

张亚洲, 钟红, 李德玉, 等. 全级配混凝土/玄武岩界面直接拉伸断裂研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(5): 266-276. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.021

ZHANG Yazhou, ZHONG Hong, LI Deyu, et al. Study on direct tensile fracture of fully-graded concrete/basalt interface[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(5): 266-276. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.021

# 全级配混凝土/玄武岩界面直接拉伸断裂研究

张亚洲, 钟红, 李德玉, 涂劲

(中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

**摘要:**【目的】以建在基岩上的混凝土坝建基面地震稳定分析为背景, 开展全级配混凝土/玄武岩界面静动态断裂试验研究。【方法】试验采取含预制裂缝的圆柱体复合试件承受直接拉伸的形式。在地震荷载典型应变率范围内考虑两种加载速率, 其中应变率  $10^{-3}/s$  为动态加载, 应变率  $10^{-6}/s$  作为准静态加载。测得了试件的荷载-位移曲线, 据此计算全级配混凝土/玄武岩界面的断裂参数, 结合数值模拟得到了断裂韧度。【结果】研究表明: 准静态加载下复合试件沿预制裂缝扩展, 而动态加载下试件在扩展过程中向玄武岩中含天然斜裂缝位置偏转。【结论】相比于准静态加载, 复合试件在动态荷载作用下有更高的断裂参数。而与全级配混凝土对比, 复合试件在准静态加载下的断裂参数显著降低。通过本次研究, 可为全级配混凝土/玄武岩界面准静态和动态作用下的断裂性能提供参考。

**关键词:** 动态直接拉伸断裂; 全级配混凝土/玄武岩界面; 位移外推法; 试验-数值耦合法; 变形; 混凝土; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.021

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV313

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)05-0266-11



## Study on direct tensile fracture of fully-graded concrete/basalt interface

ZHANG Yazhou, ZHONG Hong, LI Deyu, TU Jin

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

**Abstract:** [Objective] Based on the seismic stability analysis of the foundation surface of concrete dam built on bedrock, the experimental study on static and dynamic fracture of fully graded concrete/basalt interface is carried out. [Methods] The tests were conducted in the form of cylindrical composite specimens subjected to direct tension containing preset cracks. Two loading rates were considered in the range of typical strain rates for seismic loading. The load-displacement curves of the specimens were measured, from which the fracture parameters of the full-graded concrete/basalt interface were calculated and the fracture toughness was obtained in combination with numerical simulations. [Results] The results show that the composite specimens under quasi-static loading expanded along the preset cracks, whereas the specimens under dynamic loading were deflected towards the location of the natural diagonal cracks contained in the basalt during expansion. [Conclusion] Compared with the quasi-static loading, the fracture parameters of the composite specimen are all increased. Furthermore, the fracture parameters of composite specimens under quasi-static loading were significantly reduced compared to fully-concrete. The present study can provide a

收稿日期: 2024-10-17; 修回日期: 2025-02-05; 录用日期: 2025-02-10; 网络出版日期: 2025-04-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979292)

作者简介: 张亚洲(1995—), 男, 博士研究生, 研究方向为界面断裂力学。E-mail: 553725239@qq.com

通信作者: 钟红(1981—), 女, 正高级工程师, 博士, 主要从事水工混凝土结构静动力响应分析研究。E-mail: zhonghong@iwhr.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

reference for the fracture properties of the fully-graded concrete/basalt interface under quasi-static and dynamic loading.

**Keywords:** dynamic direct tensile fracture; fully-graded concrete/basalt interface; displacement extrapolation method; coupled experimental-numerical approach; deformation; concrete; influencing factors

## 0 引言

对于建在基岩上的混凝土结构, 如混凝土重力坝, 岩石与混凝土界面黏接性能较差, 因此该区域被认为是混凝土坝最薄弱部分<sup>[1]</sup>。由于施工过程中不可避免的原因, 混凝土/岩石界面可能产生潜在的微裂缝, 这些裂缝在外部荷载和环境因素的作用下逐渐扩展形成宏观裂缝, 对坝体的安全运行造成严重威胁<sup>[2-3]</sup>。为保证混凝土坝安全运行, 混凝土/岩石界面的断裂机理得到广泛关注, 可以更好预测和评估混凝土坝在服役期间的性能, 确保结构的稳定性和安全性<sup>[4]</sup>。

针对混凝土/岩石界面断裂参数的研究已经开展许多研究。相较于混凝土单一材料, 混凝土/岩石界面的抗拉强度、断裂能和断裂韧度等均有所降低<sup>[5]</sup>。张利花<sup>[6]</sup>、POON 等<sup>[7]</sup>、WONG 等<sup>[8]</sup>和 POPE 等<sup>[9]</sup>均采用三点弯曲梁, 分别发现混凝土/岩石界面的断裂参数受初始缝高比、粉煤灰含量、水灰比以及硅灰含量的影响。此外关于混凝土/岩石界面裂缝扩展路径的预测也得到广泛关注。SLOWIK 等<sup>[10]</sup>发现在剪切应力较大时, 混凝土/岩石试件在裂缝扩展时倾向于岩石部分。DONG 等<sup>[11]</sup>发现混凝土/岩石界面裂缝扩展路径与两侧材料以及两者界面的断裂韧度有关。ZHONG 等<sup>[12]</sup>开展四点剪切试验, 发现当模态角较大, 裂缝在扩展过程中可能会转向岩石, 罗丹旒等<sup>[13]</sup>采用声发射技术同样得到了该结论。DONG 等<sup>[2]</sup>基于数字图像相关法发现小缝高比下裂缝扩展过程中可能转向岩石。

以上成果均基于准静态或静态荷载作用下得到, 而我国西部多座混凝土高坝建设在难以避让的地震区, 地震荷载作用下对混凝土与基岩裂缝的稳定性和扩展过程研究具有重要的学术意义和工程价值<sup>[14-15]</sup>。有关动态荷载断裂的研究目前多集中于岩石<sup>[16-20]</sup>、混凝土<sup>[21-28]</sup>单一材料, 发现混凝土或岩石材料断裂参数存在明显的应变率效应。而混凝土/岩石试件两侧材料力学性能存在差异, 其动态荷载作用下的断裂性能更为复杂。钟红等<sup>[29-30]</sup>通过开展劈拉、轴拉和四点剪切试验, 姚洁香等<sup>[31]</sup>通过开展三点弯曲和轴向拉伸试验, 均发现混凝土/岩石断裂参数存在应变率效应。陈兴等<sup>[32]</sup>开展巴西劈裂试验对花岗岩/砂浆

进行研究, 结果表明其抗拉强度与应变率有关。尽管已有部分研究涉及动态荷载作用下混凝土/岩石界面的断裂性能, 但相关试验研究数量仍然较少, 目前较难形成共识<sup>[33]</sup>。此外, 全级配混凝土在实际工程中应用广泛, 然而目前有关全级配混凝土/岩石相关文献鲜少可见, 需要深入探讨与研究。

以混凝土坝建基面抗震稳定为背景, 本文运用 MTS 试验机, 实现了全级配混凝土/玄武岩界面直接拉伸试验, 此外还实现了快速加载, 获得了全级配混凝土/玄武岩界面动态断裂参数。结合对试验的数值模拟, 考虑加载过程中的偏心现象, 通过位移外推法计算试件的断裂韧度, 与全级配混凝土准静态荷载作用下的断裂性能<sup>[34]</sup>进行对比。

## 1 试验方案

### 1.1 试件准备

为了研究全级配混凝土/玄武岩界面断裂性能, 从白鹤滩拱坝坝址附近钻芯得到 470 mm 直径的玄武岩。混凝土配合比( $\text{kg}/\text{m}^3$ )水泥: 水: 砂子: 石子 = 141.56 : 91 : 619.01 : 1 450.43。其中水泥为低热硅酸盐 42.5 级水泥, 石子包括 5~20 mm 小石、20~40 mm 中石和 40~80 mm 大石, 比例( $\text{kg}/\text{m}^3$ )为 463.03 : 463.03 : 618.37。

采用直接拉伸试验研究全级配混凝土/玄武岩界面的静动态断裂特性, 试验示意如图 1 所示。试件直径 470 mm, 高度 450 mm, 在高度方向上等分为混凝土和玄武岩。本文试件尺寸借鉴《水工混凝土试验规程》(SL/T 352—2020)<sup>[35]</sup>的规定确定, 可在一定程

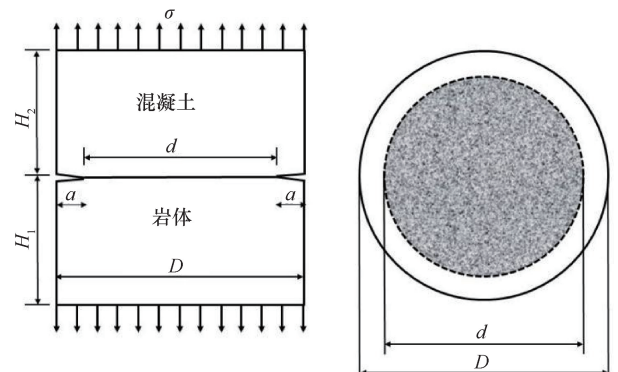


图 1 试验示意

Fig. 1 Schematic diagram of test

度上避免尺寸效应问题。玄武岩芯样切割成高度 225 mm 的圆柱体后, 将其中一个端面作拉毛处理以增加粗糙度。拉毛处理方式: 在端面的直径位置绘制两条相互垂直的线, 沿两条线分别向两侧等距(每间隔 47 mm)绘制平行线以形成四边形网格, 用圆锥形电磨头在网格端点处打出 5 mm 深度的孔。采用灌砂法<sup>[36]</sup>, 即在处理后的玄武岩端面均匀铺撒不超过玄武岩初始表面的细砂, 将孔填满, 从而将孔的体积转化为可测量砂的体积, 根据公式(1)得到本文的界面粗糙度为  $R_a=0.128$  mm。采用双面胶将两个 PVC 薄膜黏贴, 在处理好的端面上用双面胶黏贴双层 PVC 薄膜预制径向长度  $2a=94$  mm 的圆环形初始裂缝, 如图 2(a)所示。将玄武岩圆柱体放入钢制试模, 处理后的端面朝上, 并浇筑混凝土, 浇筑过程中采用插入式振捣棒以及平板式振捣器, 最后将试件上表面抹平, 如图 2(b)所示。将棉被浸湿覆盖在复合试件上并定期浇水养护, 3~4 天后拆除模具并放置于湿度 98%、温度 20 °C 的养护室, 根据《混凝土重力坝设计规范》(NB/T 35026—2022)<sup>[37]</sup> 将试件养护至 90 d, 如图 2(c)所示。同时制备 3 个边长为 150 mm 立方体试件, 养护 90 d 后开展单轴压缩试验最终得到全级配混凝土试件材料参数<sup>[34]</sup>。全级配混凝土和玄武岩的材料参数如表 1 所列, 其中玄武岩参数通过对 3 个长×宽×高=75 mm×75 mm×150 mm 的棱柱体试件开展单轴压缩试验得到。界面粗糙度公式为

$$R_a = \frac{V}{A} \quad (1)$$

式中,  $V$  为灌砂体积( $\text{mm}^3$ );  $A$  为岩石端面面积( $\text{mm}^2$ )。

## 1.2 试验方案

试验在中国水利水电科学研究院 15 MN 静动态

表 1 全级配混凝土和玄武岩的材料参数

| 材料  | 弹性模量/GPa | 泊松比   | 密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | 抗压强度/MPa |
|-----|----------|-------|-------------------------------------|----------|
| 混凝土 | 42.171   | 0.167 | 2 400                               | 50.44    |
| 玄武岩 | 25.986   | 0.275 | 3 000                               | 86.05    |

材料试验机上进行。试验机最大拉力 8 MN, 最大加载速率 50 mm/s, 数据采集最高频率为 6 144 Hz, 主机刚度约为 6 MN/mm, 均满足试验要求。

将开展直接拉伸试验的圆柱体试件连接到材料试验机上有两种常见方式, 一种是在试件两端预埋螺栓, 另一种是在试件两端用环氧树脂胶连接金属接头。很明显, 第二种方法更适合本研究, 图 3 为已安装完成的试件。直接拉伸试验的关键是对中, 从而保证试验过程中试件各处均匀受力、均匀变形。由于混凝土和岩石与金属的弹性模量和泊松比不同, 如果将试件直接连接到钢板上会使试件上下表面附近出现应力集中。为了尽量减小这种不均匀的应力分布, 采用一对铝锭连接件, 因为相比于其他金属材料, 铝更接近混凝土和岩石的弹性模量和泊松比。试件和铝锭中间灌入厚度约为 10 mm 的环氧树脂胶, 这样可以进一步释放试件两端的应力集中。在环氧树脂胶和试件连接前, 将试件上下表面拉毛处理以提高黏接强度。环氧树脂胶凝固后, 将每个铝锭通过 24 个 M16 螺栓固定在钢板上<sup>[38]</sup>。

参考地震典型应变率范围<sup>[39]</sup>, 选取应变率  $10^{-3}/\text{s}$  作动态加载, 并选取应变率  $10^{-6}/\text{s}$  作为准静态加载以便比较。试验过程采用位移加载控制方式, 因此准静态和动态荷载对应的加载速率分别为 0.002 mm/s 和 2 mm/s, 具体试验方案如表 2 所列。其中 D01 和 D02 为全级配混凝土/玄武岩复合试件准静态加载,

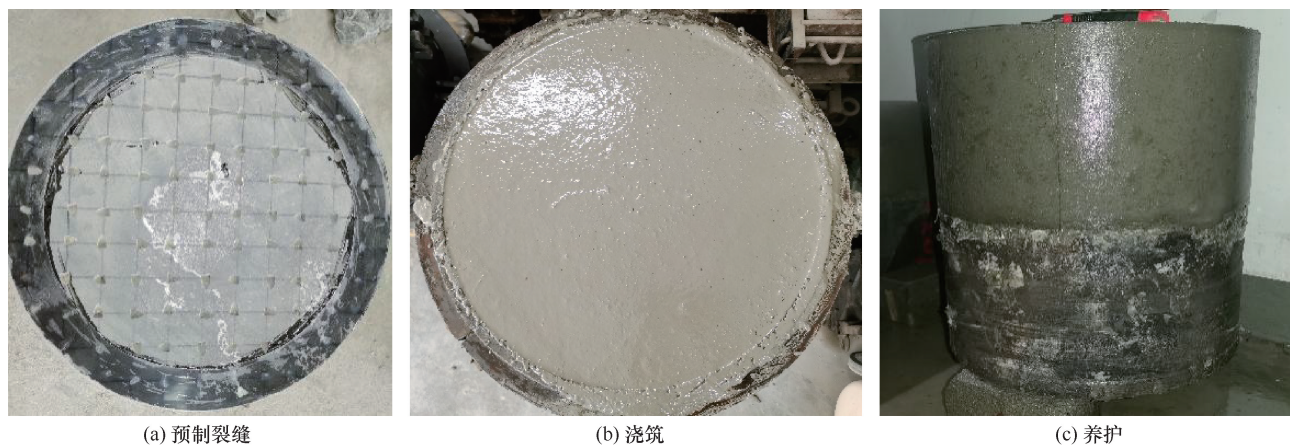


图 2 试件的制备

Fig. 2 Preparation of specimens

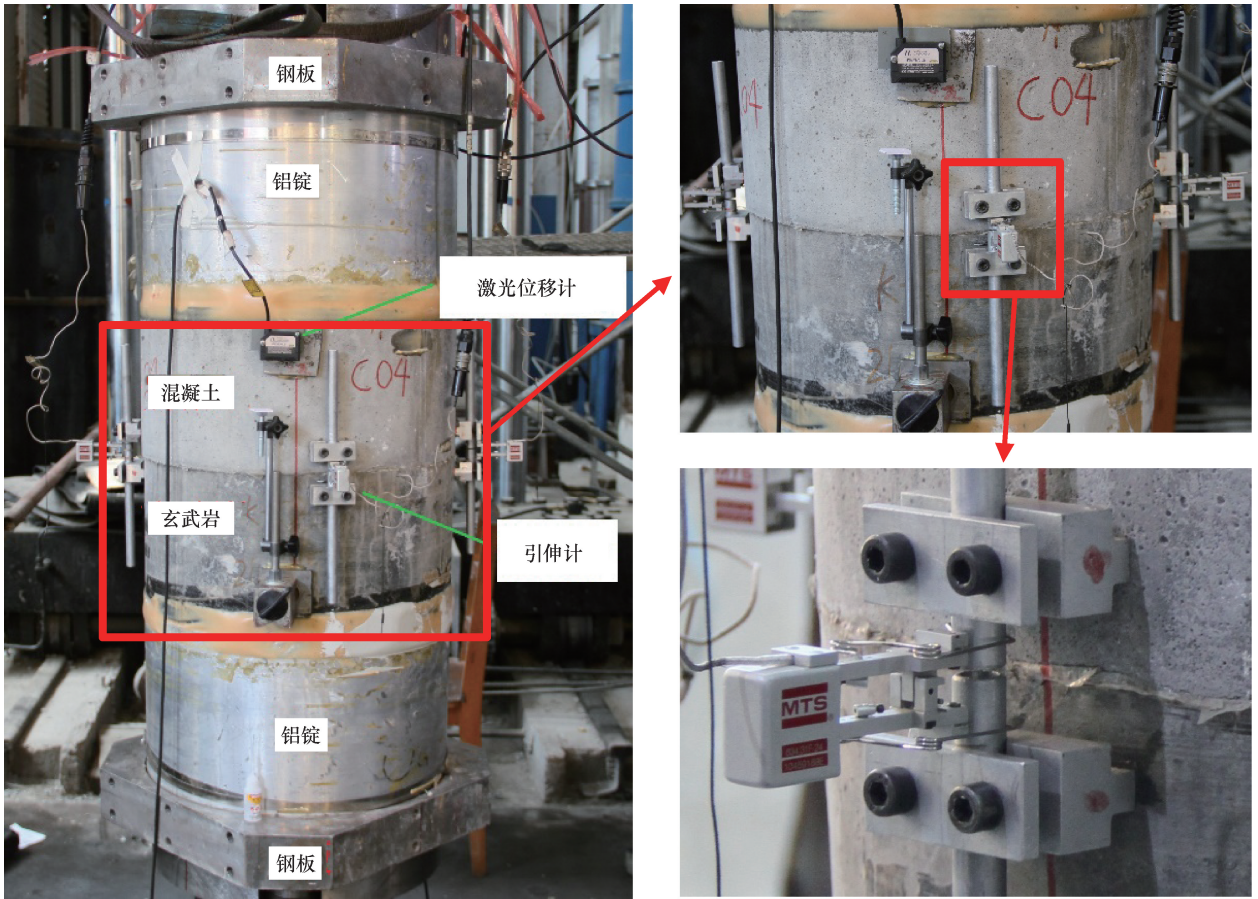


图3 试件连接形式以及位移计的布置

Fig. 3 Connection form of specimen and arrangement of displacement gauges

表2 试验方案

Table 2 Test program

| 试件编号                | 龄期/d | 应变率/ $s^{-1}$ | 位移加载速率/ $mm \cdot s^{-1}$ | $H_1/mm$ | $H_2/mm$ | $D/mm$ | $2a/mm$ |
|---------------------|------|---------------|---------------------------|----------|----------|--------|---------|
| D01                 | 205  | $10^{-6}$     | 0.002                     | 225      | 225      | 470    | 94      |
| D02                 | 205  | $10^{-6}$     | 0.002                     | 225      | 225      | 470    | 94      |
| D03                 | 205  | $10^{-3}$     | 2.000                     | 225      | 225      | 470    | 94      |
| C01 <sup>[34]</sup> | 201  | $10^{-6}$     | 0.002                     | 225      | 225      | 450    | 90      |

D03 为动态加载, 而 C01 为本课题组开展的准静态加载下全级配混凝土轴拉试验结果<sup>[34]</sup>, 用来和复合试件对比。加载点的位移在整个试验过程中单调增加, 因此可以得到试样在整个加载过程中的整体变形。试件表面沿环向均匀布置四个引伸计测量预制裂缝的张开位移, 以及四个激光位移计测量试件的整体变形, 具体布置方式如图 3 所示。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 界面破坏形态

得到的全级配混凝土/玄武岩复合试件断裂面如图 4 所示, 图中左侧为混凝土, 右侧为玄武岩。准静态荷载作用下, 复合试件均沿预制裂缝所在的界面

发生破坏, 如图 4(a)(b)所示。裂尖应力集中导致试件开裂, 而界面作为试件相对薄弱部位, 因此裂缝更易从预制裂缝沿界面扩展。从断裂面可以发现嵌入在玄武岩基质中的混凝土浆体在试验过程中均被拉断或者拔出, 玄武岩断面粗糙且黏连部分水泥浆。混凝土表面显露出不同粒径大小的骨料, 断面存在不同程度向上凸起的水泥浆。

如图 4(c)所示, 全级配混凝土/玄武岩复合试件在动态荷载作用下混凝土断裂面上黏有部分玄武岩基质。通过试验前的照片发现附着于混凝土部分的玄武岩基质区域存在斜裂隙, 从而该处强度低于界面, 因此裂缝在扩展过程中向此处偏转。与准静态荷载作

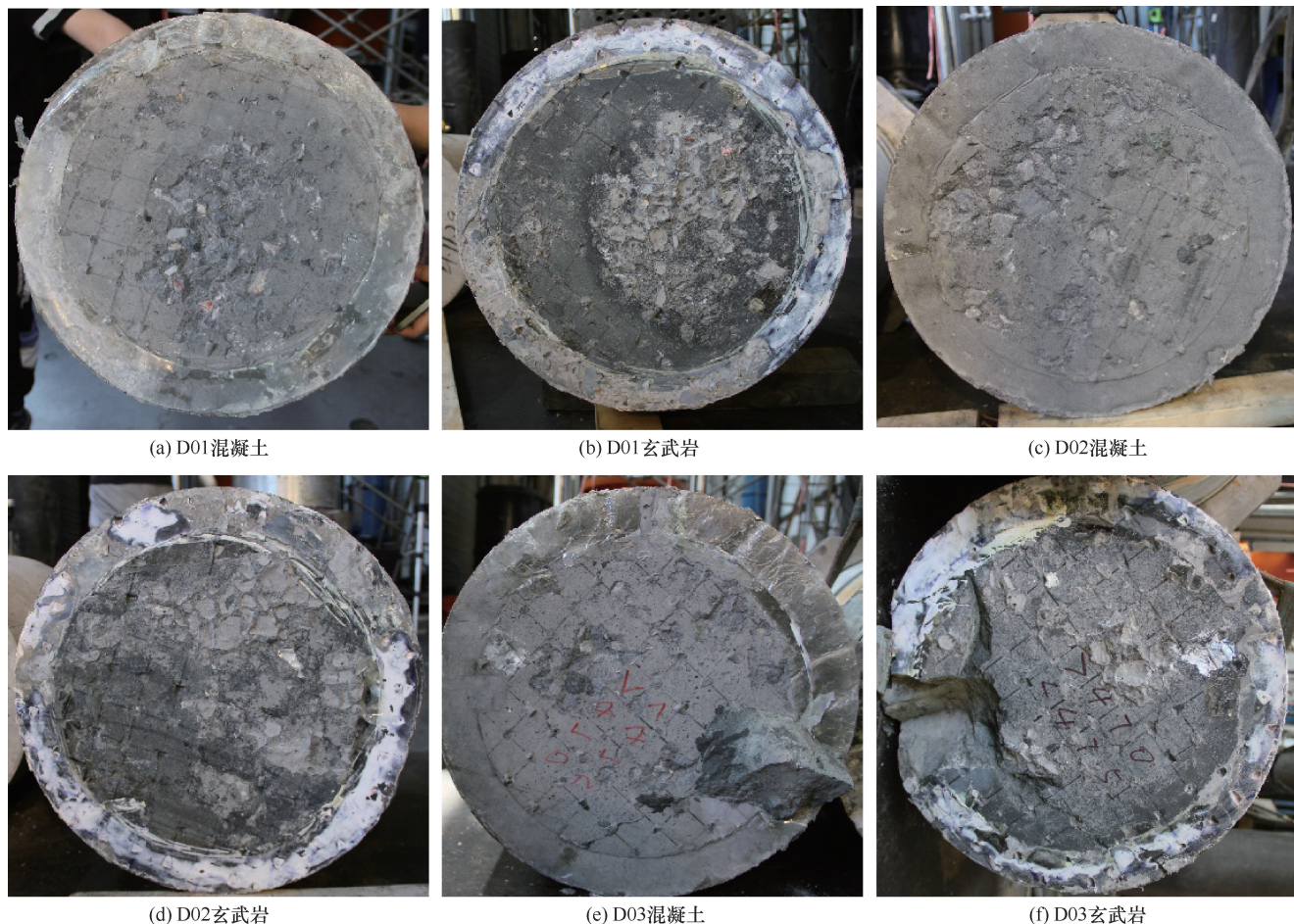


图4 全级配混凝土/玄武岩试件破坏面

Fig. 4 Fully-graded concrete/basalt interface damage surface

用下断裂面相比, 动态荷载作用下沿界面的断裂面更光滑, 较少的骨料暴露出来, 这是由于在较高速率下裂缝直接贯穿浆体发生破坏。结合全级配混凝土试件<sup>[34]</sup>的结果发现, 动态荷载作用下裂缝在扩展过程中依照路径最短原则, 而准静态为依照耗能最少原则。

## 2.2 荷载-位移曲线

裂缝张开口位移 (*CMOD*) 是指试件在试验过程中承受拉伸荷载, 预制裂缝部位张开的位移, 而加载点位移 ( $\delta$ ) 是指整个试件的变形。全级配混凝土/玄武岩复合试件的荷载-位移曲线如图 5 所示, 其中 *CMOD* 和  $\delta$  分别根据四个引伸计和激光位移计结果的平均值得到。相比于 *P-CMOD*, *P- $\delta$*  曲线存在波动现象, 主要是试验过程中噪音对激光位移计的影响更明显。

根据图 5(a) 发现相比于全级配混凝土<sup>[34]</sup>, 准静态荷载作用下全级配混凝土/玄武岩复合试件荷载-位移曲线上段的斜率降低, 表明复合试件的刚度更

低。复合试件 D01 和 D02 峰值荷载分别为 114.99 kN 和 124.84 kN, 与全级配混凝土试件 C01 的峰值荷载 178.82 kN 相比, 复合试件分别下降了 35.70% 和 30.19%。取 D01 和 D02 试件峰值荷载的平均值 119.92 kN 为全级配混凝土/玄武岩复合试件在准静态荷载作用下的峰值荷载, 相比于全级配混凝土试件下降了 32.95%。

全级配混凝土/玄武岩在准静态和动态荷载作用下的荷载-位移曲线如图 5(b) 所示。裂缝张开口和加载点位移随荷载增加而增大, 当荷载达到最大值, 试件发生破坏, 随后荷载迅速下降, 同时裂缝张开口和加载点位移显著增大。动态荷载作用下全级配混凝土/玄武岩峰值荷载为 108.56 kN, 与准静荷载相比降低了 9.47%, 且达到峰值荷载前, 动态荷载作用下位移曲线斜率明显低于准静态。该规律与全级配混凝土试件不同<sup>[34]</sup>, 可能是玄武岩表面存在的斜裂缝相当于增加了预制裂缝面积, 从而降低试件刚度和强度导致。

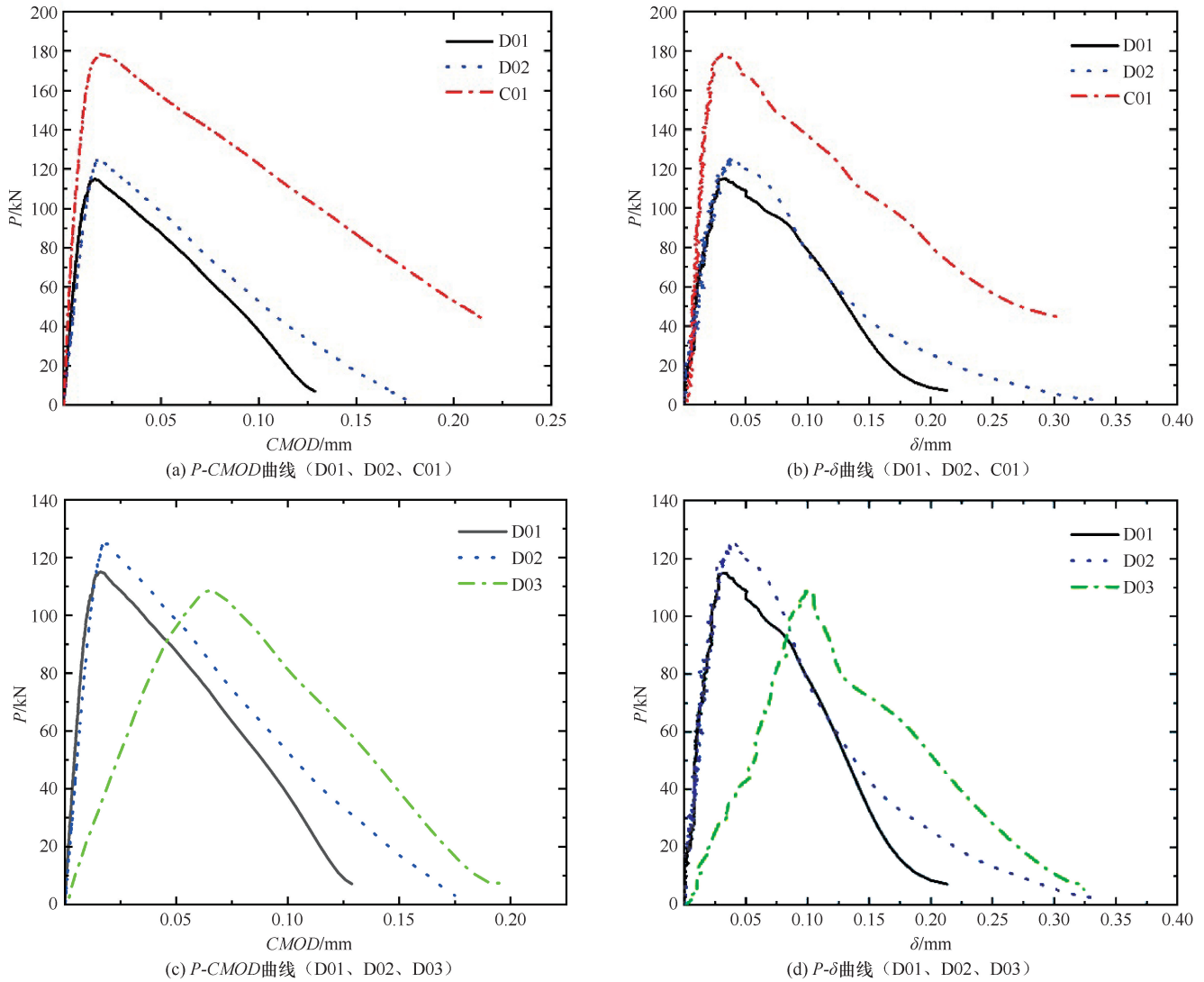


图5 荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curve

### 2.3 吸能能力和断裂能

全级配混凝土/玄武岩复合试件吸能能力和断裂能的计算方式与全级配混凝土<sup>[34]</sup>一致, 即分别为  $P$ - $CMOD$  曲线上上升段面积和全曲线围成的面积与复合试件断裂韧带净面积 (半径为 188 mm 的圆) 的比值<sup>[30]</sup>, 计算结果如表 3 所列。

准静态荷载作用下, 复合试件的吸能能力分别为

10.99 N/m 和 12.16 N/m, 与全级配混凝土试件<sup>[34]</sup> 23.19 N/m 相比, 分别下降了 52.61% 和 47.56%。复合试件的断裂能分别为 75.46 N/m 和 96.00 N/m, 与全级配混凝土试件 235.59 N/m 相比, 分别下降了 67.97% 和 59.25%。取 D01 和 D02 平均值为准静态荷载作用下全级配混凝土/玄武岩复合试件的吸能能力和断裂能, 即 11.58 N/m 和 85.73 N/m。

表3 峰值荷载时刻拟合的平面位移方程

Table 3 Plane displacement equation fitted at the time of peak load

| 试件编号 | 激光位移计/mm |          |          |          | 平面位移方程                     |
|------|----------|----------|----------|----------|----------------------------|
|      | 1        | 2        | 3        | 4        |                            |
| D01  | 0.016 20 | 0.035 30 | 0.017 80 | 0.002 19 | $x+0.154y-14.195z+0.266=0$ |
| D02  | 0.008 60 | 0.010 30 | 0.030 70 | 0.022 10 | $x-4.53y+95.918z-1.88=0$   |
| D03  | 0.034 10 | 0.024 20 | 0.131 00 | 0.111 00 | $x-1.46y+5.402z-0.365=0$   |

动态荷载作用下复合试件的吸能能力和断裂能为 34.47 N/m 和 103.30 N/m, 与准静态相比, 分别提高了 197.67% 和 20.50%。全级配混凝土试件吸能能力和断裂能与峰值荷载呈正相关, 而复合试件相反, 可能是岩石表面存在的斜裂缝导致裂缝扩展过程中沿界面向玄武岩部分发生偏转, 从而扩展路径增长, 因此消耗的能量也更多。

## 2.4 断裂韧度

本文采用数值模拟与试验结合的方法计算复合试件的断裂韧度。基于线弹性本构关系, 峰值荷载时刻裂缝在扩展前的应力强度因子即为试件的断裂韧度。全级配混凝土采用的数值方法是扩展有限元法, 而对于双材料界面模型, 位移外推法计算精度更高<sup>[40]</sup>, 因此得到了广泛的应用<sup>[30-31]</sup>。

位移外推法是将位移场的奇异性展开, 计算裂缝前端积分点坐标值  $r$  对应的  $K$ , 通过采用最小二乘法拟合得到裂缝尖端应力强度因子。许金泉<sup>[41]</sup>推导出界面裂尖前端应力表达式为

$$\delta_2 + i\delta_1 = \frac{K_1 + iK_2}{C(1 + 2i\varepsilon)} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left(\frac{r}{L}\right)^{i\varepsilon} \quad (2)$$

式中,  $K_1$  和  $K_2$  分别为张开和剪切型应力强度因子 ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ );  $\delta_1$  和  $\delta_2$  分别为剪切位移(两侧材料沿裂缝方向位移差)和张开位移(两侧材料垂直于裂缝方向位移差)(m);  $L$  为特征长度, 通常取预制裂缝长度(m);  $r$  为裂尖前端积分点坐标值(m);  $i$  为虚部;  $\varepsilon$  为振荡因子, 计算公式见公式(5);  $C$  是常数, 见公式(4)。

本文试件以张开型应力强度因子  $K_1$  为主, 通过公式(2)可推出

$$K_1 = C \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \{ [\sin Q - 2\varepsilon \cos Q] \delta_1 + [\cos Q + 2\varepsilon \sin Q] \delta_2 \} \quad (3)$$

式中,  $Q$  为常数。

$$C = \frac{2 \cosh(\varepsilon \pi)}{\left(\frac{\kappa_1 + 1}{\mu_1} + \frac{\kappa_2 + 1}{\mu_2}\right)} Q = \varepsilon \ln\left(\frac{r}{L}\right) \quad (4)$$

式中,  $\kappa_1$  和  $\kappa_2$  分别为混凝土和岩石的卡帕参数, 计算公式见公式(6);  $\mu_1$  和  $\mu_2$  分别为混凝土和岩石剪切模量(MPa), 计算公式为

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{\frac{\kappa_1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2}}{\frac{\kappa_2}{\mu_2} + \frac{1}{\mu_1}} \right) \quad (5)$$

$$\begin{cases} \text{平面应力问题,} & \kappa = \frac{3 - \nu}{1 + \nu} \\ \text{平面应变问题,} & \kappa = 3 - 4\nu \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (7)$$

式中,  $E$  为弹性模量(MPa);  $\nu$  为泊松比。

以 D01 试件为例, 使用 ABAQUS 软件对复合试件建立有限元模型及得到最大主应力云图如图 6 所示, 全局采用 8 节点的 C3D8R 结构化网格, 并对裂尖区域进行了网格加密处理。全级配混凝土和玄武岩的弹性模量和泊松比取值如表 1 所列。模型下表面中心点施加全约束, 而其余节点仅施加竖向约束。图 6(a)模型上表面节点施加竖向均匀分布力, 表示试验过程中试件承受均匀荷载。尽管试验通过球铰将钢板与试验机连接以尽量保证试件对中, 但是根据激光位移计得到的位移可以发现加载过程中仍存在偏心现象。因此, 通过四个激光位移计测得峰值荷载时刻加载点位移, 拟合出平面位移方程, 如表 3 所列, 施加于有限元模型以模拟试验过程中存在的偏心现象, 如图 6(c)所示。平面位移方程模拟过程以 D01 为例: 四个点的初始位移均为 0 mm, 峰值荷载时刻位移分别为  $u_1 = 0.01620$  mm、 $u_2 = 0.03530$  mm、 $u_3 = 0.01780$  mm 和  $u_4 = 0.00219$  mm。以初始状态建立空间坐标系, 其中轴拉试件底部中心点为原点, 1 和 3 方向为  $x$  轴, 2 和 4 方向为  $y$  轴, 沿试件高度方向为  $z$  轴, 则峰值荷载时四个点的坐标分别为(235, 0, 0.01620)、(0, 235, 0.03530)、(-235, 0, 0.01780)、(0, -235, 0.00219)。设平面方程为  $x+ay+bz+c=0$ , 将三个点带入方程求解, 根据得到的方程计算第四个点的位移, 并与激光位移计测得的位移进行对比, 从而找到拟合效果最好的平面方程。

以考虑试验过程中偏心现象为例, 得到的  $K_I-r$  曲线如图 7 所示, 由于裂缝尖端的应力奇异性故在拟合时剔除了部分数据, 得到的断裂韧度如表 4 所列。相比于不考虑偏心, 三个试件考虑试验过程中偏心现象的断裂韧度分别增加了 75.57%、47.01% 和 97.38%。由此可见, 试验过程中的偏心现象对断裂韧度影响较大, 应予以考虑。准静态荷载作用下全级配混凝土/玄武岩复合试件的断裂韧度取自 D01 和 D02 的平均值  $0.542 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , 动态荷载作用下提高了 11.07%。与全级配混凝土<sup>[34]</sup>相比, 复合试件在准静态荷载作用下的断裂韧度降低了 42.28%。

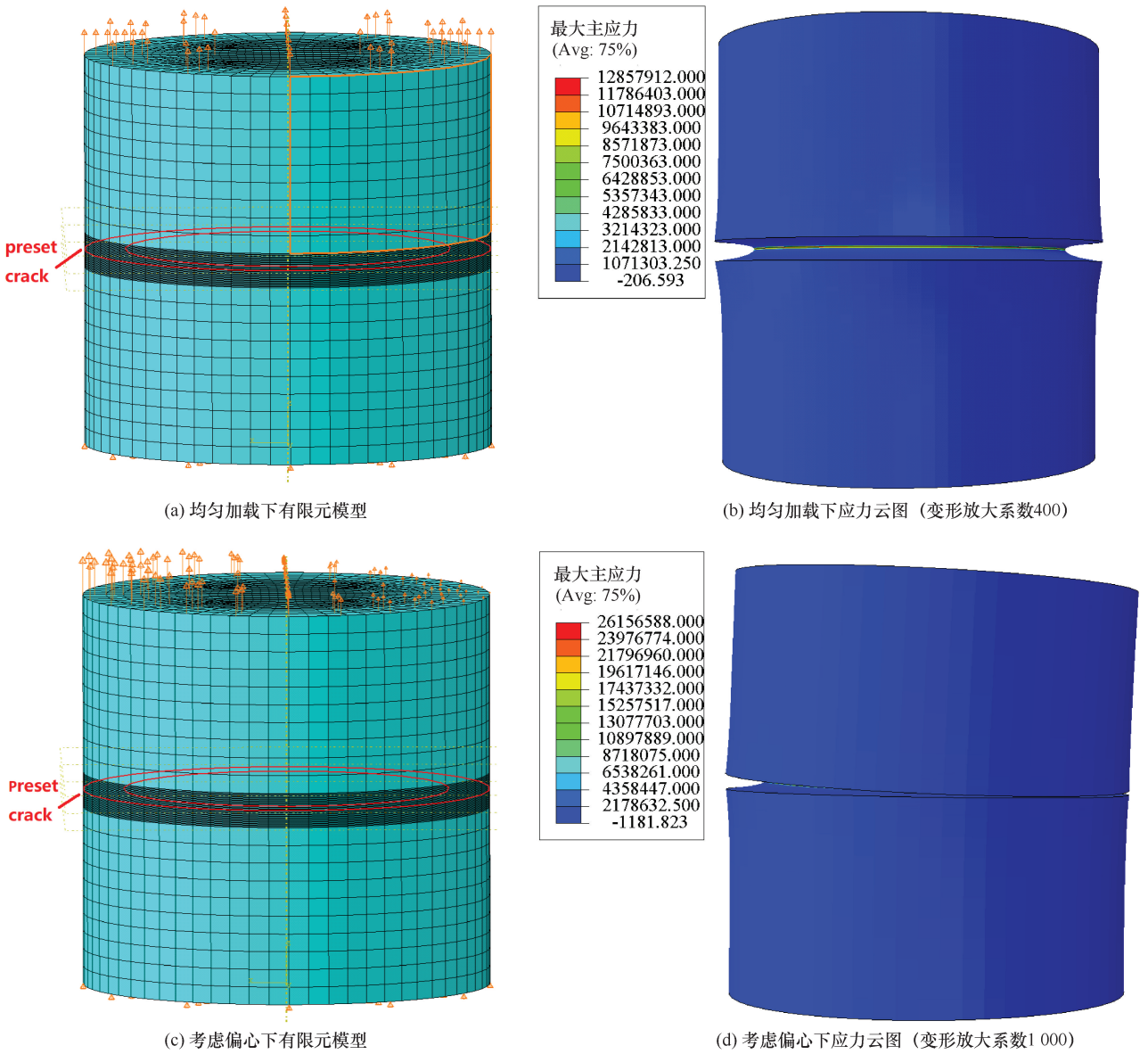
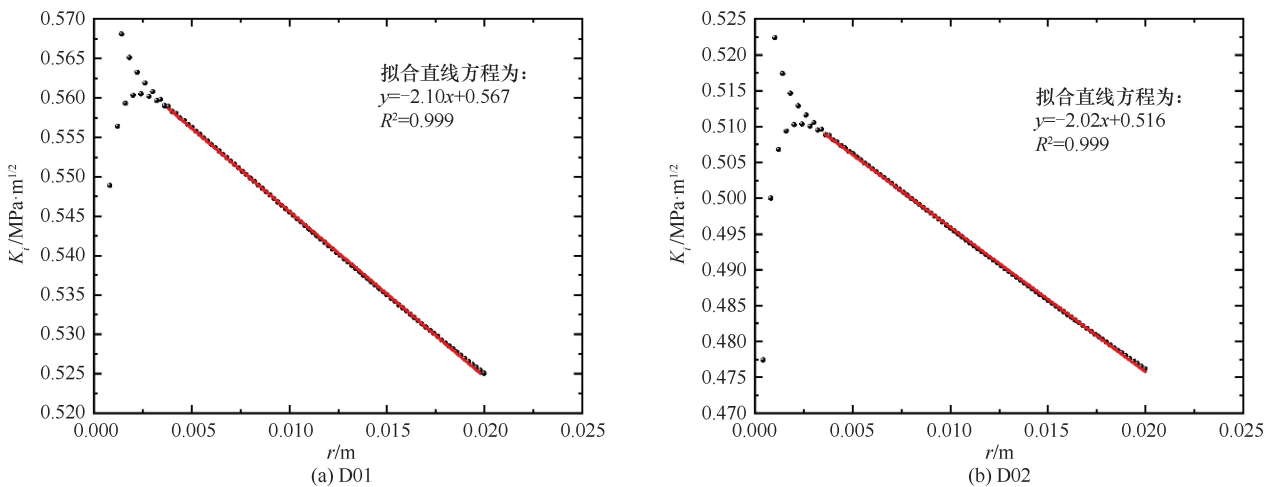


图 6 有限元建模及后处理应力云图(单位: Pa)

Fig. 6 Finite element modelling and post-processing stress clouds (Unit: Pa)



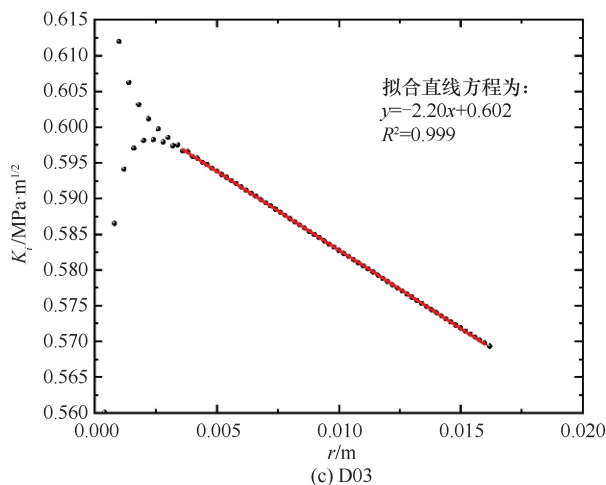
图7 考虑偏心现象复合试件  $K_I-r$  曲线Fig. 7  $K_I-r$  curve of composite specimen considering eccentricity

表4 全级配混凝土/玄武岩复合试件试验结果

Table 4 Test results of fully-graded concrete/basalt composite specimens

| 试件编号 | 峰值荷载/kN | 吸能能力/ $N \cdot m^{-1}$ | 断裂能/ $N \cdot m^{-1}$ | 断裂韧度/ $MPa \cdot m^{1/2}$ |       |
|------|---------|------------------------|-----------------------|---------------------------|-------|
|      |         |                        |                       | 不考虑偏心                     | 考虑偏心  |
| D01  | 114.99  | 10.99                  | 75.46                 | 0.323                     | 0.567 |
| D02  | 124.84  | 12.16                  | 96.00                 | 0.351                     | 0.516 |
| D03  | 108.56  | 34.47                  | 103.30                | 0.305                     | 0.602 |

### 3 结论

本文以白鹤滩拱坝为依托,在坝址附近钻芯得到玄武岩芯样,采用与其相同配合比制备的全级配混凝土/玄武岩复合试件开展了断裂试验研究,得到以下结论。

(1)准静态荷载作用下复合试件均沿预制裂缝方向发生扩展,断裂面较粗糙。而动态荷载作用下复合试件扩展过程中偏向含斜裂缝的玄武岩材料,断裂面较光滑。与全级配混凝土相比,复合试件的断裂参数均大大降低,由此可见界面部分更加薄弱。全级配混凝土/玄武岩界面断裂参数存在应变率效应。

(2)本文采用试验和数值模拟相结合办法得到断裂韧度。通过激光位移计测得峰值荷载处的位移运用在数值计算中,模拟了试验过程中存在的偏心现象,从而更加反映裂缝的真实状态,使结果更加真实。

从试验结果发现,岩石部分存在的天然裂隙会严重降低混凝土/岩石复合试件的刚度和强度。在实际工程中,在动荷载作用下上述影响更加严重,应加强关注。此外,本文提供了直接拉伸断裂试验方案,丰富了界面断裂试验形式,并对界面动态荷载作用断裂参数进行研究。但是需要说明的是,本文试件数量有

限,深入了解全级配混凝土/岩石复合试件的静动态断裂性能需要更多的试验研究。

### 参考文献(References):

- [1] ČERVENKA J, CHANDRA KISHEN J M, SAOUMA V E. Mixed mode fracture of cementitious bimaterial interfaces Part II: Numerical simulation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1998, 60(1): 95-107.
- [2] DONG W, WU Z M, ZHOU X M, et al. An experimental study on crack propagation at rock-concrete interface using digital image correlation technique[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 171: 50-63.
- [3] 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]. Construction and Building Materials, 2016, 120: 293-308.
- [4] LI D Y, XIAO P, HAN Z Y, et al. Mechanical and failure properties of rocks with a cavity under coupled static and dynamic loads[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 225: 106195.
- [5] KISHEN J M C, SAOUMA V E. Fracture of rock-concrete interfaces: Laboratory tests and applications [J]. ACI Materials Journal, 2004, 101(3): 325-331.
- [6] 张利花. 岩石-混凝土界面断裂特性与界面拉伸软化本构关系试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.

- Rock-concrete Interface and Tensile Softening Constitutive Relation of Interface[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [7] POON C S, LAM L, WONG Y L. Effects of fly ash and silica fume on interfacial porosity of concrete[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1999, 11(3): 197-205.
- [8] WONG Y L, LAM L, POON C S, et al. Properties of fly ash-modified cement mortar-aggregate interfaces[J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(12): 1905-1913.
- [9] POPE A W, JENNINGS H M. The influence of mixing on the microstructure of the cement paste/aggregate interfacial zone and on the strength of mortar[J]. *Journal of Materials Science*, 1992, 27(23): 6452-6462.
- [10] SLOWIK V, CHANDRA KISHEN J M, SAOUMA V E. Mixed mode fracture of cementitious bimaterial interfaces Part I: Experimental results [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1998, 60(1): 83-94.
- [11] 王振波, 周潮, 王家赫, 等. 高延性水泥基材料(ECC)开裂后渗透性研究综述[J]. *水利发展研究*, 2024, 24(6): 59-64.  
WANG Zhenbo, ZHOU Chao, WANG Jiahe, et al. Summary of research on the permeability of Engineered Cementitious Composites (ECC) after cracking[J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(6): 59-64.
- [12] ZHONG H, OOI E T, SONG C M, et al. Experimental and numerical study of the dependency of interface fracture in concrete-rock specimens on mode mixity[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2014, 124: 287-309.
- [13] 罗丹旋, 谢雨卿, 苏国韶, 等. 岩石-混凝土界面 I—II 型断裂及声发射特征[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(7): 118-130.  
LUO D N, XIE Y Q, SU G S, et al. Mixed mode I—II fracture and acoustic emission characteristics of rock-concrete interfaces[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(7): 118-130.
- [14] 段国勇, 马如梦. 三峡库区灰岩浸泡损伤-孔隙水压耦合模型研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(9): 178-186.  
DUAN Guoyong, MA Rumeng. Study on the coupled model of limestone soaking damage and pore water pressure in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(9): 178-186.
- [15] 杨卿, 陈志亮, 李国锋, 等. 地震作用下岩质高边坡行波激励与一致激励动力响应分析 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(9): 164-177.  
YANG Q, CHEN Z L, LI G F, et al. Analysis for dynamic response of traveling-wave excitation and uniform excitation on high rock slope under earthquake action [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(9): 164-177.
- [16] ZHAO G F, RUSSELL A R, ZHAO X B, et al. Strain rate dependency of uniaxial tensile strength in Gosford sandstone by the Distinct Lattice Spring Model with X-ray micro CT[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2014, 51(7/8): 1587-1600.
- [17] LOK T S, LI X B, LIU D, et al. Testing and response of large diameter brittle materials subjected to high strain rate[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2002, 14(3): 262-269.
- [18] DAI F, HUANG S, XIA K W, et al. Some fundamental issues in dynamic compression and tension tests of rocks using split Hopkinson pressure bar[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010, 43(6): 657-666.
- [19] LI X B, LOK T S, ZHAO J. Dynamic characteristics of granite subjected to intermediate loading rate[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2005, 38(1): 21-39.
- [20] LI X B, ZHOU T, LI D Y. Dynamic strength and fracturing behavior of single-flawed prismatic marble specimens under impact loading with a split-Hopkinson pressure bar[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(1): 29-44.
- [21] MINDESS S, BANTHIA N, YAN C. The fracture toughness of concrete under impact loading[J]. *Cement and Concrete Research*, 1987, 17(2): 231-241.
- [22] NGO T T, PARK J K, KIM D J. Loading rate effect on crack velocity in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 197: 548-558.
- [23] NOGUEIRA C L, RENS K L. Experimental analysis of cement-based materials under shear stress [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 170: 392-401.
- [24] ZHANG X X, RUIZ G, YU R C, et al. Fracture behaviour of high-strength concrete at a wide range of loading rates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(10/11): 1204-1209.
- [25] MUSIKET K, ROSENDAHL M, XI Y P. Fracture of recycled aggregate concrete under high loading rates[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 28(6): 04016018.
- [26] CADONI E, SOLOMOS G, ALBERTINI C. Concrete behaviour in direct tension tests at high strain rates [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2013, 65(11): 660-672.
- [27] 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.
- [28] 马振洲, 钟红, 陈育志, 等. 混凝土/花岗岩界面 I—II 复合型动态断裂试验研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(4): 277-282.  
MA Z Z, ZHONG H, CHEN Y Z, et al. An experimental study on mixed mode I—II dynamic fracture of concrete/granite interface [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(4): 277-282.
- [29] 钟红, 马振洲, 范向前, 等. 混凝土/花岗岩界面动态断裂性能的劈拉试验研究[J]. *水电与抽水蓄能*, 2019, 5(6): 133-138.  
ZHONG H, MA Z Z, FAN X Q, et al. Split-tension tests for dynamic fracture behavior of concrete/granite interface [J]. *Hydropower and Pumped Storage*, 2019, 5(6): 133-138.
- [30] 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 H, MA Z Z, HU S W, et al. Axial tensile tests for dynamic fracture characteristics of concrete-granite interface [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(11): 152-158.
- [31] 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 J X, DONG W, ZHONG H. Rate-dependency of tensile fracture properties of rock-concrete interface [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(12): 108-119.
- [32] 陈兴, 卢玉斌, 滕骁, 等. 砂浆-花岗岩界面过渡区的劈裂拉伸

- 试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(4): 10-16.
- CHEN X, LU Y B, TENG X, et al. Experimental study on split tension of mortar-aggregate interface transition zone [J]. China Concrete and Cement Products, 2016(4): 10-16.
- [33] 张亚洲, 钟红, 蒋新新. 混凝土-岩石界面断裂试验研究进展[J]. 混凝土, 2024(1): 21-27.
- ZHANG Y Z, ZHONG H, JIANG X X. Research progress on fracture mechanics of concrete-rock interface [J]. Chinese Journal of Concrete, 2024(1): 21-27.
- [34] 张亚洲, 钟红, 李春雷, 等. 全级配混凝土静态轴拉断裂试验[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(2): 569-578.
- ZHANG Y Z, ZHONG H, LI C L, et al. Static and dynamic axial tensile fracture of fully-graded concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2024, 52(2): 569-578.
- [35] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土试验规程: SL/T 352—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Test Code for Hydraulic Concrete: SL/T 352—2020[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2020.
- [36] TIAN Y, ZHAO X Y, TAI Y T, et al. Investigation on the fracture toughness of concrete-rock interface damaged by high-pressure water environment [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 277: 109025.
- [37] 国家能源局. 混凝土重力坝设计规范: NB/T 35026—2022[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2022.
- National Energy Bureau of the People's Republic of China. Code for Design of Concrete Gravity Dams: NB/T 35026—2022[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2022.
- [38] WANG H B, LI C L, TU J, et al. Dynamic tensile test of mass concrete with Shapai Dam cores [J]. Materials and Structures, 2016, 50(1): 44.
- [39] BISCHOFF P H, PERRY S H. Compressive behaviour of concrete at high strain rates[J]. Materials and Structures, 1991, 24(6): 425-450.
- [40] 张亚洲, 钟红, 王立强. 位移外推法和扩展有限元法计算应力强度因子的比较[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(5): 2045-2051.
- ZHANG Y Z, ZHONG H, WANG L Q. Comparison of displacement extrapolation method and extended finite element method for calculating stress intensity factor [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(5): 2045-2051.
- [41] 许金泉. 界面力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- XU J Q. Mechanics of Interface [M]. Beijing: Science Press, 2006.

(责任编辑 王璐)