

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.10.014

# 含孔隙混凝土的动态压缩数值模拟

郭煜, 巫绪涛, 王宝珍, 程长征, 冯学凯

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽合肥 230009)

**摘要:**为研究孔隙大小、数量及位置分布对混凝土动态压缩力学性能的影响,文章通过 ANSYS 参数化设计语言编程创建含随机分布球形孔隙的混凝土有限元模型,利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对孔隙混凝土的分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)试验进行数值模拟;提出一个预测不同孔隙率、不同孔隙数目混凝土在不同应变率下动态抗压强度的经验方程。研究表明:对于含单个球形孔隙的混凝土,孔隙尺寸越大,抗压强度越小,但内部孔隙位置发生变化时,抗压强度基本没有变化;相同孔隙率下,孔隙数目增加,混凝土抗压强度呈指数衰减,并最终趋于一个稳定值;孔隙率越低,混凝土抗压强度趋于稳定值时的孔隙数目越少,孔隙率为 1.11%时,多孔混凝土的抗压强度与单个孔隙时无显著差别,可按单孔隙计算;提出的经验方程预测结果与仿真试验结果有很好的 consistency。

**关键词:**混凝土;孔隙;动态压缩;数值模拟;背景网格法;强度

中图分类号:O347.1

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2023)10-1388-07

## Numerical simulation of dynamic compression of concrete with pores

GUO Yu, WU Xutao, WANG Baozhen, CHENG Changzheng, FENG Xuekai

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to study the influence of pore size, quantity and location distribution on dynamic compressive mechanical properties of concrete, the finite element model of concrete with randomly distributed spherical pores was established by ANSYS parametric design language, and the split Hopkinson pressure bar(SHPB) test of concrete with pores was numerically simulated by ANSYS/LS-DYNA. An empirical equation for predicting dynamic compressive strength of concrete with different porosity and number of pores under different strain rates was proposed. The results show that the compressive strength of concrete with single spherical pore decreases with the increase of pore size. However, when the positions of internal pores change, the compressive strength is basically unchanged. With the same porosity, the compressive strength of concrete decreases exponentially with the increase of the number of pores, and finally tends to a stable value. The lower the porosity, the smaller the number of pores when the compressive strength of concrete tends to a stable value. When the porosity is 1.11%, there is no significant difference between the compressive strength of porous concrete and that of single pore, which can be calculated according to single pore. The prediction results of the empirical equation are in good agreement with the simulation results.

**Key words:** concrete; pore; dynamic compression; numerical simulation; background mesh method; strength

混凝土作为工程中常用的建筑材料,具有良好的力学性能,广泛地应用于建筑、地下防护、水利等领域。然而混凝土在浇筑、振荡、脱模过程中

会出现气体未排干净、漏振、灌注不畅通等现象,从而产生孔隙、裂纹等初始缺陷。深入研究孔隙对混凝土力学性能的影响,对提高其在工程应用

收稿日期:2022-05-18;修回日期:2022-06-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12172114)

作者简介:郭煜(1998—),男,河南周口人,合肥工业大学硕士生;

巫绪涛(1971—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:wuxvtao@sina.com;

程长征(1979—),男,安徽太湖人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

中的可靠性极为重要。

在含孔隙混凝土的静态力学性能研究方面,文献[1]建立孔隙的二维介观数值模型,将孔隙形状、尺寸等多项特征进行随机化处理,研究孔隙对混凝土断裂模式和承载能力的影响规律;文献[2]在混凝土试样制备过程中加入云母片来模拟缺陷,并进行单轴压缩试验,探讨不同尺寸和倾角的初始缺陷对混凝土变形和破坏的影响。上述研究均发现,混凝土的初始缺陷对其静态力学性能有显著的不利影响。

对于一些重要的民用和军用防护设施,混凝土结构在设计时还必须考虑承受爆炸、冲击等强度较大的动荷载。相关研究发现,动荷载作用下混凝土的力学性能和静荷载下存在较大差异<sup>[3-4]</sup>。在含孔隙混凝土的动态力学性能研究方面,文献[5]建立不同孔隙率二维混凝土简支梁有限元模型,研究其在动荷载作用下的弯拉破坏模式和宏观力学性能;文献[3]在混凝土加载方向上预制贯穿孔洞,进行静、动态压缩试验,研究孔洞大小、位置及应变率对混凝土抗压强度的影响;文献[6]采用数值方法,对砂浆、砂浆与骨料界面处的部分单元进行缺陷化处理,建立含细观缺陷的混凝土计算模型,研究试样在 3 种冲击荷载作用下应力和应变的分布规律。

在混凝土试样制备中,预制孔隙的同时也可能产生新的缺陷,且动荷载作用下试样内部结构的变形和破坏特征不易获取。而在数值方法的研究中,由于建立的动态有限元模型较复杂,且计算耗时较长,目前对混凝土缺陷的研究主要是针对贯穿型孔隙或在二维状态下进行数值模拟,对含内部孔隙缺陷的三维混凝土结构的研究较少。

本文构建含不同尺寸、位置、数目球形空洞的混凝土三维计算模型,模拟采用分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)进行混凝土冲击压缩试验的过程,分析不同冲击荷载作用下,多种孔隙特征参数对混凝土破坏形态及动态力学性能的量化影响。

## 1 有限元模型

混凝土试样模型的直径为 98 mm,厚度为 50 mm。整体有限元模型中,入射杆、透射杆的直径均为 100 mm,长度分别为 3 000、2 000 mm。入射杆、透射杆、混凝土基体和孔隙均采用 Solid164 单元划分。

近年来,混凝土细观骨料模型的建模方法已

经较成熟,其中背景网格法<sup>[7-10]</sup>具有易参数化、网格精度高的优点。本文采用背景网格,在混凝土试样模型中生成球形孔隙,算法步骤如下所述。

1) 将试样进行背景网格划分,并赋予混凝土的材料参数。

2) 确定球形孔隙的形心坐标 $(x_i, y_i, z_i)$ 和半径  $R$ ,满足的条件为:

$$\begin{cases} \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \leq R_s - R, \\ z_i - R \geq -L_s/2, \\ z_i + R \leq L_s/2 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $R_s$ 、 $L_s$  分别为试样的半径和厚度。试样形心坐标为 $(0, 0, 0)$ 。

3) 进行干涉判断,判断第  $i$  个球形孔隙与前面生成的所有球形孔隙是否发生重叠:若不重叠,则生成球体;若发生重叠,则返回步骤 2);对于单孔隙混凝土,该步骤省略。

4) 获取所有单元形心坐标并存放数组,若某单元的形心位于球体投影范围内,即单元形心与球体形心距离小于球体半径,则将该材料参数更改为孔隙材料参数;反之,仍为混凝土材料参数。

用背景网格法建立的含球形孔隙混凝土试样 SHPB 试验计算模型如图 1 所示。

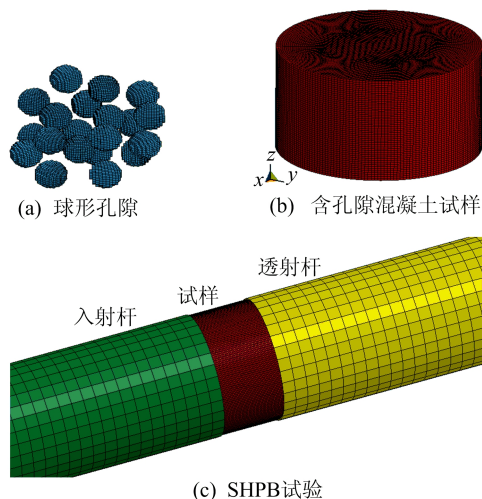


图 1 含孔隙试样及 SHPB 试验计算模型

图 1 中: $z$  方向为杆和试样的轴向;试样径向划分单元数为 100,轴向划分单元数为 50,单元数总计 375 000;入射杆、透射杆径向划分单元数为 10,轴向划分单元数分别为 300、200,单元数分别为 57 600、38 400。

本文重点研究孔隙大小、孔隙数目、孔隙位置、应变率等因素对混凝土力学性能影响的一般规律,因此混凝土基体采用文献[11]提出的 HJC

本构原始参数,见表 1 所列。表 1 中: $\rho$ 、 $G$ 、 $f_c$ 、 $T$  分别为材料的密度、剪切模量、静态抗压强度、抗拉强度; $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $N$  为强度参数; $D_1$ 、 $D_2$ 、 $\epsilon_{f\min}$  为损伤参数; $p_c$ 、 $\mu_c$  分别为弹性状态下的极限压力及相应的体积应变; $p_1$ 、 $\mu_1$  分别为塑性状态下的极限压力及相应的体积应变; $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为压力参数; $S_{\max}$  为归一化的最大强度。

表 1 混凝土基体的 HJC 本构参数

参数	数值	参数	数值
$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	2 400	$\epsilon_{f\min}$	0.01
$G/\text{GPa}$	14.86	$T/\text{MPa}$	4.0
$f_c/\text{MPa}$	48.0	$p_c/\text{MPa}$	16.0
$A$	0.79	$\mu_c$	0.001
$B$	1.60	$p_1/\text{MPa}$	810.0
$C$	0.007	$\mu_1$	0.1
$N$	0.61	$k_1/\text{GPa}$	85.0
$S_{\max}$	7.0	$k_2/\text{GPa}$	-171.0
$D_1$	0.04	$k_3/\text{GPa}$	208.0
$D_2$	1.0		

为了模拟出混凝土动态破坏效果,需要加入失效准则<sup>[4,12]</sup>,且失效准则采用主应变失效才能得出与试验相近的破坏形态,因此本文采用最大主应变失效准则。在 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件中,可通过关键字“Mat\_add\_erosion”添加失效准则,当试样单元的最大主应变  $\epsilon_1$  大于所定义的失效主应变  $\epsilon_{\max}$  时,该单元就被删除。对于失效主应变的取值,文献[13]指出,侵蚀发生在完全受损的材料中,因此本文设置最大主应变失效阈值为 0.02,确保所删单元均为损伤单元。

入射杆、透射杆材料采用线弹性模型,其密度为  $7\,800\text{ kg}/\text{m}^3$ ,弹性模量为  $200\text{ GPa}$ ,泊松比为 0.3。球形孔隙采用线弹性模型<sup>[6]</sup>,并通过单元失效使其在计算开始时失效。杆与试样端面采用面面自动接触,接触刚度罚因子<sup>[14]</sup>设置为 2.0。

直接将速度时程入射波加载到入射杆自由端面,为减小入射波波形弥散效应,并模拟不同应变率试验,入射波波形选择 3 种半正弦波,波长历时  $400\text{ }\mu\text{s}$ ,幅值分别为 4、6、8 m/s。

## 2 数值模拟结果分析

### 2.1 模型有效性验证

背景网格法生成的球形孔隙为近似球体,用很小的弹性模量代替空材料;为验证其有效性,利

用 Truegrid 软件直接建立含球形空洞的混凝土模型。入射波、反射波和透射波作用下混凝土应变分别为  $\epsilon_i$ 、 $\epsilon_r$ 、 $\epsilon_t$ ,相同状态下 2 种方法得到的波形如图 2 所示。由图 2 可知,2 种方法的计算结果基本一致。背景网格法的有效性由此得到验证,而其建模过程方便快捷,可大幅提高计算效率。

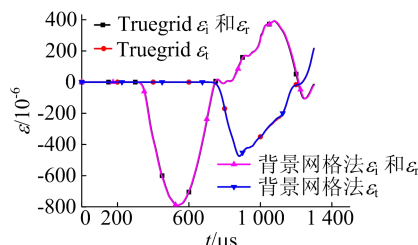


图 2 2 种方法计算波形对比

由于所有计算工况均能在入射波上升沿持续时间内达到应力平衡,可根据模拟得到的反射波  $\epsilon_r(t)$ 、透射波  $\epsilon_t(t)$  计算试样的应力和应变时程,在共同时间坐标下可得试样的应力-应变关系为:

$$\epsilon(t) = -\frac{2c_0}{L_s} \int_0^t \epsilon_r(t) dt, \quad \sigma(t) = \frac{A_0}{A_s} E_0 \epsilon_t(t) \tag{2}$$

其中: $A_0$ 、 $c_0$ 、 $E_0$  分别为压杆横截面面积、波速和弹性模量; $A_s$  为试样横截面面积。

### 2.2 单孔隙混凝土数值模拟结果

首先对含单孔隙混凝土的 SHPB 试验进行模拟,试样  $y=0$  直径剖面下孔隙尺寸及位置示意如图 3 所示。

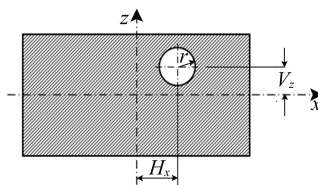


图 3  $y=0$  剖面下孔隙尺寸及位置示意图

在不同入射波作用下,对试样应变率分别为  $28$ 、 $45$ 、 $54\text{ s}^{-1}$  时,4 个孔隙尺寸和 9 个孔隙位置进行计算,得到的混凝土试样动态抗压强度见表 2 所列。表 2 中: $N$  表示完整试样; $C$  表示试样孔隙位于试样中心; $H$  表示孔隙球心关于试样中心  $x$  方向左偏置,偏置量  $H_x$  分别为 15、30 mm; $V$  表示孔隙球心关于试样中心  $z$  方向上下偏置,偏置量  $V_z$  分别为 25、-25 mm(正值为靠入射杆侧); $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  分别表示孔隙半径  $r$  为 10、15、18、20 mm; $\varphi$  为孔隙率; $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  分别为试样在 3 个应变率下的强度。

表 2 不同应变率作用下混凝土动态抗压强度

试样编号	r/mm	$\varphi/\%$	$\sigma_1/\text{MPa}$	$\sigma_2/\text{MPa}$	$\sigma_3/\text{MPa}$
N	0	0	101.8	107.4	113.5
C-R1	10.0	1.11	98.8	104.5	109.2
C-R2	15.0	3.75	93.8	99.3	102.8
C-R3	18.0	6.48	89.6	94.2	97.4
C-R4	20.0	8.89	86.7	91.3	93.9
H1-R2	15.0	3.75	93.7	98.7	102.4
H2-R2	15.0	3.75	93.6	98.0	102.2
V1-R2	18.9	3.75	88.8	93.3	96.7
V2-R2	18.9	3.75	90.1	94.1	97.1
H1-R3	18.0	6.48	89.2	94.2	97.4
H2-R3	18.0	6.48	89.9	93.6	97.2
V1-R3	22.7	6.48	81.1	84.7	87.5
V2-R3	22.7	6.48	81.8	85.0	87.9

部分单孔隙试样直径剖面单元随加载时间变化的应力云图如图 4 所示。从图 4a~图 4c 可以看出: 800  $\mu\text{s}$  时 C-R1 试样孔隙周边出现剧烈的应力集中, 其中沿加载方向的孔周上下产生较大的拉应力, 垂直于加载方向的孔周左右产生较大的压应力; 840  $\mu\text{s}$  时在拉、压应力共同作用下, 孔周出现明显的“X”型剪切带, 试样局部发生破坏; 890  $\mu\text{s}$  时端面和孔周之间形成贯通的“X”型断裂

路径, 试样压缩剪切失效<sup>[15-16]</sup>。从图 4d~图 4f 可以看出, 890  $\mu\text{s}$  时, C-R3、V2-R2 和 H1-R2 试样围绕孔隙均产生“X”型剪切带和断裂路径, 但影响范围存在显著差异。

1) 孔隙尺寸对混凝土力学性能的影响。由表 2 可知: 随着应变率增加, 所有试样的动态抗压强度显著增大; 随孔隙尺寸增大, 试样的动态抗压强度减小。

结合应变率和孔隙率对混凝土动态抗压强度的影响<sup>[3,17]</sup>, 可得应变率  $\dot{\epsilon}$ 、孔隙率  $\varphi$  与单孔隙混凝土动态抗压强度  $f_{dc}$  的关系式为:

$$\frac{f_{dc}}{f_c} = \left[ a_1 + b_1 \lg\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \right] \exp(-c_1 \varphi) \quad (3)$$

其中:  $\dot{\epsilon}_0$  为 HJC 本构参数中的参考应变率,  $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ ;  $a_1, b_1, c_1$  为无量纲参数, 由表 2 中 C 系列试样数据拟合得到  $a_1 = 1.10, b_1 = 0.70, c_1 = 0.02$ 。单孔隙混凝土孔隙尺寸对动态抗压强度的影响如图 5 所示。图 5 中, 拟合曲线综合相关系数  $R^2 = 0.9727$ , 拟合曲线与数值模拟结果吻合较好, 说明式(3)可以很好地预测单孔隙混凝土动态抗压强度随应变率和孔隙率的变化规律。

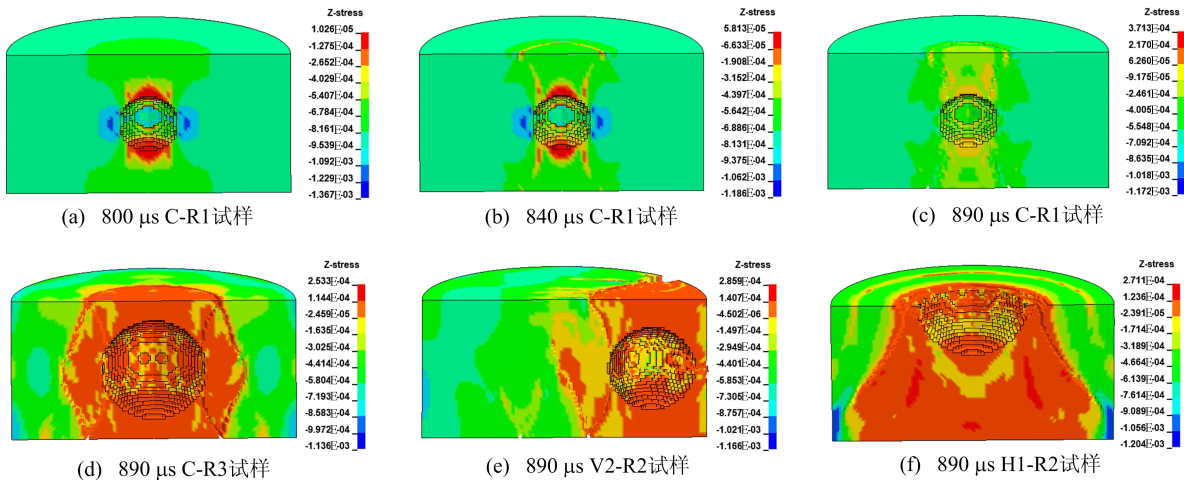


图 4 单孔隙混凝土 SHPB 试验的应力云图

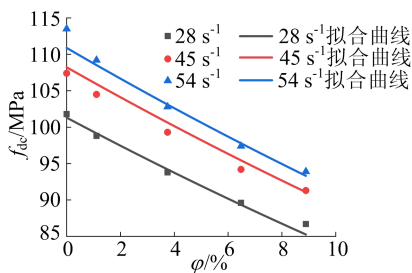


图 5 单孔隙混凝土孔隙尺寸对动态抗压强度的影响拟合曲线

2) 孔隙位置对混凝土力学性能的影响。根据表 2 数据可以得到:

在应变率和孔隙率不变的情况下, H 系列试样强度相较于 C 系列无明显变化, 内部缺陷位置对试样动态抗压强度的影响较小; 当缺陷向试样端面靠近时 (V1 系列和 V2 系列), 试样强度稍微降低, 即接近试样端面的缺陷会导致该处提前破坏, 试样与压杆接触处的波阻抗降低, 阻止应力波透过试样。

### 2.3 多孔混凝土数值模拟

对含随机分布的多孔隙混凝土 SHPB 试验进行模拟, 在混凝土试样内部生成若干个互不干

涉的球形孔隙。典型含多孔隙混凝土破坏时直径剖面单元的应力云图如图 6 所示。试样从各孔隙附近单元开始破坏并向外扩展,各个孔隙的破坏路径在多方向产生交汇,从而最终导致试样碎成许多大块,失去承载能力。

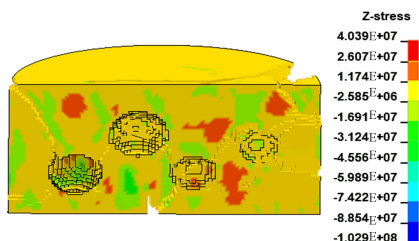


图 6 典型多孔隙混凝土直径剖面单元应力云图

不同孔隙率  $\varphi$ 、不同孔隙数目  $n$  下试样在不同应变率作用下的应力-应变曲线如图 7 所示。图 7 中,  $f_{dc}'$  为含多个孔隙的混凝土动态抗压强度。从图 7 可以看出,所有试样的动态抗压强度都会随着应变率的增加而提高,这表明多孔隙试样也具有应变率效应。

需要指出,多孔隙混凝土孔隙率  $\varphi$ 、孔隙数目  $n$  及孔隙半径  $r$  之间的关系为:

$$V\varphi = \frac{4}{3}\pi n r^3 \quad (4)$$

其中,  $V$  为试样体积。当  $\varphi$  一定时,  $n$  与  $r^3$  成反比,

即  $r$  随着  $n$  增大而减小,因此,孔隙半径对试样强度的影响规律可由孔隙数目对强度的影响规律类比得到。对比图 7a 和图 7d、图 7b 和图 7e、图 7c 和图 7f 可以看出,当  $\dot{\varepsilon}$ 、 $n$  相同时,  $f_{dc}'$  随着  $\varphi$  的增加而降低。此时较大的孔隙率对应更大的孔隙尺寸,从而其周围的断裂带范围越大,对强度的影响越明显。

当  $\varphi$ 、 $\dot{\varepsilon}$  一定时,从图 7a~图 7c 可以看出,各曲线基本重合,即  $\varphi$  较小时,  $n$  对试样强度的影响较小;从图 7d~图 7f 可以看出,各曲线在弹性段基本重合,而进入塑性段后,随着  $n$  增加软化加剧,最终强度出现较大差异。由此可知,当孔隙率达到一定程度后,孔隙数目会对混凝土力学性能产生影响。

$\varphi=1.11\%$  时,  $n$  对强度影响不显著,此时可按单孔隙确定试样强度;  $\varphi=8.89\%$  时,随着  $n$  增大,试样强度呈先降低后收敛的趋势。文献[18]对含孔隙岩石进行数值模拟发现,孔隙率一定时,随着孔隙数目增多,试样强度降低,这是由于模型中随机分布的孔隙较多,产生的失效更有可能聚结形成持续的破坏路径,导致构件丧失承载能力。文献[19]在对含 10% 泡孔的混凝土试样进行 SHPB 试验研究中发现,当泡孔体积分数为 10% 时,不同泡孔直径的混凝土强度基本一致,也有强度收敛趋势。

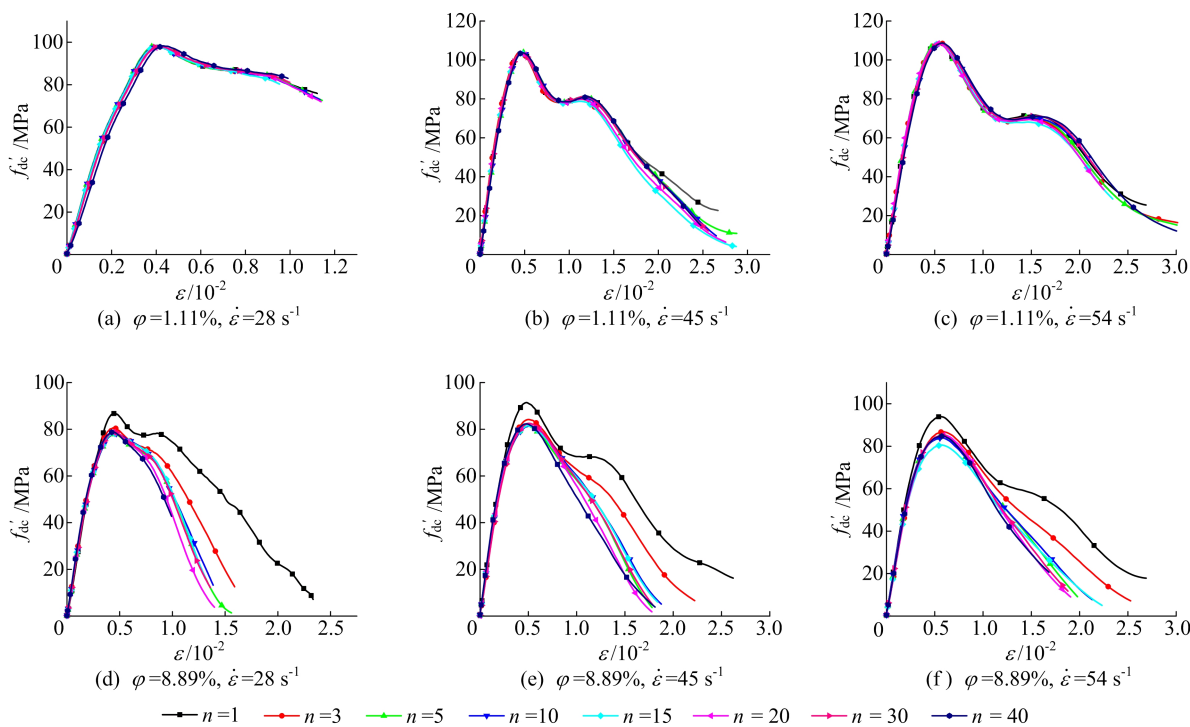


图 7 不同孔隙率和孔隙数目下混凝土的应力-应变曲线

为保证观测结果的准确性,加入  $\varphi$  为 3.75%、6.48% 时,对不同孔隙数目的混凝土动态抗压强度进行分析,4 种孔隙率下混凝土在 3 种应变率下的动态抗压强度随孔隙数目变化如图 8 所示。

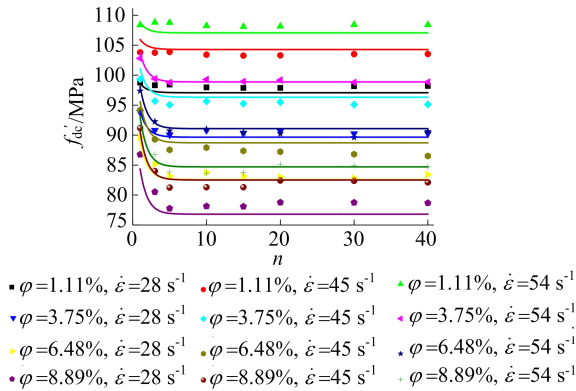


图 8 孔隙数目和应变率对动态抗压强度的影响

从图 8 可以看出:随着  $\varphi$  增加,  $f_{dc}'$  逐渐降低;随着  $\dot{\epsilon}$  增加,  $f_{dc}'$  显著增大,表现出明显的应变率效应;随着  $n$  增加,  $f_{dc}'$  呈指数下降并最终趋于一个稳定值,且强度趋于稳定值时的  $n$  临界值随着  $\varphi$  增加而增加。

根据上述规律,混凝土动态抗压强度经验方程可表述为:

$$\frac{f_{dc}'}{f_c} = g_1(\dot{\epsilon})g_2(n)g_3(\varphi, n),$$

$$g_1(\dot{\epsilon}) = 1 + a_2 \lg\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right),$$

$$g_2(\varphi) = \exp(-b_2\varphi),$$

$$g_3(\varphi, n) = 1 + \frac{\varphi}{c_2 + \varphi} \exp(-n) \quad (5)$$

其中:  $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c_2$  为无量纲参数,由图 8 中的数据点拟合得到  $a_2 = 0.75$ ,  $b_2 = 0.03$ ,  $c_2 = 24.37$ 。图 8 中,拟合曲线综合相关系数  $R^2 = 0.9843$ ,表明拟合曲线与数值模拟结果吻合较好。

根据以上研究可知,当应变率和孔隙率一定时,随着孔隙数目增加,混凝土动态抗压强度将趋向于一个稳定值。

为研究不同孔隙率和应变率下该值的变化规律,取  $n=40$ ,将各个孔隙率和应变率下的强度代入式(3),拟合得到  $a_1 = 1.11$ ,  $b_1 = 0.69$ ,  $c_1 = 0.03$ ,拟合效果如图 9 所示。

图 9 中,拟合曲线综合相关系数  $R^2 = 0.9880$ ,说明当孔隙数目较多时,式(3)也可以很好地预测混凝土动态抗压强度随应变率和孔隙率的变化规律。

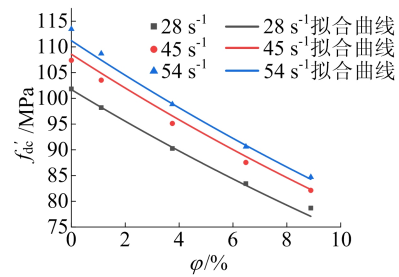


图 9 孔隙率和应变率对动态抗压强度的影响拟合曲线

### 3 结 论

1) 无论孔隙的尺寸、位置、数目如何,相较于完整试样,孔隙的存在总会使试样强度有所减小;随着应变率增大,同一试样的强度均增大,含孔隙混凝土强度具有显著的应变率效应。

2) 单孔隙混凝土动态抗压强度随着孔隙尺寸增大而减小,内部孔隙位置的改变对强度的影响较小。本文得到的经验公式(式(3))能较好反映应变率、孔隙率对试样强度的影响规律。

3) 多孔混凝土孔隙率较低时,孔隙数目对强度的影响较小,可以按同体积单孔隙试样考虑;而孔隙率较大时,强度随着缺陷数目增加呈先减小后收敛的指数衰减趋势。本文提出的经验公式(式(5))可较好地描述这种变化规律,而混凝土动态抗压强度随缺陷数目增加的最终收敛值可采用式(3)进行估算。

### 【参 考 文 献】

[1] WANG X F, YANG Z J, YATES J R, et al. Monte Carlo simulations of mesoscale fracture modelling of concrete with random aggregates and pores[J]. Construction and Building Materials, 2015, 75: 35-45.

[2] CUI W, LIU M M, SONG H F, et al. Influence of initial defects on deformation and failure of concrete under uniaxial compression [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 234: 107106.

[3] 李意. 混凝土在单轴冲击荷载作用下的破坏准则研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2012.

[4] WANG C, SONG R, WANG G H, et al. Modifications of the HJC (Holmquist-Johnson-Cook) model for an improved numerical simulation of roller compacted concrete (RCC) structures subjected to impact loadings[J]. Materials, 2020, 13(6): 1361.

[5] 杜修力, 揭鹏力, 金浏. 考虑初始缺陷影响的混凝土梁动态弯拉破坏模式分析[J]. 工程力学, 2015, 32(2): 74-81.

[6] 覃源, 柴军瑞, 党发宁. 冲击荷载作用下混凝土缺陷模型细观损伤演化定量分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(11): 172-177.

段的安装线形计算,进而确定每个梁段的制造标高。

#### 4 结 论

通过全面的计算分析与比较,将几何分析和无应力状态法运用到斜拉桥悬拼施工的线形控制中,得到的结论如下:

1) 桥梁结构的安装线形和制造线形是独立统一的,它们只代表结构在不同阶段的线形,利用零初始位移法和切线位移法可分别计算求解。

2) 安装线形与施工过程密切相关,不同的施工荷载作用下会得到不同的安装线形,而制造线形作为无应力线形,是结构的稳定量,与施工过程无关。

3) 不同的临时荷载作用下,梁段的制造夹角与其施工中的安装夹角相等,数值不会发生变化。因此,制造线形也可以通过安装夹角按悬拼的施工流程依次求解。

4) 制造线形是主梁节段在无应力状态下的线形,由于一次落架施工方法满足无应力状态基本原理,也可求解制造线形,经调索后即可达到理想成桥状态,成桥时的索力和无应力索长也是唯

一的。

#### [参 考 文 献]

- [1] 黄晓航,高宗余. 无应力状态控制法综述[J]. 桥梁建设, 2010,40(1):71-74.
- [2] 秦顺全. 无应力状态控制法:斜拉桥安装计算的应用[J]. 桥梁建设,2008,38(2):13-16,30.
- [3] 卜一之,孙才志. 大跨度结合梁斜拉桥制造线形控制与分析[J]. 重庆交通大学学报,2011,30(5):916-920,1053.
- [4] 谭康荣,余昆. 四线曲线钢箱梁斜拉桥施工控制技术[J]. 桥梁建设,2013,43(4):116-122.
- [5] 李冠军,王卫锋. 基于 midas 的悬臂拼装桥梁安装线形的计算[J]. 科学技术与工程,2012,12(34):9425-9427.
- [6] 周潇. 悬臂拼装斜拉桥安装线形与制造线形的区别和联系[J]. 公路交通技术,2016,32(5):66-69.
- [7] 凌华才. 北江大桥悬臂拼装施工技术[J]. 公路,2012(2):113-115.
- [8] 李乔,卜一之,张清华,等. 大跨度斜拉桥施工全过程几何控制概论与应用[M]. 成都:西南交通大学出版社,2009.
- [9] 余昆,李景成. 基于无应力状态法的悬臂拼装斜拉桥的线形控制[J]. 桥梁建设,2012,42(3):44-49.
- [10] 张安林,郑报文,夏伟. 悬臂拼装桥主梁制造线形计算[J]. 安徽建筑大学学报,2015,23(1):21-24.

(责任编辑 张 镛)

#### (上接第 1393 页)

- [7] 吕钊. 基于随机骨料的混凝土细观力学模型研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2019.
- [8] LV T H, CHEN X W, CHEN G. The 3D meso-scale model and numerical tests of split Hopkinson pressure bar of concrete specimen[J]. Construction and Building Materials, 2018,160:744-764.
- [9] CHEN X W, LV T H, CHEN G. Experimental and numerical studies on the dynamic behaviors of concrete material based on the waveform features in SHPB test[J]. EPJ Web of Conferences, 2018,183:01001.
- [10] YU Q, CHEN Z Y, YANG J, et al. Numerical study of concrete dynamic splitting based on 3D realistic aggregate mesoscopic model[J]. Materials, 2021,14(8):1948.
- [11] HOLOMQUIST T J, JOHNSON G R, COOK W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures[C]// JACKSON N, DICKERS S. The 14th International Symposium on Ballistics. [S.l. : s. n. ], 1993:591-600.
- [12] 李耀,李和平,巫绪涛. 混凝土 HJC 动态本构模型的研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 32(8):1244-1248.
- [13] KUCEWICZ M, BARANOWSKI P, MALACHOWSKI J. Dolomite fracture modeling using the Johnson-Holmquist concrete material model: parameter determination and validation[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021,13(2):335-350.
- [14] 巫绪涛,孙善飞,李和平. 用 HJC 本构模型模拟混凝土 SHPB 实验[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(2):137-142.
- [15] SHANGGUAN Z H, ZHU Z W, TANG W R. Dynamic impact experiment and numerical simulation of frozen soil with prefabricated holes[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2020,146(8):04020085-1-04020085-13.
- [16] ZHAO R, TAO M, ZHAO H T, et al. Dynamics fracture characteristics of cylindrically-bored granodiorite rocks under different hole size and initial stress state[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020,109:102702.
- [17] 施润. 初始孔隙对碾压混凝土力学性能的影响研究[D]. 西安:西安理工大学,2020.
- [18] PENG J, WONG L N Y, ZHANG Y H. Influence of pore-like flaws on strength and microcracking behavior of crystalline rock[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2021,45(4):521-539.
- [19] 徐沛保. EPS 混凝土的 SHPB 实验数值模拟[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.

(责任编辑 张淑艳)