

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.05.015

罗曦, 彭刚, 刘博文, 等. 用改进 Najar 能量法分析混凝土单轴受压损伤特性[J]. 水利水运工程学报, 2016(5): 103-108.
(LUO Xi, PENG Gang, LIU Bo-wen, et al. Analysis of damage characteristics of concrete under dynamic uniaxial compression based on improved Najar energy method[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(5): 103-108.)

用改进 Najar 能量法分析混凝土单轴受压损伤特性

罗 曦, 彭 刚, 刘博文, 王孝政

(三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: Najar 能量法定义了损伤耗散能和无损应变能, 并通过两者的比值确定了混凝土单轴受压情况下的损伤变量。该方法原理清晰, 但不能在宏观上很好地描述混凝土单轴受压破坏的实际过程。针对此问题改进了 Najar 能量法, 将混凝土受压过程中的弹性变形和塑性变形剥离开来, 定义了一个新的损伤变量。为了对比分析改进前后的方法, 进行了不同加载速率下的混凝土单轴压缩试验, 并对试验数据加以拟合。以拟合后的试验数据为基础, 分别利用改进前后的两种方法计算了混凝土受压过程中损伤变量, 得到了改进前后损伤变量随应变变化的关系曲线。对比分析发现, 改进后的 Najar 能量法在计算上更为简便, 而且在宏观上更符合混凝土单轴受压的一般破坏规律。同时, 这一关系曲线也反映了混凝土材料的应变率效应。

关 键 词: 混凝土; 单轴受压; 损伤特性; Najar 能量法

中图分类号: TV431

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2016)05-0103-06

自 1976 年 Dougill 将损伤力学与混凝土性能结合, 提出研究混凝土损伤特性, 迄今已近 40 年, 在此期间, 关于混凝土损伤特性的研究已经引起了诸多学者的兴趣, 也取得了丰富的研究成果。逯静洲等^[1]结合人工神经网络研究了混凝土三轴抗压损伤特性; 李庆斌等^[2]根据损伤理论建立了基于静力损伤本构理论的混凝土动力损伤本构方程; 徐俊祥等^[3]利用损伤力学理论, 对混凝土结构的初始损伤进行了分析; 肖诗云等^[4-5]研究了混凝土在不同应变速率下受拉和受压的损伤特性; 彭刚等^[6]研究了混凝土在有孔隙水压的不同应变速率下的受压损伤特性。

基于不同的损伤观点, 对损伤变量的定义也有所不同。目前国内大多研究采用混凝土受压时力学性能的退化来描述损伤的发展。最近一些学者也尝试从能量法的角度定义损伤变量。丁发兴等^[7]通过塑性应变能与混凝土吸收能量的比值定义损伤变量, 并假设其与弹性模量损伤变量数值上相等来确定唯一的损伤本构方程。李淑春等^[8-9]用 Najar 能量法来定义损伤变量。Najar 能量法提出了理想状态下无损外力做功 W_{perf} 的概念, 并在此基础上定义了损伤耗散能 W_D 。该方法原理清晰, 但其定义的损伤变量的演化与混凝土实际受压的破坏过程并不十分吻合。本文针对此问题对 Najar 能量法的损伤演化方程做了进一步改进, 用改进后的方法对不同应变速率下混凝土的受压损伤特性进行试验研究, 并基于 Weibull-Lognormal 统计分布的 σ - ε 本构关系给出了损伤-应变关系表达式。

1 试验设备与过程

试验采用三峡大学和长春朝阳试验仪器有限公司联合研制的 TAZW-10000 型 10 MN 微机控制电液伺服

收稿日期: 2015-09-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51279092)

作者简介: 罗 曦(1989—), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 主要从事混凝土材料与结构动静力性能研究。

E-mail: 444965352@qq.com 通信作者: 彭 刚(E-mail: gpeng158@126.com)

大型多功能动静力三轴仪。通过该仪器的竖向传力系统对混凝土试件进行加载。该仪器最大动力加载值为 5 000 kN, 最大静力加载值为 10 MN。

混凝土试件采用尺寸为 $\phi 300 \times 600$ mm 圆柱形试件, 设计强度等级为 C30。配合比为水:水泥:砂:石子 = 0.50:1.00:2.28:3.72 (按质量计)。与试件同条件养护的 150 mm 标准立方体的实测抗压强度为 35 MPa。其中水泥采用宜昌三峡水泥有限公司生产的 P·O 42.5 级水泥, 拌合水采用自来水, 粗骨料为 5~30 mm 连续级配的碎石, 细骨料为连续级配的河沙。共制备 6 个试件进行应变速率为 $10^{-5}/\text{s}$, $10^{-4}/\text{s}$ 和 $10^{-3}/\text{s}$ 的 3 组单轴抗压试验, 每组两个试件, 取数据较优者为最终结果。

试验轴向荷载主要由三轴仪的竖向加载框架完成。主要试验步骤有: ①装样。将打磨平整的混凝土试件放置在传力柱下, 标出试件中心线, 并在低油压下校准, 将混凝土试件与传力柱对中。②加载。首先预加载到 20 kN, 使传感器和试件充分接触, 同时检查设备是否工作正常。确认无误后加大油压, 开始正式加载。通过计算机系统控制应变速率分别为 $10^{-5}/\text{s}$, $10^{-4}/\text{s}$ 和 $10^{-3}/\text{s}$ 进行 3 组试验。③卸载。试件破坏后, 首先将数据保存, 降低油压, 将传力柱缓慢升至初始位置, 确认安全后清理混凝土残渣。

2 试验数据处理

2.1 应力-应变本构模型的选取

1936 年, W. Weibull 基于链条模型提出了脆性破坏统计理论^[10]。研究表明, Weibull 分布能较好地模拟混凝土材料峰值应力前的单元强度分布规律。

王乾峰等^[11-12]在此基础上对混凝土损伤做了进一步的研究。本文根据试验曲线, 对比多个应力-应变本构模型后, 在峰值应力前采用 Weibull 统计分布, 峰值应力后采用 Lognormal 统计分布。最终采用的 Weibull-Lognormal 本构模型表达式为

$$\sigma = \begin{cases} E_0 \varepsilon \left\{ \exp \left[-\frac{1}{m} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pk}} \right)^m \right] \right\}, & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{pk} \\ \sigma_{pk} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{\ln \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pk}} \right)}{t} \right]^2 \right\}, & \varepsilon \geq \varepsilon_{pk} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ε_{pk} , σ_{pk} 分别为峰值应变与峰值应力; $m = 1/\ln \left(\frac{E_0 \varepsilon_{pk}}{\sigma_{pk}} \right)$ 为上升段曲线形状控制参数; t 为下降段曲线形状控制参数, 需通过应力-应变全曲线拟合得到。

2.2 应力-应变全曲线拟合

基于式(1)并采用最小二乘法对单轴受压情况下混凝土的应力-应变全曲线进行拟合, 拟合效果如图 1 所示。

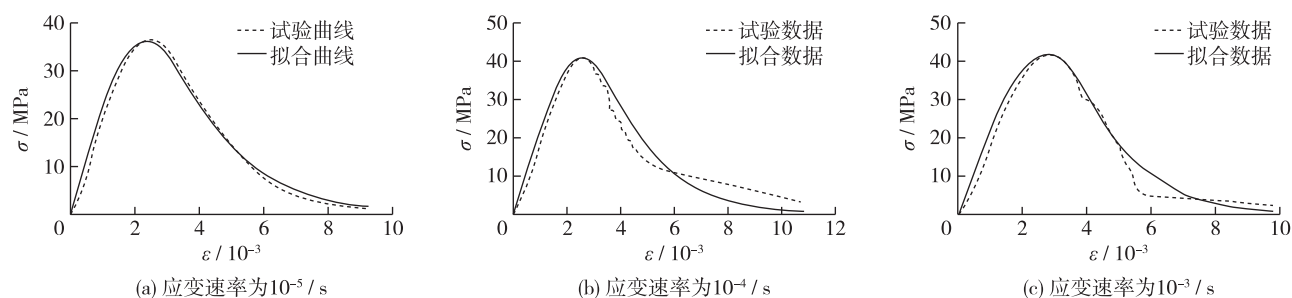


图 1 不同应变速率时试验曲线与拟合曲线对比

Fig. 1 Comparisons between testing and fitting curves under different strain rates

比对试验所得曲线与拟合曲线可见,试验所得数据和拟合所得数据的拟合效果较好,Weibull-Lognormal 分段本构模型表达式能较好地模拟混凝土单轴受压的应力-应变变化。同时可以观察到,与拟合曲线不同的是,试验曲线在上升段时变形模量表现为先增后减,而并非严格减小,其原因可能是混凝土试件的养护以及试验本身误差导致试件在开始受压时产生一种“压密”效应。因此用试验数据分析损伤将存在较大误差,以下对试件的损伤特性分析将依据拟合所得的数据展开。

3 混凝土单轴受压损伤特性分析

3.1 损伤变量的确定

Najar 损伤理论^[13]所定义的损伤变量是基于描述损伤耗散能这一概念,通过材料在实际受荷损伤状态中与理想无损伤状态下对比而得到,如图2所示。

定义无损状态下外力做功: $W_{\text{perf}} = E_0 \varepsilon^2 / 2$ (2)

式中: E_0 为混凝土初始无损弹性模量; ε 为混凝土试件压应变; σ 为混凝土试件压应力。混凝土承载过程中的应变能:

$$W_{\text{PE}} = W_p + W_E = \int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (3)$$

式中: W_E 为可恢复的弹性应变能; W_p 为不可恢复的塑性应变能。Najar 能量法认为,若材料承载处于弹性变形阶段,外力做功完全被材料吸收且转变为可恢复的弹性应变能,即 $W_{\text{perf}} = W_{\text{PE}} = W_E$; 若材料承载处于塑性变形阶段,则开始产生未被材料吸收的耗散能 W_D , Najar 能量法认为这部分能量通过损伤的方式耗散出去。于此定义损伤变量为:

$$D = \frac{W_D}{W_{\text{perf}}} = \frac{W_{\text{perf}} - W_{\text{PE}}}{W_{\text{perf}}} = 1 - \frac{\int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{E_0 \varepsilon^2 / 2} \quad (4)$$

式中: W_D 为未被材料吸收的损伤耗散能。

式(4)即为 Najar 能量法所定义的损伤变量。对于该式中的积分运算,采用微分近似算法,即:

$$D \approx 1 - \frac{\sum_{\xi=1}^i \frac{\sigma_\xi + \sigma_{\xi-1}}{2} (\varepsilon_\xi - \varepsilon_{\xi-1})}{E_0 \varepsilon^2 / 2} \quad (5)$$

殷有泉^[14]认为,材料的塑性变形和损伤是同时发生的,两者之间存在着一定的关系。按照损伤力学的能量损伤理论,材料的损伤被视为能量转换的不可逆过程。基于上述两个假设,不采用式(4)定义的损伤变量,而是将塑性应变能 W_p 和耗散能 W_D 这两种不可逆的耗能机制一起定义为混凝土的损伤能量 W_s , 认为只有弹性变形这一可逆的过程不引起材料的损伤,即定义:

$$W_s = W_D + W_p = W_{\text{perf}} - W_E = E_0 \varepsilon^2 / 2 - \sigma^2 / (2E_r) \quad (6)$$

式中: E_r 为混凝土受压过程中某一点卸载及再加载应力路径(可逆)上的弹性变形模量,反映了材料的弹性性能; $\sigma^2 / (2E_r)$ 为卸载点处的弹性应变能。参照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010), E_r 求解公式如下:

$$\begin{cases} E_r = \sigma / \varepsilon - \varepsilon_z \\ \varepsilon_z = \varepsilon - \left(\frac{(\varepsilon + \varepsilon_{ca}) \sigma}{\sigma + E_0 \varepsilon_{ca}} \right) \\ \varepsilon_{ca} = \max \left(\frac{\varepsilon_{pk}}{\varepsilon_{pk} + \varepsilon}, \frac{0.09 \varepsilon}{\varepsilon_{pk}} \right) \sqrt{\varepsilon_{pk} \varepsilon} \end{cases} \quad (7)$$

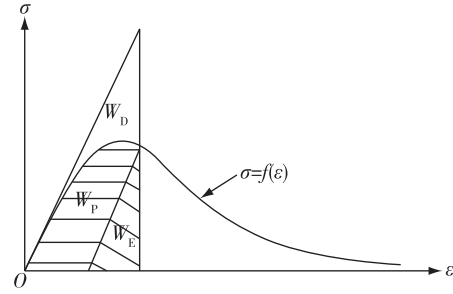


图2 混凝土单轴受压应力状态
Fig. 2 Uniaxial state of stress of concrete

式中: ε_x 为受压混凝土卸载至零应力点时的残余应变; ε_{ca} 为附加应变。 E_r 有两个自变量: σ 与 ε , 结合本文已拟合的应力、应变数据, 可以得到受压混凝土加载过程中的 E_r 值。

在得到混凝土受压过程中的 E_r 后, 可以定义损伤变量如下:

$$D = \frac{W_s}{W_{perf}} = \frac{\frac{1}{2}E_0\varepsilon^2 - \frac{\sigma^2}{2E_r}}{\frac{1}{2}E_0\varepsilon^2} = 1 - \frac{\sigma^2}{E_0E_r\varepsilon^2} \quad (8)$$

式(8)即为改进后的 Najjar 能量法所定义的损伤演化方程, 该变量随混凝土受压过程中应力、应变的变化而变化。现将式(1)采用的 Weibull-Lognormal 应力-应变关系代入式(8), 得到如下表达式:

$$D = \begin{cases} 1 - \frac{E_0}{E_r} \exp \left[-\frac{2}{m} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pk}} \right)^m \right], & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{pk} \\ 1 - \left\{ \frac{\sigma_{pk}^2}{E_0E_r\varepsilon^2} \exp \left[-\frac{\ln \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pk}} \right)}{t} \right]^2 \right\}, & \varepsilon \geq \varepsilon_{pk} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)为基于 Weibull-Lognormal 统计理论和改进后的 Najjar 能量法的分段损伤模型。其中, E_r 的计算方法见式(7)。

3.2 改进前后的损伤特性对比分析

下面对改进前后的 Najjar 能量法进行损伤特性的对比分析。将 3 种不同应变速率下的拟合数据分别代入式(5)和(9), 可以得到基于改进前后的 Najjar 能量法在不同应变速率下的 D - ε 曲线, 如图 3 所示。对比图 3 中的 D - ε 关系曲线可以发现:

(1) 改进前的 Najjar 能量法在混凝土试件卸载断裂时, 损伤变量依然没有趋于稳定; 改进后的方法在应变达到 6×10^{-3} 左右时损伤变量已经发展完全, 而在试验中, 此时贯通试件的主裂缝已经很宽, 对于无侧向约束的混凝土此时已经失去其结构意义。

(2) 割线模量能较直观地反应混凝土抵抗弹性和塑性变形的能力, 若以此参数衡量混凝土受压过程中力学性能的变化, 可以发现混凝土力学性能急剧退化的应变范围与改进后方法的损伤变量陡增的应变范围吻合度更高。

综合上述两点, Najjar 能量法并不能准确描述混凝土实际受压过程中的破坏过程, 而改进后的 Najjar 能量法在宏观上更符合混凝土受压破坏的一般规律。

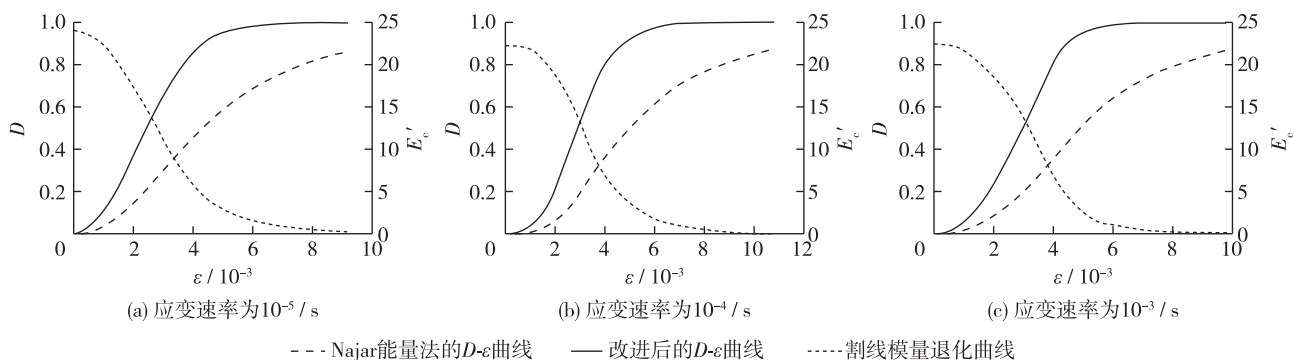


图 3 不同应变速率下 D - ε 曲线对比

Fig. 3 Comparisons of D - ε curves under different strain rates

图 4 为利用改进后的方法所得的不同应变速率下的 D - ε 关系曲线对比。如图所示, 相同方法, 不同应变速率下的 D - ε 曲线形状相似, 可以将损伤的发展大致概括为 3 个阶段: ①损伤初期累积阶段; ②损伤突变发

展阶段;③损伤完全发展阶段。对应损伤发展的速度表现为平稳发展-加速发展-减速发展-停止发展。

混凝土在受压过程中,高应变速率下损伤变量的发展在应变上相对滞后,混凝土损伤的演化表现出一定的应变率效应。该结果与闫东明^[15]和肖诗云等^[5]得出的结论相符,即认为随着应变速率的增加,略微有更多的骨料发生断裂。而混凝土的三相结构层中,骨料、水泥砂浆及黏结界面的力学性能不同,发生在骨料上的断裂在宏观上“推迟”了混凝土损伤的演化,因此在相同的应力比条件下,混凝土损伤值随应变率的增加而减小。

4 结 语

基于改进的 Najar 能量法,定义了一种新的损伤变量,并用该方法分析了混凝土单轴动态受压情况下的损伤特性。该方法从能量法角度为分析研究混凝土受压的损伤特性提供了一条新思路。

(1)新方法将混凝土受压过程中的弹性变形与塑性变形剥离开来,考虑了混凝土受压过程中的塑性变形与损伤发展的相互关系。

(2)新方法定义出的损伤变量计算相对简便,避免了繁杂的积分运算,更适用于实际工程中。

(3)新方法在描述混凝土单轴受压破坏过程时,更符合其一般破坏规律,能在宏观上更好地描述混凝土单轴受压的破坏过程。

(4)该方法得到的损伤-应变曲线在不同应变速率下形状相似。高应变速率下的损伤发展比低应变速率时略显滞后。

参 考 文 献:

- [1] 逯静洲. 三轴受压混凝土损伤特性理论与试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2001. (LU Jing-zhou. Theoretical and experimental research on damage characteristics of concrete due to triaxial compression [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2001. (in Chinese))
- [2] 李庆斌, 邓宗才, 张立翔. 考虑初始弹模变化的混凝土动力损伤本构模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(8): 1088-1091. (LI Qing-bin, DENG Zong-cai, ZHANG Li-xiang. Dynamic damage constitutive model for concrete accounting for the difference of the initial elastic modulus[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2003, 43(8): 1088-1091. (in Chinese))
- [3] 徐俊祥. 混凝土结构的损伤力学分析[D]. 南京:河海大学, 2004. (XU Jun-xiang. Analysis of concrete based on damage mechanics[D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese))
- [4] 肖诗云, 田子坤. 混凝土单轴动态受拉损伤试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(7): 14-20. (XIAO Shi-yun, TIAN Zi-kun. Experimental study on the uniaxial dynamic tensile damage of concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(7): 14-20. (in Chinese))
- [5] 肖诗云, 张剑. 不同应变率下混凝土受压损伤试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(3): 40-45. (XIAO Shi-yun, ZHANG Jian. Compressive damage experiment of concrete at different strain rate[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(3): 40-45. (in Chinese))
- [6] 彭刚, 王乾峰, 梁春华. 有压孔隙水环境中的混凝土动态抗压性能研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(1): 11-18. (PENG Gang, WANG Qian-feng, LIANG Chun-hua. Study on dynamic compressive properties of concrete under pore water pressure environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(1): 11-18. (in Chinese))
- [7] 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

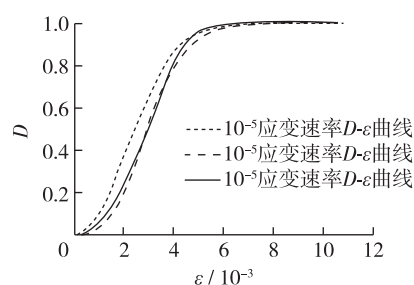


图4 不同应变速率下受压混凝土的 D - ε 曲线

Fig. 4 Curves of D - ε under different strain rates

- Chang'an University(Natural Science Edition), 2008, 28(4): 70-73. (in Chinese))
- [8] 李淑春, 刁波, 叶英华. 基于能量方法的分段曲线混凝土损伤模型[J]. 工业建筑, 2007, 37(5): 1-4. (LI Shu-chun, DIAO Bo, YE Ying-hua. Segment curve damage constitutive model of concrete based on energy method [J]. Industrial Construction, 2007, 37(5): 1-4. (in Chinese))
- [9] 任梦宁. 基于Najar 能量法的混凝土分形损伤本构模型研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2013. (REN Meng-ning. Study on fractal damage constitutive laws of concrete based on Najar energy method[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013. (in Chinese))
- [10] WEIBULL W. A statistical theory of the strength of materials[J]. Ingeniors Vetenskaps Akadanien Handlinger, 1939, 151(15): 1-45.
- [11] 王乾峰. 钢纤维混凝土动态损伤特性研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2009. (WANG Qian-feng. Investigation to dynamic damage behavior of steel fiber reinforced concrete[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2009. (in Chinese))
- [12] 王春来, 徐必根, 李庶林, 等. 单轴受压状态下钢纤维混凝土损伤本构模型研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 151-154. (WANG Chun-lai, XU Bi-gen, LI Shu-lin, et al. Study on a constitutive model of damage of SFRC under uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(1): 151-154. (in Chinese))
- [13] KRAJCIHOVI C D, LEMAITRE J. Continuum damage mechanics theory and applications[M]. NewYork: Springer-Verlag, 1987: 233-294.
- [14] 殷有泉. 岩石的塑性、损伤及其本构表述[J]. 地质科学, 1995, 30(1): 63-69. (YIN You-quan. Plastic and damage of rock and the constitution[J]. Scientia Geologica Sinica, 1995, 30(1): 63-69. (in Chinese))
- [15] 闫东明. 混凝土动态力学性能试验与理论研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006. (YAN Dong-ming. Experimental and theoretical study on the dynamic properties of concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese))

Analysis of damage characteristics of concrete under dynamic uniaxial compression based on improved Najar energy method

LUO Xi, PENG Gang, LIU Bo-wen, WANG Xiao-zheng

(College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Najar energy method defines damage dissipation energy and nondestructive strain energy, and the ratio of those two is defined as the damage variable. The principle of the method is clear, but the method can't well describe the actual process of concrete uniaxial compression failure. In this paper, this method is improved, the delamination of elastic deformation and plastic deformation in the process of concrete compression is done, and a new damage variable is defined. In order to make a comparison between those two methods, the uniaxial compression tests of concrete under different loading rates are carried out, and the experimental data are fitted. Based on the fitted data, the damage variables in the compression process of concrete are calculated by those two methods, and the relationship curves between the damage variables and strain are obtained from the experimental studies. It is found from the experimental studies that the improved Najar energy method is more simple and more convenient than the conventional methods, and it is also more conformable to the general failure law of concrete under the uniaxial compression. At the same time, the relationship curves also reflect the strain rate effects of concrete.

Key words: concrete; uniaxial compression; damage characteristics; Najar energy method