

三峡工程永久船闸岩体 高边坡锚固方案优化研究

③
14-19

张永兴 哈秋舫

(重庆建筑大学建筑工程学院 630045)

U641
TU457
~~TV632.63~~

摘要 在三峡工程永久船闸高边坡岩体卸荷非线性力学分析的基础上,分总体锚固方案及具体锚固措施两个层次研究了边坡锚固问题。总体四个方案的研究表明边坡下部直墙重点锚固是最优方案;具体措施锚固方案研究成果表明,长大锚洞方案最优,其他方案锚固力似有不足,可能影响边坡的长期稳定。

关键词 岩体高边坡、锚固方案、优化研究 船闸, 三峡工程。

中图法分类号 TU457

理论和试验均表明,在岩体中加入锚杆或锚索可以提高裂隙岩体的整体性,增加岩体的侧压力,进而使岩体的摩擦强度增加;另一方面,岩体锚固后,变形量明显减少。前者可提高边坡岩石块体的稳定性,后者可提高边坡岩体的稳定性,从而使边坡的稳定性得到了改善。根据三峡工程永久船闸边坡的基本特性(尺度大、岩体各向异性和卸荷非线性)及边坡工程的要求(边坡稳定且不得发生有害的时效变形),需要对该边坡开挖以及加固措施进行较为全面的岩体应力应变再分布规律及稳定性的研究。作这样的研究,需要选择描述岩体力学行为有效的数值分析方法并且需要与此边坡岩体应力分布范围和条件相适应的岩体宏观力学参数,这些参数的取得必须充分注意边坡岩体的基本力学特性及地下水渗透特性等重要因素,所得结论应满足工程要求。同时,由于该边坡岩体初始地应力值具有一定量级,应力释放条件又好,且无侧向约束,应力释放范围很大,并有较大的拉应力区,新的卸荷裂隙将有一定数量的发展,地下水渗流场、地震作用等也相继发生变化,因此,该边坡的稳定以及加固问题是十分复杂的。

根据船闸高边坡的特点和对锚固措施的要求,本研究所采用的技术路线如图1所示。其中三峡工程岩石高边坡岩体各向异性卸荷特性及非线性力学分析方法研究可参考文献[1]及[2],本文主要报导锚固方案及其优化方面的研究成果。

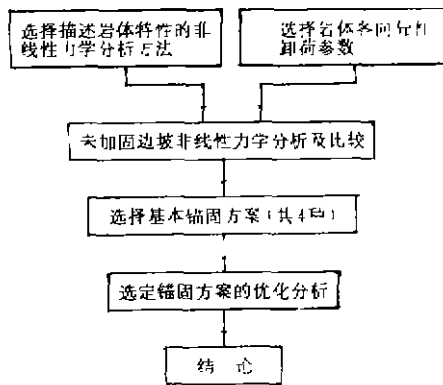


图1 技术路线框图

收稿日期:1997-03-26

张永兴,男,1961年生,工学博士,教授

国家“八五”重点科技攻关资助项目(85-16-03-05(3))

1 锚固计算方法简介

1.1 锚杆、锚索的模拟

在有限元分析中,锚杆(索)采用杆单元来模拟。由于在开挖边坡中,锚杆或锚索一般承受拉应力作用,故它们均可采用相同的杆单元来处理。

计算程序中杆单元作为一维单元,允许处在整体XYZ坐标系里任意方位,且只能传递轴向力。XYZ空间的一维杆是2~4可变节点单元,在它的每个结点有三个自由度。

由于锚杆(索)主要是钢材,通常在岩体中我们采用它发挥的弹性部分,故在计算中采用线弹性模型。

预应力锚杆(索)的预应力通过给锚杆(索)施加初始应变来实现,计算时,根据锚杆(索)预应力大小,给锚杆(索)施加相应的初始应变。

有限元模拟计算锚固效应是在文献[2]未加锚固系统基本分析的基础上进行的。计算中,锚索采用上述多结点杆单元,由于系统锚杆及随机加固锚杆数量较多,为了在计算中反映它们的影响,全部采用杆单元在网格离散时存在较大的困难,因此,在计算中采用等效参数处理,并特地研究了全长粘接锚杆时岩体的等效力学参数,其研究成果将另文专论。目前采用的长江水利委员会(简称长委)的设计方案锚杆锚索布置及其处理方法如图2所示。

在计算中,闸室及边坡周边支设砂浆短锚杆(长3~5m)的密度较大,认为使该范围内岩体的整体性获得了提高,从而好象在闸室或边坡周边加上了挡墙,减小了内侧岩体的卸荷量。挡墙的力学参数按锚杆支设的不同时间近似确定(视其卸荷程度确定),研究中取 $E = 25 \text{ GPa} \times 3/5$,即15 GPa(此值可商讨,但不会影响优化的结论,仅对计算位移有影响)。

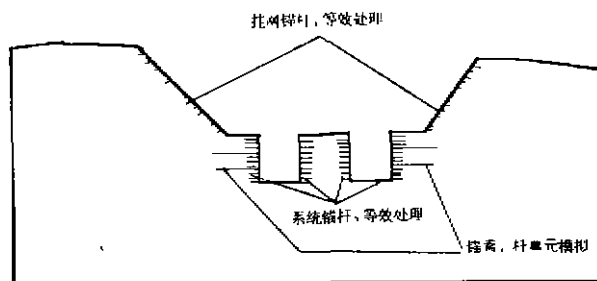


图2

1.2 钢筋混凝土墙及水荷载的模拟

计算中,闸室的钢筋混凝土墙采用板单元及施加被动侧压两种方案,施加时间为在开挖弹性变形释放完时,前者主要模拟控制闸室立墙的位移在规定范围时钢筋混凝土墙所承受的挡力,后者主要模拟钢筋混凝土墙挡力在一定时间内闸室立墙可能产生的位移。

根据渗流分析结果,同时考虑闸室混凝土衬砌墙后排水管网的运行效果,拟定两侧边坡设计状态时渗压力分布形态为:各层排水洞坡面侧5m处的连线,上接岩体弱风化顶板线,下接按闸室墙后排水管网降压效率系数0.6,计18m的残余水头线。

2 基本锚固方案及其分析

2.1 基本锚固方案

在对边坡岩体未设锚固系统时的岩体应力应变特征进行了较为全面的研究分析的基

础上,结合目前国内外岩石边坡锚固技术的具体实际,经研究,提出如下的基本锚固方案,旨在分析合理的锚固区域。

方案 1: 上部用长锚索,下部不锚的边坡岩体锚固系统。在上部缓坡段采用长锚索,锚索长度 30~45 m,布设密度 3×20 m,水平布置,坡面及直立坡段在开挖过程中仅对局部不稳定的块体进行锚杆加固,不布置系统锚杆,每根组合锚索的承载力为 3 000 kN,设计支护强度 50 kN/m^2 。

方案 2: 上部不锚,下部长锚的边坡岩体锚固系统。在船闸闸室直立坡段采用长锚索,锚索长度 30~45 m,布设密度 3×20 m,水平布置,每根组合锚索的承载力为 3 000 kN,设计支护强度为 50 kN/m^2 。在开挖过程中仅对上部缓坡面局部不稳定的块体进行锚杆加固,不布置系统锚杆。

方案 3: 全部长锚的边坡岩体锚固系统。在边坡周边均采用长锚索,锚索长度为 30~45 m,布设密度 3×20 m,水平布置,在开挖过程中仅对坡面局部不稳定的块体进行锚杆加固,不布置系统锚杆,每根组合锚索的承载力为 3 000 kN,设计支护强度 50 kN/m^2 。

方案 4: 全部短锚的边坡岩体锚固系统。在边坡周边均采用短锚杆,锚杆长度 4~5 m,布设密度 3×3 m,锚杆直径 $\varnothing 25$ mm,水平布置或略向坡内倾斜布置。

2.2 基本锚固方案的计算结果及其分析

锚固方案的计算是在非线性力学分析基础之上进行的,所采用的力学模型是非线性正交异性模型,开挖卸荷模拟计算方法同文献[2],考虑因开挖卸荷对岩体劣化的影响,计算区域均划分 10 个以上,锚固区采用等效力学参数计算,下面是 16# (如图 2) 剖面的计算成果。

2.2.1 最大水平位移

表 1 列出的为抗拉强度 $R_{\text{max}} = 0.8、0.4、0$ (无拉分析) MPa 时上述基本锚固方案情况下, 16# 剖面边坡闸墙顶点的最大水平位移计算成果。

计算表明,当岩体抗拉强度 $R_{\text{max}} \geq 0.8 \text{ Mpa}$ 时,锚固对边坡位移的影响不大,只有当 $R_{\text{max}} \leq 0.4 \text{ Mpa}$ 时,锚固作用的影响加大,且 $R_{\text{max}} = 0$ (无拉分析) 时,作

表 1 不同基本锚固方案时的最大水平位移 单位:cm

锚固方案	$R_{\text{max}} = 0.8 \text{ MPa}$	$R_{\text{max}} = 0.4 \text{ MPa}$	$R_{\text{max}} = 0 \text{ MPa}$	备注
方案 1	17.165	38.706	139.500	50 kN/m^2
方案 2	16.534	33.933	79.898	50 kN/m^2
方案 3	16.567	33.933	80.528	50 kN/m^2
方案 4	17.213	36.533	102.815	—
下锚	17.985	39.208	148.400	—

用显著增加。上述 4 种基本锚固方案中,当与不锚方案比较时,方案 1 的锚固效果最差,方案 4 的锚固效果也不好,方案 2 和方案 3 对约束位移比较显著,其中方案 2 的锚固效果最好,因此,从位移结果分析来看,采用上锚方案和全小锚方案是不理想的,而下锚方案是比较好的。

2.2.2 拉应力区

当对岩体进行加固时,加固系统能有效地约束位移,岩体所能承受的拉应力大小及其受拉流变特性对岩体的变形和强度有重要影响。因此,加固的目的应有效地削减坡内的拉应力。由弹塑性分析可知,边坡产生的拉应力区和塑性区主要集中在直立坡段(闸室侧墙)

内,而上部边坡拉应力比较分散,且大部分在边坡浅层,所以,锚固的重要部位应是在闸室侧墙部位,当对这部分岩体施加预应力时,就可以有效地削减坡内的拉应力,上面4个基本方案的研究也就说明了这一点。由此可见,全部短锚杆和上部长锚索对下部拉应力区力学条件改善作用不大,效果不好;全部长锚索和下部长锚索对拉应力区力学条件改善作用显著,但全部锚索数量多,并不比下锚方案优越多少,且不利于机械化施工,较好的方案是下部重点锚方案,可以有效地改善边坡的力学条件。

3 基本锚固措施优化研究

3.1 锚固措施方案

从上面的分析可以看出,永久船闸高边坡采用下锚方案较为合理,为了进一步研究下锚方案的锚固措施,本研究提出如下几种下锚方案进行研究比较,以便选择合理的锚固措施。

方案5:长委设计方案(如图2),下部采用锚索与锚杆相结合的锚固系统。锚杆采用上长下短(上部12~14m,下部8~10m),上疏下密(上部 2×2 ,下部 1.3×1.3)的布置方式,锚杆均下倾 5° 垂直边坡走向布置,锚杆直径均为 $\varnothing 28$ mm;两侧各布置两排3000kN级锚索,上排设置在直立墙顶以下5~6m处,长40~45m,下排设置在直立坡中部,长35~40m,锚索间距3m,均为对穿锚,内锚头锚固在边坡山体内排水洞内;

方案6:下部采用全长锚杆的锚固系统。锚索长30~40m,布设密度 3×3.3 m,水平布置,每根组合锚索的承载力为50kN,设计支护强度 50 kN/m^2 ;

方案7:下部采用锚碇加固系统,每侧各设3排锚碇,上排距直立墙顶约5~6m,中排设在直立坡段 $2/3$ 高度处,下排设在直立坡段的 $1/3$ 高度处,中部。每根组合锚索的承载能力为16000kN,长35~40m,间距10m,设计支护力为 100 kN/m^2 ,内锚头锚固在边坡山体内排水洞内;

方案8:下部采用辐射状斜锚加固方式。锚索长30~45m,布设密度 3×20 m,每根组合锚索承载力为3000kN,设计支护强度为 50 kN/m^2 。上述方案中,在开挖过程中仅对闸室直墙的上部缓坡段局部不稳定块体进行锚杆加固,不布置系统锚杆。

3.2 计算结果及其分析

根据各锚固方案在边坡岩体处于不同抗拉强度时的16*剖面边坡开挖面周边的位移的计算,可以明确如下几点:

(1) 当边坡岩体的抗拉强度较高时($R_{\text{max}} \geq 0.8 \text{ MPa}$),锚固措施对边坡岩体的位移基本无影响,此点与上面分析及以往的研究成果是一致的。这说明当岩体抗拉强度较高时,主要由岩体自身来承受卸荷应力的的大小。根据未设锚杆系统时的基本方案分析,在此范围时,岩体的变形主要以弹性变形为主,且变形产生的时间很短,因此,锚固对之控制作用不大。

(2) 表2为 $R_{\text{max}} = 0.8, 0.4$ 和 0 MPa 时下锚加固方案5、6、7、8情况下闸室顶部最大位移点的位移。由表可见:

① 当岩体质量劣化、抗拉强度丧失时,加固措施起的作用将不断增大,各种方案均如此;

② 对岩体进行无拉分析时,不加锚方案最大水平位移为148.40cm,当边坡加固时,最

佳方案的最大位移可控制到 20.72 cm, 控制量达 80%;

③ 通过对各种不同的下锚方案计算分析可知, 当采用预应力锚索布置时, 辐射状布置方式的锚固效果最好, 无拉分析最大水平位移由不锚的 148.40 cm 控制到

68.484 cm, 研究表明设计方案的锚固方式对改善边坡的力学条件不明显, 且锚杆(索)种类多, 不利于施工; 预锚方案虽可有效地改善边坡的受力条件, 但未能从根本上解决; 而当采用锚碇加固时(方案 7), 加固效果最佳, 使得最大水平位移控制到了 20.72 cm 左右, 根本上解决了边坡的受力条件。

(3) 采用 Hoek - Brown 的抗剪强度参数(非线性, 残余强度)计算了各计算方案的各积分点的安全系数, 并统计了处于拉应力状态的积分点个数, 表 3 为 $R_{max} = 0.4 \text{ MPa}$ 时的情况, 由表可知, 增加预应力锚索的数量可以较大地改善岩体的应力状态。计算发现, 利用残余强度计算 F_s 时, $F_s < 1$ 的积分点已经连通, 形成了曲线包围区域, 锚固方案好时, 该区域较小。该区域起自边坡 1: 1 坡段与 1: 0.5 坡段的交点附近, 至直立闸室底处, 中部有与陡坡段闭合处, 使其大致分为两部分。从表也可以看出, 方案 8 是比较好的长锚方案而方案 7 是好方案。

表 2 不同锚固方案最大水平位移 单位: cm

锚固方案	$R_{max} = 0.8 \text{ MPa}$	$R_{max} = 0.4 \text{ MPa}$	$R_{max} = 0 \text{ MPa}$	备注
方案 5	16.518	33.093	80.287	50 kN/m ²
方案 6	15.354	30.935	69.789	50 kN/m ²
方案 7	14.560	16.910	20.720	100 kN/m ²
方案 8	15.558	30.354	68.484	50 kN/m ²
不锚	17.985	39.208	148.400	—

表 3 不同锚固方案时的拉应力及 $F_s < 1$ 的积分点个数

锚固方案	拉应力点数	积分点个数	效果
方案 5	389	360	一般
方案 6	389	336	一般
方案 7	160	132	好
方案 8	281	220	较好

4 主要结论

通过上述 8 个基本方案的研究, 我们得出了如下几点结论:

(1) 永久船闸陡高边坡岩体上部缓坡段的加固效果不明显, 效果较好的方案为下部长锚的方案, 因此该边坡锚固的重点部位是边坡下部直立坡段;

(2) 设计大锚索和长锚杆相结合的形式, 工程量很大, 施工复杂, 且其力学条件不符合边坡的力学条件, 方案不很理想; 小锚索可以代替部分锚杆, 有利于机械化施工和减少锚杆数量, 但其力学条件也未能得到根本改善; 预锚方案可改善岩体开挖卸荷的力学特性, 效果较好, 但未能从根本上改善边坡的力学条件。从改善边坡的力学条件来讲, 采用锚碇方案的效果最佳, 但在该方案下长锚索的施加数量及长度设计优化等需作进一步的研究;

(3) 边坡岩体开挖地应力释放过程中岩体将产生的弹性最大位移约 14 cm 左右(闸室立墙顶点处), 该位移在上述几种加固方案下均无法有效控制, 如不及时锚固, 岩体在拉应力作用下产生流变, 边坡将发生破坏。因此, 在闸室开槽时, 应及时或预先对开挖立面施加主动侧压, 以防止岩体质量进一步劣化而产生大位移(最大可能达到 148 cm)和边坡失稳;

(4) 根据计算结果可知, 16#剖面的拉应力区深度约为 35~40 m 左右, 因此锚碇或锚索的深度 L 应大于 45 m 为宜;

(5) 因岩体质量劣化而产生的流变值 (最大水平位移) 视锚固方案和锚固力大小而变化, 有效的锚固可减小边坡拉应力, 从而减小岩体的流变值;

(6) 在现有锚固措施条件下, 方案 6 ($N = 50 \text{ kN/m}^2$) 的流变量将达到 16 cm 左右, 如果提高方案 7 中的锚固力, 可使流变量降到 4 cm 以内。

参 考 文 献

- 1 张永兴, 哈秋龄. 三峡工程永久船闸岩石高边坡岩体力学特性研究. 重庆建筑大学学报, 1996(4)
- 2 张永兴, 哈秋龄. 三峡工程永久船闸岩石高边坡岩体非线性力学分析. 重庆建筑大学学报, 1997(2)。

Optimization of Anchorage Scheme of the High Slope of the Permanent Navigation Lock in Three - Gorges Project

Zhang Yongxing

(Faculty of Civil Engineering, Chongqing Jianzhu University, 630045)

Ha Qiuling

(China Three - Gorges Project Development Company, 443002)

Abstract Based on unloading nonlinear rock mechanics analysis of the high slope of the permanent navigation lock in Three - Gorges Project, Anchorage scheme is presented at two levels: the overall anchorage procedure and the detailed anchoring measures. Results of four schemes show that the optimal one is the heavy anchorage of vertical wall at lower part of the slope. Analysis in detail has shown that the scheme with long, large anchorage holes is better than others, in which long - term stability of the slope may be influenced.

Key Words high slope, anchorage scheme, optimization

(编辑:王秀玲)