硫酸盐侵蚀与干湿循环下混凝土本构关系研究

姜 磊¹,牛荻涛²

(1. 安阳师范学院 建筑工程学院,河南 安阳 455000;
 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055)

摘要:为了研究硫酸盐环境下混凝土单轴受压应力-应变关系,对质量分数为 10%的 Na₂SO₄, 10%的 MgSO₄ 溶液中干湿循环作用下的混凝土进行单轴受压试验,分析了硫酸盐溶液种类对 混凝土峰值应力、峰值应变、弹性模量及应力-应变全曲线的影响,并对损伤层混凝土的力学性能 进行分析.结果表明:混凝土应力-应变曲线随侵蚀时间增加呈现扁平,整体右移,硫酸镁溶液中 侵蚀 300 d 后损伤层应力-应变曲线上升段轻微上扬,并出现下凹现象.峰值应力在侵蚀前期下 降缓慢,在侵蚀 240 d 后快速下降;弹性模量呈现先增大,后降低趋势;峰值应变在侵蚀 240 d 后 快速增加,硫酸镁溶液中峰值应变增长较快.通过回归分析,建立了硫酸盐侵蚀与干湿循环作用 下混凝土单轴受压应力-应变全曲线方程,并得到了损伤层混凝土应力-应变方程的确定方法. 关键词:混凝土;硫酸盐侵蚀;干湿循环;单轴受压;应力应变曲线 中图分类号:TU 528 文献标志码:A 文章编号:1000-1964(2017)01-0066-08 DOI:10.13247/j.cnki.jcumt.000627 Study of constitutive relation of concrete under

sulfate attack and drying-wetting cycles

JIANG Lei 1 , NIU Ditao 2

School of Civil Engineering and Architecture, Anyang Normal University, Anyang, Henan 455000, China;
 School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: In order to study the stress-strain relationship of concrete under sulfate environment, the uniaxial compression experiments of concrete subjected to drying-wetting cycles in the 10% Na₂SO₄ and 10% MgSO₄ solution (mass fraction) were carried out. The effects of sulfate solution types on the peak stress, peak strain, elastic modulus and stress-strain curve of concrete were investigated. Furthermore, the mechanical property of the damage layer of concrete was analyzed. The results show that the stress-strain curve is flat and then moves to the right with the increase of corrosion time. The rising step of stress-strain curve rises slightly, and the curve is concave when concrete is exposed to the MgSO₄ solution after 300 d. The peak stress decreases slowly in the early stage of corrosion time, and then decreases rapidly after 240 d. There is an initial increase in the elastic modulus of concrete, and then follows by a steady drop. The peak strain shows a rapid increase trend after 240 d, and the peak strain increases faster when concrete exposed to MgSO₄ solution. Through regression analysis, the uniaxial compressive stress-strain curve equation under sulfate solution and drying-wetting cycles was proposed to fit the test results. Moreover, the stress-strain curve equation of the damage layer of concrete was also obtained.

基金项目:国家自然科学基金项目(51278403);教育部创新团队发展计划(IRT13089)

通信作者:牛荻涛(1964-),男,陕西省华县人,教授,博士生导师,工学博士,从事混凝土结构耐久性及寿命预测方面的研究. E-mail: niuditao@163.com Tel: 029-82202951

收稿日期:2015-11-07

Key words: concrete; sulfate attack; drying-wetting cycles; uniaxial compression; stress-strain curve

我国地域宽广,硫酸盐分布广泛,在沿海地区 和西部盐湖地区及其周边土壤、地下水中含有大量 硫酸盐^[1].硫酸盐环境中的侵蚀性离子进入混凝土 内部,与水泥石中一些组分发生化学反应,生成膨 胀性产物,并分解水泥石中的重要组分,造成混凝 土开裂、剥落及强度下降,由表及里形成损伤层,最 终导致混凝土破坏.硫酸盐侵蚀是影响混凝土耐久 性且造成混凝土老化病害的重要因素之一.硫酸盐 环境中处于水位变动区、浪溅区以及潮汐区等部分 的混凝土结构物,不但受到硫酸盐侵蚀,还遭受干 湿循环的加速破坏作用,混凝土劣化更严重^[2-4].

混凝土单轴受压应力-应变关系,能反映混凝 土各个受力阶段的变形特点和破坏过程,包含着重 要的力学性能指标,是最基本的本构关系,也是研 究混凝土结构承载力和变形的主要依据.硫酸盐侵 蚀作用下的混凝土强度随侵蚀劣化程度改变,并且 其密实程度和表面状态均产生改变,因此必然引起 混凝土单轴受压状态下的应力─应变关系发生变 化.因此针对硫酸盐侵蚀作用下混凝土应力-应变 关系具有重要的研究意义.国内外学者对混凝土遭 受硫酸盐侵蚀后的单轴受压应力-应变关系开展了 一些研究,文献[5]提出了硫酸钠溶液侵蚀后混凝 土的应力-应变关系模型,认为侵蚀介质不改变混 凝土应力-应变关系的基本函数形式;文献[6]通过 实验室加速腐蚀实验,研究了混凝土在不同硫酸盐 侵蚀时期的应力-应变全曲线;文献[7]基于混凝土 干湿循环试验和混凝土细观力学,研究了海水侵蚀 作用对混凝土应力-应变关系的影响;文献「8]采用 CT 技术在细观层面模拟了受硫酸钠溶液侵蚀后 混凝土的应力-应变曲线;文献「9]研究了不同硫酸 钠溶液浓度对粉煤灰轻骨料混凝土应力一应变曲线 的影响;文献[10]对硫酸盐侵蚀作用下不同水灰比 水泥砂浆的单轴压缩应力应变过程进行了研究.

当混凝土遭受冻害、火灾或化学物质侵蚀时, 外层混凝土会产生不同程度的损伤,出现微裂缝并 导致疏松从而形成一定厚度的损伤层,影响混凝土 结构的承载力和耐久性.近年来,随着超声波无损 检测技术的发展,混凝土损伤层研究得到广泛关 注.国内外学者通过对混凝土材料在硫酸盐侵蚀作 用下的损伤层研究表明,损伤层厚度可以作为评价 混凝土损伤情况的有效指标^[11-14].随着侵蚀时间增 加,受侵蚀混凝土内部缺陷不断扩大,损伤层厚度 逐渐增加,损伤层混凝土不断劣化,在一定程度上 影响混凝土结构承载力.因此,研究损伤层的力学 性能变化对分析侵蚀环境中混凝土结构承载力具 有重要意义.

目前,关于硫酸盐侵蚀与干湿循环作用下的混 凝土本构关系相关研究还不多,尤其是硫酸盐侵蚀 环境中损伤层混凝土本构关系的相关研究鲜有报 道.另外,大多学者采用升温干燥来进行干湿循环, 虽能加速试验,但难与实际环境相符,且高温烘干 会对混凝土中侵蚀产物成分产生影响,从而改变混 凝土损伤劣化机理.本文采用室温自然浸泡和自然 晾干来模拟干湿循环,通过开展硫酸盐侵蚀环境下 混凝土单轴受压本构关系试验,对干湿循环作用下 不同侵蚀时期混凝土的单轴受压性能及其应力-应 变曲线变化规律进行研究,并进一步对损伤层混凝 土的力学性能进行分析,为硫酸盐环境中受侵蚀混 凝土结构计算分析提供理论基础.

1 试验概况

1.1 原材料和配合比

水泥采用陕西秦岭水泥厂 P.O42.5R 水泥;粉 煤灰为渭河电厂 II 级粉煤灰;细骨料为霸河中砂, 细度模数 2.69;粗骨料采用泾阳口镇石灰岩质锤 破碎石,粒径 5~16 mm;减水剂采用西安市红旗 外加剂厂 GJ-1 型高效减水剂;拌合水为普通自来 水,符合国家标准.水泥和粉煤灰的化学成分见表 1.混凝土配合比见表 2.

表 1 原材料化学成分 Table 1 Chemical composition of OPC and fly ash

						$w_{ m B}/\%$
材料	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Fe_2O_3
水泥	21.66	5.13	64.37	1.06	2.03	5.25
粉煤灰	49.02	31.56	4.88	0.83	1.20	6.97

 $: w_B$ 为物质 B 的质量分数.

表 2 混凝土配合比

Table 2	Mix	proportion	of	concrete

水灰比	水泥 / (kg・ m ⁻³)	粉煤灰/ (kg・ m ⁻³)	水/ (kg・ m ⁻³)	粗骨料 / (kg・ m ⁻³)	细骨料/ (kg・ m ⁻³)	减水剂 / %
0.45	284	71	160	1 300	585	0.5

1.2 试验方案

硫酸盐侵蚀与干湿循环作用下的混凝土单轴 受压本构试验主要考察不同溶液种类的影响,试验 分别采用质量分数为 10%的 Na₂SO₄,10%的 Mg-SO₄ 溶液. 混凝土试块浇注 24 h 后拆模,放入标准 养护室内养护 28 d,然后自然养护 60 d 后开始试 验.采用室温自然浸泡和自然晾干来模拟干湿循 环,将混凝土试块分别放入配置好的溶液中浸泡 7 d,取出擦干表面水分,在室温下干燥 8 d,此为一 个循环,周期为 15 d,试验共持续 360 d. 混凝土单 轴受压本构试验采用尺寸为 100 mm×100 mm× 300 mm 的棱柱体试块,在干湿循环 120,240,300, 360 d 后测试混凝土应力-应变曲线.对于单轴受压 本构试验的试块数量,侵蚀前每组采用 3 个,侵蚀 后试块离散性较大,每组采用 4 个.

试验采用上海华龙测试仪器有限公司生产的 WAW-1000 电液伺服万能试验机.试验加载过程 分2个阶段:在加荷值达到预估峰值的 60%~ 70%前,加载速率为 0.2 mm/min,超过预估峰值 的 70%后,加载速率为 0.03 mm/min,直至应力趋 于稳定或试块完全破坏.文献[15]研究发现,标距 较小不能反映混凝土试块整体应力-应变特征,且 测量误差较大;而标距较大时结果相对精确,裂缝 区大部分在标距内,因此测量标距采用 200 mm. 试验采用两个灵敏度相同的位移传感器,分别布置 在两个侧面的纵向中线位置处,如图 1.



图 1 单轴受压试验加载装置 Fig. 1 Setup for uniaxial compression test

2 试验结果与分析

2.1 单轴受压破坏形态

对混凝土棱柱体进行单轴受压试验,不同硫酸 盐溶液、不同侵蚀时间下的混凝土试块破坏特征基 本相同.在初始加载时,混凝土中微裂缝处于稳定 扩展阶段,各条微裂缝相互独立扩展,试块表面尚 无可见裂缝.应力继续增加至最大值后,混凝土中 裂缝发生分叉、贯通,试块表面可见裂缝扩展.随着 荷载继续增加,裂缝未见增多,却有变宽、伸长趋 势,接近极限荷载时,裂缝迅速延伸贯通,试块最后 被压碎.在试验过程中,硫酸盐溶液中混凝土试块 可见剥离、翘皮和局部压缩等现象,尤其发生在侵 蚀劣化严重的试块.试验发现破坏基本出现在粗骨 料表面和水泥砂浆内部,粗骨料本身很少出现破 裂,说明硫酸盐侵蚀主要针对水泥石产生破坏,分 解其水化硅酸钙凝胶,导致混凝土强度降低.

2.2 峰值应力

不同溶液中混凝土单轴受压峰值应力与侵蚀 时间关系见图 2a. 可以看出,在侵蚀 360 d 后,硫酸 钠和硫酸镁溶液中混凝土峰值应力分别下降 14.1%和16.6%,硫酸镁溶液中峰值应力损失明 显. 硫酸钠溶液中混凝土峰值应力变化呈现两个阶 段,在第一阶段,峰值应力在侵蚀前 120 d 内出现 一个增长期,主要原因是侵蚀产物及盐结晶的出现 填充混凝土孔隙,暂时起到密实作用;在第二阶段, 侵蚀产物钙矾石和石膏在混凝土内部产生膨胀应 力,加速裂缝的形成与发展,外部硫酸根离子更容 易进入混凝土,混凝土劣化加剧,在侵蚀 240 d 后 进入快速下降阶段. 与硫酸钠溶液中混凝土相比, 硫酸镁溶液中峰值应力呈现持续下降趋势,侵蚀前 120 d 降低缓慢,在侵蚀 240 d 后快速下降,峰值应 力降低更明显.原因在于硫酸镁侵蚀过程中存在镁 离子和硫酸根离子的双重破坏作用,不但产生侵蚀 产物膨胀破坏,还引起水化硅酸钙凝胶的脱钙分 解,侵蚀破坏严重.

2.3 峰值应变

不同溶液中混凝土单轴受压峰值应变与侵蚀 时间关系见图 2b. 可以看出,随着侵蚀时间增加, 混凝土单轴受压峰值应变逐渐增大. 在侵蚀 360 d 后,硫酸钠与硫酸镁溶液中混凝土峰值应变分别增 加 15.76%和 20%,硫酸镁溶液中混凝土峰值应变 增长速度较快. 在硫酸盐侵蚀前 120 d,侵蚀产物及 盐结晶对混凝土孔隙的填充起到一定密实作用,混 凝土刚度降低不明显,峰值应变增加缓慢;随着侵 蚀时间增长,混凝土劣化程度增加,混凝土内部结 构逐渐疏松,峰值应变在侵蚀 240 d 后快速增加.

2.4 弹性模量

文中弹性模量数值是根据 50%峰值应力对应 的应变计算出的割线弹性模量^[15].不同溶液中混 凝土弹性模量与侵蚀时间关系见图 2c.由试验结 果可知,在侵蚀 360 d 后,硫酸钠与硫酸镁溶液中 混凝土弹性模量分别下降 31%和 40.5%,硫酸镁 溶液中弹性模量降低明显.随着侵蚀时间增加,混 凝土弹性模量呈现先增大,后降低趋势,且在侵蚀 240 d 后进入快速下降阶段,与峰值应力变化规律 相似.侵蚀初期孔隙中的侵蚀产物及结晶物暂时起 到密实作用,弹性模量有一定程度增大;随着侵蚀 时间增加,侵蚀产物及硫酸盐结晶产生的膨胀力进 一步造成混凝土开裂、结构疏松及刚度降低,混凝





3 混凝土应力-应变全曲线

混凝土在不同溶液中干湿循环作用下的应力-应变全曲线如图 3 所示.可以看出,混凝土在不同 侵蚀时间下的应力-应变曲线变化趋势基本相似, 混凝土在侵蚀 120 d 时的应力-应变曲线与未侵蚀 混凝土相比变化不明显.随着侵蚀时间增加,混凝



土应力-应变曲线中上升段斜率逐渐降低,曲线峰 值点不断下降和右移,峰值应力减小,峰值应变增 加,曲线呈现变宽变扁特征,在侵蚀 300 d 后尤为 明显.原因在于侵蚀后期混凝土内部微裂缝和孔隙 增多,结构疏松程度增加,当混凝土试块受压时,垂 直于压应力方向的微裂纹和孔洞受压闭合,因此在 很小的应力下,就能产生较大变形.



图 3 混凝土单轴受压应力-应变全曲线 Fig. 3 Stress-strain curves for concrete

0 d

120 d

240 d 300 d

360 d

本文采用文献[16]建议的混凝土单轴受压分 段式本构方程,见式(1),拟合得到硫酸盐侵蚀与干 湿循环作用下混凝土单轴受压应力-应变全曲线的 参数计算值,见表 3.

	$ax+(3-2a)x^2+(a-2)x^3$	$(0 \leqslant x \leqslant 1)$,
y=-	$\left \frac{x}{h(x-1)^2 + x} \right $	$(x \ge 1),$	(1)

式中: $x = \epsilon/\epsilon_p$, $y = \sigma/f_p$; f_p , ϵ_p 分别为混凝土峰值 应力和峰值应变; a, b 分别为与材料相关的上升段 和下降段控制参数.

混凝土单轴受压应力-应变全曲线参数 a 和 b 有明确的物理和几何意义^[15],若 a 值越小、b 值越 大,则曲线越窄,曲线下面积越小,其延性和塑性变 形能力越差,相反越强.

表:	3 混》	誕土单轴受	€压应力→	应变全曲线	も上升段、	下降段参数	
Table 3	Paran	neters of r	ising and	descending	stage of s	stress-strain	curves

试块分组	$w(Na_2SO_4) = 10\%$						$w(MgSO_4) = 10\%$			
侵蚀时间 /d	0	120	240	300	360	120	240	300	360	
上升段参数 a _D	2.210 8	2.240 8	2.001 5	1.927 7	1.706 0	2.174 6	1.940 0	1.662 2	1.426 5	
下降段参数 b _D	1.351 9	1.434 6	1.600 8	1.815 6	1.956 1	1.563 0	1.673 4	1.862 5	2.085 9	

因此,可以通过参数 a 和 b 来比较或衡量混凝 土的受力性能差别.由表 3 可以看出,在侵蚀前期, 硫酸钠溶液中 a_D 出现小幅度增加,在应力-应变曲 线上也可看出相应变化.随着侵蚀时间增加,a_D 在 侵蚀 240 d 后逐渐减小,硫酸镁溶液中 a_D 降低速 度较快,在侵蚀 360 d 后降低 35.5%,硫酸钠溶液 中 a_D 仅降低 22.8%.随着侵蚀时间增长,硫酸盐 溶液中 b_D 明显增加,在干湿循环作用 360 d 后,硫 酸钠 与硫酸镁溶液中混凝土 b_D 值分别增加 44.7%和 54.3%,与上升段参数相比变化明显. 经过数据统计回归分析,得到混凝土应力-应 变曲线上升段参数 a_D/a_0 和下降段参数 b_D/b_0 与 侵蚀时间 t 的关系如下.

Na₂SO₄ 溶液中: $\frac{a_{\rm D}}{a_{\rm 0}} = 1 + 3.328 \times 10^{-4} t - 2.675 \times 10^{-6} t^{2}$, $\frac{b_{\rm D}}{b_{\rm 0}} = 1 + 4.94 \times 10^{-5} t + 3.373 \times 10^{-6} t^{2}$. (2)

 $MgSO_4$ 溶液中:



式中 *a*₀,*b*₀分别为未侵蚀混凝土试块受压全曲线 上升段与下降段参数.

根据式(1)~(3)可以得到不同侵蚀时间下的 混凝土应力-应变拟合曲线,图4为拟合曲线与试 验结果的比较,可以看出,二者吻合较好.





4 损伤层混凝土单轴受压本构关系

根据硫酸盐侵蚀机理可知,环境中侵蚀性离 子与混凝土中水泥胶凝基体反应生成具有膨胀 性的侵蚀产物,最终导致混凝土细观结构产生缺 陷,由表及里形成损伤层.对于硫酸盐侵蚀环境 下混凝土损伤层厚度测量,通常采用超声波平测 法^[17],该方法假定损伤层是均匀分布,且与未损 伤层有明显界限,则受硫酸盐侵蚀作用下的混凝 土由损伤层混凝土和未损伤层混凝土两部分组 成,如图 5.



图 5 硫酸盐作用下混凝土的截面分布 Fig. 5 Cross-section distributions of concrete under sulfate attack

随着侵蚀时间增长,损伤层厚度增加,损伤 层混凝土不断劣化,在一定程度上影响整体混凝 土结构的承载力.因此,有必要探讨损伤层混凝 土的强度变化规律.硫酸盐侵蚀与干湿循环作用 下的混凝土,其损伤层强度随着侵蚀劣化程度发 生改变,必然会引起其本构关系的变化.由于受 侵蚀混凝土中损伤层与未损伤层这两部分的本 构关系不同,但其应变是协调的,通过应变协调 将这两部分联系起来.那么,受侵蚀混凝土在受 压过程中符合下式

$$P = P_{c} + P_{f},$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{c} = \varepsilon_{f},$$
(4)

式中:*P* 为试验机作用在混凝土上的力;*P*。为未损 伤混凝土承受的力;*P*_f 为损伤层混凝土承受的力; ε 为荷载作用下混凝土实测应变;ε。为荷载作用下 未损伤混凝土应变;ε_f 为荷载作用下损伤层混凝土 应变.

则损伤层混凝土在受压过程中的应力应变符 合下式

$$\sigma_{\rm f} = \sigma \frac{A}{A_{\rm f}} - \sigma_{\rm c} \frac{A_{\rm c}}{A_{\rm f}}, \qquad (5)$$
$$\varepsilon_{\rm f} = \varepsilon = \varepsilon_{\rm c},$$

式中: $\sigma = P/A$, $\sigma_c = P_c/A_c$, $\sigma_f = P_f/A_f$. σ 为试块上 实测应力; σ_c 为未损伤混凝土的截面应力; σ_f 为损 伤层混凝土的截面应力;A为实测试块的截面面 积; A_c 为未损伤混凝土的截面面积; A_f 为损伤层 混凝土的截面面积; $A = A_c + A_f$.

关于混凝土损伤层厚度的测量及损伤层部分 的截面面积 A_f 采用文献[18]中相关数据,并根据 式(5)计算得到硫酸盐侵蚀与干湿循环作用下损伤 层混凝土的应力-应变关系曲线,见图 6.



图 6 损伤层混凝土应力-应变计算曲线 Fig. 6 Calculated stress-strain curves for damage layer concrete

由图 6 可以看出,随着硫酸盐侵蚀时间增长,损 伤层混凝土应力-应变曲线中上升段斜率逐渐降低, 且曲线长度随之减小,峰值点出现明显的下降和右 移.与图 3 中曲线相比,损伤层混凝土应力-应变曲 线呈现更明显的扁平特征.侵蚀 300 d 后,硫酸镁溶 液中损伤层混凝土应力-应变曲线的上升段还呈现 出轻微上扬现象,曲线下凹,并出现拐点,表现出较 大的非线性,原因在于硫酸镁溶液对混凝土侵蚀更 严重,损伤层混凝土中微裂缝数量增多,在加载时微 裂缝受压闭合,呈现被压实现象.随着切线模量增 大,到曲线上升段的一拐点处,曲线表现出外凸形 状.

由式(1) 拟合得到损伤层混凝土应力-应变全 曲线上升段、下降段参数,并由式(5)计算不同侵蚀

Table 4

时间下的损伤层混凝土峰值应力,见表 4. 可以看 出,随着侵蚀时间增加,损伤层混凝土峰值应力逐 渐降低,在侵蚀 240 d 后进入加速下降阶段.在经 历 360 d 后,硫酸钠溶液和硫酸镁溶液中的损伤层 峰值应力分别下降 22.2%和 25.6%,硫酸镁溶液 中损伤层峰值应力损失严重.原因在于,硫酸镁侵 蚀除了生成钙矾石和石膏,镁离子和氢氧化钙反应 还会生成难溶性的氢氧化镁,溶液 pH 值降低,引 起严重的脱钙反应,导致混凝土中水化硅酸钙凝胶 分解.此外,镁离子还能与混凝土中水化产物反应 生成没有胶结能力的水化硅酸镁,混凝土黏结力和 强度降低,损伤劣化严重.与图 2a 中数据相比,损 伤层峰值应力降低更加明显.

表 4 损伤层混凝土应力-应变曲线上的特征值及曲线拟合参数

1 able 4	1 al anicters 0	i fishig and des	centuing stage o	i stress strain v	uives for dama	ige layer concre	.u	
试块分组		$w(Na_2SC)$	$(0_4) = 10\%$		$w(\mathrm{MgSO}_4) = 10\%$			
侵蚀时间/d	0	240	300	360	240	300	360	
峰值应力/MPa	46.913 0	44.788 0	41.204 0	36.514 0	43.265 0	37.959 0	34.912 0	
峰值应变 /10 ⁻³	1.640 0	1.730 0	1.800 0	1.910 0	1.770 0	1.850 0	2.010 0	
上升段参数 af	2.210 8	1.696 0	1.620 7	1.318 1	1.598 8	1.089 5	0.835 0	
下降段参数 b _f	1.351 9	2.052 0	2.501 0	2.588 7	2.243 1	2.590 6	2.878 3	

通过比较分析发现混凝土峰值应力与损伤层 峰值应力二者之间存在明显的相关性,并且溶液种 类对其影响较小,所以对不同溶液中混凝土峰值应 力及损伤层峰值应力进行统一回归分析,二者关系 曲线见图 7,关系式见式(6).



and peak stress in damage layer

在此经验公式基础上,可以较为方便的计算硫酸盐侵蚀与干湿循环作用下损伤层峰值应力,便于 实际工程或试验过程中分析混凝土损伤劣化情况 及受损混凝土承载力计算.

由表 4 中损伤层混凝土应力-应变曲线上升段 参数 a_i 与下降段参数 b_i 的变化规律可以看出,随 着侵蚀时间增加, a_i 逐渐减小,硫酸镁溶液中 a_i 降 低速度较快,在侵蚀 360 d 后降低 62.2%,硫酸钠 溶液中 a_i 仅降低 40.4%.下降段参数 b_i 随侵蚀时 间逐渐增大,但与 a_i 相比变化幅度较小,在侵蚀 360 d 后,硫酸钠与硫酸镁溶液中 b_i 分别增加 17.1%和 30.2%.文献[16]中指出,上升段参数 a一般变化范围为:1.5 $\leq a \leq 3.0$,曲线下凹临界值为 1.1.对于硫酸镁溶液中侵蚀 300 d 和 360 d 后的损 伤层混凝土上升段回归曲线参数分别为 1.089 5 和 0.835 0,均小于 1.1, 与图 6 中二者应力-应变曲 线上升段呈现轻微上扬,并出现下凹现象相吻合.

经过数据统计回归分析,得到不同溶液中损伤 层混凝土应力-应变曲线上升段参数 a_f/a₀ 和下降 段参数 b_f/b_0 与侵蚀时间 t 的关系如下.

Na₂SO₄ 溶液中:

1.0

0.8

0.6

04

0.2

0

1

 $\frac{\sigma_{\rm f}}{f_{\rm fp}}$

$$\frac{a_{t}}{a_{0}} = 1 - 5.027 \times 10^{-4} t - 1.623 \times 10^{-6} t^{2},$$
(7)
$$\frac{b_{t}}{b_{0}} = 1 + 0.0019 t + 2.077 \times 10^{-6} t^{2}.$$
MgSO₄ 溶液中

$$\frac{a_{\rm f}}{a_0} = 1 - 2.662 \times 10^{-4} t - 4.216 \times 10^{-6} t^2,$$

$$\frac{b_{\rm f}}{b_0} = 1 + 0.0021 t + 2.986 \times 10^{-6} t^2.$$
(8)

损伤层混凝土单轴受压无量纲应力-应变拟合 曲线如图 8 所示,可以看出,随着侵蚀时间增加,曲 线下面积减小,表明损伤层混凝土延性和塑性变形

能力逐渐变差,残余强度逐渐降低,破坏过程更加 急速,尤其是硫酸镁溶液中的损伤层混凝土在侵蚀 360 d 后表现更为明显.

硫酸盐侵蚀与干湿循环共同作用下的混凝土 力学性能退化主要是由损伤层中受侵蚀劣化的混 凝土引起的.随着侵蚀时间增长,损伤层不断劣化, 其力学性能对侵蚀环境中的混凝土结构承载力有 重要影响,以钢筋混凝土受弯构件为例,随着侵蚀 程度增加,受压区的损伤层混凝土强度逐渐降低, 直接影响受弯构件的破坏形式,当受压区混凝土劣 化不严重时,受侵蚀构件多为适筋破坏;当劣化严 重时,受压区混凝土强度损失较多,则受侵蚀构件 会由适筋破坏转换为超筋破坏.并且由于损伤层的 出现,混凝土受压区高度与损伤层厚度两者之间的 大小关系也对抗弯承载力计算方法有直接影响.因 此,研究损伤层混凝土的力学性能退化规律对受侵 蚀混凝土结构承载力计算有重要意义.



损伤层混凝土单轴受压应力-应变拟合曲线 图 8 Fig. 8 Fitting stress-strain curves for damage layer concrete

5 结 论

1) 硫酸盐侵蚀与干湿循环作用下,混凝土单 轴受压应力-应变曲线变化趋势基本相同,随着侵 蚀时间增加,曲线呈现扁平,整体右移.损伤层混凝 土应力-应变曲线表现出更明显的扁平特征,侵蚀 300 d 后,硫酸镁溶液中损伤层混凝土应力-应变曲 线的上升段轻微上扬,曲线下凹,并出现拐点,表现 出较大的非线性特征.

2) 硫酸盐侵蚀与干湿循环作用下,混凝土峰 值应力在侵蚀前期下降缓慢,硫酸钠溶液中峰值应 力在 120 d 有轻微增长趋势,在侵蚀 240 d 后进入 快速下降阶段;混凝土弹性模量呈现先增大,后降 低趋势,在侵蚀 240 d 后降低明显;峰值应变在侵 蚀前期增长缓慢,在侵蚀 240 d 后表现出快速增加 趋势,硫酸镁溶液中混凝土峰值应变增长较快.

3) 建立了硫酸盐侵蚀与干湿循环作用下混凝 土单轴受压应力-应变全曲线方程,得到了参数 a,b

值与侵蚀时间的关系,模型计算值与试验结果吻合 较好.进一步对损伤层混凝土力学性能进行分析, 拟合得到了损伤层混凝土的单轴受压应力-应变全 曲线方程及其参数确定方法.

参考文献:

- [1] 冷发光,周永祥,王 晶.混凝土耐久性及其检验评价 方法[M]. 北京:中国建材工业出版社,2012:200-202.
- [2] BASSUONI M T, NEHDI M L. Durability of selfconsolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(3): 206-226.
- [3] GAO Jianmin, YU Zhenxin, SONG Luguang. Durability of concrete exposed to sulfate attack under flexural loading and drying-wetting cycles[J]. Construction and Building Materials, 2013, 39: 33-38.
- [4] 乔宏霞,周茗如,何忠茂,等.硫酸盐环境中混凝土的 性能研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2009,17

(1):77-84.

QIAO Hongxia, ZHOU Mingru, HE Zhongmao, et al. Research on performance of concrete in sulfate environment[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(1):77-84.

[5] 曹双寅.受腐蚀混凝土的力学性能[J].东南大学学 报,1991,21(4):89-95.

CAO Shuangyin. Mechanical properties of corroded concrete[J]. Journal of Southeast University, 1991, 21 (4):89-95.

[6] 梁咏宁,袁迎曙.硫酸盐腐蚀后混凝土单轴受压本构 关系[J].哈尔滨工业大学学报,2008,40(4):532-535.

LIANG Yongning, YUAN Yingshu. Constitutive relation of sulfate attacked concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(4):532-535.

[7] 张 峰,祝金鹏,李术才,等.海水侵蚀环境下混凝土 力学性能退化模型[J].岩土力学,2010,31(5):1469-1474.

ZHANG Feng, ZHU Jinpeng, LI Shucai, et al. Mechanical property deterioration model for concrete in environment with salt solution[J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(5):1469-1474.

[8] 刘汉昆,孙 超,李 杰.基于 CT 扫描的混凝土三维 细观数值模拟[J].建筑科学与工程学报,2010,27 (1):54-59.

LIU Hankun, SUN Chao, LI Jie. Three-demensional mesoscopic numerical simulation of concrete based on CT scan[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(1):54-59.

[9] 解国梁,杜金胜,申向东.粉煤灰轻骨料混凝土抗硫酸 盐侵蚀研究[J].硅酸盐通报,2015,34(2):544-549. XIE Guoliang, DU Jinsheng, SHEN Xiangdong. Experimental study on fly ash lightweight aggregate concrete resistance to sulfate carrion[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(2):544-549.

- [10] 文红宇. 硫酸盐侵蚀后砂浆的力学性能试验研究 [D]. 南宁:广西大学土木建筑工程学院,2007.
- [11] 张凤杰,袁迎曙,杜健民.硫酸盐腐蚀混凝土构件损 伤检测研究[J].中国矿业大学学报,2011,40(3): 373-378.

ZHANG Fengjie, YUAN Yingshu, DU Jianmin. Ultrasonic detection in concrete structures of damage from sulfate attack[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(3): 373-378.

[12] 杜建民,陈 耀,于贵霞,等.吸附区粉煤灰混凝土抗 硫酸盐腐蚀性能研究[J].中国矿业大学学报,2014, 43(4):600-605.

DU Jianmin, CHEN Yao, YU Guixia, et al. Research on the sulfate attack corrosion resistance of fly ash concrete in adsorption area[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43 (4): 600-605.

- [13] JIANG Lei, NIU Ditao, SUN Yingzhao, et al. Ultrasonic testing and microscopic analysis on concrete under sulfate attack and cyclic environment [J]. Journal of Central South University, 2014, 21:4723-4731.
- [14] CHU Hongyan, CHEN Jiankang. Evolution of viscosity of concrete under sulfate attack[J]. Construction and Building Materials, 2013, (39):46-50.
- [15] 过镇海,时旭东.钢筋混凝土原理和分析[M].北京: 清华大学出版社,2003:19-24.
- [16] 过镇海. 混凝土的强度和本构关系[M]. 北京:中国 建筑工业出版社,1997:35-38.
- [17] 陕西省建筑科学研究设计院.CECS 21:2000 超声法 检测混凝土缺陷技术规程[S].北京:中国工程建设 标准化协会,2000:691-693.
- [18] 姜 磊.硫酸盐侵蚀环境下混凝土劣化规律研究 [D].西安:西安建筑科技大学土木工程学院,2014.

(责任编辑 王彩云)