混凝土多轴应力状态下的徐变研究

郭 磊,陈守开

(河海大学水工结构研究所,江苏 南京 210098)

摘要 在搜集国内外有关资料的基础上,通过对混凝土在多轴应力作用下的徐变与强度关系分析,说明在多轴应力状态下不能简单地采用叠加原理。展示了新的三轴徐变量测仪器及其徐变试验成果以及 2 组多轴与单轴应力状态下的徐变恢复试验成果,并对试验数据进行比较分析,得到多轴应力状态下徐变恢复与应力大小以及持荷时间之间的规律,证实了多轴应力状态下的徐变恢复与已经产生的压缩徐变有密切的关系。

关键词 :混凝土 ;单轴应力状态 ;多轴应力状态 ;徐变 ;徐变恢复

中图分类号 :TU41 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2007)06-0018-03

Study on concrete creep in state of multi-axial stress//GUO Lei, CHEN Shou-kai (*Institute of Hydraulic Structures, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: Based on the collection of relevant data at home and abroad, it is demonstrated that the superposition principle is invalid for analysis of the relationship between creep and strength of concrete under multi-axial stress. The new triaxial creep measurement instrument as well as experimental result was introduced. By analysis of the experimental data of creep recovery under triaxial and uniaxial stresses in two groups, the relationships between the creep recovery, stress, and loading time were deduced, and it is verified that there is a close relationship between creep recovery and compression creep being produced under multi-axial stresses.

Key words: concrete; state of uniaxial stress; state of multi-axial stresses; creep; creep recovery

根据近代徐变理论,混凝土试件在荷载持续作用一段时间后卸载就会发生两种恢复变形:一种是瞬时弹性恢复变形;另一种是随时间发展的恢复变形,被称为徐变恢复。徐变恢复的资料对预报复杂应力下徐变和建立徐变理论都是非常重要的。影响徐变恢复的因素很多,这不仅与混凝土的组成材料及其配合比,周围环境的温度、湿度,构件截面形式与养护条件以及混凝土的龄期等有关,而且还与应力的状态、性质有着密切的关系。

1 多轴三向应力下徐变与强度的关系

20 世纪 30 ~ 80 年代徐变的理论和方法大都基于线性关系和叠加原理发展而来,这与混凝土的实际情况有较大差距。目前,在叠加原理的基础上建立了混凝土徐变恢复函数,并利用恢复函数与徐变度函数建立了基于等效历史应力假定的双功能徐变函数[1],也只是在应力比不大于 0.5 的情况下基本能满足实际工程的需要。在工程计算中,一般假定拉、压徐变是相等的,即有 $P = Q$ 时叠加原理对于混凝土的徐变大体上是适用的。对于卸载时的徐变恢复,采用叠加原理会产生较大的偏差。大多数混凝土和钢筋混凝土结构是在空间应力持续作用条件下工作的。混凝土徐变对大体积水工建筑物或核电站压力容器等应力应变状态有很大影响。因此,研究三向应力状态下的混凝土徐变特性是很重要的。

在轴向应力作用下,不仅在加荷方向产生徐变,而且在与加荷方向垂直的方向也产生徐变,即横向徐变。因此,混凝土结构在二轴、三轴应力作用下,3 个方向的徐变将互相影响。根据以往试验证实,在单轴正常工作应力约为 40% 强度的作用下,应力与徐变呈线性关系。同样,在三向应力作用下,徐变与应力之间也近似成线性关系[1]。

$$\varepsilon_{ic} = \frac{1}{3}\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \tag{1}$$

式中 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 为 3 个主应力方向的徐变应变分量。

应力强度 σ_i 为

$$\sigma_i = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \tag{2}$$

作者简介:郭磊(1980—),男,河南信阳人,博士研究生,从事水工结构研究。E-mail:glboss@126.com

另外，体积徐变（$\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3$）与平均正常应力 $\frac{1}{3}(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)$ 也成线性关系，体积徐变随持荷时间的增加而增大。若假定多轴徐变符合叠加原理，则在三向应力作用下，与 σ_1 同方向的徐变可用式(3)计算：

$$C_1 = C_{u1} - \mu_{cp,u}(C_{u2} + C_{u3}) \quad (3)$$

式中：C_{u1}，C_{u2}，C_{u3} 分别为在轴向应力 σ_1，σ_2 和 σ_3 单独作用产生的轴向徐变；$\mu_{cp,u}$ 为在单轴压缩应力作用下的徐变泊松比；C_1 为在三向应力作用下与 σ_1 同方向上产生的徐变。

根据上述结果，进一步假定徐变与应力成正比，则式(3)变为

$$C_1 = [\sigma_1 - \mu_{cp,u}(\sigma_2 + \sigma_3)]\,C_{sp} \quad (4)$$

式中 C_{sp} 为单位应力作用的徐变，即徐变度。

以上和部分国内外文献记载的试验结果表明，在多轴应力作用下有效徐变的泊松比与单轴应力作用下徐变的泊松比不相等，一般前者比后者小。同时 3 个方向的有效徐变泊松比也是不相等的，其大小取决于 3 个方向应力的组合情况。严格地说，多轴应力下徐变不符合叠加原理[2]。因此，多轴徐变的特性不能简单地从单轴徐变试验结果来推断。

2 多轴与单轴徐变对比试验成果

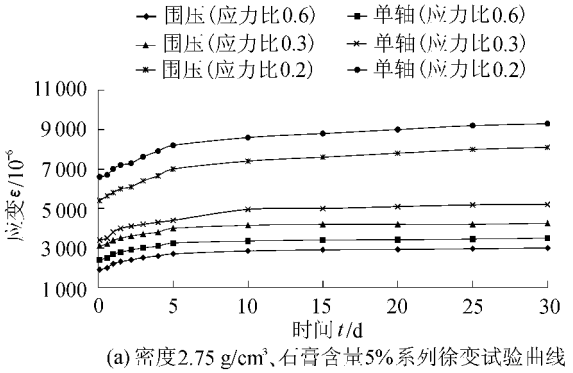
2.1 国内先进的三轴徐变量测仪器

水工结构模型试验除了研究模型在外荷载作用下经过弹性、弹塑性或黏弹性阶段直至破坏的整个发展过程外，还必须考虑时间因素引起的模型材料的徐变变形。但是由于模型材料需要满足相似比，其弹性模量和强度都很低，无法直接使用现有的混凝土和岩石材料的徐变仪进行模型材料的徐变试验。

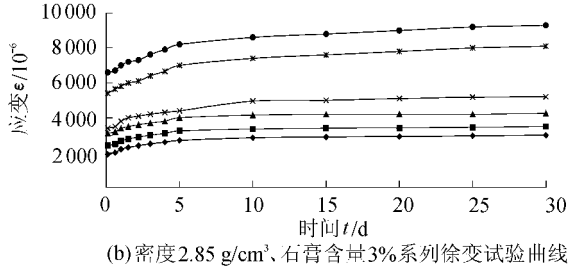
目前大体积混凝土仿真应力计算，多轴徐变应力都是根据单轴的试验结果拟合计算参数。通过叠加原理应用于多轴的情况，和实际相差甚远。而国内徐变试验都是单轴形式[2]，操作过程由人工手动进行，影响试验精度。文献[3]介绍了双轴徐变仪器，将单轴弹簧式拓展到双轴方向，但这会影响到加载时的精度。文献[4]甚至研制过三轴徐变试验机，用油压千斤顶从 3 个方向调整荷载，很不方便。另外在测量相对面压板之间的变形时，由于减磨材料的变形会使测量不准。三向加载使得试件没有裸露的表面，无法观测试件的表面变形。清华大学水利水电工程系近期针对地质力学模型试验中使用的 NIOS 新型模型材料徐变性能研究问题，进行了小型围压三轴徐变量测仪的研制，并成功应用于上述模型材料的徐变试验。与常规的液压系统相比，该系统结构简单，制作容易，造价低廉，易于操作控制，而且不会因为传压流体介质的泄漏造成试件的损坏和仪器、环境的污染。

2.2 NIOS 模型材料压缩徐变试验

在 NIOS 模型材料的徐变试验中，各组配比的试件轴向加荷所采用的应力比分别为 0.2，0.3 和 0.6，围压则采用 100 kPa 和 50 kPa 两个级别，以研究相同配比材料在不同应力水平下的徐变特性。2 组引用 NIOS 模型材料的徐变试验曲线如图 1 所示，其中每一组包含 3 个加载量级（应力比，为加载强度与材料单轴抗压强度之比），每个量级包括 2 个试件，分别进行单轴徐变和围压三轴徐变试验。曲线为根据试验数据进行拟合后的曲线[5]。



(a) 密度2.75 g/cm³、石膏含量5%系列徐变试验曲线



(b) 密度2.85 g/cm³、石膏含量3%系列徐变试验曲线

图 1 NIOS 材料徐变单轴及围压三轴试验曲线

2.3 徐变试验结果分析

a. 从图 1 试验曲线形状上看，单轴徐变与三轴徐变走势相似。

b. 三轴压缩徐变较单轴压缩徐变小，并且该比值有随持续荷载时间的增长而减小的趋势。

c. 随着应力比的增大，单轴徐变与三轴徐变的差异有增大的趋势。

3 徐变恢复试验

在相对湿度 70% 的单轴压缩下的横向徐变和徐变恢复曲线如图 2 所示。三轴压缩应力作用下的典型徐变试验成果[6]如图 3 所示。三轴压缩徐变恢复与单轴压缩徐变恢复的比较见表 1。

根据图 1、图 2、图 3 及表 1，可以得出以下结论：

a. 三轴压缩应力作用下的典型徐变恢复趋势和单轴徐变恢复的趋势相似。

b. 单轴压缩下的横向徐变是膨胀，其徐变恢复

表 1　三轴压缩徐变恢复与单轴压缩徐变恢复的比较

持荷时间/d	单轴压缩			多轴压缩								
	σ/MPa	$C/10^{-6}$	$\frac{C_d'}{C}$	应力/MPa			徐变/10^{-6}			$\frac{C_d'}{C}$		
				σ_1	σ_2	σ_3	C_1	C_2	C_3	σ_1 向	σ_2 向	σ_3 向
28	5.4	136	0.27	5.2	3.6	0	112	70	-30	0.33	0.51	0.31
28	7.1	167	0.27	10.0	7.7	3.1	200	140	20	0.31	0.36	0.34
28	10.1	239	0.26	11.1	9.7	2.0	235	190	25	0.33	0.31	0.32
35	10.1	161	0.23	13.3	3.4	9.8	270	77	-35	0.28	0.27	0.14
28	11.7	259	0.25	12.5	6.5	2.4	240	210	-30	0.31	0.30	0.16
28	12.2	268	0.26	12.6	3.2	0	250	125	-65	0.33	0.27	0.35

注：C 为徐变值；C_d' 为徐变恢复值。

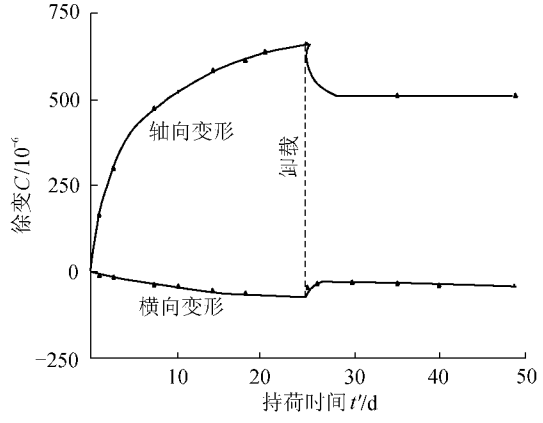


图 2　单轴压缩下的横向徐变和徐变恢复曲线
（70% 相对湿度，水灰比 0.75，应力比 0.45）

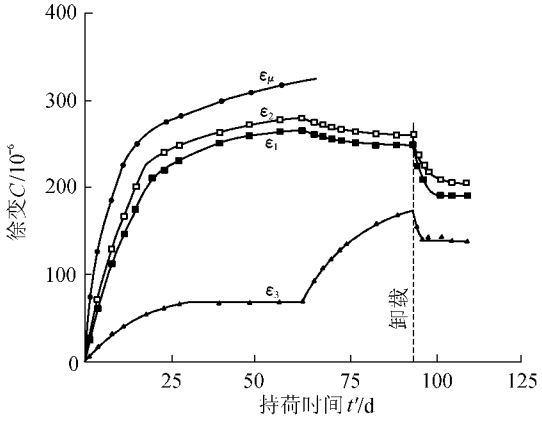


图 3　三轴压缩应力作用下的典型徐变曲线

在开始 20 d 左右发生收缩，而后稍有膨胀就很快趋于稳定。

c. 从表 1 可以看出，三轴压缩徐变恢复与徐变之比较单轴压缩的大。

d. 从两组数据可以看出，即使卸载前主应力方向的徐变为零，卸载后，该方向仍有徐变恢复发生。

4　结　语

影响徐变恢复的因素较多，要准确预测徐变恢复比较困难。通过试验方法，虽然能较准确地考虑到混凝土在多轴应力状态下的影响，但混凝土所处的环境难以模拟，且徐变试验周期长，费用高，国内外完整的试验数据较少。本文通过单轴压缩应力状态与多轴压缩应力状态的徐变计算，进一步说明了多轴应力状态下的徐变计算不符合叠加原理，要综合考虑三向应力间的相互作用。此外，通过对单轴压缩应力状态与多轴压缩应力状态下的徐变恢复试验及其数据对比，得到多轴应力状态下徐变恢复与应力大小以及持荷时间之间的某些规律。同时，证实了多轴应力状态下的徐变恢复与已经产生的压缩徐变有密切的关系。

参考文献：

[1] 高政国，赵国藩. 混凝土徐变分析的双功能函数表达[J]. 建筑材料学报，2001，4(3)：250-254.

[2] 唐崇钊. 混凝土的徐变和徐变试验[M]. 北京：水利电力出版社，1982.

[3] ROSS A D. Experiments on the creep of concrete under 2-dimensional stressing[J]. Magazine of Concrete Research，1954(6)：3-10.

[4] GOPALAKRISHNAN K S，NEVILLE A M. Creep Possion's ratio of concrete under multiaxial comp ression[J]. ACI Journal，1969，66(9)：1006-1019.

[5] 王爱民，李仲奎，马芳平，等. 杠杆式小型围压三轴徐变仪器系统研究及应用[J]. 实验技术与管理，2004，21(6)：85-90.

[6] 惠荣炎，黄国兴. 混凝土的徐变[M]. 北京：中国铁道出版社，1988.

（收稿日期：2006-12-26　编辑：方宇彤）