

UDC

中华人民共和国行业标准

**TB**

**TB 10223—2004**  
**J 341—2004**

P

# 铁路隧道衬砌质量无损检测规程

Code for undestructive detecting  
of railway tunnel lining

2004-03-09 发布

2004-04-01 实施

中华人民共和国铁道部 发布

中华人民共和国行业标准

铁路隧道衬砌质量无损检测规程

Code for undestructive detecting  
of railway tunnel lining

TB 10223—2004

J 341—2004

主编单位：中国铁路工程总公司

批准部门：中华人民共和国铁道部

施行日期：2004年4月1日

中国铁道出版社

2004年·北京

# 关于发布《铁路工程土工试验规程》等5项 铁路工程建设标准的通知

铁建设函〔2004〕121号

《铁路工程土工试验规程》(TB 10102—2004)、《铁路工程水文地质勘察规程》(TB 10049—2004)、《铁路工程物理勘探规程》(TB 10013—2004)、《铁路隧道衬砌质量无损检测规程》(TB 10223—2004)及《铁路工程结构混凝土强度检测规程》(TB 10426—2004)等5项铁路工程建设标准,经审查现予发布,自2004年4月1日起施行。原《铁路工程土工试验方法》(TBJ 102—87,含1996年局部修订版)、《填土密度湿度核子仪测试规程》(TB/T 10217—96)、《铁路供水水文地质勘测规则》(TBJ 15—96)、《铁路工程水文地质勘测规范》(TB 10049—96)、《铁路工程物理勘探规程》(TB 10013—98)同时废止。

以上标准由铁道部建设管理司负责解释,由中国铁道出版社和铁路工程技术标准所组织出版发行。

中华人民共和国铁道部

二〇〇四年三月九日

## 前 言

本规程是根据《关于印发 2002 年铁路工程建设规范、定额、标准设计编制计划的通知》(铁建设〔2002〕26 号)的要求编制而成的。

本规程内容包括：总则、术语和符号、基本规定、地质雷达法、声波法和无损检测质量的检查及评定等 6 章，另有 1 个附录。

本规程以黑体字标志的条文为强制性条文，必须严格执行。

本规程系首次编制，在执行过程中，希望各单位结合工程实践，认真总结经验，积累资料。如发现需要修改和补充之处，请及时将意见及有关资料寄交中国铁路工程总公司（北京市丰台区莲花池南里 26 号，邮政编码：100055），并抄送铁路工程技术标准所（北京市海淀区羊坊店路甲 8 号，邮政编码：100038），供今后修订时参考。

本规程由铁道部建设管理司负责解释。

本规程主编单位：中国铁路工程总公司。

本规程参编单位：中铁地质物探试验研究中心、中铁西南科学研究院。

本规程主要起草人：刘成军、陈唯一、何振宁、李海明、刘玉乾、王洁、潘瑞林、方青利、张宇、回孝诚、周朝征、粟健、吴晓军。

# 目 次

1 总 则 .....	1
2 术语和符号 .....	2
2.1 术 语 .....	2
2.2 符 号 .....	3
3 基本规定 .....	4
4 地质雷达法 .....	5
4.1 一般规定 .....	5
4.2 现场检测 .....	5
4.3 数据处理与解释 .....	8
5 声 波 法.....	10
5.1 一般规定.....	10
5.2 现场检测.....	11
5.3 数据处理及计算.....	12
5.4 判释与推定.....	13
6 无损检测质量的检查及评定.....	15
附录 A 无损检测记录表 .....	16
本规程用词说明 .....	21
《铁路隧道衬砌质量无损检测规程》条文说明.....	22

# 1 总 则

**1.0.1** 为统一铁路隧道衬砌质量无损检测的技术要求，规范检测行为，提高检测质量，制定本规程。

**1.0.2** 本规程适用于铁路隧道衬砌施工过程的质量控制和工程验收的质量无损检测，检测内容包括衬砌的厚度、强度、背后回填密实度和内部缺陷。

**1.0.3** 本规程地质雷达法和声波法可根据不同的检测内容和要求选用。

**1.0.4** 从事铁路隧道衬砌质量无损检测的单位及人员应具备相应的资质、资格。

**1.0.5** 铁路隧道衬砌质量无损检测除应符合本规程外，尚应符合国家现行的有关强制性标准的规定。

## 2 术语和符号

### 2.1 术 语

#### 2.1.1 无损检测 undestructive detection

无破损性检测。

#### 2.1.2 地质雷达法 ground penetrating radar method

利用介质对电磁波的反射特性,对介质内部的构造和缺陷(或其他不均匀体)进行探测的方法。

#### 2.1.3 声波法 acoustical wave method

利用声波在介质中的传播特性及有关参数,对介质特征和内部的构造与缺陷进行探测的方法。

#### 2.1.4 介电常数 dielectric constant

在有外电场作用时,物质储存电荷能力的量度。是一个点上电位移和电场强度的比值。

#### 2.1.5 相对介电常数 relative dielectric constant

介质相对于真空的介电常数。

#### 2.1.6 中心频率 center frequency

某频率范围的中间频率。

#### 2.1.7 采样率 sample rate

每个采样周期的采样点数。

#### 2.1.8 采样间隔 sample interval

相邻采样点间的时间间隔。

#### 2.1.9 测量时窗 measurement time window

信号采集的时间范围。

#### 2.1.10 电磁波速 velocity of electromagnetic wave

电磁波在介质中的传播速度。

### 2.1.11 初至 first arrival of acoustical wave

激发时，在某测点观测到的第一个波到达的时间。

### 2.1.12 有效异常 effective anomaly

检测目标体产生的异常。

### 2.1.13 干扰异常 interference anomaly

检测目标体以外的其他因素（或目标体）引起的异常。

### 2.1.14 时域 time field

介质内某质点以时间为变量的振幅、相位函数，即时间波形。

### 2.1.15 频域 frequency field

介质内某质点以频率为变量的振幅、相位函数，即频率、相位谱。

## 2.2 符 号

$\epsilon_r$ ——相对介电常数

$t$ ——时间

$d$ ——检测和标定目标体的厚度（或距离）

$V$ ——电磁波速

$s$ ——采样率

$f$ ——天线中心频率

$V_p$ ——衬砌混凝土的纵波速度

$\Delta f$ ——反射面在频域中的对应频差

C25——混凝土强度等级，即保证率为 95% 的混凝土强度标准值（25 MPa）

### 3 基本规定

**3.0.1** 检测仪器应按规定定期检查、标定和保养。

**3.0.2** 检测仪器应具有防尘、防潮、防震性能，并应满足现场温度和湿度环境的要求。

**3.0.3** 检测前的准备工作应符合下列要求：

1 收集隧道工程地质资料、施工图、设计变更资料和施工记录；

2 制定检测计划，选定技术参数；

3 进行现场调查，做好测量里程标记。

**3.0.4** 检测报告应符合下列规定：

1 检测报告应准确、完整，数据应真实、齐全。内容应包括：检测项目、检测方法、采用的仪器和设备、工作布置和工作量、检测数量、抽验地段及结果、资料处理和解释、结论。

2 检测报告所附的资料表和成果图件应符合本规程附录 A 要求，内容需包括：

1) 测网布置平面图，含测线的位置、方向和里程等；

2) 衬砌厚度及回填纵剖面图；

3) 衬砌厚度检测结果、衬砌混凝土强度等级检测结果、衬砌背后回填情况统计、钢架和钢筋分布及衬砌质量汇总等资料表。

**3.0.5** 检测时应遵守有关安全规定，配备必要的安全防护人员及设备。

## 4 地质雷达法

### 4.1 一般规定

4.1.1 地质雷达法适用于检测衬砌厚度、衬砌背后的回填密实度和衬砌内部钢架、钢筋等分布。

4.1.2 地质雷达主机技术指标应符合下列要求：

- 1 系统增益不低于 150 dB；
- 2 信噪比不低于 60 dB；
- 3 模/数转换不低于 16 位；
- 4 信号迭加次数可选择；
- 5 采样间隔一般不大于 0.5 ns；
- 6 实时滤波功能可选择；
- 7 具有点测与连续测量功能；
- 8 具有手动或自动位置标记功能；
- 9 具有现场数据处理功能。

4.1.3 地质雷达天线可采用不同频率的天线组合，技术指标应符合下列要求：

- 1 具有屏蔽功能；
- 2 最大探测深度应大于 2 m；
- 3 垂直分辨率应高于 2 cm。

### 4.2 现场检测

4.2.1 测线布置应符合下列规定：

1 隧道施工过程中质量检测应以纵向布线为主，横向布线为辅。纵向布线的位置应在隧道拱顶、左右拱腰、左右边墙和隧底各布 1 条；横向布线可按检测内容和要求布设线距，一般情况

线距 8~12 m; 采用点测时每断面不少于 6 个点。检测中发现不合格地段应加密测线或测点。

2 隧道竣工验收时质量检测应纵向布线, 必要时可横向布线。纵向布线的位置应在隧道拱顶、左右拱腰和左右边墙各布 1 条; 横向布线线距 8~12 m; 采用点测时每断面不少于 5 个点。需确定回填空洞规模和范围时, 应加密测线或测点。

3 三线隧道应在隧道拱顶部位增加 2 条测线。

4 测线每 5~10 m 应有一里程标记。

#### 4.2.2 介质参数标定应符合下列要求:

1 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, 且每座隧道应不少于 1 处, 每处实测不少于 3 次, 取平均值为该隧道的介电常数或电磁波速。当隧道长度大于 3 km、衬砌材料或含水量变化较大时, 应适当增加标定点数。

2 标定可采用下列方法:

- 1) 在已知厚度部位或材料与隧道相同的其他预制件上测量;
- 2) 在洞口或洞内避车洞处使用双天线直达波法测量;
- 3) 钻孔实测。

3 求取参数时应具备以下条件:

- 1) 标定目标体的厚度一般不小于 15 cm, 且厚度已知;
- 2) 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:

$$\epsilon_r = \left( \frac{0.3t}{2d} \right)^2 \quad (4.2.2-1)$$

$$v = \frac{2d}{t} \times 10^9 \quad (4.2.2-2)$$

式中  $\epsilon_r$ ——相对介电常数;

$v$ ——电磁波速 (m/s);

$t$ ——双程旅行时间 (ns);

$d$ ——标定目标体厚度或距离 (m)。

#### 4.2.3 测量时窗由下式确定：

$$\Delta T = \frac{2d \sqrt{\epsilon_r}}{0.3} \cdot \alpha \quad (4.2.3)$$

式中  $\Delta T$ ——时窗长度 (ns)；

$\alpha$ ——时窗调整系数，一般取 1.5~2.0；

其他参数意义同式 (4.2.2—1)。

#### 4.2.4 扫描样点数由下式确定：

$$S = 2 \cdot \Delta T \cdot f \cdot K \times 10^{-3} \quad (4.2.4)$$

式中  $S$ ——扫描样点数；

$\Delta T$ ——时窗长度 (ns)；

$f$ ——天线中心频率 (MHz)；

$K$ ——系数，一般取 6~10。

4.2.5 纵向布线应采用连续测量方式，扫描速度不得小于 40 道 (线)/s；特殊地段或条件不允许时可采用点测方式，测量点距不得大于 20 cm。

#### 4.2.6 检测工作应符合下列要求：

1 测量前应检查主机、天线以及运行设备，使之均处于正常状态；

2 测量时应确保天线与衬砌表面密贴（空气耦合天线除外）；

3 检测天线应移动平稳、速度均匀，移动速度宜为 3~5 km/h；

4 记录应包括记录测线号、方向、标记间隔以及天线类型等；

5 当需要分段测量时，相邻测量段接头重复长度不应小于 1 m；

6 应随时记录可能对测量产生电磁影响的物体（如渗水、电缆、铁架等）及其位置；

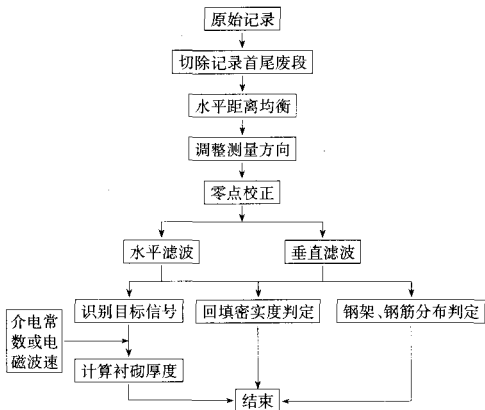
7 应准确标记测量位置。

### 4.3 数据处理与解释

4.3.1 原始数据处理前应回放检验，数据记录应完整、信号清晰，里程标记准确。不合格的原始数据不得进行处理与解释。

4.3.2 数据处理与解释软件应使用正式认证的软件或经鉴定合格的软件。

4.3.3 数据处理与解释可采用下列流程：



4.3.4 数据处理应符合下列规定：

- 1 确保位置标记准确、无误；
- 2 确保信号不失真，有利于提高信噪比。

4.3.5 解释工作应符合下列规定：

1 解释应在掌握测区内物性参数和衬砌结构的基础上，按由已知到未知和定性指导定量的原则进行；

2 根据现场记录，分析可能存在的干扰体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；

3 应准确读取双程旅行时的数据；

4 解释结果和成果图件应符合衬砌质量检测要求。

4.3.6 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。

4.3.7 衬砌厚度应由下式确定：

$$d = \frac{0.3t}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.3.7-1)$$

或 
$$d = \frac{1}{2}v \cdot t \cdot 10^{-9} \quad (4.3.7-2)$$

式中  $d$ ——衬砌厚度 (m)；

$\epsilon_r$ ——相对介电常数；

$t$ ——双程旅行时间 (ns)；

$v$ ——电磁波速 (m/s)。

4.3.8 衬砌背后回填密实度的主要判定特征应符合下列要求：

1 密实：信号幅度较弱，甚至没有界面反射信号；

2 不密实：衬砌界面的强反射信号同相轴呈绕射弧形，且不连续，较分散；

3 空洞：衬砌界面反射信号强，三振相明显，在其下部仍有强反射界面信号，两组信号时程差较大。

4.3.9 衬砌内部钢架、钢筋位置分布的主要判定特征应符合下列要求：

1 钢架：分散的月牙形强反射信号；

2 钢筋：连续的小双曲线形强反射信号。

## 5 声 波 法

### 5.1 一 般 规 定

5.1.1 声波法包括直达波法和反射波法，应根据不同的检测目的选用。直达波法适用于检测隧道衬砌表层混凝土质量，判定浅部的典型缺陷，在具有参照标准的前提下，可推定衬砌表层混凝土的单轴抗压强度等级；反射波法适用于检测隧道衬砌混凝土厚度、内部缺陷等。

5.1.2 声波检测仪主机技术指标应符合下列要求：

- 1 频率范围 1~100 kHz；
- 2 模/数转换精度不低于 12 位；
- 3 最高采样间隔不低于 0.2  $\mu$ s；
- 4 量程范围 0.1~5 V；
- 5 记录长度不低于 4 kB；
- 6 具有负延时和通道触发功能；
- 7 测试软件具有频谱分析功能。

5.1.3 声波激振器技术指标应符合下列要求：

- 1 压电激振器应输出 600~800 V 的脉冲电压并具有足够的稳定性；
- 2 冲击激振器应能在衬砌混凝土中激发短余振声波；
- 3 激发的声波频率范围 10~50 kHz。

5.1.4 换能器、传感器应符合下列规定：

- 1 发射换能器应为厚度振动型压电换能器，其共振频率宜为 50~100 kHz；
- 2 接收传感器应为短余振压电传感器，其共振频率宜为 50~100 kHz，工作频率应为 10~50 kHz。

## 5.2 现场检测

**5.2.1** 沿隧道里程每 8~12 m 应布置一个测试断面。无仰拱的隧道，每个断面布置 5 个测点（拱顶、左右拱腰和左右边墙各一个）；有仰拱的隧道，应在隧道底部增加 1~3 个测点。

**5.2.2** 采用直达波法检测时仪器应包括高压发生器、发射换能器、接收传感器、声波检测仪、便携计算机等。采用反射波法检测时仪器应包括冲击器、接收传感器、电荷放大器、声波检测仪、便携计算机等。

**5.2.3** 检测工作应符合下列要求：

- 1 确认检测断面里程和测点位置。
- 2 应搜集隧道衬砌混凝土龄期、配合比等相关资料。
- 3 检测点的混凝土表面应平整、清洁。换能器、传感器应通过耦合剂与混凝土表面保持紧密结合，耦合层不得夹杂泥砂或空气。

- 4 数据采集前应通过试验选择最佳的激发、接收距离及仪器工作参数，设置量程、采样速度、记录长度、触发电平、负延时数等参数。

- 5 采用直达波法时，应以测点位置为中心安装发射换能器和接收传感器并使其耦合良好。发射换能器与接收传感器之间距离误差不得大于 0.5%。测试直达波并保存到磁盘文件，重复测试 3 次。

- 6 采用反射波法时，应以测点位置为中心点在隧道衬砌表面安装 2 个接收传感器，并通过电荷放大器接至声波仪的 1、2 通道。各传感器与衬砌混凝土表面之间应耦合良好。两传感器间距宜为 0.5~1.0 m。两传感器之间距离误差不得大于 0.5%。在两传感器延长线上距离 1 通道传感器 5 cm 处激发声波，测试并确认得到清晰的直达波及反射波信号，保存到磁盘文件，重复测试 3 次。

### 5.3 数据处理及计算

5.3.1 测点衬砌混凝土纵波速度应按下式计算：

$$v_p = \frac{L}{t - t_0} \quad (5.3.1)$$

式中  $v_p$ ——纵波速度 (m/s)；

$L$ ——直达波 (纵波) 的旅行距离 (m)；

$t$ —— $(t_1 + t_2 + t_3)/3$ ，直达波 (纵波) 旅行时间的平均值 (s)；

$t_0$ ——系统延迟时间 (s)。

5.3.2 反射波时域分析应包括以下内容：

- 1 对 1 通道信号作偏移距为  $L_0 = 5 \text{ cm}$  的反射波时域分析；
- 2 当衬砌厚度或缺陷深度大于 20 cm 且倾斜较小时，对 1 通道作零偏移距分析，即点反射分析；
- 3 按反射波形态、能量、相位特征识别主要反射界面；
- 4 点反射时的界面深度按下式计算：

$$d = \frac{v_p \cdot t}{2} \quad (5.3.2)$$

式中  $d$ ——界面深度 (m)；

$t$ ——反射波到达 1 通道的时间 (s)。

5 对 2 通道信号作偏移距为  $L_0 + L$  的反射波时域分析，对 1 通道分析的对应界面作验证、偏移校正和倾斜分析等。

5.3.3 反射波频域分析应包括：

1 对信号作快速傅里叶变换 (SFFT) 分析。确认时域分析中的每一个反射界面，在频域中有对应的一组频差  $\Delta f$ 。1 通道点反射时，应满足下式：

$$\Delta f = \frac{v_p}{2 \cdot d} \quad (5.3.3)$$

2 对信号作二次快速傅里叶变换 (SFFT) 分析。确认时域分析中的每一个反射界面，在二次快速傅里叶变换中有惟一的对应

应峰值。

## 5.4 判释与推定

5.4.1 应根据衬砌混凝土强度与纵波速度关系，推定衬砌混凝土的强度等级。其强度等级标准参照体系可采用以下方法之一确认：

- 1 以设计的混凝土等级相应的波速值为标准；
- 2 以室内标准试件或同条件养护的试件的波速值为标准；
- 3 以被检测地段隧道衬砌无缺陷的完整混凝土实测波速为标准；
- 4 以区域纵波速度与混凝土强度等级关系为参考，或参照表 5.4.1。

表 5.4.1 普通混凝土纵波速度与强度等级参照表

强度等级	C15	C20	C25	C30	C35
纵波速度 $v_p$ (m/s)	2600~3000	3000~3400	3400~3800	3800~4200	4200~4500

5.4.2 衬砌混凝土浅部缺陷的判识特征应符合下列要求：

- 1 低强度混凝土：直达波形态无明显异常但速度明显偏低；
- 2 充填低速异物（如片石等）：直达波形态畸变且速度偏低；
- 3 充填高速异物（如卵石等）：直达波形态畸变且速度明显偏高。

5.4.3 衬砌混凝土厚度计算应符合下列要求：

- 1 衬砌混凝土厚度计算：

$$d = \frac{v_p \cdot t}{2} \quad (5.4.3-1)$$

式中  $d$ ——衬砌混凝土厚度 (m)；

$t$ ——衬砌界面反射波到达时间 (s)。

- 2 衬砌混凝土厚度计算值的验证应按下式进行：

$$\Delta f = \frac{v_p}{2 \cdot d} \quad (5.4.3-2)$$

式中  $\Delta f$ ——隧道界面反射波频差值；

$d$ ——衬砌混凝土厚度计算值 (m)。

**5.4.4** 反射波路径中的缺陷判识特征应符合下列要求：

**1** 衬砌与围岩接触不密实：反射波能量相对较强且与直达波同相，甚至出现多次反射；

**2** 衬砌厚度不足：直达波速度正常，只有一个反射界面，界面深度较设计值低；

**3** 衬砌内部有充填物：直达波速度正常，衬砌厚度对应的反射界面前有其他不规则反射信号；

**4** 隐伏裂纹、间隙：直达波速度正常，反射波能量强且与首波同相位。裂纹很浅时，直达波出现变异甚至出现半波缺失。

## 6 无损检测质量的检查及评定

6.0.1 采集数据检查工作应符合下列规定:

1 地质雷达法的采集数据检查应为总工作量的 5%，检查资料与被检查资料的雷达图像应具有良好的重复性、波形基本一致、异常没有明显位移。

2 声波法的采集数据检查应为总工作量的 5%，允许相对误差为  $\pm 10\%$ ，其计算公式为：

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{t_i - t}{(t_i + t)/2} \times 100\% \quad (6.0.1)$$

式中  $\delta$ ——相对误差；

$t$ ——基本观测值；

$t_i$ ——检查观测值。

6.0.2 检查资料质量评定应符合下列规定：

1 衬砌背后回填密实度和衬砌混凝土强度的检查点相对误差小于 10% 为合格，衬砌混凝土厚度的检查点相对误差小于 15% 为合格；

2 合格的检查点数量大于总检查点数量 90% 为合格。

6.0.3 当检查资料的质量不满足第 6.0.1 条和第 6.0.2 条要求时，检查工作量应增加至总工作量的 20%；仍不合格时，则整个检测工作必须重新进行。检查资料应与检测报告一起提交。



表 A—2 隧道衬砌混凝土强度等级检测结果

序号	里程范围	测点位置	龄期 (d)	纵波速度 $v_p$ (m/s)	混凝土 强度等级	设计强度值 (MPa)	备注
		拱顶					
		左边墙					
		左拱腰					
		右边墙					
		右拱腰					
		仰拱					

检测日期：\_\_\_\_\_ 检测人：\_\_\_\_\_ 复核人：\_\_\_\_\_

注：里程范围可以隧道进口为零。



表 A-4 隧道衬砌背后回填情况统计

序号	里程范围	位置	回填情况			备注
			密实	不密实	空洞	
		拱顶				
		左边墙				
		左拱腰				
		右边墙				
		右拱腰				

检测日期：\_\_\_\_\_ 检测人：\_\_\_\_\_ 复核人：\_\_\_\_\_

- 注：1 里程范围可以隧道进口为零；  
2 三线隧道可根据测线数量增加相应的栏目。



## 本规程用词说明

执行本规程条文时，对于要求严格程度的用词说明如下，以便在执行中区别对待。

(1) 表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”；

反面词采用“严禁”。

(2) 表示严格，在正常情况均应这样做的用词：

正面词采用“应”；

反面词采用“不应”或“不得”。

(3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”；

反面词采用“不宜”。

表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

# 《铁路隧道衬砌质量无损检测规程》

## 条文说明

本条文说明系对重点条文的编制依据、存在的问题以及在执行中应注意的事项等予以说明。为了减少篇幅，只列条文号，未抄录原条文。

**1.0.1** 铁路隧道衬砌是隐蔽工程，用传统的目测或钻孔对其质量进行检测有较大的局限性。应用物理勘探的方法对隧道衬砌混凝土厚度、强度及结构进行无破损性的检测，可取得快速、安全、可靠的效果，为此制定本规程。

**1.0.2** 铁路隧道的衬砌包括：喷锚衬砌、整体式衬砌、复合式衬砌、装配式衬砌、下锚段衬砌、底板和仰拱等。既有铁路隧道、公路隧道、水利工程隧道及相应各类地下洞室衬砌工程质量的无损检测可参照本规程执行。

**1.0.3** 地质雷达法和声波法有其适用范围和使用条件，应根据不同的检测对象和检测要求选用。新建工程的施工过程质量控制和竣工验收质量检测多以地质雷达法为主，抽检时做少量声波法检测。既有线隧道衬砌的表面病害检测除采用地质雷达法和声波法外，还可采用摄像检查，记录表面病害情况。检测渗水、漏水时，可采用红外线摄像。检测隧道衬砌混凝土厚度和强度时也可采用瑞雷波法。

**1.0.4** 由于进行检测的人员技术水平参差不齐，使用的仪器设备良莠不分，对检测技术和方法不熟悉，忽略隧道衬砌质量的要求，因而造成检测成果资料应用价值低，影响了无损检测的效果。因此，除制定本规程，对隧道衬砌施工过程的质量控制和竣工验收质量评定提供有效的手段外，还应选择具备规定资质的检

测单位及人员对隧道衬砌质量进行检测。

**1.0.5** 与本规程相关的技术标准有：《铁路隧道设计规范》、《铁路隧道施工规范》、《铁路隧道工程施工质量验收标准》、《铁路桥隧建筑物大修检测规则》、《铁路混凝土强度检验评定标准》、《铁路工程施工安全技术规程》、《铁路工程物理勘探规程》等。在正常情况下，混凝土质量的检查应按国家现行有关标准的规定，采用标准试块的抗压强度来检验混凝土的强度质量。

**3.0.4** 检测报告的内容还可包括：检测任务来源及要求、工程情况（包括围岩等级、衬砌设计厚度、衬砌混凝土强度等级、龄期、水泥、骨料等）及处理建议等。

根据委托单位的检测要求和内容，提供的成果图、表还可包括：衬砌等厚度图、混凝土强度等级纵剖面图、衬砌混凝土完整性图、衬砌表面病害展示图、回填空洞平面展示图和断面图。成果报告、图件和各类表格应制做成电子文档，以便归档保存。

**4.1.1** 衬砌厚度对于复合衬砌是指二次衬砌（模筑衬砌）厚度。

**4.1.3** 地质雷达天线的中心频率的选择，应既能满足分辨率的要求又能满足检测深度的要求。根据隧道衬砌设计厚度、围岩类型及检测部位的不同，天线中心频率可在 400~1 000 MHz 之间选择。

**垂直分辨率：**一般指垂直方向在空间上（或时间上）可以分辨的两个界面间的最小距离（或时间），本规程指可分辨的衬砌背后最小间隙。

**4.2.1** 纵向布置测线的目的是对隧道衬砌质量能够进行连续测量，防止遗漏。检测衬砌厚度时，6 条测线应分别布置在拱顶、左右拱腰和左右边墙和隧底。布置 4 条测线时可在拱腰或边墙各减 1 条。当被检测隧道长度小于 50 m 时，可采用横向布线。采用横向布线时，可连续测量，也可点测，但一个断面上的测点不应少于 6 个。

施工过程质量控制也可视情况随时横向布线，重点地段可纵向、横向综合布线。

**4.2.3** 时窗调整系数  $\alpha$ ：为使界面信号位于记录中部而设此系数。

**4.2.4** 采样定理：在模拟信号数字化时，为保证模拟信号不失真，需要较小的采样间隔，当信号的频率成分不大于  $f_c$  时，可选取  $\Delta T \leq \frac{1}{2 \cdot f_c}$  为采样间隔。

**4.2.5** 考虑仪器扫描速度与实测条件，每秒扫描速度不小于 40 道（线）是天线移动速度为 3~5 km/h 时的扫描速度设置值。

**4.3.8** 密实系指衬砌与围岩密贴或衬砌背后全部用填料回填，填料内无空隙。不密实系指衬砌背后全部用填料回填，但填料内空隙率较大。空洞系指衬砌背后没有或部分回填，衬砌背后有明显空隙、空腔和空洞。

**5.1.1** 本规程中的声波法，是指在衬砌混凝土表面激发并接收瞬态高频弹性波信号，通过分析直达波、反射波的时域、频域特征，进而测定隧道衬砌混凝土特性的一种物理方法。

直达波法的基本原理是，在隧道衬砌表面激发高频声波，声波沿表层传播至接收传感器，通过分析直达波速度及波形形态推定混凝土强度等级，判定衬砌浅部典型缺陷。直达波法的作用宽度和深度一般在 1/4 波长范围内。

反射波法的基本原理是，在隧道衬砌表面向混凝土内部激发高频声波，当混凝土内部存在反射界面时，声波将发生反射，通过接收分析反射波信号进而测定混凝土厚度及判定内部缺陷。反射波法也接收直达波，用于测定纵波速度并作为判识缺陷深度的计算依据。

**5.1.2** 本条规定了数字式声波仪的主要性能参数，对模拟式声波仪不适用。

**5.1.3** 压电激振器也称为内发射器，适用于直达波法，其余振较长不适用于反射波法。压电激振器的高压发生端与发射换能器间应用屏蔽线相连，线长不大于 20 m，线径不宜过细以减少线路损耗。高压发生器的稳定性应符合重复 100 次时间误差小于

1  $\mu\text{s}$  的要求。

冲击激振器亦即通道外触发器。适用于直达波法和反射波法。冲击器应具有足够小的质量，否则不能激发高频短余震声波信号，禁止使用榔头、石块等重物敲击。冲击方式应为小距离抛击。对隧道底部仰拱进行测试时，宜采用小距离自由下落的方式激发。冲击方向应与衬砌表面或冲击垫垂直，倾斜冲击容易产生假反射信号。耦合剂宜为车用黄油，隧道底部测试时也可使用清水，禁止使用高频吸收材料。

**5.1.4** 接收传感器应体积小、重量轻，以确保信号质量。不宜使用发射换能器作为接收传感器。

**5.2.1** 当同时采用地质雷达法和声波法进行检测时，或只针对重点部位和特殊地段进行检测时，测点布置方式可作相应调整。

**5.2.3** 只测定混凝土强度时，宜采用压电激振方式，可不使用电荷放大器。同时测试混凝土强度和厚度时应采用冲击激振方式并使用电荷放大器，冲击激振频率应与压电激振方式一致，以便于采用综合法推定混凝土强度等级。

声波仪的测试参数设定应满足波形清晰、不限幅、信噪比足够、衰减过程完整等基本要求。测试参数可设置为：采用速度 1~2  $\mu\text{s}$ ，记录长度 4kB，负延时数为 100 点。合理选择冲击激振方式确保接收到短余振高频声波信号。

**5.3.1** 系统延迟时间  $t_0$  用时距曲线法测定。

**5.3.2** 反射波时域分析中应注意偏移、倾斜修正。

**5.3.3** 频域中的反射界面的对应频差  $\Delta f$  不是系统主频，不能混淆。

**5.4.1** 不同地区、不同气候波速值有差异。表 5.4.1 基于中铁西南科学研究院在四川境内的内昆线等地区进行的强度与波速关系测试，并参考基桩低应变检测中的实际应用曲线。为满足强度等级标准值的 95% 保证率的要求，将波速值提高了 10%。实际测试时，应取相应强度等级对应波速范围的上限值为宜，以确保足够的保证率。

**5.4.2** 浅部缺陷指深度在  $1/4$  波长范围内，体积较大，足以使直达波发生明显改变的缺陷。浅部缺陷只能作定性判识。可采用其他方法对浅部缺陷进行验证。

**5.4.3** 厚度计算应先易后难，即先分析已知的或只有一个反射面的测点，再综合分析多反射面或反射不明显的测点。不得在反射波不清晰的情况下单独使用式（5.4.3—2）计算衬砌厚度，以免发生错误。

**5.4.4** 缺陷特征一般较复杂，应采用对比法进行识别。多缺陷时，应判定特征最明显的缺陷。

**6.0.1** 采集数据的检查是采用重复检测的方式进行，按检测总工作量的 5% 随机抽验，并在报告中纳入检查地段位置和检查结果。

**6.0.2** 资料质量的检查可采用原检测方式重复检验，也可采用其他不同的检测方法检验。需钻孔验证检查时应根据隧道衬砌是否允许等情况与委托方商定。