

文章编号:1007-9629(2011)06-0000-00

硫酸钠侵蚀混凝土柱动态抗压特性试验研究

邹笃建, 刘铁军, 滕 军

(哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要: 通过混凝土柱的轴心动态抗压试验,在 $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 应变速率范围内对比研究了硫酸钠侵蚀与未侵蚀混凝土本构关系的应变速率效应,分析了该效应对硫酸钠侵蚀与未侵蚀混凝土的抗压强度、弹性模量、峰值应变和吸能能力的影响.结果表明:随着应变速率的增加,混凝土的抗压强度也随之增加,受硫酸钠侵蚀混凝土抗压强度的应变速率敏感性较高,弹性模量的应变速率敏感性较低,但是峰值应变和混凝土的吸能能力随着应变速率的增加显著增加.另外,对受硫酸钠侵蚀与未侵蚀混凝土试件在不同应变速率下的破坏现象也进行了初步的讨论.

关键词: 素混凝土; 硫酸钠侵蚀; 应变速率效应; 应力-应变关系; 破坏现象

中图分类号: TU528.33

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2011.06.000

Research on Dynamic Compressive Behavior of Plain Concrete Columns Suffering from Sulfate Attack

ZOU Du-jian, LIU Tie-jun, TENG Jun

(Shenzhen Graduate School of Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Axial compressive experiments for concrete specimens with different strain rates($10^{-5} - 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) were carried out for comparative study on the dynamic strength and deformation characteristics of concrete. The compressive strength, peak strain, elastic modulus and energy absorption capacity at different strain rates were discussed in detail. The experimental results show that, with increasing strain rate, the compressive strength, peak strain and energy absorption capacity were increased while elastic modulus had no obvious change. Further, the rate sensitivity of compressive strength of sulfate attack concrete was more sensitive than control concrete. In addition, the failure phenomenon of specimens was shown and discussed.

Key words: plain concrete column; sulfate deterioration; strain rate effect; stress-strain relationship; damage phenomenon

混凝土是典型的应变速率敏感材料,在不同应变速率下,其强度、延性和破坏模式明显改变^[1-2].土木工程中的各种混凝土结构除了承受静荷载外,还会遭遇到动荷载的作用.欧洲混凝土协会在总结大量试验成果的基础上,规定了一个准静态应变速率,推荐了不同动态应变速率下混凝土材料抗压强度、

峰值应变和弹性模量相对准静态应变速率的变化系数^[3].近年来国内外学者开始着重研究荷载路径、温度、水含量以及侧压对混凝土材料应变速率效应的影响^[4-6].另外,服役中的混凝土结构在遭受不可避免的动荷载作用时,会产生或多或少的耐久性破坏.混凝土材料力学性能的退化是经历化学作用、物理

收稿日期:2010-07-22; 修订日期:2010-09-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50878070),国家自然科学基金重点资助项目(50938001),深圳市科技计划基础研究项目(JC201005260163A),广东省自然科学基金资助项目(9151064101000066)

第一作者:邹笃建(1984—),男,山东莱芜人,哈尔滨工业大学博士生. E-mail:zoudujian@163.com

通信作者:刘铁军(1976—),男,内蒙古包头人,哈尔滨工业大学副教授,博士生导师,博士. E-mail:liutiejun@hit.edu.cn

破坏和环境侵蚀的必然结果. 在众多常见的环境侵蚀中,硫酸钠侵蚀以膨胀破坏和水泥浆体的化学组成劣化为显著特点^[7-12]. 为了更合理模拟混凝土材料的真实工作状态,在试验研究中必须同时考虑耐久性破坏和应变速率效应. 为了更好评估混凝土结构全寿命过程中的安全性和适用性,也必须考虑由于材料性能劣化和应变速率效应引起的结构反应的时间相关性. 本文通过混凝土柱的轴心动态抗压试验,在 $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 应变速率范围内对比研究了硫酸钠侵蚀与未侵蚀混凝土的抗压强度和变形特性. 另外,对受硫酸钠侵蚀与未侵蚀混凝土试件在不同应变速率下的破坏现象与机理也进行了初步的讨论.

1 试验

1.1 试验设备及试件设计

本试验设备采用 Wawtest 液压试验机(见图 1),其最大负荷为 5 000 kN. 在试验过程中需要采集时间、试验力、位移等数据,试验力通过短柱顶端的力传感器测出,位移通过自制的引伸计测出,测量标距为 300 mm. 试件为 $\phi 150 \times 450 \text{ mm}$ 柱体. 混凝土的配合比为 $m(\text{水泥}):m(\text{水}):m(\text{石子}):m(\text{砂子}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{减水剂})=1:0.570:3.760:2.640:0.210:0.027$,水泥采用广东梅州塔牌 P·O42.5R 水泥,骨料为碎石,最大粒径为 25 mm,砂子为河砂. 试件以钢管为模具浇筑成型,1 d 后拆模,在养护室恒温恒湿条件下养护 28 d. 混凝土抗压强度测试试件为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 立方体.

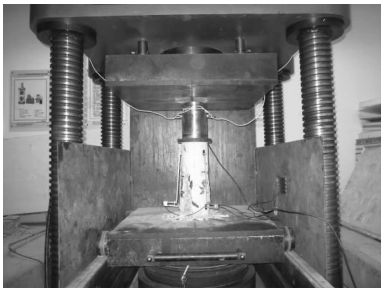


图 1 混凝土柱的单轴抗压试验

Fig. 1 Axial compressive experiment of concrete columns

1.2 加速侵蚀试验

加速侵蚀试验采用苏州晨光试验设备有限公司制作的盐水喷雾试验箱. 针对南方沿海地区气候环境特点(夏天炎热高温,湿度大,阳光照射强烈),加速侵蚀试验箱中的试验环境如表 1 所示,盐雾侵蚀液为 10%(质量分数)硫酸钠溶液. 取半数试件放入试验箱进行加速侵蚀试验,另外半数试件在室温环

境中养护. 混凝土立方体抗压强度如表 2 所示.

表 1 加速侵蚀试验中的环境参数

Table 1 Simulation parameters of accelerated deterioration test		
Environment	Simulation Parameters	Deterioration time
Combined wetting and drying cycles and sulfate attack	(1) Sulphate solution of 10% mass concentration, $(35 \pm 1)^\circ\text{C}$, humidity = 100%, duration is three hours;	120 d
	(2) 45°C , humidity = 0%, hot-air drying, duration is three hours.	

表 2 混凝土的抗压强度

Table 2 Compressive strength of concrete materials				
Condition	Compressive strength/MPa			Average values/MPa
Standard curing	36.89	40.22	39.19	38.77
Deterioration after 120 d	33.67	34.89	36.24	34.93

1.3 试验过程

试验主要研究不同应变速率对混凝土柱单轴抗压强度的影响,综合考虑地震荷载作用下的应变速率范围以及试验设备的条件,取应变速率为 10^{-5} , 10^{-4} , 10^{-3} s^{-1} ,准静态应变速率为 10^{-5} s^{-1} . 整个试验过程以位移控制加载,位移加载速率分别为 0.01, 0.05, 0.50 mm/s,轴向应变速率的大小由式(1)计算. 通过式(1)的试算可知,在整个试验过程中,混凝土试件应变速率的稳定性良好. 另外,可由式(2)来计算试验中惯性效应对试验结果的影响程度.

$$\dot{\epsilon} = \frac{v/L}{1 + (\partial\sigma/\partial\epsilon)(A/KL)}$$

1

$$F_I = \rho A (L^2/3) \ddot{\epsilon}(t)$$

2

式中: $\dot{\epsilon}$ 为应变速率(s^{-1}); v 为试验机加载速率(mm/s); L 为试件长度(mm); A 为试件截面积(mm^2); $\partial\sigma/\partial\epsilon$ 为材料在某应力状态下的切线模量(Pa); K 为试验机刚度(N/mm); F_I 为等效惯性力(N); ρ 为试件材料的密度(kg/m^3); $\ddot{\epsilon}(t)$ 为应变对时间的两阶导数(s^{-2}).

将未装传感器的混凝土试件放在液压试验机台面上,以准静态应变速率进行 3~5 次预压,预压荷载为试件静态抗压强度的 30%. 在预压过程中,同时观测试件两端是否与试验台紧密接触,如果接触不好,可以对其端部进一步打磨,以实现轴心均匀受压. 安装好各类传感器,然后由计算机程序控制加载,直至试件破坏.

2 试验结果及分析

由于混凝土动力试验受到试验设备、试验技术

及试件离散性等多方面的影响,试验的成功率较静力试验偏低. 在下面的结果分析中,应力-应变曲线取自试验效果比较好、测量数据比较完整的试件,它们不能完全反映整个试验结果,因此在具体分析中,所有试验结果取平均值.

2.1 应力-应变曲线

不同应变速率下未侵蚀、硫酸钠侵蚀混凝土的

应力-应变曲线如图 2 所示. 由图 2 可见,混凝土试件在单调单轴压力作用下,当应力水平小于单轴抗压强度的 30% 时,应力-应变曲线基本呈线性,当应力水平达到单轴抗压强度的 80%~90% 时,非线性明显. 随着应变速率水平的增加,混凝土试件的抗压强度和峰值应变随之增加,但是,其弹性模量变化不大.

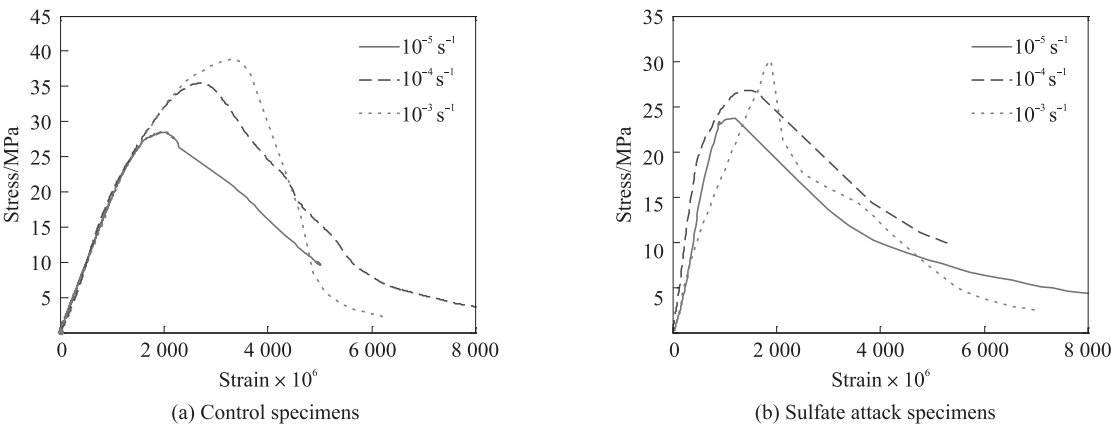


图 2 不同应变速率下未侵蚀、硫酸钠侵蚀混凝土的应力-应变曲线
Fig. 2 σ - ϵ curves for specimens at different strain rates

2.2 应变速率效应

不同应变速率下混凝土试件的平均抗压强度、峰值应变、弹性模量和吸能能力如表 3 所示. 随着应变速率的增加,混凝土试件的抗压强度、峰值应变明显增加,而且硫酸钠侵蚀对峰值应变的影响明显高于对抗压强度的影响. 许多学者用抗压强度的损失来评估硫酸钠侵蚀混凝土的程度^[13-14]. 值得强调的是,硫酸钠侵蚀混凝土仍然是一种应变速率敏感材料,而且相对未侵蚀混凝土来讲,其抗压强度的应变速率敏感性有所增强. 对于受硫酸钠侵蚀程度相同的混凝土,较高应变速率下的抗压强度损失小于较

低应变速率下的抗压强度损失. 另外,峰值应变的明显降低说明由于硫酸钠侵蚀而引起的混凝土内部的膨胀破坏和水泥浆体的化学组成劣化对其变形能力产生了巨大的影响.

一般认为硫酸钠侵蚀混凝土的弹性模量较未腐蚀混凝土的弹性模量先增长而后降低. 由表 3 可见,在不同应变速率下,未侵蚀混凝土和硫酸钠侵蚀混凝土的弹性模量变化不明显. 在混凝土试件被硫酸钠侵蚀 120 d 后,其平均弹性模量降低约 6.6%. 另外,随着应变速率的增加,混凝土的吸能能力有了大幅度的提高.

表 3 不同应变速率下的抗压强度、峰值应变、弹性模量和吸能能力

	Strain rate/ s^{-1}					
	10^{-5}		10^{-4}		10^{-3}	
	Control	With sulfate attack	Control	With sulfate attack	Control	With sulfate attack
Compressive strength/MPa	31.68	23.77	34.04	26.68	37.86	30.18
Peak strain $\times 10^6$	2 485	1 405	2 708	1 692	3 127	1 868
Elastic modulus/GPa	22.53	21.53	23.60	21.58	23.14	22.00
Energy absorption capacity/kPa	47.50	17.75	57.86	27.14	75.76	31.85

将受硫酸钠侵蚀和未侵蚀混凝土的动态抗压强度、峰值应变进行拟合,得:

$$f_{ud}/f_{us} = 1 + 0.1292lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s) \tag{3}$$

$$f_{sd}/f_{ss} = 1 + 0.1606lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s) \tag{4}$$

$$\epsilon_{ud}/\epsilon_{us} = 1 + 0.1482lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s) \tag{5}$$

$$\epsilon_{sd}/\epsilon_{ss} = 1 + 0.2076lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s) \tag{6}$$

式中: f_{ud} 为当前应变速率下未侵蚀混凝土的抗压强度(MPa); f_{us} 为准静态应变速率下未侵蚀混凝土的抗压强度(MPa); f_{sd} 为当前应变速率下硫酸钠侵蚀混凝土的抗压强度(MPa); f_{ss} 为准静态应变速率下硫酸钠侵蚀混凝土的抗压强度(MPa); ϵ_{ud} 为当前应变速率下未侵蚀混凝土的峰值应变; ϵ_{us} 为准静态应变速率下未侵蚀混凝土的峰值应变; ϵ_{sd} 为当前应变速率下硫酸钠侵蚀混凝土的峰值应变; ϵ_{ss} 为准静态应变速率下硫酸钠侵蚀混凝土的峰值应变; $\dot{\epsilon}_d$ 为当前应变速率; $\dot{\epsilon}_s$ 为准静态应变速率。

2.3 破坏现象与机理分析

不同应变速率下混凝土试件的破坏现象如图3所示。由图3可见,单调单轴应力作用下混凝土柱试件主要以贯通斜裂缝的形式破坏,有时也会出现平行裂缝。对比未侵蚀混凝土试件和硫酸钠侵蚀混凝土试件的破坏现象可以发现,硫酸钠侵蚀混凝土试件破坏过程中出现平行裂缝的频率比较大,而且试件破坏后,其可视宏观裂缝的条数也比较多。这是由于混凝土是由粗骨料、水泥基材以及骨料与水泥基材之间的过渡区组成的脆性材料,由于水分失去和温度应力等原因,在承受荷载前其内部就已存在大量微裂缝,承受荷载时,这些微裂缝必然有1条或数条较大的裂缝优先扩展形成主裂缝。在准静态条件下,主裂缝有足够的时间形成和扩展,最终形成贯穿裂缝。在高应变速率加载条件下,主裂缝来不及扩展,冲击能量被试件中的微裂缝和弱界面吸收,导致大量微裂缝进一步扩展,使试件破坏成小碎块,表现出不同于静态加载下的破坏模式。混凝土抗压强度的增加主要是由于随着应变速率的增加,混凝土在破坏时其砂浆基体内部微裂缝来不及充分扩展,导致骨料破坏,而且应变速率越高,骨料破坏就越多,表现出来的抗压强度也就越大。这与试验现象相吻合:随着应变速率的增加,试件断裂面上破坏的骨料明显增多。

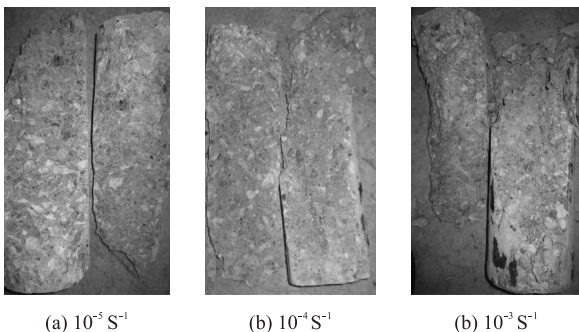


图3 不同应变速率下混凝土试件的破坏形态

Fig. 3 Fracture surface of concrete specimens at different strain rates

3 结论

(1)随着应变速率的增加,混凝土的抗压强度、峰值应变和能量吸收能力保持增加,弹性模量变化不明显。受硫酸钠侵蚀120 d的混凝土柱试件,其抗压强度、峰值应变、弹性模量和吸能能力出现了不同程度的降低。

(2)混凝土的应变速率效应来自于其多相组成,硫酸钠侵蚀使其水化产物劣化,导致膨胀破坏,均匀性变差。与未侵蚀混凝土相比,侵蚀后的抗压强度应变速率敏感性较高。

(3)硫酸钠侵蚀混凝土试件破坏过程中出现平行裂缝的次数比较多,而且试件破坏后,可视宏观裂缝数量也增多。

(4)有关侵蚀对混凝土的动态力学性能影响还有待于今后进一步研究。

参考文献:

- [1] MALVAR L J, ROSS C A. Review of strain rate effects for concrete in tension[J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(6): 735-739.
- [2] 林皋, 陈健云. 混凝土大坝的抗震安全评价[J]. 水利学报, 2001, 32(2): 8-15.
LIN Gao, CHEN Jian-yun. Seismic safety evaluation of large concrete dams[J]. Shuili Xuebao, 2001, 32(2): 8-15. (in Chinese)
- [3] CEB-FIP—1990 Model code[S].
- [4] YAN Dong-ming, LIN Gao. Dynamic properties of concrete in direct tension[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(7): 1371-1378.
- [5] 闫东明, 林皋. 不同初始静态荷载下混凝土动态抗压特性试验研究[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 360-364.
YAN Dongming, LIN Gao. Study on dynamic compressive properties of concrete with different loading paths[J]. Shuili Xuebao, 2006(3): 360-364. (in Chinese)
- [6] FORQUIN P, SAFA K, GARY G. Influence of free water on the quasi-static and dynamic strength of concrete in confined compression tests[J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(2): 321-333.
- [7] BONAKDAR A, MOBASHER B. Multi-parameter study of external sulfate attack in blended cement materials[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(1): 61-70.
- [8] NEVILLE A. The confused world of sulfate attack on concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(8): 1275-1296.
- [9] TIAN B, COHEN M D. Expansion of alite paste caused by gypsum formation during sulfate attack[J]. J Mater Civ Eng, 2000, 12(1): 24-25.
- [10] MATHER B. Discussion of “the process of sulfate attack on cement mortars” by Shen Yang, Xu Zhongzi, and Tang Ming-

shu[J]. Advanced Cement Based Materterials,1997,5(3-4): 109-111.

[11] SANTHANAM M,COHEN M D,OLCK J. Sulfate attack re- search-whither now? [J]. Cement and Concrete Research, 2001,31(6):845-851.

[12] RASHEEDUZZAFAR, AL-AMOUDI O S B, ABDULJAU- WAD S N, et al. Magnesium-sodium sulfate attack in plain and blended cements[J]. ASCE J Mater Civ Eng,1994,6(2): 201-222.

[13] BROWN P W. An evaluation of the sulfate resistance of ce- ments in a controlled environment[J]. Cement and Concrete Research,1981,11(5-6):719-727.

[14] AL-AMOUDI O S B, MASLEHUDDIN M, SAADI M M. Effect of magnesium sulfate and sodium sulfate on the dura- bility performance of plain and blended cements[J]. ACI Ma- terials Journal,1952,92(1):15-24.