

中华人民共和国行业标准

多道瞬态面波勘察技术规程

Technical specification for multi-channel
transient surface wave investigation

JGJ/T 143—2004

J 370—2004

2004 北京

中华人民共和国行业标准

多道瞬态面波勘察技术规程

Technical specification for multi-channel
transient surface wave investigation

JGJ/T 143—2004

批准部门：中华人民共和国建设部

实施日期：2004年12月1日

中华人民共和国建设部 公 告

第 260 号

建设部关于发布行业标准 《多道瞬态面波勘察技术规程》的公告

现批准《多道瞬态面波勘察技术规程》为行业标准，编号为 JGJ/T 143—2004，自 2004 年 12 月 1 日起实施。

本规程由建设部标准定额研究所组织中国建筑工业出版社出版发行。

中华人民共和国建设部
2004 年 8 月 18 日

前 言

根据建设部建标 [2002] 84 号文的要求, 规程编制组在广泛调查研究, 认真总结实践经验, 参考有关国际先进标准, 并在广泛征求意见的基础上, 制定了本规程。

本规程的主要技术内容是: 1 总则; 2 术语和符号; 3 基本规定; 4 仪器设备与处理软件; 5 现场采集; 6 数据资料处理; 7 成果报告编写。

本规程由建设部负责管理, 由主编单位负责具体技术内容的解释。

本规程主编单位: 北京市水电物探研究所 (地址: 北京市东城区东中街 58 号美惠大厦 A902 室; 邮政编码: 100027)。

本规程参编单位: 建设综合勘察研究设计院

福建省建筑设计研究院

中航勘察设计研究院

中交第一公路勘察设计研究院

北京市地震局震害防御与工程地震研究所

本规程主要起草人员: 刘云祯 梅汝吾 任书考 李哲生

刘金光 刘运平 胡 平

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 仪器设备与处理软件	5
4.1 仪器设备	5
4.2 处理软件	6
5 现场采集	8
5.1 现场试验	8
5.2 测线、测点布设	9
5.3 正式采集	10
5.4 采集记录质量评价	11
6 数据资料处理	12
6.1 资料处理的主要内容	12
6.2 数据资料处理	12
6.3 面波资料的分析论证	13
7 成果报告编写	16
7.1 一般规定	16
7.2 成果报告的基本要求	16
本规程用词说明	18
条文说明	19

1 总 则

1.0.1 为了规范多道瞬态面波勘察方法，保证勘察成果的精度和可靠性，提高工程投资效益、环境效益和社会效益，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于各行业利用多道瞬态面波方法进行的各类岩土工程勘察、检测。

1.0.3 多道瞬态面波勘察，宜与钻探和其他物探方法密切配合，综合分析，正确评价。

1.0.4 在现场作业时，应遵守现行安全和劳动保护的有关规定，做到安全作业。

1.0.5 多道瞬态面波勘察除应符合本规程的规定外，尚应符合国家现行有关强制性标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 面波 surface wave

规程中面波特指瑞利波，即质点运动轨迹为椭圆形的波。

2.1.2 剪切波 shear wave (transverse wave)

波的传播方向与介质质点的振动方向垂直的波。又称横波、S波。

2.1.3 压缩波 compression wave

波的传播方向与介质质点振动方向一致的波。又称纵波、疏密波、P波。

2.1.4 基阶面波 first mode of surface wave

面波的多个传播模式中以第一阶振型传播的波动为基阶面波。

2.1.5 面波频散 frequency dispersion of surface wave

面波各频率组份具有不同的传播速度的现象。

2.1.6 基阶面波的频散 first mode dispersion of surface wave

基阶面波传播模式波动的频散规律。

2.1.7 面波速度 surface wave velocity

面波在介质中传播的平均相速度。

2.1.8 剪切波层速度 shear wave velocity of layer

剪切波在地层中的传播速度。

2.1.9 多道 multi-channel

面波勘察中所采用的多个通道仪器，同时记录形成完整的面波记录。

2.1.10 瞬态 transient vibration

震源的一种动力特征。

2.1.11 排列 array

为完成一个面波采集记录，布置在一条测线上接收震动信号的检波器组合。

2.1.12 偏移距 offset

面波采集时，震源与仪器第一通道所连接的检波器之间的距离。

2.1.13 道间距 distance of channel

在排列中，相邻检波器之间的距离。

2.2 符 号

E_d ——动弹性模量

f ——频率

G_d ——动剪切模量

H ——深度

K ——波数

v_P ——压缩波波速

v_R ——瑞利波波速

v_S ——剪切波波速

λ ——波长

μ ——动泊松比

ρ ——质量密度

η_S ——与泊松比有关的系数

3 基本规定

3.0.1 多道瞬态面波勘察，应具备下列资料：

- 1 收集场地的岩土工程勘察资料；
- 2 任务委托书应包括勘察目的与技术要求，勘察范围及工作量，完成工作时间等；
- 3 有条件时，应收集场地建（构）筑物的平面图（剖面图）等；
- 4 场地及其邻近的干扰震源。

3.0.2 多道瞬态面波勘察前，应根据选定的勘察方法制订勘察方案。其内容宜包括：

- 1 勘察目的及要求；
- 2 具备面波勘察方法的地球物理条件、技术可行性，精度应满足勘察深度与精度的要求，勘察工期以及质量保证体系等；
- 3 勘察内容、具体方法和测点、测线布置图；
- 4 仪器设备；
- 5 拟采用的数据处理方法；
- 6 报告书的要求、份数以及提交时间。

3.0.3 现场勘察时，仪器主机设备等应有防风砂、防雨雪、防晒和防摔等保护措施。

3.0.4 现场勘察场地应避开干扰震源。

3.0.5 勘察报告应包括现场原始记录、勘察结果、分析意见和勘察结论等内容。

4 仪器设备与处理软件

4.1 仪器设备

4.1.1 多道瞬态面波勘察仪器应符合下列要求：

1 仪器放大器的通道数不应少于 12 通道。采用的通道数应满足不同面波模态采集的要求；

2 仪器放大器的通频带应满足采集面波频率范围的要求。对于岩土工程勘察，其通频带低频端不宜高于 0.5Hz，高频端不宜低于 4000Hz；

3 仪器放大器各通道的幅度和相位应一致：各频率点的幅度差在 5% 以内，相位差不应大于所用采样时间间隔的一半；

4 仪器采样时间间隔应满足不同面波周期的时间分辨，保证在最小周期内采样 4 至 8 点；仪器采样时间长度应满足在距震源最远通道采集完面波最大周期的需要；

5 仪器动态范围不应低于 120dB，模数转换（A/D）的位数不宜小于 16 位。

4.1.2 用于多道瞬态面波采集的检波器应符合下列要求：

1 应采用垂直方向的速度型检波器；

2 检波器的自然频率应满足采集最大面波周期（相应于勘察深度）的需要，岩土工程勘察宜用自然频率不大于 4.0Hz 的低频检波器；

3 用作面波勘察，同一排列的检波器之间的自然频率差不应大于 0.1Hz，灵敏度和阻尼系数差别不应大于 10%；

4 检波器按竖直方向安插，应与地面（或被测介质表面）接触紧密。

4.1.3 用于多道瞬态面波采集的检波器排列布置应符合下列要求：

1 采用线性等道间距排列方式，震源在检波器排列以外延长线上激发；

2 道间距应小于最小勘探深度所需波长的二分之一；

3 检波器排列长度应大于预期面波最大波长的一半（相应最大探测深度）；

4 偏移距的大小，需根据任务要求通过现场试验确定。

4.1.4 用于多道瞬态面波的震源应符合下列要求：

1 震源方式可采用大锤激振、落重激振或炸药激振。选择震源需保证面波勘察所需的频率及足够的激振能量；

2 震源方式的选择应根据勘察深度要求和现场环境确定，勘察深度 0~15m，宜选择大锤激振；0~30m 选择落重激振，0~50m 以上选择炸药激振，在无法使用炸药的场地亦可采用加大落锤重量或提高落锤高度的办法加大勘察深度；

3 激振条件的改善：勘察深度小时，震源应激发高频率波；勘察深度大时，震源应激发低频率波。同种震源方式，改变激振点条件和垫板亦可使激发频率改变。

4.2 处理软件

4.2.1 处理软件应具有下列功能：

1 采集参数的检查与改正、采集文件的组合拼接、成批显示及记录中分辨坏道和处理等基本功能；

2 识别和剔除干扰波功能；

3 分辨识别与利用基阶面波成分的功能；

4 正反演功能，在波速递增及近水平层状地层条件下应能准确反演地层剪切波速度和层厚；

5 分频滤波和检查各分频段面波的发育及信噪比的功能，以利于测深分析；

6 能调入多条频散曲线，以供研究不同测点或同一测点加固改良后地层波速的改变。

4.2.2 对于多测点频散曲线的剖面成图，软件应具有速度映像

成图功能，以便直观分析地层速度结构。在有条件的情况下，软件应具有自动拾取映像速度等值线和图例填充等功能，使面波成果成图电脑化。

4.2.3 对于速度映像处理成图的文件格式，应为通用计算机平台所调用，便于报告编制。

5 现场采集

5.1 现场试验

5.1.1 现场正式工作前，应进行试验工作。在地质地形条件复杂的工区，试验工作应充分，试验工作量宜控制在预计工作量的5%。

5.1.2 试验工作应包括下列主要内容：

1 仪器设备系统的频响与幅度的一致性检查，应符合下列要求：

1) 仪器各道的一致性检查：将仪器输入端各道并联后接入信号源，采集与工作记录参数相同的记录并存储，利用软件分析频响与幅度的一致性；

2) 检波器的一致性检查：选择介质均匀的地点，将检波器密集地安插牢固，在大于10m外激振，采集面波记录并存储，利用软件分析频响与幅度的一致性；

3) 仪器通道和检波器的频响与幅度特性，在测深需要的频率范围内应符合一致性要求。

2 采集试验工作应符合下列要求：

1) 干扰波调查，在工区选择有代表性的地段进行干扰波调查，干扰波调查应通过展开排列采集的方式进行。采集面波在时空域传播的特征，根据基阶面波发育的强势段确定偏移距离、排列长度和采集记录长度，一般展开排列长度应与勘察深度相当；

2) 选用不同频率检波器的原则：可根据勘察深度要求，利用 $f = v_R / \lambda_R$ 和 $H \approx \frac{1}{2} \lambda_R$ 估算选用的检波器频率，式中： f ——检波器的频率； v_R ——地层面波速度； λ_R ——波长； H ——探测地层的深度；

3 根据勘探深度和现场环境条件进行激振方式试验。依据采集记录进行频谱分析，震源的频带宽度应满足勘探深度和分辨薄层的需要，据此确定最佳激振方式。

5.1.3 通过以上3项试验工作，应确定满足勘察目的和精度要求的采集方案、采集参数和激振方式。

5.1.4 在具有钻孔资料的场地宜在钻孔旁布置面波勘察点，取得对比资料。

5.2 测线、测点布设

5.2.1 在地形较平坦的工区，测线布置可根据任务书布置，面波排列宜与测线相重合布置。

5.2.2 在地形起伏较大的工区，面波排列可不与测线重合，宜结合地形等高线取平坦段布置。

5.2.3 在滑坡体、泥石流等勘察项目中，测线布置宜沿主滑方向平行布置，适当布置横向联络线。

5.2.4 在岩溶、土洞或采空区勘察项目中，测线间距应小于被调查对象的尺寸，发现异常，在异常点（带）布置垂直测线，重点勘察项目可采取布置网格线的方案。

5.2.5 构造破碎带勘察，测线布置应与构造走向相垂直；古河床调查，测线应垂直古河床方向。

5.2.6 地基加固效果检验，应在加固前后采取测点、测线位置不变的原则。

5.2.7 面波排列的中点为面波勘探点，面波勘探点间距的布置应根据勘察阶段、场地地质地形条件的复杂性以及勘察目的和精度综合考虑。

5.2.8 面波排列方式应遵循以下要求：

- 1 面波排列的长度不应小于勘探深度所需波长的二分之一；
- 2 在场地存在固定噪声源的环境中工作，应使面波排列线的方向指向噪声源，并布置激振点与固定噪声源在面波排列的同侧，干扰震源波不得构成对面波排列线的大角度传播；

3 在地表存在沟坎及在建筑群中进行面波勘察时，面波排列线的布置应考虑规避非震源干扰波的影响。

5.3 正式采集

5.3.1 观测系统以激振点分类可分为单端激振法和双端激振法；以排列移动方式分类可分为全排列移动、半排列移动和根据勘探点间距移动排列的方法。根据勘察目的、要求、地形地质与地球物理条件应合理选用观测系统，并应符合下列要求：

- 1 所选用的观测系统，应保证主要目的层的连续追踪；
- 2 简单地质地形条件应采用单端激振法，复杂地质地形条件下应采用双端激振法。

5.3.2 面波的接收应遵循下列原则：

- 1 仪器应设置在全通状态，对定点仪器应设置各道增益一致；
- 2 记录长度为“采样点数”和“采样间隔”的乘积，采样点数可选择 1024 点或 2048 点；采样间隔的选择视采集记录的长度要求，应满足最大源检距基阶面波的采集需要；
- 3 记录的近震源道不应出现削波，排列中不宜有坏道；
- 4 排列方向的设计应视地形条件和规避干扰波的需要确定；排列上的道间距应小于最小勘探深度所需波长的二分之一；
- 5 检波器安置的位置应准确；
- 6 检波器应与地面（或被检测物表面）安置牢固，并使埋置条件一致；
- 7 检波器的安置：在地表介质松软时，应挖坑埋置；在地表为稻田或潮湿条件时，应防止漏电。检波器周围的杂草等易引起检波器微动之物应清除；在风力较大条件下工作时，检波器应挖坑埋置；
- 8 检波器与电缆连接应正确，防止漏电、短路或接触不良等故障。

5.3.3 面波的激发应符合本规程第 4.1.4 条的规定，并符合下

列要求：

1 面波的激发应根据勘察任务要求和工区条件合理选择震源；

2 使用锤击震源、落重震源应在激振点敷设专用垫板。专用垫板是硬材料，有利于激发高频波，专用垫板是软材料，有利于激发低频波；

3 使用炸药震源时：炸药量要通过试验确定；炸药坑深度宜大于 60cm 并压实；炸药记时应采用回线记时和内触发记时。

5.3.4 采集工作结束后，应及时从仪器外传数据做好备份，以防数据丢失，同时做好现场采集班报表记录。

5.3.5 每项工程应进行检查观测。检查工作量不得少于总工作量的 5%，检查记录与原记录波形应相似，频散曲线应一致。

5.3.6 采集记录的文件宜按下列要求存贮：

1 宜按工程名称或工程代号设置存贮文件的子目录；

2 文件名由字符和数字组成，以字符表示线号，以数字表示测点顺序。同测线上的文件名中的数字连续。文件名中的后缀常用“.dat”，表示为原始采集记录。

5.4 采集记录质量评价

5.4.1 采集记录中的削波和通常地震勘查中的坏道，在多道瞬态面波勘察中应视为坏道。

5.4.2 采集记录的长度满足最大源检距基阶波采集的记录，并视为合格记录；否则为不合格记录。

5.4.3 采集记录中基阶波应为强势波，否则为不合格记录。

5.4.4 采集记录中相邻两道为坏道应视为不合格记录。

5.4.5 采集记录中坏道数大于使用道数 10% 的记录应为不合格记录。

5.4.6 发现不合格记录，应进行补测。

6 数据资料处理

6.1 资料处理的主要内容

6.1.1 资料整理应包括：绘制测线（点）平面布置图和编制测线（点）的高程表，面波数据资料的处理与解释。

6.1.2 绘制测线（点）平面布置图应根据实测点坐标，按要求的比例尺绘制。在工区具备电子地图的条件下，可直接将测线（点）绘制在电子地图文件中，并按要求绘制测线（点）平面布置图。

6.1.3 面波数据资料处理应使用软件程序完成。其主要功能应包括：面波数据资料预处理、生成面波频散曲线、频散曲线分层反演剪切波速度及确定层厚，利用面波频散曲线生成速度映像彩色剖面，并在此基础上绘制地质剖面图等。

6.1.4 建立地形高程文件、绘制面波速度映像剖面图和地质解释剖面图。剖面图的比例尺应按勘察任务书的要求绘制。

6.2 数据资料处理

6.2.1 面波数据资料预处理时，通过成批调入与显示采集记录，应检查现场采集参数的输入正确性，对错误的输入应予以改正；检查面波成批记录中面波多振形组份的发育情况，尤其观察基阶波组份和干扰波的发育情况以及检查采集记录的质量，选用利于提取基阶波组份的时间-空间窗口。对合格记录中的坏道，应予以处理。预处理完毕，应进行存盘。存盘时另起文件名，不得覆盖原始记录文件。

6.2.2 面波频散曲线提取应符合下列要求：

1 可用 DOS 环境下的软件，也可使用 Windows 环境的软件，软件均具有面波频散曲线的提取功能；

2 对基阶面波选用合理的时间-空间窗口，是频散曲线提取的关键；

3 面波频散曲线的提取宜在 f - K 域中进行；

4 在 f - K 域进行的二维滤波应突出基阶面波的能量；

5 在 f - K 域中的等值线图上应确认频散曲线，并转换为速度-深度域（速度-波长域）的频散曲线；

6 频散曲线应遵循收敛的原则。在面波频散曲线上若频散点点距过大，不收敛，变化的起点处可解释为地质界线。不收敛的频散曲线段不能用于地层速度的计算；

7 频散曲线提取完毕后，应进行存储。

6.2.3 频散曲线的分层应根据曲线的曲率和频散点的疏密变化综合分析；分层完成后反演计算剪切波层速度和层厚。

1 剪切波层速度和层厚的反演计算可采用两种方式：固定层厚，反演层速度和固定层速度，反演层厚。一般宜选择固定层厚的方式反演剪切波层速度；

2 反演过程宜遵循由浅及深逐层调试，使正、反演结果逼近，完成剪切波层速度和层厚的处理；

3 确认层参数后，存储处理结果。

6.3 面波资料的分析论证

6.3.1 面波频散数据反演的结果应视为检波器排列下的地层综合信息，对于近水平层状地层，反演结果视为检波器排列中点位置竖直方向地层的波速分布；对于倾斜地层，反演结果视为检波器排列中点位置至地层界面法向深度的波速分布。

6.3.2 面波速度映像图的制作可分为以下几个步骤：

1 输入剖面线上超过 3 个测点的面波频散曲线文件；

2 输入测点的剖面坐标和高程；

3 设置合适的比例尺生成面波速度映像图；

4 需进行地形校正时应进行校正，生成地形校正后的面波速度映像图。

6.3.3 面波速度映像图的地质分析应结合面波频散曲线的分层结果或地层地质柱状资料进行。分析同点位、同深度映像的速度值与地层的关系，逐层确认划分，生成地层（物质）界线框图，选择地质图例，绘制地质剖面图。

6.3.4 地质剖面的绘制，在有条件的情况下应利用既有的点位地质资料，进行综合分析。

6.3.5 地基的剪切波波速应按下列公式计算：

$$v_s = \frac{v_R}{\eta_s} \quad (6.3.5-1)$$

$$\eta_s = \frac{0.87 - 1.12\mu}{1 + \mu} \quad (6.3.5-2)$$

式中 v_s ——地基的剪切波波速 (m/s)；

v_R ——地基的面波波速 (m/s)；

η_s ——与泊松比有关的系数；

μ ——地基的动泊松比。

6.3.6 地基的动剪切模量应按下列公式计算：

$$G_d = \rho v_s^2 \quad (6.3.6)$$

式中 G_d ——地基的动剪切模量 (MPa)；

ρ ——地基的质量密度 (kg/m^3)；

v_s ——地基的剪切波波速 (m/s)。

6.3.7 地基的动弹性模量应按下列公式计算：

$$E_d = 2(1 + \mu)\rho v_s^2 \quad (6.3.7)$$

式中 E_d ——地基的动弹性模量 (MPa)；

μ ——地基的动泊松比；

ρ ——地基的质量密度 (kg/m^3)；

v_s ——地基的剪切波波速 (m/s)。

6.3.8 地基的动泊松比应按下列公式计算：

$$\mu = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (6.3.8)$$

式中 v_p ——地基的压缩波波速 (m/s);
 v_s ——地基的剪切波波速 (m/s)。

7 成果报告编写

7.1 一般规定

7.1.1 多道瞬态面波勘察报告的原始资料，应在验收合格后使用。

7.1.2 多道瞬态面波勘察报告的文字应叙述准确、完整、真实；图表清晰；结论与建议明确、合理。

7.2 成果报告的基本要求

7.2.1 多道瞬态面波勘察报告应根据任务要求、工程特点和工程地质条件等具体情况编写，并应包括下列内容：

1 勘察目的、任务要求、所依据的规程规范以及勘察时间和完成的工作量；

2 拟建工程的概况；

3 开展面波勘察有关的场地地形、地质和地球物理条件；

4 场地振动干扰背景及分析；

5 方法技术和工作布置（内容包括方法技术原理、仪器性能、观测系统及采集参数选择；激振与接收方式；测线布置及工作质量保证措施等）；

6 资料的整理、分析与解释；

7 结论与建议（阐明面波勘察工作的主要技术成果、结论与建议）。

7.2.2 成果报告应附下列图件：

1 勘察综合平面图；

2 仪器设备一致性检查的原始资料；

3 干扰波实测记录和面波点采集记录图；

4 面波点频散曲线图；

5 面波频散曲线速度分层图，有钻探地质资料时，绘制面波点速度分层与工程地质柱状对比图；

6 面波测试成果图表等。

7.2.3 勘察报告的文字、术语、代号、符号、数字、计量单位等均应符合国家现行有关标准的规定。

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”。

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时的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

中华人民共和国行业标准

多道瞬态面波勘察技术规程

JGJ/T 143—2004

条文说明

前 言

《多道瞬态面波勘察技术规程》JGJ/T 143—2004，经建设部2004年8月18日以第260号公告批准，业已发布。

为便于广大勘察、检测、设计、施工、科研、学校等单位的有关人员在使用本规程时能正确理解和执行条文规定，《多道瞬态面波勘察技术规程》编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明，供使用者参考。在使用中如发现本条文说明有不妥之处，请将意见函寄北京市水电物探研究所。

目 次

1 总则	22
2 术语和符号	24
2.1 术语	24
2.2 符号(略)	26
3 基本规定	27
4 仪器设备与处理软件	28
4.1 仪器设备	28
4.2 处理软件	29
5 现场采集	30
5.1 现场试验	30
5.2 测线、测点布设	31
5.3 正式采集	31
5.4 采集记录质量评价	32
6 数据资料处理	33
6.1 资料处理的主要内容(略)	33
6.2 数据资料处理	33
6.3 面波资料的分析论证	34
7 成果报告编写(略)	35

1 总 则

1.0.1 面波勘察方法是近年来发展很快的一种物探方法，大致可分为稳态方法和瞬态方法两大类。稳态面波勘察技术由于设备沉重、勘探深度不大，虽然经过十余年的实践，但进展不快。而以北京市水电物探研究所生产的 SWS 系列为代表的多道瞬态面波仪，却以其轻便、高效、勘探深度大、重复性好、可靠性高等优势受到业界的普遍好评，呈现出了良好的发展态势，为提高工程投资效益和社会效益做出了贡献。但是，由于各仪器厂家以及使用单位，对仪器的性能指标的要求以及对方法技术本身的理解、掌握程度不一致，也出现了不注重应用条件，没有科学严谨、统一的数据处理以及解释方法，给物探方法本身带来负面影响的情况。因此，制定本规程是适时和必要的。

1.0.2 本条说明的是面波勘察适用于各行业利用多道瞬态面波方法进行的各类岩土工程勘察、检测。可应用于探查覆盖层厚度、划分松散地层沉积层序；探查基岩埋深和基岩界面起伏形态，划分基岩的风化带；探测构造破碎带；探测地下隐埋物体、古墓遗址、洞穴和采空区；探测非金属地下管道；探测滑坡体的滑动带和滑动面起伏形态；地基动力特性测试；地基加固效果检验等。这里所列的工程领域，基本上覆盖了岩土工程勘察、检测与监测的各个方面，但并不排斥随着方法技术的进步所带来的应用范围的拓展或延伸。例如，在堤坝隐患的勘察等方面，也有成功的实例。

1.0.3 本条强调了面波勘察与其他岩土工程勘察手段的密切配合。

1.0.4 本条强调在作业过程中要以人为本，遵守国家现行的安

全与劳动保护条例，做到安全生产。

1.0.5 本条强调在应用本规程进行多道瞬态面波勘察时，不应与国家现行的有关强制性标准、规范的规定相抵触。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 本规程所指的面波，特指成层半无限空间的瑞利波。面波有瑞利波和勒夫波两种类型。瑞利波是在非均质半无限空间中，由于自由边界的作用，非均匀平面波 P 和 SV 波相互干涉而衍生出来的，且 P 与 SV 波都沿自由面以同一视速度 $C < v_s$ 前进。瑞利波具有频散特性，其质点运动轨迹为一椭圆。勒夫波是由 SH 波在自由表面和分界面上经多次反射的加强干涉而形成的。均质半空间中也存在面波，但不具频散性。

2.1.4~2.1.7 面波传播速度按其特征区分为相速度和群速度两种。相速度系指单一频率组份面波的同一相位的传播速度；群速度是指同一震源产生不同频率的面波按各自的相速度传播时，相互干涉形成的波组的传播速度。如果介质均匀，产生的面波没有频散，各频率成份以同一相速度传播，合成的波组的群速度与相速度等同。在有面波频散的介质表面，不同频率组份以不同相速度传播，将随传播距离干涉成为几个不同群速度的波组。

在层状介质中面波的传播速度 v_R 随频率变化是频率或波长的函数（即频散），在进行频散方程求解时，对于同一个频率 f ，往往存在多个相速度（ v_R ），这就是说频散曲线往往具有多个模态，如果将它们按速度大小排列，我们将相速度最小的模称为基阶模。与之相对应，我们把以最小相速度传播的面波称为基阶面波。实际采集的面波信息大多是由多阶面波相互叠加而成，如何准确分离各阶面波并加以利用，这是目前国内外研究的热点问题。但大量的研究表明：基阶面波反映了正频散（面波群速度 $<$ 相速度）地层间岩土的基本物理性质，这也是多道瞬态面波勘察目前要把握的基本点。而对高阶面波的研究与应用，目前尚不成

熟，一般认为是在高频影响较突出，本规程暂不纳入。

本规程所指的面波速度，指的是某一频率的速度，即相速度，而非多频率面波群包络的群速度。群速度 (U) 与相速度 (v_R) 的关系是： $U = v_R - \lambda \times dv_R/d\lambda$ ；在均匀质介质中， $U = v_R$ ；而地层刚度随深度逐层增加时， $U < v_R$ ，表现为正频散；反之，当下覆地层较上层软弱时， $U > v_R$ ，呈现负频散。

从面波模态的角度看，最简单，也是常见的地层分层结构，是地层刚度随深度逐层增加。此时面波的大部分能量都集中在基阶模态中，形成的频散特征也比较简单，容易求出地层的弹性参数。如果地层结构中含有软弱夹层，或地表为刚度大的地层覆盖，面波的能量将扩展分布于基阶和多个高阶的模态中，构成复杂的频散特征。提取的关键在于正确识别面波的基阶振型。

面波数据处理按其算法一般分为时间域与频率域两大类。目前频率域的处理多进行 f - K 域（频率波数域）的变换，因为面波各个模态，在时间和距离上往往是相互穿插叠合的。在 f - K 域中，可以清楚地区分开面波不同模态的波动能量，从而能够单一地提取出基阶模态的频散数据。

运用二维傅立叶变换，可以将时间距离域的弹性波场数据，转换为频率波数谱数据，表示为二维坐标中的图形。一般其左上角为坐标原点，纵坐标为频率轴，沿纵坐标向下波动频率增高，也就是在时间上波动越快。横坐标为波数轴，沿横坐标向右波数增多，也就是在空间上波长越短。各个波动组份谱振幅的大小，用不同颜色的色标来表示，一般色度越亮，表示谱振幅越大。波动组份坐标点 (f - K) 和原点联线的斜率 (f/K)，体现了它的相速度。这条联线越陡，说明该波动组份的相速度越大，而越平缓则说明相速度越小。

2.1.9 “多道”是本规程强调的方法重点，它有别于原来美国研究人员提出的两道瞬态面波（亦称表面波频谱分析法）方法（1973）。多道方法是利用多个检波器按一定间距与震源排列在一条直线上组合接收面波的方法。理论和实践均证明，多道采集的

记录，能够在时间空间域上识别各种波动组份（包括体波、面波和干扰波）的信息，有利于基阶面波的提取与利用；记录数据经过 f - K 域的变换，能够快速有效地分离多阶模态的面波及其他类型的波，并方便地计算出面波频散曲线。该方法最具代表性的实用系统为北京市水电物探研究所推出的 SWS 系列多道瞬态面波系统，具有我国自主知识产权。

2.1.12 偏移距是有正负之分的，震源在第一通道以外为正，末道以外为负。

2.2 符号（略）

3 基本规定

3.0.1 本条规定了进行多道瞬态面波勘察前应收集、具备的基本资料。强调了以下几个基本的要素：

1 尽可能收集已有勘察资料，做到有针对性地进行工作，明确要解决的地质问题；

2 任务书是勘察工作的重要文件，应及时向甲方索取，保障工作的合法性。

3.0.2 本条规定了进行多道瞬态面波勘察前应做的准备工作，这是在前一条基础上的进一步完善和具体化。它实际上是一份完整的施工组织设计。

3.0.5 本条是对成果报告书的基本要求。

4 仪器设备与处理软件

4.1 仪器设备

4.1.1 本条是由十多年的工程实践经验得出，其内容是各行业利用多道瞬态面波勘察方法进行各类岩土工程勘察、检测所需仪器设备性能的基本条件。对于探测波速分层差别不大的地层，可采用较少的通道，对波速差别大的地层，或具有低速夹层，宜采用更多的通道，以保证空间分辨率。

多道瞬态面波勘察仪器的主要技术参数如下：

通道数：24道（12、24道或更多通道）；

采样时间间隔：一般为10、25、50、100、250、500、1000、2000、4000、8000 μ s；

采样点数：一般分512、1024、2048、4096、8192点等；

模数转换： ≥ 16 位；

动态范围： ≥ 120 dB；

模拟滤波：具备全通、低通、高通功能；

频带宽度：0.5~4000Hz。

4.1.2 本条是对检波器的基本要求。检波器是面波勘察的重要组成部分，它的频响特性、灵敏度、相位的一致性以及与地面（或被测介质表面）的耦合程度，都直接影响面波记录的质量。

任何检波器都有其特定的频响和灵敏度。固有频率不同，其频响特性（或称带宽）也不一样，而灵敏度则取决于材料与制作工艺。检波器对于输入信号来说，相当于一个滤波器，不同的频响其输出是不一样的。一般说来，接收低频信号（反映较深部信息），就要选择具有较低固有频率的检波器；反之，接收高频信号（反映浅部信息），就要选择具有较高固有频率的检波器。因此，合理选择检波器，对于面波勘察来说，是非常重要的。

多道瞬态面波勘察，是采用了多个检波器来拾取不同频率（不同深度）的面波信号的，所以，各检波器之间的一致性十分重要。如果检波器的固有频率、灵敏度、阻尼等相差太大，会直接导致接收信号的相位发生畸变，从而导致面波信息的错误计算。

检波器的安装，也是面波勘察的一个重要环节。因为不正确的安装会改变检波器的频率响应。一般的安装原则是：稳、正、紧。

4.1.3 本条强调工作排列的基本要求：

1 由于算法的原因，排列中的道间距只能是线性的；

2 道间距决定了频率-波数域的波数分辨率；

3 排列长度决定了分辨空间的最大尺度，相应于最大的探测深度；

4 偏移距的选择合适与否，直接关系到有效面波的采集。因此，本规程要求偏移距的选择，需在现场通过试验确定。

4.1.4 在锤击、落重、炸药三种震源中，锤击激发的地震波频率最高，采用大锤人工敲击地面，可获得深度 15m 以内的面波频散信息；落重激发面波频率次之，采用标贯锤或其他重物，吊高 1 至数米，自由落下，激发出较低频率面波和得到较深处的频散信息；炸药震源频率最低，用它可得到更深处的频散信息。

4.2 处理软件

目前国内广泛应用的主流处理软件为北京市水电物探研究所编制的 CCSWS 和 CCSWSwin 面波频散曲线分析软件和 CCSWSmap 面波速度映像与地质剖面图绘制软件。

Windows 下的 CCSWSwin 增加了频散曲线对比功能、道清除与内插功能和反演过程的实时分析以及频散曲线结果的多格式存储等功能。

5 现场采集

5.1 现场试验

5.1.1 物探成果是否达到预期目的，通过试验来确定工作方法至关重要。在一个项目的全过程中，试验的技术含量是最高的，应该由具有丰富经验的工程师来主持试验工作。

5.1.2 仪器设备系统的频响与幅度的一致性检查是一项很重要的工作。在勘察工作的始末，应进行例检，有条件时，应送回家进行年检。

干扰波调查是指在时间-空间域调查面波发育和其他波共存的情况。在面波勘察中，将面波作为有效波，而反射波、折射波、声波、直达波，以及面波的反射等均作为干扰波。由于面波传播速度较慢，能量较强，在展开排列波形图上容易识别。确定了面波后，就容易确定偏移距、道间距、采样间隔及记录长度。

获得展开排列的方法是：在测线上先布置一个排列，偏移距为一个道距，采集第一个记录，然后整排列向后移一个排列距离加一个道距，仍在原激发点激发，采集第二个记录，依次采集第三个、第四个记录等等，直到全波列排能在记录上体现为止。依次将几个排列记录拼接，从而获得展开排列的记录。由此分析面波的发育情况，根据基阶面波的优势段，选择合理的采集参数。

面波勘察的检波器不同于通常使用的地震检波器，它不仅要求频响特性好，而且低频段比通常使用的地震检波器低得多。由公式 $f = \frac{v_R}{\lambda_R}$ 和有效勘探深度估算使用的检波器频率，国内一般用于面波勘察的地震检波器低频应在 4Hz 左右，如果 $v_R = 200\text{m/s}$ ，则探测深度可达 25m。

面波激发频率和能量也是影响勘察深度的重要环节，应在工

作中引起重视。

5.2 测线、测点布设

5.2.1~5.2.5 一般在平坦的地区，排列与测线重合可使工作效率提高和保证成果精度。在地表起伏较大的地区，可沿地表等高线、垂直或斜交等高线设计排列，使排列成直线，以免道距不等而引起较大的误差。

对于滑坡体、泥石流、岩溶、土洞、采空区等勘察，由于地质体横向变化大，测线应尽量采用纵横网格布置，以利于提高勘察精度。

对于条带状地质体，如地下构造破碎带、古河床调查等，测线布置应垂直于调查对象的走向，便于在正常背景下突显异常。

5.2.6 利用面波方法检测地基加固效果，主要是检测地基加固前后地基土的面波速度变化。面波速度可以转为剪切波速度，剪切波速度与标贯值有较好的对应关系，因此可用面波速度来评价地基土在加固前后的强度变化。检测工作应在同点同线进行。

5.2.8 本条说明面波的排列方式。

5.3 正式采集

5.3.1 根据勘察目的、要求、地形地质与地球物理条件合理选用观测系统，包括选用的观测系统满足勘察要求和野外施工方便、经济两个方面。勘察目的层在水平方向的变化大于排列长度时应用全排列移动方法，移动的距离根据勘察点的距离确定；勘察目的层在水平方向的变化小于排列长度时，采用半排列移动，或更小的距离移动排列。

单端激振法和双端激振法的选择，根据地质地形条件确定。在地形平坦、地质条件简单条件下一般采用单端激振法，复杂地质地形条件下应采用双端激振法，单斜地形条件下，在地层下倾方向激振具有较好的效果。排列方向的设计按条文说明第 5.2 节中的有关规定执行。

5.3.2 记录（时间）长度由采样点数和采样间隔的变化确定，一般采样点数固定为 1024 点，改变采样间隔即可改变记录（时间）的长度。

检波器的安置：一般条件下检波器的尾锥能满足与地表的牢固安装；在特殊条件下，例如：在松散的地表可改换长尾锥来保证检波器与地表牢固插接；在坚硬的地表条件下，可采用托盘或单向磁座使检波器与地表牢固接触；在风噪声大或松散耕植土地表，可挖深 20 ~ 30cm 安装检波器，以改善接收条件。

5.4 采集记录质量评价

5.4.1 ~ 5.4.6 是对采集记录质量评价做出的规定。多道瞬态面波勘察的技术特点，决定了其对采集记录质量的高标准要求，削波、坏道、记录长度以及基阶波的采集质量，直接关系到多道瞬态面波勘察工作的成败。没有好的第一手外业采集记录，后期的任何软件处理，都是没有用的。

6 数据资料处理

6.1 资料处理的主要内容 (略)

6.2 数据资料处理

6.2.1 规程中“对合格记录中的坏道, 应予以处理”, 是指先将坏道充零, 然后利用其相邻的左右道内插生成新道, 参与计算。

6.2.2 本条是对面波频散曲线的提取做出规定。

6.2.3 频散曲线反映了地层面波速度随深度的变化情况, 可根据波速划分地层, 但应注意:

1 频散曲线上纵坐标在物理意义上是波长, 波长与勘探深度的对应关系和地质体的物理力学指标有关, 较为复杂。因此, 在有条件的工区要与已知钻孔资料对比, 做深度校正;

2 频散曲线上某深度的面波速度是地面到该深度的平均速度, 不是该深度的地层速度, 地层速度应根据以下公式计算。

1) 当地层的平均速度随深度增加而增大时, 应用公式 (1) 计算层速度。

$$v_{Rn} = \frac{H_n \bar{v}_{Rn} - H_{n-1} \bar{v}_{R(n-1)}}{H_n - H_{n-1}} \quad (1)$$

式中 H_n ——第 n 点深度 (m);

H_{n-1} ——第 $n-1$ 点深度 (m);

\bar{v}_{Rn} ——第 n 点深度以上的平均面波速度 (m/s);

$\bar{v}_{R(n-1)}$ ——第 $n-1$ 点深度以上的平均面波速度 (m/s);

v_{Rn} —— $H_n \sim H_{n-1}$ 深度间隔的层速度 (m/s)。

2) 当地层平均速度随深度增加而减小时, 应按公式 (2) 计算层速度。

$$v_{Rn} = \frac{H_n - H_{n-1}}{\frac{H_n}{v_{Rn}} - \frac{H_{n-1}}{v_{R(n-1)}}} \quad (2)$$

3) 当不考虑地层平均速度随深度变化趋势时, 可用公式 (3) 计算层速度。

$$v_{Rn}^2 = \frac{v_{Rn}^2 H_n - v_{R(n-1)}^2 H_{n-1}}{H_n - H_{n-1}} \quad (3)$$

当软件有自动反演功能时, 可确定层厚后由软件自动反演层速度。

6.3 面波资料的分析论证

6.3.1 本条是应用面波频散数据反演结果进行地质解释的规定。面波的传播与地震勘探中反射波的传播路径相比, 后者在排列下有明确的反射点位置, 而前者不是射线的位置概念。面波的传播, 不像反射波那样, 以射线的路径来确定反射点的位置; 而是不同组份的面波群以其各自的波长传播, 表征一定深度范围内的平均响应。采集一个排列获得的频散曲线: 对于水平层状结构介质, 视为该排列长度内垂直方向地层的平均响应; 对于倾斜地层结构, 视为该排列长度内排列中点至界面法线深度方向地层的平均响应。

6.3.2~6.3.4 这三条是对面波速度映像图的制作原则做出具体规定。

6.3.5 本条列出了地基动弹性模量与动剪切模量的基本计算公式。目前, 许多单位在不同地区做了面波波速与标贯值的对比试验, 建立了本地区实用的经验公式, 本规程暂不纳入。在进行此类工作时, 在有条件的情况下, 应该在勘察现场进行波速测井和标贯试验, 以便建立本场地的面波速度与标贯值的对应关系式; 但如果条件不具备, 也可借用邻近区域相近地质条件下的经验公式。

7 成果报告编写（略）