

长河坝水电站进水口边坡稳定性分析及加固措施

杨 飞 翔, 费 文 平

(四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:四川长河坝水电站进水口边坡裂隙发育,岩体结构复杂,河流下切作用明显,进水口边坡稳定性较复杂。分别采用快速拉格朗日 (FLAC) 法、临界滑动场分析以及不连续变形分析 (DDA) 理论,从不同角度研究其稳定性,得到边坡的整体应力变形情况、整体安全系数以及块体的位移和变形情况。研究表明,在无支护情况下,开挖的直立边坡坡顶和少数结构面存在局部不稳定情况,但采取相应锚固措施后,边坡的整体稳定性良好;锚杆受力均在规定的范围内。研究成果对类似工程的边坡开挖和加固措施有一定参考价值。

关 键 词:边坡稳定; FLAC; 临界滑动场; DDA

中图法分类号: P642

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.S1.045

西南地区高山峡谷众多,岩体裂隙发育,加上雨水、地震等作用,边坡事故频发,仅 2008 年汶川地震就诱发了 15 000 余处滑坡、崩塌、泥石流。因此,人们对边坡稳定分析结果的准确度要求日渐提高。在岩石边坡稳定分析领域,研究方法多种多样,郭亮等采用极限平衡分析对某工程的滑坡进行了计算,分析表明其稳定性较差,应采取相应的锚固措施^[1]。付强等采用有限元对黄土边坡稳定性进行了研究,得出坡体内应力偏转,易使潜在滑动面贯通而发生滑塌破坏^[2]。强天驰等采用不连续变形分析方法,研究了锦屏一级拱坝三滩坝址边坡,发现其整体安全度符合规定^[3]。以上单个方法的简化、理想化以及局限性往往使分析结果不够全面,欠缺一定的准确性。

受多期构造作用影响,长河坝水电站进水口部位岩体中小断层、裂隙和挤压破碎带发育,构成了边坡复杂的岩体结构。同时受河流强烈下切作用影响,边坡表部岩体卸荷作用明显。该边坡的特殊性和复杂性要求其稳定分析及加固措施的研究结果更为全面和准确,因此本文分别采用 FLAC 分析、临界滑动场以及

DDA 理论 3 种方法进行研究^[4]。一方面对边坡无支护情况下进行整体稳定性评价,另一方面对边坡支护后进行加固措施评价,并将 3 种方法的评价结果进行比较分析,从而得出全面、可信度高的边坡整体稳定情况和加固措施建议,为边坡开挖施工提供依据。

1 进水口边坡工程概况

左岸进水口引水洞底板高程 1 628 m,工程开挖后将形成坡高约 70~190 m 的高边坡,设计开挖坡比除下部 36m 为直立坡外,其余边坡坡比为 1:0.5~1:0.75,并结合考虑全部挖除左岸坝前卸荷松弛破碎岩体。据地表地质调查和平硐揭示,地质构造以次级小断层、节理密集带、节理裂隙为特征。IV 级结构面在左岸进口坡段地表揭露 6 条小断层 (f15、f17、f18、f22、f40、f41),边坡岩体中主要发育 J4、J3、J7、J1、J9 五组裂隙,以 J4、J3、J7 组裂隙最为发育。其中,J4 组结构面多以密集带形式产出,较发育;J3 组裂隙常以裂隙密集带形式产出,发育程度较高,是引水洞进口边坡稳定的主要控制性结构;J7 组裂隙较发育,尤其在中、高

收稿日期:2014-10-25

基金项目:国家自然科学基金项目 (51379139,51109152)

作者简介:杨飞翔,男,硕士研究生,主要从事水工结构方面的研究。E-mail:820441729@qq.com

通讯作者:费文平,男,副教授,博士,从事水工结构数值模拟、现场监测和室内试验方面的研究。E-mail:wpfei@scu.edu.cn

高程一带尤为发育;J1 组裂隙在低高程一带较发育,高高程一带发育程度相对降低;J9 组裂隙发育程度较弱;此外,在边坡局部地段可见产状为 $N50^{\circ}E/NW \angle 14^{\circ}$ 的裂隙及 J2 组裂隙,裂隙发育情况统计见表 1,进水口边坡开挖典型剖面见图 1。

表 1 边坡裂隙发育统计

组别	产状	性状特征
J4	$N60^{\circ} \sim 65^{\circ}W/NE(SW) \angle 70^{\circ} \sim 85^{\circ}$	较平直、粗糙,常成带密集产出,单条延伸 20m 左右,断续延伸 100~150m,间距 1~5m
J3	$N30^{\circ} \sim 50^{\circ}E/NW \angle 50^{\circ} \sim 65^{\circ}$	稍起伏、粗糙;一般延伸数十米,间距 2~5m,多以裂密集带形式产出
J7	$N10^{\circ} \sim 20^{\circ}E/SE \angle 70^{\circ} \sim 80^{\circ}$	稍起伏、粗糙,延伸 30 至上百米,间距 2~5m
J1	$N10^{\circ} \sim 30^{\circ}E/SE \angle 30^{\circ} \sim 40^{\circ}$	裂面平直,稍糙;延伸一般 50~100m,个别延伸达 100m 以上,间距一般 5~10m,局部 1~2m
J9	$N65^{\circ} \sim 80^{\circ}W/NE \angle 15^{\circ} \sim 25^{\circ}$	平直,稍糙,延伸 5~20m,间距 4~8m,零星发育
J2	$N20^{\circ} \sim 50^{\circ}E/SE \angle 45^{\circ} \sim 65^{\circ}$	平直、较粗糙;常以较大裂隙形式产出,延伸数十米至上百米,间距 5~15m,延伸相对较短者,密度相对较大,局部部位较密集;同组小断层也较发育;J2 组主要发育于中、高高程

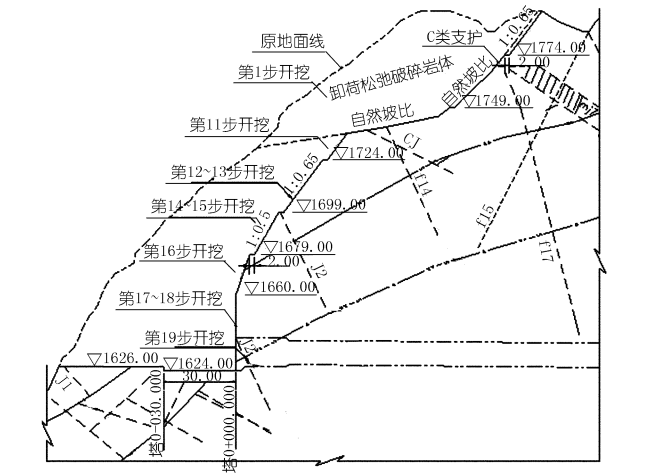


图 1 进水口边坡开挖典型剖面

2 分析成果

2.1 FLAC 法

2.1.1 计算模型及参数

计算模型 x 轴方向为水平方向,计算边界共 650 m, y 轴方向为铅直方向,从高程 1 300 m 至纵剖面自然边坡坡顶。计算考虑 II、III、IV 岩体和卸荷破碎带(V 类),地质概化模型如图 2,计算参数见表 2。

2.1.2 计算结果分析

采用锚杆支护后,锚杆应力变化情况如表 3。其中支护方案为:① 斜边坡采用 $\varnothing 25$, $L=4.5$ m 和 $\varnothing 25$, $L=6$ m,交替梅花型布置,间距 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$;② 直立边坡采用 $\varnothing 25$, $L=6$ m 和 $\varnothing 32$, $L=8$ m,交替梅花型布置,间距 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 。

计算结果表明,开挖引起了开挖面附近局部范围应力调整,仅在直立边坡坡顶(高程 1 626~1 660 m)和结构面局部存在拉应力区且量值较小,边坡整体上处于稳定状态;开挖后最大水平方向位移值出现在高程 1 626 m 的底板位置,指向坡内,位移量为 28.34 mm,可见开挖引起的变形量级不大。采用锚固措施的情况下,大部分锚杆处于受拉状态,最大锚杆应力为 40.82 MPa,位于直立边坡接近坡脚部位(高程 1 638.24 m)。锚固前后位移变化最大的点位于直立边坡坡顶,无支护时合位移为 12.09 mm,有支护时合位移为 11.79 mm,位移变化率为 -2.48%,由此可见,锚固措施可增强边坡稳定性。

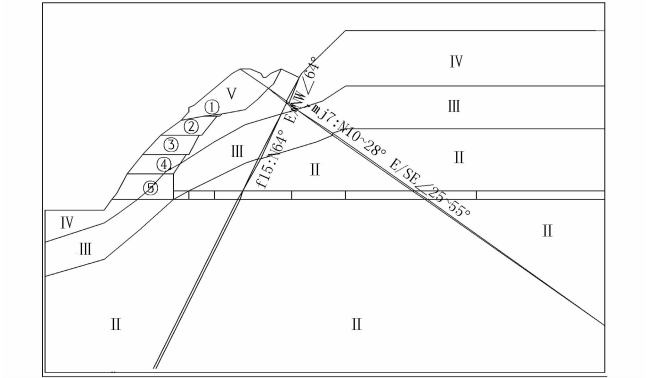


图 2 边坡剖面图地质概化模型

表 2 边坡岩体物理力学参数

类别	天然密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	变形模量 E/GPa	泊松比 μ	凝聚力 c/MPa	摩擦 系数	抗拉强度/ MPa
II	2.70	18.0	0.25	1.60	1.25	0.8
III	2.65	9.0	0.30	1.20	1.10	0.6
IV	2.60	2.0	0.35	0.50	0.80	0.3
V	2.20	1.0	0.38	0.05	0.50	0.0
节理密集带、刚性结构面	2.40	1.0	0.38	0.12	0.50	0.0
软弱结构面	2.40	0.5	0.40	0.05	0.40	0.0

表 3 锚杆应力变化

锚头高程/ m	位置说明	开挖步应力/MPa				
		第 1 步	第 2 步	第 3 步	第 4 步	第 5 步
1738.64	1735~1739m 边坡顶部	-21.59	-20.63	-20.70	-20.81	-22.57
1722.50	1710~1735m 边坡中部		17.92	17.17	16.84	11.34
1697.50	1685~1710m 边坡中部			23.13	21.32	10.85
1672.48	1660~1685m 边坡中部				13.00	4.26
1659.24	直立边坡坡顶					-5.99
1848.54	直立边坡中部					39.76
1638.24	直立边坡坡脚					40.82

2.2 临界滑动场法

计算考虑的地层包括 II、III、IV 类岩体和卸荷松散破碎岩体(作为 V 类岩体)(见图 2),计算考虑边坡上部沿 f15 断层,下部切割开挖边坡坡脚的岩体作整体滑动,计算参数同 FLAC 分析法中参数选择。计算结

果见图3~4。图中滑动面出口处的数字为边坡取该滑动面时的安全系数,弧线为安全系数最小的滑动面。

计算表明,边坡开挖前后,最小安全系数分别为2.85和1.82,进水口边坡开挖前后的安全系数均能满足规范要求,安全系数最小的滑动面出口位于第一级马道以下的边坡,边坡整体稳定性均能满足规范要求。

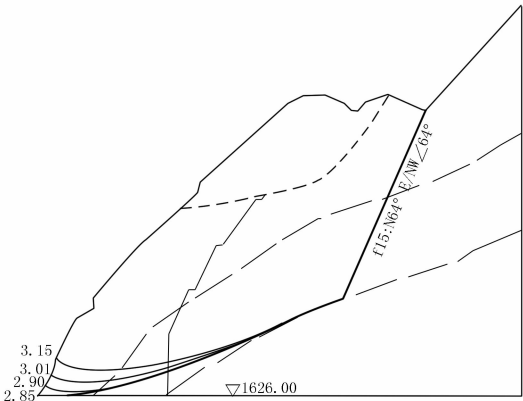


图3 开挖前剖面计算结果

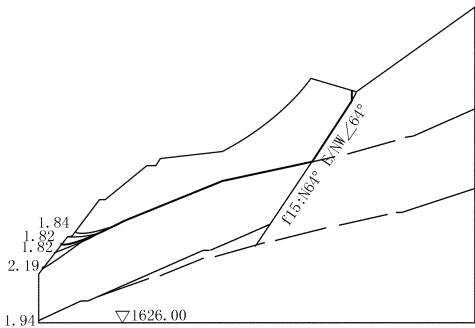


图4 开挖后剖面计算结果

2.3 不连续变形分析(DDA)

由边坡地质条件可知,进水口边坡的节理裂隙主要包括裂隙组J1、J3、J4、J7、J9,结构面参数见表1。分别按不支护和支护的情况对边坡纵剖面进行DDA分析,支护情况同2.1节中提出的支护方案,分析结果见图5。

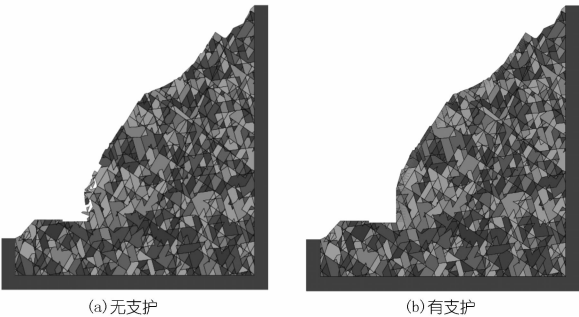


图5 边坡DDA分析计算结果

计算结果表明,在边坡无支护情况下,高程1660

m附近的块体有局部开裂或滑动趋势;在锚杆支护下,锚杆最大受力约22 t,出现在1650 m高程附近,即直立边坡上部。因边坡的坡角垂直为J3组节理提供了很好的出露面,开挖引起的边坡内岩体松动较大。

2.4 稳定性综合分析及加固措施评价

FLAC分析结果表明,边坡的整体应力状况较好,在无支护情况下,直立边坡坡顶以及部分结构面存在局部拉应力。按设计的锚固措施支护后,边坡变形有所控制,锚杆受力最大处在直立边坡接近坡脚,锚杆受力在规定范围内。临界滑动场主要从边坡整体安全系数角度出发,在无支护情况下,边坡安全系数满足规范要求,整体稳定性良好,可能的滑动面为沿f15断层和开挖边坡坡脚,当采取锚固措施后,边坡稳定性明显提高。DDA理论研究得出,整个边坡块体稳定性良好,J3组节理裂隙的发育对边坡影响较大,且同FLAC计算结果类似,边坡无支护时,直立边坡坡顶局部有块体破裂的现象。锚杆受力最大处在直立边坡上部,受力大小在规定范围内。可见,3种方法评价结果均表明,边坡整体稳定性良好,相应的锚固措施可保证直立边坡和少数结构面的稳定性。

3 结论

本文采用FLAC法、临界滑动场法和DDA理论3种方法,对长河坝水电站进水口边坡稳定性进行了分析及综合评价。研究结果表明,进水口边坡的整体稳定状况良好,只存在局部小规模块体失稳现象;系统锚杆设计合理,支护后进水口边坡基本能够满足稳定要求。与传统仅用一种方法来判断边坡稳定状况相比,采用综合评价方法的可信度更高。同时,研究表明,左岸进水口边坡J3裂隙、f15断层对局部边坡的稳定起控制作用,需要重点关注其出露情况并进行锚固;边坡直立段开挖时,应力释放较为剧烈,开挖面变形发展迅速,因此,在施工过程中,应关注节理面的影响和卸荷变形特征。

参考文献:

[1] 郭亮,周晓亮,庞永莉. 极限平衡法对某工程滑坡的计算与分析[J]. 科学技术与工程,2012,12(8):1807-1810.
[2] 付强. 有限元塑性极限分析法在黄土高边坡稳定性方面的应用[D]. 甘肃:兰州理工大学,2007.
[3] 强天驰. 不连续变形分析方法(DDA)在边坡稳定分析中的应用[J]. 岩土工程界,2004,7(6):40-42.
[4] 梁海波,张明,李仲奎,等. 快速拉格朗日差分法及其应用[J]. 红水河,1997,16(2):21-24.

(编辑:郑毅)