# 基于试验的 ABAQUS 混凝土塑性损伤参数取值方法

李伟琛* 韩小雷 崔济东
(华南理工大学土木与交通学院土木工程系,广州 510641)

**摘 要** 在 ABAQUS 的混凝土塑性损伤本构中,塑性损伤参数是影响钢筋混凝土构件行为的重要参数,其取值不仅影响卸载或反向加载的刚度,且直接对构件应变成分有很大影响。对国内外多组混凝土单轴往复压、拉试验数据进行统计分析及数据拟合,提出了一种新的塑性损伤参数的取值方法。与其他方法的比较及数值试验均表明,该方法能较准确地反映真实的混凝土退化特性,并且相对于其他损伤参数取值方法形式更为简洁,便于使用。

**关键词** 混凝土塑性损伤本构,ABAQUS,损伤参数,混凝土单轴试验,曲线拟合
DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2016.02.011

# Determination of Damage Parameter of ABAQUS CDP Model Based on Test Data

LI Weichen* HAN Xiaolei CUI Jidong
(Department of Civil Engineering, School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract** The damage parameter in ABAQUS Concrete Damaged Plasticity model plays an important role in defining the behavior of reinforced concrete members for that it has remarkable influence on not only the unloading and cyclic loading stiffness of concrete but also the ratio of plastic strains to elastic ones. A number of test data was collected and analyzed. By adopting the data fitting scheme, a new approach of determining the parameter is put forward based on these data. The comparison of the damage parameter attained from this study and those calculated via other formulas as well as a numerical test are conducted. The results reveal that the method is capable of accurately reflecting the material deterioration while remaining its conciseness and applicability comparing with other approaches.

**Keywords** concrete damaged plasticity, ABAQUS, damage parameter, axial test of concrete, curve fitting

## 1 引 言

ABAQUS 及其损伤塑性本构 CDP(Concrete Damaged Plasticity)被应用在大量针对混凝土、组合结构构件及结构[1]的数值模拟中,其理论为 Lubliner 等[2]及 Lee 等[3]提出的混凝土塑性损伤本构模型;其中,受压及受拉损伤参数是其模型的关键参数之一。损伤参数定义为单轴受力过程中,1 减去卸载刚度与初始弹性刚度之比[4],其不仅决定了混凝土材料单轴受力时的卸载及反向加载刚度,并且直接影响卸载点处应变的成分(即弹性应变与塑性应变的比例),对单调加载曲线后期也有较大影响[5]。

针对此模型的损伤参数取值,Fajar 根据连续介质损伤力学,认为损伤参数为线弹性本构

收稿日期: 2015-03-11
基金项目: 国家自然科学基金项目(51378221)
* 联系作者, Email: liweichen_scut@163.com

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

与真实本构做功之比[6]，但混凝土并非连续介质，做功面积比与某点的卸载刚度比并非同一物理量，并且使得损伤参数完全取决于本构曲线《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)[7]提出的混凝土受压卸载刚度确定方法(即Mander法)在应变较大时，损伤参数出现下降，并且其未提供受拉卸载刚度的确定方法；还有不少学者提出了精细化的混凝土加、卸载数值模型[8-11]，其能较准确地模拟混凝土单轴加、卸载的路径，但其包含较多参数，计算过程复杂，难以直接应用在CDP模型中。因此，确定具有准确物理含义及简洁形式的损伤参数取值方法具有重要意义。本文以试验的角度出发，搜集多组混凝土单轴拉、压加卸载试验数据，并通过数据拟合，提出了一种混凝土拉、压损伤参数的取值方法，该方法简洁易用；数值试验表明该方法可准确模拟真实的构件行为。

## 2　混凝土损伤因子取值方法

### 2.1　弹性模量定义

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)规定的弹性模量是原点切线模量[7]，但由于ABAQUS计算需要分离弹性应变及非线性应变，若弹性模量按原点切线模量取值，则会造成离散后的受压本构在强度峰值前平滑度较差。因此，参考ACI-318[12]的规定，取规范本构曲线0.5倍$f_u$对应的割线模量为弹性模量，其与切线模量相差较小，并且混凝土在低应力水平下可看作弹性体。此割线模量是后面章节中定义损伤参数及输入ABAQUS的弹性模量值，之后章节的“弹性模量”如无特别说明均指此割线模量。

### 2.2　损伤参数计算

ABAQUS中的损伤参数定义为1减去卸载刚度与弹性刚度之比，因此根据如图1所示的典型混凝土单轴受压加卸载本构曲线，可以得到如下几个特征点的坐标：O(原点)、A(0.5倍峰值强度点)、B(强度峰值点)、$C_i$(第$i$个卸载开始点)、$D_i$(第$i$个卸载完成点)及$E_i$(第$i$个再加载点，常与$D_i$点为同一点)。

根据这些特征点坐标，可得到以下物理量。

弹性刚度：

$$K_0 = \frac{y_A - y_O}{x_A - x_O}$$

第$i$次卸载刚度：

$$K_i = \frac{y_{C,i} - y_{D,i}}{x_{C,i} - x_{D,i}}$$

第$i$次卸载损伤参数：

$$d_i = 1 - \frac{K_i}{K_0}$$

第i次卸载非线性应变与峰值强度应变比：

$$r_i = \frac{x_{C,i} - y_{C,i}/K_0}{x_{B,i}}$$

对于受拉的加卸载本构曲线，弹性点A与强度峰值点B重合。

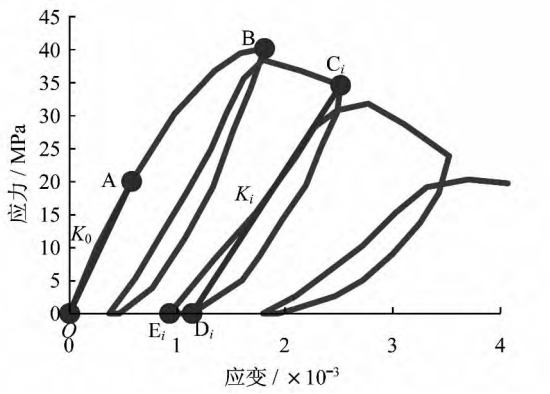


图1　典型加卸载曲线(局部)[13]

Fig. 1　A typical cyclic loading curve[13]

由于多组试验中混凝土的强度及峰值应变均有不同，并为了便于ABAQUS直接使用，宜将损伤参数$d_i$与无量纲化的非线性应变比$r_i$相关联。注意到损伤参数也为无量纲量，因此本构曲线并不限定于应力-应变曲线，对于力-位移曲线、应力比-位移比曲线等均适应此计算规则，其计算结果$d_i$及$r_i$均表示同一含义，并不因为曲线的单位变化而变化。

### 2.3　试验数据搜集

根据以上计算要求，搜集一批国内外混凝土单轴受压、拉的加卸载试验数据(表1、表2)，这些试验的混凝土材料强度从20 MPa到43 MPa不等，并包含多种卸载及再加载方式。

### 2.4　受压损伤参数曲线

根据2.2节的计算方法及2.3节中的试验数据，将13组混凝土受压试验的损伤参数$d$与非线

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

性应变比 $r$ 的曲线及其平均值曲线绘于图 2。

表 1 受压试验数据搜集

Table 1 Compressive test data

| 序号 | 学者 | 试件编号 |
|---|---|---|
| 1 | 过镇海 等(1979) [13] | BI-1 |
| 2 | 过镇海 等(1979) [13] | BII-6 |
| 3 | Sinha et al. (1964) [14] | - |
| 4 | Okamoto et al. (1976) [15] | - |
| 5 | Tanigawa et al. (1979) [16] | - |
| 6 | 过镇海 等(1979) [13] | DI-2 |
| 7 | 过镇海 等(1979) [13] | EI-1 |
| 8 | 过镇海 等(1979) [13] | FI-1 |
| 9 | Bahn et al. (1998) [8] | - |
| 10 | Karsan et al. (1969) [17] | - |
| 11 | Okamoto et al. (1976) [15] | - |
| 12 | Karsan et al. (1969) [17] | - |
| 13 | Spooner et al. (1975) [18] | - |

表 2 受拉试验数据搜集

Table 2 Tensile test data

| 序号 | 学者 | 试件编号 |
|---|---|---|
| 1 | Gopalaratnam et al. (1985) [19] | - |
| 2 | Yankelevsky et al. (1989) [11] | - |
| 3 | Yankelevsky et al. (1989) [11] | - |
| 4 | Yankelevsky et al. (1989) [11] | - |
| 5 | Tylor et al. (1992) [20] | - |

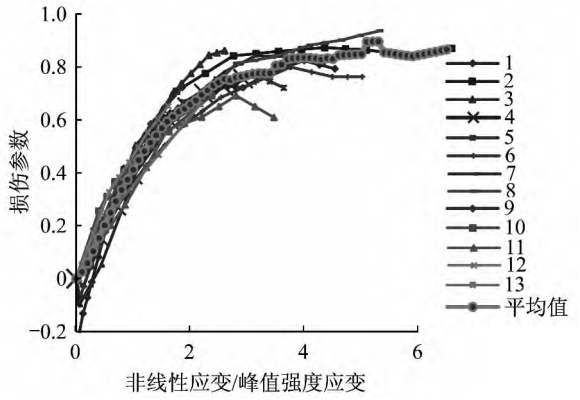


图 2 混凝土受压损伤参数

Fig. 2 Compressive damage parameter of concrete

从图 2 可以看出:

(1) 包含不同强度及不同卸载再加载方式的多组试验,其损伤参数与非线性应变比曲线非常贴近(尤其是 $r<2.5$ 时),显示出较好的一致性和规律性。

(2) 损伤参数的发展与混凝土强度未显示出必然的相关性,如第 2 组及第 13 组试件强度均超 28 MPa,但其损伤参数分布在强度为 21 MPa 的第 1 组、第 6 组及第 7 组两侧,而这三组后期分布也有一定离散性。

(3) 少部分曲线在原点附近出现负值,其是由于卸载点较早(如试验在约一半峰值强度时即卸载)且弹性模量取为割线刚度,使得其比初始切线模量略小的缘故,对于这些初始的负值,在拟合曲线过程中认为是 0,即无损伤。

对以上试验数据的平均曲线进行拟合,以得到统一的受压损伤参数 $d=d(r)$ 关系曲线。考虑到一半以上的试验均在非线性应变比 $r<3.5$ 时已结束,并且在早期应力较高时损伤参数对应变成分影响大,拟合引入随应变比 $r$ 值线性递减的权 $w$。根据损伤指数的实际物理含义,拟合的损伤参数 $d$ - 非线性应变 $r$ 函数必须具备以下特征:过原点、单调递增、随 $r$ 值增大趋近 1,并且兼具准确性和简洁性。表 3 中的三种函数形式能较好满足上述约束条件,其既满足数学上的函数特征条件,同时形式非常简单、易于使用;作者对此三种函数形式进行拟合,结果见表 3,结果显示式(1)函数形式的拟合效果最好。

$$d(r)=\frac{a\cdot r^b}{1+a\cdot r^b} \tag{1}$$

因此,确定参数的条件为寻找 $a$ 与 $b$,使得:

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i\cdot|d_i-d(r_i)|}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \tag{2}$$

取得最小值。

其中,$d_i$ 为第 $i$ 个点平均曲线的值,$d(r_i)$ 为同一点的拟合函数计算值,$w_i$ 为线性递减的权:$w_i=n+1-i$。

采用数值方法求解,可得到参数 $a=0.70$,$b=1.47$;此时,式(2)对应的加权平均残差 $R=0.0096$。

表 3 三类函数拟合结果

Table 3 Results of 3 fitting functions

| 函数 | $1-e^{a\cdot r}$ | $\frac{a\cdot r}{1+a\cdot r}$ | $\frac{a\cdot r^b}{1+a\cdot r^b}$ |
|---|---|---|---|
| 参数 $a$ | -0.52 | 0.94 | 0.70 |
| 参数 $b$ | - | - | 1.47 |
| $R$ 值 | 0.0292 | 0.0482 | 0.0096 |

拟合的函数曲线及试验数据的平均曲线见图 3。

## 2.5 受拉损伤参数曲线

同理,将受拉的试验数据曲线及其平均值曲

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

线绘于图4。

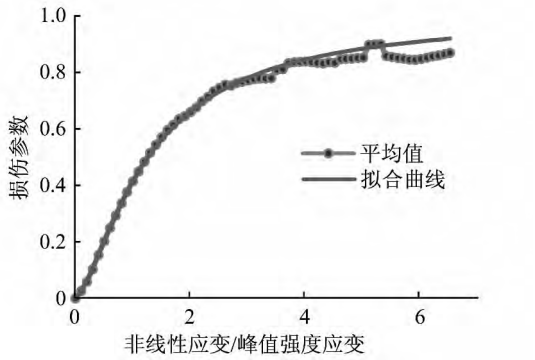


图3　受压损伤参数拟合

Fig. 3　Fitting curve of the compressive damage parameter

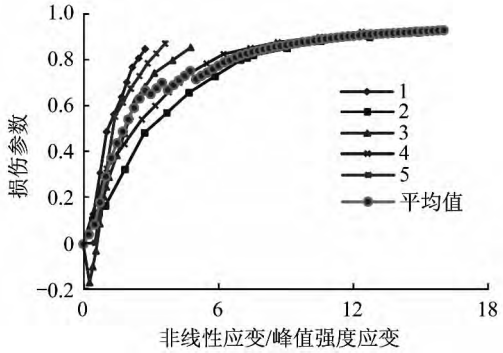


图4　混凝土受拉损伤参数

Fig. 4　Tensile curve damage parameter of concrete

考虑到受拉应力很低，且只有两条曲线非线性应变比超过10，因此拟合段仅计入非线性应变比为10之前的曲线段，同样采用线性递减的权$w$。采用与受压曲线函数相同的函数形式及拟合方法，得到的参数结果为：$a=0.48$，$b=1.15$；对应加权平均残差为0.026 4。拟合的曲线与试验数据平均曲线绘于图5。

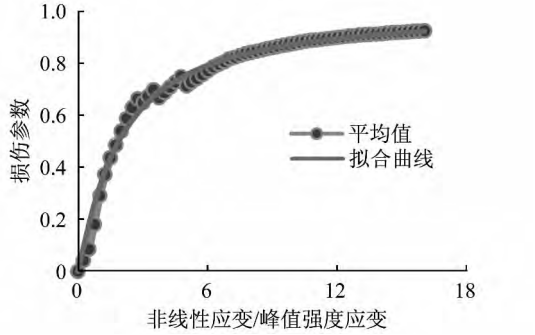


图5　受拉损伤参数拟合

Fig. 5　Fitting curve of the tensile damage parameter

## 3　损伤参数取值方法对比及数值模型验证

### 3.1　三种损伤参数取值方法对比

为了将本文的方法与Fajar的面积法及Mander法本构进行对比，现按规范选取C30混凝土（按标准值$f_c=20.1$ MPa）的受压本构曲线及相关参数按三种方法的计算，结果对比见图6。

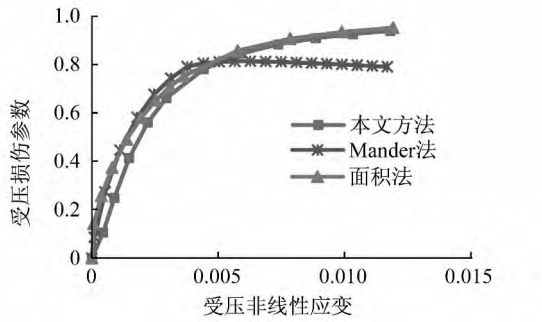


图6　三种损伤参数曲线对比

Fig. 6　Comparison of 3 types of damage parameter curves

由图6可见，按三种方法计算的受压损伤参数曲线在低应变时较为接近，其中本文的方法略微偏小；在后期本文的曲线与面积法较为接近，但面积法在物理含义上与CDP的损伤物理定义不相同；Mander法曲线则逐渐平稳并下降。从实际物理含义及使用简易性的角度，本文的方法具有较大优势。

### 3.2　损伤参数模型验证

为对此损伤参数作一简单的验证，现取文献[21]中BG－3号钢筋混凝土柱试件的骨架曲线与ABAQUS计算的曲线作对比，其中，混凝土本构按《混凝土结构设计规范》[7]本构取值，弹性模量按0.5倍峰值强度对应的割线模量确定，损伤参数按本文方法计算。混凝土实体单元采用C3D8R，钢筋单元采用T3D2，两者用Embedded约束实现共同作用的模拟；轴力与水平位移加载作用于两个参考点，参考点与构件相应受荷表面通过Coupling约束实现力与位移的传递。试验构件及ABAQUS模型主要参数见表4及表5，构件配筋示意图及ABAQUS模型见图6，材料本构及损伤参数取值见图7－图9。

试验及模拟结果如图10所示，计算的力－位移曲线与试验结果吻合良好，弹性段完全吻合，屈服后到极限承载力前有轻微差异，峰值力与其对应位移结果非常接近，下降段吻合良好，证明模型

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参数取值合理，能反映真实情况。

表 4 试件及材料参数

Table 4 Parameters of specimen and material

| 试件及材料参数 | 值 |
|---|---|
| 试件高(不计底座) | 1 645 mm |
| 轴力 | 831 kN |
| 混凝土抗压强度 | 34 MPa |
| 配置纵筋 | 8ϕ22 |
| 纵筋屈服/极限强度 | 456/660 MPa |
| 配置箍筋 | ϕ9.5@76 mm |
| 箍筋屈服/极限强度 | 570/680 MPa |

表 5 ABAQUS 材料参数

Table 5 Parameters of material in ABAQUS

| 模型参数 | 值 |
|---|---|
| Dilation angle | 38 |
| Eccentricity | 0.1 |
| $f_{b0}/f_{c0}$ | 1.16 |
| $K$ | 0.667 |
| Viscosity parameter | 0.000 01 |

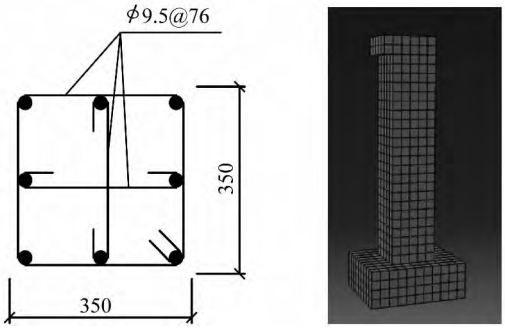


图 7 柱配筋图及 ABAQUS 模型

Fig. 7 Reinforcement arrangement and ABAQUS model of the specimen

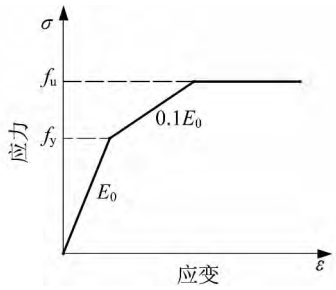


图 8 ABAQUS 钢筋本构关系

Fig. 8 Constitutive relation of reinforcement in ABAQUS

## 4 结 论

当下针对混凝土及组合结构构件的数值模拟中大量使用了混凝土塑性损伤本构，在这种模型中，损伤参数是影响模拟结果的重要参数之一，而目前确定损伤参数的方法并未能很好地同时兼顾实际物理含义与 ABAQUS 模型应用的简易性。基于上述现状，作者搜集了一批混凝土(强度范围: 29 ~ 43 MPa)单轴加卸载试验数据，根据混凝土塑性损伤本构模型对损伤参数的定义，从试验本构曲线中计算、分析并通过最小加权平均残差拟合，提出了损伤参数 $d$ 与非线性应变比 $r$ 的函数关系，通过对比本文的曲线与其他两种方法的

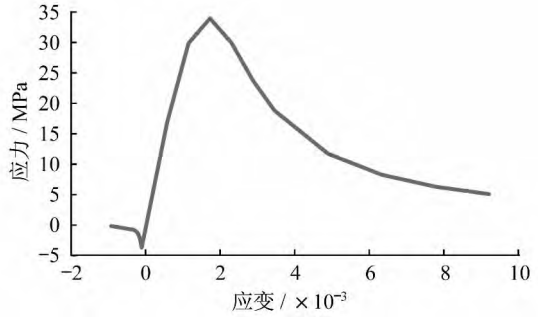


图 9 ABAQUS 混凝土单轴本构关系

Fig. 9 Axial constitutive relation of concrete in ABAQUS

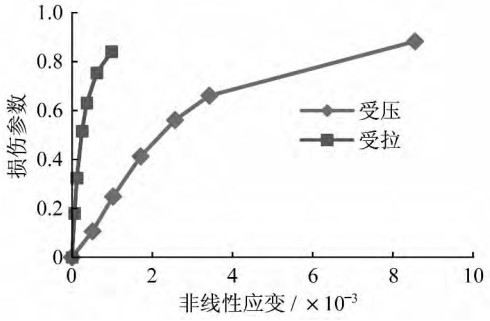


图 10 本试件 ABAQUS 模型混凝土损伤参数

Fig. 10 Concrete damage parameter of the specimen model in ABAQUS

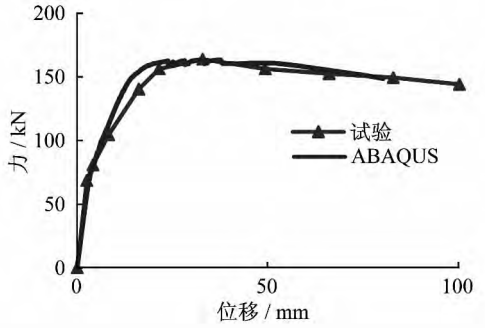


图 11 试验与计算力 - 位移曲线对比

Fig. 11 Comparison of the force-displacement curves of the test and ABAQUS

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

曲线以及一个柱子的数值试验，说明了该函数关系的准确性及使用简易性。主要结论如下：

（1）13组受压试验的混凝土损伤参数与非线性应变比的关系离散性较小，尤其在 $r<2.5$ 的阶段，说明其有较强的一致性和规律性；

（2）损伤参数与混凝土强度间无必然的关系，同一个 $r$ 值对应不同强度混凝土的值没有随强度变化的单调规律性；

（3）根据试验数据的平均值曲线，按最小加权平均残差的方法得到了混凝土受压、拉损伤参数与对应受压、拉非线性应变比的函数关系，分别为 $d(r)=\frac{0.70\cdot r^{1.47}}{1+0.70\cdot r^{1.47}}$ 及 $d(r)=\frac{0.48\cdot r^{1.15}}{1+0.48\cdot r^{1.15}}$，其基于真实试验数据拟合，形式简单，使用方便。

## 参考文献


[1] 高向玲，张业树，李杰. 基于ABAQUS梁单元的钢筋混凝土框架结构数值模拟[J]. 结构工程师，2013，29(6)：19-26.
Gao Xiangling，Zhang Yeshu，Li Jie. Numerical simulation of a RC frame based on ABAQUS beam elements[J]. Structural Engineers，2013，29(6)：19-26.(in Chinese)

[2] Lubliner J，Oliver J，Oller S，et al. A plastic-damage model for concrete[J]. International Journal of Solides and Structures，1989，25：299-329.

[3] Lee J，Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. Journal of Engineering Mechanics，1998，124(8)：892-900.

[4] ABAQUS Analysis user´s manual v6.10 [M]. ABAQUS Inc，2010

[5] 雷拓，钱江，刘成清. 混凝土塑性损伤模型应用研究[J]. 结构工程师，2008，24(2)：22-27.
Lei Tuo，Qian Jiang，Liu Chengqing. Application for damaged plasticity model for concrete[J]. Structural Engineers，2008，24(2)：22-27.(in Chinese)

[6] Krajcinovic D，Fonseka G U. The continuous damage theory of brittle materials，part 1：general theory[J]. Journal of Applied Mechanics，1981，48(4)：809-815.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People´s Republic of China. GB 50010—2010 Code for design of concrete structures[S]. Beijing：China Architecture and Building Press，2010.(in Chinese)

[8] Bahn B Y，Hus C T. Stress-strain behavior of concrete under cyclic loading[J]. ACI Material Journal，1998，95(2)：178-193.

[9] Aslani F，Jowkarmeimandi R. Stress-strain model for concrete under cyclic loading[J]. Magazine of Concrete Research，2012，64(8)：673-685.

[10] Yankelevsky D Z，Reinhardt H W. Model for cyclic compressive behavior of concrete[J]. Structural Engineering，1987，113：228-240.

[11] Yankelevsky D Z，Reinhardt H W. Uniaxial behavior of concrete in cyclic tension[J]. Structural Engineering，1989，115：166-182

[12] American Concrete Institute. ACI 318-08 Building code requirements for structural concrete[S]. Farmington Hills：American Concrete Institute，2008.

[13] 过镇海，张秀琴. 混凝土在反复荷载作用下的应力-应变全曲线[J]. 冶金建筑，1991(9)：13-17.
Guo Zhenhai，Zhang Xiuqin. Stress-strain relations for concrete under cyclic loading[J]. Metallurgical Structures，1991(9)：13-17.(in Chinese)

[14] Sinha B P，Gerstle K H，Tulin L G. Stress-strain relations for concrete under cyclic loadings[J]. ACI Journal Proceedings，1964，52(3)：349-359.

[15] Okamoto S，Shiomi S，Yamabe K. Earthquake resistance of prestressed concrete structures[J]. Proceedings，Annual Convention，AIJ，1976，1251-1252.

[16] Tanigawa Y，Uchida Y. Hysteretic characteristics of concrete in the domain of high compressive strain[J]. Proceedings，Annual Convention，AIJ，1979 449-450.

[17] Karsan I K，Jirsa J O. Behavior of concrete under compressive loadings[J]. Structure Div，ASCE，1977，103(2)：229-241.

[18] Spooner D C，Dougill J W. A qualitative assessment of damage sustained in concrete during compressive loading[J]. Magazine of Concrete Research，1975，27(9)：151-160.

[19] Gopalaratnam V S，Shah S P. Softening response of plain concrete in direct tension[J]. ACI Journal，Proceeding，1985，82(3)：310-323.

[20] Taylor R L. FEAP：A finite element analysis program for engineering workstation[R]. No. UCB/SEMM-92 (Draft Version)，Department of Civil Engineering，University of California，Berkeley，California，1992.

[21] Saatcioglu M，Grira M. Confinement of reinforced concrete columns with welded reinforcement grids[J]. ACI Structural Journal，1999，96(1)：29-39.


?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net