

# 预应力群锚高边坡增稳机理研究

黄福德 吕祖珩

**【提要】**本文阐述国家“八五”重点科技攻关项目“高边坡预应力群锚加固机理研究”中加锚岩体的变形体传力特征。通过现场群锚试验,室内模型试验和数值计算验证研究,发现群锚增稳不同于刚体法加锚的岩体的受力传力动态机理效应,提出了依安全度布锚增效的新参数理论,探讨了判别加锚效果的岩体表层新生压应力层的“岩壳效应”场的机理依据。

**关键词** 高边坡 预应力 群锚 增稳机理

## 前言

预应力群锚加固岩质高边坡的增稳效果已成为国内外大量工程实践所证实,已成为不可替代的有效手段。但其加固增稳的机理及度量标准、合理有效的设计与施工方法等尚处于宏观经验判断或工程类比阶段,对加固效果的鉴别评价亦无统一的机理标准。本文重点介绍在“八五”攻关项目“预应力锚索群锚加固机理研究”中对群锚岩体的地表、内部、外锚墩作用下及滑面抗剪能力等方面的不同于刚体的新的变形体动态规律、时效性、过程性等群锚效应的研究成果,通过系统的现场测试、模型验证对群锚增稳机理提出了不同于刚体法的效果和机理探讨,提出了评价与鉴别加固效果的新生压应力场的“岩壳效应”新的力学标准,分析了群锚的动态加固的设计与施工系统工程论下的新广义预锚参数优控原则与方法,可取得边坡增稳安全系数远远高于刚体群锚设计的结果的机理依据。

### 一、现场测试群锚高边坡岩体动态传力效应

#### 1. 岩体地表的变形体传力特征与增切止裂效应

在黄河李家峡水电站左岸下游群锚加固的层岩高边坡上,随边坡边挖边锚的正规施工顺序,开展了大规模、系统地群锚加固机理研究的现场生产性试验。在群锚高边坡上部510m<sup>2</sup>的试验区内,共布设600kN级、1000kN级和3000kN级锚索(杆)16根。埋设地表变形测桩11个;外锚墩下岩体小应变计22孔55支;多点变位计6孔;声

波测试4孔;测力计12台;锚杆电阻片15组;锚索体变形传感器58支,进行了边坡开挖前后,边挖边锚,张拉前后以及蠕滑和开挖放炮影响等全过程的多项测试,获得了大量论证岩体受力传力新动态规律的变化参数。

从地表水平测轴的7个测点的动态变形规律,可发现岩体各点卸荷变形呈不均匀的波浪式起伏形变化。见图1。

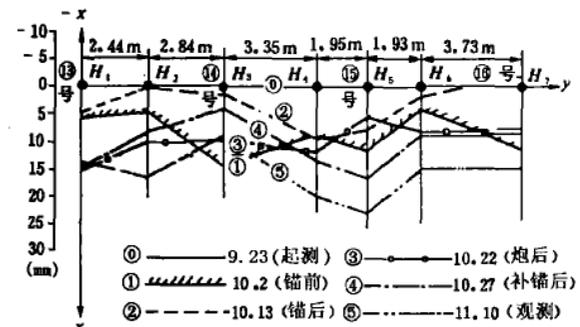


图1 水平测轴地表各测点X向变位过程线

李家峡两岸高边坡岩体属于中等强度的裂隙密集发育的层状岩体,为混合岩和片岩岩性。岩体的这种变形体特征具有普遍性。从竖向变形观测,发现上部变形大于下部的特征。群锚作用有抑制岩体变形的动态效应,图示各阶段轮廓线可看出,各锚点两次锚固时的压缩变形量及继续卸荷变形量均呈不均匀变化,各点的安全度不同,加锚吨级及布锚参数均直接影响加固效果。

群锚对岩体的变形调整能力见表1。从水平7个测点向河床变形速率受群锚抑制的测试结果可以看出,一期加锚后,其各点平均压缩速率达 $\bar{V} = -0.475\text{mm/d}$ ,使未锚前自然卸荷率 $\bar{V} = -0.949\text{mm/d}$ ,受到了反向抑制,压缩量达5~15mm。9d后由

于初锚量仅占总锚量的20.7%，变形率发展至 $V=-0.697\text{mm/d}$ ，当后续补锚量增至加锚量的31%后，7个点平均速率减至 $V=0.183\text{mm/d}$ ，50d后速率稳定在 $V=0.370\text{mm/d}$ 附近，且各锚点在加锚前的松弛卸荷极不均匀量级达 $V=0.411\sim 1.611\text{mm/d}$ ，加锚后被调整到 $V=0.200\sim 0.554\text{mm/d}$ ，接近均匀。这种均匀性调整的岩体，增强了岩体韧性和承受大变形而不破坏的止裂能力，当实测出下层放炮、地下水增加等对边坡稳定不利影响后，上部边坡变形达70mm时，少量锚杆拉断，多点变位计缩头无法测量时，仍能整体性很强地工作。群锚岩体力学性能的提高，从多点变位计、小应变计等测试的结果也得到了验证。

2 岩体内部的群锚压缩效应

群锚锚索之间岩体内部的传力特征，表现在多点变位计的动态压缩变形规律图2中。图示 $d_2$ 号测孔周边群锚锚索一层层施加过程中，测孔处岩体压缩变形在加深，量级增加的效果，且加锚影响区完成后，仍有加压的时效效应。这种后续锚对先期锚区岩体内部增加压缩效果的效应称为增效效应，可根据边坡重要性及加固设计标准，确定布锚参数，节省锚固量。这种动态效应受外界不利影响较敏感，如不利放炮，可把压缩效果

损失大部份，正常状态下可保证岩体一定深度内均呈受压的传力状态。

3. 外锚墩的压缩扩散效应

根据室内模型试验对单根锚索外锚墩的进锚方向与吨级的研究，采用仿真现场棱台状四面扩散成方底的钢筋混凝土体形时，预应力在墩底层横向传压半径为 $R=(2\sim 3)r$ ， $r$ 为墩底面积的当

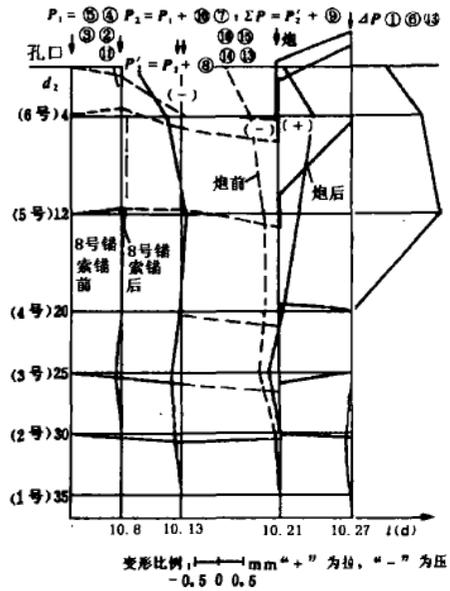


图2  $d_2$  多点变位计对群锚效果

表1 平均轴七桩X方向在锚固前后各时段变形速率

桩点 速率(mm/d)	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	H <sub>4</sub>	H <sub>5</sub>	H <sub>6</sub>	H <sub>7</sub>	时段
9d段点速率	0.644	0.478	1.611	0.967	1.322	0.411	1.211	锚固前
9d段平均速率	$\bar{v}=0.949(\text{mm/d})$							
11d段点速率	-0.1	-0.382	-1.22	-0.060	-0.355	-0.2	-1.127	锚固期
11d段平均速率	$\bar{v}=-0.475(\text{mm/d})$							
9d段点速率	1.156	1.078	0.933	0.267	-0.311	0.733	1.022	过渡期
9d段平均速率	$\bar{v}=0.697(\text{mm/d})$							
5d段点速率	-0.08	-0.3	-1.14	0.320	2.300	0.020	0.160	补锚期
5d段平均速率	$\bar{v}=0.183(\text{mm/d})$							
14d段点速率	-0.107	0.571	0.364	0.436	0.457	0.464	0.407	一观期
14d段平均速率	$\bar{v}=0.370(\text{mm/d})$							
13d段点速率	0.200	0.262	0.238	0.392	0.415	0.531	0.554	二观期
13d段平均速率	$\bar{v}=0.370(\text{mm/d})$							

量半径。传压深度为 $h=(4-6)r$ 。在保证墩体安全刚度的条件下, 3000kN级、1000kN级、600kN级锚墩的 $r$ 分别为1.32m、0.67m、0.61m, 其扩散半径分别为 $R_{3000}=2.64\sim 3.96\text{m}$ 、 $R_{1000}=1.34\sim 2.01\text{m}$ 、 $R_{600}=1.22\sim 1.83\text{m}$ , 其布锚层间距除3000kN级为6m外, 其余均为4m, 均满足小于 $2R$ 的标准, 说明各锚墩下压应力扩散范围可有一份重迭。实测多点变位计已测到索向岩体内压应力下变形的动态特征, 见图3。

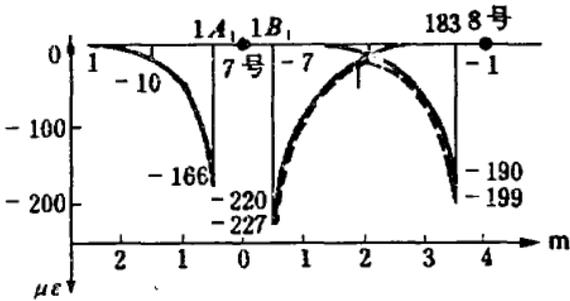


图3 ①号、⑧号锚索锁定后地表以下0.5m处应变分布

现场实测出1000kN级和3000kN级墩下压缩半径分别为 $R_{1000}=2.4\sim 3.8\text{m}$ 和 $R_{3000}=2.5\sim 4.0\text{m}$ , 当群锚布距合理时, 其各吨级锚墩下预应力传递范围分别为600kN级时为2~4m、1000kN级时为3~6m、3000kN级时为3~10m。这种动态群锚效应说明了增效效应的机理现象, 更重要的是揭示了群锚岩体表层一定深度内可形成新生的连续不均匀深度分布的压应力场, 即不同于 $\sigma_z$ 作用场的“岩壳效应”场。其效果表现为对岩体的增韧止裂, 其功能表现为评价或鉴定群锚加固标准的力学依据。

## 二、群锚楔形体边坡仿真破坏性试验对增稳效果的检验

### 1. 仿真群锚效应

用长×宽×高为2.0m×1.5m×0.4m的模型按1:50比例模拟李家峡左岸典型群锚楔形体高边坡段, 在深100m、高75m, 宽40m坡面上, 用40根锚索加固的边坡上进行边挖边锚仿真试验, 并采用立面旋转及顶部推力法加载至破坏, 测试了其变形场、应力场、超载安全系数及变形体特征等群锚效应, 验证了与现场试验发现的效应相一致的测试规律, 延伸和完善了现场无法进行破坏

试验、应力场埋设仪器等机理探讨的范围。模型试验见图4。

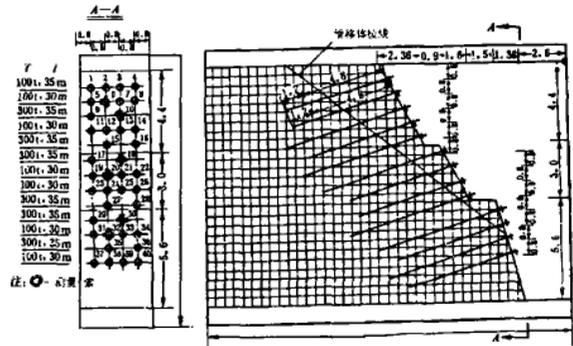


图4 锚索布置方案图

模型中楔形体滑出时的破坏性试验结果表明, 群锚边坡比对照组的不加锚模型的变形量大大增加, 即不加锚模型破坏时的变形仅为加锚模型破坏变形量的47%; 而加锚模型破坏时达到的变形能力增大, 比不加锚时变形增加2倍以上; 测出的上部边坡锚索超载先拉坏, 变形量大于下部, 而群锚抑制变形体的变形效应, 可使岩体均匀性、整体性加强, 增加了韧性和承受大变形而不破坏的能力。对变形体各点不均匀卸荷和阶段蠕滑的全过程力学性能测试, 沿锚索轴向压应力分力的增强的应力场的测试结果, 均验证了与现场测试相吻合的结论。

### 2. 群锚增稳效果与机理依据

群锚楔形体破坏时的超载安全系数达到 $K_m=2.49\sim 2.87$ , 且模拟群锚量比现场实用量少10000kN的状态下, 比刚体平衡法计算的 $K=1.60$ , 高出50%~80%的增稳效果, 比不加锚时 $K_0=1.04$ 高出2.4倍以上的效果。验证了现场超载运行中, 边坡不利放炮影响等造成上部大变形而不破坏的安全能力是靠群锚实现的, 但又不同于刚体法的均锚或点锚的“销钉”平衡作用, 也改变了刚体法底滑面的抗滑能力全部消失后再去锚的被动作用力, 而是采用逐层抑制人工边坡的卸荷松弛, 减少对岩体应力释放调整中过多的损伤, 保留住力学性能指标的一部份; 预应力的“岩壳效应”靠设计施工全过程的布锚安全度法、增效两期法、工艺关键环节优化如加密张拉等级、压力

注浆、分序级张拉等来优控预锚参数实现；预压应力除地表层加压之外，一定深度的滑面上会同达到错动挤压，压力注浆体的抗剪能力加大，注浆锚索体的抗剪阻滑刚度加大三种效果，实质上是增加了岩体分散单元的抗卸荷能力，相当于C、 $\phi$ 值的提高。模型试验滑面上加压时的振颤挤压错动现象，达到压应变量加大的结论，在现场同样出现张拉时锚墩的振颤现象。见图5。

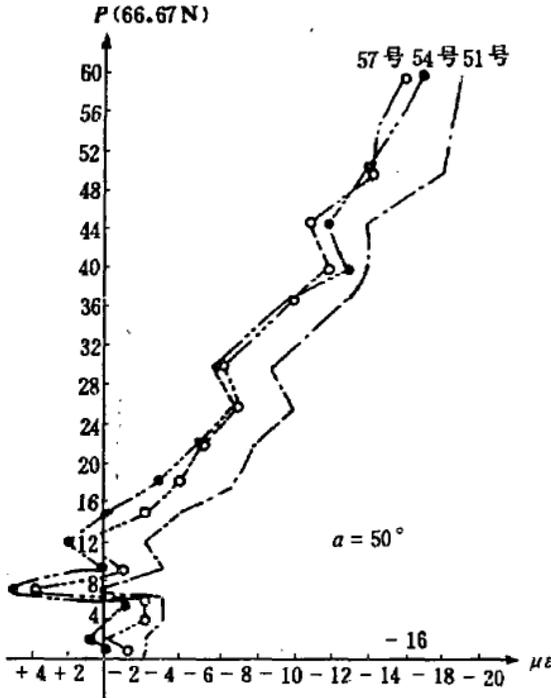


图5 层面挤压过程中准法向应变的振颤现象

滑面上的压密压紧的啮合过程，是预应力耗能过程，产生了滑面几何变形后摩擦能力提高，相应抗剪能力提高。为了取得最佳压缩效果，进锚方向参数取值宜选择与坡面成 $70^{\circ}$ ~ $90^{\circ}$ 之间布置。同时欲达到岩体整体力学性能的改善，必须采用群锚设计理论和方法，用单锚或少数锚索的经验推演群锚都忽略了变形体、动态时效和安全度不同而区别布锚等优控原则。

### 三、结语

群锚岩体已由原脆性松弛岩体预应力锚索的加入调整变柔韧，弹性能力大大提高，已成为一种新型复合材料，其受力传力与增稳机理从动态施工现场测试和模型验证中的地表变形、内部变形和压变效应等多侧面得到合乎机理的规律，这

些研究成果已从机理角度解释了群锚比，刚体锚的稳定性高的问题，同时从变形体的设计理论和方法中指出了群锚工程的系统论控制法，刚体法加固的简化力的平衡理论应结合变形体理论加以丰富完善，弥补上施工中对应应力损耗而造成的安全度降低，从施工中增加效应获得经济效益大有可为。群锚加固岩体的实质为功能转换，已为理论研究者重视并开发出可喜成果，对群锚机理的综合研究必将推进我国预锚技术的发展。

### 参考文献

1. 黄福德 李家峡水电站层状岩质高边坡现场大型预应力群锚加固机理试验研究，《西北水电》，1995.4.
2. 黄福德 层状岩质高边坡预应力群锚加固机理研究，《水力发电》1996.8.

(上接第35页)

的75%，锚索有效锚固长度的安全系数为3.0。

### 四、工程的实施情况及效果

本项加固工程于1995年8月份开工，同年年底竣工。截至目前，已经过近三年的考验，从现场返回的信息显示：工程效果良好，无边坡变形及预应力松弛等现象，通过本项工程的设计，笔者有如下体会：

1 预应力锚固技术，不但能处理象滑坡、坍塌、落石等工程，而且能解决桥梁、房屋等地基的加固问题。

2 对于较完整的岩体，预应力施工中的超张拉问题，笔者不主张用补张拉的办法，而主张将超张拉的吨位计入设计吨位，进行一次张拉到位，从而，减少施工中的循环，加快施工进度。