

文章编号:1005-0930(2023)03-0780-014 中图分类号:TU528 文献标识码:A
doi:10.16058/j.issn.1005-0930.2023.03.020

钢管混凝土柱纯扭破坏尺寸效应细观数值分析

金 浏, 王仲实玉, 祝华杰, 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)

摘要:在地震作用下,钢管混凝土柱常受到扭转作用或压-弯-剪-扭复合作用,扭矩的存在会加剧钢管混凝土柱的破坏.为探究钢管混凝土柱纯扭破坏及尺寸效应行为,采用三维细观数值模拟方法,考虑混凝土细观组分的非均质性及钢管与混凝土间的接触作用,建立了钢管混凝土柱的三维纯扭细观数值模型.分析了结构尺寸、套箍系数和截面形状对不同尺寸钢管混凝土柱纯扭破坏的影响.最后,对比并修正了 Bažant 尺寸效应律,提出了全尺寸范围内的名义抗扭强度公式.结果表明:(1)素混凝土柱纯扭破坏表现出显著的脆性破坏特征,而钢管混凝土柱纯扭破坏表现出一定的延性破坏特征;(2)钢管混凝土柱纯扭破坏具有尺寸效应,且方柱的尺寸效应强于圆柱;(3)在低约束作用(用套箍系数表征)下,钢管混凝土柱纯扭破坏尺寸效应较为明显,随着套箍系数的增加,名义抗扭强度的尺寸效应被削弱.

关键词:钢管混凝土柱;纯扭破坏;套箍系数;尺寸效应;细观模拟;延性破坏

由于钢管混凝土柱具有优异的静力性能及抗震性能,目前在建筑结构的被广泛应用.实际工程中,在弯桥、斜桥等一些桥梁体系中,由于结构整体的水平抗侧中心与质量中心不重合,导致在地震作用下,墩柱时常发生扭转破坏.随着结构尺寸、建筑高度和桥梁跨度的不断增大,钢管混凝土柱的安全性能受到关注.因此,为了推广钢管混凝土柱在一些不规则大跨结构中的应用,并保证其在扭转状态下的安全性,有必要研究钢管混凝土柱在扭转状态下的破坏行为.

Beck 和 Kiyomiya^[1]对钢管混凝土构件的扭转性能进行了试验研究,结果表明,混凝土能有效防止钢管的局部屈曲,混凝土对钢管混凝土柱的抗扭性能起重要作用,且结构整体具有较好的延性和抗扭性能.Nie 等^[2-3]证明了钢管混凝土柱的纯扭状态可视为钢管的拉-扭状态和混凝土压-扭状态的总和,且套箍系数对其抗扭承载力有显著影响,随着套箍系数的增大,结构整体抗扭承载力增大,但当套箍系数大于 1 时,这种影响减弱.Xu 和 Zhou^[4]

收稿日期:2021-11-18;修订日期:2022-06-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1504302);国家自然科学基金项目(51822801).

作者简介:金 浏(1985—),男,教授,博士生导师.E-mail:jinfliu@bjut.edu.cn

通信作者:杜修力(1962—),男,教授,博士生导师.E-mail:duxili2015@163.com

探究了含钢率对钢管混凝土柱抗扭承载力的影响,结果表明,对含钢率较低的试件,必须考虑核心混凝土的尺寸效应.以上研究结果表明,钢管混凝土柱的抗扭承载力为混凝土部分和钢管部分的叠加,低套箍系数下的钢管混凝土柱的抗扭性能和尺寸效应有待研究.

Bažant^[5]对最大截面尺寸为 300mm 的素混凝土梁进行了纯扭试验,结果表明,素混凝土梁的扭转破坏脆性特征显著,其名义抗扭强度具有明显的尺寸效应现象.对于钢管混凝土柱纯扭破坏的尺寸效应问题,国内外相关研究较少.Beck 和 Kiyomiya^[1],Nie 等^[2-3],Xu 和 Zhou^[4]开展的钢管混凝土构件纯扭试验中构件截面尺寸集中在 200mm 以下,缺少对大尺寸构件的研究.另外,GB 50936—2014^[6]也未提及钢管混凝土柱的尺寸效应问题,因此,不同尺寸尤其是大尺寸钢管混凝土柱的扭转性能及破坏机理值得研究和讨论.

鉴于此,通过建立钢管混凝土柱纯扭破坏的三维细观数值分析模型,研究了套箍系数及截面形状对钢管混凝土柱抗扭强度尺寸效应的影响规律.最后,对比并修正了 Bažant 的尺寸效应律的适用性,提出了全尺寸范围内的名义抗扭强度尺寸效应公式.

1 钢管混凝土柱细观分析模型

1.1 细观数值分析模型的建立

钢管混凝土柱的尺寸效应主要由以下两点造成:(1)混凝土材料的非均质性和随机性^[7-8];(2)钢管和混凝土之间的相互作用关系.针对原因一,建立一个能反应混凝土非均质性的细观数值模型,将其视为由骨料、砂浆基质和界面过渡区组成的三相复合材料^[9-10];针对原因二,考虑钢管和混凝土之间复杂的相互作用.

基于以上分析,建立了钢管混凝土柱纯扭作用三维细观数值模型,如图 1 所示.参考聂建国等^[11]的研究,简化了加载装置,在柱两端放置垫块,柱顶设置参考点,在参考点上施加转角位移,柱底固定.

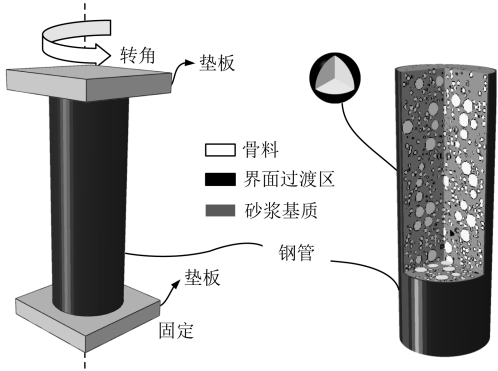


图 1 钢管混凝土柱三维细观数值模型

Fig.1 Three-dimensional mesoscopic numerical model of CFST columns

1.1.1 骨料、砂浆基质和界面过渡区 Naderi 和 Zhang^[12]研究表明,骨料形状对混凝土宏观应力-应变曲线无显著影响,因此,为简化计算,在三维细观模拟中将骨料视为球形颗粒.混凝土骨料采用两级配,用 Fortran 程序将粗骨料颗粒随机投入砂浆基质中^[13],第一组骨料粒径的下界、上界分别为 5mm、20mm,等效粒径为 12mm;第二组骨料粒径的下界、

上界分别为 20mm、40mm, 等效粒径为 30mm.

结合 Meddah 等^[14]的研究, 可将砂浆基质视为由直径小于 5mm 的细集料、微裂缝和水泥浆体中的孔隙等细观组分混合而成的基质体.

界面过渡区是存在于骨料颗粒与水化水泥浆体之间的薄层, 体积小但对混凝土力学性能影响较大, Song 和 Lu^[15]、Jin 等^[16]研究表明, 当界面过渡区厚度为 0.1~2.0mm 时, 其厚度变化仅影响混凝土应力-应变曲线的下降部分, 几乎没有提升部分和峰值应力的影响.

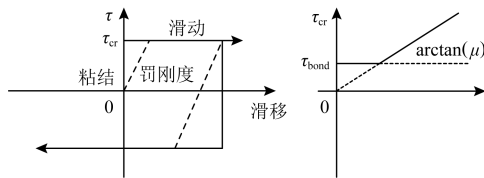


图2 库伦摩擦模型

Fig.2 Coulomb friction model

因此, 考虑结果的准确性和计算效率, 界面过渡区厚度设置为 2.0mm^[15].

1.1.2 钢管和混凝土界面模型 参考 Han

等^[17]研究, 建立了钢管与混凝土之间的相互作用关系, 法线方向采用“硬”接触, 允许钢管和混凝土在相互作用过程中分离; 切线方向采用罚函数来考虑粘结滑移, 切向力用库伦

摩擦模型表示^[18], 如图 2, 摩擦系数取 0.6^[18].

1.1.3 单元类型、单元网格和边界条件 为了保证单元网格不产生扭曲, 混凝土采用八节点减缩积分格式的三维实体单元 (C3D8R), 钢管采用四节点减缩积分格式的壳单元 (S4R). 采用细化网格的方法对网格进行收敛性分析. 边界条件为底部固定, 顶部施加转角位移. 采用 Newton-Raphson 增量迭代法求解钢管混凝土柱在纯扭作用下的响应.

1.2 本构模型

1.2.1 塑性损伤本构模型 由于骨料比砂浆基质和界面过渡区有更强的抗拉和抗压强度, 因此建模时将骨料设置为弹性体^[19]. 砂浆基质和界面过渡区采用混凝土塑性损伤本构模型^[20], 如图 3. 在该模型中, 混凝土的主要破坏机制是拉伸开裂和压缩破坏. 此外, 为了缓解由于应变软化引起的网格敏感性问题, 在应力-应变软化阶段, 采用应力-开裂位移来描述材料拉伸软化段力学行为, 从而保证了单元破坏时“断裂能”的唯一性. 这种处理方法, 已在众多分析^[21-22]中被采用.

1.2.2 钢管本构模型 采用弹塑性模型描述钢的本构行为, 由弹性和硬化两个线性阶段组成, 如图 4. 硬化模量取 $0.01E_s$, 其中 E_s 为钢的弹性模量^[23].

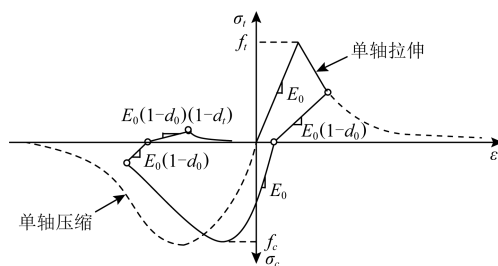


图3 塑性损伤模型

Fig.3 Plasticity damage model

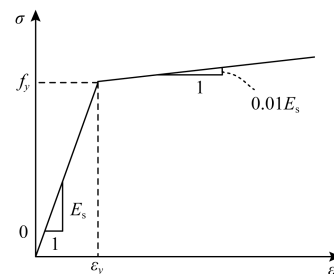


图4 钢管本构模型

Fig.4 Steel tube constitutive model

1.3 细观数值模型的验证

参考聂建国等^[11]对钢管混凝土柱纯扭破坏进行的加载试验, 建立了钢管混凝土柱纯

扭三维细观数值模型,来验证模型建立的准确性和可靠度.试件具体信息见表 1.试验分别对圆柱和方柱顶部施加一定转角位移,柱底固定.

表 1 试件详细信息
Table 1 Detailed information on the specimens

试件编号	截面尺寸 $D(B\times h)\times L/\text{mm}^2$	加载方式	钢管厚度/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
CH35(圆形) ^[1]	140×1 000	纯扭	3.5	323	460
R1-2(矩形) ^[11]	200×150×1 100	纯扭	6	336	465

首先,需要确定钢管和混凝土细观构件的力学参数,包括抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比、钢管屈服强度、钢管极限强度和剪胀角.混凝土和钢管细观构件的力学参数,详见表 2.在实际工程计算中,对于剪胀角的具体取值^[24]尚无一致的结论.Tao 等^[25]研究发现,当混凝土剪胀角为 20°~40°时,宏观应力-应变曲线上升段几乎不受影响,下降段受影响较小.因此,参考前人研究^[25-26],将混凝土各细观组分的剪胀角定为 30°.界面过渡区力学参数的确定方法如下:先将砂浆基质的各种力学参数折减 70%~85%,进而在这个区间内挑选不同的数值,通过反复试算的方法来确定 ITZ 的力学参

数^[27-28].建立标准立方体混凝土试块(150mm×150mm×150mm)的三维细观数值模型,通过对界面过渡区的力学参数反复试算,当各力学参数如表 2 中参数时,混凝土抗压强度模拟值为 45.09MPa,试验值为 45.32MPa,说明所取参数合理^[29-30].此外,为了探究网格敏感性对模拟结果的影响,选取文献[1]中编号为 CH35 的钢管混凝土柱进行不同网格尺寸(2mm、4mm 和 5mm)下的纯扭模拟,模拟结果与试验结果^[1]对比,如图 5 所示.图中,损伤因子表征混凝土损伤程度,0 代表无损伤,1 代表完全损坏.结果表明,不同网格尺寸下的核心混凝土柱破坏图及扭矩-转角关系差异较小,网格尺寸为 4mm 时,扭矩-转角曲线最接近试验结果.考虑到数值模拟的计算准确性和效率,选择 4mm 的网格尺寸进行模拟.

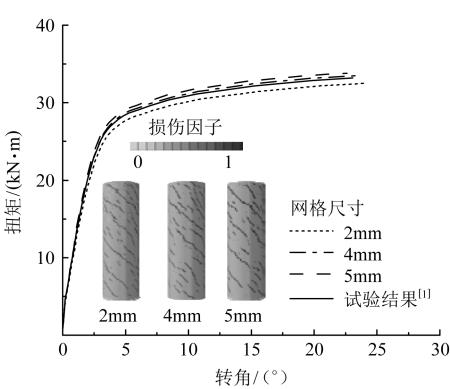


图 5 不同网格尺寸下的扭矩-转角曲线关系
Fig.5 Torque-twist relationship under different mesh sizes

表 2 混凝土和钢管细观构件的力学参数

Table 2 Mechanical parameters of the meso-components of concrete and steel tube

细观组分	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比	断裂能 G_c /(J/m ²)	剪胀角 Ψ /(°)	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa
骨料	—	—	60	0.2	60	—	—	—
砂浆基质	56.65 [*]	4.35 [*]	4.5 [*]	0.2	50 [*]	30 ^a	—	—
界面过渡区	42.72 [#]	3.48 [#]	24.15 [#]	0.2	30 [#]	30 ^a	—	—
钢管	—	—	200 [*]	0.3	—	—	350 [*]	409 [*]

注:“*”为试验实测值(砂浆基质、钢管的力学参数根据试验^[11]得到);“#”为反复试算;“a”为数据来自文献[25-26];其他数据为力学参数默认值.

图6所示为模拟与试验^[1,11]结果的破坏模式以及扭矩-转角关系对比.可以看出,细观数值模拟方法能较好地反映试验的破坏模式.模拟结果为圆钢管混凝土柱中的核心混凝土柱沿柱身均匀地产生螺旋斜裂缝,矩形钢管产生斜向褶皱,两者均与试验结果吻合较好.此外,由于混凝土是一种非均质材料,其骨料和初始裂缝分布随机,细观数值模拟能较好地描述混凝土内部的非均质性,因此,混凝土产生的裂缝不完全对称.将模拟结果得到的扭矩-转角曲线与试验曲线进行对比,可以看出,对于钢管混凝土柱的不同截面尺寸、截面形式和钢管厚度,数值模拟均能较好地反映试验的真实情况,说明了本文细观模拟方法的合理性及准确性,可以在此基础上开展钢管混凝土柱纯扭尺寸效应的研究.

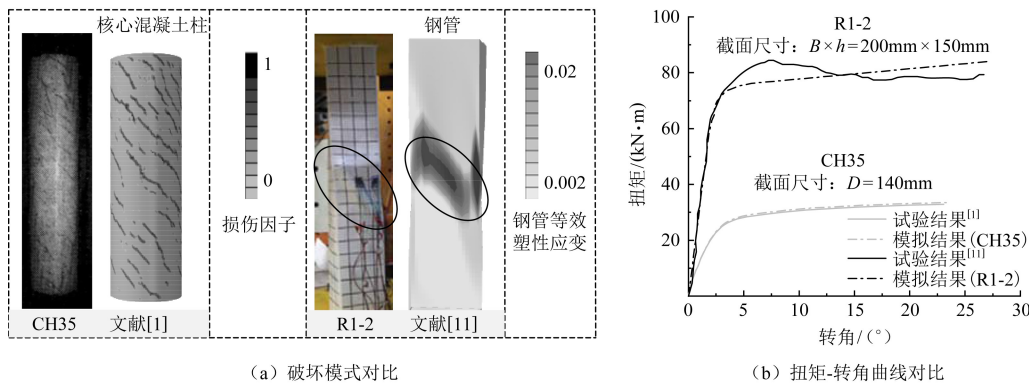


图6 模拟结果与试验结果对比
Fig.6 Comparison of simulation results and test results

2 结果与分析

为了进行钢管混凝土柱纯扭尺寸效应律的研究,采用细观数值模拟的方法对32个钢管混凝土柱进行了建模.由于工程实际中常用套箍系数 ζ (钢管与核心混凝土轴心抗压强度承载力之比)的取值为0.5~2.0,含钢率取值为0.4%~15%,综合起来确定最终套箍系数取值为0.5、0.65、0.8、0.95.此外,增加8组对比试验,即套箍系数为0的素混凝土柱.最终确定试件详细信息(表3).

表3 试件详细尺寸参数
Table 3 Size parameters of the CFST columns

试件分组	截面形式	截面尺寸 $D(B) \times h/\text{mm}$	套箍系数 ζ
C(R)-S	圆(方)形	200×600	0,0.5,0.65,0.8,0.95
C(R)-S	圆(方)形	400×1 200	0,0.5,0.65,0.8,0.95
C(R)-S	圆(方)形	800×2 400	0,0.5,0.65,0.8,0.95
C(R)-S	圆(方)形	1 000×3 000	0,0.5,0.65,0.8,0.95

模拟获得的素混凝土柱的破坏模式,如图7所示.当主拉应力达到混凝土的抗拉强度时,试件开裂.结果表明,扭矩作用下,试件先在混凝土柱中点附近被拉裂,并迅速延展为螺旋斜裂缝,最终试件被劈裂成两半.破坏模式与Bazant^[5]的试验一致.

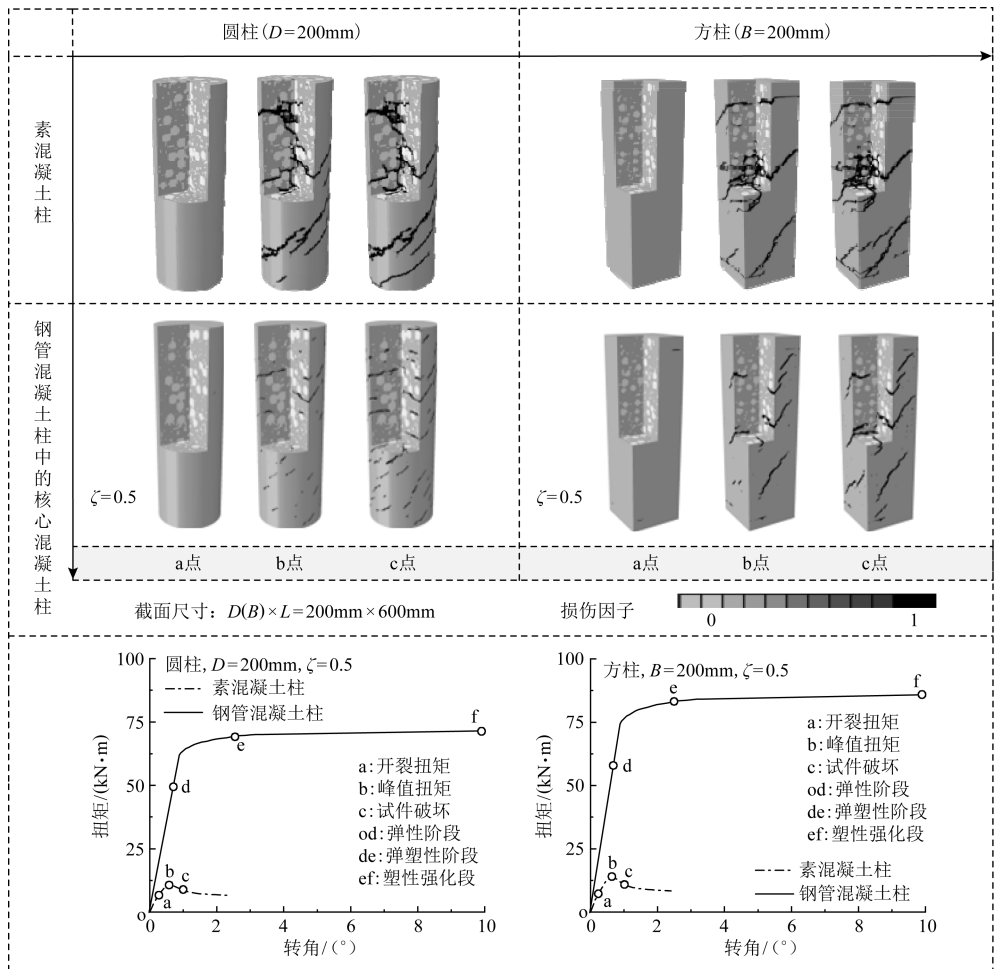


图 7 素混凝土柱与钢管混凝土柱破坏过程对比

Fig.7 Comparison of failure process of plain concrete columns and CFST columns

2.1 破坏模式

由于素混凝土柱抗扭承载力低且破坏具有明显的脆性特征,因此使用钢管约束混凝土柱来提高其延性及抗扭承载力.图 7 为柱直径(横截面宽度) $D(B)=200\text{mm}$, $\zeta=0.5$ 的钢管混凝土柱破坏模式图与素混凝土柱破坏模式图的对比.可以发现,对于素混凝土柱,在扭矩作用下,试件先在中点附近被拉裂,并迅速延伸形成螺旋斜裂缝,导致其丧失承载力,最终被劈裂成两半.而对于钢管混凝土柱,由于钢管和核心混凝土柱协同工作,使得核心混凝土表面薄弱处出现裂缝后,裂缝区域的拉应力传递给钢管,使得核心混凝土和钢管的拉应变协调,从而抑制了裂缝沿半径开裂的速度,并且开裂部分的混凝土不会迅速丧失承载力,因此表现出塑性质质.

图 8 所示为相同结构尺寸下不同套箍系数的钢管混凝土柱的破坏情况.可以看出,随着套箍系数增大,混凝土柱扭转斜裂缝增加,这是因为套箍系数增大,使得钢管对核心混

凝土约束作用增强,核心混凝土裂缝发展得更加充分,抗扭性能提高.此结论与王宇航^[31]试验结论吻合.另外,随着套箍系数增大,钢管变形减小.此现象与 Nie 等^[23]试验现象吻合.

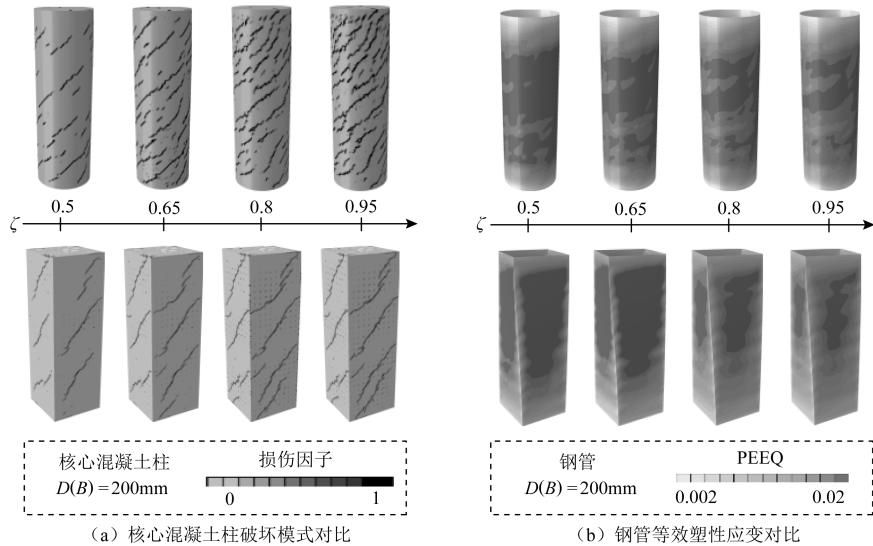


图 8 钢管混凝土柱破坏

Fig.8 Failure mode of the CFST columns

图 9 所示为 $D(B)=400\text{mm}$, $\zeta=0.65$ 柱的扭矩与钢管不同高度处应变的关系,包括环向应变与纵向应变. ε_v 和 ε_h 分别表示钢管的纵向应变和环向应变, ε_{vc} 和 ε_{hc} 分别表示方钢管角部的纵向应变和环向应变.在弹性阶段,试件在不同高度处的环向和纵向应变的曲线走势没有太大差异.达到极限扭矩之后,圆钢管在不同高度处的扭矩-应变关系差异不大,方钢管角部的应变大于中部的应变,这是由于圆钢管对混凝土柱的约束效果较方钢管更均匀,方钢管对核心混凝土角部的约束作用强于中部的.

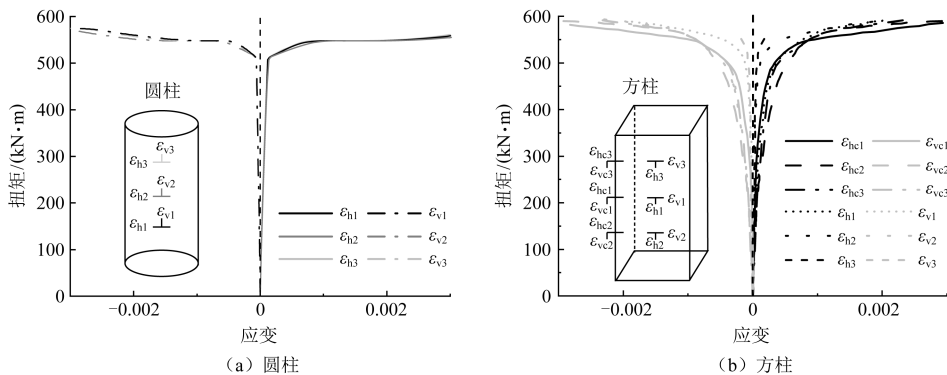


图 9 扭矩-应变关系

Fig. 9 Relationship between torque figure and stress-strain

2.2 扭矩-转角曲线

图 10 所示为素混凝土柱的扭矩-转角曲线.对于素混凝土柱,扭矩-转角曲线有一个很明显的下降段,说明素混凝土柱达到极限扭转强度后,混凝土很快失去承载力,表现为明显的脆性破坏,这与前面分析的素混凝土柱的破坏模式吻合.

图 11 所示为圆钢管混凝土柱和方钢管混凝土柱的扭矩-转角曲线.对比图 10 可以发现,钢管混凝土柱与素混凝土柱的扭矩-转角曲线差异明显.钢管混凝土柱的扭矩-转角曲线几乎没有下降段,达到极限扭矩后,曲线没有下降,而是缓慢上升,说明钢管的加入使结构整体延性大幅提高,且抗扭能力提高.

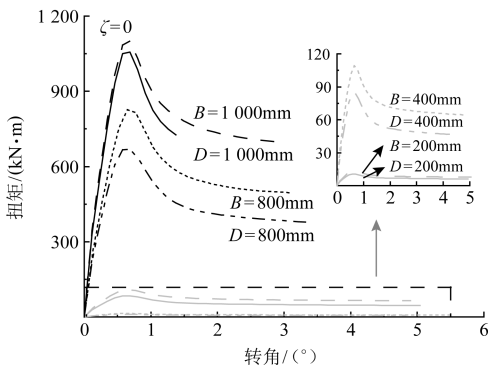


图 10 素混凝土柱扭矩-转角关系

Fig.10 Diagram of torque-rotation angle of plain concrete columns

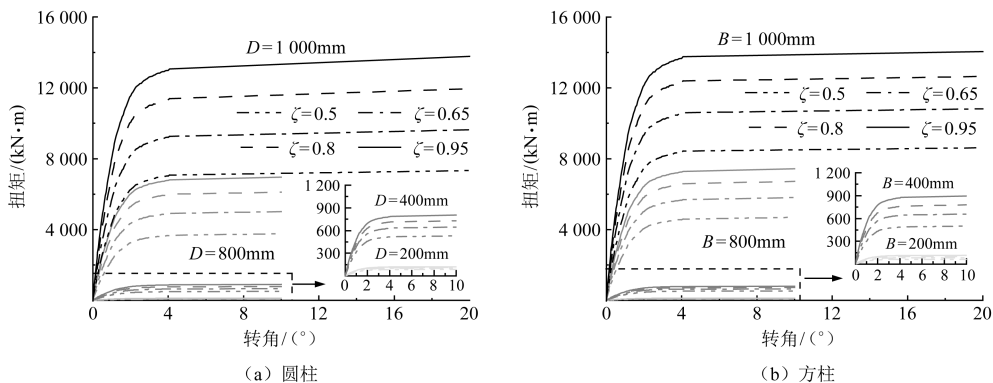


图 11 钢管混凝土柱扭矩-转角关系

Fig.11 Diagram of torque-rotation angle of CFST columns

3 尺寸效应分析

3.1 扭转强度的尺寸效应

名义扭转强度^[32]可表示为

$$V_u = \frac{T_{\max}}{W_{tp}} \quad (1)$$

式中: V_u 为钢管混凝土柱的名义扭转强度; $T_{\max}$ 为极限扭矩; W_{tp} 为受扭截面塑性抵抗矩, 对于圆形截面, $W_{tp} = 1/2\pi r^3$, r 为圆形截面的半径; 对于矩形截面, 按面积相等等效为圆形截面的半径.

图 12 所示为圆柱和方柱的名义扭转强度与结构尺寸的关系.整体来看,圆柱的名义扭转强度强于方柱,这是由于圆钢管对混凝土的约束作用更强.随着结构尺寸的增大,名

义扭转强度被削弱,且方柱被削弱的程度强于圆柱,说明大尺寸下的方钢管对混凝土的约束作用较圆钢管弱,即方柱的尺寸效应强于圆柱.随着套箍系数的增大,名义扭转强度被削弱程度降低.以上分析仅是由名义抗扭强度-结构尺寸关系图得到,尚无定量地描述名义抗扭强度的尺寸效应问题,因此,还需一个尺寸效应律的理论公式来描述这个规律.

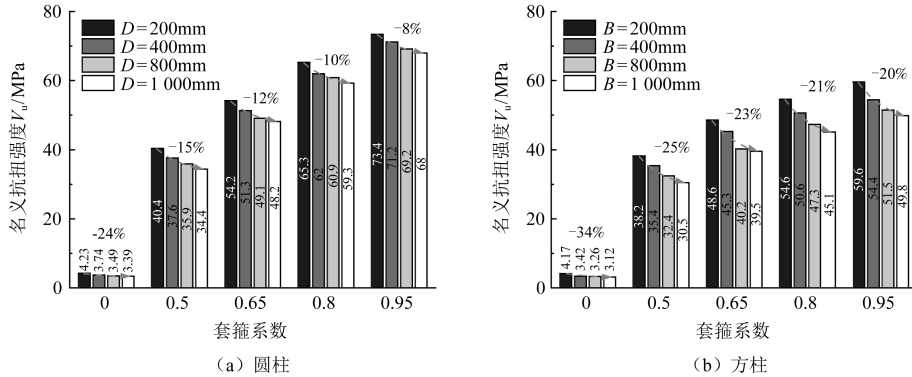


图 12 名义扭转强度与结构尺寸的关系

Fig.12 Relationship between the nominal torsion strength and structure size

图 13 所示为钢管与混凝土分别承担的扭矩占总扭矩的百分比图.可以发现,随着套箍系数的增大,钢管承担的扭矩占比增大,这与王宇航^[31]的试验结论吻合.此外,随着结构尺寸的增大,钢管承担的扭矩占比增大,这是因为随着结构尺寸的增大,CFST 柱的名义抗扭强度减小,此时钢管的名义抗扭强度不变,导致钢管占结构整体扭矩的百分比增加.

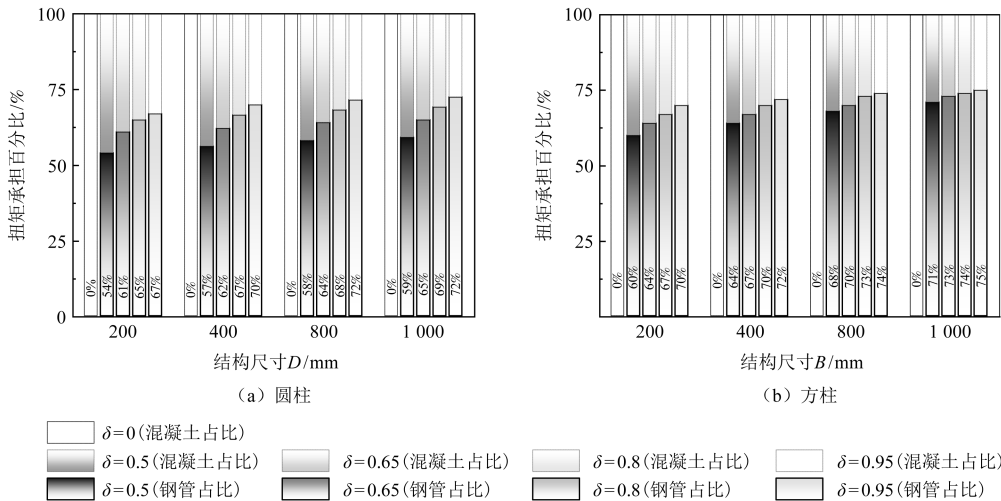


图 13 扭矩占比百分图

Fig.13 Percentage of the torque graph

3.2 与 Bažant 尺寸效应律的对比

目前,国内外学者提出了多种基于材料层次的混凝土尺寸效应律,如 Weibull^[33]的随

机强度尺寸效应律,Carpinteri 和 Ferro^[34]的多重分形尺寸效应律和 Bažant^[5]的断裂力学尺寸效应律.其中,被广泛接受的是 Bažant^[5]的断裂力学尺寸效应律,分为两种,即 Type-1 型尺寸效应律和 Type-2 型尺寸效应律.

Type-1 型尺寸效应出现在宏观裂缝刚刚生成,即破坏的混凝土结构中.素混凝土柱的扭转破坏是脆性的,破坏发生在混凝土表面的裂纹萌生处,基于断裂能的尺寸效应是由应变局域化导致的,这种情况下,大尺寸构件的名义扭转强度在双对数曲线中将无限趋近于一条不为 0 的水平渐近线.Type-1 型尺寸效应律公式为^[30]

$$V_u = V_{u\infty} \left(1 + \frac{rD_b}{D} \right)^{1/r} \quad (2)$$

式中: V_u 为结构的名义抗扭强度; $V_{u\infty}$ 为无限大尺寸($D \rightarrow +\infty$)柱的名义抗扭强度; r 和 D_b 分别为与混凝土断裂性能及结构几何形状有关但与结构尺寸无关的常数.由于国内外关于钢管混凝土柱纯扭破坏尺寸效应的试验研究较少,因此参考 Kirane 等^[32]的研究,取 $r = 1.5$.拟合素混凝土柱的模拟数据得,圆柱 $V_{u\infty} = 3.18 \text{ MPa}$, $D_b = 68.32 \text{ mm}$,方柱 $V_{u\infty} = 2.94 \text{ MPa}$, $D_b = 102.3 \text{ mm}$.

Type-2 型尺寸效应出现在裂缝或缺口显著大于断裂过程区尺寸的混凝土结构中.公式^[5]为

$$V_u = \frac{V_0}{\sqrt{1 + D/D_0}} \quad (3)$$

式中: V_0 和 D_0 分别为与混凝土断裂性能及结构几何形状有关但与结构尺寸无关的常数.拟合素混凝土柱的模拟数据得,圆柱 $V_0 = 4.22 \text{ MPa}$, $D_0 = 1\,780 \text{ mm}$,方柱 $V_0 = 4.31 \text{ MPa}$, $D_0 = 1\,267.2 \text{ mm}$.图 14 所示为模拟结果与两种尺寸效应律的对比,可以发现,素混凝土柱截面尺寸为 200~1 000 mm,模拟数据点与两种尺寸效应律曲线吻合较好.

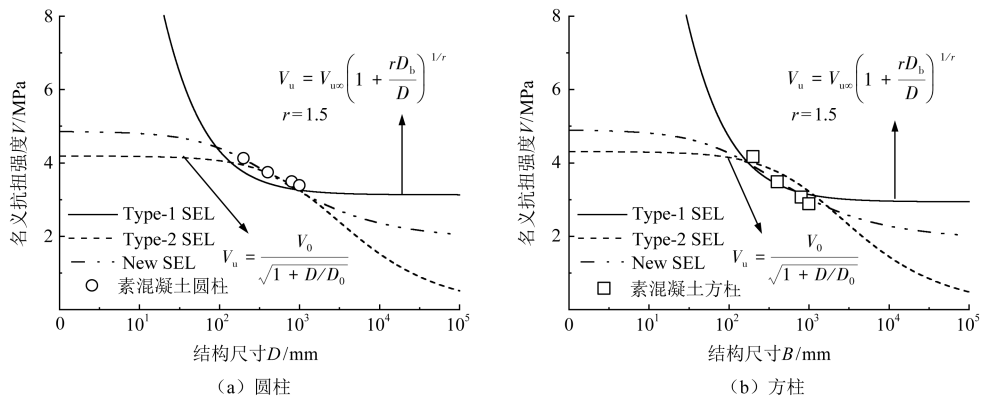


图 14 尺寸效应律

Fig.14 Size effect law

从图 14 所示曲线走势来看,可以发现以下两个问题:Type-1 型尺寸效应律中,无限小尺寸柱的名义扭转强度趋于正无穷;Type-2 型尺寸效应律中,无限大尺寸柱的名义扭转强度趋于 0,不符合实际.因此,需要考虑对 Bažant 尺寸效应律公式进行修正.

3.3 尺寸效应律的修正

基于以上分析,对 Bažant 尺寸效应律公式进行了修正,修正公式为

$$V_u = \frac{V_0 - V_{u\infty}}{\sqrt{1 + D/D_0}} + V_{u\infty} \quad (4)$$

式中: V_0 和 D_0 分别为与混凝土断裂性能及结构几何形状有关但与结构尺寸无关的常数; $V_{u\infty}$ 为无限大尺寸 ($D \rightarrow +\infty$) 的名义抗扭强度。

Kim^[35] 定义 $V_{u\infty} = 0.47f_t$ 。实际上, $V_{u\infty}$ 的确定应该采用统计的方法,由于缺少扭转数据,暂定 $V_{u\infty} = 0.5f_t$ 。通过对素混凝土柱模拟数据进行拟合,得到圆柱 $V_0 = 4.49\text{MPa}$, $D_0 =$

253.47mm,方柱 $V_0 = 4.95\text{MPa}$, $D_0 =$

164mm。由图 14 可知,修正后的尺寸效

应律能准确地反映素混凝土柱全尺寸下的名义抗扭强度与结构尺寸的关系,且可以避免以上提到的两点问题。

由图 15 可知,模拟结果与新尺寸效应律吻合较好。方柱的模拟数据更靠近线弹性断裂力学理论,说明方柱的尺寸效应强于圆柱。无论是圆柱还是方柱,套箍系数越大,模拟结果越靠近水平线,说明随着套箍系数的增大,尺寸效应都被削弱。同时,搜集了部分试验数据 ($D = 140\text{mm}$ ^[1], $D(B) = 200\text{mm}$ ^[37], $D(B) = 400\text{mm}$ ^[17]) 与修正后的尺寸效

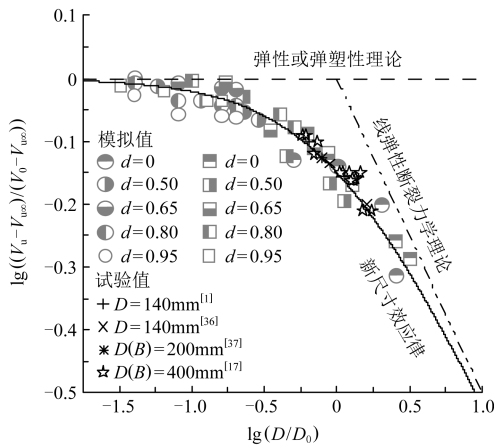


图 15 修正后的尺寸效应律

Fig.15 Modified size effect law

应律进行对比,发现不同尺寸下的钢管混凝土柱试验值与修正后的尺寸效应律吻合较好,进一步证明了新尺寸效应律的正确性。

4 结论

采用细观数值模拟方法,建立了钢管混凝土柱扭转作用下的三维细观数值模型。研究了不同截面形式和套箍系数下钢管混凝土柱扭转的尺寸效应现象。最后,修正了 Bažant 的尺寸效应律公式。得出结论如下:

- (1) 钢管的加入很大程度提高了结构整体的延性,且提高了结构整体的扭转强度;
- (2) 钢管混凝土柱的名义抗扭强度存在尺寸效应现象,且方柱的尺寸效应强于圆柱;
- (3) 在低套箍系数下,钢管混凝土柱纯扭破坏尺寸效应较为明显,随着套箍系数的增大,名义抗扭强度的尺寸效应被削弱;
- (4) 由模拟结果可知,修正后的尺寸效应律能够准确地描述全尺寸范围内钢管混凝土柱的抗扭强度尺寸效应现象。

目前研究仍存在研究因素不全面、缺乏大尺寸柱试验数据等不足。后续将继续研究影响钢管混凝土柱抗扭性能的其他因素,同时,仍需开展大尺寸钢管混凝土柱的纯扭破坏试验来进一步证明该研究的可靠性。

参 考 文 献

- [1] Beck J, Kiyomiya O. Fundamental pure torsional properties of concrete filled circular steel tubes [J]. Construction and Building Materials, 2003, 60: 285-296
- [2] Nie J G, Wang Y H, Fan J S. Experiment study on concrete filled steel tubular columns subjected to combined compression flexure and torsion [J]. Building Structure, 2012, 33(9): 1-11
- [3] Nie J G, Wang Y H, Fan J S. Experiment study on seismic behavior of concrete filled steel tube columns subjected torque torsion and compression-torsion cyclic load [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 79(12): 115-126
- [4] Xu J S, Zhou J. Research on the tests of tall CFST Columns subjected to compound torsion [J]. Proceedings of the Third Annual Conference on Steel-concrete Composite Structure Association of China Steel Association, 1991
- [5] Bažant Z P. Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1984, 110(4): 518-535
- [6] 钢管混凝土结构技术规范: GB 50936—2014 [S]. 中华人民共和国国家标准, 2014
Code for design of concrete-filled steel tube structures; GB 50936—2014 [S]. National Standards of People's Republic of China, 2014
- [7] 杜修力, 金 浏. 混凝土静态力学性能的细观力学方法述评 [J]. 力学进展, 2011, 41(4): 411-426
Du Xiuli, Jin Liu. A review on meso-mechanical method for studying the static-mechanical properties of concrete [J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(4): 411-426
- [8] 李 冬, 金 浏, 杜修力. 钢筋混凝土柱轴压强度尺寸效应影响因素分析 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(3): 650-660
Li Dong, Jin Liu, Du Xiuli. Analyses of the influencing factors on the size effect of axial compressive strength of RC columns [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(3): 650-660
- [9] Xu J, Li F. A meso-scale model for analyzing the chloride diffusion of concrete subjected to external stress [J]. Construction and Building Materials, 2017, 130: 11-21
- [10] 金 浏, 李 平, 杜修力. 箍筋约束方形混凝土柱轴压强度尺寸效应律 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(4): 986-998
Jin Liu, Li Ping, Du Xiuli. Size effect law of nominal compressive strength for squared concrete columns confined by stirrups [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(4): 986-998
- [11] 聂建国, 王宇航, 樊健生. 钢管混凝土柱在纯扭和压扭荷载下的抗震性能研究 [J]. 土木工程学报, 2014, 47(1): 47-58
Nie Jianguo, Wang Yuhang, Fan Jiansheng. Study on seismic behavior of concrete filled steel tube columns under pure torsion and compression-torsion combined action [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(1): 47-58
- [12] Naderi S, Zhang M. Meso-scale modelling of static and dynamic tensile fracture of concrete accounting for real-shape aggregates [J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 116: 103889
- [13] Jin L, Li D, Du X L, et al. Experimental and numerical study on size effect in eccentrically loaded stocky RC columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(2): 04016170
- [14] Meddah M S, Salim Z, Saïd B. Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(4): 505-512
- [15] Song Z, Lu Y. Mesoscopic analysis of concrete under excessively high strain rate compression and implications on interpretation of test data International [J]. Journal of Impact Engineering, 2012, 46: 41-55
- [16] Jin L, Wang T, Jiang X A, et al. Size effect in shear failure of RC beams with stirrups: simulation and formulation [J]. Engineering Structure, 2019, 199: 109573
- [17] Han L H, Yao G H, Tao Z. Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion [J]. Thin-Walled Structures, 2007, 45(1): 24-36
- [18] Genikomsou A S, Polak M A. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS [J]. Engineering Structures, 2015, 98: 38-48
- [19] Kim S M, Al-Rub R K A. Meso-scale computational modeling of the plastic-damage response of cementitious composites [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(3): 339-358

- [20] Cicekli U, Voyiadjis G Z, Al-Rub R B A. A plasticity and anisotropic damage model for plain concrete[J]. *International Journal of Plasticity*, 2007, 23: 1874-1900
- [21] Santos L R, Cardoso H, Caldas R B, et al. Finite element model for bolted shear connectors in concrete-filled steel tubular columns[J]. *Engineering Structures*, 2020, 203: 109863
- [22] Jin L, Du M, Li D, et al. Effects of cross section size and transverse rebar on the behavior of short squared RC columns under axial compression[J]. *Engineering Structures*, 2017, 142: 223-239
- [23] Nie J G, Wang Y H, Fan J S. Experimental study on seismic behavior of concrete filled steel tube columns under pure torsion and compression-torsion cyclic load[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 79: 115-126
- [24] 郝明辉, 陈厚群, 张艳红. ABAQUS 中剪胀角的选取讨论[J]. *液压工程*, 2012 43(增 1): 91-97
Hao Minghui, Chen Houqun, Zhang Yanhong. Argument on dilatancy angle based on ABAQUS [J]. *Hydraulics Engineering*, 2012 43(S1): 91-97
- [25] Tao Z, Wang Z B, Yu Q. Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression[J]. *Journal of Construction Steel Research*, 2013, 89: 121-131
- [26] Du X L, Jin L. Size effect in concrete materials and structures[M]. Beijing: Science Press, 2021
- [27] 金浏, 夏海, 蒋轩昂, 等. 剪跨比对 CFRP 加固无腹筋混凝土梁剪切破坏及尺寸效应的影响研究[J]. *工程力学*, 2021, 38(3): 50-59, 85
Jin Liu, Xia Hai, Jiang Xuanang, et al. Effect of shear-span ratio on shear failure and size effect of concrete beams without web reinforcement strengthened by CFRP[J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(3): 50-59, 85
- [28] 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[J]. *工程力学*, 2020, 37(1): 53-62
Jin Liu, Wang Tao, Du Xiuli, et al. Size effect theory on shear failure of RC cantilever beams [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(1): 53-62
- [29] Jin L, Fan L L, Li D, et al. Size effect of square concrete-filled steel tubular columns subjected to lateral shear and axial compression; Modelling and formulation[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 157: 107158
- [30] Jin L, Chen H M, Fan L L, et al. Size effect on nominal strength of lightweight and normal concrete-filled steel tube columns under axial compression; Mesoscale simulations [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(12): 04020265
- [31] 王宇航. 曲线梁桥钢管混凝土桥墩的扭转效应研究[D]. 北京: 清华大学, 2013
Wang Yuhang. Study on torsion effect in concrete filled steel tube piers of curved girder bridges [D]. Beijing: Tsing University, 2013
- [32] Kirane K, Singh K D, Bazant Z P. Size effect in torsional strength of plain and reinforced concrete[J]. *ACI Structural Journal*, 2016, 113(6): 1253-1262
- [33] Weibull W. The phenomenon of rupture in solids[J]. *Proceedings of Royal Sweden Institute of Engineering Research*, 1939, 153: 1-55
- [34] Carpinteri A, Ferro G. Size effects on tensile fracture properties: a unified explanation based on disorder and fractality of concrete microstructure[J]. *Material Structure*, 1994, 27(10): 563-571
- [35] Kim J K. Size effect in concrete specimens with dissimilar initial cracks[J]. *Magazine of Concrete Research*, 1990, 42(153): 233-238
- [36] Nie X, Wang Y H, Li S, et al. Coupled bending-shear-torsion bearing capacity of concrete filled steel tube short columns [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 123: 305-316
- [37] Le K B, Van C V, Cao H X. Circular concrete filled thin-walled steel tubes under pure torsion; Experiments[J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 164: 107874

Meso-Scale Modelling of Size Effect on Pure Torsional Failure of CFST Columns

JIN Liu, WANG Zhongshiyu, ZHU Huajie, DU Xiuli

(The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract

Under the action of earthquake, concrete-filled steel tubular (CFST) columns are often subjected to torsion action or combined action of compression-bending-shear-torsion. The existence of torque will aggravate the damage of CFST columns. In order to study the pure torsional failure and size effect behavior of CFST columns, a numerical model of CFST columns on pure torsional failure was established by using the three-dimensional meso-scale numerical simulation method, considering the meso-heterogeneity of concrete and the contact between steel tube and concrete. The influence of structural size, confinement coefficient and cross-sectional shape on torsional failure of CFST columns with different sizes were analyzed. Finally, the Bažant size effect law was compared and revised, and the formula for the nominal torsion strength in the full size range was proposed. The results show that: (1) Pure torsion failures of plain concrete columns show significant brittle failure characteristics, while pure torsion failures of CFST columns show certain ductile failure characteristics; (2) The pure torsion failure of the CFST column has the size effect, and the size effect of the square columns is stronger than that of the circular columns; (3) Under low constraints (use confinement coefficient to mark), the size effect of the pure torsion failure of the CFST column is more obvious, with the increase of the confinement coefficient, the size effect of the nominal torsion strength is weakened.

Keywords: concrete-filled steel tubular column; pure torsional failure; confinement coefficient; size effect; meso-scale simulation; ductility failure