

单压下类岩材料有序多裂纹体的 宏观力学性能

黎立云¹⁾ 车法星²⁾ 卢晋福¹⁾ 刘大安³⁾

1)北京科技大学应用科学学院,北京 100083 2)上海隧道施工技术研究所,上海 200233
3)中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029

摘要 用高强度白水泥及石膏等类岩材料有序多裂纹模型进行了大量单向加压实验,得出了单压时宏观等效强度 σ_e ,等效弹性模量 E_e 及泊松比 μ_e 随裂纹群倾角 α 的变化规律.在一定程度上考虑了裂纹密度对宏观力学性能的影响.综合实验结果与理论分析,给出了多裂纹体强度特征曲线 $\sigma_e-\alpha$.

关键词 多裂纹体;宏观等效;力学参数;强度特征

分类号 O346.1

地下岩体常以多裂纹的面貌出现,由于裂纹尖端应力分布的奇异性(理论上)与集中性(实际上),因而容易引发裂纹尖端材料局部失效而导致宏观破坏.另一方面,由于裂纹群的存在,降低了岩体的宏观刚度,使岩体的总变形加剧,容易引起各类工程事故的发生,因而工程界早已对此类问题给予了很多关注,并通过对裂纹尖端细观破坏现象的观察与分析,得出了很多有意义的结果^[1,2].

另一方面,地下岩体中裂隙的长度、密度及方向分布情况可通过大量的现场取样、统计而大致得到,也可通过地质CT得到一定程度的估计.在裂纹主体分布已知的情况下,对其宏观力学性能及宏观等效本构关系作出预测,从而为配合有限元及边界元等各类数值计算提供较为可信的计算参数,以准确地计算出地下开采及施工过程中岩体各处的位移及强度储备等,这是一个很有工程意义但研究很不成熟的问题.本文就是从这一角度出发,对多裂纹类岩体模型进行了大量单向加压试验,旨在研究单向受压情况下,有序裂纹群其方位及密度变化对宏观力学性能的影响,进而为借助于概率统计理论与分形几何理论^[4]去研究无序多裂纹问题提供实验及理论依据.

1 实验过程及结果

1.1 试件制作

试件用特制的模具浇注而成,外部尺寸为 $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 3\text{ cm}$.裂纹用厚度为 0.4 cm 左右的锯片预埋而成,裂纹尖端呈 10° 左右的V型,成型后裂纹缝宽变为 0.3 cm .裂纹群都位于中间区域(见图1).用以模拟无穷大地下岩体中有序排列的裂纹群问题.

裂纹倾角 α 分别设置有 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 与无裂纹共7种情况.图1模型I的裂纹长度为 $2a=1\text{ cm}$,裂纹纵向间距 $s=2.2\text{ cm}$,裂纹横向间距 $h=1.5\text{ cm}$;模型II的裂纹长度为 $2a=1\text{ cm}$, s 及 h 随 α 变化.对于模型I,实测了2种石膏与1种白水泥材料;对于模型II,实测了1种白水泥材料.

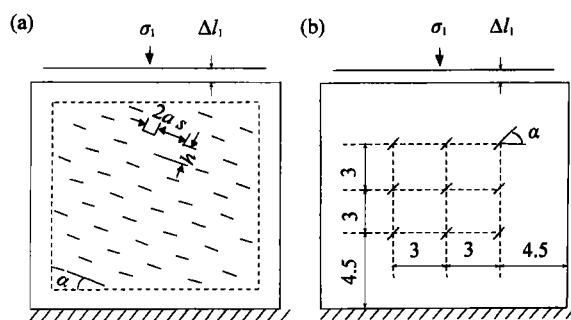


图1 模型试件外形(单位: cm). (a)模型I; (b)模型II

Fig.1 Two types of model

1.2 实验过程

实验时,在试件上下受压边都贴了一层抹有黄油的橡皮,再垫有2块具有足够刚度的钢块,以减少摩擦与均匀压力.为了测得模型的宏观等效泊松比 μ_e ,特别地制作了原始跨距 $L=15\text{ cm}$ 的横向位移传感器夹持在试件的中部(见图2),实验过程中用计算机记录了经过严格标定处理的载荷与纵向位移($P-\Delta l_1$)曲线(见图3)及载荷与横向位移($P-\Delta l_2$)曲线.石膏材料的 $P-\Delta l_1$ 曲线在加载初期表现为一定程度的凸型形状,与结构致密坚硬的白色大理岩的 $P-\Delta l_1$ 曲线很相似,白水泥材料的 $P-\Delta l_1$ 曲线在加载初期表现为一定程度的凹型形状,与某些岩浆岩、砂岩的 $P-\Delta l_1$ 曲线很相似.随着载荷的继续增加,试件中某些裂纹初次开裂;此时, $P-\Delta l_1$ 曲线表现为开始变弯,非线性段开始、载荷 P 还能再增加一点;然后 $P-\Delta l_1$ 曲线进入平台段,试件失去继续承载的能力,最后 $P-\Delta l_1$ 曲线下落,试件整体破坏.模型的破坏情况可见图4与图5.

不同于 $P-\Delta l_1$ 曲线,2种材料的 $P-\Delta l_2$ 曲线都表现出良好的线性关系,主要原因在于横向位移总很微小.以上特征并不因为试件中预制



图4 模型试件 I 单压破坏情况

Fig.4 Failure specimens of model I in uniaxial compressing



图5 模型试件 II 单压破坏情况

Fig.5 Failure specimens of model II in uniaxial compressing

有不同倾角、不同密度的裂纹群而有所改变.借助于试件处于基本弹性变形阶段的载荷 P_e 及对应的纵(Δl_1)横(Δl_2)向变形值,即可计算等效弹性模量 E_e 及泊松比 μ_e :

$$E_e = (P_e/L \cdot d)/(\Delta l_1/L) = P_e/(d \cdot \Delta l_1) \quad (1)$$

$$\mu_e = (\Delta l_2/L)/(\Delta l_1/L) = \Delta l_2/\Delta l_1 \quad (2)$$

宏观等效强度值:

$$\sigma_e = P_e/(L \cdot d) \quad (3)$$

图3中 δ_0 为纵向变形中夹带进去的橡皮的总变形量,计算 Δl_1 时应该扣除.式(3)中 P_e 为起裂载荷.

由于本文涉及的裂纹具有一定的缝隙宽度,因而可以用来模拟不闭合或具有软弱夹层的实际裂纹.由于这类裂纹不能传递压力也不能传递摩擦力,所以是所有结构面中对宏观强度削弱最严重的裂纹群,其产状(裂纹群倾角 α)对宏观力学参数的影响正是本文所关心的.这些裂纹在水平位置排裂时,不同于水平放置的层状岩体^[3];亦对宏观强度有较强的削弱作用,试件的总体破坏是由于裂纹面中部弯曲拉应力引起(见图5中水平裂纹的破坏).

随着 α 的增加,破坏点逐步从上述裂纹面往

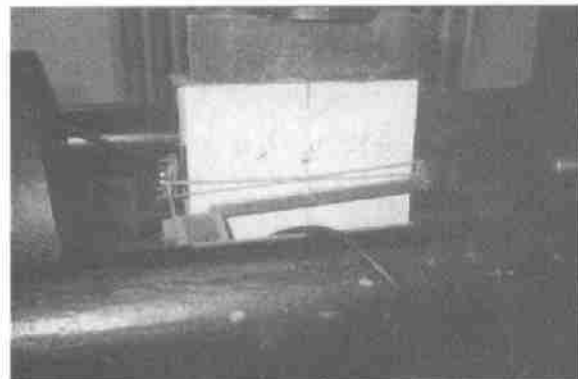


图2 单压试验情况

Fig.2 Situation of uniaxial compressing

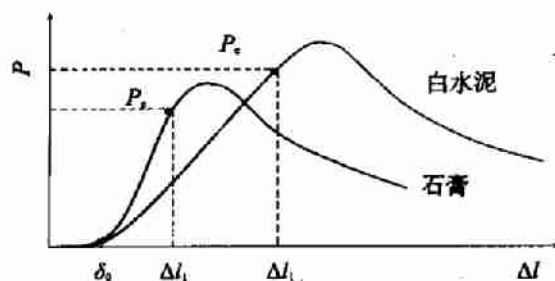


图3 纵向压力 P 与变形 Δl_1 的关系

Fig.3 Relationship between compression P and displacement Δl_1

裂纹尖端转移. 试件的破坏逐步由强度控制转化为由裂纹尖端应力场控制,或者说近似由裂纹尖端压应力强度因子 K_I 与剪应力强度因子 K_{II} 控制,当 α 接近或等于 90° 时,由于裂纹尖端的应力奇异性已消失,即 $K_I=K_{II}=0$,因而又转化为由强度控制破坏,试件因裂纹尖端引发的压裂裂纹而导致宏观贯通破坏($\sigma_c \approx \sigma_c$,见图4与图5中竖直裂纹的破坏, σ_c 为抗压强度).

1.3 实验结果

图1(a)所示模型I(石膏材料a, $\sigma_t=0.56$ MPa; 石膏材料b, $\sigma_t=1.31$ MPa; 白水泥材料a, $\sigma_t=5.24$ MPa. σ_t 为材料弯曲抗拉强度)的单向压缩实验结果列于表1~3中,表中无裂纹所属的那一列的3个数值,即为模型材料的材料常数:抗压强度 σ_c ,弹性模量 E 与泊松比 μ ,表中每一数据来自于3个实验.

从表1~3可以看出,此种多裂纹模型单向受压时,在 $30^\circ \sim 45^\circ$ 时,为宏观强度最低点, $\alpha=0^\circ$ 的水平裂纹亦对宏观强度有较大影响;而对 $\alpha=90^\circ$ 的竖直裂纹,与无裂纹试件相比,对宏观强度略有削弱,但相差不大.

图1(b)所示模型II(白水泥材料b, $\sigma_t=3.57$ MPa)的单向压缩实验结果列于表4中,表中每一数据来自三个试验.从表4可看出,此种多裂纹模型单向受压时,宏观强度最低点发生在 $\alpha=45^\circ$ 左右; $\alpha=0^\circ$ 的水平裂纹对宏观强度也有一定程度削弱;而 $\alpha=90^\circ$ 的竖直裂纹对起裂应力与无裂纹试件相比,只是略有削弱,但由实验知,对最终破坏应力却有明显削弱.

从表1~4可以看出,对于宏观等效弹性模量 E_c 而言,比较明显的现象为在 $\alpha=45^\circ$ 时,有一个最低值,这说明 $\alpha=45^\circ$ 时,对有序排列的多裂体而言,总体纵向刚度最低,纵向变形容易发生.实际上从前面的总结也可看出, $\alpha=45^\circ$ 时,宏观强度也基本偏低,当 α 为其他角度时, E_c 值稍有波动;总之,从 $\alpha=0^\circ$ 到 $\alpha=90^\circ$,再到无裂纹模型,除 $\alpha=45^\circ$ 有最低值外, E_c 基本呈上升趋势,无裂纹模型的 E_c 具有最大值.对于宏观等效泊松比 μ_c 而言,随着 α 从 0° 变化到 90° ,再到无裂纹模型,变化规律也基本呈上升趋势.

比较模型I与模型II的实验值,由于模型I的裂纹较模型II的裂纹密度要大,所以各力学

表 1 石膏 a 模型 I 等效力学参数实验平均值
Table 1 Experimental values of equivalent mechanical parameter of gypsum a model I

$\alpha/^\circ$	0	30	45	60	75	90	无裂纹
σ_c/MPa	0.327	0.288	0.346	0.551	0.662	0.577	0.601
E_c/MPa	56.6	60.4	37.2	53.8	48.5	63.9	76.1
μ_c	0.058	0.079	0.109	0.071	0.107	0.102	0.118

表 2 石膏 b 模型 I 等效力学参数实验平均值
Table 2 Experimental values of equivalent mechanical parameter of gypsum b model I

$\alpha/^\circ$	0	30	45	60	75	90	无裂纹
σ_c/MPa	0.598	—	0.559	—	0.950	1.405	1.586
E_c/MPa	185.3	—	133.6	—	202.0	227.1	230.8
μ_c	0.043	—	0.051	—	0.062	0.045	0.093

表 3 白水泥 a 模型 I 等效力学参数实验平均值
Table 3 Experimental values of equivalent mechanical parameter of white cement a model I

$\alpha/^\circ$	0	30	45	60	75	90	无裂纹
σ_c/MPa	4.04	3.60	6.43	8.06	6.24	8.49	9.33
E_c/MPa	476.7	481.9	494.6	609.4	656.4	796.6	1 152.9
μ_c	0.017	0.015	0.012	0.019	0.022	0.019	0.054

表 4 白水泥 b 模型 II 等效力学参数实验平均值
Table 4 Experimental values of equivalent mechanical parameter of white cement b model II

$\alpha/^\circ$	0	30	45	60	75	90	无裂纹
σ_c/MPa	7.13	6.48	3.24	5.87	5.90	7.82	9.41
E_c/MPa	1 326.6	1 320.5	920.3	1 554.4	1 826.6	1 620.7	1 959.6
μ_c	0.019	0.016	0.015	0.021	0.020	0.028	0.043

参数随 α 的变化趋势就明显,而模型II的各力学参数随 α 的变化趋势要弱一点,但在 $\alpha=45^\circ$ 时,影响仍比较突出;所以可以估计,当裂纹分布短而稀时,在压剪载荷条件下,裂纹的存在对宏观力学参数的影响几乎可以忽略。

特别值得一提的是,由于有序裂纹群的存在,使得多裂纹体在宏观力学性能上呈现出较强的正交各向异性,例如 $\alpha=30^\circ$ 时的各项力学指标与另一正交方向 $\alpha=60^\circ$ 时的对应指标就存在着较大差异; $\alpha=0^\circ$ 与 $\alpha=90^\circ$ 时亦如此;只有 $\alpha=45^\circ$ 时的有序裂纹体才成为正交各向同性体。这为构筑关于有序多裂纹的宏观等效本构关系提供了一定的实验基础。工程上在计算大型多裂纹岩体的宏观变形时也应考虑到这一点。

上面的实验结果来自于不同的材料,不同的裂纹密度,但其宏观等效力学参数随 α 的变化都有着比较相近的规律。这些规律对于采矿工程及各类岩土工程中的数值计算、工程选址、锚固技术、多裂纹体的各类理论建模的验证都具有较好的参考价值及指导作用。

2 多裂纹体强度特征曲线的确定

2.1 裂纹具有一定的缝隙宽度

对于这种岩体内的最不利缺陷群,其宏观等效强度 σ_c 随 α 变化的定量关系(本文称之为强度特征曲线),应该是工程界最为关心的。分析前面所示的四套实验结果,可以发现强度特征曲线基本由四个特征点(即 $\alpha=0^\circ$, $\sigma_c=\sigma_0$; $\alpha\approx 40^\circ$, $\sigma_c=\sigma_{\min}$; $\alpha=90^\circ$, $\sigma_c\approx 0.9\sigma_c$; 无裂纹时 $\sigma_c=\sigma_c$)光滑连接而成,如图6(a)所示。因而只要知道了有序裂纹体在 $\alpha=0^\circ$ 与 40° 时等效强度 σ_0 与 $\sigma_{\min}$ 及无裂纹时的抗压强度 σ_c 后,则其他倾角 α 下的等效强度 σ_c 就可以得到比较好的估计。宏观等效弹性模量 E_c 及泊松比 μ_c 亦可按此方式作出定量估计。

2.2 理想线裂纹,但不考虑裂纹闭合

作为理论与实验的比较,这里考虑理想线裂纹情形。此时,裂纹尖端具有压应力奇异性,分别用压应力强度因子 K_I 及剪应力强度因子 K_{II} 来表征。由于考虑的是疏裂纹群问题,裂纹间的相互影响较小,所以可以取无限大板中单个斜裂纹受单压 σ_c 时的情况来考虑,研究其开裂应力 σ_c 与裂纹倾角 α 的关系。对此种裂纹,有^[5]:

$$K_I = -\sigma_c \sqrt{\pi a} \cdot \cos^2 \alpha \quad (4)$$

$$K_{II} = -\sigma_c \sqrt{\pi a} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha \quad (5)$$

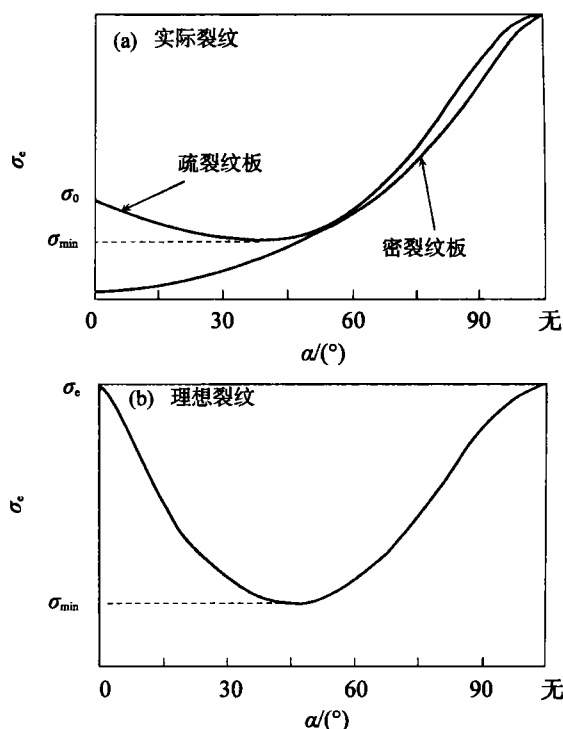


图6 有序裂纹群强度特征曲线 $\sigma_c-\alpha$

Fig.6 Specificity curve of strength $\sigma_c-\alpha$ for regular cracks

式中, a 为半个裂纹长度。将上述应力强度因子代入常用的复合型断裂判据^[6]中,如最大拉应力断裂判据 $\sigma_{\theta\max}$ (与 μ 无关)、最大拉应变断裂判据 $\epsilon_{\theta\max}$ (取 $\mu=0.1$)及最小应变能密度因子断裂判据 $S_{\min}$ (取 $\mu=0.1$),三者预示的临界开裂载荷 σ_c 在 $\alpha\approx 45^\circ$ 左右都取得最低值 $\sigma_{\min}$,其特征曲线 $\sigma_c-\alpha$ 如图6(b)所示,也由4个特征点光滑连接而成。这4个特征点为: $\alpha=0^\circ$, $\sigma_c=\infty$ (实际应为 $\sigma_c=\sigma_c$); $\alpha\approx 45^\circ$, $\sigma_c=\sigma_{\min}$; $\alpha=90^\circ$, $\sigma_c=\infty$ (实际应为 $\sigma_c=\sigma_c$); 无裂纹, $\sigma_c=\sigma_c$ 。由于 $\alpha=0^\circ$ 与 90° 时, $K_{II}=0$,所以这对压剪裂纹而言,裂尖不会主动开裂^[7],故理论值为 $\sigma_c=\infty$,实际应为 $\sigma_c=\sigma_c$ 。此理论特征曲线与前面图6(a)所示实验特征曲线很相似,差别仅在于 $\alpha=0^\circ$ 时,图6(b)的 $\sigma_c=\sigma_c$,而图6(a)的 $\sigma_c=\sigma_0$;另一差别在于 σ_c 的极小值发生的区域,图6(b)发生在 $\alpha=45^\circ$ 左右,而图6(a)发生在 $\alpha=40^\circ$ 左右。

需要说明的是,对于 $\alpha=0^\circ$ 时,裂纹与裂纹将相互搭接起来的密裂纹情形,裂纹尖端之间的影响将非常强烈。通过有限元计算已了解到,两相邻裂纹尖端之间区域呈很强的压应力区,终因裂纹之间的相互贯通而导致最终破坏。所以当 α 接近 0° 时,宏观的承载能力(起裂应力) σ_c 将接近为0。其强度特征曲线近似为图6(a)中所示的纯单调上升曲线。

3 结论

(1)对有序排裂的多裂纹类岩体,其宏观等效抗压强度 σ_c 基本随裂纹群倾角 α 增加而呈上升趋势,只是在 $\alpha=40^\circ$ 左右,有一个强度最低值。

(2)有序排列的多裂纹类岩体的宏观等效弹性模量 E_c 基本随 α 增加而增加,且波动范围不大,只是在 $\alpha=45^\circ$ 左右有一个最低值。宏观等效泊松比 μ_c 基本随 α 增加而略有增加,且波动范围不大。

(3)有序多裂纹体在宏观力学性能上呈现出较强的正交各向异性。这为构筑关于有序多裂纹体的宏观等效本构关系提供了一定的实验基础。在计算多裂纹岩体宏观变形时应注意这一点。

(4)本文给出了关于多裂纹体的强度特征曲线。由此曲线,工程上可以对各种倾角 α 的有序多裂纹体进行宏观等效强度 σ_c 估算。同时,对宏

观等效弹性模量 E_c 及泊松比 μ_c 亦可仿此方式进行估算。

参 考 文 献

- 1 Liu Da'an, Wang Sijing, Li Liyun. Investigation of Fracture Behavior during Rock Mass Failure. Int J Rock Mech Min Sci, 2000, 37(3):489
- 2 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.固体力学学报,1998,19(4):355
- 3 孙广忠.岩体结构力学.北京:科学出版社,1989
- 4 谢和平.分形几何及其在岩土力学中的应用.岩土工程学报,1992,14(1):14
- 5 中国航空研究院.应力强度因子手册.北京:科学出版社,1981
- 6 黎立云,黎振兹,孙宗硕.岩石的复合型断裂实验与分析.岩石力学与工程学报,1994,13(2):134
- 7 刘大安,黎立云,马孝春.岩石裂纹剪切加载破坏的非奇异应力场效应.水利学报,1998,(5):39

Macro-mechanical Properties of Regular Cracks Body in Rock-like Materials under Uniaxial Compression

LI Liyun¹⁾, CHE Faxing²⁾, LU Jinfu¹⁾, LIU Daan²⁾

1)Applied Science School, UST Beijing, Beijing 100083, China

2)Shanghai Institute of Tunnel, Shanghai 200233, China

3)Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

ABSTRACT A large number of experiments, research on the effects of regular cracks to macro-mechanical properties in rock like materials, such as high strength gypsum and white cement, under uniaxial compression are conducted. The experimental relationships of the macro-equivalent strength σ_c , elastic modulus E_c and passion's ratio μ_c versus the inclined angle of cracks α are obtained. The specificity curve of $\sigma_c-\alpha$, also depending on cracks density h , for multi-crack body is given by the analysis of experimental and theoretical results. The data and conclusion will be useful for mining industry and some other underground engineering.

KEY WORDS multi-crack body; macro equivalent; mechanical parameter; strength specificity