

文章编号:1673-2049(2014)02-0099-06

基于预插粘性界面单元的全级配混凝土梁 弯拉破坏模拟

徐海滨,杜修力

(北京工业大学 城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室,北京 100124)

摘要:为确定预插粘性界面单元法模拟全级配混凝土梁在弯拉荷载作用下断裂破坏过程的有效性和适用性,基于粘结裂缝模型的基本原理,在混凝土梁的中心区域采用 Monte-Carlo 法生成随机骨料模型,通过自编程序实现了砂浆单元间和界面处粘性界面单元的预插,对全级配细观混凝土梁的弯拉断裂破坏过程进行数值模拟,模拟结果与相关文献结果吻合良好。研究表明:预插粘性界面单元法能够有效地模拟细观混凝土材料的弯拉断裂破坏过程和宏观力学特性。

关键词:全级配混凝土梁;弯拉破坏;粘性界面单元;数值模拟;粘聚力

中图分类号:TU528.1

文献标志码:A

Numerical Simulation for Bending Fracture of Fully-graded Concrete Beam Using Cohesive Interface Elements

XU Hai-bin, DU Xiu-li

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to determine validity and applicability of numerical simulation for fracture process of fully-graded concrete beam under bending load using the cohesive interface element method, based on the basal theory of cohesive crack model, random aggregate model was generated in the central region of concrete beam with Monte-Carlo method, then cohesive interface elements were embedded inside mortar and interface (aggregate-mortar) finite element meshes by self-compiled program. Fully-graded mesoscopic concrete beam was numerically simulated in the process of bending fracture, the numerical results were in good agreement with those obtained in the literature. The research results indicate that it is an efficient method to simulate the mesoscopic bending fracture process of concrete materials and macro-mechanical properties.

Key words: fully-graded concrete beam; bending fracture; cohesive interface element; numerical simulation; cohesive force

0 引言

大坝混凝土属于大体积混凝土,一般采用三级配或四级配的配合比。大坝混凝土的力学性能比较

复杂,其抗力评价指标参数大多通过湿筛混凝土试件测试得到,所以对湿筛混凝土试件的破坏及其力学性能的研究具有重要的意义^[1]。

近年来,细观损伤力学得到了较快的发展,它从

收稿日期:2014-03-14

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2011CB013600);国家自然科学基金重大研究计划项目(91215301)

作者简介:徐海滨(1982-),男,河北沧州人,工学博士研究生,E-mail:xuhaibin1982@126.com。

混凝土的细观结构出发,通过对细观结构变化的物理与力学过程的研究来了解混凝土的破坏,建立了细观结构与宏观力学特性之间的关系。杜成斌等^[2]对三级配混凝土梁进行了静、动载下细观弯拉破坏机制的研究,马怀发等^[3]对四级配混凝土梁进行了弯拉强度的数值模拟,均采用以力控制的加载方式,得到的荷载-位移曲线的软化阶段为呈近似水平的一条直线,以此来确定梁的极限荷载。田瑞俊等^[4-5]采用自编位移控制的加载有限元程序,基于细观损伤力学原理模拟了三级配和四级配混凝土梁弯拉破坏过程,得到了弯拉应力-应变全曲线。杜修力等^[6]基于细观单元等效化方法分析了混凝土梁的弯拉破坏过程。近年来,粘性裂缝模型(Cohesive Crack Model, CCM)得到了快速的发展^[7],为模拟混凝土这种准脆性材料的断裂破坏过程提供了一种较好的方法。Yang 等^[8-9]编制了插入粘性界面单元的程序,采用 Monte-Carlo 法生成一个材料属性的随机分布场,对二维和三维混凝土试块进行拉伸断裂模拟,结果表明,此方法可以很好地模拟混凝土的断裂破坏过程。

本文中笔者基于粘结裂缝模型,以有限元软件 ABAQUS 为平台,应用自编 FORTRAN 程序,尝试将粘性界面单元预插到实体单元的边上,对全级配混凝土梁进行弯拉断裂过程的数值模拟,研究梁的荷载-位移曲线,结果表明,该方法能够很好地模拟混凝土梁的弯拉破坏过程和宏观力学特性。

1 粘结裂缝模型

CCM 将物理断裂用粘聚力 t 来描述,粘结裂缝区域由物理裂缝和粘结裂缝构成,如图 1 所示,其中, δ 为位移。粘结裂缝区域就是物理裂缝尖端和粘聚力尖端之间的区域(B-A),通过粘聚结合在一起,粘聚力 t 大小取决于 2 个面的张开位移,粘聚力-张开位移的非线性关系见图 2,其中, t_0 为极限抗拉强度, δ_{sep} 为裂缝最大开口位移, G_f 为粘结断裂能。

CCM 是由粘结裂缝区域的本构关系定义的,通过粘聚力和相对位移来描述其本构关系^[10-13],本文中采用线性 CCM 模拟混凝土梁的弯拉断裂破坏,如图 3 所示,其中, t_n , t_s 分别为粘结裂缝区域内的法向粘聚力和切向粘聚力, δ_n , δ_s 分别为粘结裂缝区域内的法向相对位移和切向相对位移, t_{n0} , t_{s0} 分别为粘聚力达到最大值时的法向开裂强度和切向开裂强度, G_{f1} , G_{f2} 分别为粘性界面单元的法向断裂能和切

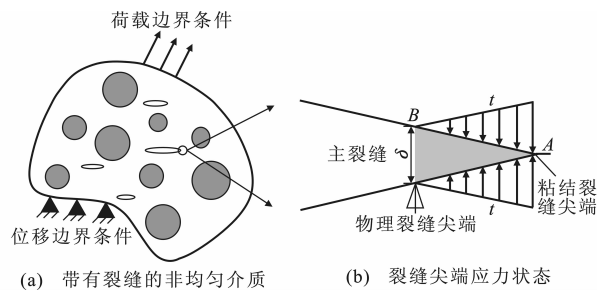


图 1 粘结裂缝模型

Fig. 1 Cohesive Crack Models

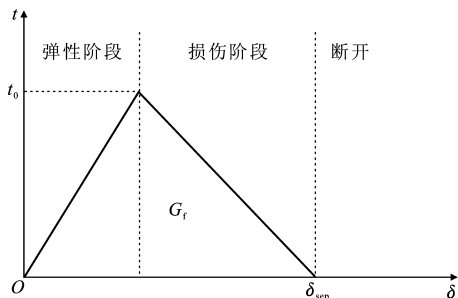


图 2 粘聚力-张开位移的关系

Fig. 2 Relation of Cohesive Force-displacement Jump

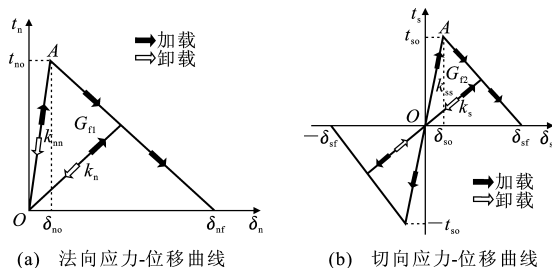


图 3 粘结裂缝模型的本构关系

Fig. 3 Constitutive Relations of Cohesive Crack Model

向断裂能, δ_{n0} , δ_{s0} 分别为法向开裂位移和切向开裂位移, k_n , k_s 分别为退化后的法向刚度和切向刚度, k_{n0} , k_{s0} 分别为初始法向刚度和初始切向刚度, δ_{nf} , δ_{sf} 分别为裂缝的法向最大开口位移和切向最大开口位移,此时粘聚力为 0,裂缝形成。从图 3 可以看出:在粘聚力未达到开裂强度之前,表现为线弹性;达到开裂强度之后,引入一个损伤变量 D (后处理中由量纲为 1 的刚度退化 SDEG 值表征) 来表示线性软化,即损伤阶段。

损伤变量 D 为

$$D = \frac{\delta_{mf}(\delta_{m, \max} - \delta_{m0})}{\delta_{m, \max}(\delta_{mf} - \delta_{m0})} \quad (1)$$

式中: $\delta_{m, \max}$ 为加载过程中界面最大有效相对位移; δ_{m0} , δ_{mf} 分别为开裂与完全破坏时有效相对位移。

有效相对位移 δ_m 为

$$\delta_m = \sqrt{\langle \delta_n \rangle^2 + \delta_s^2} \quad (2)$$

$$\langle \delta_n \rangle = \begin{cases} \delta_n & \delta_n \geq 0 \quad \text{受拉} \\ 0 & \delta_n < 0 \quad \text{受压} \end{cases} \quad (3)$$

退化后的刚度 k_n 和 k_s 可以由初始刚度 k_{nn} 和 k_{ss} 表示为

$$\begin{cases} k_n = (1-D)k_{nn} \\ k_s = (1-D)k_{ss} \end{cases} \quad (4)$$

法向粘聚力和切向粘聚力分别为

$$t_n = \begin{cases} (1-D)k_{nn}\delta_n & \delta_n \geq 0 \\ k_{nn}\delta_n & \delta_n < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$t_s = (1-D)k_{ss}\delta_s \quad (6)$$

由断裂准则-名义应力平方准则得

$$\left(\frac{\langle t_n \rangle}{t_{no}}\right)^2 + \left(\frac{t_s}{t_{so}}\right)^2 = 1 \quad (7)$$

2 全级配混凝土梁的弯拉破坏模拟

2.1 三级配混凝土梁的弯拉破坏模拟

为了与文献[2]中的试验结果进行对比,同样以小湾拱坝作为工程背景,三级配混凝土小、中、大的骨料比例为 3 : 3 : 4,粒径分别为 60,30,12.5 mm,选用尺寸为 300 mm×300 mm×1 100 mm 的混凝土梁进行弯拉试验,如图 4 所示,其中, P 为荷载。加载时跨中的弯矩最大,故选取中间 300 mm×300 mm 区域作为研究对象,进行细观剖分,如图 5 所示的网格采用三角形单元进行剖分,跨中细观部分网格尺寸为 3.75 mm,两侧部分考虑为均质材料,根据 Walaraven 等^[14] 公式计算出细观区域大石、中石和小石的个数分别为 4,14,102。然后采用 Monte-Carlo 法把骨料随机投放到跨中的细观区域,生成如图 6 所示的混凝土的随机骨料模型。表 1 中给出了三级配混凝土梁试件的材料参数,其中插入到砂浆和界面处的粘性界面单元的断裂能分别为 120,60 N·m⁻¹。

为了准确模拟混凝土梁在弯拉作用下裂缝扩展

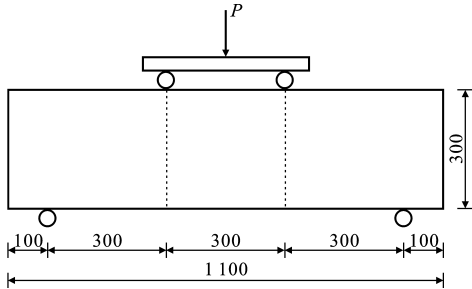


图 4 三级配混凝土梁弯拉试验示意(单位:mm)

Fig. 4 Schematic of Three-gradation Concrete Beam Bending Test (Unit:mm)

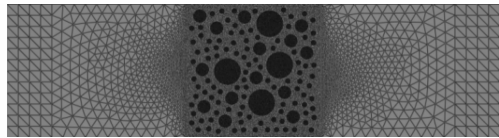


图 5 三级配混凝土梁单元网格剖分

Fig. 5 Grid Mesh of Three-gradation Concrete Beam

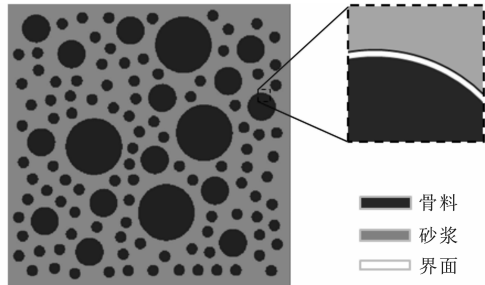


图 6 随机骨料模型

Fig. 6 Meso Random Aggregate Model

表 1 三级配混凝土梁的材料参数

Tab. 1 Material Parameters of Each Component for Three-gradation Concrete Beam

参数	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa
骨料	55.5	0.16	6.0
砂浆	26.0	0.22	2.5
界面	25.0	0.16	2.0
混凝土	30.0	0.17	2.8

过程,应用自编的 FORTRAN 程序在初始实体单元边上嵌入四节点粘性界面单元,图 7 为嵌入粘性界面单元后网格示意。图 7 中显示的粘性界面单元具有一定的厚度,实际嵌入的为零厚度单元,把粘性界面单元分别嵌入到砂浆和界面单元边上,赋予相应的材料属性,模拟裂缝的扩展。跨中部分的节点总数为 40 488,单元总数为 26 709,预插粘性界面单元数为 13 213。

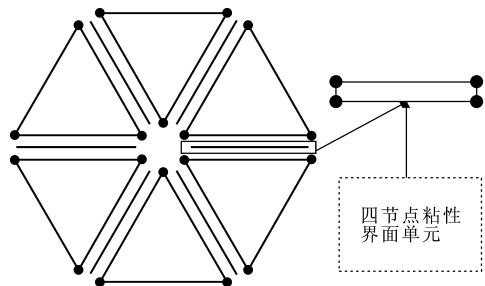


图 7 嵌入粘性界面单元后网格示意

Fig. 7 Cohesive Interface Elements Inserted in Initial Mesh

图 8 为三级配混凝土梁的跨中部分裂缝扩展过程。单元的破坏程度是通过一个量纲为 1 的 SDEG 来表征的,范围为 0~1,断裂的界面单元的 SDEG

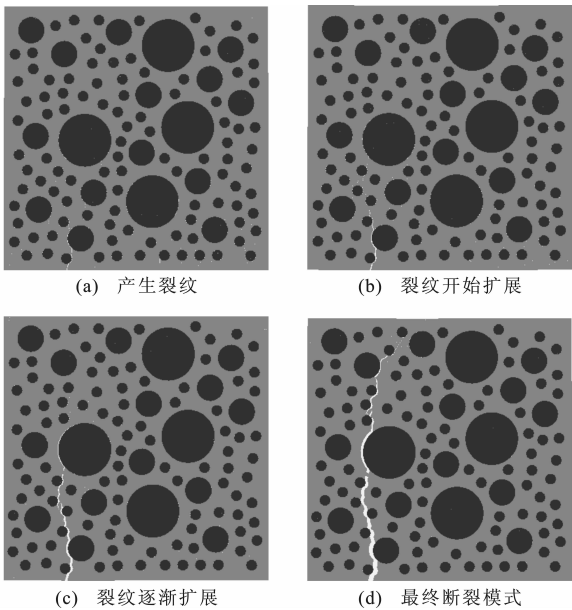


图 8 三级配混凝土梁的裂缝扩展过程

Fig. 8 Crack Propagation Processes of Three-gradation Concrete Beam

值均大于 0.99。从图 8 可以看出:微裂缝首先在砂浆和骨料的界面处产生,随着荷载的增加,砂浆和界面处的微裂缝逐渐扩展汇聚成 1 条贯穿的主裂缝。图 9 为三级配混凝土梁的荷载-位移曲线,该数值模拟方法得到的极限荷载为 77.2 kN,文献[2]中给出的三级配混凝土梁的破坏荷载为 77.4 kN,且试验得到的三级配混凝土梁的极限荷载为 70~80 kN,与文献[2]中的结果吻合良好。

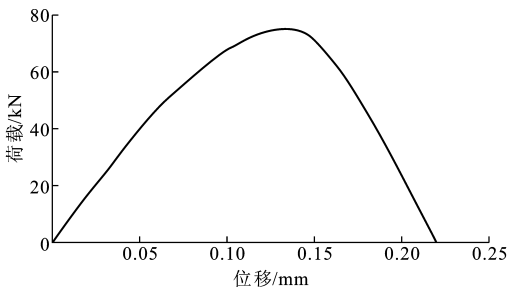


图 9 三级配混凝土梁的荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement Curve of Three-gradation Concrete Beam

2.2 四级配混凝土梁的弯拉破坏模拟

按照《水工混凝土试验规程》(SL 352—2006)[15],四级配混凝土梁的弯拉试验采取如图 10 所示的三分点加载法。同样为了与文献[4]中的试验结果进行对比,四级配混凝土小、中、大、特大的骨料比例为 2:2:3:3,粒径分别为 120,60,30,15 mm,选用尺寸为 450 mm×450 mm×1 700 mm 的混凝土梁进行弯拉试验。加载时跨中的弯矩最大,

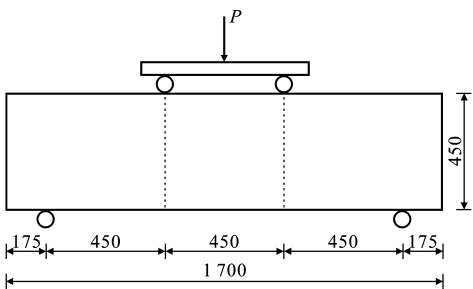


图 10 四级配混凝土梁弯拉试验示意(单位:mm)

Fig. 10 Schematic of Four-gradation Concrete Beam Bending Test (Unit:mm)

故选取中间 450 mm×450 mm 区域作为研究对象,进行细观剖分,根据 Walaraven 等[14]公式计算出细观区域特大石、大石、中石和小石的个数分别为 3,12,35,167。然后采用 Monte-Carlo 法把骨料随机投放到跨中的细观区域,生成混凝土的随机骨料模型。图 11 为四级配混凝土梁单元网格剖分。图 11 中的网格采用三角形单元进行剖分,跨中细观部分网格尺寸为 3.75 mm,两侧部分考虑为均质材料。应用自编的 FORTRAN 程序在初始实体单元边上嵌入零厚度的四节点粘性界面单元,跨中部分的节点总数为 99 060,单元总数为 54 443,预插粘性界面单元数为 21 584。表 2 中给出了四级配混凝土梁的材料参数,其中插入到砂浆和界面处的粘性界面单元的断裂能分别为 162,81 N·m⁻¹。

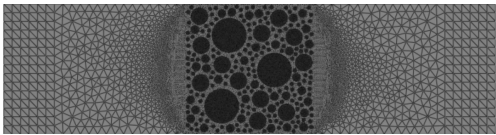


图 11 四级配混凝土梁单元网格剖分

Fig. 11 Grid Mesh of Four-gradation Concrete Beam

表 2 四级配混凝土梁的材料参数

Tab. 2 Material Parameters of Each Component for Four-gradation Concrete Beam

参数	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa
骨料	50.0	0.2	10.0
砂浆	25.0	0.2	3.6
界面	25.0	0.2	2.0
混凝土	28.0	0.2	3.0

图 12 为四级配混凝土梁的跨中部分裂缝扩展过程。从图 12 可以看出,微裂缝首先在砂浆和骨料的界面处产生 2 条微裂缝,随着荷载增加,2 条微裂缝各自扩展延伸,形成 1 条贯穿的主裂缝。图 13 为四级配混凝土梁的荷载-位移曲线,该数值模拟方法得到的极限荷载为 164.8 kN,文献[4]中给出的四

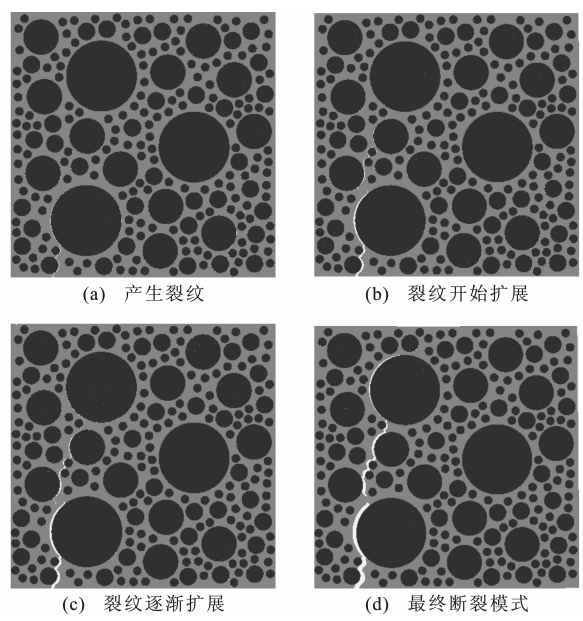


图 12 四级配混凝土梁的裂缝扩展过程
Fig. 12 Crack Propagation Processes of Four-gradation Concrete Beam

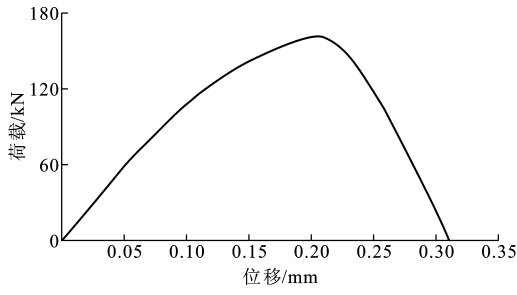


图 13 四级配混凝土梁的荷载-位移曲线
Fig. 13 Load-displacement Curve of Four-gradation Concrete Beam

级配混凝土梁破坏荷载为 168.397 4 kN,抗弯强度为 2.494 776 MPa,且试验得到的四级配混凝土梁的极限荷载为 154.7~171.6 kN,抗弯强度为 2.3~2.54 MPa^[16]。上述模拟结果与文献[4],[16]中的结果吻合良好,证明此方法可以很好地模拟混凝土梁的弯拉断裂破坏过程。

3 结 语

- (1)对比 2 种级配混凝土梁的荷载-位移曲线,级配越高,破坏荷载越高,位移越大。
- (2)在弯拉荷载作用下,全级配混凝土梁应力集中首先产生在界面处,进而达到破坏强度生成微裂纹,不断演变扩展汇聚成 1 条贯穿的主裂缝。
- (3)计算结果与相关文献结果基本吻合,证明此方法模拟全级配混凝土梁断裂破坏过程及其宏观力学特性的可行性。

参考文献:

References:

[1] 杜成斌,江守燕,徐海荣,等.湿筛混凝土试件的静、动破坏数值模拟[J].河海大学学报:自然科学版,2012,40(2):195-200.
DU Cheng-bin,JIANG Shou-yan,XU Hai-rong,et al. Numerical Simulation of Static and Dynamic Failure of Wet-screened Concrete Specimen[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2012,40(2):195-200.

[2] 杜成斌,尚 岩.三级配混凝土静、动载下力学细观破坏机制研究[J].工程力学,2006,23(3):141-146,125.
DU Cheng-bin,SHANG Yan. Study on Micro-mechanical Failure Mechanism of the Three-gradation Concrete Under Static and Dynamic Loadings[J]. Engineering Mechanics,2006,23(3):141-146,125.

[3] 马怀发,陈厚群,黎宝琨.混凝土试件细观结构的数值模拟[J].水利学报,2004(10):27-35.
MA Huai-fa,CHEN Hou-qun,LI Bao-kun. Meso-structure Numerical Simulation of Concrete Specimens[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2004(10):27-35.

[4] 田瑞俊,杜修力,彭一江.全级配混凝土梁弯拉应力-应变全曲线的细观力学模拟[J].水力发电,2008,34(2):23-25.
TIAN Rui-jun,DU Xiu-li,PENG Yi-jiang. Meso-mechanical Simulation on the Total Stress-strain Curve of Fully-graded Concrete Beam in Bending[J]. Water Power,2008,34(2):23-25.

[5] 田瑞俊,杜修力,彭一江.基于细观力学全级配混凝土梁弯拉试验的数值模拟[J].水利与建筑工程学报,2008,6(1):1-3.
TIAN Rui-jun,DU Xiu-li,PENG Yi-jiang. Numerical Simulation for Bending and Rupturing Test of Fully-graded Concrete Beam Based on Meso-mechanics[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2008,6(1):1-3.

[6] 杜修力,金 浏.考虑过渡区界面影响的混凝土宏观力学性质研究[J].工程力学,2012,29(12):72-79.
DU Xiu-li,JIN Liu. Research on the Influence of Interfacial Transition Zone on the Macro-mechanical Properties of Concrete[J]. Engineering Mechanics,2012,29(12):72-79.

[7] SHET C,CHANDRA N. Analysis of Energy Balance when Using Cohesive Zone Models to Simulate Fracture Processes[J]. Journal of Engineering Materials and Technology,2002,124(4):440-450.

[8] YANG Z J,SU X T,CHEN J F,et al. Monte Carlo

- Simulation of Complex Cohesive Fracture in Random Heterogeneous Quasi-brittle Materials [J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(17): 3222-3234.
- [9] SU X T, YANG Z J, LIU G H. Monte Carlo Simulation of Complex Cohesive Fracture in Random Heterogeneous Quasi-brittle Materials; a 3D Study [J]. International Journal of Solids and Structures, 2010, 47(17): 2336-2345.
- [10] 丁发兴, 余志武, 欧进萍. 混凝土单轴受力损伤本构模型[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(4): 70-73.
- DING Fa-xing, YU Zhi-wu, OU Jin-ping. Damage Constitutive Model for Concrete Under Uniaxial Stress Conditions [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(4): 70-73.
- [11] 郑木莲, 陈拴发, 王崇涛. 多孔混凝土的强度特性[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(4): 20-25.
- ZHENG Mu-lian, CHEN Shuan-fa, WANG Chong-tao. Strength Character of Porous Concrete [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(4): 20-25.
- [12] 孟江, 赵宝俊, 刘建梅. 混凝土收缩徐变效应预测模型及影响因素[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2013, 33(2): 56-62.
- MENG Jiang, ZHAO Bao-jun, LIU Jian-mei. Prediction Model and Influencing Factors for Concrete Shrinkage and Creep Effects [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(2): 56-62.
- [13] 李新忠, 魏雪英, 赵均海. 混凝土力学性能的应变率效应[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(2): 82-86.
- LI Xin-zhong, WEI Xue-ying, ZHAO Jun-hai. Strain Rate Effect on Mechanical Properties of Concrete [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(2): 82-86.
- [14] WALARAVEN J C, REINHARDT H W. Theory and Experiments on the Mechanical Behavior of Cracks in Plain and Reinforced Concrete Subjected to Shear Loading [J]. Heron, 1981, 26(1A): 23-33.
- [15] SL 352—2006, 水工混凝土试验规程[S].
- SL 352—2006, Test Code for Hydraulic Concrete [S].
- [16] 邓宗才. 高性能大坝混凝土的强度与变形[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- DENG Zong-cai. Strength and Deformation of High Performance Dam Concrete [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- ~~~~~
- (上接第 70 页)
- [4] 陆新征, 李易, 叶列平. 混凝土结构防连续倒塌理论与设计方法研究[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- LU Xin-zheng, LI Yi, YE Lie-ping. Theory and Design Method for Progressive Collapse Prevention of Concrete Structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [5] LYNN K M, ISOBE D. Structural Collapse Analysis of Framed Structures Under Impact Loads Using ASI-Gauss Finite Element Method [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(9): 150-160.
- [6] 李国强, 孙建运, 王开强. 爆炸冲击荷载作用下框架柱简化分析模型研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(1): 8-11, 20.
- LI Guo-qiang, SUN Jian-yun, WANG Kai-qiang. Research on a Simplified Frame Column Model to Resist Blast Load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(1): 8-11, 20.
- [7] SUN R, HUANG Z, BUGRESS I W. Progressive Collapse Analysis of Steel Structures Under Fire Conditions [J]. Engineering Structures, 2012, 34: 400-413.
- [8] WANG Y C. Postbuckling Behavior of Axially Restrained and Axially Loaded Steel Columns Under Fire Conditions [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(3): 371-380.
- [9] SHEPHERDA P G, BURGESS I W. On the Buckling of Axially Restrained Steel Columns in Fire [J]. Engineering Structures, 2011, 33(10): 2832-2838.
- [10] 高山, 魏民, 徐嫚. 支撑钢框架中关键柱破坏后结构抗倒塌性能分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(1): 66-73.
- GAO Shan, WEI Min, XU Man. Performance Analysis of Structural Resist Progressive Collapse of Braced Steel Frames After Destruction of Key Column [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(1): 66-73.
- [11] 黄华, 刘伯权, 吴涛, 等. 结构工程抗倒塌设计研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(1): 27-37.
- HUANG Hua, LIU Bo-quan, WU Tao, et al. Overview of Research on Collapse-resistant Design in Structure Engineering [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(1): 27-37.