

文章编号: 1000-4750(2010)10-0182-08

高强箍筋高强混凝土柱约束箍筋用量研究

孙治国¹, 司炳君², *王东升¹, 于德海¹

(1. 大连海事大学道路与桥梁工程研究所, 辽宁, 大连 116026; 2. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁, 大连 116024)

摘 要: 为研究高强箍筋约束高强混凝土柱塑性铰区配箍要求, 统计了国内外进行的 98 个矩形截面和 11 个圆形截面高强箍筋高强钢筋混凝土柱拟静力试验数据。分析了影响高强箍筋高强混凝土柱延性抗震能力的主要因素为配箍特征值、轴压比、纵筋配筋率、混凝土保护层厚度等。在此基础上, 通过回归分析分别以 2% 和 3% 极限位移角为延性目标, 建议了具有 85% 保证率的高强箍筋高强混凝土柱塑性铰区约束箍筋用量计算公式及配箍构造措施, 适用于混凝土轴心抗压强度在 40MPa—110MPa 之间, 箍筋屈服强度在 400MPa—800MPa 之间, 试验轴压比在 0—0.6 之间的高强箍筋高强混凝土柱。

关键词: 结构工程; 高强箍筋; 高强混凝土; 框架柱; 延性

中图分类号: TU375.3 **文献标识码:** A

RESEARCH ON CONFINING REINFORCEMENT FOR HIGH-STRENGTH CONCRETE COLUMNS WITH HIGH-STRENGTH STIRRUPS

SUN Zhi-guo¹, SI Bing-jun², *WANG Dong-sheng¹, YU De-hai¹

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China;

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

Abstract: Quasi-static test results of 98 rectangular and 11 circular high-strength concrete (HSC) columns with high-strength stirrups (HSS) are collected to study the confining reinforcement for ductile HSC columns. Based on the analysis of test results, it is concluded the parameters that have significant influences on the ductility of HSC columns are characteristic value of stirrups, axial load ratio, longitudinal reinforcement and concrete cover thickness. Based on regression analysis, design equations and design details are suggested, which stipulate the amount of confining reinforcement required to achieve ultimate drift ratios of 2% and 3% with 85% assurance rate for HSC columns. The design equations and details can be applied to the columns with concrete compression strength of 40MPa—110MPa, stirrup yield strength of 400MPa—800MPa and experimental axial load ratio of 0—0.6.

Key words: structural engineering; high-strength stirrups; high-strength concrete; frame columns; ductility

高强混凝土的脆性对混凝土柱的延性和耗能能力产生较大影响, 特别是当其承受较大轴压时, 使用普通强度的约束箍筋, 为满足延性抗震要求而

需要的配箍率较高, 造成箍筋配置太密以至于无法施工, 大大限制了高强混凝土结构在强震区的使用。而采用高强箍筋以减少箍筋用量, 对柱形成有

收稿日期: 2009-04-22; 修改日期: 2009-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878033, 50978042); 地震行业科技专项基金项目(200808021); 大连海事大学青年骨干教师基金项目(2009QN055)

作者简介: 孙治国(1980—), 男, 山东德州人, 博士生, 从事结构抗震研究(E-mail: szg_1999_1999@163.com);

司炳君(1971—), 男, 黑龙江宾县人, 副教授, 博士, 从事结构抗震研究(E-mail: sibingjun@sina.com);

*王东升(1974—), 男, 内蒙古哲里木盟人, 教授, 博士, 从事桥梁抗震研究(E-mail: dswang@newmail.dlmu.edu.cn);

于德海(1977—), 男, 辽宁朝阳人, 讲师, 博士, 从事工程地质与岩土工程研究(E-mail: ydhdy1977@163.com).

效约束并提高其延性抗震能力,为高强混凝土结构在强震区的推广应用提供了新的解决途径^[1-2]。国内外学者对混凝土轴心抗压强度在 40MPa 以上,箍筋屈服强度在 400MPa 以上的高强箍筋高强混凝土柱的抗震性能进行了众多的试验研究,一个基本认识为:对承受较高轴压的高强混凝土柱,通过合理配置高强箍筋,仍能充分保证其延性和耗能能力;而对承受较低轴压的高强混凝土柱,只要箍筋间距满足构造要求,使用屈服强度在 400MPa 左右的约束箍筋一般能保证其延性抗震能力,而不建议采用强度过高的约束箍筋^[3]。针对混凝土材料强化的发展趋势,张国军等^[4]根据收集的高强混凝土框架柱拟静力试验数据,通过回归分析建立了高强混凝土柱配箍特征值与轴压比和极限位移角之间的关系,并提出了配箍特征值的实用计算公式;Li 和 Park^[5]对高强混凝土柱延性抗震能力的影响因素进行了广泛总结,并借助高强箍筋高强混凝土柱弯矩-曲率关系的数值模拟数据,提出了满足其不同曲率延性的塑性铰区约束箍筋用量设计公式。

然而,由于缺乏充足的试验数据及必要的理论支持,目前无论我国现行建筑抗震设计规范(GB 50011-2001)^[6]及高强混凝土结构技术规程(CECS 104:99)^[7]、美国 ACI318-08 规范^[8]及新西兰 NZS 3101 规范^[9],均对高强混凝土在强震区的使用进行了较为严格的限制。如我国建筑抗震设计规范(GB 50011-2001)规定,抗震设防烈度为 9 度,混凝土强度不宜超过 C60,8 度时不宜超过 C70。而高强混凝土结构技术规程(CECS 104:99)则规定,抗震设计时钢筋混凝土柱取用的混凝土强度等级一般不宜超过 C80,对于设防烈度为 8 度的钢筋混凝土结构,抗震柱的混凝土强度等级不宜超过 C70,9 度时不宜超过 C60。NZS 3101 规范主要根据 Waston^[10]等人的研究,适用于混凝土轴心抗压强度在 20MPa—40MPa,箍筋屈服强度小于 400MPa 的混凝土柱。

本文在考虑轴力 P - Δ 效应的基础上,建立了评价混凝土柱延性抗震能力的统一标准,统计了国内外进行 98 个矩形截面和 11 个圆形截面高强箍筋高强混凝土柱拟静力试验数据;分析了影响其延性抗震能力的若干主要因素,通过回归分析,建立了柱极限位移角与其配箍特征值、轴压比、纵筋配筋、混凝土保护层厚度等因素的关系,提出了可行的高强箍筋约束高强混凝土柱塑性铰区约束箍筋用量计算公式。

1 试验数据处理及整理

本文试验数据主要以美国太平洋地震工程研究中心(以下简称 PEER 柱数据库)及部分国内试验数据为主,由于试验加载装置及试验者提供数据的方式各不相同,可获得的柱滞回曲线中的侧向荷载包含了不同加载模式的影响,如标准加载方式下的侧向荷载 F_H 、试验过程中直接记录的侧向荷载 F_{Rep} 、柱底弯矩 M_{base} 与柱高 L 的比值 F_{eff} 等,由于试验轴力的存在使得滞回曲线并不统一,称之为轴力的 P - Δ 效应。

如图 1 所示,第 1 种试验装置在试验过程中可保证轴力始终垂直向下,本文称之为标准加载方式;第 2 种装置中,轴力是靠锚固于底部的高强拉杆受拉而施加于柱顶,轴力始终垂直于柱顶截面,由于轴力的水平分量,这种装置使得试验采集的荷载 F_{Rep} 增大;而第 3 种装置试验过程中由于施加轴力的压杆随柱发生偏移而使得采集的侧向荷载减少。在高轴压或柱侧移较大的情况下,是否考虑轴力的 P - Δ 效应对滞回曲线有较大影响。如文献[11]中试验装置为加载方式 2,以混凝土抗压强度为 65MPa,试验轴压比为 0.313 的 RC-1 试件为例,当侧向荷载分别为 F_{eff} 和 F_H 时,试件的滞回曲线有非常明显的差别(图 2 所示),能否正确处理轴力的 P - Δ 效应将会对研究结论产生很大的影响。

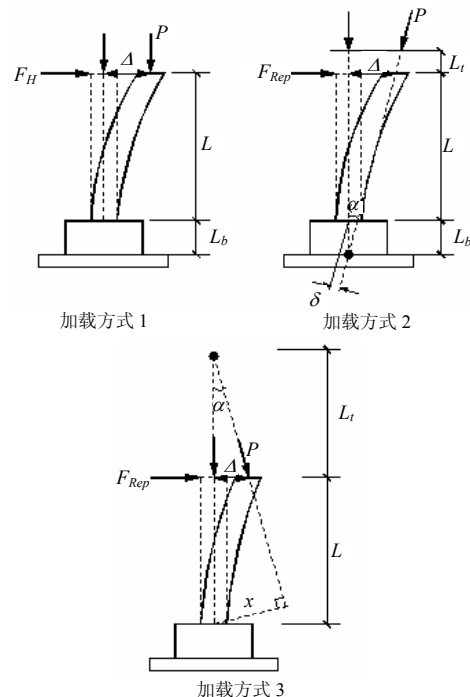


图 1 P - Δ 效应的修正

Fig.1 P - Δ effect correction

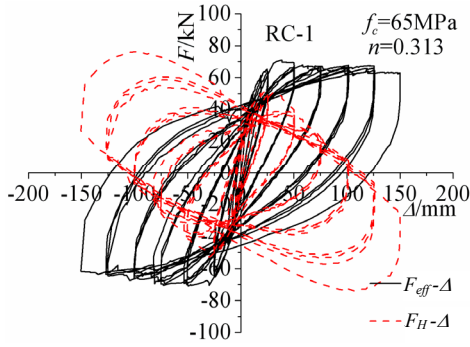


图2 轴力 $P-\Delta$ 效应对试件延性的影响

Fig.2 Influence of $P-\Delta$ effect on the ductility of the specimen

为便于比较, 首先将各试验者提供的代表不同含义的柱滞回曲线统一转化为图 1 中的标准格式, 其它加载方式下的侧向荷载与本文中定义的标准荷载的转化关系如下:

加载方式 2:

$$M_{base} = F_{Rep} \times L + P \times \delta = F_H \times L + P' \times \Delta \quad (1)$$

$$\delta = L_b \times \sin(\alpha) \quad (2)$$

$$F_H = F_{Rep} - P \times \sin(\alpha) \quad (3)$$

$$P' = P \cos(\alpha) \quad (4)$$

一般情况下, 由于 α 较小, 可按 $P' = P$, $\sin(\alpha) = \tan(\alpha)$ 处理, 将式(1)左右同时除以 L , 则有:

$$F_{eff} = \frac{M_{base}}{L} = F_{Rep} + \frac{P \times \delta}{L} = F_H + \frac{P \times \Delta}{L} \quad (5)$$

$$\delta = L_b \times \sin(\alpha) \cong L_b \times \tan(\alpha) =$$

$$L_b \times \left[\frac{\Delta \left(\frac{L + L_t}{L} \right)}{L + L_t + L_b} \right] \quad (6)$$

加载方式 3:

$$M_{base} = F_{Rep} \times L + P \times X = F_H \times L + P' \times \Delta \quad (7)$$

$$X = (L + L_t) \times \sin(\alpha) \cong$$

$$(L + L_t) \times \tan(\alpha) = (L + L_t) \frac{\Delta}{L_t} \quad (8)$$

$$F_H = F_{Rep} + \frac{P \times \Delta}{L_t} \quad (9)$$

共整理了 98 个矩形截面、11 个圆形截面高强箍筋高强混凝土柱的试验数据, 所有试件均发生弯曲破坏, 图 3 为试件相关参数的分布情况。统计试件混凝土轴心抗压强度 f_c 在 42.5MPa—118MPa 之间, 以 80MPa—90MPa 最多; 箍筋屈服强度 f_{yt} 在 391MPa—1424MPa 之间, 集中于 400MPa—800MPa; 试验轴压比 n 在 0—0.64 之间, 集中于 0.2—0.5; 体积配箍率 ρ_v 在 0.63%—6.38% 之间, 集中于 1.0%—4.5% 之间; 纵筋配筋率 ρ_l 为 0.99%—

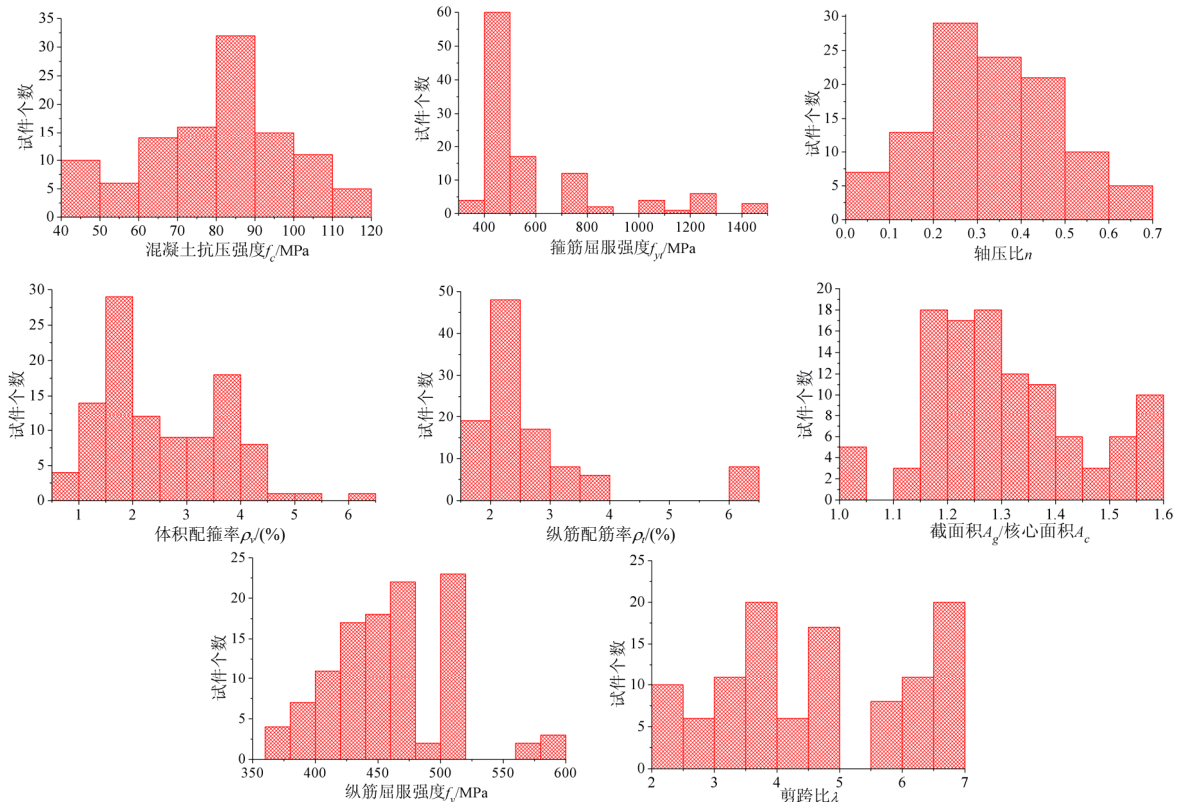


图3 高强混凝土柱参数统计

Fig.3 Statistics of the parameters for high strength concrete columns

6.03%，集中于 1.5%—3.0%，试件截面与核心面积的比值 A_g / A_c 在 1—1.56 之间，集中于 1.15—1.4；纵筋屈服强度 f_y 在 361MPa—586MPa 之间，集中于 420MPa—520MPa；剪跨比 λ 在 2.0—6.6，分布较为均匀。

另外，试件极限位移角 R_u 定义为柱极限位移 Δu 与其高度的比值，极限位移 Δu 及位移延性系数 μ_{Δ} 的定义见图 4 所示。

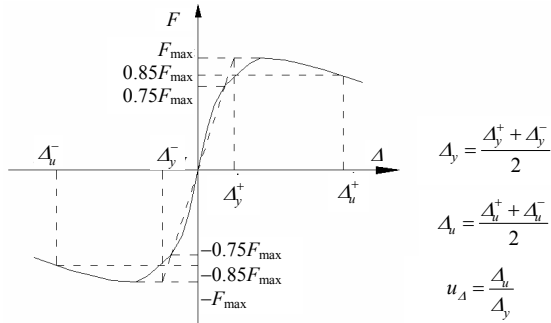


图 4 高强混凝土柱极限位移及位移延性系数的定义

Fig.4 Definition of ultimate displacement and ductility parameter for HSC columns

2 现有研究工作的对比

对于高强混凝土框架柱的极限位移角，不同学者根据各自的试验资料，回归了不同的建议公式。王琳榕等^[12]通过 10 个试验轴压比在 0.49—0.56 之间的矩形截面高强混凝土柱的拟静力试验，并结合以往的试验数据，回归出如下极限位移角的经验公式：

$$R_u = \frac{\sqrt{\lambda_v}}{11.943 + 19.823n} \quad (10)$$

其中， λ_v 为配箍特征值。

张国军等^[4]根据收集的 108 根高强混凝土框架柱的拟静力试验结果，建立了如下极限位移角的计算公式：

$$\lambda_v = (0.18 + 0.25n) \times [1 - \sqrt{1 - R_u / (0.062 - 0.033n)}] \quad (11)$$

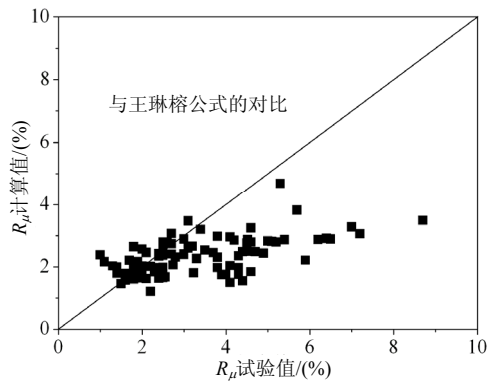
肖岩等(2002)^[13]根据进行的足尺高强混凝土柱的拟静力试验及 Bayrak 等人^[14]的试验结果，回归了如下形式的计算公式：

$$(\Delta / L)_u = 28 \ln(\alpha + 1) + \frac{38}{\sqrt{\beta + 1}} - 31(\%) \quad (12)$$

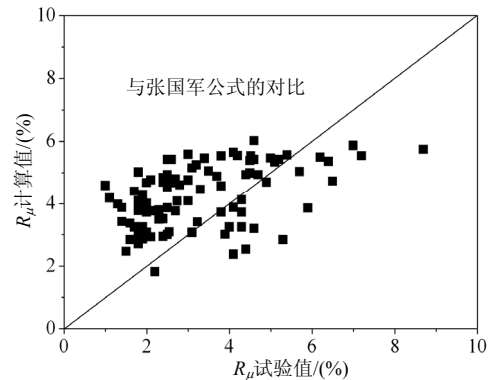
$$\alpha = \frac{A_{sh} f_{yh}}{s h_c f_c} \quad (13)$$

$$\beta = \frac{P}{A_g f_c} \quad (14)$$

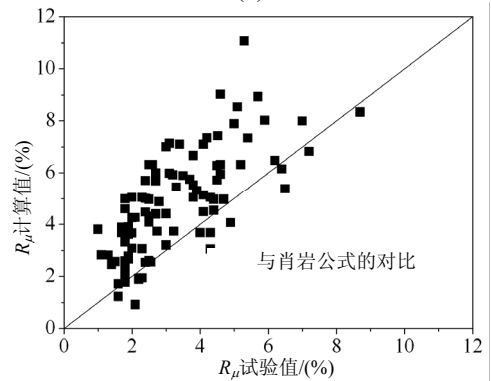
将以上收集到的矩形截面高强混凝土柱的试验资料与各个学者建议的公式进行对比，如图 5 所示。可以看出，王琳榕建议的公式略偏于保守，张国军公式与试验结果离散较大，而肖岩公式计算得到的试件极限位移角偏大，含有较多不安全因素。



(a)



(b)



(c)

图 5 高强混凝土柱极限位移角理论与试验结果的对比
Fig.5 Comparison of calculated and experimental ultimate drift ratios for HSC columns

3 高强箍筋高强混凝土柱延性影响因素分析

3.1 配箍特征值的影响

提高高强混凝土柱的体积配箍率可有效增加对核心混凝土的约束,增大混凝土的强度和延性,并提高了对纵筋的侧向约束能力,有效防止纵筋屈曲,从而增大高强混凝土柱的延性变形能力。Bayrak 和 Sheikh^[14]、Légeron 和 Paultre^[15]、Hwang 等^[16]进行的矩形截面柱的试验结果均表明了体积配箍率对柱延性变形能力的有益作用。

同样,采用高强箍筋也可提高对核心混凝土的有效约束,并增强纵筋抵抗屈曲的能力,从而增加高强混凝土柱的延性变形能力,Muguruma^[17]进行了不同混凝土强度,不同轴压下的3组高强混凝土柱的对比试验,每组中箍筋强度分别为328.4MPa和792.3MPa,其余条件相同,试验结果表明(图6),提高箍筋强度可有效提高高强混凝土柱的延性。

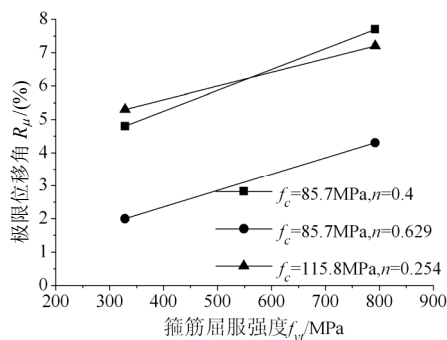


图6 箍筋强度对高强混凝土柱极限位移角的影响

Fig.6 Influence of transverse reinforcement strength on the ultimate drift ratios of HSC columns

混凝土抗压强度 f_c 越高,其延性抗震能力越不易保证,Légeron 和 Paultre^[15,18]的试验结果,ACI-ASCE 委员会^[19]、Azizinamini^[20]等进行的研究结果均表明,随混凝土抗压强度增大,柱的延性变形能力减少。

将体积配箍率、箍筋强度及混凝土强度综合考虑,利用高强混凝土柱的配箍特征值 $\rho_v f_{yt} / f_c$ 分析,Razvi 和 Saatcioglu^[21]通过对高强混凝土柱拟静力试验结果的广泛对比研究发现,在其它条件一致的情况下,只要高强混凝土柱的配箍特征值相同,且最小配箍率及箍筋间距满足要求,不同混凝土强度的柱变形能力基本相似。Paultre 等^[18]的研究也发现,高强混凝土柱的延性及耗能能力与其配箍特征值 $\rho_v f_{yt} / f_c$ 正相关。

3.2 轴压比的影响

对普通强度钢筋混凝土柱,轴压比对其延性抗震能力的影响是不利的,对于本文研究的高强箍筋约束高强混凝土柱,Bayrak 和 Sheikh^[14]、Légeron 和 Paultre^[15]、Azizinamini^[20]等进行的矩形截面柱的试验结果证实,随轴压比提高,试件延性变形能力降低。Saatcioglu 和 Baingo^[11]进行的圆形截面高强混凝土柱的试验结果也可证明轴压比对其变形能力的不利作用。

3.3 纵筋配筋的影响

高强混凝土柱纵筋对其延性性能的影响目前仍未有明确结论,Galeota 等^[22]的试验结果表明,在轴压比为0.2和0.3两种情况下,纵筋配筋率为6.03%的高强混凝土柱比配筋率为1.51%的柱极限位移角增大(图7)。Sakai^[23]进行的高强混凝土柱的拟静力试验结果也得出了相同的结论。这可能由于柱纵筋在混凝土保护层脱落后将起到骨架作用,对塑性铰的形成和充分发展具有有益作用。

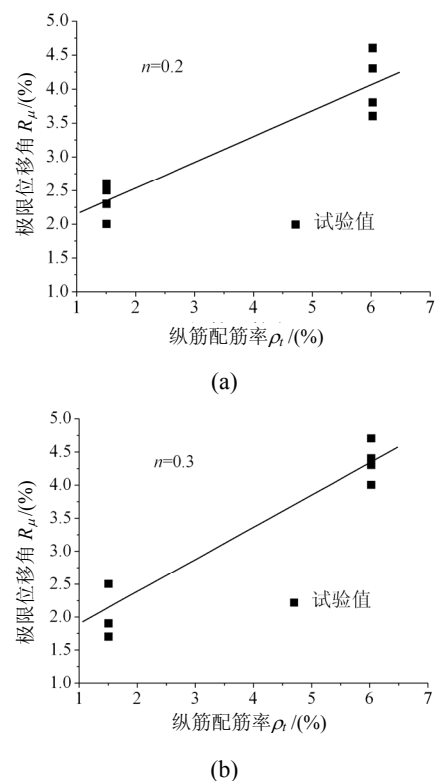


图7 纵筋配筋对高强混凝土柱极限位移角的影响

Fig.7 Influence of longitudinal reinforcement on the ultimate drift ratios of HSC columns

3.4 A_g/A_c 的影响

混凝土保护层脱落后,柱的延性更多依赖于箍筋约束的混凝土,因此 A_g/A_c 越大,需要的约束箍筋越多。王琳榕等^[12]进行的试验结果证明了柱

A_g/A_c 值与试件极限位移角的关系,他们进行了轴压比分别为 0.50 和 0.55 左右的两组试验,每组试件轴压比、体积配箍率、纵筋配筋率等相似,试件的极限位移角与 A_g/A_c 的关系见图 8 所示。

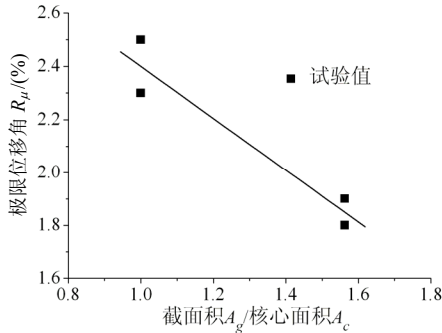


图 8 A_g/A_c 对高强混凝土柱极限位移角的影响

Fig.8 Influence of A_g/A_c on the ultimate drift ratios of the HSC columns

4 高强箍筋高强混凝土柱约束箍筋用量

4.1 配箍计算公式的回归

结合以上进行的分析,可借助新西兰 NZS 3101 规范格式,列出如下高强箍筋高强混凝土柱极限位移角的回归公式:

$$R_{\mu}(\%) = A \times \xi + B \quad (15)$$

式中:

$$\xi = \frac{A_{sh}}{sh_c} \times \frac{f_{yt}}{f_c} \times \frac{1}{(1.3 - \rho_l m) \times n} \times \frac{A_c}{A_g} \quad (16)$$

式中, $m = \frac{f_y}{0.85f_c}$, 基于 origin 软件,以统计的矩

形截面柱试验数据进行回归,经分析,得到以下公式(图 9 所示):

$$R_{\mu}(\%) = 6.06 \times \frac{A_{sh}}{sh_c} \times \frac{f_{yt}}{f_c} \times \frac{1}{(1.3 - \rho_l m) \times n} \times \frac{A_c}{A_g} + 1.70 \quad (17)$$

同时,可得到与之平行的具有 85%保证率的柱极限位移角计算公式:

$$R_{\mu}(\%) = 6.06 \times \frac{A_{sh}}{sh_c} \times \frac{f_{yt}}{f_c} \times \frac{1}{(1.3 - \rho_l m) \times n} \times \frac{A_c}{A_g} + 0.65 \quad (18)$$

国内外大部分抗震设计规范对钢筋混凝土框架柱的极限位移角限值取在 2%—2.5%之间;而极限位移角达 4.0%以上的高强混凝土柱可认为具有很好延性^[15,19]。Brachmann 等^[24]曾将中等地震活动

性地区钢筋混凝土柱的极限位移角定义为 1.5%,而在较高地震活动性地区则取为 2.5%。基于此,本文分别以 2%和 3%极限位移角为抗震设计目标,建立高强箍筋约束高强混凝土柱配箍设计公式,供不同地震活动风险区采用。

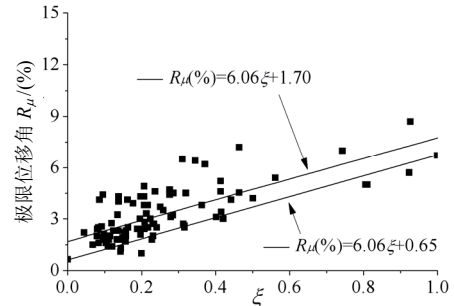


图 9 高强混凝土柱极限位移角的回归

Fig.9 Regression of the ultimate drift ratios for HSC columns

对矩形截面柱,考虑到实际工程中多为方形截面且配筋对称的特点,可直接将矩形截面柱约束箍筋用量计算公式以体积配箍率形式给出。对于圆形截面柱,根据已有研究,直接取 1.4 倍截面系数考虑^[10]。

由式(18)可知,当混凝土抗压强度及轴压比较高时,为达到延性变形要求而需要的约束箍筋用量可能会较多,Razvi 和 Saatcioglu^[21]认为,过高的配箍并不一定取得更好的延性变形能力,且从施工角度考虑,柱体积配箍率达 5%已基本接近其上限。结合试验数据,我们认为 4%—5%可作为高强混凝土柱体积配箍率的上限,且能够充分保证高强混凝土柱的延性变形能力。同时,参考《高强混凝土结构技术规程》(CECS 104:99)^[7]中对混凝土柱的配箍要求,对其最低体积配箍率进行限定。

综上,当以 2%极限位移角作为高强混凝土柱的延性抗震设计目标时,对矩形截面柱,由式(18)可得:

$$0.04 \geq \rho_v = \frac{1}{2.24} \times \frac{f_c}{f_{yt}} \times (1.3 - \rho_l m) \times n \times \frac{A_g}{A_c} \geq 0.008 \quad (19)$$

对圆形截面柱:

$$0.04 \geq \rho_v = \frac{1}{3.21} \times \frac{f_c}{f_{yt}} \times (1.3 - \rho_l m) \times n \times \frac{A_g}{A_c} \geq 0.008 \quad (20)$$

当以 3%极限位移角作为高强混凝土柱的延性抗震设计目标时,对矩形截面柱:

$$0.05 \geq \rho_v = \frac{1}{1.29} \times \frac{f_c}{f_{yt}} \times (1.3 - \rho_l m) \times n \times \frac{A_g}{A_c} \geq 0.01 \quad (21)$$

对圆形截面柱:

$$0.05 \geq \rho_v = \frac{1}{1.84} \times \frac{f_c}{f_{yt}} \times (1.3 - \rho_l m) \times n \times \frac{A_g}{A_c} \geq 0.01 \quad (22)$$

4.2 配箍构造措施

当轴压比小于 0.2 时, 高强混凝土柱的延性抗震能力易于保证, 此时若配置强度过高的箍筋, 按式(19)一式(22)计算得到的箍筋间距可能太大, 无法对纵筋提供有效约束而造成纵筋过早屈曲, 反而对柱的延性不利。因此, 当柱轴压比小于 0.2 时, 不建议采用屈服强度大于 400MPa 的高强度箍筋^[19-20,25]。基于此, 对高强混凝土柱的配箍设计进行如下限制:

$$n \leq 0.2 \text{ 时, } f_{yt} \leq 400 \text{ MPa} \quad (23)$$

$$n > 0.2 \text{ 时, } f_{yt} > 400 \text{ MPa} \quad (24)$$

同时, 为充分保证箍筋对纵筋形成有效侧向约束, 根据 Budek 及 Bing 等人的研究结果^[26-27], 对柱塑性铰区最大箍筋间距 s 进行如下限制:

$$f_{yt} \leq 500 \text{ MPa 时, } s \leq 4d_b \quad (25)$$

$$f_{yt} > 500 \text{ MPa 时, } s \leq 5d_b \quad (26)$$

式中, d_b 为纵筋直径。

4.3 公式的验证

式(19)一式(22)均根据矩形截面柱试验数据回归分析得到, 为验证对所有截面形式高强混凝土柱的适用性, 将本文整理的所有试验数据对式(19)一式(22)进行验证, 见图 10、图 11 所示, 同时, 为区分轴压因素的影响, 将试验数据按轴压比 $0 \leq n \leq 0.2$, $0.2 < n \leq 0.4$, $n > 0.4$ 进行区分。可以看出, 除个别试件外, 建议式(19)一式(20)对不同轴压下高强混凝土柱 2% 的极限位移角设计目标有充分的保证。同样, 除个别试件外, 建议式(21)一式(22)对保证高强混凝土柱 3% 极限位移角的设计目标也具有充分

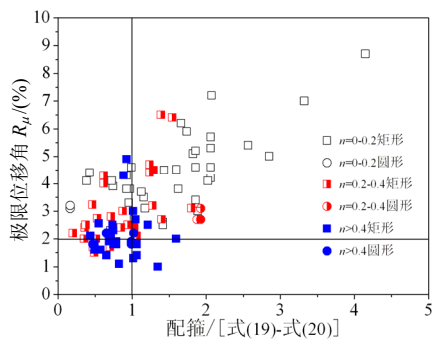


图 10 对 2% 为极限位移角的设计公式的验证
Fig.10 Evaluation of the design equations indicating the confining reinforcement for 2% ultimate drift ratio

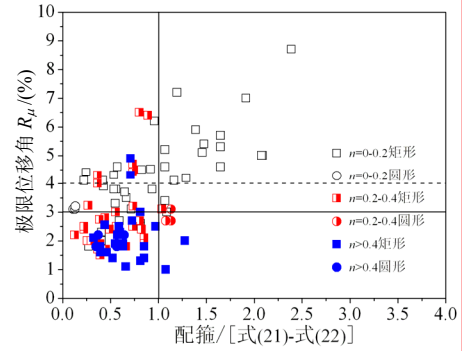
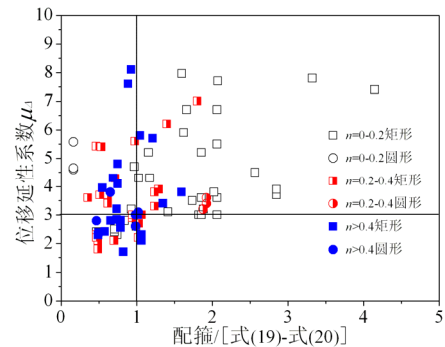
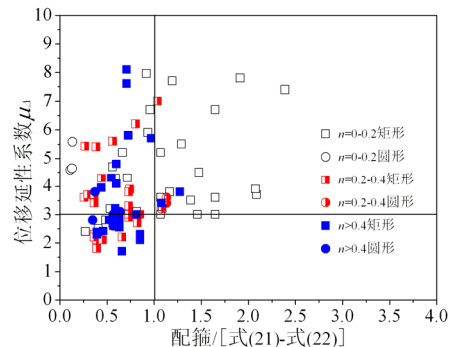


图 11 对 3% 为极限位移角的设计公式的验证
Fig.11 Evaluation of the design equations stipulating the confining reinforcement for 3% ultimate drift ratio 的可靠性, 另外, 由图 11 可以看出, 满足建议式(21)一式(22)配箍要求的高强混凝土柱极限位移角较多在 4% 以上。

图 12 则将所有柱的位移延性系数与建议式(19)一式(22)进行了对比, 可以发现, 建议公式可保证高强混凝土柱的位移延性系数基本大于 3.0。



(a)



(b)

图 12 建议公式与位移延性系数的对应关系
Fig.12 The relationship between the proposed design equation and the displacement ductility factors

4.4 适用范围

参考回归时采用的数据范围, 对本文建议的高强混凝土柱约束箍筋用量设计公式的适用范围作如下限制: 混凝土轴心抗压强度 f_c 在 40MPa—110MPa 之间, 箍筋屈服强度 f_{yt} 在 400MPa—

800MPa 之间, 试验轴压比 n 在 0—0.6 之间(对应设计轴压比约为 0—1.0 之间), 体积配箍率 ρ_v 在 0.8%—5.0% 之间, 纵筋配筋率 ρ_l 为 1.5%—3%, 试件截面与核心面积的比值 A_g / A_c 在 1—1.4 之间, 纵筋屈服强度 f_y 为 360MPa—520MPa, 剪跨比 λ 在 2.0—6.0 之间。

5 结论

本文在考虑轴力 P - Δ 效应的基础上, 对国内外进行的高强箍筋约束高强混凝土柱拟静力试验数据进行了广泛总结, 分析了影响高强箍筋约束高强混凝土柱延性抗震性能的主要因素为配箍特征值、轴压比、纵筋配筋、混凝土保护层厚度等。借助回归分析, 建立了联系高强箍筋约束高强混凝土柱极限位移角与各影响因素的回归公式, 并分别以 2% 和 3% 极限位移角为设计目标, 建立了具有 85% 保证率的高强箍筋约束高强混凝土柱约束箍筋用量计算公式, 并提出了高强箍筋的适用条件和配箍构造措施要求。建议公式对高强混凝土柱 2% 和 3% 极限位移角设计目标的实现具有较大的可靠性, 且基本保证柱位移延性系数在 3.0 以上。这也说明, 在强震区, 对混凝土轴心抗压强度在 40MPa—110MPa, 轴压比在 0—0.6 之间的高强混凝土柱, 通过合理配置高强箍筋, 是可以有效保证其延性抗震能力的。

参考文献:

- [1] 陈肇元. 高强与高性能混凝土的发展及应用[J]. 土木工程学报, 1997, 30(5): 3—11.
Chen Zhaoyuan. Development and utilization of high-strength and high-performance concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(5): 3—11. (in Chinese)
- [2] 徐有邻. 我国混凝土结构用钢筋的现状与发展[J]. 土木工程学报, 1999, 32(5): 3—9.
Xu Youlin. Present situation and development of reinforcing steel for concrete structure [J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(5): 3—9. (in Chinese)
- [3] 司炳君, 孙治国, 王东升. 高强箍筋约束高强混凝土柱抗震性能研究综述[J]. 土木工程学报, 2009, 42(4): 1—9.
Si Bingjun, Sun Zhiguo, Wang Dongsheng. Review on the seismic behavior of high strength concrete columns using high strength transverse reinforcement [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(4): 1—9. (in Chinese)
- [4] 张国军, 吕西林, 刘健新. 高强约束混凝土框架柱基于位移的抗震设计[J]. 同济大学学报(自然科学版),

- 2007, 35(2): 143—148.
Zhang Guojun, Lu Xilin, Liu Jianxin. Displacement-based seismic design of high-strength concrete frame columns with confinement [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(2): 143—148. (in Chinese)
- [5] Li B, Park R. Confining reinforcement for high-strength concrete columns [J]. ACI Structural Journal, 2004, 101(3): 314—324.
- [6] GB 50011-2001, 建筑抗震设计规范[S]. 2001.
GB 50011-2001, Code for seismic design of buildings [S]. 2001. (in Chinese)
- [7] CECS 104:99, 高强混凝土结构技术规程[S]. 1999.
CECS 104:99, Technical specification for high-strength concrete structures [S]. 1999. (in Chinese)
- [8] ACI Committee 318, ACI 318-08 Building code requirements for structural concrete and commentary [S]. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2007.
- [9] NZS 3101: Part 1. Code of practice for the design of concrete structures [S]. Standards Association of New Zealand, Wellington, New Zealand, 1995.
- [10] Watson S, Zahn F A, Park R. Confining reinforcement for concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1994, 120(6): 1798—1824.
- [11] Saatcioglu M, Baingo D. Circular high-strength concrete columns under simulated seismic loading [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1999, 125(3): 272—280.
- [12] 王琳榕, 朱金铨. 周期反复荷载下高强混凝土压弯构建抗震性能的试验研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 1996, 24(增 1): 145—151.
Wang Linrong, Zhu Jinquan. Experimental study of the seismic behavior of high-strength concrete structures subjected to low cyclic loads [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science), 1996, 24(S1): 145—151. (in Chinese)
- [13] 肖岩, 伍云天, 尚守平. 高强混凝土柱抗震性能的足尺试验研究及理论分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(5): 746—749.
Xiao Yan, Wu Yuntian, Shang Shouping. Experimental and analytical studies on full-scale high-strength concrete columns [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2002, 32(5): 746—749. (in Chinese)
- [14] Bayrak O, Sheikh S A. Confinement reinforcement design considerations for ductile hsc columns [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1998, 124(9): 999—1010.
- [15] Légeron F, Paultre P. Behavior of high-strength concrete columns under cyclic flexure and constant axial load [J]. ACI Structural Journal, 2000, 97(4): 591—601.
- [16] Hwang S K, Yun H D, Park W S. Seismic performance of high-strength concrete columns [J]. Magazine of Concrete Research, 2005, 57(5): 247—260.

(参考文献[17]—[27]转第 213 页)

- reinforced by wound steel wires under external pressure [J]. *China Plastic*, 2008, 22(4):53–56. (in Chinese)
- [7] 刘兵山, 黄聪. Patran 从入门到精通[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- Liu Bingshan, Huang Cong. Patran from entry to the master [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2003. (in Chinese)
- [8] 马爱军, 周传月, 王旭. Patran 和 Nastran 有限元分析专业教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- Ma Aijun, Zhou Chuanyue, Wang Xu. Patran and Nastran finite element analysis professional guide [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [9] 陈烈民, 杨宝宁. 复合材料的力学分析[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2006.
- Chen Liemin, Yang Baoning. Mechanical analysis for composite materials [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2006. (in Chinese)
- [10] 中国石油天然气集团公司. GB50341-2003 立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范[S]. 中国计划出版社, 2003.
- China National Petroleum Corporation. GB50341-2003 Code for design of vertical cylindrical welded steel oil tanks [S]. China Planning Press, 2003. (in Chinese)

(上接第 189 页)

- [17] Muguruma H, Watanabe F, Komuro T. Applicability of high strength concrete to reinforced concrete ductile column [J]. *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 1989, 11: 309–316.
- [18] Paultre P, Légeron F, Mongeau D. Influence of concrete strength and transverse reinforcement yield strength on behavior of high-strength concrete columns [J]. *ACI Structural Journal*, 2001, 98(4): 490–501.
- [19] ACI-ASCE Committee 441. High-strength concrete columns: state of the art [J]. *ACI Structural Journal*, 1997, 94(3): 323–335.
- [20] Azizinamini A, Kuska S S B, Brungardt P. Seismic behavior of square high-strength concrete columns [J]. *ACI Structural Journal*, 1994, 91(3): 336–345.
- [21] Razvi S R, Saatcioglu M. Strength and deformability of confined high-strength concrete columns [J]. *ACI Structural Journal*, 1994, 91(6): 1–10.
- [22] Galeota D, Giammatteo M M, Marino R. Seismic resistance of high strength concrete columns [C]. Acapulco, Mexico: No.1390, Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, 1996.
- [23] Sakai Y, Hibi J, Otani S. Experimental study on flexural behavior of reinforced concrete columns using high-strength concrete [J]. *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 1990, 12: 323–330.
- [24] Brachmann I, Browning J, Matamoros A. Drift-dependent confinement requirements for reinforced concrete columns under cyclic loading [J]. *ACI Structural Journal*, 2004, 101(5): 669–677.
- [25] Thomsen J H, John W W. Lateral load behavior of reinforced concrete columns constructed using high-strength materials [J]. *ACI Structural Journal*, 1994, 91(5): 605–615.
- [26] Budek A M, Priestley M J N, Lee C O. Seismic design of columns with high-strength wire and strand as spiral reinforcement [J]. *ACI Structural Journal*, 2002, 99(5): 660–670.
- [27] Bing L, 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): 395–406.