

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2014.06.005

# 裂纹尺寸对混凝土抗压强度的影响规律和 动态断裂韧度计算方法研究

张玘璐, 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:** 目前,学者普遍认为裂纹尺寸对混凝土抗压强度的影响不大,并采用较为复杂的方法计算混凝土动态断裂韧度。为全面分析混凝土内部缺陷对混凝土力学性能的影响,并简化动态断裂韧度的计算方法。文中利用线弹性断裂力学理论,探讨了裂纹尺寸对混凝土抗压强度的影响规律,研究表明,当分支裂纹间距一定时,混凝土抗压强度随裂纹尺寸的增大而降低。基于上述研究,给出了不同含水率下混凝土动态断裂韧度的近似计算方法。模型计算结果与宏观试验现象较为一致,表明文中计算模型可以较好地反映混凝土的动态断裂特性。

**关键词:** 抗压强度;线弹性断裂力学;裂纹尺寸;动态断裂韧度

中图分类号: TV313

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2014)06-0026-06

## Influence Law of the Crack Size on Compressive Strength and the Calculation Method for Dynamic Fracture Toughness of Concrete

ZHANG Qi-lu, WANG Li-cheng

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

**Abstract:** Currently, many researchers think that the crack size has no effect on compressive strength, and use a complex method to calculate the dynamic fracture toughness. In order to analyze the influence of concrete internal defect on its mechanical behavior and simplify the method of calculating concrete, dynamic fracture toughness, the linear elastic fracture mechanics theory was used to discuss the influence of crack size on the compressive strength of concrete. This research showed that concrete compressive strength decreased with the increasing of the crack size when the intervals between the branching cracks were at a certain value. Based on these findings, an approximate calculation method for the dynamic fracture toughness of concrete under different water content was proposed. The calculated results agreed well with available experiment data, This indicates that the proposed method can, to some extent, predict the dynamic fracture property of concrete.

**Keywords:** compressive strength; linear elastic fracture mechanics; crack size; dynamic fracture toughness

长期在水环境中工作的混凝土结构通常处于饱和状态,如桥墩、大坝、海洋平台等等。Yaman等<sup>[1]</sup>和闫东明<sup>[2]</sup>的试验表明,与干燥混凝土相比,饱和混凝土的动态抗压强度有较大的提高,而静态抗压强度有所下降。但是他们的研究多是在试验的基础上给出定性的描述,缺乏系统的理论研究。

Li等<sup>[3]</sup>和张秀芳等<sup>[4]</sup>分别采用理论和试验方法计算混凝土的断裂韧度,然而其计算与试验过程较为复杂。本文基于线弹性断裂力学理论,考虑加载速率和含水率对混凝土断裂韧度的影响,提出一种混凝土断裂韧度的近似计算方法。

收稿日期:2014-07-07

修稿日期:2014-08-14

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(IWHR-SKL-201309);中央高校基本科研业务费专项基金(DUT14LK23)

作者简介:张玘璐(1988—),男,辽宁抚顺人,硕士研究生,研究方向为混凝土动态强度破坏准则。

通讯作者:王立成(1975—),男,山东安丘人,博士,副教授,主要从事混凝土多轴静、动态强度准则和钢筋混凝土结构耐久性的教学与科研工作。

# 1 静态荷载下裂纹尺寸对混凝土抗压强度的影响

## 1.1 双滑移裂纹模型

由于混凝土内部存在大量的随机裂纹,因此在抗压强度的讨论中要考虑裂纹之间的相互影响。混凝土的破坏通常是由部分主控裂纹扩展导致的,而考虑两个主控裂纹和考虑多个主控裂纹的混凝土抗压强度相差不到 5%<sup>[5]</sup>,因此本文仅考虑两条主控裂纹来计算混凝土的抗压强度,采用如图 1 所示的双滑移裂纹模型<sup>[6]</sup>。

图 1(a)为双滑移裂纹,图 1(b)为双滑移裂纹的等效形式。图中, $a_k$ 、 $b_k$  分别为两条斜裂纹的半长; $l_a$ 、 $l_b$  分别为两条分支裂纹的长度; $a_l$ 、 $b_l$  分别为两条裂纹的等效长度; $c$  为分支裂纹间距; $w$  为等效裂纹中心点间距。

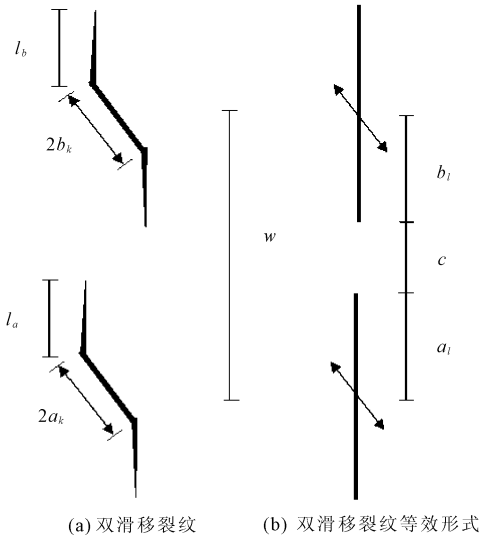


图 1 双滑移裂纹模型

混凝土在轴向受压状态下,斜裂纹表面会产生轴向压应力  $\sigma_n$  和剪应力  $\tau_n$ ,则裂纹表面处等效剪应力可表示为:

$$\tau_n^e = \tau_n - \mu\sigma_n = (\sin\theta\cos\theta - \mu\sin^2\theta)\sigma_3 \quad (1)$$

式中: $\theta$  为斜裂纹与轴向压力间的夹角; $\mu$  为混凝土的摩擦系数; $\sigma_3$  为混凝土单轴抗压强度。

于是,对应两条斜裂纹表面的等效剪力( $F_1$  和  $F_2$ )可分别表示为:

$$F_1 = 2a_k\tau_n^e = 2a_k(\sin\theta\cos\theta - \mu\sin^2\theta)\sigma_3 \quad (2)$$

$$F_2 = 2b_k\tau_n^e = 2b_k(\sin\theta\cos\theta - \mu\sin^2\theta)\sigma_3 \quad (3)$$

考虑裂纹间的相互作用对混凝土的抗压强度有较大的影响。两条分支裂纹的应力强度因子可分别

表示为<sup>[6]</sup>:

$$K_{I1} = I_1(c) \frac{\sigma_3 T(\theta) a_k}{\sqrt{\pi a_l}} \quad (4)$$

$$K_{I2} = I_2(c) \frac{\sigma_3 T(\theta) b_k}{\sqrt{\pi b_l}} \quad (5)$$

式中, $T(\theta) = 2\sin\theta(\sin\theta\cos\theta - \mu\sin^2\theta)$ ;  $I_1(c)$ 、 $I_2(c)$  为裂纹间相互影响系数,Kachanov<sup>[7]</sup> 给出  $I_1(c)$ 、 $I_2(c)$  的计算方法。

两条斜裂纹半长满足:

$$b_k = k \cdot a_k \quad (6)$$

式中: $k$  为两条斜裂纹半长的比例系数。

混凝土开裂和抗压强度与夹角  $\theta$  有关。混凝土的开裂总是从最薄弱的界面开始,然后逐渐串联破坏。王海龙等<sup>[8]</sup> 通过计算给出了混凝土抗压强度与夹角  $\theta$  的关系,可以看出,当  $\theta$  在  $45^\circ$  和  $55^\circ$  之间时,混凝土抗压强度变化较小,为简化计算,可近似取  $\theta$  为  $45^\circ$ 。

由图 1 可见

$$w = a_l + b_l + c \quad (7)$$

假设当裂纹扩展时满足以下条件:

$$K_{I1} = K_{I2} \quad (8)$$

由式(4)、式(6)、式(7)、式(8)可得等效裂纹长度  $a_l$  为:

$$a_l = \frac{w - c}{1 + \left[ \frac{kI_2(c)}{I_1(c)} \right]^2} \quad (9)$$

将式(9)带入式(4)中,则应力强度因子  $K_I$  可表示为:

$$K_I = K_{I1} = K_{I2} =$$

$$\sigma_3 \frac{I_1(c)}{I_2(c)} \sqrt{\frac{a_k [I_2^2(c) + I_1^2(c)k^2]}{w - c}} T(\theta) \sqrt{\frac{a_k}{\pi}} \quad (10)$$

在单轴应力状态下,裂纹扩展以 I 型劈裂破坏为主,即断裂准则为<sup>[9]</sup>:

$$K_I = K_{Ic} \quad (11)$$

式中: $K_{Ic}$  为混凝土的断裂韧度。

如果假定两条主控裂纹尺寸相同,则裂纹的应力强度因子  $K_I$  还可采用更简单的表示形式,即<sup>[9]</sup>

$$K_I = \frac{F_1 \sin\theta}{\sqrt{w \sin\left(\frac{\pi a_k}{w}\right)}} \quad (12)$$

1.2 考虑斜裂纹半长比例系数  $k$  的混凝土抗压强度

文献[10]中的材料参数:32.5 级矿渣硅酸盐水

泥,中砂,5 mm ~ 20 mm 粒径的碎石,混凝土的配合比为:水:水泥:砂:石 = 0.52 : 1 : 1.51 : 3.49,  $K_{lc} = 0.877 \text{ MN/m}^{3/2}$ ,斜裂纹半长  $a_k = 0.62 \text{ cm}$ ,摩擦系数  $\mu = 0.35$ ,混凝土断裂时  $w = a_k/0.15$ ,准静态抗压强度为 35.730 MPa。

混凝土双滑移裂纹模型中,分别令  $k = 0.6, 0.8, 1.0, 1.2$ ,可以得到干燥情况下混凝土的单轴抗压强度与分支裂纹间距  $c$  的关系,如图 2 所示。

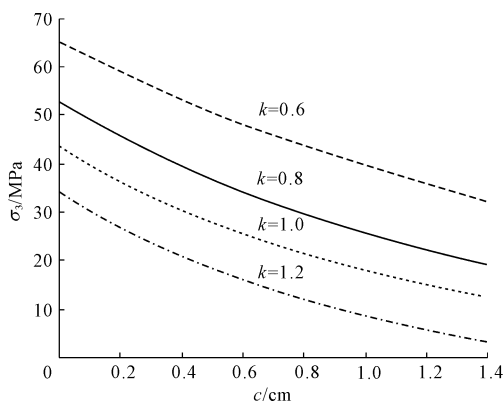


图 2 混凝土抗压强度与分支裂纹间距关系

由于混凝土达到抗压强度时,仍具有一定的变形能力,所以此时混凝土内部裂纹并未完全串通。公式(10)中有两个变量  $c, k$ ,对于不同的比例系数  $k$ ,可以得到  $c$  的最优取值(此时混凝土抗压强度的计算值与试验值误差最小),如表 1 所示。

表 1  $k$  与  $c$  的关系

$k$	$\sigma_3/\text{MPa}$	$c/\text{cm}$
0.6	35.828	1.20
0.8	35.836	0.55
1.0	35.667	0.22
1.2	36.205	0.66

由图 2 可以看出,当分支裂纹间距  $c$  固定时, $k$  越小混凝土抗压强度越高,因此不能简单地认为  $k$  对混凝土抗压强度影响较小。对表 1 中数据拟合可以得到,当混凝土达到抗压强度时,对于不同的比例系数  $k$ ,分支裂纹间距为:

$$c = \frac{1.386}{k} - 1.173 \quad (13)$$

静态加载下饱和混凝土孔隙水压力主要与体积应变  $\epsilon_v$  有关。随着外荷载增加,混凝土压缩体积应变增大,受压混凝土孔隙水压力亦增大。另外,随着混凝土损伤的发展,裂纹体积增加,孔隙水压力减少。综合以上考虑,混凝土破坏时的孔隙水压力  $p$  可表示为<sup>[8]</sup>:

$$p = \alpha(\epsilon_v, D)\sigma_3 \quad (14)$$

式中: $p$  为孔隙水压力; $\alpha$  为混凝土体积处于膨胀状态时,孔隙水压力与内部损伤因子  $D$  和混凝土体积应变  $\epsilon_v$  有关的系数。

静态加载下,混凝土内部孔隙水,容易到达裂纹尖端,进而加速裂纹扩展,降低混凝土的抗压强度。所以对于干燥混凝土双滑移裂纹模型下的应力强度因子进行修正,可得到饱和状态下裂纹尖端应力强度因子的计算公式为:

$$K_I = \sigma_3 \frac{I_1(c)}{I_2(c)} \sqrt{\frac{a_k [I_2^2(c) + I_1^2(c) k^2]}{w - c}} T(\theta) \sqrt{\frac{a_k}{\pi}} + p \sqrt{\pi \left[ \frac{w - c}{1 + \left[ \frac{I_2(c)}{I_1(c)} \right]^2} \right]} \quad (15)$$

当  $K_I = K_{Ic}$  时,裂纹发生串联,宏观裂纹形成,此时可通过式(15)计算饱和混凝土的静态抗压强度  $\sigma_3$ 。

## 2 动态荷载作用下混凝土的细观破坏机理

### 2.1 Stefan 效应

Rossi 等<sup>[11-12]</sup>论述了在动态荷载作用下,混凝土内部自由水对混凝土力学性能的影响,认为在高应变率下混凝土抗压强度的提高,可由 Stefan 效应解释(如图 3),即两块相距为  $h$  的平板以速度  $v$  分离,中间的粘性液体会产生与  $v$  相反方向的力  $P$ ,  $P$  与分离速度  $v$  成正比,可表示为:

$$P = \frac{3\pi\eta r^4}{2h^3} v \quad (16)$$

式中: $r$  为平板半径; $\eta$  为牛顿液体粘度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ );  $h$  为平板间距; $v$  为板分离速度。

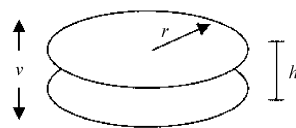


图 3 Stefan 效应模型

于是,平板间应力为:

$$\sigma_c = \frac{3\eta r^2}{2h^3} v \quad (17)$$

Sharma 和 Hans - Wolf<sup>[13]</sup>认为,当应变率大于 10/s 时,动态荷载作用下材料强度的提高主要由 Stefan 效应引起。而当应变率小于 10/s 时,材料强度提高则主要是由材料惯性效应造成的。因此,当应变率小

于 10/s 时, Stefan 效应可以忽略。

## 2.2 动态应力强度因子

在动态荷载作用下, 裂纹扩展速度对混凝土应力强度因子影响较大。动态应力强度因子可以表示为

$$K_{I_d} = k(v) K_I \quad (18)$$

式中:  $k(v)$  为与裂纹扩展速度  $v$  有关的影响系数;  $K_I$  为静态应力强度因子。根据 Freund<sup>[14]</sup> 的研究可以作如下取值

$$k(v) = \frac{C_R - v}{C_R - \lambda v} \quad (19)$$

式中: 系数  $\lambda$  与加载方式有关, 当承受中心劈裂荷载时取 0.75, 当承受侧向荷载时取 0.5;  $C_R$  为 Rayleigh 波速, 与材料杨氏模量  $E$ 、泊松比  $\mu$  和密度  $\rho$  有关<sup>[14]</sup>, 即:

$$C_R = \frac{0.862 + 1.14v}{1 + v} \sqrt{\frac{E}{2(1 + \mu)\rho}} \quad (20)$$

对混凝土而言,  $C_R$  约为 2 000 m/s<sup>[8]</sup>。

由式(15)、式(18)、式(19) 可得单轴受压下动态应力强度因子为:

$$K_{I_d} = \frac{C_R - v}{C_R - 0.75v} \sigma_3 \frac{I_1(c)}{I_2(c)} \sqrt{\frac{a_k [I_2^2(c) + I_1^2(c) k^2]}{w - c}} \cdot T(\theta) \sqrt{\frac{a_k}{\pi} + \frac{C_R - v}{C_R - 0.5v} p \sqrt{\pi \left[ \frac{w - c}{1 + \left[ \frac{I_2(c)}{I_1(c)} \right]^2} \right]}} \quad (21)$$

在中低应变率下(通常小于 10/s), 裂纹扩展速度远远小于 2 000 m/s, 可近似取裂纹扩展系数  $k(v) = 1$ 。即动态应力强度因子与静态相同, 由式(15) 得:

$$K_{I_d} = \sigma_3 \frac{I_1(c)}{I_2(c)} \sqrt{\frac{a_k [I_2^2(c) + I_1^2(c) k^2]}{w - c}} T(\theta) \sqrt{\frac{a_k}{\pi} + p \sqrt{\pi \left[ \frac{w - c}{1 + \left[ \frac{I_2(c)}{I_1(c)} \right]^2} \right]}} \quad (22)$$

## 2.3 混凝土动态断裂韧度计算方法

大量研究表明, 动态荷载与静态荷载作用下, 混凝土破坏都是由裂纹的产生、扩展、连通造成的, 因此, 动态荷载作用下, 混凝土的动态断裂准则与静态有相同的形式, 即<sup>[9, 15-16]</sup>:

$$K_{I_d} = K_{I_c}^d \quad (23)$$

式中:  $K_{I_c}^d$  为混凝土动态断裂韧度。

假设混凝土在动态荷载作用下破坏时的分支裂纹间距与静态相同, 由式(14)、式(22)、式(23) 得混凝土在动态荷载作用下的抗压强度为:

$$\sigma_3 = K_{I_c}^d \div \left( \frac{I_1(c)}{I_2(c)} \sqrt{\frac{a_k [I_2^2(c) + I_1^2(c) k^2]}{w - c}} T(\theta) \sqrt{\frac{a_k}{\pi} + \alpha \sqrt{\pi \left[ \frac{w - c}{1 + \left[ \frac{I_2(c)}{I_1(c)} \right]^2} \right]}} \right) \quad (24)$$

式中,  $T(\theta) = 2\sin\theta(\sin\theta\cos\theta - \mu(\sin^2\theta - \alpha))$

当把混凝土含水率、加载速率等作为外界因素考虑后, 认为混凝土的断裂韧度是其本身属性, 不随含水率和加载速率而改变<sup>[17]</sup>, 则动态断裂韧度与静态相同。而混凝土破坏是其自身和外界因素相互作用的结果, 含水率和加载速率对混凝土的力学性能影响较大, 不能简单的认为动态断裂韧度与静态相同。

研究表明, 岩石材料动态断裂韧度只与加载速率有关<sup>[15]</sup>, 其动态断裂韧度通常表示为

$$\frac{K_{I_c}^d}{K_{I_c}} = 1.696 + 0.1211g\dot{\epsilon} \quad (25)$$

式中:  $\dot{\epsilon}$  为动态荷载的应变率。由于混凝土和岩石同为脆性材料, 若只考虑加载速率的影响, 则动态断裂韧度与应变率的关系应与式(25) 有相同的形式, 即:

$$\frac{K_{I_c}^d}{K_{I_c}} = C_1 + C_2 g\dot{\epsilon} \quad (26)$$

式中:  $C_1$ 、 $C_2$  为材料参数。

普通混凝土的断裂韧度与强度的关系为<sup>[3]</sup>

$$K_{I_c} = 0.06(f_c)^{0.75} \quad (27)$$

式中:  $f_c$  为干燥混凝土的准静态抗压强度, 由文献[3] 中试验数据可以看出, 自然状态下混凝土准静态抗压强度与干燥情况下差别不大, 近似取干燥混凝土准静态抗压强度与自然状态下相同。

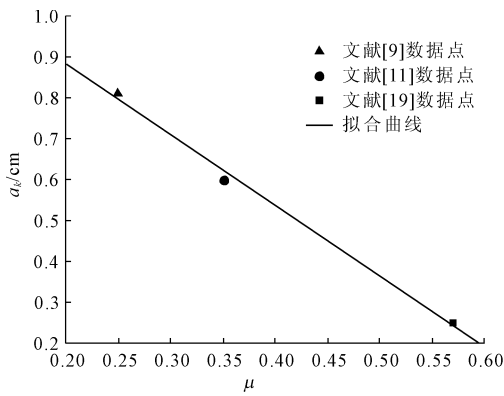
根据闫东明<sup>[2]</sup> 的试验结果, 自然状态下, 准静态加载速率为  $10^{-5}$ /s 时, 混凝土抗压强度为 16.83 MPa, 带入到式(27) 中, 可得混凝土静态断裂韧度为  $0.499 \text{ MN/m}^{3/2}$ 。

混凝土的摩擦系数随着斜裂纹半长的增加而减小, 如图 4 所示。

对图 4 中数据拟合得到:

$$\mu = -0.6038 a_k + 0.7269 \quad (28)$$

根据式(27), 可以得到不同准静态抗压强度下, 混凝土的静态断裂韧度, 将式(28) 和混凝土的静态断裂韧度带入式(12), 并令  $w = a_k/0.15$ , 可以得到不同静态断裂韧度下的混凝土斜裂纹半长, 计算结果见表 2。

图 4  $a_k$  与  $\mu$  的关系表 2 不同  $f_c$  时  $K_{Ic}$  与  $a_k$  取值

$f_c/\text{MPa}$	$K_{Ic}/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2})$	$a_k/\text{cm}$
20	0.5674	0.80
25	0.6708	0.72
30	0.7691	0.66
35	0.8634	0.61
40	0.9543	0.57
45	1.0425	0.54
50	1.1282	0.51

对表 2 中数据进行线性插值,可以得到  $K_{Ic} = 0.499 \text{ MN}/\text{m}^{3/2}$  时,  $a_k = 0.91 \text{ cm}$ 。将混凝土斜裂纹半长  $0.91 \text{ cm}$ , 带入式 (28) 中, 可得混凝土摩擦系数为  $0.178$ 。

采用本文表 2 的分析方法, 可以得到不同比例系数所对应  $c$  的最优值。当比例系数  $k = 1$  时, 静态破坏时分支裂纹间距为  $0.02 \text{ cm}$ 。

根据以上分析, 闫东明<sup>[2]</sup>的混凝土试件, 静态断裂韧度为  $0.499 \text{ MN}/\text{m}^{3/2}$ , 斜裂纹半长为  $0.91 \text{ cm}$ , 摩擦系数为  $0.178$ ,  $k = 1$  时的分支裂纹间距为  $0.02 \text{ cm}$ 。将已知参数带入到式 (22) 中, 可以得到自然状态混凝土在不同加载速率作用下的断裂韧度。闫东明<sup>[2]</sup>试验测得的混凝土抗压强度和本文计算得到的断裂韧度如表 3 所示。

表 3 不同应变率下的混凝土抗压强度和断裂韧度

应变率/ $\text{s}^{-1}$	抗压强度/MPa	断裂韧度/ $(\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2})$
$10^{-5}$	16.83	0.499
$10^{-4}$	17.53	0.522
$10^{-3}$	19.34	0.575
$10^{-2}$	20.67	0.615

应变率与混凝土动态断裂韧度的关系见图 5。

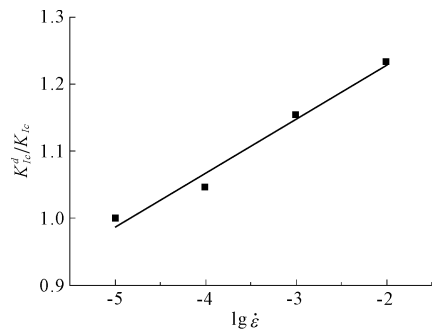


图 5 应变率与动态断裂韧度关系

对图 5 中数据拟合得到, 式 (26) 中的材料参数  $C_1 = 1.394$ ,  $C_2 = 0.081$ , 即

$$\frac{K_{Ic}^d}{K_{Ic}} = 1.391 + 0.0811 \lg \dot{\epsilon} \quad (29)$$

混凝土的相对含水率  $\gamma$  可表示为:

$$\gamma = \frac{S - S_g}{S_g} \quad (30)$$

式中:  $S$  为混凝土试件的重量;  $S_g$  为完全干燥后混凝土试件重量。

考虑混凝土含水率对动态断裂韧度的影响, 对式 (29) 进行修正, 可得

$$\frac{K_{Ic}^d}{K_{Ic}} = f\left(\frac{\gamma}{\gamma_z}\right) (1.391 + 0.0811 \lg \dot{\epsilon}) + C \quad (31)$$

式中:  $\gamma$  为混凝土实际含水率;  $\gamma_z$  为混凝土自然状态下的含水率;  $f$  为与含水率有关的函数, 当试件含水率低于自然状态下含水率时,  $f < 1$ ; 当试件在自然状态下时,  $f = 1$ ; 当试件完全饱和时,  $f > 1$ 。综合上述分析,  $f$  可假设为:

$$f\left(\frac{\gamma}{\gamma_z}\right) = 1 + B \lg\left(\frac{\gamma}{\gamma_z}\right) \quad (32)$$

式 (31)、(32) 中的  $B$ 、 $C$  为材料参数, 可由试验数据分析得到。

肖诗云<sup>[18]</sup>开展了饱和条件对混凝土动态抗压强度影响的研究, 试验结果如表 4 所示。肖诗云通过试验测得 C20 混凝土完全饱和时含水率为  $4.8\%$ , 自然情况下含水率为  $0.3\%$ 。采用本文双滑移裂纹模型, 对表 4 中五组数据进行分析, 得到  $B = 1.0$ ,  $C = 2.5$ , 相关系数为  $0.961$ 。

根据文献 [10] 中试验结果, 饱和混凝土在动态荷载  $10^{-4}/\text{s}$  加载条件下, 抗压强度为  $39.034 \text{ MPa}$ , 饱和含水率近似取  $4\%$ 。采用本文模型, 并取  $B = 1.0$ ,  $C = 2.5$ , 计算得到混凝土的抗压强度为  $38.740 \text{ MPa}$ , 与试验结果相差  $0.8\%$ , 吻合较好。

表 4 饱和混凝土动态抗压强度 单位:MPa

编号	不同应变率下抗压强度/ $s^{-1}$				
	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$
1	22.12	22.38	22.71	22.50	24.23
2	20.34	24.12	22.02	25.13	26.22
3	21.50	21.92	24.64	24.00	25.08
4	22.57	25.57	23.28	24.92	—
平均	21.32	22.75	23.16	24.14	25.18

### 3 结 论

双滑移裂纹模型可以较好的模拟混凝土断裂过程,当分支裂间距  $c$  固定时,混凝土抗压强度随斜裂纹半长比例系数  $k$  的增大而降低;如果  $k$  和  $c$  满足文中关系,可以取  $k = 1$  简化计算。

本文在岩石动态断裂韧度计算方法的基础上,建立了考虑含水率和应变率影响的混凝土动态断裂韧度计算模型。通过该模型计算得到的混凝土动态抗压强度结果与试验数据吻合较好,可以较好反映混凝土的动态破坏机理。

#### 参考文献:

- [1] Yaman I O, Heam N, Aktan H M. Active and non-active porosity in concrete part I: experimental evidence[J]. Material and Structure, 2002,35(3):102-109.
- [2] 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.
- [3] Li H B, Zhao J, Li T J. Micromechanical modelling of the mechanical properties of a granite under dynamic uniaxial compressive loads[J]. International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000,37(6):923-935.
- [4] 张秀芳,徐世焱.权函数计算的混凝土断裂韧度[J].工程力学,2011,28(4):58-62.
- [5] Murakami Y, Aoki S. Stress Intensity Factors Handbook [M]. Oxford: Pergamon Press, 1988.
- [6] Zheng D, Li Q B, Wang L B. A microscopic approach to rate effect on compression strength of concrete[J]. Engineer-

- ing Fracture Mechanics, 2005,72(15):2316-2327.
- [7] Kachanov M. Elastic solids with many cracks: a simple method of analysis[J]. International Journal of Solids and Structures, 1987,23(1):23-43.
- [8] 王海龙,李庆斌.孔隙水对湿态混凝土抗压强度的影响[J].工程力学,2006,23(10):141-144.
- [9] Nemat-Nasser S, Deng H. Strain-rate effect on brittle failure in compression[J]. Acta Metal Iurgicaet Materialia, 1994,42(3):1013-1024.
- [10] 王海龙,李庆斌.饱和混凝土静动力抗压强度变化的细观力学机理[J].水利学报,2006,37(8):958-962.
- [11] Rossi P. Strain rate effects in concrete structures: the LCPC experience[J]. Materials and Structures, 1997,30(1):54-62.
- [12] Rossi P, Van Mier J G M, Toutlemonde F, et al. Effect of loading rate on the strength of concrete subjected to uniaxial tension[J]. Materials and Structures, 1994,27(5):260-264.
- [13] Ozbolt J, Sharma A, Reinhardt H W. Dynamic fracture of concrete-compact tension specimen[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011,48(10):1534-1543.
- [14] Freund L B. Dynamic fracture mechanics[M]. UK: Cambridge University Press, 1990.
- [15] Deng H, Nemat-Nasser S. Dynamic damage evolution in brittle solids[J]. Mechanics of Materials, 1992,14(2):83-103.
- [16] Ravichandran G, Subhash G. A micromechanical model for high strain rate behavior of ceramics[J]. International Journal of Solids and Structures, 1995,32(17):2627-2646.
- [17] Rossi P, Van Mier J G M, Toutlemonde F, et al. Effect of loading rate on the strength of concrete subjected to uniaxial tension[J]. Materials and Structures, 1994,27(5):260-264.
- [18] 肖诗云.混凝土率型本构模型及其在拱坝动力分析中的应用[D].大连:大连理工大学,2002.
- [19] Li S, Lajtai E Z. Modeling the stress-strain diagram for brittle rock loaded in compression[J]. Mechanics of Materials, 1998,30(3):243-251.