

混凝土蠕变与应力松弛耦合破坏及临界幂律行为

王影冲¹, 王 鼎¹, *郝圣旺^{1,2}

(1. 燕山大学建筑工程与力学学院, 河北, 秦皇岛 066004; 2. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘要: 与时间有关的力学性能是混凝土工程设计与评估的一个基本材料行为。蠕变与应力松弛试验是测量该性能的最基本的方法。但在实际工程中, 混凝土材料常处于两者的耦合过程。该文设计和开展了混凝土蠕变与应力松弛耦合试验, 着重分析混凝土蠕变与应力松弛耦合过程诱发宏观破坏的演化过程。在施加一个初始位移并保持初始位移恒定的过程中, 混凝土试样在应力松弛的同时, 其变形也在增长且试样的宏观平均应力、应变演化会呈现三个典型演化阶段, 即呈减速的快速演化阶段、稳定演化阶段和呈加速的快速演化阶段。系统能量释放率在破坏前会呈现出临界幂律行为。

关键词: 混凝土; 应力松弛; 蠕变; 耦合; 幂律行为

CREEP-STRESS RELAXATION COUPLING RUPTURE IN CONCRETE AND ITS CRITICAL POWER-LAW BEHAVIOR

WANG Ying-chong¹, WANG Ding¹, HAO Sheng-wang^{1,2}

(1. School of civil engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004, China

2. The State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of mechanics, Chinese academy of sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Time-dependent behavior is a key mechanics property of concrete material and thus for design and safety evaluation of concrete engineering. Creep and stress relaxation are two basic way to recognize time-dependent characteristics of a material. But in practical engineering, concrete material usually involves in a coupling process of creep and stress relaxation. This paper presents creep-relaxation coupling experiments on concrete material to show how it evolves to macroscopic rupture. It indicates that after impose an instantaneous displacement on the cross-head of testing machine, the concrete material exhibits a stress relaxation process associates with increase of deformation. The stress (or deformation) –time curves undergo three stages before failure, i.e. the primary stage with rapid evolution, followed by a steady stage with almost constant slope, and the tertiary stage with accelerated evolution. In the tertiary stage, the energy release rate present a power law behavior and eventually leads to macroscopic rupture.

Key words: concrete, stress relaxation, creep, coupling, power-law behavior

与时间有关^[1-2]的力学性能是混凝土工程设计和安全评估的一个重要问题, 尤其是对于大型的混凝土结构, 如大坝、大型混凝土桥梁、地下混凝土工程等尤其重要。蠕变与应力松弛是混凝土两个最基本的与时间有关的力学特性。蠕变是指在恒定应力下, 材料变形随时间增长的现象。与此相对应的, 应力松弛指的是混凝土在恒定应变时, 其应力随时间逐渐衰减的现象。

由于混凝土蠕变和应力松弛对混凝土工程的安全与耐久性的重要影响, 人们对这方面十分关注。蠕变是混凝土固有的时变特性^[3-6], 混凝土在受拉、压、弯情况下均会发生蠕变现象, 且蠕变现象多表现为非线性变形, 对结构或构件的受力性能影响较大。为了解混凝土的蠕变特征, 大量蠕变试验对蠕变变形演化

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB834100); 国家自然科学基金青年基金项目(51408526)

作者简介: 王影冲(1990—), 男, 河北人, 研究生, 主要从事混凝土结构性能研究;

王 鼎(1985—), 男, 河北人, 讲师, 博士, 主要从事结构可靠度分析研究;

*郝圣旺(1975—), 男, 安徽人, 教授, 博士, 主要从事混凝土结构性能与模拟研究(E-mail: hsw@ysu.edu.cn).

[7-8]蠕变系数^[9-10]等方面的分析研究。正因为蠕变效应对混凝土结构的重要性, 研究者在探索混凝土蠕变机理方面做出了大量工作, 这些结果表明加载水平和龄期^[错误! 未定义书签。]、混凝土内部的微裂隙及内粘聚力^[11]、早期裂缝和腐蚀^[12]、水化作用^[13-14]等对混凝土蠕变有着重要影响。为了实际工程设计和安全评估的需要, 混凝土蠕变计算^[15]和预测^[16-17]一直是人们关注的重点。损伤变量引入法^[18]考虑了损伤对物性参数的影响, 将材料自身缺陷作为蠕变演化的因素之一, 优化了混凝土蠕变计算模型; B3 模式^[19-20]可以通过短期实验数据修正有关参数以获得更精确的徐变计算和预测模型, 目前 B3 模型在混凝土结构分析中应用较为广泛; ACI^[21]推荐使用的双曲线函数模型, 可以预测非标准条件下混凝土的蠕变, 但没有考虑混凝土强度的影响; 混凝土的蠕变预测模型^[22]多为连续型函数模型, 不能很好的适用于混凝土在蠕变变形下发生突然破坏的情况。蠕变破坏预测方法的一直是该领域的一个核心问题, 在部分损伤的混凝土拉、弯蠕变试验^[23]中, 破坏时间与加载应力水平之间呈现出线性关系, 这为预测蠕变破坏提供了一种方法, 但对于蠕变破坏的准确预测需要进一步的研究。

与蠕变相对应, 应力松弛是混凝土的另一种固有时效特性^[24-25], 是影响混凝土长期行为的一个关键因素。应力松弛试验常用来测量和分析混凝土长期变形下的应力损失^[26-28], 松弛系数^[29-31]等。研究者们^[24, 32]尝试探索基于应力松弛试验确定混凝土的长期强度的方法, 以确定混凝土结构的长期承载力; 非均质材料的应力松弛破坏模型中, 在临界刚度条件下, 材料应力变化率与失效时间之间遵循幂律行为^[33], 这一临界幂律行为, 为预测破坏的发生的提供了指南。准确的测定^[34-36]混凝土的应力松弛对于实际工程的设计和施工具有重要的工程实践意义。

综合以上分析, 蠕变和应力松弛是混凝土固有的时效特性的两个方面^[37-38], 是决定混凝土长期行为的关键因素。理解其演化特征是实际工程设计与安全维护的一个核心问题, 也是长期以来研究的热点问题。但是, 实际工程中混凝土常处于蠕变与应力松弛的耦合过程, 对该耦合过程中混凝土响应特征及其机理还不完全清楚, 尤其是该过程通向破坏的特征还不清楚。基于此, 本文将设计和开展实现混凝土蠕变与应力松弛耦合试验, 观测和分析混凝土蠕变和应力松弛耦合过程诱发宏观破坏过程中应力和变形的演化特征。在此基础上, 定义能量释放率, 分析能量释放率随时间的演化过程及其破坏前的临界行为。加深对混凝土时效性能的理解与认识, 为混凝土工程的设计和评估提供借鉴。

1 试验设计与加载方式

1.1 试验材料

本实验所用水泥是秦皇岛浅野水泥制品有限公司生产的 P.O32.5R 型水泥; 细骨料为秦皇岛青龙县的河砂, 最大粒径为 4.5mm, 细度模数为 2.5, 密度为 2.6g/cm³; 粗骨料为秦皇岛抚宁县的石灰岩质的碎石, 最大粒径 16mm, 最小粒径 4.5mm; 外加剂为秦皇岛独楼外加剂厂生产的 UNF 型高效减水剂, 制备尺寸为 40mm×40mm×160mm 的混凝土长方体试样。

1.2 试验加载方法

实验中, 采用闭环位移加载方式, 即控制试验机作动器的运动过程。为实现混凝土蠕变与应力松弛耦合变形, 实验中首先控制试验机作动器运行到预先设定值(加载速度为 1.5mm/min), 然后保持位移不变, 观测试样平均应力应变的时程演化特征。试验开始前先进行预压, 本实验预压至 5-10kN, 预压时间为 5-10min, 每个试样预压 3 次。由于混凝土的离散性较大, 并不能根据单轴压缩试验完全准确确定合适的应力松弛试验点, 因此试验过程中不能保证每一个试样都会在实验过程中发生破坏, 这需要进行反复的试验以得到较好的实验结果。

所以, 整个实验加载可以分为两个阶段。第一阶段是施加初始位移, 即控制试验机作动器运行到设定位置; 随后, 保持作动器位置恒定不变, 也就是加载的第二个阶段。

由于实验机加载架不可能完全刚性, 加载中其会有弹性变形。所以实验中的总位移 U (也就是作动器位移) 由混凝土试样变形 U_c 和实验机加载变形 U_e 两部分组成。在试验过程中利用夹式引伸计测量混凝土试样变形 U_c 。

2 试验结果分析

2.1 试验曲线

图 1 示出了一个典型试样的完整试验结果。其中,图 1(a)为作动器位移随时间的演化曲线,图 1b 和图 1(c)分别表示混凝土试样轴向应力和轴向变形的时程曲线,图 1(d)为作动器位移保持恒定后应力、轴向变形随时间演化放大图。图 1(a)中 OA 段是施加初始位移阶段,该过程近似呈线性。相应地,伴随着作动器位移的增加,混凝土试样的轴向应力(图 1b)和轴向变形(图 1(c))相应单调增加。随后的 AB 段(图 1(a))是保持作动器位移恒定阶段,可以看出试验中作动器位置控制很稳定。在该过程中,混凝土轴向应力随时间逐渐降低(图 1(b)),而其轴向变形 U_c 随时间单调增加(如图 1(c))。因此,在作动器位置保持恒定过程中,混凝土在变形增加的同时伴随着应力的衰减。也就是说混凝土一方面处于变应变作用下的应力松弛过程,另一方面在变应力作用下发生蠕变变形,即呈现出蠕变与应力松弛的耦合过程(图 1)。定义该过程的起始点时间为 t_0 (图 1(a)),也就是应力松弛和蠕变变形的起始点。该时时间点也是整个加载过程中的最大应力 σ_{\max} 点。随着蠕变变形和应力松弛的发展,混凝土试样最后突然发生破坏,并伴随有巨大响声。 t_f 为试样破坏时间。

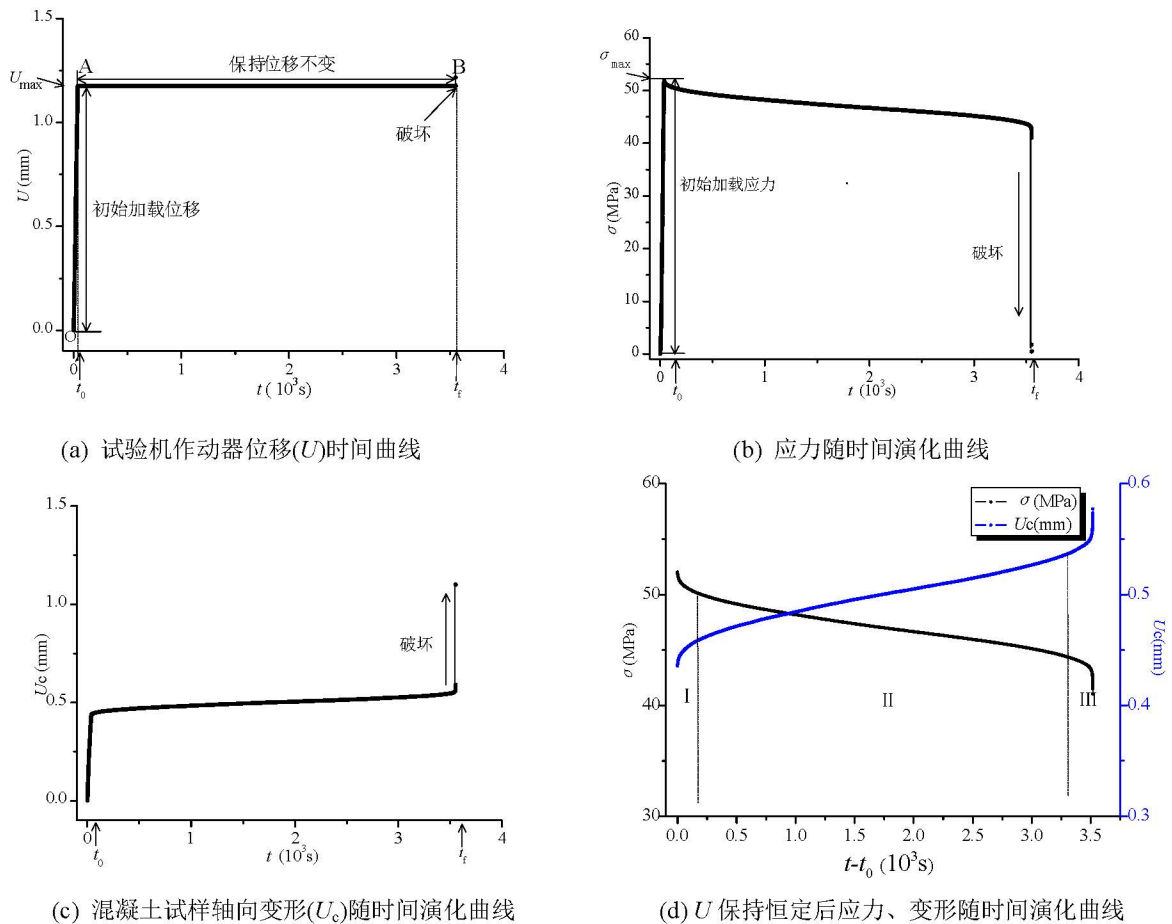


图 1 试验中一个典型试样的试验结果

2.2 应力时程演化曲线

为了考察作动器位移恒定过程中,混凝土应力松弛演化过程。图 2 给出了试验中所有 13 个混凝土试样的应力松弛演化时程曲线。为了更清楚地说明时程曲线演化呈现出的不同演化阶段,图 3 给出了相应的应力率时程曲线。可以明显观察到在保持恒定位移后,每个混凝土试样都经历三个典型阶段。即开始的应力快速松弛阶段,该阶段应力时程曲线呈上凹下降,即表现为减速衰减。随后,进入稳定应力松弛阶段,此时应力率呈近似恒定特征。最后,进入第三阶段。该阶段应力时程曲线呈上凸下降,表现为加速的快速

松弛，并最终导致突然的宏观破坏。

值得注意的是，如图 2 所示，混凝土试样发生宏观破坏的时间点及破坏应力均具有较大的分散性(又见图 4、图 5)。图 4、图 5 横轴分别每个试样试验中施加的最大应力 σ_{\max} 和初始位移 U ，纵轴均为每个试样对应的破坏时间。可以看出，破坏时间与加载水平(最大应力和初始位移)之间并没有呈现出直接关联。这其中的原因在于该过程是蠕变与应力松弛耦合过程，混凝土破坏不会像蠕变破坏那样直接依赖于加载应力水平，也不会像应力松弛那样直接依赖于初始施加位移，而是两者的综合效应。

考虑到最大应力 σ_{\max} 和初始位移 U 的乘积反应的是施加给整个系统的最大总能量 W_{\max} ，所以在图 6 中给出了其与破坏时间的散点图。可以看出，两者之间依然没有呈现出显著关联，这其中的机理还需要更进一步的探索。

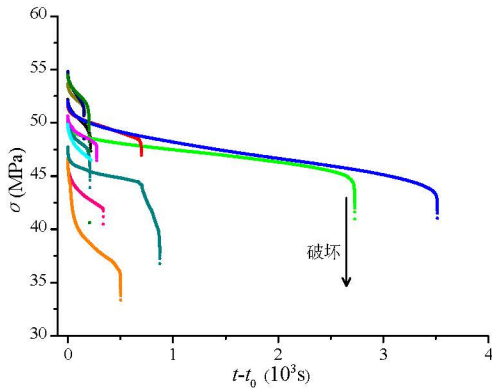


图 2 应力随时间变化曲线

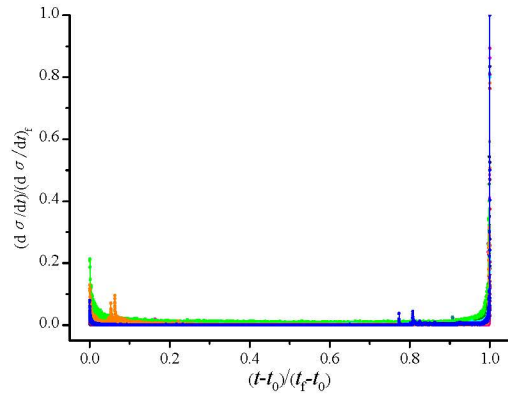


图 3 应力率时程曲线

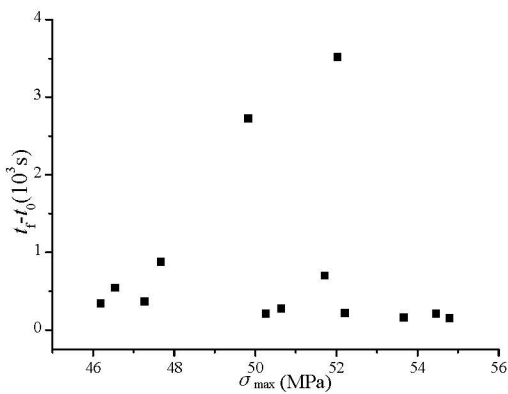


图 4 加载应力水平与 t_f-t_0 关系图

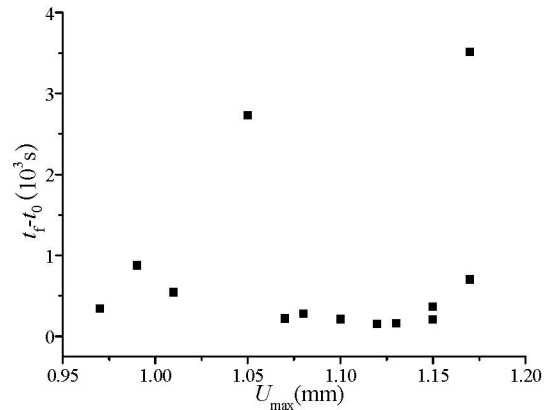


图 5 加载位移水平与 t_f-t_0 关系图

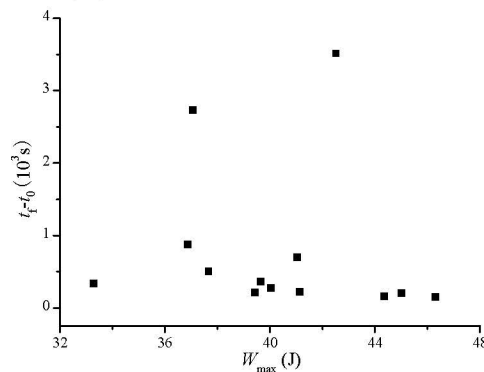


图 6 最大总能量与 t_f-t_0 关系图

2.3 能量分析

图 7、图 8 分别表示在保持作动器位移 U 恒定后的加载系统和试样储存的总能量 W 、混凝土试样储存能量 E 的时程曲线。其中总能量 W 、混凝土试样储存能量 E 定义如下：

$$W = \frac{1}{2} F \cdot U \quad (1)$$

$$E = \frac{1}{2} F \cdot U_c \quad (2)$$

式中 F 是混凝土试样承受载荷。

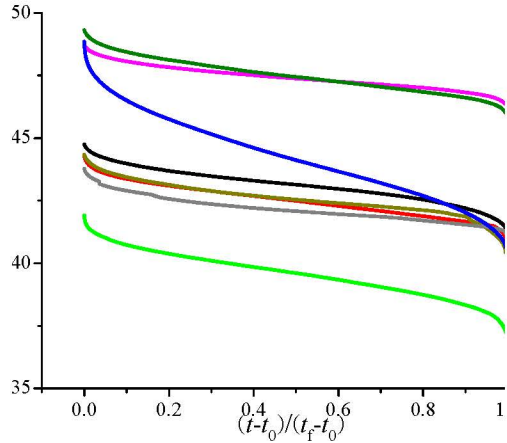


图7 试验系统总能量曲线

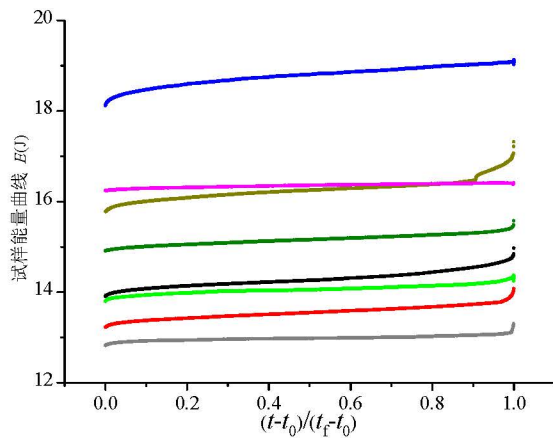


图8 混凝土试样能量曲线

可以看出，试样储存的能量随时间单调增加，但是，整个系统储存的总能量 W 随时间在不断衰减。这说明，总能量 W 中还有一部分以别的形式释放了，其释放的主要途径混凝土的损伤发展。

2.4 能量释放率的临界幂律行为

为了考察能量释放率随时间的演化特征，图9给出了系统总能量释放率的时程演化曲线。其中能量释放率定义为 dW/dt 。可以看出，能量释放率同样展现出了三个典型阶段，即初始呈减速的能量快速释放阶段、能量释放率近似为0的稳定阶段及后期能量的加速释放阶段。

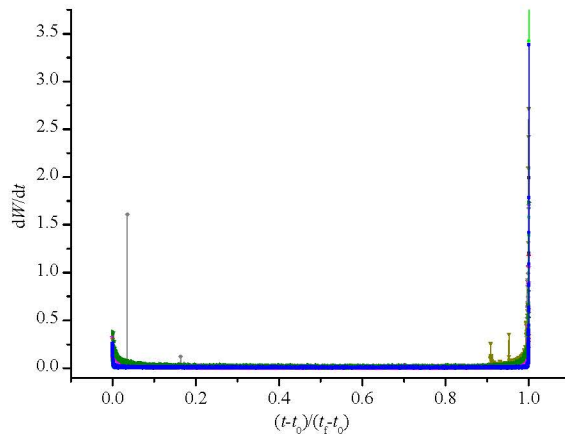


图9 系统总能量释放率

所有试验试样表明，最后的加速释放阶段，能量释放率在破坏前呈现出幂律行为。图10给出了每个试样试验中能量释放率与时间的双对数图。为了更清楚地说明该幂律特征，图中，做了斜率为-2/3的虚线进行比照。可以看出，虽然每个试样的破坏时间和演化曲线会呈现出样本个性，但是所有试样在破坏前，其能量释放率会呈现出近似幂指数为-2/3的临界幂律行为的共性特征，可以统一表示为：

$$\log_{10}[(dW/dt)/(dW/dt)_f] \propto (-2/3) \log_{10}[(t-t_0)/(t_f-t_0)] \quad (3)$$

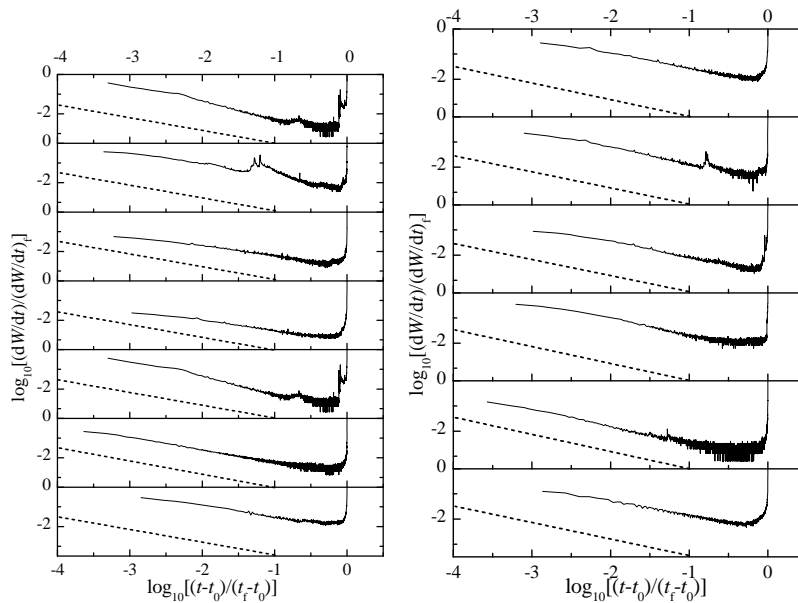


图 10 试验系统能量双对数曲线

3 结论

(1) 在实验室, 实现了混凝土的蠕变与应力松弛耦合破坏。该耦合破坏过程呈现出了与蠕变类似一些特性, 但是, 也展现出了明显区别于蠕变或应力松弛单一过程的特征, 尤其是破坏时间并没有表现出与加载水平的直接关联, 其中的机理还有待进一步研究。

(2) 混凝土蠕变与应力松弛破坏可以分为三个典型阶段, 即初始快速发展阶段、稳定阶段和最后的加速发展阶段。初始的快速阶段应力和变形均快速演化, 但速率不断减小, 并进入稳定阶段; 在稳定阶段中, 能量释放率近似为一个常数; 最后快速发展阶段, 为非稳定阶段。

(3) 在蠕变与应力松弛耦合过程中, 混凝土试样储存能量随时间单调增加, 而整体总能量随时间单调减少, 其中的一部分能量由于混凝土试样的损伤而释放。

(4) 虽然, 试样破坏时间和演化曲线呈现出样本个性行为, 但是所有试验总能量释放率在破坏前呈现出-2/3 阶临界幂律行为的共性特征。

参考文献:

- [1] Milan Suter, Gurmail S.Benipal.Time-dependent behaviour of reacting concrete I: Mechanism and theory [J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2006, 10(1): 51—62.
- [2] Milan Suter, Gurmail S.Benipal.Time-dependent behaviour of reacting concrete II :Applications and discussion [J]. Mechanics of Time-Dependent Materials,2006,10(1): 63—81.
- [3] Narintsoa R,Stephane M,Analet T. Basic creep of concrete under compression, tension and bending[J]. Construction and Building Materials, 2012, 38: 173-180.
- [4] 赵祖武. 关于非线性蠕变问题[J]. 力学学报, 1959, 3(4): 325—334.
- [5] Lennart Ostergaard,David A.Lange,Salah A.Altoubat,Henrik Stang.Tensile basic creep of early-age concrete under constant load [J].Cement and Concrete Reasearch,2001,31(12):1895—1899.
- [6] Fabrizio Barpi, Silvio Valente. Lifetime evaluation of concrete structures under sustained post-peak loading [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72(16): 2427—2443.
- [7] Altoubat S A, Lange D A. Creep,shrinkage,and cracking of restrained concrete at early age [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(4): 323—332.
- [8] Narintsoa Ranaivomanana, Stephane Multon, Analettt Turatsinze.Tensile compressive and flexural basic creep of concrete at different stress level [J].Cement and Concrete Research,2013,52: 1—10
- [9] Ichinose L H, Watanabe E, Nakai H. An experimental study on creep of concrete filled steel pipes [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57(4): 453—466.

- [10] Lino Maia, Joaquim Figueiras. Early-age creep deformation of a high strength self-compacting concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 34: 602—610.
- [11] Pierre Rossi, Jean Philippe Charron, Malena Bastien-Masse, Jean-Louis Tailhan, Fabrice Le Maou, Sandrine Ramanich. Tensile basic creep versus compressive basic creep at early ages: comparison between normal strength concrete and a very high strength fibre reinforced concrete [J]. *Materials and Structures*, 2014, 47(10): 1773—1785.
- [12] Adrien Hilaire, Faris Benbudjema, Aveline Darquennes. Modeling basic creep in concrete at early age under compressive and tensile loading [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, 269: 222—230.
- [13] Neville A M. Recovery of creep and observations on the mechanism of creep of concrete [J]. *Applied Scientific Research*, 1960, 9(1): 71—84.
- [14] A. Sousa Coutinho. A contribution to the mechanism of concrete creep [J]. *Materials and Structures*, 1977, 10(1): 3—16.
- [15] 卓旬, 梅明荣. 混凝土徐变计算理论和方法综述[J]. *水利与建筑工程学报*, 2012, 10(2): 14-19.
- [16] Khristova Yu, Aniskevich K. Prediction of creep of polymer concrete [J]. *Mechanics of Composite Materials*, 1995, 31(3): 216-219.
- [17] Forth J P. Predicting the tensile creep of concrete [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2015, 55: 70—80.
- [18] 杨海天, 邬瑞锋, 佟晓利. 蠕变损伤问题的有效模量法及差分解[J]. *固体力学学报*, 1995, 16(3): 264—268.
- [19] Zdenek P. Bazant, Murphy W P. creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures-model B₃ [J]. *Materials and structures*, 1995, 28(6): 357—365.
- [20] Zdenek P. Bazant. Prediction of concrete creep and shrinkage: past, present and future [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2001, 203(1): 27—38.
- [21] ACI Committee 209, ACI SP 27-3. Prediction Of Creep, Shrinkage And Temperature Effects In Concrete Structures [S]. American Concrete Institute, 1992.
- [22] 丁文胜, 吕志涛, 孟少平, 刘钊. 混凝土收缩徐变预测模型的分析比较[J]. *桥梁建设*, 2004, (6): 13—16.
- [23] A. Carpinteri, S. Valente, F. P. Zhou, G. Ferrara, G. Melchiorri. Tensile and flexural creep rupture test on partially-damaged concrete specimens [J]. *Materials and structures*, 1997, 30(5): 269—276.
- [24] 黄国兴, 惠荣炎, 易若冰. 大体积混凝土的应力松弛[J]. *水利学报*, 1989, 1: 61—65.
- [25] 朱伯芳. 混凝土的弹性模量、徐变度与应力松弛系数[J]. *水利学报*, 1985, 9: 54—61.
- [26] I. Pane, W. Hansen. Early age creep and stress relaxation of concrete containing blended cements [J]. *Mechanics of Materials*, 2002, 35(2): 92-96.
- [27] Wen-Yih Kuo, Jong-Shin Huang, Bien-You Yu. Evaluation of strengthening through stress relaxation testing of organo-modified montmorillonite reinforced cement mortars [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(6): 2771—2776.
- [28] Sudip Bhattacharjee, Aravind Krishna Swamy, Jo S. Daniel. Continuous relaxation and retardation spectrum method for viscoelastic characterization of asphalt concrete [J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2012, 16(3): 287—305.
- [29] V. Sanchez-Galvez, M. Elices, A. Erdelyi, M. Kosiorek. Stress relaxation due to steam curing [J]. *Materials and Structures*, 1977, 10(6): 351—356.
- [30] J. Murali, Krishnan, K. R. Rajagopal. Triaxial testing and stress relaxation of asphalt concrete [J]. *Mechanics of Materials*, 2004, 36(9): 849—864.
- [31] Yuan Gao, Jun Zhang, Po Han. Determination of stress relaxation parameters of concrete in tension at early-age by ring test. *Construction and Building Materials*, 2013, 41: 152—164.
- [32] H. Beushausen, C. Masuku, P. Moyo. Relaxation characteristics of cement mortar subjected to tensile strain [J]. *Materials and Structures*, 2012, 45(8): 1181—1188.
- [33] Hao Shengwang, Zhang Baoju, Tian Jifeng. Relaxation creep rupture of heterogeneous material under constant strain [J]. *Physical Review E*, 2012, 85(1): 1—5.
- [34] Heinrich Trost. Stress Relaxation of Concrete Structures and Relaxation Tests of Very Old Concrete [J]. *Fundamental Research on Creep and Shrinkage of Concrete*, 1982, 171—178.
- [35] Benjamin E. Byard, Anton K. Schindler. Modeling early-age stress development of restrained concrete [J]. *Materials and Structures*, 2015, 48(1-2): 435—450.
- [36] Kogan E A. Stress relaxation in concrete of massive hydraulic structures [J]. *Power Technology and Engineering*, 1980, 14(9): 916—920.
- [37] Brooks J J, Neville A M, 周履. 混凝土中的应力松弛及其与徐变的关系[J]. *国外桥梁*, 1978, 2: 54—60.
- [38] Klug P, Wittmann F. The correlation between creep deformation and stress relaxation in concrete [J]. *Materials and Structures*, 1970, 3(2): 75—80.