圆钢管混凝土柱轴压破坏行为与尺寸效应理论研究

金浏, 樊玲玲, 杜修力*, 李秀荣

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: duxili@bjut.edu.cn

收稿日期: 2019-02-20; 接受日期: 2019-04-29; 网络版发表日期: 2019-11-22

国家重点研发计划(编号: 2016YFC0701100, 2018YFC1504302)和国家自然科学基金(批准号: 51822801, 51421005)资助项目

摘要 当前混凝土材料层次的尺寸效应理论已较为完备, 而对钢管混凝土构件层次的尺寸效应理论研究则远远不足. 针对圆钢管混凝土柱, 考虑混凝土细观非均质性及钢管-混凝土相互作用, 建立了研究其轴压破坏行为的三维细观数值分析模型. 在模拟结果与已有试验结果吻合良好的基础上, 基于细观模拟方法研究了不同横向约束作用(以套箍系数来表征)及不同尺寸下钢管混凝土柱的轴压破坏机理与失效模式, 揭示了钢管横向约束作用对混凝土柱名义轴压强度及其尺寸效应的影响规律. 最后, 结合钢管对混凝土柱轴压强度的影响机制——“强度增强效应”与“尺寸效应削弱效应”, 在材料层次尺寸效应律的基础上, 建立了能反映横向约束作用的混凝土柱轴压强度的尺寸效应理论公式, 并验证了理论公式的准确性和合理性.

关键词 圆钢管混凝土柱, 细观数值模型, 横向约束作用, 轴压强度, 尺寸效应

1 引言

钢管混凝土(concrete filled steel tubular, CFST)属于约束混凝土的一种, 是指在钢管中填充混凝土而形成的复合材料, 其常见的截面形式有圆形、方形和矩形等, 具有承载力高、塑性和韧性性能好、抗震和耐火性能优异及施工方便等特性, 被广泛应用于大跨和超高层等结构中^[1~4].

国内外众多学者对钢管混凝土柱的力学性能与破坏机制开展了大量的试验和理论研究. Giakoumelis和Lam^[5]开展了混凝土强度对圆钢管混凝土柱轴压加载

下力学性能影响的试验研究发现, 随混凝土强度的提高, 钢管和混凝土间的黏结作用对柱承载力的影响逐渐提高. Schneider^[6]对14根钢管混凝土短柱开展了轴压试验, 研究了钢管形状和壁厚对复合柱极限强度的影响, 试验结果表明, 与方形和矩形柱相比, 圆钢管混凝土柱达到屈服后仍具有很大的强度和刚度. 韩林海及其合作者^[1,7]针对钢管和混凝土之间的约束作用开展了一系列试验研究, 并提出了适用于核心混凝土的应力-应变曲线及钢管混凝土柱轴压承载力的理论公式.

当然, 国内外学者对钢管混凝土柱尺寸效应也进

引用格式: 金浏, 樊玲玲, 杜修力, 等. 圆钢管混凝土柱轴压破坏行为与尺寸效应理论研究. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 209–220
Jin L, Fan L L, Du X L, et al. Failure behavior and size effect theory of circular concrete-filled steel tubular columns under axial compression (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 209–220, doi: [10.1360/SST-2019-0065](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0065)

行了研究分析。Yamamoto等人^[8]开展了截面形状对钢管混凝土柱轴压承载力尺寸效应的影响试验, 试件直径或边长范围为100~320 mm, 结果表明, 圆钢管混凝土柱承载力尺寸效应不明显, 而方钢管混凝土柱轴压破坏尺寸效应明显。Sakino等人^[9]对已有的钢管混凝土柱轴压试验数据进行了分析, 试件最大直径为450 mm, 通过引入混凝土尺寸效应提出了钢管混凝土柱轴压承载力公式。陆新征等人^[10]对252个方钢管混凝土柱承载力试验数据进行分析, 试件最大截面宽度为320 mm, 结果表明, 大多规范公式高估了钢管混凝土柱轴压承载力。王玉银等人^[11]探讨了含钢率对轴压下圆钢管混凝土柱尺寸效应的影响, 将试验结果与现行规范公式比较, 提出了可考虑混凝土尺寸效应影响的折减系数概念。这些试验工作促进了对钢管混凝土柱轴压破坏模式及其尺寸效应行为的认识。

虽然针对钢管混凝土柱的力学性能和尺寸效应问题已开展了大量的研究工作, 但仍存在众多问题需要做进一步的分析与讨论。如: 对于钢管混凝土柱破坏机理的认识还依然不够, 尤其是由于尺寸效应产生的破坏机理的认识还不足, 且不系统; 目前开展的试验研究均是基于小尺寸进行的, 难以覆盖大尺寸(足尺)构件相关的破坏机理及尺寸效应的认识; 此外, 目前依然缺乏构件层次上的尺寸效应理论公式, 由于构件与材料破坏机理的差异性, 采用混凝土材料层次尺寸效应律来描述构件层次尺寸效应规律是有待商榷的。目前, 关于钢管混凝土构件设计规范比较典型的有美国的AISC360-10^[12]、日本的AIJ(2008)^[13]、欧洲的EC4(2004)^[14]以及我国的CECS(2012)^[15]和DL/T5085(1999)^[16]等规程, 均是基于小尺寸构件相关试验数据及理论研究得出的理论公式, 其是否适用于大尺寸(足尺)构件还待进一步论证。

鉴于以上分析, 本文以圆钢管混凝土柱为研究对象, 采用细观数值模拟方法, 建立圆钢管混凝土柱3D细观数值模型, 在验证其模型合理的基础上, 开展轴压加载下不同尺寸尤其是大尺寸圆钢管混凝土柱破坏模拟试验, 研究钢管约束作用对柱破坏模式及尺寸效应规律的影响。最后, 依据钢管横向约束作用对混凝土柱轴压强度及其尺寸效应的影响机制, 提出了构件层次上圆钢管混凝土柱轴压名义强度的尺寸效应理论公式, 并对建立的理论公式的合理性和准确性进行验证。

2 3D细观数值模型的建立与验证

本质上, 钢管混凝土构件尺寸效应的主要根源有两个方面^[17,18]: (1) 混凝土材料本身的尺寸效应; (2) 钢管对混凝土的约束作用。针对钢管混凝土柱的破坏行为, 数值计算模型中需要考虑到这两方面因素的影响, 即需要考虑到混凝土材料的非均质性以及钢管-混凝土间复杂的非线性相互作用。

2.1 3D细观数值模型的建立

为了能真实地反映出圆钢管混凝土柱实际破坏形态进而研究其破坏机理, 这里采用三维的数值分析模型, 同时考虑到影响构件尺寸效应的材料层次的非均质性因素, 将混凝土材料看成是由骨料、砂浆基质、界面过渡区组成的三相复合材料^[19,20]。假定骨料为圆形, 采用二级分配^[21], 大骨料等效粒径为0.03 m, 小骨料等效粒径为0.015 m, 取骨料体积分数为30%, 基于Monte-Carlo方法利用Fortran编程将骨料颗粒随机投放到砂浆基质中。界面过渡区是骨料和砂浆基质两者之间的接触面, 由于两者之间存在一定的孔隙, 使得界面过渡区处于破坏薄弱区, 并且其弹性模量及强度等力学行为是渐变的^[22]。界面过渡区的厚度没有严格定义, 考虑到数值模拟过程中计算效率的问题, 将界面过渡区的厚度取为1 mm^[23,24]。对各组分进行有限元划分, 生成如图1的3D细观模型。并根据各组分在网格中的位置确定单元类型, 依据单元类型赋予材料属性。

如前所述, 混凝土材料是由骨料、砂浆基质和界面过渡区组成的。假定骨料为弹性体, 强度高不会发生破坏; 砂浆基质和界面过渡区采用塑性损伤本构模型来描述其力学性能^[25]。钢材材质较均匀, 为弹塑性体, 采用理想弹塑性模型描述其力学行为。

大量试验表明, 对于轴压作用下的钢管混凝土短柱, 由于钢管与混凝土是同时加载的, 钢管与混凝土之间几乎没有黏结滑移, 因此钢管和混凝土之间的相互作用采用绑定(Tie)的方式^[26], 符合实际情况。对圆钢管混凝土柱施加的边界条件: 柱底端为固定端, 顶部施加轴压均布荷载, 采用位移单调加载的方式, 如图1所示。

2.2 细观数值模型的验证

基于以上的细观数值方法, 建立3D细观数值模型,

图1 圆钢管混凝土柱3D细观数值模型及加载模型

Figure 1 3D meso-scale simulation model of the circular CFST column and loading model.

与韩林海试验^[1]进行对比, 验证其合理性. 混凝土和钢材的材料强度采用文献^[1]试验中相应件的强度参数, 各材料组分的力学参数如表1. 其中, “*”数据为试验实测数据, “※”数据是在反复试算法的基础上, 开展边长为150 mm的标准立方体混凝土试块单轴压缩试验得到的界面力学参数数据^[25]. 采用表1中给出的界面力学参数进行模拟, 得到的混凝土单轴抗压强度为51.40 MPa, 与试验结果53.40 MPa吻合较好, 可以证明参数选取的合理性.

本文以韩林海试验^[1]中编号为sccs6-1的试件(直径 D 为115 mm, 钢管厚 t 为3.9 mm, 柱长 L 为339 mm)为例, 如图2是该试件细观尺度数值模型在轴心受压荷载下的损伤破坏云图. 图中的“Damage”表示损伤, 用损伤因子 d ($d=0$ 表示没有破坏, $d=1$ 完全破坏)来表征损伤破坏的程度. 从图2中可以看出, 在细观尺度模型得出的破坏发展过程中, 裂缝的开展清晰可见. 首先圆钢管混凝土柱从中下部形成斜裂缝, 随着荷载的增大, 斜裂

表1 混凝土细观组分及钢材力学参数^{a)}

Table 1 Mechanical parameters of the meso-components of concrete and rolled steel^{a)}

细观组分	抗压强度 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	泊松比	屈服强度 (MPa)
骨料	—	—	*60	*0.2	—
砂浆基质	*53.40	*4.85	*35.5	*0.2	—
界面过渡区	※42.6	※3.88	※28.40	※0.2	—
钢材	—	—	*210	*0.3	*350

a) “*”为试验实测值, “※”通过反复试算选值, 其他为默认值

图2 圆钢管混凝土柱压缩损伤过程

Figure 2 Compression damage process of the circular CFST column.

缝逐渐扩展延伸, 最终表现为剪切型破坏.

图3是该试件模型最终破坏时的应力、应变及位移分布云图. 从图3(a)混凝土材料的应力分布云图中可以看出混凝土受到压剪破坏(拉应力为+, 压应力为-); 图3(b)是钢管的应力分布图, 可以看出钢管大部分已完全屈服, 只有端部没有完全屈服, 因此端部处钢管对混凝土的横向约束作用比中部较强; 图3(c)是圆钢管混凝土柱轴压下的最大主应变分布图, 可以看出裂缝的最终发展形态, 形成了两条主斜裂缝; 图3(d)是圆钢管混凝土柱的变形位移分布图, 显示了其变形特征

图3 圆钢管混凝土柱应力、应变及位移分布. (a) 混凝土应力; (b) 钢管应力; (c) 应变; (d) 位移

Figure 3 Stress, strain and displacement distribution of the circular CFST column. (a) Stress of the concrete; (b) stress of the steel tube; (c) strain; (d) displacement.

符合压剪破坏。

图4是圆钢管混凝土柱轴压下模拟结果和试验结果最终破坏模式的对比。由于模拟中存在加载板和钢管混凝土柱接触等影响因素,使柱端部的破坏受到影响,但仍可以看出两者端部均有局部破坏,破坏模式为压剪破坏,与试验结果吻合较好^[1]。在此基础上,对韩林海试验中另一编号为sccs7-1的试件(直径 D 为142 mm,钢管厚 t 为3.3 mm,柱长 L 为419 mm)进行模拟。如图5是模拟的两个试件轴压荷载-应变曲线,可以看出模拟强度与试验结果吻合良好,下降段部分与试验结果存在差异,但可以接受。因此,通过以上研究工作可以证明本文建立的数值模型及各参数选取的合理性。

3 圆钢管混凝土柱轴压作用下的力学行为

一般来说,可以采用套箍系数 ζ 来衡量钢管对混凝土约束作用的强弱^[1],套箍系数 ζ 的表达式为

$$\zeta = \frac{f_y A_s}{f_{ck} A_c}, \quad (1)$$

式中, f_y 为钢材的屈服强度, f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度, A_s 为钢管的横截面面积, A_c 为混凝土的横截面面积, $\alpha=A_s/A_c$ 为钢管混凝土截面含钢率。

为研究横向约束作用对圆钢管混凝土柱轴压作用下的力学行为及尺寸效应的影响,选取的套箍系数 ζ 分别为0(即为素混凝土柱),0.2,0.4,0.6和1.0,选取的素混凝土圆柱截面直径 D_c 分别为200,400和800 mm。柱的长细比均取为3,每组构件数为2,各模型中骨料的体

图4 圆钢管混凝土柱最终破坏模式的对比。(a) 模拟结果;(b) 试验结果^[1]

Figure 4 Comparison of the final failure patterns of the circular CFST column. (a) Simulated result; (b) experimental result [1].

图5 圆钢管混凝土柱轴压荷载-名义应变关系

Figure 5 Axial compression loading-strain curves of the circular CFST column.

积分数均相同,而骨料的空间分布形式不同。

各模型的具体尺寸、钢材和混凝土强度值、套箍系数以及模拟结果值见表2,其中,“A”,“B”,“C”,“D”,“E”表示5种不同的套箍系数,“S”,“M”,“L”分别表示小、中、大3种构件尺寸。其中,名义轴压强度 σ_{Nu} 定义为

$$\sigma_{Nu} = \frac{P_u}{\pi D^2/4}, \quad (2)$$

式中, P_u , σ_{Nu} , D 分别是峰值荷载、名义轴压强度、截面直径。名义轴压强度 σ_{Nu} 为轴向荷载达到峰值荷载 P_u 时的名义应力值。

3.1 破坏模式

图6是混凝土截面直径 D_c 为200 mm的圆钢管混凝土柱在不同套箍系数 ζ 下的最终破坏模式。可以看到:细观尺度下的素混凝土圆柱斜裂缝开展较多,破坏严重;随着套箍系数 ζ 的增大,圆钢管混凝土柱的裂缝开展减少,破坏程度降低,破坏范围在缩小,这是因为钢管对混凝土的约束增强,限制了混凝土裂缝的开展。

3.2 横向约束作用与荷载-应变曲线

图7是混凝土截面直径 D_c 为200 mm的圆钢管混凝土柱在不同套箍系数 ζ 下的轴压荷载-名义应变曲线。可以看出:素混凝土圆柱在峰值荷载之后荷载-应变曲线下下降较陡,而随着套箍系数 ζ 的增大,圆钢管混凝土柱的轴压荷载逐渐增大,且增大的速度越快;名义峰值应变也随之增大,下降段在逐渐变缓。由此分析得出:

表 2 圆钢管混凝土柱微观模型的具体情况

Table 2 Detailed description of the meso-models of circular CFST column

样本编号	$D \times t \times L$ (mm)	f_y (MPa)	f_{ck} (MPa)	ζ	σ_{Nu}
AS-1	200×0×600				53.48
AS-2					52.56
AM-1	400×0×1200				46.64
AM-2		350	53.4	0.0	47.94
AL-1	800×0×2400				41.73
AL-2					40.50
BS-1	202.28×1.14×600				60.71
BS-2					59.43
BM-1	404.56×2.28×1200				54.38
BM-2		350	53.4	0.2	55.92
BL-1	809.1×4.55×2400				50.54
BL-2					51.70
CS-1	204.54×2.27×600				67.50
CS-2					66.29
CM-1	409.06×4.53×1200				62.96
CM-2		350	53.4	0.4	64.11
CL-1	818.1×9.05×2400				60.95
CL-2					59.81
DS-1	206.76×3.38×600				73.96
DS-2					73.01
DM-1	413.5×6.75×1200				72.46
DM-2		350	53.4	0.6	71.59
DL-1	826.98×13.49×2400				71.60
DL-2					70.62
ES-1	211.2×5.6×600				86.08
ES-2					85.48
EM-1	422.4×11.2×1200				85.49
EM-2		350	53.4	1.0	84.83
EL-1	844.6×22.3×2400				85.18
EL-2					85.24

由于圆钢管对混凝土提供了均匀有效的侧向约束作用,使核心混凝土处于理想的三轴受压状态,极大地提高了混凝土的承载力和变形能力.因此套箍系数 ζ 不仅

图 6 不同套箍系数圆钢管混凝土柱最终破坏模式

Figure 6 The final failure patterns of the circular CFST column in different confinement coefficients.

图 7 不同套箍系数圆钢管混凝土柱轴压荷载-名义应变关系

Figure 7 Axial compression loading-nominal strain curves of the circular CFST column in different confinement coefficients.

影响柱的轴压名义强度,同时对柱的延性也有影响,即套箍系数 ζ 越大,名义强度越高,延性越好.

4 圆钢管混凝土柱轴压强度尺寸效应分析

4.1 破坏模式随尺寸变化

图8是在套箍系数 ζ 为0.2时不同尺寸下圆钢管混凝土柱最终破坏模式.大体上可以看出不同尺寸下柱的破坏模式略有不同.在相同套箍系数 ζ 下,随着截面尺寸的增大,柱的破坏模式逐渐呈现压剪破坏,最大截面尺寸柱的斜裂缝开展较大,脆性破坏较明显.

4.2 名义强度随尺寸变化

图9是在不同套箍系数 ζ 下不同截面尺寸的圆钢管

图8 相同套箍系数不同尺寸圆钢管混凝土柱最终破坏模式

Figure 8 The final failure patterns of the circular CFST column of different sizes in the same confinement coefficient.

混凝土柱轴压下名义应力-名义应变曲线。名义应力定义为轴压荷载 N 与柱截面面积的比值, 名义应变为柱的整体位移与柱高的比值。由此可以看出: 在同一套箍系数 ζ 下, 随着截面尺寸 D 的增大, 圆钢管混凝土柱的名义强度降低, 且降低的幅度变缓; 名义峰值应变

也随之减小, 下降段变陡, 延性降低, 脆性增强, 体现出了明显的尺寸效应规律。素混凝土圆柱的尺寸效应最为明显, 随着套箍系数 ζ 的增大, 圆钢管混凝土柱的名义强度增强, 而尺寸效应逐渐被削弱, 当套箍系数 ζ 达到0.6时, 尺寸效应已基本消失。由于套箍系数 ζ 的增大, 圆钢管对混凝土的横向约束作用增强, 不仅提高了混凝土的强度和变形能力, 同时削弱了圆钢管混凝土柱的尺寸效应。

4.3 轴压强度尺寸效应分析

图10给出了不同套箍系数 ζ 下圆钢管混凝土柱轴压下的名义强度随截面尺寸变化的关系, 模拟结果与王玉银等人^[11]的试验结果基本吻合。可以看出: 在5组不同套箍系数 ζ 下每组柱模型的名义强度均随截面尺寸的增大而减小, 尤其是素混凝土圆柱表现出明显的尺寸效应; 而随着套箍系数 ζ 的增大, 约束作用的增强, 相同截面尺寸柱的名义强度提高, 并且每组柱的强度随尺寸增大而减小的幅度降低, 即尺寸效应被削弱。由此得出在圆钢管混凝土柱轴心受压荷载作用下套箍系数 ζ 在尺寸效应的影响中占主导因素。

目前, 在混凝土材料层次上的尺寸效应理论已较

图9 不同尺寸下圆钢管混凝土柱名义应力-名义应变关系

Figure 9 Nominal stress-strain curves of the circular CFST column of different sizes.

图 10 (网络版彩图)圆钢管混凝土柱名义强度与截面直径关系

Figure 10 (Color online) Nominal strength vs. cross-section diameter of the circular CFST column.

为完善,典型的尺寸效应律包括: Bažant^[27]基于断裂力学理论的尺寸效应律、Carpinteri和Ferro^[28]基于分形理论的尺寸效应律、Weibull^[29]统计尺寸效应律以及Duan和Hu^[30]边界尺寸效应律等,大量的试验结果证实了这些理论公式的准确性和合理性。

为了验证本文中尺寸效应规律的正确性,利用Bažant基于断裂力学理论提出的适用于混凝土材料的尺寸效应理论公式^[26]:

$$\sigma_{Nu} = \frac{Bf_c}{\sqrt{1+D/D_0}}, \quad (3)$$

式中, σ_{Nu} 为名义强度, f_c 为混凝土材料抗压强度(这里取最小尺寸素混凝土柱的抗压强度模拟值), B 和 D_0 是依赖于材料的断裂性能以及结构的几何形状但与结构尺寸无关的常数,通过回归分析得到的经验系数, D 是试件的特征尺寸(这里为柱截面直径)。式(2)可转化成线性方程:

$$Y = AX + C, \quad (4)$$

式中, $Y=(f_c/\sigma_{Nu})^2$, $X=D$, $C=1/(B)^2$, $A=C/D_0$ 。这里 f_c 采用尺寸 $\Phi 200 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 素混凝土圆柱的抗压强度模拟值的平均值,即为53.02 MPa。通过对素混凝土圆柱(A系列)模拟结果进行回归分析得到线性方程,由线性方程的系数得出尺寸效应参数,如表3所示,进而可以绘制出Bažant尺寸效应理论拟合曲线。

尺寸效应理论(size effect law, SEL)、基于线弹性断裂力学理论(linear elastic fracture mechanics, LEFM)

表 3 Bažant尺寸效应理论拟合参数

Table 3 Parameter of Bažant size effect law

编号	σ_{Nu}	A	C	B	D_0	D/D_0
AS-1	53.48					0.276
AS-2	52.56					0.276
AM-1	46.64	0.0011	0.797	1.120	724.6	0.552
AM-2	47.94					0.552
AL-1	41.74					1.104
AL-2	40.518					1.104

确定的尺寸效应渐近线(针对完全脆性材料)以及基于塑性强度理论(strength criterion)确定的无尺寸效应的渐近线(针对弹塑性材料)拟合的关系曲线,得出了不同截面尺寸下素混凝土圆柱轴压下名义强度的变化规律,其拟合的相关系数为0.972,表明素混凝土圆柱轴压作用下的数值模拟结果与Bažant尺寸效应理论吻合良好(图11),可以用来反映混凝土材料层次的尺寸效应规律。

5 圆钢管混凝土柱轴压强度尺寸效应理论

5.1 轴压强度尺寸效应理论公式

目前,国内外关于圆钢管混凝土构件承载力计算方法的规程具有代表性的有美国AISC 360-10^[12]、日

图 11 (网络版彩图)素混凝土圆柱模拟结果与理论结果的拟合对比

Figure 11 (Color online) Fitting comparison of the simulation results and theory results of Plain circular concrete columns.

本AIJ(2008)^[13]、欧洲EC4(2004)^[14]、我国CECS(2012)^[15]及DL/T5085(1999)^[16], 其中美国AISC 360-10^[12]是将混凝土的强度折算到钢材中, 得到钢材的名义抗压强度, 再计算出构件的承载力; 日本AIJ(2008)^[13]和欧洲EC4(2004)规程^[14]实质上是叠加钢管和混凝土两者的承载力计算构件的承载力; 我国CECS(2012)^[15]和DL/T5085(1999)规程^[16]是利用引入套箍指标来提高混凝土强度的计算方法规定了圆钢管混凝土轴压构件的承载力公式. 利用我国规程中的计算理论方法, 则圆钢管混凝土柱的轴压承载力 N 为

$$N = \sigma_{Nu} A_{sc}, \quad (5)$$

式中, σ_{Nu} 为核心混凝土柱的轴压强度; A_{sc} 为圆钢管混凝土柱横截面面积. 由式(5)可知, 核心混凝土柱承载力 N 与混凝土材料的强度、钢管的强度和厚度即钢管对核心混凝土约束作用的强弱程度等因素有关, 而这些影响因素均与柱截面尺寸相关, 即核心混凝土柱承载力 N 与尺寸效应相关.

从第3节中圆钢管混凝土柱轴压破坏行为的数值模拟结果不难得知, 钢管的横向约束作用的强弱程度即套箍系数 ζ 对圆钢管混凝土柱轴压承载力存在两个方面的影响.

(1) 名义强度的增强. 在圆钢管的横向约束作用下, 圆钢管混凝土柱轴压下的名义强度较素混凝土圆柱明显有所提高; 且套箍系数 ζ 越大, 名义强度越高. 此影响可用强度提高系数 φ 来表征.

(2) 尺寸效应的削弱. 由于圆钢管的约束作用, 混凝土处于三轴受压应力状态, 圆钢管内部混凝土的变形被限制, 柱的延性能力增强, 脆性程度降低, 圆钢管混凝土柱尺寸效应削弱. 当约束作用较强, 如套箍系数 ζ 达到0.6时, 整个圆钢管混凝土柱的轴压破坏表现为延性破坏, 此时尺寸效应基本上完全消失. 该行为可用尺寸效应削弱系数 β 来描述.

基于以上两点的分析总结, 在Bazant材料层次尺寸效应理论的基础上, 确定了钢管对混凝土横向约束作用在圆钢管混凝土柱轴压承载力中的贡献, 从而得出构件层次上的尺寸效应律, 建立构件层次圆钢管混凝土柱轴压强度尺寸效应理论, 提出如下表达式:

$$\sigma_{Nu} = \frac{B f_c}{\sqrt{1+D/D_0}} \cdot \varphi \cdot \beta, \quad (6)$$

式中, 参数 φ 和 β 应为套箍系数 ζ 的函数, 表征钢管的横

向约束作用的具体影响. 该尺寸效应理论公式构建了混凝土材料层次尺寸效应规律与构件层面尺寸效应定量规律之间的关联性.

下文将探讨参数 φ 和 β 的具体函数形式.

5.2 强度提高系数 φ 的确定

在我国CECS(2012)规程^[15]中, 利用引入套箍指标来提高混凝土强度的计算方法规定了圆钢管混凝土轴压构件的承载力公式:

$$N_u = \varphi_t N_0, \quad (7)$$

$$N_0 = f_{ck} A_c (1 + 1.8\theta), \quad (8)$$

式中, φ_t 为考虑长细比影响的承载力折减系数, N_0 为钢管混凝土轴心受压短柱承载力, f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度, θ 为套箍指标即套箍系数 ζ , $\theta = \zeta = f_y A_s / (f_c A_c)$.

此计算方法是在混凝土轴心抗压强度的基础上, 考虑圆钢管约束作用对混凝土强度的提高, 从而引入套箍系数 ζ 来计算圆钢管混凝土轴压构件的承载力. 因此利用此规程中的计算方法, 以模拟的最小尺寸素混凝土圆柱($\Phi 200 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$)的轴心抗压强度值 f_c 为基准强度, 则强度提高系数 φ 为

$$\varphi = \frac{f_{cc}}{f_c} = \gamma^* (1 + 1.8\theta), \quad (9)$$

式中, f_{cc} 为圆钢管混凝土柱轴心抗压强度, γ 为基准强度转换系数, $\gamma = f_{ck} / f_c$. 将模拟数据与CECS规程中的提高系数进行拟合, 如图12, 当 $\gamma=0.6$ 时, 两者吻合情况较好.

5.3 尺寸效应削弱系数 β 的确定

由模拟结果可知, 由于圆钢管对混凝土的横向约束作用, 柱的强度和延性均有所提高, 且随着套箍系数 ζ 的增大, 约束作用的增强, 尺寸效应现象逐渐被削弱, 当套箍系数 ζ 为0.6时, 尺寸效应基本上被完全抑制. 图13是削弱系数 β 和套箍系数 ζ 之间的关系曲线.

(1) 当 $\zeta=0$ 时即素混凝土圆柱, 由于不存在圆钢管的横向约束作用, 柱的尺寸效应最显著, 此时套箍系数 ζ 对柱轴压破坏尺寸效应无影响, 因此 $\beta = 1$.

(2) 当 $\zeta \geq \zeta_0$ (ζ_0 为临界套箍系数, 在本文工况中, $\zeta_0=0.6$)时, 由于圆钢管提供的约束作用很强, 柱的轴压破坏呈现“塑性”特征, 且柱的名义强度随尺寸的增大基本保持不变, 此时轴压强度的尺寸效应基本上被

图 12 (网络版彩图)圆钢管混凝土柱轴压强度提高系数的拟合曲线

Figure 12 (Color online) Fitting curve of the increase of axial compression strength of circular CFST column.

图 13 (网络版彩图)尺寸效应削弱系数与套箍系数的关系曲线

Figure 13 (Color online) Relationship curve of the determination of the weakening coefficient and the confinement coefficient.

完全抑制. 该状态下, 名义轴压强度与结构尺寸无关, 则此时对应的名义轴压强度应为

$$\sigma_{\text{Nu}} \Big|_{\zeta \rightarrow \zeta_0} = f_{\text{cc}}. \quad (10)$$

联立式(6)、(9)和(10), 可得尺寸效应被完全抑制时所对应的削弱系数 β 为

$$\beta \Big|_{\zeta \rightarrow \zeta_0} = \frac{\sqrt{1+D/D_0}}{B}. \quad (11)$$

(3) 当 $0 < \zeta < \zeta_0$ 时, 随着套箍系数 ζ 的增大, 约束作用的增强, 圆钢管混凝土柱轴压名义强度的尺寸效应现象逐渐被削弱, 削弱系数 β 在 1 和 $\sqrt{1+D/D_0}/B$ 之间, 并且随着套箍系数 ζ 的增大, 削弱系数 β 无限接近于 $\sqrt{1+D/D_0}/B$, 因此可以假定削弱系数 β 和套箍系数 ζ 之间的关系曲线是一条渐近于 $\sqrt{1+D/D_0}/B$ 的非

线性曲线. 这里可假定为双曲正切曲线, 如图13所示.

基于以上假定和分析, 削弱系数 β 可表示为

$$\beta = \begin{cases} \left(\frac{\sqrt{1+D/D_0}}{B} - 1 \right) \tanh(\alpha\zeta) + 1, & \zeta \leq \zeta_0, \\ \frac{\sqrt{1+D/D_0}}{B}, & \zeta > \zeta_0, \end{cases} \quad (12)$$

式中, α 为调节系数, 反映钢管约束作用对尺寸效应削弱的快慢, 其可通过试验和模拟结果数据拟合来确定.

5.4 尺寸效应公式的验证

基于本文以上的分析和推导, 可得出圆钢管混凝土柱轴压承载力尺寸效应理论公式, 现需要通过试验和模拟数据验证该半经验-半理论公式的准确性和合理性.

通过分析可知, 在推导出的尺寸效应理论公式中, 有3个参数(B , D_0 和 α)需要确定. 这里将最小尺寸的素混凝土圆柱模型($\Phi 200 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$)作为基准试件, 其轴心抗压强度 $f_c = 53.02 \text{ MPa}$; 将素混凝土圆柱数值模拟结果回归分析得到的尺寸效应参数 B 和 D_0 作为基准参数, $B = 1.120$, $D_0 = 724.6$. 关于调节系数 α , 这里则是通过与模拟结果进行反复试算与对比的方法来确定.

结合上述给定参数, 将本文半经验-半理论公式与模拟结果进行对比分析发现, 当调节系数 α 的值在 $10 \sim 15$ 之间时, 理论预测值与模拟结果吻合良好. 这里, 建议 α 取值为 12 , 即 $\alpha = 12$.

在此基础上, 为验证本文尺寸效应半经验-半理论公式的准确性, 将其与韩林海等人^[1]的试验结果进行对比, 如图14所示, 可以看出, 理论值与试验值吻合较好, 证明提出的圆钢管混凝土柱轴压承载力尺寸效应半经验-半理论公式的准确性. 当然, 此公式尚需要大量的试验数据来验证.

6 结论

本文借助细观数值模拟方法研究了圆钢管约束混凝土柱轴压破坏行为, 揭示了钢管横向约束作用对混凝土柱名义轴压强度及其尺寸效应的定量影响规律, 进而提出了轴压加载下圆钢管混凝土柱的尺寸效应理论公式. 获得如下主要结论.

(1) 建立的细观数值分析模型可以很好地模拟不

图 14 理论值与试验结果对比

Figure 14 Comparisons between the theoretical values and experimental results.

同尺寸圆钢管混凝土柱的破坏机理与失效模式。

(2) 相同结构尺寸下, 随套箍系数的增大, 约束作用增强, 钢管混凝土柱内裂缝发展受到抑制, 破坏程度减弱, 使得轴压强度和延性能力均明显提高。

(3) 相同约束作用下, 不同尺寸圆钢管混凝土柱的破坏模式略有差异, 随结构尺寸的增大, 柱破坏呈现明显的压-剪破坏, 且柱的强度和延性能力都随尺寸的增大而降低。

(4) 当套箍系数达到0.6时, 圆钢管混凝土柱轴压强度的尺寸效应基本消失, 尺寸效应被完全抑制。

(5) 钢管约束作用对混凝土柱产生两方面作用: 强度增强效应与尺寸效应削弱效应。

此外, 建立的圆钢管混凝土柱轴压破坏尺寸效应公式搭建了材料与构件层次尺寸效应的关联性。关于截面形式、混凝土强度等级及加载方式等因素对钢管混凝土柱尺寸效应的影响将另文讨论。

参考文献

- 1 Han L H. Structure of Concrete Filled Steel Tube Theory and Practice (in Chinese). Beijing: Science Press, 2000. 118–130 [韩林海. 钢管混凝土结构. 北京: 科学出版社, 2000. 118–130]
- 2 Cai S H. Modern Steel Tube Confined Concrete Structures (in Chinese). 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2007. 3–7 [蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构. 第2版. 北京: 人民交通出版社, 2007. 3–7]
- 3 Han L H, Li W, Bjorhovde R. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members. *J Constr Steel Res*, 2014, 100: 211–228
- 4 Han L H, An Y F. Performance of concrete-encased CFST stub columns under axial compression. *J Constr Steel Res*, 2014, 93: 62–76
- 5 Giakoumelis G, Lam D. Axial capacity of circular concrete-filled tube columns. *J Constr Steel Res*, 2004, 60: 1049–1068
- 6 Schneider S P. Axially loaded concrete-filled steel tubes. *J Struct Eng*, 1998, 124: 1125–1138
- 7 Han L H, Liu W, Yang Y F. Behaviour of concrete-filled steel tubular stub columns subjected to axially local compression. *J Constr Steel Res*, 2008, 64: 377–387
- 8 Yamamoto T, Kawaguchi J, Morino S. Experimental study of scale effects on the compressive behavior of short concrete-filled steel tube columns. In: *Composite Construction in Steel and Concrete IV Conference 2000*. Banff, 2000. 879–890
- 9 Sakino K, Nakahara H, Morino S, et al. Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns. *J Struct Eng*, 2004, 130: 180–188
- 10 Lu X Z, Zhang W K, Li Y, et al. Size effect of axial strength of concrete-filled square steel tube columns (in Chinese). *J Shenyang Jianzhu Univ*, 2012, 28: 974–980 [陆新征, 张万开, 李易, 等. 方钢管混凝土短柱轴压承载力尺寸效应. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28: 974–980]
- 11 Wang Y Y, Chen P, Liu C Y, et al. Size effect of circular concrete-filled steel tubular short columns subjected to axial compression. *Thin-Walled Struct*, 2017, 120: 397–407

- 12 American Institute of Steel Construction. Specification for Structural Steel Buildings: AISC 360-10. Chicago, IL: AISC, 2010
- 13 Architectural Institute of Japan. Recommendations for Design and Construction of Concrete Filled Steel Tubular Structures. Tokyo: AIJ, 2008
- 14 European Committee for Standardization. Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings: EN 1994-1-1. Brussels: CEN, 2004
- 15 China Association for Engineering Construction Standardization (CECS). CECS 28:2012: Technical Specification for Concrete-Filled Steel Tubular Structures (in Chinese). Beijing: China Planning Press, 2012 [中国工程建设标准化协会. 钢管混凝土结构技术规程(CECS 28:2012). 北京: 中国计划出版社, 2012]
- 16 National Economic and Trade Commission of the People's Republic of China (NETC). DL/T5085-1999: Code for Design of Steel-Concrete Composite Structure (in Chinese). Beijing: China Electric Power Press, 1999 [中华人民共和国国家经济贸易委员会. 钢-混凝土组合结构设计规程(DL/T5085-1999). 北京: 中国电力出版社, 1999]
- 17 Du X L, Jin L, Li D. A review of the size effect of concrete and concrete structures (I): Material hierarchy (in Chinese). Chin J Civil Eng, 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]
- 18 Du X L, Jin L, Li D. A review of dimensional effects of concrete and concrete structures (II): Component levels (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]
- 19 Du X L, Jin L. Mesoscopic unit equivalent model for analysis of macroscopic mechanical properties of concrete materials (in Chinese). Chin J Comput Mech, 2012, 29: 654–661 [杜修力, 金浏. 混凝土材料宏观力学特性分析的细观单元等效化模型. 计算力学学报, 2012, 29: 654–661]
- 20 Du X L, Jin L, Ma G. Meso-element equivalent method for the simulation of macro mechanical properties of concrete. Int J Damage Mech, 2013, 22: 617–642
- 21 Du M, Jin L, Li D, et al. Mesoscopic and heterogeneous effects of model size and aggregate grade on concrete (in Chinese). J Appl Basic Eng Sci, 2017, 25: 382–394 [杜敏, 金浏, 李冬, 等. 模型尺寸和骨料级配对混凝土细观非均质影响. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25: 382–394]
- 22 Chen H S, Sun W, Stroeven P. Review of research on aggregate and slurry interface of cement-based composites (II): Formation, degradation mechanism and influencing factors of interface microstructure (in Chinese). J Chin Ceramic Soc, 2004, 32: 70–79 [陈惠苏, 孙伟, Stroeven P. 水泥基复合材料集料与浆体界面研究综述(二): 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]
- 23 Jin L, Li D, Du X L, et al. Experimental and numerical study on size effect in eccentrically loaded stocky RC columns. J Struct Eng, 2017, 143: 04016170
- 24 Du X L, Jin L. Study on macroscopic mechanical properties of concrete considering the influence of interface in transition zone (in Chinese). Eng Mech, 2012, 29: 72–79 [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 Li D, Jin L, Du X L, et al. Mesoscopic numerical investigations on the slenderness effect of reinforced concrete column under axial compression (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 961–969 [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]
- 26 Wang Y J. The finite element analysis of concrete-filled thin-walled steel tube columns based on ABAQUS (in Chinese). Fujian Constr Sci Tech, 2014, 138: 37–39 [王阳杰. 基于ABAQUS的钢管混凝土柱有限元分析. 福建建设科技, 2014, 138: 37–39]
- 27 Bažant Z P. Size effect in blunt fracture: Concrete, rock, metal. J Eng Mech, 1984, 110: 518–535
- 28 Carpinteri A, Ferro G. Size effects on tensile fracture properties: A unified explanation based on disorder and fractality of concrete microstructure. Mater Struct, 1994, 27: 563–571
- 29 Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability. J Appl Mech, 1951, 18: 293–297
- 30 Duan K, Hu X, Wittmann F H. Scaling of quasi-brittle fracture: Boundary and size effect. Mech Mater, 2006, 38: 128–141

Failure behavior and size effect theory of circular concrete-filled steel tubular columns under axial compression

JIN Liu, FAN LingLing, DU XiuLi & LI XiuRong

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

Although great progress has been made in the research of size effect laws of concrete materials, little attention has been paid on the size effect theory of concrete-filled steel tube components. In this study, a three-dimensional mesoscopic numerical analysis model is established to explore the axial compressive failure of circular concrete-filled steel tubular columns, considering concrete heterogeneity and interaction between the steel tube and concrete. A good agreement between our simulation results and the existing experimental results is achieved. Also, the axial compressive failure mechanism and failure modes of concrete-filled steel tubular columns under different lateral constraints (represented by confinement coefficients) and different structural sizes are studied by using the mesoscopic simulation method. In addition, the effect of horizontal confinement on the nominal axial compressive strength of concrete columns and the corresponding size effect are revealed. Finally, by applying the influencing mechanism of steel tube to the axial compressive strength of concrete columns, causing the strength enhancement effect and size effect weakening effect, based on the size effect law of material level, a theoretical formula of size effect reflecting the axial compressive strength of concrete columns under lateral constraint is established. The accuracy and rationality of the derived theoretical formula are verified.

circular concrete-filled steel tubular column, meso-scale simulation model, confinement effect, axial compressive strength, size effect

doi: [10.1360/SST-2019-0065](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0065)