

文章编号: 1000-7598(2010)01-0032-07

三维裂隙间距对砂浆材料力学特性的影响

杨磊¹, 李术才¹, 郭彦双^{1,2}, 朱维申¹, 林春金¹

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061; 2. 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 采用刚性伺服试验机 and 声发射仪器, 研究了预置三维裂隙间距对砂浆材料力学特性的影响, 总结了含裂隙试件的破坏过程。综合分析单轴压缩应力-应变曲线和声发射数据可知, 含三维裂隙试件的破坏主要由预置裂隙扩展、贯通造成, 破坏过程可以分为微裂纹萌生、预置裂隙起裂、扩展、贯通几个基本阶段, 试件最终破坏型式为单斜面剪切破坏。裂隙间距 d 与椭圆形裂隙长轴 $2c$ 之比 ($d/2c$) 在 0~1 范围内, 随着 $d/2c$ 值增大, 试件起裂应力 σ_i 和峰值强度 σ_p 有降低的趋势。当 $d/2c$ 值从 1/3 增至 2/3 时, σ_i 和 σ_p 发生突降, 可见此范围为影响强度的敏感区间。 $d/2c$ 值为 1 的试件 σ_i 和 σ_p 最低, 相对完整 (无预置裂隙) 试件分别降低了 22.48% 和 18.60%。裂隙间距不同的试件 σ_i 和 σ_p 之比变化范围为 83.1%~78.9%, 且随 $d/2c$ 值增大, σ_i/σ_p 有下降趋势。可见裂隙间距越大, 从起裂应力到峰值应力的承载空间越大, 这对工程实践有一定参考价值。

关键词: 砂浆试件; 声发射; 裂隙间距; 起裂应力; 峰值强度

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Influence of space between 3D-cracks on mechanical feature of mortar material

YANG Lei¹, LI Shu-cai¹, GUO Yan-shuang^{1,2}, ZHU Wei-shen¹, LIN Chun-jin¹

(1. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

Abstract: The rigid serve-controlled test machine and acoustic emission equipment are used to study the influence of space between 3D-cracks on the mechanical feature of mortar material; and the failure process of samples with pre-existing cracks is concluded. The analysis of complete stress-strain curves and AE data indicates that sample failure is due to the propagation and coalescence of cracks. Failure process of samples with pre-existing cracks could be divided into the following stages: microcrack initiation, initiation of pre-existing cracks, crack propagation and crack coalescence. The failure pattern is shear failure along single inclined plane. When the ratio of cracks space d and length of elliptic crack long axis $2c$ ranging from 0-1, as the ratio grows, the initiation stress and maximum stress of samples reduce. With the ratio $d/2c$ growing from 1/3 to 2/3, the initiation stress and maximum stress fall suddenly, showing that this space scope is the sensitive range. When the ratio $d/2c = 1$, the initiation stress and maximum stress of sample fall 22.48% and 18.60% respectively corresponding to the sample without pre-existing cracks. The ratio of initiation stress to maximum stress of all different samples ranges from 83.1% to 78.9%. As the ratio $d/2c$ grows, the ratio of initiation stress to maximum stress declines, which indicates that as space d grows, the loading range between initiation stress and maximum stress increase.

Key words: mortar material sample; acoustic emission; space between cracks; initiation stress; maximum stress

1 引言

岩体中裂隙和节理等结构面是在漫长的地质历史过程中由成岩及构造运动产生的, 且存在于复杂的应力环境中。当环境营力达到一定程度, 岩体中的裂隙就开始萌生、扩展以致贯通, 最后使岩体失

去承载能力^[1]。研究表明, 岩体中单条裂隙扩展不足以引发整体失效, 而众多裂隙的联合扩展及裂隙间相互作用才是影响岩体强度的关键因素^[2]。很多工程事故都是由于岩体内部裂隙的扩展、贯通造成的, 如法国弥帕塞大坝的失稳破坏是由于坝基片麻岩中的微裂隙的扩展、贯通造成的, 意大利瓦伊昂

收稿日期: 2008-06-05

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (No. 50625927); 国家自然科学基金资助项目 (No. 50579033, No. 50574053)。

第一作者简介: 杨磊, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要从事岩石力学试验研究方面的工作。E-mail: dylei@mail.sdu.edu.cn

边坡滑移以及我国长江三峡奉节段某处山体滑坡等事故也与其岩体内部裂隙的扩展有关。大量理论研究和工程实践表明裂隙的存在对工程具有潜在的危险性。因此，裂隙扩展、演化规律及裂隙间相互作用机制成为岩土工程热门研究方向。

鉴于三维问题在数学处理和现象观测上的复杂性，人们对裂隙扩展问题的研究往往简化成二维情况来处理。自 20 世纪 20 年代 Griffith 提出其经典断裂理论以来，关于二维裂隙的理论和试验研究已经很多^[3-6]，但实际工程中，如地下峒室边墙、边坡等应力扰动区范围内，裂隙大都处于三维应力状态（表面或深埋裂隙），把三维裂隙简化为二维裂隙会丢失许多重要的三维信息，因此与实际情况有较大差距。

对三维裂隙扩展的试验研究是从近 50 年才开始的，A.V.Dyskin & L.N.Germanovich 分别采用透明树脂和 PMMA 材料进行了三维裂隙扩展试验，研究了含单双裂隙试件在单轴压缩条件下的裂隙扩展状况^[2, 7]，Adams & Sines 研究了含币状裂隙的 PMMA 试件在单轴压缩下的裂隙扩展情况^[8]；香港的黄凯珠和周锦添完成了表面椭圆裂隙和币状裂隙在 PMMA 及真实岩石材料中的三维扩展试验^[9]；滕春凯、尹详础等（1987 年，1998 年）运用玻璃、有机玻璃、大理岩等平板材料研究了表面裂隙起裂和扩展机制，并进行了初步理论探讨^[10]。透明树脂和 PMMA 为均匀性材料，而实际工程中遇到的真实岩体为非均匀性材料，因此采用均匀材料进行裂隙扩展试验具有一定局限性。另外，工程岩体中裂隙绝大多数为深埋裂隙，表面裂隙的扩展贯通机制也不能很好地反映实际情况。

裂隙联合扩展及裂隙间相互作用是导致整体失稳的根本原因，前人研究的重点是单条裂隙的萌生扩展演化规律，对多裂隙间的相互作用及其影响因素（裂隙位置、裂隙角度、裂隙间距等）考虑较少。有的也仅限于现象的描述，并没有量化分析。裂隙间的相互作用主要表现为裂隙周围应力场的叠加，而裂隙的间距对叠加效果影响较大。本文用试验方法研究了预置三维裂隙间距对砂浆材料的力学性能的影响。在一定程度上弥补了前人试验研究中的不足，对理论分析和工程应用均具有一定的参考意义。

2 试验材料与试件制备

特制砂浆材料配比为 C42.5#硅酸盐水泥，砂土（粒径小于 5 mm）：减水剂：水=1：2.34：0.01：0.35。按此比例配制的砂浆具有良好的流动性、黏聚性和

保水性，并能方便地埋置裂隙。预置裂隙材料为 0.1 mm 厚聚酯薄膜片，形状为椭圆，尺寸为 $2c \times 2b = 30 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 。对砂浆材料进行物理力学性能测试，所得参数与砂岩对比见表 1。

表 1 砂浆材料和砂岩的物理力学测试指标
Table 1 Physico-mechanical properties of mortar material and sandstone

指标	弹性模量 E/GPa	抗压强度 σ_c/MPa	抗拉强度 σ_t/MPa	泊松比 μ	断裂韧度 K_{Ic} $/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	密度 $/(\text{g}/\text{cm}^3)$
砂浆	22.09	50.26	2.19	0.14	0.58	2.26
砂岩	3~35	20~170	2~25	0.10~0.30	0.22~2.66	2.20~2.71

砂浆材料拉压比高达 23，是具有良好的脆性的非均质材料，其物理力学参数与真实岩石十分接近。作为真实岩石的替代品进行试验可以很好地模拟其受力变形特征，且材料性质稳定，不易受外界环境影响，取材方便。

试件制备过程：按比例称取不同组份放入搅拌机中搅拌 3 min，然后把混合均匀的砂浆材料迅速倒入组装好的模具（预置裂隙通过细棉线绑定于模具中，图 1）。将整体放在振动台上振动约 150 s，以保证混合物均匀密实，气体充分溢出。然后把试件放入 38℃ 蒸汽养护箱中 7 d 达到预期强度。

试件长方体其尺寸（ $L \times W \times H$ ）为 70 mm×70 mm×140 mm。为研究三维裂隙间距对砂浆材料力学性能的影响，制备 4 组含双裂隙试件，间距 d 分别为 0、10、20、30 mm，裂隙间距 d 与裂隙长轴 $2c$ 之比 $d/2c$ 分别为 0、1/3、2/3、1。裂隙面与加载方向夹角 α 均为 45°，双裂隙平行、且等距布置于试件几何中心两侧（沿高度方向重叠布置），试件形状及裂隙布置见图 2。另外制备了不含初始裂隙的完整试件作为参照标准，共对 5 组不同试件进行了单轴压缩试验。



图 1 模具（用棉线定位内部裂隙）
Fig.1 Die with cracks fixed by cotton string

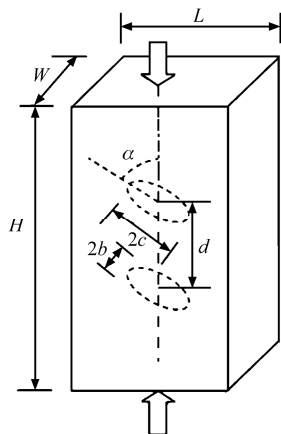


图2 试件形状及裂隙布置示意图

Fig.2 Schematic diagram of sample shape&crack disposal

3 试验装置与技术

本试验主要装置为山东大学岩土与结构工程研究中心自行设计生产的3 000 kN全数字电液伺服控制刚性三轴岩石试验机和美国 PAC 公司生产的声发射 (AE) 测试仪, 见图 3。试验所用传感器分别为: 500 kN 荷载传感器, 5 mm 轴向位移传感器。声发射仪采用 8 探头定位, 探头尺寸为 $\phi 10 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$, 频率响应范围为 100~600 kHz, 采用 40 db 的增益。另外, 用高速摄影机记录试件受压过程中的外观破坏过程。

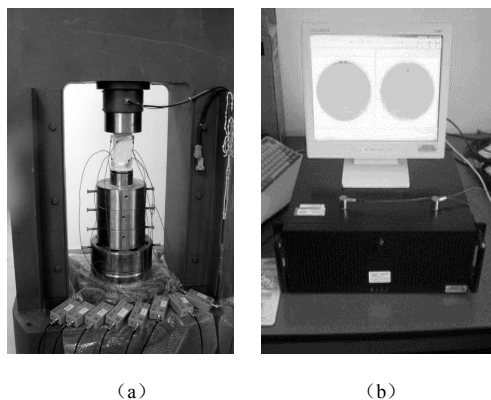


图3 伺服压力机和声发射测试仪

Fig.3 Serve-controlled test machine and acoustic emission equipment

试验开始前, 先把试件放置在压力机平台上, 控制活塞缓缓上升直至试件上表面与刚性压板轻微接触 (此时试件不受压力)。将 8 个声发射探头表面涂沫声耦合剂后粘结在试件表面, 并用透明胶带固定保证松紧合适 (固定过紧影响试件受力状态, 固定过松声发射信号传递不良)。固定好轴向位移传感

器后启动压力机数据采集系统和 AE 数据采集处理软件。试验采用位移控制模式, 加载速率为 0.002 mm/s。试验开始时, 要确保压力机数据采集系统和 AE 数据采集系统同时启动, 以保证应力-应变数据与 AE 信号关于时间对应。

4 试验结果分析

用上述试验装置和技术对 5 组不同试件进行了单轴压缩试验, 得到各组的全应力-应变曲线以及与时间有关的受力和变形曲线。同时 AE 数据采集系统记录试件受压过程中的声发射特征数 (AE hits), 以及声发射累计特征数 (acc hits)。受力变形数据和声发射数据在时间轴上相互对应, 综合反映砂浆试件的受力破坏过程。

4.1 试件受力变形过程

应力-应变全过程曲线反映了试件的受力变形特征, 而声发射数据表征试件内部破裂信息。同一时刻的受力变形数据与声发射信息相结合可推测试件内部裂隙的萌生、扩展、贯通情况以及对试件整体力学特征的影响。

对比分析 4 组含裂隙试件的试验曲线可知, 尽管裂隙间距 d 不同, 但应力-应变曲线及声发射特征曲线形状类似。含三维裂隙试件的受力变形过程可分为 4 个阶段, 且与材料破坏的 4 个阶段相对应。以 $d=20 \text{ mm}$ 试件为例说明各阶段的划分, 见图 4。

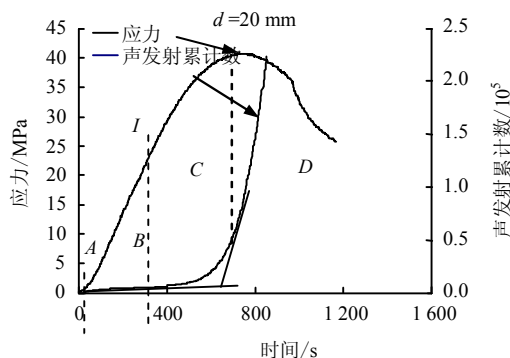


图4 试件变形破坏阶段

Fig.4 Deformation and failure stages of sample

试件受力变形过程的第 1 阶段: 压缩阶段 (A 段), 对应为微裂隙闭合和萌生阶段。初期的压缩应力使得材料中微裂隙、孔洞等逐渐闭合, 同时材料中萌生许多尺度不均的微裂隙。声发射累计数很少。第 2 阶段: 弹性变形阶段 (B 段), 对应为微裂隙的继续萌生和扩展阶段。微裂隙萌生速度加快, 但扩展速度较缓慢。声发射累计数稳定增长。第 3

阶段：弹塑性变形阶段（C段），对应预置裂隙的起裂和扩展阶段。当外荷载增大至起裂应力（图4中I点），预置裂隙尖端起裂，生成宏观翼裂纹并不断扩展，伴随声发射数迅速增长，声发射累计数曲线斜率突增。第4阶段：整体失稳阶段（D段），对应宏观裂隙的贯通阶段。峰值强度后的软化阶段，材料承载能力迅速下降至残余强度。此阶段宏观裂隙的扩展、交叉、及贯通造成声发射数急剧增长，声发射曲线陡升直至试件破坏。

含双裂隙试件（ d 分别为 0、10、20 mm 和 30 mm）及完整试件的应力和声发射曲线如图5所示。与完整试件相比，含裂隙试件压密阶段较短，较小应力下就能完成压密过程，这是由于预置裂隙的存在改变了周围的应力场分布，裂隙周围存在应力集中，使得区域内萌生的微裂纹迅速进入稳定扩展阶段。整体失稳阶段中，伴随内部宏观滑裂面的形成和滑移，含裂隙试件所承受应力迅速降低，而完整试件应力降则相对平缓，这是因为含裂隙试件更容易形成宏观滑裂面而导致整体失稳破坏，含不同间距裂隙试件之间差异并不明显。

4.2 预置裂隙扩展演化过程

预置裂隙萌生、扩展、贯通的过程就是试件变形破坏过程。砂浆材料中裂隙扩展很难直接观测，故采用声发射设备采集破裂点信息，以分析裂隙扩展演化过程。另外，还可结合观察法综合判断，观察主要包括两方面：①破裂面与试件表面相交的破裂迹线；②将试件沿破裂面掰开以观察内部裂隙扩展情况。

限于篇幅，以 $d=20$ mm 试件为例介绍内裂隙扩展演化及试件破坏过程。试验中由 8 个声发射探头对试件内部破裂点进行空间定位，经 AE 数据处理软件分析，以散点图的形式反映裂隙扩展和试件破坏的过程，见图 6（图中预置裂隙已标出），预置裂隙扩展贯通过程见图 7。当压缩荷载低于 $3/4$ 峰值强度 σ_p 时，由图 6(a) 可见，此时声发射破裂点较少，且在试件中分布较均匀，说明试件压缩阶段和弹性阶段初期，材料未发生较大破坏，只有原始缺陷的压缩摩擦及微裂纹萌生发出少量声发射信号。预置裂隙附近声发射破裂点稍有集中但仍不多，原因是裂隙附近存在应力集中区导致微裂纹萌生较多，但应力集中水平未达到裂隙扩展临界值，预置裂隙未扩展，对应图 7(a)。当外荷载增至约 $3/4 \sigma_p$ 时，由图 6(b) 可见试件中破裂点密度增大，破裂发生速度加快，说明微裂纹萌生速度加快。此阶段破裂点位置分布不均匀，大多集中在预置裂隙附近，

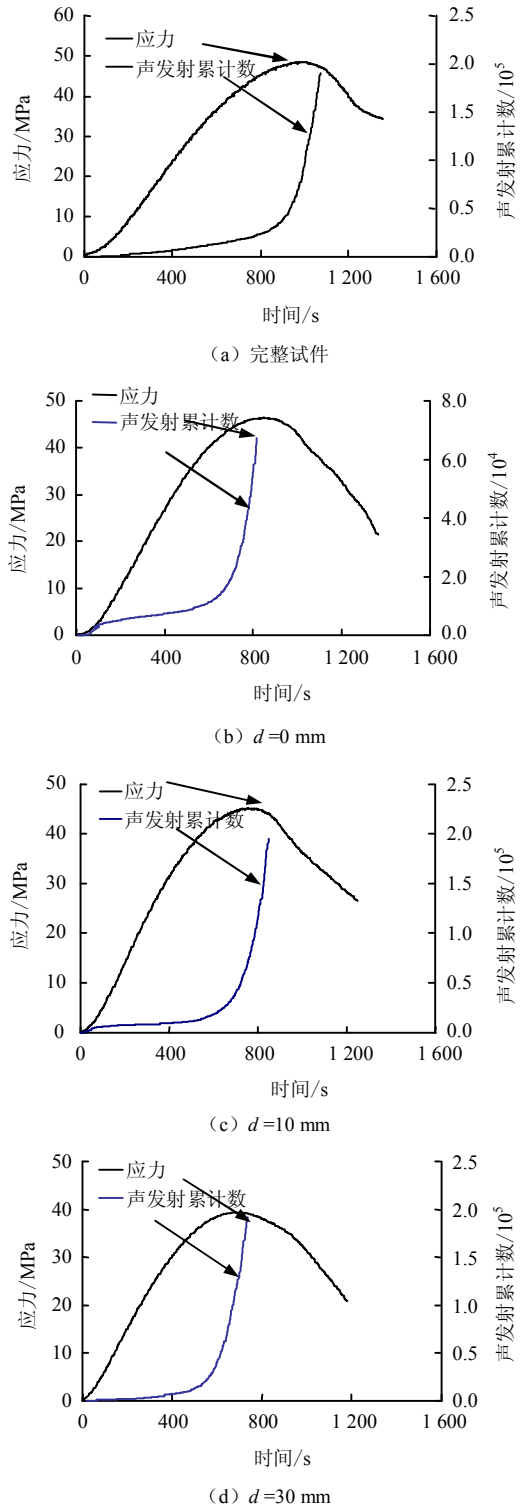


图5 不同试件的应力时间和声发射时间曲线
Fig.5 Stress-time and acc.hits-time curves of samples

尤其是裂隙端部和裂隙之间区域，可见此处应力集中程度最大。裂隙尖端破裂点密集，说明此处应力超过裂隙扩展临界值，宏观预置裂隙已开始扩展生成翼裂纹，对应图 7(b)；荷载继续增加，由图 6(c) 可见，试件中破裂点密度持续增大，且主要集中于预置裂隙周围区域，而试件其他部位破裂很少发生。

此时裂隙间破裂点密度很高,说明裂隙间应力叠加区已开始发生破坏。预置裂隙尖端附近产生拉伸包裹翼裂纹并沿近似平行于最大主应力方向扩展,上裂隙下端翼裂纹和下裂隙上端翼裂纹分别向下和向上扩展切割岩桥,岩桥厚度持续降低,岩桥区承载力下降,两裂隙周围应力场叠加作用越来越明显,对应图 7(c);当荷载达到 σ_p 后,由图 6(d)可见,试件内部破裂情况极其严重,破裂点分布以裂隙为中心迅速向其他部位扩展,裂隙间区域破裂发生密度最大,说明翼裂纹扩展已彻底切断岩桥,形成中间薄弱区后,两裂隙贯通成为一条主裂隙,并继续沿近似平行于主荷载方向扩展,形成宏观滑裂面,试件整体承载力急剧下降,对应图 7(d)。最后试件为单斜面剪切破坏,试件断裂迹线及双裂隙贯通情况照片见图 8。

d 分别为 0、10、30 mm 试件的破坏过程与 $d=20$ mm 试件类似:所含预置裂隙在外荷载达到约 $3/4\sigma_p$ 时起裂,裂隙长轴尖端附件产生翼裂纹并近似沿主应力方向扩展;当外荷载达到 σ_p 时,岩桥被彻底贯穿,双裂隙贯通为单条主裂隙导致试件破坏。在本试验所取的 d ($d/2c=0\sim 1$) 范围内,岩桥均被贯穿,两条相邻裂隙贯通为一条主裂隙,这与 Dyskin 用透明树脂材料所做试验中的现象相吻合^[2]。

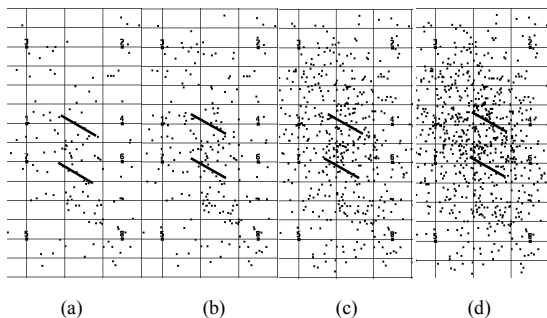


图 6 试件变形破坏过程的声发射源定位图(正面图)
Fig.6 AE location of fracture points in sample(HL plane)

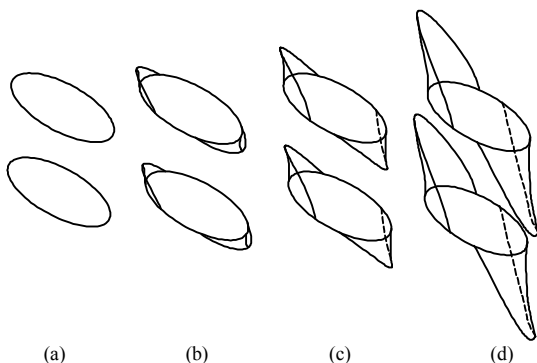


图 7 预置双裂隙扩展贯通过程示意图
Fig.7 Growth process of pre-existing two cracks

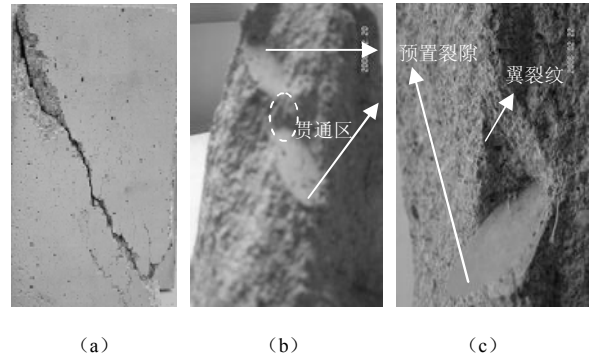


图 8 试件断裂迹线及预置裂隙贯通情况
Fig.8 Fracture trace and crack coalescence pattern of failure samples

4.3 起裂应力分析

预置裂隙开始扩展时的临界应力即为起裂应力 σ_i ,判断方法为声发射累计曲线斜率陡增点对应的应力,此刻预置裂隙尖端声发射破裂点密度突然增大,图 4 中 I 点所示。受预置裂隙间距 d 的影响,4 组试件起裂应力不同,见表 2。

表 2 不同裂隙间距试件起裂应力
Table 2 The initiation stress of samples with different values of $d/2c$

$d/2c$	0	1/3	2/3	1
σ_i/MPa	37.7	36.8	31.6	31.1

无初始损伤的完整试件 σ_i 最高,为 40.12 MPa, $d/2c$ 值为 1 试件最低。 σ_i 随 $d/2c$ 值增大而降低,说明在 $d/2c$ 值 0~1 范围内,间距越大,预置裂隙越容易起裂。 $d/2c$ 分别为 0、1/3、2/3、1 的试件起裂应力相对完整试件分别降低了 6.03 %、8.28 %、21.24 %和 22.48 % (图 9),可见裂隙间距对 σ_i 的影响十分明显。值得注意的是,当 $d/2c$ 从 1/3 变到 2/3, σ_i 发生突降,说明此范围为影响材料起裂应力的敏感区间。试件承受荷载时预置裂隙周围应力场叠加效果不同是导致起裂应力不同的主要原因。

4.4 峰值强度分析

4 组含双裂隙试件与完整试件的轴向应力-应变曲线见图 10。虽然裂隙间距不同,但应力应变曲线形状基本一致,裂隙贯通和试件破坏型式类似。但 d 对试件峰值强度 σ_p 有很大影响,表 3 列出了不同试件的 σ_p 值,并与完整试件(σ_{pnc})作了比较。起裂应力后试件仍处于加载阶段,直至应力达到峰值强度。试件受力过程的 σ_i 到 σ_p 段提供一定承载储备,因此, σ_i/σ_p 值对工程安全预警具有重要意义。不同试件的 σ_i/σ_p 值也列于表 3。

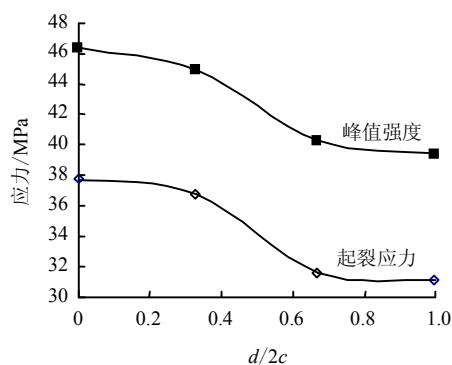


图9 裂隙间距对起裂应力和峰值强度的影响

Fig.9 Influence of crack space on the initiation stress and peak stress

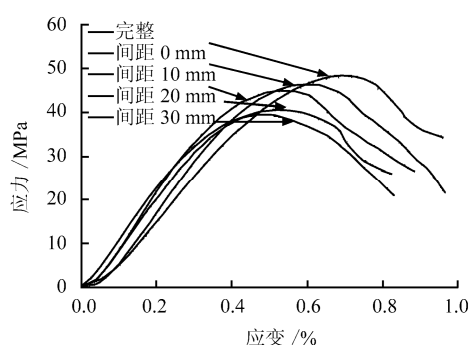


图10 5组试件轴向应力-应变曲线

Fig.10 Axes stress-axes strain curves of 5 kinds of samples

表3 不同裂隙间距试件的峰值强度

Table 3 The maximum stress of samples with different crack space

$d/2c$	σ_p /MPa	$\frac{\sigma_p}{\sigma_{pnc}}$	$\frac{\sigma_i}{\sigma_p}$
0	46.4	0.959	0.813
1/3	45.0	0.926	0.818
2/3	40.3	0.833	0.784
1	39.4	0.814	0.789

完整试件峰值强度最高，为 48.4 MPa， $d/2c=0$ 的试件次之，且随 $d/2c$ 增大 σ_p 值有降低趋势； $d/2c$ 值为 0、1/3、2/3、1 的试件 σ_p 值相对完整试件分别降低了 4.13 %、7.02 %、16.74 % 和 18.60 %，见图 9，可见裂隙间距对材料抗压强度的影响是很明显的。值得注意的是，当 $d/2c$ 从 1/3 增至 2/3 时， σ_p 突然降低，降幅高达 9.72 %，说明 $d/2c$ 值从 1/3 至 2/3 范围为影响材料峰值强度的敏感区间。另外，由不同试件的 σ_i/σ_p 值可见， $d/2c$ 从 0~1 范围内， σ_i/σ_p 值由 83.1 % 降至 78.9 %，随着 $d/2c$ 值增大， σ_i/σ_p 值有下降趋势。也就是说，在一定范围内，间距越大，应力从起裂到峰值的加载空间越大，这作为一种承载安全储备对工程实践有一定的参考意义。

5 结 论

(1) 试验配制的砂浆材料拉压比高达 23，是具有良好的脆性的非均质材料，其物理力学参数与砂岩接近，可作为真实岩石的替代品进行试验。裂隙材料选用 0.1 mm 厚聚酯薄膜片，可较好地模拟非摩擦型裂隙。

(2) 虽然裂隙间距不同，但其受力变形曲线形状基本一致，试件的破坏过程可分为微裂隙萌生、预置裂隙起裂、扩展、贯通几个阶段。

(3) $d/2c$ 在 0~1 范围内，随 $d/2c$ 值增大试件起裂应力降低。 $d/2c$ 值分别为 0、1/3、2/3、1 的试件起裂应力相对于完整试件分别降低了 6.03 %、8.28 %、21.24 % 和 22.48 %。

(4) $d/2c$ 在 0~1 范围内，随 $d/2c$ 值增大试件峰值强度有降低的趋势。相对完整试件， $d/2c$ 值分别为 0、1/3、2/3、1 的试件峰值强度分别降低了 4.13 %、7.02 %、16.74 %、18.60 %。在一定间距范围内，裂隙间距越大，从起裂应力到峰值应力的加载空间越大，这作为承载安全储备对工程有重要意义。

(5) 起裂应力后，预置裂隙尖端产生翼裂纹并不断扩展，最后预置裂隙间岩桥被贯通，两条预置裂隙形成宏观滑裂面，最后试件为单斜面剪切破坏。

参 考 文 献

- [1] 李廷春. 三维裂隙扩展的 CT 试验及理论分析研究 [博士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2005.
- [2] DYKSI A V, SAHOURYEH E, JEWELL R J, et al. Influence of shape and locations of initial 3-D cracks on their growth in uniaxial compression[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2003, 70: 2115—2136.
- [3] 朱维申, 陈卫忠, 申晋. 雁形裂纹扩展的模型试验及断裂力学机制研究[J]. 固体力学学报, 1998, 19(4): 355—360.
ZHU Wei-shen, CHEN Wei-zhong, SHEN Jin. Simulation experiment and fracture mechanism study on propagation of echelon pattern cracks[J]. **Acta Mechanica Sinica**, 1998, 19(4): 355—360.
- [4] 李海波, 赵坚, 李廷芥, 等. 花岗岩动三轴抗压强度的裂纹模型研究 (II): 应用[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 329—333.
LI Hai-bo, ZHAO Jian, LI Ting-jie, et al. Study on dynamic triaxial compressive strength of a granite using sliding crack model (II): Application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(3): 329—333.
- [5] TANG C A, LIN P, WONG R H C, et al. Analysis of

- crack coalescence in rock-like materials containing three flaws. II. Numerical approach[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(7): 925—936.
- [6] 陈卫忠, 李术才, 朱维申, 等. 岩石裂纹扩展的实验和数值分析研究[J]. **岩石力学与工程学报** 2003, 22(1): 18—23.
CHEN Wei-zhong, LI Shu-cai, ZHU Wei-shen, et al. Experimental and numerical research on crack propagation in rock under compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(1): 18—23.
- [7] DYSKIN A V, GERMANOVICH L N, USTINOV K B. A 3-D model of wing crack growth and interaction[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 1999, 63: 81—110.
- [8] ADAMS M, SINES G. Crack extension from flaws in brittle material subjected to compression[J]. **Tectonophysics**, 1978, 49: 97—118.
- [9] WONG R H C, LAU K W, LIN P, et al. A numerical and experimental study of the effects of non-persistent joints on slope stability problems[C]//Symposium on Slope Hazards and their Prevention, Hong Kong: [s. n.], 2000: 126—131.
- [10] 腾春凯, 尹祥础, 李世愚, 等. 非穿透裂纹平板试件三维破裂的试验研究[J]. **地球物理学报**, 1987, 30(4): 371—378.
TENG Chun-kai, YIN Xiang-chu, LI Shi-yu, et al. Experimental study of three dimensional fracture in plate specimens with non-penetrating crack[J]. **Acta Geophysica Sinica**, 1987, 30(4): 371—378.
-
- 上接第 19 页
- [2] 谢定义. 21 世纪土力学的思考[J]. **岩土工程学报**, 1997, 19(4): 111—114.
XIE Ding-yi. Consideration of soil mechanics in 21st century[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(1): 1—13.
- [3] LIU M D, CARTER J P. Volumetric deformation of natural clays[J]. **Journal of Geomechanics**, 2003, 2(3): 236—252.
- [4] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. **岩土工程学报**, 2001, 23(1): 1—13.
XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess mechanics[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(1): 1—13.
- [5] 谢定义, 齐吉林. 土的结构性及其量化参数研究的新途径[J]. **岩土工程学报**, 1999, 21(6): 651—656.
XIE Ding-yi, QI Ji-ling. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(6): 651—656.
- [6] 陈存礼, 胡再强, 高鹏. 原状黄土的结构性及其与变形特性关系研究[J]. **岩土力学**, 2006, 27(11): 1891—1896.
CHEN Cun-li, HU Zai-qiang, GAO Peng. Research on relationship between structure and deformation property of intact loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 1891—1896.
- [7] 邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇. 原状黄土结构性及其量化参数研究[J]. **岩土工程学报**, 2004, 26(4): 531—536.
SHAO Sheng-jun, ZHOU Fei-fei, LONG Ji-yong. Structural properties of loess and its quantitative parameter[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(4): 531—536.
- [8] 邵生俊, 邓国华. 原状黄土的结构性强度特性及其在黄土隧道围岩压力分析中的应用[J]. **土木工程学报**, 2008, 41(11): 93—98.
SHAO Sheng-jun, DENG Guo-hua. The strength characteristics of loess with different structures and its application in analyzing the earth pressure on loess tunnel[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2008, 41(11): 93—98.
- [9] 邵生俊, 龙吉勇, 杨生, 等. 湿陷性黄土结构性变形特性分析[J]. **岩土力学**, 2006, 27(10): 1668—1672.
SHAO Sheng-jun, LONG Ji-yong, YANG Sheng, et al. Analysis of structural deformation properties of collapsible loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(10): 1668—1672.
- [10] 骆亚生, 谢定义, 邵生俊, 等. 复杂应力条件下的土结构性参数[J]. **岩石力学与工程学报**, 2004, 23(4): 4248—4251.
LUO Ya-sheng, XIAN Ding-yi, SHAO Sheng-jun, et al. Structural parameter of soil under complex stress conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(4): 4248—4251.
- [11] 邓国华. 真三轴条件下黄土的结构性参数及结构性本构关系研究[博士学位论文 D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- [12] 冯志焱. 非饱和黄土结构性量化参数与结构性本构关系研究[博士学位论文 D]. 西安: 西安理工大学, 2008.