

文章编号:1673-2049(2009)03-0014-06

钢筋混凝土构件的尺寸效应研究进展及展望

杜修力, 张建伟, 符佳, 李振宝

(北京工业大学 城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要:为提高大尺寸钢筋混凝土构件设计的合理性,对各国钢筋混凝土构件的尺寸效应研究现状进行了综述与分析,并重点介绍了混凝土强度、钢筋混凝土梁和钢筋混凝土柱的尺寸效应试验研究成果;在归纳总结的基础上,对钢筋混凝土构件尺寸效应研究的发展进行了展望,建议了进行涵盖大尺寸混凝土构件破坏试验的尺寸效应研究方案。

关键词:钢筋混凝土构件;尺寸效应;破坏试验;力学性能;综述

中图分类号:TU375

文献标志码:A

Research Progress and Prospect of Size Effect on Reinforced Concrete Members

DU Xiu-li, ZHANG Jian-wei, FU Jia, LI Zhen-bao

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

Abstract: In order to improve the rationality of design of reinforced concrete (RC) members, the size effect covering large size of RC members at home and abroad should be considered. The state-of-the-art of studies on size effect of RC members was summarized and analyzed. The results of size effect experimental studies about concrete intensity, RC beam and RC column were introduced emphatically. Based on the summaries of previous research, the research progress and prospect of size effect on RC members was introduced. Finally, a research plan of size effect covering large size of concrete members destruction tests was suggested.

Key words: RC member; size effect; destruction test; mechanical behavior; summary

0 引言

钢筋混凝土结构是由混凝土和钢筋组成的复合结构,其力学性能直接取决于混凝土和钢材的力学性能。相对于混凝土材料而言,钢材具有较好的匀质性,其力学性能较简单和易掌握,因此,钢筋混凝土结构材料力学性能研究的重点是混凝土材料以及混凝土与钢筋的共同作用问题。

混凝土是一种由粗骨料、细骨料及硬化水泥基体组成的多相混合材料,它的显著特点之一是其内

部的非均质构造。混凝土内部构成材料的分布具有随机性,水硬化过程中凝胶结体在水泥砂浆内及其与粗骨料之间的界面区形成了大量的微裂纹和微孔穴,并有夹杂物。混凝土材料的这些细观特征,使其破坏过程与机理尤为复杂,并且随着尺寸的增大,其非均质性增强,破坏的随机性增大。以往的混凝土材料试验结果表明:试件尺寸大小不同,其试件名义强度不同,因而,试验确定的混凝土试件性能依赖于几何尺寸的参数,即试验得到的混凝土材料性能存在随试件几何尺寸变化的尺寸效应。这种尺寸效

收稿日期:2009-06-02

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50838001);北京市优秀人才培养项目(20081D0501500182)

作者简介:杜修力(1963-),男,四川广安人,教授,博士研究生导师,工学博士,博士后,E-mail:duxuli@bjut.edu.cn。

应是混凝土这种准脆性材料的固有特性,传统的材料强度理论已难于满足工程设计要求,而只能通过材料自身的测试来确定,大尺寸混凝土试件的性能测试是确认其实际性能不可或缺的手段。混凝土材料的这种尺寸效应必然直接反映到钢筋混凝土结构的力学性能中,因此钢筋混凝土结构的力学性能特别是由混凝土材料性能决定的部分必然存在尺寸效应。另外,钢筋混凝土结构中钢筋和混凝土共同工作的基础是它们之间存在的粘结力,而钢筋和混凝土之间粘结力的大小受钢筋直径和外形、钢筋间距、混凝土强度、混凝土保护层厚度及混凝土浇筑时钢筋所处的位置等影响,因此钢筋混凝土构件中这些因素的影响程度都会随构件尺寸的不同而变化,进而其力学性能随构件尺寸不同发生变化,加剧钢筋混凝土结构力学性能受尺寸效应的影响。也就是说,钢筋混凝土结构力学性能在构件尺寸变化时,除受混凝土材料力学性能尺寸效应的影响外,还可能存在构件层次的尺寸效应。为此,各国许多学者开展了此方面的研究工作,取得了一些研究成果。

1 尺寸效应理论

尺寸效应的研究目前主要存在 7 种理论^[1-3]: Weibull 尺寸效应统计理论;能量释放引起的尺寸效应理论;裂纹的分形特性引起的尺寸效应理论;材料的非均匀性和泊松效应引起的边界层尺寸效应理论;裂纹尖端的三维应力奇异性引起的尺寸效应理论;扩散现象引起的时间依赖性尺寸效应理论;材料本构关系的时间依赖性引起的尺寸效应理论。在分析过程中,当断裂尺寸效应变得很重要时,后 4 种尺寸效应理论相对于前 3 种理论来说,是不重要的。

1.1 Weibull 尺寸效应统计理论

在概率分析和试验研究过程中,尺寸效应分析取得了一定的进展。1926 年 Peirce 建立了链的最弱连接模型,并介绍了 Tippet 于 1925 年提出的极值统计理论。随后,Weibull 于 1939 年得出了一个至关重要的结论:具有极小概率的极小强度的尾分布不能使用现有的任何分布加以描述;建议用一个具有门槛值的幂函数律来描述强度极值分布律。Freudenthal 等通过材料微裂纹的分布概率模型在理论上证实了 Weibull 的这种分布。在 Weibull 等学者的努力下,建立了尺寸效应统计理论的基本框架。黄海燕等指出尺寸效应的经典 Weibull 统计理论可应用于下述结构:①恰好在宏观裂纹起始处失效(或必须假设为失效)的结构;②失效处只有引起

可忽略应力重分布的小断裂过程区结构。该理论对由疲劳而变脆的金属结构特别适合,但对于混凝土材料,该理论还需进行修正。现在的大部分工作都是完善、应用和修正该理论。

1.2 能量释放引起的尺寸效应理论

该理论以 Bazant 尺寸效应律为代表。Bazant 指出对于大多数准脆性材料,裂纹起裂时,并不马上破坏。他在广泛研究了混凝土、岩石、海冰、复合材料、韧化陶瓷、骨骼、灌浆土壤、煤等准脆性材料之后,认为这类准脆性材料的尺寸效应是在达到最大荷载前,由一个大裂纹或一个包含有微裂纹的大的断裂过程区发生稳定增长引起的,尤其是由大裂纹或微裂纹区的发展而产生的应力重分布和贮存的能量释放引起的,即尺寸效应是由宏观裂纹扩展时应变能耗散引起的。

1.3 裂纹的分形特性引起的尺寸效应理论

该理论以 Carpinteri 多重分形尺寸效应理论为代表。由于混凝土材料细观结构的无序性和各种微缺陷(微裂纹、微孔穴)相互作用的存在,致使宏观断裂力学理论不再适用于描述其断裂行为。在准脆性材料中,随机的和不连续分布的缺陷及其内部结构的各向异性会导致材料内部各点的强度不尽相同。在相同的外部力场作用下,不同点的应力强度因子是不同的,强度较弱的点会先产生裂纹。因此,外部力场所引起的裂纹是不连续的、随机的,在材料断裂之前,内部微裂纹的演化过程具有分形特性。分形理论特别适合描述不规则和无秩序的材料,如孔结构、水泥水化颗粒或无定形材料的微裂纹。Carpinteri 认为在不同的观察尺度下,裂纹分形特性上的差异是材料产生尺寸效应的根源。他通过建立材料的断裂特性与分形维数之间的数学关系式,确定了建立在分形理论基础上的尺寸效应理论——多重分形尺寸效应律。

2 混凝土强度尺寸效应试验

目前各国对混凝土强度尺寸效应的试验研究主要包括 3 个方面^[4]:抗压强度尺寸效应、抗弯强度尺寸效应和抗拉强度尺寸效应。

2.1 抗压强度尺寸效应

Neville 对抗压强度在 13~48 MPa 范围内的混凝土,取超过 300 个边长分别为 70、125、150 mm 的立方体试件进行试验测试,结果表明:小尺寸试件具有明显高的强度。Malhotra^[5]则发现对于抗压强度在 7~48 MPa 的混凝土, $\Phi 150 \times 300$ mm 圆柱体试

件抗压强度普遍低于 $\Phi 100 \times 200$ mm 圆柱体试件。Sabins 等^[6]对 12 个研究者所做的不同混凝土、不同养护方式和不同龄期的抗压强度数据进行回归分析得出了计算公式。Sabins 的研究说明混凝土材料的强度尺寸效应受许多因素的影响。Lessard 等^[7]对来自 14 个不同实验室和现场的抗压强度为 72~126 MPa 的混凝土试件的研究结果表明:高强混凝土存在明显的尺寸效应。其他一些研究者也得出类似的结果,如中国对不同尺寸的高强混凝土立方体试件抗压强度测试结果之间折算关系的研究。多数试验结果表明:边长 100 mm 立方体试件的抗压强度 $f_{cu,10}$ 换算到边长 150 mm 标准立方体试件应乘以的折算系数 k 随抗压强度提高而减小^[8]。黄煜镔^[9]对高强混凝土抗压强度的尺寸效应研究结果也表明:抗压强度越高,尺寸效应越明显。大连理工大学在“六五”至“九五”国家科技攻关中得到了边长 150~450 mm 立方体试件的尺寸效应数据和抗压强度计算公式。一般边长为 450 mm 立方体试件的抗压强度是相应边长为 150 mm 立方体湿筛试件强度的 75%。

2.2 抗弯强度尺寸效应

研究表明:混凝土的抗弯强度存在明显的尺寸效应,但对于不同类型混凝土、不同因素对尺寸效应的影响研究很少。黄煜镔对高强混凝土的抗弯强度尺寸效应进行了研究,结果表明:超高强混凝土相比于高强混凝土,其抗弯强度对尺寸效应的影响比较平缓,这与抗压强度尺寸效应的规律不同。

2.3 抗拉强度尺寸效应

Malhotra^[10]采用 $\Phi 100 \times 200$ mm 和 $\Phi 150 \times 300$ mm 2 种圆柱体试件测定抗拉强度,试验结果表明: $\Phi 100 \times 200$ mm 圆柱体试件的抗拉强度约比 $\Phi 150 \times 300$ mm 试件的抗拉强度高 7%。中国水利水电科学研究院的试验结果表明^[11]: $\Phi 150$ mm 圆断面试件的抗拉强度约比断面 150 mm \times 150 mm 试件的抗拉强度高 5%,断面 100 mm \times 100 mm 试件的抗拉强度约比断面 150 mm \times 150 mm 试件的抗拉强度高 15%。Carpinteri 等^[12-14]的试验结果表明:拉伸强度具有显著的尺寸效应,截面宽度 50 mm 的试件抗拉强度为 4.33 MPa,而当截面宽度增大到 400 mm 时抗拉强度仅为 3.17 MPa。对于劈裂抗拉强度,试验结果表明:不论是圆柱体试件还是立方体试件,其劈裂抗拉强度都随试件尺寸增大而减小。奥西泽的研究显示,圆柱体试件混凝土受拉断面大于 80 000~90 000 mm²(直径 $d \geq 300$ mm)时尺寸

效应已消失,劈裂抗拉强度趋于稳定而不受试件尺寸的影响。姜福田在统计以往试验结果的基础上得出了不同尺寸立方体试件与边长 150 mm 立方体试件的换算系数,边长 100、200 mm 立方体试件的换算系数分别为 0.85、1.15。大连理工大学在“六五”至“九五”国家科技攻关中得到 450 mm \times 450 mm \times 1 200 mm 试件的轴拉强度是相应尺寸为 150 mm \times 150 mm \times 150 mm 的湿筛试件强度的 63%。

3 钢筋混凝土梁破坏的尺寸效应

各国对钢筋混凝土构件的尺寸效应研究相对较少,并且研究主要集中在混凝土强度尺寸效应对钢筋混凝土结构理论分析的影响和较大尺寸钢筋混凝土梁的试验研究上^[15-24]。研究发现,梁的抗剪强度存在尺寸效应^[25-28],试验所得到的破坏剪应力低于通常设计采用的抗剪强度(美国规范 ACI 318—99^[29])。Frosch^[30]对 2 组最小抗剪配筋率的大尺寸梁进行试验,通过比较研究 Johnson 等^[31]的小尺寸梁试验,发现梁尺寸对箍筋提供的抗剪强度和开裂后工作性能没有影响,并认为这可能是由少筋梁的剪应力离散程度较大引起的。Base 等^[32-34]用统计方法分析了 Collins 和 Kuchma 的试验数据,认为在计算混凝土梁抗剪强度时必须考虑尺寸效应的影响,并且对 ACI 318—99 规范中抗剪强度设计值进行了修正,提出了基于非线性断裂力学开裂段模型的建议公式,该公式普遍适用于高强或普通混凝土梁,并考虑了深梁的拱作用。Tan 等^[35]在对大尺寸混凝土深梁和规范的比较研究后认为,斜裂缝的开裂强度与尺寸无关,但极限抗剪强度存在确定的尺寸效应。Chana^[36]通过 5 组共 36 根简支梁的试验(纵筋配筋率为 1.8%,剪跨比为 3)进一步证实了抗剪强度的尺寸效应,试验包括截面尺寸 200 mm \times 400 mm 的原型试件和缩尺比例分别为 1:2、1:3.3、1:8.5 的模型试件。试验研究表明:尺寸效应对钢筋混凝土梁的受弯承载力没有明显的影响,对钢筋混凝土梁的受剪承载力存在较明显的影响。这主要是由于梁的受弯破坏是受拉纵筋屈服引起的,而尺寸效应的影响主要来自混凝土强度和混凝土与钢筋之间的粘结力,使尺寸效应对因混凝土受压强度达到极限而破坏的构件的力学性能影响较大。

4 钢筋混凝土柱破坏的尺寸效应

Bazant 等^[37]为证实柱受压破坏存在显著的尺寸效应并研究强度与尺寸的相互关系,对细石混凝

土浇筑的缩尺钢筋混凝土柱进行了偏压试验。模型柱为正方形截面,边长分别为127、254、508 mm,模型的长细比分别为19.2、35.8、52.5,长细比相同的每一组试验柱,截面尺寸不同但几何相似,试件设计严格按照几何相似关系,只是骨料粒径保持常量,不进行缩尺,以保证混凝土性质相同。试验结果反映出强烈的尺寸效应,试验中柱的破坏方式不同,一些破坏发生在柱中段,一些接近柱端,不同的破坏分布体现了不同的能量释放。Brocca等^[38]基于微平面模型,用有限元方法模拟了Bazant和Kwon的试验,模拟结果证实了破坏区域发生位置不同时,峰值荷载的尺寸效应依然存在,此外,该模拟研究还得到了如下结论:①混凝土受压破坏是由储存在结构中的应变能释放引起的,与受拉破坏相似;②基于开裂模拟,通过有限元分析微平面模型,可以得到钢筋混凝土柱偏压破坏的尺寸效应;③名义强度随尺寸增加而减小的估算结果,较试验实测值稍小。Nemeczek等^[39]对钢筋混凝土柱峰值后性能的尺寸效应试验研究及数字模拟结果表明:尺寸效应显示在荷载-位移曲线的下降段上,大尺寸柱较小尺寸柱下降段陡,即单位体积耗散能量少。Sene等^[40]对轴心受压的钢筋混凝土柱进行了尺寸效应研究,共设计了3组正方形截面的试验模型,模型截面尺寸分别为50 mm×50 mm、100 mm×100 mm、200 mm×200 mm,柱的长细比分别为34.7、18.0、9.7,混凝土立方体强度均值为34.43 MPa。试验研究表明:大尺寸柱存在着较大的缺陷,随着构件尺寸的增加,构件破坏时所承受的最大压应力值降低;随着长细比的增大,尺寸效应影响增大。另一方面,试验模型的几何尺寸大小也会对其破坏形态及发生机理产生影响。为此,Lu等^[41]研究了不同尺寸的钢筋混凝土柱在水平低周反复荷载作用下的力学性能,共设计了3组正方形截面的试验模型,模型立方体尺寸分别为110 mm×110 mm×1 100 mm、200 mm×200 mm×2 000 mm、300 mm×300 mm×3 100 mm,混凝土立方体强度均值为31.4 MPa,柱的轴压比分别为0.07和0.2。试验研究表明:小尺寸试件的延性较低,裂缝分布比较集中,其他性能与大尺寸试件没有明显差别。不足之处在于柱的轴压比和几何尺寸均较小,其研究结论有待进一步验证与完善。

2008年1月,日本利用大型模拟地震振动台(E-defense)进行了直径1 800 mm钢筋混凝土桥墩在地震作用下的振动台破坏试验,同时进行了1/4缩尺比例模型(直径450 mm)的振动台破坏试验,

研究大尺寸钢筋混凝土构件在地震作用下的破坏机理及抗震性能,以检验现行设计规范公式的适用性,并确认其是否存在尺寸效应,但是其详细数据尚未公开。

北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室建成了 4×10^4 kN多功能电液伺服试验系统以及多种相关加载、量测设备,为大尺寸混凝土构件的破坏试验提供了必要的试验条件。笔者所在的课题组依托该试验加载系统,初步进行了包括最大截面尺寸为800 mm×800 mm的不同尺寸钢筋混凝土柱的轴心受压加载试验,按相似关系设计了4组正方形截面的试验模型,截面尺寸分别为800 mm×800 mm、600 mm×600 mm、400 mm×400 mm、200 mm×200 mm,在对32个试验柱的研究过程中主要考虑了混凝土强度等级、构件长细比、配筋率等影响因素,研究了不同尺寸钢筋混凝土柱的受力性能、破坏特征、尺寸效应等。

5 结 语

目前,钢筋混凝土结构在中国的土木工程结构中占有极其重要的地位,并且随着材料科学的发展、结构跨度和高度的增加以及结构形式的多样化,使得组成钢筋混凝土结构的构件尺寸越来越大(如柱截面尺寸达1 m×1 m以上)、承载能力越来越高、受力越来越复杂,给设计、施工等都提出了新的挑战。由于受到试验研究条件和认识水平的限制,目前对这些受力复杂的大尺寸、高承载能力的钢筋混凝土结构构件的真实破坏机理以及力学性能的研究还很不足,更不系统,在实际工程中对这些大尺寸构件的设计还只能依据和参考基于小尺寸范围的材料和构件破坏试验研究及其相应的尺寸效应研究成果建立起来的设计理论和方法,这实际上是一种没有坚实科学依据的外推,缺乏科学性和合理性,也难以保证其可靠性。对于钢筋混凝土结构构件,其复杂的非线性和非均质性以及构造性使得尺寸效应问题十分复杂,小尺寸的材料和构件破坏试验及其相应的研究结论并不一定具有普遍的指导意义,即以往基于小尺寸构件研究结果得出的规范计算公式是否适用于大尺寸构件,是需要研究的重要问题。开展大尺寸的材料和构件破坏试验,研究其相应的破坏机理、力学性能和基于此开展钢筋混凝土构件尺寸效应的深入研究,是建立更为科学、合理、可靠的钢筋混凝土结构设计方法的需要,具有重要的工程和科学意义,其研究工作应围绕以下几个问题展开:

(1)混凝土是一种多相多孔的非均质材料,随着尺寸的增大其非均质性增强,破坏的随机性增大,揭示混凝土中凝胶体与骨料界面、钢筋混凝土中混凝土与钢筋界面特征是研究其尺寸效应的一个关键问题,有待通过试验和理论研究予以解决。

(2)各类钢筋混凝土构件(梁、柱、节点)的截面极限承载力、变形能力及在低周反复荷载作用下滞回特性的尺寸效应问题,特别是针对大尺寸钢筋混凝土构件,应对其开展系统的试验研究工作。

(3)随着构件尺寸的增大,大尺寸混凝土构件破坏试验不单纯是有了设备加载能力就能解决的问题,保持设备加载刚度、加载控制技术、量测技术、边界条件的模拟等都具有很大的难度;另外考虑混凝土界面特征、大尺寸混凝土本构模型以及钢筋与混凝土界面特征的数值模拟技术也有很大的难度,因此对大尺寸钢筋混凝土构件破坏试验的试验技术及其数值模拟技术应进行深入的研究。

(4)在考虑大尺寸钢筋混凝土构件破坏机理和力学性能的基础上,将尺寸因素引入现行的基于小尺寸构件研究结果的钢筋混凝土结构设计理论和计算公式,建立覆盖大尺寸的考虑混凝土尺寸效应的钢筋混凝土结构设计理论与方法。

参考文献:

References:

- [1] BAZANT Z, CHEN E P. 结构破坏的尺度律[J]. 力学进展, 1999, 29(3): 383-433.
BAZANT Z, CHEN E P. Scaling of Structural Failure [J]. Advances in Mechanics, 1999, 29(3): 383-433.
- [2] 黄海燕, 张子明. 混凝土的尺寸效应[J]. 混凝土, 2004 (3): 8-9.
HUANG Hai-yan, ZHANG Zi-ming. Size Effect in Concrete[J]. Concrete, 2004(3): 8-9.
- [3] 黄海燕, 张子明. 混凝土的统计尺寸效应[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(3): 291-294.
HUANG Hai-yan, ZHANG Zi-ming. Statistical Size Effect of Concrete[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2004, 32(3): 291-294.
- [4] 钱觉时, 黄煜镔. 混凝土强度尺寸效应的研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2003(3): 1-5.
QIAN Jue-shi, HUANG Yu-bin. Review of Size Effect on Strength of Concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2003(3): 1-5.
- [5] MALHOTRA V M. Are 4×8 Inch Concrete Cylinders as Good as 6×12 Inch Cylinders for Quality Control of Concrete? [J]. ACI Structural Journal,

1976, 73(1): 33-36.

- [6] SABINS G M, MIRZA S M. Size Effects in Model Concrete[J]. Journal of the Structural Division, 1979, 105(6): 1007-1020.
- [7] LESSARD M, CHAALLAL O, AITCIN P C. Testing High Strength Concrete Compressive Strength [J]. ACI Materials Journal, 1993, 90(4): 303-308.
- [8] 中国土木工程学会高强混凝土委员会. 高强混凝土结构设计与施工指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
High-strength Concrete Committee of China Civil Engineering Society. Design and Contruction Direction to High Strength Concrete Structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1994.
- [9] 黄煜镔. 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 Yu-bin. Study on Brittleness and Size Effect of Mechanical Parameters of Concrete and Their Correlation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2002.
- [10] MALHOTRA V M. Effect of Specimen Size on Tensile Strength of Concrete [J]. Amer Concrete Inst, 1970, 67(6): 467-469.
- [11] 姜福田. 混凝土力学性能与测定[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989.
JIANG FU-tian. Mechanical Properties of Concrete and Its Measurment[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1989.
- [12] CARPINTERI A, FERRO G. Scaling Behaviour and Dual Renormalization of Experimental Tensile Softening Responses [J]. Material and Structure, 1998, 31 (5): 303-309.
- [13] CARPINTERI A. Decrease of Apparent Tensile and Bending Strength with Specimen Size: Two Different Explanations Based on Fracture Mechanics [J]. International Jounrnal of Solids and Structure, 1989, 25 (4): 407-429.
- [14] CARPINTERI A, FERRO G. Apparent Tensile Strength and Fictitious Fracture Energy of Concrete; a Fractal Geometry Approach to Related Size Effects [C]//ROSSMANITH H P. Fracture and Damage of Concrete and Rock: FDCR-2. London: Taylor & Francis, 1993: 86-94.
- [15] SOLTANI M, AN X H, MAEKAWA K. Localized Nonlinearity and Size-dependent Mechanics of Inplane RC Element in Shear [J]. Engineering Structures, 2005, 27(6): 891-908.
- [16] CARPINTERI A, FERRO G, VENTURA G. Size Effects on Flexural Response of Reinforced Concrete

- Elements with a Nonlinear Matrix[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70(7/8): 995-1013.
- [17] AICA N, ALEXANDER S D B, MACGREGOR J G. Effect of Size on Flexural Behavior of High-strength Concrete Beams[J]. ACI Structural Journal, 1997, 94(1): 59-67.
- [18] BAZANT Z P, KAZEMI M T. Size Effect on Diagonal Shear Failure of Beams Without Stirrups[J]. ACI Structural Journal, 1991, 88(3): 268-276.
- [19] ORETA A W C. Simulating Size Effect on Shear Strength of RC Beams Without Stirrups Using Neural Networks[J]. Engineering Structures, 2004, 26(5): 681-691.
- [20] KANI G N J. How Safe Are Our Large Reinforced Concrete Beams[J]. ACI Journal Proceedings, 1967, 64(3): 128-141.
- [21] TAYLOR H P J. Shear Strength of Large Beams[J]. Journal of the Structural Division, 1972, 98(11): 2473-2490.
- [22] WEISS W J, GULER K, SHAH S P. Localization and Size-dependent Response of Reinforced Concrete Beams[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(5): 686-695.
- [23] RIOS R D, RIERA J D. Size Effects in the Analysis of Reinforced Concrete Structures [J]. Engineering Structures, 2004, 26(8): 1115-1125.
- [24] INCE R, ARSLAN A, KARIHALOO B L. Lattice Modelling of Size Effect in Concrete Strength[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70(16): 2307-2320.
- [25] SHIOYA T, IGURO M, NOJIRI Y, et al. Shear Strength of Large Reinforced Concrete Beams[C]// LI V C, BAZANT Z P. Fracture Mechanics: Applications to Concrete. Detroit: ACI, 1989: 259-279.
- [26] COLLINS M P, KUCHMA D. How Safe Are Our Large, Lightly Reinforced Concrete Beams, Slabs, and Footings? [J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(4): 482-490.
- [27] BAZANT 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.
- [28] BAZANT 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, 131(12): 1886-1897.
- [29] ACI 318—99, Building Code Requirements for Reinforced Concrete[S].
- [30] FROSCHE R J. Behavior of Large-scale Reinforced Concrete Beams with Minimum Shear Reinforcement [J]. ACI Structural Journal, 2000, 97(6): 814-820.
- [31] JOHNSON M K, RAMMIREZ J A. Minimum Shear Reinforcement in Beams with Higher-strength Concrete[J]. ACI Structural Journal, 1989, 86(4): 376-382.
- [32] BASE Y H, LEE J H, YOON Y S. Prediction of Shear Strength in High-strength Concrete Beams Considering Size Effect[J]. Magazine of Concrete Research, 2006, 58(4): 193-200.
- [33] ANGELAKOS D, BENTZ E C, COLLINS M P. Effect of Concrete Strength and Minimum Stirrups on Shear Strength Large Members[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(3): 290-299.
- [34] SHIN S W, LEE L S, MOON J I, et al. Shear Strength of Reinforced High-strength Concrete Beams with Shear Span-to-depth Ratios Between 1.5 and 2.5[J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(4): 549-556.
- [35] TAN K H, LU H Y, TENG S. Size Effect in Large Prestressed Concrete Deep Beams[J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(6): 937-946.
- [36] CHANA P S. Some Aspects of Modelling the Behaviour of Reinforced Concrete Under Shear Loading [R]. London: Cement and Concrete Association, 1981.
- [37] BAZANT Z P, KWON Y W. Failure of Slender and Stocky Reinforced Concrete Columns: Tests of Size Effect[J]. Materials and Structures, 1994, 27(2): 79-90.
- [38] BROCCA M, BAZANT Z P. Size Effect in Concrete Columns: Finite-element Analysis with Microplane Model[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(12): 1382-1390.
- [39] NEMECEK J, BITTNER Z. Experimental Investigation and Numerical Simulation of Post-peak Behavior and Size Effect of Reinforced Concrete Columns[J]. Materials and Structures, 2004, 37(3): 161-169.
- [40] SENE S, BARR B I G, ABUSIAF H F. Size Effect in Axially Loaded Reinforced Concrete Columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(4): 662-670.
- [41] LU Y, VINTZILEOU E, ZHANG G F, et al. Reinforced Concrete Scaled Columns Under Cyclic Actions [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1999, 18(2): 151-167.