

高坝全级配混凝土断裂特性的相关性分析

石振祥¹, 夏京亮², 陈徐东¹, 杨瀚清¹, 白 银²

(1. 河海大学土木与交通学院, 南京 210098; 2. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 3. 南京水利科学研究院材料结构研究所, 南京 210098)

摘 要: 无粘结裂缝的产生可以被视为宏观裂缝发展的标志。为探究地震作用对全级配混凝土裂缝行为特征的影响, 采用一种无粘结裂缝的识别模型, 以数字图像相关技术作为试件裂缝扩展的监测手段, 对不同加载速率(0.000 1 mm/s、0.001 0 mm/s、0.010 0 mm/s)的全级配混凝土试件进行三点弯曲试验, 考虑全级配混凝土裂缝扩展的率相关性。结果表明: 对于不同加载时间间隔内的全级配混凝土试件, 峰值前后均会产生无粘结裂缝, 说明达到峰值荷载时预制裂缝处已发生开裂; 试件的破坏主要集中在荷载加载至峰值荷载的 50%以后; 相同条件下, 加载速率越慢, 无粘结裂缝出现的阶段越早, 随着加载速率增大, 裂缝呈现细而长的特征。

关键词: 全级配混凝土; 加载速率; 三点弯曲试验; 数字图像相关技术; 断裂过程区; 无粘结裂缝

中图分类号: TV431 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)08-1898-10

网络出版时间: 2023-05-05



Correlation Analysis of Fracture Characteristics of High Dam Fully-Graded Concrete

SHI Zhenxiang¹, XIA Jingliang², CHEN Xudong¹, YANG Hanqing¹, BAI Yin³

(1. College of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 3. Materials & Structural Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China)

Abstract: The development of cohesionless cracks can be regarded as a sign of macroscopic crack development. An identification model of cohesionless cracks was adopted with results of crack development by digital image correlation (DIC) method. Three-point bending tests were carried out on fully-graded concrete specimens with different loading rates (0.000 1 mm/s, 0.001 0 mm/s, 0.010 0 mm/s), considering the rate correlation of crack propagation of fully-graded concrete. The results show that for the fully-graded concrete specimens with different loading time intervals, cohesionless cracks will occur throughout the peak load, indicating that the prefabricated cracks have cracked when the peak load is reached. The cracks of the specimen is mainly concentrated after the load is loaded to 50% of the peak load. Under the same conditions, the slower the loading rate is, the earlier the unbonded cracks appear. With the increase of the loading rate, the cracks are thin and long.

Keywords: full-graded concrete; loading rate; three-point bending fracture test; digital image correlation technology; fracture process zone; cohesionless cracks

作为水利大国, 中国已经具有较为完备的大坝建造技术。目前特高混凝土拱坝高度已达到 300 m 以上。大坝内部裂缝的产生和扩展会影响大坝的正

常使用, 甚至危及国家和人民财产安全^[1-2]。研究发现, 目前大坝绝大多数均处于带裂缝工作的状态, 在已发生严重破坏的混凝土坝中, 有 1/8 是由内部

收稿日期: 2023-02-21。 修订日期: 2023-03-24。

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2600200); 国家自然科学基金面上项目(51979090); 国家重点实验室开放基金(2019CEM002)。

第一作者: 石振祥(1999—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 陈徐东(1985—), 男, 教授, 博士。

Received date: 2023-02-21. Revised date: 2023-03-24.

First author: SHI Zhenxiang (1999—), male, Master candidate.

E-mail: s923335190@163.com

Correspondent author: CHEN Xudong (1985—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: cxdong1985@163.com

裂缝引起的^[3]。率相关性指应变率对断裂韧度、断裂能、裂缝扩展速率等参数的影响,目前对混凝土断裂性能的研究已产生较多成果。Pyo 等^[4]研究发现高性能混凝土裂缝扩展速率随着应变率增大而增加;姚洁香等^[5]研究了应变率对复合试件断裂参数的影响。在大坝实际工作过程中,地震作用对大坝结构破坏较为严重,混凝土裂缝扩展和断裂性能对于加载速率存在较高的敏感性,因此研究全级配混凝土断裂性能的率相关性有助于大坝抗震安全。

当前已有部分学者对大坝混凝土进行了室内试验研究。崔博等^[6]利用超声波测定了大坝混凝土的凝结时间;沈璐等^[7]进行了湿筛二级配大坝混凝土双轴动态受压特性试验,得出湿筛混凝土双轴动态强度准则;管俊峰等^[8-9]探究了全级配和湿筛混凝土各项断裂参数的尺寸效应,确定了不产生尺寸效应的全级配混凝土双 K 断裂参数及其最小试件尺寸;高小峰等^[10]通过理论方法推求全级配混凝土的真实强度。然而,限于室内试验条件,多数室内试验采用最大骨料粒径为 40 mm 的二级配混凝土或最大骨料粒径为 80 mm 的三级配混凝土^[11]。全级配混凝土是指最大骨料粒径达到 120 mm,其粗骨料含量占混凝土质量的 60%以上,而胶凝材料仅占 8%~10%^[12]。经研究,大坝混凝土强度、断裂性能、损伤尺度等力学性能与混凝土尺寸^[13]和最大骨料粒径^[14-16]相关。全级配混凝土试件虽然与实际大体积混凝土性能状态有所差距,但其配合比相同,因此采用全级配混凝土能够在一定程度上反映大坝真实状态下的结构性能演变^[17],对于混凝土力学性能的分析更加真实可靠。

混凝土断裂过程中,通常会在断裂尖端存在一个含有微裂缝的有限区域,也就是断裂过程区(FPZ),断裂过程区存在能够阻碍裂缝张开与扩展的粘结力,对混凝土的承载能力和稳定性具有较大影响^[18]。随着荷载加载,曲线开始非线性发展,试件内部裂缝不断扩展,此时由于粘结区存在,试件裂缝处仍然能够承受部分荷载。随着裂缝进一步发展,裂缝处粘结应力减小。当粘结应力降为 0 时,无粘结裂缝形成,此时裂缝两端混凝土不产生交错,断裂位置试件不再承受荷载作用,即视为此处混凝土已经完全破坏。因此可以将无粘结裂缝的出现视

为宏观裂缝发展的标志。通过研究 FPZ 长度可以确定混凝土裂缝扩展的粘结区,从而确定无粘结裂缝的产生位置。

然而,裂缝扩展初期,由于裂缝过小无法进行观测,常规手段难以准确描述 FPZ 的形成与发展。数字图像相关技术(DIC)^[19-20]能够通过高速摄像机进行拍摄,通过比对混凝土表面不同时间内散斑相对位置变化,从而确定混凝土应力和位移变化。方致远等^[21]利用数字图像相关技术对混凝土应变场变化规律进行分析;郭嘉等^[22]利用 DIC 技术揭示了混凝土内部材料的应变变化规律;傅帅旻等^[23]借助 DIC 和声发射(AE)技术对宏观尺度下 I 型裂纹尖端的断裂过程区孕育过程进行研究;宁二强^[24]利用 DIC 技术研究了砂岩的断裂过程区变形演化特征;Dutler 等^[25]通过 DIC 技术确定了岩石断裂过程区的长度与宽度。

当前阶段,大量学者对大坝混凝土力学特性进行了研究,但是由于试验设备及实验室条件,对大体积的全级配混凝土试件研究较少。因此本工作结合 DIC 技术,对全级配混凝土开裂的率相关性进行分析,通过研究断裂过程区扩展过程,获得无粘结裂缝产生位置,从而判断试件的破坏阶段。本研究反映了地震加载范围内加载速率对全级配混凝土裂缝发育的影响规律,为大坝抗震提供一定理论依据。

1 实验

1.1 制备

采用海螺牌 P O 42.5 水泥。粉煤灰等级为 I 级。细骨料为细度模数为 2.5 的天然河砂。粗骨料主要采用玄武岩碎石,按照粒径范围分为 4 种,其中小石为 0~20 mm,中石为 20~40 mm,大石 40~80 mm,特大石 80~120 mm。减水剂采用苏博特公司生产的聚羧酸高性能减水剂。全级配混凝土配合比如表 1 所示,水灰比为 0.35,全级配混凝土基本力学性能如表 2 所示。

全级配混凝土试件尺寸为 1 700 mm×450 mm×450 mm,试件中间设有预制裂缝,缝高比设置为 0.4,预制裂缝高度为 180 mm,宽度为 2 mm。

全级配混凝土制备过程如下:先将原料称重后倒入搅拌机进行干拌;再将水与减水剂混合均匀后

表 1 全级配混凝土配合比
Table 1 Mix proportion of full graded concrete

kg/m³

Water	Cement	Sand	Little stone	Mid stone	Large stone	Extra-large stone	Fly ash	Water reducer
84	180	652	326	378	460	434	60	1.211

表 2 全级配混凝土基本力学性能

Table 2 Basic mechanical properties of fully-graded concrete

f_{cu} / MPa	f_{cp} / MPa	E / GPa
32.6	2.17	20.6

f_{cu} is compressive strength; f_{cp} is splitting strength; E is elastic modulus.

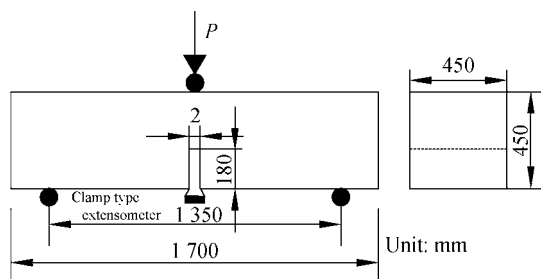
加入搅拌机；搅拌完成后，将混凝土倒入刷好油的木模具，模具底部中央位置固定一块高度为 180 mm 的钢板，以形成预制裂缝；最后脱模后在标准养护条件下养护 90 d 后待测。

1.2 数字图像相关技术

数字图像由型号为 VIC-3D HR 的高速摄像机获取，相机分辨率为 2 448 pixels×2 048 pixels，帧率为 20 Hz。DIC 技术主要是通过跟踪试件表面粒子变化获得位移参数，将 2 台高速摄像机放置在待测面一侧，从 2 个角度捕获试件表面图像，用白漆喷涂混凝土试件预制裂缝上部区域，使其为纯白色，在白漆表面喷涂黑色散斑，使用摄像机对试件跨中区域的灰度图像进行捕捉，通过对比图像参数得到试件表面变化特征，从而得到试件的整体位移变化^[26-27]。

1.3 加载

采用三点弯曲试验，由 MTS 电液伺服试验机进行试验加载，采用夹式引伸计测定裂缝张口位移 (δ_{CMOD})。试验数据由 MTS 计算机进行采集，试件安装与加载如图 1 所示，图中 P 表示外荷载作用。



P is external load action.

图 1 加载示意图

Fig. 1 Loading schematic

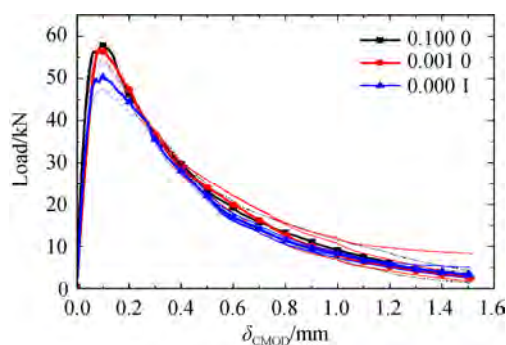
为模拟地震作用(应变率为 $10^{-6} \sim 10^{-3}/s$)对全级配混凝土试件的影响，三点弯曲试验采用 0.010 0 mm/s、0.001 0 mm/s、0.0001 mm/s 3 种不同加载速率，用以模拟低应变率下全级配混凝土内部裂缝扩展规律，每种工况准备 3 个试件。

2 断裂参数分析

2.1 荷载与裂缝张口位移的关系(P - δ_{CMOD} 响应)曲线

根据 MTS 电液伺服试验机采集的全级配混凝土

土试件加载过程中荷载与位移的数据，可以得到试件 P - δ_{CMOD} 响应曲线，为保证数据可靠性，采用 3 组试件的平均值作为试验结果，并将每组数据平均值统称为 FC-1、FC-2 和 FC-3。所得 P - δ_{CMOD} 曲线如图 2 所示，虚线表示实际荷载曲线，实线表示曲线均值。同时，为防止试验误差，将试件荷载达到峰值荷载的 5% 作为试验开始与结束的标志。表 3 为不同试件峰值荷载以及峰后曲线斜率，峰后曲线斜率为割线斜率，起点为峰值荷载，终点为材料由损伤向破坏转化的软化点。



δ_{CMOD} is fracture opening displacement

图 2 不同加载速率下全级配混凝土 P - δ_{CMOD} 曲线
Fig. 2 P - δ_{CMOD} curves of full-graded concrete under different loading Rates

加载前期， P - δ_{CMOD} 曲线近似为直线，接近峰值时，曲线开始呈非线性增长。这是因为由于预制裂缝的存在，随着荷载不断增加，预制裂缝处产生较大的应力集中，从而导致局部区域产生微小的变形或裂缝。随着荷载继续增加，独立微裂缝开始扩展并逐渐贯通，荷载越过峰值后，裂缝进入不稳定扩展阶段，微裂缝扩展贯通形成宏观裂缝，最终试件破坏。

根据曲线可以看出，对于不同加载速率，试件峰值荷载均出现在 $\delta_{CMOD}=0.100$ 0 mm 处，随着加载速率增加，峰值荷载有所上升，这是由于加载速率对于混凝土强度的增强效应^[28]。接近峰值荷载时，加载速率越慢，裂缝尖端微裂缝扩展越充分。随着加载速率的增大，峰前阶段时间减少，微裂缝的发展不完全，从而导致荷载能够继续增加。除此以外，据表 3 数据可得，峰后阶段曲线斜率也随着加载速率的增大而增大，说明峰值荷载后，加载速率大的试件内部损伤发展较快，荷载值迅速下降。

2.2 断裂韧度

断裂韧度能够反映试件抵抗裂缝扩展的能力，徐世烺等^[29]提出了水工混凝土断裂韧度 K_{IC}

表 3 试件峰值荷载
Table 3 Peak load of specimens

Mix ID	Loading rate/(mm·s ⁻¹)	Peak load/kN	Average peak load/kN	Post-peak slope	Average post-peak slope	$K_{IC}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	Average $K_{IC}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$
FC-1-1	0.01	55.10	58.03	-79.93	-75.07	5.58	6.71
FC-1-2	0.01	57.53	58.03	-74.46	-75.07	6.70	6.71
FC-1-3	0.01	61.46	58.03	-70.81	-75.07	7.84	6.71
FC-2-1	0.001	54.27	57.92	-76.02	-71.04	4.60	5.11
FC-2-2	0.001	58.89	57.92	-72.41	-71.04	5.07	5.11
FC-2-3	0.001	60.60	57.92	-64.70	-71.04	5.67	5.11
FC-3-1	0.000 1	48.86	50.32	-70.96	-69.06	3.51	3.84
FC-3-2	0.000 1	49.03	50.32	-68.63	-69.06	3.81	3.84
FC-3-3	0.000 1	53.07	50.32	-67.60	-69.06	4.21	3.84

K_{IC} is fracture toughness

的计算公式：

$$K_{IC} = \frac{1.5 \left(F_{\max} + \frac{mg}{2} \times 10^{-2} \right) \times 10^{-3} S a_c^{0.5}}{th^2} f(\alpha) \quad (1)$$

$$f(\alpha) = \frac{1.99 - \alpha(1 - \alpha) \times (2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)}{(1 + 2\alpha) \times (1 - \alpha)^{1.5}} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{a_c}{h} \quad (3)$$

其中： K_{IC} 为断裂韧度， $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ； $F_{\max}$ 为峰值荷载，kN； g 为重力加速度， 9.8m/s^2 ； h 为试件高度，m； m 为试件加载区域质量，kg； S 为试件加载跨度，m； a_c 为有效裂缝长度，m； t 为试件厚度，m； $f(\alpha)$ 为关于 α 的函数； α 为有效裂缝长度与试件高度之比。

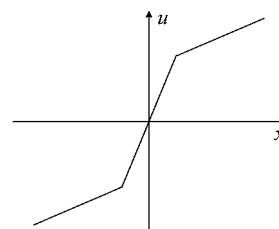
为确保试验数据的准确性，使用实际测量尺寸作为断裂韧度的计算数据，代入式(1)~式(3)，得到不同工况下全级配混凝土断裂韧度如表 3 所示。随着加载速率增大，试件断裂韧度呈上升趋势，加载速率由 0.000 1 mm/s 增加至 0.001 0 mm/s 时，断裂韧度提高了 33.1%。当加载速率达到 0.010 0 mm/s 时，断裂韧度相较于 0.000 1 mm/s 的试件提高了 74.7%。说明加载速率较快时，全级配混凝土反映出较好地阻止裂缝扩展的能力，其原因可能是加载速率较慢时，试件内部由于荷载稳步增长而产生较多微裂缝，而加载速率加快后，试件内部微裂缝发展不充分，试件受到迅速增长的荷载而在短时间内被撕裂，裂缝形态表现为细长的宏观裂缝。

3 裂缝扩展分析

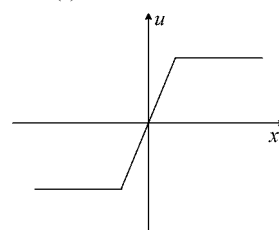
3.1 裂缝扩展模型

对裂缝断裂过程区的表征是研究混凝土裂缝断裂参数的重要手段，断裂过程区是指裂缝尖端周围一个存在大量微裂缝的区域，为了简化研究通常使

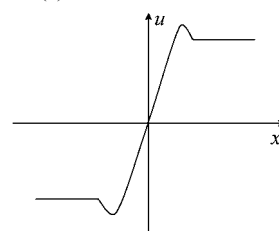
用一条主裂缝进行替代。根据 Fakhimi 等的研究，可将裂缝扩展位移表述为 3 种模式^[30-31]，相关曲线示意图如图 3 所示。



(a) Elastic stress model



(b) Unbonded crack model



(c) Material softening model

x is the horizontal actual coordinate, u is the horizontal displacement.

图 3 裂缝扩展模型^[30-31]

Fig. 3 Crack opening displacement model^[30-31]

1) 模型(a): 开始加载时，由于荷载作用，试件内部产生变形，由中心点向两端位移增大。位移曲线表现为裂缝扩展梯度曲线斜率为正值，主裂缝出现时中间存在较大梯度差，此时试件裂缝区域受到拉伸荷载作用，曲线中心的位移梯度是由裂缝尖端的应力集中引起的。

2) 模型(b): 随着荷载作用, 断裂过程区内部裂缝进一步发展, 位移梯度增大而粘结区内部粘结应力减小, 当粘结应力减小到 0 时, 断裂过程区内存在较大位移差, 而两侧区域试件位移不再随着荷载作用发生变化。位移曲线表现为裂缝扩展梯度曲线斜率为 0, 中间存在较大梯度差, 此时试件内部存在无粘结裂缝。

3) 模型(c): 无粘结裂缝产生后, 宏观裂缝开始扩展, 由于试件加载导致试件内部材料卸载, 试件内部靠近 FPZ 部分区域存在材料软化导致位移减小。位移曲线表现为裂缝扩展梯度曲线在中央梯度差部分两端存在两个斜率为负值的曲线段。

3.2 开裂阶段分析

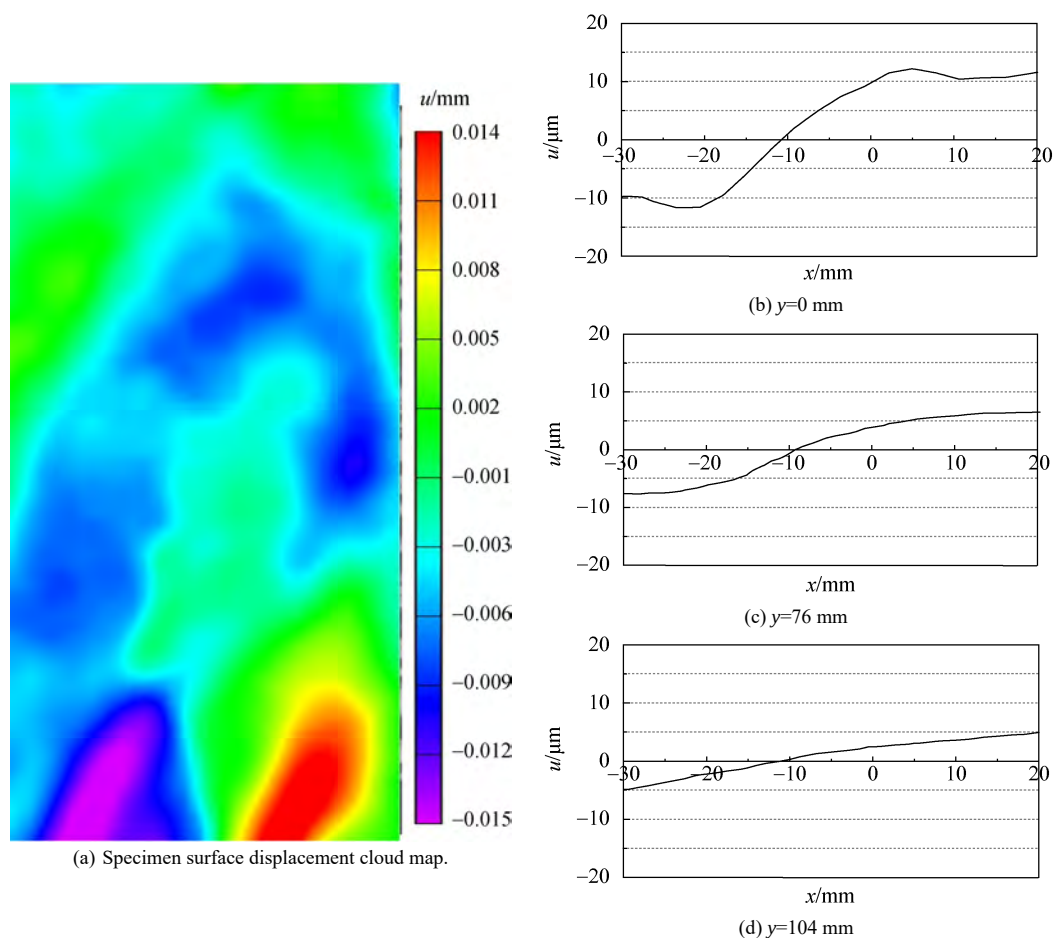
为探究全级配混凝土开裂时的加载阶段, 对试件在加载速率为 0.010 0 mm/s 时, 不同加载阶段的水平位移场进行了统计。加载间隔为开始加载到峰值阶段的位移场及不同高度的位移曲线如图 4 所示, 图中应变云图表示以加载阶段开始为参照, 加载阶段结束时试件表面位移变化; 曲线图表示加载

阶段结束时, 试件不同高度水平位移变化量, y 表示纵向试件实际高度, 预制裂缝顶端处 $y=0$ mm。

由图 4 可以看出, 当荷载达到峰值时, 预制裂缝左右 20 mm 范围内已经出现了集中的位移扩展, 此时预制裂缝尖端位移曲线与模型(c)相符, 说明试件在此加载阶段内出现材料卸载; 当 y 上升至 76 mm 时, 位移曲线不再产生较大的位移不连续段, 说明此时试件表面并未产生明显的裂缝。

当荷载阶段由峰值加载至峰后荷载为峰值的 50% 时, 试件预制裂缝上部位移场及位移曲线如图 5 所示。荷载达到峰后时, 试件内部位移继续发展, 试件分别在 $y=0$ mm、 $y=81$ mm 及 $y=116$ mm 处出现符合 3 种模型的曲线规律。对比图 4 可以得到, 荷载加载至峰后时, 位移加快增长, 说明在荷载越过峰值后裂缝增长迅速增加。

通过图 4、图 5 可知, 当加载速率为 0.01 mm/s 时, 峰值荷载前后均出现了模型(c)所示曲线, 说明在这 2 个阶段试件内部均存在无粘结裂缝, 在峰值荷载时, 试件预制裂缝尖端处已经发生开裂。



y is the actual height of the longitudinal specimen

图 4 加载间隔为峰前 5%至峰值
Fig. 4 Loading from 5% pre-peak to peak

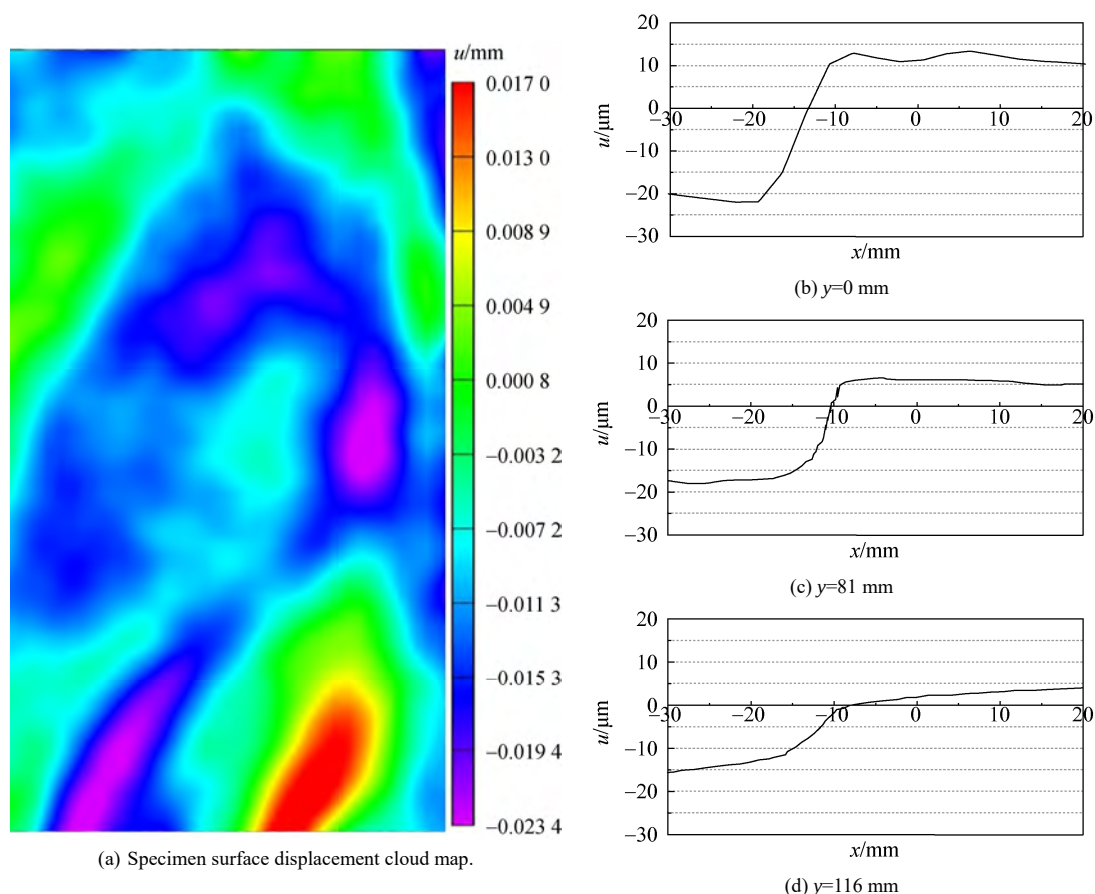


图 5 加载间隔为峰值至峰后 50%
Fig. 5 Loading from peak to post-peak 50%

3.3 裂缝扩展的率效应分析

3.3.1 应变云图分析 通过分析 DIC 图像,可以得到不同加载速率下,全级配混凝土试件加载结束时的应变云图。图 6 所示为试件中心位置,从预制裂缝顶部到试件顶部的应变云图。

全级配混凝土裂缝形态并非沿预制裂缝竖直向上发展,而是曲折上升,这种裂缝形态的形成可能是因为全级配混凝土粗骨料粒径较大,加载过程中骨料胶结面相比骨料本身更加容易被破坏,因此裂缝会由于沿着胶结面发生破坏而弯折。从图 6 可以

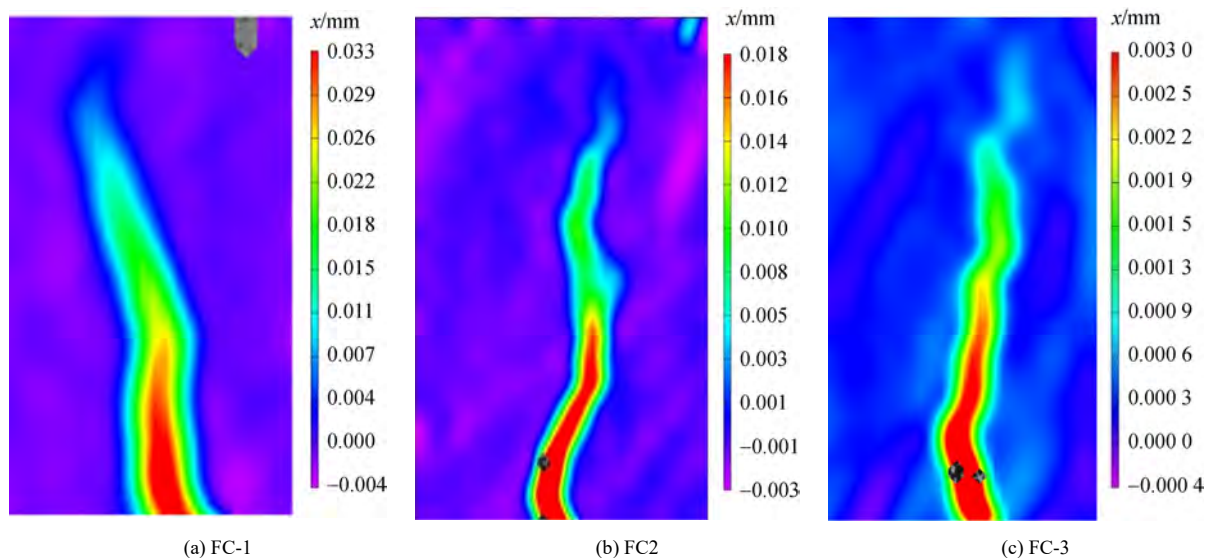


图 6 不同加载速率下全级配混凝土应变云图
Fig. 6 Strain cloud image of fully-graded concrete under different loading rates

看出,对于不同加载速率,试件裂缝形态有所差别,加载速率为 $0.000\ 1\ \text{mm/s}$ 的试件裂缝与周围区域应变差值较小,而随着加载速率增大,试件主裂缝区域应变增大,并且与周围区域应变差增大。这是由于加载速率较大,试件内部裂缝发展不充分导致应变集中更加严重。

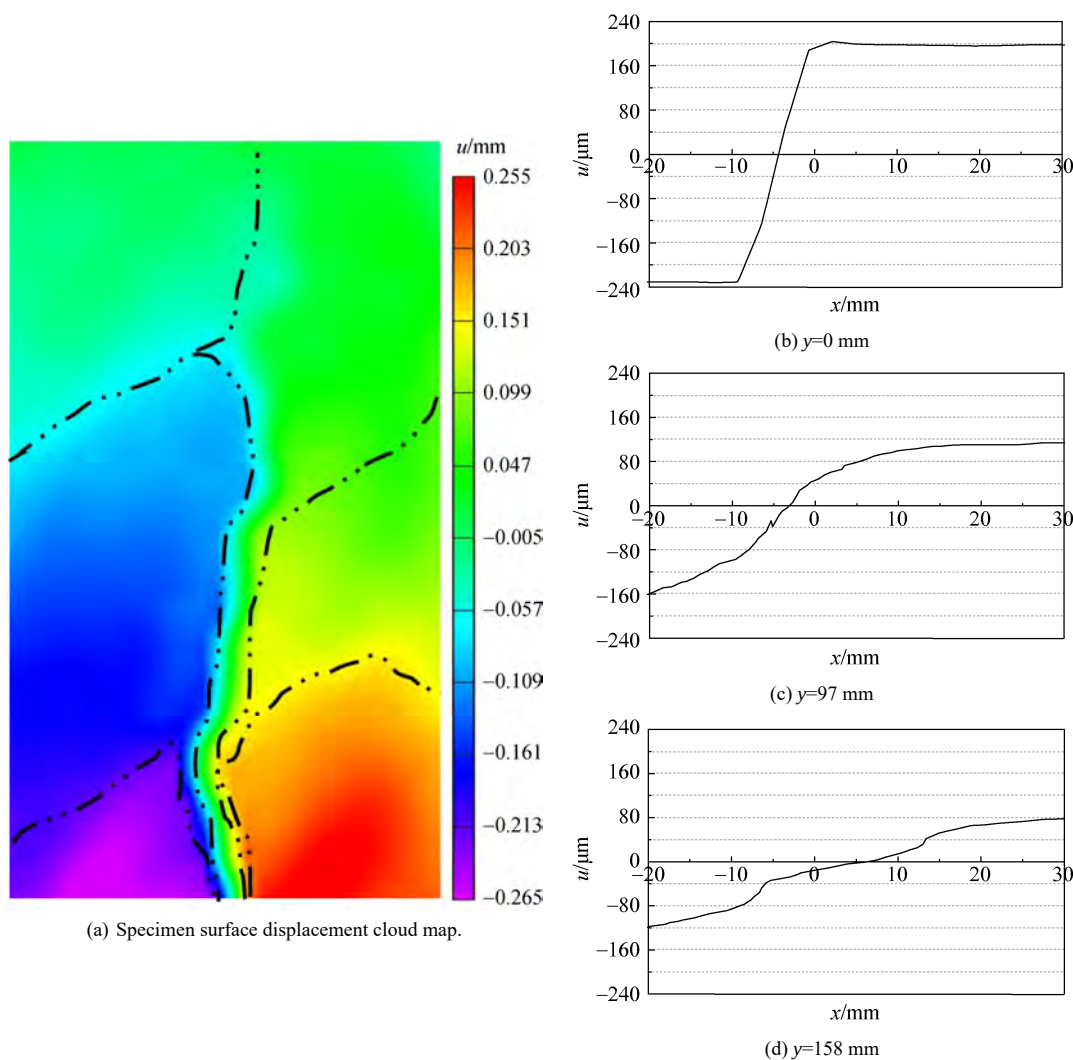


图7 FC-1 水平方向位移场云图
Fig. 7 Horizontal displacement field of FC-1

在预制裂缝尖端,其位移曲线形式符合模型(b)所示,梁中心两侧曲线平均位移梯度分别为 -0.5×10^{-3} 和 -1.0×10^{-3} ,而预制裂缝尖端的中心处曲线斜率为 49.90×10^{-3} ;而当 y 值增大时, $y=97\ \text{mm}$ 处位移不连续处两侧线段斜率仍保持水平,该处是曲线形式由模型(b)向模型(a)的过渡点,因此可以将该处视为无粘结裂缝起点,同时在预制裂缝尖端已经出现了无粘结裂缝;随着 y 值继续增大,曲线位移不连续段位移差减少,此时曲线形态符合模型(a)所示。由此可以得出,当加载速率为 $0.01\ \text{mm/s}$ 时,试件加

3.3.2 不同加载速率位移场 通过 DIC 数据分析,可以得到全级配混凝土试件裂缝扩展的位移场,并且能够反映试件不同高度水平位移曲线。图7为试件 FC-1 加载间隔为峰值荷载到加载结束时的水平方向位移场云图,以及不同纵向高度的水平位移曲线,其中 $y=0\ \text{mm}$ 表示位置为预制裂缝尖端。

载间隔内试件无粘结裂缝尖端位于 $y=97\ \text{mm}$ 处。

相较于图5加载过程位移,加载间隔为峰值至峰后5%时位移为图5的4~6倍,说明宏观裂缝的增长主要集中在荷载加载至峰值荷载的50%以后。

当加载速率切换为 $0.001\ \text{mm/s}$ 时,试件 FC-2 加载间隔为峰值荷载到加载结束时的水平方向位移场云图如图8所示。

在检查 $y=0\ \text{mm}$ 的位移曲线时,得到在位移不连续段两端存在小段的负斜率曲线,位移曲线中心部分被分为斜率为 -2.31×10^{-3} 、 27.10×10^{-3} 和

-0.59×10^{-3} 的 3 部分, 此曲线与模型(c)的曲线形式相符, 说明在这种工况下试件内部存在材料的软化; 当 y 值增大到 83 mm 时, 曲线斜率分别为 0.01×10^{-3} 、 13.40×10^{-3} 和 -0.07×10^{-3} , 即模型(b)所示规律, 此时是模型(b)向模型(a)转变的过渡点; 当 y 值继续增大时, 位移曲线形态与模型(a)相同, 此时裂缝产生主要是拉伸荷载作用引起的。

对试件 FC-3(图 9), 沿截面 $y=0$ mm 的位移曲线斜率产生了负值, 说明在试件内部存在卸荷区, 而在 $y=68$ mm 和 $y=118$ mm 分别出现了符合模型(b)、(a)的曲线特征。

为揭示全级配混凝土裂缝开展规律, 对试件断裂面进行观察, 断裂面形态如图 10 所示。根据图像可以看出, 当加载速率为 0.000 1 mm/s 时, 试件断裂面主要是沿着粗骨料与胶凝材料的胶结面, 仅有少量粒径较小的粗骨料发生断裂, 断裂面较为粗糙; 随着加载速率增大, 发生断裂的粗骨料数量增多, 且骨

料粒径范围增大; 当加载速率为 0.01 mm/s 时, 断裂面存在较多粗骨料断裂事件, 且断裂面较为平整。

综上所述, 对于不同加载速率下的全级配混凝土试件, 其无粘结裂缝出现的高度分别为 $y=97$ mm、 $y=83$ mm 和 $y=68$ mm, 无粘结裂缝出现的高度随着加载速率的增大而升高。另外, 随着加载速率增大, 试件中心位移不连续段斜率越大, 说明该处裂缝宽度越小。结果表明, 加载速率较快时, 裂缝扩展直接穿过粗骨料使破裂面较为光滑^[26], 断裂过程区粘结应力较小, 因此加载速率越快, 无粘结裂缝出现的阶段越早。

除此以外, 通过对比不同试件的位移曲线可以看出, 试件 FC-1 位移曲线波动较大, FC-2 曲线波动有所减弱, 而试件 FC-3 位移曲线更加平滑, 说明加载速率较大时, 试件内部各点水平位移相差较大, 加载速率较小时, 由于试件内部微裂缝发展更加充分, 临近区域内各点水平位移相近。

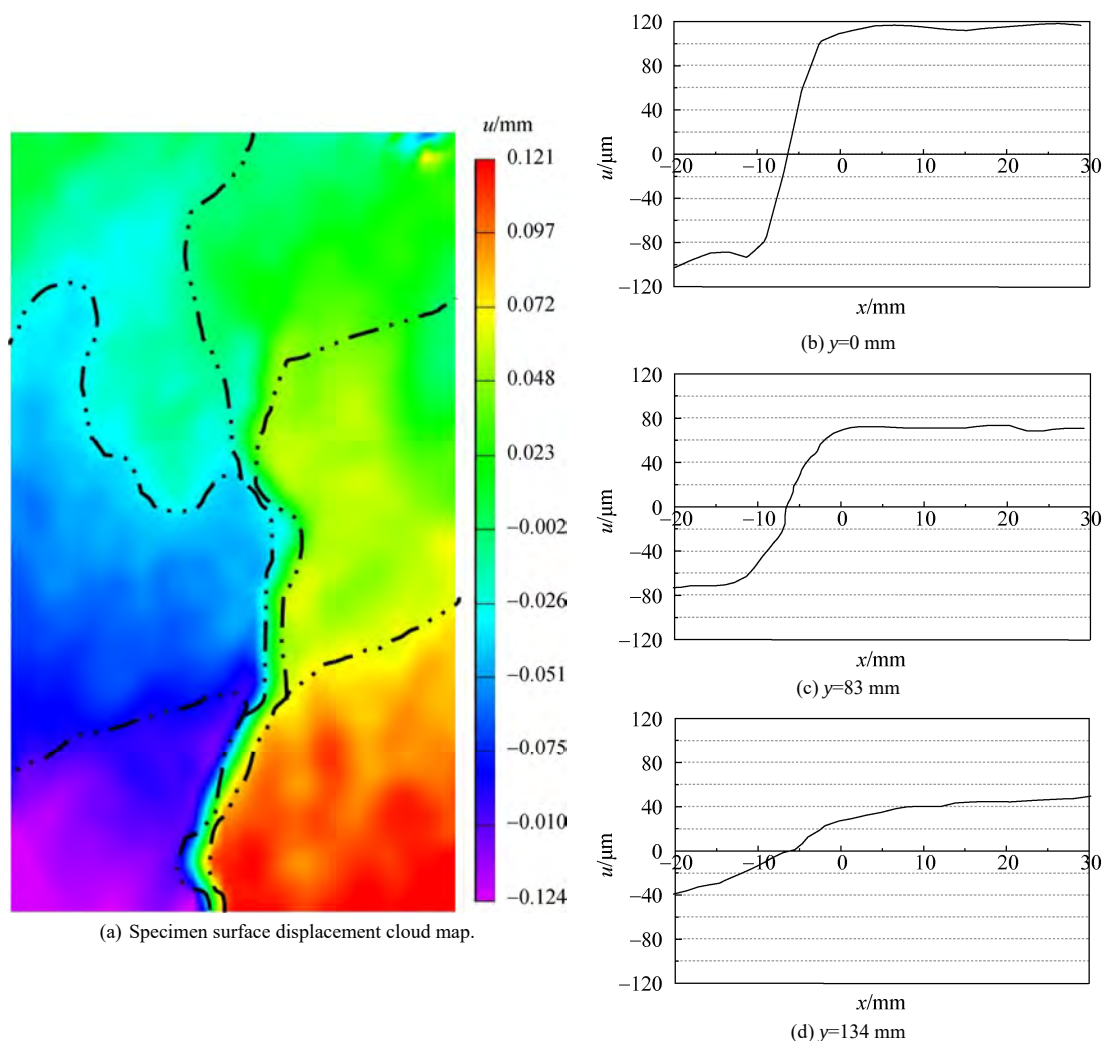


图 8 FC-2 水平方向位移场云图
Fig. 8 Horizontal Displacement Field of FC-2

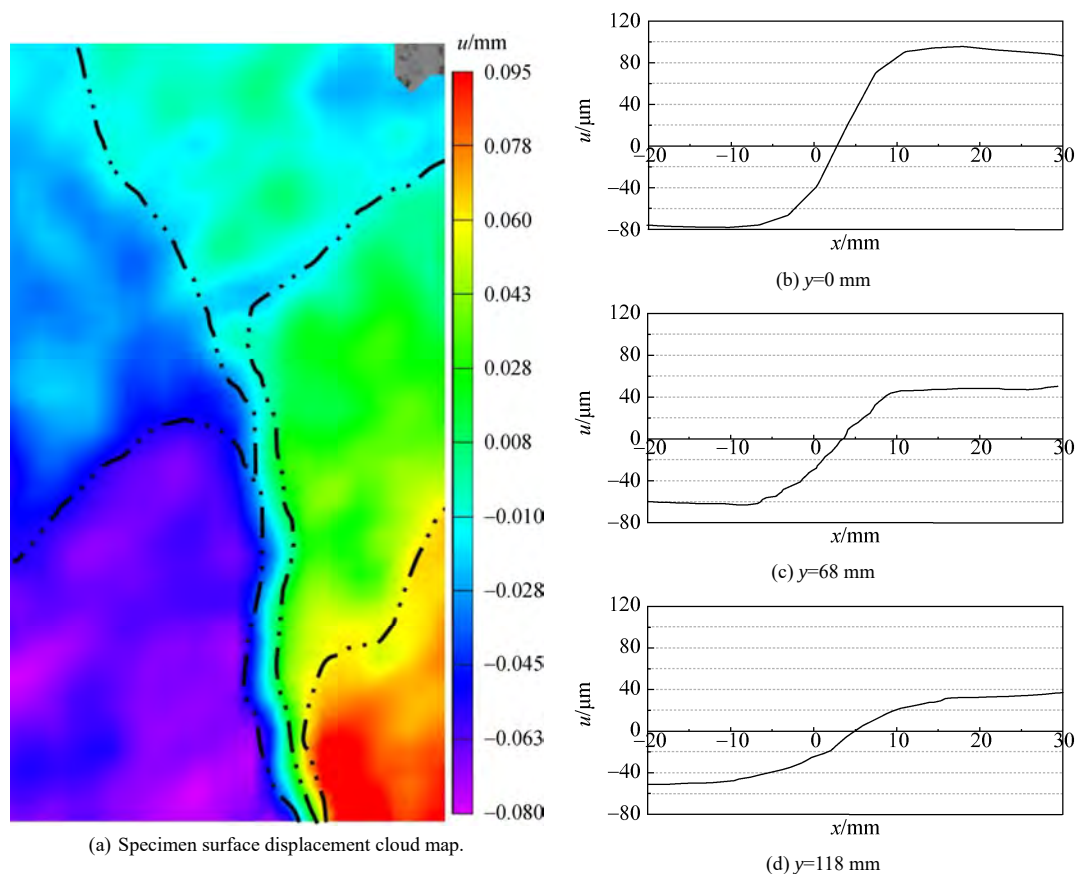


图9 FC-3 水平方向位移场云图
Fig. 9 Horizontal displacement field of FC-3

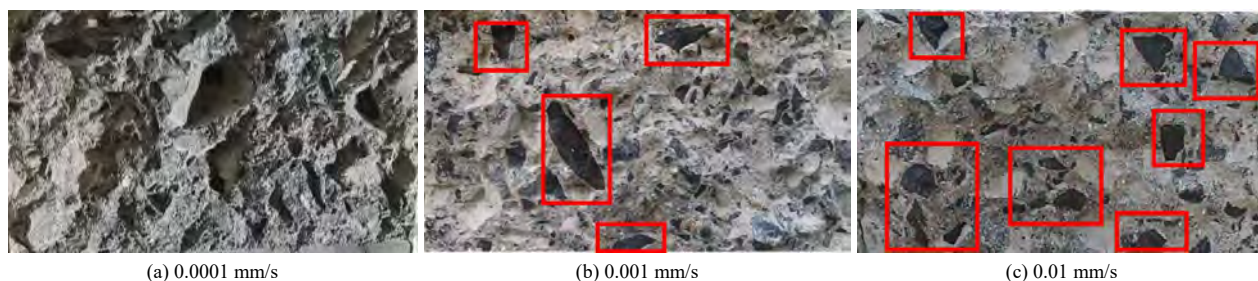


图10 试件断面图
Fig. 10 Specimen section photos

4 结论

基于一种无粘结裂缝的识别模型,采用DIC技术对不同加载速率下全级配混凝土试件的裂缝扩展规律进行研究,得到如下结论:

1) DIC 位移场显示,全级配混凝土试件峰值前后,其预制裂缝尖端均存在无粘结裂缝特征位移曲线,说明达到峰值荷载时预制裂缝处已发生开裂,该模型对试件开裂具有较好的灵敏性。

2) 加载间隔为峰值至峰后 5%时,位移为加载间隔为峰值至峰后 50%时的 4~6 倍,说明试件的破坏主要集中在荷载加载至峰值荷载的 50%以后。

3) 相同参考阶段下,随着加载速率增大,无粘结裂缝出现高度上升,说明加载速率增大,试件破坏程度更加严重。

4) 加载速率较快时,裂缝扩展直接穿过粗骨料使破裂面较为光滑,断裂过程区粘结应力较小,因此加载速率越快,无粘结裂缝出现的阶段越早,并且随着加载速率增大,主裂缝区域裂缝宽度减小。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李金玉, 彭小平, 曹建国, 等. 高贝利特水泥低热高抗裂大坝混凝土性能的研究[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(3): 364–371.

- LI Jinyu, PENG Xiaoping, CAO Jianguo, et al. J Chin Ceram Soc, 2004, 32(3): 364–371.
- [3] 陈应波, 李秀才, 张雄. 大体积混凝土浇筑温度场的仿真分析[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2004, 21(2): 37–39.
- CHEN Yingbo, LI Xiucui, ZHANG Xiong. J Wuhan Urban Constr Inst(in Chinese), 2004, 21(2): 37–39.
- [4] PYO S, ALKAYSI M, EL-TAWIL S. Crack propagation speed in ultra high performance concrete (UHPC)[J]. Constr Build Mater, 2016, 114: 109–118.
- [5] 姚洁香, 董伟, 钟红. 岩石-混凝土界面拉伸断裂性能的率相关性研究[J]. 工程力学, 2022, 39(12): 108–119.
- YAO Jiexiang, DONG Wei, ZHONG Hong. Eng Mech(in Chinese), 2022, 39(12): 108–119.
- [6] 崔博, 王梓钧, 刘长欣, 等. 大坝混凝土凝结过程的超声波联合测定方法[J]. 水力发电学报, 2022, 41(8): 121–133.
- CUI Bo, WANG Zijun, LIU Changxin, et al. J Hydroelectr Eng(in Chinese), 2022, 41(8): 121–133.
- [7] 沈璐, 宋玉普, 尹翠. 湿筛二级配大坝混凝土双轴动态受压特性试验[J]. 混凝土, 2017(1): 6–10.
- SHEN Lu, SONG Yupu, YIN Cui. Concrete(in Chinese), 2017(1): 6–10.
- [8] 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.
- GUAN Junfeng, LI Qingbin, WU Zhimin, et al. J Basic Sci Eng(in Chinese), 2016, 24(6): 1219–1231.
- [9] GUAN J F, LI Q B, WU Z M, et al. Fracture parameters of site-cast dam and sieved concrete[J]. Mag Concr Res, 2016, 68(1): 43–54.
- [10] 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.
- GAO Xiaofeng, HU Yu, YANG Ning, et al. Eng Mech(in Chinese), 2022, 39(7): 183–193.
- [11] 国家能源局. 水工混凝土试验规程: DL/T 5150—2017[S]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
- [12] 陈厚群, 吴胜兴, 党发宁, 等. 高拱坝抗震安全[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 191–193.
- [13] 韩菊红, 李明轩, 杨孝青, 等. 混杂钢纤维二级配混凝土断裂性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(9): 31–40.
- HAN Juhong, LI Mingxuan, YANG Xiaoqing, et al. China Civ Eng J(in Chinese), 2020, 53(9): 31–40.
- [14] QING L B, HU Y, WANG M. Stochastic cohesive law of concrete based on energy consumption equivalence[J]. Eng Fract Mech, 2018, 202: 458–470.
- [15] 杜敏, 金浏, 李冬, 等. 粗骨料粒径对混凝土弯拉强度尺寸效应影响的试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(6): 912–918.
- DU Min, JIN Liu, LI Dong, et al. J Beijing Univ Technol(in Chinese), 2016, 42(6): 912–918.
- [16] YANG H Q, RAO M J, DONG Y. Influence study of extra-large stone limited size and content on full-graded concrete properties[J]. Constr Build Mater, 2016, 127: 774–783.
- [17] 管俊峰, 李庆斌, 吴智敏, 等. 特高拱坝真实断裂参数研究的必要性与可行途径[J]. 水力发电学报, 2014, 33(5): 152–158.
- GUAN Junfeng, LI Qingbin, WU Zhimin, et al. J Hydroelectr Eng(in Chinese), 2014, 33(5): 152–158.
- [18] AMINZADEH A, FAHIMIFAR A, NEJATI M. On Brazilian disk test for mixed-mode I/II fracture toughness experiments of anisotropic rocks[J]. Theor Appl Fract Mech, 2019, 102: 222–238.
- [19] 陈徐东, 石振祥, 郭玉柱, 等. 基于DIC的花岗岩-混凝土梁抗弯性能研究[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(10): 1040–1046.
- CHEN Xudong, SHI Zhenxiang, GUO Yuzhu, et al. J Build Mater(in Chinese), 2022, 25(10): 1040–1046.
- [20] 高鹏, 陈阳, 黄浩良, 等. 干燥环境下混凝土内部损伤的量化[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(2): 312–322.
- GAO Peng, CHEN Yang, HUANG Haoliang, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(2): 312–322.
- [21] 方致远, 张庆贺, 牛龙华, 等. 裂隙混凝土应变场和温度场演化规律试验[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(34): 14726–14733.
- FANG Zhiyuan, ZHANG Qinghe, NIU Longhua, et al. Sci Technol Eng(in Chinese), 2021, 21(34): 14726–14733.
- [22] 郭嘉, 高嵩, 班顺利, 等. 再生混凝土单轴受压下多重界面过渡区的破坏机理研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(10): 3445–3457.
- GUO Jia, GAO Song, BAN Shunli, et al. Bull Chin Ceram Soc(in Chinese), 2022, 41(10): 3445–3457.
- [23] 傅帅阳, 李海波, 李晓锋. 基于DIC方法与声发射的花岗岩断裂过程区范围研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(12): 2497–2508.
- FU Shuaiyang, LI Haibo, LI Xiaofeng. Chin J Rock Mech Eng(in Chinese), 2022, 41(12): 2497–2508.
- [24] 宁二强. 断裂过程区发育为宏观裂缝的演变规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- NING Erqiang. Study on the evolution law of macro-cracks in fracture process area(in Chinese, dissertation). Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [25] DUTLER N, NEJATI M, VALLEY B, et al. On the link between fracture toughness, tensile strength, and fracture process zone in anisotropic rocks[J]. Eng Fract Mech, 2018, 201: 56–79.
- [26] 阚黎黎, 王飞, 邬海江, 等. 不同养护条件下混杂钢纤维超高性能混凝土的早期力学性能及开裂特性[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(2): 429–437.
- KAN Lili, WANG Fei, WU Haijiang, et al. J Chin Ceram Soc, 2022, 50(2): 429–437.
- [27] 郭聚坤, 王瑞, 寇海磊, 等. 基于三维数字图像相关技术钙质砂颗粒运动行为试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(10): 2785–2798.
- GUO Jukun, WANG Rui, KOU Hailei, et al. Rock Soil Mech(in Chinese), 2022, 43(10): 2785–2798.
- [28] 张国辉, 李宗利. 加载速率对湿态混凝土强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(4): 616–622.
- ZHANG Guohui, LI Zongli. J Build Mater(in Chinese), 2017, 20(4): 616–622.
- [29] 徐世烺, 熊松波, 李贺东, 等. 混凝土断裂参数厚度尺寸效应的定量表征与机理分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(5): 57–71.
- XU Shilang, XIONG Songbo, LI Hedong, et al. China Civ Eng J(in Chinese), 2017, 50(5): 57–71.
- [30] FAKHIMI A, TAROKH A, LABUZ J F. Cohesionless crack at peak load in a quasi-brittle material[J]. Eng Fract Mech, 2017, 179: 272–277.
- [31] LIN Q, WAN B, WANG S Q, et al. Visual detection of a cohesionless crack in rock under three-point bending[J]. Eng Fract Mech, 2019, 211: 17–31.