

缓倾错动带对白鹤滩水电站右岸出线场边坡稳定的影响分析

邵 兵，方 丹，万祥兵

(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘 要:右岸出线场边坡位于白鹤滩水电站右岸坝肩顶部,出线场北侧边坡两侧临空,坡体内发育有多条缓倾角错动带,边坡表层岩体受风化卸荷影响随机长大裂隙较发育,与缓倾错动带组合可能形成不稳定块体;在开挖过程中错动带出露部位附近坡面出现多条竖向裂缝,可见坡面残留炮孔沿错动带错位明显,局部稳定问题突出,需对受缓倾错动带影响区域的局部稳定性进行重点分析。建立了右岸出线场区域的精细三维有限元模型,采用强度折减法分析了无支护条件下人工边坡的稳定性,着重分析了出线场北侧边坡的局部稳定特征;针对缓倾错动带影响区域提出了“长锚索+框格梁”的局部支护方案并对支护效果进行了评价。分析结果表明:右岸出线场人工边坡整体稳定性较好,但受缓倾错动带和随机长大裂隙影响区域在开挖扰动和临空条件改变的状况下可能会出现局部失稳破坏;“长锚索+框格梁”的局部支护方案对缓倾错动带影响区域岩体变形抑制效果明显,有效地改善了出线场北侧边坡的局部稳定性。

关键词:白鹤滩水电站;边坡稳定;强度折减法;错动带;分析

中图分类号:TV223;TV7;TV221 **文献标识码:** B **文章编号:**1001-2184(2019)01-0110-06

1 工程概述

白鹤滩水电站右岸出线场布置于金沙江右岸谷肩下红岩堆积体 A 区邵家斜坡前部高程 1 130~1 203 m,邵家斜坡总体地形起伏变化不大,坡面走向约 N50°E,倾向 SE,坡度约 15°。出线场宽 49 m,长 180 m,长轴走向 N2.4°W,建基面高程为 1 145 m,右岸出线场西侧为右岸坝肩开挖边坡,

南侧为排风竖井出口平台,北侧为出线场开挖工程边坡,边坡坡面走向 N87.6°E,倾向 SE,顶部为一级土坡,按 1:1.5 开挖,坡高小于 10 m,下部基岩坡按 1:0.75 开挖,坡高 10 m 或 15 m 一级,开挖边坡最大高度为 58 m,上下级边坡间设置 2~8 m 宽的马道,出线场附近开挖地形情况见图 1。

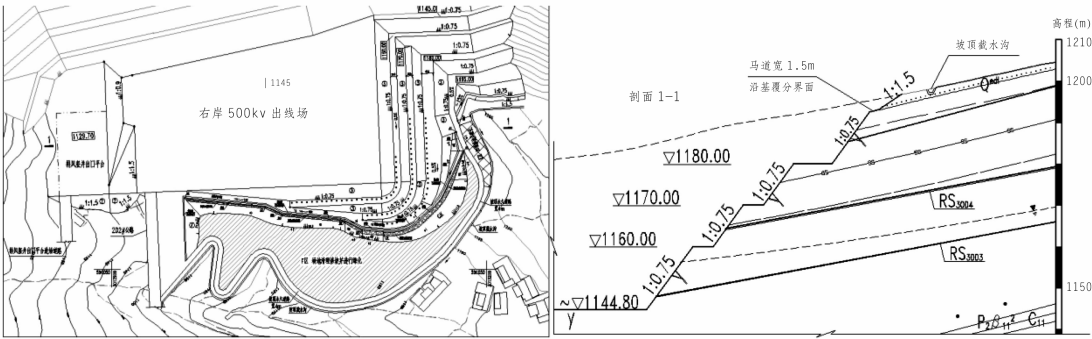


图 1 出线场边坡开挖图

2 工程地质条件

白鹤滩水电站右岸出线场边坡地层岩性由砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩组成,砂岩和粉砂岩呈互层状,粉砂质泥岩呈夹层状,为缓倾向南东的单斜地质构造,地层产状为 N45°~50°E,SE∠15°~

20°,出线场北侧坡岩层视倾角为 9°~13°,右岸坝顶以上边坡岩层视倾角为 10°~12°,出线场开挖边坡区域发育 RS₃₀₀₄、RS₃₀₀₃、RS₃₀₀₂、RS₃₀₀₁、C₁₁、C₁₀ 等多条缓倾角错动带,局部发育裂隙,层间错动带的力学性质差,延伸性较好,可成为潜在底滑面。

右岸出线场北侧边坡坡面与右岸坝肩坝顶以

收稿日期:2018-09-06
基金项目:国家自然科学基金青年资助项目(51309243)

上边坡坡面相交处两侧临空,边坡中发育粉砂质泥岩和缓倾角错动带(如RS₃₀₀₄、RS₃₀₀₃),力学性质差,受不同产状的长大裂隙切割容易形成小规模稳定性较差的块体,可能发生指向右岸出线场方向的顺缓倾软弱层内带的滑移,在边坡开挖过程中,受错动带影响区域坡面出现4条竖向裂缝,

均顺坡面发育残留爆破孔,裂缝两侧岩面新鲜,最宽裂缝达10 cm,长度约2.5 m,深度大于50 cm,裂缝集中分布在右岸坝顶以上边坡高程1 182.5~1 185 m靠右岸出线场侧(南侧),且错动带部位残留炮孔存在明显错动迹象,具体情况见图2。

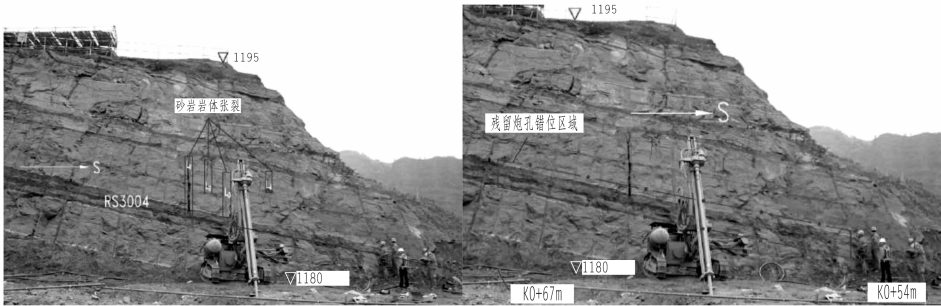


图2 岩体裂缝和缓倾错动带分布图

3 数值分析方法与所取得的岩体参数

3.1 数值分析方法

笔者采用离散元法^{[1]~[3]},运用3DEC^[4]程序计算解决工程实际问题。与连续力学方法相比,离散元能同时描述连续体的连续力学行为和接触的非连续力学行为,可将岩体处理成岩块(连续体)和结构面(接触)两个基本对象,其中的接触(结构面)是连续体(岩块)的边界,在对每个连续体在力学求解过程中可以被处理成独立对象(即离散的概念),而连续体之间的力学关系通过边界(接触)的非力学行为实现。

对边坡岩块采用理想弹塑性本构关系,即岩块屈服以后不考虑其强度衰减。描述其峰值强度特征的准则采用传统的摩尔-库伦准则,其常见式为:

$$\pi=c+\sigma_m\tan\varphi$$

式中 c 和 φ 为岩体强度参数,即内聚力和内摩擦角。上式还可以改写为:

$$\sigma_1=\frac{2c\cos\varphi}{1-\sin\varphi}+\sigma_3\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}$$

式中 σ_1 为最大主应力, σ_3 为最小主应力。

对于结构面采用3DEC中无厚度的结构面单元模拟,结构面单元由两个面贴合而成,面与面的相对变形(变形参数)和粘合特征(强度特征)由参数控制。由于无需模拟软弱充填结构面的厚度(几何形态),避免出现计算单元的“奇异”造成的

不利影响,同时,结构面的工程响应,如张开、压缩、剪切滑移乃至它们之间的任何组合都可以得到直观模拟,故结构面的参数确定根据岩石力学基础理论由结构面的厚度和结构面填充物质进行等效换算。

边坡岩体中地下水作用的模拟主要考虑静水压力的作用,通过设置几乎任意复杂形态的地下水曲面形态的方式予以实现,三维计算时采用离散元程序3DEC直接模拟地下水位面的位置,程序自动根据水位面计算有效应力。

3.2 岩体物理力学参数

本次计算模型综合考虑了工程关心区域和右岸出线场边坡形态及结构面分布情况,岩体的材料分区以互层岩层线和强、弱卸荷风化线划分,岩体材料主要考虑砂岩、泥岩、粉砂岩、Ⅲ₂类和Ⅲ₁

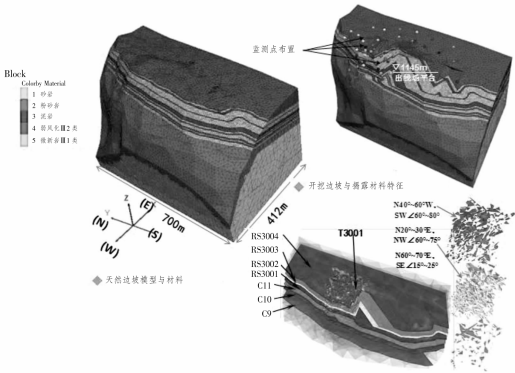


图3 右岸出线场自然边坡和人工边坡三维模型示意图

类岩体,同时考虑地下水位;结构面主要考虑了缓倾层内错动带 RS₃₀₀₁~RS₃₀₀₄,层间错动带 C₉~C₁₁和长大裂隙 T₃₀₀₁及随机裂隙,计算模型见图 3,主要岩体力学参数及结构面力学参数见表 1~2。

表 1 材料力学参数表

岩土结构类型	容重 /kN·m ⁻³	变形模量 /GPa	泊松比	抗剪断强度	
				摩擦系数 <i>f</i>	凝聚力 <i>c</i> /MPa
砂岩(弱风化)	26.5	5.5	0.27	0.9	0.7
粉砂岩(弱风化)	26.2	3	0.31	0.75	0.55
泥岩(弱风化)	26.3	1.45	0.33	0.55	0.425
玄武岩(Ⅲ2类)	26	7	0.26	0.9	0.75
玄武岩(Ⅲ1类)	27	9	0.24	1.1	1.1

表 2 结构面力学参数表

结构面	产 状	法向刚度 /GPa·m ⁻¹	切向刚度 /GPa·m ⁻¹	抗剪断强度	
				摩擦系数 <i>f</i>	凝聚力 <i>c</i> /kPa
RS ₃₀₀₄ 、RS ₃₀₀₂ 、 RS ₃₀₀₁ 、C ₇ ~C ₁₁	N47°ESE∠16°	0.5	0.2	0.25	1
RS ₃₀₀₃	N47°ESE∠16°	0.5	0.2	0.25	2
T ₃₀₀₁	N40°~50°WNE∠35°	0.6	0.25	0.4	100
优势裂隙 1	N40°~60°W,NE 或 SW∠60°~80°	0.4	0.1	0.4	200
优势裂隙 2	N20°~30°ENW∠60°~75°	0.4	0.1	0.4	200
优势裂隙 3	N65°~70°ESE∠15°~25°	0.4	0.1	0.4	200

4 无支护条件下出线场边坡局部稳定分析

图 4 为无支护条件下出线场边坡开挖至不同高程时坡表岩体的合位移云图。边坡开挖至高程 1 160 m 时,出线场北侧边坡高程 1 180 m 处缓倾错动带 RS₃₀₀₄上盘岩体开始出现显著变形,开挖至高程 1 145 m 时,缓倾错动带 RS₃₀₀₄上盘岩体变形呈持续增长状态,局部量值达 100 mm,同时,缓倾错动带 RS₃₀₀₃上盘岩体变形也开始变得显著。图 5 为无支护条件下出线场边坡开挖完成

时沿缓倾错动带 RS₃₀₀₄的剪切位移和法向位移云图,沿缓倾错动带 RS₃₀₀₄的剪切变形大于 9 mm 的区域分布范围较大,靠近坡面的局部区域剪切变形达 20 mm 且法向位移亦较大,岩体受张拉作用明显。总体上,无支护条件下出线场的边坡变形主要为沿缓倾错动带的剪切变形和坡脚处岩体的卸荷回弹变形;受缓倾错动带 RS₃₀₀₃影响区域的变形不如受缓倾错动带 RS₃₀₀₄影响区域的变形显著。

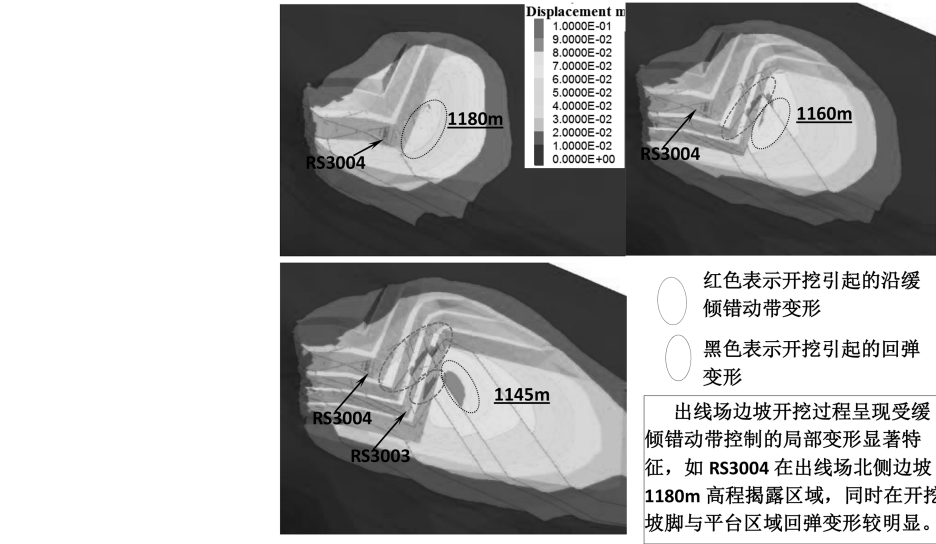


图 4 未支护条件下出线场边坡开挖过程变形图

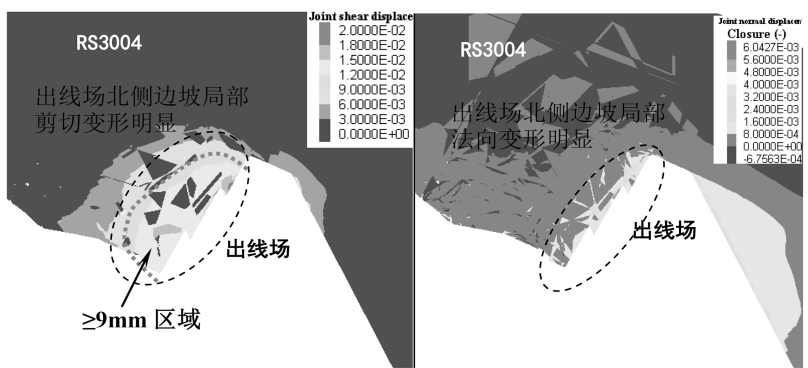


图5 未支护条件下出线场边坡沿错动带 RS₃₀₀₄ 剪切位移(左)和法向位移(右)图

采用强度折减法^{[5]~[11]}计算并分析了无支护条件下出线场边坡的整体稳定安全系数,分析并评价了边坡变形破坏失稳特征。

通过在模型坡面布置变形监测点,根据监测点的变形是否收敛来判断边坡是否失稳。由图6可知,当折减系数为1.5时,监测点的变形呈现收敛态势;当折减系数达1.6时,监测点的变形呈持续增长趋势,相对应的变形速率亦呈持续增大趋势,呈不收敛态势,由此可以判断:无支护条件下出线场边坡持久工况的整体稳定安全系数为1.5。

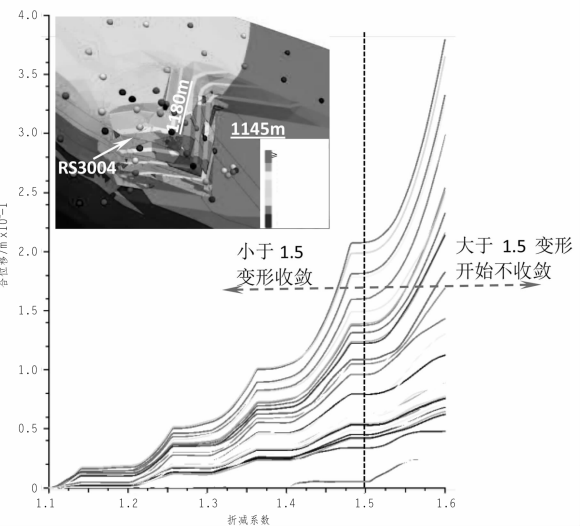


图6 边坡监测点变形随强度折减系数变化关系曲线图

图7为不同强度折减系数下出线场边坡变形增量云图。当折减系数为1.2时,出线场北侧边坡缓倾错动带 RS₃₀₀₄ 和 RS₃₀₀₃ 控制的上盘岩体首先发生较大的变形,最大变形量达150~250 mm,表明这两个区域是出线场边坡率先发生显著变形而发生破坏的区域;随着折减系数增大,这两个区域的变形量值和范围逐步增大,当折减系

数为1.4时,变形较大区域的最大量值达250~350 mm;当折减系数为1.6时,变形较大区域的最大变形量值达300~400 mm,表明无支护条件下出线场北侧边坡呈受缓倾结构面控制的局部变形破坏特征。

综上所述,无支护条件下出线场边坡整体稳定性较好,但受缓倾结构面及陡倾裂隙面控制的局部区域变形显著,边坡的局部稳定问题突出,尤其出线场北侧边坡受缓倾错动带 RS₃₀₀₄ 控制的上盘岩体在一定范围内存在局部失稳破坏的可能,应引起重点关注,建议针对图7所指示的潜在破坏区域采取局部支护措施。

5 出线场边坡局部支护措施分析

5.1 局部支护方案设计

出线场边坡的局部稳定主要受缓倾结构面控制且影响深度较深,笔者建议针对缓倾错动带影响区域的上盘岩体采用“长锚索+框格梁”的支护方案。长锚索可穿过缓倾结构面深入到边坡内部的稳定岩体,从而达到锚固缓倾结构面上盘岩体的作用;而框格梁可将各锚索有机联系起来、联合发挥作用,从而提高锚索支护的系统性。具体支护方案见图8。另外,右岸出线场边坡由于岩体成互层夹泥岩特征,需采用有效的截排水措施防止雨水沿坡面卸荷裂隙渗入造成的岩体和结构面软化而导致边坡出现局部失稳破坏。

5.2 局部支护方案支护效果评价

图9为出线场边坡在未支护和支护条件下开挖完成时的变形云图。局部支护措施对出线场北侧边坡的变形总体上有一定的限制,尤其是对缓倾错动带 RS₃₀₀₄ 控制的上盘岩体变形限制明显,有效地改善了出线场北侧边坡的局部稳定性。支

护锚索在预张拉 70% 的情况下,锚索轴力均小于设计荷载 1 000 kN,最大值为 861.7 kN,接近设计荷载的 90%,支护强度满足工程要求。

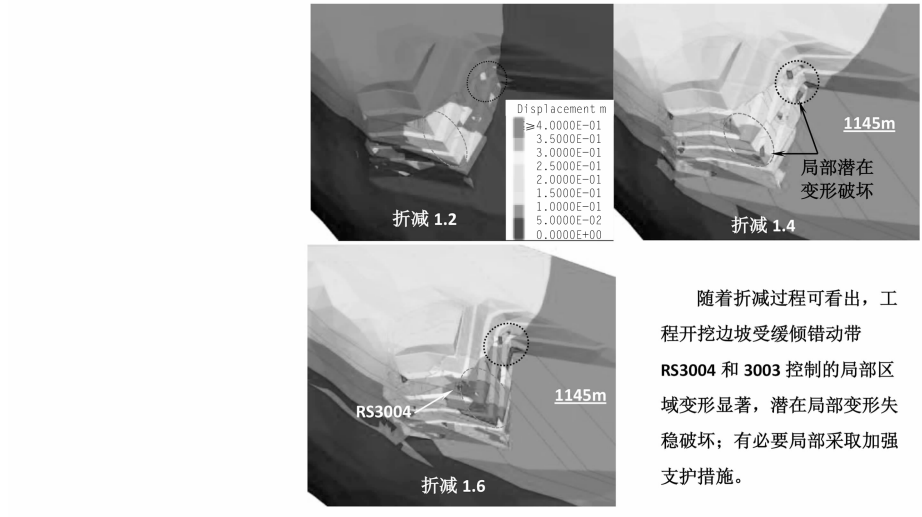


图 7 出线场边坡变形随强度折减过程合位移增量变化特征图

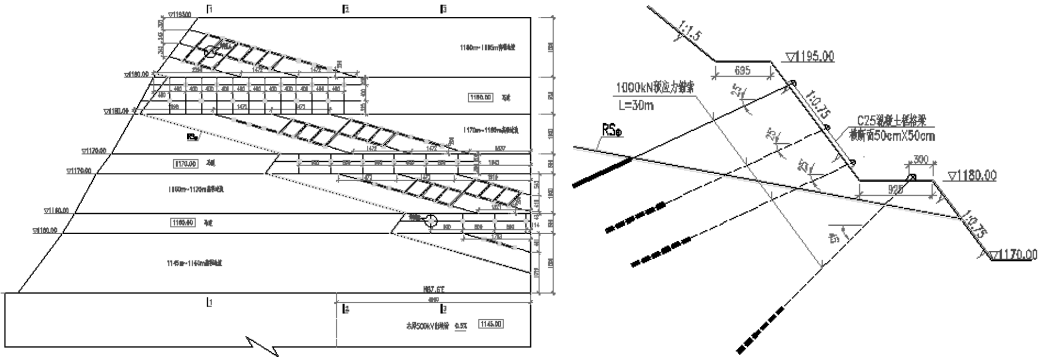


图 8 出线场边坡局部支护方案图

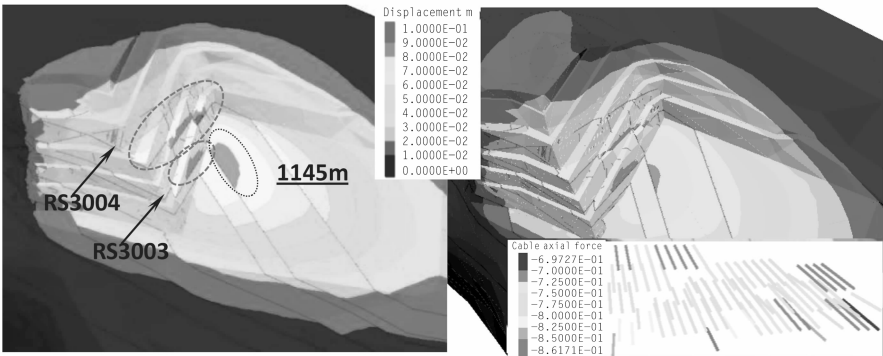


图 9 出线场边坡在未支护(左)和支护条件下(右)开挖完成时变形特征对比图

图 10 为当折减系数为 1.6 时出线场边坡在未支护和支护条件下的变形增量云图。局部支护措施对缓倾错动带影响区域的变形限制效果相比于未折减时更加明显,变形量值和变形区域都有明显的减少,支护效果显著。锚索荷载普遍超设计荷载 50%,但并未达到锚索的极限荷载。

图 11 为出线场边坡在未支护和支护条件下边坡变形监测点变形随折减系数增加的过程曲线

图。局部支护后安全系数由 1.5 提高至 1.8,边坡的稳定性有较明显的提高,表明局部支护措施有

效改善了边坡稳定性,支护效果较好。

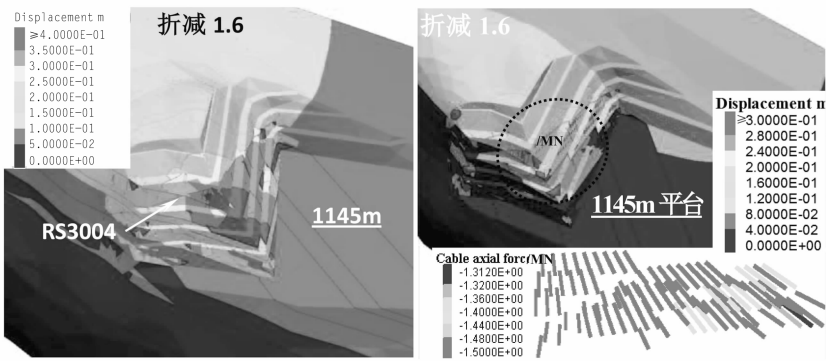


图 10 出线场边坡在未支护(左)和支护条件下(右)开挖边坡折减系数为 1.6 时的变形特征对比图

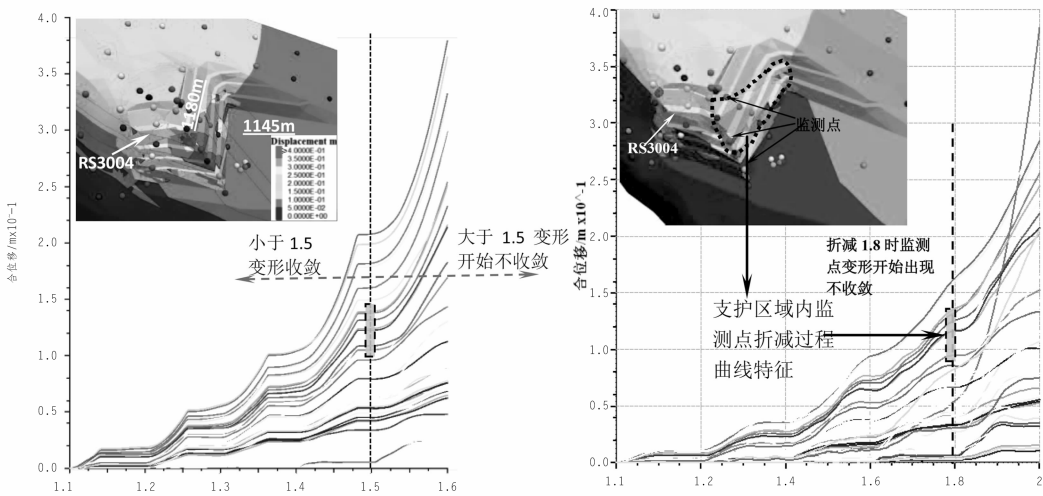


图 11 出线场边坡在未支护(左)和支护条件下(右)开挖边坡折减过程曲线对比图

6 结 语

(1)由无支护条件下出线场边坡稳定性分析可知:出线场边坡整体稳定性较好,但出线场北侧边坡受缓倾错动带影响的区域变形较大,尤其是缓倾错动带 RS₃₀₀₄控制的上盘岩体在一定范围内变形最为显著,存在局部失稳破坏的可能,应重点予以关注。建议采取局部支护措施。

(2)针对由缓倾错动带控制的局部稳定问题,笔者提出了“长锚索+框格梁”的局部支护方案,同时加强了整个边坡的截排水工作。局部支护方案有效地限制了出线场北侧边坡受缓倾错动带影响区域的变形,边坡持久工况的安全系数由 1.5 提高至 1.8,表明局部支护措施有效改善了边坡稳定性,支护锚索发挥了显著的作用,支护效果好。

(3)右岸出线场边坡局部支护锚索锚固力达

1 000 kN,满足工程要求。为更好地监控边坡施工期和运行期的稳定状态,笔者建议:在锚索支护区域布置一定数量的锚索测力计并加强日常的监测工作,根据实际施工后锚索的锁定值和现场锚索测力计监测数据进行实时反馈分析。

参考文献:

[1] Ante Munjiza. The Combined Finite – Discrete Element Method[M]. John Wiley & Sons Ltd,2005.

[2] Lanur Jing,Ove Stephansson. Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering Theory and Applications[M]. Elsevier B.V.2007.

[3] 魏 群.散体单元法的基本原理数值方法及程序[M].北京:科学出版社,1991.

[4] Itasca Consulting Group. Inc. 3DEC (3 Dimensional Distinct Element Code) User’s Manual, Version3.0[R]. [s. l.]: Itasca Consulting Group, 2005. (下转第 120 页)

(3)刷架上端绝缘套的爬电距离很短。通过增大绝缘套、侧面开沟槽的方式,增加了爬电距离;

(4)在下导电环上安装毛刷及集尘挡板,在加强密封的同时,还可以兜接住落下的碳粉,防止碳粉飘落。

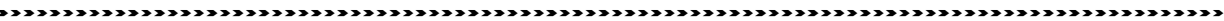
4.2.3 碳粉收集装置及管路优化

(1)更换了碳粉收集装置。除尘风机为原装进口、功率更大的风机。将过滤材料由滤袋改为滤筒,使过滤面积更大,拆换、清洗亦更方便,碳粉收集效果更好;

(2)原碳粉收集装置系通过一根软管连接除尘器和一个吸风口。改进后,通过两根软管连接一台除尘器和两个吸风口,优化后的设备除尘效果大大提高。

4.3 处理效果

该电站在对发电机集电环堆积的碳粉进行清扫之后,发电机转子绝缘情况恢复到正常范围内。

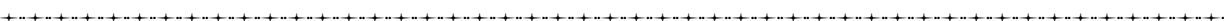


(上接第 101 页)

经营后需要在注册地进行抵扣。建筑企业应当充分利用信息化手段来提高工作效率,加强后台集中管控,降低合同风险。信息化建设一方面能够将合同签订、审核时间等有效地缩短;另一方面亦可以实现电子化管理,利用电子增值税专用发票进行管理,从而避免出现物资采购合同管理风险。

4 结 语

营改增已全面实施,其对施工企业经营活动的各个环节影响很大。因此,建筑施工企业要进一步加强学习、理解和掌握其内涵与实质。企业



(上接第 115 页)

[5] Dawson E M, Roth W H. Drescher A Slope stability analysis by strength reduction[J]. Geotechnique, 1999,49(6): 835—840.

[6] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, 49(3):387—403.

[7] 连镇营,韩国城,孔宪京.强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J].岩土工程学报,2001,23(4):406—411.

[8] 郑宏,李春光,李焯芬,等.求解安全系数的有限元法[J].岩土工程学报,2002,24(5):626—628.

[9] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等.用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J].岩土工程学报,2002,24(3):343—346.

[10] 赵尚毅,郑颖人,邓卫东.用有限元强度折减法进行节理岩

经过上述几项技术改进,降低了机组运行过程中碳粉的产生量,提高了碳粉装置的收集效果,碳粉堆积严重的问题得到了大大改善。

5 结 语

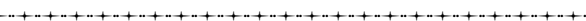
水轮发电机组转子绝缘降低问题在很多水电站均有出现,甚至很频繁,使机组被迫停运,给电站造成了一定的经济损失和安全隐患。笔者介绍的某水电站机组针对转子绝缘降低问题采取的有效措施对类似电站发电机转子的日常维护及故障处理具有一定的借鉴作用。

作者简介:
瞿大林(1991-),男,四川成都人,助理工程师,学士,从事水电站

运行技术与管理工
作;
肖启露(1989-),男,四川西昌人,助理工程师,学士,从事水电站
运行技术与管理工
作;
李侯小(1994-),男,陕西榆林人,助理工程师,学士,从事水电站
运行技术与管理工
作;
刘 鹏(1994-),男,四川成都人,助理工程师,学士,从事水电站
运行管理工作. (责任编辑:李燕辉)

在实施营改增后的合同管理过程中,应当建立完善的合同保障体系,建立健全合同管理体系,提高管理人员的能力与素质,从而提高合同管理的整体水平。笔者从多个角度分析了企业在生产、销售以及经营各个合同管理环节存在的问题并提出了解决方法,对树立企业的良好形象、提高企业的经营效益、提高其市场竞争力、促进企业在建筑市场良好的生存和发展具有重要的作用。

作者简介:
冉 念(1970-),女,四川都江堰人,高级工程师,学士,从事工程
技术与经营管理工作. (责任编辑:李燕辉)



质边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程报,2003,22(2): 254—260.

[11] 邓建辉,魏进兵,闵 弘.基于强度折减概念的滑坡稳定性三维分析方法(Ⅰ);滑带土抗剪强度参数反演分析[J].岩土力学,2003,24(6):896—900.

作者简介:
邵 兵(1990-),男,江西九江市人,工程师,硕士,从事水电站设计工
作;
方 丹(1980-),男,安徽黄山人,教授级高级工程师,硕士,从事
水电站设计工
作;
万祥兵(1978-),男,江西南昌人,教授级高级工程师,硕士,从事
水电站设计工
作; (责任编辑:李燕辉)