

卸荷条件下锚杆对节理岩体力学参数的影响

王兴霞¹, 李建林²

(1. 武汉大学 水利水电学院, 武汉 430072; 2. 三峡大学 土木水电学院, 宜昌 443002)

摘 要: 岩体在加载和卸荷条件下, 其力学性质有本质的区别。采用数值模拟方法, 以 ADINA 软件为计算平台, 研究了卸荷条件下, 锚固密度、锚杆长度和岩体性质 3 个因素对节理岩体力学参数的影响。采用等效变形参数的方法计算节理岩体和锚固体的等效变形模量和泊松比。在分析数值计算结果的基础上, 分析了加锚后等效变形模量 E_n 与锚固密度 N 和锚杆长度 L 之间的关系。

关 键 词: 卸荷; 锚杆; 节理岩体; 等效变形参数

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Influence of Anchor Bolts on Mechanical Parameters under Unloading Conditions

WANG Xing-xia¹, LI Jian-lin²

(1. School of Water Resource and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. College of Civil & Hydropower Engineering, Three Gorges Univ., Yichang 443002, China)

Abstract: The mechanical properties of a jointed rockmass under loading conditions are essentially different from those under unloading conditions. The paper makes studies on how bolt consistency, bolt length and rock characteristics to affect the mechanical parameters of a bolt-supported rockmass under unloading conditions. Numerical simulation method and ADINA software are employed. In addition, equivalent deformation parameter method is used to calculate the equivalent deformation modulus and Poisson's ratio of a jointed rockmass and bolt-supported rockmass. Based on that, the paper analyzes the relation between the equivalent deformation modulus E_n of bolt-supported rock mass and bolt consistency N , and the relation between E_n and bolt length L .

Key words: unloading; bolt; jointed rockmass; equivalent deformation parameter

1 引 言

岩体工程类型不同, 其力学条件各不相同, 主要分为加载和卸荷两种力学条件, 并由此将岩体力学分为加载岩体力学和卸荷岩体力学^[1,2]。不同的力学条件下, 岩体有着不同的力学性质。在岩体工程的岩石(体)力学分析研究中, 如果对岩体力学特性认识不够, 未能采用正确的力学理论进行计算分析, 所得结果往往与实际不符。边坡开挖后, 岩体主要为卸荷力学条件, 工程实践表明采用卸荷岩体力学理论对其进行变形及稳定分析, 计算结果与实际资料较一致^[2]。

加载岩体力学的研究相对比较成熟, 而卸荷岩体力学理论的发展相对迟缓, 有关卸荷岩体力学研

究成果的报导也相对较少。因此, 对卸荷岩体的计算方法、锚固理论等内容进行深入研究是十分必要的。本文采用数值模拟方法, 研究了卸荷条件下, 全长粘结式锚杆对节理岩体力学参数的影响, 得出了一些有意义的结论, 希望能为工程实际提供理论依据。

2 卸荷数值模拟方法

卸荷作用相当于在初始应力作用下的岩体中施加一个反向拉应力, 在数值分析中可以将岩体卸荷前的应力状态视为初始应力状态, 卸荷应力看作作用在同样岩体的一种拉应力, 将卸荷问题分解为卸荷应力应变场和卸荷前的应力应变场的和^[1]。具体模拟过程如图 1 所示。

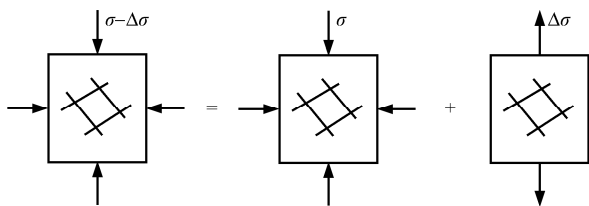


图1 卸荷应力分解图

Fig.1 Map of stress decomposition

岩体由岩石和结构面组成，在卸荷条件下，岩石和结构面的质量均发生一定程度的劣化。由于岩石材料相对比较致密、强度高，因此，岩石材料的力学参数降低相对较小，而结构面材料力学参数不断明显降低，所以本文计算时主要考虑结构面在卸荷过程中的参数的降低。结构面卸荷力学参数降低量见表1^[2]。

表1 边坡卸荷过程中裂隙体材料卸荷变形模量降低百分比

Table 1 Decreasing percent of unloading deformation modulus for fissured rockmass

卸荷量 /%	<30	30~50	50~80	80~100	0~ σ_1	σ_1
卸荷变模降低 /%	0	13	47	73	87	93

3 锚固体等效变形参数计算方法

计算试块内不是单一材料，而是由岩体和锚杆组成的，在表面压力作用下，试块内的岩体和锚杆变形是不一致的，所谓岩体的等效变形参数是在综合考虑岩块的变形和锚杆的变形条件下的一个综合参数^[3]。计算试件在给定的应力增量条件下，通过弹塑性有限元分析计算，可计算各方向上的应变增量，由此反演计算其相当某单一应力状态下的材料的等效变形参数。

在主应力空间，弹性应力状态下，应力-应变关系服从广义虎克定律：

$$\begin{cases} \Delta \varepsilon_1 = \frac{1}{E} (\Delta \sigma_1 - \mu (\Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_3)) \\ \Delta \varepsilon_2 = \frac{1}{E} (\Delta \sigma_2 - \mu (\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_3)) \\ \Delta \varepsilon_3 = \frac{1}{E} (\Delta \sigma_3 - \mu (\Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_1)) \end{cases} \quad (1)$$

平面应变状态下，计算试件在应力增量的作用下，通过有限元计算得到该试件的 $\Delta \varepsilon_1$ 、 $\Delta \varepsilon_2$ ，通过式(1)可求解泊松比 μ 和变形模量 E ^[4]如下：

$$\mu = \frac{(\Delta \varepsilon_2 \Delta \sigma_2 - \Delta \varepsilon_1 \Delta \sigma_1) + \sqrt{(\Delta \varepsilon_1 \Delta \sigma_1 - \Delta \varepsilon_2 \Delta \sigma_2)^2 - 4(\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2)}}{\sqrt{(\Delta \varepsilon_1 - \Delta \varepsilon_2)(\Delta \varepsilon_2 \Delta \sigma_1 - \Delta \varepsilon_1 \Delta \sigma_2)}} / 2(\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2)(\Delta \varepsilon_1 - \Delta \varepsilon_2) \quad (2)$$

$$E = \frac{(\Delta \sigma_1 - \mu (\Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_3))}{\Delta \varepsilon_1} \quad (3)$$

4 算例

锚固方式、锚固时间、岩体性质和锚固参数等因素均对锚固体力学参数的变化产生影响，且在一个边坡的防护过程中，往往是某几种因素共同作用。本文主要研究锚固密度、锚杆长度、岩体性质3个因素对锚固体等效变形参数的影响。

为了研究不同强度参数岩体的锚固效果，特建立4种不同强度参数的模型，如表2所示。

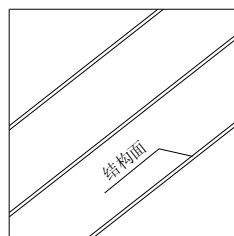
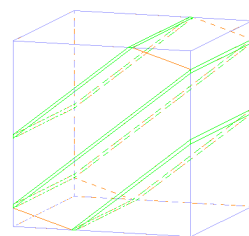
表2 模型力学参数表

Table 2 The mechanical parameters of various models

类别	岩石				结构面			
	弹模 /MPa	泊松比	c /MPa	φ /(°)	弹模 /MPa	泊松比	c /MPa	φ /(°)
模型1	3	0.28	0.2	30	1.5	0.30	0.1	27
模型2	5	0.28	0.5	35	1.5	0.30	0.1	27
模型3	10	0.25	1.0	40	1.5	0.30	0.1	27
模型4	20	0.2	2.0	45	1.5	0.30	0.1	27

4.1 数值模拟力学模型的建立

数值模拟时，按照常规方法将锚杆看成杆单元，以ADINA软件为计算平台，进行三维有限元分析，采用平面应变模式，岩体为符合Mohr-Coloumb破坏准则的弹塑性材料，如图2、图3所示。

图2 试件平面模型
Fig.2 2-D Model图3 试件三维模型
Fig.3 3-D Model

分析中，把结构面单元和岩石单元等同看待，并做软弱材料处理。节理间距约2 m，节理宽度约0.1 m。取岩体范围6.75 m×6.75 m。考虑3组结构

面, 结构面倾角为 38° 。

4.1.1 加载条件

本模型主要模拟实际边坡节理岩体的受力状态, 在垂直方向施加最大主应力, 3 个侧面固定约束, 另一个侧面为自由面, 本模型中节理反倾向方向为自由面。具体加载情况如图 4 所示^[5]。

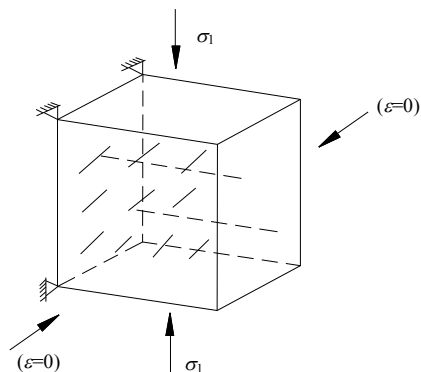


图 4 加载条件示意图

Fig.4 Sketch map of loading condition

在竖直方向卸荷, 根据表 1 边坡卸荷过程中裂隙体材料卸荷变形模量的变化规律, 考虑卸荷量为 20%, 40%, 60%, 90% 时加锚前后岩体力学参数的变化, 不考虑岩体受拉的情况。

4.1.2 布锚方式

锚杆变形模量取 210 GPa, 直径为 0.028 cm。考虑无锚及水平布锚两种情况, 锚杆布置方式如图 5 所示。比较加锚前后岩体的等效变形模量, 据此研究布锚方式对岩体等效力学参数的影响。

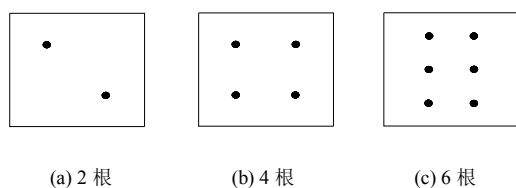


图 5 锚杆布置示意图

Fig.5 Sketch map of bolt arrangement

模型 2 考虑锚杆长度为 3, 4, 5, 6 m 4 种情况, 其他模型仅考虑锚杆长度为 6 m 的情况。

未施加锚杆的模拟图如图 6 所示, 施加锚杆的模拟图如图 7~图 9 所示(以锚杆长 6 m 为例)。

4.2 计算结果及分析

4.2.1 锚固密度对锚固体力学参数的影响

当锚杆长度为 6 m 时, 计算得到模型 1 的水平位移图、竖直位移图(以施加 2 根锚杆、卸荷量为 20% 时为例)如图 10、图 11 所示。

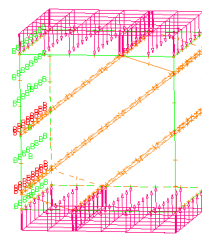


图 6 未施加锚杆模拟图

Fig.6 Simulation without bolts

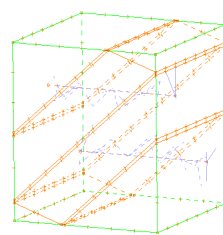


图 7 施加 2 根锚杆模拟图

Fig.7 Simulation with 2 bolts

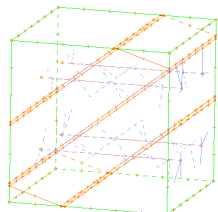


图 8 施加 4 根锚杆模拟图

Fig.8 Simulation with 4 bolts

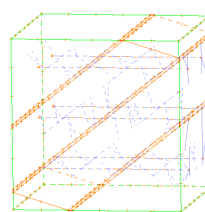


图 9 施加 6 根锚杆模拟图

Fig.9 Simulation with 6 bolts

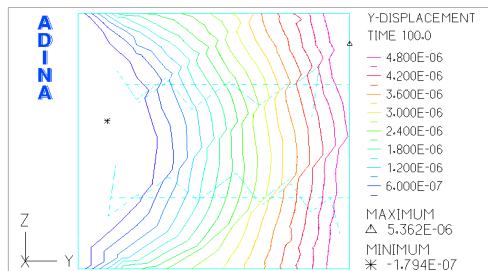


图 10 模型 1 施加 2 根锚杆时(卸荷量 20%)水平位移图

Fig.10 Horizontal deformation of model 1 with 2 bolts

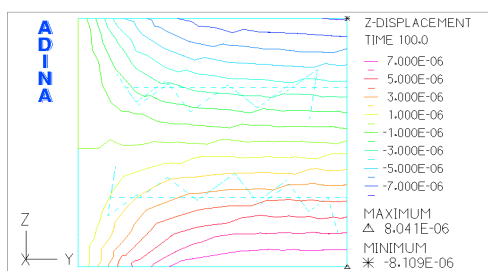


图 11 模型 1 施加 2 根锚杆时(卸荷量 20%)竖直位移图

Fig.11 Vertical deformation of model 1 with 2 bolts

根据模拟结果计算应变 $\Delta\epsilon_1$ 和 $\Delta\epsilon_2$, 即

$$\Delta\epsilon = \Delta l / L \quad (4)$$

式中: $\Delta l / \Delta l$ 为荷载作用下节点的平均位移, L 为模拟试件的边长; 然后根据式(2)和式(3)计算泊松比 μ 和等效变形模量 E_n 。模型 1 计算所得 $\Delta\epsilon_1$ 、 $\Delta\epsilon_2$ 、 μ 、 E_n 的统计结果如表 3 所示(以卸荷量为 20% 时为例)。

按照相同的方法, 可以计算得到模型 2, 3, 4 加锚前后岩体的等效变形模量见表 4。

表3 模型1岩体加锚前后等效变形参数统计表(6 m)
Table 3 Equivalent deformation parameters of model 1

卸荷量 /%	布锚情况	$\Delta\epsilon_1$	$\Delta\epsilon_2$	μ	E_n/GPa	E_n/E_0
20	0	2.274 5e-6	-7.763 5e-7	0.254 5	2.960 6	1
	2	2.273 7e-6	-7.752 7e-7	0.254 3	2.961 8	1.000 4
	4	2.273 0e-6	-7.741 9e-7	0.254 1	2.963 2	1.000 8
	6	2.272 3e-6	-7.725 6e-7	0.253 9	2.964 2	1.001 2

表4 模型2, 3, 4岩体加锚前后等效变形参数统计表(6 m)
Table 4 Equivalent deformation parameters of model 2, 3, 4

模型号	卸荷量 /%	布锚情况	μ	E_n/GPa	E_n/E_0
模型2	20	0	0.253 8	4.628 5	1.0
		2	0.253 6	4.630 1	1.000 3
		4	0.253 5	4.631 5	1.000 7
		6	0.253 5	4.623 7	1.000 9
模型3	20	0	0.2324	8.4297	1.0
		2	0.2322	8.0320	1.0003
		4	0.2321	8.0344	1.0006
		6	0.2321	8.0361	1.0008
模型4	20	0	0.2094	12.8094	1.0
		2	0.2080	12.8142	1.0004
		4	0.2090	12.8189	1.0007
		6	0.2090	12.8229	1.0011

对表3~表4的数据用最小二乘法拟合卸荷量为20%时, 加锚后等效变形模量 E_n 与无锚岩体变形模量 E 和锚固密度 N 之间的关系式, 并且可将卸荷量为20%时的关系式近似作为卸荷量小于30%时的关系式, 即:

当卸荷量小于30%时:

$$E_n = E + 0.0533N \quad r=0.9910 \quad (5)$$

按照相同的方法拟合卸荷量为30%~50%, 50%~80%, 80%~100%时加锚后等效变形模量 E_n 与无锚岩体变形模量 E 和锚固密度 N 之间的关系式, 即:

当卸荷量为30%~50%时:

$$E_n = E + 0.0533N \quad r=0.9635 \quad (6)$$

当卸荷量为50%~80%时:

$$E_n = E + 0.1019N \quad r=0.9941 \quad (7)$$

当卸荷量为80%~100%时:

$$E_n = E + 0.2005N \quad r=0.9959 \quad (8)$$

4.2.2 锚杆长度对锚固体力学参数的影响

对于模型2, 水平布置6根锚杆, 考虑锚杆长度分别为3, 4, 5, 6 m 4种情况下, 施加锚杆对岩体力学参数的影响。计算结果见表5。

用最小二乘法可以拟合卸荷量小于30%时加锚后等效变形模量 E_n 与无锚岩体变形模量 E 和锚杆长度 L 之间的关系式, 按照同样的方法也可以

表5 锚杆长度不同模型2加锚前后等效变形参数统计表
Table 5 Equivalent deformation parameters of model 2 with different bolt lengths

卸荷量 /%	锚杆长度 /m	μ	E_n/GPa	E_n/E_0
20	0	0.253 8	4.628 5	1.0
	3	0.253 7	4.629 9	1.000 3
	4	0.253 6	4.631 4	1.000 6
	5	0.253 5	4.632 6	1.000 9
	6	0.253 5	4.632 7	1.000 9

拟合卸荷量分别为30%~50%, 50%~80%, 80%~100%时, E_n 与 E 和 L 之间的关系式, 即:

当卸荷量小于30%时:

$$E_n = E + 0.0043\ln(L) - 0.0031 \quad r=0.9734 \quad (9)$$

当卸荷量为30%~50%时:

$$E_n = E + 0.0052\ln(L) + 0.0013 \quad r=0.9659 \quad (10)$$

当卸荷量为50%~80%时:

$$E_n = E + 0.0061\ln(L) - 0.0038 \quad r=0.9779 \quad (11)$$

当卸荷量为80%~100%时:

$$E_n = E + 0.0071\ln(L) + 0.019 \quad r=0.9870 \quad (12)$$

5 结 论

边坡开挖条件下, 岩体往往处于卸荷力学条件, 因此, 研究卸荷条件下岩体的加固理论具有广阔的应用前景。本文通过研究得到以下结论:

(1) 卸荷条件下, 节理岩体加锚后力学性质得到了改善, 表现为锚固体等效变形模量的提高。

(2) 当外荷载卸荷量处于某一范围时, 在锚杆长度相同的条件下, 锚固体等效变形模量随着锚固密度的增加而增大, 近似呈线性关系, 而泊松比则随着锚固密度的增加而减小。当锚固密度相同时, 锚杆长度越大, 锚固体等效变形模量增大。

(3) 布锚方式相同的条件下, 随着卸荷量的增大, 锚固对岩体力学参数的提高效果越明显。

(4) 本文根据数值计算结果分别推导了加锚后等效变形模量 E_n 与锚固密度 N 和锚杆长度 L 之间的关系式。

参 考 文 献

- [1] 李建林. 卸荷岩体力学理论与应用[M]. 北京: 水利水电出版社, 1999. 55—142.
 - [2] 哈秋龄, 李建林, 张永兴等. 节理岩体卸荷非线性岩体力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
 - [3] 冯文娟, 琚晓冬, 李建林, 等. 预应力锚索在卸荷岩体中的作用机理[J]. 常州工学院学报, 2005, 18: 97—102.
- FENG Wen-juan, JU Xiao-dong, LI Jian-lin, et al. The action mechanism of prestress anchor rope in rock mass[J].

- Journal of Changzhou Institute of Technology**, 2005, 100(4)18: 97—102.
- [4] 杨学堂, 哈秋龄, 张永兴等. 裂隙岩体宏观力学参数数值仿真模拟研究[J]. 水利发电, 2004, 30(7): 14—17.
YANG Xue-tang, HA Qiu-ling, ZHANG Yong-xing, et al. Study on numerical simulation of macro mechanics parameters of fissured rock mass[J]. **Water Power**, 2004, 30(7): 14—17.
- [5] 朱维申, 李术才, 陈卫忠. 节理岩体破坏机理和锚固效应及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 116—127.