

中华人民共和国能源行业标准

P

NB/T 35101—2017

水电工程弹性波测试技术规程

Technical Specification for Elastic Wave Test of
Hydropower Projects

2017 – 11 – 15 发布

2018 – 03 – 01 实施

国家能源局 发布

中华人民共和国能源行业标准

水电工程弹性波测试技术规程

Technical Specification for Elastic Wave Test of
Hydropower Projects

NB/T 35101—2017

主编部门：水电水利规划设计总院

批准部门：国 家 能 源 局

施行日期：2 0 1 8 年 3 月 1 日

2018 北 京

国家能源局
公 告

2017 年 第 10 号

依据《国家能源局关于印发〈能源领域行业标准化管理办法（试行）〉及实施细则的通知》（国能局科技〔2009〕52号）有关规定，经审查，国家能源局批准《煤层气生产站场安全管理规范》等204项行业标准，其中能源标准（NB）62项、电力标准（DL）86项、石油标准（SY）56项，现予以发布。

附件：行业标准目录

国家能源局

2017 年 11 月 15 日

NB/T 35101—2017

附件：

行 业 标 准 目 录

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	批准日期	实施日期
...						
35	NB/T 35101— 2017	水电工程 弹性波测试技术 规程			2017 - 11 - 15	2018 - 03 - 01
...						

前 言

根据《国家能源局关于下达 2013 年第二批能源领域行业标准制（修）订计划的通知》（国能科技〔2013〕526 号）的要求，规程编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程的主要技术内容是：仪器设备、现场工作、数据处理与资料解释、成果报告编写。

本规程由国家能源局负责管理，由水电水利规划设计总院提出并负责日常管理，由能源行业水电勘测设计标准化技术委员会负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送水电水利规划设计总院（地址：北京市西城区六铺炕北小街 2 号，邮编：100120）。

本规程主编单位：中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

本规程参编单位：中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司

四川中水成勘院工程物探检测有限公司

中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司

中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司

中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司

本规程主要起草人员：刘 昌 李 洪 赵安宁 孙致安

薛有平 沙 椿 黄世强 杨 战

韩道林 刘 山 郭建伟 姚德兀

赵党军 王国滢 许海燕 岳军民

陈宗刚 乌 江 陈卫东 李平宏

祁增云 张建成 张明财 杨义锋

NB/T 35101—2017

任海翔 唐 力 王奶生
本规程主要审查人员：杨 建 张东升 郭义华 李文纲
王 波 邓希贵 常 伟 李广场
刘康和 李维耿 卢小林 熊永红
郭玉松 刘贵福 李仕胜

目 次

1	总则	1
2	术语	2
3	基本规定	4
3.1	应用范围和条件	4
3.2	工作流程	6
3.3	成果校审与资料归档	8
4	仪器设备	10
4.1	仪器设备技术要求	10
4.2	仪器设备使用与保养	13
4.3	仪器检查	13
5	现场工作	14
5.1	一般规定	14
5.2	表面声波法	15
5.3	单孔声波法	16
5.4	穿透声波法	18
5.5	钻孔声波全波列法	20
5.6	声波反射法	21
5.7	脉冲回波法	22
5.8	超声横波反射三维成像	24
5.9	表面地震波法	25
5.10	单孔地震波法	26
5.11	穿透地震波法	28
5.12	质点振动测试	31
5.13	地脉动测试	32
6	数据处理与资料解释	34

NB/T 35101—2017

6.1 一般规定	34
6.2 表面声波法	34
6.3 单孔声波法	36
6.4 穿透声波法	38
6.5 钻孔声波全波列法	39
6.6 声波反射法	40
6.7 脉冲回波法	41
6.8 超声横波反射三维成像	42
6.9 表面地震波法	43
6.10 单孔地震波法	44
6.11 穿透地震波法	45
6.12 质点振动测试	46
6.13 地脉动测试	47
7 成果报告编写	49
附录 A 弹性波测试方法应用表	51
附录 B 弹性波测试仪器检查	52
附录 C 基本公式	57
本规程用词说明	68
引用标准名录	69
附：条文说明	71

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms	2
3	Basic Requirement	4
3.1	Applicable Scope and Conditions	4
3.2	Workflow	6
3.3	Result Reviewing and Data Archiving	8
4	Instruments and Equipment	10
4.1	Technical Requirements of Instruments and Equipment	10
4.2	Use and Maintenance of Instruments and Equipment	13
4.3	Calibration of Instruments	13
5	Field Work	14
5.1	General Requirement	14
5.2	Surface Sonic Wave Method	15
5.3	Single Borehole Sonic Wave Method	16
5.4	Penetrating Sonic Wave Method	18
5.5	Borehole Sonic Wave Full Wavetrain Method	20
5.6	Sonic Wave Reflection Method	21
5.7	Pulse – echo Method	22
5.8	Ultrasonic Shear Wave Reflection 3D Tomography	24
5.9	Surface Seismic Wave Method	25
5.10	Single Borehole Seismic Wave Method	26
5.11	Penetrating Seismic Wave Method	28
5.12	Particle Vibration Test	31
5.13	Microtremor Test	32
6	Data Processing and Interpretation	34

NB/T 35101—2017

6.1	General Requirement	34
6.2	Surface Sonic Wave Method	34
6.3	Single Borehole Sonic Wave Method	36
6.4	Penetrating Sonic Wave Method	38
6.5	Borehole Sonic Wave Full Wavetrain Method	39
6.6	Sonic Wave Reflection Method	40
6.7	Pulse – echo Method	41
6.8	Ultrasonic Shear Wave Reflection 3D Tomography	42
6.9	Surface Seismic Wave Method	43
6.10	Single Borehole Seismic Wave Method	44
6.11	Penetrating Seismic Wave Method	45
6.12	Particle Vibration Test	46
6.13	Microtremor Test	47
7	Compilation of Results and Reports	49
Appendix A List of Elastic Wave Test Method		
	Application	51
Appendix B	Calibration of Elastic Wave Test Instruments	52
Appendix C	Basic Formula	57
Explanation of Wording in This Specification		68
List of Quoted Standards		69
Addition: Explanation of Provisions		71

1 总 则

1.0.1 为规范水电工程弹性波测试，做到方法可靠、数据准确、分析解译合理，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于水电工程弹性波测试工作。

1.0.3 水电工程弹性波测试工作，除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 弹性波测试 elastic wave test

利用弹性波的运动学和动力学原理对岩土体或混凝土进行速度、振幅、频率和相位等参数测试，用于分析和评价岩土体或混凝土物理力学特性的一种测试方法。

2.0.2 表面声波法 surface sonic wave method

在介质表面布置声发射源和接收换能器，测试介质表面声波传播特性，获取声波传播速度、振幅、频率和相位等参数的一种方法。

2.0.3 单孔声波法 single borehole sonic wave method

在孔内使用声发射源与接收换能器，测试孔壁介质声波传播特性，获取声波传播速度、振幅和频率等参数的一种方法。

2.0.4 穿透声波法 penetrating sonic wave method

在两个及以上钻孔或两观测面分别放置声发射源与接收换能器，测试孔间或观测面间介质的声波传播特性，获取声波传播速度、振幅和频率等参数的一种方法。

2.0.5 钻孔声波全波列法 borehole sonic wave full wavetrain method

在孔内或孔间放置声发射源与接收换能器，记录声波纵波、横波或斯通利波整个波列，获取声波纵波与横波的传播速度、振幅、频率和相位等参数的一种方法。

2.0.6 声波反射法 sonic wave reflection method

在介质表面呈直线布置声发射源和接收换能器，测试介质中声波反射波的传播特性，获取声波反射传播时间、振幅、频率和相位等参数的一种方法。

2.0.7 脉冲回波法 pulse - echo method

在介质表面布置声发射源和接收换能器，测试声波脉冲回波传播特性，获取脉冲回波传播时间、振幅、频率和相位等参数的一种方法。

2.0.8 超声横波反射三维成像 ultrasonic shear wave reflection 3D tomography

在混凝土表面布置阵列式传感器，激发超声横波，接收其反射波，采用合成孔径聚焦技术重建混凝土内部三维图像，探测混凝土内部缺陷的一种方法。

2.0.9 表面地震波法 surface seismic wave method

在介质表面呈直线布置震源和检波器，测试地震波传播特性，获取地震波纵波与横波传播速度、频率、振幅和相位等参数的一种方法。

2.0.10 单孔地震波法 single borehole seismic wave method

在孔内或孔旁布置震源或检波器，测试孔壁或孔周介质地震波传播特性，获取地震波纵波与横波传播速度、频率、振幅和相位等参数的一种方法。

2.0.11 穿透地震波法 penetrating seismic wave method

在两个及以上钻孔或两观测面分别布置震源和检波器，测试孔间或观测面间介质地震波传播特性，获取地震波纵波或横波传播速度、振幅、频率和相位等参数的一种方法。

2.0.12 质点振动测试 particle vibration test

在距离人工震源一定范围内布置传感器，测试质点振动特性，获取振动速度、加速度和频率等参数的一种方法。

2.0.13 地脉动测试 microtremor test

在地面或地下布置拾振器，测试天然条件下场地卓越周期特性的一种方法。

3 基本规定

3.1 应用范围和条件

3.1.1 弹性波测试应根据测试方法的探测能力、使用条件和地球物理条件，合理选用测试方法。弹性波测试方法应用宜符合本规程附录 A 及现行行业标准《水电水利工程物探规程》DL/T 5010 的有关要求。

3.1.2 弹性波测试应用范围应符合下列要求：

1 表面声波法宜用于岩体或混凝土表层声波速度测试，混凝土表部损伤层厚度及浅裂缝深度检测等。

2 单孔声波法宜用于孔内岩体或混凝土声波速度测试，岩体风化及卸荷松弛厚度、洞室松弛圈、开挖爆破影响深度、软弱夹层和岩体破碎带探测，岩体质量、混凝土质量和灌浆质量检测等。

3 穿透声波法宜用于岩体和混凝土声波速度测试，岩体风化及卸荷松弛厚度、洞室松弛圈和岩体破碎带探测，岩体质量、混凝土质量、灌浆质量、混凝土裂缝深度和混凝土结构或构件内部缺陷检测等。

4 钻孔声波全波列法宜用于孔内或孔间岩体纵波速度和横波速度测试，划分地层岩性和结构，评价地层孔隙度、渗透性等。

5 声波反射法宜用于隧洞混凝土衬砌体或混凝土面板厚度与脱空和混凝土浅部缺陷检测等。

6 脉冲回波法宜用于隧洞混凝土衬砌体或混凝土面板厚度与脱空、钢板或钢管衬砌脱空和接触灌浆质量检测等。

7 超声横波反射三维成像宜用于混凝土内部缺陷及钢筋分

布、混凝土构件厚度及脱空缺陷检测等。

8 表面地震波法宜用于地表或洞室裸露岩土体地震波纵波和横波速度测试，岩体风化厚度或深度、卸荷松弛厚度探测，岩土体质量检测等。

9 单孔地震波法宜用于孔内岩土体地震波纵波和横波速度测试，岩体风化厚度、卸荷松弛厚度和岩体破碎带探测，覆盖层分层，土的振动液化判定，建筑场地类别划分，岩体质量检测等。

10 穿透地震波法宜用于孔间或测试面间岩土体或混凝土地震波纵波和横波速度测试，岩体风化厚度或深度、卸荷松弛厚度和岩体破碎带探测，覆盖层分层，土的振动液化判定，建筑场地类别划分，岩体或混凝土质量检测。

11 质点振动测试宜用于获取爆破振动参数，监测爆破有害效应和影响程度等。

12 地脉动测试宜用于测试场地卓越周期和脉动幅值等波动传播特征。

3.1.3 弹性波测试应用条件应满足下列要求：

1 表面声波法测试介质表面应平整。混凝土表部损伤层检测时，损伤层与未损伤混凝土应有明显速度差异，且有一定的厚度；混凝土浅裂缝检测时，裂缝中应无积水或泥浆等充填物。

2 单孔声波法和钻孔声波全波列法宜在无套管、有井液的钻孔中进行。

3 穿透声波法宜在成对的、方向相同的临空面或钻孔间测试；钻孔内宜有井液耦合，有套管时，套管应与孔壁耦合良好。

4 声波反射法检测对象与周边介质应存在明显的声阻抗差异，其几何尺寸相对探测深度应有一定的规模，厚度应大于有效波波长的 $1/4$ 。

5 脉冲回波法检测对象宜为板状体，其与周边介质应存在明显的声阻抗差异，并可产生多次回波信号，厚度不宜大

于 3.0m。

6 超声横波反射三维成像测试混凝土表面应平整、无涂层，探测深度不宜大于 2.0m。

7 表面地震波法测试介质表面应较平整。

8 单孔地震波法宜在无金属套管、有井液的钻孔中进行。

9 穿透地震波法宜在成对的、相互平行的临空面、钻孔、平洞、地面与平洞间进行。钻孔内宜有井液，有套管时，套管应与孔壁耦合良好。

10 质点振动测试宜在无强烈震动干扰条件下进行。

11 地脉动测试应在场地环境安静条件下进行。

3.2 工 作 流 程

3.2.1 弹性波测试工作流程宜按图 3.2.1 进行。

3.2.2 弹性波测试任务宜通过书面形式下达，并包括工作内容、测试目的与要求、工作量和工期等。

3.2.3 资料收集与现场调查应满足下列要求：

1 应收集与测试工作有关的设计、地质、物探和施工等技术资料。

2 现场调查宜包括测区地形、地貌、地质、交通及工作条件，核对已收集的资料等。

3 当已知资料缺乏，测试条件复杂时，宜先开展试验工作。

3.2.4 弹性波测试技术方案宜包括下列内容：

1 工程概况、任务来源、测试目的、测试范围、工作内容和以往工作情况等。

2 测区地质简况或工程施工简况、地球物理条件和存在的主要问题等。

3 采用的技术标准和文件等。

4 工作方法选择、工作布置、技术措施等。

5 人员、仪器和设备等资源配置。

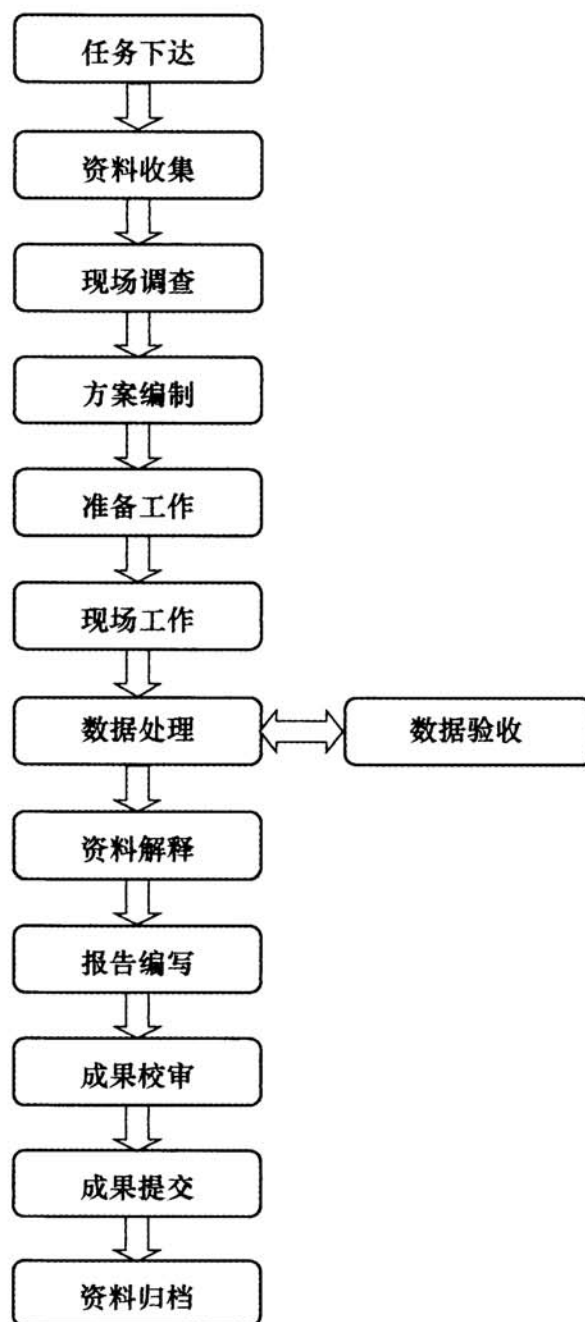


图 3.2.1 弹性波测试工作流程

- 6 进度计划与工期。
- 7 现场配合及要求。
- 8 资料提交要求。
- 9 安全生产要求。
- 10 质量控制、职业健康安全与环境保护控制措施。

3.3 成果校审与资料归档

3.3.1 弹性波测试成果资料应符合下列要求：

1 弹性波测试记录应包括仪器检查记录、原始记录、资料检查与评价记录和成果校审记录。

2 原始记录应包括班报、测试数据或记录、计算机媒体记录、仪器观测过程中的异常情况记录、测量数据或记录等。

3 班报内容宜包括工程名称、工作时间、工作地点，测区、测线、测点、钻孔（洞）等编号，仪器编号，观测数据或记录文件名、编号及计算机存储目录，观测系统主要参数、工作单位和操作人员等信息。

4 计算机媒体记录宜包括记录文件编号、目录、文件名称或序号，内容应齐全，且应与班报内容相符，工作后应及时备份。

5 记录内容应齐全、准确，字迹清晰，不应涂改、擦去或撕页。

3.3.2 成果资料检查和评价应符合下列要求：

1 现场测试人员应对全部原始记录进行自检。

2 专业技术负责人应组织人员对原始记录进行检查和评价，抽检率不应低于 30%。

3.3.3 原始资料质量评价结果应分为合格或不合格，存在下列情况之一者为不合格：

1 记录不全。

2 原始记录有涂改、擦去、撕页现象。

3 计算机媒体记录的文件名错误，文件内容不符、不全。

4 使用的仪器不符合本规程要求。

5 使用的仪器无检查记录，或检查不合格，或使用时间超过检查周期。

6 采用不符合本规程要求的观测系统。

3.3.4 弹性波测试成果应经过校核和审查，中间成果应经过校核合格后方可提供使用。提交校审的成果资料应齐全，报告应是内容完整、图表齐全、内容的形式应符合本规程的相应规定。

3.3.5 呈送校核和审查的成果资料应包括下列内容：

- 1 任务书、弹性波测试技术方案。
- 2 原始记录，检查及评价记录。
- 3 计算书，宜包括原始数据、数据校正、参数选取、计算公式、计算结果、分析和解释资料等。
- 4 成果报告、附图、附表等。
- 5 收集的设计、地质、物探和施工等有关资料。

3.3.6 成果资料校核应包括下列内容：

- 1 原始资料和质量记录。
- 2 方法选择、工作布置、工作量、技术运用的合理性。
- 3 数据处理、参数选取、计算公式与结果、分析与解释。
- 4 成果报告和成果图表。

3.3.7 成果资料审查应包括下列内容：

- 1 技术方案的执行情况，工作完成情况。
- 2 工作流程、方法选择、工作布置和技术运用的合理性。
- 3 数据处理、计算与分析 and 解释方法合理性。
- 4 成果资料的完整性和规范性。
- 5 成果报告内容、分析与解译、结论与建议。

3.3.8 成果报告提交后应及时归档，归档资料宜包括下列内容：

- 1 任务书、技术方案。
- 2 仪器设备检查记录、原始记录。
- 3 原始资料检查和评价记录、成果资料校审记录。
- 4 计算书。
- 5 成果报告及图表。
- 6 收集的设计、地质、物探和施工等相关资料。

4 仪 器 设 备

4.1 仪器设备技术要求

4.1.1 地震仪器应符合下列规定：

- 1 仪器通道数不宜少于 6 道，具有信号增强、延时、内外触发、前置放大、滤波、数据存储与传输等功能。
- 2 采样间隔可选，最小采样间隔不宜大于 0.025ms。
- 3 记录长度可选，采样点数不应少于 1024。
- 4 模数转换精度不应低于 20bit。
- 5 动态范围不应低于 96dB。
- 6 通频带不宜窄于 2Hz~2000Hz。
- 7 等效内部噪音应小于 $2.5\mu\text{V}$ 。
- 8 系统道间串音抑制比应大于 80dB。

4.1.2 地震检波器应符合下列规定：

- 1 检波器之间自然频率允许偏差为 $\pm 10\%$ ；灵敏度允许偏差为 $\pm 10\%$ ；相位差允许偏差为 $\pm 0.25\text{ms}$ ；电阻值允许偏差为 $\pm 10\%$ 。
- 2 绝缘电阻应大于 $10\text{M}\Omega$ 。
- 3 检波器应有良好的防水性能。

4.1.3 声波仪器应符合下列规定：

- 1 接收道数不应少于 2 道的非金属声波仪，具有内、外、信号、稳态触发方式，波形显示和储存功能，宜有预分析和数据通信等功能。
- 2 采样间隔可选，最小采样间隔不应大于 $0.1\mu\text{s}$ 。
- 3 采样点数可选，不应少于 1024。
- 4 模数转换精度不应低于 12bit。

5 频率响应范围宜为 10Hz~500kHz。

6 发射电压宜为 100V~1000V。

7 发射脉宽宜为 $1\mu\text{s}$ ~ $500\mu\text{s}$ 。

4.1.4 钻孔声波全波列仪器应符合下列规定：

1 接收道数不应少于 2 道的非金属声波仪，具有内、外、信号、稳态触发方式，全波列采集、显示和储存功能，宜有预分析和数据通信等功能。

2 采样间隔可选，最小采样间隔不应大于 $0.1\mu\text{s}$ 。

3 采样点数可选，不应少于 4096。

4 模数转换精度不应低于 12bit。

5 频率响应范围宜为 10Hz~500kHz。

6 发射电压宜为 100V~1000V。

7 发射脉宽宜为 $1\mu\text{s}$ ~ $500\mu\text{s}$ 。

4.1.5 超声横波反射三维成像仪器应符合下列规定：

1 具有阵列式发射和相位天线接收系统，具有采集、处理、存储等功能，可实时显示线、面、三维扫描影像功能。

2 脉冲发射频率范围为 20Hz~100kHz，工作频率范围为 50kHz~70kHz。

4.1.6 脉冲回波法仪器应符合下列规定：

1 接收道数不应少于 2 道的非金属声波仪，具有内、外、信号、稳态触发方式，脉冲回波采集、显示和储存功能，宜有时域和频域预分析功能。

2 采样间隔可选，最小采样间隔不应大于 $0.1\mu\text{s}$ 。

3 采样点数可选，不应少于 4096。

4 模数转换精度不应低于 12bit。

5 频率响应范围不宜窄于 2Hz~2kHz。

6 配备有超磁致震源或弹击钢球振源。

4.1.7 地脉动测试仪器应符合下列规定：

1 通道数不应少于 3 通道。

- 2 采样间隔可选，最小采样间隔不宜大于 0.5ms。
- 3 采样时长不宜小于 5min。
- 4 模数转换精度不宜低于 20bit。
- 5 通频带不宜窄于 0.1Hz~100Hz，信噪比应大于 80dB。
- 6 放大器串音抑制比应大于 96dB。
- 7 动态范围不应低于 96dB。

4.1.8 地脉动测试拾振器应符合下列规定：

1 拾振器频带范围应为 0.5Hz~25.0Hz，阻尼系数应为 0.65~0.70，电压敏感度不应小于 30V·s/m，最大可测位移不应小于 0.5mm。

2 拾振器自然频率允许偏差为±10%；灵敏度允许偏差为±10%；相位允许偏差为±1ms。

3 拾振器应具有良好的防尘、防潮和防水性能。

4.1.9 质点振动记录仪应符合下列规定：

1 接收道数不应少于 3 道，具有信号触发、负延时、多段自动采集和储存等功能。

2 模数转换精度不应低于 16bit。

3 采样点数可选，不应少于 8192。

4 通频带不应窄于 0.1Hz~3.0kHz。

5 采样间隔可选，最小采样间隔不应大于 0.025ms。

6 宜具有量程自适应功能，最大量程不应低于 30cm/s。

7 幅值允许偏差为±5%。

8 自动触发可手动设置触发阈值。

9 通道间隔离度不应小于 90dB。

10 信噪比不应小于 96dB。

4.1.10 质点振动测试传感器应符合下列规定：

1 速度型传感器自然频率应小于 5Hz，频带线性范围宜为 0.5Hz~500.0Hz，最大量程不应小于 30cm/s。

2 加速度型传感器频带线性范围宜为 0Hz~3000Hz。

4.2 仪器设备使用与保养

4.2.1 仪器应建立档案，内容包括仪器合格证、说明书、使用记录、维修记录、检查记录等，并由专人负责管理。

4.2.2 仪器应有标识牌，包括仪器名称、仪器型号、仪器出厂日期、仪器编号和状态标识。

4.2.3 仪器设备使用与维护应符合下列要求：

1 仪器设备应按说明书中的注意事项和要求进行操作、维护和保养。

2 仪器设备应储放在清洁、干燥、无尘、阴凉、通风、无强电磁辐射的库房内，对长期不使用的仪器应定期开机检查。

3 使用的仪器应在检查合格有效期内。

4 仪器设备在特殊环境下应做好防潮、保温等防护措施。

5 仪器出现故障应及时维修，修复后应进行检查和验收，并记录处理过程。

4.3 仪 器 检 查

4.3.1 仪器应定期检查，检查周期不宜超过一年。

4.3.2 仪器定期检查主要参数包括幅频特性和灵敏度特性，检查方法应符合本规程附录 B 的有关规定。

4.3.3 仪器期间检查应符合下列要求：

1 在一个工区开展工作之前和工作结束之后，应对所使用的仪器进行现场检查。

2 仪器在检查周期内出现使用频次过高、使用环境恶劣、运输频繁等情况时，应增加检查次数。

3 仪器在检查周期内出现故障，维修后应重新进行检查。

4.3.4 质点振动记录仪应送国家法定机构检定。

5 现场工作

5.1 一般规定

5.1.1 现场准备工作应符合下列要求：

1 现场工作开始前，应对工作区域的工作环境和工作条件进行确认，当满足测试要求后方可开展测试工作。

2 孔内测试应对钻孔内部情况进行探查。铅直钻孔宜采用直径大于测试探头、形状相仿，重量略重的材料进行探查；水平钻孔、斜度较大的钻孔或上斜孔宜使用探棍进行探查。

5.1.2 试验工作应根据测试目的和要求，选择有代表性的部位开展，试验内容宜包括观测系统选择和仪器工作参数设置等。

5.1.3 测网、测线、测点的布置和观测系统选择应满足测试目的与要求，应能反映被测物体物性特征、形态和分布范围。

5.1.4 仪器采样间隔和采样点数选择应满足测试精度要求，同一测区的仪器工作参数设置宜保持一致。

5.1.5 现场测试工作应在无强烈噪音和振动干扰的条件下进行。

5.1.6 测试孔宜为直孔，孔壁宜光滑、顺直，宜有井液耦合，孔径不宜小于 56mm。

5.1.7 观测和重复观测应符合下列要求：

1 测试人员应对测试的记录波形进行现场识别，对合格测试记录应及时存储；现场测试工作中发现记录品质明显下降时，应及时查找原因，采取相应的技术措施，改善记录品质。

2 当测试记录波形出现异常时，应进行重复观测。

5.1.8 应对测线、测点、测试孔和激发点的位置进行测量。

5.2 表面声波法

5.2.1 工作布置应符合下列规定：

1 岩体或混凝土表面声波速度测试时，测线应选择在岩体或混凝土表面较平整的部位布置，测点间距宜为 0.2m。

2 缺陷探测时，测线宜垂直缺陷走向布置，缺陷分布区域较大时，测线宜呈网状布置。

5.2.2 观测系统的选择应符合下列规定：

1 表面声波速度测试应采用一发一收或一发双收的观测方式。

2 表部缺陷层厚度检测宜选择相遇观测系统。

5.2.3 表面声波测试宜选用平面换能器，主频宜为 4kHz～100kHz。

5.2.4 仪器工作参数应符合下列规定：

1 声波速度测试时，仪器采样间隔宜为 $0.5\mu\text{s}$ ～ $1.0\mu\text{s}$ ，采样点数不宜小于 1024。

2 表部缺陷检测时，仪器采样间隔宜为 $1.0\mu\text{s}$ ～ $5.0\mu\text{s}$ ，采样点数不宜小于 1024。

3 远道增益应大于近道增益，并应保证首波初至清晰。

4 仪器屏幕应完整显示各道有效波波形。

5 仪器滤波档宜使用全通。当需要压制干扰时，应选择适宜的滤波档，同一测区或测试部位宜使用相同的滤波方式。

5.2.5 现场测试应符合下列要求：

1 换能器安置处应打磨平整、清理干净，换能器与测试面应使用耦合剂耦合，耦合层不宜夹杂泥沙或空气。

2 当测试距离较大或声波能量衰减较快时，应加大发射功率，或采用具有前置放大功能的换能器。

5.2.6 测试记录应符合下列规定：

1 记录有效波波形应完整，相位特征明显，延续不宜少于

3 个周期。

2 声波速度测试时，首波初至应清晰可辨，相位一致。

3 声波波幅测试时，应无削波。

5.2.7 存在下列情况之一者应评价为不合格记录：

1 采用一发双收测试，有一接收道工作不正常的记录。

2 干扰背景强烈，影响有效波识别或准确读取有效波旅行时的记录。

3 使用了不正确的滤波档进行滤波的记录。

4 采用相遇时距曲线观测系统其互换道工作不正常的记录。

5.3 单孔声波法

5.3.1 工作布置应符合下列规定：

1 应根据勘探或测试目的与要求布置钻孔。

2 勘探平洞测试孔宜垂直洞轴线下斜 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ ，孔距宜为 1m，孔深不宜小于 2m。

3 边坡、边墙水平孔宜水平下斜 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ ，孔深应大于松弛厚度，孔径不宜小于 76mm。

4 长观孔孔径不宜小于 76mm，孔口段应使用金属套管保护。

5.3.2 换能器应符合下列规定：

1 应使用一发双收柱状换能器。发射换能器与两接收换能器中心点之间距离宜为 30cm 和 50cm，主频宜为 10kHz ~ 60kHz。

2 换能器直径应与孔径相匹配，直径宜小于孔径 10mm ~ 40mm。孔径大于 100mm 时，宜选用直径大于 45mm 的低频换能器。

3 钻孔较深时，宜使用具有前置放大功能和防水与耐压性能良好的深孔换能器。

4 在干孔或漏水严重的孔内进行测试时，宜使用干孔换

能器。

5.3.3 仪器工作参数选择应符合下列规定：

1 声波速度测试时，仪器采样间隔宜为 $0.5\mu\text{s}\sim 1.0\mu\text{s}$ 。岩体波速较高时，应选择小采样间隔，采样点数不宜小于 1024。

2 远道增益应大于近道增益，并应保证首波初至清晰。

3 仪器屏幕应完整显示两道首波波形。

4 仪器滤波档宜使用全通。当需要压制干扰而采用滤波时，应选择适宜的滤波档，同一测区或测试孔宜使用相同的滤波方式。

5.3.4 现场测试应符合下列规定：

1 宜从孔底向孔口方向逐点测试，点距宜为 0.2m，每测试 2.0m 应核对一次孔深。

2 在同一钻孔进行多次测试或采用不同方法测试时，起始深度应一致。

3 当钻孔覆盖层段有套管时，测点进入套管底端的测段不宜少于 1.0m；有覆盖混凝土时，测点进入混凝土测段不宜少于 2.0m。

4 长观孔观测时，使用的换能器型号和参数设置应保持一致。

5 爆前与爆后测试宜在原孔进行。如不具备条件，爆后测试孔应选择爆前邻近孔，孔内各测点高程应保持相同。

5.3.5 测试记录应符合下列规定：

1 首波波形应完整，相位特征应明显，延续不宜少于 3 个周期。

2 首波初至应清晰可辨，初至波前应有平直段，零时发射干扰波应与初至波明显分离。

5.3.6 存在下列情况之一者应评价为不合格记录：

1 两接收道中有一道工作不正常的记录。

2 干扰背景强烈，影响首波的识别或准确读取首波旅行时

的记录。

3 使用了不正确的滤波档进行滤波的记录。

5.4 穿透声波法

5.4.1 工作布置应符合下列规定：

1 孔间穿透声波测试和单孔声波测试的钻孔布置宜相互兼顾，孔深宜相同。

2 勘探平洞洞壁穿透测试孔宜垂直于洞轴线下斜 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ ，孔距宜为1m，孔深不宜小于2m。

3 孔间穿透测试宜选择2个~3个孔为一组，宜呈直线或三角形布置，孔距宜为1m~3m。

4 混凝土裂缝检测时，宜呈L形布置3个检测孔，跨缝检测孔孔口连线宜垂直裂缝的走向，孔深应大于裂缝预计深度。

5 被测体临空面间穿透测试宜选择两个相互平行的观测面布置测网、测线、测点，测点或测线宜呈对称布置，并应标注清晰。

6 孔间穿透声波测试的发射孔与接收孔应在同一平面内，宜相互平行。

5.4.2 观测系统的选择应符合下列要求：

1 孔间穿透测试应采用一发一收或一发双收观测方式，多孔呈直线布置时宜选择边孔作为发射孔。宜采用水平同步、深度同步或斜同步观测方式。

2 被测体临空面间穿透测试应采用一发一收同步或扇形观测方式。

5.4.3 换能器应符合下列规定：

1 孔间穿透声波测试应使用柱状换能器，主频宜为2kHz~20kHz。

2 被测体临空面间穿透声波测试应使用平面换能器，主频宜为4kHz~100kHz。

3 接收信号较弱时，宜使用具有前置放大功能换能器。

5.4.4 仪器工作参数选择应符合下列规定：

1 声波速度测试时，采样间隔宜为 $0.5\mu\text{s}\sim 5.0\mu\text{s}$ ，采样点数不宜小于 1024。

2 声波振幅测试时，激发方式、激发能量和增益应保持一致，采样间隔宜为 $0.5\mu\text{s}\sim 5.0\mu\text{s}$ ，采样点数不宜小于 2048。

3 仪器屏幕应完整显示有效波形。

4 仪器滤波档宜使用全通。当需要压制干扰而采用滤波时，应选择适宜的滤波档，同一测区或测试孔宜使用相同的滤波方式。

5.4.5 现场测试应符合下列规定：

1 孔间穿透应测量孔口间距和孔斜，临空面间穿透应测量激发与接收点间距离。收发换能器应作零时校正。

2 孔间穿透测试宜从孔底向孔口方向逐点测试，点距宜为 0.2m，每测试 2.0m 应核对一次孔深。混凝土裂缝检测时，点距宜为 0.1m。

3 在同一钻孔进行多次测试或采用不同方法测试时，起始深度应一致。

4 在干孔或漏水严重的孔内进行测试时，宜使用干孔换能器。

5 被测体临空面间穿透声波测试时，换能器安置处应打磨平整、清理干净，换能器与测试面宜使用耦合剂耦合，耦合层不宜夹杂泥沙或空气。

6 参数对比测试应在原位进行。

7 应根据接收信号强弱，选择内发射方式、大功率超磁震源或电火花震源。

5.4.6 测试记录应符合下列规定：

1 有效波波形应完整，相位特征应明显，延续不宜少于 3 个周期。

2 初至波前应有平直段，零时发射干扰波应与初至波明显分离。

3 声波速度测试时，首波初至应清晰可辨，相位应一致。

4 声波振幅测试时，应无削波。

5.4.7 存在下列情况之一者应评价为不合格记录：

1 干扰背景强烈，影响有效波的识别或准确读取有效波旅行时的记录。

2 声波振幅测试时，有效波削波或记录长度不足的记录。

3 使用了不正确的滤波档进行滤波的记录。

5.5 钻孔声波全波列法

5.5.1 工作布置应符合下列规定：

1 应根据勘探或测试目的与要求布置钻孔。

2 孔间穿透测试，孔距不宜大于 10m。

5.5.2 观测系统的选择应符合下列要求：

1 单孔声波全波列测试应采用一发双收或双发双收观测方式。

2 孔间声波全波列测试应采用一发一收水平同步或深度同步观测方式。

5.5.3 换能器应符合下列规定：

1 孔间声波全波列测试宜选择大功率一发一收换能器。

2 单孔声波全波列测试应选择单孔长源距一发双收或双发双收换能器，长源距换能器最小收发距宜大于 1.0m。

3 换能器频带宽宜为 0.5kHz~60.0kHz。

5.5.4 震源应符合下列规定：

1 单孔声波全波列测试应选择单极子高频或偶极子低频换能器；单极子换能器主频宜为 3kHz~50kHz，偶极子换能器主频宜为 0.5kHz~5.0kHz。

2 孔间声波全波列测试激发能量不足时，宜使用大功率超

磁震源或电火花震源。

5.5.5 仪器工作参数的选择应符合下列规定：

1 单孔声波全波列测试，采样间隔不宜大于 $1.0\mu\text{s}$ ，采样点数应记录到全波列信息。

2 孔间声波全波列测试，采样间隔不宜大于 $5.0\mu\text{s}$ ，采样点数应记录到全波列信息。

3 仪器屏幕应完整显示有效波列。

5.5.6 现场测试应符合下列规定：

1 单孔声波全波列测试宜从孔底向孔口方向测试，宜以孔口为深度起始点，点距宜为 0.2m ，每测试 2.0m 应核对一次孔深。

2 孔间穿透全波列测试宜从孔底向孔口方向测试，宜以孔口为深度起始点，测点距宜为 0.5m ，每测试 5.0m 应核对一次孔深。

5.5.7 钻孔声波全波列法测试记录中纵波、横波、斯通利波的波形应清晰完整、相位特征明显、不削波。

5.5.8 存在下列情况之一者应评价为不合格记录：

1 两接收道中有一道工作不正常的记录。

2 有效波削波或记录长度不足的记录。

3 干扰背景强烈，影响有效波的识别或准确读取有效波旅行时的记录。

4 使用了不正确的滤波档进行滤波的记录。

5.6 声波反射法

5.6.1 工作布置应符合下列规定：

1 应根据测试目的与要求布置测网、测线、测点。

2 测线间距宜为 $0.5\text{m}\sim 1.0\text{m}$ ，测点间距宜为 $0.1\text{m}\sim 0.2\text{m}$ 。

3 缺陷异常区域应加密测线或布置网状测线。

5.6.2 宜采用一发一收等偏移距观测系统，偏移距不宜大

于 0.5m。

5.6.3 宜选择高灵敏度、中阻尼特性的加速度传感器，主频宜为 1kHz~10kHz。

5.6.4 仪器工作参数选择应符合下列规定：

- 1 采样间隔宜为 $0.5\mu\text{s}\sim 5.0\mu\text{s}$ ，采样点数不宜小于 1024。
- 2 增益选择应满足记录波形完整、无削波，目标体反射波明显、可辨。
- 3 仪器屏幕应完整显示有效波形。
- 4 滤波档宜使用全通，当需要压制干扰而采用滤波时，应对典型波形记录进行频谱分析后选择适宜的滤波档，同一测区或测试部位宜使用相同的滤波方式。

5.6.5 根据测试目的，宜选择超磁震源或回弹锤等窄脉冲震源。

5.6.6 工作开展之前，应选择有代表性部位进行仪器参数、触发方式、偏移距等现场试验。

5.6.7 现场工作应符合下列要求：

- 1 换能器安置处应打磨平整、清理干净，换能器与测试面应使用耦合剂耦合，耦合层不宜夹杂泥沙或空气。
- 2 同一检测单元或测区宜选择相同观测系统、仪器参数、触发方式和激发能量。

5.6.8 测试记录中波形应完整，无削波，目标体的反射波同相轴清晰、可辨、相位一致。

5.6.9 存在下列情况之一者应评价为不合格记录：

- 1 有效波削波或记录长度不足的记录。
- 2 干扰背景强烈，影响有效波识别或准确读取有效波旅行时的记录。
- 3 使用了不正确的滤波档进行滤波的记录。

5.7 脉冲回波法

5.7.1 工作布置应符合下列规定：

- 1 应根据测试目的与要求, 布置测网、测线、测点。
 - 2 测线间距宜为 0.5m~1.0m, 测点间距宜为 0.2m。
 - 3 缺陷异常区域应加密测线或布置网状测线。
- 5.7.2 宜采用一发一收等偏移距观测系统, 偏移距不宜大于 0.2m, 测点间距宜为 1 倍~2 倍的偏移距。
- 5.7.3 宜选择高灵敏度、中阻尼特性的加速度传感器, 主频宜为 1kHz~10kHz。
- 5.7.4 仪器工作参数选择应符合下列规定:
- 1 板状体厚度或缺陷测试时, 仪器采样间隔宜为 $2.0\mu\text{s}$ ~ $10.0\mu\text{s}$, 记录长度宜为 2 倍~3 倍的构件底面反射时间。
 - 2 钢管或钢板衬砌脱空缺陷和接触灌浆质量检测时, 仪器采样间隔宜为 $0.5\mu\text{s}$ ~ $5.0\mu\text{s}$, 采样点数不宜小于 1024。
 - 3 增益选择应满足记录波形完整、无削波现象, 有效波明显、可辨。
 - 4 仪器屏幕应完整显示有效波形。
 - 5 仪器滤波档宜使用全通, 当需要压制干扰而采用滤波时, 应对典型波形记录进行频谱分析后选择适宜的滤波档, 同一测区或测试部位宜使用相同的滤波档。
- 5.7.5 根据测试目的, 宜选用可激发不同频率瞬态声脉冲信号的钢球或超磁震源。
- 5.7.6 工作开展之前, 应选择有代表性部位进行仪器参数、触发方式、偏移距等现场试验。
- 5.7.7 现场工作应符合下列要求:
- 1 换能器安置处应打磨平整、清理干净, 换能器与测试面应使用耦合剂耦合, 耦合层不宜夹杂泥沙或空气。
 - 2 同一检测单元或测区宜选择相同观测系统、仪器参数、触发方式和激发能量。
- 5.7.8 测试记录波形应完整, 无削波; 频率测试或分析的记录不宜少于 3 个回波。

5.7.9 存在下列情况之一者应评价为不合格记录：

- 1 有效波削波或记录长度不足的记录。
- 2 干扰背景强烈，影响有效波识别或准确读取有效波旅行时的记录。
- 3 使用了不正确的滤波档进行滤波的记录。

5.8 超声横波反射三维成像

5.8.1 工作布置应符合下列规定：

- 1 混凝土平面或构件检测应采用网状布置，测线方向根据测试条件布置，宜垂直缺陷走向。测线间距宜为 10cm。
- 2 大面积缺陷检测宜采用剖面布置，应根据缺陷的范围和类型布置剖面，测线方向宜垂直缺陷走向。剖面间距宜为 1m~5m。
- 3 测试单元间距宜为 15cm~25cm，相邻单元应部分重合。

5.8.2 应选择干式点接触压电换能器，工作频率宜为 25kHz~85kHz，应采用由多个换能器呈纵横排列组成的阵列式发射和相位天线接收系统。

5.8.3 现场试验应符合下列规定：

- 1 应在完整混凝土区域进行波速测试，测试点不少于 5 个，取其平均值作为测试预设波速。混凝土特性发生变化时，应重新测试波速。
- 2 宜在已知埋深异常处进行探测试验，试验测试预设波速时，宜在预设波速的 10% 范围试验最佳波速。
- 3 宜根据探测深度，在已知埋深异常进行探测试验，试验选取合适的频率和测试量程。
- 4 在测试前应试验最佳增益、色标，不应出现削波现象。

5.8.4 现场测试应符合下列要求：

- 1 应在待测混凝土表面进行网格标记，测试应按照网格标记进行。

2 测试混凝土表面应平整，不平整处应打磨平整，清理干净。

3 同一测试网格和剖面应采用同一波速、频率、测试量程、增益等参数。

4 换能器与测试表面应紧密贴合。

5 在测试过程中，探测成像图出现异常特征时应进行重复测试，确定该异常非人为因素导致。

5.8.5 探测成像图应清晰，目标体或缺陷明显可辨。

5.8.6 存在下列情况之一者应评价为不合格记录：

1 波速、频率、量程设置不正确的记录。

2 干扰背景强烈，影响异常识别且通过相邻道对比无法校正的记录。

5.9 表面地震波法

5.9.1 工作布置应符合下列规定：

1 应选择表面岩体起伏不大的地段，按岩性、岩体类别或风化程度布置测线。经过断层破碎带等软弱结构面时，应单独布置测线，测线方向宜垂直其走向。

2 应沿测线布置排列，每个排列不宜少于6个检波点。

3 呈网格状布置测线时，测线间距宜为5.0m~10.0m。

5.9.2 宜选择相遇观测系统。

5.9.3 地表岩土体地震波速度测试宜使用固有频率为10Hz~40Hz的检波器。洞室岩体地震波速度测试宜使用固有频率为28Hz~100Hz的检波器。

5.9.4 宜采用锤击或落重的激发方式，触发计时宜使用锤击开关。

5.9.5 仪器参数选择应符合下列规定：

1 纵波速度测试时，采样间隔宜为0.025ms~0.050ms，采样点数不宜小于1024。

2 横波速度测试时，采样间隔宜为 0.05ms~0.10ms，采样点数不宜小于 1024。

3 仪器滤波档宜使用全通。当需要压制干扰而采用滤波时，应选择适宜的滤波档，同一测区或测试部位宜使用相同的滤波方式。

5.9.6 现场测试应符合下列规定：

1 检波器安置处应平整、无松散物，检波器应粘贴牢固。

2 排列检波点距宜为 1.0m~2.0m。沿测线连续测试时，相邻排列应重复一道。

3 纵波速度测试时，检波器最大灵敏度方向和激发方向应与测线方向一致，激发点到最近检波器的距离不宜小于 2.0m。

4 横波速度测试时，检波器最大灵敏度方向和激发方向应与测线方向垂直，激发点到最近检波器的距离宜为纵波激发点距的 2 倍，宜分别进行正反向激发。

5 信号较弱时，应在原激发点重复激振进行信号叠加，叠加次数不宜超过 5 次。

5.9.7 测试记录应符合下列要求：

1 有效波波形应完整、相位一致。

2 纵波测试记录各道首波初至应清晰。

3 横波测试记录各道横波特征应明显、无削波、同相轴连续。

5.9.8 存在下列情况之一者应评价为不合格记录：

1 不正常道数大于排列道数的 1/3，且连续分布。

2 干扰背景强烈，影响有效波识别或准确读取有效波旅行时的记录。

3 采用了不合适的滤波档的记录。

5.10 单孔地震波法

5.10.1 工作布置应符合下列规定：

1 应根据勘探或测试目的与要求布置钻孔。

2 覆盖层地震波纵波速度和横波速度测试时，钻孔孔径宜为 90mm。

5.10.2 观测系统的选择应符合下列要求：

1 孔内纵波速度测试应采用一发一收或一发多收的观测方式。

2 孔内横波速度测试宜采用地面激发，孔中接收的观测方式。

5.10.3 检波器的选择应符合下列规定：

1 孔内纵波速度测试应使用贴壁式井下检波器或检波器串。

2 孔内横波速度测试应使用贴壁式井下三分量检波器。

3 完整岩体测试宜使用固有频率为 28Hz~100Hz 的检波器；破碎岩体或土层测试宜使用固有频率为 10Hz~40Hz 的检波器。

5.10.4 震源的选择应符合下列要求：

1 纵波速度测试时，地面激发宜使用锤击或落重，孔中激发宜使用电火花震源等。

2 横波速度测试时，地面激发宜使用叩板或钉耙装置激振。

5.10.5 仪器参数的选择应符合下列规定：

1 纵波速度测试时，采样间隔宜为 0.05ms~0.10ms，采样点数不宜小于 1024。

2 横波速度测试时，采样间隔宜为 0.05ms~0.20ms，采样点数不宜小于 1024。

3 仪器滤波档宜使用全通。当需要压制干扰而采用滤波时，应选择适宜的滤波档，同一测区或测孔位宜使用相同的滤波方式。

5.10.6 现场测试应符合下列规定：

1 地震波速度测试宜从孔底开始自下而上逐点测试，点距宜为 1.0m~2.0m。宜以孔口为深度起始点，每测试 10m 应核

对一次孔深。

2 孔内放置 PVC 管护壁时, PVC 管外壁与孔壁之间的空隙应用细砂充填密实。

3 横波测试时, 激振板中心距孔口距离宜为 2.0m~4.0m, 方向宜垂直其中心点与孔口的连线, 叩板或钉耙与地面应耦合牢固。每个测点应进行正反向激发。

4 孔内接收时, 贴壁式井下检波器应贴壁良好。

5 孔中采用电火花震源激发时, 井液宜为清水, 宜提前投入适量的食盐。

6 孔口接收时, 检波器距孔口距离宜为 1.0m~2.0m。检波器应安置牢固。

7 信号较弱时, 宜加大激发能量或信号叠加, 叠加次数不宜超过 5 次。

5.10.7 测试记录应符合下列要求:

1 纵波测试记录首波波形应完整、初至清晰。

2 横波测试记录波形应完整、特征明显、无削波。

5.10.8 存在下列情况之一者应评价为不合格记录:

1 有明显延时且通过相邻道对比无法校正的记录。

2 横波波形不完整或削波的记录。

3 干扰背景强烈, 影响有效波识别或准确读取有效波旅行时的记录。

4 采用了不合适的滤波档的记录。

5.11 穿透地震波法

5.11.1 工作布置应符合下列规定:

1 根据测试目的与要求和现场条件, 应利用已有的钻孔、平洞、被测体临空面等选择穿透组合方式。

2 洞间、被测体临空面间穿透距离不宜大于 50m。

3 地面与洞间穿透测试时, 地表测线宜沿洞轴线方向布置。

4 孔间穿透纵波速度测试孔距宜为 5.0m~10.0m, 横波速度测试孔距宜为 2.0m~5.0m。孔径宜为 90mm。

5.11.2 观测系统的选择应符合下列规定:

1 洞间、洞地间或被测体临空面间穿透测试时, 应选择一发一收或一发多收观测方式。

1) 一发一收观测时, 宜选择深度同步或距离同步观测, 激发和接收点距宜为 2.0m~5.0m。

2) 一发多收观测时, 宜采用扇形观测, 接收点距宜为 2.0m~5.0m, 激发点距宜为 2.0m~10.0m。

2 孔间穿透测试时, 宜选择水平同步或深度同步观测。

5.11.3 检波器的选择应符合下列规定:

1 孔间穿透测试应使用贴壁式井下检波器。

2 横波速度测试应使用贴壁式井下三分量检波器。

3 测试岩体较完整时, 宜使用固有频率为 28Hz~100Hz 的检波器; 测试岩体较破碎或为土层时, 宜使用固有频率为 10Hz~40Hz 的检波器。

5.11.4 震源的选择应符合下列要求:

1 洞间、洞地间或临空面间穿透测试, 宜选择锤击、落重或爆炸震源。

2 孔间穿透测试宜选择超磁震源或电火花震源等。

3 孔间横波测试应选择井下剪切锤或其他可定向激发激振装置。

5.11.5 仪器参数的选择应符合下列规定:

1 孔间穿透测试, 采样间隔宜为 0.05ms~0.20ms, 采样点数不宜小于 1024。

2 洞间、洞地间、临空面间穿透测试, 采样间隔宜为 0.1ms~0.5ms, 采样点数不宜小于 2048。

3 仪器滤波档宜采用全通。当需要压制干扰而采用滤波时, 应选择适宜的滤波档, 同一测区或穿透组合位宜采用相同的滤波

方式。

5.11.6 现场测试应符合下列规定：

1 孔间穿透测试宜从孔底开始自下而上逐点测试，点距宜为 1.0m~2.0m。宜以孔口为深度起始点，每测试 10m 应核对一次孔深。

2 孔中采用电火花震源激发时，井液宜为清水，宜提前投入适量的食盐。

3 洞间、洞地间、被测体临空面间穿透测试，检波器最大灵敏度方向应与最大激发能量方向一致，安置处应清理干净，检波器应安置牢固。

4 岩面锤击激振时，激发点宜选择在较完整、坚硬的岩石上。土体锤击激振时，激发点应夯实，锤击板应与地面接触良好。

5 孔间横波测试时，激发孔和接收孔宜放置 PVC 管护壁，PVC 管与孔壁之间的空隙应用细砂充填密实。贴壁式井下检波器应贴壁良好，每个测点应分别进行正、反向激发。

6 信号较弱时，宜加大激发能量或信号叠加，叠加次数不宜超过 5 次。

7 测线的端点和拐点坐标、激发点坐标、孔口坐标和孔斜应进行测量。

5.11.7 测试记录应符合下列要求：

1 纵波测试记录首波波形应完整、初至清晰。

2 横波测试记录波形应完整、特征明显、无削波。

5.11.8 存在下列情况之一者应评价为不合格记录：

1 有明显延时且通过相邻道对比无法校正的记录。

2 剪切波波形不完整或削波记录。

3 干扰背景强烈，影响有效波识别或准确读取有效波旅行时的记录。

4 采用了不合适的滤波档的记录。

5.12 质点振动测试

5.12.1 工作布置应符合下列规定：

1 质点振动测试应根据测试目的与要求布置测点，测点应布置在靠近震源对振动敏感的建筑物或设备基础上。

2 质点振动传播规律试验场地的地形、地质条件及施工参数等宜与工程实际相符，测点至震源宜按近密远疏的对数规律布置，测点不应少于5个。

3 每个测点应按垂向、径向和切向三个方向布置传感器。

5.12.2 传感器应符合下列规定：

1 质点振动测试宜选择速度型或加速度型传感器。

2 速度型传感器自然频率应小于5Hz，频带线性范围宜为0.5Hz~500.0Hz，最大量程不应小于30cm/s；加速度型传感器频带线性范围宜为0.1Hz~3000Hz。

5.12.3 记录仪的工作参数选择应符合下列规定：

1 采样频率应大于12倍被测物理量的主振频率。

2 量程宜按被测物理量预估幅值的2倍~3倍设置，触发电平宜按量程的1%~10%设置。

3 采样长度宜大于1.5倍被测物理量的振动持续时间。

5.12.4 现场测试应符合下列规定：

1 合理选择自触发阈值，设置的量程、采样频率及记录时间等参数应满足被测物理量的要求。

2 传感器安装部位表面应清理干净，传感器与被测目标形成刚性连接。

3 径向传感器应水平指向爆炸中心点。

4 每一测点不同方向传感器安装角度允许偏差为 $\pm 5^\circ$ 。

5 传感器与仪器连接完毕后，应对系统进行调试，保证系统处于待触发工作状态，并对传感器及仪器采取安全防护措施。

6 震源与测点的位置应测量，现场应绘制工作布置草图。

5.12.5 质点振动测试记录波形应完整，无明显其他强烈振动干扰和削波。

5.12.6 存在下列情况之一者应评价为不合格记录：

- 1 有效波削波或记录长度不足的记录。
- 2 数据采集时周围环境干扰较大，无法识别有效波的记录。

5.13 地脉动测试

5.13.1 工作布置应符合下列规定：

1 应根据工程设计、建筑物规模、轴向和地质构造复杂程度确定测试方式及测点布置。

2 每个建筑场地的地脉动测点应均匀分布，每块场地不应少于3个测点，测点宜布置在天然土地基处及波速测试孔附近。

3 地下脉动测试时，测点深度应根据工程需要进行布置。

4 测点宜布置在较开阔的场地上，应避开地下构筑物，远离人为振动干扰点，与建筑物距离宜大于20m。

5.13.2 地脉动测试宜使用自然频率不大于1Hz的短周期三分量拾振器或单分量拾振器。

5.13.3 仪器参数的选择应符合下列规定：

1 应根据预估频率范围设置低通滤波频率和采样频率。

2 采样间隔宜为10ms~20ms，记录时间不宜少于15min。

5.13.4 现场测试应符合下列规定：

1 现场测试时间宜选择在安静的夜间进行。

2 记录仪和拾振器编号应与标定时编号一致。

3 拾振器托板与地面应粘贴牢固，拾振器三个分量应按东西、南北、竖向三个方向安置，拾振器放置在托板上时应进行调平。使用单分量拾振器时，每个拾振器之间的距离不宜大于1.0m。

4 根据所需频率范围宜设置低通滤波频率。

5 测试时，在距离观测点100m范围内应无振动干扰，每

点数据采集不应少于 2 次。

6 地脉动测试过程中，应详细记录强风、强降雨及气温变化等气候情况和地下水位深度等外界自然条件。

5.13.5 测试记录波形应完整、无明显干扰和削波。

5.13.6 存在下列情况之一者应评价为不合格记录：

- 1 数据采集时周围环境干扰较大，有明显高频噪音的记录。
- 2 记录时间不足的记录。

6 数据处理与资料解释

6.1 一般规定

6.1.1 弹性波测试资料解释推断应充分结合地质、设计、施工和其他物探方法测试资料，分析和总结各种异常现象，得出客观准确的结论。

6.1.2 现场应及时对资料进行初步整理和解释。如发现原始数据错误或不全时，应及时进行必要的补充测试工作。

6.1.3 数据处理与资料解释应包括波的对比分析、数据读取、计算与分析、解译和成果图件绘制。

6.1.4 数据处理及计算应符合下列要求：

1 应使用合格的原始记录或数据。

2 数据处理软件应为鉴定合格的软件。

3 用于计算的原始数据在计算前应根据观测系统、读时方式等进行相应的延时、相位、距离、孔斜等校正处理。

6.1.5 弹性波测试成果宜用地质或相关专业语言解译。

6.1.6 弹性波测试提供的图件应包括工作布置图、成果图和解译图等。

6.1.7 弹性波测试解译图应是以物探成果为主要资料绘制的平面图、剖面图、曲线图等。

6.2 表面声波法

6.2.1 波的对比分析应符合下列要求：

1 宜根据相邻点波形的相似性、同相性及振幅衰减的规律性等特征识别有效波。

2 有效波对比分析应选择靠近有效波起始相位处，可采用

单相位或多相位对比。

6.2.2 读时应符合下列要求：

- 1 应将首波调整到初至起跳明显后读取初至。
- 2 采用一发一收观测方式时，应识别触发信号，并对初至时进行校正。
- 3 折射波初至读取困难时，可读取首波第一个极值时间，并进行 $1/4$ 相位校正。

6.2.3 计算与分析应符合下列要求：

- 1 一发一收观测方式应按本规程附录 C 的有关规定计算声波速度。
- 2 一发双收观测方式应按本规程附录 C 的有关规定计算声波速度。
- 3 混凝土表部缺陷层检测相遇时距曲线应按本规程附录 C 的有关规定计算。
- 4 混凝土浅裂缝深度宜通过对比同一测线点距由小变大时各测点首波相位的变化特征判定。当发现某测距首波反相时，应按本规程附录 C 的有关规定计算该测距及两个相邻测距裂缝深度值，并取此三点的平均值作为该测点处的裂缝深度值；当难以发现首波反相时，应按本规程附录 C 的有关规定计算各测距的裂缝深度和平均值，将各测距的裂缝深度计算值与平均值进行比较，剔除小于平均值和大于 3 倍平均值的数据，取余下的数据的平均值作为该测点处的裂缝深度值。

6.2.4 资料解译应符合下列要求：

- 1 声波速度测试应按速度变化对被测介质进行评价，圈定异常范围、确定异常性质。
- 2 混凝土表部缺陷检测应按速度变化确定混凝土缺陷范围及厚度。
- 3 混凝土浅裂缝检测应根据计算结果确定裂缝深度及范围。

6.2.5 成果图件宜符合下列要求：

1 声波速度测试成果图件宜绘制速度平面分布图、速度等值线图、速度统计分析图表等。

2 混凝土表部缺陷检测成果图件宜绘制剖面图、平面图和等值线图等。

3 混凝土浅裂缝检测成果图件宜绘制剖面图和平面图等。

6.3 单孔声波法

6.3.1 波的对比分析应符合下列要求：

1 宜根据波形特征和相邻测点波形的相似性识别和追踪有效波。

2 首波的对比分析应选择靠近首波起始相位处，可采用单相位或多相位对比。

3 宜根据波形变化、振幅衰减、波速值降低等特征确定软弱夹层、裂隙密集带和断层破碎带等对应关系。

4 孔内测试范围内有盖重或套管时，宜根据波形记录中波幅、频率变化特征分析。

6.3.2 应将首波调整到初至起跳明显后读取初至。

6.3.3 计算与分析应符合下列要求：

1 单孔声波速度应按本规程附录 C 的有关规定计算。

2 岩体风化波速比应按本规程附录 C 的有关规定计算，完整性系数应按本规程附录 C 的有关规定计算。测区内同一类岩性的新鲜完整岩石声波速度取值应相同。

3 宜结合原位试验结果进行声波速度与静弹模量或变形模量相关分析，给出声波速度与静弹模量或变形模量相关关系。

4 灌前与灌后声波速度提高率应按本规程附录 C 的有关规定计算。资料分析时，应对灌前声波速度与灌后声波速度提高率进行统计分析。

5 爆前和爆后声波速度衰减率应按本规程附录 C 的有关规定计算。

6 应将长观孔每次观测的声波速度曲线绘制在同一张图上进行对比和统计分析。

6.3.4 资料解译应符合下列要求：

1 宜根据声波速度、振幅和频率变化确定软弱夹层、裂隙密集带和断层破碎带等位置、厚度。

2 岩体完整程度评价与风化带划分宜按声波速度-孔深曲线图的声波速度变化分段划分，划分应符合现行国家标准《水力发电工程地质勘察规范》GB 50287 的相关规定。

3 洞室围岩松弛圈和边坡岩体卸荷松弛厚度应根据声波速度-孔深曲线形态和声波速度变化确定。

4 灌浆效果、灌浆质量宜依据灌后声波速度提高率统计结果和工程验收声波速度标准进行评价。

5 爆破影响深度宜根据爆前和爆后声波速度衰减率和速度-孔深曲线形态确定。当只进行爆后声波速度测试时，宜根据声波速度-孔深曲线形态和拐点位置确定爆破影响深度。

6 应根据长期观测资料统计结果，结合工程地质条件和施工情况，分析岩体卸荷松弛随时间变化的规律。

6.3.5 成果图件应符合下列要求：

1 单孔声波速度测试成果图件宜绘制速度-孔深曲线图和统计图表等。

2 声波速度与静弹模量相关分析宜绘制相关曲线图。

3 洞室围岩松弛圈及边坡岩体卸荷松弛厚度检测成果图件宜绘制速度-孔深曲线图、松弛圈或卸荷松弛层断面图或剖面图等。

4 长观孔宜绘制声波速度随时间变化曲线图、声波速度随时间变化衰减率图等。

5 爆破影响深度检测成果图宜绘制爆前与爆后速度-孔深曲线图，宜用线型加以区别；爆破影响深度等值线剖面图和平面图等。

6 灌浆质量检测成果图件宜绘制灌前与灌后速度-孔深曲线图，宜用线型加以区别；声波速度与提高率分布图、统计图和平面图等。

6.4 穿透声波法

6.4.1 波的对比分析应符合下列要求：

1 宜根据波形特征和相邻测点波形的相似性识别和追踪有效波。

2 有效波对比分析应选择靠近有效波起始相位处，可采用单相位或多相位对比。

3 宜通过波幅、频率衰减变化的对比，分析混凝土裂缝所对应的波形特征。

6.4.2 读时应符合下列要求：

1 应将首波调整到初至起跳明显后读取初至。

2 采用一发一收观测方式时，应识别触发信号，并对初至时进行校正。

6.4.3 计算与分析应符合下列要求：

1 穿透声波测试应根据测量资料和孔斜资料计算激发点到接收点的距离。

2 一发一收观测方式声波速度应按本规程附录 C 的有关规定计算；一发双收方观测方式声波速度应按本规程附录 C 的有关规定计算。

3 灌后与灌前声波速度提高率应按本规程附录 C 的有关规定计算。资料分析时，应对灌前声波速度与灌后声波速度提高率进行统计分析。

4 混凝土裂缝测试资料分析时，应与完整部位的波形进行对比分析，判定裂缝深度。

5 混凝土结构或构件内部缺陷判定宜采用临界值法统计分析波速、波幅和频率异常测点分布范围，判定缺陷区域。统计分

析应符合本规程附录 C 的有关规定。

6.4.4 资料解译应符合下列要求：

1 孔间穿透测试资料应结合单孔测试资料进行综合分析和解译。当单孔和孔间穿透声波速度存在较明显差异时，应对两者差异进行统计分析，并给出其相关关系。

2 洞室围岩松弛圈和边坡岩体卸荷松弛厚度应根据声波速度-孔深曲线形态和声波速度变化确定。

3 混凝土裂缝深度应根据波形对比分析结果确定。

6.4.5 成果图件宜符合下列要求：

1 孔间穿透声波速度测试成果图件宜绘制速度-孔深曲线图和统计图表等。

2 洞室围岩松弛圈及边坡岩体卸荷松弛厚度检测成果图件宜绘制速度-孔深曲线图、松弛圈或松弛层断面图或剖面图等。

3 灌浆质量检测成果图件宜绘制灌前与灌后速度-孔深曲线图，宜用线型加以区别；声波速度与提高率分布图，统计图和平面图等。

4 混凝土裂缝孔间穿透声波测试成果图件宜绘制声波首波波幅-孔深曲线图、声波波列图、成果剖面图和平面图等。

5 混凝土结构或构件缺陷检测成果图宜绘制声速或声幅异常测点范围和缺陷分布平面图和统计图表等。

6.5 钻孔声波全波列法

6.5.1 波的对比分析应符合下列要求：

1 宜根据波形特征和相邻测点波形的相似性识别和追踪各成分波。

2 波列中各成分波的对比分析应选择靠近有效波起始相位处，可采用单相位或多相位对比。

3 宜采用波形识别法、慢度-时间相关法和同相轴类比法识别波列中纵波、横波和斯通利波。

6.5.2 各成分波旅行时宜读取初至，当初至读取有困难时，可读取第一极值时间。

6.5.3 计算与分析应符合下列要求：

1 单孔声波全波列测试声波速度应按本规程附录 C 的有关规定计算。

2 孔间声波全波列测试声波速度应按本规程附录 C 的有关规定计算。

3 岩石泊松比、动弹模量和动剪切模量应按本规程附录 C 的有关规定计算。

4 岩石纵波与横波时差比应按本规程附录 C 的有关规定计算，可按本规程附录 C 中的表 C.8.2 识别岩性。

6.5.4 资料解译应符合下列要求：

1 应根据计算分析结果划分地层与岩性，圈定构造、岩溶、节理裂隙发育带及软弱夹层，确定含水层位置等。

2 宜根据声波在岩层中传播的时差变化、波幅和频率衰减等特征，判定裂隙发育程度。

3 宜根据斯通利波的时差、主频变化和波幅衰减情况评价地层渗透性。

6.5.5 成果图件宜绘制时域全波列波形图、纵波速度-孔深曲线、横波速度-孔深曲线、岩石动弹模量曲线和相关参数统计分析图等。

6.6 声波反射法

6.6.1 波的对比分析时，应将同一测线各测点时域波形记录按测点顺序排列成共偏移时域波列图，并根据波列图中波形特征、相邻测点波形的相似性、同相轴的连续性识别和追踪反射波。

6.6.2 反射波的旅行时宜读取反射波第一极值时间值，并对该读时进行 $1/4$ 相位校正。

6.6.3 计算与分析应符合下列要求：

- 1 频域滤波处理宜在频谱分析的基础上选择滤波频率。
 - 2 反射界面深度应按本规程附录 C 的有关规定计算。
- 6.6.4 资料解译宜根据等偏移波形记录中同相轴的连续性、波幅相对变化等特征确定反射界面，划定异常范围，判定异常的性质。
- 6.6.5 声波反射法测试成果图件宜绘制共偏移波列图、成果剖面图和平面图等。

6.7 脉冲回波法

- 6.7.1 波的对比分析时，应将同一测线各测点波形记录按测点顺序排列成波列图。宜根据波列图中波形特征识别脉冲回波。
- 6.7.2 脉冲回波的旅行时宜读取回波第一极值时间值，并对该读时进行 $1/4$ 相位校正。
- 6.7.3 计算与分析应符合下列要求：
- 1 在波列图中识别构件底面反射波同相轴时，应按本规程附录 C 的有关规定计算构件底面脉冲回波到达时间。
 - 2 根据波列图中识别的混凝土构件内部缺陷脉冲回波旅行时，应按本规程附录 C 的有关规定确定缺陷深度。
 - 3 应将各测点声波时域曲线进行傅立叶变换得到频域曲线，并确定频域曲线的频差值或优势频率，宜按本规程附录 C 的有关规定推算混凝土衬砌体或构件的厚度或缺陷深度。
 - 4 在评判隧洞衬砌脱空缺陷时，应按本规程附录 C 的有关规定计算各测点的回波能量，根据测区内各测点的能量分布情况确定测区回波能量临界值。
 - 5 宜通过钻孔或其他方法的验证结果确定回波能量临界值。当无验证资料时，回波能量临界值宜按本规程附录 C 的有关规定计算。
 - 6 宜采用本规程附录 C 中表 C.5.5 定性评价钢板或钢管衬砌脱空缺陷程度和接触灌浆质量。脱空缺陷系数宜按本规程附录

C的有关规定计算。

6.7.4 资料解译应符合下列要求：

1 应对比分析时域和频域的推算值，综合判断构件的厚度和内部缺陷深度。

2 应综合分析时域曲线和回波能量曲线，可将时域曲线的底板回波能量明显增强，并且回波能量超过临界值的测点，判断为混凝土面板脱空异常测点。

3 应根据脱空缺陷测点的位置确定脱空缺陷范围，并统计分析单个脱空范围大于 0.5m^2 的脱空缺陷。

6.7.5 脉冲回波法测试成果图件宜绘制混凝土面板或衬砌体内部缺陷与脱空缺陷分布图、钢衬脱空缺陷分布图等。

6.8 超声横波反射三维成像

6.8.1 数据处理应符合下列要求：

1 宜按测试单元和剖面整理测试数据，对异常数据应删除。

2 增益调整宜突出异常区域和反射界面信息。

3 宜根据测试量程或剖面延伸宽度确定测试剖面 and 网格的
原点坐标。

6.8.2 资料解译应符合下列要求：

1 资料解译与分析应根据反射波幅值的变化特征圈定异常范围，确定反射界面。

2 应结合实际工程资料判定异常的性质，区分钢筋与混凝土缺陷异常。

3 应结合测试频率分析混凝土异常的大小。

4 采用网状测试时，应通过立体透视图分析异常空间关系，并绘典型图。

5 在多个测试面测试时，宜绘制立体测试布置示意图。

6.8.3 超声横波反射三维成像成果图宜绘制立体透射图、立体剖面图、切片图、反射剖面图、解释图等。

6.9 表面地震波法

6.9.1 波的对比分析应符合下列要求：

1 有效波的对比分析应选择靠近有效波的起始相位处，可采用单相位或多相位对比。

2 宜根据波形记录中相邻道波形的相似性、同相性、同相轴的连续性和振幅衰减规律进行对比分析，识别有效波。

3 宜根据横波频率低、振幅强、旅行时间迟于纵波和正反向激发其相位反向等特征识别横波。

6.9.2 读时应符合下列要求：

1 纵波旅行时应将首波调整到初至起跳明显后读取。

2 横波旅行时宜读取横波波至时。横波波至时读取困难时，可读取第一相位极值点时间。

6.9.3 计算与分析应符合下列要求：

1 表面地震波速度宜按相遇时距曲线斜率变化分段计算或按两测点间时差计算。相遇观测系统的地震波速度应按本规程附录 C 的有关规定计算；两测点间地震波速度应按本规程附录 C 的有关规定计算。

2 岩体泊松比和动弹模量应按本规程附录 C 的有关规定计算。

3 岩体风化系数应按本规程附录 C 的有关规定计算。

4 完整性系数应按本规程附录 C 的有关规定计算。

5 各向异性系数应按本规程附录 C 的有关规定计算。

6 岩体完整程度评价与风化带划分应符合现行国家标准《水力发电工程地质勘察规范》GB 50287 的相关规定。

6.9.4 资料解译应符合下列要求：

1 应分析原始记录上有无伴随振幅衰减、波形变化等现象确定低速带与不良地质结构的对应关系。

2 宜根据岩体完整程度与风化带划分结果，结合实际地质

资料对岩体质量进行评价。

3 宜结合原位试验结果进行动弹模量与静弹模量对比分析。

6.9.5 成果图件宜符合下列要求：

1 地震波速度测试成果图件宜绘制成果平面图、综合剖面图和地震波速度分布统计图表等。

2 当测线成网状布置时，宜绘制地震波速度平面等值线图。

3 动弹模量与静弹模量相关分析宜绘制相关曲线。

6.10 单孔地震波法

6.10.1 波的对比分析应符合下列要求：

1 有效波的对比分析应选择靠近有效波的起始相位处，可采用单相位或多相位对比。

2 宜根据波形记录中相邻道波形的相似性、同相性、同相轴的连续性和振幅衰减规律进行对比分析，识别有效波。

3 宜根据横波频率低、振幅强、旅行时间迟于纵波和正反向激发其相位反向等特征识别横波。

6.10.2 读时应符合下列要求：

1 纵波旅行时应将首波调整到初至起跳明显后读取。

2 横波旅行时宜读取波初至时。当读取困难时，可读取横波第一相位极值点时间，并进行 $1/4$ 相位时间校正。

6.10.3 计算与分析应符合下列要求：

1 地震波纵波和横波速度应按本规程附录 C 的有关规定计算。

2 土层的等效横波速度应按本规程附录 C 的有关规定计算。

6.10.4 资料解译应符合下列要求：

1 宜根据纵波速度变化情况，结合波形对比中首波波幅衰减和频率变化等特征综合分析和判断孔内断层破碎带等不良地质体的位置和范围。

2 覆盖分层宜按速度-深度曲线变化划分。

3 应用横波速度进行水工建筑物场地类别划分应符合现行行业标准《水电工程防震抗震设计规范》NB 35057 的相关规定。

4 应用横波速度判别土的振动液化应符合现行国家标准《水力发电工程地质勘察规范》GB 50287 的相关规定。

6.10.5 成果图件宜符合下列要求：

1 单孔地震波纵波速度测试成果图宜绘制孔深-纵波速度折线图或曲线图。

2 单孔横波速测试成果图宜绘制孔深-横波速度折线图或曲线图。场地勘察成果图宜绘制场地类别划分成果剖面图和平视图。

3 当多孔构成断面时，宜绘制速度分布与地质解译成果剖面图。

6.11 穿透地震波法

6.11.1 波的对比分析应符合下列要求：

1 有效波的对比分析应选择靠近有效波的起始相位处，可采用单相位或多相位对比。

2 宜根据波形记录中相邻道波形的相似性和同相性等特征识别有效波。

3 宜根据横波频率低、振幅强、旅行时间迟于纵波和正反向激发其相位反向等特征识别横波。

6.11.2 读时应符合下列要求：

1 纵波旅行时应将首波调整到初至起跳明显后读取。

2 横波旅行时宜读取波初至时。当读取困难时，可读取横波第一相位极值点时间，并进行 1/4 相位时间校正。

6.11.3 计算与分析应符合下列要求：

1 应根据测量资料和钻孔测斜资料计算激发点至接收点间的距离。

2 穿透地震波速度应按本规程附录 C 的有关规定计算。

6.11.4 资料解译应符合下列要求：

1 孔间穿透地震波测试资料宜结合单孔地震波测试资料进行综合分析和解译。

2 应用横波速度进行水工建筑物场地类别划分应符合现行行业标准《水电工程防震抗震设计规范》NB 35057 的相关规定。

3 应用横波速度判别土的振动液化应符合现行国家标准《水力发电工程地质勘察规范》GB 50287 的相关规定。

4 应对整个测区穿透地震波速度变化情况进行统计分析，波速异常区宜结合地质资料进行综合分析解译。

6.11.5 成果图件应符合下列要求：

1 洞间、孔间等穿透地震波测试成果图宜绘制地震波射线图、波速分布平面图和剖面图、地质缺陷体异常分布平面图和剖面图等。

2 空间穿透横波测试成果图宜绘制横波速度-孔深折线图或曲线图。场地勘察成果图宜绘制场地类别划分成果剖面图和平面图。

6.12 质点振动测试

6.12.1 应对径向、切向和垂向三个方向测试时域波列分时段对比分析，并根据振幅、频率变化等特征识别有效波。

6.12.2 数据读取应符合下列要求：

1 振动波形相对基线出现漂移时，应对峰值振动速度或峰值振动加速度进行零点漂移校正。

2 使用振动测试仪配套软件，依据测试系统标定的灵敏度，读取或计算径向、切向和垂向三个方向的峰值振动速度或峰值振动加速度，获取各方向的主振频率。

6.12.3 质点振动传播规律测试应根据测试数据和已知的距离、药量，对样点数据进行统计分析，应按本规程附录 C 的有关规

定计算振动常数 K 、 α 、 β 值。

6.12.4 资料解译应符合下列要求：

1 质点振动传播规律测试应根据计算的振动常数 K 、 α 、 β 值，给出试验区爆破振动特征表达式。

2 水电工程爆破振动安全评价应符合现行行业标准《水电水利工程爆破安全监测规程》DL/T 5333 的相关规定。

6.12.5 成果图件宜符合下列要求：

1 质点振动监测成果图件宜包括垂向、径向和切向时域振动波形图和成果表等。

2 质点振动传播规律测试成果图件宜包括垂向、径向和切向时域振动波形图、成果表和统计分析图表等。

6.13 地脉动测试

6.13.1 数据处理应符合下列规定：

1 数据处理前，在时间域处理时应应对零点漂移和记录波形进行校验，处理波形的失真；在频率域处理时应首先按采样定理的要求选择合理的采样频率，采样频率宜按所求频率上限的 3 倍～5 倍选取。

2 测试数据处理宜采用功率谱分析法，每个样本数据宜采用不少于 1024 个点，采用间隔宜为 10ms～20ms，并加窗函数处理；频率域平均次数不宜小于 32 次。

6.13.2 资料分析与解译应符合下列要求：

1 场地卓越周期应根据卓越频率确定。

2 卓越频率应按图谱中最大峰值所对应的频率确定；当图谱中出现多峰且各峰的峰值相差较小，在谱分析的同时应进行相关谱和互谱分析，对场地脉动卓越频率进行综合评价。

3 脉动幅值应取实测脉动信号的最大幅值；确定脉动信号的幅值时，应充分考虑排除人为干扰信号及外界自然条件变化的影响。

4 在对场地脉动信号进行振幅谱或功率谱分析的同时，也可进行相关分析或互谱分析，应对同一场地同一测点不同分量或不同测点同一方向的地脉动信号的计算结果进行比较、分析得到可靠的卓越周期。

5 当需要了解地面上测点和孔中测点的相互关系时，可进行传递函数或互谱分析。

6.13.3 地脉动测试成果图件宜包括测点时域波形图和频谱图等。

7 成果报告编写

7.0.1 弹性波测试工作完成后应编写弹性波测试成果报告。成果报告应内容完整、目的明确、层次清晰、表述准确、数据真实、依据充分、分析合理、图表齐全、结论正确。

7.0.2 测试工作时间跨度较长时，应分阶段提交弹性波测试阶段或中间成果报告；当弹性波测试作为物探项目的一部分时，弹性波测试成果宜作为物探成果的一个章节进行编写。

7.0.3 成果报告内容宜包括概况、工程地质简况或工程施工简况、物性条件、测试方法与技术、质量控制、资料处理、分析与解译、结论与建议等章节及附图和附表。各章节宜包括下列内容：

1 概况宜包括工程概况、任务来源、任务内容、目的与要求、工作时间、以往工作情况、工作完成情况和完成的工作量等。

2 工程地质简况宜包括测区地形地貌、地层岩性等工程地质条件。

3 工程施工简况宜包括工程部位、结构类型、施工工艺、材料和龄期等。

4 物性条件宜包括测区岩土体或混凝土力学特性等。

5 测试方法与技术宜包括工作方法 with 原理、工作布置、仪器设备、参数选取、技术措施等。

6 质量控制宜包括质量控制措施、数据质量评价、技术标准等。

7 资料处理宜包括资料处理流程、方法、参数的选取、应绘制成果图件。

8 分析与解译宜包括数据统计分析、评价依据、异常判定

与解译等。

9 结论与建议宜包括测试成果结论、工作中尚未解决的问题和需要补充工作的建议、资料使用注意事项等。

10 附图与附表应符合本规程相关规定。

附录 A 弹性波测试方法应用表

表 A 弹性波测试方法应用表

测试方法	应用项目												
	岩土体力学参数测试	岩体风化、卸荷松弛带探测	洞室岩体松弛带探测	岩体爆破影响深度探测	软弱夹层探测	断层等地质缺陷探测	建筑场地类别划分	岩体质量检测	灌浆质量检测	洞室混凝土衬砌检测	混凝土质量及脱空检测	钢管、钢管脱空检测	混凝土质量检测
表面声波法	○	—	—	—	—	—	—	△	—	—	△	—	○
单孔声波法	○	○	○	○	○	○	—	○	○	—	—	—	○
穿透声波法	○	○	△	△	○	○	—	○	○	—	—	—	○
钻孔声波全波列法	○	△	—	—	○	○	—	△	—	—	—	—	—
声波反射法	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	○	△	○
脉冲回波法	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	○	○	△
超声横波反射三维成像	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○	○	—	○
表面地震波法	○	○	—	—	—	○	—	○	—	—	—	—	—
单孔地震波法	○	△	—	—	—	△	○	○	△	—	—	—	—
穿透地震波法	○	△	—	—	△	△	○	○	△	—	—	—	△
质点振动测试	○	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—
地脉动测试	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注：○—主要方法；△—辅助方法。

附录 B 弹性波测试仪器检查

B.1 地震仪器设备检查

B.1.1 地震仪道间感应检查应符合下列规定：

- 1 宜使用地震仪专用检查电缆，电缆芯线与被检查地震仪通道数相符。
- 2 应任选取不少于 1/3 通道接入地震仪检查用的等效电阻，其余各道应并联接入一个检波器。
- 3 宜在近检波点锤击激发，使输入道信号幅度最大，但不削波。
- 4 读取信号道首波最大幅值 A_i ，计算 A_i 的平均值 $A_{\text{平}}$ ；无信号输入道最大幅值 A_j 。
- 5 无信号道对信号道的隔离度优于一 80dB，可按下式计算：

$$C_j = 20 \lg \left(\frac{A_j}{A_{\text{平}}} \right) \quad (j=1, 3, \dots, N) \quad (\text{B.1.1})$$

式中： C_j ——第 j 道的串音；

A_j ——第 j 道信号的最大幅值；

$A_{\text{平}}$ ——信号道输出平均幅值。

B.1.2 地震仪记录道放大器一致性检查应符合下列规定：

- 1 宜使用地震仪道间放大器一致性检查电缆。
- 2 应将地震仪各道并联接入一个检波器。
- 3 宜在近检波点进行锤击激发，激发能量应要求波形信号不限幅、波形完整。
- 4 读取每个通道首波波峰或波谷所对应的振幅 A_j ，计算平均振幅 \bar{A} ，并按下式计算振幅偏差。

$$\Delta A_j = \frac{A_j - \bar{A}}{\bar{A}} \times 100\% \quad (\text{B. 1. 2 - 1})$$

式中： ΔA_j ——第 j 道的幅度一致性；

A_j ——第 j 道 t 时刻的幅值；

\bar{A} ——各道 t 时刻幅值的平均值。

5 连续取第 i 道相邻时刻三个点的幅值 A_1 、 A_2 、 A_3 ，应满足 $A_2 \geq A_1$ 和 $A_2 \geq A_3$ ，并按下式计算相位偏差：

$$t_i = \frac{(A_2 - A_1) \Delta t}{(A_2 - A_1) + (A_2 - A_3)} + \frac{\Delta t}{2} \quad (\text{B. 1. 2 - 2})$$

$$t'_i = t_i + (i - 1) \delta_i \quad (\text{B. 1. 2 - 3})$$

平均值相位为

$$\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t'_i \quad (\text{B. 1. 2 - 4})$$

相位偏差为

$$\Delta t = t'_i - \bar{t} \quad (\text{B. 1. 2 - 5})$$

式中： t_i ——第 i 道的相位误差 (ms)；

t'_i ——第 i 道含固定时差的相位差 (ms)；

\bar{t} ——平均相位误差 (ms)；

Δt ——采样率 (ms)；

A_1 、 A_2 、 A_3 ——第 i 道相邻时刻三个点的幅值；

δ_i ——第 i 道的固定时差 (ms)；

N ——道数。

6 地震仪记录道放大器一致性应符合下列要求：

- 1) 各道波形相似。
- 2) 道间相位允许偏差为 $\pm 1.0\text{ms}$ 。
- 3) 各道振幅允许偏差为 $\pm 2\%$ 。

B. 1. 3 地震仪系统记录道一致性检查应符合下列规定：

- 1 检查宜选在地表介质均匀且平坦的场地上进行。
- 2 应对现场工作期间所使用全部电缆和检波器进行检查。

3 检波器应紧密安置在宽度 1m 范围内，电缆的各通道均接入检波器。

4 宜在距检波器 5m、8m、10m 位置设置锤击激发点，应测量每个检波器与激发点的距离，距离允许偏差为 $\pm 0.5\text{cm}$ 。

5 采样间隔不宜大于 0.25ms，采样点数大于 512，延时为 $0\mu\text{s}$ ，滤波挡为全通，各道增益相同。

6 应读取每个激发点所有检波道上的首波波峰或波谷所对应的幅值 $A_{\text{测}}$ ，计算每张记录的平均振幅 $A_{\text{平}}$ ，并按下式计算出振幅偏差：

$$\sigma_A = \frac{A_{\text{测}} - A_{\text{平}}}{A_{\text{平}}} \times 100\% \quad (\text{B. 1.3 - 1})$$

式中： σ_A ——振幅偏差（%）；

$A_{\text{测}}$ ——各道幅值；

$A_{\text{平}}$ ——各道幅值平均值。

7 应读取每个激发点所有检波道上的首波初至时间，计算对应的速度 $v_{\text{测}}$ 和平均速度 $v_{\text{平}}$ ，并按下式计算出波速偏差：

$$\sigma_v = \frac{v_{\text{测}} - v_{\text{平}}}{v_{\text{平}}} \times 100\% \quad (\text{B. 1.3 - 2})$$

式中： σ_v ——振幅偏差（%）；

$v_{\text{测}}$ ——速度测量值（m/s）；

$v_{\text{平}}$ ——各道速度测量值的平均值（m/s）。

8 地震仪系统记录道一致性应符合下列要求：

- 1) 每次激发记录的各道波形应相似。
- 2) 各道振幅允许偏差为 $\pm 10\%$ 。
- 3) 所有偏移距中的任意检波道的波速允许偏差为 $\pm 5\%$ 。

B.2 声波仪器设备检查

B.2.1 声波仪宜采用实测空气声速法检查，检查步骤如下：

1 将一只平面发射换能器倒置固定在桌面上，辐射面朝上，用支架将接收换能器悬挂在发射能器正上方，辐射面向下，并可上下移动。

2 通过移动接收换能器改变两换能器辐射面之间的距离，依次为 10cm、20cm、30cm、40cm、50cm、60cm、70cm、80cm、90cm 和 100cm，移动时两换能器辐射面的轴线始终保持在同一直线上，距离测量偏差不大于 $\pm 1\text{mm}$ ，在保持首波幅度一致的前提下，读取各间距所对应的首波初至时 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_{10}$ ，同时测量空气温度 T 。

3 通过对 10 个测点的距离和时间测量值进行线性回归计算空气声速测量值。

4 空气中声速计算值可按下式计算：

$$v_{\text{cal}} = 331.4 \times \sqrt{1 + 0.00367T} \quad (\text{B. 2.1-1})$$

式中： v_{cal} ——空气中声速计算值 (m/s)；

T ——测试环境的空气温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

5 空气中声速计算值与空气声速测量值相对误差可按下式计算：

$$e_r = \frac{v_{\text{cal}} - v_{\text{obs}}}{v_{\text{cal}}} \times 100\% \quad (\text{B. 2.1-2})$$

式中： e_r ——空气中声速计算值与空气声速测量值相对误差 (%)；

v_{obs} ——空气中声速测量值 (m/s)。

6 声波仪空气校准的相对误差 e_r 为 $\pm 0.5\%$ 。

B. 2.2 声波仪系统延时检查宜采用对测法，检查步骤如下：

1 宜将声波仪系统延时设置为 $0\mu\text{s}$ 。

2 宜将平面换能器发射与接收面用黄油耦合对贴；将柱状发射与接收换能器并排捆绑在一起并放入水中，测量的首波初至声时即为系统延时。

B. 2.3 声波换能器检查应符合下列要求：

1 平面换能器宜在空气中测试空气的声波速度进行校准；

柱状换能器宜在清水中测试水的声波速度进行校准，或在 PVC 管或钢管中测试管壁声波速度进行校准。

2 平面换能器校准应按本规程 B.2.1 条声波仪检查方法测试声波速度。

3 柱状换能器在清水中校准时，应备有一个长、宽、高宜为 1.0m 的水槽，并注满清水。将换能器直立悬挂在水槽中部，入水深度宜为 0.5m，一发一收柱状换能器宜相距 50cm，测试水的声波速度。

4 利用 PVC 管或钢管进行一发双收柱状换能器校准时，宜选取一段长 1.0m、直径略大于换能器直径的 PVC 管或钢管，管底的一端应封住，管应直立放置，管中应注满清水，测试管壁声波速度。

5 取测试不宜少于 3 次的声波速度平均值为测量值。

6 声波速度校准参照值按不宜少于 2 台声波仪分别进行不宜少于 3 次声波速度测试结果的平均值取值。

7 换能器校准偏差可按式计算：

$$e_v = \frac{v_{\text{测}} - v_c}{v_c} \times 100\% \quad (\text{B.2.3})$$

式中： e_v ——换能器波速校准偏差（%）；

$v_{\text{测}}$ ——声波速度测量值（m/s）；

v_c ——声波速度校准参照值（m/s）。

8 换能器校准偏差应为 $\pm 3.0\%$ 。

附录 C 基本公式

C.1 岩土体物理力学参数计算公式

C.1.1 一发一收声波速度可按下式计算：

$$v = \frac{s}{t - t_0} \times 10^6 \quad (\text{C. 1. 1})$$

式中： v ——发射点至接收点间的声波速度（m/s）；

s ——发射换能器与接收换能器中心距离（m）；

t ——发射点至接收点声波旅行时间（ μs ）；

t_0 ——发射换能器与接收换能器对零时或仪器系统延时（ μs ）。

C.1.2 一发双收声波速度可按下式计算：

$$v = \frac{l}{t_2 - t_1} \times 10^6 \quad (\text{C. 1. 2})$$

式中： v ——两接收点间声波速度（m/s）；

l ——两接收点间距离（m）；

t_1 ——发射点至第一接收点声波旅行时间（ μs ）；

t_2 ——发射点至第二接收点声波旅行时间（ μs ）。

C.1.3 一发一收地震波速度可按下式计算：

$$v = \frac{s}{t - t_0} \times 10^3 \quad (\text{C. 1. 3})$$

式中： v ——激发点至接收点间地震波速度（m/s）；

s ——激发点至接收点间距离（m）；

t ——激发点至接收点地震波旅行时间（ms）；

t_0 ——仪器系统延时（ms）。

C.1.4 两点间地震波速度可按下式计算：

$$v = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \times 10^3 \quad (\text{C. 1. 4})$$

式中： v ——第一道检波器和第二道检波器间地震波速度 (m/s)；

x_1 ——激发点至第一道检波器距离 (m)；

x_2 ——激发点至第二道检波器距离 (m)；

t_1 ——激发点至第一道检波器地震波旅行时间 (ms)；

t_2 ——激发点至第二道检波器地震波旅行时间 (ms)。

C. 1. 5 单孔一发一收地震波速度可按下列公式计算：

$$t'_i = \frac{h_i}{\sqrt{d^2 + h_i^2}} t_i \quad (\text{C. 1. 5 - 1})$$

$$v_i = \frac{h_i - h_{i-1}}{t'_i - t'_{i-1}} \times 10^3 \quad (\text{C. 1. 5 - 2})$$

式中： t'_i ——垂直距离修正后第 i 接收点地震波旅行时间 (ms)；

t_i ——激发点至第 i 接收点地震波旅行时间 (ms)；

h_i ——第 i 接收点深度 (m)；

d ——扣板中心点至孔口距离 (m)；

v_i ——第 i 接收点至第 $i-1$ 接收点间地震波速度 (m/s)；

h_{i-1} ——第 $i-1$ 接收点深度 (m)；

t'_{i-1} ——垂直距离修正后第 $i-1$ 接收点地震波旅行时间 (ms)。

C. 1. 6 土层等效横波速度可按下列公式计算：

$$v_{se} = \frac{d_0}{t} \times 10^3 \quad (\text{C. 1. 6 - 1})$$

$$t = \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i}{v_{si}} \right) \quad (\text{C. 1. 6 - 2})$$

式中： v_{se} ——计算深度范围内土层等效横波速度 (m/s)；

d_0 ——计算深度 (m)，取覆盖层厚度和 20m 两者的较小值；

t ——横波在地面至计算深度之间的传播时间 (ms)；

d_i ——计算深度范围内第 i 土层的厚度 (m)；

v_{si} ——计算深度范围内第 i 土层的横波速度 (m/s);

n ——计算深度范围内土层的分层数。

C. 1.7 灌浆后声波速度提高率可按下式计算:

$$k = \frac{v_{\text{灌后}} - v_{\text{灌前}}}{v_{\text{灌前}}} \times 100\% \quad (\text{C. 1. 7})$$

式中: k ——灌浆后声波速度提高率 (%);

$v_{\text{灌前}}$ ——灌浆前声波速度 (m/s);

$v_{\text{灌后}}$ ——灌浆后声波速度 (m/s)。

C. 1.8 爆破后声波速度衰减率可按下式计算:

$$\eta = \frac{v_{\text{爆前}} - v_{\text{爆后}}}{v_{\text{爆前}}} \times 100\% \quad (\text{C. 1. 8})$$

式中: η ——爆破后声波速度衰减率 (%);

$v_{\text{爆前}}$ ——爆破前声波速度 (m/s);

$v_{\text{爆后}}$ ——爆破后声波速度 (m/s)。

C. 1.9 岩土体泊松比可按下式计算:

$$\mu = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (\text{C. 1. 9})$$

式中: μ ——岩土体泊松比;

v_p ——岩土体纵波速度 (m/s);

v_s ——岩土体横波速度 (m/s)。

C. 1.10 岩土体动弹性模量可按下式计算:

$$E_d = v_p^2 \rho \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} \times 10^{-3} \quad (\text{C. 1. 10 - 1})$$

或
$$E_d = 2v_s^2 \rho (1+\mu) \times 10^{-3} \quad (\text{C. 1. 10 - 2})$$

式中: E_d ——岩土体动弹性模量 (MPa);

v_p ——岩土体纵波速度 (m/s);

v_s ——岩土体横波速度 (m/s);

ρ ——岩土体密度 (kg/m^3);

μ ——岩土体泊松比。

C. 1.11 岩土体动剪切模量 G_d 可按下式计算:

$$G_d = v_s^2 \rho \times 10^{-3} \quad (\text{C. 1. 11})$$

式中： G_d ——岩土体动剪切模量（MPa）；

v_s ——岩土体横波速度（m/s）；

ρ ——岩土体密度（kg/m³）。

C. 1. 12 岩体风化波速比可按下式计算：

$$K_w = \frac{v_p}{v_{pr}} \quad (\text{C. 1. 12})$$

式中： K_w ——岩体风化波速比；

v_p ——风化岩体纵波速度（m/s）；

v_{pr} ——新鲜完整岩的纵波速度（m/s）。

C. 1. 13 岩体完整性系数可按下式计算：

$$K_v = \left(\frac{v_p}{v_{pr}} \right)^2 \quad (\text{C. 1. 13})$$

式中： K_v ——岩体完整性系数；

v_p ——有裂隙岩体纵波速度（m/s）；

v_{pr} ——新鲜完整岩石的纵波速度（m/s）。

C. 1. 14 岩体各向异性系数可按下式计算：

$$\eta = \frac{v_p^{\parallel}}{v_p^{\perp}} \quad (\text{C. 1. 14})$$

式中： η ——岩体各向异性系数；

v_p^{\parallel} ——平行岩体结构面方向的纵波速度（m/s）；

v_p^{\perp} ——垂直岩体结构面方向的纵波速度（m/s）。

C. 2 折射波相遇时距曲线 t_0 法计算公式

C. 2. 1 $t_0(x)$ 曲线和 $\theta(x)$ 曲线可按下列公式计算：

$$t_0(x) = t_A(x) - [T_{AB} - t_B(x)] \quad (\text{C. 2. 1 - 1})$$

$$\theta(x) = t_A(x) + [T_{AB} - t_B(x)] \quad (\text{C. 2. 1 - 2})$$

式中： $t_0(x)$ —— x 点的 t_0 值（ms）；

x ——观测点距离（m）；

$t_A(x)$ —— A 点激发时距曲线的观测时间 (ms);

$t_B(x)$ —— B 点激发时距曲线的观测时间 (ms);

T_{AB} —— 相遇时距曲线互换时间 (ms);

$\theta(x)$ —— x 点 θ 值 (ms)。

C. 2. 2 折射波界面速度可按下式计算:

$$v_2 = \frac{2\Delta x}{\Delta\theta(x)} \times 10^3 \quad (\text{C. 2. 2})$$

式中: v_2 —— 折射波界面速度 (m/s);

Δx —— 距离差 (m);

$\Delta\theta(x)$ —— Δx 间 θ 值差 (ms)。

C. 2. 3 折射波界面深度可按下式计算:

$$h(x) = \frac{v_1 v_2}{2 \sqrt{v_2^2 - v_1^2}} t_0(x) \times 10^{-3} \quad (\text{C. 2. 3})$$

式中: $h(x)$ —— 观测点 x 处折射界面深度或上覆介质层厚度 (m);

v_1 —— 折射界面上覆介质速度 (m/s);

v_2 —— 折射界面下覆介质速度 (m/s);

$t_0(x)$ —— x 点的 t_0 值 (ms)。

C. 3 表面声波法混凝土浅裂缝深度计算公式

平测法混凝土浅裂缝深度可按下式计算:

$$d_{ci} = \frac{l_i}{2} \sqrt{\left(\frac{t_{ci}}{t_i}\right)^2 - 1} \quad (\text{C. 3. 1 - 1})$$

$$m_{ci} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{ci} \quad (\text{C. 3. 1 - 2})$$

式中: d_{ci} —— 第 i 次测试裂缝深度 (mm);

l_i —— 第 i 次测试发射换能器至接收换能器中心点距离 (mm);

t_{ci} —— 第 i 次测试声波跨裂缝的传播时间 (μs);

- t_i ——第 i 次测试声波不跨裂缝的传播时间 (μs);
 m_{ci} ——各测点计算裂缝深度的平均值 (mm);
 n ——测点数。

C.4 声波反射法反射界面深度计算公式

声波反射界面深度可按下式计算:

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{[v(t-t_0) \times 10^{-6}]^2 - l^2} \quad (\text{C. 4. 1})$$

- 式中: h ——反射界面深度 (m);
 v ——反射界面上覆介质速度 (m/s);
 t ——反射波旅行时间 (μs);
 t_0 ——发射换能器与接收换能器对零时间 (μs);
 l ——偏移距 (m)。

C.5 脉冲回波法参数计算公式

C.5.1 脉冲回波时间可按下式计算:

$$t = \frac{2}{v} \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + d^2} \times 10^6 \quad (\text{C. 5. 1})$$

- 式中: t ——脉冲回波时间 (μs);
 v ——混凝土声波速度 (m/s);
 l ——偏移距 (m);
 d ——回波界面深度 (m)。

C.5.2 脉冲回波深度可按下列公式计算:

$$d = \frac{\sqrt{(vt \times 10^{-6})^2 - l^2}}{2} \quad (\text{C. 5. 2 - 1})$$

或

$$d = \frac{1}{2} \frac{v}{f_c} \quad (\text{C. 5. 2 - 2})$$

- 式中: d ——回波界面深度 (m);
 v ——混凝土声波速度 (m/s);

t ——脉冲回波时间 (μs);

l ——偏移距 (m);

f_c ——声波回波的频差或优势频率 (Hz)。

C.5.3 回波能量可按下式计算:

$$E_i = \sum_{j=1}^N \rho v_j^2 \quad (\text{C.5.3})$$

式中: E_i ——第 i 测点的回波能量 (J);

ρ ——混凝土密度 (kg/m^3);

v_j ——第 j 时刻采样点的质点振动速度 (m/s);

N ——脉冲回波信号采样点总数。

C.5.4 回波能量临界值可按下式计算:

$$E_r = \bar{E} + 3\sigma \quad (\text{C.5.4})$$

式中: E_r ——回波能量临界值 (J);

\bar{E} ——测区回波能量平均值 (J);

σ ——测区回波能量平均值均方差 (J)。

C.5.5 脱空缺陷系数可按下式计算:

$$\delta_i = \frac{E_i}{E_r} \quad (\text{C.5.5})$$

式中: δ_i ——第 i 测点的脱空缺陷系数;

E_i ——第 i 测点的回波能量临界值 (J);

E_r ——回波能量临界值 (J)。

可按照表 C.5.5 中的脱空缺陷系数定性评价钢板或钢管衬砌脱空缺陷程度和接触灌浆质量。

表 C.5.5 脱空缺陷程度定性评价表

序号	脱空缺陷系数 δ	缺陷程度评价
1	$\delta \leq 1$	基本无脱空缺陷
2	$1 < \delta \leq 3$	轻微脱空缺陷
3	$\delta > 3$	较严重脱空缺陷

C.6 爆破质点振动参数计算公式

C.6.1 同一高程的爆破质点振动速度传播规律，可按下式进行回归整理：

$$v = K \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{\alpha} \quad (\text{C.6.1})$$

式中： v ——质点振动速度（cm/s）；

K 、 α ——与爆区至测点间的地形、地质条件有关的系数和衰减指数；

Q ——炸药量，齐发爆破时为总装药量，延时爆破时为对应于 v 值时刻起爆的单段药量（kg）；

R ——测点至爆源的距离（m）。

C.6.2 不同高程的爆破质点振动速度传播规律，可按下式进行回归整理：

$$v = K \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{\alpha} \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{H} \right)^{\beta} \quad (\text{C.6.2})$$

式中： H ——测点至爆源的高差（m）；

R ——测点至爆源的水平距离或在介质中的传播距离（m）；

β ——与爆区至测点间的地形、地质条件有关的衰减指数。

C.7 声学参数统计分析计算公式

C.7.1 测区混凝土声时或声速、波幅、频率等声学参数测量值的平均值、标准差和离差系数可按下列公式计算：

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{C.7.1-1})$$

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n m_x^2 \right)} \quad (\text{C.7.1-2})$$

$$C_v = \frac{S_x}{m_x} \quad (\text{C. 7. 1 - 3})$$

式中： m_x ——测量值的平均值；

x_i ——声学参数测量值；

n ——测点数；

S_x ——测量值的标准差；

C_v ——测量值的离差系数。

C. 7. 2 应用临界值法判定测区声学参数中异常数据可按下列方法判别：

1 将测区内各测点的声速、声幅或频率值由大到小按顺序排列，即

$$x_1 \geq x_2 \geq \cdots \geq x_i \geq \cdots \geq x_{n-k} \geq \cdots \geq x_{n-1} \geq x_n \quad (\text{C. 7. 2 - 1})$$

式中： x_i ——按序排列后的第 i 个声速测量值；

n ——测点数；

k ——从零开始逐一去掉声速序列尾部最小数值的数据个数。

2 对从零开始逐一去掉 x_i 序列中最小数值后余下的数据进行统计计算。当去掉最小数值的数据个数为 k 时，对包括 x_{n-k} 在内的余下数据 $x_1 \sim x_{n-k}$ 按本规程式 (C. 7. 1 - 1) 和式 (C. 7. 1 - 2) 计算平均值 m_x 、标准差 S_x ，并按下式计算异常判断值 x_0 ：

$$x_0 = m_x - \lambda S_x \quad (\text{C. 7. 2 - 2})$$

式中： x_0 ——异常判断值；

m_x —— $n-k$ 个数据的平均值；

S_x —— $n-k$ 个数据的标准差；

λ ——异常值判定系数，按表 C. 7. 2 取与 $(n-k)$ 相对应的值。

3 将 x_{n-k} 与异常判断值 x_0 进行比较。当 $x_{n-k} \leq x_0$ 时， x_{n-k} 及其以后的数据均为异常数据；当 $x_{n-k} > x_0$ 时，再用数据 $x_1 \sim x_{n-k-1}$ 重复上述步骤，直到 x_i 序列中余下的全部数据满足

$x_i > x_0$ ，最终确定的 x_0 值即为声速、声幅或频率的临界值。

表 C.7.2 统计数据的个数 ($n-k$) 与对应的 λ 值

$n-k$	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
λ	1.64	1.69	1.73	1.77	1.80	1.83	1.86	1.89	1.91	1.94
$n-k$	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
λ	1.96	1.98	2.00	2.02	2.04	2.05	2.07	2.09	2.10	2.11
$n-k$	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78
λ	2.13	2.14	2.15	2.17	2.18	2.19	2.20	2.21	2.22	2.23
$n-k$	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98
λ	2.24	2.25	2.26	2.27	2.28	2.29	2.29	2.30	2.31	2.32
$n-k$	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145
λ	2.33	2.34	2.36	2.38	2.39	2.41	2.42	2.43	2.45	2.46
$n-k$	150	155	160	170	180	190	200	210	220	240
λ	2.48	2.49	2.50	2.52	2.54	2.56	2.57	2.59	2.61	2.63

C.8 钻孔声波全波列测试分析计算公式

C.8.1 岩石纵波与横波时差比应按下式计算：

$$DTR = \frac{DT_s}{DT_p} \tag{C.8.1}$$

式中： DTR ——岩石纵波与横波时差比；

DT_p ——纵波时差 (μs)；

DT_s ——横波时差 (μs)。

C.8.2 利用 DTR 值识别岩性可按表 C.8.2 进行。

表 C.8.2 常见岩石纵波与横波时差比

序号	岩性	DTR
1	砂岩（气层）	1.60
2	砂岩（水层）	1.72

续表 C. 8. 2

序号	岩性	<i>DTR</i>
3	石英岩	1. 67~1. 78
4	砂岩	1. 58~2. 05
5	黏土	1. 94
6	石灰岩	1. 90
7	白云岩	1. 80
8	泥灰岩	1. 87~2. 45
9	盐岩	1. 77
10	玄武岩	1. 69
11	花岗岩	1. 63~1. 87
12	石膏	2. 49
13	硬石膏	1. 85

本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对于要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

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：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指定应按其他有关标准执行的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 《水力发电工程地质勘察规范》GB 50287
- 《水电工程防震抗震设计规范》NB 35057
- 《水电水利工程物探规程》DL/T 5010
- 《水电水利工程爆破安全监测规程》DL/T 5333

中华人民共和国能源行业标准

水电工程弹性波测试技术规程

NB/T 35101—2017

条 文 说 明

制 定 说 明

《水电工程弹性波测试技术规程》NB/T 35101—2017，经国家能源局 2017 年 11 月 15 日以第 10 号公告批准发布。

本规程在制定过程中，编制组在广泛的调查研究的基础上，认真总结了水电工程弹性波测试工作的实践经验，吸收了近年来弹性波测试方法、仪器设备、数据处理等方面的成果，并向有关设计和科研单位征求了意见。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本规程时能正确理解和执行条文规定，《水电工程弹性波测试技术规程》按章、节、条顺序编制了条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与规程正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规程规定的参考。

目 次

3	基本规定	75
3.1	应用范围和条件	75
4	仪器设备	76
4.1	仪器设备技术要求	76
4.3	仪器检查	76
5	现场工作	77
5.1	一般规定	77
5.2	表面声波法	77
5.3	单孔声波法	78
5.4	穿透声波法	79
5.5	钻孔声波全波列法	79
5.6	声波反射法	79
5.7	脉冲回波法	80
5.8	超声横波反射三维成像	80
5.9	表面地震波法	81
5.10	单孔地震波法	82
5.11	穿透地震波法	82
5.12	质点振动测试	82
5.13	地脉动测试	83
6	数据处理与资料解释	85
6.4	穿透声波法	85
6.5	钻孔声波全波列法	85
6.6	声波反射法	86
6.7	脉冲回波法	86
6.8	超声横波反射三维成像	87

NB/T 35101—2017

6.9	表面地震波法	87
6.10	单孔地震波法	87
6.12	质点振动测试	87
6.13	地脉动测试	88

3 基本规定

3.1 应用范围和条件

3.1.1 弹性波测试分为声波法和地震波法两类，本规程中所涉及的测试方法是目前水电工程中常用的测试方法。其中，钻孔声波全波列法、超声横波反射三维成像和地脉动测试为新增方法。

3.1.2 由于声波频率高、波长短，地震波频率低、波长长，所以声波法较地震波法的分辨率和测试精度高，而地震波法的测试距离或探测深度要大于声波法。因此，弹性波测试工作中方法的选择应根据声波法和地震波法的特点和适用范围，结合测试目的与要求选择适宜的测试方法。

3.1.3 弹性波测试技术是以弹性波的折射、透射和反射物理学原理为基础，各种测试方法有其相应的适用条件，方法应用时应充分考虑是否满足其基本物理条件，以达到最佳测试效果。

4 仪 器 设 备

4.1 仪器设备技术要求

4.1.4 单孔声波全波列测试要求记录纵波、横波、斯通利波等全部波列，并能有效区分各成分波，穿透声波全波列测试孔距较大，声波走时较长，因此声波全波列测试仪器应具有足够的采样点数，以便全部记录其全波列信息。

4.3 仪 器 检 查

4.3.1 定期检查的目的是为防止使用不符合技术规程要求的仪器设备，保证测试结果的准确性。

4.3.3 仪器期间检查的目的是为了确认在整个工作期间仪器设备工作状况，以保证所获得的弹性波测试资料准确、可靠，也是为资料验收和检查提供的必要依据。

5 现场工作

5.1 一般规定

5.1.1 现场工作环境是指无强烈的噪声干扰、无交叉作业干扰、无严重的粉尘或废气污染，有照明和通、排风设施等；工作条件是指测试工作面无障碍物，登高作业有登高设施和安全防护设施，有可供使用的水源和电源等。

5.1.2 现场试验工作一般是根据实际工作需要而确定。当被测介质物性条件简单、测试参数单一时，可不进行现场试验工作。当被测介质地质条件和物性条件较复杂，工作布置、观测系统选择和仪器参数设置难以确定时，需选择具有代表性的部位开展相应的试验工作。

5.1.4 仪器采样间隔和采样点数与测试精度是相互制约的，实际工作中应根据测试目的合理选择采样间隔和采样点数，以使观测效果达到最佳，测试人员应灵活把握。

5.1.7 为了减少或消除现场各种不确定性因素对观测数据的影响，保证观测数据的准确性，现场测试人员应对每个测点的记录波形进行辨识。当有效波形相似时，表明测试信号相对稳定，可以选择品质较好的记录作为该测点的测试记录进行存储；当观测数据发生突变或明显偏离其他测量值时可视为异常，这些异常现象可能是由于介质的物性条件变化所引起，也可能是因背景干扰或观测不当等所致，所以这些测试点应进行重复观测，以确认异常的真伪。

5.2 表面声波法

5.2.1 在缺陷检测中，混凝土浅裂缝深度检测一般需布置跨缝

和不跨缝测线，跨缝测线与裂缝方向垂直。当混凝土中有钢筋穿过裂缝且与测线大致平行时，测线与钢筋在观测面上的投影间距离一般要大于 1.5 倍的裂缝深度。

5.2.5 使用耦合剂是为了使换能器与被测介质粘贴牢固，声波平面换能器使用的耦合剂通常采用黄油或凡士林。

5.3 单孔声波法

5.3.1 水电工程前期勘探阶段，单孔声波测试工作主要布置在坝址区、厂址区、导流洞、引水洞等重点部位，在有条件的情况下可充分利用勘探钻孔。

洞室围岩松弛圈检测一般是按断面布置检测孔，断面与洞轴线方向垂直，检测孔分别布置在拱顶、拱肩、边墙等部位。边坡岩体卸荷松弛厚度检测一般是垂直坡面等高线方面布置断面。在测试时，为了能使孔中储存住水，边墙孔和边坡孔一般要求检测孔为水平孔下斜 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 。

布置长观孔目的主要是为了研究高地应力地区大洞径地下洞室和高边坡岩体卸荷松弛变随时间变化的规律。由于长观孔需进行长时间多次观测，为了避免施工对孔口的破坏，保证各次测试起始深度一致，在孔口处需安置金属套管进行保护。

5.3.2 常用的一发双收柱状换能器，主频一般为 10kHz、20kHz、30kHz、40kHz 和 60kHz 等，有上发射或下发射两种结构。当采用上发射结构声波换能器进行测试时，孔口下 50cm 段为测量盲区，若进行孔口段测试应采用下发射结构换能器。

5.3.4 测点进入钢套管或有覆盖混凝土体一定深度是为了确定钻孔钢套管底端位置和混凝土体与岩土体接合面位置及接触情况。

由于爆破开挖导致岩体中产生卸荷裂隙，并使原有裂隙等结构面进一步开裂，使岩体发生卸荷松弛现象，导致岩体物理力学性质发生变化。为了准确判定岩体爆破影响深度，爆前与爆后声

速对比测试最好能在原位进行。

5.4 穿透声波法

5.4.1 混凝土裂缝检测时，每组一般为 3 个检测孔，多呈 L 形布置，组成跨缝和不跨缝各 2 个检测孔。其中，跨缝的 2 个检测孔孔口连线方向与裂缝走向垂直，并始终位于裂缝两侧，不跨缝的 2 个检测孔孔口连线方向与裂缝走向平行，孔间不能有混凝土结构缝。一般需在裂缝延伸长度的 $1/3$ 、 $1/2$ 和 $2/3$ 处各布置 1 组检测孔。当裂缝延伸较长时，可根据实际情况增加检测孔组数。

5.4.2 水平同步是指激发点与接收点位于孔内同一高程上，同步移动进行测量；深度同步是指激发点与接收点位于孔内相同深度上，同步移动进行测试；斜同步是指激发点与接收点位于孔内不同深度上，同步移动进行测试。

5.5 钻孔声波全波列法

5.5.3 声源激发的全波列是有多种波列成分组成的，其主要波列到达的先后顺序为纵波、横波和斯通利波等，长源距换能器收发距较长，有利于区分各成分波。

5.5.4 用于硬地层纵波和横波速度测试或地层岩性划分，一般采用单极子高频声源激发；用于软地层测量纵波和横波速度来识别地层岩性、裂缝，一般采用偶极子低频声源激发；用于识别裂缝和评价地层渗透性，一般采用单极子低频声源激发。

5.6 声波反射法

5.6.1 隧洞衬砌体脱空或内部缺陷检测时，一般在拱顶、拱肩、边墙等部位沿洞轴线方向布置测线；混凝土面板脱空检测时，可按检测单元呈网状布置测线。

5.6.3 加速度传感器具有高灵敏度和中等阻尼等特性，对波动

信息反应敏感，对波的续至有较好的衰减效果，易于反射波的识别。

5.6.5 超磁震源和回弹锤能激发脉冲窄声波，且能量较强、稳定，适宜作为声波反射法的外触发震源。

5.7 脉冲回波法

5.7.1 隧洞混凝土衬砌体厚度、脱空、内部缺陷和回填灌浆质量检测时，一般在拱顶、拱肩、边墙等部位沿洞轴线方向布置测线。

引水发电洞的钢管或钢板衬砌脱空和接触灌浆质量检测时，一般在管壁的顶、肩、腰及底部沿洞轴线方向布置测线。

5.7.4 设置记录长度时应兼顾时间域和频率域的分辨率，一般以2倍~3倍的构件底面反射时间为宜，特殊情况下可设置不同的记录长度分别采集用于时间域和频率域分析的信号。

5.7.5 脉冲回波法检测时，被检测物体表面的激发条件和接收条件要一致，激发和接收的应力波应尽可能高频、短振。被检测物体不宜太厚，以免应力波扩散衰减过大。

5.7.7 激振震源耦合和接收传感器耦合不良将可能导致信号畸变，宜多次测试以确认所采集的信号正常。

5.8 超声横波反射三维成像

5.8.3 超声横波反射三维成像测试预设波速和探测频率会影响探测异常的尺寸、形态和成像准确性。当波速小于或大于实际波速10%时将导致对缺陷无法“聚焦”，对缺陷的成像深度也会出现较大偏差。应在检测部位临近的完整混凝土区域进行多次波速值测定，并采用其平均值；当混凝土波速发生较大变化（大于5%）时应重新测试波速。

超声横波反射三维成像探测频率对探测异常的埋深和尺寸有影响，频率低时可探测较深部的异常反射，异常图像相对偏大；

频率高时探测深度浅，浅部异常明显，异常图像较小。现场工作前应对混凝土内部结构和探测目标的可能埋深、尺寸进行预估，通过预估和试验的方式确定合适的探测频率。此外，可采用不同频率进行多次探测以识别不同尺寸、不同埋深的异常目标。

5.9 表面地震波法

5.9.1 洞壁岩体地震波速度测试时，洞径较小的平洞可选择相对平整的一壁布置测线；洞径较大的地下洞室可在洞两壁分别布置测线。

大跨度、高边墙地下洞室洞壁岩体地震波速度测试时，可按开挖层数布置测线，洞室底板测线可呈“十”或“井”或网格状布置。

建基面岩体地震波速度测试时，可按检测单元布置测线或测网。

5.9.2 相遇时距曲线观测系统可利用差数时距曲线特点，减少或消除观测面凹凸不平对地震波速度测试的影响，可提高测试成果的准确度。

5.9.3 地表露头岩土体大多破碎、松散，地震波频率相对较低，适宜使用中低频检波器进行测试。洞壁和建基面岩体相对较完整、坚硬，地震波频率相对较高，适宜使用中高频检波器进行测试。

5.9.4 锤击开关触发时间相对稳定，重复性较好，便于进行叠加观测。

5.9.6 根据弹性波理论，纵波在介质中传播时，波的传播方向与质点振动方向一致；横波在介质传播时，波的传播方向与质点振动方向垂直。因此在进行纵波和横波速度测试时，检波器安置方向和激震方向应符合其物理学特性。

激发点要离最近检波器有一定距离，目的是为了减少洞壁或岩面表部松动岩体对波速测试的影响，使测试成果能真实反映岩

体动力学特性。

根据横波传播时间约为纵波传播时间的 2 倍的特点，采取加大横波激发距离的措施，使横波与纵波产生较大的时差，在波形记录上可将横波从纵波续至中分离出来。正、反向激发的横波相位会产生反相，便于识别横波。

5.10 单孔地震波法

5.10.2 在孔口处使用叩板或钉耙装置定向激振，孔内接收，测试横波速度的这种方法又称速度检层法。横波即剪切波，剪切波是建筑场地勘察采用的专业术语。本规程统一称为横波。

5.10.6 横波测试激发装置一般使用叩板或钉耙。为了减少激发能量损失，保证观测效果，使用叩板时，需在叩板上加足够的重物来增加叩板与地面的摩擦力；使用钉耙时，要将钉耙打入土层中，与地面接触牢固。

井液中投入适量的食盐是为了增加其导电性，加大电火花震源瞬间放电所产生的能量，且食盐对环境无污染。

5.11 穿透地震波法

5.11.1 穿透地震波测试工作布置时应充分考虑穿透距离对测试结果的影响。穿透距离过大时，地震波沿高速介质传播，导致地震波速偏高。

在建筑物场地勘察时，由于土质地层结构复杂、层厚度变化较大，孔间横波测试时易受折射现象影响。工作布置时，应结合地质资料设计孔距，每组检测孔数一般为 2 个～3 个孔。

5.12 质点振动测试

5.12.1 一般水电工程爆破施工重点保护和监测对象主要有：坝基、边坡、坝肩、坝体、输水与泄水建筑物、地下工程结构和设备，以及对水库安全运行有重大影响的近坝区岸坡等水工建

(构) 筑物。当施工区周围有工业与民用建筑物时，还应对其他需保护对象进行监测，如房屋、重要设备等。

爆破地震波在介质中传播是一个复杂的力学过程，岩体性质、地质特征和构造、爆破药量、爆破方式以及其他爆破参数均会影响爆破地震效应。在开展爆破质点振动传播规律试验工作时，测点至振源的距离可根据质点振动传播规律经验公式估算，以获得符合施工区地形、地质条件的爆破振动传播规律，为编制爆破施工方案提供依据。

在描述振动强度的位移、速度、加速度三个物理量中，质点振动速度与建筑物的破坏特征关系比较密切，且实测资料的规律性强，国内外工程界一般采用质点振动速度作为衡量和描述振动强度的标准，我国现行的有关标准也采用质点振动速度作为安全控制标准，因此质点振动测试的观测物理量一般采用质点振动速度。目前水工建筑物抗震设计采用的地震动参数是加速度，当设计有数值计算分析需要时，可监测质点振动加速度。

5.13 地脉动测试

5.13.1 地脉动是由地震、风振、火山活动、海洋波浪、气候等自然振源引起的振幅为 $10^{-6}\text{m}\sim 10^{-7}\text{m}$ 、频率为 $0.5\text{Hz}\sim 20.0\text{Hz}$ 的微振动波群。

在城市地脉动观测时，地面振动干扰较大，但它随深度衰减很快，一般也需在一定深度的钻孔内进行测试。通常远处震源的脉动信号是通过基岩传播反射到地层表面的，通过地面与地下脉动的测试，不仅可以了解脉动频谱的性状，还可了解场地脉动信号竖向分布情况和场地土层对脉动信号的放大和吸收作用。

地面脉动测试时，每块建筑场地不应少于 3 个观测点，当同一建筑物场地有不同的地质地貌单元，其地层结构不同时，地脉动的频谱特征也有差异，此时可适当增加测点数量。

地下脉动测试时，由于不同土工构造物的基础埋深和形式不

同，测点深度应根据工程需要进行布置。

由于地脉动信号微弱，测点应布置在远离人为振动干扰点，与建筑物应保持一定距离。如果测点选择不好，微弱的信号有可能淹没于周围环境的干扰信号之中，给地脉动信号的数据处理带来困难。

5.13.3 脉动信号频率在 1Hz~10Hz 范围内，采样频率大于 20Hz 即可。但实际工作中，最低采样频率常取分析上限频率的 3 倍~5 倍。连续观测过程中，一般记录时间为 15min，为充分保证资料的可靠性，一般要求观测不少于 2 次。

6 数据处理与资料解释

6.4 穿透声波法

6.4.1 当声波穿过混凝土裂缝时，声波一部分能量因反射和散射而损失，其中波长较短或频率较高的成分波难以穿过裂缝继续传播，观测到的波形相对未穿过裂缝的波形具有波幅小和频率低等特征，是波对比分析时判定裂缝是否存在的主要依据。

6.5 钻孔声波全波列法

6.5.1 全波列中纵波为首波，波幅小，传播速度快；横波为续至波，波幅较纵波幅度大，次到达；斯通利波为界面波，沿孔壁传播，其相速度约为流体声速的 0.90 倍~0.96 倍，最后到达。

波形识别法。根据纵波与横波时差比的变化范围，确定横波的初始波至点。一般岩石横波与纵波时差比一般为 1.4~2.2，横波初至时间约为纵波初至时间的 1.5 倍~1.8 倍。根据纵波传播一周所需时间，纵、横波传播源距 L 所需时间差值，即可以估计纵波延续约 5 个周波后出现横波。

慢度-时间相关法。通过在一组全波波列中开设时窗，以一定的慢度（时差）移动时窗来寻找纵波、横波、斯通利波，通过计算一系列相关系数来确定各成分波的时差，即可估算出各成分波在全波波形上的初至时间。

同相轴类比法。一般根据相邻测点的纵波、横波波至相位特性，先把纵波波至点连接起来，再把横波波至点连接起来，横波波至的连线类似于纵波。

岩石裂缝可根据声波在岩层中传播的时差变化和各子波的衰减情况进行识别。对于低角度裂缝，声波在岩层中传播要通过裂

缝，时差就会增大，裂缝密度越大声波时差增大就越多。声波通过裂缝的波幅衰减与裂缝倾角和声波全波列中各子波的波形有关。一般来说，垂直裂缝带纵波衰减明显低于横波衰减，中到高角度裂缝纵波衰减明显大于横波衰减，但低角度裂缝纵波衰减又明显低于横波衰减。反射斯通利波信号越强，裂缝越发育。

随地层或裂缝的渗透率增大，斯通利波的时差增大，其速度也相应减小。斯通利波的衰减越显著，其主频明显降低。

6.5.3 本规程附录 C 表 C.8.2 常见岩石纵、横波时差比值为大量实测结果，在鉴别岩性时可作为参考。

6.6 声波反射法

6.6.4 声波反射法在检测混凝土浅部缺陷、混凝土面板或衬砌体脱空时，主要是根据等偏移时域波形剖面图上反射波同相轴的连续性、波幅值的变化特征圈定异常范围，由于声波纵波反射波能量较弱，探测深度一般较浅。

当混凝土均匀、无缺陷时，时域波形剖面图上无反射波同相轴出现；当混凝土存在缺陷时，时域波形剖面图上会出现较明显的反射波同相轴，缺陷区域呈连续分布，续至区波形较杂乱。

当混凝土面板或衬砌体与下部基岩或围岩接触良好，且无明显波阻抗差异时，时域波形剖面图上无明显反射波同相轴出现；当存在波阻抗差异时，时域波形剖面图上会出现较明显的、呈连续分布的反射波同相轴，续至区波形基本相似。当混凝土面板或衬砌体存在脱空时，时域波形剖面图上会出现能量较强的、呈不连续分布的反射波同相轴，续至区波形较杂乱。

6.7 脉冲回波法

6.7.4 在时间域分析检测数据时，通常利用波列图或影像图定性判断构件的底界面和缺陷部位，然后根据反射波旅行时间计算其厚度或缺陷位置，并与频率域计算结果相互验证。对于大坝面

板脱空缺陷和隧洞衬砌脱空缺陷，一般通过分析反射波的能量进行判断，但对于脱空尺寸尚无法定量计算。

当计算声波回波深度小于混凝土面板设计厚度时，应判断混凝土面板内存在缺陷，该深度应为缺陷顶界面深度；当计算声波回波深度等于或与混凝土面板设计厚度时相近时，该深度应为混凝土面板实际厚度。

6.8 超声横波反射三维成像

6.8.2 超声横波反射三维成像图中异常只与波速差异有关，空洞、低速缺陷与钢筋的异常都为正值，因此应通过异常形态和工程设计、施工等加以区分。

6.9 表面地震波法

6.9.2 在波形记录中，由于横波受纵波续至波的干扰，其初至不易识别或读取，一般读取横波相位第一极值点时间。

6.10 单孔地震波法

6.10.3 当需要计算层速度时，可根据地质钻探资料按实际地层计算各层纵波或横波速度；在没有地质钻探资料时，可按纵波或横波速度进行分层，然后计算各层纵波或横波速度。

6.12 质点振动测试

6.12.1 仪器参数设置不当、数据采集时有其他干扰时，会使采集的振动波形出现失真或削波现象，这类记录所反映的被测物理量将产生较大误差，应予以剔除。在爆破质点振动监测时，一些人为活动和机械振动等会导致监测装置在爆破前被触发，为防止使用这种记录，在资料处理时要根据振动波形特征加以区别。

6.12.3 在双对数坐标系下，本规程附录 C 式 (C.6.1)、式 (C.6.2) 为二元一次或三元一次线性方程，采用最小二乘法对

样点数据进行统计分析和线性回归计算，可得出公式中的常数项 K 、 α 、 β 值。为了保证统计分析结果的准确性，计算时要有足够样点数据，离散度较大的异常值应予剔除。

6.13 地脉动测试

6.13.1 为了减少频谱分析中的频率混迭现象，事先应对分析数据进行各种不同的窗函数处理，对脉动信号一般加滑动指数窗、哈明窗及汉宁窗较为合适。同时为便于对成果分析，应按要求绘制脉动时程曲线及成果表等。

脉动信号的性质一般可用随机过程样本函数集合的平均描述，脉动信号的卓越频率应是多次频域平均的结果，也是其特征频率。从数理统计与分析系统的计算考虑，随着现代计算机技术的发展，考虑应不小于32次频域平均。

6.13.2 卓越周期可按峰值大小分别提出，为综合分析同时可以进行传递函数或互谱分析。脉动信号频谱图一般表现为一个突出谱峰形状，卓越周期只有一个；若地层为多层结构时，谱图有多阶谱峰形状，通常不超过三阶。

脉动幅值在通常情况下应取实测脉动信号的最大幅值，最大幅值可以是位移、速度、加速度幅值等，也可以根据测试仪器、设计要求及工程的需要确定。
