

• 地质与勘测 •

隧洞超前地质预报中的新技术——BEAM 法

谭天元, 张 伟

(中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院, 贵州 贵阳 550002)

摘要: BEAM 作为隧洞超前预报的新技术, 本文简要介绍了其方法、原理、现场工作方式、资料解释依据及成果显示方式, 并与传统的地质雷达预报进行了对比分析, 说明 BEAM 预报技术对隧洞掌子面前方的不良地质情况、尤其是岩层的含水情况有较好的预测效果。

关键词: 勘查技术; BEAM 法; 隧洞超前地质预报; 激发极化

中图分类号: P631.3 文献标志码: B 文章编号: 1007-0133(2008)01-0026-05

0 前言

随着隧洞工程向深埋、特长方向发展, 隧洞工程遇到的地质条件越来越复杂、穿越的地质单元也越来越多。特别是隧洞工程常常要穿越高山峻岭, 由于前期的工程地质勘察不可能完全准确的查明隧洞轴线方向的工程地质问题, 这为隧洞的施工安全带来了新的挑战。为了在隧洞施工过程中能够提供及时准确的工程地质资料, 提前预知前方开挖洞段可能存在的地质灾害, 超前地质预报应运而生。

目前国内外预报技术主要分为两大类: 地质预报法和物探法^[1]。地质预报法主要为水平超前导洞、超前钻孔和地质分析, 物探方法主要有 TSP 法、地表雷达法、陆地声纳法、红外探测法等等, 这些方法虽取得了良好的预报效果, 也基本上能够满足一般隧洞超前预报的需要, 但都存在一个共同的缺陷: 就是对隧洞前方地下涌水的预报都不是很理想, 而目前危害隧洞施工安全的一个重要因素之一就是隧洞的涌水。因此, 必须研发出一种对水较敏感的预报方法来弥补以上方法的不足。

水是电流的良导体, 针对这一物理特性, 德国 GEOHYDRAULIC DATA 公司开发出一种叫隧道电法的预报方法, 即 Bore-Tunneling Electrical Ahead Monitoring(简称 BEAM)。本文通过作者对该方法的实际应用, 简述该方法的基本原理及在某电站辅助洞对水的成功预报实例来阐述其应用前景。

1 BEAM 法的基本原理及测试技术

1.1 BEAM 法的基本原理

BEAM 测试技术是通过岩层视电阻率进行测试来探知岩体质量和其中的空洞及水体。

地下岩体在人工电场作用下会发生复杂的电化学过程, 并形成一随时间增加而增长的极化电场, 它叠加在人工电场及由于岩体电性差异而产生的异

常电场之上。习惯上把人工电场及因岩体电性差异而产生的电场称为一次电场, 把极化电场称为二次电场, 它们的叠加称为总场。总场经数分钟后趋于饱和, 如果切断电源, 一次电场随即消失, 但二次电场却仍然存在并随时间增加而逐渐衰减, 几十秒至几分钟后衰减至零, 这种现象称为激发极化效应。常规电法勘探中的激发极化法就是通过研究激发极化电场的分布以达到找矿、找水或解决其他地质问题的一种物探方法。早期的激发极化法应用主要以直流激电法为主, 但由于直流激电法断电后的二次电场易受外界电磁干扰, 激电法后来的发展以交流激发极化法为主, BEAM 测试系统就是以交流激发极化为理论基础的一种全新的电法勘探技术^[2]。

BEAM 具体操作是通过外围的环状电极 (A1) 发射一个屏障电流, 并在内部发射一个测量电流 (A0), 以便电流聚焦进入要探测的岩体中, 通过测量岩体的交流变频激发极化特征, 计算出岩体视电阻率和一个与岩体中孔隙有关的电能储存能力的参数 PFE 的变化来预报前方岩体的完整性和含水性 (见图 1)。

1.2 BEAM 的资料解释依据

岩体及其含水性不同, 电性和极化特征不同, 因此频率响应也不同, BEAM 正是利用此原理工作的。BEAM 法供电采用频率分别为 f_1 和 f_2 的低频电流, 然后按下列公式计算视电阻率 $R(\Omega \cdot m)$ 和频率效应百分比 PFE (%) :

$$R_{f_1} = \frac{U_{f_1}}{I_{f_1}} \quad (1)$$

$$R_{f_2} = \frac{U_{f_2}}{I_{f_2}} \quad (2)$$

收稿日期: 2007-09-20

作者简介: 谭天元 (1969-), 男, 贵州省岑巩县人, 高级工程师, 从事水利水电工程物探技术管理工作。

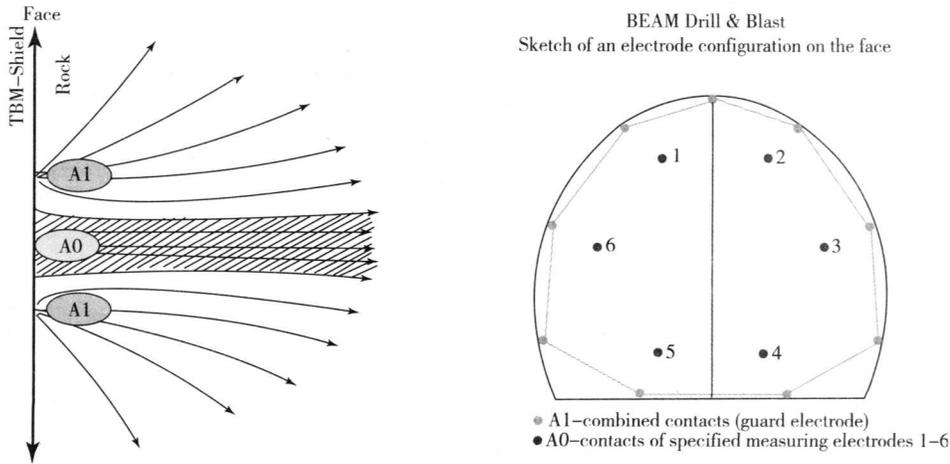


图 1 BEAM 原理及供电极 A1 与测量极 A0 布置示意图

$$PFE = \frac{R_{f1} - R_{f2}}{R_{f1}} \times 100\% \quad (3)$$

岩体含水量多少会影响岩体视电阻率值和极化率的高低, 而 PFE 值代表极化信息, 因此, 实时测量掌子面前方岩体的视电阻率及 PFE 值并进行综合分析, 可以了解掌子面前方的水文地质情况, 判断前方的岩体类型和含水情况。图 2 是德国 GEOHYDRAULIC DATA 公司通过大量实验给出的岩

体类型和含水情况与 PFE 及视电阻率的对应关系。由图 2 可以看出, 根据观测和计算获得的视电阻率值和 PFE 值判定岩体类别及含水量具有科学依据。

需特别注意的是在不同地区用该方法进行预报时, 应根据当地地质情况进行现场试验, 得出当地如图 2 所示的岩体类型和含水情况与 PFE 值及视电阻率值的对应关系, 用以指导预报进程。

1.3 BEAM 的显示方式

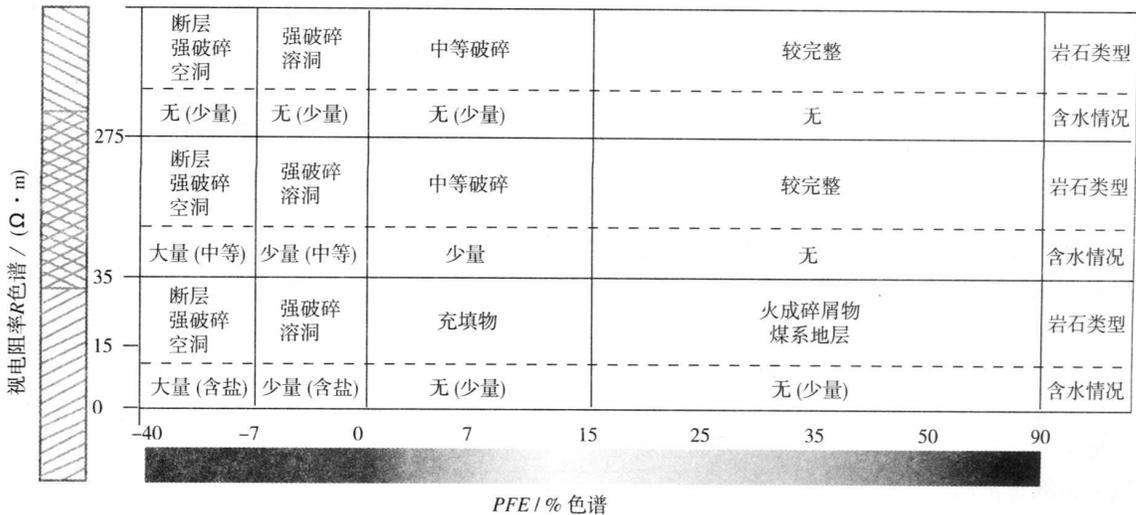


图 2 岩体类型和含水情况与 PFE 值及视电阻率 R 值的关系

BEAM 的成果显示是以可视化的方式显示的, 通过将岩体质量以及是否含水的情况以颜色深浅来表示。图 3 直观、清晰地展示了前方预报范围内的地质情况, 非常便于现场技术人员译解。

1.4 BEAM 的现场工作方法

BEAM 专门用于隧洞掌子面前方探测, 与常规 5m 处布置一环形供电电极 A1 极发射互斥的电流, 环形供电电极不少于 9 支, 等间距布置在掌子面外沿, 打孔安置并注少量水耦合; 测量电极 (A0 极) 共 6 支也按环形布置, 半径小于供电环 1m 左右

地面电法相比, BEAM 利用了同性电极相排斥的原理, 使用同极 (正极 A1、A0) 环型电极供电, 无穷远作负极 (B 极), 从而形成流向掌子面前方、类似聚光效应的聚集电流场, 以便有效、精确测量掌子面前方一定范围内岩石的电性变化。

现场数据采集时在掌子面四周或离掌子面后方 (A1、A0 布置在同一个掌子面时) (如图 1); 离掌子面 300~600m 远处布置 1 根负极 (即 B 极) 作为无穷远极, 与 A1、A0 极构成回路。该环型电极接入 1 个组合控制开关, 由 BEAM 仪按一定的程序

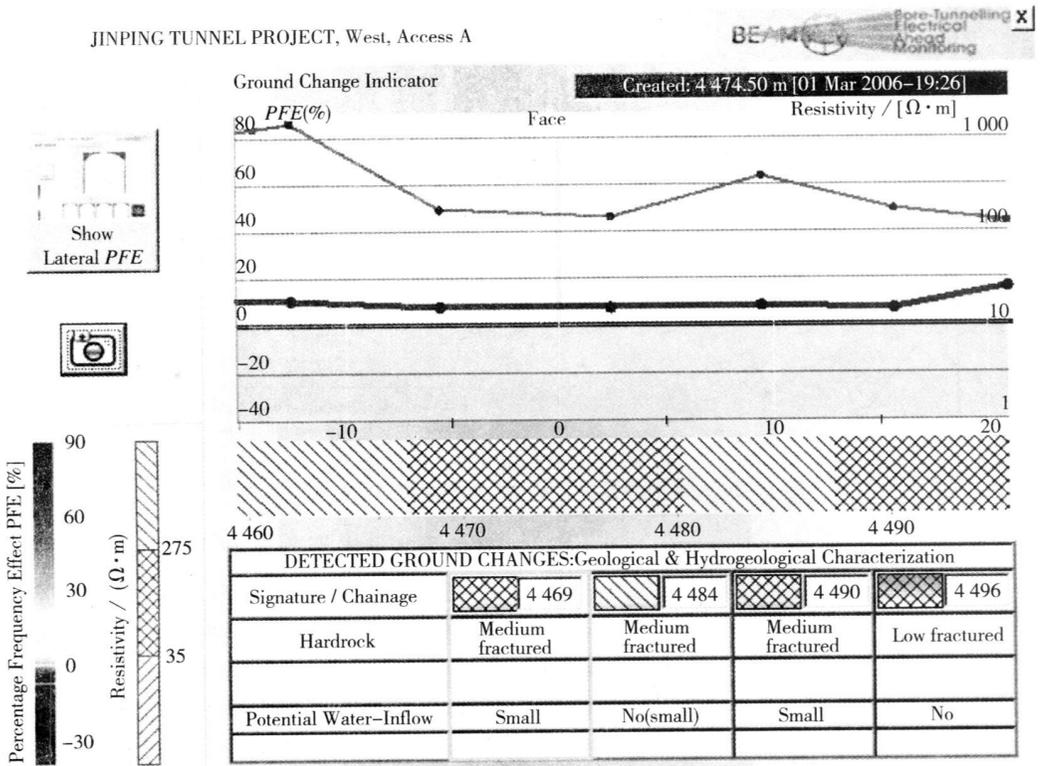


图 3 PFE 及视电阻率值 R 与岩体类型、含水情况可视化图

进行控制测量，从而得到 1 组与该掌子面前方一定范围内的视电阻率和极化率数值空间分布情况的数据。供电电流采用多频方式供电，测量不同频率下的观测数据。

2 应用情况^[3]

2.1 工程概况

某水电站位于四川省凉山彝族自治州的木里、盐源、冕宁 3 县交界处的雅砻江干流上，其辅助洞工程作用是沟通东西雅砻江的交通隧洞，并作为该水电站引水隧洞的施工辅助洞和超前勘探洞。

辅助洞地处青藏高原向四川盆地过渡的斜坡地带，隧洞沿线地形起伏、山峦重叠、沟谷深切，主峰高程在 4 000 m 以上，最大高差达 3 000 m 以上。辅助洞最大埋深约为 2 375 m，埋深大于 1 500 m 的洞段占全洞总长的 73%。辅助洞围岩均由三叠系 (T) 地层组成，岩性主要为大理岩、灰岩等碳酸盐岩 (占整个洞线的 91%) 及少量砂岩、板岩、绿泥片岩。除泥质灰岩外，其他碳酸盐岩大多为厚层状，岩面新鲜完整，在高程 2 000 m 以下岩溶不发育。辅助洞除进出口段外，II 类围岩约占 88%、III 类围岩约占 8%、IV 类围岩约占 3%。

2.2 岩体类型和含水情况与 PFE 及视电阻率 R 对应关系的建立

经过试验，辅助洞内岩体类型和含水情况与

PFE 及视电阻率 R 的对应关系见图 4。

2.3 成果分析

2.3.1 涌水段 BK5+ 073~ BK5+ 080 m 段的预报

图 5 是辅助洞桩号 BK5+ 060~ BK5+ 090 m 段 BEAM 的测试成果图，根据该成果图可以知道：从桩号 BK5+ 067 m 开始，岩体的 PFE 值、视电阻率值 R 都明显下降，且 PFE 值在桩号 BK5+ 072 m 处已经小于零、在桩号 BK5+ 074 m 处达到最低；从桩号 BK5+ 074 m 开始 PFE 值、视电阻率值又逐渐缓慢上升，并在桩号 BK5+ 079 m 处 PFE 值大于零。

根据 PFE 值、视电阻率曲线走势可以推测：在桩号 BK5+ 067~ BK5+ 074 m 段岩体由中等破碎向破碎过渡，且岩层由少量含水向富水过渡；在桩号 BK5+ 074~ BK5+ 090 m 段岩体由破碎向中等破碎过渡，岩层从富水到少量含水过渡，其中桩号 BK5+ 070~ BK5+ 080 m 段是富水最集中的区域。

后经开挖证实：桩号 BK5+ 073~ BK5+ 075 m 发育一小断层，产状：N60°~ 70°E，NW ∠ 80°，宽度 0.4~ 2.0 m，为方解石及方解石胶结的角砾岩充填，断层面均附有钙华物；在该断层附近，裂隙极为发育，形成与该断层走向平行的裂隙密集带，裂隙带内出现大涌水。

2.3.2 岩性分界面的预报

图 6 是辅助洞桩号 AK4+ 439~ AK4+ 490 m 段 BEAM 的测试成果图。根据该成果图可以分析：桩

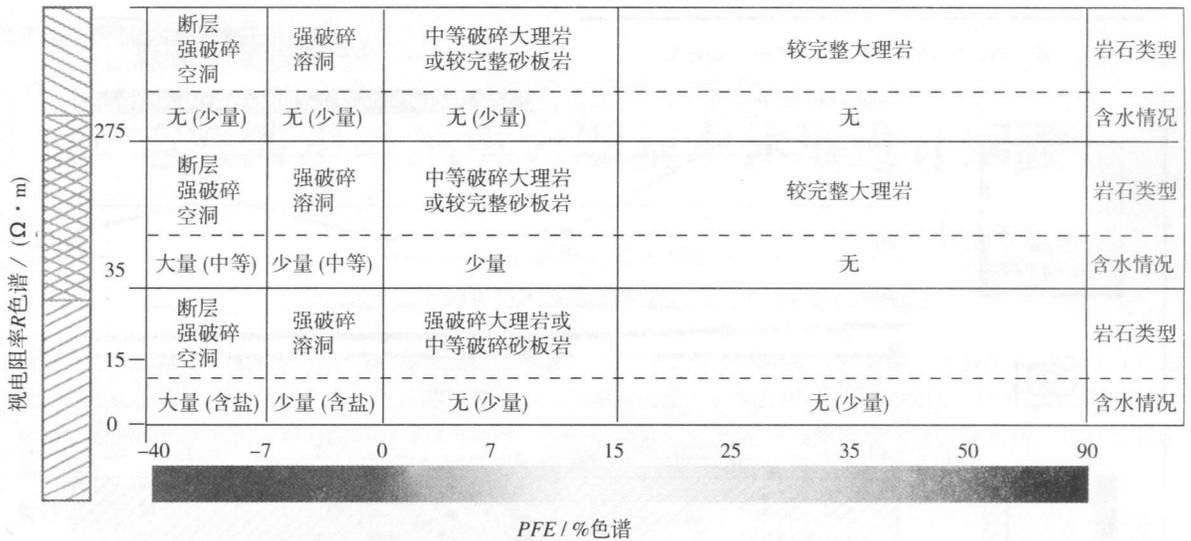


图 4 辅助洞内岩体类型和含水情况与 PFE 及视电阻率 R 的关系

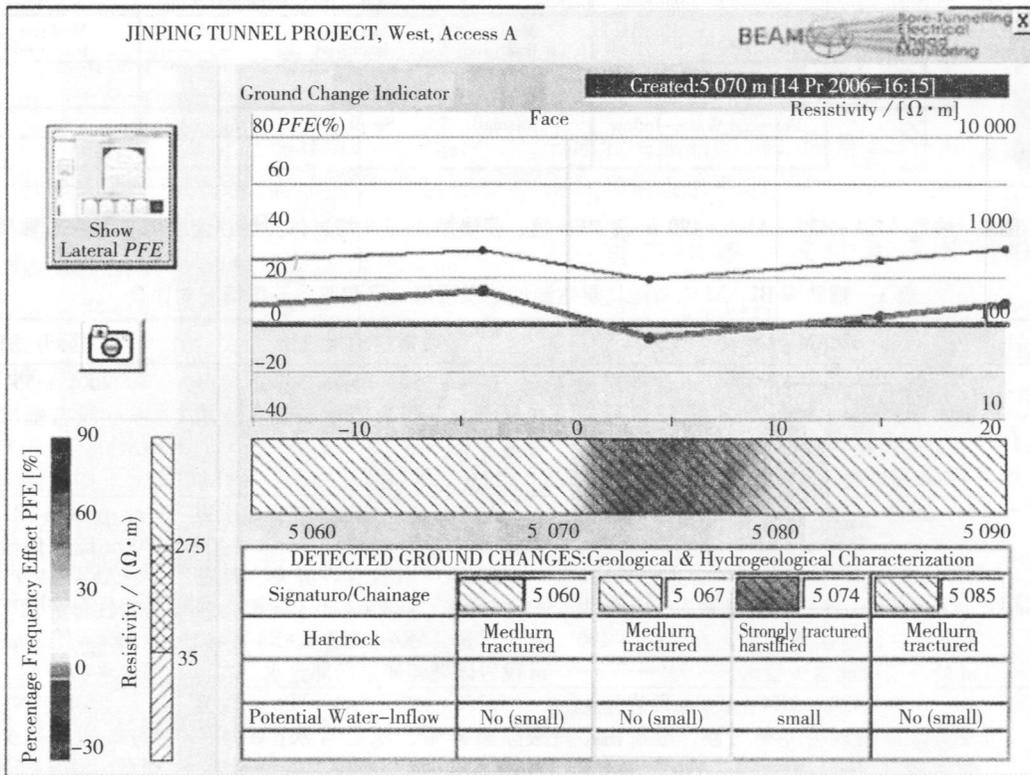


图 5 桩号 BK5+060 ~ BK5+090 m 段 PFE 值、视电阻率值 R 与岩体类型、含水情况可视化图

号 AK4+ 439 ~ AK4+ 469 m 范围 BEAM 所测得的 PFE 值和视电阻率值 R 值都呈下降趋势, 且视电阻率值在 300 ~ 500 Ω·m 范围内, 推测此段为中等破碎的岩石且不含水; 在桩号 AK4+ 469 ~ AK4+ 477 m 的范围, 视电阻率 R 值在 200 Ω·m 以下, 推测在桩号 AK4+ 469 m 处地层发生改变, 且地层改变含水特征是由“没有”到“很小”; 从桩号 AK4+ 484 m 左右开始, 岩石的视电阻率 R 再一次升高, 推测此段岩体不含水, 但当到桩号 AK4+ 490 m 可能会再一次发现少量的水。

后经开挖对比, 在桩号 AK4+ 469 m 处为砂质板岩与大理岩的分界, 且桩号 AK4+ 455 ~ AK4+ 469 m 段岩体较破碎; 在桩号 AK4+ 469 ~ AK4+ 490 m 段岩体相对较完整, 局部存在零星水滴。

通过以上实例可见, BEAM 对隧洞掌子面前方水体的预测具有良好的效果, 而且该方法可与地质雷达和 TSP 配合使用, 形成相互补充、互为印证的超前预报工作体系, 以更为准确的提高预报精度。

表 1 列出了 BEAM 与地质雷达在辅助洞不同洞段的预报结果以及与实际开挖的对比情况。

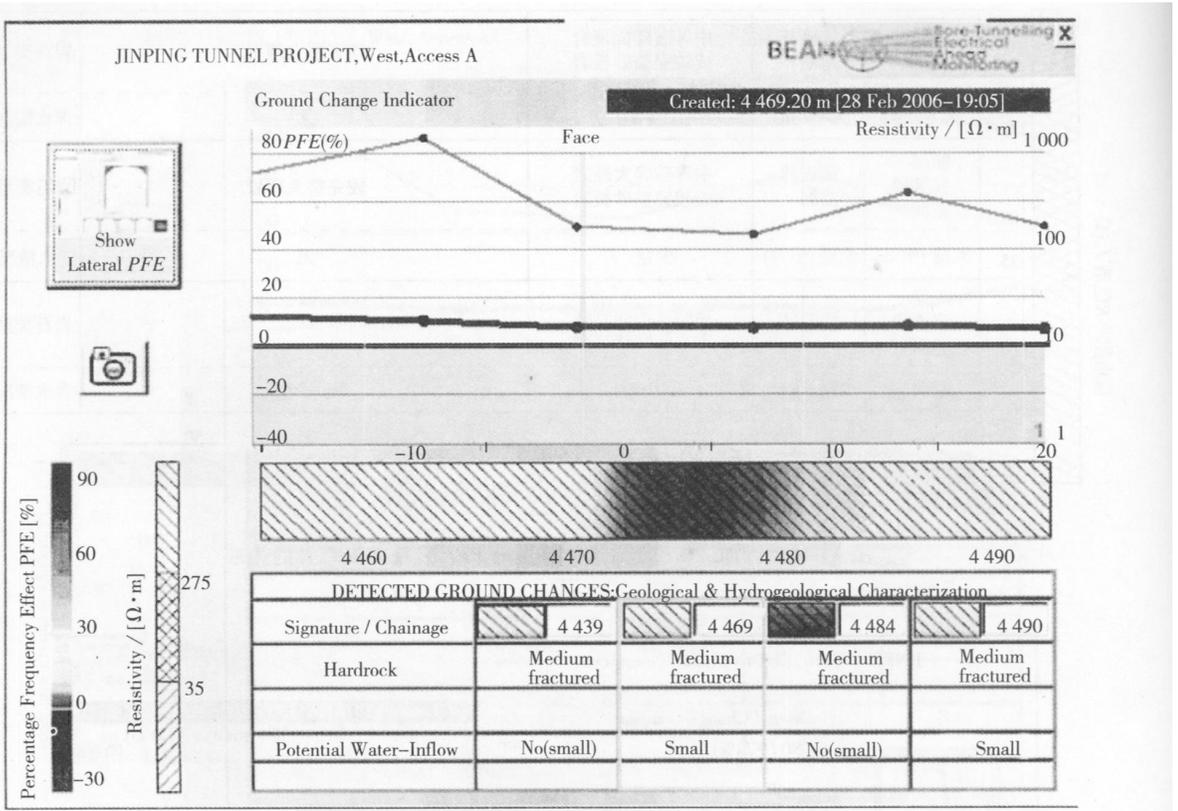


图 6 桩号 AK4+439~AK4+490m 段 PFE 值、视电阻率值 R 与岩体类型、含水情况可视化图

表 1 辅助洞 BEAM 法与地质雷达测试地质预报成果和实际开挖情况对比表

预报洞段桩号	BEAM 预报成果	地质雷达预报成果	实际开挖情况
BK4+540~BK4+560m	BK4+540~BK4+547m 段地层局部含水, BK4+547~BK4+553m 段岩体完整性相对较好, BK4+553~BK4+560m 段裂隙较发育。	BK4+554~BK4+557m 段存在异常, 推断为溶蚀裂隙, 地层可能含水。	BK4+551~BK4+556m 段右壁出现渗水和滴水。
AK4+439~AK4+490m	AK4+439~AK4+469m 段岩体中等破碎且不含水, AK4+469~AK4+477m 段地层不含水到少含水, 其中: AK4+469m 处岩性发生改变, AK4+484m 左右地层不含水, 在 AK4+490m 处地层可能含少量水。	AK4+456~AK4+476m 段裂隙发育, 岩体较破碎; AK4+469~AK4+480m 段存在异常, 推断 AK4+469~AK4+473.5m 段为岩性分界面, AK4+473~AK4+480m 段岩体破碎地层局部含水。	AK4+433~AK4+480m 段岩体较破碎, 其中: AK4+469~471m 段为岩性分界面, AK4+470~AK4+485m 段岩体局部渗水和滴水。
AK4+490~AK4+520m	AK4+490~AK4+496m 段岩体由中等破碎到较为完整过渡, 地层由不含水向含水过渡; AK4+496~AK4+502m 段岩体较完整, 地层由含水向不含水过渡; AK4+502~AK4+520m 段岩体较完整, 地层不含水。	AK4+497~AK4+506m 段为裂隙破碎带, 地层含水; AK4+514~AK4+520m 段为溶蚀裂隙, 地层含水。	AK4+495~AK4+499m 段岩体少量渗水和滴水; AK4+516~AK4+520m 岩体段存在水流。
AK4+637~AK4+648m	AK4+637~AK4+648m 段岩体中等破碎, 地层由少量含水向不含水过渡或极少量含水。	AK4+636~AK4+650m 段为裂隙密集带, 地层少量含水。	AK4+638~AK4+648m 段右壁少量渗水。
AK4+810~AK4+846m	AK4+810~AK4+815m 段岩体中等破碎, 地层少量含水或不含水; AK4+815~AK4+846m 段岩体中等破碎, 地层由少量含水向含水过渡。	AK4+828~AK4+831m 段为溶蚀裂隙, 地层少量含水, AK4+838~AK4+841m 段岩体溶蚀破碎, 含水较严重。	AK4+828~AK4+831m 段岩体完整, 不含水; AK4+838~AK4+841m 段右侧岩体少量含水。

3 结论

(1) BEAM 法利用与岩石含水密切相关的传导

电流原理进行预报, 理论与技术较合理, 能较为准确的对富含水洞段进行预报。

(2) BEAM 法由于是通过 PFE 和视电阻率值的

· 水工建筑物设计与施工 ·

毛家河水电站重力坝基本体形设计回顾

王军平, 王小红

(中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 毛家河水电站枢纽区由于地质条件复杂, 随着地质勘探工作的不断深入, 揭露出坝基摆佐组 (C_1b^2) 风化带内原生泥页岩夹层次生泥化普遍, 新鲜基岩为炭质灰岩与炭质泥页岩互层, 因此大坝深层抗滑稳定问题凸显。要较好地解决该水电站大坝的深层抗滑稳定问题, 需采取相应工程措施或调整大坝体形, 使其在满足抗滑稳定的前提下, 施工最方便、增加投资最少、影响工期最短。

关键词: 水利水电工程; 水工结构; 重力坝; 体形设计回顾; 毛家河水电站

中图分类号: TV 624.3 文献标志码: B 文章编号: 1007-0133(2008)01-0031-03

0 前言

毛家河水电站位于北盘江上游支流清水河上, 是一座以发电为主的 II 等中型水电工程, 装机 3×60 MW。工程枢纽由碾压混凝土重力坝、坝身泄洪冲沙系统、右岸长引水系统及地面厂房等组成。

本工程可行性研究于 2005 年 8 月开展地质勘探工作, 2005 年 9 月开始进行水工建筑物设计工作, 2006 年 3 月提交可行性研究报告。

1 坝址地质条件

毛家河水电站坝址处于河湾地带, 从地形上看, 正常蓄水位以下天然河谷地形较宽缓, 宽高比达 2.8 且在左岸陡壁脚、右岸岸坡脚均发育崩塌堆积体及出露河床冲积层, 最大厚度达 40 m, 不能作为坝肩岩体, 清除该层后, 河谷呈典型宽“U”型河谷; 从地质构造上看, 坝基岩性上硬下软, 均匀性较差, 两岸岩层倾角较缓, 软弱夹层、顺河向裂隙发育, 左岸卸荷带深度达 17~23 m。大坝基岩主要地层为摆佐组 (C_1b^2) 中厚层、薄层

含炭质、泥质灰岩夹薄层炭质泥页岩, 软弱夹层发育, 风化带内原生泥页岩夹层次生泥化普遍, 新鲜基岩为炭质灰岩与炭质泥页岩互层。大坝坝肩两岸卸荷裂隙发育, 左岸岩层倾左岸, 倾角 $10^\circ \sim 25^\circ$; 右岸岩层倾右岸偏, 倾角 $12^\circ \sim 30^\circ$; 河床部位岩层视倾角近水平。

2 重力坝体形设计及调整过程

2.1 初步体形设计

本工程由于勘测设计周期较短、地质条件较为复杂, 设计与地质勘测同时开展工作。根据地质中间成果和《混凝土重力坝设计规范》(SL319-2005), 用材料力学法和刚体极限平衡法计算成果, 初步拟定了重力坝坝体断面。经分析计算, 初步拟定挡水坝段坝体基本断面参数: 坝顶高程为 1303.50m, 坝底高程为 1229.00m, 上游坝坡 1:0.15, 折坡点

收稿日期: 2007-08-10

作者简介: 王军平 (1974-), 女, 湖北省天门市人, 工程师, 学士, 从事水工建筑物设计工作。

曲线变化作为判断隧道前方岩体质量的基础, 因此对岩性变化界面、岩石破碎带及含水情况预报具有一定的准确性和有效性, 对于裂隙、岩溶、断层也有良好的反映, 但对于它们的性质却难以判断。

(3) BEAM 系统只能做近距离预报, 测试的精度与测试的频度有关, 即测试次数越密, 精度越高, 预报的效果越好。

(4) BEAM 系统原设计是与 TBM 施工机械联用, 而国内隧洞以钻爆法施工为主, 在钻爆法施工条件下使用 BEAM 作为超前预报手段, 存在测试设备安装时间过长的问题。要在国内推广应用该技

术, 还需对其测试设备的安装操作方式进行适当改进, 如采用饼状电极外包装盐水海棉套、电极采用绝缘杆支撑附着在洞壁上的测量方式, 则可以适当缩短电极安装时间。

参考文献:

- [1] 何发亮, 等, 隧道地质超前预报 [M]. 西南交通大学出版社, 2006
- [2] 朱劲, 等, BEAM 超前地质预报技术在铜锣山隧道中的应用 [J]. 工程地质学报, 2007, (2): 258-262
- [3] 谭天元, 等, 隧道工程超前地质预报中的综合物探技术 [J]. 贵州水力发电, 2006, (6): 13-18