DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.06.012

邓媛, 邹荣华, 彭刚, 等. 孔隙水压循环次数对混凝土损伤影响[J]. 水利水运工程学报, 2016(6): 83-89. (DENG Yuan, ZOU Rong-hua, PENG Gang, et al. Influences of pore water cycles on damage properties of concrete under triaxial compression tests [J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(6): 83-89.)

孔隙水压循环次数对混凝土损伤影响

邓媛1,邹荣华2,彭刚1,肖杰1,梁辉1

(1. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖 北 武汉 430010)

摘要:历经不同孔隙水压循环次数(0,10,50和200次)后,进行了中低应变速率(10⁻⁴/s)下混凝土常三轴受压 损伤特性试验研究,分析其峰值应力、应变和弹性模量等基本力学参数随孔隙水循环次数变化的关系。同时依 据受压切线模量的退化定义了损伤变量,得到应力水平比-损伤曲线,对混凝土损伤特性进行了研究。结果表 明:①历经不同孔隙水循环后,混凝土常三轴受压峰值应力和应变随循环次数的增加呈指函数增加的趋势;弹 性模量随循环次数的增加呈幂函数减小趋势并逐渐趋于平缓。②历经不同孔隙水循环次数后,混凝土的损伤 发展速度整体上均大于0次循环,且随着循环次数的增加损伤速度逐渐降低。③通过应力水平比-损伤曲线,将 混凝土损伤演化过程分为3阶段:损伤起始阶段、损伤发展阶段和损伤失稳阶段,同时依据所求损伤变量数据, 拟合构建了损伤随应力水平比的演化方程。④依据损伤3个发展阶段定义了损伤界点,分析了损伤界点和损伤 3阶段的应力水平区间长度随不同循环孔隙水压次数的变化。分析表明,随孔隙水压循环次数的增加,损伤界 点对应的应力水平先增后减。

关 键 词:孔隙水循环次数;常三轴受压;损伤特性;损伤界点 中图分类号:TU502 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-640X(2016)06-0083-07

目前,关于大气自然条件下混凝土材料率效应的研究已有大量成果,众多学者不仅对混凝土的动态抗 拉、抗压、弹性模量、泊松比等物理力学参数方面进行了大量试验研究,在损伤破坏机理分析方面也取得了可 喜成果^[1-8]。王海龙等^[9-10]对湿态混凝土中孔隙水压力对混凝土开裂、扩展和抗压强度的影响进行了讨论, 认为由于孔隙水压影响,湿态混凝土的开裂应力和抗压强度比干燥混凝土有所降低,同时还利用断裂力学对 不同加载速率下饱和混凝土劈拉强度变化机理进行了探讨。李庆斌等^[11]进行了混凝土在水中及三轴应力 状态下的抗压强度特性试验研究,得到了密封条件下,干燥和饱和混凝土的强度均随围压增加且增效明显; 而不密封时,干燥混凝土强度明显降低。陈有亮等^[12]基于损伤力学基本原理建立了单轴压缩下水饱和混凝 土的弹塑性损伤本构模型,并结合太沙基"有效应力原理"建立水饱和混凝土的单轴压缩损伤演化方程。胡 海蛟等^[13]进行湿态混凝土单轴压缩试验研究,对自然湿度和水饱和混凝土的基本力学参数进行了详细分 析。大坝、海洋平台、桥墩等结构经常在水环境中工作,由于混凝土具有毛细管--孔隙结构的特点以及水泥 石的干燥收缩和温度变形而引起的微裂缝,在水压力作用下,水会渗透到混凝土孔隙中,使其处于饱和状态; 自然状态下的混凝土材料也有一定含水率,孔隙水以及裂隙水的存在将导致混凝土材料力学性能显著变化, 这些变化会对混凝土结构的设计强度、使用年限等产生一定的影响,而关于真实水环境下混凝土的动静态损

收稿日期:2015-11-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51279092);三峡大学研究生科研创新基金项目(2014CX022);2014 年湖北省协同创新中心研究生自主探索基金项目;三峡大学培优基金资助项目(2016PY026)

作者简介:邓 媛(1991—),女,湖北宜昌人,硕士研究生,主要从事结构工程方面的研究。 E-mail: 690174099@qq.com 通信作者:彭 刚(E-mail: gpeng158@126.com) 伤特性研究相对较少,且在水环境对混凝土的动态性能影响机理研究方面并未达成共识。

由此,本文进行了历经不同孔隙水压次数后,混凝土中低应变速率下的常三轴压缩试验,以对其损伤破 坏机理进行研究,为复杂应力状态下水环境中混凝土结构动态特性的研究奠定一定基础。

1 试验过程

1.1 试验设备

试验所用设备为三峡大学 10 MN 大型多功能液压伺服静动力三轴仪。该设备主要由控制系统、伺服系 统控制箱、加载框架系统、液压油泵、围压系统和计算机系统等部分组成。加载框架可用于对试件进行 3 个 方向加载,其轴向和竖向最大动静力加载数值分别为 5 和 10 MN。围压系统由压力室外桶(顶部有活塞)、 底座、高压四通阀、12 个卡紧块及卡紧套构成,可用来施加循环孔隙水压预处理,可施加最大围压为 30 MPa。 围压桶还配备了由三峡大学自行设计的高压水环境内试件变形测量装置,可以满足试验要求。

1.2 试件制备

试验采用 φ300×600 mm 圆柱体试件,试件采用水泥为宜昌三峡水泥有限公司生产的 P • O 42.5 硅酸盐 水泥,粗骨料为 5~40 mm 连续级配的碎石;细骨料为细度模数 2.3 连续级配的天然河砂,设计强度为 C30。 配合比为水:水泥:砂:石子=0.50:1.00:2.28:3.72。试件成型方式为钢模浇筑,为了使骨料与水泥均匀性 分布,采用了先干拌后湿拌的机械搅拌方式。试件成型后在室温下静置 24 h 后拆模并编号,按 20~40 mm 的间距摆放在木质垫条上,自然养护 28 d。试验前,为了避免试验过程中出现试件偏心受压及应力集中的情 况,对试件上表面进行磨平处理。

1.3 试验步骤

试验分为两个部分:孔隙水循环处理和竖向加载。对混凝土试件进行孔隙水循环处理,具体操作步骤 如下:

(1)加载试验前,对试件先进行水饱和预处理,即在有压(5 MPa)水中浸泡 24 h 后,电脑控制软件显示 围位移不再随时间增加而改变,即认为混凝土已达水饱和状态,将试件置于围压桶中,采用"围压控制"方式 控制孔隙水压力进行上、下限加卸载。待围位移不再发生较大变化时,以 3 MPa/min 的速率从上限值 3 MPa 开始卸载到下限值 1 MPa,保持 30 min,再以 3 MPa/min 的速率从下限值开始加载到上限值 3 MPa。

(2)编制循环控制程序,不间断重复加卸载步骤(1),直至试验预订的循环次数 N。

然后在加载系统中进行应变速率为 10⁻⁴/s 的常三轴加载试验,具体步骤如下:试件置于围压桶中,确认 围压桶在加载框架中处于水平状态;给试件预加 30 kN 的初始静荷载,以位移控制方式,按设定的应变速率 对试件进行加载直至试件破坏,加载过程中保证围压 3 MPa 恒定不变,围压变化范围控制在 0.001 MPa。

2 混凝土基本力学参数分析

试验得到应变速率 10⁻⁴/s 下不同循环次数时混凝土的峰值应力、峰值应变、弹性模量数据见表 1。取应 力-应变曲线 35%~45%处割线斜率作为混凝土弹性模量。混凝土试验曲线和其对应的拟合曲线见图 1 所 示,其中应变速率为 10⁻⁴/s。

| | | | | 1 | | | |
|---------|----------|-----------|----------|---------|----------|-----------|----------|
| 孔隙水循环次数 | 峰值应力/MPa | 峰值应变/10-3 | 弹性模量/GPa | 孔隙水循环次数 | 峰值应力/MPa | 峰值应变/10-3 | 弹性模量/GPa |
| 0次 | 39.95 | 2.18 | 26.14 | 50 次 | 40.21 | 2.72 | 21.83 |
| 10次 | 39.96 | 2.57 | 25.69 | 200 次 | 44.33 | 2.98 | 20.07 |

表1 基本力学参数 Tab.1 Basic mechanical parameters





2.1 不同孔隙水循环次数峰值应力分析

由表 1 可见,随着孔隙水循环次数的增加,混凝土峰值应力整体上呈增加趋势。相对于 0 次循环,孔隙水循环 10,50 和 200 次后,混凝土峰值应力分别增加了 0.03%, 0.65% 和 10.96%。同时可知,在循环 10 次

和 50 次时,峰值应力增速比较缓慢,而循环次数达到了 200 次时,峰值应力出现了较大增幅。产生此种现象的原因是,当循 环次数不大于 200 次时,孔隙水的渗透压力作用使混凝土产生 有限损伤,产生一定数量厚度很薄的毛细裂缝,经历孔隙水压 循环作用后,混凝土孔隙中充满了自由水,当受到外部荷载作 用时,孔隙在变形过程中就会产生强烈的 Stefan 效应,即产生 阻止微孔隙扩展(相对运动)的阻力,并且在一定循环次数范围 内,介质内饱和的自由水越多,Stefan 效应表现得越明显,最终 导致混凝土强度的增大。

将循环次数和峰值应力进行归一化处理,使单位统一。采用如下式(1)进行数据拟合。试验和拟合曲线图形见图 2。其拟合所得系数分别为 $a_1 = 0.17 \times 10^{-2}$, $a_2 = 4.19$ 。试验和拟合数据相关系数达 0.999 5,表明拟合效果良好。

$$\sigma_{\rm pk}/\sigma_{\rm pk0} = 1 + a_1 \exp(a_2 N/N_{\rm max}) \tag{1}$$

式中: σ_{pk} 为不同孔隙水循环次数下的峰值应力; σ_{pk0} 为0次循环下的峰值应力;N为循环次数; N_{max} 为最大循环次数。

2.2 不同孔隙水循环次数峰值应变分析

由表1可知,相对于0次循环,10,50和200次循环后,混 凝土峰值应变分别增加了17.89%,24.77%和36.70%。采用 式(2)对峰值应变和循环次数进行拟合,得到拟合系数*b*₁ = 0.79, *b*₂ = 0.25,相关系数为0.9990,拟合图形见图3。



85

$$\varepsilon_{\rm nk} = \varepsilon_{\rm nk0} + b_1 (N/N_{\rm max})^{b_2} \tag{2}$$

式中: ε_{nk} 和 ε_{nk0} 分别表示峰值应变和0次循环后的峰值应变。

由表1和图3可见,随着循环孔隙水次数增加,峰值应变整体上也呈现增大趋势,其增长速度逐渐降低, 渐渐趋于平缓。这表明,循环孔隙水作用导致混凝土脆性性能降低,在一定程度上增加了其延性性能。且循 环次数较低时,所表现出的效果最明显,随着循环次数增加,增加效果逐渐减弱,最终维持在一个稳定值。

2.3 不同孔隙水循环次数弹性模量分析

由表1可见,随孔隙水循环次数增加,混凝土初始弹 性模量逐渐减小。相对于0次循环,10,50和200次循环 后,弹性模量分别减少1.72%,16.49%和23.22%。相对 于循环10次,循环50次后,出现较大减幅;而相对于50 次循环,循环200次的减幅明显减小。这表明,经过循环 孔隙水作用后,混凝土内部已经产生了一定的初始损伤, 且随着循环次数的增加,损伤在不断累积。将循环次数 和弹性模量进行归一化处理,使单位统一。采用式(3)对 弹性模量和循环次数进行拟合,得到拟合系数 c₁ = 0.24, c₂ = 0.48,相关系数为0.9565,拟合图见图4。



Fig. 4 Relationships between number of pore water cycles and elastic modulus

$$E/E_0 = 1 - c_1 (N/N_{\rm max})^{c_2}$$
(3)

3 混凝土损伤特性分析

3.1 损伤变量的构建和损伤特性分析

循环孔隙水能够使混凝土产生初始损伤,导致初始弹性模量降低。由此以常三轴受压切线模量的退化 来描述不同孔隙水循环次数后,混凝土损伤变化特性。定义损伤变量 D 如下:

$$D = (E_0 - E_h) / E_0$$
 (4)

式中: E_0 为初始弹性模量; E_h 为任意应力水平下的切线模量。

采用此种方法定义损伤变量,可以不计混凝土内部初始 缺陷造成的初始损伤。由此,基于试验数据得到不同次数循 环孔隙水后,混凝土的损伤演化规律见图 5。由图 5 可知,经 过 10 次,50 次和 200 次孔隙水循环后,混凝土的损伤发展速 度整体上比 0 次循环快;但随着循环次数的增加,损伤发展速 度反而有所减慢,这表明随着循环次数增加,孔隙水渗透到混 凝土内部孔隙的量逐渐增多,导致进行应变速率为 10⁻⁴/s 的 常三轴动态受压试验时,混凝土内部孔隙水的 Stefan 效应逐 渐增强,有效地阻碍了内部裂纹的扩展,进而延缓了损伤的发 展。通过曲线可知,在应力水平比小于 0.2 时,损伤处于起始 发展阶段,此阶段由于循环孔隙水在混凝土内部产生了初始 损伤,同时又有围压水的作用,导致此阶段持续较短,而迅速





进入下一阶段,即损伤发展阶段。此阶段发生在应力比为 0.20~0.85,损伤发展速度逐渐增大,混凝土内部 损伤逐渐累积。当损伤累积发展到一定程度时,即应力比约 0.9 时,此时进入损伤发展失稳阶段,损伤迅速 发展,直至混凝土不能继续承受更多荷载而发生破坏。

基于所求损伤变量,采用式(5)来对其演化规律进行描述。

$$D = (1 - \exp(a(\sigma/\sigma_{\rm pk}))) / (1 - \exp(a))$$
(5)

式中:D为损伤变量;a为相关系数; o为某一时刻应力。由此得到经历不同循环孔隙水次数后,混凝土损伤 变量随应力水平比变化规律见图 6。0,10,50 和 200 次孔隙水循环的拟合系数分别为 3.787 0,2.280 3, 2.850 9,3.540 5,对应的试验数据和拟合数据的相关系数分别为 0.993 1,0.994 0,0.989 0 和 0.995 7。可 见,采用本文所建立的应力水平比-损伤曲线方程能够较好地描述不同孔隙水循环后,混凝土损伤演化 规律。





3.2 损伤界点分析

上述分析可见,混凝土的损伤演化规律可以分为3个阶段:损伤初始阶段、损伤稳定发展阶段和损伤发展失稳阶段。这3个阶段分界点的研究对损伤演化规律具有重大意义。由此,定义了损伤界点和损伤阶段应力水平区间长度。损伤界点分为:损伤第一界点和第二界点,分别指损伤发展第1阶段的终点或第2阶段的起点,以及损伤发展第2阶段的终点或第3阶段的起点。损伤阶段应力水平区间长度:即为相应界点对应的应力水平点将应力水平区间所分成的3个区间段的长度,记为*l*₁,*l*₂和*l*₃。其对应的应力水平为第1应力水平和第2应力水平,记为µ1和µ2。

结合损伤演化曲线三阶段的特征统计得到历经不同孔隙水压循环后,损伤过程三阶段的应力水平区间 和损伤界点,见表 2。

| 表 2 顶伤阶段应力水平区间和顶伤界 |
|--------------------|
|--------------------|

| Tab 2 | Longthe | of stress | loval | interval | and | damaga | houndary | nointe |
|--------|---------|-----------|-------|----------|-----|--------|----------|--------|
| 1 a. 2 | Lenguis | or sucss | rever | mervar | anu | uamage | Doundary | points |

| N/次 | μ_1 | μ_2 | l_1 | l_2 | l_3 | N/次 | μ_1 | μ_2 | l_1 | l_2 | l_3 |
|-----|---------|---------|---------|--------|----------|-----|---------|---------|--------|--------|---------|
| 0 | 0.145 2 | 0.764 9 | 0.145 2 | 0.6197 | 0.235 1 | 50 | 0.1778 | 0.8277 | 0.1778 | 0.6499 | 0.172 3 |
| 10 | 0.1641 | 0.8108 | 0.1641 | 0.6467 | 0. 189 1 | 200 | 0.1367 | 0.754 1 | 0.1367 | 0.6174 | 0.245 9 |

由表 2 可知, 历经 0 次孔隙水循环后, 混凝土损伤三阶段的分配比例为 14.51%, 61.97% 和 23.51%; 10 次孔隙水循环后, 比例为 16.41%, 64.67% 和 18.91%; 50 次孔隙水压循环后, 比例为 17.78%, 64.99% 和 17.23%; 200 次孔隙水压循环后, 比例为 13.67%, 61.74% 和 24.59%。这表明孔隙水压循环次数改变了损伤 三阶段的分配比例。在孔隙水循环次数较低时, 随着循环次数的增加, 损伤第 1 阶段与第 2 阶段的应力水平 区间长度也逐渐增加, 第 3 阶段的应力水平区间长度减小; 当孔隙水循环次数达到 200 时, 第 1 阶段和第 2 阶段的应力水平区间长度反而减小, 而第 3 阶段应力水平区间长度增加。损伤第一界点应力水平在 0.2 左 右波动, 损伤第二界点应力水平在 0.8 左右波动。

图 7 的曲线走势说明,在低孔隙水压循环次数下,孔隙水压循环次数的增加,使得损伤第一界点和第二 界点向着应力水平较高的方向推移;而历经高孔隙水压循环次数(200次)后,第一和第二界点则处于较低应 力水平,界点的变化必然导致损伤 3 个阶段应力水平区间分配比例的变化。



图 7 历经不同孔隙水循环次数后应力变化

Fig. 7 Changes in stress level after different cycles of pore water

4 结 语

历经 0~200 次孔隙水循环后,进行了中低应变速率下(10⁻⁴/s)混凝土常三轴试验研究,得到结论如下: (1) 历经 0~200 次孔隙水循环后,混凝土的峰值应力随循环次数增加而逐渐增加,且呈现指数增加的趋势;其峰值应变随循环次数的增加呈幂函数增加,并渐趋于平缓;而弹性模量则随着循环次数增加逐渐减小,

最终趋于平缓。随着孔隙水循环次数的增加,混凝土损伤发展的速度有所减缓,可依据应力水平比-损伤曲 线将损伤发展过程分为3个阶段:损伤起始阶段,应力水平比为0~0.2;损伤稳定发展阶段,应力水平比为 0.2~0.85;损伤失稳阶段,应力水平比在0.85之后。

(2)通过应力水平比-损伤数据拟合得到损伤演化方程,所得到的方程能够较好地描述循环孔隙水后, 混凝土常三轴受压损伤演化过程。

(3)针对损伤发展三阶段,定义了损伤界点,并通过损伤界点对损伤3个阶段对应的应力水平区间长度 进行了定量分析,得到历经不同孔隙水压循环作用后,损伤第1阶段和第2阶段应力水平区间长度呈现先增 后减的趋势,而第3阶段则是先减后增。

参考文 献:

- TEDESCO J W, POWELL J C, ROSS C A, et al. A strain-rate-dependent concrete material model for ADINA[J]. Computer & Structures, 1997, 64(5/6): 1053-1067.
- [2] ZHENG S, HAUSSLER-COMBER V, EIBL J. New approach to strain rate sensitivity of concrete in compression [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1999, 10: 1403-1410.
- [3] 肖诗云,田子坤. 混凝土单轴动态受拉损伤试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(7): 14-20. (XIAO Shi-yun, TIAN Zikun. Experimental research on the dynamic tensile damage of concrete under uniaxial tension [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(7): 14-20. (in Chinese))
- [4] 彭刚, 刘德富, 戴会超. 钢纤维混凝土动态压缩性能及全曲线模型研究[J]. 工程力学, 2009, 26(2): 142-147. (PENG Gang, LIU De-fu, DAI Hui-chao. Study on dynamic compressive properties of steel fiber reinforced concrete and full curve model [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(2): 142-147. (in Chinese))
- [5] 肖诗云,张剑.不同应变率下混凝土受压损伤试验研究[J].土木工程学报,2010,43(3):40-45. (XIAO Shi-yun, ZHANG Jian. Compressive damage experiment of concrete at different strain rates[J]. China Civil Engineering Journal, 2010,43 (3):40-45. (in Chinese))
- [6] 杜修力, 窦国钦, 李亮,等. 纤维高强混凝土的动态力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(4): 138-144. (DU Xiuli, DOU Guo-qin, LI Liang, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of fiber reinforced high strength concrete
 [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(4): 138-144. (in Chinese))
- [7] 张艳红, 胡晓, 杨陈, 等. 全级配混凝土动态轴拉试验[J]. 水利学报, 2014, 45(6): 720-727. (ZHANG Yan-hong, HU Xiao, YANG Chen, et al. Dynamic uniaxial tension test of fully graded concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45

(6): 720-727. (in Chinese))

- [8] 杜修力,黄景琦,金浏,等. 混凝土三轴动态强度准则[J]. 水利学报, 2014, 45(1): 10-17. (DU Xiu-li, HUANG Jing-qi, JIN Liu, et al. A tri-axial dynamic strength criterion for concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(1): 10-17. (in Chinese))
- [9] 王海龙,李庆斌. 孔隙水对湿态混凝土抗压强度的影响[J]. 工程力学, 2006, 23(10): 141-144. (WANG Hai-long, LI Qing-bin. Effect of pore water on the compressive strength of wet concrete[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(10): 141-144. (in Chinese))
- [10] 王海龙,李庆斌.不同加载速率下饱和混凝土的劈拉试验研究及强度变化机理[J].工程力学,2007,24(2):105-109.
 (WANG Hai-long, LI Qing-bin. Experiments on saturated concrete under different splitting tensile rate and mechanism on strength change[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(2):105-109. (in Chinese))
- [11] 李庆斌,陈樟福生,孙满义,等. 真实水荷载对混凝土强度影响的试验研究[J]. 水利学报,2007,38(7):786-791.(LI Qing-bin, CHEN Zhang-fu-sheng, SUN Man-yi, et al. Experimental study on the influence of real water load on concrete strength[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(7):786-791. (in Chinese))
- [12] 陈有亮, 邵伟, 周有成. 水饱和混凝土单轴压缩弹塑性损伤本构模型[J]. 工程力学, 2011, 28(11): 59-63. (CHEN You-liang, SHAO Wei, ZHOU You-cheng. Elastoplastic damage constitutive model of water-saturated concrete under uniaxial compression[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(11): 59-63. (in Chinese))
- [13] 胡海蛟,彭刚,王敏,等. 湿态混凝土的单轴压缩试验研究[J]. 混凝土, 2014(1): 21-23. (HU Hai-jiao, PENG Gang, WANG Min, et al. Uniaxial compression test of wet concrete[J]. Concrete, 2014(1): 21-23. (in Chinese))

Influences of pore water cycles on damage properties of concrete under triaxial compression tests

DENG Yuan¹, ZOU Rong-hua², PENG Gang¹, XIAO Jie¹, LIANG Hui¹

(1. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The triaxial compression tests of concrete are carried out to study damage properties after different number of pore water cycles at a middle strain rate of 10^{-4} s⁻¹. The relationships among mechanical properties including the peak stress, peak strain and elastic modulus with number of cycles are analyzed. And damage variable is defined according to the degeneration compressive tangent modulus. Thus, the curves of the stress levels-damage are obtained, and the damage properties of concrete are studied. The research results show that: ①after different pore water cycle, the peak stress and peak strain of concrete under the triaxial compression show an exponential increasing trend with numbers of cycles. The elastic modulus shows a decreasing trend of the power function with the cycles, and then becomes slow. ②damage growth rates under 10, 50, and 200 cycles are greater than that under 0 cycle as a whole, and it decreases with number of cycles. ③through the curves of stress levels-damage, the process of damage evolution can be divided into three parts: initial stage, development stage and instability stage. And according to the data of damage, the damage evolution equation is constructed by fitting. ④according to the three stages of damage development, the damage boundary points are defined. The relationships between the damage boundary points with length of stress level of damage and the different pore water cycles are analyzed. The stress level of the damage boundary points increases at first and then decreases with the pore water cycles.

Key words: number of pore water cycles; triaxial compression test; damage properties; damage boundary point