文章编号: 1000-8608(2007)04-0563-04

混凝土抗拉疲劳剩余强度损伤模型

孟宪宏1,2,宋玉普*1

(1.大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室,辽宁 大连 116024; 2.沈阳建筑大学 土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要:基于连续体损伤力学理论,建立了各向异性混凝土抗拉疲劳剩余强度衰减模型.模型中采用了基于应变能量释放率空间的边界面模型,通过极限断裂面的不断移动模拟疲劳过程中损伤阈值的不断变化.提出了在高周疲劳过程中损伤模量表达式中的 *D为一*与剩余强度有关的变量的观点,并给出了函数表达式.结合已完成的混凝土疲劳抗拉剩余强度试验,确定了模型的参数,并验证了模型的有效性.

关键词:混凝土;疲劳;剩余强度;损伤;边界面

中图分类号: TU375 文献标识码: A

0 引 言

随着混凝土结构应用的拓展,许多结构或构件经常处于重复性的较高应力水平下,结构的疲劳破坏已是不可回避的问题.结构的疲劳破坏主要是因为混凝土内部损伤而导致其强度下降,所以了解疲劳过程中混凝土剩余强度的衰减规律显得尤为重要.

边界面模型最早由 Dafalias等[1] 提出,并用 干金属材料的循环加载,该模型认为应力空间中 存在着一个无形的与损伤水平相一致的包络面, 所有可能的应力点都包含在此包络面内,这一包 络面被称为边界面. Dafalias[2] 又进一步在他的 模型中定义了极限断裂面、加载面和边界面的概 念,只有加载面超过极限断裂面时才有损伤发 生. 损伤的增长率是加载面上一点与其在边界面 上的投影点间距离的函数. Suaris等 [3] 利用连续 体损伤力学理论建立了预测单调和循环荷载混凝 土损伤发展的模型,模型中将弹性势能表示成主 应力和损伤柔度张量的函数.模型中的极限损伤 断裂面、加载面和边界面都用应变能量释放率向 量 R表示. Al-Gadhib等[4]在 Suaris模型的基础 上,建立了各向异性弹性损伤模型,用于预测混凝 土承受单调荷载与疲劳荷载时的应变变化与疲劳 寿命,该模型在建立本构关系时利用了损伤因子 张量 M. Baluch等[5]利用损伤力学概念建立了混 凝土抗压疲劳剩余强度预测模型,并作了少量试验验证了模型的精度.但由于其试验内容中试件较少.最大应力水平较高.疲劳寿命较短等,模型的有效性没有得到充分的验证.

鉴于目前国内外对混凝土疲劳剩余强度模型研究较少,试验数据缺乏等原因,本文利用连续体损伤力学的概念,建立混凝土抗拉本构模型,利用模型编制计算机程序,绘出不同最大应力水平下混凝土疲劳剩余抗拉强度的衰减曲线.为了验证模型的精度,进行99个变截面棱柱体试件的疲劳抗拉剩余强度试验,并利用试验结果与理论模型相对比,分析理论模型的有效性及不足.

1 建立模型

1.1 损伤因子张量及有效柔度矩阵

由复合材料损伤力学^[6]可知,对于各向异性 损伤的情况,有效应力。可以表示为

$$\overline{\sigma} = \mathbf{M}(\mathbf{k}) : \sigma \tag{1}$$

式中: σ 为表观应力; · 为张量双点积; M(k) 为损伤因子张量, 它是一个四阶张量. 研究者们建议了很多 M(k) 的表达形式,并将其应用到金属的损伤分析中. Khan等^[7] 最初将损伤因子张量的概念用于分析混凝土的损伤, Khan模型同时考虑了混凝土拉压两种损伤,本文在 Khan模型的基础上进行简化,去掉了与抗压有关的参数得到了用于抗拉疲劳的损伤因子张量,形式为

收稿日期: 2005-12-05; 修回日期: 2007-05-28.

作者简介: 孟宪宏(1978-), 男, 博士生; 宋玉普*(1944-), 男, 教授, 博士生导师.

$$\mathbf{M}(k) = \begin{pmatrix} \frac{1}{1 - Tk_1} & 0 & 0\\ 0 & \frac{1}{1 - Tk_2} & 0\\ 0 & 0 & \frac{1}{1 - Tk_3} \end{pmatrix}$$
(2)

式中: k_i (i = 1, 2, 3)为主损伤分量; T为由试验确定的常数.

根据 Lemaitre 应变等效假设原理,弹性损伤本构方程可写成如下形式:

$$X = \bar{C} : \sigma$$
 (3)

式中: ${}^{\,
m X}$ 为弹性应变; ${ar C}$ 为有效柔度矩阵,且有

$$\mathbf{C} = \mathbf{M}^{\mathrm{T}} : \mathbf{C} : \mathbf{M} \tag{4}$$

式中: M^{T} 为 M的转置; C为无损状态时的柔度矩阵, 其表达形式为

$$C = \frac{1}{E_0} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{bmatrix}$$
 (5)

式中 Eo 为初始状态的弹性模量; v 为泊松比.

将式(2)(5)代入式(4)得

$$\bar{C} = \begin{pmatrix}
\bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{13} \\
\bar{C}_{21} & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{23} \\
\bar{C}_{31} & \bar{C}_{32} & \bar{C}_{33}
\end{pmatrix}$$
(6)

$$C_{11} = \frac{1}{E_0 (1 - Tk_1)^2}$$

$$C_{22} = \frac{1}{E_0 (1 - Tk_2)^2}$$

$$C_{33} = \frac{1}{E_0 (1 - Tk_3)^2}$$

$$\bar{C}_{12} = \bar{C}_{21} = \frac{-\nu}{E_0 (1 - Tk_1) (1 - Tk_2)}$$

$$\bar{C}_{13} = \bar{C}_{31} = \frac{-\nu}{E_0 (1 - Tk_1) (1 - Tk_3)}$$

$$\bar{C}_{23} = \bar{C}_{32} = \frac{-\nu}{E_0 (1 - Tk_2) (1 - Tk_3)}$$

1.2 边界面及损伤演化方程

类似于 Dafalias等^[1]在应力空间内建立的边界面模型, Suaris等^[3]在能量释放率空间建立了边界面模型,模型具体形式为

$$f = (R_i R_i)^{1/2} - R_c / b = 0$$
 (8)

$$F = (\overline{R}_i \overline{R}_i)^{1/2} - R_i = 0$$
 (9)

$$f_0 = (R_i R_i)^{1/2} - R_0 = 0$$
(10)

式中: f 是加载面; F 是边界面; f_0 是极限断裂面; R_0 为损伤应变能释放率. 具体形式为

$$R_{i} = d\frac{\partial \Lambda}{\partial k_{i}}(e_{ij}, k_{i})$$
 (11)

式中: d为材料质量密度; A 为弹性余能; S 为应力,

分量: k 为损伤变量.

 R_i 为加载面上一点 R_i 在边界面上的投影点,

$$\overline{R}^{i} = bR^{i} \tag{12}$$

$$b = R_1 / (R_i R_i)^{1/2}$$
 (13)

 R_1 为极限能量释放率,由混凝土单轴抗拉试验确定; R_0 为极限断裂面的大小,对于疲劳加载 R_0 随损伤的增大而增大。

根据文献 [5]的推导,由应力控制的损伤在 主轴方向上的增量为

$$d^{k_k} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial R_j} \frac{\partial R_j}{\partial e_s} d^{e_s} \\ H - \frac{\partial f}{\partial R_n} \frac{\partial R_n}{\partial k_m} \frac{\partial f}{\partial R_m} \end{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial R_k}$$
(14)

其中 H为损伤模量,它可以表示成加载面与边界面间距离的函数,

$$H = \frac{DW}{\langle W_n - W \rangle} \tag{15}$$

式中:〈〉为克罗内克符号,即符号中小于零的数取零:W为标准化的加载面与边界面间距离,

$$W = \frac{(R_i R_i)^{1/2} - (R_i R_i)^{1/2}}{(R_i R_i)^{1/2}} = 1 - \frac{1}{b} \quad (16)$$

当加载面首次与极限断裂面相交时,W= Wn.

D是一个和强度有关的常数,对于单调加载和低周反复加载的情况,可以认为 D为一个常数. 但在高周疲劳情况下,疲劳荷载的最大应力水平较低,在材料破坏时其剩余强度衰减较多,所以 D应被看做随剩余强度变化的变量. 从本文和文献 [8]的试验数据中可以看出,D 和剩余强度之间存在近似的指数关系,故作者提出了如下形式的 D 随剩余强度变化的关系式:

$$D = T - U = \frac{e_{t} - e_{r}}{e_{t} - e_{way}}$$
 (17)

式中: c 是初始抗拉强度; c 是剩余强度; c _{max}是疲劳最大应力. 当 c , ${}^$

验结果,式(17)充分考虑了剩余强度衰减对损伤。

模量的影响,使计算过程中损伤的增加趋于缓和, 很好地模拟了高周疲劳过程中混凝土内部损伤缓 慢发展的特点.

2 模型的建立与参数的确定

对于单轴拉伸的情况,应力矢量为

$$(e \ 0 \ 0)$$
 (18)

将式 (18) 代入式 (11), 由于在单轴拉伸时, $k_2 = k_3 = 0$, 且令 $k_1 = k_3$,得

$$R_1 = \frac{T^{e^2}}{E_0(1 - Tk_1)^3}$$
 (19)

$$R_2 = R_3 = 0 (20)$$

加载面方程为

$$f = R_1 - R_1 / b = 0 (21)$$

将式(19),(21)代入式(14),得

$$dk_{t} = \frac{\frac{2T^{e}}{E_{0}(1 - Tk_{t})^{3}}d^{e}}{H - \frac{6T^{e}e}{E_{0}(1 - Tk_{t})^{4}}}$$
(22)

弹性损伤本构方程(3)可以表示成增量形式:

$$dX = \overline{C}_{ij} d^{e_{j}} + e_{j} \frac{\partial \overline{C}_{il}}{\partial k_{k}} dk_{k}$$
 (23)

将式(7)(22)代入式(23),得

$$dX = \left[\frac{1}{E_0 (1 - Tk_1)^2} + \frac{\frac{4T^{e^2}}{E_0^2 (1 - Tk_1)^6}}{H - \frac{6I^2 e}{E_0 (1 - Tk_1)^4}} \right] d^e$$
(24)

以上模型用于疲劳加载与单调加载时情况是不同的,损伤的阈值是随着疲劳次数的增加而变化的.对于单调加载,损伤阈值是由极限断裂面 $f^0=0$ 的大小确定的.而在疲劳过程中, R_0 是随着疲劳次数的增加而变化的. Baluch等 [5] 认为 R_0 是积累损伤值的函数,并且其关系符和椭圆形式的关系曲线

$$R^{0} = R^{i}_{0} + \left\{ (R^{b}_{0} - R^{i}_{0})^{2} \left[1 - \frac{(k - k_{b})^{2}}{(k_{i} - k_{b})^{2}} \right]^{1/2} \right\}$$
(25)

式中: R^{i} 和 k_{i} 分别是初始时极限断裂面的大小和相应的损伤, R^{i} 和 k_{i} 分别是极限断裂面的极限大小和相应损伤. 根据本文试验结果和文献 [8]的研究结果,本文取 R^{i} = 0.58× 10⁻⁵ M Pa, R^{i} = 1.56× 10⁻⁵ M Pa, k_{i} = 0.05, k_{b} = 0.85.

3 模型的验证

为了验证模型的有效性,本文对 99个变截面 棱柱体试件进行了静载强度和疲劳剩余强度的试 验,试件尺寸如图 1所示. 试验采用的混凝土强度等级为 C30,配合比为 m(水泥):m(细骨料):m(粗骨料):m(水)= 383:663:1154:193,水泥采用大连水泥厂生产的 425 普通硅酸盐水泥,细骨料为中砂,粗骨料为碎石,最大粒径为 15 mm,拌和水为自来水. 用木模成型,振捣台振捣密实,24 h后脱模,自然养护 28 d.为使试验时混凝土强度稳定、离散性小,自然放置 300 d后进行疲劳试验. 同批试件还浇注了 150 mm× 150 mm× 150 mm 的立方体试件和 150 mm× 150 mm× 150 mm 的立方体试件和 150 mm× 150 mm 的立方体试件和 150 m 150 m

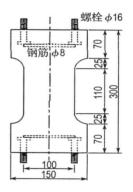


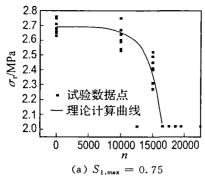
图 1 试件示意 Fig. 1 Specimen size

本文试验测定了两种最大应力水平下 $(S_{1, \max})$ = 0.75, 0.85; $S_{1, \max} = {e_{\max} | f_1 \rangle}$ 的混凝土疲劳剩余强度的变化.试验的具体结果作者将著文另述.

参数 T控制着受拉损伤的增长速率 $,R_1$ 为材料破坏时的极限应变能释放率 , 根据文献 [8] 和本文试验结果 , 取 $T=0.15, R_1=2.83 \times 10^{-5}$ M Pa. 利用以上本构模型和已确定的模型参数,作者利用 FORTRAN90计算软件编制了程序 , 并将计算结果和试验结果进行对比 .

图 2中的试验曲线是根据作者的试验结果,按照作者采用的模型回归得到. 从图 2所示的对比结果可以看出,在疲劳的初始阶段该损伤模型可以较好地反映出混凝土疲劳剩余强度的衰减过程,随着疲劳次数的增加,理论计算曲线逐渐偏离试验曲线,理论计算结果的剩余强度衰减较快,疲劳寿命较低.产生以上现象是因为随着疲劳次数的增加,混凝土的塑性变形逐渐增加,而弹性损伤

模型不能很好地反映出混凝土的这一特点。 b 模型不能很好地反映出混凝土的这一特点。



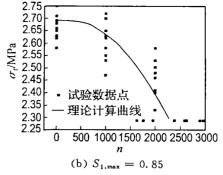


图 2 不同最大应力水平下试验曲线与理论计算曲线比较

Fig. 2 Comparisons of the residual strength between tests and calculation at different $S_{1,\max}$

4 结 论

本文基于连续体损伤力学理论,并结合边界面的概念,建立了混凝土剩余强度衰减模型.提出了损伤模量表达式中的 D并不是一个常数,而是与剩余强度有关的一个变量. 对于单调加载和低周疲劳加载,D可以近似为一常数. 通过 99个变截面棱柱体试件的疲劳剩余强度试验数据,验证了模型的有效性. 本文的研究为解决混凝土疲劳剩余强度的预测问题提供了理论基础和有效方法.

参考文献:

- [1] DAFALIAS Y F, POPOV E P. Cyclic loading for material with a vanishing elastic region [J]. Nuclear Eng Des, 1977, 41(2): 283-302
- [2] DAFALIAS Y F. Bounding surface plasticity I mathematical foundation and hypo-plasticity [J]. J Eng Mech, 1986, 112(9): 966-987

- [3] SUARIS W, OUYANG C, FERNANDO V. Damage model for cyclic loading of concrete [J]. J Eng Mech, 1990, 116(5): 1020-1035
- [4] AL-GADHIB A H, BALUCH M H, SHAALAN A, et al. Damage model for monotonic and fatigue response of high strength concrete [J]. Int J Damage Mech, 2000, 9(1): 57-78
- [5] BALUCH M H, AL-GADHIB A H, KHAN A R, et al. CDM model for residual strength of concrete under cyclic compression [J]. Cem and Concr Compos, 2002, 25(12): 503-512.
- [6] 杨光松. 损伤力学与复合材料损伤 [M]. 北京: 国防工业出版社,1995
- [7] KHAN A R, AL-GADHIB A H, BALUCH M H. An elasto-damage constitutive model for high strength concrete [C]// Proceeding of the EURO-C 1998 Conference on Computational Modeling of Concrete Structure. Austria [s n], 1998 133-142
- [8]吕培印,李庆斌,张立翔. 混凝土拉-压疲劳损伤模型及其验证[J]. 工程力学,2004,21(3): 162-167

Damage model for residual strength of concrete under tension fatigue loading

MENG Xian $hong^{1,2}$, SONG Yu pu^{*-1}

- (1.State Key Lab. of Coastal and Offshore Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China;
 - 2. School of Civil Eng., Shenyang Jianzhu Univ., Shenyang 110168, China)

Abstract Based on the continuum damage mechanics, an anisotropic elasto-damage model for predicting the residual strength of concrete under tension fatigue loading is presented. The model utilizes the concept of multiple bounding surfaces, with a varying size limit fracture surface defining fatigue loading. D in the damage modulus expression is not a constant under high cycles. It is a variable which depends on the residual strength. The calculation parameters of the model are given according to the fatigue test results acquired. Comparison of the residual strength results indicates a good agreement between the theoretical model and the experimental data.

Key words concrete; fatigue, residual strength; damage; bounding surface