

复杂地质条件下大型导流洞群快速开挖施工技术

吴越建, 韩进奇, 杨帆

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川成都 610081)

摘要:白鹤滩水电站左岸导流洞具有开挖断面大、地质条件复杂、开挖支护施工强度高、施工工期极其紧张等施工特点和难点。介绍了在层间、层内错动带、高地应力引起岩爆、玄武岩柱状节理等不良地质条件下,通过采用科学的开挖支护方案和程序,该大型导流洞群洞挖创造了40.65万 m^3 /月的月开挖强度记录,可为同类工程提供借鉴。

关键词:复杂地质;导流洞群;快速;开挖;关键技术;白鹤滩水电站

中图分类号:TV7;TV554;TV52

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2014)增1-0074-06

1 工程概述

白鹤滩水电站施工导流采用全年挡水围堰、隧洞导流的方式,共布置5条导流隧洞,其中左岸布置3条,从左至右依次编号为1号、2号、3号,左岸导流隧洞总长5383.76 m。导流隧洞平面上呈双弯、平行布置,轴线间距60 m,其中3条导流隧洞下游段均与引水发电系统的尾水隧洞相结合(图1)。

左岸导流隧洞进口底板高程585 m,出口高

程574 m。其中1号导流隧洞开挖长度为2007.63 m,2号导流隧洞开挖长度为1791.31 m,3号导流隧洞开挖长度为1584.82 m。开挖断面为城门洞形,尺寸宽×高分别为:进口渐变段(22.5~28.5 m)×27 m、标准洞段19.7 m×24.2(24.38)m、结合段20.5 m×25(25.16 m)、21.5 m×26 m。全洞采用钢筋混凝土衬砌,衬砌后尺寸为17.5 m×22 m(宽×高)。

白鹤滩左岸导流洞地质条件复杂,玄武岩柱

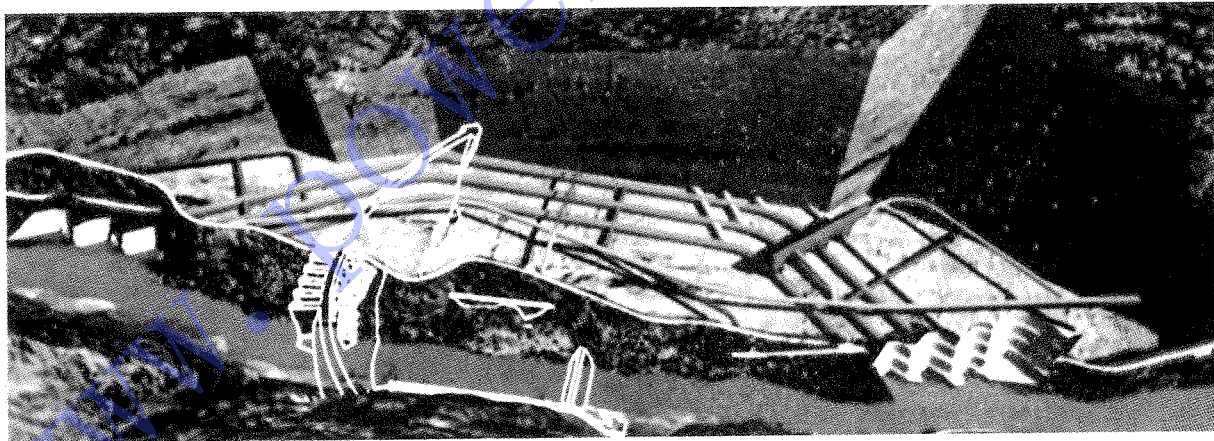


图1 左岸导流洞三维布置图

状节理分布广泛;层内、层间错动带发育;洞室埋深大、地应力高,岩爆、片帮发生频繁。

2 工程特点

(1)左岸导流洞洞挖工程量巨大,施工工期紧,施工强度极高。

导流洞工程石方洞挖总工程量为258.82万 m^3 ,开挖工期11个月,平均月开挖强度为23.52

万 m^3 /月,最高月开挖强度为40.65万 m^3 /月。

(2)不良地质情况分布广泛,对施工进度影响大。

导流洞不良地质情况包括C3、C2大型层间错动带2条,LS321等层内错动带若干,玄武岩柱状节理发育洞段总长约1500 m,F13、F17等大型断层发育,洞室埋深大——最大埋深为395 m,地应力为中等~高,围岩强度应力比S大部分洞段

收稿日期:2014-06-28

表 1 左岸导流洞实际不良地质段分布情况统计表

部位	不良地质段长度 /m						不良地质段总长 /m	洞长 /m	不良地质段占比 /%
	层内错动带	层间错动带	柱状节理段	岩爆洞段	断层	随机裂隙			
1号导流洞	192	90	0+435~0+925(450 m)	371	70	471	1 278	2 007.63	64
2号导流洞	102	97	0+330~0+848(518 m)	230	97	476	1 280	1 791.31	71
3号导流洞	3	102	0+280~0+767(487 m)	175	15	163	945	1 584	59.7

为4~7,部分洞段为2~4,轻微岩爆和片帮发生频繁,偶尔发生中等岩爆。每条导流洞不良地质段分布长度占隧洞总长的60%~70%。

不良地质段因随机支护量大、系统支护需及时跟进,导致支护占用开挖循环时间,制约了整体开挖进度(表1)。

(3) 支护形式多样,工序复杂。

在IV类围岩洞段,支护形式有 $\varphi 28$ 、 $L=6$ m普通砂浆锚杆, $\varphi 32$ 、 $L=9$ m预应力锚杆,初喷钢

纤维混凝土,挂 $\varphi 6.5@15$ cm \times 15 cm钢筋网,3 $\varphi 32$ 钢筋拱肋,复喷9 cm C25混凝土。柱状节理洞段还设置有带锚垫板的砂浆锚杆。

3 快速开挖关键技术

3.1 导流洞开挖分层分区设计

通过综合考虑施工工期、施工设备匹配性等因素并进行分析,将导流洞优化为分三层进行开挖支护,分层情况见图2、3。

其中,第I层分区方案根据不同地质条件共

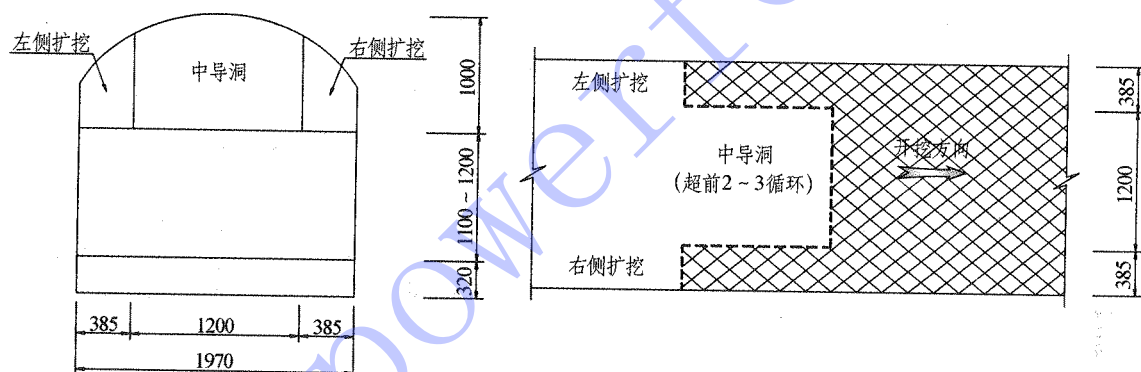


图2 导流洞分层分区示意图(方案一)

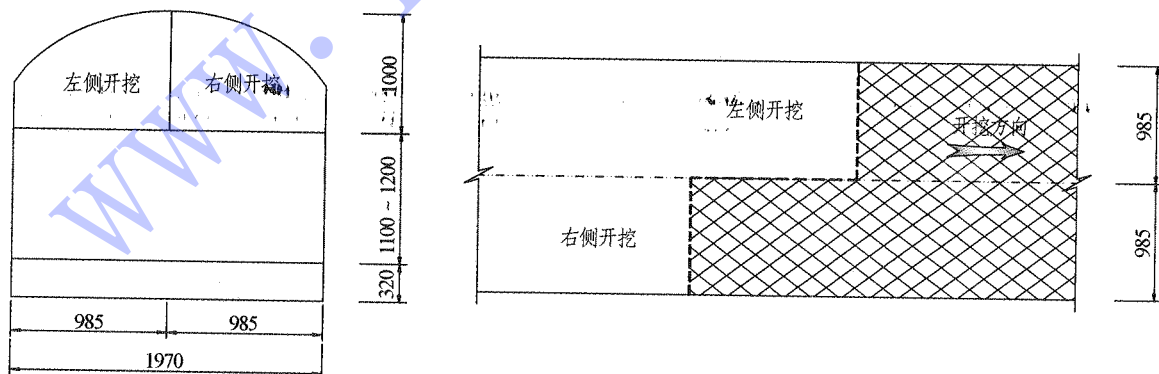


图3 导流洞分层分区示意图(方案二)

分为两种:

方案一:分三区开挖,中导洞超前2~3个循环,两侧扩挖跟进,“品”字形开挖;

方案二:分左、右两区开挖,一侧超前、一侧滞后同步开挖。

其中方案一主要用于地质条件较差的IV类围

岩洞段,方案二用于Ⅱ类和ⅢⅠ类围岩洞段。

3.2 分段分序支护

导流洞工程施工工期紧张,锚杆数量多,结合本工程的地质情况,在确保围岩稳定、施工安全的情况下,为加快施工进度,锚杆支护施工采取分序或分段的方式跟进支护,快速形成岩体稳定状态,加快施工进度。

(1) 采取分序支护的方案。

分序支护的原则为:利用设计锚杆长短交错布置的设计型式,开挖后,采用短锚杆(Ⅰ序锚杆)跟进开挖10~20m、长锚杆(Ⅱ序锚杆)滞后

短锚杆80~90m的分次施工方式。由于短锚杆钻孔速度快,可利用开挖时的钻孔时间,同时采用多臂钻进行Ⅰ序锚杆跟进作业;在开挖掌子面放炮出渣阶段,为避免影响出渣,多臂钻退后在距离掌子面100m左右范围进行Ⅱ序锚杆钻孔作业。

采用分序锚杆施工方式,不影响开挖且不在开挖工序中进行时间循环,其既可保证支护的部分跟进、又可保证总体支护不至于滞后太多且不影响开挖的直线时间。但在不利地质条件下,局部采用系统支护Ⅰ、Ⅱ序锚杆跟进施工的方式进行。

具体的分序施工程序见图4。

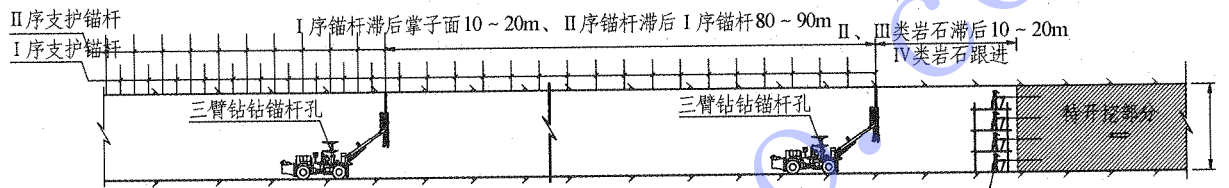


图4 第Ⅰ层锚杆分序施工示意图

(2) 采取分段支护的方案。

分段支护就是将整个支护段锚杆分段进行施工,以加快施工进度。在岩石较好的情况下,整个支护段每支护30m间隔18~20m不予支护;在

岩石较差的情况下,支护紧跟掌子面,在必要的情况下采取加密间排距的方法稳定岩体,确保施工安全。

具体的分段施工程序见图5。

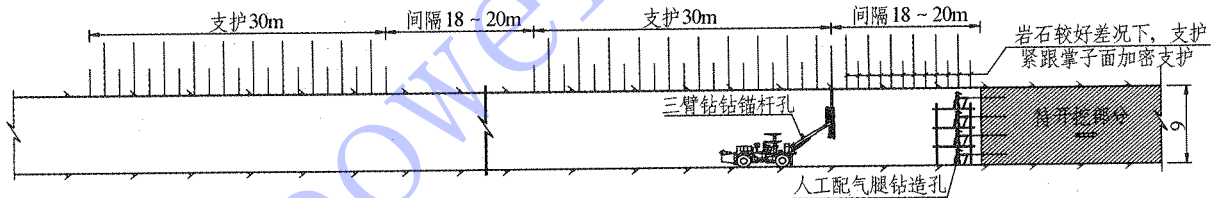


图5 第Ⅱ层锚杆分段施工示意图

3.3 层间、层内错动带发育洞段快速开挖支护技术

左岸导流洞凝灰岩和沿凝灰岩分布的层间错动带产状平缓,在隧洞顶拱出现会沿洞展布较长距离,尤其是在导流洞中后段,因轴线方向与岩层走向基本相近,当错动带距洞顶较近时,很容易形成较大范围的顶拱坍塌和局部的楔形、三角形不稳定块体,对隧洞顶拱局部的围岩稳定影响较大。

针对层间错动带对导流洞顶拱稳定性的影响,我们主要通过采取优化施工工序,做好随机支护、系统支护与开挖之间的工序穿插的方式,确保了层间错动带影响范围内导流洞开挖支护快速进行。

层间错动带主要影响导流洞第Ⅰ层开挖施工安全。若按照常规施工程序,对于层间错动带影

响带区域开挖简单的采取“一炮一支护”的方式进行施工,势必造成单循环施工时间过长,进而影响总体施工进度。在此情况下,针对导流洞层间错动带(Ⅳ类围岩)区域设计支护形式,对“一炮一支护”的工艺流程进行了细化和优化,施工程序见图6。

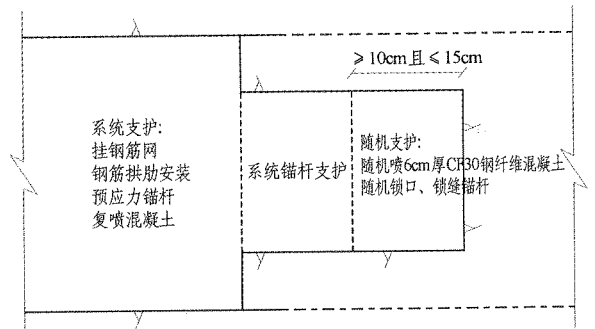


图6 层间错动带影响范围内开挖支护程序图

如图 6 所示,导流洞层间错动带发育部位分三区开挖,中导洞先行、两侧扩挖跟进,中导洞开挖一个循环后,随即进行喷 6 cm 厚 CF30 钢纤维混凝土进行支护,对裂隙发育部位施工随机锁缝锚杆遏制裂缝的发展,在保证安全后继续向前开挖。滞后中导洞掌子面 10 ~ 15 m 距离进行系统锚杆支护——主要是长度 6 m 的短锚杆。采用多臂钻、利用中导洞开挖钻孔时进行穿插施工。在

6 m 长系统锚杆施工完成的区域进行两侧扩挖,扩挖区同样按照上述程序进行支护。由于层间错动带影响范围有限(20 ~ 40 m),待其全断面开挖完成、初喷及 6 m 长系统锚杆施工完成后进行剩余系统支护——挂钢筋网、钢筋拱肋支护、预应力锚杆支护及复喷混凝土。

具体施工工艺流程见图 7

3.4 岩爆洞段快速开挖支护技术

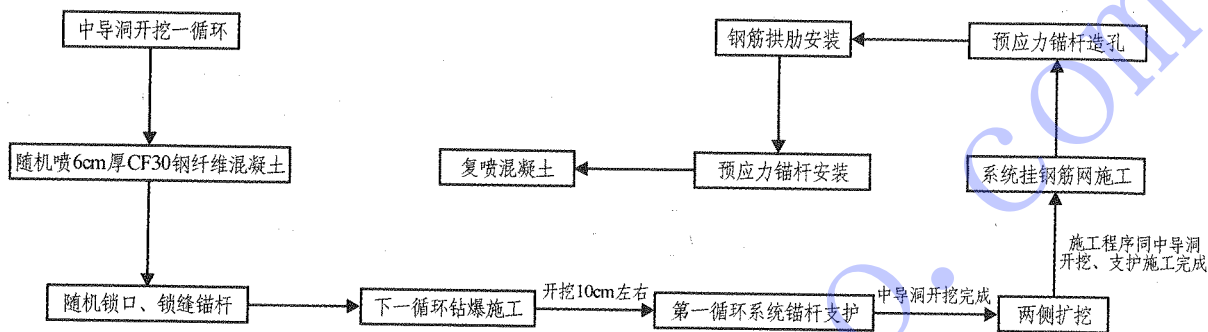


图 7 层间错动带影响范围内快速开挖支护施工工艺流程图

(1) 岩爆的预测。

由于岩爆发生前无明显征兆,发生过程短暂,岩爆的可预测性不强。根据开挖揭露出的围岩性状,可基本判断其存在岩爆的可能性。但是什么时间发生难以预测,甚至可能不发生。

因此,在实际施工过程中,对于岩爆发生的洞段只能当其发生岩爆后启动应急机制,按照岩爆洞段开挖、支护施工方案进行施工。

(2) 随机锚杆及喷钢纤维混凝土。

岩爆洞段开挖后,进行随机锚杆支护及喷钢纤维支护可起到较好的初期支护效果。实际施工过程中,岩爆洞段揭露后,先初喷 6 cm 厚钢纤维混凝土,再在片帮掉块区域及周边施工 $\phi 25, L = 4.5$ m 的随机锚杆。对于岩爆烈度较大的地段,使用锚垫板锚杆。随机支护后,即可继续进尺。系统支护滞后 15 m 左右跟进。

(3) 岩壁喷水及布设应力释放孔。

在掌子面和洞壁周边喷水一定程度上可降低表层围岩强度。采用应力释放防治岩爆的基本理论是:应力释放孔作为脆性破坏防治措施的局部解危方法,减轻了应力集中程度并使其向深部转移,同时使围岩积聚的弹性应变能提前得以耗散,从而有效降低围岩发生岩爆的风险(图 8、9)。

在左岸导流洞岩爆洞段开挖施工过程中,对

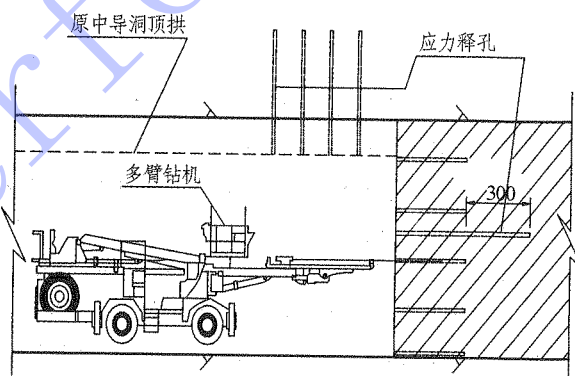


图 8 超深及应力释放孔示意图

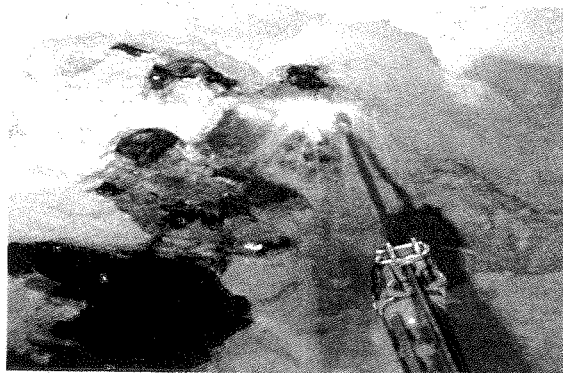


图 9 多臂钻进行岩壁喷水和径向应力释放孔施工片帮较严重的部位采取该措施,取得了较好的效果。

(4) 强支护挺进岩爆洞段。

在岩爆发生频繁、岩爆烈度等级高的局部洞段施工过程中,常出现以下问题:

采取初喷6 cm厚钢纤维混凝土后,在准备进行锚杆支护的短暂过程中再次发生岩爆,将已喷的钢纤维混凝土剥落。由于岩爆持续的时间过长,在不能形成有效支护的情况下,只能采取待避的应对措施,对开挖进度的影响比较大。

在此情况下,通过调整施工程序进行施工。

岩爆洞段分三区进行开挖,优先进行中导洞

的开挖,中导洞超前20~30 m,遇到强岩爆洞段,中导洞进行待避,对中导洞已开挖区域进行加强支护。同时,进行左右侧扩挖施工。待掌子面岩爆停止后,再进行岩爆区的支护施工,支护完成后中导洞优先进尺开挖。中导洞的开挖采取超前应力释放孔松动爆破,形成人工破碎带及低弹性区,从而使下一循环的掌子面和洞壁应力降低,进而降低了岩爆烈度。通过采用该方法施工,减小了岩爆对开挖进度的影响(图10)。

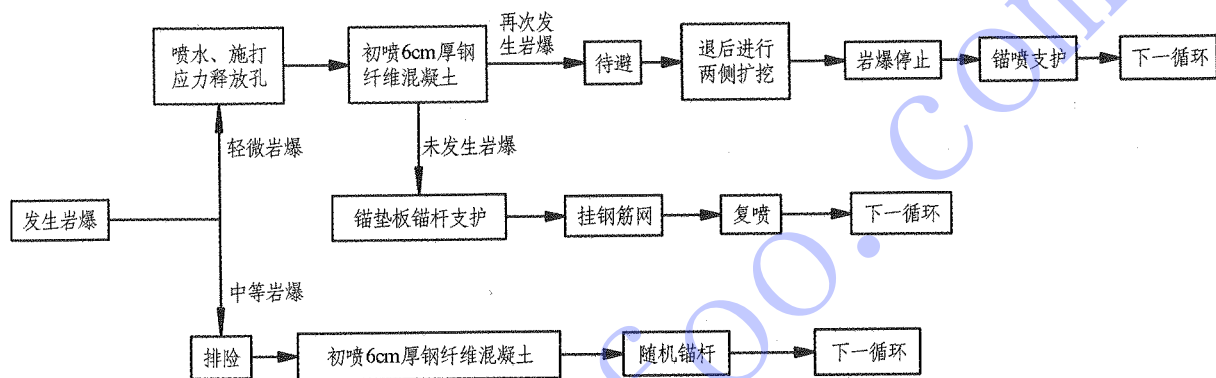


图10 岩爆洞段开挖支护施工程序流程图

3.5 柱状节理洞段快速开挖支护技术

(1) 柱状节理松弛变形特征。

导流洞沿线的 $P_2\beta_3^2$ 、 $P_2\beta_3^3$ 层为柱状节理玄武岩,柱状节理玄武岩开挖后易松弛,原嵌合紧密的柱体因松弛而形成局部塌方、掉块现象。

为研究柱状节理岩体在开挖强卸荷下的围岩松弛变形规律,在左岸1号、2号、3号导流洞布置了8个断面开展了围岩松弛效应测试。测试结果显示:柱状节理的松弛变形除自身受到爆破卸荷影响而增大外,还与地应力的影响、错动带或其他节理裂隙产生的影响密切相关(图11)。

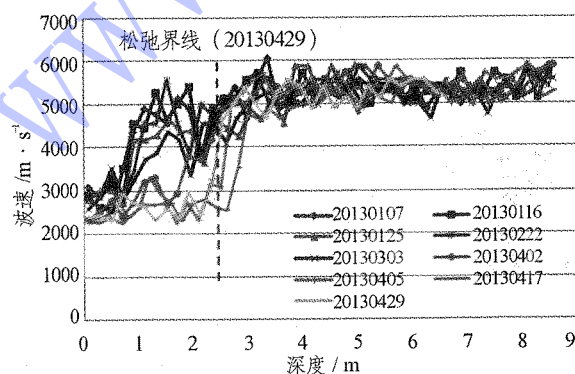


图11 导流洞 K0+315 断面钻孔 T1-E6 声波波速随深度变化曲线图

(2) 柱状节理发育洞段快速开挖技术。

针对柱状节理松弛变形特点,导流洞各层开挖采取了有针对性的开挖支护技术施工程序和技术措施。

① 第 I 层开挖支护。

对于柱状节理发育的 III1 类围岩洞段,开挖完成后立即进行初喷6 cm厚钢纤维混凝土封闭。钢纤维混凝土克服了素混凝土抗拉强度低、极限延伸率小和脆性等弱点,能够在初期形成一层具有较高的抗拉、抗压、抗弯和抗剪强度的承载拱圈,从而有效防止了柱状节理开挖完成后的松弛变形。对于有渗水的部位,需优先设排水孔引排渗水,再进行喷钢纤维混凝土封闭,防止围岩因渗透压力大而导致坍塌。初喷钢纤维混凝土完成后,对于 III1 类围岩等地质条件相对较好的部位,可暂缓进行系统锚杆支护但滞后的距离不应超过30 m。

对于柱状节理发育段同时存在缓倾角错动带、层面、随机节理裂隙、断层等不利地质构造的部位,则需严格按照一炮一支护进行施工,否则极易发生坍塌。开挖完成后,按照设计的支护形式完成所有的系统支护后方能进行下一循环的开挖

支护施工。对于有钢筋拱肋支护的部位,通常在完成 $\varphi 28, L=6\text{ m}$ 的系统锚杆支护后方可继续开挖,待开挖一定距离后再进行钢筋拱肋及预应力锚杆支护施工。

② 第 II 层开挖支护。

对于导流洞第 II 层采用深孔梯段爆破的方式进行开挖,根据柱状节理松弛时效特征试验成果,在导流洞第 II 层开挖时,采取以下措施进行控制:

a. 对于柱状节理洞段轮廓面,原则上采用光面爆破施工,若采用预裂爆破则需按照边墙预裂与中部梯段一齐爆破但预裂孔先响的方式进行。防止单独进行预裂爆破成缝后梯段爆破滞后较远,长时间无法对边墙结构面进行支护而导致边墙松弛变形。

b. 在边墙达到松弛界限前完成必要的支护施工,防止松弛深度扩展。施工时,主要按照以下程序进行系统支护:

开挖完成后,1 周内完成初喷钢纤维混凝土封闭,20 d 内完成 6 m 系统锚杆支护,1 个月内完成所有系统支护施工。

(3) 柱状节理段施工总结与建议。

① 柱状节理发育段由岩体的特殊性决定其稳定性较差,极易发生塌落掉块,每排炮都需及时进行支护。

② 针对洞内渗水部位,施工中要加强观察,发现渗水点后施工排水孔,跟进锚杆支护,喷钢纤维混凝土及时进行封闭,视岩石情况可增加随机挂网。

③ 在出露缓倾角错动带的洞段,需对错动带的走向进行预测,判断出其在顶拱部位外露的位置,可采用沿错动带施工带锚垫板的随机锚杆加强支护,跟进系统锚杆,及时喷钢纤维混凝土进行封闭,视情况增加随机挂网。

④ 对于梯段开挖,不宜采用超前预裂的方式。需采用光爆或同步预裂爆破,笔者建议:优先采用光爆开挖。

⑤ 在采用深孔梯段开挖的情况下,笔者建议:柱状节理段开挖分层高度为 7~8 m,不宜超过 8 m,以便于快速支护。同时,减小分层高度可以有效地减小围岩变形。在工期允许的条件下,建议优先采用水平推进开挖,采用平层开挖可有效减小单排炮总装药量、最大单响药量,进而减小

围岩爆破松动圈;同时,由于单排炮爆破渣量少、爆破飞石距离短,从而更有利于跟进支护。

⑥ 合理选择锚杆长度和时间的关系,根据武汉岩土所的初步研究成果,宜采用长度为 6 m 及 6 m 以下的短锚杆支护,以便能够尽可能快地完成初期支护,遏制柱状节理松弛变形。

4 实施效果

在导流洞施工过程中,通过采取优化施工分层、分区,制定在不良地质洞段快速开挖、支护的施工程序和施工方法,达到了复杂地质条件下大断面导流洞群快速开挖支护的预期目标,导流洞开挖高峰期洞挖强度达到 $40.65\text{ 万 m}^3/\text{月}$,达到了国内领先水平,创造了同等规模导流洞群石方洞挖单月施工强度的记录。最终导流洞于 2013 年 4 月 30 日完成首仓底板垫层混凝土施工,实现赶工 2.5 个月。

在导流洞开挖支护施工阶段,通过制定合理的施工程序,及时进行随机支护和系统支护,加强了现场安全管理,未发生重大安全事故。

5 一点反思

在导流洞开挖支护完成、进行混凝土浇筑施工时,右侧拱肩平行于最大主应力方向部位多处发生片帮、掉块,左、右岸导流洞均存在类似情况。

通过对导流洞地质情况进行分析,认为产生这种现象的主要原因是:左、右岸导流洞属于中等~高应力区。左岸导流洞第一主应力为 NW 向,缓倾 SE,量值为 14.2~22.4 MPa,洞轴线方向为 $N25^\circ W$ ~近 SN,容易在右拱肩部位产生应力集中(图 11)。第一层开挖后,应力集中区主要在拱肩一带,造成右侧顶拱地应力较高,当应力集中到一定程度时,就会产生片帮剥离现象。第二、三层开挖后,应力集中从拱肩向边墙一带扩展,随着边墙临空面加大,松弛深度逐渐增大且随着时间的延长松弛持续发展,产生渐进式破坏;若有陡倾角裂隙、小角度切割边墙,则松弛发生的速度更快、范围更大。

问题出现后,在现场采取了在掉块区域扩大 2 m 范围进行主动防护网防护的措施,有效保证了其下部作业的安全。与此同时,该问题也提醒我们,在类似中、高地应力洞室支护设计时,应对隧洞应力集中部位采取加强支护,并加强围岩变

(下转第 127 页)

少长 200 mm。必须严格控制热连接,以保证土工布补片和土工布紧密结合并对土工布没有损害;

(3) 每天铺设结束前,对当天所有铺设的土工布表面进行目测以确定所有损坏的地方都已作上标记并完成修补,确定铺设表面无可能造成损坏的外来物质,如针状物、石块等;

(4) 对于用来补洞或补裂缝的补丁材料应和原土工布一致;

(5) 补丁应延伸到受损土工布范围外至少 20 cm;

(6) 施工人员所穿工作鞋及所用施工机具不能损伤土工布,施工人员不得在已铺设完成的土工布上做可能伤害土工布的行为,如抽烟或用尖锐工具戳土工布等。

4.2 土工膜的修补方法

4.2.1 修补规程

应对未通过损伤试验或无损试验的任何不合格土工膜或焊缝进行修补。如果损伤处不能取得满意的修补效果,应将损伤的土工膜移除,或使用可接受的土工膜材料进行更换。对于不合格的焊缝应将其移除并使用新材料进行更换。

修补方法应符合制造商的修补规程并应在开始修补前将修补方法提交工程师批准。

4.2.2 土工膜的修补方法

(1) 打补丁:用来修补大型孔洞、撕裂、针孔、未分散原材料以及异物污染。每个补丁应至少比缺陷的各边长出 150 mm。

(2) 点焊:用来修补小型表面刮痕或其它较小的局部瑕疵或土工膜厚度减少的地方。

(3) 加盖:使用长条土工膜修补较长的不合格焊缝。

4.2.3 土工膜修补的具体要求

(1) 所有土工膜表面均应干净、无颗粒物,并应在进行修补时保持干燥。

(2) 对使用挤出焊缝焊接的聚乙烯土工膜表面进行轻轻擦拭,确保其表面清洁。

(3) 如采用挤压焊接,补丁或盖材应至少比缺陷的各边长出 150 mm;如采用热楔式焊接,补丁或盖材应至少比缺陷的各边长出 100 mm。

(4) 补丁的各角均应为圆角,圆的半径应大于 75 mm。

(5) 破坏性检查孔修复后,再进行非破坏性检验,对检查结果、检查位置、检查方法作好记录,直到再次检查合格为止。

5 结 语

土工布具有重量轻、特性稳定、施工中受环境因素影响小等优点,施工中可大面积连续铺设。

由于当地气温高、风沙大,而土工膜的铺设对环境因素的要求比较高,焊接时空气温度不能超过 25℃。为保证土工膜的焊接质量,施工前要制定出严格的施工计划,将土工膜的铺设与焊接安排在夜晚或早晨 9:00 以前施工,以避开高温炎热天气。每次铺设前,都要按计划做好土工膜的裁剪备料及相关的准备工作,合理安排施工工序,以确保土工膜的铺设与焊接能够有序、连续地开展。

作者简介:

李超(1986-),男,河南鹤壁人,工程师,学士,从事水电工程建设施工技术与管理工

张长万(1965-),男,四川大竹人,副总经理,高级工程师,从事国际工程施工技术与管理工作;

侯云强(1985-),男,辽宁大连人,工程师,学士,从事水电工程建设施工技术与管理工

(责任编辑:李燕辉)

(上接第 79 页)

形观测,预防围岩应力调整后的二次掉块。

6 结 语

白鹤滩水电站左岸导流隧洞工程洞室规模大,地质条件复杂,施工工期极为紧张。通过对不同不良地质危害特性进行充分研究,有针对性地制定开挖支护相互跟进和穿插程序,从而有效地加快了工程进度,创造了洞室开挖单月强度记录,取得了一定的经济效益和社会效益,可为同类工程施工提供借鉴。

参考文献:

[1] 水力发电工程地质勘察规范,GB50827-2006[S].

作者简介:

吴越建(1966-),男,四川射洪人,副总经理兼白鹤滩施工局局长,高级工程师,学士,从事水利水电工程项目管理工作;

韩进奇(1978-),男,湖北应城人,白鹤滩施工局总工程师,高级工程师,一级建造师,从事水电工程施工技术与管理工作;

杨帆(1985-),男,四川彭州人,白鹤滩施工局技术部副主任,工程师,学士,从事水电工程施工技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)