

全级配混凝土静动态轴拉断裂试验

张亚洲, 钟 红, 李春雷, 王海波, 李德玉, 李志远

(中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘 要: 以高混凝土坝抗震为背景, 全级配混凝土断裂试验存在欠缺。为研究全级配混凝土静态和动态荷载作用下的断裂特性, 对含有环切预制裂缝的圆柱体全级配混凝土进行了单轴拉伸试验。通过位移加载方式控制, 获得了静态和动态加载条件下的试件荷载-裂缝张开位移曲线, 据此得到了峰值荷载并计算了吸能能力、断裂能和特征长度, 进而综合基于扩展有限元的数值模拟求得试件的断裂韧度。结果表明: 所测试件均大致沿预制裂缝方向开裂, 但静态加载时多表现为骨料与水泥砂浆界面开裂, 而快速加载时裂缝来不及沿着最薄弱的方向发展, 而可能切断粗骨料, 断面上可看到有较多粗骨料破坏。相比于静态加载情形, 动态荷载作用下试件的峰值荷载、吸能能力、断裂能和断裂韧度均显著提高, 而特征长度略微减小。

关键词: 全级配混凝土; 轴拉断裂试验; 动态荷载; 断裂韧度; 扩展有限元法

中图分类号: TV431; TV313 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2024)02-0569-10

网络出版时间: 2023-12-05



混凝土作为非均质材料, 其表面和内部存在大量微裂缝甚至宏观缺陷^[1-3]。混凝土坝中的裂缝可能损害大坝的整体性, 改变其受力状态, 降低其耐腐蚀性, 从而缩短其使用寿命^[4]。在实际工程中, 大多数混凝土结构承受地震和动水压力等动态荷载作用, 例如重力坝、核电站的保护壳和火力发电厂的冷却塔等, 这些动态荷载的存在往往具有不确定性和复杂性, 对混凝土结构的承载能力和耐久性有重要的影响^[5-8]。而对混凝土抗裂性能的研究有利于延缓、减轻混凝土的开裂以及对已开裂混凝土采取止裂措施, 从而提高混凝土结构的耐久性和安全性^[9]。

1961 年, 南非 University of Southampton 的 Kaplan 基于 Griffith 理论对混凝土进行断裂研究, 至今已有 60 余年^[10]。张开型裂缝(I型)由于容易引起低应力断裂而更危险, 因此也成为试验研究重点。三点弯曲和楔入劈拉试验由于有计算断裂韧度的公式, 因此被学者广泛运用到断裂试验研究中。Xu 等^[11]通过三点弯曲试验考虑断裂过程区提出了混凝土 K_R 曲线的数值方法。Dai 等^[12]利用数字图像法和声发射技术对含有预制裂缝的三点弯曲试验对混凝土断裂过程区进行研究。Zhang 等^[13]基于声发射技术对

含有预制裂缝的三点弯曲试验捕捉到了起裂时刻。Ruiz 等^[14]通过开展三点弯曲试验, 发现随加载速率的增加, 混凝土断裂韧度和断裂能增大, 这种趋势在低加载速率下由于孔隙和多孔结构中存在自由水引起的粘性效应而相对较低; 在高速率下, 由于惯性效应的影响, 以及由于冲击荷载下产生许多微裂纹, 这些裂纹同时扩展并且没有足够的时间寻找最小能量或最小阻力路径, 而被迫沿更大阻力的最短路径进行扩展, 因此断裂韧度和断裂能增加显著。

上述试验采用的是小尺寸湿筛试件, 而在实际工程中大都采用全级配混凝土。由于全级配混凝土试件浇筑困难, 因此常对湿筛试件的断裂参数进行修正近似得到全级配混凝土断裂参数。但是该做法存在局限性, 主要是因为全级配混凝土中水泥砂浆和骨料的含量与湿筛混凝土有所差异^[15], 湿筛后的试件内部组份发生变化。Li 等^[16-17]和赵志方等^[18]均对全级配混凝土和湿筛混凝土进行了直接拉伸试验, Li 等发现全级配混凝土断裂能大于湿筛混凝土, 约为 1.40~2.23 倍, 而赵志方等发现全级配混凝土断裂能更小, 约为湿筛混凝土的 0.69 倍, 由此发现全级配混凝土和湿筛混凝土的断裂参数存在差异。此

收稿日期: 2023-07-07。 修订日期: 2023-08-18。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51979292)。

第一作者: 张亚洲(1995—), 男, 博士研究生。

通信作者: 钟 红(1981—), 女, 博士, 正高级工程师。

Received date: 2023-07-07. Revised date: 2023-08-18.

First author: ZHANG Yazhou (1995—), male, Doctoral candidate.

E-mail: zyz999310@163.com

Correspondent author: ZHONG Hong (1981—), female, Ph.D., Professor.

E-mail: zhonghong@iwhr.com

外,学者针对全级配混凝土和湿筛混凝土强度关系进行研究^[19–21],但是由于试验数据较少,并不能达成共识,因此开展全级配混凝土的断裂试验研究具有必要性。李庆斌等和管俊峰等^[15,22]对全级配大坝混凝土进行楔入劈拉试验,发现起裂断裂韧度和断裂能随龄期的增加而增加。Li等^[23]通过楔入劈拉试验对含有预制裂缝的全级配大坝混凝土进行断裂试验研究,发现其夏季浇筑的混凝土断裂能高于冬季,其中养护 28 d 的混凝土试件最为明显。管俊峰等^[24]和高小峰等^[25]对含有预制裂缝的全级配混凝土进行楔入劈拉试验,发现韧带高度与骨料最大粒径的比值超过 6 时,起裂和失稳断裂韧度趋于稳定。Xu等^[26]通过楔入劈拉试验进行初始缝高比对混凝土断裂特性研究,发现断裂韧度和断裂能与初始缝高的变化不敏感。Zhao^[3]和 Amirreza^[27]通过楔入劈拉试验和三点弯曲试验发现大坝混凝土全级配混凝土的断裂能随试件的高度增加而增大。

虽然目前三点弯曲试验形式比较成熟,计算断裂韧度和断裂能较简便,但是当制作成较大的全级配混凝土试件时,不易搬运且在搬运过程中可能会发生折断,更重要的是试件由于自重对试验结果产生影响。楔入劈拉试验可以忽略自重产生的影响且降低对试验刚度的要求,通过施加压力的方式经过传力装置转变为使预制裂缝张开的拉力,形成张开型裂缝,安装较简单,但是由于竖向荷载会引起附加力矩从而会对裂缝尖端的应力场产生影响,可能会影响试验的断裂参数。混凝土作为准脆性材料,其抗压能力较强^[28],抗拉能力较弱^[29–30]。作为确定混凝土拉伸特性最直接的方法,单轴拉伸试验所测的抗拉强度是最接近真实强度^[31–32]。肖诗云等^[33–35]和闫东明等^[36]通过对混凝土开展动态单轴拉伸试验发现抗拉强度随应变率的提高而增加。Chen等^[37]利用分离式霍普金森压杆研究了高应变率下混凝土的拉伸性能。Wang等^[38]对沙牌拱坝钻芯取样,通过开展轴拉试验得到了动态抗拉强度。张艳红等^[39–40]开展全级配混凝土动态轴拉断裂试验,得到了抗拉强度的动态提高因子,并获得了轴拉全曲线段的软化段。钟红等^[41]分别对混凝土、岩石和混凝土/岩石界面试件开展了不同应变率下的轴拉断裂试验,发

现 3 种材料的抗拉强度随应变率的提高而增加。轴拉试件制备简便,同样适用于研究混凝土断裂的特性。但是全级配混凝土轴拉断裂试验存在端部应力集中和试验过程中可能出现偏心现象,难度大,目前有关该研究鲜少可见。

本研究以高混凝土坝抗震为背景,为测定全级配混凝土的断裂特性,通过 MTS 液压式伺服机,针对 10^{-6} s^{-1} 和 10^{-3} s^{-1} 2 种应变速率下含环切预制裂缝缺口的高为 450 mm、直径为 450 mm 的圆柱体全级配混凝土试件进行单轴拉伸试验。采用位移加载方式,研究了全级配混凝土在静态和动态荷载作用下峰值荷载、吸能能力、断裂能和特征长度,采用扩展有限元法计算了断裂韧度,并考虑了试验过程中的偏心现象,为评价抗震安全提供依据。

1 实验

1.1 试件制备

采用预制环向裂缝的圆柱体轴向拉伸试验开展全级配混凝土断裂性能的测试。试件直径 450 mm,高度 450 mm。表 1 为全级配混凝土配合比。石子选用大石、中石和小石 3 种类型,其中小石粒径为 5~20 mm,中石粒径为 20~40 mm,大石粒径为 40~80 mm。在制作的钢制试模中进行试件的浇筑,运用平板振捣器和插入式振捣棒进行充分振捣密实后将上表面进行磨平处理。对试件覆盖湿棉被以防止水分流失,养护 3~4 d 后拆模,之后将试件放置温度 20 ℃、湿度 98% 的养护室养护至 90 d,运抵实验室后预制裂缝。采用切割机在混凝土试件中部高度处进行切割,形成环形预制裂缝,缝深为 45 mm,预制裂缝长度和韧带长度之比为 0.2。图 1 为全级配混凝土轴拉断裂试验示意图。表 3 展现了实际测试时的混凝土龄期。

在制作大尺寸圆柱体试件时同时制作 3 个湿筛立方体伴随试件,边长 150 mm,在同等条件下养护。90 d 龄期后对立方体试件开展单轴压缩试验,得到全级配混凝土物理力学参数^[42]如表 2 所示。

1.2 装置

采用的设备为中国水利水电科学研究院建置的 15 MN 动静态材料试验机。其中主机通过电信号将实时记录到的数据传递给的控制器及主控计算机。作动

表 1 全级配混凝土配合比
Table 1 Fully-graded concrete proportions

$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Water	Stones grain size/mm			Sand	Cement	Fly ash	Water reducing agent
	5–20	20–40	40–80				
91.00	463.03	463.03	618.37	619.01	141.56	60.67	1.6

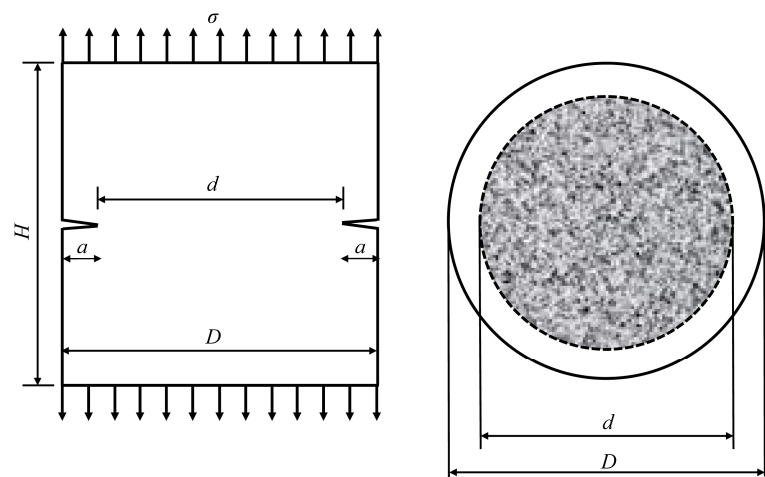


图 1 全级配混凝土轴拉断裂试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the axial tensile fracture test for fully-graded concrete

表 2 全级配混凝土物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of fully-graded concrete

E/GPa	ν	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	f_c/MPa	f_{st}/MPa	
				Strain rate/ (10^{-6} s^{-1})	Strain rate/ (10^{-3} s^{-1})
42.171	0.167	2 400	50.44	2.76	4.40

$E, \nu, \rho, f_c, f_{st}$ denoted elastic modulus, Poisson's ratio, density, uniaxial compressive strength and axial tensile strength, respectively.

器行程为±300 mm，最大速度 50 mm/s。249.51 Swivels 球铰接头最大荷载 1 000 kN。球铰接头可以消除偏心所造成的弯矩，适于开展轴向拉伸试验。采用 2.5 MN 荷载传感器及磁致伸缩(Temposonic)数字位移传感器。试验机采用 MTS FlexTest 数字控制系统，可支持 32 通道返回信号控制，还提供用户可编程多通道测量信号运算值进行控制，如实时分析计算选取多个应变或位移测量值中的最大值。试验机拥有 40 通道数采系统，支持最高采样频率为 6 144 Hz。

1.3 加载方案

为比较全级配混凝土在静动态荷载作用下的断

裂性能，设定应变率为 10^{-6} s^{-1} 作为准静态工况。根据地震特征应变率范围，设定应变率为 10^{-3} s^{-1} 作为动力工况，由表 3 可知具体试验方案。采用位移加载方式控制，可获得完整的荷载–位移曲线。

试验过程中试验机记录荷载、加载点位移的变化过程。此外，在裂缝处沿环向每 90° 布置 1 个跨缝位移引伸计，共 4 个引伸计，标距约 50 mm。位移引伸计测量方向与试件长度方向平行，用来测定加载过程中裂缝张开口位移随荷载的变化曲线。邻近每个位移引伸计均布置激光位移计，标距约 350 mm，用来测量试件整体变形。图 2 为全级配混凝土轴拉试验引伸计和激光位移计布置方式。

表 3 试验方案

Table 3 Test program

Specimen No.	Age/d	Strain rate/ s^{-1}	Displacement loading rate/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	H/mm	D/mm	$2a/\text{mm}$
C01	201	10^{-6}	0.002	450	450	90
C02	201	10^{-3}	2.000	450	450	90
C03	203	10^{-3}	2.000	450	450	90

2 结果与讨论

2.1 破坏形态

图 3 为全级配混凝土试件断裂面照片。由图 3 可见，3 个试件均沿预制裂缝面发生断裂。对于准

静态荷载作用下的试件，断裂面较为粗糙且裸露较多的粗骨料，断面上多见骨料与基质剥离的界面，骨料断裂的情况少见。动态荷载作用下的试件，断裂面略显平整，断面上除存在骨料与基质剥离的界面外，可看出多个粗骨料被拉断。究其原因，在荷

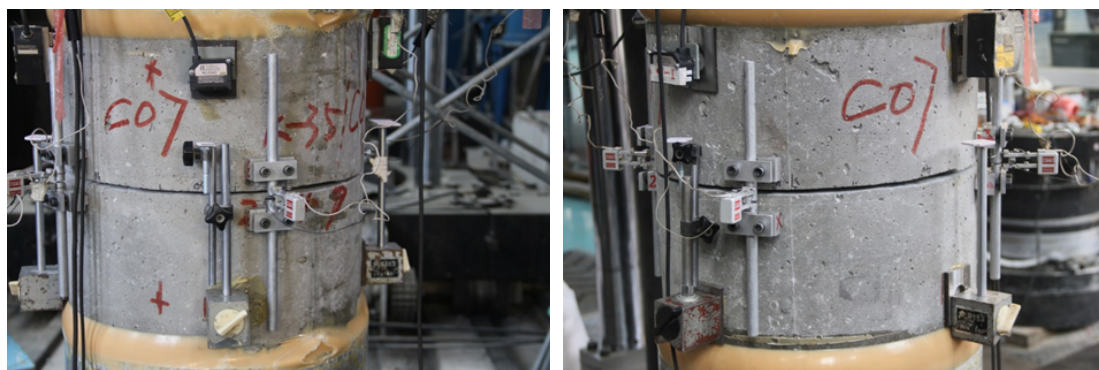


图2 全级配混凝土轴拉试验引伸计和激光位移计布置方式

Fig. 2 Arrangement of elongation and laser displacement gauges for axial tensile testing of fully-graded concrete

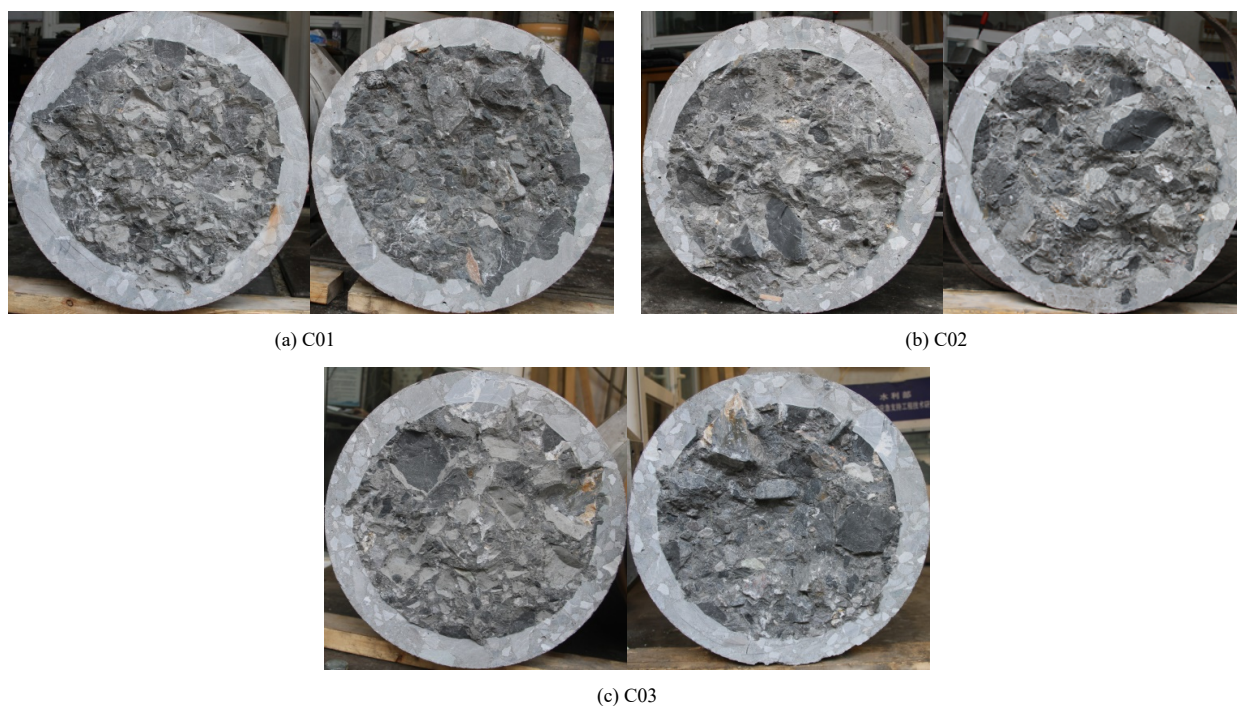


图3 全级配混凝土试件断裂面

Fig. 3 Fracture surface of fully-graded concrete specimens

载慢速增加的过程中, 裂缝倾向于沿着薄弱面, 即骨料与基质的界面扩展。而在动态荷载作用下, 裂缝来不及沿最薄的部分发展, 而是沿着最短路径扩展导致试件破坏。

2.2 荷载-位移曲线

试验通过位移引伸计得到了 3 个试件的荷载(P)–裂缝张开口位移(CMOD), 以及通过激光位移计得到了 3 个试件的荷载(P)–加载点位移(δ)。峰值荷载后, 动态荷载作用下激光位移计测得的数据出现异常舍去。图 4 为 3 个试件的荷载–位移曲线。

由图 4 可见, 3 个试件在达到峰值荷载前的荷载–位移曲线的曲线形式相近, 随荷载的增加, 裂缝张开口位移和加载点位移增大, 且呈线性增加的

关系。随着荷载继续增加, 静、动态荷载作用下的曲线分离, 静态荷载作用下的曲线斜率降低, 荷载率先达到峰值。动态荷载作用下的荷载继续增大, 最终缓慢增加到峰值。当荷载达到最大值, 试件发生破坏, 荷载会迅速降低, CMOD 和 δ 也会急剧增加。

表 4 为全级配混凝土轴拉试验结果。由表 4 可知 3 个试件的峰值荷载。以 C01 试件峰值荷载为基准, C02 和 C03 试件的峰值荷载分别提高了 59.05% 和 57.97%。取 C02 和 C03 试件峰值荷载的平均值作为动态荷载作用下的峰值荷载, 即 283.45 kN。与准静态荷载作用相比, 动态荷载作用下的峰值荷载提高了 58.51%, 表明峰值荷载存在应变率效应。

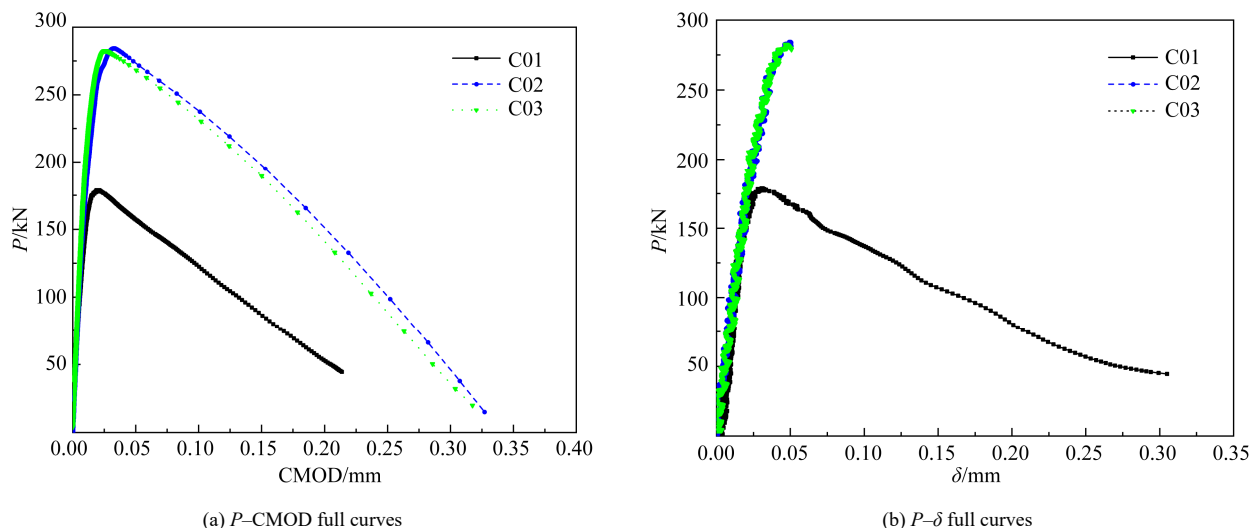


图 4 荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves

表 4 全级配混凝土轴拉试验结果

Table 4 Axial tension test results for fully-graded concrete

Specimen No.	Peak loads/kN	Energy absorption capacity/(N·m ⁻¹)	Fracture energy/(N·m ⁻¹)	Characteristic length/mm
C01	178.82	23.19	235.59	1 304.23
C02	284.41	62.29	538.38	1 172.73
C03	282.48	51.68	519.32	1 131.34

2.3 吸能能力和断裂能

试件的吸能能力定义为在达到最大应力前应力-应变曲线中上升段曲线与应变轴所围成的面积。该试验是通过 P -CMOD 曲线上升段的面积与断裂带净面积的比值来计算，代表试件在达到峰值荷载，即发生破坏前所吸收的能量。试件的断裂能是指在承受拉伸荷载作用下，裂缝扩展单位面积所需要的吸收的能量[式(1)]。该试验是通过 P -CMOD 全曲线段所围面积与断裂带净面积的比值来计算，代表试件整个断裂过程中所需要吸收的能量。

$$G_f = \int_0^{\varepsilon_0} \sigma d\varepsilon \quad (1)$$

其中： G_f 为混凝土断裂能； σ 为应力； ε 为应变； ε_0 为裂缝最终张开口应变值。

表 4 为计算得到的吸能能力和断裂能。同样以 C01 试件为基准，C02 和 C03 试件的吸能能力分别提高了 168.61%和 122.85%，断裂能分别提高了 128.52%和 120.43%。试验前期的刚度值是定值，理论上讲吸能能力强弱和峰值荷载直接相关，但是由于混凝土的不均匀性导致 2 个试件在动态荷载作用下吸能能力存在差异。从 P -CMOD 曲线也可发现，C03 试件更早达到峰值荷载，且峰值荷载略低，故

C03 试件的吸能能力略低于 C02。取 C02 和 C03 试件的平均值作为动态荷载作用下的吸能能力和断裂能，即 56.98 N/m 和 528.85 N/m。与准静态荷载作用相比，动态荷载作用下的吸能能力和断裂能分别提高了 145.75%和 124.48%，表明吸能能力和断裂能同样与应变率相关。

混凝土试件在动态荷载作用下的强度增加的原因是在沿预制裂缝扩展的过程中直接贯穿粗骨料，而来不及通过水泥砂浆与粗骨料结合的薄弱部分。究其本质，混凝土材料本身的惯性力和不均匀性使得试件在动态荷载作用下的强度提高^[43-44]。在准静态荷载作用下，混凝土试件应变能释放和聚集速度较慢，裂缝沿着材料薄弱部分发生扩展。而动态荷载作用下，混凝土试件应变能释放和聚集速度加快，裂缝可能会穿过材料强度较高的部分，从而导致强度提高。当应变率超过 10 s^{-1} 时，混凝土试件强度的提高主要与材料的惯性效应相关^[45-46]。

2.4 特征长度

关于评判混凝土断裂过程中脆性指标大小，本研究运用 Hillerborg 提出的特征长度这一指标，表征混凝土在扩展过程中的变形能力。材料的特征长度越小，表明该材料越脆，更易发生断裂，计算公式：

$$L_{ch} = \frac{E_c \cdot G_f}{f_t^2} \quad (2)$$

其中： L_{ch} 为特征长度； E_c 为弹性模量； f_t 为混凝土轴心抗拉强度。

由表 4 可知 3 个试件特征长度的大小。与 C01 试件相比，C02 和 C03 试件的特征长度减小了 10.08%和 13.26%。取 C02 和 C03 试件特征长度的平均值作

为动态荷载作用下的特征长度, 即 1 152.04 mm。与准静态荷载作用相比, 动态荷载作用下的特征长度减小了 11.67%。

2.5 断裂韧性

目前对于轴拉断裂试验计算断裂韧性没有解析解, 因此需要采用试验与数值模拟相结合的办法进行计算和分析。1996 年 Melenk 等^[47]提出单位分解法, 1999 年 Belytschko 等^[48]基于最小重构网格来研究弹性体模型的裂缝扩展, 2000 年 Daux 等^[49]在研究多裂缝问题时引入连续函数, 并命名扩展有限元法(XFEM)。薛河采用扩展有限元法计算三维应力强度因子, 并与解析解进行对比发现精度较高^[50], 因此本工作的数值模拟方法选用扩展有限元法。

相比于传统有限元法, 扩展有限元法以单位分解法为理论基础并在模型中裂缝是可以穿过网格。图 5 为扩展有限元法的各单元示意图。此时裂缝两侧

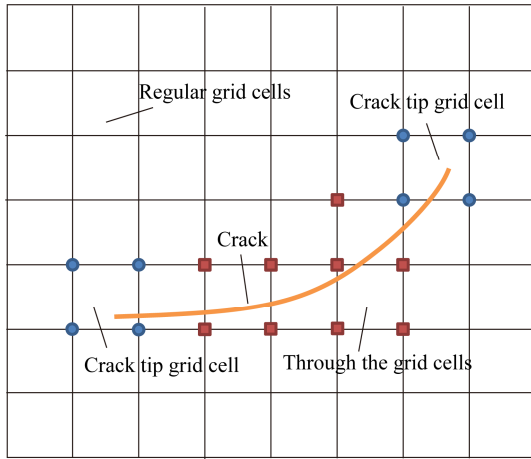


图 5 扩展有限元法的各单元示意图

Fig. 5 Schematic diagram of each cell of the extended finite element method

由于出现跳跃现象, 其位移场不再连续, 并且裂缝尖端会出现应力集中现象, 基于此通过引入加强函数以反映间断性, 包括裂缝尖端的应力渐进函数和间断跳跃函数, 用于增加节点自由度。

扩展有限元法常通过 J 积分法来计算应力强度因子, J 积分在裂缝尖端周围的曲线曲面积分存在路径无关情况, 其断裂韧性指标以能量形式呈现, 而相互积分法作为其扩展可以合理、自然的描述总能量的释放^[51], 因此可以运用在扩展有限元法中, 通过引入辅助场(在公式中记为状态 2)与真实场(在公式中记为状态 1)进行叠加得到 J 积分分量, 称为相互作用积分, 其表示式如下:

$$M^{(1,2)} =$$

$$\int_A \left[W^{(1,2)} \sigma_{1j} - \sigma_{ij}^{(1)} \frac{\partial u_i^{(2)}}{\partial x_j} - \sigma_{ij}^{(2)} \frac{\partial u_i^{(1)}}{\partial x_j} \right] q_j dA \quad (3)$$

$$W^{(1,2)} = \sigma_{ij}^{(1)} \varepsilon_{ij}^{(2)} = \sigma_{ij}^{(2)} \varepsilon_{ij}^{(1)} \quad (4)$$

$$J = J^{(1)} + J^{(2)} + \frac{2}{E^*} (K_I^{(1)} K_I^{(2)} + K_{II}^{(1)} K_{II}^{(2)}) \quad (5)$$

$$E^* = \begin{cases} E & \text{平面应力问题} \\ \frac{E}{1-\nu^2} & \text{平面应变问题} \end{cases} \quad (6)$$

其中: A 为围绕裂缝尖端的任意闭合回路; $W^{(1,2)}$ 为应变能密度, 具体表达式如式(4); q_j 为闭合回路的单位法向向量, 方向指向外侧。

利用 ABAQUS 软件对全级配混凝土轴拉试件建模, 图 6 为均匀分布力下的有限元型及最大主应力云图。模型下表面所有节点施加 y 方向约束, 中心点施加全约束, 对上表面施加 y 方向均匀分布力。由表 2 可知材料参数, 基于线弹性本构理论, 计算裂缝扩展前的应力强度因子, 根据试验峰值荷载计

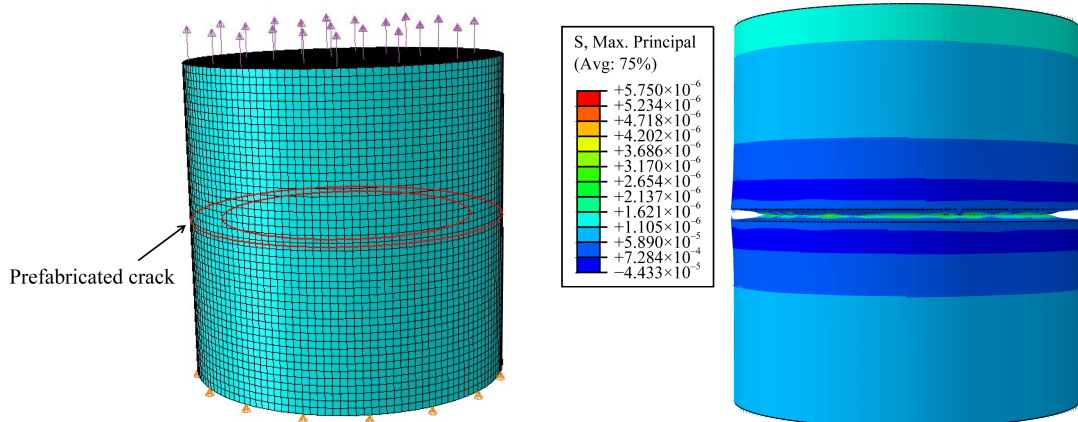


图 6 均匀分布力下的有限元型及最大主应力云图(变形放大系数 2000)

Fig. 6 Finite element type and maximum principal stress cloud for uniformly distributed forces (deformation magnification factor 2000)

算出的应力强度因子即为断裂韧度。钟红等^[41]和闫东明^[46]发现在地震这类中低应变率下试件动强度提高主要受材料的不均匀性的影响，而惯性效应可以忽略，因此本试验 C02 和 C03 试件不考虑惯性效应对断裂韧度的影响。

试验过程中利用球铰使得试件对中，但是从激光位移计测得的数据发现偏心现象仍然存在。将试

验出现的偏心现象考虑在数值模拟中研究对断裂韧度的影响，只需将不考虑偏心现象的有限元模型中上表面 y 方向均匀分布力变为平面位移荷载。图 7 为平面位移荷载下的有限元模型及最大主应力云图。平面位移荷载是根据试验中峰值荷载时刻激光位移计测得的位移拟合得到。表 5 为峰值荷载时激光位移计的位移值。由表 5 可知拟合方程。

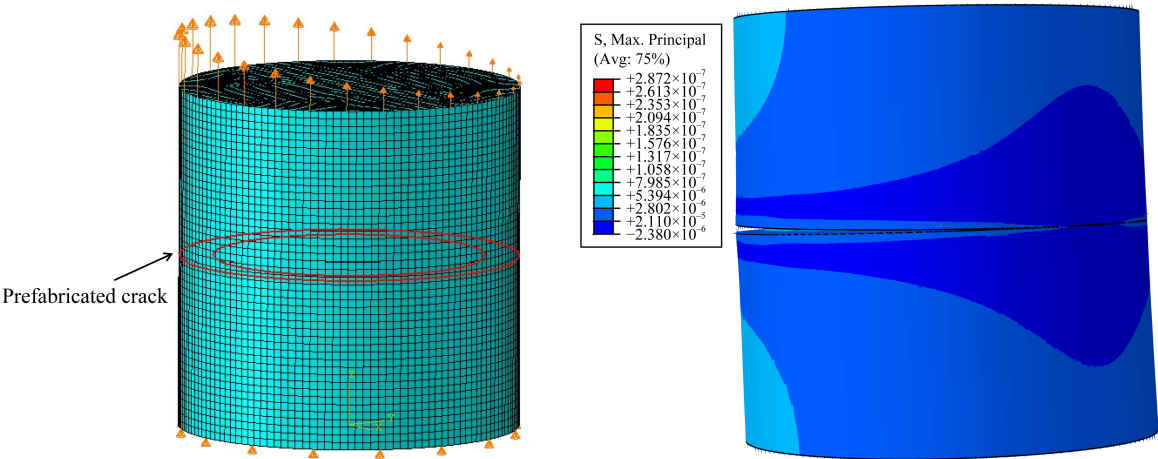


图 7 平面位移荷载下的有限元模型及最大主应力云图(变形放大系数 300)

Fig. 7 Finite element model and maximum principal stress cloud under plane displacement loading (deformation magnification factor 300)

表 5 峰值荷载时激光位移计的位移值

Table 5 Displacement values of the laser displacement gauge at peak load

Specimen No.	Laser displacement meter/mm				Plane displacement equations
	1	2	3	4	
C01	0.008 100	0.014 100	0.033 100	0.029 890	$x+0.528y+18\,000z=0.370\,8$
C02	0.008 960	0.015 300	0.056 000	0.058 700	$x+1.142y+11\,842z=0.438\,0$
C03	0.018 156	0.040 180	0.032 075	0.013 031	$1.736y+32\,330z=0.812\,0$

表 6 为是否考虑试验过程中偏心现象计算得到的断裂韧度。由表 6 可知，相比于准静态荷载，动态荷载作用下的断裂韧度增加，且与峰值荷载的增长趋势接近。对于准静态荷载作用下，相比于不考虑偏心，考虑偏心得到的断裂韧度提高了 71.98%。取 C02 和 C03 试件断裂韧度的平均值作为动态荷载作用下的断裂韧度，即 2 种情况下的断裂韧度分别为 $0.865\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 和 $1.387\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。与不考虑偏心相比，动态荷载作用下考虑偏心现象的断裂韧度提高了 60.35%。

由此可以发现，对于轴拉断裂试验在计算断裂韧度时需要考虑偏心现象带来的影响。将考虑试验过程中偏心现象得到的结果作为全级配混凝土的断裂韧度，准静态荷载作用下为 $0.939\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ，动态荷载作用下为 $1.387\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ，提高了 47.71%。

表 6 断裂韧度的对比			
Table 6 Comparison of fracture toughness			
Specimen No.	Peak load/kN	Fracture toughness/(MPa·m ^{1/2})	
		Eccentricity not considered	Eccentricity considered
C01	178.82	0.546	0.939
C02	284.41	0.868	1.394
C03	282.48	0.862	1.379

3 结论

为研究全级配混凝土在静态荷载作用下的断裂特性，利用 MTS 试验机在 10^{-6} s^{-1} 和 10^{-3} s^{-1} 应变率下，对含有环切预制裂缝的圆柱体全级配混凝土试件开展了单轴拉伸试验。得到如下结论：

1) 所有试件在扩展过程中均沿预制裂缝方向。相比于准静态荷载作用，动态荷载作用下试件的断

裂面略显平整, 多个粗骨料被拉断。全级配混凝土裂缝扩展在准静态荷载作用下遵循耗能最少原则, 在动态荷载作用下遵循路径最短原则。

2) 动态荷载作用下全级配混凝土试件的峰值荷载、吸能能力、断裂能和断裂韧度相比于静态荷载分别提高了 58.51%、145.75%、124.48%和 47.71%, 而特征长度减小了 11.67%。

3) 断裂韧度的计算通过试验与数值模拟耦合得到, 数值模拟时考虑了试验过程中的偏心现象, 相比于不考虑偏心现象的均匀加载方式, 准静态荷载作用提高了 71.98%, 动态荷载作用下提高了 60.35%。

参考文献:

- [1] DONG W, ZHOU X M, WU Z M. On fracture process zone and crack extension resistance of concrete based on initial fracture toughness[J]. *Constr Build Mater*, 2013, 49: 352–363.
- [2] WU Z M, RONG H, ZHENG J J, et al. An experimental investigation on the FPZ properties in concrete using digital image correlation technique[J]. *Eng Fract Mech*, 2011, 78(17): 2978–2990.
- [3] ZHAO Z F, KWON S H, SHAH S P. Effect of specimen size on fracture energy and softening curve of concrete: Part I. Experiments and fracture energy[J]. *Cem Concr Res*, 2008, 38(8–9): 1049–1060.
- [4] OTSUKA K, DATE H. Fracture process zone in concrete tension specimen[J]. *Eng Fract Mech*, 2000, 65(2–3): 111–131.
- [5] BRARA A, KLEPACZKO J R. Fracture energy of concrete at high loading rates in tension[J]. *Int J Impact Eng*, 2007, 34(3): 424–435.
- [6] CADONI E, SOLOMOS G, ALBERTINI C. Concrete behaviour in direct tension tests at high strain rates[J]. *Mag Concr Res*, 2013, 65(11): 660–672.
- [7] MINDESS S, BANTHIA N, YAN C. The fracture toughness of concrete under impact loading[J]. *Cem Concr Res*, 1987, 17(2): 231–241.
- [8] MINDESS S, BENTUR A. A preliminary study of the fracture of concrete beams under impact loading, using high speed photography[J]. *Cem Concr Res*, 1985, 15(3): 474–484.
- [9] ROSSI P, BOULAY C, TAILHAN J L, et al. Macrocrack propagation in concrete specimens under sustained loading: Study of the physical mechanisms[J]. *Cem Concr Res*, 2014, 63: 98–104.
- [10] KAPLAN M F. Crack propagation and the fracture of concrete[J]. *J Am Concr*, 1961, 58(11): 591–610.
- [11] XU F, WU Z M, ZHENG J J, et al. Crack extension resistance curve of concrete considering variation of FPZ length[J]. *J Mater Civ Eng*, 2011, 23(5): 703–710.
- [12] DAI S H, LIU X L, NAWNIT K. Experimental study on the fracture process zone characteristics in concrete utilizing DIC and AE methods[J]. *Appl Sci*, 2019, 9(7): 1346.
- [13] ZHANG Y, SHI J F, ZHENG J Y. A method of fracture toughness J_{IC} measurement based on digital image correlation and acoustic emission technique[J]. *Mater Des*, 2021, 197: 109258.
- [14] RUIZ G, ZHANG X X, YU R C, et al. Effect of loading rate on fracture energy of high-strength concrete[J]. *Strain*, 2011, 47(6): 518–524.
- [15] 管俊峰, 李庆斌, 吴智敏, 等. 现场浇筑大坝混凝土起裂断裂韧度研究[J]. *水利学报*, 2014, 45(12): 1487–1492.
- [16] GUAN Junfeng, LI Qingbin, WU Zhimin, et al. *J Hydraul Eng*, 2014, 45(12): 1487–1492.
- [17] DENG Z C, LI Q B, FU H A. Comparison between mechanical properties of dam and sieved concretes[J]. *J Mater Civ Eng*, 2008, 20(4): 321–326.
- [18] LI Q, DENG Z, FU H. Effect of aggregate type on mechanical behavior of dam concrete[J]. *ACI Mater J*, 2004, 101(6): 483–492.
- [19] 赵志方, 张小刚, 周厚贵, 等. 长江三峡大坝混凝土双 K 断裂参数试验研究[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2007, 24(4): 363–367.
- [20] ZHAO Zhifang, ZHANG Xiaogang, ZHOU Hougui, et al. *J Shenzhen Univ Sci Eng*, 2007, 24(4): 363–367.
- [21] 古丽娜, 田军涛, 孔祥芝, 等. 基于全级配试件性能的大坝混凝土抗裂性分析[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(12): 178–183.
- [22] GU Lina, TIAN Juntao, KONG Xiangzhi, et al. *Water Resour Hydropower Eng*, 2019, 50(12): 178–183.
- [23] 沈璐, 施林林, 宋玉普. 三级配混凝土及湿筛混凝土单轴动态拉伸性能试验研究[J]. *大连理工大学学报*, 2014, 54(4): 452–460.
- [24] SHEN Lu, SHI Linlin, SONG Yupu. *J Dalian Univ Technol*, 2014, 54(4): 452–460.
- [25] 郑丹, 韩巍巍, 张寅. 水工全级配与湿筛混凝土强度关系的研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2011, 9(5): 10–14.
- [26] ZHENG Dan, HAN Weiwei, ZHANG Yin. *J Water Resour Archit Eng*, 2011, 9(5): 10–14.
- [27] LI Q B, GUAN J F, WU Z M, et al. Fracture behavior of site-casting dam concrete[J]. *ACI Mater J*, 2015, 112(1): 11–20.
- [28] LI Q B, GUAN J F, WU Z M, et al. Equivalent maturity for ambient temperature effect on fracture parameters of site-casting dam concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2016, 120: 293–308.
- [29] 管俊峰, 李庆斌, 吴智敏, 等. 确定现场浇筑全级配水工混凝土双 K 断裂参数的最小试件尺寸[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2016, 24(6): 1219–1231.
- [30] GUAN Junfeng, LI Qingbin, WU Zhimin, et al. *J Basic Sci Eng*, 2016, 24(6): 1219–1231.
- [31] 高小峰, 胡昱, 杨宁, 等. 低热水泥全级配混凝土断裂试验及尺寸效应分析[J]. *工程力学*, 2022, 39(7): 183–193.
- [32] GAO Xiaofeng, HU Yu, YANG Ning, et al. *Eng Mech*, 2022, 39(7): 183–193.
- [33] XU S, REINHARDT H, WU Z, et al. Comparison between the double-K fracture model and the two parameter fracture mode[J]. *Otto Graf J*, 2003, 14: 131–158.
- [34] GHAEMMAGHAMI A, GHAEMIAN M. Large-scale testing on specific fracture energy determination of dam concrete[J]. *Int J Fract*, 2006, 141(1–2): 247–254.
- [35] DENG Z C, LI Q B, FU H A. Comparison between mechanical properties of dam and sieved concretes[J]. *J Mater Civ Eng*, 2008, 20(4): 321–326.
- [36] JALASUTRAM S, SAHOO D R, MATSAGAR V. Experimental investigation of the mechanical properties of basalt fiber-reinforced concrete[J]. *Struct Concr*, 2017, 18(2): 292–302.
- [37] ZIMMERMANN T, LEHKÝ D, STRAUSS A. Correlation among selected fracture-mechanical parameters of concrete obtained from experiments and inverse analyses[J]. *Struct Concr*, 2016, 17(6): 1094–1103.
- [38] GUO Y Z, CHEN X D, YANG H Q, et al. Experimental study on direct tension behavior of concrete through combined digital image correlation and acoustic emission techniques[J]. *Struct Concr*, 2019,

- 20(6): 2042–2055.
- [32] 李冬, 金浏, 杜修力, 等. 骨料级配对二维模型混凝土单轴抗拉强度影响的理论研究[J]. 工程力学, 2017, 34(6): 64–72.
LI Dong, JIN Liu, DU Xiuli, et al. Eng Mech, 2017, 34(6): 64–72.
- [33] 肖诗云, 林皋, 王哲, 等. 应变率对混凝土抗拉特性影响[J]. 大连理工大学学报, 2001, 41(6): 721–725.
XIAO Shiyun, LIN Gao, WANG Zhe, et al. J Dalian Univ Technol, 2001, 41(6): 721–725.
- [34] 肖诗云, 田子坤. 历经荷载历史混凝土动态受拉损伤试验研究[J]. 工程力学, 2010, 27(1): 123–128.
XIAO Shiyun, TIAN Zikun. Eng Mech, 2010, 27(1): 123–128.
- [35] 肖诗云, 张剑. 荷载历史对混凝土动态受压损伤特性影响试验研究[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 943–952.
XIAO Shiyun, ZHANG Jian. J Hydraul Eng, 2010, 41(8): 943–952.
- [36] 闫东明, 林皋, 王哲, 等. 不同应变速率下混凝土直接拉伸试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(6): 97–103.
YAN Dongming, LIN Gao, WANG Zhe, et al. China Civ Eng J, 2005, 38(6): 97–103.
- [37] CHEN X D, SHAO Y, XU L Y, et al. Experimental study on tensile behavior of cement paste, mortar and concrete under high strain rates[J]. J Wuhan Univ Technol Mater Sci Ed, 2015, 30(6): 1268–1273.
- [38] WANG H B, LI C L, TU J, et al. Dynamic tensile test of mass concrete with Shapai Dam cores[J]. Mater Struct, 2016, 50(1): 1–11.
- [39] 张艳红, 胡晓, 杨陈. 全级配混凝土轴拉应力-变形全曲线试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2017, 15(2): 96–100.
ZHANG Yanhong, HU Xiao, YANG Chen. J China Inst Water Resour Hydropower Res, 2017, 15(2): 96–100.
- [40] 张艳红, 胡晓, 杨陈, 等. 全级配混凝土动态轴拉试验[J]. 水利学报, 2014, 45(6): 720–727.
ZHANG Yanhong, HU Xiao, YANG Chen, et al. J Hydraul Eng, 2014, 45(6): 720–727.
- [41] 钟红, 马振洲, 胡少伟, 等. 混凝土/花岗岩界面动态断裂性能的轴拉试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(11): 152–158.
ZHONG Hong, MA Zhenzhou, HU Shaowei, et al. J Vib Shock, 2019, 38(11): 152–158.
- [42] 张亚洲. 全级配混凝土及与玄武岩界面静态轴拉断裂研究[D]. 中国水利水电科学研究院, 2023.
ZHANG Yazhou. Research on static and dynamic axial tensile fracture of fully-graded concrete and its interface with basalt. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2023.
- [43] 党发宁, 焦凯, 潘峰. 混凝土抗折动强度及其极值研究[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(3): 422–428.
DANG Faning, JIAO Kai, PAN Feng. Explos Shock Waves, 2016, 36(3): 422–428.
- [44] 党发宁, 潘峰, 焦凯, 等. 不均匀脆性材料动强度提高机理及破坏形态研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(3): 111–118.
DANG Faning, PAN Feng, JIAO Kai, et al. Earthq Eng Eng Dyn, 2015, 35(3): 111–118.
- [45] ROSSI P. Influence of cracking in the presence of free water on the mechanical behaviour of concrete[J]. Mag Concr Res, 1991, 43(154): 53–57.
- [46] 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 Dongming. Experimental and theoretical study on the dynamic properties of concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [47] MELENK J M, BABUŠKA I. The partition of unity finite element method: Basic theory and applications[J]. Comput Meth Appl Mech Eng, 1996, 139(1–4): 289–314.
- [48] BELYTSCHKO T, BLACK T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing[J]. Int J Numer Meth Eng, 1999, 45(5): 601–620.
- [49] DAUX C, MOËS N, DOLBOW J, et al. Arbitrary branched and intersecting cracks with the extended finite element method[J]. Int J Numer Meth Eng, 2000, 48(12): 1741–1760.
- [50] 薛河, 王双, 王正, 等. 基于扩展有限元法的三维裂纹前缘应力强度因子计算方法[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(3): 1–5.
XUE He, WANG Shuang, WANG Zheng, et al. Ship Sci Technol, 2022, 44(3): 1–5.
- [51] 王德法, 高小云, 师俊平. 三维固体问题中 M 积分与总势能变化关系的研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2009, 7(1): 36–38.
WANG Defa, GAO Xiaoyun, SHI Junping. J Water Resour Archit Eng, 2009, 7(1): 36–38.

Static and Dynamic Axial Tensile Fracture of Fully-Graded Concrete

ZHANG Yazhou, ZHONG Hong, LI Chunlei, WANG Haibo, LI Deyu, LI Zhiyuan
(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Extended Abstract

Introduction As a non-homogeneous material, concrete has a large number of microcracks and even macro-defects on its surface and inside. Cracks in concrete dams can impair the integrity of the dam, change its stress state, and shorten its service life. In practical engineering, most concrete structures are subjected to dynamic loads such as earthquakes and dynamic water pressure. Dynamic loading has uncertainty and complexity, which has an important impact on the load-carrying capacity and durability of concrete structures. Research on the crack resistance of concrete is conducive to delaying and mitigating the cracking of concrete as well as taking measures to stop the cracking of cracked concrete, thus improving the durability and safety of concrete structures.

Dam concrete is usually fully-graded concrete, subject to various conditions usually uses wet-screening concrete to carry out experimental research, but its test results do not fully reflect the mechanical properties of fully-graded concrete due to the sieve out of the large aggregate. It is thus necessary to carry out the fracture test of fully-graded concrete. In addition, many concrete high dams in China are constructed in the southwest and northwest earthquake areas, and the existing research on the fracture under dynamic

loading is seriously lack. This paper was to carry out tests during rapid loading to obtain the dynamic fracture parameters of fully-graded concrete.

Methods Fully-graded concrete specimens were prepared using the same mix ratio as the Baihetan Arch Dam. The 15MN dynamic and static material was used and an axial tensile fracture test was carried out. The specimens had a diameter of 450 mm and a height of 450 mm. The central part of the concrete specimen was cut by a cutting machine to form a ring prefabricated crack with a depth of 45 mm and a ratio of the length of the prefabricated crack to the length of the ligament of 0.2.

To compare the fracture properties of fully-graded concrete under static and dynamic loading, a strain rate of 10^{-6} s^{-1} was set as the quasi-static condition. According to the range of seismic characteristic strain rate, a strain rate of 10^{-3} s^{-1} was set as the dynamic working condition. The test was controlled *via* displacement loading, and the change process of load and loading point displacement was recorded during the test. At the cracks, one trans-seam displacement extensometer was arranged at every 90° degree along the ring, with a total of four extensometers at a distance of 50 mm, and the direction of the displacement extensometers was parallel to the length of the specimen, which was used to determine the change curve of the crack opening displacement with the load in the loading process. Laser displacement gauges were arranged adjacent to each of the displacement gauges at a distance of 350 mm to measure the overall deformation of the specimen. The fracture toughness was calculated *via* the experimental and numerical data, where the numerical method was an extended finite element method, and the eccentricity phenomenon that occurred during the test was also taken into account.

Results and discussion All the specimens are fractured along the prefabricated crack surface. For the specimens under quasi-static loading, the fracture surface is rough and exposed more coarse aggregate, and the interface between aggregate and matrix stripping mostly appears on the fracture surface, and the fracture of aggregate is rare. In the specimens under dynamic loading, the fracture surface is slightly flat, and in addition to the interface between the aggregate and matrix stripping, a number of coarse aggregates are pulled off in the section. During the slow increase in load, the cracks tend to expand along the weak surface, *i.e.*, the aggregate-matrix interface. Under dynamic loading, the cracks do not have time to develop along the weakest part but expand along the shortest path, leading to damage to the specimen.

The increase in the strength of concrete specimens under dynamic loading is because the process of extension along the prefabricated cracks runs directly through the coarse aggregate, without having time to pass through the weak part of the cement mortar-coarse aggregate bond. In essence, the inertial forces and inhomogeneity of the concrete material itself lead to an increase in the strength of the specimens under dynamic loading. Under quasi-static loading, the rate of strain energy release and aggregation in concrete specimens is slower, and crack expansion occurs along the weak part of the material. In contrast, under dynamic loading, the rate of strain energy release and aggregation in concrete specimens accelerates and cracks may propagate through the stronger parts of the material, leading to an increase in strength.

Conclusions The peak load, energy absorption capacity, fracture energy, and fracture toughness of fully-graded concrete specimens under dynamic loading were increased by 58.51%, 145.75%, 124.48% and 47.71%, respectively, compared to static loading, while the characteristic length was reduced by 11.67%. The numerical simulation calculated the fracture toughness taking into account the eccentricity phenomenon during the test, which was increased by 71.98% for quasi-static loading and by 60.35% for dynamic loading, compared to the uniform loading method without taking into account the eccentricity phenomenon.

Keywords fully-graded concrete; axial tensile fracture test; dynamic loading; fracture toughness; extended finite element method