

结构尺寸对 RC 柱剪扭复合受力抗震性能影响分析

金 浏, 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: 在地震水平作用下, 曲线梁桥的桥墩、不规则钢筋混凝土(RC)框架结构的边柱、角柱等受力构件, 由于上部结构的重心偏心, 使构件处于剪扭复合受力状态, 而产生脆性破坏, 脆性破坏往往会加剧钢筋混凝土构件的尺寸效应行为。为探究剪扭荷载相互作用下钢筋混凝土柱的抗震性能和尺寸效应, 建立了不同扭转比的钢筋混凝土柱剪扭复合受力三维细观数值模型, 模拟分析了扭转比对 RC 柱剪扭复合受力抗震性能和尺寸效应的影响。研究结果表明: 在剪扭复合荷载作用下, 钢筋混凝土柱破坏更具脆性, 承载能力降低; 扭转比的增大导致构件变形能力, 延性能力和耗能能力下降; 扭矩的存在, 在一定范围内增强了钢筋混凝土柱抗剪强度的尺寸效应。对比并修正了中国规范提出的剪-扭承载力相关方程, 保证了预测结果的安全度。

关键词: 钢筋混凝土柱; 剪扭复合受力; 抗震性能; 尺寸效应; 细观模拟

中图分类号: TU375; TU352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)05-1211-11

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.05.019

引 言

曲线梁桥的桥墩、不规则钢筋混凝土框架结构的边柱、角柱等受力构件, 在地震水平荷载作用下, 由于上部结构的重心偏心, 导致附加弯矩作用明显, 同时也产生扭矩。因此, 这些结构或构件处于压、弯、剪、扭的复合受力状态, 在多种复合应力作用的耦合下, 将导致复杂的构件失效模式^[1-2]。因此, 有必要开展在剪扭复合受力状态下钢筋混凝土柱的抗震性能研究。

目前, 国内外对钢筋混凝土柱压弯、弯剪等复合受力状态的抗震性能已有较成熟的研究^[1-4], 探究了轴压比、剪跨比等因素对钢筋混凝土柱抗震性能的影响。如 Jin 等^[4]进行了最大截面尺寸为 700 mm × 700 mm 的钢筋混凝土方柱压弯剪复合受力抗震性能试验研究, 探究了轴压比、剪跨比对抗剪强度尺寸效应的影响。而对包括扭转作用在内的钢筋混凝土柱复合受力的抗震性能研究较少。Huang 等^[3]、Wang 等^[5]、Li 等^[6]和 Prakash 等^[7]进行了不同扭转比下钢筋混凝土方柱的压剪扭复合受力抗震试验。扭矩和弯矩/剪力的组合比例可用扭转比(T/M)来表示, 扭转比为作用在柱子底端扭矩和弯矩的比值^[7]。试验结果表明, 扭转荷载显著影响钢筋混凝土柱的力学性能和变形特性, 在弯曲/剪切荷载和扭转荷载的共同

作用下, 扭转力的存在增加了剪切主导破坏的可能性, 导致试件的破坏加剧, 塑性铰的位置变高^[5-7]。

在钢筋混凝土构件承受多种荷载的共同作用时, 各应力之间也存在相关关系。Deifalla 等^[8]进行了 3 个不同扭转比的钢筋混凝土梁复合受力试验, 建立了剪力和扭矩共同作用的计算模型, 且与试验结果吻合良好。Wang 等^[5]和 Prakash 等^[7]结合自己的试验数据, 提出了考虑压、弯、剪、扭复合受力相关关系的统一公式。关于剪-扭承载力相关关系方程, GB 50010—2010^[9]提出的相关关系为 1/4 圆模型。

此外, 钢筋混凝土构件剪切破坏的尺寸效应行为已受到广大学者的关注^[4, 10-11], 进行了钢筋混凝土短柱压剪抗震试验和模拟^[4]、钢筋混凝土浅/深梁剪切试验和模拟^[10-11]; 探究了剪跨比、轴压比、腹筋率对其抗剪性能及尺寸效应的影响。结果表明, 钢筋混凝土构件的剪切破坏为典型的脆性破坏模式, 其名义抗剪强度具有显著的尺寸效应现象^[4, 10-11]。在剪扭复合受力状态下, 扭矩的存在使得构件内部产生高剪切应力, 增加了构件剪切主导破坏的可能性, 使构件破坏更具脆性^[5-7]。因此, 钢筋混凝土柱剪扭复合受力状态下的尺寸效应行为更值得关注。

综上所述, 目前对钢筋混凝土柱剪扭复合受力的抗震性能研究较少, 扭矩的存在对其破坏模式和尺寸效应的影响还不明确。本文采用三维细观数值

收稿日期: 2021-09-07; 修订日期: 2021-11-08

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC1504302); 国家自然科学基金资助项目(51822801, 51421005)。

模拟方法,建立了钢筋混凝土柱剪扭复合受力的数值模型,探究扭转比对钢筋混凝土柱抗震性能和抗剪强度尺寸效应的影响,并与Bazant^[12]尺寸效应律公式进行了对比。最后,探究了扭矩和剪力作用的相关关系,对比并修正了GB 50010—2010^[9]提出的剪-扭承载力相关方程,保证了预测结果的安全度。

1 RC柱剪扭复合作用三维数值模型

1.1 细观数值模型的建立

混凝土材料的宏观力学性能,主要来源于内部裂纹、气泡等缺陷的萌生、发展、交汇贯通等细观结构的变化过程^[13]。从宏观层次所进行的力学性能研究,很难从根本上解释各种宏观力学行为,如混凝土的尺寸效应行为。因此,本文建立细观层次的钢筋混凝土柱三维模型,将混凝土视为由骨料、砂浆基质和界面过渡区组成的三相复合材料^[13-15],并考虑钢筋和混凝土间的粘结滑移作用,所建立的三维细观数值模型能有效表征混凝土材料力学行为,并合理解释混凝土的尺寸效应行为^[15-16]。之后,使用ABAQUS 6.14-2有限元软件进行模拟分析。

图1为钢筋混凝土柱剪扭复合受力三维细观数值模型。参考文献[17]的工作,使用Fortran程序将粗骨料随机投放到砂浆基质中。骨料假定为球形,采用二级配混凝土,最小骨料粒径为12 mm,最大骨料粒径为30 mm,骨料体积分数为40%。实际情况中,界面过渡区厚度为20~50 μm ,考虑到计算效率的限制,界面过渡区的厚度被设置为0.5~2 mm^[18],并且发现界面过渡区的厚度的变化只影响应力-应变曲线的下降段^[18]。因此,参考Šavija等^[19]的工作,界面过渡区厚度取2 mm,模型的平均网格尺寸取2 mm。实际工程中,试件在地震中承受剪扭复合荷载作用,在建立数值模型时做了相应的简化。如图1所示,在加载端设置参考点,施加偏心的水平荷载(正方向为推,负方向为拉),模拟试件在地震中受到

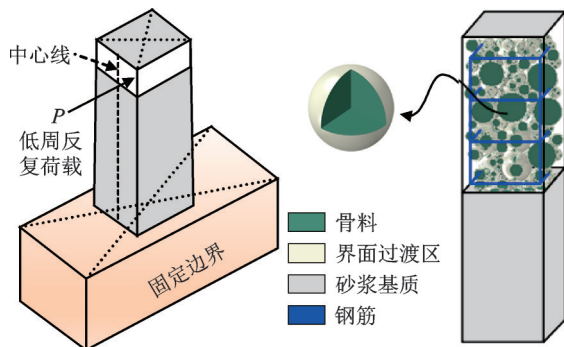


图1 三维细观数值模型

Fig. 1 Three-dimensional mesoscopic numerical model

单向剪扭复合力的作用。水平荷载加载方案如图2所示,以 $0.5\Delta_y$ 为一个加载步对称等幅加载, Δ_y 为钢筋混凝土柱的屈服位移。

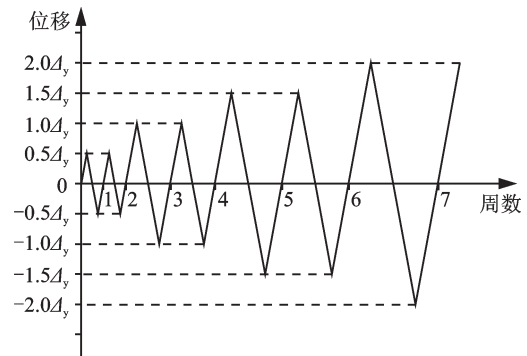


图2 加载方案

Fig. 2 Scheme of loading

1.2 细观组分的本构关系

在低应变率荷载状态下,骨料在试件失效时一般不会被破坏。因此,在数值模型中骨料被模拟为弹性体^[20]。砂浆基质和界面过渡区的本构模型采用塑性损伤本构模型^[21-22]。此外,为了缓解由于应变软化引起的网格敏感性问题,保证单元破坏时断裂能的唯一性,用拉伸应力-位移曲线代替混凝土材料拉伸应力-应变曲线的下降段^[23]。

钢筋被视为均质材料,在模型中被模拟为理想弹塑性体。为考虑钢筋和混凝土之间的粘结滑移作用,参考Jin等^[10]工作,在钢筋和混凝土之间建立非线性弹簧,如图3所示,采用GB 50010—2010^[9]推荐的粘结滑移(τ - s)本构模型,在非线弹性弹簧上定义钢筋和混凝土间的相互作用。各参数的含义和确定方法如表1所示。

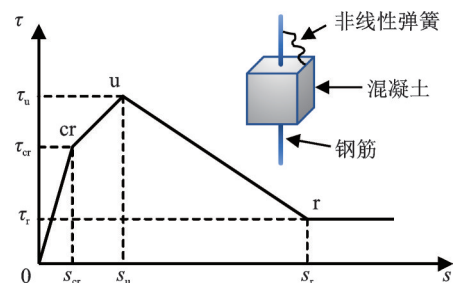


图3 粘结滑移本构模型

Fig. 3 The bond-slip curve

表1 粘结滑移本构模型中采用的参数

Tab. 1 Parameters utilized in the bond-slip model

| | | 特征点 | | |
|------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|------|
| | | 开裂 cr | 峰值 u | 残余 r |
| 粘结应力 τ/MPa | $\tau_{cr} = 2.5f_t$ | $\tau_u = 3f_t$ | $\tau_r = f_t$ | |
| 钢筋相对滑移 s/mm | $s_{cr,1} = 0.025d$ | $s_{u,1} = 0.04d$ | $s_{r,1} = 0.55d$ | |

注: d 为钢筋的直径; f_t 为混凝土抗拉强度。

1.3 数值模型的验证

基于以上的数值模拟方法,参考Prakash等^[7]的试验,建立了钢筋混凝土柱剪扭受力三维细观数值模型。分别模拟了扭转比为0,0.2和0.4的试件,试件的边长为560 mm,长细比为6,柱顶端施加7% f_c (f_c 为混凝土抗压强度)的轴向荷载。更多试验细节详见文献^[7]。

表2给出了混凝土及钢筋的细观力学参数。表中“*”为试验实测值,根据文献^[7]取用。表中“-”为反复试算选值,建立标准圆柱体混凝土($\phi 150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$)三维细观数值模型进行轴压模拟,通过对砂浆基质的力学参数进行不同程度的折减(70%~85%)反复试算并确定界面过渡区的力学参数。当参数取表2所示参数时,轴压强度试验值为34.5 MPa,模拟值为34.4 MPa,如图4所示,验证了所取参数的适用性和合理性。此外,为验证网格尺寸对计算精度的影响,分别进行了网格尺寸为1,2和3 mm的标准圆柱体混凝土轴压模拟,发现网格尺寸在3 mm以下时,计算精度可以保证,考虑到计算效率,后续模拟网格尺寸采用2 mm。

表2 混凝土细观组分及钢筋力学参数
Tab. 2 Mechanical parameters of the meso-components of concrete and reinforcing bars

| | 细观组分 | | | |
|---|------|-------|--------|------|
| | 骨料 | 砂浆 | 界面过渡区 | 钢筋 |
| 抗压强度/MPa | - | *45.1 | ~37.43 | - |
| 抗拉强度/MPa | - | *4.48 | ~3.67 | - |
| 断裂能 G_c /($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$) | - | 50 | 30 | - |
| 弹性模量/GPa | 60 | *33.5 | ~27.81 | *200 |
| 泊松比 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 |
| 纵筋屈服强度/MPa | - | - | - | *457 |
| 箍筋屈服强度/MPa | - | - | - | *450 |
| 剪胀角 Ψ /($^\circ$) | - | 18 | 15 | - |

注: *为试验实测值, ~为反复试算选值,其他力学数据为默认值。

图5展示了试验与模拟荷载-位移曲线的对比。可以发现:滞回骨架曲线基本吻合;屈服、峰值和极限荷载的试验值与模拟值差异很小;随着扭转比的增加,滞回环捏缩效果越明显。图6为试验与模拟破坏模式的对比。图中“DAMAGET”为混凝土的拉伸损伤因子,表征混凝土的破坏程度,“0”代表无破坏,“1”代表完全破坏。可以发现,试验与模拟试件破坏时斜裂缝的角度基本一致,混凝土剥落区域基本相同,且随着扭转比的增加,混凝土的破损区域变大,试件破坏变严重。因此,从荷载-位移曲线和破坏模式上验证了所建立模型的合理性和准确性。

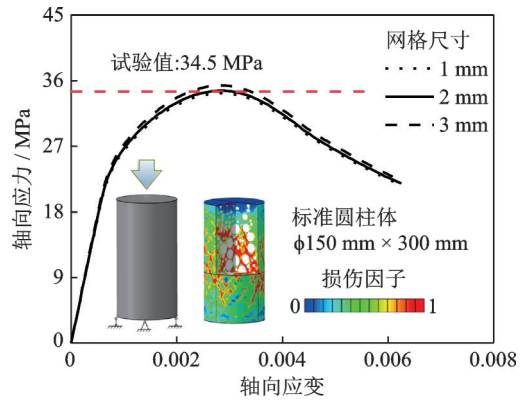


图4 标准圆柱体混凝土轴压模拟与试验对比

Fig. 4 Comparison of simulation and test of standard cylindrical concrete under axial compression

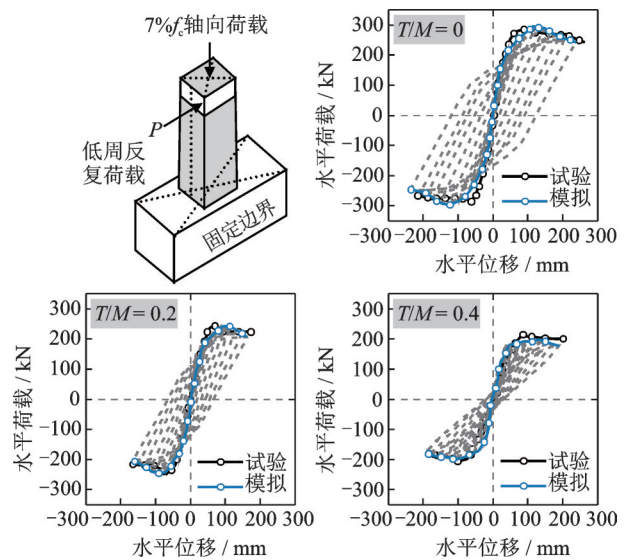


图5 试验与模拟荷载位移曲线的对比

Fig. 5 Comparison of test and simulated $P-\Delta$ curves

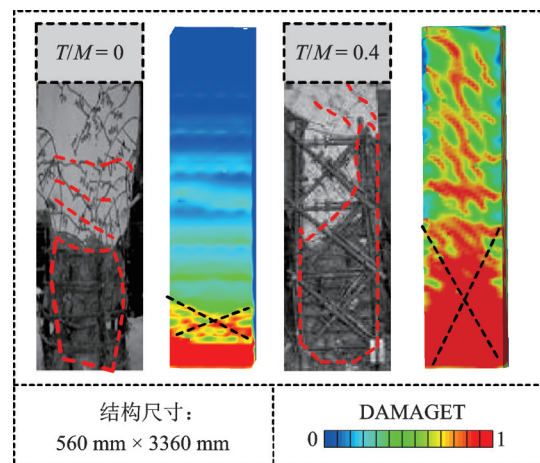


图6 模拟与试验破坏模式的对比

Fig. 6 Comparison of simulated and test failure modes

该方法建立了钢筋混凝土构件的三维细观数值模型,考虑了混凝土材料的非均质性和钢筋与混凝土之间的相互作用,适用于不同长细比、不同结构尺寸、不同扭转比的构件受力分析。

2 结果与分析

基于以上的数值模拟方法,建立了钢筋混凝土方柱剪扭复合受力数值模型,一共16个试件,分4组,柱横截面宽度分别为200,400,800和1000 mm,

试件长细比为3,纵筋率为1.28%,配箍率为0.565%,各尺寸的截面配筋图如图7所示。对每组试件分别进行扭转比为0,0.1,0.2和0.4的受力情况试验,当扭转比为0时,试件受力为纯剪。对以上试件进行了实验分析,并探究了扭转比对钢筋混凝土方柱抗震性能和尺寸效应的影响。

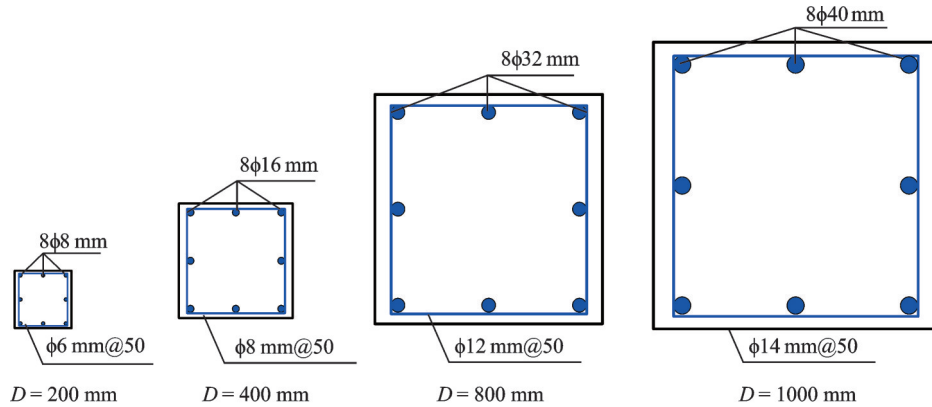


图7 试件截面配筋图

Fig. 7 Reinforcement drawings of specimen section

2.1 破坏模式

图8为不同扭转比试件的破坏模式。不同扭转比的试件呈现出剪切和扭转的滞回破坏特性,并且出现不同角度的扭剪斜裂缝。混凝土剥落区域随着扭转比的增加而增大,扭转比为0.4的试件混凝土剥落区域最大,破坏最严重,说明扭转力的存在影响混凝土塑性铰的位置,扭转比越大,塑性铰的位置越高,试件破坏越严重。模拟结果与Prakash等^[7]的试验结果一致。

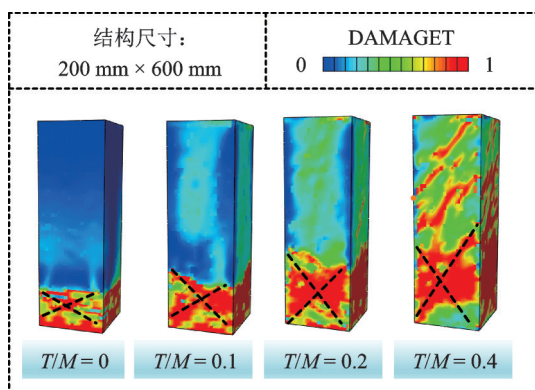


图8 试件的破坏模式

Fig. 8 Failure modes of simulated pieces

2.2 荷载-位移曲线

图9展示了模拟试件的滞回曲线。对比相同结构尺寸下不同扭转比的滞回曲线可以发现:随着扭转比的增加,滞回曲线越捏缩,变形值减少,循环次

数减少,承载力退化越快;且峰值荷载下降明显,纯剪试件的正向峰值承载力为155.7 kN,扭转比为0.4的试件正向峰值承载力为59.1 kN,正向峰值承载力下降62%,下降趋势明显。对比相同扭转比下不同结构尺寸的滞回曲线可以发现;不同结构尺寸试件的滞回曲线形状大致相似,大尺寸试件滞回曲线略有捏缩,承载力退化较小尺寸快。

试件的骨架曲线如图10所示。在骨架曲线中标出了正负方向水平荷载的屈服点,峰值点和极限点,极限荷载的大小为85%的峰值荷载。对比试件骨架曲线可以看出,在加载初期,荷载-位移骨架曲线呈现线性变化,此时混凝土处于弹性阶段;在试件出现扭剪斜裂缝时,混凝土刚度下降,骨架曲线开始弯曲,直到试件屈服,骨架曲线出现明显的拐点;随后荷载达到峰值,由于裂缝的发展,承载力开始下降,直至试件破坏。扭矩的存在对试件承载力,变形能力有显著的影响。对比不同扭转比的骨架曲线,可以发现骨架曲线的初始刚度基本相同,说明扭转比对混凝土初始刚度无显著影响。但随着扭转比的增大,峰值荷载降低,刚度退化更明显;曲线下降段变陡,承载力退化加快,变形能力降低。

2.3 延性能力

延性是指构件在进入弹塑性状态后,承载力没有显著降低的变形能力^[24]。试件的变形能力用位移延性系数 μ 来表示。位移延性系数 μ 被定

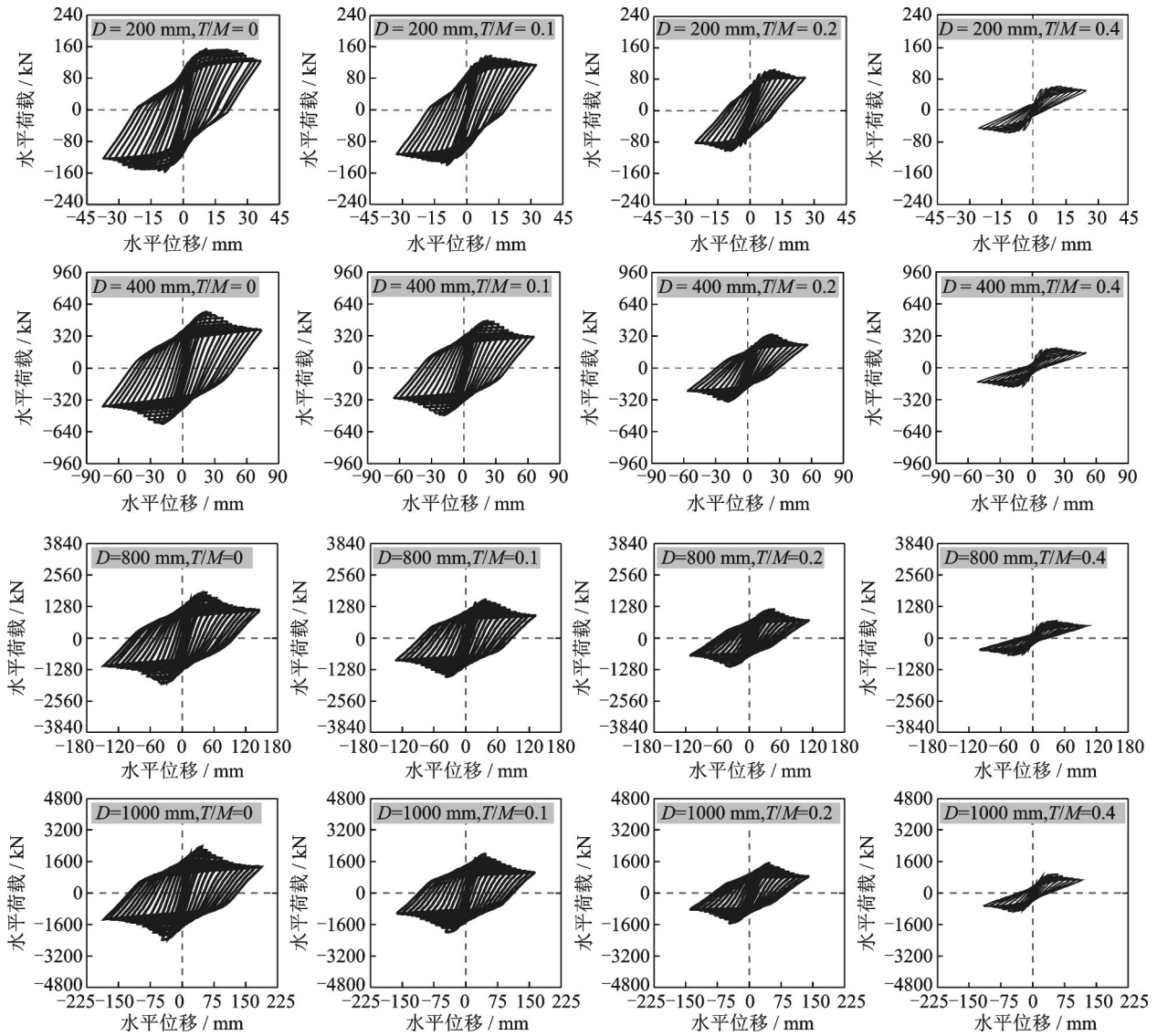


图 9 不同结构尺寸的钢筋混凝土柱滞回曲线

Fig. 9 Hysteretic curves of RC columns of different structural sizes

义为：

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y \quad (1)$$

式中 μ 表示钢筋混凝土构件在极限位移时的位移延性系数； Δ_u 为试件在极限承载力 $P_u = 0.85P_{max}$ 时对应的水平位移； Δ_y 为屈服荷载对应的水平位移， Δ_y 根据能量法确定^[24]，确定方法如图 11 所示。

对所有试件骨架曲线上的特征点进行了提取，计算得到各试件的位移延性系数如图 12 所示。扭矩对混凝土构件的变形能力存在显著的影响，如结构尺寸为 200 mm 的试件，纯剪作用时的位移延性系数为 5.15，而扭转比为 0.4 时的位移延性系数为 2.33，位移延性系数下降 54.8%，变形能力显著降低。在相同扭转比下，试件尺寸越大，位移延性系数越低，说明结构尺寸对试件变形能力存在影响，结构尺寸越大，试件承载力退化越快，试件破坏更具脆性。但随着扭转比的增加，变形能力的尺寸效应现

象减弱，如纯剪作用时，最大尺寸试件的位移延性系数较最小尺寸试件降低 41%，而扭转比为 0.4 时，下降趋势仅为 10.3%。

2.4 耗能能力

目前，大都使用等效阻尼比 ξ_e ^[25] 来表示构件的耗能能力，其定义为：

$$\xi_e = S_{abcd} / (S_{aof} + S_{coe}) \quad (2)$$

式中 ξ_e 为试件的等效阻尼比； S_{abcd} 为一个滞回环的面积； S_{aof} 和 S_{coe} 为图 13 中三角形的面积。

图 13 给出了所有试件等效阻尼系数与侧移率的关系，侧移率为柱端水平位移与柱长的比值。从图 13 可以看出，在相同结构尺寸下，当侧移率在 2% 的范围内时，各试件的等效阻尼比基本一致且呈线性增长，说明此阶段混凝土处于弹性阶段，内部损伤和裂缝发展比较均匀，能较好地吸收地震能量。随着侧移率的增加，试件进入弹塑性阶段，构件损伤加

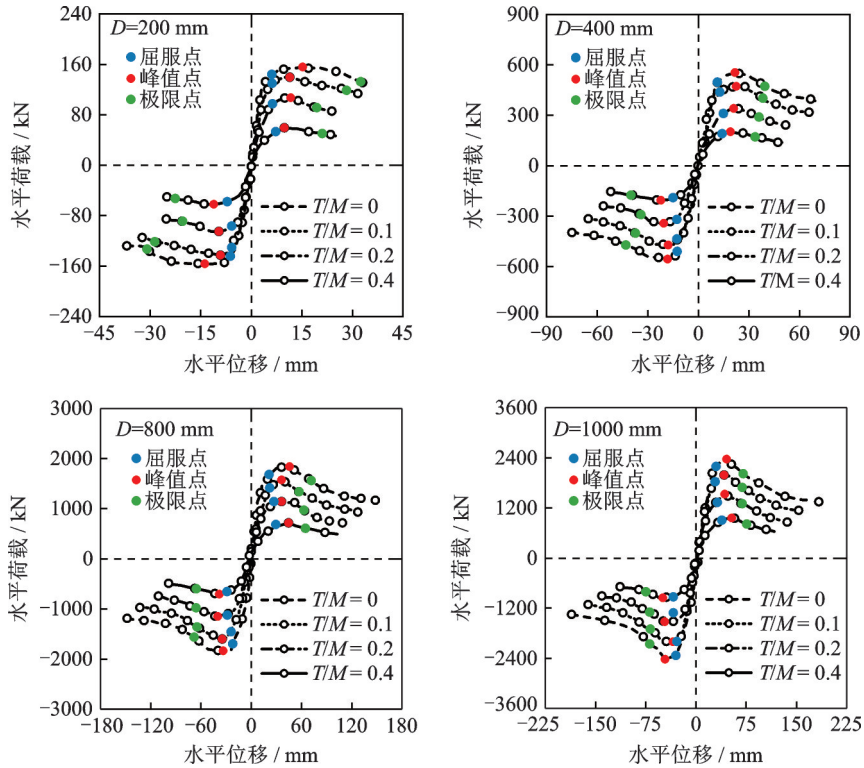


图10 不同结构尺寸的钢筋混凝土柱滞回骨架曲线

Fig. 10 Skeleton hysteresis curves of RC columns of different structural sizes

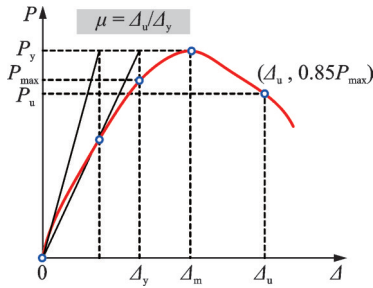


图11 荷载-位移曲线的特征点

Fig. 11 Feature points of load-displacement curves

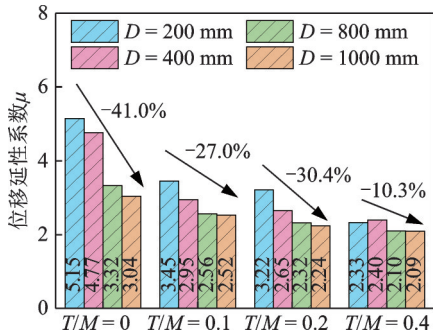


图12 钢筋混凝土柱的延性能力

Fig. 12 Ductility capacity of RC columns

重,等效阻尼比迅速增大,耗能增多。相同结构尺寸下,扭转比越大,等效阻尼比越小,耗散的能量越少。对比相同扭转比下不同结构尺寸的耗能能力,可以发现结构尺寸大的试件等效阻尼比越大,耗散的能量越多。

等效阻尼比仅反映了相同侧移率下的耗能能力

的区别,而不同试件的极限侧移率不同,仅用等效阻尼比不能完全反映构件的耗能能力。因此,参考文献[24],采用平均耗能系数 μ_e 来评估构件的耗能能力,其定义为:

$$\mu_e = \frac{E}{mE_y} \tag{3}$$

式中 μ_e 为平均耗能系数; E 为所有滞回环的面积和; E_y 为名义弹性模量,用 $E_y = P_y/\Delta_y$ 表示, P_y 为屈服荷载, Δ_y 为屈服位移; m 为试件屈服后的循环次数。图14给出了各试件平均耗能系数与结构尺寸的关系。对比不同试件的平均耗能系数,可以发现,大尺寸试件的平均耗能系数较小尺寸低,耗能能力差,表现出明显的尺寸效应现象;随着扭转比的增大,平均耗能系数的下降趋势变缓,受结构尺寸的影响降低。

2.5 刚度退化

采用割线刚度来表征试件的刚度退化现象。割线刚度的定义为:

$$K_i^+ = P_i^+/\Delta_i^+ \tag{4}$$

$$K_i^- = P_i^-/\Delta_i^- \tag{5}$$

式中 K_i 为第*i*次循环的割线刚度; P_i 和 Δ_i 为第*i*次循环时的峰值荷载和峰值位移;+/-代表加载的正、负方向。

图15为试件割线刚度与侧移率的关系。由图发现:结构尺寸越大的试件,其初始刚度越大,随着

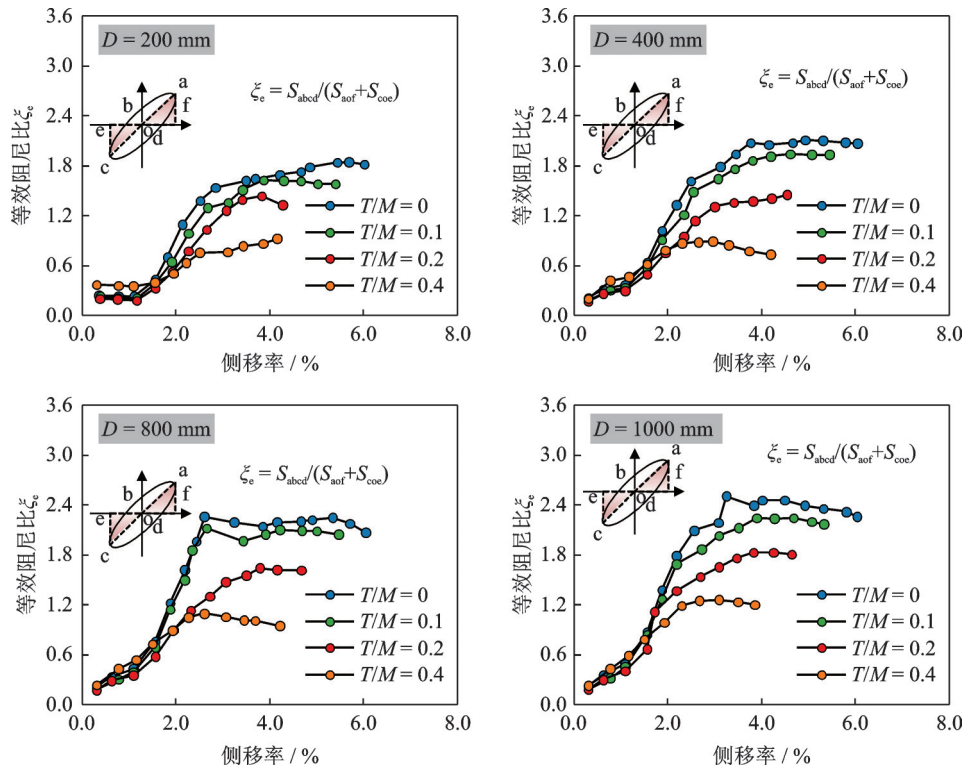


图 13 等效阻尼比与侧移率的关系

Fig. 13 Relationship between equivalent viscous damping and drift ratio

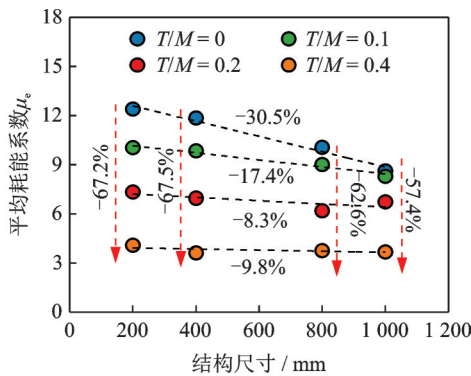


图 14 平均耗能系数

Fig. 14 Average energy dissipation coefficient

侧移率的增大,割线刚度逐渐降低,截面尺寸大的试件刚度退化速度越快,说明大尺寸试件更具脆性;相同结构尺寸下,扭转比越大的试件,试件初始刚度越低,但刚度退化速度较扭转比小的试件缓慢。

3 尺寸效应分析

3.1 名义抗剪强度与结构尺寸关系

关于 RC 柱名义抗剪强度的定义方法,参考文献[4, 26]的工作,定义为: $\tau_u = P / (bh_0)$, 其中 τ_u 为试件的名义抗剪强度, P 为水平荷载, b 为横截面宽度, h_0 为横截面有效高度。计算所得的试件名义抗剪强度如图 16 所示。可以发现,钢筋混凝土方柱在剪扭复合作用下的名义抗剪强度存在明显的尺寸效

应。各扭转比试件的名义抗剪强度分别下降 37.8%, 42.5%, 40.5% 和 35.6%, 其尺寸效应呈现先增加后降低的趋势。这是因为扭矩的存在一方面降低了其名义抗剪强度,另一方面增强了名义抗剪强度的尺寸效应。在低扭转比状态下,扭矩对尺寸效应的影响较大,而在高扭转比状态下,扭矩对强度的影响较大。

3.2 与 Bažant 尺寸效应律的对比

对于剪扭问题,目前尚无相关的尺寸效应律。本文暂借助 Bažant^[12] 基于断裂力学理论提出的混凝土材料层次尺寸效应律来描述钢筋混凝土柱的剪扭尺寸效应问题,其理论公式为:

$$\tau_u = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 + D/D_0}} \quad (6)$$

式中 τ_u 为试件名义抗剪强度; D 为特征尺寸,这里为柱子截面尺寸; D_0 和 τ_0 为经验参数。将式(6)转化为线性方程: $Y = AX + C$, 其中 $Y = (1/\tau_u)^2$, $X = D$, $C = 1/(\tau_0)^2$, $A = C/D_0$ 。

对模拟数据进行线性回归分析,得到如图 17 所示的双对数曲线方程。图中水平虚线代表弹性或弹塑性理论(强度准则),表明材料无尺寸效应;斜率为 $-1/2$ 的斜线代表线弹性断裂力学,表明材料存在较强的尺寸效应。从图 17 可以看出 Bažant 尺寸效应律能较好地反映钢筋混凝土柱名义抗剪强度的

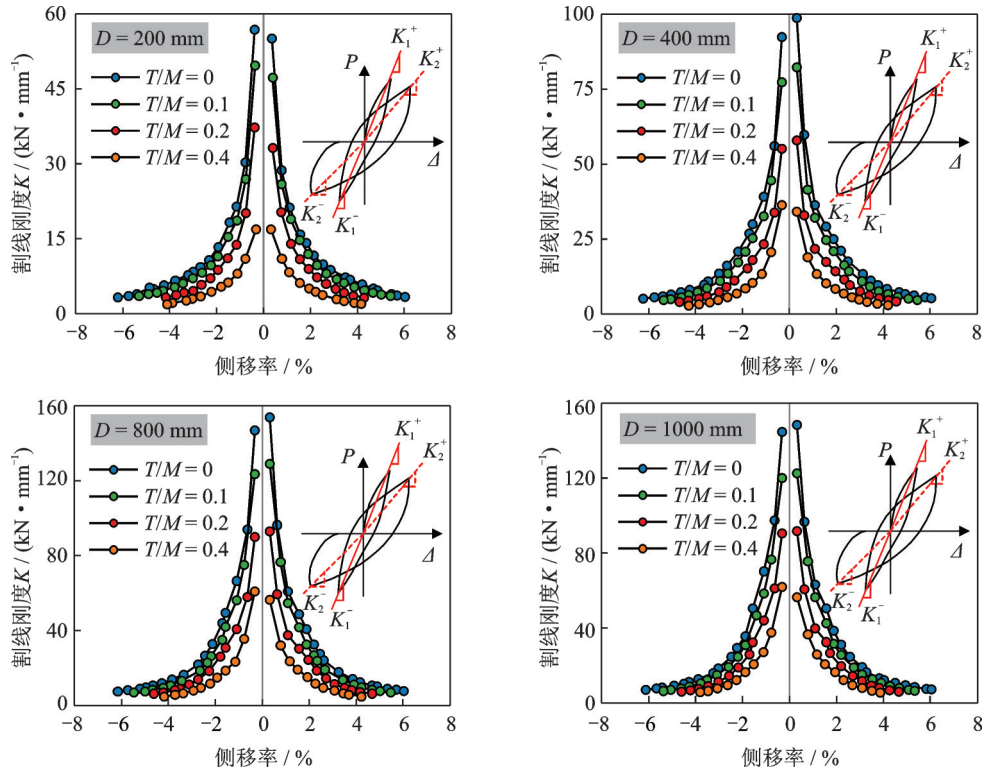


图15 割线刚度退化曲线

Fig. 15 Secant stiffness degradation curve of all the specimens

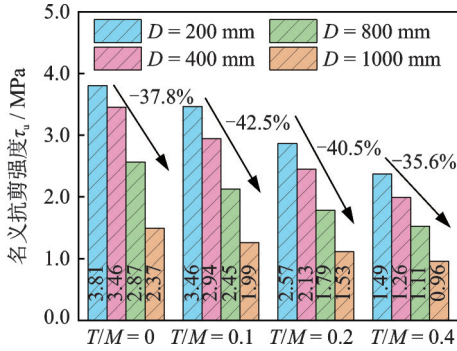


图16 名义抗剪强度与结构尺寸的关系

Fig. 16 Relationship between nominal shear strength and structural size

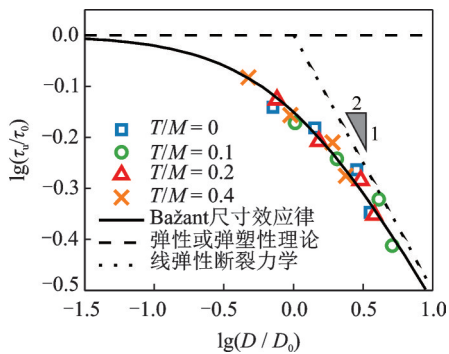


图17 与Bažant尺寸效应律的对比

Fig. 17 Comparison with the Bažant's size effect law

尺寸效应规律,且数据点的位置靠近斜率为-1/2的斜线,说明剪扭作用下,名义抗剪强度存在明显的尺寸效应,且尺寸效应呈现先增大后降低的趋势。

3.3 剪-扭承载力相关曲线

根据力学平衡关系,计算得到构件的受扭承载力,其受剪承载力和受扭承载力的相关关系如图18所示。图18中纵坐标 ν/ν_0 为归一化的抗剪承载力, ν_0 为纯剪极限承载力,横坐标 T/T_0 为归一化的抗扭承载力, T_0 为纯扭极限承载力。通过对模拟数据点的拟合,可以发现剪-扭承载力相关关系近似为1/4圆,这与GB 50010-2010^[9]提出的相关关系方程和Prakash等^[7]得出的结论一致,具体的剪-扭承载力相关关系方程为:

$$\left(\frac{T}{T_0}\right)^2 + \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^2 = 1 \quad (7)$$

式中 T 为试件的抗扭承载力; ν 为试件的抗剪承载力。抗剪承载力和抗扭承载力之间呈现负相关关系,扭矩的存在降低了试件的抗剪承载力。对比图中试件尺寸为200 mm和试件尺寸为1000 mm的数据点,可以发现,试件尺寸为200 mm的数据点位于1/4圆的外部,而试件尺寸为1000 mm的数据点位于1/4圆的内部。这就说明,因为尺寸效应的存在,随着结构尺寸的增加,GB 50010-2010^[9]提出的剪-扭承载力相关曲线的预测结果偏于不安全,因此需要对其修正。

3.4 剪-扭承载力相关曲线修正方法

基于以上的分析,现将GB 50010-2010^[9]提出的剪-扭承载力相关曲线进行如下修正:

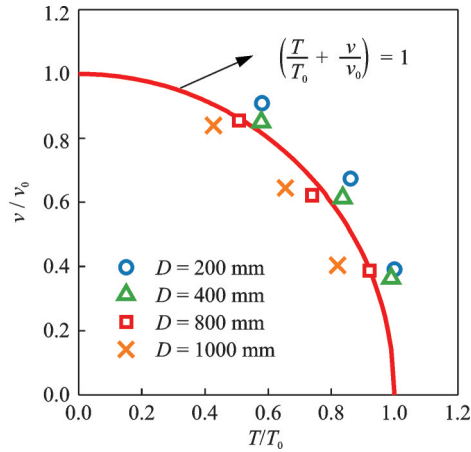


图18 剪-扭承载力相关关系曲线

Fig. 18 Related equations of shear and torsional capacity

$$\left(\frac{T}{T_0}\right)^2 + \left(\frac{v}{v_0}\right)^2 = k \quad (8)$$

式中 k 为承载力折减系数,反映结构尺寸对构件承载力的削弱作用以及扭转比对尺寸效应的影响,即 k 可表示为:

$$k = k(D/D_0, r) \quad (9)$$

式中 D 为结构尺寸; D_0 为基准结构尺寸,这里取模拟中最小结构尺寸 $D_0 = 200$ mm; $r = T/M$ 为扭转比。以 $D_0 = 200$ mm 为基准结构尺寸,此时 $k = 1$ 。将模拟数据代入式(8),根据与 200 mm 试件数据的比例关系反算出其他结构尺寸试件的折减系数 k ,如图 19 所示。从图 19 中可以看出,折减系数 k 与归一化结构尺寸 D/D_0 呈现负相关关系,这里暂用幂函数形式表示两者关系,即 $k = (D/D_0)^a$ 。通过对模拟数据的拟合,得到试件在不同扭转比下的承载力折减系数,如图 19 所示。

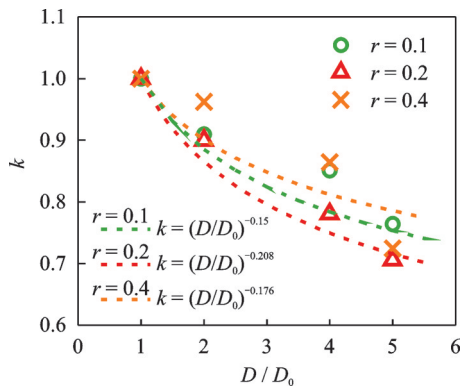


图19 承载力折减系数 k

Fig. 19 Bearing capacity reduction factor k

计算结果显示,试件在不同扭转比下的 k 值不同,反映了扭转比对尺寸效应的影响,即扭转比对试件承载力有不同的折减程度。则式(9)可表示为:

$$k = (D/D_0)^a = (D/D_0)^{f(r)} \quad (10)$$

即系数 a 是关于扭转比 r 的函数。当 $r = 0$ 时,为纯剪切工况,此时把 $v/v_0 = 1, T/T_0 = 0$ 代入式(8)与(10),得 $a = 0$;同理当 $r = \infty$ 时,为纯扭转工况,此时 $a = 0$;当 $r > 0$ 时,通过对系数 a 和扭转比 r 的拟合,暂用二次函数表示,如图 20 所示。需要说明的是,当计算 $a > 0$ 时,取 $a = 0$ 。综上所述,承载力折减系数 k 的计算公式为:

$$k = (D/D_0)^{f(r)} \quad (11)$$

$$f(r) = \begin{cases} mr^2 + nr, & r \geq 0 \\ 0, & r = \infty \end{cases} \quad (12)$$

式中 D_0 为基准结构尺寸,这里取 $D_0 = 200$ mm; m 和 n 为经验拟合系数,此模拟工况下, $m = 3.145$, $n = -1.687$;且 $f(r) \leq 0$ 。

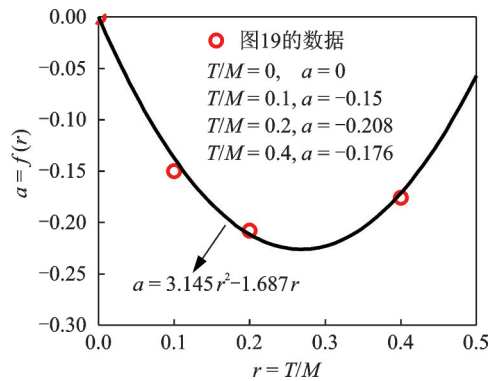


图20 系数 a 的确定

Fig. 20 Determination of the coefficient a

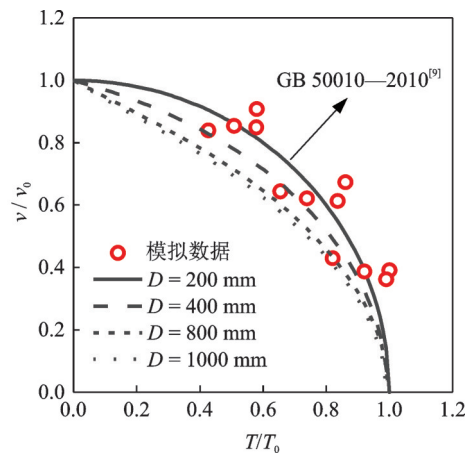


图21 修正后的剪-扭承载力相关关系曲线

Fig. 21 Revised shear-torsion capacity correlation curve

图 21 为修正后的剪-扭承载力相关关系曲线。可以看出所有数据点都在大尺寸预测曲线的外侧,修正后的相关关系曲线较为安全。

4 结 论

本文通过建立钢筋混凝土柱剪扭复合受力三维

细观数值模型,探究了扭转比对钢筋混凝土柱抗震性能及尺寸效应的影响,分析了剪扭荷载共同作用的承载力相关关系。主要结论如下:

(1) 钢筋混凝土柱在剪扭荷载共同作用时,扭矩的存在影响了构件的力学性能和破坏模式,使构件损伤破坏区域变大,破坏更具脆性,抗剪承载力降低。

(2) 扭矩的存在对钢筋混凝土柱抗震性能存在影响。随着扭转比的增大,其承载力退化速度越快,延性能力,耗能能力越差。

(3) 扭矩对钢筋混凝土柱名义抗剪强度尺寸效应存在影响。在一定范围内,扭矩的存在增强了其尺寸效应。

(4) 抗剪承载力和抗扭承载力呈现负相关关系,GB 50010—2010^[9]提出剪-扭承载力相关关系为1/4圆。因为尺寸效应的存在,剪-扭承载力相关关系模型对大尺寸试件的预测结果偏于不安全,修正后的相关关系曲线安全度得到保证。

参考文献:

- [1] 韩强,王丕光,杜修力.弯扭复合作用下RC圆形桥墩滞后性能及模型研究[J].土木工程学报,2014,47(6):97-108.
Han Qiang, Wang Piguang, Du Xiuli. Hysteretic behavior and model study of circular RC bridge piers under cyclic combined flexural and torsional loadings[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(6): 97-108.
- [2] Attarchian N, Attari N K A, Waezi Z. Experimental investigation of the seismic performance of rectangular reinforced concrete columns subjected to combined flexure-torsion cyclic loading[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2020: 1-23.
- [3] Huang H, Hao R, Zhang W, et al. Experimental study on seismic performance of square RC columns subjected to combined loadings [J]. Engineering Structures, 2019, 184: 194-204.
- [4] Jin L, Zhang S, Li D, et al. A combined experimental and numerical analysis on the seismic behavior of short reinforced concrete columns with different structural sizes and axial compression ratios[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2018, 27(9): 1416-1447.
- [5] Wang P, Han Q, Du X. Seismic performance of circular RC bridge columns with flexure-torsion interaction [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 66: 13-30.
- [6] Li Q, Belarbi A. Seismic behavior of RC columns with interlocking spirals under combined loadings including torsion [J]. Procedia Engineering, 2011, 14: 1281-1291.
- [7] Prakash S S, Li Q, Belarbi A. Behavior of circular and square reinforced concrete bridge columns under combined loading including torsion[J]. ACI Structural Journal, 2012, 109(3): 317-328.
- [8] Deifalla A, Ghobarah A. Behavior and analysis of inverted T-shaped RC beams under shear and torsion[J]. Engineering Structures, 2014, 68(6): 57-70.
- [9] 混凝土结构设计规范,GB 50010—2010 [S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [10] Jin L, Wang T, Jiang X, et al. Size effect in shear failure of RC beams with stirrups: simulation and formulation[J]. Engineering Structures, 2019, 199: 109573.
- [11] Chen H, Yi W J, Ma Z J. Shear size effect in simply supported RC deep beams[J]. Engineering Structures, 2019, 182: 268-278.
- [12] Bazant Z P. Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1984, 110(4): 518-535.
- [13] 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[J].土木工程学报,2017,50(9):28-45.
Du Xiuli, Jin Liu, Li Dong. A state-of-the-art review on the size effect of concretes and concrete structures (I): concrete materials[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(9): 28-45.
- [14] 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.
- [15] Jin L, Yu W X, Du X L, et al. Meso-scale modelling of the size effect on dynamic compressive failure of concrete under different strain rates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 125: 1-12.
- [16] 金浏,李秀荣,杜修力.CFRP加固钢筋混凝土方柱抗震性能尺寸效应的细观分析[J].工程力学,2021,38(7):41-51.
JIN Liu, LI Xiu-rong, DU Xiu-li. Meso-scale analysis of size effect on aseismic behavior of reinforced concrete square columns strengthened with CFRP[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(7): 41-51.
- [17] Wriggers P, Moftah S O. Mesoscale models for concrete: homogenisation and damage behavior[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2006, 42 (7) : 623-636.
- [18] Song Z, Lu Y. Mesoscopic analysis of concrete under excessively high strain rate compression and implica-

- tions on interpretation of test data [J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 46: 41-55.
- [19] Šavija B, Pacheco J, Schlangen E. Lattice modeling of chloride diffusion in sound and cracked concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 42(9): 30-40.
- [20] Kim S M, Abu Al-Rub R K. Meso-scale computational modeling of the plastic-damage response of cementitious composites[J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(3): 339-358.
- [21] Lubliner J, Oliver J, Oller S, et al. A plastic-damage model for concrete [J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(3): 299-326.
- [22] Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892-900.
- [23] Santos L, 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.
- [24] 张帅. 钢筋混凝土柱抗震性能及其尺寸效应研究[D]. 北京:北京工业大学, 2018.
Zhang Shuai. Seismic performances and the corresponding size effect of RC columns[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018.
- [25] Wang B, Wang J, Gong X, et al. Experimental studies on circular CFST frames with ALC walls under cyclic loadings [J]. International Journal of Steel Structures, 2014, 14(4): 755-768.
- [26] Jin L, Du X, Li D, et al. Seismic behavior of RC cantilever beams under low cyclic loading and size effect on shear strength: an experimental characterization [J]. Engineering Structures, 2016, 122: 93-107.

Effect of structural size on seismic performances of RC columns under combined shear and torsional loadings

JIN Liu, ZHU Hua-jie, DU Xiu-li

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

Abstract: Under the horizontal earthquake excitations, reinforced concrete (RC) columns such as the piers of curved girder bridge or the side columns and corner columns of the irregular reinforced concrete frame structure may be subjected to a combination of shear force and torsional moments and often produce brittle failure, due to the eccentric center of gravity of the superstructure. In addition, brittle failure often aggravates the size effect of reinforced concrete structures. In order to study the seismic performance and size effect of RC columns under combined shear and torsional loadings, a three-dimensional meso-scale numerical model of RC columns under combined shear and torsional loadings with different torsion-to-moment (T/M) ratios is established. Then, the effect of torsion-to-moment ratio on the seismic performance and size effect of RC columns subjected to shear-torsion combined loading is studied. The results show that the RC column is more brittle and the bearing capacity is lower under the combined action of shear and torsion. The increase of torsion-moment ratios leads to the decrease of deformation capacity, ductility capacity and energy dissipation capacity. The size effect on shear strength of RC columns is enhanced within a certain range due to the presence of torque. The related equations of shear and torsional capacity proposed in Chinese regulation are compared and modified to ensure the safety of the predicted results.

Key words: RC columns; shear-torsion combined loadings; seismic performance; size effect; meso-scale simulation

作者简介: 金 浏(1985—),男,教授。电话:15811171018; E-mail:jnliu@bjut.edu.cn。

通讯作者: 杜修力(1962—),男,教授。电话:13801139161; E-mail:duxiuli2015@163.com。