

混凝土偏应力循环拉-压加载的梨形双面模型

张 静,温 森,周志勇

(河南大学土木建筑学院,河南 开封 475001)

摘 要 目的 研究混凝土在复杂三轴循环载荷下的动力本构模型,为探求混凝土结构在复杂荷载作用下的累积变形与破坏规律提供基础理论。方法 在梨形边界面模型的框架下,针对混凝土在应力偏平面上的三轴拉-压加载情况,提出一个细化模型。该模型包含一个加载面和一个形状相似的边界面,采用非相关流动法则,通过加载面和边界面在应力空间的演化来描述混凝土在加卸载作用下的循环塑性、损伤、变形累积的特性。结果 运用模型对混凝土试块在偏平面上的两种循环加载情况—沿着拉伸-压缩方向以及仅沿着压缩方向的试验结果进行了预测,得到的广义剪应变-平均应变关系曲线和应力-应变关系曲线与试验曲线的变化规律相同。结论 该模型模拟的应力-应变曲线比较合理,能够反映滞回曲线形状和面积的变化情况,能够描述应力-应变曲线的上升-下降段,能够表现出混凝土的剪胀特性。

关键词 边界面模型;偏平面;循环加载;拉伸-压缩;剪胀

中图分类号 TU528.1

文献标志码 A

Pear-Shaped Two-Surface Model of Concrete under Cyclic Tension-Compression Loading of Deviatoric Stress

ZHANG Jing, WEN Sen, ZHOU Zhiyong

(School of Civil Engineering and Architecture, He'nan University, Kaifeng, China, 475001)

Abstract: The dynamic constitutive model of concrete under complex triaxial cyclic load is studied, which provides a basic theory for exploring the cumulative deformation and failure law of concrete structure under complex loads. In the framework of the pear-shaped bounding surface model, a refined model was given for the triaxial tension-compression loading of concrete in the stress deviatoric plane. The model includes a loading surface and a similarly shaped bounding surface. Using the non-associated flow rule, the cyclic plasticity, damage characteristics and accumulated deformation of concrete under loading-unloading were described through the evolution of loading surface and bounding surface in the stress space. By using the model to simulate the loading data, the test results which are belong to two cyclic loading conditions of concrete in the

收稿日期:2021-04-06

基金项目:国家自然科学基金项目(52005155);河南省科技发展计划项目(192102310014)

作者简介:张静(1986—),女,博士,主要从事混凝土力学性能及其本构关系等方面研究。

deviatoric plane—along the tension-compression direction and only along the compression direction were predicted. And the generalized shear strain-average strain curves and the stress-strain curves were obtained, which have the same variation law as the test results. The model can simulate the reasonable stress-strain curves, can reflect the changes of shape and area of the hysteretic curves, can describe the increasing-decreasing stage of the stress-strain curves, and can show the dilatancy characteristics of concrete.

Key words: bounding surface model; deviatoric plane; cyclic loading; tension-compression; shear dilatancy

混凝土作为一种性能良好的建筑材料,常用于楼房、桥梁、路面、隧道、轨枕和安全壳等结构构筑物。这些结构在使用阶段,不仅承受静荷载,还承受动荷载,例如循环荷载的作用,因此有必要研究混凝土在循环加载下的力学行为。不同的加载试验主要区别之一就是加载路径的不同,常见的混凝土多轴动力加载路径有:考虑加载速率的多轴单调加载^[1-5]、定侧压力下的压缩或拉伸循环加载^[6-9]及多轴拉-压循环加载^[10-13]。而沿着偏平面进行加载是一种少见但重要的加载路径,有学者在假三轴条件下,对混凝土试件沿着偏平面进行了压缩和拉伸加载^[14-16],试验结果良好,完善了混凝土本构关系的试验数据。

在应用计算机软件对复杂混凝土结构进行地震作用下的变形分析时,需要用到动力弹塑性的分析方法,采用这种方法时,则要用到混凝土的动力本构关系。而研究混凝土的动力本构模型,可为解决此类复杂问题提供基础理论,以及为获得可靠的动力响应计算结果提供保证。一种常用且简洁的适用于循环加载的本构模型就是双面(边界面)模型^[17]。由于多数混凝土双面模型采用的运动硬化准则存在结构性缺陷,不能反映材料在复杂加载条件下应力路径的各种变化,例如拉-压循环加载路径,或不能记忆应力路径改变的事件,或不能较好地描述材料的应变软化过程,因此有必要探究合适、准确、适用性广泛的混凝土动态本构模型。文献[18]中提出的模型,是基于梨形双面本构模型架

构提出的,对混凝土在偏平面上,沿着压缩方向的循环加载试验模拟较好。笔者仍基于梨形双面本构模型架构,考虑上述模型的优点,再结合有关混凝土试件的试验数据^[16],建议了一个细化模型,对混凝土试件沿着偏平面拉-压循环加载的试验结果进行模拟,对梨形双面模型架构的适用性进行验证,为研究混凝土结构在复杂荷载下的动力响应以及拓展混凝土动力本构模型提供一种理论方法。

1 模型形式

1.1 基本假设

对模型作如下基本假设:

- (1)选取塑性体积应变 ε_v^p 和剪切引起的塑性偏应变 e_p 为硬化参量;
- (2)采用非相关流动法则;
- (3)不考虑黏滞性和时间效应;
- (4)屈服面和边界面具有几何相似性,在塑性加载中,屈服面的尺寸保持不变,仅位置变化,边界面的尺寸和位置都变化。

1.2 屈服面和边界面方程

根据梨形双面本构模型框架,屈服面方程可写为

$$f = \left(\frac{\sigma_m - c}{a} \right)^2 + \left(\frac{1 - p}{1 + p \frac{\sigma_m - c}{a}} \right)^2 \left(\frac{\sqrt{J_2}}{bg(\theta)} \right)^2 - 1 = 0. \quad (1)$$

式中: f 表示屈服面; σ_m 表示平均应力; p 表示子午面内屈服面形状的修正参数,当 $0 < p < 1$ 时,为梨形曲面,当 $p = 0$ 时,还原为椭圆; a 和 b 分别表示椭圆的长、短半轴, c 表示

子午面内屈服面的中心, a 、 b 、 c 均为内变量, 对应有各自的演化方程; J_2 为采用应变偏量表示的第二应力偏量不变量; $g(\theta)$ 表示控制屈服面在偏平面内形状的函数。

J_2 和 $g(\theta)$ 的表达式为

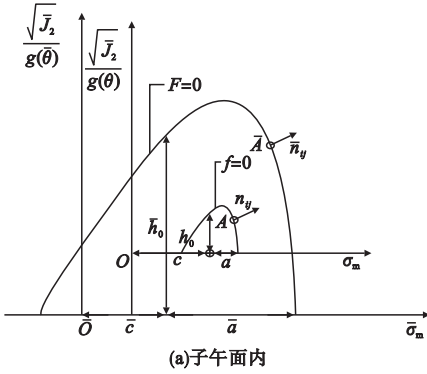
$$J_2 = \frac{1}{2} R_{ij} R_{ij}. \quad (2)$$

$$g(\theta) = 1/(1+\kappa) + (1-\kappa)^2 \sin^2 3\theta - (1-\kappa) \cos 3\theta. \quad (3)$$

其中, $R_{ij} = 2G(e_{ij} - e_{ij}^p) - \alpha_{ij}$ 。

式中: e_{ij} 表示偏应变张量; e_{ij}^p 表示塑性偏应变张量; α_{ij} 表示偏平面内屈服面的中心, 为内变量, 对应有演化方程; θ 表示罗德角; κ 表示偏平面内屈服面形状的修正参数。

同理, 边界面的方程可写为



$$F = \left(\frac{\bar{\sigma}_m - \bar{c}}{a} \right)^2 + \left(\frac{1-p}{1+p} \frac{\bar{\sigma}_m - \bar{c}}{a} \right)^2 \left(\frac{\sqrt{J_2}}{bg(\theta)} \right)^2 - 1 = 0. \quad (4)$$

式中: F 表示边界面; \bar{J}_2 、 $\bar{\sigma}_m$ 、 \bar{a} 、 \bar{b} 、 \bar{c} 、 \bar{c}_{ij} 和 $\bar{\theta}$ 都是边界面中的变量, 对应的表达式和含义与以上屈服面中的定义相似。

假设边界面在整个塑性过程中, \bar{a} 与 \bar{b} 的变化满足:

$$\bar{b}/\bar{a} = b/a = t_1. \quad (5)$$

假设 $\sigma_m = c$ 时, $\frac{\sqrt{J_2}}{g(\theta)} = h_0$; $\bar{\sigma}_m = \bar{c}$ 时,

$\frac{\sqrt{J_2}}{g(\theta)} = \bar{h}_0$ 。屈服面和边界面在应力空间中的形状如图 1 所示。

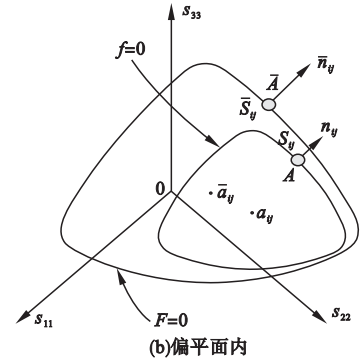


图 1 应力空间中边界面和屈服面示意图

Fig. 1 Schematic illustration of bounding surface and loading surface in stress space

映射法则中, 假设当前点和映射点具有相同的单位法向量。经推导, 该映射法则将保证屈服面和边界面不会相交。具体定义见文献[18]。

记:

$$D_1 = \bar{I}_1 - I_1. \quad (6)$$

$$D_2 = \sqrt{(\bar{s}_{ij} - s_{ij})(\bar{s}_{ij} - s_{ij})}. \quad (7)$$

式中: I_1 为屈服面上当前应力张量 σ_{ij} 的第一不变量; \bar{I}_1 为边界面上映射应力张量 $\bar{\sigma}_{ij}$ 的第一不变量。

1.3 内变量的演化方程

(1) 屈服面中内变量演化方程分别为

$$da = 0. \quad (8)$$

$$db = 0. \quad (9)$$

$$dc = \bar{dc} + T_1 \gamma_1 D_1 d\lambda + T_2 (\sigma_m - c) \times \frac{d(\bar{a}) - d(a)}{a}. \quad (10)$$

$$d\alpha_{ij} = \bar{d\alpha}_{ij} + T_3 \frac{((D_2)_0/m_1)(\bar{s}_{ij} - s_{ij})de_p}{[1 + ((D_2)_0/m_2)^2](D_2 + \Delta)^{0.5}} + T_4 R_{ij} \frac{d\bar{b} - db}{b}. \quad (11)$$

$$\text{取: } T_1 = H_1 = A_{ij} A_{ij}, T_2 = \frac{\gamma_3}{1 + (D_1/\gamma_2)^2},$$

$$T_3 = \frac{\gamma_3^2}{H_2 [(D_2)_0]^{0.5} (m_3 e_p + 1)}, T_4 = \frac{\gamma_3}{1 + t_3 (D_2/f_c)^0}.$$

$$\text{其中, } H_2 = \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} - A_{ij} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} - A_{ij} \right),$$

$$A_{ij} = \frac{1}{3} \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{11}} + \frac{\partial f}{\partial \sigma_{22}} + \frac{\partial f}{\partial \sigma_{33}} \right) \delta_{ij}.$$

式中: T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 为模型参数,经分析混凝土的偏应力拉-压加载试验数据得到; γ_1 、 γ_2 、 γ_3 、 t_3 、 m_1 、 m_2 和 m_3 为材料常数; f_c 为混凝土单轴抗压强度。若当前点和映射点重合,且材料持续发生塑性变形,式(10)和式(11)可确保两个面同时运动。

(2) 边界面中内变量 \bar{a} 的演化方程为

$$d\bar{a} = d(\bar{\mu}_1 + \bar{\mu}_2). \tag{12}$$

其中, $\bar{\mu}_1$ 与 $\bar{\mu}_2$ 的微分形式为

$$d\bar{\mu}_1 = T_5 d\lambda. \tag{13}$$

$$d\bar{\mu}_2 = T_6 \frac{u_3}{\chi e_p + 0.1} de_p. \tag{14}$$

$$\text{取: } T_5 = \frac{\sigma_m - c}{a} w_1 (H_1)^{0.5} D_1 \sigma_m q' - w_2 e^{(10 \times \varepsilon_p^p)},$$

$$T_6 = \chi = \chi_1 e^{\chi_2 I_1'}. \tag{15}$$

式中:假设边界面大小的变化,一部分与体积应变和静水压力有关,一部分与偏应变有关;

$e_p = \int de_p$, 为等效塑性偏应变; u_3 为材料常数。 T_5 和 T_6 为模型参数,经分析混凝土的偏应力拉-压加载试验数据得到; T_5 表达式中, w_1 和 w_2 为材料常数, q' 表示侧向平均压力增量与竖向压力增量之比; T_6 表达式中, $\chi = \chi_1 e^{\chi_2 I_1'}$, χ_1 和 χ_2 为材料常数, $I_1' = I_1/f_c$ 。

边界面中其余内变量的演化方程为

$$d\bar{b} = t_1 d\bar{a}. \tag{16}$$

$$d\bar{c} = T_7 d\bar{\mu}_1. \tag{17}$$

$$d\bar{a}_{ij} = 0. \tag{18}$$

$$\text{取: } T_7 = 1 + t_2 \ln(1 + t_3 |I_1'|).$$

式中: T_7 为模型参数,经分析混凝土的偏应力拉-压加载试验数据得到,假设仅与静水压力有关; t_1 和 t_2 为材料常数。

1.4 弹塑性增量应力-应变关系

总应变增量 $d\varepsilon_{ij}$ 为

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p. \tag{19}$$

式中: $d\varepsilon_{ij}^e$ 表示弹性应变增量,可通过胡克定律求得; $d\varepsilon_{ij}^p$ 表示塑性应变增量,采用非相关流动法则得到。

假设剪切引起的塑性应变增量方向 n_{ij}^p

包含两部分:

$$n_{ij}^p = B_{ij} + C_{ij}. \tag{20}$$

$$B_{ij} = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} - A_{ij}. \tag{21}$$

$$C_{ij} = \frac{\omega \zeta}{(q_e + 1)^{2.5}} \delta_{ij}. \tag{22}$$

其中,

$$\omega = (e_{11} - e_{22})(B_{11} - B_{22}) + (e_{22} - e_{33})(B_{22} - B_{33}) + (e_{33} - e_{11})(B_{33} - B_{11}),$$

$$q_e = \frac{1}{2} \sqrt{(e_{11} - e_{22})^2 + (e_{22} - e_{33})^2 + (e_{33} - e_{11})^2}.$$

式(19)中, B_{ij} 表示塑性应变增量中相关流动部分; C_{ij} 表示修正塑性应变增量中与其相关流动部分的偏差。

式(21)是经分析体积应变 ε_v -广义剪应变 q_e 的关系曲线后得到的, ζ 体现了剪切对体积应变的影响,假设由两部分组成

$$\zeta = \zeta_1 + \zeta_2. \tag{23}$$

式中: ζ_1 和 ζ_2 分别表示剪切引起的体积压缩和体积膨胀。

$$\zeta_1 = z_1 (k_1 I_1' + k_2 - \delta) e^{-z_2 (\delta - 0.9)^2}. \tag{24}$$

$$\zeta_2 = z_3 (q_e - (q_e)_{\max}) e^{-z_4 (q_e - (q_e)_{\max})^2}. \tag{25}$$

$$\delta = [(D_2)_0 - D_2] / (D_2)_0.$$

式中: z_1 、 z_2 、 z_3 、 z_4 、 k_1 和 k_2 均为材料常数; $(q_e)_{\max}$ 表示历史上经历过的最大值; $(D_2)_0$ 为当前应力点由弹性区刚到达屈服面时的 D_2 值,之后若持续加载,保持不变,若卸载后再次加载,则需重新计算。

因此,剪切引起的塑性应变增量 $d(\varepsilon_{ij}^p)_s$ 可表示为

$$d(\varepsilon_{ij}^p)_s = B_{ij} d\lambda + C_{ij} d\lambda = d\varepsilon_{ij}^p +$$

$$\frac{1}{3} \delta_{ij} d(\varepsilon_v^p)_s. \tag{26}$$

式中: $d\varepsilon_{ij}^p$ 为塑性偏应变增量; $d(\varepsilon_v^p)_s$ 为剪切引起的塑性体积应变增量。

假设静水压力引起的塑性体积应变增量 $d(\varepsilon_v^p)_h$ 为

$$d(\varepsilon_v^p)_h = \frac{l \cdot h}{\sigma_m - c} d\lambda. \tag{27}$$

式中:参数 h 考虑了静水压力增量方向的影响, $h = \frac{\frac{\partial f}{\partial I_1} dI_1}{|dI_1 + \Delta|}$; l 为材料常数,单位同应力。

塑性应变增量 $d\epsilon_{ij}^p$ 可表示为

$$d\epsilon_{ij}^p = d(\epsilon_{ij}^p) + \frac{1}{3}\delta_{ij}d(\epsilon_v^p)_h.$$

(28)

2 屈服函数的加卸载准则

屈服面函数为 $f = f(I_1, e_{ij}, e_{ij}^p, \alpha_{ij}, a, b, c)$ 。

其中, I_1 和 e_{ij} 为自变量,其余参变量为内变量。

加载函数 L 为

$$L = \frac{\partial f}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial f}{\partial e_{ij}} de_{ij}.$$

(29)

屈服函数 f 的加卸载准则为

(1) $f < 0$: 材料为弹性状态,相应的内变量不改变。

(2) $f = 0$: 材料为塑性状态,当前应力位于屈服面上,应用加载函数 L 进一步判断:

① $L > 0$, 球应力和偏应变同时加载,相应的内变量变化,分别使用式(8) ~ (17)来计算;

② $L \leq 0$, 表示卸载或中性加载,相应的内变量不改变。

当材料在塑性状态且 $L > 0$ 时,由一致性条件可得到塑性因子 $d\lambda$,再通过 $d\lambda$ 求出 $d\epsilon_{ij}^p$ 、 $d\epsilon_v^p$ 和 $d(\epsilon_v^p)_h$,就得到了材料的增量本构关系。塑性过程中,一致性条件为

$$df = \frac{\partial f}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial f}{\partial e_{ij}} de_{ij} + \frac{\partial f}{\partial e_{ij}^p} de_{ij}^p + \frac{\partial f}{\partial \alpha_{ij}} d\alpha_{ij} + \frac{\partial f}{\partial a} da + \frac{\partial f}{\partial b} db + \frac{\partial f}{\partial c} dc = 0.$$

(30)

3 本构模型的计算结果

3.1 模型的计算参数

验证本构模型时,选用的试验数据为对混凝土在应力偏平面上,进行的拉-压循环三轴试验^[16]。通过对试验数据的处理和分析,并结合试算结果,所用模型参数取值见表1。

表 1 模型参数

Table 1 Model constants

$E/10^4$ MPa	ν	p	$m_1/10^5$ MPa ⁻²	$m_2/$ MPa	m_3	χ_1	χ_2	t_1	t_2	t_3	$w_1/$ MPa ⁻²
2.90	0.17	0.71	5.72	1.41	14	250.00	-2.56	0.60	0.06	35	6.46
l/MPa	k_1	k_2	u_3/MPa	γ_1/MPa^{-2}	γ_2/MPa	γ_3	z_1	z_2	z_3	z_4	w_2/MPa
12.72	0.06	0.78	-12.24	550	1.73	100	2.30	8.10	522.00	23 000	2

除上述参数,参变量 a 、 \bar{a} 、 b 、 \bar{b} 、 c 和 \bar{c} 需要分别赋予初值: $a_0 = 2$ MPa, $\bar{a}_0 = 38$ MPa, $b_0 = t_1 a_0$, $\bar{b}_0 = t_1 \bar{a}_0$, $c_0 = 1.2$ MPa, $\bar{c}_0 = 21.6$ MPa。另外 $\kappa = 0.8$, $f_c = 35$ MPa。

3.2 模拟结果与试验结果比较

采用 Fortran 语言并对照模型中的相关计算公式,编写计算程序。选用试验为混凝土在三个偏平面上(σ_m 取 30 MPa、45 MPa 和 60 MPa),沿拉-压子午线进行的循环加载;随着轴向应力的变化,侧向应力向相反方向并保持相应的比例改变。第一阶段为静水压力加载($d\sigma_y = d\sigma_z = d\sigma_x$),之后进入第二阶段,为应力偏量加载($d\sigma_y = d\sigma_z = -d\sigma_x/2$)。根据 σ_m 取值的不同,试验分三组加载路径。

程序中,对静水压力加载部分,以平均应力控制加载并计算;对于偏应力加载部分,以偏应变控制加载并计算。利用计算程序,结合混凝土有关偏应力拉-压循环加载的试验数据,对文中模型的合理性进行验证。

数据分析时采用的广义剪应变 q_e 和平均应变 ϵ_m 表示为

$$q_e = \sqrt{\frac{1}{2} (e_x - e_y)^2 + (e_y - e_z)^2 + (e_z - e_x)^2}.$$

(31)

$$\epsilon_m = \frac{\epsilon_v}{3} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z}{3}.$$

(32)

因为试块具有较低的离散性^[15],对每组加载路径,选用两个试块的试验数据进行分析和比较。三组加载路径下模型计算结果与

相应试块的试验结果如图2~图4所示。

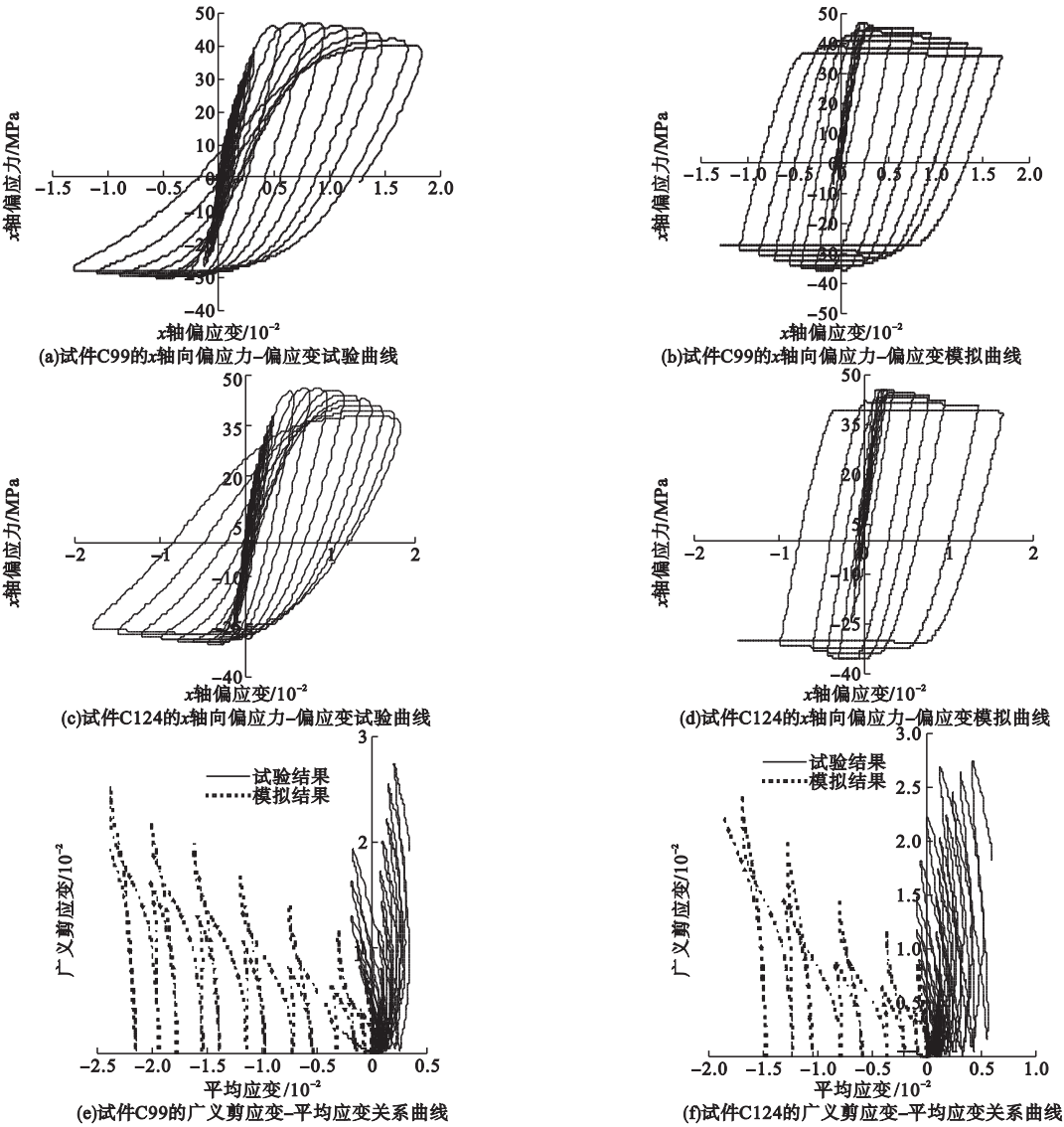
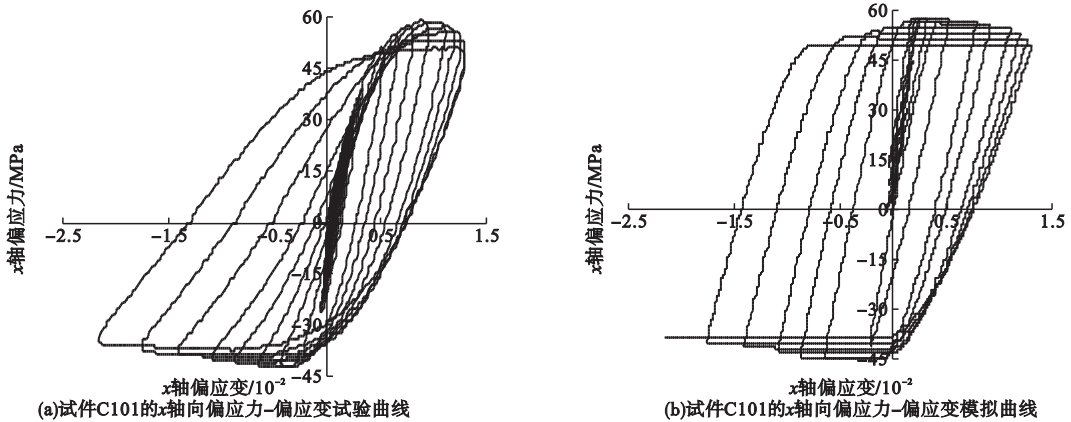


图2 $\sigma_m = 30\text{ MPa}$ 时偏平面上循环拉-压加载的响应曲线

Fig. 2 Model simulation for cyclic compression-tension test in the π plane when $\sigma_m = 30\text{ MPa}$



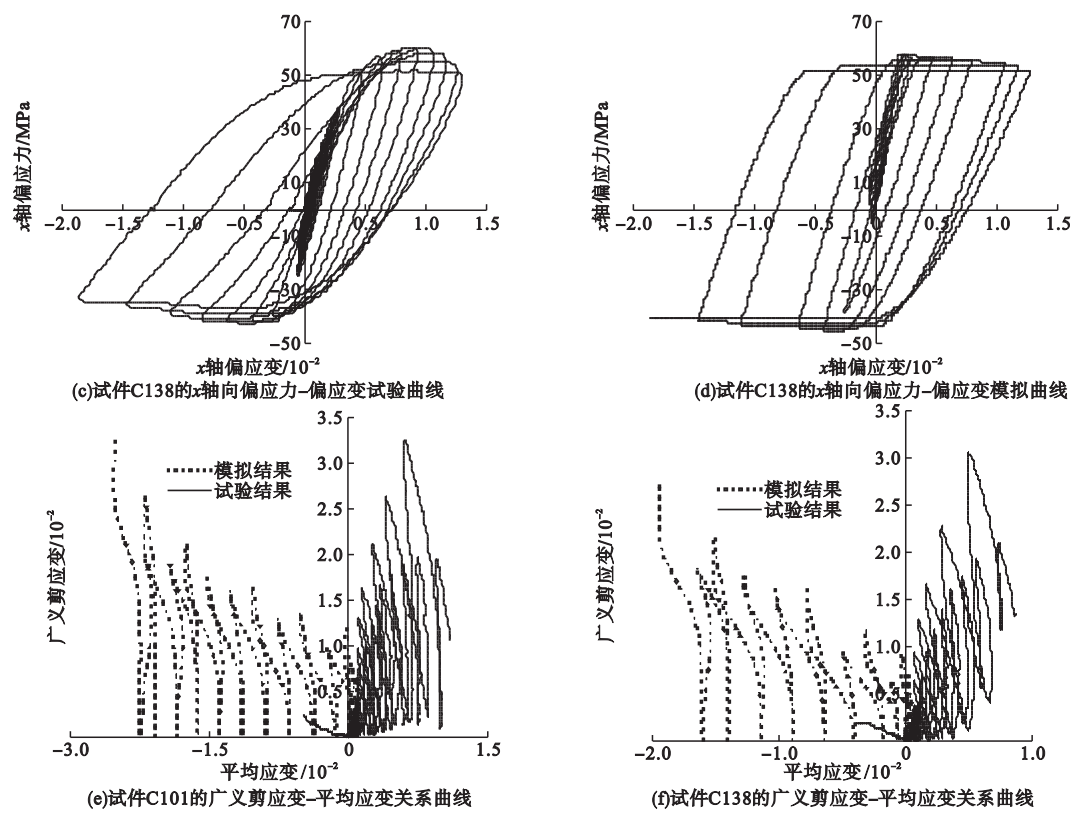
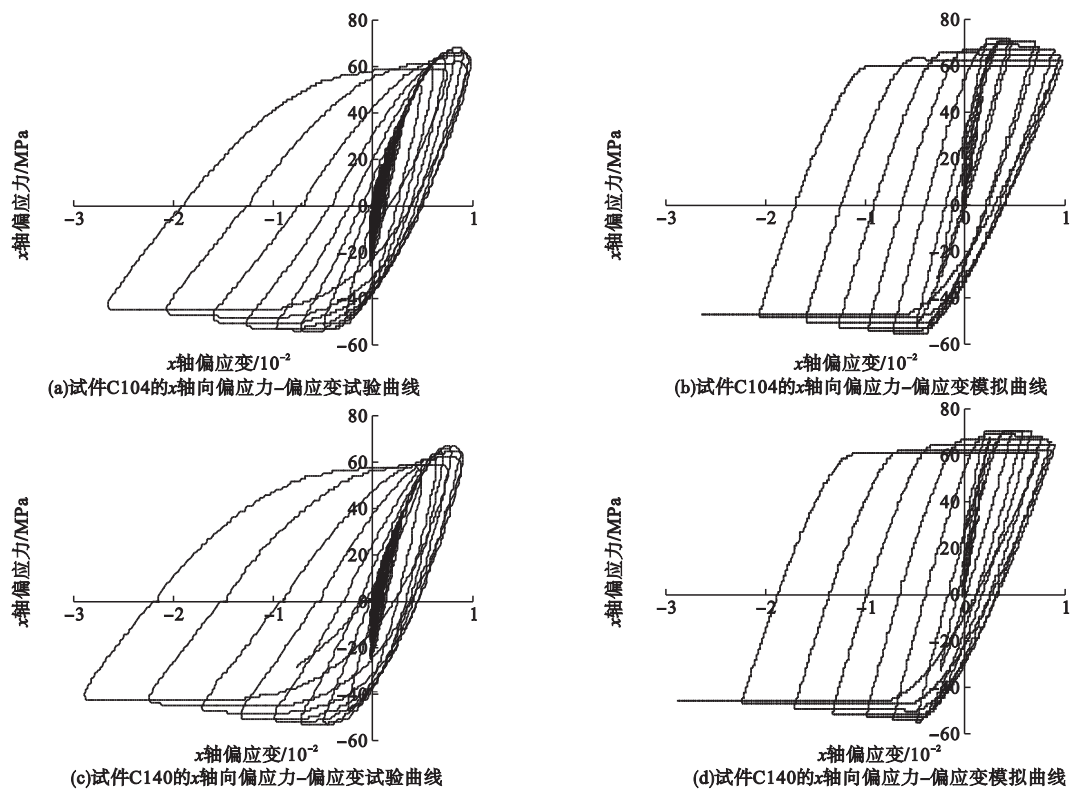


图3 $\sigma_m = 45$ MPa 时偏平面上循环拉-压加载的响应曲线

Fig.3 Model simulation for cyclic compression-tension test in the π plane when $\sigma_m = 45$ MPa



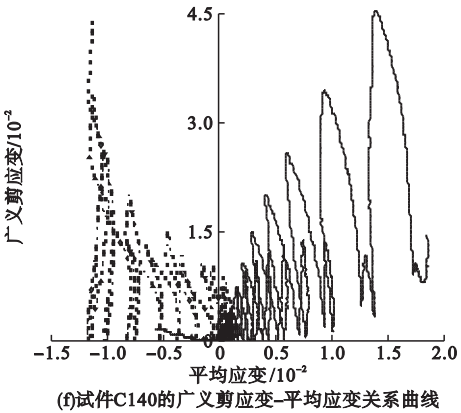
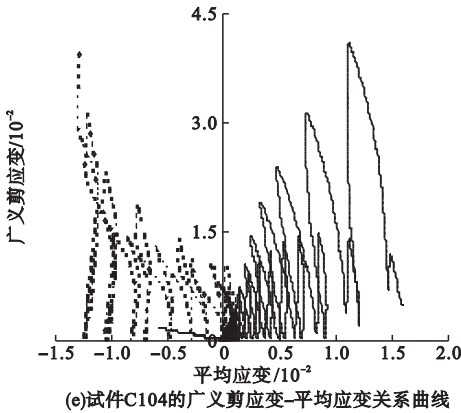


图4 $\sigma_m = 60\text{ MPa}$ 时偏平面上循环拉-压加载的响应曲线

Fig. 4 Model simulation for cyclic compression-tensile in the π plane when $\sigma_m = 60\text{ MPa}$

对以上模拟曲线进行分析得:

(1) 针对三轴循环偏应力试验, 由本构模型模拟静态加载数据并预测得到的偏应力-偏应变曲线, 具有和试验结果相似形式和变化趋势的滞回环, 能够体现混凝土的循环塑性, 且材料在偏应力循环作用下, 应变不断地增加, 最终因变形过大发生破坏(见图2(a)~图2(d)、图3(a)~图3(d)、图4(a)~图4(d)), 这与受到循环荷载作用的非饱和和重塑黏土所表现的现象相同^[17]。但模拟曲线在应力峰值前后的弯曲度不如试验曲线饱满, 且偏平面上的压缩和拉伸两种曲线的差异性表现的效果不理想, 下一步的改进方向应对硬化方程或参变量进行调整, 以得到更为合适的曲线形式, 进而反映拉-压两方向的特性。

(2) 通过对模拟结果和试验结果中的平均应变变化进行分析(见图2(e)~图2(f)、图3(e)~图3(f)、和图4(e)~图4(f)), 在模拟结果中, 混凝土的体积应变整体上存在更多的膨胀变形, 这一特点与试验结果有一定差异, 但是广义剪应变的模拟计算和试验结果比较一致, 且模拟曲线和试验曲线的形式大致相似。

采用模型对混凝土在应力偏平面上的三轴压缩循环试验结果进行模拟, 并将结果同文献[18]中相同试块的模拟结果进行比较

分析, 得到的模拟曲线, 其基本趋势是正确的, 滞回曲线与试验曲线也比较吻合。说明笔者提出的模型可以应用于混凝土偏应力循环拉-压加载和偏应力循环压缩加载这两种情形, 限于篇幅, 文中没有列出后者的模拟结果。

4 结 论

(1) 基于弹塑性力学的知识和边界面模型理论, 提出一种双面本构模型, 可用于描述混凝土在应力偏平面上三轴拉-压循环加载和三轴压缩循环加载的动态力学特性。

(2) 模型能够大致模拟混凝土在偏平面上多轴拉、压加载后的多种特性: 可完整地描述材料的应力-应变曲线(包含上升和下降段); 可近似地描述偏平面上拉-压曲线特点; 也可描述混凝土的剪胀现象。说明模拟结果与试验结果有着较好的一致性。

(3) 模拟范围有所扩大, 但模拟效果有待提升, 且需对方程具体形式和参变量的选取等工作进一步探讨和改进。

参考文献

[1] QUAST M, CURBACH M. Concrete under biaxial dynamic compressive loading [J]. Procedia engineering, 2017, 210: 24-31.
[2] 尚世明, 宋玉普. 混凝土双轴拉压动态强度及破坏准则试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(5): 782-787.
(SHANG Shiming, SONG Yupu. Experimental

- study of concrete dynamic strength and failure criterion under biaxial tensile-compressive load [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28(5): 782–787.)
- [3] 王怀亮. 双向应力下碾压混凝土动态力学性能[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(5): 847–851.
(WANG Huailiang. Dynamic properties of RCC in biaxial stress states [J]. Journal of building materials, 2015, 18(5): 847–851.)
- [4] 王浩. 饱和大骨料混凝土双轴动态力学性能试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
(WANG Hao. Study on the dynamic behavior of saturated large aggregate concrete under biaxial loading with tests [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.)
- [5] 周甲佳, 潘金龙, 姚少科, 等. 高强高性能混凝土三轴拉压力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2018, 35(4): 144–150.
(ZHOU Jiajia, PAN Jinlong, YAO Shaoke, et al. Experimental study on the mechanical behavior of high strength and high performance concrete under triaxial compressive-tensile loading [J]. Engineering mechanics, 2018, 35(4): 144–150.)
- [6] MANSOUR M, HSU T T C. Behavior of reinforced concrete elements under cyclic shear II: theoretical model [J]. ASCE structural journal, 2005, 131(1): 54–65.
- [7] SAKAI J, KAWASHIMA K. Unloading and reloading stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of structural engineering, 2006, 132(1): 112–122.
- [8] 杨建辉, 方坤河, 赵东佛, 等. 基于残余应变的多侧压下混凝土受拉疲劳损伤研究[J]. 工程力学, 2006, 23(增刊1): 169–176.
(YANG Jianhui, FANG Kunhe, ZHAO Dongfu, et al. Damage study on concrete fatigue in tension under multi-lateral pressures based on residual strains [J]. Engineering mechanics, 2006, 23(S1): 169–176.)
- [9] LU X, HSU C T T. Stress-strain relations of high-strength concrete under triaxial compression [J]. Journal of materials in civil engineering, 2007, 19(3): 261–268.
- [10] 曹伟, 宋玉普, 刘海成. 混凝土三轴变幅拉-压疲劳性能试验研究[J]. 工程力学, 2006, 23(3): 111–117.
(CAO Wei, SONG Yupu, LIU Haicheng. Fatigue properties of plain concrete under triaxial variable-amplitude tension-compression cyclic loading [J]. Engineering mechanics, 2006, 23(3): 111–117.)
- [11] 郭蒙蒙, 冯仲仁, 王雄江. 侧压作用下混凝土的拉压疲劳性能[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2): 266–270.
(GUO Mengmeng, FENG Zhongren, WANG Xiongjiang. Fatigue behavior of concrete under tension and compression loading with lateral pressure [J]. Journal of building materials, 2017, 20(2): 266–270.)
- [12] 赵东佛, 高海静, 杨健辉. 混凝土双轴拉压、三轴拉压变幅疲劳性能研究[J]. 工程力学, 2017, 34(8): 154–160.
(ZHAO Dongfu, GAO Haijing, YANG Jianhui. Variable-amplitude fatigue properties of plain concrete under biaxial tension-compression and triaxial tension-compression cyclic loading [J]. Engineering mechanics, 2017, 34(8): 154–160.)
- [13] 赵东佛, 赵润东, 常陆华, 等. 混凝土多轴等幅疲劳性能研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2): 297–303.
(ZHAO Dongfu, ZHAO Rundong, CHANG Luhua, et al. Multiaxial constant amplitude fatigue properties of concrete [J]. Journal of building materials, 2020, 23(2): 297–303.)
- [14] KOTSOVOS M D. Effect of stress path on the behavior of concrete under triaxial stress states [J]. Journal of the American concrete institute, 1979, 76(2): 213–223.
- [15] 王哲, 宋玉普, 尚仁杰. 应力偏量加载条件下混凝土力学行为试验研究[J]. 水利学报, 2011, 42(6): 648–656.
(WANG Zhe, SONG Yupu, SHANG Renjie. Experimental research on concrete mechanical behavior upon loading on deviatoric planes [J]. Journal of hydraulic engineering, 2011, 42(6): 648–656.)
- [16] 历永杰. 偏平面上单调及循环荷载作用下混凝土的界面面模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
(LI Yongjie. Study of bounding surface model for monotonously and cyclic loading on bias plane for concrete [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.)
- [17] 李潇旋, 李涛, 李舰, 等. 循环荷载下非饱和结构性黏土的弹塑性双面模型[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1–9.
(LI Xiaoxuan, LI Tao, LI Jian, et al. Elastoplastic two-surface model for unsaturated structural clays under cyclic loading [J]. Rock and soil mechanics, 2020, 41(4): 1–9.)
- [18] 张静, 王哲. 混凝土的一种梨形边界面本构模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(8): 142–149.
(ZHANG Jing, WANG Zhe. A pear-shaped bounding surface constitutive model for concrete [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2018, 50(8): 142–149.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)