

三峡工程船闸高边坡锚固 方案的平面有限元计算^{*}

张玉军 朱维申
(中国科学院武汉岩土力学研究所, 430071)

1 前 言

三峡水利枢纽永久船闸在修建时将形成路堑式双高陡边坡, 最高达 170m, 其中闸墙直立坡一般高 50m, 最高有 70m。高边坡的稳定, 直接影响到船闸运行的安全。为此, 对高边坡设置了系统砂浆锚杆加固, 并在适当部位采用了预应力长锚杆或锚索。为了探讨锚杆(索)加固的效果, 特就 20 号剖面对设定的多种锚固方案进行了平面弹塑性有限元计算, 并得出了相应的结论。

2 计算条件

2.1 岩体力学参数及锚杆(索)参数

船闸地区的岩石为前震旦系闪云斜长花岗岩, 从地表向下依次为全风化、强风化、弱风化和微新岩层, 其间穿插有片岩捕虏体。岩体中赋存三条主要结构面。岩体及结构面的力学参数见表 1、表 2。锚杆(索)参数见表 3。

表 1 船闸区岩体强度及变形指标

岩石名称	风化程度	容重 (kN/m^3)	泊松比	弹性模量 (GPa)	抗拉强度 (MPa)	抗剪强度		残余抗剪强度	
						f	c (MPa)	f	c (MPa)
闪云斜长 花岗岩	微新	27.0	0.22	40	1.5	1.8	1.5, 1.8, 3.0	1.3	0.5, 0.7, 0.9
	弱风化	26.8	0.24	15	0.8, 1.0, 1.2	1.3	0.5, 1.0, 1.5	1.1	0.2, 0.35, 0.5
	强风化	26.5	0.30	1.0	0.0, 0.5, 0.8	1.0	0.2, 0.35, 0.5	0.9	0.1, 0.15, 0.2
	全风化	25.0	0.35	0.1	—	0.7	0.05, 0.1, 0.2	0.7	0.05, 0.07, 0.1

表 2 船闸区岩体结构面强度指标

岩性	结构面类型	抗剪强度		残余强度		切向刚度 (MPa/cm)	法向刚度 (MPa/cm)
		f	c (MPa)	f	c (MPa)		
花岗岩	硬性结构面	0.70	0.10, 0.20, 0.30	0.60	0.05, 0.10, 0.15	30	75
	软弱结构面	微弱、弱风化	0.60	0.15, 0.18, 0.20	0.50	0.10, 0.12, 0.15	10
			0.40	0.10, 0.12, 0.15	0.35	0.05, 0.07, 0.10	10

注: 取表中的三组数据分别计算。

* 国家自然科学基金委员会和中国长江三峡工程开发总公司联合资助的国家自然科学基金重大项目(编号 59493600-3-3)。

表 3

锚杆(索)参数

种类	直径 (mm)	长度 (m)	间距 (m)	部位	预应力 (kN)	备注
系统锚杆	Ø28	5~ 8	3 × 3 或 4 × 4	斜边坡	—	高强度螺纹钢筋
		10~ 16	2.5 × 2	直立坡及中隔墩		
预应力锚杆	Ø36	16	3	斜边坡	200	布置一排
预应力锚索	19 × Ø15.24	60	—	闸墙及中隔墩	3000	布置二排, 对穿

2.2 初始地应力场

在全风化岩层中, 按自重应力场考虑, 而在其余岩层中, 按以下公式计算:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -4.3982 - 0.01168H \\ \sigma_y &= -1.6628 - 0.03039H \\ \tau_{xy} &= 0.0472 - 0.00008H \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 的单位为 MPa; H 为埋置深度, m; x, y 分别为水平及垂直方向坐标。

2.3 锚固岩体力学指标的改善

关于锚杆加固对岩体力学性质的改善, 人们已经做了许多探讨^[1~3]。根据他人与笔者的研究结果, 提出了下述经验关系式:

$$c_1 = c_0(1 + \eta \frac{\tau S}{ab}), \quad \varphi_1 = \varphi_0 \quad (2)$$

式中 $c_0, \varphi_0, c_1, \varphi_1$ 分别为原岩体及锚固岩体的粘聚力和内摩擦角; τ, S 分别为锚杆材料的抗剪强度及横截面积; a, b 为锚杆的纵、横向间距; η 为综合经验系统, 暂时可取 2~ 5(有待深入研究)。

需要指出, 锚杆对岩体的加固强度视方向而变化, 但差别不很大。这里为便于计算处理, 将锚固体的 c_1, φ_1 值作为定值。由表 3 及式(2)可得 $c_1 = 1.3c_0$, 而 $\varphi_1 = \varphi_0$ 。

2.4 锚杆长度、间距的改变

c 取低值时, 在锚杆已知参数(表 3)的基础上, 分别比较了锚杆增长 4m; 或缩短 2m 而间距不变; 间距增大 1 倍而锚杆长度不变这三种计算情况。

2.5 计算剖面及开挖步骤

20 号剖面的计算域被划分为 1959 个结点和 2117 个岩石及节理单元。开挖分成 7 个步骤进行, 见图 1。

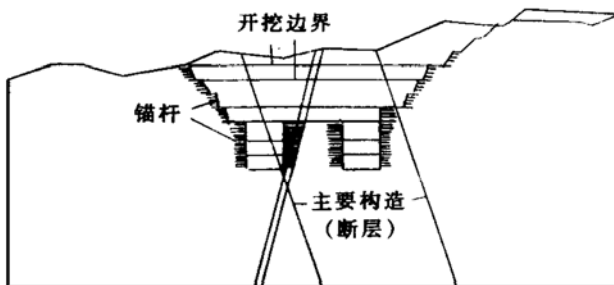


图 1 20 号剖面的计算域

3 计算结果

为节省篇幅, 仅以若干算例最后一步的计算结果来说明问题。

3.1 开挖边界上的位移与应力值

20 号剖面开挖边界上若干点的位移分布见图 2。其中 10 个点的位移值及主应力值分别见表 4、表 5。

从上述表中看到, 有锚与无锚时位移相差很小, 这表明锚杆(索)支护对岩体位移的约束作用不显著。同时, 开挖周边上多数点有锚比无锚时的主应力值大, 这是由于锚固区的 c 值得到提高, 同时又存在锚杆的约束作用, 增大了锚固区的承载能力。

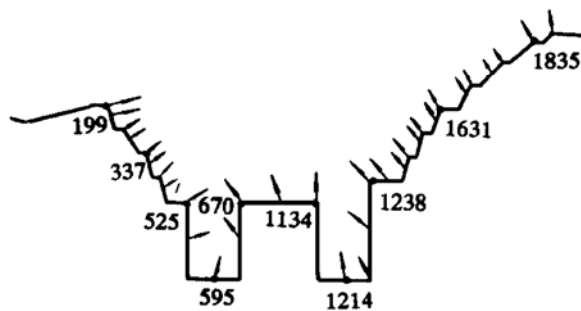


图 2 20 号剖面开挖边界上位移

表 4 20 号剖面开挖边界上若干点的位移值

点号			199	337	525	595	670	1134	1214	1238	1631	1835
位移 (cm)	$c =$ 低值	无锚	4.96	1.57	1.73	1.08	3.05	3.21	2.59	2.97	1.56	1.28
		有锚	4.72	1.57	1.72	1.08	3.00	3.19	2.58	2.96	1.56	1.28
	$c =$ 中值	无锚	4.68	1.57	1.72	1.06	2.93	3.18	2.52	2.90	1.59	1.32
		有锚	4.59	1.36	1.39	1.15	2.84	3.12	2.53	2.72	1.54	1.29
	$c =$ 高值	无锚	4.82	1.56	1.70	1.03	2.89	3.08	2.47	2.84	1.53	1.28
		有锚	4.62	1.55	1.69	1.02	2.95	3.20	2.47	2.93	1.56	1.28

表 5 20 号剖面开挖边界上若干点的主应力值

点号			199	337	525	595	670	1134	1214	1238	1631	1835
主应力 (MPa)	$c =$ 低值	无锚	- 0.11 - 0.44	- 0.12 - 1.19	0.34 - 0.26	0.02 - 8.44	0.01 - 0.17	0.01 - 0.15	- 0.02 - 5.59	0.20 - 0.30	- 0.35 - 0.54	- 0.35 - 0.86
		有锚	- 0.20 - 0.67	- 0.20 - 1.48	0.07 - 0.38	0.02 - 8.44	- 0.08 - 0.24	0.00 - 0.22	0.00 - 5.59	0.13 - 0.36	- 0.37 - 0.90	- 0.35 - 0.86
	$c =$ 中值	无锚	- 0.06 - 0.34	- 0.13 - 1.39	0.11 - 0.39	- 0.22 - 8.38	- 0.16 - 0.21	- 0.04 - 0.18	- 0.23 - 5.51	0.02 - 0.23	- 0.09 - 0.70	- 0.36 0.85
		有锚	- 0.19 - 0.56	- 0.14 - 1.64	0.11 - 0.37	- 0.17 - 8.37	- 0.14 - 0.20	- 0.01 - 0.15	- 0.12 - 5.38	- 0.02 - 0.20	- 0.07 - 0.87	- 0.36 - 0.85
	$c =$ 高值	无锚	- 0.11 - 0.46	- 0.16 - 1.40	0.24 - 0.25	0.14 - 8.68	- 0.10 - 0.17	0.02 - 0.07	0.16 - 5.47	0.46 - 0.37	- 0.39 - 0.63	- 0.36 - 0.85
		有锚	- 0.25 - 0.62	- 0.20 - 1.70	- 0.07 - 0.60	0.13 - 8.74	0.26 - 0.10	0.00 - 0.11	0.15 - 5.46	0.21 - 0.07	- 0.40 - 0.80	- 0.36 - 0.85

3.2 岩体中主应力及塑性区分布

从计算结果看到, 有、无锚杆(索)时岩体中施锚区的主应力分布有较明显的差别, 而其它区域的主应力分布基本相同; 而有、无锚时塑性区分布却无明显差别。如 c 取低值时塑性区单元个数分别为有锚 992 个、无锚 983 个。这与计算方法有一定关系。锚固区单元的 c 值是在锚杆施作后才提高的, 在这之前该区域单元一旦屈服就保持塑性状态不再改变(回复到弹性状态)。 c 取低值及有锚情况的塑性区分布见图 3。



图 3 20 号剖面塑性区分布(有锚)

3.3 岩体中拉应力区分布

锚杆(索)加固对减少围岩中受拉区的效果是比较明显的。如 c 取低值时, 有、无锚时受拉单元分别为 231 个和 275 个, 见图 4。



图 4 20 号剖面拉应力区分布

3.4 岩体中的等强度分布

当强度系数 $D \geq 1$ 时, 表示单元处于塑性状态, 而 $D < 1$ 表示单元仍在弹性范围。经比较可知, c 取低值时, 有锚与无锚的等强度线分布无明显差别; 当 c 取高值时, 有、无锚的情况就有了较明显的变化(表现为 $D \geq 1$ 的区域减小, 见图 5)。这是由于 c_0 越大, c_1 提高的幅度也越大, 因而相对的加固效果也就越显著。

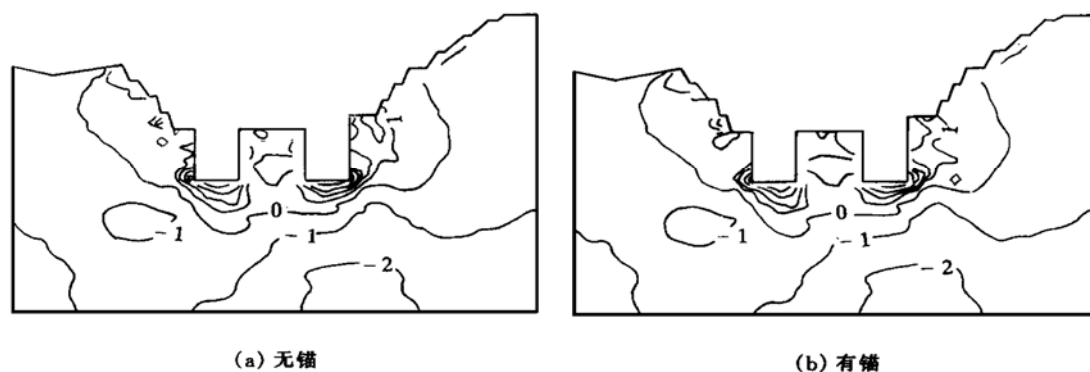


图 5 c 取高值时 20 号剖面等强度线分布

3.5 锚杆长度、间距改变的效果

由计算得知, 在所述所给出的锚杆长度、间距变化的范围内, 围岩中位移、应力、塑性区等基本相同, 只是受拉区单元的个数有一定差别(依次为 216, 232 和 242 个), 所以加固效果几乎无差别。对于这种现象, 分析有如下原因:

- 锚杆支护的部位主要在弱风化和微新岩层中, 这两种岩体的弹性模量较高, 达到 15~40GPa, 因而岩体变形小, 被动受力的锚杆支护作用一般也都较小(小于 60kN)。
- 相对而言, 开挖后岩体变形较大的区域范围有限, 一般小于设计的锚杆长度。故锚杆增加或缩短一个较小的长度, 并不能明显地增大或降低支护作用。
- 当原岩体的 c_0 取低值时, 锚固区的 c_1 值增加量相对较小, 对计算影响不能明显地反映出来。
- 每个开挖部位的岩体变形大部分都是在开挖过程中产生的, 引起锚杆受力的变形在总变形中比例较小, 这也使得锚杆的支护作用对其长度、间距的变化反应不敏感。

3.6 锚杆轴力

对于 20 号剖面, 锚杆轴力极大多数在 5~ 60kN 之间, 极少数为 180~ 370kN。而这些轴力高的锚杆位于第二步开挖后所支护的区域内。

4 结论

在所拟定的计算条件下, 根据计算结果, 可得到下述结论:

(1) 20 号剖面经过系统锚杆和预应力锚索加固后, 由于岩体弹模较高和开挖、支护模拟方式的缘故, 锚杆(索)对位移的约束作用不明显。

(2) 施锚区的应力值及分布发生了一定变化, 但其余区有、无锚时的应力分布基本相同。

(3) 锚杆(索)提高了所支护区域岩体的承载能力, 受拉区有较明显的减少; 有、无锚时塑性区几乎相同, 但等强度线发生了有利的变化。

(4) 锚杆的长度、间距在所给定的范围内变化, 对支护效果的影响不明显。

(5) 计算终了时, 锚杆轴力一般为 5~ 60kN, 极少数在 180~ 370kN 之间。

本项计算工作得到了长江水利委员会设计局徐麟祥总工程师、杨启贵主任、高锋工程师等同志的大力支持和帮助, 在此一并表示衷心感谢!

参 考 文 献

- 1 土矢(日本). 成组锚杆隧道工法的设计研究. 薛耀宗译. 隧道译丛, 1982(6): 53~ 59.
- 2 朱维申, 王平. 适于软岩的新型锚固方法的数理模拟研究. 见: 第二次全国岩石力学与工程学术会议论文集. 北京: 知识出版社, 1989. 493~ 499.
- 3 邹志晖, 汪志林. 锚杆在不同岩体中的工作机理. 岩土工程学报, 1993, 15(6): 71~ 79.

请订阅铁道部《路基工程》

《路基工程》是经国家科委批准, 铁道部主管的专业刊物。由建设司、工务局、中国铁路工程总公司和中国铁道建筑总公司联合主办, 中国工程院周镜院士主编。

内容: 路基工程的方针政策, 技术标准和工程理论; 大量的设计、施工、维修和病害整治的技术及管理经验; 国内外科研新成果, 工程动态及科情通讯。

本刊为双月刊, 16 开本, 订价 4.50 元, 全年 27 元。邮购每期(本)附邮费 0.5 元, 全年 3.0 元。

国内统一刊号: CN51- 1414/U, 国际标准刊号: ISSN1003- 8825。

地址: 成都市通锦路 16 号 邮编: 610032 电话: 路电 62963, 64283 市电(028) 7799247

(路基工程编辑部)