

基于无损弹塑性模型的混凝土损伤定量分析

金 玉¹,王向东²,徐道远²,李同春¹

(1.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098;2.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 通过对混凝土 $\sigma - \epsilon$ 全曲线的损伤机理分析,比较了理想无损弹塑性模型与实际混凝土材料的 $\sigma - \epsilon$ 全曲线,并基于此得到了一种简便的混凝土损伤演变方程,在此方程中损伤量仅取决于相对应力水平.算例结果表明,本文方法不但具有较高的计算精度,而且具有较广的使用范围.

关键词 混凝土;损伤;定量分析;机理;理想无损弹塑性模型

中图分类号:O344;TU528 文献标识码:A 文章编号:1000-198X(2003)06-0659-03

混凝土是常用的工程材料之一.任何混凝土构件的内部或表面都不可避免地会有一些缺陷(如小于1 mm 的裂纹或空隙等).在一定的外部因素(荷载、温度变化以及腐蚀介质等)作用下,这些缺陷会不断扩展、贯穿和合并,形成宏观裂缝.裂缝如继续扩展,最终可能导致构件的断裂破坏.微缺陷的存在和发展,也是构件的强度、刚度、韧性下降或剩余寿命降低的原因.这些导致构件力学性能劣化的微结构的变化称为损伤.从力学上看,损伤就是单调加载或重复加载下,材料的微缺陷导致其力学性能劣化的行为.按损伤的概念,混凝土材料的破坏是混凝土损伤及其积累所致.

在混凝土结构浇注成型过程中的气孔、裂纹等缺陷及混凝土中骨料和砂浆的界面裂纹,就是混凝土的初始损伤.受外载作用后,不仅初始损伤将有可能发展,还将发生新的损伤.即使在由于损伤积累而出现宏观裂缝以及宏观裂缝扩展发生断裂行为的过程中,损伤行为仍是持续的.严格的来说,在加载直至断裂的过程中,损伤对材料的力学性能参数都一直有着动态的影响.因此,用损伤本构方程取代没有考虑损伤的本构方程,是使分析结果更加逼近实际情况的有效途径,这就是研究混凝土损伤的实际意义.

从 20 世纪 80 年代以来,国内外已提出多个混凝土损伤模型,如 Loland 模型、Mazars 模型、分段线形模型、分段曲线模型^[1]和指数函数模型^[2]等,每一模型都建立在不尽相同的混凝土 $\sigma - \epsilon$ 全曲线的基础上,并有各自的损伤演变方程.但是,在这些模型的损伤演变方程中,都或多或少的有一些待定参数需由试验确定.这些模型的损伤演变方程的数学形式也往往比较复杂,由它们来进行混凝土的损伤定量分析是相当繁琐的.况且,这些模型大多没有考虑初始损伤,因此也带来了定量分析的不准确性.可以认为,到目前为止,混凝土损伤定量的分析仍没有得到很好的解决.

在混凝土的损伤定量分析中,最重要的是(a)初始损伤 D_0 、应力峰值损伤 D_f 、损伤临界值 D_c 三个特征值的确定;(b)拉、压损伤的等效关系;(c) $\sigma - \epsilon$ 全曲线上任一点损伤 D 的确定.

关于 D_0 、 D_f 和 D_c 的确定,只能通过试验.文献[3]的试验结果是,对于普通混凝土, D_0 为 0.05~0.07; D_f 为 0.11~0.14,其中已包含初始损伤 D_0 ;从理论上讲, D_c 应为 1(全损伤),事实上试验值只有 0.7~0.95.关于混凝土拉、压损伤的等效关系,文献[3]也已从理论上进行了分析,结论是在绝对值相同的应变水平下,混凝土的拉、压损伤比值为 16~19.关于如何确定 $\sigma - \epsilon$ 全曲线(包括上升段和下降段)上任一点的损伤值,文献[4]中提出了一种基于 $P - \Delta$ 全曲线的定量方法.文献[5]提出了一种基于 $\sigma - \epsilon$ 全曲线损伤机理的混凝土损伤定量分析的简便方法.文献[6]提出了一种基于平均应力分析的混凝土损伤演变方程,但它们对初始损伤及其发展考虑的都还不是很全面.

为此,本文提出了一种基于理想无损弹塑性模型的更为合理的混凝土损伤定量分析的简便方法.

1 $\sigma - \epsilon$ 全曲线的损伤分析

对于理想的无损弹塑性材料, 随应变的增大其应力也不断增大, $\sigma - \epsilon$ 全曲线呈上升趋势, 直至极限应力后转为水平, 且整个过程中既无初始损伤也无损伤的发展. 而实际的混凝土材料是应考虑初始损伤的, 且当其应力达到峰值 σ_f 前, $\sigma - \epsilon$ 曲线基本呈线性增长关系, 表明上升段即使有损伤, 其损伤值也不大, 如前所述应力峰值损伤只有 0.11 ~ 0.14, 但过应力峰值后, 在试件最薄弱的区段上, 将出现新的损伤. 如继续承载, 损伤会继续发展并且加剧. 由于损伤带来的性能劣化, 使试件承载力下降. 即随应变的增大其应力会不断下降, 出现下降段, 这就是混凝土材料的应变软化效应. 并且, 在下降段中, 应变随应力下降而增长的趋势会越来越明显, 所以下降段呈下凹曲线形态. 即这个阶段的损伤积累大部分是不可逆的弹塑性损伤, 演变过程也是非线性的, 从而使确定下降段上任一点的损伤量难度很大.

对比理想的无损弹塑性材料和实际的混凝土材料, 因其在上升段前者没有初始损伤而后者有初始损伤, 所以虽然在达到峰值应力前, 后者的 $\sigma - \epsilon$ 全曲线也基本上呈线性增长, 但它们的峰值应力和弹性模量是不同的, 前者的峰值应力 σ'_f 和弹性模量 E_0 都会高一点, 同时, 对实际的混凝土材料在上升段的峰值应力附近, 初始损伤会或多或少的有一定的发展, 即有少量的损伤增量, 所以, 其 $\sigma - \epsilon$ 全曲线的上升段在峰值应力附近呈现非线性.

2 损伤定量分析与演变方程

由上述分析可知, 混凝土材料 $\sigma - \epsilon$ 全曲线的下降段(图 1 中线 ②)实际上是应力达到峰值后损伤的发展和积累所致, 而理想的无损弹塑性材料, 其下降段应为水平线(图 1 中线 ①). 因此水平线和真实下降段曲线的“差距”(应力的下降), 就可以认为是下降段损伤引起的.

从而, 计算实际混凝土 $\sigma - \epsilon$ 曲线下降段中 A 点的损伤可用如下方法: 在图 1 中过 A 点作竖向线与线 ① 的水平段交于 B 点, 从 B 点卸载, 卸载线为平行于线 ① 上升段的 BC, 假定从 A 点卸载, 也降至 C 点, 则 AC 就是 A 点的卸载线.

由图 1 两线间的几何关系可得 A 点的卸载弹模

$$\tilde{E} = \frac{\sigma_A}{\epsilon_A - (\epsilon_A - \epsilon'_f)} = \frac{\sigma_A}{\epsilon'_f} \quad (1)$$

式中 ϵ'_f 为理想无损弹塑性模型的峰值应变. 由于线 ① 上升段为直线, 故

$$\epsilon'_f = \frac{\sigma'_f}{E_0}$$

式中 σ'_f ——理想无损弹塑性模型的峰值应力; E_0 ——理想无损材料的弹模.

代入式(1)得实际混凝土 A 点的卸载弹模

$$\tilde{E} = \frac{\sigma_A}{\sigma'_f} E_0 \quad (2)$$

由 Lemaitre^[1] 的应变等效原理可得损伤公式

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E_0} \quad (3)$$

将式(2)代入, 得

$$D_A = 1 - \frac{\sigma_A}{\sigma'_f} \quad (4)$$

对于实际混凝土 $\sigma - \epsilon$ 全曲线的峰值点, 由式(3)得

$$D_f = 1 - \frac{\tilde{E}_f}{E_0} \quad \text{即} \quad \tilde{E}_f = E_0(1 - D_f) \quad (5)$$

式中 \tilde{E}_f 为 σ_f 处的卸载弹模, 即实际混凝土上升段的弹模.

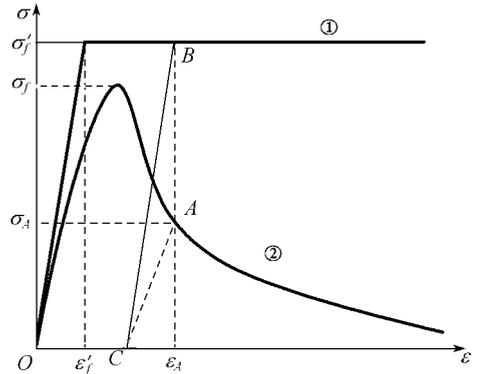


图 1 本文方法原理

Fig. 1 Principle of the present method

对于实际混凝土 $\sigma - \epsilon$ 全曲线的峰值点,由式(4)得

$$D_f = 1 - \frac{\sigma_f}{\sigma'_f} \quad \text{即} \quad \sigma'_f = \frac{1}{(1 - D_f)}\sigma_f \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)得
$$D_A = 1 - \frac{\sigma_A}{\sigma_f}(1 - D_f) \quad (7)$$

式(7)仅考虑了 A 点在过峰值后的损伤,而在 σ_A 应力水平下,在上升段中已有损伤,应一并考虑,才是 A 点的总损伤.因此,对应于 $\sigma - \epsilon$ 全曲线完整的损伤演变方程为

$$\left. \begin{aligned} D &= D_0 + \frac{\sigma}{\sigma_f}(D_f - D_0) & (\epsilon \leq \epsilon_f) \\ D &= \frac{\sigma}{\sigma_f} \left[D_0 + \frac{\sigma}{\sigma_f}(D_f - D_0) - 1 + D_f \right] + 1 & (\epsilon \geq \epsilon_f) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

由式(8)可见,对混凝土而言,在已知 D_0, D_f 和上升段为直线的前提下,无论是上升段还是下降段上任一点的损伤量,只取决于该点的相对应力水平 σ/σ_f ,而与 $\sigma - \epsilon$ 全曲线的表达式无关,即式(8)对任何形态的 $\sigma - \epsilon$ 全曲线都适用.从而在混凝土损伤定量分析中避开了必须要有 $\sigma - \epsilon$ 具体关系和损伤演变方程 $D = f(\epsilon)$ 的难点.同时,在本方法中,也并不需要 σ'_f 和 E_0 的具体数值,从而在应用上也更为方便.

3 算 例

为验证本文方法的正确性和精度,取文献[5]的混凝土三点弯曲梁算例进行对比计算.已知该梁混凝土 $\sigma_f = 2.5 \text{ MPa}$, $E_0 = 32.7 \text{ GPa}$, $\epsilon_f = 0.76 \times 10^{-4}$, $\epsilon_{\max} = 4.56 \times 10^{-1}$.已由实验测得其 $D_0 = 0.048$, $D_f = 0.114$.在上升段和下降段取 12 个点,进行对比计算,按本文和文献[5]所得损伤演变曲线见图 2.

以上结果表明,两种方法的损伤演变规律接近,最大误差为 3.4%.但本文提出的是基于无损弹塑性模型的混凝土损伤定量分析,其方法在理论上要比文献[5]精确,更具有实用的价值.

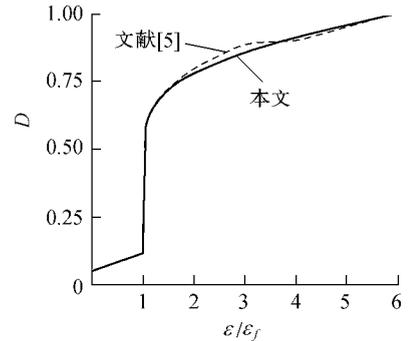


图 2 损伤演变曲线

Fig.2 Damage evolution

参考文献:

[1] 余天庆,钱济成.损伤理论及其应用[M].北京:国防工业出版社,1993.139—153.
 [2] 徐道远,符晓陵,朱为玄,等.坝体混凝土损伤—断裂模型[J].大连理工大学学报,1997(增1):1—6.
 [3] 邓爱民.混凝土损伤行为特性研究[D].河海大学,2001.
 [4] 徐道远,王向东,朱为玄,等.基于 $P - \Delta$ 全曲线的混凝土损伤定量分析[J].岩石力学与工程学报,2001(增):1428—1431.
 [5] 徐道远,朱为玄,王向东,等.混凝土损伤定量分析的一种简便方法[A].王秀喜.固体力学及其应用[C].北京:中国科学技术大学出版社,2001.107—112.
 [6] 逯静洲.三轴受压混凝土损伤特性理论与研究[D].大连理工大学,2001.

Elastic-plastic undamaged model-based quantitative analysis of concrete damage

JIN Yu¹, WANG Xiang-dong², XU Dao-yuan², LI Tong-chun¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on an analysis of the mechanism of concrete damage according to the full $\sigma \sim \epsilon$ curve, a comparison is made between the $\sigma \sim \epsilon$ curves of the ideal elastic-plastic undamaged model and actual concrete material. Then, a simple concrete damage evolution model is derived, in which the damage only depends on the relative stress. Application shows that the present method is of high precision and wide scope of application.

Key words: concrete; damage; quantitative analysis; mechanism; ideal elastic-plastic undamaged model