

岩石压剪断裂的模型试验研究*

刘东燕 朱可善

(建筑工程学院)

摘要 本文通过含中心斜裂纹砂浆试件的单轴压缩模型试验,测试并分析了裂纹扩展过程中的声发射特性和裂纹面相对位移。试验表明:岩石类脆性材料的压剪断裂破坏机理与拉剪断裂有本质的区别,裂纹面相对位移随轴压荷载的变化曲线与裂纹扩展过程中的声发射曲线具有一定的同步性,反映出中心斜裂纹压剪断裂的阶段性,以及裂纹的几何尺寸、分布规律和裂纹面物理力学性质对岩石压剪断裂的影响。

关键词 岩体, 压剪断裂, 声发射, 应力集中

中图法分类号 TU457

压剪断裂是岩石类脆性材料所特有的破坏现象,由于裂纹开度、闭合应力以及裂纹闭合后接触面的摩擦阻力对裂纹尖端应力场将产生不同的影响,使得岩石的压剪断裂与拉剪断裂在破坏机理和强度特征上都有明显的区别^[1]。线弹性断裂力学的复合断裂理论不能反映裂纹受压闭合效应,用于求解压剪断裂力学问题时,会得出两裂纹面相互嵌入的不合理现象^[2]。因此,对于岩石类脆性材料的压剪断裂,必须重新建立能反映裂纹面受压闭合效应的新的强度理论,而这一理论则要以岩石压剪断裂破坏机理和强度特性为研究基础。

为了深入研究压剪断裂的内在机理,为强度理论的建立提供实验依据,并验证理论公式及其计算结果。我们以水泥砂浆为试件材料,通过含裂纹体的单轴压缩试验,分析了含中心斜裂纹在不同方向下的强度、变形及破坏特征。分析试验结果以期达到以下几个目的。

(1) 测定初裂扩展方向角 θ ,稳定扩展长度 l_1 ,建立他们同预制裂纹方向角 β 及其长度 $2a$ 之间的关系,以进一步研究裂纹尖端应力场的演变及裂纹扩展的路径。

(2) 观察裂纹尖端初裂到失稳的强度演变过程,分析裂纹发展过程与脆性断裂的关系;分析含裂隙体的强度硬化和软化过程,建立初裂强度和峰值强度之间的关系。研究其本构特征和次生裂纹发生、发展的关系。

(3) 测定含裂隙体在单轴压缩过程中声发射全过程线 $P \sim AE$,以及荷载位移全过程线 $p \sim \delta$ 。分析裂纹形态对压剪断裂破坏过程的影响。以声发射过程来分析压剪断裂破坏过程中各阶段的强度特征。

(4) 测定含裂纹体在受压剪荷载过程中裂纹面相对法向和切向位移。分析随荷载增加的位移增长所伴随的压剪断裂声发射现象,从而研究裂纹对岩石强度的影响,建立新生裂纹

* 收稿日期:1993-07-26.

刘东燕, 1959年生, 讲师. 重庆建筑大学建筑工程学院(630045).

扩展与原生裂纹面相对位移的关系。

1 模型制作及试件分组

为了较好地反映岩石脆性断裂特性和声波的传导特性,并考虑加荷设备的容许能力、试件制作的方便。我们选用水泥砂浆作为模型材料,通过不同配比的试验,最后选定川东水泥厂生产的标号 425# 普通硅酸盐水泥,配以重庆产特细砂,其配比为:水泥:细砂:水 = 1:2.5:0.52。按砂浆材料性能测试的标准方法,测得蒸气养护后的材料性能指标为:

单轴抗压强度: $\sigma_c = 12.5 \text{ Mpa}$;

劈裂抗拉强度: $\sigma_t = 1.46 \text{ Mpa}$;

弹性模量: $E = 1.14 \times 10^4 \text{ Mpa}$;

帕松比: $\mu = 0.168$ 。

将拌合好的水泥砂浆浇注到 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 的模具中,放到振动台上振实、捣固。按设计要求分别选用厚度为 $0.2 \sim 0.07 \text{ mm}$ 的紫铜片插入砂浆中,约经 7 小时后,砂浆初凝,将铜片抽出,便形成长 $50 \sim 55 \text{ mm}$,宽 $0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$ 的窄缝。

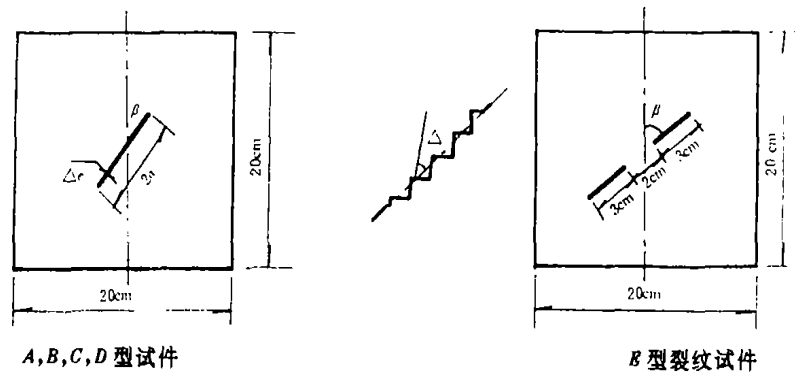


图 1 试件及裂纹面几何形状面

表 1 单一裂纹模型试件个数统计表

裂纹面特征	裂面标号	β						裂纹长度 (cm)
		15°	30°	45°	60°	0°	90°	
$\Delta e = 0.2 \text{ mm}$ 8	A				2			2
$\Delta = 0^\circ$								
$\Delta e = 0.07 \text{ mm}$ 8	B				2			2
$\Delta = 0^\circ$								
$\Delta e = 0.07 \text{ mm}$ 8	C				2			2
$\Delta = 45^\circ$								
$\Delta e = 0.07 \text{ mm}$ 8	D				2			2
$\Delta = 25^\circ$								
$\Delta e = 0.2 \text{ mm}$ 2 X 3	E				2			2
$\Delta = 0^\circ$								

注: Δe 为裂纹面张开度; Δ 为糙面爬坡角。试件标号: 45C, 表示 $\beta = 45^\circ$,

$\Delta e = 0.007 \text{ mm}, \Delta = 45^\circ$ 。

试件采用带模蒸气养护,自然风干36小时后进入蒸养室,按2小时升温,恒温6小时,降温

5小时的蒸养过程,最高蒸养温度为 100°C 。拆模后再对试件进行磨平抛光,以保证受压面的平整度和正面的光洁度。根据试验所要求达到的目的,我们设计了不同裂纹方向和裂面粗糙度的各种试件共50个。如表1所示,图1为试件及裂纹面的几何形状。

2 加载设备及测试系统

本试验采用电液伺服刚性压力机 Instron-1346系列设置实现加载。试件受压两端设置垫铁并辅以聚四氟乙稀薄片,减少端部摩擦的约束效应。加载分别采用荷载控制和位移控制两种方式进行。加载速率为荷载:1.525 t/min;位移:0.1 mm/min。位移控制可绘出全应力应变曲线。

利用 Instron 系统配备的函数记录仪和计算机数据采集及绘图设备,可以记录加载过程中的荷载~位移关系曲线,反映试件加载过程中的强度发展过程,并由此确定试件的初裂、峰值及残余强度。

声发射测试是监测裂纹发展的主要手段,本试验采用 AET-5000型声发射测试仪,利用计算机控制数据采集,并进行成果分析。在裂纹尖端附近设置声发射探头,测定裂纹扩展过程中的声发射全过程特征曲线,以分析压剪断裂特征。为消除试件端部噪声及液压油缸噪声对声发射测试效果的影响,在靠近液压作动头方向设置了排噪装置。

裂纹对岩石强度的影响,是本试验的主要研究目的。为此测量试件在受力过程中裂纹面的相对位移,对于分析裂纹尖端的压剪断裂机制具有极其重要的意义。选择位移最大的裂纹面中点为特征点,利用位移传感器,即可同部测出裂纹中点在受压力过程中的相对法向和切向位移。

通过 Instron 和 AET-5000的通讯联系,将有关变量输入声发射仪,经计算机处理后建立声发射事件与荷载、位移、裂纹面相对位移等参数之间的关系,从而多方位分析裂纹尖端压剪断裂的特征。

3 试件破坏形态与强度特征

3.1 裂纹扩展的基本规律和破坏形态

含中心斜裂纹的试件,其破坏的显著特征是以原生裂纹端部为突破点,产生新的次生裂纹。随着压剪应力的增加,裂纹尖端的应力集中加剧,次生裂纹经过初始断裂、稳应扩展、失稳扩展三个阶段,最终导致其强度丧失。新生裂纹扩展的总趋势是转向主压应力方向,由稳定扩展过渡到失稳扩展时,其发展方向有明显的偏转,表明压剪断裂过程的阶段性。如图3所示。新生裂纹在原生裂纹倾角 β 较小时一般为张性裂纹,如果 β 较大($\geq 45^{\circ}$)则在失稳破坏阶段产生新的剪性裂纹,这时张性裂纹朝主压应力方向发展有限,而剪性裂纹随强度软化不断发展到试件边界,并控制其后期残余强度。

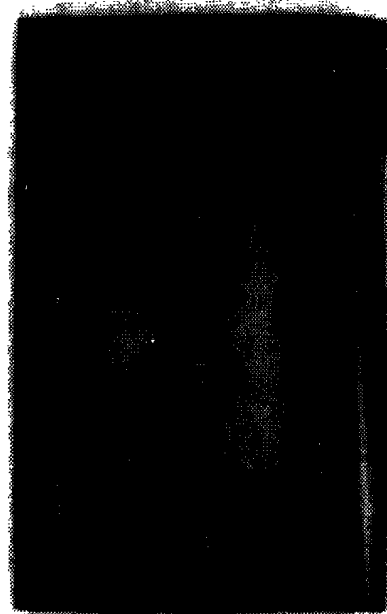


图 2 试件加载过程

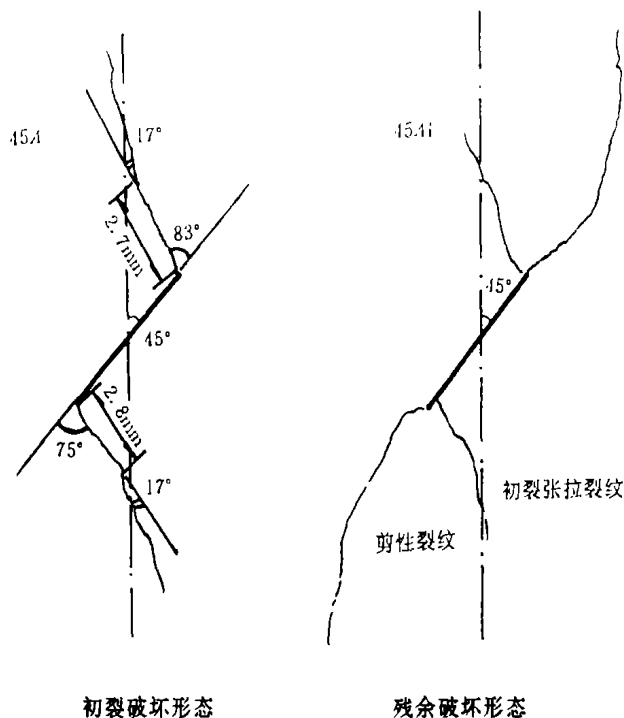


图 3 中心斜裂纹受轴压破坏形态

3.2 单轴压缩的强度特征

含裂纹体的强度受裂纹的影响而发生显著变化,由强度曲线的不同特征段可划分为初裂强度、峰值强度和残余强度。如图 4 所示,初裂强度受裂纹倾向角 β 的影响明显,最低强度在 $\beta = 45^\circ$ 左右;残余强度随 β 的增大而提高,反映出贯穿节理的强度性质,其大小依赖于剪切裂纹面的强度;初裂强度量值和残余强度值接近,约为无裂纹强度的 40% 左右。峰值强度约为无裂纹强度的 70%,比初裂强度增加约一倍左右,但过峰值后强度骤跌至残余值,表明裂纹失稳扩展的脆性破坏特征,故峰值强度的可靠性有待商榷。

含裂纹体单轴压缩的强度特征也表现出破坏过程中强度发展的阶段性。这种阶段性由后面的声发射特性曲线和裂面相对位特性都可以得到证实。

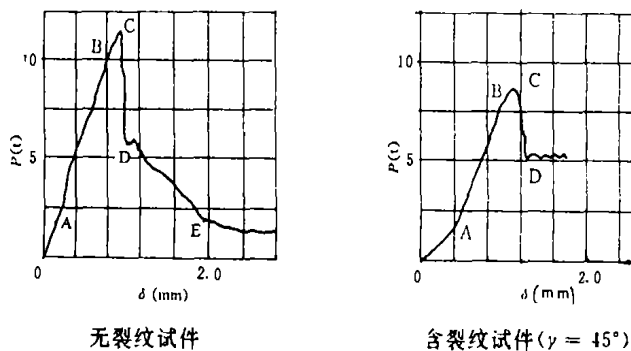


图 4 中心斜裂纹试件强度曲线比较

4 断裂破坏过程中的声发射特性

含中心斜裂纹试件单轴压缩试验的破坏特征,集中表现为裂纹尖端在压剪应力场作用下应力集中所导致的新生裂纹的发生和发展。对于岩石类脆性材料,裂纹扩展的能量释放过

程伴有较强烈的声发射现象。运用声发射仪接收裂纹扩展过程中的声发射信号,分析声发射事件随轴压力的变化特征,即可从另一角度分析裂纹尖端压剪断裂的破坏机理^[3]。

由声发射事件及其累计曲线来看,裂纹扩展过程的声发射特征表现为三个阶段。第一为线性阶段,声发射可能来源于原生裂纹内砂粒的摩擦和试件压密过程的声发射,事件继续而且较少;第二阶段为非线性阶段,声发射事件增长速率加快,但能量较小,反映出初裂的发生,这一阶段短暂,即初裂后声发射迅速减弱;随着荷载增加,声发射出现第二次高峰,形成坡度较陡的第三阶段,声发射事件的突发性猛增,反映出裂纹的不稳定扩展。过峰值强度以后,声发射事件骤跌,表明裂纹完全扩展后,声发射事件也随之消失。各声发射特征段,由累计曲线的转折点明显地划分出来,进一步证明了压剪断裂破坏的裂纹扩展阶段性。如图 5 所示。因此,可由此确定含裂纹试件压剪断裂的初裂强度和峰值强度。

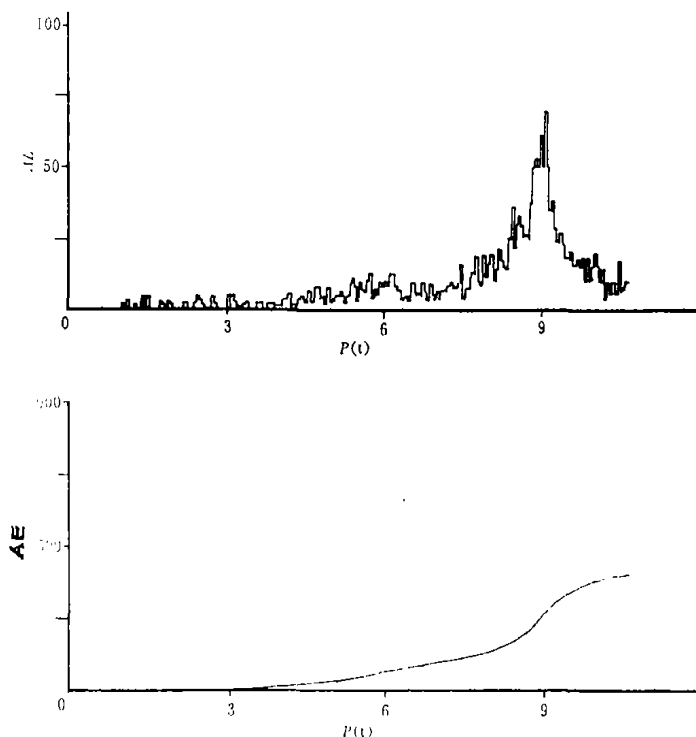
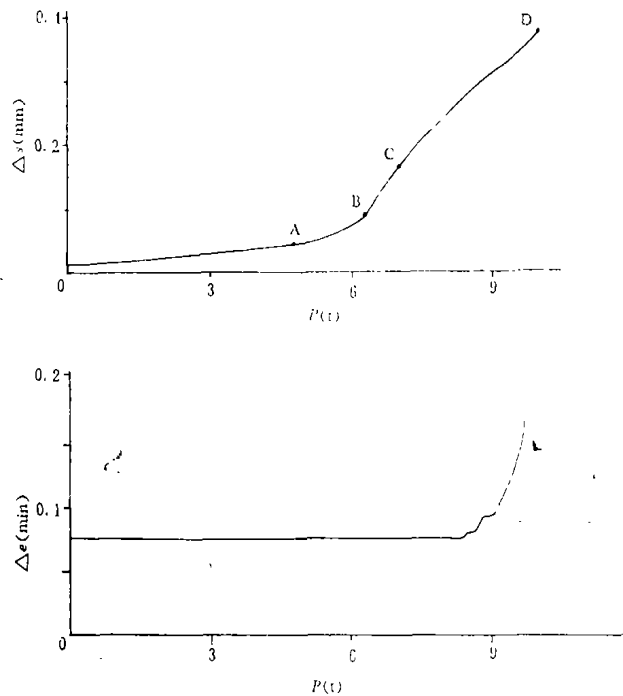


图 5 声发射事件随轴压 P 的变化

5 裂纹面相对位移与裂纹扩展

含裂纹体的强度明显低于完整岩体,究其原因裂纹的存在破坏了材料的连续性,不连续面的相对位移使裂纹尖端产生高度应力集中,使岩桥拉裂。因此,分析裂纹面的相对位移及其在受力过程中的变化规律,对于深入探讨压剪断裂破坏机理具有重要意义。

裂纹面的相对位移包括沿裂纹走向的相对切向错位和法向的相对闭合(张开)位移。裂纹中点的位移最大,故以此作为分析研究的代表点,运用特制的支架在裂纹中点设置位移引伸计,即可测得裂纹面中点相对切向位移 Δ_s 和相对法向位移 Δ_e ,并建立位移和轴向压力 P 的相关曲线。如图 6 所示。

图 6 裂面相对位移随轴压 P 的变化

5.1 相对切向位移

裂纹面相对切向位移,是裂纹尖端出现 I 型断裂的直接原因。反映了裂纹尖端的剪应力集中,导致裂纹尖端的撕拉破坏。由 $\Delta s \sim P$ 曲线可见,三个明显的转折点将曲线分为四个特征段。阶段 I, Δs 随 P 增加呈线性上升态,上升坡度平缓,表明这时裂纹尖端的应力场处于弹性阶段,没有新生裂纹扩展;第 II 阶段多为非线性曲线,较小荷载增值引起位移加速增长,表明裂纹尖端材料进入塑性或发生断裂破坏,初裂的出现引起位移突变,因此 A 点也可作为初裂强度判断点;初裂发生后,新生裂纹有一稳定扩展阶段,表明为位移曲线的第二个线性特征段,位移的主要成份是新生裂纹的张开度,故位移增量梯度明显大于第一阶段;裂纹发展方向偏转,位移曲线发生第二次突变而进入第四阶段,该段变化梯度极大,并有非稳定发展的趋势。

比较 $\Delta s \sim P$ 曲线和前面的 $AE \sim P$ 曲线可见,同一试件的两种曲线在阶段性及特征点位置上极其相近,说明声发射过程和切向相对位移具有一定的同步性。从而进一步证明:压剪断裂的发生,主要是受裂纹面相对切向位移控制的剪应力影响,这时 I 型断裂起主导作用。由此可见,切向相对错位的阶段性和声发射特征线的阶段性都共同反映了含裂纹体压剪断裂破坏的阶段性的。

5.2 裂纹面的法向位移

裂纹面法向的相对位移,表现为轴向压力下裂纹面的张开或闭合。当裂纹倾角 β 较小时,法向位移表现为裂面张开,当 β 较大则主要为受压闭合。 $\beta = 30^\circ \sim 45^\circ$ 时法向位移很小,张开与闭合都可能发生。和切向相对位移相比,法向相对位移普遍较小,特别在初裂发生之前,法向相对位移几乎为零。当切向位移发生突变时,法向位移也有突变或波动,说明二者是相互关联的,均随新生裂纹的产生和发展而出现突变。法向位移由张开发展到闭合的变化,直接反映了裂纹尖端的不同应力状态和破坏机理。总的位移量表现为切向位移普遍大于法向位移;法向闭合位移又大于法向张开位移。

6 结束语

岩石的压剪断裂是岩石断裂力学的重点和难点,同时也是研究含裂隙岩体受压破坏机理和强度预测的理论基础。本文以含中心斜裂纹砂浆模型的单轴压缩试验,揭示了含裂纹岩石压剪断裂的破坏机理及强度特征。有关断裂力学的理论分析和数值计算结果将另文发表。认识岩石压剪断裂规律对于我们分析含裂隙岩体的洞室围岩稳定性,以及岩质边坡、基础的可利用岩体质量评价都具有工程实践意义。

参 考 文 献

- 1 Z. P. BAZANT. Mechanics of Geomaterials Rock, Concrete, Soils. 1985
- 2 E. E. GDOUTOS. Problems of Mixed Mode Crack Propagation. 1984
- 3 刘东燕. 断续节理岩体的压剪断裂及其强度特性研究. 重庆建筑工程学院博士学位论文. 1993, 4

(编辑:徐维森)

AN EXPERIMENTAL STUDY ON CEMENT MORTAR SPECIMENS WITH A CENTRAL SLITS UNDER UNIAXIAL COMPRESSION

Liu Dongyan *Zhu Keshan*

(Faculty. of Civil Engineering)

ABSTRACT The cement mortar specimens with a central slits are tested under uniaxial compression. The test results show that tensile cracks initiate, as a rule near the tip and may propagate steady for a certain length. Mean while shear fructures appear and propagate slowly to the failure state in the zone of compressive stress concentration. So the fracture strength of rock under compression might be differentiated into the initial tensile strength, the peak strength and residual strength.

KEY WORDS rockmass, fracture mechanics, acoustic emission, stress concentration