DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2014.06.010

文章编号:1005-0523(2014)06-0007-06

地质雷达检测隧道衬砌常见病害模型实验研究

耿大新[1],李洪梅[1],郭 俊[2],梁国卿[3]

(1.华东交通大学土木与建筑学院岩土研究所,江西 南昌 330013;2.南昌市政公用投资控股有限责任公司,江西 南昌 330000;3.江西省天驰高速科技发展有限公司,江西 南昌 330103)

摘要:建立了由素混凝土、单层钢筋网及双层钢筋网3个区段组成的隧道衬砌试验模型,模型中布设了常见病害(空洞、空洞积水和混凝土析水)。模型自然养护28天,运用地质雷达对衬砌模型进行检测。对比隧道衬砌模型的地质雷达剖面图与实际的衬砌布设情况,可得结论:地质雷达检测对钢筋的存在反应敏感;双层钢筋网检测存在一定程度的缺陷;病害复杂(叠加)处检测图像辨识准确度较差;钢筋网的存在对其上下方病害的检测存在一定的影响;空洞积水的反射特征明显,易于识别;地质雷达(配800 MHz天线)的检测精度约在50 mm范围内,不能完成小尺寸空洞的检测。这为隧道衬砌常见病害的检测识别提供了一定的经验依据,并对隧道衬砌中双层钢筋网内病害和小尺度病害的检测做了初步探讨和研究。

关键词:地质雷达;隧道衬砌;模型试验;空洞积水;混凝土析水

中图分类号:U456 **文献标志码**:A

地质雷达(简称GPR),是利用不同媒质介电常数的差异对地下或物体内不可见的目标体或界面进行定位的一种浅层地球物理探测方法。因其检测连续、快速、无损、高效及易携带、操作简易等优点,地质雷达法在检测行业中运用广泛。然而,地质雷达检测法尚存在雷达图的准确分辨率不高、检测深度与检测精度相矛盾等缺陷。近几年,运用地质雷达检测方法测定隧道的衬砌结构(尤其二次衬砌)的质量和病害,以及地质雷达检测方法的使用精确度等问题颇受业界人士的关注。学者们对其应用于隧道衬砌的检测进行了大量的试验和正反演模拟研究。2000年,美国科研小组通过二次衬砌实验模型研究,对模型中布设的常见病害及不同媒质进行了地质雷达法检测,重点研究了地质雷达在此检测过程中的精确度和探测深度[1];Michael Scott和Park S K[2-3]也分别对不同埋设尺寸与深度的空洞和钢筋的桥面板和混凝土结构进行了实验模型研究,分析了这些布设对地质雷达图像的影响;朱彤,杨艳寿[4-5]分别对隧道素混凝土衬砌和钢筋混凝土衬砌背后空洞及不密实病害的辨识及精确度进行了试验模型研究;Bergner J P,刘四新,等[6-8]研究了FDTD防真的频散介质吸收边界条件的实现方法;戴前伟,等[9-10]对衬砌常见病害进行了各种地电模型的模拟研究,分析了病害的地质雷达时间剖面图的特点。

然而,这些研究主要是对常见病害进行单独的试验和模拟分析,少有考虑隧道衬砌布设钢筋网时对其常见病害检测的综合研究。为了对地质雷达在复杂的隧道衬砌病害的应用的进一步研究,制作了一个大型的隧道衬砌模型,并在模型中布设了空洞、空洞积水和混凝土析水等病害。通过对比地质雷达法检测的地质雷达深度剖面图和实际的衬砌布设情况,分析了衬砌分别在双层钢筋网、单层钢筋网和素混凝土区3种情况下病害的反射特征。

收稿日期:2014-09-12

基金项目:江西省交通厅重点科技项目(2011H0019);江西省研究生创新专项资金项目(YC2013-X008)

作者简介:耿大新(1977-),男,副教授,博士,主要从事地下工程与岩土特性研究。

通讯作者:李洪梅(1987-),女,在读硕士,主要研究隧道衬砌的检测评估。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 模型试验与GPR检测

1.1 试验模型的布局

为更贴近隧道衬砌的实际情况，在混凝土水泥路面（现场取样，厚25 mm）和防水板（塑料板模拟）上用预拌商用混凝土（C30）现浇了二次衬砌，其尺寸为6.0 m × 1.5 m × 0.45 m。试验模型分为素混凝土区，单层钢筋网区和双层钢筋网区；同时，在二次衬砌中的每一区段均布设了常见病害混凝土析水、空洞及空洞积水，布设示意图见图1~图3。

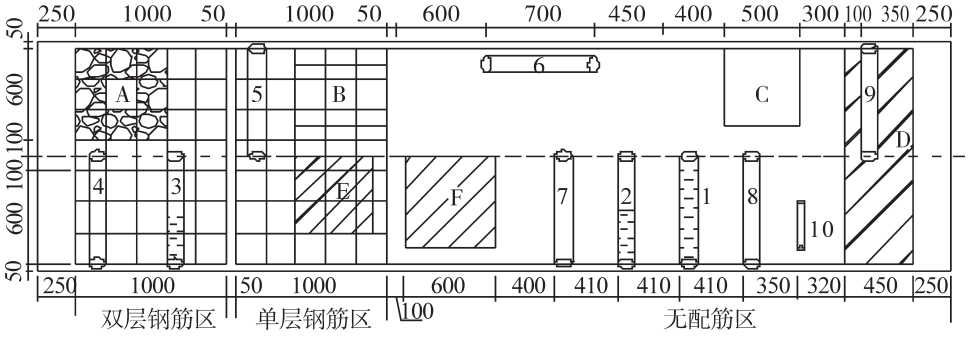


图1 二次衬砌病害布设平面图（mm）

Fig.1 The damage layouts in the tunnel lining（mm）

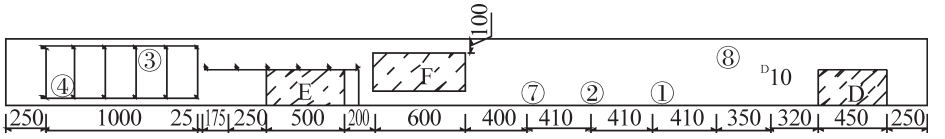


图2 东测线病害布设剖面图（mm）

Fig.2 Longitudinal section of the damage layouts (the East side)（mm）

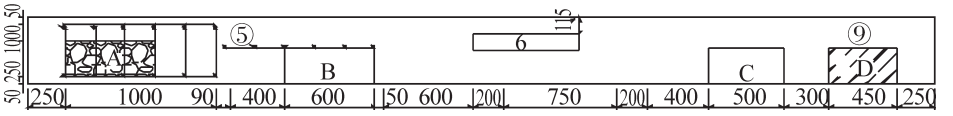


图3 西测线病害布设剖面图（mm）

Fig.3 Longitudinal section of the damage layouts (the West side)（mm）

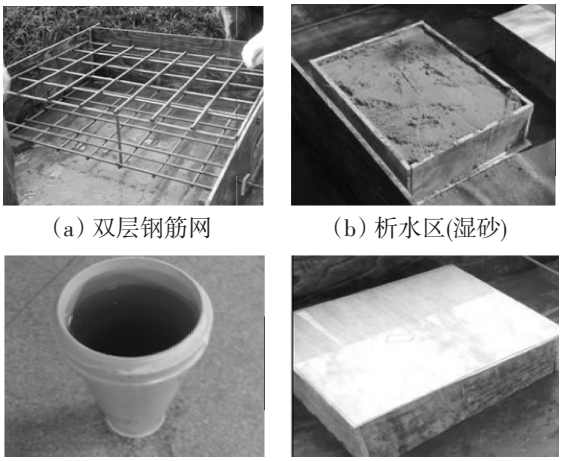
鉴于研究的重点为钢筋网的存在对隧道二次衬砌常见病害检测的影响研究，所以，从外界环境限制、对比性等方面综合考虑，隧道衬砌的空洞和混凝土析水病害布设情况如表1、表2所示。

1.2 试验材料的确定

试验中用薄塑料板模拟初次衬砌与二次衬砌之间的防水层，以贴近实际情况。圆形空洞，用直径为110 mm和50 mm的PVC管模拟，并通过PVC管中密封自来水模拟积水；矩形空洞（脱空）用矩形三合板空箱模拟；混凝土析水，用满含碎石和湿砂的矩形三合板箱模拟。具体模型如图4。

1.3 衬砌表面测线的布设

鉴于隧道二次衬砌中的病害布设主要沿东西两个方向分布，在二次衬砌1/4和3/4宽度处分别布置东西测线，如图5所示。



（a）双层钢筋网 （b）析水区(湿砂)

（c）圆形空洞(积水） （d）矩形脱空

图4 衬砌钢筋网及各病害的模型

Fig.4 The model of the double rebar and diseases

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表1　空洞病害布设

Tab.1　The layouts of voids

病害	编号	模型	埋深/mm	尺寸/mm	备注
圆形空洞	1	满含水	340	长700 直径110	素混凝土区,垂直于测线
	2	半含水	340	长700 直径110	素混凝土区,垂直于测线
	3	无水	50	长700 直径110	紧靠下层钢筋网,垂直于测线
	4	无水	290	长700 直径110	素混凝土区,垂直于测线
	5	无水	125	长700 直径110	素混凝土区,垂直于测线
	6	无水	115	长700 直径110	素混凝土区,平行于测线
	7	无水	340	长700 直径110	素混凝土区,垂直于测线
	8	无水	55	长700 直径110	素混凝土区,垂直于测线
	9	无水	55	长700 直径110	矩形空洞上方,垂直于测线
	10	无水	175	长300 直径50	素混凝土区,垂直于测线
矩形空洞	D	无水	200	450×1400×250	单层钢筋网区,顶面紧挨钢筋网
	E	无水	200	500×500×250	素混凝土区,顶面横跨有空洞
	F	无水	100	600×600×250	素混凝土区

表2 混凝土析水病害布设

Tab.2　The layouts of concrete bleedings

病害	编号	模型	埋深/mm	尺寸/mm	备注
混凝土析水	A	碎石箱	150	600×600×250	双层钢筋网之间
	B	湿砂箱	200	600×400×250	单层钢筋网下方
	C	湿砂箱	200	500×500×250	素混凝土区

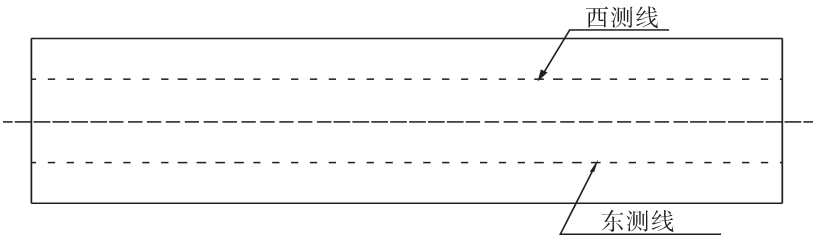


图5　测线布置图

Fig.5　The survey line

1.4　地质雷达检测仪器及参数设置

隧道衬砌模型洒水养护28天,采用配置有主机ProEX和中心频率为800 MHz的天线的瑞典地质雷达进行检测。综合考虑到病害的布设情况以及检测的分辨率,采样参数等依尼奎斯特采样定理计算和经验[11-12]取值如表3所示。

表3　800 MHz天线的采集参数

Tab.3　The acquisition parameter of the GPR with antenna of 800 MHz

地质雷达参数	发射器和接收器的间距/m	测点间/m	时窗/ns	采样率/(样/扫描)	扫描率/(扫描/秒)
设定值	0.10	0.01	25	512	60

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2 地质雷达检测结果与分析

依据地质雷达检测的原始数据，利用REFLEXW软件将检测信号进行滤波和增益处理等，可得东西测线的地质雷达时间深度剖面图，如图6、图7。

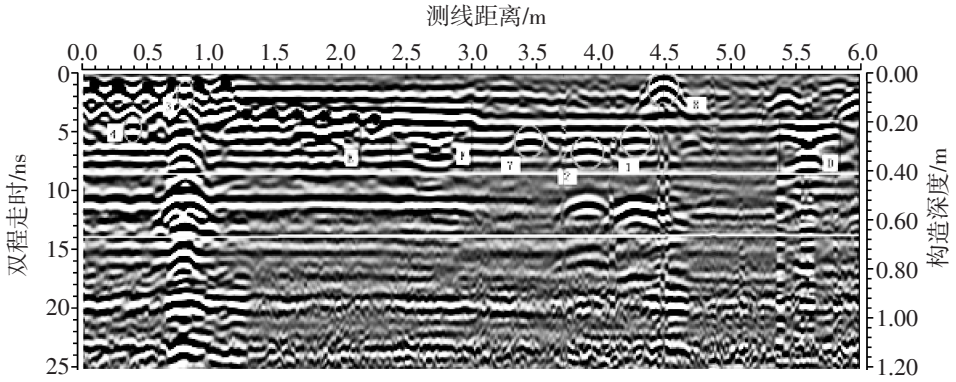


图6 东测线地质雷达时间深度剖面图

Fig.6 Geological radar profile for the east line

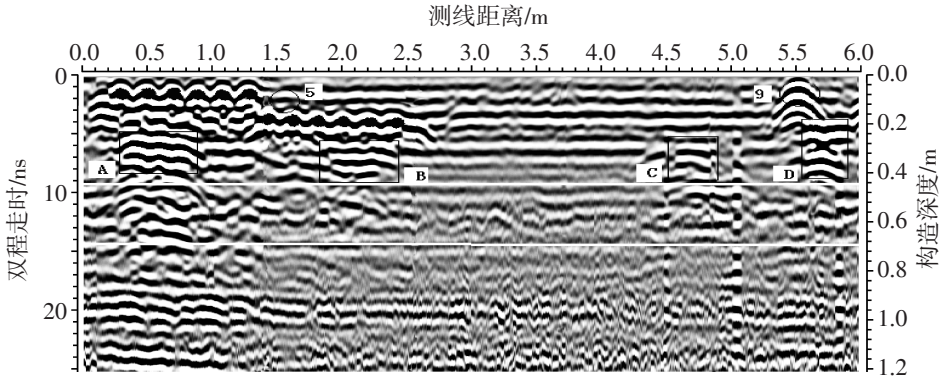


图7 西测线地质雷达时间深度剖面图

Fig.7 Geological radar profile for the west line

2.1 钢筋网的检测

对比分析图2、图3与图6、图7，钢筋的地质雷达图像辨识存在如下现象：①单层钢筋网，其数量与位置（深度与间距）显示清晰准确；②双层钢筋网，其数量及上层钢筋位置显示清晰且准确，而其下层钢筋的位置（深度）出现极大偏差，下层钢筋网与上层的的检测间距只有100 mm左右，这与实际布置间距（350 mm）相差太大；③下层钢筋网的反射波形的同相轴与上层钢筋稍有差异。

初步分析，双层钢筋的间距误差的可能原因主要有3个：电磁波在钢筋与天线间多次反射导致双层钢筋间距的误差；双层钢筋间的其他病害布设，导致电磁波反射叠加导致上下层钢筋网的相位变化；距离测线75 mm的沿测线方向的钢筋对电磁波反射的影响导致相位变化。而双层钢筋的同相轴的差别主要源于钢筋网的安装工艺。

2.2 空洞及空洞积水的检测

试验模型中空洞病害主要从填充状态（满含水、半含水、无水）、形状与尺寸、深度及埋设位置（是否在钢筋网下面）4个方面予以设置。

1）空洞积水状况对检测结果的影响。对比图6、图7中的不同空洞的地质雷达图像，可知：无水空洞4～9只有一个反射界面，满含水空洞1和半含水空洞2则均呈现3个反射界面。这主要原因是电磁波遇不同媒质会发生反射，不含水空洞为混凝土-空气-混凝土，半含水空洞为混凝土-空气-水-混凝土，满含水空洞理论上为混凝土-水-混凝土（满含水的条件难以达到，出现混凝土-空气-水-混凝土的情况）。空气、混凝

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

土、水3种媒质的相对介电常数分别为1，6.4和81，且电磁波进入相对介质较小的媒质时，反射波形为正波，从而反射波形的最外层表现为白色[13]。所以，空洞的含水状态可通过地质雷达图像明确判断。

2）空洞的形状对检测结果的影响。鉴于施工中的空洞（脱空）实际情况，试验中设置了矩形空洞（D/E/F）和圆形空洞（1～9）。从地质雷达剖面图不难发现：矩形空洞（脱空）的反射波强烈，且脱空的中间部分更为显著，反射界面表现为顶面水平、底面抛物线形；而圆形空洞的反射波形则表现为双曲线形。从而，实际检测中容易区分矩形脱空和圆形空洞。

3）空洞尺寸对检测结果的影响。鉴于矩形脱空的自身性，脱空宽度不会很小，反射波的特征差异也不大。所以，试验中，只考虑圆形空洞的尺寸影响。由地质雷达检测图像可知，800 MHz的天线对直径为50 mm的圆形空洞检测不明显，从而可知地质雷达（配800 MHz天线）的检测精度大约为50 mm。

4）空洞埋深对检测结果的影响。比较空洞7、8可得，埋深较浅的空洞其电磁反射波更加强烈，更易区分辨别。其主要原因是病害深度越深，电磁波在传播过程中的能量损失越大。空洞7、8均位于二衬和初衬的交界处，故用800 MHz天线检测埋深40 mm的较大尺寸病害可行。

5）钢筋网对空洞检测结果的影响。从图6、图7中可知：布设在双层钢筋网之间的空洞4因受上层钢筋的影响隐约可以判断识别，且空洞4对上层钢筋网反射波影响甚微。而半含水的圆形空洞3因双层钢筋反射影响呈现竖向条状多重反射，反射较强烈；并且与双层钢筋的反射波相互影响，反射界面无从分辨，从而不易判断空洞3的具体时间深度、尺寸与积水状态。

2.3　混凝土析水病害的检测

混凝土析水病害主要布设于西测线附近，故由图7可知：

1）布设于无钢筋区的析水区域*C*（湿砂）反射波很微弱。从而可知模型在养护28天后，析水区域的湿砂含水量由于木板箱的存在而没有大量减少，故含水量的存在显著削弱了反射波的能量，使得析水区域*C*在剖面图中很难辨识。

2）布设于单层钢筋网下的析水区域*B*（湿砂）的反射波却较强烈，其主要原因很可能是湿砂的水份大量流失。

3）布设于双层钢筋间的析水区域*A*（碎石）处的雷达反射波明显要比析水区域*B*和*C*要强烈，并且表现为明显的带状矩形区。经分析主要有4个原因：析水区域*A*（碎石）埋深较浅，电磁波能量消耗少，反射强烈；碎石与混凝土见的相对介电常数差异比细砂的大；湿砂含水量比碎石大使得反射信号明显减弱[14]；下层钢筋的存在对析水区域*A*的反射起到一定的反射增强作用。

综上可得：钢筋网的存在，对其上方的析水病害的检测有一定的反射增强现象，而对析水病害的反射波形在地质雷达时间深度剖面图的表观特征无明显影响。

3　结论

目前，较多隧道的二次衬砌中布设有钢筋网，且多有空洞和混凝土析水等病害，故此，研究隧道二次衬砌内钢筋网的布设检测、空洞与析水等常见病害的检测以及钢筋网的存在对空洞、析水等病害检测结果的影响，具有很重要的实用价值。本文采用800 MHz中心频率屏蔽天线针对不同埋深、不同布设条件下的二次衬砌病害的GPR时间深度剖面图的特征与规律进行了初步的研究。试验结果表明：

1）上层钢筋的数量与间距可通过GPR剖面图清晰准确地判断，而双层钢筋网中下层钢筋的反射波明显比上层弱，且两层间的距离与实际状况却存在极大的差异；双层钢筋网的相位存在差异，主要因为钢筋网的安装工艺。

2）空洞存在积水时，GPR图像一般会出现三个反射界面，从而为判断空洞中是否含有积水提供经验依据。

3）无积水空洞的存在对钢筋网反射特征的影响甚微，而钢筋网的反射会削弱无水空洞的反射强度；另外，含水空洞的反射信号与钢筋网的反射相互影响，且影响较大。

4）钢筋网的存在，使其上方混凝土析水病害的反射波在一定程度上增强，而对析水病害的反射波形在

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

地质雷达时间深度剖面图的表观特征无明显影响。

参考文献：

[1] SIGGINS A F, WHITELY R J. A laboratory simulation of high frequency GPR responses of damaged tunnel liners [J]. The International Society for Optical Engineering.2010,40(11):805-811.
[2] PARK S K, UOMOTO T. Radar image processing for detection of shape of voids and location of reinforcing bars in or under reinforced concrete [J]. Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 1997,39(7):488-492.
[3] Scott M, Rezai-zadeh A, Moore M. Ground penetrating radar technology for detection and identification of common bridge deck features[R]. Wiss, Janney, Elstner and Associates, Inc, 2001,4.
[4] 朱彤,李兴,周晶,等.层隧道衬砌空洞及积水的地质雷达识别和应用[J].中国水运,2012,12(8): 198-201.
[5] 杨艳青,贺少辉,齐法琳,等.铁路隧道复合式衬砌地质雷达检测模拟试验研究[J]. 岩土工程学 报,2012,34(6):1160-1165.
[6] 葛德彪.电磁波时域有限差分方法[M]. 3版. 西安电子科技大学出版社, 2011:37-137.
[7] BERENGER J P. Perfectly matched layer for the FDTD solution of wave-structure interaction problem [J]. Antennas Propagation, IEEE Translations on, 1996,44(1):110-117.
[8] 刘四新,曾昭发.频散介质中地质雷达波传播的数值模拟.地球物理学报[J]. 2007,50(1):320~326.
[9] 戴前伟,冯德山,王启龙,等.时域有限差分法在地质雷达二维正演模拟中的应用[J]. 地球物理学进展,2004,19(4):898-902.
[10] 孙忠辉,刘金坤,张新平等.基于GPRMAX的隧道衬砌地质雷达检测正演模拟与实测数据分析[J].工程地球物理学报,2013,10(5):730-735.
[11] 柳建新,HARRY M J. 探地雷达理论与应用[M].电子工业出版社,2011:51-90.
[12] 汪谋,地质雷达探测效果影响因素研究[J]. 雷达科学与技术,2007,5(2):86-90.
[13] 王通,张虎元.高频电磁波在媒质中的反射波特征分析[J].工程勘察, 2011(2):85-89.
[14] 刘恒柏,朱安宁,等.不同水分条件下粗砂土剖面中目标物的GRP图像特征及其解译[J].土壤, 2009,4(1):112-117.

Experimental Study on Common Disease Detection of Tunnel Lining with GPR

Geng Daxin[1], Li Hongmei[1], Guo Jun[2], Liang Guoqing[3]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013,China;
2. Nanchang Municipal Public Investment Holding Co., Ltd., Nanchang 330000, China;
3. Jiangxi Province Tianchi Highway Technology Development Co., Ltd., Nanchang 330103, China)

Abstract: In order to study the application of geological penetrating radar (GPR) in tunnel lining detection elaborately, this paper establishes a test model comprised of three different supporting sections (plain concrete, single-layer rebar and double-layer rebar), which formulates such normal damages as voids, voids filled with water and the concrete bleeding. The GPR profiles were obtained via processing the health monitoring signals with the special geological radar software. Comparing the GPR images with the actual layout settings in the tunnel lining, it finds that the GPR is impressible to steel, while it is inaccurate for the double rebar. And the reflection images for the common diseases are difficult to identify due to the steels in the tunnel liner. For the void, the reflection image is easy to identify when it is filled with water, while it is difficult when the diameter of the voids is 50 mm. To some degree, the results are significant for further researches of the GPR in tunnel lining common disease detection.

Key words: GPR; tunnel lining; cavities with water; concrete bleeding; model test

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net