论文

箍筋约束混凝土方柱轴压破坏尺寸效应细观数值研究

杜敏^{1,2*}, 金浏², 杜修力², 李冬², 张帅²

1. 防灾科技学院防灾工程系, 三河 065201;

2. 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: dumin2001@163.com

收稿日期: 2017-07-21; 接受日期: 2017-07-26; 网络出版日期: 2017-09-15

国家自然科学基金(批准号: 51408127)、国家自然科学基金创新研究群体项目(编号: 51421005)和防灾科技学院教育研究与教学改革项目(编号: JY2016B07)资助

摘要 钢筋混凝土构件尺寸效应行为源于混凝土材料的非均质性及钢筋/混凝土复杂的非线性相互作用。通过建立反映上述特征的约束混凝土方柱3D细观数值模型, 开展轴心受压破坏行为及尺寸效应数值研究, 探讨体积配箍率对箍筋约束混凝土方柱轴心受压力学行为及尺寸效应的影响机理, 并与试验结果进行对比分析。基于Bažant尺寸效应律, 开展约束混凝土轴心抗压强度尺寸效应理论分析。研究结果表明: 数值模拟与试验结果吻合良好, 构建的钢筋混凝土柱细观力学模型能够准确地描述箍筋约束混凝土构件的破坏行为及尺寸效应规律; 体积配箍率增加, 约束混凝土柱的名义强度增大、破坏呈现更少的脆性, 尺寸效应现象减弱; Bažant尺寸效应理论能够对约束混凝土柱轴心加载下的尺寸效应行为做出合理解释。

关键词 箍筋约束, 混凝土方柱, 轴压强度, 尺寸效应, 配箍率, 细观数值模拟

1 引言

约束混凝土是指利用外部约束, 改善混凝土自身原有的受压特性, 以提高其抗压强度及变形能力^[1]。约束混凝土构件(包括: 箍筋, FRP, CFRP及钢管等约束方式)被广泛应用于土木工程。约束混凝土材料的力学行为是现代结构工程界研究的热点问题之一, 国内外学者对此进行了大量的研究。

1903年, Considere指出螺旋箍筋的约束作用对混凝土强度的提高具有积极作用^[2]。1928年Richart等

人^[3]定量研究了液体围压对混凝土圆柱体轴压性能的影响, 并提出约束混凝土抗压强度以及峰值应变的计算理论。1967年, Soliman和Yu^[4]开展了方形箍筋约束混凝土试验研究, 考虑了箍筋间距、直径、体积配箍率、混凝土全截面面积与受约束混凝土核心面积之比等参数, 试验结果表明矩形箍筋约束也能够提高混凝土的宏观强度。1988年Mander等人^[5]基于钢筋混凝土柱的试验结果, 提出了约束混凝土力学模型, 该模型力学机理清晰、适用性广, 得到广泛应用。此外, 钱稼茹等人^[6]、史庆轩等人^[1,7]、郑文忠和侯舸^[8]及West

引用格式: 杜敏, 金浏, 杜修力, 等. 箍筋约束混凝土方柱轴压破坏尺寸效应细观数值研究. 中国科学: 技术科学, 2017, 47: 1057–1066
Du M, Jin L, Du X L, et al. Mesoscopic simulation of size effect on stirrup-confined concrete columns under axial compression (in Chinese). Sci Sin Tech, 2017, 47: 1057–1066, doi: 10.1360/N092017-00240

等人^[9]亦对箍筋约束混凝土的承载力计算方法进行了深入的研究, 他们提出的理论方法计算结果与试验结果(较小尺寸试件试验结果)吻合很好. 这些研究工作促进了对箍筋约束混凝土力学性能的认识. 纵使如此, 现有箍筋约束混凝土应力-应变本构关系模型以及我国《混凝土结构设计规范》^[10]是基于缩尺模型研究成果提出, 未考虑尺寸效应对约束混凝土柱轴心受压承载力的影响.

大量试验工作, 如文献^[11~16]证实了箍筋约束混凝土柱在轴心加载下的承载力(或名义轴压强度)具有尺寸效应特征. 这些试验工作主要针对小尺寸箍筋约束混凝土柱. 受到试验设备与经济条件的限制, 对大尺寸箍筋约束混凝土柱的轴压破坏行为及尺寸效应的研究很少涉及.

钢筋混凝土构件尺寸效应源于两个方面: (1) 混凝土材料本身的尺寸效应——非均质性; (2) 钢筋/混凝土复杂的非线性相互作用. 因此, 如果能够建立合理的钢筋混凝土构件的数值分析模型, 反映上述两方面的全部“特征”, 即可采用有限元数值模拟手段, 研究并揭示钢筋混凝土构件宏观力学特性及其破坏行为, 拓展试验研究的尺度范围, 对大尺寸约束混凝土构件的力学特性和破坏行为进行预测.

一些研究者尝试采用细观力学分析方法来模拟钢筋混凝土构件破坏行为及尺寸效应问题, 如Rios和Riera^[17]基于二维离散元模型, 考虑混凝土细观结构形式, 数值模拟了钢筋混凝土梁名义强度的尺寸效应行为; Wang^[18]基于二维细观尺度分析方法(RBSM法)模拟了钢筋混凝土梁的破坏行为. Du等人^[19]尝试将细观力学分析方法扩展到三维情况, 基于具有较高计算效率的细观单元等效化模型与分析方法, 建立了钢筋混凝土柱尺寸效应研究的三维细观尺度分析模型, 初步探讨了钢筋混凝土柱在轴压荷载作用下的尺寸效应行为. 总体来说, 由于计算量庞大、运算效率低等原因, 约束混凝土构件尺寸效应的细观数值研究工作主要集中于二维模型, 使用三维细观数值模型开展研究较为少见.

鉴于此, 本文拟开展约束混凝土构件尺寸效应行为的数值理论研究, 从细观尺度出发假定混凝土由骨料颗粒、砂浆基质、界面过渡区(ITZ)组成, 采用钢筋-混凝土黏结滑移本构关系模型来描述其相互作用, 建立钢筋混凝土柱3D细观数值模型, 开展构件截

面尺寸在267~800 mm, 长细比为3, 体积配箍率为0%, 1.26%, 2.89%的箍筋约束混凝土柱轴心受压加载数值实验, 探讨体积配箍率对箍筋约束混凝土方柱尺寸效应的影响机理, 并与试验结果进行对比分析. 基于Bažant尺寸效应理论对约束混凝土构件轴心加载下的尺寸效应行为开展理论分析.

2 约束混凝土柱细观尺度力学模型

如前所述, 钢筋混凝土构件尺寸效应源于混凝土材料本身的尺寸效应——非均质性, 以及钢筋/混凝土复杂的非线性相互作用. 因此, 合理的钢筋混凝土构件数值分析模型不仅能够表征混凝土材料本身的尺寸效应, 还应准确地描述钢筋/混凝土的非线性相互作用行为. 最好的方法是采用能精准描述混凝土细观结构形式的细观尺度数值分析方法^[20].

2.1 箍筋约束混凝土柱微细观结构

在细观层次上假定混凝土材料由骨料颗粒、砂浆介质和界面过渡区组成, 骨料颗粒假定为球体, 采用30和16 mm的等效粒径表示骨料颗粒的连续级配, 骨料含量为35%. 对于卵石和砾石等球状骨料, 采用Walraven和Reinhardt^[21]公式计算箍筋混凝土柱数值模型内部骨料的颗粒数, 见表1所示.

基于Monte-Carlo方法采用Fortran编程对表1中骨料颗粒进行随机投放, 并将有限元网格投影到骨料结构上. 网格单元尺寸的大小影响细观组分的准确描述及运算效率, 依据文献^[22], 混凝土细观力学分析时, 为得到稳定的宏观力学特性, 随机骨料细观力学模型的网格单元尺寸不宜大于骨料粒径的1/4. 本文中最小骨料粒径为16 mm, 故选用4 mm网格单元尺寸, 4种截面尺寸下细观力学模型的网格单元数分别为: 897800, 3000000, 10125000, 24000000.

表1 钢筋混凝土柱数值模型的骨料颗粒数

试件	边长 (mm)	小石 (粒)	中石 (粒)
方试件	150	18334	3068
轴压柱	267	311079	51846
轴压柱	400	1047272	174545
轴压柱	600	3534545	589090
轴压柱	800	8378181	1396363

“界面过渡区”是骨料周围近场砂浆内孔隙率渐变的一个区域,其弹性模量及强度等力学性质也是渐变的,过渡区厚度没有严格的定义^[23].在进行数值模拟时,由于计算效率问题,难以选取“微米”量级的单元尺度作为混凝土有限元细观计算分析的尺度.采用较大的厚度(如2或4 mm)作为界面相厚度对混凝土进行力学分析时,若界面力学参数选取准确,数值模拟结果不会影响混凝土试件整体的宏观力学特性^[24],故本文界面相厚度选取为4 mm.有限元网格划分后根据骨料在网格中的位置判定单元类型,如:骨料单元、砂浆单元及界面单元,并依单元类型赋予相应的材料特性.

为揭示箍筋约束混凝土方柱轴压破坏尺寸效应,按照1:1.5:2.25的截面尺寸比例设计与试验试件^[11,12]尺寸相同的3组3D约束混凝土方柱数值模型,即截面边长为267, 400和600 mm,柱高为800, 1200和1800 mm,另外扩展构建更大尺寸(边长为800 mm,高为2400 mm)的箍筋约束混凝土方柱,其细观结构如图1(a)~(d)所示.图1(d)中从左到右依次是混凝土方柱模型透视图、模型内骨料颗粒分布及方柱模型的剖面构造.

体积配箍率是影响箍筋约束混凝土柱的重要力学指标,依据该指标,本文共建立3种箍筋约束混凝土方柱数值模型,即PA系列($\rho_{sv}=0\%$),PB系列($\rho_{sv}=1.26\%$)和PC系列($\rho_{sv}=2.89\%$),其几何参数及配筋情况如表2和图2所示,PA系列为素混凝土方柱,构件尺寸同PB,PC系列模型.约束混凝土柱仅在四角布置与箍筋同等直径的纵筋,其配筋率为0.28%.表中符号“P”代表棱柱体,“A”,“B”和“C”表示体积配箍率,分别为0%, 1.26%和2.89%.试件编号中的“S”,“M”,“L”和“U”分别代表小、中、大和超大4种构件尺寸.为了防止加载过程中试件端

部过早破坏,试件上下端各1/6全高范围内,对箍筋进行加密布置,约束混凝土柱的长细比 λ 均为3.

2.2 材料模型及细观组分参数

箍筋约束混凝土柱轴心加载试验采用C30混凝土,纵筋和箍筋均采用HRB400级钢筋^[11,12].有限元细观数

图1 (网络版彩图)约束混凝土柱细观尺度数值模型

图2 (网络版彩图)约束混凝土柱钢筋配置

表2 约束混凝土柱几何参数与钢筋配置

系列	样本编号	截面尺寸 (mm)	端区箍筋	中部箍筋	箍筋率 (%)	保护层 (mm)
PB	PB-S	267	8@18(2)	8@66(2)	1.26	10
	PB-M	400	12@27(2)	12@99(2)	1.26	20
	PB-L	600	18@40(2)	18@149(2)	1.26	30
	PB-U	800	22@80(2)	22@160(2)	1.26	40
PC	PC-S	267	8@18(2)	8@29(2)	2.89	10
	PC-M	400	12@27(2)	12@44(2)	2.89	20
	PC-L	600	18@40(2)	18@66(2)	2.89	30
	PC-U	800	22@37(2)	22@74(2)	2.89	40

值研究时假定混凝土由骨料颗粒、砂浆基质和界面区组成, 同文献[25,26], 砂浆基质和界面区采用塑性损伤本构来描述其力学性能; 骨料颗粒强度较高, 故假定不破坏, 为弹性体. 钢筋材料力学性能较均匀, 采用理想弹塑性本构描述其单轴应力-应变关系, 将Von-Mises屈服面作为判断钢材屈服准则. 混凝土细观组分及钢筋的主要力学参数见表3. 需要说明的是, 在骨料、砂浆强度一定, 本文假定混凝土抗压强度只同界面力学特性有关. 界面区的泊松比参考文献[27,28]选取为0.2, 抗压强度与抗拉强度之比参考文献[29]取为11, 界面区的弹性模量及单轴抗压强度数值参考混凝土材料力学性能数值研究实践^[24-27]的取值范围, 通过立方体试件(边长为150 mm, 如图3所示)数值反演的方式来确定. 通过反复试算, 发现采用表3所示的混凝土各细观组分时, 数值模拟结果与试验结果吻合. 该力学参

数下, 获得的混凝土单轴压缩强度为42.6 MPa(与试验测得的42.8 MPa接近), 界面区力学参数(材料弹性模量和抗压强度)具体试算过程见表4所示.

2.3 钢筋/混凝土细观单元相互作用

由于钢筋/混凝土相互作用力学行为的高度复杂性, 目前尚未得到统一的理论与力学模型, 这里为了考

图3 (网络版彩图)立方体试件数值模拟与试验破坏形态对比. (a) 加载方式; (b) 压缩破坏云图; (c) 试验破坏形态

表3 混凝土细观组分及钢筋力学参数

细观组分	骨料	砂浆基质	界面过渡区	钢筋
抗压强度(MPa)	—	*45.3	^37.2	—
抗拉强度(MPa)	—	*6.8	^3.3	—
弹性模量(GPa)	*60	*30.8	^24.7	*207
泊松比	*0.2	*0.2	^0.2	*0.3
屈服强度(MPa)	—	—	—	*477

注: “*”所示的力学参数为实测数据, “^”所示的界面泊松比参数为参考文献所取数据, “^”所示的界面力学参数(材料弹性模量和抗压强度)为反复试算获得的选取值.

表4 界面区力学参数试算过程

泊松比	弹性模量(GPa)	拉压强度输入值(MPa)	混凝土抗压强度模拟值(MPa)
0.2	24.0	35/3.2	40.23
		37.2/3.3	41.01
		40/3.6	41.68
	24.4	35/3.2	40.80
		37.2/3.3	41.41
		40/3.6	42.02
	24.7	35/3.2	41.17
		37.2/3.3	42.60
		40/3.6	43.10
	25.0	35/3.2	42.20
		37.2/3.3	43.08
		40/3.6	43.26

考虑钢筋与混凝土之间的黏结滑移等因素对钢筋混凝土柱力学性能的影响, 采用我国混凝土结构设计规范 (GB50010-2010) 推荐的钢筋-混凝土黏结滑移本构关系模型来描述其相互作用问题, 即首先将钢筋 (采用梁单元进行离散) 嵌入到混凝土细观单元 (采用六面体八节点线性等参单元进行离散), 进而在钢筋单元与混凝土细观单元间设置非线性弹簧单元, 如图 4(a) 所示, 并采用如图 4(b) 所示的 τ - s 曲线作为判定钢筋与混凝土细观单元间黏结应力随滑移量变化的度量标准, 本构模型中各参数参考杜修力等人^[30]试验中的取值, 如表 5 所示, 这里需要说明的是, 该本构关系模型仅考虑了钢筋与混凝土细观单元材料之间的切向滑移, 即切线方向可以产生位移, 法向则认为钢筋与混凝土细观单元间的交界面刚度无穷大, 不考虑其法向位移. 钢筋混凝土柱 3D 细观力学分析模型建立后, 将其导入 ABAQUS 商业软件, 进而基于 ABAQUS 非线性数值计算方法来求解箍筋约束混凝土柱的宏观力学行为.

3 约束混凝土柱轴心受压力学行为

3.1 破坏模式

基于提出的细观数值模拟方法, 对 3 种体积配箍率 $\rho_{sv}=0\%$, $\rho_{sv}=1.26\%$, $\rho_{sv}=2.89\%$, 4 组不同尺寸约束混凝土方柱的轴压破坏行为进行模拟, 柱底边固定, 在其顶部施加位移荷载, 两侧为自由边界. 每组尺寸构件模型数量为 2, 各模型中骨料的体积分数相同, 仅空间随机分布不同. 图 5 为边长尺寸为 400 mm 约束混凝土柱的轴压破坏模拟结果与试验破坏模式的对比. 从柱子损伤变化过程 (图 5(a)) 可以看出, 损伤破坏首先发生在混凝土内部的薄弱环节, 即骨料颗粒与砂浆基质间的界面过渡区, 随着荷载增大, 损伤破坏区域向砂浆基质延伸. 且损伤区域集中在柱中位置, 随着荷载增加, 混凝土受压损伤区域扩大, 呈压-剪破坏形态, 材

料的非均质性导致损伤区域分布呈非均匀状态. 混凝土柱横向膨胀过程中, 箍筋约束混凝土横向形变的作用开始发挥, 箍筋应变不断增大, 部分箍筋达到屈服强度, 如图 5(b) 所示. 图 5(a) 和 (b) 与试验结果图 5(c) 的对比可知, 本文数值模拟结果较好地表征了约束混凝土柱轴心加载下的破坏行为.

数值模拟获得的 4 根几何相似, 具有不同截面尺寸的约束混凝土方柱的最终破坏模式见图 6 所示, 可以发现构件截面尺寸小于 400 mm 时, 约束混凝土柱中主要产生轴向压缩破坏; 而对于截面尺寸较大的约束混凝土柱 (截面尺寸为 600 和 800 mm), 则发生典型的压-剪破坏形式, 这与约束混凝土构件试验结果^[10,11]亦吻合一致.

图 4 (网络版彩图) 钢筋混凝土柱 3D 细观力学分析模型. (a) 钢筋/混凝土相互作用模型; (b) 钢筋/混凝土黏结滑移本构

图 5 (网路版彩图) 约束混凝土柱 (边长 400 mm) 损伤破坏. (a) 混凝土柱损伤演化; (b) 钢筋笼反应; (c) 试验结果

表 5 混凝土细观单元与钢筋间粘结应力-滑移曲线的参数值^{a)}

特征点	劈裂 (τ_r)	峰值 (τ_u)	残余 (τ_r)
黏结应力 τ (MPa)	$\tau_{cr}=2.5f_t$	$\tau_u=3f_t$	$\tau_r=f_t$
纵筋相对滑移 S_l (mm)	$S_{cr,l}=0.025d_l$	$S_{u,l}=0.04d_l$	$S_{r,l}=0.55d_l$
箍筋相对滑移 S_t (mm)	$S_{cr,t}=0.025d_t$	$S_{u,t}=0.04d_t$	$S_{r,t}=0.55d_t$

a) “ f_t ”为实测混凝土抗拉强度, “ d_l ”为纵筋直径, “ d_t ”为箍筋直径.

图6 (网络版彩图)不同尺寸约束混凝土柱的破坏模式

3.2 名义轴压强度与应力应变关系曲线

数值模拟获得的名义轴压强度见表6. 可见, 数值模拟与试验结果吻合很好(误差不超过5%), 再次

证实了数值方法的有效性. 另外, 扩展模拟得到素混凝土柱及更大尺寸(边长800 mm)配箍率1.26%, 2.89%方柱名义轴压强度均值为30.07, 38.52, 42.16 MPa. 随着配箍率的增加, 4种尺寸方柱的名义轴压强度有所提高. 相同体积配箍率下, PA($\rho_{sv}=0\%$), PB($\rho_{sv}=1.26\%$), PC($\rho_{sv}=2.89\%$) 3种系列构件模型的名义轴心抗压强度均随着构件尺寸的增大而降低, 表明约束混凝土方柱存在尺寸效应现象.

尺寸为267 mm×267 mm×800 mm, 400 mm×400 mm×1200 mm, 体积配箍率为0%, 1.26%, 2.89%约束混凝土方柱数值模拟得到的应力应变关系曲线见图7所示. 图中横坐标是柱端竖向位移 Δ 与柱高 H 的比值, 纵坐标轴向应力为轴向荷载与柱横截面面积的比值. 由图7可见, 由于核心区混凝土处于三轴受压应力状态, PB, PC系列约束混凝土构件模型的轴压强度和变形能力均较单轴受压的PA系列素混凝土柱有较大提

表6 数值模拟和试验结果对比

样本编号	数值解 (MPa)	数值解均值 (MPa)	试验结果 (MPa)	误差 (%)
PA-S-1	39.86	40.21	—	—
PA-S-2	40.56		—	—
PA-M-1	35.05	35.64	—	—
PA-M-2	36.22		—	—
PA-L-1	33.06	32.45	—	—
PA-L-2	31.83		—	—
PA-U-1	29.50	30.07	—	—
PA-U-2	30.64		—	—
PB-S-1	45.22	46.12	47.63	3.17
PB-S-2	47.03		—	—
PB-M-1	43.27	43.99	43.47	1.19
PB-M-2	44.71		—	—
PB-L-1	41.33	42.04	42.60	1.30
PB-L-2	42.75		—	—
PB-U-1	39.17	38.52	—	—
PB-U-2	37.86		—	—
PC-S-1	48.03	48.99	49.80	1.63
PC-S-2	49.95		—	—
PC-M-1	47.27	47.40	47.99	1.23
PC-M-2	47.53		—	—
PC-L-1	47.06	46.88	47.23	0.67
PC-L-2	46.70		—	—
PC-U-1	42.03	42.16	—	—
PC-U-2	42.29		—	—

图7 (网络版彩图)约束混凝土方柱应力应变曲线. (a) 267 mm×267 mm×800 mm模型; (b) 400 mm×400 mm×1200 mm模型

高. 特别是构件模型达到峰值强度后, 混凝土材料横向膨胀量明显增大, 箍筋的约束作用随之增强. 在箍筋的约束作用下, 核心区混凝土的膨胀变形和剪切变形被限制, 因而名义轴压强度和变形能力显著提高, 体积配箍率越大, 提高的幅度越大. 体积配箍率2.89%的PC系列构件模型的应力应变曲线软化段名义强度缓慢降低, 破坏具有较大的塑性.

数值模拟与试验结果的良好吻合证明了数值方法的有效性. 后续工作中, 将基于该套数值分析方法, 开展系列的参数分析, 如探讨更多配箍率、柱子截面形式、钢筋屈服强度及混凝土强度等级等对箍筋约束混凝土柱尺寸效应的定量影响.

4 约束混凝土轴心抗压强度尺寸效应分析

4.1 名义轴压强度与构件尺寸关系

箍筋约束混凝土柱数值模拟的名义轴压强度 σ_{Nu} 随构件尺寸 D (即柱子截面边长)的变化规律如图8所示, 可见: (1) 三组柱子的名义轴压强度均随构件尺寸的增加而降低, 即存在尺寸效应现象; (2) 配箍率越大, 约束作用越强, 柱子名义轴压强度越大; (3) 配箍率越大, 名义强度随尺寸增大而减小的幅度越小, 即强度减弱越缓慢. 相比于PC系列, PB系列柱的体积配箍率低, 约束作用弱, 破坏具有更强的脆性, 因而表现出更明显的尺寸效应. PA系列素混凝土柱轴压受压破坏的脆性最大, 因而尺寸效应现象最明显.

图8 (网络版彩图)约束混凝土柱强度尺寸效应曲线

4.2 约束混凝土柱强度尺寸效应理论分析

基于断裂力学理论, Bažant提出了适用于混凝土材料及钢筋混凝土构件的尺寸效应理论公式^[31]:

$$\sigma_{Nu} = \frac{Bf_t'}{\sqrt{1+\beta}}, \quad \beta = D/D_0, \quad (1)$$

式中, σ_{Nu} 为名义强度, f_t' 为混凝土材料劈裂抗拉强度, B, D_0 是依赖于结构的几何常数(由模拟数据拟合获得), D 是试件尺寸参数(这里为截面边长), β 是反映材料脆性大小的参数. 根据数值实验结果, 通过回归分析来确定常数项 Bf_t' 和 D_0 . 式(1)可表达成线性方程:

$$y = Ax + C, \quad (2)$$

式中, $x = D$, $y = 1/\sigma_{Nu}^2$, $C = 1/(Bf_t')^2$, $A = C/D_0$. 通过回归法求解得到线性方程见图9所示, 由图中线性方

程的系数得到Bažant尺寸效应律拟合参数如表7所示, 进而可以绘制尺寸效应理论拟合曲线(图10).

由表7可见, PA系列素混凝土方柱的脆性参数 β 最大, PC系列约束混凝土方柱模型的脆性参数 β 最小. 表明体积配箍率越高, 约束混凝土方柱轴压破坏的脆性越小. 图10中约束混凝土柱数值模拟结果与Bažant尺寸效应理论拟合方程的相关系数为0.93, 说明数值模拟结果与Bažant尺寸效应理论吻合良好. 可以看出: 素混凝土柱模型(PA系列)的名义强度数据点最趋近LEFM, 即斜率为 $-1/2$ 的直线, 体积配箍率越大, 强度数据点越远离该直线, 更趋近于斜率为零的水平渐近线. 简言之, 体积配箍率越小, 约束混凝土柱模型破坏脆性越大, 名义轴压强度下降越为明显, 表现出更为明显的尺寸效应现象.

5 结论

本文采用钢筋混凝土柱轴压破坏行为及尺寸效应模拟的3D细观尺度数值分析方法, 开展了体积配箍为0%, 1.26%和2.89%, 不同截面尺寸箍筋约束混凝土方柱轴心加载数值实验, 探讨了箍筋约束作用对钢筋混凝土方柱轴压破坏模式及尺寸效应的影响规律. 并与试验结果对比验证分析, 在模拟结果与试验结果吻合良好的基础上, 扩展模拟了更大尺寸方柱的破坏行为. 同时结合Bažant尺寸效应理论开展了箍筋约束混凝土柱轴心抗压强度尺寸效应理论分析, 主要研究结论如下.

(1) 构建的钢筋混凝土柱3D细观分析模型较好地反映了箍筋约束混凝土柱轴心加载下的损伤破坏行为, 即: 损伤主要发生在薄弱的界面区域并向砂浆基质扩展, 由于材料的非均质性导致损伤区域分布呈非均匀状态.

(2) 数值模拟与试验结果吻合良好, 钢筋混凝土柱3D细观分析模型很好地描述了几何尺寸对构件破坏行为以及名义强度的影响, 可为约束混凝土构件尺寸

效应研究提供理论支持.

(3) 体积配箍率越大, 核心区混凝土受到的箍筋约束作用越强, 钢筋混凝土方柱的名义轴压强度数值越大, 构件破坏时呈现出更少的脆性, 表现出更弱的尺寸效应现象.

(4) Bažant尺寸效应理论能够很好地描述箍筋约束混凝土方柱在轴心加载下的破坏行为及尺寸效应规律.

本文钢筋/混凝土细观单元本构关系模型仅考虑

图9 (网络版彩图)Bažant尺寸效应参数拟合方程

图10 (网络版彩图)Bažant尺寸效应理论拟合曲线

表7 Bažant尺寸效应理论参数

系列编号	$A(\times 10^{-5})$	$C(\times 10^{-3})$	Bf'_t (MPa)	D_0 (mm)	β
PA	0.80	0.34	49.74	425	0.63
PB	0.30	0.31	52.08	1033	0.38
PC	0.20	0.29	53.85	1450	0.18

了钢筋与混凝土细观单元材料之间的切向滑移, 未考虑其法向位移, 存在不足. 鉴于此, 建立能够准确表征钢筋/混凝土细观单元间相互作用及尺寸效应的三维细观尺度数值模型, 在与试验结果吻合良好的基础上

开展大量箍筋约束混凝土柱数值模拟工作, 探索研究不同长细比、体积配箍率和强度等级以及复合受力状态下箍筋约束混凝土柱尺寸效应行为, 是今后研究工作的重点和难点问题.

参考文献

- 1 史庆轩, 侯炜, 张兴虎, 等. 箍筋约束混凝土结构及其发展展望. *建筑结构学报*, 2009, 30: 109–114
- 2 De Diego A, Arteaga A, Fernández J, et al. Behaviour of FRP confined concrete in square columns. *Mater Construcc*, 2015, 65: e069
- 3 Richart F E, Brandtzaeg A, Brown L R. A study of the failure of concrete under combined compressive stresses. Technical Reports. Illinois: Urbana University of Illinois, 1928. 82–95
- 4 Soliman M T M, Yu C W. The flexural stress-strain relationship of concrete confined by rectangular transverse reinforcement. *Mag Concrete Res*, 1967, 19: 223–238
- 5 Mander J B, Priestley M J N, Park R. Observed stress-strain behavior of confined concrete. *J Struct Eng*, 1988, 114: 1827–1849
- 6 钱稼茹, 程丽荣, 周栋梁. 普通箍筋约束混凝土柱的中心受压性能. *清华大学学报*, 2002, 42: 1369–1373
- 7 史庆轩, 杨坤, 刘维亚, 等. 高强箍筋约束高强混凝土轴心受压力学性能试验研究. *工程力学*, 2012, 29: 141–149
- 8 郑文忠, 侯驰. 不同强度等级箍筋约束混凝土柱设计方法. *建筑结构学报*, 2016, 37: 74–82
- 9 West J, Ibrahim A, Hindi R. Analytical compressive stress-strain model for high-strength concrete confined with cross-spirals. *Eng Struct*, 2016, 113: 362–370
- 10 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范GB50010-2010. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
- 11 Li Z, Song J, Du X, et al. Size effect of confined concrete subjected to axial compression. *J Cent South Univ*, 2014, 21: 1217–1226
- 12 李振宝, 宋佳, 杜修力, 等. 方形箍筋约束混凝土力学性能尺寸效应试验研究. *北京工业大学学报*, 2014, 40: 223–229
- 13 车轶, 王铁东, 班圣龙, 等. 箍筋约束混凝土轴心受压性能尺寸效应研究. *建筑结构学报*, 2013, 34: 118–123
- 14 Bažant Z P, Kwon Y W. Failure of slender and stocky reinforced concrete columns: Tests of size effect. *Mater Struct*, 1994, 27: 79–90
- 15 Nemecek J, Bittnar Z. Experimental investigation and numerical simulation of post-peak behavior and size effect of reinforced concrete columns. *Mater Struct*, 2004, 37: 161–169
- 16 Li D, Jin L, Du X L, et al. Size effect tests of normal-strength and high-strength RC columns subjected to axial compressive loading. *Eng Struct*, 2016, 109: 43–60
- 17 Rios R D, Riera J D. Size effects in the analysis of reinforced concrete structures. *Eng Struct*, 2004, 26: 1115–1125
- 18 Wang L C. Meso-scale numerical modeling of the mechanical behavior of reinforced concrete members. *Int J Eng Tech*, 2013, 5: 680–684
- 19 Du X L, Jin L, Ma G W. Meso-element equivalent method for the simulation of macro mechanical properties of concrete. *Int J Damage Mech*, 2013, 22: 617–642
- 20 Bažant Z P. Scaling theory for quasibrittle structural failure. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2004, 101: 13400–13407
- 21 Walraven J C, Reinhardt H W. Theory and experiments on the mechanical behavior of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading. *Heron*, 1981, 26: 23–33
- 22 Guo L P, Carpinteri A, Rongella R, et al. Fatigue damage of high performance concrete through a 2D mesoscopic lattice model. *Comput Mater Sci*, 2009, 44: 1098–1106
- 23 陈惠苏, 孙伟, Stroeve P. 水泥基复合材料与浆体界面研究综述: 界面微观结构的形成、劣化机理及其影响因素. *硅酸盐学报*, 2004, 32: 70–79
- 24 杜修力, 金浏. 考虑过渡区界面影响的混凝土宏观力学性质研究. *工程力学*, 2012, 29: 72–79
- 25 Unger J F, Eckardt S. Multiscale modeling of concrete. *Arch Comput Methods Eng*, 2011, 18: 341–393
- 26 李冬, 金浏, 杜修力, 等. 钢筋混凝土轴压柱长细比效应的细观数值研究. *中国科学: 技术科学*, 2016, 46: 961–969
- 27 杜敏, 杜修力, 金浏, 等. 混凝土抗压强度尺寸效应的细观非均质机理. *土木建筑与环境工程*, 2015, 37: 11–17
- 28 Jin L, Li D, Du X L. Mechanical behavior and size effect of moderate high-strength RC columns under monotonic and cyclic axial compression. *Eng Struct*, 2016, 124: 269–285
- 29 黄政宇. 土木工程材料. 北京: 高等教育出版社, 2002. 74–80
- 30 杜修力, 符佳, 张建伟. 钢筋混凝土柱轴心受压性能尺寸效应的大比尺试验研究. *土木工程学报*, 2010, 43: 1–8

- 31 Hoover C G, Bažant Z P. Cohesive crack, size effect, crack band and work-of-fracture models compared to comprehensive concrete fracture tests. *Int J Fract*, 2014, 187: 133–143

Mesoscopic simulation of size effect on stirrup-confined concrete columns under axial compression

DU Min^{1,2}, JIN Liu², DU XiuLi², LI Dong² & ZHANG Shuai²

¹ *Department of Disaster Prevention Engineering, Institute of Disaster-prevention Science and Technology, Sanhe 065201, China;*

² *Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

Size effect of reinforced concrete (RC) members is mainly caused by the heterogeneity and mutual effect of concrete and steel. Considering of the above influential factors, the 3D meso-mechanical models of stirrup-confined concrete square columns were set up and the damage process subjected to axial compressive loading was simulated. The confinement effect on the failure patterns and the axial compressive strength of the stirrup-confined columns was explored. Moreover, the simulated results were compared with test data. Based on the basic theory of the size effect law (SEL) proposed by Bažant, size effect of stirrup-confined concrete columns was analyzed. It was showed that the simulated results have a good consistence with the test data and the mesoscopic analysis models of RC columns can accurately describe the damage behavior and size effect of stirrup-confined columns. With the increase of stirrup ratio, the nominal strength and deformation behavior of columns boost. Then, it becomes little brittle in the damage process. Therefor the size effect is little obvious. The simulation data fit well with basic theory of the size effect law (SEL) proposed by Bažant.

stirrup-confined, concrete square columns, axial compressive strength, size effect, stirrup ratio, meso-scale simulation

doi: 10.1360/N092017-00240