第16卷 第2期　　地 震 学 报　　Vol. 16, No. 2
1994年5月 (190—194)　　ACTA SEISMOLOGICA SINICA　　May, 1994

茅坪800 m钻孔饼状岩芯分析*

阮小平　李方全

(中国北京 100085 国家地震局地壳应力研究所)

摘　要

根据茅坪800 m钻孔的水压致裂应力测量结果及钻孔岩芯的力学特性,分析了该钻孔出现饼状岩芯的破坏机制.文中认为,饼状岩芯是由于低地应力作用下,地应力主轴的倾斜所引起.由饼状岩芯的断面特性及应力分析结果表明,饼状岩芯的破坏形式为拉伸破坏.

关键词　饼状岩芯;地壳应力;有限元

1 引　言

在工程钻孔中,常常出现饼状岩芯现象,国内外学者对此进行了分析研究.一般认为,饼状岩芯是由高地应力所引起.Hast(1979)以此提出了应力解除的极限深度.侯发亮等(1986)建议以出现"岩芯饼化"及"岩爆"现象来划分高地应力值.

饼状岩芯的破坏形式,国内外学者有两种不同的看法,或认为是拉伸破坏,或认为是剪切破坏.本文根据茅坪钻孔饼状岩芯的断面分析及应力分析结果,认为饼状岩芯的破坏形式为拉伸破坏.

由于饼状岩芯与岩爆等问题相联系,故在地下工程设计中,对饼状岩芯现象非常重视.本文根据钻孔的水压致裂应力测量结果及岩芯的力学特性,提出了饼状岩芯形成的另一机制,即"低应力"作用下地应力轴的倾斜.

2 钻孔概况及应力测量结果

茅坪800 m钻孔位于湖北省姊归县茅坪镇,钻孔饼状岩芯主要集中在深度为572.80—573.78 m及607.68—618.93 m孔段,饼状岩芯厚度一般为1—3 cm.在出现饼状岩芯的岩层之间(深度为583.97—591.60 m),存在一较大的断裂破碎带,其走向约为北西西,倾角约为70°,倾向北东.钻孔深度93.13—800.65 m为新鲜岩石,属灰-灰白色闪云斜长花岗岩,岩芯完整.

据国家地震局地壳应力研究所对茅坪钻孔所作水压致裂应力测量,该钻孔在出现饼

* 地震科学联合基金会资助项目.
1992年5月11日收到初稿,1993年3月10日决定采用.

http://www.dizhenxb.org.cn

状岩芯孔段附近的应力测量结果如表 1 所示.

表 1　茅坪钻孔水压致裂应力测量结果

压裂深度，m	关闭压力 P_S/MPa	重张压力 P_T/MPa	最小水平主应力 S_h/MPa	最大水平主应力 S_H/MPa	铅直应力 S_V/MPa
271—272	7.10	6.45	7.10	12.15	7.28
331—332	8.05	7.68	8.05	13.17	8.86
390—391	9.15	8.90	9.15	14.65	10.46
419—420	9.58	8.33	9.58	16.21	11.24
470—471	11.70	10.60	11.70	19.80	12.60
555—556	9.30	8.55	9.30	13.80	14.90
639—640	11.90	10.70	11.90	18.60	17.12
669—670	11.40	10.20	11.40	17.30	17.93
696—697	14.64	14.47	14.64	22.48	18.65

我们采用与饼状岩芯的岩石特性基本相同的该钻孔岩芯制备岩石试件，作三轴莫尔剪切强度及圆柱劈裂试验. 表 2 为茅坪花岗岩莫尔剪切强度三轴试验结果. 表 3 为茅坪花岗岩圆柱劈裂试验结果.

表 2　茅坪花岗岩莫尔剪切强度三轴试验结果

试件号	1	2	3	4	5	6	7	8
侧向应力 σ_3/MPa	0.0	9.8	9.8	14.7	19.6	19.6	24.5	34.3
极限应力 σ_1/MPa	176.9	262.9	259.5	298.7	324.0	324.0	375.1	410.5
凝聚力 $\tau_0=34.0$ MPa，内摩擦系数 $\mu=1.7$								

表 3　茅坪花岗岩圆柱劈裂试验结果

试件号	1	2	3	4	5	6	7	8
试件平均直径，cm	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
试件平均厚度，cm	2.90	2.60	2.80	2.90	2.70	2.70	2.60	2.75
破坏载荷，kN	18.32	19.11	18.14	23.81	16.18	19.54	20.03	21.19
抗拉强度，MPa	7.90	9.20	8.10	10.30	7.50	9.00	9.60	9.60

根据实验结果得到莫尔直线包络线方程为(单位：MPa)

$$\tau = 34.0 + 1.17\sigma \qquad (\sigma > 0)$$

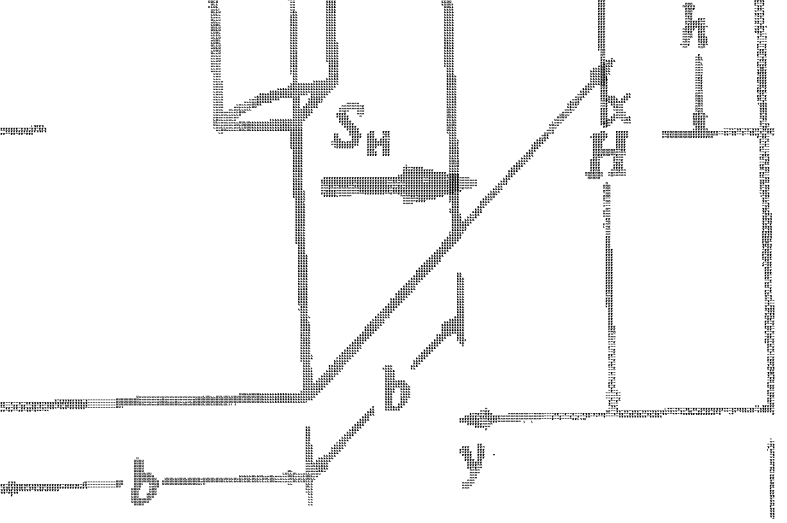
岩石的抗拉强度

$$[\sigma_t] = 8.90 \text{ MPa}.$$

3　饼状岩芯的“低应力”破坏理论

根据茅坪钻孔水压致裂应力测量结果，在集中出现饼状岩芯的孔段，深度为 572.80—573.78 m 及 607.68—618.93 m 处，其实测水平主应力值较小并小于上面孔段的应力值. $\sigma_H=13.80$ MPa，$\sigma_h=9.30$ MPa. 显然，如果以“高应力”破坏理论来解释该孔段饼状岩芯现象是行不通的. 饼状岩芯的岩性为致密花岗岩(照片 1，2)，也可以排除岩石各向异性等因素的影响.

http://www.dizhenxb.org.cn



地 質 學 報
ACTA GEOLOGICA SINICA

小水平主应力 S_h 及上覆岩层的重力 S_V 作为计算模型的外载荷，即取 $S_H=13.80$ MPa，$S_h=9.30$ MPa，$S_V=14.90$ MPa.

在计算模型中，我们还假定一个主应力轴与 S_h 方向一致，另二个主应力轴在铅垂轴与 S_H 轴所组成的平面内变动. 若剪切外载荷 $S_{yz}=0$，则 S_V 即为垂直主应力，此时主应力轴不发生倾斜. 若 $S_{yz}\neq 0$，则主应力轴发生倾斜. 我们给出不同的 S_{yz} 值，分析钻孔底端部以下的应力分布，并与实验所得的岩石强度进行比较. 当钻孔底端部以下岩层某一点达到破坏强度时，可得到此时的临界 S_{yz} 值，同时也得出了主应力轴的倾斜角度. 我们应用 SAP6 程序 8－20 节点块体单元进行线弹性三维有限元分析，对图 1 所示计算模型共划分成 144 个单元.

5　计算结果

我们分析 $z=21.5$ cm 截面(即距钻孔底端面 1 cm)处应力分量 σ_y，σ_z，τ_{yz} 的分布规律(表 4). 表中序号位置如图 2 所示，剪切载荷 S_{yz} 取为 17.0 MPa.

表 4　$z=21.5$ cm 截面处的应力分量

序　号	σ_y/MPa	σ_z/MPa	τ_{yz}/MPa	σ_{max}/MPa
1	－7.23	1.19	2.75	2.01
2	－3.68	0.09	5.27	3.80
3	－1.41	2.73	7.96	8.88
4	－2.68	1.38	9.37	8.94
5	－5.46	－0.10	8.35	5.99
6	－5.75	－1.05	10.36	7.22
7	－7.17	－4.23	12.48	6.87
8	－16.04	－2.81	11.25	3.63
9	－15.59	－8.62	15.51	3.79
10	－19.88	－17.10	21.48	3.03

注：张应力为正.

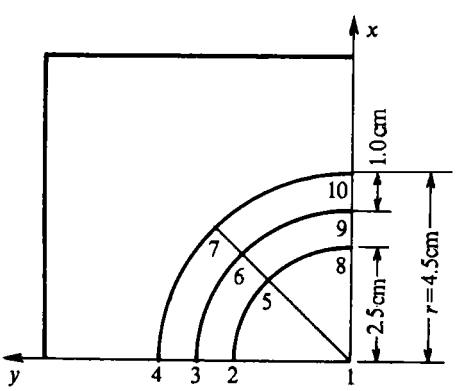


图 2　$z=21.5$ cm 截面序号点位置(r 为钻孔半径)

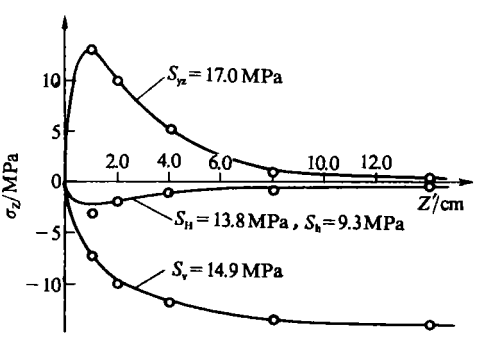


图 3　不同载荷作用下(图 2 第 3 点处)σ_z 沿深度变化

http://www.dizhenxb.org.cn

从表中可见，各点的应力状态与岩石莫尔剪切强度相比较，相差很大，无论何处均不可能发生剪切破坏. 当 $S_{yz}=17.0$ MPa 时，首先在第 3、第 4 点发生拉伸破坏.

在钻孔底端面以下区域，应力分布比较复杂. 我们以底端面为起点向下过图 2 第 3 点取为 z' 轴. 图 3 为在不同载荷作用下 σ_z 沿深度变化规律.

根据上述分析，当剪切载荷 $S_{yz}=17.0$ MPa 时，距钻孔端面 1 cm 的截面上，其应力状态已达到岩石的抗拉强度，已有可能产生拉伸破坏. 此时临界最大主压应力 $S_{max}=31.36$ MPa，临界最小主压应力 $S_{min}=-2.66$ MPa. 最大主应力轴与铅垂轴的夹角为 44.1°.

6 分析与讨论

(1) 由饼状岩芯的断面特性(照片 2)来看，其断面晶界分明，除断面凸起部分有少许摩擦痕迹外，其余部分均未有摩擦痕迹，故分析其破坏形式为拉伸破坏.

(2) 为了得到计算模型的外载荷，文中假设了垂直和平行于水平面的平面内的剪切应力对关闭压力、重张压力无影响. 若应力轴倾斜较小，此假设的误差会较小. 因文中最后结果应力轴倾斜较大，故此假设误差会大些.

(3) 从应力分析结果我们得出，饼状岩芯的破坏形式为拉伸破坏，这和饼状岩芯的断面特性一致. 根据本文的应力分析和岩石的莫尔剪切强度试验结果，饼状岩芯不可能由剪切破坏所引起.

(4) 茅坪钻孔的饼状岩芯出现在断裂破碎带附近，这是否可以说明，在远场水平应力作用下，由于断裂破碎带的存在，使得局部段落附近水平主应力轴的方向发生倾斜.

(5) 田中豊(1991)给出了冈山市万成钻孔应力测量资料，且描述了该钻孔出现的饼状岩芯现象. 钻孔岩芯为匀质花冈岩，在钻孔深度为 190—201 m 处出现饼状岩芯，其最大主应力 $\sigma_H=11.12$ MPa，最小主应力 $\sigma_h=6.08$ MPa，这与茅坪钻孔情况相似.

(6) 按照本文理论和应力分析结果，饼状岩芯并非仅仅由于“高地应力”(如 $\sigma_H=70$ MPa)所引起，也可能由于在“低地应力”作用下，应力轴的倾斜所引起. 因此，在地下工程设计中，如果遇上钻孔饼状现象，并非一定会有岩爆发生.

参 考 文 献

侯发亮、刘军、卓光，1986. 应力解除时岩芯中的应力状态及饼状岩芯破裂成因分析. 岩石力学与工程学报，**5**，1，61—78.

田中豊，1991. 岡山市万成における地殻応力の深度勾配の測定. 京都大学防災研究所年報，第 34 号，B-1，313—323.

Hast, N. , 1979. Limits of stress measurements in the earth's crust. *Roct Mechanics*, **11**, 143—150.

Kuriyagawa, M. and Kobayashi, H. , 1989. Application of Hydraulic fracturing to three-dimensional *in situ* stress measurement. *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.* , **26**, 6, 587—593.

http://www.dizhenxb.org.cn