

DOI:10.3969/j.issn.1004-4701.2016.06.01

# 混凝土徐变与损伤的耦合试验研究

汪庆

(江西省水利科学研究院,江西 南昌 330029)

**摘要:** 本文重点研究了混凝土材料损伤对徐变变形的影响,以及混凝土非线性徐变过程中的损伤大小. 本文将长期荷载下混凝土的性能作为研究对象,从混凝土徐变以及损伤两方面出发,运用超声波检测的方法测量混凝土内部损伤的演化规律,分析高持荷水平下混凝土材料发生徐变破坏的时间及对应的徐变变形,分析了徐变对混凝土材料损伤的影响规律,得出了高持续荷载下混凝土材料徐变与损伤相互影响的规律.

**关键词:** 混凝土;长期荷载;徐变;超声检测;损伤

**中图分类号:** TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4701(2016)06-0391-07

## 0 前言

现有水工混凝土材料抗力的研究主要还依靠室内试验,但由于室内试验的条件和结构服役环境相差很大,其中服役时间是不可忽视的关键因素.在室内混凝土试验中,从最开始施加荷载到试件发生破坏仅仅用时几分钟<sup>[1]</sup>,但在实际工作环境下,混凝土结构必须承受自重等荷载的持续作用.而混凝土在持续荷载作用下会产生一定的徐变变形,从图1看出,徐变时间会使混凝土结构的强度降低,从而缩短其使用寿命<sup>[2]</sup>.这也将导致混凝土真实强度与室内短期加载下的强度相比产生了一定的劣化<sup>[3]</sup>,倘若忽视长期荷载下的强度劣化影响,将不利于混凝土结构的设计,不利于安全耐久性的评价.

通过混凝土非线性徐变的深入研究,发现长期荷载作用下混凝土的变形,实际上是由凝胶体流动变形产生的徐变变形与微裂纹累加产生的损伤变形两者相互耦合的作用结果<sup>[4]</sup>.当应力水平较低,混凝土的损伤变形还很小,不足影响整体变形,此时的徐变系数为线性关系;当应力水平较高时,混凝土的损伤变形开始发挥作用,宏观表现为徐变系数为非线性关系.图2看出,当应力水平很高时,混凝土的损伤变形承担主要作用,此时混凝土在徐变和损伤的共同作用下,最终导致材料

发生破坏<sup>[2,5]</sup>.

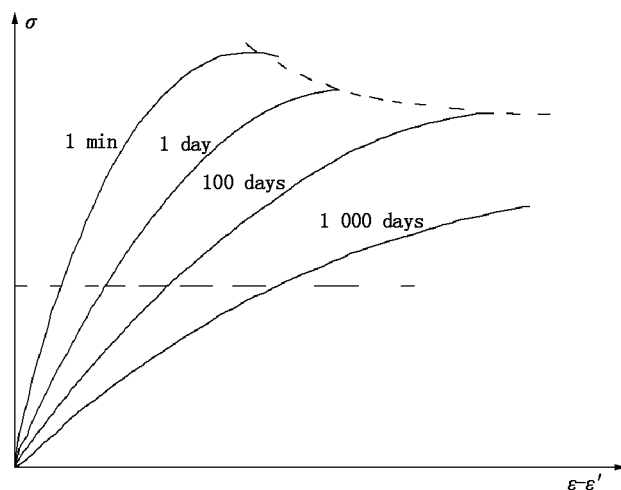


图1 不同持荷时间下混凝土的应力应变关系

经过多年研究,李兴贵<sup>[6,7]</sup>和王德兴<sup>[8]</sup>等人通过混凝土材料高应力持荷下轴心受拉试验所得数据分析,得出混凝土徐变中所施加的荷载强度越大,混凝土材料所能承受荷载的时间也就越短<sup>[9]</sup>,但该理论仅局限在研究徐变施加的应力与破坏时间之间的关系. Smad<sup>[10]</sup>通过研究一定持荷强度下不同持荷时间与混凝土材料抗压强度之间关系,得出同为C39的混凝土材料,持荷时间越长,混凝土抗压强度折损量越大. Iravan<sup>[11]</sup>与 Claeson<sup>[12]</sup>等人试验模拟的结果也得出相同结论.

收稿日期:2016-10-21

项目来源:国家自然科学基金资助项目(编号:50809079).

作者简介:汪庆(1990-),女,硕士.

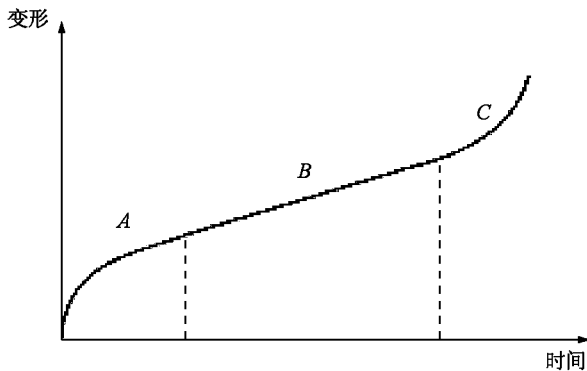


图2 高应力水平下混凝土的徐变变形

混凝土线性徐变的研究已得到较为成熟的理论,运用粘弹性理论可以很好的模拟分析混凝土的线性徐变。相比之下,对混凝土非线性徐变的研究成果较少,仅运用粘弹性理论不能完善的阐述混凝土的非线性徐变现象<sup>[13]</sup>。而且大多数现有徐变试验的研究对象是未发生初始损伤的混凝土试件,而有关具有损伤的混凝土徐变研究方面还较少涉及,因此本文主要就具有初始损伤的混凝土进行非线性徐变试验的研究。

## 1 混凝土非线性徐变试验研究

### 1.1 试件制备

本文试验所需的混凝土试件采用水灰比 0.41,砂率 31% 制作成型,所制成的混凝土试件设计强度为 C30,具体配合比如表 1 所示。

表 1 混凝土设计的配合比  $\text{kg}/\text{m}^3$

强度等级	水灰比	砂率	水	水泥	砂	石子
C30	0.41	31%	205	500	517	1 151

### 1.2 混凝土初始损伤的引入

引起混凝土试件产生初始损伤的方法很多,本文主要采用碱骨料反应法和高温烘烤法这两种方式,其中碱骨料反应法引入的损伤较小,高温加热法引入的损伤较大。

(1)碱骨料反应法。采用碱骨料反应法引入初始损伤,主要利用溶液中较高的碱含量会与骨料中的活性硅化物产生化学反应这一特点,对混凝土试件进行初始损伤的引入。由于在外环境一定的情况下,混凝土试件在发生碱骨料反应后的损伤程度取决于试件浸泡碱液的时间长短,停止浸泡后,再将其放置在干燥环境下,碱

骨料反应便会随即停止。

将三组  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  的试件分别放入盛有  $1\text{ mol/L}$  的  $\text{NaOH}$  溶液<sup>[14]</sup> 的养护盒中,将试件完全浸泡于碱溶液中再将养护盒密封,最后将养护盒放置于温度为  $80\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$  的碱骨料试验箱内,三组试件分别养护 12 h、18 h、24 h。同时本试验运用 pH 试纸对碱骨料反应前后碱液的 pH 值进行对比,保障了碱骨料反应所需的碱浓度要求,保证了试验全过程碱浓度的一致性。

(2)高温烘烤法。高温加热法引入初始损伤,利用高温作用下混凝土的抗压强度会随时间与温度变化的这一特点<sup>[15]</sup>,对混凝土试件进行初始损伤的引入。在一定温度加热下,混凝土试件的损伤情况取决于受热的长短,受热时间越长,混凝土损伤的程度就越大。

本试验通过将两组混凝土试件放置于  $800\text{ }^\circ\text{C}$  的电阻炉内分别加热 106 min、60 min,从而得到具有不同初始损伤程度的混凝土试件。

(3)初始损伤程度。将经历了碱骨料反应法与高温烘烤法的混凝土试件放置于岩石力学试验系统下进行单轴抗压试验,测其抗压强度。其中,本文将初始损伤程度定义为混凝土试件发生损伤反应后的抗压强度与该组未发生损伤试件的抗压强度的百分比。

实验数据表明<sup>[16]</sup>,混凝土试件经碱骨料反应 12 h 后的单轴抗压强度降低了 16.36%,经碱骨料反应 18 h 后的单轴抗压强度降低了 18.86%,经碱骨料反应 24 h 后的单轴抗压强度降低了 25.47%,经高温加热反应 106 min 后的单轴抗压强度降低了 70.37%,经高温加热反应 60 min 后的单轴抗压强度降低了 53.84%。

从而表明,本次试验已经成功地在混凝土试件中引入了损伤,并可通过控制反应时间的不同引入了具有不同初始损伤的试件。

### 1.3 混凝土非线性徐变试验

对具有不同初始损伤的试件进行高应力水平下的持荷徐变试验,持荷强度大致为每组试件 85%、90%、95% 的抗压强度。基于混凝土试件的损伤情况无法直接测得,而超声波速的衰减情况可间接反映出损伤的变化情况,因此本文采用式(1)来定义损伤量。

$$D = 1 - \left( \frac{V_i}{V_0} \right)^2 \quad (1)$$

式中: $V_0$ —混凝土试件在历经初始损伤后所对应的超声波波速;

$V_i$ —混凝土试件在徐变过程中第  $i$  时刻所对应的超声波波速。

为了便于统计处理,本文将浸泡 12 h 的混凝土试件命名为 1 组,浸泡 18 h 的混凝土试件命名为 3 组,浸泡 24 h 的混凝土试件为 2 组,800 °C 高温加热 106 min 的混凝土试件命名为 5 组,800 °C 高温加热 60 min 的混凝土试件命名为 6 组。

高应力水平下的徐变试验同样采用岩石力学试验系统,在加载过程中定时测其波速,达到持荷强度后加载停止,系统进入持荷阶段。利用超声检测仪监测持荷阶段的波速,并记录测试时间点的波速以及轴向变形情况,直至试件发生破坏(图 3),如果持荷时间超过预期要求,则继续加载直到将其压坏。

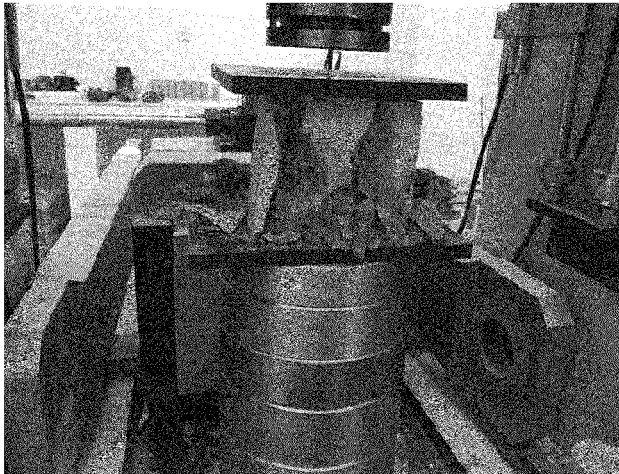


图3 试件徐变至破坏

## 2 数据分析

### 2.1 初始损伤对混凝土徐变的影响规律

#### 2.1.1 徐变中混凝土应变与持荷时间关系

将不同初始损伤的试件组别在非线形徐变过程中应变随持荷时间的变化数据<sup>[16]</sup>描绘于图中,可初步分析初始损伤对徐变的影响,其中横坐标为持荷时间,纵坐标为应变的百分比,而应变是其轴向变形与原始长度(100 mm)的比值。

从图 4 中可以看出,在徐变荷载的作用下,随着持荷时间的增加,混凝土应变持续增加。应变与时间的曲

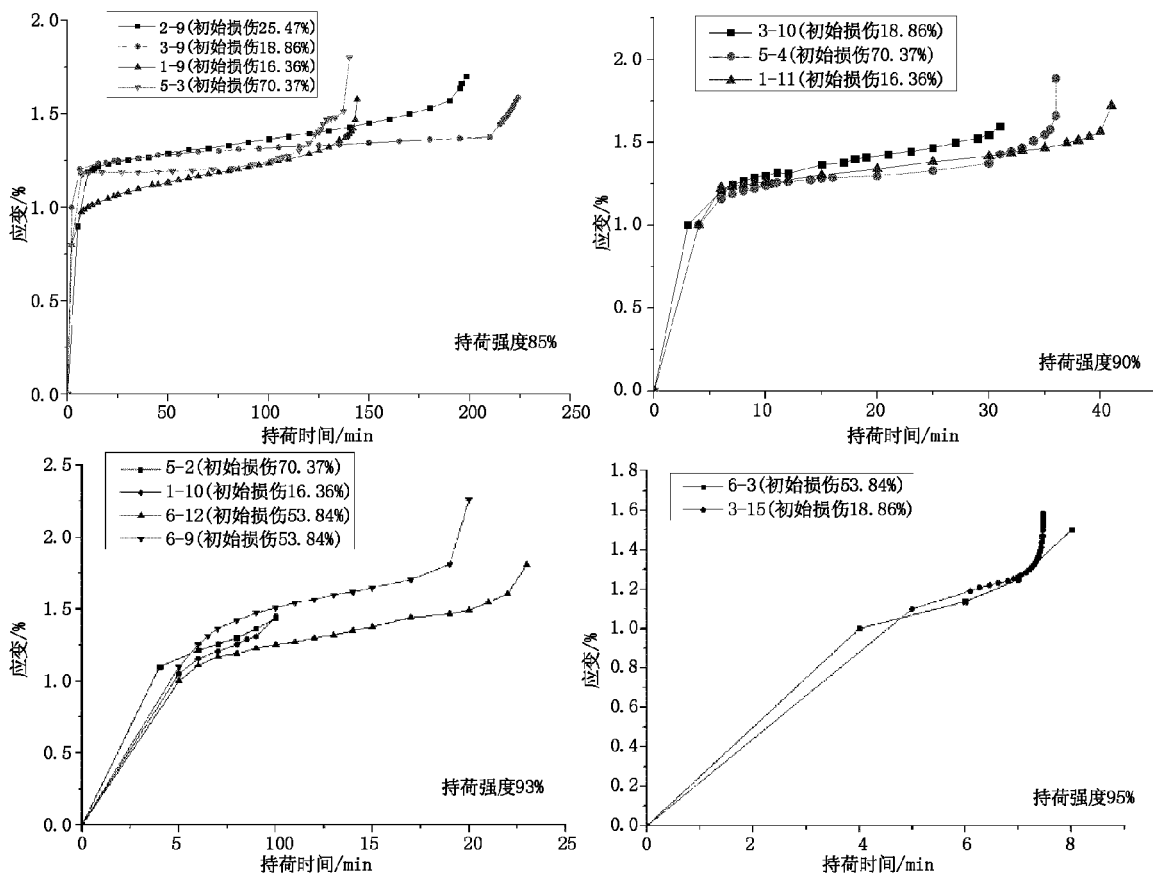


图4 持荷时间与应变的关系曲线

线分为3部分,第一部分为荷载从0增加到预定荷载阶段,此时混凝土的应变增长较快,此时的应变主要为弹性应变和部分损伤应变;第二部分为荷载保持恒定,但应变缓慢增加,此时混凝土的应变增长主要贡献为徐变应变;第三部分为应变迅速增加,并导致混凝土材料的破坏,此时混凝土的损伤较大,应变增长的主要贡献来自于损伤应变。

同时从图4中可以看出,当徐变荷载分别为85%,90%,93%和95%的抗压强度时,混凝土的徐变破坏时间分别为150min,40min,20min和8min左右,即随着持续荷载水平的提高,混凝土的徐变破坏时间逐渐减小。

具有不同初始损伤的混凝土试件在徐变过程中产生的应变增长发展趋势情况大致相同,也就是说,初始损伤仅仅削弱混凝土的强度,但对徐变过程中应变的发展趋势并无太大影响。

### 2.1.2 持荷水平对徐变稳定段的影响

在不同持荷水平的徐变过程中,截取其对应的应变稳定发展阶段的曲线,用origin软件中快速线性拟合的方法求解出所需要区域段的斜率,再取同一持荷水平下应变斜率的平均值作为该持荷水平下稳定发展段的斜率值,从而分析每个持荷水平下应变的稳定增长阶段的斜率变化规律。

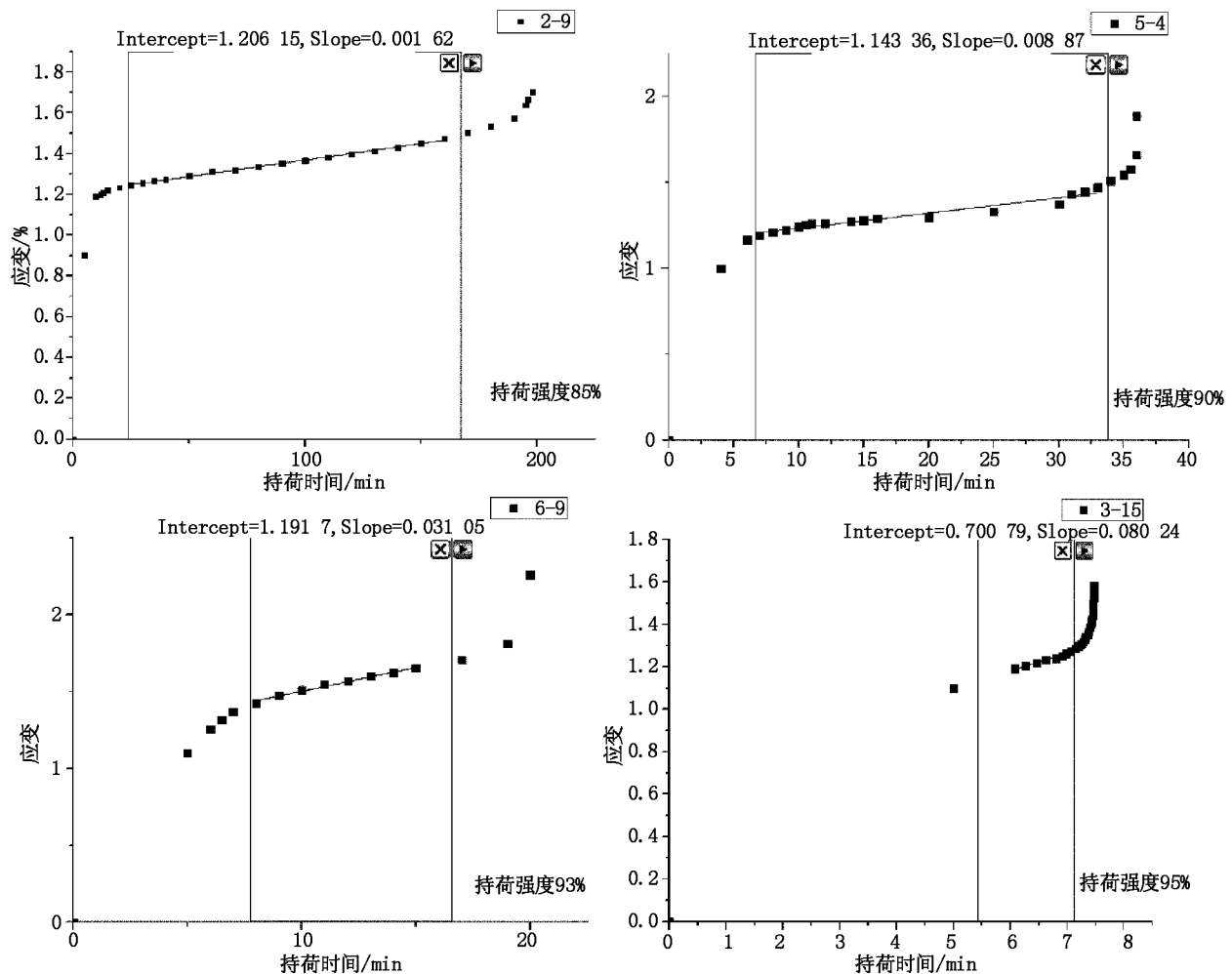


图5 在应变稳定阶段的斜率取值

根据上述图5的拟合结果,现将各个持荷水平下应变的稳定发展阶段的斜率值描点绘于图6。

可以看出在徐变持荷初期应变处于线性增长阶段,这时的变形主要是由徐变引起的,但在持荷的末期混凝土

内部的裂纹急剧扩张,这时的变形主要是损伤决定的,最终导致试件破坏。从图6可以清晰看出,随着持荷水平的不断增长,混凝土在应变线性增长阶段的应变斜率也会随之增加,并且应变斜率与持荷水平呈现近似

指数增长的趋势。

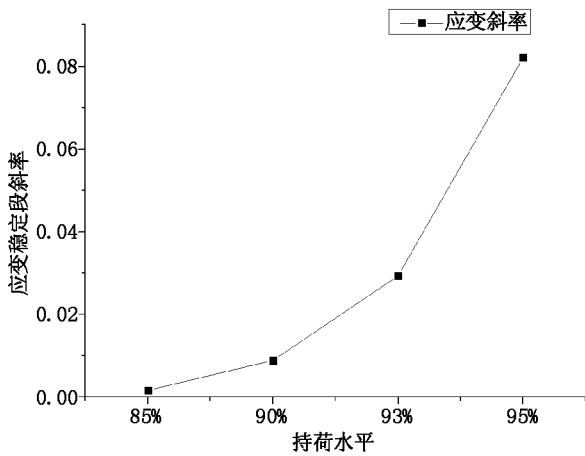


图 6 持荷水平与应变稳定阶段斜率的关系

### 2.2 混凝土徐变对损伤的影响规律

研究混凝土试件徐变与损伤之间相互耦合的关系,不仅仅要分析上节中损伤对徐变的影响规律,而且也需要研究混凝土试件在徐变过程中损伤的发展情况,两者相结合分析方可得出最终耦合的关系。

#### 2.2.1 混凝土徐变中损伤发展规律

提取持荷时间以及对应时刻的损伤量值<sup>[16]</sup>,并运用 origin 软件对各数据进行描点,最终绘制于图 7 便于综合对比分析其规律。

通过对比分析图 7 中各组损伤曲线可以得出,混凝土损伤的发展规律与应变的发展规律基本相同,在持荷初期,混凝土的损伤较小,随着持荷时间的增加,混凝土的损伤持续增加,在持荷后期,损伤迅速增加,并导致混凝土材料的破坏。同时可以看出,在相同持荷水平下,具有不同初始损伤的混凝土试件在徐变过程中,损伤的

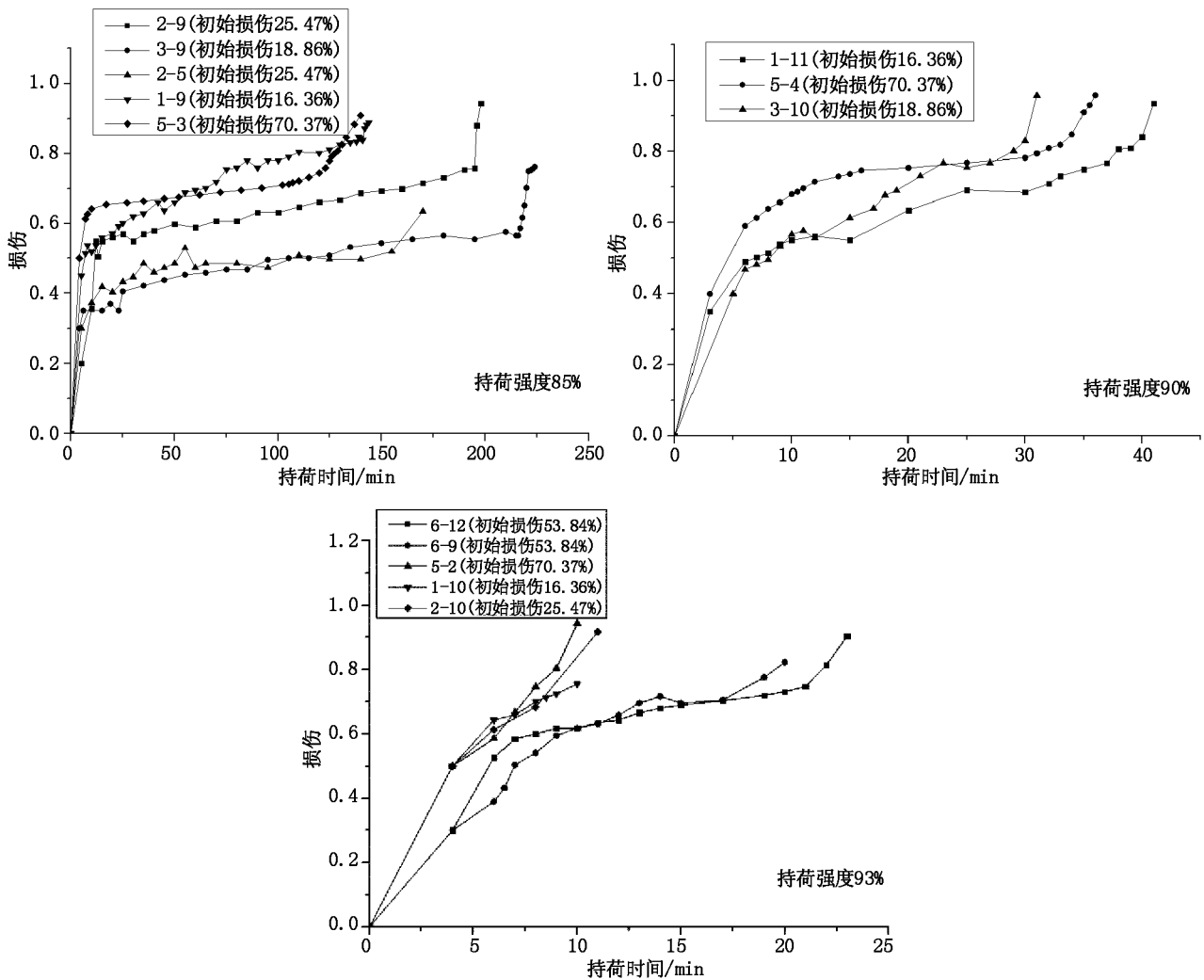


图 7 持荷时间与损伤的关系曲线

增加量与持荷时间之间的发展趋势线大致相同,只是初始损伤越大的试件在徐变过程的所能承受的持荷时间会稍微减少。

将图7损伤与持荷时间关系与图4应变与持荷时间的关系进行对比分析,可以看出,混凝土材料在高应力水平下进行的徐变试验,前期应变增长的很慢,而损伤的增加也较为缓慢,而当徐变到达一定程度后应变与损伤均随之发生陡然的增加。可以认为徐变初期产生

的应变增加是由徐变引起的,而徐变到了一定阈值后混凝土的应变趋势与损伤发展趋势一致,也就是说达到一定阈值后混凝土的损伤是由徐变应变引起的,同时混凝土的损伤又会导致混凝土的应变迅速增加。

### 2.2.2 混凝土徐变对损伤的影响

为进一步反映徐变对损伤的影响规律,本文将混凝土徐变变形过程中的损伤与应变关系绘图如图8。

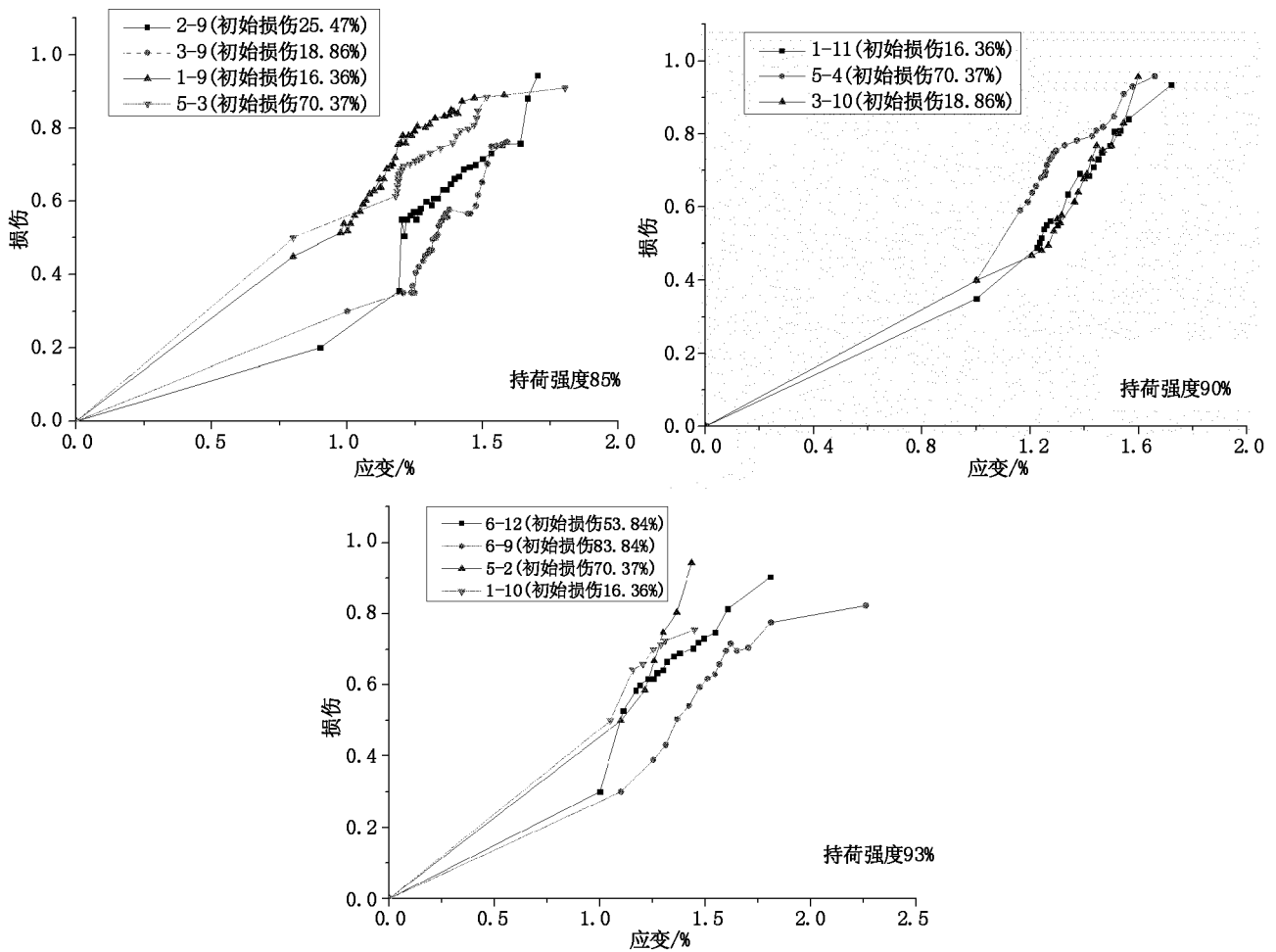


图8 应变持荷时间与损伤的关系曲线

从图8中可以看出,在不同的持荷水平下,混凝土损伤和徐变的关系基本相同。在应变发展的初期,混凝土内部的损伤较小,发展较慢;当徐变应变发展到一定阶段后,混凝土内徐变应变对材料造成了一定的损伤,此时损伤发展速率较快,最后导致混凝土材料破坏。同时可以看出,具有初始损伤试件在非线性徐变的过程中其演变发展的特性与未发生损伤的混凝土试件的特征是完全一致的,相当于初始损伤的引入仅仅只改变试件

的抗压强度,并不会改变混凝土材料在徐变中的特性。也就是说初始损伤并不会改变混凝土材料本身的特性,可以将初始损伤后的试件看成是原本强度相对较低的混凝土试件。

## 3 结论

本文分析了不同初始静荷载下混凝土动力强度和

应力-应变特性。通过本文分析可以得出以下结论：(1)在高徐变荷载的作用下，混凝土的徐变应变分为三个阶段，在加载阶段，混凝土应变呈现快速增长；在持荷阶段的前期，混凝土应变在荷载不变的条件下呈现缓慢地稳定增长，同时稳定增长阶段所持续的时间较长；而持荷后期，当徐变达到一定程度后，混凝土应变迅速增加，并导致混凝土材料的破坏。(2)在高徐变荷载的作用下，混凝土的损伤在持续荷载的作用下而呈缓慢增长，当徐变过程达到一定程度后，混凝土的损伤发展速率便会较快，直至混凝土材料发生破坏。(3)混凝土在高持续荷载下的徐变变形具有稳定段，稳定发展段的应变斜率会随持荷水平的不断增长而随之增加，并且应变斜率与持荷水平之间呈现近似指数增长的趋势。(4)徐变到了一定阈值后混凝土的应变与损伤发展趋势一致，可以认为徐变后期，混凝土的损伤是由徐变应变引起的，同时混凝土的损伤又会导致混凝土的应变迅速增加。

#### 参考文献：

- [1] DL/T5150-2001 水工混凝土试验规程[S].
- [2] Neville AM. Creep of concrete; plain, reinforced, and prestressed North-Holland Pub. Co 1970.
- [3] 俞茂铨. 混凝土强度理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [4] 封伯昊, 张立翔, 李桂青. 混凝土损伤研究综述[J]. 昆明理工大学学报, 2001, 26(3): 21~30.
- [5] 王德法, 张浩博, 黄松梅. 混凝土受拉徐变中破坏时间与持荷应力关系研究[J]. 西安交通大学学报. 1999; 33(10): 104~105.
- [6] 李兴贵. 高拉应力作用下混凝土的徐变和徐变破坏[J]. 河海大学学报. 1996, 24(4): 58~64.
- [7] 李兴贵, 周耀文. 混凝土在不同介质中持续高拉应力下的徐变破坏试验研究[J]. 水利水电技术, 1996, 3: 58~62.
- [8] 王德法, 张浩博. 轴拉荷载下混凝土徐变性能的研究[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(3): 95~98.
- [9] G. E. Troxell, H. E. Davis. Composition and Properties of Concrete. New York: McGraw-Hill, 1956.
- [10] M. Smadi M, O. Slate F, Nilson AH. Shrinkage and Creep of High, Medium, and Low-Strength Concretes, Including Overloads. ACI Materials Journal. 1987, 84(3): 224~234.
- [11] Irvani S, MacGregor JG. Sustained Load Strength and Short-Term Strain Behavior of High-Strength Concrete. ACI Materials Journal. 1998, 95(5): 636~647.
- [12] Claeson C, Gylltoft K. Slender Concrete Columns Subjected to Sustained and Short-Term Eccentric Loading. ACI Structural Journal. 2000, 97(1): 45~51.
- [13] Bazant ZP. Creep and Damage in Concrete. Materials Science of Concrete IV, J Skalny and S Mindess, Eds, Am Ceramic Soc, Westerville, OH. 1995: 355~389.
- [14] 中国建筑科学研究院. GB50204-2002 混凝土结构工程施工质量验收规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [15] 李国华, 凤凌云, 郑盛娥. 高温后混凝土及其组成材料性能研究[J]. 四川建筑科学研究, 1991, 17(2): 1~4.
- [16] 汪庆. 混凝土非线性徐变和损伤耦合试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.

编辑: 张绍付

## Statistical dynamic damage model of concrete under initial static loading

WANG Qing

(Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China)

**Abstract:** In this paper, the influence of concrete material damage on creep deformation and the damage size in the process of nonlinear creep of concrete are studied. Concrete under long-term load as the research object, from the two aspects of concrete creep and damage, study the damage deformation of concrete under sustained load, using ultrasonic testing to measure the evolvement rules about the inside damage of concrete, analyzed the time of creep damage when materials under a level high of load, and the correspond to creep deformation, analyzed the influence of creep to concrete materials damage, synthesize that the concrete materials under high sustained load - the effect of creep and damage to each other.

**Key words:** Concrete; Sustained loading; Creep; Ultrasonic testing; Damage

翻译: 汪庆