

考虑卸荷的加锚裂隙岩体力学参数研究

邓华锋^{1,2}, 李建林^{1,2}, 王乐华

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

摘 要: 加锚岩体的力学参数确定一直是岩土工程中的一个重要和困难的问题, 在考虑卸荷的情况下, 对边坡岩体的分离块体经系统锚杆加固后的抗压强度、泊松比、弹性模量及 c , ϕ 值的变化规律进行了数值模拟计算和分析, 并考虑了不同的加卸载路径、锚固角和岩体强度对加固效果的影响, 计算结果表明, 在分析卸荷岩体边坡加固时, 必须考虑裂隙岩体卸荷历史的影响。最后用试验结果验证了等效数值计算方法的正确性。

关 键 词: 系统锚杆; 卸荷岩体; 力学参数; 数值模型试验

中图分类号 TU 452

文献标识码: A

Study on mechanic parameters of bolted fractured rock mass under unloading

DENG Hua-feng^{1,2}, LI Jian-lin^{1,2}, WANG Le-hua

(1.College of Civil & Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002,China;2.School of Water Resource and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072,China)

Abstract: How to decide the parameters of bolted rock mass is an important and complicated problem in geotechnical engineering. Taking unloading into account, the variation regularity of compression strength, Poisson's ratio, elastic modulus, c and friction angle ϕ values were studied and simulated by computer; and different loading-unloading paths, anchoring angle, strength of rock mass were taken into account. The computed results show that the influence of unloading process before reinforcement should not be neglected. Finally, some experimental data were used to testify the above-mentioned analysis.

Key words: systematic bolts; unloading rock mass; mechanical parameter; numerical model test

1 引 述

边坡岩体经过开挖卸荷后, 采用系统锚杆进行加固, 在计算方法上, 除了用特定的适宜的锚杆模型(即离散模型)来模拟外, 如果边坡岩体节理裂隙比较发育, 布置较多、较密和长度较短的系统锚杆时, 采用离散模型逐一模拟每根锚杆是不太可能的。为此, 有的学者提出了等效连续模型的理论, 不具体模拟每根锚杆, 而是将岩体施加锚杆后得到改善的裂隙面和岩体新的力学性能反映到岩体计算参数中去, 但是锚固后岩体力学参数的提高现在还没有一个确定的依据^[1,2], 并且, 在对卸荷节理岩体进行系统锚杆加固分析时, 必须考虑裂隙岩体在系统锚杆加固前的卸荷过程, 即岩体加固前的应力变

化过程, 这是以往绝大部分研究者都很少考虑的问题。本文就是针对这些问题, 通过数值模型试验的方法, 研究卸荷岩体加锚的抗压强度、变形模量、泊松比及 c , ϕ 值的变化规律。

2 裂隙岩体锚固的等效参数的研究

2.1 裂隙面卸荷岩体力学参数的确定^[3,4]

从宏观上来看, 岩体是由不同的岩石和结构面构成的, 岩石强度高, 节理面、断层间充填物质的强度及变形参数低, 相互结合后的岩体强度及变形参数如何确定是相当困难的。边坡开挖以后, 初始应力场发生变化, 主要以岩体卸荷为主, 卸荷过程有岩体质量劣化趋势, 主要表现在以下两个方面: 一方面卸荷后, 裂隙面张开, 裂隙面参数降低, 节

理连通率增加。另一方面,岩体卸荷后,应力状态发生变化,在复杂的应力环境下,部分岩体和裂隙体的应力达到其屈服状态,岩体受到损伤,抗拉强度降低。因此,在岩体开挖卸荷过程中,卸荷岩体力学参数是变化的,其强度和变形参数是一动态变化过程。

开挖卸荷过程中,岩石材料相对比较致密,强度高,其力学参数降低的相对较小,计算中可不考虑岩石在卸荷过程中的参数降低;而裂隙面材料参数降低明显,计算中应该加于考虑。裂隙面的卸荷力学参数的降低量如表 1 所示^[3],表中 σ_t 表示岩体残余抗拉强度。

表 1 岩体卸荷后裂隙体材料变形模量变化情况

Table.1 Deformation modulus of cranny change with unloading

类别	百分比/%				
卸荷量	<30	30~50	50~80	80~100	0~ σ_t σ_t
卸荷变形模量降低	0	13	47	73	87 93

岩体卸荷至不同程度再加荷时的加荷变形参数与岩体继续卸荷时的变形参数是不同的,在加荷时,岩体内裂隙面开度减小甚至闭合,岩体抗压缩变形能力比抗拉伸变形能力高,当卸荷到一定百分比时岩体再加荷,裂隙材料加荷变形参数相当原岩初始参数降低百分比如表 2 所示^[3]。

表 2 岩体卸荷后再加荷裂隙材料变形模量变化情况

Table 2 Deformation modulus of cranny change with unloading and loading

类别	百分比/%			
卸荷量	<30	50	70	100
加荷变形模量降低	0	10	30	60

2.2 裂隙岩体锚固的等效变形参数的研究

本文的重点是在考虑节理岩体在系统锚杆加固前卸荷过程的情况下,将岩体施加锚杆后得到改善的节理面和岩体新的力学性能反映到岩体计算参数中去,也就是研究岩体加锚后的等效变形参数和强度参数。

(1) 裂隙岩体锚固的等效变形参数计算

计算试块内材料并不是单一材料,而是由岩石、节理和锚杆组成的,在表面压力作用下,试块内的岩块和锚杆的变形是不一致的,所谓岩体的等效变形参数是在综合考虑岩块、节理的变形和锚杆变形条件下的一个综合参数^[5]。

计算试块在给定的应力增量条件下,可通过弹塑性有限元计算试块各方向上的应变增量,由此反演计算其相当某单一弹性体材料在各应力状态下的

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,平面应变状态下, $\Delta\epsilon_3 = 0$,试块在应力增量 $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$ 的作用下,通过有限元计算得到该试块的 $\Delta\epsilon_1$, $\Delta\epsilon_2$,未知量 E , ν 和 $\Delta\sigma_3$ 可以通过物理方程解得:

$$\left. \begin{aligned} \nu &= \frac{(\epsilon_2 \Delta\sigma_2 - \Delta\epsilon_1 \Delta\sigma_1) + \sqrt{(\Delta\epsilon_1 \Delta\sigma_1 - \Delta\epsilon_2 \Delta\sigma_2)^2 - 4(\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2)(\Delta\epsilon_1 - \Delta\epsilon_2)(\Delta\epsilon_2 \Delta\sigma_1 - \Delta\epsilon_1 \Delta\sigma_2)}}{2(\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2)(\Delta\epsilon_1 - \Delta\epsilon_2)} \\ E &= \frac{(\Delta\sigma_1 - \nu(\Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3))}{\Delta\epsilon_1} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(2) 裂隙岩体锚固的等效强度参数的确定

由有限元计算岩体试块在两种不同的应力状态屈服时的应力,可得到相应两个破坏莫尔圆,由其包络线,可以导出岩体的等效粘聚力 c_m 和内摩擦角 φ_m 的计算公式^[5]:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_m &= \sin^{-1} \left(\frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3) - (\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma'_1 + \sigma'_3) - (\sigma_1 + \sigma_3)} \right) \\ c_m &= \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi_m}{2 \cos \varphi_m} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

3 数值模型的建立

3.1 模型的建立

试块尺寸为 12 m×12 m×24 m,锚杆布置如图 1 所示,锚杆根数为 2 根、4 根、6 根和 9 根,锚杆直径取 25 mm。

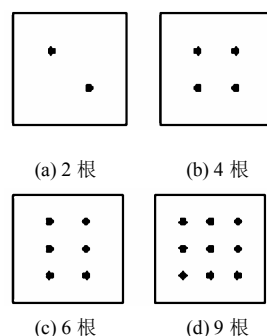


图 1 锚杆布置示意图

Fig.1 Sketch of arrangement of bolts

模型示意图如图 2 所示,采用 D-P 屈服准则,在有限元网格中,把裂隙材料和岩石材料同等对待,均采用六面体或四面体网格,在模型中考虑了裂隙倾角 30° 和 45° 两种情况。

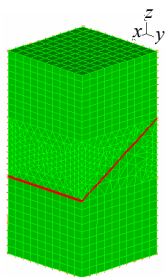


图2 模型示意图
Fig.2 Sketch of model

为了研究不同强度岩体的锚固效果，特建立了两种不同强度参数的模型，以便于对比分析，详细的参数如表3所示。

表3 模型材料参数表
Table.3 Parameters of the models

类别	变形模量/ GPa	泊松比	c / MPa	φ /(°)
锚杆	200	0.25	/	/
裂隙	0.3	0.35	0.05	20
岩石 模型1	3	0.3	0.2	30
岩石 模型2	10	0.25	1.0	45

3.2 加载方式

本模型主要模拟实际卸荷岩体边坡的受力状态，在平面应变条件下进行。在垂直方向施加最大主应力 $\Delta\sigma_1$ ，左右两个侧面施加位移约束 $\Delta\varepsilon_3=0$ ，前后两个平面施加侧压力 $\Delta\sigma_2$ ，满足平面应变的条件。具体的加载情况如图3所示。

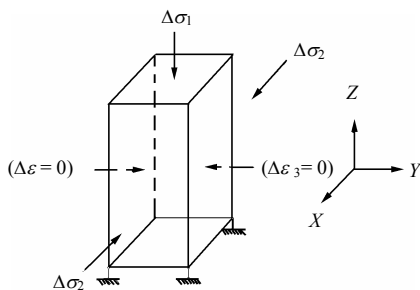


图3 加载方式示意图
Fig.3 Sketch map of loading mode

其中模拟试验具体的加、卸载路径如下：

(1) 施加锚杆，直接加载至破坏

X向:	0	→	0.5 MPa	→	0.5 MPa	→	0.5 MPa
Y向:	$\varepsilon_3=0$						
Z向:	0	→	0.5 MPa	→	1.0 MPa	→	破坏

(2) 加载—卸载—施加锚杆—加载至破坏

X向:	0	→	0.5 MPa	→	0.5 MPa	→	0.5 MPa	→	0.5 MPa	→	0.5 MPa
Y向:	$\Delta\varepsilon_3=0$										
Z向:	0	→	0.5 MPa	→	1.0 MPa	→	0.5 MPa	→	0.5 MPa	→	破坏

计算中，为了对比分析，模型1采用上述两种

加、卸载方式；模型2仅采用第2种加、卸载方式。

3.3 计算结果及分析

表4~7列出了模型1, 2的计算结果，表8列出了模型试验的结果^[1]。

表4 模型1 (30°) 的等效变形参数和抗压强度
Table 4 Equivalent deformation parameters of model 1

布锚情况	E_m / GPa	E_m/E	ν_m	抗压强度/ MPa	强度比
无	2.615	1.00	0.322 941	2.35	1.00
加载 2根	2.712	1.04	0.315 812	2.42	1.03
4根	2.779	1.06	0.311 015	2.50	1.06
6根	2.84	1.09	0.306 817	2.61	1.11
9根	2.951	1.14	0.300 583	2.75	1.17
考虑 卸荷	2.404	1.00	0.331 883	2.05	1.00
2根	2.490	1.04	0.325 561	2.10	1.02
4根	2.545	1.06	0.321 603	2.15	1.05
6根	2.601	1.08	0.318 286	2.20	1.07
9根	2.682	1.12	0.312 769	2.25	1.10

表5 模型1 (45° 倾角) 的等效变形参数和抗压强度
Table 5 Equivalent deformation parameters of model 1 (45°)

布锚情况	E_m /GPa	E_m/E	ν_m	抗压强度/ MPa	强度比
无	2.491	1.00	0.351 183	2.06	1.00
加载 2根	2.517	1.01	0.348 865	2.15	1.04
4根	2.705	1.09	0.333 116	2.31	1.12
6根	2.780	1.12	0.328 726	2.5	1.21
9根	2.902	1.16	0.318 733	2.66	1.29
考虑 卸荷	2.179	1.00	0.363 604	1.55	1.00
2根	2.235	1.03	0.357 942	1.65	1.06
4根	2.345	1.08	0.348 928	1.70	1.10
6根	2.411	1.11	0.344 513	1.80	1.16
9根	2.487	1.14	0.338 351	1.90	1.23

表6 模型2 的等效变形参数和抗压强度

Table 6 Equivalent deformation parameters of model 2

布锚情况	E_m / GPa	E_m/E	ν_m	抗压强度/ MPa	强度比
卸荷	6.740	1.00	0.312 893	5.20	1.00
30° 2根	6.872	1.02	0.309 447	5.40	1.03
4根	6.989	1.04	0.305 915	5.50	1.04
6根	7.111	1.05	0.303 276	5.55	1.05
9根	7.311	1.08	0.297 12	5.60	1.06
45° 卸荷	6.319	1.00	0.342 745	2.90	1.00
2根	6.517	1.03	0.335 790	3.00	1.03
4根	6.704	1.06	0.329 622	3.15	1.09
6根	6.855	1.08	0.325 216	3.20	1.10
9根	7.021	1.11	0.318131	3.30	1.14

表 7 模型 1 的等效强度参数
Table.7 Equivalent strength parameters of model 1

布锚情况		c_m/MPa	c_m/c	$\varphi_m/(\text{ }^\circ)$	φ_m/φ
30° 倾角	卸荷	0.185 3	1.000	28.273 71	1.000
	2 根	0.194 5	1.050	28.982 08	1.025
	4 根	0.208 5	1.125	29.155 37	1.031
	6 根	0.216 5	1.169	29.327 17	1.037
	9 根	0.227 5	1.228	29.497 51	1.043
45° 倾角	卸荷	0.136 1	1.000	24.097 09	1.000
	2 根	0.150 4	1.105	24.746 53	1.027
	4 根	0.162 6	1.194	24.958 73	1.036
	6 根	0.184 2	1.353	25.168 85	1.044
	9 根	0.189 0	1.388	25.583 00	1.062

从表 4~7 可以看出, 施加锚杆后, 岩体的变形模量、黏聚力和内摩擦角均有所提高 (2%~14%, 5.0%~38.8%, 2.5%~6.2%), 并且锚固角不同, 岩体强度参数不一样时, 提高幅度也不一样, 因此, 在锚杆设计时, 要注意选择最优的锚固角。同时, 在表中我们可以看出, 岩体锚固后, 相对于卸荷后的等效参数, 泊松比有变小的趋势。分析这种现象出现的原因是由于施加锚杆时, 约束了节理裂隙面的变形, 因此水平方向的变形减小, 而竖直方向的变形变化不大, 因此, 泊松比减小。但是, 由于锚杆的长度一般较短, 泊松比的这种变化是有限的。

对比表 4 和表 5 可以看出, 不考虑卸荷时, 试块的等效变形模量、抗压强度要比考虑卸荷时高出 8%~14% 和 15%~33%, 可见节理岩体在系统锚杆加固前的卸荷过程, 即岩体加固前的应力变化过程, 对加固后的效果影响是很大的。

表 8 无锚试件与加锚试件变形参数和强度参数之间的关系 (试验)
Table.8 Relationship between deformation parameters and intensive parameters of the test bodies without bolts and with bolts

类型	布锚方式			
	无锚	2 根	4 根	6 根
变形模量	1	1.26	1.42	1.70
抗压强度	1	1.42	1.52	1.57
黏聚力	1	1.41	1.50	1.65
内摩擦角	1	1.03	1.05	1.08

比较表 8 与表 4~7 可以看出, 数值模拟计算结果和模型试验结果的基本分布趋势和规律是一致的, 说明上述的数值计算分析方法是可行的, 但是模型试验的结果要比数值模拟分析的结果大, 分析原因主要是由于模型试验没有节理裂隙的影响和模型试验尺寸效应的问题。

4 结 论

(1) 采用等效计算试块法解决了物理试验对加锚岩体参数评价的局限性和在整体模型计算中参数选取的任意性等问题。加锚岩体等效参数的数值模拟方法是以工程调查和勘察资料以及室内试验资料为基础的, 计算成果表明裂隙的倾角、性质及锚固角度对岩体参数有非常重要的影响。

(2) 裂隙岩体经系统锚杆加固后, 其力学性质得到改善, 相同的试块, 在不同的加、卸载路径作用下, 试验结果的差别较大, 而这个差别也正好验证了裂隙岩体加固前的应力状态对加固效果的影响, 因此, 在分析卸荷岩体边坡加固时, 必须考虑裂隙岩体卸荷历史的影响。

(3) 本文的数值模拟计算中, 仅考虑了单组贯通裂隙的情况, 采用这种计算方法和理论, 在清江水布垭电站溢洪道边坡开挖卸荷及加固优化研究及其它项目的研究中, 根据节理裂隙的实际分布情况, 采用分区分级的方法计算加锚裂隙岩体的宏观力学参数, 收到了较好的效果, 限于篇幅, 这里不再介绍。

参 考 文 献

- [1] 朱维申, 张玉军, 任伟中. 系统锚杆对三峡船闸高边坡岩体加固作用的块体相识模型试验研究[J]. 岩土力学, 1996, 6, 17(2): 1—6.
ZHU Wei-shen, ZHANG yu-jun, REN wei-zhong. Similar model block tests for reinforcing effects of systematic bolts on rock mass of high slope of three gorges shiplock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1996, 17(2): 1—6.
- [2] YAP L P, RODGER A A. A study of behaviour of vertical rock anchors using the finite element method [J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**. 1984, 21(2): 47—61.
- [3] 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.
- [4] 李建林, 丁振明. 卸荷岩体加固若干问题的探讨[J]. 武汉水利电力大学(宜昌)学报, 2000, 9 22(3): 191—195.
LI Jian-lin, DING Zhen-ming. Discussion on some problems related to anchoring unloading rock mass [J]. **Journal of University of Hydraulic and Electric Engineering/Yichang**, 2000.9, 22(3): 191—195.
- [5] 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]. 水力发电, 2004.7, 30(7): 14—16.
YANG Xue-tang, HA Qiu-ling, ZHANG Yong-xing, et al. Study on numerical simulation of macro mechanic parameters of fissured rock mass[J]. **Water power**, 2004, 30(7): 14—16.