

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.01.011

江培情, 王立成. 基于 Ottosen 模型的混凝土多轴动态强度准则[J]. 水利水电工程学报, 2015(1):74-81. (JIANG Pei-qing, WANG Li-cheng. Dynamic strength criterion of concrete based on Ottosen model under multi-axial stress[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(1):74-81.)

基于 Ottosen 模型的混凝土多轴动态强度准则

江培情, 王立成

(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)

摘要: 由于混凝土材料的率敏感特性,不同应变率水平下混凝土结构的承载力、刚度具有不同的变化机理。在地震作用下,除了考虑混凝土结构承受的复杂应力之外,应变率也是分析混凝土动态强度变化规律不可忽略的因素,若依然使用单轴拉、压、剪强度理论对工程进行设计和计算,可能会对大型结构的建设和使用带来危险。基于 Ottosen 静态强度准则模型,结合大量不同强度等级混凝土多轴静、动强度试验结果,建立了一种考虑应变率效应和混凝土强度等级两个因素的混凝土多轴动态强度准则。分析表明该强度准则符合混凝土破坏曲面连续、光滑、外凸等要求,能较好地反映普通混凝土的多轴动态强度变化规律,而且只需要通过几个特征点就能得到,形式简单,便于实际工程应用。

关键词: 混凝土; Ottosen 模型; 子午线; 应变率; 动态强度准则

中图分类号: TU37

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2015)01-0074-08

混凝土结构除承受多轴静荷载作用之外,往往还要承受诸如风荷载、地震作用和冲击荷载等动态作用。大量试验研究发现,混凝土材料具有率敏感性,在不同应变率水平下混凝土结构的承载力、刚度具有不同的变化机理。国内外许多学者已经对混凝土单轴动态力学性能的应变率效应做了大量研究^[1-5]。然而,由于实际工程中混凝土结构大多处于复杂应力状态,单轴应变率效应研究往往不能反映混凝土真实的工作状态。由于多轴动态试验设备相对复杂,技术要求高,操作难度大,不同的试验设备、材料以及试验条件所得到的结论不尽相同,因此,混凝土在多轴应力状态下的动态特性方面仅有少量的研究^[6-10]。本文基于 Ottosen 静态多轴强度准则,并结合已有的混凝土静、动态强度试验结果,建立了一个考虑应变率效应和混凝土强度等级的多轴动态强度准则。

1 多轴应力状态下混凝土强度准则

对于多轴应力状态下的混凝土强度准则,通常采用以3个主应力作为坐标轴的空间破坏包络曲面表示。当以 Cauchy 应力第一不变量 I_1 , 应力偏张量第二不变量 J_2 表示时,混凝土强度准则可表示为

$$F(I_1, J_2; \alpha_i, i = 1, 2, 3 \dots) = 0 \quad (1)$$

式中: α_i 为待定参数。Ottosen 提出的四参数模型能够体现混凝土破坏曲面的主要特点,即在偏平面上的图形是对称的光滑凸曲线,且利用该模型得到的静态强度准则与试验值吻合度较好。因此本文以 Ottosen 模型为基础建立考虑应变率效应的混凝土动态强度准则。

收稿日期: 2014-05-21

基金项目: 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金资助项目(IWHR-SKL-201309); 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金资助项目(2013491711)

作者简介: 江培情(1991-),男,湖北麻城人,硕士研究生,主要从事混凝土多轴动态特性方面的研究。

E-mail: dlmujpq@163.com

在不同应变率下, 应力张量第一不变量 I_1 和偏应力张量第二不变量 J_2 值变为有效应力张量^[13], 因此引入 3 个系数分别反映不同应变率下的有效应力张量变化值, 建立考虑应变率效应的混凝土强度准则表示为:

$$F(I_1, J_2, \cos 3\theta; \alpha, \beta, \gamma) = \alpha a \frac{J_2}{f_{cs}^2} + \beta \lambda \frac{\sqrt{J_2}}{f_{cs}} + \gamma b \frac{I_1}{f_{cs}} - 1 = 0 \quad (2)$$

式中: α, β, λ 为与应变率 $\dot{\varepsilon}$ 相关的待定参数; a, b 为常数, 可由试验数据确定; 参数 λ 为 $\cos 3\theta$ 的函数, 即 $\lambda = \lambda(\cos 3\theta) \geq 0$, 见式(3)。

$$\lambda = \begin{cases} k_1 \cos \left[\frac{1}{3} \arccos(k_2 \cos 3\theta) \right], & \cos 3\theta \geq 0 \\ k_1 \cos \left[\frac{\pi}{3} - \frac{1}{3} \arccos(-k_2 \cos 3\theta) \right], & \cos 3\theta < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_1 和 k_2 分别表示量值系数和形状系数, 均由试验来确定。Lode 角 θ 的表达式为:

$$\cos \theta = (2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3) / (6J_2) \quad (4)$$

通常, 偏平面上从静水压力轴(ξ 轴)到破坏曲面边界的直线距离定义为 r 。 r_t, r_c 分别表示拉、压子午面上静水压力轴到强度包络线的距离; 若 $0.5 < r_t/r_c < 1$, 函数 λ 将勾画出在偏平面上的光滑凸曲线。对于低应力状态, 偏平面上的横截面图形近似于三角形, 对于高应力状态(或极限状态 $I_1 \rightarrow -\infty$), 横截面轨迹近似于圆形($r_t/r_c \rightarrow 1$), 符合混凝土在偏平面上的强度包络线的变化规律。

由式(2)可得混凝土强度准则的拉压子午线方程。

$$\text{拉子午线: } \alpha \frac{a}{2} \frac{r^2}{f_{cs}^2} + \beta \frac{\lambda_t}{\sqrt{2}} \frac{r}{f_{cs}} + \gamma b \sqrt{3} \frac{\xi}{f_{cs}} - 1 = 0 \quad (5)$$

$$\text{压子午线: } \alpha \frac{a}{2} \frac{r^2}{f_{cs}^2} + \beta \frac{\lambda_c}{\sqrt{2}} \frac{r}{f_{cs}} + \gamma b \sqrt{3} \frac{\xi}{f_{cs}} - 1 = 0 \quad (6)$$

式中: λ_t 和 λ_c 分别为 $\theta=0^\circ$ 和 60° 时的 λ 值。 r, ξ 与 I_1, J_2 的转换公式为: $-\xi = \sqrt{3}/3 I_1, r = \sqrt{2J_2}$ 。

2 静态应力条件下的破坏面方程

在复杂准静态应力条件下, 设定静态加载速率为 $\dot{\varepsilon} = 10^{-5}/s$, 若取 $\alpha=1, \beta=1, \gamma=1$, 式中 4 个参数可以由两组单轴、一组双轴和一组三轴共 4 组试验数据确定。由于具体应用中多轴试验数据不易获得, 常用单轴数据近似推算^[12]。4 组试验为: ①单轴抗压强度 $f_{cs} (\theta=60^\circ)$; ②单轴抗拉强度 $f_{ts} (\theta=0^\circ)$; ③双轴等压强度 $f_{ccs} (\theta=0^\circ)$; ④三轴应力状态 (ξ, r) , 其中 ξ, r 按试验结果取值。

采用 Haigh-Westergaard 坐标系 (r, ξ, θ) , 上述应力特征点的应力状态计算结果见表 1。

表 1 破坏面的特征应力点

Tab. 1 Typical stress points on the failure surface

应力状态	ξ	θ	r	I_1	J_2
$\sigma_1=0, \sigma_2=0, \sigma_3=-f_{cs}$	$-f_{cs}/\sqrt{3}$	60°	$\sqrt{2}f_{cs}/\sqrt{3}$	$-f_{cs}$	$f_{cs}^2/3$
$\sigma_1=f_{ts}, \sigma_2=\sigma_3=0$	$f_{ts}/\sqrt{3}$	0	$\sqrt{2}f_{ts}/\sqrt{3}$	f_{ts}	$f_{ts}^2/3$
$\sigma_1=0, \sigma_2=\sigma_3=-f_{ccs}$	$-2f_{ccs}/\sqrt{3}$	0	$\sqrt{2}f_{ccs}/\sqrt{3}$	$-2f_{ccs}$	$f_{ccs}^2/3$
三轴应力状态 (ξ, r)	ξ	60°	r	$\sqrt{3}\xi$	$r^2/2$

将表 1 中的计算结果代入式(5)和(6), 可以得到关于 a, b, k_1, k_2 的非线性方程组, 如下式:

$$\begin{cases} \frac{1}{3}a + \frac{1}{\sqrt{3}}k_1\cos\left[\frac{\pi}{3} - \frac{1}{3}\arccos(k_2)\right] - b - 1 = 0 \\ \frac{1}{3}\left(\frac{f_{ts}}{f_{cs}}\right)^2 a + \frac{1}{\sqrt{3}}\frac{f_{ts}}{f_{cs}}k_1\cos\left[\frac{1}{3}\arccos(k_2)\right] + \frac{f_{ts}}{f_{cs}}b - 1 = 0 \\ \frac{1}{3}\left(\frac{f_{ccs}}{f_{cs}}\right)^2 a + \frac{1}{\sqrt{3}}\frac{f_{ccs}}{f_{cs}}k_1\cos\left[\frac{1}{3}\arccos(k_2)\right] - 2\frac{f_{ccs}}{f_{cs}}b - 1 = 0 \\ a\frac{r^2}{2f_{cs}^2} + \frac{r}{\sqrt{2}f_{cs}}k_1\cos\left[\frac{\pi}{3} - \frac{1}{3}\arccos(k_2)\right] + b\frac{\sqrt{3}\xi}{f_{cs}} - 1 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中:混凝土强度关系系数 f_{ccs}/f_{cs} 和 f_{ts}/f_{cs} 根据混凝土材料常规试验得出。

试验全部在大连理工大学结构实验室的静、动三轴电液伺服试验系统上完成^[14-18]。试件为 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试件,混凝土强度分别按照 C10,C20,C25,C30,C35 强度等级设计。加载路径主要有两种:

- (1)三轴恒侧压加载^[14,16,18]:试件 2 个侧面加载至预设的侧应力值(X,Y 方向),并保持恒定, Z 方向以设定的不同加载速率施加竖向荷载,直至试件破坏。混凝土侧应力加载量级分别为 0,4,8 和 16 MPa,应变速率分别为 $10^{-5}/s,10^{-4}/s$ 和 $10^{-3}/s$ 共 3 个量级。
- (2)双轴比例加载^[15,17]:两个方向按照预设的应力比以设定的加载速率施加双轴荷载,直至试件破坏。选取的 5 种应力比分别为 1:0,1:0.25,1:0.5,1:0.75 和 1:1。
- 不同强度等级混凝土的两种强度关系系数如表 2 和图 1 所示。由图 1 可见, f_{ccs}/f_{cs} 值随着混凝土强度的提高而减小,而 f_{ts}/f_{cs} 则随着混凝土强度的增大先增大后减小,表现出非单调性变化趋势。

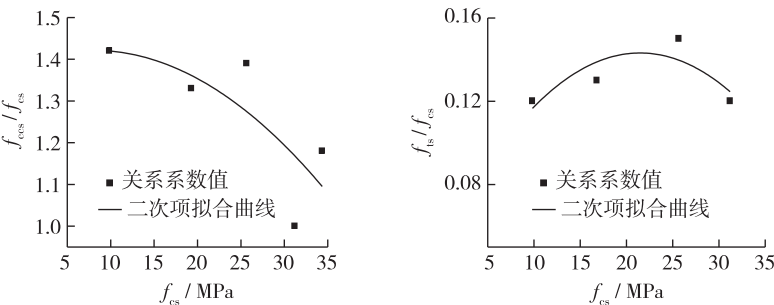


图 1 不同强度混凝土的强度关系系数

Fig.1 Intensity coefficients for concrete with different strength grades

表 2 不同强度等级混凝土的单轴抗拉、抗压和双轴抗压强度

Tab.2 Uniaxial tensile, compressive and biaxial compressive strength of concrete with different grades

混凝土强度	强度和归一化强度				
	f_{ts}/MPa	f_{cs}/MPa	f_{ccs}/MPa	f_{ts}/f_{cs}	f_{ccs}/f_{cs}
C10 ^[14]	1.18	9.84	14.00	0.12	1.42
C20 ^[14]	2.21	16.80	—	0.13	—
C25 ^[15]	3.95	25.65	35.78	0.15	1.39
C30 ^[16]	3.80	31.20	31.20	0.12	1.00
C35 ^[17]	—	34.36	40.79	—	1.19

由图 1 所示的拟合曲线可以得到不同强度混凝土的强度系数,而由三轴试验可得三轴应力状态特征点;

将应力状态特征值分别代入式(7), 解四元非线性方程组, 可得方程中的参数值(见表 3)。

表 3 同强度混凝土的应力状态特征值和系数计算值

Tab. 3 Typical values of stress state of concrete with different strength grades and recorded coefficient values

混凝土强度/ MPa	f_{ts}/f_{cs}	f_{ccs}/f_{cs}	$(\xi/f_{cs}, r/f_{cs}, \theta)$	a	b	k_1	k_2	λ_1	λ_e
9.84 ^[14]	0.12	1.42	$(-5, 4.1, 60^\circ)$	0.972 9	2.683 6	9.781 2	0.942 6	9.718 3	5.818 0
16.8 ^[14]	0.13	1.38	$(-1.57, 1.645, 60^\circ)$ ^[18]	1.065 5	2.470 5	9.026 3	0.938 9	8.964 7	5.395 8
31.2 ^[17]	0.12	1.17	$(-3.1, 2.5, 60^\circ)$	2.010 0	2.727 5	9.588 4	0.983 0	9.570 2	5.295 9

将表 3 中的参数值分别代入式(5)和(6), 可以得出不同强度混凝土的 Ottosen 强度准则表达式和拉压子午线方程。绘出不同强度混凝土的拉、压子午线并将其与试验结果进行比较(如图 2)。结果表明:根据强度准则绘出的混凝土破坏曲面的拉、压子午线与试验结果吻合良好。

3 不同应变率下混凝土破坏面方程

在实际受力过程中,混凝土结构承受静态、动态荷载作用,而且其动、静态力学性能之间的差异十分明显,然而目前混凝土结构抗震安全评价中,仅将混凝土静态力学参数提高 1% 作为动力学参数^[19]。因此,开展混凝土多轴应力条件下的动态力学性能研究具有重要应用价值。本文基于大连理工大学的林皋、宋玉普等人试验数据^[14-17],确定出适用于普通混凝土的多轴动态强度准则的材料参数值。需要说明的是,本文研究的应变率范围为 $10^{-6}/s \sim 1/s$,主要考虑了地震作用下的加载速率范围。在这样的加载速率范围内,混凝土在应力空间内的破坏面具有光滑、外凸的形式。

假定混凝土动态强度关系系数为:

$$\psi_{cs}^d = \frac{f_{cs}^d}{f_{cs}}, \psi_{ts}^d = \frac{f_{ts}^d}{f_{ts}}, \psi_{ccs}^d = \frac{f_{ccs}^d}{f_{ccs}} \quad (8)$$

式中: $f_{cs}^d, f_{ts}^d, f_{ccs}^d$ 分别是动态加载速率下,由试验得到的动态单轴抗压强度、单轴抗拉强度、双轴等压强度; $\psi_{cs}^d, \psi_{ts}^d, \psi_{ccs}^d$ 为 3 种应力状态下的动态强度放大系数。

根据式(7)和表 3 中的 a, k_1, k_2, b 值,通过两组单轴和一组双轴试验即可以确定参数 α, β, γ 的具体表达式,从而确定不同应变率下的强度准则方程。混凝土在单轴受压、受拉、双轴等压应力状态下的特征应力点(见表 4)。

表 4 动态应力条件下的应力特征点

Tab. 4 Typical stress points under dynamic stress

应力状态	ξ	θ	r	I_1	J_2
$\sigma_1 = 0, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = -\psi_{cs}^d f_{cs}$	$-\psi_{cs}^d f_{cs} / \sqrt{3}$	60°	$\sqrt{2} \psi_{cs}^d f_{cs} / \sqrt{3}$	$-\psi_{cs}^d f_{cs}$	$(\psi_{cs}^d f_{cs})^2 / 3$
$\sigma_1 = \psi_{ts}^d f_{ts}, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$	$\psi_{ts}^d f_{ts} / \sqrt{3}$	0	$\sqrt{2} \psi_{ts}^d f_{ts} / \sqrt{3}$	$\psi_{ts}^d f_{ts}$	$(\psi_{ts}^d f_{ts})^2 / 3$
$\sigma_1 = 0, \sigma_2 = \sigma_3 = -\psi_{ccs}^d f_{ccs}$	$-2\psi_{ccs}^d f_{ccs} / \sqrt{3}$	0	$\sqrt{2} \psi_{ccs}^d f_{ccs} / \sqrt{3}$	$-2\psi_{ccs}^d f_{ccs}$	$(\psi_{ccs}^d f_{ccs})^2 / 3$

将 a, b, k_1, k_2 和表 4 中的应力状态值代入式(7)得:

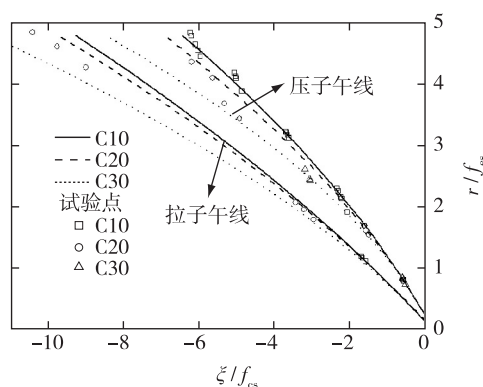


图 2 静态应力条件下子午平面上不同强度混凝土的强度准则与试验数据对比

Fig. 2 Comparison of experimental results and proposed criterion of concrete with different strength grades in meridian plane under static condition

$$\begin{cases} \alpha a \frac{1}{3} (\psi_{cs}^d)^2 + \beta \lambda_c \frac{1}{\sqrt{3}} \psi_{cs}^d - \gamma b \psi_{cs}^d - 1 = 0 \\ \alpha a \frac{1}{3} \left(\frac{\psi_{ts}^d f_{ts}}{f_{cs}} \right) + \beta \lambda_t \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{\psi_{ts}^d f_{ts}}{f_{cs}} \right) + \gamma b \left(\frac{\psi_{ts}^d f_{ts}}{f_{cs}} \right) - 1 = 0 \\ \alpha a \frac{1}{3} \left(\frac{\psi_{ccs}^d f_{ccs}}{f_{cs}} \right) + \beta \lambda_t \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{\psi_{ccs}^d f_{ccs}}{f_{cs}} \right) - \gamma b 2 \left(\frac{\psi_{ccs}^d f_{ccs}}{f_{cs}} \right) - 1 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

解此线性方程组,得:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\frac{3}{m_2} + \frac{3}{m_1} - \left(1 + \frac{\lambda_c}{\lambda_t}\right) \left(\frac{1}{m_3} + \frac{2}{m_1}\right)}{a \left[m_1 + m_2 - \frac{1}{3} \left(1 + \frac{\lambda_c}{\lambda_t}\right) (m_3 + 2m_1) \right]} \\ \beta = \frac{\sqrt{3}}{3\lambda_t} \left[\frac{2}{m_1} + \frac{1}{m_3} - \frac{a}{3} (m_3 + 2m_1) \right] \\ \gamma = \frac{\frac{\lambda_c}{\sqrt{3}} \beta + \frac{a}{3} \alpha m_2 - \frac{1}{m_2}}{b} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $m_1 = \psi_{ts}^d f_{ts} / f_{cs}$; $m_2 = \psi_{cs}^d$; $m_3 = \psi_{ccs}^d f_{ccs} / f_{cs}$ 。混凝土处于准静态应力时, $m_1 = f_{ts} / f_{cs}$, $m_2 = 1$, $m_3 = f_{ccs} / f_{cs}$, 可得 $\alpha = 1$, $\beta = 1$, $\gamma = 1$ 。

吕培印和宋玉普^[20]认为混凝土动态强度增长因子与应变率之间的关系为:

$$\begin{cases} \psi_{ts}^d = f_{ts}^d / f_{ts} = 1 + \eta_1 \lg(\varepsilon / \varepsilon_s) \\ \psi_{cs}^d = f_{cs}^d / f_{cs} = 1 + \eta_2 \lg(\varepsilon / \varepsilon_s) \\ \psi_{ccs}^d = f_{ccs}^d / f_{ccs} = 1 + \eta_3 \lg(\varepsilon / \varepsilon_s) \end{cases} \quad (11)$$

式中: 应变率 ε 的变化范围为 $10^{-5}/s \sim 10^{-2}/s$; ε_s 表示准静态应变率, 取 $10^{-5}/s$; η 为材料系数。

不同强度等级的混凝土在不同应变率下的 $\psi_{cs}^d, \psi_{ts}^d, \psi_{ccs}^d$ 见表 5, 其中的 η_1, η_2, η_3 由最小二乘法对试验数据根据式(11)拟合得到。

表 5 不同强度等级混凝土在不同应变率下的强度增长因子

Tab.5 Dynamic increase factors for concrete with different strength grades at different strain rates

混凝土强度/MPa	归一化强度														
	f_{ts}^d / f_{ts}					f_{cs}^d / f_{cs}					f_{ccs}^d / f_{ccs}				
	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	η_1	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	η_2	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	η_3
C10 9.84 ^[14]	1	1.15	1.22	1.30	0.106	1	1.08	1.157	1.252	0.090	1	1.094	1.19	1.286	0.095
C20 16.8 ^[14]	1	1.08	1.26	1.29	0.105	1	1.04	1.149	1.230	0.071	-	-	-	-	-
C25 25.65 ^[15]	1	1.06	1.13	1.20	0.060	1	1.09	1.15	1.254	0.083	1	1.113	1.20	1.252	0.091
C30 31.2 ^[16]	1	1.04	1.07	1.10	0.034	1	1.043	1.096	1.128	0.042	1	1.070	1.10	1.19	0.060
C35 34.36 ^[17]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1.060	1.10	1.16	0.053

在不同应变率下,混凝土动态抗压强度增长因子、动态抗拉强度增长因子、动态双轴等压强度增长因子与混凝土强度之间的关系分别如图 3(a), (b) 和 (c) 所示。在相同应变率下,随着混凝土强度的增加,混凝土动态强度增长因子逐渐变小,这种影响是由于混凝土材料本身是非均匀的,而且内部具有大量缺陷所致。较低强度混凝土的固有缺陷,例如各种孔隙、微裂缝等的存在导致了其在动载作用下有一个明显的压密过程,从而导致了混凝土的抗压强度增加。较高强度的混凝土的瑕疵和微损伤相对较少,在动载作用下产生了

材料抗力的惯性效应, 这些固有缺陷的减少导致了其抗压强度提高相对较低。其中单轴抗拉和双轴抗压动态强度的增长因子减小趋势更加明显。

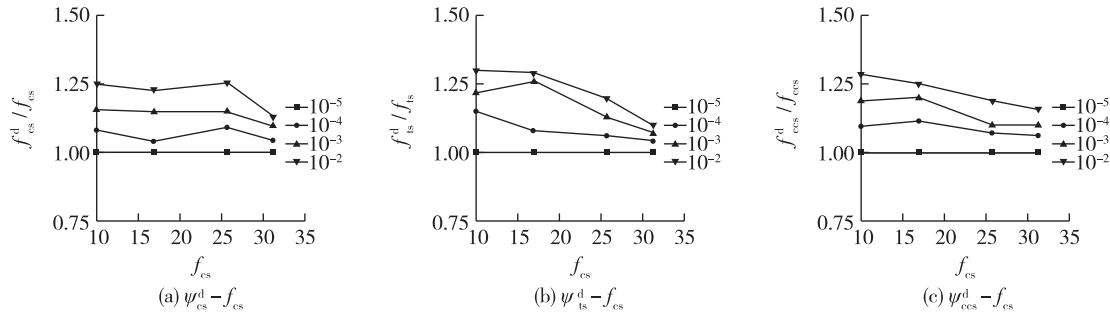


图 3 不同强度等级混凝土强度增长因子

Fig. 3 Dynamic increase factors for concrete with different strength grades

利用式 (11) 和表 5 中 C10 和 C30 两种混凝土的材料参数值, 可得出不同应变率下的 α, β, γ 值, 即可得出混凝土在不同应变率下的强度准则 (见图 4)。

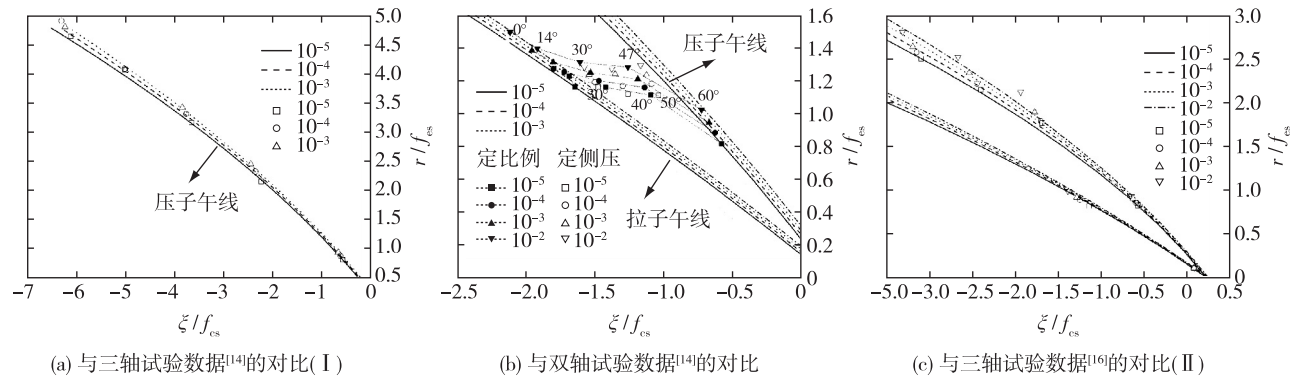


图 4 强度准则与三轴试验数据在子午平面上的对比

Fig. 4 Comparison of the triaxial experimental results and the proposed criterion in the meridian plane

从图 4(a) 可见, 在不同应变率下, 试验数据与压子午线吻合较好; 随着应变率增加, 混凝土强度准则的子午线逐渐向外推移, 而随着应变率减小, 混凝土动态强度准则逐渐逼近于静态强度准则。

图 4(b) 为 C10 混凝土强度准则的拉压子午线与双轴定侧压加载试验和双轴定比例加载试验数据的对比。在相同应变率下, 定侧压加载试验和定比例加载试验得到的数据点基本在同一条线上, 因此可以近似认为双轴动态抗压强度包络线与加载方式无关。图 4(c) 为 C30 混凝土强度准则的拉压子午线与试验数据的对比。可见, 不同应变率下试验数据点与对应的拉压子午线吻合较好。

不同静水压力下偏平面上的包络线如图 5 所示, 随着静水压力的增大, 偏平面上的强度包络线逐渐由三角形向圆形过渡, 符合混凝土破坏曲面的基本特征。

图 5 还清楚显示了拉、压子午线之间的动态强度随着相似角的变化规律。在定比例加载时, 随着应变率

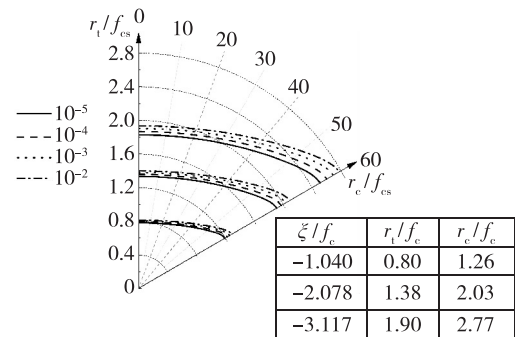


图 5 偏平面上的强度包络线

Fig. 5 Ultimate strength envelope in the deviatoric plane

增加,相似角不变,八面体正应力和剪应力为线性比例增加。随相似角的改变,拉、压子午线之间的破坏曲线可视为随应变率的增加平行外扩;而在定侧压加载时,随着应变率的增加,相似角发生变化,但变化幅度很小。

4 结 语

本文基于 Ottosen 强度准则模型,在八面体应力空间内建立了考虑应变率效应和混凝土强度等级的统一多轴静、动态强度准则,强度准则中的材料参数通过试验的特征应力点确定。

结合试验数据分析可得:①混凝土的 f_{cc}/f_c 值随着混凝土强度的提高而变小,而 f_{ct}/f_c 则随着混凝土强度的增大先增大后减小,呈非单调性变化。②在相同的应变率下,可以近似认为双轴动态抗压强度包络线与加载方式无关。③随相似角的改变,偏平面上拉、压子午线之间的破坏曲线可视为随应变率的增加平行外扩。

通过利用强度准则得到的计算结果与试验数据对比发现,该强度准则满足混凝土破坏曲面连续、光滑、外凸等基本要求,能够系统、全面地反映不同强度等级混凝土的多轴静态和动态强度变化规律,并可适用于多轴应力状态和不同应变速率下的低强度混凝土,便于应用于实际工程中。对于不同环境因素下的混凝土动态强度准则,需根据实际试验条件和试验数据重新标定材料参数。

参 考 文 献:

- [1] BISCHOFF P H, PERRY S H. Compressive behavior of concrete at high strain rates[J]. Materials and Structures, 1991, 24(6):425-450.
- [2] ROSS C A, TEDESCO J W, KUENNEN S T. Effect of strain rate on concrete strength[J]. ACI Materials Journal, 1995, 92(1): 37-47.
- [3] MALVAREZ L J, ROSS C A. Review of strain rate effects for concrete in tension[J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(6): 435-439.
- [4] BICANIC N, ZIENKIEWICZ O C. Constitutive model for concrete under dynamic loading[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1983, 11(5):689-710.
- [5] TEDESCO J W, POWELL J C, ROSS C A, et al. A strain-rate dependent concrete material model for ADINA [J]. Computers and Structures, 1997, 64(5):1053-1067.
- [6] GRAN J K, FLORENCE A L, COLTON J D. Dynamic triaxial tests of high-strength concrete[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1989, 115(5):891-904.
- [7] TAKEDA J, HIROYUKI T. Mechanical behavior of concrete under higher rate loading rate than in static test[J]. Journal of the Institution of Water Engineers and Scientists, 1974:479-486.
- [8] 吕培印,宋玉普,吴智敏. 变速率加载下有侧压混凝土强度和变形特性[J]. 大连理工大学学报, 2001, 41(6):716-720. (LV Pei-yin, SONG Yu-pu, WU Zhi-min. Strength and deformation characteristics of concrete subjected to different loading rates combined with confined stress[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2001, 41(6): 716-720. (in Chinese))
- [9] 宋玉普,吕培印,侯景鹏. 有侧压混凝土的变速率劈拉强度试验及其破坏准则[J]. 水利学报, 2002(3): 1-5. (LV Pei-yin, SONG Yu-pu, HOU Jing-peng. Concrete splitting tensile strength and failure criterion for different loading rate and lateral stress[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003 (3): 1-5. (in Chinese))
- [10] 吕培印,宋玉普,侯景鹏. 一向侧压混凝土在不同加载速率下的受压试验及其破坏准则[J]. 工程力学, 2002, 19(5): 67-71. (LV Pei-yin, SONG Yu-pu, HOU Jing-peng. Experimental study and failure criterion of compressive concrete under various loading rates with uniaxial lateral confinement[J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(5):67-71. (in Chinese))
- [11] OTTOSEN N S. Failure and elasticity of concrete[R]. Risoe; Danish Atomic Energy Commission, 1975.
- [12] 董哲仁. 钢筋混凝土非线性有限元法原理与应用[M]. 北京:中国铁道出版社, 1993: 108-112. (DONG Zhe-ren. Nonlinear finite element method of reinforced concrete: theory and application[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1993: 108-112. (in Chinese))
- [13] 冀晓东,宋玉普,刘健,等. 混凝土冻融损伤本构模型研究[J]. 计算力学学报, 2011, 28(3):462-467. (JI Xiao-dong, SONG Yu-pu, LIU Jian, et al. Study on frost damage constitutive model of concrete[J]. Chinese Journal of Computational

- Mechanics, 2011, 28(3): 462-467. (in Chinese))
- [14] 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 researches on the dynamic mechanical properties of concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [15] 张剑,肖诗云,王锦文,等.混凝土双轴动态等比例受压损伤试验研究[J].人民长江, 2013, 44(1): 74-77. (ZHANG Jian, XIAO Shi-yun, WANG Jin-wen, et al. Experimental study on biaxial dynamic equal ratio load compressive damage of concrete[J]. Yangtze River, 2013, 44(1): 74-77. (in Chinese))
- [16] 尚世明.普通混凝土多轴动态性能试验研究[D].大连:大连理工大学, 2013. (SHANG Shi-ming. Experimental study on the multi-axial dynamic behavior of plain concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [17] 孟顺意.混凝土双轴动态试验研究[D].大连:大连理工大学, 2010. (MENG Shun-yi. Experimental study on the biaxial dynamic behavior of plain concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [18] 宋玉普.多种混凝土材料的本构关系和破坏准则[M].北京:中国水利水电出版社, 2002: 49-51. (SONG Yu-pu. The constitutive relation and failure criterion for a variety of concrete materials[M]. Beijing: China Water Power Press, 2002: 49-51. (in Chinese))
- [19] DL 5037-2000, 水工建筑物抗震设计规范[S]. (DL 5037-2000, Code of seismic design of hydraulic structure[S]. (in Chinese))
- [20] 吕培印.混凝土单轴、双轴动态强度和变形试验研究[D].大连:大连理工大学, 2001. (LV Pei-yin. Experimental study on dynamic strength and deformation of concrete under uniaxial and biaxial action[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2001. (in Chinese))

Dynamic strength criterion of concrete based on Ottosen model under multi-axial stress

JIANG Pei-qing, WANG Li-cheng

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Due to the characteristic of the rate sensitive material, the changing mechanism of strength and stiffness of concrete structure under various strain rates are different. In addition to the complex stress state where concrete structure is subjected to dynamic loading such as earthquake, the effect of the strain rate is an important factor that can not be ignored. If projects are designed and calculated with strength theories of uniaxial tension, compression and shear, there will have great potential dangers in the construction and use of structure. Based on the Ottosen criterion model, in the present paper, by analysis of multiaxial static and dynamic strength test data of numerous concrete specimens, which are classified into different strength grades, a multiaxial dynamic strength criterion is reasonably established, in which both the strain rate effect and the strength of concrete are taken into account. The analysis results show that the predicted strength of the failure criterion is in good agreement with the basic requirements of continuity, smoothness and convexity and better reflects the dynamic strength change rule of ordinary concrete. Meanwhile, the strength criterion can be obtained just by the typical stress points, thus it has a simple expression form and is convenient for practical application to analysis of engineering structures.

Key words: concrete; Ottosen model; typical stress points; strain rate; dynamic strength criterion