

# 配箍率对CFRP筋混凝土梁-柱节点抗剪强度尺寸效应的影响分析

金浏, 万顺寅, 李冬\*, 苗丽越, 杜修力

北京工业大学城市减灾与防灾防护教育部重点实验室, 北京 100124

\* E-mail: dong.li@bjut.edu.cn

收稿日期: 2021-07-30; 接受日期: 2021-10-14; 网络版发表日期: 2022-06-24

国家重点研发计划(编号: 2018YFC1504302)和国家自然科学基金(批准号: 51822801)资助项目

**摘要** 本文对CFRP筋混凝土梁-柱节点的剪切破坏行为及其抗剪强度的尺寸效应进行了分析。采用细观数值模拟方法, 建立了CFRP筋混凝土梁-柱节点剪切破坏的有限元模型, 研究了几何相似的CFRP筋混凝土梁-柱节点细观破坏模式与失效机制, 探讨了节点配箍率对CFRP筋混凝土梁-柱节点抗剪强度及其尺寸效应规律的影响。模拟结果表明: CFRP筋混凝土梁-柱节点的名义抗剪强度存在明显的尺寸效应, 提高节点配箍率可以削弱抗剪强度的尺寸效应。与钢筋混凝土梁-柱节点抗剪性能对比发现: CFRP筋混凝土梁-柱节点名义抗剪强度的尺寸效应更为明显。基于前期工作中提出的考虑配箍率影响的钢筋混凝土梁-柱节点名义抗剪强度尺寸效应律, 结合本文数值试验结果, 扩展建立了适用于CFRP筋混凝土梁-柱节点名义抗剪强度分析的尺寸效应律。

**关键词** 配箍率, CFRP筋, 梁-柱节点, 抗剪强度, 尺寸效应, 细观模拟

## 1 引言

钢筋混凝土梁-柱节点是框架结构中重要的传力部位, 同时承受轴力、弯矩和剪力的作用, 在地震作用下往往发生脆性剪切破坏<sup>[1,2]</sup>。此外, 钢筋锈蚀是钢筋混凝土结构自诞生以来就面对的主要问题之一。对于在侵蚀性环境中服役的钢筋混凝土结构, 钢筋锈蚀易导致其承载力及耐久性产生严重折减。此外, 维护锈蚀钢筋混凝土结构的经济成本巨大<sup>[3,4]</sup>。在此背景下, FRP筋由于其轻质、高强和耐腐蚀等特性成为在侵蚀性环境中替代钢筋的良好选择<sup>[5]</sup>。研究表明, 通过合理

配置FRP筋, 并限制FRP筋的应力水平, FRP筋混凝土结构的承载力、延性及变形可以满足工程结构的设计要求<sup>[6,7]</sup>。此外, FRP筋在混凝土中表现出良好的黏结性能, 在50年的使用期中, 仍能保持53%~85%的黏结强度<sup>[8]</sup>。因此, 文献[8]指出在混凝土结构中使用FRP筋不存在关键问题。

受到混凝土材料固有的准脆性特征影响, 混凝土结构通常具有明显的尺寸效应, 即以名义强度为代表的力学性能指标随结构尺寸的增大而减小<sup>[9]</sup>。钢筋、钢管以及FRP等材料与混凝土之间的相互作用则会对混凝土构件的尺寸效应行为产生不同程度的影

**引用格式:** 金浏, 万顺寅, 李冬, 等. 配箍率对CFRP筋混凝土梁-柱节点抗剪强度尺寸效应的影响分析. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 1484–1494  
Jin L, Wan S Y, Li D, et al. Influence of stirrup ratio on size effect of shear strength of concrete beam-column joints reinforced with CFRP bars (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 1484–1494, doi: 10.1360/SST-2021-0333

响<sup>[10~13]</sup>。研究结果表明, 钢筋混凝土构件的剪切破坏行为及其抗剪承载力存在显著的尺寸效应, 且尺寸效应行为随配箍率增大而削弱, 随轴压比增大而加剧<sup>[14,15]</sup>。针对钢管混凝土构件, FRP加固混凝土构件等的试验研究亦表明其存在尺寸效应行为<sup>[12,13]</sup>。由此可知, 结构尺寸能够显著影响混凝土构件的抗剪性能及其安全储备。

梁-柱节点在荷载作用下往往发生脆性剪切破坏, 关于钢筋混凝土梁-柱节点尺寸效应的研究表明, 节点的抗剪承载力随着结构尺寸的增大而降低, 配箍率、轴压比及加载方式等因素能够影响节点尺寸效应的显著程度<sup>[9,16~18]</sup>。此外, 随着节点尺寸的增大, 其抗震性能亦呈现出劣化的趋势<sup>[19,20]</sup>。FRP筋混凝土节点亦可能存在尺寸效应。研究FRP筋混凝土节点抗剪性能的尺寸效应行为具有重要的科学和工程意义。部分学者对FRP筋节点的力学性能及抗震性能进行了研究, 并将其与钢筋节点的性能进行了对比<sup>[21~24]</sup>。这些研究证明了FRP筋可以在混凝土梁-柱节点中作为受力筋使用。Sharbatdar等人<sup>[21]</sup>对不同配箍率的CFRP筋混凝土边节点进行了试验研究, 其结果表明CFRP筋节点可以满足结构抗震设计的强度及变形要求, 可以有效地应用于混凝土结构中。Mady等人<sup>[22,23]</sup>对GFRP筋边节点的试验研究表明, GFRP筋节点能够达到4%的位移角且没有明显的残余变形; 另外, 在梁筋满足锚固条件(锚固长度大于30倍的纵筋直径)的情况下, GFRP筋在节点中作为受力筋及箍筋使用是可行的。Sonobe等人<sup>[24]</sup>对一个三层两跨的AFRP筋混凝土框架进行了拟静力试验, 试验表明该框架具有良好的弹性恢复力和一定的延性。Nehdi和Said<sup>[25]</sup>对三种不同配筋(钢筋、混合配筋及GFRP筋)的梁-柱边节点进行了试验研究发现, 节点的塑性变形能力随着钢筋的减少而降低, 但GFRP筋节点仍具有较好的变形能力(位移角高于3%)。杨帅<sup>[26]</sup>、Hasaballa等人<sup>[27]</sup>、Said和Nehdi<sup>[28]</sup>的试验对比研究了钢筋与FRP筋节点的抗震性能, 结果表明FRP筋节点可以满足抗震结构的强度及变形要求。虽然FRP筋节点的耗能能力与延性比钢筋节点差, 但其具有较好的变形恢复能力, 因此, 与钢筋节点相比, FRP筋节点的残余变形更小。

以上关于钢筋及FRP筋混凝土梁-柱节点的研究促进了学者们对节点受力性能的认知, 然而已有的研究仍存在以下不足: (1) CFRP筋混凝土节点和钢筋混

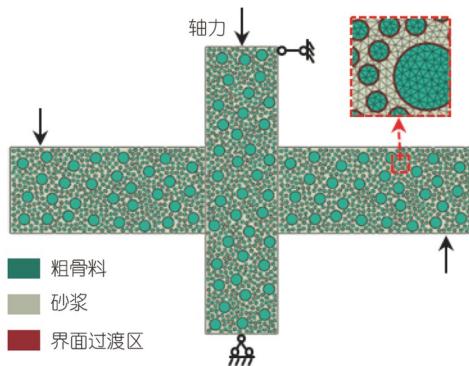
凝土节点的破坏模式及破坏机制是否一致仍不明确; (2) 节点配箍率对钢筋节点的性能有显著影响, 尤其是延性, 而其对CFRP筋节点的影响尚不明确。因此, 配箍率对CFRP筋节点性能及抗剪强度尺寸效应的影响有待研究。

基于上述背景及研究不足, 本文设计了4组不同配箍率的几何相似的CFRP筋混凝土梁-柱节点, 采用细观数值模拟方法研究CFRP筋节点抗剪强度的尺寸效应和CFRP筋对节点性能的影响, 并与钢筋混凝土梁-柱节点的抗剪性能进行了对比。结合前期工作中提出的考虑配箍率影响的钢筋混凝土梁-柱节点名义抗剪强度尺寸效应律和本文数值试验结果, 扩展建立了适用于CFRP筋混凝土梁-柱节点名义抗剪强度分析的尺寸效应律。

## 2 二维细观数值模型

### 2.1 模型建立

混凝土是由粗细骨料、水泥、水以及掺合料和外加剂按照一定比例拌合而成的人工石材, 具有显著的非均质性。Donza等人<sup>[29]</sup>和Meddah等人<sup>[30]</sup>的工作表明, 在细观尺度的研究中可将细骨料(直径小于5 mm的骨料)视为砂浆基质的一部分。因此, 本文将混凝土视为由粗骨料、砂浆基质和界面过渡区(ITZ)三相组成的复合材料<sup>[31]</sup>, 如图1所示。参考金沢和杜修力<sup>[32]</sup>以及Pedersen等人<sup>[33]</sup>的工作, 假定粗骨料为圆形, 并采用Fuller级配中的二级配。用直径为12 mm的圆形骨料等效实际混凝土中直径在5~20 mm区间内的骨料, 用直径为30 mm的圆形骨料等效直径在20~40 mm区间内的骨料<sup>[34]</sup>, 骨料体积分数为46%。根据Walraven和Reinhardt公式<sup>[35]</sup>计算二维模型中的骨料数目, 并通过随机摆放的方法确定骨料的分布。在细观数值模型中, 参考文献<sup>[36]</sup>的工作, ITZ的厚度取为1 mm。数值模型的边界条件如图1所示, 即柱底为固定铰支座, 柱顶为水平铰支座, 先在柱顶施加轴压比为0.25的轴压力, 并保持轴压力恒定, 再在左右梁端施加方向相反的单调荷载, 采用位移加载的方式, 保持加载速率恒定且处于准静态范围内直至构件破坏(承载力下降至峰值的85%)。采用三角形单元对混凝土进行网格划分, 梁单元划分CFRP筋和钢筋。综合考虑计算量与计算精度, 后续数值模型中ITZ的网格尺寸取为1 mm, 其余部分的网格



**图 1** (网络版彩图)细观模型的组分及边界条件  
**Figure 1** (Color online) Components and boundary conditions of the mesoscale model.

尺寸取为5 mm.

## 2.2 本构模型

根据Du等人<sup>[37]</sup>的工作, 认为粗骨料的强度远高于砂浆及ITZ, 在静力加载时不会发生破坏. 因此, 采用线弹性本构模型描述粗骨料的力学性能, 采用塑性损伤本构模型<sup>[38]</sup>描述砂浆基质与ITZ的力学性能. 塑性损伤本构模型引进了损伤因子描述混凝土刚度退化及损伤发展的过程. 该模型可以描述混凝土反向加载时刚度恢复的特性, 被广泛地用于循环荷载作用下的混凝土结构分析. 该模型假定刚度退化为各项同性, 混凝土的受拉受压应力应变关系为

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 (\varepsilon_t - \bar{\varepsilon}_t^{pl}), \quad (1)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\varepsilon_c - \bar{\varepsilon}_c^{pl}), \quad (2)$$

其中,  $\sigma$ ,  $E_0$ ,  $\varepsilon$ ,  $\bar{\varepsilon}^{pl}$ 分别为混凝土的应力、初始刚度、应变和塑性应变, 脚标c和t分别表示压缩和拉伸状态. FRP筋具有弹脆性<sup>[39]</sup>, 其应力-应变关系如图2(a)所示. FRP筋作为箍筋使用时, 由于应力集中, 其弯折段的抗拉强度显著低于直线段<sup>[40,41]</sup>. JSCE<sup>[42]</sup>采用式(3)计算FRP筋弯折以后的抗拉强度:

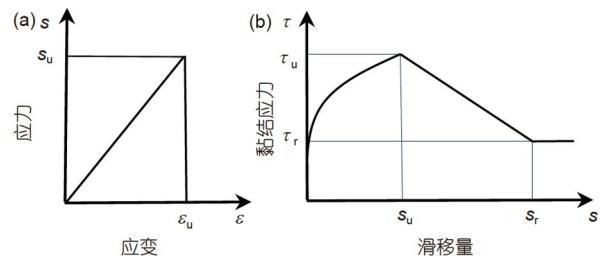
$$f_v = \left(0.05 \frac{r_B}{d_b} + 0.3\right) f_{fu} \leq f_{fu}, \quad (3)$$

式中,  $f_v$ 为FRP筋弯折段的抗拉强度,  $f_{fu}$ 为FRP筋直线段的抗拉强度,  $r_B$ 为箍筋的弯折半径,  $d_b$ 为FRP筋的直径. 考虑箍筋的弯折半径为箍筋直径的2~3倍<sup>[43]</sup>, 则 $f_v$ 的值

位于0.4~0.45 $f_{fu}$ 之间<sup>[44]</sup>. CSAS806-12建议取 $f_v=0.4f_{fu}$ <sup>[45]</sup>. 试验<sup>[46]</sup>得出与规范值相近的结果: CFRP箍筋弯折段的抗拉强度与其直线段抗拉强度的平均比值为0.39. 综上, 本文取 $f_v=0.4f_{fu}$ . 此外, FRP筋与混凝土之间的黏结滑移关系采用改进的BPE模型<sup>[47]</sup>描述, 如图2(b)所示.

## 2.3 模型验证

为验证上述二维细观数值模型的合理性和准确性, 采用试验结果对其进行检验. 由于目前关于CFRP筋中节点的试验有限, 选取试验1<sup>[21]</sup>中的CFRP筋边节点、试验2<sup>[17]</sup>中的RC中节点及试验3<sup>[48]</sup>中的CFRP筋梁, 对模型进行验证. 试验1主要对CFRP筋节点的抗震性能进行了探究. 本文选取试件JFRP2进行验证, 其相关参数如表1所示. 试验2研究了配箍率和荷载类型对RC梁-柱节点剪切破坏行为和尺寸效应的影响. 试验中节点宽度在300~900 mm之间. 本文选取其中的试件BCJ-300进行验证. 试件的相关参数如表2所示. 试验3研究了不同配筋类型的混凝土梁的受弯性能, 配筋类型包括钢筋、GFRP筋和CFRP筋. 本文对其中的CFRP筋梁进行验证, 试验中的相关参数如表3所示. 通过试



**图 2** CFRP筋本构模型及黏结滑移关系. (a) CFRP筋应力-应变关系; (b) CFRP筋-混凝土黏结滑移关系

**Figure 2** Constitutive model of CFRP bars and the bond-slip relation curves. (a) Stress-strain curve of CFRP bars; (b) bond-slip relation curve between CFRP bars and concrete.

**表 1** 试验1中试件的参数<sup>[21]a)</sup>

**Table 1** Specimen parameters in test 1 [21]

	$b \times h$ (mm)	$l$ (mm)	$n$	纵筋	$s$ (mm)
梁	225×450	2100	—	12×12.7 mm	100
柱	483×350	3810	0.20	12×12.7 mm	100
节点	483×350	—	0.20	—	100

a)  $b$ ,  $h$ ,  $l$ 分别为试件的宽度、高度和长度,  $n$ 为轴压比,  $s$ 为箍筋间距

**表 2** 试验2中试件的参数<sup>[17]a)</sup>**Table 2** Specimen parameters in test 2 [17]

$b \times h$ (mm)	$l$ (mm)	$n$	$\rho$ (%)	$\rho_{sv}$ (%)
梁 225×450	850	—	0.78	0.67
柱 300×300	1500	0.30	1.00	0.63
节点 300×450	—	0.30	—	0.84

a)  $\rho$ 为配筋率,  $\rho_{sv}$ 为配箍率**表 3** 试验3中试件的参数<sup>[48]</sup>**Table 3** Specimen parameters in test 3 [48]

参数		数值
几何参数	$b$ (mm)	200
	$h$ (mm)	280
	$l$ (mm)	3100
配筋	受拉筋	CFRP筋(3×12.7 mm)
	受压筋	GFRP筋(2×6.35 mm)
	箍筋	钢筋(2×8 mm)

算150 mm×150 mm的二维细观混凝土试样的抗压强度和抗拉强度, 得到模型验证中混凝土细观组分的力学参数如表4所示。钢筋与CFRP筋的力学参数采用试验测定值。

采用上述方法对试件JFRP2, BCJ-300和CFRP筋梁进行数值计算, 结果如图3所示。图3(a)为模拟结果与试验结果的破坏模式对比图。可以看出, 模拟结果与试验结果一致, 节点JFRP2和BCJ-300均发生了核心区的剪切破坏, 节点核心区沿对角线方向出现了剪切斜裂缝。CFRP筋梁上出现了与试验结果相似的弯曲裂缝和剪切裂缝。图3(b)是试验和数值模拟得到的荷载-位移曲线对比图。可以看到, 模拟曲线的峰值(即承载力)和趋势均与试验曲线吻合良好。表明本文采用的二维细观数值模拟方法以及所选取的力学参数具有合理性和准确性, 可用于后续的数值试验。

### 3 数值结果与分析

#### 3.1 破坏模式

为了探究CFRP筋混凝土梁-柱节点抗剪承载力的尺寸效应规律以及节点配箍率对其的影响, 本文设计了4组节点配箍率( $\rho_{sv}=0.0\%$ ,  $\rho_{sv}=0.4\%$ ,  $\rho_{sv}=0.8\%$ 和 $\rho_{sv}=1.2\%$ )和4组不同尺寸(节点宽度分别为250, 500,

750和1000 mm)的CFRP筋混凝土梁-柱节点和相同工况的钢筋混凝土梁-柱节点。表5给出了所有工况下梁-柱节点的信息。模拟中混凝土参数的取值与节点试验2<sup>[17]</sup>一致, 见表4。CFRP筋的参数与试验1<sup>[21]</sup>一致, 如表6所示。采用上述数值模拟方法对上述所有工况进行计算。

**表 4** 模型验证采用的参数<sup>a)</sup>**Table 4** Parameters adopted for model validation

	参数	粗骨料	砂浆	ITZ
试验1 <sup>[21]</sup>	$E_c$ (GPa)	70	35.00	28.00
	$f_c$ (MPa)	—	29.25	23.40
	$f_t$ (MPa)	—	2.75	2.20
试验2 <sup>[17]</sup>	$E_c$ (GPa)	70	32.10	25.68
	$f_c$ (MPa)	—	27.82	22.26
	$f_t$ (MPa)	—	2.84	2.27
试验3 <sup>[48]</sup>	$E_c$ (GPa)	70	30.20	24.16
	$f_c$ (MPa)	—	23.10	18.48
	$f_t$ (MPa)	—	2.26	1.81

a)  $E_c$ ,  $f_c$ ,  $f_t$ 分别为混凝土的弹性模量、抗压强度和抗拉强度**表 5** 数值试验中节点的参数<sup>a)</sup>**Table 5** Parameters of joints in numerical tests

$D$ (mm)	$b \times h$ (mm)	$l$ (mm)	$\rho_{sv}$ (%)	$\rho$ (%)	$\rho_y$ (%)
250	梁	180×300	675	0.6	0.8
	柱	250×250	1000	0.6	1.0
500	梁	360×600	1350	0.6	0.8
	柱	500×500	2000	0.6	1.0
750	梁	540×900	2025	0.6	0.8
	柱	750×750	3000	0.6	1.0
1000	梁	720×1200	2700	0.6	0.8
	柱	1000×1000	4000	0.6	1.0

a)  $D$ 为节点宽度,  $\rho_{sv}$ ,  $\rho$ ,  $\rho_y$ 分别为配箍率、配筋率和腰筋率**表 6** CFRP筋的力学参数<sup>a)</sup>**Table 6** Mechanical parameters of CFRP bars

CFRP筋类型	$E_f$ (GPa)	$f_t$ (MPa)	$\varepsilon_u$
纵筋、腰筋	115	1450	0.0126
箍筋	115	580	0.0050

a)  $E_f$ ,  $f_t$ ,  $\varepsilon_u$ 分别为CFRP筋的弹性模量、抗拉强度和极限应变

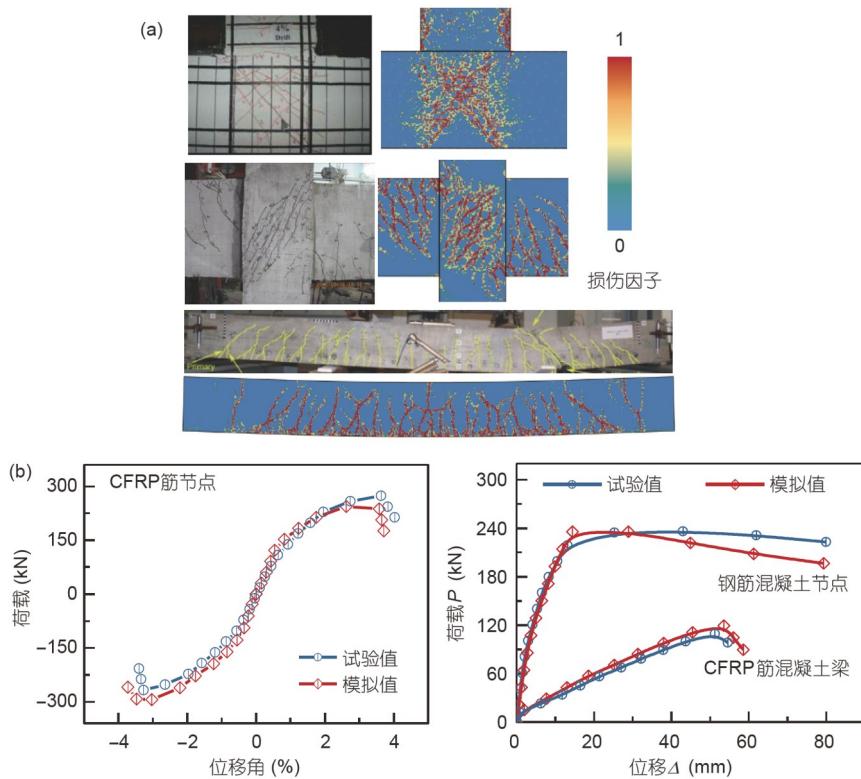


图3 (网络版彩图)模拟与试验结果对比. (a) 破坏模式; (b) 曲线图

Figure 3 (Color online) Comparison between simulation results and experimental results. (a) Failure modes; (b) curve graphs.

图4为同一尺寸(节点宽度为500 mm)不同配箍率的CFRP筋节点的破坏模式。可以看出，所有试件的节点区均出现了剪切损伤，节点均出现了梁端的弯曲裂缝和核心区沿节点对角线方向的剪切斜裂缝。细观尺度上，损伤首先出现在ITZ，随着荷载的增加，砂浆区域逐渐出现了损伤。在荷载的作用下，这些损伤进一步发展并逐渐汇聚形成损伤带。宏观上，CFRP筋节点在荷载作用下首先在梁端出现弯曲裂缝。随着荷载的增加，节点核心区出现了沿对角线方向的斜裂缝，这些斜裂缝随着荷载的增大逐渐发展并延伸，最终形成贯通节点的主斜裂缝。节点最终由于核心区混凝土被压碎而破坏，呈现出明显的脆性剪切破坏特征。可以看出，当节点配箍率 $\rho_{sv}=0.0\%$ 时，节点的损伤区域较小，且损伤带较为平直，随着配箍率的增加，节点的损伤区域逐渐增大且损伤带的曲折度增加。即随着配箍率的增加，核心区斜压杆的宽度有所增加，并逐渐趋于固定。说明节点区混凝土参与受力的程度随着FRP筋约束作用的提高而增加，也表明节点破坏模式的脆性

特征随着配箍率的增加逐渐减弱。

图5为同一配箍率(0.8%)不同尺寸梁-柱节点的破坏模式。可以看出，节点在荷载作用下均发生了节点区的剪切破坏。随着节点宽度的增加，节点区的损伤程度

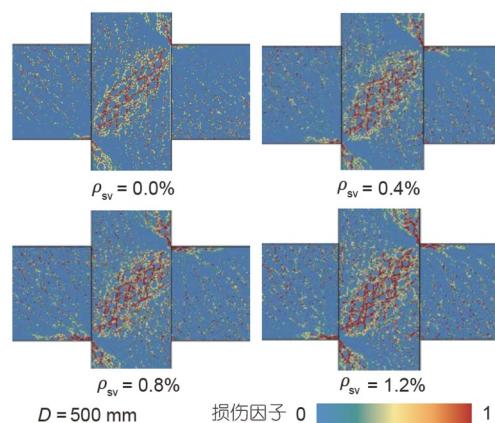


图4 (网络版彩图)不同配箍率节点的破坏模式

Figure 4 (Color online) Failure patterns of joints with different stirrup ratios.

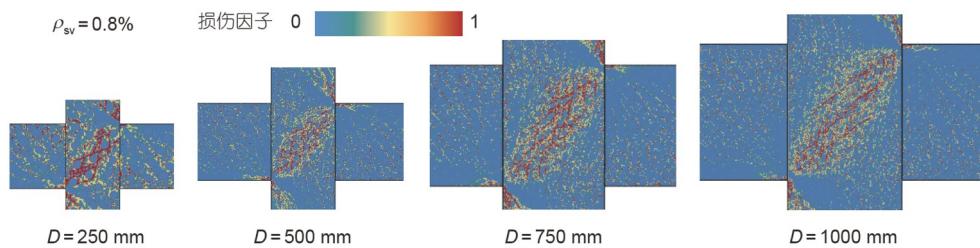


图 5 (网络版彩图)不同尺寸节点的破坏模式  
Figure 5 (Color online) Failure patterns of joints of different sizes.

逐渐减小，并且节点核心区裂缝的曲折程度逐渐减小，表明大尺寸节点破坏模式的脆性特征更明显。

图6为相同工况下钢筋节点和CFRP筋节点的破坏模式。两种节点的核心区均出现了沿对角线方向的损伤，但是CFRP筋节点核心区损伤分布的面积较小，斜压杆宽度较窄，同时梁端弯曲裂缝也较少，其破坏模式的脆性特征更为明显。

### 3.2 荷载-位移曲线

图7为不同工况下CFRP筋节点的荷载-位移曲线。从图中可以看出，随着配箍率的增大，节点的承载力有所提高。同时，节点的最大位移随配箍率的提高略有增加，说明CFRP筋对节点区的约束作用随配箍率的提高而增加。并且，随着节点尺寸的增大，节点间最大位移的增量逐渐减小，说明节点的脆性随着节点尺寸的增大逐渐凸显，即CFRP筋对大尺寸节点的约束作用低于小尺寸节点。此外，不同配箍率的节点均在峰值荷载后迅速丧失承载力，说明提高配箍率对节点的变形能力没有明显的改善。

图8为相同工况下CFRP筋节点与钢筋节点的荷载-位移曲线。可以看出，钢筋节点的初始刚度大于CFRP

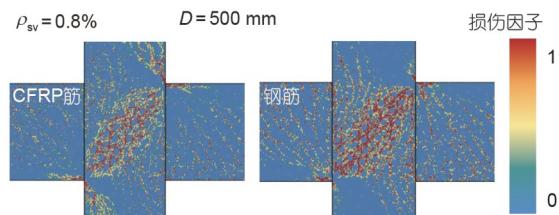


图 6 (网络版彩图)CFRP筋节点和钢筋节点的破坏模式  
Figure 6 (Color online) Failure patterns of joint reinforced with CFRP bars and that of joint reinforced with steel bars.

筋节点，而CFRP筋节点的承载力高于钢筋节点，是钢筋节点的1.4倍。同时，钢筋节点具有较好的延性，而CFRP筋节点的承载力到达峰值后即迅速下降，表现出明显的脆性。这是由于钢筋在屈服后仍能保持较高的应力水平，而CFRP筋具有弹脆性，在达到抗拉强度后即断裂，不能在加载后期为混凝土提供足够的约束作用。

### 3.3 节点抗剪强度尺寸效应分析

图9给出了不同节点配箍率的CFRP筋混凝土梁-柱节点名义抗剪强度与节点宽度的关系。节点的名义抗剪强度定义<sup>[17]</sup>为

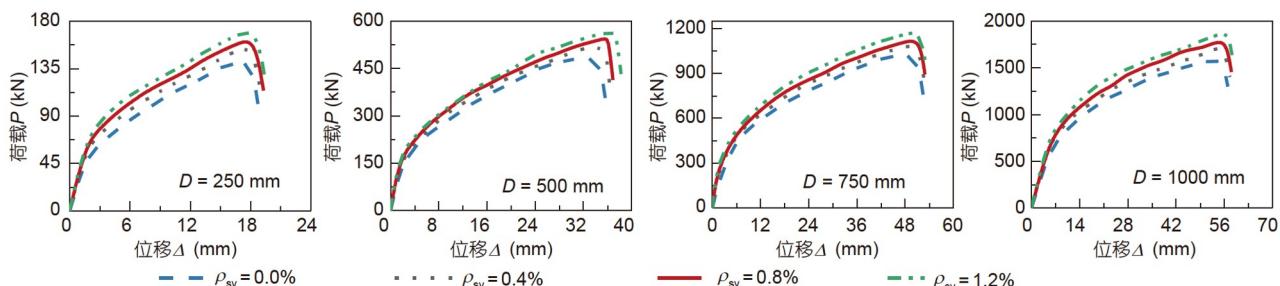
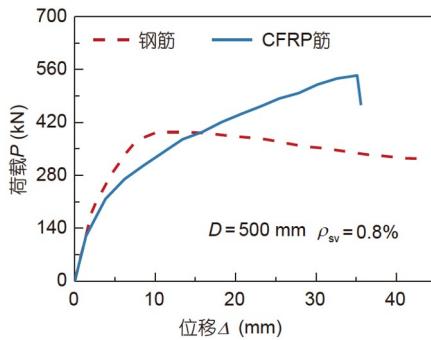
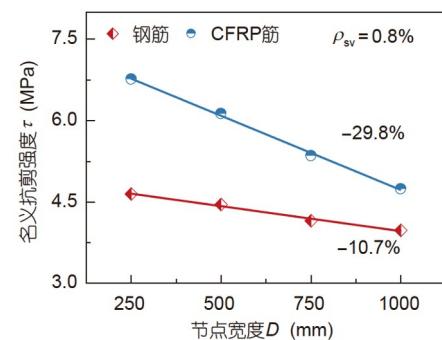


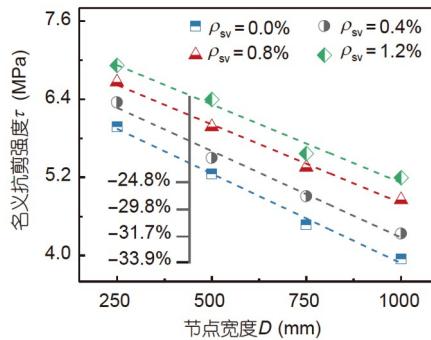
图 7 (网络版彩图)节点的荷载-位移曲线  
Figure 7 (Color online) Load-displacement curves of joints.



**图 8** (网络版彩图)CFRP筋节点和钢筋节点的荷载-位移曲线  
**Figure 8** (Color online) Load-displacement curve of joint reinforced with CFRP bars and that of joint reinforced with steel bars.



**图 10** (网络版彩图)CFRP筋节点和钢筋节点尺寸效应对比  
**Figure 10** (Color online) Comparison of size effect between joints reinforced with CFRP bars and joints reinforced with steel bars.



**图 9** (网络版彩图)名义抗剪强度与节点宽度的关系  
**Figure 9** (Color online) Relationship between nominal shear strength and joint width.

$$\tau = V / bh, \quad (4)$$

式中,  $\tau$ 为节点的名义抗剪强度,  $V$ 为节点承担的剪力, 可依据《混凝土结构设计规范》<sup>[49]</sup>计算,  $b$ 和 $h$ 分别为节点的宽度和高度. 从图9可以看出, CFRP筋混凝土梁-柱节点的名义抗剪强度随着节点宽度的增加而减小, 即CFRP筋混凝土梁-柱节点的名义抗剪强度存在尺寸效应. 同时, 随着配箍率的提高, 节点名义抗剪强度的下降速率有缓和, 即提高配箍率可以缓和节点抗剪强度的尺寸效应. 这是因为随着配箍率的增加, 节点破坏时的脆性程度被削弱, 从而使得节点抗剪强度的尺寸效应得到缓和.

图10为相同配箍率下钢筋节点与CFRP筋节点的名义抗剪强度与节点尺寸的关系. 从图中可以得出, CFRP筋节点的抗剪强度明显高于钢筋节点, 且CFRP筋节点的尺寸效应强于钢筋节点. 此外, 配箍率对钢

筋节点承载力及其尺寸效应的影响(参见文献[50])大于CFRP筋节点. 这是由于穿过节点区的梁柱纵筋会对节点的抗剪承载力产生一定的贡献. 本文中CFRP筋的抗拉强度约为钢筋的3.2倍. 因此, 在相同的配筋情况下, CFRP节点中纵筋对节点抗剪承载力的贡献高于钢筋节点, 导致了CFRP筋节点中箍筋对抗剪承载力的贡献小于钢筋节点.

Bažant和Kim<sup>[51]</sup>基于断裂力学建立的尺寸效应律可以较好地描述混凝土材料的尺寸效应. 其表达式为

$$v_u = \frac{v_0}{\sqrt{1+d/d_0}}, \quad (5)$$

式中,  $v_u$ 为试件的名义强度,  $d$ 为试件的特征尺寸(在本文中为节点宽度 $D$ ),  $v_0$ 和 $d_0$ 为与尺寸效应相关的系数, 可由回归分析得出. 将式(5)转换为如下形式:

$$\frac{1}{v_u^2} = \frac{d}{v_0^2 d_0} + \frac{1}{v_0^2}, \quad (6)$$

将式(6)写成线性方程的形式:

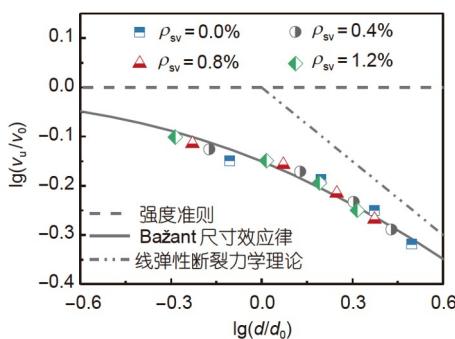
$$Y = AX + C, \quad (7)$$

式中,  $Y=1/v_u^2$ ,  $X=d$ ,  $A=1/d_0 v_0^2$ ,  $C=1/v_0^2$ . 通过回归分析计算出本文不同工况下的 $v_0$ 与 $d_0$ 值, 见表7. 进而可得到本文模拟结果与Bažant尺寸效应律的拟合情况, 如图11所示.

图11中线弹性断裂力学理论表示完全脆性材料, 强度准则表示完全塑性材料. 随着节点尺寸的增大, 节点的抗剪强度值向线弹性断裂力学理论斜线靠近, 说明节点的脆性随着节点尺寸的增大而增大. 并且, 随着配箍率的提高, 节点的抗剪强度值逐渐向强度准则

**表 7 不同工况下的 $v_0$ 和 $d_0$** **Table 7 Coefficients  $v_0$  and  $d_0$  under different conditions**

配箍率	$v_0$	$d_0$
0.0%	8.86	318
0.4%	8.91	372
0.8%	8.8	423
1.2%	8.73	482

**图 11 (网络版彩图)用Bažant尺寸效应律拟合本文模拟值**  
**Figure 11 (Color online) Fitting of Bažant's size effect law to the simulated values.**

线靠近, 表明节点的尺寸效应随着配箍率的提高逐渐被削弱。

### 3.4 尺寸效应律验证

虽然Bažant尺寸效应律可以描述节点的抗剪强度随节点尺寸增大而减小的规律, 但当节点尺寸处于更大范围内时, Bažant尺寸效应律的计算结果将具有较大偏差。此外, Bažant尺寸效应律不能定量考虑配箍率对节点抗剪强度的影响。Du和Jin<sup>[50]</sup>研究了配箍率对普通钢筋混凝土梁-柱节点剪切破坏及抗剪强度尺寸效应的影响, 并提出了考虑配箍率影响的钢筋混凝土节点的抗剪强度尺寸效应律, 该尺寸效应律的具有以下形式:

$$v_u = v_c + v_N + v_s, \quad (8)$$

$$v_c = \left[ \frac{v_0 - v_{d \rightarrow \infty}}{\sqrt{1+d/d_0}} + v_{d \rightarrow \infty} \right] \gamma, \quad (9)$$

其中,  $v_u$ 为节点的名义抗剪强度,  $v_c$ ,  $v_N$ ,  $v_s$ 分别为混凝土、轴压力和箍筋对节点抗剪强度的贡献,  $v_N$ 和 $v_s$ 依据规范公式计算,  $v_0$ 和 $d_0$ 为与尺寸效应相关的系数, 对于钢筋混凝土梁-柱节点,  $v_0$ 和 $d_0$ 分别取为5.8和490,

$v_{d \rightarrow \infty}$ 为当节点尺寸足够大时混凝土贡献的抗剪强度, 取 $0.4f_t$ <sup>[52]</sup>,  $\gamma$ 为配箍率对节点抗剪强度的影响系数, 按照下式计算:

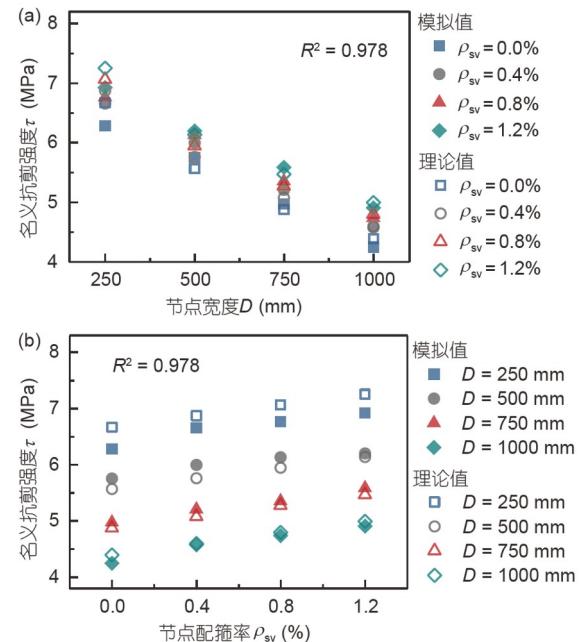
$$\gamma = \begin{cases} 1, & \rho_{sv} \leq \rho_{min}, \\ (A-1)\tanh[\alpha(\rho_{sv} - \rho_{min})] + 1, & \rho_{sv} > \rho_{min}, \end{cases} \quad (10)$$

$$A = \frac{0.121f_c \sqrt{1+d/d_0}}{v_0}, \quad (11)$$

其中,  $\alpha$ 为调节系数,  $\rho_{sv}$ 为节点配箍率,  $\rho_{min}$ 为最小配箍率, 这里取0.4%。采用本文模拟值与该尺寸效应律进行拟合。经试算, 当尺寸效应系数采用配箍率为0.0%时的结果, 即 $v_0=8.86$ ,  $d_0=318$ , 并取 $\alpha=1.0$ 时, 该尺寸效应律预测值与本文模拟值具有较好的一致性, 如图12所示。说明该尺寸效应律可以有效地计算CFRP筋混凝土梁-柱节点的名义抗剪强度。需要说明的是, 由于目前关于CFRP筋中节点的试验非常有限, 该公式的适用性仍有待试验结果的进一步检验。

## 4 结论

本文采用二维细观数值模拟方法, 建立了CFRP筋混凝土梁-柱中节点模型, 模拟了不同配箍率下的

**图 12 (网络版彩图)尺寸效应律计算值与模拟值对比****Figure 12 (Color online) Comparison between simulated values and calculated values.**

CFRP筋节点剪切破坏试验, 对节点的抗剪性能及其抗剪强度的尺寸效应规律进行了分析, 并与钢筋节点的性能进行了对比, 得到了以下主要结论.

(1) CFRP筋混凝土梁-柱节点的抗剪强度存在显著的尺寸效应, 并且CFRP筋节点抗剪强度的尺寸效应强于钢筋节点.

(2) 提高节点配箍率可以略微减缓CFRP筋节点抗剪强度的尺寸效应.

(3) 本文基于RC节点抗剪强度的尺寸效应律和本文数值试验结果建立的CFRP筋混凝土梁-柱节点抗剪强度的尺寸效应律能够较好地计算和预估节点的名义抗剪强度.

## 参考文献

- 1 Bird J F, Bommer J J. Earthquake losses due to ground failure. *Eng Geol*, 2004, 75: 147–179
- 2 van de Lindt J W, Goh G H. Effect of earthquake duration on structural reliability. *Eng Struct*, 2004, 26: 1585–1597
- 3 Hong N F. Corrosion of steel in concrete and structure durability (in Chinese). Highway, 2001, 2: 66–69 [洪乃丰. 混凝土中钢筋腐蚀与结构物的耐久性. 公路, 2001, 2: 66–69]
- 4 Hou B R, Zhang D, Wang P. Marine corrosion and protection: Current status and prospect (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2016, 31: 1326–1331 [侯保荣, 张盾, 王鹏. 海洋腐蚀防护的现状与未来. 中国科学院院刊, 2016, 31: 1326–1331]
- 5 Kara I F, Ashour A F. Flexural performance of FRP reinforced concrete beams. *Compos Struct*, 2012, 94: 1616–1625
- 6 Deng Z C, Gao L. Research and development in seismic performance of FRP reinforced concrete columns and structures (in Chinese). *Fiber Reinforced Plast/Compos*, 2016, 4: 88–92 [邓宗才, 高磊. FRP筋混凝土柱及框架抗震性能的研究进展. 玻璃钢/复合材料, 2016, 4: 88–92]
- 7 Nanni A. Flexural behavior and design of RC members using FRP reinforcement. *J Struct Eng-ASCE*, 1993, 119: 3344–3359
- 8 Nepomuceno E, Sena-Cruz J, Correia L, et al. Review on the bond behavior and durability of FRP bars to concrete. *Construct Build Mater*, 2021, 287: 123042
- 9 Barbhuiya S, Choudhury A M. A study on the size effect of RC beam-column connections under cyclic loading. *Eng Struct*, 2015, 95: 1–7
- 10 Du X L, Jin L, Li D. A state-of-the-art review on the size effect of concretes and concrete structures (I): Concrete materials (in Chinese). *China Civil Eng J*, 2017, 50: 28–45 [杜修力, 金浏, 李冬. 混凝土与混凝土结构尺寸效应述评(I): 材料层次. 土木工程学报, 2017, 50: 28–45]
- 11 Du X L, Jin L, Li D. A state-of-the-art review on the size effect of concretes and concrete structures (II): RC members (in Chinese). *China Civil Eng J*, 2017, 50: 24–44 [杜修力, 金浏, 李冬. 混凝土与混凝土结构尺寸效应述评(II): 构件层次. 土木工程学报, 2017, 50: 24–44]
- 12 Wang Z H, Shen S Y, Cui Y Q, et al. Experimental analysis on size effect of axial compressive behavior for reinforced concrete columns strengthened with CFRP (in Chinese). *J Harbin Inst Technol*, 2020, 52: 112–120 [王作虎, 申书洋, 崔宇强, 等. CFRP加固混凝土柱轴压性能尺寸效应试验分析. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52: 112–120]
- 13 Wu H L, Wang Y F. Study on size effect of concrete filled steel tubular columns (in Chinese). *J Harbin Inst Technol*, 2007, 39: 22–25 [吴寒亮, 王元丰. 钢管混凝土柱的尺寸效应研究. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39: 22–25]
- 14 Zhang S, Jin L, Li D, et al. Effect of structural size on seismic performance of reinforced concrete short columns—A meso-scale study (in Chinese). *Eng Mech*, 2018, 35: 164–174 [张帅, 金浏, 李冬, 等. 结构尺寸对钢筋混凝土短柱抗震性能影响: 细观分析. 工程力学, 2018, 35: 164–174]
- 15 Jin L, Wang T, Du X L, et al. Size effect theory on shear failure of RC cantilever beams (in Chinese). *Eng Mech*, 2020, 37: 53–62 [金浏, 王涛, 杜修力, 等. 钢筋混凝土悬臂梁剪切破坏及尺寸效应律研究. 工程力学, 2020, 37: 53–62]
- 16 Abrams D P. Scale relations for reinforced-concrete beam-column joints. *ACI Struct J*, 1987, 84: 502–512
- 17 Jin L, Miao L, Han J, et al. Size effect tests on shear failure of interior RC beam-to-column joints under monotonic and cyclic loadings. *Eng Struct*, 2018, 175: 591–604
- 18 Jin L, Wei N, Miao L Y, et al. Numerical study on shear failure and the corresponding size effect of interior RC beam-column joints (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 112–122 [金浏, 魏娜, 苗丽越, 等. RC梁-柱中节点核心区剪切破坏及尺寸效应数值分析. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 112–122]
- 19 Li Z B, Guo E W, Zhou H Y, et al. The seismic behavior of interior beam-column joints of RC frames (in Chinese). *World Earthq Eng*, 2009, 25: 61–66 [李振宝, 郭二伟, 周宏宇, 等. RC框架节点核心区剪切破坏——抗震性能试验. 世界地震工程, 2009, 25: 61–66]
- 20 Li Z B, Guo E W, Zhou X Y, et al. Seismic behaviors and size effects of large-scale interior beam-column joints of RC frames (in Chinese). *China*

- Civil Eng J, 2012, 45: 39–47 [李振宝, 郭二伟, 周锡元, 等. 大尺度RC梁柱节点抗震性能及尺寸效应试验研究. 土木工程学报, 2012, 45: 39–47]
- 21 Sharbatdar M K, Saatcioglu M, Benmokrane B. Seismic flexural behavior of concrete connections reinforced with CFRP bars and grids. *Compos Struct*, 2011, 93: 2439–2449
- 22 Mady M, Hasaballa M, El-Ragaby A. Effect of Reinforcement Detailing on the Behavior of GFRP-RC Beam-Column Joints. Berlin: Springer-Verlag Berlin, 2010. 330–333
- 23 Mady M, El-Ragaby A, El-Salakawy E. Seismic behavior of beam-column joints reinforced with GFRP bars and stirrups. *J Compos Constr*, 2011, 15: 875–886
- 24 Sonobe Y, Fukuyama H, Okamoto T, et al. Structural performances of concrete frame reinforced with FRP reinforcement. *Concrete Res Tech*, 1994, 5: 103–113
- 25 Nehdi M, Said A. Performance of RC frames with hybrid reinforcement under reversed cyclic loading. *Mat Struct*, 2005, 38: 627–637
- 26 Yang S. Experimental and finite element analysis of hysteretic behavior of FRP-reinforced concrete beam-column joints (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Jinan: University of Jinan, 2020 [杨帅. FRP筋混凝土梁柱节点的滞回性能试验及有限元分析. 硕士学位论文. 济南: 济南大学, 2020]
- 27 Hasaballa M H, El-Ragaby A, El-Salakawy E F. Seismic performance of exterior beam-column joints reinforced with glass fibre reinforced polymer bars and stirrups. *Can J Civ Eng*, 2011, 38: 1092–1102
- 28 Said A M, Nehdi M L. Use of FRP for RC frames in seismic zones: Part II. Performance of steel-free GFRP-reinforced beam-column joints. *Appl Compos Mater*, 2004, 11: 227–245
- 29 Donza H, Cabrera O, Irassar E F. High-strength concrete with different fine aggregate. *Cement Concrete Res*, 2002, 32: 1755–1761
- 30 Meddah M S, Zitouni S, Belâabes S. Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete. *Construct Build Mater*, 2010, 24: 505–512
- 31 Rios R D, Riera J D. Size effects in the analysis of reinforced concrete structures. *Eng Struct*, 2004, 26: 1115–1125
- 32 Jin L, Du X L. Meso numerical simulation of reinforced concrete members (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2012, 43: 1230–1236 [金浏, 杜修力. 钢筋混凝土构件细观数值模拟分析. 水利学报, 2012, 43: 1230–1236]
- 33 Pedersen R R, Simone A, Sluys L J. Mesoscopic modeling and simulation of the dynamic tensile behavior of concrete. *Cement Concrete Res*, 2013, 50: 74–87
- 34 Jin L, Wang T, Du X L. Size effect theory on shear strength of RC cantilever beams without stirrups (in Chinese). *Chin J Comput Mech*, 2020, 37: 396–404 [金浏, 王涛, 杜修力. 无腹筋RC悬臂梁抗剪强度及尺寸效应理论研究. 计算力学学报, 2020, 37: 396–404]
- 35 Walraven J C, Reinhardt H W. Theory and experiments on the mechanical behaviour of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading. *Heron*, 1981, 26: 1–68
- 36 Šavija B, Pacheco J, Schlangen E. Lattice modeling of chloride diffusion in sound and cracked concrete. *Cement Concrete Compos*, 2013, 42: 30–40
- 37 Du X, Jin L, Ma G. A meso-scale analysis method for the simulation of nonlinear damage and failure behavior of reinforced concrete members. *Int J Damage Mech*, 2013, 22: 878–904
- 38 Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *J Eng Mech*, 1998, 124: 892–900
- 39 Kara I F, Ashour A F, Dundar C. Deflection of concrete structures reinforced with FRP bars. *Compos Part B-Eng*, 2013, 44: 375–384
- 40 Maruyama T, Honma M, Okamura H. Experimental study on tensile strength of bent portion of FRP rods. *Symposium Paper*, 1993, 138: 163–176
- 41 Shehata E, Morphy R, Rizkalla S. Fibre reinforced polymer shear reinforcement for concrete members: Behaviour and design guidelines. *Can J Civ Eng*, 2000, 27: 859–872
- 42 JSCE. Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials. Tokyo: Japan Society of Civil Engineering, 1997
- 43 ACI 440.1R-06 Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2006
- 44 Razaqpur A G, Spadea S. Shear strength of FRP reinforced concrete members with stirrups. *J Compos Constr*, 2015, 19: 04014025
- 45 CSA S806-12. Design and construction of buildings components with fiber-reinforced polymers. Toronto: Canadian Standards Association, 2012
- 46 El-Sayed A K, El-Salakawy E, Benmokrane B. Mechanical and structural characterization of new carbon FRP stirrups for concrete members. *J Compos Constr*, 2007, 11: 352–362

- 47 Cosenza E, Manfredi G, Realfonzo R. Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete. *J Compos Construct*, 1997, 1: 40–51
- 48 Soric Z, Kisicek T, Galic J. Deflections of concrete beams reinforced with FRP bars. *Mater Struct*, 2010, 43: 73–90
- 49 GB 50010-2010. Code for design of concrete structures (in Chinese). Beijing: China Architecture & Building Press, 2010 [GB 50010-2010. 混凝土结构设计规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010]
- 50 Du X L, Jin L. Size Effect in Concrete Materials and Structures. Singapore: Springer, 2021
- 51 Bažant Z P, Kim J K. Size effect in shear failure of longitudinally reinforced beams. *J ACI*, 1984, 81: 456–468
- 52 Kim J K. Size effect in concrete specimens with dissimilar initial cracks. *Mag Concrete Res*, 1990, 42: 233–238

## Influence of stirrup ratio on size effect of shear strength of concrete beam-column joints reinforced with CFRP bars

JIN Liu, WAN ShunYin, LI Dong, MIAO LiYue & DU XiuLi

*Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

The shear failure behavior and the size effect of shear strength of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP)-reinforced concrete beam-column joints are investigated in this study. The finite element model for failure analysis of CFRP-reinforced concrete beam-column joints was established using a mesoscale numerical method. The mesoscale failure mode and failure mechanism of geometrically similar CFRP-reinforced concrete beam-column joints were studied, and the influence of CFRP-bar ratio on shear strength and size effect law of joints was discussed. The simulation results show that the nominal shear strength of CFRP-reinforced concrete beam-column joints has an obvious size effect, and the size effect of shear strength can be alleviated by increasing the CFRP-bar ratio. In addition, it is found that the size effect of the nominal shear strength of concrete beam-column joints with CFRP bars is more obvious than that of reinforced concrete (RC) beam-column joints. Based on the size effect law of nominal shear strength for RC beam-column joints, considering the effect of stirrup ratio proposed in the previous work, along with the numerical test results in this study, the size effect law was extended and established for the analysis of nominal shear strength of concrete beam-column joints with CFRP bars.

**CFRP-bar ratio, CFRP bars, beam-column joints, shear strength, size effect, mesoscale modeling**

doi: [10.1360/SST-2021-0333](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0333)