

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201910012

箍筋间距对 RC 梁剪切破坏及尺寸效应的影响研究*

金 浏, 王 涛, 杜修力, 蒋轩昂, 夏 海

(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: 箍筋间距对钢筋混凝土梁的裂缝开展及剪切延性有重要影响, 但对其抗剪强度及尺寸效应的影响研究较少。采用三维细观数值模拟方法, 建立了钢筋混凝土梁剪切破坏力学分析模型, 研究了箍筋间距及配箍率对钢筋混凝土梁剪切破坏及尺寸效应的影响机制与规律, 并重点分析了箍筋间距对钢筋混凝土梁剪切延性及尺寸效应的影响。研究表明: 箍筋间距对剪切破坏模式及抗剪强度的影响不大, 主要影响钢筋混凝土梁的剪切延性; 减小箍筋间距可以有效抑制梁的脆性行为; 箍筋增大梁的抗剪承载能力, 同时削弱梁抗剪强度尺寸效应。此外, 将模拟结果与所提抗剪强度尺寸效应理论公式进行对比分析, 验证了所提公式的适用性与准确性。

关键词: 钢筋混凝土悬臂梁; 箍筋间距; 配箍率; 剪切破坏; 尺寸效应

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1157-10

Effect of Stirrups Spacing on Shear Failure and Size Effect of RC Beams

JIN Liu, WANG Tao, DU Xiuli, JIANG Xuanang, XIA Hai

(The key laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Stirrup spacing has an important influence on the crack development and shear ductility of reinforced concrete (RC) beams, but its influence on shear strength and size effect is seldom studied. A mechanical analysis model for shear failure of RC beams was established by using 3D meso-scale numerical simulation method. The mechanism and regularity of the influence of stirrup spacing and stirrup ratio on shear failure and size effect of RC beams were studied. The influence of stirrup spacing on shear ductility and size effect of RC beams was emphatically analyzed. The results showed that the stirrup spacing has little effect on the shear failure mode and shear strength, mainly on the shear ductility of RC beams; reducing the stirrup spacing can effectively restrain the brittle behavior of beams; stirrups increase the shear capacity of beams while weakening the size effect of shear strength. In addition, the simulation results were compared with the theoretical formula of shear strength size effect, which verified the applicability and accuracy of the proposed formula.

Keywords: RC cantilever beam; stirrup spacing; stirrups ratio; shear failure; size effect

* 收稿日期: 2019-10-11; 修回日期: 2020-02-15

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, 51421005)资助

作者简介: 金浏(1985—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事多灾害下混凝土工程结构性能方面研究。

E-mail: jinliu@bjut.edu.cn

通讯作者: 杜修力(1962—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事地震工程领域研究。E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn

引言

抗剪承载力是衡量钢筋混凝土梁承载能力的一项重要指标。由于剪切问题的高度复杂性,钢筋混凝土梁抗剪承载力及破坏行为一直是工程领域密切关注的问题。

众所周知,钢筋混凝土梁的剪切破坏存在尺寸效应现象,并且众多试验均证明了有/无腹筋梁抗剪强度尺寸效应的存在^[1-6]。A.K.El-Sayed等^[1]开展了梁高为350~1 000 mm的钢筋混凝土梁剪切破坏试验,发现最大尺寸梁的抗剪强度相比最小尺寸降低38%;E.Syroka-Korol等^[2]开展了钢筋混凝土梁剪切破坏试验,发现梁高800 mm的梁抗剪强度相比梁高200 mm的梁降低39%。另外,G.N.J.Kani^[3],J.K. Kim等^[4],N.D.Tung等^[5]以及L.Yu等^[6]开展的剪切破坏试验均表明无腹筋梁剪切破坏存在尺寸效应现象。尽管如此,对于无腹筋梁剪切破坏尺寸效应的产生机理,研究者并没有得到统一结论。M.P.Collins等^[7]以及A. Lubell等^[8]认为大尺寸构件在受剪时出现较宽裂缝,这些宽裂缝减少骨料咬合力,进而使得梁抗剪承载力降低,并提出了裂缝间距尺寸效应模型。而Z.P.Bazant等^[9]认为梁在承受最大荷载时,通过斜裂缝骨料咬合所传递的剪力可以忽略不计,裂缝间距与尺寸效应仅仅部分关联;Z.P.Bazant等^[10]将断裂力学理论应用到钢筋混凝土梁剪切破坏尺寸效应的研究中,并提出了基于断裂力学的尺寸效应模型。

对于含有箍筋的钢筋混凝土梁,箍筋对抗剪强度尺寸效应的影响仍没有统一论断。A.Lubell等^[8]认为配置最低配箍率,梁的抗剪强度尺寸效应也会被完全抑制。而J.Walraven等^[11]的试验结果表明:配置超过最小配箍率的混凝土深梁,抗剪强度尺寸效应现象依然明显。Q.Yu等^[12]的数值结果同样表明,箍筋难以完全抑制抗剪强度尺寸效应,仅能起到削弱的作用。L.Jin等^[13]开展了最大梁高为1 000 mm的悬臂梁低周往复加载试验,结果表明配有箍筋的梁的抗剪强度仍然存在明显的尺寸效应现象。由于箍筋的存在,梁在受剪过程中,裂缝开展受到抑制,骨料咬合作用增强,使得含箍筋梁的力学性能更为复杂,仍需开展相关研究工作。

另外,箍筋间距对钢筋混凝土梁裂缝开展以及延性都有一定的影响。F.Ceroni等^[14]的试验结果表

明,箍筋间距对裂缝发展有明显影响,即混凝土多在箍筋处开裂,直到梁破坏时箍筋间距内部才会出现不规则裂缝。M.M.Hanna等^[15]、M.A.Rashid等^[16]的试验结果同样表明了箍筋间距对裂缝开展的影响较大。然而,箍筋间距对梁抗剪承载力影响的相关研究较少,并且多数研究仅仅单独改变箍筋间距,箍筋直径保持不变,这实际上改变了梁的配箍率,并不能直接反映箍筋间距对抗剪承载力的影响。因此,有关箍筋间距对梁抗剪强度及尺寸效应的影响,仍需进一步研究确定。

由于经济及试验条件的限制,进行大量的大尺寸梁剪切破坏试验是难以实现的。因此,数值仿真模拟试验成为解决相关问题的有效研究手段。文献[17]从混凝土细观角度出发,建立了钢筋混凝土悬臂梁三维细观数值分析模型,分析了剪跨比及配箍率对RC悬臂梁剪切破坏及其尺寸效应的影响,并提出了含有箍筋的RC悬臂梁抗剪强度尺寸效应理论公式。本文在文献[17]所建RC悬臂梁三维细观数值模型的基础上,分析了箍筋间距对RC悬臂梁剪切破坏行为的影响,重点讨论了RC梁剪切延性及软化率的变化行为,并进一步研究了配箍率及箍筋间距对RC梁剪切破坏及尺寸效应的影响,所得模拟结果对文献[17]所建立的抗剪强度尺寸效应律进行了补充分析与验证。

1 钢筋混凝土悬臂梁细观数值分析模型

钢筋混凝土构件存在尺寸效应行为,主要受两方面影响^[18]:(1)混凝土材料本身的非均质性及力学非线性;(2)钢筋-混凝土之间复杂的相互作用。因此,为了通过数值模拟手段更加真实准确地分析构件层次的尺寸效应行为,应同时考虑以上两个方面。

文献[17]建立了RC悬臂梁三维细观数值分析模型,所建模型将混凝土视为由骨料颗粒、砂浆基质及界面过渡区(ITZ)^[19]组成的三相非均质复合材料。模型及其加载方式如图1所示。其中固定端部分采用完全固定约束方式,即约束固定端单元的所有自由度;加载面采用耦合方式,并将加载点设置在耦合加载面的形心位置。本文中保持混凝土细观结构特征,即骨料体积分数、骨料ITZ厚度、最大/最小骨料粒径均不变。

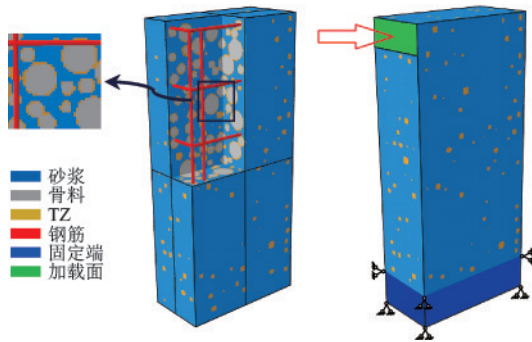


图1 三维细观数值分析模型

Fig.1 Three-dimensional meso-scale numerical model

1.1 钢筋混凝土细观组分本构关系

根据文献[18]的工作,将粗骨料颗粒设置为高弹性体,假定其在静力加载下不产生较大变形。对于砂浆基质及界面过渡区,参照X.L.Du等^[20]的工作,其力学性能采用J.Lee等^[21]提出的塑性损伤本构模型来描述,即假定材料的破坏形式主要分为拉伸损伤和压缩破坏,用各向同性损伤变量描述拉伸损伤和压缩损伤引起的刚度退化行为,其具体的应力—应变关系为:

$$\sigma = (1 - d) D_0^e : (\epsilon - \epsilon^pl) \quad (1)$$

式中, D_0^e 为初始弹性矩阵; d 表示损伤变量; ϵ^pl 表示塑性应变张量。

另外,将钢筋视为均质材料,采用理想弹塑性本构模型描述其力学行为。

1.2 钢筋—混凝土黏结滑移本构关系

考虑钢筋混凝土构件产生尺寸效应的第二方面原因(即钢筋—混凝土之间复杂的相互作用),本

文采用《混凝土结构设计规范》^[22]推荐的钢筋—混凝土黏结滑移($\tau-s$)本构关系模型,即通过设置非线性弹簧单元来描述钢筋与混凝土之间的黏结滑移行为。弹簧单元的设置形式及其黏结应力 τ —滑移量 s 关系如图2所示,各参数的意义及参数选取方法详见文献[18]。

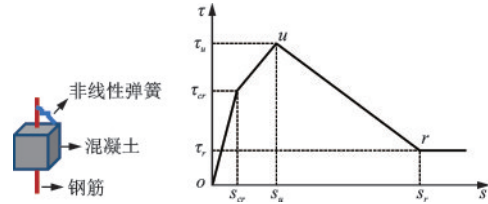


图2 钢筋—混凝土黏结滑移关系

Fig.2 Bond-slip relationship between reinforcing bar and concrete

2 不同箍筋间距混凝土梁剪切破坏行为

为研究箍筋间距对钢筋混凝土悬臂梁剪切破坏及其尺寸效应的影响,采用文献[17]所建立的三维细观数值分析方法,设计了不同截面尺寸(S: 100 mm × 200 mm、M: 200 mm × 400 mm、L: 400 mm × 800 mm、U: 800 mm × 1 600 mm)、箍筋间距(I: 30 mm、II: 60 mm、III: 90 mm、IV: 120 mm)以及不同配箍率(0.2%、0.4%、0.6%)的悬臂梁构件。需要说明的是,根据《混凝土结构设计规范》^[22]规定,箍筋间距不应过大,因此不同截面尺寸梁的箍筋间距保持一致。由于模型数量较多,表1列出了部分模型的相关几何参数,其它试件相关参数可按几何倍数类比得出。

表1 钢筋混凝土悬臂梁几何参数

Table 1 Geometrical parameters of the RC cantilever beam

| 试件名称 | 截面尺寸($b \times D$) / (mm × mm) | 配箍率 $\rho_{sv} / \%$ | 箍筋间距 s / mm | 单肢箍筋截面面积 A_{sv1} / mm^2 | 有效截面高度 h_0 / mm | 剪跨比 λ | 纵筋配箍率 $\rho / \%$ |
|--------------|----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------------|---------------|-------------------|
| CB-S-I-0.4 | 100 × 200 | 0.4 | 30 | 6 | 170 | 2 | 1.0 |
| CB-S-II-0.4 | 100 × 200 | 0.4 | 60 | 12 | 170 | 2 | 1.0 |
| CB-S-III-0.4 | 100 × 200 | 0.4 | 90 | 18 | 170 | 2 | 1.0 |
| CB-S-IV-0.4 | 100 × 200 | 0.4 | 120 | 24 | 170 | 2 | 1.0 |
| CB-M-I-0.4 | 200 × 400 | 0.4 | 30 | 12 | 370 | 2 | 1.0 |
| CB-M-II-0.4 | 200 × 400 | 0.4 | 60 | 24 | 370 | 2 | 1.0 |
| CB-M-III-0.4 | 200 × 400 | 0.4 | 90 | 36 | 370 | 2 | 1.0 |
| CB-M-IV-0.4 | 200 × 400 | 0.4 | 120 | 48 | 370 | 2 | 1.0 |
| CB-L-I-0.4 | 400 × 800 | 0.4 | 30 | 24 | 760 | 2 | 1.0 |
| CB-L-II-0.4 | 400 × 800 | 0.4 | 60 | 48 | 760 | 2 | 1.0 |
| CB-L-III-0.4 | 400 × 800 | 0.4 | 90 | 72 | 760 | 2 | 1.0 |
| CB-L-IV-0.4 | 400 × 800 | 0.4 | 120 | 96 | 760 | 2 | 1.0 |
| CB-U-IV-0.4 | 800 × 1 600 | 0.4 | 30 | 48 | 1 550 | 2 | 1.0 |
| CB-U-IV-0.4 | 800 × 1 600 | 0.4 | 60 | 96 | 1 550 | 2 | 1.0 |
| CB-U-IV-0.4 | 800 × 1 600 | 0.4 | 90 | 144 | 1 550 | 2 | 1.0 |
| CB-U-IV-0.4 | 800 × 1 600 | 0.4 | 120 | 192 | 1 550 | 2 | 1.0 |

2.1 剪切破坏模式

不同箍筋间距及不同尺寸悬臂梁在单调加载下的最终破坏模式如图3所示。根据裂缝开展情况可知,所有试件在最终破坏时均出现明显贯通的主斜裂缝,具有显著的剪切破坏特征。不同尺寸悬臂梁最终破坏形态相似,均为大量的横向弯曲裂缝斜向发展为贯通的斜裂缝,并最终延伸至梁底部固定端。另外,对比相同尺寸的试件梁,发现在配箍率保持不变时,相应改变箍筋间距及箍筋直径,裂缝斜向开展的趋势大致相同,最终破坏模式相近。

图4为悬臂梁CB-L-I-0.4(梁高800 mm、箍筋间距30 mm)的裂缝开展过程。位移加载初期,梁内受拉一侧首先横向开裂,弯曲裂缝逐渐开展并延伸,此时梁刚度退化不明显,荷载—位移曲线接近直线;继续加载,横向弯曲裂缝延伸并开始向梁底固定端处斜向发展,出现明显的斜裂缝;随着加载位移进一步增大,斜裂缝继续延伸,新产生的弯曲裂缝同时斜向发展,并与已有斜裂缝逐渐汇集为主斜裂缝,此时梁刚度退化明显,荷载逐渐达到峰值;继续加载,斜裂缝进一步延伸并贯通,最终形成由加载点附近延伸至梁底部固定端的贯通斜裂缝,构件破坏。

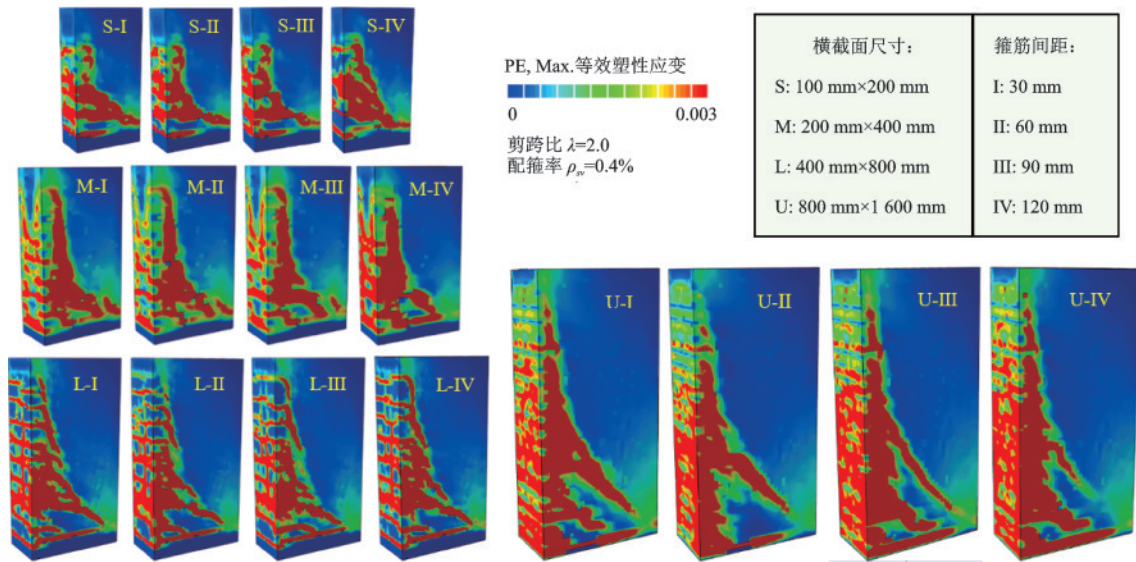


图3 不同箍筋间距不同尺寸悬臂梁最终破坏形态

Fig.3 Ultimate failure modes of the cantilever beams with different sizes and different stirrup spacings

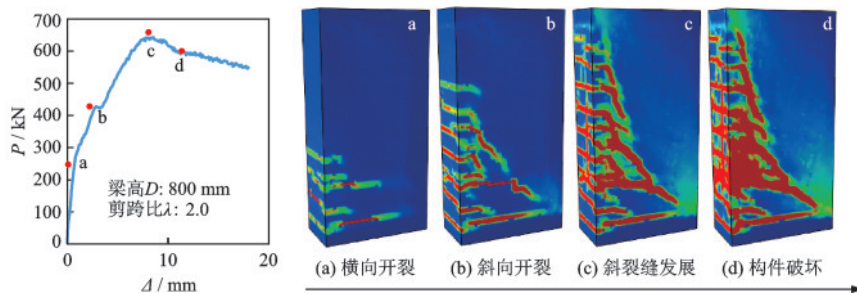


图4 悬臂梁CB-L-I-0.4裂缝开展过程

Fig.4 Crack development process of CB-L-I-0.4

2.2 剪切破坏荷载—位移曲线

图5为各悬臂梁最终的荷载—挠度($P-\Delta$)曲线,图5中(a)、(b)、(c)分别代表配箍率为0.2%、0.4%、0.6%。相同尺寸不同箍筋间距的悬臂梁,其 $P-\Delta$ 曲线走势基本一致,峰值荷载及对应位移均大

致相同,说明在配箍率相同的情况下,单纯改变箍筋间距及箍筋直径对混凝土梁的抗剪承载能力没有明显影响。对比图5中相同尺寸不同箍筋间距梁的 $P-\Delta$ 曲线,在上升段的混凝土弹性阶段大致重合,即在弹性阶段,试件梁主要由混凝土承担剪力。继续加载,直到梁内横向裂缝逐渐开展延伸,斜裂

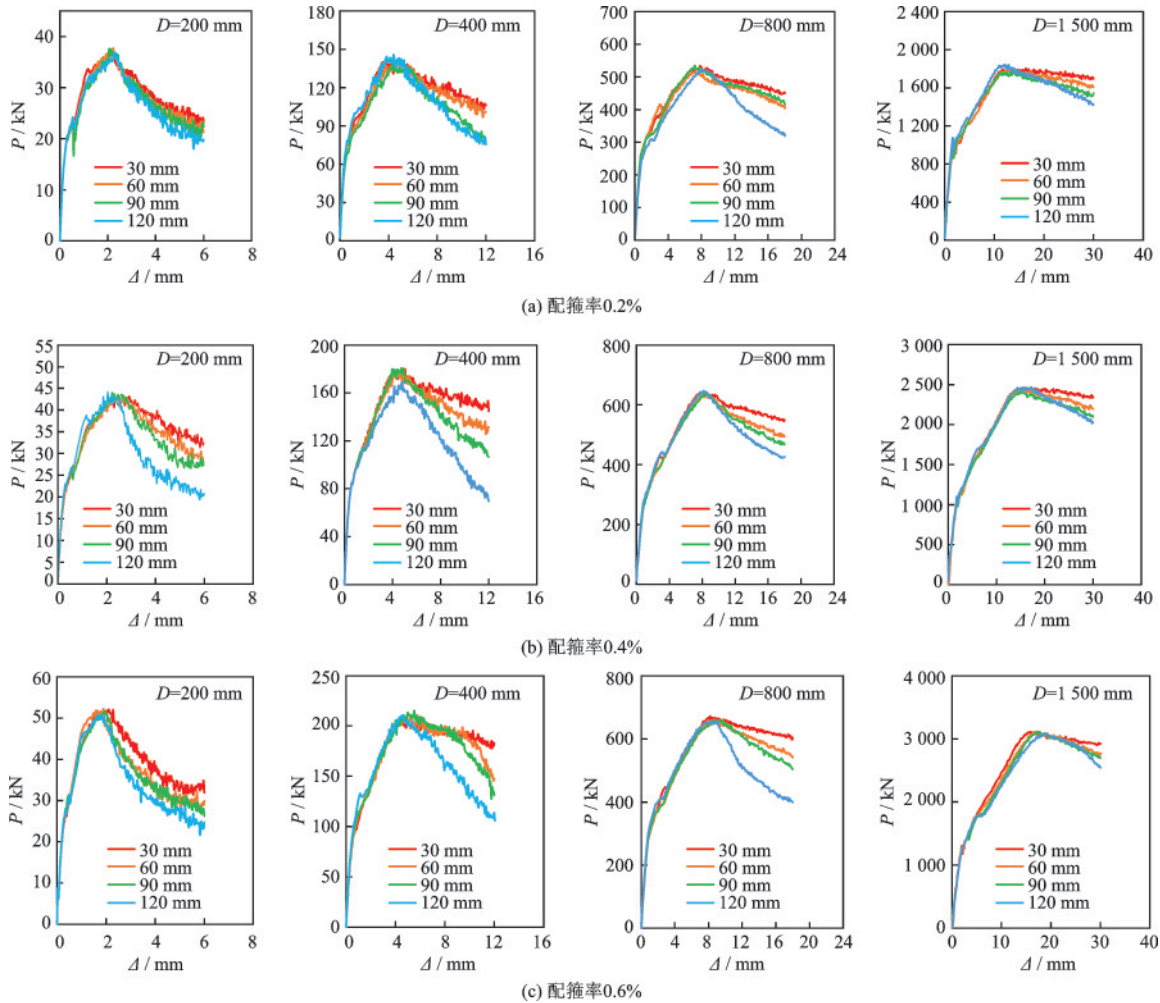


图5 不同尺寸试件在不同箍筋间距下的 $P-\Delta$ 曲线

Fig.5 $P-\Delta$ curves of specimens with different sizes and different stirrup spacings

缝开始出现,不同箍筋间距梁的 $P-\Delta$ 曲线不再重合,但走势依然大致相同,说明此时各混凝土梁力学性能没有明显区别。峰值荷载之后, $P-\Delta$ 曲线出现明显分离。相较于大箍筋间距的梁,较小箍筋间距梁的 $P-\Delta$ 曲线更为平缓,刚度退化更缓慢,即箍筋间距减小改善了梁的剪切延性。另外,随着配箍

率增大,梁抗剪承载能力也出现不同程度的增大。配箍率由0.2%增加至0.6%时,四种截面尺寸梁的抗剪承载力均增加30%以上,即相较于箍筋间距,配箍率对混凝土梁抗剪承载能力的影响更为显著。

图6为梁高200 mm、两种不同箍筋间距(30 mm、90 mm)混凝土梁的箍筋屈服过程。图中分别

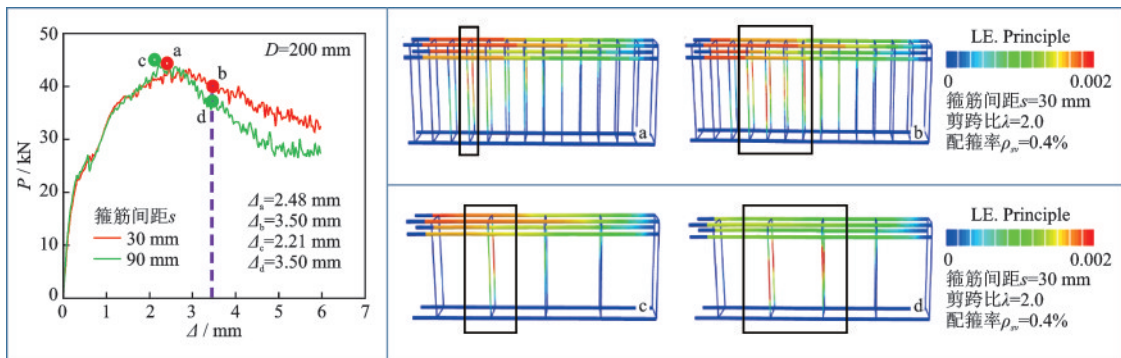


图6 不同箍筋间距梁箍筋屈服过程对比

Fig.6 Comparison of yield process of stirrups in beams with different stirrup spacings

选取了两根试验梁 $P-\Delta$ 曲线中峰值荷载及位移加载到 3.5 mm 时所对应的钢筋变形图(其中 a、c 两点对应两根试验梁峰值荷载, b、d 两点对应 3.5 mm 位移点, 黑框内为达到屈服的箍筋)。

由图 6 可知, 在荷载达到峰值时(a、c 两点), 梁内均有部分箍筋达到屈服, 即在钢筋混凝土梁剪切破坏过程中, 梁内箍筋均发挥了作用, 有效限制了裂缝开展并增大混凝土梁的抗剪承载能力。继续加载至位移为 3.5 mm(b、d 两点), 发现相比小箍筋间距的梁, 较大箍筋间距梁在更大范围内(黑框内)的箍筋出现屈服, 并且 $P-\Delta$ 曲线下降的更快。这是因为箍筋间距增大, 每肢箍筋所直接约束的混凝土范围更大, 使得箍筋屈服后, 更大范围的混凝土在开裂过程中得不到有效约束, 裂缝会迅速开展延伸, 导致梁的破坏更为突然, $P-\Delta$ 曲线下降得更为剧烈。这说明相比大箍筋间距, 较小的箍筋间距使得箍筋对混凝土的约束作用更为均匀, 对裂缝开展的抑制效果更为明显。

2.3 剪切延性分析

位移延性系数通常被用来描述构件的延性^[23], 其计算公式为:

$$\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y \quad (2)$$

式中, Δ_u 为极限位移, 采用荷载—位移曲线下降段上对应 85% P_{max} 的位移; Δ_y 为屈服位移。

配箍率 0.4% 的不同箍筋间距悬臂梁位移延性系数见表 2。表 2 中相同尺寸不同箍筋间距的各悬

表 2 钢筋混凝土悬臂梁位移延性系数

Table 2 Displacement ductility factors of the RC beams

| 试件名称 | 箍筋间距 s/mm | 屈服位移 Δ_y/mm | 极限位移 Δ_u/mm | 位移延性 系数 Δ_u/Δ_y |
|--------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| CB-S-I-0.4 | 30 | 1.35 | 4.24 | 3.14 |
| CB-S-II-0.4 | 60 | 1.31 | 3.66 | 2.79 |
| CB-S-III-0.4 | 90 | 1.28 | 3.47 | 2.71 |
| CB-S-IV-0.4 | 120 | 1.22 | 2.73 | 2.24 |
| CB-M-I-0.4 | 30 | 2.90 | 8.88 | 3.06 |
| CB-M-II-0.4 | 60 | 2.86 | 7.02 | 2.45 |
| CB-M-III-0.4 | 90 | 2.84 | 6.72 | 2.37 |
| CB-M-IV-0.4 | 120 | 2.81 | 6.47 | 2.30 |
| CB-L-I-0.4 | 30 | 4.81 | 17.53 | 3.64 |
| CB-L-II-0.4 | 60 | 5.15 | 14.57 | 2.83 |
| CB-L-III-0.4 | 90 | 4.96 | 12.77 | 2.57 |
| CB-L-IV-0.4 | 120 | 4.98 | 11.03 | 2.21 |
| CB-U-IV-0.4 | 30 | 11.1 | 32.1 | 2.89 |
| CB-U-IV-0.4 | 60 | 12.4 | 31.5 | 2.54 |
| CB-U-IV-0.4 | 90 | 12.8 | 30.1 | 2.35 |
| CB-U-IV-0.4 | 120 | 12.9 | 27.8 | 2.16 |

臂梁屈服位移大致相同, 但极限位移随箍筋间距的增大而逐渐减小, 差异明显, 这是因为箍筋间距大的梁在 $P-\Delta$ 曲线达到峰值后下降得更为迅速。

另外, 图 7 中各悬臂梁的位移延性系数变化趋势同样表明, 相同截面尺寸梁的剪切延性随箍筋间距的增大呈现出逐渐减小的趋势。但箍筋间距增大到一定程度后, 位移延性系数下降不再明显, 其变化的趋势线逐渐平缓, 说明钢筋混凝土梁的剪切延性不会随箍筋间距的增大而无限减小, 而是逐渐趋向于无腹筋混凝土梁的剪切延性。

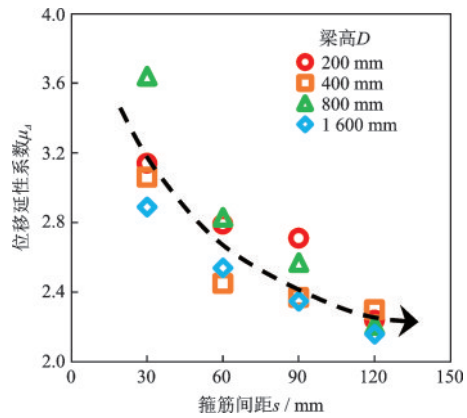


图 7 位移延性系数变化趋势

Fig.7 Variation trend of displacement ductility factors

3 考虑箍筋间距的抗剪强度尺寸效应分析

采用名义抗剪强度 τ 表征钢筋混凝土梁的抗剪承载能力, 其公式为^[13]:

$$\tau = \frac{V}{bh_0} \quad (3)$$

式中, V 为梁所承受的最大剪力; b 为梁截面宽度; h_0 为梁的有效截面高度。

3.1 抗剪强度尺寸效应分析

图 8 为不同箍筋间距下悬臂梁的名义抗剪强度值。图中相同截面尺寸的悬臂梁, 其不同箍筋间距下的名义抗剪强度值大致相同, 说明箍筋间距对梁名义抗剪强度值没有明显影响。但随着尺寸的增加, 梁名义抗剪强度明显减小, 呈现出极为显著的尺寸效应现象。

图 9 为不同配箍率下的悬臂梁名义抗剪强度值。由图可知, 钢筋混凝土悬臂梁名义抗剪强度尺

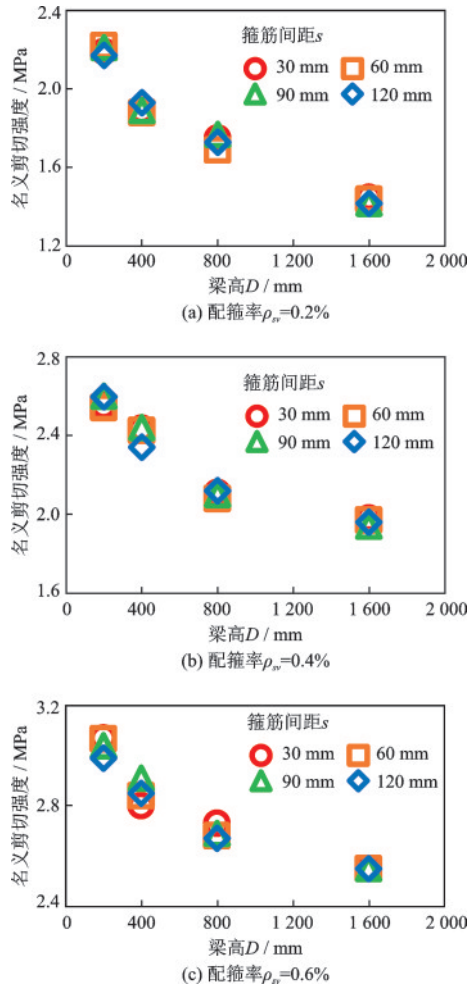


图8 不同箍筋间距悬臂梁名义抗剪强度

Fig.8 Nominal Shear Strength of cantilever beams with different stirrup spacings

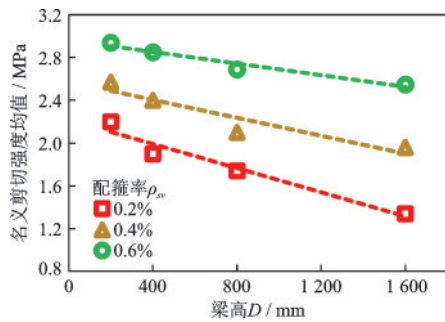


图9 不同配箍率下悬臂梁名义抗剪强度均值

Fig.9 Mean nominal shear strengths of cantilever beams with different stirrup ratios

寸效应极为明显,尤其在配箍率较低时(0.2%),名义抗剪强度降低39%。但随着配箍率的增大,这种降低的趋势逐渐缓和,其趋势线的斜率逐渐减小。配箍率为0.6%时,名义抗剪强度降低近14%,这说明配箍率的增大有效削弱了梁抗剪强度尺寸效应现象。另外,配箍率为0.4%时,名义抗剪强度降低

近24%,说明在配箍率较小时,增大配箍率对尺寸效应的削弱作用更为显著。尽管如此,配箍率较大时(0.6%),尺寸效应仍然明显,即增大配箍率并不能完全抑制混凝土梁的抗剪强度尺寸效应现象,这同Q.Yu等^[12]的结论一致。

3.2 箍筋间距对软化率尺寸敏感性的影响

混凝土材料的脆性行为与试件的尺度有关^[24]。一般来说,钢筋混凝土梁剪切破坏是典型的脆性破坏,因此,本节主要讨论钢筋混凝土梁脆性行为与构件尺寸的关系。

脆性是材料的一种固有性质,是指直到材料断裂前只出现很小的弹性变形而不出现塑性变形^[24]。目前还没有适当的参数来定量描述脆性,多数情况采用混凝土构件的软化或韧度(材料或结构在荷载作用下直到破坏或失效所吸收的能量)来表征脆性。

为了简单直观地进行分析,本文提出了软化率 k 的概念,即名义抗剪强度—名义应变($\tau-\epsilon$, ϵ 为挠度与梁高的比值)曲线中,由峰值强度指向下降段85%峰值强度的斜率绝对值。图10为软化率 k 随梁高的变化趋势。由图10可知,钢筋混凝土梁软化率随截面尺寸的增大而逐渐增大,说明大尺寸梁的脆性行为更为显著。较大箍筋间距时,梁的软化率对截面尺寸更为敏感,并且随着箍筋间距的减小,软化率的尺寸敏感性降低,说明箍筋间距的减小削弱了软化率对梁截面尺寸的敏感性,使大尺寸梁的脆性行为受到一定的抑制作用。

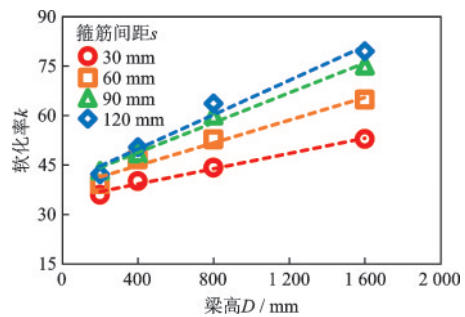


图10 软化率 k 随梁高变化趋势

Fig.10 Trend of softening rate k with beam height

3.3 与Bažant尺寸效应律对比

Z.P.Bažant^[25]将断裂力学理论应用到混凝土尺寸效应的研究中,提出了适用于混凝土材料的尺寸效应理论公式:

$$\sigma_{Nu} = \frac{Bf_t'}{\sqrt{1 + D/D_0}} \quad (4)$$

式中, σ_{Nu} 为混凝土构件的名义抗剪强度; B 和 D_0 为经验系数; D 为混凝土构件的特征尺寸(即梁截面高度); f_t' 为混凝土抗拉强度, 这里采用混凝土材料劈拉强度模拟值 2.01 MPa。

将上述公式转化为线性方程:

$$Y = AX + C \quad (5)$$

式中, $Y = (f_t'/\sigma_{Nu})^2$; $X = D$; $C = 1/(B^2)$; $A = C/D_0$ 。

对模拟数据进行回归分析, 得到了钢筋混凝土悬臂梁名义抗剪强度随构件尺寸变化的双对数曲线, 如图 11 所示。图中斜率为 $-1/2$ 的斜线为线弹性断裂力学理论(LEFM: 针对完全脆性材料), 水平线代表塑性强度(Strength criterion: 针对塑性材料, 不考虑尺寸效应)。另外, 还将模拟结果同 Bazant 尺寸效应律(SEL)进行了对比分析, 拟合相关系数为 0.98, 说明 Bazant 尺寸效应律可以较好地描述钢筋混凝土梁抗剪强度尺寸效应规律。

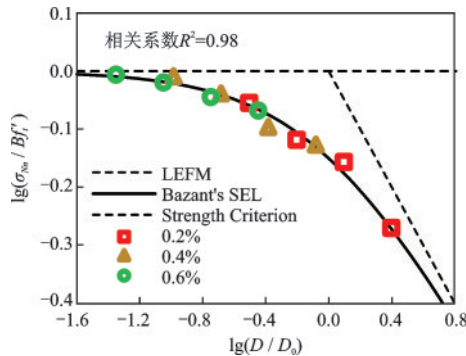


图 11 钢筋混凝土悬臂梁名义抗剪强度尺寸效应拟合
Fig.11 Size effect fitting of nominal shear strength of RC cantilever beams

尽管如此, 拟合过程中得到三种配箍率下的 B 和 D_0 分别为 1.247/642, 1.312/1 937, 1.490/4 502, 这说明不同配箍率下 B 和 D_0 的差异很大。也即是, Bazant 尺寸效应律不能描述配箍率对名义剪切强度尺寸效应的定量影响。因此, 能合理反映配箍率等相关因素对尺寸效应定量影响的名义剪切强度预测公式的建立, 是亟待解决的重要问题。

4 钢筋混凝土梁抗剪强度尺寸效应律

钢筋混凝土梁抗剪承载力 V 主要由两部分组

成: (1) 箍筋直接受剪而承担的剪力 V_{sv} ; (2) 无腹筋混凝土梁承受的剪力 V_c 。因此, 梁的抗剪承载力 V 为:

$$V = V_{sv} + V_c \quad (6)$$

其中,

$$V_{sv} = f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (7)$$

$$V_c = \tau_c b h_0 \quad (8)$$

式中, f_{yv} 为箍筋抗拉强度值^[22]; A_{sv} 为配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积; s 为沿构件长度方向的箍筋间距; h_0 为截面有效高度; τ_c 为无腹筋混凝土梁名义抗剪强度; b 为梁截面宽度。

联立公式(6)~(8), 得到钢筋混凝土梁名义抗剪强度 τ 的计算公式为:

$$\tau = \tau_c + f_{yv} \frac{A_{sv}}{bs} \quad (9)$$

金浏等^[17]基于 Bazant 材料层次尺寸效应律, 考虑配箍率、剪跨比等因素, 建立了构件层次上的钢筋混凝土梁抗剪强度尺寸效应理论公式:

$$\tau = \frac{Bf_t'}{\sqrt{1 + D/D_0}} \cdot \gamma \cdot \beta + f_{yv} \frac{A_{sv}}{bs} \quad (10)$$

其中,

$$\gamma = \frac{1}{\lambda} \quad (11)$$

$$\beta = \begin{cases} 1 & , \rho_{sv} \leq \rho_{sv, \min} \\ (A - 1) \cdot \tanh[\alpha(\rho_{sv} - \rho_{sv, \min})] + 1 & , \rho_{sv} > \rho_{sv, \min} \end{cases} \quad (12)$$

式中, γ 为剪跨比对抗剪强度的影响系数; β 为配箍

率对尺寸效应的削弱系数; $A = \frac{1.2 \sqrt{1 + \frac{D}{D_0}} \cdot \lambda}{f_t^{0.11} \cdot B}$; α

为调节系数。

因此, 这里的 τ 实际上是考虑了剪跨比、配箍率以及构件尺寸影响下的钢筋混凝土梁名义抗剪强度。

由模拟结果的拟合过程可知, 公式(10)~(12)中需要确定的三个参数分别取值为: $B=1.802$, $D_0=616$, $\alpha=10$ ^[17]。另外, 我国规范^[22]规定了钢筋混凝土梁配箍率下限值 $\rho_{sv, \min} = 0.24 f_t / f_{yv}$, 这里 $\rho_{sv, \min}$ 取为 0.23%。

图 12 为模拟结果与所提公式预测值的对比拟合情况, 可以发现所提公式能很好的预测不同箍筋间距及配箍率下钢筋混凝土梁的名义抗剪强度。另外, 根据前文所得结论, 在相同配箍率下, 单纯改

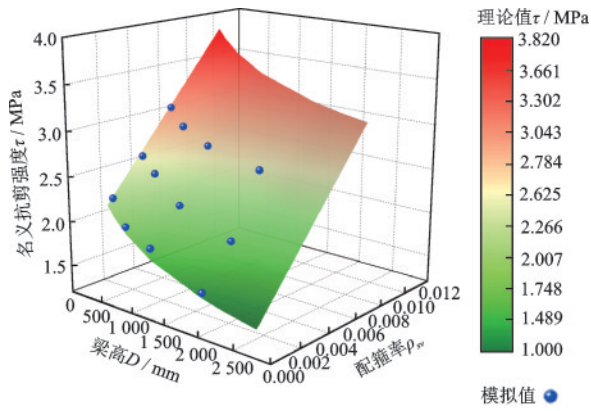


图12 名义抗剪强度理论值与模拟结果对比

Fig.12 Comparisons between the theoretical values and numerical results

变箍筋间距对混凝土梁抗剪强度没有明显影响,因此,所提出的抗剪强度预测公式不需单独考虑箍筋间距的影响。

为更深入验证所提公式的合理性与准确性,本文搜集了相关的试验结果来进行对比。图13为所提出的理论公式预测值与A.K.El-Sayed等^[1]、L.Jin等^[13]及N.S.Bhal^[26]的试验数据之间的对比情况。可以看出二者吻合良好,从而进一步验证了所提公式的准确性与合理性。尽管如此,本文所提公式的正确性仍需更多试验数据进一步验证。

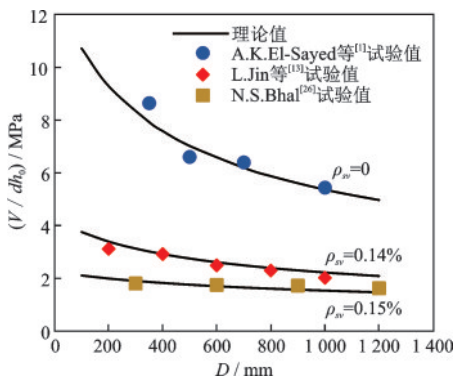


图13 名义抗剪强度理论值与现有试验数据对比

Fig.13 Comparisons between the theoretical values and available test data

5 结论

采用三维细观数值模拟方法,建立了钢筋混凝土悬臂梁剪切破坏力学分析模型,模拟研究了不同箍筋间距及配箍率对钢筋混凝土梁剪切延性、破坏行为及名义剪切强度尺寸效应的影响机制与规律。

模拟结果验证了所提出的抗剪强度尺寸效应理论公式的合理性与准确性。得到以下主要结论:

(1)相同配箍率下,箍筋间距对钢筋混凝土梁剪切破坏模式及抗剪强度影响不大。

(2)钢筋混凝土梁剪切延性随箍筋间距的增大而逐渐减小,但减小的程度随间距增大而逐渐降低;减小箍筋间距可以有效抑制梁的脆性破坏行为。

(3)梁内箍筋直接承受剪力,增大了梁的抗剪承载力;同时限制裂缝开展,改善梁的延性,从而削弱了梁抗剪强度尺寸效应。

(4)RC梁抗剪承载力随配箍率的增大而增大,配箍率为0.6%的梁的抗剪承载力比配箍率为0.2%的梁提高近30%;另外,配箍率的增大有效削弱了RC梁抗剪强度尺寸效应现象。

(5)所建立的钢筋混凝土梁抗剪强度尺寸效应半经验-半理论公式反映了材料层次及构件层次尺寸效应的关联性,可以很好地描述箍筋间距及配箍率对抗剪强度尺寸效应行为的影响;同时,箍筋间距对梁抗剪强度值影响较小,因此所提公式不需单独考虑箍筋间距的影响。

参考文献:

- [1] El-Sayed A K, Shuraim A B. Size effect on shear resistance of high strength concrete deep beams [J]. Materials and Structures, 2016, 49(5): 1871-1882.
- [2] Syroka-Korol E, Tejchman J. Experimental investigations of size effect in reinforced concrete beams failing by shear [J]. Engineering Structures, 2014, 58: 63-78.
- [3] Kani G N J. How safe are our large reinforced concrete beams [J]. ACI Journal Proceedings, 1967, 64(3): 128-141.
- [4] Kim J K, Park Y D. Shear strength of reinforced high-strength concrete beams without web reinforcement [J]. Magazine of Concrete Research, 1994, 46(166): 7-16.
- [5] Tung N D, Tue N V. A new approach to shear design of slender reinforced concrete members without transverse reinforcement [J]. Engineering Structures, 2016, 107: 180-194.
- [6] Yu L, Che Y, Song Y P. Shear behavior of large reinforced concrete beams without web reinforcement [J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(4): 653-665.
- [7] 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.
- [8] Lubell A, Sherwood T, Bentz E C, et al. Safe shear design of large, wide beams [J]. *Concrete International*, 2004, 26(1): 67-78.
- [9] 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, 131(12): 1877-1885.
- [10] Bažant Z P, Kim J K. Size effect in shear failure of longitudinally reinforced beams [J]. *ACI Journal Proceedings*, 1984, 81(5): 456-468.
- [11] Walraven J, Lehwalter N. Size effect in short beams loaded in shear [J]. *ACI Structural Journal*, 1994, 91(5): 585-593.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Ceroni F, Pecce M. Cracking behavior of RC beams externally strengthened with emerging materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(4): 736-743.
- [15] Hanna M M, Fads A M. The effect of thick concrete cover on the maximum flexural crack width under service load [J]. *ACI Structural Journal*, 1996, 93(3): 257-265.
- [16] Rashid M A, Mansur M A, Paramasivam P. Behavior of aramid fiber-reinforced polymer reinforced high strength concrete beams under bending [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2005, 9(2): 117-127.
- [17] 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 L, Wang T, Du X L, et al. Size effect theory on shear failure of RC cantilever beams [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(1): 53-62. (in Chinese)
- [18] 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.
- [19] Rios R D, Riera J D. Size effects in the analysis of reinforced concrete structures [J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(8): 1115-1125.
- [20] Du X L, Jin L, Ma G W. Numerical simulation of dynamic tensile-failure of concrete at meso-scale [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 66(4): 5-17.
- [21] Lee J, Fenves G L. Pseudo-elastic damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(8): 892-900.
- [22] 混凝土结构设计规范: GB50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [23] Paulay T, Priestley M J N. *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings* [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- [24] 黄煜斌. 混凝土脆性与力学参数的尺寸效应及其相互关系的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
Huang Y B. Study on brittleness and size effect of mechanical parameters of concrete and their correlation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2002. (in Chinese)
- [25] Bažant Z P. Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1984, 110(4): 518-535.
- [26] Bhal N S. Über den Einfluss der Balkenhöhe auf Schubtragfähigkeit von einfeldrigen Stalbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung [M]. Germany: Otto Graf Institut, 1968.

(本文责编: 池营营)