

基于声发射特性下的含骨料混凝土裂隙演化特性及其统计损伤本构研究

张峰

(淮北职业技术学院, 安徽 淮北 235000)

摘要: 为探讨含骨料混凝土的损伤裂隙演化特性,基于统计损伤理论的数值模拟手段,建立了含骨料混凝土有限元模型,得到了不同工况下的裂隙扩展过程、声发射规律和峰值强度变化,同时基于声发射数值结果定义了损伤度的概念。结果表明:不同工况下的裂隙演化呈现“X”型扩展,由“翼形裂纹”与“反翼形裂纹”共同组成;“翼形裂纹”萌生及扩展主要破坏模式为拉伸破坏,“反翼形裂纹”的萌生是由于剪切破坏而产生,随后扩展模式为拉剪复合破坏;预制裂纹的倾角越大,骨料含量百分比越大,则试样的峰值强度也越大,但是前者对混凝土抗压强度的增幅要小于后者;定义了损伤度的概念,加载过程中混凝土的损伤变化经历4个阶段:线弹性变形阶段、裂纹萌生阶段、裂纹加速扩展阶段和损伤平稳发展阶段。骨料含量百分比越大,预制裂隙倾角越小,则最大损伤度越大,不同工况下的损伤度变化范围为0.85~0.94;骨料的破坏模式共分为4种,即偏转绕行、止裂、裂纹被骨料吸附和裂纹穿过骨料。本文数值模拟中偏转绕行是主要破坏模式。

关键词: 混凝土裂隙; 含骨料混凝土; 裂隙演化; 声发射特性; 统计损伤; 损伤度; 数值模拟

中图分类号:TV431; TU528

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)05-0182-07

Study on fracture evolution characteristics of concrete containing aggregate and its statistical damage constitutive model based on acoustic emission characteristics

ZHANG Feng

(HuaiBei Vocational and Technical College, HuaiBei 235000, China)

Abstract: In order to understand the evolution characteristics of damaging cracks in aggregate concrete, a finite element model of concrete containing aggregate was established using numerical simulation method of statistical damage theory, through which the crack propagation process, acoustic emission law and peak intensity under different working conditions were obtained and the concept of damage degree was defined based on the numerical results of acoustic emission. The results show that the crack evolution under different working conditions presents X-shaped expansion, which is composed of “wing crack” and “reverse wing crack”. The main failure mode of “wing crack” initiation and propagation is tensile failure; the initiation of “reverse wing crack” is caused by shear failure, followed by tension – shear composite failure in the propagation phase. The larger the inclination angle of the prefabricated crack is, the greater the percentage of the aggregate content is and the greater the peak strength of the specimen is, but the increase of compressive strength of the specimens caused by the former is smaller than that by the latter. The damage propagation of the specimens during loading process went through four stages, namely, linear elastic deformation stage, crack initiation stage, crack accelerated propagation stage and damage stable development stage. It is found that the larger the percentage of the aggregate content is, the smaller the inclination angle of the prefabricated crack is and the greater the maximum damage degree is. The range of dam-

收稿日期:2019-10-29; 修回日期:2020-02-03

基金项目:国家自然科学基金项目(61503201)

作者简介:张峰(1978-),男,安徽怀远人,硕士,副教授,主要从事工业与民用建筑施工、土力学及应用及项目管理方面的科研及教学工作。

age degree under different working conditions is 0.85 – 0.94. The failure modes of aggregate can be divided into four types, which are deflected winding crack, crack arrest, crack adsorbed by aggregate, and crack through aggregate. In this paper, deflected winding crack is the main failure mode in the numerical simulation.

Key words: concrete fracture; aggregate concrete; crack evolution; acoustic emission characteristics; statistical damage; damage degree; numerical simulation

1 研究背景

裂隙作为材料的固有特性,广泛存在于岩石和混凝土中,对材料的物理力学性质影响巨大^[1-4]。在复杂的应力状态下会导致裂隙的扩展贯通,使材料的物理力学参数弱化^[5-8],极限条件下会发生结构破坏。因此,对于裂隙复杂应力条件下的开裂及裂纹扩展路径的把握是正确认识混凝土损伤机理及防治混凝土断裂破坏的前提。

国内外学者对于含裂隙混凝土断裂特性已进行了大量有益的研究探索工作,如王靖荣等^[9]对不同相对切口深度下的混凝土预切缝试样进行不同冻融循环次数下的三点弯曲试验,分别从宏、细观视角进行了研究;安阳等^[10]基于颗粒流离散元程序 PFC,对干湿循环下的石膏劣化效应展开研究,研究表明干湿循环对石膏劣化程序影响巨大;吴聪等^[11]对有侧压的混凝土试样进行了动态劈拉试验,并基于统计损伤理论改进了 Mazars 劈拉本构模型;熊学玉等^[6]基于内聚力的损伤模型,将以往只能计算拉伸破坏拓展到单轴压缩的损伤模拟。上述研究揭示了含裂隙混凝土的断裂损伤特性,但实际上混凝土内部存在不同粒径、不同百分比含量的混凝土骨料,关于含骨料混凝土的研究,胡大琳等^[12]利用 Matlab 编程实现了二维尺度下的骨料混凝土随机模型并进行了数值模拟;许岳周等^[13]对再生骨料与再生骨料混凝土的基本性能进行了系统的试验研究,回归分析了再生骨料混凝土的弹性模量及抗压强度的理论计算公式;任志刚等^[14]针对含骨料混凝土细观结构的多相性及不确定性,编制了二维混凝土骨料的随机生成及投放算法与程序,对含骨料混凝土的力学特性进行了研究分析。但是,以往的研究内容局限于均质或非均质混凝土含裂隙条件下的裂纹扩展贯通规律,或是仅仅针对骨料混凝土的破坏特性,而较少有综合研究含裂隙的骨料混凝土的损伤过程及其机理特性^[15-19]。

本文基于混凝土的统计损伤本构模型,首先建立了含裂隙混凝土的骨料模型,基于统计损伤理论对不同裂隙倾角、不同骨料含量的混凝土立方体算

例进行了数值分析,同时基于混凝土的损伤本构提出了混凝土损伤度的概念,基于声发射数值规律对不同情况下的混凝土损伤度进行了分析,研究成果为正确认识和评价混凝土损伤断裂特性规律提供了一定的参考。

2 统计损伤理论

2.1 破坏准则

脆性材料在单轴压缩下,其强度及破坏特性方程可以表达如下:

$$\begin{cases} S_t = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{8(\sigma_1 + \sigma_3)} & \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_1} \geq -\frac{1}{3} \right) \\ S_t = -\sigma_3 & \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_1} < -\frac{1}{3} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_1 、 σ_3 为大、小主应力,MPa; S_t 为岩体试样的抗压强度,MPa。

对于含裂隙岩石材料在单向压缩情况下, $\sigma_3 = 0$,因此由公式(1)可知:

$$\sigma_1 = 8S_t \quad (2)$$

为了能够将 Griffith 理论与 Mohr – Coulmb 理论进行统一,将公式(2)用正应力 σ 与剪应力 τ 表达为如下形式:

$$\tau^2 = 4S_t(S_t - \sigma) \quad (3)$$

式中: S_t 为单轴抗拉强度,MPa; τ 为剪切应力,MPa。

2.2 细观损伤理论

对于单轴压缩荷载下,混凝土的损伤断裂条件根据公式(1) ~ (3) 进行判别,为充分考虑到混凝土单元破裂后的力学特性,将破坏单元转化为能够继续承受压力的“接触单元”,根据 Lemaitre 等价理论^[15],混凝土的细观损伤方程可以表达如下:

$$\sigma = E\varepsilon = E_0(1 - D)\varepsilon \quad (4)$$

式中: E_0 和 E 分别为混凝土破坏前和混凝土损伤过程中任意时刻的弹性模量,MPa; D 为损伤程度; ε 为应变。

因此,细观单元的典型本构曲线如图 1 所示。单元在考虑细观损伤情况下,在未达到单轴强度(压缩强度 σ_c ,拉伸强度 σ_t)之前,单元为完全的线弹性体,

未有损伤产生,因此表现在图1的强度曲线上,为压缩弹性段与拉伸弹性段的直线段,随着荷载的持续增大,细观单元达到拉伸极限或者是压缩极限,单元发生破坏,强度突然下降,表现为图1所示的拉伸屈服段或者是压缩屈服段,此时单元发生破坏,但是任然有残余拉伸强度(σ_{tr})或者是残余压缩强度(σ_{cr})。

单轴拉伸情况下,损伤变量表达式为:

$$D = \begin{cases} 0 & (\varepsilon \geq \varepsilon_t) \\ 1 - \frac{\lambda_t \varepsilon_t}{\varepsilon} & (\varepsilon_t > \varepsilon \geq \varepsilon_{tu}) \\ 1 & (\varepsilon < \varepsilon_{tu}) \end{cases} \quad (5)$$

单轴压缩情况下,损伤变量表达式为:

$$D = \begin{cases} 0 & (\varepsilon < \varepsilon_c) \\ 1 - \frac{\lambda_c \varepsilon_c}{\varepsilon} & (\varepsilon_c \leq \varepsilon < \varepsilon_{cu}) \\ 1 & (\varepsilon \geq \varepsilon_{cu}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: λ_t 为拉伸模量; ε_t 为极限拉伸应变; ε 为拉伸应变; λ_c 为压缩模量; ε_c 为极限压缩应变。式中的变量参见图1。

2.3 混凝土非均质理论

1939年,Weibull首先提出利用统计数学来描述材料非均质特性的方法,即著名的Weibull统计模型^[16-17]:

$$\phi(\alpha) = \frac{m}{\alpha_0} \cdot \left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^{m-1} \cdot e^{-\left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^m} \quad (7)$$

式中: $\phi(\alpha)$ 为基元分布密度; α 为基元体力学参数; α_0 为力学均值; m 为形状参数,为均质性表征参数。

3 模型建立与计算工况

3.1 模型建立

为探究含骨料混凝土不同裂隙倾角组合下的裂隙演化规律以及混凝土材料的物理力学特性,利用RFPA软件建立如图2所示的试样计算模型。试样尺寸为350 mm × 350 mm,裂隙长度为50 mm,承受单轴压缩荷载,边界设置4 mm/s的位移边界。

3.2 计算工况

计算工况。计算工况分为A、B两组共11个工况,各工况计算参数见表1。其中骨料的粒径最大为17.5 mm,最小粒径为3.5 mm,服从正态分布。单轴压缩的加载步长为 4×10^{-6} m。

3.3 参数确定

数值模拟细观参数与试验的对应性体现在与试验破坏过程的对应关系上,需要通过试验的实测数

据,不断调整数值模拟的细观参数,以达到对应的目的。本文通过素混凝土立方体试样的室内单轴压缩试验,得到混凝土的应力-应变曲线,根据试验结果调整数值模拟的细观参数,调整后的数值模拟细观参数见表2,数值模拟与室内试验的应力-应变曲线对比见图3。

表1 数值模型计算工况

工况	裂隙倾角/(°)	骨料含量/%
A	A1	45
	A2	45
	A3	45
	A4	45
B	B1	0
	B2	15
	B3	30
	B4	45
	B5	60
	B6	75
	B7	90

表2 材料基本参数

参数名称	参数值
弹性模量/MPa	8690
抗压强度均值/MPa	200
压拉比	10
内摩擦角/(°)	24.7
泊松比	0.33
密度/(kg · m ⁻³)	2600
均值度系数	2.5

4 结果与分析

4.1 裂纹扩展过程分析

为方便叙述及展示,本文直接给出数值模拟的各计算工况试样最终破坏图和对应的声发射图,如图4所示。图中各工况的左图为试样最终破坏图,右图为对应的声发射图;红色圆圈代表拉伸破坏,白色圆圈代表剪切破坏。

根据图4所示,总体而言,预制裂隙改变了骨料混凝土试样的裂纹演化规律,裂纹从预制裂隙的尖端产生并沿着最大主应力方向扩展,此为“翼裂纹”,当“翼裂纹”扩展一段长度后,在预制裂隙反向出现“反翼裂纹”。同时,骨料作为混凝土内部强度较大的“异质体”,裂纹扩展难以穿过骨料,大多数裂纹是绕骨料进行扩展,使得裂纹出现分叉、弯曲,最终形成“X”形扩展形态。

对于相同裂隙倾角、不同骨料含量百分比情况下,骨料含量百分比越大,试样破坏后的裂纹扩展越充分,同时裂纹的分叉现象越明显;对于相同骨料含量、不同裂隙倾角情况下,裂隙倾角改变了翼裂纹的扩展角度,但对于试样的整体破坏模式影响不大。

由声发射规律可知,预制裂隙尖端首先产生剪切破坏(白色圆圈),随后形成的翼裂纹与反翼裂纹为拉剪复合破坏(即白色圆圈与红色圆圈相间)。

4.2 不同工况单轴强度统计

对各计算工况的试样峰值强度进行统计,统计结果见图 5。

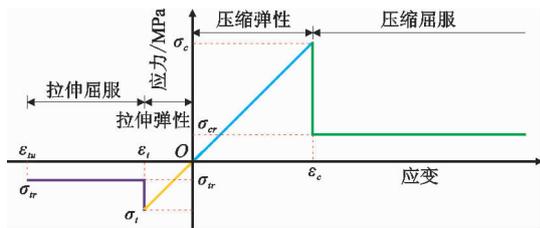


图 1 混凝土细观单元单轴压缩本构曲线

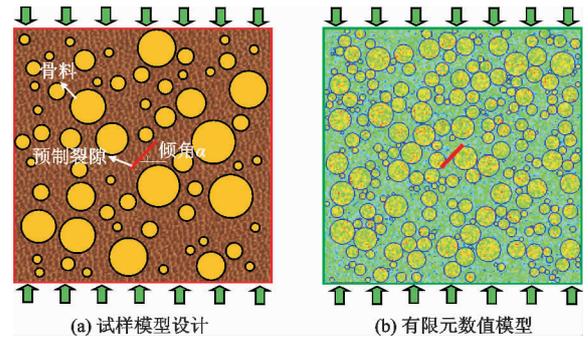


图 2 含预制裂隙的试样模型设计及数值模型

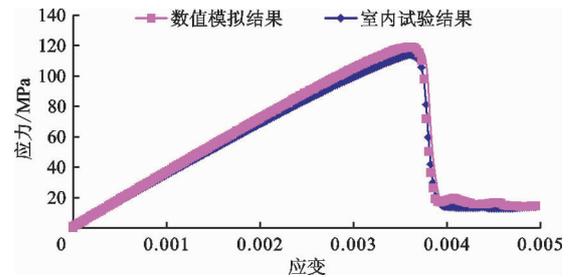


图 3 数值模拟与室内试验的混凝土应力 - 应变曲线对比

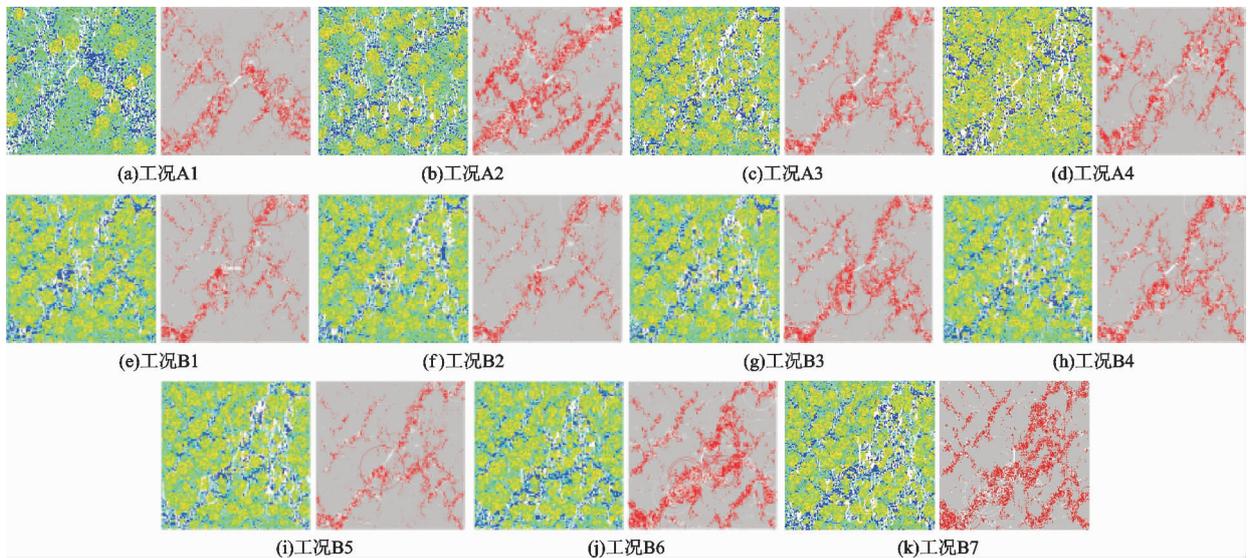


图 4 数值模拟的各计算工况混凝土试样最终破坏图及声发射图

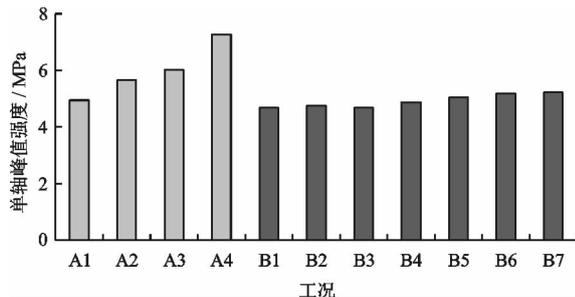


图 5 不同计算工况下的混凝土试样峰值荷载统计

由图 5 可见,对于相同骨料含量、不同裂隙倾斜

角工况(工况 B),随着预制裂隙倾角的增大,试样的峰值强度总体上也逐渐增大,但变化幅度较小,将工况 B7 与工况 B1 相比,其峰值强度增幅约为 11.54%。

但是对于相同裂隙倾斜角、不同骨料含量工况(工况 A)而言,骨料百分比为 10%、30%、50% 以及 70% 时(工况 A1 ~ A4),相应的峰值强度增长百分比分别为 1.43%、16.0%、23.4% 以及 49.0%。可见骨料含量对于混凝土力学特性的影响要远大于裂隙倾角的影响。

4.3 基于声发射的混凝土损伤本构及裂隙演化特性

为从机理上探究骨料混凝土的损伤演化特性, 本文将基于数值模拟中的声发射特性及损伤理论对混凝土裂隙演化的损伤特性进行研究分析。前人研究表明, 声发射表征了混凝土材料的位错及断裂^[18], Kachanov^[19]认为: 材料内部的损伤度 D 与断裂截面损伤面积为 A_m 情况下的声发射振铃数 N_m 及无损截面面积 A 完全断裂所产生的振铃数 N 有关, 表达式如下:

$$D = \frac{N_m}{N} \quad (8)$$

Wadley 等^[20]认为, 混凝土无法完全破坏, 因此改进了损伤度的定义如下:

$$D = (1 - \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_p}) \frac{N_m}{N} \quad (9)$$

式中: σ_{cr} 为混凝土的残余压缩强度, MPa; σ_p 为混凝土的单轴抗压强度, MPa。

因此可以根据数值模拟中的声发射特性, 建立相应的混凝土单轴压缩的损伤本构模型^[21]:

$$\sigma = E_0 \varepsilon (1 - D) = E_0 \varepsilon (1 - (1 - \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_p}) \frac{N_m}{N}) \quad (10)$$

式中: σ 为应力, MPa; ε 为应变; E_0 为混凝土破坏前弹性模量, MPa。

由公式(8)定义的损伤度, 对工况 A1 进行分析, 得到如图 6 所示的损伤度随应变的变化关系曲线, 并展示了不同损伤变化阶段混凝土试样的裂纹

发展状态。

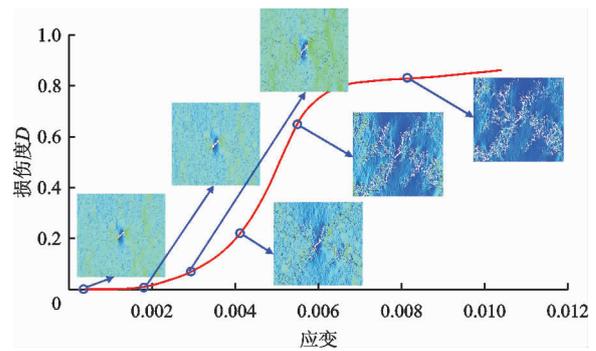


图 6 工况 A1 混凝土试样损伤度随应变的变化关系曲线

由图 6 可知, 加载过程中混凝土试样的损伤变化呈现 4 个阶段: (1) 线弹性变形阶段。此阶段发生在混凝土加载初期, 混凝土内部不出现损伤, 对应于混凝土的应力 - 应变曲线为线弹性段, 此阶段混凝土发生纯弹性变形; (2) 裂纹萌生阶段。此阶段裂纹缓慢生长, 形成明显的“翼形裂纹”, 同时损伤度也在缓慢增大, 损伤度 - 应变曲线呈现“下凹”趋势; (3) 裂纹加速扩展阶段。此阶段损伤度急剧增大, 混凝土内部裂纹发展较为迅速且充分, “翼裂纹”与“反翼裂纹”形成典型的“X”型交叉裂隙; (4) 损伤平稳发展阶段。此阶段混凝土丧失承载力, 损伤度平稳发展。

图 7 为各计算工况下的混凝土试样的损伤度随应变的变化曲线, 各工况的最大损伤度统计见表 3。

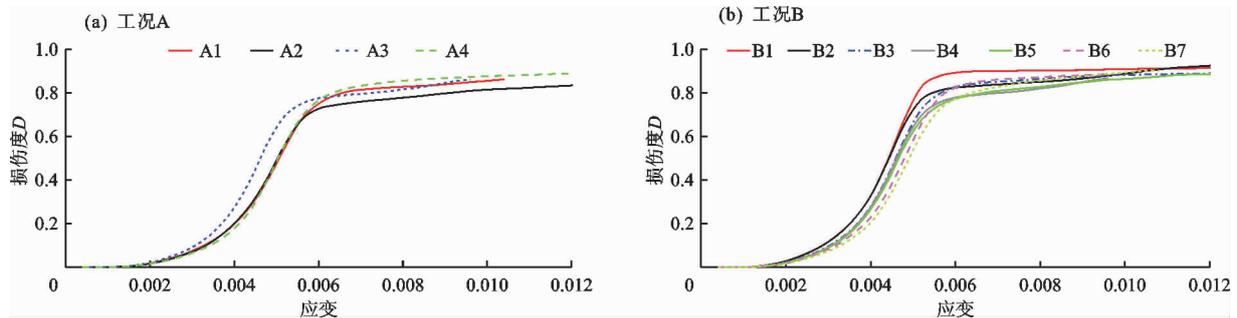


图 7 各计算工况混凝土试样损伤度随应变的变化曲线

表 3 不同工况最大损伤度统计

计算工况	最大损伤度	计算工况	最大损伤度
A1	0.86	B3	0.91
A2	0.85	B4	0.86
A3	0.86	B5	0.91
A4	0.90	B6	0.88
B1	0.91	B7	0.90
B2	0.94		

由图 7 和表 3 可知, 骨料含量百分比越大, 最终的最大损伤度也越大, 对应的最大应变也越大; 裂隙倾角较小时, 易产生较大的损伤度; 各工况下的损伤度 - 应变规律总体一致; 不同工况下的最大损伤度范围为 0.85 ~ 0.94。

5 讨论

通过本文的数值模拟可以发现, 含骨料混凝土

预制裂隙扩展存在“翼裂纹”与“反翼裂纹”两种裂纹扩展模式,骨料的存在对裂纹扩展起到“阻碍”作用,极少情况裂纹扩展会“穿透”骨料而发生破坏,以下分别就“翼裂纹”扩展模型及骨料破坏形式进行详细讨论。

5.1 压剪裂隙扩展模型

对于含预制裂纹的扩展问题,已有较多的研究成果,也较为成熟。预制裂纹的扩展模式如图 8 所示。裂纹扩展模式主要有“翼裂纹”和“反翼裂纹”。

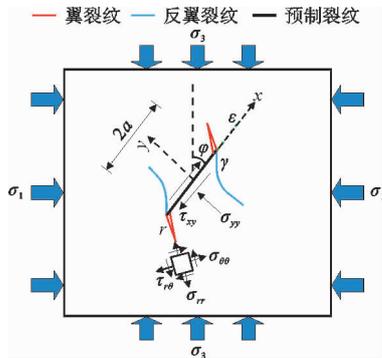


图 8 混凝土预制裂纹的扩展模式

考虑到试件的双向应力状态,远场应力 σ_{yy} 和 τ_{xy} 可以表示为:

$$\sigma_{yy} = \sigma_1 \sin^2 \varphi + \sigma_3 \cos^2 \varphi \quad (11)$$

$$\tau_{xy} = (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \varphi \cos \varphi \quad (12)$$

式中: σ_1 和 σ_3 分别为最大主应力和最小主应力, MPa; φ 为预制裂纹与垂直方向的夹角。

预制裂纹表面的有效剪应力可以表达成为:

$$\tau_{xy} = (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \varphi \cos \varphi - \mu (\sigma_1 \sin^2 \varphi + \sigma_3 \cos^2 \varphi) \quad (13)$$

裂纹尖端的两个应力强度因子可以表达成为:

$$K_I = \sigma_{yy} \sqrt{\pi a} = (\sigma_1 \sin^2 \varphi + \sigma_3 \cos^2 \varphi) \sqrt{\pi a} \quad (14)$$

$$K_{II} = \tau_{xy} \sqrt{\pi a} = [(\sigma_1 - \sigma_3) \sin \varphi \cos \varphi - \mu (\sigma_1 \sin^2 \varphi + \sigma_3 \cos^2 \varphi)] \sqrt{\pi a} \quad (15)$$

在受压载荷作用下,由于裂纹上、下表面之间的相对滑移,拉应力沿 θ 角方向出现,从而导致裂纹的萌生和扩展。翼裂纹从裂纹尖端扩展,翼裂纹萌生的最大拉应力准则可以表达成为:

$$\frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \varepsilon} \Big|_{\varepsilon=\varepsilon_0} = 0, \quad \frac{\partial^2 \sigma_{\theta\theta}}{\partial \varepsilon^2} \Big|_{\varepsilon=\varepsilon_0} < 0 \quad (16)$$

反翼裂纹属于滑移裂纹,因此最大剪应力准则可以用于反翼裂纹的萌生:

$$\frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial \varepsilon} \Big|_{\varepsilon=\varepsilon_0} = 0, \quad \frac{\partial^2 \sigma_{r\theta}}{\partial \varepsilon^2} \Big|_{\varepsilon=\varepsilon_0} < 0 \quad (17)$$

5.2 含骨料混凝土的破坏模式讨论

图 9 为含骨料混凝土裂纹扩展破坏模式的数值模拟及试验结果。由图 9(a) 数值模拟结果可知,骨料之间的裂纹扩展主要存在 4 种模式:(1)偏转绕行,即裂纹扩展至骨料周围并不会穿过骨料,而是绕着骨料进行扩展;(2)止裂,即裂纹扩展到骨料处便停止扩展;(3)裂纹被骨料吸附,即骨料与水泥基质接触部分存在应力集中,裂纹扩展至骨料附近便被骨料所吸附;(4)裂纹直接穿过骨料,即裂纹的扩展应力较大(即 I 型应力强度因子较大),导致裂纹直接劈穿骨料。

上述 4 种模式中,偏转绕行和裂纹被骨料吸附为骨料混凝土破坏的主要模式,这两种破坏模式也被大多试验者所观察到。文献[22]给出了试验中典型的绕骨料破坏模式,如图 9(b) 所示,但是也存在裂纹止裂与裂纹穿过骨料的破坏模式,这些阻碍裂纹扩展的因素使得材料的抗压强度变大,与本文数值模拟中骨料百分比含量越大,抗压强度越大的规律所一致。

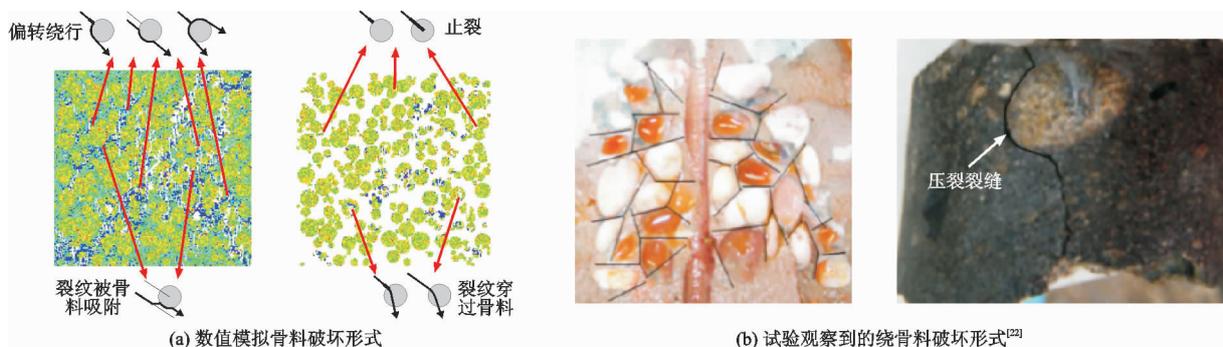


图 9 含骨料混凝土裂纹扩展破坏模式的数值模拟及试验结果

6 结论

(1) 不同工况下混凝土的裂隙演化呈现“X”型

扩展,由“翼形裂纹”与“反翼形裂纹”共同组成。

(2) “翼裂纹”萌生及扩展主要破坏模式为拉伸破坏,“反翼裂纹”的萌生是由于剪切破坏产生,随

后扩展模式为拉剪复合破坏。

(3)混凝土中预制裂隙的倾角越大,骨料含量百分比越大,则试样的峰值强度也越大,但是前者对混凝土抗压强度的增幅要小于后者。

(4)定义了损伤度的概念,加载过程中混凝土的损伤变化经历4个阶段:线弹性变形阶段、裂纹萌生阶段、裂纹加速扩展阶段及损伤平稳发展阶段。骨料含量百分比越大,预制裂隙倾角越小,则最大损伤度越大。不同计算工况下的损伤度变化范围为0.85~0.94。

(5)含骨料混凝土的破坏模式分为4种,即偏转绕行、止裂、裂纹被骨料吸附和裂纹穿过骨料。本文数值模拟中,偏转绕行是主要的破坏模式。

参考文献:

- [1] 胡少伟,陆俊,范向前. 混凝土损伤断裂性能试验研究进展[J]. 水利学报,2014,45(S1):10-18.
- [2] 张楚汉,唐欣薇,周元德,等. 混凝土细观力学研究进展综述[J]. 水力发电学报,2015,34(12):1-18.
- [3] 朱万成,赵启林,唐春安,等. 混凝土断裂过程的力学模型与数值模拟[J]. 力学进展,2002,32(4):579-598.
- [4] 杜修力,金浏. 混凝土静态力学性能的细观力学方法述评[J]. 力学进展,2011,41(4):411-426.
- [5] 李晓琴,陈建飞,陆勇. K&C局部损伤混凝土材料模型在精细有限元模拟中的应用[J]. 云南大学学报(自然科学版),2015,37(4):541-547.
- [6] 熊学玉,肖启晨. 基于内聚力模型的混凝土细观拉压统一数值模拟方法[J]. 水利学报,2019,50(4):448-462.
- [7] 李忠献,刘泽锋. 混凝土动态本构模型综述[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2015,48(10):853-863.
- [8] 李杰,任晓丹. 混凝土随机损伤力学研究进展[J]. 建筑结构学报,2014,35(4):20-29.
- [9] 王靖荣,陈有亮,傅喻. 冻融环境下不同预制裂缝混凝土断裂性能研究[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(2):178-185.
- [10] 安阳,晏鄂川,李兴明,等. 石膏岩干湿循环细观模拟及损伤本构模型[J]. 地质科技情报,2019,38(4):240-246.
- [11] 吴聪,彭刚,肖洋,等. 有侧压混凝土动态劈拉力学性能试验研究[J]. 长江科学院院报,2019,36(3):126-132.
- [12] 胡大琳,张立兴,陈定市. 二维细观随机混凝土模型的建立和应用[J]. 长安大学学报(自然科学版),2017,37(3):53-63.
- [13] 许岳周,石建光. 再生骨料及再生骨料混凝土的性能分析与评价[J]. 混凝土,2006(7):41-46.
- [14] 任志刚,徐彬,李培鹏,等. 二维混凝土骨料随机生成与投放算法及程序[J]. 土木工程与管理学报,2015,32(1):1-6.
- [15] 李汉章,束加庆,王海军,等. 单轴压缩下砂岩断裂试验及细观统计损伤模型[J]. 人民珠江,2019,40(1):36-42.
- [16] 卞康,肖明. 水工隧洞衬砌水压致裂过程的渗流-损伤-应力耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(S2):3769-3776.
- [17] 张科,刘享华,杨红宣,等. 含孔洞裂隙岩体灌浆后力学特性的物理试验与数值模拟[J]. 水文地质工程地质,2019,46(1):79-85+110.
- [18] 刘学文,林吉中,袁祖贻. 应用声发射技术评价材料疲劳损伤的研究[J]. 中国铁道科学,1997,18(4):74-81.
- [19] KACHANOV L M. Rupture time under creep conditions[J]. International Journal of Fracture, 1999, 97(1-4):11-18.
- [20] WADLEY H N G, SCRUBY C B, SPEAKE J H. Acoustic emission for physical examination of metals[J]. International Metals Reviews, 1980, 25(1):41-64.
- [21] 周军华,杨坤,房凯,等. 裂隙对含孔洞砂岩力学及损伤演化特征的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2019,50(4):968-975.
- [22] 李连崇,李根,孟庆民,等. 砂砾岩水力压裂裂缝扩展规律的数值模拟分析[J]. 岩土力学,2013,34(5):1501-1507.