

文章编号 1001-8166(2004)增-0376-04

岩芯饼裂机制及其对工程地质特性影响的分析

李树森, 聂德新, 任光明

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室 四川 成都 610059)

摘要 提出了岩芯饼裂主要受地应力平均值控制的观点, 说明了岩饼表面圆周状对称拉裂坎以及垂直拉裂坎方向擦痕的形成原因, 结合工程地质讨论了岩体的弹性模量和内聚力。

关键词 岩饼 地应力平均值

中图分类号 P642 文献标识码 A

0 引言

对于岩芯饼裂机制, 国内外学者进行了充分研究, 一种观点认为是由高应力引起, Haselt^[1]提出了应力解除的极限深度, 候发亮等^[2]建议以出现“岩芯饼化”及“岩爆”现象来划分高地应力值; 另一种观点认为岩饼是在低应力条件下, 由于地应力轴的倾斜而引起的^[3]。在上述学者研究的基础上, 根据Tramter发现钻取岩芯过程中, 岩芯根部存在拉应力区以及黄润秋关于岩饼的电镜扫描成果^[4]。本文提出了岩芯饼裂主要受地应力平均值控制以及岩芯所在岩体的强度参数等有关的观点, 并结合工程地质问题进行讨论, 有一定的理论和实践意义。

1 岩饼特征及形成环境

(1) 以拉西瓦水电站坝址钻孔岩饼为例, 其主要特征如下: 形态上主要为“灯盏”形, 分为凸面和凹面, 也有一种为平整, 极少数表面凹凸不平; 岩饼直径50~60 mm, 厚度一般为7~8 mm, 最薄的为2~3 mm; 岩饼表面新鲜, 无浸染痕迹, 断面上存在逐级对称于圆心分布的拉裂坎及擦痕。扫描电镜下岩芯断口靠岩饼圆周边明显为拉断破坏特征, 内部石英颗粒断口形态平整光滑, 其上可见顺槽方向微刻槽以及垂直方向的锯齿状微拉裂坎^[4]; 岩饼形状为园形, 基本无长短轴之分。

(2) 岩饼形成环境。根据西北勘测设计研究院

的成果^[5]: “岩体 E_0 值不受试验应力方向的控制, 表现为水平和垂直弹、变模量间无明显的大小关系”; “孔内测试的应力应变曲线基本上为上凹型, 应力增大, 模量增高”; “当测试对现场孔内压力增大至60 MPa时, 岩体仍处于弹性变形阶段, 并未发生破裂”, 说明高围压下岩体具有很高的承载力及弹性变形范围, 岩体整体性好, 属于高弹模储能结构。

2 岩饼的力学模型及卸荷分析

(1) 参见图1, 设 Z 轴沿岩芯轴线, 坐标原点 O 离根部自由端距离 R , R 为圆柱半径, 岩饼首先从自

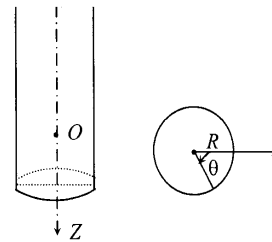


图1 岩芯及圆柱坐标系OZR示意图
Fig.1 The sketch map of rock core and cylinder coordinate OZR

由端面出现, 当岩饼出现后, 新的自由端又在根部形成, 这时将坐标原点 O 又向上移动, 这个过程直至

收稿日期: 2004-04-10

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 40372127)资助

岩饼停止出现为止。

岩芯取出前,根部所在地层处地应力以实测值为准,其主应力为 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 。注意到以下两点,第一点,岩芯饼化前是圆柱,饼化后将其按原来形成顺序拼合在一起仍为圆柱体,只是直径变大,体积增大。第二点,钻孔方向无论垂直或倾斜,岩饼都垂直于岩芯轴线。由弹性力学可知,对于弹性体的体积变化起控制作用的是应力球张量:

$$\frac{1}{3} \sigma_{kk} = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

平均应力 $\bar{\sigma} = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$, 平均应力 $\bar{\sigma}$ 与各主应力方向无关。

从观测中发现坝区花岗岩体嵌合紧密,可作各向同性体处理。岩芯直径 50~60 mm,因此可以认为在半径 25~30 mm 的球体范围内地应力平均应力 $\bar{\sigma}$ 为一常量,使问题大为简化。以下讨论平均应力 $\bar{\sigma}$ 对岩芯的影响。

(2) 以卸荷的观点分析拉断为主要特征的岩饼。

岩芯未取出时,可认为其初始平均应力为 $\bar{\sigma}$,岩芯取出后,其表面应力为 0,这是一个卸荷过程,相当于在初始应力下,对岩芯表面施加了一个反向拉应力 $-\bar{\sigma}$ 。为了简化问题设在初始平均应力 $\bar{\sigma}$ 作用下岩芯的应变为计算基点。

卸荷时施加拉应力,岩芯可作轴对称问题处理

$$\sigma_r = \sigma_\theta = -\bar{\sigma} \quad (1)$$

在 r 、 θ 三向等拉情况下,岩芯裂纹扩张的几率在 r 、 θ 方向上是均等的,但由于在钻取岩芯过程中,根部表面沿 z 轴向的拉应力集中区,使岩芯裂纹在卸荷时沿垂直 z 的方向优先扩展。

$$\sigma_z = -\frac{(1-2\nu)\bar{\sigma}}{E} \quad (2)$$

式中 E 为岩芯卸荷弹性模量, ν 为岩芯泊松比, $\bar{\sigma}$ 为岩芯的初始平均应力。

根据提供的花岗石单轴抗拉强度(干) $\sigma_c = 5.8 \sim 9.8$ (MPa);(湿) $\sigma_c = 3.5 \sim 8.8$ (MPa),弹性模量 $E = 35.3 \sim 63.7$ (GPa),可知单轴拉伸断裂时应变约在 $5.4 \times 10^{-5} \sim 28 \times 10^{-5}$ 之间^[5]。

而由(2)式可得

$$\bar{\sigma} = -\frac{\sigma_z \cdot E}{(1-2\nu)} \quad (3)$$

这时,若取单轴拉伸断裂时的应变 ϵ 、 ν 分别为原位弹性模量和泊松比,根据提供的资料^[5], $E = 82 \sim 87$ (GPa), $\nu = 0.25 \sim 0.26$ 。

当 $\epsilon = 54 \times 10^{-5}$,取 $E = 82$ GPa, $\nu = 0.25$,则 $\bar{\sigma} = -8.9$ (MPa)。

当 $\epsilon = 28 \times 10^{-5}$,取 $E = 87$ GPa, $\nu = 0.25$,则 $\bar{\sigma} = -48.7$ (MPa)。

由此可知岩芯原位平均应力 $\bar{\sigma}$ 应为 8.9~48.7 MPa,即平均应力在这个范围,都可能出现岩饼,而且在这种应力状态下出现的岩饼以拉断为其特征,表面平整。如果原位平均应力 $\bar{\sigma}$ 较小,或者模量 E 较高,则岩芯表面的拉断裂纹不能进一步扩展贯通形成岩饼。应用(3)式在工程中可以根据饼裂的出现和单轴拉断实验来判定地应力的大小。上述分析也说明岩芯饼裂有可能在低应力条件下发生,与文献[6]从断裂力学出发给出的结论是一致的。

卸荷有一个时间过程,可以设定取出瞬间,岩芯表面应力为 0,而内部各点应力满足如下关系:

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \bar{\sigma}(t) \cdot \frac{R-r}{R} \cdot \frac{R-z}{R} \quad (4)$$

$t=0$ 时 $\bar{\sigma}(0) = \bar{\sigma}$, $\bar{\sigma}$ 可取岩芯所在地层地应力平均值, t 增大, $\bar{\sigma}(t) \rightarrow 0$,由于岩芯半径 R 较小,(4)式所表达的应力线性分布形式,有一定误差,可以估计这种误差很小,在工程分析中这种误差是允许的。

当 $t=0$ 时,岩芯各点的卸荷应力

$$\sigma_r = \sigma_\theta = -\bar{\sigma} \cdot \frac{R-r}{R} \cdot \frac{R-z}{R} \quad (5)$$

$$\sigma_z = \frac{d}{dz}$$

为 z 方向位移。

$$\sigma_{\max} = \frac{(-\bar{\sigma})(1-2\nu)(R-r)}{2E}$$

令 $\frac{(-\bar{\sigma})(1-2\nu)}{2E}$ 为常量 A ,所以 $\sigma_{\max} = A(R-r)$,当 r 从 0 $\rightarrow R$, σ_{\max} 由 $A \rightarrow 0$,由此较好说明岩饼为什么形成微凸的锅底或灯盏状。

3 灯盏状岩饼形成机制的进一步分析

(1) 岩饼表面成圆周状对称拉裂垮破坏成因(图2)。取岩饼厚度 t ,由(4)式知岩饼上部应力 σ_z :

$$\sigma_z = \bar{\sigma} \frac{R-r}{R} \cdot \frac{R-z}{R}$$

岩饼受力 P_z 。

$$P_z = \int_0^r \sigma_z \cdot 2r \cdot dr = \frac{\sigma_0 t \cdot (3Rr^2 - 2r^3)}{3R^2}$$

设岩饼 Z 方向单位面积的平均荷载为 q:

$$q_0 = \frac{P_z}{r^2} = \frac{\sigma_0 t (3R - 2r)}{3R^2}$$

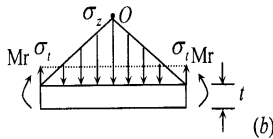
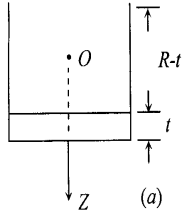


图 2 岩饼受力示意图

Fig.2 The sketch map of force acting on rock core

岩饼为对称弯曲,其边界条件:

中心处 $r = 0, \sigma_r = 0$ 为有限大小。

岩饼边界 $r = R, (\sigma_r) = \frac{d}{dr} = 0$

岩饼(形成拉裂坎)周边的弯曲力矩 Mr

$$|Mr| = \frac{q_0 r^2}{8}$$

岩饼(形成拉裂坎)周边上下表层之应力

$$| \sigma_{max} | = \frac{6 |Mr|}{t^2} = \frac{3}{4} \cdot \frac{q_0 r^2}{t^2} = \frac{\sigma_0 r^2 (3R - 2r)}{4tR^2}$$

当 $| \sigma_{max} |$ 达到抗拉强度 σ_t ,岩饼出现圆周状对称拉裂坎。所以

$$\sigma_0 = \frac{4tR^2 \sigma_t}{r^2 (3R - 2r)} \quad (7)$$

从表 1 可知,平均应力 σ_0 从 2 ~35.7 MPa,在适当条件下都可能产生 5.8 ~9.8MPa 的拉应力,形成岩饼上逐级对称拉裂坎。可用(6)式计算出地应力的平均值,这在工程中的意义是明显的。从上表还可说明为什么有的钻孔在地下 10 ~20 m 处,应力并不很高的情况出现岩饼。因此仅凭钻孔饼裂现象,划分高地应区是不妥的。

(2) 垂直拉裂坎方向擦痕的成因。由(4)式 u, v 分别为 r, z 方向位移,可得:

表 1 形成拉裂坎的地应力平均值的取值范围

Table 1 The range of mean geostress which form the crack bank of discal core

地应力平均值 珙 (MPa)	r (mm)	t (mm)	t (MPa)	备注
2.07	20			
2.9	15	2		
5.3	10		5.8	
8.3	20			
11.5	15	8		R =25mm
21.1	10			文献
3.5	20			[5]
4.8	15	2		
8.9	10		9.8	
14.0	20			
19.4	15	8		
35.7	10			

$$r_{rz} = \frac{u}{z} + \frac{v}{r} = \frac{\sigma_0 (1 - 2\nu) (2Rr - r^2 + 2Rz - z^2)}{2ER^2}$$

式中 $z = R - t, t$ 为岩体厚度 $r = R$ 。

$$r_{rz} = \frac{\sigma_0 (1 - 2\nu) (2Rr - r^2 + R^2 + t^2)}{2ER^2} = \frac{\sigma_0 (1 - 2\nu) (2Rr - r^2 + R^2 + t^2)}{4R^2 (1 + \nu)} \quad (8)$$

表 2 形成岩饼擦痕剪应力的地应力平均值取值范围

Table 2 The range of mean geostress which form the slickenside of discal core

珙 (MPa)	t (mm)	r (mm)	t (MPa)	备注
	2	20	2.0	
		15	1.8	
10		20	2.1	
	8	15	1.9	
		20	4	
20	2	15	3.7	
		20	4.1	
	8	15	3.9	R =25mm
		20	6	v =0.25
30	2	15	5.5	
		20	6.2	
	8	15	5.8	
		20	8	
40	2	15	7.2	
		20	8.4	
	8	15	7.6	

由(8)式可根据相应的地应力平均值 σ_0 ,计算出岩芯所受的剪应力,如表 2 所示。根据提供的花岗岩抗剪试验成果^[5],抗剪断峰值, $C = 3.2 \sim 7$ (MPa),反推当地应力的平均应力约在 20 ~30

MPa。因为 $\sigma = C + \tau g$ ，在 $z = R - t$ 若芯周边 $\sigma_n = 0$ ，所以 $\sigma = c$ ，只要剪应力值达到内聚力 c ，就可能出现剪切破坏。坝址河谷应力集中区，平均应力一般超过 20 MPa，所以易于岩饼出现，花岗岩内聚力 c 越高，取出岩芯如果饼裂，只能说明岩芯原来所处地层地应力越高，具有同样内聚力 c 的岩体，岩芯取出后，由于应力状态发生变化，而出现饼裂，但是在原位，不但不会饼裂，其承载能力、内聚力只会提高，所以在选坝时，不能因有岩饼的出现降低岩体质量等级或建议过多挖去这部分岩体，而应保留这部分岩体较为有利；剪应力方向是沿径向与前述拉裂坎垂直，这一点也为电镜观察到的擦痕所证实。

参考文献(References)：

- [1] Hast N. Limits of stress measurements in the Earth's crust [J]. *Rock Mechanics* 1979, 11: 143-150.
- [2] 侯发亮, 刘军, 卓光. 应力解除时岩芯中的应力状态及饼状岩芯破裂成因分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 1986, 5(1): 61-78.
- [3] 阮小平, 李方全. 茅坪 800 m 钻孔饼状岩芯分析 [J]. *地震学报*, 1994, 16(2): 190-194.
- [4] 黄润秋, 张倬元, 王跃. 高边坡稳定性的系统工程地质研究 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1991: 74-84.
- [5] 能源部·水利部西北勘测设计研究院. 黄河拉西瓦水电站工程初步设计报告 [J]. *工程地质*, 5: 1-75.
- [6] 刘竹华, 姚宝魁. 钻孔岩芯饼状断裂破坏机制 [J]. *工程地质学报*, 1997, 5(4): 330-334.
- [7] 徐芝纶. 弹性力学 (下册) [M]. 北京: 人民教育出版社, 1980: 18-19.
- [1] Hast N. Limits of stress measurements in the Earth's crust [J].

THE FRACTURE MECHANISM OF DISCAL DRILL CORE AND ITS INFLUENCE ON CHARACTERISTIC OF ENGINEERING GEOLOGY

LI Shu-sen, NIE De-xin, RE Guang-ming
(Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: This paper bring forward the viewpoint that geostress average value controls the destroy of discal drill core. Explain that the tension fracture is mainly fracture form al at periphery of drill core and the cause of formation of crack bank and slickenside of symmetry within the rock core. At last, the elastic modulus and cohesion of rock mass related engineering geological characters are discussed.

Key words: Discal core; Geostress average value.