

文章编号:1673-2049(2007)03-0007-06

混凝土损伤演化的随机力学参数 细观数值影响分析

李建波¹, 林 皋^{1,2}, 陈健云^{1,2}, 赵 娟¹

(1. 大连理工大学 工程抗震研究所, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:在提出一种交叠骨料微步长迭代自动调整算法的基础上,采用任意凹凸型骨料配置算法建立混凝土细观数值试件。基于细观单元的弹性损伤本构关系,采用位移控制模式,着重针对两类常用的力学参数随机分布——Weibull及正态分布,进行了不同力学参数的常规混凝土拉压数值模型破坏试验,分析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。该研究可为混凝土细观数值模型中力学参数的合理确定提供依据。

关键词:混凝土;随机骨料模型;细观数值模拟;损伤与破坏;单轴拉伸;单轴压缩

中图分类号:TU528.041

文献标志码:A

Mesoscopic Numerical Influence Analysis of Random Mechanical Parameter of Concrete Damage Evolution

LI Jian-bo¹, LIN Gao^{1,2}, CHEN Jian-yun^{1,2}, ZHAO Juan¹

(1. Earthquake Engineering Research Division, Dalian University of Technology, Dalian 116024,

Liaoning, China; 2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering,

Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: According to the objective grading curve and filling area fraction of aggregates, numerical concrete specimen was firstly built on the basis of the advanced numerical generation method of aggregates with random shapes. And then, mesoscopic numerical simulation tests were carried out to study the damage evolution and to compare the influences of mechanical parameter distribution patterns (Weibull and lognormal distribution) on the mesoscopic strength of concrete specimen. Numerical result shows that Weibull distribution pattern is more active to reflect the discrete mechanical properties of concrete.

Key words: concrete; random aggregate model; mesoscopic numerical simulation; damage and fracture; uniaxial tension; uniaxial compression

0 引言

随着数值计算技术的发展,以细观力学理论和实际物理试验相结合为手段,研究混凝土受力特性

在细观裂缝发展和宏观力学性能研究之间建立起的必然联系,是近年来诸多研究者关心的热点^[1-8]。相对于宏观数值分析,细观尺度的数值试验更容易反映局部材料的非均匀性,更容易捕捉试件局部破坏

收稿日期:2007-07-15

基金项目:国家自然科学基金项目(90510018);国家自然科学基金项目(50679006);大连理工大学青年教师培养基金项目(893221)

作者简介:李建波(1977-),男,河北邢台人,讲师,工学博士,E-mail: jianboli@dlut.edu.cn。

的随机特征,阐释混凝土材料破坏的机理。已有的研究也表明,细观非均匀性确实对混凝土等数值试件的宏观破坏特征有明显的影响。

细观非均匀性主要体现在两方面:细观结构的几何随机特征和细观力学参数分布的随机特征。就混凝土试件来说,细观几何随机特征可以基于图形学,以增加表征骨料颗粒形状与分布的随机控制量为手段,来细化模拟精度;而在细观力学参数随机分布方面,由于细观层次的材料测定试验相对极少,目前仍主要停留在人为假定的基础上,主要有两类:力学参数的 Weibull 分布和对数正态分布。这两类细观力学参数分布模型哪种更优,使混凝土数值试件的宏观破坏特征更契合实际?两者在分布特征上的异同点如何?相关的对比分析可为细观单元的力学参数确定提供一定的依据。

笔者首先基于随机凹凸型骨料的填充算法建立混凝土数值试件,以微步长迭代调整算法实现了骨料集合的全自动填充,提高了二维骨料填充的成功率与效率,并利于在数值试验中反映凹凸型骨料可能发生的契合作用,有效地反映混凝土细观结构方面的几何随机特征;然后以数值试验作为手段,针对力学参数的两类分布模式,开展了混凝土拉压细观破坏的数值分析,并通过混凝土试件宏观表征的力学特征,与规范 GB 50010—2002 中的混凝土力学参数进行对比分析。

1 细观数值模型几何特征的随机性

随机骨料数值模型的提出,开辟了目前细观层次混凝土力学性能研究的主线。为更真实地反映混凝土材料的细观构成,骨料颗粒形状及分布的几何特征有必要采用更为细致的方法来模拟。随着计算机性能的提高,可以用任意形状来模拟混凝土骨料颗粒。从已有研究不难看出,随机骨料数值试件逐渐形成了两种思路的建模方式^[9]:一种是骨料集合填充法,先按级配曲线和指定填充率生成骨料颗粒集合,再从大到小互不交叠地逐个填充到试件的轮廓线内;另一种是基网格延凸法,即将试件轮廓先进行规格化基网格划分,再将局部网格组合生成骨料颗粒。骨料集合填充法可精确控制骨料颗粒形状,并保证满足级配曲线和填充率的要求,但就随机填充过程的效率问题值得探讨;基网格延凸法则不再涉及骨料的随机填充过程,但骨料颗粒的个体形状过多地受基网格形状的限制,如何调控颗粒形状及保证骨料严格满足级配曲线是一个难题。显然,为

突出细观结构特点,尤其是便于开展骨料颗粒形状的精细模拟,骨料集合填充法较基网格延凸法要有明显的优势。相应地,混凝土细观数值试件几何特征的随机性则主要体现在骨料颗粒形状及填充位置选取两个阶段的随机量表达上,下面将就本文采用的任意凹凸型骨料配置算法作一简要阐述:

文献[1]~[4]中数值骨料颗粒的自动生成技术,较多集中于简单的凸型多边形或多面体模拟,而较少提及控制形状的统计学参量,使得很狭长不现实的颗粒也可能存在,尚需评价颗粒形状质量的统一标准及反映凹骨料存在的可能性。针对这些方面,采用文献[9]中的任意凹凸型骨料配置算法,使骨料的主要统计学控制量达到 5 个(粒径、体积、面总数、凹凸面比例、长细比),进而可结合混凝土配合比试验对统计参数进行校正研究。

复杂形状的骨料颗粒显然会使填充过程的难度增大,尤其是在复杂轮廓形状的混凝土试件建模中,若完全依赖无控的随机数方法进行骨料颗粒的定位,其成功率及效率很值得怀疑。对此,文献[9]中提出了人为调整的做法,而本文在“占位排除填充法”的基础上进行了改进研究。首先,在拟建试件内剖分细观尺度的规则化基网格,然后,采用一种两次随机数定位的骨料颗粒填充方法,即先随机选择“未占”基网格,再在该网格内以极坐标形式细致随机选定骨料颗粒的形心位置,并与内嵌于该骨料颗粒的基网格标记为“已占”,不再选用。该过程中,如何判别复杂形状的骨料颗粒与基网格及骨料之间的位置关系是一个关键问题,本文中拟以骨料颗粒的圆形或者矩形包围盒为例进行简化判别,这对于填充率在 60% 以下的随机骨料模型将十分适用;然而,针对个别骨料颗粒,也可能发生所有的“未占”基网格均尝试后,骨料颗粒也无法有效填充的现象,那么将保留入侵量最小的那次位置,待初步预填充完成后再次细致消除骨料颗粒间的交叠区域,故笔者提出了一种微步长迭代调节算法,将另文详细阐述。为此,只要规则化基网格能够模拟试件的轮廓形状,就能进行骨料集合的有效填充。

2 细观力学参数的随机分布

从混凝土的细观构成角度来看,骨料、胶结面及砂浆基质三组份的力学参数,与来源地及配比、搅拌过程等多因素相关,均各自满足一定的随机分布规律。其中,Weibull 或对数正态分布是目前通常采用的两类基本形式。

2.1 Weibull 分布

Weibull 分布的分布密度函数(图 1)的一般表达式为

$$f(x)=\frac{m}{u_0}(\frac{x}{u_0})^{m-1}e^{-(\frac{x}{u_0})^m} \tag{1}$$

式中: x 为待分布的力学参量(强度、弹性模量); m 为均值度,反映随机量的离散程度,即 $m_3 < m_2 < m_1$; u_0 为与随机量平均值有关的参数,简称均值。由图 1 可以看出,当 m 由小到大变化时,Weibull 分布曲线由低而宽变为高而窄,反映为随机量逐渐趋于集中。

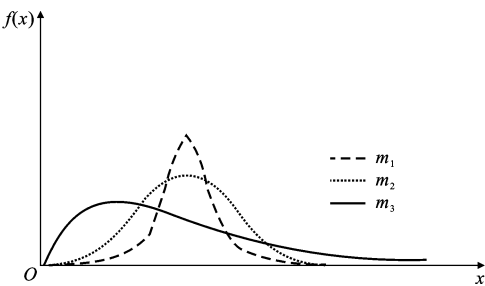


图 1 Weibull 分布的分布密度函数

Fig. 1 Distribution Density Functions of Weibull Distribution

2.2 对数正态分布

对数正态分析的分布密度函数为

$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x}e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(\ln x-\mu)^2} \tag{2}$$

式中: $\mu \in (-\infty, +\infty)$; $\ln x$ 服从正态分布 $N(\mu, \sigma)$ 。通常在 $[0, 1]$ 区间内首先生成均匀分布的相互独立的随机数,再利用随机数变换的方法,生成服从标准正态分布的随机数,进而变换为对数正态分布的随机数。

2.3 两类随机分布模式的比较

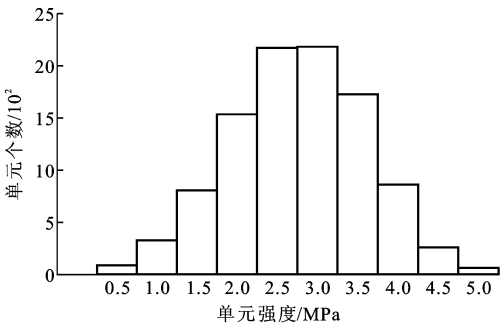
为反映混凝土各细观组份力学参数分布上的非均匀性,以 Weibull 分布及对数正态分布随机数生成的方式来确定抗拉强度、弹性模量等值。参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)及相关文献,设定细观组份力学参数的统计量如表 1 所示。表 1 中各相材料的抗压强度参照规范中混凝土的抗拉与抗压强度的比值来确定。

表 1 中建立了 3 组数值力学参数,各分布模式的均值相同:① Weibull 分布 I,骨料、基质和界面的均值度分别为 9、6、4;② Weibull 分布 II,骨料、基质和界面的均值度分别为 12、9、6;③ 对数正态分布 III。图 2 以直方图形式给出了不同模式下胶结面细观单元抗拉强度的随机分布对比。

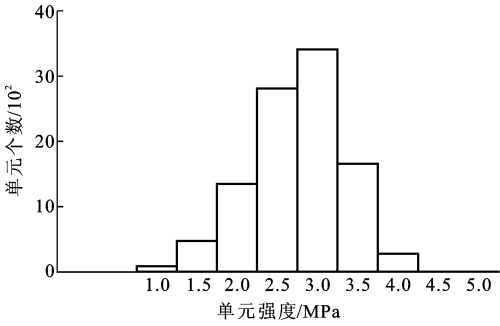
表 1 随机力学参数的统计量

Tab. 1 Statistics of Random Mechanical Parameters

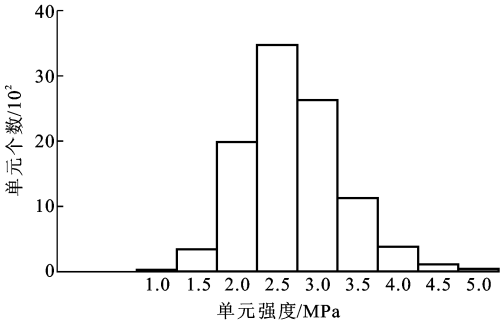
材 料		骨料	基质	胶结面
弹性模量	均值 u_0 /GPa	50	26	25
	均值度 m_1	9	6	4
	均值度 m_2	12	9	6
	变异系数	0.1	0.1	0.1
抗拉强度	均值 u_0 /GPa	6.0	3.5	3.0
	均值度 m_1	9	6	4
	均值度 m_2	12	9	6
	变异系数	0.15	0.15	0.20
泊松比		0.2	0.2	0.2



(a)Weibull分布(均值度 $m=4$)



(b)Weibull分布(均值度 $m=6$)



(c)对数正态分布

图 2 不同分布条件下胶结面强度的分布直方图

Fig. 2 Histogram of Bond's Strength Distribution Under Different Distribution Conditions

由图 2 中可看出:① Weibull 分布 I 中的值比较分散,界面强度的范围为 $0 \sim 5.0$ MPa, Weibull 分布 II 中的范围为 $0.5 \sim 4.0$ MPa,对数正态分布 III 中的范围为 $1.0 \sim 5.5$ MPa;② 对数正态分布 III 在

2.0~3.0 MPa 内的值最多,峰值前后的单元个数基本持平,Weibull 分布 II 在 2.5~3.0 MPa 内的值最多,峰值前的单元个数明显多于峰值后,直方图的轮廓线不再对称,表现出明显的前偏;③对数正态分布 III 在 2.0~2.5 MPa 内的值最多,峰值后的单元个数明显多于峰值前,直方图的轮廓线表现出明显的厚尾性。

3 细观单元的弹性损伤本构关系

首先,在表 1 所列统计量的基础上,采用蒙特卡罗随机数生成算法为混凝土细观数值试件赋予力学参数;进而,基于岩石、混凝土类材料细观单元(基元)的各向同性建立弹性损伤本构模型^[10-11],主要考虑细观单元可能发生的拉伸及压剪损伤破坏。相应地,采用如下两个损伤判据:受拉状态下的最大拉应变准则及压剪状态下的摩尔库仑准则。具体公式可参见文献[9],单轴应力环境下,按应变等价原理,建立拉伸和压剪状态下损伤变量随应变值的定量演化方程;而在三轴应力环境下,通过等效主拉应变和主压应变定义,延用单轴拉伸及剪切损伤演化方程。

采用位移控制模式进行增量加载,以第 k 载荷步的第 $i+1$ 增量步为例,其控制方程为

$$\mathbf{K}_{jj,k}^0 \Delta u_{j,k}^{i+1} = -\mathbf{K}_{jb,k}^0 \Delta u_{b,k} - \Delta \mathbf{K}_{jj,k}^i u_{j,k}^i \quad (3)$$

式中: j, b 分别为试件内部节点与加载边界节点; Δu_b 为加载位移增量; Δu_j 为内部点待求位移增量; \mathbf{K} 为割线刚度矩阵; $\mathbf{K}_{jj,k}^0$ 为初始刚度阵; $\Delta \mathbf{K}_{jj,k}^i$ 为由于细观单元的损伤,上一迭代第 i 步与本载荷步初始刚度阵 $\mathbf{K}_{jj,k}^0$ 的差值。

4 随机力学参数的数值影响分析

建立 100 mm×100 mm 混凝土试件的随机骨料(断面骨料填充率为 45%;骨料的粒径范围为 5~12 mm,均匀分布)细观数值模型,并把它剖分为 1 mm×1 mm 的有限元网格。

4.1 单轴拉伸时随机分布的影响

试件加载过程采用位移控制,试件底面节点采用法向约束;考虑到单轴拉伸时极限拉应变较小,加载位移步长为 0.001 mm,而单轴压缩时,加载位移步长调整为 0.004 mm。混凝土在单轴拉伸载荷作用下应力-应变曲线的数值模拟结果如图 3 所示。

细观力学参数在 3 种不同分布条件下,其数值模拟的结果:峰值强度为 1.66、1.79、1.85 MPa,弹性模量为 27.67、35.80、30.83 GPa。从图 3 中可以看到:3 条曲线的形状相似,残余应力强度很接近;

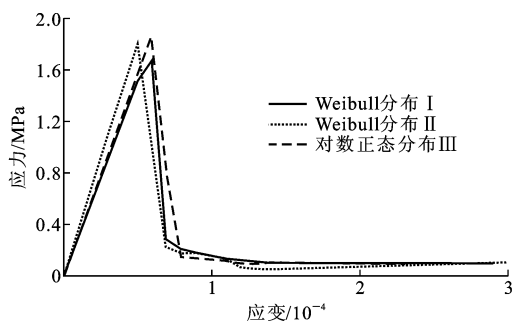


图 3 不同分布条件下试件单轴拉伸的应力-应变曲线
Fig. 3 Stress and Strain Curves of Specimen Under Uniaxial Tension with Different Distribution Conditions

对数正态分布 III 的峰值强度最大,Weibull 分布 I 的最小,Weibull 分布 II 表征的宏观弹性模量最大。这些结果与《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)中所列的抗拉强度与弹性模量关系吻合较好。此规范中,利用插值可以得到:抗拉强度为 1.66 MPa 时,混凝土弹性模量近似为 26.75 GPa;抗拉强度为 1.79 MPa 时,混凝土弹性模量近似为 28.09 GPa;抗拉强度为 1.85 MPa 时,混凝土弹性模量近似为 28.61 GPa。

图 4 为试件的破坏情况:试件破坏时出现一条与载荷方向垂直的横向裂纹。由图 4 可以发现,当两者的随机骨料模型相同,但随机力学参数不同时,裂纹的位置有较大差别。统计数据显示,Weibull 分布 II 总的损伤和破坏单元中,骨料占 1.9%,基质占 30.1%,界面占 68.0%;对数正态分布 III 总的损伤和破坏单元中,骨料占 2.5%,基质占 34.9%,界面占 62.6%。

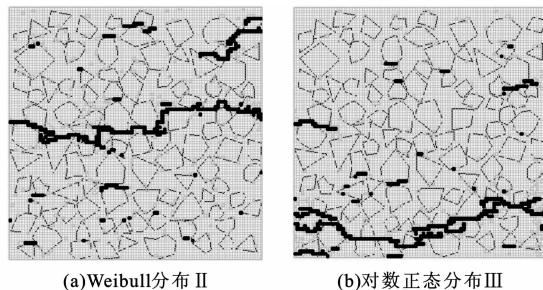


图 4 单轴拉伸时的试件破坏情况

Fig. 4 Fracture Conditions of Specimen Under Uniaxial Tension

4.2 单轴压缩时随机分布的影响

混凝土在单轴拉伸载荷作用下应力-应变曲线的数值模拟结果如图 5 所示。

对于上述 3 种不同的随机分布,其数值模拟的结果:峰值强度为 13.71、18.51、16.02 MPa,单轴压

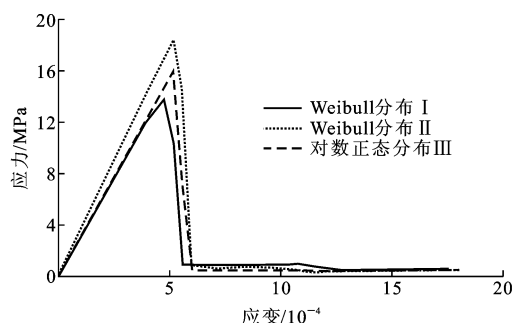


图5 不同分布条件下试件单轴压缩的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress and Strain Curves of Specimen Under Uniaxial

Compression with Different Distribution Conditions

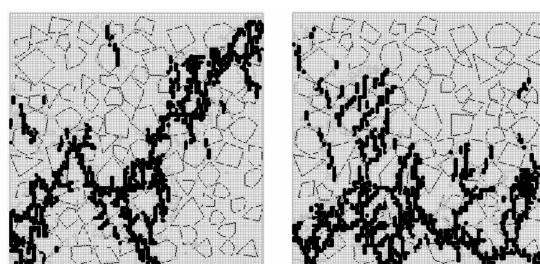
缩强度和单轴拉伸强度的比值为8.26、10.34、8.65,弹性模量为28.54、35.58、30.77 GPa,弹性模量与单轴拉伸时几乎相等。从图5中可以看到:Weibull分布Ⅱ的峰值强度最大,Weibull分布Ⅰ的峰值强度最小,Weibull分布Ⅱ表征的宏观弹性模量最大;Weibull分布Ⅱ和对数正态分布Ⅲ的残余强度接近,Weibull分布Ⅰ的残余应力强度较大,这与数据均值度较小有关。与单拉情况类似,模拟结果与《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)中的混凝土抗压强度与弹性模量的关系吻合。规范中,利用插值可以得到:抗压强度为13.71 MPa时,混凝土弹性模量近似为25.73 GPa,压拉强度比为8.79;抗压强度为16.02 MPa时,混凝土弹性模量近似为27.78 GPa,压拉强度比为9.3;抗压强度为18.51 MPa时,混凝土弹性模量近似为29.22 GPa,压拉强度比为9.74。

图6为单轴压缩时试件的破坏情况。从图6中可以看出,随着微裂纹的扩展和贯通,最终在Weibull分布Ⅱ中形成了一条宏观的斜裂缝,而在对数正态分布Ⅲ中,由于试件底部出现大范围的破坏而失去了承载能力。统计数据显示,Weibull分布Ⅱ总的损伤和破坏单元中,骨料占14.6%,基质占41.3%,界面占44.1%;对数正态分布Ⅲ总的损伤和破坏的单元中,骨料占15.1%,基质占35.6%,界面占49.1%。

5 结语

(1)比较力学参数的Weibull分布和对数正态分布的直方图,如果以峰值处为参考轴,前者表现出左偏性,即实际均值较峰值处偏低;而后者表现出右偏性(厚尾性),即实际均值较峰值处偏高。

(2)比较Weibull分布的细观分析结果可知:试件,对均质度较敏感,但不论是单轴拉伸还是单轴压



(a)Weibull分布Ⅱ

(b)对数正态分布Ⅲ

图6 单轴压缩时的试件破坏情况

Fig. 6 Fracture Conditions of Specimen Under Uniaxial Compression

缩,试件的宏观力学性能都随均值度提高而提高,且满足抗压强度愈大压拉强度比愈大的规律;而对数正态分布情况下,也基本符合规范GB 50010—2002中所列混凝土的宏观统计特征。

(3)比较Weibull分布和对数正态分布的数值模拟结果可以发现:单轴拉伸中,损伤和破坏的单元主要是界面单元,它的强度取决于界面抗拉强度的随机分布中小于峰值(随机分布)的单元个数,个数越多峰值强度就越低,所以对数正态分布的抗拉强度要大一些;单轴压缩,损伤和破坏中骨料和基质单元的比重增加,而在对数正态分布中基质单元抗拉强度的随机分布中小于峰值的单元的个数(那些抗拉强度过大的基质单元和骨料单元一样都不易发生破坏)较少,裂纹的纵向扩展就变得艰难一些,转而在局部范围内扩展,以至于试件底部很快被压坏,所以Weibull分布的抗压强度会显得更大一些。

(4)采用增量位移加载控制模式,利于捕捉峰值后的应力-应变曲线,而且经简单修改后,可处理动力加载的情况。

参考文献:

References:

- [1] 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.
- [2] 马怀发,陈厚群,黎保琨. 细观结构不均匀性对混凝土动弯拉强度的影响[J]. 水利学报, 2005, 36(7): 846-852.
MA Huai-fa, CHEN Hou-qun, LI Bao-kun. Influence of Meso-structure Heterogeneity on Dynamic Bending Strength of Concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(7): 846-852.
- [3] 刘庭金,朱合华,莫海鸿. 非均质混凝土破坏过程的

- 细观数值试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4120-4133.
- LIU Ting-jin, ZHU He-hua, MO Hai-hong. Meso-structure Numerical Test of Nonuniformity Concrete Damage Process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(22): 4120-4133.
- [4] 马怀发, 陈厚群, 黎保琨. 混凝土试件细观结构的数值模拟[J]. 水利学报, 2004, 35(10): 27-35.
- MA Huai-fa, CHEN Hou-qun, LI Bao-kun. Meso-structure Numerical Simulation of Concrete Specimen[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(10): 27-35.
- [5] 刘小燕, 颜东煌, 张峰, 等. 预应力高强混凝土梁极限承载力分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1): 58-61.
- LIU Xiao-yan, YAN Dong-huang, ZHANG Feng, et al. Ultimate Load Analysis of Prestressed High-strength Concrete Beam[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 58-61.
- [6] 邵长江, 吴永红, 钱永久. 混凝土桥梁结构非线性地震损伤演化[J]. 中国公路学报, 2006, 19(5): 41-45.
- SHAO Chang-jiang, WU Yong-hong, QIAN Yong-jiu. Evolution of Nonlinear Seismic Damage of Concrete Bridge Structure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5): 41-45.
- [7] 朱劲松, 宋玉普. 定侧压混凝土双轴拉-压疲劳累积损伤试验研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(1): 40-45.
- ZHU Jin-song, SONG Yu-pu. Experimental Research on Fatigue Cumulative Damage of Concrete Under Cyclic Tension-compression with Constant Confined Stress[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 40-45.
- [8] 钟铭, 王海龙, 王海良. 高强混凝土梁在疲劳荷载作用下的裂缝宽度计算[J]. 中国公路学报, 2005, 18(4): 48-53.
- ZHONG Ming, WANG Hai-long, WANG Hai-liang. Calculation of Crack Width of High-strength Concrete Beams Under Fatigue Loading[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(4): 48-53.
- [9] 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.
- [10] 宋玉普. 多种混凝土材料的本构关系和破坏准则[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- SONG Yu-pu. Constitutive Relation and Failure Criterion of Multiple Concrete Material[M]. Beijing: China Water Conservancy and Electric Power Press, 2002.
- [11] 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 Relation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.

《混凝土》2008 年征订通知

《混凝土》创刊于 1979 年, 是全国中文核心期刊(2004 年版)、中国科学引文数据库统计源期刊、中国建筑业协会混凝土分会会刊, 被中国核心期刊(遴选)数据库、万方数据-数字化期刊群收录; 由中华人民共和国建设部主管, 中国建筑东北设计研究院、中国建筑业协会混凝土分会联合主办; 主要报道与混凝土专业有关的科研、设计、生产、施工等内容, 以宣传党的技术政策, 加强科技指导, 交流行业信息, 促进行业科技进步为宗旨。

《混凝土》为大 16 开本, 彩色胶版印刷, 每月 27 日出版, 国内外公开发行。国内统一连续出版物号为 CN 21-1259/TU, 国际标准连续出版物号为 ISSN 1002-3550。全国各地邮局均可订阅, 每期定价 8.00 元, 全年定价 96.00 元, 邮发代号为 8-110; 读者也可直接汇款到本刊编辑部订阅(每期另收邮费 2.00 元, 如需挂号每期另收邮挂费 5.00 元)。

地址: 沈阳市和平区光荣街 65 号

邮编: 110006

电话: (024) 62123865

联系人: 姚老师

传真: (024) 23214156

E-mail: hntbjb@vip.163.com