

考虑初始缺陷影响的混凝土受压特性试验研究

史帅帅,张云发,高鲁超,于祥龙
(河海大学力学与材料学院,江苏南京 210098)

摘要:在 WAW-E2000 电液伺服万能试验机上,对掺入 4 种不同含量引气剂的混凝土试件进行单轴压缩试验,分析了混凝土试件的抗压强度、弹性模量、极限抗压应变和损伤特性的变化规律。结果表明:随着掺入引气剂含量的增加,混凝土的抗压强度、弹性模量和极限抗压应变均逐渐减小,而初始损伤的程度随之增加。

关键词:混凝土;初始缺陷;受压;引气剂;试验研究

中图分类号:TU528.1

文献标识码:A

Experiment study on compressive prosperities of concrete under different initial defections

SHI Shuai-shuai, ZHANG Yun-fa, Gao Lu-chao, YU Xiang-long
(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China)

Abstract: Uniaxial compression test is carried out using WAW-E2000 hydraulic servo universal testing machine under the four different air entraining agent content of concrete samples. We analyzed the compressive strength of concrete samples, elastic modulus variation, limit compression strain and damage property. The results showed that: With the incorporation of air entraining agent content increases, the compressive strength of concrete, elastic modulus and ultimate compressive strain decreased gradually, while the extent of the initial damage increases.

Key words: concrete; initial defections; compression; air entraining agent; experiment study

混凝土在浇筑的过程中,由于粗骨料形状的不规则性、质量的不均匀性及水化热等因素的影响,不可避免的存在着空隙、夹杂、空洞及骨料间的软弱界面等原生缺陷,这必然影响了混凝土的静、动力学性能,进而对混凝土结构的灾变破坏过程和安全评估产生很大影响。从损伤的角度来看,这种缺陷是一种损伤,当温度变化或荷载的作用下,这种损伤会不断增加,直到混凝土结构完全失效破坏^[1-2],但目前混凝土结构的设计和研究多是针对成型无损的结构体进行的,很少考虑混凝土初始缺陷的影响。在混凝土的试验方面,邱玲等^[3]研究了包含初始损伤的混凝土的部分力学性能,得到了混凝土的损伤变化规律;邓爱民等^[4]研究了拉伸和压缩损伤的关系;Liners^[5]研究了含微裂纹的混凝土压缩下的力学性能以及对抗拉强度的影响;张云发等^[6]研究了含初始缺陷的混凝土

土对其弯曲性能的影响研究。本文通过对 4 组混凝土试块进行单轴压缩试验,研究了混凝土缺陷对其抗压强度、应变等力学性质影响规律,建立合适的破坏本构模型来准确地模拟混凝土结构的动力损伤和破坏过程,对保证已建和待建混凝土结构的抗震安全及其评估具有重要的意义。

1 试验概况

1.1 试验设备和试验制备

本试验采用河海大学工程力学与结构检测实验室的 WAW-E2000 电液伺服万能试验机。混凝土受压试件的尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm,混凝土的设计标号为 C30,配合比(按重量)如表 1 所示。水泥采用的是南京地区质量合格的普通硅酸盐水泥,其强度等级为 32.5;粗骨料为经过直径

为 20 mm 的筛网筛过的连续粒径的碎石;砂子采用长江地区的天然中砂;采用自来水搅拌,并振捣充分。在温度(20±3)℃和相对湿度 90% 以上的环境下养护 28 d,测得的具有 95% 保证率的抗压强度。

表 1 混凝土配合比参数表

Tab. 1 Table of concrete mix parameters

编号	水灰比	水泥 /kg·m ⁻³	引气剂 /kg·m ⁻³	砂子 /kg·m ⁻³	碎石 /kg·m ⁻³
C1	0.49	367	0	649	1 204
C2	0.49	367	1.2	649	1 204
C3	0.49	367	1.2	2.4	1 204
C4	0.49	367	2.4	3.6	1 204

试件在制作前,分别掺入引气剂的含量为 0%、0.05%、0.1% 和 0.15%,主要是用来区别混凝土中不同程度的缺陷,因为引气剂使混凝土内部产生人为增加的空洞或材料交界的软弱面,建立外加剂含量与材料力学指标变化量的联系,以量化描述混凝土的初始缺陷和力学指标。把压缩

试件分为四组,每组包括 8 个试件,一组为纯混凝土(引气剂量为 0),编号为 C1-n(n=1,2,⋯,8),另外三组分别掺入质量比为 0.05%、0.10% 和 0.15% 的引气剂,编号分别为 C2-n、C3-n 和 C4-n。一组试件一次配料,按照规范规定的方法将集料放入搅拌机搅拌均匀,分别浇入水平放置、尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 立方体钢模中,并在振动台上振动密实、成型。

1.2 试验过程

本试验采用程序控制,第一步负荷加载模式 100 N·s⁻¹ 加载到 10 kN;第二步位移加载模式,采用 0.045 mm·min⁻¹ 的加载速率,应变率为 0.5×10⁻⁵。根据相关文献,此应变率下的试验可视为准静态加载试验。实验数据的采集频率为 10 Hz,即每秒中采集十个数据点。

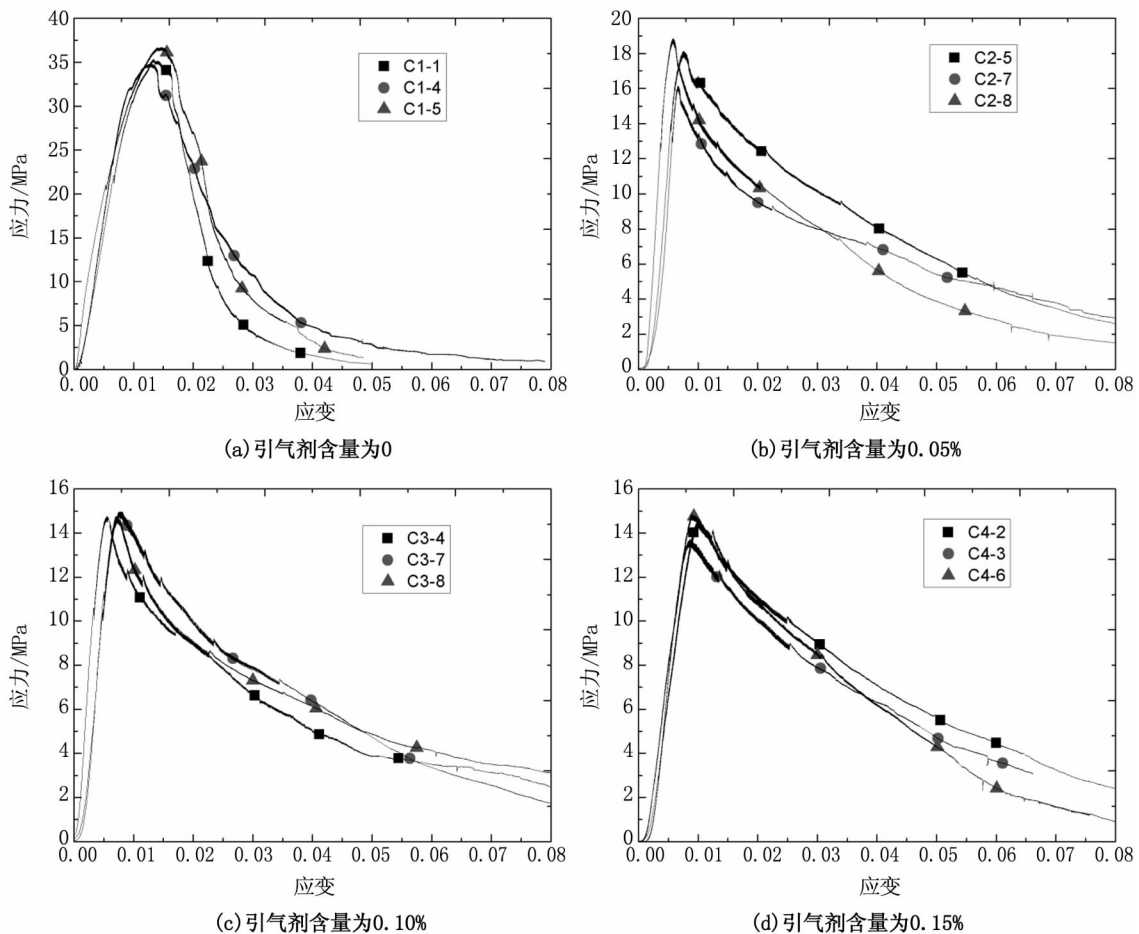


图1 混凝土应力-应变全曲线

Fig.1 Concrete stress-strain curve

2 试验结果与分析

2.1 引气剂含量对混凝土应力应变全曲线的影响

图1分别给出了引气剂含量为0%、0.05%、0.1%和0.15%时,混凝土试件单轴压缩条件下的应力-应变全曲线。从图1可以看出:未加引气剂的混凝土试块的全曲线,无论是在曲线的上升段还是下降段,都与以往的经典试验和理论吻合的较好;而引气剂含量为0.05%、0.1%和0.15%时的混凝土试块的应力-应变曲线与未加引气剂的试块有着较大的区别,主要是全曲线的下降段变的平缓,而引气剂含量为0.05%、0.1%和0.15%的三组混凝土试块的应力-应变曲线之间并没有很大的区别,全曲线都变的比较平缓,同时也说明引气剂的掺入对混凝土的力学性能产生了明显的影响。

2.2 引气剂含量对混凝土相关力学性能的影响

混凝土的力学性能和诸多参数有关,如强度、弹性模量、峰值应变等,引气剂的引入会使得这些参数不同于一般混凝土。试验中,相同含量引气剂的混凝土试件一共制作了八个,按照规范规定的抗压强度的取值方法除掉这些不合理的数据外,从每组中选出4个有效试件。对试验结果进行分析和整理,得到不同缺陷含量混凝土相关力学性能参数如表2所示。

2.2.1 不同引气剂含量对混凝土抗压强度的影响

从表2中可以看出,当引气剂含量从0%到0.15%,导致了混凝土内部缺陷的增多,其中混凝土抗压强度的平均值有所降低。相对于未加引气剂的混凝土试样,加入了0.05%、0.10%和0.15%引气剂含量后的平均抗压强度分别降低了49.18%、57.42%和59.20%。因此,可以看出引气剂的引入对混凝土产生了初始的损伤,并且当引气剂含量为0.15%时,产生的初始损伤最大。同时,也可以从表2和图2中看出,当引气剂含量增大到0.10%、0.15%时,引气剂的掺量大小对混凝土的强度影响变的很小,将来可以在此试验的基础上,降低引气剂掺量如降到0.01%或0.005%时,再进一步的研究引气剂对抗压强度的影响。

表2 混凝土力学性能参数表

Tab.2 Table of mechanical properties of concrete parameters

引气剂含量	编号	强度 /MPa	弹性模量 /GPa	峰值应变 / $\mu\epsilon$
0	C1-1	35.9	31.64	1 664
	C1-2	35.08	36.34	1 606
	C1-4	35.6	32.61	1 733
	C1-5	36.65	35.45	1 753
	平均值	35.56	34.01	1 689
0.05%	C2-1	19.2	28.12	1 052
	C2-5	17.98	29.3	1 037
	C2-7	16.24	26.5	1 024
	C2-8	18.87	30.78	959
	平均值	18.07	28.68	1 018
0.10%	C3-1	15.4	23.57	1 012
	C3-4	14.87	31.62	908
	C3-7	15.19	22.93	953
	C3-8	15.08	24.63	967
	平均值	15.14	25.69	960
0.15%	C4-1	14.65	25.09	1 018
	C4-2	14.12	20.43	962
	C4-3	13.69	23.13	865
	C4-6	15.57	24.49	987
	平均值	14.51	23.29	958

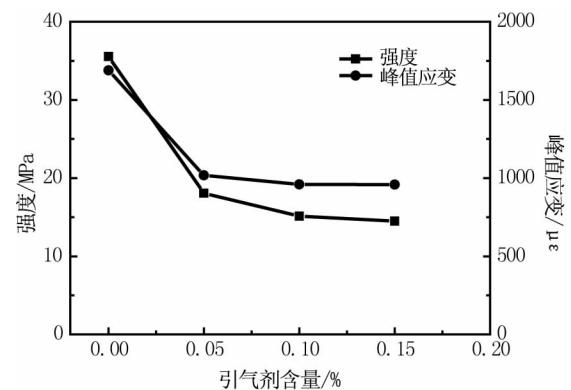


图2 引气剂含量与抗压强度和峰值应变的关系图

Fig.2 Quantity air-entraining agent , stress and peak strain of the diagram

2.2.2 不同引气剂含量对混凝土峰值应变的影响

从邱玲等^[5]的研究中可以得出,当引气剂含量分别为0%、0.01%、0.02%、0.08%、0.16%时,其峰值应变也逐渐随之增大。而从表2和图2可以得出,当引气剂含量从0%到0.15%时,其峰值应变逐渐减小,且趋于一个极限值。这与前人研究有所区别,由于混凝土的离散性、养护条件和实验条件的不同,才会出现这种情况,后续还会在继续类似试验对混凝土峰值应变的研究。

2.2.3 不同引气剂含量对混凝土损伤特性的影响

混凝土试件受压时的应力-应变状态如果需要从损伤的角度来描述,第一步就是要选择合适的损伤变量。Rabotnov 首先提出了损伤表达的公式:

$$D = 1 - \psi = 1 - \frac{B}{A} \quad (1)$$

可以看出, $D = 0$ 对应于无损状态; $0 < D < 1$ 对应于不同程度的损伤状态;而 $D = 1$ 对应于完全损伤状态,即破坏状态。 A 为无损时混凝土试块的横截面面积, B 为实际的承载面积或有效面积。但实际试验中根据现有的实验条件无法测量到混凝土试件的有效面积,故根据应变等价原理,可以求得用弹性模量来描述混凝土损伤的表达式:

$$D_0 = \frac{E_0 - E_c}{E_0} \quad (2)$$

式中: D_0 为初始损伤; E_0 为混凝土的初始弹性模量; E_c 为理想的无损弹性模量,通过不同含量引气剂得到的初始弹性模量拟合后得到。

把表 2 中 C2、C3、C4 组混凝土的平均弹性模量和引气剂含量的关系进行如下曲线拟合:

$$y = ae^{-bx} + c \quad (3)$$

式中, y 为弹性模量,单位为 GPa; x 为引气剂含量,其中把 C2 组中含量 0.05% 看作单位一,将试块的平均弹性模量及引气剂含量带入上式得:

$$a = 18.88 \quad b = 0.22 \quad c = 13.53 \quad (4)$$

可得方程:

$$y = 18.88e^{-0.22x} + 13.53 \quad (5)$$

将在 $x = 0$, 可得理想的无损混凝土的弹性模量:

$$E_0 = 18.88 + 13.53 = 32.4 \text{ GPa} \quad (6)$$

由表 2 可知, C1 组混凝土的平均初始弹性模量为 34.01 GPa, 由(2)式可求得未加引气剂的混凝土试件的初始损伤:

$$D_0 = 1 - 32.41/34.01 = 0.047 \quad (7)$$

同样的方法可以得到掺入引气剂含量为 0.05%、0.1% 和 0.15% 的混凝土试件的初始损伤值分别为 0.157、0.245 和 0.315。由此可得:引气剂含量为 0.05%、0.1% 和 0.15% 的混凝土初始损伤程度比未加引气剂的分别增加了 234%、421%、570%;当引气剂含量为 0.05% 时,混凝土的损伤程度比未加时增大了 234%,说明此次试验的最小引气剂含量还是偏大,后期的试验要降低引气剂含量,如

降到 0.01% 或 0.005% 时,再进行类似试验。

3 结论

1) 当引气剂含量分别为 0%、0.05%、0.10%、0.15% 时,初始损伤的程度也随引气剂含量的增大而增大,加引气剂的混凝土应力应变全曲线在下降段比未加引气剂试件的曲线更平缓,而掺入引气剂含量为 0.05%、0.10%、0.15% 的试件平缓程度区别不大。

2) 当引气剂含量从 0% 到 0.15%,混凝土的抗压强度逐渐减小,并趋向一个极限值,且减小的速率明显减少,说明引气剂含量到达 0.10%、0.15% 后,对抗压强度的影响变的很弱。

3) 当引气剂含量从 0% 到 0.15%,混凝土的峰值应变逐渐减小且趋向于一个极限值,其弹性模量也逐渐减少,减少的幅度也在减少。

4) 用数值分析的方法把当引气剂含量为 0%、0.05%、0.10%、0.15% 时的混凝土弹性模量进行拟合,可以得到对应引气剂含量下混凝土试样的初始损伤,把混凝土损伤的程度进行了量化,为建立含初始缺陷混凝土的本构关系提供依据,也为后期的数值模拟奠定了基础。

参考文献:

- [1] 徐道远,王向东,朱为玄,等. 混凝土坝的损伤及损伤仿真计算[J]. 河海大学学报:自然科学版,2002(7):14-17.
- [2] 金玉,王向东,徐道远,等. 基于无损弹塑性模型的混凝土损伤定量分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2003(11):659-661.
- [3] 邱玲,徐道远,朱为玄,等. 混凝土压缩时初始损伤及损伤演变的试验研究[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2001,24(6):1061-1065.
- [4] 邓爱民,徐道远,符晓陵,等. 混凝土单轴拉伸损伤试验研究[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2003,26(1):77-80.
- [5] LINERS A, Delibes. Microcracking of concrete under compression and its influence on tensile strength[J]. Materials and Structures, 1987, 20(2):111-116.
- [6] 张云发,章青,袁锋华,等. 混凝土初始缺陷对其弯曲性能的影响研究[J]. 混凝土,2015(1):41-44.

(特约编辑 李军)