

文章编号:1673-2049(2009)01-0062-06

# 冻融环境下混凝土力学性能退化模型

祝金鹏<sup>1</sup>, 李术才<sup>1</sup>, 刘宪波<sup>2</sup>, 刘 敏<sup>2</sup>

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061;

2. 山东省公路桥梁建设有限公司, 山东 济南 250014)

**摘要:**基于混凝土冻融试验和混凝土细观力学对混凝土冻融后的力学性能变化进行了研究,建立了混凝土随冻融循环次数变化的强度折减模型和弹性模量折减模型。在混凝土冻融试验方面,采用快速冻融方法对混凝土试件和根据混凝土配合比制成的砂浆试件进行了 100、200、300 次的冻融循环,利用大型混凝土静、动三轴试验系统检测了冻融循环对海水中混凝土抗压强度、弹性模量及应力-应变关系的影响;在混凝土细观力学方面,对混凝土试件进行了数值模拟,为考虑各组成相的非均匀性,各组成相的材料性质按照 Weibull 分布来赋值,同时为反映冻融对混凝土的影响,砂浆的强度和弹性模量均以砂浆冻融试验所得结果为准。结果表明:该方法为进一步开展混凝土结构在冻融作用下的劣化机理与计算模型的研究提供了依据。

**关键词:**混凝土;强度折减模型;冻融循环;细观数值模拟;力学性能

中图分类号:TU375

文献标志码:A

## Mechanical Property Deterioration Model for Concrete in Environment with Freezing-thawing

ZHU Jin-peng<sup>1</sup>, LI Shu-cai<sup>1</sup>, LIU Xian-bo<sup>2</sup>, LIU Min<sup>2</sup>

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061,

Shandong, China; 2. Shandong Road & Bridge Construction Co., Ltd., Jinan 250014, Shandong, China)

**Abstract:** Based on the freezing-thawing test and micro-mechanics of concrete, the mechanical properties of concrete after freezing-thawing were studied, and the strength reduction model and elastic modulus reduction model were built with the changes of freezing-thawing cycles of concrete. In aspects of freezing-thawing test, the compressive tests of concrete specimens and mortar specimens which were made according to the ratio of concrete suffering 100, 200 and 300 cycles of freezing-thawing were completed. Using the large static-dynamic triaxial test system for concrete, the influences of cycles of freezing-thawing on the compressive strength of concrete, elastic moduli and stress-strain relationships were tested. In aspects of micro-mechanics, examination of the concrete specimen was numerically simulated. To consider the non-uniformity of the various components, the nature of the material of the various components was assigned in accordance with the Weibull distribution. In order to reflect the impact of freezing-thawing to concrete, the strength and elastic modulus of mortar specimens were both assigned according to the results of mortar freezing-thawing test. The results show that this method can offer references for further research on deterioration mechanism and calculation model of reinforced

收稿日期:2008-11-20

基金项目:国家自然科学基金项目(50574053);山东省博士后创新项目(200703072)

作者简介:祝金鹏(1983-),男,山东淄博人,工学硕士研究生,E-mail:59267153@qq.com。

concrete structures in actions of freezing-thawing cycles.

**Key words:** concrete; strength reduction model; freezing-thawing cycle; mesoscopic numerical simulation; mechanical property

0 引 言

混凝土经冻融作用后,其力学性能有显著的改变。随着对混凝土耐久性的要求越来越高,对混凝土抗冻融能力的要求也越来越高。目前,关于混凝土经冻融作用后的力学性能的研究主要集中于混凝土的冻融循环试验,而基于混凝土细观力学对混凝土冻融的数值分析的研究还未见相关报道。随着高性能计算机及数值算法的迅速发展,相对廉价的细观数值分析有望弥补或替代部分材料试验。

各国学者在混凝土冻融试验和混凝土细观力学方面的研究已经取得了一定成果,文献[1]~[4]中通过冻融循环试验,从材料、湿度、热力学等角度研究了冻融作用对混凝土抗压性能的影响,但是没有进行数值分析方面的研究。文献[5]中分析了不同界面参数、不同砂浆损伤参数、不同加载形式对混凝土试件的变形特点、破坏形式以及承载能力的影响,探讨了混凝土宏观力学性能(如应变软化和剪胀等性质)的细观机制。文献[6]中研究了主要力学参数的随机分布对混凝土试件宏观表征力学性质的影响。以上研究均没有将试验和数值分析结合起来,也没有通过细观数值分析研究混凝土受冻融的影响。

本文中通过将混凝土冻融循环试验和细观力学分析结合,着力研究在冻融环境下混凝土基本力学性能的劣化规律,为推演本构关系、研究构件和结构的力学性能退化规律奠定了基础,这对于理论研究和工程实践都大有裨益。

1 冻融试验

1.1 试件规格及配合比

进行冻融试验的混凝土是按在建的山东青岛海湾大桥下部结构混凝土的配合比配制而成的,试配强度为 43.2 MPa。试件一般规格为 100 mm×100 mm×100 mm,少部分为 100 mm×100 mm×400 mm(测试混凝土立方体抗压强度和弹性模量用)。试件均采用标准钢模成型,24 h 拆模后露天盖草袋养护。表 1 为混凝土的配合比。

进行冻融试验的砂浆试件的一般规格为 100 mm×100 mm×100 mm,其配合比以去掉碎石

表 1 混凝土的配合比

Tab. 1 Mix Ratios of Concrete  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

水泥	矿粉	粉煤灰	砂子	碎石	水	减水剂	阻锈剂	引气剂
164	212	94	737	938	155	4.47	6.0	0.011 8

成分的混凝土试件其他组成材料的配合比为准。

1.2 试件单轴压缩试验

本文的混凝土冻融循环试验按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GBJ 82—85)中的“快速冻融方法”[每次冻融循环应在 2~4 h 内完成,其中用于融化的时间不得小于整个冻融时间的 1/4。在冻结和融化终了时,试件中心温度应分别控制在 $(-17 \pm 2)^\circ\text{C}$ 和 $(8 \pm 2)^\circ\text{C}$ ]进行。混凝土力学性能试验是在大型三轴电液伺服试验机上完成的。试验时,将试件安装在试验机的加载板间,试件加载面与加载板之间采取减摩措施,减摩材料采用塑料薄膜和甘油。每种工况至少试验 3 个试件,当发现数据离散较大时,增加试件数目,以求数据的完整准确,试件承受的压力、位移和应变值均由计算机动态采集。

在单轴压缩载荷作用下,混凝土试件随不同冻融循环次数变化的应力-应变曲线如图 1 所示,混凝土试件单轴受压后的破坏情况如图 2、3 所示。

2 数值模型

2.1 模型的建立

基于混凝土细观力学,利用 RFPA 数值模拟软件,把混凝土视为由砂浆基质骨料以及两相之间界面组成的三相复合材料。为了考虑各组成相的非均匀性,各组成相的材料性质按照 Weibull 分布来赋值。首先,用 1 个 Weibull 分布来表达整个试件的材料性质分布,这相当于生成砂浆基质试件,该试件的力学性质要与真实的硬化水泥砂浆体的参数基本一致;然后,在该基质试件中添加骨料颗粒,RFPA 软件会自动搜索骨料的边界并把边界上的单元赋上相应的力学参数。骨料的参数参照岩石的力学性质参数选取,对于普通混凝土,骨料的强度相对于砂浆基质的强度较高,并且其均质度也较高。砂浆的参数参照混凝土配合比制成的砂浆试件的冻融循环试

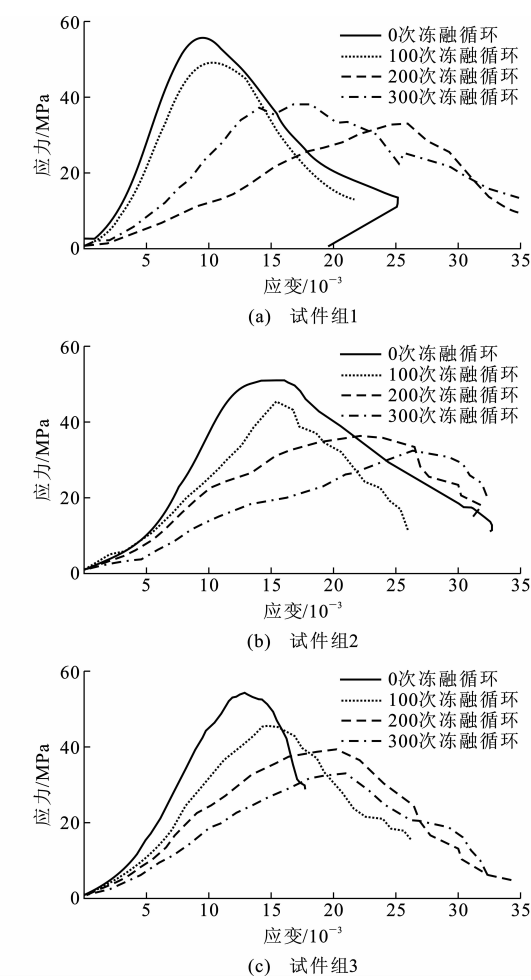


图 1 混凝土试件的单轴应力-应变关系曲线(试验)  
Fig. 1 Relation Curves of Uniaxial Stress and Strain of Concrete Specimens (Experiment)

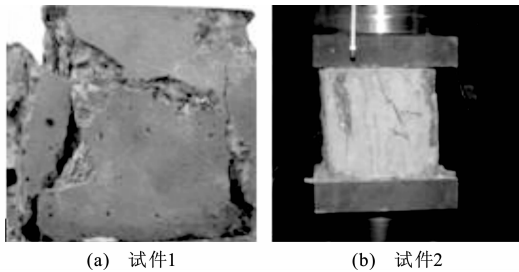


图 2 未冻融混凝土试件单轴受压破坏(试验)  
Fig. 2 Failures of Concrete Specimens Under Uniaxial Compression Before Freezing-thawing Cycles (Experiment)

验所得到的结果进行赋值。界面的参数没有现成的试验依据,这里根据以往类似数值模拟中使用的参数选取<sup>[7]</sup>。

参照文献<sup>[7]</sup>中关于混凝土数值模型的参数研究和验证,基于 Weibull 分布,考虑混凝土为三相复合材料,混凝土试件数值模型的各参数见表 2。

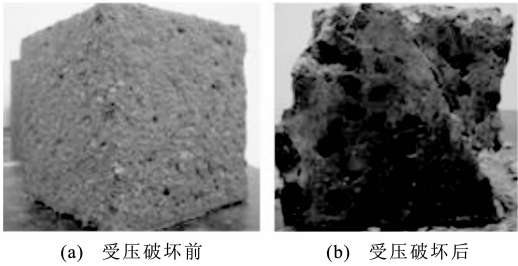


图 3 冻融混凝土试件单轴受压破坏(试验)  
Fig. 3 Failures of Concrete Specimens Under Uniaxial Compression After Freezing-thawing Cycles (Experiment)

表 2 混凝土试件的 Weibull 分布力学参数  
Tab. 2 Mechanical Parameters of Weibull Distribution of Concrete Specimens

组分	弹性模量均值/GPa	强度均值/MPa	均质度/m
骨料	32.0	500	3.0
砂浆	11.4	175	1.5
胶结面	15.0	150	1.5

为了反映冻融作用对混凝土力学性能的影响,根据混凝土的配合比制成了砂浆试件并对其进行了 100、200、300 次的冻融循环,在冻融循环后分别进行了单轴压缩试验并测得了其抗压强度和弹性模量。利用式(1)、(2)得到了数值模拟时砂浆基质在 Weibull 分布赋值时的弹性模量和强度的均值,见表 3。

$$\frac{F}{F_0}=0.260\ 2\ln(m/m)+0.023\ 3\ 1.2\ m\leq m\leq 50\ m\quad(1)$$

$$\frac{E}{E_0}=0.141\ 2\ln(m/m)+0.647\ 6\ 1.2\ m\leq m\leq 10\ m\quad(2)$$

式中: $E_0$ 、 $F_0$  分别为 Weibull 分布赋值时试件的弹性模量和强度的均值; $E$ 、 $F$  分别为数值模拟时试件宏观的弹性模量和强度; $m$  为材料的均质度。

表 3 砂浆试件随冻融循环次数变化的 Weibull 分布力学参数

冻融循环次数	弹性模量均值/GPa	强度均值/MPa	均质度/m
0	12.0	175	1.5
100	11.4	162	1.5
200	10.5	146	1.5
300	9.5	128	1.5

2.2 细观单元的弹性损伤本构关系

一般认为,混凝土应力-应变曲线的非线性是由于其受力后的不断损伤所引起的微裂纹萌生和扩展造成的,而不是由于其塑性变形引起的,因此用弹性

损伤力学的本构关系来描述混凝土细观单元的力学性质是合适的。图 4 为细观单元单轴压缩时的损伤本构关系,其中,  $f_{cr}$  为细观单元的残余强度。按照应变等价原理,认为应力  $\sigma$  作用在受损材料上引起的应变与有效应力作用在无损材料上引起的应变等价。根据这一原理,受损材料的本构关系可通过无损材料中的名义应力得到,即

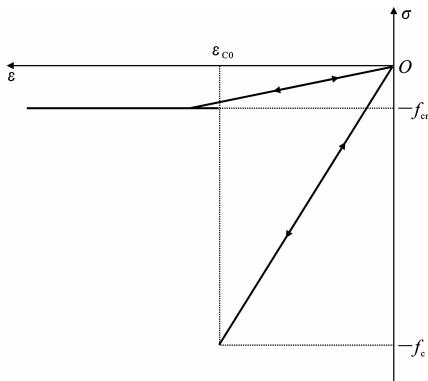


图 4 细观单元单轴压缩时的损伤本构关系  
Fig. 4 Damage Constitutive Relation of Uniaxial Compression for Mesoscopic Element

$$\sigma=E_0(1-D)\varepsilon \tag{3}$$

式中:  $D$  为损伤变量;  $\varepsilon$  为应变。

为了反映细观单元在压缩或剪切应力下的损伤,这里选择摩尔-库仑准则作为第 2 个损伤阈值判据,此时有

$$\left. \begin{aligned} F &= \frac{1+\sin \varphi}{1-\sin \varphi} \sigma_1 - \sigma_3 \geq f_c \\ \varphi &= \arcsin \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \\ \alpha &= \frac{f_t}{f_c} \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

式中:  $\varphi$  为细观单元的摩擦角;  $f_c$ 、 $f_t$  分别为细观单元的单轴抗压强度和单轴抗拉强度;  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  分别为细观单元的最大和最小应力值。

对应于图 4 中的单轴压缩应力状态下的本构关系,损伤变量  $D$  为

$$D=\left\{\begin{aligned} 0 & \quad \varepsilon > \varepsilon_{cu} \\ 1-\frac{\lambda \varepsilon_{cu}}{\varepsilon} & \quad \varepsilon_{cu} < \varepsilon \leq \varepsilon_{cu} \\ 1 & \quad \varepsilon \leq \varepsilon_{cu} \end{aligned}\right. \tag{5}$$

式中:  $\varepsilon_{cu}$  为单元应力达到抗压强度时的压应变;  $\varepsilon_{cu}$  为极限压应变,取定值 0.003 3;  $\lambda$  为残余强度系数。当应变达到极限压应变时,单元的刚度将急剧退化为接近于零矩阵的矩阵<sup>[8-15]</sup>。

### 2.3 单轴压缩过程的数值模拟

建立 100 mm×100 mm 混凝土试件的随机骨

料(断面骨料填充率为 40%;骨料的粒径范围为 5~20 mm,其中,粒径范围在 5~10 mm 的占 30%,粒径范围在 10~20 mm 的占 70%)。细观数值模型,并把它分割为 0.5 mm×0.5 mm 的有限元网格<sup>[16]</sup>。

混凝土试件在单轴压缩载荷作用下随不同冻融循环次数变化的应力-应变曲线的数值模拟结果如图 5 所示,混凝土试件单轴受压后的破坏情况如图 6、7 所示。

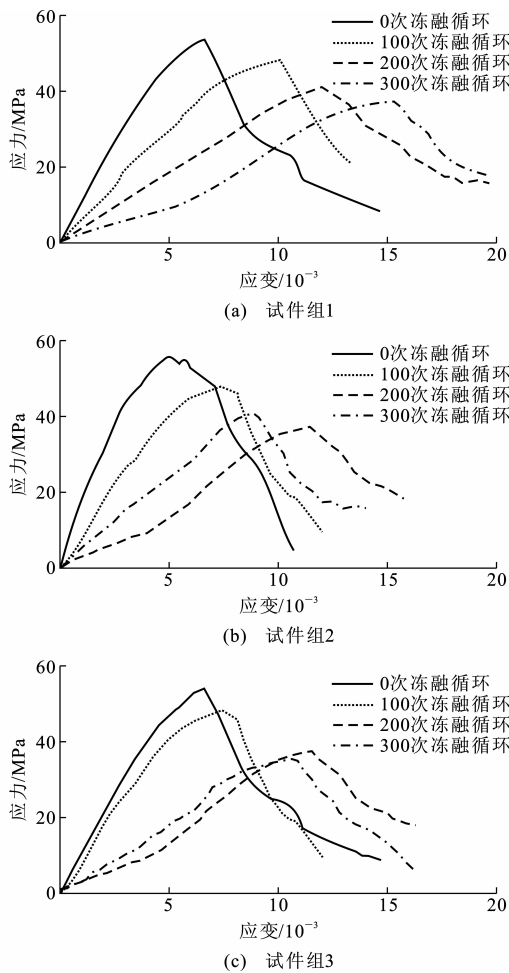


图 5 混凝土试件的单轴应力-应变关系曲线(模型)  
Fig. 5 Relation Curves of Uniaxial Stresses and Strains of Concrete Specimens (Model)

不同冻融循环次数下混凝土的极限强度计算值与试验值对比如表 4 所示,由图 2、3 与图 6、7 可以看出,计算值与试验值吻合较好。

### 2.4 与试验结果的对比分析

通过以上混凝土冻融循环试验和混凝土细观力学分析,将得到的混凝土在不同冻融循环次数下的极限强度和弹性模量进行了整合,利用计算结果和试验结果的互补性,得到了随冻融循环次数变化的抗压强度折减曲线和弹性模量折减曲线,见图 8、9。

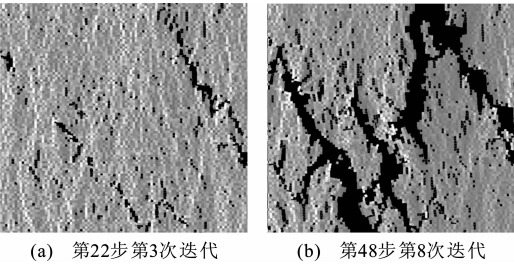


图 6 未冻融混凝土试件单轴受压破坏(模型)  
Fig. 6 Failures of Concrete Under Uniaxial Compression Before Freezing-thawing Cycles (Model)

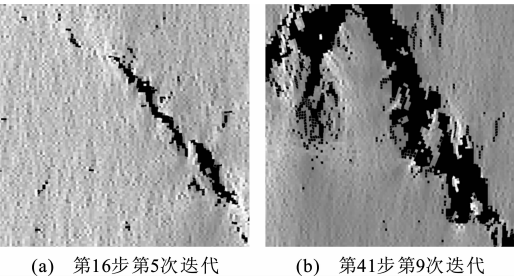


图 7 冻融混凝土试件单轴受压破坏(模型)  
Fig. 7 Failures of Concrete Specimens Under Uniaxial Compression After Freezing-thawing Cycles (Model)

表 4 混凝土极限强度试验值与计算值  
Tab. 4 Experimental Values and Calculated Values of Ultimate Strengths of Concrete

冻融循环次数		GPa			
		0	100	200	300
试件组 1	试验值	58.76	49.31	39.58	33.65
	计算值	55.44	47.53	40.37	30.24
试件组 2	试验值	51.73	47.28	34.65	32.75
	计算值	53.27	48.24	37.24	31.26
试件组 3	试验值	56.48	44.52	42.67	34.26
	计算值	55.16	45.97	38.53	31.89

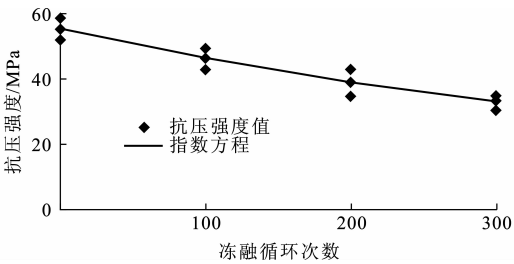


图 8 混凝土抗压强度与冻融循环次数的关系  
Fig. 8 Relationships Between Concrete Compressive Strengths and Freezing-thawing Cycles

通过最小二乘法得到的混凝土随冻融循环次数变化的折减方程为:  
抗压强度折减方程

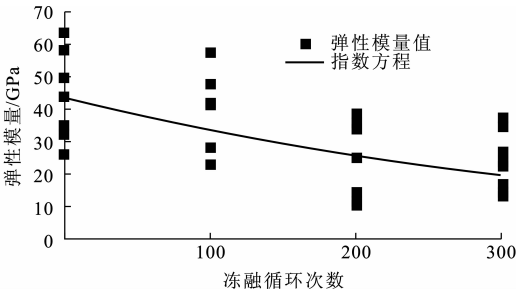


图 9 混凝土弹性模量与冻融循环次数的关系  
Fig. 9 Relationships Between Concrete Elastic Moduli and Freezing-thawing Cycles

$F=55.562e^{-0.0018n}$  (6)

弹性模量折减方程  
 $E=43.837e^{-0.0027n}$  (7)

式中: $n$  为冻融循环次数。

3 结 语

- (1)混凝土在单轴受压荷载作用下的极限压应力和弹性模量随冻融循环次数的增加而逐渐降低,300 次冻融循环以后强度降低约 31.9%,弹性模量降低约 51.3%。
- (2)由数值模拟得到的虚拟试验值与计算值的误差在允许范围内,而且由模拟单轴抗压得到的混凝土的开裂位置、开裂方向和应力-应变曲线等结果均与试验结果吻合较好。
- (3)根据试验结果和计算结果,通过最小二乘法建立了混凝土随冻融次数变化的抗压强度折减方程  $F=55.562e^{-0.0018n}$  和弹性模量折减方程  $E=43.837e^{-0.0027n}$ 。
- (4)着重从混凝土细观力学的角度研究了冻融作用对混凝土力学性能的影响,通过与试验结果的比较可知,该方法对混凝土受冻融作用的模拟结果与试验结果吻合较好,对研究混凝土受冻融作用影响具有一定的参考价值。

参考文献:  
References:

[1] 覃丽坤,宋玉普,王玉杰,等.冻融循环对海水中混凝土抗压性能的影响[J].混凝土,2004(1):16-18.  
QIN Li-kun, SONG Yu-pu, WANG Yu-jie, et al. The Influence of Cycles of Freezing and Thawing on the Compressive Property of Concrete in Seawater[J]. Concrete, 2004(1):16-18.

[2] 宋玉普,商怀帅,张 众,等.冻融循环后引气混凝土双轴破坏准则研究[J].工程力学,2007,24(6):

- 134-141.
- SONG Yu-pu, SHANG Huai-shuai, ZHANG Zhong, et al. Investigation on Failure Criterion of Air-entrained Concrete Under Biaxial Loads After Freeze-thaw Cycles[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(6): 134-141.
- [3] GOKCE A, NAGATAKI S, SAEKI T, et al. Freezing and Thawing Resistance of Air-entrained Concrete Incorporating Recycled Coarse Aggregate; the Role of Air Content in Demolished Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(5): 799-806.
- [4] PENTTALA V, AL-NESHAWY F. Stress and Strain State of Concrete During Freezing and Thawing Cycles[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(9): 1407-1420.
- [5] 夏晓舟, 章青, 汤书军. 混凝土细观损伤破坏过程的数值模拟[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(3): 319-325.
- XIA Xiao-zhou, ZHANG Qing, TANG Shu-jun. Numerical Simulation of Meso-damage Process for Concrete Material[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2007, 35(3): 319-325.
- [6] 李建波, 林皋, 陈健云. 混凝土损伤演化的随机力学参数细观数值影响分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2004, 24(3): 7-12.
- LI Jian-bo, LIN Gao, CHEN Jian-yun, et al. Mesoscopic Numerical Influence Analysis of Random Mechanical Parameter of Concrete Damage Evolution[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2004, 24(3): 7-12.
- [7] 唐春安, 朱万成. 混凝土损伤与断裂——数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- TANG Chun-an, ZHU Wan-cheng. Damage and Fracture of Concrete—Numerical Test[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [8] 过镇海. 混凝土的强度和变形——试验基础和本构关系[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- GUO Zhen-hai. Strength and Distortion of Concrete—Test Basis and Constitutive Relationship[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [9] NAGAI K, SATO Y, UEDA T. Mesoscopic Simulation of Failure of Mortar and Concrete by 3D RBMS[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2005, 3(3): 385-402.
- [10] 金伟良, 徐波, 王海龙. 混凝土材料的细观结构数值模拟与性能分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(4): 19-22.
- JIN Wei-liang, XU Bo, WANG Hai-long. Numerical Simulation and Performance Analysis of Concrete Based on Material Mesostructures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(4): 19-22.
- [11] 申爱琴, 朱建辉, 王晓飞, 等. 聚合物改性超细水泥修补混凝土结构物微裂缝的性能及机理[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 46-51.
- SHEN Ai-qin, ZHU Jian-hui, WANG Xiao-fei, et al. Performance and Mechanism of Polymer Modified Superfine Cement for Microcrack Mending of Concrete Structure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 46-51.
- [12] 宋焕生, 赵祥模, 王国强, 等. 混凝土结构层析成像检测系统[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(3): 73-77.
- SONG Huan-sheng, ZHAO Xiang-mo, WANG Guo-qiang, et al. Ultrasonic-tomography System for Non-destructive Concrete Structure Testing[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(3): 73-77.
- [13] 金伟良, 朱平华. 混凝土结构耐久性的修复性等级划分[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 64-70.
- JIN Wei-liang, ZHU Ping-hua. Restorability Class Partition for Durability of Concrete Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 64-70.
- [14] 马玉平, 马昕, 崔建涛. 高强度混凝土试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 67-69.
- MA Yu-ping, MA Xin, CUI Jian-tao. Experimental Research on High-strength Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 67-69.
- [15] 吴建营, 李杰. 混凝土弹塑性损伤本构关系统一模型[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 15-21.
- WU Jian-ying, LI Jie. Unified Elasto-plastic Damage Constitutive Relations Model for Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 15-21.
- [16] 林皋, 李建波, 赵娟, 等. 单轴拉压状态下混凝土破坏的细观数值演化分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(1): 1-6.
- LIN Gao, LI Jian-bo, ZHAO Juan, et al. Mesoscopic Numerical Evolution Analysis of Concrete Damage Under Uniaxial Tension and Compression[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(1): 1-6.