

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.03.007

基于灰色理论的混凝土压缩损伤参数尺寸效应

王向东,王跃锋,华 曦,岑家全

(河海大学力学与材料学院,江苏 南京 210098)

摘要 :为解决混凝土损伤参数的尺寸效应问题,通过试验获得几组混凝土压缩试件的损伤参数。基于灰色理论进行混凝土压缩损伤参数的尺寸效应研究,建立预测方程,以试验测得的小试件初始损伤和峰值损伤数据为基础,预测大试件的初始损伤和峰值损伤。结果表明,大体积混凝土的初始损伤和峰值损伤均随混凝土尺寸的增大而增大,但最终均趋近于一个固定值,初始损伤趋近于 0.1827,峰值损伤趋近于 0.3526。

关键词 混凝土损伤参数;灰色理论;初始损伤;峰值损伤;尺寸效应

中图分类号 :TU528.1 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2011)03-0024-03

Size effect of compression damage parameters of concrete based on gray theory//WANG Xiang-dong, WANG Yue-feng, HUA Xi, CEN Jia-quan(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract :To solve the size effect problems of damage parameters of concrete, several sets of damage parameters of concrete compressive specimens were obtained through experiments. Based on the gray theory, the size effect of compressive damage parameters of concrete was studied. Relevant equations based on the initial and peak damages of small specimens were established to predict those of large specimens. The results show that the initial and peak damages of large specimens increase with the increase of concrete size. They tend to certain values to the end, that is, 0.1827 and 0.3526 for the initial and peak damages, respectively.

Key words :damage parameter of concrete; gray theory; initial damage; peak damage; size effect

混凝土结构在浇筑过程中都有初始损伤,在外界因素如荷载、温度等作用下将产生新损伤和损伤积累,从而导致材料性能劣化,最终形成宏观裂缝直至整个结构破坏^[1-2]。目前,混凝土的初始损伤、峰值损伤及损伤演变方程中的参数均是在实验室用标准小试件做试验测得,而工程中的结构特别是水工建筑物均是大体积混凝土结构,用上述损伤参数及损伤演变方程进行结构的损伤分析显然不合理^[3]。因为混凝土的材料性能参数具有尺寸效应^[4],损伤参数也与混凝土结构的尺寸密切相关,所以在混凝土结构的损伤分析计算中,必须考虑混凝土损伤参数的尺寸效应。而大试件的试验有相当的难度,因而解决混凝土损伤参数的尺寸效应问题非常必要。目前关于混凝土材料性能参数的尺寸效应问题已有许多研究,如混凝土材料的抗拉强度、抗压强度、弹性模量、断裂韧度、临界能量释放率和断裂能等^[5],但是关于混凝土损伤参数的尺寸效应问题研究还很

少。笔者拟对混凝土压缩损伤参数的尺寸效应问题进行研究。

1 混凝土损伤参数尺寸效应的试验研究

由于损伤是微观量,目前的实验设备不能直接测得,因此有必要将微观量宏观化,文中试验是在混凝土试件浇筑过程中掺入引气剂,人为制造随机微孔隙模拟损伤,并通过改变引气剂掺量达到模拟不同程度损伤的目的。对几组不同引气剂掺量的混凝土试件进行单轴压缩试验,测定弹性模量。通过弹性模量与引气剂掺量之间的关系曲线,计算混凝土理想无损弹性模量 E ,同时测定多组不掺引气剂混凝土试件的弹性模量作为初始有效弹性模量^[6]。

基于 Lemaitre 的应变等效假设,引入有效应力的概念,可以得到^[7]

$$D = 1 - \frac{E'}{E} \tag{1}$$

式中: D 为损伤; E' 为材料的有损弹性模量; E 为材

$$[c, b]^T = (G^T G)^{-1} G^T Y \tag{5}$$

其中

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[X^{(0)}(m_2) + X^{(0)}(m_1)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[X^{(0)}(m_3) + X^{(0)}(m_2)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[X^{(0)}(m_n) + X^{(0)}(m_{n-1})] & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$Y_n = \left[\frac{X^{(0)}(m_2) - X^{(0)}(m_1)}{m_2 - m_1}, \frac{X^{(0)}(m_3) - X^{(0)}(m_2)}{m_3 - m_2}, \dots, \frac{X^{(0)}(m_n) - X^{(0)}(m_{n-1})}{m_n - m_{n-1}} \right]^T \tag{7}$

试件边长 h/m	初始损伤 D_0	峰值损伤 D_f
0.05	0.0323	0.0948
0.10	0.0593	0.1699
0.15	0.0828	0.2191
0.20	0.0995	0.2539

2 混凝土损伤参数尺寸效应的灰色理论研究

应用灰色理论,由小试件的试验数据预测较大尺寸试件的损伤参数,具体方法为:应用前期所做混凝土压缩损伤试验的结果,即不同尺寸试件的初始损伤、峰值损伤建立灰色预测 GM(1,1)系统,预测较大尺寸试件的损伤参数,观察损伤参数的发展趋势,对损伤参数尺寸效应进行分析计算,以便进行混凝土结构的损伤分析及安全评价。

2.1 灰色预测模型概述

灰色预测模型是通过少量信息建立数学模型进行预测的一种方法。该模型所需建模信息少,运算方便,精度较高,在各种预测领域都有着广泛的应用,是处理小样本预测问题的有效工具。因此可以对混凝土压缩损伤参数建立预测模型,基于试验小样本数据进行大尺寸试件损伤参数的预测。

选用灰色预测的 GM(1,1)模型^[10],用对 m (m 为自变量,文中指试件边长 h)具有指数连续性的离散数列 $X^{(0)}(m) = \{X^{(0)}(m_i) | m_i \in R^+, i = 1, 2, \dots, n\}$ 建立 GM(1,1)模型,则有^[11]

$$\frac{dX^{(0)}(m)}{dm} + aX^{(0)}(m) = u \tag{2}$$

其解为

$$X^{(0)}(m) = ce^{-am} + b \tag{3}$$

式中: a, u, c, b 为参数,由式(4)和式(5)确定:

$$[a, u]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_n \tag{4}$$

$$[c, b]^T = (G^T G)^{-1} G^T Y \tag{5}$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[X^{(0)}(m_2) + X^{(0)}(m_1)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[X^{(0)}(m_3) + X^{(0)}(m_2)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[X^{(0)}(m_n) + X^{(0)}(m_{n-1})] & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$Y_n = \left[\frac{X^{(0)}(m_2) - X^{(0)}(m_1)}{m_2 - m_1}, \frac{X^{(0)}(m_3) - X^{(0)}(m_2)}{m_3 - m_2}, \dots, \frac{X^{(0)}(m_n) - X^{(0)}(m_{n-1})}{m_n - m_{n-1}} \right]^T \tag{7}$$

$$G^T = \begin{bmatrix} e^{-am_1} & e^{-am_2} & \dots & e^{-am_n} \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$Y = [X^{(0)}(m_1), X^{(0)}(m_2), \dots, X^{(0)}(m_n)]^T \tag{9}$$

2.2 损伤参数的灰色预测模型

应用连续型 GM(1,1)模型建立初始损伤的模型^[12]。考虑到模型计算的便利,设试件边长为零时 D_0 和 D_f 均为零,由表1和式(6)式(7)可得

$$B^T = \begin{bmatrix} -0.01615 & -0.04580 & -0.07105 & -0.09115 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y_n = [0.646 \quad 0.540 \quad 0.470 \quad 0.334]^T$$

根据式(4)计算得

$$[a, u]^T = [3.9669 \quad 0.7197]^T$$

则有 D_0 随 h 的变化规律为

$$D_0(h) = ce^{-3.9669h} + b \tag{10}$$

根据式(8)和式(9)可得

$$G^T = \begin{bmatrix} 1 & 0.8201 & 0.6725 & 0.5515 & 0.4523 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y = [0 \quad 0.0323 \quad 0.0593 \quad 0.0828 \quad 0.0995]^T$$

根据式(5)计算得

$$[c, b]^T = [-0.1839 \quad 0.1827]^T$$

最终得出初始损伤的灰色数值模型,即 D_0 随 h 的变化规律为

$$D_0(h) = -0.1839e^{-3.9669h} + 0.1827 \tag{11}$$

同理可以进行峰值损伤的灰色预测, D_f 随 h 的变化规律为

$$D_f(h) = -0.3529e^{-6.4471h} + 0.3526 \tag{12}$$

根据上述数值模型得到不同截面尺寸试件的初始损伤和峰值损伤,分别如表2、表3所示。由表2可见,初始损伤随着混凝土尺寸的增大而增大,最后收敛于一个固定值,根据式(11)可知该定值即为最大初始损伤0.1827。由表3可见,峰值损伤也随着混凝土尺寸的增大而增加,最后也收敛于一个固定值,根据式(12)可知该定值即为最大峰

表 2 不同尺寸试件的压缩初始损伤

h/m	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
D_0	-0.0012	0.0319	0.0590	0.0813	0.0995	0.1148	0.1268	0.1368
h/m	0.40	0.50	0.60	0.80	1.00	1.40	1.80	2.00
D_0	0.1451	0.1574	0.1657	0.1750	0.1792	0.1820	0.1825	0.1826

表 3 不同尺寸试件的压缩峰值损伤

h/m	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
D_t	-0.0003	0.0969	0.1674	0.2184	0.2554	0.2822	0.3016	0.1368
h/m	0.40	0.50	0.60	0.80	1.00	1.40	1.80	2.00
D_t	0.3258	0.3385	0.3452	0.3505	0.3520	0.3526	0.3526	0.3526

值损伤 0.3526。
将表 2 和表 3 中 $h = 0.05 \sim 0.20\text{ m}$ 的计算结果与表 1 中的结果进行比较,最大误差小于 2%,可见在现有的试验数据范围内,灰色预测模型具有很高的精度,据此预测的较大尺寸试件的损伤参数可应用于大尺寸结构的损伤分析。

3 结 语

混凝土损伤参数具有尺寸效应,在混凝土结构的损伤分析中应考虑混凝土损伤参数的尺寸效应。运用灰色理论对混凝土压缩损伤参数的尺寸效应进行研究,建立预测方程,以小试件初始损伤和峰值损伤试验数据为基础,预测较大尺寸试件的初始损伤和峰值损伤,推测了大体积混凝土的初始损伤和峰值损伤,得出如下结论:损伤参数虽然随混凝土尺寸的增大而增大,但最终趋近于一个固定值,初始损伤趋近于 0.1827,峰值损伤趋近于 0.3526,该值可用于大体积混凝土结构的损伤计算。

参考文献:

[1] 徐道远,符晓陵,计家荣,等.拱坝破坏机理及损伤:断裂分析方法[C]//高拱坝学术讨论会论文集.北京:国家自然科学基金委员会工程与材料科学部,1996:208-217.
[2] 徐道远,王向东,朱为玄,等.混凝土损伤及损伤仿真计算[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(4):14-20.
[3] 周栋.混凝土材料性能尺寸效应[D].南京:河海大学,2003.
[4] 曹亮.三点弯曲试件混凝土 K_{IC} 尺寸效应公式的修正[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(1):63-66.
[5] 金玉,王向东,徐道远,等.基于无损弹性模型的混凝土损伤定量分析[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(6):659-663.
[6] 王向东,徐道远,周栋,等.混凝土损伤参数的尺寸效应[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2005,28(3):308-310.
[7] 余天庆,钱济成.损伤理论及其应用[M].北京:国防工

业出版社,1993:58-90.
[8] 李兆霞.损伤力学及其应用[M].北京:科学出版社,2002:46-70.
[9] ANDREEV G. Brittle failure of rock materials test results and constitutive model[M]. Rotterdam: Balkema A A,1995:1-5.
[10] 邓聚龙.灰色预测与决策[M].武汉:华中科技大学出版社,2002:120-180.
[11] 王向东,朱为玄,徐道远.灰色理论在预测混凝土性能参数长期值中的应用[J].河海大学学报:自然科学版,1999,27(6):64-67.
[12] 岑家全.混凝土压缩损伤参数尺寸效应的数值分析[D].南京:河海大学,2010.

(收稿日期:2010-10-12 编辑:骆超)

(上接第 8 页)

[3] SHEN Hong-dao, WANG D, WASANTHALAL A M. Numerical simulation of river ice processes[J]. Journal of Cold Regions Engineering, ASCE, 1995, 9(3):107-118.
[4] 茅泽育,许昕,王爱民,等.开河期冰坝预测方法研究[J].水利水电科技进展,2007,27(3):76-80.
[5] 冀鸿兰,陈守煜.冰凌预报模糊优选神经网络 BP 方法[J].水利学报,2004,35(6):114-118.
[6] 冀鸿兰,朝伦巴根,陈守煜.模糊优选神经网络 BP 模型在黄河内蒙段封开河预报中的应用[J].水利水电科技进展,2008,28(3):70-72.
[7] 陈守煜.工程模糊集理论与应用[M].北京:国防工业出版社,1998.
[8] 陈守煜.水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M].大连:大连理工大学出版社,2005.
[9] 陈守煜.复杂水资源系统优化模糊识别理论与应用[M].长春:吉林大学出版社,2002.
[10] 李希灿,刘桂生,张波,等.水文中长期预报成因模糊综合分析预测模式[J].黑龙江水专学报,1998,25(3):67-71.
[11] 冀鸿兰.黄河内蒙段凌汛成因分析及封开河日期预报模型研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2002.
[12] 冀鸿兰,朝伦巴根,陈守煜.基于模糊识别人工神经网络的冰凌预报模型[J].水力发电,2008,33(11):24-26.

(收稿日期:2010-09-07 编辑:骆超)