约束混凝土峰值压应力下箍筋拉应变的预测值; ρ_v 为体积配箍率; k_e 为网格式箍筋约束混凝土方柱的有效约束系数, $k_e = [(1 - \sum \omega_i^2/6A_{cor})(1 - s/2b_{cor})^2]/(1 - \rho_s)$,其中 ω_i 为相邻纵筋间的水平距离, A_{cor} 为约束混凝土核心区面积, s 为箍筋间距, b_{cor} 为约束混凝土核心区边长, ρ_s 为纵筋配筋率; E_s 为钢材弹性模量; f_{c0} 为非约束混凝土轴心抗压强度; $\varepsilon_{sv,n}$ 为具有 95% 保证率的箍筋拉应变预测值^[11]。

文献[3-4,7-8]给出的峰值压应力下箍筋不屈服时的拉应变计算公式见表 6,图 15 将表中各式

箍筋拉应力预测值与本文试验值进行了比较,结果表明本文的计算公式拟合效果相对较好。

表 6 约束混凝土峰值压应力下箍筋不屈服时的拉应变预测公式

Tab. 6 Prediction formula of tensile strain of stirrups under peak compressive stress of confined concrete	
公式来源	箍筋不屈服时的拉应变预测公式
文献[3]	$\varepsilon_{sv} = 0.002\,5 + 0.04\sqrt[3]{k_e\rho_v/f_{c0}}$
文献[4]	$\varepsilon_{sv} = 0.45\varepsilon_{c0} + 6.39(k_e\rho_w/f_{c0})^{0.881}$
文献[7]	$\varepsilon_{sv} = 12.29k_e\rho_w/f_{c0} + 180/E_s$
文献[8]	$\varepsilon_{sv} = 0.05k_e\rho_w\sqrt{f_{yv}/f_{c0}} + 180/E_s$

注: ε_{c0} 为非约束混凝土峰值压应变, ρ_w 为面积配箍率。

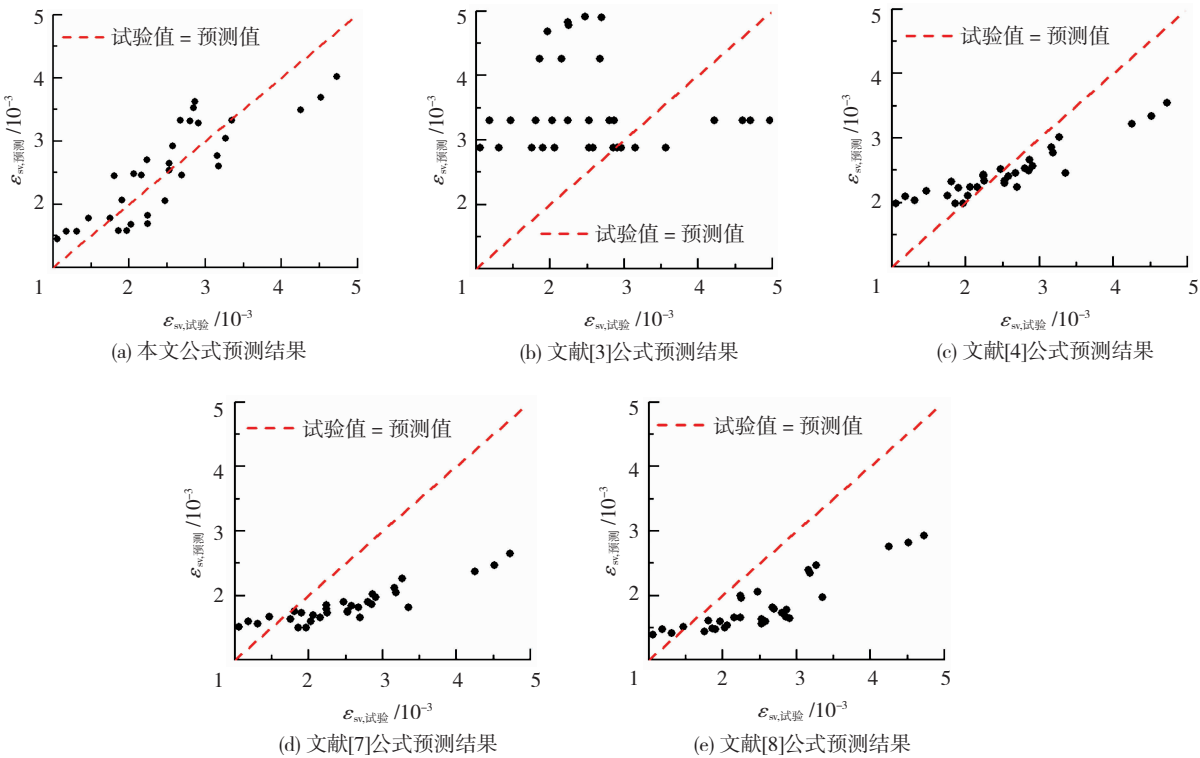


图 15 预测公式计算值与试验值比较

Fig. 15 Comparison of calculated and experimental values of prediction formula

当体积配箍率低于一定值时,算得的峰值荷载下箍筋拉应变为零甚至负值,这是因为当配箍率较低、箍筋间距较大时,箍筋基本上不再发挥约束作用。规范^[2]中对一级、二级、三四级抗震设计区箍筋加密区最小体积配箍率的规定分别为 0.8%、0.6% 和 0.4%。取 $k_e = 0.7$, $E_s = 2.05 \times 10^5$ MPa,

$\rho_v = 0.4\%$,混凝土强度等级为 C30 ~ C80,用式(1)算得的峰值荷载下箍筋拉应变见表 7。说明若加密区体积配箍率刚好满足规范的最低要求,该公式认为当混凝土强度高于 C70 时,箍筋不再对混凝土发挥约束作用。

表 7 按规范最低要求算得的峰值荷载下箍筋拉应变

Tab. 7 Tensile strain of stirrups under peak load calculated according to the minimum requirements of the code											
混凝土强度等级	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
箍筋拉应变/ 10^{-6}	1 066	815	612	471	326	230	127	36	-43	-111	-176

3.6 约束混凝土峰值压应力下箍筋能够屈服的体积配箍率下限值

对于有明显屈服点的热轧钢筋,将箍筋拉应变预测公式(1)与式(3)联立,得到热轧箍筋能够屈服的体积配箍率下限值计算公式,见式(4)。

$$f_{yv} = E_s \varepsilon_{yv} \quad (3)$$

$$\rho_{v,\min} = \frac{(0.0023E_s + f_{yv})\sqrt{f_{c0}}}{0.0084\sqrt{E_s^3 k_e}} \quad (4)$$

对于无明显屈服点的高强预应力筋,将箍筋拉应变预测公式(1)与式(5)联立,得到 PC 钢棒箍筋能够屈服的体积配箍率下限值计算公式,见式(6)。低于此体积配箍率下限值时,就要按箍筋不屈服来考虑,用式(1)来计算约束混凝土峰值压应力下箍筋的实际拉应力。

$$f_{0.2} = E_s (\varepsilon_{yv} - 0.002) \quad (5)$$

$$\rho_{v,\min} = \frac{(0.0043E_s + f_{0.2})\sqrt{f_{c0}}}{0.0084\sqrt{E_s^3 k_e}} \quad (6)$$

4 应力-应变关系模型

4.1 峰值压应力和峰值压应变

箍筋提供的侧向约束应力使约束混凝土抗压强度得以提高,试验发现约束混凝土峰值压应力和峰值压应变的提高倍数与约束程度(有效约束应力/非约束混凝土轴心抗压强度)近似呈线性关系。以箍筋的实际拉应力水平下的约束程度为横坐标,峰值压应力和峰值压应变提高倍数为纵坐标,拟合关系曲线见图 16、17,线性拟合公式见式(7)、(8)。

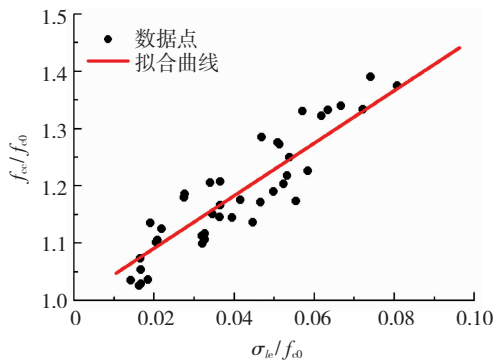


图 16 峰值压应力拟合曲线

Fig. 16 Fitting curve of peak compressive stress

$$f_{cc} = f_{c0} (1 + 4.58 \sigma_{le}/f_{c0}) \quad (7)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0} (1 + 7.9 \sigma_{le}/f_{c0}) \quad (8)$$

式中: σ_{le} 为箍筋提供的有效约束应力, $\sigma_{le} = 0.5k_e \rho_v \sigma_{sv}^{[11]}$, 当约束混凝土峰值压应力下箍筋不能屈服时,取 $\sigma_{sv} = E_s \varepsilon_{sv}$, 箍筋能够屈服时,取 $\sigma_{sv} = f_{yv}$ 。

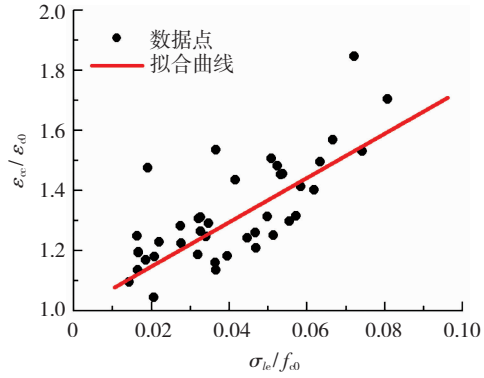


图 17 峰值压应变拟合曲线

Fig. 17 Fitting curve of peak compressive strain

4.2 下降段参数

根据试验结果,约束混凝土应力下降至峰值荷载的 85% 和 50% 时,箍筋基本达到其屈服强度,此时取 $\sigma_{le} = 0.5k_e \rho_v f_{yv}$ 。用回归分析法拟合得到 85% 峰值应力时的应变和 50% 峰值应力时的应变计算公式见式(9)、(10)。

$$\varepsilon_{cc85} = \varepsilon_{c0} (1 + 21 \sigma_{le}/f_{c0}) \quad (9)$$

$$\varepsilon_{cc50} = \varepsilon_{c0} (1 + 40.8 \sigma_{le}/f_{c0}) \quad (10)$$

4.3 约束高强混凝土受压应力-应变模型

文献[8-13]基于试验提出了约束高强混凝土受压应力-应变模型,这些模型中曲线的上升段差异不大,主要区别在曲线的下降段,箍筋的约束程度越强,曲线下降段越平缓。结合试验曲线特点,上升段采用文献[12]提出的模型,见式(11)。下降段采用文献[13]提出的模型,见式(12)。

$$\sigma_c = f_{cc} \frac{\gamma x}{\gamma - 1 + x^\gamma}, x \leq 1 \quad (11)$$

$$\sigma_c = f_{cc} \frac{x}{k_1 (x - 1)^{k_2} + x}, x > 1 \quad (12)$$

式中: $x = \varepsilon_c/\varepsilon_{cc}$; $\gamma = \frac{E_{c0}}{E_{c0} - f_{cc}/\varepsilon_{cc}}$, 其中 E_{c0} 为非约束混凝土的弹性模量, $E_{c0} = \frac{10^5}{2.2 + 34.7/f_{cu}}^{[14]}$ 。

约束高强混凝土受压应力-应变模型下降段经过点 $(\varepsilon_{cc85}, 0.85f_{cc})$ 和 $(\varepsilon_{cc50}, 0.5f_{cc})$, 将这两点代入式(12),解得 k_1 和 k_2 :

$$k_1 = \frac{\varepsilon_{cc50}/\varepsilon_{cc}}{(\varepsilon_{cc50}/\varepsilon_{cc} - 1)^{k_2}} \quad (13)$$

$$k_2 = \frac{\ln(0.176\varepsilon_{cc85}/\varepsilon_{cc50})}{\ln((\varepsilon_{cc85}/\varepsilon_{cc})/(\varepsilon_{cc50} - \varepsilon_{cc}))} \quad (14)$$

部分网格箍筋约束高强混凝土轴心受压应力-应变关系拟合曲线与试验实测曲线的对比见图 18。

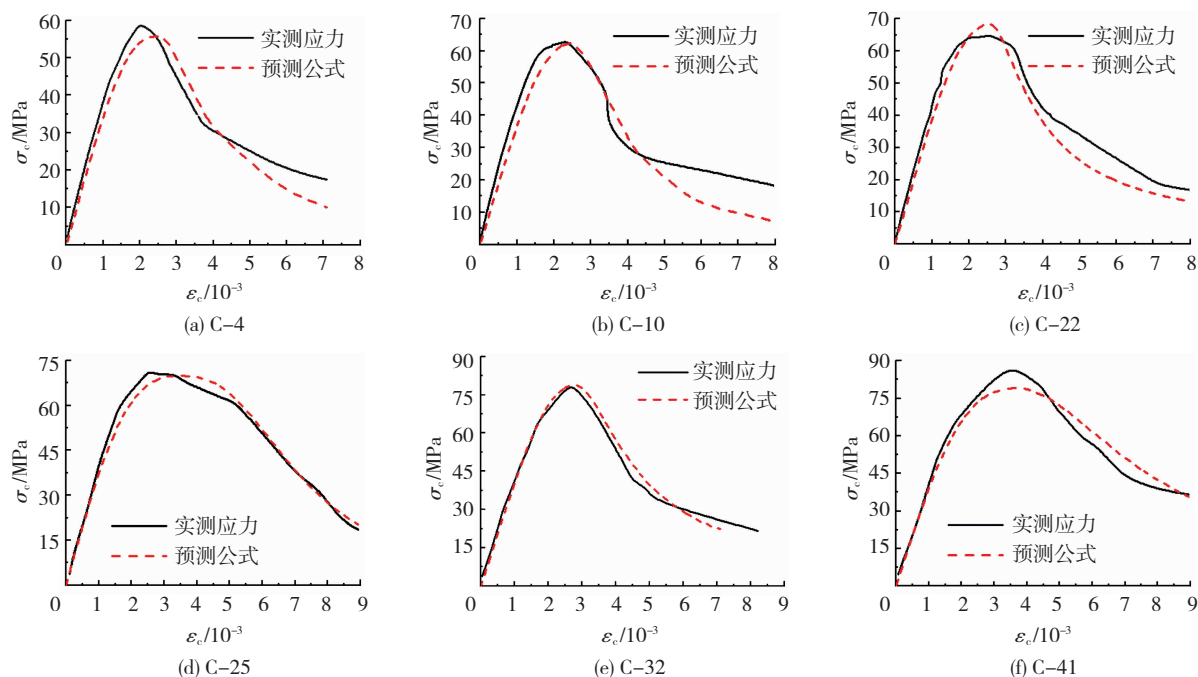


图18 预测模型与试验曲线对比

Fig. 18 Comparison of prediction model and test curve

5 结 论

1) 42根网格箍筋约束高强混凝土柱轴压试验表明,约束混凝土达到峰值压应力时存在箍筋不屈服的现象,此时应该用箍筋的实际拉应力计算箍筋的侧向约束应力。

2) 约束混凝土峰值压应力下的箍筋拉应变随混凝土轴心抗压强度的增大而减小,随体积配箍率的增大而增大。体积配箍率相同时,箍筋间距越小,约束混凝土峰值压应力下箍筋拉应变越大。

3) 用回归分析法给出了约束混凝土峰值压应力下箍筋实际拉应变计算公式,提出了在约束混凝土峰值压应力下网格箍筋约束高强混凝土柱的箍筋能够屈服的体积配箍率下限值计算公式。

4) 基于峰值压应力下箍筋的实际拉应力及试验结果,给出了约束混凝土峰值压应力、峰值压应变和下降段参数计算公式,提出了网格箍筋约束高强混凝土受压应力-应变关系全曲线方程。

参考文献

- [1] 史庆轩,王南,田建勃,等. 高强箍筋约束混凝土实用本构关系模型[J]. 建筑材料学报,2014,17(2):217
SHI Qingxuan, WANG Nan, TIAN Jianbo, et al. A practical stress-strain model for high-strength stirrups confined concrete[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(2): 217
- [2] 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
- [3] RAZVI S, SAATCIOGLU M. Confinement model for high-strength concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(3): 284. DOI: 10. 1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:3(281)
- [4] MITSUYOSHI A, SUZUKI M, FRANGOPOL D M. Stress-averaged strain model for confined high-strength concrete[J]. ACI Structural Journal, 2010, 107(2): 179. DOI: 10. 1061/(ASCE)ST. 1943-

- 541X. 0000348
- [5] 史庆轩,王南,田园,等. 高强箍筋约束高强混凝土轴心受压应力-应变全曲线研究[J]. 建筑结构学报,2013, 34(4):149
SHI Qingxuan, WANG Nan, TIAN Yuan, et al. Study on stress-strain relationship of high-strength concrete confined with high-strength stirrups under axial compression[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(4): 149
- [6] RAZVI S. Confinement of normal and high-strength concrete columns[D]. Ottawa: University of Ottawa, 1995
- [7] 王南. 高强箍筋约束混凝土柱及节点受力性能与抗震设计研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015
WANG Nan. Mechanical behavior and seismic design of rc columns-joints confined with high-strength stirrups [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015
- [8] 史庆轩,王南,王秋维,等. 高强箍筋约束高强混凝土轴心受压本构关系研究[J]. 工程力学, 2013, 30(5): 135
SHI Qingxuan, WANG Nan, WANG Qiuwei, et al. Uniaxial compressive stress-strain model for high-strength concrete with high-strength lateral ties[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5): 135. DOI: 10. 6052/j. issn. 1000-4750. 2011. 12. 0894
- [9] CUSON D, PAULTRE P. Stress-strain model for confined high-strength concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(3): 472. DOI: 10. 1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:3(468)
- [10] MANDER J B, PRIESTLEY M J N. Observed stress-strain behavior of confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1848. DOI: 10. 1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1827)
- [11] MANDER J A B, PRIESTLEY M J N. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1812. DOI: 10. 1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)
- [12] POPOVICS S. A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1973, 3(5): 583. DOI: 10. 1016/0008-8846(73)90096-3
- [13] 张秀琴,过镇海,王传志. 反复荷载下箍筋约束混凝土的应力-应变全曲线方程[J]. 工业建筑, 1985(12): 18
ZHANG Xiuqin, GUO Zhenhai, WANG Chuazhi. Stress-strain full curve equation of stirrup confined concrete under repeated loads [J]. Industrial Construction, 1985(12): 18
- [14] 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012
Standard for test method of concrete structures: GB/T 50152—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012

(编辑 赵丽莹)