

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.010



基于细观模型的含腹筋混凝土梁 受剪承载力尺寸效应

金浏¹, 苏晓¹, 徐海滨², 李冬^{1,3}, 杜修力¹

(1. 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

2. 中国三峡新能源有限公司, 北京 100038; 3. 清华大学 土木系, 北京 100084)

摘要:考虑混凝土细观非均质性及钢筋与混凝土之间相互作用,建立了钢筋混凝土梁破坏行为模拟的三维细观数值分析模型。以悬臂梁为例,在数值模拟结果与已有试验结果吻合良好的基础上,扩展模拟了腹筋率、剪跨比及加载方式对大尺寸钢筋混凝土梁(最大梁深为 2 000 mm)剪切破坏尺寸效应的影响规律。模拟结果表明:无腹筋梁抗剪名义强度尺寸效应显著,中国《混凝土结构设计》规范提出的截面高度影响系数难以全面的反映梁剪切破坏的尺寸效应现象;腹筋会抑制梁抗剪强度的尺寸效应,随着腹筋率的增加,梁的抗剪强度尺寸效应逐渐减弱;随着剪跨比的增加,梁的抗剪承载力有所减弱,同时,尺寸效应现象也略有减弱;相比于单调加载,循环加载下梁将产生低周疲劳脆性破坏,使得梁抗剪强度尺寸效应更加明显。

关键词:钢筋混凝土梁;剪切破坏;三维细观模型;尺寸效应;加载方式;腹筋;剪跨比

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2019)01-0080-09

Meso-scale simulation of size effect in shear capacity of reinforced concrete beams with web reinforcement

Jin Liu, Su Xiao, Xu Haibin, Li Dong, Du Xiuli

(1. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China; 2. China Three Gorges New Energy Company, Ltd, Beijing 100053, P. R. China; 3. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China)

Abstract: A 3D meso-scale simulation model was developed to study the failure behavior of reinforced concrete (RC) beams, in which the concrete heterogeneities and the nonlinear concrete-steel interaction were taken into account. The developed meso-scale simulation method was then validated by comparing the simulation results with the available tests for RC cantilever beams. In addition, the effects of stirrups ratio, shear-span ratio and loading mode on the size effect in shear strength of RC beams with a maximum depth of 2 000 mm were explored. The simulation results indicate that: 1) The shear strength of beams

收稿日期: 2018-03-06

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0701100); 国家自然科学基金(51822801, 51421005)

作者简介: 金浏(1985-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事混凝土及混凝土结构领域研究, E-mail: jinliu@bjut.edu.cn。
杜修力(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn。

Received: 2018-03-06

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0701100); National Natural Science Foundation of China (No. 51822801, 51421005)

Author brief: Jin Liu (1985-), professor, doctoral supervisor, main research interests: concrete materials and structures, E-mail: jinliu@bjut.edu.cn.

Du Xiuli (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn.

without web reinforcement presents obvious size effect, and the influence coefficient of section height proposed by Chinese Code for design of concrete structures cannot fully reflect the size effect of RC beams; 2) The web reinforcements can inhibit size effect on the shear strength of RC beams, and the size effect on shear strength of beams gradually weakens with the increase of stirrups ratio; 3) As the shear-span ratio increases, the shear capacity of the beam decreases, and the size effect becomes to be weakened; 4) Compared with monotonic loading, cyclic loading leads to the low-cyclic fatigue failure of RC beams, and thus it makes the size effect in shear strength more prominent.

Keywords: reinforced concrete beam; shear failure; 3D meso-scale simulation model; size effect; loading mode; web reinforcement; shear-span ratio

剪切破坏是钢筋混凝土构件失效模式中最危险的一类,通常体现出强烈的脆性特征。研究者对有/无腹筋混凝土梁的剪切破坏尺寸效应行为开展了大量研究工作。Kani^[1]设计了截面高度为 150~1 220 mm 的几何相似无腹筋钢筋混凝土梁的抗剪试验,研究发现,梁截面的有效高度对梁的受剪承载力有较大的影响,具有明显的尺寸效应。Iguro 等^[2]和 Shioya 等^[3]通过均布荷载作用下钢筋混凝土梁的试验发现,随着截面尺寸的增加,梁的受剪承载力会有较大幅度的降低。Tan 等^[4]对大尺度钢筋混凝土梁进行了深入研究,他们认为钢筋混凝土梁斜裂缝的开裂强度与梁的尺寸无关,但极限承载时的抗剪强度则存在非常明显的尺寸效应。Chana^[5]设计了截面高度为 150~750 mm 的 36 根钢筋混凝土简支梁的抗剪试验,亦证实了尺寸效应的存在。Kim 等^[6]对最大梁深为 1 000 mm 的不同剪跨比(1.5~6)的高强钢筋混凝土无腹筋梁开展抗剪破坏试验,发现高强混凝土梁剪切强度尺寸效应与普通混凝土类似,且尺寸效应与腹筋率无关。于磊等^[7]、车轶等^[8]对最大截面尺寸为 600 mm × 1 200 mm 的无腹筋钢筋混凝土梁进行了受剪试验研究,结果表明,无腹筋钢筋混凝土梁的抗剪强度存在明显的尺寸效应。Zararis 等^[9]试验结果亦证实此。Sherwood 等^[10]关于薄板剪切破坏试验的研究发现,最大骨料尺寸对梁剪切承载力有重要影响。

虽然如此,不同研究者对无腹筋梁剪切行为尺寸效应产生机理的认识则存在很大差异。如:Collins 等^[11]及 Lubell 等^[12]认为大尺寸梁会出现宽的裂缝,宽裂缝减小了骨料咬合力,使得梁的受剪承载力下降。按照钢筋混凝土梁的剪力传递机理,斜裂缝所在的斜截面应该能够传递剪应力,但随着裂缝加宽或骨料粒径减小,通过斜裂面的骨料咬合力传递的剪应力减少,因而使得梁破坏时的剪应力低于小梁的破坏剪应力。他们认为梁腹部裂缝间距与梁的高度成正比,进而提出了裂缝间距尺寸效应模

型。此外,Minelli 等^[13]认为:深梁在外荷载作用下产生较大的斜裂缝宽度是其剪切破坏行为尺寸效应产生的主要原因。而 Bazant 等^[14-15]认为,基于裂缝间距的尺寸效应模型在机理上是不正确的,认为达到最大荷载时,通过斜裂缝上的骨料咬合力传递的剪力可以忽略不计,裂缝间距与尺寸效应仅部分关联,而大尺寸试件的破坏反映出接近线弹性断裂的趋势。Bazant 等^[16]把断裂力学的理论应用于钢筋混凝土梁斜截面承载力尺寸效应研究,认为尺寸效应产生的根本原因是宽度比较大的斜裂缝减小了混凝土的残余拉应力,并提出了相应的尺寸效应系数。Syroka-Korol 等^[17]关于梁剪切破坏的试验研究验证了 Bazant 尺寸效应律的有效性。

对于有腹筋梁,腹筋的存在将限制裂缝的开展,使得骨料咬合作用增强,因而有腹筋混凝土梁的受剪力学行为变的极为复杂。Kuchma 等^[18]及 Frosch^[19]认为即使配置最低腹筋率,梁的抗剪强度尺寸效应将完全消失。而 Yu 等^[20]基于微平面模型获得的数值结果表明,腹筋的存在会削弱钢筋混凝土梁抗剪强度的尺寸效应,但即使高腹筋率也不能使尺寸效应完全消失。Jin 等^[21]试验表明,含腹筋混凝土悬臂梁在地震循环往复荷载作用下获得的名义抗剪强度具有明显的尺寸效应。Walraven 等^[22]的试验工作表明:对于配置超过最小配箍率的几何相似的混凝土深梁,其剪切破坏行为表现出了显著的尺寸效应行为。Bhal^[23]及 Kong 等^[24]关于含腹筋混凝土细长梁(剪跨比分别为 3.0 和 2.4)的剪切破坏试验结果表明:梁的抗剪强度表现出了明显的尺寸效应。

综上所述,目前在腹筋对梁剪切破坏尺寸效应行为影响机制方面的认识依然还远远不足。此外,腹筋率、剪跨比、加载方式及混凝土/钢筋的强度等是影响钢筋混凝土梁抗剪承载力主要因素,这些因素对梁名义抗剪强度尺寸效应规律的影响亦需进行深入探究。

实际上,钢筋混凝土构件层面的尺寸效应根源在于^[25]:1) 混凝土材料组成的非均质性;2) 钢筋与混凝土间复杂的非线性相互作用。因此,合理的能够表征钢筋混凝土构件尺寸效应的数值模型需能同时反映该两方面因素的影响。

结合混凝土三维细观随机骨料模型,着重考虑混凝土材料的细观尺度非均质性以及钢筋与混凝土之间的非线性粘结-滑移相互作用,建立了钢筋混凝土构件的三维细观数值模型。在细观数值模拟结果与已有试验结果吻合良好的基础上,研究腹筋率、剪跨比及加载方式等对钢筋混凝土梁抗剪强度尺寸效应规律的影响,为建立能反映结构尺寸影响的钢筋混凝土梁抗剪承载力设计理论与方法提供数据支撑。

1 细观数值模型建立与验证

1.1 三维细观数值模型

混凝土通常被视为三相非均质复合材料,包括骨料、砂浆及界面过渡区(ITZ)。同文献[25],采用经典的“取-放”方法^[26-27],将满足 Fuller 级配分布的骨料颗粒(最大粒径为 30 mm)随机放入砂浆基质中,骨料的体积分数约为 35%。将骨料颗粒周围薄层作为界面相(实体单元),厚度设定为 2 mm。然后将钢筋笼插入,形成如图 1 所示的典型的钢筋混凝土梁三维细观数值分析模型。混凝土各细观组成采用八节点六面体减缩积分单元进行划分,钢筋采用梁单元进行离散,网格单元平均尺寸为 5 mm。

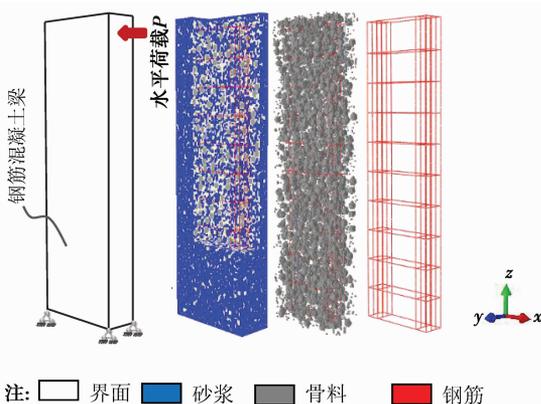


图 1 钢筋混凝土梁三维细观数值模型

Fig. 1 3D meso-scale simulation model of RC beam

同文献[25],骨料设为弹性体,采用弹塑性损伤模型来描述砂浆基质和界面行为;钢筋采用理想弹塑性模型。采用非线性弹簧单元来描述钢筋与混凝土之间的非线性粘结滑移,即采用中国《混凝土结构设计规范》^[28]推荐的钢筋-混凝土粘结滑移本构关系模型来描述两者间的非线性相互作用。悬臂梁的

边界/加载条件为:底端完全固定,侧面顶部施加水平荷载 P 。需要说明的是,这里采用循环强制位移进行加载来表征地震作用下的循环往复作用。

1.2 数值方法验证

文献[21]开展了不同结构尺寸下钢筋混凝土悬臂梁剪切破坏试验。试验中,混凝土抗压强度为 37.1 MPa,劈拉强度为 1.74 MPa;纵筋采用 HRB335 级钢筋,箍筋采用 HPB235 级钢筋,纵筋率为 1.66%,箍筋率为 0.14%。混凝土配合比参数以及钢筋直径等参数,详见文献[21]。为验证提出的细观数值方法的合理性,对文献[21]中几组不同尺寸构件的破坏及力学行为进行了数值模拟。

3 种细观组分以及钢筋材料的主要力学参数,包括单轴拉伸强度 σ_t 、压缩强度 σ_c 、弹性模量 E 、泊松比 ν 及剪胀角 ψ 等见表 1。需要说明的是,骨料及砂浆力学参数为试验实测(以“*”标示);对于界面相,其力学参数(如强度参数)则通过反演法获得。具体为:取砂浆力学参数折减数值作为界面参数的试算值,对二级配方形混凝土试件(边长为 150 mm)压缩破坏过程进行数值试验(共开展了 16 组数值来反演确定界面力学参数),发现采用表 1 中给出的界面参数(以“-”标示)时,获得的混凝土单轴压缩强度为 37.24 MPa,与实测值 37.1 MPa 较为接近,因此,可以认为采用该组力学参数合理。

表 1 3 种细观成分及钢筋的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the three meso-components of concrete and reinforcing bars utilized

组分	抗压强度 σ_c / MPa	抗拉强度 σ_t / MPa	弹性模量 E / GPa	泊松比 ν	剪胀角 ψ / (°)	屈服强度 f_y / MPa	配筋率 ρ / %
粗骨料			* 70	* 0.2			
砂浆基质	* 35.3	* 3.9	* 42.8	* 0.2	18		
界面过渡区	-28.2	-3.2	-38.7	-0.2	15		
纵筋			* 196	* 0.3		* 405	* 1.66
箍筋			* 210	* 0.3		* 297.9	* 0.14

注:“*”数据为试验实测值^[21],-“为反复试算选值,其他力学数据为默认值。

图 2(a)为基于细观尺度数值方法获得的钢筋混凝土悬臂梁(两组试件,尺寸为 80 mm×200 mm×400 mm 和 160 mm×400 mm×800 mm;腹筋率为 $\rho_{sv} = 0.14\%$)在水平循环加载下的剪切破坏模式与试验结果对比;图 2(b)为模拟获得的 5 组不同尺寸梁骨架曲线与试验结果的对比情况。从图 2 可以看出,细观尺度数值模型均可以很好地描述钢筋混凝

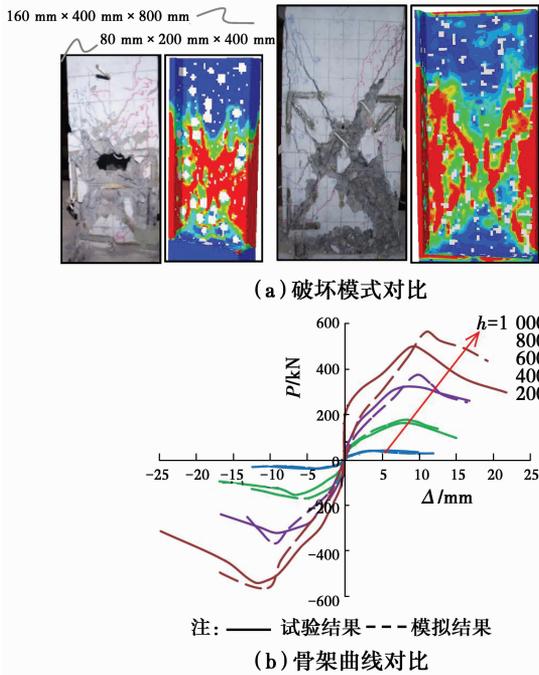


图 2 试验结果与模拟结果对比

Fig. 2 Comparison of the simulated and tested results

土悬臂梁的剪切破坏行为,验证了模型的可靠性和合理性。

借助于验证了的细观尺度数值模拟方法,拓展研究更大尺寸梁(最大横截面尺寸为 800 mm × 2 000 mm)的大变形剪切破坏行为,并进一步探究腹筋率 ρ_{sv} 、剪跨比 λ 以及加载方式(单调及循环加载)等对钢筋混凝土梁剪切破坏尺寸效应规律的影响。如表 2 所示,选取了 5 组不同尺寸的钢筋混凝土梁作为数值研究工况,即:CS-1~CS-5。这里,“C”代表 Cyclic loading,“S”代表 Shear,数字代表相应尺寸的构件。另外,混凝土材料的劈拉/单轴压缩强度亦如表 2 所示。需要说明的是,文献[21]中开展的物理试验中梁的最大深度为 1 000 mm,故构件 CS-3~CS-5 拓展到了更大的结构尺寸。

表 2 钢筋混凝土梁几何参数

Table 2 Physical parameters of the tested RC shear beams

构件	截面尺寸 ($b \times h$)	梁的长度 l/mm	有效高度 h_0/mm	混凝土拉/压强度/MPa
CS-1	160 mm × 400 mm	800	345	1.74/37.1
CS-2	320 mm × 800 mm	1 600	735	1.74/37.1
CS-3	480 mm × 1 200 mm	2 400	1 120	1.74/37.1
CS-4	640 mm × 1 600 mm	3 200	1 510	1.74/37.1
CS-5	800 mm × 2 000 mm	4 000	1 900	1.74/37.1

2 无腹筋梁名义抗剪强度尺寸效应

中国《混凝土结构设计规范》^[28]采用了截面高

度影响系数 β_h 来反映尺寸对无腹筋梁抗剪承载力 V 的影响。承载力 V 计算公式为

$$V = \beta_h \frac{1.75}{a/h_0 + 1} f_t \quad (1)$$

式中: a 为集中荷载到支座的剪跨长度; h_0 为梁截面有效高度(单位为 mm); a/h_0 为剪跨比; f_t 为混凝土抗拉强度设计值; $\beta_h = (800/h_0) / 4$ 为截面高度影响系数,当 $h_0 < 800$ mm 时,取 $h_0 = 800$ mm,当 $h_0 > 2 000$ mm 时,取 $h_0 = 2 000$ mm。

目前,大尺寸(如梁深 1 000 mm 以上)无腹筋梁尺寸效应实验数据缺乏,为探究中国无腹筋受剪承载力公式中关于截面高度影响系数选取的合理性,首先对无腹筋梁(即 $\rho_{sv} = 0$)进行数值模拟。

图 3 为循环荷载作用下 5 组不同尺寸无腹筋梁承载力 P 与加载端偏移 Δ 的骨架曲线。加载初期构件弹性高,曲线斜率高,随着荷载增加构件产生裂缝,裂缝发展较快,曲线斜率下降较快,达到极限承载力后,曲线迅速下降,承载力迅速降低,构件发生明显脆性破坏。此外,构件尺寸越大,下降段曲线斜率越陡,构件破坏时脆性特性越强。图 4(a)为数值模拟获得的无腹筋梁名义剪切强度 σ_{Nu} ($=P_{max}/bh_0$) 与结构尺寸(梁深 h)的关系曲线,可发现 $h = 2 000$ mm 时无腹筋梁的名义剪切强度约为 $h = 400$ mm 时的 50%,名义抗剪强度表现出显著的尺寸效应。

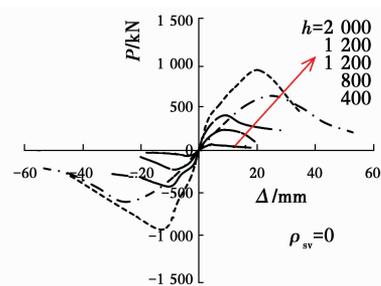


图 3 循环荷载下无腹筋混凝土梁骨架曲线

Fig. 3 The skeleton curves of RC beams without web reinforcements under cyclic loading

Bazant 根据断裂力学理论提出了适合混凝土材料和构件的尺寸效应的理论公式^[16]。

$$\sigma_{Nu} = \frac{Bf_t}{\sqrt{1 + D/D_0}} \quad (2)$$

式中: σ_{Nu} 为混凝土构件的名义弯曲强度, D 为混凝土构件的特征尺寸(这里即为梁深); B, D_0 为通过回归分析得到的两个经验系数; f_t 为混凝土抗拉强度。由图 4(b)给出的尺寸效应规律可知, Bazant 尺寸效应律(SEL)^[16]能很好地反映无腹筋梁名义剪切

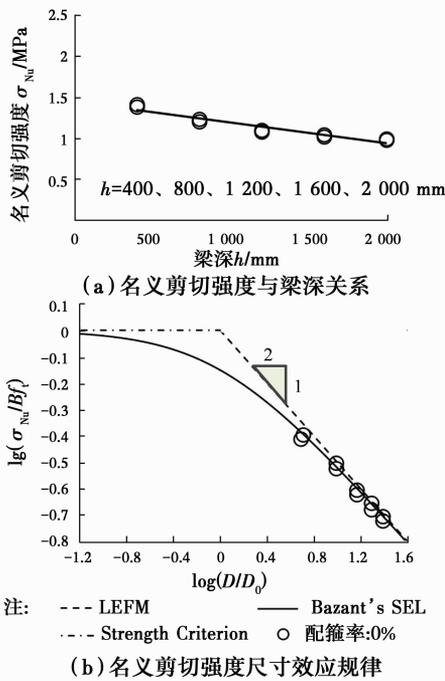


图 4 循环荷载下无腹筋梁抗剪强度尺寸效应规律

Fig. 4 Size effect of the nominal shear strength of RC beams without web reinforcement under cyclic loading

强度随尺寸变化的特征。且数据点逼近于线弹性断裂力学曲线(LEFM,斜率为 $-1/2$),说明了名义剪切强度尺寸效应的显著性。

如图 5 所示,将获得的 5 组无腹筋的抗剪承载力带入式(1),计算得到截面高度影响系数 β_h 。将数据与中国规范曲线对比可知,截面尺寸小于 800 mm 时,数据点在规范曲线以上,具有一定的安全系数。截面尺寸大于 800 mm 时,截面高度影响系数与规范曲线接近,安全系数降低,特别是梁深达到 2 000 mm 时,截面高度影响系数值则低于规范曲线。按照试验数据分布规律,当截面尺寸更大时,构件的截面高度影响系数会低于规范值,因此,中国规范规定的截面影响系数难以全面反映超大尺寸构件(梁深大于 2 000 mm)的尺寸效应特征。车轶等^[8]的研究结果亦获得此结论。

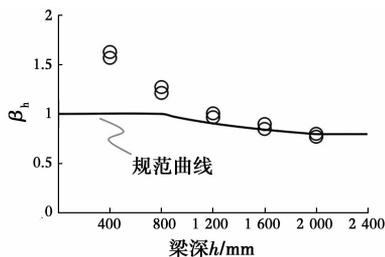


图 5 模拟的高度影响系数与规范的对比

Fig. 5 Comparison of height influence coefficients obtained by numerical result and concrete code

3 腹筋对抗剪强度尺寸效应的影响

腹筋对钢筋混凝土梁抗剪性能的影响机理十分复杂,系统试验较少,且试验结果离散性大^[29]。为分析腹筋作用对梁剪切破坏行为尺寸效应的影响,建立了 4 种腹筋率下($\rho_{sv} = 0, 0.14\%, 0.28\%$ 和 0.56%)钢筋混凝土悬臂梁(剪跨比 $\lambda = 2.0$)数值计算模型。

图 6 为腹筋率 $\rho_{sv} = 0.14\%$ 的 5 组不同尺寸梁的最终破坏形式。可以看出:5 组梁的细观破坏形态基本类似,梁表面产生弯曲裂缝,弯曲裂缝进而向梁内部斜向扩展,形成较为明显的“X”型裂缝。

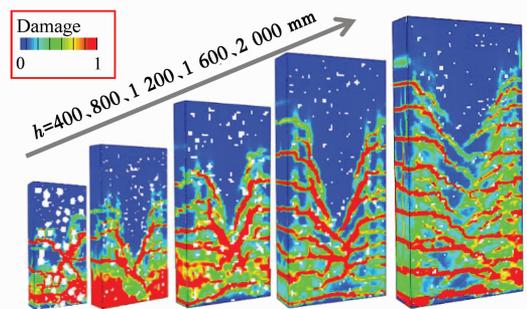


图 6 不同尺寸钢筋混凝土梁的剪切破坏形态($\rho_{sv} = 0.14\%$)

Fig. 6 Shear failure patterns of RC beams having different structural sizes ($\rho_{sv} = 0.14\%$)

图 7 给出的是腹筋率为 0.14%、0.28% 和 0.56% 的钢筋混凝土悬臂梁在循环往复荷载作用下的骨架曲线。可以看出:随着腹筋率的增大,梁的抗剪承载力明显提高;随着梁尺寸增大,梁达到其抗剪承载力后的下降段曲线变得更陡,破坏时更具脆性。

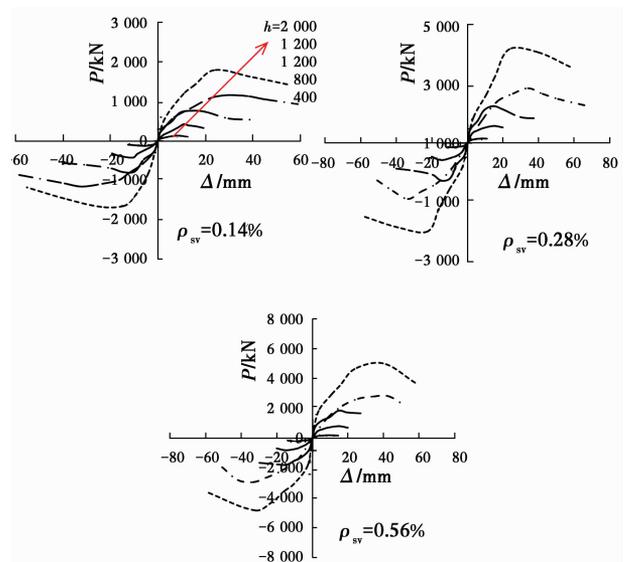


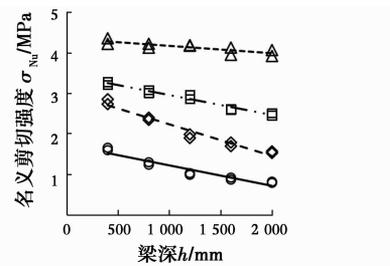
图 7 不同腹筋率下钢筋混凝土梁的荷载-位移骨架曲线

Fig. 7 Skeleton curves of beams with different stirrup ratios

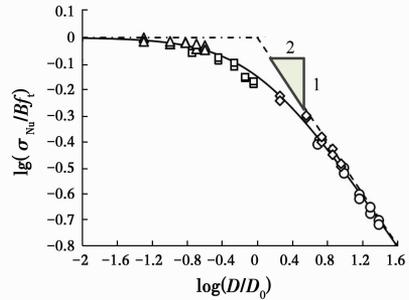
图 8(a)为不同腹筋率下梁的名义剪切强度随构件尺寸的变化趋势。随腹筋率的提高,梁的抗剪名义强度也随之提高,腹筋率为零时的名义抗剪强度明显低于有腹筋构件;随着腹筋率增加,名义剪切强度随梁结构尺寸增大而减小的趋势减缓,说明腹筋作用有效地抑制了构件的尺寸效应行为,这由图 8(b)的尺寸效应规律亦可得到证实。

由图 8(b)可以看出:随着腹筋率的增加,强度数据点由脆性曲线(LEFM)逐渐转到塑性曲线(Strength criterion,不考虑尺寸效应)。实际上,这是由于腹筋作用的增强,抑制了梁内斜裂缝的开展以及裂缝宽度的增大,同时,增强了混凝土裂缝面上骨料间的咬合作用,使梁的承载力提高,破坏时的脆性变弱。另外,从图 8 还可以看出,当腹筋率达到 0.56% 时,梁的名义抗剪强度尺寸效应近乎消失。

表 3 为不同配箍率下 5 组不同尺寸梁承载力模拟值与规范设计计算值的对比情况。可以看出:同一腹筋率下,随着梁深增加,安全系数(=模拟值/规范计算值)逐渐降低。不同配箍率下,小尺寸梁的安全系数普遍较高,可以满足梁的安全性,而大尺寸构件的安全系数较低,特别是无腹筋构件,模拟获得承载力小于规范计算值。简言之,腹筋可有效地提高



(a) 名义剪切强度与梁深关系



(b) 名义剪切强度尺寸效应规律

注: --- LEFM — Bazant's SEL - - - Strength Criterion
 ○ 配箍率 0% ◇ 配箍率 0.14% □ 配箍率 0.28% △ 配箍率 0.56%

图 8 腹筋对梁名义剪切强度尺寸效应影响规律

Fig. 8 Effect of web reinforcement on the size effect in nominal shear strength of RC beams

梁的抗剪承载力;但当腹筋率较小时,需要考虑大尺寸梁抗剪承载力的尺寸效应行为。

表 3 不同腹筋率下 5 组钢筋混凝土梁的抗剪承载力模拟值与计算值对比

Table 3 Comparison of the tested and simulated shear capacity of the geometrically RC beams with different stirrup ratios

截面尺寸 $b \times h$	$\rho_{sv} = 0\%$			$\rho_{sv} = 0.14\%$			$\rho_{sv} = 0.28\%$			$\rho_{sv} = 0.56\%$		
	模拟值	计算值	安全系数	模拟值	计算值	安全系数	模拟值	计算值	安全系数	模拟值	计算值	安全系数
160 mm × 400 mm	87.768	56.00	1.57	150.70	87.37	1.72	181.06	134.44	1.35	238.64	165.82	1.43
320 mm × 800 mm	303.41	238.59	1.27	563.07	368.35	1.53	724.42	563.00	1.29	993.42	692.76	1.43
480 mm × 1 200 mm	529.20	503.03	1.05	1 069.20	844.35	1.27	1 598.40	1 289.18	1.24	2 224.74	1 585.74	1.40
640 mm × 1 600 mm	781.57	798.71	0.98	1 617.66	1 418.00	1.14	2 371.97	2 162.13	1.10	3 614.48	2 658.22	1.38
800 mm × 2 000 mm	1 198.08	1 251.86	0.96	2 396.16	2 400.72	1.00	3 855.36	3 664.58	1.05	6 021.20	4 507.16	1.35

4 剪跨比对抗剪强度尺寸效应的影响

由于剪跨比不同,梁的斜截面受剪破坏形态分为斜压、剪压和斜拉破坏,即剪跨比影响梁的破坏模式,此外,它还将影响梁的抗剪承载力。这里,主要探讨剪跨比对梁名义剪切强度尺寸效应的影响。为此,模拟了 3 组不同剪跨比 λ (1.5、2 和 2.5) 钢筋混凝土梁(腹筋率为 0.14%) 试件的破坏行为。

图 9 为模拟获得的 3 种不同剪跨比下不同尺寸梁的破坏模式。可知:3 种剪跨比下的梁均发生剪切破坏,但 $\lambda = 1.5$ 的梁斜裂缝的宽度更宽,而 $\lambda = 2.5$ 的梁的破坏模式具有一部分的弯曲破坏成分,且最后的斜裂缝的裂缝宽度要小,说明剪跨比小的构件破坏模式脆性更大。这从图 10 给出的荷载-偏移曲线也可得到证明。图 10 分别为 3 种不同剪跨比下梁的荷载-偏移骨架曲线。可知:3 种剪跨比下

梁的骨架曲线形式基本一致,软化曲线均表现出明显的脆性,开始时梁的弹性较大,曲线斜率大,随着裂缝增大,刚度有所减小,曲线的屈服段较短,达到极限承载力后,承载力迅速下降,而且随着构件尺寸的增加,曲线的下降段越陡,说明随着构件尺寸增加,构件破坏时脆性越明显。

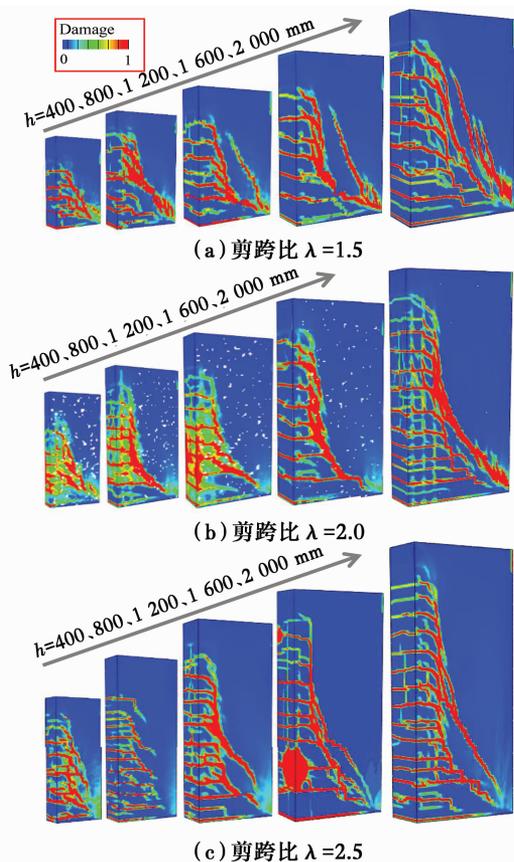


图 9 3 组剪跨比下不同尺寸梁的剪切破坏形态

Fig. 9 The shear failure pattern of the geometrically similar RC beams with different shear-span ratio

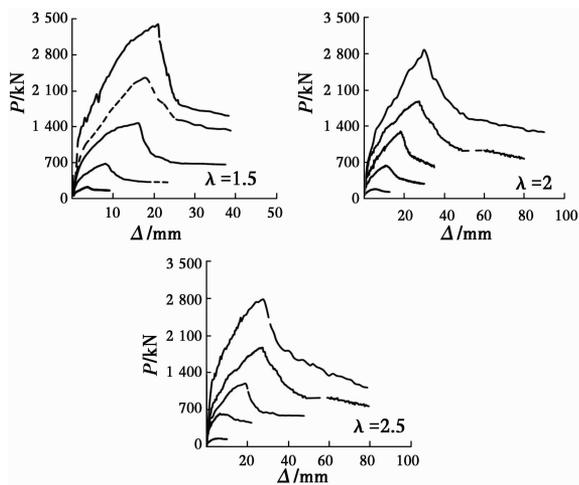
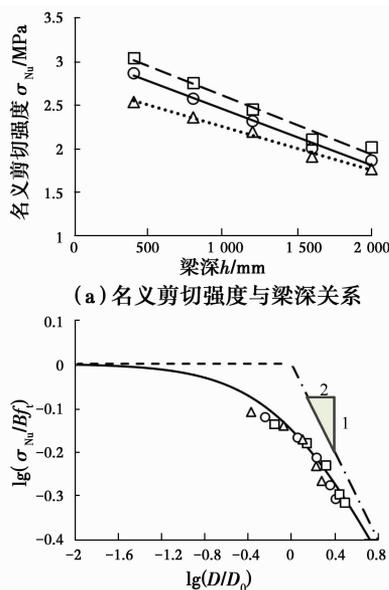


图 10 剪跨比对不同尺寸钢筋混凝土梁骨架曲线的影响
Fig. 10 Effect of shear-span ratio on the skeleton curves of RC beams having different structural sizes

从图 11(a)可以看出,随着剪跨比增大,梁的名义抗剪强度减弱;剪跨比越小,名义剪切强度随尺寸增大而减小的趋势更为显著。该结论与易伟建等^[30]的试验结果一致。从图 11(b)可知,Bazant 尺寸效应律可很好地描述 3 组不同剪跨比下梁剪切破坏的尺寸效应规律。另外,发现剪跨比小的数据点更趋近于 $-1/2$ 斜率的 LEFM,说明梁的破坏更具脆性。



(a) 名义剪切强度与梁深关系
(b) 名义剪切强度尺寸效应规律
注: --- LEFM — Bazant's SEL - - - Strength Criterion
○ 剪跨比:2 □ 剪跨比:1.5 △ 剪跨比:2.5

图 11 剪跨比对梁名义剪切强度尺寸效应影响规律

Fig. 11 Effect of shear-span ratio on the size effect in nominal shear strength of RC beams

5 加载模式对抗剪强度尺寸效应的影响

在地震荷载作用下,构件由于受到循环往复作用而出现低周疲劳损伤破坏,从而使得构件可能产生脆性破坏。文献[21]针对含腹筋钢筋混凝土梁的抗剪破坏问题开展了循环往复试验,发现循环往复加载下钢筋混凝土梁的剪切破坏具有显著脆性,梁抗剪强度尺寸效应明显。这里,从数值手段补充单调加载工况下的力学行为,进而探究加载方式对抗剪强度尺寸效应规律的影响。

建立了剪跨比 $\lambda=2$, 腹筋率 $\rho_{sv} = 0.14\%$, 最大梁深为 2 000 mm 的 5 组钢筋混凝土悬臂梁数值模型,模拟获得了单调及循环加载下梁的力学性能。图 12 为单调加载与循环加载条件下名义剪切强度随梁深增加的变化趋势。从图 12(a)可以看出,单调加载下名义剪切强度比循环加载下强度高,说明

循环加载造成了构件内部的损伤,降低了承载力;随着构件尺寸增加,两种加载方式下的名义剪切强度均逐渐减小,均具有一定的尺寸效应,且循环加载条件下名义剪切强度下降略快。从图 12(b)可知,两种加载方式下获得的名义抗剪强度均符合 Bazant 尺寸效应律,且循环加载下名义强度数据点更接近 LEFM 脆性曲线,说明循环加载条件下梁抗剪强度尺寸效应更加明显。

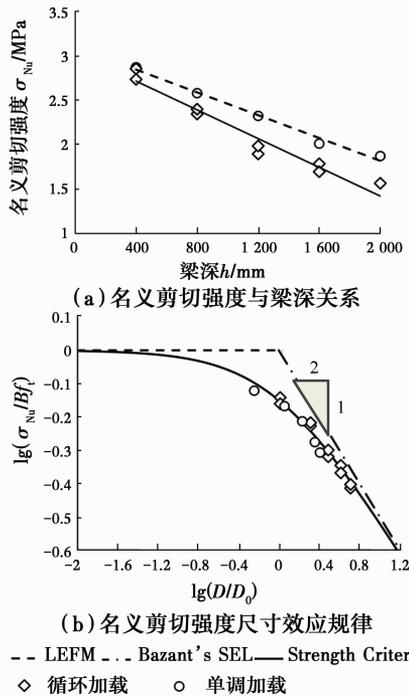


图 12 加载方式对梁名义剪切强度尺寸效应影响规律
Fig. 12 Effect of loading types on the size effect in nominal shear strength of RC beams

6 结论

基于考虑钢筋/混凝土相互作用的三维细观数值分析模型,模拟分析了无腹筋梁名义抗剪强度与结构尺寸(梁深)之间的关系,进而研究了腹筋率、剪跨比及加载方式等对钢筋混凝土悬臂梁名义抗剪强度尺寸效应的影响。

1) 无腹筋梁名义抗剪强度下降趋势比有腹筋梁更快,尺寸效应更加明显。

2) 随着腹筋率的增加,梁的抗剪承载力增加,但增加趋势逐渐减缓;腹筋会抑制梁抗剪强度的尺寸效应,随着配箍率的增加,梁抗剪强度尺寸效应逐渐减弱。

3) 低配箍率下,随着剪跨比的增加,梁的抗剪承载力有所减弱,且尺寸效应也有所减弱。

4) 相比于单调加载,循环加载下梁将产生低周疲劳脆性破坏,使得梁抗剪强度尺寸效应更加明显。

参考文献:

- [1] KANI G N J. How safe are our large reinforced concrete beams [J]. ACI Journal, 1967, 64 (31): 128-141.
- [2] IGUTO M, SHIOYA T, NOJIRI Y, et al. Experimental studies on shear strength of large reinforced concrete beams under uniformly distributed load [J]. Concrete Library International of JSCE, 1985, 5: 137-146.
- [3] SHIOYA T, IGURO M, NOJIRI Y, et al. Shear strength of large reinforced concrete beams [J]. ACI Special Publications, 1990, 118: 259-280.
- [4] TAN K H, LU H Y, TENG S. Size effect in large pre-stressed concrete deep beams [J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(6): 937-946
- [5] CHANA P S. Some aspects of modeling the behavior of reinforced concrete under shear loading [R]. Cement and Concrete Association, 1981.
- [6] KIM J K, PARK Y D. Shear strength of reinforced high-strength concrete beams without web reinforcement [J]. Magazine of Concrete Research, 1994, 46: 7-16.
- [7] 于磊, 车轶, 宋玉普. 大尺寸钢筋混凝土无腹筋梁受剪试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(1): 1-7.
YU L, CHE Y, SONG Y P. Experimental study on shear strength of large size reinforced concrete beams without web reinforcement [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(1): 1-7. (in Chinese)
- [8] 车轶, 于磊. 剪力作用下钢筋混凝土大尺寸无腹筋构件安全性研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(2): 144-151.
CHE Y, YU L. Safety of large reinforced concrete members without web reinforcement subjected to shear [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(2): 144-151. (in Chinese)
- [9] ZARARIS P D, PAPDAKIS G C. Diagonal shear failure and size effect in RC beams without web reinforcement [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(7): 733-742.
- [10] SHERWOOD E G, BENTZ E C, COLLINS M P. Effect of aggregate size on beam-shear strength of thick slabs [J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(2): 180-190.
- [11] COLLINS M P, KUCHMA D A. How safe are our large, lightly reinforced concrete beams, slabs, and footings[J]. ACI Structural Journal, 1999, 96 (4): 482-490.
- [12] LUBELL A, SHERWOOD T, BENTZ EC, et al. Safe shear design of large, wide beams [J]. Concrete

- International, 2004, 26(1): 67-78.
- [13] MINELLI F, CONFORTI A, CUENCA E, et al. Are steel fibres able to mitigate or eliminate size effect in shear [J]. *Materials and Structures*, 2014, 47: 459-473.
- [14] BAŽANT Z P, YU Q. Designing against size effect on shear strength of reinforced concrete beams without stirrups; I. Formulation [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 141(12): 1877-1885.
- [15] BAŽANT Z P, YU Q. Designing against size effect on shear strength of reinforced concrete beams without stirrups; II. Verification and calibration [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 141(12): 1886-1897.
- [16] BAŽANT Z P, KIM J K. Size effect in shear failure of longitudinally reinforced beams [J]. *ACI Journal Proceedings*, 1984, 81(5): 456-468.
- [17] SYROKA-KOROL E, TEJCHMAN J, MRÓZ Z. FE analysis of size effects in reinforced concrete beams without shear reinforcement based on stochastic elastoplasticity with non-local softening [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2014, 88(10): 25-41.
- [18] KUCHMA D, VÉGH P, SIMIONOPOULOS K, et al. The influence of concrete strength, distribution of longitudinal reinforcement, and member size, on the shear strength of reinforced concrete beams [J]. *Bulletin d'Information-Comite Eurointernational Du Beton*, 1997, 237: 209-230.
- [19] FROSCHE R J. Behavior of large-scale reinforced concrete beams with minimum shear reinforcement [J]. *ACI Structural Journal*, 2000, 97(6): 814-820.
- [20] YU Q, BAŽANT Z P. Can stirrups suppress size effect on shear strength of RC beams [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011, 137(5): 607-617.
- [21] JIN L, DU X L, 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.
- [22] WALRAVEN J, LEHWALTER N. Size effect in short beams loaded in shear [J]. *ACI Structural Journal*, 1994, 91(5): 585-593.
- [23] BHALL N S. Über den einfluss der balkenhöhe auf schubtrafahigkeit von einfeldrigen stalbetonbalken mit und ohne schubbewehrung [D]. Dissertation; Universität Stuttgart, 1968.
- [24] KONG W J, THURSTON C W. Studies of the high-performance concrete beams [J]. *ACI Structural Journal*, 1998, 95(6): 667-677.
- [25] 金浏, 苏晓, 杜修力. 基于三维细观数值方法的钢筋混凝土悬臂梁抗剪行为研究[J]. *工程力学*, 2017, 34(12): 59-66.
- JIN L, SU X, DU X L. Study on the shear performances of reinforced concrete cantilever beam using 3D meso-scale simulation method [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 2017, 34(12): 59-66. (in Chinese)
- [26] 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.
- [27] UNGER J F, ECKARDT S. Multiscale modeling of concrete [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2011, 18(3): 341-393.
- [28] 中华人民共和国建设部. 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. Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [29] 易伟建, 黄斌, 陈晖. 腹筋对连续深梁剪切破坏影响的有限元分析[J]. *计算力学学报*, 2017, 34(2): 175-182.
- YI W J, HUANG B, CHEN H. Finite element analysis on the effect of web reinforcement on shear failure of reinforced concrete continuous deep beams [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2017, 34(2): 175-182. (in Chinese)
- [30] 易伟建, 丁雅博, 陈晖. 轻骨料混凝土无腹筋梁受剪性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(6): 123-132.
- YI W J, DING Y B, CHEN H. Experimental study on shear behavior of lightweight aggregate concrete beams without stirrups [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(6): 123-132. (in Chinese)

(编辑 胡玲)