



T/CECS G XXXX: 2022

中国工程建设协会标准
Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

公路隧道衬砌结构地质雷达检测技术规程
(征求意见稿)

中国工程建设标准化协会 发布
Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

中国工程建设标准化协会标准 (CECS G)

公路隧道衬砌结构地质雷达检测技术规程
(征求意见稿)

中路高科交通检测检验认证有限公司
长安大学

中交第一公路勘察设计研究院有限公司
江西省天驰高速科技发展有限公司
青岛中电众益智能科技有限公司

二〇二二年一月

目 录

1 总则	1
2 术语与符号	2
2.1 术语	2
2.2 符号	3
3 基本规定	5
3.1 一般规定	5
3.2 检测内容	6
4 仪器设备	8
4.1 性能与要求	8
4.2 使用与保养	8
5 检测工作程序	10
5.1 一般规定	10
5.2 准备工作	10
5.3 现场实施	12
5.4 数据处理与解译	13
6 衬砌厚度检测	15
6.1 一般规定	15
6.2 检测方法	15
6.3 数据处理与判定	17
7 衬砌内部缺陷检测	19
7.1 一般规定	19
7.2 检测方法	19
7.3 数据处理与判定	19
8 钢架检测	21
8.1 一般规定	21
8.2 检测方法	21
8.3 数据处理与判定	21
9 钢筋检测	22
9.1 一般规定	22
9.2 检测方法	22
9.3 数据处理与判定	22
10 隧底结构层检测	24
10.1 一般规定	24
10.2 检测方法	24

10.3 数据处理与判定	25
11 检测成果	27
11.1 一般规定	27
11.2 检测报告	27
附录 A 地质雷达核查方法	29
附录 B 检测工作方案内容与要求	32
附录 C 地质雷达现场标定记录表	33
附录 D 地质雷达现场检测记录表	34
附录 E 衬砌结构典型地质雷达图像	35
附录 F 检测报告编写内容与要求	38

征求意见稿

1 总则

1.0.1 为规范和指导公路隧道衬砌结构地质雷达检测工作，提高检测质量和水平，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于钻爆法施工的公路隧道衬砌结构地质雷达检测。

1.0.3 公路隧道衬砌结构地质雷达检测应根据不同检测阶段的检测目的与任务要求，遵循技术可行、适宜有效、经济合理的原则确定检测方法和工作量。

1.0.4 隧道现场检测作业必须遵守国家、行业安全生产法律法规和相关的安全操作规定，采取切实可行的安全保障措施。

1.0.5 公路隧道衬砌结构地质雷达检测工作除应符合本规程外，尚应符合国家、行业现行有关标准、规范的规定。

征求意见稿

2 术语与符号

2.1 术语

2.1.1 地质雷达法 radar method

利用电磁波在不同介质（介电常数不同）的交界面产生电磁波反射的原理，根据反射波的振幅、双程旅行时间、相位和二维剖面图的形状来分析地下目标体分布形态的方法。

2.1.2 工程质量检测 inspection of structural quality

为评定隧道衬砌结构工程质量与设计要求或与施工质量控制及验收标准的符合性所实施的检测。

2.1.3 衬砌结构性能检测 inspection of lining structural performance

为评估隧道衬砌结构安全性、适用性、耐久性所实施的检测。

2.1.4 地质雷达天线 radar antenna

地质雷达天线是一种将电磁能量发送到介质中并接收来自地下不同介质的能量的反射的装置，一般由一个发射天线和接收天线组成。

2.1.5 地质雷达主机 radar control unit

控制地质雷达信号发射、采集、处理和存储的装置。

2.1.6 数字叠加和平均 data addition and average

在同一个测点上将进行多次探测的数据对应相加和平均，以提高信噪比增加二维剖面的清晰度从而突出异常目标体数据处理方法。

2.1.7 屏蔽天线 shielded antenna

为保证信号按一定的辐射角度定向发射或定向接收且不产生漏场，对天线振子除辐射方向外的其余方向进行电磁波屏蔽。

2.1.8 增益 gain

放大雷达信号的幅度来减小能量衰减的影响，从而凸显雷达信号的特征值。

2.1.9 采样间隔 sample interval

由模拟信号转换为数字信号时为保证信号不失真而采用的相邻采样点间的时间间隔，其倒数为采样率。

2.1.10 探测深度 radar detecting depth

地质雷达能够在当前介质中能够作用的最大距离。

2.1.11 衬砌内部缺陷 lining concrete defect

主要指初期支护背后空洞、初期支护与二次衬砌之间的脱空、结构加固层与原衬砌结构之间的脱空及衬砌内部的空洞和不密实等。

2.1.12 隧底结构层 bottom structure

指隧道路面及以下、隧底围岩以上范围内的混凝土结构。

2.1.13 纵向测线 longitudinal survey line

沿隧道衬砌结构长轴方向或走向的雷达检测测线。

2.1.14 环向测线 cross survey line

垂直于隧道衬砌结构长轴方向或走向的雷达检测测线。

2.1.15 介电常数 dielectric constant

代表了介质保持和传输电荷的能力，该值由材料成分、湿度、物理性质、密度和温度决定的。在探地雷达的应用中使用该参数计算目标的埋设深度。

2.1.16 直达波 direct wave

由发射天线直接耦合到接收天线的电磁波，该电磁波是二维剖面纵坐标上显示的一个波所以又叫初至波。对于地面耦合天线二维剖面纵坐标上显示的一个波是直达波和地面反射波的叠加波，一般把该波作为双程旅行时间的起点（零点）。

2.1.17 相对介电常数 relative permittivity

是介质的绝对介电常数与空气的绝对介电常数的比值。在地质雷达中使用该值来确定电磁波在介质中的传播速度。

2.1.18 采样时窗 time-frequency windows

地质雷达信号采集的电磁波在介质中双程旅行时间范围。

2.1.19 反射波 reflected wave

由客观存在的电性异常目标界面所产生的电磁回波。

2.1.20 地质雷达图像 radar profile

由横坐标为扫描道或水平距离和纵坐标为双程旅行时间或埋设深度组成二维剖面图。该二维剖面图可以描绘出被测目标体的埋设深度和分布形态。

2.1.21 有效异常 effective signal

检测目标体产生的异常。

2.1.22 干扰异常 garbage signal

检测目标体以外的其他因素引起的异常。

2.1.23 空洞 void

指初期支护背后或者混凝土结构内部存在的空腔。

2.1.24 脱空 void in concrete

指不同结构层之间的空隙，如初期支护与二次衬砌之间的空隙。

2.2 符号

2.2.1 地质雷达检测系统性能参数符号：

f ——天线中心频率；

x ——垂直分辨率。

2.2.2 地质雷达检测系统计算参数符号：

ϵ_r ——介质的相对介电常数；

R_{max} ——发射天线与接收天线的最大间距；

h ——检测深度。

v ——电磁波速；

t ——电磁波双程旅行时间；

d ——标定目标物体的厚度。

征求意见稿

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 地质雷达检测属于测线覆盖式检测，检测结果可反应测线位置衬砌结构受检时的状况。

3.1.2 隧道衬砌结构地质雷达检测按检测目的应分为工程质量检测和衬砌结构性能检测。

3.1.3 当遇到下列情况之一时，应进行工程质量检测：

- 1 相关标准规范规定的检测。
- 2 对衬砌结构工程质量有怀疑或争议。
- 3 发生质量或安全事故。
- 4 相关行政主管部门要求进行的工程质量第三方检测。

3.1.4 当遇到下列情况之一时，应进行衬砌结构性能检测：

- 1 出现影响隧道结构安全的病害。
- 2 隧道需要维修加固或改扩建。
- 3 隧址区发生地震、泥石流或隧道内发生火灾等影响结构安全的灾害事件。
- 4 隧道达到设计使用年限需要继续使用。
- 5 发现其他紧急情况或特殊问题。

3.1.5 隧道衬砌结构检测按检测阶段可分为施工过程检测、交（竣）工检测、养护检测（专项检查或应急检查）、养护工程过程检测与养护工程交（竣）工检测。

3.1.6 各阶段检测内容、频率、测线布置及评定方法应分别满足相应阶段的标准规范要求 and 实际需要。

【条文说明】隧道施工过程检测、交（竣）工检测的检测内容、频率、测线布置及评定方法应符合《公路隧道施工技术规范 JTG/T 3660—2020》、《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程 JTG F80/1-2004》的有关规定，养护检测（专项检查或应急检查）、养护工程过程检测与养护工程交（竣）工检测的检测内容、频率、测线布置及评定方法应符合《公路隧道养护技术规范 JTJ H12-2003》、《公路隧道加固技术规范 JTG/T 5440—2018》、《公路养护工程质量检验评定标准 JTG5220-2020》的有关规定。

3.1.7 地质雷达检测测区应满足下列要求：

1 受检的初期支护喷射混凝土 3 天强度应达到 28 天强度的 55%或 7 天强度达到 28 天强度的 85%；二次衬砌混凝土龄期不宜低于 28 天。

2 测区表面宜干燥、平整，并能保证地质雷达天线平稳移动。测区内不应存在干扰衬砌结构检测结果的金属物或其他电磁波源。检测环境温度宜在-10℃~40℃范围内。

【条文说明】随温度、湿度等条件的改变，地质雷达性能指标也会产生一定的变化，不同类型的仪器，其影响程度有所差异。测区表面潮湿、不平整影响雷达天线的移动稳定性，测区内存在的金属物（如隧道保温层钢性龙骨）或电磁波源也会干扰反射波正常成像，影响检测推定结果。

3.1.8 检测机构宜定期参加隧道衬砌结构地质雷达检测比对试验或能力验证，确保具备相应的检测能力。

3.1.9 瓦斯隧道地质雷达检测应符合下列规定：

1 微瓦斯工区、低瓦斯工区可采用非防爆型设备，高瓦斯工区、煤（岩）与瓦斯突出工区宜采用防爆型设备。

2 使用非防爆型设备时检测人员应配备便携式甲烷报警仪，当瓦斯浓度超过 0.5%时应停止检测。

3 进入煤（岩）与瓦斯突出工区的检测人员必须随身携带隔绝式自救器。

3.2 检测内容

3.2.1 地质雷达检测内容包括衬砌厚度、衬砌内部缺陷、钢架、钢筋及隧底结构层，具体检测项目及指标见表 3.2.1。

表 3.2.1 地质雷达检测项目及指标

检测项目	检测指标	检测阶段				
		施工过程检测	交（竣）工检测	养护检测	养护工程过程检测	养护工程交（竣）工检测
初期支护	喷射混凝土厚度●	有钢架★ 无钢架☆	☆	☆	☆	☆
	背后空洞◎	★	★	★	★	★
	钢架数量及分布●	★	/	二衬无配筋★ 二衬有配筋☆	二衬无配筋★ 二衬有配筋☆	二衬无配筋★ 二衬有配筋☆
	赋水情况□	★	★	★	★	★
二次衬砌	厚度●	★	★	★	★	★
	密实性□	★	★	★	★	★
	空洞及脱空◎	★	★	★	★	★
	主筋数量及分布●	★，☆（第二层配筋）	/	★，☆（第二层配筋）	★，☆（第二层配筋）	★，☆（第二层配筋）
	赋水情况□	★	★	★	★	★
隧底结构层	厚度●	☆	/	☆	☆	☆
	钢架数量及分布●	★	/	★	★	★
	结构层缺陷（密实性、层间脱空、空洞等）	☆	/	☆	☆	☆

检测项目	检测指标	检测阶段				
		施工过程检测	交（竣）工检测	养护检测	养护工程过程检测	养护工程交（竣）工检测
无仰拱	□					
	结构层横断面轮廓◎	☆	/	☆	☆	☆
	厚度●	☆	/	☆	☆	☆
	结构层缺陷（密实性、层间脱空、空洞等）□	☆	/	☆	☆	☆
衬砌加固层	厚度●	/	/	★	★	★
	密实性□	/	/	★	★	★
	背后脱空◎	/	/	★	★	★
	钢架数量及分布●	/	/	无配筋★ 有配筋☆	无配筋★ 有配筋☆	无配筋★ 有配筋☆
	主筋数量及分布●	/	/	★，☆（第二层配筋）	★，☆（第二层配筋）	★，☆（第二层配筋）

注：①●—定量指标；②◎—半定量指标；③□—定性指标。

④★—雷达易实现的指标；⑤☆—雷达较难实现或可进行综合试验性检测的指标。

3.2.2 检测指标宜分为雷达易实现的指标和雷达较难实现或可进行综合试验性检测的指标，以分类满足合格评定、结构安全评价或评估以及病害诊断要求。雷达较难实现或可进行综合试验性检测的检测指标可根据实际需要进行选择。

3.2.3 检测指标宜分为定量指标、半定量指标、定性指标三类，对应检测指标可按精度要求分类提交。但应注意以下情况：

1. 当二次衬砌有配筋时，可选择性提供二次衬砌背后的钢架或钢格栅数量和分布情况。

2. 当二次衬砌为双层及以上配筋时，可选择性提供第一层配筋后的钢筋数量和分布。

3. 当初期支护未设置钢架时，可选择性提供喷射混凝土厚度数据。此时对喷射混凝土厚度的合格评定应综合进行。

3.2.4 除单项检测委托外，一项完整的检测应根据检测目的、拟检测隧道实际状况及检测阶段选取全部雷达易实现的指标及一定数量的雷达较难实现或可进行综合试验性检测的指标。

4 仪器设备

4.1 性能与要求

4.1.1 地质雷达系统应包含地质雷达主机、天线、测距装置及数据处理软件。

4.1.2 地质雷达应性能稳定、可靠，具有良好的防尘、防潮、抗震性能，对现场检测环境（温度、湿度、灰尘）有较强的适应性能。

4.1.3 地质雷达功能应符合下列要求：

- 1 信号叠加次数可选择或自动叠加。
- 2 实时滤波功能可选择。
- 3 具有点测与连续测量功能。
- 4 具有手动和自动位置标记功能。
- 5 具有现场数据实时处理功能。
- 6 工作模式具有距离/时间/手动三种工作方式。
- 7 满足隧道检测所需深度及精度的要求。
- 8 地质雷达天线为地面耦合天线且具有背向屏蔽功能。

4.1.4 地质雷达技术指标应符合下列要求：

- 1 系统增益不低于 150dB。
- 2 信噪比不低于 60dB。
- 3 采样间隔不大于 10ps。
- 4 模/数转换不低于 16 位。
- 5 工作环境温度-20℃~60℃。
- 6、防护等级 IP65 及以上。

4.2 使用与保养

4.2.1 地质雷达应定期进行校准或期间核查，确保仪器的各项性能满足检测要求。地质雷达期间核查方法见附录 A。

4.2.2 地质雷达应严格按照设备说明书的规定使用、维护和管理。

4.2.3 地质雷达应储存在阴凉、清洁、干燥、通风、无腐蚀性气体、无强电磁辐射的环境中，长期不使用的地质雷达通电前应进行必要的干燥处理。

4.2.4 地质雷达在运输、使用过程中应防水、防潮、防暴晒和防剧烈颠簸，并应符合下列要求：

1 在工地现场注意保护仪器，轻拿、轻放，避免人为损坏。电缆线应避免机械轧、拉，重物压损等现象造成断裂，避免长期在地面磨损。

2 仪器使用、搬运转移过程中，主机与天线注意防震，避免设备内部部件接触不良。仪器主机要装箱运输。

3 天线系统应该轻拿轻放，在测试过程中防止长时间剧烈震荡，以避免破坏天线系统。

4 检测时要保护好天线、电缆接头，并做好防水措施。

5 整套雷达仪器系统应注意防水防尘防震。

6 在南方潮湿地区操作，检测完毕后，在室内应对仪器主机进行通电加热除湿。

7 检测完毕清除仪器系统表面附着的灰尘泥土，保持整套仪器系统整洁干净。

4.2.5 检测前后，应对仪器设备进行全面检查及维护。对于长期不使用的设备，应每月进行一次通电检查。

【条文说明】检测及维护内容主要包括以下几个方面：

1 检查地质雷达设备放置环境是否满足防尘防水条件，雷达主机和天线外壳无破损、无进水、插座和插座内无灰尘、电池电量及是否能够正常充放电。

2 连接地质雷达并上电开机检查，查看主机是否能够正常开机、正常采集数据、正常调节参数、正常存储和回放数据。

3 将天线正对地面缓慢抬高后再缓慢降低至地面，重复做上述动作，看地质雷达设备是否能够捕获地面反射波形(天线底面距离地面距离变化形成如下图所示一个波浪形二维剖面反射波)，以此来初步判定雷达是否工作正常。

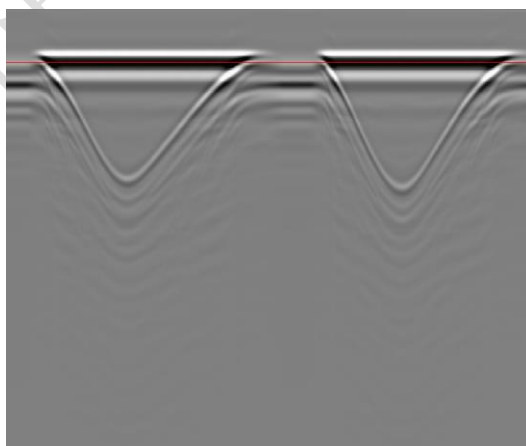


图 4.2.1 天线距离地面变化录取的探地雷达回波

4.2.6 对维修过的地质雷达，应采用期间核查的方式，验证其符合附录 A 要求的核查标准后方可投入使用。

5 检测工作程序

5.1 一般规定

5.1.1 地质雷达检测工作流程宜按图 5.1.1 进行。

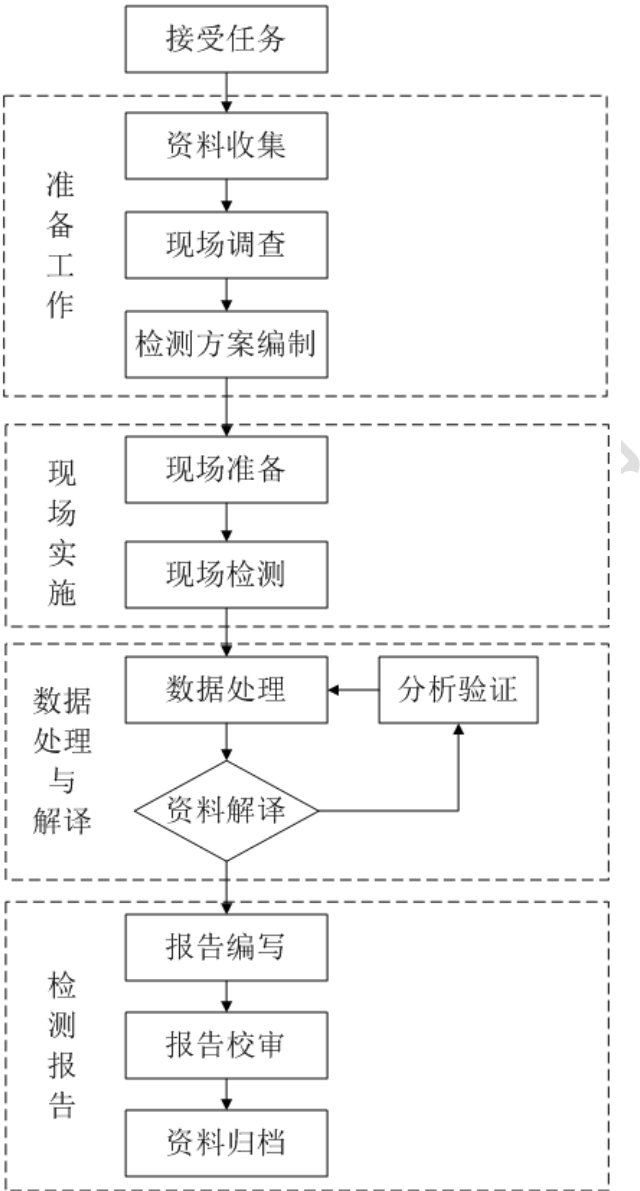


图 5.1.1 地质雷达检测工作流程

5.1.2 检测报告应根据任务要求编制，编制内容应符合本规程第 11.2 节的规定。

5.2 准备工作

5.2.1 检测单位接受委托后，应收集隧道建设期、运营期相关技术资料。不同检测阶段收集资料内容宜按表 5.2.1 进行。

表 5.2.1 收集的技术资料内容

序号	检测阶段	收集的资料内容
1	施工过程检测	地质资料、施工图设计文件、设计变更资料、施工记录等
2	交（竣）工检测	地质资料、施工图设计文件或交、竣工图、设计变更资料、施工记录、施工过程检测报告等
3	养护检测	地质资料、施工图设计文件或交、竣工图、设计变更资料、施工过程检测报告、历次经常检查记录及养护检测报告等
4	养护工程过程检测	地质资料、施工图设计文件或交、竣工图、设计变更资料、养护工程设计文件、养护工程设计变更资料、养护工程施工记录等
5	养护工程交（竣）工检测	地质资料、施工图设计文件或交、竣工图、设计变更资料、养护工程设计文件、养护工程设计变更资料、养护工程施工记录、养护工程过程检测报告等

5.2.2 现场调查内容宜按表 5.2.2 进行，必要时对已收集资料进行复核。

表 5.2.2 现场调查内容

序号	检测阶段	现场调查内容
1	施工过程检测	施工进度；施工工法；施工机械设备等地质雷达检测干扰源；工作条件等
2	交（竣）工检测	隧道病害情况；隧道交通量情况；隧道通行条件；保温层、隧道风机、电缆桥架等干扰源情况；里程桩号牌设置情况等
3	养护检测	隧道病害情况；隧道交通量情况；隧道通行条件；保温层、隧道装饰、隧道风机、电缆桥架等干扰源情况；里程桩号牌设置情况等
4	养护工程过程检测	施工进度；施工机械设备等地质雷达检测干扰源；工作条件等
5	养护工程交（竣）工检测	隧道病害情况；隧道交通量情况；隧道通行条件；保温层、隧道风机、电缆桥架等干扰源情况；里程桩号牌设置情况等

5.2.3 检测前应根据检测目的和检测内容选择雷达天线，天线选择应符合以下规定：

1 天线中心频率应根据检测任务要求、探测深度、探测精度以及天线尺寸是否符合现场条件等因素综合确定。

2 天线最大探测深度应大于探测目标体深度，在满足探测深度的前提下，宜选用频率较高的天线。单一频率天线不能完全达到检测目的时，应选用两个或两个以上频率的天线。

3 衬砌厚度、衬砌内部缺陷及钢架检测宜选择 400MHz~900MHz 频

率天线，钢筋检测宜选择 900MHz~2.0GHz 频率天线，隧底结构层检测宜选择 150MHz~400MHz 频率天线。

5.2.4 检测前应根据检测目的和检测环境布置测线，测线布置应符合以下规定：

1 应根据检测目的和检测内容，确定测线条数及测线位置，并对测线依次编号。

2 测线布置应以纵向布置为主、环向布置为辅。

3 测线布置应避免预留洞室、电缆桥架及其他走行不便或对雷达信号干扰较严重的部位。

5.2.5 开展地质雷达检测前应编制检测工作方案，检测工作方案内容与要求见附录 B。

5.3 现场实施

5.3.1 现场检测工作条件准备应符合下列规定：

1 清理施工器具、堆放物品等影响检测作业的障碍物。

2 根据现场条件，合理确定测线位置，并移除测线附近的金属物，避免干扰地质雷达信号。

3 在检测段落内衬砌边墙上准确标记里程桩号，标记间距宜为 5~10m，特殊情况下可加密标记，必要时标记应保留一定时间。

4 根据现场条件，选择安全可靠、使用方便的高空作业设备，并由专业人员操作。

5 应按检测工作方案进行交通管制，包括按有关规定程序办理交通管制手续、安排交通管制人员及车辆、设立安全警示标志等。

5.3.2 检测前应对衬砌混凝土的介电常数或电磁波速做现场标定，填写附录 C。介质参数的标定应符合下列规定：

1 现场标定每座隧道应不少于 1 处，每处实测不少于 3 次，取平均值为该隧道衬砌结构的介电常数或电磁波速。

对于特长隧道、衬砌结构材料或含水量变化较大时，应分段进行标定。

2 标定方法包括：钻孔实测；在已知厚度部位或材料与隧道衬砌结构相同的其他预埋件上测量；在洞口处使用双天线直达波法测量。

3 求取参数时应具备如下条件：标定目标体的厚度不宜小于 15cm，且厚度已知；标定记录中界面反射信号应清晰、准确。

4 标定结果应按下式计算：

$$\varepsilon_r = \left(\frac{0.3t}{2d} \right)^2 \quad (5.3.1)$$

$$v = \frac{2d}{t} \times 10^9 \quad (5.3.2)$$

式中： ε_r ——介质的相对介电常数；

v ——电磁波速（m/s）；

t ——电磁波双程旅行时间（ns）；

d ——标定目标物体的厚度（m）。

5.3.3 地质雷达现场检测应符合下列规定：

1 天线操作人员不应佩戴含有金属成分的物件，支撑天线的器材应选用绝缘材料。

2 检测前，应根据选定的地质雷达型号、目标检测深度及现场实际检测条件设定相应检测参数，包括：时窗、采样点或采样间隔、时间延迟、滤波、增益等。

3 检测时，应确保天线与衬砌表面始终密贴，天线移动速度应平稳、匀速，移动速度宜为 3~5km/h。

4 地质雷达天线的定位方法应采用手动打标定法或测量轮测距定位法，条件允许时，两种方法宜同时使用。测量轮定位法宜选择在衬砌表面平整地段，检测时测量轮应密贴隧道衬砌表面，并宜每 10m 校对一次测量距离。

5 检测过程应准确定位桩号和打标，严格控制纵向或横向误差。

6 连续检测时，单次测线长度不宜大于 100m，前后两次重叠长度不宜小于 2m。

7 检测过程中应随时记录可能产生电磁影响的物体（如渗水、电缆、铁架及预埋管件等）及其位置。

8 检测时应关注实时回波图像，对有较大可疑的反射异常应及时记录和复检。

9 现场检测应做好原始记录，记录格式可参见附录 D。地质雷达检测原始记录应做到数据准确、字迹清晰、信息完整，不应追记、涂改，当有笔误时，应进行杠改并签字确认。电子记录应与原始记录对应并妥善保存。

10 检测完毕后应尽快恢复交通或施工。

5.3.4 在满足探测深度和检测精度的前提下，以下指标可同时检测：

1 初期支护厚度、钢架及初支背后空洞。

2 二次衬砌厚度、二次衬砌内部缺陷、二次衬砌钢筋。

3 套拱加固层厚度、套拱加固层内部缺陷、套拱加固层钢筋。

4 隧道结构层厚度、隧底结构层钢架设置情况、隧底结构层缺陷、隧底结构层横断面轮廓。

5.4 数据处理与解译

5.4.1 数据处理与解译流程宜按图 5.4.1 进行。

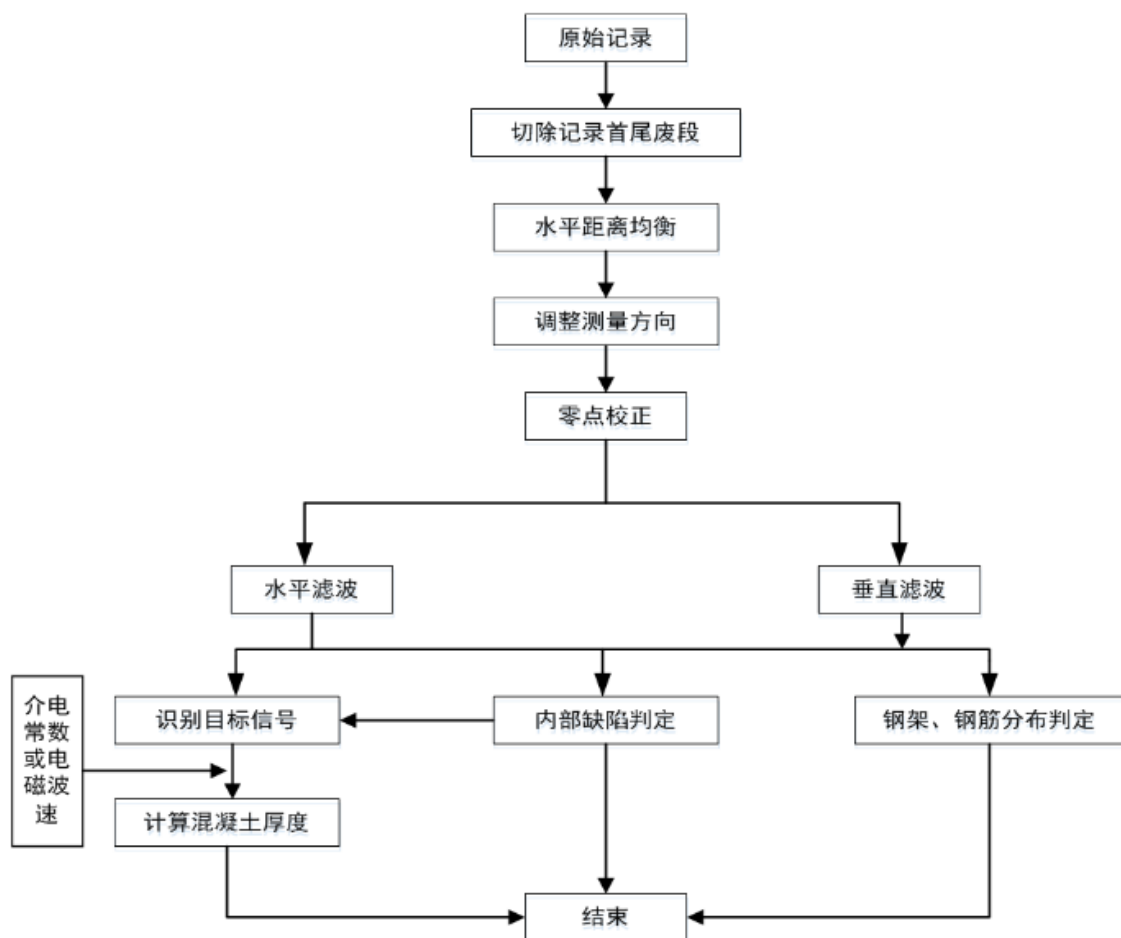


图 5.4.1 数据处理与解译流程

5.4.2 数据处理应符合下列规定：

- 1 数据处理前应检查原始数据是否完整，信号是否清晰，里程记录是否正确，不合格的原始数据不得进行处理。
- 2 数据处理过程中应选择正确的滤波方式，从而根据数据图像对隧道衬砌结构工程质量或性能作出分析与解译。
- 3 雷达图像可依据入射波和反射波的振幅、相位特征和同相轴形态特征等进行识别。

5.4.3 雷达图像分析应按下列步骤进行，衬砌结构典型地质雷达图像见附录 E。

- 1 结合多个相邻剖面单道雷达波形，找到数据之间的相关性。
- 2 结合现场的实际情况，将检测区域表面情况和测得的雷达图像进行对比分析。
- 3 将测得的雷达图像和经过验证的雷达图像进行对比分析。

5.4.4 图像解译应符合下列规定：

- 1 雷达图像解译时，应根据现场记录，分析可能存在干扰位置与雷达记录中异常的关系，准确区分有效异常与干扰异常。
- 2 必要时对有异常的部位可现场钻孔验证。

6 衬砌厚度检测

6.1 一般规定

6.1.1 衬砌厚度检测内容包括初期支护厚度、二次衬砌厚度及套拱加固层厚度。

6.1.2 统计检测段落衬砌厚度合格率时，测点数量不宜少于 100 个。

6.1.3 条件许可时，可采用钻孔取芯的方法对检测结果进行验证。

6.1.4 检测结果应给出每个测点实测值，说明欠厚段落起止桩号、部位、最大欠厚值等，并根据检测依据或委托单位要求进行厚度合格率统计。

6.1.5 衬砌厚度实测值可采用列表的方法给出，并对实测值与设计值进行对比，衬砌厚度列表方法如表 6.1.1 所示。对初期支护喷射混凝土，还应计算其平均厚度。施工过程检测、交（竣）工检测、养护工程过程检测与养护工程交（竣）工检测一般需要进行衬砌厚度合格率统计，而养护检测一般不需统计衬砌厚度合格率。

表 6.1.1 衬砌厚度实测值（示例表格）

桩号	实测厚度（mm）					设计厚度（mm）
	左边墙	左拱腰	拱顶	右拱腰	右边墙	
ZK55+420	632	584	638	687	635	500
ZK55+415	653	613	661	676	634	500
Zk55+410	665	612	654	676	609	500

6.2 检测方法

6.2.1 衬砌厚度检测测线布置应符合下列规定：

1 纵向测线应采用连续测量方式，若遇特殊地段或条件不允许时，可采用点测方式。

2 环向测线宜采用连续测量方式，也可采用点测方式。环向测线沿隧道纵向的布置间距宜为 8~12m，采用点测时，每条测线不宜少于 20 个测点。

3 施工过程检测时，单洞两车道隧道应分别在隧道的拱顶、左右拱腰、左右边墙布置共 5 条纵向测线，单洞三车道以及上隧道应在隧道的拱腰部位增加两条纵向测线。

4 交（竣）工检测时，单洞两车道隧道应分别在隧道的拱顶、左右拱腰布置共 3 条纵向测线，单洞三车道及以上隧道应在隧道的拱腰部位增加两条纵向测线。

5 养护检测时，单洞两车道隧道应在隧道的拱顶、左右拱腰、左右边墙布置共 5 条纵向测线，单洞三车道及以上隧道应在隧道的拱腰部位增加两条纵向测线。

6 养护工程过程检测时,单洞两车道隧道应在隧道的拱顶、左右拱腰、左右边墙布置共 5 条纵向测线,单洞三车道及以上隧道应在隧道的拱腰部增加两条纵向测线。

7 养护工程交(竣)工检测时,单洞两车道隧道应在隧道的拱顶、左右拱腰、左右边墙布置共 5 条纵向测线,单洞三车道及以上隧道应在隧道的拱腰部增加两条纵向测线。

8 衬砌厚度检测时,5 条纵向测线的布置示意如图 6.2.1 所示。

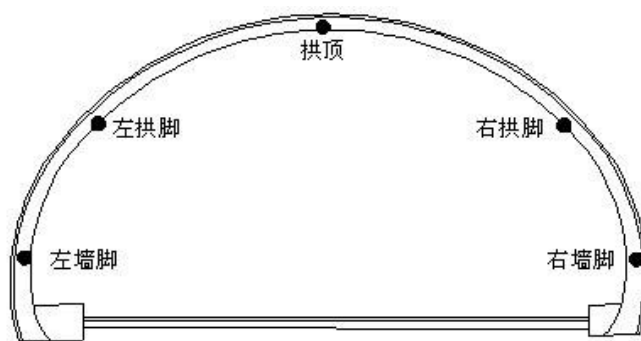


图 6.2.1 衬砌厚度检测纵向测线布置示意图

6.2.2 在隧道衬砌病害严重区段应加密测线,加密测线布置应符合下列规定:

1 加密测线可沿隧道纵向、环向“井”字形布置,增加纵向测线数量,补充设置环向测线。

2 测线布置范围应向衬砌病害严重区段两端延伸不少于 10m。

6.2.3 衬砌厚度检测结果应沿测线等间距提取测点进行分析,每条环向测线的测点不宜少于 20 个,纵向测线测点间距应符合下列规定:

1 施工过程检测时,初期支护厚度测点间距不应大于 3m,二次衬砌厚度测点间距不应大于 2m;

2 交(竣)工检测时,初期支护厚度测点间距不应大于 10m,二次衬砌厚度测点间距不应大于 20m;

3 养护检测时,衬砌厚度测点间距不应大于 5m;

4 养护工程过程检测时,套拱加固层厚度测点间距不应大于 2m,换拱加固层厚度测点间距不应大于 1m;

5 养护工程交(竣)工检测时,套拱加固层厚度测点间距不应大于 10m,换拱加固层厚度测点间距不应大于 1m。

【条文说明】本条主要规定不同阶段衬砌厚度检测的测点间距,施工过程检测、交(竣)工检测、养护工程交(竣)工检测测点间距按现行《公路隧道施工技术规范》(JTGT 3660-2020)、《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1-2017)及《公路养护工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG 5220—2020)的相关规定执行,养护检测、养护工程过程检测测点间距根据工程检测经验拟定。

6.3 数据处理与判定

6.3.1 隧道衬砌结构分层界面应按本规程第 5.4 节给出的方法进行数据处理，并根据雷达图像判断初期支护与围岩、二次衬砌与初期支护、套拱加固层与二次衬砌分层界面。

6.3.2 衬砌界面应根据反射信号的强弱、频率变化及延伸情况确定，并按式（6.3.1）或（6.3.2）计算衬砌厚度。

$$H_i = \frac{1}{2} v t_i \quad (6.3.1)$$

$$H_i = \frac{c t_i}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6.3.2)$$

式中： H_i ——第*i*层厚度检测值（保留到 1mm）；

c ——电磁波在真空中的传播速度，取 0.3m/ns；

t_i ——根据确定的分层界面得到的电磁波在第*i*层结构中的双程传播时间；

ϵ_r ——现场标定确定的介质相对介电常数，按式（5.3.1）计算；

v ——现场标定确定的电磁波速（m/s），按式（5.3.2）计算。

6.3.3 衬砌厚度检测值应与设计值进行比较，小于设计值其差值为负，大于设计值其差值为正。

6.3.4 工程质量检测时，衬砌厚度检测结果应按表 6.3.1 中要求进行判定。

表 6.3.1 衬砌厚度检测结果判定标准

检测阶段	衬砌厚度	规定值或允许偏差
施工过程检测	喷射混凝土	平均厚度≥设计厚度；60%的检查点厚度≥设计厚度；最小厚度≥0.6 倍设计厚度，且≥50mm
	二次衬砌	90%的检查点厚度≥设计厚度；最小厚度≥0.5 倍设计厚度
交（竣）工检测	喷射混凝土	平均厚度≥设计厚度；60%的检查点厚度≥设计厚度；最小厚度≥0.6 倍设计厚度
	二次衬砌	90%的检查点厚度≥设计厚度；最小厚度≥0.5 倍设计厚度
养护工程过程检测	喷射混凝土	90%的检查点厚度≥设计厚度；最小厚度≥0.8 倍设计厚度
	模注混凝土	90%的检查点厚度≥设计厚度；最小厚度≥0.8 倍设计厚度
养护工程交（竣）工检测	喷射混凝土	无衬砌：平均厚度≥设计值；60%的检查点厚度≥设计厚度；最小厚度≥0.5 倍设计值，且≥60mm； 有衬砌：平均厚度≥设计值；80%的检查点厚度≥设计厚度；最小厚度≥0.8 倍设计值，且≥50mm
	换拱模注混凝土	不小于设计值

征求意见稿

7 衬砌内部缺陷检测

7.1 一般规定

7.1.1 衬砌内部缺陷检测主要包括初期支护背后空洞、初期支护与二次衬砌之间的脱空、结构加固层与原衬砌结构之间的脱空及衬砌内部的空洞和不密实等。

7.1.2 检测前，应掌握隧道衬砌内预留（埋）洞室、管线的设置情况。

7.1.3 检测结果应明确缺陷段落起止桩号、缺陷类型、具体部位、规模等信息。对脱空或空洞，还应给出对应段落地质雷达实测衬砌厚度最小值和最大值，并对脱空或空洞深度进行估算。

7.2 检测方法

7.2.1 衬砌内部缺陷检测测线布置应与衬砌厚度检测测线布置一致。

7.2.2 衬砌内部缺陷纵向长度大于 3m 时，可在缺陷位置补充设置环向测线。当需补充设置多条环向测线时，相邻两条测线的间距宜不大于 2m。

7.2.3 衬砌内部缺陷检测时，宜采用纵向测线连续探测方式；对衬砌内部重点缺陷形态情况加密检测时，可采用环向测线、测点等间断探测方式。

7.2.4 衬砌内部缺陷进行验证时，宜采用敲击方式，必要时可采用钻孔方式，钻孔时应尽量避免破坏防水板。

7.3 数据处理与判定

7.3.1 衬砌内部缺陷检测应按本规程第 5.4 节给出的方法进行数据处理，采用雷达剖面图像确定缺陷位置。

7.3.2 衬砌内部缺陷判定时，宜将检测到缺陷的雷达图像和典型的经过验证的缺陷雷达图像进行对比分析，并结合缺陷处雷达单道波形，分析判断缺陷的性质、位置和规模。

7.3.3 雷达图像解译时，应根据现场检测记录，分析可能存在干扰的预埋管件等刚性构件的位置，准确区分衬砌内部缺陷异常与预埋管件异常，并排除天线未密贴所产生的假空洞。

7.3.4 衬砌内部缺陷地质雷达图像应符合下列判释特征：

- 1 脱空：反射信号强，图像呈连续的扁平状且反射界面明显。
- 2 空洞：反射信号强，图像呈弧形且反射界面明显。
- 2 不密实：反射信号强，图像变化杂乱。

7.3.5 衬砌内部需记录的缺陷宜满足以下要求：

- 1 二次衬砌内部和初期支护背后的空洞纵向长度不小于 0.2m。
- 2 二次衬砌与初期支护之间的脱空纵向长度不小于 0.5m。

3 二次衬砌和初期支护内部的不密实纵向长度不小于 0.5m。

7.3.6 对衬砌内部缺陷应按照空洞、脱空、不密实等进行定性区分。

7.3.7 检测结果中缺陷对应位置的平面精度不低于 0.1m，缺陷对应位置深度（厚度）精度不低于 0.01m。

7.3.8 工程质量检测时，衬砌内部缺陷的检测结果应符合下列判定标准：

- 1 初期支护背后无空洞、杂质。
- 2 初期支护与二次衬砌之间无脱空，衬砌内部无空洞。
- 3 结构加固层与原衬砌结构之间无脱空。

征求意见稿

8 钢架检测

8.1 一般规定

8.1.1 钢架检测主要包括隧道初期支护钢架及加固用钢架的数量及分布情况。

8.1.2 检测前，应掌握隧道预埋钢管、钢板、小导管等的设置情况，注意与钢架进行区分。

8.1.3 钢架检测应在设置钢架的段落内，钢架检测段落长度不宜小于30m。

8.1.4 钢架检测水平定位误差不宜大于10mm。

8.1.5 钢架检测结果应明确钢架里程桩号、榀数及间距等信息。

8.2 检测方法

8.2.1 钢架检测应沿隧道纵向分别在拱顶、两侧边墙布置3条测线。

8.2.2 钢架检测时宜采用纵向测线连续探测方式，必要时可采用环向测线、测点等间断探测方式。

8.2.3 钢架检测边墙纵向测线应保持水平高度一致。

8.3 数据处理与判定

8.3.1 钢架检测应按本规程第5.4节给出的方法进行数据处理，通过分析解读图像信息，判断是否设置了钢架，得到钢架位置、榀数、间距等参数。

8.3.2 钢架的主要判释特征为分散的月牙状强反射信号。

8.3.3 钢架间距检测应逐榀进行，每榀间距应在同一断面沿环向在拱顶、两侧边墙取3个间距，计算平均值。钢架间距检测结果应保留到1mm。

8.3.4 工程质量检测时，钢架检测结果应符合下列判定标准：

- 1 钢架榀数不少于设计值。
- 2 钢架间距允许偏差为 $\pm 50\text{mm}$ 。

9 钢筋检测

9.1 一般规定

9.1.1 钢筋检测内容包括钢筋设置情况、主筋数量及分布情况。

【条文说明】钢筋设置情况包括是否设置钢筋、是否设置双层钢筋。双层钢筋间距不低于 20cm 时可检测双层钢筋间距。检测双层钢筋时，应先对较易检测的浅层钢筋分布情况进行检测，根据浅层钢筋分布情况布置测线检测深层钢筋。检测双层钢筋间距时，可按照表 9.2.1 选取检测频率，数据处理应按本规程 5.4 节给出的方法进行数据处理，并根据雷达图像判断第一层钢筋与第二层钢筋顶部界面，钢筋顶部界面应根据反射信号强弱、频率变化及延伸情况确定，并按下式计算：

$$D_m = \frac{1}{2}v (t_{i2} - t_{i1}) \quad (9.1.1)$$

式中： D_m ——双层钢筋间距值（m）；

t_{i2} ——根据确定的第 2 层钢筋顶部界面得到的电磁波双程传播时间（ns）；

t_{i1} ——根据确定的第 1 层钢筋顶部界面得到的电磁波双程传播时间（ns）；

v ——现场标定确定的电磁波速（m/s），按式（5.3.2）计算。

9.1.2 二次衬砌钢筋设置情况检测可与衬砌厚度检测同时进行，主筋数量及分布情况检测宜单独进行。

9.1.3 主筋数量及分布情况检测天线中心频率宜不低于 900MHz，且水平定位误差不宜高于长度标定值的 1%。

9.1.4 检测结果应明确是否设置钢筋、是否设置双层钢筋，并按检测任务要求给出主筋数量、平均间距、最大间距及最小间距。

9.2 检测方法

9.2.1 钢筋检测地质雷达测线布置应符合下规定：

- 1 检测钢筋设置情况时，测线布置应与衬砌厚度检测测线布置一致。
- 2 检测主筋数量及分布情况时，测线应沿垂直于选定的被测钢筋轴线方向连续检测，且天线极化方向应与所布置测线方向一致。条件允许的情况下，宜进行网格状扫描。

9.2.2 可采用钢筋探测仪对钢筋地质雷达检测结果进行验证。

9.3 数据处理与判定

9.3.1 数据及图像处理应按本规程第 5.4 节进行，通过分析解读图像信息，判断是否设置钢筋、是否设置双层钢筋，得到主筋间距及数量。

9.3.2 衬砌钢筋地质雷达图像应符合下列判释特征：

-
- 1 钢筋：反射信号强，图像呈连续的小双曲线形。
 - 2 双层钢筋：在衬砌不同深度处出现连续小双曲线形强反射信号。

9.3.3 检测主筋纵向间距时，可按测线给出被测钢筋的最大间距、最小间距和平均间距。钢筋平均间距按下式计算：

$$s_m = \frac{s}{n-1} \quad (9.3.1)$$

式中： s_m ——钢筋平均间距，保留到 1mm；

s ——被检区域首根钢筋与末根钢筋之间的距离（mm）；

n ——被检区域钢筋数量。

9.3.4 工程质量检测时，钢筋检测结果应符合下列判定标准：

- 1 钢筋设置情况符合设计要求。
- 2 主筋数量符合设计要求。
- 3 主筋纵向间距允许偏差为 $\pm 10\text{mm}$ 。
- 4 双层钢筋间距允许偏差为 $\pm 5\text{mm}$ 。

10 隧底结构层检测

10.1 一般规定

10.1.1 隧底结构层检测包括隧底结构层厚度、隧底结构层钢架设置情况、隧底结构层缺陷、隧底结构层横断面轮廓等。

10.1.2 隧底结构层厚度检测结果应明确检测段落厚度合格率以及欠厚测点具体位置。统计检测段落隧底结构层厚度合格率时，应沿测线等间距提取测点，测点数量不宜少于 100 个。

10.1.3 隧底结构层钢架设置情况检测结果应明确检测段落钢架设计樁数、实测樁数。

10.1.4 隧底结构层缺陷按照缺陷性质可分为结构层密实性、空洞、层间脱空等，并应明确缺陷的里程桩号、具体位置、缺陷类型、缺陷规模等信息。

10.1.5 隧底结构层横断面轮廓检测结果应明确每一测点结构层的实测深度。针对单洞两车道隧道，单条横向测线应至少包含等间距的 10 个测点，测点间距宜为 0.5m~1.0m。测点数量可随车道数等比例增加。

10.1.6 隧底结构层检测结果可采用钻孔的方式进行验证，钻孔时应避免破坏隧底防水体系及其他加固结构。

10.2 检测方法

10.2.1 隧底结构层检测测线布置应符合下列规定：

1 对单洞两车道隧道，应分别在隧道路面中线、左右两侧路幅中线布置共 3 条纵向测线。

2 对单洞三车道隧道，应分别在隧道路面中线、3 条路幅中线布置共 4 条纵向测线。当隧道路面中线与中间车道路幅中线位置相近时，可视为同一条测线。

3 检测隧底结构层横断面轮廓时，应视现场情况，在选定区域内布设多条垂直于隧道轴线的横向测线，测线间距不宜大于 5m。

4 检测人员可根据检测需要及现场采集条件，调整测线布置方式。当隧道出现结构变形、路面隆起或不同测线临近桩号范围存在同类型缺陷时，应在对应区域合理加密测线，并将检测范围向既定检测区域两端适度延伸。

10.2.2 隧底结构层厚度检测结果应沿测线等间距提取测点解译分析，测点间距应符合下列要求：

1 施工过程检测及交（竣）工检测时，隧底结构层厚度测点间距不宜大于 3m。

2 养护检测时，隧底结构层厚度间距不宜大于 5m。

3 养护工程过程检测及养护工程交（竣）工检测时，隧底结构层厚度

测点间距不宜大于 2m。

10.3 数据处理与判定

10.3.1 数据及图像处理应按本规程第 5.4 节进行，通过分析解读图像信息判断结构分层界面、钢架设置情况、密实性及空洞、隧底结构层横断面轮廓等。

10.3.2 隧底结构层厚度判定应符合下列规定：

1 针对无仰拱结构隧道，可根据隧底围岩反射界面来判断隧底结构层厚度。

2 针对有仰拱结构隧道，隧底结构层厚度应至少包含路面层、调平层、仰拱回填层、仰拱结构层的累计厚度。当检测段落隧底围岩与初支交界无法准确判识时，可将路面至初支钢架上方整体厚度视为本段落隧底结构层厚度的判识范围。

3 隧底结构层厚度检测结果判识应考虑隧道横坡对不同测线位置设计标准值的影响。

【条文说明】一般情况下，由于隧道路面设计横坡及隧道仰拱闭环拱形结构的存在，会导致在隧道路面下不同位置测量的隧底结构层厚度之间存在数值差异（如图 10.3.1 所示）。

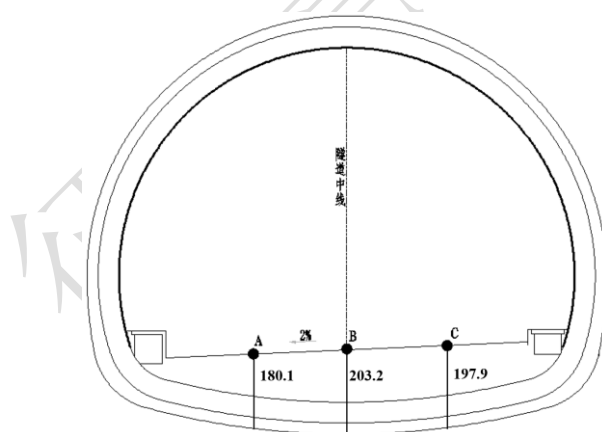


图 10.3.1 不同测线位置 (A、B、C) 隧底结构层厚度差异示意 (单位: cm)

4 应给出检测段落的隧底结构层厚度合格率，当测点位置结构层检测厚度小于设计厚度时，判定该测点为不合格测点。

5 隧底结构层厚度检测结果应保留到 1mm。

10.3.3 隧底钢架数量及分布情况判定应符合以下规定：

1 隧底钢架检测结果应根据隧底钢架设计参数对检测段落钢架设置符合性进行判定。

2 检测/评定段落应为按设计要求设置钢架的实际段落，当钢架实测根数小于设计根数时，判定该段落为钢架设置不合格段落。

3 当实测钢架榀数不少于设计榀数,但存在两榀钢架间距超过允许偏差值时($\pm 50\text{mm}$),应判定该位置钢架设置不合格。

4 钢架间距检测结果应保留到 1mm。

10.3.4 隧底结构层缺陷判识应符合以下规定:

1 隧底结构层缺陷判识:应结合隧道地质勘察资料、隧道设计文件、现场表观检测、地质雷达数据解译等结果综合判断。

2 密实性判识:当剖面中无明显异常反射信号、图像均匀连续且无明显杂乱波形时,判定为该区域无明显异常区域;当剖面中某一区域反射信号杂乱,能量增强,灰度剖面中该区域明暗变化明显,且呈细碎状、雪花状富集时,判定该区域为欠密实区域。

3 空洞判识:数据剖面中局部位置衬砌界面反射信号增强,在其下部仍有强反射界面信号,判定该区域存在空洞。

4 层间脱空判识:数据剖面中局部位置反射信号增强,交界面清晰且连续时,判定该区域存在脱空。

11 检测成果

11.1 一般规定

11.1.1 检测过程中,发现异常状况或出现数据采集信号中断时,应自异常状况或信号中断处倒退 2m 重新检测。

【条文说明】地质雷达在现场工作时应时刻关注数据变化和现场环境条件变化情况,可能由于隧道内其他物体干扰严重导致数据信噪比变差,或者电源问题导致信号变弱,或者介质发生变化使原来设置的增益参数等不合理造成信号显示异常等,这时需暂停工作,排除问题后再重新检测。

11.1.2 地质雷达原始数据存在下列情况之一时应为不合格:

- 1 干扰背景强烈导致有效波无法识别。
- 2 观测系统、记录时窗、滤波等参数设置不合理,不能满足检测任务要求。

11.1.3 地质雷达数据处理时,应对数据处理流程和参数进行检查,对处理结果进行抽查。

- 1 结合原始数据,对单个处理步骤的必要性和处理流程的合理性进行检查。
- 2 结合处理后雷达图像,对处理方法中相关处理参数的设置进行检查。
- 3 从处理结果中随机抽取部分雷达图像,对检测结果进行检查。

11.2 检测报告

11.2.1 检测报告编制宜符合下列要求:

1 检测报告应根据委托合同要求、工程特点等具体情况进行编制,内容应包括任务来源、工程概况、检测依据、检测内容、检测方法、频率、仪器设备及型号、检测结果、结论与建议。检测报告编写内容与要求见附录 F。

2 检测报告应结构严谨、内容全面、文字简练、数据真实完整、结论明确、建议合理,报告中的术语、符号、计量单位应符合国家、行业有关规范及本规程的规定。

3 检测报告编制所依据的技术资料、检测原始记录及数据应经检查确认无误后方可使用。

4 报告中应含有典型的地质雷达图像,以足以示明其判定方法、判定标准及图像质量。

5 检测结论应符合所依据的标准规范中相应检测参数的有关要求。

【条文说明】对不同检测参数,规范中对其规定值或允许偏差的要求不同,如对喷射混凝土厚度,《公路隧道施工技术规范》(JTGT 3660-2020)中施工控制值的要求如下:(1)平均厚度 $\geq$ 设计厚度;(2)60%的检查

点的厚度 $\geq$ 设计厚度；（3）最小厚度 ≥ 0.6 设计厚度且 $\geq 50\text{mm}$ 。在编制检测报告时，要逐项对照上述要求进行评定后再给出受检段落喷射混凝土厚度是否符合规范要求的结论。然而，目前检测报告中未对照规范要求给出检测结论的情况依然普遍，有的甚至对规范中没有合格率要求的检测参数进行合格率统计。

11.2.2 检测成果提交与归档应符合下列要求：

1 检测报告应经检测机构审核、批准，签字盖章齐全后，方可提交委托单位。

2 检测原始资料、检测报告应按有关规定进行归档。

【条文说明】检测原始资料包括地质雷达检测记录表、地质雷达数据处理操作记录表、现场标定记录表、电子影像文件、地质雷达检测原始数据电子文件及其处理结果电子文件。

附录 A 地质雷达核查方法

A.1 核查条件

A.1.1 每次施工作业前、每半年或地质雷达进行维修后需进行一次核查。

A.1.2 场地应尽量远离干扰源，以提高测试精度。

A.1.3 天线地面及被测物表面应平整，确保天线与被测物表面耦合。

A.1.4 探地雷达外观符合 JT/T940 的要求，标牌清晰。

A.1.5 环境温度： $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，湿度不大于 85%RH。

A.2 核查项目包括：

A.2.1 距离测量误差核查；

A.2.2 厚度测量误差核查；

A.2.3 钢筋间距误差核查。

A.3 核查标准

A.3.1 距离测量误差核查： $\leq 1\%$ ；

A.3.2 厚度测量误差核查： $\leq 10\%$ ；

A.3.3 钢筋间距误差核查： $\leq 1\%$ 。

A.4 核查方法

A.4.1 距离测量误差核查

- 1 将地质雷达各组件连接好，开启并预热；
- 2 选择平整直线路段，用全站仪量取 10m 试验长度 $L_{\text{标}}$ ，分别在起始、终止点做标记；
- 3 将测距轮中心线对准起始点标记，启动地质雷达开始检测，匀速推动测距轮向前移动，当测距轮中心线与终止点标记对准时停止，记录探地雷达输出的距离测试值 $L_{\text{测}}$ ，精确值 0.005m，由下式计算测量误差 ΔL_1 。

$$\Delta L_1 = \frac{|L_{\text{测}} - L_{\text{标}}|}{L_{\text{标}}} \times 100\% \quad (\text{A.4.1})$$

式中： ΔL_1 ——距离测量误差；

$L_{\text{测}}$ ——距离实测值（m）；

$L_{\text{标}}$ ——试验长度标准值（m）

A.4.2 厚度测量误差核查

1 试验前将实验室温度调节至 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，湿度不大于 85%RH，将试验用纯净水放置在试验空间 2h 以上。

2 如图 4.2.1 布置测试现场，将天线夹持固定在高精度支架上并使其底面水平，将面积不小于 4 倍天线底面的金属板平放在充满水的容器底，天线底面紧贴水面。

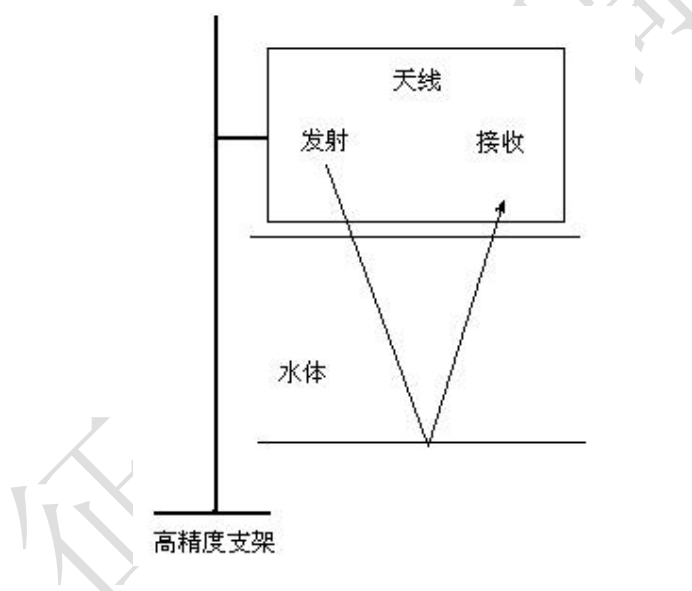


图 A.4.1 地质雷达深度测量核查示意图

3 将地质雷达各组件连接好，并开机预热 20min。

4 向容器注入试验用纯净水，深度不大于 10cm，用游标卡尺测量水深并记录 d_1 。

5 启动地质雷达用点测模式连续采集不少于 100 道数据，数据处理及解译应按本规程第 5.4 节进行，记录水体的雷达电磁波双程走时平均值 t_w ，并根据下式计算水体深度测试值 h_1 ：

$$h_1 = v_w \times \frac{t_w}{2} \quad (\text{A.4.2})$$

式中： v_w ——经过标定的电磁波在纯净水中的速度（m/ns）；

t_w ——水体的雷达电磁波双程走时平均值（ns）。

6 根据下式计算深度误差 Δh_1 ：

$$\Delta h = |h_1 - d_1| \quad (\text{A.4.3})$$

7 提升天线，增加水槽中纯净水至约 30cm 深，用游标卡尺测量水深并记录 d_2 ，天线底面恰好紧贴水面。

8 重复步骤 4.2.5，计算出水体深度的测试值 h_2 ，按照下式计算相对误差 e ：

$$e = \frac{|h_2 - d_2|}{d_2} \times 100\% \quad (\text{A.4.4})$$

A.4.3 钢筋间距误差核查

1 核查试件宜采用模筑混凝土制作而成，厚度不低于 50cm，宽度不低于 30cm，长度不低于 300cm，在距试件两侧表面 5cm 深度位置对称布置钢筋，钢筋直径为 20mm，纵向间距 20cm。

2 将地质雷达各组件连接好，并开机预热 20min。

3 选取试件单侧表面纵向居中测线采集数据，数据及图像处理应按本规程第 5.4 节进行。

4 钢筋平均间距按下式计算：

$$s_m = \frac{s}{n-1} \quad (\text{A.4.5})$$

5 由下式计算钢筋间距误差 Δs 。

$$\Delta s = \frac{|s_m - s_{\text{标}}|}{s_{\text{标}}} \times 100\% \quad (\text{A.4.6})$$

式中： $s_{\text{标}}$ ——钢筋间距标准值（mm）；

A.4.4 核查距离测量误差、厚度测量误差及钢筋间距误差是否满足核查标准的要求。

附录 B 检测工作方案内容与要求

1 任务来源

委托单位、委托检测目的及检测内容。

2 工程概况

隧道名称、隧道长度（起止桩号）、设计支护参数等。

3 检测依据

检测依据的标准规范，检测结果评定依据的标准规范及相关技术资料。

4 检测内容、方法及频率

检测段落，检测项目及检测指标，测线布置，地质雷达天线频率，检测频率，检测工作量，技术要求等。

5 人员和仪器设备投入

拟投入的人员和仪器设备类型和数量。

6 工作进度计划

检测工作进度计划安排。

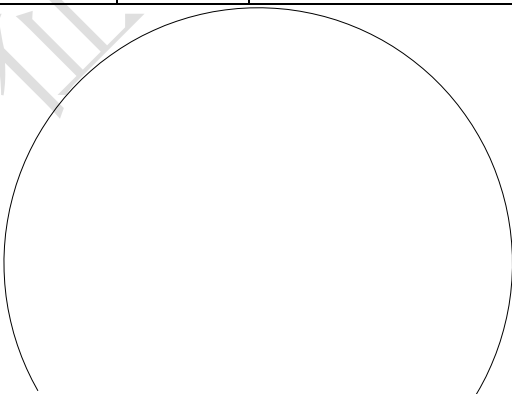
7 质量与安全保障措施

质量保证措施，检测作业安全措施，交通管制措施等。

8 需要相关方协助配合的事项

附录 C 地质雷达现场标定记录表

隧道名称				幅别	☐ 右洞/上行方向 ☐ 左洞/下行方向
设备型号（含天线频率）及编号				检测日期	
序号	桩号	部位	实测厚度 (cm)	文件名称	备注
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					

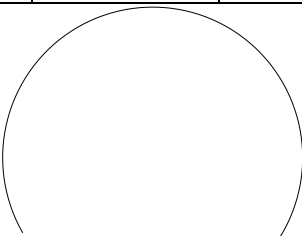


测点示意图

说明：1.左右侧说明：面对_____方向，以_____为左，以_____为右；
 2.原始数据由仪器导出。

检测：
记录：
校核：

附录 D 地质雷达现场检测记录表

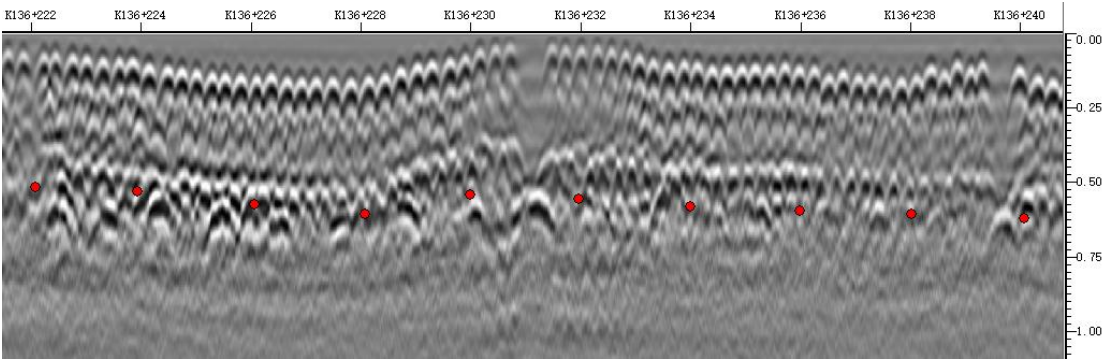
隧道名称			幅别	☐ 右洞/上行方向 ☐ 左洞/下行方向	
设备型号（含 天线频率）及 编号			检测日期	年 月 日	
文件名	测线编号	检测部位	起始桩号	终止桩号	现场情况说明
测 线 布 置 图					
说明	1.左右侧说明：面对_____方向，以_____为左，以 _____为右； 2.原始数据由仪器导出。				

检测：

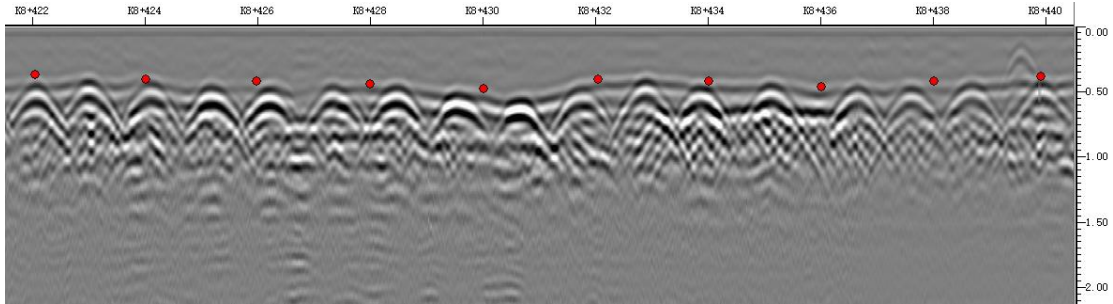
记录：

校核：

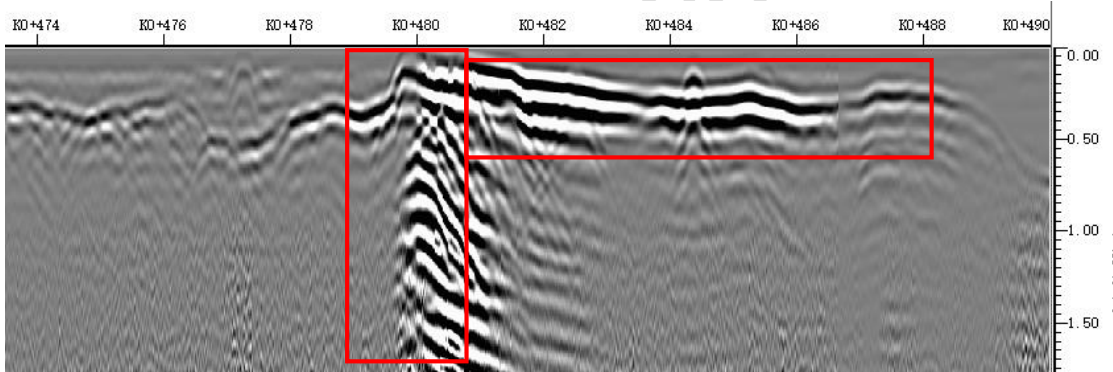
附录 E 衬砌结构典型地质雷达图像



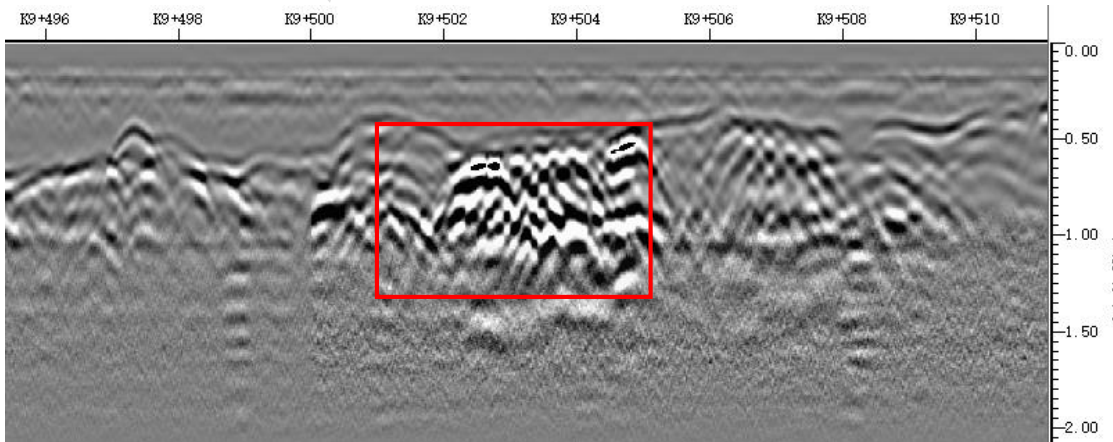
附录 F-1 钢筋混凝土二衬厚度拾取（2m 抽检间距）



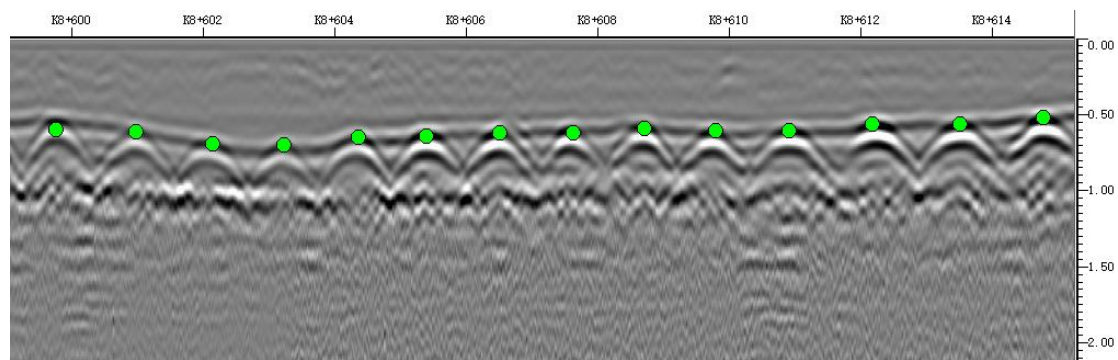
附录 F-2 素混凝土二衬厚度拾取（2m 抽检间距）



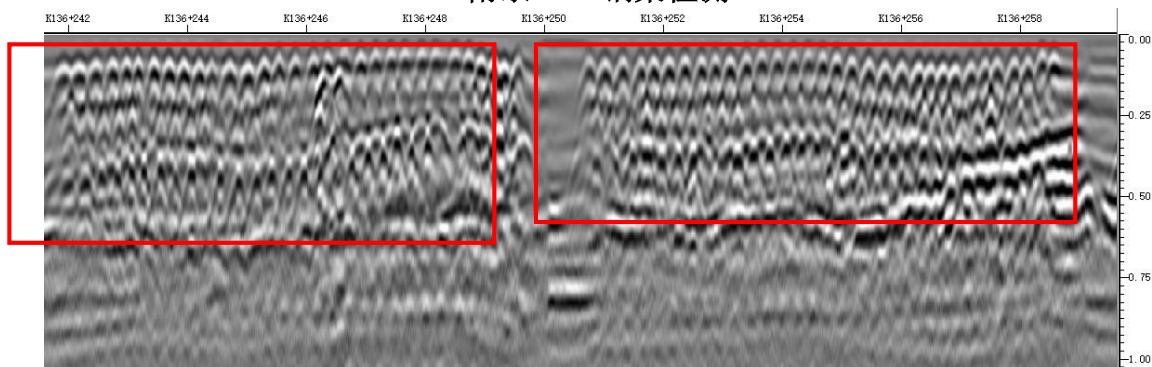
附录 F-3 二衬背后空洞、脱空



附录 F-4 二衬背后不密实



附录 F-5 钢架检测



附录 F-6 双层钢筋检测

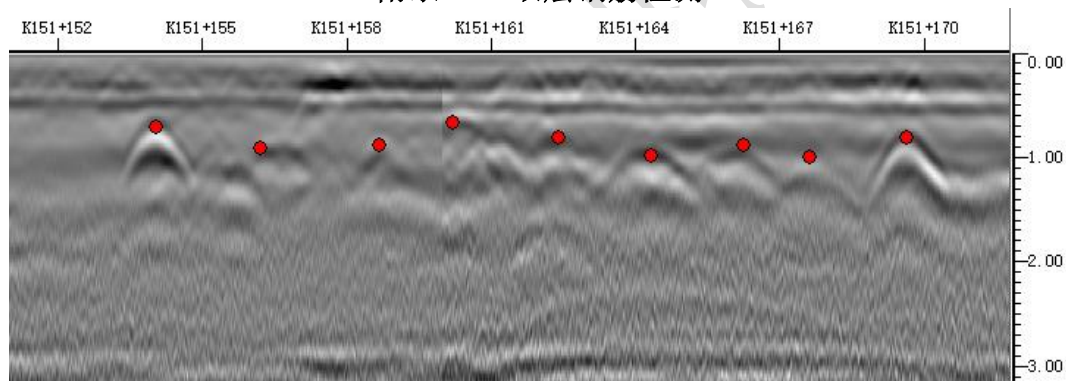


图 F-7 隧底结构层厚度典型地质雷达图像（1）

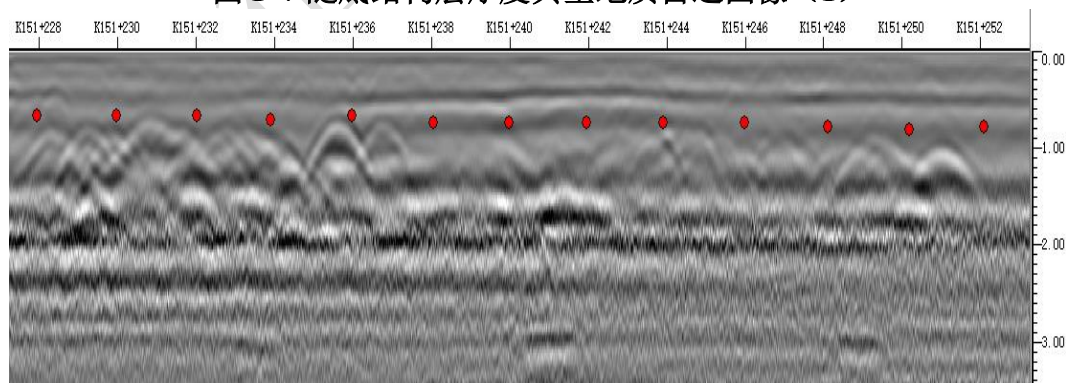


图 F-8 隧底结构层厚度典型地质雷达图像（2）

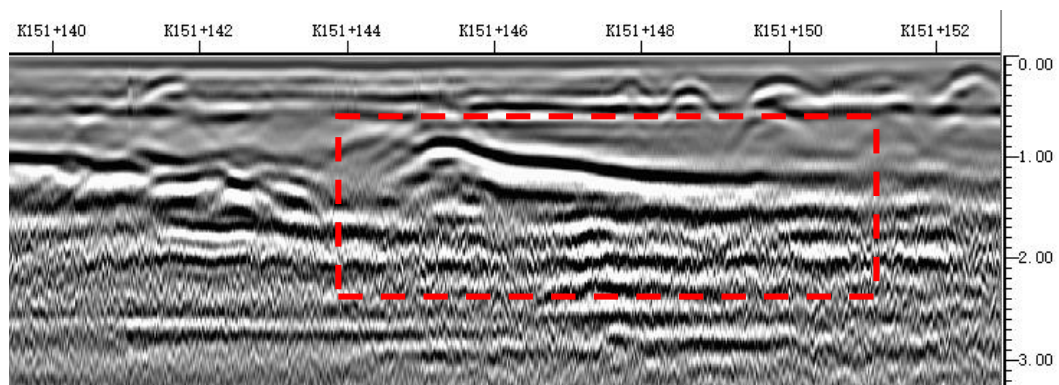


图 F-9 隧底结构层层间脱空典型地质雷达图像

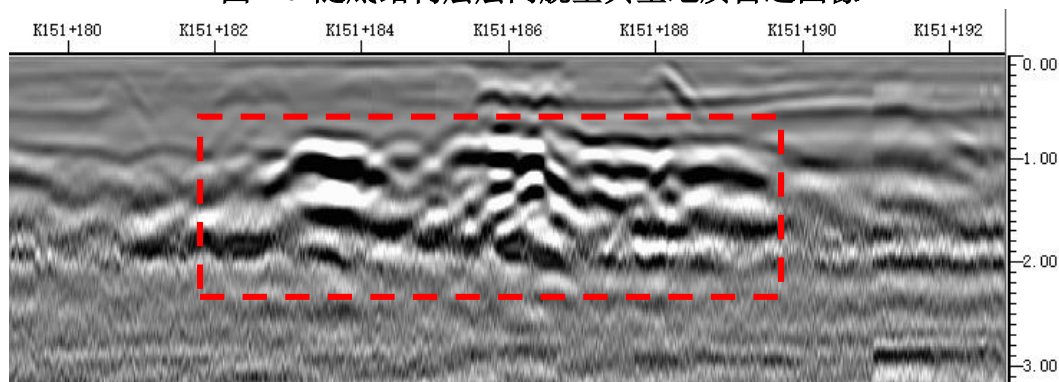


图 F-10 隧底结构层局部破碎典型地质雷达图像（1）

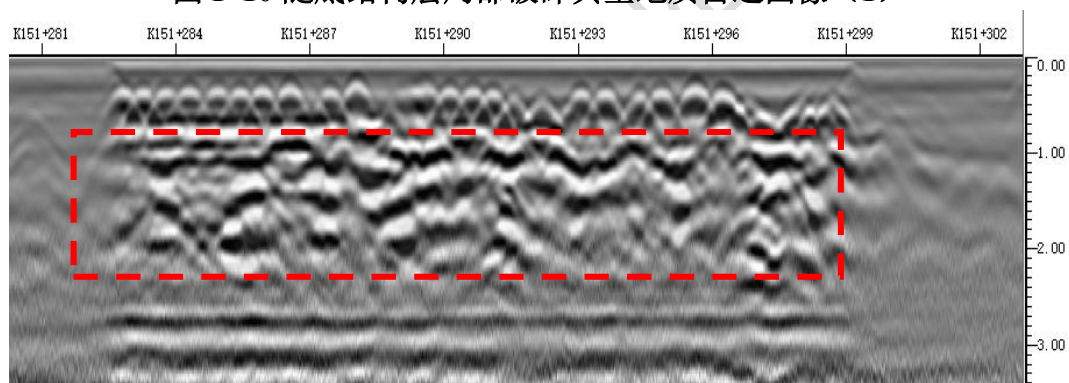


图 F-11 隧底结构层局部破碎典型地质雷达图像（2）

附录 F 检测报告编写内容与要求

1 任务来源

（包括委托单位、委托检测内容及检测时间等。）

2 工程概况

（包括隧道名称、设计技术标准、工程地质水文地质条件、隧道长度（起止桩号）、设计参数、建成时间、养护概况或病害发展情况（对养护检测）等。）

3 检测依据

（包括：（1）检测依据：与检测参数相对应的受控标准规范；（2）评定依据：标准规范、设计文件、合同文件等。）

例：

3.1 检测依据

- （1）《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTGF80/1-2017）；
- （2）《公路隧道施工技术规范》（JTGT 3660-2020）；
- （3）《铁路隧道衬砌质量无损检测规程》（TB 10223-2004）。

3.2 评定依据

- （1）《公路隧道施工技术规范》（JTGT 3660-2020）；
- （2）隧道施工图设计文件。

4 检测内容与方法

（包括检测区段、检测内容、检测方法、检测频率、测线布置、检测工作量等。）

例：

4.1 检测内容

××隧道上行方向××段落专项检测内容见表 4.1-2。

表 4.1-2 ××隧道专项检测内容

序号	检测项目	检测指标
1	初期支护	初支钢架间距
2	二次衬砌	二次衬砌厚度、缺陷、钢筋设置情况
3	隧底结构层	隧底结构层厚度、缺陷情况

4.2 检测方法

根据《公路工程质量检验评定 标准 第一册 土建工程》（JTGF80/1-2017）的要求，结合××隧道的具体情况，本次检测所采用的检测方法及抽检方案详见 4.2-1。

表 4.2-1 ××隧道专项检测方案

序号	检测指标	抽检方案
1	初支钢架间距	采用地质雷达 400MHz 天线，在隧道拱顶、拱腰、边墙共设置 5 条测线。
2	二衬厚度、缺陷、钢筋设置情况	采用地质雷达 600MHz 天线，在隧道拱顶、拱腰、边墙共设置 5 条测线。确认检测段落二次衬砌厚度、内部及背后缺陷、钢筋设置情况。
3	隧底结构层	采用地质雷达 200MHz 天线，在隧道路面共布设 3 条测线，分析推定检测段落隧底仰拱结构层厚度及现状。

（1）地质雷达检测初支钢架间距、二衬厚度、衬砌内部缺陷、二衬钢筋设置情况共布置 5 条测线，分别位于隧道拱顶、左右拱腰及左右边墙位置，布置情况如图 4.2-1 所示，测线对应关系见表 4.2-2。

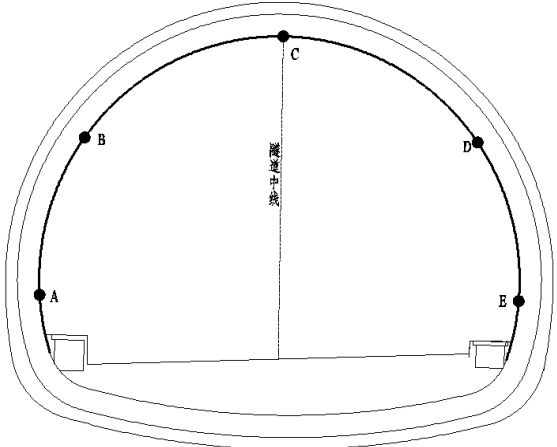


图 4.2-1 初支及二衬测线布置图

表 4.2-2 测线代码与位置对应关系

序号	测线代码	测线位置
1	A	左边墙
2	B	左拱腰
3	C	拱顶
4	D	右拱腰
5	E	右边墙

（2）地质雷达检测隧底结构层情况共布置 3 条测线，分别位于行车道中央和隧道中线位置，布置情况如图 4.2-2 所示，测线对应关系见表 4.2-3。

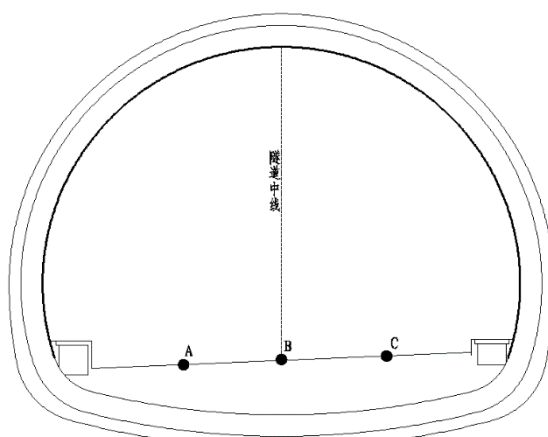


图 4.2-2 隧底结构层测线布置图

表 4.2-3 测线代码与位置对应关系

测线代码	检测部位	测线位置
A	隧底结构层	左行车道中线
B	隧底结构层	隧道中线
C	隧底结构层	右行车道中线

5 检测结果

（包括构件编号规则、各项内容具体检测结果）

例：

5.1 初支钢架间距检测结果

根据××单位提供的检测段落衬砌结构设计参数表（见附录），检测段落中，设置钢架的段落为××，具体检查结果见表 5.2-1。典型雷达图像见图 5.2-1。

表 5.1-1 ××隧道检测段落钢架设置情况

序号	检测段落	衬砌类型	设计参数	钢架间距	平均偏差
1	...	...	...	钢架数量××榀，平均间距××，最小间距××，最大间距××	××

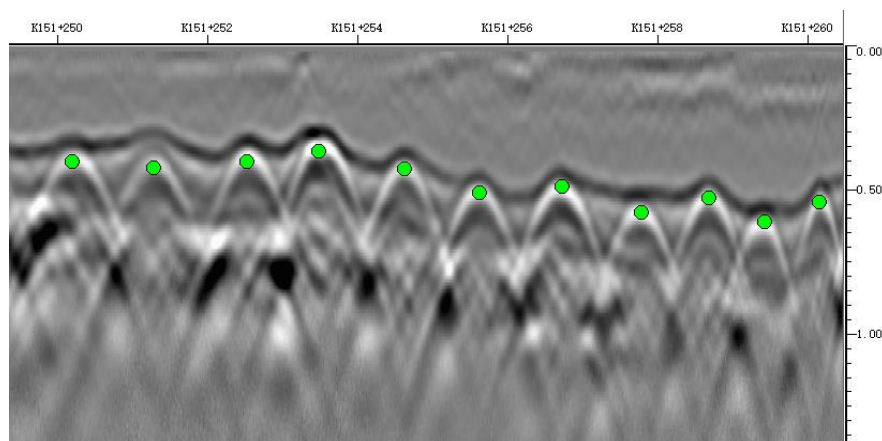


图 5.1-1 钢架设置情况

5.2 二次衬砌厚度检测结果

采用地质雷达对××隧道××段落二次衬砌厚度进行连续扫描检测，抽检间距为 2m。根据××单位提供的检测段落衬砌结构设计参数表（见附录），统计二次衬砌厚度检测结果。

按照《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》（JTG F80/1-2017）第 10.14.2 条关于衬砌厚度的评定规定：90%检查点的厚度 $\geq$ 设计厚度，且最小厚度 ≥ 0.5 设计厚度，××隧道上行方向 YK151+250~YK151+400 段落内共抽检测点××个，其中合格点数××个，不合格点数××个，合格率为××%，检测段落内有/无小于设计厚度 1/2 的测点。具体统计结果见表 5.2-1。

表 5.2-1 ××隧道检测段落二次衬砌厚度实测结果统计表

序号	里程桩号	设计厚度 (mm)	实测厚度 (mm)				
			左边墙	左拱腰	拱顶	右拱腰	右边墙
1	...	...	...	...	...	...	...
2	...	...	...	...	...	...	...
3	...	...	...	...	...	...	...
4	...	...	...	...	...	...	...

5.3 衬砌内部及背后缺陷

通过分析检测段落地质雷达检测数据，发现测线位置附近二次衬砌内部及背后共存在缺陷××处，其中脱空××处，空洞××处，不密实××处，统计结果见表 5.3-1，典型缺陷雷达图像见图 5.3-1。

表 5.3-1 ××隧道检测段落衬砌内部及背后缺陷统计表

序号	起讫桩号	测线位置	缺陷类型	缺陷长度 (m)	缺陷范围 (cm)
1	...	...	...	...	...
2	...	...	...	...	...

序号	起讫桩号	测线位置	缺陷类型	缺陷长度（m）	缺陷范围（cm）
3	...	...	...	...	...
4	...	...	...	...	...

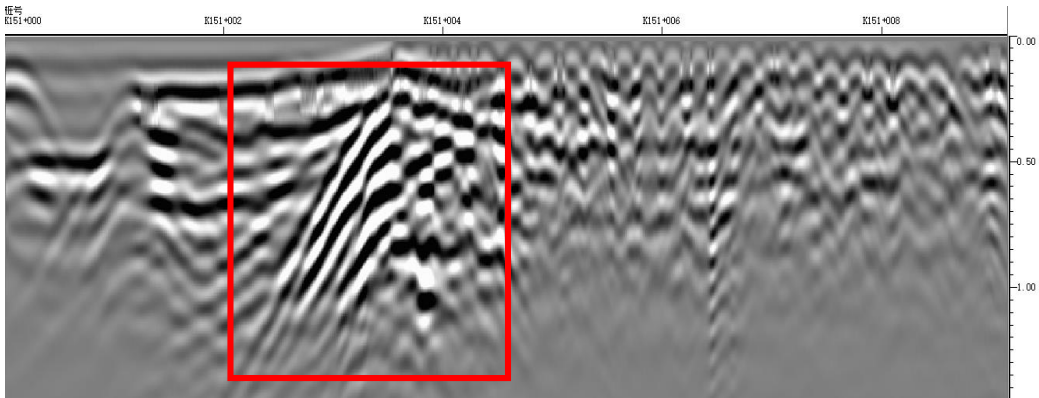


图 5.3-1 二衬空洞

5.4 二衬钢筋设置情况

根据××单位提供的检测段落衬砌结构设计参数表（见附录），检测段落中，二次衬砌内设置钢筋的段落为××，具体检查结果见表 5.4-1。

表 5.4-1 ××隧道检测段落二衬钢筋设置情况

序号	检测段落	衬砌类型	设计参数	二衬钢筋设置情况
1	...	...	...	说明：主要说明各检测段落二衬钢筋设置情况，如：是否设置钢筋、是否按设计要求设置双层钢筋、钢筋设置间距是否符合设计要求等。
2	...	...	...	

5.5 隧底结构层厚度

采用地质雷达对××隧道××段隧底结构层进行连续扫描检测，按 2m 抽检间距统计隧底结构层厚度。检测结果表明，隧底结构层厚度抽检点数共××个，其中合格点数××个，不合格点数××个，合格率为××%，统计结果详见表 5.5-1。

表 5.5-1 ××隧道检测段落隧底结构层厚度实测结果统计表

序号	里程桩号	衬砌类型	测线代码					
			A		B		C	
			设计厚度（cm）	实测厚度（cm）	设计厚度（cm）	实测厚度（cm）	设计厚度（cm）	实测厚度（cm）
1	...	...	...	...	...	...	...	...

序号	里程桩号	衬砌类型	测线代码					
			A		B		C	
			设计厚度 (cm)	实测厚度 (cm)	设计厚度 (cm)	实测厚度 (cm)	设计厚度 (cm)	实测厚度 (cm)
2	...	...	...	...	...	...	...	...
3	...	...	...	...	...	...	...	...
4	...	...	...	...	...	...	...	...

5.6 隧底结构层缺陷

通过分析检测段落地质雷达检测数据，发现隧底结构层部分位置存在××（结构层层间脱空、局部破碎、赋水等）等情况。其中层间脱空××处，局部破碎××处，赋水××处。统计结果详见表 5.6-1，典型缺陷图像见图 5.6-1。

表 5.6-1 ××隧道检测段落隧底结构层缺陷统计表

序号	起讫桩号	测线位置	缺陷类型	缺陷长度（m）	缺陷范围（cm）
1	...	...	...	...	...
2	...	...	...	...	...
3	...	...	...	...	...
4	...	...	...	...	...

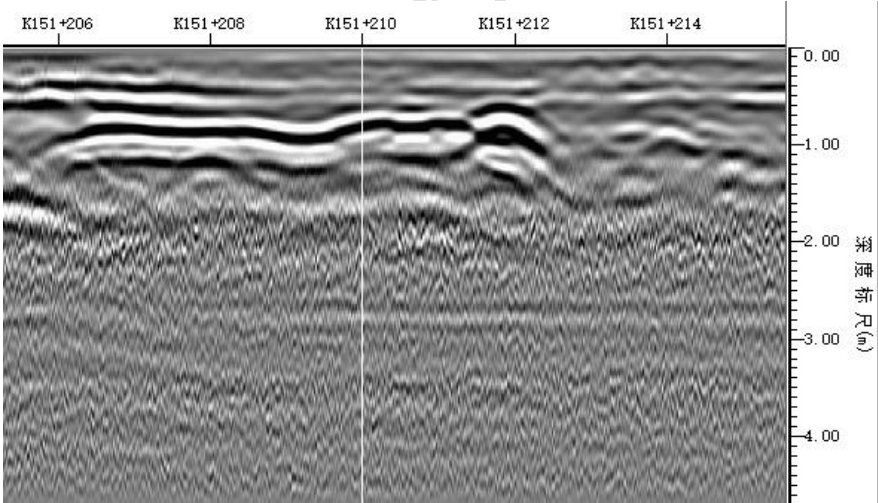


图 5.6-1 隧底结构层层间脱空

6 结论与建议

（包括对本次检测过程中发现主要问题的汇总、分析及养护建议等。）

6.1 结论

（综合系统阐述本次检测过程中各项检查内容发现的问题）

6.2 建议

（根据检测结果，提出对应问题的整改措施及合理的养护建议）

附录

（包括检测过程中投入的主要仪器设备以及必要的文件及图表（含衬砌参数表）等）

征求意见稿