

高速地质雷达在隧洞混凝土衬砌质量检测中的应用

胡少伟, 陆俊, 牛志国

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: SIR-3000型高速地质雷达能连续、快速、全面、精确地对地下结构衬砌进行无损检测。论述了该项技术中探测天线、介电常数和环境电导率等重要参数的选用原则及其混凝土衬砌质量的判别。应用 SIR-3000型高速地质雷达技术对宁波某引水隧洞混凝土衬砌质量进行检测评价, 针对该工程确定了检测方案和需设置的参数, 分析了典型缺陷的图像结果, 表明检测结果具有很高的准确性。

关键词: 高速地质雷达; 引水隧洞混凝土衬砌; 质量评价; 检测参数设定

中图分类号: TV672.1:TU332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-640X(2010)02-0001-06

地下工程混凝土衬砌是地下工程开挖后构筑在其周边的支护结构。它的主要作用一是承受围岩压力、地下水压力、结构自重及其他荷载的作用;二是防止围岩风化、崩塌及防水防潮。但因其属隐蔽工程,施工作业空间有限、作业环境恶劣,极易造成衬砌厚度不足、衬砌与围岩结合部脱空、回填不密实、混凝土结构空洞、局部开裂、钢筋错位等质量事故。常规的检验方法如局部开孔或开槽取样,不仅效率低、代表性差、偶然性大,而且还破坏了衬砌结构的整体性。因此,一种能够连续、全面、精确、快速对衬砌结构无损伤的检测方法——地质雷达就得以发明并广泛应用^[1]。它能快速、无损、连续检测,并以实时成像方式显示地下结构剖面,使探测结果直观方便,而且探测精度高、样点密、工作效率高,已被广泛应用于工程地质勘察、建筑结构调查、无损检测、水文地质调查、生态环境等众多领域,特别是在结构检测和灾害的预测方面发挥着越来越大的作用。

由于受多种因素影响,引水隧洞衬砌混凝土可能会出现不密实、厚度不够、局部空洞、钢筋配置不均匀或者漏配等工程质量问题。本文以宁波某大型水库超长混凝土引水隧洞衬砌工程质量评价为例。该工程建设方为及时发现评价混凝土引水隧洞衬砌施工质量,采用地质雷达对引水隧洞的钢筋混凝土衬砌进行无损检测,找到了引水隧洞衬砌质量控制的薄弱环节,有针对性地加强质量监控,提高了引水隧洞衬砌的内在质量;同时,把检测出来的混凝土厚度作为甲方与施工单位结算的主要依据之一。

1 SIR-3000型地质雷达的工作原理

由于衬砌混凝土与围岩(花岗岩、砂岩、黄土等)之间存在着物性差异;缺陷部位衬砌混凝土被水或空气充填,与密实的混凝土的物性有明显差异。因此,可采用地质雷达法对隧道衬砌混凝土质量进行检测。

检测设备采用 GSSI 公司(美国地球物理探测公司)制造的 SIR-3000 型高速地质雷达(又称探地雷达)^[2]。SIR-3000 型地质雷达利用脉冲电磁波探测隐蔽介质的分布。由发射天线(T)向被测物发射高频宽带短脉冲电磁波,电磁波遇到不同介电特性的介质就会有部分返回,接收天线(R)接收反射波并记录反射的时间。根据接收到波的旅行时间(双程走时)、幅度频率与波形变化资料,可以推断介质的内部结构以及目标体的深度、形状等特征参数。根据双程反射时间可以求得目标层的深度 H :

$$H = tc / (2\sqrt{\epsilon_r}) \quad (1)$$

收稿日期: 2009-05-01

作者简介: 胡少伟(1969-),男,河南杞县人,教授级高级工程师,博士,主要从事水工结构和材料性能研究。

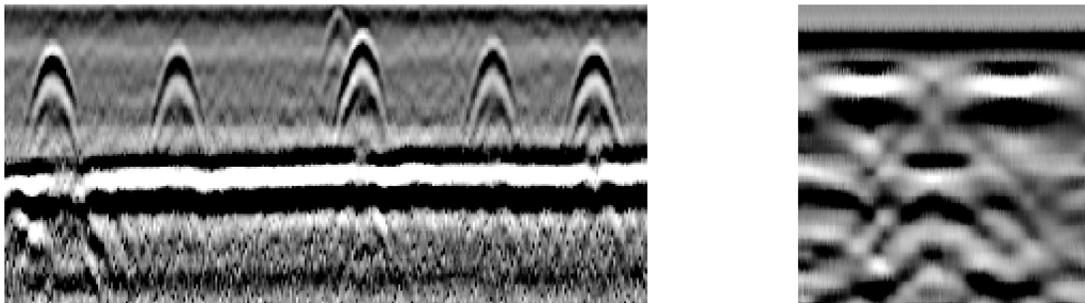
E-mail: hushaowei@nhri.cn

式中: t 为目的层雷达波的反射时间; c 为雷达波在真空中的传播速度($c=3\times 10^8$ m/s); ϵ_r 为目的层以上介质相对介电常数均值。

地下不同物体具有不同的性质,如导电率、介电常数和磁导率,对雷达或电磁波的传播起到重要影响。一般地导电率高,吸收雷达波强烈,雷达波通过这些介质,振幅衰减快;介电常数大,雷达波在这种介质中的传播速度就小。真空的介电常数 $\epsilon_{\text{空}}=1$,雷达波在真空中的传播速度最高,等于光速;水的介电常数 $\epsilon_{\text{水}}=81$,雷达波在水中的传播速度 $v_{\text{水}}=c/\sqrt{\epsilon_{\text{水}}}=c/9\approx 3\times 10^7$ m/s。

由反射原理可知,砌体与围岩的分界面在雷达图像上反映为一个连续性好、能量较强的反射波组,据此可判别砌体与围岩间的分界面^[3](见图1(a))。分界面的双程反射时间 t 可在雷达时间剖面图中读取,电磁波的传播速度 v 可通过宽角扫描法或经验数据得到。因此,衬砌厚度可用公式 $h=tv/2$ 求得。

衬砌混凝土中的空洞由空气或水等差异较大的材料所填充,雷达波仅能反射宽的平行于表面的水平裂缝,而垂直或近似垂直的裂缝则无法探测。由空气填充的空洞在图像上显示为“黑-白-黑”连续的图像,这是由于雷达波能量由高介电常数介质向低介电常数介质传播所致;与此相反,由水填充的空洞在图像上显示为“白-黑-白”连续的图像,空洞的宽度可由雷达反射波的标尺量得(见图1(b))。此外,空洞在雷达图像上也反映为同相轴呈“U”字(双曲线)异常,并与相邻道之间发生相位错位,且其能量明显增强,这是判别的另一依据,其中,反“U”字(双曲线)异常顶部的双程反射时间 t 可在雷达时间剖面图中读取,电磁波在砌体中传播的速度 v 可通过宽角扫描法或经验数据得到。因此,空洞的深度也可用公式 $h=tv/2$ 求得^[4]。



(a) 混凝土层底部反射波

(b) 混凝土空洞反射波

图1 混凝土层底部和空洞反射波

Fig.1 Typical section of concrete bottom's and concrete voids' reflections

2 工程实例

2.1 测线布置和参数选择

2.1.1 测线布置 本次对某水库引水工程隧道1~30标段衬砌进行检测,检测范围包括每个断面拱顶、拱的肩部和腰部各1条测线共3条(见图2)。检测标距1.0或1.2 m(视模板长度而定),每条测线扫描采样点数512点。

2.1.2 探测天线频率的选择 探测频率是制约探测深度的关键因素,同时也决定了探测的垂直分辨率。一般,探测频率越高,探测深度越浅,探测的垂直分辨率越高^[5]。电磁波频率越高,波长越短,反射区的半径越小,水平分辨率越高。SIR-3000型的探测天线应用范围见表1。现场隧洞衬砌的深度设计小于100 cm,故选用900 MHz天线对该隧洞衬砌进行检测。

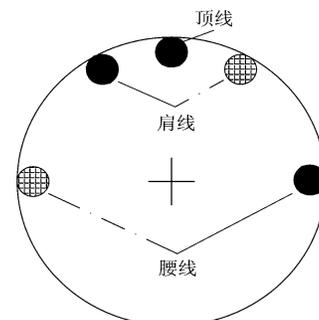


图2 测线断面布置

Fig.2 Sketch of detection lines

表1 探测天线的应用范围

Tab. 1 Application range of antennas

频率/ MHz	适用范围	最大探测深度/ m	时窗/ ns
1500	混凝土结构、公路、桥面	0.5	10 ~ 15
900	混凝土、浅层岩石、考古	1.0	10 ~ 20
400	浅层地质、生活区、环境、考古	4.0	20 ~ 100
200	地质概况、环境	8.0	70 ~ 300
100	地质概况、环境	20.0	300 ~ 500

2.1.3 介电常数选择 介电常数反映了处于电场中的介质存储电荷的能力. 介质的介电常数主要受其含水量及孔隙率影响, 与电导率相似. 由于地质雷达是接受反射波的信息来探测目标体, 而反射信号的强弱取决于介电常数的差异, 因此, 介电常数的差异是地质雷达应用的先决条件. 常用的介电常数见表2^[6-7].

表2 常见材料的介电常数

Tab. 2 Dielectric values for common materials

材料	介电常数	传播速度/ (mm·ns ⁻¹)	材料	介电常数	传播速度/ (mm·ns ⁻¹)	材料	介电常数	传播速度/ (mm·ns ⁻¹)
空气	1	300	淡水	81	33	海水	81	33
极地冰	3 ~ 3.15	168	淡水湖冰	4	150	干沙	3 ~ 6	120 ~ 170
湿沙	25 ~ 30	55 ~ 60	湿黏土	8 ~ 15	86 ~ 110	干黏土	3	173
湿地	12	86	耕地	15	77	牧地	13	83
花岗岩	5 ~ 8	106 ~ 120	石灰石	7 ~ 9	100 ~ 113	白云石	6.8 ~ 8	106 ~ 115
玄武岩(湿)	8	106	页岩	7	113	沙岩	6	112
煤	4 ~ 5	134 ~ 150	石英	4.3	145	混凝土	4.5 ~ 9	55 ~ 120
沥青	3 ~ 5	134 ~ 173	PVC	3	173	极地雪	1.4 ~ 3	194 ~ 252

SIR-3000型地质雷达有“TEST_DIEL”功能, 允许操作人员在检测前测试材料的介电常数, 通过对已知深度材料的测试, 从雷达反射波图像来确定介电常数值是否接近实际值. 雷达判别的典型图见图3.

由于该工程多处于潮湿环境, 因此, 介电常数的选择不能仅从雷达图形上选取, 而要根据现场的实际情况反复验证才能确定. 经现场图像对比和局部凿开试验, 选取混凝土介电常数均值为9.

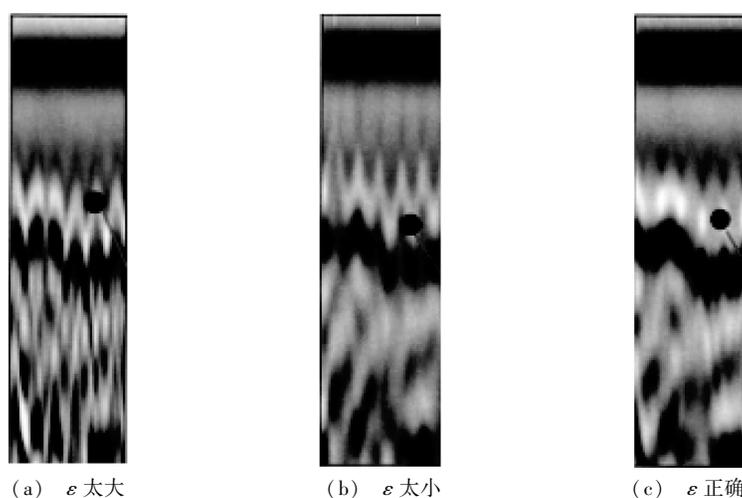


图3 介电常数选择典型图例

Fig. 3 The typical section of dielectric value for choosing

2.1.4 时窗的选择 时窗的选择非常重要. 若记录长度(时窗)过短, 则记录数据达不到目标体的深度; 若

过长,则增大了采集量,降低了效率.时窗的计算为 $Range = 1.5DT$,其中: $Range$ 为时窗(ns); D 为最大探测深度(m); T 为雷达波穿越每米地下物质来回所需要的时间,即双程时间(ns/m).双程时间只是近似值,根据所处的位置而不断变化,表3中列举了不同材料的双程时间的近似值.该工程衬砌混凝土因为施工期环境潮湿,所以时窗选择20 ns.

表3 不同材料的双程时间近似值

Tab.3 Approximate two-way travel time values of various materials

(单位:ns/m)

材 料	T						
空气	6.5	冰	13	雪	8	水	59
沥青	14	干混凝土	15	湿混凝土	23	干沙	13
湿沙	25.5	湿黏土	34	干黏土	13	干花岗岩	14.5
湿花岗岩	16.5	湿玄武岩	19	火山灰	23.5	煤	14
干石灰石	15.5	湿石灰石	18.5	湿沙岩	16	有机土壤	52.5

2.1.5 环境电导率的选择 环境电导率是表征介质导电能力的参数,决定了电磁波在介质中的穿透深度,其穿透深度随电导率的增加而减小.各种常见介质对于雷达波检测的适用程度见表4.

表4 与隧道衬砌有关介质对雷达波的适用程度

Tab.4 Some physical parameters related to tunnel lining

环境电导率 $\sigma / (s \cdot m^{-1})$	雷达波适应程度	适宜介质
$<10^{-7}$	最适宜	空气、燥花岗岩、干燥灰岩、混凝土、沥青、橡胶、玻璃、陶瓷等
$10^{-7} \sim 10^{-2}$	勉强适宜	淡水、淡水冰、雪、砂、淤泥、干黏土、含水玄武岩、湿花岗岩、土壤、冻土、砂岩、黏土岩、页岩等
$>10^{-2}$	难以使用	湿黏土、湿页岩、海水、海水冰、湿沃土、金属物等

高频电磁波在地下介质的传播过程中能量发生衰减,此过程满足介电极限条件^[8-10],即

$$\sigma = \omega \epsilon \quad (2)$$

式中: σ 为环境电导率; ω 为电磁波的频率; ϵ 为环境的介电常数.

该工程衬砌混凝土环境电导率为 $\sigma = 9 / (0.12 \times 10^{-9}) = 0.75 \times 10^{-7} s/m$,适宜雷达波的传播.

2.2 资料解释步骤

对检测的雷达波进行分析后处理,资料解释步骤如下:

- (1) 根据 $h = tv/2$ 这一关系可计算出某点的埋深(厚度),或根据 t, h 计算 v ;
- (2) 取任意已知点的数据与雷达相应测点的测试厚度比较,用已知厚度计算雷达波波速;
- (3) 用计算的雷达波波速,分析另外已知点的厚度,最终确定一个合适的波速,使各对比点的误差最小;
- (4) 根据选定的波速计算其它位置测点的测试厚度.该测区混凝土中雷达波波速近似 0.12 m/ns.

2.3 资料分析

雷达波经发射天线发射后,最先到达接收天线的雷达波为空气直达波,紧接着为表面直达波,然后为混凝土和围岩胶结面的反射波.第1层反射波同相轴一致且平整,厚度基本相同,显示为衬砌混凝土厚度,其中 10~30 cm 处为环向钢筋的反射波.第2层回波能量减弱,但反射波相轴基本一致,显示为完整岩石段,局部有杂波干扰,为围岩裂隙带所致(见图4(a)).在深度 40~42 cm,水平位置为 2+341~2+353 段,出现多次反射波,同相轴呈弧形,与相邻道之间发生相位错位,且其能量明显增强,说明该段存在局部点状脱空(见图4(b)).17+100 顶部雷达反射波波形杂乱,同相轴错断,该处衬砌与围岩结合部混凝土密实性稍差(见图4(c)).

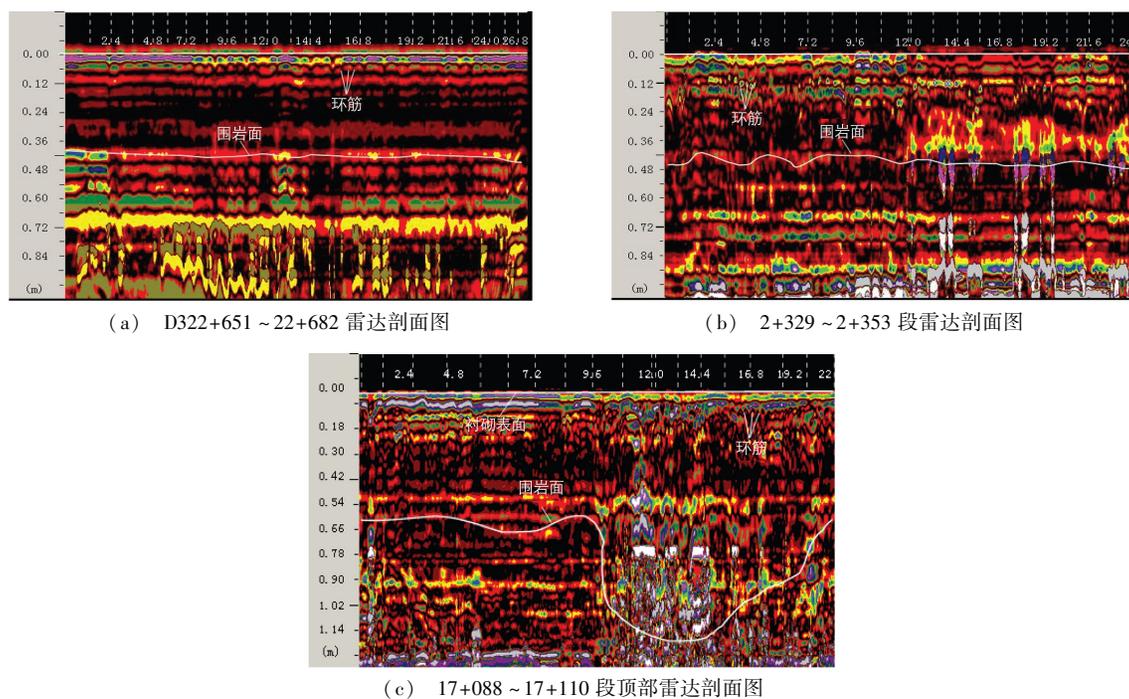


图4 雷达剖面图

Fig.4 Section sketch of geologic radar

3 结 语

(1)根据本次雷达探测,1~30标段衬砌混凝土均匀性较好,未发现较大脱空区域,有些标段局部有点状脱空.除少数部位发现局部不密实外,其余未发现明显异常.说明衬砌厚度满足设计要求,测线范围内沿轴向配筋数量为5根/m.

(2)雷达检测的准确性取决于测线频率、介电常数和环境电导等因素.SIR-3000型高速地质雷达有适用于不同介质丰富的数据库,不同的测量环境通过不断调整参数,提高测量的准确度.

(3)地质雷达系统在检测水工建筑物工程质量,特别是在判断引水隧洞衬砌厚度、空洞等方面有一定的科学性和准确性,特别是SIR-3000型改进了许多不同的环境测量条件,并附有强大的后处理软件,可作为建设者、决策者控制和评价工程质量的检测手段,以便宏观掌握施工质量,消灭工程质量隐患.

参 考 文 献:

- [1] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京:地质出版社,1994. (LI Da-xin. Method and application of ground penetrating radar[M]. Beijing: Geological Publishing Press, 1994. (in Chinese))
- [2] Geophysical Survey Systems Inc. Inventor TerraSIRch SIR system-3000 user's manual[M]. United States: Geophysical Survey Systems Inc,2005.
- [3] 李大心. 地球物理方法综合应用与解释[M]. 武汉:中国地质大学,1999. (LI Da-xin. Comprehensive application and interpretation of geophysical methods[M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1999. (in Chinese))
- [4] Geophysical Survey Systems Inc. Inventor GSSI handbook for radar inspection of concrete[M]. United States: Geophysical Survey Systems Inc, 2006.
- [5] 戴前伟,吕绍林,肖彬. 地质雷达的应用条件探讨[J]. 物探与化探. 2000, 24(2): 157-159. (DAI Qian-wei, LU Shao-lin, XIAO Bin. A discussion on the applied condition of GPR[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2000, 24(2): 157-159. (in Chinese))
- [6] REYNOLDS J M. An introduction to applied and environmental geophysics[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1997.

- [7] SLATER L, BINLEY A M, DAILY W, et al. Cross-hole electrical imaging of a controlled saline tracer injection [J]. *Geophysics*, 2000, 44: 85–102.
- [8] 董延朋, 孔祥春. 影响地质雷达工作的因素分析[J]. *物探装备*, 2007, 17(2): 130–133, 155. (DONG Yan-peng, KONG Xiang-chun. Analysis of factors affecting ground-penetrating radar[J]. *Equipment for Geophysical Prospecting*, 2007, 17(2): 130–133, 155. (in Chinese))
- [9] 曾昭发, 刘四新, 王者江, 等. 探地雷达方法原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (ZENG Zhao-fa, LIU Si-xin, WANG Zhe-jiang, et al. *The method of ground penetrating radar and its application*[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [10] SAARENKETO T, SCULLION T. Road evaluation with ground penetrating radar[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, 43(2–4): 119–138.

Application of high-speed ground penetrating radar in detecting the quality of tunnel concrete lining

HU Shao-wei, LU Jun, NIU Zhi-guo

(*Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: SIR-3000 high-speed ground penetrating radar is one of the advanced ground penetrating radar test equipments. It can carry out non-destructive testing on the lining of underground structures continuously, fast, completely, and accurately. This article presents the choosing principle of the testing antenna, dielectric constant and environmental conductivity and so on, which are the important parameters in this technology, and discusses how to judge the quality of concrete lining. Then this technology is applied to an evaluation test for the diversion tunnel concrete lining in Ningbo. First of all, it determines the detection program and sets the detecting parameters according to the project requirement. Secondly, it analyses typical defect images and makes the coring site testing. The results show very high accuracy. It will provide an effective support and judgement to builders in controlling the quality of concrete and eliminating the incipient fault of project quality.

Key words: high-speed ground penetrating radar; concrete lining in diversion tunnel; quality assessment; detecting parameter setting