

尺寸效应对混凝土受压力学性能影响试验研究

叶 生

(安徽交通职业技术学院 土木工程系,安徽 合肥 230051)

摘要:设置 3 种立方体尺寸与强度等级普通混凝土,应用液压伺服机对混凝土进行单轴受压,通过试验得到不同加载工况混凝土破坏形态和抗压强度特征值,并进行相应对比分析和机理探讨,从尺寸效应度和尺寸效应律两个方向对混凝土抗压强度尺寸效应进行定量分析,并提出尺寸效应律统一方程,得到以下结论:不同强度等级混凝土受尺寸效应影响破坏形态变化规律基本相同,尺寸较大试件破坏后的完整性相对较好,破坏裂缝表现得相对不明显;相同强度等级混凝土,立方体边长尺寸的提高使得混凝土单轴受压强度特征值随之降低;不同强度等级混凝土,混凝土受尺寸效应抗压强度降低幅值逐步提高,其降低百分率变化基本平稳。

关键词:混凝土;单轴受压;强度特征值;尺寸效应律

中图分类号:TU313 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2019)02-0074-05

混凝土尺寸效应是指混凝土力学性能随着混凝土构件尺寸的变化而发生变化,对于其尺寸效应的研究,有助于理解从模型试验和实际工程结构的异同点,尺寸效应的研究对于复杂混凝土结构工程应用发展具有重要意义^[1-3]。

对于混凝土尺寸效应的研究,目前研究主要从混凝土单轴受压、单轴受拉和受剪加载方式角度进行研究,试验结果表明,混凝土的强度随着尺寸的提高而逐步降低,并运用多种理论讨论该作用机理,然而对于目前的试验研究一般从单一的强度值角度进行分析^[4-6]。对于多种强度等级混凝土尺寸效应的影响从定性的角度分析,较少文献从定量的角度研究不同强度等级混凝土尺寸效应对受压力学性能的影响^[7]。对于从定性和定量角度分析多种强度等级混凝土受压力学性能受尺寸效应的影响对混凝土的研究应用具有重要工程价值。

本文设计强度等级、边长尺寸均不同的立方体混凝土试块,采用液压机对混凝土试件进行单轴受压试验研究,从而确定不同加载工况时的混凝土抗压强度特征值和破坏形态,同时从尺寸效

应度、尺寸效应律以及机理探讨角度分析尺寸效应对普通混凝土受压力学性能的作用影响。

1 试验概况

1.1 配合比设计

本文考虑 C30、C40 和 C50 强度等级不同的混凝土,参考(JGJ55—2011)《普通混凝土配合比设计规程》确定如表 1 所示混凝土配合比。原材料中采用相同来源的城市自来水和代号为 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥,细骨料为细度模数为 2.4 的河砂,粗骨料为粒径范围为 5~20 mm 碎石。

表 1 混凝土配合比设计数据表

Table 1 Data sheet for concrete mix design (kg/m³)

混凝土强度等级	水	水泥	河砂	新料碎石
C30	176	426	524	1 287
C40	176	437	521	1 280
C50	206	487	561	1 196

1.2 试件设计和加载方案

对混凝土受压尺寸效应的研究,需要考虑不同的尺寸试件,本文设计立方体试件的尺寸分别

收稿日期:2019-01-31

基金项目:2017 年安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2017A675);2015—2018 安徽省高职教育创新发展项目(270);2018—2020 年度中国交通教育研究会教育科学研究课题(交教研 1802-308)

作者简介:叶生(1971—),男,安徽舒城人,副教授,硕士,主要研究方向为城市道路与桥梁工程。

为 $70\text{ mm} \times 70\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 、 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 和 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$, 采用液压机对不同加载工况混凝土进行单轴受压试验, 液压机中装有如图 1 所示、满足精度要求的荷载传感器。



图 1 加载试验设备

Fig. 1 Loading Test Equipment

加载混凝土试块对混凝土加载面应用机械黄油对其进行减摩处理, 避免摩擦作用影响试验结果。加载采用荷载和位移混合控制加载方式, 首先采用荷载控制加载方式, 对试件进行加载卸载重复 3 次, 从 0 加载至 30 kN 再到 0, 通过该种方式处理混凝土加载面与试件的间隙。正式加载设置的加载速率为 0.5 mm 每分钟, 通过位移控制加载方式, 直到试件破坏停止加载, 采集获取荷载特征值, 考虑混凝土材料的随机性和离散性, 相同加载工程设计 3 个试件进行对比试验, 取荷载的平均值来进行分析。

2 试验分析

2.1 破坏模式

通过对 3 种不同强度等级和 3 种不同立方体尺寸混凝土试件受压尺寸效应试验研究, 得到不同加载工况混凝土破坏形态, 考虑文章篇幅, 选取 C40 混凝土 3 种不同尺寸单轴受压破坏形态进行研究, 如图 2 所示。

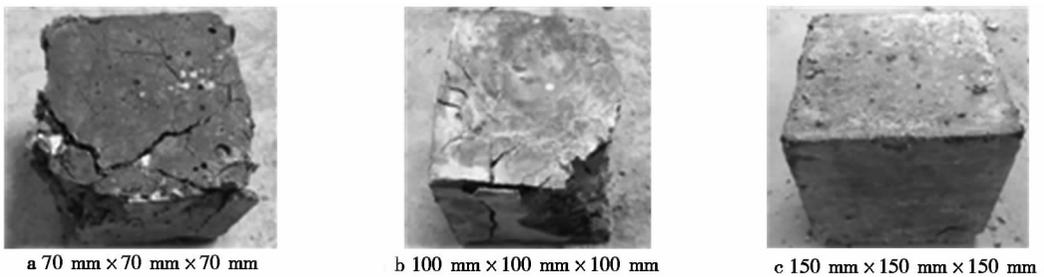


图 2 不同立方体尺寸混凝土受压破坏形态

Fig. 2 Failure modes of concrete with different cube sizes under compression

混凝土单轴受压破坏机理在于, 随着轴向荷载的逐步增大, 在轴向形成压应变, 同时, 受泊松比效应的影响, 在垂直于压应力方向上形成拉应变; 随着轴向压应力逐步提高, 则与压应力方向相垂直的拉应变也随之提高, 如果试验时混凝土拉应变高于极限拉应变值后, 试件在非加载面方向形成均匀的裂缝带, 3 种不同尺寸混凝土均表现出该破坏形态, 存在不同的是受尺寸效应影响, 随着试件尺寸的增大, 试件破坏裂缝表现得越不明显, 整体性相对越好。3 种不同强度等级普通混凝土受压破坏形态受尺寸效应影响均表现出该变化规律。

2.2 抗压强度

根据上述试验加载方案, 得到 3 种不同强度

等级 C30、C40 和 C50 和 3 种不同立方体尺寸的普通混凝土受压荷载和抗压强度特征值, 如表 2 所示。

表 2 不同加载工况混凝土受压荷载强度特征值

Table 2 Characteristic values of compressive load strength of concrete under different loading conditions

混凝土强度等级	立方体/ (mm × mm × mm)	受压荷载/ kN	抗压强度/ MPa
C30	70 × 70 × 70	157.54	32.15
	100 × 100 × 100	301.09	30.11
	150 × 150 × 150	630.24	28.01
C40	70 × 70 × 70	213.54	43.58
	100 × 100 × 100	402.49	40.25
	150 × 150 × 150	848.49	37.71
C50	70 × 70 × 70	260.97	53.26
	100 × 100 × 100	486.55	48.66
	150 × 150 × 150	1026.31	45.61

根据表 2 所示分析,三种不同强度等级普通混凝土均表现出明显的尺寸效应,相同强度等级混凝土,随着边长尺寸的提高,混凝土抗压强度发生明显降低的趋势,当混凝土强度等级较高时,受尺寸效应影响,其抗压强度降低幅值也随之提高,为进一步探究尺寸效应对混凝土抗压强度特征值的影响,本文将从尺寸效应度和尺寸效应律两个角度进行定性和定量分析。

2.3 尺寸效应

2.3.1 尺寸效应度

为进一步探究尺寸效应对混凝土抗压强度特征值的影响,本文引入尺寸效应度 γ ,即以最小尺寸 $70\text{ mm} \times 70\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 混凝土试件抗压强度特征值作为参照值,以其他两种尺寸 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 和 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 混凝土试件抗压强度特征值作为分析值进行研究,即如公式(1)~(2)所示。根据表 2 混凝土抗压强度特征值,可得到如表 3 所示不同强度等级混凝土抗压强度尺寸效应度。

$$\gamma_{100} = \frac{f_{cu,70} - f_{cu,100}}{f_{cu,70}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\gamma_{150} = \frac{f_{cu,70} - f_{cu,150}}{f_{cu,70}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, γ_{100} 、 γ_{150} 分别为立方体尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 和 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 混凝土试件的尺寸效应度, $f_{cu,70}$ 、 $f_{cu,100}$ 和 $f_{cu,150}$ 混凝土立方体抗压强度,MPa。

表 3 不同强度等级混凝土立方体抗压强度尺寸效应度

Table 3 Size effect of cubic compressive strength of concrete with different strength grades

工况	C30	C40	C50
$\gamma_{100}/\%$	6.35	7.64	8.65
$\gamma_{150}/\%$	12.88	13.47	14.36

由表 2 和表 3 分析,当混凝土强度等级为 C30 时,其抗压强度从 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 立方体尺寸的 32.15 MPa 降低至 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 立方体尺寸的 28.01 MPa ,降低幅值为 4.14 MPa ,尺寸效应度为 12.88% ;当混凝土强度等级为 C40 时,立方体抗压强度从 43.58 降低至 37.71 ,降低幅值为 5.87 MPa ,尺寸效应度

为 13.47% ;当混凝土强度等级为 C50 时,立方体抗压强度从 53.26 降低至 45.61 ,降低幅值为 7.65 MPa ,尺寸效应度为 14.36% ;由此可知,随着混凝土强度等级的提高,混凝土抗压强度降低幅值逐步提高,受尺寸效应影响到额尺寸效应度也随之提高。

2.3.2 尺寸效应律

在尺寸效应的定量研究过程中,Bazant^[8]根据相关理论提出了相应的尺寸效应律方程,通过本文不同强度等级混凝土试件具体的试验数据,表明立方体边长的尺寸差异对影响普通混凝土的抗压强度尺寸效应度较小,故本文基于 Bazant 所提出的相关方程,提出了如公式(3)所示 3 种强度等级混凝土试件关于尺寸效应律的通用方程。

$$\frac{\sigma}{\sigma_{70}} = a(1 + \frac{b}{D}) \quad (3)$$

式中, σ 为不同尺寸混凝土抗压强度值,单位:MPa; σ_{70} 为 $70\text{ mm} \times 70\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 尺寸混凝土抗压强度值,单位:MPa; D 为混凝土立方体边长,单位:mm; a 和 b 为待定系数。

根据表 2 和公式(3),应用数学软件进行数学回归分析,基于尺寸效应律研究不同强度等级普通混凝土受尺寸效应影响变化关系,如图 3 和公式(4)所示。

$$\frac{\sigma}{\sigma_{70}} = 76.26(1 + \frac{22.03}{D})$$

$$R^2 = 0.98719 \quad (4)$$

根据图 2 和公式(4)分析,3 种不同强度等级普通混凝土抗压强度受尺寸效应具有明显的影响,应用尺寸效应律通用方程来验证混凝土抗压强度尺寸效应具有良好的适用性。

3 机理探讨

混凝土属于多相复合型材料,其主要构成成分有水泥、水、细骨料和粗骨料部分,也可以将其简化为砂浆和粗骨料两个部分,由于其组成特性原因,混凝土中砂浆和粗骨料之间的胶结面属于最为薄弱的环节,由于该薄弱环节部分存在一定的随机性和离散性,最终导致混凝土材料的基本特性,由此可将不同尺寸的混凝土立方体简化为如图 4 所示模型。

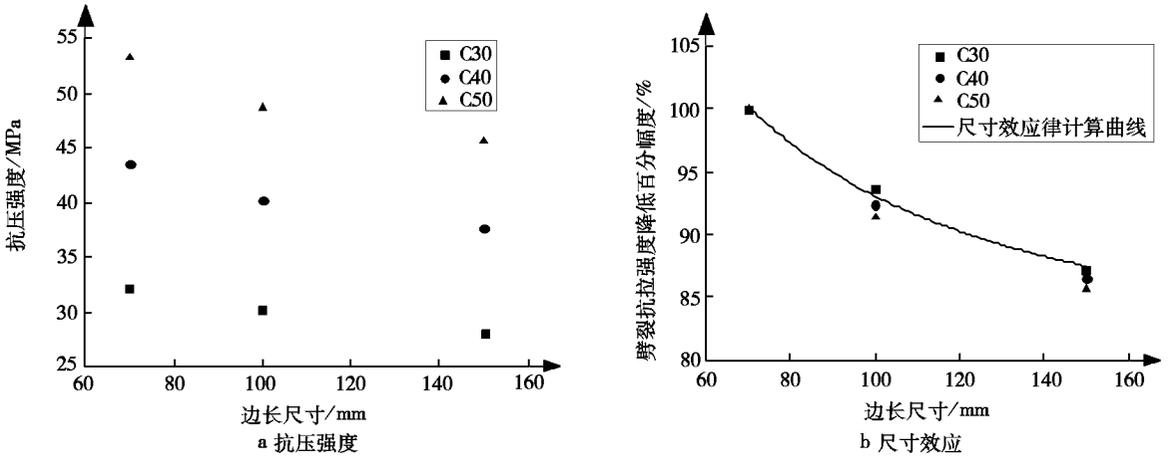


图 3 混凝土尺寸效应对抗压强度影响

Fig. 3 Effect of concrete size on compressive strength

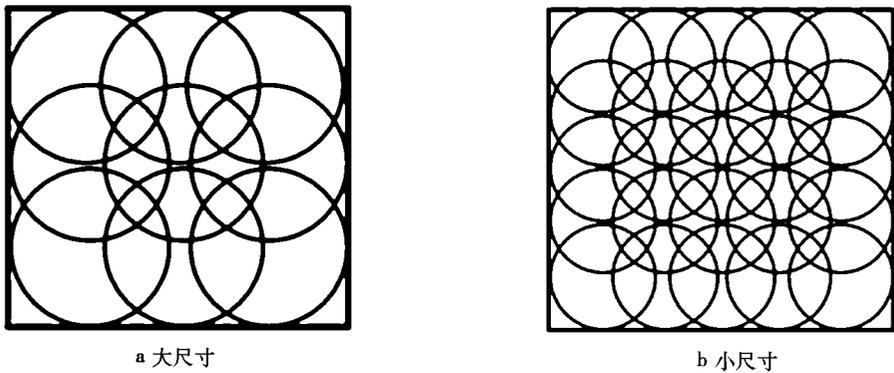


图 4 不同尺寸混凝土立方体模型

Fig. 4 Concrete cube models of different sizes

混凝土尺寸效应的产生导致尺寸越大的试件,其抗压强度越低。根据混凝土组成特性分析,混凝土强度的大小,主要是由混凝土中薄弱环节决定,即混凝土中低强度单元,随着试件尺寸的增大,产生低强度单元的概率越高,随着试件尺寸的减小,产生低强度单元的概率越低。根据图 3 尺寸效应模型分析,最终导致随着混凝土尺寸的增大,混凝土抗压强度逐步降低,抗压强度受尺寸效应具有明显的影响。

4 结论

本文对 3 种不同强度等级和 3 种立方体尺寸混凝土进行单轴受压试验研究,对混凝土抗压受力方式尺寸效应研究,得到以下 3 点结论:

(1)混凝土破坏形态表现出明显的尺寸效

应,随着尺寸的提高,混凝土破坏后的整体性相对较好,非加载面裂缝较为不明显;但不同强度等级混凝土受尺寸效应影响均表现出相同的破坏机理和破坏规律。

(2)相同强度等级混凝土的抗压强度特征值随着立方体尺寸的提高而逐步降低,尺寸效应对强度等级高的混凝土试件工况,其抗压强度降低幅值将逐步提高,但抗压强度降低百分率基本稳定。

(3)基于尺寸效应度和尺寸效应律对不同强度等级混凝土抗压强度尺寸效应进行定量分析,同时基于尺寸效应律提出普通混凝土抗压强度尺寸效应统一方程,所提出的方程具有良好的适用性。

参考文献:

- [1] 周静海,康天蓓,王凤池,等. 废弃纤维再生混凝土劈裂抗拉强度尺寸效应试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(6):1036-1044.
- [2] 倪洪将,余振鹏,谢兴华. 普通混凝土局部受压与偏载力学性能试验研究[J]. 混凝土,2018,12:44-47.
- [3] 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.
- [4] 赵靖芸,杨秋伟,张莹,等. 再生混凝土无腹筋梁抗剪性能尺寸效应试验研究[J]. 混凝土,2018(6):39-42.
- [5] 杜修力,金浏,李冬. 混凝土与混凝土结构尺寸效应述评(II):构件层次[J]. 土木工程学报,2017,50(11):24-44.
- [6] 何渐渐,徐积善. 混凝土拉、压强度尺寸效应的研究[J]. 河海大学学报,1997(4):49-55.
- [7] 周胤呈. 基于尺寸效应的有腹筋钢筋混凝土梁的剪切强度研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2017.
- [8] Bazant Z P. Size effect[J]. International Journal of Solids and Structures,2000,37(4):69-80.

Experimental Study of Size Effect on Compressive Mechanical Properties of Concrete

YE Sheng

(Department of Civil Engineering, Anhui Communications Vocational & Technical College, Hefei Anhui 230051, China)

Abstract: Three cube sizes and strength grades of ordinary concrete are set up. The concrete is subjected to uniaxial compression by hydraulic servo machine. The characteristic values of failure modes and compressive strength of concrete under different loading conditions are obtained through experiments, and the corresponding comparative analysis and mechanism discussion are carried out. The size effect of concrete compressive strength is quantitatively analyzed from the two directions of size effect degree and size effect law, and the unified equation of size effect law is put forward. The following conclusions are drawn that the regularity of failure modes of concrete with different strength grades affected by size effect is basically the same. The integrity of the larger specimens is relatively good after failure, and the performance of the cracks is relatively insignificant. For concrete of the same strength grade, the characteristic value of uniaxial compressive strength of concrete decreases with the increase of cube side length size. For concrete of different strength grades, the reduction amplitude of compressive strength of concrete affected by size effect increases gradually, and the change of reduction percentage is basically stable.

Keywords: Concrete; Uniaxial compression; Strength characteristic value; size effect law

(责任编辑:张英健)