

# 高强箍筋约束高强混凝土柱抗震性能研究综述

司炳君<sup>1</sup> 孙治国<sup>2</sup> 王东升<sup>2</sup> 王清湘<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学, 辽宁大连 116024; 2. 大连海事大学, 辽宁大连 116026)

**摘要:** 强烈地震作用下, 高强箍筋对保证高强混凝土柱的抗震能力具有重要意义。为研究高强箍筋约束高强混凝土柱的抗震性能, 对国内外进行的混凝土抗压强度在 40~112 MPa、箍筋屈服强度在 400~1569 MPa 的混凝土柱的抗震拟静力试验结果进行广泛总结, 发现基于普通强度混凝土得出的钢筋混凝土柱压弯构件的矩形应力图、抗剪承载力及塑性铰约束箍筋用量计算公式并不适用于高强箍筋约束的高强混凝土柱, 对此应进行修正。对高强混凝土柱的延性抗震能力, 一个基本结论为, 对于承受较高轴压的高强混凝土柱, 通过合理配置高强箍筋, 是可以充分保证其延性和耗能能力的; 而对于承受较低轴压的高强混凝土柱, 只要箍筋间距满足要求, 使用高强箍筋一般能保证其延性抗震性能。

**关键词:** 高强混凝土柱; 高强箍筋; 抗震性能; 延性; 综述

**中图分类号:** TU224 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-131X (2009) 04-0001-09

## Review of studies on the seismic behavior of high strength concrete columns with high strength transverse reinforcement

*Si Bingjun<sup>1</sup> Sun Zhiguo<sup>2</sup> Wang Dongsheng<sup>2</sup> Wang Qingxiang<sup>1</sup>*

(1. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** High strength transverse reinforcement plays a crucial role for the seismic performance of high strength concrete columns under severe earthquakes. A comprehensive study of the experimental results for reinforced concrete columns is undertaken to evaluate the seismic behavior of high strength concrete columns, with the concrete compression strength in the range of 40~112 MPa and the transverse reinforcement yield strength in the range of 400~1569 MPa. It is concluded that the design formulas for the rectangular stress block of concrete, the shear strength of the column and the confining reinforcement in the potential plastic hinge region developed for normal strength concrete are not applicable to high strength concrete columns confined by high strength transverse reinforcement. For the ductility behavior of high strength concrete columns under high levels of axial load, it is considered possible to obtain ductile behavior through proper use of high strength transverse reinforcement. It is easy to obtain ductile behavior for the columns under relatively low levels of axial load if the transverse spacing is properly designed.

**Keywords:** high strength concrete column; high strength transverse reinforcement; seismic behavior; ductility; review

**E-mail:** sibingjun@yahoo.com.cn

## 引言

现代土木工程结构向大跨、高耸、重载及承受恶劣环境的方向发展, 推动了高强混凝土在现代土木工程中的应用<sup>[1]</sup>。在建筑结构的框架柱或桥墩中, 与普

通强度钢筋混凝土墩柱相比, 高强混凝土柱的主要优点在于<sup>[1-2]</sup>: ①增大结构强度和刚度; ②更易于实现“强柱弱梁”的设计思想; ③由于高强混凝土早期强度较高, 加快了施工进度; ④减少了对钢筋锚固长度要求; ⑤减少截面尺寸, 增加下部净空; ⑥提高耐久性, 这一点对更易于遭受腐蚀的桥墩来说尤为重要。

高强混凝土的脆性对墩柱结构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

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (50308027)、海岸和近海工程国家重点实验室基金 (LP0504、LP0709)

作者简介: 司炳君, 博士, 副教授

收稿日期: 2007-11-20

Academic Journal Electronic Publishing House

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配箍率<sup>[3]</sup>，对柱形成有效约束并提高高强混凝土柱的延性抗震性能，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。

在美国，强度达 113.9 MPa 的超高强混凝土已经在西海岸震区使用<sup>[4]</sup>，高层建筑柱使用强度达 100 MPa 以上的混凝土已屡见不鲜。日本建设省在 1988~1993 年开展了题为“采用高强度混凝土和钢筋开发先进的钢筋混凝土建筑”的 5 年全国性研究项目，其目的在于生产出抗压强度在 30~120 MPa 的混凝土，以及屈服强度在 400~1200 MPa 的高强度钢筋，并在开发新的钢筋混凝土建筑时使用这些材料<sup>[5]</sup>。在我国，早期如清华大学<sup>[6-7]</sup>、大连理工大学<sup>[8-9]</sup>，近期如沈阳建筑大学<sup>[10-11]</sup>等高校也对高强箍筋约束高强混凝土柱的抗震性能进行了研究。有所不同的是，清华大学和大连理工大学使用的高强箍筋主要为冷轧带肋钢筋，屈服强度约在 550~750 MPa；而沈阳建筑大学阎石教授主要采用屈服强度为 1300 MPa 左右的高强预应力棒作为横向约束箍筋。我国台湾学者结合岛内“高速铁路计划”，对高强箍筋约束高强混凝土空心截面桥墩的抗震性能也进行了较多研究<sup>[12]</sup>。

通过国内外钢筋混凝土柱（桥墩）抗震性能的研究文献发现，即使对于普通强度的混凝土柱，国外也较多采用屈服强度在 400 MPa 以上的高强钢筋配箍<sup>[13-21]</sup>，我国台湾学者在近期关于空心截面桥墩抗震性能的研究中<sup>[22-25]</sup>，使用的箍筋强度也多在 400 MPa 以上。而目前我国大陆仍较多采用强度较低的 HPB235 级钢筋作为箍筋，总体上比国外低一个强度等级，难以有效保证高强混凝土墩柱在高轴压下的抗震安全，同时，低强钢筋也含有较多的不经济因素<sup>[3]</sup>。本文在总结国内外相关文献的基础上，对采用高强箍筋约束的高强混凝土柱（桥墩）的抗震性能进行介绍，以期促进这一技术在我国的应用和发展。

需要说明的，本文所讨论的高强箍筋约束高强混凝土柱，是指混凝土圆柱体抗压强度大于 40 MPa、箍筋屈服强度大于 400 MPa 的高强混凝土柱，作者搜集了 137 根高强箍筋约束高强混凝土柱的抗震拟静力试验结果（混凝土圆柱体抗压强度范围为 40~112 MPa，箍筋屈服强度范围为 400~1569 MPa），并总结了高强混凝土柱（桥墩）矩形应力图、抗剪强度、约束箍筋用量及延性等抗震性能的研究结论。每个柱的混凝土强度与箍筋强度的关系如图 1 所示。本文中，如无特殊说明，混凝土强度均指圆柱体抗压强度，箍筋强度均为屈服强度。

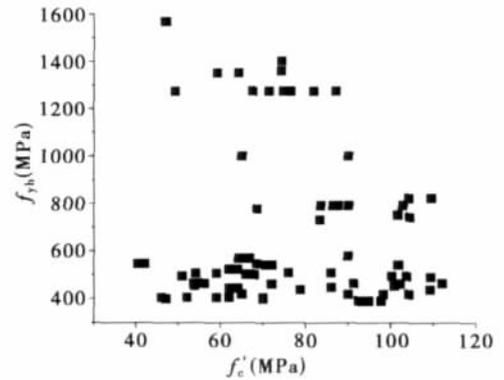


图 1 混凝土强度与箍筋强度的关系  
Fig. 1 Relationship between concrete strength and transverse yield strength

### 1 高强箍筋约束高强混凝土柱压弯构件的矩形应力图

我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)<sup>[26]</sup>、美国 ACI 318—05 规范<sup>[27]</sup>以及新西兰规范 NZS 3101—1995<sup>[28]</sup>均采用等效矩形应力图计算混凝土结构在压弯作用下的抗弯承载力。在矩形应力图中，主要有两个参数  $\alpha_1$  和  $\beta_1$ ，对混凝土柱抗弯承载力的计算起重要作用。

我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)中，矩形应力图的应力值为混凝土轴心抗压强度设计值乘以  $\alpha_1$ ，当混凝土强度等级不超过 C50 时， $\alpha_1$  取为 1.0，当混凝土强度等级为 C80 时， $\alpha_1$  取为 0.94，其间按线性内插法确定；参数  $\beta_1$  为矩形应力图高度与混凝土受压区高度的比值，当混凝土强度等级不超过 C50 时， $\beta_1$  取为 0.8，当混凝土强度等级为 C80 时， $\beta_1$  取为 0.74，其间按线性内插法确定。

ACI 318—05 规范的矩形应力图，参数  $\alpha_1$  为矩形应力图中的应力与混凝土圆柱体抗压强度的比值，取为 0.85，参数  $\beta_1$  为矩形应力图高度与混凝土受压区高度的比值，当抗压强度  $f'_c$  在 17~28 MPa 时，取 0.85，当  $f'_c$  超过 28 MPa，抗压强度每增加 7 MPa， $\beta_1$  减少 0.05，但不小于 0.65。

新西兰规范 NZS 3101—1995 适用的混凝土抗压强度范围最高为 70~100 MPa：

$$f'_c > 55 \text{ MPa 时,} \quad \alpha_1 = 0.85 - 0.004(f'_c - 55) \geq 0.75 \quad (1)$$

$$f'_c > 30 \text{ MPa 时,} \quad \beta_1 = 0.85 - 0.008(f'_c - 30) \geq 0.65 \quad (2)$$

各国规范规定的矩形应力图主要基于普通强度的混凝土柱压弯试验结果得到，随着高强及超高强混凝土的广泛应用，这些公式能否应用于高强混凝土柱的正截面承载力计算值得探讨。近期的研究结果表

明<sup>[29-30]</sup>, 当混凝土强度较低时, 按照 ACI 318—05 规范及新西兰 NZS 3101—1995 规范计算的柱抗弯强度偏于安全, 但是对于承受较大轴压的高强混凝土柱, 计算结果较大, 偏于不安全。我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002) 及叶列平教授<sup>[31]</sup>对高强混凝土矩形应力图的规定也仅限于 C80 及以下强度的混凝土构件, 对于 C80 以上混凝土压弯构件的矩形应力图则没有说明。

基于此, 不少学者根据高强混凝土柱的压弯试验结果对矩形应力图进行修正, 使其适用于高强混凝土压弯柱的正截面承载力计算。

Azizinamini 等人<sup>[32]</sup>通过对屈服强度在 454~753 MPa 之间的高强箍筋约束高强混凝土柱的拟静力试验发现, 当混凝土抗压强度小于 55 MPa 时, 按 ACI 318 规范计算的桥墩抗弯强度小于试验值, 偏于安全; 当混凝土强度大于 97 MPa 后, 按 ACI 318 规范计算的桥墩抗弯强度偏大, 可能不安全。并建议, 当混凝土抗压强度大于 69 MPa 时, 对  $\alpha_1$  值进行修正:

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.05 \left( \frac{f'_c - 69}{6.9} \right) \geq 0.60 \quad (3)$$

Attard 等<sup>[33]</sup>基于概率分析结果, 提出了适用于高强混凝土柱的双参数矩形应力图, 用于抗压强度在 20~100 MPa 之间的混凝土:

$$\alpha_1 = k_1 k_3 = 1.2932 (f'_c)^{-0.0998} \geq 0.71 \quad (4)$$

$$\beta_1 = k_2 = 1.0948 (f'_c)^{-0.091} \geq 0.67 \quad (5)$$

Ozbakkaloglu 等<sup>[34]</sup>通过对高强混凝土柱的回归分析, 提出了如下矩形应力图表达式, 适用于混凝土强度最高达 130 MPa 的高强混凝土柱:

$f'_c > 30$  MPa 时,

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.0014 (f'_c - 30) \geq 0.72 \quad (6)$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.0020 (f'_c - 30) \geq 0.67 \quad (7)$$

## 2 高强箍筋约束高强混凝土柱的抗剪承载力

强震作用下, 钢筋混凝土柱的脆性剪切破坏将严重削弱结构的整体抗震能力。近几十年来, 对于钢筋混凝土柱或桥墩的抗剪承载力分析, 已经发展了不少分析模型, 但对于高强箍筋约束高强混凝土柱的适用性, 尚值得探讨。且从目前所进行的试验研究来看, 大量的试验集中针对于高强箍筋约束高强混凝土柱的弯曲破坏, 专门针对其抗剪承载力进行的研究还较少。

美国 ACI 318—05 规范规定的压弯构件抗剪承载力计算公式:

$$V_n = V_c + V_s \quad (8)$$

$$V_c = 0.17 \left( 1 + \frac{N_u}{144 A_g} \right) \sqrt{f'_c} b_w d \quad (9)$$

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} \quad (10)$$

式中:  $\sqrt{f'_c} \leq 8.3$  MPa,  $V_c$ 、 $V_s$  分别为混凝土和箍筋提供的抗剪承载力;  $N_u$  为设计轴力大小;  $A_g$  为柱的截面积;  $b_w$  为柱截面宽度, 对于圆形截面柱为截面直径;  $d$  为受压区边缘至受拉纵筋中心之间的距离;  $A_v$  为间距  $s$  内的抗剪箍筋总面积;  $f_{yt}$  为箍筋屈服强度;  $s$  为箍筋间距。

Priestley 等<sup>[35]</sup>建议的 UCSD 模型:

$$V = V_c + V_s + V_p \quad (11)$$

$$V_c = k \sqrt{f'_c} A_e \quad (12)$$

式中:  $k$  为混凝土的抗剪承载力随柱位移延性增加而退化的系数;  $A_e$  为柱的有效抗剪面积, 可取为 0.8 倍截面积; 对于圆形截面柱,

$$V_s = \frac{\pi}{2} \frac{A_{sh} f_{yh} D'}{s} \cot \theta \quad (13)$$

对于方形截面柱:

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} D'}{s} \cot \theta \quad (14)$$

式中:  $D'$  为柱加载方向上最外侧箍筋中心之间的距离;  $\theta$  为剪切裂缝与柱轴线之间的夹角。

$$V_p = \frac{D - c}{2a} P \quad (15)$$

式中:  $V_p$  为轴力提供的抗剪承载力;  $D$  为柱的宽度;  $c$  为混凝土受压区高度;  $a$  为柱反弯点至柱底的高度。

Kowalsky 等在 UCSD 模型的基础上, 对箍筋和混凝土对柱抗剪强度贡献的计算公式进行了修正, 提出了改进的 UCSD 模型<sup>[36]</sup>。

Martirossya 和肖岩<sup>[37-38]</sup>通过高强箍筋 (449 MPa) 约束的高强混凝土 (86 MPa) 柱的拟静力试验结果表明, 由于高强混凝土的脆性, 其提供的抗剪承载力随位移的增加快速退化, ACI 318—05 规范和 Priestley 等的 UCSD 模型<sup>[35]</sup>均过高地估计了高强混凝土柱的抗剪强度, 偏于不安全, 并且对 UCSD 模型公式进行了局部修正, 以考虑高强混凝土对柱抗剪承载力的贡献随位移增大而快速退化的特性。

Budek 等<sup>[39]</sup>进行的试验结果 (箍筋强度高达 1569 MPa、混凝土强度在 40~47 MPa) 表明, 高强箍筋可有效提高柱的抗剪强度, 但 ACI 318 规范规定的抗剪强度计算结果偏于不安全。而改进的 UCSD 模型<sup>[36]</sup>可较好地计算高强箍筋约束高强混凝土柱的抗剪能力。

## 3 高强箍筋约束高强混凝土柱延性及耗能能力

### 3.1 高强箍筋约束高强混凝土柱的约束箍筋用量

为充分保证柱 (桥墩) 的抗震安全, 各国规范均

对其塑性铰区最低约束箍筋用量进行了规定，保证在强烈地震下钢筋混凝土柱塑性铰的转动能力，形成有效耗能机制。

美国 ACI 318—05 规范要求的约束箍筋用量为：

对圆形截面柱：

$$\rho_s = 0.45 \left( \frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yt}}$$

或  $\rho_s = 0.12 \frac{f'_c}{f_{yt}}$  中的大值 (16)

对矩形截面柱：

$$A_{sh} = 0.3s b_c \frac{f'_c}{f_{yt}} \left( \frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right)$$

或  $A_{sh} = 0.09s b_c \frac{f'_c}{f_{yt}}$  中的大值 (17)

式中： $A_{ch}$  为箍筋外边缘包围的核心混凝土面积； $b_c$  为最外侧的箍筋中心之间的距离。

新西兰 NZS 3101—1995 规范中，对约束箍筋用量的规定考虑了轴力作用对箍筋用量的影响：

对于矩形截面柱：

$$\frac{A_{sh}}{s b_c} = \left[ \frac{A_g}{A_{ch}} \frac{1.3 - \rho_l m}{3.3} \frac{f'_c}{f_{yt}} \frac{P_e}{\phi f'_c A_g} \right] - 0.006 \quad (18)$$

对于圆形截面柱：

$$\rho_s = \left[ \frac{A_g}{A_{ch}} \frac{1.3 - \rho_l m}{2.4} \frac{f'_c}{f_{yt}} \frac{P_e}{\phi f'_c A_g} \right] - 0.0084 \quad (19)$$

式中： $\rho_l$  为柱的纵筋配筋率； $m = f_y / 0.85 f'_c$ ； $\phi$  为强度折减系数。

可以看出，ACI 318—05 规范没有考虑轴压因素对约束箍筋需求量的影响，在较高的轴力水平下，难以有效保证高强混凝土柱的抗震安全。文献[40—41]的研究结果表明，在低轴压下（轴压比小于 0.2），ACI 318—05 规范规定的约束箍筋用量偏于保守，而对于承受较高轴压的高强混凝土柱，规定的约束箍筋用量偏少，难以有效保证柱的抗震安全。

新西兰 NZS 3101—1995 规范中对约束箍筋的用量考虑了轴力的影响，Li 等人<sup>[41]</sup>通过研究发现，对于箍筋强度小于 500 MPa 的高强混凝土柱，NZS 3101—1995 规范规定的矩形截面柱约束箍筋用量计算公式较为合理，但对于螺旋箍筋约束的柱，规定的约束箍筋用量偏于保守；对于使用屈服强度在 500 MPa 以上的箍筋约束的矩形截面柱，特别是在承受较高轴压的情况下，NZS3101 规范规定的箍筋用量不安全。通过回归分析，他们得出了专门针对于高强箍筋约束高强混凝土柱的约束箍筋用量计算公式：

对矩形截面高强混凝土柱：

$$\frac{A_{sh}}{s b_c} = \frac{A_g}{A_{ch}} \frac{\phi_u / \phi_y - 30 \rho_l m + 22}{\lambda} \frac{f'_c}{f_{yt}} \frac{P_e}{\phi f'_c A_g} \quad (20)$$

对圆形截面高强混凝土柱：

$$\frac{A_{sh}}{s b_c} = \frac{A_g}{A_{ch}} \frac{\phi_u / \phi_y - 55 \rho_l m + 25}{79} \frac{f'_c}{f_{yt}} \frac{P_e}{\phi f'_c A_g} \quad (21)$$

张国军<sup>[42]</sup>收集了 108 根高强混凝土框架柱的拟静力试验结果，混凝土立方体强度在 50~144.75 MPa，箍筋强度在 255~1424 MPa，轴压比在 0~1.47 之间。通过分析发现，高强混凝土柱的屈服位移角、最大位移角、极限位移角及延性系数均随着配箍特征值的增加而增加，随着配筋率的增加，柱的延性系数和极限位移角亦相应增加，随轴压比的增加而减少，且柱的截面积与核心混凝土面积之比越大，延性越低。并提出了配箍特征值的实用计算公式：

$$\lambda = (0.18 + 0.25n) [1 - \sqrt{1 - R_u / (0.062 - 0.033n)}] \quad (22)$$

式中： $n$  为轴压比； $R_u$  为柱的极限位移角。

### 3.2 高强箍筋约束高强混凝土柱的延性

与普通强度钢筋混凝土柱的延性抗震性能相似，当柱的轴压提高时，高强箍筋约束高强混凝土柱的承载力提高，但延性降低，强度和刚度退化速度加快；配箍率提高，延性和耗能能力增加；同时，采用复合箍筋能取得更好的约束作用，进而提高柱的延性<sup>[43—44]</sup>。下面分别针对不同轴压水平下高强混凝土柱的延性抗震性能进行介绍。

#### 3.2.1 高强箍筋约束高强混凝土柱在高轴压下的延性抗震性能

对于承受较大轴压的高强混凝土柱，为充分保证其抗震延性，当采用普通强度的箍筋时，需要的配箍率较高，甚至因配箍太密而无法施工。在这种情况下，采用高强度箍筋可有效减少配箍率，保证了对核心混凝土的有效约束。同时，高强箍筋能够对纵筋提供更好的侧向约束，防止纵筋过早屈曲，大量的试验结果已经证实，在力学含箍率  $\rho_s f_{yh} / f'_c$  相同，且箍筋满足最小配箍要求，同时箍筋间距满足要求的情况下，混凝土柱表现出相同的延性变形能力<sup>[45]</sup>，说明可以通过使用高强箍筋保证高强混凝土柱的延性。

Sheikh 等<sup>[4]</sup>对于强度为 55.2 MPa、轴压比为 0.64 的方形截面高强混凝土柱，使用强度为 464 MPa 约束箍筋且菱形配箍，在配箍率为 4.30% 的情况下，柱的曲率延性系数能够达到 16，位移延性系数达到 5.4，基本满足延性抗震需求。

Razvi 等<sup>[45]</sup>对高强箍筋约束高强混凝土柱在高轴压下的抗震性能进行了拟静力试验研究，对于混凝土强度达 85 MPa、轴压比达 0.5 的高强混凝土柱，使用的箍筋强度为 1362 MPa，配箍率为 2.4%。试验结果表明，柱的位移延性系数可达到 5，极限侧移角超过 12%。对混凝土强度在 86~116 MPa，配箍率为 4.4%

的高强桥墩,当箍筋强度由 328 MPa 增加到 792 MPa 时,其延性能力可为原来的 2.5 倍,其位移延性系数超过 7,侧移角超过 3%,充分证实了在高轴压下高强箍筋对保证高强混凝土柱延性的有利作用。

Bayrak 等<sup>[46-48]</sup>共进行了 24 个矩形或方形截面高强混凝土柱的拟静力试验,混凝土强度在 56.2~112.1 MPa 之间,箍筋强度在 463~1402 MPa 之间。试验结果证实,对于混凝土强度为 74.2 MPa、轴压比为 0.53 的柱,当配置 3.54%、强度为 1402 MPa 的高强箍筋时,柱的位移延性系数可达 6.3,表现出良好的延性和耗能能力。同时,试验结果证实,配置菱形箍筋可对所有的纵筋提供有效约束,防止了纵筋的屈曲,对提高柱的延性和耗能有利,而仅配置矩形方箍的柱,由于对纵筋的约束效应有限,延性较差。

我国清华大学<sup>[6-7]</sup>、大连理工大学<sup>[8-9]</sup>使用冷轧带肋箍筋约束高强混凝土柱的抗震性能试验研究,证实了高强冷轧带肋箍筋对提高高强混凝土柱延性的有效作用。沈阳建筑大学<sup>[10-11]</sup>研究了采用高强预应力钢棒(1275 MPa)作为横向约束的高强混凝土柱(C60 和 C90 混凝土)的抗震性能,研究发现,在**高强混凝土构件中配置适当的高强箍筋,可有效增强其延性,从而满足抗震要求,特别是在高轴压下,高强箍筋的作用更为明显。**

### 3.2.2 高强箍筋约束高强混凝土柱在低轴压下的延性抗震性能

对于承受较低轴压的高强混凝土柱,不建议使用强度超过 500 MPa 的高强约束箍筋,主要原因在于低轴压下**高强混凝土柱的延性易于保证,使用强度在 400~500MPa 之间的约束箍筋即可得到较好的延性水平<sup>[30,49]</sup>,同时,约束箍筋强度太高但箍筋间距太大时,易引起纵筋的过早屈曲<sup>[29]</sup>,对柱的延性不利。**Budek<sup>[39]</sup>和 Bing 等<sup>[50]</sup>的研究表明,为防止纵筋的过早屈曲而引起的延性降低,对普通强度的箍筋,建议箍筋最大间距为 4 倍纵筋直径,对超高强箍筋,最大间距为纵筋直径的 5 倍。

Hwang 等人<sup>[30,49]</sup>对混凝土强度为 68.6 MPa、轴压比约为 0.3、配箍强度在 548.8~779.1 MPa 之间的 8 根方形截面**高强混凝土柱进行了抗震性能的拟静力试验研究,结果表明,当配箍为 1.42 倍 ACI 318 规范规定的配箍量时,高强混凝土柱表现出较好的延性,其位移延性系数在 3.69~4.85 之间,曲率延性系数均超过 10,同时发现,高强箍筋虽然能够保证箍筋间距较大的情况下满足对混凝土的约束要求,但间距过大必然引起纵筋的过早屈曲,对延性不利,且对于轴压比在 0.3 以下的高强混凝土柱,使用强度过高的箍筋对柱**

的抗震延性几乎没有影响。

Thomsen 等人<sup>[51]</sup>研究了**高强箍筋(强度 793~1276 MPa 之间)约束高强混凝土(圆柱体抗压强度在 71~103 MPa 之间)柱在低轴压(0~0.2 比在之间),低配箍(小于或等于 ACI 318—89 规范的 50%)下的抗震性能,试验研究发现,所有柱均能达到 2%的极限侧移角,且当轴压为 0 时,侧移角可达 4%以上,在轴压较低的情况下,使用超高强箍筋对柱的延性影响不大。**

肖岩等<sup>[52-53]</sup>进行的高强混凝土柱抗震性能的足尺试验结果表明,对于混凝土强度达 64 MPa,轴压比为 0.2,配箍率仅为 ACI318 规范的 82%的高强混凝土柱,采用强度为 524 MPa 的高强箍筋,即能达到 6.0%的最大侧移角。

Matamoros 等<sup>[54]</sup>将**高强与普通强度混凝土桥墩在同样轴力(不是轴压比)下的抗震性能进行对比,主要讨论轴力、混凝土强度等参数对桥墩抗震性能的影响,高强混凝土柱式构件中,混凝土抗压强度约为 70 MPa,箍筋强度在 400~500 MPa 之间,轴压比在 0~37%之间,主要结论为:①桥墩的轴力提高,极限侧移角降低,但是在轴力较小的情况下,影响并不明显;②尽管高强混凝土表现出更大的脆性,但在同样的轴力下,混凝土强度提高,桥墩的极限侧移角反而增大,且柱塑性较区混凝土压碎脱落对应的延性增大,从而得出结论:在同样的轴力下,使用高强混凝土柱可有效避免地震中混凝土的压碎脱落,节约震后维护费用;③使用强度达 70 MPa 的混凝土柱,当轴压比小于 30%时,按照 ACI 318 规范配置箍筋的混凝土柱,其极限侧移角可达 4%。**

Martirosyan 和肖岩<sup>[37-38]</sup>对混凝土强度为 76~86 MPa、轴压比在 0.1~0.2 之间、箍筋强度为 510 MPa 的 6 根方形截面**高强混凝土柱进行的拟静力试验表明,对于配箍满足 ACI 318—95 规范要求的高强混凝土柱,轴压比小于 0.2 时,柱的位移延性系数可达到 6~8,对于配箍为 ACI 318 规范的 50%,但轴压比小于 0.1 的高强混凝土柱,仍能达到较好的延性;对于使用较粗纵筋的高强混凝土柱,由于纵筋抵抗屈曲的能力增加,柱的延性增加。**

### 3.2.3 高强箍筋约束高强混凝土柱在变轴力下的抗震性能

在地震或风荷载下,高层建筑柱或排架桥墩承受的轴力随侧向往复荷载而发生变化,其抗震延性与承受固定轴力的柱不同。Esmaeily 和肖岩<sup>[55]</sup>进行了 6 根**高强混凝土柱在固定轴力和变轴力下的拟静力试验,混凝土强度在 49.3~50.3 MPa 之间,箍筋强度为 469 MPa。**

试验结果表明,在固定轴力下,柱的强度和延性与单调 Pushover 加载得到柱的强度和延性相似,对于承受变轴力的柱,轴力的变化方式对柱的强度、延性和破坏形态影响很大。

Kuramoto 等<sup>[56]</sup>研究了高强箍筋(抗拉强度为 1352.4 MPa)约束高强混凝土柱(混凝土抗压强度在 59~64 MPa 之间)在变轴力和双向弯矩下的抗震性能。通过试验研究发现,变轴力下,当柱的初始轴力相同时,轴力变化情况、最大轴力值对柱的轴向变形影响不大;当柱的初始轴力较高或箍筋配置较少时,柱的轴向变形加快;随轴力增大,双向弯曲柱的延性降低。

### 3.2.4 箍筋弯钩对柱延性的影响

强烈地震作用下,钢筋混凝土柱塑性铰区混凝土保护层压碎脱落以后,箍筋应力急剧变大,并对核心混凝土和纵筋提供有效约束,箍筋不被拉断或弯钩不拉开是保证墩柱抗震延性的重要前提。Priestley 和 Park<sup>[57]</sup>指出,在柱的塑性铰区,箍筋接头必须焊接牢固或者弯成 135°弯钩并深入核心混凝土长度超过 8 倍箍筋直径。

Saatcioglu 等人<sup>[58]</sup>进行的试验表明,在圆形截面高强混凝土柱中,在保证箍筋 90°弯钩且深入核心混凝土后,单根的环形箍筋可对高强混凝土柱起到与螺旋箍筋相同的约束效应,但在加载后期,螺旋箍筋更能有效保证纵筋的稳定性。

Ho 等<sup>[40]</sup>的试验结果表明,对于方形截面的高强混凝土柱,在塑性铰区,当箍筋弯钩仅为 90°时,试验过程中弯钩张开,纵筋过早屈曲,建议箍筋应弯成 135°弯钩且深入核心混凝土长度大于 6 倍箍筋直径。Légeron 和 Paultre<sup>[59-60]</sup>对方形截面混凝土柱进行的试验证实了这种做法对保证高强混凝土柱延性的有效性。

### 3.2.5 墩台对柱的约束作用

在钢筋混凝土柱或桥墩构件中,由于柱的基础或桥墩的墩台对临近的柱中混凝土的有效约束(stub effect),在地震作用下,柱的破坏区域并不是发生在弯矩最大的柱与墩台交汇处,而是上移一定距离(图 2)<sup>[4]</sup>,并造成墩柱的承载力提高。肖岩等发现墩台的约束区域约呈 45°夹角,即约束高度约为 0.5 倍柱的直径<sup>[52-53]</sup>。

### 3.2.6 高强箍筋约束高强混凝土柱延性指标

高强混凝土柱的轴压承载力  $P_0$  可表示为:

$$P_0 = 0.85f'_c(A_g - A_c) + A_{st}f_y \quad (23)$$

Sheikh<sup>[4]</sup>和 Bayrak<sup>[46-48]</sup>等的试验结果表明,对于截面形状、配箍形式相同的高强混凝土柱,当以  $P_0$  为指标的轴压水平相同且配箍率与混凝土强度比值相

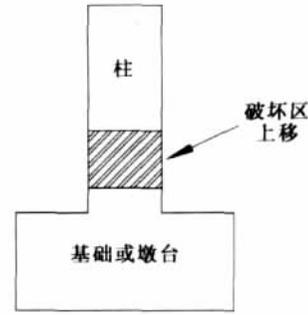


图 2 墩台的约束作用

Fig. 2 Stub effect in the columns

同时,不同强度的混凝土柱延性及耗能能力相似。即对于配箍形式相同的混凝土柱,当延性指标  $R_{AP}$  相同时,柱的延性相似。

$$R_{AP} = \frac{A_{sh}/A_{sh(ACI)}}{P/P_0} \quad (24)$$

式中:  $A_{sh}$  为柱的塑性铰区约束箍筋用量;  $A_{sh(ACI)}$  为满足 ACI 规范需求的约束箍筋用量;  $P$  为轴力。

Légeron 和 Paultre<sup>[59-60]</sup>的试验结果证实,在相同的轴压水平下,钢筋混凝土柱的有效约束系数  $I_e$  与柱的位移延性系数成正比。

$$I_e = \frac{f_{le}}{f'_c} \quad (25)$$

式中:  $f_{le}$  为约束箍筋对核心混凝土提供的约束力,按下式计算:

$$f_{le} = K_e \frac{A_{sh}}{cs} f'_h \quad (26)$$

式中:  $K_e$  为箍筋的几何有效系数;  $c$  为箍筋约束的核心混凝土宽度;  $f'_h$  为箍筋应力<sup>[61]</sup>。

## 4 结 论

大力推广高强钢筋高强混凝土结构在土木工程中的应用是提高我国建设水平的重要方向,高强箍筋约束高强混凝土柱抗震性能的研究打破了高轴压及高强混凝土柱在震区使用的禁区。目前我国在这方面的研究基础较为薄弱,大大限制了高强混凝土结构在我国的使用,本文力图对国内外所进行的高强箍筋约束高强混凝土抗震性能的研究成果进行较为全面的介绍,主要获得如下认识:

(1) 由于高强混凝土的应力-应变关系曲线同普通强度混凝土不同,国内外应用较为广泛的钢筋混凝土柱矩形应力图及抗剪承载力计算公式在计算高强混凝土柱时结果可能不安全或过于保守,对其应进行修正,使其能够适用于高强箍筋约束高强混凝土柱的抗弯、抗剪承载力计算。

(2) ACI 318 及 NZS 3101 规范为保证钢筋混凝土

柱延性而规定的最低约束箍筋用量计算公式, 无法保证高强箍筋约束高强混凝土柱的抗震安全, 甚至根本不适用于高强箍筋约束的高强混凝土柱, 应针对其特点进行专门研究。

(3) 即使在轴压比大于 0.6 的较高轴压下, 高强箍筋对高强混凝土柱仍能够提供有效约束, 充分保证了高强混凝土柱的延性和耗能能力。

(4) 对于轴压较低的高强混凝土柱, 因其延性抗震性能易于保证, 不建议使用强度过高的约束箍筋, 同时, 对箍筋最小间距进行规定从而保证反复荷载下纵筋不过早屈曲, 对提高高强混凝土柱的延性具有重要意义。

#### 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] Assa B, Nishiyama M. Prediction of load-displacement curve of high-strength concrete columns under simulated seismic loading [J]. ACI Structural Journal, 1998, 95 (5): 547-557
- [3] 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))
- [4] Sheikh S A, Shah D V, Khoury S S. Confinement of high-strength concrete columns [J]. ACI Structural Journal, 1994, 91(11): 100-111
- [5] 青山博之. 现代高层钢筋混凝土结构设计[M]. 张川, 译. 重庆: 重庆大学出版社, 2006 (Hiroyuki Aoyama. Design of modern highrise reinforced concrete structures [M]. Zhang Chuan, translation. Chongqing: Chongqing University Press, 2006(in Chinese))
- [6] 王浩, 张惠英. LL550 冷轧带肋箍筋高强混凝土柱抗震性能的试验研究[J]. 建筑结构, 2002, 32(3): 13-16(Wang Hao, Zhang Huiying. Experimental study on aseismic properties of high strength concrete columns with grade 550 cold-rolled ribbed steel stirrups[J]. Building Structures, 2002, 32(3): 13-16 (in Chinese))
- [7] 李蓬. 冷轧带肋箍筋高强混凝土压弯构件抗震性能的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2000 (Li Peng. Experimental study on the seismic properties of press-bending component with high strength concrete and cold-rolled ribbed steel stirrups [D]. Beijing: Tsinghua University, 2000 (in Chinese))
- [8] 王清湘, 赵国藩, 林立岩. 冷轧带肋箍筋柱轴压比及配箍率的试验研究[J]. 建筑结构, 1999, 29(9): 7-9 (Wang Qingxiang, Zhao Guofan, Lin Liyan. Experimental research on the ratio of axial load and stirrups for columns with cold rolled deformed stirrups [J]. Building Structures, 1999, 29(9): 7-9 (in Chinese))
- [9] 关萍, 关群. 冷轧带肋钢筋作箍筋对高强混凝土柱延性的影响[J]. 大连大学学报, 1999, 20(4): 56-58 (Guan Ping, Guan Qun. Effect of cold-rolled ribbed wires hooping on ductility of high-strength concrete columns [J]. Journal of Dalian University, 1999, 20 (4): 56-58 (in Chinese))
- [10] 阎石, 肖潇, 张曰果, 等. 高强钢筋约束混凝土矩形柱的抗震性能试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2006, 22(1): 7-10 (Yan Shi, Xiao Xiao, Zhang Yueguo, et al. Seismic performance of square HSC columns confined with high-strength PC rebar [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2006, 22(1): 7-10 (in Chinese))
- [11] 阎石, 张曰果, 王旭东. 圆形截面高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2006, 22(4): 538-542(Yan Shi, Zhang Yueguo, Wang Xudong. Seismic performance test study on circular HSC columns confined with high-strength PC rebar [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2006, 22 (4): 538-542(in Chinese))
- [12] Mo Y L, Nien I C. Seismic performance of hollow high-strength concrete bridge columns [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2002, 7(6): 338-349
- [13] Lehman D E, Moehle J P. Seismic performance of well-confined concrete bridge columns [R]. PEER Report, 1998/01. Berkeley: University of California, 2000
- [14] Calderone A J, Lehman D E, Moehle J P. Behavior of reinforced concrete bridge columns having varying aspect ratios and varying lengths of confinement[R]. PEER Report, 2000/08. Berkeley: University of California, 2001
- [15] Gh A E, Xiao Y. Seismic behavior of bridge columns subjected to various loading patterns[R]. PEER Report, 2002/15. Berkeley: University of California, 2002
- [16] Sheikh S A, Toklucu M T. Reinforced concrete columns confined by circular spirals and hoops[J]. ACI Structural Journal, 1993, 90(5): 542-553
- [17] Sheikh S A, Khoury S S. Confined concrete columns with stubs[J]. ACI Structural Journal, 1993, 90(4): 414-431
- [18] Wehbe N I, Saïidi M S, Sanders D H. Seismic performance of rectangular bridge columns with moderate confinement [J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(2): 248-258
- [19] Mo Y L, Wang S J. Seismic behavior of reinforced concrete columns [J]. Magazine of Concrete Research, 2000, 52 (6): 419-432

- evaluation of the seismic performance of reinforced concrete bridge columns [J]. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 2004, 130(6): 869-879
- [21] Sezen H, Moehle J P. Seismic tests of concrete columns with light transverse reinforcement [J]. *ACI Structural Journal*, 2006, 103(6): 842-849
- [22] Yeh Y K, Mo Y L, Yang C Y. Seismic performance of hollow circular bridge piers [J]. *ACI Structural Journal*, 2001, 98(6): 862-871
- [23] Yeh Y K, Mo Y L, Yang C Y. Seismic performance of rectangular hollow bridge columns[J]. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 2002, 128(1): 60-68
- [24] Yeh Y K, Mo Y L, Yang C Y. Full-scale tests on rectangular hollow bridge piers [J]. *Materials and Structures*, 2002, 35(2): 117-125
- [25] Mo Y L, Wong D C, Maekawa K. Seismic performance of hollow bridge columns[J]. *ACI Structural Journal*, 2003, 100(3): 337-348
- [26] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范 [S] (GB 50010—2002 Code for design of concrete structures[S] (in Chinese))
- [27] ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete(ACI 318—05) and commentary (ACI 318R—05)[S]
- [28] NZS 3101—1995 The design of concrete structures[S]
- [29] ACI-ASCE Committee 441. High-strength concrete columns: state of the art[J]. *ACI Structural Journal*, 1997, 94(3): 323-335
- [30] Hwang S K, Yun H D, Park W S, et al. Seismic performance of high-strength concrete columns [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2005, 57(5): 247-260
- [31] 叶列平, 庄崖屏, 吴佩刚, 等. 高强混凝土构件正截面承载力计算方法[J]. *土木工程学报*, 2000, 33(6): 70-75 (Ye Lieping, Zhuang Yaping, Wu Peigang, et al. The capacity of normal section for high-strength concrete members[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2000, 33(6): 70-75 (in Chinese))
- [32] Azizinamini A, Kuska S S B, Brungardt P, et al. Seismic behavior of square high-strength concrete columns [J]. *ACI Structural Journal*, 1994, 91(3): 336-345
- [33] Attard M M, Stewart M G. A two parameter stress block for high-strength concrete [J]. *ACI Structural Journal*, 1998, 95(3): 305-317
- [34] Ozbakkaloglu T, Saatcioglu M. Rectangular stress block for high-strength concrete [J]. *ACI Structural Journal*, 2004, 101(4): 475-483
- [35] Priestley M J N, Verma R, Xiao Y. Seismic shear strength of reinforced concrete columns [J]. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 1994, 120(7): 2310-2329
- [36] Kowalsky M J, Priestley M J N. Improved analytical model for shear strength of circular reinforced concrete columns in seismic regions [J]. *ACI Structural Journal*, 2000, 97(8): 388-396
- [37] Martirosyan A, Xiao Y. Flexural-shear behavior of high-strength concrete short columns[J]. *Earthquake Spectra*, 2001, 17(4): 679-695
- [38] Xiao Y, Martirosyan A. Seismic performance of high-strength concrete columns [J]. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 1998, 124(3): 241-251
- [39] 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
- [40] Ho J C M, Pam H J. Inelastic design of low-axially loaded high-strength reinforced concrete columns[J]. *Engineering Structures*, 2003, 25(8): 1083-1096
- [41] Li B, Park R. Confining reinforcement for high-strength concrete columns[J]. *ACI Structural Journal*, 2004, 101(3): 314-324
- [42] 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, Lü 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))
- [43] Ahn J M, Lee J Y, Bahn B Y, et al. An experimental study of the behavior of high-strength reinforced concrete columns subjected to reversed cyclic shear under constant axial compression [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2000, 52(3): 209-218
- [44] Kawatoh C, Unjoh S. Evaluation of seismic performance of high-strength reinforced concrete members[J]. *Technical Memorandum of Public works Research Institute*, 2002, 38(43): 457-466
- [45] Razvi S R, Saatcioglu M. Strength and deformability of confined high-strength concrete columns[J]. *ACI Structural Journal*, 1994, 91(6): 1-10
- [46] Bayrak O, Sheikh S A. Confinement reinforcement design considerations for ductile HSC columns [J]. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 1998, 124(9): 999-1010
- [47] Bayrak O. Seismic performance of rectilinearly confined high strength concrete columns [D]. Toronto: University of Toronto, 1998
- [48] Bayrak O, Sheikh S A. High-strength concrete columns under simulated earthquake loading [J]. *ACI Structural Journal*, 1997, 94(6): 708-722
- [49] Hwang S K, Yun H D. Effects of transverse reinforcement on flexural behavior of high-strength concrete columns [J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(1): 1-12

- [50] 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
- [51] Thomsen J H, Wallace J W. Lateral load behavior of reinforced concrete columns constructed using high-strength materials[J]. ACI Structural Journal, 1994, 91(5): 605-615
- [52] Xiao Y, Yun H W. Experimental study on full-scale high-strength concrete columns [J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(2): 199-207
- [53] 肖岩, 伍天云, 尚守平, 等. 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 Tianyun, Shang Shouping, et al. 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))
- [54] Matamoros A B, Sozen M A. Drift limits of high-strength concrete columns subjected to load reversals [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2003, 129(3): 297-313
- [55] Esmaily A, Xiao Y. Behavior of reinforced concrete columns under variable axial loads [J]. ACI Structural Journal, 2004, 101(1): 124-132
- [56] Kuramoto H, Kabeyasawa T, Shen F H. Deformation on ductility of high-strength reinforced concrete columns under varying triaxial forces [J]. ACI Structural Journal, 1995, 92(5): 1-8
- [57] Priestley M J N, Park R. Strength and ductility of concrete bridge columns under seismic loading[J]. ACI Structural Journal, 1987, 84(8): 61-76
- [58] Saatcioglu M, Baingo D. Circular high-strength concrete columns under simulated seismic loading[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1999, 125(3): 272-280
- [59] 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
- [60] 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
- [61] Légeron F, Paultre P. Uniaxial confinement model for normal-and high-strength concrete columns[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2003, 129(2): 241-252

司炳君 (1971-), 男, 博士, 副教授。主要从事结构工程研究。

孙治国 (1980-), 男, 硕士。主要从事结构抗震研究。

王东升 (1974-), 男, 博士, 教授。主要从事结构及桥梁工程抗震研究。

王清湘 (1945-), 男, 教授。主要从事结构工程的科研和教学工作。