DOI:10.11918/202008002

约束混凝土受压应力-应变曲线统一方程

李柯璇[1,2],郑文忠[1,2],侯翀驰[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:为改善已有约束混凝土本构关系模型的局限性,收集了混凝土强度为19.6~158 MPa,体积配箍率为0.5%~7.27%,箍筋屈服强度为296~1 318 MPa,纵筋配筋率为0%~5.87%的约束混凝土轴压试验数据,建立数据库。分析了7个关键参数对约束混凝土强度增强系数($K_c=f_{cc}/f_c$)和变形增强系数($K_\varepsilon=\varepsilon_{cc}/\varepsilon_c$)的影响规律。对数据库中试验数据进行统一处理,采用回归分析的方法,提出了峰值压应变及峰值压应力计算公式,约束混凝土受压应力-应变曲线统一方程。对比分析本文统一方程和已有的本构模型对本课题组试验的预测效果,本文提出的统一方程得到的应力-应变曲线与试验曲线吻合程度更高,本文提出的峰值压应变及峰值压应力公式预测效果好,本文模型精确度高且适用范围广。

关键词:约束混凝土;峰值压应力;峰值压应变;受压应力-应变关系;统一方程
中图分类号:TU375.3 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2021)04-0010-21

Unified equation of confined concrete stress-strain curve under axial compression

LI Kexuan[1,2], ZHENG Wenzhong[1,2], HOU Chongchi[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, Harbin 150090, China)

Abstract: To deal with the limitations of the existing constitutive relation models of confined concrete, the experimental results of confined concrete columns were collected to establish a database, including concrete strength of 19.6 - 158 MPa, volumetric ratio of 0.5% - 7.27%, stirrup yield strength of 296 - 1 318 MPa, and longitudinal reinforcement ratio of 0% - 5.87%. The effects of seven key parameters on the strength enhancement factor ($K_c=f_{cc}/f_c$) and deformation enhancement factor ($K_\varepsilon=\varepsilon_{cc}/\varepsilon_c$) of confined concrete were analyzed. Through the unified processing and regression analysis of the data in the database, the unified equation of confined concrete stress-strain curve under axial compression was proposed, and the computation formulas of peak stress and peak strain were obtained. The prediction effects of the proposed unified equation and the existing models were compared and analyzed. Results show that the stress-strain curves obtained by the unified equation were more consistent with the experimental curves. The formulas of peak strain and peak stress had good predictive effect. From the overall verification results, it can be concluded that the model proposed in this paper is highly accurate and widely applicable.

Keywords: confined concrete; peak stress; peak strain; stress-strain curve; unified equation

随着混凝土技术的发展,高强度及超高强度混凝土的应用成为发展趋势。但混凝土强度越高,脆性愈发明显,限制了其在工程中的推广应用。用箍筋约束混凝土是一种改善混凝土脆性的有效方式。随着约束混凝土柱中混凝土强度提高,所配置的箍筋强度也在不断增加。中国《混凝土结构设计规范》[1]推广HRB400、HRB500钢筋的使用,顺应高强度箍筋约束高强度及超高强度混凝土结构的发展趋势。

文献[2]对约束混凝土的应力-应变全曲线进行了研究,该模型的上升段和下降段分别取决于两个独立的试验参数,形式简洁。但研究的混凝土强度在28~40 MPa,对强度较高的混凝土的适应性还需验证[3]。试验仅考虑了矩形箍筋对约束混凝土应力-应变曲线的影响,没有考虑其他箍筋形式对约束混凝土承载能力和变形能力的影响。

文献[4-5]对箍筋屈服强度为300~340 MPa,体积配箍率为1%~2%,纵筋配筋率为1.6%~4.8%的约束普通强度混凝土圆柱受压应力-应变关系进行研究,提出了适用于多种箍筋形式的约束混凝土受压应力-应变关系上升段和下降段统一的方程。Mander模型考虑了箍筋形式、体积配箍率、

收稿日期:2020-08-01
基金项目:国家自然科学基金面上项目(51678190)
作者简介:李柯璇(1996—),女,博士研究生;
郑文忠(1965—),男,教授,博士生导师
通信作者:郑文忠,hitwzzheng@163.com

箍筋间距、箍筋强度及纵筋的影响,但对高强及超高强混凝土的适应性还需进一步研究。

文献[6]提出了适用于高强混凝土的应力 - 应变模型,该模型考虑了混凝土强度等级、箍筋形式、体积配箍率、箍筋间距、箍筋屈服强度、截面尺寸等因素的影响。曲线下降段形式较简单,便于应用,但模型没有考虑纵筋配筋率对约束效果的影响。

文献[7]对箍筋条件屈服强度分别为 411、716、1 120 MPa,混凝土强度等级 C70 ~ C80 的约束混凝土圆柱进行了试验,给出了约束混凝土峰值应力、峰值应变及本构关系方程。研究过程发现当箍筋屈服强度高于 700 MPa 时,体积配箍率为 1.3% ~4.2% 的约束混凝土达到峰值应力时箍筋未屈服。

文献[8]对非约束混凝土强度为 120 ~ 160 MPa,体积配箍率为 0.8% ~2.1% 的约束超高强混凝土圆柱进行轴压试验,提出了受压应力 - 应变关系的上升和下降分支模型,并且提出了一种残余应力计算方法。该模型对约束超高强混凝土准确性较高,但对普通混凝土及高强混凝土适应性还需验证。

已有的约束混凝土本构关系模型,大多是基于各自试验数据得到的,适用范围不同且有限。本文针对这一问题,收集大量试验数据统一处理,建立了混凝土强度为 19 ~ 160 MPa,箍筋屈服强度为 164 ~ 1 386 MPa,体积配箍率为 0.15% ~16.7%,纵筋配筋率为 0% ~5.87% 的约束混凝土轴压试验数据库。在此基础上,提出了约束混凝土受压应力 - 应变曲线统一方程和峰值压应力、峰值压应变计算公式。经验证,该方程适用范围广,准确度较高,有较高的理论意义和工程使用价值。

1　约束混凝土本构关系数据库的建立

1.1　本文试验数据

本课题组已完成 47 个螺旋箍筋约束混凝土圆柱轴压试验[9],作为补充验证性数据,考察本文结论的准确性。测得试件轴压应力 - 应变曲线及约束混凝土峰值压应力和峰值压应变的值。试验结果见表 1。

表 1　本文试验结果

Tab. 1　Experimental results of this paper

试件编号	f_c/MPa	f_{yv}/MPa	ρ_{sv}/%	ρ_s/%	f_{cc}/MPa	ε_{cc}	试件编号	f_c/MPa	f_{yv}/MPa	ρ_{sv}/%	ρ_s/%	f_{cc}/MPa	ε_{cc}
C50 - 8 - 1	43.45	899	2.0	2.28	83.51	0.008 748	C80 - 8 - 1	81.75	899	2.0	2.28	106.14	0.004 289
C50 - 8 - 2	43.45	899	1.6	2.28	74.88	0.007 101	C80 - 8 - 2	81.75	899	1.6	2.28	100.49	0.003 867
C50 - 8 - 3	43.45	899	1.2	2.28	69.42	0.005 111	C80 - 8 - 3	81.75	899	1.2	2.28	95.71	0.003 630
C50 - 8 - 4	43.45	899	0.9	2.28	61.76	0.004 370	C80 - 8 - 4	81.75	899	0.9	2.28	90.49	0.003 074
C50 - 9 - 1	43.45	992	2.0	2.28	82.98	0.009 482	C80 - 9 - 1	81.75	992	2.0	2.28	108.62	0.004 363
C50 - 9 - 2	43.45	992	1.6	2.28	75.37	0.007 963	C80 - 9 - 2	81.75	992	1.6	2.28	101.27	0.004 130
C50 - 9 - 3	43.45	992	1.2	2.28	70.94	0.005 333	C80 - 9 - 3	81.75	992	1.2	2.28	91.65	0.003 926
C50 - 9 - 4	43.45	992	0.9	2.28	64.23	0.004 667	C80 - 9 - 4	81.75	992	0.9	2.28	91.53	0.003 259
C60 - 8 - 1	59.03	899	2.0	2.28	95.14	0.006 922	C100 - 8 - 4	92.29	899	1.0	2.28	97.43	0.002 667
C60 - 8 - 2	59.03	899	1.6	2.28	88.61	0.005 770	C100 - 8 - 3	92.29	899	1.2	2.28	99.12	0.002 877
C60 - 8 - 3	59.03	899	1.2	2.28	82.59	0.004 763	C100 - 8 - 5	92.29	899	1.4	2.28	100.82	0.003 108
C60 - 8 - 4	59.03	899	0.9	2.28	73.26	0.004 585	C100 - 8 - 2	92.29	899	1.6	2.28	105.90	0.003 444
C60 - 9 - 1	59.03	992	2.0	2.28	97.26	0.007 889	C100 - 8 - 1	92.29	899	2.0	2.28	111.83	0.003 885
C60 - 9 - 2	59.03	992	1.6	2.28	88.72	0.006 233	C100 - 9 - 4	92.29	992	1.0	2.28	99.00	0.002 618
C60 - 9 - 3	59.03	992	1.2	2.28	83.14	0.005 000	C100 - 9 - 3	92.29	992	1.2	2.28	100.25	0.002 821
C60 - 9 - 4	59.03	992	0.9	2.28	76.69	0.004 378	C100 - 9 - 5	92.29	992	1.4	2.28	103.50	0.003 002
C70 - 8 - 1	70.25	899	2.0	2.28	100.76	0.005 259	C100 - 9 - 2	92.29	992	1.6	2.28	108.40	0.003 613
C70 - 8 - 2	70.25	899	1.6	2.28	94.45	0.004 785	C100 - 9 - 1	92.29	992	2.0	2.28	115.75	0.004 025
C70 - 8 - 3	70.25	899	1.2	2.28	90.54	0.004 659	C100 - 12 - 4	92.29	1 218	1.0	2.28	100.02	0.002 702
C70 - 8 - 4	70.25	899	0.9	2.28	84.11	0.004 304	C100 - 12 - 3	92.29	1 218	1.2	2.28	106.00	0.003 018
C70 - 9 - 1	70.25	992	2.0	2.28	101.45	0.005 374	C100 - 12 - 5	92.29	1 218	1.4	2.28	110.10	0.003 301
C70 - 9 - 2	70.25	992	1.6	2.28	95.05	0.004 859	C100 - 12 - 2	92.29	1 218	1.6	2.28	113.06	0.003 607
C70 - 9 - 3	70.25	992	1.2	2.28	89.24	0.004 370	C100 - 12 - 1	92.29	1 218	2.0	2.28	117.26	0.004 010
C70 - 9 - 4	70.25	992	0.9	2.28	87.18	0.004 037							

注:f_c 为非约束混凝土轴心抗压强度;f_{yv} 为箍筋屈服强度或条件屈服强度;ρ_{sv} 为体积配箍率;ρ_s 为纵筋配筋率;f_{cc} 为约束混凝土峰值压应力;ε_{cc} 为约束混凝土峰值压应变。表中试件编号 C50 代表使用的混凝土强度等级," - 8、- 9、- 12" 表示箍筋屈服强度 899、992 和 1 218 MPa,最后的" - 1 ~ - 5" 分别代表试件的体积配箍率。

1.2 数据库试验数据处理方法

为避免由于各文献中对数据处理方法不同带来的误差,对搜集的试验数据按下列方法进行统一处理。

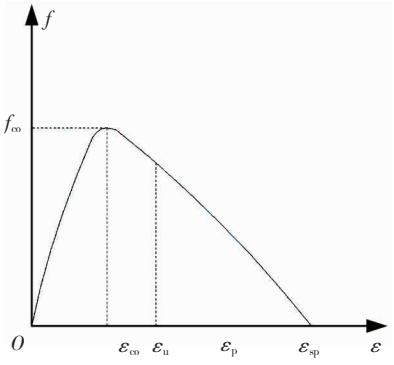
1.2.1 混凝土保护层处理方法

本文在处理试验数据时,假定纵筋应变与混凝土应变相同[10],核心混凝土的承载力计算该公式为

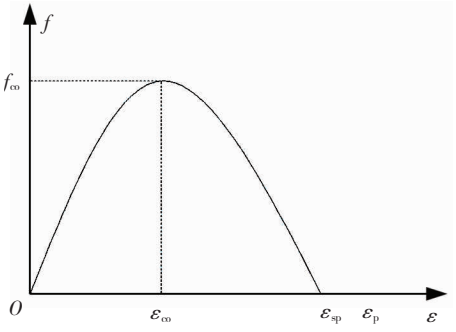
$$F_0(\varepsilon) = F(\varepsilon) - A_{cov}f_{cov}(\varepsilon) - A_s f_s(\varepsilon) \quad (1)$$

式中:$F_0(\varepsilon)$为轴向应变为 ε 时试件核心混凝土的轴向力,$F(\varepsilon)$为轴向应变为 ε 时试件全截面的轴向力,A_{cov}为混凝土保护层截面面积,A_s 为纵筋总截面面积,$f_{cov}(\varepsilon)$为轴向应变为 ε 时对应的保护层混凝土应力,$f_s(\varepsilon)$为竖向应变为 ε 时的纵筋应力。

纵筋采用的本构模型在第 1.2.3 中详述。保护层混凝土本构模型采用过镇海模型[2]。图 1 是试件中保护层混凝土应力 - 应变关系示意。采用式(1)计算核心混凝土的承载力时,若轴向应变(ε_p)在混凝土极限压应变(ε_u)与剥落应变(ε_{sp})之间时,见图 1(a),假定保护层混凝土承担的荷载线性下降;若 $\varepsilon_p > \varepsilon_{sp}$,见图 1(b),则 $A_{cov}f_{cov}(\varepsilon) = 0$。计算时,按下列标准来判断混凝土保护层是否已剥落:$f_c <$ 50 MPa,取 $\varepsilon_{sp} = 0.003$;50 MPa $< f_c \leqslant 80$ MPa,取 $\varepsilon_{sp} = 0.002\,5$;$f_c > 80$ MPa,增加一个强度折减系数 r_1,此时 $\varepsilon_{sp} = 0.002\,5\ r_1$,$r_1 = 1 - [(f_c - 80)/300]$。



(a) $\varepsilon_u < \varepsilon_p < \varepsilon_{sp}$



(b) $\varepsilon_p > \varepsilon_{sp}$

图 1 试件保护层混凝土应力 - 应变关系示意

Fig. 1 Schematic diagram of the stress-strain relationship of the concrete protective layer of the specimen

1.2.2 箍筋应力的计算方法

箍筋约束混凝土轴压试验中,约束混凝土达到峰值压应力时,箍筋能否达到屈服强度是不可忽视的问题。对搜集的数据进行处理分析,采用本课题组已有研究成果[9],将体积配箍率作为判断箍筋在约束混凝土达到峰值压应力时是否屈服的依据。箍筋屈服时,体积配箍率上限值 $\rho_{sv,max}$ 和箍筋屈服强度、非约束混凝土轴心抗压强度、箍筋和混凝土弹性模量存在关系,计算公式[9]为

$$\rho_{sv,max} = \frac{8.735 \times 10^{-8} E_c}{(f_{sy}/E_s - 5.91 \times 10^{-4}) f_c} \quad (2)$$

当体积配箍率小于该限制,则假定箍筋达到屈服强度,否则认为箍筋无法达到屈服强度,此时箍筋应力水平计算公式[6]为

$$f_{sv} = E_s\left(0.002\,5 + 0.04\sqrt[3]{\frac{k'}{f_{co}}}\right) \leqslant f_{sy} \quad (3)$$

式中:E_s 为钢筋弹性模量;ρ_{sv} 为体积配箍率;f_{co} 为非约束混凝土峰值压应力;f_{sy} 为箍筋屈服强度;k' 与柱中配筋分布有关,系数 k' 由经验表达式(4)计算得到[6]。

$$k' = 0.15\sqrt{\left(\frac{b_c}{s}\right)\left(\frac{b_c}{s_l}\right)} \leqslant 1.0 \quad (4)$$

式中:s 为箍筋间距,s_l 为纵筋间距,b_c 为水平面箍筋净距,箍筋内沿间的距离。

1.2.3 纵筋应力处理方法

搜集到的约束混凝土峰值压应力试验数据,有一部分考虑了部分纵筋应力影响。本文处理时,假定纵筋与核心混凝土无相对滑移,核心混凝土达到峰值压应力时对应的应变,为此时的纵筋应变[11]。再根据纵筋单轴加载时的应力 - 应变本构关系曲线,得到此时纵筋应变对应的应力,从试验数据中扣除纵筋应力的影响,即可得到真正的约束混凝土峰值压应力。

钢筋单轴加载的本构关系曲线模型,有明显屈服点的钢筋采用三段式模型,无明显屈服点钢筋采用两段式模型,见图 2。

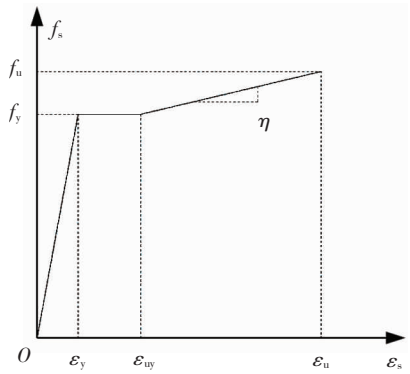
有屈服点钢筋,采用三段式模型:线弹性阶段、屈服阶段和硬化阶段。计算公式[1]为

$$f_s = \begin{cases} E_s\varepsilon_s, & \varepsilon_s \leqslant \varepsilon_y \\ f_y, & \varepsilon_y < \varepsilon_s \leqslant \varepsilon_{uy} \\ f_y + \eta(\varepsilon_s - \varepsilon_{uy}), & \varepsilon_{uy} < \varepsilon_s \leqslant \varepsilon_u \end{cases} \quad (5)$$

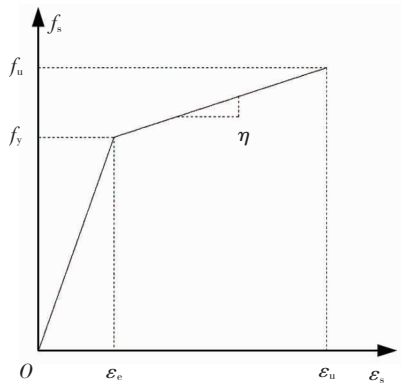
式中:ε_s 为钢筋应变;ε_y 是钢筋屈服强度 f_y 对应的屈服应变;ε_{uy}是钢筋硬化起点的应变;ε_u 是钢筋极限强度 f_u 对应的极限应变;η 为钢筋硬化段斜率,$\eta = (f_u - f_y)/(\varepsilon_u - \varepsilon_y)$。

无屈服点钢筋,采用两段式模型:线弹性阶段及硬化阶段。计算公式[1]为

$$f_s = \begin{cases} E_s\varepsilon_s, & \varepsilon_s \leqslant \varepsilon_e \\ f_e + \eta(\varepsilon_s - \varepsilon_e), & \varepsilon_e < \varepsilon_s \leqslant \varepsilon_u \end{cases} \quad (6)$$



(a) 有屈服点钢筋



(b) 无屈服点钢筋

图 2　钢筋本构关系曲线

Fig. 2　Constitutive relations of steel bars

式中:ε_e 为钢筋在比例极限 f_e 对应的应变;η 为钢筋硬化段斜率,$\eta = (f_u - f_e)/(\varepsilon_u - \varepsilon_e)$。

1.2.4　非约束混凝土峰值压应变处理方法

为避免计算方法的差异产生的误差,本文采用文献[12]中模型对非约束混凝土峰值压应变的处理方法,计算公式为

$$\varepsilon_{co} = 0.000\,5(f_{co})^{0.4} \tag{7}$$

1.2.5　体积配箍率计算方法

数据库中试件的箍筋形式符合“同心对称”原则,本文按照文献[13]的方法计算体积配箍率,见表 2。

1.3　数据库试验数据处理方法

为了提高研究结果的准确性,本文按照以下原则进行收集数据:约束混凝土柱中,箍筋均只有一层;试件的高宽比范围均在 2 ~ 6;试验数据均是在试件轴心受压作用下得到的。

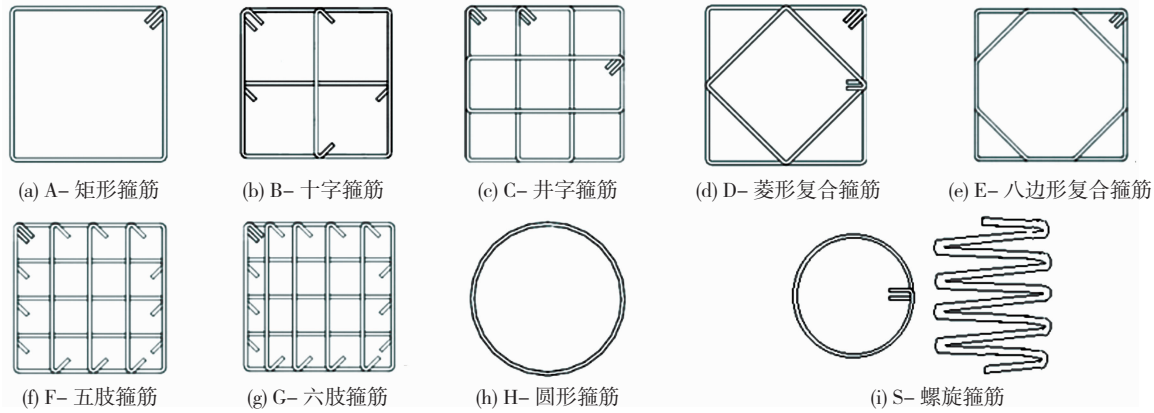
为建立约束混凝受压应力 – 应变曲线数据库,本文搜集 326 个约束混凝土柱的轴压应力 – 应变关系曲线数据,376 个约束混凝土试件峰值压应力试验数据及 376 个约束混凝土试件峰值压应变试验数据,数据库中涉及的箍筋形式见图 3。对数据库试验数据,按照本章中的计算方法进行处理,数据见表 3、4。

表 2　各箍筋形式的体积配箍率计算方法

Tab. 2　Calculation methods of volumetric ratio for different stirrup configurations

箍筋形式	计算公式	箍筋形式	计算公式	箍筋形式	计算公式
圆形箍筋	$\rho_{sv} = \frac{4A_{sv}}{D_{cor}s}$	十字箍筋	$\rho_{sv} = \frac{6A_{sv}}{b_{cor}s}$	八边形复合箍筋	$\rho_{sv} = 4\left[1 + \frac{1}{3}(1+\sqrt{2})\right]\frac{A_{sv}}{b_{cor}s}$
螺旋箍筋	$\rho_{sv} = \frac{4A_{sv}}{D_{cor}s}$	井字箍筋	$\rho_{sv} = \frac{28A_{sv}}{3b_{cor}s}$	菱形复合箍筋	$\rho_{sv} = \left(4 + 4\frac{1}{\sqrt{2}}\right)\frac{A_{sv}}{b_{cor}s}$
矩形箍筋	$\rho_{sv} = \frac{4A_{sv}}{b_{cor}s}$	五肢箍筋	$\rho_{sv} = \frac{10A_{sv}}{b_{cor}s}$	六肢箍筋	$\rho_{sv} = \frac{12A_{sv}}{b_{cor}s}$

注:A_{sv} 为箍筋间距 s 范围内单根箍筋截面面积;b_{cor} 为正方形截面混凝土核心部分的宽度;D_{cor} 为按箍筋截面重心计算的核心混凝土直径。



(a) A– 矩形箍筋　(b) B– 十字箍筋　(c) C– 井字箍筋　(d) D– 菱形复合箍筋　(e) E– 八边形复合箍筋

(f) F– 五肢箍筋　(g) G– 六肢箍筋　(h) H– 圆形箍筋　(i) S– 螺旋箍筋

图 3　箍筋形式

Fig. 3　Stirrup configurations

表 3 圆形箍筋及螺旋箍筋约束混凝土圆柱试验数据

Tab. 3 Experimental results of concrete columns confined by circular and spiral stirrups

引用文献	$(D\times H)$/mm	f_c/MPa	f_{sy}/MPa	ρ_{sv}/%	ρ_s/%	s/mm	d_{sv}/mm	c/mm	f_{cc}/MPa	ε_{cc}	箍筋形式
文献[14]	145 ×300	34. 13	1 296	4. 15	0. 00	20	6. 25	7. 5	129. 03	0. 049 0	S
	145 ×300	34. 13	1 296	3. 04	0. 00	28	6. 25	7. 5	100. 34	0. 036 4	S
	145 ×300	34. 13	1 296	1. 80	0. 00	47	6. 25	7. 5	62. 87	0. 021 6	S
	145 ×300	34. 13	909	1. 69	0. 00	50	6. 25	7. 5	58. 19	0. 013 2	S
	145 ×300	34. 13	909	1. 13	0. 00	75	6. 25	7. 5	48. 28	0. 005 7	S
	145 ×300	41. 38	1 296	3. 05	0. 00	28	6. 25	7. 5	109. 94	0. 025 0	S
	145 ×300	41. 38	1 296	1. 92	0. 00	44	6. 25	7. 5	76. 59	0. 013 1	S
	145 ×300	49. 75	1 296	3. 05	0. 00	28	6. 25	7. 5	125. 98	0. 020 5	S
	145 ×300	49. 75	1 296	1. 92	0. 00	44	6. 25	7. 5	88. 61	0. 011 3	S
	145 ×300	64. 40	1 296	3. 02	0. 00	28	6. 25	7. 5	134. 25	0. 017 0	S
	145 ×300	64. 40	1 296	3. 05	0. 00	28	6. 25	7. 5	130. 87	0. 015 9	S
	145 ×300	64. 40	1 296	1. 92	0. 00	44	6. 25	7. 5	96. 74	0. 008 1	S
	145 ×300	70. 10	1 296	1. 92	0. 00	44	6. 25	7. 5	91. 18	0. 004 7	S
	145 ×300	75. 04	1 296	2. 23	0. 00	38	6. 25	7. 5	104. 91	0. 004 2	S
	145 ×300	70. 10	1 296	3. 02	0. 00	28	6. 25	7. 5	130. 00	0. 011 9	S
	145 ×300	75. 04	1 296	3. 38	0. 00	25	6. 25	7. 5	133. 85	0. 009 3	S
	145 ×300	74. 49	1 296	3. 38	0. 00	25	6. 25	7. 5	146. 46	0. 011 0	S
	145 ×300	83. 03	1 296	4. 15	0. 00	20	6. 25	7. 5	163. 01	0. 019 4	S
	145 ×300	83. 03	1 296	3. 01	0. 00	28	6. 25	7. 5	129. 74	0. 009 8	S
	145 ×300	83. 03	1 296	1. 82	0. 00	47	6. 25	7. 5	105. 48	0. 005 8	S
	145 ×300	83. 03	909	1. 69	0. 00	50	6. 25	7. 5	99. 64	0. 004 7	S
	145 ×300	83. 03	909	1. 13	0. 00	75	6. 25	7. 5	83. 38	0. 003 4	S
文献[15]	144 ×500	66. 00	580	2. 20	0. 00	36	6. 00	0. 0	94. 00	0. 003 9	S
	144 ×500	92. 00	580	2. 20	0. 00	36	6. 00	0. 0	113. 00	0. 003 4	S
	144 ×500	92. 00	588	1. 10	0. 00	51	5. 00	0. 0	112. 00	0. 002 5	S
	144 ×500	112. 00	580	4. 30	0. 00	18	6. 00	0. 0	140. 00	0. 004 9	S
	144 ×500	112. 00	580	2. 20	0. 00	36	6. 00	0. 0	127. 00	0. 002 8	S
	144 ×500	112. 00	580	2. 20	0. 00	36	6. 00	0. 0	126. 00	0. 002 9	S
	144 ×500	112. 00	580	2. 20	0. 00	36	6. 00	0. 0	131. 00	0. 003 4	S
	144 ×500	112. 00	580	2. 20	0. 00	36	6. 00	0. 0	121. 00	0. 002 8	S
	144 ×500	112. 00	580	2. 20	0. 00	36	6. 00	0. 0	125. 00	0. 003 3	S
	144 ×500	112. 00	580	2. 20	0. 00	36	6. 00	0. 0	127. 00	0. 003 8	S
	144 ×500	112. 00	588	1. 10	0. 00	51	5. 00	0. 0	127. 00	0. 002 7	S
文献[16]	300 ×1 000	54. 43	462	1. 44	1. 00	70	9. 52	15. 0	75. 79	0. 002 3	S
	300 ×1 000	54. 43	462	2. 88	1. 00	35	9. 52	15. 0	88. 19	0. 003 1	S
	300 ×1 000	55. 12	462	1. 44	2. 50	70	9. 52	15. 0	75. 10	0. 002 9	S
	300 ×1 000	55. 12	462	2. 88	2. 50	35	9. 52	15. 0	82. 33	0. 004 1	S
	300 ×1 000	55. 12	462	1. 44	4. 00	70	9. 52	15. 0	73. 72	0. 002 1	S
	300 ×1 000	55. 12	462	2. 88	4. 00	35	9. 52	15. 0	88. 19	0. 003 3	S
	300 ×1 000	79. 92	434	1. 44	2. 50	70	9. 52	15. 0	80. 61	0. 002 8	S
	300 ×1 000	81. 30	434	1. 44	4. 00	70	9. 52	15. 0	93. 01	0. 002 6	S
	300 ×1 000	110. 24	462	2. 02	1. 00	50	9. 52	15. 0	128. 84	0. 003 3	S
	300 ×1 000	110. 24	462	4. 05	1. 00	25	9. 52	15. 0	141. 24	0. 003 6	S
	300 ×1 000	110. 24	462	2. 02	2. 50	50	9. 52	15. 0	130. 22	0. 002 5	S
	300 ×1 000	110. 24	462	4. 05	2. 50	25	9. 52	15. 0	139. 87	0. 003 4	S
	300 ×1 000	110. 24	462	1. 98	4. 00	50	9. 52	15. 0	124. 71	0. 002 9	S
	300 ×1 000	110. 24	462	3. 96	4. 00	25	9. 52	15. 0	141. 93	0. 004 1	S

续表 3

引用文献	$(D\times H)$/mm	f_c/MPa	f_{sy}/MPa	ρ_{sv}/%	ρ_s/%	s/mm	d_{sv}/mm	c/mm	f_{cc}/MPa	ε_{cc}	箍筋形式
	225 ×900	104. 73	434	3. 67	2. 00	38	9. 52	12. 5	109. 55	0. 003 3	S
	225 ×900	103. 35	434	3. 67	3. 00	38	9. 52	12. 5	115. 75	0. 003 8	S
	225 ×900	100. 59	434	3. 67	4. 00	38	9. 52	12. 5	116. 44	0. 003 3	S
	225 ×900	104. 04	434	3. 64	2. 00	70	9. 52	12. 5	109. 55	0. 003 4	S
文献[16]	225 ×900	104. 04	434	7. 27	2. 00	60	12. 70	12. 5	138. 49	0. 004 2	S
	225 ×900	104. 04	434	3. 64	3. 00	70	12. 70	12. 5	112. 31	0. 003 2	S
	225 ×900	104. 04	434	7. 27	3. 00	60	12. 70	12. 5	138. 49	0. 005 1	S
	225 ×900	104. 73	434	3. 64	4. 00	70	12. 70	12. 5	108. 86	0. 003 0	S
	225 ×900	104. 73	434	7. 27	4. 00	60	12. 70	12. 5	143. 31	0. 006 9	S
	240 ×720	35. 20	1 318	1. 68	1. 50	35	6. 40	0. 0	115. 60	0. 040 6	S
	240 ×720	35. 20	1 318	1. 10	1. 50	53	6. 40	0. 0	83. 80	0. 031 8	S
	240 ×720	35. 20	1 318	0. 84	1. 50	70	6. 40	0. 0	71. 10	0. 027 0	S
	240 ×720	52. 00	1 318	2. 94	1. 50	20	6. 40	0. 0	126. 00	0. 026 6	S
	240 ×720	52. 00	1 318	1. 67	1. 50	35	6. 40	0. 0	87. 50	0. 020 4	S
	240 ×720	52. 00	1 318	1. 17	1. 50	50	6. 40	0. 0	68. 50	0. 012 9	S
	240 ×720	63. 00	445	2. 69	1. 50	20	6. 00	0. 0	93. 00	0. 005 2	S
	240 ×720	63. 00	445	1. 54	1. 50	35	6. 00	0. 0	78. 00	0. 004 5	S
文献[17]	240 ×720	63. 00	445	1. 08	1. 50	50	6. 00	0. 0	74. 70	0. 003 3	S
	240 ×720	63. 00	445	0. 83	1. 50	65	6. 00	0. 0	70. 60	0. 003 8	S
	240 ×720	72. 30	445	2. 69	1. 50	20	6. 00	0. 0	108. 80	0. 010 2	S
	240 ×720	72. 30	445	1. 54	1. 50	35	6. 00	0. 0	92. 70	0. 005 3	S
	240 ×720	72. 30	445	1. 08	1. 50	50	6. 00	0. 0	85. 00	0. 004 2	S
	240 ×720	72. 30	445	0. 83	1. 50	65	6. 00	0. 0	73. 80	0. 003 0	S
	145 ×300	82. 50	1 318	2. 94	1. 50	20	6. 40	0. 0	146. 50	0. 014 1	S
	145 ×300	82. 50	1 318	1. 67	1. 50	35	6. 40	0. 0	106. 80	0. 009 7	S
	145 ×300	82. 50	1 318	1. 17	1. 50	50	6. 40	0. 0	92. 30	0. 005 5	S
	500 ×1 500	28. 00	310	1. 99	1. 60	52	12. 00	20. 0	50. 00	0. 006 4	S
	500 ×1 500	31. 00	340	1. 99	1. 60	52	12. 00	20. 0	49. 00	0. 005 8	S
	500 ×1 500	33. 00	340	1. 99	1. 60	52	12. 00	20. 0	54. 00	0. 004 5	S
	500 ×1 500	28. 00	340	2. 52	1. 60	41	12. 00	20. 0	46. 00	0. 005 8	S
	500 ×1 500	28. 00	340	1. 50	1. 60	69	12. 00	20. 0	38. 00	0. 008 0	S
	500 ×1 500	28. 00	340	1. 00	1. 60	103	12. 00	20. 0	36. 00	0. 003 3	S
	500 ×1 500	28. 00	320	0. 60	1. 60	119	10. 00	20. 0	47. 00	0. 006 5	S
文献[2]	500 ×1 500	28. 00	320	1. 98	1. 60	36	10. 00	20. 0	40. 00	0. 004 0	S
	500 ×1 500	28. 00	307	1. 97	1. 60	93	16. 00	20. 0	46. 00	0. 005 0	S
	500 ×1 500	27. 00	340	1. 99	4. 80	52	12. 00	20. 0	51. 00	0. 007 3	S
	500 ×1 500	31. 00	340	1. 99	3. 30	52	12. 00	20. 0	48. 00	0. 004 2	S
	500 ×1 500	27. 00	340	1. 99	3. 30	52	12. 00	20. 0	52. 00	0. 005 4	S
	500 ×1 500	27. 00	340	1. 99	3. 20	52	12. 00	20. 0	52. 00	0. 005 6	S
	500 ×1 500	31. 00	340	1. 99	3. 20	52	12. 00	20. 0	52. 00	0. 005 7	S
	500 ×1 500	31. 00	340	1. 99	2. 34	52	12. 00	20. 0	47. 00	0. 005 8	S
	150 ×300	148. 00	360	2. 10	2. 60	35	6. 00	5. 0	158. 60	0. 003 7	S
	150 ×300	151. 00	360	2. 10	2. 60	35	6. 00	5. 0	155. 90	0. 004 3	S
	150 ×300	158. 00	360	1. 40	2. 60	50	6. 00	5. 0	136. 50	0. 003 9	S
文献[8]	150 ×300	152. 00	360	1. 40	2. 60	50	6. 00	5. 0	134. 10	0. 003 6	S
	150 ×300	143. 00	360	1. 20	2. 60	60	6. 00	5. 0	145. 40	0. 004 1	S
	150 ×300	148. 00	360	1. 20	2. 60	60	6. 00	5. 0	156. 80	0. 003 7	S
	150 ×300	151. 00	360	1. 20	2. 60	60	6. 00	5. 0	148. 70	0. 003 1	S

续表 3

引用文献	$(D\times H)$/mm	f_c/MPa	f_{sy}/MPa	ρ_{sv}/%	ρ_s/%	s/mm	d_{sv}/mm	c/mm	f_{cc}/MPa	ε_{cc}	箍筋形式
文献[8]	150 ×300	144.00	360	1.00	2.60	70	6.00	5.0	146.20	0.003 7	S
	150 ×300	148.00	360	0.80	2.60	90	6.00	5.0	149.00	0.003 6	S
	150 ×300	120.00	360	1.40	2.60	50	6.00	5.0	128.70	0.004 3	S
	150 ×300	126.00	360	1.40	2.60	50	6.00	5.0	140.20	0.003 1	S
	150 ×300	126.00	360	1.20	2.60	60	6.00	5.0	135.10	0.003 2	S
	150 ×300	126.00	360	1.00	2.60	70	6.00	5.0	125.00	0.003 8	S
	150 ×300	124.00	360	1.00	2.60	70	6.00	5.0	127.20	0.003 6	S
	150 ×300	146.00	360	2.10	2.60	35	6.00	5.0	159.00	0.004 6	S
	150 ×300	148.00	360	2.10	2.60	35	6.00	5.0	161.30	0.003 4	S
	150 ×300	144.00	360	1.40	2.60	50	6.00	5.0	158.40	0.004 5	S
	150 ×300	146.00	360	1.40	2.60	50	6.00	5.0	148.60	0.003 4	S
	150 ×300	146.00	360	1.20	2.60	60	6.00	5.0	148.90	0.003 7	S
	150 ×300	146.00	360	1.00	2.60	70	6.00	5.0	133.50	0.003 6	S
	150 ×300	148.00	360	1.00	2.60	70	6.00	5.0	149.10	0.003 1	S
文献[18]	300 ×1 500	35.90	452	2.38	3.21	56	11.30	0.0	51.87	0.013 3	H
	300 ×1 500	35.90	452	1.75	3.21	76	11.30	0.0	48.52	0.017 9	H
	300 ×1 500	35.90	452	1.19	3.21	112	11.30	0.0	41.50	0.003 6	H
	300 ×1 500	35.90	452	0.88	3.21	152	11.30	0.0	43.03	0.003 0	H
	300 ×1 500	35.90	607	1.89	3.21	56	10.10	0.0	44.55	0.004 2	H
	300 ×1 500	35.90	607	1.39	3.21	76	10.10	0.0	47.91	0.003 5	H
	300 ×1 500	35.90	607	0.95	3.21	112	10.10	0.0	46.69	0.003 5	H
	300 ×1 500	35.90	593	0.60	3.21	56	5.70	0.0	46.08	0.004 8	H
	300 ×1 500	35.50	452	2.55	4.13	79	11.30	0.0	42.85	0.025 1	H
	300 ×1 500	35.50	452	1.85	4.13	109	11.30	0.0	38.92	0.003 5	H
	300 ×1 500	35.50	607	4.91	4.13	41	11.30	0.0	49.79	0.034 3	H
	300 ×1 500	35.50	607	3.02	4.13	53	10.10	0.0	46.47	0.032 8	H
	300 ×1 500	35.50	607	2.03	4.13	79	10.10	0.0	43.84	0.003 5	H
	300 ×1 500	35.50	607	1.47	4.13	109	10.10	0.0	36.51	0.003 5	H
	300 ×1 500	35.50	593	1.23	4.13	41	5.70	0.0	41.34	0.015 6	H
	300 ×1 500	35.50	593	0.95	4.13	53	5.70	0.0	41.04	0.005 5	H
	300 ×1 500	34.50	607	3.36	4.08	64	10.10	0.0	45.98	0.023 5	H
	300 ×1 500	34.50	629	1.32	4.08	64	6.40	0.0	40.34	0.003 6	H
	300 ×1 500	34.90	629	1.32	4.08	64	6.40	0.0	38.86	0.003 6	H
	300 ×1 500	34.90	629	0.98	4.08	86	6.40	0.0	35.89	0.003 7	H
	300 ×1 500	34.90	629	1.96	4.08	43	6.40	0.0	45.98	0.025 4	H
	300 ×1 500	34.90	629	1.96	4.08	43	6.40	0.0	44.79	0.018 8	H
	300 ×1 500	34.90	629	1.96	4.08	43	6.40	0.0	45.98	0.028 4	H
	300 ×1 500	34.90	605	1.01	4.08	43	4.80	0.0	40.64	0.003 4	H
文献[19]	300 ×750	53.51	515	1.45	1.83	55	8.00	20.0	74.50	0.003 8	S
	300 ×750	53.51	515	1.00	1.83	80	8.00	20.0	75.20	0.003 4	S
	300 ×750	53.51	515	0.73	1.83	110	8.00	20.0	82.31	0.004 0	S
	300 ×750	53.51	515	0.50	1.83	160	8.00	20.0	79.94	0.004 6	S
	300 ×500	53.51	515	1.45	1.83	55	8.00	20.0	76.88	0.002 8	S
	300 ×1 000	53.51	515	1.45	1.83	55	8.00	20.0	85.34	0.004 0	S
	300 ×750	63.62	515	1.45	1.83	55	8.00	20.0	100.23	0.004 5	S
	300 ×750	63.62	515	1.00	1.83	80	8.00	20.0	97.20	0.003 8	S
	300 ×750	63.62	515	0.73	1.83	110	8.00	20.0	96.18	0.008 4	S
	300 ×750	63.62	515	0.50	1.83	160	8.00	20.0	95.85	0.003 4	S

续表 3

引用文献	$(D\times H)$/mm	f_c/MPa	f_{sy}/MPa	ρ_{sv}/%	ρ_s/%	s/mm	d_{sv}/mm	c/mm	f_{cc}/MPa	ε_{cc}	箍筋形式
文献[19]	300 ×500	63. 62	515	1. 45	1. 83	55	8. 00	20. 0	90. 74	0. 003 7	S
	300 ×1 000	63. 62	515	1. 45	1. 83	55	8. 00	20. 0	103. 29	0. 004 2	S
	300 ×750	74. 29	515	1. 45	1. 83	55	8. 00	20. 0	114. 09	0. 006 1	S
	300 ×750	74. 29	515	1. 00	1. 83	80	8. 00	20. 0	109. 71	0. 003 2	S
	300 ×750	74. 29	515	0. 73	1. 83	110	8. 00	20. 0	114. 46	0. 004 0	S
	300 ×750	74. 29	515	0. 50	1. 83	160	8. 00	20. 0	112. 09	0. 005 5	S
	300 ×500	74. 29	515	1. 45	1. 83	55	8. 00	20. 0	109. 02	0. 004 1	S
	300 ×1 000	74. 29	515	1. 45	1. 83	55	8. 00	20. 0	118. 84	0. 004 5	S
文献[20]	200 ×600	19. 60	390	1. 89	1. 44	150	12. 00	25. 0	30. 70	0. 003 1	H
	200 ×600	19. 60	390	3. 78	1. 44	75	12. 00	25. 0	34. 10	0. 003 1	H
	200 ×600	39. 50	500	0. 84	1. 14	150	8. 00	25. 0	50. 00	0. 002 4	H
	200 ×600	39. 50	296	0. 84	1. 14	150	8. 00	25. 0	41. 90	0. 002 6	H
	200 ×600	39. 50	390	1. 89	1. 14	150	12. 00	25. 0	48. 80	0. 002 3	H
	200 ×600	39. 50	390	1. 89	2. 88	150	12. 00	25. 0	50. 40	0. 002 9	H
	200 ×600	34. 13	500	0. 84	1. 44	150	8. 00	25. 0	30. 50	0. 003 0	H
	200 ×600	34. 13	390	1. 89	1. 44	150	12. 00	25. 0	30. 70	0. 003 1	H
	200 ×600	34. 13	390	3. 78	1. 44	75	12. 00	25. 0	34. 10	0. 003 1	H
	200 ×600	62. 70	500	0. 84	1. 44	150	8. 00	25. 0	67. 70	0. 002 3	H
	200 ×600	62. 70	296	0. 84	1. 44	150	8. 00	25. 0	57. 80	0. 002 3	H
	200 ×600	62. 70	390	1. 89	1. 44	150	12. 00	25. 0	72. 50	0. 002 5	H
	200 ×600	62. 70	390	3. 78	1. 44	75	12. 00	25. 0	68. 80	0. 002 3	H
	265 ×768	32. 70	451	1. 26	0. 29	27	8. 00	5. 0	43. 20	0. 000 6	H
	265 ×768	32. 70	451	1. 26	0. 29	27	8. 00	5. 0	44. 05	0. 000 6	H
	384 ×1 152	32. 70	451	2. 90	0. 29	40	12. 00	5. 0	54. 43	0. 001 7	H
	384 ×1 152	32. 70	451	2. 90	0. 29	40	12. 00	5. 0	53. 78	0. 001 7	H
	265 ×768	32. 70	478	1. 26	0. 29	60	8. 00	5. 0	39. 49	0. 000 5	H
	265 ×768	32. 70	478	1. 26	0. 29	60	8. 00	5. 0	38. 77	0. 000 5	H
	384 ×1 152	32. 70	478	2. 90	0. 29	90	12. 00	5. 0	52. 53	0. 001 6	H
	384 ×1 152	32. 70	478	2. 90	0. 29	90	12. 00	5. 0	52. 09	0. 001 5	H
文献[21]	500 ×1 500	45. 60	424	2. 12	1. 23	50	12. 00	30. 0	64. 90	0. 005 9	S
	500 ×1 500	41. 30	424	2. 12	1. 23	50	12. 00	30. 0	74. 00	0. 003 7	S
	500 ×1 500	43. 60	424	1. 42	1. 23	75	12. 00	30. 0	64. 30	0. 004 2	S
	500 ×1 500	41. 10	424	1. 06	1. 23	100	12. 00	30. 0	60. 20	0. 003 4	S
	500 ×1 500	43. 50	502	0. 73	1. 23	100	10. 00	30. 0	58. 20	0. 003 3	S
	500 ×1 500	43. 50	502	2. 43	1. 23	30	10. 00	30. 0	68. 00	0. 006 1	S
	500 ×1 500	43. 50	440	1. 92	1. 23	100	16. 00	30. 0	71. 40	0. 003 5	S
	500 ×1 500	41. 30	424	2. 12	2. 00	50	12. 00	30. 0	72. 10	0. 003 2	S
	500 ×1 500	45. 60	424	2. 12	2. 75	50	12. 00	30. 0	71. 70	0. 004 1	S
	500 ×1 500	43. 60	424	2. 12	2. 56	50	12. 00	30. 0	68. 00	0. 003 1	S
	500 ×1 500	43. 60	424	2. 12	2. 56	50	12. 00	30. 0	69. 50	0. 003 7	S
	500 ×1 500	43. 60	424	2. 12	2. 46	50	12. 00	30. 0	72. 80	0. 005 5	S
	500 ×1 500	45. 60	424	2. 12	3. 69	50	12. 00	30. 0	74. 70	0. 004 3	S
	500 ×1 500	36. 30	424	1. 42	1. 23	75	12. 00	30. 0	60. 70	0. 003 0	S
	500 ×1 500	36. 30	424	1. 06	1. 23	100	12. 00	30. 0	59. 10	0. 003 2	S
	500 ×1 500	36. 50	424	0. 73	1. 23	100	10. 00	30. 0	58. 30	0. 003 0	S
	500 ×1 500	39. 00	502	2. 43	1. 23	30	10. 00	30. 0	63. 90	0. 003 1	S
	500 ×1 500	39. 40	502	1. 92	1. 23	100	16. 00	30. 0	59. 40	0. 003 8	S
	500 ×1 500	39. 90	440	2. 12	2. 00	50	12. 00	30. 0	71. 50	0. 003 7	S

续表 3

引用文献	$(D\times H)$/mm	f_c/MPa	f_{sy}/MPa	ρ_{sv}/%	ρ_s/%	s/mm	d_{sv}/mm	c/mm	f_{cc}/MPa	ε_{cc}	箍筋形式
文献[21]	500 ×1 500	36.50	424	2.12	2.46	50	12.00	30.0	71.10	0.003 9	S
	500 ×1 500	43.50	424	2.12	2.56	50	12.00	30.0	59.40	0.003 2	S
	500 ×1 500	39.90	424	2.12	2.75	50	12.00	30.0	75.90	0.004 2	S
	500 ×1 500	39.40	424	2.12	3.69	50	12.00	30.0	65.50	0.003 0	S
	500 ×1 500	37.50	424	2.12	2.56	50	12.00	30.0	64.10	0.003 6	S
文献[22]	250 ×750	76.04	541	1.34	1.09	60	8.00	0.0	105.37	0.003 2	S
	250 ×750	76.29	541	1.34	2.15	60	8.00	0.0	105.68	0.003 1	S
	250 ×750	76.83	541	1.34	3.56	60	8.00	0.0	116.50	0.002 6	S
	250 ×750	76.86	541	1.34	2.15	60	8.00	0.0	85.24	0.002 0	S
	250 ×750	76.87	541	1.34	2.15	60	8.00	0.0	108.30	0.002 9	S
	250 ×750	76.90	541	1.34	2.15	60	8.00	0.0	98.30	0.002 0	S
	250 ×750	76.93	541	1.34	2.15	60	8.00	0.0	93.98	0.001 9	S
	300 ×900	81.02	541	1.34	1.12	50	8.00	0.0	89.20	0.002 7	S
	300 ×900	81.18	541	1.34	2.00	50	8.00	0.0	94.55	0.002 6	S
	300 ×900	81.24	541	1.34	2.00	50	8.00	0.0	70.19	0.002 6	S
	300 ×900	81.29	541	1.34	2.00	50	8.00	0.0	101.45	0.002 1	S
	300 ×900	81.43	541	1.34	2.00	50	8.00	0.0	99.24	0.002 0	S
	300 ×900	81.47	541	1.34	2.00	50	8.00	0.0	94.29	0.002 0	S
	300 ×900	81.68	541	1.34	3.13	50	8.00	0.0	82.98	0.003 0	S

表 4 箍筋约束混凝土矩形柱试验数据

Tab. 4 Experimental results of square concrete columns confined by stirrups

引用文献	试件尺寸/mm	f_c/MPa	f_{sy}/MPa	ρ_{sv}/%	ρ_s/%	s/mm	d_{sv}/mm	c/mm	f_{cc}/MPa	ε_{cc}	箍筋形式
文献[15]	235 ×235 ×1 400	75.90	715	4.90	3.60	50	9.5	20	111.86	0.015 6	D
	235 ×235 ×1 400	67.90	680	4.80	3.60	50	7.9	20	103.27	0.015 5	C
	235 ×235 ×1 400	52.60	715	4.90	3.60	50	9.5	20	93.55	0.032 1	D
	235 ×235 ×1 400	55.60	680	4.80	3.60	50	7.9	20	93.44	0.028 7	C
	235 ×235 ×1 400	95.40	410	2.80	2.20	50	9.5	20	106.51	0.003 3	A
	235 ×235 ×1 400	95.40	392	3.40	2.20	50	7.9	20	110.81	0.004 8	D
	235 ×235 ×1 400	95.40	392	3.60	2.20	50	7.9	20	106.92	0.004 7	B
	235 ×235 ×1 400	100.40	392	4.80	2.20	50	7.9	20	118.61	0.005 7	C
	235 ×235 ×1 400	100.40	392	4.80	2.20	50	7.9	20	131.29	0.006 0	C
	235 ×235 ×1 400	96.40	392	2.00	2.20	50	7.9	20	96.30	0.003 4	A
	235 ×235 ×1 400	96.40	414	2.20	2.20	50	6.4	20	95.42	0.003 5	D
	235 ×235 ×1 400	96.40	414	2.30	2.20	50	6.4	20	102.56	0.003 6	B
	235 ×235 ×1 400	96.40	414	3.10	2.20	50	6.4	20	101.97	0.004 0	C
	235 ×235 ×1 400	98.10	410	1.40	2.20	100	9.5	20	87.13	0.003 4	A
	235 ×235 ×1 400	98.10	410	2.50	2.20	100	9.5	20	92.30	0.003 4	D
	235 ×235 ×1 400	98.10	410	2.60	2.20	100	9.5	20	96.45	0.003 5	B
	235 ×235 ×1 400	98.10	410	3.50	2.20	100	9.5	20	99.74	0.004 6	C
	235 ×235 ×1 400	93.10	410	2.80	3.60	50	9.5	20	100.75	0.003 3	A
	235 ×235 ×1 400	93.10	392	3.40	3.60	50	7.9	20	105.78	0.004 7	D
	235 ×235 ×1 400	93.10	392	3.60	3.60	50	7.9	20	108.78	0.004 7	B
	235 ×235 ×1 400	93.10	392	4.80	3.60	50	7.9	20	114.72	0.006 4	C
	235 ×235 ×1 400	99.90	705	2.80	3.60	50	9.5	20	104.04	0.003 4	A
	235 ×235 ×1 400	99.90	770	3.40	3.60	50	7.9	20	107.87	0.004 7	D
	235 ×235 ×1 400	99.90	770	3.60	3.60	50	7.9	20	113.46	0.006 8	B
	235 ×235 ×1 400	99.90	770	4.80	3.60	50	7.9	20	131.69	0.009 7	C
	235 ×235 ×1 400	115.90	715	4.90	3.60	50	9.5	20	128.33	0.009 6	D

续表 4

引用文献	试件尺寸/mm	f_c/MPa	f_{sy}/MPa	ρ_{sv}/%	ρ_s/%	s/mm	d_{sv}/mm	c/mm	f_{cc}/MPa	ε_{cc}	箍筋形式
文献[15]	235 ×235 ×1 400	113.60	680	4.80	3.60	50	7.9	20	130.15	0.008 9	C
	600 ×600 ×2 700	31.20	249	0.65	3.37	172	8.0	30	31.10	0.001 6	F
	400 ×400 ×1 800	32.00	249	0.65	5.87	144	6.0	20	32.40	0.002 4	F
	200 ×200 ×900	31.10	249	0.65	3.10	72	3.0	10	36.50	0.002 4	F
	200 ×200 ×900	31.10	249	0.65	3.10	72	3.0	10	45.60	0.002 4	F
	600 ×600 ×1 800	31.20	249	0.65	3.37	114	6.5	30	41.20	0.001 6	F
	400 ×400 ×1 200	32.00	249	0.65	4.85	96	4.9	20	49.80	0.002 3	F
	200 ×200 ×600	31.10	249	0.65	3.10	72	3.0	10	47.20	0.002 3	F
	200 ×200 ×600	31.10	249	0.65	3.10	72	3.0	10	46.20	0.002 9	F
	600 ×600 ×2 700	28.50	249	0.65	2.15	172	8.0	30	37.90	0.001 6	F
	400 ×400 ×1 800	29.10	249	0.65	3.10	144	6.0	20	38.30	0.001 6	F
	200 ×200 ×900	28.30	249	0.65	1.75	72	3.0	10	46.30	0.002 4	F
	200 ×200 ×900	28.30	249	0.65	1.75	72	3.0	10	50.50	0.002 4	F
	600 ×600 ×2 700	31.20	249	0.94	3.37	172	9.6	30	38.20	0.002 4	F
文献[17]	400 ×400 ×1 800	32.00	249	0.94	5.87	144	7.2	20	34.90	0.003 0	F
	200 ×200 ×900	31.10	249	0.94	3.10	72	3.6	10	49.20	0.003 0	F
	200 ×200 ×900	31.10	249	0.94	3.10	72	3.6	10	49.10	0.003 0	F
	600 ×600 ×2 700	31.20	249	1.31	3.37	172	11.4	40	39.20	0.001 7	F
	400 ×400 ×1 800	32.00	249	1.31	5.87	144	8.5	30	41.30	0.003 5	F
	200 ×200 ×900	31.10	249	1.31	3.10	72	4.2	20	46.90	0.002 8	F
	800 ×800 ×2 400	54.81	249	1.20	1.50	200	13.5	40	60.90	0.002 9	F
	800 ×800 ×2 400	54.81	249	1.20	1.50	200	13.5	40	60.00	0.002 7	F
	600 ×600 ×1 800	54.81	249	1.20	1.50	170	10.8	30	66.20	0.002 9	F
	600 ×600 ×1 800	54.81	249	1.20	1.50	170	10.8	30	66.60	0.002 7	F
	400 ×400 ×1 200	54.81	249	1.20	1.50	145	8.2	20	68.40	0.002 7	F
	400 ×400 ×1 200	54.81	249	1.20	1.50	145	8.2	20	64.20	0.002 9	F
	200 ×200 ×600	54.81	249	1.20	1.50	85	6.0	10	69.10	0.002 6	F
	200 ×200 ×600	54.81	249	1.20	1.50	85	6.0	10	67.80	0.004 5	F
文献[23]	240 ×240 ×720	26.00	445	1.54	2.29	90	10.0	20	34.49	0.004 3	A
	240 ×240 ×720	24.50	510	1.30	2.36	100	8.0	20	31.47	0.004 1	B
	240 ×240 ×720	26.50	510	1.33	2.25	130	8.0	20	35.35	0.004 5	C
	240 ×240 ×720	22.50	510	1.35	2.25	150	8.0	20	29.77	0.004 4	C
	240 ×240 ×720	25.50	510	1.30	2.25	120	8.0	20	33.86	0.004 4	E
	240 ×240 ×720	23.00	510	1.35	2.65	150	8.0	20	26.88	0.003 6	C
	240 ×240 ×720	44.50	510	2.17	2.29	40	8.0	20	56.12	0.003 7	A
	240 ×240 ×720	45.00	510	2.25	2.25	90	8.0	20	62.00	0.004 1	C
	240 ×240 ×720	49.00	510	2.24	2.25	70	8.0	20	66.94	0.004 7	E
	240 ×240 ×720	47.00	510	2.17	2.76	60	8.0	20	57.12	0.003 6	B
	240 ×240 ×720	44.00	510	1.74	2.29	50	8.0	20	51.30	0.004 8	A
	240 ×240 ×720	49.50	510	1.74	2.36	75	8.0	20	60.33	0.004 4	B
	240 ×240 ×720	44.50	510	1.76	2.25	115	8.0	20	54.96	0.004 2	C
	240 ×240 ×720	47.00	445	3.08	2.29	45	10.0	20	65.96	0.004 8	A
	240 ×240 ×720	48.00	445	2.97	2.36	70	10.0	20	72.89	0.003 9	B
	240 ×240 ×720	50.00	510	2.70	2.25	75	8.0	20	80.22	0.004 3	C
	240 ×240 ×720	44.50	500	1.74	3.14	50	8.0	20	43.16	0.003 9	A
	240 ×240 ×720	49.50	500	1.76	3.29	115	8.0	20	36.34	0.004 2	B
	240 ×240 ×720	87.50	440	3.20	3.32	65	10.0	20	86.47	0.004 9	C
	240 ×240 ×720	87.00	440	3.16	3.32	75	10.0	20	88.70	0.004 6	D

续表 4

引用文献	试件尺寸/mm	f_c/MPa	f_{sy}/MPa	ρ_{sv}/%	ρ_s/%	s/mm	d_{sv}/mm	c/mm	f_{cc}/MPa	ε_{cc}	箍筋形式
	240 ×240 ×720	86. 70	500	2. 70	3. 29	75	8. 0	20	83. 03	0. 004 8	C
	240 ×240 ×720	86. 50	500	2. 85	3. 29	55	8. 0	20	86. 01	0. 004 9	E
	240 ×240 ×720	44. 50	500	2. 17	3. 14	40	8. 0	20	47. 31	0. 003 7	A
	240 ×240 ×720	45. 00	500	2. 25	3. 29	90	8. 0	20	52. 27	0. 004 6	C
	240 ×240 ×720	86. 00	440	4. 16	3. 32	50	10. 0	20	91. 55	0. 004 4	B
	240 ×240 ×720	86. 90	330	3. 70	3. 32	50	9. 5	20	86. 67	0. 004 5	B
	240 ×240 ×720	87. 50	440	3. 95	3. 32	60	10. 0	20	92. 04	0. 004 8	D
	240 ×240 ×720	86. 30	330	3. 51	3. 32	60	9. 5	20	89. 59	0. 003 3	D
文献[23]	240 ×240 ×720	86. 80	440	4. 05	3. 29	80	10. 0	20	92. 40	0. 004 9	B
	240 ×240 ×720	86. 50	500	3. 37	3. 29	60	8. 0	20	89. 05	0. 005 9	B
	240 ×240 ×720	85. 90	440	4. 18	3. 29	60	10. 0	20	90. 85	0. 006 9	E
	240 ×240 ×720	47. 00	440	3. 08	3. 14	45	10. 0	20	53. 45	0. 004 8	A
	240 ×240 ×720	50. 00	500	2. 70	3. 29	75	8. 0	20	59. 98	0. 005 8	C
	240 ×240 ×720	86. 30	440	4. 63	3. 32	45	10. 0	20	93. 97	0. 006 5	B
	240 ×240 ×720	85. 80	440	4. 74	3. 32	50	10. 0	20	92. 09	0. 007 2	D
	240 ×240 ×720	86. 00	440	4. 98	3. 29	65	10. 0	20	93. 10	0. 009 1	C
	240 ×240 ×720	86. 70	440	5. 01	3. 29	50	10. 0	20	91. 45	0. 007 9	E
	240 ×240 ×720	38. 30	476	1. 91	2. 05	60	8. 0	5	56. 60	0. 002 8	D
	240 ×240 ×720	38. 30	476	1. 91	1. 97	70	8. 0	5	54. 22	0. 004 6	C
	240 ×240 ×720	38. 30	642	1. 91	2. 05	60	8. 0	5	57. 91	0. 004 4	D
	240 ×240 ×720	38. 30	642	1. 91	1. 97	70	8. 0	5	58. 31	0. 005 4	C
文献[17]	240 ×240 ×720	38. 30	642	1. 28	2. 05	90	8. 0	5	54. 44	0. 003 2	D
	240 ×240 ×720	38. 30	642	1. 28	1. 97	105	8. 0	5	55. 29	0. 003 6	C
	240 ×240 ×720	38. 30	642	1. 91	1. 31	60	8. 0	5	54. 82	0. 005 0	D
	240 ×240 ×720	38. 30	642	1. 28	1. 97	105	8. 0	5	50. 07	0. 003 2	C
	240 ×240 ×720	38. 30	642	1. 91	1. 97	70	8. 0	5	59. 40	0. 008 1	C
	250 ×250 ×1 500	124. 00	400	3. 33	1. 64	55	11. 3	10	126. 28	0. 003 2	A
	250 ×250 ×1 500	124. 00	570	2. 16	3. 28	55	6. 5	10	132. 07	0. 004 0	B
	250 ×250 ×1 500	124. 00	570	2. 16	4. 90	55	6. 5	10	144. 50	0. 003 3	C
	250 ×250 ×1 500	124. 00	1 000	2. 17	3. 28	55	7. 5	10	133. 94	0. 004 0	B
	250 ×250 ×1 500	124. 00	1 000	1. 32	4. 91	120	7. 5	10	138. 35	0. 003 0	C
	250 ×250 ×1 500	124. 00	400	3. 06	4. 91	120	11. 3	10	150. 05	0. 003 7	C
	250 ×250 ×1 500	81. 00	400	4. 59	1. 64	40	11. 3	10	101. 53	0. 003 3	A
	250 ×250 ×1 500	81. 00	400	3. 33	1. 64	55	11. 3	10	90. 28	0. 003 3	A
	250 ×250 ×1 500	92. 00	570	2. 16	3. 28	55	6. 5	10	97. 57	0. 006 7	B
文献[24]	250 ×250 ×1 500	92. 00	570	2. 16	4. 91	55	6. 5	10	111. 33	0. 003 0	C
	250 ×250 ×1 500	81. 00	1 000	2. 18	3. 28	55	7. 5	10	106. 98	0. 003 5	B
	250 ×250 ×1 500	81. 00	1 000	1. 87	4. 91	85	7. 5	10	112. 67	0. 003 3	C
	250 ×250 ×1 500	81. 00	400	1. 40	4. 91	85	6. 5	10	94. 35	0. 002 8	C
	250 ×250 ×1 500	92. 00	400	3. 24	3. 28	85	11. 3	10	115. 74	0. 004 8	B
	250 ×250 ×1 500	92. 00	400	4. 32	4. 91	85	11. 3	10	123. 58	0. 007 0	C
	250 ×250 ×1 500	60. 00	1 000	1. 40	3. 28	85	7. 5	10	80. 33	0. 003 5	B
	250 ×250 ×1 500	60. 00	1 000	1. 32	4. 91	120	7. 5	10	89. 63	0. 003 8	C
	250 ×250 ×1 500	60. 00	400	3. 24	3. 28	85	11. 3	10	85. 22	0. 003 5	B
	250 ×250 ×1 500	60. 00	400	3. 06	4. 91	120	11. 3	10	88. 77	0. 004 3	C
	600 ×600 ×1 800	54. 81	454	0. 65	1. 50	170	8. 0	30	56. 19	0. 002 4	F
文献[25]	600 ×600 ×1 800	54. 81	454	0. 65	1. 50	170	8. 0	30	62. 25	0. 002 1	F
	400 ×400 ×1 200	54. 81	541	0. 65	1. 50	145	6. 0	20	56. 49	0. 002 8	F

续表 4

引用文献	试件尺寸/mm	f_c/MPa	f_{sy}/MPa	ρ_{sv}/%	ρ_s/%	s/mm	d_{sv}/mm	c/mm	f_{cc}/MPa	ε_{cc}	箍筋形式
文献[25]	400 ×400 ×1 200	54. 81	541	0. 65	1. 50	145	6. 0	20	64. 60	0. 002 7	F
	200 ×200 ×600	54. 81	433	0. 65	1. 50	85	4. 0	10	54. 47	0. 002 9	C
	200 ×200 ×600	54. 81	433	0. 65	1. 50	85	4. 0	10	52. 53	0. 003 2	C
	600 ×600 ×1 800	54. 81	454	1. 20	1. 50	145	10. 0	30	66. 17	0. 003 0	F
	600 ×600 ×1 800	54. 81	454	1. 20	1. 50	145	10. 0	30	66. 64	0. 002 7	F
	400 ×400 ×1 200	54. 81	454	1. 20	1. 50	140	8. 0	20	68. 42	0. 002 8	F
	400 ×400 ×1 200	54. 81	454	1. 20	1. 50	140	8. 0	20	64. 19	0. 003 1	F
	200 ×200 ×600	54. 81	541	1. 20	1. 50	105	6. 0	10	59. 00	0. 003 7	C
	200 ×200 ×600	54. 81	541	1. 20	1. 50	105	6. 0	10	57. 63	0. 003 9	C
文献[26]	200 ×200 ×600	34. 10	500	0. 84	1. 13	150	8. 0	20	52. 34	0. 003 1	A
	200 ×200 ×600	34. 10	390	1. 89	1. 13	150	12. 0	20	50. 63	0. 003 8	A
	200 ×200 ×600	34. 10	390	3. 78	1. 13	75	12. 0	20	60. 00	0. 003 8	A
	200 ×200 ×600	50. 00	500	0. 84	1. 13	150	8. 0	20	67. 81	0. 002 6	A
	200 ×200 ×600	50. 00	296	0. 84	1. 13	150	8. 0	20	76. 25	0. 003 1	A
	200 ×200 ×600	50. 00	390	1. 89	1. 13	150	12. 0	20	71. 88	0. 002 5	A
	200 ×200 ×600	50. 00	390	1. 89	2. 26	150	12. 0	20	77. 97	0. 002 1	A
	200 ×200 ×600	74. 30	390	3. 78	1. 13	75	12. 0	20	84. 38	0. 003 0	A
	200 ×200 ×600	74. 30	390	3. 78	2. 26	75	12. 0	20	78. 44	0. 003 9	A
	200 ×200 ×600	74. 30	500	0. 84	1. 13	150	8. 0	20	103. 75	0. 002 8	A
	200 ×200 ×600	74. 30	390	1. 89	1. 13	150	12. 0	20	109. 38	0. 002 5	A
	200 ×200 ×600	74. 30	390	3. 78	1. 13	75	12. 0	20	115. 63	0. 002 5	A
文献[27]	267 ×267 ×801	36. 18	458	2. 90	0. 36	29	8. 0	13	49. 80	0. 003 7	A
	267 ×267 ×801	36. 18	458	1. 26	0. 36	66	8. 0	13	47. 99	0. 003 4	A
	400 ×400 ×1 200	36. 18	478	2. 90	0. 36	44	12. 0	20	47. 23	0. 002 9	A
	400 ×400 ×1 200	36. 18	478	1. 26	0. 36	99	12. 0	20	47. 67	0. 008 9	A
	600 ×600 ×1 800	36. 18	494	2. 90	0. 36	66	18. 0	30	43. 47	0. 002 5	A
	600 ×600 ×1 800	36. 18	494	1. 26	0. 36	149	18. 0	30	45. 95	0. 003 0	A
	400 ×400 ×1 200	36. 18	485	2. 90	0. 36	46	10. 0	20	49. 11	0. 006 1	B
	400 ×400 ×1 200	36. 18	485	1. 26	0. 36	103	10. 0	20	47. 13	0. 002 5	B
	600 ×600 ×1 800	36. 18	478	2. 90	0. 36	59	12. 0	30	42. 60	0. 002 5	C
	600 ×600 ×1 800	36. 18	478	1. 26	0. 36	132	12. 0	30	45. 10	0. 003 0	C
	800 ×800 ×2 400	36. 18	452	1. 26	0. 30	169	14. 0	40	45. 58	0. 003 0	F
文献[28]	270 ×270 ×750	72. 19	962	0. 80	2. 18	140	6. 5	10	64. 15	0. 003 3	C
	270 ×270 ×750	72. 19	962	1. 49	2. 18	75	6. 5	10	75. 16	0. 004 3	C
	270 ×270 ×750	72. 19	962	2. 83	2. 18	40	6. 5	10	87. 76	0. 006 0	C
	270 ×270 ×750	86. 10	962	0. 80	2. 18	140	6. 5	10	80. 17	0. 003 2	C
	270 ×270 ×750	86. 10	962	1. 49	2. 18	75	6. 5	10	89. 79	0. 004 2	C
	270 ×270 ×750	86. 10	962	2. 83	2. 18	40	6. 5	10	97. 64	0. 005 4	C
	270 ×270 ×750	86. 10	962	1. 49	2. 18	75	6. 5	10	84. 38	0. 003 4	A
	270 ×270 ×750	86. 10	962	1. 28	2. 18	75	6. 5	10	85. 00	0. 003 9	D
	270 ×270 ×750	86. 10	962	1. 37	2. 18	75	6. 5	10	87. 97	0. 004 2	F
	270 ×270 ×750	102. 20	962	0. 80	2. 18	140	6. 5	10	104. 88	0. 003 2	C
	270 ×270 ×750	102. 20	962	1. 49	2. 18	75	6. 5	10	111. 08	0. 003 7	C
	270 ×270 ×750	102. 20	962	2. 83	2. 18	40	6. 5	10	122. 03	0. 004 3	C

注:$D \times H$ 为试件直径 × 高度;f_c 为非约束混凝土轴心抗压强度,搜集的数据中由于试验方法不同,存在混凝土标准圆柱体抗压强度以及标准棱柱体抗压强度,根据《圆柱形混凝土试件抗压强度的标准试验方法》ASTM C39 / C39M—2018[29],本文在建立数据库时将数据全部转换为标准棱柱体抗压强度;f_{sy} 为箍筋屈服强度;s 为箍筋间距;d_{sv} 为箍筋直径;c 为混凝土保护层厚度;A ~ F、H、S 表示箍筋形式,见图 3。

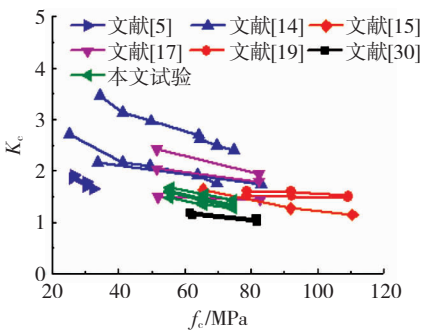
2 关键参数对约束混凝土柱受力性能影响分析

研究各因素对约束混凝土强度增强系数($K_c = f_{cc}/f_c$)和变形增强系数($K_\varepsilon = \varepsilon_{cc}/\varepsilon_c$)的影响,分析原因。

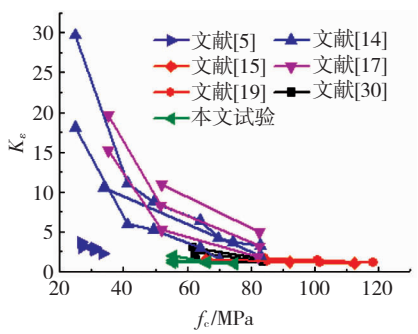
2.1 混凝土强度

图 4 是强度增强系数和变形增强系数随混凝土强度的变化[5,14-15,17,19,30]。

由图 4(a)和图 4(b)可知,同一研究中,随着混凝土强度增加,约束混凝土强度增强系数和变形增强系数减小。当混凝土强度较高时($f_c > 90$ MPa),强度增强系数均小于 1.5。这主要是由于随着非约束混凝土强度增加,其横向扩展变形能力降低,箍筋对混凝土的约束能力随着混凝土强度的增加而减小。因此,为了提高高强混凝土的强度增强系数和延性增强系数,需要增加约束。



(a) 强度增强系数随混凝土强度的变化



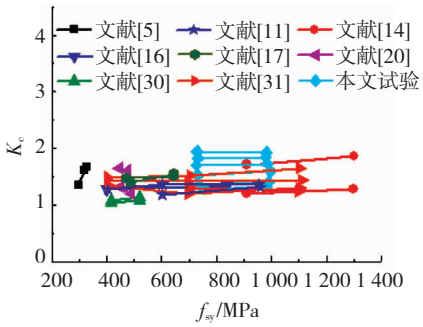
(b) 变形增强系数随混凝土强度的变化

图 4 混凝土强度对试件强度和变形的影响

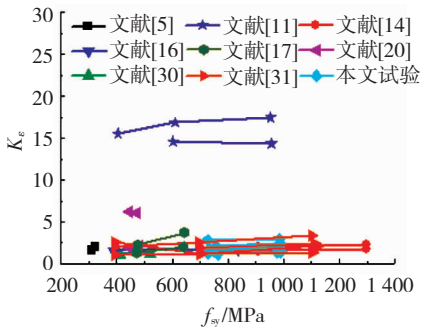
Fig. 4 Influence of concrete strength on deformation and strength of specimens

2.2 箍筋屈服强度

箍筋屈服强度是影响约束混凝土强度和变形的主要参数之一。图 5 是强度增强系数和变形增强系数随箍筋屈服强度的变化[5,11,14,16-17,20,30-31]。当箍筋在约束混凝土的峰值应力处达到屈服强度,高强度箍筋可以有效提高约束混凝土的强度和变形能力。若箍筋在约束混凝土的峰值应力处没有达到屈服强度,提高箍筋屈服强度,无法增强约束效果。因此,单纯提高箍筋强度并不能保证箍筋对整体试件的约束效果显著提高,需要综合考虑体积配箍率,混凝土强度等因素。



(a) 强度增强系数随箍筋屈服强度的变化



(b) 变形增强系数随箍筋屈服强度的变化

图 5 箍筋屈服强度对试件强度和变形的影响

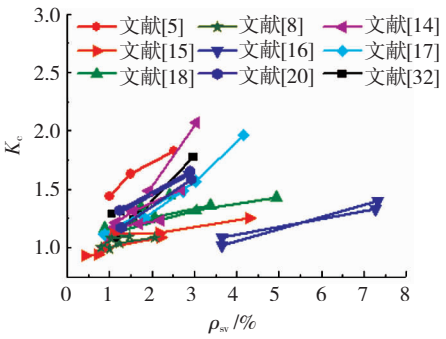
Fig. 5 Influence of stirrup yield strength on deformation and strength of specimens

2.3 体积配箍率

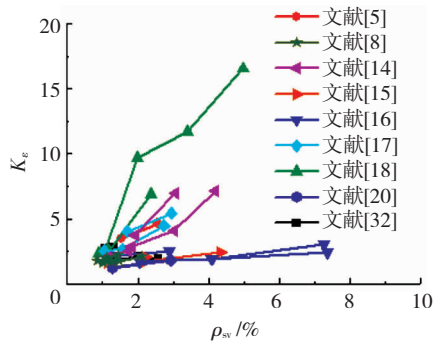
箍筋的体积配箍率由箍筋间距、箍筋直径和核心混凝土尺寸决定。高体积配箍率能够抵抗较大的应力,为核心混凝土提供较大的有效约束约束,提高约束程度。图 6 给出了约束混凝土的强度增强系数和延性增强系数随体积配箍率的变化[5,8,14-18,20,32]。当体积配箍率大于 1.5% 时,约束混凝土的强度增强系数迅速增加。此外,在体积配箍率小于 1% 时,对约束混凝土试件强度的增强作用较小。在图 6(b)中,当体积配箍率为 1.0% ~4.0% 时,约束混凝土变形增强系数增长迅速。由此可见,在设计箍筋的体积配箍率时至少应大于 1%。

2.4 箍筋间距

图 7 是约束混凝土强度增强系数和变形增强系数随箍筋间距的变化规律[17,26,28,33-36]。由图 7 可知,箍筋间距越小,试件强度和变形能力越好。在其他条件相同的条件下,箍筋间距过大,对核心混凝土无法提供有效的约束,约束混凝土试件的强度和变形能力都没有明显提高。当箍筋间距大于 150 mm,箍筋间距的变化对约束混凝土柱强度和变形能力的影响基本不再发生变化。此时箍筋能提供的约束效果较小,对约束混凝土柱的强度和变形能力作用不大。箍筋间距减小时,相邻两箍筋间被有效约束的混凝土面积增加,这样可以显著提高约束混凝土柱的强度,较好地改善柱子的变形能力。



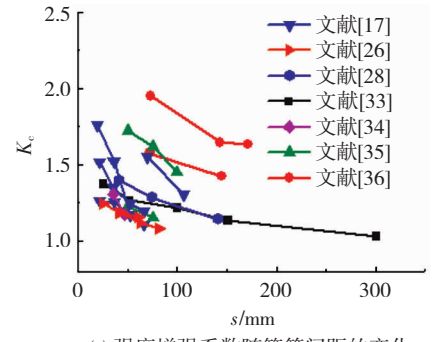
(a) 强度增强系数随体积配箍率的变化



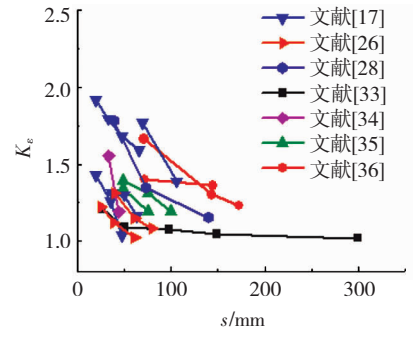
(b) 变形增强系数随体积配箍率的变化

图 6　体积配箍率对试件强度和变形的影响

Fig. 6　Influence of volumetric ratio on deformation and strength of specimens



(a) 强度增强系数随箍筋间距的变化



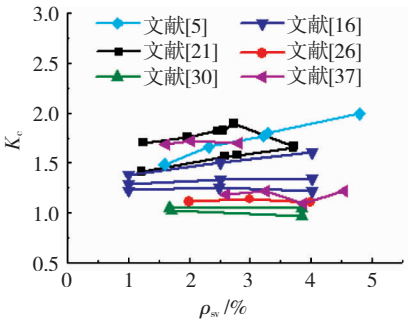
(b) 变形增强系数随箍筋间距的变化

图 7　箍筋间距对试件强度和变形的影响

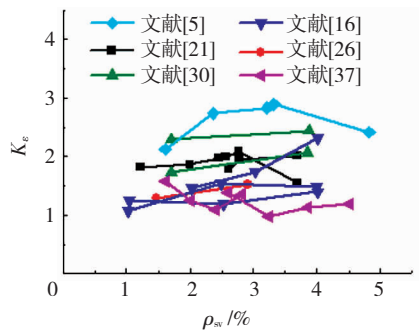
Fig. 7　Influence of stirrup spacing on deformation and strength of specimens

2.5　纵筋配筋率

纵筋对试件核心区混凝土的峰值压应变产生较大影响,对峰值压应力有一定作用,特别是约束高强度混凝土柱中配置纵筋,有利于提高柱子的变形能力[6,24]。图 8 是约束混凝土强度增强系数和变形增强系数随纵筋配筋率的变化规律[5,16,21,26,30,37]。由图 8(a)可知,约束混凝土的强度增强系数随着纵筋配筋率的增大提高。在图 8(b)中,约束混凝土变形增强系数,随着纵筋配筋率增加有所提高。Kim[16]的研究中,由于试件混凝土强度大,体积配箍率小,纵筋与箍筋强度小,能提供的约束作用有限,出现了个别试件变形增强系数仅为 1.0 左右的情况。纵筋配筋率对约束混凝土柱强度和变形能力的影响不可忽略。



(a) 强度增强系数随纵筋配筋率的变化



(b) 变形增强系数随纵筋配筋率的变化

图 8　纵筋配筋率对试件强度和变形的影响

Fig. 8　Influence of longitudinal reinforcement ratio on deformation and strength of specimens

2.6　箍筋形式

圆形柱箍筋形式主要有圆形箍筋和螺旋箍筋。表 5 中列举了分别采用圆形和螺旋箍筋试件的部分试验结果。其他条件相同或接近的情况下,圆形箍筋为约束混凝土柱提供更好的约束效果,试件有更好的强度和变形能力。这是由于圆形箍筋都是独立的,当其中一个发生破坏时,其余箍筋继续提供约束力。因此,宜使用圆形箍筋来设计试件。

对于矩形柱,箍筋形式决定了试件水平方向的有效约束面积和纵向钢筋的分布,影响核心混凝土水平方向的有效约束面积。表 6 是不同箍筋形式对试件强度增强系数和变形能力增强系数的影响规律[10,23,25,27,38]。复杂的箍筋形式约束效果明显好于单个矩形箍。箍筋形式 B 和 D 的约束效果相近,网格式箍筋形式 C、F、G,能增强约束混凝土柱的强度和变形能力,网格划分越密集,约束效果越好。从箍筋约束效果及施工复杂程度的角度出发,对于矩形

柱，避免使用箍筋形式 A（矩形箍），建议采用 B（十　字复合箍）或 C（井字箍）两种箍筋形式。

表 5　其他条件相同时，圆形箍筋和螺旋箍筋对 K_c、K_ε 的影响

Tab. 5　Influence of stirrup configuration on K_c and K_ε

试件编号	试件尺寸/mm	f_c/MPa	f_{sy}/MPa	ρ_{sv}/%	ρ_s/%	s/mm	d_{sv}/mm	c/mm	f_{cc}/MPa	ε_{cc}	K_c	K_ε
H1	110×550	51.8	488	4.38	1.27	45	8	0	83.99	0.006 0	1.621	2.609
S1	110×550	51.8	488	4.38	1.27	45	8	0	81.66	0.005 8	1.576	2.522
H2	110×550	75.3	488	4.38	0.87	45	8	0	138.56	0.005 5	1.840	1.964
S2	110×550	75.3	488	4.38	0.87	45	8	0	122.07	0.005 3	1.621	1.892
H3	110×550	75.3	567	4.38	1.01	45	8	0	139.55	0.005 7	1.853	2.036
S3	110×550	75.3	587	4.38	1.05	45	8	0	121.79	0.005 1	1.617	1.821
H4	110×550	75.3	567	2.78	0.64	65	8	0	115.06	0.005 1	1.528	1.821
S4	110×550	75.3	587	2.78	0.67	65	8	0	106.84	0.004 8	1.419	1.714

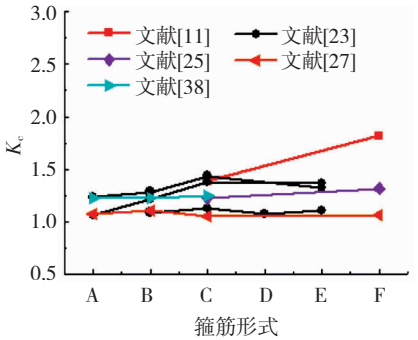
注：试件编号中 S 表示螺旋箍筋形式，H 表示圆形箍筋形式；圆柱试件尺寸为截面直径×试件高度，方柱试件尺寸为试件截面边长×试件高度；K_c 是强度增强系数；K_ε 是变形增强系数。

表 6　其他条件相同或接近时，圆形截面与矩形截面对 K_c、K_ε 的影响

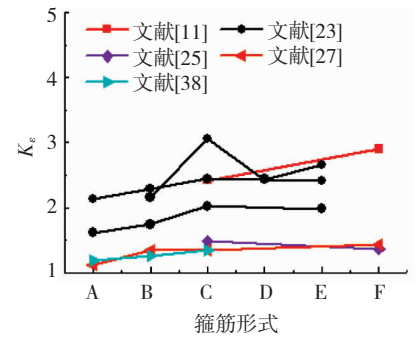
Tab. 6　Influence of cross section on K_c and K_ε

试件编号	试件尺寸/mm	f_c/MPa	ρ_{sv}/%	ρ_s/%	f_{sy}/MPa	s/mm	d_{sv}/mm	c/mm	f_{cc}/MPa	ε_{cc}	K_c	K_ε
R1	265×265×1 000	57.22	1.82	1.11	475	105	12	12.5	61.83	0.003 3	1.081	1.272
C1	300×1 000	54.46	1.44	1.10	462	115	12	12.5	68.64	0.004 1	1.260	1.595
R2	265×265×1 000	56.54	1.82	2.44	475	105	12	12.5	65.60	0.003 1	1.189	1.161
C2	300×1 000	55.16	1.44	2.19	462	115	12	12.5	70.45	0.003 4	1.246	1.273
R3	265×265×1 000	54.46	1.82	4.04	475	105	12	12.5	67.06	0.002 6	1.216	1.083
C3	300×1 000	55.16	1.44	3.94	462	115	12	12.5	77.21	0.002 8	1.418	1.167

注：试件编号中 R 表示矩形截面试件，C 表示圆形截面试件。



(a) 强度增强系数随箍筋形式的变化



(b) 变形增强系数随箍筋形式的变化

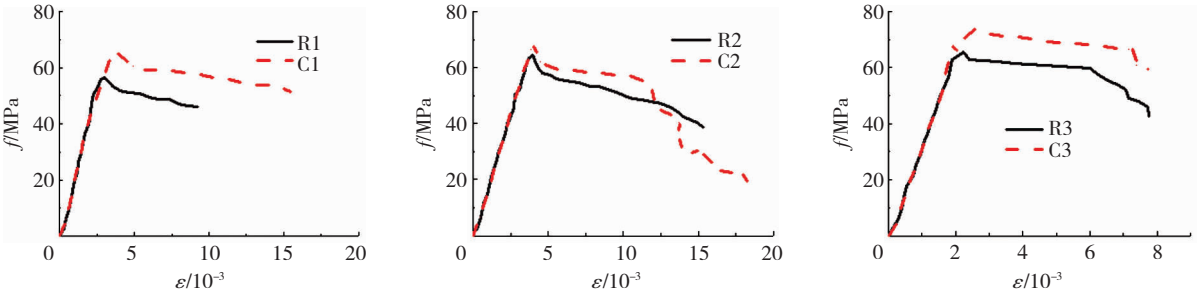
图 9　箍筋形式对试件强度和变形的影响

Fig. 9　Influence of stirrup configuration on deformation and strength of specimens

2.7　试件截面形状与尺寸

在混凝土强度、试件截面面积、纵筋配筋率及体积配箍率相同或接近的条件下，圆形箍筋或螺旋箍筋形式要比矩形箍筋对混凝土的约束效果好。图 10 中列举的曲线，是在其他条件相同或接近的情况下，约束混凝土圆柱和矩形柱试件受压应力－应变曲线对比。由图可知，在其他条件相同的情况下，圆形截面柱的承载能力及变形能力优于矩形截面柱。

在研究约束混凝土受压应力－应变曲线时，试件的尺寸效应不能忽略。符佳等[25]引入尺寸效应影响系数。试件高宽比相同时，截面尺寸越大，配箍率越低，受压时试件越容易破坏。通常采取较高体积配箍率和高强箍筋来增强试件的约束效果。在其他条件均相同情况下，由于尺寸效应的存在，大尺寸试件的强度增强系数（K_c）和变形增强系数（K_ε）通常小于小尺寸试件，见表 7。分析原因认为，一方面是由于箍筋约束作用是通过对核心区受弯和受拉作用来完成的，小尺寸试件箍筋主要是受拉破坏，大尺寸试件主要是受弯破坏[22]，其约束应力要小，相应的约束混凝土强度和变形能力都较低；另一方面是由于大尺寸截面的构件在角部产生的应力集中要比小尺寸截面的构件严重，且在其他条件相同的情况下，大截面面积构件体积配箍率要小于小截面面积构件。



(a) 圆柱 C1 和矩形柱 R1 对比　　(b) 圆柱 C2 和矩形柱 R2 对比　　(c) 圆柱 C3 和矩形柱 R3 对比

图 10　其他条件相同或接近时,约束混凝土圆柱和矩形柱受压应力 - 应变曲线对比

Fig. 10　Comparison of compressive stress-strain curves of different confined concrete columns

表 7　其他条件相同或接近时,试件尺寸对 K_c、K_ε 的影响

Tab. 7　Influence of size effect on K_c and K_ε

引用文献	试件尺寸/mm	f_c/MPa	f_{sy}/MPa	ρ_{sv}/%	ρ_s/%	s/mm	d_{sv}/mm	c/mm	f_{cc}/MPa	ε_{cc}	K_c	K_ε	箍筋形式
文献[27]	267×267×801	36.18	458	2.90	0.36	29	8.0	13	49.80	0.003 7	1.376	1.761	A
	400×400×1 200	36.18	478	2.90	0.36	44	12.0	20	47.23	0.002 9	1.305	1.380	A
	600×600×1 800	36.18	494	2.90	0.36	66	18.0	30	43.47	0.002 5	1.201	1.190	A
	267×267×801	36.18	458	1.26	0.36	66	8.0	13	47.99	0.003 4	1.326	1.618	A
	400×400×1 200	36.18	478	1.26	0.36	88	12.0	20	47.67	0.008 9	1.318	4.237	A
	600×600×1 800	36.18	494	1.26	0.36	149	18.0	30	45.95	0.003 0	1.270	1.428	A
文献[36]	600×600×2 700	22.21	249	0.94	2.50	172	9.6	30	43.20	0.002 4	1.945	1.406	F
	400×400×1 800	22.21	249	0.94	2.50	144	7.2	20	39.90	0.003 0	1.796	1.753	F
	200×200×900	22.21	249	0.94	2.50	72	3.6	10	54.10	0.003 0	2.436	1.753	F
	800×800×2 400	42.24	249	1.20	1.50	200	13.5	40	60.00	0.002 6	1.420	1.190	F
	600×600×1 800	42.24	249	1.20	1.50	170	10.8	30	66.20	0.002 7	1.567	1.208	F
	400×400×1 200	42.24	249	1.20	1.50	145	8.2	20	68.40	0.002 9	1.619	1.284	F
	200×200×600	42.24	249	1.20	1.50	85	6.0	10	69.10	0.004 5	1.636	2.009	F

3　约束混凝土受压应力 - 应变曲线统一方程

3.1　约束混凝土受压应力 - 应变曲线统一方程的建立

为了描述该应力 - 应变关系曲线统一方程,曲线采用无量纲坐标,$x=\varepsilon/\varepsilon_{cc}$,$y=f/f_{cc}$。由于文献[5]中 Mander 模型对约束混凝土本构关系曲线上升段预测较准确,统一方程上升段直接采用 Mander 模型来描述。上升段公式为

$$y=\frac{\gamma x}{\gamma+x^{\gamma}-1},\ x\leqslant 1 \tag{8}$$

式中 γ 是控制上升段曲线的参数,由式(9)计算

$$\gamma=E_c/[E_c-(f_{cc}/\varepsilon_{cc})] \tag{9}$$

式中 E_c 为非约束混凝土初始弹性模量

$$E_c=5\ 000\sqrt{f_{co}}\ \text{MPa}$$

统一方程下降段以文献[2]中过镇海模型下降段为基础,建立统一方程下降段公式。统一方程下降段为

$$y=\frac{x}{\alpha(x-1)^{\beta}+x},\ x>1 \tag{10}$$

式中 α 和 β 是下降段曲线的重要参数,决定了该公式的预测效果。本文采用回归分析的方法来确定 α 和 β 的计算公式。

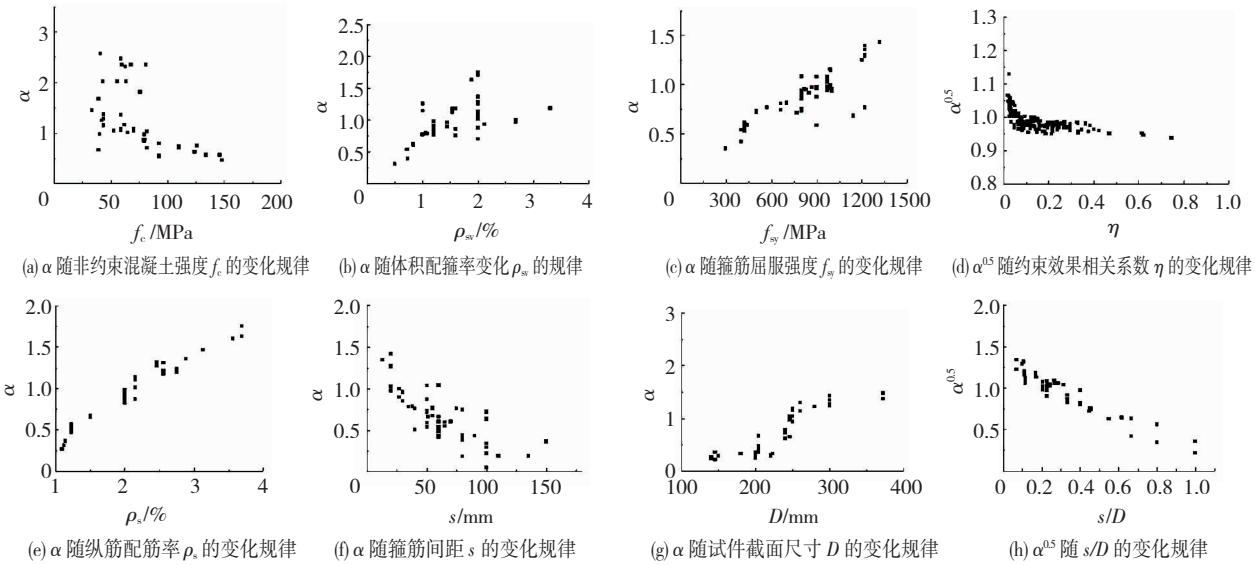
本文用无量纲坐标描述曲线,$x>0$,$0\leqslant y\leqslant 1$,采用 Mander 与过镇海的组合的形式来描述统一方程,能够满足约束混凝土本构关系曲线的特性:1)曲线通过坐标初始点,即 $x=0$ 时,$y=0$;2)从坐标初始点开始的切线斜率可以表述为 $\mathrm{d}y/\mathrm{d}x=E_c/E_{co}$;3)上升段曲线满足 $0\leqslant x\leqslant 1$ 时,$\mathrm{d}^2y/\mathrm{d}^2x<0$;4)在曲线峰值点($\varepsilon_{cc}$,$f_{cc}$)处的切线近似为水平直线,即 $x=1$ 时,$y=1$ 且 $\mathrm{d}y/\mathrm{d}x=0$;5)下降段曲线中存在一个拐点,即 $x>1$时,$\mathrm{d}^2y/\mathrm{d}^2x=0$;6)下降段曲线中存在一个最大曲率点,即 $x>1$ 时,$\mathrm{d}^3y/\mathrm{d}^3x=0$;7)当应力无穷大时,曲线应力趋近于 0,即 $x\to\infty$,$y\to 0$,$\mathrm{d}y/\mathrm{d}x\to 1$。

3.1.1　α 计算公式

约束混凝土的应力 - 应变曲线关系的变化,不仅与非约束混凝土强度、体积配箍率、箍筋屈服强度有关,还与箍筋间距、纵筋配筋率以及试件截面尺寸存在一定关系。此处试件截面尺寸为圆柱截面直径或方柱截面边长,用符号 D 表示。分析各影响因素对 α 的影响,以此为基础,提出 α 回归分析模型。

图 11 中各图为其他条件相同或接近时,α 随某一影响因素的变化规律。由图 11 (a)可知,随着非约束混凝土强度的提高,α 呈下降趋势,但 $f_c<80$

MPa 时,该现象不明显。这是由于试件体积配箍率和箍筋强度存在较大差异,对核心混凝土的约束效果差异明显,导致 α 的变化规律不明显。由图 11(b)和(c)可知,随着体积配箍率和箍筋屈服强度的提高,α 呈增大趋势。根据已有文献的研究,发现核心混凝土的横向扩张程度不仅与体积配箍率、箍筋屈服强度有关,而且受非约束混凝土的强度影响。在一定范围内,被约束混凝土强度较低,体积配箍率和箍筋屈服强度较高时,试件被压碎时,核心混凝土部分横向扩张程度较大,试件延性较好。引入约束效果相关系数 η,$\eta = \rho_{sv} f_{sv} / f_c$,其中,$f_{sv}$ 是约束混凝土达到峰值压应力时箍筋达到的应力水平。综合反映体积配箍率、箍筋屈服强度和非约束混凝土强度对参数 α 的影响。分析发现,$\alpha^{0.5}$ 随约束效果相关系数 η 的变化规律较明显,见图 11(d)。随着约束效果相关系数 η 的增大,$\alpha^{0.5}$ 先迅速下降之后趋近于 0.92,呈幂函数变化规律。由图 11(e)中可知,α 与纵筋配筋率 ρ_s 呈正相关关系,随着纵筋配筋率的增加,α 呈明显的线性增加趋势。图 11(f) ~ (g)中是箍筋间距 s 与试件截面尺寸 D 对参数 α 的影响规律,随着箍筋间距的增大,参数 α 呈下降趋势;试件截面尺寸 D 越大,参数 α 越大,但增加程度减小。参数 α 随箍筋间距与试件截面尺寸变化的规律性并不十分明显,这是因为箍筋间距与试件截面尺寸会影响试件水平面内有效约束面积的大小,且通常与箍筋间距呈负相关,与试件截面尺寸呈正相关。定义箍筋间距 s 与试件截面尺寸 D 的比值(s/D)为有效约束面积影响系数,经分析发现,$\alpha^{0.5}$ 与有效约束面积影响系数 s/D,有较强的规律性,$\alpha^{0.5}$ 与 s/D 线性相关,$\alpha^{0.5}$ 随 s/D 增大而减小。



(a) α 随非约束混凝土强度 f_c 的变化规律 (b) α 随体积配箍率变化 ρ_{sv} 的规律 (c) α 随箍筋屈服强度 f_{sy} 的变化规律 (d) $\alpha^{0.5}$ 随约束效果相关系数 η 的变化规律

(e) α 随纵筋配筋率 ρ_s 的变化规律 (f) α 随箍筋间距 s 的变化规律 (g) α 随试件截面尺寸 D 的变化规律 (h) $\alpha^{0.5}$ 随 s/D 的变化规律

图 11 α 随各影响因素的变化规律

Fig. 11 Influence of parameters on α

基于 α 随各影响因素变化规律的分析,建立 α 的回归分析模型

$$\alpha^{a_1} = a_2 \eta^{a_3} \frac{a_4 - a_5(s/D)}{1 - \rho_s} \tag{11}$$

回归分析发现,参数 α 随非约束混凝土强度的变化产生波动,在 $f_c > 80$ MPa 时,参数 α 的拟合值偏小,$f_c < 80$ MPa 时,参数 α 的拟合值偏大,增加一个混凝土强度影响系数 r,$r = 80\ \text{MPa}/f_c$,得到 α 的计算公式为

$$\alpha^{0.496} = 0.936 r \eta^{-0.029} \frac{3 - 1.1(s/D)}{1 - \rho_s} \tag{12}$$

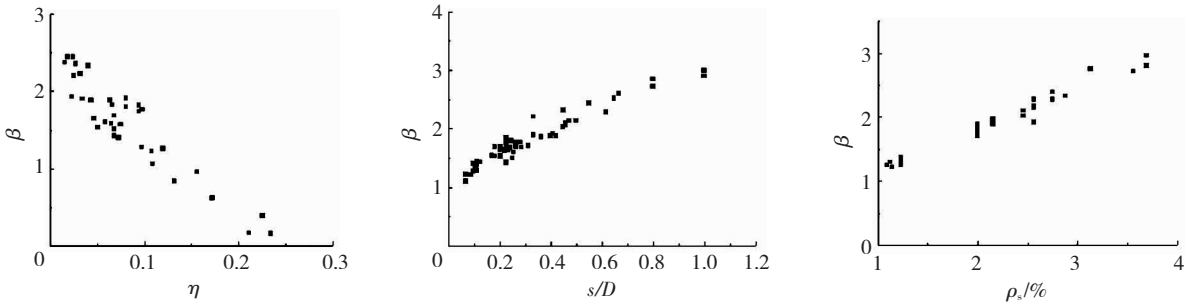
式中 f_{sv} 为约束混凝土达到峰值压应力时的箍筋应力水平,由式(3)和式(4)计算。

该公式 $R^2 = 0.916\ 3$,标准差是 0.006 5,平均绝对误差是 0.005 0,说明拟合效果较好。

3.1.2 β 计算公式

基于对参数 α 的研究,分析其他条件相同的情况下,β 分别随约束效果相关系数、有效约束面积影响系数和纵筋配筋率的变化规律,见图 12。

图 12 中各图为其他条件相同或接近,β 随某一影响因素的变化规律。由图 12 可知:1)一定范围内,η 越大,β 越小,且线性变化较明显,见图 12(a)。究其原因,约束效果相关系数 η 较大时,箍筋对核心混凝土的约束效果提高,试件受压应力 - 应变曲线下降段较平缓,此时参数 β 较小。2)由图(b)知,一定范围内,有效约束面积影响系数越小,箍筋间距越小试件截面尺寸越大,参数 β 越小,试件延性发展越好。3)由图(c)知,参数 β 与纵筋配筋率 ρ_s 呈正相关关系,随着纵筋配筋率的增加,β 呈明显的线性增加趋势。



(a)β 随 η 的变化规律　(b)β 随 s/D 的变化规律　(c)β 随纵筋配筋率 ρ_s 的变化规律

图 12　β 随各影响因素的变化规律

Fig. 12　Influence of parameters on β

基于参数 β 随 η、s/D 和 ρ_s 变化规律的分析,建立 β 的回归分析模型

$$\beta = b_1 + b_2\eta\frac{b_3 - b_4(s/D)}{1-\rho_s} \tag{13}$$

回归分析发现,在 $f_c > 80$ MPa 时,参数 β 的拟合值偏小,$f_c < 80$ MPa 时,参数 β 的拟合值偏大,引入混凝土强度影响系数 r,$r = 80\ \text{MPa}/f_c$,能明显增强参数 β 的拟合效果。本文得到 β 的计算公式为

$$\beta = 1.059 - 0.838r\eta\frac{3 - 1.1(s/D)}{1-\rho_s} \tag{14}$$

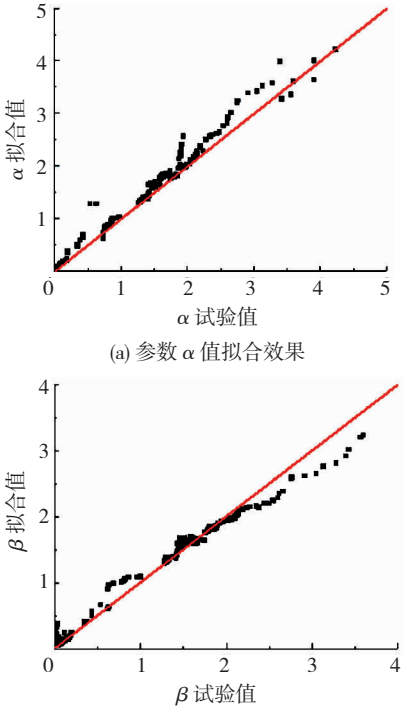
该公式 $R^2 = 0.920\ 1$,标准差等于 0.003 9,平均绝对误差等于 0.002 7,R^2 接近 1,标准差与平均绝对误差接近 0,说明拟合效果较好。

图 13 是参数 α 和参数 β 的拟合效果图,图中可以看出参数 α 和参数 β 计算公式具有较好的拟合效果。

3.1.3　本文统一方程模型分析验证

为了进一步验证本文统一方程的精确度,用统一方程和已有的受压应力 - 应变模型,对本课题组试验得到的试验结果,进行了计算。各模型及本文模型对部分试件的计算结果和试验结果的比较,见图 14。

由图 14 可知,由本文统一方程得到的预测曲线和试验曲线的吻合程度均好于已有模型。分析原因认为是:1)每一种模型都是在各自的试验基础上提出的,混凝土材料离散性大,试验方法与测量手段又不统一,模型在计算 f_{cc}、ε_{cc}、ε_{80} 时误差较大。2)模型中所考虑的影响因素是否全面,是下降段延性好坏的关键[31]。Li Bing 模型未考虑试件达到峰值压应力时箍筋的应力水平,且每个试验曲线的参数 β 是用试验法和误差法得来的,对预测试件应力 - 应变曲线会产生较大误差。3)模型建立的试验基础广泛与否对模型模拟是否准确起着重要作用。本文统一方程考虑的影响因素比较全面,且范围较广,这也是本文模型下降段延性较好的一个主要原因。本文提出的分析模型精确度较高,适用范围更广,计算结果是精确可信的。



(a) 参数 α 值拟合效果

(b) 参数 β 值拟合效果

图 13　α 与 β 拟合效果

Fig. 13　Fitting curves of α and β

3.2　峰值压应力

采用 Richard 公式[39]的形式,引入参数 k_c,定义 $k_c = p\eta$,k_c 与约束效果相关系数有关,而且受纵筋配筋率和箍筋体积配箍率的影响。回归分析得到峰值压应力计算公式

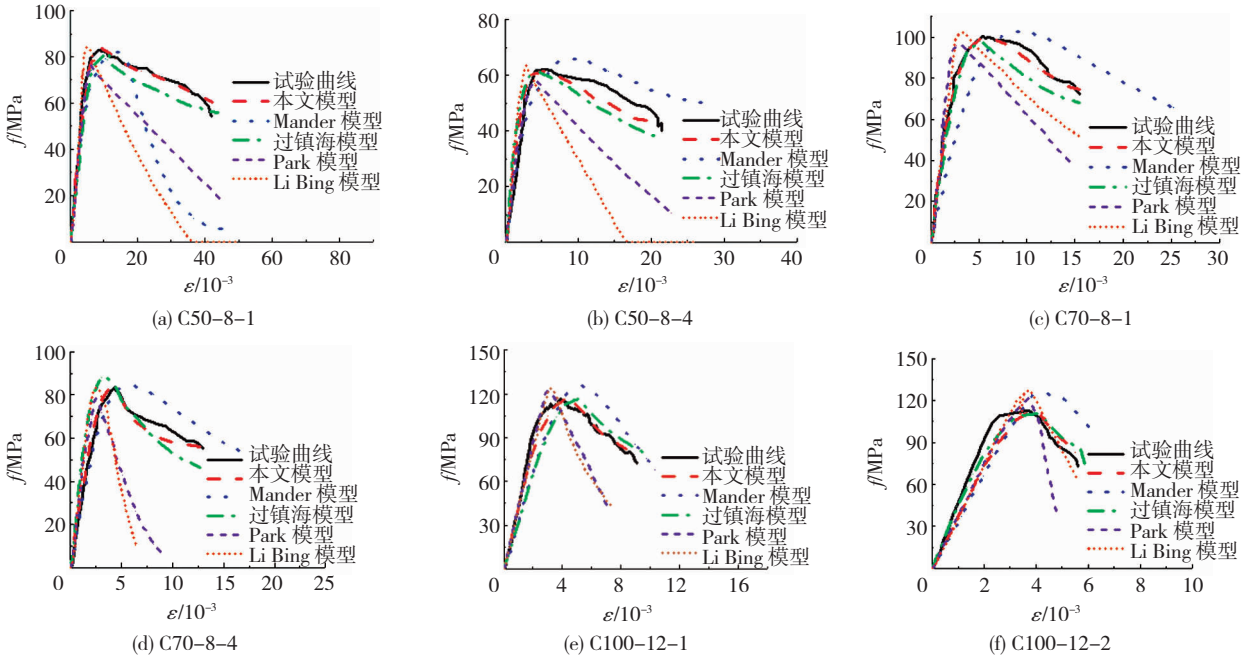
$$f_{cc}/f_{co} = 1 + m_c k_c^{nc} \tag{15}$$

式中:η 为约束效果相关系数,$\eta = \rho_{sv}f_{sv}/f_c$;$\rho_{sv}$ 为体积配箍率;f_{sv} 为约束混凝土达到峰值压应力时箍筋的应力水平,由公式(3)计算;p 为钢筋影响系数,$p = (1+\rho_{sv})/[3(1-\rho_s)]$;$\rho_s$ 为纵筋配筋率。

系数 m_c、n_c 按混凝土强度和试件截面形状划分,回归分析,得出 m_c、n_c 取值表,见表 8。

由 R^2 及残差平方和可知,该公式拟合效果较好。图 15 是本文提出的峰值压应力公式,对数据库试件峰值压应力的预测值,与试验值的对比图。本

文公式的误差小。以绝对误差积分为指标,该公式 的绝对误差积分为 12.35%,精确度较高。



(a) C50-8-1 (b) C50-8-4 (c) C70-8-1

(d) C70-8-4 (e) C100-12-1 (f) C100-12-2

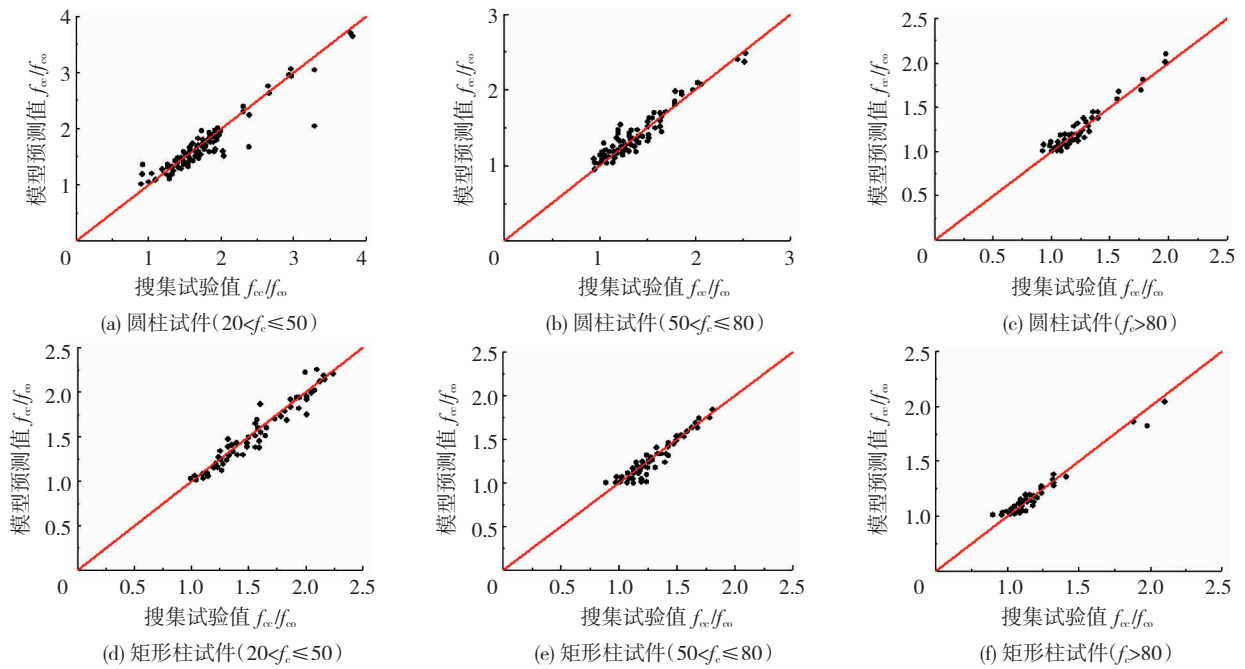
图 14 各模型及本文模型与本文试验曲线对比

Fig. 14 Comparison of different models

表 8 m_c、n_c 取值表

Tab. 8 Values of m_c and n_c

f_c	约束混凝土圆形柱				约束混凝土方形柱			
	m_c	n_c	R^2	残差平方和	m_c	n_c	R^2	残差平方和
$20<f_c\leqslant50$	4.538	0.857	0.886	0.047	20.079	1.469	0.893	0.056
$50<f_c\leqslant80$	7.033	1.222	0.923	0.069	19.623	1.631	0.947	0.023
$f_c>80$	8.131	1.413	0.969	0.052	18.464	2.044	0.913	0.062



(a) 圆柱试件($20<f_c\leqslant50$) (b) 圆柱试件($50<f_c\leqslant80$) (c) 圆柱试件($f_c>80$)

(d) 矩形柱试件($20<f_c\leqslant50$) (e) 矩形柱试件($50<f_c\leqslant80$) (f) 矩形柱试件($f_c>80$)

图 15 本文公式的峰值压应力预测值与试验值对比

Fig. 15 Comparison of experimental values and calculated values of peak stress

3.3 峰值压应变

综合考虑约束混凝土影响因素,引入参数 k_ε,定义 $k_\varepsilon=p\eta(3-1.1(s/D_{cor}))$,$D_{cor}$为核心混凝土长度,回归分析得出峰值压应变计算公式为

$$\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}=1+m_\varepsilon k_\varepsilon^{n\varepsilon} \tag{16}$$

式中:ε_{co}为非约束混凝土的峰值压应变,按式(7)计

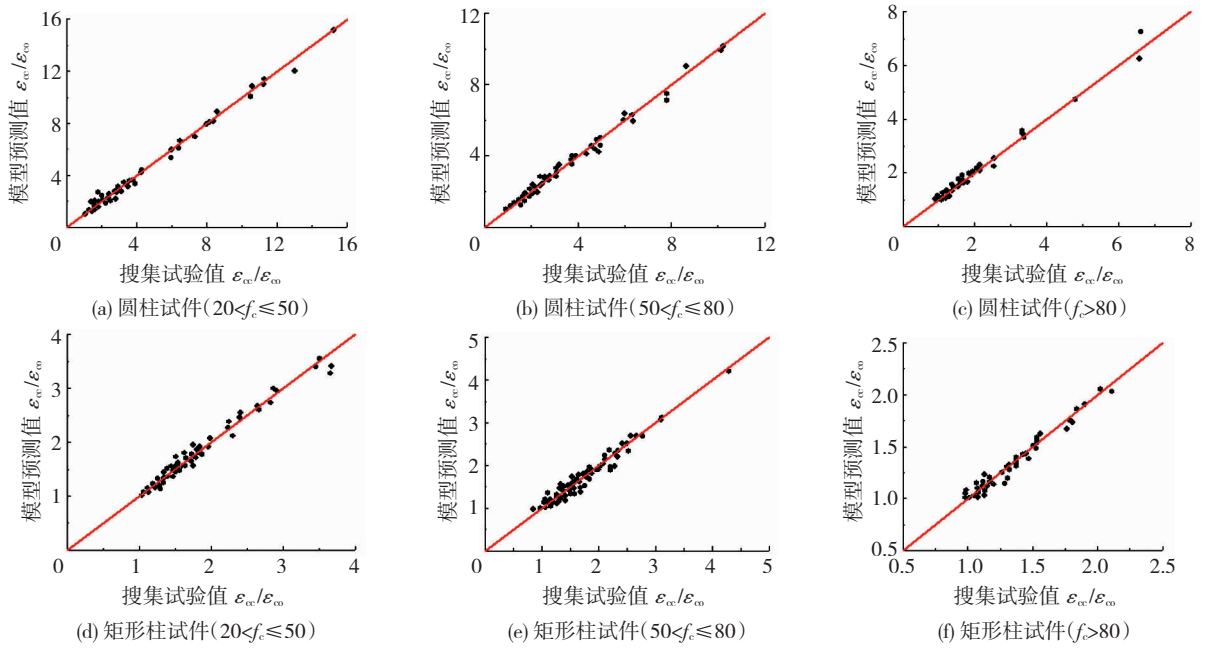
算;参数 m_ε、n_ε 按混凝土强度和试件截面形式划分,回归分析得出 m_ε、n_ε 的取值表,见表 9。

R^2 接近于 1,相关关系强,残差平方和接近于 0,数据分布较好,图 16 是本文提出的峰值压应变计算公式,对数据库试件峰值压应变的预测值,与试验值的对比图。从图中可以看出,本文峰值压应变计算公式,预测值与试验值之间误差小,绝对误差积分为 13.21%,精确度较高。

表 9　m_ε、n_ε 取值表

Tab. 9　Values of m_ε and n_ε

f_c	约束混凝土圆形柱				约束混凝土方形柱			
	m_c	n_c	R^2	残差平方和	m_c	n_c	R^2	残差平方和
$20<f_c\leqslant50$	11.699	1.539	0.937	0.043	3.554	0.807	0.939	0.037
$50<f_c\leqslant80$	14.091	1.963	0.919	0.016	2.276	1.112	0.926	0.053
$f_c>80$	15.487	2.190	0.953	0.073	1.959	1.178	0.932	0.042



(a) 圆柱试件($20<f_c\leqslant50$)　(b) 圆柱试件($50<f_c\leqslant80$)　(c) 圆柱试件($f_c>80$)

(d) 矩形柱试件($20<f_c\leqslant50$)　(e) 矩形柱试件($50<f_c\leqslant80$)　(f) 矩形柱试件($f_c>80$)

图 16　本文公式的峰值压应变预测值与试验值对比

Fig. 16　Comparison of experimental values and calculated values of peak strain

4　结　论

1)建立数据库试验数据处理方法,包括混凝土保护层处理方法、约束混凝土达到峰值应力时箍筋应力计算方法、纵筋应力处理方法、非约束混凝土的峰值压应变处理方法及体积配箍率计算方法。

2)本文搜集 326 个约束混凝土柱的轴压应力 - 应变关系曲线数据,376 个约束混凝土试件峰值压应力试验数据及 376 个约束混凝土试件峰值压应变试验数据,建立了约束混凝土本构关系数据库。

3)基于 Mander 模型和过镇海模型,建立了约束混凝土受压应力 - 应变曲线统一方程。对数据库试验数据进行对比分析,结果表明,本文统一方程的预测曲线与试验曲线吻合较好,准确性较高,适用范围更广。

4)本文基于 Richard 公式的形式,提出了峰值压应力和峰值压应变计算公式,定义了参数 k_c、k_ε。利用本文得出的计算公式,对数据库试验数据进行对比分析。结果表明,本文公式预测误差控制在 15% 以内,预测结果精确度较高,适用范围更广。

参考文献

[1] 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
Code for design of concrete structure: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010

[2] 过镇海,张秀琴,张达成,等. 混凝土应力 - 应变全曲线的试验研究[J]. 建筑结构学报,1982(1): 1
GUO Zhenhai, ZHANG Xiuqin, ZHANG Dacheng, et al. Experimental investigation of the complete stress-strain curve of concrete[J]. Journal of Building Structures, 1982(1): 1. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.1982.01.001

[3] 汤郅. 高强螺旋箍筋约束高强混凝土柱力学性能研究[D]. 深圳:深圳大学,2015

[4] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Observed stress-strain behavior of confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1827. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1827)

[5] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model of confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)

[6] RAZVI SR, SAATCIOGLU M. Circular high-strength concrete columns under concentric compression[J]. ACI Structural Journal,

1999, 96(5): 817
[7] 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): 131
SHI Qingxuan, WANG Nan, WANG Qiuwei, et al. Uniaxial compressive stress-strain model for high-strength concrete confined with high-strength lateral ties[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5): 131. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.12.0894
[8] BADUGE S K, MENDIS P, NGO T. Stress-strain relationship for very-high strength concrete (>100 MPa) confined by lateral reinforcement[J]. Engineering Structures, 2018, 177: 795. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.08.008
[9] 郑文忠,侯翀驰,常卫. 高强钢棒螺旋箍筋约束混凝土圆形截面柱受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2018,39(6):21
ZHENG Wenzhong, HOU Chongchi, CHANG Wei. Experimental study on the mechanical behavior of circular concrete columns with high-strength spiral stirrups[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(6):21. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.06.003
[10] 张微敬,张兵,蒋孝鹏,等. 强约束大尺寸钢筋混凝土柱轴心受压试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2013,33(1):106
ZHANG Weijing, ZHANG Bing, JIANG Xiaopeng, et al. Experimental study on axial compressive behavior of full-scale reinforced concrete columns with close confinement[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(1): 106. DOI: 10.13197/j.eeev.2013.01.027
[11] 钱稼茹,纪晓东,乐毓敏. 拉筋复合箍约束混凝土短柱轴心受压试验研究[J]. 土木工程学报,2012,45(11):61
QIAN Jiaru, JI Xiaodong, LE Yumin. Experimental study on axial compressive behavior of short concrete columns confined with hoops and crossties [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(11): 61. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2012.11.013
[12] LÉGERON F, PAULTRE P. Uniaxial confinement model for normal- and high-strength concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(2): 241. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:2(241)
[13] 白生翔. 钢筋混凝土构件基本抗震性能设计[R]. 北京:中国建筑科学研究院建研科技股份有限公司,2014
BAI Shengxiang. Design of basic seismic behavior of reinforced concrete member [R]. Beijing: China Academy of Building Research and Construction Technology Company, 2014
[14] ASSA B, NISHIYAMA M, WATANBE F. New approach for modeling confinement concrete I: Circular columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(7): 743. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:7(743)
[15] CUSSON D, PAULTRE P. High-strength concrete columns confined by rectangular ties[J]. Journal of Structural Engineering,1994,120(3):783. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:3(783)
[16] KIM S. Behavior of high-strength concrete columns[D]. Raleigh: North Carolina State University, 2007
[17] LI B, PARK R, TANAKA H. Stress-strain behavior of high-strength concrete confined by ultra-high and normal-strength transverse reinforcements[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(3):395
[18] TOKLUCU M T. Behavior of reinforced concrete columns confined with circular spirals and hoops[D]. Toronto:University of Toronto,1992
[19] WANG Weilun, ZHANG Mingyang, TANG Yun, et al. Behaviour of high-strength concrete columns confined by spiral reinforcement under uniaxial compression [J]. Construction and Building Materials, 2017, 154:496. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.179
[20] 宋佳,李振宝,杜修力. 箍筋约束高强混凝土应力-应变本构关系模型[J]. 天津师范大学学报(自然科学版),2012,32(4):41
SONG Jia, LI Zhenbao, DU Xiuli. Stress-strainmodel for high strength concrete confined by hoop reinforcement [J]. Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition), 2012, 32(4):41. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1114.2012.04.009
[21] 李一鸣. 箍筋约束再生混凝土受压应力-应变本构关系研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2018
[22] 祝平瑞. 500 MPa级螺旋箍筋约束C100混凝土圆柱轴压力学性能研究[D]. 深圳:深圳大学,2016
[23] HAN B S, SHIN S W. Confinement effects of high-strength reinforced concrete tied columns [J]. International Journal of Concrete Structures & Materials, 2006, 18(2E):133. DOI: 10.4334/ijcsm.2006.18.2e.133
[24] SAATCIOGLU M, RAZVI S R. High-strength concrete columns with square sections under concentric compression[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(12):1438. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:12(1438)
[25] 符佳, 杜修力, 张建伟. 大尺寸钢筋高强混凝土柱的轴心受压性能[J]. 建筑结构, 2013, 43(5): 77
FU Jia, DU Xiuli, ZHANG Jianwei. Mechanical properties of large-size reinforced high-strength reinforced concrete columnsunder axial compression [J]. Building Structure, 2013, 43(5): 77. DOI: 10.19701/j.jzjg.2013.05.015
[26] 胡钟. 高强箍筋约束高强混凝土柱在轴压下的力学性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2010
[27] 李振宝,宋佳,杜修力,等. 方形箍筋约束混凝土轴压力学性能尺寸效应试验研究[J]. 北京工业大学学报,2014,40(2):223
LI Zhenbao, SONG Jia, DU Xiuli, et al. Experimental study on size effect of compressive response of concrete confined by square stirrups [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2014, 40(2): 223. DOI: 10.11936/bjutxb2014020223
[28] 唐信. 高轴压下超高强混凝土柱轴压特性及徐变性能研究[D]. 深圳:深圳大学,2016
[29] Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens: ASTM C39/C39M-18[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018
[30] SHARMA U K, BHARGAVA P, KAUSHIK S K. Behavior of confined high strength concrete columns under axial compression [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2005, 3(2): 267. DOI: 10.3151/jact.3.267
[31] 贺霞. 高强螺旋箍筋约束高强混凝土力学性能的试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2008
[32] KIM Y S, KIM H G, PARK C B, et al. Evaluation of minimum spiral reinforcement ratio of circular RC columns[J]. Journal of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 2017, 21(6): 1. DOI: 10.11112/jksmi.2017.21.6.001
[33] 叶列平,叶燕华. 箍筋约束高强混凝土应力-应变全曲线的试验研究[J]. 南京建筑工程学院学报, 1994,31(4):67
YE Lieping, YE Yanhua. Experimental study on the complete stress-strain curves of high strength concrete confined by stirrups [J]. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, 1994, 31(4): 67
[34] SHI Qingxuan, TIAN Yuan, WANG Nan, et al. Comparison study of high-strength concrete confined by normal-and high-strength lateral ties[J]. Advanced Science Letters, 2011, 4(8/9/10): 2686. DOI: 10.1166/asl.2011.1737
[35] AWATI M, KHADIRANAIKAR R B. Behavior of concentrically loaded high performance concrete tied columns[J]. Engineering Structures,2012,37:76. DOI:10.1016/j.engstruct.2011.12.040
[36] LI Dong, JIN Liu, DU Xiuli, et al. Size effect tests of normal-strength and high-strength RC columns subjected to axial compressive loading[J]. Engineering Structures, 2016, 109: 43. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.11.022
[37] MARVEL L, DOTY N, LINDQUIST W, et al. Axial behavior of high-strength concrete confined with multiple spirals [J]. Engineering Structures, 2014, 60:68. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.12.019
[38] 李振宝,杨修广,宋佳,等. 高强箍筋约束混凝土轴压力学性能尺寸效应试验研究[J]. 混凝土,2013 (8):1
LI Zhenbao, YANG Xiuguang, SONG Jia, et al. Experimental study on the size effect of axial compressive mechanical performance of concrete confined by high-strength stirrups[J]. Concrete, 2013(8): 1. DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2013.08.001
[39] RICHARD F E, BRANDTZÆG A, BROWN R L. A study of the failure of concrete under combined compressive stresses [J]. Bulletins-Engineering Experimental Station, 1928,26(12):185

(编辑 赵丽莹)